



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM

分类号: U469.72
研究生学号: 2012424047

单位代码: 10183
密 级: 公 开



吉 林 大 学
硕 士 学 位 论 文
(专业学位)

基于热特性分析的双电压HEV复合电源优化设计与控制

Optimization Design and Control of Dual-voltage HEV Compound

Power Based on Analysis of Thermal Characteristics

作者姓名: 王 伟

类 别: 工程硕士

领域(方向): 车辆工程

指导教师: 于远彬 副教授

培养单位: 汽车工程学院

2015 年 4 月

未经本论文作者的书面授权，依法收存和保管本论文书面版本、电子版本的任何单位和个人，均不得对本论文的全部或部分内容进行任何形式的复制、修改、发行、出租、改编等有碍作者著作权的商业性使用（但纯学术性使用不在此限）。否则，应承担侵权的法律责任。

吉林大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。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作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名： 王伟

日期： 2015 年 6 月 7 日

基于热特性分析的双电压 HEV 复合电源
优化设计与控制

Optimization Design and Control of Dual-voltage HEV
Compound Power Based on Analysis of Thermal Characteristics

作者姓名：王 伟

领域（方向）：车辆工程

指导教师：于远彬 副教授

类 别：工程硕士

答辩日期： 2015 年 6 月 7 日

摘 要

基于热特性分析的双电压 HEV 复合电源优化设计与控制

当前,能源短缺与环境污染问题日益突出,发展节能与新能源汽车被提上日程,但是高压成组电源成本及安全性等问题阻碍了纯电动汽车的发展。为了以最小成本最大程度地改善整车燃油经济性,同时考虑电池的生热问题对其使用性能的影响,本文将原有的传统轻型车改进为采用双电压复合电源的微混车,以提高整车能量利用率。并且,兼顾电池生热问题,通过结构和控制两方面进行优化,实现复合电源系统集成化设计与控制。本文的主要研究工作总结如下:

首先,研究了温度对电池使用性能的影响,并从理论入手分析了锂离子电池生热及传热机理,基于电池充放电实验对其温升特性进行了初步分析,论证了基于热特性分析进行复合电源设计的必要性。

其次,研究分析复合电源系统各部件特性,确定了双电压复合电源系统构型及基本参数,利用汽车正向仿真软件 AVL Cruise 搭建了采用复合电源的微混车仿真平台,并利用 Matlab/Simulink 搭建复合电源控制策略,联合仿真得到了电池包在整个循环过程中的充放电电流随时间的变化曲线,并对整车动力性及燃油经济性进行仿真,结果表明,所制定的控制策略能够很好地实现对复合电源系统电压电流的控制,并且整车燃油经济性有所提高。

第三,根据锂离子电池生热传热特性,获取相关热物性参数,定义其边界条件,建立了三维锂离子电池电化学-热耦合模型,利用计算流体力学仿真软件 Fluent 对电池组进行温度场仿真,为其散热结构设计提供理论依据。对比分析当前电池组的传热介质及散热结构,最终采用并行风冷方式,并设计了三种主要散热结构,并对电池组进行流场对比仿真,最终确定了电池组单体布置形式和散热结构。

最后,选择合适的 DC/DC 转换器电路拓扑和电池电容参数,并对系统各部件控制原理进行了研究分析。在循环工况下仿真得到了电池的温升情况,结合复合电源在整车行驶工况下的生热分析,最终确定了复合电源系统总体布置方案及控制。

本文提出的基于热特性进行复合电源系统设计和控制的方法可以很好地改善其工作条件，延长复合电源使用寿命，提高整车燃油经济性，在一定程度上利于实现较好节能效果。

关键词：

复合电源， 电池热特性， 控制策略， 温度场仿真， 结构优化

Abstract

Optimization Design and Control of Dual-voltage HEV Compound

Power Based on Analysis of Thermal Characteristics

Nowadays energy shortage and environmental pollution problems have become increasingly prominent, development of energy-saving and new energy vehicles is put on the agenda, but cost and safety issues of high-voltage power supply group hinder the development of pure electric vehicles. In order to minimize cost to improve vehicle fuel economy and take into account the battery thermal problem influence on their performance, this paper improved existing traditional light vehicles for mild hybrid vehicle with dual-voltage compound power in order to improve vehicle energy efficiency and consider the battery thermal problem, analyzed the battery thermal characteristics, optimized the structure and control to realize compound power system integrated design and control. The main works of this paper are summarized as follows:

Firstly, the effects of temperature on battery performance was analyzed, and starting from the theoretical analysis of the lithium-ion battery heat generation and heat transfer mechanism, made a preliminary analysis of its temperature characteristics based on a battery charge and discharge test, it proved that compound power design based on thermal characteristics is necessary.

Then, analyzed the components characteristics of compound power system and determined the dual-voltage compound power system configuration and basic parameters, built mild hybrid vehicle with compound power simulation platform using the forward vehicle simulation software AVL Cruise, and used Matlab / Simulink to build compound power Control strategy, got charge and discharge currents versus time of battery pack in the whole cycle through a joint simulation, and simulated its dynamics and fuel economy and compared with the original car, the simulation results showed that the control strategy can be formulated well to realize voltage and current control of compound power system and improved fuel economy.

Thirdly, according to the lithium-ion battery heat generation and transfer characteristics, obtained the relevant thermal parameters, defined the boundary conditions and established a three-dimensional lithium-ion battery electrochemical - thermal coupling model, and used computational fluid dynamics simulation software Fluent to simulate battery pack thermal field to provide a theoretical basis for its thermal structure design. Through analysis of the current battery pack heat transfer medium and cooling structure, this paper adopted air cooling and designed three major cooling structures, then made battery pack flow field simulation comparison to finalize the arrangement of battery cells and cooling structure.

Finally, chose a suitable DC / DC converter topology and battery super-capacitor parameters, and control theory of the system components was analyzed. In driving cycle conditions simulated three-dimensional temperature field of the battery pack, combined with compound power thermal analysis in the vehicle driving cycle to determine the compound power system layout and control.

The proposed design and control of compound power system based on the thermal characteristics can improve their working conditions, extend the life of compound power and improve vehicle fuel economy. It is conducive to achieve the goal of fuel economy to some extent.

Keywords:

Compound power, battery thermal characteristics, control strategy, thermal field simulation, structure optimization

目 录

| | |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 绪 论 | 1 |
| 1.1 新能源汽车及车用电源发展现状 | 1 |
| 1.1.1 新能源汽车发展现状 | 1 |
| 1.1.2 车用电源发展现状及对比 | 2 |
| 1.2 复合电源的发展现状及电池热特性研究现状 | 6 |
| 1.2.1 复合电源研究意义 | 6 |
| 1.2.2 复合电源国内外发展现状 | 7 |
| 1.2.3 锂离子电池热特性研究现状 | 9 |
| 1.3 本文研究内容及研究方法 | 10 |
| 1.3.1 本文研究内容 | 10 |
| 1.3.2 本文研究方法 | 11 |
| 第 2 章 锂离子电池热特性分析 | 13 |
| 2.1 温度对锂离子电池性能的影响 | 13 |
| 2.1.1 温度对电池内阻的影响 | 13 |
| 2.1.2 温度对电池充放电性能的影响 | 14 |
| 2.1.3 温度对电池安全性的影响 | 15 |
| 2.1.4 温度对电池寿命的影响 | 15 |
| 2.2 锂离子电池生热机理 | 17 |
| 2.3 锂离子电池传热机理 | 18 |
| 2.4 锂离子电池充放电温度特性 | 21 |

| | | |
|-------|------------------------------|----|
| 2.5 | 本章小结 | 23 |
| 第 3 章 | 双电压复合电源构型选择及建模仿真 | 24 |
| 3.1 | 复合电源系统部件特性分析 | 24 |
| 3.1.1 | 锂离子电池特性 | 24 |
| 3.1.2 | 超级电容特性 | 25 |
| 3.1.3 | DC/DC 特性 | 26 |
| 3.2 | 双电压复合电源系统构型方案选择 | 27 |
| 3.3 | 基于 Cruise 的复合电源仿真平台建立 | 28 |
| 3.3.1 | Cruise 仿真软件简介 | 28 |
| 3.3.2 | 复合电源参数选择 | 29 |
| 3.3.3 | HEV 复合电源 Cruise 仿真平台建立 | 30 |
| 3.4 | 复合电源控制策略制定及仿真 | 32 |
| 3.5 | 本章小结 | 37 |
| 第 4 章 | 基于 FLUENT 仿真的电池组热特性分析 | 38 |
| 4.1 | 计算流体力学及 FLUENT 简介 | 38 |
| 4.2 | 锂离子电池生热建模仿真 | 40 |
| 4.2.1 | 锂离子电池热特性仿真原理 | 40 |
| 4.2.2 | 电池单体参数获取及三维建模 | 41 |
| 4.2.3 | 锂离子电池生热仿真 | 42 |
| 4.3 | 电池组散热仿真分析 | 45 |
| 4.3.1 | 电池组传热介质的选择 | 45 |
| 4.3.2 | 电池组散热风道布置 | 47 |

| | | |
|-------|--------------------------|----|
| 4.3.3 | 不同结构的电池组温度场和流场仿真对比 | 48 |
| 4.4 | 本章小结 | 52 |
| 第 5 章 | 复合电源系统优化设计与控制 | 53 |
| 5.1 | DC/DC 转换器拓扑选择与控制 | 53 |
| 5.2 | 电池组和超级电容参数选择及控制 | 54 |
| 5.3 | 复合电源系统控制 | 56 |
| 5.4 | 复合电源系统总体结构布置 | 58 |
| 5.5 | 本章小结 | 59 |
| 第 6 章 | 全文总结与工作展望 | 60 |
| 6.1 | 全文总结 | 60 |
| 6.2 | 工作展望 | 61 |
| 参考文献 | | 62 |
| 致 谢 | | 66 |

基于热特性分析的双电压 HEV 复合电源优化设计与控制

第1章 绪论

1.1 新能源汽车及车用电源发展现状

1.1.1 新能源汽车发展现状

汽车的发明给我们的生活带来极大的便利,节约了时间成本并且拉近了人与人的距离,经过一百多年的发展,汽车已经从最初的满足基本行驶功能的代步工具发展成为集舒适、安全、环保于一体的智能交通工具。汽车保有量逐年急剧增加,石油资源日益枯竭,2013年末中国汽车保有量达1.37亿辆,并且2013年我国国产汽车平均燃油消耗量为每百公里7.33L,据估计,按当前的石油消耗速度增长,全球石油总量只能满足连续使用40多年^[1]。伴随而来的汽车排放污染问题也日益突出,能源危机与环境问题成为当前汽车发展亟需解决的关键问题。

为了应对能源与环境危机,世界各大汽车生产商积极推出新技术来实现汽车的节能环保,主要有两种类型:一是在原有的燃油汽车基础上进行改进减少污染排放,如取消怠速,制动能量回收等;二是完全改变传统车的能源供给形式。通常所说的新能源汽车不仅包括取消传统燃油供能方式的纯电动汽车、燃料电池汽车(Fuel Cell Vehicle)和液化天然气(LNG)汽车等,还包括至少采用两种能源供能的混合动力汽车。纯电动汽车和混合动力汽车在十九世纪末期已经被制造出,但是受制于当时电池和电机技术的发展,以及发动机技术进步和良好的动力性,首批新能源汽车在历史初期的竞争中败下阵来,但随着能源环境需求及科技进步,新一代新能源汽车应运而生。

目前,混合动力汽车多是在原有的燃油车基础上增加电池等电力供能系统,以实现降低整车燃油消耗。按照混合度(电机功率与整车功率之比)划分,混合动力汽车可分为微混车、中混车和深混车,不同混合度的混动车可以不同程度地降低燃油消耗。当前最成功的混合动力汽车是丰田生产的Pruis,截止2014年底,已在全球卖出超过700万辆,取得这一骄人成绩得益于其优良的燃油经济性,其油耗约为5.7L/100km,并且动力性也能得到保证。混合动力汽车的优点主要表

现在以下几个方面:

- 1) 在市区工况下, 整车需频繁起停, 可消除怠速, 降低燃油消耗;
- 2) 可行驶在纯电动模式, 消除发动机在低速时燃油利用率不高的问题;
- 3) 可以和发动机协调互补, 能使其工作在高效区;
- 4) 制动时, 可以将整车动能转化为电能进行再利用;
- 5) 减少发动机废气排放。

混合动力汽车是在原有传统车基础上进行革新, 能够充分利用原有的技术又能满足当前对车辆排放要求, 是现阶段新能源汽车的重要实现方式。

纯电动汽车完全采用电能作为动力供给, 消除排放污染, 但是为达到高功率需求, 需要采用高压成组电池, 受制于目前电池成本较高、能量密度和功率密度不能兼顾、电池使用存在高压及起火爆炸危险等问题, 纯电动汽车仍然处于起步阶段, 需要大量新技术的革新才能实现其真正应用。燃料电池汽车由于采用氢能源, 反应生成水, 完全无污染, 但是氢气存储及制取、燃料电池散热问题目前也存在技术瓶颈; LNG 汽车采用新型燃料可以有效降低排放污染, 但是存在动力性不足问题。

纵观各种新能源汽车的优缺点, 随着技术的突破, 纯电动汽车和燃料电池汽车将是未来汽车的发展趋势, 但目前采用混合动力汽车是应对环境与能源危机的一种有效解决方案。

1.1.2 车用电源发展现状及对比

车用电源的主要任务是提供整车驱动或电附件使用所需电能, 常用能量密度和功率密度来评价其充放电性能, 能量密度用来评价其电量存储能力, 功率密度用来评价其在整车加速或制动时大功率充放电能力, 其性能的优良直接关乎汽车整体性能, 电动汽车对电源的要求主要有以下几点:

- 1) 能量密度和功率密度高。汽车本身空间有限且整车质量不能过重, 启动加速爬坡时需要提供瞬时大功率并且需要满足一定的续驶里程。
- 2) 良好的一致性。为满足汽车的功率和能量需求, 车用电源单体需要进行不同方式的串并联成组使用, 单体性能的参差不齐将会使整体产生“木桶效应”, 最终影响整车的性能。
- 3) 环境适应性能好。汽车经常工作在各种不同的环境条件下, 车用电源需

要有一定的抗振能力和防尘性能，并且要能经受住高温严寒天气和雨雪天气，具备防水能力。

4) 成本低且循环寿命长。虽然使用新能源车有利于降低汽车污染排放，但是高成本的车用电源会成为阻碍消费者购买的关键问题，消费者关注的更多的是经济利益而不是环境利益，车用电源使用寿命短也会造成相对成本的提高。

目前车用电源主要以可充放电电池为主，包括铅酸蓄电池、镍氢电池、锂离子电池和燃料电池等几种代表类型，当前高功率密度的超级电容也被用作车用电源的辅助动力源^[2]，表 1.1 为三种常用电池的性能对比结果。

表 1.1 三种车用电池特性对比

| 电池类型 | 铅酸电池 | 镍氢电池 | 锂离子电池 |
|------------------------------|---------|----------|-----------|
| 工作温度(°C) | -30~60 | -20~50 | 0~55 |
| 单体电压(V) | 1.7~2.1 | 1.0~1.4 | 2.5~3.7 |
| 能量密度(Wh · kg ⁻¹) | 25~45 | 55~70 | 100~200 |
| 功率密度(W · kg ⁻¹) | 300~500 | 500~1000 | 800~2000 |
| 工作效率 (%) | 85 | 90 | 94 |
| 自放电效率(%/月) | 3~8 | 15 | 1~5 |
| 循环寿命(80%DOD) | 400~600 | 600~1200 | 1000~3000 |
| 记忆效应 | 否 | 有 | 否 |

铅酸电池以 VRLA 蓄电池为主，该类电池完全密封且不会漏酸。与早期的铅酸蓄电池相比，不会有酸雾释放腐蚀汽车零部件，因而在 20 世纪 70 年代迅速形成规模，由于其良好的低温性能，广泛应用于车辆、邮电、计算机等方面，主要的铅酸电池供应商有美国的德尔福和 Electrosources、英国的霍克和日本的松下，美国通用公司生产的 EV-1 和福特公司的 EV Ranger 等曾经使用铅酸电池作为电动汽车的动力源，但是由于使用寿命短，回收困难造成环境污染，以及能量和功率密度较低，重量相对较重。作为汽车动力源，它明显不能满足汽车动力性需求和整车质量控制，但是其良好的低温特性使其成为目前电动自行车蓄电池和车用低压蓄电池的较好选择。

镍氢 (Ni-MH) 电池是 1990 年左右开发出来的，因其不存在重金属污染，被称作“绿色电池”，与铅酸电池相比其能量密度和功率密度均显著提高，循环寿命长，快速充放电性能优良且效率高，因此在 2000 年左右，镍氢电池被选作车用动力电源，全球较早的混动汽车—丰田的 Pruis 和本田的 Insight 均采用的这

种电池, 2000 年上市的第二代 Pruis 采用的是电压 273.6V, 容量 6.5Ah 的 Ni-MH 电池, 可存储电量为 1.5kWh, 效率为 90% 左右, 使用保证期为 7 年; 本田 Insight 采用的是标称电压 144V, 容量 8.5Ah 的 Ni-MH 电池, 该车百公里油耗约为 5.7L。并且最早的两款商业化纯电动汽车即丰田的 RAV4 和本田的 EV Plus 也是使用 Ni-MH 电池作为动力源, 目前国外的主要生产厂商有美国的 Ovonic, 日本的松下和法国的 Saft 等, 国内主要有湖南神舟、江苏春兰和上海万宏。但是镍氢电池也存在不足之处: 自放电率高, 单体电压较低, 存在一定的记忆效应, 高低温性能差, 因此需要在这些方面加以改进, 从而使镍氢电池能更好地应用于汽车产业。

锂离子电池是从 20 世纪 70 年代开始兴起, 由于其无记忆效应, 能量存储能力强, 工作电压高, 充放电性能和效率高, 无环境污染等优点, 因此被看作是未来纯电动汽车能量供给的可靠来源^[3]。常见的是由锂和钴锰镍铁等合金组成的, 目前在 3C 产业中得到广泛应用的是钴酸锂电池, 能量存储能力强和质量轻是其快速应用到电脑和手机等电子设备的重要原因, 最近备受关注的纯电动汽车公司特斯拉 (Tesla) 生产的 Model S 电池包采用的便是日本松下公司的 18650 型钴酸锂电池, 整个电池包含约 8000 个电池单体, 但由于稳定性较差、不耐受穿刺和冲撞等, 接连 3 起电池起火事故也使这些问题暴露无遗, 因此需要采用完善的管理系统确保电源的正常运行。磷酸铁锂电池原料来源广泛、成本较低且无污染, 并且 2008 年东京工业大学和东北大学的联合研究表明, 磷酸铁锂材料可以保证其大电流充放电的安全性, 因此磷酸铁锂电池成功扩张至电动自行车、油电混动车和纯电动汽车领域, 比亚迪的 E6 使用的便是自主开发的容量为 57kWh 的 LiFePO_4 电池, 美国通用的雪佛兰沃蓝达 PHEV 和日本丰田普锐斯 PHEV 也都采用 LiFePO_4 电池, 但是锂离子电池高低温特性也不好, 因此需要采用可靠的高压成组电池热管理系统。

燃料电池是一种利用氢气和氧气化学反应转换为电能的电池, 能量利用率可达 70%, 是普通的发动机效率的两倍左右, 质子交换膜燃料电池具有无污染、噪声低、效率高、能量补给方便快捷等优点, 被视为未来纯电动汽车最理想的动力驱动电源^[4]。美国通用生产的 Electrovan 汽车和戴姆勒-奔驰开发的 Necar-4 汽车, 采用氢气为原料, 一次加氢可行驶 400km 以上。目前阻碍其发展的最大瓶

颈还是其成本、安全性和氢气的贮存技术等问题。



图 1.1 48V 电源在汽车高功率系统中的应用

新能源汽车高压成组电池当前面临的阻碍主要是成本问题，如纯电动汽车比亚迪 E6 虽然可享受国家和地方各 6 万元补贴，但是其折合售价仍然为 25 万元左右，很难满足普通消费者的支付能力，并且相关研究表明，高压成组电池存在一致性和高压安全性问题，限制了其全面普及。而传统车制动能量无法回收，且在市区工况下怠速较多，燃油消耗增加，为了尽可能降低整车电源成本且最大限度地提高整车燃油经济性，20 世纪 90 年代末，为了应对汽车电气化升级及智能化需求，42V 低压电源系统被提出，用于取代原先的 14V 系统，即省去原有的 12V 蓄电池和对应的 14V 电气部件，采用较高电压系统，但是完全取代原有的 14V 电气部件不是一蹴而就的，汽车零部件供应商的电气系统电压升级的成本阻力等因素致使该方案被淘汰^[5]。众所周知，人体所能承受的安全电压应该低于 60V，出于电气安全需求，超过 60V 则必须为相应的连接线等设置绝缘或接地保护。2011 年，德国汽车制造商联合推动了 48V 概念，并制定了 LV148 标准说明，在增加一个 48V 电源的同时，保留原有的 12V 电池，如图 1.1 所示。目前，多个汽车零部件供应商如博世、大陆、舍弗勒等都已加入到该系统相关部件研发中，预计最快能于 2016 年在宝马七系轿车上使用^[6]。长安马自达 CX-5 采用的 i-Eloop 系统则采用高效率的超级电容作为制动能量回收的存储媒介，可以实现快速充放电同时显著减少燃油消耗^[7]。可见，采用超级电容的双电压系统不仅能够满足基本的降低燃油消耗需求，而且还能兼顾成本及安全性问题。

综上所述,采用双电压复合电源的微混车对于降低燃油消耗和应对汽车电气部件大功率需求是可行的,本文将以某一前驱轻型车为基础进行改进,该车具体参数如表 1.2 所示,本文将以该车为基础改进为采用复合电源的微混车,分析双电压复合电源构型并确定其参数。

表 1.2 原车基本参数

| | |
|--------------------------|-------|
| 整车整备质量 (kg) | 1500 |
| 迎风面积 A (m ²) | 2.0 |
| 整车风阻系数C _D | 0.335 |
| 发动机最大功率 (kW) | 70 |
| 变速箱 | 5 挡 |

1.2 复合电源的发展现状及电池热特性研究现状

1.2.1 复合电源研究意义

复合电源是融合使用电池高比能量性能和超级电容高比功率特性的一种组合装置,超级电容具有高比功率、使用寿命长的特点,但是能量存储能力较弱,而电池特性与之相比基本相反,所以将两者组合能兼顾能量和功率需求^[8]。复合电源按照其结构形式可以分为直接并联式和主动控制式两种,主动控制式又分为电池在负载端和电容在负载端两种构型(如图 1.2 所示)。直接并联式结构简单,但是由于电容电量存储能力较低,其端电压在充放电过程中变化较剧烈,而电池和其电压要保持一致,所以电池需要不断地与其进行电压平衡,同时其电压又受电池电压钳制,其高功率能力也相应收到限制,该构型效果较差。对于主动控制式复合电源,当超级电容在负载端时,能够充分利用其高功率能力,电池作为能量源为其补充能量,该构型在汽车启动加速和制动能量回收时可满足大电流充放电需求,超级电容相当于一个电能缓存器,可以迅速存储和释放能量;当电池在负载端时,电池发挥主要作用,超级电容的高功率能力不能得到充分利用,对电池的削峰填谷作用不大。

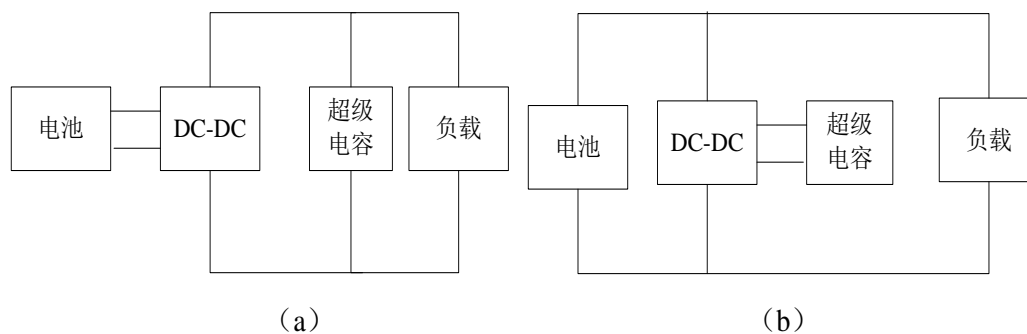


图 1.2 两种主动控制式复合电源方案

当前，锂离子电池能量密度已能够满足汽车需求，但是其大功率充放电能力不足，并且其高低温特性较差，超级电容的引入可以缓解大电流对电池的冲击，并且在一定程度上缓解电池长时间工作而产生的热量累积，改善电池工作条件且满足整车动力要求。

1.2.2 复合电源国内外发展现状

国外汽车生产商和研究实验室对复合电源开展研究早于国内。2007年，美国可再生能源实验室的 Ahmad Pesaran^[9]发表了关于超级电容的研究报告，对其应用于汽车的可行性进行了评估和总结，它的循环使用次数长、低温性能优和功率密度高的优点被看好；2009年 Ahmad Pesaran^[10]等人在先进电容世界峰会上所作的关于超级电容在汽车中的应用和评估的报告中指出：复合电源可以有效降低油耗，并且为了达到期望的性能和循环寿命，其使用过程中的生热问题应当引起注意；2009年美国阿贡国家实验室（Argonne National Laboratory）的 Theodore Bohn^[11]所作的用于插电式混合动力汽车的主动控制式复合电源的总结报告中指出：该构型的复合电源可以很好地兼顾电池和电容各自的性能优势，复合电源系统结构布置如图 1.3 所示；加拿大的 Gregory Wight^[12]等人将超级电容应用于纯电动汽车中，并进行了严寒条件和不同路况的试验，结果表明超级电容有助于提高制动动能利用率，缓解大功率需求对电池的损害，并且受制于 DC/DC 的能量转换效率，复合电源性能在某种程度上取决于循环工况；伊朗的 Masoud Masih-Tehrani^[13]等人将复合电源移植到串联混动客车上，利用动态规划算法制定了基于工况进行优化的功率分配控制策略，仿真结果表明超级电容的引入以及相应控制使电池使用寿命显著提高，并以电池寿命和总体成本为目标进行了优化设

