



国际电气工程先进技术译丛

大规模锂离子电池 管理系统

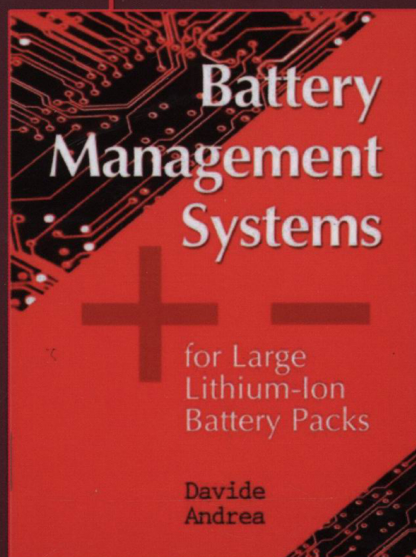
**Battery Management Systems for Large
Lithium-Ion Battery Packs**

[美] 达维德·安德里亚 (Davide Andrea) 著

李建林 李蓓 房凯 等译



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



关于作者

Davide Andrea是创立于2008年的Elithion公司的所有者，该公司致力于研究可用于工业的锂离子电池管理系统。最初，Andrea先生创立了Hybrids Plus和Inverger两家公司，前者致力于应用电池管理技术发展Prius和Escape PHEV间的能量转换问题；后者主要经营方向则在于研发可用于V2G的双向充电器/变流器。Andrea先生也曾通过DAVIDE、DBA提供电子顾问服务。他具有6年锂离子电池管理系统开发设计经验、25年的电子设计经验，并具有科罗拉多大学电气工程与计算机专业学士学位。



国际电气工程先进技术译丛

大规模锂离子电池 管理系统

Battery Management Systems for Large
Lithium-Ion Battery Packs

[美] 达维德·安德里亚 (Davide Andrea) 著

李建林 李蓓 房凯 译
许守平 谢志佳 惠东



机械工业出版社

本书主要介绍大规模锂离子电池组的电力电子和控制系统等相关内容，并不涉及电池化学原理方面的知识。针对大规模锂离子电池管理系统的技术、功能、拓扑、商业可行性、电子电路以及算法进行了专业深入的探究，并介绍了电池管理系统的部署问题。

在当前储能技术大力发展的背景下，这本适时出版的图书描述了本领域中重要的技术挑战，并探索了应对挑战的最有效的解决方法。本书通过列举大量的图形、图像和表格深入地阐述了为什么以及如何对锂离子电池管理系统进行设计、安装、配置和故障排除。这份实用资源对当下可用的规模化的电池管理系统进行了公正的描述和比较。此外，本书还针对在限定的功能要求下如何选择正确的电池管理系统保证锂离子电池组运行低消耗、少用时进行了描述。

译者的话

锂离子电池储能系统是众多电化学储能系统中发展最快、最为成熟的一种，兆瓦级和百兆瓦级储能电站逐步成为热点，实际工程中需要数以万计的单体电池通过串并组合，因此对其进行能量管理和热管理就变得尤为重要。

本书对锂离子电池管理系统的结构、功能以及商业模式等进行了逐一介绍。首先，介绍了锂离子电池组和电池管理系统，并由此提出为锂离子电池组配备电池管理系统的必要性；其次，针对大规模锂离子电池管理系统的技术、功能、拓扑、商业可行性、电子电路以及算法进行了探讨和介绍；最后，针对大规模锂离子电池管理系统的部署问题进行了介绍。本书既适合作为广大读者的科普读物，又适用于高等院校的教材。

本书得到了国家电网公司科技项目（KY-SG-2016-204-JLDKY）和中国电力科学研究院专著出版基金的大力资助，在此深表谢意。中国电力科学研究院的修晓青、马会萌、靳文涛、杨水丽、徐少华等同志在本书的翻译过程中提供了诸多帮助并提出了宝贵意见，机械工业出版社的付承桂和诸多同志也为出版本书付出了辛勤的劳动，在此表示诚挚的感谢。

