



ELSEVIER



The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design

锂离子 电池组设计手册

电池体系、部件、类型和术语

[美] 约翰·沃纳 (John Warner) 著

王莉 何向明 赵云 等译

ELSEVIER

清华大学出版社



锂离子电池组设计手册

电池体系、部件、类型和术语

[美] 约翰·沃纳(John Warner) 著

王 莉 何向明 等译



清华大学出版社

北 京

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2018-1889
本书封面贴有 Elsevier 防伪标签，无标签者不得销售
版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

锂离子电池组设计手册：电池体系、部件、类型和术语 / (美) 约翰·沃纳(John Warner) 著；王莉 等译. —北京：清华大学出版社，2019

书名原文：The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design

ISBN 978-7-302-51229-5

I. ①锂… II. ①约… ②王… III. ①锂离子电池—手册 IV. ①TM912-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 212740 号

责任编辑：王 军 于 平

封面设计：孔祥峰

版式设计：思创景点

责任校对：牛艳敏

责任印制：丛怀宇

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>，<http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社 总 机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：三河市国英印务有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：148mm×210mm 印 张：8.125 字 数：226 千字

版 次：2019 年 1 月第 1 版 印 次：2019 年 1 月第 1 次印刷

定 价：98.00 元

产品编号：077131-01

Elsevier(Singapore) Pte Ltd.
3 Killiney Road, #08-01 Winsland House I, Singapore 239519
Tel: (65) 6349-0200; Fax: (65) 6733-1817

The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design
John Warner
Copyright © 2015 Elsevier Inc. All rights reserved.
ISBN-13: 9780128014561

This translation of The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design by John Warner was undertaken by Tsinghua University Press and is published by arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design by John Warner 由清华大学出版社进行翻译, 并根据清华大学出版社与爱思唯尔(新加坡)私人有限公司的协议约定出版。

《锂离子电池组设计手册 电池体系、部件、类型和术语》(王莉 何向明 赵云等译)
ISBN: 9787302512295

Copyright © 2015 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from Elsevier (Singapore) Pte Ltd. Details on how to seek permission, further information about the Elsevier's permissions policies and arrangements with organizations such as the Copyright Clearance Center and the Copyright Licensing Agency, can be found at our website: www.elsevier.com/permissions.

This book and the individual contributions contained in it are protected under copyright by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. and Tsinghua University Press (other than as may be noted herein).

This edition is printed in China by Tsinghua University Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the contract.

本书简体中文版由Elsevier (Singapore) Pte Ltd.授权Tsinghua University Press在中国大陆地区(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口, 视为违反著作权法, 将受民事和刑事法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签, 无标签者不得销售。

注意

本书涉及领域的知识和实践标准在不断变化。新的研究和经验拓展我们的理解, 因此须对研究方法、专业实践或医疗方法作出调整。从业者和研究人员必须始终依靠自身经验和知识来评估和使用本书中提到的所有信息、方法、化合物或本书中描述的实验。在使用这些信息或方法时, 他们应注意自身和他人的安全, 包括注意他们负有专业责任的当事人的安全。在法律允许的最大范围内, 爱思唯尔、译文的原文作者、原文编辑及原文内容提供者均不对因产品责任、疏忽或其他人身或财产伤害及/或损失承担责任, 亦不对由于使用或操作文中提到的方法、产品、说明或思想而导致的人身或财产伤害及/或损失承担责任。

译者序

自 1991 年第一款锂离子电池商业化以来，锂离子电池以高比能量的特点迅速占领了便携式电子产品市场。近年来，随着全球对能源及环境问题的日益关注，电动汽车产业逐渐成为世界主要经济体国家角逐的领域。相比于燃料电池、铅酸电池或者其他蓄电池，锂离子电池具有质量及体积比能量高、能量转换效率高、绿色环保等优点，应用于汽车动力不仅可以提高新能源的利用效率、减少对化石能源的依赖，还有利于降低汽车尾气对 PM2.5 的影响，改善城市大气质量，因此以锂离子电池作为动力电源是新能源汽车的主要发展方向。锂离子电池在当前及未来的国民经济和人们生活中占据着越来越重要的位置，其技术发展也日新月异。

