



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM

国内图书分类号: TP15,TP13,TM619,TM911.42

密级: 公开

国际图书分类号: 621.3,621.5,629.4

西南交通大学
研究生学位论文

基于过氧比的车载燃料电池系统控制技术

年 级 二零零三

姓 名 郭爱

申请学位级别 工学博士

专 业 电力系统及其自动化

指 导 老 师 陈维荣 教授

二零一五年十一月二十日

Classified Index:TP15,TP13,TM619,TM911.42
U.D.C: 621.3,621.5,629.4



Southwest Jiaotong University
Doctor Degree Dissertation

Control of Fuel Cell System for Vehicle Based on Oxygen Excess Ratio

Grade: 2003

Candidate: Guo Ai

Academic Degree Applied for : Ph. D.

Speciality: Power System and Its Automation

Supervisor: Prof. Chen Weirong

Nov.,20,2015

西南交通大学 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权西南交通大学可以将本论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复印手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1. 保密□，在 年解密后适用本授权书；
2. 不保密☑，使用本授权书。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：郭爱

指导老师签名：陈永荣

日期：2015年11月29日

日期：2015年11月29日

西南交通大学博士学位论文创新性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是在导师指导下独立进行研究工作所得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

本学位论文的主要创新点如下：

(1)提出了一种改进等效电路。该等效电路利用动态电阻与动态电感并联环节，能够表征燃料电池电流跳变时电池内部氢氧浓度的变化，更加全面反映电池的动态特性。等效电路中元件参数可以通过电流扰动方法确定。(对应2.5内容)。

(2)提出了通过电堆电流和阴极入口压力在线计算最佳过氧比的方法。车载燃料电池系统组成设备的工作条件及参数会影响电堆发出的电功率和辅机功耗，导致系统净输出功率改变，该方法实现了车载燃料电池系统净功率最高。在此基础上，设计了基于最佳过氧比的空气供应系统控制结构。(对应5.1.4、5.2.2内容)

(3)提出了基于经验的过氧比区域划分，设计了防止“氧饥饿”和“氧饱和”的电流调节器。过氧比区域的划分明确了在不同电堆电流下发生“氧饥饿”的边界值，而电流调节器防止了车载燃料电池系统在变载时“氧饥饿”和“氧饱和”现象，实现了燃料电池净功率优化控制并延长电池寿命。(对应第5.2.4内容)

学位论文作者签名： 郭爻

日期： 2015年11月29日

摘 要

传统车载能源利用方式致使能源短缺与环境污染问题日益突出, 严重影响了经济的可持续发展, 清洁、可再生能源的开发利用已成为世界能源发展的必然趋势。燃料电池, 尤其是质子交换膜燃料电池, 具有低噪音、零污染、能量转换效率高和功率可随意缩放等优点, 因而引起科研工作者广泛关注。目前以质子交换膜燃料电池为动力源是车辆发展的新领域。

首先, 本文分析了质子交换膜燃料电池常用的四种等效电路, 其中简化等效电路直观地体现了电池电压输出特性和双电层电容效应, 其元件参数可以通过电流扰动方法精确计算。以简化电路为基础, 结合车载燃料电池电流跳变的特点, 提出了一种改进的电路模型。为了表征物料传递时浓度变化, 利用动态电阻与动态电感并联环节等效, 并与开路电势串联。在改进电路中, 根据理论公式计算开路电势和欧姆电阻, 电容值采用经验数值, 其它参数由电流扰动实验数据计算获得。利用实验数据验证等效电路和参数计算方法的准确性, 通过比较仿真与实验结果可知, 直线拟合活化电压和活化电阻效果最佳。

接着, 本文对车载燃料电池系统各个部分进行了建模和仿真分析, 完成了以下研究工作:

(1)压缩机的流量、压力和功耗的影响分析。供应一定流量和压力的空气, 环境温度或海拔越高, 压缩机消耗的功率越大。在其出口压力和转速不变的情况下, 环境大气压力越大, 压缩机流量越大。

(2)阴极流场压力和氧气分压力的耦合关系分析。在确定的环境参数和电堆温度下, 阴极流场压力和氧气分压力由压缩机转速决定, 并且随压缩机转速增大而增大。而电堆温度升高, 氧气分压力将降低。

(3)电堆电压、净功率和效率的影响分析。若电堆温度升高, 电堆电压和净功率将升高, 而效率降低。若增大过氧比, 功耗会单调增长, 用电效率单调下降, 而净功率存在最优值。

(4)调节阀电压、回流泵转速和排气阀开度对阳极入口压力、流量的耦合关系分析。这三个量都可以调节阳极流场入口气体流量, 回流泵转速调节能力强。阳极流场入口压力主要是通过调节阀进行控制。

(5)排气管路压降的动态特性。排气时, 其压降受排气阀开度、管路的压力、排气时间长短关系的影响。排气阀开度小、排气管路压力低、排气时间短, 压降就越小, 反之, 压降就越大。

(6)散热器风机电压、循环泵电压、旁路阀对电堆温度和温度差的影响分析。散热器风机电压能有效调节电堆温度, 循环泵电压能够调节温度差, 阀门开度能够局部调节电

堆温度。风机电压越大，系统响应越快；而风机和泵电压小有利于提高系统效率。

最后，本文研究了车载燃料电池系统控制方法，并通过仿真验证了其合理性和准确性。针对空气供应系统，提出了基于最佳过氧比控制方法。该方法首先根据电堆电流计算最佳过氧比参考值，然后利用前馈控制计算压缩机空气流量参考值，采用模糊控制方法实现了对压缩机的有效控制，并比较了两种最佳过氧比的计算方法。然后将过氧比区域划分为氧饥饿、氧适量和氧饱和三个区域，提出了氧适量区域最小过氧比的计算方法，进而提出了防止‘氧饥饿’和‘氧饱和’的电流调节器。针对氢气供应系统，提出了基于动态矩阵的预测控制。该方法是通过改变调节阀的开度达到控制阳极流场压力。在两个子系统控制方法基础上，提出了基于最佳过氧比的氢气控制系统。针对热管理系统，在稳态工作点线性化，建立了二阶状态方程，分别采用了双PI控制、二次型最优控制和基于状态方程的模型预测控制，对电堆温度及温度差进行调节，并提出了基于最佳过氧比的热管理控制。对燃料电池系统进行了总成控制实验，验证了各个子系统的控制器能够协调工作，并达到满意的控制精度。

关键词：质子交换膜燃料电池，等效电路，面向控制的建模，过氧比区域，氧饥饿，氧饱和，多参数耦合分析，预测控制

Abstract

Energy shortage and environmental pollution produced by automobile with traditional energy utilization patterns have been prominent and have hindered the sustainable development of economic. Hence, utilization of clean and renewable energy sources has become an inevitable trend throughout the world. Fuel cells which have low noise, zero emissions, high efficiency and scalable power have attracted much attentions. Especially, a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), which is suitable as power source for vehicles, has become a new field in electric vehicle.

Firstly, this paper discusses four kinds of dynamic equivalent circuit models of PEMFC. In these models, the simplified equivalent circuit visually reflects voltage output of fuel cell and the effect of double layer capacitor, and its component parameters can be calculated by current interrupt method. An improved simplified equivalent circuit models based on the characteristic of current step is proposed for automotive fuel cell. The dynamic resistance and inductance in parallel could be used to simulation concentration change of gases in transportation, which is series with the open circuit potential source. In the improved circuit, the values of open circuit potential and of ohmic resistance are calculated in theory. The capacitance is obtained through empirical formula, and other parameters are evaluated with current interrupt experimental data. The improved circuit and parameter deciding method are tested by experiments and good match results are obtained. The results show linear fitting method in computing of activation voltage and activation resistance works better.

Secondly, an oriented-control model including each part of PEMFC system is proposed and the following research are conducted: (1) Analysis of flow, pressure and power consumption of compressor. When compressor produces a certain air flow and outlet pressure, the higher ambient temperature and the altitude are, the greater the power consumed by compressor is. Under the terms of its outlet pressure and speed remain unchanged, the outlet flow increases with atmospheric pressure. (2) Analysis of air and oxygen pressures on cathode flow field. Under set environmental and stack temperature, the pressures are determined by the rotational speed of the compressor, increasing along with the speed. Whereas the oxygen pressure decreases correspondingly when the stack temperature increases. (3) Analysis of stack voltage, the net power and efficiency. If the stack temperature increase, the stack voltage and the net power increase, but the efficiency decreases. With the increase of oxygen excess ratio (OER), power consumption increases and efficiency decreases monotonically, while there is an optimal value for the net power. (4) Analysis of the flow and pressure at inlet of stack anode. They are affected

by voltage of solenoid valve, rotational speed of recirculation pump and open degree of purge valve. The rotational speed adjusts the flow most strongly in these three parameters, same as the voltage of valve for the pressure. (5) Analysis of the dynamics of the pressure drop in return manifold. It is affected by the open degree of purge valve, purge duration and pressure at return manifold. The pressure drops are small for small open degree, short purge duration and low pressure, and vice versa. (6) Analysis of the temperature in the stack and the temperature difference across the stack. The temperature can be adjusted effectively by the voltage of the blower in the radiator, and be changed in a certain range by the open degree of bypass valve. The temperature difference could be regulated by the voltage of the recirculation pump. The higher the voltage of blower is, the faster the system responses. The lower voltages of the blower and the pump are benefit for system efficiency.

Finally, in this paper the control strategies of PEMFC system for vehicle are investigated and their rationality and accuracy are tested by simulations. For air supply system, a control based on optimal OER is proposed. The optimal OER is evaluated by stack current, then the feed-forward control is used to calculation reference of air flow through compressor, lastly fuzzy controller adjusts the compressor. The two methods of searching the optimal OER are compared. Besides, OER region is divided into three areas: oxygen starvation, oxygen moderation, oxygen saturation. Formula that estimates the minimum OER value in oxygen moderation region is proposed and then current regulators are presented against phenomenon of oxygen starvation and its saturation. For hydrogen supply system, the dynamic matrix control (DMC) adjusts effective cross-sectional area of solenoid valve in order to change the pressure at inlet of stack anode. Combined with air supply system, the hydrogen supply control based on the optimal OER is proposed. For thermal management, a second state equation is built by means of linearizing steady state operation point. Two PI controllers, quadratic optimal controller and model-based predictive controller based on state equations are adopted and compared for the stack temperature and its temperature difference. Similar to hydrogen supply, the thermal control strategy based on the optimal OER is proposed. The tests on the system combining these three subsystem show each controller can coordinate the work of the various subsystems and achieve satisfactory accuracy.

key words: PEMFC, Equivalent circuit, Control-oriented model, Oxygen excess ratio region, Oxygen starvation, Oxygen saturation, Analysis of multi-parameter coupling, Predictive control

目 录

第1章 绪论	1
1.1 课题的研究意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 PEMFC动态模型	3
1.2.2 PEMFC系统控制技术	5
1.2.3 基于最佳过氧比的PEMFC系统控制技术	6
1.3 主要研究内容	8
1.4 结构安排	9
第2章 燃料电池等效电路	10
2.1 燃料电池的能量	10
2.2 燃料电池电压输出	11
2.2.1 燃料开路电压	12
2.2.2 活化极化	13
2.2.3 欧姆极化	14
2.2.4 浓差极化	15
2.2.5 燃料电池端电压	16
2.3 双电层效应	16
2.4 燃料电池等效电路	17
2.4.1 简化等效电路	18
2.4.2 简化等效电路参数计算	18
2.5 一种改进的车载燃料电池等效电路	20
2.5.1 参数计算	23
2.5.2 实验验证和结果分析	24
2.6 本章小节	27
第3章 车载燃料电池系统建模	28
3.1 湿度和含湿量	28
3.2 压缩机	29
3.2.1 压缩效率和功率	30
3.2.2 压缩机特性图	31
3.2.3 压缩机模型	32

3.3 阴极流体系统模型	34
3.3.1 空气管路.....	34
3.3.2 静态散热器和静态增湿器	35
3.3.3 阴极流场.....	37
3.3.4 各部分气体流量与压力关系	38
3.3.5 气体扩散层.....	40
3.4 泵和风机.....	42
3.4.1 管路特性.....	44
3.4.2 泵与管路模型	45
3.5 氢气供应系统模型	45
3.5.1 进气管道.....	46
3.5.2 阳极流场.....	46
3.5.3 排气管道.....	47
3.5.4 回流泵模型.....	47
3.5.5 调节阀和排气阀	47
3.6 水平衡	48
3.6.1 水平衡分析.....	48
3.6.2 生成水的状态	49
3.6.3 水回收.....	50
3.7 热平衡	50
3.7.1 开口能量系统.....	50
3.7.2 反应产生的热量	51
3.7.3 反应气体的影响.....	51
3.7.4 电堆温度.....	52
3.8 冷却系统.....	53
3.8.1 冷却液流场.....	53
3.8.2 旁路阀.....	54
3.8.3 散热器.....	54
3.8.4 各部件阻力.....	55
3.9 本章小结.....	56
第4章 车载燃料电池系统仿真分析	57
4.1 空气供应系统	57
4.1.1 环境因素对压缩机的影响	57

4.1.2 阴极流体特性.....	59
4.1.3 压缩机功耗和系统电效率.....	59
4.1.4 各部件压力与流量.....	62
4.1.5 气体扩散层.....	64
4.2 水泵与风机.....	65
4.3 氢气供应系统.....	67
4.4 热管理系统.....	70
4.4.1 水平衡.....	70
4.4.2 电堆、管路和散热器阻力.....	71
4.4.3 模型验证.....	72
4.4.4 功耗分析.....	74
4.4.5 性能分析.....	75
4.5 本章小结.....	79
第5章 燃料电池系统的过氧比分析与控制.....	80
5.1 燃料电池过氧比特性.....	80
5.1.1 电堆功率.....	80
5.1.2 压缩机功耗.....	82
5.1.3 PEMFC系统净功率.....	83
5.1.4 最佳过氧比.....	84
5.2 空气供应系统控制.....	86
5.2.1 基于模型的最佳过氧比.....	86
5.2.2 最佳过氧比控制.....	88
5.2.3 仿真结果及分析.....	89
5.2.4 过氧比控制问题.....	92
5.3 氢气供应系统控制.....	97
5.3.1 动态矩阵控制原理.....	97
5.3.2 氢气供应系统的动态矩阵控制.....	100
5.3.3 最佳过氧比的氢气供应系统控制.....	103
5.4 热管理系统控制.....	105
5.4.1 基于状态方程的预测控制原理.....	107
5.4.2 热管理系统的PI控制和二次型最优控制.....	109
5.4.3 热管理系统的模型预测控制.....	114
5.4.4 最佳过氧比的热管理系统控制.....	119

5.5 燃料电池的总成控制	123
5.6 本章小结	125
第6章 结论和展望	127
6.1 结论	127
6.2 展望	127
致 谢	129
参考文献	130
附 录	137
A. 常用物理量参数	137
A.1 气体常数	137
A.2 摩尔质量	137
A.3 定压热容常数(25℃)	137
A.4 其它常数	137
B. 公式中符号含义	138
C. 饱和水蒸气气压	139
D. 标称扩散率	139
攻读博士学位期间的论文及科研情况	140

第1章 绪论

1.1 课题的研究意义

人类社会在经济发展过程中，遇到能源短缺、资源争夺以及环境污染等一系列无法避免的挑战。在车辆发动机方面，由于受到卡诺循环限制，传统的内燃机将储存于燃料中的化学能转变成热能后，再将其转变成机械能或者电能，只有约35%能量被利用，浪费了许多能量，还带来了大量废气、废热和噪声。这种能源利用方式严重影响了经济的可持续发展，从而使太阳能、风能和氢能等清洁、可再生能源的研究得到了高度重视^[1, 2]。氢燃料电池是一种清洁的发电装置，被认为是继蒸汽机和内燃机之后的第三代动力源。鉴于它能解决“能源短缺”和“环境污染”这两大难题，因而近年来兴起的燃料电池电动汽车或机车，以其节能、清洁的优点，已成为新一代汽车或机车的发展方向^[3, 4]。

燃料电池是众多电化学电源的一种，它是将燃料的化学能直接转化成为电能的一种装置，因而可以在相当长时间内连续工作，不必周期地更换部件或为电池充电，而只需要添加燃料。燃料电池的种类很多，根据其工作温度和电解质不同，有碱性燃料电池、质子交换膜燃料电池、磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池和固体氧化物燃料电池。

适合做为汽车或机车动力源的燃料电池，需要满足在各种工况下的车辆需求。质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)采用质子导电率佳的固体高分子膜为电解质，除具有很好的稳定性外，还有许多优点：其化学反应生成的副产物为水，因而腐蚀程度低；工作温度低(60°C~80°C)，启动时间短，可以在几秒内达到满载运行；其电流密度和功率密度都相对较高，发电效率可以达到45%~50%^[5]。同时，PEMFC还具有运行可靠的特点，因此适合作为车辆发动机。

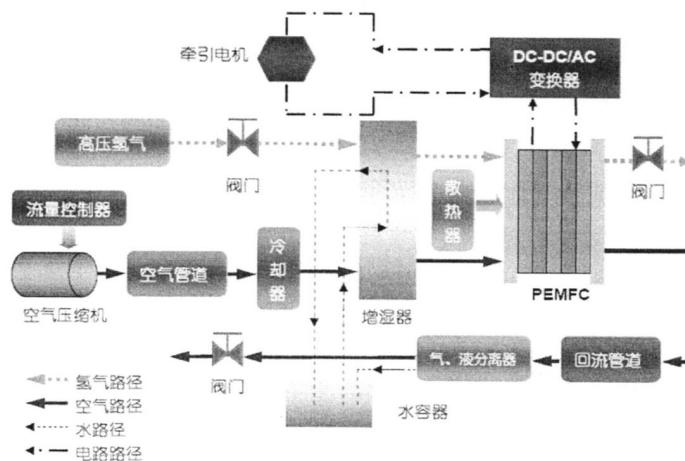


图1-1 车载燃料电池系统

通常将质子交换膜燃料电池的单体组合在一起构成燃料电池堆，这样可获得较高的

输出电压和输出功率,同时配置压缩机、加湿器、散热器、冷凝器、高压储气罐等辅助设备,形成车载燃料电池系统,如图1-1所示。车载燃料电池系统要安全高效、长时间的运行,必须对其操作条件进行有效地控制,如压缩机的控制电压、氢气流量调节阀的开度、散热风扇控制电压和加湿器的水泵转速等。这些操作条件都有一些限制,如压缩机空气流量不足会使电堆输出电压降低,而超过一定流量引起阴极压力过高。加湿器用于控制气体加湿水量,可以将电堆内的水控制在一个合适范围内;散热风扇控制燃料电池温度,温度高会增加燃料电池活性,提高电堆输出电压;但过高温度会烧坏质子交换膜,因此燃料电池内温度要控制在适合范围内。这些控制量之间耦合性很强,如压缩机空气流量过大,会降低电堆内温度和湿度;若电堆内温度升高,在电堆内部流场压力及流量不变的情况下,会降低电堆内湿度;堆内湿度过大致使水蒸气凝结成水则会阻碍流道,降低电堆输出功率,同时也会降低电堆内温度等。因此对燃料电池系统这样一个多输入/多输出、强耦合的复杂系统进行优化控制,使其经济性、动态响应及耐久性兼优,是燃料电池系统研究的热点和难点^[6]。

PEMFC系统控制是一个多输入多输出的复杂过程控制,具有强非线性、强耦合性、时滞性、不确定性等特点。对于一个车载大功率PEMFC系统,当负载运行工况突变时,由于供气系统的时滞性,导致PEMFC电堆内部反应气体的流量不能随之快速响应。与阳极氢气流量相比,阴极氧气流量具有相对缓慢的动态特性^[7],在运行工况突变等负载大电流快速变化条件下,控制PEMFC系统的氧气流量在合理范围内是个难题。如果阴极中氧气流量过低,即发生“氧饥饿”现象^[7,8],此时电堆内部空气流量过低,电堆供氧不足,致使电堆输出电压急速衰减,质子交换膜表面出现“热点”甚至燃烧,降低电堆使用寿命;如果氧气流量过高,即产生“氧饱和”现象,此时电堆内阴极的氧气远高于所需的氧气,电堆的输出功率没有明显的提高,但压缩机的功耗显著增大,从而使系统净输出功率(电堆输出功率与其辅助设备所需的寄生功耗之差)降低。在车载大功率应用方面,寄生功耗大约占电堆输出功率的15%,当发生“氧饱和”现象时,寄生功耗会明显增大,可以占到电堆输出功率的20%^[9],这对于本身就功率有限的车载PEMFC系统而言,是一个非常严重的问题。因此需要对阴极气体流量进行适当控制,使燃料电池系统的过氧比(Oxygen Excess Ratio, OER)维持在最优值,从而获得最大的净输出功率和良好的动态特性。

过氧比OER是指进入阴极的氧气质量流量与反应所消耗的氧气质量流量之比^[7,8],它表征了PEMFC系统的供氧状况,是衡量系统发电性能的重要且便于测量的指标。最佳过氧比OER是指在给定电堆电流、温度、湿度的情况下系统净输出功率最大时的过氧比。因而为了保证系统的净输出功率最大,必须保证OER为最佳。

PEMFC系统最大净输出功率的控制,本质上就是最佳OER的控制。OER的控制也是一个涉及负载电流、空气压缩机端电压、氢气流量阀的开度、冷却液循环泵控制电压和加湿器水泵的转速等多个系统输出和输入变量的复杂过程控制。具体来说,最佳OER的

控制属于一种优化控制，在避免发生“氧饥饿”和“氧饱和”情况下，要达到如下目标^[6]：

(1)降低燃料电池的氢耗量

对各种控制量进行优化控制，如压缩机的电压、氢气流量阀的开度、排气阀排气周期和回流泵转速等，可以提高燃料电池的净输出功率，使燃料电池以最少的氢气的量发出最多的电力，提高燃料电池系统的效率，降低燃料电池的运行成本。这类类似于汽车的百公里油耗运行指标。

(2)改善燃料电池系统的动态特性

车载燃料电池系统运行工况和操作条件比较复杂，如汽车或机车的启动、加速、减速和刹车等，而燃料电池系统的电堆及其辅助系统自身存在着时滞特性，故需要研究燃料电池系统的优化控制策略，使其满足运行工况的要求，提高燃料电池系统的动态响应能力。

(3)提高燃料电池的使用寿命

实验室稳态运行条件下的燃料电池系统的寿命大于40000小时^[10]，而据BALLARD公司报导车载燃料电池系统的最高使用寿命只有15000小时。影响燃料电池系统耐久性因素很多，而在汽车或机车起停频繁及瞬时加速等工况下，燃料电池系统性能的衰减很明显。例如在负载变化频繁的环境下，空气压缩机将快速频繁地变化，引起电堆内部空气侧压力频繁剧烈波动，长期运行会使质子交换膜性能下降。因此既要满足动态响应要求，又要考虑实际约束条件，提高燃料电池系统的耐久性，需要优化燃料电池系统的控制策略。

综上所述，最佳OER的控制目标为：在负载变化的情况下，始终保持燃料电池系统处于良好的运行状态，避免车载大功率燃料电池系统在运行时出现“氧饥饿”、“氧饱和”问题，保持OER在最佳值，使PEMFC系统输出最大净功率，同时会延长燃料电池工作寿命。因而研究PEMFC的OER控制将具有重要的意义。

1.2 国内外研究现状

燃料电池被称为‘21世纪理想的发电装置’之一，在分布式电站、电动车辆、航天航空、移动通讯、舰船等领域具有广阔的应用前景，对其建模和控制已取得许多成果。

1.2.1 PEMFC动态模型

研究燃料电池系统控制之前应先建立其数学模型，基于模型的基础上，对于不同的电堆电流、反应气体的流量和压力、电堆温度和湿度等条件下对系统仿真，预测燃料电池系统的动态特性，这对于设计系统的控制策略是非常有用。

研究PEMFC系统最佳OER问题，首先必须建立合适的PEMFC系统动态模型，其动态模型包括膜电极模型和系统级模型。膜电极模型包括电化学反应的环境参数、氢气、氧气、水蒸气和水合质子等的传质现象，以及燃料电池电压、电流、温度和湿度特性等。

根据建模的方法,膜电极模型分为机理模型和经验模型。建立在严格的物理关系基础上的机理模型,不仅由于其形式比较复杂,并且有时一些关键参数难以获得,因而这种建模的方法受到了限制,降低它的有效性和可行性。利用实际现象和实验数据来描述系统的经验模型,由于避免了物理量之间的复杂关系,简化了模型并提高了可行性,因而受到广泛应用。在膜电极模型中,最经典的是Amphlett J C等^[11]通过对MK-IV燃料电池稳态流体条件下的实验数据分析建立了燃料电池性能模型,该模型能够预测在不同工作条件下燃料电池的极化程度;在此基础上,Mann R F等^[12]考虑了阳极极化,并在计算欧姆过电压时引入膜电阻系数,得到电堆的输出特性模型。李奇等^[13]提出一种适用于工程分析的PEMFC实验模型,并采用改进粒子群优化算法对该模型的关键参数进行了辨识。

对于电堆而言, Lee J H等^[14]在单电池性能经验公式基础上,将电堆划分为若干个单元(与膜电极平行的方向划分单电池),累加每个单元功率得到电堆的总功率,它是预测PEMFC伏安特性的比较完整的经验模型。Jiang R Z等^[15]提出了在恒定电流工作下的电堆电压与温度的经验公式及电压时变特性的经验公式,有助于分析电堆长期运行的性能。在电堆稳态特性的基础上,其电流跳变时的动态特性逐渐成为关注的焦点。Pathapati P R等^[16]提出了一个燃料电池堆的动态模型,包含了双电层电容与活化电压、阴阳极流道的流量和压力的动态特性、物质质量或热量的瞬态特性,能够预测在电堆电流突变时电池电压、温度、阴阳极流道中氢气和氧气的流量和压力的动态变化。Xue X等^[17]用控制体方法建立电堆模型,将电堆分成阳极流道、阴极流道和电池3个控制体,结合机理知识和经验模型,建立了一个反映电堆温度、气体流量和双电层电容的动态模型。徐腊梅等^[18]基于质子交换膜燃料电池电特性方程建立了PEMFC的电化学模型,分析了电池电流阶跃变化时,电池电压、输出功率、消耗功率、电池效率以及电池等效内阻的动态响应,为燃料电池的优化控制提供指导。为便于设计电堆的微处理控制器, Hung Y H等^[19]用统一标准的键合图(bond graph)方法来建立电堆的实时动态模型,构造了两个键合图:流体热力学图和电化学图,考虑流体动态、热传输和电化学影响,建立了以阴极流体质量、阳极流体质量、阴极能量、阳极能量和电池温度为状态变量的非线性模型,并将其线性化得到状态空间方程,讨论了端口电压和电流的频域特性。Kunusch C等^[20]基于系统辨识方法建立了燃料电池堆空间状态方程,以电堆电流、阴极氧气流量为输入,电堆电压和阴极总压力为输出,用实验数据建立它们之间的传递函数,再将传递函数转换成状态空间方程。该方法建立起来的模型和实际相符,可用于燃料电池堆的实时控制中。

PEMFC发电系统中包括电堆和辅助设备,辅助设备主要包括空气压缩机、冷却水循环泵、加湿器、氢气回流泵和电控设备。近年来,PEMFC的技术研究逐渐成熟开始关注发电系统层次的建模。Pukrushpan J T等^[7, 8]提出了面向控制的燃料电池发电系统模型,将系统空气供应通道分为:进气管道、电堆内部阴极流场、排气管道,利用理想气体状态方程和能量守恒定律对每一个模块建模,该模型包括空气压缩机、增湿器、空气冷却

器、阳极流场模型、电堆电压模型，且首次提出了“过氧比”概念和“氧饥饿”的问题。马天才^[21]在Pukrushpan J T的模型基础上，根据MK902电堆的实验数据，提出了一种适于电堆内部水量的宏观状态水分析方法，且建立了加湿器模型和面向控制的冷却系统模型。Bao C等^[22]在Pukrushpan J T的基础上，将模型中阴极系统的空气压缩机由离心式改为双螺杆压缩机，增加了阳极系统建模，包括氢气注射泵、氢气回流泵、阳极排气阀，用有限速率相变模型描述阴极流道中的液态水，并且涉及了气体扩散层的‘水淹’现象。

虽然目前已有的PEMFC系统动态模型能够反映其部分工作机理，可用于分析和预测电堆的性能和设计相关元件参数，但大功率PEMFC系统的辅助设备功耗在这些模型中大多没涉及，因此不能分析燃料电池的“氧饥饿”和“氧饱和”问题。虽然Pukrushpan J T等^[7,8]提出了“氧饥饿”问题，但是其动态模型中没有考虑温度、湿度动态变化对电堆的影响，也没有建立电堆散热系统的功耗模型，且温度和加湿器模型采用的是静态模型，其模型在研究车载大功率系统的“氧饥饿”和“氧饱和”问题研究有一定的局限性。

1.2.2 PEMFC系统控制技术

PEMFC系统是一个的复杂系统，各子系统之间的既相互独立又相互联系。为保证整个系统可靠运行，需要各子系统之间协调工作，即需要对PEMFC系统进行有效的控制。目前国内外对PEMFC控制技术已进行了大量研究，提出了许多控制方法，有模糊控制、神经网络控制、自适应控制、鲁棒控制、预测控制等，且取得了众多研究成果^[23-26]。

模糊控制：针对一个15片8cm²的小型PEMFC，Schumacher等^[27]提出了水管理的控制策略，通过Takagi Sugeno Kang型模糊逻辑控制器控制风扇电压，调节风量以实现电堆内部水平衡。李炜等^[28]鉴于重整器在燃料电池系统中的作用，设计了自适应模糊控制器实现在线控制氢气摩尔流，从而控制PEMFC系统的输出功率。张天贺等^[29]建立了车载PEMFC空气供给系统模型，并采用自适应模糊PID控制器调节风机供给电堆的风量，实现对电堆入口压力控制。胡鹏等^[30]建立了燃料电池的温度机理动态模型，设计了带积分环节的二维增量模糊温度控制器，该控制器具有较强的鲁棒性。

神经网络控制：Almeida PEM等^[31]针对住宅用的燃料电池系统，提出了一种优化的神经网络控制方法，采用小脑神经模型控制PEMFC电压，该控制器允许用户设置任意性能指标。Azmy A等^[32]为了便于优化管理住宅用的燃料电池系统，提出了一种基于人工神经网络方法实现燃料系统的日常参数在线更新。孙涛等^[33]利用神经网络对非线性系统具有较强的逼近能力以及自学习能力，将其与模糊逻辑系统相结合，以空气压力和冷却水流量作为输入，以电堆温度为输出，设计出基于自适应神经模糊算法的PEMFC温度模型。

自适应控制：Zhang J等^[34]针对燃料电池系统的时变非线性，利用实时参数辨识和配置闭环系统的极点方法设计了自适应控制器，调节燃料电池空气流量从而保持过氧比在一个优化区域，并通过实验装置进行了验证。Yang Y等^[35]针对一个低功率通信用燃料电

池,将系统简化为2输入(氢气流量和空气流量)和2输出(电堆电流和电压)系统。用伪随机二进制序列作为输入,测量燃料电池的电压和电流,用辨识的方法得到降阶的传递函数,对未建模部分和高阶动态部分用辅助输入项来描述,对燃料电池采用自适应控制,该控制器对燃料电池系统的动态特性变化具有鲁棒性。

鲁棒控制: Sedghisigarchi K等^[36]设计了一个 H_{∞} 控制器来调整固体氧化物燃料电池在负载变动情况下的电池电压,通过控制氢气流量使得输出电压变化可以保持在5%左右。Wang F等^[37]将多变量鲁棒控制策略应用于燃料电池系统中,在固定输出电阻条件下,通过空气和氢气流量调节电池电压。由于燃料电池系统的非线性,多变量鲁棒控制能够处理系统的不确定性和降低氢耗量。Li Q等^[38]基于燃料电池的多输入和多输出非线性模型,提出了一种非线性鲁棒控制。通过非线性坐标变换,状态反馈精确化方法可以实现全局精确化以及动态伸展算法,使得 H_{∞} 鲁棒控制策略可直接用于燃料电池系统,保证了系统的鲁棒性。

预测控制:针对单独的燃料电池系统容易引起“氧饥饿”的问题,Vahidi A等^[39]提出了燃料电池-超级电容的混合控制结构,基于混合系统的状态方程设计了预测控制器,该控制器完成受限条件下的最优电流分配策略,显著降低了变载时燃料电池缺氧程度。Golbert等^[40]考虑燃料电池的电压、电流、物料平衡和温度的空间依赖性,建立了一个燃料电池电堆的降阶动态模型。在设定的工作点,将模型预测控制应用于电堆的需求功率,同时保证最小的燃料消耗和最大的效率。Ren Y等^[41]将一种基于支持向量机的预测控制方法应用于燃料电池控制中,设计了PEMFC系统控制器。Vahidi A等^[9]为解决“氧饥饿”问题并计及空气压缩机饱和限制,提出了一种燃料电池与超级电容的混合结构,采用模型预测控制调节燃料电池和超级电容之间电流的分配。仿真结果显示当负载电流突变时,反应物不足量从单独供电时的50%减小到混合供电时的1%。Zhang L等^[42]将模型预测控制应用于燃料电池的水管理。在每个采样周期,用自回归神经网络CNN优化目标函数,选择最优的加湿器注水流量,使电堆内部的湿度快速达到设定值,且无震荡。

此外,刘呈则等^[43]将参数在线辨识和Smith预估器结合,以及自适应控制和模糊PID控制相结合,对PEMFC的输出电流进行控制。许思传等^[44]为了获得最佳的空气温度和湿度控制及最短的调节时间,将最优控制应用于燃料电池发动机测试平台。魏金强等^[45]为了克服燃料电池系统的时变、非线性特性,采用模糊PID控制器对燃料电池的风量进行控制。李奇等^[46]根据PEMFC工作机理,建立了一种适用于控制的PEMFC系统动态模型,分别采用双模控制和非线性鲁棒控制对PEMFC系统输出电压和阴、阳极压力进行控制。

1.2.3 基于最佳过氧比的PEMFC系统控制技术

目前,尽管PEMFC控制技术已经进行了大量研究,也已提出了许多控制方法,但是针对燃料电池系统“氧饥饿”、“氧饱和”等最佳OER问题的研究成果较少。

Pukrushpan J T等^[7, 8]在面向控制模型基础上, 提出了“氧饥饿”问题和OER限制条件; 分析并设计了三种不同的控制结构, 实现阴极流场内空气流量快速到达稳定。第一种是通过查表实现的稳态前馈控制器。第二种是采用动态前馈控制器, 能获得较好的动态特性, 但当对象参数变化时鲁棒性较差。为了消除稳态误差, 将PI控制器添加到反馈支路, 同时又能降低建模误差、设备老化和周围条件变化引起的敏感性。第三种是将状态观测器作为反馈环节, 然后和静态前馈控制器结合, 提高了系统的闭环带宽, 获得更好的可观测性以及更好的动态特性。

Bao C等^[47]将面向对象的系统状态方程在工作点附近线性化后, 分析了系统输入与输出之间的耦合关系, 得到电堆电压和水传递之间的相位关系, 便于分析电堆湿度和排气阀动作频率的关系。为了获得燃料电池系统的理想OER、阴极流场入口压力和质子交换膜两边压力差, 设计并比较了三种控制结构。第一种是分离的PI控制(静态前馈+PI控制), 将这种线性控制方法调节非线性系统, 因而控制效果较差。第二种是线性多输入控制器(静态前馈控制+带有积分器和状态观测器的反馈控制), 采用一个线性最优状态观测器, 状态预估通过卡尔曼滤波器实现。尽管控制也属于线性控制, 但是由于采用了具有状态预估和状态观测器的反馈控制, 控制效果优于第一种。第三种是多输入非线性控制器(模型预测控制), 通过神经网络辨识参数, 最小二乘算法实现控制器参数优化和在线参数辨识, 控制获得了很好的效果。

Suh KW等^[48]针对一个压缩机由燃料电池供电的自治系统, 控制结构采用前馈控制与反馈控制结合的方式, 研究变载时如何调整过氧比避免“氧饥饿”发生。详细讨论了控制器的限制条件并进行了验证。

Arce A等^[49]研究燃料电池系统空气流量的控制, 比较了两种控制目标: 防止“氧饥饿”与最大效率, 由于考虑系统的实时性, 控制方法采用受约束的显式模型预测控制, 并将所设计的控制器用于1.2kW的BALLARD燃料电池系统, 获得了较好的控制效果, 该文献是首次在OER曲线上定义了“氧饥饿”标准。Garcia-Gabin W等^[50]根据OER的变化情况, 采用滑模控制方法对空气供应系统的实时控制, 提高了燃料电池系统的鲁棒性。

李奇等^[51]在面向控制的燃料电池发电系统模型基础上, 为满足短时间内的负载需求, 加入超级电容器形成混合发电系统。将一种改进的粒子群算法(MPSO)和 H_{∞} 次优控制方法结合, 设计了基于MPSO算法的 H_{∞} 次优控制器, 用于控制燃料电池的OER, 获得良好的抗干扰性和鲁棒性。

此外, Danzer M A等^[52]设计非线性差分平坦控制器, 通过控制流量和排气阀开度分别调节阴极压力和过氧比, 并设计状态观测器检测瞬时“氧饥饿”和峰值压力, 避免燃料电池工作在不良状态。Ramos-Paja C A等^[53]用电路元件和功能模块完成燃料电池的动静态特性, 该电路模型能够预测过氧比。Restrepo C等^[54]研究具有过氧比预估的燃料电池仿真器, 便于分析由功率变换器引起的“氧饥饿”现象。Restrepo C等^[55]提出了计算过氧

比的简化方法，便于微处理器实现和实时控制。

以上控制方法各有特点，对所研究的问题都获得良好的控制效果，大多数的线性控制方法是在燃料电池系统的工作点线性化处理后进行设计，只保留了系统非线性的一些基本性质，且忽略了系统变量之间的耦合关系、不确定性摄动以及控制器保守性设计所带来的影响，导致系统有效控制的动态范围窄、抗干扰能力较弱、跟踪性能较差^[56, 57]。采用非线性控制的仅考虑了燃料电池系统的空气流量控制，同时亦没有考虑系统温度、湿度变化对控制效果的影响。

对于车载燃料电池系统这样一个多输入/多输出系统，为使系统具有较好的动静态特性及抗干扰性、鲁棒性，常常需要使用复杂控制。由于预测控制采样频率低，可以保证系统控制的实时性，又因模型预测控制具有模型预测、滚动优化、反馈校正这些特征^[57]，使其在过程控制中得到广泛的应用。

综上所述，本论文拟在已有成果的基础上，采用模糊控制和预测控制原理设计车载燃料电池控制器，研究基于最佳过氧比的车载燃料电池系统净输出功率最优控制，使PEMFC系统能够跟踪最佳OER，避免大功率燃料电池系统运行时出现“氧饥饿”、“氧饱和”等问题，进而最大化系统净输出功率，延长系统使用寿命。

1.3 主要研究内容

本文的研究内容主要包括：燃料电池等效电路、车载燃料电池动态建模、OER区域的划分和电流调节方法、基于OER控制方法(包括空气供应系统、氢气供应系统和热管理控制)。

(1) 车载燃料电池等效电路

由开路电势、活化电阻、双电层电容和欧姆电阻构成的燃料电池简化模型，在线性电路范围不能充分反映电池的动态特性，本文通过分析车载燃料电池电流跳变时电压波形，结合化学反应和物料传递的机理，将提出一种改进等效电路，能更全面反映电池的动态特性。

(2) 车载燃料电池动态建模

针对目前已有的PEMFC动态模型没有包含燃料电池系统的辅助设备功耗模型，不能分析“氧饥饿”和“氧饱和”现象，在既有模型的基础上，将建立一个适用于OER分析的车载PEMFC动态新模型，包括电堆散热系统模型和空气压缩机模型以及氢气回流泵模型，以适合分析系统的“氧饥饿”及“氧饱和”问题。

(3) OER区域的划分和电流调节方法

在车载燃料电池控制中，OER是一个与系统效率密切关联的参数，然而很难划分不同供氧状态时OER范围。通过研究系统组成设备工作条件、参数对系统净输出功率的影响，将确定车载燃料系统的OER区间划分，并在此基础上提出在变载过程中，防止“氧

饥饿”和“氧饱和”的电流调节方法。

(4)基于OER的PEMFC系统控制方法

实时保持OER在最佳值是保证车载燃料电池系统输出最大净功率的唯一条件，然而最佳OER由电堆电流、温度、湿度、流场气体压力和辅助设备的功耗决定，难以用确切的函数表示。结合理论方程和实验数据建立OER方程组，将通过寻优得到不同工作状态下最佳OER。在此基础上，提出了对空气供应系统的最佳过氧比控制方法，并设计了对氢气供应系统和热管理系统的控制器。

1.4 结构安排

第1章是绪论，阐述论文工作的研究背景和意义，介绍质子交换膜燃料电池动态模型、质子交换膜燃料电池控制技术以及基于过氧比的质子交换膜控制技术的国内外研究现状。

第2章是燃料电池等效电路，阐述燃料电池的能量、输出电压特性、双电层效应，将介绍燃料电池的四种等效电路和它们的特点。由于简化等效电路直观地反映了电池的基本原理，将电池物料传输方程用等效电路替代，在简化等效电路基础上提出一种改进等效电路。

第3章是车载燃料电池系统建模，包括空气供应系统、氢气供应系统和热管理系统。空气供应系统包括压缩机、供气管路、静态散热器和加湿器、阴极流场、气体扩散层和排气管路；氢气供应系统包括高压氢气罐、减压阀、压力调节阀、供气管路、静态加湿器、回流泵、阳极流场、排气管路和排气阀；热管理系统包括冷却水循环泵、冷却管路、冷却水流场、散热器和旁路阀。对各系统的每个部件和各部件之间的连接建立方程，同时考虑气体湿度和各动力设备的功耗。

第4章是车载燃料电池仿真研究。在第3章所建模型的基础上，对空气供应系统、氢气供应系统和热管理系统，讨论输入量阶跃变化对辅助设备功耗、流道各处流量和压力的影响。

第5章是燃料电池系统的过氧比分析与控制。首先推导电堆、压缩机和净功率的过氧比特性，接着对于空气供应系统，提出基于最佳过氧比控制方法。对过氧比区域进行划分，设计防止“氧饥饿”和“氧饱和”的电流调节器。然后对氢气供应系统，设计了动态矩阵控制器控制氢气压力跟随空气压力。对热管理系统，在稳态工作点线性化建立二阶状态方程，提出基于状态方程的热管理控制。最后是燃料电池系统的总成控制。

第6章是对全文工作的总结，并给出下一步的工作展望。

第2章 燃料电池等效电路

燃料电池等效电路不仅可以定量地比较电池性能、区分电池设计优劣，而且便于电池外围电路设计，尤其是输出端变换器设计。本章首先阐述燃料电池能量、输出电压特性、双电层电容，接着介绍燃料电池的几种等效电路，重点叙述简化等效电路和参数计算方法，最后通过电池物料传输方程和实验波形，在简化等效电路基础上提出一种改进等效电路。

2.1 燃料电池的能量

燃料电池化学反应释放的能量可以通过反应物和生成物的焓值计算。电池氢氧化学反应释放的能量等于物质反应前后的焓值变化(简称焓变) $\Delta\bar{h}_f$ ，即氢气的焓值 \bar{h}_{f,H_2} 与氧气的焓值之和 \bar{h}_{f,O_2} 减去水的焓值 \bar{h}_{f,H_2O} ^[58]：

$$\Delta\bar{h}_f = \bar{h}_{f,H_2} + \frac{1}{2}\bar{h}_{f,O_2} - \bar{h}_{f,H_2O} \quad (2-1)$$

物质的焓值受温度、压力影响，不同的温度、压力及生成物状态，其反应的焓变不同。为了便于计算通常采用标准状况下(温度25°C，压力1.013bar)燃料电池的焓变，如表2-1所示，焓变241.83kJ/mol称为低热值，而285.84kJ/mol称为高热值，两种状态的焓变差值等于水的摩尔蒸发焓。如果化学反应产生的焓变全部转换为电能，那么燃料电池的等效电势满足^[58]：

$$E_{eq} = \frac{\Delta\bar{h}_f}{2F} \quad (2-2)$$

式中： F 是法拉第常数。等效电势 E_{eq} 大小与生成物水的状态有关，如表2-1所示。将等效电势1.481V称为高热值，而电势1.253V称为低热值。

表2-1 反应焓和等效电动势^[58]

生成物水的状态	焓变 $\Delta\bar{h}_f$ (kJ/mol)	等效电动势 E_{eq} (V)
液态	285.84	1.481
气态	241.83	1.253

燃料电池可逆电势的大小可以通过吉布斯自由能计算。电池中氢氧化学反应释放的最大电能等于吉布斯生成自由能的变化，该反应中1mol的氢气和0.5mol氧气生成1mol水，吉布斯生成自由能的变化量 $\Delta\bar{g}_f$ 等于生成物水的自由能 \bar{g}_{f,H_2O} 减去反应物氢气自由能 \bar{g}_{f,H_2} 与氧气自由能 $0.5\bar{g}_{f,O_2}$ 之和：

$$\Delta\bar{g}_f = \bar{g}_{f,H_2O} - \bar{g}_{f,H_2} - 0.5\bar{g}_{f,O_2} \quad (2-3)$$

吉布斯生成自由能由温度和生成物状态决定，表2-2给出了不同温度和状态下自由能变化的数值，温度升高自由能变化量的绝对值减小。如果没有能量损失(即过程可逆)，反应释放的自由能将全部转换成电能，那么燃料电池的可逆电势 E_0 可以表示成^[58]

$$E_0 = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{2F} \quad (2-4)$$

表2-2 不同温度下的自由能变化量^[58]

生成物	温度	自由能变化量	可逆电动势	生成物	温度	自由能变化量	可逆电动势
水状态	(°C)	$\Delta \bar{g}_f$ (kJ/mol)	$E_0(V)$	水状态	(°C)	$\Delta \bar{g}_f$ (kJ/mol)	$E_0(V)$
液态	25	-237.21	1.2292	气态	70	-226.63	1.1744
液态	50	-233.12	1.2080	气态	80	-226.17	1.1720
液态	60	-231.48	1.1995	气态	90	-225.71	1.1696
液态	70	-229.84	1.1990	气态	100	-225.24	1.1672
液态	80	-228.19	1.1825	气态	110	-224.78	1.1648

不同温度和状态下可逆电势数值如表2-2所示。温度升高可逆电势减小。生成物水的不同状态产生的自由能不同，导致可逆电势有差异，气态时电势小于液态时的电势。

一个燃料电池单体输出电流 I_{fc} 时，由化学反应式和法拉第定律得到氧气、氢气的供给以及生成物水蒸气产生的速率分别是^[58]：

$$n_{O_2} = \frac{I_{fc}}{4F} \quad n_{H_2} = \frac{I_{fc}}{2F} \quad n_{H_2O} = \frac{I_{fc}}{2F} \quad (2-5)$$

其中： n_{O_2} 和 n_{H_2} 分别是单位时间内消耗的氧气、氢气摩尔数(mol/s)；而 n_{H_2O} 是单位时间内化学反应产生的水蒸气摩尔数(mol/s)。

燃料电池电堆是由许多单体串联形成的，每个单体流过相同的电流，因而单体消耗的物质质量是相同。如果电堆由 n_{fc} 个单体构成，则反应物的供给和生成物产生的速率分别是：

$$W_{O_2} = n_{fc} n_{O_2} M_{O_2} = \frac{n_{fc} I_{fc} M_{O_2}}{4F} \quad (2-6)$$

$$W_{H_2} = n_{fc} n_{H_2} M_{H_2} = \frac{n_{fc} I_{fc} M_{H_2}}{2F} \quad (2-7)$$

$$W_v = n_{cell} n_{H_2O} M_{H_2O} = \frac{n_{cell} I_{fc} M_{H_2O}}{4F} \quad (2-8)$$

其中： W_{O_2} 和 W_{H_2} 分别是单位时间氧气、氢气的消耗量； W_v 是单位时间内产生的水蒸气。 M_{O_2} 、 M_{H_2} 和 M_{H_2O} 分别是氧气、氢气 and 水的摩尔质量。

2.2 燃料电池电压输出

当电流通过燃料电池时会发生一系列物理和化学变化的过程，每一个过程都存在阻力，为了使反应能够持续不断进行，就必须消耗自身的能量去克服这些阻力，因此电极电势出现极化现象。根据产生的原因，极化可以分成三部分：

(1) 活化极化

活化极化是指开始进行化学反应时，激活化学反应需要克服的阻力。由于反应速度

过慢，导致在驱动质子经过电解质时产生能量损耗。

(2) 欧姆极化

欧姆极化主要包括电子通过电极材料和连接部件的能量损失以及氢质子通过电解质的能量损失。电解质与电极阻抗都遵循欧姆定律，影响电池性能的关键因素是电解质膜的离子交换阻抗和电极连接部件阻抗。

(3) 浓度极化

浓度极化的产生是由于燃料气体和氧化剂不能及时供给引起的。当流过大大电流时，为维持大量的电荷交换，反应物必须适时地移动到电极表面上，如果不能及时供给，会导致电池电压的急剧下降。这种损失是由于传质过程引起的，又称其为传质损失。

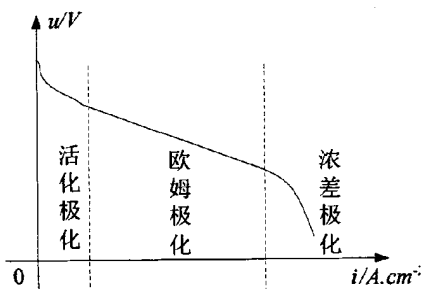


图2-1 燃料电池极化曲线

燃料电池的输出电压特性称为极化曲线，如图2-1所示，它反映了电流密度和单体电压的关系。

2.2.1 燃料开路电压

燃料电池工作环境常常不同于标准状态，标准状态下的可逆电势不能作为其开路电势，在常压下任意温度 T 的可逆电势 E_T 为^[59]

$$E_T = E_0 + \frac{\Delta\hat{s}}{2F}(T - T_0) \quad (2-9)$$

式中： E_0 表示标准状态下的可逆电势， T_0 是标准状态下的温度， $\Delta\hat{s}$ 是反应物的熵变值。将能斯特方程引入到氢氧化学反应中，该反应的能斯特方程是^[59]

$$E = E_0 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{\alpha_{H_2O}}{\alpha_{H_2} \alpha_{O_2}^{0.5}} \quad (2-10)$$

其中： R 是普适气体常数， α 表示物质的活度，水蒸气的活度取1。将氢气、氧气和水的活度改用它们的压力替代，式(2-10)变为

$$E = E_0 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{1}{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}} \quad (2-11)$$

尽管能斯特方程中有温度变量，但是推导过程没有涉及可逆电势随温度的变化关系。将式(2-9)中的 E_T 替代式(2-11)中 E_0 ，得到燃料电池的开路电势

$$E = E_0 + \frac{\Delta\hat{s}}{2F}(T - T_0) + \frac{RT}{2F} \ln(p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}) \quad (2-12)$$

将反应的熵变值和常数代入式(2-12)，燃料电池开路电势可以表示如下：

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T \ln(p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}) \quad (2-13)$$

电池的开路电势是温度、氧气分压力、氢气压力和水蒸气压力的函数。车载燃料电

池中, 气体的入口温度不高于 63°C , 出口温度一般要求不高于入口温度 10°C , 这样电池温度不高于 80°C 。电池工作时, 空气入口的压力范围在 $1.0\text{bar}\sim 2.0\text{bar}$, 空气中氧气分压力约占总压力的 0.21 (单位体积空气中氧气体积占 0.21), 氢气入口压力比空气入口压力高出 0.2bar 。令空气压力等于 1.6bar , 氢气压力等于 1.8bar , 温度从 25°C 变化至 80°C , 开路电势与温度的关系如图2-2(a)所示。图中电池开路电势随温度升高直线下降。开路电势在 25°C 时是 1.2295V , 80°C 时是 1.1829 , 变化量是 0.0466V 。

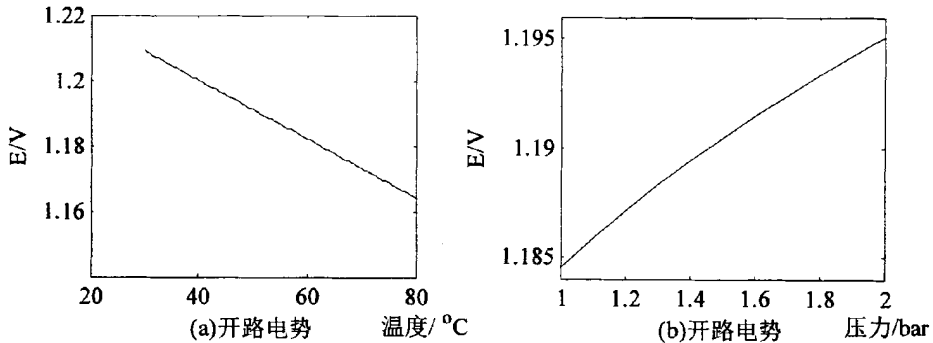


图2-2 单体电池开路电势

当温度不变时, 开路电势随空气压力变化如图2-2(b)所示。图中温度是 80°C , 空气压力升高则开路电势缓慢提升。在空气压力 1bar 时开路电势是 1.1568V , 2bar 时是 1.1684V , 压力升高 1bar 而电压提高 0.0116V , 因而不宜通过增加空气压力提高电池电压。

2.2.2 活化极化

活化极化是用于克服电池内部的反应能垒所需要的能量, 电化学反应一个明显的特征是通过改变电压来操作活化能垒的大小。在化学反应中, 带电物质的自由能对电压很敏感, 改变电池电压将改变带电物质的自由能, 从而影响活化能垒的大小。

电池化学反应中存在正向电流密度和反向电流密度, 在平衡条件下电池没有输出电流, 此时这两种电流密度相等, 这个电流值被称为交换电流密度 i_0 。利用活化能垒, Butler-Volmer方程建立了电流密度与活化过电压的关系^[58]:

$$i = i_0 [e^{anFv_{act}/(RT)} - e^{-(1-\alpha)nFv_{act}/(RT)}] \quad (2-14)$$

式中 v_{act} 代表电压损失; n 是化学反应中转移的电子数, 氢氧反应中 $n=2$; α 是电荷传输系数, 它的值取决于化学能垒的对称性, 取值介于 $0\sim 1$ 之间, 对于平衡条件下, $\alpha=0.5$; 大部分化学反应的取值范围是 $0.2\sim 0.5$ 之间。如果燃料电池的电极表面越活跃, 那么其中一个方向的电流流动性就越强, 交换电流密度 i_0 的值越高。温度升高时 i_0 将增大, 且大多情况下活化过电压的减小量远大于温度对其的增长量, 因而一般来说温度升高活化过电压降低。

式(2-14)所示的Butler-Volmer方程常认为过于复杂, 不能将活化过电压 v_{act} 表示成电池电流显函数形式。当活化过电压较大时, 可以忽略Butler-Volmer方程中的第二项, 这样

公式可以简化为

$$i = i_0 e^{2\alpha F v_{act}/(RT)} \quad (2-15)$$

解此方程得到活化过电压 v_{act}

$$v_{act} = \frac{RT}{2\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) = -\frac{RT}{2\alpha F} \ln(i_0) + \frac{RT}{2\alpha F} \ln(i) \quad (2-16)$$

以上公式称为Tafel公式，仅适用于电流密度 i 大于交换电流密度 i_0 的范围。对于在 $i \geq 0$ 范围的活化过电压，Pukrushpan J T给出了改进的公式^[60]

$$v_{act} = v_0 + v_a(1 - e^{-c_1 i}) \quad (2-17)$$

其中： v_0 是电流密度为零时的过电压， v_a 和 c_1 是常数。这些参数受氧气分压力和温度因素的影响。

活化极化现象在燃料电池的阴极和阳极都存在，阴极的交换电流密度比阳极小得多，有时要小 10^5 倍，如一个低温燃料电池，在常压下阴极的交换电流密度大约是 0.1 mA/cm^2 ，而阳极的大约是 200 mA/cm^2 。因而根据式(2-16)可知，与阴极的活化过电压相比，阳极的过电压可以忽略不计。

2.2.3 欧姆极化

欧姆极化是克服电解质中氢离子流动时遇到的阻力和电极的电阻而产生的过电压。

欧姆过电压 v_{ohm} 与电流密度 i 成正比^[58]，即

$$v_{ohm} = R_{ohm} i \quad (2-18)$$

其中： R_{ohm} 是电解质、电极和双极板的等效阻抗($\Omega \cdot \text{cm}^2$)。

欧姆极化的等效电阻与电池的构造和工作状态有关^[59]，例如电极和双极板的材料、接触的紧密程度、电解质的温度及其含湿量。欧姆极化的等效阻抗主要取决于电解质的厚度 t_m 和其电导率 σ_m ^[58]，忽略其它电阻可表示为：

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (2-19)$$

电解质的电导率 σ_m 是温度 T_{fc} 和含水量 λ_m 的函数。目前质子交换膜燃料电池大多使用杜邦公司生产的Nafion膜，不同温度和含水量下的Nafion膜电导率满足^[60, 61]

$$\sigma_m = b_1 \exp\left[b_2 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{fc}}\right)\right] \quad (2-20)$$

其中： b_1 是含水量 λ_m 的函数， b_2 是常数，且 $b_2=350$ 。 b_1 与含水量 λ_m 的关系为

$$b_1 = b_{11} \lambda_m - b_{12} \quad (2-21)$$

其中： b_{11} 、 b_{12} 是常数，需要根据经验公式确定，适用于Nafion112膜的参数 $b_{11} = 5.139 \times 10^{-3}$ 和 $b_{12} = 3.26 \times 10^{-3}$ ^[60]。

电解质膜的温度及水活性决定膜的含水量 λ_m ，温度分别是 30°C 和 80°C 时膜含水量与其水活性关系^[62]：

$$\begin{cases} \lambda_m(30^\circ\text{C}) = 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36.0a^3 \\ \lambda_m(80^\circ\text{C}) = 0.300 + 10.81a - 16.0a^2 + 14.1a^3 \end{cases} \quad (2-22)$$

