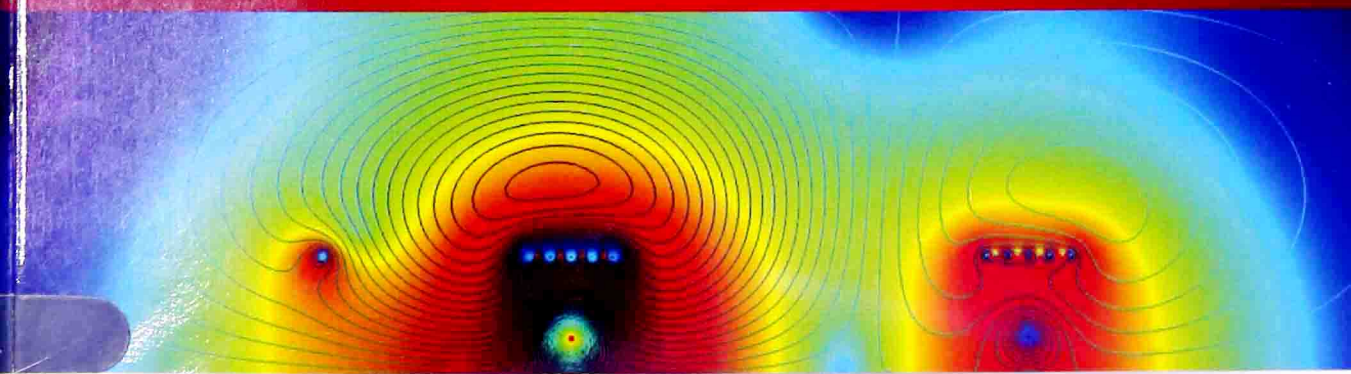


# 无线电能传输 技术及其应用

Wireless Power Transmission Technology And Its Applications



■ 杨庆新 张献 李阳 等著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

014057020

TM72  
55

# 无线电能传输技术及其应用

杨庆新 张 献 李 阳 徐桂芝  
陈海燕 祝丽花 闫 卓 赵 军 著



机械工业出版社



北航

C1742038

TM72  
55

本书重点阐述无线电能传输技术的基本原理及相关特性建模分析。对课题组基于电磁-机械同步共振的无线电能传输与转换技术和无线电能传输技术在高铁列车中应用等的最新研究成果也进行了介绍。

全书共分8章,首先是绪论和无线电能传输技术的基本原理;第3章给出无线电能传输技术的建模分析;第4章阐述传输效率与电源频率及传输距离的关系;第5章介绍电磁-机械同步共振无线电能传输与转换技术;第6章是多源-多用户无线电能传输技术;第7章介绍未来太阳能卫星电站点对点无线供电技术;第8章给出无线电能传输技术在人体植入器件、家用电器、电动汽车和高铁列车中的应用研究成果。

到目前为止,国内外还未见到关于无线电能传输技术及其应用的学术专著。写作本书的目的主要是为满足电气、电子工程类专业博士和硕士研究生以及相关科研人员需求。本书也可供高等学校相关专业师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

无线电能传输技术及其应用/杨庆新等著. —北京:  
机械工业出版社, 2014. 8  
ISBN 978-7-111-47451-7

I. ①无… II. ①杨… III. ①无导线输电-研究  
IV. ①TM724

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第160708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:徐明煜 责任编辑:徐明煜 朱林

版式设计:赵颖喆 责任校对:陈秀丽

封面设计:马精明 责任印制:刘岚

北京京丰印刷厂印刷

2014年8月第1版·第1次印刷

169mm×239mm·11.75印张·213千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-47451-7

定价:39.00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

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前 言

无线电能传输技术的基本原理是依靠场效应耦合。目前主要有3种方式,即电磁感应耦合、磁共振耦合和微波辐射耦合。该技术适用于不宜拖带电线的场合。由于它能够给人类带来极大的方便,因此,其一经问世便引起了研究工作者和商家的极大关注。

著者课题组从2007年开始先后对基于电磁感应耦合和磁共振耦合的无线电能传输技术进行研究,得到了多项国家自然科学基金[电磁—机械无线传能与转换方法研究(50977062)、近场谐振与感应耦合协同式无线电能传输的几个关键问题研究(51307120)、基于磁耦合谐振的电动汽车无线供电基础研究(51207106)]、天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目[植入器件磁共振无线电能传输关键技术研究(11JCZDJC17000)]和河北省自然科学基金[新型高效无接触能量传输系统耦合机理与实验研究(E2007000089)]等的大力支持,完成的成果均达到国际先进水平,相关论文在本领域最有影响的国际学术刊物IEEE会刊及国内电工界权威刊物——《中国电机工程学报》和《电工技术学报》以及重要国际会议上发表。

