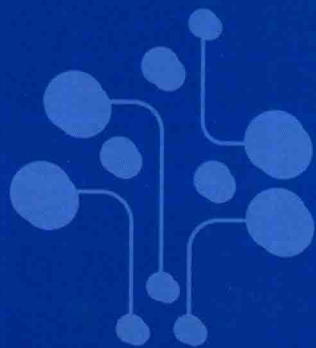


WIRELESS POWER TRANSFER TECHNOLOGY

无线电能传输技术

戴欣 孙跃 唐春森 王智慧 苏玉刚 / 著



科学出版社

科学出版社
科学出版社
科学出版社

科学出版社
科学出版社
科学出版社

无线电能传输技术

戴欣 孙跃 著
唐春森 王智慧 苏玉刚

科学出版社

北京

内 容 简 介

无线电能传输技术是一种实现电能以无线的形式由供电设备向用电设备传输的新兴技术,是当前物理科学、电气工程等领域研究的热点。本书是一本比较全面的无线电能传输技术专著,主要介绍了重庆大学无线电能传输技术研究团队近年来研究成果。内容包括:无线电能传输技术概述,系统基本结构及工作原理,电能变换拓扑,统磁耦合机构,系统建模方法,非线性行为分析方法,磁路机构设计,系统综合控制与优化及参数优化设计。

本书适用于无线电能传输技术的研究者、教师以及研究生,也适用于从事本领域研究的工程师与开发者。

图书在版编目(CIP)数据

无线电能传输技术/戴欣等著. —北京:科学出版社, 2017.1

ISBN 978-7-03-051000-6

I.①无… II.①戴… III.①无导线输电 IV.①TM724

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 287632 号

责任编辑:杨 岭 朱小刚 / 责任校对:邓利娜

责任印制:余少力 / 封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第一版 开本: B5 (720×1000)

2017年1月第一次印刷 印张: 10

字数: 200千字

定价: 69.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

19 世纪，伟大的发明家尼古拉·特斯拉发明了交流电，开启了人类的电气化时代。电力的产生、传输以及推广应用，一直是电气工程界以及其他工程领域和人类社会大力关注并着力发展的科学技术内容和应用技术领域。然而，截至目前，电力的传输以及电力应用的最后 1m 接入方式，均为有线传输方式和接入模式。这种“有线”传输和接入方式存在着诸如空间占用、使用环境的局限性、传输与接入过程的可靠性以及大量的资源浪费等问题。几乎是在交流电发明的同期，其发明人——尼古拉·特斯拉就开始思考并着手进行“电力的无线传输”的探索和研究，提出了无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术。

进入 20 世纪后叶，随着电磁理论和实用技术、电力电子技术及电能变换装置技术的发展和普及，WPT 技术重新进入人们的视线。特别是，随着无线通信技术及设备的广泛使用，现代人类充分享受到“无线”给日常生活、生产工作以及学习娱乐带来的乐趣和便利，更是激发了人们对电力无线传输和电源的无线接入的追求。电能的“无线”应用，成为现代人类一个美好的梦想与追求。WPT 技术及其推广应用，已经成为当下世界工程领域以及电气工程学术界的研究和实用技术开发的一项重大课题。

作为一个有着较好理论和技术基础、短期内得以快速推广应用的 WPT 技术的分支——基于磁场耦合原理的 WPT 技术，即感应耦合电能传输技术(ICPT 技术)以迅猛的发展态势，走进人们的生活和社会各个领域。特别是 2007 年，美国麻省理工学院的物理学助理教授马林·索尔贾希克和其研究团队在期刊上发表的文章，让人们看到利用磁耦合技术实现一定空间尺度的电能无线传输的可能性，极大地激发了人们对基于磁场耦合原理实现电能无线传输的信心和期待。从而，掀起了全球性的无线电能传输技术的研究与开发以及推广应用的热潮。

