JISHU GEMING ZHI
DIANDONG QICHE GUANJIAN JISHU JIEXI

技术革命之

电动汽车关键技术解析

刘海朝◎著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

需要全本请访问 www.ertongbook.com

技术革命之

电动汽车关键技术解析

刘海朝◎著

藏书专用章

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn
·北京·

内 容 提 要

电动车辆是现代汽车发展的未来趋势，是汽车工业可持续发展的主要方向之一。本书按照当前电动汽车的主流设计理念，力求全面解析电动汽车中涉及的关键技术。

本书主要内容包括电动汽车电机及其驱动技术、电动汽车车载储能技术、电动汽车动力电池管理技术、纯电动汽车技术、混合动力电动汽车技术、燃料电池及燃料电池电动汽车技术、电动汽车的其他技术等。

本书条理清晰，内容新颖，具有较强的可读性及参考价值，可供从事电动汽车技术研究、生产管理、技术服务等方面的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

技术革命之电动汽车关键技术解析/刘海朝著. —
北京：中国水利水电出版社，2017.5

ISBN 978-7-5170-5358-3

Ⅰ. ①技… Ⅱ. ①刘… Ⅲ. ①电动汽车—汽车工程
Ⅳ. ①U469.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 094811 号

书　　名	技术革命之电动汽车关键技术解析　JISHU GEMING ZHI DIANDONG QICHE GUANJIAN JISHU JIEXI
作　　者	刘海朝　著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址：www. waterpub. com. cn E-mail：sales@waterpub. com. cn 电话：(010)68367658(营销中心)
经　　售	北京科水图书销售中心(零售) 电话：(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排　　版	北京亚吉飞数码科技有限公司
印　　刷	三河市佳星印装有限公司
规　　格	170mm×240mm　16 开本　18.25 印张　237 千字
版　　次	2017 年 8 月第 1 版　2017 年 8 月第 1 次印刷
印　　数	0001—2000 册
定　　价	56.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前　言

能源危机和日益严重的环境污染使汽车技术正经历着燃料多元化、动力电气化等重大技术变革。具有高效节能、低排放或零排放优势的电动汽车重新获得了生机，并受到世界各国的广泛重视，是国际节能环保汽车发展的主攻方向。世界上许多国家都开始投入大量资金开发电动汽车。

电动汽车的最大特点是在行驶过程中很少甚至没有排放污染，热辐射低，噪声低且对环境友好。电动汽车可应用多种能源，能节省甚至不消耗汽油或柴油，解决汽车的能源需求问题。毫无疑问，电动汽车是一种节能、环保、可持续发展的新型交通工具，具有广阔的发展前景。

本书着重从电动汽车关键技术入手，给予其理论知识阐述、技术分析、工程设计与实践指导评价，突出业界理论与运用实践的有机结合，使本书具有一定的理论深度及知识普及、技术指导广度。全书共有 8 章，第 1 章介绍了电动汽车的历史、意义、发展现状等内容。第 2 章详细阐述了电动汽车电机及其驱动技术。第 3、4 章介绍了电动汽车储能技术及电池管理技术。第 5～7 章阐述了三类电动汽车的技术，分别为纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池汽车。第 8 章则简单介绍电动汽车的其他技术。

在整个撰写过程中，既坚持注重理论体系的准确完整，更讲求概念清晰，语言精炼，图文并茂，内容深入浅出；既注重围绕主线，简明扼要，凸显主要部分内容，又强调电动汽车关键技术的基本要素，同时展现当今及未来时代对汽车发展需求的趋势，力求在有限的文字篇幅里，体现一个较为完整的电动汽车关键技术

