

电力废弃物资源化及无害化应用技术丛书

动力锂电池 梯次利用与回收处理

王 刚 赵光金 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电力废弃物资源化及无害化应用技术丛书

动力锂电池 梯次利用与回收处理

王 刚 赵光金 吴文龙 李东梅 朱莉娜 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书针对当今节能和环保研究开发领域中最前沿的课题之一,即电动汽车动力电池梯次利用与回收处理基础科学问题的研究和关键应用技术的开发,以过去几年工作中积累的第一手实验数据为素材,以风—光—储微电网示范工程历史运行数据和电池回收处理试验验证数据为依据,全面系统地介绍了电动汽车及动力电池的原理及发展趋势、国家电网公司电动汽车与智能电网发展思路、动力电池梯次利用与回收处理技术及应用实例、梯次利用与回收处理安全共性问题探讨等。

本书内容丰富、通俗易懂,具有较高的参考和实用价值。

本书可供从事动力电池梯次利用与回收处理的技术人员阅读,也可供高等院校和职业院校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

动力锂电池梯次利用与回收处理 / 王刚, 赵光金编著. —北京: 中国电力出版社, 2015. 4

(电力废弃物资源化及无害化应用技术丛书)

ISBN 978-7-5123-5589-7

I. ①动… II. ①王… ②赵… III. ①动力-锂电池-废物综合利用 IV. ①X77

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 035629 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 4 月第一版 2015 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 29.25 印张 704 千字

印数 0001—3000 册 定价 90.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



随着环保问题越来越多地受到更多国家的关注，新能源汽车也不断地在更多的国家被研发推广。作为新能源汽车产业链中的重要组成部分，动力电池发展在提高性能的同时，回收与再利用模式的探索已成为一个不可忽视的问题。目前我国动力电池研究主要集中在提高其安全性能及使用寿命等方面，而回收利用环节却严重脱节。相关资料显示，动力锂电池用于汽车动力只有3~5年的使用寿命，因在其容量衰减至初始容量的80%以下时，电动汽车的续航里程会明显减少，但对于储能系统来说，这些电池仍具有较大的使用价值。再比如，作为动力电池的锂离子电池不含汞、镉、铅等毒害大的重金属元素，但其正负极材料、电解质溶液等物质对环境还是有很大的影响。此外，有研究机构预测，随着电动车需求全面攀升，到2017年锂将供不应求。因此，应及早着手研究动力电池回收及再利用问题。

目前，在国内外还没有一部系统介绍动力电池梯次利用、回收处理及资源化利用的专著，在国内前辈和同行们的支持、鼓励下，我们决定编写一部动力电池梯次利用与回收处理方面的书，我们借鉴公开报道的研究结果和结论，以我们过去几年工作中积累的第一手实验数据为素材，以风—光—储微电网示范工程历史运行数据和电池回收处理试验验证数据为依据，通过细致分析和归纳整理的基础上对这一领域的基础和应用技术问题进行了系统和详细的描述。

本书共分为8章。第1章至第3章是基本概念方面的内容，主要介绍电动汽车发展概况和发展趋势，我国电动汽车发展思路及政策支持，动力电池基本概念、工作原理及分类，国家电网公司电动汽车供电服务模式简介、智能电网发展思路介绍及发展现状简评、新能源电力消纳及储能发展现状概述。

第4章与第5章主要介绍了动力电池梯次利用技术发展思路，动力电池分选方法、寿命预判技术、性能诊断分析方法、电池重组技术及BMS开发、均衡技术与热管理系统，动力电池梯次利用于电力系统储能和电动摩托车应用实例及数据分析，梯次利用技术经济性评估。

第6章主要介绍了动力电池资源化回收与无害化处理技术，相关工艺开发和设备的研制。

第7章与第8章介绍了动力电池梯次利用与无害化处理安全共性问题与防护技术，在梯次利用与回收处理技术应用思路、制度设计、制定与执行等方面的思考。

在本书的编写过程中，得到了中南大学、国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司、河南环宇赛尔新能源科技有限公司、中国科学院物理研究所等单位的支持与帮助，在此表示深深的感谢！

由于我们的水平有限，时间短促，书中错误在所难免，希望本书出版后能够得到国际、国内同行的批评指正，以期有机会改进。

作 者

2015年1月



前言

第 1 章 电动汽车发展概况	1
1.1 电动汽车发展简史	1
1.2 电动汽车车辆类型	4
1.3 电动汽车发展趋势	7
1.4 我国电动汽车产业发展思路及政策支持	13
参考文献	15
第 2 章 动力电池基本概念及分类	17
2.1 化学电源基本构成及工作原理	17
2.2 蓄电池分类	18
2.3 动力电池及电池组	33
2.4 电池基本参数与充放电策略	40
2.5 磷酸铁锂动力电池	43
参考文献	47
第 3 章 国家电网公司新能源汽车及储能技术发展概况	49
3.1 国家电网公司新能源汽车供电服务发展思路与运营模式介绍	49
3.2 国家电网公司智能电网发展思路与发展现状简述	55
3.3 新能源发电与并网技术	65
3.4 电网储能技术	74
参考文献	83
第 4 章 动力电池梯次利用评估技术平台技术与应用	85
4.1 退役动力电池及其梯次利用	85
4.2 退役电池梯次利用信息系统	95
4.3 退役电池分选评估技术	115
4.4 退役电池寿命预判与建模仿真	142
4.5 退役电池性能诊断与分析技术	156
4.6 退役电池重组依据与技术要求	175

