

Principle of Wireless Power Transmission

无线电能传输原理

张波 黄润鸿 疏许健/著



科学出版社

无线电能传输原理

Principle of Wireless Power Transmission

张波 黄润鸿 疏许健 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

无线电能传输是人类的一个梦想。100多年前,伟大的发明家尼古拉·特斯拉开启了对无线电能传输的探索。2006年,麻省理工学院的学者提出了谐振无线电能传输的机理,使中距离的无线电能传输成为可能,这再一次激发了人们对无线电能传输技术研究的热潮。目前,企业界对无线电能传输技术的热忱远高于学术界,多种技术和产品标准相继制定,手机无线充电器、电动汽车无线充电桩已有产品出现。然而,无线电能传输技术远没有像有线输电技术一样成为一种通用的技术。为此,本书将介绍现阶段最具应用价值的磁感应、磁谐振无线电能传输技术,系统地阐述它们的原理、特性和设计方法,以推动无线电能传输技术的发展。

本书共分为8章。第1章介绍无线电能传输技术的起源和国内外的研究现状;第2章介绍磁感应无线电能传输技术的基本原理和模型;第3章介绍磁感应无线电能传输系统的基本特性;第4章介绍磁感应无线电能传输系统的设计方法;第5章介绍磁谐振无线电能传输技术的基本原理和模型;第6章介绍磁谐振无线电能传输系统的基本特性;第7章介绍磁谐振无线电能传输系统的设计方法;第8章介绍无线电能传输系统的电磁环境。

本书既是一本从理论上系统地阐述无线电能传输原理的专著,又是一本具有工程意义的无线电能传输系统分析和设计指导书。因此,本书可作为电气工程的硕士生、博士生和教师的参考教材,也可供电子信息、自动化、机械等专业相关科研人员及工程技术人员在无线电能传输系统分析、设计中使用。

图书在版编目(CIP)数据

无线电能传输原理 = Principle of Wireless Power Transmission / 张波, 黄润鸿, 疏许健著. —北京: 科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-057835-8

I. ①无… II. ①张… ②黄… ③疏… III. ①无导线输电 IV. ①TM724

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第129189号

责任编辑: 耿建业 武 洲 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 无极书装

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>

天津市新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

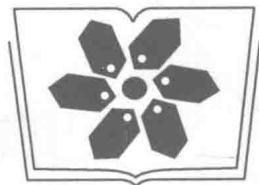
2018年6月第一版 开本: 720×1000 1/16

2018年6月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 231 000

定价: 96.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



中国科学院科学出版基金资助出版

前 言

有线输电是人类的一个伟大的发明，与此同时，人类也开始了对无线电能传输的探索。交流电的发明者尼古拉·特斯拉梦想着有一天人类在地球的任意一个角落都能以无线方式接收电能，虽然著名的特斯拉塔倒了，但人类对无线电能传输技术的探索从未停止。

2003年，笔者第一次接触到无线电能传输技术时，国内还只有对国外无线电能传输技术研究的报道，国外也只有少数高校在开展感应无线电能传输技术的研究。当笔者以无线电能传输为内容申请研究课题时，评审专家都质疑它的发展前景。幸运的是，该课题最终还是得到了资助，笔者从而开始了无线电能传输技术的研究。2006年可以说是对于无线电能传输技术的发展具有重要意义的一年，麻省理工学院的物理学家马林·索尔贾希克教授领导的研究团队提出了谐振无线电能传输的原理，无线电能传输技术成为了一个新的研究热点。

无线电能传输技术能否最终与有线输电一样成为一个通用技术，其传输距离、传输效率、传输功率以及电磁环境是人们关注的关键问题。感应无线电能传输技术基于电磁感应原理，只能近距离无线传输电能，因此有学者称之为无接触式电能传输。感应无线电能传输系统要增大传输距离，必须在线圈的铁芯材料、减少漏磁、无功补偿方面做出努力，但这无疑增加了系统的成本、体积和重量，且传输距离仍然在厘米数量级。谐振无线电能传输技术基于能量耦合原理，理论上在近场范围内可以实现中距离的无线传输电能，突破了距离的瓶颈，使得无线电能传输技术更具有实用性。然而，目前学术界和工业界有一个观点，认为感应无线电能传输与谐振无线电能传输原理是一致的，都是电磁感应原理，导致谐振无线电能传输系统的特性分析、参数设计、电磁环境分析都沿用电磁感应的方式，无法体现谐振无线电能传输技术的优势。依照笔者的认识，基于电磁感应原理的磁耦合，由于磁场强度只是电能传输的一个影响因素，因此磁耦合大并不一定意味着电能耦合大；而谐振无线电能传输技术是基于电能耦合原理，因此，可以通过控制除磁场强度以外的其他参数来提高电能传输的效率和大小，使得无线电能传输的距离不受磁耦合大小的制约，从而增大了传输距离。本书的目的之一就是试图从原理、特性和设计方法上对磁感应、磁谐振无线电能传输系统的异同点进行对比，以深刻认识无线电能传输的机理和掌握无线电能传输技术。

