

# 基于 WPT 技术的超声辅助加工系统研究进展

许磊 李鹏南 邱新义 牛秋林 李常平

(湖南科技大学机电工程学院,湘潭 411201)

**摘 要** 对超声辅助加工技术及 WPT 技术进行了分析归纳,总结了国内外目前有关 WPT 超声辅助加工系统的研究成果,提出共振式无线电能传输技术可能是超声辅助加工领域一种更为灵活、更为理想的供电模式的想法。

**关键词** 超声辅助加工, WPT, 先进材料, 难加工

中图分类号: TG502.3; TB559

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2017.05.001

## Research Progress of Ultrasonic Assisted Machining System Based on WPT Technology

XU Lei LI Pengnan QIU Xinyi NIU Qiulin LI Changping

(The Institute of Electromechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

**Abstract** In this paper, the characteristics of ultrasonic assisted machining technology and WPT technology are generalized, and the achievements of WPT ultrasonic assisted processing system is also summarized. An idea is proposed that the technology of magnetically-coupled resonant wireless power transfer (MCR-WPT) may be a more flexible and more ideal power supply mode.

**Key words** Ultrasonic assisted machining, WPT, Advanced materials, Difficult-machining

### 0 引言

一代材料一代革命,先进材料凭借着其自身优异的性能在 21 世纪这个高科技时代占据着极其重要的地位,改变着我们的世界,但同时也给材料的加工带来了极大的挑战。先进材料的难加工问题一直是国内外学者关注的热点问题,也是难点问题。目前几种典型先进材料的加工性能主要如下:

(1) 硬脆性材料脆性高、断裂韧性低,材料的弹性极限与强度非常接近,因此加工难度很大,加工既不同于一般的高脆性材料(金刚石)的纯断裂过程,更不同于金属材料的塑性剪切过程,加工稍有不

便会引起工件表面组织的破坏<sup>[1-3]</sup>;

(2) 碳纤维复合材料硬度高强度大,导热性差,加工时切削温度高,刀具磨损严重,加工质量差效率低,易产生分层和撕裂等缺陷,且切屑多为粉尘,容易影响加工和污染环境,危害人的健康<sup>[4-7]</sup>;

(3) 钛合金塑性低硬度大,弹性模量小,刚性差,加工易变形,回弹性高,单位面积切削力大;导热性差,切削温度高,化学活性大,冷硬现象严重,刀具易磨损<sup>[8-13]</sup>;

(4) 高温合金极低的热传导性,切削温度高,切削力大,变形量大,加工硬化严重,刀具磨损严

收稿日期:2017-04-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51275168, 51605161),湖南省自然科学基金项目(2015JJ5028),湖南省研究生科研创新项目(CX2016B602)

第一作者简介:许磊,1992 年出生,硕士研究生,主要从事先进制造技术方向的研究。E-mail:18216435633@sina.cn

通信作者:李鹏南,教授,博士。E-mail:2002lpn@163.com

重<sup>[14-15]</sup>。

为了解决先进材料的难加工问题,各种先进复合技术成为国内外学者的主要研究方向之一,而超声辅助加工技术已被大量实验证明是难加工材料领域一种行之有效的先进加工技术,开发基于 WPT 技术的超声辅助加工系统更成为国内外学者研究的热点。本文主要对 WPT 技术及其在超声辅助加工领域的应用进行归纳研究并从中寻求新的突破点。

### 1 超声辅助加工技术及其应用

超声辅助加工技术(UAM)是传统加工与超声加工(USM)复合形成的一种新的加工技术,具有切削力小、改善切屑流、缩短断屑避免积瘤、减少切削热、加工表面损伤层小、刀具磨损小等特点,被广泛应用于加工硬脆材料、复合材料等难加工材料。超声辅助加工技术在传统机械切除过程中引入了超声振动使得加工过程除了机械切削作用外还有高频微撞击作用和空化作用,改变了工件和刀具间的接触状态和作用机制,减小了两者间的作用时间,增强了切削去除作用,进而改善了加工质量<sup>[16]</sup>。