4.7	退役电池能量均衡与热管理	193
4.8	退役电池箱体及 BMS 设计	233
	参考文献	251
第 5 章	动力电池梯次利用实例	258
5.1	微电网仿真平台研究	258
5.2	退役电池多维参量分选与目标应用场合	283
5.3	退役电池储能集成与监控系统	293
5.4	退役电池在风-光-储-微电网中的应用	325
5.5	退役电池电动摩托车	357
5.6	其他基于退役电池的储能系统开发与应用	362
5.7	动力电池梯次利用适用性及技术经济性评估	363
	参考文献	396
第 6 章	动力电池资源化及无害化处理	398
6.1	动力电池回收国内外研究背景	399
6.2	动力电池回收预处理	408
6.3	动力电池资源化与无害化处理	411
6.4	“三废”处理与废水“零排放”	416
6.5	电池回收过程二次污染防治	417
6.6	回收处理自动化及机械化工艺设备	418
	参考文献	420
第 7 章	动力电池梯次利用与回收处理安全共性问题	421
7.1	退役电池安全性评估	421
7.2	电池组拆解、重组过程安全性问题	423
7.3	梯次利用过程安全性监测技术	425
7.4	废旧电池安全存储要求	429
7.5	电池回收处理安全防护措施	433
	参考文献	436
第 8 章	动力电池梯次利用与回收处理的市场化发展	437
8.1	“充电”与“换电”模式下动力电池梯次利用与回收处理发展思路探索	437
8.2	退役电池梯次利用-降低电池成本新思路	447
8.3	电池回收处理与循环经济	453
8.4	政策支持与市场化发展制度设计思考	460
	参考文献	461

第 1 章



电动汽车发展概况

1.1 电动汽车发展简史

近年来随着科学技术的不断进步,人类文明得以高速地发展,工业化信息化的程度也在不断加深。但是,科学的发展在给人们的生活带来极大便利的同时也给自然环境带来了严重的破坏。近年来,环境污染事件频发^[1],不仅给社会造成了巨大的经济损失,更是严重影响人们的身心健康。

在众多污染物中,城市汽车尾气是一个重要的方面。在我国随着近年来汽车保有量的急剧增加,汽车尾气排放量也急剧上升^[2-4]。而因汽车数量增加引起的交通拥堵就成了常见现象,这种情况下由于发动机不完全燃烧造成的尾气排放更为严重。据测算,一辆轿车一年排出的有害废气甚至是自身质量的3倍还要多。汽车尾气中含有大量的固体悬浮微粒、一氧化碳、二氧化碳、碳氢化合物、氮氧化合物、铅及硫氧化合物等有害成分。这些气体排放物不仅气味怪异,易诱发头昏、恶心,影响人的身体健康,而且容易引起城市酸雨和雾霾天气。

从2012年入冬以来,全国中东部地区陷入严重的雾霾天气中,道路上能见度不足50m,如图1-1所示,已经严重影响到了人们的生产生活,医院患呼吸道疾病的患者也显著增多。经研究发现,这主要是由于尾气中的固体颗粒污染物PM_{2.5}在特定的大气相对湿度、风速、气温等气象要素的综合作用下形成的^[5]。政府对此也是高度重视,为了解决这方面问题,减少城市中汽车尾气的排放,采取了如城市机动车单双号限行、针对大排量车加收过路费等