本书的特色体现在以下几个方面：①较全面地回溯了无线电能传输技术的起

源、主要形式，系统地分析了无线电能传输技术的发展现状。②对磁感应无线电能传输系统建立发射线圈和接收线圈的松耦合变压器模型，继而建立了 SS 型、SP 型、PP 型和 PS 型 4 种不同无功补偿拓扑的系统模型；分析了感应无线电能传输系统的输入、输出特性，尤其是频率分岔特性；介绍了感应无线电能传输系统的设计过程和方法，并以实例的形式对无功补偿性能、最大传输功率特性和频率分岔特性进行设计和验证；③对磁谐振无线电能传输系统，分别采用耦合模方程和电路理论，建立了单负载两线圈、四线圈和多线圈、多负载谐振无线电能传输系统模型；分析了谐振无线电能传输系统的传输特性和频率分裂特性，并将频率分裂特性与感应无线电能传输系统的频率分岔特性进行了比较；介绍了谐振无线电能传输系统的设计过程和方法，分别对四线圈、频率跟踪式和多负载谐振无线电能传输系统进行了参数设计和验证。④介绍了无线电能传输的电磁环境标准和导则，采用特例的方式论述了无线电能传输系统电磁辐射和电磁场强度的测量方法。

本书是根据我们团队 14 年来的部分研究成果整理而成，研究工作得到了国家自然科学基金重点项目(批准号：51437005)、面上项目(批准号：51677074)的支持，在此表示衷心的感谢！

张 波

2018 年 5 月于华南理工大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 无线电能传输技术的起源	1
1.2 无线电能传输技术的形式	3
1.3 无线电能传输技术的发展历程	4
1.3.1 感应无线电能传输技术	4
1.3.2 谐振无线电能传输技术	6
1.3.3 微波无线电能传输技术	8
1.4 感应与谐振无线电能传输技术的比较	10
1.4.1 原理不同	10
1.4.2 系统构成的异同	10
1.4.3 分析方法的异同	12
1.4.4 运行条件的差异	12
1.5 无线电能传输技术的应用前景	13
1.5.1 可移动机电设备的无线供电	13
1.5.2 电动汽车的无线充电	13
1.5.3 机器人的无线供电	14
1.5.4 水下设备的无线供电	14
1.5.5 植入式医疗设备的无线供电	14
1.5.6 无线充电器	14
1.5.7 家用电器的无线供电	15
1.6 本书的章节安排	15
参考文献	15
第 2 章 感应无线电能传输系统的原理及模型	22
2.1 感应无线电能传输的基本概念	22
2.1.1 基本结构	22
2.1.2 工作原理	23
2.2 松耦合变压器模型	24
2.2.1 理想模型	24
2.2.2 磁导率模型	25
2.2.3 漏感模型	26

