

空间全向无线电能传输技术研究与应用综述

郭海潮¹, 张献², 杨庆新², 沙琳¹, 王奉献³, 朱子旭¹

- (1. 天津市电气装备智能控制重点实验室(天津工业大学), 天津市 西青区 300387;
2. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学), 天津市 北辰区 300401;
3. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室(河北工业大学), 天津市 北辰区 300401)

Review of Research and Application of Spatial Omnidirectional Wireless Power Transmission Technology

GUO Haichao¹, ZHANG Xian², YANG Qingxin², SHA Lin¹, WANG Fengxian³, ZHU Zixu¹

(1. Tianjin Key Laboratory of Intelligent Control of Electrical Equipment (Tiangong University), Xiqing District, Tianjin 300387, China; 2. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment (Hebei University of Technology), Beichen District, Tianjin 300401, China; 3. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province (Hebei University of Technology), Beichen District, Tianjin 300401, China)

ABSTRACT: In recent years, spatial omnidirectional wireless power transmission technology has developed rapidly. Compared with the existing technology, it has the advantages of high degree of freedom and freedom from direction and space constraints. Moreover, this technology can supply power to multiple dynamic devices at the same time, which is an important development trend in the field of wireless power transmission in the future. Firstly, this paper analyzed and summarized the research progress of the key technology of omnidirectional wireless power transmission. Secondly, the actual research results of this technology were classified and summarized according to the application scenarios, and the advantages and disadvantages of this technology in specific scenarios were pointed out. Finally, it pointed out the problems to be solved urgently, and provided a reference for the future research and development of this technology.

KEY WORDS: omnidirectional wireless power transmission; high degree of freedom; electromagnetic coupling mechanism; electromagnetic safety; application scenarios

摘要: 近几年,空间全向无线电能传输技术发展迅速,与现有技术相比,具有自由度高、不受方向和空间约束的优点。并且该技术可对多个动态设备同时进行供电,是未来无线电能传输领域的重要发展趋势。文中分析并总结全向无线电能传输关键技术的研究进展,对该技术的实际研究成果按照应用场景进行分类综述与成果归纳,指出该技术在特定场景下

的优势与短板。最后指出其技术亟待解决的问题,并对该技术未来研究的发展提供一定参考。

关键词: 全向无线电能传输; 高自由度; 电磁耦合机构; 电磁安全; 应用场景

0 引言

无线电能传输(wireless power transfer, WPT)是指电能从电网到用电设备的一种无需经过电气直接接触的能量传输方式^[1]。由于无线电能传输技术自身所具备的变革性与创新性,该技术曾连续两年被世界经济论坛列为对世界影响最大、最有可能为全球面临的挑战提供答案的十大新兴技术之一。相比于传统的有线充电方式的连接部位易损坏、线路易老化、插拔时存在安全隐患以及需要人工维护等存在的不足,无线电能传输有较高的可靠性^[2]、安全性^[3]、使用方式灵活^[4]、不易受外界环境干扰^[5]、维护费用较低^[6]、与电网互动能力强^[7-8]、可在某些极端环境和特殊条件下应用等优点^[9-10],因而近年来得到越来越多的国内外高校与科研机构的广泛关注并发展迅猛。经过各界学者多年的研究与探索,该技术的理论研究成果不断向商业成果转化并在多个领域内都得到了推广,尤其是在电动汽车与智能手机无线充电领域得到了广泛应用,其技术转化的产品在日常生活中为我们提供了便利。但目前无线电能传输技术的发展进入到瓶颈期,遇到了一系列亟待解决的问题。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52122701, 51977147)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52122701, 51977147).

现有的无线充电设备虽然避免了使用充电线缆，但用电设备必须放置在规定的位置才能实现无线电能传输。当智能手机、智能手表和蓝牙耳机等便携式电子设备^[11]进行无线充电时，用电设备与充电位置相互发生偏移会导致其传输电能效率下降，甚至不能正常工作。这不但限制了设备无线电能传输的空间灵活性，而且对于一些特殊环境中用电设备来说，例如水下环境或航空航天场景中，现有技术的应用无法保证设备的用电安全与实时供电。而全向无线电能传输技术可以较好地满足上述设备的用电需求，它具有全方向、范围广、自由度高的特点^[12]。这项技术较好地弥补了现有无线电能传输技术传输角度单一、传输范围较短和抗偏移能力弱等不足之处，同时也是无线电能传输技术未来发展的重要方向之一。

本文首先分析并总结全向无线电能传输关键技术的研究进展，按照磁场控制方法、电磁耦合机构、电磁兼容技术、系统理论及设计以及新型传输机理进行对比分析。然后对该技术研究成果按照先进工业制造、植入式医疗电子、智能家居、商业办公和水下探测等 5 类应用场景进行分类综述。其次将全向系统的工作频率、传输功率、系统效率、线圈结构、传输距离及距径比等参数设计成果归纳，然后围绕新型传输机理的探究与应用、电磁曝露安全性研究、不同应用场景的精细化研究、控制策略的优化以及可靠性与稳定性的提升进行深入讨论。最后为其技术未来值得关注的发展方向提供参考。

1 全向无线电能传输关键技术研究进展

目前，国内外学者主要是针对磁场控制方法、电磁耦合机构、电磁兼容技术、系统理论及设计以及新型传输机理展开研究，下面将通过几方面对关键技术的进展分类并对比分析。

1.1 磁场控制方法

在全向 WPT 系统磁场控制方法中，主要包括全向均匀磁场控制方法和定向磁场传输控制方法两类。前者使系统在空间内在产生均匀分布的空间磁场，后者可以通过对负载方位和数量的监测，调整发射端磁场的大小与方向，最终达到对接收负载精准传输和节省损耗的目的。

1.1.1 全向均匀磁场控制方法

1) 发射线圈电流控制。

对发射线圈的电流激励进行不同方式的调制

是产生均匀全向磁场的主流控制方法。从 2014 年到 2017 年，香港大学在发射线圈的电流控制方法方面取得了一系列理论研究成果。2014 年该团队提出了一种二维和三维全向无线电能系统的非一致电流控制方法^[13]。全向功率发射器可使交流磁通量流向各个方向，使线圈接收器可在发射端附近的任何位置获取电能。2015 年该团队提出一种新型离散磁场控制方法^[14]，该控制方法能够保证系统高自由度的无线电能传输。该团队在 2016 年提出了一种可控制三正交发射线圈电流振幅的新方法^[15]，该方法可使磁场矢量均匀地指向球面上。在此基础上，该团队得出了一种基于加权分时方案的功率流控制方法，该方法可将功率发送到适当的方向，并提高了功率输出器的性能。2017 年基于电流矢量控制，该团队提供了全方位无线功率传输的基本数学理论^[16-17]。证明了输入功率矢量和输出功率矢量分布的三维分布空间的几何形状遵循伯努利双纽线，且沿其纵轴的旋转。通过运用该理论使系统中磁场矢量可以产生并指向任何方向，从而实现真正的全向无线功率传输。

2018 年中南大学提出了一种新型磁场定向方法^[18]。该方法使磁化电流的大小和相位角受到控制，并通过线圈结构使 3 个传感器之间的耦合最小化，使系统的漏磁达到最小。该方法可使系统将能够消除初始系统误差，具有一定的抗干扰能力。虽然发射线圈的电流控制较为复杂，但其产生磁场的全向性和均匀性较好，是较为理想的全向磁场控制方法。

2) 机械式旋转控制。

通过对发射线圈与接收线圈进行机械式旋转控制，可以保证发射线圈产生全方向磁场或接收线圈最大程度上的利用空间中的磁场。2011 年，重庆大学^[19]针对接收线圈在空间中最大程度获取磁场的问题就提出了一种磁场跟踪伺服机构，通过电机设备控制接收线圈在空间中自由旋转并接收磁场能量。

2018 年，华南理工大学^[20]针对该系统中多个负载功率不平均分配现象，提出了一种基于旋转发射线圈的全向 WPT 系统。该系统可缓解由传输方向的偏离引起的传输效率和功率的变化，并改善接收负载之间的不平衡功率分配现象。

上述两者差异在于前者是通过电机控制接收线圈接收空间磁场能量，后者通过电机控制发射线

圈产生全方向磁场。该方法本质上具有结构简单、灵活性高以及成本低的特点。由于系统需要加入控制电机，在设计时需要考虑系统的体积重量、电机使用寿命和电机控制方法等多种因素。

1.1.2 定向磁场传输控制方法

1) 发射端监测负载位置。

通过监测发射线圈的电流幅值大小，即可判断全向 WPT 系统中接收端的负载位置。2015 年香港大学团队通过对二维全向无线电能传输进行了数学模型分析，提出并实现了用于确定负载位置且有效引导无线电能的机制^[21]，该机制只需对发射侧电流进行几次测量，即可对负载进行高效的电能传输，该团队在 2017 年提出了一种 WPT 系统中互感和负载电阻的新方法^[22]，在串-串补偿电路中只需输入电压与电流测量值即可获得较为精确的估计值。2019 年福州大学通过采用一种锥形线圈的排布方式^[23]，提出了一种发射端监测控制系统。该系统先监测发射线圈中电流幅值的大小，再通过自适应算法实现线圈的最大功率输出值。2020 年中南大学提出了一种三维无线功率传输的实时算法^[24]，该算法不需要了解用电设备的位置与方向。通过调节发射线圈的幅值和相位，可同时向多个具有不同功率需求的移动设备进行电能传输。2021 年弗吉尼亚理工大学提出一种智能检测算法^[25]，该算法基于发射端电流矢量的输入功率信息，通过智能扫描并识别负载定位。在自学习过程中该算法能自动识别系统中的负载位置，最大化发挥发射端的电能传输能力。

