



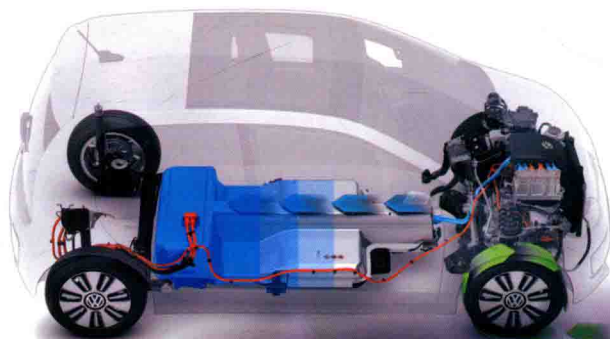
新能源汽车关键技术研发系列

普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

动力电池 系统设计

Design of Power Battery System

徐晓明 胡东海 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新能源汽车关键技术研发系列
普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

动力电池系统设计

徐晓明 胡东海 编著



机械工业出版社

本书旨在探究动力电池系统的匹配设计,先简要介绍动力电池系统设计的发展概况,使读者有一个清晰的认识,之后详细介绍了动力电池的系统方案设计、机械结构设计、高压电连接设计、管理系统设计、热管理系统设计。为了让读者有更为直观的理解,本书还系统研究了动力电池系统仿真分析技术,从原理讲到结构,再匹配仿真实例。本书也考虑到了工程应用,对动力电池系统安全测试技术、动力电池系统制造技术和动力电池系统的应用进行了详细介绍。

本书适合电动汽车工程技术人员及研究人员阅读使用,也可供大专院校电动汽车、动力电池专业作为教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

动力电池系统设计/徐晓明,胡东海编著. —北京:机械工业出版社,2018.12

(新能源汽车关键技术研发系列)

ISBN 978-7-111-61485-2

I. ①动… II. ①徐…②胡… III. ①电动汽车-蓄电池-系统设计
IV. ①U469.720.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第265991号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:孙鹏

责任编辑:孙鹏

责任校对:樊钟英 王延 封面设计:张静

责任印制:常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2019年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·19印张·366千字

0 001—2 500册

标准书号:ISBN 978-7-111-61485-2

定价:89.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前言



近年来,我国的电动汽车发展进入了关键时期,电动汽车对于缓解能源危机以及环境保护的意义得到了广泛的认可及重视。

与传统内燃机驱动的汽车相比,电动汽车需要解决一系列与“电”有关的技术问题、例如驱动电机问题、动力电池问题、电辅助系统问题,等等。这一系列的技术点将构成新的属于电动汽车的技术体系。本书所涉及的动力电池系统设计技术,融合了机械结构、电子、系统管理等相关技术,重点解决动力电池系统集成、安全保护以及制造问题。

本书是笔者依据过去8年在电动汽车相关领域工作的积累所编写的,笔者在从事动力电池系统设计研究的初期,也非常希望能有一本类似的技术文献可以参考,但当时国内外几乎没有类似的高水平出版物。随着电动汽车的研发越来越热,从事这一行业工作的工程技术人员越来越多,笔者认为有必要把这几年的一些体会与同行们分享。希望本书能实现两个目的:其一,系统地阐述动力电池系统设计技术的要点,供新入门的同行参考,避免走弯路;其二,抛砖引玉,希望引起更多的同行朋友对这一技术领域的重视,多出版一些图书,供大家参考,共同促进电动汽车核心技术的快速发展。

本书的主要技术工作,源于江苏大学汽车学院新能源汽车研究中心从事电动汽车相关科研工作的同志们的辛勤劳动,正是整个团队的坚持才有今天的成果。

目 录



前言

第1章 动力电池系统发展概述	1
1.1 动力电池系统技术发展概述	1
1.1.1 电池单体选型设计	2
1.1.2 机械结构设计	4
1.1.3 高压电气设计	5
1.1.4 电池管理系统设计	6
1.1.5 热管理系统设计	7
1.1.6 仿真分析技术	7
1.1.7 安全测试技术	8
1.1.8 制造工艺技术	9
1.2 动力电池系统发展趋势	10
参考文献	12
第2章 动力电池系统方案设计	13
2.1 动力电池方案设计概述	13
2.1.1 动力电池系统方案设计流程	13
2.1.2 动力电池系统方案设计需求	14
2.2 机械结构设计	18
2.2.1 机械结构设计要求	18
2.2.2 机械结构设计方案	21
2.3 高压电气设计	23