锂离子电池管理系统涉及多学科、多领域的专业知识，尽管译者竭力求实，但受到水平和专业领域所限，本书难免存在错误和不妥之处，恳请读者不吝赐正。

译者

于中国电力科学研究院

原 书 前 言

在撰写本书时，锂离子电池（Li-Ion）已经成为消费类产品（例如手机或笔记本电脑）所用小型电池的主要选择，并且在汽车牵引和陆基分布式储能等大型电池应用中，也逐渐呈现出取代铅酸电池和镍氢电池的趋势。

仅当管理得当时，锂离子电池才能够表现出比其他化学电池更加优良的特性，因此，锂离子电池需要配备有效的电池管理系统（BMS）。

本书旨在协助工程师或项目管理者对大容量锂离子电池组进行选择、规定、设计、部署和应用的工作。

在过去的六年中，我开发了数个大型锂离子电池组用电池管理系统，积累了对这些系统需求、挑战和解决方法的见解，并通过讲演、出版白皮书和答疑等多种方式分享了我所了解的知识。我希望能够通过本书以一种更加系统和更加综合的方式与大家分享有关大型锂离子电池组管理系统的相关知识。由于我对于本领域的认识和了解并不是十分全面，因此书中的一些表述难免有不妥之处。对此，我表示诚挚的歉意，并希望读者能够通过网站（<http://book.LiIonBMS.com>）联系指正，以便于在勘误表和网站上做出澄清和回应。

本书主要关于电力电子和控制系统等相关内容，并不涉及化学原理方面的知识。在本书中，电池被看作是黑盒子，仅针对其对外等效电路进行介绍。总体而言，本书适合对物理和技术具有一定理解基础的人阅读。本书的第5章则为对于电力电子和软件算法具有一定基础的读者编写。

全书共分为6章，从基础概念开始，然后逐步延伸到更深层、更实用的细节。

- 第1章介绍了锂离子电池和电池管理系统的概念，并阐述了开发锂离子电池管理系统的必要性。

- 第2章论述了电池管理系统的分类方法：按功能分类、按技术方法以及按拓扑分类。

- 第3章讲解了电池管理系统可具备的功能。

- 第4章探究了商用电池管理系统方案。

- 第5章深入探究了电池管理系统的电子电路以及算法（如果需要设计定制的电池管理系统）。

- 第6章介绍了锂离子电池管理系统发布的全过程。

Davide Andrea

目 录

译者的话

原书前言

第 1 章 概述	1
1.1 命名规则	1
1.1.1 单体电池、电池和电池组	1
1.1.2 电阻	1
1.2 锂离子单体电池	1
1.2.1 形状	2
1.2.2 化学过程	3
1.2.3 安全性	4
1.2.4 安全运行区	6
1.2.5 效率	6
1.2.6 老化	8
1.2.7 建模	10
1.2.8 串联组串中的均压问题	13
1.3 锂离子电池管理系统	15
1.3.1 电池管理系统定义	15
1.3.2 锂离子电池管理系统的功能	16
1.3.3 电池管理系统选型	16
1.4 锂离子电池	19
1.4.1 荷电状态 (SOC)、放电深度 (DOD) 和容量	19
1.4.2 一致性及均衡	23
1.4.3 健康状态	33
参考文献	35
第 2 章 电池管理系统分类	36
2.1 按功能分类	36
2.1.1 恒流恒压充电器	36
2.1.2 分流器	38
2.1.3 监测器	39
2.1.4 监控器	40