2) 接收端监测负载位置。

全向 WPT 系统接收端的负载位置监测指的是通过对负载电压幅值的监测，再反馈到发射端对激励进行调整。2011 年清华大学针对全向无线传输的植入式医疗微球内窥镜^[26]，提出了一种自适应机制。该机制首先对接收线圈的电压幅值进行监测，经通信机构反馈到发射端，最后调整发射线圈的电流幅值与相位使全向 WPT 系统达到最佳工作状态。麻省理工学院在 2015 年提出了一种全方向无线充电控制算法^[27]，当接收端监测负载位置变化时，该算法通过调整 6 个平放的平面螺旋形发射线圈中的电流幅值与相位，使系统电能传输更加精准高效。2018 年庆应大学提出了一种发射线圈向自由定位装置有效传输功率的技术^[28]，该技术基于电压移相原理控制发射线圈开关的相位。通过接收线圈向发射线圈发射的感应电压来获得传输的最佳相位。发射

端监测负载位置优势在于控制简单、损耗小以及无需通信机构，在节省系统体积的同时也降低了成本。

1.2 电磁耦合机构

全向 WPT 系统的电磁耦合机构在电能传输过程中产生着至关重要的作用。发射线圈负责产生全方向且密度均匀的磁场，接收线圈负责接收空间各个方向的磁场能量。本节通过将发射线圈和接收线圈按照不同结构进行划分，如表 1 所示，对不同线圈结构类型的优缺点总结对比。

表 1 不同发射线圈结构类型优缺点对比
Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of different types of transmitting coil structures

线圈结构	优点	缺点
二维平面线圈	线圈结构简单，覆盖面积大传输距离远，可产生旋转的空间磁场，自由度高，传输功率大	传输效率较低且磁场分布不均匀，控制复杂
三维正交线圈	可以产生密度均匀的全方向磁场，传输效率高，传输的稳定性好	控制方法复杂，线圈结构体积大传输距离不够远
其他立体线圈	磁场分布均匀，空间灵活度高，自由度高，控制简单	结构比较复杂体积较大

1.2.1 发射线圈结构

1) 二维平面线圈。

二维平面线圈的优势在于大范围和远距离的全向无线电能传输。如图 1 所示，在 2016—2019 年期间，韩国高等科学技术院(KAIST)对二维平面线圈结构进行了深入研究。该团队在 2016 年提出一种十字交叉偶极子发射线圈结构^[29-30]。该线圈由正交相位差的交叉偶极线圈组成，在系统工作时可

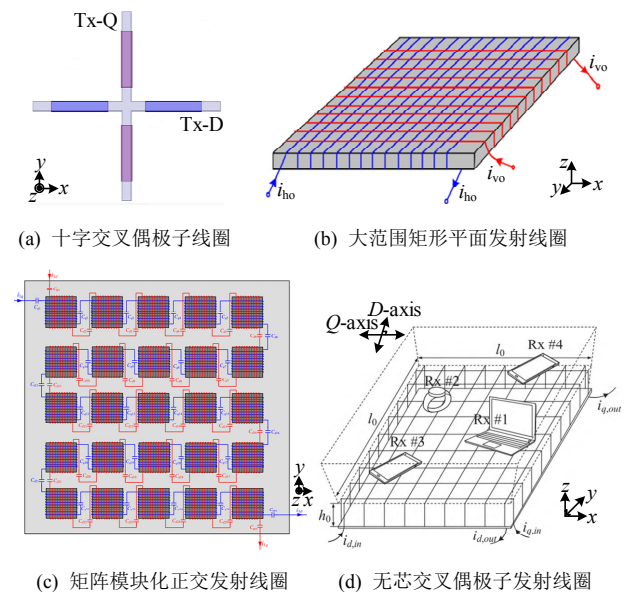


图 1 KAIST 二维平面线圈研究成果

Fig. 1 KAIST 2D planar coil research results

产生平面旋转磁场, 同时可实现三维全向电能传输, 经实验验证其输出功率为 100W, 系统效率达 33.6%左右。在 2017 年提出一种大范围矩形平面发射线圈^[31], 该线圈可对覆盖区域的小型用电设备进行实时供电。当输出功率达到 16.2W 时, 其效率可达到 9.3%。

文献[32] 2018 年提出一种由多个矩形发射模块组成的正交发射线圈^[32], 实现了具有均匀性磁场的大范围区域并对多个用电设备供电。在输出功率为 14.2W 时, 系统效率达到 8.2%, 在实验中通过发射线圈模块化构建大范围空间的充电区域。2019 年提出了一种无芯交叉偶极子的发射线圈^[33], 该结构具有导电金属屏蔽效果且适用于大范围感应电能传输区域。当输出负载的功率为 47W 时, 系统效率可达 32%。

2) 三维正交线圈。

三维正交线圈可实现短距离内空间磁场的均匀分布, 其传输效率较高。2014 年哈尔滨工业大学提出了一种具有 90° 馈电相差的正交线圈^[34], 该线圈可作为全向 WPT 系统的发射端。该团队基于该发射端设计了一种工作在 10MHz 的全向无线电能传输系统。最后通过仿真与实验实际验证了该系统全向无线充电的可行性。2017 年香港大学提出一种三正交的立体圆形线圈结构^[17], 如图 2(a)所示, 该结构可产生全方向均匀磁场。同时该结构配合其控制方法可对空间内多个负载进行供电。同年, 该团队针对在空间中的无人机动态充电问题, 提出了一种双层三正交方形线圈的发射结构^[35]。该结构外层为中继线圈, 内层为接收线圈, 可实现无人机在空间中高自由度的动态无线充电。

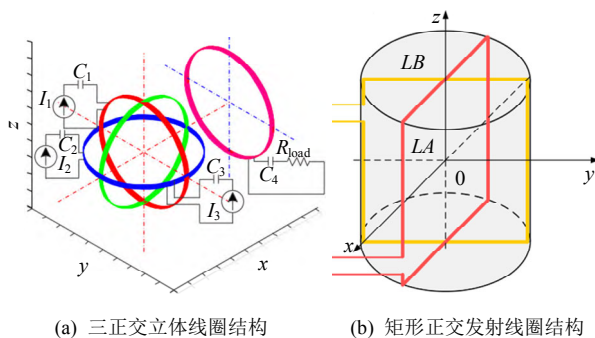


图 2 三维正交线圈结构

Fig. 2 Three dimensional orthogonal coil structure

2019 年中南大学提出了一种两个矩形线圈相互正交的全向无线充电筒^[36]。如图 2(b)所示, 通过

拓扑电路配合正交线圈产生稳定的旋转磁场, 该线圈结构简单且便于使用。

3) 其他立体线圈。

除上述二维平面线圈和三维立体线圈外, 本节还总结了其他不同形状的立体线圈。这些立体线圈具有控制简单、灵活度高及磁场分布均匀等优点。2017 年天津工业大学为了提升空间磁场的自由性、灵活性和均匀性, 提出了一种新型的全向三维发射线圈装置^[37]。该装置以一个正十二面体作为发射线圈的承载机构, 该装置降低了接收系统对发射系统的依赖性, 实现单电源多负载系统在任意空间范围内的功率稳定性传输。

2018 年弗吉尼亚理工大学提出一种由多个发射线圈组成的碗状结构^[38], 如图 3 所示, 该结构由 5 个发射线圈组成, 前 4 个发射线圈分布在碗状结构的侧面, 最后一个发射线圈分布在底部。该结构的输出功率达 5W, 可满足小型电子设备的用电需求。2019 年北京交通大学提出一种用于紧凑型空间的三维发射线圈结构^[39], 该结构对用电设备容错率高, 且不消耗多余空间。2021 年合肥工业大学提出一种半球体全方向磁场发射机构^[40], 该机构仅由单相电源供电, 同时可实现系统的高自由度且稳定的功率传输。

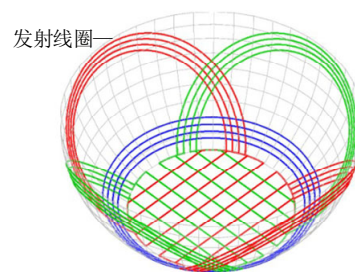


图 3 碗状立体线圈结构

Fig. 3 Bowl shaped three-dimensional coil structure

1.2.2 接收线圈结构

1) 平面型线圈。

平面型对于立体型接收线圈, 其优势在于构造简单、节省体积及磁场能量传输的稳定性好。2016 年 KAIST 提出了适用于大范围全向感应电能传输的交叉偶极子线圈^[29], 如图 4(a)所示, 其中发射和接收线圈由正交相位差的交叉偶极线圈组成, 其接收线圈的正交结构可以保证系统在大范围且高自由度的状态下接收磁场能量。