其中：系数 a 表示水活性，当电解质膜周围是水蒸气时取值范围在 $[0,1]$ 之间，若周围有液体水时取值范围在 $[1,3]$ 区间。

电池温度在 $[30^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}]$ 区间时，可以利用线性差值近似计算膜的含水量，即

$$\lambda_m = \frac{[\lambda_m(80^\circ\text{C}) - \lambda_m(30^\circ\text{C})]}{50}(T_{fc} - 30) + \lambda_m(30^\circ\text{C}) \quad (2-23)$$

由式(2-19)、(2-20)、(2-21)、(2-22)和(2-23)可以得到温度、水活性对欧姆电阻的影响如图2-3所示，图中膜的厚度 t_m 是 $51\mu\text{m}$ (Nafion112)。随着水活性 a 的增加欧姆电阻减小。水活性 a 越大电解质膜含水量越高，膜的导电性越好，但是 a 大于1时电解质周围有水存在，容易阻塞电池中气体扩散层的气孔，降低电池性能。 a 等于1时是保持电池性能最佳状态，此时随着电池温度升高，由于含水量微弱降低，使得膜电阻存在微弱上升趋势。

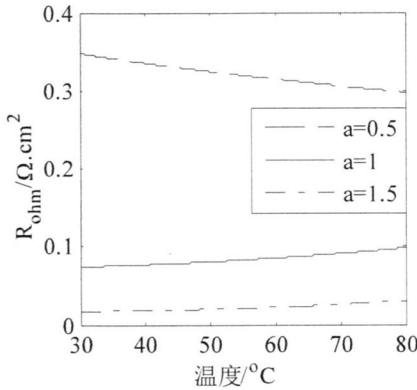


图2-3 温度对欧姆电阻的影响

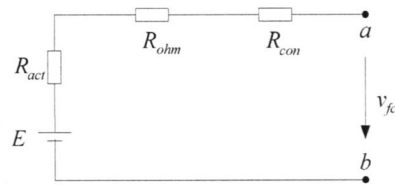


图2-4 燃料电池等效电路

2.2.4 浓差极化

当电堆电流突然增大时，由于电极处氧气浓度的突然降低，使得电池端电压骤降，这个电压称为浓差极化过电压，其下降的幅度取决于电流的大小、电极周围空气压力、外部氧气的补充速度。反应气体压力由 p_1 变为 p_2 ，引起地电压变化 v_{con} 可以表示为^[58]

$$v_{con} = \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \quad (2-24)$$

假设电池工作在最大电流密度 i_{max} 时燃料的供应速度最大，同时负载以相同的速度消耗掉这些燃料，这样电极处气体压力刚好为零。如果电池电流为零(开路)，反应气体压力是 p_1 时，而电流密度是 i_{max} 时，假设气体压力线性下降到零，那么任意电流密度 i 时气体压力 p_2 可以表示为：

$$p_2 = p_1 \left(1 - \frac{i}{i_{max}}\right) \quad (2-25)$$

将式(2-25)代入式(2-24)将得到

$$v_{con} = \frac{RT}{2F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_{max}}\right) \quad (2-26)$$

在上式中供给燃料电池的气体不是纯氧气而是空气时,无法表达氮气在系统中的累积,因而利用数据拟合将浓差极化过电压修改为^[60]

$$v_{con} = i \times \left(c_2 \times \frac{i}{i_{max}}\right)^{c_3} \quad (2-27)$$

其中 c_2 和 c_3 是常数,与温度、气体分压力有关。

2.2.5 燃料电池端电压

燃料电池工作时,端电压 v_{fc} 等于其开路电势减去各个极化过电压,即

$$v_{fc} = E - v_{act} - v_{ohm} - v_{con} \quad (2-28)$$

令活化电阻 R_{act} 、浓差电阻 R_{con} 分别满足

$$R_{act} = \frac{v_{act}}{i} \quad R_{con} = \left(c_2 \times \frac{i}{i_{max}}\right)^{c_3} \quad (2-29)$$

由式(2-18)、式(2-29)和式(2-28)得电池端电压可以表示为

$$v_{fc} = E - R_{act}i - R_{ohm}i - R_{con}i \quad (2-30)$$

根据式(2-30)得到燃料电池的等效电路如图2-4。单体电压的范围在 $0.6V \sim 0.9V$ 之间,而燃料电池工作场所需要的电压远远高出单体电压,因而与其它电池一样,必须将单电池串联起来组成电堆以实现高电压的需求。将 n_{fc} 个单电池串联构成燃料电池堆,电堆的端电压 V_{st} 可以表示为

$$V_{st} = n_{fc}v_{fc} = n_{fc}(E - v_{act} - v_{ohm} - v_{con}) \quad (2-31)$$

2.3 双电层效应

当两种不同的材料接触时,将发生电荷从一种材料转移到另外一种材料的现象,或是在接触层面上产生电荷,从而在接触面形成一个“双电层”。在燃料电池中,膜电极和电解质接触就形成了双电层,它是电极上的电子、电解质中的氢离子及外部的电压共同作用的结果。电子聚集在电极的表面,而氢离子被吸附在电解质表面。位于电极-电解质界面或其附近的电荷层能够存储电荷和能量,相当于一个电容器元件。当电池电流变化时,由于电荷层中电荷的聚集和消散都需要一段时间,这样活化过电压不会随电流变化而快速变化,而是缓慢变化到稳态值。由电容器的容量的定义得到双电层电容 C ^[58]

$$C = \varepsilon \frac{A_{fc}}{d} \quad (2-32)$$

其中:参数 ε 是介电常数; A_{fc} 是表面积; d 是双电层分界面的宽度。表面积比实际的电极面积大几千倍,而宽度 d 很小,通常只有几个纳米。在很多燃料电池中,电容大约是几个法拉。

2.4 燃料电池等效电路

根据燃料电池电化学原理和流体特性, 基于反应气体压力和流量的稳态和动态模型仅便于分析电池内部气体状态, 不能反应其电气特性, 然而电池的等效电路具有重要的工程意义^[63-65]。一方面, 等效电路便于工程人员设计和分析燃料电池的测试方法; 另一方面, 燃料电池工作时输出端必须接DC/DC变换器或DC/AC变换器, 电池等效电路可以有助于变换器设计。燃料电池等效电路分为两种: 无源等效电路和有源等效电路^[66]。无源等效电路指反映燃料电池在待机时状态的电路, 此时电池不发出电功率, 用于研究在受到外部电激励时, 电池内部的情况^[67]。有源等效电路指反映电池在输出功率时状态的电路, 包括产生的电势和内部损失。这里仅讨论燃料电池的有源等效电路。

目前基于燃料电池工作机理或是测试方法, 提出的燃料电池等效电路已有几种类型^[65, 66, 68], 而常用的有四种: 原始等效电路(Original Electric Equivalent Circuit Model)^[69]、电子等效电路(Electronic Circuit Model)^[70]、频域响应等效电路(Frequency Response Equivalent Circuit Model)^[71]、简化等效电路(Simplified Equivalent Circuit Model)^[58, 72], 如图2-5所示。

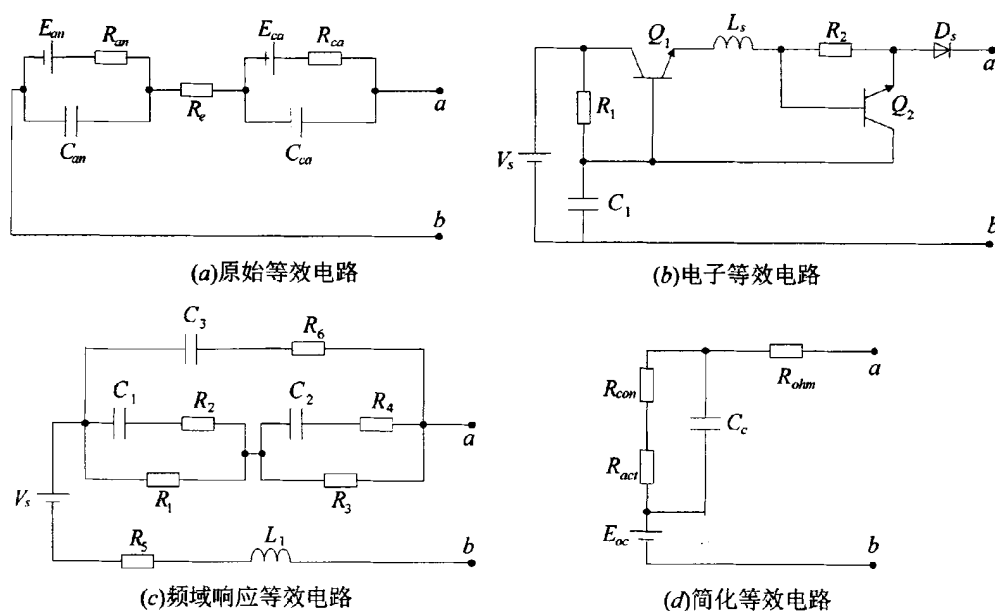


图2-5 燃料电池等效电路

原始等效电路是利用电路元件模拟电池的阳极、阴极和电解质, 如图2-5(a)。图中 E_{an} 和 E_{ca} 分别是阳极和阴极产生的电动势, R_{an} 和 R_{ca} 分别是电池阳极和阴极的法拉第电阻, C_{an} 和 C_{ca} 是相应的电容, 而 R_e 代表电解质电阻。 R_{an} 和 R_{ca} 的值比较低, 一般是每平方厘米几欧姆, 而电容 C_{an} 和 C_{ca} 较大, 一般是每平方厘米几法拉。利用电流扰动技术容易确定元件参数, 根据燃料电池的电压电流时域波形和电路方程, 得到等效电路中元件参数计算

公式。

图2-5(b)中所示的电子等效电路是以燃料电池的极化特性曲线为基础，利用三极管、电阻、电感、电容和电压源实现电池模拟。电路中一个二极管和一对三极管实现电池的静态特性，而一个电容和一个电感体现电池的动态特性。

燃料电池输出电压是直流电压，工作时其输出端连接有DC/DC或DC/AC变换器，为了估算变换器产生的纹波电流，需要对电池建立一种频域等效电路。让燃料电池工作在指定的工作点，在其输出端的直流电流上叠加交流小信号，频率范围取[0,10kHz]，测量每一个频率下的交流电压，通过计算得到不同频率下的交流阻抗。绘制不同直流工作点下阻抗的Nyquist图，利用频域分析技术得到燃料电池频域响应等效电路，如图2-5(c)。

图2-5(d)所示的简化等效电路是在图2-4电路中基础上，用电容元件 C_c 反映电池的双电层效应。当电池电流增加时，由于双电层存在，延缓了活化极化和浓差极化的加深速度，因而将电容器与这两个电阻并联。该电路不仅反应了稳态时电池电压电流关系，而且体现电池的动态特性。

以上四种等效电路的复杂度不同，原始等效电路体现了电化学原理，但通过简单测试技术计算的参数误差较大；电子和频域响应等效电路不仅比较复杂且不能反映电池电化学反应的物理意义；简化等效电路即简化了计算复杂性，物理含义清晰，又基本能满足工程应用的需要，元件参数可以通过电流扰动方法精确计算。下面重点讨论简化等效电路。

2.4.1 简化等效电路

燃料电池堆是由一个个单体电池串联而成，其等效电路与单体电池类似，图2-5(d)中活化电阻 R_{act} 和浓差电阻 R_{con} 串联，且稳态时浓差极化发生在电流最大区域，因而忽略浓差电阻，简化的等效电路如图2-6虚线框所示。与超级电容串并联时的参数计算方法^[73]类似，等效电路中开路电压、双电层电容、活化电阻和欧姆电阻与单体电池的相应参数的关系是

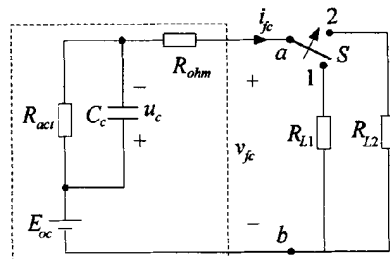


图2-6 电池简化等效电路

$$\begin{aligned}
 E_{oc,st} &= n_{fc} E_{oc} & C_{c,st} &= C_{c,fc} / n_{fc} \\
 R_{act,st} &= n_{fc} R_{act,fc} & R_{ohm,st} &= n_{fc} R_{ohm,fc}
 \end{aligned}
 \tag{2-33}$$

式中角标 st 表示电堆参数， fc 表示单体电池参数。以后的章节中如果没有特殊说明角标 fc 或是 st 都是指电堆的参数。

2.4.2 简化等效电路参数计算

电流扰动方法是将电池电流在某时刻突然发生跳变，从而引起端电压变化，利用它

们的数值计算等效电路的参数。在图2-6中, 开关 S 在 $t < t_0$ 时合在1位, 此时电池电流是 I_1 , $t = t_0$ 时开关 S 合到2位, 稳态时电流是 I_2 。电流跳变使得端电压发生变化, 波形如图2-7所示。

当 $t < t_0$ 时, 电路处于稳态电路, 电容元件相当于开路, 电池电流、电压、电阻及电势满足:

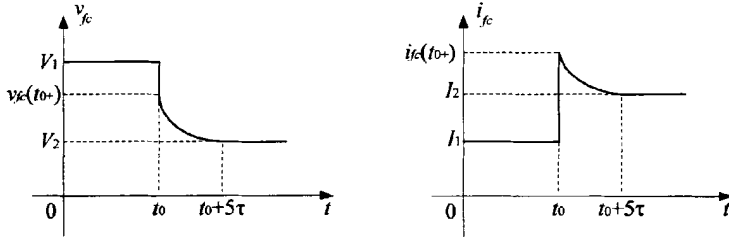


图2-7 电池端口电压电流

$$(R_{ohm} + R_{act})i_{fc}(t) = E_{oc} - v_{fc}(t) \quad (2-34)$$

取 $t = t_0$, 上式变为

$$(R_{ohm} + R_{act})i_{fc}(t_{0-}) = E_{oc} - v_{fc}(t_{0-}) \quad (2-35)$$

因为 $i_{fc}(t_{0-}) = I_1$ 和 $v_{fc}(t_{0-}) = V_1$, 所以有

$$(R_{ohm} + R_{act})I_1 = E_{oc} - V_1 \quad (2-36)$$

此外电容电压满足:

$$u_c(t_{0-}) = E_{oc} - R_{ohm}I_1 - V_1 \quad (2-37)$$

当 $t = t_{0+}$ 时, 电池电压可表示为:

$$v_{fc}(t_{0+}) = E_{oc} - u_c(t_{0+}) - R_{ohm}i_{fc}(t_{0+}) \quad (2-38)$$

电流发生跳变, 欧姆过电压随之迅速发生变化, 而活化过电压由于双电层效应不能瞬间发生变化, 即此时 $u_c(t_{0+}) = u_c(t_{0-})$, 代入式(2-38)得到:

$$v_{fc}(t_{0+}) = E_{oc} - u_c(t_{0-}) - R_{ohm}i_{fc}(t_{0+}) \quad (2-39)$$

将式(2-37)代入上式, 整理得到欧姆电阻:

$$R_{ohm} = -\frac{v_{fc}(t_{0+}) - V_1}{i_{fc}(t_{0+}) - I_1} \quad (2-40)$$

当 $t_0 + 5\tau > t > t_0$ 时, 电路处于过渡过程。由基尔霍夫电流定律和元件的伏安关系, 得到描述电容电压 u_c 的一阶微分方程:

$$C_c \frac{du_c}{dt} + \left(\frac{1}{R_{act}} + \frac{1}{R_{ohm} + R_{L2}} \right) u_c = \frac{E}{R_{ohm} + R_{L2}} \quad (2-41)$$

由以上一阶微分方程的系数得到等效电路的时间常数 τ 为

$$\tau = C_c \left(\frac{1}{R_{act}} + \frac{1}{R_{ohm} + R_{L2}} \right)^{-1} = C_c [R_{act} // (R_{ohm} + R_{L2})] \quad (2-42)$$

上式中“//”表示电阻并联。整理上式得到电容:

$$C_c = \frac{\tau}{R_{act} / (R_{ohm} + R_{L2})} \quad (2-43)$$

当 $t > t_0 + 5\tau$ 时, 电路再一次处于稳态, 此时依旧有

$$(R_{ohm} + R_{act})i_{fc}(t) = E_{oc} - v_{fc}(t) \quad (2-44)$$

$$(R_{ohm} + R_{act})I_2 = E_{oc} - V_2 \quad (2-45)$$

联合式(2-36)、上式和(2-40)推出活化电阻:

$$R_{act} = -\frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2} - R_{ohm} \quad (2-46)$$

燃料电池稳态工作时, 测量此时电池的电压 V_1 和电流 I_1 , 在 $t=t_0$ 时刻令电池电流发生跳变, 记录此时刻电池电压 $v_{fc}(t_{0+})$ 和电流 $i_{fc}(t_{0+})$, 当电池完成过渡过程再次到达稳态时, 又一次记录电池电压 V_2 和电流 I_2 。根据以上分析, 简化等效电路中元器件参数计算公式总结如下:

(1) 欧姆电阻 R_{ohm}

$$R_{ohm} = -\frac{v_{fc}(t_{0+}) - V_1}{i_{fc}(t_{0+}) - I_1} \quad (2-47)$$

(2) 活化电阻 R_{act}

$$R_{act} = -\frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2} - R_{ohm} \quad (2-48)$$

(3) 电容参数 C_c

$$C_c = \frac{\tau}{R_{act} / (R_{ohm} + R_{L2})} \quad (2-49)$$

其中: 负载电阻 $R_{L2} = \frac{V_2}{I_2}$

2.5 一种改进的车载燃料电池等效电路

简化等效电路及其参数确定方法, 在一个4W的小功率风冷燃料电池方面取得满意的实验效果^[66, 74]。对于大功率水冷型燃料电池, 当电堆电流突然变大时, 必须调大进气流量, 同时由于电池温度升高, 温度控制系统需要调节冷却水流量和散热风扇转速。一个Barllard公司150kW质子交换膜燃料电池的电压、电流和温度的试验波形如图2-8所示。图(a)的电流分别在80s、125s、180s和235s时刻发生4次跳变, 变化幅度分别是34A、37A、35A和34A; 图(b)的电压波形在相应的时刻跳变, 每次跳变后有一个过渡过程存在。图(c)的电池温度在 $t < 310s$ 时由于没有到达设定值一直缓慢上升。

如果将图2-6所示的燃料电池简化等效电路看成线性电路, 对于图2-8(b)所示的电压波形, 该电路很难解释电压变化的局部动态特性。在线性电路中, 图2-6中电池端电压在 $t=t_{0+}$ 和 $t=t_0+5\tau$ 时表示为:

$$v_{fc}(t_{0+}) = \frac{R_{L2}}{R_{ohm} + R_{L2}} \left(E_{oc} - R_{act} \frac{E_{oc}}{R_{act} + R_{ohm} + R_{L1}} \right) \quad (2-50)$$

$$v_{fc}(t_0 + 5\tau) = \frac{R_{L2}}{R_{act} + R_{ohm} + R_{L2}} E_{oc}$$

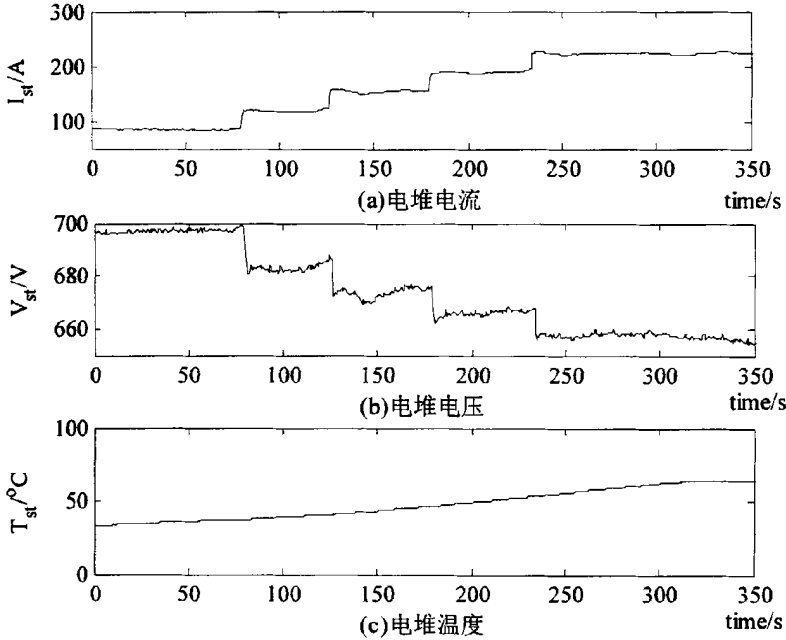


图2-8 燃料电池实验波形

假设两个负载电阻满足 $R_{L1} > R_{L2}$ ，即电堆电流突然增大，由上式可知端电压在 $t=t_{0+}$ 和 $t=t_0+5\tau$ 时满足 $v_{fc}(t_{0+}) > v_{fc}(t_0 + 5\tau)$ ，即电池电压跳变后最初时刻的值高于其稳态值，且电路是一阶电路，电池电压从跳变后最初值指数衰减到稳态值。由于跳变之前的电池电压高于跳变之后的稳态电压，因而在跳变时刻电压波形没有‘尖峰’。

图2-8(b)所示的燃料电池电压波形具有在电流跳变处，波形有一个小‘尖峰’，然后紧随一个过渡过程，这是由于电解质表面氢氧浓度(或压力)突然发生变化引起的。

燃料电池堆中满足物质守恒定律，氢氧压力瞬态变化用理想气体方程描述：

$$\begin{aligned} \frac{V_{an}}{RT_{st}} \frac{dp_{H_2,an}}{dt} &= W_{H_2,an,in} - W_{H_2,an,out} - \frac{I_{st}}{2F} \\ &= W_{H_2,an,net} - \frac{I_{st}}{2F} \end{aligned} \quad (2-51)$$

其中： R 是气体常数， T_{st} 是电堆温度， V_{an} 和 $p_{H_2,an}$ 是分别是阳极流场体积和压力， $W_{H_2,an,in}$ 和 $W_{H_2,an,out}$ 分别是流入、流出电堆阳极流场的氢气流量，而 $W_{H_2,an,net}$ 是氢气净流量。

同样，电堆中氧气的压力满足：

$$\begin{aligned} \frac{V_{ca}}{RT_{st}} \frac{dp_{O_2,ca}}{dt} &= W_{O_2,ca,in} - W_{O_2,ca,out} - \frac{I_{st}}{4F} \\ &= W_{O_2,ca,net} - \frac{I_{st}}{4F} \end{aligned} \tag{2-52}$$

其中： V_{ca} 和 $p_{O_2,ca}$ 是分别是阴极流场体积和压力， $W_{O_2,ca,in}$ 和 $W_{O_2,ca,out}$ 分别是流入、流出电堆阴极流场的空气流量，而 $W_{O_2,ca,net}$ 是空气净流量。

稳态时氢气和氧气分压力变化为零，即有

$$W_{H_2,an,net} = \frac{I_{st}}{2F} \quad W_{O_2,ca,net} = \frac{I_{st}}{4F} \tag{2-53}$$

在瞬态时电流变化与气体流量变化之间存在一个延时，它们之间的关系可表示为^[64]

$$\begin{aligned} \tau_{an} \frac{dW_{H_2,an,net}}{dt} &= \frac{I_{st}}{2F} - W_{H_2,an,net} \\ \tau_{ca} \frac{dW_{O_2,ca,net}}{dt} &= \frac{I_{st}}{4F} - W_{O_2,ca,net} \end{aligned} \tag{2-54}$$

其中： τ_{an} 和 τ_{ca} 是延时时间。气体流量变化引起电池电压改变，为体现这一现象引入一个动态电势 $E_{d,st}$ ，它在电流稳态时为零。同时为了反映燃料和氧气变化与电流之间延时，因此动态电势定义为^[64]

$$E_{d,st} = K[I_{st} - I_{st} * e^{-\frac{t}{\tau_c}}] \tag{2-55}$$

其中： K 是比例常数， τ_c 是反应延时的时间常数，符号'*'表示卷积。

对式(2-55)取拉普拉斯变换，整理可得到

$$E_{d,st}(s) = \frac{K\tau_c s}{\tau_c s + 1} I_{st}(s) \tag{2-56}$$

上式描述的动态电势和电堆电流关系用电阻和电感并联实现，如图2-9所示的虚线框内电路。图中动态电势和电堆电流满足

$$E_{d,st}(s) = \frac{L_d s}{R_d s + 1} I_{st}(s) \tag{2-57}$$

其中： R_d 是动态电阻， L_d 是动态电感。

燃料电池发生化学反应首先要克服化学能垒，在式(2-17)中电压 U_0 反映了电池的活化能垒^[59]，有别于式(2-29)，将活化电阻的定义为：

$$R_{act} = \frac{U_0 - U}{i_{st}} \tag{2-58}$$

其中：电源 U_0 反应电池的活化能垒。

在简化等效电路中，增加动态电势和反应活化能垒的电源，改进等效电路如图2-9。

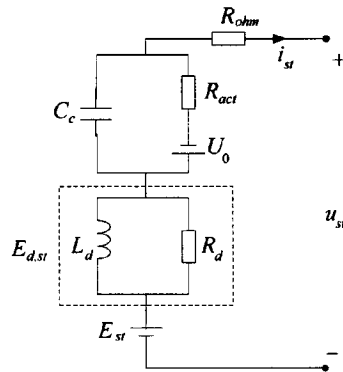


图2-9 改进等效电路

2.5.1 参数计算

在改进等效电路中,开路电势和欧姆电阻根据理论公式计算,电容值采用经验数值,其它参数由实验数据计算。下面讨论开路电势 E_{st} 、欧姆电阻和电容。

1) 开路电势 E_{st}

燃料电池的开路电势等于电池个数乘以单体电池开路电势,即 $E_{st} = n_{fc} E$,将其代入式(2-13)得到

$$E_{st} = n_{fc} [1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T \ln(p_{H_2} P_{O_2}^{0.5})] \quad (2-59)$$

2) 欧姆电阻

车载燃料电池中,进入电堆的燃料和空气的湿度达到95%,认为电堆内部电解质膜的水活性是1,这样膜的含水量仅是温度的函数。当水活性等于1时,根据式(2-22)得到:膜含水量在30°C是14,在80°C是9.2,代入式(2-23)有

$$\lambda_m = 14 - 0.096(T_{fc} - 30) = 16.88 - 0.096T_{fc} \quad (2-60)$$

将含水量代入式(2-21),再由式(2-20)和(2-19)得到燃料电池单体欧姆电阻,然后乘以电池单体个数,除以电堆膜电极有效面积得到欧姆电阻。

在等效电路中,电感和其它参数利用电流扰动法测量。当 $t < t_0$ 时燃料电池稳态工作,令在 t_0 时刻输出电流发生跳变,经过渡过程之后,在 t_1 时刻电池又处于稳定工作。

1) 活化电阻和活化能垒电压

在两次稳态工作状态,电路方程是

$$\begin{aligned} E_{st}(t_{0-}) &= U_0 + (R_{ohm} + R_{act})i_{st}(t_{0-}) + u_{st}(t_{0-}) \\ E_{st}(t_1) &= U_0 + (R_{ohm} + R_{act})i_{st}(t_1) + u_{st}(t_1) \end{aligned} \quad (2-61)$$

以上两式相减,整理得到活化电阻

$$R_{act} = \frac{[E_{st}(t_{0-}) - E_{st}(t_1)] + [u_{st}(t_{0-}) - u_{st}(t_1)]}{i_{st}(t_{0-}) - i_{st}(t_1)} - R_{ohm} \quad (2-62)$$

在 $t < t_0$ 时,电压 U_0 表示为

$$U_0 = E_{st}(t_{0-}) - (R_{ohm} + R_{act})i_{st}(t_{0-}) - u_{st}(t_{0-}) \quad (2-63)$$

2) 动态电阻

在电流跳变后初始时刻 t_{0+} ,储能元件的能量不能跳变,电容电压和电感电流依旧保持在换路之前状态,即电容电压是 $U_0 + R_{act}i_{st}(t_{0-})$,电流是 $i_{st}(t_{0-})$ 。此时电池端口电压和电流满足:

$$u_{st}(t_{0+}) = E_{st}(t_{0+}) - R_d[i_{st}(t_{0+}) - i_{st}(t_{0-})] - R_{act}i_{st}(t_{0-}) - U_0 - R_{ohm}i_{st}(t_{0+}) \quad (2-64)$$

整理得到动态电阻:

$$R_d = \frac{E_{st}(t_{0+}) - u_{st}(t_{0+}) - U_0 - R_{act}i_{st}(t_{0-}) - R_{ohm}i_{st}(t_{0+})}{i_{st}(t_{0+}) - i_{st}(t_{0-})} \quad (2-65)$$

3) 动态电感

在图2-8所示电压波形中,过渡时间由电容、电感及电阻决定。为简化计算,电压‘尖峰’的过渡过程仅考虑由电感和动态电阻决定,因而有:

$$L_d = \frac{t_r R_d}{4} \quad (2-66)$$

其中: t_r 是过渡时间。

4)电容

等效电路中的电容用于反应燃料电池的双电层效应,理论分析可知其数值很大,且目前很少有文献讨论它的数值。Wang C等^[64]对一个48片500W的SR-12PEM燃料电池进行建模,每片电池的电容取值4.8F。Change W等^[66]研究一个12片电体构成的燃料电池,电解质膜是Nafion112,电极有效面积是50cm²,根据实验数据计算得到电容值范围在0.04F~0.06F,即每一个单电池的电容值是0.48F~0.72F。这两个文献的数据差距较大。燃料电池电压的过渡时间是10s的数量级^[68],可以认为这个过渡时间 t_r 是由双电层电容引起的。在式(2-49)中电阻之间满足 $R_{act} \ll (R_{ohm} + R_{L2})$,因而电容计算公式

$$C_c = \frac{t_r}{4R_{act}} \quad (2-67)$$

2.5.2 实验验证和结果分析

一个150kW的质子交换膜燃料电池系统,由778片燃料电池单体构成。负载电流从55A上升到226A,然后再降到55A,端口电压、电流及电池温度波形如图2-10所示。在 $t=80s$ 电流发生跳变,在[50s,100s]区间电流和电压波形如图2-11所示。观察电压波形,在86s时过渡过程已完成。利用采集的数据计算开路电势和欧姆电阻,数值见表2-3所示。

在燃料电池中,电解质膜附近氢气和氧气压力不能测量,而电堆入口处氢气和空气的压力可测量,它们与电堆输出的电流、压缩机的气体流量有关。在电堆内部,质子交换膜每一处附近的压力都不同,这些压力受入口压力、出口压力、电堆内部流道形状、空间位置等影响。这里将电堆看成一体,不考虑内部的压力梯度,电堆内部压力通过出口和入口压力近似计算。

在150kW燃料电池技术手册中^[75],测试了不同电流下电堆入口空气和氢气的压力。电流30A时入口空气压力是1.1bar,随电流增大需要的入口压力逐渐升高,到300A时空气压力是2.0bar。电堆的出口压力是大气压,考虑出口接有排气管道,气体经过管道时会有压降,因而将电堆压力取入口与出口压力和的0.6倍。与计算膜的含水量方法类似,电流在[30A, 300A]区间,气体压力用线性插值计算,即

$$P_{air} = \frac{P_{air,300} - P_{air,30}}{270} (I_{st} - 30) + P_{air,30} \quad (2-68)$$

在公式(2-59)中,尽管氢气和氧气分压力对开路电势有影响,但是由于对数函数作用于气体压力,对开路电势的影响比较弱。在2.2.1节分析中,空气压力从1bar变到2bar,单

体电势增加0.0116V。这样采用线性插值计算压力满足要求。

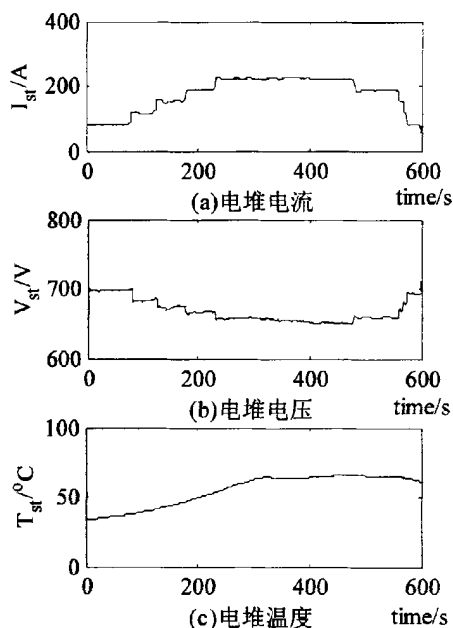


图2-10 150kW燃料电池实验波形

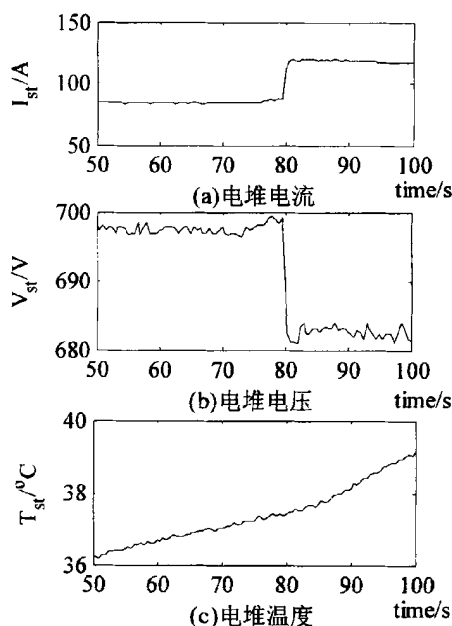


图2-11 电流跳变时电压和温度

表2-3 采集数据和计算的参数

时刻(s)	电流(A)	电压(V)	温度(°C)	开路电动势 $E_o(V)$	欧姆电阻(Ω)
50	84.5	698.2	36.21	934.837	0.19678
79.5	87.1	699.1	37.36	934.068	0.19766
80.5	118.1	682.3	37.44	934.515	0.19773
100	117.1	681.4	39.16	933.287	0.19910

表2-3中反应了温度变化对欧姆电阻的影响，温度升高欧姆电阻升高。利用 $t=50s$ 和 $t=79.5s$ 、 $80.5s$ 的数据，由式(2-46)可得欧姆电阻与活化电阻之和是 0.4678Ω 。由于欧姆电阻随温度微弱变化，为计算方便取平均值 0.19744Ω ，这样活化电阻值是 0.2704Ω 。利用 $t=50s$ 、 $100s$ 数据计算得到活化能垒电压 U_0 分别是 $197.1075V$ 和 $197.1071V$ 。根据式(2-67)得到电容参数 $C_c=1.1095F$ ；电压的‘尖峰’的过渡时间 $6s$ ，由式(2-65)和(2-66)，利用 $t=79.5s$ 和 $80.5s$ 数据计算动态电阻 $R_d=0.3399\Omega$ 和电感 $L_d=0.345H$ 。元件参数数值列在表2-4中。

不考虑温度对参数的影响，等效电路的参数选如表2-4所示。用受控电流源作用到等效电路的输出端，仿真结果如图2-12(a)所示。在 $[110s, 580s]$ 区间具有较大误差。稳态时，在 $t=200s$ 时电池电压是 $666.4V$ ，电流是 $187.7A$ ； $t=300s$ 时电压是 $658.3V$ ，电流是 $223.7A$ 。忽略开路电势的变化，根据式(2-48)计算得到欧姆电阻与活化电阻之和等于 0.2250Ω 。在 $[200s, 300s]$ 区间，电池电流比较大，电堆温度较高。在 $t=300s$ 时电堆温度是 $62.23^\circ C$ ，可得欧姆电阻是 0.2241Ω ，因而活化电阻是 0.0009Ω ，与表2-4中的活化电阻存在很大的差异。

活化电阻随电流增大急剧衰减，这一现象也可通过式(2-17)中第二部分 $v_a(1 - e^{-ct})/i$ 解释。

表2-4 改进的等效电路参数

开路电势	动态电阻	动态电感	电容	活化电阻	活化能垒电压	欧姆电阻
$E_s(V)$	$R_d(\Omega)$	$L_d(H)$	$C_c(F)$	$R_{acr}(\Omega)$	$U_0(V)$	$R_{ohm}(\Omega)$
934	0.3399	0.345	1.1095	0.2704	197.1	0.1974

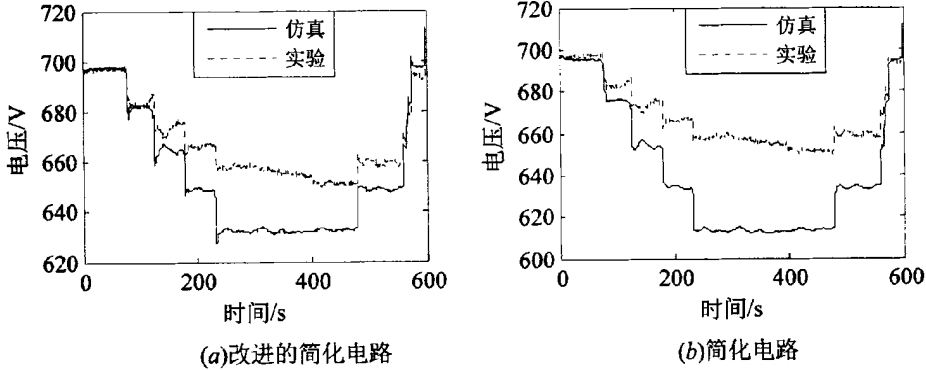


图2-12 仿真与实验比较(1)

根据公式(2-47)~(2-49)得到简化等效电路的参数分别为： $R_{acr}=0.0421\Omega$ 、 $R_{ohm}=0.4732$ 和 $C_c=237.5F$ ，理论计算开路电势是934V，由于会产生很大的误差，将其修正为745V，仿真结果如图2-12(b)所示。与图(a)相比，该图没能反映跳变时动态‘尖峰’过程，电压最大误差由28.0V达到50.0V。

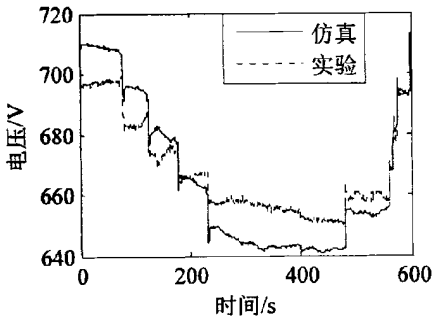


图2-13 仿真与实验比较(2)

图2-12(a)中，一方面没有考虑温度对欧姆电阻影响，另一方面没有考虑活化电阻随电流变化。根据电堆温度实时计算开路电势，而欧姆电阻和活化电阻取80s和300s均值，分别是： 0.2108Ω 和 0.1357Ω ，而活化能垒电压、电容、动态电阻和电感取值依旧使用表2-4中的参数，仿真结果如图2-13所示，与图2-12(a)相比最大电压差由28.0V减小到16.36V。

另一种改进的方法是：开路电势、欧姆电阻取电池工作最低和最高温度时均值；而两电阻之和及活化能垒电压通过对实验数据拟合得到。图2-10中在[80s,300s]区间，电池温度从37.2°C升到62.2°C，计算这两个温度点的电势和欧姆电阻，取均值得到电势是926.804V，电阻是0.2109Ω。将电池电压、电流数据中动态过程数据去掉，稳态时电压电流对应关系如图2-14所示。用直线拟合稳态数据得到稳态时电压电流关系是

$$U_{st} = 719.9 - 0.2941I_{st} \tag{2-69}$$

上式与式(2-61)比较, 得到活化能垒电压和活化电阻分别是

$$\begin{aligned} U_0 &= E_{sr} - 719.9 = 926.804 - 719.9 = 206.8V \\ R_{act} &= 0.2941 - R_{ohm} = 0.2941 - 0.2109 = 0.0832\Omega \end{aligned} \quad (2-70)$$

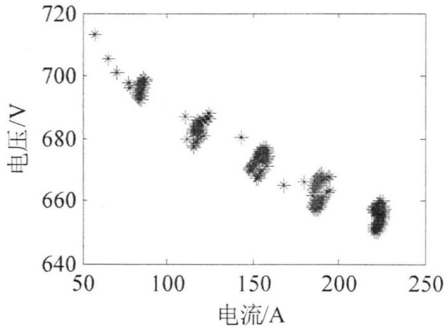


图2-14 稳态时电池电压和电流

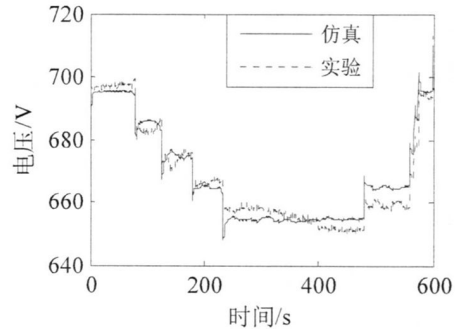


图2-15 仿真结果与实验结果

电容、动态电阻和电感取值依旧取表2-4中的参数, 仿真结果如图2-15所示。其结果基本上与实验吻合, 最大误差出现在510s附近, 电压误差6.2V, 远小于之前28V。与图2-12(a)相比, 由于对电池的伏安特性曲线进行数据拟合, 等效电路能更准确反映实际电池运行特性。

2.6 本章小节

燃料电池等效电路通常有四种: 原始等效电路、电子等效电路、频域响应等效电路、简化的等效电路。其中简化等效电路最直观地体现了电池电压输出特性和双电层电容效应, 其元件参数通过电流扰动方法精确计算。

根据车载大功率燃料电池电流跳变的特点, 本文提出了一种改进等效电路。为了表征物料传递时浓度变化, 利用动态电阻与动态电感并联环节等效, 并将其与电源串联。在改进电路中, 开路电势 E_{sr} 和欧姆电阻根据理论公式计算, 电容值采用经验公式计算, 其它参数由电流扰动实验数据计算。利用测得的实验数据验证等效电路和参数计算方法的准确性, 通过仿真分析与实验结果比较可知, 改进电路中活化能垒电压 U_0 和活化电阻 R_{act} 的计算通过直线拟合方法效果更好。

本文提出的等效电路中, 开路电势的计算涉及空气压力和氢气压力, 对空冷型燃料电池而言, 空气压力取大气压, 氢气压力取给定范围的均值; 对水冷型燃料电池, 电堆入口的空气和氢气压力随电流不同而不同, 压力取电堆入口和出口压力之和的0.6倍。欧姆电阻的计算没有考虑连接件阻值, 会引起一定的误差; 但是用测试数据计算活化电阻, 有效地弥补了因欧姆电阻产生的稳态误差。用活化能垒电源 U_0 串联电阻 R_{act} 等效活化极化体现了电池工作原理, 而且参数 U_0 的引入保证了开路电压的准确性。动态电阻 R_d 和电感 L_d 反映了电流跳变时电池内部传质现象, 更详细地反映了系统动态过程。因此, 改进等效电路具有普适性。

第3章 车载燃料电池系统建模

车载燃料电池建模包括空气供应系统、氢气供应系统和热管理系统。本章首先引入湿度和含湿量，讨论不同温度下饱和蒸气压以及空气和氢气最大的含湿量；接着介绍压缩机的流量和功率特性、阴极流体方程，建立压缩机、空气供应管道、电堆阴极流场和气体扩散层模型；然后阐述泵与风机的流量和效率特性、阳极流体方程，对回流泵、调压阀、氢气供应管道、排气阀建立模型，最后介绍电池热管理系统方程，建立电堆的冷却液流场、散热器和管路阻力模型。

3.1 湿度和含湿量

车载燃料电池中，进入电堆的气体是经加湿的空气和氢气。气体的含湿特性是指混合气体中容纳水蒸气的程度，常使用相对湿度和含湿量来衡量。通常，将混合气体中所含水蒸气质量 m_v 与同一温度下饱和气体所含水蒸气质量 $m_{v,sat}$ 之比^[76]，称为相对湿度 φ 。根据该定义和理想气体状态方程得：

$$\varphi = \frac{m_v}{m_{v,sat}} = \frac{p_v}{p_{sat}(T)} \quad (3-1)$$

其中： p_v 是混合气体中水蒸气压力； $p_{sat}(T)$ 是温度 T 时的饱和蒸气压。

气体含湿量是指在湿气体中水蒸气质量与干气体质量 $m_{mix,dry}$ 之比^[76]，用 d (g/g)表示，即

$$d = \frac{m_v}{m_{mix,dry}} \quad (3-2)$$

由理想气体状态方程可知，水蒸气质量 m_v 和干气体质量 $m_{mix,dry}$ 分别满足

$$\begin{cases} m_v = \frac{p_v V}{R_v T} \\ m_{mix,dry} = \frac{p_{mix,dry} V}{R_{mix} T} \end{cases} \quad (3-3)$$

其中： p_v 、 $p_{mix,dry}$ 分别是水蒸气和干气体压力； R_v 、 R_{mix} 分别是二者气体常数。

将式(3-3)代入式(3-2)，整理得到：

$$d = \frac{p_v R_{mix}}{R_v p_{mix,dry}} = \frac{M_v p_v}{M_{mix,dry} p_{mix,dry}} \quad (3-4)$$

而水蒸气压力 p_v 和干气体压力 $p_{mix,dry}$ 分别满足

$$p_v = \varphi p_{sat} \quad p_{mix,dry} = p_{mix} - p_v \quad (3-5)$$

其中： p_{mix} 是混合气压力， M_v 和 $M_{mix,dry}$ 分别是水蒸气和混合干气体摩尔质量。

将上式代入式(3-4)得到：

$$d = \frac{M_v}{M_{mix,d}} \frac{\varphi p_{sat}(T)}{p - \varphi p_{sat}(T)} \quad (3-6)$$

将空气、氢气和水蒸气的摩尔质量代入上式，湿空气、湿氢气的含湿量 d_{air} 和 d_{H_2} 可表示为：

$$d_{air} = 0.622 \frac{\varphi_{air} p_{sat}(T)}{p_{air} - \varphi_{air} p_{sat}(T)} \quad (3-7)$$

$$d_{H_2} = 8.92 \frac{\varphi_{H_2} p_{sat}(T)}{p_{H_2} - \varphi_{H_2} p_{sat}(T)} \quad (3-8)$$

其中： φ_{air} 和 φ_{H_2} 是湿空气和湿氢气相对湿度； p_{air} 、 p_{H_2} 是它们的压力。

表3-1 空气和氢气的含湿量

温度 (°C)	饱和水蒸气 压力(kPa)	空气含湿量(g/g)			氢气含湿量(g/g)		
		100kPa	150kPa	200kPa	120kPa	170kPa	220kPa
20	2.338	0.0149	0.0099	0.0074	0.1775	0.1245	0.0959
30	4.245	0.0276	0.0181	0.0135	0.3275	0.2287	0.1757
40	7.381	0.0496	0.0322	0.0239	0.5853	0.4053	0.3100
50	12.334	0.0877	0.0558	0.0410	1.0241	0.6993	0.5309
60	19.933	0.1550	0.0955	0.0689	1.7794	1.1864	0.8899
65	25.024	0.2079	0.1247	0.0891	2.3539	1.5419	1.1464
70	31.177	0.2823	0.1634	0.1150	3.1364	2.0064	1.4750
75	38.565	0.3913	0.2156	0.1488	4.2324	2.6217	1.8990
80	47.376	0.5614	0.2877	0.1934	5.8319	3.4527	2.4523
85	57.898	0.8554	0.3910	0.2534	8.3163	4.6070	3.1860
90	70.221	1.4667	0.5475	0.3366	12.5830	6.2776	4.1820

根据式(3-6)可知，气体含湿量由相对湿度、饱和水蒸气压力决定，当相对湿度是100%，由式(3-7)和(3-8)得到不同温度和压力下湿空气、湿氢气的含湿量，其数值如表3-1所示。表中氢气含湿量远大于空气含湿量。含湿量随温度升高而增大，随压力升高而降低。如果环境温度是20°C，假设相对湿度是100%，将气体温度升高至60°C(电堆要求的进气温度)。在压力是100kPa的情况下，20°C时空气最大含湿量是0.0149g/g，60°C时是0.1550g/g，相对湿度由100%变为9.61%，如果不对空气加湿会引起质子交换膜脱水，导致电堆性能下降。如果进入电堆气体压力是200kPa，此时60°C的空气最大含湿量是0.0689g/g，相对湿度是21.63%。因而增加压力可以提高气体相对湿度，减少增湿器在单位时间的加湿水量。

3.2 压缩机

压缩机向燃料电池提供空气(氧气)，是燃料电池阴极系统的关键部件。燃料电池系统中功耗最大的辅助设备是压缩机，有效利用它对整个电池系统效率起至关重要的作用。

3.2.1 压缩效率和功率

与燃料电池效率一样,压缩机的效率很难确定。对气体压缩需要对其做功,气体温度将会升高。在一个可逆过程(又称绝热过程)中,气体体积 v 、压力 p 和其比热比 γ 满足^[77]:

$$pv^\gamma = \text{const} \quad (3-9)$$

如果气体压力从 p_1 变化到 p_2 ,温度将会从 T_1 变化到 T_2 ,由理想气体方程和式(3-9)得到

$$\frac{T_{2s}}{T_0} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \quad (3-10)$$

在实际压缩过程中,由于压缩机内部移动滑片和叶片的运动以及压缩机周围气体运动,都会产生热量致使实际温度 T_2 高于 T_{2s} 。为了得到压缩机效率,需要作一些假设条件^[58]:(1)压缩机与周围环境的热量交换忽略不计;(2)流入或者流出压缩机气体的动能忽略不计,或者气体动能的改变忽略不计;(3)气体是理想气体,并且恒压热容是常数。

在这些假设条件下,压缩机对气体作的功 P 等于气体焓的变化,即

$$P = C_p(T_2 - T_1)m \quad (3-11)$$

其中: m 是压缩气体质量, C_p 是气体定压热容。

而压缩气体等熵功率是

$$P_s = C_p(T_{2s} - T_1)m \quad (3-12)$$

这两个功的比值是等熵效率 η_{cp} ,即

$$\eta_{cp} = \frac{C_p(T_{2s} - T_1)m}{C_p(T_2 - T_1)m} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (3-13)$$

由式(3-10)表示温度 T_{2s} ,然后带入式(3-13)得到:

$$\eta_{cp} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (3-14)$$

压缩机工作时通过机械传动传递电动机力矩,机械传动的效率较高,几乎超过98%,因而可将等熵效率近似看成压缩机效率。在环境温度 T_{atm} 、气压 p_{atm} 下,压缩机将空气压缩到压力 p_{cp} ,由式(3-14)可知压缩机出口气体的温度 T_{cp} :

$$T_{cp} = T_{atm} + \frac{T_{atm}}{\eta_{cp}} \left[\left(\frac{p_{cp}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (3-15)$$

如果环境温度 25°C ,压缩机效率是0.6,压力是大气压的2倍,由式(3-15)得到压缩机出口温度是 195°C ,远高于质子交换膜燃料电池堆入口温度最高值 63°C ,所以压缩空气进入电堆之前必须降温。

将式(3-15)代入式(3-12),得到在环境温度 T_{atm} 、气压 p_{atm} 下的压缩机等熵功率 P_{cp} :

$$P_{cp} = C_p \frac{T_{atm} W_{air}}{\eta_{cp}} \left[\left(\frac{P_{cp}}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{RT_{atm} W_{air}}{\eta_{cp}} \left[\left(\frac{P_{cp}}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (3-16)$$

上式表明环境温度越高、压缩气体流量越大、效率越低，获得同样压缩比所需的功率就越大。

3.2.2 压缩机特性图

压缩机结构涉及叶轮进出口直径、扩压器内径及各自叶片角和叶片数及其管口外形等，表征压缩机的性能参数包括进口压力、出口压力、气体流量、密度、进口温度、气体密度和黏度等，为了便于研究同一类型的压缩机，根据涡轮机方程将这些变量进行了处理^[58,77]，用相似原则组合而成一些无因次参数，得到不受压缩机进口条件变化的性能曲线，这些性能表示为：

$$\text{压缩比} \quad \gamma_p = f_1 \left(\frac{W\sqrt{T_1}}{p_1}, \frac{N}{\sqrt{T_1}} \right) \quad (3-17)$$

$$\text{效率} \quad \eta = f_2 \left(\frac{W\sqrt{T_1}}{p_1}, \frac{N}{\sqrt{T_1}} \right) \quad (3-18)$$

其中： T_1 、 p_1 压缩机入口温度和压力； N 是旋转速度。

式(3-17)和(3-18)中将 T_1 、 p_1 取标准状态下的温度和压力，得到一个压缩机通用特性图，描述这个特性图需要两个因素：质量流动因数 $W\sqrt{T_1}/p_1$ 和旋转速度因数 $N/\sqrt{T_1}$ ，双螺杆压缩机和离心式压缩机特性图如图3-1所示。图中两种压缩机的特性有很大不同，离心式压缩机工作状态对其效率影响更灵敏，恒定效率等高线比较窄；恒定转速时，压缩比与气体流量呈非线性关系。

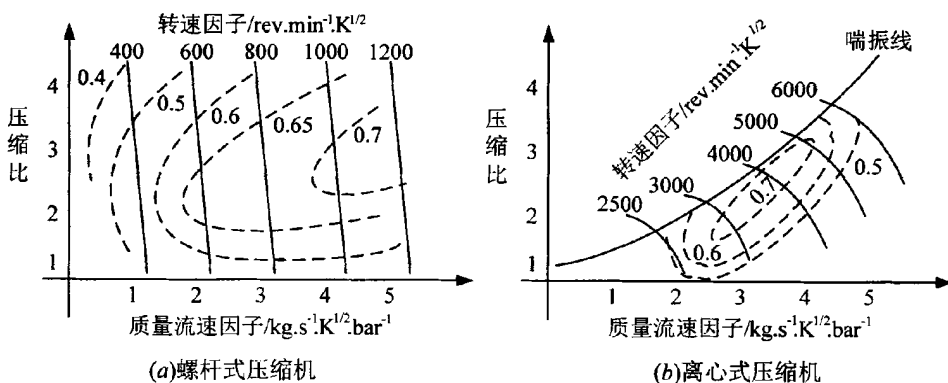


图3-1 压缩机特性图

从效率角度比较这两类压缩机，在峰值情况下两者效率差异不大^[78]。从控制角度而言，双螺杆压缩机优于离心式压缩机，原因是^[78]：(1)双螺杆压缩机工作时转速较低，比离心式压缩机几乎低一个数量级，而转速越低对系统的安全隐患越小；(2)在恒定转速下，

双螺杆压缩机流量特性近似是条直线,且受压力影响远远小于离心式压缩机,易于控制;
 (3)离心式压缩机存在喘振现象,控制系统比较复杂。除此以外,由离心式压缩机构成的燃料电池系统,在遇到干扰时,如阀门的抖动、流场堵水、电堆输出功率突变等,极易造成空气供应不足而引起系统失效。因此本论文的车载燃料电池系统采用双螺杆压缩机。

3.2.3 压缩机模型

压缩机为燃料电池阴极供应空气,通过电机拖动将机械能转换为气体能量,即焓值的增量,理想情况下气体能量增量完全转换为其静压能。然而在实际压缩气体的过程中,压缩机消耗的电能一部分转换为压缩气体的静压外,还有一部分转化为气体热能和动能等,描述压缩过程比较理想的方法是流体动力学(CFD)的方法^[79],但是从控制角度而言,这种方法处理宏观特性过于复杂。文献[78]指出使用数据插值处理方法建立压缩机模型存在一些不足,并给出了一种数据拟合建模方法,但是这种方法需要获得压缩机结构的精确数据,实际使用难度较大。目前工程应用中,依然普遍使用数据插值方法处理压缩机模型,故本文采用这种处理方法。为了提高模型精度,在标准状况下缩小插值间隔、增加测量的数据,然后再利用热力学关系对数据进行校正。

双螺杆压缩机模型如图3-2所示,模型包含两部分:(1)压缩机特性数据,(2)热力学校正。在这个模型中,输入变量包括环境温度 T_{am} 和环境压力 p_{am} 、压缩机转速 N_{cp} 以及出口压力 p_{cp} 。压缩机出口连接到供气管路上,可认为其出口压力等于供气管路压力,而供气管路压力是由其后阴极流体系统决定。在第一部分中,利用压缩机特性图的数据制成二维表格,以转速 N_{cp} 和压缩比 γ_p 作为输入变量进行插值计算,得到出口空气流量 $W_{cp,cal}$ (测试环境下)和压缩机功耗 P_{cp} ;根据功耗和压缩比计算出出口空气温度 T_{cp} 。通常压缩机工作环境与测试环境往往不同,第二部分根据两种环境下的温度和压力,利用理想气体方程对第一部分输出的空气流量 $W_{cp,cal}$ 进行校正。

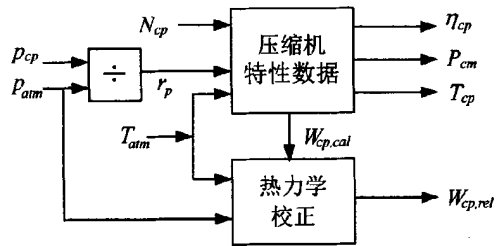


图3-2 双螺杆压缩机模型

在压缩机模型中,压缩机转速 N_{cp} 是唯一可控的信号,转动角频率 ω_{cp} 与转速满足:
 $\omega_{cp} = 2\pi N_{cp} / 60$ 。压缩机端电压调节转速或角频率,它们之间的动态变化与压缩机转动惯量、电动机参数的关系可通过以下方程组描述^[21]:

$$\begin{cases} J_{cp} \frac{d\omega_{cp}}{dt} = \tau_{cm} - \tau_{cp} \\ \tau_{cm} = \eta_{cm} \frac{k_t}{R_{cm}} (v_{cm} - k_v \omega_{cp}) \\ \tau_{cp} = \frac{P_{cp}}{\omega_{cp}} \end{cases} \quad (3-19)$$

其中： J_{cp} 、 τ_{cm} 和 τ_{cp} 分别是压缩机转动惯量、驱动转矩和阻力转矩； v_{cm} 是电机驱动电压， k_t 和 k_v 是电机力矩常数， R_{cm} 是电机电枢电阻。