解析。

本书在撰写过程中，引用了电动汽车标准、一些网上的资料和图片以及相关参考文献中的部分内容，特向其作者表示深切的谢意。

由于作者学识有限，书中有不当之处在所难免，恳盼读者给予指正。

作　者

2017 年 1 月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

前　言
第 1 章　电动汽车概述 …… 1
1.1　电动汽车发展历史 …… 1
1.2　电动汽车的定义、特点与种类 …… 5
1.3　电动汽车的关键技术 …… 7
1.4　我国发展电动汽车的意义及具有的优势 …… 12
1.5　电动汽车工业和技术的发展现状及未来发展方向 …… 14
第 2 章　电动汽车电机及其驱动技术 …… 16
2.1　电动汽车的车用电机概述 …… 16
2.2　直流电动机 …… 17
2.3　三相异步电动机 …… 26
2.4　永磁无刷直流电动机 …… 31
2.5　永磁同步电动机 …… 39
2.6　开关磁阻电动机 …… 43
2.7　电动汽车驱动电动机调速控制技术 …… 52
第 3 章　电动汽车车载储能技术 …… 58
3.1　车载储能装置概述 …… 58
3.2　电动车辆对电池性能的要求 …… 62
3.3　蓄电池 …… 65
3.4　锂离子电池 …… 81
3.5　超级电容器 …… 98
3.6　飞轮储能的相关理论及应用 …… 102
第 4 章　电动汽车动力电池管理技术 …… 108
4.1　动力电池管理系统的功能和拓扑结构 …… 108

4.2 动力电池数据采集方法 …… 114
4.3 动力电池电量管理系统 …… 121
4.4 动力电池组的均衡控制和管理 …… 126
4.5 动力电池组热管理 …… 129
4.6 动力电池的电安全控制 …… 133
第 5 章 纯电动汽车技术 …… 146
5.1 纯电动汽车概述 …… 146
5.2 纯电动汽车的结构原理与特点 …… 152
5.3 纯电动汽车的核心技术 …… 163
5.4 纯电动汽车制动能量回收系统 …… 166
5.5 纯电动汽车的充电技术 …… 170
第 6 章 混合动力电动汽车技术 …… 181
6.1 混合动力电动汽车概述 …… 181
6.2 混合动力电动汽车的结构原理 …… 183
6.3 混合动力电动汽车的关键技术 …… 197
6.4 混合动力电动汽车能量管理与控制策略 …… 202
6.5 混合动力汽车节能技术 …… 211
第 7 章 燃料电池及燃料电池电动汽车技术 …… 224
7.1 燃料电池电动汽车概述 …… 224
7.2 燃料电池 …… 227
7.3 燃料电池电动汽车组成、原理与特点 …… 232
7.4 燃料电池电动汽车动力系统 …… 234
7.5 燃料电池电动汽车能量控制策略 …… 244
7.6 国外燃料电池电动汽车的研究进展 …… 245
第 8 章 电动汽车的其他技术 …… 252
8.1 电动汽车的电动转向系统 …… 252
8.2 电动汽车电机制动和再生制动技术 …… 257
8.3 电动汽车的电气安全技术 …… 270
8.4 电动汽车的混合电源技术 …… 272
参考文献 …… 282

第 1 章　电动汽车概述

电动汽车是一种电力驱动的道路交通工具。这个概念包含广泛，包括纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车等。

1.1　电动汽车发展历史

19 世纪末，由于多种可充电电池的大量生产和应用，电动车辆在一些工业化国家流行起来。法国的电动汽车一直保持着世界电动汽车行驶里程和车速的最高纪录。然而电动汽车的黄金时代仅仅维持了 20 多年，由于汽油的质量能量密度是电池的 100 倍，体积能量密度是电池的 40 倍，因此，电动汽车续驶里程短、充电时间长成为无法与内燃机汽车相抗衡的致命因素。1913 年，福特(Ford)建立了内燃机汽车生产线，内燃机汽车进入了标准化、大批量生产阶段。

从 19 世纪末到 20 世纪初，在欧美等发达国家的新兴城市里，电动汽车、内燃机车及蒸汽机车已经逐步取代了传统的马车、自行车。电动汽车变得流行起来，并进入了一个商业化的发展阶段。美国、英国和法国先后涌现了一批著名的电动汽车制造公司，如最早的电动汽车制造厂 Morris 和 Salom 电动客车和货车公司，以及 Pope 制造公司、Riker 电动汽车公司、BGS 公司等，甚至英国伦敦的电动出租车公司也生产了 15 辆电动汽车。到 1912 年，美国约有 34000 辆注册的电池电动汽车，几乎涵盖了各种车

