



# 电动汽车动力电池寿命 估算与能量管理系统研究

田晟 著

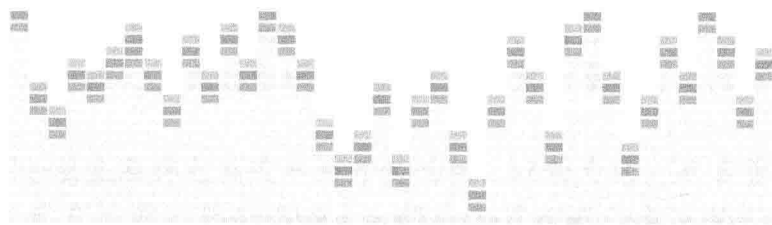


华南理工大学出版社  
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

Diandong Qiche Dongli Dianchi Shouming Gusuan Yu Nengliang Guanli XitongYanjiu

# 电动汽车动力电池寿命 估算与能量管理系统研究

田晟 著



华南理工大学出版社  
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

电动汽车动力电池寿命估算与能量管理系统研究/田晟著. —广州: 华南理工大学出版社, 2018. 8

ISBN 978 - 7 - 5623 - 5777 - 3

I. ①电… II. ①田… III. ①动力 - 锂离子电池 - 能量管理系统 - 研究  
IV. ①TM912

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 223523 号

电动汽车动力电池寿命估算与能量管理系统研究

田 晟 著

---

出 版 人: 卢家明

出版发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

http://www.scutpress.com.cn E-mail:scutc13@scut.edu.cn

营销部电话: 020-87113487 87111048 (传真)

责任编辑: 欧建岸

印 刷 者: 虎彩印艺股份有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 10.25 字数: 250 千

版 次: 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 50.00 元

---

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

# 前 言

近年来，随着我国汽车工业取得长足发展，汽车产量和保有量迅速增加，而由此带来的能源危机与环境压力日益凸显，发展电动汽车成为推动汽车产业发展的大趋势。动力电池及其控制技术是电动汽车发展的关键技术之一，也是制约电动汽车产业化发展的瓶颈。因此，动力电池及其控制技术受到政府、企业和社会的高度重视，其对尚在发展进程中的国产自主品牌汽车影响重大。本书以国内某一自主品牌电动汽车的动力电池及其管理系统为研究对象，采用实验、理论建模与仿真分析有机结合的方法研究动力电池及其控制技术的相关问题，具有重要的理论价值和工程应用背景。

动力电池及其控制技术是电动汽车发展的关键技术之一。实现对电池系统的高效管理与控制，可以优化电池组工作性能，延长电池组使用寿命并保障其安全性。本书结合作者近些年来在教学和科研方面积累的成果，并参考了国内外最新科技文献，在研究不同工况和环境下锂离子电池的工作特性及寿命衰减的影响因数的基础上对动力电池进行寿命估计，同时对动力电池管理系统的硬件及软件进行设计，在此基础上形成理论体系指导动力电池系统的开发与研究。

本书结合国内某一自主品牌电动汽车的开发过程，以动力电池及其管理系统为研究对象，在现有的电池模型基础上，提出车用锂离子电池的二阶RC等效电路模型，并进行模型参数辨识；通过电池系统的循环寿命试验，得到充放电容量与循环次数的关系，进行锂离子电池系统的寿命曲线拟合，并根据拟合公式推算电池系统的循环寿命；提出提高动力电池寿命的改进意见，主要包括空冷散热系统优化、提高一致性、充电策略优化等方面；同时进行了热管理系统的相关研究。在能量管理与安全防护等方面，设计了电池能量管理系统的硬件主板、从板以及高压板方案，分析了高压上下电各控制节点的响应原则，研究正常高压上下电时序以及紧急高压下电时序，利用Stateflow/Simulink工具对上下电时序控制进行基于CAN信号的建模仿真分析；根据电池管理系统的故障情况并定义故障等级，设计BMS故障阈值表以及状态跳转图；对BMS的多种工作模式控制进行基于CAN信号的仿真建模分析，研究预充电过程、快充过程、慢充过程、高压互锁回路(HVIL)及绝缘检测的内容，对其控制逻辑基于CAN信号进行建模仿真分析，采用

CANape 软件对 CAN Logger 采集的数据进行分析,验证设计的系统功能的可靠性与稳定性。

最后通过试验对动力电池及其系统的稳定性、安全性和可靠性等相关指标进行评价,验证了该方案的可行性。试验也表明动力电池的相关性能指标有了显著的提高。

本书体系完整,理论充分联系实际,具有明显的汽车行业特色,可以作为车辆工程、载运工具运用工程等研究生以及相关学科领域研究人员的参考用书,也可以供汽车企业和汽车研发部门从事动力电池及其能量管理系统的专家和工程师使用。