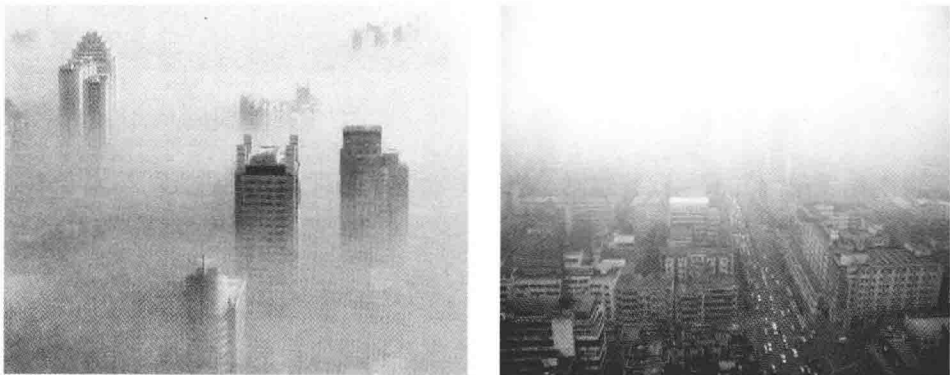


图 1-1 北方雾霾天气中的城市



一系列政策措施。但是这些方法可以说绝大部分都是治标不治本，只有真正减少了化石能源的燃烧才是真正的解决途径。

为此，近年来，人们加大了对于新能源交通工具的开发工作，并且相关研究已经成为了科技能源领域的重点工作。例如：凯迪拉克公司宣布研制出了采用钍燃料的核动力概念汽车，样车正在制造过程中。这时电动汽车再次走入了我们的视野，它在使用过程中主要依赖电力，电能是一种二次能源，这使得对于化石能源的利用由分散的低效的转变为了集中高效的，而且在电动机能量转化过程中，能量的无用消耗也被降到了最低；同时对污染物的处理也能变得更为集中，形成规模化优势，减少对环境的污染。

之所以对电动汽车说“再”字，是因为严格来说电动汽车并不是一个新生事物，它的实际历史要远早于内燃机汽车。追溯电动汽车的发展历史，我们可以回顾到 19 世纪 30 年代初期，早在 1834 年，美国人托马斯·达文波特（Thomas Davenport 1802—1851）通过使用一组不可充电的玻璃封装蓄电池，造出了世界上第一部直流电动车，如图 1-2 所示，虽然他的电动车只能行驶很短的一段距离，但自此开创了电动汽车的历史^[6]。

到了 1837 年，英国人罗伯特·戴维森（Robert Davidson 1804—1894）制作了世界上最初的可供实用的电动汽车。这比德国人戈特利布·戴姆勒（Gottlieb Daimler 1834—1900）和卡尔·本茨（Karl Benz 1844—1929）发明汽油发动机汽车（1886 年）早了近半个世纪^[7]。戴维森发明的电动汽车是一辆载货车：长 4800mm×宽 1800mm，使用铁、锌、汞合金与硫酸进行反应的一次电池，此时的电动汽车在实用性上还受到很大的限制。其后，1881 年，法国人古斯塔夫·图维（Gustave Trouvé 1839—1902）第一次采用铅酸电池（二次电池）来制造电动汽车，如图 1-3 所示。从此开创了应用可以充放电的二次电池作为能源的电动汽车时代。电动汽车真正进入了实际应用的阶段^[6]。

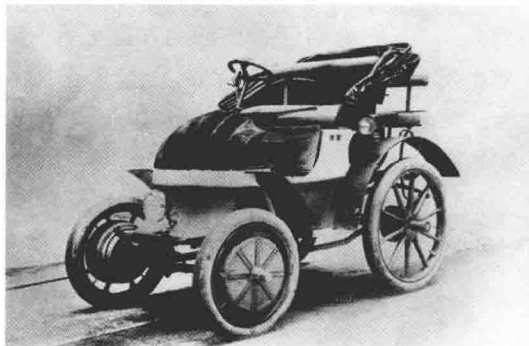


图 1-2 第一部直流电动车

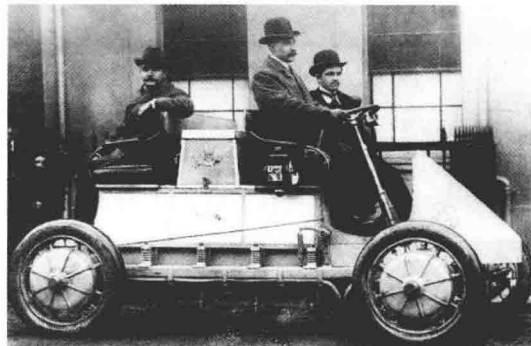


图 1-3 早期的二次电池电动汽车

从一次电池发展到二次电池，这对于当时电动汽车来讲是一次重大的技术变革，由此电动汽车需求量有了很大提高，在 19 世纪下半叶成为交通运输的重要产品，写下了电动汽车在人类交通史上的辉煌一页。

1890—1910 年，可以说电动汽车收获了它黄金的 20 年。在 19 世纪末 20 世纪初迎来经济繁荣的美国和欧洲，人们的收入快速增长，汽车开始流行起来，电动汽车也进入了商用化的阶段，如图 1-4 所示。1899 年和 1900 年，电动车销量远远超过其他动力的汽车^[6]。



图 1-4 20 世纪初使用镍铁电池的商用化电动汽车

该时期，电动汽车相比同时代的其他动力汽车具有非常明显的优势。它们没有振动，没有难闻的废气，也没有汽油机巨大的噪声。汽油机汽车需要换挡，令其操控起来比较繁杂，而电动车不需要切换挡位。虽然蒸汽机汽车也不需要换挡，但却需要长达 45min 的漫长的预热时间。并且蒸汽机汽车加一次水的续航里程，相比电动车单次充电的续航里程更短。由于当时只有城市中才拥有良好路面，大部分时间汽车都只能在本地使用，因此电动车续航里程短的问题并没有成为阻碍其发展的原因。