近年来,研究人员已经在超声辅助加工领域做了大量的工作,对一系列难加工材料进行了超声辅助切削实验,例如:KADIVAR 等<sup>[17]</sup>对 Al/SiC<sub>p</sub> 金属基复合材料进行了超声辅助钻削实验;PUJANA 等<sup>[18]</sup>对 Ti6Al4V 工件样品的钻孔施加超声振动来对比研究相对常规钻孔时的切削力、钻尖温度变化;BAGHLANI 等<sup>[19]</sup>设计了一种特殊的喇叭,用于对钻头施加旋转和振动,用于在深度/直径比为 10 的 Inconel 738LC 上进行深钻测试;PHADNIS 等<sup>[20]</sup>使用超声辅助钻削的先进钻孔技术证明了其相对于常规钻孔的若干优点,包括减小切削力;W. L. CONG 等<sup>[21]</sup>使用可变进给率(CFRP 的高进给率和 Ti 的低进给率)对 CFRP/Ti 叠层板进行超声辅助加工技术研究。

超声辅助加工技术已被大量实验证明是难加工材料领域一种有效的先进加工技术,被广泛应用于航空航天、精密仪器、光学医疗等诸多领域,比如涡轮叶片、发动机机轴、发动机缸体、叶轮胚体和轮辋等的超声辅助车削加工,飞机翼盒、蒙皮、精密轴承保持环、激光陀螺仪腔体的超声辅助磨削制孔加工,棱镜光学表面、陶瓷牙冠和关节球的超声辅助磨削加工<sup>[22]</sup>。

### 2 无线电能传输技术(WPT)及其应用

无线电能传输技术(WPT)是一种凭借空间电磁场、微波等介质进行电能传输的新型供电模式,最早由“交流电之父”特斯拉提出并进行了大量实验研究<sup>[23]</sup>。将无线电能传输技术普及到生活中的各个

领域一直是人们的一个追求,从特斯拉开启这个无线传能的大门后,人们投入了大量的精力致力于这一领域的研究,但进展缓慢。在 2007 年 MIT 的研究团队终于取得了突破性的进展,发现了一种全新的无线供电模式—非辐射电磁能谐振隧道效应,称作“WiTricity”技术,也称为磁共振感应耦合技术,大大提高了电能传输的距离和效率,使 WPT 技术重新成为国内外学者研究的热点<sup>[24]</sup>。

根据传输原理将 WPT 技术主要分为 5 类:电磁感应式(MCI-WPT)、电磁共振式(MCR-WPT)、微波辐射式、超声波式、激光式。其中电磁感应式由于结构简单、技术最为成熟得到最广泛的应用,目前多用于交通运输、电子设备、生物医学等领域,但也存在着传输距离短(厘米级)、位置要求严格的缺点;电磁共振式传输距离相对较远(米级),无严格的方向性,能量损失小,但易出现频率失谐导致功率效率急剧减小,目前主要用于家电、汽车、医疗器械及一些特殊工业应用等领域;微波辐射式能量损耗小,适合远程传输,但功率较小(一般不高于 100 mW),多应用于一些特殊领域,如空间太阳能电站、低轨道和同步轨道卫星、高空飞行器或无人飞机等;超声波式和激光式方向性强,能量易于集中,但损耗相对较大,技术不够成熟,多用于医疗器械和航空领域<sup>[25-31]</sup>。

### 3 基于 WPT 技术的超声辅助加工系统的研究现状

传统的超声辅助加工系统大多采用碳刷-导电滑环的方式进行电能传输,这种供电方式凭借其成本低、结构简单、使用方便等优势在超声电能传输领域得到了广泛的应用。但碳刷-导电滑环的供电方式同时也存在着碳刷磨损快、发热量大、容易积碳打火、限制主轴转速、无法实现自动换刀等诸多弊端,这些弊端严重影响了超声辅助加工系统的推广和应用。而无线电能传输技术的出现使这一问题有了新的解决思路,开发基于 WPT 技术的超声辅助加工系统成为国内外学者研究的热点。

