

WILEY

储能科学与技术丛书

电池建模与电池 管理系统设计

BATTERY
SYSTEMS
ENGINEERING



[美] 克里斯多夫·D. 瑞恩 (Christopher D. Rahn) 著
王朝阳 (Chao-Yang Wang) 等译
惠东 李建林 官亦标 等译

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

书与技术丛书 ■

电池建模与电池管理系统设计

Battery Systems Engineering

[美]

克里斯多夫·D. 瑞恩 (Christopher D. Rahn)
王朝阳 (Chao-Yang Wang)

著

惠东 李建林 官亦标
杨凯 金翼 许守平

译



机械工业出版社

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、电力储能等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。

Copyright © 2013 John Wiley & Sons, Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Battery Systems Engineering, ISBN: 9781119979500, by Christopher D. Rahn and 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

电池建模与电池管理系统设计/(美)克里斯多夫·D. 瑞恩(Christopher D. Rahn), 王朝阳著; 惠东等译. —北京:机械工业出版社, 2018. 8

(储能科学与技术丛书)

书名原文: Battery Systems Engineering

ISBN 978-7-111-60579-9

I. ①电… II. ①克…②王…③惠… III. ①电池-系统建模②电池-储能-系统设计 IV. ①TM911

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第171177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

责任校对:王延 封面设计:鞠杨

责任印制:常天培

北京机工印刷厂印刷

2018年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm·14.75印张·2插页·294千字

0 001—3 500册

标准书号:ISBN 978-7-111-60579-9

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

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。

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、电力储能等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法和离散化方法、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人员而言，本书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。

本书的翻译得到了国家重点研发计划项目(2017YFB0903504)和国家自然科学基金项目(51777197)支持。在编译过程中，除本书译者外，谢志佳、胡晨、靳文涛等同事做了大量的校对、图稿整理工作，在此深表感谢。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

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。回收制动时消耗能量的混合动力汽车，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，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，使得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，他们是 Kelsey Hatzell、Ed Simoncek、Ryan Weichel 和 Tanvir Tanim。Chao - Yang Wang 非常感谢他的妻子 May M. Lin 和女儿 Helen、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	2
1.2 电池的作用	7
1.3 电池系统工程	8
1.4 基于模型的方法	9
1.5 电化学基础	10
1.6 电池设计	11
1.7 本书的目的	12
第2章 电化学	14
2.1 铅酸电池	15
2.2 镍-氢电池	19
2.3 锂离子	21
2.4 性能比较	22
2.4.1 能量密度和比能量	22
2.4.2 充电与放电	24
2.4.3 循环寿命	26
2.4.4 工作温度范围	27
第3章 控制方程	28
3.1 热力学与法拉第定律	29
3.2 电极动力学	32
3.2.1 Butler-Volmer 方程	32
3.2.2 双电层电容	33
3.3 多孔电极的固相	34
3.3.1 嵌入物的传输	35
3.3.2 电荷守恒	35
3.4 多孔电极的电解液相	37
3.4.1 离子传输	37

3.4.2 电荷守恒	40
3.4.3 浓溶液理论	41
3.5 电池电压	42
3.6 电池温度	43
3.6.1 Arrhenius 方程	43
3.6.2 能量守恒	43
3.7 副反应与老化	44
习题	46
第4章 离散化方法	51
4.1 解析法	53
4.1.1 电解质扩散	53
4.1.2 铅电极中电解液——固相耦合扩散	60
4.1.3 锂离子电池和镍氢电池中的固相扩散	61
4.2 帕德近似法	62
4.2.1 锂离子电池中的固相扩散	63
4.3 积分近似法	64
4.3.1 电解液扩散	64
4.3.2 锂离子和镍氢电池中的固相扩散	66
4.4 Ritz 法	67
4.4.1 单域中的电解液扩散	67
4.4.2 耦合域中的电解液扩散	68
4.4.3 铅电极中电解液——固相耦合扩散	71
4.5 有限元法	72
4.5.1 电解质扩散	73
4.5.2 锂离子电极中的电解液——固相耦合扩散	75
4.6 有限差分法	76
4.6.1 电解质扩散	76
4.6.2 在铅电极内的非线性电解质——固相耦合扩散	77
4.7 频域内的系统辨识	78
4.7.1 系统模型	79
4.7.2 最小二乘优化问题	79
4.7.3 优化方法	81
4.7.4 多重输出	82
4.7.5 系统辨识工具箱	83
4.7.6 实验数据	83