本书由华南理工大学田晟副教授著,得到科技部国家 863 计划重大项目“增程式纯电动轿车研发与产业化技术攻关”(项目批准号:2011AA11A218)、广东省省级科技计划项目“广州市新能源汽车产业技术路线图编制研究”(项目批准号:2015A080803001)、2017 年国家留学基金项目(项目批准号:201706155003)以及 2018 年度华南理工大学出版基金的资助,集中体现了这些项目的最新研究成果。

田 晟  
2018 年 6 月

# 目 录

1 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 电动汽车国内外发展现状 .....	3
1.3 动力电池寿命估算与能量管理系统研究现状 .....	6
1.4 本书主要研究内容 .....	11
2 锂离子动力电池及其寿命衰减机理 .....	13
2.1 锂离子动力电池的工作原理 .....	13
2.2 锂离子动力电池组 .....	15
2.3 锂离子动力电池主要性能 .....	17
2.4 锂离子动力电池循环寿命和衰减机理 .....	21
3 锂离子动力电池系统寿命估算 .....	23
3.1 常用的荷电状态估算方法 .....	23
3.2 锂离子动力电池二阶 RC 模型及参数辨识 .....	26
3.3 锂离子动力电池系统寿命试验与分析 .....	29
3.4 基于 GA 的锂离子动力电池系统循环寿命拟合 .....	33
4 锂离子动力电池寿命优化管理 .....	39
4.1 锂离子动力电池热管理系统研究现状 .....	39
4.2 锂离子动力电池系统的热管理优化 .....	42
4.3 锂离子动力电池一致性的管理 .....	47
4.4 锂离子动力电池充电优化控制 .....	49
5 动力电池热管理系统研究 .....	52
5.1 相关电池模型研究 .....	53
5.2 电池特性概述 .....	55
5.3 基于温度变化的电池物理动态变化 .....	57
5.4 电池热管理系统 .....	59
5.5 热管理评估仿真 .....	63
6 动力电池能量管理系统总体方案设计 .....	65
6.1 电动汽车电动系统及动力电池系统介绍 .....	65
6.2 CAN 总线介绍 .....	68
6.3 动力电池能量管理系统原理 .....	71

6.4	动力电池能量管理系统设计的功能要求	72
6.5	动力电池能量管理系统总体方案设计	73
7	动力电池能量管理系统硬件设计	75
7.1	电池能量管理系统硬件主板设计	75
7.2	电池能量管理系统硬件从板设计	80
7.3	电池能量管理系统硬件高压板设计	84
8	动力电池能量管理及安全防护	87
8.1	动力电池能量管理系统的控制逻辑	87
8.2	高压上下电技术	94
8.3	预充电设计	102
8.4	BMS 故障阈值表	105
8.5	BMS 状态跳转图	109
8.6	动力电池系统充电流程设计	111
8.7	HVIL 设计	115
8.8	绝缘检测设计	116
9	基于 Stateflow 的电池能量管理系统 CAN 信号仿真研究	118
9.1	Stateflow 状态机建模仿真介绍	118
9.2	高压上下电仿真分析	119
9.3	BMS 状态跳转仿真	126
9.4	预充电仿真分析	131
9.5	充电仿真	133
9.6	故障仿真分析	137
10	实车验证与分析	139
10.1	数据采集工具 CAN Logger	139
10.2	数据分析软件 CANape	141
10.3	系统功能性实验分析	142
10.4	系统稳定性实验分析	150
	参考文献	153

# 1 绪论

## 1.1 研究背景及意义

随着我国经济持续快速发展,群众购车需求旺盛,我国汽车保有量继续呈快速增长趋势。截至2015年底,我国机动车保有量达2.79亿辆,汽车保有量达到1.72亿辆,仅次于美国位居全球第二位。表1-1为我国2009—2015年汽车产销量数据统计。然而,伴随着汽车行业的快速发展,资源和环境问题日益成为限制汽车产业持续发展的两大主要问题<sup>[1]</sup>。2015年,我国原油表观消费量达5.43亿吨,对外依存度达到60.60%。图1-1为我国2005—2015年原油表观消费量和对外依存度关系图。因为过高的对外依存度不利于国家能源安全,这迫使我国加大勘探开发力度以提高自给率,但是由于国内油气开发对技术的要求逐渐提高,单位油气产量的资本支出也不断提高。

表1-1 2009—2015年我国汽车产销量数据统计 (单位:万辆)

年份(年)	产量	销量
2009	1379.10	1364.48
2010	1826.41	1806.19
2011	1841.89	1850.51
2012	1927.18	1930.64
2013	2211.68	2198.41
2014	2372.29	2349.13
2015	2450.33	2459.76

