

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

 Springer



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版

新能源汽车关键技术研究丛书

# 新能源汽车 动力电池技术

AUTOMOTIVE BATTERY TECHNOLOGY

[奥] 亚历山大·泰勒 (Alexander Thaler) 主编

[奥] 丹尼尔·瓦兹尼格 (Daniel Watzenig)

陈勇 译

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

 Springer



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版

新能源汽车关键技术研究丛书

# 新能源汽车 动力电池技术

AUTOMOTIVE BATTERY TECHNOLOGY

[奥] 亚历山大·泰勒 (Alexander Thaler) 主编

[奥] 丹尼尔·瓦兹尼格 (Daniel Watzenig)

陈勇 译

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目 (CIP) 数据

新能源汽车动力电池技术 / (奥) 亚历山大·泰勒 (Alexander Thaler), (奥) 丹尼尔·瓦兹尼格 (Daniel Watzenig) 主编; 陈勇译. —北京: 北京理工大学出版社, 2017. 2

(新能源汽车关键技术研究丛书)

书名原文: Automotive Battery Technology

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 中国汽车工程学会汽车工程图书出版专家委员会推荐出版

ISBN 978-7-5682-3693-5

I. ①新… II. ①亚… ②丹… ③陈… III. ①电动汽车-蓄电池-研究  
IV. ①U469.720.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 029140 号

---

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2017-0343

Translation from the English language edition:

*Automotive Battery Technology*

edited by Alexander Thaler and Daniel Watzenig

Copyright © The author(s) 2014

Springer International Publishing AG is part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 8

彩 插 / 4

字 数 / 149 千字

版 次 / 2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷

定 价 / 42.00 元

责任编辑 / 李秀梅

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

新能源汽车已被国家列入七大战略新兴产业之一和《中国制造 2025》十大重点优先发展的领域之一。习近平总书记指出，“发展新能源汽车是我国由汽车大国迈向汽车强国的必由之路”。国家《节能与新能源汽车产业发展规划（2012—2020 年）》指出，汽车产业是国民经济的重要支柱产业，在国民经济和社会发展中发挥着重要作用。随着我国经济持续快速发展和城镇化进程加速推进，今后较长一段时期汽车需求量仍将保持增长势头，由此带来的能源紧张和环境污染问题将更加突出。加快培育和发展节能汽车与新能源汽车，既是有效缓解能源和环境压力，推动汽车产业可持续发展的紧迫任务，也是加快汽车产业转型升级、培育新的经济增长点和国际竞争优势的战略举措。

结合国际汽车产业发展趋势来看，大力发展以纯电动汽车、插电式混合动力汽车、燃料电池汽车等为代表的新能源汽车，不仅有助于解决我国汽车消费面临的能源、环保和噪声污染等问题，也是我国汽车产业实现由大变强的重要途径之一。在国家“863 计划”等科技重大项目和节能与新能源汽车示范推广等扶持政策的大力支持和推动下，我国汽车企业纷纷加大新能源汽车产业化力度，新能源汽车关键零部件及相关技术取得重大进步，动力电池发展环境持续优化，驱动电机技术稳步提升，整车控制技术研发布应用水平显著提升。

目前，我国新能源汽车研发体系已初步形成，2015 年新能源汽车产销量跃居世界第一。自主研发开发出混合动力、插电式混合动力、纯电动和燃料电池汽车等各类整车产品，初步掌握了电动汽车整车设计、系统集成等关键技术，基本形成混合动力、纯电动和燃料电池新能源汽车动力系统技术平台和新能源汽车技术标准体系框架和测试评价能力，建立了新能源汽车的动力技术平台，形成了比较完整的关键零部件体系；自主开发的纯电动汽车在整车动力系统匹配与集成设计、整车控制方面，取得了突破性进展，接近国际先进水平。

本丛书汇集了近年来我国新能源汽车研究掌握的新技术、新理论等先进成果，充分体现了我国在新能源汽车领域所取得的卓越成绩。北京理工大学、同济大学、吉林大学、华南理工大学、

北京信息科技大学、中国汽车技术研究中心、长安汽车工程研究院等国内从事相关领域研究的权威单位共同组建了本丛书的作者队伍，期望以此为新能源汽车领域专家和学者搭建学术交流平台，对提升我国新能源汽车的研发水平起到促进作用，也是出版界助力提升我国新能源汽车关键技术的重要成果。

