

# 无线电能传输技术发展与应用综述

刘 耀<sup>1,2</sup>, 肖晋宇<sup>1,2</sup>, 赵小令<sup>1,2</sup>,

吴佳玮<sup>1,2</sup>, 杜宇维<sup>3</sup>, 赵宇霏<sup>3</sup>, 王贺阳<sup>3</sup>, 王振兴<sup>3</sup>

(1. 全球能源互联网集团有限公司, 北京 100031; 2. 全球能源互联网发展合作组织, 北京 100031;  
3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:**二十一世纪以来,无线电能传输技术进入飞速发展阶段,相关的理论研究、创新实验以及应用推广都有了长足的进步,随着全球能源互联网的提出和构建,相关技术在未来会有更大的发展潜力和应用价值。本文从无线电能传输技术的发展历史出发,阐述了无线电能传输的诞生与发展;其次重点梳理了磁场耦合式、电场耦合式、微波式、激光式和超声式五种不同的无线电能传输技术在国内外近20年的关键研究动态;然后面向电力系统、交通运输、航空航天等领域,归纳展望了具体的应用场景;最后针对不同的无线电能传输技术分别讨论了各自面临的主要技术挑战。

**关键词:** 无线电能传输; 全球能源互联网; 发展历史; 研究动态; 应用场景展望; 技术挑战

DOI: 10.12067/ATEEE2203007

文章编号: 1003-3076(2023)02-0048-20

中图分类号: TM724

## 1 引言

随着现代科技的发展,全球能源互联网旨在为人类提供清洁可持续的低碳零碳能源,大幅提高全社会电气化水平。如今,用电设备无处不在,不断地提高人们生活质量以及推动各行各业发展。传统的电能传输需要借助于导线,然而伴随着社会电气化程度的提高,人们希冀开发出更为灵活、便捷的无线电能传输技术<sup>[1,2]</sup>。

无线电能传输由诞生到今天经历了120多年的发展,从一个美好的构想演变为一门拥有丰富理论与实践基础的技术。如图1所示,无线电能传输技术根据不同的电能传输机理可被划分为磁场耦合式、电场耦合式、微波式、激光式和超声式五大类,可实现不同距离和功率等需求的能量传输。

## 2 无线电能传输技术的发展历程

为梳理无线电能传输技术发展脉络,本文分别对磁场耦合式、电场耦合式、微波式、激光式和超声

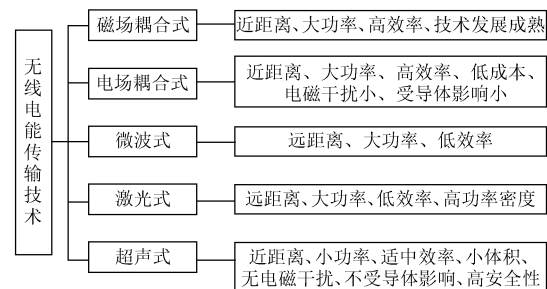


图1 无线电能传输技术分类及特点

Fig.1 Classification and characteristics of wireless power transmission technology

式五类无线传能技术的国内外研究历程展开综述。

### 2.1 磁场耦合式

#### 2.1.1 国外研究历程

无线电能传输领域的开创者是伟大的电气工程师尼古拉·特斯拉。早在1895年,特斯拉在美国纽约第五大道实验室中就通过磁场耦合式无线传能技术成功地隔空点亮灯泡,这也是世界上首次无线传能实验<sup>[3]</sup>。其实验原理如图2所示,特斯拉设计了

收稿日期: 2022-03-03

基金项目: 全球能源互联网集团有限公司研究项目(SGGEIG00JYJS2100026)

作者简介: 刘 耀(1983-),男,内蒙古籍,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统分析、超特高压交直流输电技术及电磁暂态仿真,高压海缆、无线输电及超导等前瞻性输电技术;  
王振兴(1983-),男,陕西籍,副教授,博士,研究方向为真空断路器理论及其应用、电弧等离子体仿真、等离子体诊断、断路器操动机构设计及超声传能技术(通信作者)。

一个磁场耦合式自激励振荡无线电能传输装置<sup>[4]</sup>。首先,电源通过特斯拉变压器为谐振电容充电,当谐振电容两端的电压达到一定阈值时,放电间隙(气隙)会被击穿,这时变压器的副边相当于短路,电容  $C$  与初级线圈  $P$  产生自激励振荡,即初级电路发生谐振,谐振频率由可调电容与可调初级线圈决定。同时相隔数米远的次级线圈  $S$  感应到初级线圈  $P$  产生的磁场,在次级电路中产生电能并为灯泡供电。

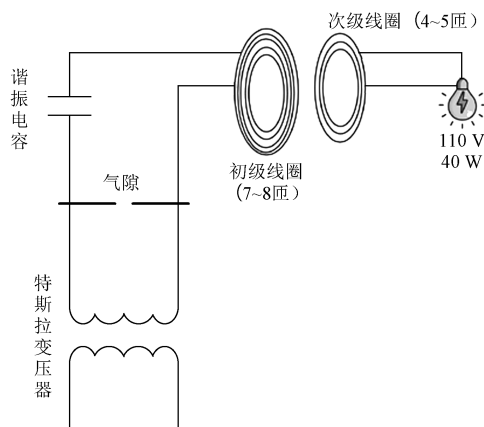


图2 特斯拉隔空点亮灯泡原理图

Fig.2 Schematic of Tesla's experiment

1898年,特斯拉在美国的科罗拉多斯普林斯观测到雷电产生的电信号可以传输极远的距离且衰减很小,由此推断电能可以远距离隔空传输,从而正式提出了无线电能传输的概念<sup>[5]</sup>。然而,受限于早期的理论以及器件的限制,磁场耦合式无线电能传输技术在当时并未得到进一步的发展。

直到1970年,随着半导体器件的突破,磁场耦合式无线电能传输技术逐渐受到人们的重视。1971年,新西兰奥克兰大学的 Don Otto 教授成功通过磁场耦合式无线传能技术为小车供电。1990年,新西兰奥克兰大学的 John Boys 教授团队研制的磁场耦合式无线传能装置使多辆汽车能够在同一个无线电能传输装置上充电运行。1996年,奥克兰联合服务公司在新西兰开发了一种基于磁场耦合式无线电能传输的电动公交车电力系统(30~60 kW), John Boys 教授团队被委托在华卡雷瓦制造了世界上的第一辆商业无线电能传输巴士。

2007年,美国麻省理工学院的 Marin Soljacic 通过在磁场耦合式无线传能系统中引入谐振结构,成功以40%的能量传输效率点亮2 m外的灯泡<sup>[6]</sup>。

2008年美国英特尔公司研究团队使用磁耦合谐振式无线电能传输技术研发出一款可在中远距离

进行无线充电的装置,能够为1 m范围内的中小型功率的设备供电,传输功率为60 W,最大传输效率可以达到75%,能够同时传输能量与信号<sup>[7]</sup>。同年,美国加州理工学院研究团队面向便携式移动设备展开三维空间的无线电能传输技术研究,能够为15 cm内任意位置的用电设备传输3 W的功率<sup>[8]</sup>。

2009年,德国庞巴迪公司投入电动汽车无线充电领域并提出了PRIMOVE技术,为电动汽车提供动态和静态两种充电方式,并且系统在动态充电时仍然有着较高的充电效率。其快速充电设备在10~30 s内最高充电功率可达400 kW,可以大幅度减轻公交枢纽的充电压力<sup>[9]</sup>。

2012年,日本东京大学在传输距离200 mm的条件下,以96%的效率为电动车传输了100 W电能<sup>[10]</sup>。日本埼玉大学采用H型磁心双面绕组构造,在传输距离70 mm的条件下,传输1.5 kW电能,传输效率超过93%<sup>[11,12]</sup>。

2017年,美国斯坦福大学提出了一个基于宇称-时间原理的传能系统,当传输距离在1 m的范围内变化时,传输效率仍能保持恒定<sup>[13]</sup>。

2020年,韩国学者将超导技术应用于耦合线圈,设计了一种可将无线电能传输效率最大化的螺旋型超导共振线圈<sup>[14]</sup>。

2021年,美国佛罗里达国际大学提出了一种适用于电动汽车的动态磁场耦合式电能传输系统的多目标优化设计方法<sup>[15]</sup>。同年,新西兰奥克兰大学提出了一种采用阵列式电感线圈的传能系统,可为移动状态下的电动汽车提供3.3 kW的充电功率<sup>[16]</sup>。

## 2.1.2 国内研究历程

国内有关磁场耦合式无线传能技术的开展较晚,但由于近年来我国在电动汽车行业投入大量资源,并制定了相关的标准与政策,这为磁场耦合式无线电能传输的研究提供了极大的支持和帮助。哈尔滨工业大学的朱春波教授、宋凯团队通过将磁场耦合式无线传能系统的发射线圈通过并联的方式分别置于多段导轨中,从而实现对移动状态下的电动汽车无线供电。该系统相比于传统的结构提升了25%的输出功率和7%的效率<sup>[17]</sup>。王懿杰教授团队针对电动汽车的抗偏移特性展开了深入研究,并设计了一款采用LCC-S拓扑结构以及偏平螺旋线管形状磁耦合结构的无线电能传输系统<sup>[18]</sup>。该系统允许在0.2 m的偏移误差内恒压输出150 V。

天津工业大学杨庆新教授科研团队在磁屏蔽、

线圈的优化设计以及耦合结构等方面做出了大量的研究。该团队研发出大功率传输设备,无线充电系统能够对1 m内的电动汽车进行30 kW的功率传输,效率高达92%。该团队研发设计出一套风能和太阳能结合的无线供电方式为电动汽车供电,同时还提出将该技术应用于高速列车的构想,未来将有望实现高铁无线供电<sup>[19]</sup>。

浙江大学的陈鹰教授团队通过实验,于4 000 m水深中连接90 V直流电源,以90%的效率传输400 W以上电能;王海洋团队通过感应耦合式技术以93%的效率传输400 W以上电能;陆晴云团队在优化设计水下无线电能传输系统中,以90%的效率传输400 W左右电能<sup>[20]</sup>。

西南交通大学在轨道交通无线电能传输方向做了大量的工作<sup>[21]</sup>,图3为该团队研制的分段式轨道供电系统,该轨道带有8个分布式供电装置,全长40 m,全程能以85%的效率传输20 kW。

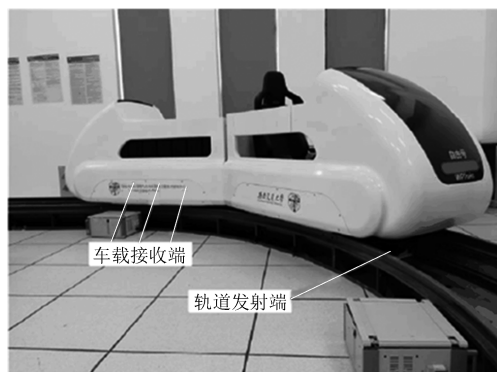


图3 高速列车无线充电系统样机图

Fig.3 Prototype of high-speed train wireless charging system

国内很多企业今年也加入到电动汽车磁场耦合式无线电能传输的研究。2014年,中兴新能源汽车研制的电动汽车无线充电系统输出功率达到60 kW,效率高达90%<sup>[22]</sup>。中惠创智、有感科技等公司也相继完成数十千瓦级别的电动汽车无线充电装置研发,效率均高达90%,可以满足多种电动汽车的充电需求<sup>[23]</sup>。

## 2.2 电场耦合式

### 2.2.1 国外研究动态

1962年,美国电气工程师Paul致力于水下通信并提出电场耦合式无线电能传输方案,但当时并未得到广泛关注<sup>[24]</sup>。直到2008年,新西兰奥克兰大学呼爱国教授团队率先投入电场耦合式无线电能传输的研究,详细分析讨论了其应用场景、耦合机理、稳态特性、控制策略等问题。随后,世界各国也纷纷