通过压缩机转速和压缩比，利用其特性图来计算测试环境下出口空气流量 $W_{cp,cal}$ 以及相应功率消耗 P_{cp} 。压缩机特性图的数据可由试验获得，图3-3为某型号双螺杆压缩机在环境温度293.25K、压力1.013bar情况下特性图，图(a)是不同转速和压缩比条件下的压缩机流量特性，图(b)为功率特性。在这两个图中，每条曲线的转速恒定，转速以步长1kRPM从3kRPM增长到12kRPM。

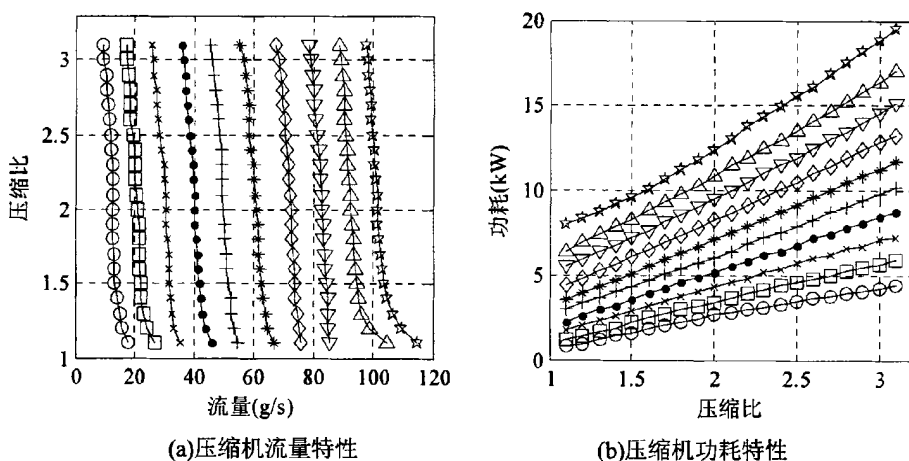


图3-3 双螺杆压缩机特性

由于双螺杆压缩机是容积式压缩机，由理想气体方程可知，压缩机实际出口流量 $W_{cp,rel}$ 是

$$W_{cp,rel} = \frac{T_0}{T_{atm}} \cdot \frac{p_{atm}}{p_0} W_{cp,cal} \quad (3-20)$$

式中： T_0 、 p_0 分别是测试压缩机特性时的环境温度和压力。

机械传动效率很高，压缩机效率近似等于等熵效率，由式(3-16)得到效率：

$$\eta_{cp} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{T_{atm} W_{cp}}{P_{cp}} \left[\left(\frac{P_{cp}}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (3-21)$$

压缩机动力由电动机驱动，如果 η_{cm} 是电动机效率，那么电动机到压缩机的效率 $\eta_{cmp} = \eta_{cm}\eta_{cp}$ ，称其为压缩机系统效率。利用图3-3数据，根据式(3-21)得到压缩机系统效率特性如图3-4所示。在压缩机效率图中，压缩比越低、转速越低，效率越低；反之越高。在出口压力不变时，双螺杆压缩机气体流量与转速几乎成正比，转速越大流量越大；为提高系统效率，尽可能让压缩机工作在高转速或是大流量状态。因此在选择双螺杆压缩机时，应使得燃料电池工作区域所需空气流量处于压缩机高转速区域。

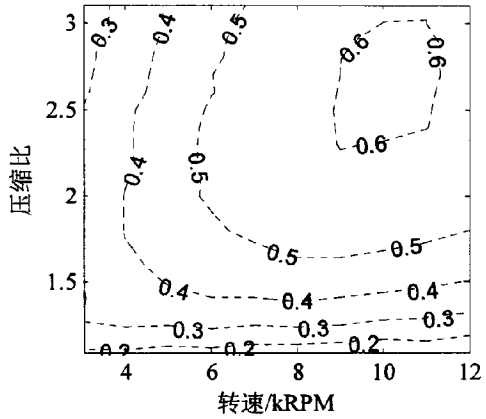


图3-4 压缩机效率

3.3 阴极流体系统模型

车载燃料电池的阴极流体系统由供气管路、散热器、加湿器、电堆阴极流场、排气管路、背压阀构成，结构如图3-5所示。为了便于建立系统模型，需要作以下几个假设^[8, 80, 81]：(1)所有气体遵从理想气体定律；(2)阴极流场中空气的温度等于电堆温度，假定电堆温度恒定；(3)当空气的湿度达到100%时，多余的水蒸气凝结成液态；(4)组成电堆的所有单体电池的流道都集中成一个总体积；(5)干空气组成为：氧气摩尔份数是21%，氮气摩尔份数是79%；(6)散热器、增湿器具有良好的动态特性，认为散热器温度和增湿器湿度是常数。(7)阳极系统具有良好的压力跟随特性，阳极流场中压力高于阴极流场压力0.2bar。

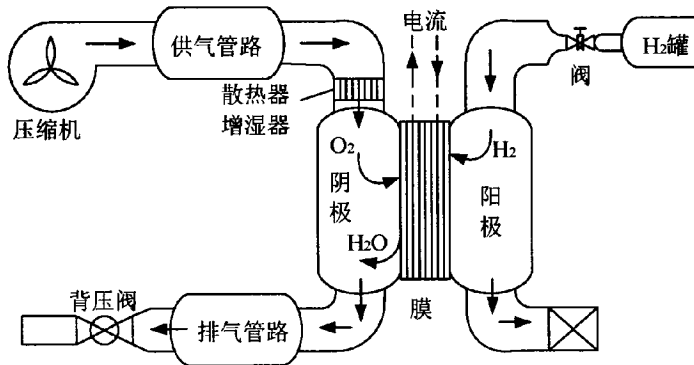


图3-5 燃料电池气体流动示意图

3.3.1 空气管路

供气管路模型如图3-6(a)所示。压缩机空气流量 W_{cp} 进入供气管路，根据物质守恒定理，管道内物质的变化即为供应空气流量和排出空气流量 W_{sm} 差值，即

$$\frac{dm_{sm}}{dt} = W_{cp} - W_{sm} \quad (3-22)$$

由理想气体方程可知供气管路气体压力 p_{sm} 为:

$$p_{sm} = \frac{m_{sm}RT_{sm}}{V_{sm}} \quad (3-23)$$

其中: m_{sm} 和 T_{sm} 是供气管路中空气质量 and 温度, V_{sm} 是供气管路的体积。



图3-6 空气管路模型

在燃料电池的工作环境中, 由式(3-2)可知干空气与湿空气质量之比

$$r_{air,dry} = \frac{1}{1+d_{air}} \quad (3-24)$$

其中: d_{air} 是环境中空气的含湿量。

供气管路流出的干空气流量

$$W_{air,dry,sm} = r_{air,dry} W_{sm} = \frac{1}{1+d_{air}} W_{sm} \quad (3-25)$$

由式(3-7)可知供气管路干空气压力 $p_{air,dry,sm}$ 与水蒸气压力 $p_{v,sm}$ 满足

$$d_{air,sm} = 0.622 \frac{p_{v,sm}}{p_{air,dry,sm}} \quad (3-26)$$

供气管路压力等于干空气压力与水蒸气压力之和, 即 $p_{sm} = p_{air,dry,sm} + p_{v,sm}$, 联合式(3-25)得到供气管路中干空气压力

$$p_{air,dry,sm} = \frac{1}{1+1.6077d_{air,sm}} p_{sm} \quad (3-27)$$

排气管路的模型与供气管路类似, 如图3-6(b)所示。由物质守恒和理想气体方程可得

$$\frac{dm_{rm}}{dt} = W_{ca,out} - W_{rm} \quad (3-28)$$

$$p_{rm} = \frac{m_{rm}RT_{rm}}{V_{rm}} \quad (3-29)$$

其中: $W_{ca,out}$ 是电堆出口空气流量; m_{rm} 、 T_{rm} 是排气管路中空气质量和温度, V_{rm} 是排气管路体积。

3.3.2 静态散热器和静态增湿器

空气经过压缩机压缩后, 温度升高超出电堆容许温度, 必须通过散热器(热交换器)将其温度降低。不考虑散热器动态过程, 并假设空气经过静态散热器时压力不变, 温度变化会影响空气湿度变化, 静态散热器出口空气相对湿度

$$\varphi_{sac} = \frac{P_{v,sac}}{p_{sat}(T_{des})} \quad (3-30)$$

其中： $p_{v,sac}$ 是散热器出口水蒸气压力， T_{des} 是散热器出口空气温度，而 $p_{sat}(T_{des})$ 是该温度时水蒸气饱和压力。

散热器出口空气压力 p_{sac} 、水蒸气压力 $p_{v,atm}$ 与环境压力 p_{atm} 的满足

$$p_{v,sac} = p_{sac} \frac{P_{v,atm}}{p_{atm}} \quad (3-31)$$

假设空气经过静态散热器时压力不变，散热器出口压力等于压缩机出口压力，即 $p_{sac} = p_{cp}$ 。将式(3-31)代入式(3-30)得到：

$$\varphi_{sac} = \frac{P_{cp} P_{v,atm}}{p_{sat}(T_{des}) p_{atm}} \quad (3-32)$$

环境温度 T_{atm} 、湿度 φ_{atm} 、水蒸气压力 $p_{v,atm}$ 及水蒸气饱和压力 $p_{sat}(T_{des})$ 满足 $p_{v,atm} = \varphi_{atm} p_{sat}(T_{atm})$ ，代入上式得到

$$\varphi_{sac} = \frac{\varphi_{atm} P_{cp} p_{sat}(T_{atm})}{p_{sat}(T_{des}) p_{atm}} \quad (3-33)$$

如果环境状况是标准状况，相对湿度是0.5，流出散热器的空气温度是333.15K(60°C)，压缩机将空气压缩至2bar，由式(3-33)可知气体相对湿度是15.9%，这样干燥的空气进入电堆容易引起质子交换膜干燥脱水，降低电池性能，因而压缩空气经降温后需要进行加湿。根据道尔顿定理，湿空气中水蒸气流量是

$$W_v = \frac{M_v}{M_{air}} \frac{p_v}{p_{air,dry}} W_{air,dry} \quad (3-34)$$

因为水蒸气压力与湿度满足 $p_v = \varphi p_{sat}$ ，代入式(3-34)得到

$$W_v = \frac{M_v}{M_{air}} \frac{\varphi p_{sat}}{p_{air,dry}} W_{air,dry} \quad (3-35)$$

从静态散热器流出湿度 φ_{sac} 、温度 T_{des} 和压力 p_{sac} 的空气流量 W_{sac} ，进入静态加湿器加湿到理想湿度 φ_{des} ，并保持温度、压力不变。根据式(3-35)可知加湿器需要注入水蒸气流量

$$W_{v,inj} = \frac{M_v}{M_{air}} \frac{(\varphi_{des} - \varphi_{sac}) p_{sat}(T_{des})}{p_{air,dry}} W_{air,dry} \quad (3-36)$$

压缩机输出的空气流量经过静态散热器降温，再由加湿器加湿注入水蒸气，然后流入电堆，这样流入电堆的空气流量(静态加湿器流出)等于压缩机的空气流量与加湿器注入的水蒸气流量之和，即 $W_{ca,in} = W_{cp} + W_{v,inj}$ 。此时湿空气压力即阴极入口压力 $p_{ca,in}$ 满足 $p_{ca,in} = p_{air,dry,sm} + \varphi_{des} p_{sat}(T_{des})$ ，由式(3-27)得到

$$p_{ca,in} = \frac{1}{1 + 1.6077 d_{air,sm}} p_{sm} + \varphi_{des} p_{sat}(T_{des}) \quad (3-37)$$

3.3.3 阴极流场

在燃料电池中，膜电极被组装后两侧加双极板，输送燃料和氧化剂是通过双极板上流道完成输送功能^[82]。构成双极板的材料有：无孔石墨、涂层金属板和高分子复合材料。石墨材质技术成熟已经用于商业，涂层金属板具有较薄的厚度、良好的导电和导热性能，高分子复合材料具有较低的接触电阻和耐腐蚀性^[83]。流道结构通常有三种：蛇纹形、平行式和交叉式。蛇纹形流道的路径是连续的，可以消除停滞气流，但反应物通过流道时损耗大，必须通过足够的气体才能降低极化损耗。平行式流道阻力小，但由于各个流场气流不均匀可能产生停滞气流。交叉式流场从流场板进口到出口是不连续的，反应气体在压力作用下需通过多孔反应层，便于去除电极结构中的水，避免发生‘水淹’^[84]。流道尺寸通常是1mm，在一个典型流道中，气体以一定的速度从一端进入从另一端流出，在进口和出口之间的压差驱动流体运动，流道中气体流量、压力随空间位置的不同发生变化^[85,86]。阴极流场的建模需借助流道的形状、尺寸，根据流体动态方程建立各处压力和流量的关系，尽管这种模型准确反映了流道中每一处的状态^[85,87-89]，但是从控制的角度而言过于复杂。

为了建立适合于面向控制的流场模型，将流场看成一个整体，忽略流道中各处压力与流量的变化，仅考虑电堆入口和出口气体压力与流量。双极板包含阴极流场板和阳极流场板，对应于有阴极流场和阳极流场。由静态加湿器流出的空气进入电堆的空气流道，即阴极流场。电堆入口湿空气参数分别是湿度 φ_{des} 、温度 T_{des} 、压力 $p_{ca,in}$ 、流量 $W_{ca,in}$ ，湿空气中包含氧气、氮气和水蒸气，则有：

$$W_{air,ca,in} = W_{O_2,in} + W_{N_2,in} + W_{v,ca,in} \quad (3-38)$$

其中： $W_{O_2,in}$ 、 $W_{N_2,in}$ 和 $W_{v,ca,in}$ 分别是流入阴极流场的氧气、氮气和水蒸气流量。

各部分气体流量之间的关系：

$$W_{O_2,in} = 0.21 \frac{M_{O_2}}{M_{air}} W_{air,dry,in} \quad (3-39)$$

$$W_{N_2,in} = 0.79 \frac{M_{N_2}}{M_{air}} W_{air,dry,in} \quad (3-40)$$

$$W_{v,ca,in} = \frac{M_v}{M_{air}} \frac{\varphi_{des} p_{sat}(T_{des})}{p_{ca,in} - \varphi_{des} p_{sat}(T_{des})} W_{air,dry,in} \quad (3-41)$$

其中： $W_{air,dry,in}$ 是 $W_{ca,in}$ 的干空气流量。

如果空气湿度超过100%时部分水蒸气变成液态水，那么由式(3-41)可知流入电堆的水蒸气最大的流量 $W_{v,ca,in,max}$ ：

$$W_{v,ca,in,max} = \frac{M_v}{M_{air}} \frac{p_{sat}(T_{des})}{p_{ca,in} - p_{sat}(T_{des})} W_{air,dry,in} \quad (3-42)$$

根据质量守恒和理想气体方程，阴极流场中各气体质量满足

$$\begin{cases} \frac{dm_{O_2}}{dt} = W_{O_2,in} - W_{O_2,out} - W_{O_2,react} \\ \frac{dm_{N_2}}{dt} = W_{N_2,in} - W_{N_2,out} \\ \frac{dm_{v,ca}}{dt} = W_{v,ca,in} - W_{v,ca,out} + W_{v,gen} + W_{v,mem} \end{cases} \quad (3-43)$$

其中： m_{O_2} 、 m_{N_2} 和 $m_{v,ca}$ 分别是阴极流场中氧气、氮气和水蒸气质量； $W_{O_2,out}$ 、 $W_{N_2,out}$ 和 $W_{v,ca,out}$ 分别是流出阴极流场的氧气、氮气和水蒸气的流量； $W_{O_2,react}$ 和 $W_{v,gen}$ 分别是化学反应消耗的氧气流量和产生的水蒸气流量； $W_{v,mem}$ 是通过质子交换膜扩散到阴极流场的水蒸气流量。

燃料电池输出某一电流时，根据其化学反应式和法拉第定律，可由式(2-7)得到所需氢气的消耗量。水蒸气流量 $W_{v,mbr}$ 是由于质子交换膜内存在水传递的现象引起的，由电堆电流 I_{st} 和质子交换膜两侧水浓度差决定，其表达式为^[90]：

$$W_{v,mem} = M_v n_{fc} \left(\frac{n_d I_{st}}{F} - D_w \frac{c_{v,ca} - c_{v,an}}{t_m} A_{fc} \right) \quad (3-44)$$

式中： A_{fc} 是燃料电池的有效面积； n_d 是电迁移系数； D_w 是膜的水扩散系数； t_m 是膜的厚度； $c_{v,ca}$ 、 $c_{v,an}$ 分别是膜在阴极侧、阳极侧表面的水浓度。

从阴极流场流出的各气体流量与总流量满足：

$$W_{O_2,out} = \frac{m_{O_2}}{m_{ca}} W_{ca,out} \quad W_{N_2,out} = \frac{m_{N_2}}{m_{ca}} W_{ca,out} \quad W_{v,ca,out} = \frac{m_{v,ca}}{m_{ca}} W_{ca,out} \quad (3-45)$$

阴极流场的气体质量等于各种气体质量之和，即

$$m_{ca} = m_{O_2} + m_{N_2} + m_{v,ca} \quad (3-46)$$

假设阴极流场中温度均匀分布，流场各气体分压力可表示为：

$$p_{O_2} = \frac{m_{O_2} RT_{st}}{V_{ca}} \quad p_{N_2} = \frac{m_{N_2} RT_{st}}{V_{ca}} \quad p_v = \frac{m_{v,ca} RT_{st}}{V_{ca}} \quad (3-47)$$

而阴极流场总压力等于各种气体分压力之和，即

$$P_{ca} = p_{O_2} + p_{N_2} + p_v \quad (3-48)$$

且气体总质量与总压力满足

$$P_{ca} = \frac{m_{ca} RT_{st}}{V_{ca}} \quad (3-49)$$

3.3.4 各部分气体流量与压力关系

在空气供应系统中，各部分流出的气体流量不仅与其上游压力和下游压力有关，而且与通道的尺寸、材质、形状有关。喷嘴流量方程用于计算两个相连容器的流量^[77]，喷嘴流出气体流量是其上游压力 p_u 和下游压力 p_d 的函数，压力比 pr 定义为

$$pr = \frac{p_d}{p_u} \quad (3-50)$$

而临界压力比^[8]

$$pr_0 = \left(\frac{p_d}{p_u} \right)_0 = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3-51)$$

其中： γ 是气体的比热比，也被称为绝热指数。空气的比热比 $\gamma = 1.4$ ，临界压力比 $pr_0 = 0.5283$ 。

如果压力比 $pr > pr_0$ ，称为亚临界工作状态，那么流体流量^[8]

$$W = \frac{C_D A_T p_u}{\sqrt{RT}} (pr)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - (pr)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3-52)$$

其中： C_D 是喷嘴的排气系数， A_T 是喷嘴开口的面积， T 是喷嘴温度。

如果压力比 $pr \leq pr_0$ ，称为临界或超临界工作状态，那么流体流量^[8]

$$W = \frac{C_D A_T p_u}{\sqrt{RT}} \gamma^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (3-53)$$

如果上下游的压力差值小，属于亚临界工作状态，那么对式(3-52)在工作点附近线性化处理，流体流量表示为^[8]：

$$W = k_{nc} (p_u - p_d) \quad (3-54)$$

其中： k_{nc} 是一个常数，反映了通道对气流的阻力，其值越大阻力越小，反之越大。

系统稳态工作时，在工作点附近线性化处理，由式(3-54)得到供气管路、电堆和排气管路的流量分别表示为：

$$W_{sm} = k_{sm} (p_{sm} - p_{ca}) \quad W_{ca,out} = k_{ca} (p_{ca} - p_{rm}) \quad W_{rm} = k_{rm} (p_{rm} - p_{atm}) \quad (3-55)$$

供气管路流出的空气中，干空气流量

$$W_{air,dry,sm} = \frac{W_{sm}}{1 + d_{air,sm}} \quad (3-56)$$

流入阴极流场的干空气与供气管路流出的干空气相等，而水蒸气不同，因此有

$$W_{ca,in} = \frac{1 + d_{air,des}}{1 + d_{air,sm}} W_{sm} \quad (3-57)$$

流入阴极流场中的水蒸气流量

$$W_{v,ca,in} = \frac{d_{air,des}}{1 + d_{air,des}} W_{ca,in} = \frac{d_{air,des}}{1 + d_{air,atm}} W_{sm} \quad (3-58)$$

供气管路流出气体经静态散热器后，压力不变，而温度由 T_{cp} 变成设定温度 T_{des} ，空气流量不发生变化；然后进入静态加湿器将空气湿度家到理想湿度，湿空气流量和压力都发生变化，加湿器出口(电堆阴极流场入口)的空气流量和压力是

$$\begin{cases} W_{ca.in} = W_{cp} + W_{v.inj} \\ P_{ca.in} = P_{sm} + (\varphi_{des} - \varphi)P(T_{des}) \end{cases} \quad (3-59)$$

3.3.5 气体扩散层

为了产生连续电流，必须不断地为燃料电池提供燃料和氧化物，同时不断地排出生成物，这个过程称为燃料电池的质量传输。质量传输分为两部分，一部分在流场沟道中，一部分是在气体扩散层和电解质膜上。对于沟道阵列形状的燃料电池流场，其流道宽度尺寸一般是毫米或厘米量级，适合于用流体力学分析。气体扩散层的结构和空隙呈现出微米或纳米数量级，这种弯曲空隙结构使得气体分子免受沟道中流力影响，气体传输通过扩散作用实现。

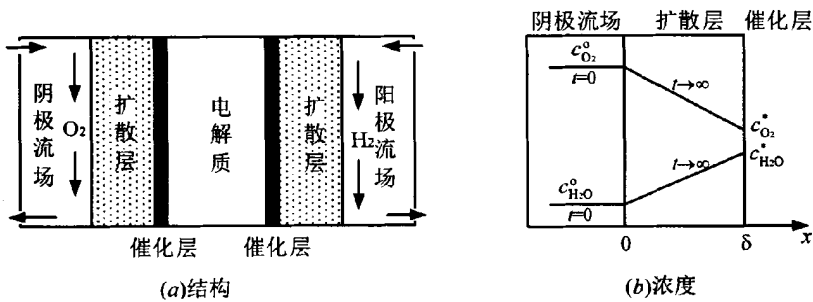


图3-7 燃料电池结构和浓度

燃料电池单体结构由气体流场(阴极、阳极)、气体扩散层、催化层和电解质构成，如图3-7(a)所示。反应物氢气、氧气通过扩散作用到达催化层，阴极反应物和生成物浓度分布如图3-7(b)所示^[59]。假定在 $t=0$ 时电池以固定电流密度 i 发电，在 $t<0$ 时流道中任意一点的反应物和生成物浓度都相等，分别记为 $c_{O_2}^0$ 和 $c_{H_2O}^0$ 。一旦电流开始产生，化学反应会导致催化层内反应物消耗和生成物堆积。反应物向催化层扩散，生成物向流道扩散，最终到达稳定状态，反应物浓度随着催化层的厚度近似线性下降，生成物近似上升。扩散层中反应物和生成物的流量等于催化层反应物消耗速率和生成物的产生速率，表示为^[59]：

$$i = 4FJ_{diff} \quad (3-60)$$

其中： J_{diff} 表示进入催化层反应物的扩散流量。

扩散是由于浓度梯度形成的物质传输，为了建立燃料电池气体扩散模型，需要作以下假设^[91]：(1)电堆内各单体温度均匀分布，且都等于冷却流道中冷却液温度；(2)气体流道各处同质无差异，将其看成一体。气体扩散层看成一维的，忽略沿传输流场的差异。(3)所有气体都是理想气体。(4)氢气、氧气和氮气分子不会穿过电解质膜。尽管薄的电解质膜中会有少量气体分子通过，但是为简化模型仅考虑稳态时有水穿过。

气体扩散使气体从高浓度区域流向低浓度区域，它是浓度梯度的函数。如果体积不变时，气体摩尔浓度 c_j 用其压力 p_j 表示为^[91]：

$$c_j = \frac{P_j}{RT} \quad (3-61)$$

氢气气体扩散发生在阳极扩散层，氧气发生在阴极扩散层，水蒸气在两者都有。由于在阴极的氮气不参与化学反应，假设其在阴极的气体扩散层浓度是常量，且各处都相等，即不发生扩散。因此在两个扩散层都是二元体系。根据菲克第一定律，扩散流量表示为^[92]

$$J_j = -D_j \frac{\partial c_j}{\partial x} \quad (3-62)$$

其中 D_j 是气体组分的有效扩散系数，计算见附录D。

扩散系数与阴极压力成反比，随温度的升高而升高。在电堆温度 70°C ，压力由 1.0bar 升到 2.0bar ，扩散系数由 $0.26142\text{cm}^2/\text{s}$ 降到 $0.13071\text{cm}^2/\text{s}$ 。稳态时，扩散层各处的气体浓度不变，由式(3-62)可知阴极流场的氧气浓度 $c_{\text{O}_2}^0$ 和催化层面氧气浓度 $c_{\text{O}_2}^*$ 满足：

$$J_j = D_j \frac{c_{\text{O}_2}^0 - c_{\text{O}_2}^*}{\delta} \quad (3-63)$$

由式(3-60)表示出扩散流量，然后代入式(3-63)得到：

$$\frac{i}{4F} = D_j \frac{c_{\text{O}_2}^0 - c_{\text{O}_2}^*}{\delta} \quad (3-64)$$

催化层面氧气浓度 $c_{\text{O}_2}^*$ 表示为：

$$c_{\text{O}_2}^* = c_{\text{O}_2}^0 - \frac{i\delta}{4FD_j} \quad (3-65)$$

由于气体扩散层厚度很小，典型范围在 $100\mu\text{m}\sim 300\mu\text{m}$ ，流场浓度 $c_{\text{O}_2}^0$ 和催化层浓度 $c_{\text{O}_2}^*$ 相差不大。如流道压力是 2.0bar ，温度是 70°C ，扩散层厚度 $100\mu\text{m}$ ，电流密度是 $1\text{A}/\text{cm}^2$ 时，由式(3-61)和式(3-65)得到流场浓度、催化层面浓度分别是 $14.7216\text{mol}/\text{m}^3$ 和 $14.5234\text{mol}/\text{m}^3$ 。两个浓度差值仅是 $0.1982\text{mol}/\text{m}^3$ 。如流道压力是 1.0bar ，其它条件不变，流道浓度是 $7.3608\text{mol}/\text{m}^3$ ，浓度差是 $0.0991\text{mol}/\text{m}^3$ 。由于稳态时浓度差比较小，因此在建立电堆模型时，用流道浓度替代催化层处浓度仅会带来较小的误差精度。

在扩散层中任一各处气体满足质量守恒，气体浓度对时间的导数是扩散流量的梯度与反应率 R_j 之和^[91]，即

$$\frac{dc_j}{dt} = \frac{\partial J_j}{\partial x} + R_j \quad (3-66)$$

将式(3-63)代入上式，整理得到

$$\frac{dc_j}{dt} = -D_j \frac{\partial^2 c_j}{\partial x^2} + R_j \quad (3-67)$$

燃料电池反应仅仅发生在阴极催化层，对于非催化层处有：

$$\frac{dc_j}{dt} = -D_j \frac{\partial^2 c_j}{\partial x^2} \quad 0 \leq x < \delta \quad (3-68)$$

式(3-67)和式(3-68)是二阶偏微分方程，求解较复杂。根据叠加原理，式(3-68)所描述的扩散过程分解为两个扩散过程(偏微分方程相同)，一个是在 $x=0$ 处气体浓度是 $c_{O_2}^0$ 向 $x \rightarrow \infty$ 的扩散过程；即初始条件是 $t=0$ 时 $c(x,0)=0$ ；边界条件是在 $x=0$ 处气体浓度 $c_j = c_{O_2}^0$ 。另一个是在 $x=\delta$ 处气体浓度是 $c_{O_2,cata}^*$ 向 $x \rightarrow \infty$ 的扩散过程，即初始条件是 $t=0$ 时 $c(x,0)=0$ ；边界条件是在 $x=\delta$ 处气体浓度 $c_j = c_{O_2,cata}^*$ ，其中 $c_{O_2,cata}^*$ 是产生电流密度 i 所需的催化层面的最小气体浓度，由式(3-65)可知最小气体浓度 $c_{O_2,cata}^* = \frac{i\delta}{4FD_j}$ 。这两个过程的解分别是^[92]：

$$c_1(x,t) = c_{O_2}^0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4D_j t}}\right) \tag{3-69}$$

$$c_2(x,t) = c_{O_2,cata}^* \operatorname{erfc}\left(\frac{\delta-x}{\sqrt{4D_j t}}\right) \tag{3-70}$$

这两个过程相减得到式(3-68)中气体浓度的近似解析解，

$$\begin{aligned} c_j(x,t) &= c_1(x,t) - c_2(x,t) \\ &= c_{O_2}^0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4D_j t}}\right) - c_{O_2,cata}^* \operatorname{erfc}\left(\frac{\delta-x}{\sqrt{4D_j t}}\right) \quad 0 \leq x \leq \delta \end{aligned} \tag{3-71}$$

3.4 泵和风机

在氢气供应系统中为减小氢气消耗量，需要利用回流泵将没有反应的氢气抽回到阳极流场入口再次利用；在热管理系统中，水泵驱动冷却水在电堆冷却流道中循环达到调节温度；此外，散热器需要风扇散热。回流泵和冷却水泵、风扇都属于离心式泵或风机。

离心式泵与风机的主要组成部分有叶轮、吸入室、压出室、轴向力平衡装置以及密封装置^[93]，性能参数包括：流量 Q 、能头 H (水泵称为扬程，风机称为风压)、功率 P 、效率 η 等。

为了建立泵与风机的模型，常采用量纲分析方法。描述泵与风机外部特性的物理量集合是^[77]： $\{Q, N, P_D, D, \nu, gH\}$ ，其中： Q 是体积流量(m^3/s)； N 是旋转速度(rpm)； P_D 是输入功率(W)； D 是叶轮直径(m)； ν 是比容积(m^3/kg)； H 是能头(m)；用重力加速度与能头乘积 gH 作为一个反应能头的组合参数，它等于泵的出口与入口的压力差 Δp 与比容积乘积，即 $\nu \Delta p$ 。假设能头参数 gH 和输入功率 P_D 受其它 Q, N, D, ν 四个参数的影响，对于能头采用量纲分析的瑞利方法^[93]，测试公式为：

$$gH = const \times Q^a N^b D^c \nu^d \tag{3-72}$$

将各物理量的量纲代入式(3-72)得到：

$$[L^2 T^{-2}] = [L^3 T^{-1}]^a [T^{-1}]^b [L]^c [L^3 M^{-1}]^d \tag{3-73}$$

根据等式两边同底的指数相等，得到关于指数 a, b, c 和 d 方程，然后将 b 和 c 用 a 表示代入上式，得到能头

$$gH = \text{const} \times Q^a N^{2-a} D^{2-3a} = \text{const} \times N^2 D^2 \left(\frac{Q}{ND^3}\right)^a \quad (3-74)$$

由上式得到能头和流量满足:

$$\frac{gH}{N^2 D^2} = \phi_1\left(\frac{Q}{ND^3}\right) \quad (3-75)$$

假设泵是几何相似的, 函数 ϕ_1 可以应用于各种尺寸的泵。函数 ϕ_1 与叶轮的直径相关, 在不同的叶轮直径 D_0 、 D_1 或 D_2 和所对应的不同的转速 N_0 、 N_1 或 N_2 下, 能头和流量满足

$$\begin{cases} \frac{Q_0}{N_0 D_0^3} = \frac{Q_1}{N_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{N_2 D_2^3} \\ \frac{gH_0}{N_0^2 D_0^2} = \frac{gH_1}{N_1^2 D_1^2} = \frac{gH_2}{N_2^2 D_2^2} \end{cases} \quad (3-76)$$

对于泵的输入功率亦采用量纲分析的瑞利方法, 有效功率和流量满足:

$$\frac{v P_D}{N^2 D^5} = \phi_2\left(\frac{Q}{ND^3}\right) \quad (3-77)$$

由于摩擦损耗致使泵的有效功率低于需求功率。将泵的有效功率看成将流量 $W(\text{kg/s})$ 的流体抬升 $H(\text{m})$ 高度的功率:

$$P_p = W g H = \frac{Q g H}{v} \quad (3-78)$$

将式(3-75)代入上式, 有效功率表示为

$$P_p = \frac{Q N^2 D^2}{v} \phi_1\left(\frac{Q}{ND^3}\right) \quad (3-79)$$

对一个特定的泵仿真时, 由于泵的叶轮直径是确定的, 因此利用相似定律对式(3-76)和(3-77), 得到不同转速 N 下流量、扬程、有效功率的关系:

$$\frac{Q}{N} = \frac{Q_0}{N_0} \quad \frac{H}{N^2} = \frac{H_0}{N_0^2} \quad v \frac{P_D}{N^3} = v_0 \frac{P_{D0}}{N_0^3} \quad (3-80)$$

其中: Q_0 、 N_0 、 H_0 、 P_{D0} 和 v_0 分别是泵的流量、转速、扬程、有效功率和比容积的设计参数, 而 Q 、 H 、 P_D 和 v 分别是泵在转速 N 下的相应值。

在额定转速 N_0 和液体比密度 v_0 下, 额定能头与额定体积流量的关系表示为: $H_0 = f_1(Q_0)$; 额定输入功率与额定体积流量的关系表示为: $P_{D0} = f_2(Q_0)$; 额定效率与额定体积流量的关系表示为: $\eta_0 = f_3(Q_0)$ 。如果泵的转速不是 N_0 , 且液体比密度不是 v_0 , 需要用相似定律确定不同转速下得能头输入功率和流量。

由式(3-80)得到在任意转速 N 下, 泵的能头与流量的特性关系

$$H = \frac{N^2}{N_0^2} f_1\left(Q \frac{N_0}{N}\right) \quad (3-81)$$

输入功率与流量的特性关系

$$P_D = \frac{v_0}{v} \frac{N^3}{N_0^3} f_2\left(Q \frac{N_0}{N}\right) \quad (3-82)$$

将式(3-81)中能头 H 用式(3-78)替代整理后,得到在不同转速 N 下泵的有效功率与流量的特性

$$P_p = \frac{\rho}{\nu} Q \frac{N^2}{N_0^2} f_1 \left(Q \frac{N_0}{N} \right) \quad (3-83)$$

由式(3-82)和(3-83)得到任意转速 N 下泵的效率特性

$$\eta_p = f_3 \left(Q \frac{N_0}{N} \right) \quad (3-84)$$

在泵的能头、功率和效率特性中, $Q \frac{N_0}{N} = \frac{Q}{N/N_0}$ 表示流量与转速标么值之比, 是一个重要的参数, 用于计算任意转速下泵的特性。函数 f_1 、 f_2 和 f_3 是相互关联的, 在对泵建模时, 一般选能头曲线和效率曲线。

3.4.1 管路特性

泵与风机的性能曲线只能说明泵与风机自身的性能。当泵与风机工作时需要连接管路, 其性能不仅取决于自身的特性而且还取决于管路系统特性, 即管路系统特性曲线。如果把泵与风机作为整个系统的流体动力源, 那么管路系统就是泵的负载。

管路系统特性是指管路扬程和流量的关系。把单位质量的液体从吸液池的表面输送到压液池的表面所做的功, 称为装置扬程, 单位与泵的扬程一样。装置扬程 H_z 表示为^[94]:

$$H_z = (z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{\rho g} + h_{sl} \quad (3-85)$$

其中: z_1 、 z_2 分别是吸液池、压液池表面高度; p_1 、 p_2 分别是吸液池、压液池表面压力; c_1 、 c_2 分别是吸液池、压液池液体流速。 h_{sl} 是管路损失。

在管路系统中, 当液体流过阀门、三通头、弯头时常常会发生过流面积的突然扩大或缩小, 流量分布发生急剧变化产生涡旋、二次回流, 从而引起附加摩擦损失和撞击损失, 这些损失称为局部阻力损失。而管路损失是指从吸液池液面到压液池液面管路系统的机械能头损失, 包括沿程摩擦阻力损失和局部阻力损失。在泵系统中流体运动状态一般都处于紊流状态, 这样包括沿程损失和局部损失在内的各种能头损失都可以表示为一个阻力系数 λ 与 $\frac{c^2}{2g}$ (c 是液体平均速度) 的乘积。由于液体平均流量 c 与流量 Q 满足 $c = \frac{4Q}{\pi d^2}$, 因此式(3-85)中右侧后两项表示为 kQ^2 , 其中 k 是一个综合考虑管路中各种损失的系数; 式(3-85)中右侧前两项之和与流量无关, 一般认为是一个常数, 用 H_0 表示; 这样式(3-85)表示为

$$H_z = H_0 + kQ^2 \quad (3-86)$$

上式称为管路特性曲线, 它是一条抛物线。当 $H_0=0$ 时, 该抛物线通过原点, 与泵的相似抛物线重合, 因而在泵的变转速运转时泵的效率不变; 而当时 $H_0 \neq 0$, 该抛物线不通

过原点，与泵的相似抛物线不重合，因此在转速变化时泵的效率将发生改变。

3.4.2 泵与管路模型

在泵系统中，泵是整个系统的流体动力源，管路系统是泵的负载；系统稳定时泵的能头等于管路扬程。通过泵的转速调节泵的流量。泵的实际运转工况点是它的特性曲线与管路特性曲线的交点，如图3-8(a)所示的A、B点。A点对应的是转速 N_1 时的工作点，B点对应的是转速 N_2 时的工作点。泵与管路模型如图3-8(b)，在图中令泵和管路的流量和扬程相同。 V_m 是电机的电压，改变 V_m 可以调节泵(电机)的转速 N ，使泵的能头特性曲线发生变化，从而流量 Q 发生变化。与压缩机类似，通过电机的电磁功率和泵的轴功率转矩方程，用式(3-19)可以得到电机的转速。

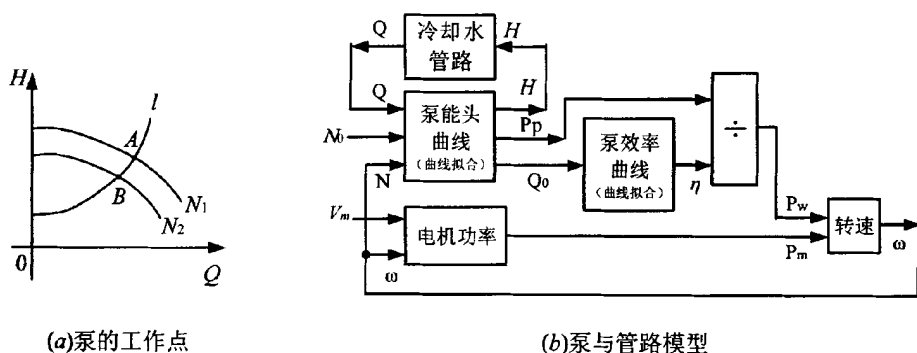


图3-8 泵的工作点及其管路模型

3.5 氢气供应系统模型

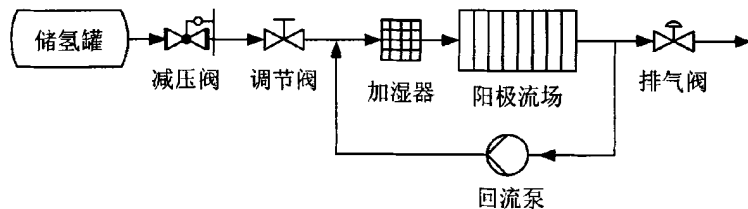


图3-9 车载燃料电池氢气供应系统

车载燃料电池的氢气供应系统如图3-9所示，氢气罐中的高压氢气经减压阀后，氢气压力降到合适的范围，然后通过调节阀控制氢气流量，实现改变电堆阳极流场压力的目的，调节阀又称为压力调节阀。由调节阀流出的氢气经过加湿器加湿到设定湿度，再流进电堆阳极流场。氢气进入阳极流场后，有一部分穿过质子交换膜与阴极中氧气发生反应生成水，剩余的氢气从电堆阳极流出后，再通过回流泵送入加湿器入口。回流泵的作用一方面在保证适量的氢气流量情况下，提高了氢气的利用率；另一方面加速电堆内部氢气流动，可将阳极流场中的液态水排出，有效地防止电堆内部发生阳极“水淹”现象从而导致电池性能下降。为了去除附着在阳极流场中质子交换膜表层的水蒸气以及通过膜

渗透到阳极的氮气，排气阀每隔一定时间开通一次。

为了建立一个适合于面向控制的动态模型，参考空气供应系统建模^[8]，并基于以下假设^[22]：(1)所有的气体遵从理想气体定律；(2)由于系统温度变化比较缓慢，假定温度恒定；(3)加湿器具有良好的动态特性；(4)当气体的湿度超过100%时，水蒸气凝结成液体；(5)将电堆看成一个整体，不考虑电堆内部流道由于空间引起的不同压降。在车载燃料氢气供应系统中，假设减压阀出口氢气压力为常数，这样氢气供应系统建模可分为进气管道(包含加湿器)、排气管道、阳极流场、回流泵、调节阀和排气阀等五部分。

3.5.1 进气管道

进气管路包含调节阀出口到电堆入口的管道以及回流泵出口与之相连的管路。调节阀和回流泵流出的氢气流量都进入进气管道，氢气从进气管道流出经加湿后进入阳极流场。在进气管道中包含氢气和水蒸气两种气体，根据理想气体质量守恒和能量守恒，气体流量与压力的关系：

$$\begin{cases} \frac{dm_{H_2,sm}}{dt} = W_{sv} - W_{H_2,sm} + W_{H_2,pump,out} \\ \frac{dm_{v,sm}}{dt} = W_{v,pump,out} - W_{v,sm} \\ p_{sm} = \frac{T}{V_{sm}} (R_{H_2} m_{H_2,sm} + R_v m_{v,sm}) \end{cases} \quad (3-87)$$

式中： $m_{H_2,sm}$ 和 $m_{v,sm}$ 分别是进气管道中氢气、水蒸气的质量； W_{sv} 、 $W_{H_2,sm}$ 和 $W_{H_2,pump,out}$ 分别是调节阀、进气管道和回流泵流出的氢气流量； $W_{v,pump,out}$ 和 $W_{v,sm}$ 分别是回流泵、进气管道流出水蒸气的流量； p_{sm} 是进气管道的压力； T_{sm} 是管道温度； V_{sm} 是进气管道的体积； R_{H_2} 是氢气的气体常数。

氢气进入电堆之前，由于其湿度较低，需通过加湿器将其加湿到合适的湿度。由进气管道压力、氢气湿度、流量以及期望湿度，可得加湿器提供水蒸气的流量 $W_{v,inj}$ ，

$$W_{v,inj} = \frac{M_v}{M_{H_2}} \frac{\phi_{des} p_{sat}}{p_{sm}} W_{H_2,sm} - W_{v,sm} \quad (3-88)$$

式中： ϕ_{des} 是期望的氢气湿度； p_{sat} 是在温度 T_{sm} 时的水蒸气饱和压力。

3.5.2 阳极流场

阳极流场是指从电堆阳极流道入口到出口部分。流进阳极流场中的氢气一部分与阴极中的氧气发生化学反应生成水；一部分由电堆阳极流场流出。流入阳极流场中的水蒸气一部分由出口流出，另一部分与氢质子结合成水合质子，在阳极流场与阴极流场的压力差作用下，水合质子通过质子交换膜到阴极。根据质量守恒和理想气体方程，阳极流场中压力 p_{an} 、氢气质量 $m_{H_2,an}$ 、水蒸气质量 $m_{v,an}$ 以及阳极流场流出氢气流量 $W_{H_2,an}$ 和水蒸气流量 $W_{v,an}$ 满足

$$\begin{cases} \frac{dm_{H_2,an}}{dt} = W_{H_2,sm} - W_{H_2,rec} - W_{H_2,an} \\ \frac{dm_{v,an}}{dt} = W_{v,hum} - W_{v,an,out} - W_{v,mem} \\ p_{an} = \frac{T_{st} R_{H_2} m_{H_2,an}}{V_{an}} + \min(p_{sat}, \frac{T_{st} R_{vw} m_{vw,an}}{V_{an}}) \end{cases} \quad (3-89)$$

式中： $W_{H_2,rec}$ 是参加反应的氢气流量； $W_{v,an,out}$ 是从阳极流场流出的水蒸气流量； $W_{v,mem}$ 是从阳极经过质子交换膜流进阴极的水蒸气流量； V_{an} 是阳极流场的体积。

3.5.3 排气管道

排气管道是从电堆阳极出口到排气阀以及与回流泵入口相连的管道。排气管道流出气体中有少部分通过排气阀间歇排出，大部分通过回流泵返回进气管道。其压力流量方程与进气管道类似，

$$\begin{cases} \frac{dm_{H_2,rm}}{dt} = W_{H_2,an} - W_{H_2,pv} - W_{H_2,pump,in} \\ \frac{dm_{v,rm}}{dt} = W_{v,an,out} - W_{v,pv} - W_{v,pump,in} \\ p_{rm} = \frac{T}{V_{rm}} (R_{H_2} m_{H_2,rm} + R_{vw} m_{vw,rm}) \end{cases} \quad (3-90)$$

式中： $m_{H_2,rm}$ 和 $m_{v,rm}$ 分别是排气管道中氢气、水蒸气的质量； $W_{H_2,pv}$ 和 $W_{v,pv}$ 分别是排气阀流出氢气和水蒸气的流量； $W_{H_2,pump,in}$ 和 $W_{v,pump,in}$ 分别是流进回流泵的氢气和水的流量； p_{rm} 是排气管道的压力； V_{rm} 是进气管道的体积。

3.5.4 回流泵模型

回流泵的一端接在排气管道，而另一端接在进气管道，因而回流泵的进口压力与排气管道相同。在额定转速下，采用曲线拟合可得回流泵出口流量

$$Q_0 = a_3 p_{sm}^3 + a_2 p_{sm}^2 + a_1 p_{sm} + a_0 \quad (3-91)$$

式中： $a_0 \sim a_3$ 是拟合系数； p_{sm} 是回流泵出口压力，即进气管道压力。

回流泵实际工作时，其转速往往不在额定转速，根据式(3-80)得到不同转速下的近似流量和功率。

3.5.5 调节阀和排气阀

调节阀和排气阀的模型建立都使用式(3-52)描述的喷嘴流量方程，阀门的输出流量与其上下游的压力、横截面积、温度等有关。喷嘴有效横截面积与控制电压的关系为^[47]：

$$A_v = A_{v0} \frac{u_A}{5} \quad (3-92)$$

式中： A_v 是阀门有效横截面积； A_{v0} 是阀门有效横截面积的最大值； u_A 是控制电压，

范围 $0 < u_A < 5V$ 。

3.6 水平衡

水热平衡是燃料电池工作性能的重要因素，它们相互影响。水平衡是指水的质量变化以及水的状态在气态和液态之间的变化；而热平衡是指电堆中化学反应产生的热量与流过电堆的冷却液带走的热量之间的平衡，它使电堆处于合适的工作温度。一方面通过水状态的变化，水平衡引起电堆内部热量的变化；另一方面通过影响电堆的湿度，水平衡导致化学反应产生热量变化，从而改变系统热平衡的状态。而热平衡通过对电堆温度影响改变电堆内部水平衡的状态。两者之间的关联主要是水的状态。

3.6.1 水平衡分析

膜含水量的程度是水平衡影响燃料电池性能的主要表现方式。膜的电导率与其含水量成正比，如式(2-19)和(2-20)给出的结论。一方面如果电堆流场内气体湿度较低，质子交换膜中的水分通过扩散层容易扩散到气体中，膜的含湿量会降低，导致膜传导质子的能力下降，欧姆损耗增加。另一方面如果电堆流场内气体湿度较高，那么水蒸气容易在膜电极表面凝结，甚至液态水会堵塞气体扩散层，出现局部气体供应不足，电堆浓差损耗增加，电池性能降低。

影响燃料电池内部的水平衡的因素包括：进入和流出电堆的水流量、阴极中生成水的速率以及水在膜中的传递量，如图3-10所示。

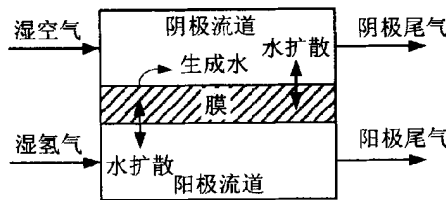


图3-10 电堆中的水平衡

由于电池内部的质子交换膜很薄，如Nafion112厚度仅为0.051毫米，忽略膜内部水分变化的梯度。根据物质守恒得到阴极流场水的变化量 $\dot{m}_{w,ca}$ 和阳极流场中水的变化量 $\dot{m}_{w,an}$ ，

$$\begin{aligned} \dot{m}_{w,ca} &= W_{w,ca,in} + W_{w,st,gen} + W_{w,m,trans} - W_{w,ca,out} \\ \dot{m}_{w,an} &= W_{w,an,in} - W_{w,m,trans} - W_{w,an,out} \end{aligned} \tag{3-93}$$

式中： $W_{w,ca,in}$ 是湿空气带入阴极流场中水流量； $W_{w,st,gen}$ 电堆内部生成水流量； $W_{w,ca,out}$ 是阴极尾气排放带出水流量； $W_{w,m,trans}$ 是经过膜的水传递由阳极流场到阴极流场的水流量。 $W_{w,an,in}$ 是湿氢气带入阳极流场中水流量； $W_{w,an,out}$ 是阳极尾气排放带出水流量。

进入电堆的水流量 $W_{w,st,in}$ 是进入阴极和阳极流场水流量之和，即

$$W_{w,st,in} = W_{w,ca,m} + W_{w,an,in} \tag{3-94}$$

如果电堆入口温度是 $T_{st,in}$ ，阴极流道入口压力是 $p_{ca,in}$ ，阳极入口压力是 $p_{an,in}$ ，湿空气和湿氢气的湿度都是95%，由式(3-2)可将进入阴极流场的水流量和阳极流场的水流量表示为

$$\begin{cases} W_{w,ca,in} = W_{air,dry,ca,in} d_{air,des}(T_{st,in}, p_{ca,in}) \\ W_{w,an,in} = W_{H_2,dry,an,in} d_{H_2,des}(T_{st,in}, p_{an,in}) \end{cases} \quad (3-95)$$

式中： $d_{air,des}$ 和 $d_{H_2,des}$ 分别是在95%湿度时空气和氢气的含湿量。

流出电堆的水流量 $W_{w,st,out}$ 是阴极和阳极流道二者的尾气中水流量之和，即

$$W_{w,st,out} = W_{w,ca,out} + W_{w,an,out} \quad (3-96)$$

电堆中水分质量的变化率 $\dot{m}_{w,st}$ 是阴极和阳极流场的变化率之和，即

$$\dot{m}_{w,st} = \dot{m}_{w,ca} + \dot{m}_{w,an} \quad (3-97)$$

当电堆中的水处于平衡状态时，由供应气体(湿空气、湿氢气)带入的水分和电堆内部产生的水分将全部由尾气排出。此时，阴极和阳极流场的水分质量变化速率为0，水分总量保持常量，因而电堆中水平衡满足：

$$\dot{m}_{w,st} = 0 \quad (3-98)$$

3.6.2 生成水的状态

尽管质子交换膜燃料电池电堆内部温度约为70°C，但是由于水的相变存在，电化学反应过程中生成水的状态既有可能为气态，也有可能为液态，是一个动态变化的过程，具体的生成物状态是难以定量分析。

在电堆内部，湿度、温度以及膜中的水含量和水传递流量难以测量，致使很难确定生成水的状态。虽然在质子交换膜内水传递方面已有一些成果，但是对于不同膜和流场结构的燃料电池电堆，不能直接应用这些成果。文献[21]从控制角度出发研究水状态的宏观影响，利用Mark902电堆测试平台数据进行分析，认为当反应过程中生成水的量小于阴极尾气中容纳水蒸气的能力，则生成水以气态方式存在；反之，超出气体容纳水蒸气最大能力的部分则以液态方式存在。根据测试数据发现，阴极和阳极流道尾气的湿度都约是100%。这样流出电堆的水蒸气流量 $W_{wv,st,out}$ 和液态水流量 $W_{wl,st,out}$ 表示为：

$$\begin{cases} W_{wv,st,out} = W_{wv,ca,out,max} + W_{wv,an,out,max} \\ W_{wl,st,out} = W_{w,st,out} - W_{wv,st,out} \end{cases} \quad (3-99)$$

其中： $W_{wv,ca,out,max}$ 和 $W_{wv,an,out,max}$ 是分别是阴极和阳极流道尾气中所能容纳的最大水蒸气流量。

阴极和阳极流道的尾气中排出的水蒸气流量与电堆出口温度、压力、气体流量有关，由式(3-2)得到：

$$\begin{cases} W_{wv,an,out} = W_{wv,an,out,max} = W_{H_2,dry,an,out} d_{H_2,sat}(T_{st,out}, p_{an,out}) \\ W_{wv,ca,out} = W_{wv,ca,out,max} = W_{O_2,dry,ca,out} d_{O_2,sat}(T_{st,out}, p_{ca,out}) + W_{N_2,ca,out} d_{N_2,sat}(T_{st,out}, p_{ca,out}) \end{cases} \quad (3-100)$$

式中： $d_{H_2,sat}$ 、 $d_{O_2,sat}$ 和 $d_{N_2,sat}$ 分别是氢气、氧气和氮气的最大含湿量，它们是电堆温度出口 $T_{st,out}$ 、阳极出口压力 $P_{an,out}$ 和阴极出口压力 $P_{ca,out}$ 的函数。

3.6.3 水回收

燃料电池生成产物为水，而空气和氢气进入电堆之前都需要加湿，此外电堆冷却也需要水，因此将生成的水回收用于加湿和冷却。在燃料电池尾气中含有气态水和液态水。对于车载燃料电池而言，电堆阳极流道出口往往接有回流泵，将未参加反应的氢气再次利用，因而只在阴极流道出口通过冷凝方式进行水的回收，则回收的水量 W_{recy} 表示为：

$$W_{recy} = W_{w,ca,out} - W_{O_2,ca,out}d_{O_2,sat}(T_{cool}, P_{cool}) - W_{N_2,ca,out}d_{N_2,sat}(T_{cool}, P_{cool}) \quad (3-101)$$

其中： T_{cool} 、 p_{cool} 分别是冷凝器的温度和压力。

3.7 热平衡

根据热力学第二定律，燃料电池将物质的化学能转化为电能必然会造成一部分能量损失，表现为系统产生的热量。燃料电池产生的热需要与外界环境进行交换，表现为电堆和辅助系统温度的改变。

3.7.1 开口能量系统

车载燃料电池工作时，湿空气从电堆阴极输入，湿氢气从电堆阳极输入，冷却液从冷却管道输入。燃料电池化学反应除了产生电能外，且伴随着大量热量产生，引起电堆温度升高，使得电堆中的反应气体和冷却液温度升高，而流出电堆的气体和冷却液带走大量热量。为了建立电堆的温度模型，将电堆看成一个开口能量系统，如图3-11所示。图中流入电堆的能量有反应气体具有的化学能、气体和冷却液具有的热力学能，流出系统的能量有电堆产生的电能、反应物和未参加反应的气体以及冷却液具有的热力学能；电堆热力学能的增量等于开口能量系统的增量。

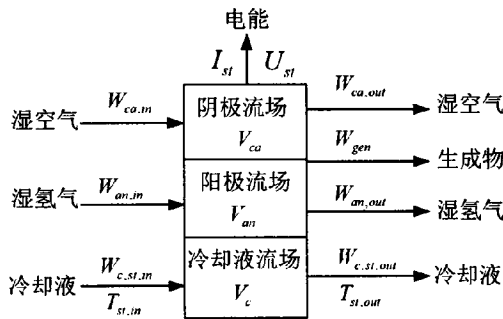


图3-11 开口能量系统

为了便于对燃料电池热力学过程进行宏观分析，做以下假设^[21, 95]：(1)与化学反应、流体特性相比，燃料电池的温度变化过程相对比较缓慢，并且组成电堆的主要材料为导热性能良好的石墨，故认为电堆内部具有均匀分布的温度场。(2)燃料电池一般都进行了

良好的封装,通过周围空气对流或是辐射将电池的热量扩散到空气中的比例很小,故忽略从电堆表面直接扩散到周围环境中的热量。(3)由于供给燃料电池的气体流量较小,忽略空气和氢气流动的动能和势能。(4)在燃料电池工作温度范围 $60^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 内,各种物质的定压热容变化较小,因而将这些热容参数当作常数。

3.7.2 反应产生的热量

在电化学反应中,燃料电池反应物(氧气和氢气)的化学能被转化成电能、热能和生成物(水)的化学能,由于物质的化学能是在标准状况条件下测试得到,为了利用这些现有的数据,选择标准状况下的物质具备的内能为基准点,实际物质可通过理想热力学过程转换为标准状态;在标准状态下,氢气和氧气发生电化学反应,生成水并且释放出电能和热能;然后再通过理想热力学过程,将生成物水以及其它物质转化为实际状态。根据式(2-2)可知电化学反应的总功率 P_{rect} 是

$$P_{rect} = n_{jc} E_{HHV} I_{st} \quad (3-102)$$

其中: E_{HHV} 是单体电池高热值等效电压(1.481V)。

若电堆输出电压是 U_{st} ,则电堆输出的电功率是 $P_{st} = U_{st} I_{st}$,因此电堆产生的热功率 P_{hot} 是

$$P_{hot} = P_{rect} - P_{st} = (n_{jc} E_{HHV} - U_{st}) I_{st} \quad (3-103)$$

根据热力学第一定律可知,在确定的初始状态和最终状态条件下,由化学反应引起的系统能量的变化量相同。在分析燃料电池的热平衡中,忽略从初态转换到标准状态与从标准状态转换到最终状态的能量损耗,反应热可以按照标准状态下进行计算。在处理电化学反应过程中可以使用低热值,也可以选用高热值。选用的数值不同会影响分析结果的数值大小,但对系统的性能是相同的。本文以标准状况下的反应物的热能作为参考基准,反应生成的水是液态形式呈现,因而反应热能等于高热值。

