



"十二五"国家重点图书出版规划项目
新能源汽车研究与开发丛书

电动车辆能量 转换与回收技术

Electric Vehicle Energy Conversion
and Recover Technologies

李永(Li Yong) 宋健(Song Jian) 著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



“十二五”国家重点图书出版规划项目
新能源汽车研究与开发丛书

电动车辆能量转换与回收技术

Electric Vehicle Energy Conversion and Recover Technologies

李 永 宋 健
(Li Yong Song Jian) 著

机械工业出版社

本书论述了电动车辆能量传输与回收技术,是电动车辆领域的一部学术专著。全书共8章。前4章介绍了电动车辆能量传输理论、纳米能源传输技术和电动车辆能量传输测试系统等,重点介绍的能量传输技术包括电磁传输技术、纳米能源技术与微系统技术等。后4章介绍了电动车辆能量回收技术,包括制动能量回收技术与压电能量回收技术等。本书以电动车辆能量技术为核心,重点围绕电动车辆的能源传输与回收技术问题,阐述了电动车辆的关键能源技术。本书具有完整的理论体系和脉络,为电动车辆的发展提供了技术支持。

本书可以作为高等学校车辆、机械、机电、力学及宇航等专业的本科生和研究生的教材或教学参考书,也可作为相关工程技术与研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电动车辆能量转换与回收技术/李永,宋健著. —北京:机械工业出版社,2015.12

(新能源汽车研究与开发丛书)

ISBN 978-7-111-51956-0

I. ①电… II. ①李… ②宋… III. ①电动汽车-能量转换-研究②电动汽车-回收技术-研究 IV. ①U469.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第256693号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:何士娟 责任编辑:何士娟 孙鹏

版式设计:霍永明 责任校对:肖琳

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京富生印刷厂印刷

2016年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·12.25印张·238千字

0 001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-51956-0

定价:59.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

能源和环境问题是当今世界汽车行业面临的巨大挑战，巨大的市场需求与严峻的能源环境约束之间的矛盾尖锐，研究替代传统能源的电动车辆，发展电动车辆关键技术就显得很迫切。高功率密度、高能量密度能量系统是电动车辆是否可以真正替代传统能源体系的重要标志。能量传输与回收技术是电动车辆的核心技术，该技术减少了电动车辆对环境的污染和对能源的消耗。高效、安全的能量传输与回收技术成为电动车辆发展的助推器。

本书是作者对近年来有关电动车辆能量传输与回收技术系统的研究，加以提炼和总结撰写而成的。书中既有电动车辆上较为成熟的技术，还充分融入了国内外该领域研究的最新成果。主要内容包括：电动车辆能量传输微系统机理、磁电能量传输技术、纳米能量传输技术、电动车辆制动能量回收系统、实验与策略和压电能量回收技术等。

本书在简略介绍有关电动车辆能量理论的基础上，详尽地介绍了电动车辆能量传输与回收技术的实验装置、测试方法、控制策略与分析方法。在内容选材上突出了工程背景、实用性和新颖性，力求对读者有所启迪。

本书由北京理工大学李永、清华大学宋健著。

本书的全部工作得到汽车安全与节能国家重点实验室开放基金的滚动资助，有关电动车辆能量传输技术的工作得到国家自然科学基金（10972037）资助，在此衷心感谢。

本书中引用的文献、报告与资料尽量在参考文献中做了说明，并表示感谢。由于工作量较大及作者不详，对没有说明的文献作者表示歉意和感谢。

电动车辆能量传输与回收技术正在蓬勃发展，本书中一些关键技术还处于研究中，希望读者能提出和发展新技术。

由于作者水平有限，难免有不当和疏漏之处，欢迎读者不吝指正。

作者

2015年11月于美国
休斯顿大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 快速充电模型与技术	4
1.2 无线充电关键技术	5
1.3 传输效率关键技术	10
1.4 电池能量管理系统	12
1.5 制动能量回收技术	14
1.6 压电能量回收技术	15
参考文献	18

IV

第 2 章 电动车辆能量传输微系统与微结构机理	20
2.1 电动车辆能源传输微系统机理	20
2.2 应力/快速温升下电池电极位错/应力电极/空洞耦合能量传输技术 ..	24
2.3 非平衡状态下位错/应力迁移/裂纹耦合能量传输定量微尺度表征	26
2.4 位错/应变/空洞耦合能量传输失效表征与加载技术	30
2.5 前景与展望	32
参考文献	32