展开对电场耦合式无线电能传输的探索 and 实验。

2011年,美国加州大学的Mitchell Kline开始研究电场耦合式无线电能传输系统,并设计了小型气隙电容器样机,可实现高效无线电能传输。另外,其设计的自动调谐回路能够确保电路在不同的耦合电容和负载条件下以最佳频率和最大效率运行<sup>[25]</sup>。

2014年,美国的Ludios极大地提高了电场耦合无线传能系统的传输功率,首次达到了千瓦的级别<sup>[26]</sup>,然而传输距离仍为毫米尺度。

2015年,美国密歇根大学研究团队将电场耦合式电能传输技术应用于电动汽车无线充电领域,采用四块铜片设计了一款气隙距离为150 mm的电场耦合式充电系统,在2.4 W的输出功率下能达到90%的效率。在发生300 mm的偏差下,输出功率下降为2.1 kW,传输效率几乎不变。该工作充分证明了电场耦合式无线电能传输系统不仅能实现大间距高功率的能量传输,还具备极强的抗偏移特性<sup>[27]</sup>。该团队后来又提出双边CLLC拓扑,将传输功率进一步提高至2.9 kW。2018年,该团队提出了一种为电动汽车无线充电的两极板电场耦合无线传能方案,利用汽车底盘与大地杂散耦合构建电流的返回路径,工作频率6.78 MHz,实现3 kW的能量传输<sup>[28]</sup>。

2022年,新西兰奥克兰大学发现耦合电容间的复杂交叉耦合是影响系统谐振和功率传递性能的主要因素,于是设计了一种基于共享电感的解耦电路及相应的补偿网络,成功将系统传输功率提高一倍<sup>[29]</sup>。

### 2.2.2 国内研究动态

国内对该技术的理论研究最早由重庆大学的苏玉刚教授团队于2009年开展,在电路补偿结构、能量信号并行传输、拓扑优化及建模分析等方面取得了一定成果。此外,还有大连理工大学、西南交通大学等高校的学者纷纷展开研究。

大连理工大学陈希有教授团队认为电流型电场耦合式无线电能传输系统的传输电流不易受到耦合电容和负载等参数变化的影响,系统输出更加稳定<sup>[30]</sup>。另外,该团队还构建了基于特斯拉变压器的空间电场耦合单导线电力传输系统,分别在室内室外开展了测试试验,传输距离为30 m,输出功率达到了80 W<sup>[31]</sup>。

重庆大学在四板双端口电容耦合模型的基础上,建立了交叉耦合电容和端口电容的数学模型,并通过多目标参数对电场耦合式无线电能传输系统进行优化设计,最终系统传输功率达到252.3 W,传输



效率高达 87.1%<sup>[32]</sup>。

北京交通大学为了节省电动汽车内部空间,提出了一种用于大气隙电场耦合式电能传输的四板紧密型电容耦合器及其电路模型。该系统能够以 85.97% 的效率传输 1.88 kW 的功率<sup>[33]</sup>。为了增大电场耦合无线传能系统的传输距离,该团队在四极板双端口电场耦合无线传能的基础上引入了中继极板,该系统传输功率为 150 W,传输效率达到 66.9%,传输距离增加至 360 mm。这一改进极大提高了电场耦合无线传能系统的传输功率和传输距离<sup>[34]</sup>。

中国矿业大学从电能传输特性的角度对相同环境下的电场耦合式能量传输与磁场耦合式无线能量传输技术进行了比较分析,并给出了不同环境下无线电能传输技术的选择依据<sup>[35]</sup>。

昆明理工大学李思奇教授团队将电场耦合无线传能系统应用到轨道交通设备的无线充电中,利用车轮与轨道的金属连接作为电流返回路径,构建一个两极板的电场耦合无线传能系统,工作频率为 2 MHz,能够以 91% 效率实现 0.7 kW 的能量传输<sup>[36]</sup>。

## 2.3 微波式

### 2.3.1 国外研究动态

在 1930~1980 年期间,人们主要对微波式无线电能传输技术展开了大量的研究和实验。1930 年,西屋公司研制了一套无线电能传输装置,能够发射数百瓦的微波点亮 10 m 内的灯泡<sup>[37]</sup>。1958 年,雷神公司联合美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)等研究中心成立了自由空间微波功率传输项目,并对直升机微波充电系统展开研究。1964 年,雷神公司与美国空军演示了直升机微波充电系统,直升机仅通过微波无线电能传输在 15 m 左右高度成功连续飞行 10 h。1968 年,随着微波式无线电能传输技术的发展, Peter Glaser 博士提出了具有重要意义的太阳能卫星概念<sup>[37,38]</sup>。他建议在地球同步轨道上捕获太阳的能量,将其转化为微波能量并发射到地球,然后转化为可利用的电能。后续很多微波能量传输技术的突破都是基于该概念完成的。1973 年,太阳能卫星成为一个重要的研究方向, NASA、雷神公司、喷气推进实验室和刘易斯研究中心(现格伦研究中心)开展了相关实验研究。1975 年,该实验在莫哈韦沙漠完成, 288 平方英尺的大型整流天线阵列接收到了来自 1.6 km 外的 2.388 GHz 的微波能量,并成功输出了高达 30 kW 的直流功率。在 1977~1980 年期间, NASA

和美国能源部合作,进一步评估太阳能卫星计划为地球上的消费者提供价格合理能源的可能性。研究完成了一份长达 670 页的报告文件,文件阐明太阳能卫星是一项切实可行的计划,应该在未来实施进一步研究。然而, NASA 赞助的项目经费在 1980 年就终止了,太阳能卫星相关的研究告一段落,美国在太阳能卫星领域的主导地位也就此结束了<sup>[39]</sup>。

2000 年,日本在微波电能传输技术上的研究迎来新的高峰,京都大学学者在 SPRITZ 项目中首次实现了全集成太阳能-微波能量发射装置,能将接收到的 166 W 太阳能转换为 5.77 GHz/25 W 的微波功率输出,传输后由 1 848 个独立整流天线实现整流,并点亮 LED 阵列<sup>[40]</sup>。

2001 年,法国科学家花费 100 万 \$ 搭建了一个微波式无线能量传输系统,传输功率能够达到 17.5 kW,传输距离为 700 m,实现了 10 kW 级微波无线电能的传输<sup>[41]</sup>。

2008 年,美宇航局的科学家在相距 148 km 的毛依岛和夏威夷主岛之间实现了 20 W 的微波无线传输,该实验验证了微波式能量传输技术将太阳能从卫星传回地球的可行性。该实验是目前距离最远的微波电能传输实验,但该系统的传输效率不足 0.1%,输出功率仅达到  $\mu\text{W}$  量级<sup>[42]</sup>。

2015 年,日本三菱科研人员利用微波将 10 kW 能量发射到 500 m 外的接收装置上,并成功点亮接收侧的展示灯。该团队宣布在未来二十年内将该技术应用于空间太阳能电站<sup>[43]</sup>。

### 2.3.2 国内研究动态

1994 年,中国微波之父林为干院士阐述了微波式电能传输技术的基本原理与研究进展,并分析了该技术在现代化建设中的重要意义<sup>[44]</sup>。2005 年上海大学通过微波供能系统不仅成功实现管道探测机器人的无缆供电,还解决了不锈钢管道影响微波传输的问题<sup>[45]</sup>。华南理工大学章秀银团队对微波电能传输技术的研究较为全面,其主要应用目标为“信能同传”,在物联网设备应用中极具前景<sup>[46,47]</sup>。2013 年,四川大学搭建了千米千瓦级微波能量传输实验装置,其进行电能无线传输的总效率达到 5.71%,对国内在微波无线电能传输领域的探索具有重要意义<sup>[1,48]</sup>。2021 年,中国电力科学院研制十米级微波传能样机,准备应用到高空无人机、杆塔监控设备、无线传感网络等小功率、中远距离场景中,实现隔空能量补给。

## 2.4 激光式

### 2.4.1 国外研究动态

激光式无线电能传输最初是由 NASA 为实现太阳能卫星计划而提出的,但当时受限于激光器和光伏电池等器件效率低下的原因,该技术发展较慢,难以实际应用。直到 20 世纪末 21 世纪初,随着高功率激光器的长足发展和高效率光伏电池技术的发展,激光式无线电能传输技术再次得到关注。

1997 年,日本近畿大学开始研究激光能量传输系统并将其应用到月球探测车上。该系统在月球环形山外围收集太阳能,再以激光的形式将能量传送给阴影处的探测车,传输距离最远可达 1 000 m<sup>[49]</sup>。

2003 年,NASA 首次进行了微型飞行器的激光无线供能飞行实验。实验中利用 1 kW 红外激光器对 15 m 外微型飞行器表面的三结 GaInP<sub>2</sub> 光伏阵列(转换效率 17.7%)进行照射,为微型飞行器提供了 6 W 的电力,使其持续飞行时间超过 15 min<sup>[50]</sup>。

2006 年日本近畿大学展示了激光式无人机无线电能传输系统,并讨论了微波无线能量传输在月球探测车、核事故救援机器人、激光风筝飞机等应用实例<sup>[51]</sup>。

2009 年,美国 Laser Motive 展示了四旋翼直升机的激光供能悬停飞行试验,飞行时长达到 12.5 h。2012 年,该公司与 Lockheed Martin 共同完成小型无人机激光能量传输系统,用于美军特种作战部队<sup>[52]</sup>。同年,又演示了一种新型激光充电系统,成功将激光式无人机无线电能传输系统的持续飞行时间延长到 48 h 以上<sup>[49]</sup>。

2016 年,俄罗斯“能源”火箭航天公司成功通过激光向相距 1.5 km 的智能手机输电。2021 年,俄罗斯开展代号“鹈鹕”的太空实验,采用激光无线电能传输技术为环绕国际空间站的小型卫星和航天器提供电能,未来还计划从太空太阳能电站为地球的偏远地区或月球的探测车输电<sup>[53]</sup>。

### 2.4.2 国内研究动态

近年来,国内多所高校和科研机构投入到激光式无线电能传输技术研究,对大功率激光器、高效率光伏电池和激光大气传输等方面进行深入研究。

2013 年,清华大学提出了采用反馈谐振的激光能量传输系统及理论模型,能够有效降低激光器的阈值电流和系统损耗<sup>[54]</sup>。

2013 年,北京理工大学搭建了激光无线电能传输系统,并详细阐述了该系统各部分的设计思路 and 关键参数。该系统能够以 18.1% 的效率相隔 10 m

传输数瓦能量<sup>[55]</sup>。次年该团队又演示了百米级高功率激光传输系统,输入功率达到 24 W,整体传输效率为 11.6%<sup>[56]</sup>。

2014 年,山东航天电子技术研究所分别在两艘飞艇上搭建激光无线传能发射系统和接收系统,演示两艘飞艇在飞行过程中进行激光传能的实验。两飞艇间距在 50~100 m 区间变化,飞行速率 5 m/s,传输功率数十瓦,最高效率可达 16%<sup>[57]</sup>。

2020 年,南京航空航天大学对激光器和光伏电池在不同工作模式下的效率特性展开研究,发现通过控制激光输入电流占空比能有效提高系统效率,同时还开展激光能量与信息同时传输的研究<sup>[58]</sup>。