3.7.3 反应气体的影响

流进电堆的湿空气和湿氢气以及流出电堆的气体会影响电堆的热平衡。进入阴极流场的湿空气具有的热能包括干空气和水蒸气所具有的能量,即为

$$\dot{q}_{ca,in} = \dot{q}_{da,ca,in} + \dot{q}_{wv,ca,in} \quad (3-104)$$

其中: $\dot{q}_{ca,in}$ 是湿空气带入电堆阴极的热功率, $\dot{q}_{da,ca,in}$ 是阴极干空气带入电堆的热功率, $\dot{q}_{wv,ca,in}$ 是阴极水蒸气带入电堆的热功率。

而干空气和水蒸气带入电堆的热功率表示为:

$$\begin{cases} \dot{q}_{da,ca,in} = W_{da,ca,in} C_{p_{air}} (T_{ca,in} - T_0) \\ \dot{q}_{wv,ca,in} = W_{wv,ca,in} [C_{p_{wv}} (T_{ca,in} - T_0) + r] \end{cases} \quad (3-105)$$

其中: $W_{da,ca,in}$ 和 $W_{wv,ca,in}$ 分别是阴极入口干空气和水蒸气的流量; $C_{p_{air}}$ 和 $C_{p_{wv}}$ 分别是干空气和水蒸气的定压热容; $T_{ca,in}$ 是电堆阴极入口温度; T_0 是标准状态下的温度; r 是气化

潜热。

流出阴极流场的气体有不参加反应的氮气、过量的氧气、水蒸气和生成物水，流出的热能即为这四种物质的热能之和，即有：

$$\dot{q}_{ca,out} = \dot{q}_{N_2,ca,out} + \dot{q}_{O_2,ca,out} + \dot{q}_{wv,ca,out} + \dot{q}_{wl,ca,out} \quad (3-106)$$

其中： $\dot{q}_{ca,out}$ 是阴极气体带出电堆的热功率， $\dot{q}_{N_2,ca,out}$ 是排出气体中氮气的热功率， $\dot{q}_{O_2,ca,out}$ 是排出气体中氧气的热功率， $\dot{q}_{wv,ca,out}$ 是排出气体中水蒸气的热功率， $\dot{q}_{wl,ca,out}$ 是排出气体中液态水的热功率。

流出阴极流场的各个热功率表示为：

$$\begin{cases} \dot{q}_{N_2,ca,out} = W_{N_2,ca,out} C_{p_{N_2}} (T_{ca,out} - T_0) \\ \dot{q}_{O_2,ca,out} = W_{O_2,ca,out} C_{p_{O_2}} (T_{ca,out} - T_0) \\ \dot{q}_{wv,ca,out} = W_{wv,ca,out} C_{p_{wv}} [(T_{ca,out} - T_0) + r] \\ \dot{q}_{wl,ca,out} = W_{wl,ca,out} C_{p_{wl}} (T_{ca,out} - T_0) \end{cases} \quad (3-107)$$

其中： $W_{N_2,ca,out}$ 、 $W_{O_2,ca,out}$ 、 $W_{wv,ca,out}$ 和 $W_{wl,ca,out}$ 分别是阴极流场流出的氮气、氧气、水蒸气和液态水的流量； $C_{p_{N_2}}$ 、 $C_{p_{O_2}}$ 和 $C_{p_{wl}}$ 分别是氮气、氧气和液态水的定压热容常数。

进入阳极流场的气体是湿氢气，流入的热能包含氢气和水蒸气的热能，有

$$\dot{q}_{an,m} = \dot{q}_{H_2,an,m} + \dot{q}_{wv,an,m} \quad (3-108)$$

其中： $\dot{q}_{an,m}$ 是阳极氢气带入电堆的热功率， $\dot{q}_{H_2,an,m}$ 是阳极干氢气带入电堆的热功率， $\dot{q}_{wv,an,m}$ 是阳极水蒸气带入电堆的热功率。

流入阳极流场的热功率表示为：

$$\begin{cases} \dot{q}_{H_2,an,m} = W_{H_2,an,m} C_{p_{H_2}} (T_{an,m} - T_0) \\ \dot{q}_{wv,an,m} = W_{wv,an,m} C_{p_{wv}} (T_{an,m} - T_0) \end{cases} \quad (3-109)$$

其中： $W_{H_2,an,m}$ 和 $W_{wv,an,m}$ 是流入阳极流场的氢气和水蒸气流量； $C_{p_{H_2}}$ 是氢气的定压热容常数； $T_{an,m}$ 是阳极流场入口温度。

阳极流场流出的气体是水蒸气和没有反应的氢气，流出的热能即：

$$\dot{q}_{an,out} = \dot{q}_{H_2,an,out} + \dot{q}_{wv,an,out} + \dot{q}_{wl,an,out} \quad (3-110)$$

其中： $\dot{q}_{an,out}$ 是阳极气体带出电堆的热功率， $\dot{q}_{H_2,an,out}$ 是排出气体中氢气的热功率， $\dot{q}_{wv,an,out}$ 是排出气体中水蒸气的热功率。

流出阳极流场的热功率表示为：

$$\begin{cases} \dot{q}_{H_2,an,out} = W_{H_2,an,out} C_{p_{H_2}} (T_{an,out} - T_0) \\ \dot{q}_{wv,an,out} = W_{wv,an,out} C_{p_{wv}} (T_{an,out} - T_0) \end{cases} \quad (3-111)$$

其中： $W_{H_2,an,out}$ 和 $W_{wv,an,out}$ 流出阳极流场的氢气和水蒸气流量； $T_{an,out}$ 是阳极流场的出口温度。

3.7.4 电堆温度

忽略电堆表面与外界之间的热量交换，由热力学第一定律可得电堆获得的热功率 \dot{q}_s

是:

$$\dot{q}_{st} = P_{hot} + (\dot{q}_{ca,in} - \dot{q}_{ca,out}) + (\dot{q}_{an,in} - \dot{q}_{an,out}) + (\dot{q}_{c,st,in} - \dot{q}_{c,st,out}) - \dot{q}_{gen} \quad (3-112)$$

其中: $\dot{q}_{ca,in}$ 和 $\dot{q}_{ca,out}$ 分别是湿空气带入和带出电堆阴极的热功率, $\dot{q}_{an,in}$ 和 $\dot{q}_{an,out}$ 分别是阳极氢气带入和带出电堆的热功率, \dot{q}_{gen} 是生成物水带出电堆的热功率。

在电堆组成部件中最大的容热部件是双极板, 构成双极板的主要材料是石墨, 因而电堆热容参数可采用石墨, 在考虑冷却流场中有冷却液情况下, 电堆热功率

$$\dot{q}_{st} = (m_{st} C_{p,st} + \rho_{wair} V_{ca} C_{p,wair} + \rho_{wH_2} V_{an} C_{p,wH_2} + \rho_c V_c C_{p,c}) \frac{dT_{st}}{dt} \quad (3-113)$$

其中: m_{st} 是电堆质量, $C_{p,st}$ 是石墨的定压热容, ρ_c 和 V_c 分别是冷却液的密度和体积, ρ_{wair} 和 ρ_{wH_2} 分别是湿空气、湿氢气的密度, $C_{p,wair}$ 、 C_{p,wH_2} 和 $C_{p,c}$ 分别是湿空气、湿氢气和冷却液的定压热容。

3.8 冷却系统

燃料电池冷却系统通常有两种冷却方式: 水冷式和风冷式, 它是保证燃料电池处于适当热平衡状态的必要环节。由于散热量大, 车载燃料电池采用水冷式。水冷式是利用冷却循环水泵提供压力, 迫使冷却液流过电堆内部流场, 带走大量的热量, 然后流过散热器使部分热量传递到周围环境, 实现燃料电池的散热。

水冷式冷却系统包括: 冷却液循环泵、冷却液管路、电堆冷却液流场、散热器、旁路分流阀以及相应的控制器。冷却水泵通常属于离心式水泵, 它为冷却液在冷却系统中循环流动提供动力, 提供的压力需足以克服冷却管路、散热器和电堆内部流场的阻力, 才能保证系统正常工作。在冷却系统中, 系统的散热能力强弱由散热器决定, 换热效率高且结构紧凑的管片式散热器常被用于车载燃料电池中。对于电堆温度, 轴流式散热风扇是主要执行部件, 控制散热风扇提高散热器周围空气流量, 可以增强散热能力。管路和电堆内部流场为冷却液提供流动通道, 使冷却液将电堆的反应热量输送到散热器中。旁路分流阀简称旁路阀, 根据电堆工作状况调整旁路阀门开度, 从而达到调节散热器中冷却水流量, 改变整个系统的冷却强度。旁路阀的作用与内燃机冷却系统的节温器类似, 在燃料电池低温启动阶段, 关闭旁路阀使电堆的温度快速升高, 同时对于不同目标温度, 调节旁路阀可以做到精确控制。

3.8.1 冷却液流场

冷却液流场指电堆内部从冷却液的入口到其出口部分。车载燃料电池系统的冷却液大多采用去离子水, 因而流入冷却液流场的热能 $\dot{q}_{c,st,in}$ 是

$$\dot{q}_{c,st,in} = W_{c,st,in} C_{p,c} (T_{st,in} - T_0) \quad (3-114)$$

其中: $W_{c,st,in}$ 是冷却液流入电堆的流量。

流出冷却液流场的热能 $\dot{q}_{c,st,out}$ 是

$$\dot{q}_{c,sl,out} = W_{c,sl,out} C p_c (T_{sl,out} - T_0) \quad (3-115)$$

其中： $W_{c,sl,out}$ 是冷却液流出的流量。

3.8.2 旁路阀

旁路阀用于调节散热器中冷却液流量，它将冷却液分成两路，一路流入散热器，另一路进入与散热器并联的支路，其信号图如图3-12所示。阀门响应时间比温度响应时间快得多，可以忽略。将流过散热器和支路的冷却液流量看成是阀门开度的线性函数^[95]，即为：

$$\begin{cases} W_{c,rad,in} = k_{bv} W_{c,bv} \\ W_{c,bp} = (1 - k_{bv}) W_{c,bv} \end{cases} \quad (3-116)$$

式中： $W_{c,rad,in}$ 、 $W_{c,bp}$ 和 $W_{c,bv}$ 分别是冷却液流入散热器、支路及旁路阀流量。 k_{bv} 表示阀门开度，取值范围是 $0 \leq k_{bv} \leq 1$ 。

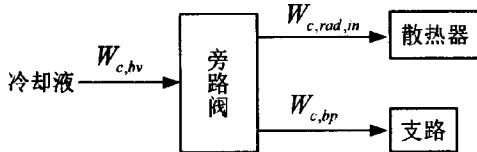


图3-12 旁路阀

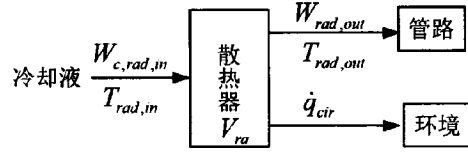


图3-13 散热器

3.8.3 散热器

在燃料电池工作时，电堆中冷却液的压力与反应气体的压力差需要保持在一定的范围。在确定的工作状态下，冷却液的流量变化范围较小。因此调节散热器的工作状态是实现燃料电池温度控制的主要手段。

冷却风扇之所以能改变散热器的散热量，实质上是由于改变散热器周围风速，从而使表面边界层的厚度改变，引起传热效率变化。风速越高，传热效率越好。散热器的散热能力还受到有效散热面积和换热两侧温差的影响。散热器本身的结构，如：材料、肋片数量及其面积、空间位置等，决定其有效散热面积。温差是指电堆的工作温度和环境温度的差值。此外，散热器中冷却液流量也影响其散热能力。

散热器在温度系统中是关键部件，它将电堆产生的大量废热散发到周围环境中去。散热器温度模型包括两部分：一部分是冷却液与散热器之间的能量交换；另一部分是散热器与周围环境的热交换量，其信号图如图3-13所示。假设进入散热器的冷却液流量 $W_{c,rad,in}$ 与流出流量 $W_{c,rad,out}$ 满足相等，有

$$\rho_c V_{rad} C p_c \frac{dT_{rad}}{dt} = W_{c,rad,out} C p_c (T_{rad,in} - k_{bv} T_{rad,out}) - \dot{q}_{cir} \quad (3-117)$$

其中： V_{rad} 和 T_{rad} 分别是散热器的体积、温度， $T_{rad,in}$ 、 $T_{rad,out}$ 分别是流入、流出散热器的冷却液温度， T_{rad} 是二者的均值。 \dot{q}_{cir} 是从散热器传给周围环境的热功率，是环境温度、周围空气流量、冷却液流量和入口温度的函数。

利用理论推导很难确定散热器的热量传递系数, 可通过实验数据建立散热器表面的空气流速和热量传递系数 $h_{rad}(kW/m^2/K)$ 关系^[96], 即:

$$h_{rad} = -1.4495W_{rad}^2 + 5.9045W_{rad} - 0.1157 \quad (3-118)$$

其中: $W_{rad}(kg/s)$ 是散热器表面的空气流量。

散热器的散热量 \dot{q}_{cir} 由散热面积 A_{rad} 、散热系数和散热器与环境温差决定, 即

$$\dot{q}_{cir} = A_{rad}h_{rad}(T_{ra} - T_0) \quad (3-119)$$

散热器风机在额定转速时的效率、全压与流量的关系利用通用特性曲线获得, 若风机的转速不是额定转速, 由实际的转速和流量根据相似理论计算得到额定状态下的流量, 从而得到风机的效率和全压。

3.8.4 各部件阻力

在车载燃料电池系统中, 冷却液在循环泵的作用下流经电堆、散热器和相应管路, 它们产生压降(阻力)等于循环泵提供的压降。

电堆阻力与冷却液流量关系取决于其冷却流场的流道形状和材质。由于流道的复杂性, 难于从理论推导方面建立二者精确的关系, 可以根据实验数据拟合得到。对于BALLARD公司HD6-150kW的燃料电池, 根据文献^[75]提供的数据拟合。

散热器管路压降即水侧阻力是由局部阻力和沿程阻力构成^[97]。沿程阻力 p_{rad1} 是摩擦阻力, 与沿程阻力系数、液体的密度和流量、管路的长度和直径有关, 即

$$p_{rad1} = f \frac{4L_{rad}n_{rad}}{D_e} \frac{\rho_c v_w^2}{2} \quad (3-120)$$

其中: v_w 是管内流量, f 为范宁摩擦因子, L_{rad} 是单根水管长度, D_e 是水管当量直径, n_{rad} 是单根水管根数。

局部阻力 p_{rad2} 由局部的阻力系数、液体密度和流量决定, 即

$$p_{rad2} = \xi \frac{\rho_c v_w^2}{2} n_{rad} \quad (3-121)$$

其中: p_{rad2} 是局部阻力; ξ 是局部阻力系数, 包括了单根管路总的局部损失系数。

由以上两式得到散热器的管路压力

$$p_{rad} = \frac{\rho_c v_w^2}{2} \left(\frac{4fL_{rad}}{D_e} + \xi \right) n_{rad} \quad (3-122)$$

旁路阀的阀门系数调节散热器中冷却液流量, 继而改变水侧总阻力。假设阀门系数是1时的散热器压降是 p_{rad0} , 那么阀门系数是 k_{bv} 时流经散热器的液体流量是原来的 k_{bv} 倍, 由式(3-120)得到此时的管路阻力满足

$$p_{rad} = k_{bv}^2 p_{rad0} \quad (3-123)$$

连接电堆冷却水流场和散热器及循环泵之间管路的阻力 p_{line} 与流量之间 Q_c 满足^[79]:

$$p_{line} = S_p Q_c^2 \quad (3-124)$$

其中： S_p 是阻抗，它与连接管的材质、直径以及是弯曲角度有关。

冷却液循环泵为冷却液在各部件和管路之间流动提供动力，其输出压力为电堆阻力、散热器阻力和管路阻力之和，它的有效功率(输出功率) $P_{pump.out}$ 是^[94]

$$P_{pump.out} = \frac{W_c}{\rho_c} (P_{st,c} + P_{rad} + P_{line}) \quad (3-125)$$

3.9 本章小结

在水冷型燃料电池中，进入电堆的空气和氢气湿度需要达到95%以上。相同湿度的气体，氢气含湿量远大于空气含湿量。气体含湿量随温度降低、压力升高而降低，因而高压和低温可以防止电堆内部膜干燥、脱水。

压缩机的内部结构比较复杂，对其压力、流量和功耗特性曲线数据制成二维表格，然后根据热力学方程校正，再与电机转速方程联合得到其面向控制的模型。

在阴极流体系统中，根据物质守恒和理想气体方程建立了供气管路、电堆和排气管路分布式模型。通过喷嘴方程建立各环节之间压力与流量的关系。在气体扩散层中，建立了氧气浓度分布函数。与压缩机类似，对额定转速下泵与风机能头和效率特性曲线进行拟合，再利用相似定理得到任意转速下的能头和效率，建立了泵与管路模型。

在氢气供应系统中，阳极流体建模与阴极相同。调节阀开度与控制电压成正比，其压力与流量利用喷嘴方程建立；回流泵的压力与流量关系通过曲线拟合获得。

在冷却系统中，散热器是关键部件，其散热量与有效散热面积、空气流量和温度差有关，建立了散热器模型；循环泵是动力源，其提供的压力需足以克服冷却液流场、散热器和相关连接管路阻力；建立了各个部分阻力模型。

第4章 车载燃料电池系统仿真分析

上一章分析了车载燃料电池系统的空气供应、氢气供应和热管理各部分建模，本章对所建模型进行仿真分析，通过改变输入信号研究系统特性。系统仿真分析可以深入了解系统特性，量化物理量之间的耦合关系，为控制器设计和优化提供指导。

4.1 空气供应系统

燃料电池阴极系统中各模块之间的连接如图4-1所示。空气流量信号的传递方向是从压缩机经电堆阴极流场到排气管路；而压力信号由排气管路传递到压缩机。本节对由BALLARD公司Mark902(85kW)燃料电池组成的系统进行仿真，其燃料电池相关参数见表4-1。

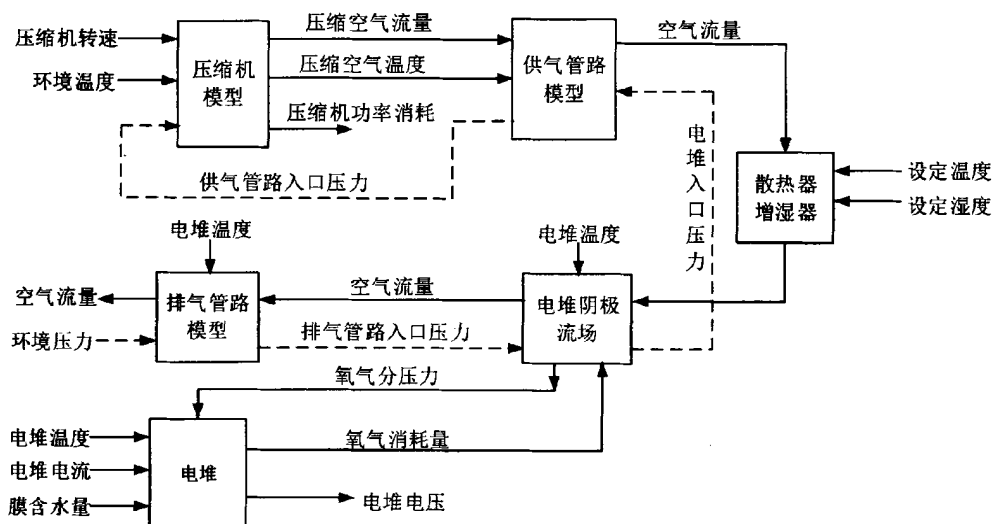


图4-1 阴极系统框图

表4-1 燃料电池阴极系统参数^[21]

含义	值	含义	值	含义	值
膜的类型	Nafion112	电堆阴极流场体积	0.01 m^3	阴极供应管路体积	0.02 m^3
燃料电池单体个数	440	电堆阳极流场体积	0.01 m^3	阴极排气管路体积	0.03 m^3
膜电极有效面积	300 cm^2	膜含水量	9.2	阳极供应管路体积	0.02 m^3
电堆温度	80°C	气体湿度	95%	阳极排气管路体积	0.05 m^3

4.1.1 环境因素对压缩机的影响

影响压缩机工作状态的环境因素主要是环境温度和气压。将环境温度 T_{amb} 分别设为 20°C 、 0°C 、 20°C 和 40°C ，压缩机空气流量 W_{cp} 与出口压力 p_{cp} 仿真结果如图4-2所示。转速和环境压力不变时，对于相同的出口压力，环境温度越低则空气流量越大；若出口流量

不变,环境温度越低出口压力越大。由式(3-16)可知压缩机功耗与环境温度和空气流量乘积 $W_{air} T_{aim}$ 成正比。由式(3-20)得到

$$W_{air} T_{aim} = T_0 \cdot \frac{P_{aim}}{p_0} W_{cp,cal} \tag{4-1}$$

其中流量 $W_{cp,cal}$ 由压缩机转速和压缩比决定。因而在给定的转速和环境压力时,相同的出口压力则压缩机功耗相同,与环境温度无关。环境温度升高,环境压力若不变则需要更多的流量 $W_{cp,cal}$, 由其流量特性图可知此时压缩比较高,需要消耗更多的功耗。

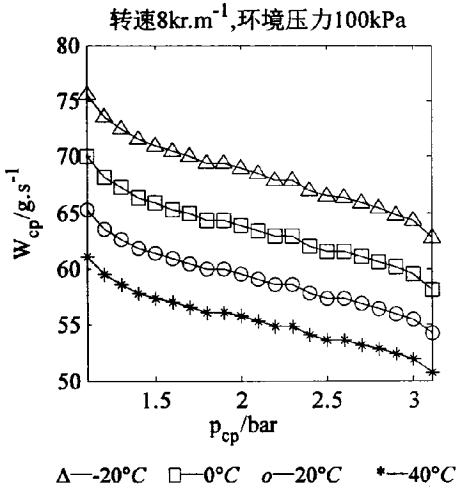


图4-2 环境温度与压缩机流量

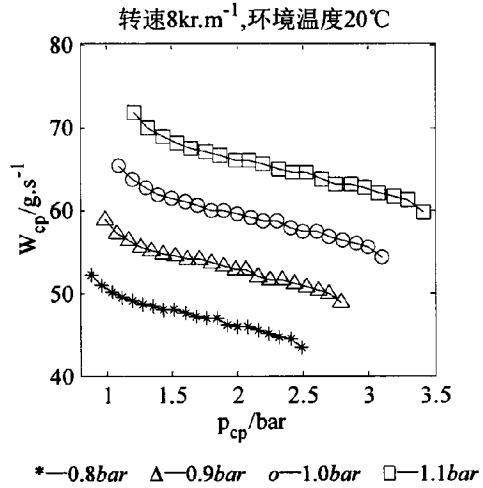


图4-3 环境压力与压缩机流量

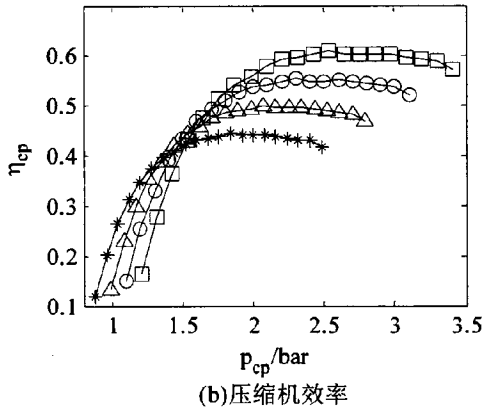
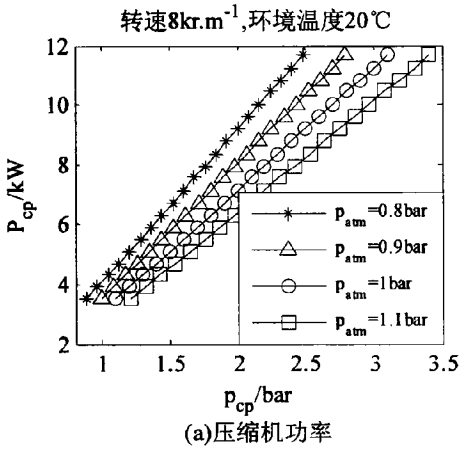


图4-4 环境压力与压缩机功率和效率

将环境压力分别设为0.8bar、0.9bar、1bar和1.1bar,压缩机空气流量与环境压力的仿真结果如图4-3。图中压缩机转速和出口压力不变时,环境压力升高会导致其出口的空气流量增加;若出口流量相同时,环境压力越高压缩比越大,即出口压力越高。环境压力对压缩机功耗与效率的影响如图4-4。在图(a)中出口压力不变时,环境压力越大功耗越小。

图(b)中在出口压力小于1.6bar时,环境压力较小时效率较高;而出口压力高于1.6bar时,环境压力较大时效率较高。

由上述分析可知,压缩机要供应一定流量和压力的空气,环境温度越高其消耗的功率越大;工作环境的海拔越高需要消耗能量越多。在其出口压力和转速不变的情况下,环境大气压力越大,压缩机流量越大。

4.1.2 阴极流体特性

阴极流体特性指压缩机转速、电堆温度对阴极流体工作状态的影响。图4-5为阴极流场压力 p_{ca} 、氧气分压力 P_{O_2} 与压缩机转速关系的仿真结果。压缩机转速变化为:启动时设定为3kRPM,在10s时转速跳变为6kRPM,在20s时转速跳变为9kRPM。仿真中环境状况是标准状况,电堆温度(电堆内部流体及管道温度)为80°C,电堆处于开路。由仿真结果可知,对于确定的环境参数和电堆温度,阴极流场压力和氧气分压力由压缩机转速决定,并且都随着压缩机转速增大而增大。

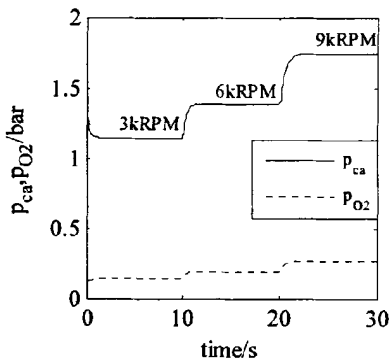


图4-5 阴极流场压力和氧气分压力

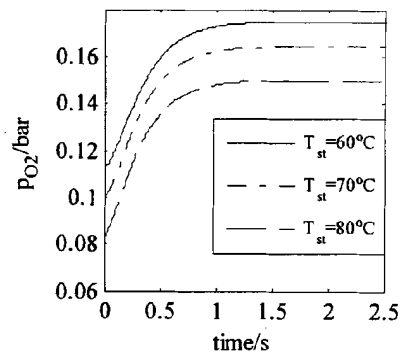


图4-6 电堆温度与氧气分压力

图4-6是氧气分压力与电堆温度的仿真结果。仿真中使用如下的参数:环境状况是标准状况,压缩机转速8kRPM,电堆电流150A,电堆温度分别取60°C、70°C、80°C。仿真结果表明,随着电堆温度升高,氧气分压力相应地降低。温度由60°C为80°C,稳态时氧气分压力变化小于0.04bar。由于压缩机的转速不变,进入电堆的空气流量变化不大,尽管温度升高阴极流场总压力(干空气压力与水蒸气压力之和)升高,但由于水蒸气的压力增长幅度大,因而干空气压力降低,导致氧气分压力随之降低。

4.1.3 压缩机功耗和系统电效率

燃料电池系统工作时,需要一些辅助设备,如压缩机、冷却器、加湿器、冷凝器等,这些辅助设备需要消耗一定的功率,为了描述燃料电池发出的电功率与辅助设备消耗的电功率之间的关系,将燃料电池系统的用电效率 η_{ele} 定义为:

$$\eta_{ele} = \frac{P_{net}}{P_{st}} = \frac{P_{st} - P_{aux}}{P_{st}} \tag{4-2}$$

其中： P_{st} 是电堆发出的电功率； P_{aux} 是辅助设备的功耗； P_{net} 是电堆输出的净功率，它等于电堆发出功率减去辅助设备功耗，即 $P_{net} = P_{st} - P_{aux}$ 。

在这些辅助设备中，压缩机的功耗 P_{cp} 最大。忽略其它设备的功耗，燃料电池系统的用电效率表示为：

$$\eta_{ele} = \frac{P_{st} - P_{cp}}{P_{st}} \tag{4-3}$$

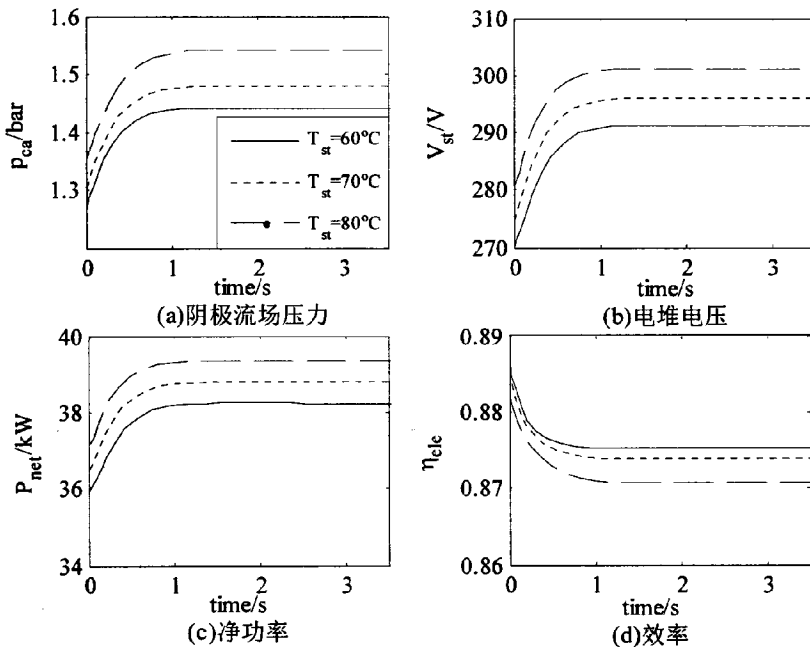


图4-7 不同温度下系统特性

在图3-4所示的压缩机特性图中，高转速区域效率较高，然而转速较高需要消耗更多的能量，这时可能会引起电池系统电效率下降。

电堆电流是150A，转速是8kRPM，环境状况是标准状况，环境湿度30%，加湿器设定的湿度是95%，电堆温度分别是60°C、70°C和80°C时，阴极流场的氧气分压力、电堆电压、净功率和用电效率如图4-7所示。图(a)中流场压力随温度升高而升高。由于压缩机转速恒定(即供给的空气流量不变)，若温度升高，则阴极入口压力增大，致使流场内部压力升高。图(b)和图(c)中电堆电压和净功率亦随温度升高而升高。电堆电流不变时，温度升高电压升高，电池发电功率升高，而压缩机转速不变即功耗不变，因而净功率随升高而升高。图(d)中效率随温度升高降低，尽管净功率随温度升高而升高，但是由于电池发电功率增大较多，因而效率降低。

内燃机的功率优化可以通过改变汽油和空气的比值。与其类似，讨论燃料电池系统

功率常常需要与过氧比联系在一起^[8],过氧比 λ_{O_2} 是指压缩机供给电堆的氧气流量 $W_{O_2,ca,in}$ 与电堆输出电流所需的氧气流量 $W_{O_2,rec}$ 之比,即

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2,ca,in}}{W_{O_2,rec}} \quad (4-4)$$

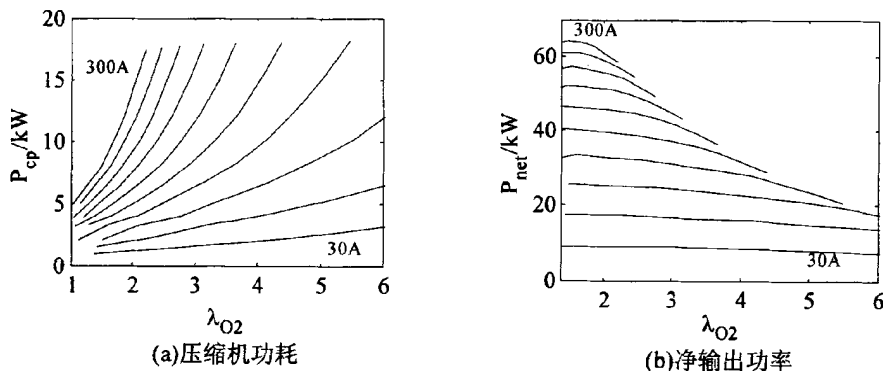


图4-8 功率特性

令电堆电流从30A升到300A,电堆温度取80°C,环境状况是标准状况下,环境湿度30%,压缩机功耗和电池净输出功率随过氧比的变化如图4-8所示。图(a)中电堆电流比较小时,例如30A,电堆需要的空气量小,压缩机供给的空气量自然少,且输出的压缩空气压力较低,压缩机功耗较小;而电堆输出较大电流时,例如300A,压缩机必须供给较多的空气流量,且输出压力较高的压缩空气,这时压缩机需要消耗较大的功率。在电流较大区域曲线较陡,过氧比变化对压缩机功耗影响较大,电流越大影响越严重。图(b)中电堆电流较小时,电池净功率几乎不会随着过氧比变化。压缩机的空气流量增加使功耗增加,电堆内部的压力增大,同时质子交换膜附近的氧气分压力增大,电堆端电压增大,产生的电功率也增大,这两部分的增量相差不大,导致电池净功率几乎不变。然而,电堆电流较大时(在90A到150A),增加过氧比,压缩机功耗的增加大于电堆电功率的增加,净输出功率单调且微弱下降。

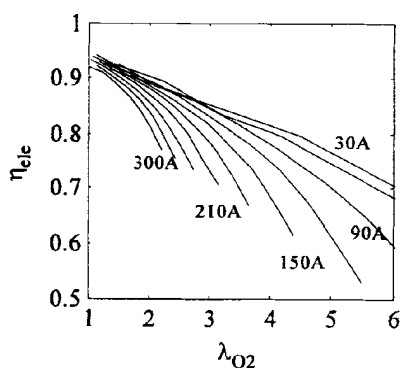


图4-9 燃料电池用电效率

当电堆电流大于180A时,随着过氧比的增加,净功率先是逐渐增长,然后再衰减,电流越大越明显。电流超过210A时,在高过氧比区域(大于2),净输出功率随过氧比增加急剧下降。

图4-9是电池用电效率特性图。图中在电堆电流不变的情况下,用电效率随过氧比增大而单调下降,电流小时下降缓慢,大时下降较快。在电流不变时,增大过氧比,由图4-8(b)可知净功率变化不大(电流较低时几乎不变),电堆空气流量增大使得电堆发出的电

功率增大, 电池用电效率降低。与压缩机功耗类似, 电堆电流较大时, 用电效率随过氧比增加衰减较快。

在图4-8和图4-9中电堆电流较大时, 由于受到压缩机的最大输出气体流量的限制, 所能达到的最大过氧比逐渐减小, 在300A时能达到的最大过氧比是2.2。

4.1.4 各部件压力与流量

电堆电流和压缩机转速影响空气流道各处压力与流量, 本节通过仿真分析各处流量和压力的动态和静态关系。

电堆电流是200A, 压缩机转速是8kRPM, 其它参数与图4-8相同, 各处气体压力和空气流量如图4-10所示。图(a)中稳态时供气管路的压力比阴极流场高0.18bar, 阴极流场比排气管路高约0.3bar。图(b)中压缩机气体流量低于阴极入口气体流量。压缩空气经降温和加湿后进入电堆, 压缩机流量必然小于阴极流场入口流量。阴极流场中部分氧气参加反应生成水, 使流场中气体湿度达到100%, 因而流场出口流量大于入口的流量。图中显示各处压力和流量的动态特性近似, 前一级比后一级的动态特性稍快。

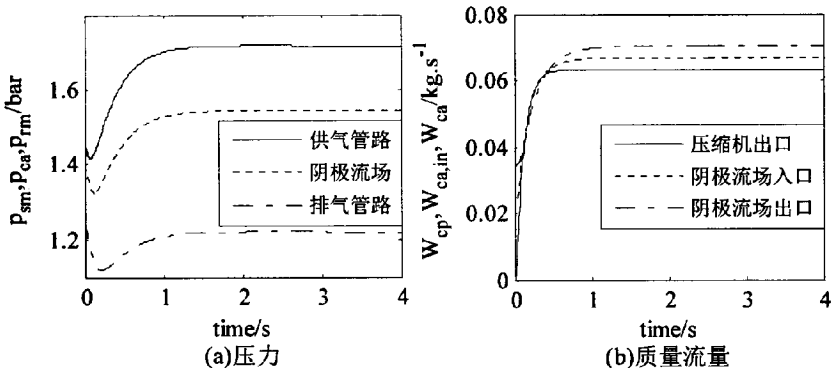


图4-10 燃料电池的阶跃响应

压缩机转速8kRPM保持不变, 电堆电流是一阶跃序列, 阴极系统各处压力与流量波形如图4-11和图4-12所示。图4-11(a)电堆电流分别在 $t=4s$ 、 $8s$ 、 $12s$ 和 $16s$ 发生了四次跳变。图4-11(b)中压缩机功耗几乎保持不变, 其原因是转速保持8kRPM不变, 压缩机空气流量几乎不变(见图4-12(b)), 出口气体压力变化范围很小(见图4-12(a)), 从而使其功耗几乎不变。电流跃变后, 电池输出电压发生变化, 引起电功率改变, 使净输出功率随之变化。图4-11(c)中过氧比随电流增大而减小, 这是由于压缩机的供气量几乎保持不变, 而电流增大时需要的氧气流量更多。此外, 压缩机转速不变使得电流跳变时过氧比不存在过渡过程。图4-11(d)是用电效率图。电流大时用电效率高, 此时过氧比小(见图4-11(c)), 电流小时用电效率低, 而过氧比大, 因此过氧比小时效率高, 过氧比大时效率低。

电堆电流变化时, 过氧比瞬间发生改变, 而功率和效率有一个很短的过渡时间(约1s)。电流跳变时, 压缩机出口压力改变微弱, 其功耗几乎不变; 而电堆内部氧气量的改变会

影响氧气分压力，使得电堆电压变化，产生的电功率改变；这样系统净功率变化，随之效率亦变化。

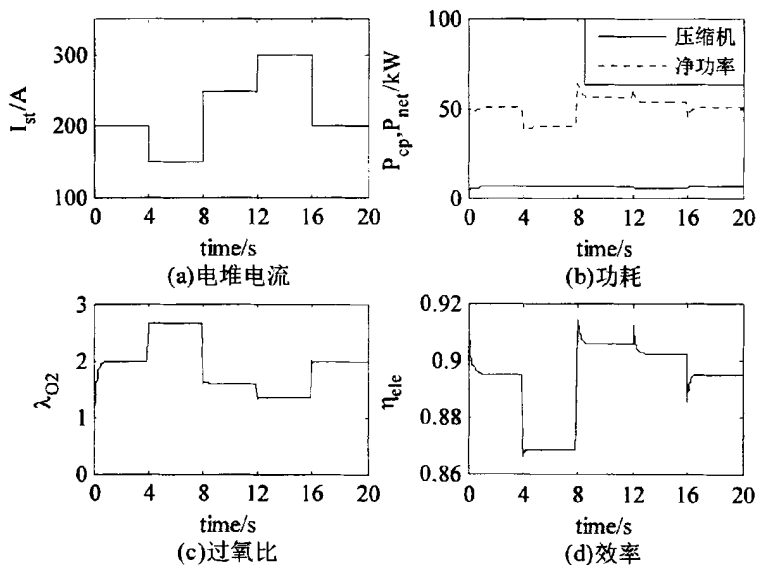


图4-11 电流跃变时系统响应

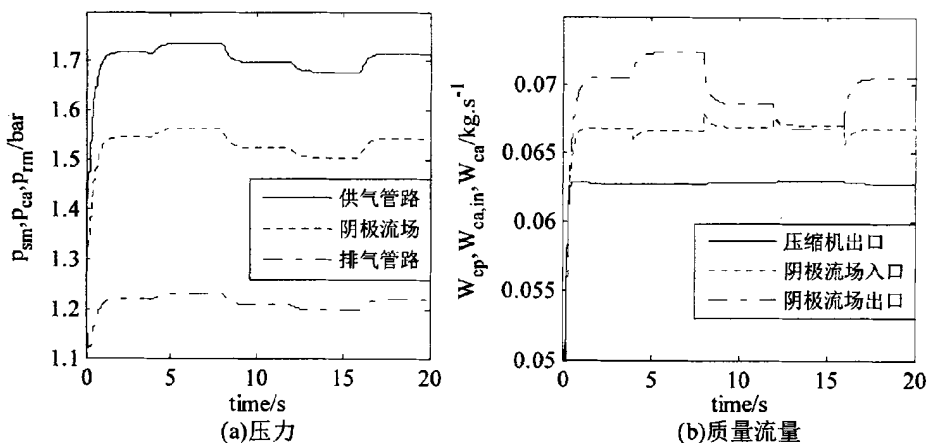


图4-12 电流跃变时压力和流量

图4-12是电流跳变对各处压力和流量的影响。图(a)中三个压力除数值不同外变化规律一致；图(b)中由于压缩机转速不变，其出口流量几乎不变，而阴极出口流量受电流影响变化最大。

转速和电流都发生一系列跃变时，电堆电流依旧如图4-11(a)所示，而转速波形如图4-13(a)，功率、过氧比和效率如图4-13中的(b)、(c)和(d)所示。在图(b)中净功率曲线和图(c)效率曲线中在[0,2s]和[8s,12s]区间以及13s附近出现缺失，原因是此区间过氧比小于1(见图(c))，压缩机供给的空气流量小于相应电流所需的流量，电堆不能发电。建模时将电堆电流作为输入量，阴极流场氧气分压力由供给氧气流量、消耗氧气流量和排出的氧

气流量决定，在过氧比小于1时，阴极流场的氧气分压力为负值，由式(2-13)可知电堆开路电势不存在，因而电堆不能发出电功率。在实际工作中，这种情况会引起电堆电压急剧降低，质子交换膜局部产生发热点甚至燃烧^[7]。为延长电池寿命，电池工作时尽可能避免发生“氧饥饿”现象。

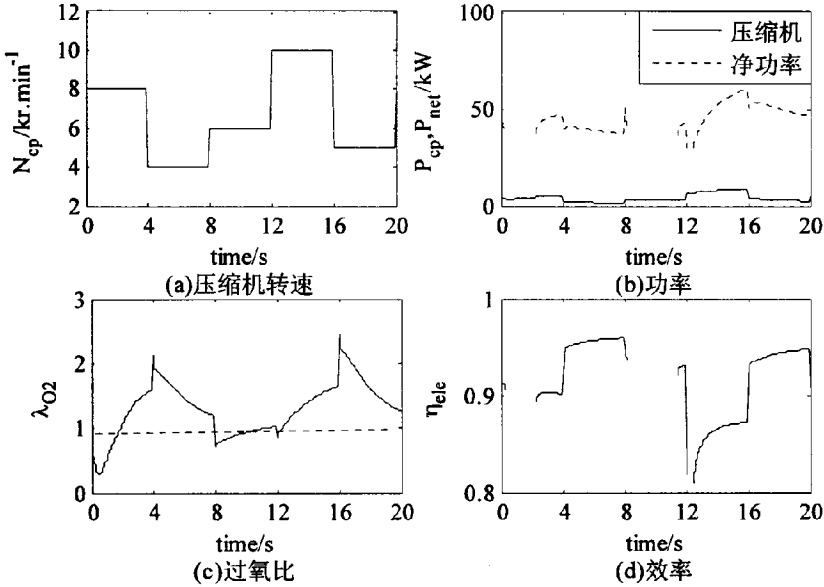


图4-13 转速、功率、过氧比和效率

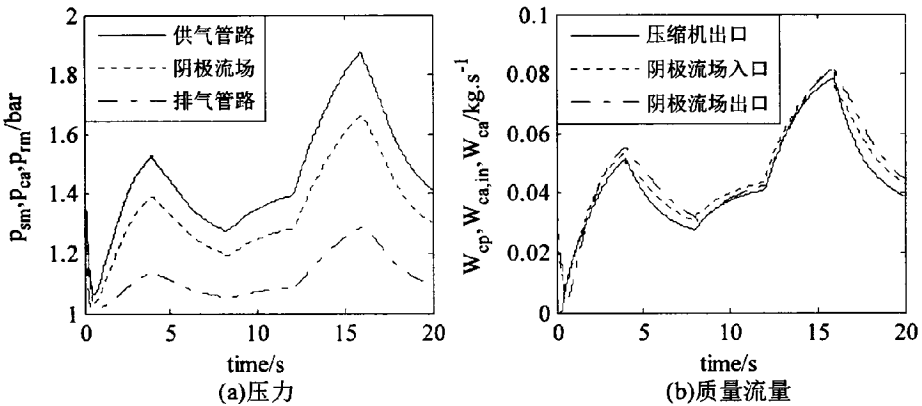


图4-14 阴极系统各处的压力和流量

在转速和电流跃变时，阴极系统各处的压力和流量的波形如图4-14所示。图(a)中供气管路、阴极流场和排气管路压力波形相似，且波形中‘拐点’同步，距离压缩机近的压力高。图(b)中压缩机流量、阴极流场入口和出口流量波形也几乎相似。

4.1.5 气体扩散层

根据第三章3.3.5节可知扩散层中气体浓度与扩散层厚度、扩散系数、阴极流场压力

及温度、电堆电流有关。取电堆温度 80°C ，压力由 1.2bar 变化至 3bar 时，扩散系数变化如图4-15所示。图中随着气体压力增加扩散系数由 $1.2 \times 10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 下降 $0.7 \times 10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

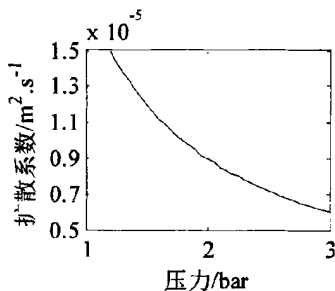


图4-15 扩散系数与阴极压力

在气体扩散层中(流场作为起点)在 0.3δ 、 0.7δ 和 δ 处(催化层)，流场压力 2.0bar 时氧气浓度如图4-16(a)所示，氧气浓度随着与流场距离增大而减小。在 0.7δ 处氧气浓度随流场压力变化如图4-16(b)所示，压力升高则浓度升高。在阴极压力 3bar 、电堆温度 80°C 、电流密度 $1\text{A}/\text{cm}^2$ 时，催化层处的沿氧气

浓度和扩散流量如图4-17所示。图(a)中氧气浓度开始时上升很快， $t=0.02\text{s}$ 时升到稳态值的 89.72% ；以后上升很慢， $t=0.1\text{s}$ 时升到稳态值的 96.52% ，随后逐渐逼近稳态值。开始时催化层浓度低，氧气扩散速度快，随着浓度升高，气体扩散速度越来越慢，浓度的增长也越来越慢。图(b)中扩散流量的过渡时间不到 0.5s 。

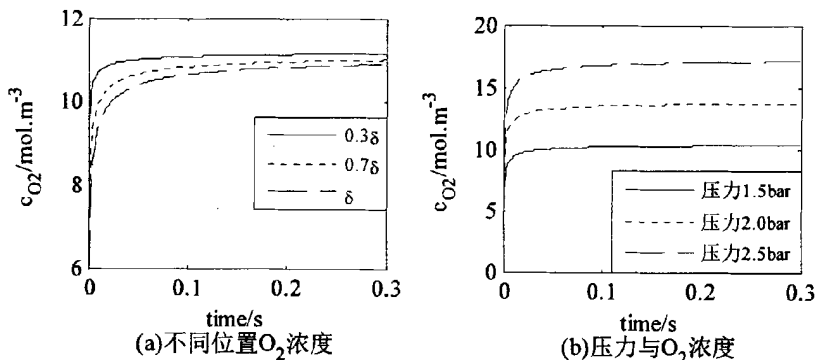


图4-16 氧气浓度

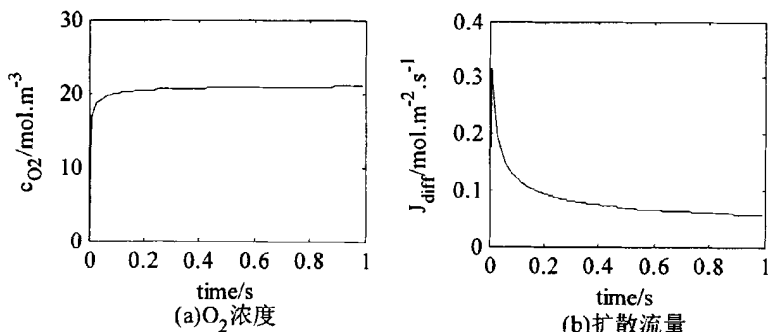


图4-17 催化层的氧气浓度与扩散流量

4.2 水泵与风机

根据第三章3.4节分析以上分析，对泵与风机建模方法如下：

(1)确定泵的额定流量 Q_0 和额定转速 N_0 ；

- (2)用多项式拟合表征能头、效率特性的函数 f_1 、 f_3 ;
- (3)在给定转速 N 下, 利用相似理论计算体积流量 Q ,

$$Q = \frac{N}{N_0} Q_0 \tag{4-5}$$

- (4)根据式(3-83)和式(3-84)计算泵的能头有效功率 P_P 、效率 η_P , 然后得到输入功率 P_D ;
- (5)在第3步中, 泵转速 $N(RPM)$ 的确定与之前压缩机转速确定方法类同, 即

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_D}{\omega} \tag{4-6}$$

其中: ω 是泵的旋转角频率(rad/s), $\omega = 2\pi N / 60$; P_m 是原动机输入的功率。

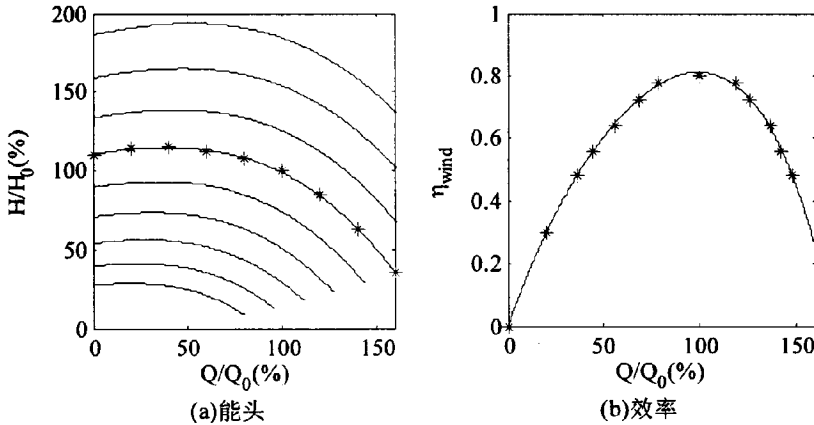


图4-18 风机与泵的通用曲线

泵与风机额定转速时全压与流量的关系根据通用特性曲线^[94]拟合, 即:

$$\frac{H}{H_0} = a_4 \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^4 + a_3 \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^3 + a_2 \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2 + a_1 \left(\frac{Q}{Q_0}\right) + a_0 \tag{4-7}$$

其中: H 是风机实际的全压, H_0 是额定全压, Q 是风机实际的空气流量, Q_0 是额定流量, $a_0 \sim a_4$ 是拟合系数, 数值分别是: $a_0 = 1.0130 \times 10^2$ 、 $a_1 = 1.8882 \times 10^{-1}$ 、 $a_2 = -1.3939 \times 10^{-3}$ 、 $a_3 = -1.5212 \times 10^{-5}$ 、 $a_4 = -1.0016 \times 10^{-8}$ 。

在额定转速时效率 η_{wind} 依旧通过通用特性曲线^[94]拟合, 即:

$$\eta_{wind} = c_4 \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^4 + c_3 \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^3 + c_2 \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2 + c_1 \left(\frac{Q}{Q_0}\right) + c_0 \tag{4-8}$$

其中: $c_0 \sim c_4$ 是拟合系数, 数值分别是: $c_0 = 2.7064 \times 10^{-5}$ 、 $c_1 = 1.7538 \times 10^{-2}$ 、 $c_2 = -1.4567 \times 10^{-4}$ 、 $c_3 = 8.2609 \times 10^{-7}$ 、 $c_4 = -3.5322 \times 10^{-9}$ 。

由式(4-8)和(4-7)得到的泵与风机的通用曲线如图4-18所示, 图中'*'是在额定转速下的拟合数据。

车载燃料电池的散热器工作时必须借助于风机, 风机为散热器周围的空气流动提供动力。风机出口的动压 $p_{wind,d}$ 与空气流量 W_{wind} 、风机出口的横截面积 A_{wind} 满足^[94]

$$W_{wind} = A_{wind} \sqrt{2p_{wind,d} \rho_{air}} \quad (4-9)$$

风机电压阶跳变时(图4-19(a)), 风机的转速、动压和空气流量的变化如图4-19(b)、(c)和(d)所示。图中转速、动压和空气流量的动态特性相同, 过渡过程时间是2s。

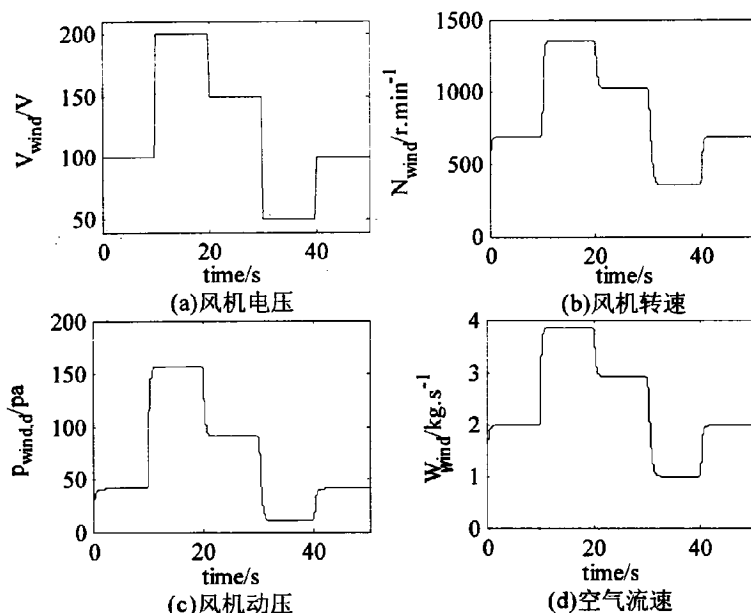


图4-19 风机电压、转速、动压和空气流量

4.3 氢气供应系统

燃料电池的氢气供应系统建模方式与空气系统相同, 且各部分之间联系也与空气系统相同, 如进气管道与阳极流场、阳极流场与排气管道之间, 它们各部分输出的流量与上游压力、下游压力之间的关系都采用喷嘴流量方程。阳极系统信号流图如图4-20所示。图中实线代表该模块输出流量, 虚线代表该模块内部压力。阳极系统建模数据使用BALLARD公司Mark902燃料电池, 具体参数值如表4-2所示。

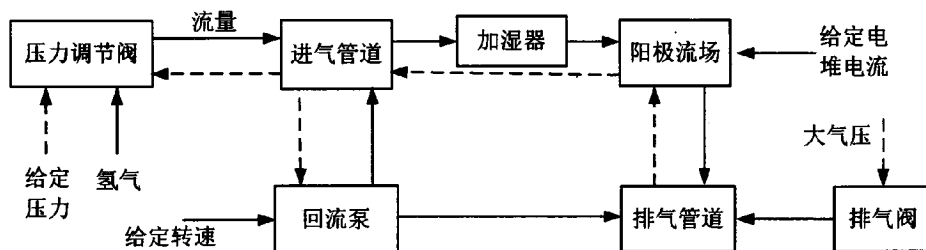


图4-20 阳极系统信号流图

改变压力调节阀的电压、回流泵转速和排气阀的开度, 调节进气管道压力和流量, 使其压力高于阴极入口压力0.2bar。在电堆电流是200A, 排气阀开度是1, 压力调节阀的电压是2V(最大电压5V)时, 回流泵转速是300r/min, 时间常数取0.3s, 各处的流量和压力

仿真结果如图4-21所示。图(a)中阳极流场气体流量在[0,1.5s]区间的抖动是由仿真时初始条件的设置所导致。图(b)中各部分压差大约0.2~0.3bar左右。阳极系统的过渡时间大约5s。

表4-2 车载燃料电池参数^[21]

名称	值	名称	值
氢罐压力	3bar	电堆阳极流场体积	0.005m ³
电堆温度	80°C	阳极供气管道体积	0.01m ³
膜电极有效面积	300cm ²	阳极排气管道体积	0.005m ³

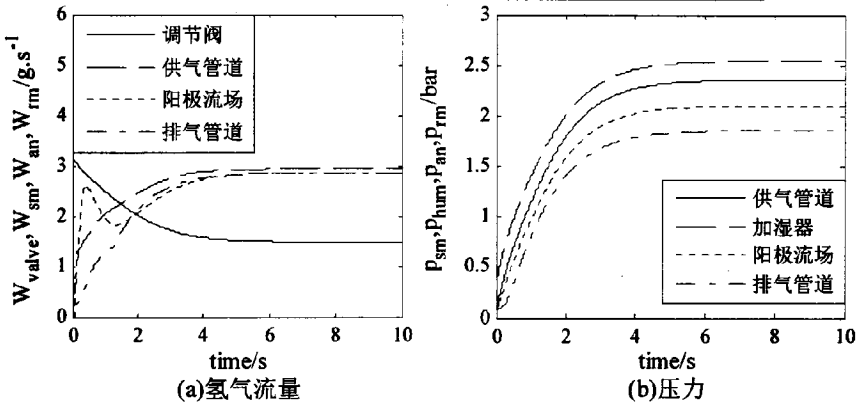


图4-21 阳极各处气体流量和压力

将电堆电流取200A，改变排气阀开度、回流泵转速、调节阀电压，稳态时阳极流场入口气体流量和压力如表4-3所示。由表可知，这三个量的改变都可以调节阳极流场入口气体流量，但排气阀调节能力较弱，而回流泵转速调节能力强；至于阳极流场入口压力，回流泵转速改变几乎不影响它，排气阀开度起到微调的作用，主要还是通过调节阀来调节。