本丛书以新能源汽车领域的研发与设计为主线，以纯电动汽车、插电式混合动力汽车以及燃料电池汽车为对象，围绕新能源汽车电池、电机、电控等关键技术的设计、仿真、优化和工程应用开展研究，汇集了我国近年来在纯电动车辆技术、混合动力驱动系统控制、混合动力耦合系统构型与装置、电动汽车整车控制优化、新能源车辆轻量化、燃料电池汽车建模等领域取得的重要理论及技术成果。其学术价值得到了国际专家学者的高度认可，其中《地面车辆混合驱动系统建模与控制优化》《混合动力耦合系统构型与耦合装置分析设计方法》已与德国 Springer 签署版权输出协议。

本丛书入选“十二五”和“十三五”国家重点出版物出版规划项目，其出版得到了中国汽车工程学会（SAE-CHINA）汽车工程图书出版专家委员会以及作者单位的领导、专家及工作人员的关心和大力支持，在此深表感谢！此外，书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正！

孙建春

汽车工业的快速发展,为人类提供了方便、舒适、快捷的现代生活。但是,随着传统燃油汽车保有量的不断增加,引发了环境污染、石油资源短缺以及国家能源安全等问题。近年来,许多国家和汽车制造商都在研发新能源汽车,以减少对传统化石燃料的依赖。2006年2月9日国务院发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》将新能源汽车列为优先主题。2015年5月8日,国务院正式印发了《中国制造2025》,将节能与新能源汽车作为大力推动的重点领域。2014年5月24日,习近平总书记在上海考察时强调,发展新能源汽车是中国从汽车大国迈向汽车强国的必由之路。截至2015年年底,我国新能源汽车累计产销近50万辆,成为全球最大的新能源汽车市场。伴随电动汽车的快速发展,动力电池需求量将急剧增加。

动力电池作为新能源汽车的核心部件,电池技术和电池产业受到了越来越多国家的重视,直接影响着电动汽车的动力性、经济性、安全性、耐久性和成本等。《新能源汽车动力电池技术》以与动力电池的安全和老化相关的问题为研究内容,涵盖了动力电池的安全、热失控、结构设计、建模、SOC估计和老化等方面研究的新理念和新方法,可以为动力电池研发提供参考,对电动汽车的推广普及具有重要意义。

原书由Springer出版社出版。第1章从ISO 26262整体系统安全性角度出发,详细阐述整体安全概念。第2章结合电池结构及电池在碰撞中的安全性要求,采用有限元法进行电池失效模式分析。第3章通过对热失控过程的测试,分析了不同正极材料对电池安全性的影响。第4章进行了电池机理建模与仿真,内容涵盖经验模型、等效电路模型、机理模型和大尺度模型。第5章从锂离子电池的电极、电解质和隔膜的老化分析对比入手,定量测量和分析了电池老化的影响因素。第6章建立了锂离子电池模型,进行参数灵敏度分析,应用马尔可夫链-蒙特卡罗采样方法完成贝叶斯模型反演,实现电池模型参数的估计。第7章为克服传统物理建模的困难,提出了基于数据驱动方法进行SOC估计的非线性观测器设计方法。

在本书翻译的过程中,一直得到北京理工大学电动车辆国家

工程实验室主任孙逢春教授的热情鼓励与悉心指导，在此表示感谢。研究生方磊、孙国跃、郑阳、殷康胜、张骞、魏晓旭参加了本书的部分译稿整理工作，向他们表示感谢。此外，在本书的翻译和审阅过程中，清华大学田光宇教授、边明远高工，中国农业大学江发潮教授，中国科学院电子学研究所高鑫研究员，北京理工大学苏岳锋副教授，北京信息科技大学赵理博士等提出了修改意见或建议，在此对他们深表谢意。

感谢清华大学汽车安全与节能国家重点实验室开放基金（项目号：KF16032）的支持，感谢北京电动车辆协同创新中心、北京市教育委员会北京市属高等学校长城学者培养计划项目（项目号：CIT&TCD20130328）的支持。