重庆大学无线电能传输技术研发团队于 2002 年开始 IPT 技术的全面系统研究，紧密围绕 IPT 传能机理与系统模式、高频谐振电能变换拓扑与优化、IPT 系统建模方法及非线性动力学行为研究、频率与输出功率的稳定性、能量双向传输、磁耦合机构设计技术及优化技术等方面进行了较为深入的研究，为 IPT 技术的推广和应用做了大量的工作。特别在家电及消费电子无线供电、电动车无线充电/供电、石油钻井系统随钻机构非接触电能传输等领域取得了大量的应用成果。

创立了具有自身特色和自主知识产权的理论技术体系，为 WPT 技术的发展及推广应用奠定了坚实基础。

本书是重庆大学无线电能传输技术研发团队十余年专注于 IPT 技术及系统实现的理论研究成果的全面盘点和展示，力图从传输机理与新型系统拓扑探索、系统建模与优化理论、磁耦合机构优化设计技术与实现、系统非线性问题与分析理论、传能过程优化控制理论与技术等几个方面全面系统的总结团队的研究成果。

我们希望，这本书能为广大无线电能传输技术爱好者和学者提供一定的参考与借鉴，为发展我国无线电能传输技术，特别是基于磁耦合原理的无线电能传输技术的发展做出我们的贡献。

在本书出版之际，作者特别感谢新西兰奥克兰大学 Aiguo Patrick Hu 教授为本书所做出的辛勤工作，本书从撰写及出版都离不开他的指导和建议。

此外，叶兆虹博士承担了第 4 章的撰写工作，李艳玲博士承担了第 7 章的撰写，李小飞博士和蒋金橙博士参与完成了第 5 章的撰写工作，余嘉副教授与朱婉婷讲师承担了第 2 章与第 3 章的撰写工作，邹洋与黄永灿硕士参与了第 8 章的撰写工作。在此一并感谢！

鉴于作者水平及时间有限，不妥之处在所难免，欢迎读者提出批评和建议。

重庆大学无线电能传输技术研发团队

2016 年 10 月 · 于重庆

目 录

第1章 绪论	1
1.1 无线电能传输的发展进程	1
1.2 无线电能传输系统的分类	2
1.2.1 利用电磁能进行能量传递	2
1.2.2 利用机械能进行能量传递	4
1.3 无线电能传输技术的研究现状	4
1.3.1 国外研究现状	4
1.3.2 国内研究现状	6
1.4 无线电能传输技术的应用	7
1.4.1 电动交通工具领域	8
1.4.2 家电及消费电子领域	9
1.4.3 生物医药领域	10
1.4.4 厂矿移动吊装领域	11
1.4.5 特殊应用领域	12
1.5 本章小结	13
参考文献	14
第2章 无线电能传输系统基本结构及工作原理	16
2.1 无线电能传输系统基本结构	16
2.2 无线电能传输系统的工作原理	19
2.3 本章小结	21
参考文献	21
第3章 无线电能传输系统基本电能变换拓扑	22
3.1 原边高频电能变换拓扑	22
3.2 原、副边谐振电路拓扑	26
3.2.1 基本无功补偿拓扑	27
3.2.2 混合型拓扑	31
3.3 副边输出调节电路拓扑	32
3.3.1 WPT系统常见的副边输出调节电路拓扑	32

