

★ 服务热线: 400-615-1233
★ 配套精品教学资料包
★ www.huatengedu.com.cn



智能网联汽车 底盘线控原理与应用

ZHINENG WANGLIAN QICHE
DIPAN XIAKONG YUANLI YU YINGYONG

智能网联汽车底盘线控原理与应用

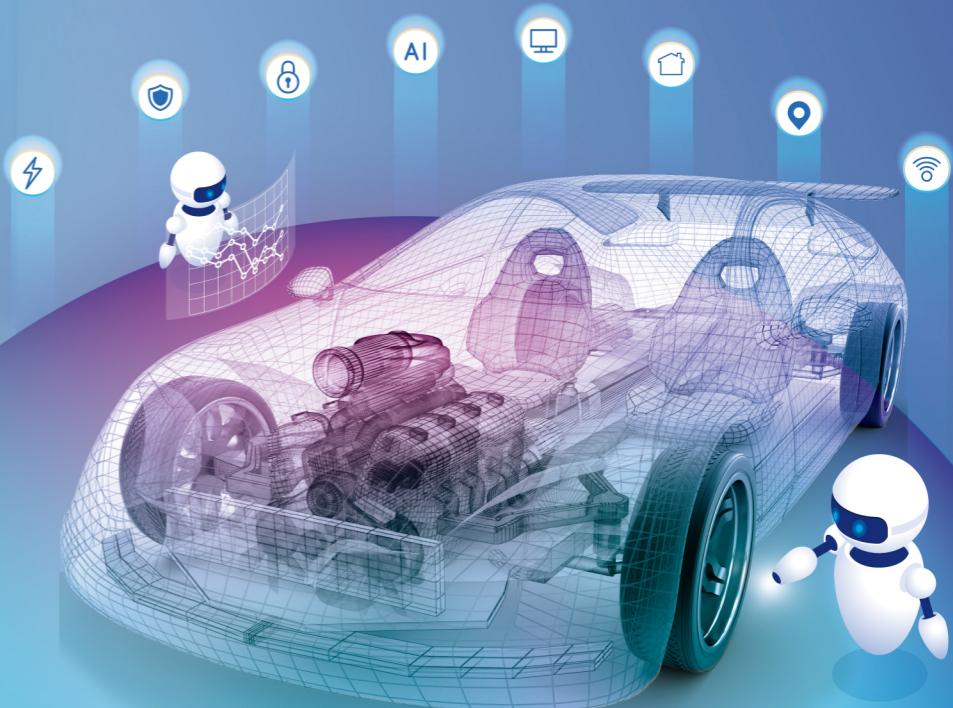
主编 徐江



定价: 48.00元

策划编辑: 闫洪一
责任编辑: 许青
封面设计: 黄燕美

高等职业教育智能网联汽车系列精品教材
校企“双元”合作开发新形态教材



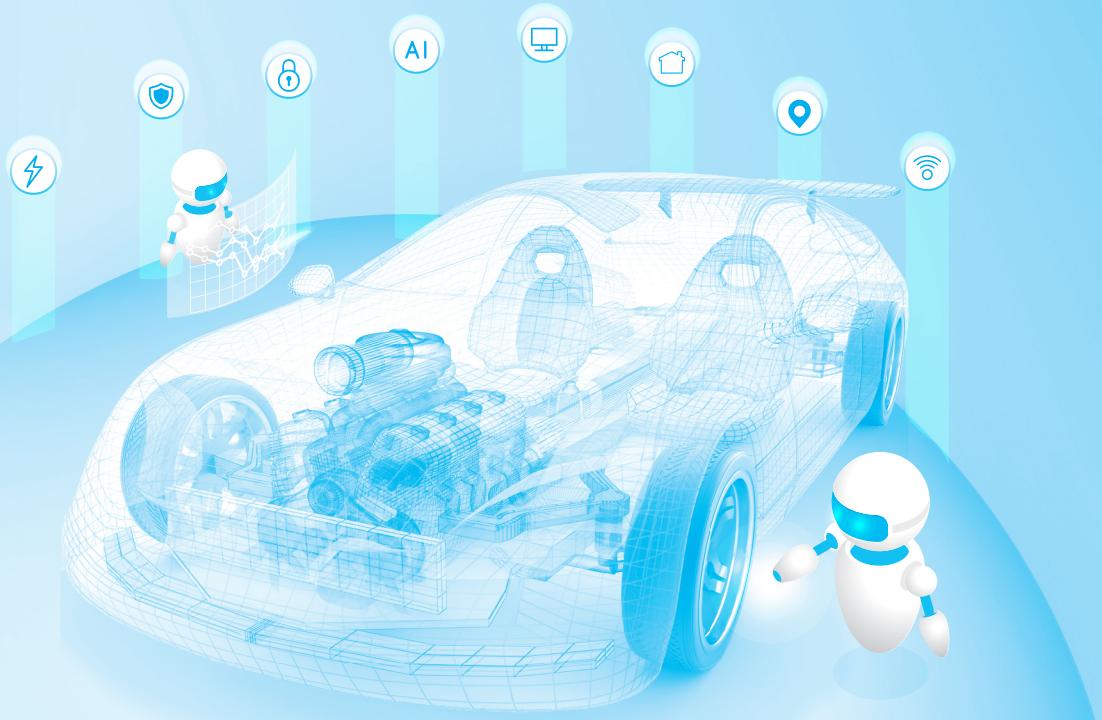
智能网联汽车 底盘线控原理与应用

主编 徐江

 北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

北京邮电大学出版社

高等职业教育智能网联汽车系列精品教材
校企“双元”合作开发新形态教材



智能网联汽车 底盘线控原理与应用

主编 徐 江

副主编 林世荣 梁海峰 陆志杰



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书系统性地介绍了汽车线控底盘中电池的基本原理与特点,直流电机与交流电机的种类和特征,线控驱动系统的功能、结构和工作原理,线控制动系统的功能、结构和工作原理,以及线控转向系统的功能、结构、路感反馈、控制测量等相关知识。

本书既可作为高等职业院校及应用型本科院校汽车类专业学生的教材,也可作为从事智能网联汽车线控底盘开发工作或相关工作的技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能网联汽车底盘线控原理与应用 / 徐江主编. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2023.12

ISBN 978-7-5635-7075-1

I. ①智… II. ①徐… III. ①智能通信网—应用—汽车—底盘—电气控制系统 IV. ①U463.6

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 243960 号

策划编辑: 同洪一 责任编辑: 许 青 封面设计: 黄燕美

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码: 100876

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 三河市骏杰印刷有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 8.5

字 数: 176 千字

版 次: 2023 年 12 月第 1 版

印 次: 2023 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-7075-1

定 价: 48.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

服务电话: 400-615-1233

前言

PREFACE

党的十八大以来,我国新能源汽车和智能网联汽车行业取得了长足的发展,甚至在某些领域还领先于国外车企。党的二十大报告明确把“科技自立自强能力显著提升”作为未来五年我国发展的主要目标任务之一。报告指出,到2035年,我国发展的总体目标包括“实现高水平科技自立自强,进入创新型国家前列”。这为我国汽车产业的发展指明了方向,也为本书的撰写提供了重要的时代背景。

随着我国多元化能源结构的持续优化和节能减排政策的不断落实,越来越多的消费者开始考虑购买新能源汽车。这使得新能源汽车的保有率日益提升,保有量已经达到一定规模。

新能源汽车的发展推动了市场对于复合型人才的需求。在这一背景下,编者编写了本书,主要介绍汽车底盘线控中的电池、牵引电机、线控驱动、线控制动、线控转向及底盘动力学模型的相关知识,旨在帮助学生更好地理解线控底盘的结构、原理和基础动力学知识,为学生学习更深层次的智能网联汽车技术打好基础。

本书由常熟理工学院徐江担任主编,常熟理工学院林世荣、陆志杰和江苏工程职业技术学院梁海峰担任副主编,湖南大学朱颖、常熟市工业和信息化局邵志达、东软教育科技集团有限公司范雅雅、北京钢铁侠科技有限公司王振超、苏州安鹿智能科技有限公司王长坤参与了编写。全书由苏州安鹿智能科技有限公司吴江龙审阅并提出了很多宝贵意见,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中疏漏之处在所难免,恳请广大读者提出宝贵意见和建议。