## 2.5 超声式

### 2.5.1 国外研究动态

超声式无线电能传输技术的起源最早可追溯到 1931 年,美国研究员 Alexander Mclean Nicolson 成为第一个使用压电材料利用声波进行能量传输的研究者<sup>[59]</sup>,发现了一种全新的能量传输方式。但此之后,超声式无线电能传输技术长时间受限于压电材料并未引起人们关注。1985 年,美国纽约海伦斯医院的 Cochran 教授在生物医学方向首先采用了超声波无线电能传输技术<sup>[60]</sup>,通过在生物体内植入压电换能器,既能收集体外传来的超声波,又能收集生物体运动产生的声波能量。如今,国内外许多研究团队已经对超声传能系统进行了更深入的研究,并实现了在医疗、航天、军工等领域的基础应用。

2008 年,NASA 研究人员设计一套千瓦级超声能量传输系统,是目前功率等级最高的超声传能实验装置。该装置采用郎之万超声换能器作为超声波的发射和接收装置,经过仿真优化,该系统成功透过 5 mm 的金属壁点亮 10 盏 100 W 灯泡,效率高达 84%<sup>[61]</sup>。

2010 年,以色列特拉维夫大学设计一套用于植入设备供电的超声波能量传输装置。在满足人体组织安全极限情况下,该装置可透过 40 mm 厚生物组织向植入设备传输 70 mW 功率,效率可达 27%<sup>[62]</sup>。

2012 年,美国应用物理科学研究公司研究了超声传能系统的阻抗匹配网络以及超声能量与信号同步传输技术,成功实现能量与信号同时穿透 63.5 mm 厚的金属墙,数据传输速率达到 17 M/s,传输功率为 50 W<sup>[63]</sup>。

2015 年,新西兰奥克兰大学提出了一种新的超声传能系统建模方法以及等效电路,能够有效计算系统功率传输特性<sup>[64]</sup>。

2020年,法国 Vermon SA 公司采用声光层析重建方法得到了超声传能系统的声压场图像,并探讨了超声换能器透过空气向人体植入设备传输能量的可行性<sup>[65]</sup>。

2021年,美国陆军研究实验室通过超声发射阵列激发不同的兰姆波振动模式,将声功率通过管道表面传递到特定位置输送能量,传输效率达到 33%<sup>[66]</sup>。

### 2.5.2 国内研究动态

2011年,东南大学首先在国内开始探索超声传能技术在空气中应用的可行性。为了提高声波在空气中的透射率,该团队采用带有辐射圆盘的压电换能器搭建超声传能系统。该系统间隔从 2 mm 提升至 20 mm 时,传输效率由 7% 降至 1%<sup>[67]</sup>。

2016年,大连理工大学开展水下超声无线电能传输系统研究,详细阐述设计思路及参数计算。另外,实验装置采用特殊的 1-3 复合压电换能器,使声波更易于在水中传输。该系统发射端与接收端相隔 6 cm,能以 30% 传输效率传输 2.85 W 功率<sup>[68]</sup>。

2017年,重庆大学搭建了隔金属超声能量传输系统,对比了发射侧和接收侧采用不同谐振网络拓扑结构的区别,最终设计了一套采用 LC-C 拓扑的超声传能系统,效率最高可达 46.9%<sup>[69]</sup>。

2021年,西安交通大学提出一种二维超声无线电能传输等效电路模型<sup>[70]</sup>,并开展水下超声无线电能传输实验,采用声阻抗匹配技术设计适配的水下超声换能器,并通过仿真对该系统进行优化设计<sup>[71]</sup>。

## 3 无线电能传输技术应用展望

无线电能传输技术使用电设备摆脱了传统导线的限制,更加灵活、便捷的供电方式将对各个领域产生重大影响,是构建全球能源互联网的重要技术之一。本文分别从电力系统、交通运输、航空航天、水下探测、家居办公以及医疗器械六个领域描述并展望具体应用场景。表 1 为各项技术在不同领域的应用情况。

表 1 各项技术在不同领域的应用情况

Tab.1 Application of wireless power transmission technology in different fields

应用领域	无线传能技术	5年内大规模推广可能性
电力系统	①②③④⑤	☆☆☆
交通运输	①②	☆☆☆☆☆
航空航天	①②③④⑤	☆
水下探测	①②⑤	☆☆
家居办公	①③④	☆☆☆☆☆
医疗器械	①②⑤	☆☆

注:①—磁场耦合式;②—电场耦合式;③—激光式;④—微波式;⑤—超声式;高—☆☆☆☆☆;低—☆。

## 3.1 电力系统

电力系统中的用电设备经常会涉及隔离供电以及绝缘等问题。无线传能技术种类较多,有适合近场大功率高效率传能的磁场耦合式和电场耦合式电能传输技术,有适合穿透外壳且无电磁兼容问题的超声式电能传输技术,还有适合远场的激光和微波无线传能技术,随着相关研究的深入,足以为电力系统提供更加贴合、可靠的供电方案。

### 3.1.1 输电线路

为了提高电力系统的可靠性,输电线路需要部署大量在线监测设备,以实时监测电线温度、电缆振动、风速、太阳辐照度、电缆电流和电压等数据。为保证在线监测系统长期在室外运行,要求电源单元具有良好的稳定性和可靠性。

目前,高压母线侧的监测设备通过电流互感器取电技术能够得到较为稳定的供电,但是高压输电杆塔侧的设备由于电气绝缘问题却无法从输电线路直接取电。因此,香港大学于 2016 年提出通过无线电能传输技术将母线侧电流互感器的电力安全传输到杆塔侧<sup>[72]</sup>,既能满足监测设备的供电需求,又能避免破坏输电线路的绝缘性能,实现安全可靠的绝缘供电。2018 年,武汉大学王军华教授团队结合输电线路和输电塔的运行环境,从安装位置、耦合结构、驱动拓扑设计等方面提出整体方案。为了提高系统在高压环境下的适应性,提出了约束潮流路径、提高系统质量等优化方法,成功设计出一款采用磁场耦合式无线传能技术的绝缘子传能系统<sup>[73]</sup>。如图 4 所示,能量从绝缘子发射线圈处传输到接收线圈并成功点亮灯泡。该系统能够在高压条件下稳定运行,并能为接收端的监测设备提供 16.7 W 功率,传输距离为 1.5 m,效率为 15%。

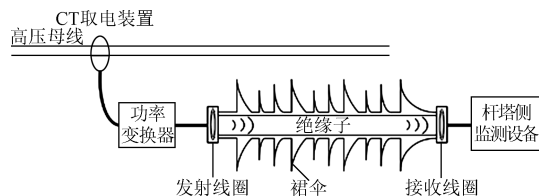


图 4 绝缘子传能实验原理图

Fig.4 Schematic of insulator power transmission experiment

### 3.1.2 变电站

在高压直流输电系统中,电压等级可以高达数百甚至数千千伏,这为其中电能变换单元的设计带来了极大挑战。现代电力电子技术的发展已经可以使基础器件工作在高压大电流的条件下,但是其配



套的驱动单元供电仍存在问题。

瑞士 ABB 公司提出一种采用磁场耦合式无线传能技术的方案,电源通过发射线圈对绝缘距离外的接收线圈供电,然后接收线圈将能量提供给驱动电路模块,驱动相应的半导体器件工作,从而实现驱动信号相互隔离<sup>[74]</sup>。但是该无线传能系统体积较大,且只能一对一单独供电,占用空间多。因此日本学者提出使用一个发射线圈为多个接收线圈连接的驱动模块同时供电<sup>[75]</sup>。为了进一步缩小无线传能系统的体积,美国有学者提出分别将发射与接收线圈嵌入在 PCB 板内部,并对整个系统进行环氧灌封,保证系统的电气绝缘性能<sup>[76]</sup>。另外,还有学者提出采用超声电能传输技术的绝缘门驱动模块电源<sup>[77]</sup>。超声功率传输的功率密度较大、结构简单,但是该模型在高压环境中使用容易发生爬电击穿,因此还需进一步研究和优化。

随着高压柔性直流电网工程的建设,对全控型半导体器件的需求越来越高,无线传能技术可以更好地解决门驱动模块供电困难的问题,提升高压柔性直流系统的可控性和安全性,进一步加快柔性直流输电技术的推广应用。

### 3.1.3 电力巡检

近年来,我国电网规模日益扩张,为了确保电力系统各个环节正常运行,现已投入了大量的巡检机器人和无人机来提高巡检效率与准确性。

为了提升巡检机器人和无人机工作的可靠性、安全性与可持续性,国内外研究机构提出建立巡检机器人和无人机的无线充电桩,机器人和无人机可自主移动至充电点,通过无线方式补充电能,并在充电完成后继续巡检。2020 年,北京交通大学还专门针对变电站巡检机器人设计了一套动态无线充电系统<sup>[78]</sup>。该系统包括电能变换子系统和导轨切换子系统两部分,电能变换子系统为变电站巡检机器人进行动态高效率充电,导轨切换子系统则在巡检机器人充电过程中提供准确可靠的导轨切换控制,有效提高了机器人的巡检里程,减轻了所携带电池组的重量,减少了电力巡检维护人员的工作量,推动电力巡检工作向着更智能、更高效的方向发展。

2021 年,日本东芝公司设计了一种面向机器人和无人机的磁场耦合式无线充电系统,并成功测试了无人机在该系统降落、快速充电、起飞以及高精度摄像等操作,展示了无线电能传输技术在远距离巡检续航方面的巨大潜力<sup>[79]</sup>。

### 3.1.4 空间太阳能电站

目前,随着空间技术的迅速发展,特别是空间运载、航天器及太阳能电池等技术日益成熟,美、日、欧等发达国家相继开展了关于空间太阳能电站研发。当前,我国能源日趋短缺的现状与经济迅速发展的矛盾也非常突出,从世界范围内能源开发利用的研究现状看,通过建设空间太阳能电站解决能源供应问题同样是切实可行的途径。

2015 年,山东航天电子技术研究所提出了一种模块化、分布式的激光无线传能空间太阳能电站系统。2019 年,美国投入 1 亿 \$ 开发太阳能卫星系统,用于向地球传输能量。另外,2018 年我国正式开展空间太阳能电站项目,首个实验基地坐落在重庆璧山。2021 年,该项目已搭建一套高空无线能量传输浮空平台,未来该实验基地还会进行大规模的发展和建设<sup>[1]</sup>。

### 3.2 交通运输

无线电能传输技术在交通运输领域的应用分为电动汽车、轨道交通、物流运输和管道运输四个方面。

#### 3.2.1 电动汽车

随着电动汽车时代的到来,国内外各大车厂商以及科研机构等组织都在积极开展电动汽车无线充电技术的研究,并取得了显著的成果。2018 年 8 月,中国电科院宣布成功搭建 181 m 长的移动式无线充电路段,可为移动状态下的电动汽车提供 20 kW 的无线充电。2018 年国家电网公司对外发布了世界首条融合了动态无线充电、无人驾驶以及路面光伏发电三项前沿技术的“三合一”电子公路(如图 5 所示)。该公路全长 500 m,动态无线充电系统由重庆大学和东南大学合力研发<sup>[80-82]</sup>。



图 5 中国电科院动态无线充电项目与“三合一”电子公路

Fig.5 Dynamic wireless charging project and “Three in one” electronic road

2020 年,上汽实现了全球首次大功率无线充电电动汽车量产,让电动汽车正式进入“无线时代”。另外,人们还针对公交车站、交通路口等电动车短暂

停留的场所展开了快速短时间静态充电的研究。美国的 Momentum Dynamics 公司就面向这类应用场景开发了多个无线充电系统,并已投入使用。

### 3.2.2 轨道交通

2015 年,韩国铁道研究院成功研发轨道列车无线充电系统,整个发射轨道长 128 m,该系统能够以 82.7%效率传输 1 MW 功率<sup>[83]</sup>。日本铁路技术研究所研制了一种轨道车辆非接触式供电系统。其线圈结构采用 8 字型线圈,有效降低轨道涡流损耗,为行驶过程中列车提供稳定的传输功率<sup>[84]</sup>。2021 年 1 月 7 日,西南交通大学的何正友教授团队成功研发基于磁场耦合式的新型无线供电制式城轨车辆,该车辆在中车唐山厂成功下线意味着国内首次实现了城轨车辆“有线”到“无线”的供电突破,打破了发达国家对城轨车辆无线供电的技术垄断。该城轨车辆无线充电系统传输功率达到 500 kW,在 15 cm 间隙下实现系统传输效率超过 90%,如图 6 所示。