3.3.2	WPT 系统常见的副边输出调节电路拓扑对比	40
3.4	本章小结	40
	参考文献	41
第4章	无线电能传输系统磁耦合机构	43
4.1	磁耦合机构的分类及特点	43
4.1.1	静止式无线电能传输电磁机构	43
4.1.2	滑动式无线电能传输电磁机构	44
4.1.3	旋转式无线电能传输电磁机构	44
4.2	磁耦合机构的建模	45
4.2.1	磁耦合机构的磁路模型	45
4.2.2	磁耦合机构的交流阻抗模型	48
4.2.3	磁耦合机构的耦合模模型	50
4.3	磁耦合机构的结构及磁场分布分析	51
4.3.1	电磁耦合机构结构特性分析	52
4.3.2	电磁耦合机构的磁场分布分析	55
4.4	磁耦合机构的设计及优化方法	59
4.4.1	磁耦合机构的设计	59
4.4.2	磁耦合机构参数优化方法	62
4.5	本章小结	63
	参考文献	63
第5章	无线电能传输系统建模方法	65
5.1	阻抗分析建模方法	65
5.2	广义状态空间平均建模方法	66
5.3	扩展描述函数法	67
5.4	离散映射建模方法	68
5.4.1	精细时域离散映射建模方法	70
5.4.2	加入修正映射的改进型精细离散映射建模方法	74
5.4.3	软开关电路广义离散映射建模理论	78
5.5	本章小结	80
	参考文献	80
第6章	无线电能传输系统非线性行为分析方法	82
6.1	LCL 型 IPT 系统及其基本原理	82
6.2	系统频闪映射建模及软开关工作点的确定	85
6.3	系统软开关工作点确定及特性分析实例	86
6.3.1	ZCS 软开关工作点	87
6.3.2	系统稳态波形	89

6.4	软开关周期参数影响分析	90
6.5	多谐振点及其稳定性分析	91
6.5.1	推拉式 IPT 系统的工作原理	92
6.5.2	全系统建模	92
6.5.3	多谐振点分析	95
6.6	本章小结	100
	参考文献	100
第7章	IPT 系统的鲁棒综合优化控制	102
7.1	IPT 系统的鲁棒性及其研究现状	102
7.2	μ 综合与 $D-K$ 迭代	105
7.2.1	结构奇异值定义	105
7.2.2	μ 综合问题	108
7.2.3	$D-K$ 迭代算法	109
7.3	用 μ 进行鲁棒性检验	113
7.3.1	μ 综合控制系统的标称性能分析	113
7.3.2	μ 综合控制系统的鲁棒稳定性分析	114
7.3.3	μ 综合控制系统的鲁棒性能分析	116
7.3.4	闭环摄动系统的鲁棒性分析	118
7.4	基于分析的电路参数鲁棒优化研究	120
7.5	本章小结	124
	参考文献	124
第8章	谐振参数设计及鲁棒综合优化控制	126
8.1	IPT 系统电路谐振参数设计	126
8.1.1	谐振参数设计原则	126
8.1.2	IPT 系统的多目标优化设计问题	126
8.1.3	副边谐振参数设计	128
8.1.4	原边谐振参数设计	129
8.1.5	IPT 系统四种基本谐振结构参数设计小结	131
8.2	IPT 系统电路谐振参数设计的求解算法	131
8.2.1	多目标遗传优化算法	131
8.2.2	群体初始化	133
8.2.3	指标计算部分	133
8.2.4	限制性非支配排序	134
8.2.5	拥挤度距离	134
8.2.6	拥挤度锦标赛选择	135
8.2.7	遗传算子	135

8.2.8	重组与精英选择	136
8.3	IPT 系统的最优谐振拓扑的多目标鲁棒遗传优化	136
8.3.1	IPT 系统鲁棒优化设计思路	136
8.3.2	IPT 系统在参数不确定下的鲁棒性	136
8.3.3	IPT 系统频率鲁棒无分叉性	137
8.3.4	不确定条件下 IPT 系统多目标鲁棒优化问题	137
8.3.5	不确定条件下多目标遗传鲁棒优化算法	139
8.3.6	IPT 系统的最优谐振结构选择	140
8.3.7	IPT 系统的多目标分层综合式优化设计方法	140
8.3.8	实际 IPT 系统的最优谐振拓扑结构鲁棒优化设计	141
8.3.9	灵敏性分析	143
8.4	数值仿真与实验	144
8.4.1	数值仿真研究	145
8.4.2	实验验证	147
8.4.3	实验数据分析	150
8.5	本章总结	151
	参考文献	151