微波辐射式能量损耗小,适合远程传输,但功率较小(一般不高于 100 mW),超声波式和激光式无线电能传输技术精度高方向性强但损耗大,传输功率和效率都相对较低,技术不够成熟,多应用于医疗器械和航空航天领域,对于超声辅助加工领域,基于电磁感应原理的无线电能传输超声辅助加工系统是应用的主流,电磁感应式无线电能传输技术原理简单,技术也相对成熟,可以有效解决传统碳刷-导电滑环方式带来的诸多弊端,是国内外研究学者和制造商目前比较热衷的第一选择。

### 3.1 基于感应式 WPT 技术的超声辅助加工系统的研究现状

2004 年美国 KAUF 等<sup>[32]</sup>根据电磁感应原理设计了一种用于钻孔的无线电能传输超声辅助加工装置,如图 1 所示,利用同轴径向分布的两个感应线圈进行无线电能传输;2008 年日本久保田治等<sup>[33]</sup>设计了一种超声波加工主轴装置,该装置利用同轴轴向分布的发射线圈和接收线圈之间的电磁感应进行电能的无线传输;目前德国 DMG MORI 公司的部分型号产品(如 ULTRASONIC 65/85 monoBLOCK、DMU/DMC duoBLOCK、HSC 等)中也采用了相似原理(发射线圈采用四分之一槽型)进行无线电能的传输,如图 2 所示<sup>[34-36]</sup>。

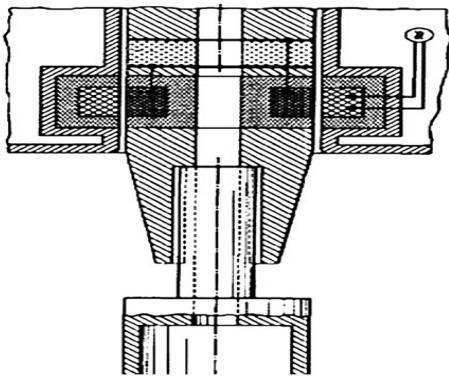


图 1 一种用于钻孔的无线电能传输超声辅助加工装置  
Fig. 1 An WPT ultrasonic assisted machining device for drilling



图 2 DMU/DMC duoBLOCK  
Fig. 2 DMU/DMC duoBLOCK

国内关于 WPT 超声辅助加工系统的研究起步较晚,主要集中于各大高校和研究所等科研单位。大连理工大学的黄浩<sup>[37]</sup>通过对无线电能传输系统进行有限元仿真,分析了影响系统传输性能的因素及规律,并搭建传输性能测试平台进行了实验验证,见图 3。

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2017 年 第 5 期

河南理工大学的陈曦<sup>[38]</sup>也对无线电能传输系统进行了仿真分析,主要研究了磁芯截面积、磁芯间隙、磁芯轴线偏移偏摆对系统的影响并据此设计了四分之一槽型无线电能传输系统进行实验,线圈模型如图 4 所示,发现装配精度对系统传输性能有较大影响。

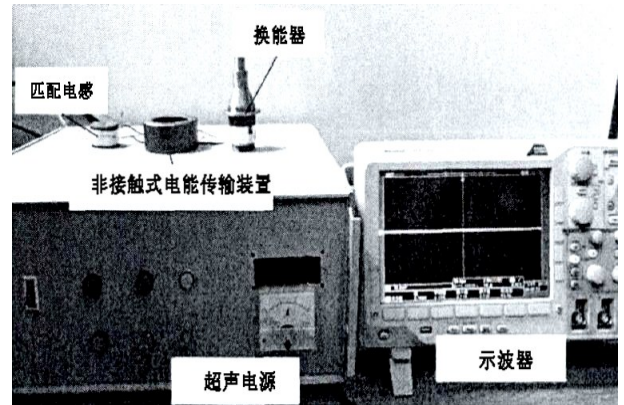


图 3 非接触式电能传输系统传输性能平台  
Fig. 3 Platform of the transmission performance test of the contactless power transmission system