文献[41]提出一种由两个方形线圈和十字形铁氧体组成的平面接收结构^[41], 如图 4(b)所示, 其中

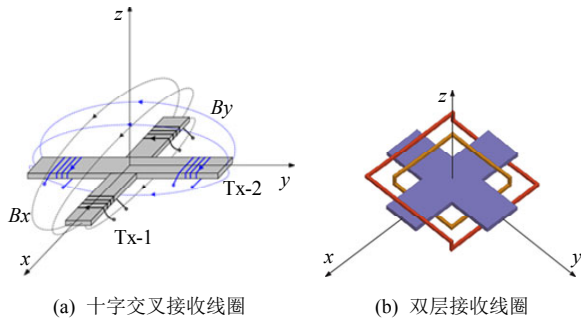


图4 平面式接收线圈结构

Fig. 4 Planar receiving coil structure

铁氧体磁芯的每侧与两个线圈相交。该线圈在任何方向下线圈都可以接收电能, 具有良好传输稳定性。

2) 立体型线圈。

立体型接收线圈一般采用多个线圈进行绕制, 该结构可对空间内来自多个方向的磁场能量进行接收, 极大提高了接收机构的空间自由度和灵活性。2007年重庆大学提出一种方形线圈正交绕制的接收机构^[42], 该结构可实现任意角度下的非接触电能传输。2016年该团队设计了一种基于正四面体的电能接收机构^[43], 如图5(a)所示, 该结构解决了接收端在动态旋转情况下的电能获取问题, 提高了电能传输的稳定性, 并且具有对系统控制依赖性不高的特点。

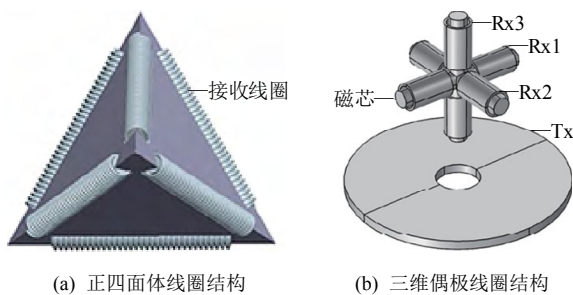


图5 立体型接收线圈结构

Fig. 5 Three dimensional receiving coil structure

文献[44]提出一种三维偶极线圈的接收结构^[44], 不需要复杂系统控制且传输效率稳定。如图5(b)所示, 该结构相较于上述的成果体积更加小巧, 灵活度与自由度更高。由于其研究不够深入, 还需要对其传输效率和控制方法进一步探索。2021年南洋理工大学提出一种由多个对称线圈组成的全向无线电能传输系统接收线圈^[45]。该线圈的与传统的单线圈相比起传输效率和方向容错率特性较好。

1.3 电磁兼容技术

全向 WPT 电磁兼容技术主要包括电磁环境限

值分析与电磁屏蔽技术两方面。全向 WPT 系统通过高频电磁场实现电能无线传输, 对长时间处于该电磁环境下的生物体是否产生不良影响尚未可知。且该系统所在的环境复杂多样, 其外部环境可能会干扰导致系统自身参数发生改变, 该系统需要具备抗电磁干扰能力。

1.3.1 电磁环境限值分析

电磁仿真分析法是电磁环境限值分析的主要方法之一, 该方法通过建立与实际条件相符的 WPT 系统和人体仿真模型, 再通过软件对模型进行模拟分析^[46]得出结果, 相较于矩量法、时域有限差分法和准静态法^[47], 它无需通过复杂的测量估计和公式推导, 只需软件中高精度的有限元法来分析各种静态、频域和时变磁场及电场。文献[48]通过对人体模型整体以及局部的三维建模进行仿真分析, 对人体电磁曝露限值做出评估后得出: 当系统的工作频率为 8MHz 且人体距离系统发射线圈为 10mm 时, 发射线圈的电流需要控制在 1.2A 及以下。文献[49]通过有限元软件分析了人体近距离接触 WPT 系统时的电磁曝露问题, 并得出系统的电流密度、功率密度和 SAR 值符合国际非电离辐射防护委员会 (ICNIRP) 导则限值。文献[50]基于有限元的三维电磁仿真软件, 构建电动汽车无线充电电磁辐射下的人体电磁环境模型, 研究了人体主要器官的电磁曝露问题。研究得出在 2.5kW 系统下各电磁物理量均低于 ICNIRP 导则要求的安全限值。上述电磁环境限值分析虽然针对传统 WPT 系统, 但其研究方法同样适用于全向 WPT 系统, 当前全向系统正常工作状况下的电磁环境限值亟待研究。

1.3.2 电磁屏蔽技术

本节将当下的电磁屏蔽技术总结为 3 类, 其中包括有源屏蔽技术、无源屏蔽技术以及无功谐振线圈屏蔽技术, 并总结了该技术的 research 现状。表 2 对电磁屏蔽技术列出了部分优缺点。

1) 有源屏蔽技术。

有源屏蔽技术是指通过带有外加电路的屏蔽线圈产生与原磁场方向相反的磁场相互抵消。2011年 KAIST 针对在线电动车的感应式无线电能传输系统, 提出了一种主动消除系统中感应电动势的方法^[51]。该方法不通过进入系统主磁路的方式进行抵消, 并通过实验验证了其具有良好的效果。2014年该团队在上述基础上提出了 3 种消除电动汽车电动

表 2 电磁屏蔽技术优缺点对比

Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of electromagnetic shielding technology

文献	技术	方法	优点	缺点
[51-52]	有源屏蔽	有源线圈	大大降低对系统主磁路影响	设计复杂, 控制难度大, 需要外加电源
[53]	无源屏蔽	铁磁材料	增大线圈自感与耦合系数	体积大, 适用的工作频率有限
[54]	无源屏蔽	非铁磁材料	对垂直方向上的漏磁场有显著抑制效果	线圈自感和系统耦合系数减小且存在涡流损耗
[55]	无源屏蔽	铁磁材料与 非铁磁材料	有效增强工作区域系统磁场, 对非工作区域磁场泄露屏蔽效果好	体积大, 成本高, 不适用于兆赫兹以上的频率区域
[56-59]	无功谐振 线圈	无源线圈与 电容电感材 料相结合	不外加激励源, 屏蔽线圈布置更为灵活, 不影响系统主磁路的能量传输过程	参数设计困难且控制方法复杂

势的通用方法^[52]。通过向系统线圈添加有源电动势的消除线圈, 可使线圈产生的电动势被对应消除线圈独立抵消。

2) 无源屏蔽技术。

无源屏蔽技术是一种利用铁磁材料或者金属材料对磁场进行屏蔽的电磁辐射抑制技术。河北工业大学针对电动汽车无线充电时对非工作区域电磁环境的影响, 设计了一套带有屏蔽的能量耦合机构^[53]。该结构可有效增强系统的传输效率, 特别是在远距离和水平偏移程度大可有效减少漏磁通。东南大学设计了一种双层屏蔽机构^[54]。该机构外层为非铁磁性材料, 内层为铁氧体材料, 可有效屏蔽非工作区域的磁场泄露并增强工作区域的磁场强度。KAIST 对铁氧体材料和铝金属材料的磁屏蔽特性进行分析对比^[55], 对不同形状和不同尺寸的磁性耦合器适用的领域进行了划分。

3) 无功谐振线圈屏蔽技术。

无功谐振线圈屏蔽技术将有源屏蔽技术与无源屏蔽技术的优势有效结合, 可通过原磁场感应出反向磁场进行抵消, 实现较好的电磁屏蔽效果。2013 年 KAIST 针对在线供电的电动汽车, 提出一种使用无功谐振电流环路的无源屏蔽方法和磁场消除方法^[56]实现对非工作区域的电磁屏蔽, 且通过实验电路验证了该方法的可靠性。2014 年该团队提出一种使用 LC 谐振线圈的磁屏蔽方法^[57], 通过谐振电抗屏蔽可以产生抵消磁场, 以减少来自 WPT 线圈的入射磁场, 并有效地减少系统周围环境的总

磁场而不消耗额外的功率。2015 年该团队提出了一种采用双层线圈和 4 个电容移相器的屏蔽方法^[58], 该方法在原有一次屏蔽线圈基础上增加了二次屏蔽线圈, 有效扩大了屏蔽区域, 且屏蔽效果好于传统有源屏蔽技术。2020 年该团队针对植入耳蜗的电磁干扰问题, 提出一种无功谐振屏蔽线圈^[59], 通过实验验证该线圈减少了系统中 5.1dB 的电磁泄漏。

1.4 系统理论分析及结构设计

全向 WPT 系统的理论分析与结构设计主要集中在传输特性分析、电路结构设计、系统参数选择以及功率传输技术等方面。

香港大学针对全向 WPT 系统提供了其系统功率传输的基本数学理论^[16-17], 该理论分为两部分阐述。第 1 部分通过对二维系统的分析, 总结出用输入磁场矢量角度表达系统输出功率和效率的函数。第 2 部分着重对三维全向 WPT 进行数学分析, 并阐述了负载检测原理。证明了在系统中最大能量效率的能量转移方向总是与最大负载功率路径的方向一致。东南大学在全向 WPT 系统的三相电路中加入了 LCC-S 补偿拓扑结构^[60], 与传统方案相比系统的功率波动下降 75%左右。重庆大学提出三相驱动的全向 WPT 系统^[61], 该系统由 3 个独立的相位调节激励源、3 个正交发射线圈和一个平面接收线圈组成。研究人员推导了系统的功率传递效率, 且提出可最大化输出效率的控制机制。浙江大学提出一种三发射端与三接收端的全向 WPT 系统^[62], 同时与传统的单发射机单接收机系统进行比较。根据电路理论和系统模型, 推导了 M: N 系统的理论模型。中南大学针对间歇和频繁移动设备的供电问题, 提出了一种全方位 WPT 系统^[63]。通过提出两种不同的最大功率传输方法并消除了发射端与接收端之间的通信链路。

1.5 新型传输机理研究

全向 WPT 技术主要包括全向感应式 WPT 和全向谐振式 WPT。而这两种传输系统对传输距离远近、工作频率高低以及负载参数大小等因素的变化十分敏感, 造成传输功率的不稳定也是这项技术的局限性之一。如果从传输机理层面出发就可以有效解决该技术的瓶颈问题, 提升无线电能传输的自由度。

