



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

电池系统工程

Battery Systems Engineering

(美) Christopher D. Rahn 著
Chao-Yang Wang
惠东 李建林 官亦标 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

电池系统工程

Battery Systems Engineering

(美) Christopher D. Rahn 著
Chao - Yang Wang

惠东 李建林 官亦标 译
杨凯 金翼 许守平



机械工业出版社

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < BATTERY SYSTEMS ENGINEERING >, ISBN < 978 - 1 - 119 - 97950 - 0 >, by < CHRISTOPHER D. RAHN, CHAO - YANG WANG >, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 WILEY 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字 01-2013-5532 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电池系统工程 / (美) 瑞恩 (Rahn, C. D.) 等著; 惠东, 李建林, 官亦标译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 8

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Battery Systems Engineering

ISBN 978-7-111-47333-6

I. ①电… II. ①瑞…②惠…③李…④官… III. ①电池 - 储能 - 系统工程 - 研究 IV. ①TM911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 152839 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: 付承桂 责任编辑: 付承桂 任 鑫

版式设计: 赵颖喆 责任校对: 潘 蕊

封面设计: 马精明 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 13.25 印张 · 284 千字

0 001—2 500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-47333-6

定价: 59.00 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

社服务中心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

本书专注于电池系统工程的学科领域，提供了开发先进电池管理系统所必需的背景、模型、求解技术和系统理论。全书内容涵盖了从基本电化学到相关系统工程等多个方面，并提供了用于电动和混合动力汽车平台系统工程的电池建模基础。本书主要内容包括：电池相关的电化学知识、电池建模中的控制方程和离散化方法、系统响应及不同类型电池模型、电池相关参数估计与电池管理系统。

本书适合电池系统工程相关设计人员和技术人员，以及高等院校相关专业师生阅读。

译者的话

本书英文版原著《Battery Systems Engineering》主要由宾夕法尼亚州立大学 Christopher D. Rahn 教授和 Chao - Yang Wang 教授共同编写而成，于 2013 年 2 月由 Wiley 出版社出版，是电池工程领域的权威著作，目前国际上尚未出现同类著作。

本书专注于电池系统工程的学科领域，提供了先进电池管理系统开发所必需的背景、模型、求解技术和系统理论。本书主题涵盖了从基本电化学到系统工程等多个方面，并提供了用于纯电动和混合动力汽车平台系统工程的电池建模基础。本书主要包括：电池相关的电化学知识、电池建模中的控制方程和离散化方法、系统响应及不同类型电池模型、电池相关参数估计与电池管理系统。对于高等院校师生以及电池行业从业者而言，本书将是一本优秀的教材与参考资料。在忠于原著的基础上，译者力求深入浅出、逻辑清晰、理论严谨、叙述明确，便于读者理解和掌握。

本书的翻译得到了 863 项目（2014AA052004）和中国电力科学研究院图书出版基金的资助。翻译过程中，除本书译者外，谢志佳、徐少华、田立亭、靳文涛等同事做了大量的校对、图稿整理工作，在此深表谢意。限于译者水平，书中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

译者

2014 年 8 月 8 日

原书前言

储能是推动电力系统效率及效益提高的关键，并且其需求日益增长。在追求更高燃油效率过程中，储能在地面运输方面变得越来越重要。回收制动时消耗的能量混合电动汽车，在轿车、卡车和公共汽车的市场份额也在不断增长。电动汽车和插电式混合动力电动汽车可利用电网的低成本能源充电。风能和太阳能等可再生能源，需要储能以缓冲电力生产不足。家庭储能可通过在谷荷时间段（例如，夜间）存储电网电能，在峰荷时间段少用电网电能的方式来减少开销。

存储能量的方法有很多，例如飞轮、超级电容和压缩空气，但对于大多数应用来说，电池是最好的选择。电池从规模上可以分为小规模应用（手机）、中等规模应用（混合动力电动汽车）和大规模应用（电网）。它们高效且比能量高，具有安全和可回收设计。然而，对成本和电池寿命的顾虑阻碍了电池储能更广泛的应用。研究人员正在不断研发成本更低、寿命更长的电池化学物质。用本书中描述的技术进行设计的高效和可延长寿命的电池管理系统，也可以解决这些问题。

