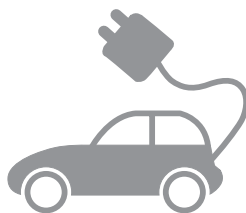


第 1 章



动力电池及其管理概述

发展节能与新能源汽车是国际共识，也是中国的战略性新兴产业和“中国制造2025”确立的重点领域。动力电池系统是新能源汽车技术的发展瓶颈，而动力电池管理技术是保障整车高效、安全和动力电池长寿命运行的核心和关键，也是各国竞相占领的技术制高点。2017年，工信部、发改委、科技部印发的《汽车产业中长期发展规划》中明确提出，“到2020年，新能源汽车年产销达到200万辆，动力电池单体比能量达到 $300\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 以上，力争实现 $350\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，系统比能量力争达到 $260\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，成本降至 $1\text{元}/\text{W}\cdot\text{h}$ 以下”。截至2017年，全球新能源乘用车年销量已达122万辆，增速超过55%。据中国汽车工业协会统计，我国新能源汽车2017年产销量分别达到79.4万辆和77.7万辆，连续三年位居全球第一。2018年1~5月，我国新能源汽车产销均完成32.8万辆，比2017年同期分别增长122.9%和141.6%。显然，我国正逐渐成为国际新能源汽车市场发展的重要角色。

但是，动力电池作为燃油的替代品，循环寿命较低，充电慢，低温放电能力差，衰减程度难以预测，导致用户对续航里程产生焦虑以及在冬季使用感到担忧；在电动汽车上成组使用时，由于单体制造和使用环境差异等原因，电池单体衰减速度和路径不同，单体间不一致性格外明显，动力电池组系统精确状态估计难度大。当部分电池的健康状况急剧恶化时，整个系统的性能会受到影响，并加剧寿命衰减，甚至引发安全问题。因此，加强动力电池电能管理，提升低温快速加热性能，准确预测剩余寿命与提高耐久性，延缓性能衰退，保障预期使用寿命的达成，成为动力电池系统管理的重要内容，是保障新能源汽车市场活力和健康可持续发展的关键，是树立新能源汽车市场信心的基本要求。

1.1

我国新能源汽车的发展规划

百年的汽车产业正在迎来有史以来最大的一场变革，统治汽车产业长达百年之久的内燃机体系正面临巨大的革新。为了抢占科技及市场的先机，全球各国争

相布局电动车辆技术，积极推动新能源汽车产业的投入和扩大。

我国早在 20 世纪 60 年代开始试制电动汽车，但是有碍于当时技术条件及社会环境的限制，只是进行尝试性制造，并未在技术上有所突破。直到 1992 年，“八五”科技攻关项目“电动汽车总体设计”获批立项，我国电动汽车产业研发才正式开始。

“十五”期间，我国开始对电动汽车技术进行大规模有组织的研究开发。2001 年，国家 863 计划“电动汽车”重大科技专项确立了以混合动力汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车为“三纵”，以多能源动力总成控制系统、驱动电机和动力电池为“三横”的电动汽车“三纵三横”研发布局，全面启动大规模电动汽车技术研发，为我国电动汽车发展奠定了技术基础。

“十一五”期间，我国组织了“节能与新能源汽车”重大项目，继续坚持“三纵三横”的总体布局，围绕“建立技术平台、突破关键技术、实现技术跨越”，“建立研发平台、形成标准规范、营造创新环境”和“建立产品平台、培育产业生态、促进产业发展”三大核心目标，全面展开电动汽车关键技术研究 and 大规模产业化技术攻关，并成功开展了“北京奥运”“上海世博”“深圳大运会”和“十城千辆”等示范推广工程。值得一提的是，2007 年国家发改委正式公布了《新能源汽车生产准入管理规则》，首次提出了新能源汽车的概念，认为新能源汽车是指采用非常规的车用燃料作为动力来源（或使用常规的车用燃料、采用新型车载动力装置），综合车辆的动力控制和驱动方面的先进技术，形成的技术原理先进，具有新技术、新结构的汽车。该公告还将新能源汽车分为混合动力汽车（Hybrid Electric Vehicle, HEV）、纯电动汽车（Battery Electric Vehicle, BEV）、燃料电池电动汽车（Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV）、氢发动机汽车、其他新能源（如高效储能器、二甲醚）汽车等，标志着我国开始对新能源汽车的生产企业及产品实施管理和准入制度。