第 3 章 电动车辆磁电效应能量传输模型与能量系统设计	36
3.1 磁电能量传输模型	36
3.2 磁电能量传输系统锂电池传输能量系统磁电效应模型	39
3.3 磁电能量传输系统耦合设计	42
3.4 磁电能量传输系统锂电池实验表征	44
3.5 结论与展望	49
参考文献	49

第 4 章 电动车辆能量传输纳米能源系统与模型	51
4.1 纳米能源系统传输基本模型	51



4.2	纳米结构耦合缺陷与纳米能源传输系统	54
4.3	Si 电极的缺陷与失效机制	59
4.4	碳电极系统耦合模型与纳米尺度传输机制表征	64
4.5	前景与展望	66
	参考文献	67
第 5 章 电动车辆制动系统电磁能量回收技术		72
5.1	电磁系统结构设计	73
5.2	电磁制动能量回收系统的电磁机理	75
5.3	阀腔流场分析	78
5.4	电磁阀的动态响应特性实验测试	83
5.5	电磁阀动态力学模型	88
	参考文献	94
第 6 章 电动车辆制动能量回收系统实验技术		96
6.1	制动能量回收实验系统与实验方法	96
6.2	BERS 的动态特性分析	99
6.3	BERS 的能量传递特性实验	103
6.4	制动能量回收的动态传输实验	108
	参考文献	113
第 7 章 电动车辆 BERS 的控制策略		116
7.1	制动能量回收系统的结构分析	116
7.2	制动能量回收系统的基本理论	118
7.3	制动能量回收系统的力学模型	120
7.4	制动能量回收系统的主动控制策略	123
7.5	制动能量回收系统的综合控制策略	135
7.6	基于制动能量回收的热力学理论	142
	参考文献	145
第 8 章 电动车辆压电能量回收技术		147
8.1	电动车辆固态压电能量系统回收模型与技术	150
8.2	高比能量压电能量回收电池系统的无序结构模型	152
8.3	压电能量系统回收的智能平台	154
	参考文献	163



附录	165
附录 A 电动车辆能量传输与回收技术实验设备简介	165
附录 B 电动车辆整体宏观运行状况	174
附录 C 电动车辆能量传输结构	180
附录 D 电动车辆能量传输与回收硬件设计	185

第1章 绪 论

随着汽车保有量的不断增长，汽车工业在世界经济发展中的地位越来越突出，已成为现代经济支柱产业之一，并对世界经济的发展和社会的进步产生巨大的作用和深远的影响。随着石油资源逐渐短缺，扭转目前以石油为主的能源利用格局，实现能源多样化成为未来汽车工业发展的趋势。混合动力系统已从原来发动机与电机离散结构向发动机电机和变速器一体化结构发展，即集成化混合动力总成系统。混合动力汽车是传统内燃机汽车与电动车辆相结合的产物，它继承了电动车辆低排放的优点，又发挥了石油燃料高的比能量和比功率的优点，显著改善了传统内燃机汽车的排放和燃油经济性，增加了电动车辆的续驶里程，在由内燃机汽车向电动车辆的转变过程中扮演着重要的角色，如图 1-1 所示。电池是混合动力和纯电动车辆的关键部件之一。锂电池目前尚处于研究改进和迅速发展阶段，其主要优势在于具有较高的比能量，可以使电池更小、更轻；具有较好的充放电效率和低的自放电率，可以提高电池的能量效率，具有较大的潜在降价空间。从技术上来看，电动车辆中许多类型已经成熟，完全可以进行大规模生产。但电动车辆产业化的最大难题通常是成本，由于传统汽车经过长期发展，具有显著的规模经济和相关产业链支持，而电动车辆在其发展初期面临着规模较小、上下游产业链不完整等因素，导致电动车辆的成本通常较高。特别是电池技术滞后于电动车辆总体技术的发展，电池的能量密度、功率密度、循环性能、安全性能与倍率性能都急需迅速提高。