习题	83
第 5 章 系统响应	85
5.1 时域响应	87
5.1.1 恒流充放电模式	88
5.1.2 铅酸电极对 DST 循环测试的响应	94
5.2 频域响应	96
5.2.1 电化学阻抗谱	96
5.2.2 离散效率	100
5.3 模型降阶	104
5.3.1 截断方法	105
5.3.2 群组划分	105
5.3.3 频域响应曲线的拟合	106
5.3.4 特性比较	106
习题	109
第 6 章 电池系统建模	113
6.1 铅酸电池模型	114
6.1.1 控制方程	115
6.1.2 Ritz 法离散化	119
6.1.3 数值收敛	122
6.1.4 仿真结果	122
6.2 锂离子电池模型	128
6.2.1 电子守恒	129
6.2.2 电荷守恒	130
6.2.3 反应动力学	131
6.2.4 电池电压	131
6.2.5 线性化	132
6.2.6 阻抗求解	133
6.2.7 FEM 电解质扩散	136
6.2.8 整体系统的传递函数	137
6.2.9 时域模型和仿真结果	137
6.3 镍氢电池模型	141
6.3.1 固相扩散	142
6.3.2 电荷守恒	144
6.3.3 反应动力学	144
6.3.4 电池电压	145

6.3.5 仿真结果	145
6.3.6 线性化模型	147
习题	149
第7章 估计	152
7.1 SOC (电池荷电状态) 估计	154
7.1.1 SOC 模型	156
7.1.2 瞬态 SOC	159
7.1.3 电流积分法	160
7.1.4 电压查表法	160
7.1.5 状态估计法	162
7.2 最小二乘法模型校正	167
7.2.1 阻抗传递函数	168
7.2.2 最小二乘算法	169
7.2.3 举例说明	171
7.2.4 可辨识性	172
7.3 SOH 估计	174
7.3.1 环境条件和电池寿命的参数化处理	175
7.3.2 参数估计	176
7.3.3 举例说明	177
习题	179
第8章 电池管理系统	182
8.1 BMS 硬件结构	186
8.2 充电模式	188
8.3 脉冲功率容量	190
8.4 动态功率限值	194
8.5 电池组管理	197
8.5.1 电池组动态特性	197
8.5.2 串联电池组中的电池均衡	204
8.5.3 热管理	216
习题	220
参考文献	222

第1章 引言

近年来，二次电池技术得到一定程度的突破。以锂离子电池、镍氢电池为代表的动力电池，已经广泛应用于纯电动汽车以及混合动力汽车。与此同时，以锂离子电池、铅酸电池为代表的储能电池，正逐渐在智能电网的升级换代中得到应用。在这些应用中，数个电池单体通过串（并）联构成电池组，大量的电池组通过串（并）再形成电池系统，并不断地进行充放电循环。电池系统如果离开先进的电池管理系统（Battery Management System, BMS），可能会导致电池单体或电池组的性能表现很差和过早老化。基于精确系统模型的 BMS，能够有效保证延长储能系统寿命和提高储能系统性能。本章将重点介绍基于模型的电池系统工程的需求，以及电池单体和电池组的电化学原理设计。

1.1 储能应用^①

储能对于许多应用至关重要，其范围从小功率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手机、笔记本电脑、医疗设备、电动工具、仪表、数据记录仪以及远程传感器。在这些应用中，电池将用户从传统的电源线束缚中解放出来，实现了设备的便携化。在这些装置中的电池随着时间推移不断释放电能，然后通过定期性充电来补充能量。

对于电动汽车，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动力汽车（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动力汽车（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。

混合动力汽车控制着轿车、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。混合动力汽车节约能源是因为其具有以下能力：

