



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM

分类号: U469.72

单位代码: 10335

密 级: _____

学 号: 21227063

浙江大学

硕士学位论文



中文论文题目: 车载制氢式燃料电池电动汽车混合动力系
统设计与研究

英文论文题目: The Design and Research of Hybrid Power
System for Fuel Cell Electric Vehicle with
on-board Hydrogen Production

申请人姓名: 郭宝圣

指导教师: 熊树生 副教授

合作导师: _____

专业名称: 动力机械及工程

所在学院: 能源工程学院

论文提交日期 2015年3月 日

车载制氢式燃料电池电动汽车混合动力系统设计与研究



论文作者签名: 郭宗毛

指导教师签名: 熊树生

论文评阅人 1: 匿名

评阅人 2: 匿名

评阅人 3: 匿名

评阅人 4: _____

评阅人 5: _____

答辩委员会主席: 李兆大

委员 1: 李京鲁

委员 2: 翟昕

委员 3: _____

委员 4: _____

委员 5: _____

答辩日期: 2015.3.7

浙江大学研究生学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：郭宗尧 签字日期：2015年3月11日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：郭宗尧

导师签名：饶树生

签字日期：2015年3月11日

签字日期：2015年3月11日

摘要

汽车是现代工业技术最具有影响的成就之一，汽车产业是现代世界经济的重要支柱之一，为现代社会的发展，在满足人类需求上做出了重大贡献。然而，随着大量汽车的使用，已经并将持续引发严重的环境与人类生存问题。

燃料电池电动汽车具有很多优点，有着巨大的发展潜力。但是，如果在燃料电池车上仅安装燃料电池同样会出现很多问题，比如电源设备体积大且沉重，起动时间长，功率响应慢，在急加速和低速行驶时效率低下等等。

结合不同类型电动汽车的优点，本课题燃料电池电动汽车的设计方案，较为有效地解决了氢气的储运问题，满足了燃料电池汽车对能量回收、功率和动态特性的特殊要求。有别于储氢式燃料电池汽车，此方案省去了加氢过程，采用车载制氢，去掉了高压储氢装置，采用燃料电池作为主动力电源驱动电机，锂电池作为辅助电源，进行驱动加速和能量回收。

本文对燃料电池电动汽车的动力和控制系统进行重新设计，根据燃料电池、锂电池和电动汽车的特性，设计适用于车载制氢式燃料电池电动汽车的混合动力系统。在此基础上试制了电驱动系统、电池管理系统、电能变换器等主要系统的样机及控制板。

在基于 MATLAB/Simulink 环境的 ADVISOR 仿真平台上，搭建混合动力驱动模型和纯燃料电池驱动模型，并进行仿真和对比分析。结果显示混合动力驱动模型中燃料电池和锂电池分别在高效率及安全运行区域工作，且燃料电池输出功率波动较小，提高了能源利用效率，延长了燃料电池使用寿命。同时可对锂电池充放电进行有效管理，保证了充电安全，同样延长了锂电池的使用寿命。

关键词： 燃料电池；电动汽车；混合动力；车载制氢；ADVISOR

Abstract

Automobile is one of the most influential modern industrial technology achievements, and the automobile industry is an important pillar of the modern world economy. It has made great influences. However, with the use of a large number of cars, it has and will continue to cause serious problems of environment and human survival.

Fuel cell electric vehicle has many advantages and great potential. But the pure fuel cell electric vehicle will also bring about a lot of problems, such as bulky and heavy power equipment, long start time, low efficiency in the condition of rapid acceleration and low speed and so on.

Combined with the advantages of various types of electric vehicles, this design of fuel cell electric vehicle, solve the storage and transportation of hydrogen, and meet the special requirements for energy recovery, power and dynamic characteristics. the scheme, using the on-board hydrogen, removing the high pressure hydrogen storage device, use fuel cell as active power and lithium batteries as auxiliary to drive motor. Based on the design and simulation, we have produced the prototype and control board of main system such as electrical driving system, the battery management system and the energy converter.

According to the characteristics of the fuel cell, lithium battery and electric vehicle, this paper designed the hybrid power system. In the simulation platform ADVISOR based on the MATLAB/Simulink environment, we build the hybrid electrical driven model and the pure fuel cell driven model, and comparative analyze the results. The fuel cell and lithium battery in hybrid drive model are working at efficient and safe operation zone, and have small output power fluctuation, high energy efficiency. The management of charging and discharging of lithium battery is efficient.

Key words: Fuel Cell, Electric Vehicle, Hybrid Power, On-board Hydrogen Production, ADVISOR

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
目 录	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外技术发展研究现状	3
1.2.1 电动汽车的发展现状	3
1.2.2 燃料电池技术的研究现状	4
1.2.3 国外燃料电池汽车的研究现状	6
1.2.4 我国燃料电池汽车技术的发展现状	7
1.3 本课题研究目标及内容	8
1.4 本章小结	10
第 2 章 制氢式燃料电池电动汽车结构分析及设计	11
2.1 车载制氢式燃料电池电动汽车的基本结构	11
2.2 车载制氢系统选用	12
2.2.1 甲醇水蒸气重整制氢	12
2.2.2 甲醇部分氧化重整制氢	13
2.2.3 甲醇自热重整制氢	13
2.3 质子交换膜燃料电池的结构、工作原理及性能分析	14
2.3.1 质子交换膜燃料电池的特点及工作原理	14
2.3.2 膜电极	16
2.3.3 催化剂	16
2.3.4 双极板	17
2.3.5 质子交换膜燃料电池的水管理和热管理	17
2.3.6 质子交换膜燃料电池的性能分析	18
2.4 DC/DC 电能变换器分析及选用	19
2.4.1 DC/DC 变换器的功能及类型	19
2.4.2 双向升降压型 DC/DC 电能变换器结构、原理及工作模式分析	20
2.5 驱动电机及其控制系统	22
2.5.1 驱动电机的主要类型	22
2.5.2 永磁无刷直流电机驱动控制策略	23
2.6 辅助电池及其管理系统	24
2.6.1 峰值电源的类型及选用	25
2.6.2 锂电池的充放电特性	25
2.6.3 电池管理系统功能设计	25
2.7 再生制动系统	28
2.8 本章小结	28

第 3 章	燃料电池电动汽车混合动力系统设计	29
3.1	混合动力系统电力耦合驱动模式分析	29
3.1.1	纯燃料电池系统驱动模式	29
3.1.2	动力电池组和燃料电池系统混合驱动模式	30
3.1.3	超级电容器和燃料电池系统混合驱动模式	31
3.1.4	辅助电池、超级电容器和燃料电池系统混合驱动模式	31
3.2	F+B 电力耦合驱动系统的结构、运行模式及控制策略	33
3.2.1	F+B 模式电力耦合驱动系统的结构设计	33
3.2.2	F+B 模式电力耦合驱动系统的运行模式	34
3.2.3	F+B 模式电力耦合驱动系统的控制策略	34
3.3	混合动力驱动系统的参数设计	37
3.3.1	设计要求	37
3.3.2	驱动电机功率设计	38
3.3.3	燃料电池系统功率设计	40
3.3.4	锂电池组功率及能量容量设计	40
3.3.5	传动比设计	41
3.4	本章小结	42
第 4 章	混合动力驱动系统建模与仿真分析	43
4.1	电动汽车建模仿真的基本原理和仿真软件简介	43
4.2	燃料电池电动汽车系统建模	44
4.2.1	主要系统模型	44
4.2.2	燃料电池电动汽车整车模型	45
4.3	仿真工况及分析	45
4.3.1	仿真工况	45
4.3.2	仿真结果与分析	47
4.4	本章小结	53
第 5 章	总结与展望	54
5.1	全文工作总结	54
5.2	后续工作展望	54
	参考文献	55

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

汽车是现代工业技术最具有影响的成就之一，汽车产业是现代世界经济的重要支柱之一，为现代社会的发展，在满足人类需求上做出了重大贡献。近年来，由于汽车的大量使用，导致了严重的环境污染，已危及到人类的生存^[1]。近年来，能源消费与日俱增（图 1-1），能源危机不断加剧，环境污染持续恶化，全球变暖加剧。为了应对复杂的全球能源安全形势，解决能源开发使用过程中所带来的生态破坏、环境污染及全球气候变化等问题，进入 21 世纪以来许多国家高度重视能源科技创新，积极开发新一代能源技术^[1,2]。

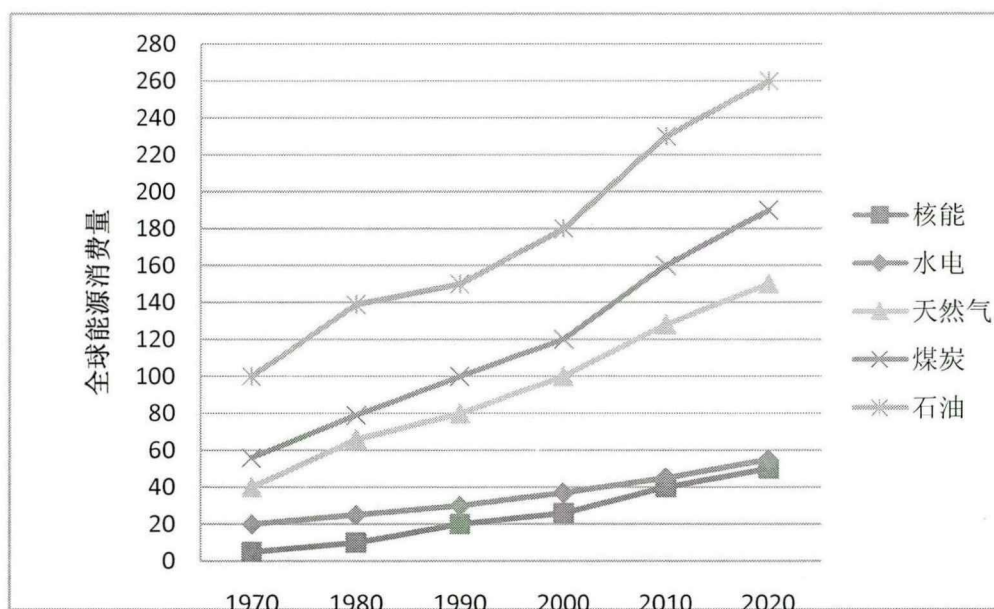


图 1-1 全球能源消费及预测 (10^{15} kJ)

电能是清洁的、无污染的。电能可以由任何一种一次能源转换而来(图 1-2)，并且它还可以再次转换为机械能、热能等其他形式的能量，并可实现精密的控制。随着能源科学技术的研究发展，可再生的能源在今后将会得到更大规模地利用，电动汽车、混合动力汽车、燃料电池汽车等新兴用电产业的地位将会越来越重要。

2002 年 6 月的第 14 届世界氢能源大会就提出了氢能源社会的概念^[3]，其中便是以燃料电池作为主导产品的。随之，很多发达国家相继加大力度研究开发燃料电池汽车。燃料电池汽车可以实现极低的排放甚至零排放，能量利用率

高，具有非常巨大的发展前景和潜力。

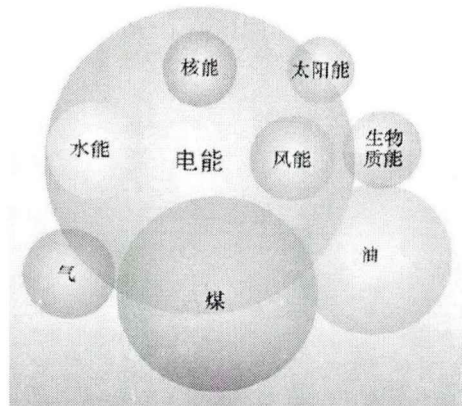


图 1-2 电能与其他能源之间的关系^[2]

我国主要的化石能源包括煤、石油和天然气等在全球范围来看总量是较为丰富的，但是资源矿产不高，开采技术水较低，可持续供应能力相对不足，而且对资源环境的破坏日益严重，对外依存度持续走高，这将对我国能源安全造成巨大的威胁。因此，推进能源发展方式的转变，走中国特色的能源现代化道路刻不容缓。电能在我国能源发展战略中的地位和重要性不言而喻，电动汽车也必将是我国未来汽车工业发展的重要方向。

我国燃料电池汽车技术自“863”计划电动汽车重大专项启动以来，在技术标准、材料、基础设施、燃料电池堆、整车设计等关键技术方面都取得了重大进展，已掌握了车用燃料电池发动机研发、制造及测试等相关技术，且处于世界先进水平。燃料电池电动汽车是中国汽车产业战略转型升级的重要组成部分，未来必将取得更大规模发展^[4,5]。

燃料电池燃料最终都是氢气，不管氢气来源如何，燃料电池本身基本是零排放的，考虑到制氢过程，其排放物也极低。即使采用甲醇作为制氢原料，其 CO_2 排放也比热机低得多。且 NO_x 、 SO_x 和粉尘排放几乎为零，CO及VOC排放很低，PM排放几乎没有。而且这些污染物主要来自重整制氢过程。随着制氢工艺的发展，燃料电池电动的汽车的排放将进一步下降。

综上所述，结合不同类型电动汽车的优点，本课题燃料电池电动汽车的设计方案，较为有效地解决了氢气的储运问题，满足了燃料电池汽车对能量回收、功率和动态特性的特殊要求。

1.2 国内外技术发展研究现状

1.2.1 电动汽车的发展现状

电动汽车是21世纪世界汽车工业发展的重要方向,其背后反映的是能源消费方式的深刻变革。很多国家已经制定了电动汽车产业发展战略,并出台了一系列配套和扶持政策。全球电动汽车研发投入与示范力度前所未有的,其发展进入了市场化推广阶段^[1]。一些发达国家的电动汽车行业已经实现产业化和商品化。电动汽车在我国具有很大的市场发展潜力,国家已将发展电动汽车作为新能源发展战略的主攻方向。电动汽车的发展意义重大。其对转变能源消费方式,缓解能源危机和环境污染,构建绿色能源消费模式,促进汽车产业转型升级,加快技术进步具有重要影响。城市大气污染的罪魁祸首就是汽车排放的尾气。而电动汽车与传统燃油汽车相比,既节约能源,又能减少尾气排放,降低环境污染。所以发展电动汽车可以有效地缓解一些环境问题。

表 1-1 纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车的特征^[6]

电动汽车类型	纯电动汽车	混合动力电动汽车	燃料电池电动汽车
驱动方式	电机	电机 内燃机	电机
能量系统	蓄电池 超级电容器	蓄电池 超级电容器 内燃机	燃料电池 蓄电池 超级电容器
能源基础设施	充/换电站	加油站 充/换电站	加氢站 甲醇或汽油 乙醇
主要特点	零排放 能源效率高 续驶里程短 初期成本高	很低排放 经济性高 续驶里程长 结构复杂	零或超低排放 能源效率高 续驶里程长 成本较高
主要问题	蓄电池及其管理 充电设施	能源管理 优化控制 蓄电池管理	燃料电池 燃料处理器 峰值电源系统 能量控制策略

电动汽车涉及的学科广,内容杂。其类型一般可以分为三类,即纯电动汽车(BEV)、混合动力电动汽车(HEV)和燃料电池电动汽车(FCEV)。目前,这三种电动汽车发展阶段各不相同,急需解决的难题也不一样,如表 1-1。

纯电动汽车峰值功率较低,续驶里程较短,一般较适用于低速短距离行驶,而混合动力电动汽车的性能现阶段来说比较理想,续驶里程与内燃机汽车差不多,而且能够实现低油耗和低排放,但是它并没有摆脱对石油燃料的依赖,需要配备两个动力源,价格也相对比较高,如今最为成熟的混合动力车型是丰田普锐斯。燃料电池汽车既彻底摆脱了对石油的依赖,又具有传统内燃机汽车的动力性能,所以具有很大的潜力,有望在不远的将来实现实用化。

1.2.2 燃料电池技术的研究现状

燃料电池是一种将储存在燃料(主要是氢气)和氧化剂(空气或者纯氧)中的化学能,通过电极反应直接转化为电能的发电装置。主要由电极(Electrode)、电解质隔膜(Electrolyte Membrane)与集电器(Current Collector)等组件构成。它的种类有很多,根据电解质类型可分为碱性燃料电池(AFC)、质子交换膜燃料电池(PEMFC)、磷酸燃料电池(PAFC)、熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)、固体氧化物燃料电池(SOFC)、直接甲醇燃料电池(DMFC)等几种^[7],其组成结构、性能及应用方向见表1-2。

表1-2 不同类型燃料电池比较^[7]

电池类型	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	PEMFC	DMFC
阳极材料	Pt/Ni	Pt/C	Ni/Al	Ni/ZrO ₂	Pt/C	Pt/C
阴极材料	Pt/Ag	Pt/C	Li/NiO	Sr/LaMnO ₃	Pt/C	Pt/C
燃料	纯氢	天然气、氢	天然气、煤气	天然气、煤气	纯氢	甲醇
电解质	KOH	H ₃ PO ₄	Li ₂ /K ₂ CO ₃	YSZ	聚合物	KOH
腐蚀性	强	强	强	弱	无	强
工作温度(°C)	约100	约200	600~700	800~1000	约100	约100
比功率(W/kg)	35~105	120~180	30~40	15~20	340~3000	110~160
起动时间	几分钟	几分钟	>10min	>10min	<5s	<5s
寿命(h)	10000	15000	13000	7000	10000	200
应用方向	航空航天	电站	电站	电站	移动电源、电动汽车、航天领域	移动电话、电脑

燃料电池的最大优点在于反应过程不涉及燃烧,没有热机作功,不受卡诺

循环热效率上限的限制, 能量转换率较高, 可以达到 60% 以上, 实际使用效率可达传统内燃机的两倍以上, 且对环境污染小。从能源的利用效率和环境保护方面来看, 燃料电池电动汽车是未来的理想车辆。其中质子交换膜燃料电池 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) 也叫聚合物电解质膜, 或固态聚合物电解质膜, 或聚合物电解质膜燃料电池。它的工作温度较低, 约为 80°C , 能在较低温度下工作, 可在严寒条件下迅速启动。其电力密度较高, 体积小, 工作效率很高, 可获得 40%~50% 的最高理论电压, 还能快速地根据用电需求调节输出, 而且排放极低甚至零排放。与其他类型的燃料电池相比, 它还具有寿命长, 应用范围广等优点, 因此它被认为是燃料电池汽车的最理想的能量来源。图 1-3 为其基本结构图。

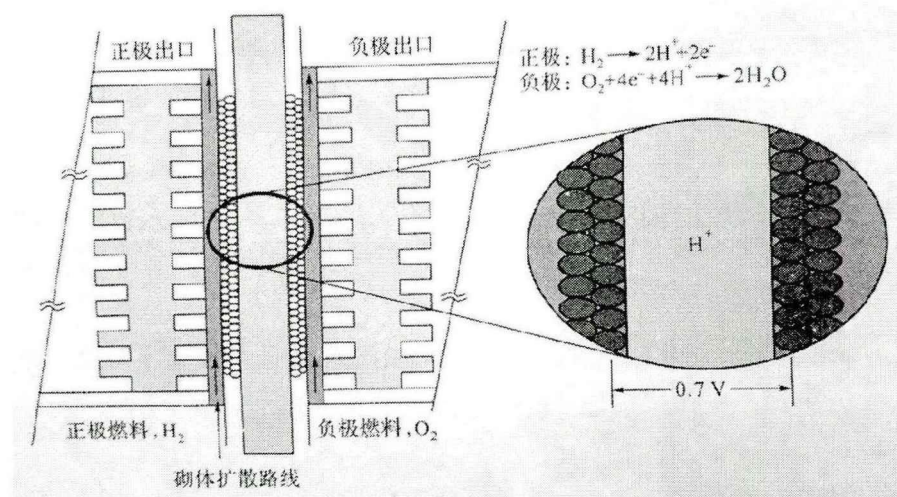


图 1-3 PEMFC 的基本结构示意图

燃料电池汽车上最关键的部件就是燃料电池。近年来, 世界各国均投入大量资金开展这方面的研发, 燃料电池成本已大大降低。

全球主要汽车厂商积极开发燃料电池汽车, 技术不断进步。燃料电池功率由上世纪 90 年代的 30kW 提高到 90kW, 续航里程由 100km 到 500km, 最高速度也达到了 150km/h。燃料电池汽车的动力性能逐渐接近传统汽车, 进入实用阶段。除了汽车企业外, 各国政府加大了对燃料电池汽车的支持力度^[8,9]。

燃料电池技术是全球致力于燃料电池汽车制造的企业竞争的焦点, 美国通用, 日本丰田、本田、尼桑, 德国戴姆勒等公司都拥有自主研发的车用燃料电池技术, 这些技术也代表了目前世界燃料电池技术的领先水平。其燃料电池堆

功率可达 1500~2000W/L, 动态寿命可达 4000~5000h^[10,11]。

燃料电池技术的重点在于降低成本, 提高其能量密度、寿命、可靠性和适应性。巴拉德公司利用十年时间(1993-2003)使燃料电池堆的体积功率密度提高了 25 倍。至 2003 年, 该公司生成的燃料电池发动机达到了美国能源部 2010 年的标准。UTC(美国联合技术公司)自 1998 年以来一直致力于车用燃料电池技术的研发, 截至 2010 年 6 月, 其与美国 AC Transit 运输公司合作开发的燃料电池系统已经连续运行了 7000h, 超过了美国能源部预计的 2015 年达到 5000h 的标准。

目前, 燃料电池汽电动车的成本较高, 售价也是居高不下, 一般要超过传统汽车的十倍以上。不过随着各大厂商不断投入, 技术不断进步, 其成本也在逐渐下降。燃料电池在 2012 年的成本已经比 2008 年下降了 30%多, 比 2002 年的下降幅度更是达到了 80%, 技术的进步可见一斑。

另外, 燃料电池中贵金属催化剂的用量也需要进一步下降, 同时, 非贵金属催化剂也要积极研发。其能量的转换效率同样需要继续提高。

1.2.3 国外燃料电池汽车的研究现状

加拿大巴拉德公司在 1993 年就第一个推出了其设计生产的燃料电池汽车。奔驰和西门子在 1996 年也联合推出第二代燃料电池电动车 NECARII。韩国现代公司在 2010 年推出了第三代燃料电池电动汽车 ix35。2011 年 1 月奔驰公司的燃料电池车运行 4 个多月, 行驶 30000km, 完成了环游世界的创举。目前, 在欧洲各大城市已经有 300 多辆奔驰公司的燃料电池轿车和公交车在运行^[1]。

日本由于其国内能源结构原因, 早在 30 多年前就开始研究燃料电池汽车, 2003 年起对燃料电池汽车实行免税制度。其中丰田公司一直处于领先地位, 在 1996 年就推出了日本第一款燃料电池汽车, 车速可达 100km/h。1997 年又开发了其第一款车载甲醇制氢燃料电池汽车。2002 年底, 丰田公司正式在日、美销售燃料电池汽车, 并向日本政府交付首批 5 台燃料电池电动汽车, 这也是世界上首批投入商业使用的燃料电池汽车。丰田致力于开发能量转换效率可达汽油机 2.5 倍的燃料电池, 且能方便地添加燃料^[11]。