VI 大规模锂离子电池管理系统

2.1.5 均衡器	41
2.1.6 保护器	42
2.1.7 功能对比	42
2.2 按技术分类	43
2.2.1 简单系统（模拟系统）	43
2.2.2 复杂系统（数字系统）	44
2.2.3 技术对比	44
2.3 按拓扑分类	45
2.3.1 集中式	45
2.3.2 模块式	45
2.3.3 主从式	46
2.3.4 分布式	47
2.3.5 拓扑对比	49
第3章 BMS 功能	50
3.1 测量	50
3.1.1 电压	50
3.1.2 温度	53
3.1.3 电流	53
3.2 管理	56
3.2.1 保护	56
3.2.2 热管理	61
3.2.3 平衡	62
3.2.4 再分配	82
3.2.5 分布式充电	84
3.3 评价	85
3.3.1 荷电状态和放电深度	85
3.3.2 容量	91
3.3.3 电阻	92
3.3.4 健康状态（SOH）	93
3.4 外部通信	94
3.4.1 专用模拟线路	94
3.4.2 专用数字线路	95
3.4.3 数据连接	98
3.5 登录和遥测	100
参考文献	100
第4章 市售电池管理系统	101
4.1 引言	101

4.1.1 简单系统	101
4.1.2 复杂系统	105
4.1.3 单体电池制造商的电池管理系统	111
4.1.4 对比	112
第5章 定制型 BMS 设计	114
5.1 BMS 专用集成电路	114
5.1.1 BMS 专用集成电路的选择	114
5.1.2 BMS 专用集成电路的比较	117
5.2 模拟 BMS 设计	118
5.2.1 模拟调节器	118
5.2.2 模拟监控器	120
5.2.3 模拟均衡器	131
5.2.4 模拟保护器	138
5.3 现有的数字 BMS 设计	138
5.3.1 ATMEL 公司生产的 BMS 处理器	139
5.3.2 Elithion 公司生产的 BMS 芯片集	140
5.3.3 National Semiconductors 公司生产的成套 BMS	141
5.3.4 Peter Perkins 生产的开源 BMS	142
5.3.5 德州仪器公司生产的 bq29330/bq20z90	143
5.3.6 德州仪器生产的 bq78PL114/bq76PL102	146
5.4 定制型数字 BMS 设计	147
5.4.1 电压及温度测量	148
5.4.2 电流测量	171
5.4.3 评估功能	176
5.4.4 通信	191
5.4.5 优化	202
5.4.6 开关	216
5.4.7 日志记录	220
5.5 电池接口	221
5.5.1 非分布式	221
5.5.2 分布式	222
5.6 分布式充电	228
第6章 BMS 的设计	231
6.1 安装	231
6.1.1 电池组设计	231
6.1.2 BMS 与电池组的连接	244

6.1.3 BMS 与系统连接	247
6.2 配置	253
6.2.1 单体电池配置	253
6.2.2 电池组配置	253
6.2.3 系统配置	253
6.3 测试	255
6.4 故障排除	256
6.4.1 接地	256
6.4.2 屏蔽	256
6.4.3 过滤	256
6.4.4 电线布置	256
6.4.5 非计划断路	256
6.5 应用	257
参考文献	257
符号及缩略语	258
术语	260

第 1 章 概 述

1.1 命名规则

1.1.1 单体电池、电池和电池组

在对电池组的各个组成部分的命名上存在着一些混淆，这或许是因为当我们提到“电池”时其实是指碱性单体电池，而往往忽略了汽车启动电池是由 6 个单体电池组合而成。

在本书中，我们对各组成部分的命名约定如下：

- 单体电池 (cell)：电池最基础的组成元素（就锂离子单体电池而言其能提供 3 ~ 4V 电压）。
- 电池块 (block)：由一系列单体电池并联组成，提供 3 ~ 4V 的电压。
- 电池 (battery)：由一系列单体电池或电池块串联组成的独立的物理模块，可以提供更高的电压水平（例如，一个由 4 个单体电池串联组成的电池块正常工作时可以提供 12V 电压）。
- 电池组 (pack)：由许多电池通过串联或并联组成的电池集合。