图 6 国内首台无线电能传输城轨车辆

Fig.6 China's first wireless power system urban rail vehicle

### 3.2.3 物流运输

近年来,物流机器人在运输领域如雨后春笋般蓬勃发展,越来越受到企业青睐。有学者提出基于智能物流仓储机器人的无线充电系统<sup>[85]</sup>,该系统采用磁场耦合式无线传能技术,在物流仓储机器人工作路线下方铺设发射线圈轨道,并在机器人内部加装无线充电接收装置,从而保证机器人续航。还有学者面向物流无人机提出一种无线充电运输方案,当无人机在运输过程中电量过低时通过 GPS 导航技术飞至最近的充电桩补充电量<sup>[86]</sup>。将无线电能传输技术应用于物流运输领域,能够有效增加无人机和机器人的工作续航,减少人力、物力的损耗,从而快速推进现代物流走向智能化、无人化。

### 3.2.4 管道运输

相比于其他运输方式,管道运输通常密封在地下且相对坚固,不仅可以实现资源的连续输送,而且

工作寿命也相对较长,运输更加环保和安全。如今,为了进一步实时监控管道健康状况以及维护系统,很多研究机构开发了许多智能机器人来监控及维护管道<sup>[87]</sup>。目前,管道机器人主要通过有线的方式与系统其他部分进行连接,虽然也有无线工作模式,但是机器人在该模式下持续工作的时间有限,且必须在电量还有剩余时就要提前返回,避免中途电量耗尽导致无法返回。无线传能技术可有效增加管道机器人的工作时间与可靠性,通过在管道外侧定点建立无线充电区域,并将无线电能接收装置置于机器人内部,当机器人电量不足时,会自动前往充电区域补充电量,并在充满电后继续执行任务。另外,还可以为管道机器人增加双向无线传能功能,当管道机器人途经电量较低的传感器时,可启动反向无线充电为传感器供电。从而有效避免管道内部传感器电池定期更换问题,极大地节省了人力物力。然而,管道传感器及机器人无线充电的相关研究较少,还有待进一步关注与发展。

## 3.3 航空航天

无线电能传输技术在航空航天领域的应用分别从无人机、卫星旋转供电和外星探测三个方向展开综述。

### 3.3.1 无人机

无人机由于其隐蔽性好、造价低、可重复使用、操作灵活和易于起降等优点,被广泛应用在航拍、新闻报道、安全巡检等领域。在无人机的各项性能指标中,续航时间长短一直是判断无人机优劣的重要指标之一。

为了提升无人机的续航能力,美国的 Lockheed Martin 公司在 2012 年成功研发激光功率传输系统将无人机的飞行时间从 2 h 延长到 48 h 以上。2014 年,我国航天科技集团展示了高空中无人机对无人机进行充电的技术<sup>[57]</sup>,充电距离维持在 50~100 m,系统最大接收功率为 13.43 W,效率为 16.08%。2015 年,美国科罗拉多大学研发了一种基于微波能量传输的小型无人机无线充电系统,充电功率为 5 W。2020 年,伦敦的帝国理工学院针对大疆 Matrice 100 型号的四旋翼无人机设计开发了一套无线充电系统<sup>[88]</sup>。当无人机降落在充电平台上的任何位置时,即使产生一定的横向偏移或角度偏差,该系统都能够以 100 W 的功率向无人机提供电力,与适配的有线充电器充电功率相同。2020 年,韩国科学技术院设计了电场耦合式无人机无线充电平台,实



现以 90% 的效率为无人机提供 100 W 功率<sup>[89]</sup>。2021 年,东芝公司研发了一种适用于面向架空输电线路巡逻的无人机磁场耦合式无线传能系统,充电功率高达 400 W,效率为 78%<sup>[79]</sup>。同年,天津工业大学设计了基于磁场耦合式的无人机双向无线充电系统<sup>[90]</sup>,该无人机既可以向传感器传输能量,又可以接收无线充电桩的能量。

### 3.3.2 卫星旋转供电

卫星在太空中执行任务时经常需要转动天线、机械臂及太阳能电池翼等部件。为了保证卫星的旋转机构正常工作,一般会采用导电滑环来传输电能和信号。然而,导电滑环的电刷和汇流盘环道会在运行过程中发生摩擦<sup>[91]</sup>。卫星在轨器件如果磨损过多,产生的磨屑会降低滑环绝缘性能,引起破坏性放电,从而导致卫星故障甚至直接报废。

理论上,无线传能技术可更出色地完成卫星旋转机构供电任务,一方面可以稳定地传输能量与信号,并保持系统的绝缘性能。另一方面无线传能没有摩擦损耗的问题,不会引起放电从而导致卫星出现故障。然而暂时还没有相关研究,卫星旋转无线传能系统的可行性与可靠性还有待进一步探究。

### 3.3.3 外星探测展望

未来的深空探测需要在外星建立基础设施、通信基站、运载工具和传感器等设备。无线电能传输技术可以在外星构建电力和通信网络系统,灵活地向电力和通信设备分配电力,从而有力地推动科学技术全面发展,为航天事业做出更大贡献。

## 3.4 水下探测

无线电能传输技术在水下探测领域分别从水下机器人以及海洋观测网两个方面展开讨论。

### 3.4.1 水下机器人

近年来,为了提高水下机器人的工作续航时间,人们展开了采用无线电能传输技术为水下机器人供电的研究。目前,水下机器人无线充电系统主要涉及磁场耦合式、电场耦合式以及超声无线传能技术。

磁场耦合式的相关研究开展较早,1994 年美国威斯康辛大学开发了基于磁耦合谐振式水下 2.5 kW 级导轨式无线充电装置<sup>[92]</sup>。2001 年,美国的伍兹霍尔海洋研究所研发出了面向水下机器人的磁场耦合式无线传能系统,该系统可在 2 000 m 水深,向水下机器人传输 200 W 的电能,效率约为 79%<sup>[93]</sup>。我国哈尔滨工业大学的朱春波教授团队研发的水下无线电能传输装置传输功率高达

10 kW,传输效率为 91%,是目前功率最高的水下无线充电系统之一<sup>[94]</sup>。然而,磁耦合式水下无线传能系统的传输距离受限于发射线圈的尺寸,当大于发射线圈半径时系统的效率会急剧下降<sup>[95]</sup>。另外,发射线圈还需要经过防水抗压封装,进一步缩小了水下传输距离。如果想要增大磁场耦合式传能系统在水下的传输距离,只能考虑增加线圈半径,不利于水下设备的设计<sup>[96]</sup>。

由于海水介质能有效地增加电场耦合式无线传能系统的耦合电容,提升系统传输能力,因此有学者认为电场耦合式无线传能技术是一种在水下无线传能场景中很有潜力的方法。西安科技大学提出一种双向电场耦合式水下无线传能系统,传输距离达 10 cm,双向传输效率均达到 80% 以上,系统能够更有效地平衡多个水下设备能量,并有效提升续航能力<sup>[97]</sup>。美国德雷塞尔大学在考虑绝缘层的影响下,建立了一种传输距离达到 200 mm 的电场耦合式水下长距离无线传能系统。欧洲有学者通过实验发现电场耦合式水下无线传能系统的接收端即使发生旋转也不会影响传输功率<sup>[98]</sup>。日本学者发现电场耦合式水下无线电能传输系统的带宽很长,系统的负载功率从 50~500 kHz 的频率范围保持恒定<sup>[99]</sup>。然而,在海水条件下,耦合电容将具有介电电阻。导电海水会产生额外功率损失,因此未来需要进一步研究电场耦合式水下无线传能系统的损耗问题。

超声式无线电能传输系统因在水中没有电磁干扰与涡流损耗问题的特点受到人们关注<sup>[96]</sup>。2015 年,大连理工大学研究了水下超声式无线传能系统的阻抗变换技术<sup>[68]</sup>,2018 年搭建超声水下无线传能系统与磁场谐振式无线传能系统,通过实验对比得出超声传能的方式更适用于远距离传输的结论<sup>[100]</sup>。目前,水下超声无线传能系统的应用研究非常少,限制其效率的主要问题是压电换能器与海水声阻抗不匹配,导致声波在海水中发生多次反射产生衰减。一旦该问题解决,将极大地提高超声水下无线传能系统的效率。

根据不同无线传能技术的特点,可以为不同环境的水下机器人制定适宜的无线充电方案。随着水下无线传能技术的发展,将极大地提高水下机器人的工作时间与可靠性,对水下探测领域有重要意义。

### 3.4.2 海洋观测网

随着世界各国对海洋经济的关注与重视日益增加,海洋观测网成为了世界上各国争相研究的领域。

海洋观测网是一种包含多种传感器的混合型物理网络,应用范围十分广泛,可以进行相关数据收集、污染预测、海洋采矿和海洋监测。可靠的水下传感器网络是海洋监测系统的核心,其监测的数据能提供必要的海洋数据,因此水下传感器网络的完整以及寿命长短,会直接影响对监测区域的监测效果<sup>[101]</sup>。

基于海洋观测网传感器节点供电问题,有学者提出采用水下无线传能技术的供电方案,美国、意大利和日本等国家率先对该领域展开研究。1997年,意大利研发了磁场耦合式船载拖拽供电装置为水下传感器供电<sup>[102]</sup>。2007年,日本提出了一种非接触式的动力馈送与数据传输系统,实验证明传感器不仅可通过该系统获得约 180 mW 的功率,还能与水面定位浮标之间实现双向信号传输<sup>[103]</sup>。2011年,天津大学设计了基于磁场耦合式无线电能和数据传输系统,为海洋监测技术的发展提供了一种新的思路<sup>[104]</sup>。2017年,天津大学又设计了一套基于浮标装置的水下无线电能传输系统,该系统可以实现能量与信号同时传输,输出功率在 10 W 以上,数据传输基本无误<sup>[105]</sup>。

现有的供电方案都是基于电感耦合的原理,并借助一条穿过传感器与电源的锚链传输能量。除此之外,还可以研究水下机器人双向无线充电技术,从母船等充电平台取电,再为海洋观测网的传感器节点依次供电,既提高了传感器节点供电的灵活性,又增加了其工作时长。但是目前海洋观测网传感器节点的机器人供电方案相关研究几乎没有,还有待进一步的关注与开发。

### 3.5 家居办公

随着科技的发展和社会的进步,生活中的电子产品越来越多。为了摆脱繁杂的电线,提升人们的充电体验,国内外对基于无线电能传输技术的电子产品充电设备开展了大量研究。

目前,市场上最常见的无线充电器需要手机紧贴并对准充电底座才能有效充电,并且充电底座仍旧需要一根电源线与插座相连。虽然省略了人们给手机插电线的操作,也提高了一定的手机续航能力,但是从节约空间和节省电线的角度看,相比于有线电子产品,并没有本质的提升。

相比于近距离无线充电,远距离无线充电技术明显更加贴合人们的需求与期待。美国的 Powercast 公司发布了一款无线充电发射器 PowerSpot,这款充电器最大的特点就是充电距离达到 24 m 远,只

需要将接收芯片安装在用电设备中,PowerSpot 就可以将 915 MHz 频段的微波发射到充电范围内的接收芯片上为用电设备供电,最多可支持 30 个设备同时充电。然而,该产品最大的缺陷就是功率太低,仅能发射 3 W 的功率。