本田公司在 1999 年发布了其第一款燃料电池原型车, 其后, 2000 年、2002 年、2006 年分别推出改进车型。2008 年其燃料电池汽车已经量产, 并正式向市

场推广。

韩国现代公司积极参与燃料电池汽车的开发,其开发的燃料电池汽车续航里程可与传统内燃机车相比,并且冷启动性能良好,可在零下 25℃正常启动,其主要部件均为韩国国内企业生产,国产化程度很高。全球第一款量产的燃料电池电动汽车 ix35 已于 2013 年 2 月正式下线。

法国也开发出燃料电池汽车 Fever,它以氢为燃料,空气为氧化剂,功率达 20kW,电压 90V,采用先进电子系统控制,并用蓄电池储存回收能量。

近年来,美国通用公司和日本丰田公司,美国国际燃料电池公司和日本东芝,德国奔驰与西门子,法国雷诺与意大利 De Nora 等一些大公司纷纷强强联合,优势互补,共同开发燃料电池汽车,其技术已取得长足发展。

最近推出的如奔驰 B-Class F-Cell、丰田 FCHV-adv、通用-欧宝 SUV Hydro Gen 4、以及本田 FCX Clarity 等燃料电池汽车的可靠性及成本控制等方面的技术取得了很大进步。这些车型基本采用电-电混合动力模式,即燃料电池与动力电池组混合,这样有利于调节燃料电池功率和能量回收,驱动电机采用永磁同步电机,动力电池采用锂电池或镍氢电池。

1.2.4 我国燃料电池汽车技术的发展现状

近年来,在科技部、中科院及各级地方政府的支持下,我国燃料电池汽车技术的研发也取得了重要进展,基本掌握了整车、动力系统及关键零部件的核心技术,开发出了具有国际水平的增强型符合自增湿质子交换膜,开展了可靠性、安全性、一体化管理、智能容错等关键技术研究,建立了国家级技术中心和测试基地,制定了国家标准,形成了自主研发体系,具有动力系统平台和整车生产能力,在北京奥运会和上海世博会期间,均有国产燃料电池汽车服务。

“十五”期间,随着国家“863”电动汽车重大专项和中科院知识创新工程重大项目“大功率质子交换膜燃料电池技术与氢源”的启动与进展,我国的车用燃料电池技术已经取得了非常大地发展^[12]。在一些关键技术上拥有自主知识产权,成功开发出了具有良好经济性的燃料电池汽车。

“十一五”期间,“863”节能与新能源汽车重大项目给予燃料电池关键材料、关键技术资助。至 2010 年,车用燃料电池发动机系统、燃料电池用炭纸、双极版、质子交换膜、催化剂及膜电极技术取得了显著成就。

我国燃料电池汽车技术经过了十几年的发展,在功率密度、可靠性、稳定性等方面都取得了明显进步,已经初步具备了小批量生产的条件。例如在燃油经济性、车外噪声等水平上,与国外处于相同水平甚至领先。

不过,在更多技术上,与国际先进水平相比仍有一定差距。如上汽、一汽、奇瑞、长安等国内厂商均基于传统内燃机车改造开发燃料电池汽车,燃料电池汽车专用车身、底盘控制等关键技术尚未掌握;受燃料电池功率水平、整车集成及轻量化技术限制,我国整车加速性能也明显低于国外主流水平;一些关键的阀门、传感器等部件也要依赖进口,氢的先进制取储存等关键技术也处于初级阶段,国产燃料电池汽车的续驶里程明显不足。

国内燃料电池发动机功率等级、功率密度等性能也明显低于国外发达国家水平,在环境适应性尤其是冷启动性能方面还处于初级水平;燃料电池堆及其关键部件寿命比较短,达不到整车寿命水平;由于燃料电池发动机和氢气存储成本较高,国内整车的成本也居高不下。

1.3 本课题研究目标及内容

设计方案中,燃料电池电动汽车为车载制氢式,采用甲醇蒸气重整和部分氧化重整相结合的自热重整方式制氢,做到氢气即时供给;采用锂电池与燃料电池相结合的混合方式驱动;利用再生制动系统为锂电池回收制动、滑行能量。有别于储氢式燃料电池汽车,此方案省掉了加氢过程(图 1-4, 1-5b),去掉了高压储氢装置,采用燃料电池作为主动力电源驱动电机,锂电池作为辅助电源,进行驱动加速和能量回收。

主要研究内容有

(1) 燃料电池电动汽车配件选型分析及结构设计

结合项目设计的燃料电池电动汽车结构,对其主要部件如车载制氢系统、燃料电池系统、电驱动系统及辅助电源及管理系统等分别进行了分析,并对其管理及控制策略进行了研究。

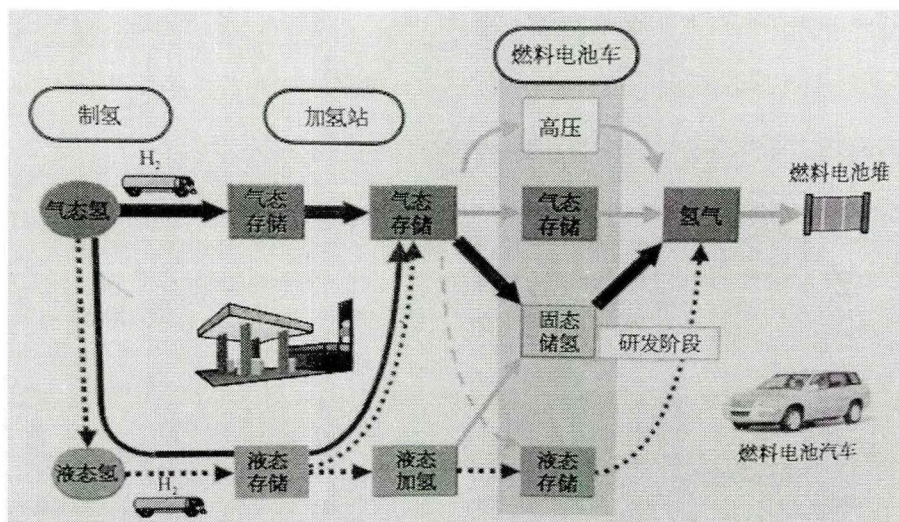
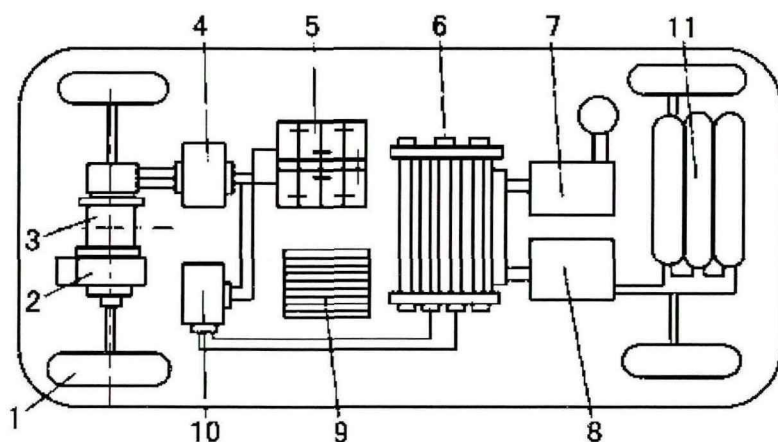
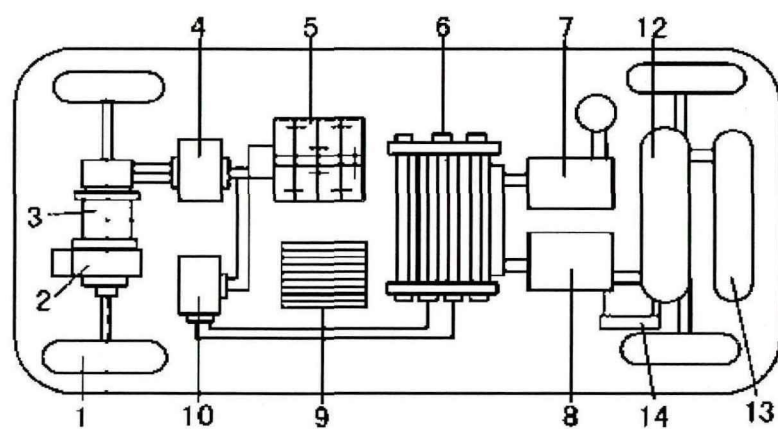


图 1-4 燃料电池电动汽车氢燃料供应图^[7]



a) 储氢式燃料电池电动汽车



b) 车载制氢式燃料电池电动汽车

- 1. 车轮 2. 传动系统 3. 驱动电机 4. 功率逆变器 5. 辅助电源（锂电池） 6. 燃料电池堆
- 7. 空气分离制氧装置 8. 氢气管理系统 9. 整车控制器 10. DC/DC 电能变换器 11. 储氢罐
- 12. 车载甲醇制氢装置 13. 甲醇储存罐 14. H₂ 净化装置

图 1-5 燃料电池电动汽车结构简图

(2) 燃料电池电动汽车混合动力驱动系统设计及主要部件试制

分析了燃料电池电动汽车动力系统电耦合驱动的三种型式, 结合各自的优缺点和现有条件及最新研究进展选定了 F+B 方案, 对其结构、运行模式和控制策略进行了研究分析和设计; 进一步对混合动力驱动系统的具体参数进行了设计计算。在设计原理和计算的基础上, 完成部分主要部件的试制工作, 并进行产品性能检验。

(3) 仿真及数据分析

运用基于 MATLAB/Simulink 环境的 ADVISOR 仿真软件 (如图 1-6 所示) 对混合动力驱动方式和纯燃料电池驱动方式分别进行了模型构建和系统仿真, 并对仿真结果进行了对比分析。主要研究相同车型参数的情况下两种模型的速度、加速性能、燃料经济性和燃料电池系统输出功率和系统效率, 以及在混合动力驱动模型中锂电池的工作特性。

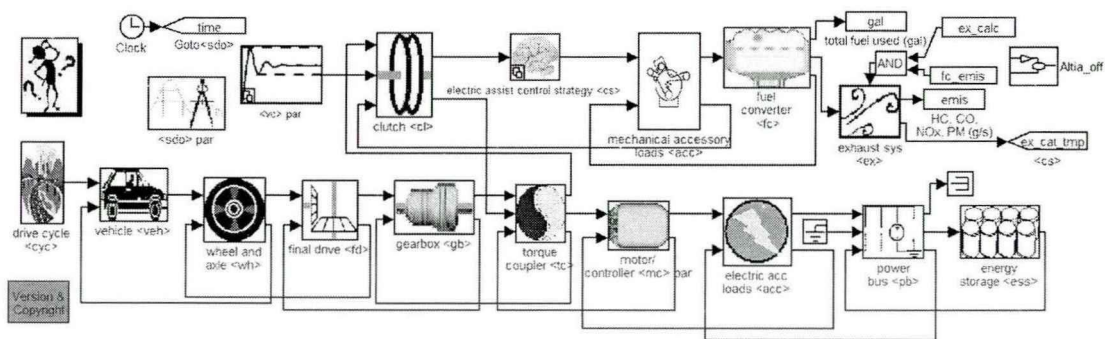


图 1-6 ADVISOR 仿真整车模型图^[13]

1.4 本章小结

本章首先分析了课题研究的背景和意义, 然后介绍了国内外电动汽车、燃料电池、燃料电池电动汽车的技术研究及发展现状, 最后提出了本课题的主要研究目标和内容。

第2章 制氢式燃料电池电动汽车结构分析及设计

2.1 车载制氢式燃料电池电动汽车的基本结构

本课题所研究的车载制氢式燃料电池电动汽车主要包括车载制氢系统、燃料电池系统、直流/直流 (DC/DC) 变换器 (电耦合装置)、电机驱动系统、辅助电池 (本文中峰值电源的概念范围包含动力电池组, 而动力电池组的概念范围又包含锂电池) 及其管理系统等。本课题主要研究混合动力驱动及控制系统设计、燃料电池及辅助电池管理 (FC+B) 等方面的内容。

车载制氢系统主要由燃烧器和重整器、甲醇储存罐和净化器等部件组成。实现氢气的制取提纯等功能。

燃料电池系统主要由燃料电池堆、燃料供给与循环系统、氧化剂 (O_2) 供给系统、水热管理系统及控制系统组成。实现电能的产生和主要功率输出功能。

DC/DC 变换器主要由单片机、脉宽调制、主电路等部件组成。实现燃料电池输出电压与动力总线电压匹配及控制能量输出功能 (图 2-1)。

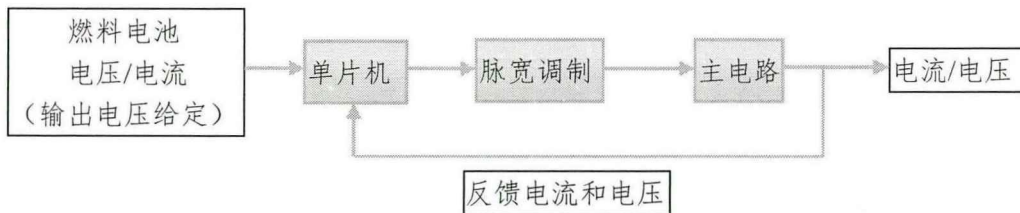


图 2-1 DC/DC 变换器的控制结构框图^[14,15]

驱动电机及其控制系统主要由电机和控制器构成, 是燃料电池电动汽车的心脏, 它使电能转变为机械能, 并通过传动系统驱动车辆行驶。控制器用来控制电机, 是一个电能变换控制装置。主要有直流电机驱动、异步电机驱动、同步电机驱动和开关磁阻电机驱动等几种方式。

峰值电源系统也是燃料电池电动汽车混合动力电力耦合驱动的重要组成部分。当燃料电池可提供功率不能满足汽车所需驱动功率 (如启动、加速、爬坡等工况) 时, 此系统释放存储电能, 降低燃料电池峰值功率要求, 使其工况较为稳定。当燃料电池提供功率超过汽车所需功率 (如怠速、低速或减速等工况) 时, 此系统可储存富余能量, 也可吸收制动能量, 可提高整车能量效率。当前主要由铅酸电池、镍氢电池、锂电池和高温钠硫电池可供选择。本课题采用锂

电池作为辅助电池。

2.2 车载制氢系统选用

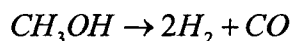
目前, 碳氢化合物燃料重整制氢是氢气的主要来源。重整就是一种由碳氢化合物提取氢的化学反应过程。在此过程中, 碳氢化合物的 C-H 键能转换成氢气。可以用于车载制氢的原料有很多种, 例如甲醇、乙醇、二甲醚等醇类或汽油、柴油、甲烷、天然气、液化石油气等烃类。不论何种燃料, 都需经过改质才能获得氢气, 其中甲醇、汽油应用较多。

甲醇在常温常压下为液态, 不易发生自燃、爆炸、毒性小、安全性高、能量密度高, 其生产、储存、运输、充加等整个流通环节不需专用装置。在采取一些措施后, 便可利用现有汽油储运系统。从化学角度看, 甲醇分子结构简单, 氢碳比例高, 无碳-碳原子共价键, 易分离, 比其他燃料更容易释放氢, 制氢温度低, 反应容易实现, 且不含硫, 不会产生催化剂中毒现象。甲醇的来源很广, 既可以用天然气生产, 又可以用有机物生产, 能摆脱对石油的依赖。另外, 甲醇添加速度快, 不需特殊安全装置, 只要燃料箱由足够容量, 就可延长续航里程。综合比较起来, 甲醇是现阶段最理想的车载制氢原料。

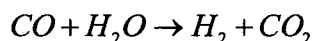
甲醇制氢可以采用水蒸气重整 (SR)、部分氧化重整 (POX) 以及自热重整 (ATR) 等方式^[16], 也可采用甲醇裂解方式。

2.2.1 甲醇水蒸气重整制氢

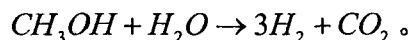
在水蒸气重整这个化学过程中, 氢通过碳氢化合物燃料和高温水蒸气之间的化学反应生成。整个过程可以看成两个反应, 首先是分解反应, 这是一个吸热过程, 需要在 600 多摄氏度的高温下进行, 反应方程式如下



这个过程是强烈吸热的, 而且还产生了一氧化碳, 这将使燃料电池的电解质中毒。所以后面必须还要有一个转化反应, 即一氧化碳依靠水煤气反应进而生成氢和二氧化碳。后面一个过程属于轻微的放热反应, 反应温度约在 200°C 至 300°C 之间, 反应方程式为



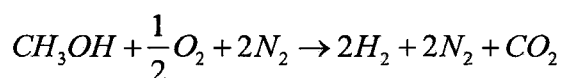
整个过程可表示为



采用这种方法时，将甲醇和水的混合物一起送入蒸发器中加热，从而气化成两者的气体混合物，然后进入重整器，混合气可在较低温度下发生转化反应生成氢气，同时甲醇中的碳以二氧化碳的形式排出。在重整器中少量未反应的氢气和二氧化碳，可进入燃烧器中燃烧，保证该反应的温度条件。整个过程氢产量很高。但由于整个反应是要吸热的，所以需要有一个外部的加热设备（如燃烧器），这样就增加了反应时间，不利于快速启动，不太适用于车载制氢装置。而且过程中产生的一氧化碳也会使重整催化剂中毒，所以要求产生的氢气中，一氧化碳的浓度必须控制在 10^{-6} 这个数量级以下。

2.2.2 甲醇部分氧化重整制氢

部分氧化重整是将燃料与氧结合制氢，并会生成一氧化碳。这种方法一般利用空气为氧化剂，但会有大量稀释的氮气放出（不是产生）。过程中产生的一氧化碳进而也会与水蒸气反应生成氢和二氧化碳。整个过程是一个强烈放热的反应，甲醇在高温下分解，碳原子与氧结合生成二氧化碳和少量一氧化碳及水，氢气单独分离出来。反应过程为



它的动态响应速度很快。但是产氢量要低于水蒸气重整方式，而且同样由于放热，它的工作温度相对来说较高（最高可达 $800^{\circ}C$ ），散热问题比较严重，从而影响这种方式在车载制氢装置上的应用。

2.2.3 甲醇自热重整制氢

由于上述水蒸气重整制氢方式需要加热，温度较高；部分氧化重整制氢方式会放出大量热，增加了热处理难度。所以本课题选用两者相结合的自热重整方式，过程中水蒸气重整反应吸收的热量平衡了部分氧化重整反应所放出的热量。其原理如图 2-2 所示。

甲醇自热重整是将甲醇部分氧化和甲醇水蒸气重整反应结合的反应过程。反应过程如下：



由于反应体系是由吸热的甲醇水蒸气重整和放热的甲醇部分氧化反应构成,过程为首先甲醇氧化分解放热,然后甲醇水蒸气重整^[17],其过程的产氢量介于两者之间。但是较高的水醇摩尔比和气体进口温度可以防止甲醇同氧气发生氧化反应,且产氢量较高,同时可使催化剂积碳降低^[18]。催化剂主要采用Cu/ZnO/Al₂O₃^[19],也可采用Pd/ZnO 催化剂^[20]。

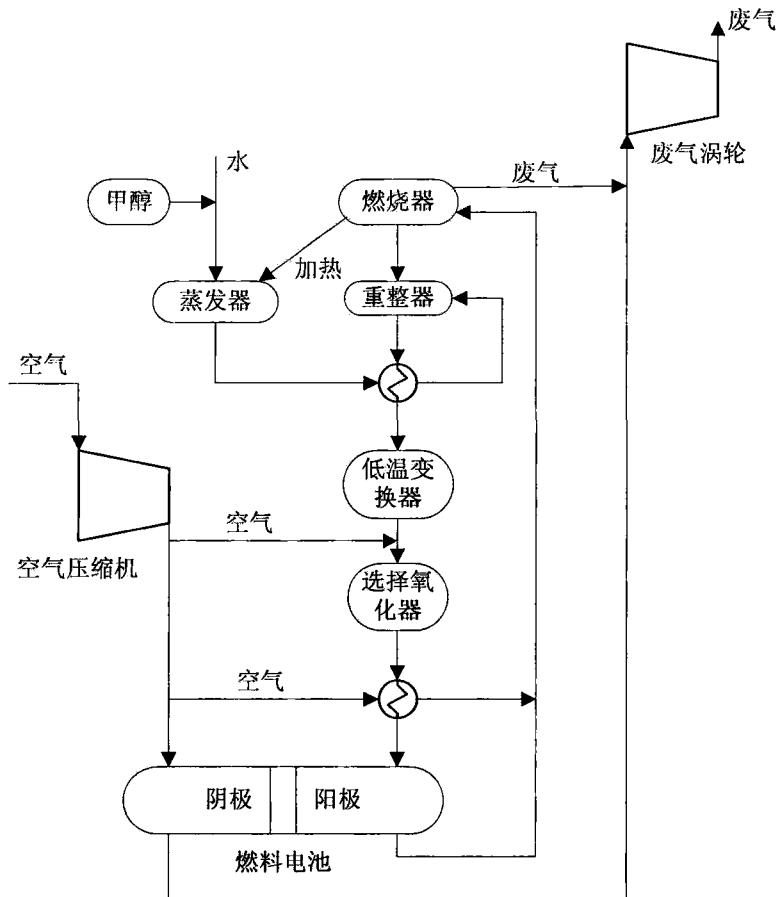


图 2-2 车载甲醇制氢系统原理图

2.3 质子交换膜燃料电池的结构、工作原理及性能分析

2.3.1 质子交换膜燃料电池的特点及工作原理

质子交换膜燃料电池单体一般由质子交换膜(含催化剂)、电极(含气体扩散层)和流场板(双极板)构成。阳极和阴极被电解质分开,电解质为固态聚合物膜,迁移的离子氢离子即质子,其名称亦由此而来。质子交换膜燃料电池以纯氢作为燃料,空气或纯氧作为氧化剂。

碳基催化剂覆盖于聚合物电解质膜上，直接与扩散层和电解质接触，以增加作用面积。催化剂层即构成电极，其上直接为扩散层。所谓的膜片-电极组件即包括电解质、催化剂层和气体扩散层在内的组合。

质子交换膜燃料电池的理论能量转换效率可达70%~80%，目前实际应用已达到50%~60%。电解质用可传导质子的聚合膜，具有选择性透过 H^+ 离子功能。质量比功率可达200W/kg，实际采用甲醇制氢时，质量比功率约为100W/kg，电压为350~400V，功率达到30~200kW。可以连续工作，适合部分负荷及满负荷特性要求，续驶里程长，灵活性和机动性好。故燃料电池汽车一般均采用质子交换膜燃料电池作为车载发电电源。

工作温度较低是质子交换膜燃料电池能够广泛应用的最大优势。其最佳工作温度为80~90℃，但在常温下也可以正常工作。其工作原理如图2-3所示。电池工作时，反应气体在扩散层扩散，在催化层发生电催化反应，阳极反应生成的质子通过交换膜传递到对侧，电子经外部电路到达阴极，与氧气反应并生成水。