计。Jorge Moreno^[14]等人采用神经网络控制算法进行复合电源能量控制，仿真及试验验证表明复合电源理论效率提高 4.9%，能量利用率能增加 28.7%km/kWh。日本丰田与 Chugoku 电力公司共同开发复合电源系统并应用于马自达 Bongo Friend 车型上进行了测试，结果表明引入电容这个电能均衡设备能使电池的充放电性能表现更佳。

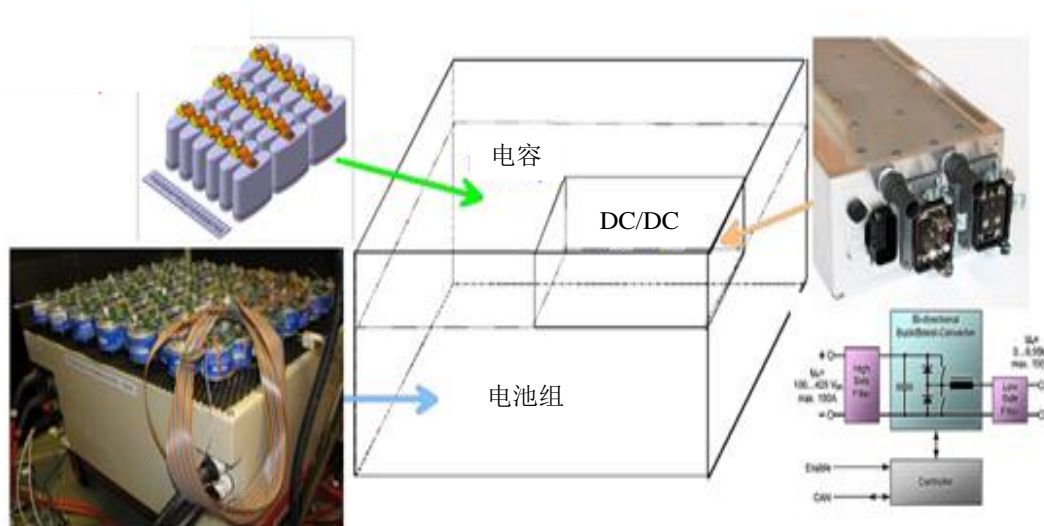


图 1.3 复合电源系统结构布置示意图

国内对复合电源研究相对较晚，通过技术引进和自主研发，已形成了一批研究单位和生产企业。吉林大学混合动力课题组是国内最早从事混合动力汽车方面研究的高校之一，并且在复合电源的参数匹配及控制理论方面做了深入研究，进行了多种构型的台架试验，与一汽合作进行了应用于混合动力客车的复合电源开发并进行了实车调试^{[15][16][17]}；清华大学的王晓峰^[18]等人对碳基双电层电容器进行了深入研究并与镍氢电池组成复合电源进行了脉冲实验测试，表明复合电源系统具有较好的脉冲充放电性能；西安交大电动车研究中心对使用双向全桥 DC/DC 变换器的复合电源系统展开了相关研究，并与博源电动车公司合作将其应用于微型电动车，实验表明超级电容的引入使微型电动汽车动力性和燃油经济性明显提高，特别是在急加速和频繁制动工况^[19]；2013 年末，宇通客车开发了采用“睿控”技术的新能源客车，真正通过自主研发和创新将复合电源系统应用于混合动力客车和纯电动客车等车型中，比传统的燃油车节约能源 30%以上，污染物排放下降 90%多^[20]；天津松正电动汽车技术公司设计开发了应用复合电源的混合动力和纯电动公交动力系统解决方案，节能程度、稳定性和安全性等都取

得了不错的效果。

总而言之,受制于电池功率密度不足的影响,超级电容的引入具有重要意义,国内外对于复合电源的研究主要侧重于构型分析及控制仿真优化,协调两者的功率分配,对于高压大容量复合电源,真正应用于实车又受制于其成本及整车空间,目前多应用于客车。虽然引入超级电容能在一定程度上缓解充放电电流对电池的冲击,但是电池生热问题一直是困扰电池使用的关键问题,超级电容正常工作范围比较宽,一般为 $-20\sim 60^{\circ}\text{C}$,并且相关研究表明,其工作过程中生热量不大^[21],目前,复合电源优化设计多是基于其成本和寿命进行分析,而温度是影响其性能的重要因素,可以从温度场分析入手,进行复合电源的优化设计和控制。

1.2.3 锂离子电池热特性研究现状

由于汽车工作环境的不同,车用锂离子电池会工作于不同的温度区间,相关的研究及实车实验表明锂离子电池虽然能够满足能量需求,但是其生热问题阻碍了高压电池组的使用,锂离子电池热特性研究是有必要的,目前国内外在这方面的研究主要集中在电池热模型建立和温度分布仿真以及温度对其性能的影响等几个方面。

国外对锂电池热特性研究比较早且深入,特别是电池生热模型及相关参数测取。电池生热仿真模型一种是按其反应原理划分,另一种则是根据其几何维度划分^[22]。1985年美国的 Bernardi D^[23]等人提出电池生热率数学模型,该模型认为电池生热主要是由焦耳热和可逆反应热两部分组成,是目前受到普遍认同的一种计算模型;美国的 Yufei Chen 和 James W.Evans^[24]建立了锂聚合物电池的三维传热模型,并且以保证电池工作温度合适和温度一致性为目标进行电池热管理系统设计,仿真结果表明电池热导率是影响其热性能的关键因素,该模型可以用于研究不同布置形式的冷却风道和电加热器的效果以便选择合适的加热强度和绝缘材料;美国可再生能源实验室的 Gi-Heon Kim 和 A. Pesaran^[25]利用 CFD 仿真建立了锂离子电池三维模型,研究了空气冷却、直接与非直接接触的液体冷却对电池散热的效果,结果表明获取电池包内热对流和电池热阻对于指导设计 BTMS 是有必要的;意大利的 Donghwa Shin^[26]等人引入超级电容研究电池的热管理,将超级电容作为一个功率缓存装置或者负载波动过滤设备,建立了一个简单的并联电池-电容混合架构并采用双模式放电策略,仿真结果表明电池温度能确保在

合理区间内。丰田的电动汽车采用并行通风方式进行冷却，如图 1.4 所示，取得了较好散热效果。另外，还有从电流分布密度和电极布置等角度进行研究的^[27]。

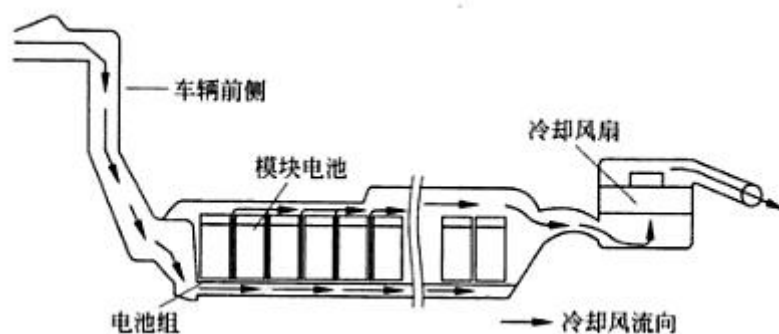


图 1.4 丰田纯电动车电池包风冷系统

国内对于锂离子电池热特性也已稳步展开，清华大学的李哲^[28]研究了磷酸铁锂电池的温度特性，通过实验和仿真得到了温度对电池性能的影响状况，魏解元^[29]基于电池温度场仿真提出了一种结构优化方案，并进行了 180Ah 磷酸铁锂电池组集成技术的研究；同济的陈磊涛^[30]等人仿真了混动车电池组温度场分布情况，通过调压法和调速法改变电池单体间隙和集流板倾斜角度进行热管理系统设计，有效控制了电池组温差；武汉理工的车杜兰^[31]基于电池包的热特性进行了 Fluent 仿真，并进行了加热和散热系统设计；吉林大学的沈帅^[32]基于磷酸铁锂电池热特性采用并行通风方式散热和电加热膜加热进行电池包仿真设计，并进行了温控系统开发和试验验证。华南理工大学的陈梓铭^[33]对混合动力公交客车锂离子动力电池组进行了热特性分析并进行了并行通风散热结构设计：一种是在出风通道的壁面设置泄风口，另一种是采用交替变换进风方向的风冷散热，后者对于保持电池组温度一致性具有较好的效果。

降低电池组温度可采用两种方式：一是采用不同冷却方式和不同传热介质进行散热；二是通过减少电池的工作时间来降低其生热量，复合电源的使用可以很好地实现这一目标，因此可以基于热特性进行复合电源优化设计与控制是有必要和可行的。

1.3 本文研究内容及研究方法

1.3.1 本文研究内容

本文将首先研究当前新能源汽车发展趋势以及车用电源优缺点，对目前阻碍

其发展的关键问题进行分析总结。为了改善整车燃油经济性，并考虑电池的生热问题对其使用性能的影响，本文将原有的传统轻型车改进为采用双电压复合电源的微混车，以提高整车能量利用率。根据整车循环工况仿真结果分析电池生热特性，从构型设计和控制两方面出发，实现复合电源系统的集成化结构设计。本文研究的主要内容有：

- 1、研究电池温度对其使用性能的影响，分析锂离子电池生热及传热机理，并且基于实验数据对其充放电过程中温度特性进行初步分析。
- 2、分析研究复合电源系统部件特性，确定双电压复合电源系统构型，基于原轻型车参数及仿真模型，建立采用复合电源的微混车仿真平台，制定复合电源控制策略，对其动力性及燃油经济性进行仿真对比。
- 3、对锂离子电池进行三维建模，将实际电池生热问题进行模型转化，仿真并分析电池组充放电过程中的温度场，为其散热结构设计提供理论依据。对电池包散热结构进行分析，优化电池组结构并仿真。
- 4、对复合电源系统各部件结构及控制进行分析，并对复合电源系统总体结构布置进行初步设计。

1.3.2 本文研究方法

图 1.5 为本文总体技术路线。具体研究方法为：

- 1、基于对电池热特性及复合电源各组件性能的研究，确定整车参数及复合电源总体参数，利用 AVL Cruise 搭建整车仿真平台，并利用 Simulink 搭建复合电源控制策略，联合仿真得到整个循环过程中电池包的电流随时间变化的历程曲线。
- 2、根据锂离子电池生热和传热机理建立三维数学模型，定义其边界条件及相关热物性参数，利用 Fluent 对电池包进行温度场和流场仿真，确定合适的散热通道，及电池单体布置形式。
- 3、选择合适的 DC/DC 电路拓扑及电池电容结构参数，根据整车循环工况过程中电池生热仿真情况，确定复合电源系统结构方案。

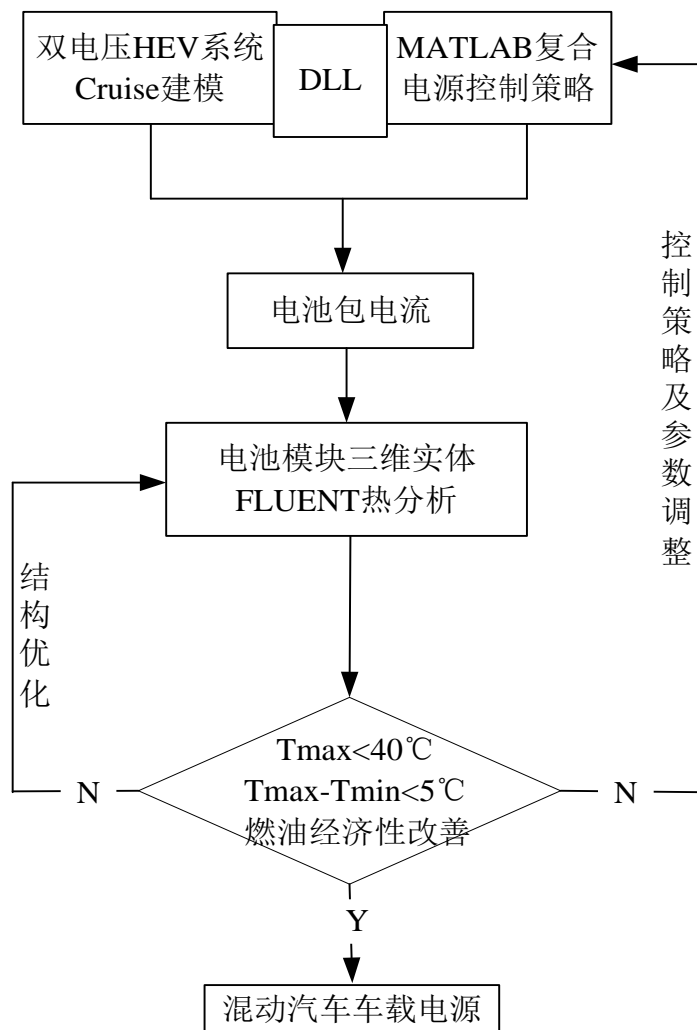


图 1.5 本文技术路线

第2章 锂离子电池热特性分析

2.1 温度对锂离子电池性能的影响

理想情况下,电池应当工作在一个使电池使用性能和循环寿命最佳的温度区间内,但由于电化机理不同,不同类型的电池期望的工作温度范围也会有所差异,通常电池最佳工作温度区间远小于整车选定的工作区间。例如,锂电池的期望工作区间是 20℃到 40℃,然而整车的工作区间可能在-30℃到 60℃^[34]。除了考虑电池包的绝对温度,电池包温度分布不均也应当引起关注,整包中模块间温度的差异会导致充放电性能的不同,最终影响整体性能和寿命。

温度是当前锂离子电池系统中控制的最关键因素,也是关乎电池使用性能的主要影响因素,具体而言,温度会影响电池的内阻,充放电性能,安全性和寿命等。

2.1.1 温度对电池内阻的影响

电池使用过程中,电荷在电池本体内移动会承受阻力作用,通常用内阻表示。是最为关键的特性参数之一,它是评价自由电子和 Li^+ 在正负极间移动容易与否的主要标准,主要由两部分构成,一是欧姆内阻,二是极化内阻,通过对电池生热机理分析可知,电池的生热量中焦耳热占很大比重,而内阻是引起焦耳热的主要原因。锂离子电池内阻的增加,会引起其在使用过程中电压下降,充放电容量降低。电池自身结构形式是一定的,只能从温度和电池容量入手来研究对内阻的影响,图 2.1 是不同荷电状态的 LiFePO_4 电池在-10℃到 50℃几种环境下与充放电内阻的关系,由图可知,相同温度下,在电池电压平台期,即 SOC 约处于 40%到 80%之间时,磷酸铁锂电池内阻基本维持恒定,而在 SOC 小于 20%时,其内阻值迅速增加。温度越低,其内阻值越高,主要是由于低温下电解质活性变低影响锂离子和自由电子的移动。

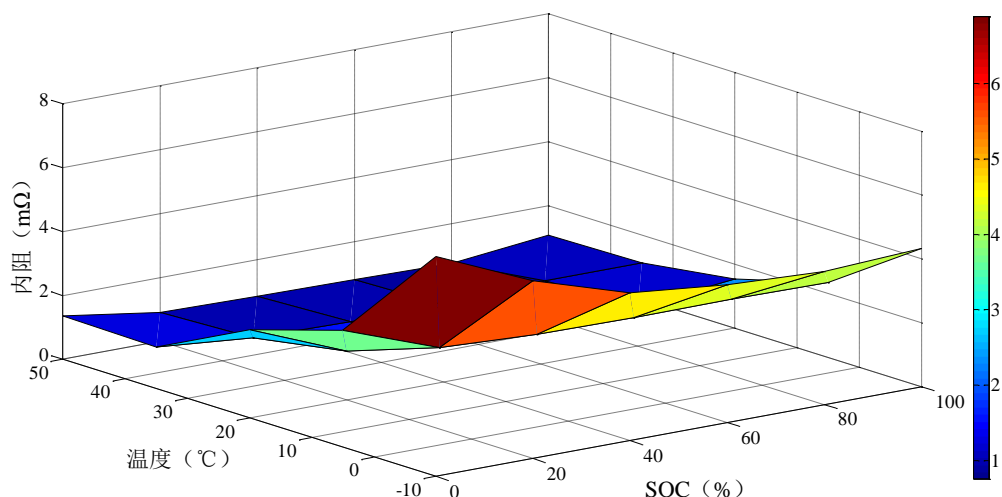


图 2.1 磷酸铁锂电池内阻与温度关系

2.1.2 温度对电池充放电性能的影响

温度对电池充放电性能的作用主要体现在工作电压和容量上。

电池在充放电过程中，由于自身内阻的存在，有电流流经时，内阻分压导致电池实测电压会在 OCV 值的基础上有所浮动，当电池温度越低时，其内阻值越高，内阻分压作用越强，会导致电池未充满电时电压已达到上限值，即电压的虚高^[35]。图 2.2 为某三元锂离子电池在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$ 区间以 0.5C 放电时的电压变化情况，随着温度的升高，电压平台期相应抬升，可放电容量也随之减少，并会影响其对 SOC 的有效精确估计，导致不能准确预估实车的续驶里程。

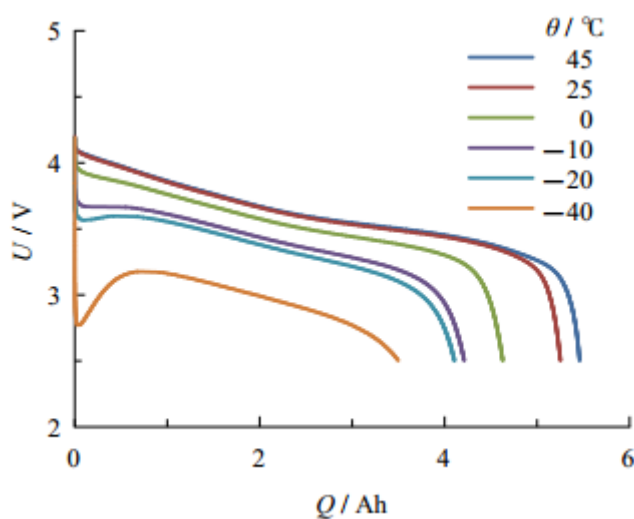


图 2.2 锂离子电池在不同温度下放电电压变化曲线

同一型号的酸铁锂电池以同种方式充满电，充分静置后，置于不同温度条件

下放电至截止电压（2.5V），计算其放出的容量，图 2.3 为磷酸铁锂电池电量随环境温度变化情况^[28]。由图可知，当温度降到 0℃ 以下时，电池可放电容量迅速降低，而高于 20℃ 后电池基本能达到满充满放，所以应尽量避免电池处于低温条件下工作。

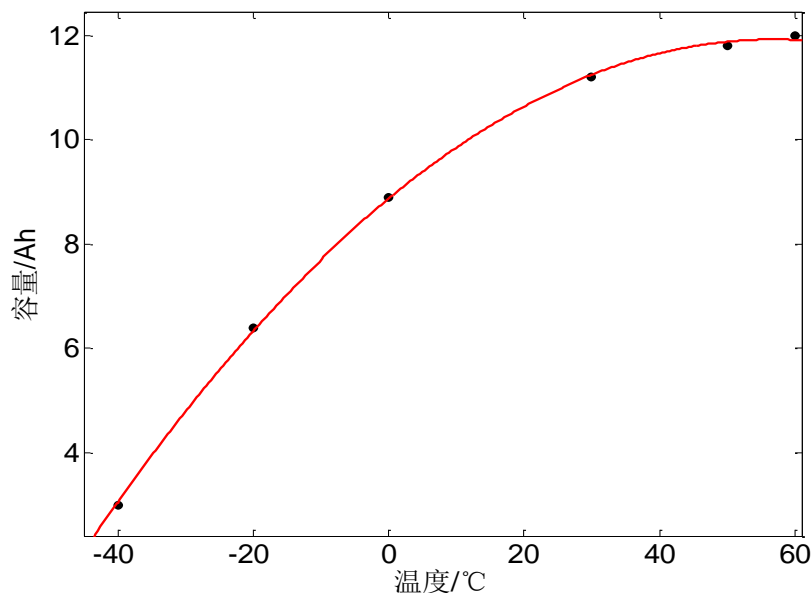


图 2.3 磷酸铁锂电池容量随环境温度变化曲线

2.1.3 温度对电池安全性的影响

锂离子电池的安全性不仅受高压大电流影响，还与温度有密切关系，特别是当电池处于高温条件下工作时，会造成热失控，引发起火甚至爆炸^[36]。

电池内部传热速度虽然比较缓慢，但能够应对短期的热负荷。若热冲击所引起的温度较高，则会致使 SEI 膜在锂离子电池内部分解，电解质和富含 Li^+ 的负极产生化学反应，使电池处于危险状态，若热量不能及时散出，则会导致锂离子电池温度持续上升，隔膜也逐渐熔化^[37]。内部发生短路，电池内部温度快速升高，致使正极材料发生反应，最终引发起火爆炸等危险事故，所以控制电池包温度特别是高温条件下的散热是十分有必要的。

2.1.4 温度对电池寿命的影响

电池的循环寿命很大程度上受工作温度的影响，工作于高温条件下的电池其健康度（SOH）会受到严重的损害。研究表明，锂离子电池循环寿命与温度关系

如图 2.4 所示。据报告，沙漠中使用的纯电动汽车相比温带地区使用的纯电动汽车，10 年之后电池健康度低 12%^[38]。可见温度是决定其使用寿命的重要因素，一般而言，温度对产品失效的促进作用符合 Arrhenius 方程：

$$\frac{dM}{dt} = Ae^{-E_a/kT} \dots\dots\dots(2.1)$$

其中： $\frac{dM}{dt}$ 为化学反应速率； E_a 为反应的活化能，单位为 J； k 为玻尔兹曼常量， $k=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ； T 为热力学温度 (K)； A 为阿伦尼乌斯常数。

电池在连续充放电使用过程中，其寿命除受温度影响之外，还受电流的影响，所以可使用带有电流函数的改进公式表示电池电量衰减情况^[39]：

$$\frac{dM}{dt} = f(I)e^{-E_a/kT} \dots\dots\dots(2.2)$$

假设电流及温度与时间无关，对上式两边积分得：

$$C_r = f(I)e^{-E_a/kT} t_c \dots\dots\dots(2.3)$$

其中： C_r 为容量衰减率； t_c 为电池使用循环寿命。

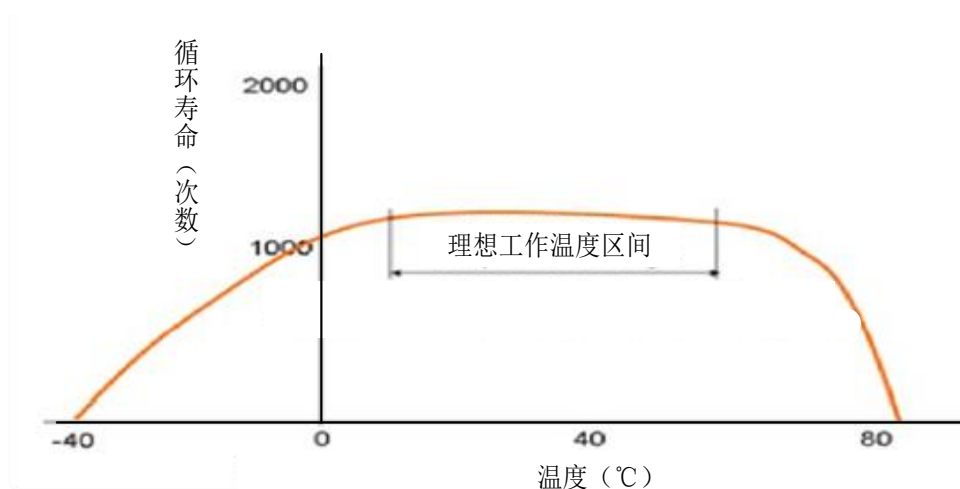


图 2.4 锂离子电池循环寿命与温度的关系曲线^[40]

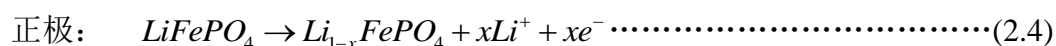
以上分析主要是基于电池平均温度高低而言的，实际电池包为了满足高电压、高容量的要求，需要进行串并联成组使用，使用的单体电池数量会很多，整包体积也会比较大，整包电池间会出现温度不一致现象，且电池单体内部电芯与外表面，正负极柱附近也会存在温度不一致^[41]，这些都会加剧温度对电池性能的影响，目前车用电池包整体设计多是基于恒流充放电温度场和流场的仿真，基于实际工况的电池包温度场仿真对于指导电池包设计是可行且有必要的。

对于电池生产者而言，电池热管理系统的目标是使电池包工作在最优的平均

温度区间并保证温度分布的一致性^[42],但是,这并不能满足汽车生产商的要求,电池热管理系统还需要布置紧凑,轻量化,成本低,易封装并且便于安置,除此之外,系统必须可靠并且易于维护。目前,电池包设计都会考虑散热,像冷却风扇等冷却装置被广泛应用以增强电池的可靠性和提高电池使用寿命,通过降低热阻来增强冷却效率的方式有时不能很快地达到降低温度以避免热失控情况的目标。基于减少热源生热量的方法如通过加入非工作区间能够很快的地降低热量累积。因此基于热特性分析进行电源优化设计是有必要的。