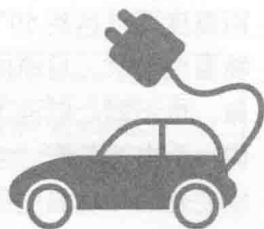
2.3.1	高压电气设计要求	23
2.3.2	高压电气系统设计方案	25
2.4	热管理系统设计	27
2.4.1	热管理系统设计要求	27
2.4.2	热管理系统设计方案	28
	参考文献	31
第3章	动力电池系统机械结构设计	32
3.1	机械结构设计原理	33
3.1.1	弹性变形体的基本假设	33
3.1.2	应力应变计算	33
3.1.3	材料模型	36
3.1.4	冲击分析	37
3.1.5	疲劳强度计算	38
3.2	动力电池系统总布置设计	42
3.2.1	外部布置设计	42
3.2.2	内部布置设计	47
3.3	动力电池箱体设计	49
3.3.1	强度设计	49
3.3.2	轻量化设计	52
3.3.3	IP 防护设计	55
3.3.4	防火阻燃设计	56
3.3.5	防腐设计	57
3.3.6	防呆设计	58
	参考文献	60
第4章	高压电连接设计	61
4.1	高压电气设计原理	61
4.2	高压系统匹配设计	65
4.2.1	总体设计规则	65
4.2.2	电池配组要求设计	66
4.2.3	电池组电连接要求	73
4.3	过载/短路保护设计	87
4.3.1	熔断器选型	87
4.3.2	接触器选型	89

4.3.3	断路器选型	92
4.4	预充电回路保护设计	93
4.5	直接接触保护设计	95
4.5.1	手动维修开关选型	95
4.5.2	高压插接件选型	96
4.5.3	高压互锁设计	101
4.6	间接接触保护设计	104
4.6.1	空气间隙	104
4.6.2	爬电距离	106
4.6.3	等电位联结	107
4.7	高压配电箱设计	109
	参考文献	111
第5章	动力电池管理系统设计	113
5.1	监测功能设计	113
5.1.1	电压监测设计	113
5.1.2	电流监测设计	118
5.1.3	温度监测设计	123
5.2	控制功能设计	128
5.2.1	均衡控制设计	128
5.2.2	充放电控制设计	129
5.2.3	充电匹配设计	132
5.3	状态估计功能设计	133
5.3.1	电池剩余电量估计	133
5.3.2	电池健康状态估计	135
5.4	故障诊断与预警功能设计	136
5.4.1	显示报警设计	136
5.4.2	电池故障报警设计	138
5.5	功能稳定性设计	143
5.5.1	BMS 抗干扰设计	143
5.5.2	线束抗干扰设计	146
	参考文献	148
第6章	热管理系统设计	150
6.1	热管理系统概述	150

6.2	热管理系统设计原理	151
6.2.1	电池单体产热机理	151
6.2.2	电池单体传热机理	152
6.3	均热散热系统设计	153
6.3.1	散热方式选择	153
6.3.2	风冷系统设计	154
6.3.3	液冷系统设计	158
6.3.4	其他冷却方案介绍	165
6.4	加热系统设计	169
6.4.1	加热方式选择	169
6.4.2	电热膜	170
6.4.3	PTC 加热	171
6.4.4	液体加热	173
6.5	保温设计	173
6.5.1	保温材料选择	173
6.5.2	隔热设计	174
6.5.3	防火考虑	175
	参考文献	176
第7章	动力电池系统仿真分析技术	177
7.1	动力电池系统仿真分析原理	177
7.1.1	有限元分析方法	177
7.1.2	计算结构力学	178
7.1.3	计算流体力学	180
7.2	结构仿真分析技术	188
7.2.1	主流结构仿真软件介绍	188
7.2.2	CAE 基本求解过程	192
7.2.3	动力电池系统 CAE 实例	194
7.3	CFD 仿真分析技术	201
7.3.1	主流流场仿真软件介绍	201
7.3.2	CFD 基本求解过程	205
7.3.3	动力电池 CFD 实例	211
	参考文献	213
第8章	动力电池系统安全测试技术	216