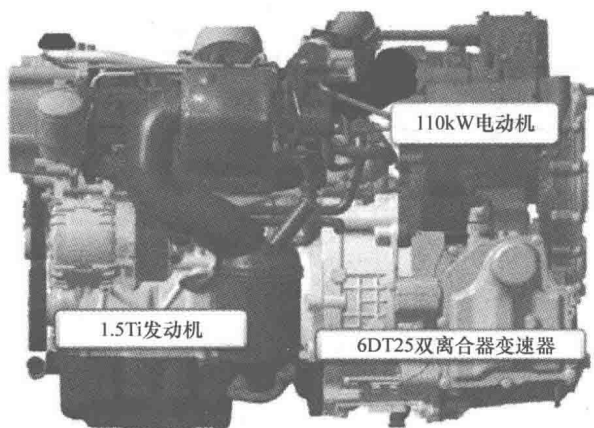


图 1-1 混合动力车辆发动机结构示意图，包括内燃机与电动机及匹配系统



在人类社会可持续发展的进程中，我们的日常生活一直都在排放二氧化碳(CO₂)。随着人类社会的发展，人口的增加与经济的增长等必将使CO₂排放增加。工业与交通领域能源燃料燃烧也是产生CO₂排放的重要原因之一，特别值得关注的就是车辆领域，传统内燃机车辆与电动车辆的CO₂排放对比示意图如图1-2a所示。科学家们认为CO₂过度排放已经并将继续为地球和人类带来灾难，因

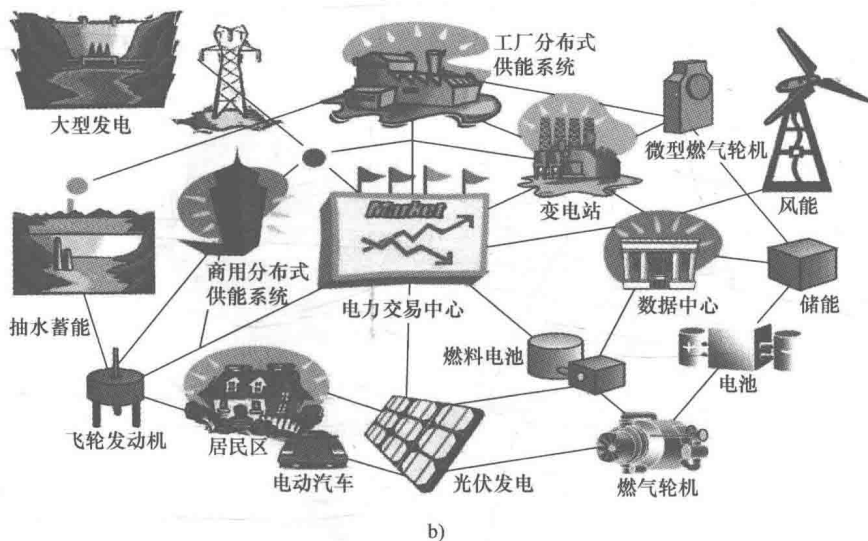
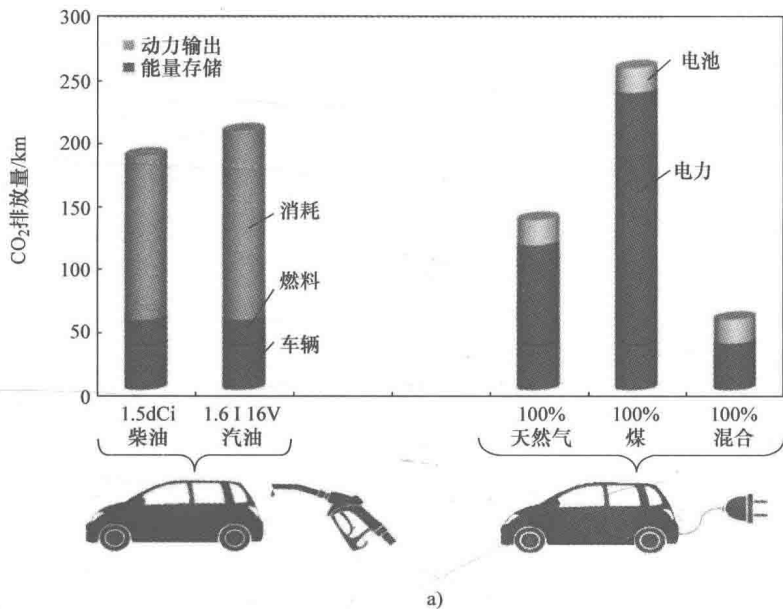