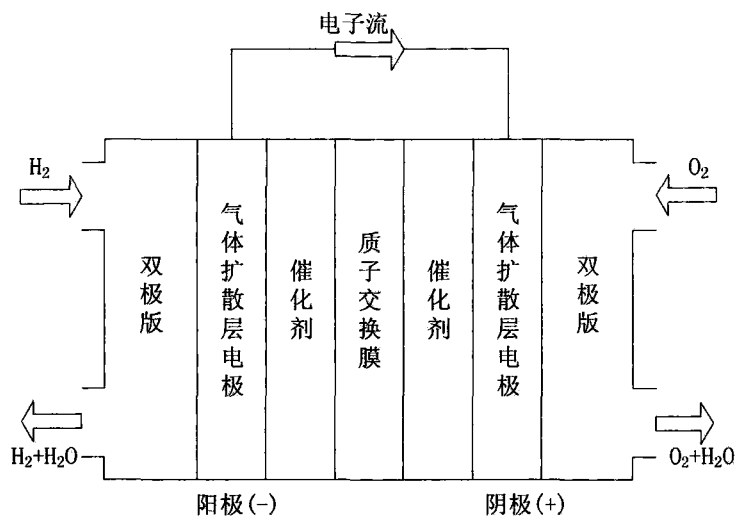
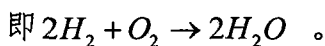
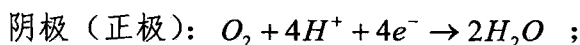
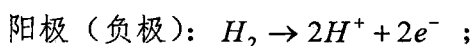


图 2-3 PEMFC 的工作原理示意图

电极反应式为



反应后即可产生电流，反应产物只有为水及少部分热量。

为获得足够高的电压,需要将多个燃料电池单体串联在一起使用,从而形成燃料电池堆。

2.3.2 膜电极

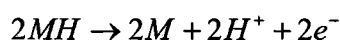
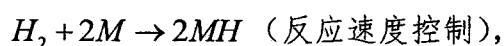
膜电极一般由电极(即扩散层)、催化剂层、电解膜层三部分组成^[14,15]。电极都会附着催化剂,现在一般采用铂,通过特殊技术将极细的铂微粒固定在起支撑作用的碳粉粒子上,然后再向其中添加聚四氟乙烯,并将其固定在高导电性能良好的碳纸或炭布上,这样气体就能很好地扩散到催化剂,形成气体扩散层即电极。也可以直接在电解膜上建立电极。

质子交换膜燃料电池的电解膜一般采用的是全氟磺酸膜(也称为 Nafion, 杜邦公司)。这种膜呈酸性,具有很高的化学稳定性和机械强度,能吸附大量水,有很好的离子导通性,以水合氢离子形式使其可以在其中自由流动,从膜的一侧转移到另一侧,而电子却不能通过。这种膜的使用温度约在 80℃ 左右,温度过高会发生脱水现象。

2.3.3 催化剂

质子交换膜燃料电池工作温度低,所以关键要有催化剂。由于质子交换膜燃料电池的运行温度低,以及电解质呈酸性,故催化剂必不可少。迄今为止,为了燃料电池的特定运行特性,电极催化材料通常采用铂,而且用量也不少,这就大大增加了其成本。随着技术的发展,现阶段的铂载量已经从早期的 28mg/cm² 下降到了 0.2mg/cm²,而且其粒径范围分布越来越小,分布越来越均匀,并使用二元甚至多元合金催化剂,抗一氧化碳毒性同时提高。

但为了进一步降低成本,国内外科学家及工程技术人员也有其他非贵金属催化剂方面的研究^{[21][22]},如掺杂金属氧化物、有机金属大环类化合物、相过渡金属硫化物等可用于阴极催化,钙掺杂型金属氧化物、碳化物、非铂合金等用于阳极催化。催化剂的反应机理为:



这是一个两电子转移过程, M 代表催化剂。若为贵金属则 M 代表 Pt。

催化剂载体材料同催化剂本身一样对催化性能具有不容忽视的影响。碳载

体成本低，抗酸性能、导电性能好，比表面积高，因此应用广泛。而随着对一些新型碳基复合载体的不断研究，其更好的性能已引起越来越多的重视。也有一些研究发现非碳类物质也可用于载体材料。

催化剂的毒化也是燃料电池一个关键问题。现在常用的催化剂贵金属铂极具活性，对一氧化碳和硫的生成物具有非常高的亲和力。如果催化剂中毒，则会阻碍氢氧与其接触并发生反应。随着毒化面积的不断扩大，燃料电池的性能也逐渐下降。甲醇重整产生的氢气由于很难保证不含一氧化碳，所以必须进行提纯，而且若采用外界空气作为氧化剂，则其中很可能含有一氧化碳或含硫化合物，同样也需要净化。

2.3.4 双极板

燃料电池单体的工作电压一般只有 0.7V，不具有实际应用价值，所以必须串联使用。而串联方法不可能像串联干电池一样采用导线连接，那样会使输出电压降低，电流减小。采用双极板连接是一种很好的串联办法。

双极板在两个侧面正好分别与相邻的两个燃料电池的阴极和阳极接触（图 2-4），同时把氢送到阳极，把氧化剂（空气或氧）送到阴极。

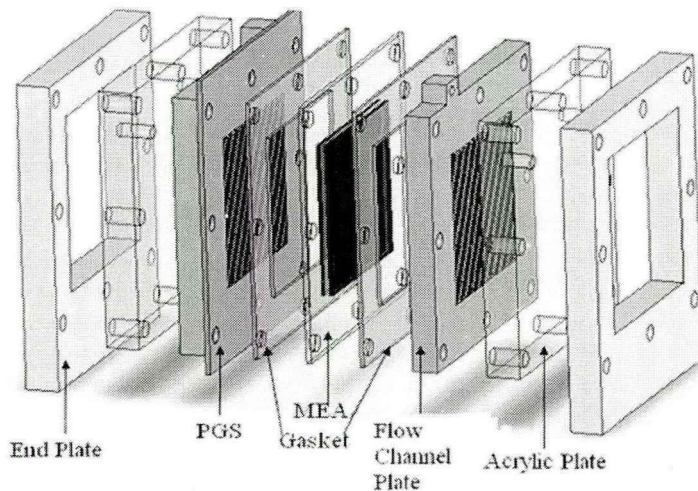


图 2-4 质子交换膜燃料电池双极板结构^[23]

双极板要求具有导电性、密封性好，气体流动阻力小，表面水分易蒸发，易冷却，体积小等特点。

2.3.5 质子交换膜燃料电池的水管理和热管理

由于现有膜对于高湿度和低温度的要求，使得其水管理系统也较为复杂。

同时低温工作环境也需要配备热管理系统。水管理系统主要作用就是控制气体加湿,保证质子交换膜两侧的水平衡^[24]。而热管理系统主要是为燃料电池提供水冷却和水加热控制,并为辅助装置(压缩机-膨胀机、焓轮、动力电池组、电能转换器、驱动电机等)提供冷却介质及进行温度控制。

PEMFC的水管理和热管理是关键性的问题,它们会影响到电池的性能、寿命和安全运行问题^[25]。

聚合物膜中离子的导电性需要水,所以其必须保持湿润状态,才能使燃料电池正常运行。若聚合物膜过于干燥,则就没有足够的酸性离子承载质子;若聚合物膜过于湿润,即被浸渍,则扩散层的细孔将被堵塞,反应气体就不能通过扩散接触催化剂。

水在燃料电池的阴极产生。理论上,燃料电池本身也可保证水分的迁移。将燃料电池控制在一定温度范围内,可使水流动并气化,则可令其以水蒸气状态从燃料电池中排出。而实际上,由于这个温度范围非常窄,具体操作起来就非常困难。所以实际当中通常采用调节反应气体湿度,改进电池结构,改进膜电极结构,优化电池内部传质过程,强化传质,改进流场分布等措施,再使燃料电池堆中的空气过量,则燃料电池较为干燥,然后再通过外部水管理系统(增湿器)供水加湿,从而实现有效的水管理。

燃料电池中约有40%的能量转换成热能散,化学反应的不可逆性,欧姆极化、加湿气体携带,环境辐射是其主要来源。如果电池的温度过高,将会导致电解质膜脱水、收缩以至破裂。

PEMFC的电池堆内部冷却板表面加工有槽道,冷却介质一般用水,采用强迫对流冷却方式^[26]。而随着对冷却介质传热特性、材料相容性和介电特性的要求越来越高,一些有机介质研究也越来越多。

另外,除了不能使燃料电池温度过高以外,还要注意电池中的温度分布是否均匀,如果局部温度过高也会使燃料电池性能下降并影响电流密度和安全运行。

2.3.6 质子交换膜燃料电池的性能分析

通过试验研究发现,当燃料电池开始输出电流时,由于活化极化损失,其输出电压会有明显的下降,而随着电流的增加,电压下降逐渐平衡,功率输出

也逐渐平稳, 电池的性能趋于稳定。当输出电流继续增大超过某一特定值时, 则输出电压和功率急剧下降, 对电池造成不可逆的损害, 影响其使用寿命和性能。

工作温度对燃料电池有明显的影响, 质子交换膜燃料电池的电解质决定了其温度特性, 它的最佳工作温度一般在 70~80℃。在输出电流不变的情况下质子交换膜燃料电池的输出功率随着温度升高而增加, 超过 80℃后功率增加变缓。这主要是由于随着温度的上升催化剂的活性提高, 反应的速率加快, 交换膜内的水扩散和质子传递加快, 电极内气氢气和氧化剂的传递也加快。如果温度继续升高则会对质子交换膜造成损伤, 一般其工作温度不能超过 100℃。

质子交换膜燃料电池在负载突变时的动态响应迅速, 而在高负载时输出电压和电流基本稳定。配合峰值电源使用, 它基本能够满足燃料电池汽车的起动、急加速、高速行驶及长距离爬坡等特殊工况要求。

2.4 DC/DC 电能变换器分析及选用

2.4.1 DC/DC 变换器的功能及类型

燃料电池的输出电压一般比动力总线的电压低, 而且电压下降幅度随着输出电流的增加而增大^[27]。为使燃料电池的输出电压与动力总线电压匹配以及控制燃料电池系统的能量输出, 燃料电池电动汽车需要配置直流/直流 (DC/DC) 电能变换器。DC/DC 变换器可以将燃料电池输出的直流电通过升压变换输送到驱动电机, 还可以通过降压变换将电能输送到动力电池组进行储存, 而且还具有稳定总线电压, 调节整车能量分配的作用。

根据不同的分类方法, DC/DC 变换器有很多种类型。例如按功率开关管数可分为单管式和双管式; 按开关控制方式可分为脉宽调制式、频率调制式、模拟/数字式及混合调制式等; 按输出电路方式可分为单路输出、双路输出和多路输出; 按与车身绝缘方式分为绝缘式和非绝缘式, 等等。一般这些不同类型的变换器都是采用交叉组合, 形成具有各种不同功能的电能变换器。

根据电动汽车的工作原理, 其主要采用升压式 (Boost)、降压式 (Buck)、升降压式 (Boost-Buck) 等类型。

2.4.2 双向升降压型 DC/DC 电能变换器结构、原理及工作模式分析

最简单的双向升降压型 DC/DC 电能变换器的结构如图 2-5 所示。其原边(即输入边)为电容器 C,后面连接由两个开关 S_1 、 S_2 和两个整流器 D_1 、 D_2 组成的两个 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) 功率开关,原边电路上装有电感 L_1 ,副边(输出边)电路上装有电感 L_2 。

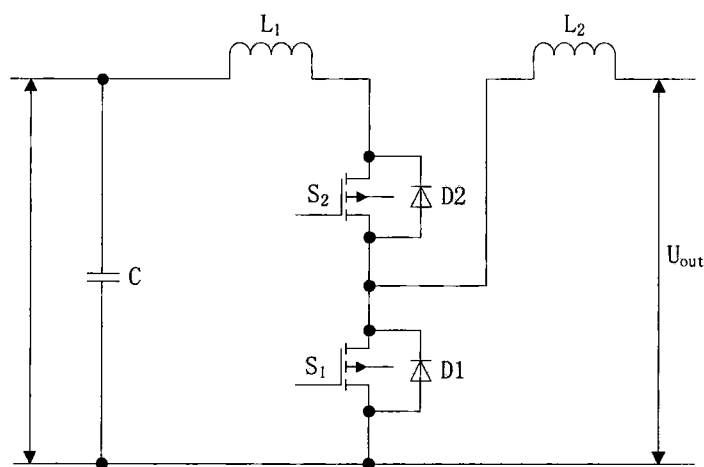


图 2-5 双向升降压型 DC/DC 电能变换器结构图^[28]

变换器处于升压 (Boost) 状态时, S_1 通 S_2 断, 电容器 C 处于放电状态, 电流经 S_1 流向总线, L_2 起减少电流脉冲的作用。原边电压 U_{in} 与副边电压 U_{out} 的关系为

$$U_{in} = \frac{1}{1-n_1} U_{out}$$

其中, $n_1=t_1/T_1$ 为 S_1 的占空比, t_1 和 T_1 分别为 S_1 的导通时间和导通周期。

当变换器处于降压 (Buck) 状态时, S_1 断通, 总线电流经 S_2 流向原边, 电容器 C 处于充电状态, L_1 起减少电流脉冲的作用。此时, 原边电压 U_{in} 与副边电压 U_{out} 的关系为

$$U_{in} = n_2 U_{out}$$

其中, $n_2=t_2/T_2$ 为 S_2 的占空比, t_2 和 T_2 分别为 S_2 的导通时间和导通周期。开关的通断时间和元器件的功率损耗影响变换器的效率。

本课题中车载制氢式燃料电池电动汽车采用燃料电池组作为车用发电式电源, 锂电池组作为车载储能式电源, 两者通过电力耦合方式驱动, 所以选用的变换器就是双向升降压型 DC/DC 电能变换器。

当燃料电池和锂电池组共同驱动电机时, DC/DC 变换器起升压作用。当燃料电池有富余电能或者有回收能量给锂电池组充电时, 变换器起降压作用。在电力总线与电源之间的配置的双向 DC/DC 变换器起到双向控制和调节输入和输出电流的作用。其具体工作模式可分为三种: 电池组放电混合工作模式、燃料电池工作模式和电池组充电工作模式。

当总线电压接近于变换器升压状态时的空载输出电压 U_0 时, 变换器的升压电路启动, 输出电压保持为 U_0 。当总线电压高于 U_0 时, D_1 截止, 变换器无电流输出; 随着输出功率增大, 总线电压低于 U_0 时, 变换器输出电流, 且电流大小随电压变化自动调节, 其输出功率随燃料电池系统输出功率增大而增大。这就是混合工作模式。

随着功率需求减小, 总线电压高于 U_0 时, 升压电路自动停止输出电流, 系统处于纯燃料电池工作模式。

当燃料电池汽车需求功率进一步减小或者制动时, 总线电压远大于 U_0 时, 变换器启动降压电路, 对锂电池组进行充电, 随着电池组的电压升高, 充电电流也逐渐减小。当电池组 SOC (剩余电量与额定电量的比值) 较大后, 电流小于设定值, 变换器自动切断降压电路。

双向 DC/DC 电能变换器是燃料电池电动汽车电能流通和组合的重要环节, 要求具有良好的升降压功能及动态特性。燃料电池不可以充电, 电流是单向的, 而锂电池是能够充电的, 电流是双向的。一般燃料电池电压高于锂电池电源压, 而两者输出特性也不相同, 难以匹配。所以要求双向 DC/DC 电能变换器能够控制不同电源放电时耦合系统的电力匹配, 满足驱动电机在不同工况下的功率需求, 还要能将燃料电池产生的电能或回收再生的电能对锂电池组高效地充电, 并防止其过充和过放现象的发生, 有效保护燃料电池和锂电池。

目前, 电能变换器一般采用模块化设计, 可采用多种控制方式, 具有体积小、重量轻、高比功率、高效率、动态性能好等等特点, 基本可以满足以上各种需求。图 2-6 是本课题设计试制的电能变换器样机。

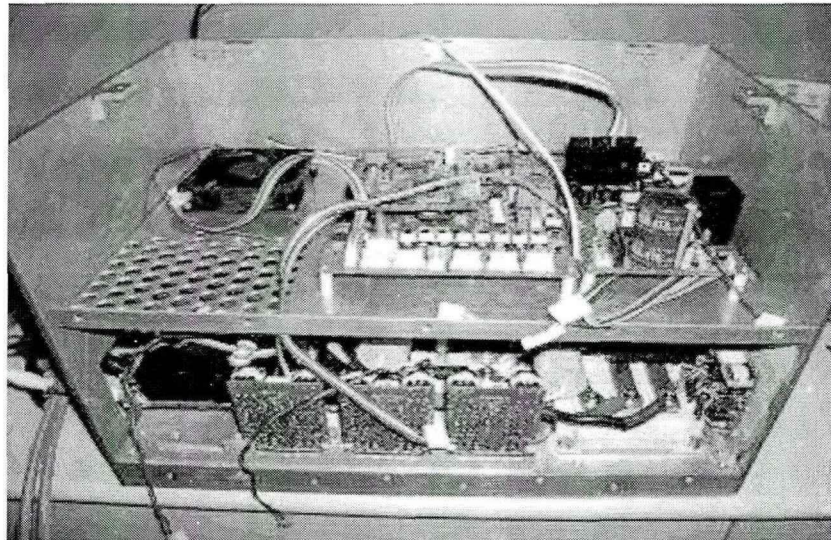


图 2-6 大功率电能变换器

2.5 驱动电机及其控制系统

2.5.1 驱动电机的主要类型

驱动电机及其控制系统也称为电驱动系统，主要由电动机、功率变换器和电子控制器构成^[29]。电动机将电能转换成机械能驱动车辆及将机械能转换成电能对辅助电源充电；功率变换器提供特定的电压和电流；控制器根据车辆行驶要求调节功率输出。用于电动汽车的电动机与工业应用不同，通常这种电机要满足起动停车频繁、速度变化率高、低速高转矩、高速低转矩及运行速度范围宽等要求。可以用在电动汽车的电动机种类有很多，如图 2-7 所示。

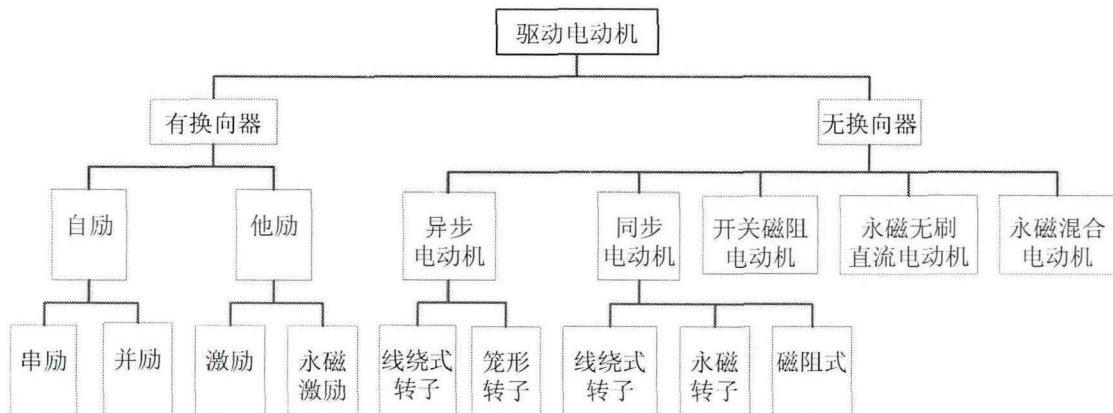


图 2-7 可用于电动汽车的电动机类型

燃料电池电动汽车多采用感应电机（异步电动机）和永磁无刷直流电机^[30]，一般感应电机功率较大，多用于较大型车辆如燃料电池客车、公交车等；永磁

无刷直流电机功率较小，多用于燃料电池轿车、游览车、助力车等。结合本课题设计方案，宜选用后者。

2.5.2 永磁无刷直流电机驱动控制策略

永磁无刷直流电动机的永磁体材料目前一般采用稀土。这种电动机具有效率高、体积小、噪声低、易控制、易冷却、维护成本低、寿命长及可靠性高等优点。被认为是电动汽车的最优驱动电机。

在驱动电动汽车时，驾驶人员要通过加速踏板及制动踏板控制电机输出转矩^[31]。其控制策略如图 2-8 所示。通过加速或制动踏板控制输出转矩 T^* ，转矩控制器给出期望电流 I_s^* ，电流控制器和换向序列发生器从位置检测器接收 I^* 的信息，或者通过电流检测器得到电流反馈信息，然后产生门控信号，再送入三项逆变器即功率变换器中，产生电机的期望相电流。

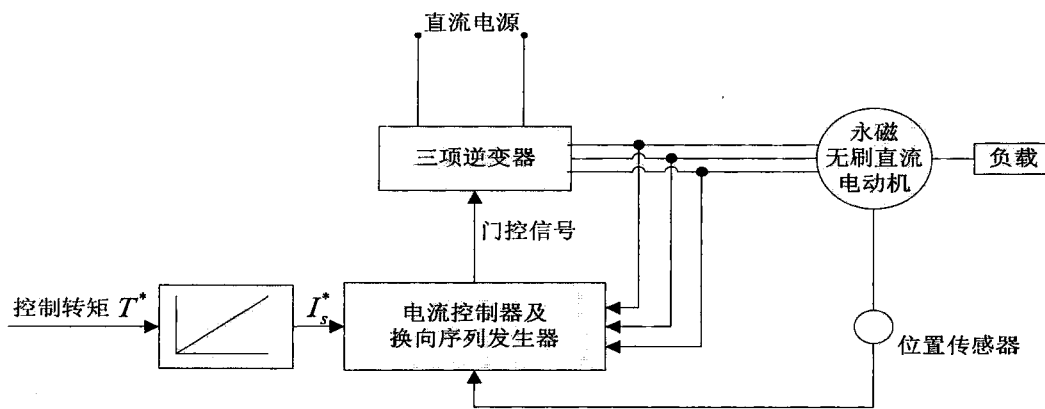


图 2-8 永磁无刷直流电动机转矩控制策略图

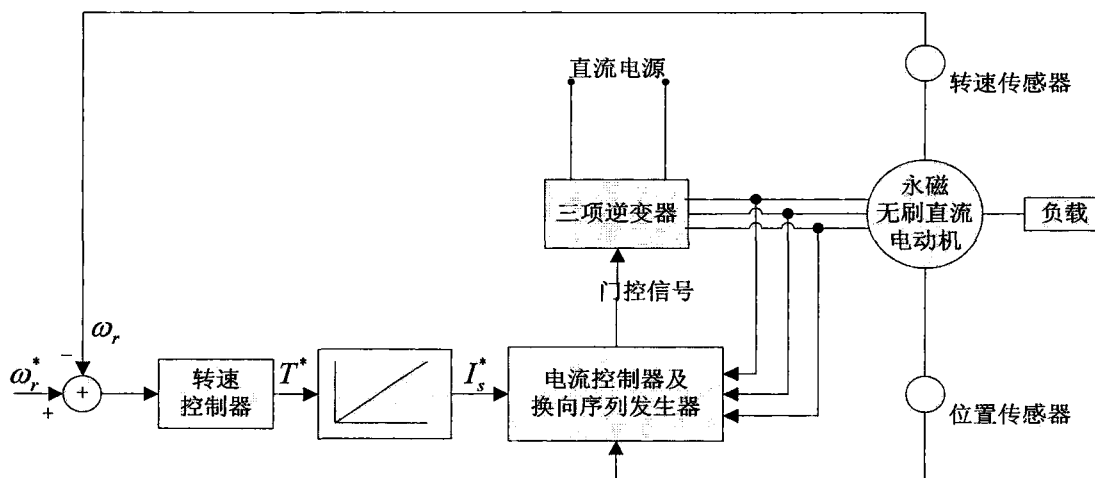


图 2-9 永磁无刷直流电动机转速控制策略图

在汽车驾驶过程中，还要涉及到转速控制（如定速巡航），其控制策略如图 2-9 所示。转速控制器收到给定转速信息和转速传感器转速信息后以转矩数据给转矩控制器，之后流程与转矩控制类同。