经过近十年的研究,基于电磁感应耦合的无线电能传输技术已渐成熟,正在或已经得到了许多实际工程应用。基于磁共振耦合的无线电能传输技术最近几年也受到了极大关注,获得了迅猛发展,基于新原理的无线电能传输技术人们还在不断探索。近几年包括IEEE在内的权威学术机构都在纷纷组织召开关于无线电能传输技术的国际会议,显然无线电能传输技术是目前世界各国同行研究的热点。

本书重点阐述无线电能传输技术的基本原理及相关特性建模分析。对课题组基于电磁—机械同步共振的无线电能传输与转换技术和无线电能传输技术在高铁列车中应用等的最新研究成果也进行了介绍。

到目前为止,国内外还未见到关于无线电能传输技术及其应用的学术专著。写作本书的目的主要是为满足电气、电子工程类专业博士和硕士研究生以及相关科研人员的需求,本书也可供高等学校相关专业师生参考。

全书共分8章,首先是绪论和无线电能传输技术的基本原理;第3章给出无线电能传输技术的建模分析;第4章阐述传输效率与电源频率及传输距离的关

系；第5章介绍电磁-机械同步共振无线电能传输与转换技术；第6章是多源-多用户无线电能传输技术；第7章介绍未来太阳能卫星电站点对点无线供电技术；第8章给出无线电能传输技术在人体植入器件、家用电器、电动汽车和高铁列车中的应用研究成果。

本书由杨庆新、张献、李阳、徐桂芝、陈海燕、祝丽花、闫卓和赵军等著。

著者感谢为本书内容做出贡献的所有课题组成员以及参加本书文稿打印和整理工作的研究生们。

在本书撰写过程中，参阅了许多相关文献资料并利用了一些图表曲线，在此向它们的作者和有关单位表示感谢。

衷心感谢国家自然科学基金委员会、天津市科学技术委员会和河北省自然科学基金委员会的大力支持。

由于著者水平所限，加之时间仓促，缺点、错误和不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

著者

2014年5月

# 目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
参考文献	8
第 2 章 无线电能传输技术的基本原理	15
2.1 电磁感应耦合式	15
2.2 磁谐振耦合式	17
2.3 微波辐射式	19
2.4 其他形式的无线电能传输技术	24
2.4.1 电场耦合式	24
2.4.2 超声波式	24
2.4.3 激光式	25
参考文献	26
第 3 章 无线电能传输技术的建模分析	27
3.1 互感模型	27
3.1.1 单一负载模型	27
3.1.2 多负载模型	31
3.1.3 多发射端多负载模型	32
3.2 耦合模模型	33
3.2.1 耦合模理论基础	33
3.2.2 振荡模式的耦合模方程	40
3.2.3 无损振荡系统耦合模方程	42
3.2.4 有损振荡系统耦合模方程	45
3.2.5 振荡系统能量交换最大化的前提	47
3.3 散射矩阵模型	52
参考文献	55
第 4 章 传输效率与电源频率及传输距离的关系	56
4.1 频率特性分析	56
4.1.1 模式耦合因数与电路耦合系数之间的关系	56
4.1.2 谐振频率固定情况下负载接收的最大功率	57
4.1.3 系统传输功率的频率分裂特性分析	60