图 1-2 电动车辆系统宏观能量排放与传输示意图

a) 内燃机与电动车辆 CO₂ 排放对比图 b) 电动车辆能量传输构架的设计模型



此,控制和减少 CO₂排放量是全球可持续发展共同面临的严峻挑战。随着电动车辆技术的发展,如何通过新技术来节能减排,成为目前全球瞩目的可持续发展能源技术新亮点。现代工业和电动车辆等对可持续能源的应用需求激增,目前电动车辆发展的重点是内燃机与电池共同作为动力源的混合动力汽车、纯电动车辆和燃料电池汽车。技术研发将围绕混合动力汽车、纯电动车辆和燃料电池汽车展开。从发电结构来看,纯电动汽车所需要的电能短期内仍然主要由煤炭、水电转化而来,二者之和所占的比重超过 90%,煤炭、水电相比其他发电方式仍具有明显的成本优势,因此短期内纯电动车辆所需要的能源主要仍由煤电和水电来提供。现代工业、电力与电动车辆系统等能量传输构架的设计模型示意图如图 1-2b 所示。可以看出,人们在拓宽可持续能源应用领域的进程中,越来越重视新技术对可持续能源系统的节能减排与多样化设计。如何研发替代传统能源的可持续发展新能源,对电动车辆等现代工业显得尤为迫切,势在必行。

2015 年,世界电动车辆产量增长约 3%,其中 80% 增量来自中国。中国电动车辆的快速发展引起了全球电动车辆产业的关注。根据中国电动车辆技术和市场的现状、面临的困难和发展的趋势,得出电动车辆锰酸锂与磷酸铁锂电池的综合性能与效益,如图 1-3a 所示,有助于电动车辆的工程师、销售经理以及供应商抓住目前中国电动车辆发展的机遇,推动电动车辆的迅速发展。2014 年我国汽车销量为 7.46 万辆,同比上升 424%。其中纯电动车销量为 4.5 万辆,同比上升 321%,如图 1-3b 所示。随着越来越多消费者对电动车辆的认可及充电设备的普及,车辆充电不再是一个难题,未来中国的电动车辆销量将进一步攀升。

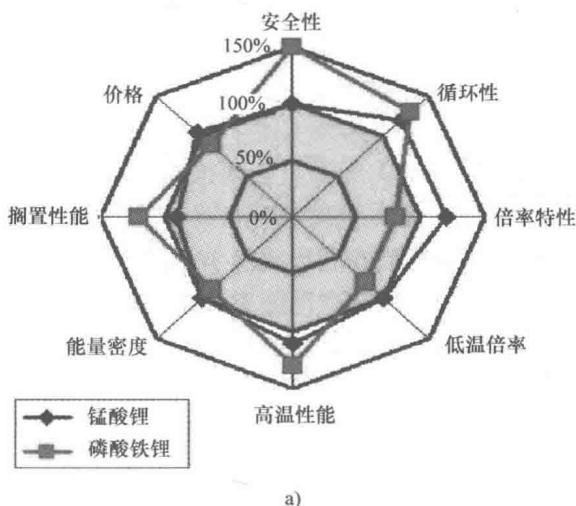
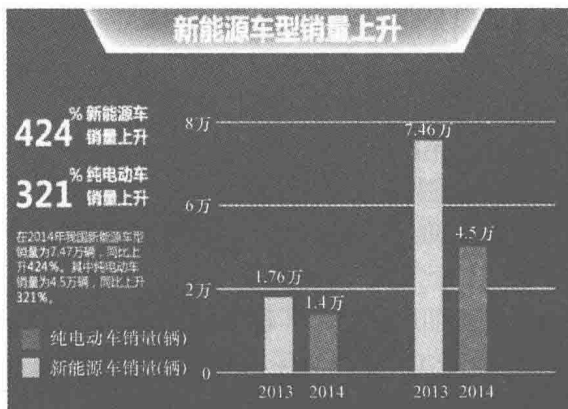


图 1-3 电池综合效益与电动车辆销量示意图
a) 锰酸锂与磷酸铁锂电池的综合性能与效益示意图



b)

图 1-3 电池综合效益与电动车辆销量示意图 (续)

b) 目前电动车辆的销量

从新能源电池材料的发展来看，电动车辆拉动作用巨大。从电池正极材料来看，几乎所有的正极材料产能都是比较充裕的，中国正极材料出货量占了全球的50%，但是产品层次相对不高。以电动车辆为代表的电动交通工具市场对锂离子电池的需求增长最快，占比从2013年的22%增长到2015年的35%。2014年该市场锂离子电池需求量590.77万kW·h，其中电动车辆325.20万kW·h，占比55.05%。2015年该市场锂离子电池需求量1144.34万kW·h，其中电动车辆642.16万kW·h，占比56.12%。2015年各种材料成本占比：正极材料58.80%，负极材料10.16%，电解液7.49%，隔膜14.98%，其他材料8.58%。