在 2017 年斯坦福大学提出了一种基于宇称时间对称(patiry time symmetry, PT 对称)原理的无线电能传输技术^[64], 该技术无需进行主动调谐, 实现

系统在强耦合区域内传输功率和效率的恒定不变,但在临界距离条件改变后,其效率急剧降低,该技术的优势可弥补全向 WPT 技术短板。2019 年西南交通大学借助微波无线传能的精确特性,提出了一种基于时间反转的无线电能传输方法^[65]。该方法所用的天线阵列可以由任何结构和排列的全向天线单元构成,其原理基于天线辐射的自动匹配和发射线圈环境适应性。2020 年华南理工大学基于宇称时间对称原理,提出针对物流机器人的全向 WPT 系统^[66]。当系统的耦合系数保持不变时,其输出效率和功率保持不变。2021 年东京大学^[67]通过多模准静态腔谐振方法实现了室内区域的多方向无线电能传输,该方法在目标设备体积导电表面上使用多向、广泛分布的电流,使其产生多个相互独立的三

维磁场。上述传输机理都较好的实现了全向电能传输,亟待进一步拓展研究。

2 全向无线电能传输技术应用场景

空间全向无线电能传输技术近些年的研究成果依据应用场景^[68]大致分为 5 类,包括先进工业制造、植入式医疗电子、智能家居、商业办公和水下探测。通过详细叙述不同应用领域下该技术的发展现状,对比突出该技术与现有技术的特定优势。同时对每种应用场景下技术优势与不足进行详细总结,对该技术的应用前景进行展望。表 3 从工作频率、传输功率、系统效率、线圈结构、传输距离、距径比及应用场景等方面对近年来国内外高等院校和科研机构在该技术场景应用的研究成果设计参数进行对比。

表 3 场景应用研究成果设计参数对比

Table 3 Comparison of scene application research results

参考文献	工作频率/MHz	传输功率/W	系统效率/%	线圈结构	传输距离/cm	距径比	应用场景
[36]	0.020	30.00	24.0	正交方形线圈	20	2:1	多负载全向无线充电
[80]	0.100	70.00	60.0	三正交线圈	8	2:1	水下探测器全向无线充电
[78]	0.140	100.00	40.0	方形线圈	70	4:1	家庭高功率设备全向无线充电
[69]	0.150	12.00	55.0	正交圆形线圈	15	3:1	无人机全向无线充电
[35]	0.270	52.00	91.0	正交方形线圈	40	—	工业无人机全向无线充电
[66]	0.300	150.00	90.0	圆形线圈	20	1:1	物流机器人全向无线充电
[69]	0.585	20.00	85.0	圆形线圈	—	—	工业机械臂全向无线充电
[39]	0.800	5.00	78.0	三维正交线圈	30	—	办公场所便携设备全向无线充电
[20]	1.000	110.00	48.0	正交圆形线圈	30	2:1	家用电器全向无线充电
[26]	3.170	0.15	36.0	立方体线圈	1	3:1	医疗微球内窥镜全向无线充电
[38]	6.780	5.00	80.0	碗状线圈	5	0.5:1	便携式智能设备全向无线充电
[77]	6.780	1.40	7.9	立方体线圈	30	9:1	微型机器人全向无线充电
[31]	6.780	16.20	9.3	方形线圈	170	—	商业场所电子设备全向无线充电
[75]	13.560, 27.120	—	61.2	双层方形线圈	20	3:1	智能家居全向无线充电

2.1 先进工业制造

随着全向 WPT 技术不断地发展进步,该技术在先进工业制造领域内有着广阔的应用前景。例如在危险工业环境下作业的无人机、流水线作业的机械臂及全天候工作的物流机器人等,这些用电设备的供电大多都需要有线电缆输电或在指定位置进行无线电能传输。且供电过程需要时间等待,为设备的正常使用带来不便。而该技术电能传输过程自由度较高且不受空间与方位的束缚,同时可实现不间断供电,较好的解决了上述场景存在的问题。

文献[35]提出了一种新型的准全向动态无线功率传输系统,如图 6 所示。接收线圈总是面对发射线圈且最大程度上接收磁场能量,使系统可以在特

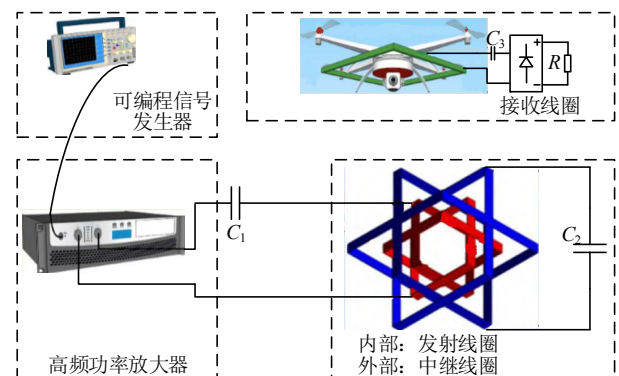


图 6 无人机全向无线功率传输示意图

Fig. 6 Schematic diagram of UAV omnidirectional wireless power transmission

定空间中灵活且高效地为无人机供电。该系统只需

要单一的电源来驱动发射器线圈,大幅减少了电能的损耗,延长了无人机工作时间。

文献[69]针对工业场景下使用的机械臂,提出了一种基于球关节结构的新型全向 WPT 系统。该系统由球结构和球窝组成,球窝容纳球结构。该结构可以任意地球座内改变角度,其电能的传输效率不改变。文献[66]基于奇偶时间对称性原理,提出了一种全方位、高效的物流机器人全向无线电能传输系统,有效的解决了系统存在充电功率波动大与位置变化导致效率低的问题。同时具有结构简单、成本低的优点。文献[70]针对危险工业环境中无人机的无线充电,提出了一种基于全向谐振式 WPT 技术的传感器节点充电系统。该系统不仅可以对该节点内的电池快速充电,同时可以选择空间中最佳的充电位置。

在先进工业制造领域内,全向 WPT 系统具有成本低、结构简单及抗偏移能力较强等特点。但也存在传输距离不够远、传输功率不够大等不足之处,对于一些高功率、大体积的用电设备来说不能很好的适用。该技术仍需优化来适应工业制造场景。

2.2 植入式医疗电子

全向 WPT 技术在植入式医疗电子领域主要包括医用微球内窥镜^[26]、人工心脏^[71]、人工耳蜗^[72]等。这类医疗设备的一般需求功率很小,大约在几十微瓦到几瓦之间。该技术可保证医疗设备在人体内不间断的工作,不仅可以缩短治疗时间,同时在一定程度上减轻了病人在医疗过程中的痛苦。因而,该技术是一种较为理想的医疗设备供电方案。

文献[26]中基于系统的自适应机制,提出一种新型全向无线电能传输解决方案。微球可在所有姿势下捕获肠胃镜图形的医疗内窥镜微球,该医用微球内部结构如图 7 所示,系统接收端将电能从图像读取器传送到微球以获取存储的图像。文献[73]提

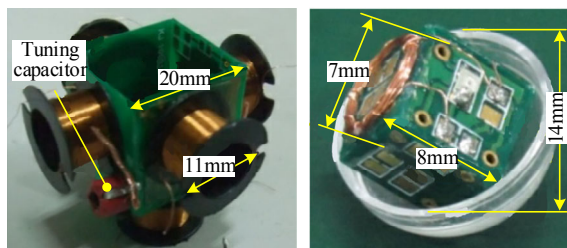


图 7 医用微球内部结构示意图

Fig. 7 Internal structure of medical microspheres

出一种用于 WPT 系统的多线圈结构全向电能采集器,在任意方向下可提供均匀的输出功率和较高的传输效率,实现了较高的自由度。

全向 WPT 技术在植入式医疗电子领域内的应用产品具有体积小、安全性高以及传输距离较远等优点。但该技术的局限性在于系统的抗干扰能力较弱以及接收端线圈发热等问题,可能会延长微型医疗设备在病人体内的工作时间,给病人带来不必要的副作用和身体健康危害。

2.3 智能家居

智能家居是全向无线电能传输系统应用的重要领域之一,随着近几年 WPT 技术的兴起,该技术在智能家居方面应用的优势变得比较突出。特别是家庭用的全向无线电能传输系统,对于推进电视、智能厨具和智能音箱等家电设备的“无尾化”具有较好的意义^[74]。在日常生活的使用过程中,用电设备的电能传输过程没有特定空间和角度的局限性,可根据设备需要实时无线传输。在一定程度上有效实现了智能家居电能系统的智能化、便捷化和人性化。

文献[75]提出了一种双频全向三维无线电能传输系统,该系统可以同时为不同频率、功率和距离的设备提供智能化的无线充电,其该系统可进行双频全向三维无线电能传输,其应用场景如图 8 所示,该系统适用于家庭房屋内多个设备实时的全向无线电能传输。

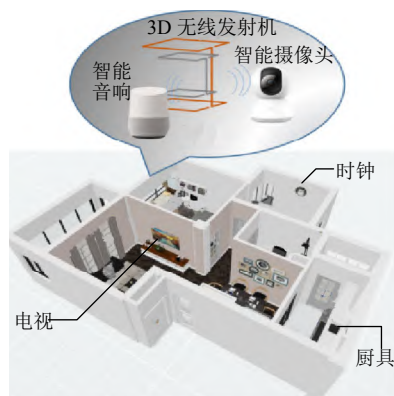


图 8 三维无线电能传输系统应用场景

Fig. 8 Application scenarios of 3D WPT system

文献[20]针对该系统中多个负载功率不平均分配现象,提出了一种基于旋转发射线圈的全向 WPT 系统。其结构如图 9 所示,该系统可缓解由传输方向改变引起的传输效率和输出功率的变化,并改善接收负载之间的不平衡功率分配现象,均匀地向周