2.2 锂离子电池生热机理

锂离子电池是利用电解液实现 Li^+ 和电子在正负极之间转移来工作的可充电电池,在整个过程中, Li^+ 在正负极之间反复转移,实现电能与化学能的相互转换,充电时, Li^+ 从正极材料脱嵌后嵌入负极材料,此时表现为高 Li^+ 态,放电过程是充电过程的逆反应。其中 LiFePO_4 电池充电时内部反应方程式如下^[43]:



锂离子电池电量存储能力强,充放电平台期和使用寿命长,使其成为当前新能源汽车动力供能装置,然而其温度特性较差,高低温工作时会严重影响其性能。其中环境温度是一方面的原因,但其自身生热问题也是很关键的影响因素,充放电过程是 Li^+ 在正负极材料之间脱嵌嵌入的往复运动,即化学能和电能之间的转化过程,在这期间难免会发生热量损耗。因此开发 BTMS 应当从研究电池组的生热机理入手。

目前对于电池生热机理方面的研究,受到普遍认同的是加州理工大学的 Bernardi D^[22]等人于 1985 年建立的电池生热速率数学计算公式,该模型认为电池生热主要是由焦耳热和可逆反应热两部分组成,该模型公式如下:

$$q = \frac{I}{V_b} \left[(U - U_0) + T \frac{\partial U_0}{\partial T} \right] (J/m^3s) \cdots \cdots (2.7)$$

其中: q 为电池微元体在单位时间内的生热量,即生热速率 (W/m^3); I 为

电池的工作电流，充电为正； U 和 U_0 分别为实际电压和开路电压； T 为电池温度， $\frac{\partial U_0}{\partial T}$ 为温度系数； V_b 为电池单体体积。

电池生热速率公式可以为计算电池生热提供辅助分析，要获得电池生热速率主要还是通过实验分析方法获得，主要根据生热原理估算其生热量。锂离子电池工作时释放的热量基本上分为以下三个方面，分别是^[44]：

1) 化学反应热 Q_r ：电池工作过程中， Li^+ 不断进行脱嵌和嵌入的化学反应过程中所释放的热量，充电为负。

2) 极化热 Q_p ：在电池工作过程中，在电池正负电极处发生极化作用，即电极实际电压偏离平衡电压，电池的端电压明显不等于 OCV 值，由该电压差导致产生的热量就是极化热。

3) 焦耳热 Q_j ：电池正负极材料及电解质等本身存在着欧姆内阻，当电池有电流通过时，由焦耳定律可知，产生与电流的平方成正比的热能，即焦耳热。

4) 副反应热 Q_s ：副反应热是电池内部正负极材料和电解质发生相变、自放电及电池过充过放时发生副反应而产生的热量。在电池的实际使用中，由于副反应一般较缓慢，释放的热量很少，可以不予考虑。

电池工作过程中产生的全部热量 Q 可表示为：

$$Q = Q_s + Q_r + Q_j + Q_p \dots\dots\dots(2.8)$$

锂离子电池的生热是一个复杂的过程，其中焦耳热是电池生热量的主要组成部分，当电池工作在高温或低温条件以及性能衰退时，其他几部分生热量会显著增加，因此需要防微杜渐，不仅要从初期使用及电池设计抓起，而且要尽量控制电池包各单体性能一致，这就需要采用行之有效的电池热管理系统和电池使用策略，使电池各单体工作条件一致。

2.3 锂离子电池传热机理

由传热学原理可知锂离子电池热传递方式有以下三种，分别是：热传导，热辐射和热对流^[45]。电池包充放电过程中热效应须满足热量守恒：

$$Q_w = Q_A + Q_i \dots\dots\dots(2.9)$$

其中： Q_w 为电池工作时释放的总热量； Q_A 为电池自身吸收的热量； Q_E 为电池与外界环境互换的热量。

Q_A 主要与电池自身组成材料特性有关，如正负极材料、电解质及外壳的质量 m_i 和比热容等 C_{pi} ，若某时间段内，电池吸收热量的多少表现为电池温度变化量 ΔT ，则：

$$Q_A = \left(\sum_{i=1}^n m_i \Delta C_{pi} \right) \Delta T = Q_w - Q_E \cdots \cdots (2.10)$$

由于电池内各部分材料性质不同及散热条件不同，难免存在温度差，此时电池内部同一材料中热量会从高温处传到低温处，或温度高的材料热量传给温度低的材料，这主要是通过热传导实现电池内部热量均衡的，热传导是热量在系统内部不同位置或不同系统间进行转移的现象，此时系统各部分不发生相对位置变化，只是单纯依靠微粒的热运动生成的热能进行转移，这是电池本体内的主要热传递方式。大量的导热实际问题经过总结服从 Fourier 定律，又叫做导热基本定律：

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx} \cdots \cdots (2.11)$$

其中： q 为流经面积微元的热流量，即热流密度 (W/m^2)； Φ 为热流量 (W)； A 为导热面积 (m^2)； λ 为热导率 ($W/(m \cdot K)$)，是评价物体导热性能好坏的重要因数，负号表示热传导方向与温度降低方向相同； T 为温度 (K)。

当电池包箱体与外界环境绝热时，电池自身产生的热量不能迅速导出，致使热量累积，而其自身所能吸收的热量是一定的，所以会导致其处于一个高温环境，影响其正常的电能与化学能的转换，因此当外界环境温度不低于其正常工作温度时，应尽量通过电池与外界环境传热进行热量的转移或减少电池的使用来防止电池热失控。

电池与外界环境之间实施热量转移是电池包维持热量平衡的重要途径，仍然是通过热传递的三种方式进行。

外界环境与电池进行热传导主要取决于传热介质的选择，一般而言，金属导体导热率最高，液体次之，气体最小。当环境温度太低时，给电池单体进行电阻丝加热主要依靠的就是热传导，也有部分热辐射起作用。

热辐射是由于热的原因产生辐射能的现象，导热和对流只能在有物质存在的

情况下发挥作用，而热辐射可以在真空中传递且效率最高，并且热辐射过程中伴随着能量的转换。计算实体的热辐射量可使用斯特凡-波尔兹曼（Stefan-Boltzmann）定律的经验修正式，对于像电池组这样的实体，可简化成表面积为 A_1 ，体表温度为 T_1 ，发射率为 ε_1 的电池被置于一个体表温度为 T_2 的空间里，则电池与空气表面间的辐射换热量运算公式如下：

$$\Phi = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \cdots \cdots \cdots (2.12)$$

其中： σ 为斯特凡-玻尔兹曼常数，数值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ； ε_1 为物体的发射率（或称黑度， $\varepsilon_1 < 1$ ），和其外表状态及类型相关。

热对流是指宏观上流体的运动使各部分产生相对位置的变化，进而使温度不同的各部分流体自由混合所产生的热传递方式。在工程实践中，我们常关注的问题是流体通过物体表面时，两者间的热量交换过程，这就是对流传热。热对流常用 Newton 冷却公式进行描述：

$$q = \lambda h (T_w - T_f) \cdots \cdots \cdots (2.13)$$

其中： q 为热流密度 (W/m^2)； λ 为常数，流体被加热为 1，流体被冷却为 -1； h 为表面传热系数，单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ； T_w 为壁面温度； T_f 为流体温度。

目前电池传热主要用到的传热介质就是空气和水与乙二醇混合液。根据是否对流体施加外力驱动，将其分为自然对流和强制对流两类^[46]。当生热量较低或外界温度较低时，自然对流完全可以满足热管理需求，而当电池工作条件恶劣时，采取强制对流是有必要的。对流传热系数 h 大小与很多参数有关，如流体的物理性质（热导率 λ 、粘度、密度 ρ 、比热 C_p 等），热量交换表面的形状、布置形式、尺寸和流速等。研究对流传热的关键问题就是运用实验或者理论分析的方法得到各种条件下的对流换热系数的计算表达式。

由牛顿冷却公式可知，热流量与接触面积、流体物性参数、流速等有关，所以研究流体流动性质，对于电池包的传热至关重要。电池组中的传热介质速度与声速相差很大时，常被看作是不可压缩流体。流体遵从的控制方程主要有以下三个^[45]：

质量守恒方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(2.14)$$

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \rho\left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) &= F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \\ \rho\left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) &= F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \\ \rho\left(\frac{\partial w}{\partial \tau} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) &= F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \end{aligned} \dots\dots\dots(2.15)$$

能量守恒方程:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + w\frac{\partial T}{\partial z}\right) = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \dots\dots\dots(2.16)$$

其中: u 、 v 、 w 和 F_x 、 F_y 、 F_z 依次表示 x 、 y 、 z 方向上的分速度和体积力分力; ρ 为流体密度; p 为流体微元体上的压力; c_p 为比热容; λ 为对流换热系数; T 为热力学温度; τ 为时间; η 为粘度。

电池传热主要分为内部自身传热和外部环境传热,对于电池自身而言,对流以及辐射的影响基本可以忽略,热传导在热传递过程中起主要作用,且电池温度变化与其材料的自身性质也有关,比热容越高,质量越大,则热量容纳能力越强,电池温度增加量越小。外部环境传热主要以热对流为主,外部环境交换的热量越多越及时,电池包温度变化越小,但是需要选取合适的换热功率,既不浪费过多能量,又能保证电池工作在适宜温度区间。

热量传递的三种方式在实际问题中一般不会单独出现,都是三者协同作用,只不过是某一种方式在电池系统的热传递过程中发挥主导作用,关键的是根据电池生热和传热原理、电池材料特性和传热介质的性质,组合选取合适的传热介质并制定合理的热交换通道。

2.4 锂离子电池充放电温度特性

锂离子电池种类众多,由于磷酸亚铁锂价格低、安全性好、不污染环境等优点,目前被大量使用,本文选用磷酸铁锂电池进行相关研究,采用 Digatron 公司

的 DLS 进行温度采集，温度采集探针主要布置于电池组表面及间隙处（如图 2.5 所示）。图 2.6 是某成组电池 0.5C 恒流充满放过程中电流变化曲线，图 2.7 为不同采温点处温度变化情况。其中在充满电之后（7200s 左右）有短时间暂停进行电量均衡，环境温度基本维持在 24 度左右。



图 2.5 磷酸铁锂电池充放电温度监测实验

由图 2.7 可知，各温度采集点处温升的趋势是：伴随充电时间的推移，温度逐步上升，充电末期达到最高；放电开始时，温度先升高，到中后期略有下降，然后快速上升，到放电末期温度达到最高。温升的总体趋势是上升的。由于该过程中电池处于开放环境，正负极直接暴露于外界环境，所以其温度相对较低，该磷酸铁锂正极柱为铝箔，负极柱为铜箔，而铝的内阻高，所以正极温度高于负极，在实际的密闭环境下，正负极柱应高于电池本体温度。

在该电池充放电温度采集实验过程中，并采用了手持式的红外成像仪进行整包温度场的分析对比，电池单体间隙处温度明显高于电池单体外表面，说明自然对流条件下的电池包热量累积问题需要及时解决。考虑到电池内部温度会高于缝隙边缘处温度，而且此成组模块在“0.5C 充放电”、“开放环境”、“自然对流”条件下电池组表面间隙温度已经在 37 度以上，与环境最大温差已经也在 15 度以上。所以对于密闭环境、极端使用条件和高低温环境使用的电池包而言，电池的生热和传热问题更为严峻，如果不采取有效的热交换措施，就不能使锂离子电池工作在最佳工作温度区间，而且处于电池组中间位置的电池由于热量累积比外围电池单体严重，电池单体之间会存在明显的温差，从而使整个电池包温度分布呈现不均匀现象。电池组充放电过程中的生热量过高和温度不一致是 BTMS 设计

需要解决和应对的关键问题。

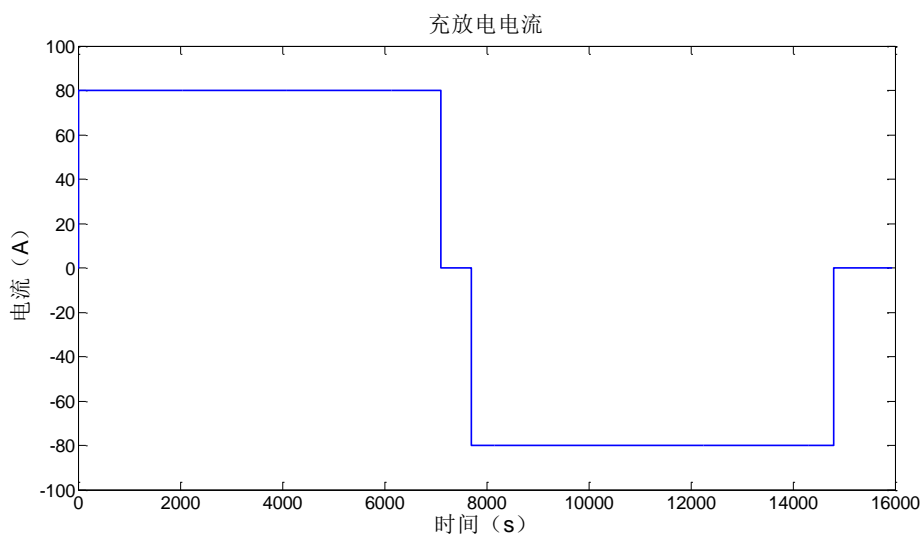


图 2.6 磷酸铁锂电池充放电电流

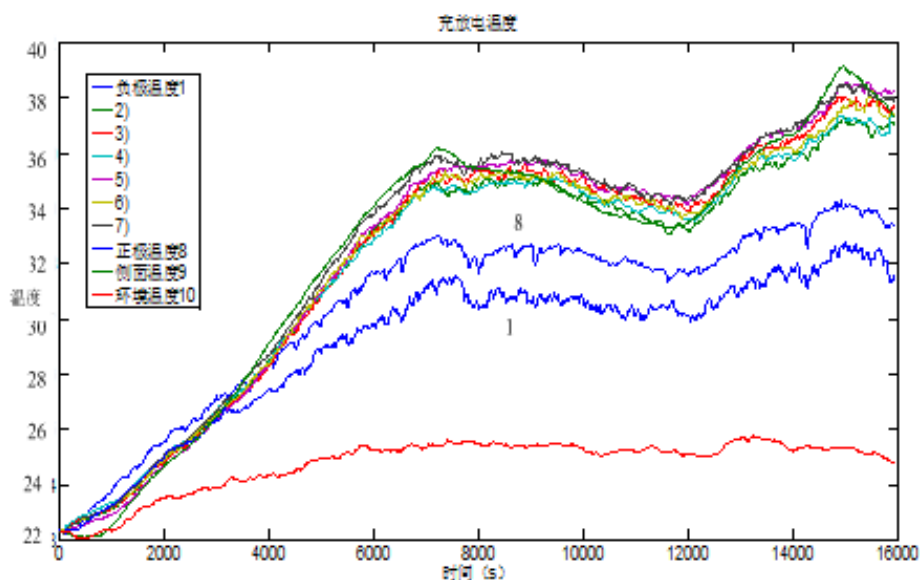


图 2.7 磷酸铁锂电池充放电过程中测温点温度变化曲线

2.5 本章小结

本章主要首先研究了温度对锂离子电池使用性能的影响，然后从理论上分析锂离子电池生热及传热机理，最后结合实验初步分析锂离子电池的工作时的温度特性，为基于热特性分析的电池组整体设计提供理论和实践指导。

第3章 双电压复合电源构型选择及建模仿真

3.1 复合电源系统部件特性分析

复合电源系统主要包含电池、超级电容和 DC/DC 转换器三大部件，三者之间不同连接类型可构成不同的复合电源方案，其对应的组合性能也会有所不同，而各个部件的性能对其整体性能也有很重要的影响，因此有必要对复合电源系统各部件特性进行分析，从而为其参数选择和控制提供依据。

3.1.1 锂离子电池特性

锂电池与传统的铅酸蓄电池相比，由于反应机理不同，在其充放电过程中存在较长时间的平台期，且放电过程中的平台期电压值小于充电过程，而且在充放电初期和末期存在电压跃变，且电压跃变值随着电流的增大而增大，静置后电压会回落到一个稳定值。图 3.1 为某 160Ah $LiFePO_4$ 电池以 0.5C 充放电时电池电压随时间的变化曲线。当电池单体电压偏高或偏低时，会对电池造成性能损坏，影响其使用寿命，所以锂电池在使用过程中一般都将其工作区间定为 SOC 在 0.4 到 0.8 之间，防止因单体状态不一致而引起电池过充或过放。另外其能量密度高的优点也利于其电压保持在一个较稳定的区间，但是当大电流脉冲充放电时，由此引起的极化电压会导致电压快速跃变，所以应该控制电池在使用过程中不能频繁地大电流充放电，电流最好确保小于 3C 且变化不要太剧烈。

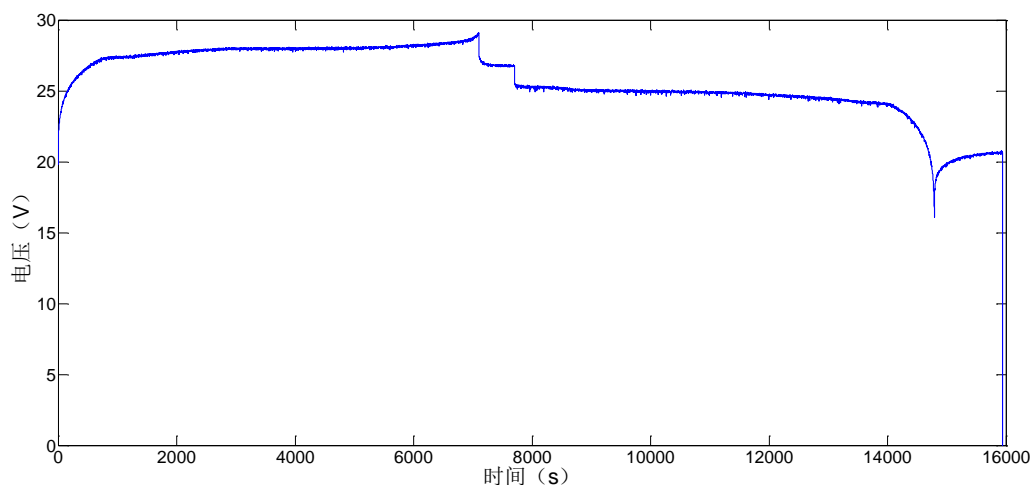


图 3.1 160Ah $LiFePO_4$ 电池 0.5C 充放电电压曲线

3.1.2 超级电容特性

超级电容作为一种利用静电极化电解溶液进行电能存储的装置，过程中不涉及化学反应，高度可逆，因此充放电循环寿命可达几十万甚至百万次，超低温特性好，温度范围宽 $-40^{\circ}\text{C}\sim+70^{\circ}\text{C}$ ，图 3.2 为超级电容容量（Capacitance）和直流等效串联内阻（DC ESR）随温度变化百分比（相对于 25°C ），其功率性能优于电池，但是其比能量较低，与容量以及电压的平方均成正比例，容量一方面与其自身电荷存储能力有关，另一方面与超级电容串并联成组有关。

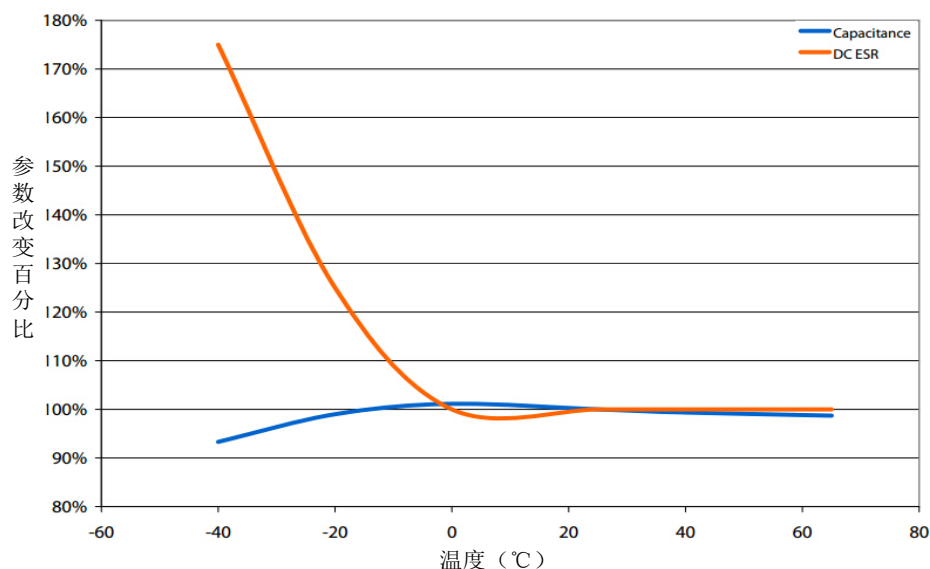


图 3.2 超级电容 DC ESR 和容量随温度变化百分比

电容串联时，超级电容成组容量 C_{sys} 和串联模块容量 C 的关系如下式：

$$\frac{1}{C_{sys}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \frac{n}{C} \Rightarrow C_{sys} = \frac{C}{n} \dots\dots\dots(3.1)$$

电容并联时，超级电容成组容量 C_{sys} 和并联单体容量 C 的关系如下式：

$$C_{sys} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = nC \dots\dots\dots(3.2)$$

其中：上述两式 $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$ 。

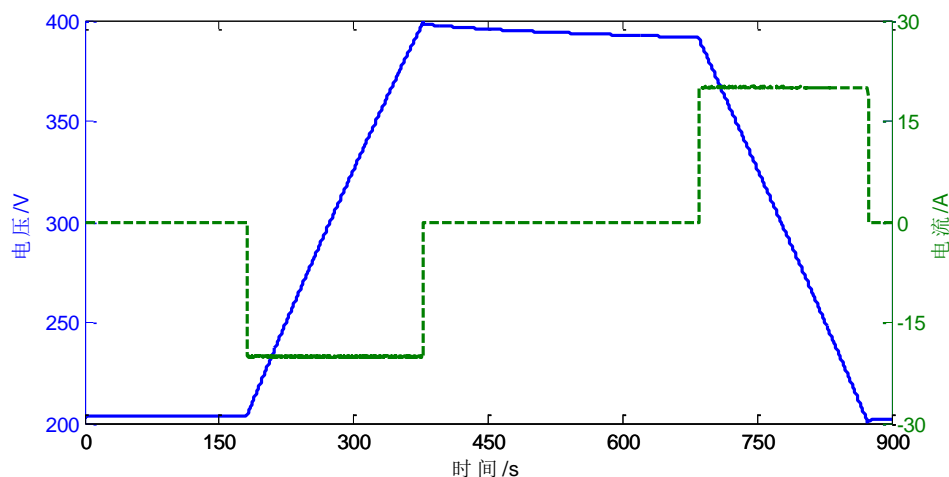


图 3.3 超级电容充放电过程中电压曲线

图 3.3 显示的是高压超级电容器脉冲充放电过程中电压变化情况，由图可知，其端电压与电流成线性关系，由于其容量较低，所以短时间能够充满电，并且可迅速大电流放电，超级电容本身内阻非常小，所以其充放电效率较高，热损耗较低，可用作制动能量回收和启动加速过程中大电流充放电缓冲设备。

3.1.3 DC/DC 特性

在主动控制式复合电源系统中， DC/DC 转换器起着两个能量源的能量均衡作用。按照有无变压器分为隔离式和非隔离式两种^[47]：隔离式 DC/DC 的两电压端存在完全的电压隔离，利用变压器的电磁耦合作用进行能量的传递；非隔离式 DC/DC 的两连接端之间无变压器，无隔离。双向升降压式的 DC/DC 可以随时根据电池和电容状态实时控制 DC/DC 工作在升压、降压模式，实现两者能量的自由均衡，为下一时刻充分发挥电池电容的充放电能力提供可能。双向 DC/DC 转换器处于升压状态时，低压端电源放电，高压端电源充电，降压模式则与此相反。图 3.4 为 DC/DC 转换器的工作效率曲线，由图可知其效率开始随能量转换功率增加而增加，之后趋于稳定维持在 96% 左右，随高低压端电压比的增加而降低。另外 DC/DC 转换器功率越高其电磁干扰越强，应处理好电磁干扰屏蔽，以确保其正常进行工作模式的切换和功能的实现。

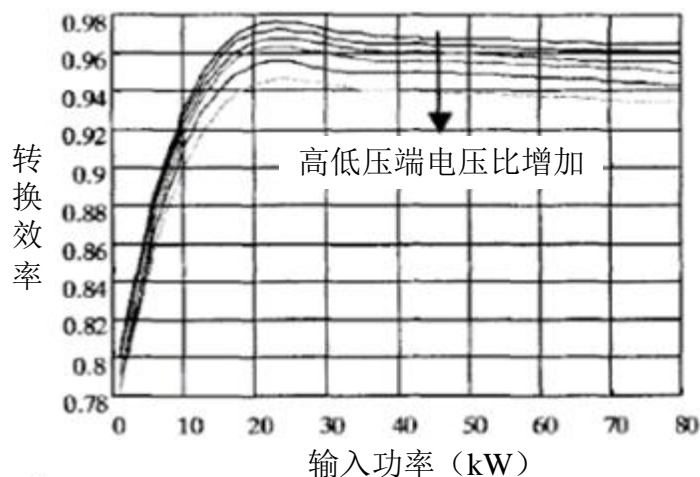


图 3.4 DC/DC 转换器的效率曲线

3.2 双电压复合电源系统构型方案选择

由于电池大倍率充放电会损害电池寿命，根据前文复合电源构型方案的优缺点对比可知，超级电容在负载端可以充分发挥其大功率充放电特性，能量不足时由电池补充，因此，本文选择超级电容在负载端的主动控制式复合电源方案（如图 3.5 所示），电池采用 12V 锂离子电池，可以在不改变原有低压电路的前提下，实现良好的节油减排效果。