4.2 距离特性分析 .....	62
4.2.1 轴向距离特性 .....	66
4.2.2 径向距离特性 .....	67
4.3 方向特性分析 .....	68
4.4 功率与效率特性分析 .....	69
参考文献 .....	71
<b>第5章 电磁-机械同步共振无线电能传输与转换技术</b> .....	<b>73</b>
5.1 超磁致伸缩执行器的研究现状 .....	73
5.2 电磁-机械同步共振系统多补偿集总参数分析 .....	74
5.2.1 不同补偿结构的漏感模型表示 .....	75
5.2.2 不同参数对系统性能的影响比较 .....	78
5.2.3 电磁-机械同步共振系统电路补偿结构选取 .....	83
5.3 电磁-机械同步共振集总参数模型 .....	86
5.4 电磁-机械同步共振系统设计 .....	89
5.4.1 电磁-机械同步共振系统的组成结构 .....	89
5.4.2 高频振动位移的测量方法 .....	91
5.4.3 电磁-机械同步共振无线电能传输与转换实验结果及分析 .....	93
5.5 电磁-机械多物理场仿真分析 .....	96
5.5.1 不同预压力下的超磁致伸缩致动器仿真与比较 .....	96
5.5.2 轴向位移仿真与实验比较 .....	99
参考文献 .....	101
<b>第6章 多源-多用户无线电能传输技术</b> .....	<b>103</b>
6.1 带中继绕组的电能传输 .....	103
6.2 单源多用户无线电能传输 .....	107
6.3 多源单用户无线电能传输 .....	110
6.4 无线电能传输网 .....	111
参考文献 .....	113
<b>第7章 未来太阳能卫星电站点对点无线供电技术</b> .....	<b>114</b>
7.1 太阳能卫星电站发展现状 .....	114
7.2 太阳能卫星电站点对点能量传输技术 .....	116
7.3 微波无线输电的应用现状 .....	117
7.4 微波无线输电的关键技术和存在问题 .....	120
7.5 未来太阳能卫星电站点对点无线供电发展趋势 .....	121
参考文献 .....	122
<b>第8章 无线电能传输技术的应用研究</b> .....	<b>123</b>
8.1 无线电能传输技术在人体植入器件中的应用 .....	123

8.1.1	国内外发展与应用现状	123
8.1.2	电磁辐射对人体的影响研究	125
8.1.3	经皮传能系统设计仿真分析	129
8.1.4	小尺寸谐振器的设计与实验研究	139
8.2	无线电能传输技术在家用电器中的应用	143
8.2.1	国内外发展与应用现状	143
8.2.2	用于家电的无线电能传输系统整体设计	146
8.2.3	采用感应耦合无线电能传输技术的无尾橱柜	150
8.3	无线电能传输技术在电动汽车中的应用	153
8.3.1	国内外发展与应用现状	153
8.3.2	电动汽车定点式无线充电系统分析	158
8.3.3	电动汽车在线式无线充电系统分析	165
8.4	无线电能传输技术在高铁列车供电系统中的应用	169
8.4.1	高铁列车无线供电的实施意义	169
8.4.2	无线电能传输在高铁列车应用中需解决的问题	171
8.4.3	高铁列车无线供电智能控制系统的设计	172
	参考文献	179



# 第1章 绪论

电的发现及其生产、输送和应用技术的发明，极大地改变了人们的生产和生活方式，现在可以说，我们已经永远离不开它了。

但自从人类学会用电开始，电线就一直伴随我们左右，在给我们带来用电方便的同时，空间或地上满布的电线也给我们带来了许多麻烦。

能否在一些不宜拖带电线的场合不用电线，而使我们的用电设备照常工作，成为人类追求的梦想。无线电能传输技术正是在这一背景下应运而生的。

目前，无线电能传输主要有3种基本方式：

一是基于分离变压器原理的电磁感应耦合方式，供电体与受电体等效成一组可分离的变压器，当供电体中流过高频电流时，受电体会感应出同频电功率。其传输功率可以高达几百千瓦，该技术已进入实用化阶段，但一般适用于近距离（厘米级）传输。

二是非辐射磁共振耦合方式，其利用两个或多个具有相同谐振频率及高品质因数的电磁系统，通过工作于特定频率的电感及电容的耦合作用产生电磁谐振，高频能量发生大比例交换并被负载吸收。该方法可在数米范围内实现无线供电，存在障碍物时也能高效传输，是新颖且更具潜力的方法。

三是基于微波辐射的传输方式，电能被转化为微波通过天线发射与接收，适用于电能的远程输送。缺点是由于不能绕过障碍物，且大气的尘埃使传输效率降低，传输功率小，损失的功率较大时对人体和其他生物会造成一定伤害，因此这种方式在传输电能方面的应用还有很大局限性。

无线电能传输技术具有十分诱人的广阔前景。例如，它可以为人体内植入器件进行体外经皮充电，免除使用者需通过手术更换电池的痛苦；可以为手机、吸尘器和移动机器人等移动设备进行无线供电，免除拖带电线的烦恼；为传感网无线提供电能，避免大量布线；为电动汽车进行无线充电，避免插拔电线造成火灾；对高铁列车进行无线供电，避免弓网接触造成的摩擦磨损和振动造成的离线、打弧；未来足够强大的太阳能卫星电站不用电线就可以为用户进行点对点供电，是输电方式革命性的重大变化，将为人们灵活自如、随时随地智能化用电带来巨大方便。