围的多个接收机供电,较好的满足率室内家电无线电能传输的需求。

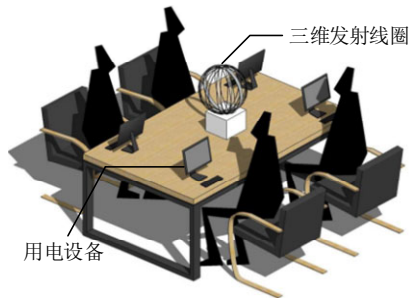


图9 基于旋转发射线圈的家用电器的WPT结构示意图
Fig. 9 WPT structure diagram of household appliances based on rotating transmitting coil

小米科技公司^[76]提出了一种隔空无线充电系统,该公司在隔空充电桩内置5个相位干涉天线,可对手机进行精准空间定位。发射端由144个天线构成相位控制阵列,通过波束成形将毫米波定向发射给手机。在半径数米的空间内实现了5W的输出功率,且可对多个便携式移动设备供电。文献[38]提出了一种新型多发射线圈的无线充电碗,可以为便携式智能设备供电。其磁场在碗内分布均匀且磁场强度高,智能设备可以在充电碗内任意方向自由无线充电。文献[77]研究了智能手机全方位感应无线充电系统。将3D立体互连器件线圈代替印刷在电路板上的传统平面线圈。该系统重量轻、体积小且可应用于许多便携式电子设备的全向无线充电。文献[78]提出了一种基于偶极线圈的带反射器的感应功率传输,它采用可变开关电容在较宽范围距离变化下进行功率调节。该系统结构简单、制作成本低且开关电容可调幅度大,可在高功率场景下进行应用。

在智能家居领域内,全向WPT技术应用的科研成果具有占用空间小、设备轻便和内部构造简单等优点。在实际家庭环境使用过程中便于移动,有效节约空间,方便家庭日常生活的使用。不足之处在于传输范围较短和传输功率不够大。还需根据日常家庭的使用情况进行实际改进,并展开细致化与针对性的技术参数研究。

2.4 商用办公

将全向WPT技术应用到商业办公领域中,不仅可以使智能手机、平板电脑、录音笔等办公设备的充电与工作同步进行,提高人员的办公效率。同时,该技术应用的产品体积小、重量轻,便于在商业办公场所安装和隐藏,解决了房屋布线、景观破

坏等问题,也有利于节省空间资源,提升办公区域内的整洁性和美观性。

文献[31]提出了一种正交旋转磁场全向WPT系统,用于分布在三维空间的多物联网进行全向无线充电。其场景应用示意图如图10所示,文献中所提出的发射线圈提供了均匀分布的正交磁场环境,在这个环境内的设备都可以进行自由无线充电。同时该设备具有供电范围大、成本低及重量轻等特点,可广泛用于商场以及办公场所。

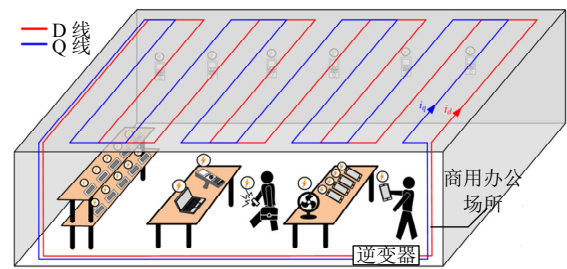


图10 三维空间的多物联网无线充电环境图
Fig. 10 Three dimensional wireless charging environment map of Internet of things

文献[39]提出了一种紧凑型空间全向WPT系统。该系统应用新型三维发射线圈结构,可对工作区域内的多个消费电子产品同时进行电能传输。该系统产生的电磁场强度较高,同时对发射端和接收端之间的位置和角度失调具有较大的容差。由于空间结构小,嵌入办公家具或立方体面板的某些角落较为简单,可省去额外空间消耗。

文献[36]针对多个负载无线电能的稳定传输问题,提出了一种三维无线充电器结构,如图11所示,该系统采用改进的补偿拓扑结构用来产生稳定的旋转磁场。当发射机与接收机之间的距离保持固定时,每个接收负载的感应电压都随负载保持不变。该系统的机构配置简单,在一般情况下能够保持传输电能的稳定性与可靠性。

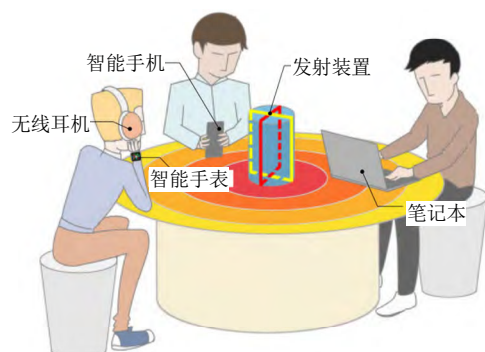


图11 用于多负载应用的三维无线充电器
Fig. 11 3D wireless charger for multi load applications

文献[60]为解决在多负载充电模式中的电能传输的稳定性问题,提出了一种三相全向 WPT 系统线圈方案,较好的解决了负载接入和切除时的功率波动问题,提高了系统发射功率的稳定性和传输功率的能力。

上述研究成果展现出了全向 WPT 技术在商业办公领域的巨大潜力,该技术应用产品优势体现在其体积小便于隐藏,可同时对多个用电设备进行供电并保持其系统功率传输的稳定性。其劣势主要表现在两个方面,首先,传输效率不高会延长用电设备用户的等待时间。其次传输空间范围不够广,设备供电受到一定的空间局限性。

2.5 水下探测

在水下探测领域,水下航行器的供电方案大致有两种。首先是有线充电,其大多使用的是湿插拔接口^[79]。湿插拔接口在使用过程中存在磨损、寿命较短以及漏电隐患等问题,不利于充电安全性的要求,且有线充电设备价格昂贵。其次无线电能传输对位置要求很严格。水下航行器装置在水下难以始终对充电目标保持相对静止,其传输效率并不理想。而全向 WPT 技术可以较好的弥补上述两种方式的缺点,可成为水下探测领域有效的供电方案。

文献[80]提出一种三维全向水下无线电能传输系统,其中发射线圈由 3 个具有不同馈电相位的相互正交环路组成。该发射线圈可以保证任何方位的接收线圈获得至少一个发射线圈的电能传输。该系统在发射回路中分别采用最简单馈电相位差和最佳馈电相位差时,其系统的输出功率有显著的提升。

在水下探测领域内,全向无线电能传输相较于传统供电方案的优势体现在全方位电能传输、可对多个负载同时供电以及传输功率相对稳定。但该系统在电能传输距离、功率传输效率以及水下供电安全性和可靠性等方面还需进一步提升,更好满足水下探测领域内设备的实际用电需求。

3 全向无线电能传输技术亟待解决的问题

3.1 新型传输机理探究与应用

全向 WPT 系统虽然在多方位与抗偏移方面得到了大幅提高,但系统对耦合系数敏感的问题没有得到本质上的解决,在系统中应用新型传输机理是一种比较理想的解决方案。将宇称时间对称原理应用于全向 WPT 系统^[79],可有效改善系统对线圈间耦合系数敏感的问题,但该机理的应用条件比较严

格,需要系统两侧固有频率一致且达到一定的互感值。此外,应用分数阶电路原理的系统对传输距离与谐振频率变化不敏感,同时还具有抗失谐能力强和鲁棒性强等优点。根据现有的验证结果,应用新型传输机理可以有效提升系统传输的稳定性,探索无线电能传输的本质规律并获得更高的应用效果的亟待进一步研究。

3.2 电磁曝露安全性研究

全向 WPT 系统周围的电磁环境是否安全是决定该技术能否实用化的关键,其中电磁曝露问题是公众关注的焦点问题。特别是在公共环境中生活的大众群体,当自身受到电磁曝露时,一般情况下很难发现且没有对应的保护措施。为此,国内外科研人员对电磁曝露安全性问题进行了长期跟踪与研究,并得出电磁曝露与人体健康之间没有必然联系的结论。

当前全向 WPT 系统的工作频率主要集中在 10GHz 以下,在该系统的设计过程中首先要满足电磁防护标准。图 12 选取了国际标准 ICNIRP—2010、ICNIRP—2020 和国内标准 GB8072—2014 在 1kHz~10GHz 范围内对国内外公共曝露限值进行对比,几种标准之间的参考限值互有不同。其中 ICNIRP—2010 与 ICNIRP—2020 标准相比,最高频率由 10MHz 提升到了 300GHz。且磁场限值大幅提高,但电场限值有所降低。GB8072—2014 与 ICNIRP—2020 相比国内标准中对电磁场曝露限值要求更为严格。如何量化分析全向 WPT 系统周围电磁场环境对人体的健康影响并使其满足电磁防护标准要求是研究全向 WPT 系统方案电磁曝露安全性的重