编 者

目录

CONTENTS

第一章 电池 1

1. 1 电池单元	1
1. 2 车身电池集成	4
1. 3 电池的参数	7
1. 4 电池的种类	8
1. 5 电池管理系统	18
1. 6 热管理系统	19
1. 7 动力电池的发展趋势	21
1. 8 课后练习	21

第二章 牵引电机 23

2. 1 电机的类型	23
2. 2 电机相关概念及参数	26
2. 3 直流电机	30
2. 4 交流电机	31
2. 5 电机认知实践	40
2. 6 课后练习	45

第三章 线控驱动 46

3. 1 线控驱动系统的功能	46
3. 2 线控驱动系统的结构	47
3. 3 线控油门系统的结构和工作原理	49
3. 4 线控驱动系统的电气原理	52
3. 5 线控挡位	52
3. 6 线控驱动系统实践	53
3. 7 课后练习	62

**第四章 线控制动 63**

4.1 制动系统与线控制动	63
4.2 线控制动系统的结构	66
4.3 线控制动系统的工作原理	73
4.4 线控制动系统的失效备份	77
4.5 线控制动系统的动能回收系统	78
4.6 线控制动系统实践	80
4.7 课后练习	90

第五章 线控转向 91

5.1 转向系统的作用	91
5.2 转向系统的发展历史	92
5.3 线控转向系统的组成与布置方式	108
5.4 线控转向系统路感反馈策略	113
5.5 线控转向系统的控制策略	114
5.6 线控转向的容错	115
5.7 线控转向系统面临的挑战	116
5.8 线控转向系统的优点及不足	116
5.9 线控转向系统的发展与应用	118
5.10 线控转向系统设计与实践指南	119
5.11 线控转向系统的发展前景	126
5.12 课后练习	126

参考文献 129

电 池

本章主要学习新能源汽车的电池单元、参数和种类,着重介绍锂离子电池的正极材料、负极材料、电解液、隔膜等重要核心部件的概念和产业相关知识,简明讲解电池管理系统和电池热管理系统。本章的学习目标、重点、难点如表 1-1 所示。

表 1-1 第一章学习目标、重点、难点

序号	学习目标	学习重点	学习难点
1	掌握电芯的种类及不同类型电芯的优缺点	√	
2	了解我国不同厂家主要电芯类型		
3	了解电池的基本度量单位	√	√
4	了解锂离子电池的基本原理和结构特点	√	√
5	了解锂离子电池的产业发展情况	√	
6	了解电池管理系统的功能和原理	√	
7	了解典型电池热管理系统的功能和原理	√	

1.1 电池单元



视频
电池

电池(electric battery)在新能源汽车领域是电池组的简称,是由一个或多个带外部连接的电化学电芯单元(electrochemical cell unit)组成的电源装置,用于为汽车动力设备和一般功能设备供电。电池组的电化学电芯单元之间可以采用并联、串联或串并联方式连接。

电池单元如图 1-1 所示,电芯有不同形状。以特斯拉(Tesla)为例,特斯拉在 2008—2017 年使用的是 1865 电芯,在 2017 年改用 2170 电芯,自 2022 年开始使用 4680 电芯。

应用 4680 电芯后,2022 年量产的第一代,单颗容量为 $98 \text{ W} \cdot \text{h}$;2023 年量产的第二代,单颗容量达到 $108 \text{ W} \cdot \text{h}$;2024 年量产的第三代,单颗容量将达到 $118 \text{ W} \cdot \text{h}$ 。特斯拉电池连接如图 1-2 所示。

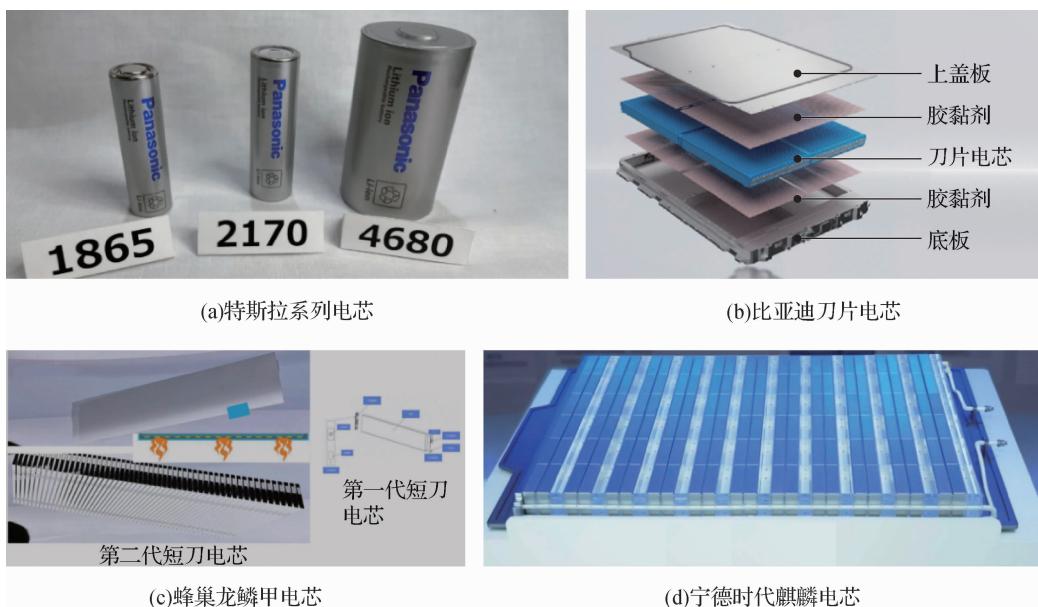


图 1-1 电池单元

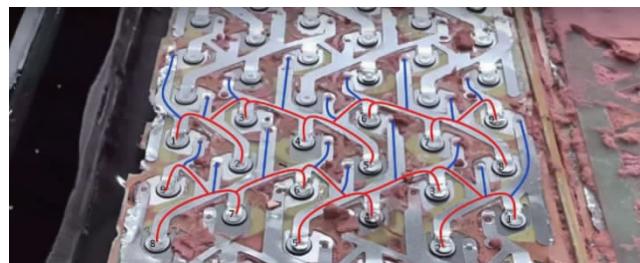


图 1-2 特斯拉电池连接

除以特斯拉 4680 为代表的圆柱电池之外,目前市场上还有方形电池(见图 1-3)、软包电池(见图 1-4)。



图 1-3 方形电池



图 1-4 软包电池

上述三种电池都有各自的优缺点。其中圆柱电池技术成熟、散热性好，但是其庞大的数量给电池管理系统带来了相当大的难题；方形电池一般为定制化生产，因此其标准化程度较低；软包电池需要在每两个电池之间加一层铝塑膜薄片，薄片中充满液体，通过加热或冷却使电池处于最佳工作温度，这也意味着它需要更复杂的电池控制系统。圆柱、方形和软包电池的优缺点对比见表 1-2。

表 1-2 圆柱、方形和软包电池的优缺点对比

对比项	圆柱电池	方形电池	软包电池
外壳	钢/铝壳	钢/铝壳	铝塑膜
制造工艺	圆柱卷绕	方形卷绕	方形叠片
能量密度	中	中	高
安全性	中	差	好
标准化程度	高	低	低
优点	循环性能优越，可快速充放电，输出功率大，生产工艺成熟，产品良率高	结构简单，空间利用率高，能量密度较大，循环寿命长，耐受性好	比能量高，重量轻，内阻小，循环次数多，不易爆炸
缺点	空间利用率低，成组效率低，能量密度相对较低	整体重量重，一致性差，型号相对较多而难以统一	成本高，一致性差，制造工艺成本高
代表车型	特斯拉 Model 3	宝马 i3	日产 Leaf
代表企业	国轩高科、智航新能源、天鹏电源	宁德时代、比亚迪、亿纬锂能	中航锂电、中信国安、万向

业界较为知名的电池还有比亚迪提供给特斯拉的六棱柱形电池等。目前，特斯拉 4680 的体积利用率为 63%，电池组能量密度为 $217 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ；比亚迪的 CTB 刀片电池的体积利用率为 66%，电池组能量密度为 $200 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ；宁德时代麒麟电池的能量密度为 $255 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 。乘用车电池解决方案中，通常能够达到 $600\sim1000 \text{ km}$ 续航。常见电芯参数对比见表 1-3。