我们先回顾一下无线电能传输技术的发展历史。

交流电和无线电的发明人、著名美籍物理学家 Nikola Tesla 是世界上第一个从事无线电能传输技术与实验的科学家。他在 1893 年的芝加哥世界博览会上, 利用无线电能传输原理, 在不用导线的情况下点亮了一盏照明电灯<sup>[1]</sup>。此后, 他又建成了著名的 Tesla Tower, 试图利用谐振无线电能传输原理, 在没有电线的情况下, 点亮位于 25mile<sup>⊙</sup>外的氦气照明电灯。虽然最终没能成功, 但是他开启了人类研究无线电能传输技术的历史。

关于直接感应耦合式无线电能传输技术, 新西兰奥克兰大学以 John T. Boys 教授为首的研究团队在 20 世纪 90 年代率先开展工作, 该团队无论是在理论研究还是工程应用技术方面都做出了大量卓有成效的工作<sup>[2-24]</sup>, 形成了一套理论系统及实用技术体系, 并率先开发出能批量生产的实用装置。在理论方面对该技术的基本原理、系统频率分析和稳定策略、功率控制策略、不同补偿电路系统特性分析、能量与信号同步传输、系统稳定性等方面都做出了很好的研究工作。在应用方面, 研究了如单轨行车、有轨电车及运料车等轨道交通设备的电源感应耦合接入、生物体内植入式器件的无线供电以及电动汽车感应耦合充供电系统等。

2010 年 11 月, 由奥克兰大学成立的 HaloIPT 公司在英国伦敦利用其最新研发的感应式电能传输技术实现为电动汽车无线充电。在充电时, 电能接收垫置于电动汽车车身下侧, 电池通过无线充电系统进行无线充电, 电能接收垫无需完全置于电源传输板的绝对正上方, 允许出现较大的位置偏差。2011 年 7 月, HaloIPT 公司宣布与 Drayson Racing Technologies 达成新的战略合作伙伴关系, 旨在率先研发零排放电动汽车动态(行进途中)充电技术<sup>[25]</sup>。2012 年 10 月, 高通公司对 HaloIPT 进行了整体收购, 并将其改组为旗下的一个事业部, 主要进行电动汽车无线充电技术与产品的研发。

精工爱普生从 2008 年 5 月开始批量生产用于便携产品的无线供电模块, 输出功率可达到 2.5W。电压 5V 时可供电 500mA, 在为普通手机充电时, 约 1.5h 即可充满。此供电模块应用感应耦合传能技术, 感应耦合线圈间的传能效率能够达到 90% 以上, 但由于中间存在安全电路和认证电路, 因此实际的传能效率在 70% 左右。

基于变压器原理的感应耦合无线电能传输技术具有非常广阔的应用前景。其优点是传递功率范围大, 小到用于人体植入器件的几十毫瓦和小型设备的几十瓦, 大到电动汽车或大型运动机器人的上千瓦和磁悬浮列车应用的上兆瓦功率。缺点是受磁场直接耦合的限制, 需要线圈匝数多, 传递距离小。

⊙ 1mile (英里) = 1609.344m, 后同。

国内在感应式无线电能传输研究方面虽然起步较晚,但近几年发展势头迅猛。2007年,重庆大学孙跃教授课题组研制出了可应用于多种场合的无线电能传输装置,能够实现600W~1kW的电能输出,传输效率为70%,并且能够向多个用电设备同时供电,即使用电设备频繁增减,也不会影响其供电的稳定性<sup>[26-29]</sup>。

河北工业大学徐桂芝教授等的课题组从2007年开始也对体内植入器件感应式无线电能传输方法做了许多研究工作,并针对脑深部电刺激器进行硬件传能系统的设计<sup>[30,31]</sup>。

在关于体内诊疗装置、植入式生物遥测装置以及心脏起搏器和脑起搏器等无线电能传输系统方面,上海交通大学、天津大学、南京航空航天大学、清华大学等研究机构也取得了突出成果。