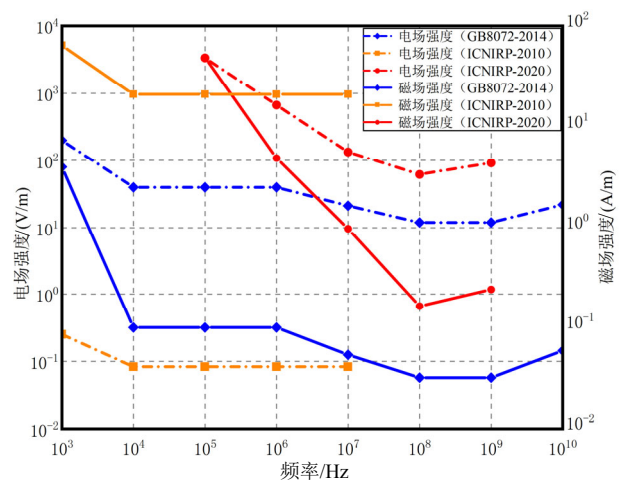


图 12 国内外公共曝露限值对比

Fig. 12 Comparison of public exposure limits at GB8072—2014 and ICNIRP

要目标。

3.3 不同应用场景的精细化研究

在不同应用场景内,全向 WPT 设备要满足的用户需求不尽相同,应针对系统的技术参数精细化研究。上述研究成果虽已经针对特定场景做出改进,但仍存在一些不足。在先进工业制造领域,现存主要问题为系统传输功率小且稳定性不高,难以满足工厂环境内高功率、多负载的运行情况。在医疗电子领域,设备抗干扰能力弱和自身发热问题还不能很好解决。在医疗过程中会导致病人的治疗时间增加,甚至会造成二次身体损伤。传输距离与电磁曝露是智能家居领域的主要问题,设备不仅需要充电范围有效覆盖家庭环境还要保证空间中磁场不对用户健康产生危害。在商用办公领域的用电设备种类繁多且较为密集,如何保证系统对多个用电设备稳定供电是急需解决的问题。在水下探测领域,传输距离与传输功率无法满足现有水下用电设备的需要。如何针对不同应用场景对磁耦合机构、电路补偿拓扑结构和磁场控制方法等方面做出特定优化和改变来满足设备需求亟待解决。

3.4 控制策略的优化

控制策略的优化是全向 WPT 技术不断进步发展的重要原因。其中磁场控制方法是系统控制策略中的重要环节,良好的磁场控制方法保证系统发射端产生全向性、均匀性和指向性的高自由度磁场。除此之外,鲁棒控制技术对于系统实现输出功率的控制优化、恒压恒流输出以及提高系统的抗干扰能力十分重要。全向 WPT 系统的鲁棒控制方法包括对原边或副边的 DC-DC 控制、移相控制及调频控制等。其中 DC-DC 控制精度高,调节范围宽,但其体积大且效率不高。移相控制的优势在于成本低且不需要增加电路,但是控制方法复杂。调频控制具有成本低与控制简单的优点,但调控范围较窄。每种控制方法的适用范围不同,需要根据系统实际使用情况的具体要求进行选择。如何结合现有全向 WPT 系统控制策略并根据实际场景需求进行深入研究。

3.5 可靠性与稳定性的提升

全向 WPT 系统需要在高频磁场环境下为多个负载稳定可靠的供电。当用电设备接入或切出系统时,系统总负载阻抗动态变化导致电路固有谐振点发生偏移,造成系统输出电压和功率的波动。其传输功率与效率的不稳定会影响到负载的可靠运行。

除去上述电磁耦合机构和磁场控制方法的优化外,增加主电路的补偿结构对于系统的稳定性尤为重要。通过在全向 WPT 系统的主电路中加入 LCC-S 型补偿结构^[60],有效提高了系统在“一对多”负载传输过程中的稳定性。如何将主电路与补偿结构有效结合提升系统的稳定性还需要进一步探究。其次,全向 WPT 系统内部结构复杂且由大量电力电子器件组成,该系统工作时产生的高频磁场会导致带有金属器件的表面产生涡流,导致主电路发热并降低系统工作效率。同时系统所处的环境中干扰源复杂多样,主要可分为负载类和有源干扰^[47]。在实际环境中,虽然主流电子设备的频段大都避开了 0.5~25MHz 区间,对系统的干扰不大。但部分低频的电力电子设备的高频谐波仍有可能达到系统的工作频率,对系统的电能传输造成影响。如何通过现有的电磁屏蔽技术对较好解决系统磁场泄漏以及通过其他方式来降低系统对环境的敏感度是提升其稳定性与可靠性的主要问题之一。

4 全向无线电能传输技术未来发展方向

4.1 新型材料在系统电路中的应用

近些年来像氮化镓材料、碳化硅材料、左手材料和纳米晶磁屏蔽材料等新型材料不断涌现出来,其材料制成的元器件展现出来的优良特性不尽相同。其中氮化镓器件具有开关速度快、导通电阻低、寄生参数小和反向恢复损耗低等优点。相比于其他材料器件,氮化镓器件更有利于实现谐振变换器的高效率与高频率。由氮化镓器件构成的谐振变换器在正向模式和反向模式下最大效率均可达 95%以上,最高工作频率达 500kHz。应用碳化硅材料制成的功率器件,具有上万伏特的耐压值,兆级的开关频率,数十毫欧的导通电阻,高达上千安培的正向电流,其结温度高达 270℃。左手材料可以实现负的介电常数和磁导率,左手介质中的电磁波能量和相位是相反的,利用左手材料可以实现对右手材料的相位补充技术。且应用左手材料的天线与普通天线相比尺寸可减少 75%左右。纳米晶磁屏蔽材料具有高磁导率、高饱和磁感强度以及低磁损耗等优点。其饱和磁感强度为 1.1~1.5T,低于常用的非晶合金和硅钢,且中高频损耗相对较小。因而将新型材料制成元器件应用在全向 WPT 系统主电路中,不仅可以缩小元器件的尺寸,减小系统体积。同时元器件可以大幅提升系统工作时电能传输的功率,

减少电能损耗, 提高整体性能。

4.2 与新兴技术相结合

全向无线电能传输技术可与如今发展迅速的人工智能技术、身份识别技术和交互通信技术等新兴技术进行结合。其中, 人工智能技术具有强大的自主学习能力和快速识别反应能力。通过人工智能技术优化控制算法可以对用户的用电行为快速学习并对其进行用电预测。在工作过程中可以掌握连接系统的用电设备数量与区域内实时用电量, 着重向用电量、用电设备多的区域传输电能, 减少空闲区域电能供应, 降低不必要损耗。利用身份识别技术可有效辨别用户的合法性, 避免非法用户进行窃电。保护系统设备的供电安全, 同时保证设备的用电安全。在未来全向 WPT 技术应用会十分广泛, 如何引导该技术智能化发展至关重要。因此将新兴技术与全向无线充电技术相结合是该技术未来的重点发展方向。

4.3 系列化与体系化标准制定

空间全向无线电能传输技术相比于现有技术, 在原理和实际应用层面都有较多相似之处。应根据该技术的发展现状和未来发展方向, 结合现有国际电动汽车无线充电标准包括 SAE J2954 标准、IEC 61980 标准、ISO 19363 标准和国内电动汽车无线充电的 GB/T 38775 系列标准。以及现有针对电子产品标准在内的 Qi 标准、Rezence 标准和 PMA 标准等。制定针对全向 WPT 技术的系列化与体系化标准要求, 包括最低传输效率、电磁泄漏阈值、频率范围、工作距离范围和功率支持范围等规范标准。该系列标准可对后续技术成熟发展提供指导方向, 并对工程化和产业化进行规范化管理。制定系列化与体系化标准是该技术推广普及与后续发展的必要任务。

5 结论

全向无线电能传输技术具有高自由度、不受方向性和空间性的优点。相较于现有技术来说, 该技术适用的场景更全面, 工作过程更具有灵活性和便捷性。因而该技术具有巨大潜力和广阔的应用前景。本文对当前空间全向 WPT 技术的研究进展和研究成果做出了总结与分析, 并指出了该技术亟待解决的问题, 对其技术未来的研究提供了参考方向。全向 WPT 技术是一种由多个学科交叉融合的用电方式, 虽然该技术的研究成果距离人们的理想

目标还有差距, 但随着理论与应用的快速发展, 实用化的产品将会出现生活中的方方面面, 更好满足人们对于美好生活的向往, 最终实现简洁、灵活、高效的无线化时代。

参考文献

- [1] 杨庆新, 章鹏程, 祝丽花, 等. 无线电能传输技术的关键基础与技术瓶颈问题[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 1-8.
YANG Qingxin, ZHANG Pengcheng, ZHU Lihua, et al. Key fundamental problems and technical bottlenecks of the wireless power transmission technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 1-8(in Chinese).
- [2] 朱春波, 姜金海, 宋凯, 等. 电动汽车动态无线充电关键技术研究进展[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 60-65, 72.
ZHU Chunbo, JIANG Jinhai, SONG Kai, et al. Research progress of key technologies for dynamic wireless charging of electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 60-65, 72(in Chinese).
- [3] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [4] PATIL D, MCDONOUGH M K, MILLER J M, et al. Wireless power transfer for vehicular applications: overview and challenges[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 3-37.
- [5] LI Siqu, MI C C. Wireless power transfer for electric vehicle applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 4-17.
- [6] 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(in Chinese).
- [7] 吴理豪, 张波. 电动汽车静态无线充电技术研究综述(下篇)[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1662-1678.
WU Lihao, ZHANG Bo. Overview of static wireless charging technology for electric vehicles (part II)[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1662-1678(in Chinese).
- [8] 程时杰, 陈小良, 王军华, 等. 无线输电关键技术及其应用[J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 68-84.
CHENG Shijie, CHEN Xiaoliang, WANG Junhua, et al. Key technologies and applications of wireless power transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(19): 68-84(in Chinese).