第1章 绪 论

1.1 无线电能传输的发展进程

第二次工业革命后，人类社会便进入了电气化时代，电能的传输主要通过金属导线的点对点直接接触进行传输。这种“有线”的传输方式带来了不少问题，例如，由于存在摩擦、老化等影响，电能在传输过程中很容易产生火花，进而影响到用电设备的使用寿命和用电安全。另外，传统的有线电力传输方式不能满足一些特殊应用场合的需要，如矿井等。随着人类社会经济的发展，各种电子设备得到了广泛的使用，但是太多的电线和插座给人们的生活带来了不便。这些问题都在呼吁一种脱离金属导线的电能传输方式，即无线电能传输^[1,2]。

早在19世纪末，无线电能传输（wireless power transfer, WPT）技术由著名的电气工程师尼古拉·特斯拉提出，并进行了相关的实验研究，受早期技术、财力等因素的限制，该技术仅仅局限于构想阶段，但为后来无线电能传输技术的发展绘制了美好的蓝图，并奠定了一定的研究基础。之后，伴随着电磁波理论的发展，古博（Goubau）等人从理论上推算了自由空间波束导波传输能量的可行性，并做了大量的理论与实验研究。到20世纪初期，日本的Yagi H等人发明了一种可用于无线电能传输的定向天线（又称八木-宇田天线），可将能量以微波的形式发送出去。在此基础上，雷声公司（Raytheon）的布朗（Brown）等人又做了大量的研究工作，设计了一种效率高、架构简单的半导体二极管整流天线，可将微波能量转换成直流电。从此，微波作为无线电能传输的一种重要方式被广泛研究。到目前为止，基于微波的无线传能模式，被公认为是一种远距离、大功率的电能无线传输的最佳模式。与此同时，激光作为一种新型的无线能量传输方式，也被用来实现大功率、远距离的能量传输。

20世纪80年代，基于磁场感应耦合原理的无线能量传输技术开始被学者们所关注，并逐渐应用到电动牙刷、手机、电动汽车等产品的无线供电中。以新西兰奥克兰大学Boys教授为首的课题组经过多年努力，在理论和实践上取得了很多重大突破，如实现了国家地热公园载人游览车的无线供电试验系统。随后，美国汽车工程协会根据Magne-charge TM系统的设计，制定了使用非接触感应电能传输技术进行电动汽车充电的统一标准——SAEJ.1773。

2007年麻省理工大学的物理学助理教授马林·索尔贾希克 (Marin Soljagic) 和他的研究团队在 *SCIENCE* 上发表文章, 提出了一种基于四线圈结构的磁耦合谐振模式的无线传能技术。此种能量传输方式利用独立的两个高 Q 值 (即品质因数) 线圈, 提高了系统的远距离传输能力。由此, 掀起了全球性的无线电能传输技术研发热潮。

近年来, 随着人们对电能无线传输的需求不断增大, 越来越多的科研院所及企业相继加入无线电能传输技术的基础研究和应用开发中来, 可以说目前该领域的研究已经是电气与自动化领域最活跃的热点之一^[3]。

1.2 无线电能传输系统的分类

无线电能传输系统的主要特征, 就是不通过导线接触, 以无线的方式将能量从一端传输至另一端。发射端将电能转换为其他形式的能量, 如电磁能、机械能等, 传播至接收端, 接收端接收到此种形式的能量, 再将其转换为电能。目前, 无线电能传输系统中所选择的中间能量形式主要有电磁能和机械能(振动)两种。

本节将按照电磁能和机械能的分类方式, 介绍目前主流的几种无线电能传输技术。

1.2.1 利用电磁能进行能量传递

对于电磁波, 其频率不同, 相应的能量传输方式有很大差别, 无线电能传输系统的工作方式也随之改变。表 1.1 列出了目前主要的几种无线电能传输技术, 它们分别利用不同频率段的电磁波来传输能量。

表 1.1 主要的无线电能传输技术中电磁波的频率和波长

无线电能传输技术	电磁波频率	电磁波波长
磁耦合式	几千至几兆赫兹	几十至几百米
微波式	几百兆至几百吉赫兹	几米至几毫米
激光式	$10^{12} \sim 10^{14}$ 赫兹	微米级别及更小