车载燃料电池中氢气供给的方式通常有三种^[98]：(1)直通式(Flow-through Mode)。氢气从电堆的阳极流场入口进入从出口排出，这种方式与空气供应类似。(2)死结式(Dead-end Mode)。在阳极流场出口端安装一个排气阀，每隔一定时间开通一次。(3)循环式(Recirculation Mode)。从电堆中流出的未参加反应的氢气，通过回流泵重新被送回到阳极流场入口，准备再次利用。直通方式会浪费大量的氢气，因而很少采用。死结方式常在空冷型燃料电池中采用^[99]，不同结构电池的排气时间和周期都有差别。间隔排气会使阳极流场中的压力波动，并使化学反应产生的电压波动，波动的幅度和频率受排气时间和其周期影响^[100]。文献[101]对800W燃料电池实验测试，建议排气时间小于500ms，排气流量大于2.2SLPM/cell，排气周期是2300A·s。在大功率水冷型燃料电池中，氢气供给常常采用循环方式。为了更有效的排出阳极流场中水蒸气，本文将第二种方式加入，即在电堆的阳极排气端加一排气阀。文献[101]中电池的额定电流是75A，本文研究的燃料电池额定电流是300A，故排气周期取9600A·s。

表4-3 不同条件下阳极流场入口流量和压力

调节阀电压 (V)	回流泵转速 (r/min)	排气阀开度	阳极流场入口	
			气体流量(g/s)	压力(bar)
0.8			2.68	1.985
1.2	300	1.0	2.93	2.361
1.8			3.13	2.634
	200		2.50	2.334
1.2	300	1.0	2.93	2.361
	450		3.34	2.385
		0.4	2.82	2.489
1.2	300	0.7	2.93	2.361
		1.0	3.00	2.269

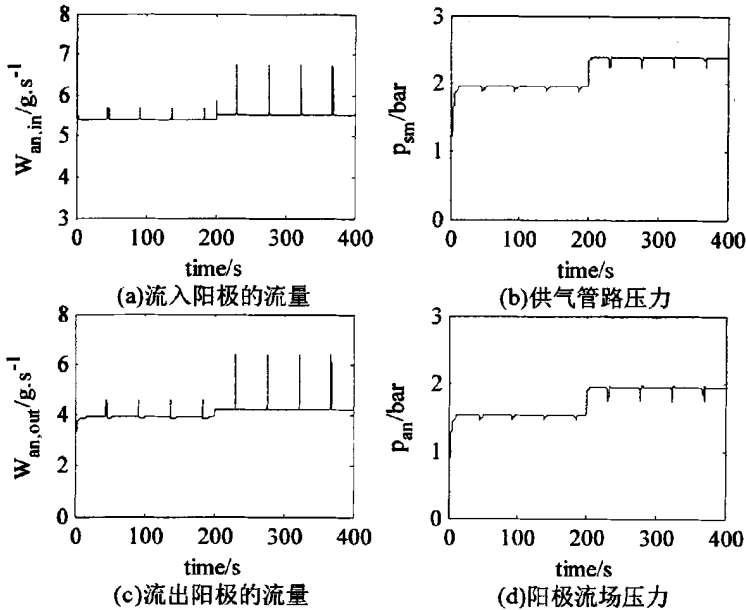


图4-22 周期排气时流量和压力

令电堆电流是200A、温度是70°C，回流泵转速是1000r/min，调节阀电压初始值是0.8V，在 $t=200s$ 时跳变为1.8V。排气周期是 $9600/200=48s$ ，每次排气时间500ms。供气管路的压力、阳极压力和进出流场的流量如图4-22所示。图中调节阀开度增大时，各处流量和压力都增大；通过图中‘毛刺’长短可知，每个排气期间开度大时流量和压力的波动大。分析数据可知，流入阳极流场的流量相对波动(图(a))小于其流出的流量相对波动(图(c))，流出流量受排气的影响较大。同样阳极流场与排气管路相邻，其压力(图(d))比供气管路压力(图(b))受较大影响。

表4-4 不同排气时间下的流量和压力

排气时间(s)	阳极流场			排气管路压力(bar)
	流入流量(g/s)	流出流量(g/s)	瞬间压降(bar)	
0.1	0.917	2.011	0.103	1.541
0.2	1.079	2.011	0.150	1.541
0.3	1.081	2.011	0.180	1.541
0.4	1.081	2.011	0.201	1.541
0.5	1.081	2.011	0.218	1.541

车载燃料电池工作时，阳极入口压力保持在比阴极入口压力高0.2bar。阳极流场压力高于阴极压力，便于水合氢质子通过质子交换膜。尾部的间歇排气，会使得阳极流场的压力出现向下的‘尖峰’，压力瞬间降落。从维护电池的性能来说，这个压降不应超过0.2bar，即保持膜两端的阳极压力高于阴极。排气时的流场压降与排气阀开度、排气管路的压力、排气时间长短有关。排气阀开度小、管路压力低、排气时间短，压降越小，反之压降越大。排气阀开度是1、回流泵转速1000r/min、电堆电流200A、调节阀电压1.5V，排气时间与压降关系如表4-4所示。表中排气时间从0.1s变化到0.5s时，流入、流出阳极流场流量几乎不变，而流场瞬间压降变化；当排气时间大于0.4s时，其值超过0.2bar。排气管路稳态压力1.541bar一直不变，如果这个压力上升，相应的排气时间要小于0.4s，否则阳极流场瞬间压降会大于0.2bar。

4.4 热管理系统

4.4.1 水平衡

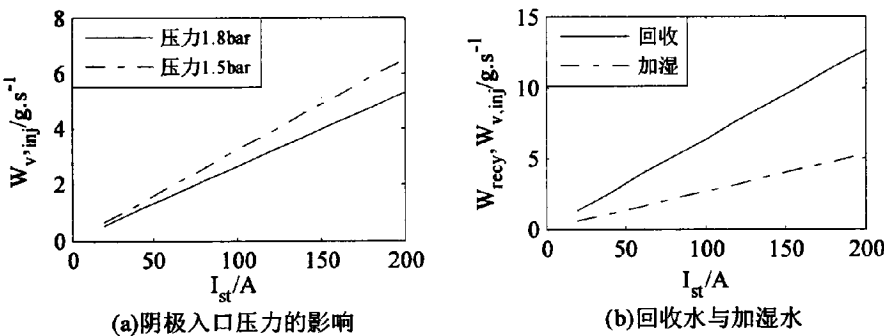


图4-23 电堆加湿水分

在标准状况下，空气湿度取20%，电堆入口气体温度取60°C，阴极入口压力分别取1.5bar和1.8bar，阳极入口压力高于阴极0.2bar，氢气当量系数取1，氧气的过氧比取2，将进入电堆气体(空气和氢气)加湿到95%，假设初始氢气为干氢气。电堆电流与加湿水分之间的关系如图4-23(a)所示。在图(a)中加湿水分随电堆电流呈正比的关系，电流越大每

秒加湿所需水越多。电流越大所需的空气和氢气越多,将这些气体加湿到理想湿度所需的水分越多。阴极入口压力与加湿水分呈反比,压力大加湿水分少。这是因为水蒸气的饱和压力随气压的增大而减小导致的。图(b)是回收的水与电流之间的关系,参数选取与图(a)相同。冷却后的温度与压力分别取环境温度和大气压。从图中看出,与加湿所需水分一样,随着电流增大回收的水越多,并且不论电流大小回收的水总大于加湿的水,因此将反应生成的水回收后用于加湿不需要另外加水。

4.4.2 电堆、管路和散热器阻力

在温度系统中,冷却水由水泵驱动,流经电堆内部的冷却流场后,吸收化学反应产生的热量且温度升高;再流入散热器,释放热量并温度下降,然后流回到循环泵。

电堆流场的结构和形状决定冷却水阻力。对于BALLARD公司HD6-150kW的燃料电池,根据文献[75]提供的数据进行拟合得到

$$p_{st,c} = c_{3,st}Q_c^3 + c_{2,st}Q_c^2 + c_{1,st}Q_c + c_{0,st} \quad (4-10)$$

式中 $p_{st,c}(mbar)$ 和 $Q_c(LPM)$ 分别是冷却流场的压力和流量,且流量小于等于330LPM。 $c_{0,st} \sim c_{2,st}$ 是拟合系数,数值分别是 $c_0 = 6.7807 \times 10^{-1}$ 、 $c_1 = 1.5864$ 、 $c_2 = 7.7398 \times 10^{-3}$ 、 $c_3 = 2.2126 \times 10^{-7}$ 。通过拟合得到电堆压降和冷却液流量的波形如图4-24所示。

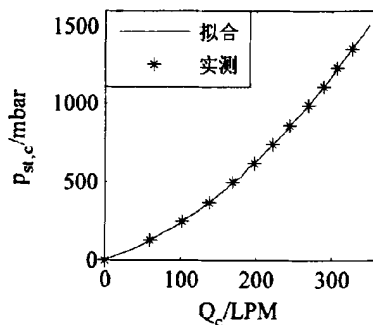


图4-24 电堆冷却液流场阻力

管路和散热器的阻力计算是将整个冷却系统分成若干部分,在每个部分中,按照串联支路阻力相加、并联支路流量相加的原则^[102]计算其阻力,然后将每一部分连接在一起。假设管路和散热器的阻力满足线性,利用文献[102]中散热器规格参数,由式(3-124)得到

$$\begin{cases} p_{line} = S_{p,line}Q_c^2 \\ p_{rad} = S_{p,rad}Q_c^2 \end{cases} \quad (4-11)$$

其中: p_{line} 和 p_{rad} 分别是管路、散热器压力, $S_{p,line}$ 和 $S_{p,rad}$ 分别是它们的阻抗, Q_c 是流量。这里阻抗 $S_{p,line} = 2.1422 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-7}$ 、 $S_{p,rad} = 8.9018 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-7}$ 。

水泵电压取阶跃跳变的波形(如图4-25(a)),水泵的转速、功率和冷却液流量分别如图4-25(b)、(c)和(d)。转速和流量随泵电压增大而增大、减小而减小。当电压向下跳变时,输入功率的暂态过程出现负值,此时负载转矩大于电磁转矩,电机处于发电状态。冷却液流过各部件时的压力变化如图4-26所示。相同流量时,电堆的阻力几乎是管路和散热器阻力的2倍。转速、功率、流量和压力的过渡过程都是4s。

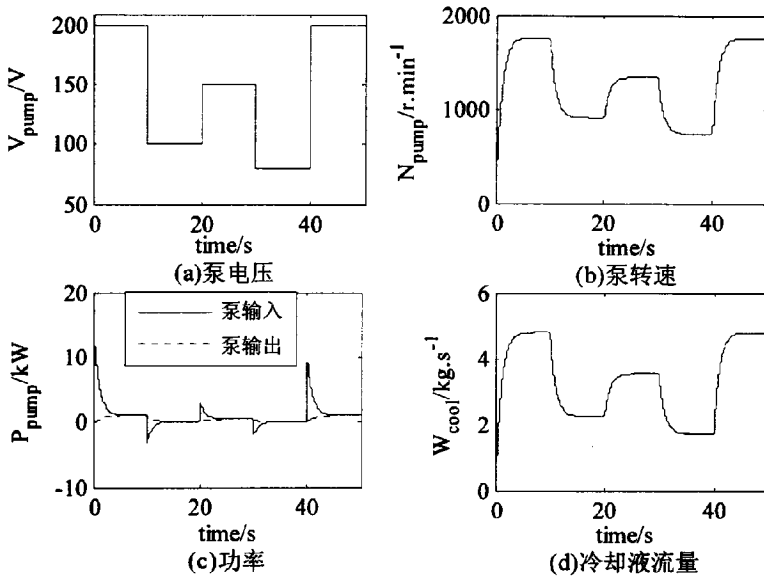


图4-25 冷却系统阶跃响应

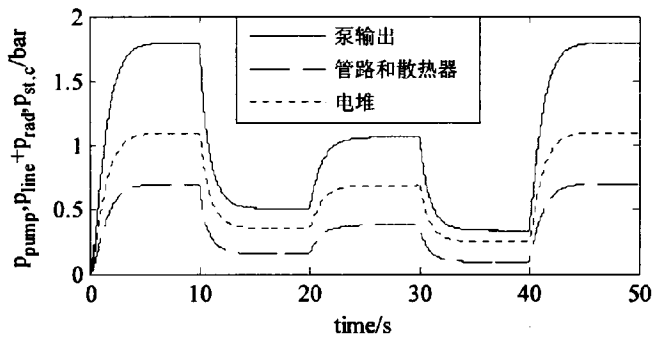


图4-26 冷却系统压力

4.4.3 模型验证

对BALLARD公司HD6-150kW燃料电池的热管理系统进行建模，建模中使用的数据来自于文献和BALLARD公司产品资料^[75, 101]，其燃料电池相关参数见表4-5。

对HD6-150kW的机车燃料电池系统进行测试，得到电堆电流、电压、冷却液流量和电堆进口、出口温度波形如图4-27所示。图中 $t > 1100s$ 以后，电堆电流为0，由于电堆流场还有反应物，电化学反应还在进行，电堆电压不会瞬间为0，而是逐渐降为0。将电堆电流和冷却液流量测试波形作为模型的输入数据，进行仿真实验后所得的电堆电压、进口、出口温度的波形如图4-28所示。

在电堆电流关断后($t > 1100s$)，电堆内部阳极流场和阴极流畅压力逐渐减弱，因而电堆电压逐步降低(图4-27(c))，散热器风机停止工作，电堆的入口和出口温度保持不变(图4-27(d))；仿真中是将电堆电压直接置0(图4-28(a))，而散热器没有停止工作，电堆温度逐

渐下降(图4-28(b))。在 $50s < t < 1100s$ 区间理论分析得出,两个图中相对应的波形变化规律、数值一致,因而本文所建的电堆及散热器模型能反映实际系统的特性。

表4-5 燃料电池热管理系统参数

含义	值	含义	值
燃料电池单体个数	778	电堆冷却液流场体积	$0.01258m^3$
膜电极有效面积	$300cm^2$	散热器 冷却液体积	$0.01m^3$
干电堆的质量	$117.4kg$	散热器 有效面积	$0.8m^2$
冷却液	额定功率	额定流量	$11682m^3/h$
	额定转速	风机 额定风压	$1186Pa$
循环泵	额定流量	额定转速	$1450 RPM$

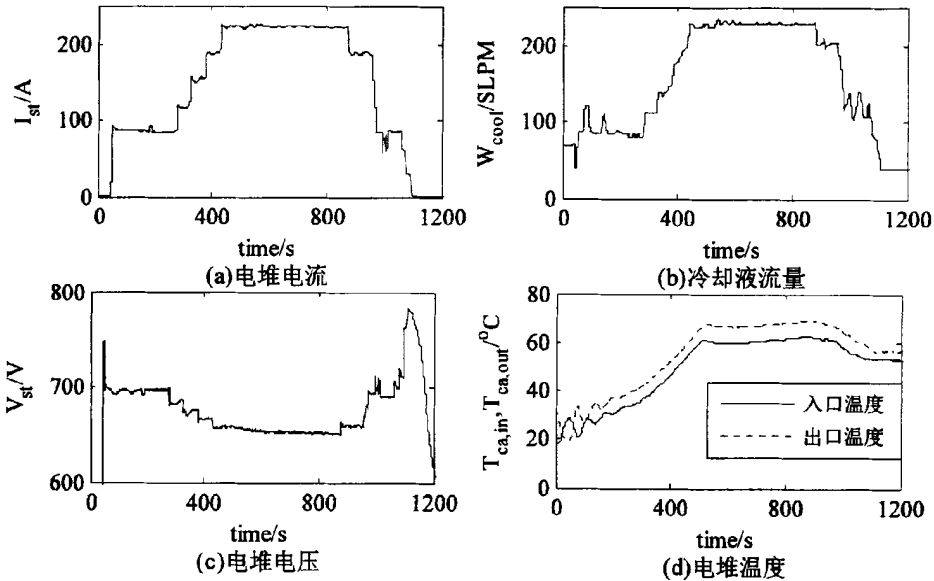


图4-27 HD6-150kW系统测试波形

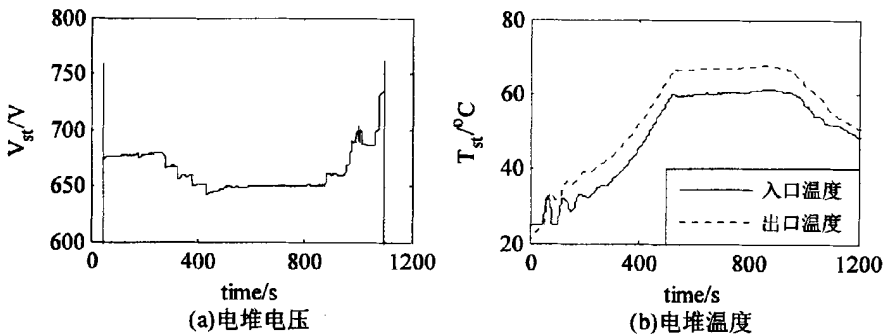


图4-28 HD6-150kW模型仿真波形

4.4.4 功耗分析

车载燃料电池温度系统是一个三个输入(散热器风机电压 V_{wind} 、循环泵电压 V_{pump} 、旁路阀门开度 k_b)两个输出(电堆入口 $T_{st,in}$ 和出口温度 $T_{st,out}$)的系统,系统结构框图如图4-29所示。为了研究辅助系统功耗问题,分别改变三个输入信号,通过仿真讨论风机和循环泵功耗的大小。仿真时电堆电流 I_{st} 取200A。

循环泵电压是300V,散热器风机电压是200V,旁路阀门开度分别是1、0.7和0.3,仿真结果如表4-6所示。电堆温度是指电堆入口和其出口温度的平均值。泵和风机的能耗是指电堆温度从环境温度升到稳态值的90%时泵和风机消耗的能量。稳态效率指电堆电功率减去循环泵和风机功率后与电功率之比。

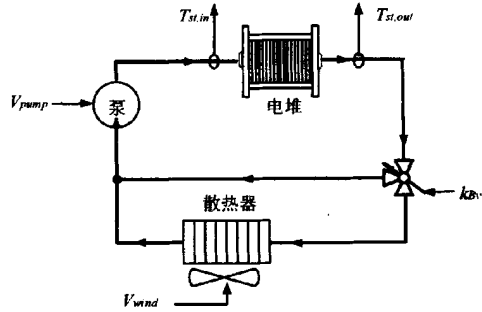


图4-29 温度系统结构

表4-6 不同阀门开度仿真结果

阀门开度	电堆温度 (°C)	温度差 (°C)	泵功率 (kW)	泵能耗 (MJ)	风机功率 (kW)	风机能耗 (MJ)	电堆功率 (kW)	稳态效率 (%)
0.3	77.28	4.23	3.617	1.338	3.451	1.277	120.21	94.12
0.7	71.02	5.34	3.028	1.029	3.451	1.173	119.07	94.56
1.0	69.44	6.42	2.620	0.875	3.451	1.152	118.81	94.89

从表4-6看出阀门开度能够调节电堆温度和温度差。原因是调节阀门开度改变散热器中冷却液的流量。阀门开度越小,电堆温度越高且温差越小。由于风机电压没有改变,风机功率在三种情况下不变;而冷却液阻力的改变使得泵功率变化。泵和风机的能耗随阀门系数变小而增大,原因是阀门系数小时,流过散热器的冷却液流量小,单位时间散出的热量少,系统到达稳定的时间变长,导致能耗变大。阀门系数变小,降低了流过电堆的冷却液流量,使得电堆温度变高,从而电堆产生的电功率增加。系统效率几乎不受阀门开度的响应。

散热器风机是200V,旁路阀门是0.7,循环泵电压分别是150V、200V和250V,仿真结果如表4-7所示。从表中看出,电堆温度几乎不随循环泵电压的变化而改变,而电堆温度差随泵电压的增大而减小。泵电压升高,其转速升高,冷却液的流量增大,冷却液通过电堆后能带走更多的热量,从而减小电堆温差。不同的泵电压使其达到稳态时能耗不同,电压越高能耗越大。风机电压一直保持不变,三种情况下稳态时功率相同;能耗相差很小,说明系统达到稳态的时间几乎相同。由于电堆温度略微不同,使其电功率有很小的

差异。稳态效率随泵电压增大微弱减小。

表4-7 不同循环泵电压仿真结果

泵的电机 电压(V)	电堆温度 (°C)	温度差 (°C)	泵功率 (kW)	泵能耗 (MJ)	风机功率 (kW)	风机能耗 (MJ)	电堆功率 (kW)	稳态效率 (%)
150	73.45	8.37	0.851	0.3042	3.451	1.235	119.50	96.40
200	71.94	6.48	1.703	0.5903	3.451	1.197	119.23	95.68
250	71.07	5.40	2.836	0.9656	3.451	1.175	119.06	94.72

表4-8 不同散热器风扇电压仿真结果

风机 电压(V)	电堆温度 (°C)	温度差 (°C)	泵功率 (kW)	泵能耗 (MJ)	风机功率 (kW)	风机能耗 (MJ)	电堆功率 (kW)	稳态效率 (%)
150	87.62	5.00	3.028	1.211	1.618	0.647	122.41	96.21
190	73.57	5.29	3.028	1.084	3.018	1.081	119.52	94.94
250	62.35	5.47	3.028	0.841	6.147	1.708	117.71	92.21

循环泵电压是300V, 旁路阀门是0.7, 散热器风机分别是150V、190V和250V, 仿真结果如表4-8所示。电堆温度随风机电压增长而减小, 但温度差增大。循环泵电压不变, 其功率不变, 到达稳态时的能耗随风机电压增大而减小, 说明温度上升时间变短, 即在给定电堆电流时, 风机电压越大, 系统响应时间越快。风机功率随其电压增大而增大, 由于电堆温度降低使电堆电功率降低, 同时稳态效率降低。

4.4.5 性能分析

车载燃料电池系统如图4-30所示。热管理系统由冷却液循环泵、空气冷却器、氢气热交换器、电堆、旁路阀和散热器以及相应的管路组成。仿真实验时空气过量系数取1.8, 氢气过量系数取1.2, 冷却水流场的压力比阴极流场的压力低0.122bar, 供给的冷却液温度取50°C, 其它参数如表4-9所示。

1. 稳态特性分析

旁路阀门系数取1, 循环泵转速是2kRPM, 电堆电流分别取是200A、300A时, 电堆温度与散热器表面风速的仿真结果如图4-31所示。图中在电堆电流不变情况下, 随着散热器表面风速增加, 电堆入口和出口温度逐渐降低。由于设定了供给冷却液的温度是50°C, 因而图(a)中风速在6m/s~8m/s电堆温度不随风速的增强而变化。比较两个图可知在相同散热条件下, 电堆电流越大, 电堆入口和出口温度越高。电堆入口的冷却液温度要求在50°C~65°C, 根据仿真结果可知电流200A时风速必须大于4.2 m/s, 电流300A时风速必须大于6.3 m/s, 才能保证冷却液入口温度在期望范围。可见电流越大, 燃料电池反应产生的热功率就越大, 需要更高的风速才能散去这些热量。

在循环泵转速是2kRPM, 旁路阀门系数变化范围0.1~1, 电堆电流 I_{st} 取200A, 风速取

5m/s, 仿真结果如图4-32(a)所示。从图中看出, 改变旁路阀门开度调节电堆温度, 但是阀门开度大于0.5时, 散热器中冷却液流量达到某一数值, 由于受到散热能力的限制, 继续增加流量而其散热功率几乎不变, 因而电堆温度几乎不变。

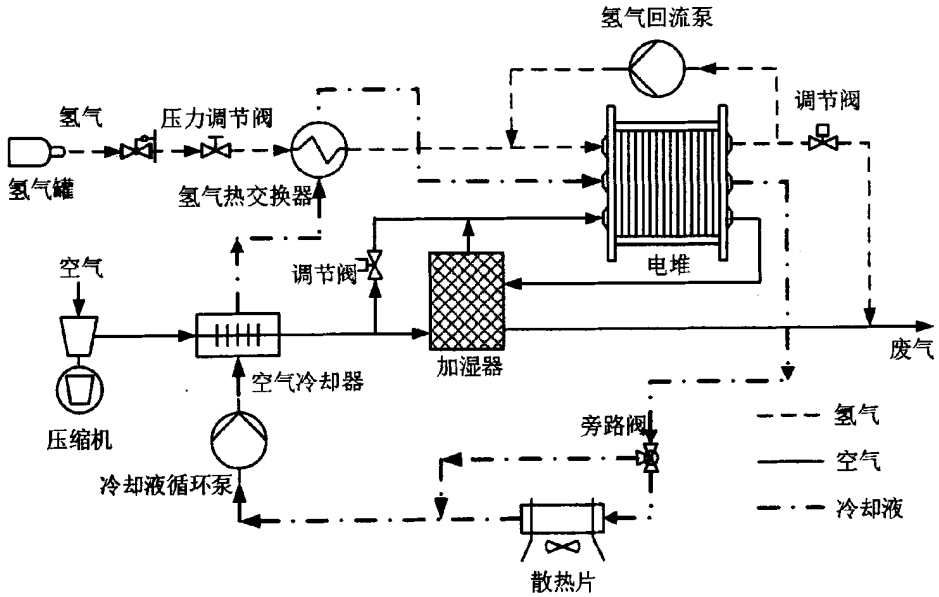


图4-30 车载燃料电池系统

表4-9 Mark902热管理系统参数

含义	值	含义	值	
燃料电池单体个数	440	空气冷却器体积	0.001m ³	
膜电极有效面积	300cm ²	氢气热交换器体积	0.0003m ³	
电堆各部分体积	阴极流场	0.01m ³	散热器中冷却液体积	0.01m ³
	阳极流场	0.005m ³	冷却液额定功率	3300 W
	冷却液流场	0.01258m ³	冷却液额定转速	1777RPM
电堆各部分压力	阴极流场	1.8bar	循环泵惯性时间常数	2s
	阳极流场	2bar	冷却管道等效体积	0.01m ³
	冷却水流场	1.678bar	散热面积	0.64m ²

循环泵的转速取1kRPM~2kRPM, 阀门系数取0.5, 电堆电流200A, 风速取5m/s, 仿真结果如图4-32(b)所示。图中调节循环泵转速改变电堆入口和出口温度, 当转速到达某一值后继续增大转速, 电堆温度几乎不变。同时转速增加减小电堆出口与入口温度差。

在忽略电堆中空气与氢气流场、电堆质量以及电堆与外界的热辐射条件下, 当电堆温度稳定时, 冷却液带走的热功率等于电堆产生的热功率, 由式(3-113)、(3-114)和(3-115)可知,

$$W_{c,st} C p_c (T_{c,st,in} - T_{c,st,out}) = P_{hot} \quad (4-12)$$

通常电堆入口与出口温度差值小于 10°C ，则流过电堆冷却液流量应满足：

$$W_{c,st} \geq \frac{P_{hot}}{10 C p_c} \quad (4-13)$$

若电堆电流是 200A 、温度是 65°C 时，电堆产生的热功率是 69.19kW ，由式(4-13)可知电堆中冷却液流量应大于 99SLPM 。在图4-32(b)中看出在转速 1000RPM (流量 108.64SLPM)时，电堆温度差大约 10°C ，仿真结果与计算结果一致。

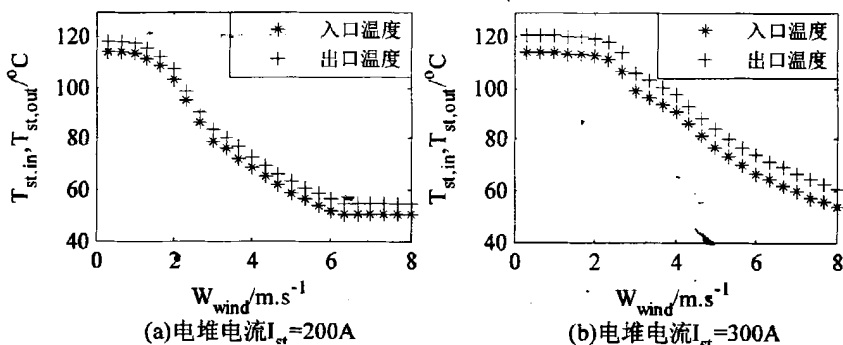


图4-31 电堆电流与温度特性

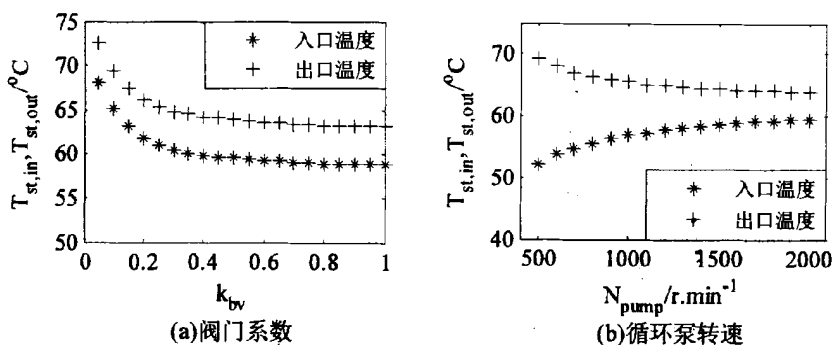


图4-32 阀门开度和水泵转速的温度特性

2. 动态特性分析

电堆电流、散热器表面风速、循环泵转速取一系列的跃变值，波形如图4-33中(a)、(b)和(c)。旁路阀门开度取 0.5 不变，仿真结果如图4-33中(d)、(e)和(f)所示。在图(d)中空气冷却器和氢气热交换器的出口与入口温度差都小于 1°C ，与氢气加热器相比，空气冷却器的温差大，其原因是将空气从大气压压缩至 1.8bar 产生的热量大于将氢气从 3bar 减为 2bar 吸收的热量。电堆电流、散热器风速和循环泵转速变化对氢气热交换器进出口温差影响很小。循环泵转速在 $[1\text{kRPM}, 1.6\text{kRPM}]$ 区间时，冷却液流量范围在 $[1.811\text{kg/s}, 2.897\text{kg/s}]$ ，若氢气热交换器的温度差是 0.5°C ，冷却液带入的热功率是 $[1.857\text{kW}, 2.865\text{kW}]$ 。电堆电流是 300A 时，供给的氢气(过量系数 1.2)是 0.1663g/s ，进入加热器时氢气温度是 -60.75°C ，若将氢气加热到 65°C ，所需热功率是 0.115kW ，远小于冷却液带进的热功率，因而氢气热

交换器的温度差几乎不受电堆电流、散热器风速和循环泵的转速影响。考虑实际系统中，氢气减压过程中气瓶、管道、阀门等都会从环境吸热，而使氢气温度不可能如此低，实际需要的换热量更少，为降低系统复杂性，实际中可以取消氢气换热器。空气系统中，往往空压机会配备独立的热管理系统为压缩机泵头散热，这样会增加系统复杂性；通过燃料电池冷却液进入泵头为压缩后的空气和泵头降温不失为一种可行的简化系统的办法。

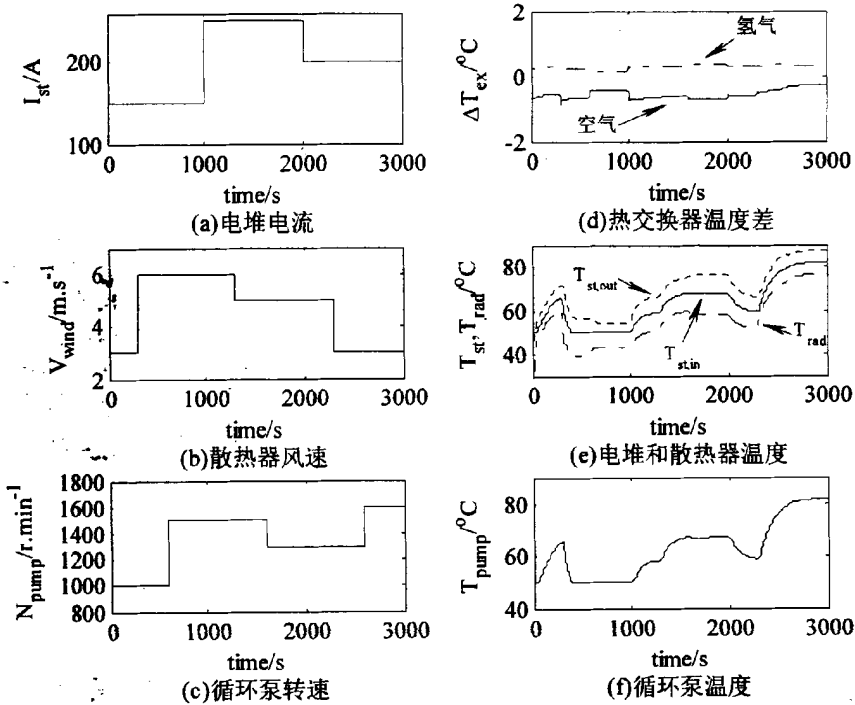


图4-33 电堆温度及温度差

在 $t=600s$ 和 $t=2600s$ 时循环泵转速提高，空气冷却器的温度差减小；在 $t=1600s$ 循环泵转速降低，空气热交换器的温度差增大。可见提高循环泵的转速可以减小空气热交换器的温度差，而改变散热器表面的风速几乎不影响温度差。

在图(e)中 $T_{st.in}$ 、 $T_{st.out}$ 是电堆入口和出口温度， T_{rad} 是散热器温度。图中改变循环泵转速对电堆入口和出口温度几乎没有影响，但对散热器出口的温度有微弱的影响。稳态时，循环泵转速高($600s < t < 1000s$, $2600s < t < 3000s$)时，电堆入口、出口及散热器出口的温度差较小；循环泵转速低($1600s < t < 2000s$)时，它们的温度差较大。可见冷却液的流量可以改善电堆和散热器的温度差。在电堆电流不变的情况下，提高散热器表面的风速($t=300s$)，由于散热量的增加，使得电堆温度将低；反之，降低散热器表面的风速($t=1300s$)，使得电堆温度升高。电堆的温度由电堆电流和散热器表面的风速共同决定的。图(f)中是循环水泵的温度变化，与图(e)中温度变化规律一致。

3 结论

车载燃料电池热管理系统稳态特性和动态特性仿真结果显示：电堆温度受其电流、散热器表面风速、冷却液流量和旁路阀开度共同影响。通过散热器风机转速改变其表面的风速，能够将燃料电池冷却液控制在期望的温度范围内，实现燃料电池系统有效的热管理；旁路阀门开度和循环泵转速可在一定程度上调节电堆入口和出口的温度差。此外，空气压缩和氢气减压引起的热负荷相对于燃料电池冷却液系统而言所占比例甚少，如考虑降低系统复杂程度及控制精度，氢气路依靠自然吸热，不采用氢气热交换器以进行氢气预热；空气路直接采用冷却液系统为空压机泵头降温而不用单独的循环降温系统。

4.5 本章小结

本章对车载燃料电池空气供应系统、氢气供应系统和热管理系统进行了仿真分析。在空气供应系统中，改变压缩机环境因素(温度和压力)，分析其流量、压力和功耗；改变压缩机转速，分析阴极流场压力和氧气分压力；改变电堆温度，分析电堆电压、净功率和效率；改变压缩机转速和电堆电流，分析阴极流体系统中各处压力和流量。在氢气供应系统中，改变调节阀电压、回流泵转速和排气阀开度，分析阳极入口的压力和流量；改变排气时间，分析阳极流场压降。在热管理系统中，改变循环泵的电压，分析泵的功耗、冷却液流量和冷却管路各处的压力；用测试数据验证局部的模型；改变散热器的风机电压、循环泵电压、旁路阀门开度，分析循环泵、风机的功耗；在考虑空气冷却器和氢气热交换器时，改变散热器的风机电压、循环泵电压，分析电堆入口和出口温度。

由仿真得到以下结论：

(1)环境温度或海拔越高压缩机消耗的功率越大。阴极流场压力和氧气分压力随着压缩机转速增大而增大。电堆温度升高，氧气分压力降低。

(2)电堆电压和净功率随温度的升高而升高，效率随温度升高降低。随着过氧比增长，功耗单调增长，用电效率单调下降，而净功率存在最优值。

(3)由于化学反应生成物是水，使得流场出口流量大于入口的流量。各处压力和流量的动态特性近似，前一级比后一级的动态特性稍快。此外，转速和电流的跳变可能引起电池的“氧饥饿”。

(4)调节阀电压、回流泵转速和排气阀开度都可以调节阳极流场入口气体流量，回流泵转速调节能力强。阳极流场入口压力主要通过调节阀电压来调节。排气阀开度小、排气管路压力低、排气时间短，阳极流场压降就越小，反之压降就越大。

(5)散热器风机电压能有效调节电堆的温度，而几乎不影响电堆的温度差；风机电压增大，系统的响应越快；风机电压小有利于提高系统效率。循环泵电压能够调节电堆温度差，且泵电压越小越消耗的功率越少，有利于系统效率的提高。阀门开度能够调节电堆温度，但对电堆温差和系统效率影响很小。

第5章 燃料电池系统的过氧比分析与控制

车载燃料电池的控制目标是系统净功率最高, 为了实现这一目标, 必须对空气和氢气供应管理以及水热管理进行控制。通过前面章节分析可知, 空气供应通过调节压缩机转速和背压阀开度, 实现空气流量和压力的控制; 氢气供应主要通过调节阀门开度和排气阀的排气周期, 完成电堆阳极入口的压力跟随阴极入口压力以及排出阳极流场部分水蒸气; 热量管理是实现电堆温度和其温度差控制, 它依赖于水泵、散热器和旁路阀。本章在前面建立的车载PEMFC系统动态模型的基础上, 首先讨论燃料电池的过氧比特性, 然后提出基于过氧比的车载燃料电池系统控制方法。

5.1 燃料电池过氧比特性

车载燃料电池中, 电堆工作时要避免发生“氧饥饿”或“氧饱和”。过氧比参数反映电堆氧气的供给情况, 其定义如式(4-4)所示, 也可以用空气流量表示, 即压缩机供给电堆的空气流量 W_{air} 与电堆电流所需的空气流量 $W_{air-rec}$ 之比,

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{air}}{W_{air-rec}} \quad (5-1)$$

若过氧比 $\lambda_{O_2} < 1$, 此时阴极流场中氧气流量小于产生给定电流值所需的氧气流量, 燃料电池系统处于“氧饥饿”状态; 而若过氧比 λ_{O_2} (大于2)较大时, 此时阴极流场中氧气流量远大于所需的氧气流量, 燃料电池系统处于“氧饱和”状态。

由于过氧比反应电堆内部氧气供给状况, 将其控制在一定的区域, 不仅可以防止引起电堆性能衰减的“氧饥饿”现象, 而且可以防止引起PEMFC系统效率过低的“氧饱和”现象。

5.1.1 电堆功率

当电堆电流 I_{st} 一定时, 由式(2-6)可知电化学反应所需的氧气流量 W_{O_2-rec} 是

$$W_{O_2-rec} = \frac{n_{fc} I_{st} M_{O_2}}{4F} \quad (5-2)$$

氧气占空气的摩尔份数是 χ_{O_2} (0.21), 则所需的空气流量 $W_{air-rec}$ 是:

$$W_{air-rec} = \frac{M_{air}}{\chi_{O_2} M_{O_2}} W_{O_2-rec} \quad (5-3)$$

将式(5-2)代入式(5-3)后, 再代入式(5-1)整理, 得到供给电堆的干空气流量 $W_{ca,in,dry}$ 满足

$$W_{ca,in,dry} = \frac{\lambda_{O_2} M_{air} n_{fc} I_{st}}{4F \chi_{O_2}} \quad (5-4)$$

系统稳态工作时, 电堆入口压力 $p_{ca,in}$ 恒定, 不考虑阴极流场流道压降, 将其看成一个容器, 电堆内部的压力 p_{ca} 必然恒定。电堆压力、流量如图5-1所示。

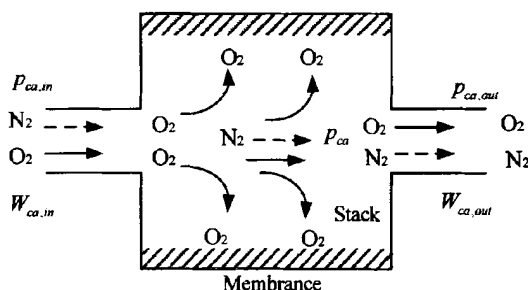


图5-1 电堆压力和流量示意图

进入电堆的干空气流量 $W_{ca,in,dry}$ 中，产生给定电流 I_{st} 需要的氧气流量 W_{O_2-rec} ，还有 $(\lambda_{O_2} - 1)W_{O_2-rec}$ 氧气流量和 $(1 - \chi_{O_2})W_{ca,in,dry} \frac{M_{N_2}}{M_{air}}$ 氮气流量没有参加化学反应。在电堆内部的氧气和氮气的质量由阴极流场的体积、压力、入口和出口气体流量决定，气体质量的比例关系近似为出口流量关系，

$$\frac{m_{N_2}}{m_{O_2}} = \frac{(1 - \chi_{O_2})W_{ca,in,dry} \frac{M_{N_2}}{M_{air}}}{(1 - \lambda_{O_2})W_{O_2-rec}} \quad (5-5)$$

将公式(5-2)、(5-4)代入公式(5-5)整理可得

$$\frac{m_{N_2}}{M_{N_2}} = \frac{(1 - \chi_{O_2})\lambda_{O_2} m_{O_2}}{\chi_{O_2}(\lambda_{O_2} - 1)M_{O_2}} \quad (5-6)$$

根据道尔顿分压定理得到流场中氧气分压力 p_{O_2} ，

$$p_{O_2} = \frac{\frac{m_{O_2}}{M_{O_2}}}{\frac{m_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{m_{N_2}}{M_{N_2}}} [p_{ca} - p_{sat}(T_{st})] \quad (5-7)$$

将公式(5-6)代入公式(5-7)整理可得

$$p_{O_2} = \frac{\chi_{O_2}(\lambda_{O_2} - 1)}{\lambda_{O_2} - \chi_{O_2}} [p_{ca} - p_{sat}(T_{st})] \quad (5-8)$$

根据式(2-13)、(2-30)、(2-31)和(5-8)，得到电堆功率 P_{st} 与过氧比 λ_{O_2} 之间的关系如图 5-2(a)所示。图中电堆温度恒定在 70°C ，阴极流场压力 p_{ca} 取 1.5bar 。当过氧比在 $[1.5, 3.0]$ 区域，电流较小时电堆功率几乎不变；电流较大时随着过氧比增加电堆功率增大。当过氧比大于 3 时，电堆功率近似常数。

燃料电池工作时，压缩机供给的空气流量影响阴极入口压力^[49]，进而影响流场压力。由于电堆内部的流场压力不能测量，用电堆入口和出口压力的均值(或者二者之和的 0.6 倍)替代，即 $p_{ca} = (p_{ca,in} + p_{ca,out}) / 2$ 。将燃料电池压力与流量实验数据通过曲线拟合，得到二者关系

$$P_{ca,in} = P_{atm} - 14.1778W_{air}^2 + 7.9184W_{air} + 0.2726 \quad (5-9)$$

将式(5-9)代入式(5-8)得到电堆功率 P_{st} 与过氧比 λ_{O_2} 之间的关系如图5-2(b)所示,与图(a)比较,二者曲线几乎相同。

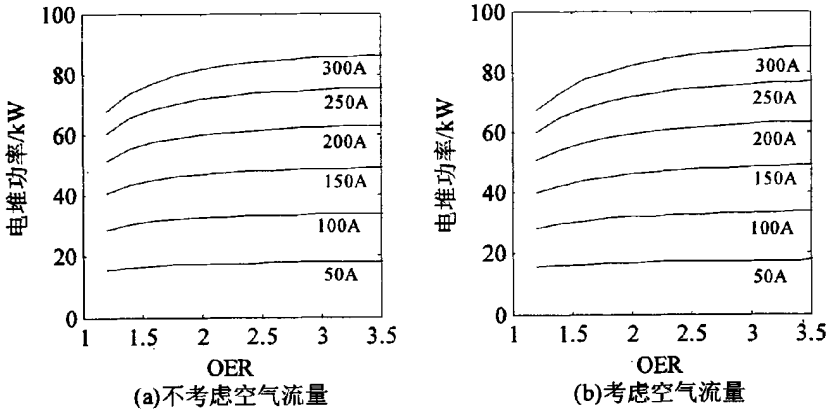


图5-2 电堆功率的过氧比特性

5.1.2 压缩机功耗

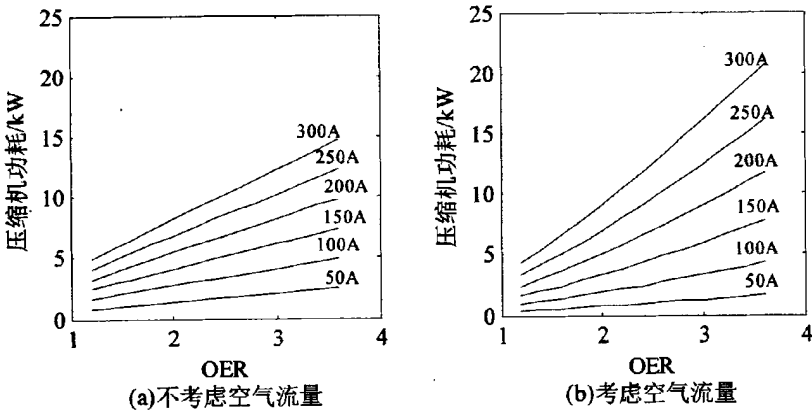


图5-3 压缩机功耗的过氧比特性

电堆需要的空气流量由压缩机提供,空气由环境压力 p_{atm} 被压缩到压力为 p_{cp} ,所需要的功率可以根据压缩机的等熵绝热功率计算,将式(5-4)代入式(3-16),并考虑空气湿度 d_{atm} 可以得到:

$$P_{cm} = \frac{1}{\eta_{cp}\eta_{cm}} \frac{\gamma}{\gamma-1} (1+d_{atm}) \lambda_{O_2} M_{air} n_{fc} I_{st} RT_{amb} \left[\left(\frac{p_{ca,in}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (5-10)$$

取压缩机效率 $\eta_{cp}=0.65$,电动机的机械效率 $\eta_{cm}=0.95$,标准环境下,压缩机出口压力 $1.8bar$,压缩机功耗与过氧比关系如图5-3(a)所示。电流恒定时,压缩机功耗与过氧比成正比,电流较大时比例系数较大,而电流较小时比例系数小。由此可见通过改变过氧比

调节压缩机功耗更适合于大电流的情况。考虑空气流量对阴极压力影响,将式(5-9)代入式(5-10),此时压缩机功耗与过氧比关系如图5-3(b)所示。与图(a)相比,图(b)曲线更陡。在电流300A曲线两端,过氧比是1.2时图(b)的功耗较小,而过氧比是3.5时图(b)功耗较大。

5.1.3 PEMFC系统净功率

系统辅助功耗包括压缩机、冷却水循环泵、散热器风扇和电控设备等的功耗。在4.4.5节中,冷却水循环泵和风扇的功耗仅占电堆发电功率的5%左右,而压缩机功耗大约占20%^[49]。若辅助功耗仅考虑压缩机时,燃料电池系统净功率表示为

$$P_{net} = P_{st} - P_{cp} \quad (5-11)$$

根据式(5-10)和(5-11),净功率与过氧比关系如图5-4所示。图(a)中电堆阴极入口压力取1.8bar,图(b)中利用式(5-9)确定阴极入口压力。在过氧比大于1.5区域,电流较小时净功率随过氧比几乎不变;而在电流较大时有明显变化,电流越大变化越显著。对给定的电堆电流,系统净功率最大对应的过氧比称为最佳过氧比,图中'*'表示的是相应电流的最佳过氧比。图(a)和图(b)中,相同电流所对应的最佳过氧比尽管不同,但是在在大电流时二者差异不超过0.3。

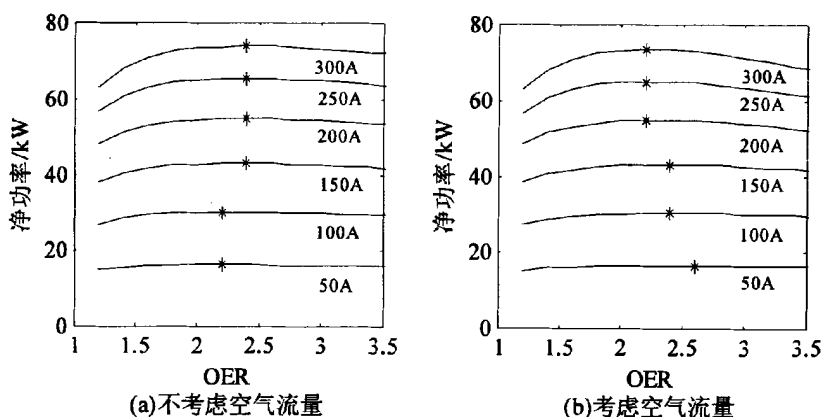


图5-4 PEMFC净功率过氧比特性

考虑冷却水循环泵和散热风扇的功耗时,系统净功率表示为

$$P_{net} = P_{st} - P_{cp} - P_{pump} - P_{fan} \quad (5-12)$$

其中: P_{pump} 是循环泵的功耗, P_{fan} 是风扇的功耗。

如果电堆温差设定是10°C,根据式(4-12)得到冷却水流量是

$$W_c = \frac{P_{hot}}{10Cp_c} \quad (5-13)$$

由式(3-125)知水泵消耗的功率是

$$P_{pump} = \frac{P_{pump} W_c}{\rho_c \eta_{pump}} \quad (5-14)$$

其中： η_{pump} 是水泵的效率， p_{pump} 是水泵出口压力。

忽略热辐射时，由式(3-119)可知，散热器的热量传递系数：

$$h_{rad} = \frac{P_{hot}}{A_{rad}(T_{ra} - T_0)} \quad (5-15)$$

又根据式(3-118)，利用数据拟合得到空气流量

$$W_{rad} = 0.01269h_{rad}^3 - 0.07219h_{rad}^2 + 0.30148h_{rad} - 0.003982 \quad 0 < h_{rad} < 6 \quad (5-16)$$

由散热器周围的空气流量 W_{rad} 、散热面积 A_{rad} 和风机出口的面积 A_{wind} ，得到风机出口的空气流量 $W_{wind} = W_{rad}A_{rad}/A_{wind}$ ，由式(4-9)得到风机出口的动压 $p_{wind,d}$

$$p_{wind,d} = \frac{1}{2\rho_{air}} \left[\frac{W_{wind}}{S_{wind}} \right]^2 \quad (5-17)$$

散热器风机的动压 $p_{wind,d}$ 与静压 $p_{wind,s}$ 之和等于其全压 p_{wind} ，即 $p_{wind} = p_{wind,d} + p_{wind,s}$ 。与压缩机功耗计算类似，风机入口压力是环境压力，出口压力是其全压，利用式(3-16)得到风机消耗的功率是

$$P_{wind} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{RT_{atm} W_{rad}}{\eta_{wind}} \left[\left(\frac{p_{wind}}{p_{atm}} + 1 \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (5-18)$$

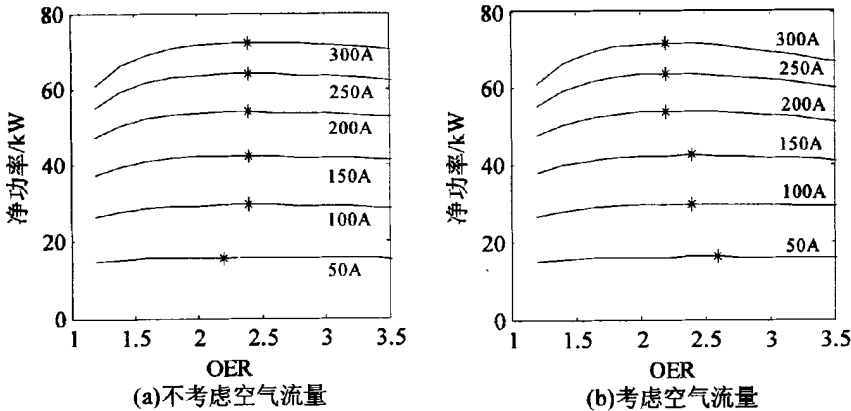


图5-5 考虑风机和水泵时净功率过氧比特性

由以上分析可得不同电流时净功率过氧比特性如图5-5所示，图(a)是不考虑空气流量对阴极压力的影响，将阴极压力取1.8bar，而图(b)是根据空气流量计算阴极压力。比较图5-4和图5-5看出，仅考虑压缩机功耗时的最佳过氧比与考虑压缩机、风机、水泵三者功耗的最佳过氧比相同。水泵的功耗最大时1.38kW，风机的功耗最大2.73kW，都远小于压缩机的最大功耗20kW，因此最佳过氧比的确定可以仅考虑压缩机的功耗。

5.1.4 最佳过氧比

根据式(2-31)，电堆发出功率可表示为

$$P_{st} = n_{fc} (E_{fc} - v_{act,fc} - v_{ohm,fc} - v_{con,fc}) I_{st} \quad (5-19)$$

忽略压力和流量对电压 $v_{act,fc}$ 、 $v_{ohm,fc}$ 和 $v_{con,fc}$ 的影响。令能斯特电势对应的功率

$$P_E = n_{fc} E_{fc} I_{st} \quad (5-20)$$

将式(2-13)代入式(5-20)，有

$$P_E = n_{fc} I_{st} \left\{ 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} \left[\ln\left(\frac{P_{H_2}}{P_{atm}}\right) + 0.5 \ln\left(\frac{P_{O_2}}{P_{atm}}\right) \right] \right\} \quad (5-21)$$

如果电堆温度恒定，令

$$P_{E1} = 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} n_{fc} I_{st} \left[\ln\left(\frac{P_{H_2}}{P_{atm}}\right) + 0.5 \ln\left(\frac{P_{O_2}}{P_{atm}}\right) \right] \quad (5-22)$$

电堆工作时要求阳极氢气压力高于阴极0.2bar，假设 $p_{H_2} = p_{ca} + 0.2$ ，代入上式有：

$$P_{E1} = 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} n_{fc} I_{st} \left[\ln\left(\frac{p_{ca} + 0.2}{P_{atm}}\right) + 0.5 \ln\left(\frac{P_{O_2}}{P_{atm}}\right) \right] \quad (5-23)$$

电堆电流和温度不变的情况下，净功率 P_{net} 取得最大值的条件与 $P_{net1} = P_{E1} - P_{cp}$ 相同。将空气流量(过氧比表示)与电堆入口压力关系，记为

$$p_{ca,in} = f_{O_2}(\lambda_{O_2}) \quad (5-24)$$

压缩机出口压力近似等于电堆入口压力与水蒸气饱和压力之差，即 $p_{cp} \approx p_{ca,in} - p_{sat}(T_{fc})$ 。这样净功率最大可表示为：

$$\max P_{net1} = P_{E1} - P_{cp} \quad (5-25)$$

其约束条件由式(5-23)、(5-10)、(5-8)和(5-24)组成。

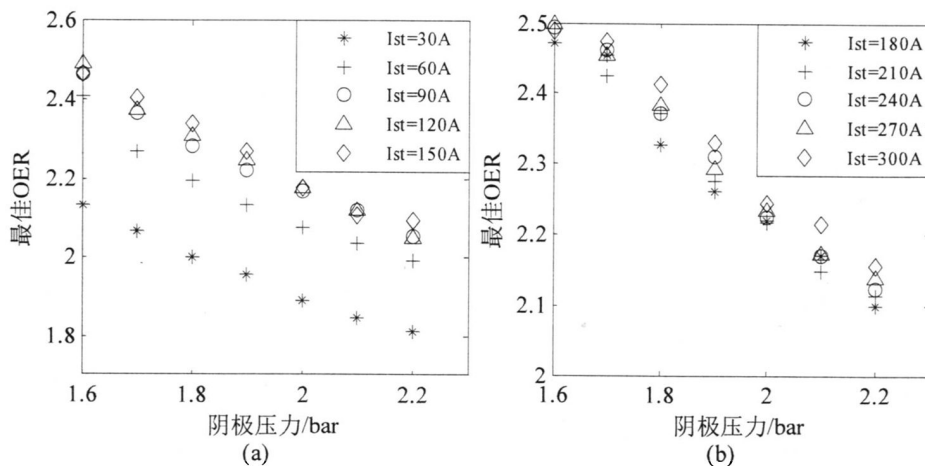


图5-6 不同电流、阴极压力下的最佳过氧比

电池净功率要获得最大值，尽管自变量只有过氧比 λ_{O_2} ，但是由于压力与过氧比之间的具有耦合关系(对具体的系统通过曲线拟合)，获得极值的约束条件是过氧比 λ_{O_2} 的隐函数，很难得到一个最优解的显性表达式，可以通过智能寻优方法获得最优解。

系统净功率受电堆电流、阴极压力、过氧比(空气流量)的影响。设定电堆温度 80°C ，采用粒子群优化算法^[103,104]，通过离线寻优，得到电堆电流和最优过氧比 $\lambda_{O_2}^*$ 的关系如图

5-6所示。图(a)中电堆电流在[30A,150A]区间；图(b)中电流在[180A,300A]区间。为便于进行实时控制，对每一条曲线利用最小二乘法拟合。假设最佳过氧比与阴极压力关系为

$$\lambda_{O_2,i}^* = a_{2,i}^2 p_{ca} + a_{1,i} p_{ca} + a_{0,i} \tag{5-26}$$

式中： $a_{0,i}$ 、 $a_{1,i}$ 和 $a_{2,i}$ 是拟合系数。拟合系数与电堆电流的关系见表5-1。

表5-1 最佳过氧比拟合系数

电堆电流 $I_{st}(A)$	$a_{2,i}$	$a_{1,i}$	$a_{0,i}$	电堆电流 $I_{st}(A)$	$a_{2,i}$	$a_{1,i}$	$a_{0,i}$
30	0.2650	-1.5480	3.9331	180	0.2024	-1.4085	4.2237
60	0.7908	-3.6559	6.2180	210	0.1985	-1.4108	4.2480
90	0.4255	-2.2738	5.0058	240	0.0602	-0.8855	3.7707
120	0.3176	-1.9097	4.7221	270	0.1877	-1.3558	4.2021
150	0.2369	-1.5695	4.3821	300	-0.0779	-0.3066	3.1981