- [9] 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(in Chinese).
- [10] 赵争鸣, 张艺明, 陈凯楠. 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 1-13.
ZHAO Zhengming, ZHANG Yiming, CHEN Kainan. New progress of magnetically-coupled resonant wireless power transfer technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 1-13(in Chinese).
- [11] ZHANG Zhen, PANG Hongliang, GEORGIADIS A, et al. Wireless power transfer: an overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1044-1058.
- [12] 谢文燕, 陈为. 全方向无线电能传输技术研究进展[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 202-215.
XIE Wenyan, CHEN Wei. Research progress of omnidirectional wireless power transfer technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 202-215(in Chinese).
- [13] 戴欣, 唐春森, 王智慧, 等. 用于无线电能传输系统的磁场跟踪伺服机构: 中国, 102005829A[P]. 2011-04-06.
DAI Xin, TANG Chunsen, WANG Zhihui, et al. Magnetic field tracking servo mechanism for wireless electric power transmission system: CN, 102005829A[P]. 2011-04-06(in Chinese).
- [14] LIU Gongjun, ZHANG Bo, XIAO Wenxun, et al. Omnidirectional wireless power transfer system based on rotary transmitting coil for household appliances[J]. Energies, 2018, 11(4): 878.
- [15] NG W M, ZHANG Cheng, LIN Deyan, et al. Two-and three-dimensional omnidirectional wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 4470-4474.
- [16] LIN Deyan, HUI S Y R, ZHANG Cheng. Omni-directional wireless power transfer systems using discrete magnetic field vector control[C]//Proceedings of 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal: IEEE, 2015.
- [17] ZHANG Cheng, LIN Deyan, HUI S Y. Basic control principles of omnidirectional wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 5215-5227.
- [18] LIN Deyan, ZHANG Cheng, HUI S Y R. Mathematical analysis of omnidirectional wireless power transfer (part-I): two-dimensional systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 625-633.
- [19] LIN Deyan, ZHANG Cheng, HUI S Y R. Mathematic analysis of omnidirectional wireless power transfer (part-II): three-dimensional systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 613-624.
- [20] ZHU Qi, SU Mei, SUN Yao, et al. Field orientation based on current amplitude and phase angle control for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 4758-4770.
- [21] LIN Deyan, ZHAN Cheng, HUI S Y R. Power and efficiency of 2-D omni-directional wireless power transfer systems[C]//Proceedings of 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal: IEEE, 2015.
- [22] YIN Jian, LIN Deyan, PARISINI T, et al. Front-end monitoring of the mutual inductance and load resistance in a series-series compensated wireless power transfer system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 7339-7352.
- [23] 陈宏亮, 林苏斌. 全方向无线充电负载位置前端监测[J]. 电气技术, 2019, 20(8): 28-32, 37.
CHEN Hongliang, LIN Subin. Front-end monitoring of all-direction wireless charging load position[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(8): 28-32, 37(in Chinese).
- [24] TANG Weiyi, ZHU Qi, YANG Jian, et al. Simultaneous 3-D wireless power transfer to multiple moving devices with different power demands[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 4533-4546.
- [25] FENG Junjie, LI Qiang, LEE F C. Load detection and power flow control algorithm for an omnidirectional wireless power transfer system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 1422-1431.
- [26] LI Xiaomeng, SUN Tianjia, LI Guolin, et al. A new omnidirectional wireless power transmission solution for the wireless Endoscopic Micro-Ball[C]//Proceedings of 2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems. Rio de Janeiro: IEEE, 2011: 2609-2612.
- [27] SHI Lixin, KABELAC Z, KATABI D, et al. Wireless power hotspot that charges all of your devices[C]//Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Paris, France: ACM, 2015.
- [28] INADA Y, KAWAJIRI T, TAKEDA U, et al. Arbitrary magnetic field control technique by multi-coil transmitter voltage phase shifting for omni-directional free-positioning magnetic resonance wireless power delivery[C]//Proceedings of the 48th European Microwave Conference. Madrid: IEEE, 2018: 186-189.
- [29] CHOI B H, LEE E S, SOHN Y H, et al. Six degrees of freedom mobile inductive power transfer by crossed dipole Tx and Rx coils[J]. IEEE Transactions on Power

- Electronics, 2016, 31(4): 3252-3272.
- [30] CHOI B H, LEE E S, SOHN Y H, et al. Crossed dipole coils for an omnidirectional wireless power zone with DQ rotating magnetic field[C]//Proceedings of 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Montreal: IEEE, 2015: 2261-2268.
- [31] LEE E S, CHOI J S, SON H S, et al. Six degrees of freedom wide-range ubiquitous IPT for IoT by DQ magnetic field[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11): 8258-8276.
- [32] LEE E S, SOHN Y H, CHOI B G, et al. A modularized IPT with magnetic shielding for a wide-range ubiquitous Wi-power zone[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9669-9690.
- [33] CHOI B H, SOHN Y H, LEE E S, et al. Coreless transmitting coils with conductive magnetic shield for wide-range ubiquitous IPT[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2539-2552.
- [34] 洮尔根. 谐振式全向无线能量发射系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
TAO Ergen. Design of omnidirectional resonant wireless power transmit system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015(in Chinese).
- [35] HAN Wei, CHAU K T, JIANG Chaoqiang, et al. Design and analysis of quasi-omnidirectional dynamic wireless power transfer for fly-and-charge[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(7): 8001709.
- [36] HAN Hua, MAO Zhu, ZHU Qi, et al. A 3D wireless charging cylinder with stable rotating magnetic field for multi-load application[J]. IEEE Access, 2019, 7: 35981-35997.
- [37] 杨庆新, 李阳, 张献, 等. 一种新型无线电能传输全向三维发射线圈装置: 中国, 201710267435. 6[P]. 2017-07-14.
YANG Qingxin, LI Yang, ZHANG Xian, et al. Novel wireless electric energy transmission omnidirectional three dimensional transmitting coil apparatus: CN, 201710267435. 6[P]. 2017-07-14(in Chinese).
- [38] FENG Junjie, LI Qiang, LEE F C. Coil and circuit design of omnidirectional wireless power transfer system for portable device application[C]//Proceedings of 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Portland: IEEE, 2018: 914-920.
- [39] LIANG Ziwei, WANG Jianqiang, ZHANG Yiming, et al. A compact spatial free-positioning wireless charging system for consumer electronics using a three-dimensional transmitting coil[J]. Energies, 2019, 12(8): 1409.
- [40] 蔡智斌, 张国荣, 徐晨林, 等. 一种新型空间无线电能传输系统耦合机构设计[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(4): 52-58.
CAI Zhibin, ZHANG Guorong, XU Chenlin, et al. Design of new space wireless power transmission system coupling mechanism[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(4): 52-58(in Chinese).
- [41] KIM J H, CHOI B G, JEONG S Y, et al. Plane-type receiving coil with minimum number of coils for omnidirectional wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6165-6174.
- [42] 孙跃, 卓勇, 苏玉刚, 等. 非接触电能传输系统拾取机构方向性分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2007, 30(4): 87-90, 112.
SUN Yue, ZHUO Yong, SU Yugang, et al. Direction analysis on contactless power transmission system[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(4): 87-90, 112(in Chinese).
- [43] 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(in Chinese).
- [44] 冯天旭, 王智慧, 孙跃, 等. 采用三维偶极线圈的无线电能传输系统多自由度拾取机构[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 99-104.
FENG Tianxu, WANG Zhihui, SUN Yue, et al. Multi-degree-of-freedom pick-up mechanism of wireless power transfer system using three-dimensional dipole coils[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 99-104(in Chinese).
- [45] TIAN Xiaoyang, CHAU K T, LIU Wei, et al. Analysis of multi-coil omnidirectional energy harvester[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(2): 8000806.
- [46] 黄学良, 王维, 谭林林. 磁耦合谐振式无线电能传输技术研究动态与应用展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 2-14, 141.
HUANG Xueliang, WANG Wei, TAN Linlin. Technical progress and application development of magnetic coupling resonant wireless power transfer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 2-14, 141(in Chinese).
- [47] 周洪, 蒋燕, 胡文山, 等. 磁共振式无线电能传输系统应用的电磁环境安全性研究及综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 1-12.
ZHOU Hong, JIANG Yan, HU Wenshan, et al. Review and research on health and safety issues for magnetically-coupled resonant wireless power transfer systems[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2016, 31(2): 1-12(in Chinese).
- [48] CHRIST A, DOUGLAS M G, ROMAN J M, et al. Evaluation of wireless resonant power transfer systems with human electromagnetic exposure limits[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(2): 265-274.
- [49] CHEN Xilin, UMENEI A E, BAARMAN D W, et al. Human exposure to close-range resonant wireless power transfer systems as a function of design parameters[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(5): 1027-1034.
- [50] 徐桂芝, 李晨曦, 赵军, 等. 电动汽车无线充电电磁环境安全性研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 152-157. XU Guizhi, LI Chenxi, ZHAO Jun, et al. Electromagnetic environment safety study of wireless electric vehicle charging[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 152-157(in Chinese).
- [51] LEE S, LEE W, HUH J, et al. Active EMF cancellation method for I-type pickup of On-Line Electric Vehicles[C]//Proceedings of 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Fort Worth, USA: IEEE, 2011.
- [52] CHOI S Y, GU B W, LEE S W, et al. Generalized active EMF cancel methods for wireless electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5770-5783.
- [53] 张献, 章鹏程, 杨庆新, 等. 基于有限元方法的电动汽车无线充电耦合机构的磁屏蔽设计与分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 71-79. ZHANG Xian, ZHANG Pengcheng, YANG Qingxin, et al. Magnetic shielding design and analysis for wireless charging coupler of electric vehicles based on finite element method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 71-79(in Chinese).
- [54] 陈琛. 谐振式无线电能传输系统的若干电磁问题研究及优化设计[D]. 南京: 东南大学, 2016. CHEN Chen. Research on electromagnetic problems and optimization design of magnetic resonant wireless power transfer systems[D]. Nanjing: Southeast University, 2016(in Chinese).
- [55] KNAISCH K, SPRINGMANN M, GRATZFELD P. Comparison of coil topologies for inductive power transfer under the influence of ferrite and aluminum[C]//Proceedings of 2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). Monte Carlo, Monaco: IEEE, 2016.
- [56] KIM J, KIM J, KONG S, et al. Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(6): 1332-1342.
- [57] KIM S, PARK H H, KIM J, et al. Design and analysis of a resonant reactive shield for a wireless power electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(4): 1057-1066.
- [58] MOON H, KIM S, PARK H H, et al. Design of a resonant reactive shield with double coils and a phase shifter for wireless charging of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3): 8700104.
- [59] HONG S, JEONG S, LEE S, et al. Low EMF design of cochlear implant wireless power transfer system using a shielding coil[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI). Reno, USA: IEEE, 2020.
- [60] TAN Linlin, ZHONG Ruying, TANG Zongyao, et al. Power stability optimization design of three-dimensional wireless power transmission system in multi-load application scenarios[J]. IEEE Access, 2020, 8: 91843-91854.
- [61] YE Zhaohong, SUN Yue, LIU Xiufang, et al. Power transfer efficiency analysis for omnidirectional wireless power transfer system using three-phase-shifted drive[J]. Energies, 2018, 11(8): 2159.
- [62] YAO Pengzhi, ZHOU Jing, HAN Li, et al. Basic principles of point-to-point omnidirectional wireless power transfer system[C]//Proceedings of the 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Harbin, China: IEEE, 2019.
- [63] SU Mei, LIU Zixi, ZHU Qi, et al. Study of maximum power delivery to movable device in omnidirectional wireless power transfer system[J]. IEEE Access, 2018, 6: 76153-76164.
- [64] ASSAWAWORRARIT S, YU Xiaofang, FAN Shanhu. Robust wireless power transfer using a nonlinear parity-time-symmetric circuit[J]. Nature, 2017, 546(7658): 387-390.
- [65] LI Bing, LIU Shiqi, ZHANG Honglin, et al. Wireless power transfer based on microwaves and time reversal for indoor environments[J]. IEEE Access, 2019, 7: 114897-114908.
- [66] ZHANG Zheng, ZHANG Bo. Omnidirectional and efficient wireless power transfer system for logistic robots[J]. IEEE Access, 2020, 8: 13683-13693.
- [67] 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.
- [68] 黄学良, 谭林林, 陈中, 等. 无线电能传输技术研究与应用综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 1-11. HUANG Xueliang, TAN Linlin, CHEN Zhong, et al.