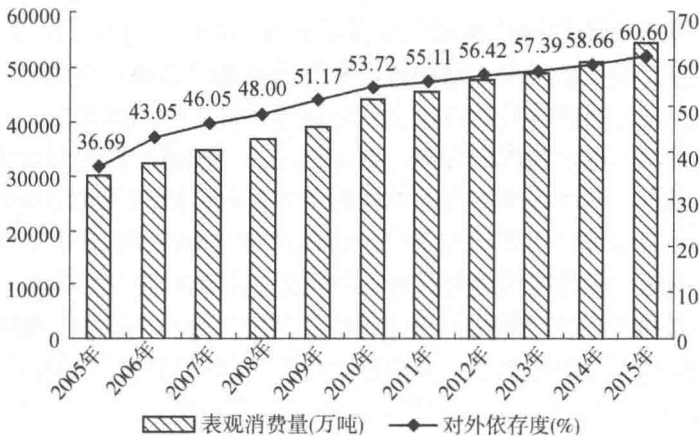


图1-1 2005—2015年我国原油消耗及对外依存度情况



传统汽车主要依赖的能源是石油资源，而石油资源是不可再生资源。随着世界能源危机愈演愈烈，提高能源利用效率、开发新的可替代的能源迫在眉睫。同时，传统汽车在使用过程中会排放大量的尾气，造成空气质量下降。面对因汽车产业的发展而带来的日益凸显的能源压力和大气污染问题，发展电动汽车成为汽车产业发展的大趋势。

目前，我国机动车辆对石油的消耗量占比超过石油总消耗量的三分之一。同时，国家对乘用车平均燃油消耗量的要求日益严格，对乘用车企业平均燃油消耗量的管理不断加强。《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)》提出我国乘用车产品的平均燃油消耗量在2015年须降至百公里6.9L，2020年的目标为百公里2.0L。2014年10月，相关部门发布了《关于加强乘用车企业平均燃料消耗量管理的通知》，对整车生产企业采取了更加严格的管理措施，以促进节能技术的应用和推广，促进实现百公里燃油消耗量2015年降至6.9L的目标。随着国家不断加强对传统汽车燃油消耗量的管理，各乘用车企业为降低车辆燃油消耗陆续采取了提高发动机燃油效率和优化整车控制等措施。但是，由于燃油发动机的技术、车辆性能要求、满足驾乘人员空间、安全等因素的限制，继续降低传统汽车燃油消耗的技术难度和成本日益增加，促使各乘用车企业加强对混合动力汽车、纯电动汽车等新能源汽车技术的研究开发<sup>[2]</sup>。

此外，近年来持续大面积的雾霾天气和城市污染引起了社会的高度关注。重度污染天气在我国北方城市集中爆发，涉及区域广，持续时间长，严重影响人们的日常生活。减少碳排放、治理空气污染被提升为国家战略。汽车尾气中不仅含有气体污染物，还包含了大量PM 2.5微粒。2012年我国机动车排放污染物达4612.1万吨。为了应对持续严重的雾霾天气，防止汽车尾气对大气环境的污染，保障人民的健康和生命安全，国家在污染排放、污染物控制和环境质量监测等方面制定了相关标准和方法。

由于环境和资源等问题对汽车工业可持续发展的限制，发展节能和新能源汽车成了我国汽车工业的战略方向<sup>[3]</sup>。“十二五”期间国家将发展电动汽车作为国家战略，制定了“汽车电气化”的技术转型战略，将发展电气化程度高的电动汽车作为重点发展方向，并明确了相关技术方向。目前新能源汽车的研发主要集中在电动汽车及其混合动力汽车的结构设计、能量控制和动力电池等方面。

从世界汽车行业工业化和产业化发展的角度来看，“汽车电气化”是逐渐深化的过程，市场上最先成熟和量产的新能源车型是混合动力汽车。如丰田Prius、雪佛兰Volt等，这些车型以内燃机发动机和电池两种能源作为整车动力源，通过电池系统补偿发动机的功率输出，使发动机工作在高效率点，有效地提高了燃油经济性。从车用能源发展的角度来看，随着动力电池技术的提高，电动汽车在环境保护和使用性能方面的优势将逐渐高于内燃机汽车，两者在成本和续航里程等方面的差距将逐步缩小，电动汽车最终将取代以石油为动力的传统内燃机汽车<sup>[4]</sup>。目前由于电池技术的限制，纯电动汽车存在成本高、续航里程短以及配套设施建设滞后的问题，因此纯电动汽车短时间内不能被市场广泛接受。纯电动汽车的产业化推进需要综合利用混合动力汽车、插电式混合动力汽车、增程式纯电动汽车等过渡车型，在电池、电机、控制技术不断提升的基础上逐步过渡至纯电动汽车。

世界各国的电动汽车产业近年来得到迅速增长，其中欧美、日本等主要国家电动汽

车产业技术发展处于世界前列,我国的电动汽车产业也取得了长足的进步。2014 年全球市场共销售 353 522 辆电动汽车,比 2013 年增长 56.78%。其中电动乘用车销售 323 864 辆,占 91.61%;电动客车及电动专用车 29 658 辆,占 8.39%<sup>[4]</sup>。世界各主要国家 2014 年及预计的 2020 年电动汽车保有量分别如图 1-2 所示<sup>[5-6]</sup>。