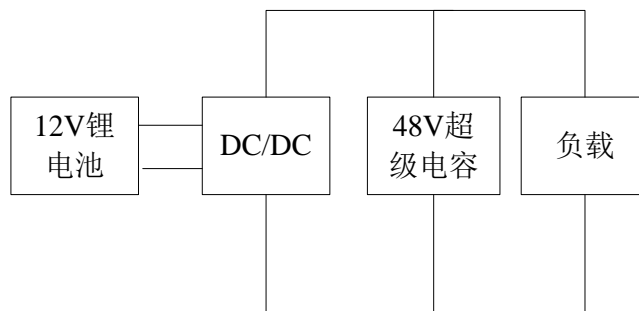


图 3.5 双电压复合电源系统构型方案

采用 48V 超级电容是为了适应当前车载电气设备增加及大功率需求，而且目前多个汽车生产企业和零配件企业都在着手研发采用 48V 电压的新车型，其中可升级为 48V 供电的汽车部件如表 3.1 所示。

采用 12/48V 双电压复合电源可以实现以下功能：

1) 快速起停：汽车启动时间极短，需要瞬时大功率将发动机拖动至怠速，由于采用 48V 超级电容，其大功率充放电特性有利于发动机快速启停的实现，

另外其启动的平顺性也明显优于传统车。当发动机转速降低到怠速时，可以使其关闭不工作，从而减少燃油消耗。

2) 制动能量回收: 再生制动是新能源汽车相比传统车节能的重要原因之一, 48V 电容可以充分利用其高功率密度的特点, 充分吸收制动动能转化成的电能, 多余电能给电池充电或者用于进行下一时刻的加速助力, 减少发动机对其充电。

3) 加速功率补偿: 当发动机工作在低速负荷率较低时, 其燃油经济性较差, 采用 48V 电容可以实现功率补偿, 保证整车可靠的加速性能。

表 3.1 采用 48V 供电的潜在部件及其功率

| 部件类别 | 部件名称 | 所需功率 |
|---------|--------------|-----------|
| 底盘及动力总成 | 电动助力转向 (EPS) | 200-900W |
| | 电动悬架 | 500-5000W |
| | ABS 制动系统 | 600W |
| | 冷却风扇及水泵 | 800W |
| 空调系统 | 玻璃加热器 | 250-2500W |
| | 电动空调压缩机 | 4000W |
| | PTC 加热器 | 750W |

3.3 基于 Cruise 的复合电源仿真平台建立

3.3.1 Cruise 仿真软件简介

本章采用的仿真建模工具 AVL Cruise 是基于 AVL 平台来分析研究车辆工作性能、燃油经济性以及污染物排放特性的模拟仿真软件。其模块化建模方式可以方便快捷地建立各种不同构型的车辆模型, 良好的图形化界面使用户可以方便地调用所需模块, 通过修改其主要参数, 连接相关信号线便可完成整车构型设计^[48], 还可以方便地导入各种所需工况 (如 NEDC、UDDS 等) 仿真整车最高车速、爬坡能力、加速性能以及燃油经济性, 并且软件采用了完善的求解器来确保计算的正确性及快速性。在整车设计初期, 可以便捷地通过对整车的匹配优化提高整车性能, 并且可以大大缩短设计周期和成本, 降低试制和试验成本。

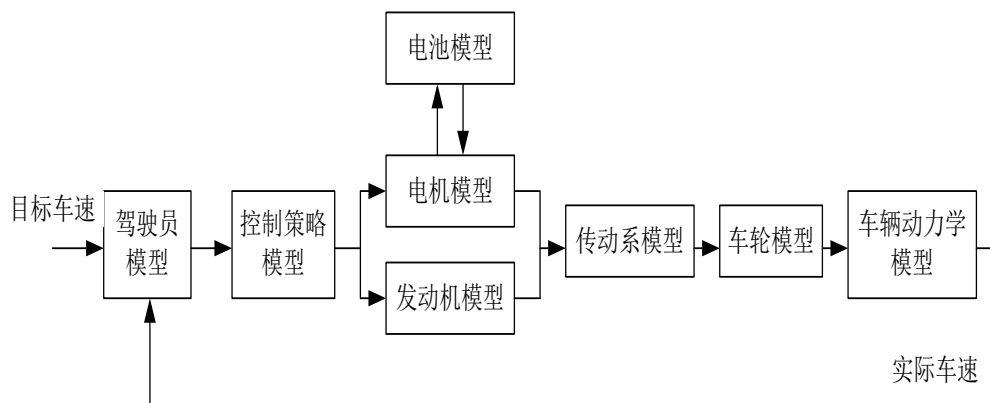


图 3.6 汽车正向仿真建模控制流程

AVL Cruise 软件采用正向仿真建模技术，如图 3.6 所示，信号从驾驶员输入到驱动系统，然后流向车轮及整车，其中驾驶员模型能够模拟踩油门或制动踏板动作对实时车速实现跟随及修正，驱动系统产生驱动功率并转化为驱动力驱动整车行驶，可用于整车或部件控制系统的仿真分析设计，而反向仿真则是以目标车速为输入，先由整车模型计算驱动力，再计算整车需要驱动系统提供的功率。采用正向仿真建模的 AVL Cruise 软件更符合实际整车控制情况，AVL Cruise 提供了与 Matlab 联合仿真接口，可以通过 API、DLL、Interface 等多种方式进行联合仿真，易于开发符合实际应用的整车控制算法，并且适合做动态过程仿真分析，从而对整车性能进行预测分析。

3.3.2 复合电源参数选择

本文旨在尽量小地改动原车结构使发动机取消怠速并且能够回收制动能量，以应对在市区行驶时的频繁启停问题，同时避免高压电池的高成本和安全性问题。基于这一目标本文采用轻型微混车，目前主要的双电压轻混车构型主要有以下两种：一是采用 BSG 电机构型，使用一个具有再生制动功能的发电机取代传统发电机，并沿用原有启动机；二是 ISG 电机构型，采用启动机发电机一体化结构，该电机直接安装于发动机与传动系统之间，与发动机曲轴相连，可以通过离合器控制与传动系统脱离或耦合。BSG 构型成本低，动力总成改动较小，易于应用，但是节油效果有限，而 ISG 构型虽然在某种程度上改动了动力总成，但是能实现较好的节油效果，所以本文采用 ISG 电机构型。

根据前文所述，本文采用双电压复合电源构型，而选择合适的电压等级和容

量是有必要的。超级电容的储能 E_{cap} 与电压 U 和容量 C 有关，如下式所示：

$$E_{cap} = \frac{1}{2}CU^2 \dots\dots\dots(3.3)$$

传统轿车在启动过程中电池放电电流，汽油机约为 200~600A，而柴油机则高达 1000A，且持续时间较短一般为 5~10s，且汽车持续加速和制动过程一般只有几秒到十几秒，需要大电流充放电，通过上式计算可知 165F 超级电容从 48V 以 200A 放电到 30V 可以持续约 15s，能够实现前文所提复合电源功能。电池根据目前汽车蓄电池常用容量作参考，选择 60Ah。初步选定复合电源参数如表 3.2 所示：

表 3.2 复合电源系统各部件参数

| 复合电源 | 容量 | 单体电压/V | 节数 |
|----------|---------|--------|---------|
| 12V 电池 | 60Ah | 3.2 | 4 串*3 并 |
| 48V 超级电容 | 165F | 2.7 | 18 |
| | 峰值功率 kW | 输入电压 V | 输出电压 V |
| DC/DC | 3 | 20-52 | 6-18 |

3.3.3 HEV 复合电源 Cruise 仿真平台建立

由于原车不能取消发动机怠速，燃油经济性相对较差，另外不能回收制动能量，使得制动动能白白浪费。根据前文所选择的整车参数，搭建了原轻型车的 Cruise 仿真平台，如图 3.7 所示。NEDC 工况是由四个市区和一个市郊运转循环两部分组成，常被用作我国轻型乘用车动力性及燃油经济性的评价测试标准。原车在 NEDC 工况下燃油消耗仿真结果为 6.9L/100km。

根据初步选定的复合电源参数及构型方案，在原车基础上进行改动得到如图 3.8 所示的采用双电压复合电源的微混车 Cruise 仿真平台。该构型中超级电容在负载端，能够应对大功率需求，如启动发动机和制动能量回收，充分发挥其“削峰填谷”作用和循环寿命高的性能，同时将额外的能量转存到电池中，能量不足时则由电池补充。

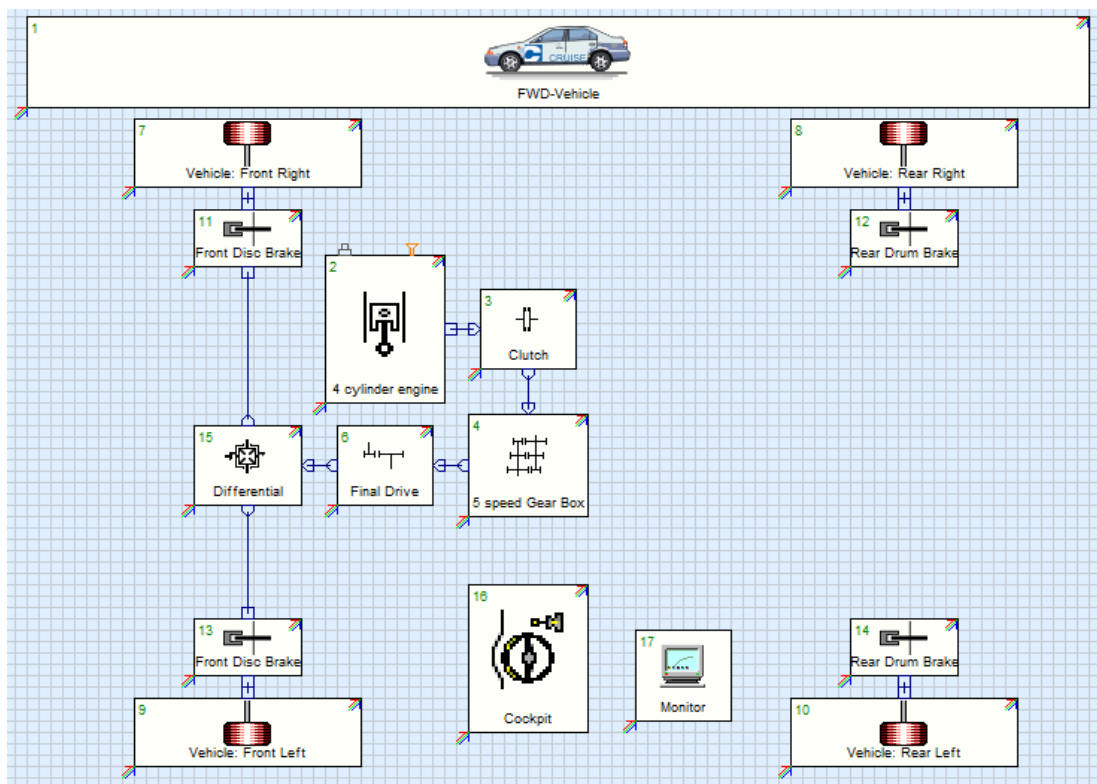


图 3.7 原车 Cruise 仿真平台

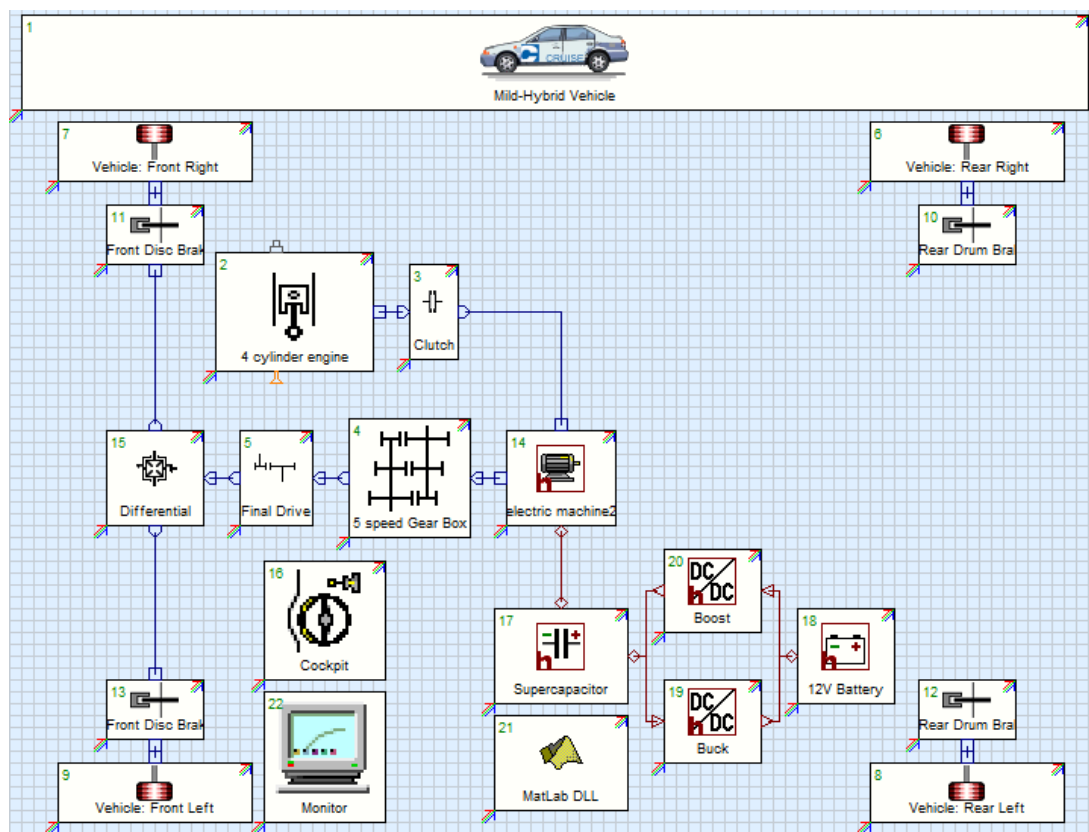


图 3.8 采用双电压复合电源的微混车 Cruise 仿真平台

采用双电压复合电源的微混车，由于电池仍然是 12V 低压蓄电池，必须首

先保证电池电压在正常范围之内，以维持低压电路的正常工作，从而保证整车控制信号的正常传送，其次应当满足电池与超级电容之间能量的交换，提高能量利用效率。所以根据整车行驶工况制定合理有效的复合电源控制策略是必需的也是有必要的。

3.4 复合电源控制策略制定及仿真

复合电源控制是基于超级电容和电池的参数，调节整车所需电功率在两者之间的合理分配，而且要控制电池和超级电容电压、电流及 SOC 工作在正常范围内，同时保证复合电源高效工作并延长电池使用年限。

当前复合电源普遍使用的控制策略有逻辑门限控制，模糊控制，神经网络控制等^[49]。逻辑门限控制策略是根据超级电容和电池电压及 SOC 等参数，对其充放电功率进行限制，并且适时地进行两者之间的能量转换，以满足下一时刻的整车或部件功率需求，充分发挥两者的组合性能。模糊控制是类比人脑的判断和处理问题能力，它是采用一定的规则将各个限值进行模糊化的方式表达，主要是将输入参数如电机的功率需求、电池和超级电容的 SOC 在其正常工作范围进行模糊处理，再反模糊化得到两能量源的功率，但是其电压不能超出其正常工作限值，否则会对两者性能造成损坏，影响其使用寿命，而模糊控制不能很好地硬性限值各个门限值，需要通过大量参数调节实现或者外加门限值进行修正。而逻辑门限控制是一种相对比较简便实用的控制方法，能够适应各种行驶工况，保证电池和超级电容在正常工作范围内使用。

本文采用逻辑门限控制策略作为复合电源控制策略，合理确定复合电源各参数的门限值，协调充放电功率与各参数之间的关系，实现能量均衡，最大程度地利用复合电源的性能优势。复合电源控制策略如下：

1) 当电机需求功率大于零时，若电池 SOC 及电压均较高时，则随着超级电容电压变化，提供不同程度功率，同时电池通过 DC/DC 输出不同等级的电流对电容进行能量补充，否则复合电源基本不工作。

2) 当电机需求功率小于零时，若电池 SOC 及电压均较低时，则随着超级电容电压变化，提供不同程度功率，同时电容通过 DC/DC 输出不同等级的电流对电池进行能量补充；若电池 SOC 较高且超级电容 SOC 较低，则超级电容单独进行电能存储；否则复合电源基本不工作。

3) 电容能量均衡控制策略: 为最大程度的发挥超级电容高功率特性并弥补其能量存储能力低的弱点, 需要尽可能控制超级电容所储能量与汽车实际车速近似成反比例关系, 即当车速较小时, 接下来驾驶员加速的概率较大, 超级电容需要存储较多能量以满足下一时刻车辆加速或发动机启动电量需求, 而当车速较高时, 则下一时刻的制动可能性较高, 超级电容中应存储较少能量以便充分回收制动能量。

超级电容理想电量满足如下条件^[50]: 当车速较高时, 若超级电容实际电压高于根据公式所得理想电压时, 超级电容所储电量过多, 需要向电池放电; 当车速较低时, 若超级电容实际电压低于计算所得理想电压, 则超级电容所储电量不足, 需要电池对其充电补充能量。超级电容理想电压限值与车速 v 近似成反比例关系, 如式 3.4 所示:

$$\frac{V_{UC_ideal}}{V_{UC_max}} = \sqrt{1 - k \left(\frac{v}{v_{max}} \right)^2} \dots\dots\dots (3.4)$$

其中: V_{UC_ideal} 为超级电容理想电压; V_{UC_max} 为电容最高电压; v_{max} 为最高车速; v 为车速; k 为电容在循环工况中的能量利用率, 数值上取 0.75。

基于以上原则本文制定了基于电容电量均衡的复合电源逻辑门限控制策略, *AVL Cruise* 整车仿真平台控制可以使用 *Matlab / Simulink* 建立, *AVL Cruise* 提供了和 *Matla* 联合仿真的接口, 可实现对各部件工作的控制。本文通过 *Matlab / Simulink* 建立复合电源控制策略编译生成 DLL 接口文件, 导入到 *AVL Cruise* 中, 从而进行两者的联合仿真。复合电源控制策略如图 3.10 所示。在该模型中输入信号为: 超级电容电压及 *SOC*、电池电压及 *SOC*、车速等。输出信号为: *DC / DC* 的升降压开关信号以及电流限值等。具体的电机需求功率计算及判断在整车控制策略中给出, 如图 3.9 所示。

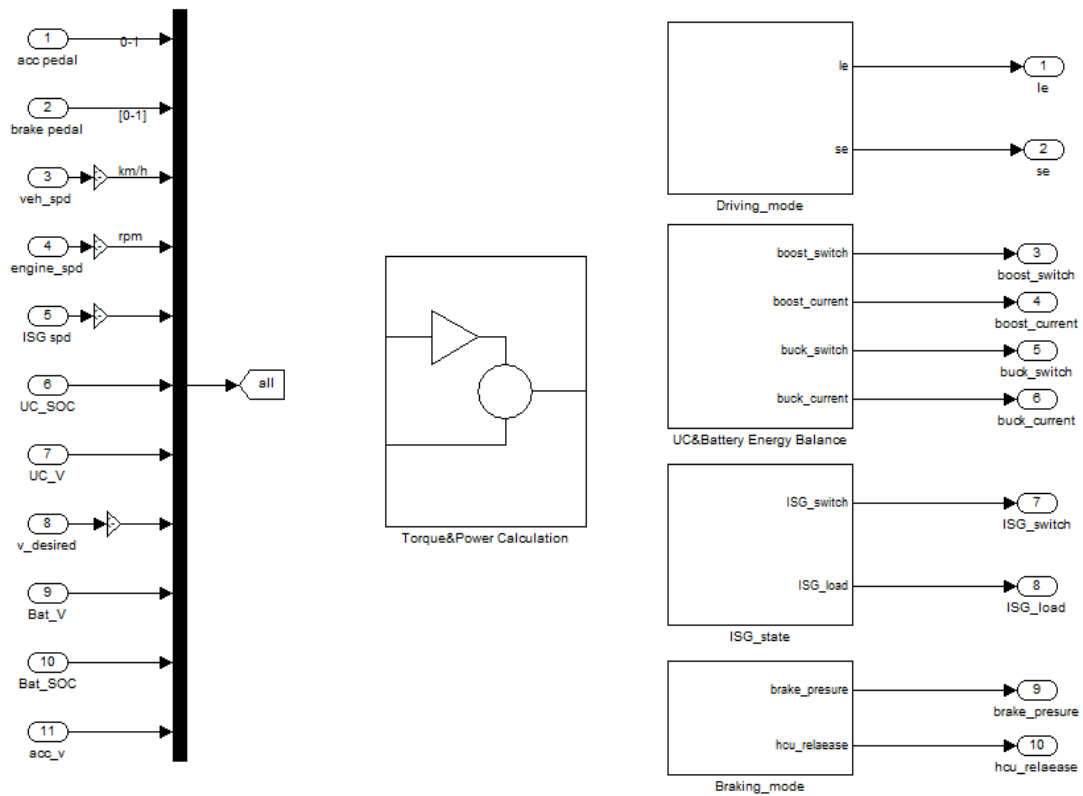


图 3.9 采用双电压复合电源的微混车 Simulink 整车控制策略

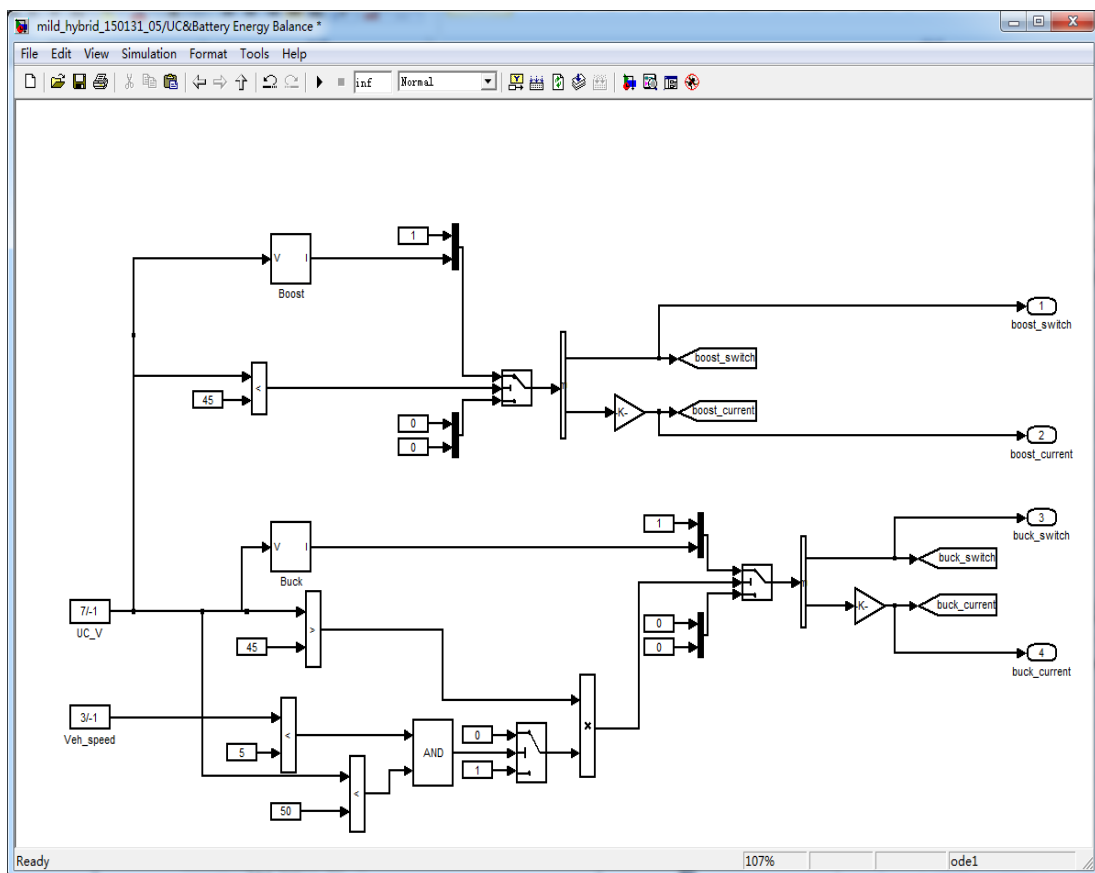


图 3.10 复合电源系统 Simulink 控制策略

采用 NEDC 循环工况仿真调试, 最终复合电源能够正常工作, 且发动机取消怠速, 提高了燃油经济性, 并且实现了很好的制动能量回收。该工况下的微混车的油耗为 6.5L/100km, 明显优于原车性能。图 3.11 为循环工况下车速跟随及发动机工作情况, 很明显发动机取消了怠速, 减少了燃油消耗, 并且实车车速能够很好的跟随需求车速。