2.2.4 互感模型·····	28
2.3 感应无线电能传输系统建模·····	29
2.3.1 SS型感应无线电能传输系统模型·····	30
2.3.2 SP型感应无线电能传输系统模型·····	32
2.3.3 PP型感应无线电能传输系统模型·····	34
2.3.4 PS型感应无线电能传输系统模型·····	36
2.4 本章小结·····	40
参考文献·····	40
第3章 感应无线电能传输系统的特性分析 ·····	42
3.1 无功补偿·····	42
3.1.1 系统无功全补偿·····	42
3.1.2 发射线圈和接收线圈单独无功补偿·····	49
3.2 输出功率和传输效率·····	55
3.2.1 SS型感应无线电能传输系统·····	55
3.2.2 SP型感应无线电能传输系统·····	57
3.2.3 PP型感应无线电能传输系统·····	59
3.2.4 PS型感应无线电能传输系统·····	61
3.3 互感对最大输出功率和传输效率的影响·····	63
3.3.1 SS型感应无线电能传输系统·····	63
3.3.2 SP型感应无线电能传输系统·····	64
3.3.3 PP型感应无线电能传输系统·····	64
3.3.4 PS型感应无线电能传输系统·····	65
3.4 负载对最大输出功率的影响·····	68
3.4.1 SS型感应无线电能传输系统·····	68
3.4.2 SP型感应无线电能传输系统·····	68
3.5 频率分岔现象·····	70
3.5.1 SS型感应无线电能传输系统·····	70
3.5.2 SP型感应无线电能传输系统·····	73
3.5.3 PP型感应无线电能传输系统·····	73
3.5.4 PS型感应无线电能传输系统·····	74
3.6 输出特性·····	75
3.7 本章小结·····	76
参考文献·····	76
第4章 感应无线电能传输系统的设计 ·····	78
4.1 系统结构·····	78
4.2 工作频率的选择·····	79

4.3 逆变器的选择	79
4.4 发射线圈、接收线圈和补偿网络设计	81
4.4.1 发射线圈和接收线圈	81
4.4.2 无功补偿网络	82
4.5 系统控制设计	82
4.6 系统设计实例及特性验证	82
4.6.1 不同无功补偿方式的影响	83
4.6.2 互感对最大输出功率的影响	85
4.6.3 频率分岔现象	86
4.7 本章小结	88
参考文献	89
第5章 谐振无线电能传输系统的原理及模型	90
5.1 谐振无线电能传输的原理及系统构成	90
5.1.1 机械共振与谐振原理	90
5.1.2 谐振的近场工作条件	91
5.1.3 谐振无线电能传输系统的构成	92
5.2 LC 串联谐振电路的耦合模方程	94
5.2.1 耦合模方程的一般形式	94
5.2.2 无损耗单回路 LC 电路的耦合模方程	94
5.2.3 有损耗单回路 LC 电路的耦合模方程	96
5.2.4 两个无损耗单回路 LC 耦合电路的耦合模方程	97
5.2.5 两个有损耗单回路 LC 耦合电路的耦合模方程	99
5.2.6 N 个有损耗单回路 LC 耦合电路的耦合模方程	102
5.3 单负载谐振无线电能传输系统的耦合模方程	102
5.3.1 两线圈系统	102
5.3.2 四线圈系统	104
5.4 单负载谐振无线电能传输系统的电路模型	106
5.4.1 两线圈系统	106
5.4.2 四线圈系统	108
5.5 多负载谐振无线电能传输系统的耦合模方程	110
5.5.1 两负载系统	110
5.5.2 多负载系统	114
5.6 多负载谐振无线电能传输系统的电路模型	115
5.6.1 两负载系统	115
5.6.2 多负载系统	117
5.7 本章小结	117

参考文献	118
第 6 章 谐振无线电能传输系统的特性分析	119
6.1 传输特性	119
6.1.1 传输功率	119
6.1.2 传输效率	120
6.1.3 传输距离	122
6.2 频率分裂	124
6.2.1 概念	124
6.2.2 影响因素	125
6.2.3 频率分裂与频率分岔的区别	128
6.3 本章小结	129
参考文献	129
第 7 章 谐振无线电能传输系统的设计	130
7.1 四线圈谐振无线电能传输系统的设计	130
7.1.1 系统结构	130
7.1.2 高频功率放大电路设计	130
7.1.3 高频变压器设计	133
7.1.4 发射线圈和接收线圈参数设计	134
7.1.5 仿真和实验	135
7.2 频率跟踪式谐振无线电能传输系统的设计	139
7.2.1 系统结构	139
7.2.2 系统设计	140
7.2.3 仿真和实验	149
7.2.4 实验分析	151
7.3 多负载谐振无线电能传输系统的设计	153
7.3.1 系统构成	153
7.3.2 高频功率放大电路的设计	153
7.3.3 主电路设计	155
7.3.4 实验验证	156
7.4 本章小结	161
参考文献	161
第 8 章 无线电能传输的电磁场环境	163
8.1 概述	163
8.2 无线电能传输的国际标准	164
8.3 无线电能传输系统的电磁辐射测量	166