1.1 快速充电模型与技术

快速充电也是现在电池技术的难题。电池损耗的重要原因是在充放电过程中，正负电极在吸收和释放电解质里离子时自身的膨胀和收缩。在充放电过程中，电极纳米粒子会相对统一地吸收和释放离子。但是如果只有少部分粒子吸收了所有离子，电极就会加速损坏，减少电池寿命。学者们利用不同的电流对电池组进行不同时间的充电，然后迅速将它们分离并阻止充电/放电过程，还将电极切成薄片，并利用同步加速X射线检测。科学家对锂电池电极里微小粒子行为的研究显示，对电池快速充电，然后用于高功率快速耗电的工作，对电池的损伤没有人们预想的差，而缓慢充电和耗电所带来的益处可能也被过度夸大，快速充电电池电极里微小粒子模型如图1-4所示。这项结果挑战了有关快速充电比缓慢充电对电极要求更高的观点。科学家可能改变电池电极或改变充电方式，以提升统一的充电和放电过程，从而延长电池寿命。在充放电过程中电极变化细节只是



确定电池寿命的众多因素之一，但这一因素在这项研究之前尚未被完全理解。他们发现了电池老化的新证据，可优化商业锂电池氧化物和石墨电极。他们研究了上千个电极纳米粒子，在不同条件下对充放电过程进行详细分析，获得充放电过程中动态表征，如图 1-4 所示。在保证较长电池寿命的前提下，这表明优化电极可实现更快的充放电速率。通过上千次循环运行电极，能够拍摄电池在充放电过程中的实际情况，这个过程在同步加速器同 X 辐射源里进行。他们正与工业界密切合作，探寻如何在电动车辆领域应用快速充电。

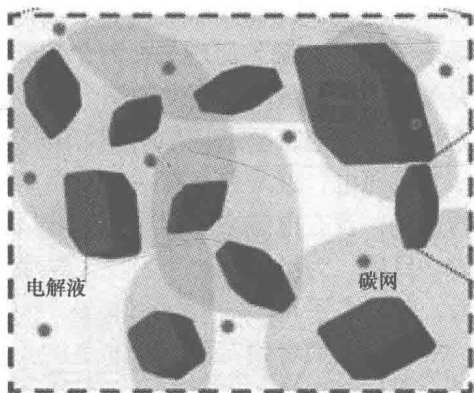


图 1-4 快速充电过程电池动态模型

科学家研制了纳米多孔电池，只需 12min 可完全充满，较目前长达数小时的充电周期大幅缩短。这种电池内部纵向排列了数以百万计的纳米孔，每一纳米孔均内含固态电解质，两端作为阴阳极，也就是说，每一个纳米孔都是一个微型电池，它们组成纳米阵列进行充放电。研究人员将能量存储材料覆盖在纳米孔的两端，然后加入电解质，使每个独立纳米孔都成为一个电池。其最大优势在于能够快速充电，并且储存能量将提升 10 倍，在快充状态下能循环 7000 次，该电池相比传统电池，不仅容量大，而且充电速度大幅加快，循环寿命长。这将给电动车辆带来重大创新。

1.2 无线充电关键技术

近年来，全世界对电动车辆的设计和制造等都提出了更高的要求，对加强电动车辆技术的要求日渐增长，但是，在电子电磁器件增加的同时，电器配线和各种信号配线也越来越多，许多电动车辆的线束重量和线束直径已分别达到甚至超过了 50kg 和 16cm，车内电线总长度可能超过 10km。由于导线太多，严重地干扰了电动车辆零部件的设计、布局和制造，另外，给电动车辆的维修也带来许多不便，还制约了电子电磁技术在电动车辆上的广泛应用。在这种情况下，研究人员一直知道如何在不使用电线的情况下输电。他们利用了“共振”原理，当送电方的电源接通后，两个线圈都以 10MHz 的频率振动，从而产生强大的电磁场，送电方发出的电磁振动即可传到受电方。两个线圈虽未相连，仍可完成隔空供电，使灯泡发光。即使在电源与灯泡中间摆上木头、金属或其他电器，灯泡仍会



发亮。“无线输电”技术的突破之处在于，找到了“抓住”电磁波的方法，即利用物理学的“共振”原理——两个振动频率相同的物体能高效传输能量。因此，研究人员先将能量囤积在发送端，而共振频率相同的接收端靠近时，这些能量就会通过共振效应将电流传送到接收端，最终实现电力的无线传播。