以美国——这个建立在公路上的国家为代表，电动汽车已经发展得相当成熟了，当时的基本型电动车售价在 1000 美元以下；同时也发展出电动豪华车，它们的外形被设计得非常华贵，拥有宽敞的座舱，座舱内则用上价格不菲的高级材料。在 1910 年时，美国的电动车保有量达到 33 842 辆。这一时期，有 40% 的汽车采用蒸汽机，38% 的汽车采用电力驱动，22% 的汽车使用汽柴油动力。电动车在 19 世纪 20 年代大获成功，销量更是在 1912 年达到了顶峰^[8]。

该时期电动汽车的销售非常好，甚至当时的邮政系统还为此专门发行了邮票。如 1901 年 5 月 1 日，美国为纪念“新 20 世纪泛美博览会”的召开发行了一套名为《电动汽车》的邮票，如图 1-5 所示，见证了这一时期电动汽车的蓬勃发展^[6]。



图 1-5 美发行的“电动汽车”主题邮票

电动车在 20 世纪初迎来成功之后，很快失去了成长的势头。从 20 世纪 20 年代开始，内燃机汽车开始逐步取代电动汽车以及蒸汽汽车，究其原因主要有四点。

(1) 美国、欧洲在城市间建立起良好的公路网络，需要汽车拥有更长的续航里程，而老旧的电池系统无法适应这一新的需要，导致当时的电动车速度低，续航里程短，输给了速度更快，续航里程更长的内燃机汽车；

(2) 美国德克萨斯、俄克拉荷马和加利福尼亚等大油田的发现，以及中东石油的发现与开采降低了汽油价格，令普通消费者也能负担燃油费用，大幅降低了内燃机的使用成本；

(3) 查尔斯·凯特林 (Charles Kettering, 1876—1958) 在 1912 年发明的电力启动系统使得汽油机不再需要人力启动，消除了内燃机汽车使用上的瓶颈^{[9][10]}；

(4) 在高端用车领域，随海勒姆·珀西·马克沁 (Hiram Percy Maxim, 1869—1936) 在 1897 发明了消声器^[11]，大幅降低了内燃机的噪声，使得内燃机汽车同样具有良好的驾驶体验，电动汽车在舒适性上也失去了竞争优势。从此，电动汽车开始逐步退出了历史的舞台。直到如今，内燃机汽车取代电动汽车成为了世界交通的主流。

但是从 20 世纪 70 年代末期，随着新技术的发展及第三次产业革命的到来电动汽车再次迎来了发展的春天^[12]。

1.2 电动汽车车辆类型

从 20 世纪 70 年代起，随着“绿色环保”概念的深入人心，以及高新能源技术的发展、应用和推广，电动汽车再次迎来了新的发展。同时随着电动汽车相关研究的进一步深入，其理论基础，也在经过了近百年的沉淀后进一步完善。

从广义上说：只要是全部或部分使用电力作为驱动力的汽车都算是电动汽车 (Electric Vehicle, EV)。在这一大前提下，人们根据汽车分类依据的不同把电动汽车分为了不同类型。其中比较主流的分类方式是依据动力运行方式的不同，对电动汽车进行了分类，和传统汽车相比较，电动汽车的动力运行方式更为复杂，由单一的发动机转变为多种动力方式配合。依动力方式的不同进行划分，从技术上更能反映车辆的性能本质，利于电动汽车相关技术的研究及应用推广，并已在业界逐渐形成了共识^[13]。

在我国，根据电动汽车术语的要求^[14]，按车载动力系统的不同电动汽车分为纯电动汽车 (Battery Electric Vehicle, BEV)、混合动力汽车 (Hybrid Electric Vehicle, HEV)、燃料电池汽车 (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) 三大类。这一分类方法和国际通用的分类方法是一致的^[15]。

1.2.1 纯电动汽车

纯电动汽车指单一由电动机驱动的汽车，电动机的驱动电能来源于车载的动力电源经逆变器进行转换，如图 1-6 所示，其中动力电源既可以是单一的可充电蓄电池，也可以是由化学电源、太阳能电池、电容器等共同组成的电源系统^[13]。