许多储能应用的动态环境对电池管理系统的要求比普通电池供电设备（如笔记本电脑或手机）的要求要高。简单的电池供电设备只需要定期充电，然后电池组低电流缓慢放电，直到需要再次充电。混合动力汽车不同，需要快速和高电流的储能配合车辆不断变化的加速和制动。电池组这种快速的充放电循环，要求复杂的电池管理系统实时调节电池组充放电电流。为了将电池寿命最大化和保证安全，一种有效的电池管理系统可以将充电电流限制设得足够低，同时为满足功率输出最大，可以将放电电流设置足够高。

电池系统工程是化学、动态建模和系统/控制工程的交叉学科，需要多学科方法。电池化学家/工程师了解设计电池所需的电化学及材料问题，但未必有高效电池管理算法所需的解决复杂数学建模及控制系统设计的背景。数学建模者可能能够开发出精确的电池单体模型，但由于底层偏微分方程的复杂性，这些模型常常不能轻松应用于实际系统。系统工程师有控制学和动力学背景，能够对系统反馈进行分析、设计和仿真，但可能不理解底层的化学反应过程或建模原理。

本书旨在研究电池系统工程的多学科领域，提供了先进电池系统开发所需的背景、模型、解决技术和系统理论。有兴趣对先进电池系统了解更多的化学工程、机械工程、电气工程和航空航天工程的系统工程师们，将从本书中获益。化学、材料工作者和数学建模者，也可以在学习他们的专业知识如何影响电池管理中受益。本书可作为一门先进的本科技术选修课程或工程研究生课程的教材。

我们想感谢我们的学生们、博士后学者们和研究伙伴们对编写本书做出的贡

献。特别是 Kandler Smith、Yancheng Zhang、Ying Shi, Githin Prasad 和 Zheng Shen 对本书内容做出了重大贡献，值得我们感谢。在宾夕法尼亚州立大学参加了电池系统工程前两次课程的学生们也提供了意见，校正了错别字，他们中有 Kelsey Hatzell、Ed Simoncek、Ryan Weichel 和 Tanvir Tanim。Chao - Yang Wang 非常感谢他的妻子 May M. Lin，他女儿 Helen 和 Emily，给予他不变的爱、支持和力量。同样感谢我的妻子 Jeanne、女儿 Katelin、儿子 Kevin 和 Matthew 给予我的爱、支持与鼓励。

Christopher D. Rahn

Chao - Yang Wang

目 录

译者的话

原书前言

第 1 章 引言	1
1.1 储能应用	1
1.2 电池的作用	3
1.3 电池系统工程	4
1.4 基于模型的方法	5
1.5 电化学基础	6
1.6 电池设计	7
1.7 本书的目的	8
第 2 章 电化学	10
2.1 铅酸电池	10
2.2 镍 - 氢电池	12
2.3 锂离子	14
2.4 性能比较	15
2.4.1 能量密度和比能量	15
2.4.2 充电与放电	17
2.4.3 循环寿命	19
2.4.4 工作温度范围	19
第 3 章 控制方程	20
3.1 热力学与法拉第定律	20
3.2 电极动力学	22
3.2.1 Butler - Volmer 方程	23
3.2.2 双电层电容	24
3.3 多孔电极的固相	24
3.3.1 嵌入物的传输	25
3.3.2 电荷守恒	26
3.4 多孔电极的电解液相	27
3.4.1 离子传输	27

3.4.2	电荷守恒	30
3.4.3	浓溶液理论	32
3.5	电池电压	32
3.6	电池温度	33
3.6.1	Arrhenius 方程	33
3.6.2	能量守恒	33
3.7	副反应与老化	34
	习题	36
第 4 章	离散化方法	41
4.1	解析法	42
4.1.1	电解质扩散	42
4.1.2	铅电极中电解液 - 固相耦合扩散	48
4.1.3	锂离子电池和镍氢电池中的固相扩散	49
4.2	帕德近似法	50
4.2.1	锂离子电池中的固相扩散	51
4.3	积分近似法	52
4.3.1	电解液扩散	52
4.3.2	锂离子和镍氢电池中的固相扩散	54
4.4	Ritz 法	55
4.4.1	单域中的电解液扩散	55
4.4.2	耦合域中的电解液扩散	56
4.4.3	铅电极中电解液 - 固相耦合扩散	59
4.5	有限元法	60
4.5.1	电解质扩散	61
4.5.2	锂离子电极中的电解液 - 固相耦合扩散	62
4.6	有限差分法	63
4.6.1	电解质扩散	64
4.6.2	在铅电极内的非线性电解质 - 固相耦合扩散	64
4.7	频域内的系统辨识	66
4.7.1	系统模型	66
4.7.2	最小二乘优化问题	66
4.7.3	优化方法	68
4.7.4	多重输出	69
4.7.5	系统辨识工具箱	69
4.7.6	实验数据	70
	习题	70