2008 年中国在奥运会上采用新能源汽车受到了世界关注，自此锂离子动力电池技术及市场在国内得到了快速发展。国内在“十二五”“十三五”发展规划中都提到大力发展新能源汽车，并在全国范围内从技术创新、产业整合、市场培育等各个方面给予了大力支持，使得越来越多的资金、人才和企业投入到了锂电产业中。目前，国内优秀的锂离子电池材料及电池生产企业已经达到世界领先水平，但行业整体技术水平良莠不齐，特别是模组技术，距离美、日、韩等国的技术水平还有相当大的差距，这极大地影响了我国动力锂离子电池产业及电动汽车产业的国际竞争力。

鉴于国内系统介绍锂离子电池组装技术的书籍不是很多，同时为了提升锂电技术及产业的全球观，译者选取了 XALT Energy 公司 John Warner 的专业论著进行了翻译。本书几乎涵盖了锂离子电池涉及的所有知识，包括电池及汽车电气化发展简史、电池和电网行业的基本术语、电池组的设计标准和选择、电池的可靠性设计和可维护性设计、电池的计算机辅助设计、锂离子电池及其他化学电池的介绍、电源管理系统、

II 锂离子电池组设计手册 电池体系、部件、类型和术语

热管理系统、系统控制电子元件、机械包装及材料选择、电池耐滥用性、行业标准和组织、锂离子电池的回收及利用、锂离子电池应用技术、锂离子电池和电气化的发展及展望。

本书对于企业新员工培训或者打算从事锂电行业并想系统学习该方面知识的人士来说是一本非常合适的书籍。本书也可以作为大学教学的辅助教材，或者作为市场调研工作者和新能源爱好者的参考书籍。

本书翻译工作由清华大学何向明教授领导的锂离子电池课题组人员共同完成，主要人员有何向明、王莉、赵云、王腾跃和王正阳。此外，感谢课题组朴楠、陈雨晴、郑思奇、王思源等人在本书编写过程中给予的建议和帮助。同时，还要特别感谢清华大学汽车系欧阳明高教授课题组的任东生博士在本书翻译过程中给予的协助。

为了符合中文的语言习惯，本书在尽量保持原文大意的基础上，进行了适当的语言修改和文字润色。如有错误或不足之处，敬请读者批评指正。

2018年8月18日
清华园

作者序

2009年初是美国汽车行业处于重新构建的阶段,我利用这个行业变化的时机进入了一家新能源初创企业,从而步入了锂电行业。因为我是从OEM(原始设备制造商)领域进入锂电行业,为了能在这个领域取得更好的成就,我尽可能地购买锂电书籍来学习这方面的基础知识。然而,我发现虽然有很多不错的书在市场销售,但是这些书要么是太专业了,面向的是工程师,要么是讨论电池在笔记本电脑的应用,要么是关于其他电池技术(比如镍氢电池、铅酸电池等),这些书都不太适合研发车用动力锂离子电池的工程人员学习。因此,在接下来的几年里,我花费了尽可能多的时间来学习化学、工程以及电池方面的科学知识。

在18个月之前,我跟同事一起开会的时候,他问我,你怎么什么都知道?这让我有了出一本动力锂离子电池的相关书籍的想法,以帮助那些从事锂电行业但还不是很专业的工作者来进一步了解锂电行业以及锂电产品,从而能够在工作中更好地完成任务。同时,我写这本书也是希望它可以激励我在该行业有一个很好的开端。我刚开始踏入这个领域的时候有很多不熟悉的知识,经常会向前辈询问很多问题、做笔记,但始终未能找到一本书籍资源从中进行系统学习。因此,我花费很长时间来思考我以前所遇到的问题并尽可能多地写到书中,以进一步巩固和加深我对锂电行业的理解及认识。

本书为不熟悉锂电行业的人们提供了最基础的入门知识。书籍的内容可以面向几乎所有人,并不是专门为电池领域的工程师而写。实际上,电池行业已经发展了超过10年,有很多人从其他行业进入锂电行业中,这就意味着有很多熟悉其他专业领域的工作者来学习锂离子电池方面的知识。也许你是一名学生,在新能源储存领域即将离开学校去社会发展;也许你是一名采购经理,正要购买该方面的产品但是并不清楚它们是什么;或者你是一名热能工程师,正要转行进入锂电行业——那么