纯电动汽车因为本身不排放污染大气的有害气体，所以即使按所耗电量换算为发电厂的排放，除硫和微粒外，其他污染物也显著减少。并且电厂大多建于远离人口密集的城市，对



人类伤害也较少。特别是电厂污染物属于固定不动的集中的排放，治理、清除各种有害排放物较容易，已经形成了相对完善的技术。由于电力可以从多种一次能源获得如煤、核能、水力、风力、光、热等，解除了人们对石油资源日见枯竭的担心。此外，电动汽车还可以充分利用晚间用电低谷时富裕的电力充电，使发电设备日夜都能充分利用，大大提高其经济效益。且有关研究表明，同样的原油经过粗炼，送至电厂发电，经充入电池，再由电池驱动汽车，其能量利用效率比经过精炼变为汽油，再经汽油机驱动汽车要高^[16]。因此纯电动汽车的推广有利于节约能源和减少二氧化碳的排放，正是这些优点，使纯电动汽车的研究和应用成为汽车工业当今的一个“热点”。但是对于纯电动车而言，目前对于纯电动汽车而言最大的问题是现在的电源系统，即蓄电池。蓄电池的存储电量和成本限制了纯电动汽车的续航里程和价格，成为发展的最大障碍。比较典型的纯电动汽车，如比亚迪的 F3e，如图 1-7 所示。



图 1-7 比亚迪 F3e 纯电动汽车

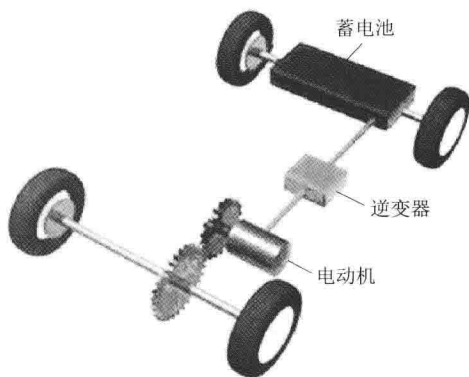


图 1-6 纯电动汽车基本结构示意图

综合来看，纯电动汽车的优点是，技术相对简单成熟，只要有电力供应的地方都能够充电。缺点是目前蓄电池单位质量储存的能量太少，还因电动车的电池较贵，又没形成经济规模，故购买价格较贵。至于使用成本，有些使用价格比汽车贵，有些价格仅为汽车的 1/3，这主要取决于电池的寿命及当地的油、电价格。纯电动汽车的产业化进程受基础设施建设以及价格的影响更为明显，与混合动力相比纯电动车更需要基础设施的配

套。这不是一家企业能解决的，需要各企业联合起来与当地政府部门一起建设，才会有大规模推广的机会^[17]。

1.2.2 混合动力汽车

混合动力汽车指能够至少从下述两类车载储存的能量中获得动力的汽车，一个是可消耗的燃料，另一个是可再充电能/能量储存装置，如图 1-8^[13]所示。

根据动力系统结构形式的不同混合动力汽车又可简单的分为以下三类：

串联式混合动力汽车（SHEV）：车辆的驱动力只来源于电动机的混合动力电动汽车。结构特点是发动机带动发电机发电，电能通过电动机控制器输送给电动机，由电动机驱动汽车行驶。另外，动力电池也可以单独向电动机提供电能驱动汽车行驶。

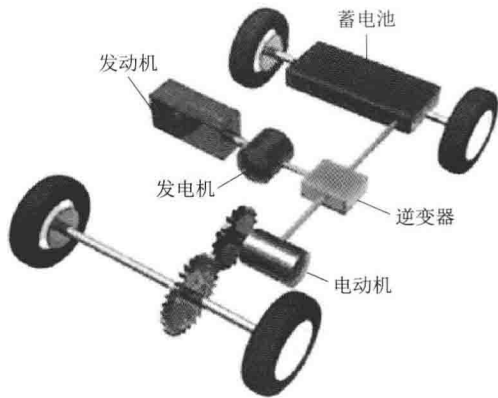


图 1-8 混合动力汽车基本结构示意图

并联式混合动力汽车 (PHEV): 车辆的驱动力由电动机及发动机同时或单独供给的混合动力电动汽车。结构特点是并联式驱动系统可以单独使用发动机或电动机作为动力源, 也可以同时使用电动机和发动机作为动力源驱动汽车行驶。

混联式混合动力汽车 (CHEV) 同时具有串联式、并联式驱动方式的混合动力电动汽车。结构特点是可以在串联混合模式下工作, 也可以在并联混合模式下工作, 同时兼顾了串联式和并联式的特点^[18]。

随着混合动力电动汽车技术的发展, 其类型不局限于以上几种, 还可按照其他形式划分如增程式、插电式等。比较典型的混合动力电动汽车, 如丰田普锐斯, 如图 1-9 所示。

目前的实用的混合动力汽车, 通常采用传统燃料的同时配以电动机或发动机来改善低速动力输出和燃油消耗, 即油主电辅的混合运行模式。随着环保要求的提高及市场的不断推广, 现在混合动力汽车的发展已从原来的汽油混合动力开始向柴油混合动力转变; 并由油主电辅的运行模式向电主油辅过渡。