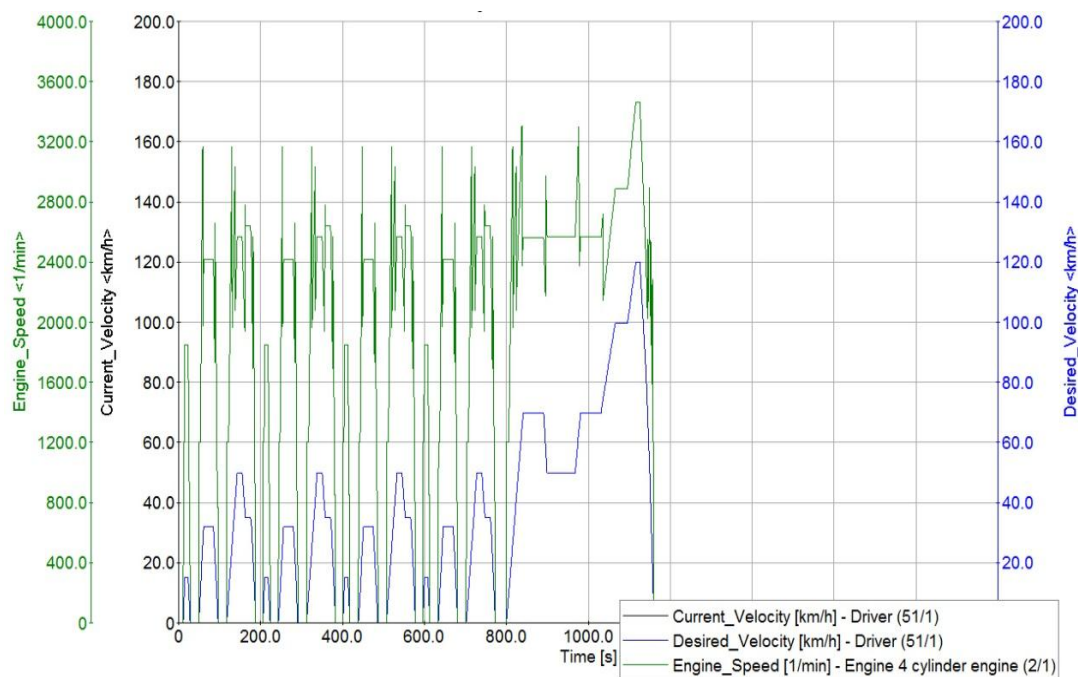


图 3.11 微混车 NEDC 工况车速跟随及发动机转速情况

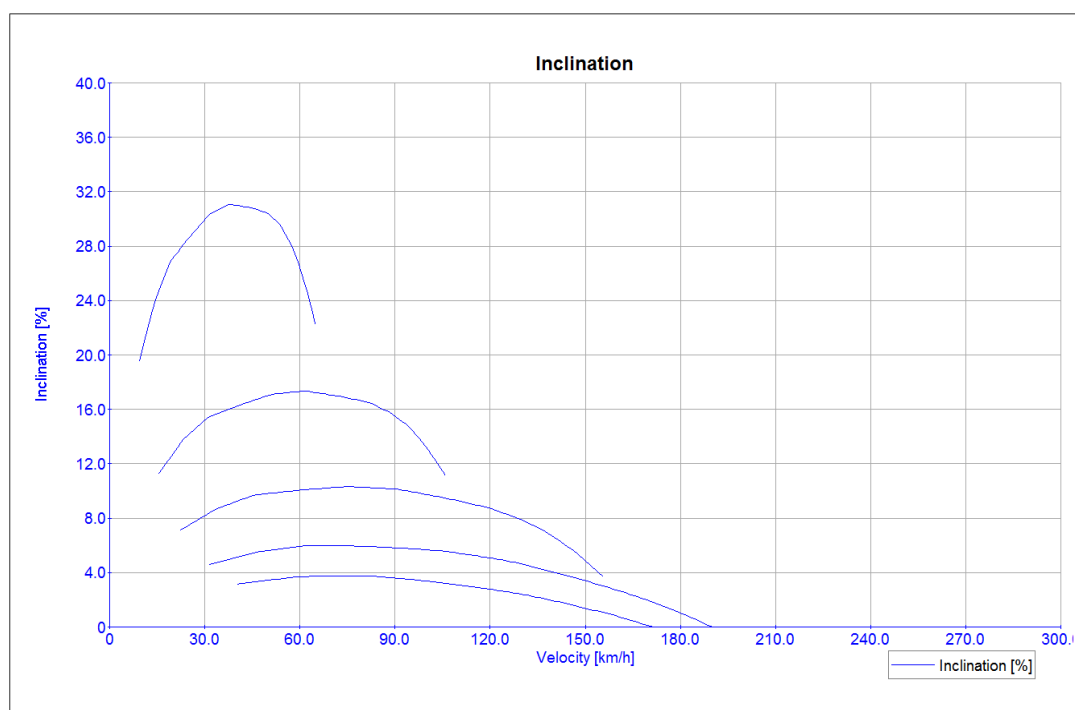


图 3.12 微混车 NEDC 工况爬坡度仿真结果

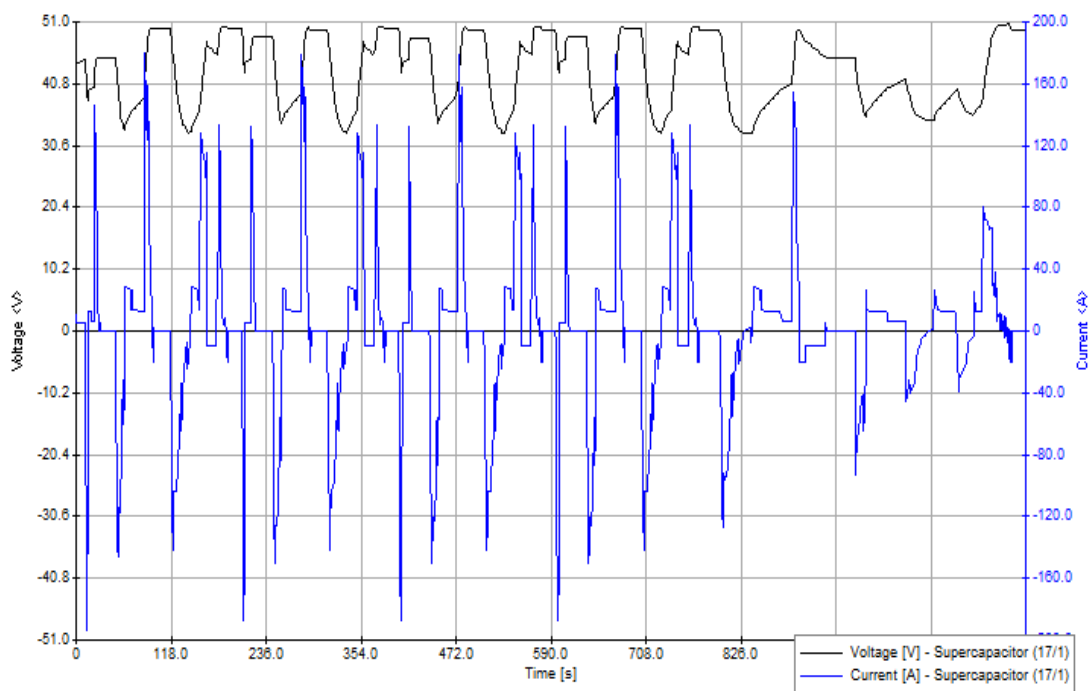


图 3.13 超级电容电压与电流仿真结果

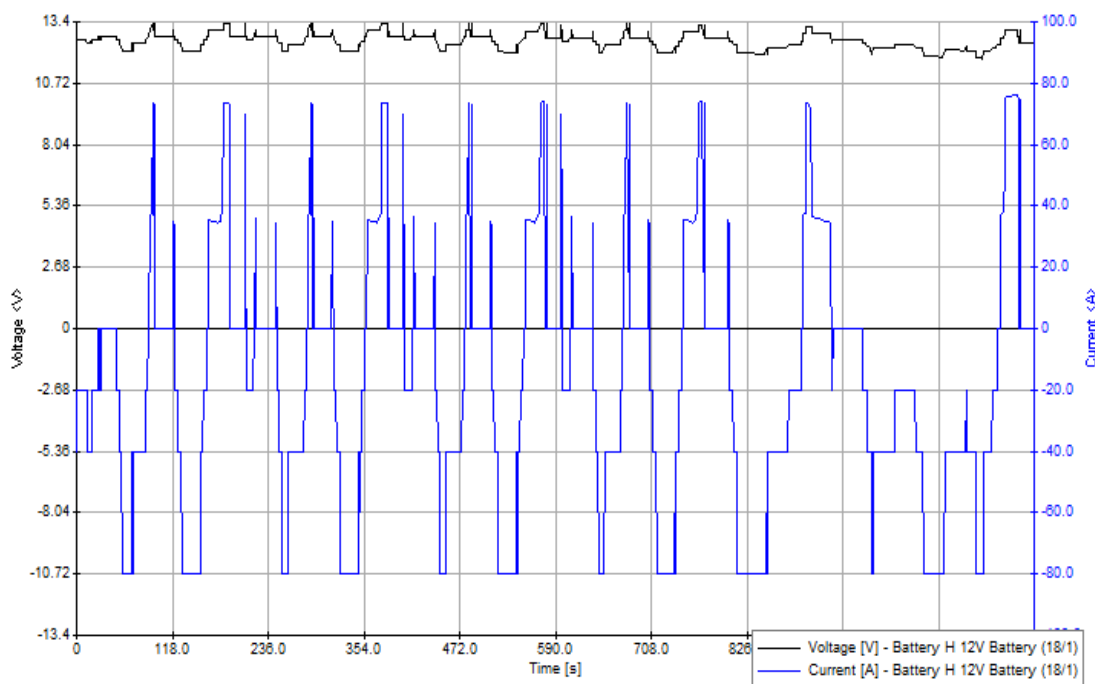


图 3.14 电池电压与电流仿真结果

图 3.13 为超级电容工作过程中电压及电流随时间的历程曲线，超级电容电压维持在合理范围内，33~50V 之间，最高充放电电流约为 180A，并且能够适时提供整车助力和进行制动能量回收。图 3.14 为电池工作过程中电压及电流随时间的历程曲线，电池电压能够始终维持在 12V 以上，电压最高不超过 13.4V，最高电流为 80A，远小于传统车启动时的电流，并且当电容电量不足时，电池可以

放电进行功率补偿或者给电容充电。在整个循环过程中，超级电容和电池电流不大，利于延长复合电源的寿命。

在得到了循环工况下油耗及动态工况性能基础上，对其表征动力性的相关参数进行仿真，改装后的微混车在各挡位下的最大爬坡度如图 3.12 所示，最高爬坡度为 30.9%。最高车速为 178.4km/h，百公里加速时间为 12.3s。由此可以看出，改装前后评价动力性的各参数基本差异不大，能够满足汽车动力性要求，而油耗较原车降低了 5.8%，实现了较好的节油效果。

3.5 本章小结

本章主要是根据前期研究的复合电源构型，选择了某轻型乘用车改装为应用复合电源的微混车，搭建整车复合电源 Cruise 仿真平台，并制定了控制策略，确保电池和超级电容电压维持在正常工作范围内并实现循环工况下复合电源系统中两能量源的能量转换，与原车进行了动力性和经济性对比，仿真表明，采用复合电源的微混车燃油消耗问题有一定改善，同时得到了电池在模拟工况下仿真的工作电流，为下一章研究其热特性提供了数据支持。

第4章 基于 FLUENT 仿真的电池组热特性分析

电池组温度的高低和一致性是决定其性能表现的关键,所有的电池模块应当工作在适合电池电化学反应的最优温度范围之内,对于 LiFePO_4 电池,期望的工作温度范围为 20 到 40°C ,而且各模块应当工作在一致的温度环境中,电池组内温度不均一会致使各模块不同的充放电性能,并且会进一步导致模块间电量不平衡和整体性能下降,因此为了延长电池组的使用年限和保证其充放电性能,电池组热管理是有必要的。美国可再生能源实验室(NERL)根据其在电池热管理方面的经验,总结出了电池热管理系统(BTMS)优化设计的系统方法^[51]:

- 1) 定义 BTMS 的约束条件和设计目标;
- 2) 获取模块的生热量和比热容等热分析参数;
- 3) 对给定工作条件下的电池生热量进行估算,确定传热介质类型和其传热通道布置方式;
- 4) 利用计算流体力学(CFD)和有限元分析(FEA)方法仿真不同条件下电池组的温度场及流场分布,预测电池模块和整包的热特性;
- 5) 根据仿真结果初步设计 BTMS;
- 6) 搭建集成热管理系统的电池包,进行试验验证和实车工况测试;
- 7) 考虑电池的性能、寿命和成本,优化设计 BTMS。

4.1 计算流体力学及 FLUENT 简介

计算流体力学(CFD)主要是采用数值计算与数据图形化技术,对流动和热交换等有关问题进行模拟计算分析,是解决流动和热交换问题的一种新方法^[52]。其基本思想是:把与时间和空间有关的连续物理场改用大量离散化的变量值数组表示,并且利用特定的规则建立表征变量之间关系的微分方程,最后利用数值计算方法运算得到因变量的迭代值。总而言之,CFD就是在流体控制微分方程的约束下,对流动换热过程进行数值模拟计算。对流换热问题通常采用理论分析、实验测量和 CFD 三种方式处理。理论分析通过将所研究的问题抽象出简化模型,建立控制方程并推导求解,可以较小成本获得所研究问题的普遍性规律,但是无法应用于研究复杂的、非线性的流动换热问题;实验测量是获得和验证所研究问题的主要方法,也是理论分析的基础,但是外界条件的干扰、测量的可行性和成

本安全问题又限制了获得准确全面的实验结果；CFD 则能够弥补两者的不足，既可以全面反映流动换热情况，又节约成本，但是也存在一定计算误差，所以需要通过理论分析和模拟实验获取初始设置参数并进行结果验证对比。综上所述，三者的有机结合能够很好地实现对流动换热问题的预测，指导实际结构的优化设计。

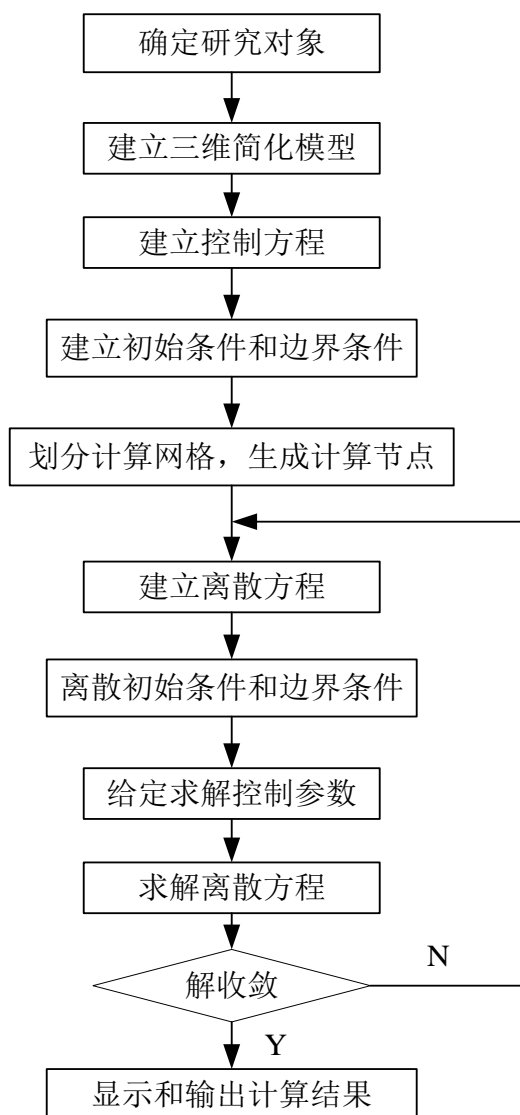


图 4.1 CFD 仿真流程图

FLUENT 主要用于计算复杂条件下的流动和传热等问题，是目前应用较广泛的 CFD 仿真软件^[53]，采用先进的数值计算方法和种类多样的物理模型，能够对多种复杂的物理模型进行仿真求解，目前已被广泛应用于汽车设计、航空航天和石油天然气等多个领域。

4.2 锂离子电池生热建模仿真

4.2.1 锂离子电池热特性仿真原理

前文第二章对锂离子电池的生热及传热原理进行了相关分析, 电池的生热主要是由于电池内阻的存在导致, 而其热传导和热对流是电池组传热的主要方式。

目前电池的生热速率主要使用 Bernardi D^[23]等人于 1985 年提出的电池生热速率数学模型进行估算, 该公式如下:

$$q = \frac{I}{V_b} \left[(U - U_0) + T \frac{\partial U_0}{\partial T} \right] (J / m^3 s) \dots\dots\dots (4.1)$$

其中: q 为电池微元体每秒的生热量, 即生热速率; I 为电池工作电流, 充电为正; U 和 U_0 分别为实际电压和开路电压; T 为电池温度, $\frac{\partial U_0}{\partial T}$ 为温度系数; V_b 为电池单体体积。

在电池内部的热传导方面, 加州大学的 Yufei Chen 和 James W • Evans^[24]等在计算模拟锂离子电池温度分布时作了如下假设:

- (1) 电池本体内电流均布, 数值相等;
- (2) 在同一方向各处的热传导率相等且不受温度和 SOC 变化的影响;
- (3) 各种电池组件材质均匀、密度相同, 比热保持恒定。

并且在直角坐标系下建立了三维方形锂离子电池的非稳态导热微分方程, 模拟电池内部热传导, 该公式可表示为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = (\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) + q \dots\dots\dots (4.2)$$

其中: 等式左边为非稳态项(内能的增量), ρ 为电池密度, C_p 为比热; 等式右边的第一项为扩散项(导入导出的净热流量), 第二项为源项(生热源), λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为电池本体沿直角坐标系三个方向的热导率, q 为生热速率。

电池热对流主要是通过流体的三个控制方程(连续性方程、能量方程和动量守恒方程)进行约束控制, 需要利用有限元和数值计算方法进行迭代计算获得相应微分方程的解, FLUENT 提供强大的求解算法和可视化窗口界面, 可以方便地

分析电池的温度场和流场分布。

电池热特性仿真即是基于以上生热和传热理论进行的,因此必须首先获得电池的相关热物性参数并确定相应的初始条件和边界条件,通过 CFD 仿真获得其温度场及流场。

4.2.2 电池单体参数获取及三维建模

本文所用的电池为某 20Ah 方形 LiFePO₄ 电池,具体参数如表 4.1 所示。

表 4.1 某磷酸铁锂电池单体参数

| 电池参数名称 | 参数值 |
|---------------|------------|
| 容量 (Ah) | 20 |
| 质量 (kg) | 0.67 |
| 循环寿命 (80%DOD) | 2500 |
| 最佳工作温度 (°C) | 20~40 |
| 尺寸 (长×宽×高 mm) | 170×12×220 |

方形锂离子电池单体并不是单纯地由各种正负极材料填充,而是采用层状结构叠加而成,方形磷酸铁锂电池内部结构如图 4.2 所示,为多层结构,正极集流体为铝箔,负极集流体为铜箔,考虑到其生热主要集中于电池端部,为了简化仿真,本文不考虑极柱生热,只考虑电池本体生热散热。

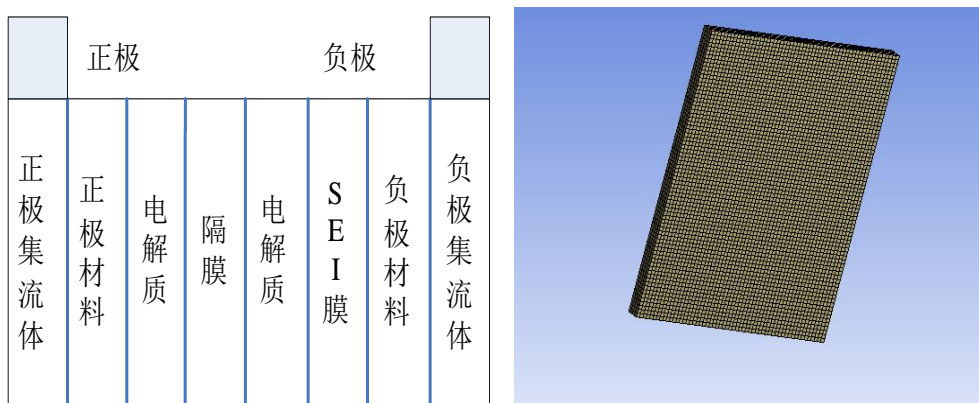


图 4.2 锂离子电池单体结构及仿真建模网格

由方形锂离子电池层状结构和其生热传热原理可知,还需获得其平均比热容以及沿各个方向的热导率^[54]:

$$C_p = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^k C_{pi} \cdot m_i \dots\dots\dots(4.3)$$

$$\lambda_1 = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot \lambda_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \dots\dots\dots(4.4)$$

$$\lambda_2 = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n (L_i / \lambda_i)} \dots\dots\dots(4.5)$$

其中： m 、 C_p 分别为电池单体总质量和平均比热； m_i 、 C_{pi} 分别为电池本体各材料的质量和平均比热。 λ_1 为平行于正负极板方向（y 和 z 方向）的热导率，表征电池的热量沿并联形式的电池层状材料传递； λ_2 为垂直于正负极板方向（x 方向）的热导率，相当于电池热量沿串联形式的电池层状材料传递； λ_i 为第*i*层材料的导热系数； A_i 为第*i*层并联结构的面积； L_i 第*i*层串联结构的厚度。

通过参数查询并计算得，磷酸铁锂电池的比热容约为 800J/(kg · K)，各个方向的平均热导率为： $\lambda_x=0.8W/(m \cdot K)$ ， $\lambda_y = \lambda_z=2.1W/(m \cdot K)$ 。

4.2.3 锂离子电池生热仿真

本文采用的锂离子电池组容量为 60Ah，采用如图 4.3 所示结构进行串并联连接（3 并 4 串）。为了重点分析电池本体的生热，简化不必要的极柱部分，研究其生热特性需先研究其不同充放电电流下，温升情况。一般将电池组箱体假定为绝热壁面，即通过其表面的热流量为 0，初始温度本文设为 30℃。

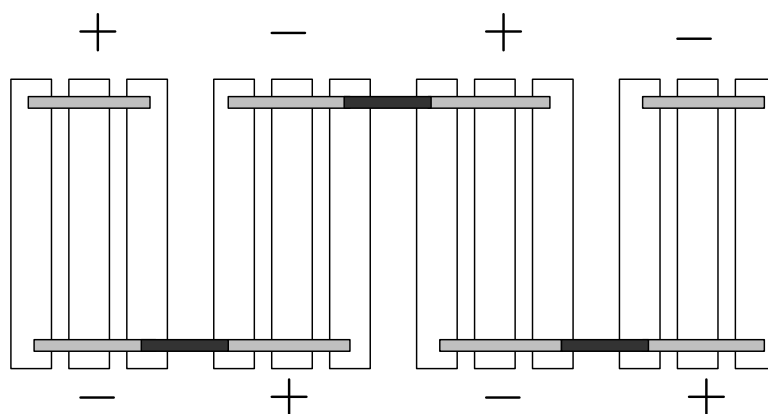


图 4.3 电池组串并联结构形式

图 4.4 和 4.5 为电池组 1C 充电过程中温度变化趋势，由图可知，在该条件下，电池组最高温度上升约 16℃，最高与最低温度之差小于 1℃，主要是由于其箱体设为绝热壁面，所以其热量累积在箱体内部，而空气的密度和比热容较小，

不能很好地吸收电池产生的热量,且电池组内部间隙处的空气明显少于外围空气,外围电池产生的热量在一定程度上得到了缓解,所以电池组整体呈现内部温度较高,外部温度相对较低,但是电池组整体温差不大。