第 5 章 系统响应	72
5.1 时间响应	73
5.1.1 恒流充电模式	74
5.1.2 铅酸电极对 DST 循环测试的响应	80
5.2 频率响应	82
5.2.1 电化学阻抗谱	82
5.2.2 离散效率	84
5.3 模型降阶	89
5.3.1 截断方法	91
5.3.2 群组划分	91
5.3.3 频率响应曲线的拟合	92
5.3.4 特性比较	92
习题	95
第 6 章 电池系统建模	99
6.1 铅酸电池模型	99
6.1.1 控制方程	100
6.1.2 Ritz 法离散化	104
6.1.3 数值收敛	107
6.1.4 仿真结果	107
6.2 锂离子电池模型	112
6.2.1 电子守恒	113
6.2.2 电荷守恒	114
6.2.3 反应动力学	115
6.2.4 电池电压	115
6.2.5 线性化	115
6.2.6 阻抗求解	117
6.2.7 FEM 电解质扩散	119
6.2.8 整体系统的传递函数	120
6.2.9 时域模型和仿真结果	121
6.3 镍氢电池模型	125
6.3.1 固相扩散	126
6.3.2 电荷守恒	128
6.3.3 反应动力学	128
6.3.4 电池电压	129
6.3.5 仿真结果	129

6.3.6 线性化模型	130
习题	133
第 7 章 估计	135
7.1 SOC (电池荷电状态) 估计	136
7.1.1 SOC 模型	138
7.1.2 瞬态 SOC	140
7.1.3 电流积分法	141
7.1.4 电压查表法	142
7.1.5 状态估计法	144
7.2 最小二乘法模型校正	148
7.2.1 阻抗传递函数	149
7.2.2 最小二乘算法	150
7.2.3 举例说明	152
7.2.4 可辨识性	153
7.3 SOH 估计	155
7.3.1 环境条件和电池寿命的参数化处理	156
7.3.2 参数估计	157
7.3.3 举例说明	158
习题	159
第 8 章 电池管理系统	161
8.1 BMS 硬件结构	163
8.2 充电模式	166
8.3 脉冲功率容量	168
8.4 动态功率限值	171
8.5 电池组管理	174
8.5.1 电池组动态特性	174
8.5.2 串联电池组中的电池均衡	182
8.5.3 热管理	192
习题	196
参考文献	198

第 1 章 引 言

高能源成本推动电力系统向提高效率和效益发展。一种提高性能的方法是存储不能在生产时刻被用掉的能量。为此，电池可用于混合电动汽车和可再生能源应用。这些应用要求电池不断地充放电循环，如果不用先进的电池管理系统（Battery Management System, BMS）进行控制，可能导致电池性能表现很差和过早老化。基于精确系统模型的 BMS，能够有力保证延长储能系统寿命和提升储能系统性能。本章促动对基于模型的电池系统工程的需求，并介绍了电池单体和电池组的电化学原理及设计。

1.1 储能应用

储能对很多应用至关重要，范围从小规模的便携式电子产品到大规模的可再生能源。使用电池的便携式电子设备包括视频/音频播放器、医疗设备、电动工具、仪表、数据记录仪和远程传感器^[1]。在这些应用中，电池将用户从电源线的束缚中释放，实现便携使用。这些装置中的电池随着时间推移不断放电，然后再定期地充电。储能也可用于大规模应用中，以降低对石油、天然气和煤的消耗。地面运输用混合动力汽车和可再生能源（例如风能和太阳能）使用电池来储存在生产时不能被用掉的能量，在这些应用中的充电和放电周期更频繁，取决于变化的电力供需。