8.1	动力电池单体特性测试	216
8.1.1	容量及充放电效率测试	216
8.1.2	放电倍率特性测试	218
8.1.3	电动势曲线及等效内阻测试	218
8.1.4	循环寿命测试	221
8.2	电池管理系统测试	228
8.2.1	物理参数采样精度测试	228
8.2.2	EMC 性能测试	232
8.2.3	SOC 估算功能测试	234
8.2.4	电池均衡功能测试	237
8.3	动力电池系统测试	238
8.3.1	安全性测试	238
8.3.2	电性能测试	241
8.3.3	可靠性测试	247
8.3.4	壳体防护功能测试	249
	参考文献	252
第9章	动力电池系统制造技术	254
9.1	电池单体制造技术	254
9.1.1	混浆	254
9.1.2	涂覆	255
9.1.3	卷绕与叠片	255
9.1.4	封装	255
9.1.5	化成和老化	256
9.2	模组制造技术	257
9.2.1	清洗	257
9.2.2	涂胶	258
9.2.3	焊接	267
9.3	箱体制造技术	279
9.3.1	焊接	281
9.3.2	钣金	281
9.3.3	铸造	282
9.3.4	冲压	283
9.3.5	喷涂	283

参考文献	285
第 10 章 动力电池系统应用	287
10.1 纯电动汽车	287
10.2 增程式混合动力汽车	289
10.3 插电式混合动力汽车	291
参考文献	294



1.1 动力电池系统技术发展概述

动力电池系统是指基于整车厂客户不同车型的个性化需求，对动力电池 BMS 方案、热管理、空间尺寸、结构强度、系统接口、IP 等级和防护等进行定制化研发与设计，通过各种成熟技术的交互使用实现动力电池组各模块的有机结合，保障核心储能装置电池单体的安全性和稳定性，有效提升动力电池系统与不同厂商的不同车型的匹配性和应用性。动力电池系统是连接上游电池单体生产与下游整车运用的核心环节，需要大量成熟技术的相互交叉与协作，其主要的技术包括电池组、BMS（电池管理系统）、机械结构件（含箱体、安装件、导电金属件、密封件等）、高低压线束（含连接器及接插端子等）、热管理系统五大部分。

动力电池系统集成，在于梳理机、电、热、化之间的相互关系、相互作用、相互影响，定量和定性地分析产品是否能满足产品设计指标。

机即机械，电池包装载在汽车上，首先得考虑和满足机械方面的特征，产品需要具有足够的强度和刚度，在振动、冲击等机械载荷下不发生形变和功能异常，在碰撞、挤压、翻滚、跌落等事故状态下有足够的安全防护。

电指电子和电气，电动汽车依靠电能驱动车辆行驶，瞬时功率可能高达几百千瓦，电压范围从几十伏特到几百伏特，电流也可以达到正负几百安培。大电流的充电和放电，以及高电压的输出，意味着电池包有很高的电气载荷要求。此外，整个电池包由非常多的电池单体构成，为了有效地管理这些电池，控制电池包的充放电，以及响应整车层面的功能需求，电池包还有一套非常复杂的电池管理系统（BMS），由传感器、执行器、控制器（电控单元）等组件构成，采集系统的电压、电流、温度等数据，进行复杂的计算，与整车其他部件进行通信，完成特定的功能，实施判定系统的运行边界，控制系统的异常状态等。

热指电池包的热管理，首先是针对外部环境的热管理要求，在北半球的高纬度地区，冬季的室外温度会达到 -30°C ，甚至更低，而在低纬度地区，夏季的地

面温度可以达到 50℃ 以上，电动汽车必须面对严寒和酷暑这两个极端的使用环境温度要求。目前的电池技术，还无法应对这种挑战，为了延长电池的使用寿命，也不能让电池工作在如此宽广的环境温度下，所以必须在电池包设计的时候，为电池装配“空调”系统，夏季能够降温，冬季能够加热，从而解决大范围变化的环境温度所带来的挑战。针对内部热管理要求，因为电池内阻和电气部件阻抗的存在，充放电条件下，电池包内部会发热，电流越大，发热量越大，如果不能及时把内部热量散出去，轻则影响电池寿命，导致使用寿命快速衰减，重则引起热失控，带来安全问题。电池包产品的热管理系统是非常复杂的，要解决加热、散热、保温、热均衡等几方面问题。