关于磁共振耦合无线电能传输技术,2007年7月美国麻省理工学院以 Marin Soljacic 教授为首的研究小组在《Science》上发表论文<sup>[32]</sup>,他们发现了一种全新的无线供电模式——非辐射电磁能谐振隧道效应,称作“WiTricity (Wireless electricity transfer)”技术,也称为磁共振感应耦合技术,关键在于利用了非辐射性磁耦合,即两个具有相同频率的谐振电路产生很强的相互耦合,采用单层线圈,两端各放置一个平板电容器,共同组成谐振回路,提高传能效率。实验中缠绕了一个5匝粗铜线的线圈作为天线,在2m距离点亮了一盏60W的电灯,无线电能传输效率约为40%,距离为1m时效率达到约90%。在一次侧电源与二次侧灯泡中间放置木料、金属或其他电器等,灯泡仍会发亮。可见这种融合了电磁共振的无线供电技术别具一格。研究人员表示,没有发现这一系统会影响人体健康,其电磁辐射水平大概和核磁共振仪类似,在安全范围之内。这一发现大大提高了电能的无线传输效率和距离,而且其对共振线圈的位置和方向没有特殊要求。由此将无线电能传输技术的研究推向一个崭新的阶段<sup>[33]</sup>。其创立的同名公司与 Delphi 汽车公司共同开发车用设备,掀起对新型无线电能传输技术研究的热潮。

2008年,Intel公司的J. R. Smith展示了基于磁耦合共振技术的研发成果,在演示过程中,该系统以75%的效率传输了60W功率,之后又加入了新功能,实现了同时传递声音信息<sup>[34]</sup>。2011年,斯坦福大学Fan Shanhui教授及团队通过有限差分法证明了即使线圈间距为1.98m供电效率仍可达97%,并设想在高速公路上铺设线圈,实现电动汽车一边行驶一边供电<sup>[35]</sup>。韩国东远集团旗下的东远OLEV公司开发的电动公交车在龟尾市进行了试运行,测试线路单程为15mile,每天可往返10个来回,但该系统受电体效率只有85%<sup>[36]</sup>。

2009年,在美国消费电子展会前的发布会上,以色列 Powermat 公司演示了该公司的无线充电系统。该系统的电能传输效率高达 93%,并在磁耦合中采用 RFID 技术来识别电能传输目标。这个系统除了可以给手机充电外,还可用于给壁挂电视、照明装置及扬声器等电器充电<sup>[37]</sup>。

SONY 公司在 2009 年 10 月研制了基于磁耦合谐振技术的无线电能传输距离延长技术 Repeater Device (中继设备)。加入中继设备后,在传输效率为 80% 的情况下,传输距离约为不采用中继设备的 1.7 倍,尤其是当发射接收系统距离较远时,这种效果更为明显<sup>[38]</sup>。

日本东京大学还开发了磁耦合谐振式无线电能传输系统演示装置,旨在研究三维空间内非对称的谐振器相对位置与传输效率之间的关系。东京大学也证实,磁耦合谐振式无线电能传输系统可以使用 kHz 频带和 GHz 频带,分别制作了 kHz 频带、MHz 频带以及 GHz 频带的天线。他们还通过阻抗匹配方法提高系统传输效率,并设计出了适用于电动汽车的磁耦合谐振系统<sup>[39-41]</sup>。

2010 年 10 月, Witricity 公司称他们已经实现了 3.3kW 级别的电能传输,该技术为大功率电器实现无线电能传输提供了可能性。卡内基梅隆大学的学者建立了多接收器磁耦合谐振无线能量传输系统,并对系统能量传输情况及频率分叉现象进行了详细的分析<sup>[42]</sup>。

2010 年,日本富士通公司利用磁耦合谐振技术对多个设备同时进行无线充电,无线传输距离在 15cm 左右,并且充电器相对于发射器的位置没有任何限制。采用这项技术研制的充电系统所需要的充电时间只有当时其他充电设备的 1/150。2013 年 Olutola Jonah 和 Stavros V. Georgakopoulos 在混凝土结构中应用强耦合实现湿度在 0.2% ~ 12% 环境中、传输距离为 10cm、最大整流效率从 17.2% ~ 38.5% 的无线电能传输实验<sup>[43]</sup>。2014 年 David S. Ricketts 等人设计了一种在无线电能传输中高品质因数的阻抗-频率高精度匹配三绕组结构,并在无线电能传输功率中证明该方法实现了约 30% 的优化<sup>[44]</sup>。

2012 年,意大利佩鲁贾大学的学者设计出具有不同频率通道的能量传输系统,并将能量和信息进行同时传递<sup>[45]</sup>,此外他们还提出一种简单的方法分析计算平面螺旋线圈的谐振频率,并应用程序及软件计算绕组集总参数<sup>[46, 47]</sup>。

美国匹斯堡大学孙民贵教授带领的科研团队,从 2008 年开始对 Witricity 技术进行研究,并将其应用于体内植入式电子器件。该课题组设计了不同形状、不同规格的立体及平面谐振器,建立了系统等效电路,应用耦合模理论对磁耦合谐振无线能量传输进行了分析,并在空气、人体头模型及猪活体中进行实验,计算了系统传输效率,针对多个接收端、中继线圈存在以及谐振器之间存在角度等情