图 1-9 丰田普锐斯混合动力汽车

综合来看, 混合动力汽车有着以下的优点: 采用混合动力后可按平均需用的功率来确定内燃机的最大

功率, 此时处于油耗低、污染少的最优工况下工作。内燃机功率不足时, 由电池来补充; 负荷少时, 富裕的功率可发电给电池充电。由于内燃机可持续工作, 电池又可以不断得到充电, 故其行程和普通汽车一样。其次, 因为有了电池, 可以十分方便地回收制动时、下坡时、怠速时的能量。再有, 在繁华市区可关停内燃机, 由电池单独驱动, 实现“零”排放。并且, 相比纯电动汽车有了内燃机可以十分方便地解决耗能大的空调、取暖、除霜等纯电动汽车遇到的难题。也可以利用现有的加油站加油, 不必浪费现有投资。能够让电池保持良好的工作状态, 不发生过充、过放, 延长其使用寿命, 降低成本。

但混合动力汽车也有其自身的不足, 如长距离高速行驶基本不能省油。车辆动力系统复杂不利于检修维护等^[19]。

1.2.3 燃料电池汽车

燃料电池汽车是指以燃料电池作为动力电源的汽车。燃料电池的化学反应过程不会产生



有害产物，因此燃料电池车辆是无污染汽车，如图 1-10^[13] 所示。

燃料电池的能量转换效率比内燃机要高 2~3 倍，因此从能源的利用和环境保护方面，燃料电池汽车是一种理想的车辆。单个的燃料电池必须结合成燃料电池组，以便获得必需的动力，满足车辆使用的要求。

近几年来，燃料电池技术已经取得了重大的进展。世界著名汽车制造厂，如戴姆勒、克莱斯勒、福特、丰田和通用汽车公司都宣布将燃料电池汽车投向市场。目前，各大汽车厂商的燃料电池轿车的商业车还正处在试验阶段，市场还只是推出了样车及示范用车；以燃料电池为动力的运输大客车在北美的几个城市中也正在进行示范项目。比较典型的燃料电池汽车，如奔腾 B70FCV 就作为上海世博会示范用车，如图 1-11 所示。

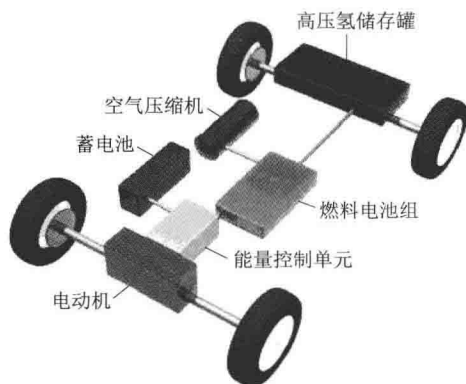


图 1-10 燃料电池汽车基本结构示意图



图 1-11 奔腾 B70FCV 燃料电池汽车

目前，阻碍燃料电池汽车发展和推广的障碍，技术因素还是占主导，市场化仍然存在着挑战：如燃料电池组的一体化，提高商业化汽车燃料电池处理器和辅助部件集成度和减少部件成本等。

综合来说，与传统汽车相比，燃料电池汽车具有以下优点：零排放或近似零排放；减少了机油泄漏带来的水污染；降低了温室气体的排放；提高了燃油经济性；提高了发动机燃烧效率；运行平稳、无噪声。从长远来看将是电动汽车的最终发展趋势^[20]。

1.3 电动汽车发展趋势

汽车是人们生活的重要交通工具，随着人们生活水平的提高，越来越多的汽车开始走入千家万户。但是，汽车的大量使用带来了能源消耗、资源短缺、环境污染等一系列问题，这些问题促使各大汽车公司竞相研制各种新型无污染、低耗能的环保车。而电动汽车是以电能为能源的交通工具，通过电动机将电能转化为机械能，在这一过程没有污染物的排出，这完全符合研制环保汽车的理念。因此，电动汽车作为解决资源短缺，环境污染等问题的重要手段，得到了快速发展。

同时随着科技的发展，特别是新型高能电池技术的发展，使电动汽车的续驶里程大大提高、充电时间大大缩短，更是帮助电动汽车进入了一个新的发展阶段，开始步入实用化。

如今，世界各国在电动汽车的研发布局中，出现了纯电动汽车、燃料电池汽车和混合动



力汽车三个大的研究方向，电动汽车产业化也按这三个方向在一步步迈进。但是，根据各国国情的不同，在电动汽车的发展也形成了各自独特的发展模式^[21]。

1.3.1 国内电动汽车发展

国内电动汽车的研究始于 20 世纪 60 年代，但当时的研究开发都是零散和小规模的，投入也很少。自 1980 年开始，随着第二次全球石油危机的爆发，越来越多的人开始意识到石油资源的有限性，并由此开启了我国电动汽车的研究高潮，电动汽车被国家列为“八五”、“九五”科技攻关项目。国内一些科研院所和生产企业相继开始研究电动汽车，并取得了一些成果。如清华大学研制的 16 座电动中巴车，东风汽车公司研制的电动轿车，华南理工大学研制的轻型电动客车，远望集团公司研制的电动大客车，长江动力公司研制的电动双层大客车等都具有一定的水平，但与国外先进电动汽车相比还有一定差距^[22]。