以色列的 Wi-Charge 公司致力于红外激光无线传能技术,将照明与红外发射技术结合开发了一款红外激光无线充电灯,将灯布置在房间中心,可以向四周发射红外激光,再通过一款光伏电池接收器接收能量为用电设备供电,该装置最远可以为 200 m 外的设备供电,如图 7 所示。



图 7 Wi-Charge 红外激光无线电能传输

Fig.7 Wi-Charge infrared laser wireless power transmission

2019年,日本东京大学演示了一款全新无线电能传输装置在房内的应用,该团队通过在 3 m<sup>2</sup> 大小房间墙壁和地板上埋入供电装置,成功在房间内部产生磁场并能够为用电设备提供 100 W 充电功率,该研究团队宣称该装置工作时对人体安全无影响。

2021年1月29日,小米宣布成功研发隔空无线充电系统,该系统基于微波式无线电能传输技术,使用 144 个相控天线作为发射阵列,内置 5 个相位干涉天线锁定手机的空间坐标。其传输距离可达数米,能够同时为多个设备提供 5 W 充电功率。2021年8月30号,日本东京大学发明了一种利用腔基多模态共振器的室内磁力准静态无线充电系统,其研究成果发表在 Nature Electronics 期刊<sup>[106]</sup>。该无线充电系统可为室内用电设备提供 50 W 功率,另外,该团队还测量了该系统对人体的安全性,通过实验证明其电磁波吸收比值(Specific Absorption Rate, SAR)和内部电场强度满足安全标准。该无线充电系统极大地提高了室内用电设备供电的灵活性,但是缺点是必须改变整个环境才能使系统工作,易于在新建建筑物中实施,但是现有建筑物必须经过改造才能适配这种充电方式。随着无线传能技术的发展,人们距离家居设备无线化的目标越来越近。



### 3.6 医疗器械

随着医疗技术快速发展,植入式医疗设备不仅能够针对某些疾病进行药物定位治疗、长期实时监测、术后康复诊断等,甚至可用来代替某些功能丧失或功能不全的器官。主要包含心脏起搏器、人工心脏、人工耳蜗、脊髓电刺激器、植入式无线传感设备和心房除颤器等。

目前,植入式医疗设备领域的相关研究主要基于磁场耦合式、电场耦合式、微波和超声四种技术。其中,磁场耦合式无线传能技术具有很强的生物组织穿透能力,可以穿过一些人体组织进行稳定的能量传输。2001年7月,美国的 Abliomed 公司研制出世界第一个无线充电的人工心脏 Abio Cor。2011年,美国华盛顿大学在磁场耦合式供电系统中引入中继线圈,将传输距离提高到1 m以上,传输功率最高16 W,效率为50%左右,但是植入线圈尺寸较大,直径为9.5 cm,不利于实际应用,且没有考虑该系统对人体的影响。我国的南京航空航天大学、河北工业大学和天津工业大学等研究机构也对磁场耦合式无线传能植入式设备进行了相关的研究,主要为小型化、优化结构、抗偏移特性等方面的研究。然而,由于金属元件(如电池和密封包装)的存在,磁场耦合式的线圈很难集成到微型植入物,需要在植入式医疗设备增加寄生负载,降低了其性能。此外,植入设备的小型化意味着系统需要具备更高的功率传输密度,因此会产生更强的电场和磁场,对人体和设备产生影响<sup>[107]</sup>。

2013年,新加坡国立大学提出了基于电场耦合式的植入式无线传能系统研究<sup>[108]</sup>,该系统工作频率为402 MHz,能够透过5 mm的皮肤进行能量传输,系统效率达到67%。2019年,印度有学者针对神经植入式传感器建立了基于人体组织的电能与信号并行传输模型<sup>[109]</sup>。2020年,奥克兰大学针对深度植入生物设备提出了一种电场耦合式无线电能传输方法,在满足人体安全的前提下,不受设备植入深度的影响恒定输出10 mW功率<sup>[110]</sup>。

2014年,斯坦福大学的 Ada Poon 教授率先展开基于微波的植入式无线传能系统研究。该团队通过对分布电流进行仿真分析,设计了一种十字槽天线。同时对系统效率、磁场分布、热效应等方面进行了深入的研究<sup>[111]</sup>。后续还设计了金属平板缝隙发射天线以及螺旋接收天线<sup>[112,113]</sup>,整个装置体积在毫米级,几乎可以用于人体任何位置,在满足人体安全的前提下,可以为植入设备提供毫瓦级的充电功

率。另外,英国学者提出了一种用于无线起搏应用的高效可植入偶极整流天线的设计方法,整流器效率为65%,可为植入设备提供3 V的输入电压<sup>[114]</sup>。

超声式无线电能传输系统几乎不会产生磁场与电场,更符合人体安全要求。2011年,美国普渡大学设计了一款可通过水电解对肿瘤进行原位氧化的超声无线供电装置。该装置尺寸为1.2 mm×1.3 mm×8 mm,微小的体积可以直接插入肿瘤内部<sup>[115]</sup>。同年,美国亚利桑那州立大学提出了一种超声式无线神经刺激器,在传输功率为23 mW的情况下,超声波对人体的影响远远低于安全阈值<sup>[116]</sup>。2012年,英国伦敦帝国理工学院开发了一种带有新型多层接口的植入设备,能够通过磁场耦合和超声两种方式无线传输能量和信号<sup>[117]</sup>。2013年,韩国电子通信研究院使用1-3型复合压电换能器,有效提高了传输距离和效率<sup>[118]</sup>。2014年,美国加利福尼亚大学通过实验证明小型化超声无线传能系统比相同尺寸的磁场耦合式系统具有更高的传输效率<sup>[119,120]</sup>。2016年,美国西南大学针对深度植入医疗设备提出一种超声无线充电系统,传输距离为5 cm,可以在210 s内为0.22 F的超级电容器快速充满电<sup>[121]</sup>。2017年,英国纽卡斯尔大学针对视觉皮质假体植入设备设计了一种超声无线传能系统,该系统能够以15%的效率传输5 mW<sup>[122]</sup>。2018年,美国宾西法尼亚州立大学提出了一种混合式无线传能装置,采用将磁场耦合式与超声无线传能系统级联的方式来为植入式医疗设备供电<sup>[123]</sup>。

2021年,重庆医科大学提出一个采用聚焦超声发射器和小型1-3压电复合材料接收换能器的植入式医疗设备的无线传能系统,传输距离达到150 mm,传输功率为60 mW<sup>[124]</sup>。同年,我国香港城市大学研究人员受到自然界树木独特三维互联结构的启发,开发了一套全新的柔性压电陶瓷加工工艺,制造了多级互联各向异性仿树木压电陶瓷复合材料,并进一步开发了超声能量收集器及其系统。该系统同时兼备在纵向上的高压电性以及横向上的柔性,而且其声阻抗也与人体组织更加匹配,并且具备良好的生物安全性,克服了传统压电材料难以应用于可植入设备的困境<sup>[125]</sup>。

## 4 主要技术挑战

### 4.1 磁场耦合式

#### 4.1.1 优化线圈耦合器

线圈耦合器作为电磁转换的核心部分,其参数



对系统传输效率、功率和距离等性能有重要影响。在同等传输水平下,耦合器的设计力求更小的体积、更低的漏感以及更低的损耗。

为了提升耦合器性能,一方面可以采用新结构来优化磁路设计,减小能量转换环节的损耗,进而提高耦合系数和传输效率;另一方面还可以对耦合器的材料进行优化。例如,超导材料线圈的交流损耗远低于常规线圈,可有效提升无线电能传输系统的传输效率。文献[126]发现超导线圈不仅能够显著提高磁场耦合式系统传输效率,还能大幅度提升能量密度。另外,电磁超材料线圈具有良好的聚焦磁通能力,故而可以提高谐振线圈之间的耦合系数,增大能量转换效率,扩大传输距离。

#### 4.1.2 多负载技术

多负载供电技术目的在于同时满足多个用电设备的供电需求。然而,由于用电设备的位置不同、负载不同以及相互干扰等问题,使得各自的接收线圈难以保持相同的谐振频率,从而导致系统传输效率大幅度下降。因此,在多负载相互隔离、多负载协同管理等关键技术仍需做进一步突破。

#### 4.1.3 异物检测技术

在磁场耦合式无线传能技术的实际应用中,往往会受到周围环境中的异物(如金属体、生物体等)的影响,造成传输功率和效率的下降。此外,金属体的存在会导致系统涡流损耗、系统耦合机构产生的电磁辐射都可能会给系统带来严重的安全隐患,对生物体的安全产生影响。因此异物检测技术是一项近年来受到广泛关注的无线传能关键技术之一。文献[127]对异物检测技术进行了较为全面的介绍,文献[128]设计了一种具有对称结构的密绕阵列式差分线圈金属异物检测系统,可通过金属异物介入引起检测线圈输出电压变化实现对金属异物的检测,检测精度高达93%。文献[129]在2022年提出了一种基于五阶谐波电流监测的异物检测技术,在线圈发生较大幅度偏移时仍能准确检测到金属异物。为了推广无线传能技术的发展,必须进一步提升不同应用场景下的异物检测准确率,并结合相关的设计和控制,形成完整的智能化异物检测与管理系统。

#### 4.1.4 电磁安全问题

磁场耦合式无线传能系统中的电磁辐射是限制其应用的一项重要因素,不仅会对电路内部的电子器件产生影响,还会对环境和人体产生极大的危害。随着磁场耦合式无线传能技术的应用深入人类生活

的各个角落,电磁安全问题成为一项亟需解决的关键技术问题。文献[130]采用有限元仿真软件 Comsol 构建了基于磁场耦合式无线传能系统的纯电动汽车电磁暴露模型,并评估了其对人体的安全性。文献[131]提出了一种有源线圈屏蔽的方法,有效降低电动汽车无线充电过程中车身周围的磁感应强度。针对电磁安全问题,需要展开多层次、多角度、多领域的研究,保障磁场耦合式无线传能技术的应用能够安全可靠地深入人类生活的各个角落。

### 4.2 电场耦合式

#### 4.2.1 单电容耦合无线电能传输

单电容耦合无线电能传输是电场耦合式无线传能技术的一个重要分支,该系统的电能发射端和接收端仅采用一块金属极板作为电极,耦合机构更加简单灵活。相比于传统电场耦合式无线传能系统,单电容耦合系统在拓扑形式上没有一个完整的电气回路,所以适用于传统电路中的分析方法无法直接应用于单电容耦合系统的建模与分析中。文献[132]基于采用分布式谐振线圈的单电容耦合系统提出了一种等效电路。文献[133]将地面视为准导电介质,提出了一种等效电路。但上述的理论模型与实验结果仍存在误差,目前尚没有完整的理论和模型来诠释单电容耦合机构的传输机理,该技术的突破将有利于拓展和促进电场耦合无线电能传输相关理论与技术的进步。

#### 4.2.2 电容耦合机构研究

电场耦合式无线传能系统中的电容耦合极板间存在着复杂的交叉耦合问题,是影响系统谐振和能量传输的主要因素,尤其对于具有多输入、输出端口的耦合机构更加难以分析。

文献[134]分析了电容耦合机构的交叉耦合情况,并量化了各极板间的耦合电容。文献[29]提出了多端口耦合机构的互耦合模型,并设计了一种基于共享电感的解耦电路及相应的补偿网络。但是,对于电容耦合机理及相关损耗模型仍有待进一步研究及优化。

#### 4.2.3 安全问题

随着电场耦合式无线传能技术的发展,其传输功率和传输距离有了很大提升,但大功率系统耦合电极的电压可达几千伏乃至上万伏,存在安全隐患。系统的耦合电极可通过附加绝缘和封装处理以防止触电,然而耦合机构的电场会在周围金属体上产生分布电压,人体触碰金属体时可能会有触电风险。