8.3.1 麻省理工学院的四线圈的系统·····	166
8.3.2 两线圈系统·····	167
8.4 无线电能传输系统电磁辐射对生命体的影响·····	168
8.5 电动汽车和手机无线充电的电磁环境·····	170
8.5.1 电动汽车·····	170
8.5.2 手机·····	170
8.5 本章小结·····	171
参考文献·····	171

第1章 绪 论

无线电能传输技术(wireless power transfer, WPT)是指无需导线或其他物理接触,直接将电能转换成电磁波、光波、声波等形式,通过空间将能量从电源传递到负载的电能传输技术,因此又被称为非接触电能传输技术(contactless energy transfer, CET)。该技术实现了电源与负载之间的完全电气隔离,具有安全、可靠、灵活等传统电能传输方式无可比拟的优点,因此得到了国内外学者的广泛关注^[1,2]。

无线电能传输是人类一百多年来一直追求的目标,作为多学科交叉的前沿技术,涉及电学、物理学、材料学、生物学、控制科学等多个学科和领域。无线电能传输可以有效地解决裸露导体造成的用电安全、接触式供电火花、接触机构磨损等问题,并能够避免在潮湿、水下、含易燃易爆气体的工作环境中,因导线式或接触式供电引起的触电、爆炸、火灾等事故。无线电能传输技术的出现还促进了大量新型应用技术的产生,如植入式医疗设备的非接触式供电、超高压/特高压杆塔上监测设备的非接触式供电、家用电器的非接触式供电、移动设备的非接触式供电以及电动汽车的无线充电等。伴随着智能电网和能源互联网的发展,电动汽车的无线充电技术将极大地促进新能源汽车产业的发展。此外,在太空领域,也可以通过无线电能传输的方式把外太空的太阳能传输到地面,还可以在航天器之间实现无线电能传输;在军事领域,无线供电可以有效地提高军事装备和器械的灵活性和战斗力。因此,世界主要发达国家都十分重视无线电能传输技术的研究,美国麻省理工学院主办的《麻省理工技术评论》杂志还将无线电能传输技术列为引领世界未来的十大科学技术之一^[3]。

1.1 无线电能传输技术的起源

无线电能传输技术的起源可以追溯到电磁波的发现。1865年,麦克斯韦在前人实验的基础上,归纳出著名的麦克斯韦方程组,理论上预见电磁波的存在。1888年,赫兹通过实验成功地“捕获”了电磁波,从而为电信号的无线传输奠定了坚实的基础,也为电能的无线传输提供了发展的可能。

继电磁波被发现后不久,伟大的发明家特斯拉就开始了对于无线电能传输技术的探索^[4],在其专利“电气照明系统”中通过改进赫兹波发射器的射频电源^[5],提出了无线电能传输的伟大设想;1893年,特斯拉在哥伦比亚世界博览会上,在没有任何导线及其他物理连接的情况下,隔空点亮了一盏磷光照明灯^[6]。特斯拉展

示的照明灯无线供电实验装置如图 1.1 所示^[7]，发射端由高频交流电源、变压器、发射线圈 P、电火花间隙开关 S.G 和电容器 C 组成；接收端由接收线圈 S 和一个 40W 的灯泡组成；发射线圈和接收线圈的直径均为 24 英寸（大约 60cm），参数见图 1.1 中标注。当发射线圈电感 L 与电容器 C 以高频交流电源的频率发生串联谐振时，电容器 C 上产生的谐振电压将击穿电火花间隙开关 S.G，使发射线圈 P 与电容器 C 经 S.G 短路发生串联谐振，发射线圈 P 上流过的谐振电流产生磁场，耦合到接收线圈 S，转换成电能将灯泡点亮。该装置可以在发射线圈和接收线圈相距 1 英尺（大约 30cm）范围内工作。