- 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，增加加速过程中的转矩。

① 此 1.1 节中后半部分有关可再生能源及电池储能系统方面的内容为译者经原作者同意，根据中国国内的情况所加，供广大行业读者参考了解。——编辑注

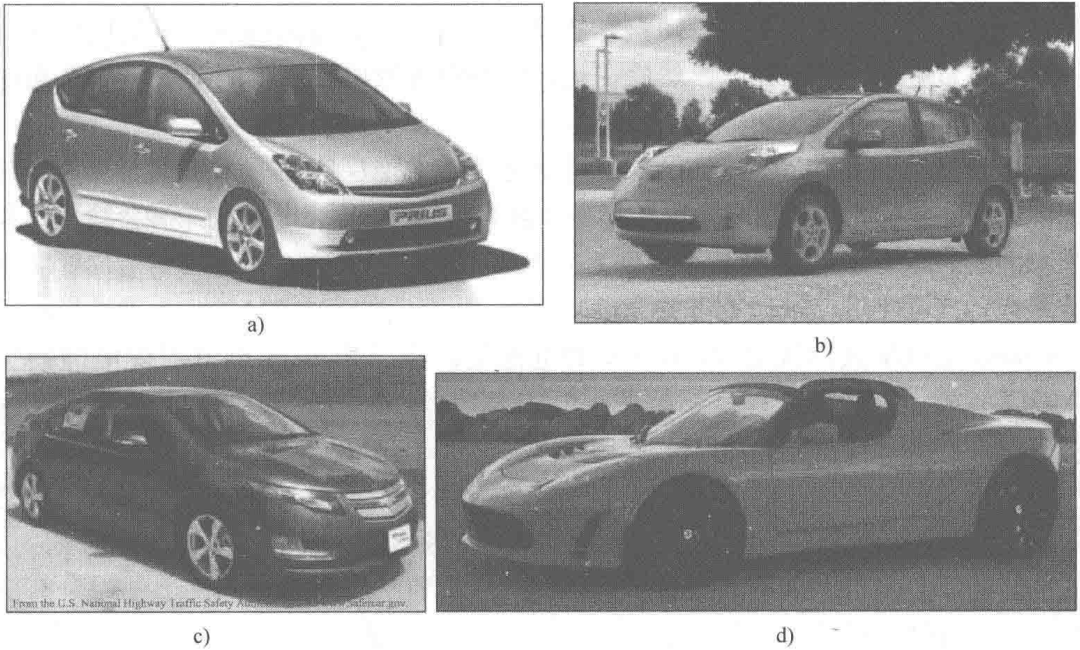


图 1-1 开创性的混合动力车辆

- 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.)

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。

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距离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。

电动汽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能量。电池组的重量和成本在电动汽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的麻烦。然而，EV 在道路上需要快速充电，快速（5min）充电设施应该分布广泛且可使用。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 $75\text{kW}\cdot\text{h}$ 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。

随着可再生能源的规模化开发以及智能电网的发展，储能被用来解决可再生能



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）

源间歇性和不稳定性、提高常规电力系统和区域能源系统效率、提高安全性和经济性的重要手段，对于保障电网安全、提高可再生能源比例、提高能源利用效率、实现能源的可持续发展具有重大的战略意义。

图 1-3 显示是宁德时代 (CATL) 开发的 3MW/1.4MW·h 锂离子电池储能装置，用于北美风电公司 Invenenergy 的某风电场参与电网的调频应用。其调频应用曲线如图 1-4 所示。当电网的频率较低时，电力公司向储能系统发出放电请求，储能系统根据接收到的请求指令及放电功率需求进行放电；当电网频率较高时，电力公司向储能系统发出充电请求，储能系统根据接收到的请求指令及充电功率需求进行充电。