根据距离发射机构的远近, 电磁波产生的交变电磁场, 可以分为近场和远场两个区域^[2]。近场分布在场源的一个波长范围内, 在这一区域, 电磁能主要以磁场或电场的形式存在, 通常具有如下特点: 几乎无推迟效应; 任一时刻, 电磁场的分布规律分别与静态场中的电场、磁场相同; 近场内以电磁能量相互转换为主,

能量几乎不向外发射。而远场指距发射机构一个波长范围之外的区域，在这一区域，电磁能主要以电磁波的形式存在，并向外发射。此时电磁场具有推迟效应，且辐射具有方向性。

而根据电磁场理论，只有当发射天线的尺寸与所发射电磁波的波长处于同一数量级时，电磁波才能够以波的形式被辐射出去，并在远场传播。当发射天线的尺寸远小于电磁波波长时，电磁波主要以磁场或电场的形式存在于近场中，被辐射至远场的能量极少。从表 1.1 可知，当电磁波的频率在千赫兹至兆赫兹别时，电磁波的波长在几十米以上，发射机构的设计较为困难。故此，磁场耦合式、电场耦合式无线电能传输系统均以近场（磁场或电场）为能量传输的介质，其传输距离较短；而微波式、激光式无线电能传输系统则主要以远场中的电磁波（磁场）为能量传输的介质，可以实现长距离的能量传输^[3-11]。

就当前的磁耦合式电能传输方式而言，目前的研究可分为三类。其中一类为借助带有空气间隙的变压器实现磁场耦合能量传输的方式，此种方法称为可分离变压器式，但这种方式随着间隙的增大，功率传输能力急剧下降。因此通常只应用于传输距离在厘米级的应用场合，如图 1.1 所示。

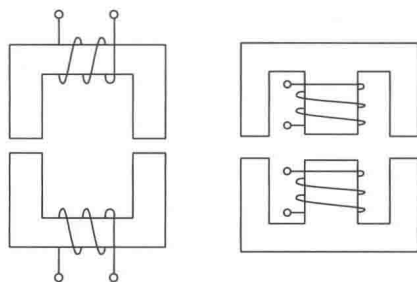


图 1.1 可分离变压器式

而另外两类是借助于谐振耦合方式实现电能无线传输的方式，分别称为两线圈谐振耦合式和四线圈谐振耦合式。其中，两线圈谐振耦合式借助原、副边线圈直接耦合实现电能耦合传递。

在两线圈谐振耦合方式中（图 1.2），原边部分通过高频电能变换方式激发谐振，并通过耦合线圈产生高频磁场，通过原、副边线圈的耦合，在副边谐振回路激发谐振，并通过能量接收与转换系统为负载提供所需要的电能。这类模式也被称为感应耦合式（或感应式）。

四线圈谐振耦合式（也有学者称其为磁共振式）是在两线圈谐振耦合式基础上加入一对独立的共振线圈（图 1.3）。由原边线圈产生的高频磁场在共振线圈激发共振，通过一对共振线圈的耦合以产生更高强度的谐振，从而延伸能量传输的有效距离。共振线圈通常是具有高 Q 值的线圈结构，通常其谐振频率在兆赫[兹]