化指的是电化学，即电池的电化学机理。以目前大量使用的锂离子电池为例，其表现出来的物理特性是有电化学机理所决定的。锂离子在正极和负极之前来回穿梭，与正极和负极发生化学反应，从而在正负极之间表现出充电和放电的物理特性（电子移动）。化学反应的数量规模，决定了电池的充放电的能量（产生的电子数量）；化学反应的快慢，决定了充放电速度；化学反应的可控与不可控，决定了电池的安全性；化学反应的可逆程度，决定了电池的寿命。电池内部的化学反应，除了跟电池本身的材料相关之外，还与外部的电气载荷和温度有非常大的相关性。如我们所知的，大倍率的充放电或者高温下使用，会导致电池寿命的衰减，短路会导致热失控等现象。

动力电池系统集成，是复杂系统产品开发的关键，除了对各个子系统需要有深入的研究之外，还要特别关注子系统的接口、交叉、相互影响等，以及由此表现出来的新特性。系统集成需要应用大量的过程分析方法，辅以仿真分析和测试验证，才能达到产品设计目标。

1.1.1 电池单体选型设计

在电池包产品的设计中，电池单体的选型设计最为关键。通常而言，对于自己研发和生产电池单体的企业来说，在电池包产品的开发过程中，包含电池单体设计与开发的内容，会基于客户的要求，开发一款满足电池包产品设计目标的电池单体。对于独立的电池包企业而言，在匹配整车需求的时候，就需要选择一款合适的电池单体，一般会选择已量产的电池单体，或者可以投入量产的电池单体（B 样或者 C 样阶段）。当然，有能力的电池包企业也可以推动电池单体企业同步开发全新的电池单体产品。常见的动力电池类型如图 1.1 所示。

电池单体是动力电池系统的基本组成，是电动车辆的能量存储装置，主要为车辆提供电能的吸收、存储和供应。电池单体的比能量、比功率和循环寿命等参数，直接影响电动车辆续航里程、加速和爬坡能力、使用寿命等性能。电池单体的选型和设计主要根据输入的动力电池系统性能要求等信息，转化为对它的设计