型。这一时期也成为早期电动汽车发展的全盛时期。

在第一次世界大战后，电力牵引技术应用的重点开始转移到了公共交通领域，如火车、有轨电车和无轨电车。随着内燃机汽车设计和制造技术的发展，在很多地区，有轨电车和无轨电车也逐步被柴油驱动的内燃机汽车取代了。一方面是由于电动汽车技术多年没有大的进步，车速低、加速度小；另一方面是由于其使用区域受限以及电力供应网络和建设维护费用偏高。

第二次世界大战后，欧洲和日本的石油供给紧张，电动汽车在局部地区出现了复苏迹象。1943 年，仅仅在日本就有 3000 多辆电动汽车处于注册状态。20 世纪 40 年代，电动汽车续驶里程只有 50～60km，最高时速仅为 30～35km/h，其性能仅能满足短途、低速运输的需要。

1988 年，在美国洛杉矶地区的市议会上曾有人提出，引入国际竞争机制，进行年产 10000 辆电动车辆，包括 5000 辆卡车和 5000 辆两座乘用车并推向市场的计划。继洛杉矶倡议之后，1989 年 12 月 13 日，加利福尼亚州空气资源委员会(CARB)对汽车排放制定了规划，该项规划要求到 20 世纪 90 年代末，在加利福尼亚州销售的所有车辆中，有 2%要符合零排放标准。满足该标准的车辆只能是纯电动汽车或氢燃料电池电动汽车。随后，美国纽约、马萨诸塞等州也颁布了类似的法律。

至于混合动力电动汽车，其历史也与其他类型的汽车一样悠久，第一辆油电混合动力电动汽车在 1897 年由美国费城电池公司首席工程师 J. B. Entz 制造，但可惜的是，在进行试验测试时，由于电火花引燃了油箱而导致整辆汽车报废。在 1899 年的 Paris Salon 展览会上首次出现了两款混合动力电动汽车——比利时 Pieper 制造公司的并联混合动力电动汽车以及法国 Vendovelli 和 Priestly 电动汽车公司制造的串联混合动力电动汽车。

燃料电池的思想最早是 W. Grove 于 1839 年提出的。但直到 1889 年，C. Langer 和 L. Mond 才设计出第一块具有实用价值的燃料电池。1911 年，美国人 Kettering 发明的燃油汽车电起动

器使燃油汽车更具吸引力，这也使电动汽车的发展遭受了一个巨大的挑战，而 H. Ford 公司大规模生产工艺的进步，使每辆福特 T 型车的价格从 1909 年的 850 美元锐减到 1925 年的 260 美元，更加速了电动汽车的消失。因此，在 20 世纪 30～60 年代，电动汽车步入了冬眠期。

1959 年，H. K. Ihrig 第一次将燃料电池作为一种全新的电力能源系统应用于电动汽车的驱动。随后在美国宇航局的推动下，燃料电池迅速发展，并成功应用于多个太空项目。进入 20 世纪 60 年代，内燃机汽车大批量使用导致了严重的空气污染，不仅如此，更严重的是内燃机汽车对石油的过分依赖，也导致一系列的政治问题和国家安全问题的发生。

20 世纪 70 年代初，中东爆发的石油危机迅速蔓延至全球，一场能源革命随之到来。这场石油危机，让靠燃油生存的普通汽车第一次面临着新的挑战。对于普通汽车来说，燃油是唯一的驱动能源，没有了石油，汽车就变得“寸步难行”。于是，各国政府和科研人员不得不重新思考和寻找新的能源以及相应的载体。电动汽车由于接近零污染，电动机比内燃机简单可靠，电动机的转速和转矩也比内燃机更易控制等因素，重新进入了各国政府和科研人员的视野，电动汽车也由此重新复苏。在 1976 年，美国颁布了关于电动汽车的研究、开发和应用的法律规范。同时，欧洲、亚洲等各国也逐渐投入大量人力物力开始重新致力于电动汽车的开发和研究。美国三大汽车制造商通用、福特和克莱斯勒都开发了相应的电动汽车，欧洲和日本的汽车制造商也不甘落后，各种类型的电动汽车重新上路。在学术界，全面研发电动汽车的时机亦已到来，各国的科研机构和大学纷纷投入大量人力物力，开发与电动汽车相关的技术，为电动汽车的发展铺下了坚实的基础。