表 1-3 常见电芯参数对比

电 池	刚 性	能 量 密 度	散 热	安 全 性	成 本	平 均 值	可 扩 展 性
比亚迪刀片	9	7	8	10	10	8.8	10
宁德时代麒麟镍	9	10	10	6	7	8.4	7
宁德时代麒麟铁	9	7	10	9	8	8.6	10
特斯拉 4680	10	9	9	8	9	9.0	7

注:表中数字为 1—10 的评分,分值越大该项指标越好。

电池组通过电能的储存和释放为电动汽车提供能量,电动汽车的电池主要包括电池组、电池箱体组件、电池管理系统、高低压系统、热管理系统等。电池组通常由电池单体串联和并联,并且与电池管理系统组成特定电压电池包,材料及生产成本较高,所以电池成本通常占到新能源汽车整车成本的 38%左右,甚至会达到 60%,大幅超过汽车内饰成本的 15%和底盘成本的 14%。

1.2 车身电池集成

在传统的模块化电池中,电芯串并联组成电池,多组电池组成模块,多个模块加上控制单元组成电池组,这种方式称为标准模组技术(cell to module,CTM)。CTM 存在一定的弊端,目前电池车身一体化技术是行业主流。

主流整车厂和电池厂商特斯拉、比亚迪、宁德时代等应用不同的电芯集成方案:电池无模组技术(cell to pack,CTP)、电池车身一体化技术(cell to body,CTB)、电池底盘一体化技术(cell to chassis,CTC)。

传统的新能源汽车动力系统集成方式是 CTM,电芯以先模组再安装电池包(PACK)的方式进行组织。CTM 是电池厂商针对不同车型、不同电池要求、不同电芯尺寸的产品组织方式,有助于形成规模经济和统一产品。一般配置方式为:电芯—模组—PACK—装车。这种方法空间利用率不高,通常只有 40%,同时还存在安全性、热管理等问题。为解决这些问题,替代 CTM 的电池车身一体化(CTP、CTB、CTC)正逐渐成为行业重点研究和应用方向。电芯、电池组、CTP、CTC 以及特斯拉的结构化电池组如图 1-5 所示。

CTP 跳过标准化模组,直接将电芯集成到电池组中,有效提高了电池组的空间利用率和能量密度。这种集成方式由宁德时代于 2019 年率先提出,此后比亚迪、蜂巢能源相继发布了各自的 CTP 解决方案。其中比较有代表性的是比亚迪的刀片电池,将单个电芯排列成阵列,然后像刀片一样插入电池组。

CTB 是比亚迪提出的电芯集成新方式,实现了从车身集成到电池车身一体化集成的转变,有助于提高电动汽车的空间利用率和进一步的性能释放。从结构设计上看,比亚迪的 CTB 技术将车身底板和电池包上壳合二为一,集成在电池上盖、门槛和前后梁形成的平面密封面中。乘客座舱用密封胶密封,底部通过安装点与车身组装在一起。即在设计制造电池



包时,将电池系统与车身集成为一个整体,可以满足电池本身的密封防水要求,电池与乘客座舱的密封相对简单,风险可控。

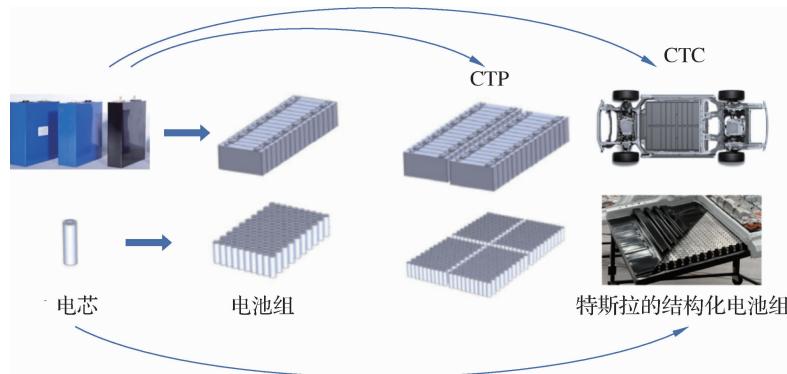


图 1-5 电芯、电池组、CTP、CTC 以及特斯拉的结构化电池组

CTB 技术是 CTP 技术的延伸,比亚迪首款 CTB 在结构上更加简洁直接,减少了车身与电池盖连接带来的空间损失,有望进一步提升整体空间利用率。在这种结构下,电池不仅是能量体,更是参与整车传力和受力的结构体,采用 CTB 技术的车身在一定速度下的撞击中可减少约 45% 的侧柱侵入。

CTC 是将电池直接集成到车辆底盘中的过程,进一步深化了电池系统与 EV 动力系统、底盘的集成,减少了零部件数量,节省了空间,提高了结构效率,显著减轻了整车重量,增加了电池续航里程。

集成度更高的 CTC/CTB 电池将成为主流。集成化的 CTC/CTB 路线往往对热管理的要求更高,在这种情况下,热泵空调的重要性凸显。预计未来热泵空调将成为 CTC/CTB 车型的标准配置。

特斯拉结构化电池组封装技术如图 1-6 所示。特斯拉应用了结构化电池组技术,其车身采用前、后两段一体式压铸技术,并将电池集成于底盘结构中,起到降低成本、增效、优化车辆动态力学特性等作用。



图 1-6 特斯拉结构化电池组封装技术



从电池集成技术发展看,CTM是第一代技术,CTP是第二代电池集成技术,各种CTC、CTB等是第三代技术,未来CTC技术量产规模将继续扩大。

电池集成于底盘上之后,通过串联和并联组成特定电压的电池组。目前多数的新能源汽车是400 V平台,依据功率等于电压乘以电流的公式,提高电功率只能通过提高电流来实现,目前特斯拉最大电流为600 A。相比之下,保时捷采用了800 V平台,相同功率情况下电流可以降低一半。电压关系到输出功率、充电效率等参数指标,因为电流损耗等于电阻乘以电流的平方,高电压低电流能够有效降低电流损耗;同时在充电的过程中,提高电压能够有效提升充电效率,同时高电压平台能够通过减小线径等方式实现电池包的轻量化。

因此高电压低电流进行高压充电,匹配车端高电压适配方案,是大多数车企的研发方向。但是目前高电压在充电端充电器、接触器、线束等部件的耐高压以及电子元件的高压匹配方面还存在一些问题,所以目前多数车企仍然沿用400 V平台。

保时捷Taycan 800 V平台电池布置如图1-7所示。保时捷800 V平台双层电池集成如图1-8所示。

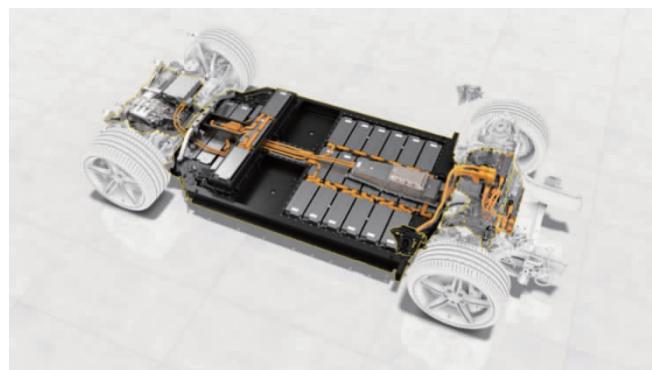


图1-7 保时捷Taycan 800 V平台电池布置

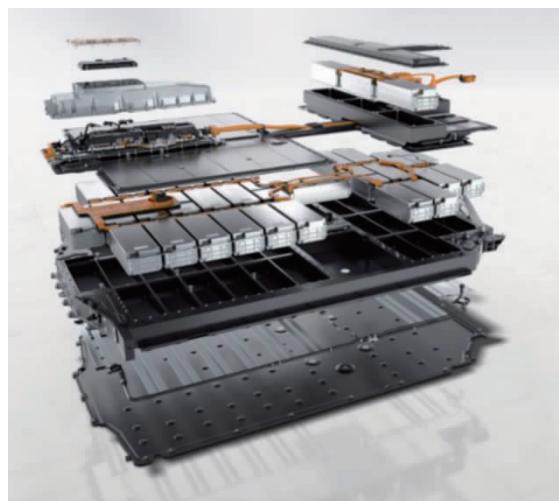


图1-8 保时捷800 V平台双层电池集成



1.3 电池的参数

电池的基本作用是为汽车提供起动电池、供电和储存能量。电池容量有多种定义方式，如以功率为单位的千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$)和以电流为单位的安时($\text{A} \cdot \text{h}$)。