为了增加地面车辆的燃料效率，电池被用于补充和有时替代液体燃料提供的功率。图 1-1 显示了四个开创性的使用电池提高燃油效率和性能的车辆。图 1-1a 中的丰田普锐斯是混合电动汽车（HEV），它采用了由松下公司生产的镍金属氢化物（镍氢）电池组。图 1-1b 和 d 中的日产聆风和 Tesla Roadster 是电动汽车（EV）。聆风使用有 Nissan-NEC 开发的叠层锂离子（Li-ion）电池组，Tesla 使用的是由数千个 18650（直径 18mm、长 65mm）锂电池单体特别构成的电池组。图 1-1c 中的雪佛兰沃蓝达是一个插电式混合电动汽车（PHEV）或增程式电动汽车（EREV），使用由 LG 化学提供的锂聚合物电池组。

混合电动汽车控制着轿车、卡车和公共汽车市场中不断增长的一份份额。混合动力系统包括：内燃机（ICE）、动力系统、电动机和电池。混合电动汽车节约能源是因为有以下能力：

- 1) 消除发动机怠速。当车辆处于静止状态时，发动机停止。
- 2) 回收和储存能量。电动机被用作发电机来制动车辆，制动产生的能量被存储在电池中。
- 3) 助推功率。电动机和发动机一起工作，增加加速过程中的扭矩。
- 4) 有效运行。发动机可运行在其最有效的速度，电动机在非高峰运行情况下提供动力。

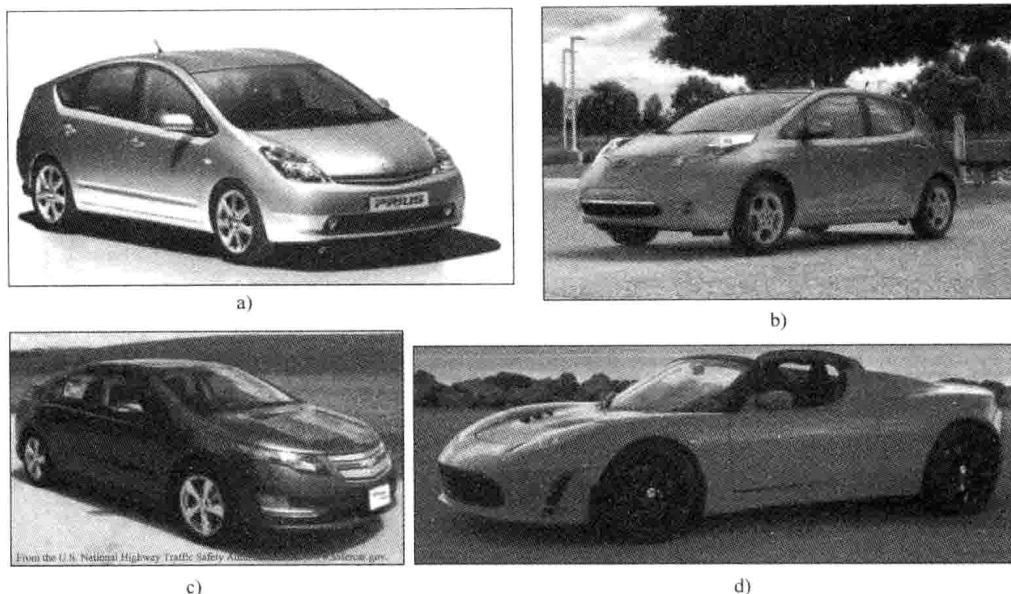


图 1-1 开创性的混合动力车辆

a) 丰田普锐斯 (©丰田) b) 日产聆风 (©2012, 日产 Nissan)

c) 雪佛兰沃蓝达 (照片由美国国家公路交通安全管理局拍摄) d) Tesla Roadster (© Tesla Motors, Inc.)

HEV 的成本及复杂度从简单的改造到复杂的重新设计现有内燃机汽车各不相同。微型混合动力车采用高功率的起动机/发电机提供消除发动机怠速的优势。软混合动力车添加一些再生制动和电功率下的低速运动。轻度混合动力车将电动机/发电机添加到驱动桥, 提供所有混合运行的好处。通常用于轻度混合动力车的并行传动系统, 使电动机/发电机能够在低速状态下驱动车辆或提供助推功率。全混合动力车通常使用串行/并行动力系统, 拥有并行动力系统的所有好处。它们可以用于将电动机速度和车辆速度解耦, 从而使电动机可以更经常地运行在最高效率模式。完全混合动力汽车是最有效和最复杂的 HEV, 电池承担大部分负载, 不断地充电和放电。