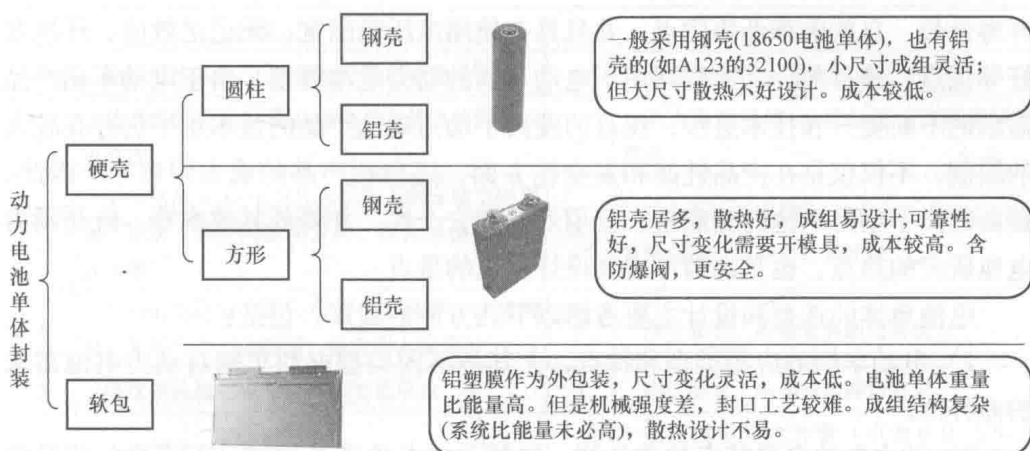


图 1.1 常见动力电池类型

开发要求等, 见表 1.1。

表 1.1 电池单体选型和设计输入输出表

输入	输出
产品的应用背景(车辆类型 BEV/PHEV、个人用户/出租运营、日均行驶里程、开发计划等)	电池单体产品技术成熟度要求
额定电压及工作电压范围要求	电池单体化学体系限制性要求
寿命起始时(25℃下), 需提供的总能量要求	电池单体额定电压、工作电压范围
寿命起始时(25℃下), 需提供的最小可用能量要求	电池单体串联数量需求
持续放电功率	电池单体容量设计或选型需求
峰值脉冲放电功率, 持续时间	电池单体并联数量需求
峰值回馈/充电功率, 持续时间	电池单体持续放电功率能力需求
快速充电功率/倍率(充电桩快速充电)	电池单体峰值放电功率能力需求
慢速充电功率/倍率(充电机慢速充电)	电池单体持续充电倍率能力需求
产品的重量/体积能量密度要求	电池单体峰值回馈功率能力需求
产品设计使用寿命和质量保证要求	电池单体重量能量密度要求
产品应用的环境条件和区域	电池单体循环寿命要求
产品的使用温度范围	可用温度(工作、储存)范围需求
产品的存储温度范围	电池单体测试、认证要求
产品的重量	电池单体限制性使用要求
相关行业规范、法律法规及认证要求	

与铅酸蓄电池、镍氢电池相比，锂离子电池具有工作电压高、比能量高、循环寿命长、自放电率低等优点，并且具有使用电压范围宽、无记忆效应、环境友好等优点，是目前公认比较适用于电动车辆的动力电池类型。由于电动车辆产品需求的不断提升和技术进步，现有的锂离子动力电池产品的技术水平仍存在较大的限制，不仅仅是在产品性能和安全性方面，还包括产品的成本因素等。因此，提高锂离子动力电池的比能量、使用寿命和安全性，并降低其成本等，既是动力电池研究的热点，也是选型考虑和设计优化的重点。

电池单体的选型和设计主要考虑以下几方面的因素，包括：

1) 电动车辆的应用类型和特点，尤其是不同类型电动车辆对动力电池需求的差异性。

2) 动力电池自身特点的差异性，包括动力电池产品性能、安全性、产品技术和工艺成熟度、产品价格、产能保证能力，以及环保因素等。

在动力电池选型过程中，需要重点关注动力电池特点的差异性，包括不同正负极材料体系和结构形式的动力电池产品，其对应的产品性能、安全性、产品技术和工艺成熟度、产品价格、产能保证能力，以及环保因素等方面。按照正负极材料体系进行划分，主要包括磷酸铁锂 (LiFePO_4)/C、镍钴锰三元 (NCM)/C、锰酸锂 (LMO)/C 等。

1.1.2 机械结构设计

电池包的结构设计，是根据整车对于电池包的产品功能要求、性能要求、包的尺寸要求、重量要求、挂点要求、接口要求、防护要求等，确定合适的箱体设计和电池包内部的电池模组设计、电连接设计、紧固设计等。在电池包产品的结构设计当中，最为关键的是电池模组设计和箱体设计。

电池模组设计需要考虑所选电池单体型号、模组能量密度、电流密度、外轮廓尺寸、机械接口、电气接口、模组加热散热、隔热、防火阻燃等因素，需要满足振动、翻滚、跌落、挤压、绝缘、刺击、海水浸泡等方面的要求。

电池包的箱体设计，需要考虑电池包外包络尺寸、电池模组尺寸、电池包结构强度、机械接口、电气接口、电池包能量密度、功率密度、加热散热要求、保温要求、防护要求、制造工艺、成本等方面的因素。在产品的设计目标上，除了满足基本功能要求之外，还需要满足振动、冲击、翻滚、跌落、滑车、碰撞、密封防护、接触防护、绝缘防护、等电位、防火阻燃、泄压防爆方面的要求。