无线充电，就是通过电磁的转换，将之前通过电缆进行传输的电能取消物与物的连接，没有电缆之间的连接，就给了电动车更多的自由度，这是电动车最需要的。目前，为了解决这个困境，采用二次能量存储和携带来供应电动车的运行动力，现在炙手可热的特斯拉汽车，也无法避免自己底盘周围庞大数量的电池布置。所以，我们看到大家对于电池发展的期待是非常高的，把“远程无线充电”列成一项值得期待的未來汽车变革技术，当然这项技术和目前的无线充电技术有没有关系、有着什么样的关系，还很难界定，或许我们目前能够看到的电磁世界对于支撑远程无线供电还不具备可能性，但是物理界以及相关的设备制备方面，这方面的能力仍然不可小视，这种可能性随时可能发生。如果远程供电不具备，则在一段路上铺设无线充电设备，电动汽车在这条路上行驶的过程中，就可以充电——这个技术难度有限，可能成本也比较高，但这种办法可以越过汽车电池的束缚。电动车如果少了电池有线充电这个包袱，一方面整体的成本可以降低，同时重量也可大幅度下降，更为重要的是，消费者担心的着火等事情跟电动车辆就基本上脱离了关系，这些车辆比现有车辆更为安全，这才是人们真正期待的电动车辆，也是无线能量传输技术的特色。

无线充电技术，源于无线电力输送技术。无线充电，又称为感应充电、非接触式感应充电，是利用近场感应，也就是电感耦合，由供电设备（充电器）将能量传送到用电的装置，该装置使用接收到的能量对电池充电，并同时供其本身运作之用。因为充电器与用电装置之间以电感耦合传送能量，两者之间不用电线连接，所以充电器及用电装置都可以做到无导电接点外露。无线充电技术的商用为现有插电和换电模式之外新增了一种电动车辆充电模式，其工作原理主要是电磁感应，主要由地面能量发送模块和车载能量接收模块等组成，充电功率可以达到3~300kW，从插座到电池的端到端充电效率可达90%以上，如图1-5所示。来自电网公司的交流电在地面能量发送模块里被转换为几十千赫的电磁能，穿过地面与车底盘之间的空气间隙被装载于车底部的能量接收模块感应接收，之后再转变成为车载电池充电所需的电能。地面能量发送模块可以地埋，不影响路面的通过性，支持在都市核心区域利用现有路面和停车场进行改装建设大功率无线充电设施，可以有效提升新能源公交线路的系统投资效率和社会效益。该技术能够对加速电动车辆充电基础设施建设产生革命性推动作用，成倍提升投资效率，解决在都市核心地带大量建设充电设施的老大难问题。并且，公交车在改造过的停车位停靠后就可以进行充电，无须人工插拔充电枪，完全不受泥沙和水浸的影



响。大功率无线充电解决方案优点总结为：站不征地、车不增负、充不动手、路不白跑、电不过放。

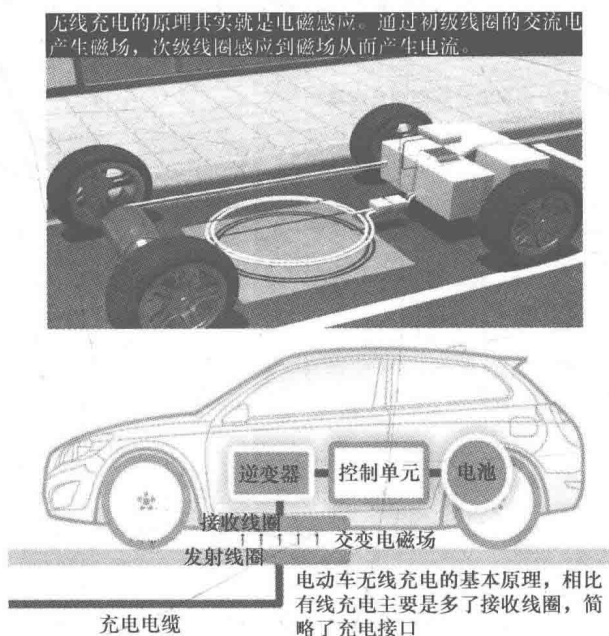


图 1-5 电动车无线充电技术原理

无线充电主要分为以下三种。

电磁感应式充电：初级线圈中一定频率的交流电，通过电磁感应在次级线圈中产生一定的电流，从而将能量从传输端转移到接收端，如图 1-6 所示。目前最为常见的充电垫方案就采用了电磁感应，事实上，电磁感应解决方案已在电动车辆技术上实现，如图 1-7 所示。