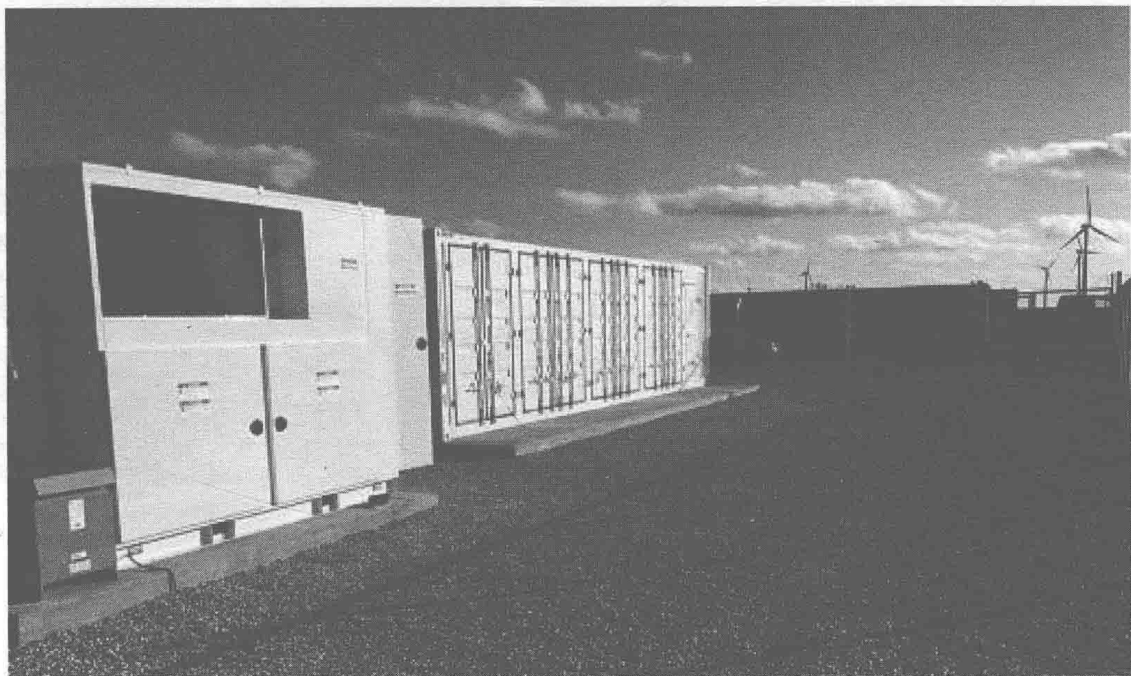


图 1-3 3MW/1.4MW·h 锂离子电池储能调频装置 (图片由宁德时代新能源有限公司提供)

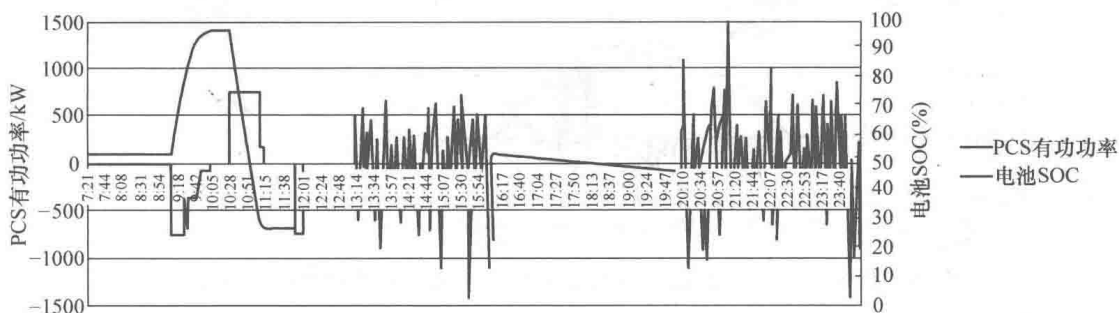


图 1-4 3MW/1.4MW·h 锂离子电池储能调频应用的典型曲线 (图片由宁德时代新能源有限公司提供)

电池储能系统由于响应速度快，出力调节精准、灵活，已经成为电网调频的重要工具。

图 1-5 显示的是中国张家口国家风光储输示范工程（一期）。在该示范工程中风电装机容量 100MW，光伏装机容量 40MW，电池储能 14MW/63MW·h。储能与风光发电联合，有效抑制了风光出力波动（见图 1-6），并实现可再生发电跟踪计划出力，提升新能源的可预测性、可控性和灵活性。