PHEV 中的电池组直接从电网充电, 在纯电动模式下驱动车辆行驶一段距离, 零燃气消耗和零排放; 同时拥有一个 ICE, 可用于延长纯电动行驶范围或突破纯电动的速度限制。当电池被耗尽到特定水平时, 车辆运行在完全混合模式, 直到能从电网再次充电。雪佛兰沃蓝达 PHEV 对串行传动系统进行改变, 发动机驱动一个发电机而不是从机械上连接到驱动轮。一个串行驱动系统不能同时使用发动机和电动机提供快速加速时的功率助推。

电动车是从电网充电的零排放汽车。电池为驱动电动机提供所需的全部功率和能量。电池组的重量和成本在电动车的设计中是主要的考虑因素。重量更轻的电池通常花费更多。电池充电, 然后在运行中慢慢地放电, 再生制动提供间歇充电脉冲。

电动汽车所需的充电基础设施建设是这项技术推广应用的一项重大挑战。在家中或工

作单位，充电器需要用几个小时给 EV 或 PHEV 充电，这并不会给驾驶者带来多大麻烦。然而，如果 EV 在道路上需要快速充电，快速（5min）充电设施应该广泛可使用。5min 充电的充电功率是 1h 充电的充电功率的 12 倍。长距离（300km）的 EV 大约需要 75kWh 的电池组，所以 5min 充电就需要电网提供 0.9MW 功率。随着越来越多续航里程更长的 EV 取代天然气为动力的汽车，电网基础设施将需要大幅增加，以适应增加的需求。

乘用车是 HEV 市场的大部分，但卡车和公共汽车也被转换为 HEV 和 EV。例如，图 1-2 所示为诺福克南方开发的全电动调车场机车。机车在夜间充电，然后在另一时间段使用 8h，在场地内移动火车的货运车厢。1000 多个铅酸电池用于给电牵引电动机供电。



图 1-2 诺福克南方电动调车场机车，NS999（图片由诺福克南方公司提供）

可再生能源，如风力、太阳能，和智能电网技术要求储能以缓冲电力生产的不足。风能和太阳能资源不能连续产生能量。产生的超过需求的能量，可以存储在大型电池场中，在稍后的时间使用。家庭储能通过在低负荷时间段（例如，晚上）存储电网电能，在高负荷时间段少用电网电能的方式来减少开销。智能电网调节供给每个家庭电力，使家庭储能可以弥补电力缺口。

1.2 电池的作用

存储能量的方法有很多（例如，飞轮、超级电容和压缩空气），但对于大多数应用

来说，电池是最好的选择。电池从规模上可以分为小规模应用（手机）、中等规模应用（混合动力汽车）和大规模应用（电网）。它们是高效的，并且具有高的比能量，有安全和可回收设计。然而，对成本和电池寿命的顾虑阻碍了电池储能更广泛的应用。研究人员正在不断研发成本更低、寿命更长的电池化学物质。当电池成为大容量产品不可分割的一部分，规模经济会降低成本。用本书描述的技术进行设计的能够延长储能系统寿命的 BMS，可保证电池组以一种最有效率和成本效益的方式被利用。

1.3 电池系统工程

电池系统工程是化学、动态建模和系统/控制工程的交叉学科，需要多学科方法。电池化学家/工程师了解设计电池所需的电化学及材料问题，但未必有高效电池管理算法所需的解决复杂数学建模及控制系统设计的背景。数学建模者可能能够开发出精确的电池单体模型，但由于底层偏微分方程的复杂性，这些模型常常不能轻松应用于系统。系统工程师有控制学和动力学背景，能够对系统反馈进行分析、设计和仿真，但可能不理解底层的化学或建模。

本书的主要目标之一是把电池带到系统工程的领域。从系统工程的角度来看，电池组是多输入多输出系统。主要的输入——电流，由用电设备的电能供需决定。主要输出是电池的电压。其他输出包括温度，单个电池或电池单体电压和一个给定电池单体的离子浓度分布。系统工程师需要电池单体、电池、电池组标准（例如，状态变量和传递函数）格式的模型，用于预测、估计并控制这些输出。