由于译者水平有限，书中难免有翻译不当之处，恳请读者提出宝贵意见。

译者

有关气候变迁和燃油经济性挑战的话题热度不减，而对该话题持续不断的讨论则促进了汽车工业更多地朝着纯电动驱动方向发展。从这个角度来说，电动化能否实现已不再是问题，问题在于何时能够实现，以及哪些应用技术会率先进入市场。世界范围内的环保法规均要求减少二氧化碳以及对排放进行限制，从根本上要求汽车电动化。另外，有两个例子可以看出消费者在面对电动汽车时态度的持续转变：特斯拉的纯电动汽车 Model S 已经取得的巨大成功和宝马汽车计划在 2013 年年底发布其纯电动汽车 i3。这两款汽车完全彰显了新的汽车技术特征，特别是全新开发的电驱动系统，预示着个人交通工具新时代的到来。

电池技术是决定上述发展趋势的关键因素之一，原因在于动力电池技术是电动汽车的核心，并在近几年取得了显著的提高。特别是高能量密度和功率密度的锂离子电池，目前已经成为插电式混合动力汽车（PHEV）和纯电动汽车（BEV）必不可少的配备，在降低成本、提高安全性、改善使用性能和可靠性等方面已经获得了巨大进步。例如，在未降低功率强度的前提下，电池的能量密度得到极大的提高。如今，18650 锂离子电池单体容量大于 3 Ah，已经应用在电动汽车上。同时，采用诸如新隔膜技术和/或改进化学成分（如  $\text{LiFePO}_4$ ），安全性明显提高。事实上，为确保电池免受外部危险事件（如过充、超高温和过流）的损害，电池管理系统也采取了许多措施。

然而，消费者对于汽车技术应用的观念理解和 20 多年的其他商业应用（如手机）中的经验表明，要让驾驶员完全拥护电力驱动及相关的电池技术，技术上仍有很多需要改进。成本需要进一步降低，锂离子电池的可靠性、耐久性和安全性也要提高。例如，就安全性而言，今后需更多地了解撞车时系统安全和抗滥用能力。诸如此类的技术进步要求对电池在正常和非正常条件（如误用或者碰撞情况）下电池的微观过程有更深入的理解。此外，必须开发出新的分析方法以求掌握锂离子电池单体内部的电化学反应过程，这将在准确地确定电池单体 SOC（荷电状态）基础上提高电动汽车剩余里程的预测精度。

通过锂离子电池技术建模现状的把握，本书有助于推动正在



进行的电池研发工作。本书的目的在于催生在实际应用中提高电池使用的新思想。从长远来看，我们希望这本书可以孕育出技术本身的改进，从而有助于引导汽车技术走向下一个时代。尽管目前的锂离子电池适于在电动汽车上应用，但这类电池中正在进行着的物理和化学方面的改进也是显而易见的。直接影响着电动汽车的续驶里程和性能的能量密度和功率密度将得到显著提高；安全性和可靠性也将得到进一步改善；一旦电池产量达到汽车规模数量，其整个成本必将下降。发展的结果是，消费者对于电动汽车的接受度将会极大地提高，因为依靠内燃机的“马力”驱动的汽车将不如“千瓦(kW)”驱动的环境友好的电动汽车有吸引力。当上述各方面都有长足进步时，插电式混合动力电动汽车和纯电动汽车的时代才会真正到来。

**Volker Hennige**

2013年11月于格拉茨

十年来，道路车辆的动力系统电动化已经在世界上至少进行了第二次尝试。除了电池这一电动化进程中的关键部件之外，所有其他部件也同样在进一步的研发中。所有的动力装置均有了长足的进步。从消费者的观点来看，功能强大的控制设备和半导体器件的结合正在提供不断完善的功能。

大多数的研究集中在电化学层面，能量密度有所提高，成本有所降低。然而，目前没有可用的电化学能量储存系统能够既满足当前驱动系统要求又满足相关的乘客舒适性要求。当然，把问题归于电池或者争论该技术能不能满足需要就太天真了。另一方面，我们可以看到社会上倾向于高效地使用能源，在交通领域的需求尤甚。因此，驱动系统的电动化趋势揭开了当今汽车概念的最根本缺陷。过去，高能量密度的化石燃料因其可利用性而孕育了汽车动力的革命。由于车载储能系统中的能量有限，公众越来越多地意识到现在汽车的低效率运行，而汽车工业正是抓住了对高效率需求的契机。