本书就是为你而写。

本书首先介绍电池的发展史。我们了解以前人们对电池的研究历程，就可以避免重复先前的错误，所以了解前人的研究很重要。接下来，对于新手来说最大的挑战是了解专业术语，本书将帮助你了解这方面的内容。随后，对于一些电池方面的数学公式，在本书中会做一些描述和注解，这部分提到的公式都是我工作七年的过程中经常用到的公式。接下来的章节将讲述电池的不同组成，以及电池组装完成后在不同领域的应用，当然，这些电池有的是锂电、有的是其他电池技术。因此无论你是正在寻找锂电某一方面的知识，还是想系统地学习基础知识，本书都将是最好的工具。

我相信，在此书撰写后的两年左右，锂离子电池技术并不会止步不前，而会随着科学研究和市场需求保持一定的发展。本书将为你的继续深造奠定基础，赶快行动起来吧。

致 谢

首先感谢我的妻子 Amy 和孩子 Erika 和 Lukas，他们对我从事这个行业给予了最大的支持与鼓励。没有他们的耐心与鼓励，我也不可能有这么多周末和夜晚来写作这本书。

同时感谢传授我锂电知识的前辈和给予这本书创作灵感的同事们：Bob Purcell，工作于汽车电气化领域，对该书的大纲列表给予了很好的指导和建议；Bob Galyen，在电池能源行业颇具领导地位，在工作中一直给予我鼓励和支持，同时也对本书进行了指导；多谢 Per Onnerud 和 Christina Lampe-Onnerud 两位博士，在我刚进入锂电行业时悉心指导我；感谢 JR Lina 博士，在我入行之初教给了我很多关于锂电的基础知识和关键概念，此书中的部分内容也是他所传授的；感谢已经领导新能源公司二十多年的 Subhash Dhar 和对电气领域了解相当广泛的 Jon Bereisa，和二位进行的交流与讨论对我启发很大，在此一并感谢。该致谢也包括给予我灵感写这本书的朋友们，Bob Kruse、Dell Crouch、Lori Hutton 和 Oliver Gross，他们同时对该书的编写也给出了合理的指导和建议。

再次感谢我在新能源领域工作的七年间和我一起工作的人员以及所有对该书的出版有所帮助的人员！

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 影响消费者购买电动汽车的因素	2
1.2 电动汽车是汽车技术发展的需要	4
1.3 本书的目的	4
1.4 章节概要	6
第 2 章 汽车电气化史	9
2.1 现代蓄电池的历史	11
2.2 电气工业的出现	14
2.3 早期电动汽车的发展	14
2.4 现代汽车的电气化	17
第 3 章 基本术语	23
3.1 汽车行业的术语	23
3.2 电网术语	28
3.3 电池行业术语	28
第 4 章 电池组的设计标准和选择	37
4.1 欧姆定律和基本的电池计算	40
4.1.1 计算电池组所需的电池单体数量	42
4.1.2 计算电池组的能量和容量	43
4.1.3 计算电池组寿命终端时的能量	45
4.1.4 计算系统功率	46
4.1.5 最大持续放电电流	48
4.1.6 计算充电电压	48

4.2	将客户需求转换为电池组设计	48
4.3	功率与能量的比值	50
4.4	电网用电池系统的计算	51
4.5	计算公式总结	51
4.6	小结	52
第5章	电池组的可靠性设计与维护设计	55
5.1	可靠性设计和维护设计	56
5.2	质量与可靠性	57
5.3	失效模式与影响分析	58
5.4	维护设计	61
5.5	本章总结	62
5.6	小结	63
第6章	计算机辅助的电池设计优化工具	65
6.1	组织和分析产品	65
6.2	分析工具	67
6.3	电池尺寸设计优化工具	69
6.4	小结	69
第7章	锂离子电池和其他化学电池	71
7.1	铅酸电池	73
7.2	镍金属基电池	77
7.2.1	镍镉电池	78
7.2.2	镍氢电池	79
7.3	钠基电池	80
7.4	锂离子电池	81
7.5	正极(阴极, Cathode)	85
7.6	负极(阳极, Anode)	86
7.7	隔膜	87
7.8	电解质	88