但是，在电动汽车还没有全面商用化之前，20 世纪 70 年代末和 80 年代，由于能源危机和石油短缺问题得到缓解，政府机构更多地提倡汽车制造商加大燃油的利用率和减小污染排放，所以电动汽车的商用化也失去了动力，电动汽车的发展又变得缓慢，再

次步入低谷。

为了满足电动汽车发展的需要，促进动力电池的发展，美国的三大汽车公司成立了美国先进电池联合会(USABC)，提供巨额资金着重开发与电动汽车配套的动力电池，美国先进电池联合会中长期开发指标见表 1-1。

表 1-1　美国先进电池联合会中长期开发指标

性能指标	单位	中期	过渡期	远期
质量能量密度(3h 率)	W·h/kg	80～100	150	200
体积能量密度(3h 率)	W·h/L	135	230	300
质量功率密度(80%DOD/30s)	W/kg	150～200	300	400
体积功率密度(80%DOD/30s)	W/L	250	460	600
循环次数(80%DOD)	次	600	1000	1000
寿命	年	5	10	10
正常充电时间	h	6	6	4
充电效率	%	40	50	60
快速充电时间	min	＜5	＜20	＜20
充电效率	%	75	80	80
工作温度	℃	－30～60	－30～65	－40～85
连续放电 1h 率	额定容量%	70	75	75

1991 年，可充电的锂离子蓄电池问世。1995 年，日本索尼公司首先研制出 100A·h 锂离子动力电池并在电动汽车上应用，展示了锂离子电池作为电动汽车用动力电池的优越性能，引起了广泛关注。到目前为止，锂离子动力电池被认为是最有希望的电动汽车用动力蓄电池之一，并在多种电动汽车上推广应用。近年推出的电动汽车产品绝大多数都采用锂离子动力电池，形成了以钴酸锂、锰酸锂、磷酸铁锂为主的电动汽车锂离子动力电池应用体系。

其他电池如锌空气电池、钠硫电池等，在过去的 100 年中在电动汽车上也有所应用，但由于其电池的特性、价格、制备工艺等

需要全本请访问 www.ertongbook.com

问题，均未成为电动汽车应用电池的主流。

2003年，以色列Bar-Ilan大学的D. Aurbach团队研究出极具潜力的充电镁电池。作为主要原材料的镁具有资源丰富、价格低廉、无环境污染并且加工处理方便等优点，因而充电镁电池被认为是未来很有发展前景的电池材料。如今锂空气、锂硫电池等新型高能动力电池不断见诸报道，可以想象，随着技术的进步，动力电池必将向高比能量、高比功率、长寿命、低价格、安全可靠的方向发展。

1.2　电动汽车的定义、特点与种类

1.2.1　电动汽车的定义和特点

按照GB/T 19596—2004《电动汽车术语》的规定，电动汽车(Electric Vehicle，EV)是纯电动汽车、混合动力(电动)汽车、燃料电池电动汽车的总称。电动汽车不仅是交通工具，而且是一个新的社会高科技系统体现的集合体。