可预期的两大研发内容：

- 汽车上提高传动系统效率、舒适度（如 HVAC）和安全性。

- 就能量存储而言，提高能量密度：

- 化学层面上提高能量密度。

- 技术集成方面（如老化、安全性）将得到更深入掌握，并在汽车工业中应用于开发过程。

本书全面概述了后者（即集成）的研究现状。老化和安全性作为本书的两个主题，直接影响着能量储存系统的尺寸和应用。

### 书中有关安全部分

在第 1 章中，Martin 等全面阐述了安全标准的研究现状。尽管这一标准在 ISO 26262 中从整体系统安全性角度进行了定义，但是仍缺少重要的过程和方法。由于安全方面影响着成本，掌握不同安全措施对降低集成到汽车环境下的新产品（如电池系统）风险至关重要。

在第 2 章中，Trattinig 和 Leitgeb 总结了在碰撞/变形仿真中电池建模的挑战。目前，这一领域的挑战在于弥合电池微观结构和

仿真可控需求之间的差距。问题在于，用简单的电池模型仍能为碰撞优化提供尽可能多汽车层面的全部必要信息。

在第3章中，Golubkov和Fuchs专注于热失控过程。他们的团队目前正致力于掌握这一过程的基本的、与应用相关的信息。此过程的相关知识有助于创建电池系统仿真架构，该架构将可以预测整个电池内部甚至以整个汽车为整体的热失控蔓延过程。

### 书中有关老化部分

第4章中，Pichler和Cifrain介绍了包含全部必要细节的电池单体电化学建模方法。主要挑战是设计出一个模型，应该包括在纳米尺度（如负极/正极上的孔隙率）上电池单体的物理特性，且需要保证在合理时间内输出满足要求的仿真结果。最后一步是应用条件（如驱动循环测试时）下优化电池单体的设计和技术，同时应包含主要的老化影响。物理过程的详细模型建立往往需要从物理测试中直接获得的实际数据。在第5章中，Weber等阐述了定量分析锂离子电池老化的方法。实验室测试结果是上述模型必需的输入。由于复杂模型所用参数不能直接测量，在第6章中Scharrer等提出了参数优化的数学方法。他们使用并行自适应的马尔可夫链-蒙特卡罗法求解综合拟合问题，说明了这一方法的过程。

在第7章中，Hametner和Jakubek为估计SOC提出了非线性观察器设计，这是一种基于数据的、与化学无关的方法。为了能量存储系统在预期寿命内可靠运行，掌握SOC是必需的，同时这也是与老化有关的关键因素之一。

在所有为提高电池系统安全性和生命周期的单个方法中，巨大的挑战之一在于这些部件安装到汽车上所带来的复杂性。汽车工业标准化程度很高，在质量和耐久性方面尤其如此，在这些领域进行的所有研究必须依据标准进行。在应用研究领域，满足这些高标准的关键在于把不同专业领域的知识加以结合。