动力电池作为电动汽车的能量来源,与电池管理系统(BMS)组成动力电池系统输出高压电能。电池

管理系统对电池组进行综合高效安全的管理,是电动汽车关键技术之一。动力电池管理系统(BMS)作为电动汽车储能装置系统化的管理工具,对动力电池系统各项功能的实现及整车控制策略的执行至关重要,对其展开深入研究与开发工作十分必要。目前针对动力电池管理系统的研究多集中在电压、电流与温度的采集、电池组的均衡、荷电状态(SOC)与健康状态(SOH)的估算、热管理等内容。本书的动力电池能量管理系统侧重动力电池管理系统中的能量管理与安全防护,对电池管理系统实现上下电功能、系统状态跳转管理、充电功能及安全功能展开研究,对于 BMS 开发具有较大的工程应用价值。

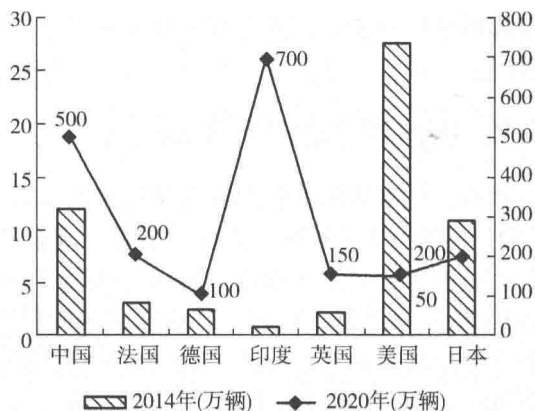


图 1-2 2014 年及预计 2020 年世界主要国家电动汽车保有量

## 1.2 电动汽车国内外发展现状

### 1.2.1 电动汽车概述

电动汽车主要分为纯电动汽车(EV)、混合动力汽车(HEV)、燃料电池汽车(FCV)三种类型<sup>[7]</sup>。与传统内燃机动力汽车相比,电动汽车顺应了新科技时代节能减排与低碳经济的发展潮流。纯电动汽车以动力电池与电机组成动力装置,清洁能源的电能作为能量来源,无尾气排放。混合动力汽车在传统内燃机的基础上增加电机和储能电池,与发动机以串联、并联或混联的方式组成动力装置驱动汽车行驶,在一定程度上减少了油耗及排放污染。燃料电池汽车以新的燃料替代汽油、柴油作为汽车的能量来源,做到高效节能低污染。如氢燃料电池汽车实现了零污染排放。

三种类型的电动汽车的发展和使用时处于不同的状态。目前来说,纯电动汽车因续航里程的限制以及充电设施建设配套发展迟缓等问题,比较适合短距离使用;混合动力汽车能够满足使用需求,但结构、控制复杂导致研发、生产成本较大;燃料电池汽车因燃料储存运输以及安全性和成本控制等问题没有得到有效解决,大批量量产使用需要时间,我国尚处于研发阶段,仅少数国家实现商业化量产<sup>[8]</sup>。电动汽车发展面临的主要问题

题是续驶里程有限、成本过高、动力电池性能难以满足要求、电动汽车配套基础设施建设缓慢。

## 1.2.2 国内外电动汽车发展概况

欧美、日本等发达国家在电动汽车产业发展方面处于领先地位。日本丰田汽车公司在1977年推出了全球第一款大批量量产混合动力车型 Prius(普锐斯),革命性地降低了汽车的燃油消耗和尾气排放。2014年美国 Tesla Motors 公司生产的高端纯电动汽车 Tesla Model S 具备自动驾驶功能,百公里加速仅需 3.0s,续驶里程可达 528km,成为近两年最为火爆的纯电动车型。图 1-3 为国外典型量产电动汽车(丰田 Prius、日产 Leaf、雪佛兰 Volt),其基本参数对比如表 1-2 所示。