关键零部件技术、整车集成技术和公共平台技术的攻关与完善、深化与升级，形成“三横三纵三大平台”战略重点与任务布局。专项指出，突破动力电池瓶颈是主要任务，还要突破动力电池、电机和电控三个核心技术并实现自主化。2015 年，新能源汽车纳入《中国制造 2025》，并明确了 2026 年动力电池的能量密度将达到 $350\text{W} \cdot \text{h}/\text{kg}$ 的目标。同年，习近平总书记在巴黎气候大会上代表中国所做的减排承诺体现在“十三五”规划及具体行动计划中。

2016 年 11 月，国务院正式发布《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》，再一次明确了新能源汽车、新能源和节能环保等绿色低碳产业的战略地位。要求大幅提升新能源汽车和新能源的应用比例，全面推进高效节能、先进环保和资源循环利用产业体系建设，推动新能源汽车、新能源和节能环保等绿色低碳产业成为支柱产业，到 2020 年，产值规模达到 10 万亿元以上。作为

“十三五”规划中的八大任务之一，新能源汽车发展是国务院关注的重中之重。规划中要求实现新能源汽车的规模应用，并全面提升电动汽车的整车品质与性能。此外，“十三五”规划还明确要求大力推进动力电池技术研发，着力突破电池成组和系统集成技术，推进动力电池梯次利用，并强调开展新能源汽车动力电池提升工程，完善动力电池研发体系，突破高安全性、长寿命、高能量密度锂离子电池等技术瓶颈。由此可见，我国正在不断深入推进动力电池在电动汽车领域的应用发展，努力完善动力电池管理的品质，进而促进汽车产业由大国到强国的成功转型。

1.2 动力电池及管理系统的的核心应用要求

电动汽车的整车性能很大程度上取决于动力电池及其管理系统的性能。为了满足电动汽车的动力性、安全性、经济性以及环境友好性，车用动力电池系统应当满足以下应用要求：

① 比能量高。提高动力电池的比能量能够大大改善目前电动汽车续航里程较短的弱点，同时也有助于减少整车的质量和体积。

② 比功率大。提高动力电池的比功率能够有效改善电动汽车的整车动力性，使其获得优异的加速性能。

③ 使用寿命长。电动汽车 50% 左右的成本来源于动力电池，因此延长动力电池的使用寿命能够大大降低动力电池的使用和维护成本，从而降低整车的成本。

④ 安全性高。能够有效降低因漏液、短路、碰撞等引起的车辆起火爆炸等危险事故的发生概率。

⑤ 可靠性高。提升动力电池应对复杂工况的适应能力，能够有效防止动力电池因工作环境剧烈变化、人为操作失误而导致的电池特性突变。

⑥ 高低温性能好。对于车辆运行环境的改变具有很强的适应能力，能够在较宽的温度变化区间内正常工作。

⑦ 自放电率低。低的自放电率能够降低动力电池在日益老化过程中的容量衰退速率，延长动力电池的使用寿命。

⑧ 价格低廉。降低动力电池的成本能够有效降低整车成本，提升电动汽车的产品竞争力。

⑨ 绿色环保。绿色环保的动力电池有助于动力电池回收再利用机制的规范化，防止动力电池对环境造成二次污染。

目前，商品化的电动汽车动力电池可根据其容量的大小和输出功率的高低划

分为三类：能量型动力电池、功率型动力电池和能量/功率兼顾型动力电池。

① 能量型动力电池通常具有较大的容量，并且可持续供给能量，常用于纯电动汽车和混合动力汽车。这类动力电池的总能量在整车能源配置中占有较大的比例，通常超过 $10\text{kW}\cdot\text{h}$ 。这样不仅有利于回收车辆制动反馈的能量，也可以增加车辆的纯电动续航里程，降低污染物的总排放量。