1.1.2 电阻

单体电池生产商通常在电池的参数表中列出的阻抗参数通常为交流阻抗（详见 1.2.7 节）。但是电池使用者需要知道的是，直流阻抗并非交流阻抗，因为电池正常工作时内部流动的是直流电流。因此，在本书中，所有的阻抗均特指单体电池或者电池的内部直流电阻。

1.2 锂离子单体电池

可充电锂离子单体电池在现有市售电池中具有最高的能量密度，并且功率密度也很高。锂离子单体电池凭借着其近乎卓越的性能（见图 1.1）已经成为如笔记本电脑和手机这样的消费类电子产品的首选。与此同时，锂离子单体电池也快速成为牵引类交通工具动力源的理想选择。



图 1.1 世界上最快的电动摩托 KillaCycle 烧胎

1.2.1 形状

锂离子单体电池一般具有 4 种基本形状（见图 1.2 和表 1.1）：圆柱形（分为大、小两种）、棱柱形和袋形。



图 1.2 锂离子单体电池形状：大、小圆柱形，棱柱形和袋形

这些锂离子单体电池的易用性使得它们在小型项目中更受青睐。圆柱形的锂离子单体电池在完全充电的化学反应过程中仍可以保持原有的形状不发生膨胀，而对于其他形状的单体电池来说，就必须选择合理的外壳来抑制膨胀。

此外，K2 能源公司将一系列小圆柱单体电池组装成为具有棱柱外形的电池，这些电池同时具备了小圆柱单体电池的机械特性、热特性和棱柱单体电池的易用特性。

表 1.1 锂离子单体电池形状对比

	小圆柱	大圆柱	棱柱	袋状
外形	包裹成小圆柱状，一般长 65mm	包裹成金属或硬塑圆柱状	中等硬度塑料包裹	软袋包裹
连接	镍焊接或铜条铜板焊接	螺栓螺母联接或螺栓螺纹联接	螺栓螺纹联接	标签夹连接或焊接
满充抗膨胀性	外形固有抗膨胀特性	外形固有抗膨胀特性	需要在电池尾部加装抗膨胀板	需要在电池尾部加装抗膨胀板
商业性	差：设计过程复杂，需要焊接，劳动强度大	好：需要一些设计	优秀：几乎不需要设计	非常差：需要很多的设计劳动
工作特性	好：焊接提供了较高的可靠性	好	优秀	好：高表现
替换特性	不可能	可能但不简单	简单	一般不可能
注释	易于改造，因为较小的外形可以适应各应用	一般不广泛应用	较高的可利用性，几乎不需要设计	高能量/功率密度，需要大量的设计工作量，一般在大型产品中才选择应用

1.2.2 化学过程

锂离子单体电池通过内部锂离子在正负电极之间嵌入和脱嵌进行充放电，锂离子在正负极之间的传递模式被戏称为“摇椅模式”。

锂离子单体电池大多采用聚合物电解质或凝胶电解质，而其他单体电池则大多采用非水液体电解质。

许多锂离子化合物可用于制作锂离子单体电池。通常情况下根据锂离子单体电池阴极材料对其进行命名。

- LiCoO_2 ：标准钴酸锂。
- LiMnNiCo ：镍钴锰酸锂。
- LiFePO_4 和 $\text{Li}_2\text{FePO}_4\text{F}$ ：纳米磷酸锂/磷酸锂/磷酸铁锂。
- LiMnO_2 ：锰酸锂。
- $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ：钛酸锂。
- LiMn_2O_4 ：锰酸锂。
- LiNiO_2 ：镍酸锂。

这些单体电池的额定电压、能量密度和功率密度等参数随着其化学反应的变

化而变化。相比于标准钴酸锂，一些锂离子单体电池更安全，也更适合用作大型牵引锂离子电池组（特别是磷酸铁锂和钛酸锂）。

1.2.3 安全性

虽然锂离子单体电池性能优异，但也不允许使其工作在严格安全区域之外，否则会产生令人不满意甚至危险的后果。

在多数情况下，单体电池故障的后果也仅仅是电池使用寿命缩短或者电池损毁，不会发生安全事故。然而滥用锂离子单体电池则是一件极其危险的事情，并且很容易对单体电池造成严重的物理损害（穿孔或破碎）和/或过热（由过电压、过电流或外部发热引起）。