能量的基本单位为焦耳(J)，1 J 能量相当于 1 N 力的作用点在力的方向上移动 1 m 距离所做的功。

做功快慢定义为功率，即单位时间内所做的功，功率的基本单位为瓦特(W)，其定义如下。

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

可以用以恒定功率做功的时长作为衡量电池容量的单位，如瓦特秒或者千瓦时，其中千瓦时的定义如下。

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3\,600\,000 \text{ W} \cdot \text{s} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

电池容量的另外一种定义方式是其持续提供电流的能力，表现为安时的形式。

$$1 \text{ A} \cdot \text{h} = 3\,600 \text{ A} \cdot \text{s} = 3\,600 \text{ C}$$

其中，C 是电量单位库仑的符号。

假设电压为 n V，那么 $1 \text{ A} \cdot \text{h}$ 包含的能量为 $3\,600 n \text{ A} \cdot \text{s} \times V = 3\,600 n \text{ J}$ ，此处 $1 \text{ J} = 1 \text{ A} \cdot \text{s} \times 1 \text{ V}$ 。

电池电压与电池电流的乘积为能量，高电压平台能够提升电池的充电效率，并且能够降低导线的横截面积从而降低线材质量。不同的电池单体电压是不一样的，常见动力电池单体的额定电压：镍氢电池 1.2 V，锂离子电池 3.8 V。额定电压对于电池是重要的，高电压下工作会导致电池寿命大幅下降，低电压下工作会导致电池出现故障。

动力电池的作用在于放电和充电，动力电池的放电速率需要能够支撑车辆加速、制动等极端工况。电池的放电速率单位为 C， aC 的含义是 a 个小时内可以以恒定的电流将动力电池储存的能量放完。这里 a 是一个大于零的实数，在放电过程中，通常用电池荷电状态(state of charge, SOC)来表示 a ，即容量/实际容量的百分比。

放电深度(depth of discharge, DOD) + SOC = 1，电池充满时 DOD 为 0，放空时 DOD 为 1。因此，电池的放电深度即表示已放电的电池相对于电池总容量的百分比，即充满电的电池放电的容量除以电池标称容量。例如，100 A · h 的电池以 50 A 的电流放电 20 min，则放电深度为 $50 \times 20 / 60 / 100 = 16.7\%$ 。

电池健康状态(state of health, SOH)表示电池当前实际容量与电池初始额定容量的比值，描述的是电池的老化程度。

例如，一个电池的初始容量为 30 kW · h，当前容量为 24 kW · h，已经放电 8 kW · h，那么其 SOC 为 $(24 - 8) / 24 = 2/3$ ，DOD 为 $8 / 24 = 1/3$ ，SOH 为 $24 / 30 = 0.8$ 。

比能量：每单位质量电池所能存储的能量，单位为 kW · h/kg，例如，三元锂电池的比能



量为 $150\sim300 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 。

比功率:电池组每单位质量的可用放电功率,用于描述电池瞬间产生能量的能力,其单位为 W/kg 。

循环寿命:描述电池在寿命终止前可以充放电的次数。

寿命终止:电池老化到实际容量与初始容量的比值下降到某预设阈值 1,或者实际内阻/初始内阻大于某预设阈值 2。

自放电:动力电池即使是在不适用的情况下,也会消耗能量,如镍电池的自放电特征就比较显著。

高温对电池影响:高温对电池电子组件的寿命和可靠性具有显著的影响。阿伦尼乌斯公式(Arrhenius equation)描述了化学反应与温度之间的关系,温度与化学反应速度正相关,体现在电动汽车上可以是密封胶圈的氧化、电池的老化等。通常电池管理系统通过热管理系统进行电池高温降温。

低温对电池影响:低温会导致电解质变得黏稠且导电性下降,这也是电动汽车在我国北方寒冷地区表现并不好且不受欢迎的原因之一。

1.4 电池的种类

动力电池的分类如图 1-9 所示。从能量来源分析,电池分为物理电池、化学电池和生物电池。

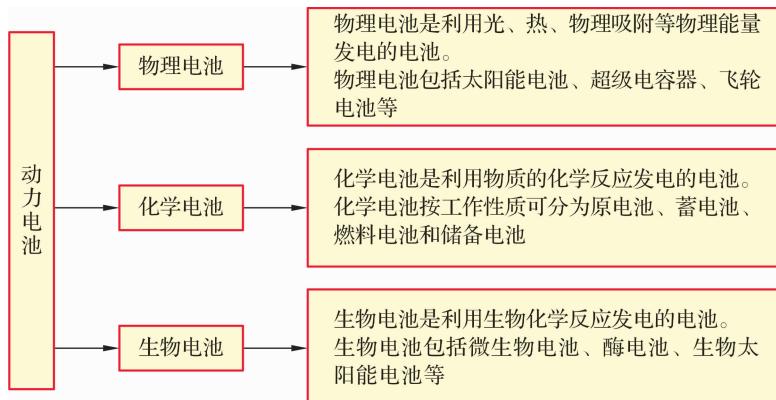


图 1-9 动力电池的分类

从原理上分析,电池分为氧化还原反应对应的原电池和不同浓度的溶液混合时高浓度状态向低浓度状态变化对应的浓差电池。

电动汽车领域的电池单体多为可充电电池(rechargeable battery),即二次电池,又称为蓄电池。从名称可知,这种电池能够进行多次充电和放电。动力电池作为二次电池,主要有铅酸电池、镍氢电池、锰酸锂电池、钴酸锂电池、磷酸铁锂电池、三元锂电池等,见表 1-4。其



中,铅酸电池、锰酸锂电池、钴酸锂电池因为环保、质量能量密度、循环次数等的缺陷,已经退出了电动汽车动力电池领域。目前市场上以磷酸铁锂电池、三元锂电池为主,镍氢电池所占市场份额相对较小。

表 1-4 动力电池的种类

电池类型	质量能量密度/(W·h·kg ⁻¹)	循环性能/次	商品化程度
铅酸电池	30~50	300~500	已淘汰
镍氢电池	70~100	800~1 200	投入使用
锰酸锂电池	100~150	600~1 000	已淘汰
钴酸锂电池	150~200	300~500	已淘汰
磷酸铁锂电池	100~126	4 000~6 000	投入使用
三元锂电池	180~200	2 000~3 000	投入使用

1.4.1 铅酸电池

经典的锌铜电池(又称丹尼尔电池)在充电过程中是阳极铜失去两个电子而变成二价铜离子,二价锌离子得到两个电子而变成锌原子,而放电过程正好相反。因为电解液硫酸较容易腐蚀铜、锌一类的金属,所以极板材料通常采用铅替代。正极板上的活性物质可以是二氧化铅,负极板上的是铅单质,充放电过程的电化学反应如下。



可以看出在充放电过程中伴随着水的产生和消耗。

铅酸电池技术成熟、安全性好、稳定性好、成本低廉,但是其缺点较为突出。

(1)比能量低,目前其比能量在 50 W·h/kg 量级。

(2)电压相对较低,单体铅酸电池为 2.0 V。

(3)寿命较短,铅酸电池的循环充电寿命为 300~500 次。

所以目前只有部分低速短途、低成本电动车辆采用铅酸电池。

铅酸电池于 1996 年应用于通用 EV1 电动汽车投放市场。通用 EV1 及其电池组如图 1-10 所示。



图 1-10 通用 EV1 及其电池组



1.4.2 镍氢电池

相对于铅酸电池,镍氢电池是一个电动汽车动力电池较好的解决方案。镍氢电池比功率较高,能够达到 1 500 W/kg 以上。1997 年推出的丰田普锐斯混动版采用镍氢电池。镍氢电池具有安全性好、低温适应性强等特点,在丰田系列的多款汽车中作为动力电池使用。

但是镍氢电池的比能量仍然不高,一般为 $70\sim100 \text{ W}\cdot\text{h/kg}$,与锂离子电池相比短板明显。除此之外,镍氢电池还存在以下问题。