根据此策略确定了控制器的控制原理（如图 2-10 所示），并试制了控制器电路板（图 2-11）。

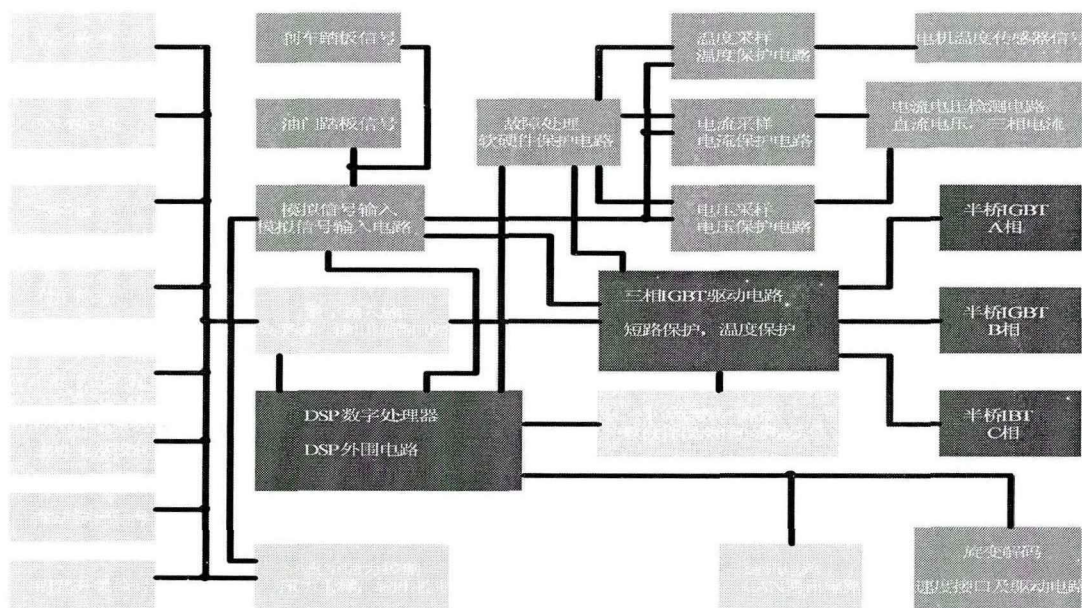


图 2-10 驱动电机控制器设计原理图

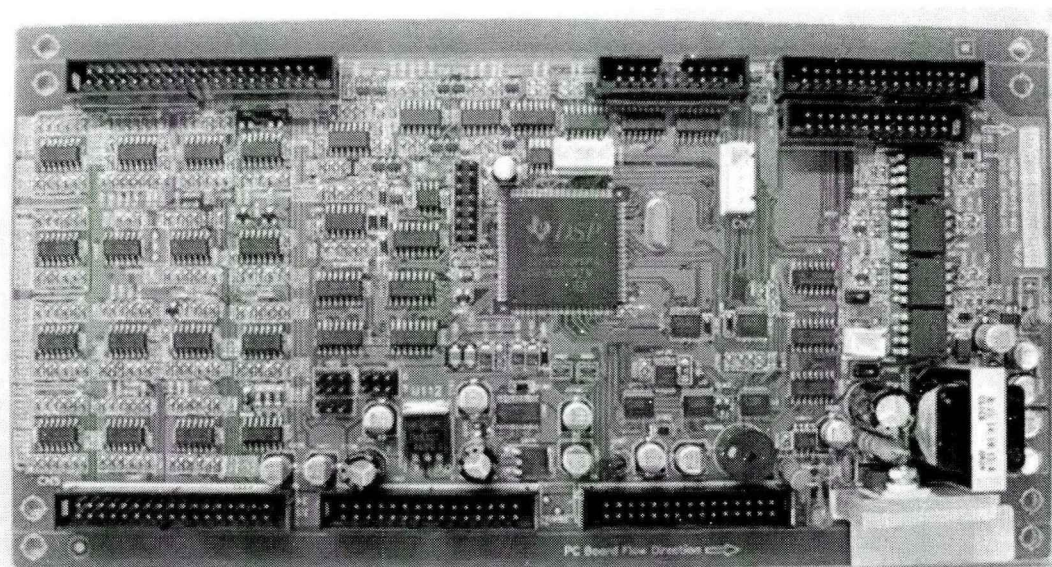


图 2-11 驱动电机控制器单元

2.6 辅助电池及其管理系统

2.6.1 峰值电源的类型及选用

为保证燃料电池电动汽车的性能,尤其是在加速、爬坡和再生制动工况的性能,除了燃料电池系统外,还需要配备峰值电源(Peak Power System, 辅助电池),以保证足够的功率输出和能量回收。常用的峰值电源有镍氢电池、锂电池和超级电容器。

镍氢电池是碱性电池,其原理是放电时负极上的金属氢化物被氧化,形成合金;正极上的镍的氢氧化物被还原为镍氢氧化物。充电时则发生逆向反应。镍氢电池的比能量和比功率较高,无毒性,无致癌性,放电曲线平缓,充电速度快,但是成本较高,存在记忆效应,且充电时容易发热。

锂电池又可分为锂离子电池和锂聚合物电池,两者的不同只是电解质的形态,锂离子电池的电解质为电解液,锂聚合物电池的电解质为固态聚合物。锂电池放电时,负极上的碳化锂释放锂离子,经电解质迁移到正极(锂化跃迁金属氧化物)。锂电池的比能量、放电率、充放电寿命较高,且无记忆性^[32]。本课题选用的峰值电源即为聚合物锂电池组。

超级电容器最主要的特性是其超高的比功率和超低的比能量。由于比能量非常低,所以一般不用其单独作为燃料电池电动汽车的峰值电源,而是与蓄电池共同组成峰值电源(即F+B+C模式,后文有述)。而因其结构复杂,且基本处于研究阶段,故不采用。

2.6.2 锂电池的充放电特性

试验表明,锂电池随着电量的降低,其输出电压也有所降低。一般当电池电量在10%以上时,其压降比较缓慢,而低于10%后,压降就会非常明显,这会对电池本身造成伤害,即过放。当燃料电池电量基本充满后继续充电,其充电电流会非常微小,如果充电时间过长,会降低锂离子电池的材料活性,影响使用寿命。因此要防止对其过充和过放现象的发生。

2.6.3 电池管理系统功能设计

为了确保行车安全、保持电池性能、延长使用寿命、提高使用效率,必须依据锂电池的特性,对其实施有效地管理。如图2-12所示,电池管理系统的主

要功能包括数据采集、状态估计、实时通信、能量管理、热管理、安全管理和故障诊断等等。

数据采集功能主要是对电池组的电压、电流及温度等信息进行采集。状态估计功能主要是对电池的剩余电量(SOC)和健康状态(SOH)进行估计,从而确定续驶里程和电池寿命。实时通信是指电池管理系统与整车管理系统及电机控制系统等设备进行数据交换。能量管理主要是控制电池的充放电过程。热管理的目的主要是控制电池工作于最佳温度范围。安全管理主要是指当出现安全问题时及时报警并紧急处理。故障诊断是指当系统出现故障后及时发现故障部位。其中,数据处理是电池管理系统的核心功能,一般由单片机完成(图2-13)。

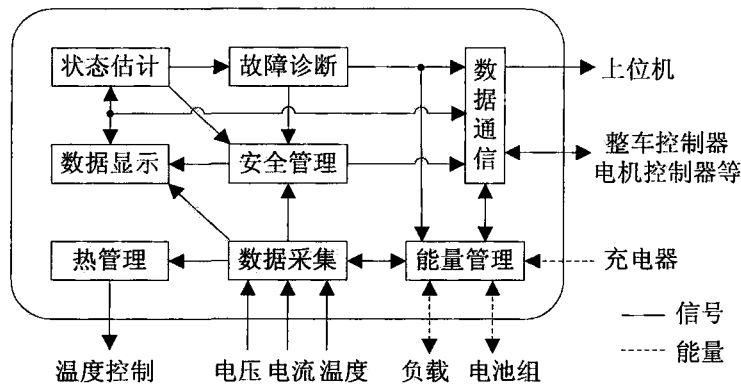


图 2-12 电池管理系统主要功能示意图

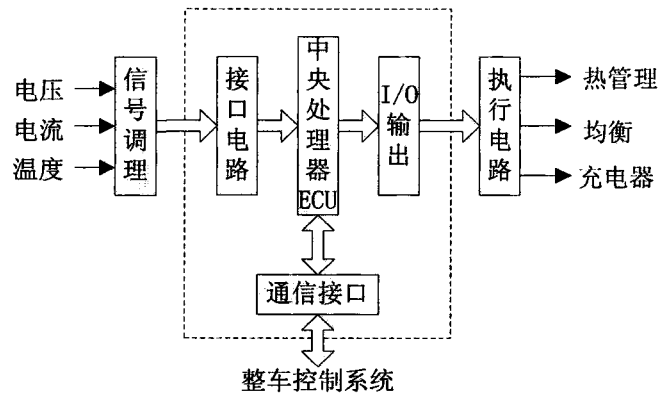


图 2-13 电池管理系统数据处理功能原理图

根据电池管理系统的功能和工作原理试制了锂电池组的管理系统控制器(图 2-14)、保护系统控制器(图 2-15)及充放电控制器(图 2-16)。

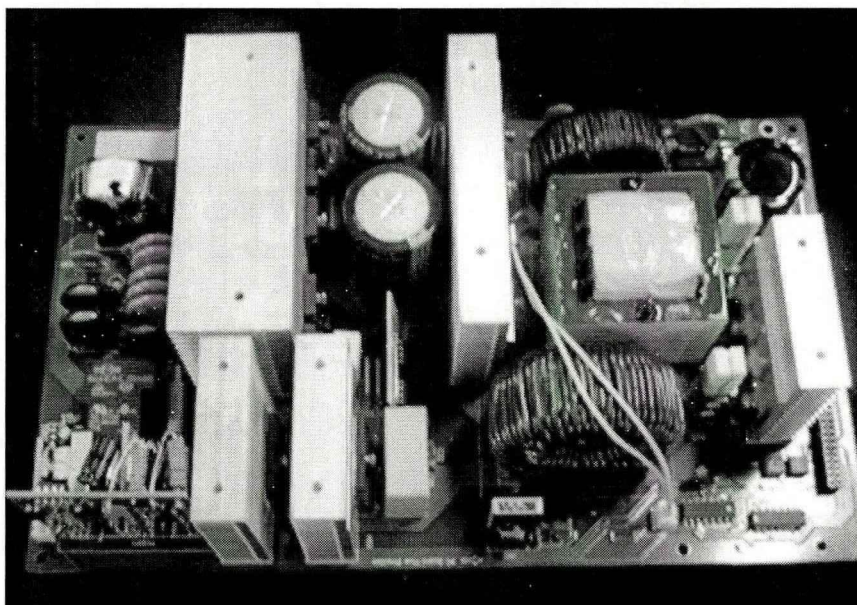


图 2-14 锂电池组管理系统控制单元

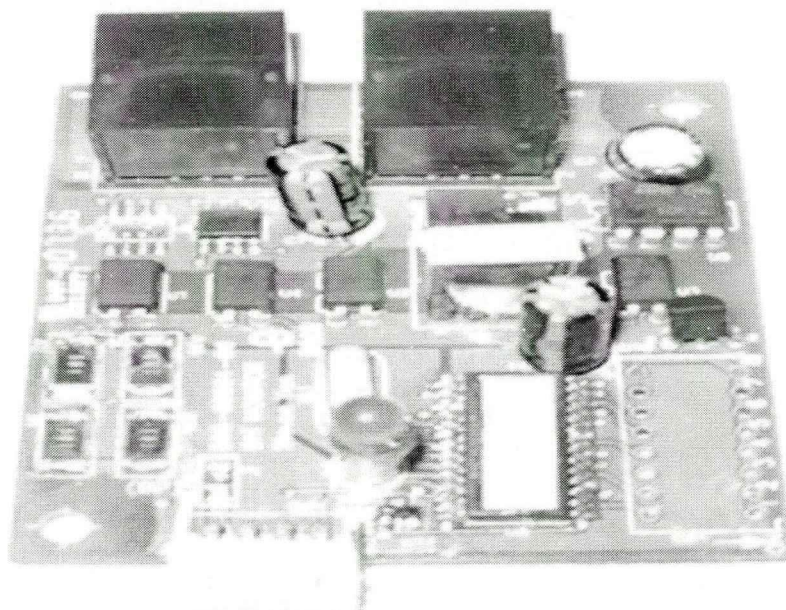


图 2-15 锂电池组管理系统保护单元

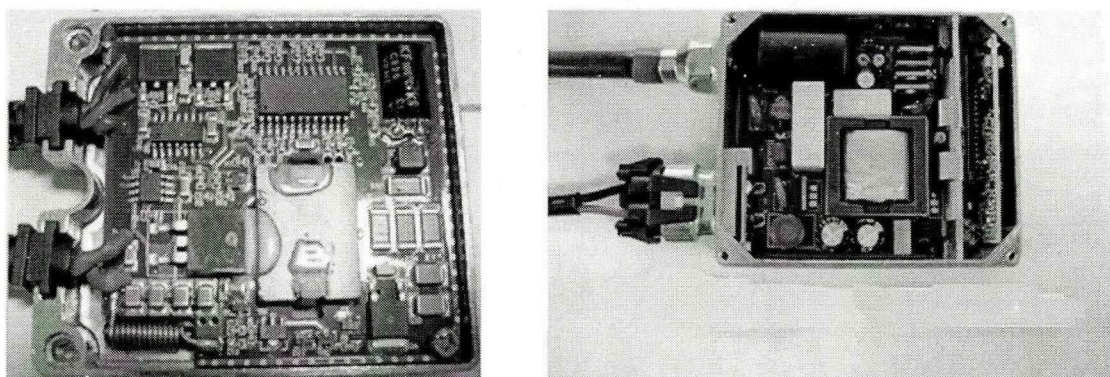


图 2-16 锂电池组充放电控制单元

2.7 再生制动系统

车辆的制动性能无疑会影响行驶安全。电动汽车的驱动电机可以当作发电机运行，从而能够回收部分制动能量，但同时也要考虑制动性能。所以电动汽车的制动系统应是同时包含机械摩擦制动和电再生制动的混合制动系统，它首先要保证足够的制动力，使汽车减速或停止；而且前后轮上的制动力分布要保证制动过程中汽车的稳定；还要能尽可能多地回收再生制动能量。

早期的混合制动系统一般式并联式的，这种系统结构简单，最接近常规制动系统结构，它保留了机械制动的主要部件，仅在前轴直接加装电制动系统。近年来，技术人员研发出了全可控混合制动系统，它可以独立控制每个车轮的制动力。这种制动系统控制策略的关键就是如何控制机械制动和电制动的转矩，从而在获得良好的制动性能的同时尽可能多地回收可用的再生制动能量。图2-17是根据设计原理试制的再生制动系统控制器。

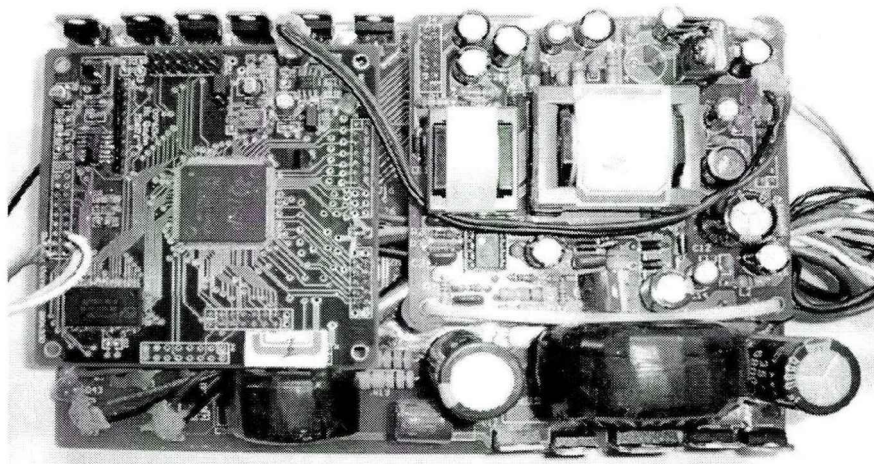


图 2-17 再生制动系统控制器

2.8 本章小结

本章分析了车载制氢式燃料电池电动汽车的基本结构，并对其主要部件进行了原理分析及选型。确定了课题中采用甲醇自热重整方式制氢的车载制氢技术，分析了质子交换膜燃料电池的基本结构和工作原理，选用了双向升降压型DC/DC电能变换器，采用永磁无刷直流电动机作为驱动电机，锂电池组作为峰值电源的结构。并进行了电能变换器、电驱动系统控制器、锂电池组管理系统控制器及再生制动系统控制器的试制。

第3章 燃料电池电动汽车混合动力系统设计

燃料电池电动汽车具有很多优点，有着巨大的发展潜力。但是，如果在燃料电池车上仅安装燃料电池同样会出现很多问题，比如电源设备体积大且沉重，起动时间长，功率响应慢，在急加速和低速行驶时效率低下等等。其基本运行特性如图 3-1。

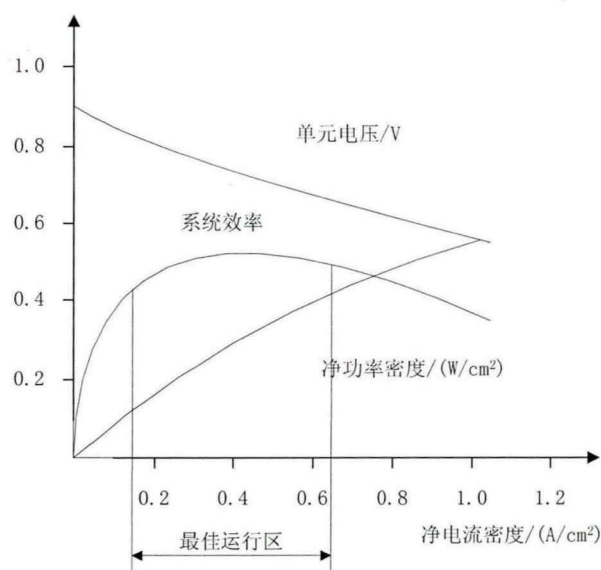


图 3-1 燃料电池系统典型运行特性^[33]

燃料电池系统与峰值电源的耦合是解决这些问题的有效办法。燃料电池电动汽车这种电力耦合混合动力模式与传统的基于内燃机的机电结合混合动力模式，在结构、工作原理及设计方法上都有所不同^[34]。

3.1 混合动力系统电力耦合驱动模式分析

燃料电池混合动力系统电力耦合驱动模式主要有辅助电池配合燃料电池系统混合驱动(FC+B)、超级电容器配合燃料电池系统混合驱动(FC+C)以及辅助电池和超级电容器共同配合燃料电池系统混合驱动(FC+B+C)三种。

3.1.1 纯燃料电池系统驱动模式

纯燃料电池系统驱动模式即 FC 模式下燃料电池车只有一个动力源，即燃料电池系统^[35]。汽车需要的所有功率都由燃料电池提供，这对燃料电池的要求很高，图 3-2 是其驱动系统示意图。

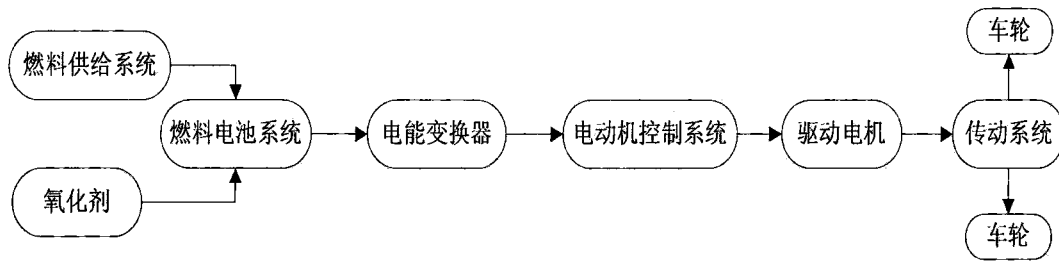


图 3-2 FC 驱动模式示意图

这种结构具有结构简单，整备质量轻，控制方便等优点。但是，它的缺点更不容忽视，例如，燃料电池功率大，成本增加，无法进行能量回收，动态性与可靠性不足，冷启动时间长等等。正是由于这些因素，纯燃料电池汽车才逐渐被混合动力型燃料电池汽车所取代。

3.1.2 动力电池组和燃料电池系统混合驱动模式

这种驱动模式简称 FC+B 模式，就是动力电池组配合燃料电池系统进行混合驱动，其中以燃料电池系统为主。如图 3-3 所示，其中 DC/DC 变换器的作用是转换和控制燃料电池的输出功率，然后再驱动电机。当功率不足时，辅助电源输出功率；当刹车制动时，辅助电源回收部分能量。辅助电源的工作由电池管理系统控制。

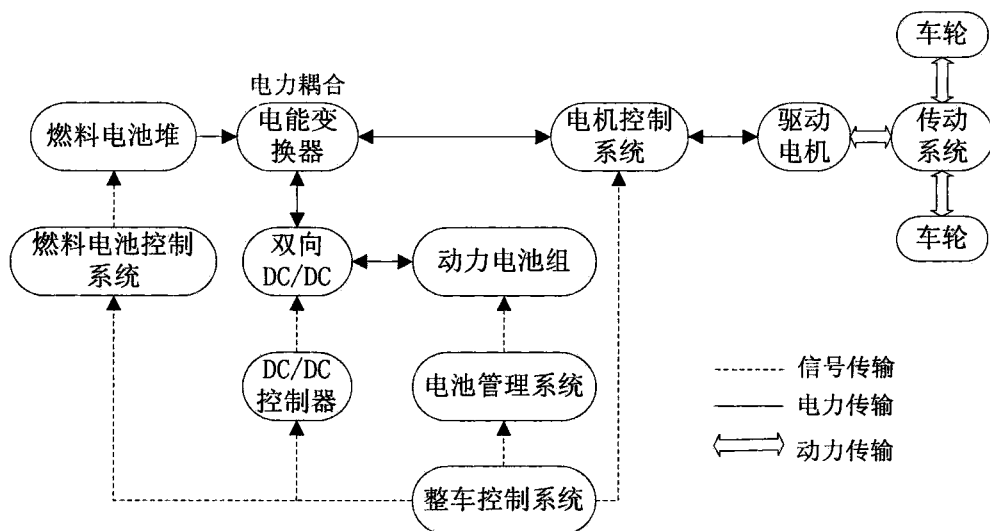


图 3-3 FC+B 模式电力耦合驱动示意图

目前这种模式是应用较为广泛的。它解决了诸如辅助设备供电、水热管理系统供电、燃料电池堆加热、能量回收等问题。主要优点有燃料电池成本降低、动态特性及功率要求降低，启动容易、可靠性高。但也有结构复杂，维护保养费用增加等缺点。本课题就是采用这种驱动模式，基本上满足了不同工况的需