我曾经惊恐地目睹过一场磷酸铁锂离子电池的短路事故：单体电池猛烈地向外喷发电解质，随后又发生了喷火爆炸事故，如图 1.3 和图 1.4 所示。得益于当时较为健全的安全措施，锂离子电池安置在手推车上，并且距离安全出口较近，使得技术人员能够很快将电池推到室外。



图 1.3 扑灭因锂离子电池直接短路引起的火灾

我曾参与过普锐斯混合动力电动汽车（见图 1.5）的电池事故分析，事故是由动力锂离子电池组内部电弧引发的起火（详见 6.1.1.5 小节）。

以上两起事故中均没有人员伤亡。在这两个案例中，人们的错误在于不健全的机械设计以及糟糕的生产流程（在生产现场不存在质量控制及干扰环节）。这两个案例都不是由电池管理系统引起的问题。

虽然这两个案例都是极端情况，但正是这样的事件让我们意识到大量锂离子电池组具有很强的危害性。从事这种电池工作时需要注意安全。



图 1.4 灭火后的图 1.3 中的电池



图 1.5 起火后的普锐斯混合动力电动汽车

- 认真思考并直接告诉周围的人保持安静——电池实验过程中禁止闲聊。
- 佩戴适当的安全装备：操作电压超过 40V 的电池时，需佩戴护目镜和绝缘手套。
- 不要将金属物品放置于未加保护的单体电池上方，因为这些物品会在重力作用下掉落在电池上。也就是说不允许在电池上方放置螺钉旋具、仪表探头、套筒扳手、油漆罐和卡钳等物品。如果暂时不使用上述工具，应将其放置在电池下方。

- 采用严格的质量控制方法合理地设计并组建电池模块。
- 提前准备电池着火事故的处理方案（如剪短电缆，快速离开事发地，灭火）；在进行电池实验之前就应该将处理方案的程序牢记于心，并能在事故发生 10s 内做到妥善处理。

1.2.4 安全运行区

锂离子单体电池安全运行区域由电流、温度和电压确定。

- 若超过电压阈值过充，那么电池将会迅速被损毁，严重时会发生爆炸。
- 大部分锂离子单体电池在低于电压阈值时继续放电将会损毁。
- 若锂离子单体电池在某个特定的温度范围之外放电，又或者在一个相比之下更小的温度范围外充电，那么将会导致锂离子单体电池的寿命严重受损。
- 长期工作于允许温度范围外的锂离子单体电池容易产生热失控和自燃现象，即使是不易产生热失控现象的单体电池，其含有的有机电解质也会助燃。
- 锂离子单体电池寿命会因大电流放电或快速充电而受损。
- 锂离子单体电池在高脉冲电流下工作几秒就会损毁。

以上介绍的这些限值会随单体电池自身化学成分不同而产生变化。例如，标准锂离子单体电池（ LiC_2 ）在没有任何保护措施时，即使工作在一个相对较低的温度下也会产生热失控；而对于 LiFePO_4 锂离子单体电池，即使工作在较为恶劣的温度条件下也不会产生热失控。不同制造商的单体电池限值也不尽相同。例如 A123 和 K2 两个公司均生产相似的筒式锂离子单体电池，A123 公司的锂离子单体电池可以放电至 0V，但 K2 公司生产的锂离子单体电池则不允许在低于 1.8V 的电压下放电，如图 1.6 所示。

1.2.5 效率

相比于其他化学电池，锂离子单体电池一个显著优点是能量和充电的高效性。

1.2.5.1 能量

锂离子单体电池的内阻非常小（尤其是在所谓的动力电池中），根据计算公式 $\Phi = I^2 R$ 可知，其内部产生的热功率损耗也极小。例如，A123 公司生产的 M126，650 型锂离子单体电池（多用于动力工具和混合动力电动汽车中），有着较为典型的 $10\text{m}\Omega$ 内阻。当它工作于 1C