与传统汽车相比，电动汽车具有如下优点：

①能量利用率高。

②可利用的能源途径多。

③环境污染小。

④噪声小。

1.2.2　电动汽车种类

电动汽车种类繁多，按驱动类型可分为纯电动汽车、混合动力汽车、燃料电池汽车等。

1.纯电动汽车

纯电动汽车是一种零污染或超低污染的车辆，没有噪声和振动，操作性能好，是当前开发和研制取代内燃机汽车的首选车型。

纯电动汽车发展至今，种类较多，按照用途不同分类，纯电动汽车可分为电动商用车、电动乘用车和特种车辆三种：

①电动商用车，指的是中大型电动汽车，包括电动公交车、电动环卫车、电动邮政车、电动洒水车等。

②电动乘用车，主要指小型电动汽车，包括出租车和私人电动汽车。

③特种车辆，为特种场合使用的电动汽车，如高尔夫球场用电动汽车、广场用电动汽车等。

2.混合动力汽车

混合动力汽车是在找到理想的高比能量和高比功率的车载电源之前，纯电动汽车的发展暂时受到阻挠而发展起来的新型车型，混合动力汽车既是一种过渡型车型，也是一种独立型车型。

3.燃料电池汽车

燃料电池汽车是以燃料电池作为动力电源的汽车。与传统汽车相比，燃料电池汽车具有以下优点：

①排放量低，对环境污染小。

②有效避免了机油泄漏造成的污染。

③降低了二氧化碳的排放。

④提高了燃料的使用效率。

⑤运行平稳，无噪声。

表 1-2 所示是三种类型电动汽车的比较。

表 1-2　三种类型电动汽车的比较

比较项目	纯电动汽车	混合动力电动汽车	燃料电池汽车
能源形式	电能	燃油(汽、柴油)； 电能(插电式)	氢气、甲醇等
储能装置	动力蓄电池、超级电容器、飞轮电池及其组合	动力蓄电池、超级电容器等	燃料电池及燃料电池和其他车载储能装置组合
驱动方式	电机驱动	内燃机驱动；电机驱动	电机驱动
主要特点	零排放；续航里程短	低排放、低油耗；续驶里程长；结构复杂	零排放或超低排放；效率高；成本高
应用状况	有销售	销售量相对大	研发中

1.3　电动汽车的关键技术

电动汽车的关键技术包括车身技术、底盘技术、电池技术、电动机控制技术、能量管理系统技术和安全防护技术。车身和底盘技术是汽车的通用技术，而电池技术、电动机技术及其控制技术则是电动汽车所特有的技术。只有将相关的技术全面整合，并且控制好成本，这才是电动汽车技术成功的核心。现代电动汽车的核心技术可以归纳为以下几个方面。

1.3.1　电池技术

目前，由于电池生产技术水平的限制和使用过程中的过充电和过放电等不当操作，使得成组应用的单体电池的容量、内阻、充电接受能力，以及自放电率等性能差异在整个生命周期中客观存在，在使用中有些性能差异会逐渐加大，个别电池性能衰减加剧，

引发部分电池的过充电、过放电、超温和过电流等问题，进而导致电池组寿命缩短，甚至发生燃烧、爆炸等严重安全事故。因此，必须对成组应用的电池进行检测和管理，使电池组的各项性能指标达到或者接近单体电池的平均水平，避免电池组提前失效。

一般而言，单体电池的电压和容量等不能满足电动汽车的行驶要求，实际使用时需要将电池串联组合以获得更高的工作电压，将电池并联组合以提高电源的容量。电池单体是最基本的电池单元，为了方便安装、运输、使用，可将多个电池单体串联或并联形成电池模块。电池模块构成电池组的方式有串联方式、并联方式和同时采用串联和并联的混联方式。

成组应用时，电池单体、模块和电池组的性能有明显差异，从电池单体到电池模块再到电池组，性能会明显衰减。电池组的输出能量、比功率等参数往往达不到单体电池的水平，使用寿命更是较单体电池缩短数倍甚至十几倍，从而导致系统使用和维护成本增加，安全性和经济性下降，成为制约动力电池推广应用和产业发展的关键问题。

动力电池的成组应用性能是影响电动汽车动力特性和行驶特性的关键因素。随着电动汽车的示范运行逐步推进，各种相关技术迅速发展，动力电池在电动汽车上成组应用的问题凸显出来。