### 4.3 微波式

#### 4.3.1 高效大功率微波源设计

大功率微波源目前主要通过电真空器件或微波固态器件制造,电真空器件输出功率较高,体积较大,而固态器件可靠性高,体积较小,但是单体输出功率略低。随着第三代宽禁带半导体器件的发展,由固态器件制作的微波源在功率、效率及微波束质量等方面展现出更强的发展潜力<sup>[135]</sup>。

#### 4.3.2 高定向性发射天线

发射天线的定向性对微波式无线传能系统至关重要。文献[136]通过波束聚焦技术以及馈电网络设计,制作了多款高定向性发射天线。另外,只有当微波在目标区域均匀分布时,才能保持接收整流天线工作在最佳状态,高聚集度的微波束可能会降低接收整流天线的效率。因此,高定向性发射天线除了波束聚焦还需要具备平顶波束赋形功能。

#### 4.3.3 接收整流天线

微波式无线传能系统通过接收天线收集微波能量,其体积、工作频率、功率、效率等因素是影响工作性能的关键所在。目前涉及的关键技术包括大规模整流天线阵列设计、低功率整流天线非线性研究、高频高效整流天线研究、信息能量同时传输等技术。

#### 4.3.4 安全问题

微波式无线传能技术对系统安全性要求很高,因此目前只有适用于偏远地区供电的案例,若要实现大规模微波输能覆盖,仍需解决好传输范围内微波能量对人类及其他生物的影响;此外,在传输范围内,通信设备及信号安全性也是不容忽视的因素。

### 4.4 激光式

#### 4.4.1 优化激光器

激光电能传输系统发射端的核心器件是激光器,激光器是激光式无线传能系统发射模块的核心部件,其性能直接影响系统的整体效率。目前,激光器的光束变换、激光准直、光束质量优化、电光转换效率提升以及温度控制等技术均有待进一步突破。

#### 4.4.2 光伏接收技术

激光无线传能系统中通过光伏器件实现接收端激光-电能的转换,其性能同样影响系统的传能效率。对光伏器件的研究,仍需从光伏材料的选择、改善光能利用率、器件的温度特性、接收跟踪技术和抗干扰技术等方面综合考虑。

#### 4.4.3 能量管理系统

随着未来功率需求的不断扩大,系统必须设置

能量管理系统,以实现激光能量接收的最优化。高效的能量管理系统不仅要实现最大功率跟踪,还要向激光二极管模块提供稳定的直流供电。因而研究对激光式无线传能系统接收到的能源进行检测、管理及控制,实现能量的高效、稳定输出。

### 4.5 超声式

#### 4.5.1 超声换能器设计

超声电能传输系统的核心器件是超声换能器,其工作效率直接决定了系统的能量传输效率。对于不同的应用场景,需要设计不同种类的换能器,以适应传输介质的需求。目前仅有很少的相关研究,文献[71]针对水下应用场景提出了换能器的设计方案,几乎没有文献再针对超声电能传输系统专门展开换能器的研究和设计。因此,相关实验中的换能器往往存在不适配的问题,其性能也有待进一步提升。

#### 4.5.2 能量传输机理

超声式无线传能系统的传输机理较为复杂,目前对其描述的常用方法有等效电路法、有限元法和二端口法等,其中,等效电路法又包括常见的 Mason 等效电路和 KML 等效电路等,都可较为直观地计算超声式无线传能系统的传输性能。但目前对系统的传输机理如阻抗匹配、谐振状态等的研究仍不充分,系统的等效电路模型也有待进一步优化,仍然缺少一套完善的描述超声无线传能系统的理论体系。另外,有限元分析也是研究超声换能器特性、系统传输性能的有效方法。若能将各种方法结合,建立更加完善的分析模型,则能为超声式无线传能技术的发展应用奠定有效基础。

#### 4.5.3 声波透射技术

在超声电能传输系统中,不同介质间的声阻抗匹配问题是限制系统效率提升的关键,且大多数条件下都无法做到完美的声阻抗匹配。为了解决这一问题,文献[137]提出梯度匹配层的方案,使换能器到传输介质之间的声阻抗平滑过渡,从而增大声波辐射的透射率,以提高整个系统的效率。

#### 4.5.4 相控聚焦技术

声波的扩散衰减是限制超声式无线传能技术距离提升的一个重要因素。单个发射换能器的传输距离可能无法做到很远,因而很多场合需要考虑换能器阵列的形式。文献[138]通过采用相控聚焦技术不仅提高了系统接收效率,还实现了传输方向的变换控制。

## 5 结论

无线传能技术具有广阔的应用前景和巨大的综合效益。同时,无线传能技术的研发也是一个循序渐进的系统性工程,其发展面临理论、器件及安全等诸多技术挑战,需要分阶段、分步骤突破各个关键技术。结合当前的技术发展现状和趋势,未来无线传能必将向着取优、兼容、融合的方向发展,同时对电力系统、交通运输、航空航天、水下探测、家居办公、医疗器械等诸多领域产生深远的影响。

## 参考文献 (References):

- [1] 薛明,杨庆新,章鹏程,等. 无线电能传输技术应用研究现状与关键问题 [J]. 电工技术学报, 2021, 36 (8): 1547-1568.  
Xue Ming, Yang Qingxin, Zhang Pengcheng, et al. Application status and key issues of wireless power transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (8): 1547-1568.
- [2] Zhang Z, Pang H, Georgiadis A, et al. Wireless power transfer—An overview [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66 (2): 1044-1058.
- [3] Thomas C M. Tesla's oscillator and other inventions [M]. America: Century Magazine, 1895.
- [4] Secor H W. Tesla apparatus and experiments—How to build both large and small Tesla and ouidin coils and how to carry on spectacular experiments with them [J]. Practical Electrics, 1921.
- [5] Tesla N. The transmission of electric energy without wires [J]. Thirteenth Anniversary Number of the Electrical World & Engineer, 1904.
- [6] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317 (5834): 83-86.
- [7] Sample A P, Meyer D T, Smith J R. Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (2): 544-554.
- [8] Yasar I, Lei S, Bai K, et al. Mobile phone mid-range wireless charger development via coupled magnetic resonance [A]. 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo [C]. Dearborn, USA, 2016.
- [9] Chen L, Nagendra G R, Boys J T, et al. Double-coupled systems for IPT roadway applications [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3 (1): 37-49.
- [10] Krishnan S, Bhuyan S, Kumar V P, et al. Frequency agile resonance-based wireless charging system for electric vehicles [A]. 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference [C]. Greenville, USA, 2012.
- [11] 赵兴福,魏健. 电动汽车无线充电技术的现状与展望 [J]. 上海汽车, 2012 (6): 3-6, 21.
- [12] 朱俊. 电动汽车的无线充电技术 [J]. 汽车工程师, 2011 (12): 50-52.  
Zhu Jun. Electric vehicle wireless charging technology [J]. Automotive Engineer, 2011 (12): 50-52.
- [13] Assawaworrit S, Yu X, Fan S. Robust wireless power transfer using a nonlinear parity-time-symmetric circuit [J]. Nature, 2017, 546 (7658): 387-390.
- [14] Gu H, Choi H. Analysis of wireless power transmission characteristics for high-efficiency resonant coils [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30 (4): 1-4.
- [15] Jafari H, Olowu T O, Mahmoudi M, et al. Optimal design of IPT bipolar power pad for roadway-powered EV charging systems [J]. IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2021, 44 (3): 350-355.
- [16] Barsari V Z, Thrimawithana D J, Covic G A. An inductive coupler array for in-motion wireless charging of electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36 (9): 9854-9863.
- [17] 宋凯,朱春波,李阳,等. 用于电动汽车动态供电的多初级绕组并联无线电能传输技术 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (17): 4445-4453.  
Song Kai, Zhu Chunbo, Li Yang, et al. Wireless power transfer technology for electric vehicle dynamic charging using multi-parallel primary coils [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (17): 4445-4453.
- [18] 王懿杰,陆凯兴,姚友素,等. 具有强抗偏移性能的电动汽车用无线电能传输系统 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (13): 3907-3917.  
Wang Yijie, Lu Kaixing, Yao Yousu, et al. An electric vehicle (EV)-oriented wireless power transfer system featuring high misalignment tolerance [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (13): 3907-3917.
- [19] 李阳,张雅希,杨庆新,等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统最大功率效率点分析与实验验证 [J]. 电工技术学报, 2016, 31 (2): 18-24.  
Li Yang, Zhang Yaxi, Yang Qingxin, et al. Analysis and experimental validation on maximum power and efficiency in wireless power transfer system via coupled magnetic resonances [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31 (2): 18-24.
- [20] 陆晴云,李德骏,李泽松,等. 海洋环境下非接触式电能传输系统的优化设计 [J]. 传感器与微系统, 2011, 30 (12): 112-115, 118.  
Lu Qingyun, Li Dejun, Li Zesong, et al. Optimization



- design of a contactless power transmission system for ocean application [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30 (12): 112-115, 118.
- [21] 麦瑞坤, 陈阳, 刘野然. 基于变补偿参数的 IPT 恒流恒压电池充电研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36 (21): 5816-5821, 6024.
- Mai Ruikun, Chen Yang, Liu Yeran. Compensation capacitor alteration based IPT battery charging application with constant current and constant voltage control [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36 (21): 5816-5821, 6024.
- [22] Bi Z, Kan T, Mi C C, et al. A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility [J]. *Applied Energy*, 2016, 179: 413-425.
- [23] 吴理豪, 张波. 电动汽车静态无线充电技术研究综述 (上篇) [J]. *电工技术学报*, 2020, 35 (6): 1153-1165.
- Wu Lihao, Zhang Bo. Overview of static wireless charging technology for electric vehicles: Part I [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35 (6): 1153-1165.
- [24] Paul C. Underwater electric field communication system; US3668617D [P]. 1966-08-09.
- [25] Kline M, Izyumin I, Boser B, et al. Capacitive power transfer for contactless charging [A]. 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. Fort Worth, USA, 2011.
- [26] Dai J, Ludois D C. Single active switch power electronics for kilowatt scale capacitive power transfer [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, 3 (1): 315-323.
- [27] Lu F, Zhang H, Hofmann H, et al. A double-sided LCLC-compensated capacitive power transfer system for electric vehicle charging [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30 (11): 6011-6014.
- [28] Lu F, Zhang H, Mi C. A two-plate capacitive wireless power transfer system for electric vehicle charging applications [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33 (2): 964-969.
- [29] Zhou W, Gao Q, Mai R, et al. Design and analysis of a CPT system with extendable pairs of electric field couplers [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37 (6): 7443-7455.
- [30] 陈希有, 伍红霞, 牟宪民, 等. 电流型电场耦合无线电能传输技术 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35 (9): 2279-2286.
- Chen Xiyu, Wu Hongxia, Mou Xianmin, et al. The current-type capacitively coupled wireless power transfer technology [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35 (9): 2279-2286.
- [31] 陈希有, 陈建辉, 牟宪民, 等. 空间电场耦合单线电力传输: 仿真、理解与构建 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37 (19): 5749-5758.
- Chen Xiyu, Chen Jianhui, Mou Xianmin, et al. Single-wire power transmission based on spatial electric field coupling: Simulation, understanding and construction [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37 (19): 5749-5758.
- [32] Wu X, Su Y, Hu A P, et al. Multiobjective parameter optimization of a four-plate capacitive power transfer system [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9 (2): 2328-2342.
- [33] Zhang H, Lu F, Hofmann H, et al. A four-plate compact capacitive coupler design and LCL-compensated topology for capacitive power transfer in electric vehicle charging application [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31 (12): 8541-8551.
- [34] Zhang H, Lu F, Hofmann H, et al. An LC compensated electric field repeater for long distance capacitive power transfer [A]. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. Milwaukee, USA, 2016.
- [35] Xia C Y, Li C W, Zhang J. Analysis of power transfer characteristic of capacitive power transfer system and inductively coupled power transfer system [A]. 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer [C]. Jilin, China, 2011.
- [36] Li S, Liu Z, Zhao H, et al. Wireless power transfer by electric field resonance and its application in dynamic charging [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63 (10): 6602-6612.
- [37] Brown W C. The history of power transmission by radio waves [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1984, 32 (9): 1230-1242.
- [38] Glaser P E. The satellite solar power station [A]. 1973 IEEE G-MTT International Microwave Symposium [C]. Boulder, USA, 1973.
- [39] 龚文翔. 微波无线传能整流电路的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- Gong Wenxiang. Research on rectifying circuits for microwave power transmission system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [40] Matsumoto H. Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2002, 3 (4): 36-45.
- [41] 马海虹, 石德乐. 模块航天器间微波无线能量传输技术应用前景及发展建议 [J]. *空间电子技术*, 2012, 9 (4): 1-5.
- Ma Haihong, Shi Dele. Microwave wireless power transmission technology: Application prospects and development suggestions in aerospace [J]. *Space Electronic*