7.9	安全性	89
7.10	锂离子电池的型号和大小	90
7.11	锂离子电池生产商	92
7.12	小结	95
第 8 章	电池管理系统	97
8.1	BMS 类型	98
8.2	BMS 中的硬件	99
8.3	BMS 的主要功能——均衡管理	101
8.3.1	被动式均衡	104
8.3.2	主动式均衡	105
8.4	BMS 的其他功能	106
8.5	BMS 的软件控制系统	107
8.6	小结	107
第 9 章	系统控制电子器件	109
9.1	接触器/继电器	110
9.2	高压互锁回路	112
9.3	保险丝	112
9.4	电池断开单元	114
9.5	连接器	114
9.6	充电	116
9.7	小结	118
第 10 章	热管理	119
10.1	为什么需要冷却	123
10.2	为什么要加热	126
10.3	主动热管理系统	127
10.4	被动热管理系统	132
10.5	温度——保护和绝热	133
10.6	热电偶和测量	133

10.7	小结	135
第 11 章	电池的机械包装及材料选择	137
11.1	模组设计	138
11.2	金属封装	139
11.3	塑料和复合物封装	141
11.4	电池封装标准	142
11.5	小结	143
第 12 章	电池耐滥用性	145
12.1	锂离子电池失效机制	146
12.2	测试与表征	148
12.3	安全与滥用测试	151
12.4	认证测试	153
12.4.1	联合国危险货物运输标准	153
12.4.2	保险商实验室锂离子电池认证标准	155
12.4.3	海上认证	155
12.5	小结	156
第 13 章	行业标准与组织	157
13.1	非强制标准	159
13.1.1	美国汽车工程师协会(SAE)	159
13.1.2	国际标准化组织(ISO)	164
13.1.3	国际电工委员会(IEC)	164
13.1.4	电气和电子工程师协会(IEEE)	166
13.1.5	保险商实验室(UL)	167
13.1.6	挪威船级社(Det Norske Veritas, DNV-GL)	168
13.2	研究、开发和贸易团体	169
13.2.1	美国先进电池联盟(USABC)	169
13.2.2	先进电池技术国家联盟(NAATBatt)	170
13.2.3	便携式可充电电池协会(PRBA)	170

13.2.4	轻型电动车协会(LEVA).....	170
13.2.5	美国国家实验室.....	171
13.3	强制性标准.....	171
13.4	中国标准和行业组织.....	172
13.5	欧洲标准和行业组织.....	175
13.5.1	国际电池和能源储存联盟.....	175
13.5.2	EUROBAT.....	175
13.5.3	德国汽车工业协会.....	176
13.6	小结.....	176
第 14 章	锂离子电池的二次利用和资源回收.....	177
14.1	维修与再制造.....	178
14.2	清洗、再利用和二次生命.....	179
14.3	锂电回收合作.....	181
14.4	电池的回收再制造.....	182
14.5	小结.....	184
第 15 章	锂离子电池的应用.....	185
15.1	在个人交通工具方面的应用.....	185
15.2	汽车方面的应用.....	190
15.2.1	微混合电动车.....	190
15.2.2	混合电动车.....	192
15.2.3	插电式混合电动车与增程式电动车.....	193
15.2.4	纯电动车.....	197
15.2.5	燃料电池电动汽车.....	200
15.3	公共交通工具.....	201
15.4	卡车.....	203
15.5	工业方面的应用.....	204
15.6	机器人和自动化应用.....	205
15.7	航海和海洋应用.....	206
15.8	电网应用.....	207