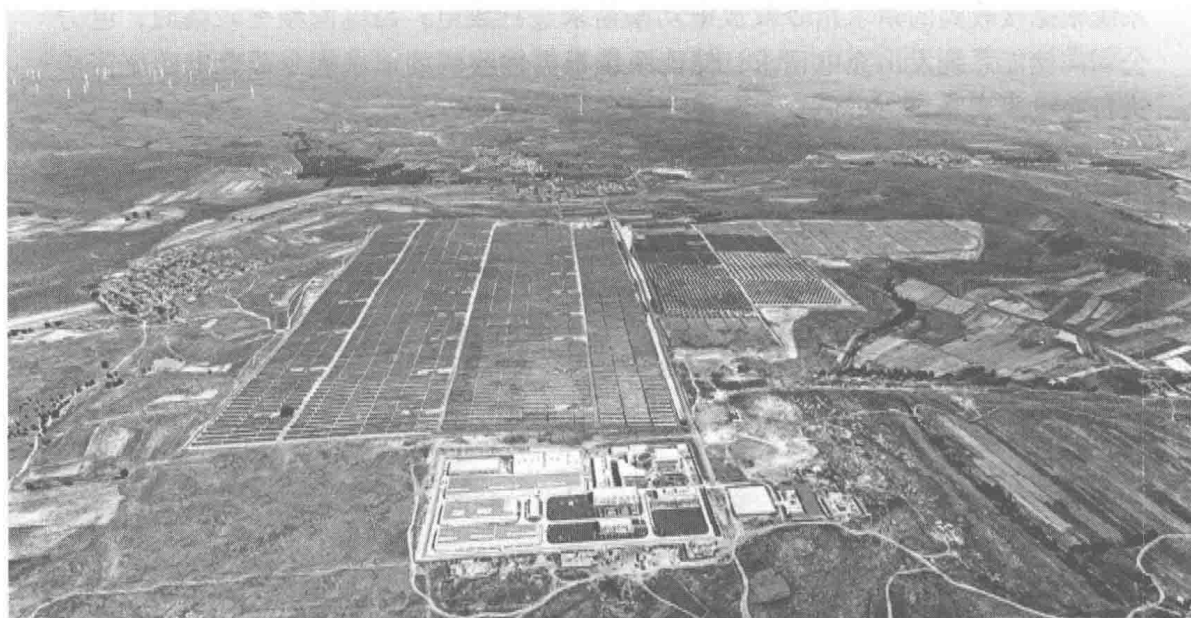


图 1-5 中国张家口国家风光储输示范工程（一期）鸟瞰图

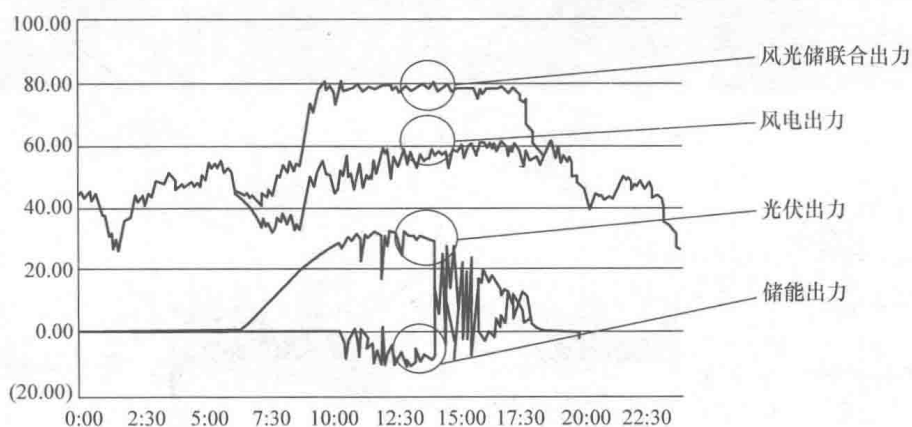


图 1-6 中国张家口国家风光储输示范工程（一期）风光储联合发电典型运行曲线图

图 1-7 显示的是南都电源开发的 20MW/160MW·h 铅炭电池储能装置。该储能电站用于中国江苏省无锡某工业园区调峰，同时参与电网需求侧响应及源网荷

储的应用。正常用于每天削峰填谷，即在园区谷段时间段充电，峰段时间段放电。同时，当电网的用电峰值或谷电余量增加时，电网公司向储能电站系统发出放电或充电请求，储能系统根据接收到的请求指令及放电功率需求进行放电或充电动作。此外，储能电站可参与电网公司的源-网-荷-储友好互动平台的应急备用调度，为园区提供供电保障，提高用电可靠性。