(1)自放电:满电搁置 28 天自放电达到 $10\%\sim30\%$ 。

(2)循环寿命:在反复充放电过程中,镍氢电池的合金粉末表面容易形成氢氧化镍,电解产生的氢气溢出导致电解质减少,从而内部阻抗增大、容量降低,所以镍氢电池的性能极大地依赖于电池的组装工艺。

(3)激活:镍氢电池需要被多次激活才能达到最大容量。

(4)金属镍的成本较高:镍氢电池大量使用镍、钴等贵金属,成本较高。

丰田普锐斯及其 Ni-MH-20 镍氢电池组如图 1-11 所示。



图 1-11 丰田普锐斯及其 Ni-MH-20 镍氢电池组

1.4.3 锂离子电池

锂电池通常指的是锂离子电池,锂离子电池相比镍氢电池、铅酸电池具有比能量高、电压高、环境友好、寿命长、充电速度快、无记忆效应等优点。



特别是在电池能量密度方面,锂离子电池中的三元锂电池可达 $200 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$, 约为镍镉电池和镍氢电池的三倍。锂离子电池单体工作电压为 3.7 V , 相当于三个并联的镍镉或镍氢电池; 锂离子电池不含铅、汞、镉等有害金属; 锂离子电池在 4.2 V 下 $90\sim150 \text{ min}$ 能够充满。典型的锂离子电池有钴酸锂、锰酸锂、三元锂、磷酸铁锂等, 这代表的是锂离子电池的正极材料, 其中三元锂电池的正极材料包含镍、钴、锰三种金属元素, 这三种元素的配比依据电池的定位而变化。

锂离子电池的原理是锂离子从高浓度流向低浓度环境形成电流, 产业界对于锂离子电池是原电池还是浓差电池是存在一定分歧的。

下面以钴酸锂电池为例介绍其工作原理。

如图 1-12 所示, 钴酸锂电池的正极材料为钴酸锂, 负极材料为石墨烯, 钴酸锂正极的化学反应式如下。

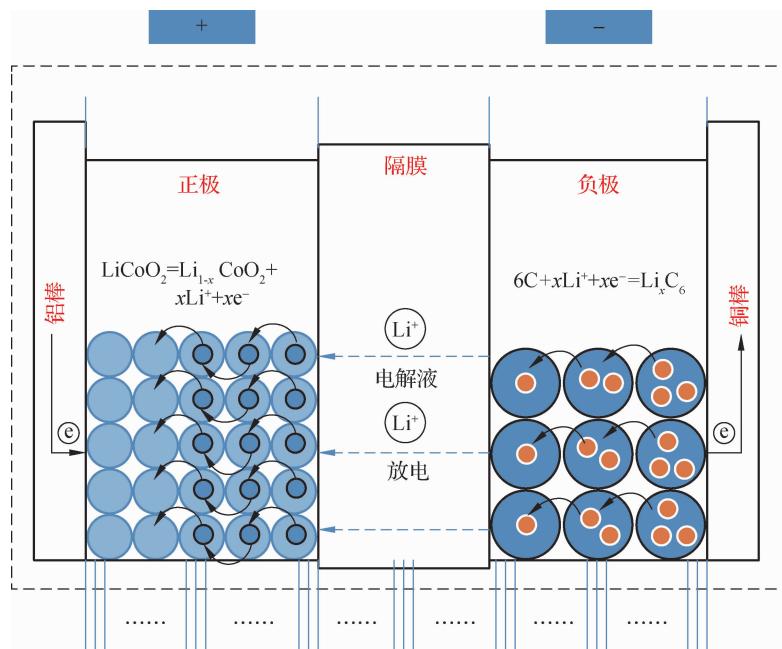
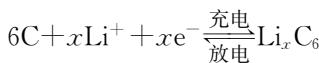
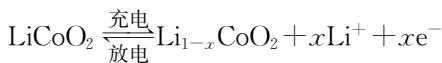
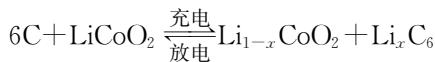


图 1-12 钴酸锂电池原理

负极的化学反应如下。



总的化学反应式如下。



除了钴酸锂充当正极之外, 镍、钴、锰与 Li 的化合物及磷酸铁锂等都可以充当正极材料。



锂离子电池的正极材料(磷酸铁锂、三元锂等)、负极材料(石墨烯等)等存在一定差异，但是电池的整体结构是类似的，如图 1-13 所示。可以看出电池由正极材料、负极材料、隔膜、电解液四个部分组成，更细粒度的划分包括正极耳、负极耳、绝缘片、铝塑包装膜、正极材料、负极材料、隔膜、电解液几个部分。

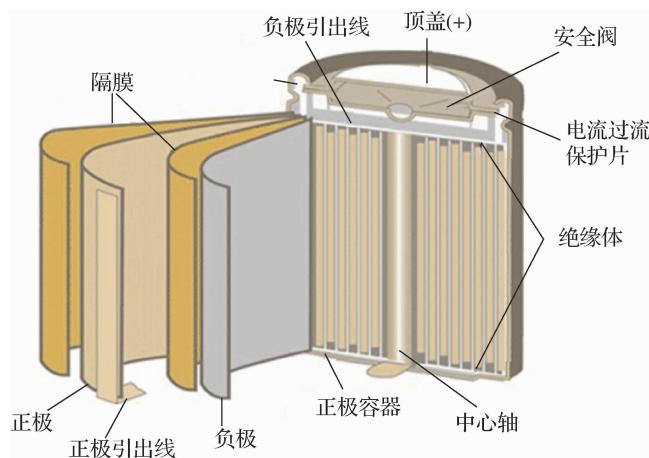


图 1-13 锂离子电池电芯结构

动力电池中，正极材料、负极材料、隔膜、电解液和其他材料的成本占比如图 1-14 所示，可以看出正极材料占了几乎一半的成本。

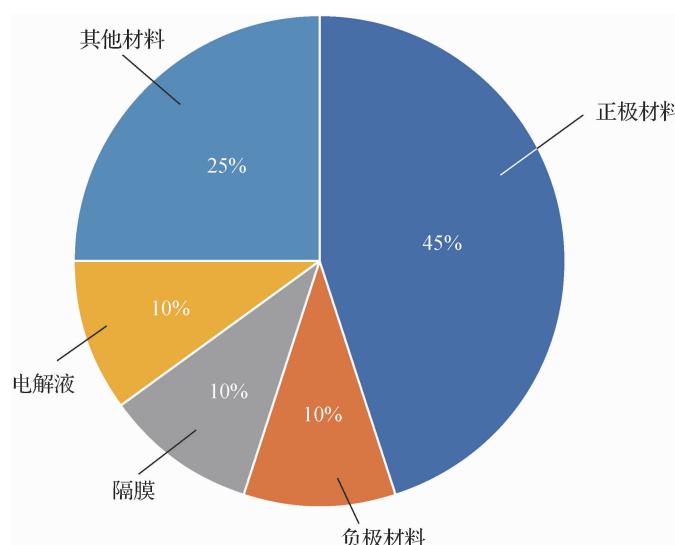


图 1-14 动力电池各部分成本占比

正极材料、负极材料、电解液和其他材料的质量占比如图 1-15 所示。

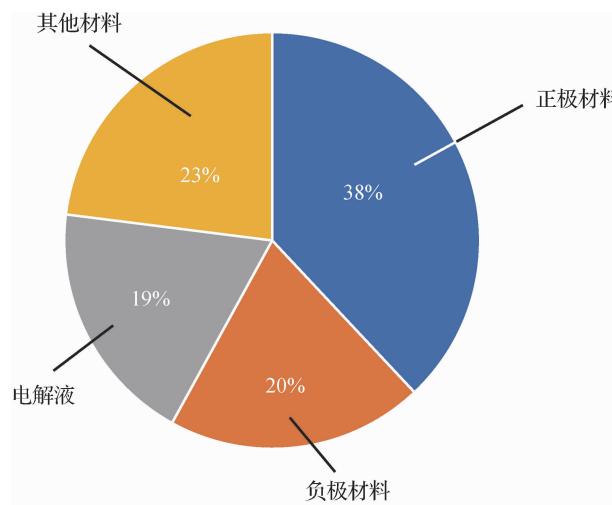


图 1-15 动力电池各部分质量占比

1. 正极材料

正极材料在这四大部分中的成本占比最高,因此,丰富的储存、低成本制备同时具有高能量密度的正极材料是目前锂离子电池研究与生产的重要目标。为了使锂离子电池具有较高的能量密度和功率密度、较好的循环性能及可靠的安全性能,正极材料的选择应满足若干条件。