求，但在急加速时稍有疲软，急刹车时，能量回收瞬时电流较高，动力电池组可能会受到一定损伤。后续研究可能会考虑在燃料电池混合动力驱动系统中加入超级电容器，从而进一步优化汽车性能。

3.1.3 超级电容器和燃料电池系统混合驱动模式

这种驱动模式（FC+C 模式）在峰值电源的选用上，除了动力电池组外，还可以采用超级电容器。超级电容器特点是具有非常高的比功率和非常低的比能量。燃料电池和超级电容器的功率匹配同样是通过双向 DC/DC 来完成的，能量回收由超级电容器完成。如图 3-4。

这种模式同样解决了使用单独燃料电池驱动的诸多问题。如辅助设备供电、水热管理系统供电、燃料电池堆加热、能量回收等。有效降低了燃料电池的成本，同时也降低了对燃料电池系统的动态特性及峰值功率的要求。又由于其瞬时功率较辅助电池大，所以汽车启动起来比 FC+B 模式更容易。不过同样也有结构复杂，维护保养费用增加等缺点。

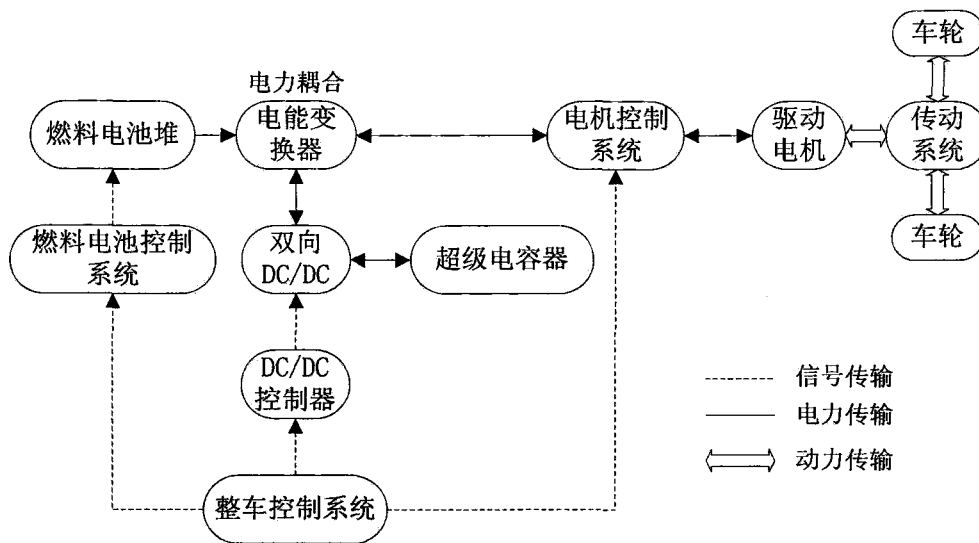


图 3-4 FC+C 模式电力耦合驱动示意图

而且，由于超级电容器的低比能量密度，以及电压与其荷电状态的关联性，控制其充放电电流，增加放电时间比较困难，所以单独使用超级电容器作为峰值电源还处于研究阶段，要想投入实际使用还有很长的路要走^{[36][37]}。一般都是与动力电池组结合组成辅助电源（即 FC+B+C 模式）。

3.1.4 辅助电池、超级电容器和燃料电池系统混合驱动模式

这种驱动模式是在 F+B 模式的基础上，再并联一组超级电容器（即 FC+B+C

模式), 它可以在启动加速时提供峰值电流, 在紧急制动时回收峰值电流。如图 3-5。

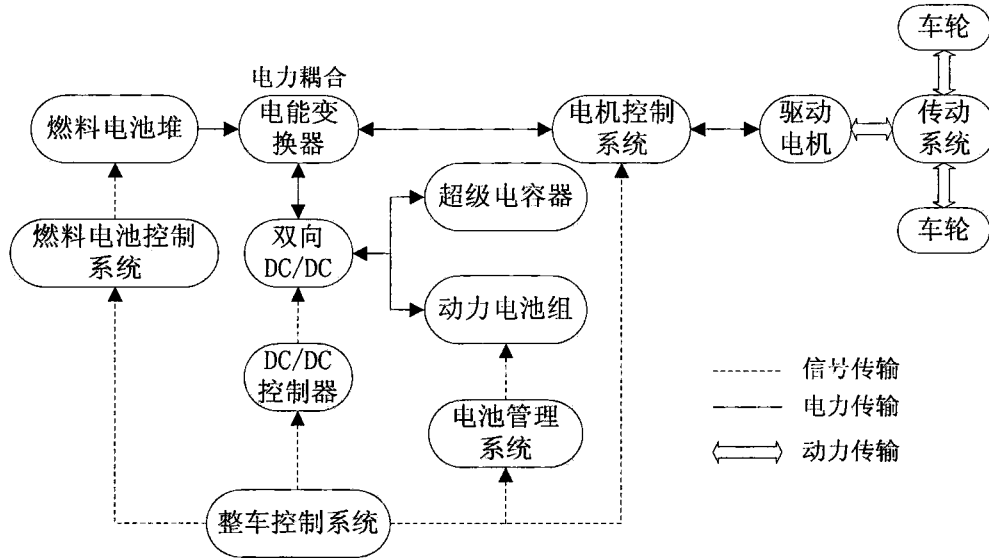


图 3-5 FC+B+C 模式电力耦合驱动示意图

这样其实就是人为地使比能量和比功率的要求相互分离了, 可以较少考虑对辅助电池的比功率要求, 着重优化辅助电池的比能量和循环寿命设计, 比功率的问题可以靠超级电容器解决。而且, 由于超级电容器的负载电平效应, 充放电效率高, 来自蓄电池(辅助电池)的大电流放电和再生制动的大电流充电被大幅度降低, 有效防止蓄电池的过放过充现象发生, 显著增加了辅助电池的可用能量、持续工作时间以及使用寿命。

这种模式是目前燃料电池电动汽车混合动力驱动的理想模式。当汽车处于启动、爬坡、加速等工况时, 辅助电池和超级电容器可以配合或者单独提供峰值功率, 能量分配更加合理。在急减速、紧急制动工况下, 超级电容器可减轻燃料电池负担, 保护辅助电池免受强电流冲击。

另外, 当环境温度过低时, 辅助电池无法产生较大电流进行启动, 但可采用辅助电池对超级电容器进行小电流充电, 然后利用超级电容产生较大电流启动的方式解决冷启动问题。这样对辅助电池的数量和容量要求就没有太大的限制。

当然, 这种模式比前面两种混合动力电力耦合驱动模式复杂的多, 给整车控制和参数匹配带来很大的困难, 目前也没有特别成熟的技术。结合实际情况, 本课题选用了 F+B 模式这种相对成熟的技术。

3.2 F+B 电力耦合驱动系统的结构、运行模式及控制策略

3.2.1 F+B 模式电力耦合驱动系统的结构设计

F+B 模式电力耦合驱动系统主要由基本电源（燃料电池系统）、峰值电源（PPS/动力电池组，本文采用锂电池组）、电动机驱动装置（电动机及其控制器）、整车控制系统和燃料电池系统和峰值电源之间的电子接口设备（电能转换器）等所组成。其基本结构及控制模式如图 3-6 所示^[34, 38]。

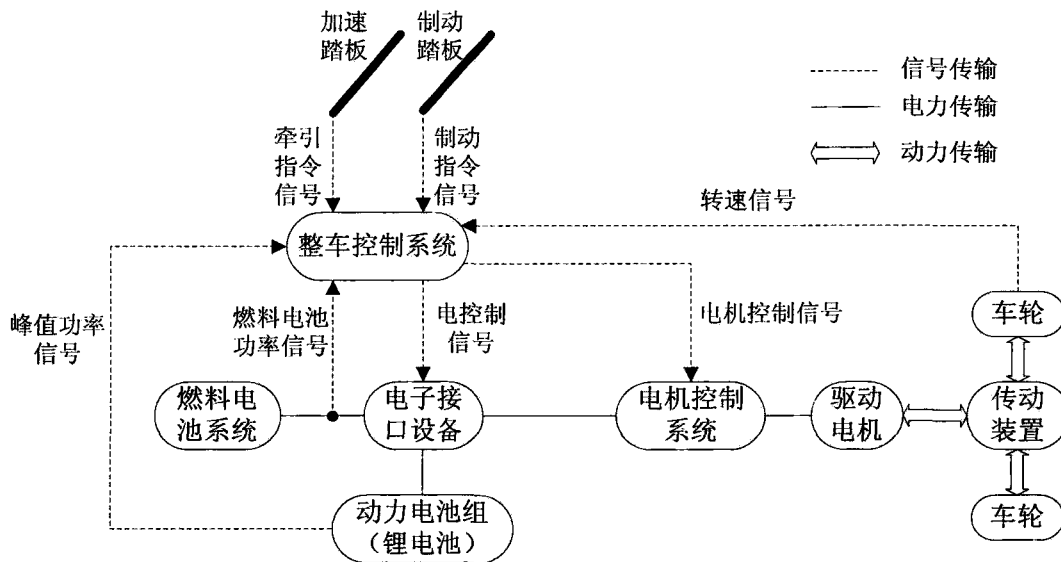


图 3-6 F+B 模式电力耦合驱动系统控制示意图

根据功率或转矩指令（包括来自加速踏板的加速信号或者制动踏板的制动信号）和其它运行信号（包括转速信号、电信号等），整车控制系统将控制电动机的功率或转矩输出，以及燃料电池系统、峰值电源和驱动系统之间的能量传输。

例如，在车辆起动或急加速工况下，对应于峰值功率的指令，燃料电池系统和锂电池（即峰值电源）两者都向电动机驱动系统提供牵引功率；在紧急制动工况下，电动机吸收制动能量，以发电机状态运行，从而将此部分能量转换为电能，并且储存于锂电池中。

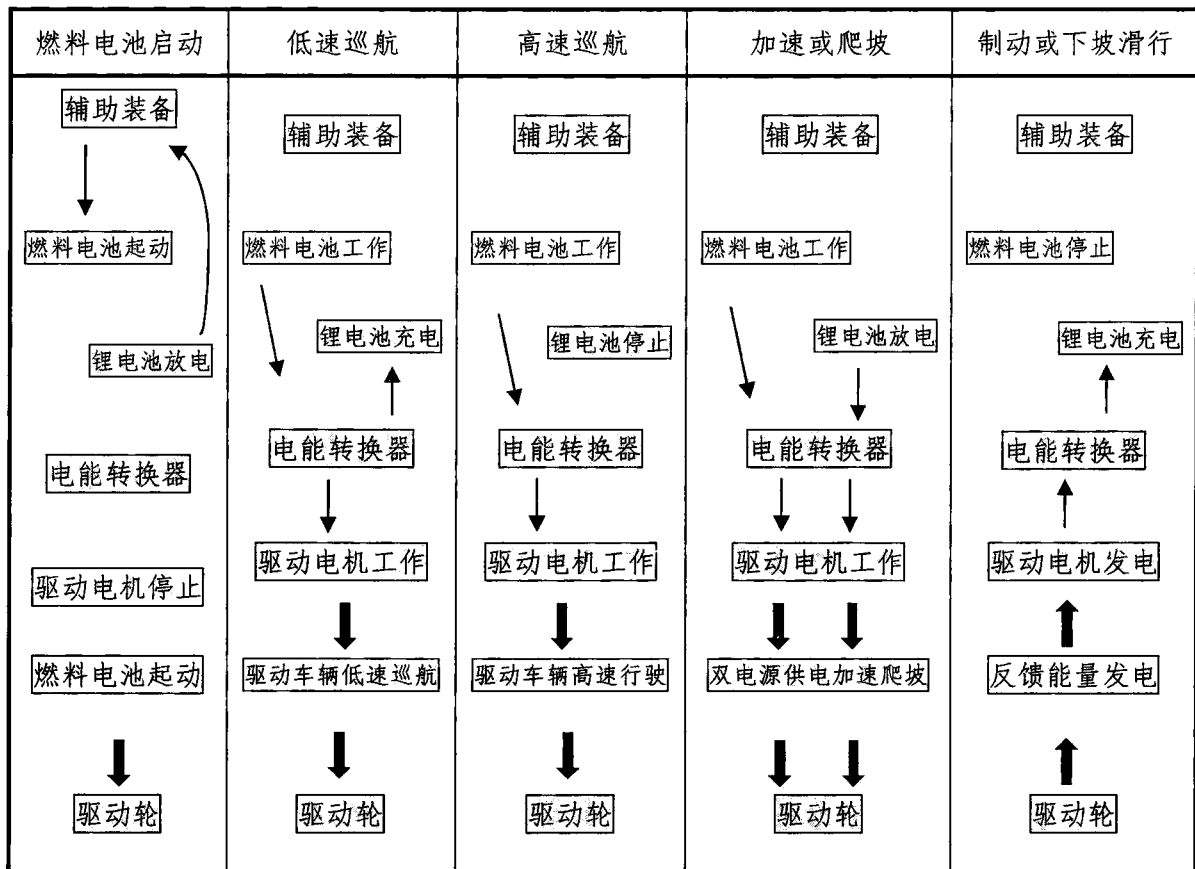
当车辆的负载功率小于燃料电池系统所能提供的额定功率时，锂电池同样也能从燃料电池系统补充、恢复其能量。所以，根据本系统的设计方案以及能量控制策略，车辆入库时，锂电池虽然可以由外部电源充电，但这不是必需的，车辆本身完全可以自行解决锂电池的充电问题。当然，考虑到制氢过程以及节

能和污染问题，具体充电方式以后会有更深入的研究测试及分析。

3.2.2 F+B 模式电力耦合驱动系统的运行模式

F+B 模式电力耦合驱动系统的具体运行模式如表 3-1 所示。表中细箭头表示电能传输，粗箭头表示动力传输；在高速行驶工况下，只有当燃料电池系统发生过载情况时，系统才控制峰值电源向驱动电动机供电。详细分析内容见 3.2.3 节。

表 3-1 F+B 模式电力耦合驱动系统运行模式



3.2.3 F+B 模式电力耦合驱动系统的控制策略

整车控制系统要控制燃料电池系统、峰值电源（PPS，本课题选用的是锂电池组）以及驱动系统之间的能量流，必须在控制器中预置控制策略。其主要功能应至少包括以下几个方面^[39]：

- (1) 电动机输出功率必须时刻满足车辆行驶所需功率要求；
- (2) 锂电池组充放电能级应始终维持在最佳范围；
- (3) 燃料电池系统应尽可能运行在其最佳运行区。

车辆驾驶人员通过控制加速踏板或者制动踏板给出牵引指令或者制动指令

(图 3-7), 即希望由电动机所提供的功率 (功率指令, 记为 P_{comm})。如此, 在牵引工况下, 输入到电动机驱动系统的电功率可表示为

$$P_{m-in} = \frac{P_{comm}}{\eta_m} \quad (3-1)$$

式中, η_m 为电动机驱动系统效率。

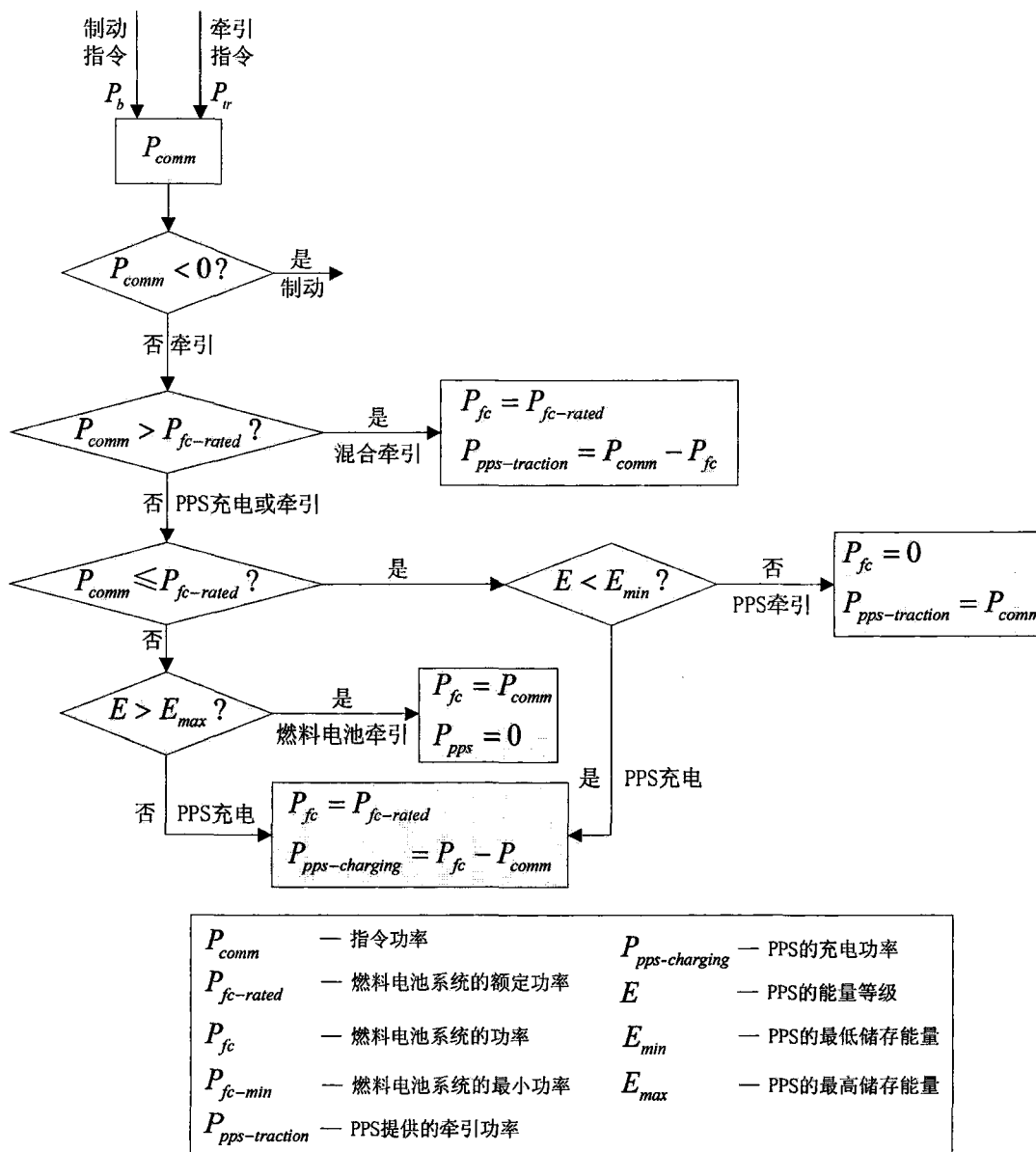


图 3-7 驱动系统控制策略流程图

在制动模式下, 电动机处于发电机工作状态, 此时电动机输出功率为

$$P_{m-out} = P_{mb-comm} \eta_m \quad (3-2)$$

其中, $P_{mb-comm}$ 为对电动机输出的制动功率指令。由于来自制动踏板的制动功率指令 P_{comm} 不可能全部由再生制动提供, 所以 $P_{mb-comm}$ 与 P_{comm} 是不太可能相同的。

车辆控制器根据电动机的功率指令和其它信息, 比如锂电池组的能量级和燃料电池系统的最小运行功率(最佳运行功率范围的最低功率, 低于此功率时, 燃料电池的效率将明显下降, 如图 3-1 所示), 控制燃料电池系统和锂电池组提供所需的相应功率。

驱动系统在车辆的不同行驶工况下具有不同的运行模式及相应的能量控制策略, 具体如下:

(1) 怠速模式

在此模式下, 燃料电池系统和锂电池组都不向驱动系统供电, 驱动电机处于停止状态, 但燃料电池系统可以空载运行。

(2) 制动模式(充电模式)

此模式(如紧急制动, 下坡滑行等工况)下, 燃料系统同样空载运行, 而驱动电机处于发电机状态进行发电, 锂电池组则根据制动系统的运行特性吸收再生制动能量。

(3) 牵引模式

此模式又可分为三种情况:

① 如果受指令控制的电动机输入功率大于燃料电池系统的额定功率(如启动、急加速、爬坡等工况), 则应用混合牵引模式, 即燃料电池系统和锂电池组同时提供电能, 此时燃料电池系统以额定功率运行, 而不足功率由锂电池组提供。燃料电池系统额定功率应处于燃料电池最佳运行功率范围的最高功率处。

② 如果受指令控制的电动机的输入功率小于设定的燃料电池系统的最低功率(同样要位于燃料电池最佳运行功率范围), 而且锂电池组需要充电(即锂电池电量不足), 则燃料电池系统可以以额定功率运行, 其输出的功率一部分要全部满足电动机所需功率, 剩余部分能量用于给锂电池组充电; 如果是另一种情况, 即锂电池组不需要充电(电量基本满额), 则燃料电池系统以空载状态运

行,且由锂电池组单独驱动车辆行驶。一般情况下,在后一种状态时,锂电池组输出的峰值功率要大于电动机所需功率(指令功率)。

③ 如果驱动电机负载功率处于设定的燃料电池系统最低功率和额定功率之间,且锂电池组不需要充电,则燃料电池系统以部分功率运行,并单独驱动车辆。若锂电池组需要充电,则燃料电池系统以额定功率运行,输出功率一部分用于驱动车辆,一部分用于向锂电池组充电。

3.3 混合动力驱动系统的参数设计

进行燃料电池电动汽车的混合动力驱动系统的参数设计需要根据设计要求计算出驱动电机功率、燃料电池系统功率和锂电池组输出功率及其能量容量的数据。

3.3.1 设计要求

本课题要设计的燃料电池电动汽车整车主要技术参数及动力性能指标要求见表 3-2, 3-3。

表 3-2 燃料电池电动汽车整车主要技术参数

技术参数	单位	参数值
车体总质量	kg	1280
滚动阻力系数	-	0.01
轮胎滚动半径	m	0.282
空气阻力系数	-	0.3
迎风面积	m ²	2.0
传动效率	-	0.92

表 3-3 燃料电池电动汽车动力性能指标要求

动力性能参数	单位	参数值
加速时间(从 0 km/h 到 100km/h)	s	≤10
最大爬坡能力(上坡角度)	°	20 (约 25km/h) 3 (约 100km/h)
最高车速	km/h	约 150