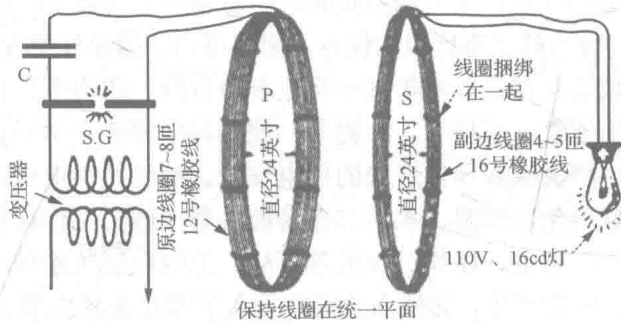


图 1.1 特斯拉无线电能传输实验装置

1898 年，特斯拉又把无线电能传输技术应用到人体电疗中，成果在美国电疗协会第 8 次年会上首次展示，并刊登在《电气工程师》第 544 期和 550 期上，1999 年被 *Proceedings of the IEEE* 作为经典论文重印^[8]。特斯拉提出的无线电疗装置如图 1.2 所示，发射线圈为一个直径不小于 3 英尺（大约 90cm）的大铁环 H，铁环上绕有几匝粗大的电缆线 P，两端并联一个由大面积极板形成的可变电容器，然后与电源相连；接收线圈为一普通漆包线绕制的线圈 S，用两个木箍 h 和硬纸板固定，连接到人体。该装置工作时，发射线圈与可变电容器在电源频率下发生并联谐振，流过发射线圈的谐振电流产生磁场，耦合到接收线圈，转换为电能对人体进行电疗。

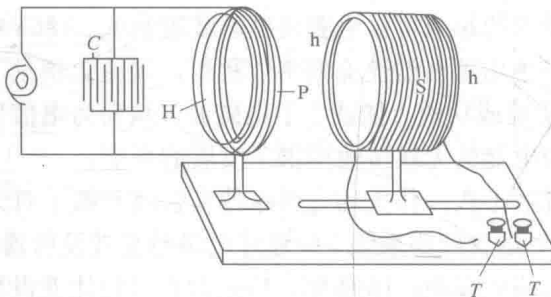


图 1.2 特斯拉无线电能传输电疗实验装置

1899年,特斯拉在科罗拉多州开展了大规模无线电能传输的尝试,发明了谐振频率为150kHz的特斯拉线圈^[9],并在长岛建造了著名的特斯拉塔,如图1.3所示。虽然最终由于资金匮乏,利用特斯拉塔进行大功率无线电能传输的实验没有实现,但留给人们无限的遐想。特斯拉甚至还设想将地球作为内导体、地球电离层作为外导体,在它们之间建立起8Hz的低频电磁共振(舒曼共振),实现全球的无线电能传输。因此,特斯拉毫无疑问是无线电能传输的开拓者,是无线电能传输原理和技术的奠基者^[10]。



图 1.3 著名的特斯拉塔

1.2 无线电能传输技术的形式

无线电能传输技术主要分为以下3种基本形式。

(1) 感应无线电能传输技术。该技术可通过两种原理实现:一是基于电磁感应原理,将发射线圈和接收线圈置于非常近的距离,当发射线圈通过电流时,所产生的磁通在接收线圈中感应电动势,从而将电能传输到负载;二是基于电场耦合原理,通过两个可分离电容极板的电场变化,实现电能的无线传输。

(2) 谐振无线电能传输技术。该技术同样可通过两种原理实现:一是基于磁谐振原理,在近场范围内,使发射线圈与接收线圈均工作于自谐振或谐振状态,实现中距离的无线电能传输;二是基于电场谐振原理,通过使两个带有电感的可分离电容极板工作于谐振状态,实现电能的无线传输。

(3) 微波无线电能传输技术。该技术的基本原理是将电能转换成微波,然后通过天线向空间发射,接收天线接收后转换为电能给负载供电,实现远距离的无线电能传输。与该技术原理相同的无线电能传输方式,还有基于射频技术的无线电

能传输、基于激光的无线电能传输和基于超声波的无线电能传输等。

以上 3 种形式的无线电能传输技术,按照工作于电磁场非辐射区或辐射区来进行分类,可以将它们分为非辐射式无线电能传输技术和辐射式无线电能传输技术,其中,感应无线电能传输技术和谐振无线电能传输技术属于非辐射式,而微波无线电能传输技术则属于辐射式。

不同的无线电能传输技术性能各异,感应无线电能传输技术的传输功率大,最大功率可达几百千瓦以上,且传输效率较高,最大效率在 90%以上,但传输距离很短,一般在几厘米以下^[11];谐振无线电能传输技术现阶段的传输距离从十几厘米到几米,传输功率从几十瓦到几千瓦,效率从 40%到 90%以上;微波无线电能传输技术的传输距离较远,为公里级,传输功率从毫瓦级到兆瓦级,但效率极低,一般低于 10%。目前,最具有发展和应用前景的是感应无线电能传输技术和谐振无线电能传输技术。