近几年，我国电动汽车的研究开发工作进入全面发展阶段，电动汽车市场已初露端倪。2001 年 9 月 30 日，科技部组织召开了“十五”国家“863”计划电动汽车重大专项可行性论证会，会议研究通过了电动车专项可行性研究报告，标志着电动汽车专项正式启动，这对我国汽车产业发展有重大战略意义。

因为在电动汽车这一新的领域我们与国外处于相近的起跑线，技术水平与产业化的差距相对较小，如果说在传统内燃机汽车方面我国落后于国外先进水平 20 年左右的话，那么在电动汽车领域只有四五年的差距。因此，把大力发展新一代汽车实现产业化作为促进我国汽车工业实现跨越式发展的战略性举措，就有可能在世界汽车工业新一轮竞争中占领制高点，取得有利地位，提高我国汽车工业的国际竞争力。与传统内燃机汽车相比，电动汽车在国内外仍然处于产业化初期准备阶段，与之相关的高新技术与产品还依赖于配套供应商的支持，尚未形成新的工业体系。同时，在发达国家，传统汽车工业已形成的庞大生产规模和社会基础设施的投入，以及发展的强大惯性，在某种意义上构成了阻碍其发展新一代汽车的社会成本，使他们难以下决心实现根本性的战略转变，从而有可能为我国赢得宝贵的时间。

论证会明确指出我国的电动汽车发展要燃料电动汽车、混合动力汽车、纯电动汽车三种整车技术同步发展，并把多能源动力总成系统、驱动电动机、动力电池三种关键技术的研究列为重点。

2008 年北京奥运会应用了 500 多辆自主研发的电动汽车，发挥了大规模的示范作用，如图 1-12 所示。2010 年上海世界博览会期间也推出了许多新能源汽车的示范车型，如图 1-13 所示。目前，中国已经初步建立了电动汽车的法规、标准与管理体系，为电动汽车的产业化、



图 1-12 北京奥运会电动大巴车



图 1-13 上海世博会电动大巴



商业化发展奠定了基础。地方上对上海、长春、深圳、杭州、合肥五城市私人购买插电式混合动力乘用车和纯电动乘用车给予一次性补贴，最高补贴金额分别达到5万元和6万元。大大的推动了电动汽车的商业化进程。

随着示范运行的持续深入，企业对电动汽车的研发和产业化投入也显著增强，产业化步伐不断加快。为了争取政府的资源和政策倾斜以及“十城千辆”电动汽车示范应用工程的订单，国内各大汽车厂商争先恐后地组建产业联盟，一汽、东风、上汽、长安、奇瑞、比亚迪等都已制定了电动汽车产品研发和产业化规划。与此同时，电池、电动机等电动汽车关键零部件的产业化全面跟进，生产配套能力显著增强。经过不懈的努力，我国汽车研发呈现较好的发展局面，各大汽车厂商也通过积极投入人力、物力研发电动汽车，取得了较好的成绩。但现在国内电动车的发展趋势总体上来说还是以政府鼓励性政策为主导的，市场化的推进还有比较长的路要走^[23]。

1.3.2 国外电动车发展

在美国、日本、欧洲等发达国家，由于新技术发展的推动和政府对于汽车排放越来越苛刻，各大汽车公司也投入了大量的人力、物力和财力用于电动汽车的开发，不断推出自己的新产品。与国内单一依赖鼓励性政策推动不同的是，国外的政策指导更多的是对现有燃油汽车的种种限制，以及商业化的运作，较之国内已形成了一定的市场及产业规模。为了促进电动汽车的发展，有关国家分别制定了一系列政策，如对电动汽车购买者的优惠政策，对燃油汽车使用者的限制政策，还有对科研经费的投入和优惠政策等，这些政策都对电动汽车的发展有很大的促进作用^[24]。

1. 美国

美国由于历史的原因，电动汽车的研究和开发相对较早，且规范化。通过了来自法律、政府的资金和科研力量的支持，已经形成一定的产业规模。1976年7月，美国国会通过《电动汽车和复合汽车的研究开发和样车试用法令》，以立法、政府资助和财政补贴等手段加速发展电动汽车。1990年，加利福尼亚州在为防止大气污染而制定的限制法规中规定：到1998年，“零污染”汽车的销售额要占新车销售额的2%；到2000年，“零污染”汽车的销售额要占新车销售额的5%；到2003年，“零污染”汽车的销售额要占新车销售额的10%，这也从法令上变相刺激了电动汽车的发展。随后，美国东部的10个州也都通过了相应的法规。法规的强力推行，促进了电动车小批量、商业化生产和实践应用。此后，美国还出台了一系列鼓励开发生产电动汽车的政策。这些因素更进一步加快了美国电动汽车产业化的进程，已经取得了一定的成效。