3.3.2 驱动电机功率设计

一般情况下,汽车加速性能(车辆从零车速加速到给定车速所需的时间)所需功率要大于爬坡所需功率。所以设计的电动机功率首要满足加速性能的要求,可应用下式估算电动机额定功率值^[33,40]:

$$P_t = \frac{1}{\eta} \left[\frac{\delta M}{2t_a} (V_f^2 + V_b^2) + \frac{2}{3} M g f_r V_f + \frac{1}{5} \rho_a C_D A_f V_f^3 \right] \quad (3-3)$$

式中, P_t 为驱动电机功率(W); η 为传动效率; δ 为转动惯量系数(取 1.1); M 为车辆的总质量(kg); t_a 为期望的加速时间(s); V_f 为车辆加速后的终速(m/s); V_b 为对应于电动机基速的车速(m/s); g 为重力加速度(取 9.8m/s²); f_r 为轮胎的滚动阻力系数; ρ_a 为空气密度(取 1.202kg/m³); C_D 为空气阻力系数; A_f 为车辆迎风面积(m²)。

其中等号右侧第一项 $\frac{\delta M}{2t_a} (V_f^2 + V_b^2)$ 表示用于车辆质量加速所需要的功率,

第二项 $\frac{2}{3} M g f_r V_f$ 表示克服轮胎滚动阻力所需要的积分平均功率, 第三项

$\frac{1}{5} \rho_a C_D A_f V_f^3$ 表示克服空气阻力所需要的积分平均功率。

汽车的转动惯量系数 δ 可用下面的经验公式估算^[33]:

$$\delta = 1 + \delta_1 + \delta_2 i_g^2 i_0^2 \quad (3-4)$$

其中 δ_1 表示车轮的转动惯量系数, 合理的估算值为 0.04; δ_2 表示与动力装置相关的旋转部件的转动惯量系数, 估算值取 0.0025; i_0 为末端传动齿轮的传动比(主减速比); i_g 为传动装置的传动比; $i_0 i_g$ 即为总传动比。

经计算可得满足电动汽车加速性能需要的电动机功率约为 69.8kW。

通过下式可计算按最高车速行驶所需功率:

$$P_t = \frac{1}{\eta} \left(M g f_r V_{max} + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V_{max}^3 \right) \quad (3-5)$$

式中, V_{max} 为最高车速 (m/s), 经计算可得满足最高车速所需的电动机功率约为 34.1kW。

通过下式可计算汽车在上坡角度分别为 3° (坡度约为 5%) 和 20° (坡度约为 36%) 的路面上行驶时所需要的功率:

$$P_i = \frac{1}{\eta} \left(Mgf_r V \cos \alpha + MgV \sin \alpha + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^3 \right) \quad (3-6)$$

式中, V 为爬坡时的车速; α 为上坡角度。经计算可得以 100km/h 的车速在 3° 的路面上行驶所需功率为 32.1kW, 以 20km/h 的车速爬 20° 的坡所需功率为 33.5kW。

由以上计算结果可见, 汽车加速时所需要的功率远大于爬坡和高速行驶时所需功率。所以选定额定功率为 70kW 的驱动电机 (假设电动机额定转速 3000r/min, 最高转速 5000 r/min), 以满足加速性能要求。

课题组根据设计结果与合作单位共同试制完成了驱动电机及其驱动器的样机 (图 3-8, 3-9)。

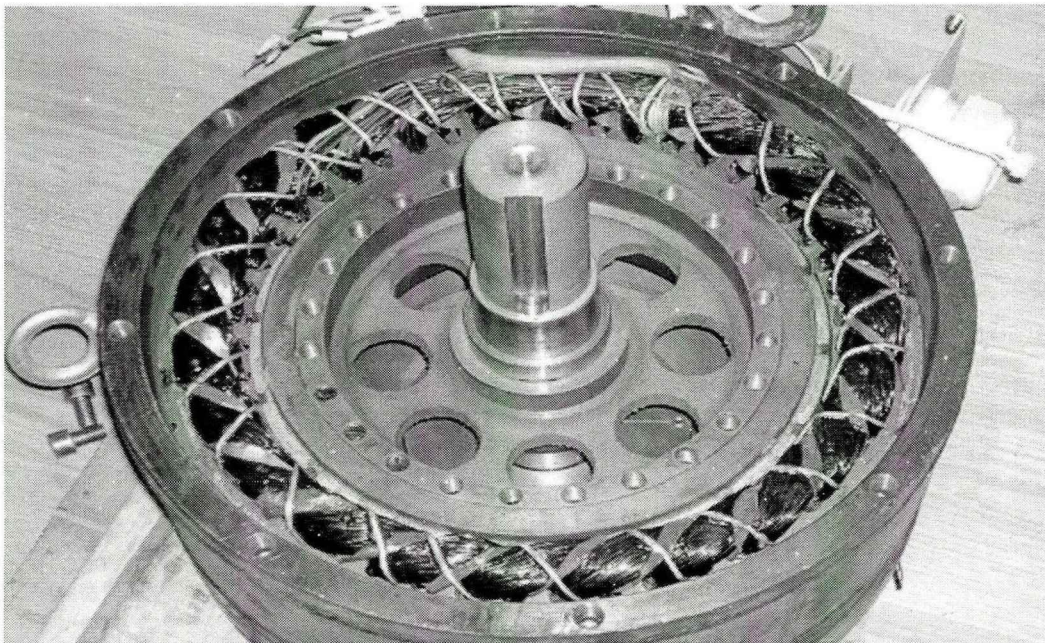


图 3-8 驱动电机样机

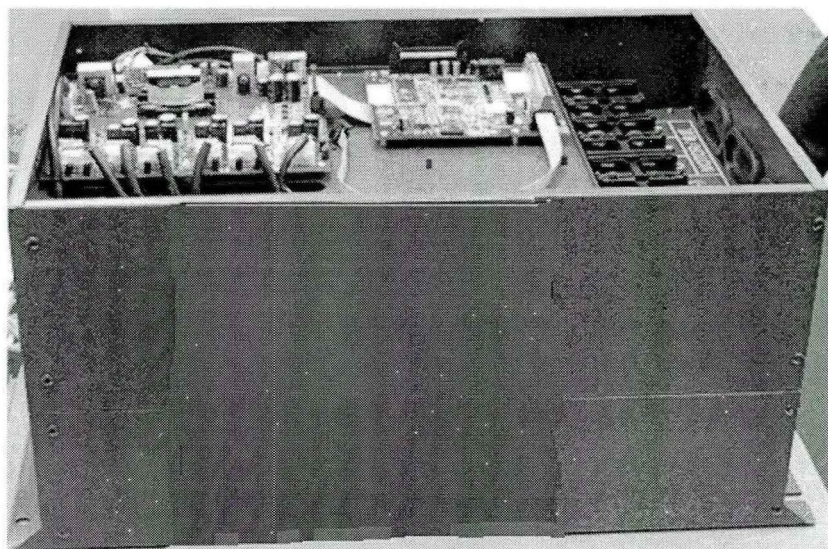


图 3-9 电机驱动器

3.3.3 燃料电池系统功率设计

根据燃料电池电动汽车的设计,当车辆以相对高速状态恒速长距离行驶时,所需功率(上述计算结果约为 34.1kW)单独由燃料电池系统提供,且在不利用辅助电池的情况下,以给定车速在适度坡度下行驶时单独向电机输出功率(上述计算结果约为 32.1kW)。因此,在考虑燃料电池系统效率和传动效率的情况下,课题将选用额定功率为 40kW 的燃料电池系统(应略大于前面两个计算结果)。

3.3.4 锂电池组功率及能量容量设计

基于由设计要求规定的加速性能所需的电动机最大输出功率,以及由恒速行驶确定的燃料电池系统功率,选定锂电池组的额定功率为 40kW。

一般来说,在正常行驶情况下是不需要锂电池组提供能量的,只有在起动和急加速状态下需要锂电池组提供辅助能量。相比较起来,在起动时由于燃料电池系统刚开始工作,温度较低,发电能量有限,这时就主要依靠锂电池组供电。根据循环测试的锂电池的 SOC 变化范围(图 3-10)在 0.6~0.8 之间,在这个荷电容量范围内其效率最高。锂电池组允许能量变化范围是 0.2kWh,则锂电池组的能量容量为 $0.2/(0.8-0.6)=1\text{kWh}$ 。

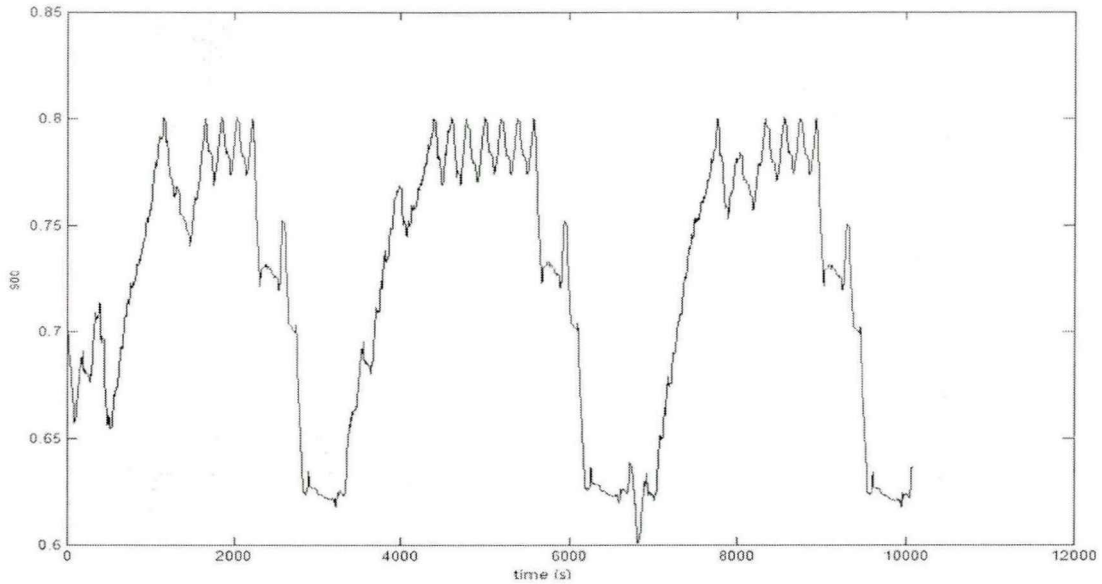


图 3-10 锂电池组 SOC 变化曲线

3.3.5 传动比设计

由于电动机转速普遍高于车轮角速度，所以驱动系统一般都需要配备主减速器，而电动汽车一般采用单档传动，所以传动系统的传动比设计应该满足在电动机处于最高转速时汽车能达到预期最高车速，即

$$i_{\max} = \frac{\pi n_{\max} r}{30V_{\max}} \quad (3-7)$$

式中， i_{\max} 为传动比的最大值； n_{\max} 为电动机最高转速 (r/min)； r 为轮胎滚动半径 (m)； V_{\max} 为最高车速 (m/s)。经计算可得 i_{\max} 为 3.544，即要选择的传动比不能大于 3.544。

传动系统的最小传动比应满足最大爬坡能力，即

$$i_{\min} = \frac{r}{\eta T_{\max}} \left(Mgf_r \cos \alpha_{\max} + Mg \sin \alpha_{\max} + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 \right) \quad (3-8)$$

式中， i_{\min} 为最小传动比； T_{\max} 为电动机最大转矩 (N·m)； α_{\max} 为最大爬坡角度 (20°)。计算可得 i_{\min} 为 3.044。所以该车辆的传动比范围要在 i_{\min} 和 i_{\max} 中间，即 $3.044 \leq i \leq 3.544$ 。图 3-11 是其传动系统结构原理图。

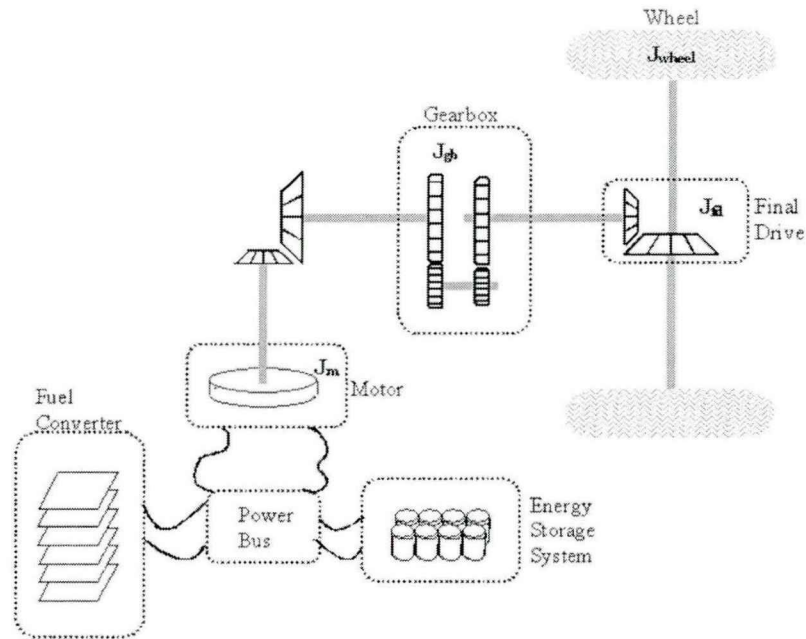


图 3-11 是其传动系统结构原理图

3.4 本章小结

本章分析了燃料电池电动汽车电力耦合驱动的几种模式，并最终选定了 F+B 模式。然后确定了驱动系统的结构、运行模式和控制策略，对驱动系统中的主要部件进行了参数设计，并完成了电机及其驱动器的试制工作。

第4章 混合动力驱动系统建模与仿真分析

随着汽车的结构越来越复杂,电子元器件的应用越来越多,建模和仿真对于汽车的参数设计、动力匹配、性能分析等已经必不可少[41,42,45]。本章应用ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) 软件对设计的燃料电池电动汽车进行建模和仿真分析

4.1 电动汽车建模仿真的基本原理和仿真软件简介

典型的车辆系统模型包括经验数据、工程假设及基于物理的算法,且根据需求的精确程度,可以建立不同的系统模型。对于燃料电池电动汽车,常用的仿真方法有前向仿真和后向仿真两种[43-45]。

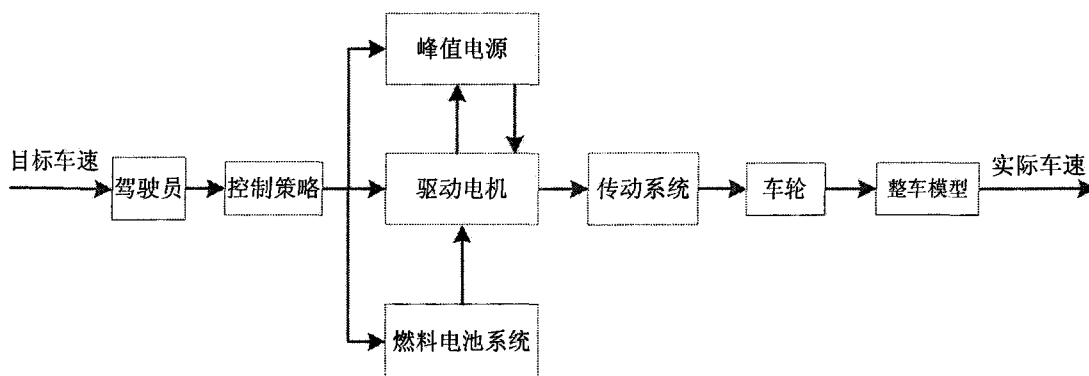


图 4-1 前向仿真流程图

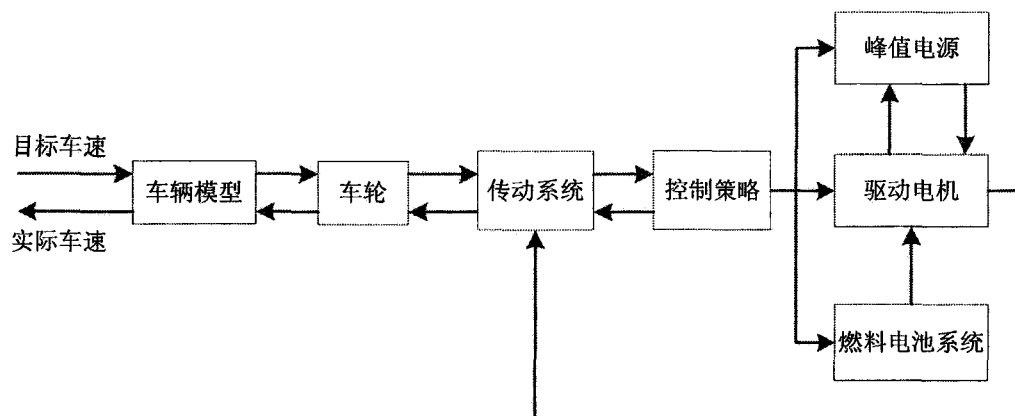


图 4-2 后向仿真流程图

前向仿真可以从驾驶员控制开始,较真实地模拟系统运行状态和逻辑结构,主要用于开发和测试(图 4-1)。后向仿真是从工况输入,逆向计算系统各项指标,适用于系统设计、参数匹配和动力性能计算等(图 4-2)。

燃料电池汽车常用的仿真软件主要有 ADVISOR、CRUISE、PAST、EASY5、VTB 等。国内应用较普遍的是前两个。其中由于 CRUISE 是商业软件，且不利于二次开发，所以免费及易于二次开发的 ADVISOR 软件应用更广^[43,44,46,47]。ADVISOR 是美国可再生能源实验室（NREL）基于 MATLAB/Simulink 开发的高级车辆仿真软件，于 1994 年开始开发和使用，并在互联网上免费发布，之后经过多次升级。ADVISOR 采用的是后向仿真为主和前向仿真为辅的方法。

4.2 燃料电池电动汽车系统建模

4.2.1 主要系统模型

根据第三章驱动系统的设计，建立主要的电驱动系统、燃料电池系统和锂电池及其管理系统的 ADVISOR 模型如图 4-3,4-4,4-5 所示。

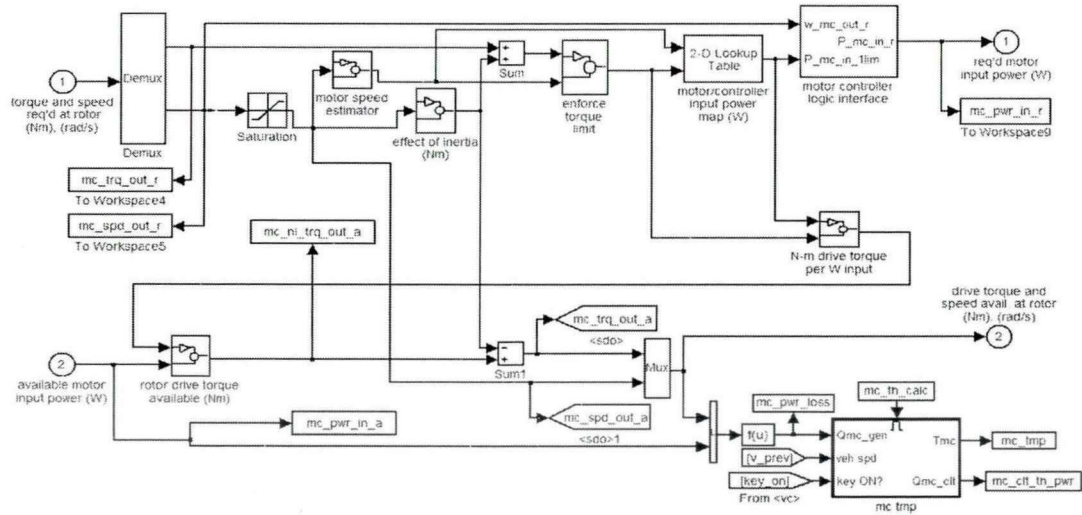


图 4-3 驱动电机模型图

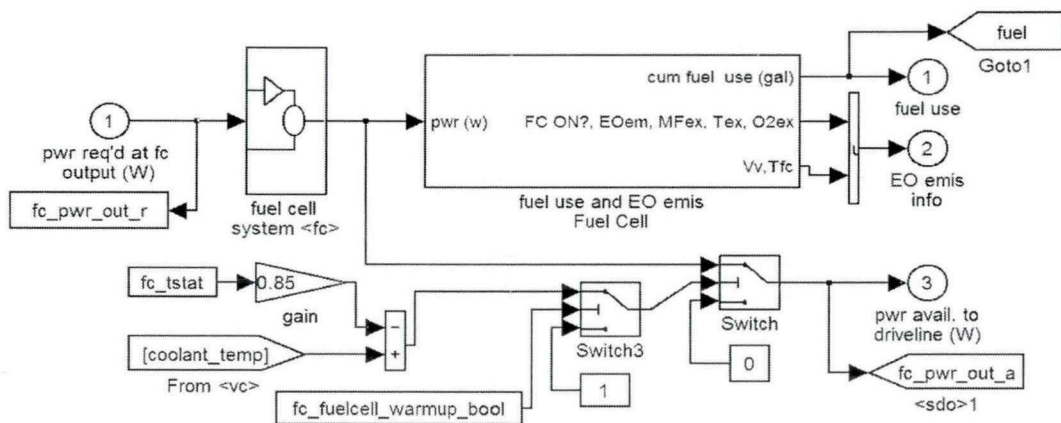


图 4-4 燃料电池系统模型图

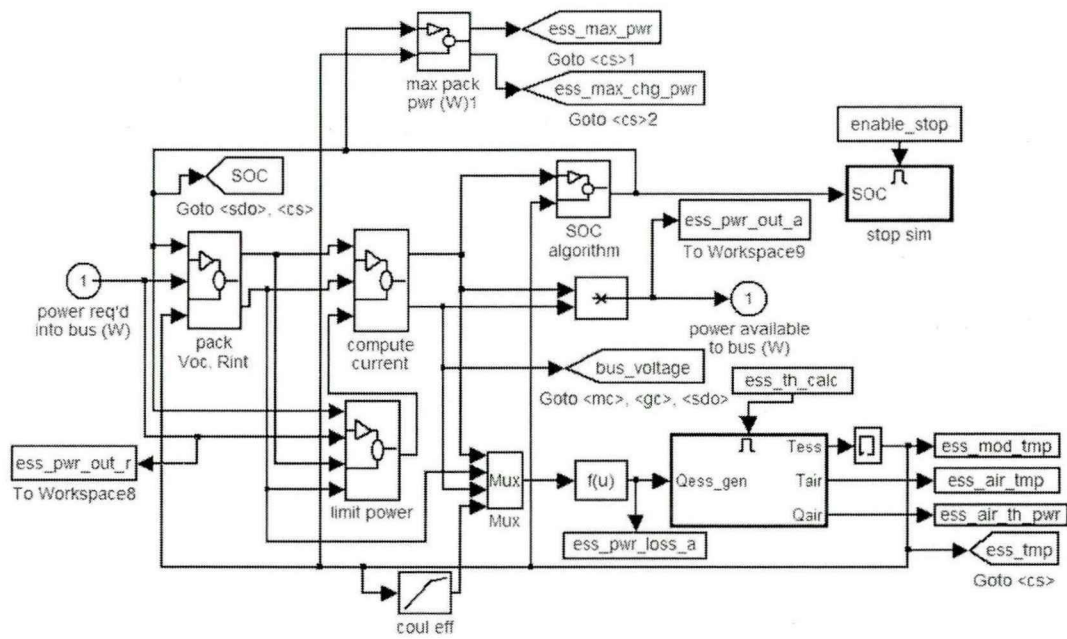


图 4-5 锂电池及其管理系统模型图

4.2.2 燃料电池电动汽车整车模型

根据系统控制策略、各系统模型及参数得到整车模型，如图 4-6 所示。

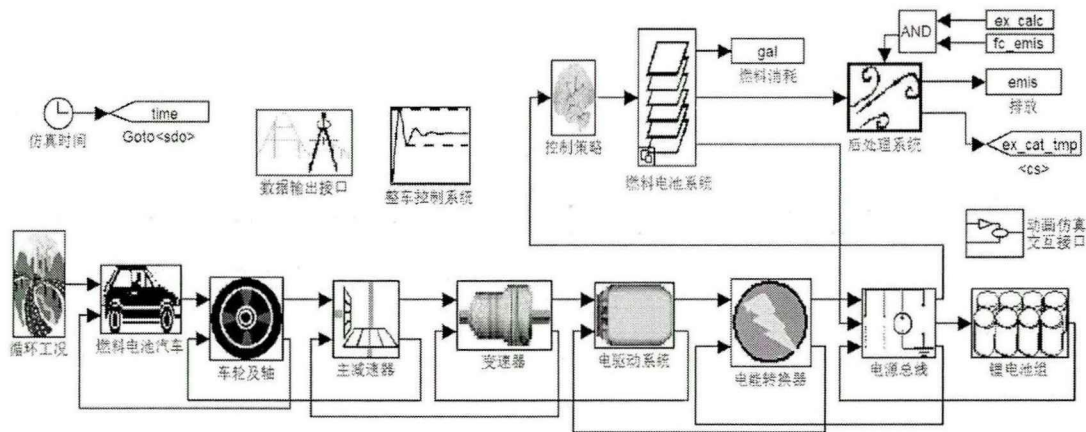


图 4-6 燃料电池电动汽车整车模型图

4.3 仿真工况及分析

4.3.1 仿真工况

车辆行驶工况一般有市区行驶工况和高速路行驶两大类。本课题设计车型采用国内常用的 UDDS、ECE-EUDC 和 HWFET 三种循环（图 4-7、4-8、4-9 和 4-10）工况进行三次连续仿真。