1.3 无线电能传输技术的发展历程

1.3.1 感应无线电能传输技术

1894 年,继特斯拉之后,Hutin 和 Leblanc 申请了“电气轨道的变压器系统”专利,提出了牵引电车的 3kHz 交流电源感应供电技术^[12];间隔大约半个世纪,1960 年,Kusserow 提出植入式血泵感应供电方式^[13],开始了感应无线电能传输技术在植入式医疗设备供电中的应用研究;随后不久,Schuder 等在哥伦比亚密苏里大学进行了一项被命名为“经皮层的能量传输”的研究项目^[14,15],提出利用接收线圈串联电容来实现谐振无功补偿,从而实现高效电能传输^[16,17];1970 年,纽约大学的 Thumim 等学者发表了植入式医疗设备感应供电的论文,提出了在发射线圈、接收线圈同时进行串联电容无功补偿的技术,并研究了耦合系数对电能传输性能的影响^[18];1971 年,射频技术的应用促进了感应无线电能传输技术在医疗设备上的发展^[19];旋转变压器在同期诞生^[20],用于取代电刷;1972 年,新西兰奥克兰大学的 Don Otto 申请了采用可控硅逆变器产生 10kHz 的交流电给小车感应供电的专利(NZ19720167422,JP49063111),首次验证了给移动物体感应供电的可能性;1974 年,出现了电动牙刷的感应无线充电技术^[21],装在杯型底座的电源通过电磁感应给牙刷中的电池充电;1978 年,电动汽车的感应无线充/供电也引起了学术界极大的兴趣^[22];进入 20 世纪 80 年代,对电动汽车感应无线电能传输理论的探索和应用实践又有了进一步的发展^[23-25];同时,植入式医疗器械非接触供电技术也有了较大突破,1981 年,Foster 进一步提出了在接收线圈进行并联电容补偿的方法,提高了传输效率和位移容差^[26];1983 年,英国医学研究理事会的 Donaldson 和 Perkins 提出了对发射线圈进行串联电容补偿、对接收线圈进行并联电容补偿的技

术,证明存在最优的耦合系数和最大接收功率,但效率较低,只有50%^[27];1989年,Ghahary发展了用串联谐振变换器实现经皮层的能量传输和对副边线圈进行串联电容补偿的技术^[28,29];1996年,Joun又提出了对发射线圈和接收线圈同时进行串联电容补偿的技术^[30,31]。

新西兰奥克兰大学的Boys教授是20世纪90年代以来对感应无线电能传输技术的发展推动最大的学者之一,他系统地开展了对感应无线电能传输技术的研究^[32-34],他的研究团队完善了感应无线电能传输系统的拓扑补偿和稳定性理论^[35-37]。Boys教授于1991年申请的“感应配电系统”专利,是近20年来感应无线电能传输技术发展史上里程碑式的成果^[32],该专利首次系统地提出了感应无线电能传输装置的结构和设计方法,该结构如图1.4所示,发射线圈由三相交流电供电,具有并联补偿的能量拾取线圈接收能量后,经整流和开关模式控制给负载供电,该结构在轨道电车非接触供电和电动汽车无线充电中得到了成功的应用。