燃料电池工作时，根据测量的电堆电流和阴极入口压力 $p_{ca,in}$ ，计算电流所在区域的边界电流的最佳过氧比，再根据内插法计算实际电流的最佳过氧比。如果电流 I_{st} 处于表 $[I_{down}, I_{up}]$ 区域，由表5-1中的系数和阴极压力 p_{ca} (用压力 $p_{ca,in}$ 计算)代入式(5-26)，分别计算 I_{down} 和 I_{up} 的最佳过氧比 $\lambda_{O_2,down}^*$ 、 $\lambda_{O_2,up}^*$ ，假设在此区间最佳过氧比与电堆电流呈线性关系，有

$$\frac{\lambda_{O_2,i}^* - \lambda_{O_2,down}^*}{\lambda_{O_2,up}^* - \lambda_{O_2,down}^*} = \frac{I_{st} - I_{down}}{I_{up} - I_{down}} \tag{5-27}$$

整理上式得到此时的最佳过氧比：

$$\lambda_{O_2,i}^* = \lambda_{O_2,down}^* + \frac{I_{st} - I_{down}}{30} (\lambda_{O_2,up}^* - \lambda_{O_2,down}^*) \tag{5-28}$$

5.2 空气供应系统控制

车载燃料电池工作时，空气需要源源不断流入电堆中，为燃料电池提供适量的空气流是空气供应系统控制的目标。如果供给的空气流量过小，那么当电池所带的负载突然变大时容易在质子交换膜出引起“氧饥饿”；而如果空气流量过大，压缩机功耗增大，系统的净功率减小，因此空气供应系统控制的优劣决定车载燃料电池系统净功率的大小。

5.2.1 基于模型的最佳过氧比

与5.1.3节确定最佳过氧比不同，这一节通过利用车载燃料电池的模型，改变电堆和压缩机转速获得不同电流时过氧比的特性曲线，然后寻极值得到最佳过氧比。

令电堆电流以步长10A从50A增加到300A，系统净功率的过氧比特性曲线如图5-7所示。图中电堆电流较大时，由于空气压缩机功率的限制，过氧比没有达到3。每条曲线的‘*’标志是该曲线的最佳过氧比点。系统的最佳过氧比范围在[1.990~2.608]之间。电堆电流在[50A, 80A]范围时，最佳过氧比随着电流的增加而减小；电堆电流在[90A, 200A]范

围时,最佳过氧比大致变化趋势是随着电流的增加而增大;电堆电流在[210A, 300A]范围时,最佳过氧比点随着电流的增加而减小。

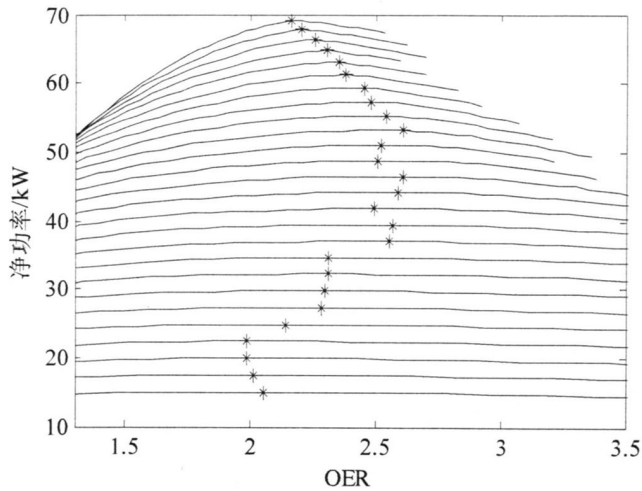


图5-7 车载燃料电池净功率的过氧比特性

文献[105]中系统的最佳过氧比变化大致趋势是随着电堆电流的增加而减小,本文曲线与其有差异,其原因是仿真模型中所使用的压缩机类型不同。在转速恒定的情况下,双螺杆压缩机流量受压缩比(范围在1.5~3)影响很小,忽略压缩比影响时,压缩机流量仅与转速有关,转速越高流量越大。而离心式压缩机正常工作时,其流量与转速、压力比都有关。

电堆输出电压受其温度、膜含水量 λ 影响,根据式(2-20)可知,其净输出功率必然也受工作温度及膜含水量的影响。系统过氧比特性与电堆温度的关系如图5-8(a)所示,仿真时令电堆电流 I_{st} 为180A。表5-2列出了电堆温度分别50°C、60°C、70°C和80°C时对应的最佳过氧比。图5-8(b)显示了系统过氧比特性与膜含水量的关系。

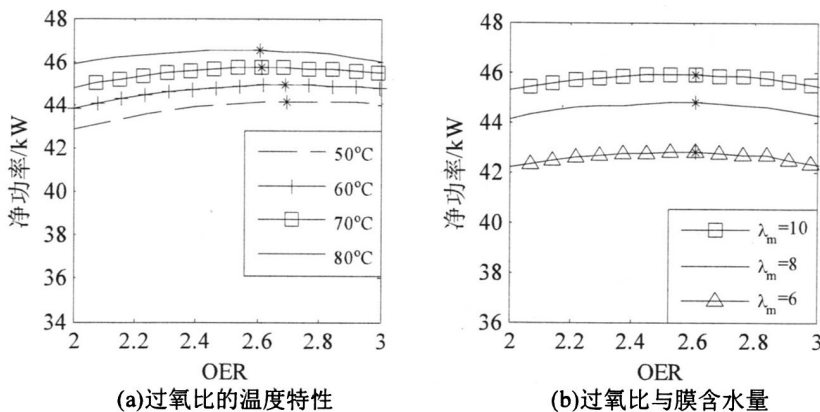


图5-8过氧比温湿度特性

表5-2 最佳过氧比与温度关系

电堆温度 $T_{st}(^{\circ}C)$	最佳过氧比 λ_{m_best}	系统净功率 $P_{net_max}(kW)$
50	2.696	44.153
60	2.691	44.943
70	2.610	45.754
80	2.608	46.543

图5-8(a)中在电堆电流不变的情况下，温度越高系统的净输出功率越大，提高温度可以改善系统的性能。由表5-2可知，最佳过氧比随温度变化有微弱的减小，范围在2.6~2.7区间。进一步分析可知，过氧比 λ_m 的范围在2.6~2.7时，净功率的变化范围不超过30W(0.068%)，因而温度对最佳过氧比影响微弱。

图5-8(b)中膜含水量分别取6、8、10，可以看出燃料电池系统净输出功率随膜含水量的增加而增大，这是由于质子交换膜对 H^+ 质子的传导采用水合质子的形式，且膜的电导率与其含水量成正比。在不发生‘水淹’情况下，膜含水量越高，欧姆电压损失越小，电堆电压越大，在电堆电流不变的情况下，电堆输出的功率越大。尽管系统的净输出功率随含水量的增加而增大，但系统的最佳过氧比几乎不变。

5.2.2 最佳过氧比控制

为了保证系统的净输出功率最大，应调节阴极空气流量使系统工作在最佳过氧比附近。在图5-7的系统过氧比特性中，大电流时空气流量一旦超过最佳过氧比，若再继续增加就会引起寄生功耗增加，进而恶化系统净输出功率；在电堆电堆电流越大时，该特点越显著。因此对于车载燃料电池系统，要获得良好的性能应使系统工作在最佳过氧比附近。

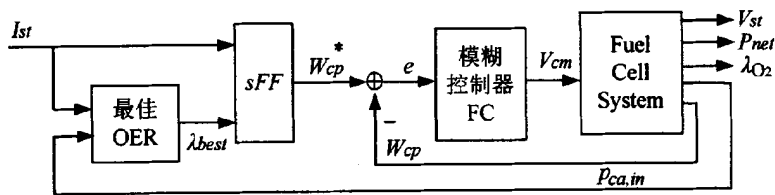


图5-9 最佳过氧比控制框图

在5.2.1节中系统的最佳过氧比不受膜含水量的影响，电堆温度变化会引起最佳过氧比微弱变化，忽略温度对最佳过氧比的微弱变化，这样在温度不变的条件下，就可以得到最佳过氧比与电堆电流一一对应关系。为使系统工作在最佳过氧比采用图5-9所示的控制方法。根据电堆电流和阴极入口压力得到最佳过氧比 λ_{best} ，由参数 I_{st} 和 λ_{best} 通过静态前馈控制(Static Feedforward, 简称sFF)得到压缩机空气流量的设定值 W_{cp}^* ，使用模糊控制器(Fuzzy Controller, 简称FC)控制压缩机电压 V_{cm} ，调节压缩机空气流量，使系统工作在

最佳过氧比。

压缩机出口干空气流量与阴极入口干空气流量相等，并且压缩机出口与入口空气的含湿量相同，已知电堆电流 I_{st} 和最佳过氧比 λ_{best} 时，由式(5-4)、(3-2)和(3-6)得到压缩机的空气流量的参考值 W_{cp}^* ，

$$W_{cp}^* = \left[1 + \frac{M_{wv}}{M_{air}} \frac{\varphi_{atm} p_{sal}^{atm}}{(p_{atm} - \varphi_{atm} p_{sal}^{atm})} \right] \frac{\lambda_{best} M_{air} n_{fc} I_{st}}{4F \chi_{O_2}} \quad (5-29)$$

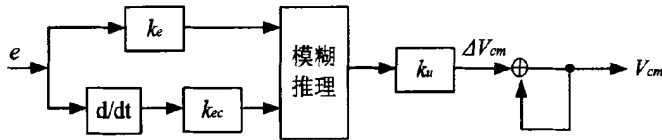


图5-10模糊控制器框图

模糊控制器选取采用常见的二输入一输出的模糊控制器，框图如图5-10所示。图中系数 k_e 、 k_{ec} 分别是误差及误差变化率的量化因子，系数 k_u 是比例因子，其作用除了保证进行论域变换以外，对系统性能起一定的调节作用。为了保证控制精度，图中模糊控制器输出采用增量控制。

使用ITAE优化指标确定模糊控制器的三个参数，为了提高系统动态过程，应避免超调量大，在优化时可加入限制条件，即若超调量大的一组参数，将指标乘以一个大于1的系数，人为增大目标函数。设定燃料电池电流 I_{st} 为180A，优化可以得到模糊控制器的三个参数为： $k_e=14.9764$ $k_{ec}=0.1972$ $k_u=0.5532$ 。

5.2.3 仿真结果及分析

针对以上所提出的车载燃料电池的最佳过氧比控制方法进行仿真验证，仿真时选取电堆温度 80°C ，膜含水量 λ_m 为10。最佳过氧比分别采用两种方法确定，一种是查表法，将图5-7中每个电流的最佳过氧比制表，实际电流的最佳过氧比利用插值获得；另一种是使用拟合系数法，即根据式(5-28)计算最佳过氧比。

1 查表确定最佳过氧比

电堆电流是180A时，经查表可得最佳过氧比参数 λ_{best} 是2.608，根据式(5-29)可得空气压缩机空气流量参考值是74.27g/s。电堆电流是180A时的仿真结果如图5-11所示。从图(a)中空气压缩机空气流量上升时间不到0.8s，没有超调量，稳态时压缩机空气流量是74.25g/s，稳态误差仅0.02g/s。阴极流场空气压力(图(b))、氧气分压力(图(c))随着空气量的增多逐渐上升，在约0.9s时达到稳定，此时阴极压力 p_{ca} 是1.6821bar、氧气分压力 p_{O_2} 是0.17062bar。随着电堆中空气量的增多，氧气逐渐增多，电堆电流不变即所需氧气的流量不变，过氧比 λ_{O_2} (图(d))逐渐增大，稳态时达到2.617，与最佳过氧比 λ_{best} 的误差是-0.009。

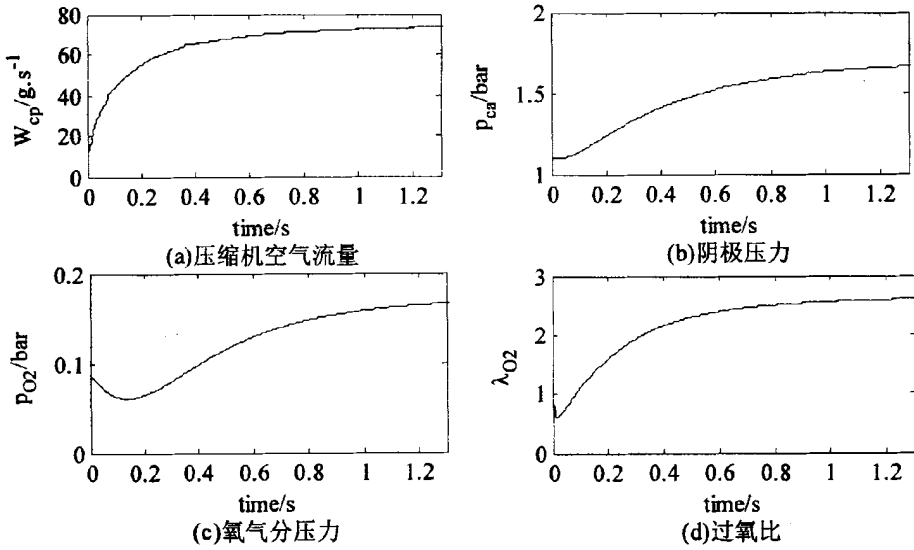


图5-11 电流180A仿真结果(查表法)

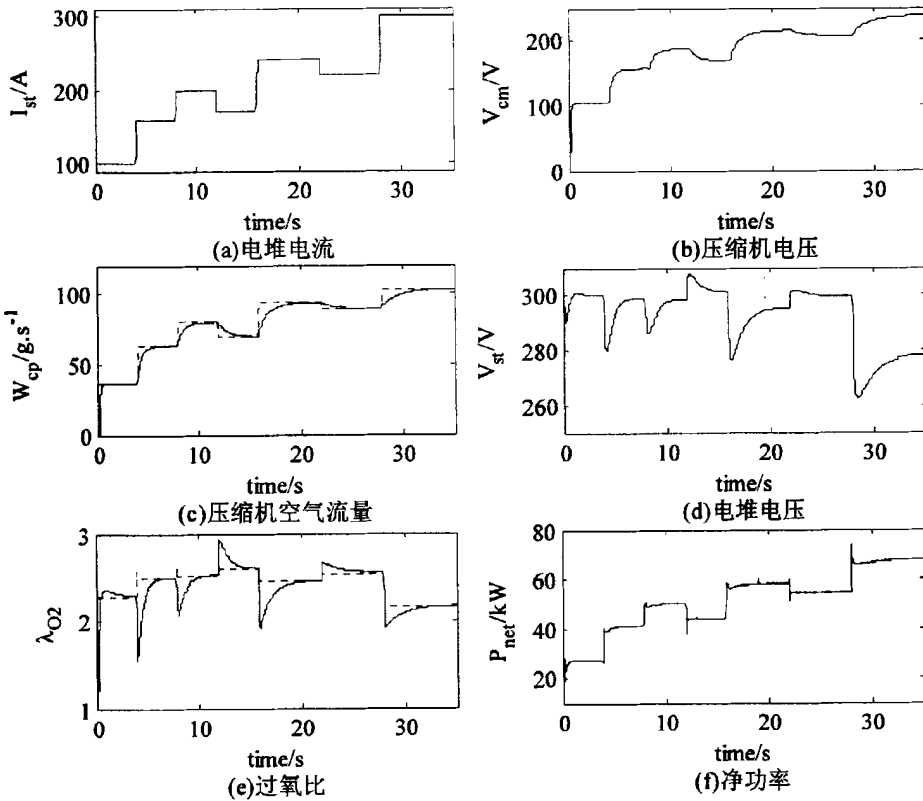


图5-12 电流为脉冲时仿真结果(查表法)

电堆电流是一系列跳变的脉冲信号(图5-12(a)), 仿真结果如图5-12所示。电堆电流跳

变时,最佳过氧比(图(e)中虚线)和压缩机空气流量参考值(图(c)中虚线)发生改变,控制器调节压缩机电压(图(b)),继而调节其空气流量(图(c)实线)达到参考值(图(c)虚线)。压缩机空气流量发生变化使得过氧比(图(e)实线)跟着发生变化,由于采用了前馈控制,当压缩机空气到达其参考值时,可以保证过氧比稳定在最佳过氧比。由图(e)看出,电堆电流发生跳变时,所设计的控制器具有良好的跟踪效果。

电堆电流向上跳变时($t=4s, 8s, 16s, 28s$),由于所需氧气突然增大,模糊控制器根据空气流量误差及其变化率调节压缩机电压(图(b)),使压缩机空气流量发生改变。将空气流量调节至稳态值需要一定时间,因而导致阴极流场中氧气流量瞬间降低,过氧比有一个瞬间突降(图(e)实线)。所需氧气突然增大时,致使阴极流场中氧气分压力突然降低,燃料电池端电压出现突降(图(d))。电堆电流向下跳变时($t=12s, 22s$),情况与上述相反。

电堆电流变化时相应的系统净功率(图(f))变化,电流大时净功率大,电流小时净功率小。电堆电流向上跳变时,净功率有一个向上的突升,原因是电堆电流瞬间增大,而电堆电压和压缩机的功耗改变需要一定的调节时间,根据式(5-11)可知净功率会瞬间增大。电堆电流向下跳变时($t=12s, 22s$),情况与上述相反。

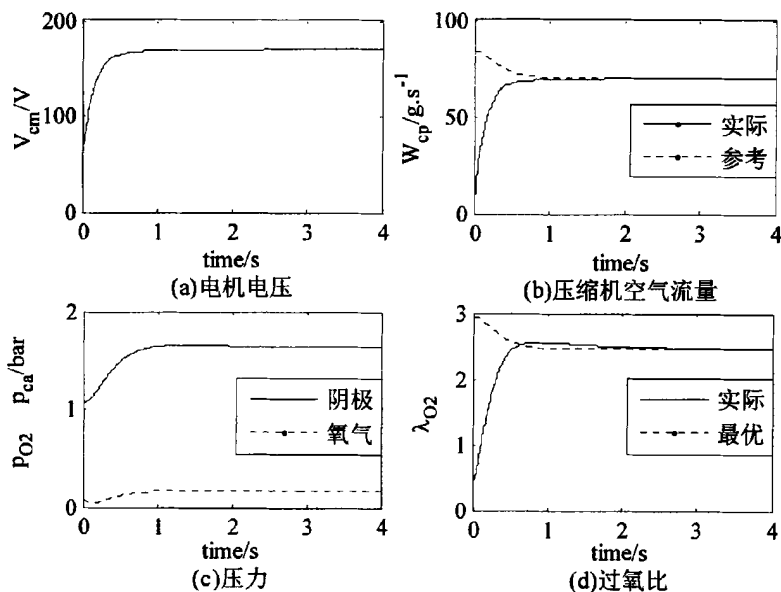


图5-13 电流180A时仿真结果(拟合法)

2 用拟合公式计算最佳过氧比

模糊控制器的采样时间取 $100\mu s$,控制其三个参数分别为 $k_e=29.953$ 、 $k_{ec}=0.394$ 、 $k_u=1.106$ 。电流是180A时波形如图5-13所示。 $t=1s$ 时,压缩机参考空气流量和实际流量分别是:70.026和69.191g/s,误差小于1.43%;过氧比的最佳值和实际值分别是:2.459和2.548,误差小于4%。 $t=2s$ 时过氧比误差是1.22%。

电堆电流是一系列跳变的脉冲信号(图5-14(a),与图5-12(a)相同),仿真结果如图5-14

所示。图(c)的压缩机空气流量和图(e)的过氧比中虚线是参考值，实线是实际值，可以看出系统具有较好的静态和动态特性。查表法和拟合系数法的仿真结果比较如表5-3所示，采用拟合系数法的误差在1%以内，因而拟合系数法在系统实际运行中可以用于实时计算最佳过氧比。

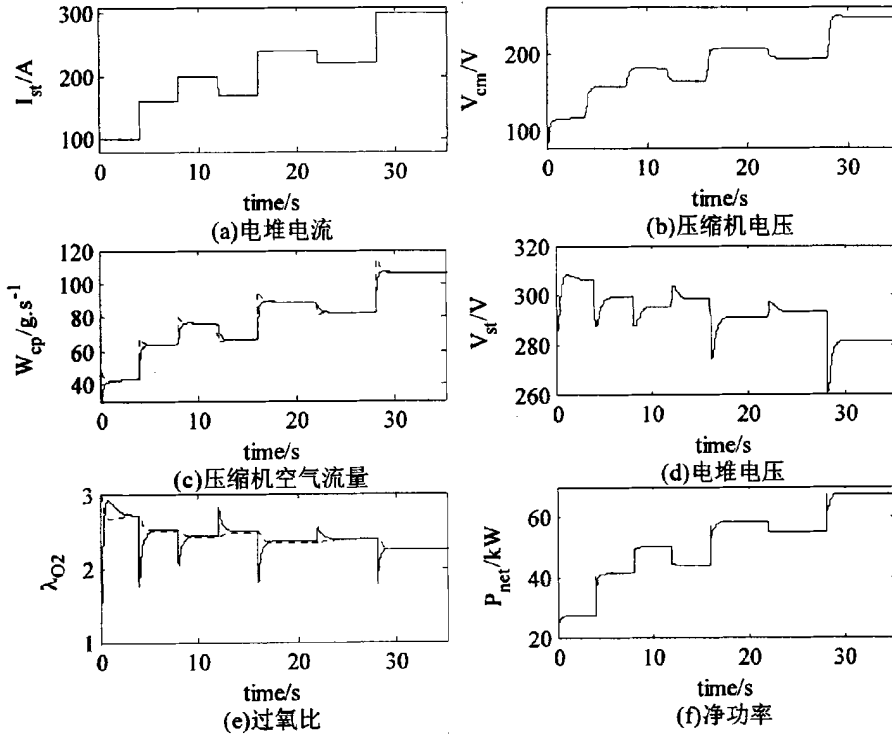


图5-14 电流脉冲时仿真结果(拟合法)

表5-3 两种方式的过氧比和净功率

时刻	最佳过氧比			净功率(kW)		
	查表法	拟合法	误差	查表法	拟合法	误差
$t=3s$	2.334	2.727	0.393	27.252	27.105	-0.147
$t=7s$	2.498	2.519	0.021	41.670	41.660	-0.01
$t=11s$	2.523	2.426	-0.097	50.703	50.714	-0.011
$t=15s$	2.610	2.494	-0.116	44.017	43.997	-0.020
$t=21s$	2.452	2.349	-0.103	58.813	58.713	-0.100
$t=27s$	2.559	2.384	-0.175	54.873	54.828	-0.045
$t=35s$	2.169	2.245	0.076	68.586	68.291	-0.295

5.2.4 过氧比控制问题

在上一节中提出了拟合法可以实时计算过氧比，且通过仿真分析得到该方法的误差

在1%内。尽管在最佳过氧比处系统的净功率最大,但是系统效率随过氧比的增大而减小。从考虑系统用电效率角度出发,过氧比较小更有利。但电堆电流较大时,较小的过氧比容易引起“氧饥饿”,因而燃料电池工作时需要将过氧比控制在一个合理区域。

理论上保证过氧比是1可以使燃料电池正常工作,但是由于电池的空气流道和气体扩散层的结构,容易被反应产生的水堵塞,此时并不能保证电池的正常工作。文献[106]中通过改变氢气和氧气的当量比调节自增湿单体燃料电池功率,实验发现当过氧比低于1.3时,电堆电流发生震荡而不能稳定。本文中考虑15%的余量,将过氧比是1.5定义为发生氧饥饿的边界。

车载燃料电池工作区域划分原则:1.对不同的电堆电流,过氧比应大于等于1.5,从而在变载时尽可能避免“氧饥饿”。2.电堆电流较小时,为避免负载突变时发生严重的“氧饥饿”,应保留较大的供气余量。尽管由公式(3-16)可知,供气量大时压缩机净输出的功率大,但是并不意味着压缩机需要的功率变大。两者之间关系涉及到压缩机效率,而其效率在供气量较小时比较低。使得压缩机工作在较高效率区域,从而做到增加空气供应量,而不会降低净输出功率。另一方面,电堆电流小时,尽管化学反应产生的水少,但如果过氧比小,电堆阴极流场的空气流量低,那么容易引起气体扩散层发生聚集水滴,堵塞供氧通道,降低电池性能。3.电堆电流较大时,过氧比应处于较小的区间,主要是考虑系统的效率。过氧比较大容易引起系统净输出功率急剧下降,因此希望工作在最佳过氧比附近。

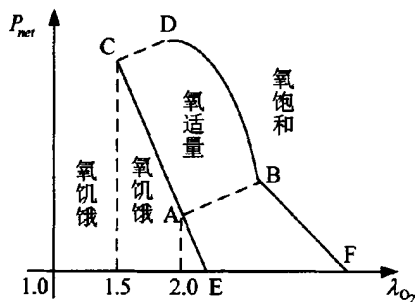


图5-15 OER区域划分

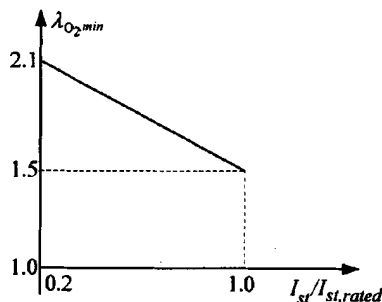


图5-16 电流与最小过氧比

将燃料电池系统的工作区域划分为三个区域:氧饥饿、氧适量和氧饱和,如图5-15所示。图中点A和点B对应的电堆电流是电池额定电流的20%,点C和点D对应的电堆电流是额定电流。直线AC是氧适量工作区域的下边界,BD是上边界。对给定的电堆电流 I_{st} ,AC边界上的过氧比 $\lambda_{O_2, \min}$ 满足

$$\frac{\lambda_{O_2, \min} - 2}{1.5 - 2} = \frac{I_{st} - 20\%I_{st, rated}}{I_{st, rated} - 20\%I_{st, rated}} \quad (5-30)$$

其中过氧比 $\lambda_{O_2, \min}$ 不仅是氧饥饿的最大值,而且是电堆工作时允许的最小过氧比。

整理式(5-30)得到

$$\lambda_{O_2, \min} = 2.125 - 0.625 \frac{I_{st}}{I_{st, rated}} \quad (5-31)$$

图5-15中曲线BD是最佳的过氧比曲线。在电堆电流小于20% $I_{st, rated}$ 时，工作区域在四边形ABFE内，此时由于电堆电流较小，为避免气体扩散层发生‘水淹’，应工作在较大的过氧比区域。

由式(5-31)得到电流与最小过氧比之间的关系如图5-16所示。图中额定电流时的最小过氧比是1.5，20%额定电流时是2.1，尽管过氧比差值是0.6，但是前者空气流量是后者的3.55倍。

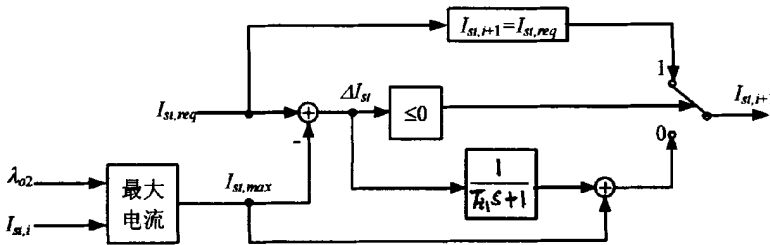


图5-17 电堆电流上升调节方式

大功率燃料电池在变载时，若负载电流突然增大很多，电堆阴极流场的氧气不足以产生需求电流，此时会发生“氧饥饿”。实际操作中为避免发生这种情况，通常是电流逐级增大，每次先提高空气流量再增加负载电流。增大电流之前提高空气流量，压缩机功耗会增加，导致这种逐级增加的方法能耗较大。此外每次提高电流后，需要等系统稳定后再继续加载，因而调节时间较长。为了降低功耗和缩短调节时间，当需求电流增大时，电流调节方式按如图5-17所示的方式调节。图中 $I_{st, req}$ 是需求电流， $I_{st, i}$ 是当前电流， $I_{st, i+1}$ 是下一时刻电流， $I_{st, max}$ 是当前能输出的最大电流，电流满足

$$I_{st, i} \lambda_{O_2} = I_{st, max} \lambda_{O_2, \min} \quad (5-32)$$

将式(5-31)代入式(5-32)得到最大电流

$$I_{st, max} = \left(1.7 - \sqrt{1.7^2 - 1.6 \lambda_{O_2} I_{st, i} / I_{st, rated}} \right) I_{st, rated} \quad (5-33)$$

电流差 ΔI_{st} 定义为：

$$\Delta I_{st} = I_{st, req} - I_{st, max} \quad (5-34)$$

若 $\Delta I_{st} \leq 0$ ，电流立即跳变，即 $I_{st, i+1} = I_{st, req}$ ；若 $\Delta I_{st} > 0$ ，则电流差 ΔI_{st} 通过一个惯性环节后与当前电流 $I_{st, i}$ 叠加得到 $I_{st, i+1}$ 。

当需求电流减小时，可能会出现“氧饱和”而降低系统效率，依旧采用惯性环节逐渐减小电流的方法，如图5-18所示。用电流与过氧比之积表征氧气量，定义氧气量差

$$\Delta W_{O_2} = I_{st, i} \lambda_{O_2} - 2.5 I_{st, req} \quad (5-35)$$

若 $\Delta W_{O_2} \leq 0$ ，电流立即跳变，即 $I_{st, i+1} = I_{st, req}$ ；若 $\Delta W_{O_2} > 0$ ，则电流差 ΔI_{st} 通过一个

惯性环节后与当前电流 $I_{st,i}$ 叠加得到 $I_{st,i+1}$ 。

惯性环节的两个时间常数 T_{i1} 和 T_{i2} 影响电堆电流变化的快慢，数值各取空气供应系统在电流上升和下降时的调节时间的 $1/3 \sim 1/4$ 。若其值大则调节时间长，反之调节时间短。惯性环节将负载的突变电流变为平缓变化的电流，从而使过氧比变化处于合理区域。若上升时间常数取值较大不易出现‘氧饥饿’；下降时间常数取值较小不易出现‘氧饱和’。

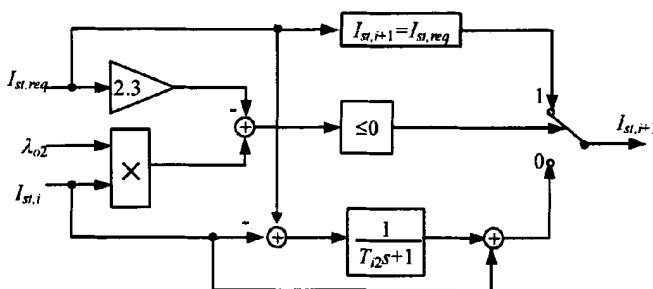


图5-18 电堆电流下降调节方式

具有电流调节器的系统框图如图5-19所示，图中需求电流 $I_{st,req}$ 用于计算最佳过氧比和空压机的流量参考值，电流 $I_{st,i}$ 是检测的当前电堆输出电流。若燃料电池直接接负载，电流 $I_{st,i+1}$ 是下一时刻的电堆输出电流。若燃料电池输出端接DC/DC变换器， $I_{st,i+1}$ 是电池电流的参考值，PI控制器调节变换器的占空比 δ 使电堆输出电流为 $I_{st,i+1}$ 。

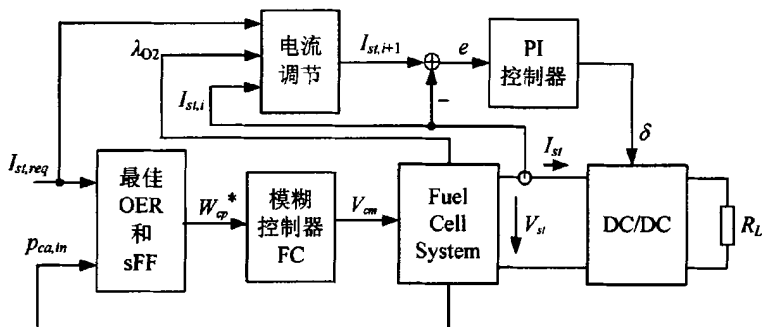


图5-19 含电流调节器的控制框图

当燃料电池直接接负载时，下降时间常数 T_{i2} 取 $0.6s$ ，上升时间常数 T_{i1} 取 $1s$ ，仿真结果如图5-20所示。图(a)是阶跃跳变的需求电流，图(b)是电流调节器输出的电流，除 $t=20s$ 外在其它的跳变时刻，电堆电流平滑上升到需求电流。图(c)中在 $t=10s$ 、 $20s$ 、 $50s$ 和 $70s$ 时电流向上跳变，过氧比的最小值都大于 1.6 ，避免了“氧饥饿”；在 $t=30s$ 、 $40s$ 和 $60s$ 时电流向下跳变，过氧比的最大值都低于 3 ，降低了“氧饱和”程度。由于压缩机空气流量的参考值由需求电流计算，因而图(d)的压缩机功率和电流调节时间常数无关。

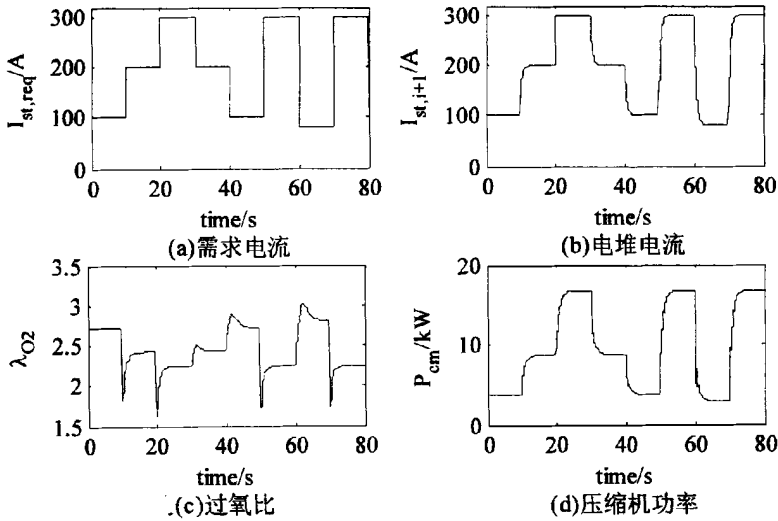


图5-20 电流调节实验波形(I)

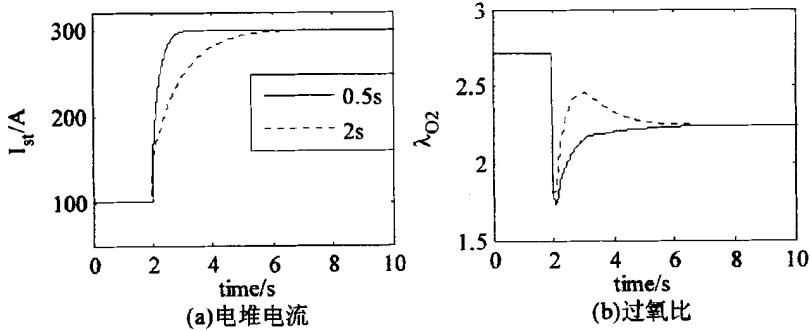


图5-21 两种时间常数对比

上升时间常数 T_{r1} 分别取 $0.5s$ 和 $2.0s$ 时,需求电流 $I_{st,req}$ 在 $t=2s$ 从 $100A$ 跳到 $300A$,仿真结果如图5-21所示。图(a)中时间常数大则电流上升过程慢,电堆输出电流较小,因而过氧比较大(见图(b))。因此,时间常数 T_{r1} 通过改变电堆响应需求电流的时间,从而调节动态过程中过氧比。同理,在电流减小时时间常数 T_{r2} 亦能够调节过氧比,且动态过程中时间常数大的过氧比大。

当燃料电池输出端接DC/DC变换器时,下降时间常数 T_{r2} 取 $0.6s$,上升时间常数 T_{r1} 取 $1s$,负载电阻取 0.8Ω ,PI控制器参数分别:比例系数 0.002 和积分系数 0.2 。电流调节模块采样时间 $0.2s$,DC/DC变换器调节时间 $0.1s$,需求电流与图5-20(a)相同,仿真结果如图5-22所示。图(a)是电堆电流,它与需求电流波形几乎相同。图(b)过氧比的波形与图5-20(c)有差异,在电流跳变处有‘毛刺’,是由于PI控制器调节电堆电流所导致。在电流调节器作用下,过氧比变化范围在 $1.5\sim 3$ 。图(c)是变换器占空比,图(d)是负载电压的波形。

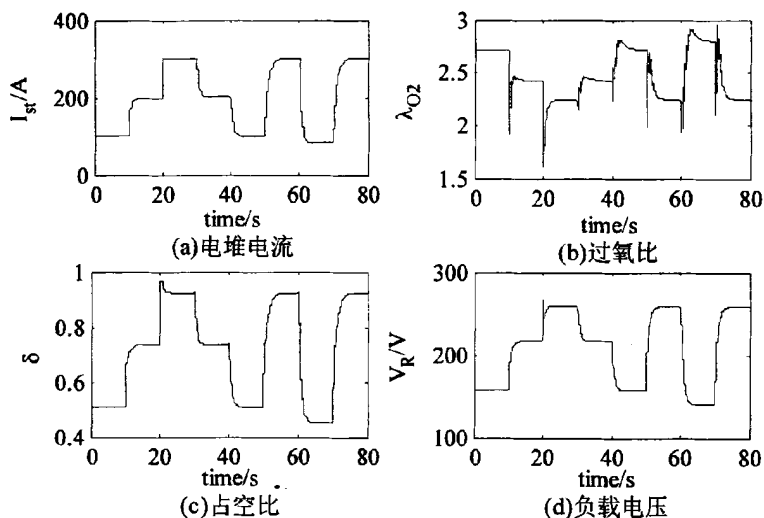


图5-22 电流调节实验波形(II)

5.3 氢气供应系统控制

对氢气供应量的合理控制是保证燃料电池正常工作的条件之一，然而目前对其研究较少。对氢气流量和压力进行适当控制具有非常重要的作用，一方面可使电堆中阳极流场具有合适的氢气浓度，从而保证氢气与氧气的反应速度，使电堆输出电流达到期望的设定值；另一方面由于电堆中质子交换膜所承受的压力在一定的范围内，通过改变进入阳极流场氢气的压力，从而调节膜两端的压力差，延长其使用寿命^[107]。此外，在燃料电池工作时，保持阳极流场压力略高于阴极流场压力，可以防止阴极氮气穿透降低电池性能，也有助于燃料电池在膜发生破裂时，压力差致使氢气从阳极流场中流出从而降低系统的危险性。在氢气供应系统中，文献[108]采用PID进行控制，由于系统属于非线性系统，在负载改变时往往不能获得良好控制效果。文献[107, 109]采用预测控制策略，虽然获得较好的控制，但是在系统模型中没有涉及回流泵和排气阀。基于3.5节所建模型的基础上，本文采用预测控制—动态矩阵控制调节燃料电池阳极流场中的氢气压力。

5.3.1 动态矩阵控制原理

以状态空间法为基础的现代控制理论，尽管在控制领域取得了许多丰硕的成果，但是其理论的出发点是能够对控制对象建立精确的数学模型。实际中有些被控对象往往难以用精确数学方程来描述，预测控制在模型失配、干扰、时变等引起的不确定性时能得到及时补偿，从而提高了系统的控制精度和鲁棒性^[56, 110]。

预测控制是在20世纪70年代提出的一种控制，在PID控制之后它是最广泛使用且最有效的控制算法。它的基本特点包括：基于模型的预测、有限时域的滚动优化、最优输入计算和反馈与预测模型校正。目前比较成熟的预测控制方法有：模型算法控制(Model

Algorithm Control, MAC)、动态矩阵控制(Dynamic Matrix Control, DMC)和广义预测控制(Generalized Prediction Control, GPC)。MAC对受控对象描述采用脉冲响应,用该模型在线实时预测系统的输出。用参考轨迹规范系统的闭环行为,该轨迹的初始值是系统实际的输出,并逐渐趋近于期望输出。DMC对受控对象描述用系统的阶跃响应,并用该模型实时预测系统输出。与MAC相同,亦采用参考轨迹规范系统闭环行为。DMC是一种增量算法,在消除系统稳态误差方面非常有效。由于系统模型使用的是控制对象的阶跃响应,因而对于复杂系统而言可以避免推导状态方程或是系统传递函数。GPC是与自适应控制相关的一种预测控制算法,它保留了自适应控制的优点,如适用于随机过程和在线辨识,又具有预测控制的滚动优化、对模型要求不高的特点。

DMC是流程工业中应用最多的预测控制算法,其控制结构主要由预测模型、滚动优化和误差校正的闭环控制形式构成^[110, 111]。

1. 预测模型

在动态矩阵算法中,首先需要确定控制对象的单位阶跃响应的采样值 $a_i = a(iT_s)$,其中 $i=1\sim N$, T_s 为系统采样周期;当 $t=NT_s$ 时阶跃响应趋于平稳。系统的动态信息可以用有限集合 $\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ 描述,这个集合是DMC的模型参数,向量 $a = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T$ 称为模型向量, N 称为模型时域长度。

在 $t=kT_s$ 时刻如果控制量保持常量,在未来 N 个时刻系统的输出分别是

$$\tilde{y}_0(k+1|k), \tilde{y}_0(k+2|k), \dots, \tilde{y}_0(k+N|k)$$

那么控制增量 $\Delta u(k)$ 作用后系统的输出是

$$\tilde{Y}_{N1}(k) = \tilde{Y}_{N0}(k) + a\Delta u(k) \quad (5-36)$$

其中: $\tilde{Y}_{N0}(k) = [\tilde{y}_0(k+1|k), \dots, \tilde{y}_0(k+N|k)]^T$ 表示在 $t=kT_s$ 时刻无控制增量 $\Delta u(k)$ 作用条件下未来 N 个时刻系统输出的预测值; $\tilde{Y}_{N1}(k) = [\tilde{y}_1(k+1|k), \dots, \tilde{y}_1(k+N|k)]^T$ 表示在 $t=kT_s$ 时刻有控制增量 $\Delta u(k)$ 作用条件下未来 N 个时刻系统输出的预测值; $k+i|k$ 表示在 $t=kT_s$ 时刻预测 $t=(k+i)T_s$ 时刻。

在 $t=kT_s$ 时刻,如果现在以及未来 M 个时刻控制增量发生变化,即在控制增量 $\Delta u(k), \dots, \Delta u(k+M-1)$ 作用下,预测系统在未来 P 个时刻的输出

$$\tilde{Y}_{PM}(k) = \tilde{Y}_{P0}(k) + A\Delta U_M(k) \quad (5-37)$$

式中: $\tilde{Y}_{PM}(k) = [\tilde{y}_M(k+1|k), \dots, \tilde{y}_M(k+P|k)]^T$ 为 $t=kT_s$ 时刻预测的有 M 个控制增量 $\Delta u(k), \dots, \Delta u(k+M-1)$ 时未来 P 个时刻的系统输出。

$\tilde{Y}_{P0}(k) = [\tilde{y}_0(k+1|k), \dots, \tilde{y}_0(k+P|k)]^T$ 为 $t=kT_s$ 时刻无控制增量条件下未来 P 个时刻的系统输出的预测值;

$\Delta U_M(k) = [\Delta u(k), \dots, \Delta u(k+M-1)]^T$ 为从现在起 M 个时刻的控制增量;

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_2 & a_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_p & a_{p-1} & \cdots & a_{p-M+1} \end{bmatrix} \quad \text{称为系统的动态矩阵, 其元素是由系统的阶跃响应采样值构成。}$$

2. 滚动优化

DMC是一种通过优化进行的控制算法。在 $t=kT_s$ 采样时刻的优化性能指标为

$$\min J(k) = \sum_{i=1}^P q_i [w(k+i) - \bar{y}_M(k+i|k)]^2 + \sum_{j=1}^M r_j \Delta u^2(k+j-1) \quad (5-38)$$

通过选取从当前时刻和未来 $M-1$ 个时刻的控制增量 $\Delta u(k), \dots, \Delta u(k+M-1)$, 使系统在未来 $P(N \geq P \geq M)$ 个时刻的输出值 $\bar{y}_M(k+1|k), \dots, \bar{y}_M(k+P|k)$ 尽可能接近期望值 $w(k+1), \dots, w(k+P)$; 在式(5-38)描述的性能指标中, 第二项是有关控制增量的约束, 即抑制控制量发生剧烈变化; q_i, r_j 为加权系数; P 和 M 分别称为优化时域长度和控制时域长度。

在预测控制中, 常常要求闭环响应沿着一条指定的、平滑的曲线到达新的稳定值, 以提高系统的鲁棒性。一般期望值取

$$w(k+j) = \alpha^j y(k) + (1-\alpha^j) y_r \quad (5-39)$$

其中: $j=1 \sim P$, α 为柔化系数; $y(k)$ 为实测的系统输出值; y_r 为系统的给定值。

在每个时刻, 尽管优化性能指标参数值是不同的, 但是其形式完全相同的, 如式(5-38)。随时间不断地向前推移, 优化在不断进行。引入向量和矩阵

$$W_p(k) = [w(k+1), \dots, w(k+P)]^T, \quad Q = \text{diag}[q_1, \dots, q_p], \quad R = \text{diag}[r_1, \dots, r_M]$$

则优化性能指标式(5-38)可改写为

$$\min J(k) = \|W_p(k) - \bar{Y}_{PM}(k)\|_Q^2 + \|\Delta U_M(k)\|_R^2 \quad (5-40)$$

上式中矩阵 Q 和 R 分别称为误差权矩阵和控制权矩阵。

在不考虑输入输出约束的情况下, 在 $t=kT_s$ 时刻 $W_p(k), Y_{P0}(k)$ 均为已知, 使 $J(k)$ 取最小值可通过极值必要条件 $\frac{dJ(k)}{d\Delta U_M(k)}$ 求得, 即

$$\Delta U_M(k) = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q [W_p(k) - \bar{Y}_{P0}(k)] \quad (5-41)$$

上式就是 $t=kT_s$ 时刻的最优控制增量的序列。由于最优解是根据预测模型求出的, 因而它属于开环最优解。

3. 反馈校正

在实际过程中, 由于模型的误差、弱非线性以及不确定的因素, 基于式(5-36)的预测模型获得的开环最优控制序列可能使系统输出不能跟随期望值。为了及时纠正模型预测使其与实际的输出一致, 在每个采样时刻都利用过程的误差信息对预测值做修正, 而不是等到 M 个控制增量作用完后再校正。因此在 $t=kT_s$ 时刻首先实施 $\Delta U_M(k)$ 中的第一个控

制作用，此时控制增量是

$$\begin{aligned}\Delta u(k) &= c^T \Delta U_M(k) \\ &= c^T (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q [W_p(k) - \tilde{Y}_{p0}(k)] \\ &= d^T [W_p(k) - \tilde{Y}_{p0}(k)]\end{aligned}\quad (5-42)$$

其中： $c^T = (1 \ 0 \ \dots \ 0)$ ， $d^T = c^T (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q = (d_1 \ d_2 \ \dots \ d_p)$

在 $t=kT_s$ 时刻，由于控制增量 $\Delta u(k)$ 已作用于被控对象，预测系统未来输出要考虑 $\Delta u(k)$ 产生的影响，即由式(5-36)计算 $\tilde{Y}_{N1}(k)$ 。在 $t=(k+1)T_s$ 时刻，不是继续采用最优控制增量 $\Delta U_M(k)$ 中的第二个元素 $\Delta u(k+1)$ ，而是比较系统的实际输出 $y(k+1)$ 与通过模型预测的输出，即与 $\tilde{Y}_{N1}(k)$ 中的第一个元素 $\tilde{y}_1(k+1|k)$ 进行比较，构成误差：

$$e(k+1) = y(k+1) - \tilde{y}_1(k+1|k) \quad (5-43)$$

这个误差体现了预测模型中未包含的模型失配、干扰等各种不定因素。由于预测模型存在误差，在以后各时刻由预测模型计算的输出值都应该校正。对未来误差的预测，可以通过将当前的误差 $e(k+1)$ 通过加权系数 $h_i (i=1, 2, \dots, N)$ 而获得，因而有

$$\tilde{Y}_{cor}(k+1) = \tilde{Y}_{N1}(k) + h e(k+1) \quad (5-44)$$

式中： $\tilde{Y}_{cor}(k+1) = [\tilde{y}_{cor}(k+1|k+1), \dots, \tilde{y}_{cor}(k+N|k+1)]^T$ 是 $t=kT_s$ 时刻经过误差校正后预测的在 $t=(k+i)T_s (i=1, \dots, N)$ 时刻的系统输出， $h = [h_1, \dots, h_N]^T$ 为误差校正向量，其中 $h_1 = 1$ 。

在经校正后的 $\tilde{Y}_{cor}(k+1)$ 中，除第一项外的其余各项是无未来控制增量作用时在 $t=(k+2)T_s, \dots, (k+N)T_s$ 时刻的预测值，可作为在 $t=(k+1)T_s$ 时刻 $\tilde{Y}_{N0}(k+1)$ 中的前 $N-1$ 个分量，在 $t=(k+1)T_s$ 时刻对未来 $(k+1+N)T_s$ 时刻的预测值作为最后一个分量，可由 $\tilde{y}_{cor}(k+N|k+1)$ 来近似，因而有：

$$\tilde{Y}_{cor}(k+1) = \tilde{Y}_{N1}(k) + h e(k+1) \quad (5-45)$$

其中 $S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}$ 为移位矩阵。

在 $t=(k+1)T_s$ 时刻，已知 $\tilde{Y}_{N0}(k+1)$ 就象之前所叙述的在 $t=kT_s$ 时刻那样，重新进行新的预测和优化，整个DMC控制算法是在这种不断推进的过程中一次次滚动进行。

DMC算法是一种增量算法。理论证明，不管模型是否存在误差，这种算法都能调节系统输出到期望值而且没有稳态误差；即使是在被控对象输入端有阶跃形式的扰动，该算法也能控制系统输出回到原来的设定值。

5.3.2 氢气供应系统的动态矩阵控制

在氢气供应系统中，阳极流场的压力可以通过调节阀进行调节，其流量主要是通过

回流泵调节。燃料电池工作时，阴极流场与阳极流场之间的压力差对质子交换膜使用寿命至关重要，调节阀根据阴极进气管道的压力实时控制阳极流场的压力，保证阳极流场压力高于阴极且压力差在膜所承受的合理范围之内。本文仅讨论调节阀的控制，而假设回流泵能将排气管道的氢气和水蒸气及时抽到进气管道。对调节阀的控制采用动态矩阵控制DMC，系统控制框图如图5-23所示。

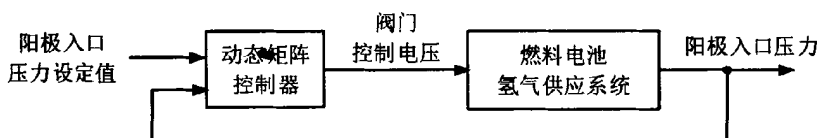


图5-23 阳极系统控制结构

仿真时使用BALLARD公司Mark902燃料电池，具体参数值如表4-2所示。由于系统属于非线性系统，车载燃料电池工作时阳极流场压力的工作范围在 $1.5\text{bar}\sim 2.2\text{bar}$ ，因而在其工作范围内测试其单位阶跃响应信号^[57]。取电堆电流 I_{st} 为 300A 时，加湿器的期望湿度 ϕ_{des} 是 0.95 ，调节阀电压取 10V (最大 36V)，系统稳定工作后，阳极流场的压力是 1.61bar ；然后调节阀电压跳变到 11V ；得到阳极流场压力的响应曲线，将该响应曲线各点值减去 1.61bar ，从而得到阳极流场压力的单位阶跃响应如图5-24所示，图中可以看出阳极流场的压力的响应时间是 9.0s 。

取模型时域长度 $N=30$ ，可得系统的采样时间 $T_s=9.0/N$ ，即 $T_s=0.3\text{s}$ 。取系统的预测时域长度 $P=6$ ，控制时域长度 $M=4$ ，动态矩阵即为6行4列的矩阵。对系统单位阶跃响应进行采样后可得动态响应矩阵，即：

$$A = \begin{bmatrix} 0.0168 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0344 & 0.0168 & 0 & 0 \\ 0.0501 & 0.0344 & 0.0168 & 0 \\ 0.0643 & 0.0501 & 0.0344 & 0.0168 \\ 0.0769 & 0.0643 & 0.0501 & 0.0344 \\ 0.0883 & 0.0769 & 0.0643 & 0.0501 \end{bmatrix} \quad (5-46)$$

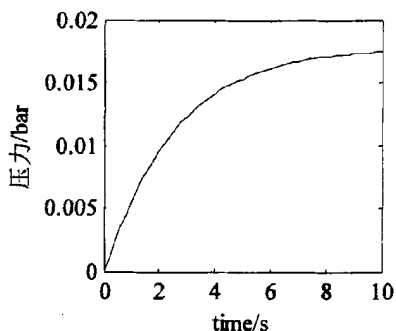


图5-24 阳极流场压力单位阶跃响应

电堆电流 I_{st} 是 300A 时，阳极流场的设定压力是 1.8bar 时，仿真结果如图5-25所示。图(a)是阳极流场压力，可以看出所设计动态矩阵控制器上升时间快(1.2s 时阳极压力是 1.735bar ，误差 3.63%)， $t>1.2\text{s}$ 后阳极流场压力缓慢下降， $t=2.7\text{s}$ 达到最低值 1.72bar (误差 4.44%)， $t>2.7\text{s}$ 后阳极流场的压力逐渐上升向设定压力值 1.8bar 逼近， $t=6\text{s}$ 时，阳极流场的压力是 1.7826bar (误差 0.97%)。图(b)是控制器输出的电压增量，可以看出控制器具有良好的动态特性。图(c)是调节阀控制电压，由于设计控制器时，在滚动优化环节调节控制权系数矩阵 R 限制了电压增量限制，从而保证了调节阀控制电压在其工作范围内。系数矩阵

R 是对角线矩阵，其对角线元素取0.001。

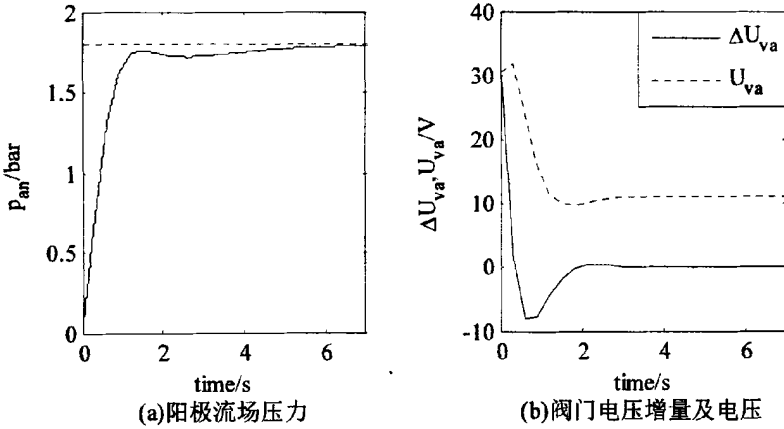


图5-25 设定压力是1.8bar时仿真结果

动态矩阵控制器输出的是电压增量，理论上无稳态误差，而本文所设计的控制器在系统输出进入设定值的误差带5%以后，缓慢向设定值逼近，其原因一方面是因为系统是非线性的，尽管动态矩阵控制具有反馈校正环节，但需要一定的时间，且时间的长短与采样时间有关，本文的采样时间是0.3s，因而校正时间较长；另一方面预测控制中采用柔化曲线，使系统输出通过柔化曲线逐渐趋于设定值，输出向设定值逼近的快慢与柔化系数有关，本文中柔化系数为0.2。

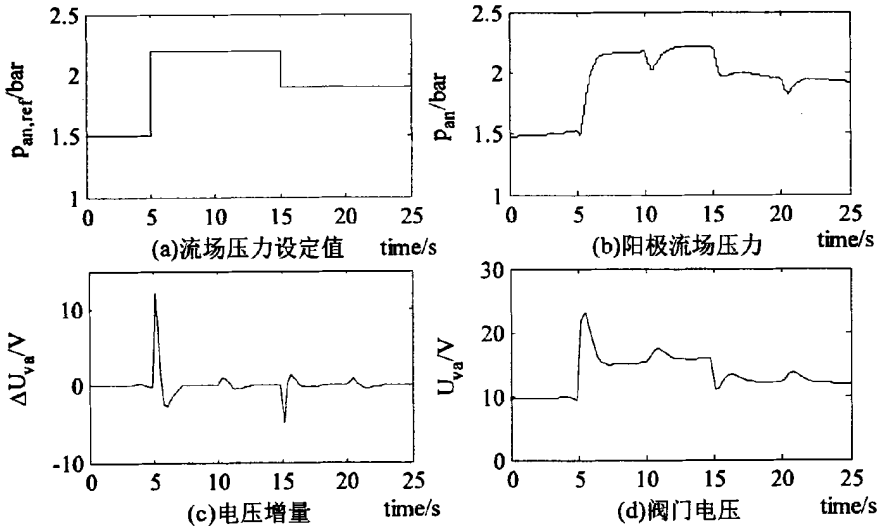


图5-26 设定压力变化时仿真结果

当阳极流场压力的设定值是一个脉冲信号时，仿真结果如图5-26所示。取电堆电流 I_{st} 为200A时，加湿器的期望湿度 ϕ_{des} 是0.95，排气阀在 $t > 5s$ 后每隔5s排一次气，排气时间为0.5s。阳极流场压力的设定值如图(a)，起始时刻阳极流场压力为1.6bar，在5s时将设定压

力值变为 2.2bar ，在 15s 时设定压力值又变为 1.90bar 。图(b)中当 $t < 5\text{s}$ 时阳极流场压力稳定在 1.5bar ；在 $t = 5\text{s}$ 阳极流场压力设定值变为 2.2bar ，控制器调节阀门电压使阳极流场压力升，在 $t = 7.5\text{s}$ 时升到 2.22bar (误差 0.91%)； $t = 10\text{s}$ 时受到排气阀动作的影响压力突降， $t = 10.5\text{s}$ 时阳极流场压力降到 2.0358bar (7.46%)，然后开始上升到 2.235bar (1.59%)； $t = 15\text{s}$ 时压力的设定值变为 1.9bar ，控制器调节阀门电压使阳极流场压力下降，同时压力受到排气阀的影响开始下降到 1.968bar (3.58%)； $t = 20\text{s}$ 时压力升为 1.927bar (1.42%)，此时又受到排气阀的影响压力出现波动。