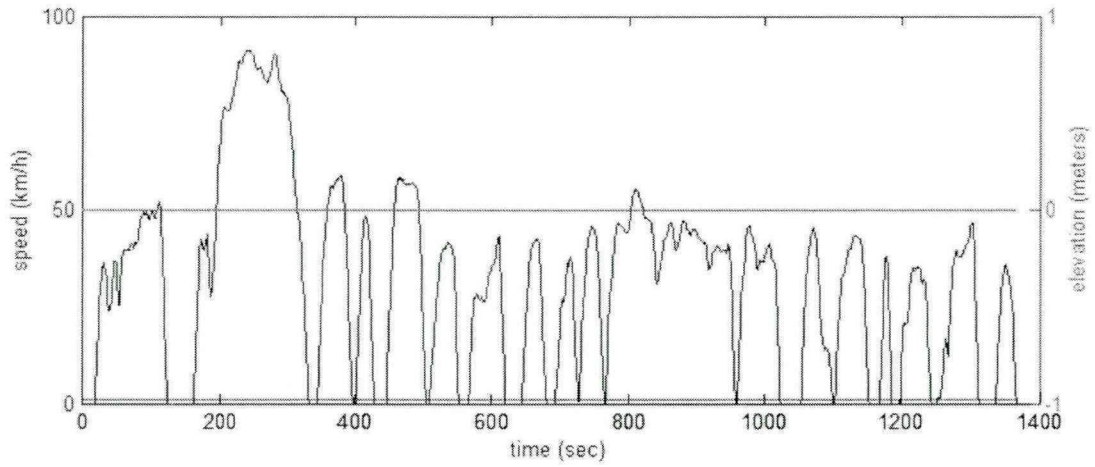


图 4-7 UDDS 循环工况图

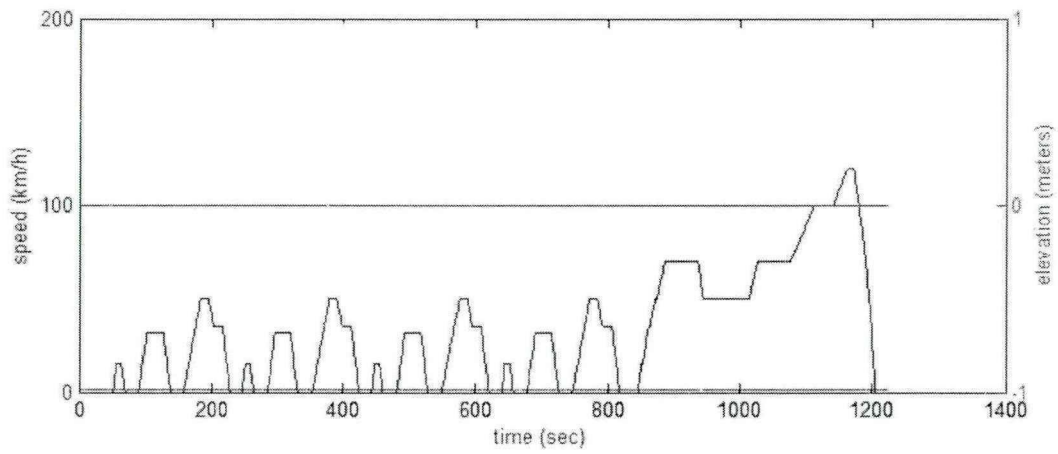


图 4-8 ECE-EUDC 循环工况图

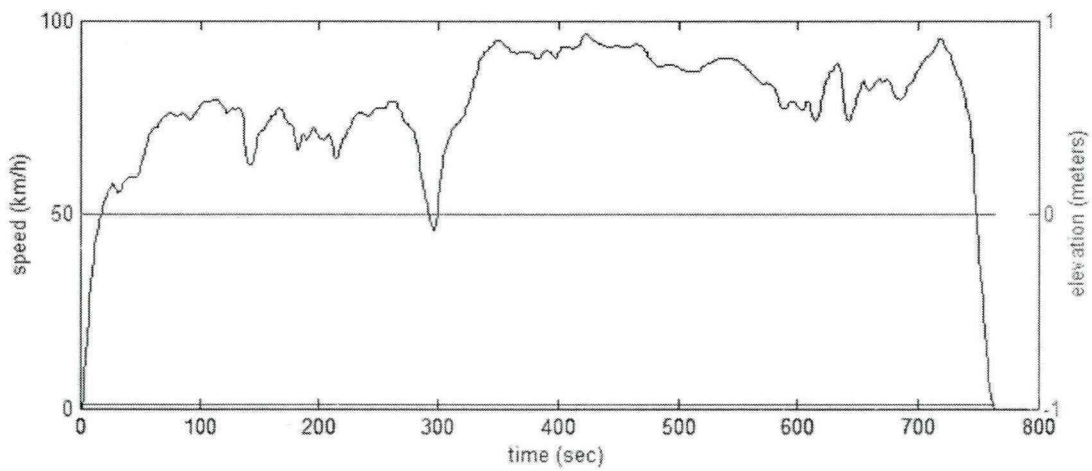


图 4-9 HWFET 循环工况图

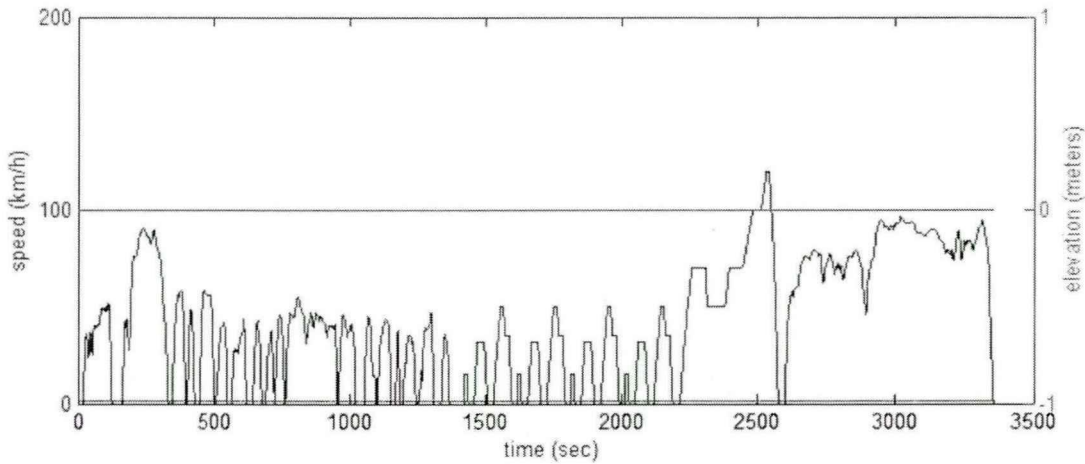


图 4-10 UDDS、ECE-EUDC 和 HWFET 连续循环工况图

4.3.2 仿真结果与分析

仿真过程中，为了对比研究，同时完成了未配置锂电池组的同型纯燃料电池电动汽车模型。

(1) 两种模型的加速性能及燃料经济性分析

表 4-1 为两种模型的加速时间及燃料经济性仿真结果对比。其中混合动力驱动模型在循环结束时锂电池组的 SOC 变化值为零，即锂电池组循环前后能量容量没有变化，所以对该模型的燃料经济性没有影响。

表 4-1 燃料电池混合动力驱动和纯燃料电池驱动配置参数及仿真结果

	燃料电池混合动力驱动	纯燃料电池驱动
整车质量/kg	1280	1280
电动机额定功率/kW	70	70
燃料电池系统额定功率/kW	40	80
锂电池组最大功率/kW	40	-
锂电池组能量容量/kWh	1	-
加速时间 (0~100km/h) /s	9.7	9.7
(0~137km/h) /s	18.9	19.5
爬坡能力 (3°) / km/h	106.3	98.5
燃料经济性 (按汽油计)	3L/100km	3.2L/100km

从中可以看出两种模型均达到了设计要求，但是未配置锂电池组的燃料电池汽车在同样的循环条件下由于没有峰值电源提供峰值功率及回收制动能量，所以比燃料电池加锂电池组混合动力驱动时在高速下加速时间略长，爬坡能力略低，燃料消耗略高。

(2) 两种模型的车速分析

图 4-11、4-12 是两种模型在循环中的速度曲线。由于测试循环相同，速度变化基本相同。

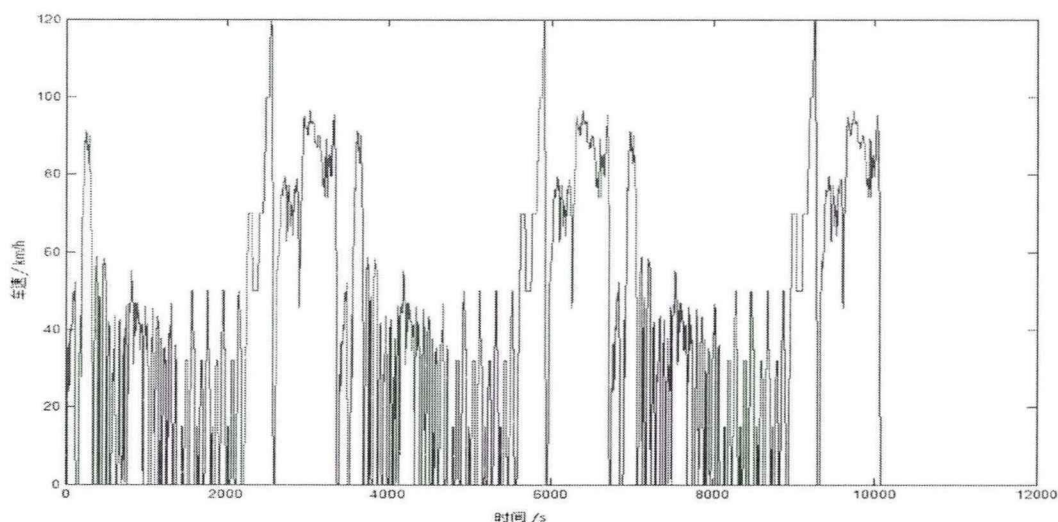


图 4-11 混合动力驱动模型速度曲线图

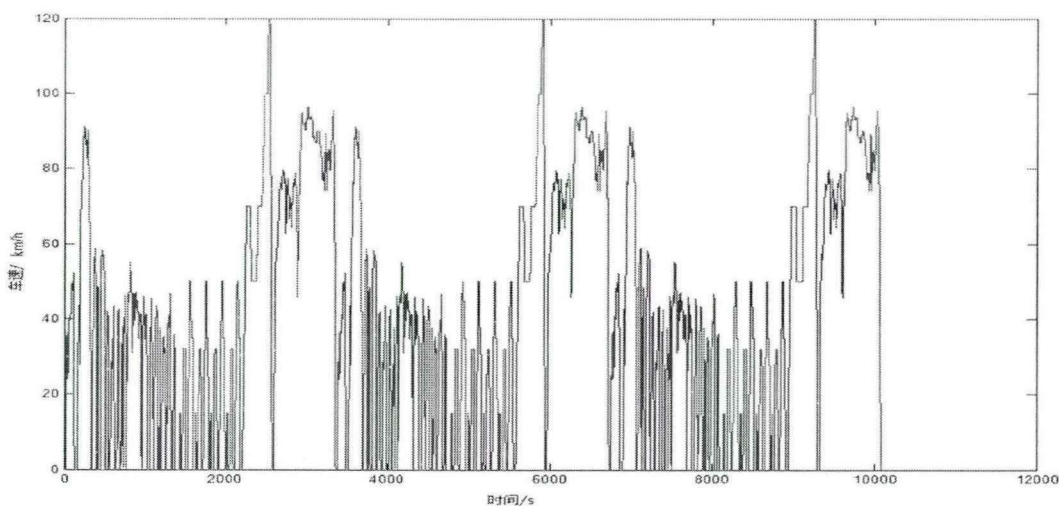


图 4-12 纯燃料电池驱动模型仿真速度曲线图

(3) 两种模型的燃料电池系统输出功率和系统效率对比分析

由图 4-13 和图 4-14 中可以看出两者输出功率曲线区别很明显。混合动力系统由于锂电池组提供的峰值能量，在起动、加速阶段，其输出功率变化比纯燃料电池汽车小得多。由图 4-15 和图 4-16 可以看出混合动力驱动模型燃料电

池系统总是工作在高效率区。而纯燃料电池驱动模型燃料电池系统随着工况变化的需要,工作在全效率区。可见锂电池组对燃料电池系统有很好的辅助作用,可以有效提高燃料电池系统的工作效率,从而延长使用寿命。

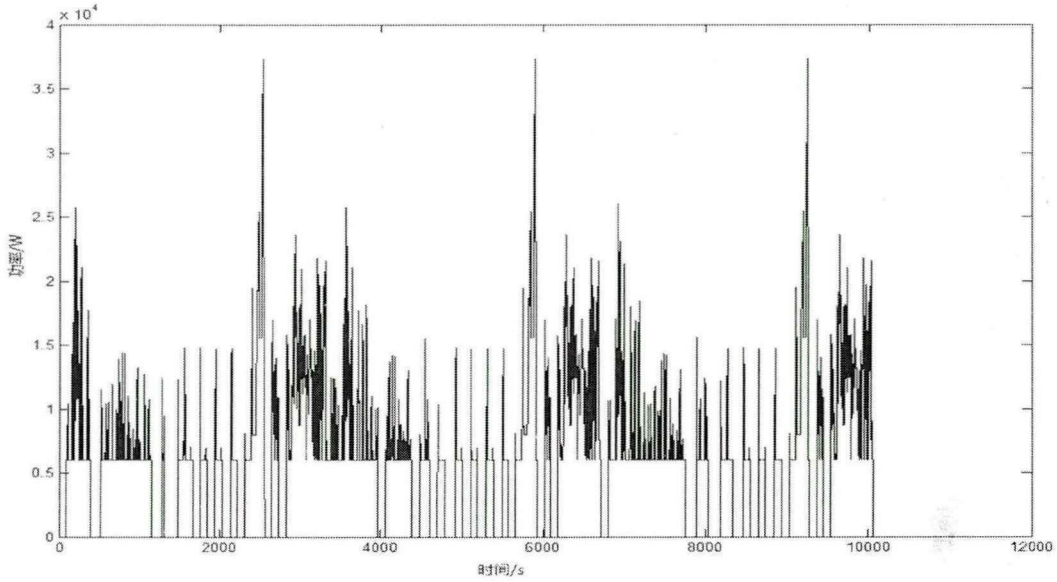


图 4-13 混合动力驱动模型燃料电池系统输出功率图

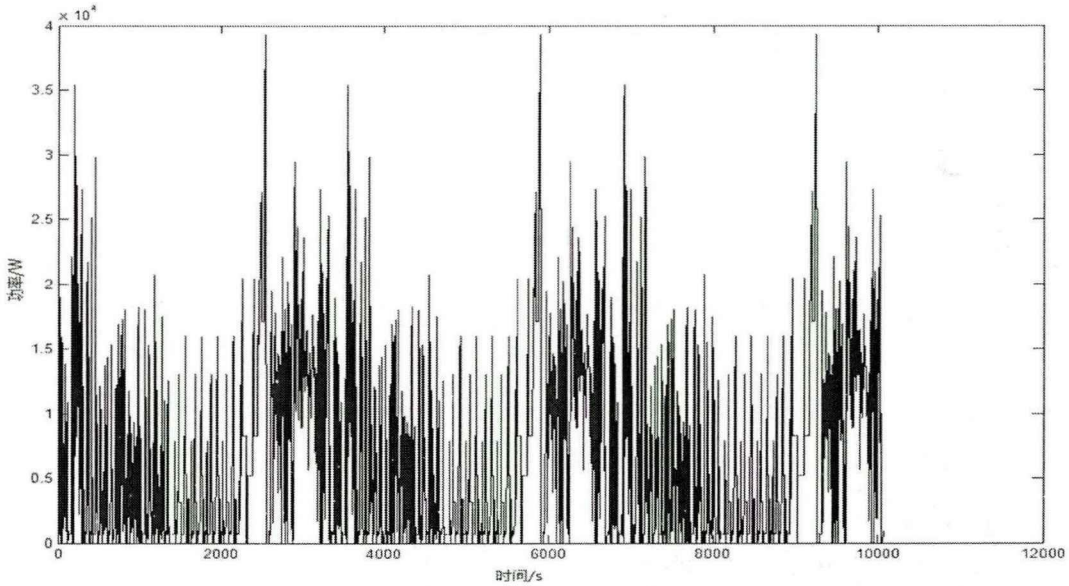


图 4-14 纯燃料电池驱动模型燃料电池系统输出功率图

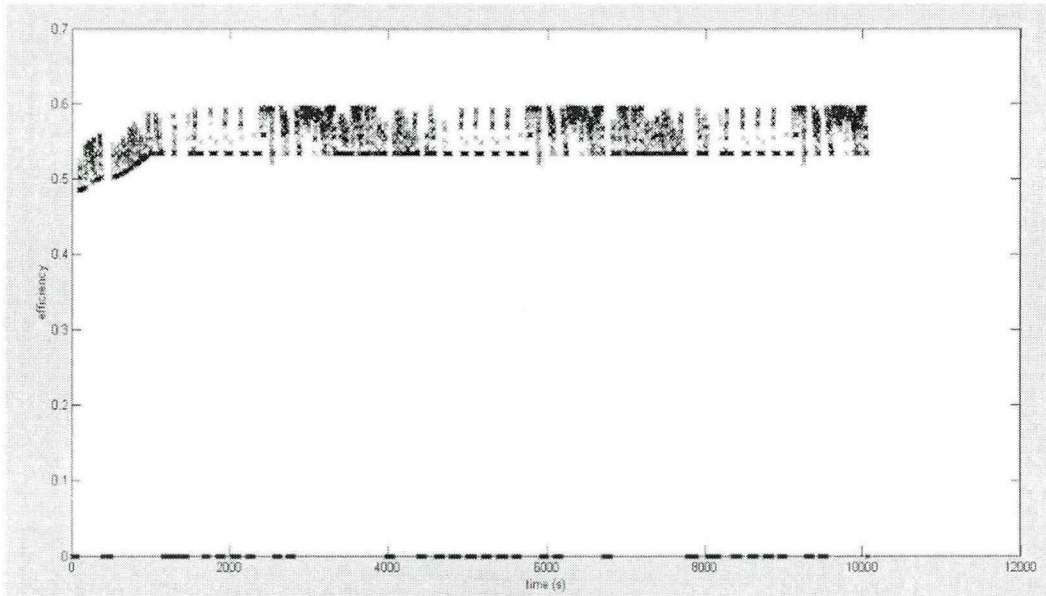
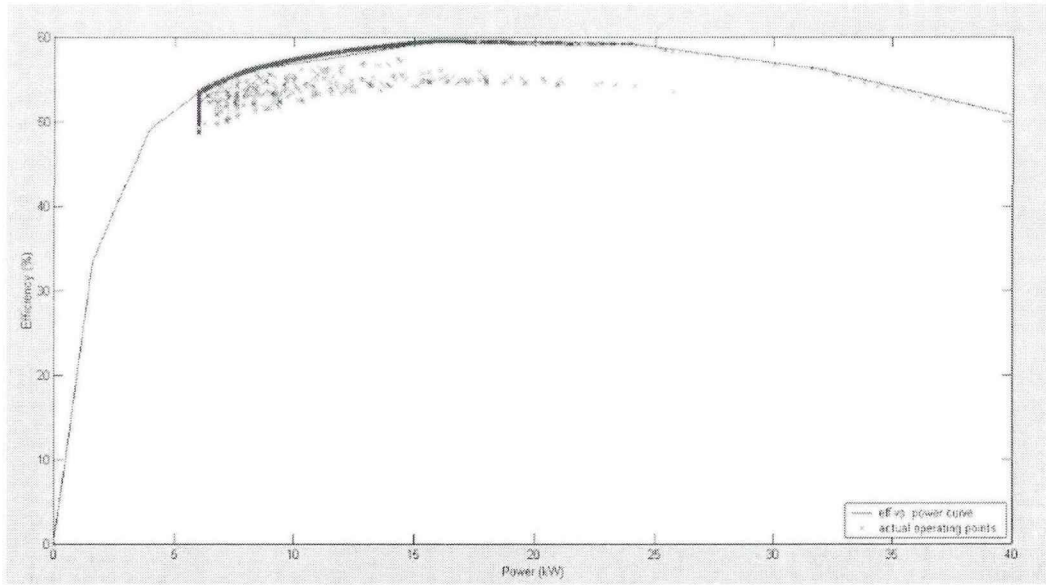
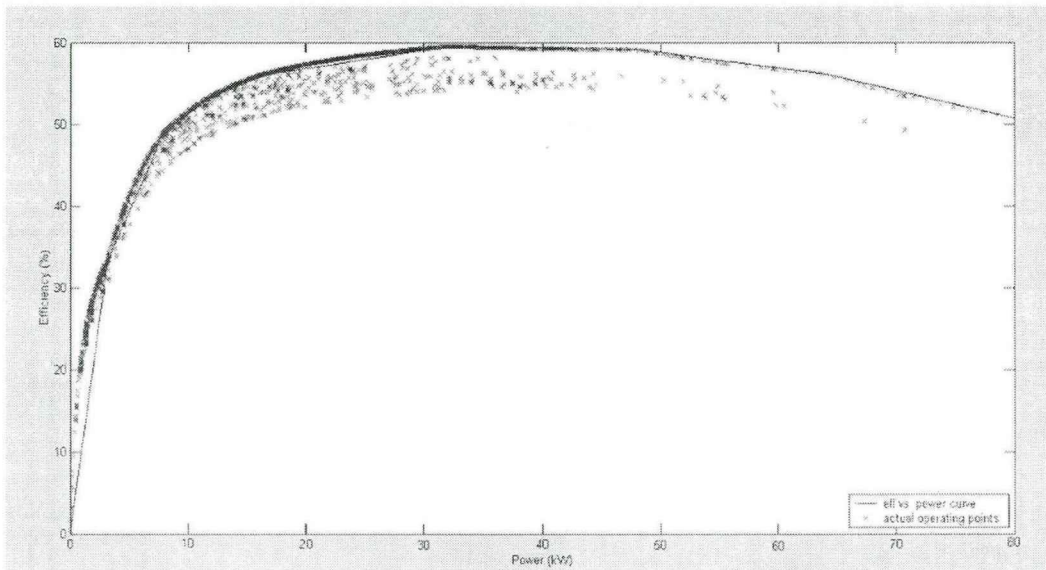