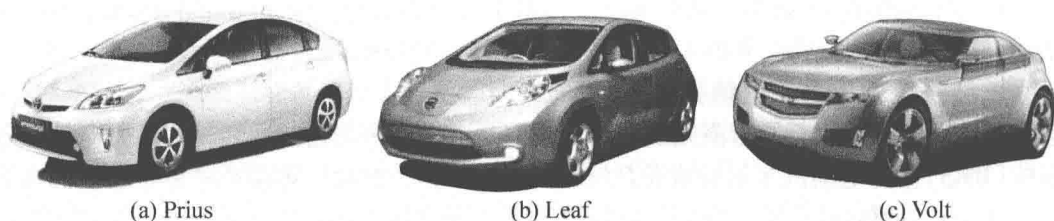


图 1-3 国外典型量产电动汽车

表 1-2 国外典型量产电动汽车基本参数

车 款	丰田 Prius 插电式混合动力车型	日产 Leaf 纯电动车	雪佛兰 Volt 增程式电动车
外形(长/宽/高)(mm)	4615/1775/1575	4450/1770/1550	4498/1798/1430
整备质量(kg)	1420	1965	1715
最高车速(km/h)	100	144	161
0~100km/h 加速时间(s)	10.7	11.9	9
发动机最大功率(kW)	73	80	63
发动机最大扭矩(N·m)	142	280	126
电机型式	交流同步电机	交流同步电机	永磁同步电机
电机峰值功率(kW)	80	80	55/111
电机峰值扭矩(N·m)	207	280	370
蓄电池型式	锂离子蓄电池	锂离子蓄电池	锂离子蓄电池
蓄电池容量(Ah)	15	70	45.0
蓄电池能量(kW·h)	5.2	24.0	16.0
蓄电池额定电压(V)	345.6(3.6×96)	345	360
一次充电续驶里程(km)	17.6(EV)	160	80(EV)
充电时间(h)	3(100V)/10min(200V)	8(200V)	4(230V、16A)

近年来在国家政策的大力支持下,我国电动汽车产业也取得了很大的发展,各种量产电动车型出现井喷的势头,但是依旧需要时间攻克关键技术来实现。同时,国内互联网公司的电动汽车计划为我国电动汽车产业增添了新的活力,百度无人驾驶技术已初步实现路试;乐视互联网公司2015年11月投资10亿元建厂,计划推出七款电动汽车。国内典型量产电动汽车(荣威E50纯电动车、比亚迪秦、北汽EV200)如图1-4所示,其基本参数对比如表1-3所示。



图1-4 国内典型量产电动汽车

表1-3 国内典型量产电动汽车基本参数

车款	荣威 E50 纯电动车	比亚迪秦	北汽 EV200
外形(长/宽/高)(mm)	3569/1551/1540	4740/1770/1480	4025/1720/1503
整备质量(kg)	1060	1720	1295
最高车速(km/h)	130	185	125
0~100km/h加速时间(s)	15	5.9	13
发动机最大功率(kW)	/	113	/
发动机最大扭矩(N·m)	/	240	/
电机型式	永磁同步电机	永磁同步电机	永磁同步电机
电机峰值功率(kW)	50	110	53
电机峰值扭矩(N·m)	160	250	180
蓄电池型式	纳米磷酸铁锂电池	磷酸铁锂电池	三元锂电池
蓄电池容量(Ah)	60	26	30.4
蓄电池能量(kW·h)	18	13	/
蓄电池额定电压(V)	300	500	/
一次充电续驶里程(km)	40(工况)	70(工况)	200(工况)
综合油耗(L/100km)	/	1.6	/
充电时间(h)	6(220V)	7(220V)	8(220V)1(快)

## 1.3 动力电池寿命估算与能量管理系统研究现状

### 1.3.1 动力电池寿命估算研究现状

西班牙奥维尔多大学 David Anseón 等<sup>[9]</sup>对 5 个不同的电动汽车磷酸铁锂(LFP)电池进行了循环寿命、能量效率、容量测试和内阻测试等试验,以判断市场上主流的磷酸铁锂电池的性能能否达到 USABC(United States Advanced Battery Consortium)规定的长期目标,从而验证磷酸铁锂电池在电动汽车上的适用性。他们将美国生产的 2.3Ah 电池样本在标准充放电工况下和高强度充放电工况下进行了寿命循环试验,并绘制了不同试验工况下 LFP 电池容量衰减曲线。试验结果显示,该电池样本在标准充放电工况下经历 13 个月 3000 次寿命循环试验后的剩余容量相比额定容量衰减了 11%,以此估计该电池的循环寿命约为 5000 次,相当于 13 年的使用寿命,这一寿命数据超过了 USABC 规定的电池使用寿命和循环寿命为 10 年 1000 次的长期目标。在高强度充放电工况下,从电池容量衰减曲线可以看出前 600 次循环试验中电池容量平缓线性衰减,之后电池容量迅速衰减,1500 次循环试验后电池容量衰减超过 20%,电池寿命终止,此时电池内阻增加了 50%。这说明充放电电流大小对 LFP 电池的寿命有重要影响,在预测寿命时需要设计一套合理的试验规程以预测电池在电动汽车实际使用中的表现。