- Technology, 2012, 9 (4): 1-5.
- [42] Charania A. Positioning space solar power (SSP) as the next logical step after the international space station (ISS) [A]. 53rd International Astronautical Congress the World Space Congress [C]. Houston, USA, 2001.
- [43] 马海虹, 徐辉, 栗曦, 等. 一种高效率微波无线能量传输系统 [J]. 空间电子技术, 2016, 13 (1): 1-5.  
Ma Haihong, Xu Hui, Li Xi, et al. A highly efficient microwave wireless power transmission system [J]. Space Electronic Technology, 2016, 13 (1): 1-5.
- [44] 林为干, 赵榆深, 文舸一, 等. 微波输电, 现代化建设的生力军 [J]. 科技导报, 1994 (3): 31-34.  
Lin Weigan, Zhao Yushen, Wen Keyi, et al. Power transmission by microwave—A propulsion for modernization construction [J]. Science & Technology Review, 1994 (3): 31-34.
- [45] 徐君书. 中小功率的整流天线技术研究 [D]. 上海: 上海大学, 2005.  
Xu Junshu. Investigation on the technology of low and medium power rectenna [D]. Shanghai: Shanghai University, 2005.
- [46] Lin Q W, Zhang X Y. Differential rectifier using resistance compression network for improving efficiency over extended input power range [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64 (9): 2943-2954.
- [47] Du Z, Zhang X Y. High-efficiency single- and dual-band rectifiers using a complex impedance compression network for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65 (6): 5012-5022.
- [48] 刘长军, 李凯, 黄卡玛. 微波输能技术研究进展 [J]. 昆明理工大学学报 (自然科学版), 2011, 36: 19-22.  
Liu Changjun, Li Kai, Huang Kama. Development of microwave power transmission study [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 36: 19-22.
- [49] 李振宇, 石德乐, 申景诗, 等. 基于激光的无线能量传输技术 [J]. 空间电子技术, 2013, 10 (3): 71-76.  
Li Zhenyu, Shi Dele, Shen Jingshi, et al. Laser wireless power transmission technology [J]. Space Electronic Technology, 2013, 10 (3): 71-76.
- [50] Blackwell T. Recent demonstrations of laser power beaming at DFRC and MSFC [J]. AIP Conference Proceedings, 2005, 766 (1): 73-85.
- [51] Kawashima N, Takeda K, Matsuoka H, et al. Laser energy transmission for a wireless energy supply to robots [A]. 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction [C]. Ferrara, Italy, 2005.
- [52] 张楠, 徐智君, 朱晓农, 等. 激光推进技术 [J]. 红  
外与激光工程, 2011, 40 (6): 1025-1037.  
Zhang Nan, Xu Zhijun, Zhu Xiaonong, et al. Laser propulsion technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (6): 1025-1037.
- [53] 周玮阳. 激光无线电能传输系统关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.  
Zhou Weiyang. Research on key technologies of wireless laser power transfer system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [54] 黄虎. 反馈谐振式激光能量传输理论及实验研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013.  
Huang Hu. Study on theory and experiment of laser feedback power transmission [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [55] 何滔, 杨苏辉, 张海洋, 等. 高效激光无线能量传输及转换实验 [J]. 中国激光, 2013, 40 (3): 252-257.  
He Tao, Yang Suhui, Zhang Haiyang, et al. Experiment of space laser energy transmission and conversion with high efficiency [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40 (3): 252-257.
- [56] He T, Yang S H, Munoz M A, et al. High-power high-efficiency laser power transmission at 100 m using optimized multi-cell GaAs converter [J]. Chinese Physics Letters, 2014 (10): 104203.
- [57] Shi D, Zhang L, Ma H, et al. Research on wireless power transmission system between satellites [A]. 2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference [C]. Aveiro, Portugal, 2016.
- [58] Yang T, Jin K. A method of simultaneous transmission of power and information based on laser power transfer system [A]. 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. New Orleans, USA, 2020.
- [59] Mclean N A. Piezo-electric crystal transformer: US1829234A [P]. 1931-10-27.
- [60] Cochran G V B, Johnson M W, Kadaba M P, et al. Piezoelectric internal fixation devices: A new approach to electrical augmentation of osteogenesis [J]. Journal of Orthopaedic Research, 1985, 3 (4): 508-513.
- [61] Bao X, Will B, Stewart S, et al. High-power piezoelectric acoustic-electric power feedthru for metal walls [A]. Proceedings of SPIE [C]. San Diego, USA, 2008.
- [62] Ozeri S, Shmilovitz D. Ultrasonic transcutaneous energy transfer for powering implanted devices [J]. Ultrasonics, 2010, 50 (6): 556-566.
- [63] Lawry T J, Wilt K R, Scarton H A, et al. Analytical modeling of a sandwiched plate piezoelectric transformer-based acoustic-electric transmission channel [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, 59 (11): 2476-2486.

- [64] Ho Fai L, Hu A P. Theoretical modeling and analysis of a wireless ultrasonic power transfer system [A]. 2015 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power [C]. Daejeon, Korea, 2015.
- [65] Yosra D, Certon D, Meulon F V, et al. Contactless acoustic power transmission through air/skin interface: A feasibility study [A]. 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium [C]. Las Vegas, USA, 2020.
- [66] Tseng V F G, Diamond D, Goodrich S, et al. Selective receiver charging using acoustic vibration modes [A]. 2021 IEEE Wireless Power Transfer Conference [C]. San Diego, USA, 2021.
- [67] 邹玉炜, 黄学良, 柏杨, 等. 基于 PZT 的超声波无接触能量传输系统的研究 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (9): 144-150.
- Zou Yuwei, Huang Xueliang, Bai Yang, et al. Research on contactless ultrasonic energy transfer system based on PZT [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26 (9): 144-150.
- [68] 许康, 陈希有, 刘丹宁. 海下超声耦合无线电能传输系统电学阻抗变换技术 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (17): 4461-4467.
- Xu Kang, Chen Xiyu, Liu Danning. Electrical impedance transformation techniques for an ultrasonic coupling wireless power transfer system under sea water [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (17): 4461-4467.
- [69] 李璐. 超声无线电能传输系统功率传输特性及功率提升方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- Li Lu. Research on power transfer characteristics and power promotion approach for ultrasonic power transfer system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [70] Du Y, Zhao Y, Wang Z, et al. Two-dimensional equivalent circuit model of ultrasonic wireless power transmission [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70 (1): 975-984.
- [71] Zhao Y, Du Y, Wang Z, et al. Design of ultrasonic transducer structure for underwater wireless power transfer system [A]. 2021 IEEE Wireless Power Transfer Conference [C]. Vancouver, Canada, 2021.
- [72] Zhang C, Niang T, Zhong W, et al. A new energy harvesting and wireless power transfer system for smart grid [A]. 2016 IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems [C]. Vancouver, Canada, 2016.
- [73] Cai C, Wang J, Liu R, et al. Resonant wireless charging system design for 110-kV high-voltage transmission line monitoring equipment [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66 (5): 4118-4129.
- [74] Marxgut C, Biela J, Kolar J W, et al. DC-DC converter for gate power supplies with an optimal air transformer [A]. 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. Palm Springs, USA, 2010.
- [75] Kusaka K, Orikawa K, Itoh J, et al. Isolation system with wireless power transfer for multiple gate driver supplies of a medium voltage inverter [A]. 2014 International Power Electronics Conference [C]. Hiroshima, Japan, 2014.
- [76] Nguyen V T, Pawaskar V U, Gohil G. Isolated gate driver for medium-voltage SiC power devices using high-frequency wireless power transfer for a small coupling capacitance [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68 (11): 10992-11001.
- [77] Wu M, Chen X, Su L, et al. Ultrasonic based contactless power transfer for gate driver supplies of full bridge module [A]. 2018 International Conference on Power System Technology [C]. Guangzhou, China, 2018.
- [78] 董伯威. 巡检机器人动态无线充电系统研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- Dong Bowei. Research on dynamic wireless charging system of patrol robot [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [79] Obayashi S, Kanekiyo Y, Uno H, et al. 400-W UAV/drone inductive charging system prototyped for overhead power transmission line patrol [A]. 2021 IEEE Wireless Power Transfer Conference [C]. San Diego, USA, 2021.
- [80] 翟渊, 孙跃, 苏玉刚, 等. 具有恒压特性的磁共振模式无线供电系统 [J]. 电工技术学报, 2014, 29 (9): 12-16.
- Zhai Yuan, Sun Yue, Su Yugang, et al. Magnetic resonance wireless power supply system with characteristics of constant voltage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29 (9): 12-16.
- [81] 孙跃, 蒋成, 王智慧, 等. 基于能量传输通道的 IPT 系统非法负载检测技术 [J]. 电工技术学报, 2015, 30 (S1): 292-296.
- Sun Yue, Jiang Cheng, Wang Zhihui, et al. Technology for identifying illegal load in IPT system based on the energy transmission channel [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30 (S1): 292-296.
- [82] 戴欣, 李璐, 余细雨, 等. 基于正四面体的无线电能传输系统多自由度电能拾取机构 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (23): 6460-6467.
- Dai Xin, Li Lu, Yu Xiyu, et al. Multi-degree-of-freedom pick-up mechanism of wireless power transfer systems based on the regular tetrahedron [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 (23): 6460-6467.
- [83] Kim J H, Lee B, Lee J, et al. Development of 1-mW inductive power transfer system for a high-speed train [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62