量级。

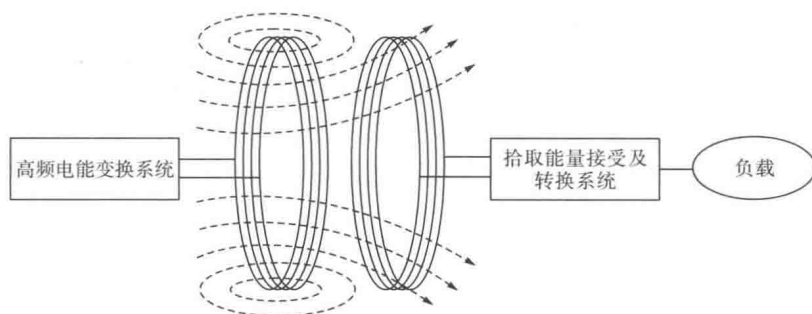


图 1.2 两线圈谐振耦合传递方式

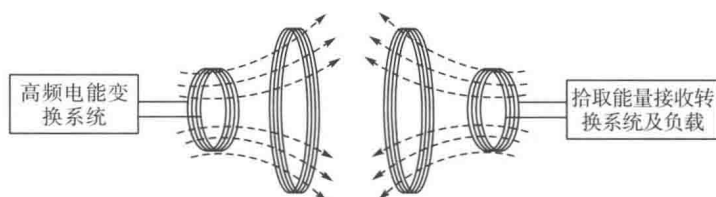


图 1.3 四线圈谐振耦合传递方式

1.2.2 利用机械能进行能量传递

机械能主要是通过机械波（即振动）将能量从发射机构传输至接收机构。目前，主要通过超声波来传输能量。超声波指频率大于 20kHz 的声波，它具有方向性强、能量易于集中、可在各种媒质中传播且无电磁干扰等优点。由于机械波主要依赖分子的振动传递能量，故当发射和接收机构间的空隙由固体填充时，能量传输的效率最高、效果最好；由液体填充时效果次之；由空气填充时效果最差。

1.3 无线电能传输技术的研究现状

当前，在无线电能传输技术的众多实现方式中，基于磁耦合形式的无线电能传输技术应用最为广泛，以下简要介绍该技术的研究现状。

1.3.1 国外研究现状

新西兰奥克兰大学以 Boys 教授为首的研究小组自 20 世纪 90 年代便开始研究电磁感应式非接触能量传输（inductive power transfer, IPT）技术并系统全面地进

行研究与推广应用工作。经过多年的努力，在理论和实践上取得了较多重大突破。该团队的 Hu A P 博士于 2001 年完成了该领域的第一篇博士论文^[12]，较为系统地阐述了 IPT 技术原理、拓扑及关键研究点等。该团队研究内容包括基本原理设计思路、耦合磁场机构设计、频率稳定策略分析、能量与信号同步传输、功率控制及系统稳定性等；在工程应用技术方面的研究主要有单轨行车、有轨电车及运料车等轨道交通设备的电源感应耦合接入，生物体体内植入式电气设备等的无线供电，以及电动汽车感应耦合充供电（图 1.4）等，已经形成了一套理论框架及应用技术体系^[13]。



图 1.4 IPT 技术在交通方面的应用

美国麻省理工学院以 Marin Soljacic 教授为首的研究小组在 2007 年提出了四线圈架构的磁耦合谐振式无线电能传输技术，实现了 2m 范围内功率为 60W 的磁耦合谐振式无线电能传输装置，系统整体的效率达到 40%，如图 1.5 所示^[14]。