丹麦奥尔堡大学的 Maciej Swierczynski 等研究了电动汽车用纳米磷酸盐  $\text{LiFeO}_4/\text{C}$  电池寿命<sup>[10]</sup>。他们根据加速寿命试验建立了  $\text{LiFeO}_4/\text{C}$  电池的日历寿命和循环寿命的半经验模型。该模型同时考虑了容量和功率衰减,并在两部电动汽车上进行了实际验证。日历加速寿命试验和循环加速寿命试验同时进行,其中日历加速寿命试验的压力因素是温度和平均 SOC 水平,循环加速寿命试验的压力因素是温度和循环深度且以 4C 的大电流充电,试验过程中定期在室温 25℃ 的环境下检测电池的容量和功率变化情况,在试验数据的基础上建立电池寿命模型并进行参数辨识。在 35℃、42℃、50℃ 的温度及循环深度为 10%、45%、80% 的条件下进行了 9 组试验,利用得到的试验数据使用内插外推的方法绘制了关于电池温度和循环放电深度的电池寿命函数三维图。从拟合的图形可以看出,循环放电深度对寿命的影响比电池温度的影响更大。同时采用两种不同的使用方式分别在两辆电动汽车上进行验证。第一种使用方式:客户在每次使用后给动力电池充电。车辆每天的行驶状况是:20min 的 NEDC 工况开车上班,然后给动力电池充电至 100% SOC,停车 8 个小时以后再经历 20min 的 NEDC 循环开车下班回家,最后充电至 100% SOC 后驻车至第二天。第二种使用方式:客户连续使用车辆 3 天,直至动力电池 SOC 较低时才为电池组充电。车辆每天的行驶状况是:20min 的 NEDC 工况开车上班,停车 8 个小时后经历 20min 的 NEDC 工况下班回家,然后驻车至第二天,EV 以相同的方式连续使用三天后再给动力电池充电至 100% SOC。试验结果表明,第一种方式使用时 EV 动力电池容量衰减 20% 时寿命约为 8.16 年,第二种方式使用时动力电池寿命约为 10.75 年,相对于第一种方式提高了约 32%。这是因为第一种方式使用 EV 时动力电

池经常充至 100% SOC 而加速了电池容量的衰减。

美国麻省大学 F. P. Tredeau 等<sup>[11]</sup>在麻省大学电池评估实验室对 160Ah 的磷酸铁锂电池进行了容量测试、循环寿命测试和实际道路试验,其中循环寿命试验将 8 个电池样本在温度为 20℃,循环放电深度为 100% 的条件下进行了 50 次充放电,通过测量试验后电池的剩余容量来预测电池寿命。循环充放电试验采用恒流恒压充放电的方式。一个完整的循环包括 6 步:

- ①恒流放电。
- ②恒压放电。
- ③静置 1h。
- ④恒流充电。
- ⑤恒压充电。
- ⑥静置 1h。

针对 8 个电池样本的寿命试验数据推测出电池寿命超过了 USABC 规定的 1000 次充放电循环次数的长期目标。

Mark S. Duvall 等<sup>[12]</sup>针对锂离子电池在插电式混合动力汽车(PHEV)的特点初步设计了准确测试 PHEV 用动力电池循环寿命的试验规程,该试验规程在插电式混合动力厢式汽车 Sprinter 上进行了应用。插电式 Sprinter 厢式车采用帅福得公司生产的 VL 41M 圆柱形锂离子电池,每 6 个单体为一个模块,共采用了 12 个模块即 72 个电池单体作为动力电池组,电池组额定电压为 367V,峰值功率 100kW,总容量为 15.1kWh。他们将 PHEV 用动力电池的寿命循环分为电量消耗、电量维持和充电等三种模式,并依据 68% 的厢式汽车日常行驶里程小于 50 英里的调查结果设计了共耗时约 2.6h 的循环工况,包括 24 个电量消耗模式循环和 28 个电量维持模式循环,以此模拟 Sprinter 厢式车的城市行驶状况。充电模式采用电池厂商提供的充电方式,该充电策略的峰值充电功率 5.04kW,充电用时 3.6h。他们将三种模式组合为一个完整的动力电池组充放电试验,三种模式共持续约 6.3h,寿命循环试验中每天进行 3 次完整的充放电试验以及约 1h 的静置时间以使动力电池恢复热力学和化学稳定。

Xi Xia 等<sup>[13]</sup>提出了一个结合多元自适应样条回归(MARS)和迭代技术在线预测锂电池剩余寿命的新模型。该模型对硬件计算能力的要求相对较低,使用低成本的微控制器就可以满足需求,而且模型可以使用电池运行产生的新数据改善寿命预算结果,解决了电池寿命预估开始阶段数据稀疏的问题。他们将 Ah 总流量作为描述电池寿命的主要变量,建立的模型在 BYD200Ah 电池样本上进行了验证,当采用 40% 的电池数据用于模型的训练时,基于该模型预测的电池容量衰减 20% 的电池寿命终止数据点与试验数据的误差低于 1.5%。

王志飞等<sup>[14]</sup>分析了放电电流和温度对电池寿命衰减的影响,认为锂离子电池的容量衰减曲线是符合幂函数的非线性曲线,基于阿列尼乌斯公式提出了锂离子电池的容量衰减模型。他们利用 10Ah 锂离子电池寿命测试的试验数据基于模型拟合出空间锂离子电池寿命曲线,通过与 50Ah 锂离子电池的试验数据对比确定模型具有良好的拟合度,证明该模型能够适用于不同容量的锂离子电池。该研究仅在放电倍率 0.5C、1C,实验温度