影响电池成组特性的主要因素有如下四个方面。

1. 不一致性

单体电池性能的不一致是影响电池成组应用特性的主要原因。电池的不一致性是指规格型号相同的单体电池在电压、内阻、容量等参数中存在差异。由于单体电池容量存在差异，容量小的单体电池在充电过程中过早进入过充电状态，在放电过程中则过早进入过放电状态。随着连续的充放电循环，对于单体电池而言，每次过充电、过放电程度更甚于单体电池独立使用，而一个单体电池特性恶化时，会导致电池组其他单体电池发生多米诺骨

牌效应式的连锁反应，从而使电池组过早失效，影响电池组使用寿命。

(1)内阻不一致的影响

电池内阻不一致时，串联电池组放电过程中内阻大的电池能耗较高，产生大量热量，局部温度持续升高会导致电池变形甚至爆炸等严重后果。充电过程中，内阻大的电池先达到允许电压限值，不得不在未充满时即中止充电。并联电池组充放电过程中，由于电池内阻不同，单体电池分配的充放电电流不同，相应的充放容量也不相同，会影响电池组的能量特性和寿命。

(2)电压不一致的影响

由于单体电池的电压不一致，在并联电池组中，会发生电池间的互充电，造成能量损耗，达不到预期的能量输出。电池的充放电过程都受终止电压限制，串联电池组中，由于电压不一致，充电过程中，电压大的单体提前达到充电终止电压，为了避免过充电，整个电池组充电就会终止，使充电性能下降。同样的，放电过程中，电压小的单体提前到达终止电压，使用中电池组的放电性能因而受到影响。

(3)容量不一致的影响

同一规格的电池有相同的最佳放电率，由于容量的不一致，不同电池的最佳放电电流不同，放电深度也不相同。而充电过程中，容量小的电池将提前充满，为使电池组中其他电池充满，小容量的电池必将过充电，充电后期充电电压偏高，甚至超出电池充电截止电压，形成安全隐患，影响整个电池组充电过程。

2. 充放电率

充放电率不仅直接影响电池的极化情况从而影响电池的使用寿命，也会因为高倍率下引起电池发热、温度升高而影响电池的使用寿命。使用过程中的充放电方式、放电深度、放电功率等都会影响电池的性能。通常小电流充放电情况下电池一致性较好，大电流放电情况下电池一致性变差。特别是过充电、过放电，

会更大程度增加电池的不一致性。对于阀控铅酸电池，过充电造成的严重失水和电化学腐蚀，会使电池寿命严重下降；对于镍氢电池和锂离子电池，过充电不仅会严重伤害电池，甚至可能会产生燃烧、爆炸等严重问题。

3. 环境温度

电池的实际容量、能量、功率和自放电率等性能随环境温度不同会发生变化，电池在其最佳工作温度区域表现出良好性能，电池的寿命与电池的温度以及充放电倍率有着密切的关系，环境温度过高或过低都会对其性能及寿命产生不利影响。以锂离子电池为例，电池的温度过低，会导致锂离子在电极材料、电解液以及隔膜之间的电导率降低，造成锂离子的脱嵌能力下降，从而导致电池即使在常规的工况下工作也会产生较为严重的极化，产生不可逆的反应，从而影响电池的使用寿命；电池的温度过高，会导致电极材料、电解液、隔膜的不稳定并引发不可逆的副反应的发生，从而影响电池的使用寿命。对于镍氢电池，相同充电条件下，电池组的荷电状态会随着温度的升高而下降。

4. 连接方式

电池的连接方式对电池组的连接可靠性和电池一致性有巨大的影响。

①并联组中，电池会发生互充电现象，当并联组中一节电池电压低时，其他电池将给此电池充电。这种连接方式，在低压电池容量小幅提高的同时，高压电池容量急剧降低，能量将损耗在互充电过程中而达不到预期的对外输出。

②串联组中，由于单电池电压不一致，电压差的累计有逐步增加和相互抵消的情况。

综合考虑连接可靠性和连接方式对电池性能的影响，电池组应采用先并联后串联的方式。

需要全本请访问 www.ertongbook.com