机械结构设计的输入输出要求见表 1.2。

表 1.2 机械结构设计输入输出表

输入		输出	
1	动力电池系统/电池包的外形包络尺寸	1	动力电池系统/电池包外形 3D 图
2	动力电池系统/电池包在电动车辆上的安装固定要求	2	动力电池系统/电池包尺寸调整建议和需求
3	动力电池系统/电池包在车辆上的安装空间限制性要求（装配间隙和方向，以及插接件插拔方向等）	3	动力电池系统/电池包在电动车辆上的安装挂点数量和挂点位置建议
4	单体电池选型方案（包括化学体系、容量规格、外形尺寸、总数量、串并联方案等）	4	固定要求，内部安装固定要求
5	电池单体成组应用技术和工艺平台	5	接口要求，内部安装接口要求
6	电池模组产品平台	6	电池模组概念方案（电池单体成组方式）和数量
7	电池模组外形尺寸要求	7	电池模组总体布置方案
8	热管理系统组件选型、尺寸及安装空间需求	8	模组总重量要求，箱体重量要求
9	电池管理系统组件选型、尺寸及安装空间需求	9	模组结构强度要求，内部安装固定要求
10	高低压电气部件选型、尺寸及安装空间需求	10	高压电气直接接触防护（IPXXB、IPXXD）和间接接触防护（等电位）要求
11	重量及轻量化要求	11	热管理系统接口定义
12	机械结构强度要求	12	电磁兼容要求
13	结构寿命要求	13	测试验证要求
14	碰撞要求		
15	防水防尘要求（密封等级）		

1.1.3 高压电气设计

电动汽车中高压电系统的功能是保证整车系统动力电能的传输，并随时检测整个高压系统的绝缘故障、断路故障、接地故障及高压故障等（图 1.2）。通常，与动力电池相关的高压元器件，如各回路的接触器及熔丝等，集成在动力电池包内。动力电池作为电动汽车的能量储存装置，受整车尺寸及布置位置的影响，可用空间非常有限。为了增加动力电池的能量，应尽量减少动力电池包内，除电池单体或模组外其他零件的数量，使电池单体或模组有充分的布置空间。同时，需要保证动力电池系统维修的便利性，减少拆卸动力电池包的次数。

高压系统电气架构的设计原则是：

- 1) 各高压部件尽量都能有独立的供电控制，确保不工作的部件不带电。
- 2) 各高压部件的熔丝盒与动力电池系统内部结构隔离，避免熔丝检修或更

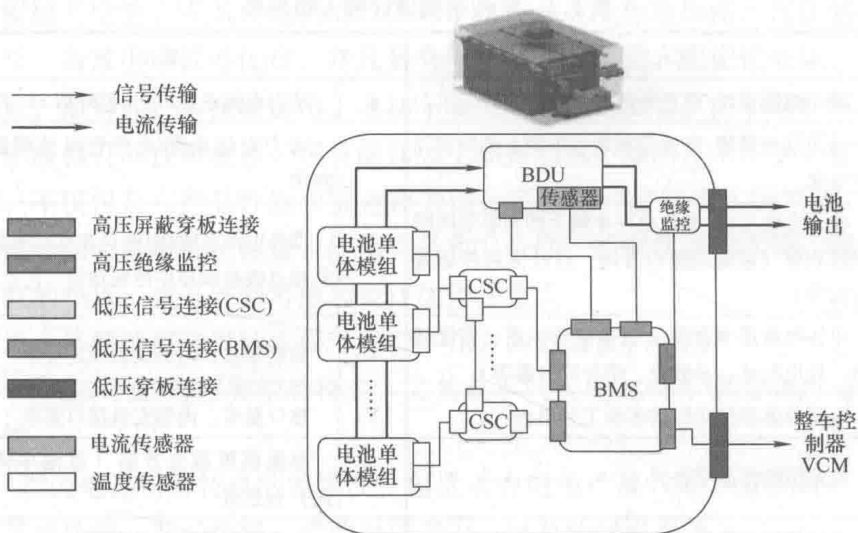


图 1.2 动力电池系统高压系统架构

换影响电池系统内部防护等级。

- 3) 工作特性相近的部件尽量共用一个接触器，减少接触器的数量。
- 4) 功率等级相近的部件尽量共用熔丝，减少熔丝的数量。
- 5) 尽量减少动力电池系统电气接口的数量。

1.1.4 电池管理系统设计

电池管理系统（Battery Management System, BMS）是用于电动汽车（EV、PHEV、HEV）的动力电池监测与高压电能管理的综合性系统。电池管理系统对动力电池进行在线监控和实时控制，为整车提供动力电池的状态信息，如电压、电流、温度、荷电状态（SOC）、健康状态（SOH）、绝缘状态、高压互锁状态等信息，同时实时判断动力电池的运行状态是否正常。若出现故障，则应做出相应处理措施，如向整车控制器发送故障信号并报警提示、降功率处理等。