况进行了分析<sup>[48-50]</sup>。

2011年,美国华盛顿大学(University of Washington, UW)、美国匹兹堡大学医学中心(University of Pittsburgh Medical Center)与英特尔公司宣布,使用磁耦合谐振无线电能传输技术,试制出了植入式人工心脏使用的供电系统,将装有接收绕组的人工心脏放在盛满水的容器中,能量可以进行传递。除了在医疗领域之外,美国华盛顿大学还在考虑把无线电能传输技术应用于海洋中设备的供电<sup>[51]</sup>。同年,Thoratec公司宣布与Witricity公司合作研发用于植入心脏辅助设备的无线传能装置<sup>[52]</sup>。

此外,新加坡、印度、英国、比利时、波兰、伊朗、泰国、加拿大等国家的学者相继投入一定的人力和物力对短距离无线电能传输技术展开了深入的研究,形成了一定的理论基础和产业化态势,为短距离无线电能传输技术向更深、更广的研究方向推进提供了强大的推动作用力,因此可以展望短距离无线电能传输技术在未来的一段时期内将会得到充分的研究并有相关技术产品问世。

在国内,哈尔滨工业大学朱春波教授课题组对磁耦合谐振式无线电能传输的机理、功率特性、距离特性、高频电流测量技术、系统驱动电源设计以及系统损耗进行了详细的研究<sup>[53-57]</sup>。

华南理工大学的张波教授课题组,从电路角度分析,研究了磁耦合谐振传能系统的传能效率与距离和绕组参数的关系。还设计了多组不同绕组参数的传能装置,经过比较实验,进一步优化了传能系统,在此基础上又加入频率跟踪系统,解决了磁耦合谐振无线电能传输中由于谐振频率失谐带来的传输效率低下的问题<sup>[58-61]</sup>。

东南大学的黄学良教授研究基于无线充电技术的电动汽车,研究的主要问题包括频率分裂、频率一致性、模型建立、最佳接收距离确定、发射和接收天线设计、最小介入技术以及高频整流技术。另外,对无线电能传输技术的电磁辐射、电磁兼容以及产品推广中的标准也都进行了研究<sup>[62-65]</sup>。

海尔集团在2010年国际消费电子展上推出世界上首台不用电源线、信号线、网络线的“无尾电视”<sup>[66]</sup>。无尾电视首次将电力无线传输与信号无线传输、网络无线连接3种技术完美融合,能够在不借助电线的情况下利用磁耦合谐振技术实现了远距离高效无线电能传输。这也是无线电能传输技术首次成功应用于电视接收终端,为人们带来了更加便捷、自由的生活体验。目前,海尔集团研发部已经开始将无线电能技术应用于各类家电产品中,进行产品的成套化和系列化开发,形成海尔集团的“无尾之家”整体解决方案。

清华大学于歆杰副教授提出磁电复合材料应用于无线电能传输新方法<sup>[67]</sup>。

中科院电工所刘国强研究员团队在无线电能传输方面也做了出色的工作<sup>[68]</sup>。

关于微波辐射无线电能传输技术,1964年,Raytheon公司的William C. Brown利用微波技术,成功地进行了向位于高空的直升机平台无线供电实验<sup>[69]</sup>,1975年他又将微波能量束传输到1mile远处的接收站并获得了30kW的直流功率。1968年,美国学者Peter E. Glaser首先提出了太阳能卫星电站的构想,利用微波将能量无线传回地面接收器,并转换成可以利用的电能<sup>[70]</sup>。1975年,美国加州理工学院喷气推进实验室进行了一项被称为“Goldstone”的实验,使用工作频率为2.388GHz的微波,实现了1.54km的无线电能传输<sup>[71]</sup>;2001年,法国科学家G. Pignolet利用微波传输电能点亮了40m外一个200W的灯泡;2003年他在留尼汪岛上建造的10kW实验室微波输电装置,以2.45GHz频率向1km外的格朗巴桑村进行点对点的无线供电实验<sup>[72]</sup>;2008年,John Mankins和Texas A&M University以及日本神户大学的学者则在夏威夷进行了微波电能传输的实验,从毛伊岛(Maui)传到距离超过148km的夏威夷岛<sup>[73]</sup>,创造了传输距离的新纪录,然而这些努力始终都无法突破微波电能传输效率低于10%的瓶颈<sup>[74]</sup>,还无法走到实用。