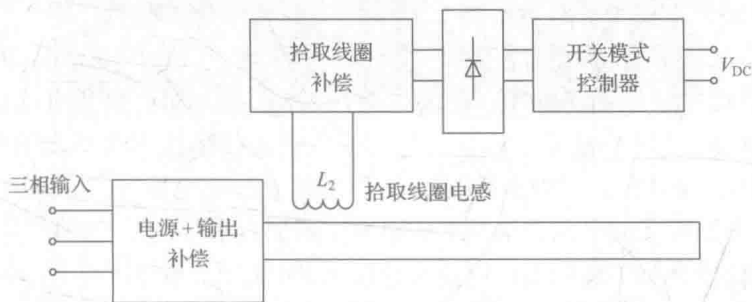


图 1.4 感应无线电能传输装置

21世纪以来,感应无线电能传输技术开始走向产品化。2003年,英国 SplashPower 公司开始进行感应无线电能传输的产品开发,2005年研制的无线充电器“SplashPad”上市^[38],可以实现1mm内的无线充电;同年,美国 WildCharge 公司开发的无线充电系统,输出功率达到90W,可以为多数笔记本电脑以及各种小型电子设备充电^[39],而香港城市大学的许树源教授则成功研制了通用型非接触充电平台^[40],充电时间与传统充电器无异;2006年,日本东京大学的学者利用印制塑性 MEMS 开关管和有机晶体管,制成大面积的无线电能传输膜片^[41,42],该膜片上印制有半导体感应线圈,厚度约为1mm,面积约为20cm²,重量约为50g,可以贴在桌子、地板、墙壁上,为装有接收线圈的圣诞树上的LED灯、装饰灯、鱼缸水中的灯泡或小型电机供电;2007年,微软亚洲研究院设计和实现了一种通用型“无线供电桌面”,随意将笔记本、手机等移动设备放在桌面上即可自动开始充电或供电^[43];同年3月,美国宾夕法尼亚州的 Powercast 公司开发的无线充电装置可为各种小功率的电子产品充电或供电,该技术采用915MHz的频率,实现1m范围内的无线电能传输,据称约有70%的电能转化为直流电能,该

技术已获得美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)的批准^[44]。

在大功率感应无线电能传输产品开发方面,主要集中在给移动设备,特别是在恶劣环境下运行的设备供电,如电动汽车、起重机、运货车以及水下、井下设备^[45-51]。目前,商业化产品的传输功率已达 200kW,传输效率在 85%以上,典型的有日本大阪幅库(Daifuku)公司的单轨型车和无电瓶自动货车,新西兰奥克兰大学所属奇思(Univervices)公司的罗托鲁瓦(Rotorua)国家地热公园的 40kW 旅客电动运输车,以及德国瓦姆富尔(Wampfler)公司的载人电动列车(其总容量为 150kW,气隙为 120mm^[52])。此外,还有美国通用汽车公司(GM)推出的 EV1 型电动汽车感应充电系统和电车感应充电器 Magne-charge, Magne-charge 工作频率可以在 80~350kHz 的范围内变动,传输效率达 99.5%。

2008 年 12 月 17 日,无线充电联盟(Wireless Power Consortium, WPC)成立,成为首个以感应无线电能传输技术为基础的无线充电技术标准化组织^[53]。2010 年 7 月,WPC 发布了 Qi 标准,同年 9 月,Qi 标准被引入中国。截至 2017 年底,WPC 的成员已经包括了 400 家以上的企业或组织。2012 年,电源事项联盟(Power Matters Alliance, PMA)成立,也是以感应无线电能传输技术为基础的无线充电技术标准化组织,2013 年,PMA 制定出了自己的无线充电标准^[54]。

国内关于感应无线电能传输技术的研究文献据查最早的是 2001 年,西安石油学院的李宏教授介绍了感应无线电能传输技术^[52]。此后,华南理工大学、重庆大学、天津工业大学、哈尔滨工业大学、中国科学院电工研究所、西安交通大学、浙江大学、南京航空航天大学等高校陆续开展了大量的研究^[55-64]。目前,重庆大学孙跃教授领导的团队在感应无线电能传输实验方面开展了大量的研究,并与新西兰奥克兰大学的 Patrick Aiguo Hu 进行了深层次的学术交流与科技合作,取得了较好的成果。2011 年 10 月在天津召开了国内首次“无线电能传输技术”专题研讨会^[65],参会的专家们讨论了无线电能传输技术的新进展和存在的一些问题,并达成了“天津共识”,对无线电能传输技术在国内的深入研究和继续推广具有重要的意义。

1.3.2 谐振无线电能传输技术

100 多年前,特斯拉提出的无线电能传输技术可以说是谐振无线电能传输技术研究的开始,但特斯拉去世后,相当长一段时间内谐振无线电能传输技术被人遗忘,没有取得实质性的进展。进入 21 世纪后,特斯拉利用谐振原理实现无线电能传输的设想再次被人关注。2006 年,麻省理工学院物理系的 Marin Soljatic 教授找到了“抓住”发散电磁波的方法,利用物理学的磁谐振原理,让电磁波发射器与接收器同频谐振,使它们之间可以进行能量互换。他领导的研究小组进行的无线电能传输实验表明,两个相同设计的铜线圈(线圈直径 60cm;线径 6mm)