- (1)在充放电过程中提供往返于正负极以及首次充放电过程中在负极表面形成SEI膜时所消耗的锂离子。
- (2)具备较高的放电电压且电压平台稳定。
- (3)正极活性物质电化当量小,可逆嵌脱锂量大,锂离子扩散系数高,具有较高的离子和电子电导率,能够支持快速充电。
- (4)充放电过程中结构稳定性好。
- (5)化学稳定性要好,常规的烧结、固化等制备方法即可制取。
- (6)对工艺要求不高,常规的搅拌、涂布等工艺即可达成。
- (7)资源丰富,无毒,制备成本低。

目前常见的高电压正极材料有如下体系。

- (1)尖晶石结构: $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ 。
- (2)层状结构:高电压 LiCoO_2 。
- (3)三元正极材料: $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Mn})\text{O}_2$,镍钴锰配比:111,523,442,622或者811。
- (4)富锂锰基正极材料: $x\text{Li}_2\text{MnO}_3(1-x)\text{LiMO}_2$ 。
- (5)橄榄石结构: LiCoPO_4 , LiNiPO_4 。

锂电池分类及其特性见表1-5。



表 1-5 锂电池分类及其特性

材料类型	钴酸锂	锰酸锂	三元锂	磷酸铁锂
工作电压	3.6 V	3.8 V	3.7 V	3.4 V
质量能量密度	180 W·h/kg	100 W·h/kg	>200 W·h/kg	130 W·h/kg
循环次数	>800 次	>1 500 次	>1 500 次	>2 000 次
成本	250 元/kg	70 元/kg	200 元/kg	120 元/kg
安全	稳定性差，非常不安全	稳定性尚可接受，较安全	稳定性极差，极不安全	稳定性好，安全性最佳
主流应用	消费类电子	日产	特斯拉等	比亚迪 E6，K9 客车，储能

三元锂通常简写为 NCM, 对应镍钴锰三种金属的首字母。按照这三种金属的比例, 三元锂又分为 NCM333、NCM523、NCM622、NCM811 几种。将锰换为铝的三元锂通常简写为 NCA, 镍含量通常与能量密度正相关, 这几种电池的能量密度排名为: NCA>NCM811>NCM622>NCM523>NCM333。三元锂电池的比较见表 1-6。

表 1-6 三元锂电池的比较

种类	NCM333	NCM523	NCM622	NCM811	NCA
镍含量	20.5%	30.8%	37.3%	50.7%	51.3%
能量密度/(mA·h·g ⁻¹)	155	165	175	200~215	210 以上
安全性	良好	较好	较好	一般	一般
成本	高	低	中	低	低
应用	电动汽车、3C 电子	电动汽车、3C 电子、电瓶车	电动汽车、高端笔记本	电动汽车、3C 电子	电动汽车 (特斯拉为主)

表 1-6 描述了不同三元材料的优缺点, 可以看出镍含量与能量密度的正相关性, 同时 NCA 以更高的能量密度应用在特斯拉电动汽车上。2016—2021 年不同类型电池装机量占比如图 1-16 所示。

从表 1-5 可以看出三元材料相对磷酸铁锂具有能量密度优势和安全性劣势。《关于 2016—2020 年新能源汽车推广应用财政支持政策的通知》按照里程补贴的政策忽略了安全性, 三元材料以能量密度优势市场占比逐年提升。到 2019 年新的补贴政策淡化能量密度和续航指标后, 磷酸铁锂电池的占比相比之下有所提升。

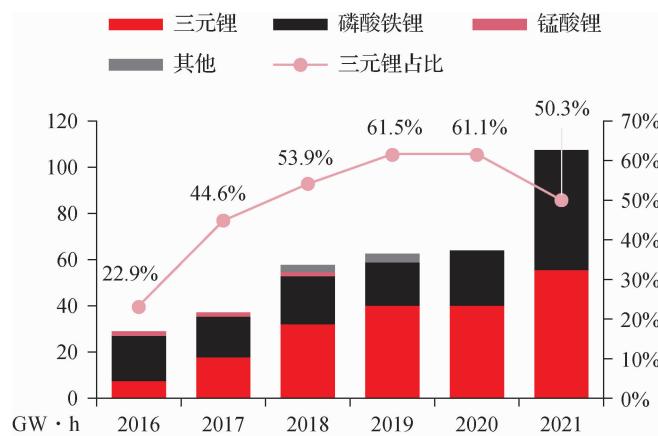


图 1-16 2016—2021 年不同类型电池装机量占比

2. 负极材料

锂离子电池充放电如图 1-17 所示。

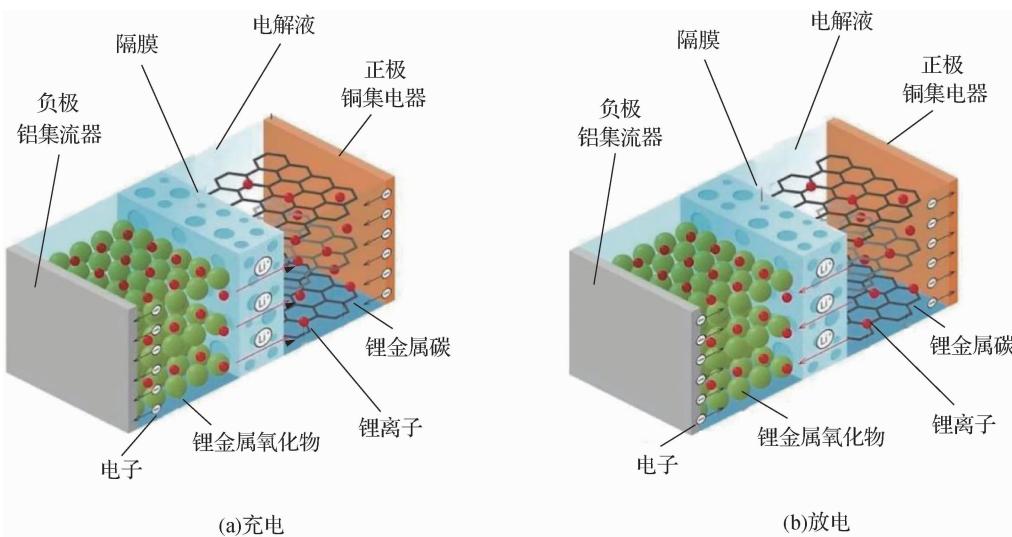


图 1-17 锂离子电池充放电

在充电过程中,电解质通过隔膜把带正电的锂离子从正极带到负极并吸附在石墨材料上;在放电过程中,锂离子从石墨中析出并通过隔膜流向正极。

负极材料成本在电池成本中的占比大约为 10%。如图 1-18 所示,负极材料可以分为碳材料和非碳材料两种。碳材料中的天然石墨和人造石墨是商业化主流,其余负极材料的商业化能力有待开发。2020 年,我国负极材料出货量约为 46 万吨,海外出口 8 万吨,全球合计 54 万吨。

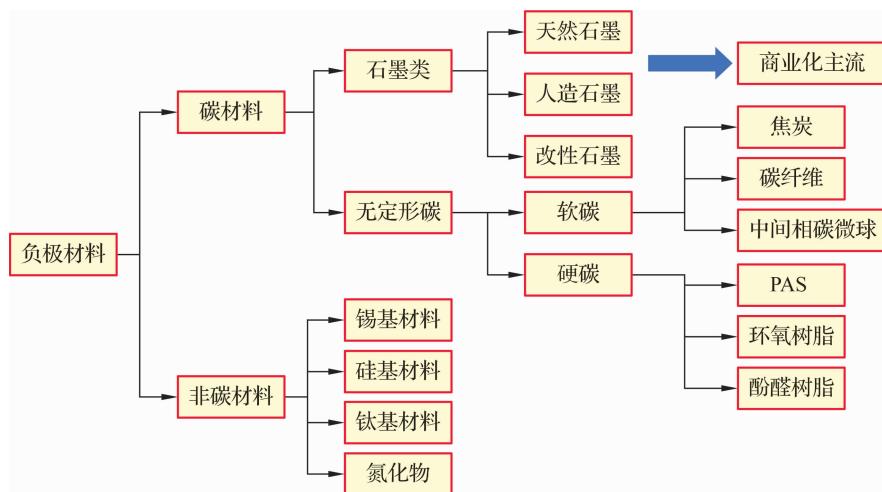


图 1-18 负极材料

人造石墨以石油焦、针状焦为原料生产。相对于天然石墨千次以内的循环寿命，人造石墨的循环寿命可以达到 2 000 次。人造石墨倍率性能好，高低温性能以及体积膨胀方面都有优势。与人造石墨相对应，天然石墨具有价格优势。