本书著者杨庆新教授带领的研究团队自2007年开始对无线电能传输技术中的理论问题和应用基础开展了多方面的研究工作。获得了国家自然科学基金委员会的连续资助,取得了许多研究成果<sup>[75-96]</sup>。对于感应耦合与磁共振耦合无线电能传输系统进行了详细的建模分析;对传输功率与电源频率和传输距离及传输效率的关系做了系统的研究;采用疏松螺线管结构谐振线圈,实现了相距2.5m的无线电能传输,成功点亮了120W的电灯,且达到额定亮度,这一数据在传输功率与传输距离两方面超越了MIT实验研究小组报道的相关数据;在国内外首先研究了电磁-机械同步共振的无线电能传输与转换方法,为微小型行走机器人长期连续供电奠定了坚实基础;对于多源多用户无线电能传输系统进行了研究,为无线传感网的无线供电提供了技术储备;研制的超级电容器电动汽车无线充电系统,能够对间距为1m内的移动负载进行快速充电,充电功率可达30kW,充电效率为92%;提出为高铁列车无线供电思想,初步研究成果入选中国科协2014年夏季基础研究和应用研究科学展17个参展项目之一。

近年来,国内以无线电能传输技术为主题的研讨会陆续开展,为该技术的发展提供了很好的平台。

2011年10月11~12日,由中国科协主办,中国电工技术学会承办的“中国科协第57期新观点新学说学术沙龙”在天津工业大学举行。本期学术沙龙的主题为“无线电能传输关键技术问题与应用前景”,由中国电工技术学会副理事

长、天津工业大学校长杨庆新教授担任领衔专家，来自高等院校、科研院所及企业的40余位专家学者出席学术沙龙。这是国内首次以无线电能传输技术为主题的学术交流活动，就当前该领域存在的一些问题，包括器件和系统设计问题，效率、距离和功率问题，电磁环境和抗干扰能力问题，成本问题和标准等议题展开讨论，得到业内专家学者的热烈响应与大力支持，对推动我国无线电能传输技术的发展产生了显著的积极影响。

2012年，由中国电工技术学会主办、重庆大学承办的无线电能传输技术研讨会在重庆召开，研讨会主题为“如何推进我国无线电能传输技术的发展与应用”，目的是进一步探讨我国无线电能传输技术研究现状与发展趋势、无线电能传输技术发展所面临的问题。

2013年，第十五届中国科协年会第二分会场“无线电能传输关键技术与应用学术研讨会”（ISWPT2013）在贵州省贵阳市召开，此次会议是首届在国内举办的无线电能传输技术国际会议，来自中国、美国、加拿大等国家和地区的众多高等学校、科研院所及大型企业的140多位专家、学者参加会议研讨。

国内相关学术组织也陆续成立。

2014年3月，全国家用电器标准化技术委员会无线电能传输家电分技术委员会成立。委员会主要负责无线电能传输技术应用于家用电器的安全、能效、性能、通信协议等领域的国家标准制修订工作。

2014年4月，中国电工技术学会无线电能传输技术专业委员会在天津成立，天津工业大学校长杨庆新教授当选为主任委员，哈尔滨工业大学朱春波教授，清华大学赵争鸣教授，重庆大学孙跃教授，华南理工大学张波教授，华中科技大学文劲宇教授，东南大学黄学良教授，中科院电工所刘国强研究员，海尔集团技术中心总工程师李聃博士等8名专家被选举为副主任委员，秘书处挂靠在天津工业大学，张献博士任秘书长。来自全国14个省、市有关高等院校、科研院所和相关企业近40位专家学者参加成立会议。会议确定了无线电能传输技术专业委员会的主要职责。

无线电能传输技术目前需要研究的主要问题是增大传输距离、提高传输效率和保障安全电磁环境。

无线电能传输作为一项崭新的技术，有着许多诱人的应用前景。五年前甚至是三年前，很多专家还对此抱着公开反对或者观望的态度，而现在，短短的几年过去，反对的人越来越少，许多观望的人已经参加到无线电能传输技术的研究队伍中来，使得我们确信这一技术的魅力无穷。

作为原理最为简洁、同行最容易取得共识的感应耦合无线电能传输技术，是

短距离无线供电的首选，国际上不但出台了相关的技术标准，而且商家已经推出了若干具有无线供电功能的家电应用产品，品种也越来越多。

磁共振无线电能传输技术与感应耦合无线电能传输技术组合应用，将极大地提高短距离无线供电的效率和实用性。

人们为了早日能够接收到太阳能卫星电站源源不断提供的电能不懈努力着。

对高铁列车进行无线供电，可以从根本上避免弓网的滑动磨损、离线、打弧及外部环境的影响，从而显著提高受流质量。无线供电有望成为高铁列车革命性的供电新模式，对促进世界高速铁路的发展具有里程碑意义。