这些结合可以产生高质量、实用性强的开发环境（建模、仿真工具、相应的试验和标准）。从这个角度来说，来自不同工业领域和研究机构的专家努力合作才是前进之路！

**Alexander Thaler**

**Daniel Watzenig**

**2013年11月于格拉茨**

# 目 录

## 第1章 车用电池系统的整体安全性考虑 / 1

### 1.1 研究背景 / 1

### 1.2 技术背景 / 3

#### 1.2.1 遵循 ISO 26262 标准的功能安全简介 / 3

#### 1.2.2 汽车电池系统的结构 / 4

### 1.3 汽车电池系统的安全措施分类与应用 / 6

#### 1.3.1 组织安全措施与技术安全措施 / 6

#### 1.3.2 电池系统单元中的安全措施应用 / 7

### 1.4 概念阶段非 E/E 措施的考虑 / 9

### 1.5 结论 / 14

致谢 / 15

参考文献 / 15

## 第2章 电池碰撞安全性的建模 / 17

### 2.1 引言 / 17

#### 2.1.1 动机 / 17

#### 2.1.2 电动汽车的特殊危险 / 18

#### 2.1.3 可行的电池设计方法 / 19

### 2.2 汽车电池设计 / 19

#### 2.2.1 电池模块和元件 / 19

#### 2.2.2 安全性相关的设计参数 / 21

### 2.3 考虑电池的汽车结构设计过程 / 22

#### 2.3.1 标准方法和要求 / 22

#### 2.3.2 电池的碰撞测试和碰撞仿真 / 23

### 2.4 电池的有限元模型 / 23

#### 2.4.1 机械变形建模 / 24

#### 2.4.2 材料和连接点失效的建模 / 26

#### 2.4.3 电接触和泄漏的建模 / 28

### 2.5 结论 / 29

致谢 / 30

参考文献 / 30

## 第3章 热失控：单体电池的热失控成因和影响 / 33

### 3.1 引言 / 33

- 3.2 实验 / 34
  - 3.2.1 实验台简介 / 34
  - 3.2.2 测试方法 / 35
  - 3.2.3 气体分析 / 35
  - 3.2.4 单体成分辨识 / 36
  - 3.2.5 锂离子电池单体 / 36
  - 3.2.6 电学特性 / 38
- 3.3 结果和讨论 / 39
  - 3.3.1 热失控的典型过程 / 39
  - 3.3.2 热失控试验 / 41
  - 3.3.3 气体分析 / 44
- 3.4 结论 / 44
- 致谢 / 45
- 参考文献 / 45

**第4章 与应用相关的电池建模：从经验建模到机理建模方法 / 48**

- 4.1 引言 / 48
- 4.2 经验模型 / 49
- 4.3 等效电路模型 / 50
- 4.4 机理模型 / 52
  - 4.4.1 电荷转移 / 53
  - 4.4.2 离子转移 / 54
  - 4.4.3 电子转移 / 55
  - 4.4.4 多孔电极 / 55
  - 4.4.5 嵌入 / 55
  - 4.4.6 生热 / 57
  - 4.4.7 电池老化 / 57
- 4.5 大尺度建模 / 57
  - 4.5.1 热特性 / 58
  - 4.5.2 电特性 / 60
  - 4.5.3 分布式微结构建模 / 61
- 致谢 / 61
- 参考文献 / 62

## 第5章 锂离子电池老化研究分析方法 / 63

### 5.1 引言 / 63

5.1.1 锂离子电池的工作原理 / 63

5.1.2 锂离子电池的老化 / 64

5.1.3 锂离子电池研究 / 66

### 5.2 电池材料的提取 / 67

5.2.1 打开电池 / 67

5.2.2 电解质的提取 / 67

5.2.3 电极取样 / 68

### 5.3 电极的分析 / 69

5.3.1 X射线光谱 (XPS) / 69

5.3.2 扫描电子显微镜 (SEM) 和能量色散 X 射线光谱仪 (EDX) / 69

5.3.3 元素分析 (ICP, TXRF) / 71

5.3.4 拉曼光谱 / 71

### 5.4 隔膜分析 / 71

### 5.5 电解质的老化 / 72

5.5.1 气相色谱仪 (GC) / 72

5.5.2 离子色谱法 (IC) / 73

5.5.3 电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES) / 全反射 X 射线荧光分析 (TXRF) / 74

### 5.6 商用电解质的分解途径 / 74

### 5.7 定量测量 / 75

致谢 / 76

参考文献 / 76

## 第6章 锂离子电池参数估计的贝叶斯推论 / 80

### 6.1 简介 / 82

### 6.2 反问题：变无形为有形 / 83

6.2.1 简介 / 83

6.2.2 确定性方法：线性和线性化模型 / 84

6.2.3 贝叶斯方法 / 86

6.2.4 马尔可夫链-蒙特卡罗方法 (MCMC 方法) / 86

### 6.3 锂离子电池单体模型 / 89

- 6.4 参数的灵敏度 / 91
- 6.5 基于 MCMC 方法的统计反演 / 92
  - 6.5.1 数据和先验分布 / 92
  - 6.5.2 后验采样 / 93
  - 6.5.3 参数的后变性 / 94
  - 6.5.4 统计效率 / 97
  - 6.5.5 计算效率的说明 / 98
- 6.6 结论 / 98
- 致谢 / 99
- 参考文献 / 99

## 第 7 章 数据驱动方法设计电池 SOC 观测器 / 100

- 7.1 引言 / 100
- 7.2 数据驱动校准工作流程 / 101
- 7.3 荷电状态观测器设计 / 102
  - 7.3.1 试验设计 / 102
  - 7.3.2 数据驱动的电池建模 / 104
  - 7.3.3 非线性观测器设计 / 107
- 7.4 结论 / 110
- 致谢 / 110
- 参考文献 / 111