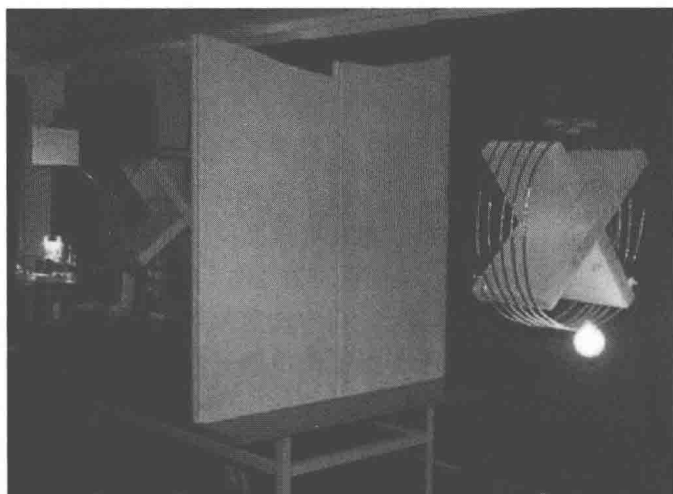


图 1.5 基于四线圈谐振耦合式无线电能传输系统

日本东京大学的 Takao Someya 教授等研究人员运用印刷式塑性 MEMS 开关及有机晶体管技术研究小功率 IPT 技术, 成功研制出一种可大面积铺置的能量发射塑性膜片, 在原、副边结合较为紧密 ($100\mu\text{m}$) 的情况下, 其最大传输功率为 40.5W , 传输效率高达 81.4% ^[15]。日本崇城大学的 Sakamoto H 及 Kumamoto Institute of Technology 的 Harada K 教授从 20 世纪 90 年代初就开始研究 IPT 技术在电动汽车无线充电等方面的应用, 内容主要包括能量与信号同步传输^[16]、磁场耦合机构^[17]等。

另外, 日本横滨国立大学 (Yokohama National University) 的 Nishimura M 及 Kawamura A 等研究了高速列车的非接触供电问题; 日本日立研究实验室的 Hideki Ayano 等研究了电梯及自动巡航车的非接触供电系统, 对其松耦合电磁机构的磁芯形状和绕圈的形状及绕制等进行了较为详细的分析; Kawamura A 等研究了旋转式 IPT 系统的无线电能及信号传输问题; 韩国庆北大学 (Kyungpook National University) 的 Choi B 等研究了基于 PCB 线圈的手机非接触充电装置^[18]; 美国 GeneralAtomics Electronic Systems 公司的 Song B M 等研究了磁悬浮列车的非接触供电问题^[19]; 美国 Delta Products 公司的 Jang Y 及 Jovanovic M M 研究了可适应宽输入电压及宽负载范围的无线电能传输技术, 并将其应用到便携式电话的非接触充电中^[20]。

1.3.2 国内研究现状

随着国外对 IPT 技术研究的深入, 自 20 世纪 90 年代开始, 国内的天津工业大学、东南大学、哈尔滨工业大学、浙江大学、华南理工大学、南京航空航天大学、中科院电工研究所、清华大学及重庆大学的相关研究团队分别在不同的应用领域对 IPT 技术进行了研究, 并取得了一定的成果。

以孙跃教授 (重庆大学) 为首的研发团队于 2002 年开始进行 IPT 技术理论的研究, 在其基本原理、高频谐振软开关变换器的建模方法及非线性行为分析、功率传输的稳定性、能量双向传输、电动汽车磁耦合机构设计及优化等领域进行了较为深入的研究, 为 IPT 技术的推广和应用方面做了大量的工作^[3]。

在技术研发与推广应用方面, 该团队早在 2010 年, 研发出了国内第一套输出功率在 1kW 以上的大功率 IPT 装置, 与中国海尔集团公司成立家用电器无线电能传输技术联合研发中心, 致力于开发家用电器无线电能传输的核心技术。该团队与国内某钻井企业合作, 联合开发同轴旋转体机构无线电能传输技术及装置; 与国内某电网企业合作, 联合研发数十千瓦级的电动汽车无线充供电示范系统, 如图 1.6 所示。该示范系统能实现定点充电和在线不停车实时供电, 停车定点无线充电的电能传输垂直距离为 40cm , 横向偏移可达 20cm , 系统整体效率大于 90% 。

不停车实时无线供电系统采用多级供电轨道级联模式,示范轨道设计长度为 100m,轨道平面与车载拾取机构最佳垂直距离为 40cm,最大输出功率为 30kW,行进供电效率为 75%~80%。

目前,该研发团队已具备开发功率等级从毫瓦级到数十千瓦级的 IPT 装置的能力,成为国内 IPT 技术研究领域一支重要的研发力量。该团队与新西兰奥克兰大学合作成立的“无线电能传输技术国际联合研究中心”,于 2015 年 10 月获得国家科技部的专家认定,这也将进一步促进该团队与国际平台的合作性研究与发展。