- Review and research progress on wireless power transfer technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 1-11(in Chinese).
- [69] ZHANG Cheng, LIN Deyan, HUI S Y R. Ball-joint wireless power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(1): 65-72.
- [70] LI Jie, YANG Yang, YAN Haixia, et al. Quasi-omnidirectional wireless power transfer for a sensor system[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(11): 6148-6159.
- [71] RAAD H, HAMMOODI A, ISSAC A. Reconfigurable printed Yagi-Uda star array for RF power transmission and harvesting systems[C]//Proceedings of 2018 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC). Cartagena, Colombia, 2018: 731-733.
- [72] LIM H G, YOON Y H, LEE C W, et al. Implementation of a transcutaneous charger for fully implantable middle ear hearing device[C]//Proceedings of 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference. Shanghai, China: IEEE, 2005: 6813-6816.
- [73] CHE Bangjun, MENG Fanyi, LYU Yuelong, et al. Omnidirectional wireless power transfer system supporting mobile devices[J]. Applied Physics A, 2016, 122(2): 54.
- [74] ISHIZAKI T, NOJIRI S, ISHIDA T, et al. 3-D free-access WPT system for charging movable terminals[C]//Proceedings of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications. Kyoto, Japan: IEEE, 2012: 219-222.
- [75] LU Conghui, HUANG Xiutao, TAO Xiong, et al. Design and analysis of an omnidirectional dual-band wireless power transfer system[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(6): 3493-3502.
- [76] 揭秘小米隔空充电背后技术[EB/OL]. [2021-01-29]. <https://www.ithome.com/0/532/934.htm>.
- [77] SERGKEI K, LOMBARD P, SEMET V, et al. The potential of 3D-MID technology for omnidirectional inductive wireless power transfer[C]//Proceedings of the 13th International Congress Molded Interconnect Devices. Würzburg, Germany: IEEE, 2018: 1-6.
- [78] LEE E S, CHOI B G, CHOI J S, et al. Wide-range adaptive IPT using dipole-coils with a reflector by variable switched capacitance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 8054-8070.
- [79] 王司令, 宋保维, 段桂林, 等. 水下航行器非接触式电能传输技术研究[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(6): 36-41.
- WANG Siling, SONG Baowei, DUAN Guilin, et al. Study on non-contact power transmission of underwater unmanned vehicle[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(6): 36-41(in Chinese).
- [80] HE Zhiqiang, WANG Yang, DING Liqin, et al. Research on three-dimensional omnidirectional wireless power transfer system for subsea operation[C]//Proceedings of the OCEANS 2017. Aberdeen: IEEE, 2017: 1-5.



郭海潮

在线出版日期: 2022-01-25。

收稿日期: 2021-08-11。

作者简介:

郭海潮(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为无线电能传输, guohaichao1213@163.com;

张献(1983), 男, 教授, 博士生导师, 无线电能传输技术专业委员会副主任委员兼秘书长, 研究方向为无线电能传输技术等, zhangxian@hebut.edu.cn;

杨庆新(1961), 男, 博士, 教授, 研究方向为工程电磁场与磁技术等, qxyang@tjut.edu.cn;

沙琳(1979), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电动汽车无线充电等, shalin@tiangong.edu.cn;

王奉献(1995), 男, 博士研究生, 研究方向为无线电能传输技术, fx-wang@outlook.com;

朱子旭(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为无线电能传输技术, zzzxyibai@163.com。

(责任编辑 吕鲜艳)

Review of Research and Application of Spatial Omnidirectional Wireless Power Transmission Technology

GUO Haichao¹, ZHANG Xian², YANG Qingxin², SHA Lin¹, WANG Fengxian³, ZHU Zixu¹

(1. Tianjin Key Laboratory of Intelligent Control of Electrical Equipment (Tiangong University);

2. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment (Hebei University of Technology);

3. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province (Hebei University of Technology))

KEY WORDS: omnidirectional wireless power transmission; high degree of freedom; electromagnetic coupling mechanism; electromagnetic safety; application scenarios

In recent years, spatial omnidirectional wireless power transmission technology has developed rapidly. Compared with the existing technology, it has the advantages of high degree of freedom and freedom from direction and space constraints. Moreover, this technology can supply power to multiple dynamic devices at the same time, which is an important development trend in the field of wireless power transmission in the future.

Firstly, this paper analyzes and summarizes the research progress of the key technology of omnidirectional wireless power transmission. The key technologies of omnidirectional WPT include: magnetic field control method, electromagnetic coupling mechanism, electromagnetic compatibility technology, system theory and design, and new transmission mechanism. The advantages and disadvantages of different types of transmitting coil structures are summarized in Table 1.

The actual research results of this technology are classified and summarized according to the application scenarios, and the advantages and disadvantages of this

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of different types of transmitting coil structures

Coil structure	Advantage	Disadvantage
Two dimensional planar coil	simple structure, long transmission distance, rotating space field, high degree of freedom	Low transmission efficiency and complex control
Three dimensional orthogonal coil	Produce omnidirectional magnetic field with uniform density and good transmission stability	The control method is complex and coil structure is large
Other stereo coils	Uniform magnetic field distribution, high spatial and simple control	The structure is complex and large volume

technology in specific scenarios are pointed out. The research results of spatial omnidirectional wireless power transmission technology in recent years are divided into five categories according to the application scenarios. The development status of the technology in different application fields is described in detail, and the specific advantages of the technology and the existing technology are compared and highlighted. At the same time, the technical advantages and disadvantages under each application scenario are also summarized in detail, and the application prospect of this technology is prospected.

Finally, it points out the problems needed to be solved urgently, analyze the electromagnetic exposure of omni-directional wireless power transmission, and compare domestic and foreign standards, as shown in Fig. 1 above. At the end of the article, it provides a reference direction for the future research of this technology.

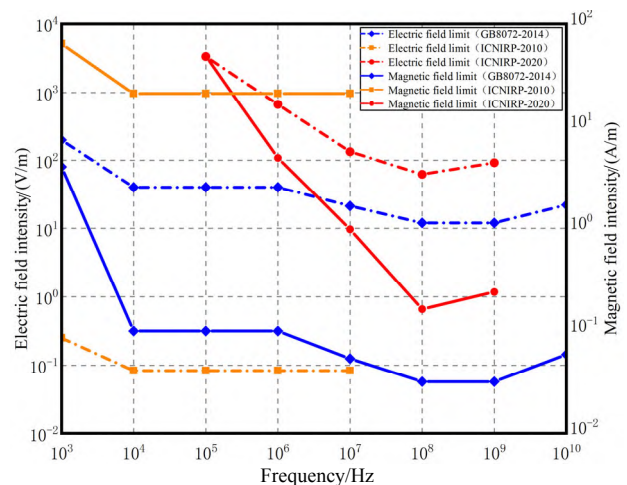


Fig. 1 Comparison of public exposure limits at GB8072—2014 and ICNIRP