电池管理系统主要有以下功能：电池单体及电池包的电压检测、电池组充放电电流检测、电池箱温度场的控制、电池箱气密性检测、电池组 SOC 与 SOH 的估算、与整车控制器及显示系统通信、充电控制、电池组实时状态判断与故障控制、能量管理、高压安全管理，热管理等。传统电池管理系统一般具有电压、电流、温度的采集功能、SOC 估算功能、数据通信与故障管理功能。电池管理系统的功能如图 1.3 所示。

除了以上的功能之外，未来 BMS 将在其他几个方面有更深入的发展：更加智能化的能量管理，通过对电池单体的建模和自学习功能，实现更加精确的荷电状态（SOC）、健康状态（SOH）、能量状态（SOE）计算；在 AUTOSAR 基础上

的软件分层和分布式开发，并实现软件的快速迭代和 OTA 远程更新；与云服务和大数据结合，对电池包所有数据进行分析，实现远程在线诊断，及时发现和修复隐患；完全满足 ISO26262 的功能安全要求，进一步提升电动汽车的安全等级。

1.1.5 热管理系统设计

电池包的热设计有两个目标：控制电池单体的工作温度和控制不同电池单体的工作温度差。前者会严重影响整个电池包的性能和寿命，后者会严重影响电池包内部的短板效应，导致电池组一致性变差。要达到这两个热设计目标，就要考虑加热、散热、热均衡、保温 4 个方面的措施。

对于电池单体而言，最佳的工作温度范围为 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ ，电池包内部的电池单体温度差控制在 5°C 以内比较合理。显然，要把工作温度和温差控制在这么严格的范围内，电池包的热管理系统将会变得非常复杂，所以通常会把工作温度范围放宽到 $10 \sim 40^{\circ}\text{C}$ ，把电池包内部温差控制在 $5 \sim 8^{\circ}\text{C}$ ，这样可以在电池包的性能、寿命和成本之间达到一个比较好的平衡状态。

对于散热设计而言，可以考虑的散热方式有自然冷却、风冷、液冷、制冷剂直冷等几种方式。我们需要根据外部环境温度、电池寿命要求来推导电池单体的工作温度限值和温差限值，需要根据系统运行工况、电池单体发热功率、电气件发热功率等来计算系统的换热系数，再综合考虑技术复杂度、电池包内部的安装空间、散热速率以及成本等因素，选择最合理的散热设计（包括冷却方式和冷却回路等），散热设计的一般流程如图 1.4 所示。对于加热设计而言，可以考虑的加热方式有加热膜、PTC、液热等几种方式。加热设计的思路与散热设计相似。

1.1.6 仿真分析技术

仿真分析是通过计算机建模和计算，对产品设计进行验证的重要手段。合理利用仿真分析手段，既可以在产品开发早期，作为主要分析方法，来验证产品设计的合理性，及时发现设计存在的问题和缺陷，避免后续的设计更改成本和周

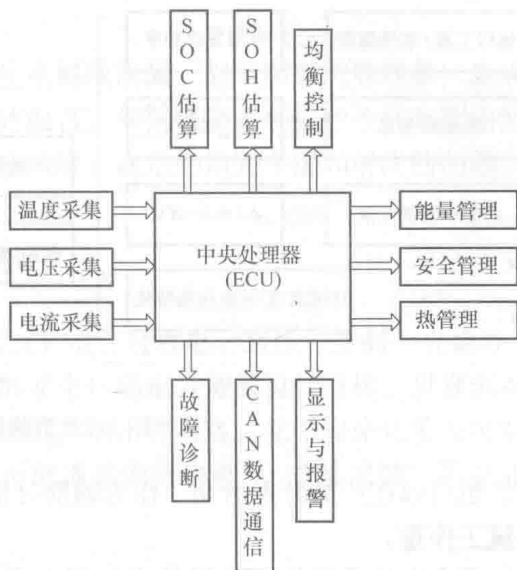


图 1.3 电池管理系统的功能