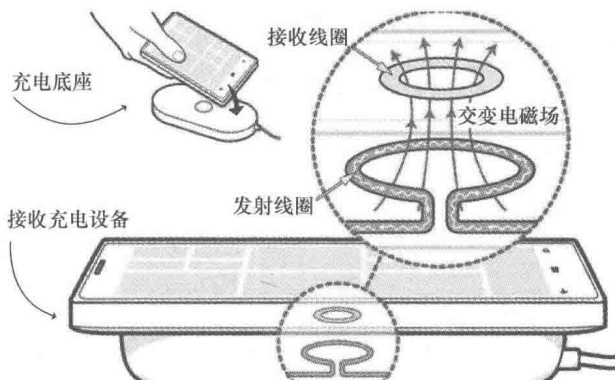
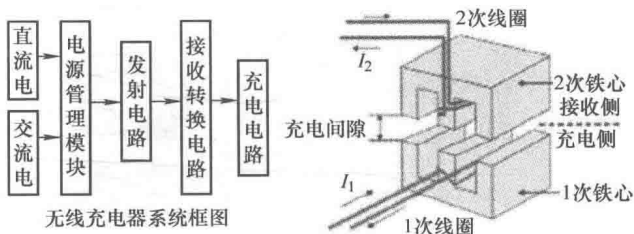


图 1-6 电磁感应系统



磁场共振充电：由能量发送装置和能量接收装置组成。当两个装置调整到相同频率或者说在一个特定的频率上共振时，它们就可以交换彼此的能量，是目前正在研究的一种技术，如图 1-8 所示。如果线圈尺寸缩小，则接收功率也会下降。

*电磁感应式充电系统框图及应用



无线充电器系统框图

*电磁感应式充电

接收线圈附着于电子设备的充电电池上
 充电板内嵌入很多形状各异的线圈，以便在充电板的各个方向上建立磁场
 置于充电板磁场中的接受线圈产生感应电流

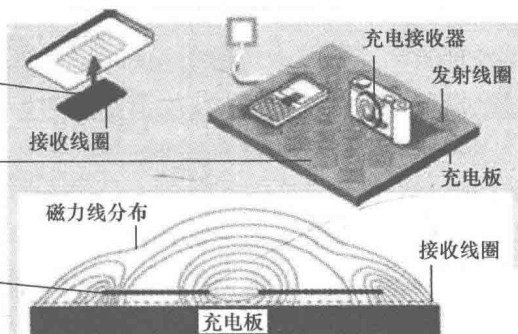


图 1-7 电磁感应逻辑结构

◆ 磁场共振

注：共振频率接收器

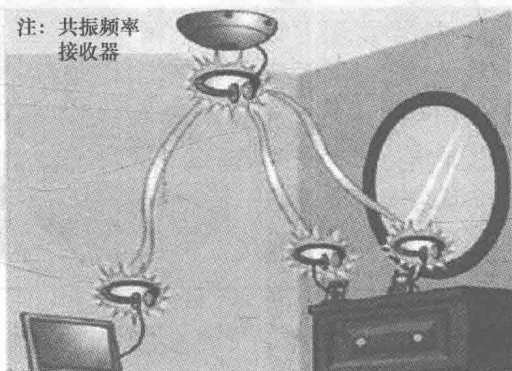


图 1-8 磁场共振模式



无线电波式充电：这是发展较为成熟的技术，类似于早期使用的矿石收音机，主要由微波发射装置和微波接收装置组成，可以捕捉到从墙壁弹回的无线电波能量，在随负载做出调整的同时保持稳定的直流电压。此种方式只需一个安装在墙身插头的发送器，以及可以安装在任何低电压产品的“蚊形”接收器。如图 1-9 所示。