硅基材料是业界研究的新型负极材料，其理论容量优于石墨材料，目前已经在松下部分动力电池上应用，但是需解决体积膨胀、循环寿命等问题。

天然石墨、人造石墨和硅基材料的特性比较见表 1-7。

表 1-7 天然石墨、人造石墨和硅基材料的特性

类 型	天然石墨	人造石墨	硅基材料
原 材 料	鳞片石墨	石油焦、沥青胶、针状焦等	碳纳米管、二氧化硅等
理 论 容 量	340~370 mA·h/g	310~360 mA·h/g	400~4 000 mA·h/g
首 次 效 率	>93%	>93%	>77%
循 环 寿 命	一般	较 好	较 差
安 全 性	较 好	较 好	一 般
倍 率 性	一 般	一 般	较 好
成 本	较 低	较 低	较 高
优 点	能量密度高，加工性能好	膨胀低，循环性能好	能量密度高
缺 点	电解液相容性较差，膨胀较大	能量密度低，加工性能差	膨胀大，首次效率低，循环性能差

3. 隔膜

隔膜如图 1-19 所示。锂离子电池中隔膜成本占比为 10%，是关键组件之一，其本质是多孔的薄膜，用来将电池的正极和负极分开，避免短路，同时锂离子、钠离子等可以自由通



过。隔膜决定了电池的内阻，内阻决定了电池的性能。

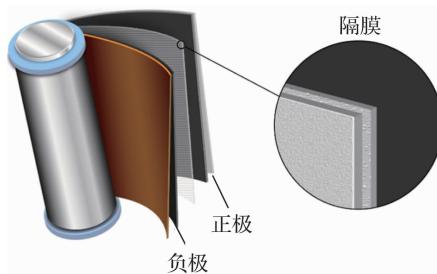


图 1-19 隔膜

4. 电解液

与经典的锌铜电池类似，锂离子电池的正极和负极之间有隔膜和电解液，如图 1-20 所示。电解液是电池中离子传导的载体，通常由高纯度的有机溶剂、电解质锂盐和必要的添加剂组成，见表 1-8。配方的比例直接决定了锂离子电池的电压、比能量等参数。电解液在电池成本中占比 10% 左右，电解液中的电解质成本占比为 50%。

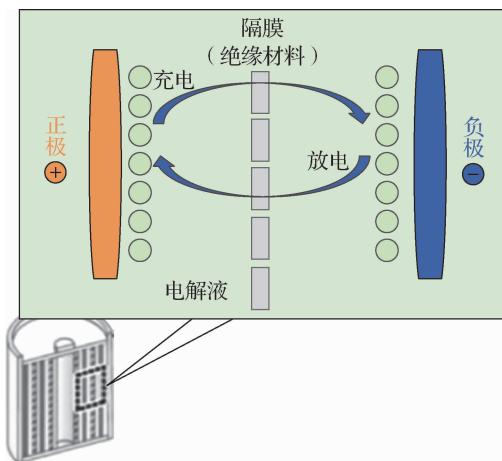


图 1-20 锂离子电池的结构

表 1-8 电解液的主要成分

电解液构成	主要成分
电解质锂盐	六氟磷酸锂、其他盐
溶剂	环状碳酸酯类、链状碳酸酯类、醇类有机溶剂
添加剂	成膜添加剂、电解液稳定剂、阻燃添加剂、过充添加剂

电解质锂盐的主要成分为六氟磷酸锂。六氟磷酸锂使用碳酸锂和氟化氢合成，它是电解液中对锂离子电池特性影响最大的部分。



1.5 电池管理系统

用来管理二次电池的电子系统都可以称为电池管理系统(battery management system, BMS)。BMS典型的功能有状态监控、数据计算及通信、充放电管理、电池保护及寿命优化等。BMS是动力电池的核心,具有分布式、高精度、被动均衡等特征,其市场规模将达到100多亿。BMS的典型架构如图1-21所示,其基本功能如图1-22所示。

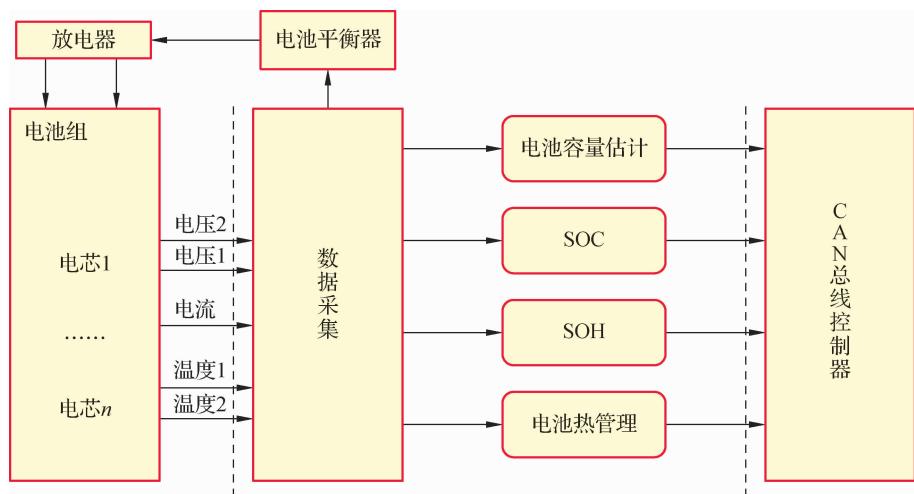


图 1-21 BMS 的典型架构

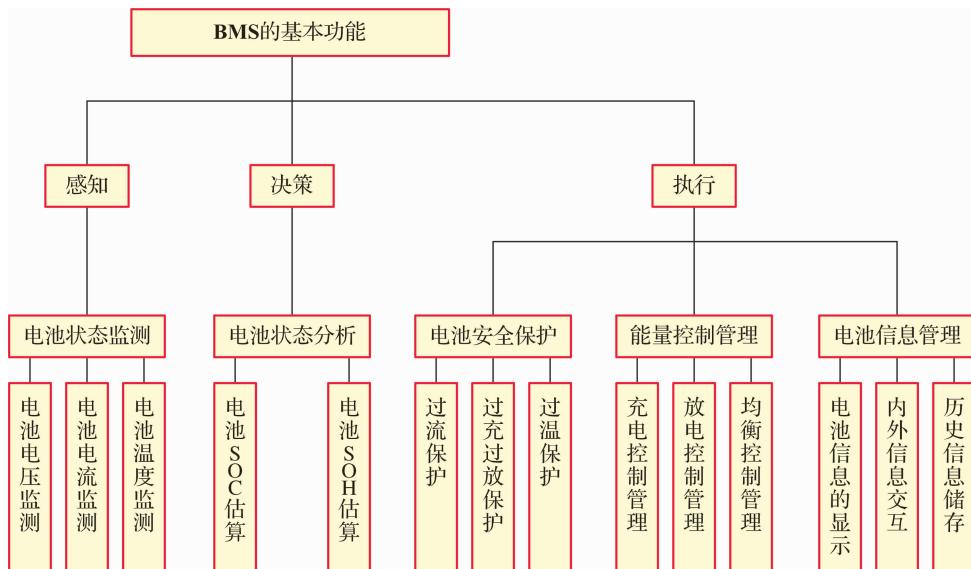


图 1-22 BMS 的基本功能



1. 监控

BMS 利用各种参数监控电池的状态,如电压(总电压、单体电池电压),温度(平均温度、冷却液入口温度、冷却液出口温度、单体电池温度),电池电流,电池健康状况,以及电芯之间的不平衡状态。