② 功率型动力电池的容量一般较小，可以满足瞬间大功率供电，常用于轻度混合动力汽车。这类动力电池主要用于吸收制动回馈的能量，同时为车辆启动、加速工况提供瞬间的额外能量。

③ 能量/功率兼顾型动力电池能量密度高，具备低电量区间的大功率输出能力和高电量区间的大功率接受能力，并且具有高能量、大功率兼顾的特性，常用于插电式混合动力汽车（Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV）。

具体来说，不同类型的电动汽车具有不同的构型和工作模式，对动力电池的工作要求也不尽相同。下面分别介绍纯电动汽车、混合动力汽车和插电式混合动力汽车对车用动力电池的具体要求。

1.2.1 纯电动汽车

BEV 是指利用动力电池作为储能动力源，通过动力电池向电机提供电能，驱电机运转，从而推动汽车前进的一种新能源汽车。BEV 的可行驶里程完全取决于动力电池的容量大小。动力电池的容量越大，整车的续航里程就越长，但是动力电池的体积和重量也随之增大。因此，BEV 需要根据设计目标、道路情况和行驶工况的不同来选择相应的动力电池，具体要求可归纳如下：

① 动力电池组应具备足够的能量和容量，确保电池组连续放电的倍率一般不超过 $1C^{\ominus}$ ，峰值放电一般不超过 $3C$ 。对于可回馈制动能量的纯电动汽车，电池组必须可以承受 $5C$ 的脉冲充电电流。

② 动力电池在深度放电时尽可能不影响到使用寿命，必要时可以支持满负荷甚至全负荷放电。

③ 需要配备动力电池管理系统（Battery Management System, BMS）以便反馈和控制电池组的实时状态，确保动力电池组的安全性和高效性。

④ 由于动力电池组的体积和质量较大，电池箱的空间布置和安装都需要进行有针对性的研究和设计。

1.2.2 混合动力汽车

HEV 是将传统内燃机系统与电力推进系统相结合的一种能源混合式的新能

[⊖] 工程上常以“倍率”描述动力电池电流的大小，符号为 C 。例如，对于一个额定容量为 $3\text{A}\cdot\text{h}$ 的动力电池， $3C$ 放电表示放电电流的数值是额定容量的 3 倍，即 $3\times 3=9\text{A}$ 。

源汽车。一般来说，动力电池是 HEV 中电力推进系统的主要能量源。因此，在 HEV 的开发过程中，动力电池的相关设计同样需要经过详细且严谨的考虑。

一般来说，HEV 不需配备容量太大的动力电池，但需要满足整车的瞬间大功率需求，即实现“小电池提供大电流”。与 BEV 不同，HEV 存在串联式、并联式和混联式三种不同的结构形式，因此相对应的动力电池设计要求也有所不同。

① 串联式 HEV 通常由发动机、发电机和动力电池组共同供能，动力电池的荷电状态（State of Charge, SOC）常处于较高的水平。因此，整车对动力电池的要求近似于 BEV，但是动力电池的容量规格要求相对较小。

② 并联式 HEV 的发动机和电机均可直接提供驱动力，不同的动力组合可以满足整车不同的功率需求。因此，整车可以采用容量较小的动力电池，但是电池的最大放电电流要求达到 20C 以上，以满足车辆加速或爬坡的瞬间大功率需求。

③ 混联式 HEV 并非单纯的串联式结构或并联式结构，而是由串联式结构与并联式结构复合而成的综合式结构，兼备了类似于串联式 HEV 和并联式 HEV 的所有工作模式。因此，需要根据实际情况综合考虑串联式 HEV 和并联式 HEV 的动力电池设计要求。