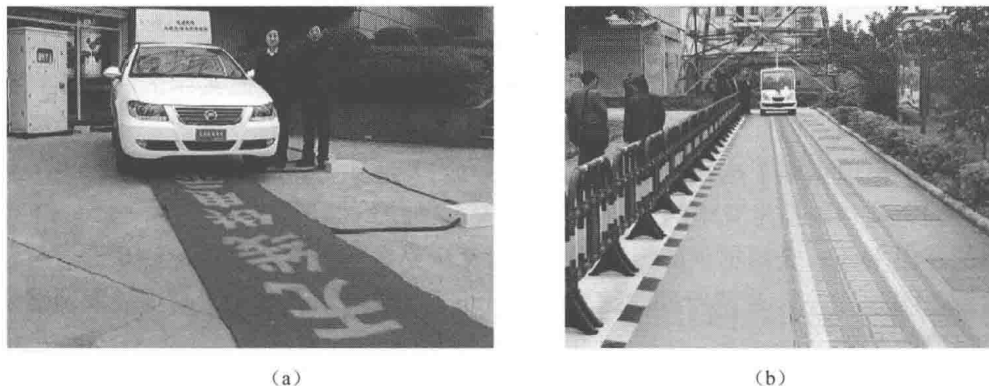


图 1.6 重庆大学电动汽车无线充电示范系统

香港城市大学的许树源教授(Hui S Y R)从 20 世纪 90 年代初就涉足 IPT 技术的研究,他主要研究了 PCB (printed circuit board) 空心变压器,以及基于此变压器的平板式电池非接触充电平台,为手机等小功率消费电子产品的便捷、安全充电提供了很好的解决方案^[21]。

随着国外对 IPT 技术研究的深入,自 20 世纪 90 年代开始,国内的天津工业大学、东南大学、哈尔滨工业大学、浙江大学、华南理工大学、南京航空航天大学、中科院电工所、清华大学及重庆大学的相关研究团队分别在不同的应用领域对 IPT 技术进行了研究,取得了一定研究成果。

总的来说, IPT 技术还是一种新兴的电能传输技术,兴起于 20 世纪 90 年代,经过多年的发展,在基础理论方面已经取得了较大的突破,其应用也越来越成熟、广泛。

1.4 无线电能传输技术的应用

目前,由于无线电能传输系统具有高安全性、高可靠性和灵活方便等优点,吸引了众多国内外学者和工业界人士的密切关注。无线电能传输技术的应用已经

渗透到了诸多领域，主要有：有轨电动汽车的研发和推广无线电能传输技术的无尾电视；为便携式电子产品所设计的无线平板充电器；生物医疗器械无线供电装置等^[22]。

1.4.1 电动交通工具领域

近些年来，全球环境污染日益严重，加上人们环保意识的提高，许多国家对应出台了针对交通工具（如汽车尾气排放）的限制标准。绿色环保的电动汽车是未来发展的方向。由于电动汽车能够实现零排放，符合环保要求，各大研究机构和制造商开始对电动汽车进行研究。传统的电动汽车在充电时采用的是插座和插销连接的方式，但此方式有诸多缺点，如易产生火花、接触不良等。无线电能传输技术的出现克服了这些缺点^[22-23]。1996年12月4日，通用公司首次推出了利用感应电能传输技术充电的电动概念车EV1，如图1.7所示。当时第一款EV1使用的是由Delco公司提供的铅酸蓄电池，每次充电后最大续航里程的理论值可以达到144km左右，最快行驶时速为128km/h。这给电动汽车无线供电的发展奠定了良好的基础。



(a)



(b)

图 1.7 通用公司推出的 EV1 电动汽车

2010年11月，HaloIPT公司在伦敦利用其最新研发的感应式电能传输技术研究成果实现了为电动汽车进行无线充电^[24]，如图1.8所示。图中电能接收器置于电动汽车车身下侧，在车内经过能量变换装置，然后再传输给车载电池组对其进行充电，电能接收垫不需要完全放置于电能传输线圈的正上方，允许出现较大的位置偏差。