总之，一个满布杂乱无章电线的家电应用现实场景会逐渐离我们远去，“无尾”的电子产品将使得我们的生活变得十分方便，人类靠着聪明和智慧在不断改变我们的生活，也许20年后，在我们生产和生活的每一个角落都离不开无线供电技术，就像现在人们都离不开手机一样，太阳能卫星电站会分配给我们每个人一个供电IP地址，并为我们随身携带或指定的电器随时供电，而电费会从手机上自动扣除。

我们都盼着这一天，也相信这一天一定会到来！

## 参 考 文 献

- [1] Barrett J P. Electricity at the Columbian explosion [M]. Madison: R R Donnelley, 1894: 168-169.
- [2] Covic G A, Boys J T, Kissin M L G, et al. A Three-Phase Inductive Power Transfer System for Roadway-Powered Vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54 (6): 3370-3378.
- [3] Kissin M L G, Covic G A, Boys J T. Steady-State Flat-Pickup Loading Effects in Polyphase Inductive Power Transfer Systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (6): 2274-2282.
- [4] Wu H H, Covic G A, Boys J T, et al. A Series-Tuned Inductive-Power-Transfer Pickup With a Controllable AC-Voltage Output [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26 (1): 98-109.
- [5] Wu Hunter Hanzhuo, Boys John T, Covic Grant Anthony. An AC Processing Pickup for IPT Systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 22 (5): 1275-1284.
- [6] Madawala U K, Thrimawithana D J, Nihal Kularatna. An ICPT-Supercapacitor Hybrid System for Surge-Free Power Transfer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54 (6): 3287-3297.



- [7] Kissin M, Kissin M, Huang Chang-Yu, et al. Detection of the Tuned Point of a Fixed-Frequency LCL Resonant Power Supply [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 22 (4): 1140-1143.
- [8] Boys J T, Covic G A, Elliott G A J Pick-up transformer for ICPT applications [J]. *Electronics Letters*, 2002, 38 (21): 1276-1278.
- [9] Hu A P, Covic G A, Boys J T. Direct ZVS start-up of a current-fed resonant inverter [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, 21 (3): 809-812.
- [10] Si Ping, Hu A P, Malpas S, et al. A frequency control method for regulating wireless power to implantable devices [J]. *IEEE*, 2008, 2 (1): 22-29.
- [11] Hu A P, Hussmann. Improved Power Flow Control for Contactless Moving Sensor Applications [J]. *IEEE Power Electronics Letters*, 2004, 2 (4): 135-138.
- [12] Li H L, Hu A P, Covic G A, et al. Optimal coupling condition of IPT system for achieving maximum power transfer [J]. *Electronics Letters*, 2009, 45 (1): 76-77.
- [13] Huang C Y, Boys J T, Covic G A. LCL Pickup Circulating Current Controller for Inductive Power Transfer Systems [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28 (4): 2081-2093.
- [14] Elliott G A J, Covic G A, Kacprzak D, et al. A New Concept: Asymmetrical Pick-Ups for Inductively Coupled Power Transfer Monorail Systems [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42 (10): 3389-3391.
- [15] Boys J T, Covic G A, Yongxiang Xu. DC analysis technique for inductive power transfer pick-ups [J]. *IEEE Power Electronics Letters*, 2003, 1 (2): 51-53.
- [16] Kissin M L G, Boys J T, Covic G A. Interphase Mutual Inductance in Polyphase Inductive Power Transfer Systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56 (7): 2393-2400.
- [17] Budhia M, Covic G A, Boys J T Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26 (11): 3096-3108.
- [18] Elliott G, Raabe S, Covic G A, et al. Multiphase Pickups for Large Lateral Tolerance Contactless Power-Transfer Systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57 (5): 1590-1598.
- [19] Budhia M, Boys J T, Covic G A, et al. Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems [J]. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2013, 60 (1): 318-328.
- [20] Hao Hao, Covic G A, Boys J T. A Parallel Topology for Inductive Power Transfer Power Supplies [J]. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 2014, 29 (3): 1140-1151.
- [21] Boys J T, Hu A P, Covic G A. Critical Q analysis of a current-fed resonant converter for ICPT