图(c)和图(d)分别是阀门控制电压增量和电压。由图(c)中， $t = 5\text{s}$ 和 $t = 15\text{s}$ 时附近控制器输出的电压增量有较大的跳变，这是由于阳极压力设定值变化引起的，可以看出控制器的响应时间短。在 $t = 10\text{s}$ 和 $t = 20\text{s}$ 附近电压增量有很小跳变，这是排气阀动作引起的。图中系统的响应时间小于 3s ，因而本文所设计的动态矩阵控制器具有较快响应时间。

5.3.3 最佳过氧比的氢气供应系统控制

车载燃料电池工作时，根据电堆电流和阴极入口压力，空气供应系统控制器保持过氧比处于最优值，阳极入口压力跟随阴极入口压力。阳极入口压力的期望值是高于阴极 0.2bar ，这样便于水合 H^+ 穿过质子交换膜；由于膜的耐压限制，阳极入口压力不能高与阴极入口 0.5bar 。对阳极入口压力的控制如图5-27所示。图中 $p_{ca,in}$ 是阴极流场入口压力， $p_{ca,in} + 0.2\text{bar}$ 作为阳极流场入口压力 $p_{an,in}$ 的参考值 $p_{an,ref}$ ，动态矩阵控制器根据压力 $p_{an,in}$ 和其参考值 $p_{an,ref}$ 调节阀门控制电压 U_{va} ，从而改变压力 $p_{an,in}$ 使其趋近于参考值 $p_{an,ref}$ ；根据电堆电流 I_{st} 计算排气阀的周期，排气时间取 500ms 。

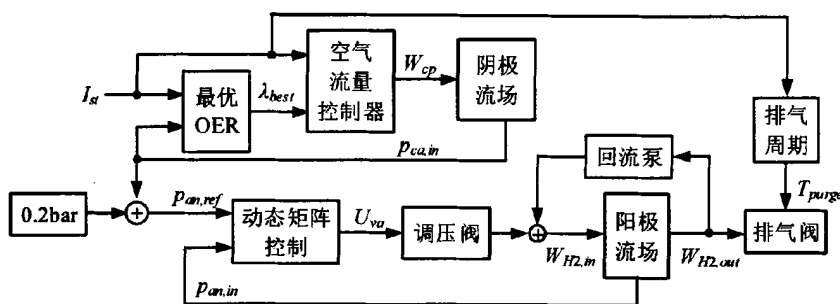


图5-27 阳极压力控制

电堆电流是 180A ，回流泵的转速是 400r/min ，其惯性环节的时间常数取 0.3s ，阴极入口压力是 180A 的最佳过氧比压力，仿真结果如图5-28所示。图(a)中虚线是阳极入口压力参考值 $p_{an,ref}$ ， $t = 2\text{s}$ 时实际入口压力高于参考压力 0.1261bar ，误差是 6.17% ； $t = 4\text{s}$ 时高于 0.0746bar ，误差是 3.67% 。控制器的调节时间短，不到 1.2s 阳极压力就高于参考压力，由于DMC控制参考轨迹使用了柔化曲线，在 $t > 2\text{s}$ 后阳极压力逐渐逼近参考值 2.0347bar 。图(b)中在 $[0\text{s}, 2\text{s}]$ 区间，流量开始阶梯式急速下降， $t = 2\text{s}$ 时流量是 0.8037g/s ， $t > 2\text{s}$ 后逐渐逼近

稳态值(产生180A电流需要0.8247g/s氢气的流量), 由于阳极末端使用了回流泵回收未反应的氢气, 使得供应的氢气流量约等于反应流量。图(c)中 $t > 2s$ 后阀门电压的增量近似是0。图(d)在 $t = 0.3s$ 电压上升28.434V, $t > 0.3s$ 电压开始迅速降低, $t = 2.1s$ 时将为6.322V。由于这区间阀门电压急速下降, 阀门开度迅速减小, 阀门的氢气流量也迅速减小。

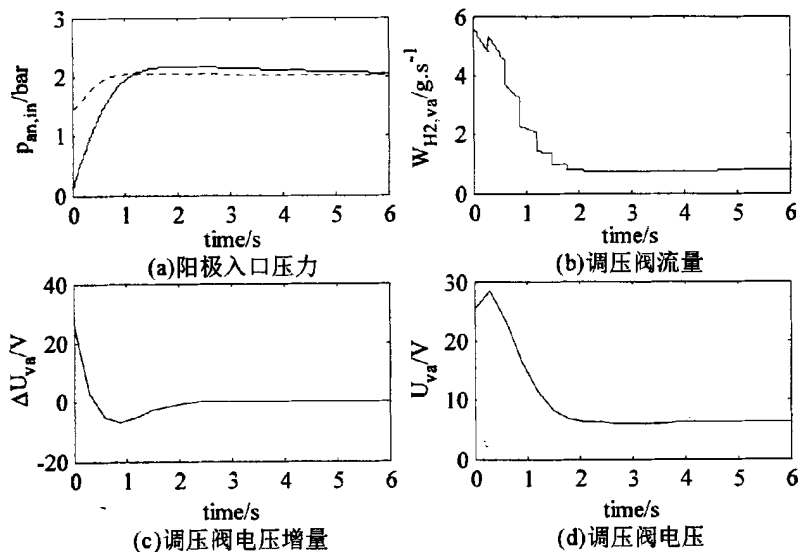


图5-28 最佳过氧比时阳极阶跃特性

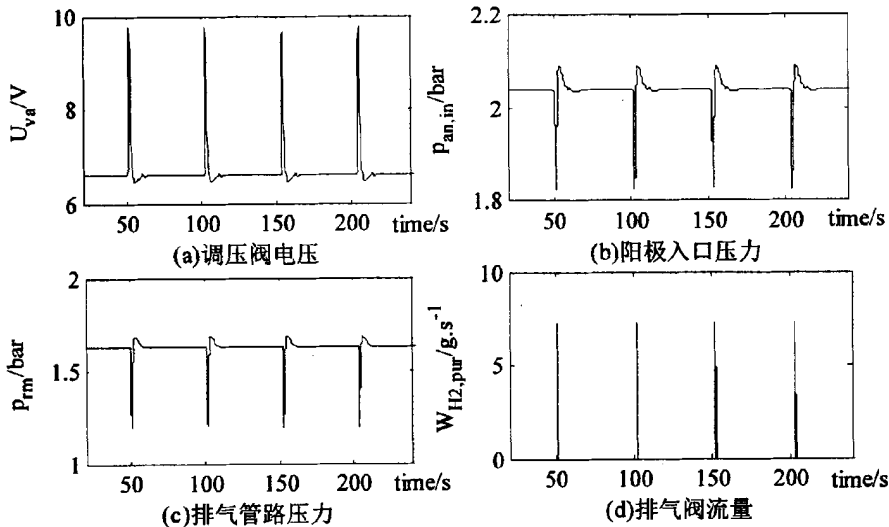


图5-29 180A时阳极稳态特性

当电流是180A时, 排气阀的周期是51s, 入口压力、排气管路压力、进气流量和排气流量如图5-29所示。排气阀每次排气, DMC控制器会使得阀门电压产生一个向上的脉冲(图(a)中), 最大电压达到9.775V(稳态电压6.6V)。阳极入口压力先出现一个向下的脉冲(图(b)), 然后有一个向上波动。阴极入口压力是1.837bar, 阳极入口压力与其差值的范围在

$[-0.0124\text{bar}, 0.253\text{bar}]$, 出现了阳极压力低于阴极压力, 但持续时间仅 0.14s 。阳极入口压力超过阴极压力最大 0.253bar , 满足小于 0.5bar 的要求。排气管路的压力变化(图(c))与阳极入口压力相似, 取二者均值计算电堆内部阳极流场的压力, 三部分压力的稳态值、最大值、最小值和变化幅度如表5-4。排气管路距离排气阀最近, 其压力变化幅度最大。每次排气时排气阀最大的气体流量达到 1.327g/s 。

表5-4 阳极压力变化情况

压力	稳态值(bar)	最大值(bar)	最小值(bar)	波动幅度(%)
阳极入口	2.037	2.091	1.825	-10.43%~2.58%
阳极流场	1.832	1.887	1.510	-17.58%~3.04%
排气管路	1.626	1.684	1.194	-26.54%~3.58%

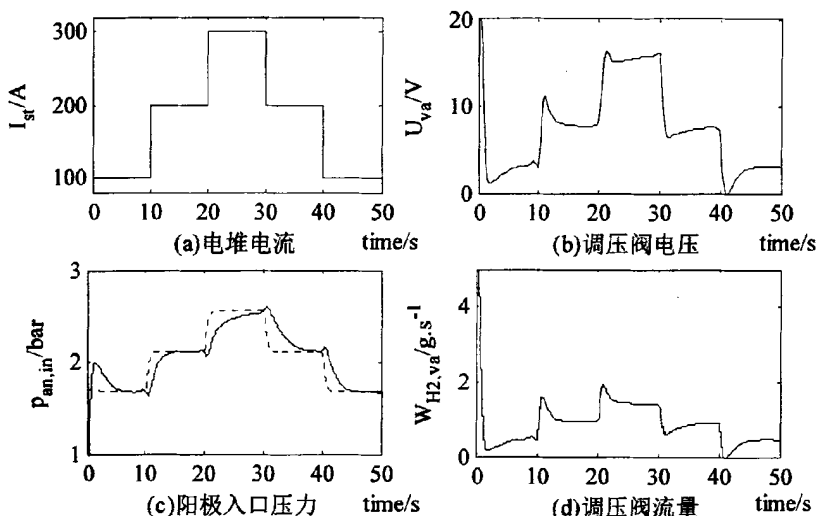


图5-30 电流是脉冲时氢气供应系统响应

电堆电流是一系列脉冲时(如图5-30(a)), 阀门电压、流量和阳极入口压力如图5-30所示。电堆电流增大时, 排气阀电压(图(b))增大, 排气阀开度变大, 气体流量增大(图(d)), 尽管排气周期减小, 但是排气管路的压力升高, 使得阳极入口压力升高(图(c))。电堆电流变小时, 过程相反。图(c)中虚线是阳极入口压力参考值, DMC根据它控制调压阀开度从而调节阳极入口压力, 阳极压力的动态特性良好。电流较小时调节短, 电流较大时调节时间长。

5.4 热管理系统控制

在燃料电池内部, 氢氧发生化学反应和电荷移动会产生热量, 从而使电堆内部温度升高, 温度升高会加快化学反应和电堆内水分子活度, 提高膜的含水量, 改善膜的导电率, 因而温度升高有利于提高电池的性能。然而PEMFC的电解质膜是一种有机膜, 耐温有限, 而且考虑膜的含水性问题, 因而工作温度不能高过 100°C 。此外, 如果燃料电池的

工作温度过高, 会加快铂粒子传输, 使得催化剂降解更快从而导致催化层有效面积的减少^[95]。

目前在燃料电池热管理方面已取得了一些研究成果。Ahn J等^[112]建立燃料电池系统的温度模型, 包括旁路阀、散热器、储液器、冷却液泵及空气供应的风机、进气和出气管路。对电堆温度控制, 分别采用了经典的比例积分(PI)控制器和带积分的状态反馈控制器, 同时通过前馈控制减小温度对空气流量的影响。电堆电流分别取脉冲波形和联邦城市循环工况下的试验电流波形时, 通过仿真验证了该控制策略不仅可以阻止催化层的温度上升和防止氧饥饿, 并且可以降低空气风机和冷却液泵的寄生功耗。Xi Li等^[113]在利用优化算法识别的温度仿射模型基础上, 设计了一种具有快速平滑趋近和快速收敛的变结构滑模控制器, 仿真证明了该方法可以控制燃料电池的温度达到满意的目标, 同时证明了算法的有效性和鲁棒性。Arce A等^[114]针对一个1.2kW Nexa燃料电池模块, 利用热力学第一定律, 建立系统温度方程, 采用一阶惯性环节(时间常数取10s)考虑热敏电阻延时性, 将该方程与空气供应子系统的方程^[49]组成一个4个状态变量、一个输入、两个干扰和一个输出的状态方程模型, 控制器的设计采用显示模型预测控制, 考虑了输入、干扰和输出的限制条件, 以最小化电堆的性能衰减和最大化电堆的效率控制目标。仿真结果和实验表明在电堆工作温度范围内, 该预测控制器能精确地跟踪温度设定值。王斌锐等^[115]对系统热传递进行分析, 建立了燃料电池温度场热模型。通过实验得到不同负载时燃料电池输出功率最大的最佳温度值, 设计了模糊PID的温度控制器。通过实验证明了最佳温度的合理性以及模糊增量PID控制能够满足电堆温度要求, 该方法适用于缓慢变化的负载。

在燃料电池机车方面, 国内外也有一些相关研究。Hess K S等^[116]介绍了用于城市和军事基地铁路的燃料电池机车原型, 使用燃料电池和蓄电池的混合驱动结构, 质子交换膜燃料电池连续净输出功率240kW, 瞬态功率超过1MW, 是目前最大的燃料电池车辆。Guo L等^[117]讨论了燃料电池混合机车功率系统的设计和建模。该文建立了燃料电池和辅助储能系统的模型, 提出了全局控制策略, 用于调节燃料电池、超级电容和蓄电池之间的能量分配。用典型作业机车的功率数据, 验证了在不同的功率需求下, 全局控制策略不仅使输出电压在合适的范围, 而且保持蓄电池的荷电状态在最优范围内以及系统工作在高效率区域。Hsiao D等^[118]研究了200W的燃料电池小火车, 燃料电池与铅酸蓄电池并联连接作为系统动力源, 实验结果证明了这种拓扑结构不仅能够适用于高温高湿的气候, 而且能提供稳定的功率。

在燃料电池机车方面, 研究主要集中在主电路拓扑结构以及燃料电池与能量贮存单元之间的能量管理, 而很少有文献针对车载大功率燃料电池热管理研究, 并考虑辅机功耗的最优控制方法。在所建的燃料电池热管理模型基础上, 本文将分别采PI控制、二次型最优控制和预测控制设计温度控制器。

5.4.1 基于状态方程的预测控制原理

描述控制对象有三种方法：系统脉冲响应/阶跃响应、传递函数和状态方程，在预测控制中不同的描述形式对应不同的控制算法。用脉冲响应/阶跃响应描述对象的预测控制出现较早，基于阶跃响应的预测控制就是在5.3节中的DMC控制。有限脉冲响应对设计人员很具有吸引力，它直观地描述了过程对象的延时、反应时间和增益。然而它仅限于稳定系统，并且需要大量的模型参数。通常依据模型动态过程和采样时间的选择，描述过程需要30到60个脉冲响应系数。传递函数描述过程控制更简洁，适用于稳定和不稳定的系统，基于传递函数的预测控制典型的方法有Peterka控制算法和Clarke等提出的广义预测控制。尽管这种算法在描述对象需要最少的系数，但不适合于多输入和输出的过程控制，基于状态方程的预测控制算法是广义预测控制的拓展^[119]。

1. 模型描述

假设被控对象有 m 个输入、 q 个输出和 n_1 个状态变量，输出变量个数小于输入变量个数，即 $q < m$ 。考虑系统的干扰和白噪声时，描述系统的状态空间方程一般形式如下：

$$\begin{cases} x_m(k+1) = A_m x(k) + B_m u(k) + B_d w(k) \\ y(k) = C_m x_m(k) \end{cases} \quad (5-47)$$

式中 $w(k)$ 代表输入信号中的干扰信号，假设它是白噪声的积分序列。令式(5-47)中状态方程中的序号 k 变为 $k-1$ 得到

$$x_m(k) = A_m x(k-1) + B_m u(k-1) + B_d w(k-1) \quad (5-48)$$

定义状态矢量、输入和干扰的差分为

$$\Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1) \quad \Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad \xi(k) = w(k) - w(k-1)$$

式(5-47)中的状态方程与式(5-48)相减得到

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) + B_d \xi(k) \quad (5-49)$$

式中 $\xi(k)$ 是一个零均值的白噪声，可以忽略。由式(5-47)的第二个方程和式(5-49)可以推导出输出 $y(k)$ 和状态差分 $\Delta x_m(k)$ 满足

$$\Delta y(k+1) = C_m \Delta x_m(k+1) = C_m A_m \Delta x_m(k) + C_m B_m \Delta u(k) \quad (5-50)$$

式中输出差分定义为 $\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k)$ 。

定义一个新的状态矢量 $x(k) = [\Delta x_m(k)^T \ y(k)^T]^T$ ，由式(5-49)和式(5-50)可以得到

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B\Delta u(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (5-51)$$

式中 $A = \begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & I_{q \times q} \end{bmatrix}$ 、 $B = \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}$ 和 $C = [0_m \ I_{q \times q}]$ 。 $I_{q \times q}$ 是一个单位阵，其阶数

与输出变量 q 相等。 0_m 是一个 $q \times n_1$ (n_1 是状态变量的个数)的零矩阵。三个矩阵构成的状态空间方程称为过程系统的增广模型。

2. 滚动优化和反馈校正

定义输出矢量 Y 和控制增益矢量 ΔU 是

$$Y = [y(k_i+1|k_i)^T \ y(k_i+2|k_i)^T \ \cdots \ y(k_i+N_p|k_i)^T]^T$$

$$\Delta U = [\Delta u(k_i)^T \ \Delta u(k_i+1)^T \ \cdots \ \Delta u(k_i+N_c-1)^T]^T$$

式中 N_c 是控制时域长度; N_p 是优化时域长度, 对于给定的状态矢量 $x(k_i)$, 优化目标选取未来 N_p 个时刻输出矢量, N_p 也是优化窗口的长度。 k_i 表示当前时刻, $\Delta u(k_i+1)$ 是在 k_i+1 时刻控制矢量增量, $y(k_i+1|k_i)$ 是在当前 k_i 时刻预测 k_i+1 时刻的输出矢量, 其它的符号一次类推。

在式(5-51)表示的增广模型基础上, 根据当前的状态矢量 $x(k_i)$ 和控制增量 ΔU 计算下一步的输出矢量 Y

$$Y = Fx(k_i) + \Phi \Delta U \quad (5-52)$$

式中矩阵 F 和 Φ 与增广模型系数矩阵 (A, B, C) 关系是

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \cdots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & CA^{N_p-3}B & \cdots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}$$

定义一个包含参考信号的矢量 $r(k_i)$ 和一个矩阵 R_s 为

$$r(k_i) = [r_1(k_i) \ r_2(k_i) \ \cdots \ r_q(k_i)]^T \quad R_s^T = \overbrace{[r(k_i) \ r(k_i) \ \cdots \ r(k_i)]}^{N_p}$$

其中: q 是参考信号输入的个数, 也是过程系统输出的个数; $r_j(k_i)$ 是第 i 个设定值 ($1 \leq j \leq q$)。

控制目标的评价函数 J 定义为

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (5-53)$$

式中 \bar{R} 是一个对角线矩阵, 主对角线上是一个矢量 R_1 , 且 $R_1 = \overbrace{[\gamma \ \gamma \ \cdots \ \gamma]}^{N_c}$ 和 $\gamma = [\gamma_1 \ \gamma_2 \ \cdots \ \gamma_m]$ (m 是输出信号的个数), γ_i ($1 \leq i \leq m$)是控制增量的加权系数。如果期望某个控制量作用强, 对应的加权系数就取较大值, 反之取较小的值。

在式(5-53)中第一项是预测输出与参考值方差最小, 而第二项是考虑控制信号的强弱。为了得到最优的控制增量 ΔU 使得评价函数 J 最小, 将式(5-52)代入式(5-53),

$$J = [R_s - Fx(k_i) - \Phi \Delta U]^T [R_s - Fx(k_i) - \Phi \Delta U] + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (5-54)$$

整理上式

$$J = [R_s - Fx(k_i)]^T [R_s - Fx(k_i)] - 2\Delta U^T \Phi^T [R_s - Fx(k_i)] + \Delta U^T (\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U \quad (5-55)$$

上式对 ΔU 求导,

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = -2\Phi^T [R_s - Fx(k_i)] + 2(\Phi^T \Phi + \bar{R})\Delta U \quad (5-56)$$

令上式等于零得到最优控制增量矢量

$$\Delta U^0 = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (R_s - Fx(k_i)) \quad (5-57)$$

其中 $(\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T$ 反映了设定的参考值变化, 而 $(\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T F$ 反映了状态反馈控制。由于实时滚动优化的控制原理, 因而在当前 k_i 时刻控制增量中前 m 个元素被用于实施。

通常过程控制中受被控对象限制, 控制信号在一定范围内变化。如果控制信号受到限制, 那么式(5-57)表示的控制增量不是最优值, 此时系统性能严重恶化。需要在设计预测控制过程中考虑控制信号受限条件, 才能得到最优控制增量 ΔU 。在式(5-55)中, 评价函数 J 要获得最小与第一项没有关系, 它等价于式(5-58)表示的评价函数 J_1 。

$$J_1 = \Delta U^T (\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U - 2\Delta U^T \Phi^T (R_s - Fx(k_i)) \quad (5-58)$$

将上式整理成

$$J_1 = \frac{1}{2} \Delta U^T H \Delta U + \Delta U^T f \quad (5-59)$$

其中: 矩阵 $H = 2(\Phi^T \Phi + \bar{R})$ 和 $f = -2\Phi^T (R_s - Fx(k_i))$ 。

控制信号受限条件表示为

$$A_{cons} \Delta U \leq b \quad (5-60)$$

其中: A_{cons} 是反映受限条件的矩阵, 元素仅由 -1、0、1 组成, 行数等于受限条件个数, 列数等于 ΔU 的长度; b 是一个由受限制组成矢量。

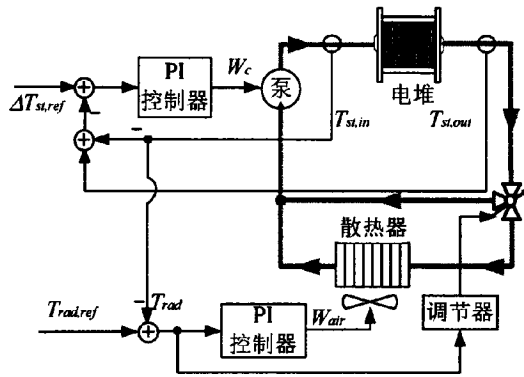
对式(5-59)的评价函数和其受限条件式(5-60), 可以采用Hildreth的二次规划程序进行优化。

5.4.2 热管理系统的PI控制和二次型最优控制

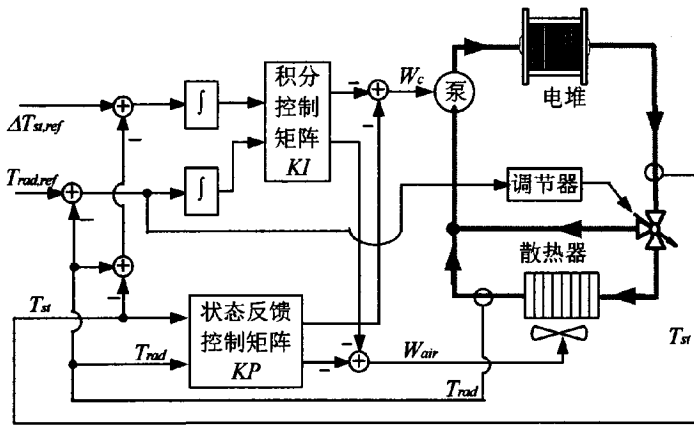
燃料电池工作时, 电堆的入口温度和温度差(出口温度减去入口温度)必须得到良好的控制, 图5-31所示的是其温度控制框图, 分别采用了PI控制(图(a))和状态反馈控制(图(b))。在温度系统中, 电堆温度高低主要取决于散热器周围空气流量; 而温度差高低主要由冷却管路中冷却液的流量决定; 因此图(a)中使用两个PI控制器调节两个流量, 分别控制电堆温度和温度差。旁路阀门开度对电堆温度和温差影响较弱, 对其使用开关控制, 即当电堆温度低于设定温度 10°C 时, 使阀门开度系数 k_{bv} 等于 0, 这样冷却液不通过散热器, 而是通过与其并联的支路流回电堆, 氧化反应产生大量的热量使得电堆温度迅速上升; 当电堆温度高于设定温度 10°C 时, 使阀门系数 k_{bv} 等于 1, 冷却液全部通过散热器, 可以使电堆温度以最快速度降低。

1. 系统数学方程

燃料电池温度系统是一个较复杂的非线性系统, 为了分析方便起见, 作以下处理:



(a)PI控制



(b)带积分的状态反馈控制

图5-31 温度系统控制框图

(1)湿氢气和湿空气带入电堆中的热量以及生成物水带出热量远小于冷却液带出的热量，可以忽略，即

$$(\dot{q}_{ca,in} - \dot{q}_{ca,out}) + (\dot{q}_{an,in} - \dot{q}_{an,out}) - \dot{q}_{gen} = 0 \quad (5-61)$$

(2)启动后每个器件以及管路中冷却液已充满，可以认为各处冷却液流量相等，即电堆入口和出口冷却液流量相等，即 $W_{c,st,in} = W_{c,st,out}$ ，记为 W_c ；当旁路阀门开度 k_{bv} 为1时，散热器入口和出口冷却液流量相等，即

$$W_{c,rad,in} = W_{c,rad,out} = W_c \quad (5-62)$$

(3)燃料电池温度系统是一个大惯性系统，时间常数远大于管路引起的延时，可以忽略管路延时，因此散热器入口温度和电堆出口冷却液温度相等，记为 T_{st} ；散热器出口温度和电堆入口冷却液温度相等，记为 T_{rad} ；有：

$$\begin{cases} T_{c,rad,in} = T_{c,st,out} = T_{st} \\ T_{c,rad,out} = T_{c,st,in} = T_{rad} \end{cases} \quad (5-63)$$

令 $A_1 = m_{st} C p_{st} + \rho_{war} V_{ca} C p_{air} + \rho_{wH2} V_{an} C p_{H2} + \rho_c V_c C p_c$, 由式(5-61)~式(5-63)、式(3-103)、式(3-113)和式(3-117)整理得到:

$$\begin{cases} A_1 \frac{dT_{st}}{dt} = (n_{jc} E_{HHV} - U_{st}) I_{st} + W_c C p_c (T_{rad} - T_{st}) \\ \rho_c V_{ra} C p_c \frac{dT_{ra}}{dt} = W_c C p_c (T_{st} - k_{bv} T_{ra}) - \dot{q}_{ctr} \end{cases} \quad (5-64)$$

由式(3-118)可以看出这是一个非线性方程。系统在额定工作点时, 各个参数值见表5-5。将式(3-119)在工作点 W_{air}^0 附近线性化后, 可以得到 $\dot{q}_{ctr} = A_{rad} K_1 W_{air} (T_{rad} - T_0)$, 而 K_1 是在工作点附近热量传递系数。状态方程和变量如下定义:

$$\begin{cases} \delta \dot{x} = A \delta x + B_u \delta u + B_w \delta w \\ \delta y = C \delta x \end{cases} \quad (5-65)$$

状态矢量 $\delta x = [\delta T_{st} \quad \delta T_{rad}]^T$; 控制量 $\delta u = [\delta W_c \quad \delta W_{air}]^T$;

扰动量 $\delta w = \delta I_{st}$; 输出 $\delta y = [\delta T_{rad} \quad \delta \Delta T_{st}]^T$ 。

表5-5额定工作点各参数值

参数	值	参数	值
电堆电流 I_{st}^0	250A	电堆出口温度 T_{st}^0	339K
电堆电压 U_{st}^0	578.2V	散热器出口温度 T_{rad}^0	332K
冷却液流量 W_c^0	4.784kg/s	散热器空气流量 W_{air}^0	0.924kg/s

2. PI控制器

温度系统是一个两输入两输出系统, 冷却液流量和散热器空气流量是控制量, 并相互耦合。在图5-31(a)中, 两个PI控制器分别控制两个流量; 为了最小化两个控制量之间耦合关系, 设计时选择两个控制器参数, 使其各自闭环响应时间差一个数量级。电堆入口温度闭环响应时间高温度差一个数量级。根据式(5-65)得到温度差与冷却液流量之间、电堆入口温度和空气流量传递函数是的是的传递函数分别是:

$$H_{\Delta}(s) = \frac{\delta \Delta T_{st}(s)}{\delta W_c(s)} = \frac{-\left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{\rho_c V_{rad} C p_c}\right) \Delta T_{st}^0 C p_c}{s + W_c^0 C p_c \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{\rho_c V_{rad} C p_c}\right)} \quad (5-66)$$

$$H_{ra}(s) = \frac{\delta T_{rad}(s)}{\delta W_{air}(s)} = \frac{A_1 K_1 (T_0 - T_{rad}^0)}{\rho_c V_{rad} C p_c s + A_1 K_1 W_{air}^0 + W_c^0 C p_c} \quad (5-67)$$

代入数值后得到:

$$H_{\Delta}(s) = \frac{-0.9266}{s + 0.6244} \quad H_{ra}(s) = \frac{-2.6128}{s + 0.5497} \quad (5-68)$$

两个传函都是一阶系统, 使用PI控制器后, 闭环系统都是具有一个零点的二阶系统,

考虑冷却液流量和空气流量限制条件(冷却液流量小于6kg/s, 空气流量小于2.036kg/s), 通过选择闭环带宽和最佳阻尼系数($\zeta=0.707$)得到的控制参数往往使系统发生震荡。本文选取采用了Ziegler-Nichols方式, 得到温差控制器的控制参数 $K_{p_Δ} = 0.0810$ 、 $K_{I_Δ} = 0.0151$ 和温度控制器的参数 $K_{p_rad} = 0.0581$ 、 $K_{I_rad} = 0.005$ 。

3. 线性二次最优调节器

PI控制是分别独立控制冷却液流量和散热风机转速, 忽略了控制量之间耦合关系。而状态反馈控制不仅考虑到系统控制量的耦合, 还可以通过加权矩阵中系数的选取使控制冷却液和空气流量避免饱和。

将式(5-65)在工作点附近线性化后, 得到状态方程(忽略二次项):

$$\begin{cases} \delta \dot{T}_{st} = -\frac{W_c^0 C_{p_c}}{A_1} \delta T_{st} + \frac{W_c^0 C_{p_c}}{A_1} \delta T_{rad} + \frac{C_{p_c}(T_{rad}^0 - T_{st}^0)}{A_1} \delta W_c + \frac{U_{st}^0}{A_1} \delta I_{st} \\ \delta \dot{T}_{rad} = \frac{W_c^0 C_{p_c}}{\rho_c V_{rad} C_{p_c}} \delta T_{st} - \frac{W_c^0 C_{p_c} + AK_1 W_{ar}^0}{\rho_c V_{rad} C_{p_c}} \delta T_{rad} + \frac{C_{p_c}(T_{st}^0 - T_{rad}^0)}{\rho_c V_{rad} C_{p_c}} \delta W_c + \frac{AK_1(T_0 - T_{rad}^0)}{\rho_c V_{rad} C_{p_c}} \delta W_{ar} \end{cases} \quad (5-69)$$

由状态方程可以得到系数矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{W_c^0 C_{p_c}}{A_1} & \frac{W_c^0 C_{p_c}}{A_1} \\ \frac{W_c^0 C_{p_c}}{\rho_c V_{rad} C_{p_c}} & -\frac{W_c^0 C_{p_c} + AK_1 W_{ar}^0}{\rho_c V_{rad} C_{p_c}} \end{bmatrix}, \quad B_u = \begin{bmatrix} \frac{C_{p_c}(T_{rad}^0 - T_{st}^0)}{A_1} & 0 \\ \frac{C_{p_c}(T_{st}^0 - T_{rad}^0)}{\rho_c V_{rad} C_{p_c}} & \frac{AK_1(T_0 - T_{rad}^0)}{\rho_c V_{rad} C_{p_c}} \end{bmatrix},$$

$$B_w = \begin{bmatrix} \frac{U_{st}^0}{A_1} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ 和 } C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

代入数值计算矩阵A和B具体数值, 有:

$$A = \begin{bmatrix} -0.1472 & 0.1460 \\ 0.4784 & -0.5170 \end{bmatrix} \quad B_u = \begin{bmatrix} -0.2106 & 0 \\ 0.7100 & -0.7714 \end{bmatrix}$$

为了消除系统的误差, 引入两个误差积分器^[60]: 一个是对电堆入口温度的误差积分; 另一个是对电堆温度差的误差积分; 选这两个积分器输出为状态变量, 即:

$$\delta q = \begin{bmatrix} T_{rad}^* - T_{rad} \\ \Delta T_{st}^* - \Delta T_{st} \end{bmatrix} \quad (5-70)$$

利用线性二次最优调节器设计带积分的状态反馈控制器, 其控制性能指标是:

$$J = \int_0^{\infty} (\delta x^T Q_x \delta x + \delta q^T Q_q \delta q + \delta u^T R \delta u) dt \quad (5-71)$$

其中 Q_x 和 R 分别是状态变量和输出变量的加权矩阵, Q_q 是温差积分的加权矩阵。

根据二次型最优调节器可知, 控制量 δu 是:

$$\delta u = -K[\delta x \ q]^T = -K_p \delta x - K_I q \quad (5-72)$$

其中控制矩阵 $K = R^{-1}B_c^T P$ 。 P 是 Riccati 代数方程的解，而其 Riccati 代数方程是：

$$PA_c + A_c P + Q - PB_c R^{-1} B_c^T P = 0 \quad (5-73)$$

$$\text{其中系数矩阵 } A_c = \begin{bmatrix} A & 0_{2 \times 2} \\ 0 & -1 & 0_{2 \times 2} \\ 1 & -1 & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad B_c = \begin{bmatrix} B_u & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad \text{加权矩阵 } Q = \begin{bmatrix} Q_x & 0 \\ 0 & Q_q \end{bmatrix},$$

选取各个加权矩阵中系数为：

$$R = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 30 \end{bmatrix}, \quad Q_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q_q = \begin{bmatrix} 0.008 & 0 \\ 0 & 0.005 \end{bmatrix}$$

因此可以得到控制矩阵分别是：

$$K_p = \begin{bmatrix} -0.0983 & 0.0784 \\ -0.0094 & 0.0211 \end{bmatrix}, \quad K_I = \begin{bmatrix} -0.2894 & -0.1167 \\ 0.0155 & 0.0043 \end{bmatrix}。$$

4. 仿真实验

设计了三个仿真实验验证所设计的控制器的性能。HD6 燃料电池工作时，要求电堆入口的气体温度不能超过 63°C ，电堆温度差不超过 10°C ，且该电堆的额定电流是 300A 。

电堆电流 I_{st} 是 250A ，电堆入口温度设定值是 60°C ，电堆温度差设定是 7°C ，仿真结果见表 5-6。两种控制器稳态精度方面基本相同。

表 5-6 性能参数比较

控制方法	温度误差	温度差误差
PI 控制	-0.0410°C	0.0021°C
SF 控制	0.0565°C	0.1770°C

系统处于稳定工作状态，此时电堆电流 I_{st} 是 250A ，电堆温度差是 7°C ，电堆的入口温度是 60°C 。令电堆入口温度在 200s 、 400s 和 600s 时分别跳变为 70°C 、 60°C 、 80°C ，仿真结果如图 5-32 所示。图 (a) 中在设定温度发生变化后，PI 控制的调节时间较长，在 $t=400\sim 500\text{s}$ 发生震荡，原因是出现控制器饱和 (空气流量 > 0)。图 (b) 中在该区间，PI 控制的冷却液流量出现凹陷，从而使得图 (c) 和图 (d) 中在该区间 PI 控制效果变差。

根据冷却液流量由式 (4-10)、式 (3-123) 和式 (3-124) 可以得到电堆、散热器和管路的阻力，再利用式 (3-125) 计算得到循环泵的功率，对其在 $[0, 600\text{s}]$ 区间积分，可得 PI 控制的能耗 $9.2952 \times 10^5\text{J}$ 和 SF 控制的能耗 $11.219 \times 10^5\text{J}$ 。PI 控制能耗小的主要原因在 440s 附近冷却液流量有一个骤降 (图 5-32(b))，这使得是电堆温度差在 450s 附近超过 10°C (图 5-32(d))，电堆温度差波动较大。

电堆入口温度设定值是 60°C ，温度差设定是 7°C ；电堆电流是 200A ，系统已稳定工作，在 0s 和 200s 时电堆电流分别跳变为 250A 、 200A ，仿真结果如图 5-33 所示。在电堆电流跳变时，SF 控制能够及时调节散热器风量和冷却液流量，比 PI 控制响应快且无超调 (图 (a) 和

图(b)), 从而使得电堆入口温度和温度差变化较小(图(c)和图(d))。

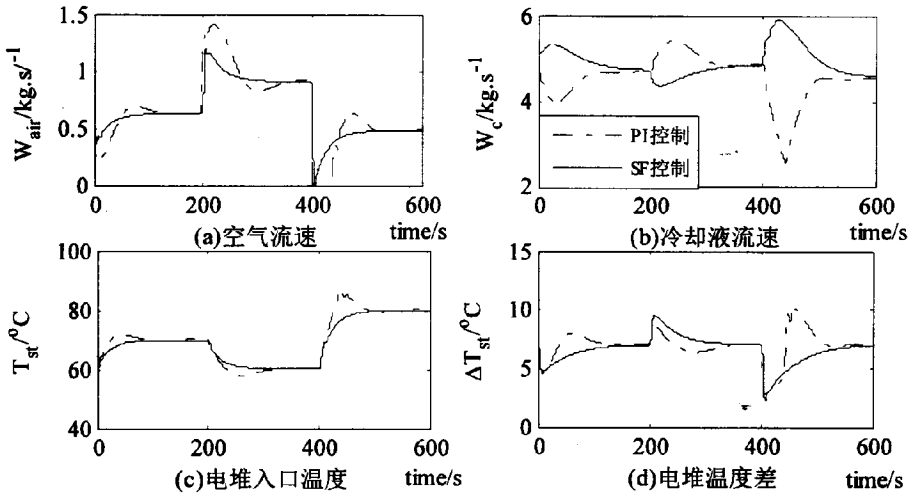


图5-32 电堆入口温度发生跃变时系统响应

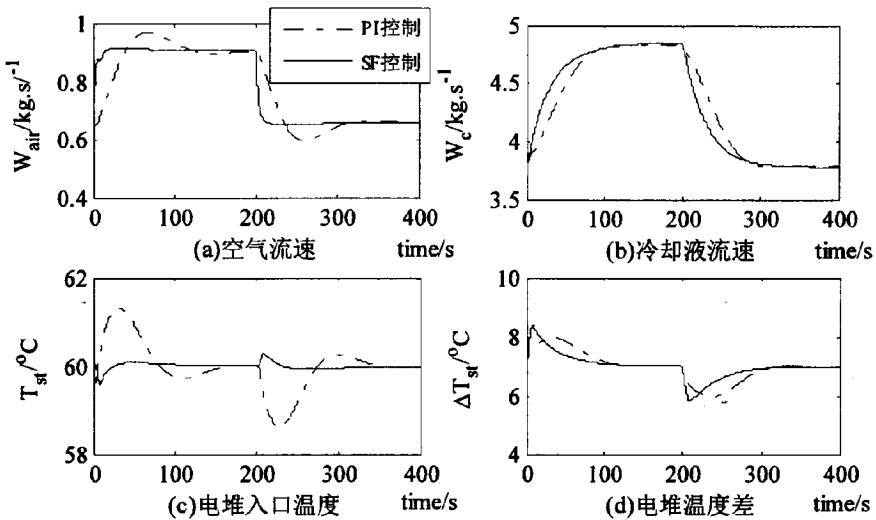


图5-33 脉冲电堆电流时系统响应

5.4.3 热管理系统的模型预测控制

图5-34是采用预测控制方法对电堆温度控制的框图, 控制器根据设定的温度和温度差以及它们实测值调节水泵流速和散热器风速, 完成电堆温度调节。

1. 预测控制器设计

式(5-65)描述的燃料电池温度系统是一个2输入、2输出的系统, 时间常数达到百秒数量级, 采样周期选取3s, 离散的状态方程是形式如式(5-47), 其中

$$\text{状态矢量 } x(k) = [T_{st}(k) \ T_{rad}(k)]^T; \quad \text{控制量 } u(k) = [W_c(k) \ W_{air}(k)]^T;$$

扰动量 $w(k) = I_{st}(k)$;

系统输出 $y(k) = [T_{rad}(k) \ \Delta T_{st}(k)]^T$

系数矩阵 (A_m, B_m, C_m) 分别是:

$$A_m = \begin{bmatrix} \frac{W_c^0 C_{p_c}}{A_1} & \frac{W_{st}^0 C_{p_c}}{A_1} \\ \frac{W_c^0 C_{p_c}}{\rho_c V_{rad} C_{p_c}} & \frac{W_{st}^0 C_{p_c} + AK_1 W_{ar}^0}{\rho_c V_{rad} C_{p_c}} \end{bmatrix}, \quad B_m = \begin{bmatrix} \frac{C_{p_c}(T_{rad}^0 - T_{st}^0)}{A_1} & 0 \\ \frac{C_{p_c}(T_{st}^0 - T_{rad}^0)}{\rho_c V_{rad} C_{p_c}} & \frac{AK_1(T_0 - T_{rad}^0)}{\rho_c V_{rad} C_{p_c}} \end{bmatrix} \text{ 和 } C_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

将表5-5工作点数据带入后, 得到增广矩阵参数矩阵 A 、 B 和 C 是

$$A = \begin{bmatrix} 0.7967 & 0.1923 & 0 & 0 \\ 0.6304 & 0.3328 & 0 & 0 \\ 0.6304 & 0.3328 & 1.0000 & 0 \\ 0.1662 & -0.1404 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -0.2971 & -0.2912 \\ 0.9378 & -1.3100 \\ 0.9378 & -1.3100 \\ -1.2350 & 1.0189 \end{bmatrix}$$

$$\text{和 } C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

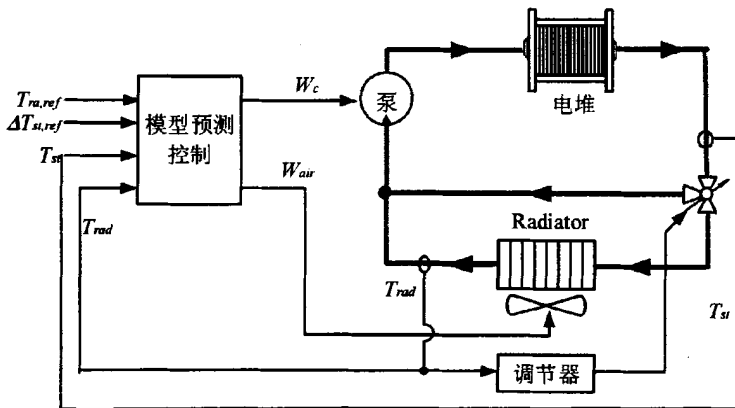


图5-34 燃料电池温度的预测控制

预测控制器的控制时域长度 N_c 和预测时域长度 N_p 分别是4和10, 系统输出是2个流量: 冷却液流量 W_c 和散热器风速 W_{ar} , 这样控制矢量 ΔU 表示为

$$\Delta U = [\Delta u_1(k) \ \Delta u_2(k) \ \Delta u_1(k+1) \ \Delta u_2(k+1) \ \Delta u_1(k+2) \ \Delta u_2(k+2) \ \Delta u_1(k+3) \ \Delta u_2(k+3)]^T \quad (5-74)$$

其中: u_1 表示冷却液流量 W_c ; u_2 表示空气流量 W_{ar} 。

循环泵和风扇的功耗分别近似与冷却液流量和散热器空气流量成正比, 因此两个流量包含在式(5-53)表示的评价函数中。为了避免较大的功耗, 将调谐矢量参数取较大的数值, 这里取 $\gamma = [100 \ 500]$, 这样权重矩阵 $\bar{R} = \text{diag}([100 \ 500 \ 100 \ 500 \ 100 \ 500 \ 100 \ 500])$ 。根据式(3-118)散热器空气流量 W_{ar} 小于等于 2 kg/s ; 电堆的冷却液流量小于等于 330 LMP , 即 W_c 于等于 6 kg/s 。此外空气流量大于0; 冷却液流量大于 1 kg/s (正常工作时, 最低的流量)。

在当前时刻 k ，控制量的限制条件是：

$$\begin{cases} 1 \leq u_1(k) \leq 6 \\ 0 \leq u_2(k) \leq 2 \end{cases} \quad (5-75)$$

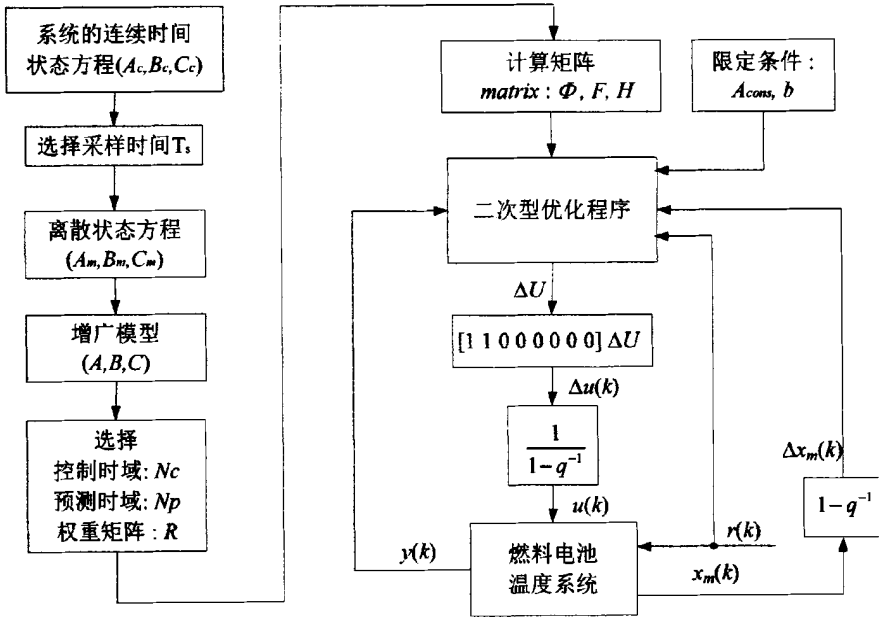


图5-35 燃料电池温度的预测控制

在将来 $k+1$ 、 $k+2$ 和 $k+3$ 时刻的控制量也应满足式(5-75)。将控制量的受限条件表示成其增量在未来4个时刻与前一时刻控制量的关系，得到式(5-60)中的系数矩阵。定义矩阵 I_1 和 I_2 ：

$$I_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad I_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5-76)$$

矩阵 $A_{cons,i}(i=1,2)$ 用矩阵 I_1 和 I_2 表示：

$$A_{cons,i} = \begin{bmatrix} I_i & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ I_i & I_i & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ I_i & I_i & I_i & 0_{2 \times 2} \\ I_i & I_i & I_i & I_i \end{bmatrix} \quad i=1,2 \quad (5-77)$$

式(5-60)中系数矩阵 A_{cons} 由矩阵 $A_{cons,1}$ 和 $A_{cons,2}$ 组成，即

$$A_{cons} = \begin{bmatrix} A_{cons,1} \\ A_{cons,2} \end{bmatrix} \quad (5-78)$$

定义矩阵 b_1 和 b_2 ：

$$b_1 = \begin{bmatrix} 6 - u_1(k-1) \\ -1 - u_1(k-1) \end{bmatrix} \quad b_2 = \begin{bmatrix} 2 - u_2(k-1) \\ u_2(k-1) \end{bmatrix} \quad (5-79)$$

式(5-60)中矩阵 b 由矩阵 b_1 和 b_2 组成，即

$$b = [b_1 \quad b_1 \quad b_1 \quad b_1 \quad b_2 \quad b_2 \quad b_2 \quad b_2]^T \quad (5-80)$$

预测控制算法如图5-35所示, 图中 q^{-1} 表示向后移位算子, $\frac{1}{1-q^{-1}}$ 是离散系统的积分器, 因而该预测控制具有积分功能, 可以消除静态误差。

2. 仿真和分析

为了分析燃料电池的动态特性和设计的预测控制器性能, 设计了3个仿真实验。

电堆电流是250A, 温度和温度差参考值分别设为60°C和7°C, 仿真结果如图5-36所示, 图(c)和图(d)中虚线是相应的设定值。图(a)中在[12s,39s]区间散热器的空气流量是0kg/s, 没有热量从散热器传递到周围, 电堆的温度(也是冷却液的温度)以最快的速度上升。图(c)中温度上升时间是117.19s, 且具有0.07%的超调。图(d)中在 $t=10s$ 时温度差有个幅度大7.3°C的脉冲, 这是由于之前冷却液流量急剧降低(图(b)起始阶段)。最大的温度差出现在 $t=100s$ 处, 其值达到7.4°C。在整个上升过程中温度差一直小于10°C, 满足电堆工作的要求。

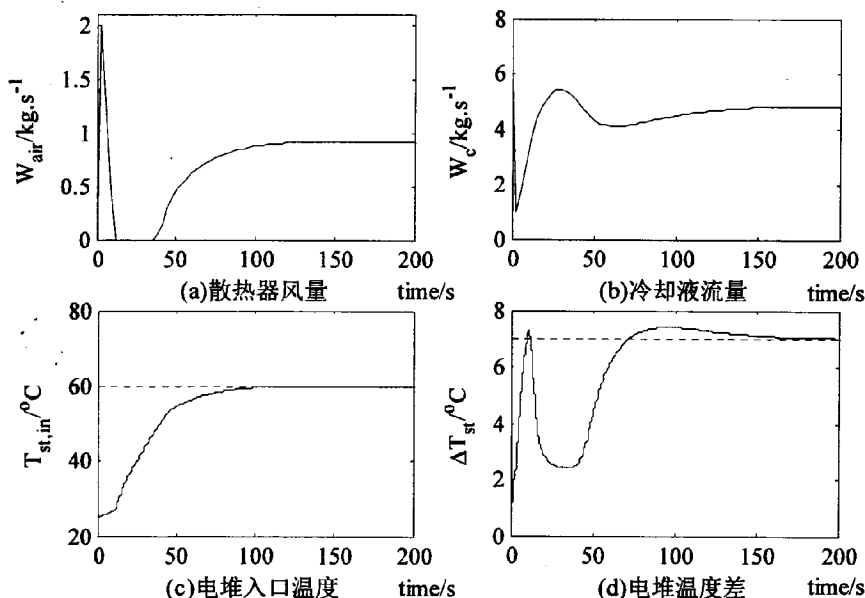


图5-36 250A电堆电流的阶跃响应

在初始状态电堆电流250A, 温度和温度差参考值分别设为60°C和7°C。将电堆温度参考值变为一脉冲信号, 仿真结果如图5-37所示。图(a)中 $t=204s$ 时散热器周围的空气流量是2kg/s, 这是风扇提供的空气流量的最大值, 此时电堆温度以最快的速度从80°C降至60°C。图(c)中的虚线是温度参考值, 从中可以看出电堆入口温度具有良好的跟随特性, 静态误差0.02°C。图(d)中温度差的上升时间70s, 在 $t=210s$ 附近有14°C超调, 超过10°C的时间仅17.9s。对式(3-125)在[0,600s]区间积分得到循环泵的功耗是 $1.561 \times 10^6 J$, 而带积分的状态反馈控制是 $1.6062 \times 10^6 J$ 。

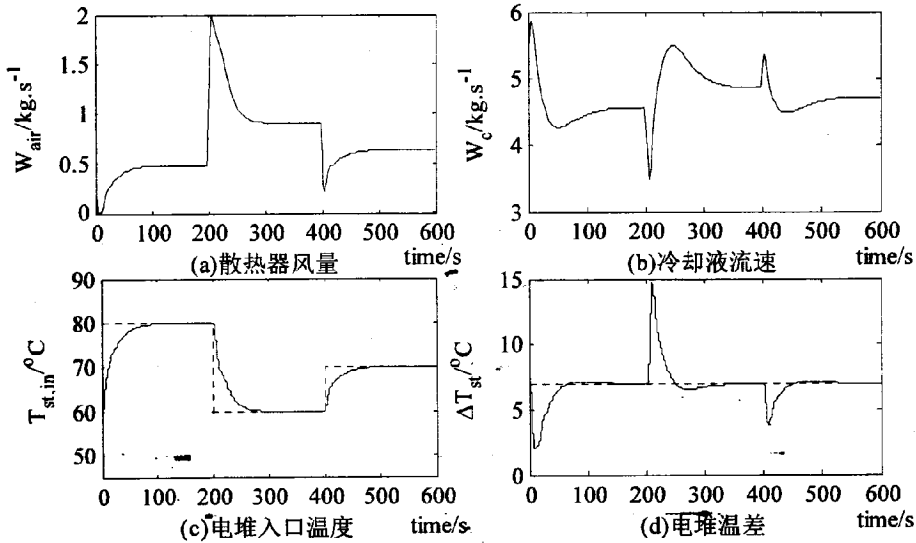


图5-37 在脉冲温度参考值下的响应

在初始状态的电堆电流是200A，温度和温度差参考值分别设为60°C和7°C。令电堆电流取一脉冲信号(如图5-38)，仿真结果如图5-39所示。图(c)中电堆入口温度在59.7°C和60.4°C之间波动，图(d)中温度差变化范围是[5.8°C, 8.2°C]。由此可知预测控制器对脉冲电流具有良好的鲁棒性。

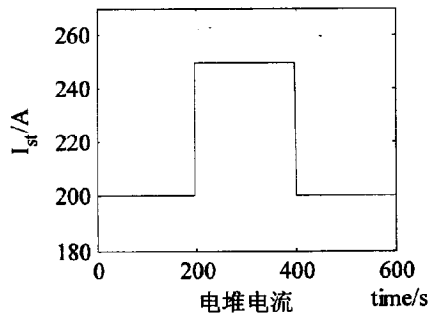


图5-38 电堆电流

3. 结论

在车载燃料电池系统中，电堆的温度是衡量其工作性能重要的参数之一。设计了适合多输入和多输出的预测控制器，且控制器的设计考虑了寄生损耗的优化。实验结果总结如下：

(1)设计的预测控制器能精确调节电堆入口冷却液的温度和电堆温差，调节时间分别是90s和110s。这两个时间的改变可以通过调节式(5-53)中 \bar{R} 的参数。

(2)对于脉冲变化的参考信号，预测控制器具有良好的跟随特性，且稳态误差小，温度和温度差误差分别是0.1°C和0.4°C，与带积分的状态反馈控制相比，预测控制效果更优。对于脉冲变化的电堆电流，预测控制器能保持温度和温度差在较小的变化区间波动。

(3)三个仿真实验不仅显示预测控制器的性能和其鲁棒性，而且式(5-61)、(5-62)和(5-63)所描述的假设的合理性得到验证。

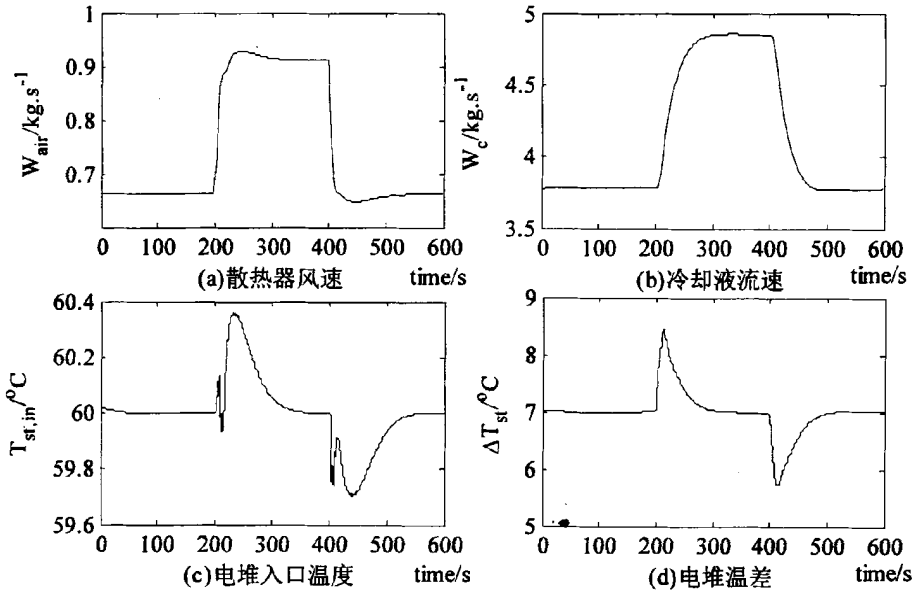


图5-39 在脉冲电流下的响应

5.4.4 最佳过氧比的热管理系统控制

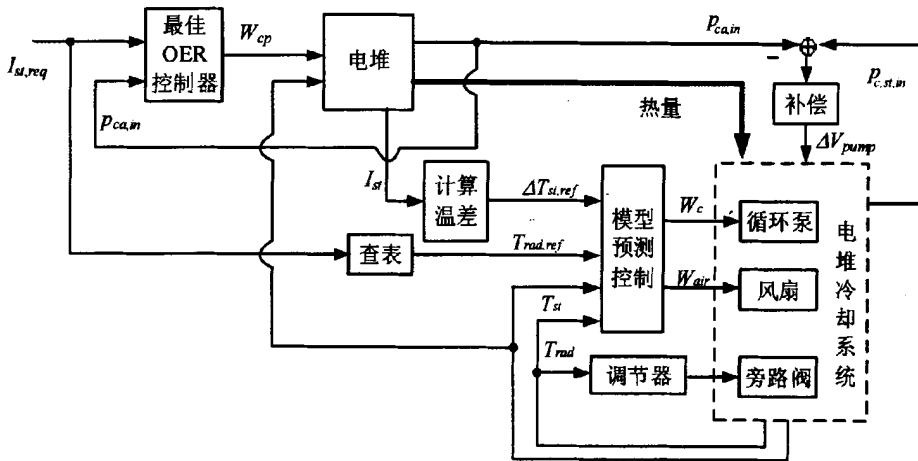


图5-40 热管理控制

车载燃料电池中，稳态时在电堆入口处冷却液的压力小于等于空气入口压力，启动或动态过程最大不能超过 100kPa ，且不同电流时电堆允许的最大温度差不同，这样基于最佳过氧比的热管理控制如图5-40所示。由电堆的需求电流 $I_{st,req}$ 查表或是寻优得到电堆入口温度 $T_{rad,ref}$ 的参考值。利用电堆电流 I_{st} 和循环泵的额定冷却液流量确定温度差 $\Delta T_{st,ref}$ 的参考值。预测控制器根据利用入口温度和温差的设定值以及实测值，计算最优的冷却液流量和风扇空气流量。为了保证动态过程中电堆入口处冷却液压力 $p_{c,st,in}$ 小于空气压力 $p_{ca,in}$ ，补偿环节根据二者差值调节冷却水泵电压。最佳OER控制器实时调节电