尽管不同类型的 HEV 对动力电池的工作要求各不相同，但归纳起来仍然存在一些共性的要求：

① 动力电池的峰值功率（State of Power, SOP）应足够大，可以满足车辆短时间内大功率充放电需求。

② 动力电池的使用寿命应尽可能长，至少满足约 1000 次的深度放电循环和 40 万次的浅度放电循环。

③ 动力电池的荷电状态应尽量保持在 50% ~ 85% 的范围之内。

④ 需要配备 BMS 以便控制和反馈电池组的实时状态，确保动力电池组的安全性和高效性。

1.2.3 插电式混合动力汽车

PHEV 是一种可以通过插电形式充电的混合动力汽车，同时兼有纯电动和混合动力两种模式，可以简单理解为纯电动汽车和传统混合动力汽车的融合。这类汽车通常要求在纯电动模式下的行驶里程能够达到几十千米，在混合动力模式下能够满足高速公路行驶，并且具备低 SOC 区间下的大功率输出能力。因此，PHEV 动力电池的能量密度要求接近于 BEV，而功率密度要求接近于 HEV。事实上，由于 PHEV 的动力电池要求较高，其售价一般高于 BEV 和 HEV。

1.2.4 相关研发指标

国家“十三五”重点规划明确了动力电池及其管理系统的相关指标，科技部2017年12月发布的《“新能源汽车”重点专项2018年度项目申报指南》中明确指出：

1. 新能源乘用车

动力电池及其管理系统的设计需要满足高安全和高比能，要求动力电池系统的比能量 $\geq 210\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，循环寿命 ≥ 1200 次[80%放电深度(Depth of Discharge, DOD)，模拟全年气温分布]，全寿命周期、宽工作温度范围内SOC、SOP和健康状态(State of Health, SOH)的估计误差绝对值 $\leq 3\%$ ，电池单体之间的最大温差 $\leq 2^\circ\text{C}$ ，快速充电至80%以上SOC状态所需时间 $\leq 1\text{h}$ ，满足安全性等国标要求和宽温度使用范围要求，并符合ISO 26262 ASIL-C功能安全要求及行业标准要求，成本 ≤ 1.2 元/W·h，完成热失控和热扩散事故致灾分析和危害评测，建立基于整车一体化的电池系统的设计、制造与测试规范。

2. 电动客车

动力电池及其管理系统的设计需要满足高安全和长寿命，要求动力电池系统的比能量 $\geq 170\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，循环寿命 ≥ 3000 次(80% DOD，模拟全年气温分布)，全寿命周期、宽工作温度范围内SOC、SOP和SOH估计误差绝对值 $\leq 3\%$ ，电池单体之间的最大温差 $\leq 2^\circ\text{C}$ ，快速充电至80%以上SOC状态所需时间 $\leq 15\text{min}$ ，满足安全性等国标要求和宽温度使用范围要求，并符合ISO26262 ASIL-C功能安全要求及行业标准要求，确保单体热失控后30min内系统无起火爆炸，成本 ≤ 1.2 元/W·h，完成热失控和热扩散事故致灾分析和危害评测，建立基于整车一体化的电池系统的设计、制造与测试规范。

1.3 动力电池

在电动汽车领域，动力电池主要负责提供整车动力。随着动力电池技术的不断革新，动力电池的种类也日渐繁多。作为电动汽车的核心部件，动力电池性能的优劣将直接影响到整车的安全性、经济性和动力性。

1.3.1 动力电池的发展背景

动力电池本质上是一种可充电电池，其发展历史最早可追溯到19世纪。1859年，法国科学家Gaston Planté发明了世界上第一个可充电电池——铅酸蓄电池。该电池以硫酸为电解液、以铅为阳极、以二氧化铅为阴极，其化学反应可以