298K 的条件下进行锂离子电池循环寿命试验, 获得的数据有限, 且空间锂离子电池的技术要求不如车用动力电池严格, 两者的性能必然存在不同。然而, 该研究仍可为锂离子动力电池的寿命研究提供思路。

邓爽等<sup>[15]</sup>采用美国 S4000 30V 20A MACCOR 电池测试系统、电动振动实验系统 HV-300-D-25 等设备, 以某电动汽车用动力型  $\text{LiFePO}_4$  电池组(额定电压 13.2V, 额定容量 40Ah)为实验样品, 分别在无振动状态和模拟实车行驶时的振动状态下, 进行电池组循环寿命试验和电池组工作电压平台试验, 得出结论: 考虑振动因素时电池组容量衰减速率约为 5.21%/500 次循环, 相比厂商提供的无振动情况下 4.09%/500 次循环的容量衰减率增加了 27.38%。他们认为振动等因素对动力电池组循环寿命衰减有明显的影响, 动力电池组长期在振动条件下工作时可能导致不一致性加剧而带来安全隐患。

清华大学汽车工程系曹建华等<sup>[16]</sup>以混合动力客车上搭载的某型号车用锰酸锂电池组为研究对象, 首先依据混合动力客车在北京某线路的实际道路行驶过程中动力电池组电压、SOC 和电流等参数的变化情况, 制定了电池组充放电工况循环。然后使用美国 Arbin 公司生产的电池试验台对动力电池组进行了 5000 次循环测试, 单个循环时长为 5min, 测试中每 1000 个循环后进行一次电池组全容量放电以测量电池组的容量。为了节省电池组寿命试验的时间和成本, 他们采取了试验加模拟的方法, 使用前 4000 次测得的电池组容量数据进行了一阶和二阶拟合, 再将拟合曲线外推来预测电池组寿命, 认为二阶拟合结果更接近电池组寿命衰减的实际情况。

其次, 曹建华等选取了电池组充放电电流和 SOC 工作范围两个应力因素进行电池组寿命强化试验, 研究了应力值与电池组容量衰减之间的关系。根据电池组寿命强化试验数据拟合出电池组容量衰减比与电流强度比的二阶方程式如下:

$$\ln c = -0.4505P^2 + 3.8305P - 3.38 \quad (1-1)$$

式(1-1)中,  $c$  表示强化试验中动力电池组容量衰减率与工况循环下电池容量衰减率的比值;  $P$  表示强化试验中电池组电流值与工况循环情况下电池组电流值的比值。通过式(1-1)可以根据大电流强度下的寿命试验结果推导出小电流状态下的电池组寿命, 从而为缩短锂离子动力电池寿命试验的时间提供依据。

清华大学汽车安全与节能国家重点实验室的林成涛等<sup>[17]</sup>研究了客车用锂离子动力电池的循环寿命特性。他们把两组正极材料为  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  容量为 100Ah 的电池组作为实验对象, 设计了适合插电式客车用锂离子动力电池组的循环寿命试验工况和包含三种模式的单日寿命循环工况, 使用美国生产的 AV-900 电池组试验台对两个电池组进行充放电试验。通过对实验数据的分析可以看出, 电池组荷电状态 SOC 对插电式混合动力客车用锂离子动力电池的循环寿命有重要影响, 在同等工作环境下, 当电池组寿命截止时, SOC 工作点为 0.5 对应行驶里程达 31200km, SOC 工作点为 0.3 对应的行驶里程仅为 17400km。

通过对国内外大量相关文献资料的整理分析<sup>[18-23]</sup>可以看出, 近年来车用锂离子电池寿命预测的方法主要有两类: 基于经验的方法和基于性能的方法。其中基于经验的方法需要积累足够的电池使用经验, 它根据经验知识的统计规律粗略估计动力电池寿命状态。这种方法适用于某些特定场合的动力电池寿命预测。基于性能的方法利用不同形式

的电池性能模型,综合考虑各种应力因素对寿命衰减的影响来预测动力电池的寿命状态,这种方法根据寿命预测所使用的信息源不同,主要包括基于机理的预测、基于特征的预测和数据驱动的预测等。电池的性能模型主要包括电化学第一原理模型、等效电路模型、人工神经网络模型等。这些性能模型可以根据负载电流描述电池的 SOC、电压、功率等参数的变化。综合分析现有的研究结果,现阶段还不能从电池机理的角度将每一个因素对电池寿命衰减的影响完全描述出来,但是在动力电池寿命研究的过程中应综合利用已有的研究成果,将几种方法相结合以准确预测动力电池的寿命状态。

### 1.3.2 电池管理系统研究现状

#### 1.3.2.1 电池管理系统

电池管理系统 (battery management system, BMS) 是用于电动汽车 (EV、PHEV、HEV) 动力电池监测与高压电能管理的综合性系统<sup>[24]</sup>。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,则采取相应处理措施,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:电池单体及整包的电压检测、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 1-5 所示。