堆空气流量 W_{cp} 保证系统工作在最优过氧比。

不同电堆电流时温差不同^[120]，本文选取的温差如表5-7所示，其它电流对应的温度差由相邻两点线性插值计算。电堆需求电流是240A时，电堆入口温度设定值60°C，环境温度25°C，循环泵流量、风扇空气流量、电堆入口温度、温度差如图5-41所示。图(a)和图(b)的是以预测控制器输出为参考值的冷却液流量和风扇空气流量；图(c)和图(d)的虚线分别是电堆入口温度和温度差的设定值。电堆温度低于45°C时，预测控制器不工作，冷却泵流量设定为3kg/s，风扇流量设定为0，并且冷却液不通过散热器。电堆温度达到45°C时，预测控制器和散热器开始工作。图(c)和图(d)中，在[30s,40s]区间曲线抖动是由于旁路阀切换导致。稳态时温度误差是0.2°C，温度差的误差是0.01°C。

表5-7 电堆温度差

电堆电流(A)	60	120	180	240	300
电堆温差(°C)	3	5	6	7	9

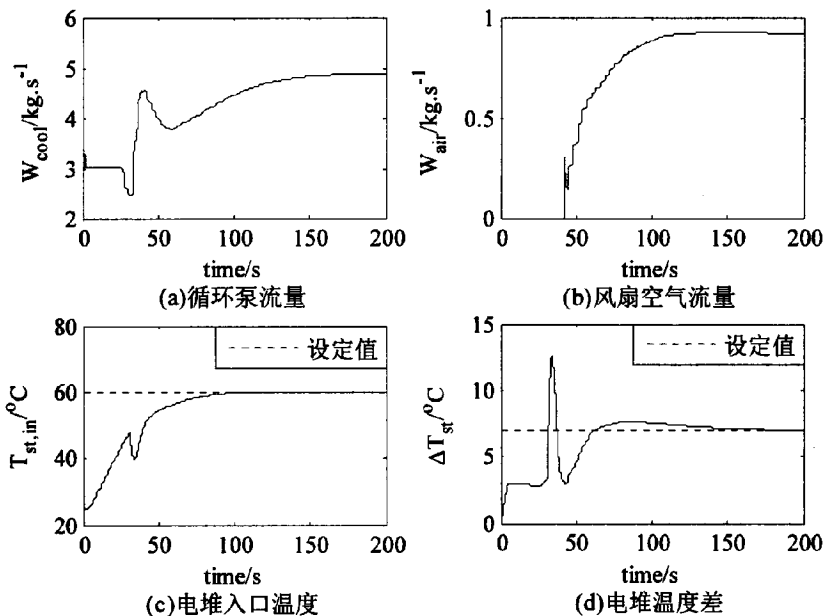


图5-41 热管理系统仿真结果(I)

电堆电流、电堆电压、压缩机电压和过氧比如图5-42所示。电流调节器采样时间0.2s，其根据当前的电堆输出电流和过氧比计算下一时刻输出电流，输出电流如图(a)所示。由于电流阶梯增长使得电堆电压(图(b))和过氧比(图(d))阶梯变化。 $t < 1.6s$ 时电流调节器输出电流较小，而压缩机空气流量参考值是根据需求电流240A计算，因而过氧比大于3(图(d))。稳态时，电流误差小于1.62A(0.68%)，过氧比误差小于0.0251(1.02%)。

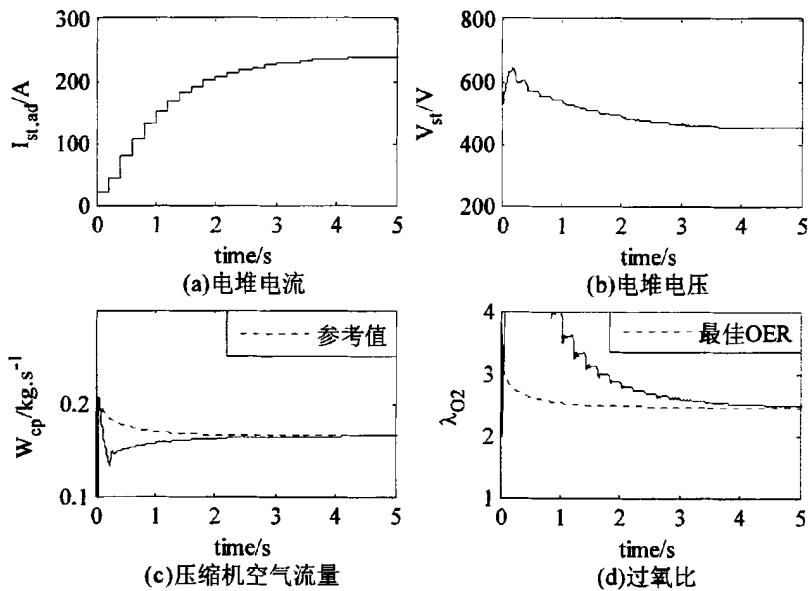


图5-42 空气系统仿真结果(I)

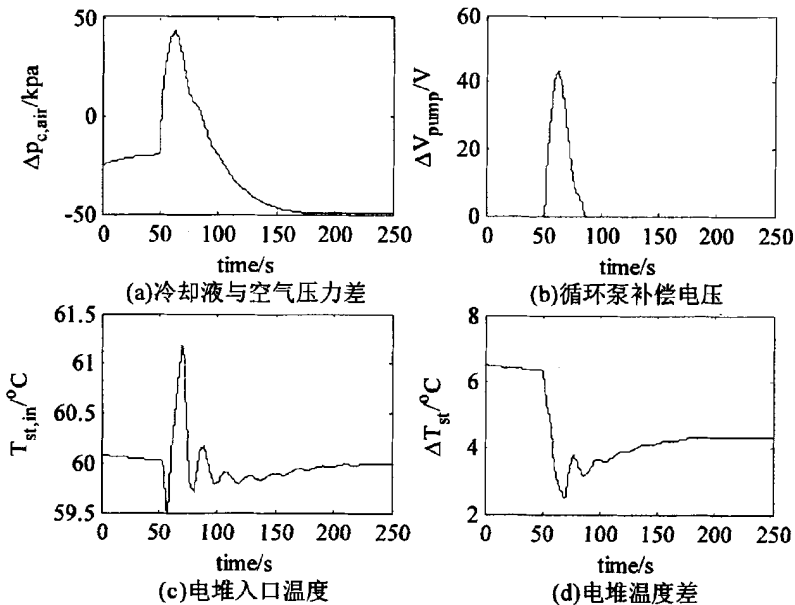


图5-43 电流跳变时仿真结果

电堆电流取200A，电堆入口温度设定值60°C，温度差6.33°C，在t=50s时电流跳变为100A，电堆入口处冷却液与空气的压力差、补偿环节输出的电压及电堆温度和温度差如图5-43所示。图(a)是电堆入口处冷却液压力加上7kpa(稳态余量)与空气压力的差值，在

[51s,87s]区间压力差大于零，补偿环节开始作用，并输出电压 $-\Delta V_{pump}$ ，叠加在循环泵的端电压上，减小泵的转速从而降低循环泵出口的压力。图(c)中电堆温度在电流跳变时变化是冷却液流量变化引起。在电流跳变后温度差的设定值变为 4.333°C ，图(d)中温度差稳态值是 4.335°C ，误差为 0.002°C 。

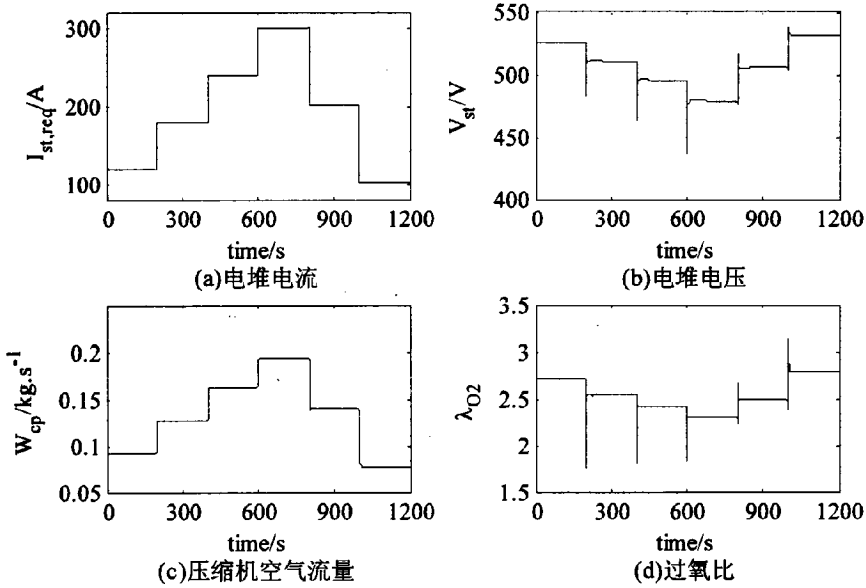


图5-44 空气系统仿真结果(II)

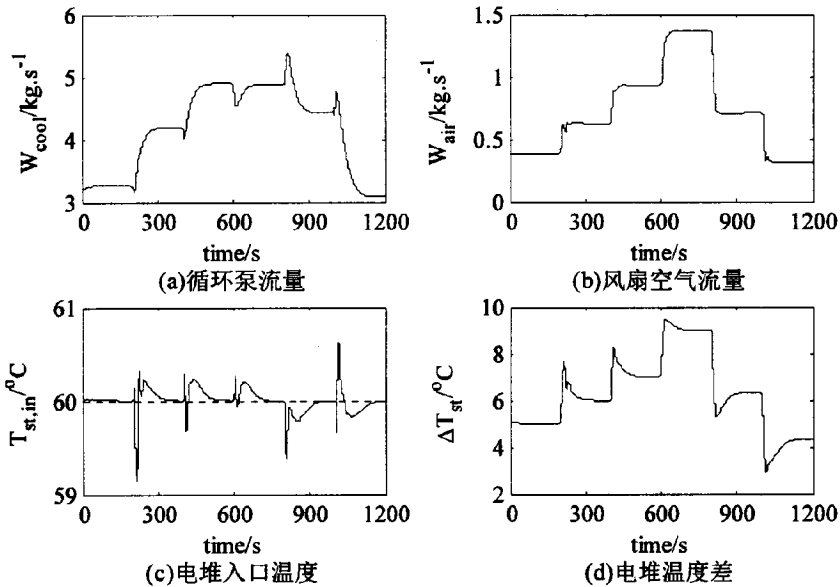


图5-45 温度系统仿真结果(II)

电堆电流阶跃变化时,电堆需求电流、电堆电压、压缩机电压和过氧比如图5-44所示。图(a)中电堆需求电流从120A跳到300A,然后下降到100A。在每次电流向上跳变时,电压(图(b))出现向下的尖峰,这是由于电堆内部氧气分压力突然减小导致。电流向下跳变时会出现相反的过程。图(c)是压缩机空气流量,其随电流增大而增大,减小而减小。图(d)的过氧比波形与电堆电压波形相似,在电流调节器的作用下,保证了过氧比范围在1.5~3。

电堆电流阶跃变化时(图5-44 (a)),循环泵流量、风扇空气流量、电堆入口温度、温度差如图5-45所示。电堆入口温度设定值是60°C,电堆电流变化引起温差设定值变化,预测控制器根据入口温度和温差的设定值及实测值实时调节冷却泵流量和风机流量,电流大时循环泵和风扇流量大,反之流量小(图(a)和图(b))。电流跳变时,电堆入口温度出现范围在-0.8~0.7°C的抖动(图(c)),然后经过约150s调节到稳态值。每次电流跳变后,温差设定值改变,预测控制能调节电堆温度差(图(d))处于设定值。

5.5 燃料电池的总成控制

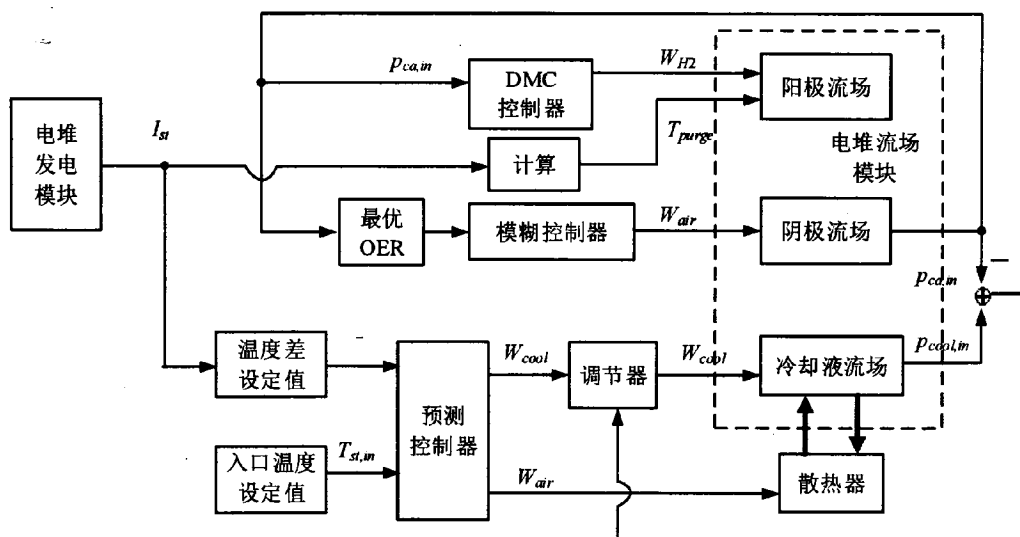


图5-46 燃料电池的总成控制框图

车载燃料电池的空气供应统、氢气供应和热管理系统三个子系统互相联系、互相影响。气体供应系统提供电堆适合的气体流量和压力,为了提供最大的净功率,空气供应系统控制空气进气量在最佳的过氧比,氢气供应系统保证氢气压力高于空气压力0.2bar。热管理系统保持电堆温度和温度差在合适的范围,在电堆入口处控制冷却液压力小于等于空气压力。车载燃料电池的总成控制如图5-46所示。以下设计2个仿真实验验证整个系统的总成控制。

电堆需求电流是200A时,入口温度设定值60°C。电堆启动过程中,电堆入口的温度、

出口温度、电堆电压、循环泵、散热风机和回流泵功率，以及加湿器所需的水量、生成水如图5-47所示。图中起始阶段由于电堆温度(图(a))上升，电堆电压(图(b))逐渐增长。图(c)中冷却液循环泵和散热风机功耗随流量增加而增长，而由于氢气回流泵没有使用控制(仅恒定转速)，起始时刻氢气供气与排气管路压差最大因而起始时刻功耗较大。图(d)的加湿器对空气和氢气的注水流量之和明显小于反映生成的水，可见燃料电池的水可以做到自给自足。稳态时温度误差是 0.0381°C (0.06%)，温度差误差 0.032°C (0.51%)，最佳过氧比误差0.01(0.44%)，氢气入口压力误差0.011bar(0.575%)。

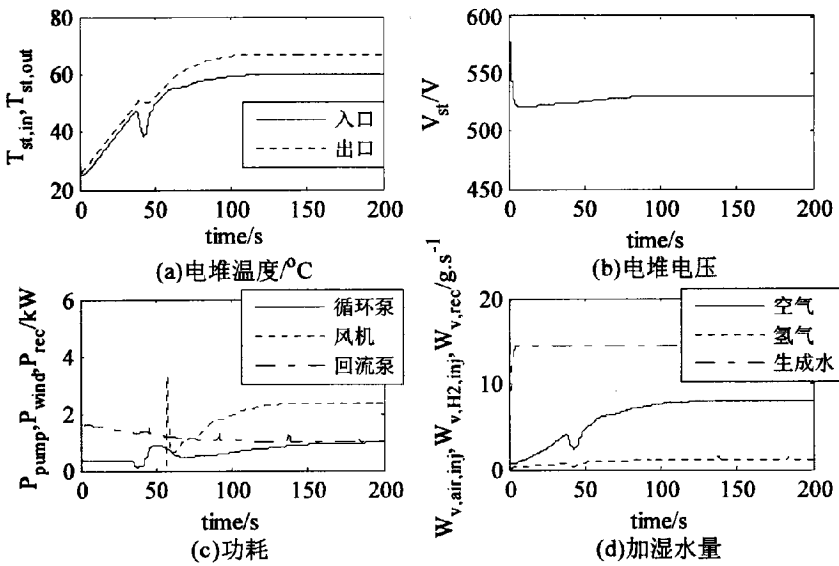


图5-47 启动时系统的温度、电压、功耗和注水量

令电堆稳态工作，入口温度 60°C ，电堆电流120A。从 $t=0$ 开始电堆需求电流发生阶跃变化，200s跳变一次。先以步长60A由最初的120A增加到300A，然后再以步长100A减小到100A(图5-48(a))，电堆温度、电堆电压、系统净功率、气体过量比、气体的压力、加湿器所需的水量如图5-48所示。电堆电流变化温度差参考值变化，出口温度随之变化(图(b))。图(d)的净功率是电堆发出的电功率减去所有辅机功耗，净功率随电流增大而增大，5个阶段对应的用电效率分别是：85.58%、83.55%、80.60%、85.03%和87.02%。由于电流调节器的作用，过氧比保持在合理区域(图(e))。阳极入口压力高于阴极0.2bar，但是在电流较大情况下在排气时出现‘短时’低于阴极压力，主要原因是排气管路压力较高引起的。由于氢气系统排气阀定时排气，氢气流量发生抖动，使得氢气加湿器的注水量抖动(图(f))。阴极和阳极入口压力如图(g)，阳极压力一直保持高于阴极0.2bar，仅在排气时出现‘下陷’。在每个稳定状态，温度误差小于 0.0011°C ，温度差误差小于 0.0043°C ，最佳过氧比误差小于0.0109(0.44%)，氢气入口压力误差小于0.01397bar(0.576%)。

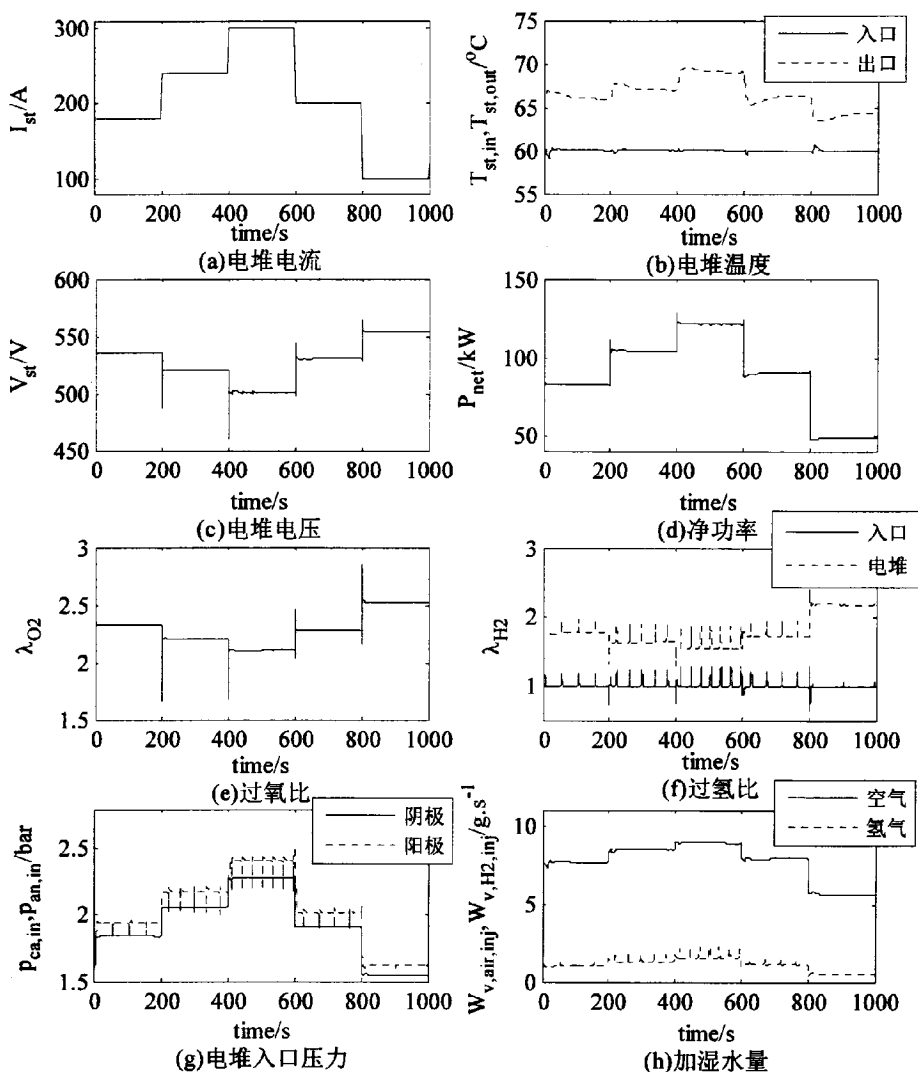


图5-48 电流跳变时系统参数的变化

5.6 本章小结

过氧比是车载燃料电池中一个重要参数，它反应电堆内部氧气供给状况，将其控制在一定的区域，不仅可以防止引起电堆性能衰减的“氧饥饿”，而且可以防止引起PEMFC系统效率过低的“氧饱和”。

推导了电堆和压缩机的过氧比特性，分别讨论了在阴极压力不受空气流量影响和受其影响两种情况下这两部分的过氧比特性曲线。比较发现两种情况下，电堆曲线几乎相同，而压缩机曲线有明显不同，二者差值(净功率)曲线有微弱差异，最佳过氧比有微弱不同。考虑散热器风机和循环水泵的功耗时，由于二者功率小，对净功率曲线和最佳过氧比影响较弱。

在固定温度、压力和电流情况下，利用粒子群优化算法寻找最佳过氧比，然后利用曲线拟合得到恒定电流下最佳过氧比与阴极入口压力关系，对任意电流和压力可以通过插值计算得到相应的最佳过氧比。

对于空气供应系统，提出了基于最佳过氧比控制方法。根据电堆电流计算最佳过氧比，然后利用前馈控制计算压缩机空气流量参考值，由模糊控制器控制压缩机电压，且比较了两种计算最佳过氧比的方法。

对于过氧比区域进行了划分，分为氧饥饿、氧适量和氧饱和三个区域，提出了氧适量区域最小过氧比的计算公式，进而提出了防止氧饥饿和氧饱和发生的电流调节器。

对于氢气供应系统，提出了动态矩阵控制。动态矩阵控制器通过改变调节阀的有效横截面积从而达到控制阳极流场压力。对于热管理系统，在稳态工作点线性化，建立了二阶状态方程，分别采用了两个 PI 控制、二次型最优控制和基于状态方程的模型预测控制。

最后，对燃料电池系统进行了总成控制仿真实验，验证了各个子系统的控制器能够协调工作，并达到满意的控制精度。

第6章 结论和展望

6.1 结论

燃料电池是一种零污染、可持续的绿色能源,车载大功率燃料电池是未来汽车、机车发展的一个新方向,本文对车载燃料电池等效电路、车载燃料电池动态建模、OER区域的划分和电流调节方法、基于OER控制方法(包括空气供应系统、氢气供应系统和热管理控制)进行了深入研究,主要工作及成果如下:

(1)提出了一种改进等效电路。已有的简化等效电路不能完全反映大功率燃料电池的动态过程。端口电流跳变后,波形有一个小‘尖峰’,紧随一个非常快的过渡过程。这个极短的过程是由于电解质表面氢氧浓度(或压力)突然发生变化引起的,可以用电阻和电感并联实现,并将其与开路电势串联。

(2)建立了大功率质子交换膜燃料电池模型,包括:空气供应系统、氢气供应系统和热管理系统模型,模型中涉及了压缩机、氢气回流泵、冷却水循环泵和散热风机的功耗。利用所建立的模型,讨论了不同工作参数对压缩机功耗、电堆功率、阳极流场压力、电堆温度和温度差的影响。

(3)在阴极压力不受空气流量和受空气流量两种情况下,讨论了燃料电池的过氧比特性。考虑散热器风机和循环水泵的功耗时,由于二者功率小,净功率曲线和最佳过氧比有微弱不同。提出了在固定温度、压力和电流情况下,利用曲线拟合最佳过氧比与阴极入口压力关系,对任意电流和压力通过插值计算得到相应的最佳过氧比。这种方法适合在线计算过氧比。

(4)对于空气供应系统,提出了基于最佳过氧比控制方法:根据电堆电流计算最佳过氧比,然后利用前馈控制计算压缩机空气流量参考值,由模糊控制器控制压缩机电压。这种控制方法能保证系统工作在最佳过氧比。为防止“氧饥饿”和“氧饱和”发生,提出了电流调节方法。

(5)对于氢气供应系统,设计了动态矩阵器调节阳极流场压力。该控制器的动态响应速度较快,稳态精度较高。

(6)对于热管理系统,在稳态工作点线性化,设计了基于状态方程的模型预测控制。仿真验证了该控制器具有良好的跟随特性,且稳态误差小,温度和温度差误差分别是 0.1°C 和 0.4°C ,与带积分的状态反馈控制相比效果更优。对于脉冲变化的电堆电流,预测控制器能保持温度和温度差在较小的变化区间波动。

6.2 展望

本文针对车载燃料电池系统控制展开研究,取得了一些成果,但是仍留许多问题值得进一步研究。今后将会在以下方面进行进一步研究:

(1)过氧比区域划分

本文对过氧比区域的划分是基于经验，而不是从理论推导得出的，因而理论推导方面需要进一步研究。建立过氧比处于的‘氧饥饿’、‘氧适量’和‘氧饱和’状态模糊隶属度函数，根据电堆电流和电堆入口空气流量判定‘氧适量’程度，设计最优的控制方法使过氧比处于‘氧适量’区域。

(2)气体扩散层建模

本文对气体扩散层的建模是一维的，且没有考虑扩散层中单位体积液态水分布，模型不能解释‘水淹’情况下“氧饥饿”发生的条件。

(3)电堆冷却液流场模型

模型不能体现电堆内部温度分布，仅涉及输入和输出，且没有考虑热辐射和热扩散。今后需将温度模型建成三维，计及热辐射和热扩散。

(4)空气供应系统状态方程

空气供应系统状态方程是一个九阶状态方程，如何有效降阶是一个值得研究的问题，该问题的解决会为空气供应系统提供更多的控制策略。

(5)热管理系统控制

热管理系统中控制量有三个，本文为了简化处理，仅考虑了两个控制量，而将旁路阀门开度设计成仅在启动时实施开关控制，但是阀门开度不仅影响电堆入口温度和电堆温度差，而且通过调节散热器中冷却液流量可以降低循环泵的功耗。

致 谢

作为一名在职的博士生，由于个人本身固有的观念，在读博士期间放弃了三次。今天能够做到将博士论文按要求写完，此时最想感谢的是我的指导老师——博士生导师陈维荣教授，是他三次将我从“放弃”拉到“继续前进”。从一个不知如何搜索、下载文章到已经可以熟练操作，从搜到海量的文章不知如何下手到很快能找到经典文献，从一个读一篇英文文章需要一个月时间还似懂非懂到几天就能深入理解，从对研究课题不知如何建模到能够熟练完成，从不知何为创新点到能够在局部问题上提出新的见解，从一个不知如何写科研文章到文章可以发表在EI刊物，这些都离不开陈老师的悉心指导和培养。

感谢实验室的刘志祥、戴朝华、李奇和张雪霞老师对我悉心指导。我的第一篇英文文章是实验室的刘老师帮我修改的。当时我读英文文章的能力已有很大的提高，但是书写能力差。借助google翻译将写好的中文文章勉强翻译成英文，刘老师将我的文章大部分重写了一遍。正是刘老师的耐心帮助，使我从害怕写英文文章到可以直接写出英文文章。从清华调到我校的刘老师具有严谨治学的风范，我从中受益非浅。我的第一篇中文文章是在戴老师的帮助下修改完成的，正是在他的帮助使得文章能顺利发表，增强了我的自信心。李奇老师是我在做论文过程中讨论最多的老师，每次有新的想法时常常和他讨论，每写完一篇文章时总纠结与投哪个期刊，他总能给出很好的建议。当文章被拒时，是他鼓励我再接再厉、不要气馁。正是在他的帮助下，我学到了更多增强自信的能力。张雪霞老师的英文很好，在英文摘要部分给了我很大的帮助。

感谢实验室的师弟和师妹们，尤其是阙海丹、李艳昆、赵兴强、曹思扬和张杰夫。在写第一篇英文文章的时候，海丹师妹几乎成了我英语顾问。艳昆和赵兴强搭建了14kW的燃料电池实验平台，他们使我真正认识到什么是研究生应该具有的能力，除了具有阅读文献能力外，还应具有很强的实际操作能力，这些是我后续需要努力学习的。思扬帮我做了一些本科工作，杰夫纠正我性格问题。

感谢我的爱人姚钢和可爱的女儿姚思祺，他们不仅给在生活给了我极大的帮助，使我有时间完成论文，而且在枯燥的研究中带给我许多欢乐，同时也是我完成论文的动力。

感谢我的大姐郭梅、二姐郭萍和弟弟郭斌。由于父母年事已高，这两年经常住院，他们三人悉心照料父母使我能安心做论文而无需牵挂。感谢我的父母，他们不抱怨在生病期间我没有照料他们。

最后，衷心感谢各位评审专家在繁忙的工作期间能评审本论文。

参考文献

- [1] Vladimir S, Bagotsky. 燃料电池——问题与对策 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [2] 黄素逸, 杜一庆, 明延臻. 新能源技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [3] Ehsani M, Gao Y, Emadi A. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车——基本原理、理论和设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [4] 陈维荣, 钱清泉, 李奇. 燃料电池混合动力列车的研究现状与发展趋势[J]. 西南交通大学学报, 2009,44(1):1-6.
- [5] 刘凤君. 高效环保的燃料电池发电系统及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] 张立炎, 全书海. 燃料电池系统建模与控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [7] Pukrushpan J T, Stefanopoulou A, Huei P. Control of fuel cell breathing[J]. Control Systems, IEEE, 2004,24(2):30-46.
- [8] Pukrushpan J T, Peng H, Stefanopoulou A G. Simulation and analysis of transient fuel cell system performance based on a dynamic reactant flow model[C].ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition,New Orleans, Louisiana, USA. American Society Of Mechanical Engineers,2002:637-648.
- [9] Ardalan V, Anna S, Huei P. Current management in a hybrid fuel cell power system: a model-predictive control approach[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006,14(6):1047-1057.
- [10] Borup R, Meyers J, Pivovar B, et al. Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation[J]. Chemical Reviews, 2007,107(10):3904-3951.
- [11] Amphlett J C. Performance modeling of the ballard mark iv solid polymer electrolyte fuel cell[J]. Journal of The Electrochemical Society, 1995,142(1):1-9.
- [12] Mann R F, Amphlett J C, Hooper M A I, et al. Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell [J]. Journal of Power Sources, 2000,86(1-2):173-180.
- [13] Li Q, Chen W, Wang Y, et al. Parameter identification for PEM fuel-cell mechanism model based on effective informed adaptive particle swarm optimization[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2011,58(6):2410-2419.
- [14] Lee J H, Lalk T R. Modeling fuel cell stack systems [J]. Journal of Power Sources, 1998,73(2):229-241.
- [15] Jiang R, Chu D. Voltage - time behavior of a polymer electrolyte membrane fuel cell stack at constant current discharge[J]. Journal of Power Sources, 2001,92(1):193-198.
- [16] Pathapati P R, Xue X, Tang J. A new dynamic model for predicting transient phenomena in a PEM fuel cell system [J]. Renewable Energy, 2005,30(1):1-22.
- [17] Xue X, Tang J, Smirnova A, et al. System level lumped-parameter dynamic modeling of PEM fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2004,133(2):188-204.
- [18] 徐腊梅, 肖金生. 质子交换膜燃料电池动态特性的建模与仿真[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工

- 程版), 2007(3):10-13.
- [19] Hung Y H, Lin P H, Wu C H, et al. Real-time dynamic modeling of hydrogen PEMfcs[J]. Journal of the Franklin Institute, 2008,345(2):182-203.
- [20] Kunusch C, Husar A, Puleston P F, et al. Linear identification and model adjustment of a PEM fuel cell stack [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008,33(13):3581-3587.
- [21] 马天才. 燃料电池发动机控制问题研究——系统分析与建模[D]. 同济大学博士论文, 2007.
- [22] Bao C, Ouyang M, Yi B. Modeling and control of air stream and hydrogen flow with recirculation in a PEM fuel cell system — I. Control-oriented modeling[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006,31(13):1879-1896.
- [23] You Z, Chen W, He G, et al. Adaptive weight particle swarm optimization algorithm with constriction factor[C].Information Science and Management Engineering (ISME),Xi'an,China.2010 International Conference of. IEEE,2010, 2:245-248.
- [24] Cheng Z, Chen W, Li Q, et al. Modeling and dynamic simulation of an efficient energy storage component-supercapacitor[C].Power and Energy Engineering Conference (APPEEC),Chengdu,China.2010 Asia-Pacific. IEEE,2010:1-4.
- [25] 李奇, 陈维荣, 刘述奎, 等. 多变量 H_{∞} 次优控制在质子交换膜燃料电池压力控制系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010(20):123-128.
- [26] 王瑞敏. 基于神经网络辨识模型的质子交换膜燃料电池系统建模与控制研究[D]. 上海交通大学, 2008.
- [27] Schumacher J O, Gemmar P, Denne M, et al. Control of miniature proton exchange membrane fuel cells based on fuzzy logic[J]. Journal of Power Sources, 2004,129(2):143-151.
- [28] 李炜, 朱新坚, 曹广益. PEMFC发电系统的自适应模糊控制与动态分析[J]. 计算机仿真, 2007(01):233-237.
- [29] 张天贺, 全书海, 张立炎, 等. 车用PEMFC空气供给系统建模与模糊PID控制研究[J]. 系统仿真技术, 2007(04):211-216.
- [30] 胡鹏, 曹广益, 朱新坚, 等. 质子交换膜燃料电池温度模型与模糊控制[J]. 控制理论与应用, 2011,28(10):1371-1376.
- [31] Almeida P E M, Simoes M G. Neural optimal control of PEM fuel cells with parametric cmac networks[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2005,41(1):237-245.
- [32] Azmy A, Erlich I. Online optimal management of PEM fuel cells using neural networks[C].Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE,2005, 2:1332-1337.
- [33] 孙涛, 闫思佳, 曹广益, 等. 基于自适应神经模糊法的PEMFC温度建模[J]. 计算机测量与控制, 2005(07):662-664.
- [34] Zhang J, Liu G, Yu W, et al. Adaptive control of the airflow of a PEM fuel cell system[J]. Journal of Power Sources, 2008,179(2):649-659.

- [35] Yang Y, Wang F, Chang H, et al. Low power proton exchange membrane fuel cell system identification and adaptive control[J]. *Journal of Power Sources*, 2007,164(2):761-771.
- [36] Sedghisigarchi K, Feliachi A. H-infinity controller for solid oxide fuel cells[C].*System Theory*, 2003. Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on.IEEE,2003:464-467.
- [37] Wang F, Chen H, Yang Y, et al. Multivariable robust control of a proton exchange membrane fuel cell system[J]. *Journal of Power Sources*, 2008,177(2):393-403.
- [38] Li Q, Chen W, Wang Y, et al. Nonlinear robust control of proton exchange membrane fuel cell by state feedback exact linearization[J]. *Journal of Power Sources*, 2009,194(1):338-348.
- [39] Vahidi A, Stefanopoulou A, Huei P. Model predictive control for starvation prevention in a hybrid fuel cell system[C].*American Control Conference*, 2004.,Boston, MA, USA.Proceedings of the 2004. IEEE,2004, 1:834-839.
- [40] Golbert J, Lewin D R. Model-based control of fuel cells (2): optimal efficiency[J]. *Journal of Power Sources*, 2007,173(1):298-309.
- [41] Ren Y, Cao G, Zhu X. Predictive control of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) based on support vector regression machine[C].*Machine Learning and Cybernetics*,2005. Proceedings of 2005 International Conference on.IEEE,2005, 7:4028-4031.
- [42] Zhang L, Pan M, Quan S. Model predictive control of water management in PEMFC[J]. *Journal of Power Sources*, 2008,180(1):322-329.
- [43] 刘呈则, 朱新坚. 基于Smith预估的先进PID控制在PEMFC中的应用[J]. *计算机仿真*, 2004(10):86-88.
- [44] 许思传, 程钦, 马天才. 燃料电池发动机空气参数的最优控制[J]. *车用发动机*, 2006(02):25-28.
- [45] 魏金强, 全书海, 陈启宏. 燃料电池发动机风量模糊PID控制器的设计[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2007(01):22-26.
- [46] 李奇, 陈维荣, 刘述奎, 等. 质子交换膜燃料电池动态建模及其双模控制[J]. *控制理论与应用*, 2009(07):809-811.
- [47] Bao C, Ouyang M, Yi B. Modeling and control of air stream and hydrogen flow with recirculation in a PEM fuel cell system—ii. Linear and adaptive nonlinear control[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006,31(13):1897-1913.
- [48] Suh K W, Stefanopoulou A G. Performance limitations of air flow control in power-autonomous fuel cell systems[J]. *Control Systems Technology*, IEEE Transactions on, 2007,15(3):465-473.
- [49] Arce A, Del Real A J, Bordons C, et al. Real-time implementation of a constrained mpc for efficient airflow control in a PEM fuel cell[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010,57(6):1892-1905.
- [50] Garcia-Gabin W, Dorado F, Bordons C. Real-time implementation of a sliding mode controller for air supply on a PEM fuel cell[J]. *Journal of Process Control*, 2010,20(3):325-336.
- [51] 李奇, 陈维荣, 刘述奎, 等. 基于改进粒子群算法的 H_{∞} 次优控制在PEMFC混合发电系统中的应用[J].

- 电力系统保护与控制, 2010(21):126-131.
- [52] Danzer M A, Wilhelm J R, Aschemann H, et al. Model-based control of cathode pressure and oxygen excess ratio of a PEM fuel cell system[J]. Journal of Power Sources, 2008,176(2):515-522.
- [53] Ramos-Paja C A, Giral R, Martinez-Salamero L, et al. A PEM fuel-cell model featuring oxygen-excess-ratio estimation and power-electronics interaction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010,57(6):1914-1924.
- [54] Restrepo C, Ramos-Paja C A, Giral R, et al. Fuel cell emulator for oxygen excess ratio estimation on power electronics applications[J]. Computers & Electrical Engineering, 2012,38(4):926.
- [55] Restrepo C, Konjedic T, Guarnizo C, et al. Simplified mathematical model for calculating the oxygen excess ratio of a PEM fuel cell system in real-time applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014,61(6):2816-2825.
- [56] 周克敏, 毛剑琴, 钟宜生, 等. 鲁棒与最优控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [57] 邹涛, 丁宝苍, 张瑞. 模型预测控制工程应用导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [58] Barnes M. Fuel cell systems explained[M]. Manchester University Press, 2002.
- [59] O'Hayre R, 车硕源, Colella W, 等. 燃料电池基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [60] Pukrushpan J T. Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors[D]. 美国密西根大学博士论文, 2003.
- [61] Springer T E, Zawodzinski T A, Gottesfeld S. Polymer electrolyte fuel cell model[J]. Journal Of The Electrochemical Society, 1991,138(8):2334-2342.
- [62] McKay D A, Siegel J B, Ott W, et al. Parameterization and prediction of temporal fuel cell voltage behavior during flooding and drying conditions[J]. Journal of Power Sources, 2008,178(1):207-222.
- [63] 尚德华, 马斌, 张广升, 等. 质子交换膜燃料电池在不同放电状态下的阻抗分析[J]. 西安交通大学学报, 2008(05):622-625.
- [64] Wang C, Nehrir M H, Shaw S R. Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005,20(2):442-451.
- [65] Maswood A I, Nandakumar S. Developing a PEM fuel cell electrical equivalent circuit[C].Sustainable Energy Technologies,2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on,Singapore.IEEE,2008:1166-1171.
- [66] Chang W. Estimating equivalent circuit parameters of proton exchange membrane fuel cell using the current change method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013,53:584-591.
- [67] Page S C, Anbuky A H, Krumdieck S P, et al. Test method and equivalent circuit modeling of a PEM fuel cell in a passive state[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007,22(3):764-773.
- [68] Zenith F, Seland F, Kongstein O E, et al. Control-oriented modelling and experimental study of the transient response of a high-temperature polymer fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2006,162(1):215-227.
- [69] Larminie J R J. Current interrupt techniques for circuit modelling[C].Electrochemical Measurement, IEE

- Colloquium on, London. IET, 1994, 12:1-6.
- [70] Yu D, Yuvarajan S. A novel circuit model for PEM fuel cells[C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE. IEEE, 2004, 1:362-366.
- [71] Choi W, Howze J W, Enjeti P. Development of an equivalent circuit model of a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current[J]. Journal of Power Sources, 2006, 158(2):1324-1332.
- [72] Correa J M, Farret F A, Popov V A, et al. Sensitivity analysis of the modeling parameters used in simulation of proton exchange membrane fuel cells[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(1):211-218.
- [73] Tongzhen W, Xinchun Q, Zhiping Q. An improved ultracapacitor equivalent circuit model for the design of energy storage power systems[C]. Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on, Seoul. IEEE, 2007:69-73.
- [74] Chang W. Equivalent circuit parameters estimation for PEM fuel cell using rbf neural network and enhanced particle swarm optimization[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013:1-8.
- [75] Barrard Power Systems Inc. Fvelocity™-hd6 integration manual[Z]. 2011: 157.
- [76] 赵蕃. 工程热力学（双语版）[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [77] Thomas P. Simulation of industrial processes for control engineers[M]. Ringgold Inc, 2000.
- [78] Kulp G W. A comparison of two air compressors for PEM fuel cell systems[D]. Virginia Polytechnic Institute and State University Mechanical Engineering, 2001.
- [79] 蔡增基, 龙天渝. 流体力学泵与风机[M]. 4. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [80] Bei G, Woon K N, Bill D. 燃料电池模拟、控制和应用[M]. 机械工业出版社, 2011.
- [81] 张立炎, 潘牧, 全书海. 燃料电池空气供应系统建模与动态仿真的研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(4):850-854.
- [82] Gülzow E, Schulze M, Gerke U. Bipolar concept for alkaline fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2006, 156(1):1-7.
- [83] Hermann A, Chaudhuri T, Spagnol P. Bipolar plates for PEM fuel cells: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2005, 30(12):1297-1302.
- [84] LI X, SABIR I. Review of bipolar plates in PEM fuel cells: flow-field designs[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2005, 30(4):359-371.
- [85] Cha S W, O Hayre R, Saito Y, et al. The scaling behavior of flow patterns: a model investigation[J]. Journal of Power Sources, 2004, 134(1):57-71.
- [86] Chen X, Wu N J, Smith L, et al. Thin-film heterostructure solid oxide fuel cells[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(14):2700-2702.
- [87] Santamaria A D, Cooper N J, Becton M K, et al. Effect of channel length on interdigitated flow-field PEMFC performance: a computational and experimental study[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(36):16253-16263.

- [88] Burkholder M B, Siefert N S, Litster S. Nonlinear analysis of voltage dynamics in a polymer electrolyte fuel cell due to two-phase channel flow[J]. *Journal of Power Sources*, 2014,267:243-254.
- [89] Mancusi E, Fontana É, Ulson De Souza A A, et al. Numerical study of two-phase flow patterns in the gas channel of PEM fuel cells with tapered flow field design[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014,39(5):2261-2273.
- [90] Chu K, Ryu J, Sunwoo M. A lumped parameter model of the polymer electrolyte fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2007,171(2):412-423.
- [91] McKay D A, Siegel J B, Ott W, et al. Parameterization and prediction of temporal fuel cell voltage behavior during flooding and drying conditions[J]. *Journal of Power Sources*, 2008,178(1):207-222.
- [92] 科琳·施皮格尔. 质子交换膜燃料电池建模与MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [93] 闫国军. 叶片式泵风机原理及设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2009.
- [94] 沙毅, 闻建龙. 泵与风机[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2005.
- [95] Nolan J, Kolodziej J. Modeling of an automotive fuel cell thermal system[J]. *Journal of Power Sources*, 2010,195(15):4743-4752.
- [96] Gurski S. D. Cold-start effects on performance and efficiency for vehicle fuel cell systems[D]. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [97] 张忠伟. 管芯式汽车散热器的特性分析与仿真[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2007.
- [98] Hwang J. Effect of hydrogen delivery schemes on fuel cell efficiency[J]. *Journal of Power Sources*, 2013,239:54-63.
- [99] 卫东, 郑恩辉, 郑东. 空冷型质子交换膜燃料电池堆温湿度特性自适应模糊建模与输出控制[J]. *中国电机工程学报*, 2010(23):114-120.
- [100] Nikiforow K, Karimäki H, Keränen T M, et al. Optimization study of purge cycle in proton exchange membrane fuel cell system[J]. *Journal of Power Sources*, 2013,238:336-344.
- [101] Barrard Power Systems Inc. Fcgen@-1020acs fuel cell stack fvelocity@-1020acs fuel cell stack[Z]. 2011.
- [102] 姚仲鹏, 王新国. 车辆冷却传热[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001.
- [103] Del Valle Y, Venayagamoorthy G K, Mohagheghi S, et al. Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2008,12(2):171-195.
- [104] Chen W, Zhang J, Lin Y, et al. Particle swarm optimization with an aging leader and challengers[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2013,17(2):241-258.
- [105] Chang Y A, Moura S J. Air flow control in fuel cell systems: an extremum seeking approach[C]. *American Control Conference*, 2009. ACC'09.IEEE,2009:1052-1059.
- [106] Woo C H, Benziger J B. PEM fuel cell current regulation by fuel feed control[J]. *Chemical Engineering Science*, 2007,62(4):957-968.

- [107] 张传升, 李全民, 王强, 等. 燃料电池氢气供应系统的自适应预测控制[J]. 山东建筑大学学报, 2009(3):248-250.
- [108] Asai Y, Takahashi N. Control of differential air and hydrogen pressures in fuel cell systems[J]. Journal of System Design and Dynamics, 2011,5(1):109-124.
- [109] Aimin A, Haochen Z, Xin L, et al. Generalized predictive control for gas supply system in a proton exchange membrane fuel cell[J]. Advanced Materials Research, 2012,512-515(1):1380-1388.
- [110] 钱积新, 赵均, 徐祖华. 预测控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [111] 李国勇. 智能预测控制及其MATLAB实现[M]. 第二版. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [112] Ahn J, Choe S. Coolant controls of a PEM fuel cell system[J]. Journal of Power Sources, 2008,179(1):252-264.
- [113] Li X, Deng Z, Wei D, et al. Novel variable structure control for the temperature of PEM fuel cell stack based on the dynamic thermal affine model[J]. Energy Conversion and Management, 2011,52(11):3265-3274.
- [114] Arce A, Panos C, Bordons C, et al. Design and experimental validation of an explicit mpc controller for regulating temperature in PEM fuel cell systems[C]. Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Milano. IFAC, 2011:2476-2481.
- [115] 王斌锐, 金英连, 褚磊民, 等. 空冷燃料电池最佳温度及模糊增量PID控制[J]. 中国电机工程学报, 2009(8):109-114.
- [116] Hess K S, Miller A R, Erickson T L, et al. Demonstration of a hydrogen fuel-cell locomotive[C]. Proceedings of Locomotive Maintenance Officers Association conference, Chicago, America. American Public Transportation Association, 2008:1-6.
- [117] Guo L, Yedavalli K, Zinger D. Design and modeling of power system for a fuel cell hybrid switcher locomotive[J]. Energy Conversion and Management, 2011,52(2):1406-1413.
- [118] Hsiao D, Huang B, Shih N. Development and dynamic characteristics of hybrid fuel cell-powered mini-train system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012,37(1):1058-1066.
- [119] Wang L. Model predictive control system design and implementation using matlab®[M]. Springer Science & Business Media, 2009.
- [120] Barrard Power Systems Inc. Fvelocity®-9ssl v4[Z]. 2011.

附 录

A. 常用物理量参数

A.1 气体常数

物理量	符号	数值	单位
通用气体常数	R_0	8.314	$J/(K \cdot mol)$
空气气体常数	R_{air}	287.1	$J/(K \cdot kg)$
氮气气体常数	R_{O_2}	259.8	$J/(K \cdot kg)$
氧气气体常数	R_{N_2}	296.8	$J/(K \cdot kg)$
氢气气体常数	R_{H_2}	4124.3	$J/(K \cdot kg)$
水蒸气气体常数	R_v	461.5	$J/(K \cdot kg)$

A.2 摩尔质量

物理量	符号	数值	单位
空气摩尔质量	M_{air}	28.965×10^{-3}	kg/mol
氧气摩尔质量	M_{O_2}	32×10^{-3}	kg/mol
氮气摩尔质量	M_{N_2}	28.016×10^{-3}	kg/mol
氢气摩尔质量	M_{H_2}	2.016×10^{-3}	kg/mol
水蒸气摩尔质量	M_v	18.016×10^{-3}	kg/mol

A.3 定压热容常数(25°C)

物理量	符号	数值	单位
空气热容常数	Cp_{air}	1.005	$J/(K \cdot g)$
氧气热容常数	Cp_{O_2}	0.917	$J/(K \cdot g)$
氮气热容常数	Cp_{N_2}	1.039	$J/(K \cdot g)$
氢气热容常数	Cp_{H_2}	14.03	$J/(K \cdot g)$
石墨热容常数	Cp_{st}	0.718	$J/(K \cdot g)$

A.4 其它常数

物理量	符号	数值	单位
法拉第常数	F	96487	C/mol
空气密度(0°C, 1.013bar°C)	ρ_{air}	1.293×10^3	g/m^3
空气比热比	γ	1.4	—

B. 公式中符号含义

符号	含义	单位	符号	含义	单位
c	摩尔浓度	mol/m^3	A	面积	m^2
d	含湿量	g/g	D	扩散系数	cm^2/s
i	电流密度	A/cm^2	E	电势	V
m	质量	g, kg	H	能头	m
n	单体个数	—	I	电流	A
p	压力	bar	J	转动惯量, 扩散流量	$kg.m^2, —$
q	热能	J	N	转速	$kRPM$
r	压力比	—	P	功率	W
v	电压	V	Q	体积流量	m^3/s
希腊字母			R	电阻, 气体常数	$\Omega,$
η	效率	—	S	管路阻抗	kg/m^7
ϕ	相对湿度	—	T	温度	$K, ^\circ C$
ρ	密度	g/m^3	V	体积, 电压	m^3, V
γ	空气比热比	—	W	质量流量	$g/s, kg/s$
λ	过氧比, 膜含水量	—, —			
τ	力矩	$N.m$			
ω	角频率	rad/s			
角标					
0	额定参数		rad	散热器	
air	空气		rm	排气管道	
an	电堆内阳极		sac	静态加湿器	
atm	环境		sat	饱和水蒸气	
c	冷却液		sm	供气管道	
ca	电堆内阴极		st	电堆	
cm, cp	压缩机		w	湿的	
dry	干的		wl	液体水	
fc	单体电池		wv	水蒸汽	
mix	混合		$wind$	风机	
in	入口		O_2	氧气	
out	出口		H_2	氢气	
$pump$	水泵		N_2	氮气	

C. 饱和水蒸气气压

饱和蒸气压力反映了一定温度下水蒸气所能达到的极限压力和混合气体所能容纳水蒸气的能力,是研究水分在混合气体中产生宏观相变的阈值。饱和蒸气压力可以根据查水蒸气图表或者使用数据拟合公式的方式获得。本文采用Goff-Gratch拟合计算公式,即

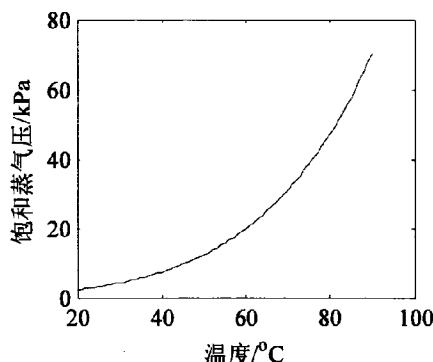
$$\lg p_{sat}(T) = a_1 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + a_2 \lg\left(\frac{T}{T_0}\right) + a_3 \left[1 - 10^{\frac{c_3}{T_0} \left(\frac{T}{T_0} - 1\right)}\right] + a_4 \times 10^{\frac{c_4}{T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)} + a_5 \quad (5-81)$$

其中:饱和压力单位是百帕,温度 T 单位是 K ,参数 $T_0=273.15K$; $a_1 \sim a_4$ 、 c_3 和 c_4 是拟合系数,取值见表C-1。

表C-1拟合系数

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	c_3	c_4
10.079586	-5.02808	1.50475×10^{-4}	4.2873×10^{-4}	0.78614	-8.2969	4.76955

水蒸气饱和压力与温度关系如图C-1所示。在图中随着温度升高饱和压力升高,并且温度越高增速越快。温度由 $20^\circ C$ 升到 $30^\circ C$,饱和压力增加 $1.907kpa$;而温度由 $85^\circ C$ 升到 $90^\circ C$,饱和压力增加 $12.323kpa$;不同温度下饱和蒸气压数值见表3-1。



图C-1 饱和蒸汽压

D. 标称扩散率

在一个由两种气体(气体 i 和气体 j)构成的二元体系中,气体扩散系数是温度、压力和两种物质摩尔质量的函数。在低压下,由气体动力学理论可以得到标称扩散率满足

$$p \cdot D_{ij} = 2.745 \times 10^{-4} \left(\frac{T}{\sqrt{T_{ci} T_{cj}}} \right)^{1.832} (p_{ci} p_{cj})^{\frac{1}{3}} (T_{ci} T_{cj})^{\frac{5}{12}} \left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right)^{\frac{1}{2}}$$

式中: p 是二元气体的总压强(atm); D_{ij} 是二元扩散系数(cm^2/s); T 是二元气体的温度(K); M_i 和 M_j 分别是物质 i 和物质 j 的摩尔质量(g/mol); T_{ci} 、 T_{cj} 、 p_{ci} 和 p_{cj} 分别是物质 i 、 j 的临界温度和压强。

攻读博士学位期间的论文及科研情况

1.已发表论文

- [1]郭爱,陈维荣,李奇,刘志祥.车用燃料电池氢气供应系统的预测控制[J].太阳能学报, 2013,34(8): 1484-1491.(EI: 20134516955047)
- [2]郭爱,李奇,陈维荣,刘志祥. 车用燃料电池阴极系统特性[J].西南交通大学学报. 2013, 48(6): 1052-1058.(EI: 20140317208929)
- [3]Ai GUO, Weirong CHEN, Qi LI, Zhixiang LIU, Haidan QUE. Air flow control based on optimal oxygen excess ratio in fuel cells for vehicles[J]. Journal of Modern Transportation, 2013, 21(2):79-85
- [4]郭爱,陈维荣,刘志祥,李奇.车用燃料电池热管理系统模型研究[J],电源技术, 2014, 38 (12): 2278-2282
- [5]郭爱,陈维荣,李奇,刘志祥,李艳昆.燃料电池机车温度系统建模和控制[J].系统仿真学报,2015,27(1):133-141
- [6]Li Qi, Chen Weirong, Liu Zhixiang, Guo Ai, Liu Shukai. Control of proton exchange membrane fuel cell system breathing based on maximum net power control strategy [J]. Journal of Power Sources, 2013:212-218.
- [7]Li Qi, Chen Weirong, Liu Zhixiang, Guo Ai, Huang Jin. Nonlinear multivariable modeling of locomotive proton exchange membrane fuel cell system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014,39(25):13777-13786.

已投稿

- [1] 郭爱,陈维荣,刘志祥,李奇. 燃料电池机车热管理系统建模和动态分析[J]. 西南交通大学学报(已录用)

2.参与科研项目

- [1] “基于最佳过氧比的机车燃料电池系统净输出功率最优控制方法研究”，自然科学基金(51177138)，主研
- [2] “基于过氧比满意运行区域的机车燃料电池系统净输出功率控制方法研究”，高等学校博士学科点专项科研基金(20100184110015)，主研

3.申请/授权专利

- [1]李奇, 陈维荣, 刘志祥, 戴朝华, 张雪霞, 黄进, 刘述奎, 郭爱, 游志宇, 冒波波. 基于过氧比区域的机车燃料电池系统净输出功率满意控制方法. 2014.06, 中国, 授权号: ZL201210175549.5

- [2]李奇, 陈维荣, 刘志祥, 戴朝华, 张雪霞, 郭爱, 刘述奎. 机车质子交换膜燃料电池系统最优效率控制方法. 2013.12, 中国, 授权号: ZL201310676416.0
- [3]李奇, 陈维荣, 刘志祥, 戴朝华, 张雪霞, 郭爱, 刘述奎. 燃料电池超级电容混合动力机车参数匹配优化方法. 2013.12, 中国, 申请号: 201310675104.8
- [4]李奇, 陈维荣, 刘志祥, 刘述奎, 戴朝华, 张雪霞, 郭爱. 基于最大净功率策略的质子交换膜燃料电池空气供应系统控制. 2013.05, 中国, 申请号: 201210412916.9
- [5]赵兴强, 陈维荣, 刘志祥, 李奇, 郭爱, 戴朝华, 张雪霞. 燃料电池机车低功率运行空压机防喘振方法. 2013.12, 中国, 申请号: 201310671985.6