2. 估算 SOC、DOD

(1)电压。电芯的最大电压和最小电压。

(2)保障电池工作在优化合理区域,避免电池越过“临界区域”。电池的临界运行或者越过临界区运行增大了电池故障、自燃、充电过程起火等事故发生的概率,BMS 需避免电池发生过流、过充电、过放电、短路、温度过高或者过低等故障。

(3)控制能量回收过程。

(4)控制电池的功率上升、下降和预充电。

(5)通过人机接口(HMI)与操作者进行沟通。

(6)平衡电池单体之间的不一致,提高电池系统的使用效率。

(7)维护电池始终处于健康状态,提供故障诊断和日志信息。

1.6 热管理系统

热管理系统是 BMS 的一个重要部分,动力电池的高效工作温度范围通常在 20~35 °C,动力电池在极端温度下工作,会出现高温或者低温现象,都会造成电池效率下降,同时电池组的性能由性能最差的电芯决定,当电芯之间温差大于 10 °C 时,电池组的使用效率将大幅降低。

燃油车的内燃机热效率基本在 50% 以下,而电动汽车的电机热效率能够达到 90% 以上。这里面蕴含着另外一个事实:燃油车的热管理系统可利用大量的发动机余热进行座舱等加热,但是电动汽车可利用的“余热”很少。同时,电池系统工作温度范围较窄,需要进行严格的制热或者制冷。这也就导致电动汽车的热管理系统相对复杂。

电动汽车典型热管理系统如图 1-23 所示。热管理系统中的冷却功能通常由压缩机、热交换器和空调系统进行换热完成,加热功能通常由 PTC 加热器和热交换器集成实现。

特斯拉的八向阀是其第四代热管理系统的关鍵,如图 1-24 所示,该八向阀在膨胀阀和止向阀的配合下能够实现 3 种制冷模式和 12 种制热模式控制。

比亚迪在 2021 年推出 e3.0 平台,其热管理系统取消了高耗能的 PTC 控制模块,通过热泵空调和其八合一电驱电控系统散发的热源来对驾驶舱加热。

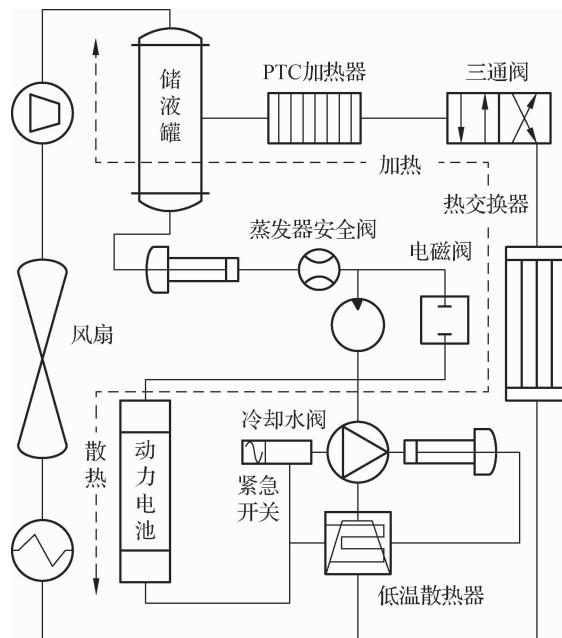


图 1-23 电动汽车典型热管理系统

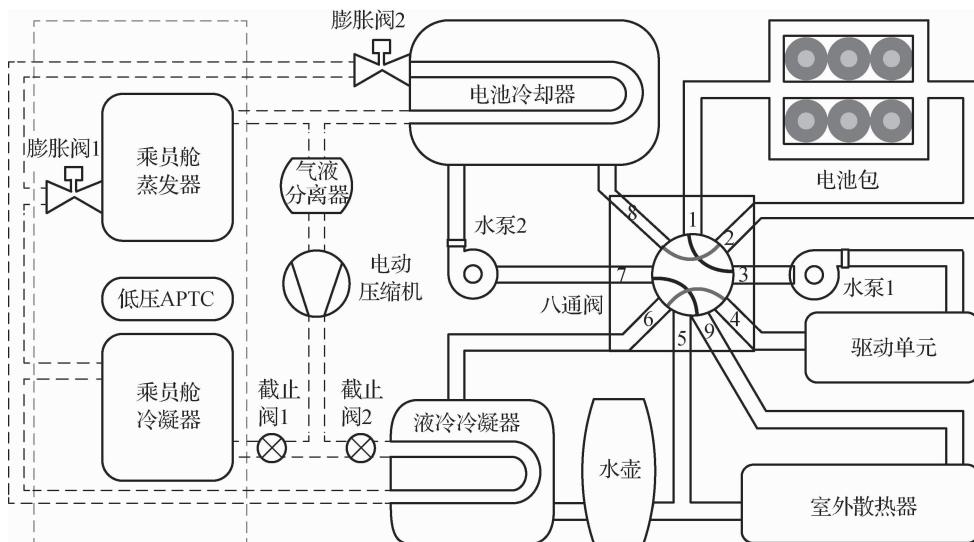


图 1-24 特斯拉第四代热管理系统



1.7 动力电池的发展趋势

寿命、成本、容量、充电速度、安全性是动力电池的关键指标。在寿命方面,目前铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池、锂电池的循环次数分别为400~600、500以上、1 000以上、1 000以上;镍氢电池的使用寿命已经能够达到十年以上。

锂离子电池领域,磷酸铁锂、钛酸锂等电极材料的出现,大大提高了锂电池的循环寿命,降低了电池的材料成本和使用成本,目前电池组寿命达到10年或20万千米。铅酸电池因为其容量、环境影响的问题,在动力电池领域已经被其他形式的电池所代替。在容量方面,锂电池的容量在 $100 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 以上,其中三元锂电池可以达到 $300 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 以上。在安全性方面,磷酸铁锂电池通过了穿刺实验,并且从比亚迪电动汽车的运行数据上看,其安全性得到了市场检验。在充电速度方面,快速充电是解决里程焦虑的有效手段。目前对于快速充电的概念还没有明确的定义,美国先进电池联盟定义的快速充电目标是15 min内能够充电到80%。目前我国典型电池和电动车辆厂商所能达到的目标是30 min内从30%充电到80%。快速充电会引发电镀锂、电池发热和电池老化等问题,现在的主要解决方案是进行电控系统优化。

1.8 课后练习

1. BEV具有以下要求:平均运行8年,每年24 000 km,每年按365天计算。假设平均电池组输出功率为 $204 \text{ W} \cdot \text{h/km}$,电池额定电压为3.6 V,容量为 $3.4 \text{ A} \cdot \text{h}$,并且寿命指数为 $L=1$ 。假设 $N_{100\%}=1\,000$ (电池在100%的放电深度下能维持1 000次循环)。

- (1)计算BOL存储能量($\text{kW} \cdot \text{h}$)。
- (2)需要多少个电池单体?BOL续驶里程是多少?
- (3)为了将BOL范围增加到425 km,一个更大的电池组需要多少个电池?
- (4)如果电池组中有96个电池串联,需要多少个并联电池串?
- (5)假定电池组的密度为 $150 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$,电池组的质量是多少千克?
- (6)如果峰值功率为325 kW,大电池组的P/E值是多少?

2. PHEV电池组有以下要求:10年运行,平均每天50 km,平均电池组输出 $5 \text{ km/kW} \cdot \text{h}$, 14.6 A 时电池额定电压为3.65 V,寿命指数为 $L=3$ 。假设 $N_{100\%}=1\,000$ (电池在100%的放电深度下能维持1 000次循环)。

- (1)BOL电池组储能是多少?
- (2)所需电池单体的总数是多少?
- (3)如果电池组的形式为3个电池单体并联,然后串联,那么电池组的电压是多少?



(4)如果峰值功率为 110 kW,电池的 P/E 值是多少?

(5)假设密度为 150 W · h/kg,电池组的质量是多少?

3. HEV 镍氢电池组的规格基于以下要求:每年 60 W · h,共 10 年的循环次数为 10 000 次,电池组容量为 6.5 A · h,额定电压为 1.2 V,寿命指数 $L=1.5$ 。假设 $N_{100\%}=1\ 000$ (电池在 100% 的放电深度下能维持 1 000 次循环)。

(1)BOL 电池组储能是多少?

(2)所需电池单体的总数是多少?

(3)如果电池全部串联,电池组的电压是多少?

(4)如果峰值功率为 30 kW,电池的 P/E 值是多少?