# ■ 第 1 章

## 车用电池系统的整体安全性考虑

Helmut Martin, Andrea Leitner, Bernhard Winkler

**摘要：**系统安全工程的目标是开发一个没有不合理风险的系统。因此，必须分析电气/电子（E/E）系统对人可能造成潜在伤害的风险，并在系统开发的早期采取恰当的措施降低风险。这需要不同工程领域间的密切合作，以便详细、全面地描述降低及缓解风险的措施，即安全概念。在开发 3.5 t 以下级别道路车辆的 E/E 系统时，必须参照国际功能安全标准 ISO 26262。此标准重点规定了相关 E/E 系统措施，也考虑了安全概念中具体指出的非 E/E 系统措施。而本章中提出了一个工作流程，该流程详细阐述了包括不同工程领域的安全措施的整体安全概念。其中主要的经验是：在系统开发的概念阶段就考虑降低风险的各种措施，可提高对系统整体安全性的理解，也利于采用各领域的专业知识进行清晰的安全概念开发。这种方法不但改善了整个系统开发的结果，同时也可以满足 ISO 26262 中关于 E/E 系统开发的要求。通过一个车用电池系统开发的案例研究，对本章所提方法的适用性进行了验证，为了降低 E/E 系统开发的成本，必须将各安全措施对汽车安全完整性等级（ASIL）确定中的影响考虑在内。

### 1.1 研究背景

纯电动汽车（EVs）或混合动力电动汽车（HEVs）正在变得越来越重要，高压（HV）电池系统是其中的核心部分<sup>[8]</sup>。纯电动汽车具有 E/E 系统能效



率高及使用地（局部）零污染的优点，其主要缺点在于和传统内燃机汽车相比差距甚大的续驶里程。传统汽车使用的化石燃料具有较高的能量密度，因而车辆具有良好的动力性和更长的续驶里程。混合动力电动汽车则集二者的优势于一身。对于在混合动力电动汽车上使用的电池而言，其主要目标是低成本、高功率密度（如 1 200 W/kg）、长循环使用寿命（如 200 000 次充电/放电循环）、长可用寿命（如 9 年）以及高安全性。随着汽车电动化重要性的日益提高，汽车用电池系统也变得越来越重要。量产车上已经采用了高功率（混合动力电动汽车，为了提供更大的动态驱动转矩，功率高达 250 kW）和高能量（如尼桑 Leaf，36 kWh 以保证更长的续驶里程）的电池系统。电池尺寸的减小及功率、能量的增大，导致电池系统发生故障时产生危险后果的可能性增大。

本章着重于安全性的研究，尤其是至关重要的纯电动汽车和混合动力电动汽车上的电池安全性。至于功能安全性（E/E 系统的安全性），IEC 61508<sup>①</sup>作为基本的国际功能安全标准，适用于所有的工业领域。ISO 26262<sup>④</sup>为此标准的改编版，适用于汽车领域中有关 E/E 系统安全性的开发。功能安全性的一个重要方面是电子故障的潜在风险，如错误输入或软件错误引起的电池控制单元故障。这些故障可能引起危险事件，伤及乘客、其他交通参与者以及非涉事方（如因过充引起的火灾）。通过分析可能的故障、故障原因及其影响，并提出弱化故障的方案，来降低发生故障的可能性。

尤为重要的是，汽车电动化需要不同学科间的高度交叉，其中风险降低也来源于不同的技术学科（如机械学、化学），这意味着系统安全同样包含不同学科的安全要求（即功能性、电气、机械和化学的安全要求）。例如，对电气安全而言，可以通过断开电路或电流隔离的方式进行危险电压的防护；机械安全的目标是通过使用诸如单体外壳或选择合适的安装位置的方式防止电池在事故中变形；化学安全可以通过使用机械通风口排出有毒气体来防止爆炸或火灾。所有这些措施均在安全系统的开发中有所应用。

虽然功能安全是系统安全工程中最重要的重要组成部分之一，但其他安全措施同样不可忽视。本章主要讨论一些诸如电池单体、电池组和电池包等不同概念级别下车用高压电池系统的安全性问题。

本章结构编排如下：1.2.1 节遵循 ISO 26262，首先介绍了安全生命周期；1.2.2 节介绍了技术背景，包括电池系统的基本结构、不同概念级别下的潜在风险以及弱化风险措施；在 1.3 节中，为更好地理解安全措施，对其进行了分类；1.4 节介绍了改进的工作流程，该流程可以降低汽车安全完整性水平（ASIL）的要求，并且通过非 E/E 措施的定义可以降低电子系统的开发成本；

① IEC 61508——电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全。