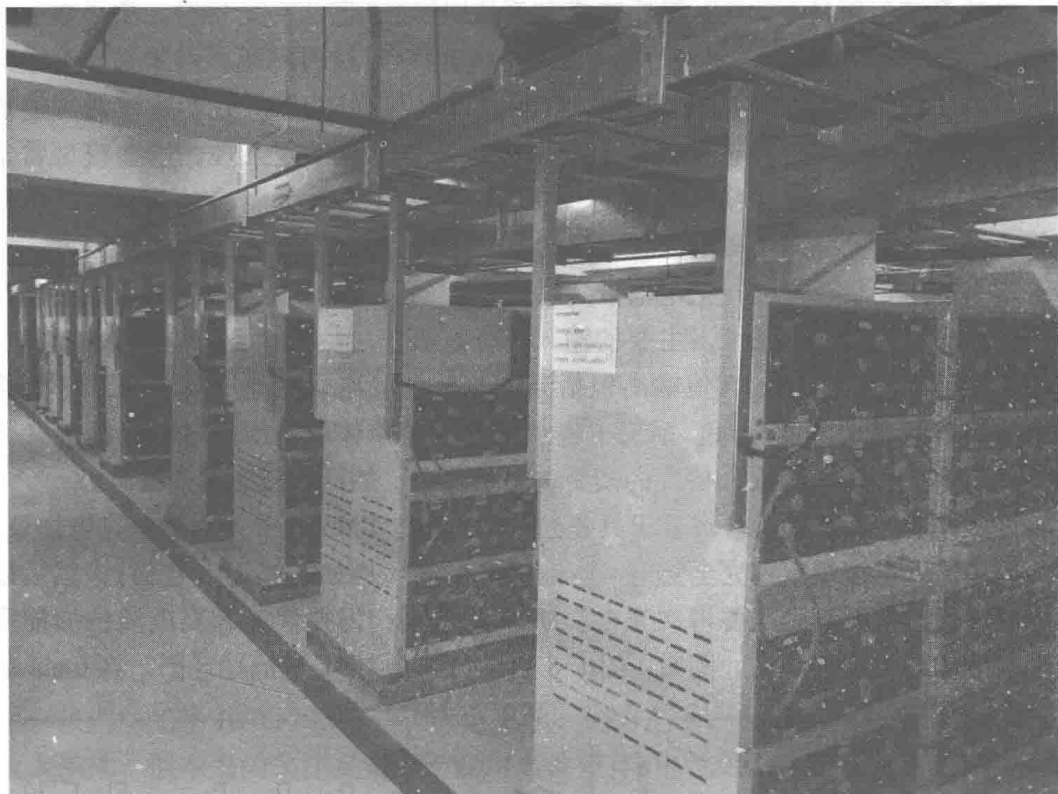


图 1-7 20MW/160MW·h 铅炭电池储能装置 (图片由浙江南都电源动力股份有限公司提供)

1.2 电池的作用

电能存储方式有很多种 (例如, 飞轮、超级电容和压缩空气等), 而对于大多数应用而言, 电池储能可能是最好的选择。电池从规模上可以分为小规模应用 (手机)、中等规模应用 (混合电动汽车) 和大规模应用 (电网)。作为能量存储载体, 电池具有比能量高、能量转换效率高等特点, 但是使用者对成本和电池寿命的顾虑阻碍了电池储能更广泛的应用。目前, 研究人员正不断研发成本更低、寿命更长的电池化学物质, 此外, 当电池实现批量生产并得到广泛应用时, 规模化经济也会降低其成本。无论参与哪一种应用, 电池在其全寿命服务周期内都需