美国三大汽车公司在1991年签订协议，合作研究电动汽车车用先进电池，成立先进电池联合体，同年7月美国电力研究院参加了美国先进电池联合体，1992年，美国电力研究院、克莱斯勒公司与南加州爱迪生公司共同开发50辆电动货车。统计数据表明，到1995年美国有190家电动汽车生产企业，共有电动汽车2000多辆，这其中大型汽车企业起到了主导。

福特汽车公司投资1.5亿英镑开发电动汽车，1993年研制成功，分赴美国各地进行试运行，采用480个钠硫单体电池，取代原来的铅酸蓄电池。福特公司还在德国投资3500万



美元，成立欧洲研究中心，从事环保车的开发和研究，福特公司研制的燃料电池轿车 P2000 是以氢为燃料的电动汽车，它是用“质子交换膜”燃料电池。

通用公司 1990 年在洛杉矶展出“冲击”牌电动轿车，1994 年生产 50 辆。通用公司欧洲分公司还建立了一个全球代用燃料推进中心（GAPC），从事汽车燃料电池技术的开发和研究，他们在 Opel Vauxhall Zafira 轿车上装上燃料电池，采用甲醇作为燃料。戴姆勒·克莱斯勒汽车公司成功利用燃料电池技术，制成首辆可驾驶的零污染环保汽车——NECAR4。该车在充电后可连续行驶 450km，最高时速可达 145km。

出于成本和技术可行性的考虑，美国政府似乎逐渐将重心从清洁能源和燃料电池汽车转向充电式混合动力汽车和纯电动汽车。在奥巴马的倡导下，联邦政府为推进充电式混合动力汽车计划出台了一系列强力的措施，并斥资 140 亿美元支持动力电池、关键零部件的研发和生产，支持充电基础设施建设以及消费者购车补贴和政府采购。美国政府还设立了一个总额为 250 亿美元的基金，以低息贷款方式支持厂商在节能和新能源汽车领域的研发和生产。美国政府的新能源政策，进一步明确了研发汽车新产品的方向和目标。预计到 2012 年，美国联邦政府购车中一半是充电式混合动力汽车或纯电动汽车。到 2015 年，美国本土将有 100 万辆混合动力汽车投入使用^[25]。

2. 日本

从世界范围电动汽车产业化发展现状看，日本也是最早开始发展电动汽车的国家之一。日本国土狭小，石油资源匮乏，几乎完全依赖进口，油价很高。同时，日本工业发达，人口密度很大，城市污染严重。因此，日本政府特别重视电动汽车的研究和开发，很早就对电动汽车的发展做出了具体的布置和计划。日本政府将电动汽车、插电式混合动力汽车、清洁动力车、混合汽车、天然动力车都定义为新的下一代汽车。日本政府对购买环保车的消费者给予补贴，从日本政府对环保车的优惠政策来看，可以享受优惠政策的车型已经超过 160 种，占现在所有销售车型的 80% 以上。

1991 年通产省制动了“第 3 届电动汽车普及计划”，用于推动电动汽车的普及和应用。

1996 年，日本通产省制定的电动汽车购买鼓励政策规定，电动汽车的购买者和租赁企业将获得相当于电动汽车与普通燃油汽车价格之差 50% 的补贴。自 1998 年开始，由日本环境厅提供给地方政府和私人企业的另一项电动汽车购买津贴的补贴额，分别达到了车辆成本的 50% 和 25%。此外，在日本凡购买电动汽车的用户可减免汽车购置税、固定资产税、特别土地保护税等。优惠政策实施后，日本新能源汽车的销量现在出现了回升的势头，尤其是丰田的混合动力型汽车普瑞斯供不应求，年销量在百万辆以上。日本也通过法规刺激市场对电动汽车的需求，这主要体现在实施严格的车辆排放标准和制定严格的排放法规。

东京电力公司 1988 年联合日本电池公司共同开发“Iza”电动汽车，体现了当时最新技术水平：空载量 1573kg，装有 288V 镍镉电池，4 台直流无刷电动机，输出功率为 100kW，最高车速 176km/h，每次充电后可以 40km/h 行驶 548km。日本公司成功研制薄而轻的镍镉电池，用一组超薄电极配以高浓度溶液，散热性能好、质量轻、充电时间短，6min 可充至 40% 的额定容量，15min 完全充满。该电池已在日产公司的未来型电动汽车（FEV）上使用，该车一次充电后，能以 72km/h 的速度行驶 160km。

1976—1991 年日本大发公司生产各种电动汽车 6253 辆，成为拥有电动面包车生产线的