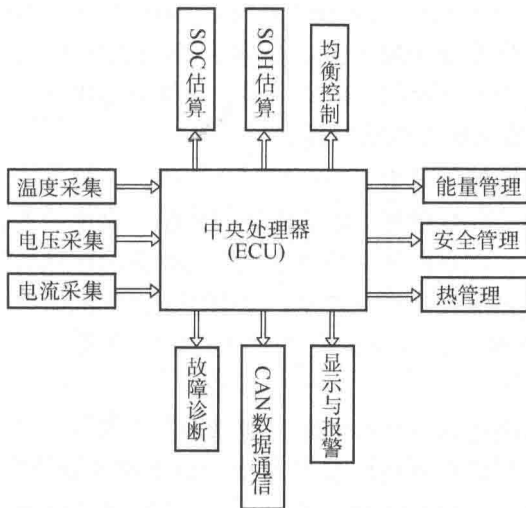


图 1-5 电池管理系统的功能

本书研究的电池管理系统不局限于电池状态信息的采集、SOC 估算、CAN 数据通信,而侧重于能量管理和安全管理的研究。其中能量管理在本文中包括高压上下电管



理、BMS 状态跳转管理、预充电管理、充电管理等；安全管理包括绝缘检测、高压互锁 (HVIL) 设计等。

### 1.3.2.2 电池管理系统国外研究现状

国外关于电池管理系统的研究较早，在 BMS 理论与实践层面都有较大突破，并且在电动汽车上的商业应用也有大量的经验。在 BMS 功能方面，除了基本的电池状态监测、数据通信、SOC 估算功能、均衡管理、热管理，也涉及充电控制和安全防护的内容。

美国在 BMS 研究水平上一直处于领先地位。The University of Toxod 最先提出电池管理系统的概念，US Nanocorp 公司通过与 Villanova 大学合作很早就荷电状态的研究提出估算模型<sup>[25]</sup>。美国典型的电池管理系统有 Aerovironmen 公司设计的 SmartGuard 系统、AC Propulsion 公司研发的 Battopt 和 Battmon 系统，以及通用公司应用在其 EVI 上的 BMS。SmartGuard 系统使用分布式结构设计，具备电压和温度采集功能、过充控制功能、单体电池状态监测功能。Battopt 系统通过主控模块和监控模块实现 BMS 的功能，主控模块用于对监控模块提供的电池状态信息进行优化处理。EVI 上的 BMS 能实现单体电压和电池组电流的监测，电池过放报警与高压保护等功能<sup>[26-29]</sup>。

欧洲电动汽车产业发展很快，典型的 BMS 是德国企业 B. Hauck 研发的 BATTMAN 系统和 Mentzer Electronic Gmbh 等开发的 BADICHEQ 系统及 BADICOACH 高性能锂电池控制管理系统<sup>[30]</sup>。BATTMAN 系统以硬线跳变及软件多参数设计的方案促成对不同型号电池组的控制。BADICHEQ 系统可以实现电池状态的采集功能、通信功能、均衡管理功能等。BADICOACH 系统实现了对 BADICHEQ 系统在电池状态信息采集方式、安全管理以及数据存储上的改进<sup>[31-34]</sup>。

韩国先进工程研究院和 Ajou 大学合作开发的 BMS，基于传统 BMS 增加了热管理功能、充电控制功能、安全管理功能等<sup>[35]</sup>。加拿大 Zade 开发的 BMS 通过主控模块、监测模块和均衡系统实现控制电池组状态信息采集、单体电池均衡等功能<sup>[34]</sup>。

### 1.3.2.3 电池管理系统国内研究现状

国内对电池管理系统的研究始于 20 世纪 90 年代，主要集中于软件功能的设计。其中电池状态信息的采集、SOC 估算、电池组均衡控制、电池组寿命估算、热管理等技术是国内高校、科研院所、汽车整车企业与电池厂商研究的热点内容。电池管理系统中关于高压上下电控制及预充电控制研究较少，充电控制方面的研究多考虑从电网的角度展开分析，关于 BMS 状态跳转控制少有研究，高压安全管理方面的研究多是针对整车的高压安全电控制讨论。

中国农业大学的辛喆等人为延长电池包使用寿命，设计了一种针对动力电池组均衡控制的电池管理系统，并实现充放电保护与设计精度的控制<sup>[36]</sup>。北京理工大学的王占国等人分析了电池单体不一致的根源，提出了一种荷电状态估算与均衡控制一体化的改进设计，有效提高了电池组的可用容量<sup>[37]</sup>。北京理工大学的贺巍等人针对电池与 BMS 之间的匹配进行了系统一体化建模与参数识别实验对比，较好地预估了电池的运行状态<sup>[38]</sup>。重庆大学的冉振亚等人采用 ModeFrontior 软件的优化算法对设计的电池管理系统进行仿真计算研究，并通过 Bitrod 实验验证其优化的 BMS 系统性能的可靠性<sup>[39]</sup>。北京