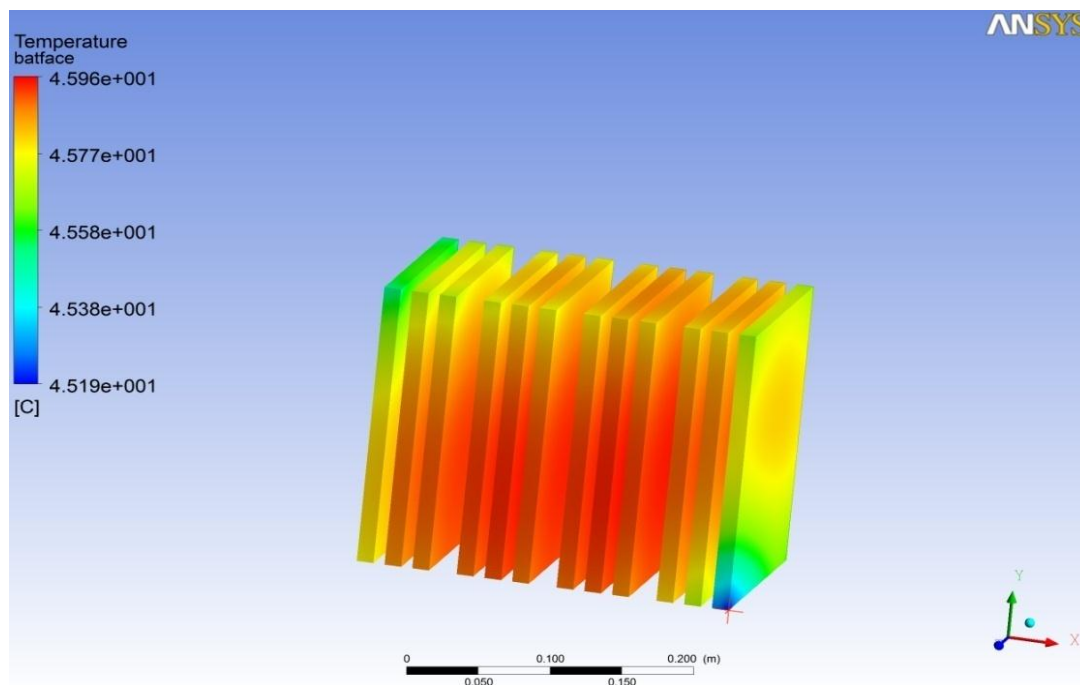


图 4.4 电池组 1C 充电结束时的温度场分布

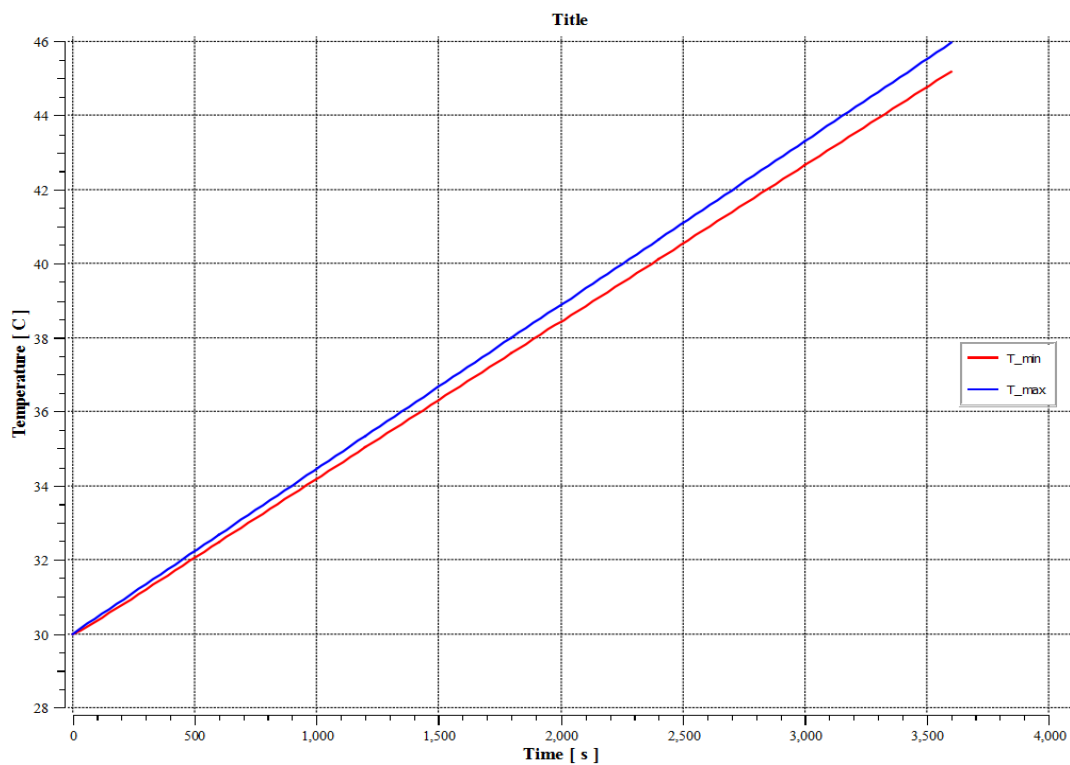


图 4.5 电池组 1C 充电过程中最高最低温度历程曲线

根据第三章的仿真结果可知电池的最大的充放电电流约为 80A,图 4.6 和 4.7 为绝热条件下电池以 80A 充电时电池组的温度变化趋势。由图可知,在 80A 充放电条件下,最高温度上升约 21℃,最高与最低温度相差 1℃,电池组整体也呈现中心温度较高,外围温度相对较低,但是其整体温差不大。

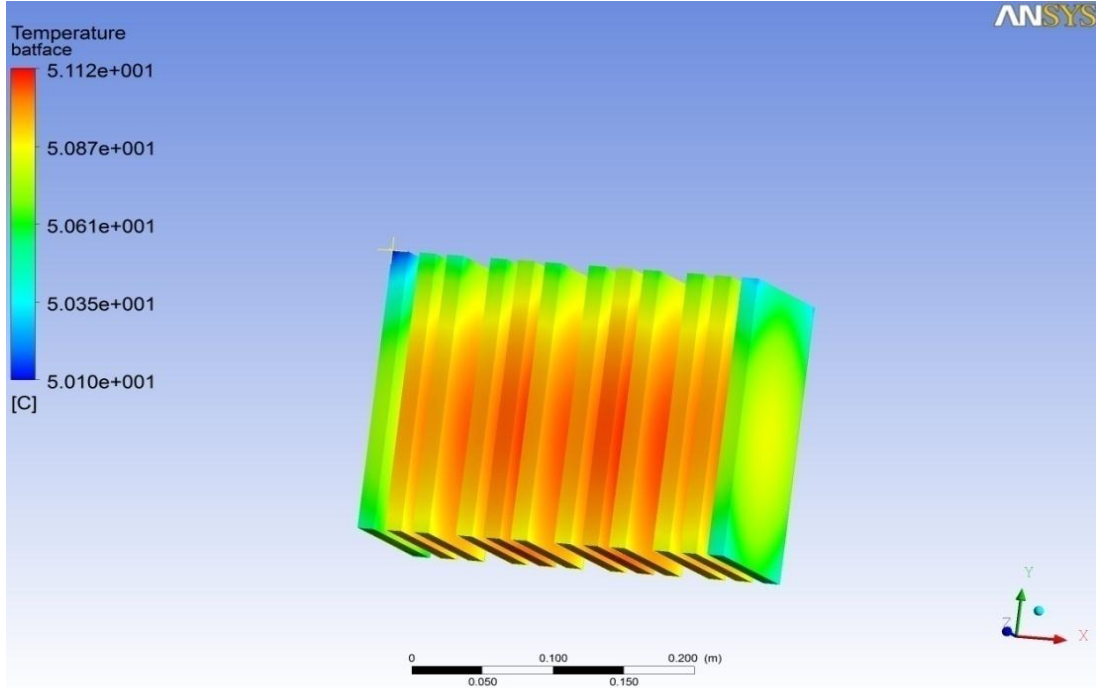


图 4.6 电池组 80A 充电结束时的温度场分布

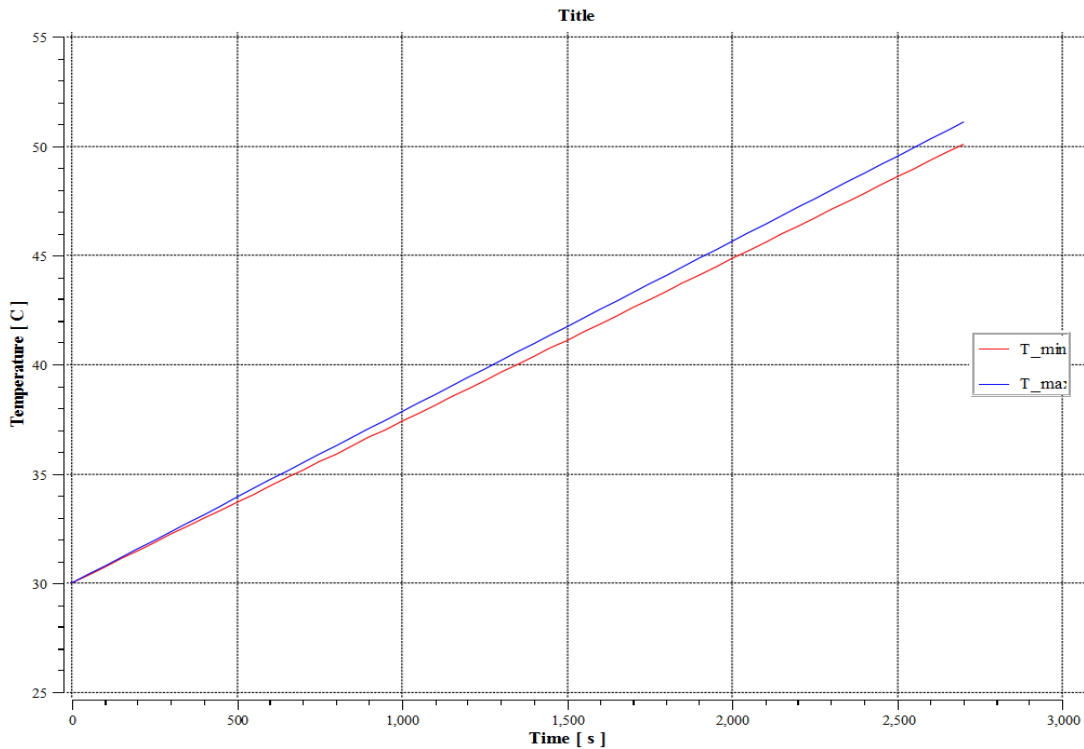


图 4.7 电池组 80A 充电过程中最高最低温度历程曲线

由上述两种情况的生热可知，电池在夏天高温天气条件下，热负荷较重，温升剧烈，会导致电池组处于非最佳工作温度区间，长时间处于该状态会导致电池组整体性能下降，因此有必要适时对其进行冷却，以延长其使用寿命并确保其保持最佳工作状态。

4.3 电池组散热仿真分析

4.3.1 电池组传热介质的选择

BTMS 热量的传递需要介质，目前按其传热介质可分为三种方式，即风冷、液冷和相变材料（PCM）冷却。

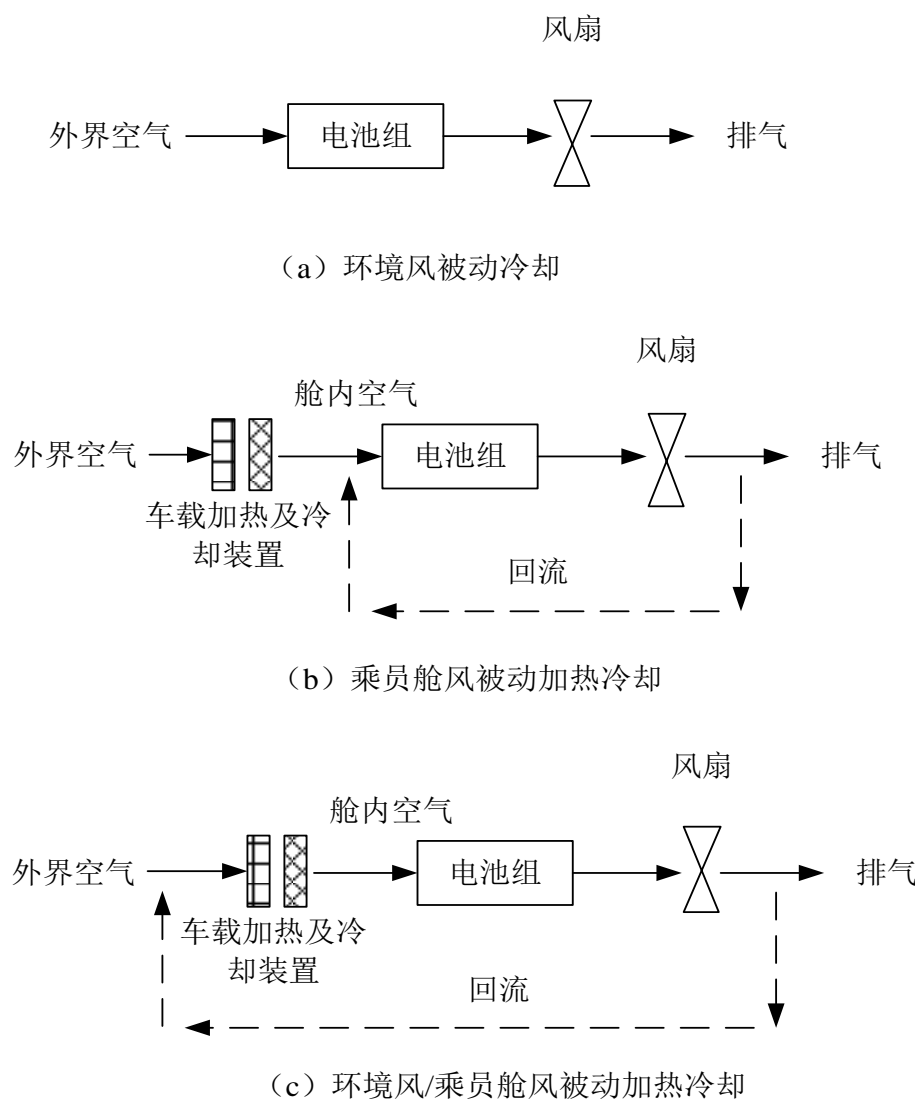


图 4.8 不同类型的风冷系统示意图

风冷即以空气作为传热介质，这是最简便的一种散热方式，仅仅需要使空气

流经电池组的外表，利用热对流将热能带走，风冷散热方式结构简单，由于不需要添加额外的冷却介质和防护材料，因此重量相对较轻，并且易于实现，成本较低，但由于空气的表面对流换热系数较小，电池组的传热速度较慢，特别是在高温环境下高压大容量电池组单纯依靠环境温度的空气散热效果不佳，需要采取其他方式进行优化。风冷可以分为自然对流和强制对流，后者一般是通过风扇驱动空气流动，风扇散热风量由 BTMS 根据当前电池温度确定。风冷方式必须合理安排风道和风扇位置，使电池组整体都能得到良好的散热，最高温度不致过高同时电池单体温度处于较一致状态。

液体冷却方式是首先利用液体与电池进行热量转移，然后使空气与液体进行热交换把热量带走。按接触方式分为直接接触冷却和非直接接触冷却两种方式，直接接触冷却一般采用矿物油或硅基油等绝缘性极佳的液体作为传热介质，电池组外箱体需要很好的密封性和硬度，电池完全处于液体介质中；非直接接触冷却一般采用水、乙二醇（ $C_2H_6O_2$ ）或两者的混合液等非绝缘液体，采用该方式需要在电池模块间布置合理的散热管道，并且管道材料需要有良好的密封性和导热性。传热液体的循环流动主要是依靠泵的驱动进行的^[55]。液体的热导率和比热容明显大于空气，同时其与电池壁面的表面传热系数较高，因此其换热效果优于风冷方式，但是液冷方式结构复杂，需要极佳的密封性，制造和维护成本较高。

PCM 冷却是利用某些特殊材料在某一温度范围发生相变吸收或释放能量的特性实现电池换热的方式，通常在原有材料中加入导热性较高的添加剂，以弥补其热导率相对较低的不足，使其相变温度维持在电池最佳温度区间附近^[56]。由于石蜡相变潜热相对较高且温度适宜，成本较低，所以成为相变材料的较好选择。PCM 冷却无需额外的驱动设备和能量消耗，并且价格低廉，吸热能力强，可用于不同形状的电池散热。

表 4.2 电池组不同传热介质的特点对比

| 传热介质 | 粘度 | 散热效果 | 系统复杂性 | 系统成本 |
|------|----|------|-------|------|
| 空气 | 低 | 较低 | 较低 | 低 |
| 液体 | 高 | 高 | 高 | 高 |
| 相变材料 | - | 低 | 低 | 较高 |

传热介质的选择不仅要考虑其对流换热系数（表面传热系数），还要考虑其

成本等因素。对于并联混合动力汽车，电池和发动机可以分别独立地提供整车所需动力，因此可以综合考虑电池热管理系统进行整车驱动能量分配，采用风冷是一种实用且比较有效的方式，而对于串联混合动力汽车、增程式混合动力汽车（RE）、插电式混合动力汽车（PHEV）特别是纯电动汽车，电池组是其主要的动力供给部件，长时间工作时生热量会比较多，直接采用环境空气冷却，极端条件下效果可能不太好，采用液体冷却可以获得很好的散热效果，目前比较受关注的纯电动汽车生产商特斯拉生产的 Model S 即是采用液冷方式进行散热，而丰田的混动汽车 Pruis 和本田的 Insight 都采用了风冷方式。本文的电池组较小，所以采用风冷方式完全能够满足系统散热需求。

4.3.2 电池组散热风道布置

电池组风冷系统按空气流动通道结构可分为串行、并行和混行三种方式^[57]，如图 4.9 所示。

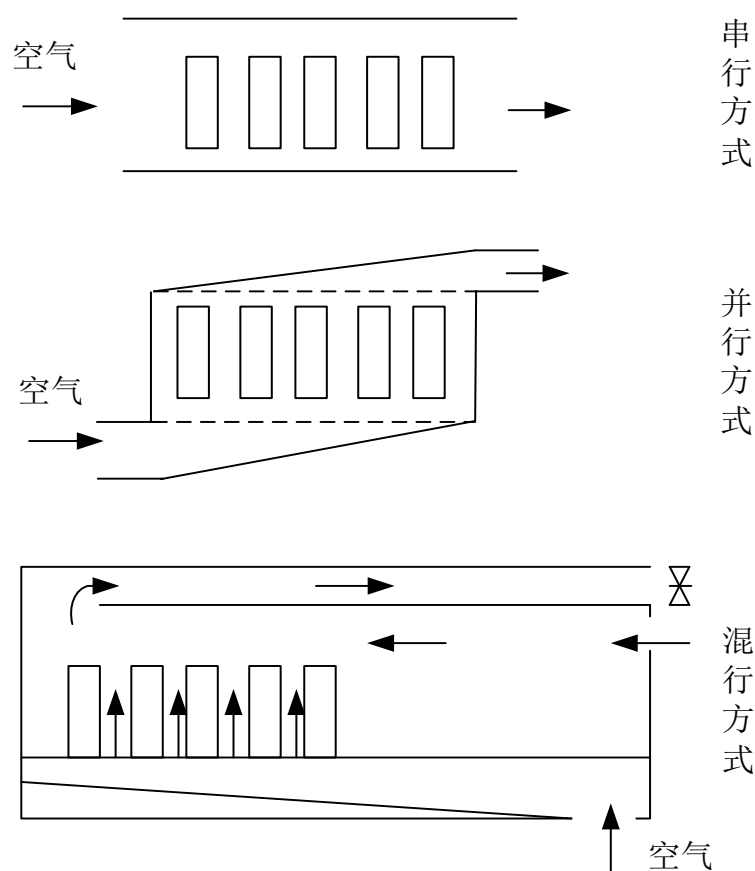


图 4.9 电池包风冷通道布置方式

串行通风方式系统中，空气依次流经成组的电池单体，主要是上下左右四个

侧面，空气不能直接流经电池单体最大的散热侧面，主要依靠虹吸现象将电池间隙处的热量带走，采用这种方式的电池组明显表现为电池组风速入口处电池冷却效果很好，但是随着与空气入口距离的增大，电池单体的冷却效果明显降低，另外处于电池组中部的电池单体由于热量的累积，相对外侧电池散热效果较差，该种散热方式也不能很好的兼顾这一问题，所以会导致电池组整体温度分布不均匀，由于不需过多考虑风道的布置和电池的布置，因此散热系统结构简单。

并行通风方式追求最大限度地通过电池所有外表面，使电池组温度分布均一，采用这种方式需要优化布置电池和风扇位置，以获得均一的流场和温度场。一般通过调整电池单体间隙来调节空气的流动阻力，使空气按照通道阻力重新分配其流量分布，调节风扇入口和出口处的楔形通道以调节通道两侧的压力。并行通风方式需要通过大量的结构优化设计以获得最佳通风散热效果。丰田的 e-com 纯电动汽车和 Pruis 混合动力汽车就是采用这种冷却方式，而且目前多数电池组风冷都是采用这种方式。

混行通风方式将串行和并行两种通风方式结合起来，但是结构设计比较复杂，风扇功率也要明显高于并行通风方式，目前较少采用这种结构。

通过对以上风冷散热结构的对比可知，并行通风是一种比较有效的散热方式。本文基于以上风冷结构，初步设计了三种形式的散热结构，如图 4.10 所示。

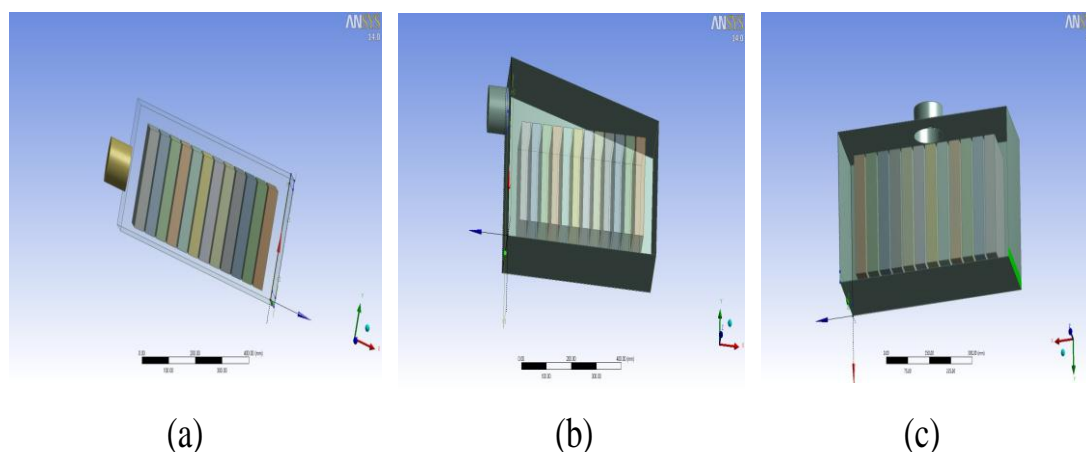


图 4.10 三种散热风道布置

4.3.3 不同结构的电池组温度场和流场仿真对比

以下仿真均是在环境温度为 30°C ，电池组初始温度为 35°C ，电池组以 80A 放电时电池温度场和流场分布，电池箱体壁面均设为绝热面，进风口风速为 1m/s 。

如图 4.11 所示, 为电池组采用串行方式时的电池组温度场和流场分布, 电池组温差约为 11°C , 且入风口处风速较高, 电池冷却效果较好, 出风口处电池冷却效果较差, 且明显表现为从入风口到出风口电池单体温度逐渐升高的趋势。由流线可知电池组明显外侧冷却效果优于内部, 流动空气不能全面覆盖所有电池单体, 离风扇较远的电池内侧表面基本不能受到良好的冷却, 而距离风扇最近的电池的温度明显低于其他单体温度, 所以电池温度分布不均。

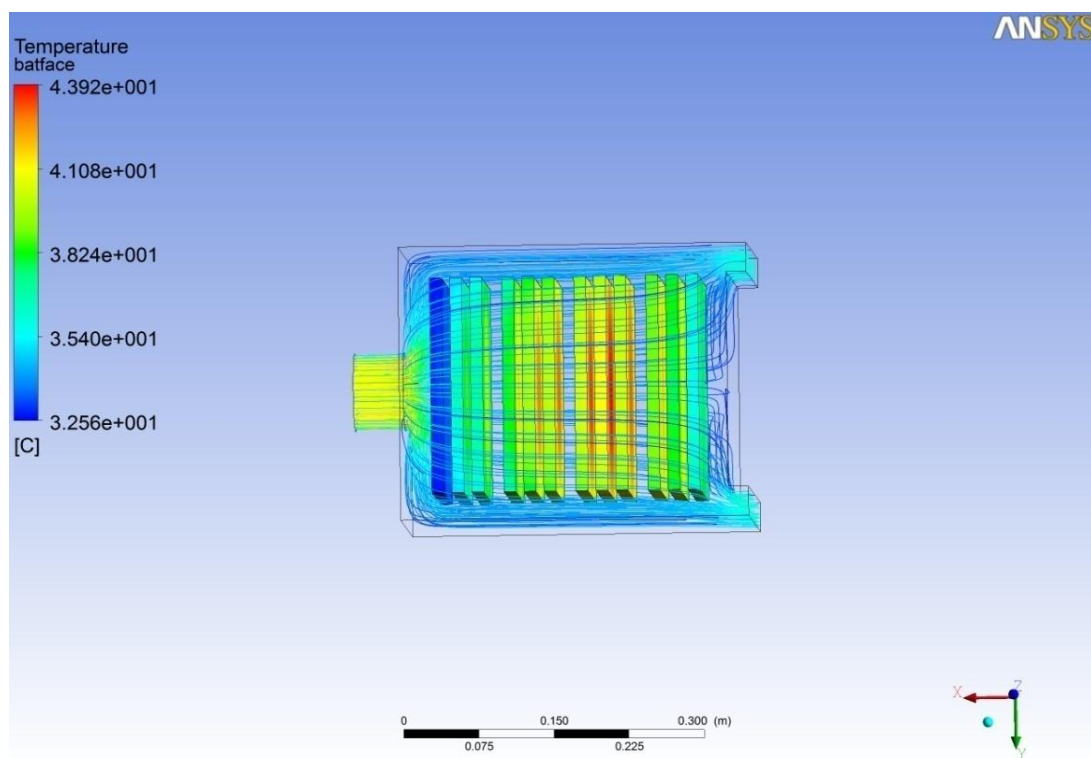


图 4.11 串行通风方式仿真结果

图 4.12 和 4.13 为并行通风方式的冷却效果图, 4.12 为只有一个出风口的冷却方式, 从图中可以看出流线主要通过后半部分电池组, 前半部分电池组基本不能得到很好的冷却, 导致电池组整体温度分布不均匀。4.13 采用两个出风口, 前后端各一个, 能够重新分配电池组内部的压力场和空气流动阻力, 流线能够包围整个电池组, 并且能够从电池单体间隙通过, 所以电池组整体呈现温度场分布比较均匀, 另外调节风扇位置和楔形通道的倾斜角度可以使流场更均匀地分布。由图 4.13 可知电池组最后的温差在 6°C 左右, 温度分布比较均匀。