图 4-15 混合动力驱动模型燃料电池系统效率图



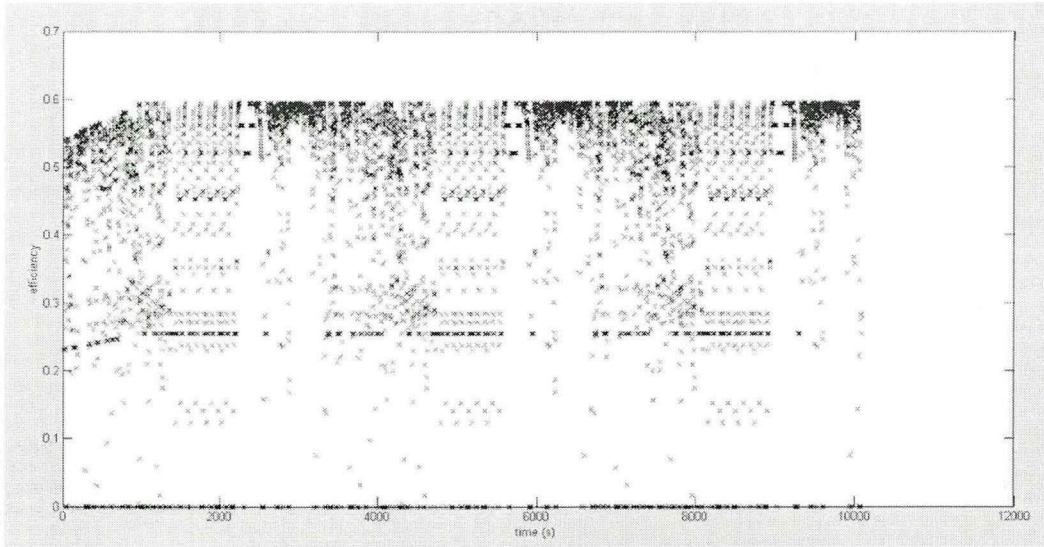


图 4-16 纯燃料电池驱动模型燃料电池系统效率图

(4) 混合动力驱动模型的锂电池工作过程分析

混合动力驱动模型中锂电池组工作时的充放电效率都非常高（图 4-17、4-18）。而且锂电池组的输出功率和能量变化（图 4-19、4-20）符合不同工况时与燃料电池系统的配合要求（设计要求）。

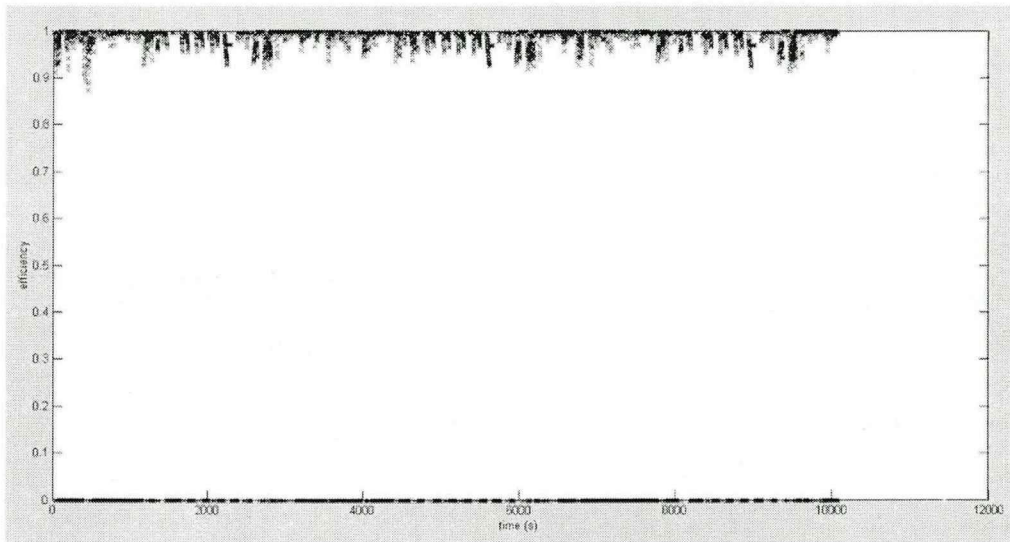


图 4-17 混合动力驱动模型锂电池组放电效率图

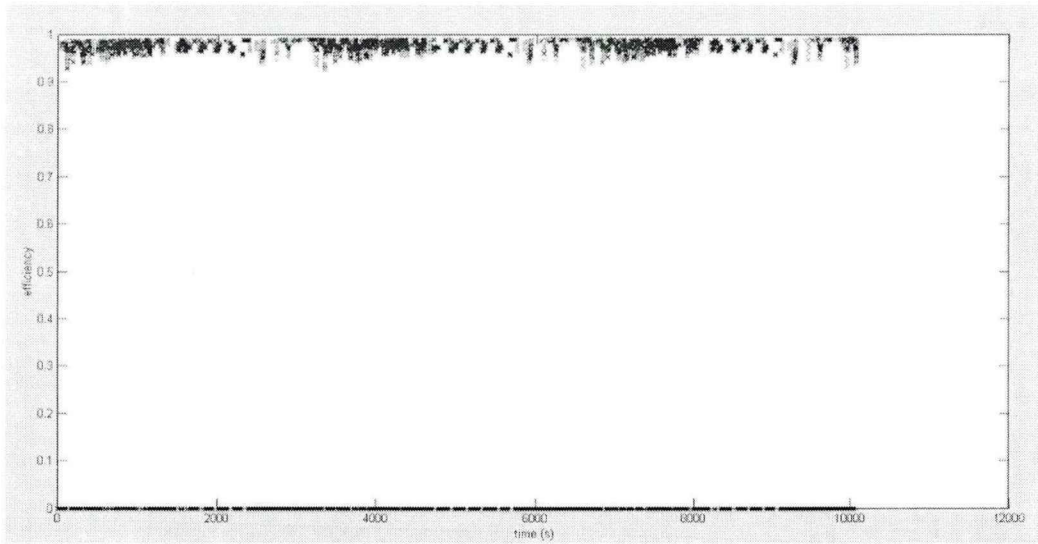


图 4-18 混合动力驱动模型锂电池组充电效率图

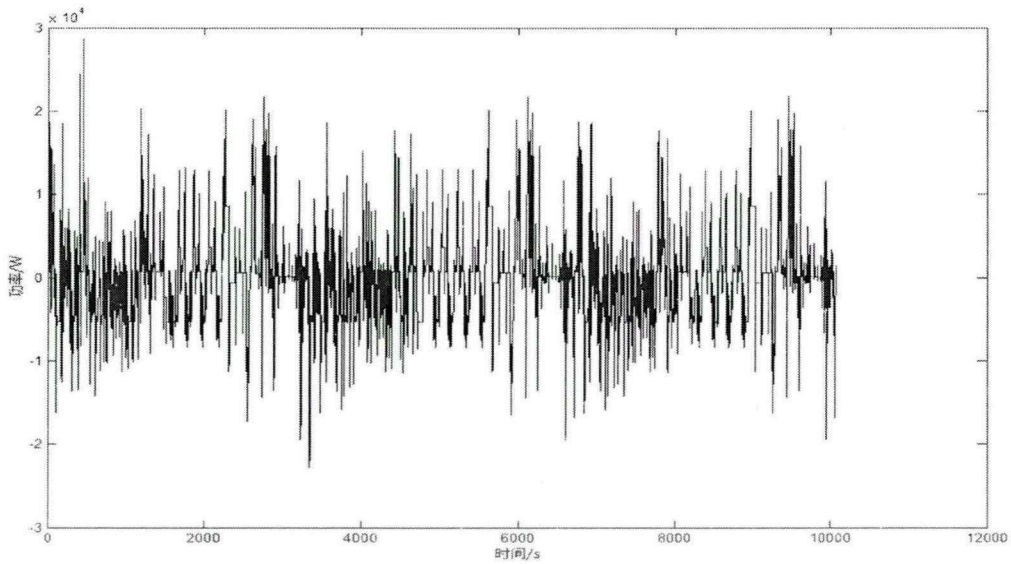


图 4-19 混合动力驱动模型锂电池组输出功率图

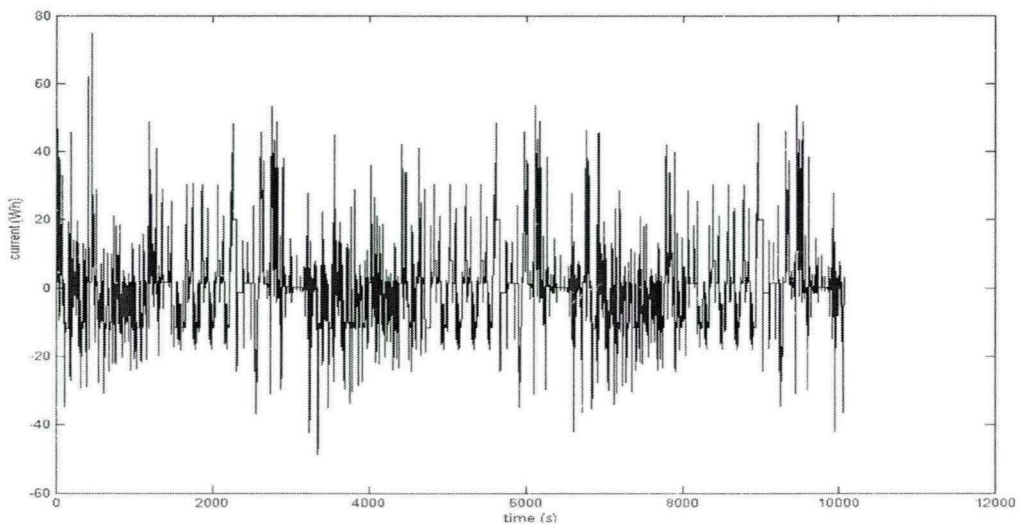


图 4-20 混合动力驱动模型锂电池组能量变化图

4.4 本章小结

本章介绍了建模仿真的基本原理，建立了燃料电池电动汽车主要部件及整车的仿真模型，对混合动力驱动方式和纯燃料电池驱动方式分别进行了仿真及分析。结果显示在车辆性能基本相同的前提下，混合动力驱动模式具有更高的动力性能和燃料效率。

第5章 总结与展望

5.1 全文工作总结

汽车工业给人类生活带来了极大的便利,给社会经济也带来了巨大的效益,但同时,我们不能忽视最重要的问题,它同样也造成了严重的环境污染和能源危机。近年来,为缓解能源危机现状,燃料电池汽车得到许多国家及企业的重视。本文为适应现阶段新能源汽车的研究技术,并结合不同类型电动汽车的优点,提出了车载制氢式燃料电池电动汽车混合动力驱动的设计方案。

本方案分析了车载制氢式燃料电池电动汽车的基本结构,并对其主要部件进行了原理分析及选型,最终选择采用自热重整方式的车载甲醇重整器、质子交换膜燃料电池系统、双向升降压型 DC/DC 电能变换器、永磁直流电机和锂电池组等作为主要部件。

分析了燃料电池电动汽车电力耦合驱动的几种模式,最终选定了 F+B 模式;确定了驱动系统的结构、运行模式和控制策略,对驱动系统中的主要部件进行了参数设计,并在此基础上试制了部分样机和控制板,实际应用功能良好。

在基于 MATLAB/Simulink 环境的 ADVISOR 仿真平台上,搭建了混合动力驱动模型和纯燃料电池驱动模型,并进行了仿真和对比分析。结果显示该燃料电池电动汽车基本达到了设计要求。其中混合动力驱动模型中燃料电池和锂电池分别在高效率及安全运行区域工作,能源利用率高;峰值电源即锂电池组的采用有效解决了纯燃料电池汽车峰值功率不足以不能进行制动能量回收的问题,具有很好的实用价值和发展前景。

5.2 后续工作展望

本文在研究在对混合动力燃料电池汽车的研究过程中发现,车载制氢系统的控制策略开发是一个难题,文中只是将其简单模型集中到了燃料电池系统当中,今后将开发独立的车载制氢系统模型,对整个系统的控制策略进行优化,并继续与某新能源技术公司合作进行样车的研究开发及试制。

另外,由于 F+B+C 电力耦合驱动模式具有不可比拟的优势,无疑也将成为今后燃料电池汽车混合动力驱动研究开发工作的重点。

参考文献

- [1] 王菊, 郑贺悦, 尤可为, 于丹. 燃料电池汽车技术政策研究[M]. 北京: 北京理工大学出版社. 2013, 3-21.
- [2] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社. 2012, 217-218.
- [3] 氢能协会(日). 氢能技术[M]. 北京: 科学出版社. 2009.
- [4] 国务院发展研究中心产业经济研究部, 中国汽车工程学会, 大众汽车集团(中国). 中国汽车产业发展报告(2013)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2013.
- [5] 国务院发展研究中心产业经济研究部, 中国汽车工程学会, 大众汽车集团(中国). 中国汽车产业发展报告(2014)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2014.
- [6] C.C.Chan. Outlook of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles [J]. Automotive Safety and Energy. 2011(1): 12-24.
- [7] 殷承良, 张建龙等. 新能源汽车整车设计——典型车型与结构[M]. 上海: 上海科学技术出版社. 2013, 186-192.
- [8] George Bush. Energy Policy Act of 2005.
- [9] 陈家昌, 王菊, 伦景光. 国际燃料电池汽车技术研发动态和发展趋势[J]. 汽车工程, 2008(5).
- [10] 伦景光. 国外燃料电池大客车的发展现状[J]. 清华大学燃料电池城市客车项目简报, 2002(2).
- [11] 伊藤慎介(日). 日本汽车界的国家能源战略[R]. 经济产业省制造产业局汽车课, 2006-10-20.
- [12] Hewu Wang, Minggao Ouyang. Transition Strategy of the Transportation Energy and Powertrain in China[J]. Energy Policy, 2007, 35(4): 2313-2320.
- [13] ADVISOR 2002/documentation/advisor_doc.htm, National Renewable Energy Laboratory, Last Revised: 30-April-2002.
- [14] 陈全世, 仇斌, 谢起成等. 燃料电池电动汽车[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [15] 陈全世等. 先进电动汽车技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

- [16] 吴素芳. 氢能与制氢技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2014, 105-119.
- [17] Reitz T L, Lee P L, Czaplewski K F, et al. Time-resolved XANES investigation of CuO/ZnO in the oxidative methanol reforming reaction [J]. *J Catal*, 2001, 199(2):193-201.
- [18] Semelsberger T A, Brown L F, Borup R L, et al. Equilibrium products from autothermal processes for generating hydrogen-rich fuel-cell feeds [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2004, 29(10): 1047-1064.
- [19] Patel S, Pant K K. Kinetic modeling of oxidative steam reforming of methanol over Cu/ZnO/CeO₂/Al₂O₃ catalyst [J]. *Appl Catal A: Gen*, 2009, 356(2): 189-200.
- [20] Liu S, Takahashi K, Uematsu K, et al. Hydrogen production by oxidative methanol reforming on Pd/ZnO [J]. *Appl Catal A: Gen*, 2005, 283(1):125-135.
- [21] Vashyam R, Zelenay P. A class of non-precious metal composite catalysts for fuel cells [J]. *Nature*, 2006, 443(7107): 63-66.
- [22] Lefevre M, Proietti E, Jaouen F, et al. Iron-based catalysts with improved oxygen reduction activity in polymer electrolyte fuel cells [J]. *Science*, 2009, 324(5923): 71-74.
- [23] <http://conf.ncku.edu.tw/research/articles/c/20081114/3.html>
- [24] 黄倬, 屠海令等. 质子交换膜燃料电池的研究开发与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [25] 王金龙. 车用质子交换膜燃料电池及其混合动力系统性研究[D]. 吉林大学, 2007.
- [26] 杨贵恒, 吕林, 杨极. 质子交换膜燃料电池及其在汽车上的应用[J]. *上海汽车*, 2004(06).
- [27] 胡骅, 宋慧. 电动汽车(第三版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012, 77-81.
- [28] 王贵明, 王金懿. 电动汽车及其性能优化[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [29] 王文伟, 毕荣华. 电动汽车新型驱动技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [30] C. C. Chan and K. T. Chau. *Modern Electric Vehicle Technology* [M]. Oxford: Oxford University Press, 2001.

- [31] I. Husain. Minimization of Torque Ripple in SRM Drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(1), 28-39.
- [32] Available at <http://www.saftbatteries.com>, SAFT, The Battery Company, 2007.
- [33] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Ali Emadi. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamental, Theory, and Design 2nd Edition [M]. CRC Press. 2009, 383-394.
- [34] Y. Gao, M. Ehsani. Systematic Design of FC Powered Hybrid Vehicle Drive Trains [C]. SAE Paper, 2001-01-2532.
- [35] 钱劲. 燃料电池电动汽车动力系统集成设计及系统控制算法开发研究[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- [36] C. C. Chan and K. T. Chau. Modern Electric Vehicle Technology [M]. Oxford: Oxford University Press. 2001, 329-334.
- [37] Y. Gao, H. Moghbelli, M. Ehsani, G. Frazier, J. Kajs, S. Bayne. Investigation of High-Energy and High-Power Hybrid Energy Storage Systems for Military Vehicle Application [C]. SAE Paper, 2003-01-2287.
- [38] D. Tran, M. Cummins, E. Stamos, J. Buelow, C. Mohrdieck. Development of the Jeep Commander 2 FC Hybrid Electric Vehicle [C]. SAE Paper, 2001-01-2508.
- [39] T. Simmons, P. Erickson, M. Heckwolf, V. Roan. The Effects of Start-up and Shutdown of a FC Transit Bus on the Drive Cycle [C]. SAE Paper, 2002-01-0101.
- [40] Z. Rahman, M. Ehsani, K. Butler. Effect of extended-speed, Constant-power Operation of Electric Drives on the Design and Performance of EV-HEV Propulsion System [C]. SAE Paper, 2000-01-1557.
- [41] 曾小华, 官维钧. ADVISOR 2002电动汽车仿真与再开发应用[M]. 北京: 机械工业出版社. 2014.
- [42] 刘明辉. 混合动力客车整车控制策略及总成参数匹配研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [43] Y. Gao, H. Moghbelli, M. Ehsani et al. Investigation of High-energy and High-power Hybrid Energy Storage Systems for Military Vehicle Application [J].

- SAE Paper, 2003-01-2287.
- [44]童毅. 并联混合动力系统动态协同控制问题研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [45]Chris Mi, M. Abul Masrur, David Wenzhong Gao. Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives [M]. Published by John Wiley & Sons, Ltd. 2011, 322-324.
- [46]程莺, 冯能莲, 李克强等. ADVISOR混合动力电动汽车仿真系统的二次开发及应用[J]. 汽车工程, 2004.
- [47]李宁. 基于ADVISOR的多能量源HEV仿真软件二次开发及应用研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2011.

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 郭宝圣,熊树生等. 加入添加剂的甲醇汽油对汽油机怠速和低负荷特性的影响[J]. 能源工程,2015(2),已录用.
- [2] Baosheng Guo, Guohai Yan, Shusheng Xiong, etc. The Development Status and Trends of Air Conditioning on New Energy Vehicles. Advanced Materials Research (2014), in press.

致 谢

光阴似箭，日月如梭，短短的两年半研究生学习生涯就要结束了，在即将毕业之际，我首先要感谢导师熊树生副教授。熊老师渊博的学科知识，严谨的科研态度，踏实的工作作风，积极乐观的生活理念，谦逊诚恳的待人风格和对学生无微不至的关心，都让我由衷的钦佩并认真学习。在熊老师的悉心指导和帮助下，我在研究生期间学到了很多知识，在科研能力和工作方式上都有很大的进步，顺利的完成了毕业论文，并将使我受益终身。在此对熊老师表达最衷心的感谢和诚挚的敬意。祝导师和他的家人身体健康，工作顺利！

在这两年多时间里，我与我们实验室的同学们都结下了深厚的友谊，感谢他们跟我一起度过快乐难忘的研究生时光。感谢李伟、任晓帅、姚红、徐进、谢莲、胡滨鹏对我学习和科研等方面的帮助，感谢王英辉、戴明新在研究生课程、科研项目及论文写作期间的互勉互励，感谢黄晓波、毛彬滔、章昱帆、应智超、孙亚博在我毕业设计期间承担了更多实验室的任务。祝已经毕业的同学工作顺利；祝即将毕业的同学毕业顺利；祝还没有毕业的同学学习顺利！祝各位身体健康！

感谢12级车辆硕士班的所有同学，跟你们相处的时光是美好而短暂的，在这即将离别，奔赴各自工作岗位之际，祝你们工作顺利，前程似锦！

感谢我的父母和爱人对我工作学习的支持、鼓励以及包容，愿你们身体健康、万事如意！

最后，感谢在百忙之中进行论文审阅和答辩工作的各位专家、教授以及同学，谢谢你们的批评指正，祝你们身体健康、工作顺利！

郭宝奎

于浙江大学车辆所

二零一五年一月

中国热管理网 www.reguanli.com