XII 锂离子电池组设计手册 电池体系、部件、类型和术语

15.8.1	大型能源储存	209
15.8.2	辅助服务	211
15.8.3	输电及配电基础设施服务	212
15.8.4	用户能源管理服务	212
15.8.5	社区储能	213
15.9	航空航天方面的应用	213
第 16 章	锂离子电池和电动化的未来发展	217
16.1	锂离子电池和电动化的未来	217
16.2	大趋势	217
16.3	技术趋势	219
16.4	电池技术的未来发展趋势	220
16.5	结论	222
附录 A	美国先进电池联盟对 12V 启/停电池组的发展目标	225
附录 B	美国先进电池联盟对 48V 电池组的发展目标	227
附录 C	美国先进电池联盟对混合动力电池组的发展目标	229
附录 D	美国先进电池联盟对插电式混合动力电池组的发展目标	231
附录 E	美国先进电池联盟对纯电动汽车电池组的发展目标	233
附录 F	术语表	235

第 1 章 引 言

锂离子电池已经渗透到现代生活的方方面面，它可以为生活中几乎所有的东西(如手表、手机、平板电脑、便携式设备、GPS 设备、手机游戏等)提供能源。但是电池在社区、家庭以及交通工具上的应用才刚刚开始，更精确地说应该是又重新开始了。随着各行业技术的迅速发展，有很多其他领域的专业工程师，他们以前从未踏入锂电领域，现在也对锂电技术有一些了解，那么本书就是为他们而写的。

本书主要为外行讲述了与锂电有关的话题，以及锂离子电池组装设计方面的内容。如果你是一名工程师，你将会很快地理解这些概念。然而，如果你不是一名工程师，本书将帮助你走进锂电的世界，并对锂电行业进行系统了解。本书主要面向锂电在汽车方面的应用，当然对于储能电站、航海设备、海上船只、工业发动机、机器人以及其他方面的电子应用也略有涉及，目的是为大家掀开锂电的神秘面纱。在此之前需要声明的是，本书并不能保证让你成为一名锂电工程师或者替代你的锂电团队。它是一本工具书，仅此而已。

电池是实现化学能和电能转化的装置，其既可以产生能量同时还可以储存能量；而其他的能源大多产生在一个地方，应用时需要储存在另一个地方。比如，一辆燃油汽车的能量是从原油中提炼出来的，然后被储存在服务站点，直到你再次购买它并储存在油箱中，等内燃机燃烧时才可以转化成能量释放出来。

在 *Handbook of Lithium-ion Battery Applications*(Warner, 2014) 一书的章节中，曾对锂离子电池设计以及机械性能、热性能、电子元器件的

组装进行了简单描述^[1]。本书对此进行了更高层次的讨论，深入地剖析了一些公式和算法，以此来解决有关电池组装方面的问题。此外，本书还会对认证测试以及锂电行业的组织现状进行介绍，最后讲述锂电池在各个方面的应用及其未来和发展。

通过一些关于锂离子电池的新闻报道，比如波音 787 客机的电池失效使新飞机延迟起飞，特斯拉以及雪佛兰电动汽车中电池失效^[2~4]等，可以看出锂电的系统设计尤其重要。我个人认为上述事故并不是由电池引起的系统安全事故，而是系统引起了电池的安全事故。我这么说的理由是把世界上品质最高、性能最好的电池放在一个设计很差的系统里面仍然会发生各种失效，比如寿命衰减、能量降低、各种各样的安全问题等。相反，把一个很差的电池用到一个设计得很好的能源储存系统中，系统仍然可能具有很高的安全性。

1.1 影响消费者购买电动汽车的因素

在开始讨论锂离子电池之前，我们还需要讨论另一个话题，那就是哪些因素影响到消费者对锂离子电池电动汽车的接纳程度。笔者在此总结了五种因素，以确保动力电池行业以及能源存储系统的健康发展。这些因素包括：

(1) 价格。人们已经采取了很多措施来降低锂离子电池的价格，但是其仍高于普通大众的价格需求。当锂离子电池被应用到能源储存系统中的时候，发展更好的技术使锂电的价格降下来是影响其市场接受度的最重要因素。

(2) 产能。尽管每年都会有新的电动汽车生产出来供消费者选择，但是无论是插电式混合动力车还是纯电动车，供消费者购买的每款产品的供应量却非常有限。

(3) 续航里程。尽管有很多种类的化学电池供电动汽车选择，然而消费者仍然会对电动汽车的续航里程表示担忧。

(4) 宣传。政府或企业或许做得都不够好的一点就是，没能让消费