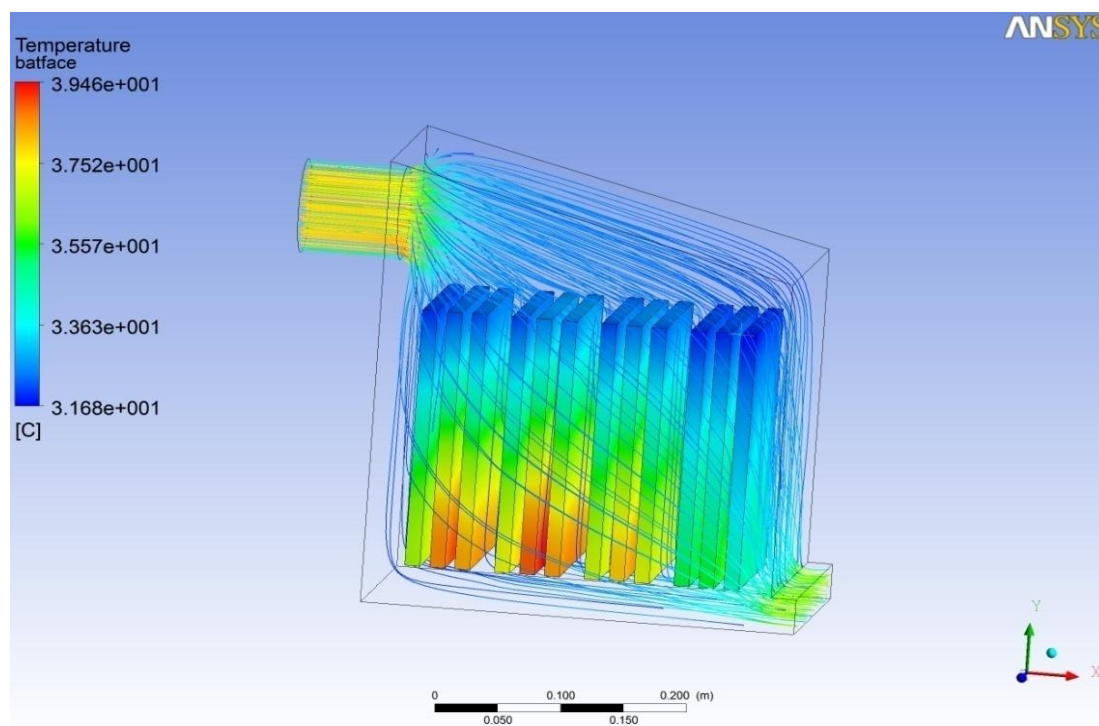


图 4.12 并行通风方式（一个出风口）仿真结果

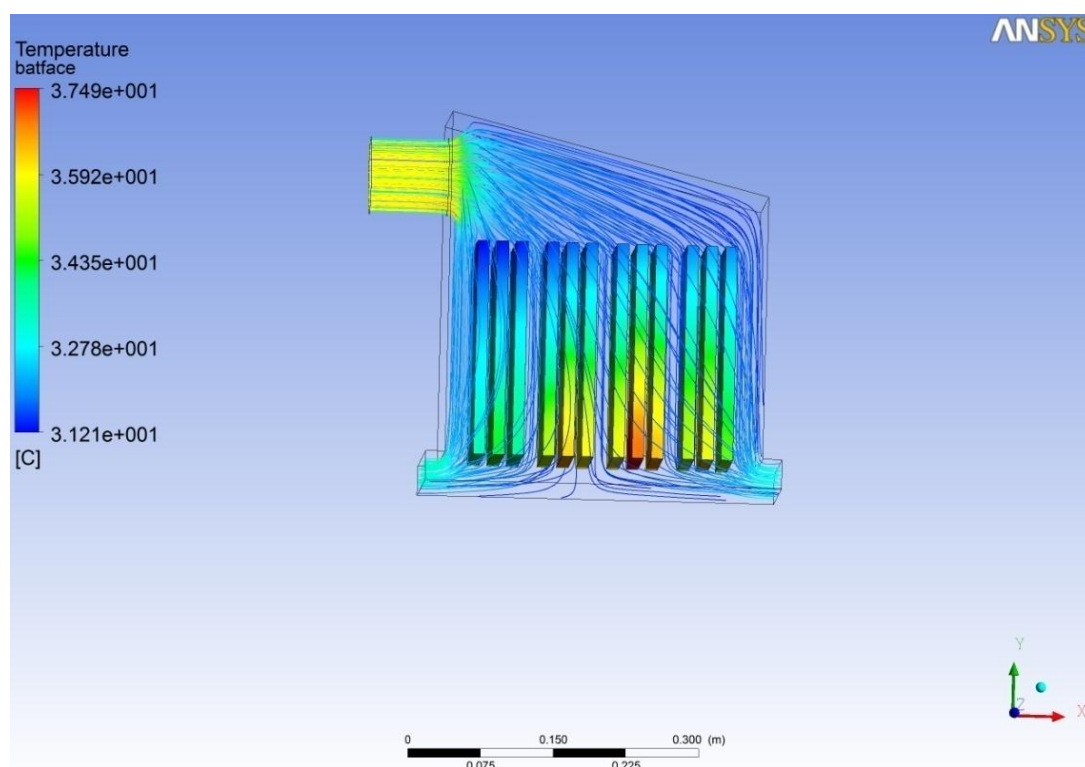


图 4.13 并行通风方式（两个出风口）仿真结果

考虑到电池单体成组后电池组中部的热量累积明显高于其他单体，因此采用将风扇置于电池组上表面中部的方案（如图 4.14 所示），该方案能够很好的解决电池组中部热量累积造成的温度不均一问题，仿真结果表明电池组温差不到 6°C ，

且最高温度不超过 40°C ，能够很好的控制住电池温度继续升高。

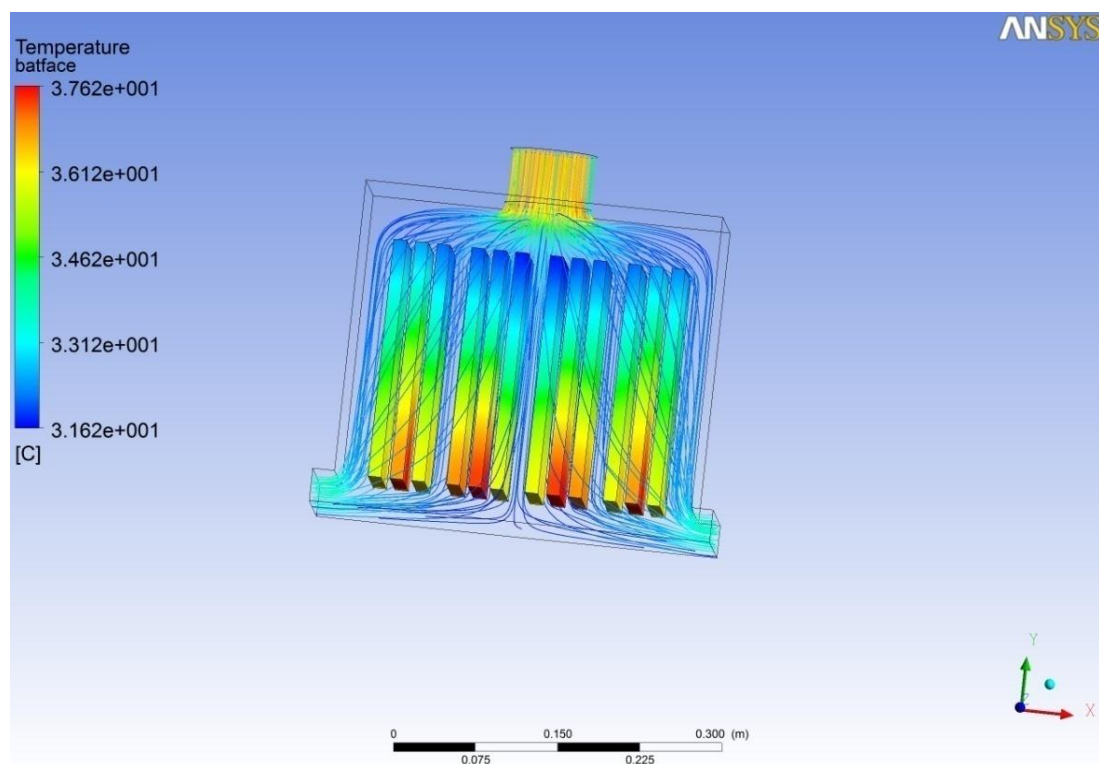


图 4.14 并行通风方式（风扇位于电池组上表面中部）仿真结果

综上所述，三种主要构型方案均能满足温度和温差限值要求，而且并行方案明显优于串行方案，文中给出的两种并行通风方式中，采用楔形通道的方案结构相对复杂一些，所以采用风扇位于电池组上表面中部的并行通风方式是简单有效的。

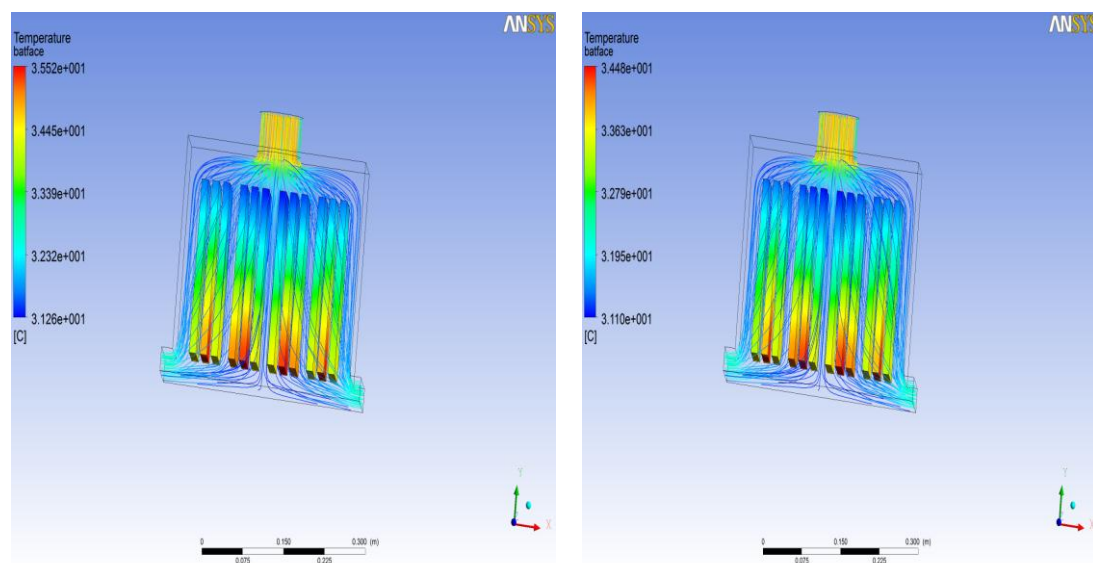


图 4.15 电池组以 1.5m/s 和 2m/s 风速散热仿真结果

另外分别采用不同风速进行仿真,最终的温度场和流场分布如图 4.15 所示,具体最高温度和温差值如表 4.3 所示,可以根据仿真结果选择合适的散热风扇功率进行不同等级的散热。

表 4.3 电池组在不同风速下温度仿真结果对比

| 风速 (m/s) | 最高温度 (°C) | 最低温度 (°C) | 温差 (°C) |
|----------|-----------|-----------|---------|
| 1.0 | 37.6 | 31.6 | 6 |
| 1.5 | 35.5 | 31.2 | 4.3 |
| 2.0 | 34.5 | 31.1 | 3.4 |

4.4 本章小结

本章主要是根据第二章对电池生热和传热原理的分析,确定电池热特性仿真所需参数,并根据原电池结构进行了抽象简化建模,得到了锂离子电池的三维模型,然后进行了电池的 1C 充电温度场的仿真,并结合第三章的仿真结果,以最大电流 80A 仿真得到电池组的温升情况,可知电池组在某些条件下需要进行散热使电池组工作在最优工作温度区间。本文根据当前电池组散热方式及传热介质的对比分析,确定使用风冷方式完全能满足所研究电池组的散热需求,仿真对比了三种不同结构形式的散热情况,综合考虑分析后,选择了一种采用并行通风方式的方案,并选用不同风速进行仿真,采用该方案的电池组,其温度分布比较均匀,温差可小于 5°C,满足使用要求。

第5章 复合电源系统优化设计与控制

5.1 DC/DC转换器拓扑选择与控制

DC/DC转换器作为复合电源系统能量均衡和电压等级转换部件,起着非常重要的作用,它主要有三种形式:降压(Buck)、升压(Boost)和双向升降压(Buck-Boost),按照有无变压器分为隔离式和非隔离式两种,隔离式转换器可以实现对输入输出端电压的隔离,能够获得彼此隔离的多路输出电压,可实现大倍率输入输出电压比的转换。而本文所用超级电容和蓄电池最大电压倍数不超过5倍,只需在两者之间进行电压转换,并不需要多路输出,隔离变压器大范围调节电压的优点未能充分利用,而且由于隔离式转换器内部采用变压器,成本相对较高,且电磁干扰严重,所以采用结构简单成本较低的非隔离式DC/DC转换器。

在非隔离式DC/DC中,半桥式双向升降压DC/DC转换器(如图5.1所示)可以实现高低压端超级电容和电池之间的能量转换,当启动发动机和加速助力时,超级电容放电消耗电能,电压下降达到限值时,控制DC/DC工作在升压模式,电池给超级电容充电;当整车制动时,超级电容补充电能,电压达到上限值时,控制DC/DC处于降压模式,超级电容放电给电池补充电能。

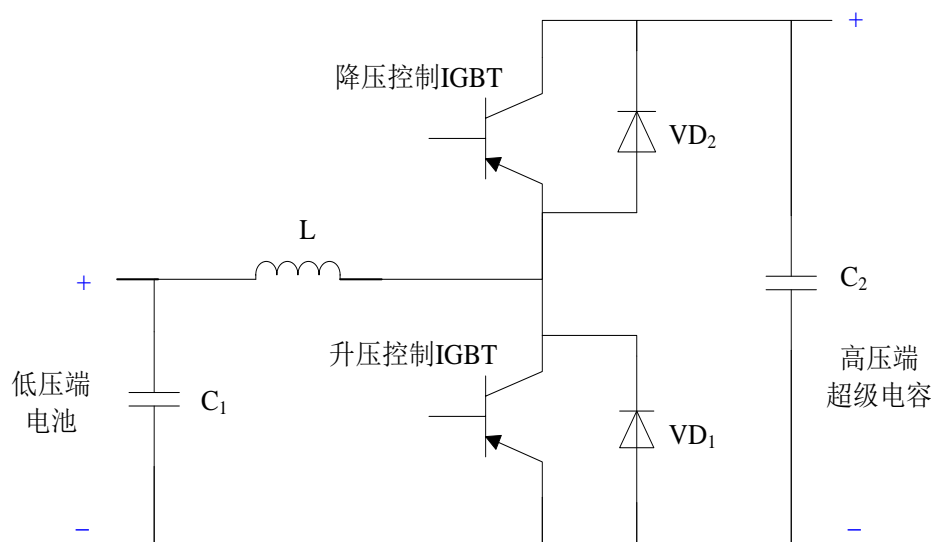


图 5.1 半桥式双向DC/DC转换器拓扑

半桥式双向升降压DC/DC转换器具体工作原理如下:DC/DC工作主要是

操控开关管 IGBT 的导通与关断进行电压调节,从而达到升降压转换和能量流动方向改变的目的。当 DC/DC 处于降压模式时,高压端利用降压开关管 IGBT 进行降压转换,并经电感 L 和电容 C_1 滤波获得当前低压端电压,二极管 VD_1 此时起续流作用,超级电容对电池组充电;当 DC/DC 处于升压模式时,低压端利用升压开关管 IGBT 斩波升压,并经电感 L 和电容 C_2 获得当前高压端电压,二极管 VD_2 此时起续流作用,电池组对超级电容进行功率补充。 DC/DC 转换器工作控制流程如图 5.2 所示。

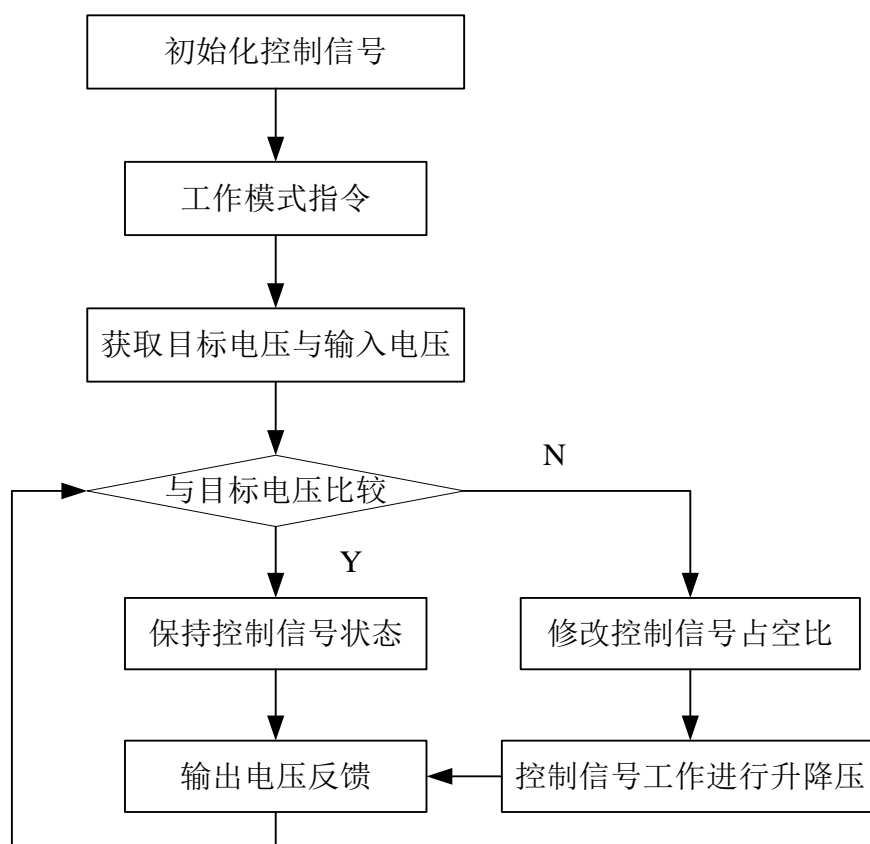


图 5.2 DC/DC 转换器控制流程图

5.2 电池组和超级电容参数选择及控制

前文第三章对复合电源系统仿真可知,48V 超级电容能够满足本文所用车型启动加速和制动能量需求,结合目前市场上的超级电容可知,Maxwell 公司生产的 BMOD0165 超级电容能够满足需要,并且模块封装良好,循环寿命达 100 万次,基本上超过整车使用寿命,能够真正达到免维护,参考该商业化的 48V 超级电容模块具体尺寸参数,为复合电源系统优化设计提供依据,结合前文对电池

组结构的设计，选取的电池组和超级电容模块的尺寸如表 5.1 所示。

表 5.1 复合电源系统部件尺寸

| 复合电源部件 | 长 (mm) | 宽 (mm) | 高 (mm) |
|--------|--------|--------|--------|
| 电池组 | 328 | 230 | 300 |
| 超级电容 | 418 | 194 | 179 |

电池组和超级电容模块均是由多个单体通过串并联组合而成，要使其发挥良好的性能，必须对其进行实时数据监测，以便根据实时状态进行相应的控制。

电池组各模块需要实时地采集其单体电压、电流和各监测点温度等信号，并且利用软件编程计算出总电压、SOC、最高最低单体电压和单体温度，确保其维持在合理的工作电压和温度区间内。超级电容模块管理系统也是如此，模块信号采集具体流程如图 5.3 所示。

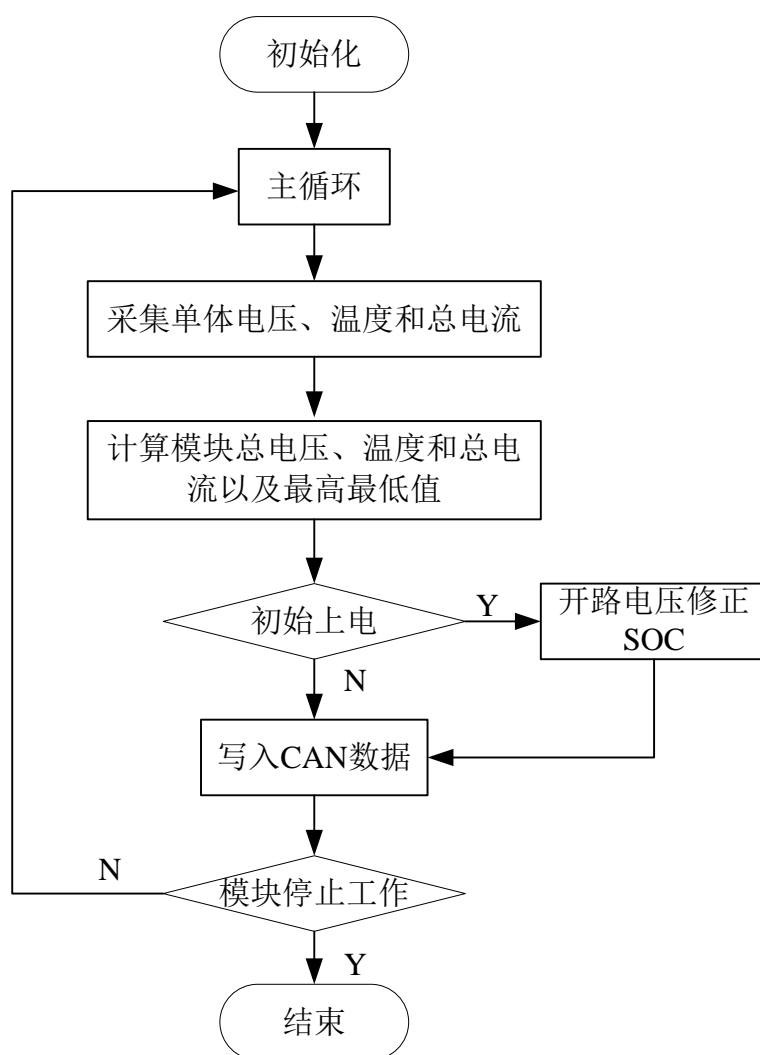


图 5.3 电池和电容模块信号采集主控单元流程图

5.3 复合电源系统控制

根据第三章对采用双电压复合电源的微混车仿真结果，将 NEDC 循环工况下的电池电流（如图 5.4）转化为对应的生热速率（如图 5.5），并编制 UDF 文件导入到 FLUENT 中，进行仿真，可得电池组的一个循环工况下的生热情况（如图 5.6）。

由图 5.6 可知，电池组在一个循环工况下(1179s)由初始温度升高将近 3°C ，所以汽车行驶一个小时电池组约升高 9°C ，而锂离子电池最佳工作温度为 30°C 左右，所以，在炎热的夏天或长时间行驶条件下，电池组有散热需求。根据前文对持续大电流生热的散热仿真结果表明，本文所采用的结构可以很好的满足电池组散热的需求，所以电池组可以控制在适宜的温差范围内同时最高温度不致过高。