- (10): 6242-6250.
- [84] Ukita K, Kashiwagi T, Sakamoto Y, et al. Evaluation of a non-contact power supply system with a figure-of-eight coil for railway vehicles [A]. 2015 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power [C]. Daejeon, Korea, 2015.
- [85] 李宇鸿, 韩丽丽, 张庆港, 等. 物流仓储机器人无线充电装置 [J]. 科技创新与应用, 2018 (28): 30-33, 35.
- [86] 余佳俊, 梁祖懿, 杨皓然, 等. 基于无线充电技术的物流无人机及充电桩设计方案 [J]. 电子制作, 2019 (9): 9-14, 30.
- [87] 张虹蕾. 基于传感器的管道自主监控与维护系统 [J]. 水利技术监督, 2021 (10): 46-50.
- [88] Lan L, Kwan C H, Arteaga J M, et al. A 100 W 6.78 MHz inductive power transfer system for drones [A]. 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation [C]. Copenhagen, Denmark, 2020.
- [89] Park C, Park J, Shin Y, et al. Separated circular capacitive coupler for reducing cross-coupling capacitance in drone wireless power transfer system [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68 (9): 3978-3985.
- [90] 倪欣. 无人机双向无线充电系统设计 [D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
- [91] 李长江, 李臣政, 张涛, 等. 低轨卫星滑环磨损寿命影响因素研究 [J]. 上海航天, 2019, 36 (S2): 79-83.
- Li Changjiang, Li Chenzheng, Zhang Tao, et al. Study on the factors affecting wear life of the slip ring of LEO satellite [J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36 (S2): 79-83.
- [92] Heeres B J, Novotny D W, Divan D M, et al. Contactless underwater power delivery [A]. Proceedings of 1994 Power Electronics Specialist Conference [C]. Taipei, Taiwan, China, 1994.
- [93] Bradley A M, Feezor M D, Singh H, et al. Power systems for autonomous underwater vehicles [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26 (4): 526-538.
- [94] Cheng Z, Lei Y, Song K, et al. Design and loss analysis of loosely coupled transformer for an underwater high-power inductive power transfer system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51 (7): 1-10.
- [95] 陈国东. 水下电缆巡检机器人无线充电关键技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- Chen Guodong. Research on key technologies of wireless charging for underwater cable inspection robot [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [96] 吴旭升, 孙盼, 杨深钦, 等. 水下无线电能传输技术及应用研究综述 [J]. 电工技术学报, 2019, 34 (8): 1559-1568.
- Wu Xusheng, Sun Pan, Yang Shenqin, et al. Review on underwater wireless power transfer technology and its application [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34 (8): 1559-1568.
- [97] Yang L, Ju M, Zhang B. Bidirectional undersea capacitive wireless power transfer system [J]. IEEE Access, 2019, 7: 121046-121054.
- [98] Carvalho N, Georgiadis A, Costanzo A, et al. Europe and the future for WPT: European contributions to wireless power transfer technology [J]. IEEE Microwave Magazine, 2017, 18 (4): 56-87.
- [99] Urano M, Ata K, Takahashi A. Study on underwater wireless power transfer via electric coupling with a submerged electrode [A]. 2017 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai [C]. Kyoto, Japan, 2017.
- [100] 陈希有, 许康, 牟宪民, 等. 海水中感应耦合与超声耦合无线电能传输技术对比 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22 (3): 9-16.
- Chen Xiyu, Xu Kang, Mou Xianmin, et al. Comparisons of inductive coupling and ultrasonic coupling wireless power transfer under seawater [J]. Electric Machines and Control, 2018, 22 (3): 9-16.
- [101] 孙玉娇. 水下传感器网络覆盖规划方法优化研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
- Sun Yujiao. Research on optimization of coverage planning method for underwater sensor network [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021.
- [102] Sellschopp J. A towed CTD chain for two-dimensional high resolution hydrography [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1997, 44 (1): 147-165.
- [103] Yoshioka D, Sakamoto H, Ishihara Y, et al. Power feeding and data-transmission system using magnetic coupling for an ocean observation mooring buoy [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43 (6): 2663-2665.
- [104] 林杰. 浮标系统非接触电能高效耦合及数据传输方法的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- Lin Jie. Research on high coupling efficiency contactless power and data transmission for buoy [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [105] 王南朔, 李醒飞, 房诚, 等. 浮标水下传感器非接触供电及通讯系统设计 [J]. 电源技术, 2017, 41 (1): 131-133, 145.
- Wang Nanshuo, Li Xingfei, Fang Cheng, et al. Design of contactless power and data transmission system for buoy's underwater sensors [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41 (1): 131-133, 145.
- [106] Sasatani T, Sample A P, Kawahara Y. Room-scale

- magnetoquasistatic wireless power transfer using a cavity-based multimode resonator [J]. *Nature Electronics*, 2021, 4 (9): 689-697.
- [107] 吴阳. 植入式超声耦合式无线能量传输系统研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2020.
- Wu Yang. Study of implantable ultrasonic-coupled wireless power transfer system [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2020.
- [108] Jegadeesan R, Guo Y X, Je M. Electric near-field coupling for wireless power transfer in biomedical applications [A]. 2013 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications [C]. Singapore, Singapore, 2013.
- [109] Narayanamoorthi R. Modeling of capacitive resonant wireless power and data transfer to deep biomedical implants [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2019, 9 (7): 1253-1263.
- [110] Sedehi R, Budgett D, Jiang J, et al. A wireless power method for deeply implanted biomedical devices via capacitively coupled conductive power transfer [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36 (2): 1870-1882.
- [111] Tanabe Y, Ho J S, Wong H, et al. Wireless powering of microchip implants by a cross-slot antenna [A]. 2012 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings [C]. Kaohsiung, Taiwan, China, 2012.
- [112] Ma A, Poon A S Y. Midfield wireless power transfer for bioelectronics [J]. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2015, 15 (2): 54-60.
- [113] Das R, Yoo H. Biotelemetry and wireless powering for leadless pacemaker systems [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, 25 (4): 262-264.
- [114] Asif S M, Braaten B D. Design of a compact implantable rectenna for wireless pacing applications [A]. 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation [C]. Fajardo, USA, 2016.
- [115] Maleki T, Cao N, Song S H, et al. An ultrasonically powered implantable micro-oxygen generator (IMOG) [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2011, 58 (11): 3104-3111.
- [116] Larson P J, Towe B C. Miniature ultrasonically powered wireless nerve cuff stimulator [A]. 2011 5th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering [C]. Cancun, Mexico, 2011.
- [117] Sanni A, Vilches A, Toumazou C. Inductive and ultrasonic multi-tier interface for low-power, deeply implantable medical devices [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2012, 6 (4): 297-308.
- [118] Lee S Q, Youm W, Hwang G. Biocompatible wireless power transferring based on ultrasonic resonance devices [J]. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2013, 19 (1): 030030.
- [119] Chou T, Subramanian R, Park J, et al. A miniaturized ultrasonic power delivery system [A]. 2014 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference Proceedings [C]. Lausanne, Switzerland, 2014.
- [120] Seo D, Carmenta J M, Rabaey J M, et al. Model validation of untethered, ultrasonic neural dust motes for cortical recording [J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2015, 244: 114-122.
- [121] Jaafar B, Neasham J, Chester G, et al. Ultrasonic wireless powering link of visual cortical prosthesis implant [A]. 2017 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference [C]. Torino, Italy, 2017.
- [122] Meng M, Kiani M. Design and optimization of ultrasonic wireless power transmission links for millimeter-sized biomedical implants [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2017, 11 (1): 98-107.
- [123] Meng M, Kiani M. A hybrid inductive-ultrasonic link for wireless power transmission to millimeter-sized biomedical implants [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2017, 64 (10): 1137-1141.
- [124] Yi X, Zheng W, Cao H, et al. Wireless power transmission for implantable medical devices using focused ultrasound and a miniaturized 1-3 piezoelectric composite receiving transducer [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2021, 68 (12): 3592-3598.
- [125] Hong Y, Jin L, Wang B, et al. A wood-templated unidirectional piezoceramic composite for transmuscular ultrasonic wireless power transfer [J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14 (12): 6574-6585.
- [126] 张国民, 余卉, 刘国乐, 等. 超导无线电能传输技术 [J]. *南方电网技术*, 2015, 9 (12): 3-10.
- Zhang Guomin, Yu Hui, Liu Guole, et al. Superconducting wireless power transfer technology [J]. *Southern Power System Technology*, 2015, 9 (12): 3-10.
- [127] Zhang Y, Yan Z, Zhu J, et al. A review of foreign object detection (FOD) for inductive power transfer systems [J]. *eTransportation*, 2019, 1: 100002.
- [128] 张献, 付志远, 薛明, 等. 无线电能传输阵列式差分线圈金属异物检测方法 [J]. *电工电能新技术*, 2020, 39 (11): 9-17.
- Zhang Xian, Fu Zhiyuan, Xue Ming, et al. Method for detecting metal foreign object by array differential coil in wireless power transfer system [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2020, 39 (11): 9-17.
- [129] Long B, Zhu Q, Zang S, et al. Metal object detection

- by monitoring fifth-order harmonic current of IPT system with dual frequency tuning [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37 (3): 2513-2518.
- [130] 李海燕, 逯迈, 董绪伟. 纯电动汽车典型无线充电线圈电磁暴露安全评估研究 [J]. 电工电能新技术, 2019, 38 (11): 74-80.
- Li Haiyan, Lu Mai, Dong Xuwei. Research on electromagnetic exposure safety assessment of typical wireless charging coil for battery electric vehicle [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38 (11): 74-80.
- [131] 蒙金雪, 张玉旺, 郭彦杰, 等. 电动汽车无线充电系统的有源磁屏蔽研究 [J]. 电工电能新技术, 2021, 40 (4): 44-51.
- Meng Jinxue, Zhang Yuwang, Guo Yanjie, et al. Research of active magnetic shielding for wireless power transfer system of electric vehicles [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40 (4): 44-51.
- [132] Li T, Chen X, Lang Z, et al. Modeling and analysis of single-wire power transfer system using distributed parameter resonant coil [A]. 2021 IEEE Industrial Electronics and Applications Conference [C]. Penang, Malaysia, 2021.
- [133] Zou L J, Zhu Q, Neste C W V, et al. Modeling single-wire capacitive power transfer system with strong coupling to ground [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9 (2): 2295-2302.
- [134] Huang L, Hu A P. Defining the mutual coupling of capacitive power transfer for wireless power transfer [J]. Electronics Letters, 2015, 51 (22): 1806-1807.
- [135] 王子岳, 刘多伟, 程飞, 等. 2.45 GHz 微波大功率信号源设计 [J]. 电子与封装, 2021, 21 (7): 51-56.
- Wang Ziyue, Liu Duowei, Cheng Fei, et al. 2.45 GHz microwave high power source design [J]. Electronics and Packaging, 2021, 21 (7): 51-56.
- [136] 李宁. 基于微波传能的微带阵列发射天线设计 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- Li Ning. Design of microstrip array transmitting antenna based on microwave energy transfer [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [137] 朱棵. 超声波换能器声阻抗梯度匹配层理论与方法的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- Zhu Ke. The study of the acoustic impedance gradient matching layer of ultrasonic transducer [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [138] Tseng V F G, Bedair S S, Lazarus N. Phased array focusing for acoustic wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2018, 65 (1): 39-49.

## Development and application review on wireless power transmission technology

LIU Yao<sup>1,2</sup>, XIAO Jinyu<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiaoling<sup>1,2</sup>, WU Jiawei<sup>1,2</sup>, DU Yuwei<sup>3</sup>, ZHAO Yufei<sup>3</sup>,  
WANG Heyang<sup>3</sup>, WANG Zhenxing<sup>3</sup>

(1.Global Energy Interconnection Group Co., Ltd., Beijing 100031, China; 2.Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Beijing 100031, China; 3.School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Since the 21st century, the wireless power transmission technology has entered a rapid development stage, and the related theoretical research, innovative experiments and application promotion have made great progress. With the proposal and construction of global energy interconnection, related technologies will have greater development potential and application value in the future. The paper firstly describes the birth and development of wireless power transmission. Secondly, the key research developments of inductive power transmission, capacitive power transmission, microwave power transmission, laser power transmission and ultrasonic power transmission technologies at home and abroad in the past 20 years are highlighted. Thirdly, the six major fields of electrical power system, transportation, aerospace, underwater detection, smart home and medical devices are summarized and prospected. Fourthly, specific application scenarios are discussed for different wireless power transmission technologies. Finally, the main technical challenges of different wireless power transmission technologies are discussed.

**Key words:** wireless power transmission; global energy interconnection; development history; research trend; application scenario outlook; technology challenge