微波通信现在很常见，而加大发射功率和方向性之后，实现远距离无线能量传输也是可行的，也许未来电动飞车也能这样充电。

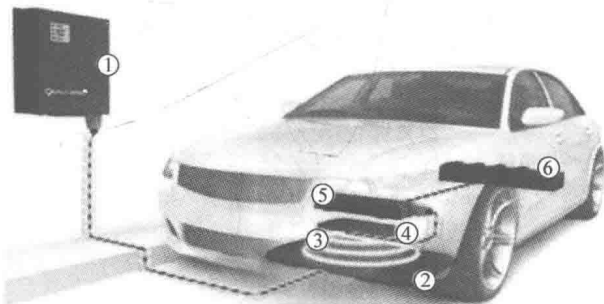


图 1-9 电波充电原理

1—供电组件 2—充电板 3—电磁波 4—车载接收版 5—车载控制器 6—电池组

因为磁共振过程中能量的损失要低于电流在传统线缆中的损耗，所以无线充电的效率非常高，可以达到 90% 以上，超过了线缆充电。未来无线充电将用于更加广泛的环境中，以实现车辆的半动态及动态充电。要想实现这个目标，需要在城市道路中埋设大量的充电板，当车辆在充电板上驶过时，便可以进行连续的充电，最理想的状态是，驾驶人可以在行驶中将电池组充满。当然，想要实现这个目标，人们还需要在技术、安全、标准、成本和政策等方面进行更加深入的努力，但这样的未来确实值得人们期待。无线充电和当年的无绳电话一样，短距离的无线充电意义不大，但由短距离开始，从开始的无绳电话到最后的手机，以及当下的移动互联网，这个改变需要时间的积累。但是，很多人可能已经考虑到一个难题，电动车辆的充电站如何建设，如果电动车辆想要普及的话，城市居民



居住的小区如何去建设充电站，首先车位不足，然后是有车位的如何进行充电桩的改建，建设一个充电桩以及改动相关线束确实存在困难，无线充电技术还没有能力去实现远程充电，但中距离的充电已具备。我们提出了快速无线充电技术系统的解决方案，如图 1-10 所示。系统由外层的整车稳定性控制器和内层的 4 个控制器组成。

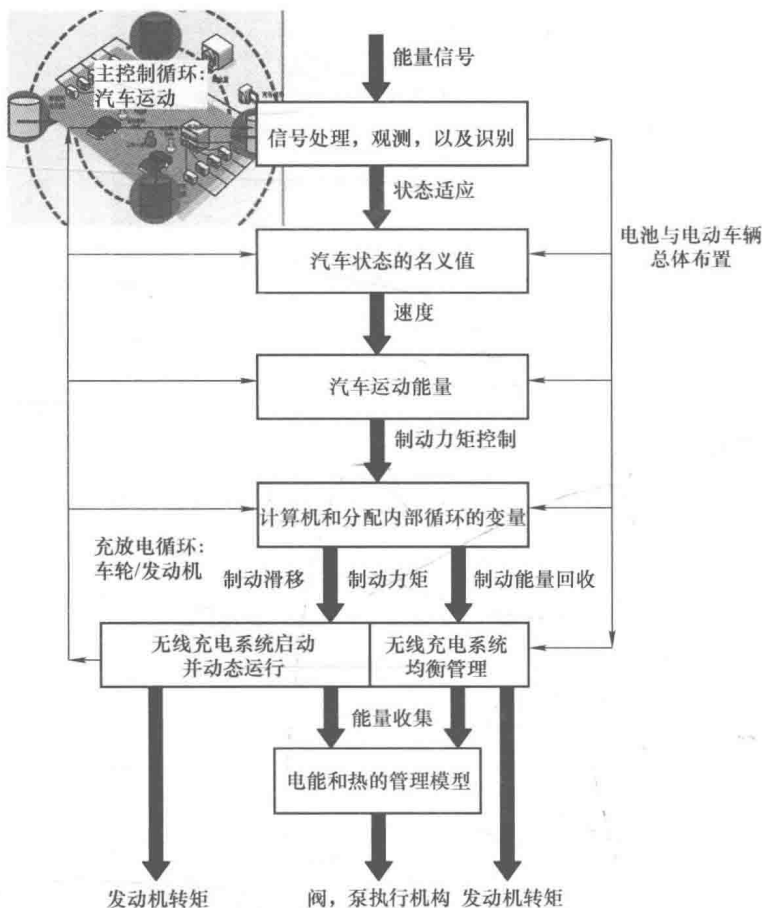


图 1-10 快速无线充电技术总体解决方案

1.3 传输效率关键技术

传输效率是所有无线充电都面临的问题，对于电动车辆这样充电功率更大的能源系统来说更是如此——电能首先转换为无线电波，再由无线电波转换成电能，这两次转换都会损失不少的能量——这与本身就是绿色、环保的电动车来