许多储能应用的动态环境要求具备先进的 BMS。BMS 经常关心的是充电协议，因为应用需要电池组定期完全充电。电池供电设备（例如，笔记本电脑），然后以低电流缓慢放电，直到需要再次充电。HEV 则不同，需要快速和高电流的储能配合车辆的动态加速和制动。例如，图 1-3 所示为 2 个 HEV 电池循环图。在 6min 的循环期间，进出

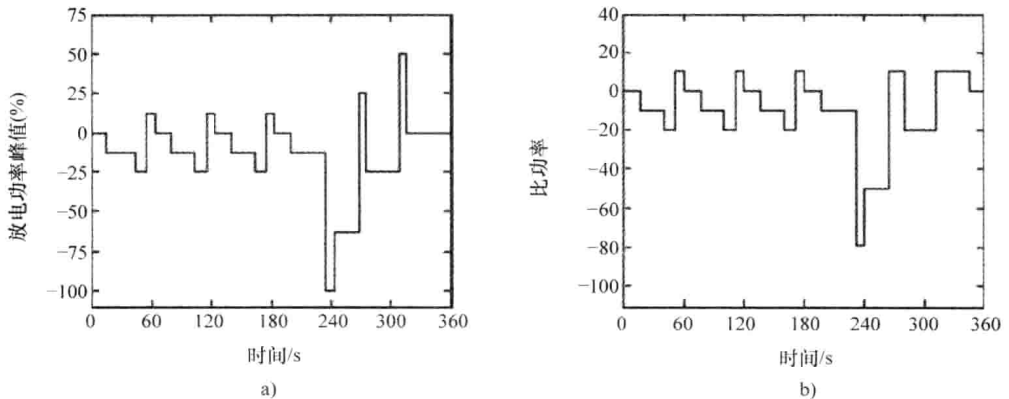


图 1-3 HEV 电池循环曲线

a) 动态强度测试 (DST) b) 简化的联邦城市道路行驶工况曲线 (SFUDS)

电池组的功率变化迅速。电池组这种快速的充放电循环，要求复杂的 BMS 实时调节电池组充放电电流。高效的 BMS 为了将电池寿命最大化和保证安全，可以将电流限制设得足够低，同时为满足功率输出最大，可以将电流设置足够高。

图 1-4 显示了 HEV 的机电系统原理。电池系统包括由电池单体成组为电池模块再组成的电池组、BMS 和热管理系统。电力电子设备将电池系统连接到电动机/发电机，再通过传动系统与 ICE 机械耦合。电力电子设备通常包括大功率开关电路、逆变器、DC - DC 变换器和充电器。传动系统将电动机/发电机和发动机都连接到车轮（并行配置）、只将电动机/发电机连接到车轮（串行配置）或者两种情况结合（混合配置）。

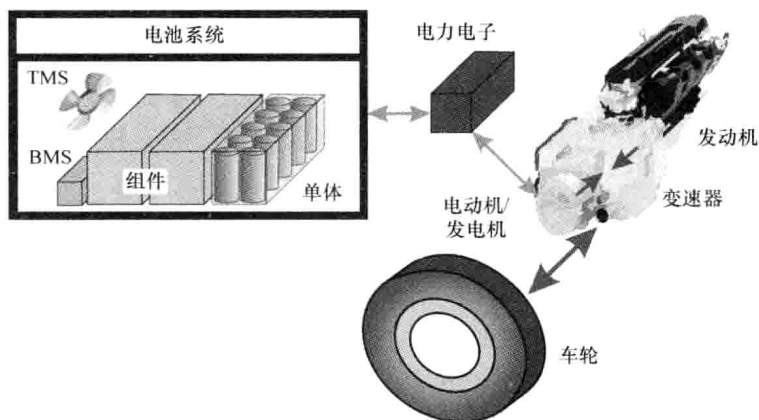


图 1-4 HEV 机电系统示意图

虽然应用于 HEV/PHEV/EV 的新电池化学、电力电子、电动机/发电机的发展面临重大挑战，本书的关注点集中于商用电池单体/电池组动态特征和车辆在线评估/控制软件的发展。动态模型可以用于模拟和优化系统响应。该软件基于建立的模型，预测和控制电池组响应，以优化电池组性能和使用寿命。电池是 HEV、PHEV 和 EV 动力系统中成本最高的部分，所以它们的最佳利用率对于发展经济型电动汽车是至关重要的。