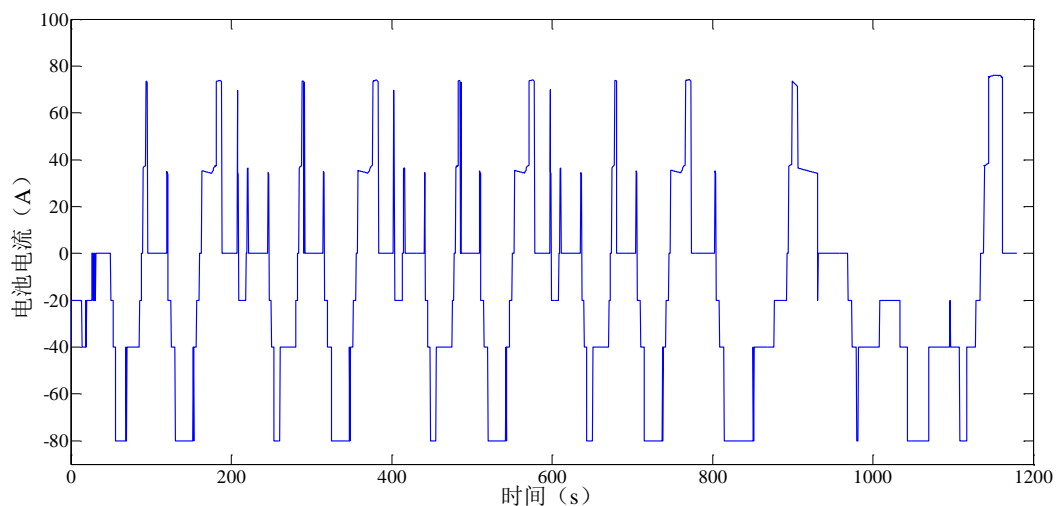


图 5.4 NEDC 工况下电池组电流仿真结果

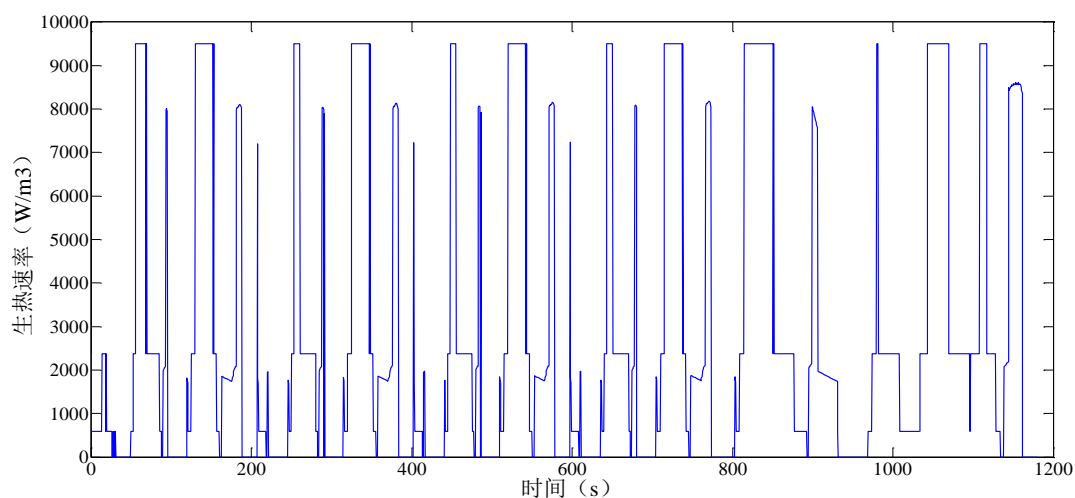


图 5.5 NEDC 工况下电池组生热速率

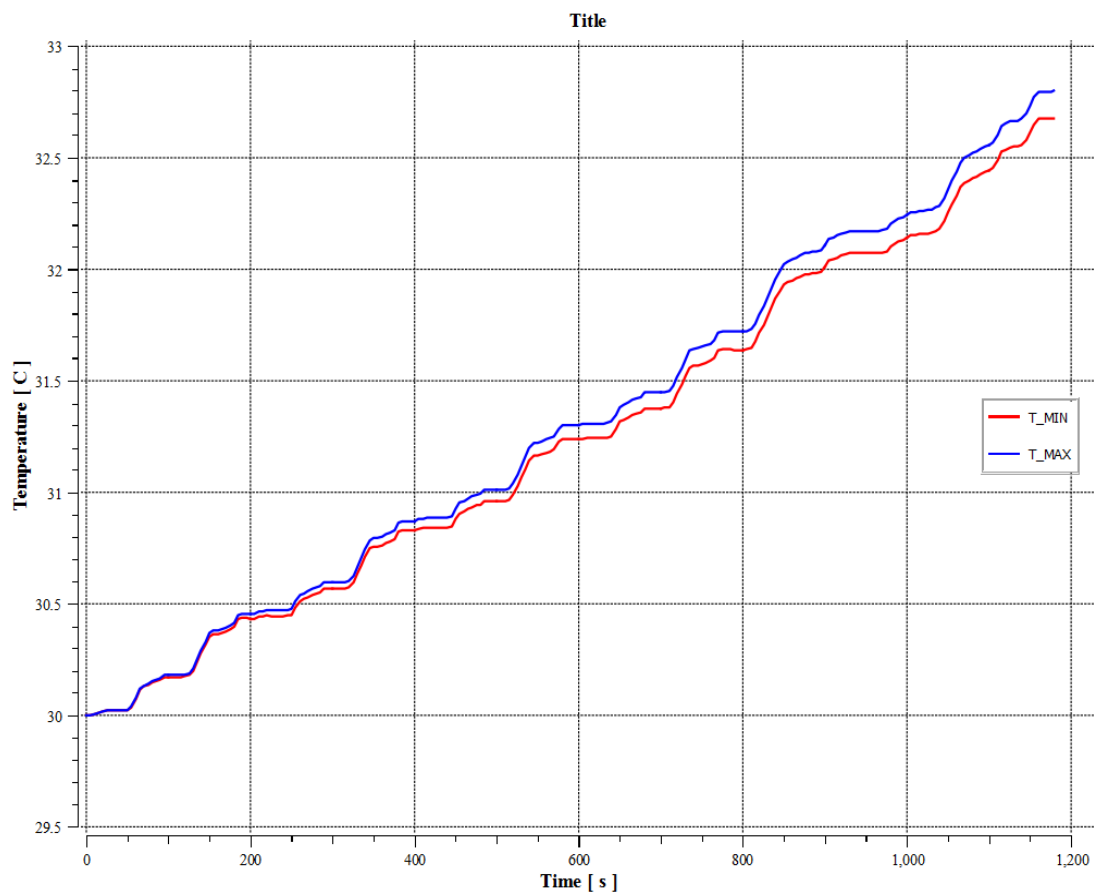


图 5.6 NEDC 工况下电池组温升情况

电池组散热风扇可以采用分级控制，即当其最高温度达到某一温度 T_1 时，开启 v_1 风速进行冷却，如果电池温度仍然持续升高，当温度达到 T_2 ($T_2 > T_1$) 时，开启 v_2 ($v_2 > v_1$) 风速进行冷却。当电池温度降低到合适温度 T_3 时，冷却风扇关闭，直到电池温度再次升高到限值才会开启进行不同级别的冷却。

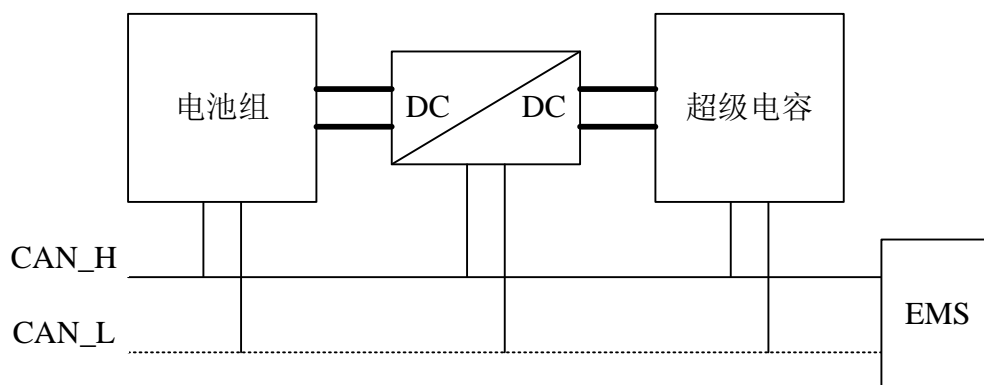


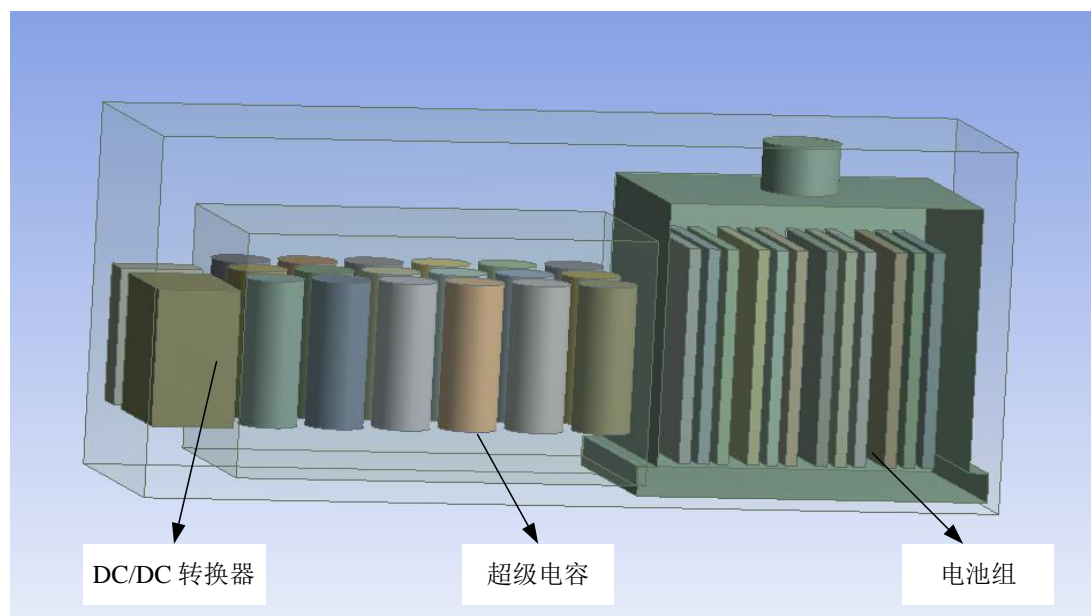
图 5.7 复合电源系统电气架构

复合电源系统中各部件的控制主要是通过 CAN 通讯进行信息交互(如图 5.7 所示)，能量管理系统 EMS 作为整个系统的“大脑”，控制复合电源系统正常地

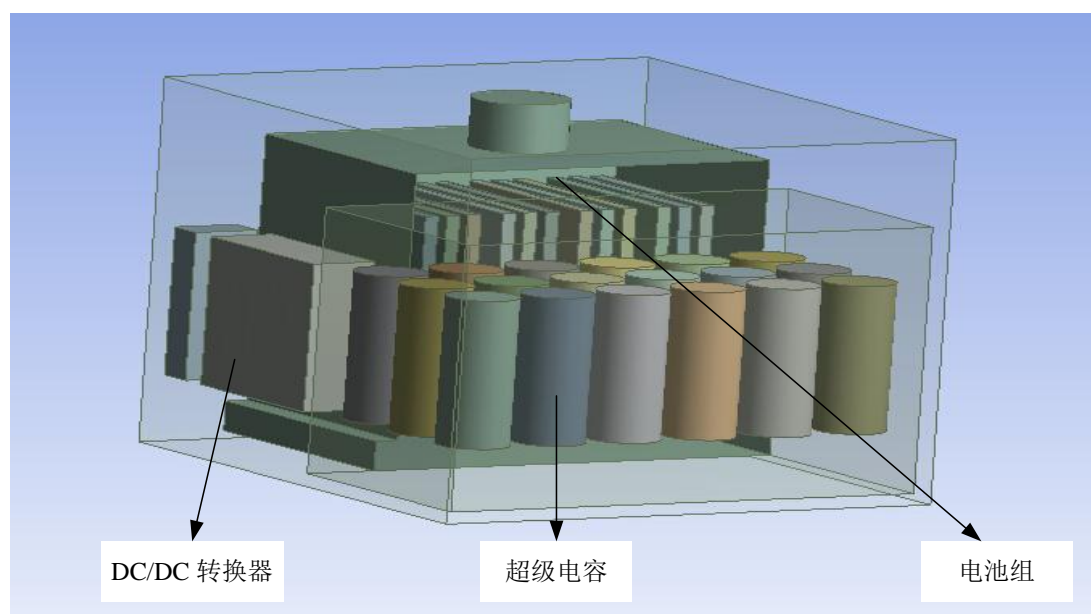
工作。

5.4 复合电源系统总体结构布置

由前文对电池和超级电容尺寸分析可知，复合电源系统整体尺寸不大，可以考虑将其整合为一个复合电源模块，图 5.8 为两种复合电源系统结构布置示意图。



结构方案 1



结构方案 2

图 5.8 复合电源系统结构布置示意图

可以根据将复合电源置于座位底部、后备箱或发动机舱处，实现复合电源系统的整体散热控制。表 5.2 为复合电源系统的相关参数：电池组中单体 3 个单体

并联组成一个模块，然后4个模块串联成组；超级电容采用可采用Maxwell生产的BCAP3000P270K03，18个电容单体串联成组，单体间隙为10mm。

表 5.2 复合电源系统参数

| 复合电源部件 | 单体尺寸 (mm) | 单体个数 | 单体电压 (V) |
|--------|-------------|------|----------|
| 电池组 | 220×12×170 | 12 | 3.2 |
| 超级电容 | Φ60×138 | 18 | 2.7 |
| 复合电源构型 | 长×宽×高 (mm) | | |
| 结构方案 1 | 858×250×320 | | |
| 结构方案 2 | 470×430×320 | | |

本文所设计的复合电源系统主要考虑到当前电池成本过高和电池的生热问题，并且适应当前汽车大功率需求而提出的48V电压标准的趋势，所以采用双电压复合电源，仿真结果表明该系统既能使电池工作在较优的温度范围，又能达到以最低成本实现节能减排的目的。

5.5 本章小结

本章主要对所构建的复合电源系统进行了部件的分析，最终确定其结构形式及其工作和控制原理等，同时对其在整体中的布局做了初步分析，并且结合前文的仿真结果对其循环工况下的生热进行了分析，结合循环工况模拟情况，基于热特性进行复合电源系统的设计和控制，确定合适的风扇控制，使复合电源工作在适宜的温度区间之内。仿真结果表明基于电池热特性进行复合电源系统优化设计和控制能够使电池单体一致性增强，延长其使用寿命。

第6章 全文总结与工作展望

6.1 全文总结

当前能源短缺与环境污染问题日益突出,节能与新能源汽车的发展被提上日程,但其发展主要受制于车用电源技术,高压成组电源成本及安全性等问题。为了以最小成本最大程度地改善整车燃油经济性,本文将原有的传统轻型车改进为采用双电压复合电源的微混车,提高整车能量利用率。同时,考虑到电池的生热问题对其使用性能的影响,对其生热特性进行了分析。最终,通过结构和控制两方面的优化,实现了复合电源系统的集成化设计。本文所做的研究工作有如下几个方面:

1、分析探讨了温度对电池使用性能的影响,并从理论入手分析了锂离子电池生热及传热机理,基于电池充放电实验对其充放电温度特性进行了初步分析,论证了基于热特性分析进行复合电源设计的必要性。

2、分析研究复合电源系统各部件特性,确定了双电压复合电源系统构型及参数,利用 *AVL Cruise* 搭建了采用复合电源的微混车仿真平台,并利用 *Matlab/Simulink* 搭建复合电源控制策略,联合仿真得到电池包在整个循环过程中的电流随时间的变化曲线,并对其动力性及燃油经济性进行仿真并与原车对比,仿真结果表明,所制定的控制策略能够很好地实现对复合电源电压的控制,并且燃油经济性有所提高。

3、根据锂离子电池生热传热模型,获得相关热物性参数,定义其边界条件,建立了三维锂离子电池电化学-热耦合模型,利用计算流体力学仿真软件 *Fluent* 对单体及电池组进行温度场仿真,为其散热结构设计提供理论依据。选择了合适的传热介质和散热通道,并对电池组进行了流场仿真。

4、选择合适的 *DC/DC* 转换器的电路拓扑和电池电容参数,并对各部件系统控制原理进行了研究分析。在循环工况下,仿真得到了电池组的温升特性曲线,验证了所设计的电池组结构的可行性,最后确定了复合电源系统整体布置方案、控制策略及参数。

6.2 工作展望

基于电池组的热特性分析,本文对微混车用复合电源进行了优化设计与控制,利用 *AVL Cruise* 建立了搭载复合电源的整车仿真平台,采用 *Matlab/Simulink* 搭建复合电源控制策略。仿真结果表明,采用低压复合电源对于提高整车燃油经济性具有一定的效果。同时,对电池组的生热传热问题进行了研究,从三维视角分析电池组在使用过程中的温度分布情况,并且设计了合理的通风散热结构,最终对复合电源系统集成设计与控制进行了研究。

本文在复合电源控制和系统结构优化设计方面取得了一定成果,但时间和实验条件有限,只对基于热特性分析进行复合电源优化设计和控制的方案进行了初步探索研究。本文的后续工作可以从以下几个方面开展:

- 1、本文主要对电池组部分的热特性进行了分析研究,但未考虑超级电容和 *DC/DC* 转换器的生热特性,而且这方面的相关研究也比较少,所以下一步可以对超级电容和 *DC/DC* 转换器等电气功率部件的热特性进行研究分析,从而真正依据复合电源系统部件协同工作时的热特性,进行系统整体散热结构设计和控制优化。

- 2、在分析电池热特性时,本文采用的是三维电化学-热耦合模型,该模型假设电池内部电流密度均匀,并且电池单体采用不分层结构,未考虑电池内部电流密度分布。为了提高模型准确性,论文可以对电池内部的电流分布进行研究,建立更加细化的电池分层结构模型。另外电池内阻与多个因素有关,最好获得内阻与温度、电池 *SOC* 的关系图,拟合出包含多因素的电池生热速率,更真实地反映电池组的温度场分布。

- 3、复合电源系统设计还应该考虑整车空间布置问题,其安放位置也会影响其热特性,特别是在夏季高温等极端天气下,太阳辐射对整车影响严重,会使复合电源工作在较高温度条件下。另外,本文未考虑低温条件下的电池加热问题。因此,复合电源设计应综合考虑各种使用条件。

- 4、本文基于热特性仿真进行了电池组结构和复合电源整体设计,未进行试验对比,应该搭建复合电源实物台架,指导修正复合电源结构设计和控制。

参考文献

- [1] OEMs Production Volume and CAFC Status in 2013, MIIT China, 2014.
- [2] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光. 现代电动汽车技术[M].北京:北京理工大学出版社,2002,11.
- [3] 陈全世,朱家琏,田光宇. 先进电动汽车技术[M].北京:化学工业出版社,2007,8.
- [4] 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,2005,5.
- [5] Henning M. Hauenstein.总成架构的演变_失败的 42V 电池总成与成功的 48V 电源总线[J],电子产品世界,2013,11:28-31.
- [6] 朱玉龙 .42V 电气系统如何败北? [EB/OL]. [2014-06-18].
<http://www.eefocus.com/automobile-electronics/328767>
- [7] 详解长安马自达 CX-5 智能回收系统 [EB/OL]. [2013-11-01].
http://price.pcauto.com.cn/28410/news_detail3695758.html
- [8] 刘杰.混合动力轿车用复合电源参数匹配与优化设计研究[D].长春:吉林大学汽车工程学院, 2011.
- [9] Ahmad Pesaran. Factors and Conditions for Widespread Use of Ultracapacitors in Automotive Applications[R]. Proceedings of the Advanced Capacitors World Summit, San Diego, California USA,2007,7.
- [10] Ahmad Pesaran, Jeff Gonder, Matt Keyser. Ultracapacitor Applications and Evaluation for Hybrid Electric Vehicles[R]. Advanced Capacitors World Summit,2009.
- [11] Bohn T. Active Combination of Ultracapacitors and Batteries for PHEV ESS[C]. DOE Vehicle Technologies Program Annual Merit Review, 2009.
- [12] Gregory Wight, et al. Integration and Testing of a DC/DC Controlled Supercapacitor into an Electric Vehicle[J]. Proceedings of EVS-18,2001.
- [13] Masoud Masih-Tehrani, et al. Optimum sizing and optimum energy management of a hybrid energy storage system for lithium battery life improvement[J] Journal of Power Sources,2013,244:2-10.
- [14] Jorge Moreno, et al. Energy-Management System for a Hybrid Electric Vehicle, Using Ultracapacitors and Neural Networks[J].IEEE TRANSACTIONS ON

- INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2006,53(2):614-623.
- [15] 于远彬.车载复合电源设计理论与控制策略研究[D],长春:吉林大学,2008.
- [16] 于远彬,王庆年,王伟华等. 应用复合电源的轻度混合动力汽车的参数匹配[J]. 吉林大学学报(工学版),2009,39(2):281-285.
- [17] 曲晓冬. 混合动力车用复合电源匹配与控制理论研究[D],长春:吉林大学汽车工程学院,2014.
- [18] 王晓峰, 王大志,梁吉,孔祥华.双电层电容器及其复合电源系统的研制[J].电子学报,2002,30(8):1100-1103.
- [19] 曹秉刚,曹建波,超级电容在电动车中的应用研究[J],西安交通大学学报,2008,42(11),1317-1322.
- [20] “睿控体验”之旅 探访宇通客车新能源基地 [EB/OL]. [2014-01-04].<http://www.yutong.com/news/mediareports/01/2014ADQ7DCr7KD.shtml>
- [21] 邓隆阳,黄海燕.超级电容性能试验与建模研究[J].车用发动机,2010,1:28-32.
- [22] 李腾,林成涛,陈全世. 锂离子电池热模型研究进展 [J]. 电源技术,2009,33(10):927-932.
- [23] Bernadi D, Pawlikowski, E Newman J. A general energy balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society,1985,132(1):5-12.
- [24] Yufei Chen, James W.Evans. Three-Dimensional Thermal Modeling of Lithium-Polymer Batteries under Galvanostatic Discharge and Dynamic Power Profile[J]. Journal of the Electrochemical Society,1994,141(11):2947-2955.
- [25] G.H. Kim and A. Pesaran, Battery Thermal Management System Design Modeling. Presented at the 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Conference and Exhibition (EVS-22)[C] Yokohama, Japan, 2006,10.
- [26] Donghwa Shin, Massimo Poncino, and Enrico Macii. Thermal management of batteries using a hybrid supercapacitor architecture[C], Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition (DATE), 2014.
- [27] Ui Seong Kima, Chee Burm Shin, Chi-Su Kim. Modeling for the scale-up of a lithium-ion polymer battery[J]. Journal of Power Sources, 2009, 189: 841-846.

- [28] 李哲.纯电动汽车磷酸铁锂电池性能研究[D].清华大学,2011.
- [29] 魏解元.车用锂离子电池组集成技术的研究[D].清华大学,2012.
- [30] 陈磊涛,许思传,常国锋.混合动力汽车动力电池热管理系统流场特性研究[J],
汽车工程,2009,31(3):224-227.
- [31] 车杜兰.电动汽车锂离子电池包热特性研究与优化设计[D].武汉:武汉理工大学汽车工程学院,2009.
- [32] 沈帅.纯电动汽车电池箱热特性研究及热管理系统开发[D].长春:吉林大学仪器科学与电气工程学院,2013.
- [33] 陈梓铭.混合动力公交客车锂离子动力电池舱的热特性研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [34] Ahmad A. Pesaran. Battery Thermal Management in EVs and HEVs Issues and Solutions[C]. Advanced Automotive Battery Conference, 2001.
- [35] 李平,安宗强,张剑波等.电动汽车用锂离子电池的温度敏感性研究综述[J].汽车安全与节能学报,2014,5(3):224-237.
- [36] 桂长清.温度对 LiFePO₄ 锂离子动力电池的影响[J]. 电池, 2011,41(2):88-91.
- [37] 王震坡,孙逢春,林程.不一致性对动力电池组使用寿命影响的分析[J]. 北京理工大学学报,2006,26(7):577-580.
- [38] Brian Cunningham. Automotive Li-ion battery cooling requirements[R]. U.S. Department of Energy, 2012.
- [39] 黎火林, 苏金然. 锂离子电池循环寿命预计模型的研究[J]. 电源技术, 2008, 32(4): 242-246.
- [40] Ehsan Samadani, Josh Lo, Michael Fowler et al. Impact of Temperature on the A123 Li-Ion Battery Performance and Hybrid Electric Vehicle Range[J], SAE International, 2013.
- [41] 李哲,韩雪冰,卢兰光,欧阳明高.动力型磷酸铁锂电池的温度特性[J].机械工程学报,2011,47(18):115-120.
- [42] 付正阳, 林成涛, 陈全世.电动汽车电池组热管理系统的关键技术[J]. 公路交通科技, 2005,22(3):119-123.
- [43] 康海鹏.锂离子动力电池生热特性分析及其选配[D].长春:吉林大学,2014.

- [44] 张云云. 电动汽车用动力 LiFePO₄ 电池散热结构的设计[D].广州:广东工业大学,2013.
- [45] 陶文铨.传热学[M]. 西安:西北工业大学出版社,2006.12.
- [46] 辛乃龙.纯电动汽车锂离子动力电池组热特性分析及仿真研究[D].长春:吉林大学汽车工程学院,2012.
- [47] 乔海波.车用 DC_DC 变换器主电路及其电磁兼容性研究[D].上海:同济大学电子与信息工程学院,2008.
- [48] 巴特.混联混合动力客车的参数匹配与控制策略研究[D].长春:吉林大学,2012.
- [49] 刘博.混合动力车用复合电源控制策略的研究[D].长春:吉林大学,2006.
- [50] 曹国强.混合动力车用复合电源系统开发与实验验证[D].长春:吉林大学,2011.
- [51] Ahmad A. Pesaran, Steve Burch, Matthew Keyser. An approach for designing thermal management systems for electric and hybrid vehicle battery packs[C]. The Fourth Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition, 1999, 5.
- [52] 张师帅.计算流体动力学及其应用[M].武汉:华中科技大学出版社,2011,1.
- [53] 唐家鹏.FLUENT14.0 超级学习手册[M].北京:人民邮电出版社,2013.
- [54] SC Chen, CC Wan, YY Wang. Thermal analysis of lithium-ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2005, 140(1):111-124.
- [55] Mao-Sung Wu K. H. Liu Yung-Yun Wang and Chi-Chao Wan. Heat dissipation design for lithium-ion batteries[J], Journal of Power Sources,2002,109:160-166.
- [56] Noboru Sato. Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric and hybrid vehicles[J]. Journal of Power Sources,2001,99:70-77.
- [57] 彭强. 电动汽车用锂离子动力电池热效应研究[D].长春:吉林大学,2012.

致 谢

本文是在导师于远彬副教授的悉心指导下完成的，于老师对我学术上的指导让我受益良多，从论文的选题到撰写以及科研项目实践，每一步都得益于导师的指导。课题组的闵海涛教授与王鹏宇副教授对于研究生学习和论文指导也给予了很大帮助。三位老师在工作生活上言传身教并且以身作则，让我受益匪浅，他们渊博的学识、认真负责的工作态度和严谨的治学精神不但在研究生阶段影响了我，而且将会在以后的工作生活中激励我努力拼搏，在此一并表示由衷感谢。

感谢课题组的师兄毕东阳、康海鹏、张聪、熊建、侯惟侯，同届同学蔡周、赵继岭、吴祯利、郭丁伊、吕亮，师弟彭凯、吕文强、肖松和谢秀磊等在选题和课题开展方面以及实验数据的获取、分析和处理上给予的无私帮助，也感谢所有研究生期间认识的伙伴们，在研究生期间给予的支持和帮助，与你们相识是人生中的宝贵财富。

感谢我的父母、大姐和二姐等亲人，求学路上，你们无私的付出，默默的支持与殷切的关怀是我前进的不竭动力，愿你们一生幸福安康。

三年研究生生活转瞬即逝，在此向曾经帮助和关心过我的亲朋好友们诚挚地道声谢谢，祝你们前程似锦，生活顺心。

2015年4月6日

于长春