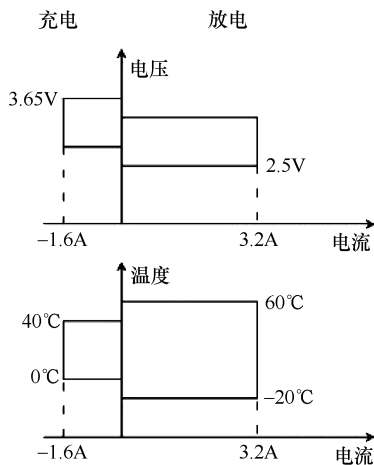


图 1.6 26, 650 型 LiFePO_4 锂离子单体电池的安全工作区域

(2.3A) 状态下, 输出的功率为 $P = 2.3\text{A} \times 3.2\text{V} = 7.6\text{W}$ 时, 其功率损耗为 $P = (2.3\text{A})^2 \times 10\text{m}\Omega = 53\text{mW}$, 具有 99.3% 的转化效率 (同时考虑充电、放电, 其双向效率为 98.6%)。

电流增大时能量效率会相应地降低。更多的能量将会以热能的形式在单体电池内部被浪费掉, 单体电池输出能量也相应减少。

当外部负载阻抗与单体电池内阻相等时, 单体电池具有最大输出功率。一半功率在单体电池内部以热量形式浪费掉了, 另一半功率作用于外部负载。

按照这种工作方式, A123 公司的 M126, 650 型锂离子单体电池能够提供 150A 的电流和 500W 的功率, 其中 250W 的功率在单体电池内部以热能的形式消耗。当然这种工作状况仅能维持很短时间 (少于 10s), 因为单体电池内阻产生的热量将会迅速扩散并引起单体电池温度升高到危险水平。当然, 当单体电池应用于赛车时, 破纪录比保护单体电池寿命更为重要, 所以偶然的起火事件也是可以接受的。

1.2.5.2 电荷

从充电方面看, 锂离子单体电池效率实际上是可以达到 100% 的 (只要单体电池的充放电循环在一个可以忽略其自放电的极短时间内发生)。本质上如果忽略充放电速率, 在单体电池满充过程中进入单体电池的电子能够在满放过程中全部释放出来。需要注意的是, 本书并没有说充放电的能量相等, 而是说充放电的电荷量相等。放电过程的单体电池电压比充电过程的单体电池电压要低, 因此尽管充放电的电荷量相等, 放电释放的能量要少于充电存储的能量。

读者或许因某个规格表显示单体电池在更大电流下释放电荷量会减小, 而对本书提出的理论存有异议。需要指出的是, 本书提出的理论是基于单体电池的完全充放电, 而规格表中曲线是单体电池恒流放电, 当单体电池电压低于某个特定的水平时其放电就会停止[⊖]。那时单体电池并没有做到完全放电, 可以通过采用较低放电电流的方式将单体电池中的剩余电荷释放出来。例如可以采用与截止电压相等的恒压条件对单体电池进行放电, 如图 1.7 所示。在忽略单体电池放电速率的前提下, 当放电电流降到零时, 单体电池释放的全部电荷量基本等于充电时存储于单体电池内部的电荷量 (无论单体电池开始放电时电流大或小, 最终都会以小电流放电终止)。

当然, 在很多电池应用中 (例如后备电源), 负载需要在大电流下工作, 这就导致了单体电池部分电荷无法完全释放。在这样的应用场景下, 单体电池内部

⊖ 对于熟悉铅酸电池和普克特常数概念的读者, 可能有兴趣了解到锂离子单体电池的普克特常数大约为 1.05 (铅酸电池的普克特常数介于 1.1 ~ 1.3 之间)。