1.4 基于模型的方法

电池可以采用实证方法或基于模型的方法进行设计。在实证方法中，构建电池单体并测试它的性能。根据测试的结果，电池被重新设计和重新测试。这是一个耗费时间并且昂贵的过程。在基于模型的方法中，模型用来预测基于电池设计的性能。因为电池可以在计算机上相对快速地进行设计和优化，这个过程被称为计算机辅助工程（CAE）。基于模型的设计，确保开发的电池有最高性能，使它们在市场上具有竞争力。

基于模型的方法建立在一个基本的物理模型之上，预测电池的响应。该模型始于电化学和物理偏微分方程（PDE），管理电池单元内的离子流。该模型需要可以独立测量的几何参数（例如，长度和面积）的知识，物理常数（例如，法拉第常数）的知识，

和不能独立测量参数和/或知道的（例如，扩散系数）的知识。给出随时间变化的电池输入电流，该模型预测电池时域响应，包括输出电压。最好的模型拥有的参数都可独立地测量，其性能和实验密切匹配。模型中的未知参数提供额外的旋钮供建模者调整，使其与实验数据更一致。模型验证过程包括在多种输入下测试模型，将模型预测和实验数据差距最小化。一旦模型得到验证，根据不同的电池设计和性能预测，输入参数可以是多种多样的。因此，为获得最大的性能，电池可以进行优化。

BMS 也可以采用实证方法或基于模型的方法进行设计。几乎所有的 BMS 都依靠电池模型，但复杂性有很大的差别。在最低水平，启发式模型用于大致预测观察到的性能。适合于在一个指定频率带宽测量响应的等效电路的更多先进实证模型已被广泛应用。然而，最先进的 BMS 是基于基本的电池模型。这些模型在实时应用中更难推导和简化，但它们都是基于电池底层的物理学和电化学。响应和系统参数之间的关系是已知的。基本的基于模型的控制器的有一个对内置的底层流程的了解，使它们能够更加高效、准确、安全。

1.5 电化学基础

图 1-5 显示的是电池单体的原理图。它包含浸渍在电解液中的正负极。电极可以是固体材料或多孔的，以允许电解质渗透通过。隔膜防止电子的流动，但允许两个电极之间的正离子和负离子迁移通过电解质。正极集流体和负极集流体为电子流过外部电路提供途径。在放电过程中，负极是阳极，正极是阴极。正离子从阳极通过电解质和隔膜到阴极。负离子向相反的方向移动。阳极集聚负电荷、阴极集聚正电荷，形成电池电压

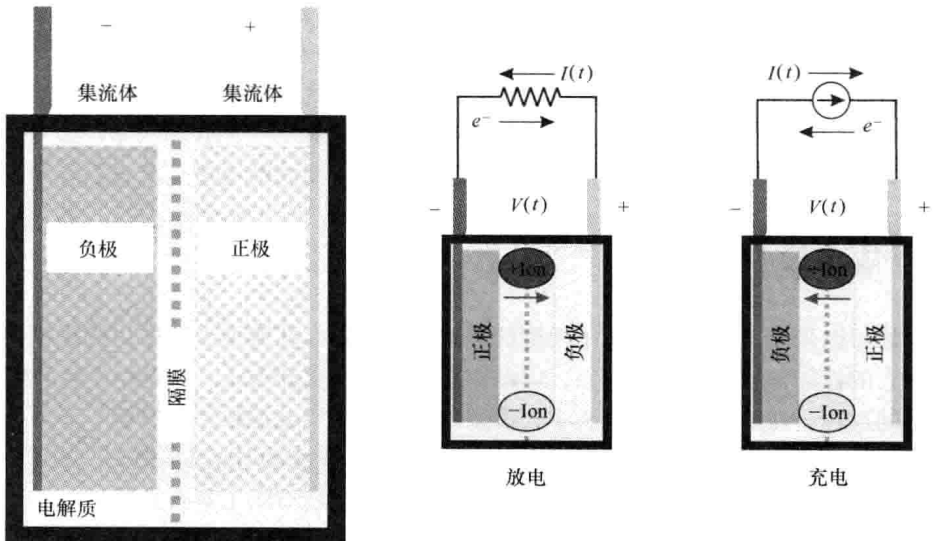


图 1-5 电池简单放电和充电过程