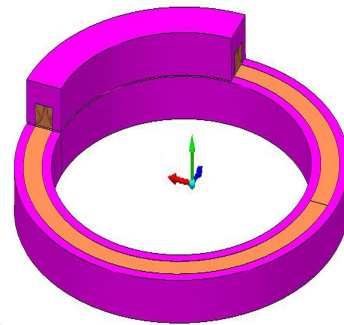


图 4 四分之一槽型线圈模型  
Fig. 4 Quarter-slot coil model

天津大学的董颖怀等<sup>[39]</sup>设计开发的集成铣削、磨削、超声、电火花的复合加工装置(如图 5 所示)和杜鹃<sup>[40]</sup>开发的旋转超声加工系统(图 6),其电能传输部分均采用了基于电磁感应原理的 WPT 技术,利用加装在主轴部分的发射线圈和刀柄内部的接收线圈进行无线电能传输。

以上均基于感应式无线电能传输技术(MCI-WPT)进行深入研究的,MCI-WPT 技术很大程度上解决了传统碳刷-导电滑环方式带来的诸多弊端,技术相对成熟,应用也最为广泛,但从上述研究成果中可以看出,基于电磁感应原理的无线电能传输系统对发射线圈和接收线圈的位置要求很高,两者之间属于疏松耦合范畴,有严格的方向性限制,要保证良好的电能传输性能,发射线圈、接收线圈的安装位置及装配精度都显得尤为重要,而无论是集成于主轴内部还是加设在主轴外部,都势必需要改装机床并且必须严



格保证精度,增加了改装的成本,并且通用性也较差,一套无线电能传输系统只能适用于一类特定型号的机床设备,不利于超声辅助加工系统的推广和应用。

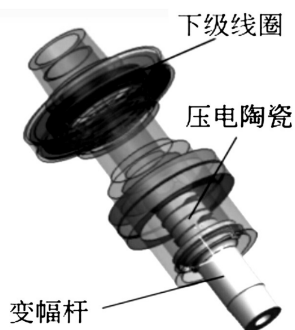


图5 复合加工装置

Fig.5 Composite processing device



(a) 加装于主轴上的发射线圈



(b) 装夹超声刀柄

图6 旋转超声加工系统

Fig.6 Rotary ultrasonic machining system

### 3.2 MCR-WPT 技术的研究现状

近年来,共振式无线电能传输技术(MCR-WPT)逐渐进入人们的视野,共振式无线电能传输技术利用频率相同的两个共振体之间的强耦合进行能量传输,相比于单纯的感应式无线电能传输技术,共振式无线电能传输技术具有无严格的方向性限制,对位置要求小,穿透性好;通过非辐射性电磁耦合进行能量传输,能量损失小,传输距离远,可实现较高的功率(一般为几百瓦)和效率并且能实现一对多供电;辐射小,

对人体基本没有危害等优势,越来越受到国内外学者的关注,有关该领域的研究也越来越多<sup>[41-43]</sup>。

ALANSON P. SAMPLE 等人<sup>[44-46]</sup>对共振式无线电能传输系统的基本原理进行了理论研究,通过建立耦合模方程和电路模型分析了共振式无线电能传输的基本特性并搭建实验平台进行了验证;KYRIAKI FOTOPOULOU<sup>[47]</sup>和陈琛等人<sup>[48]</sup>分别针对线圈错位和存在金属障碍物的情况对共振式无线电能传输系统的传输性能进行了研究;BENJAMIN L. CANNON 等人<sup>[49]</sup>针对共振式无线电能传输系统一源多负载模型进行了理论分析,总结了一源多负载模型传输的基本特性。对于提高共振式无线电能传输系统的传输性能,傅文珍等人<sup>[50-55]</sup>通过对共振式无线电能传输系统电路模型的研究,为系统电路参数优化设计提供了一定的理论基础;罗斌等人<sup>[56-59]</sup>通过理论分析和实验总结了中继线圈对电能传输系统传输性能的影响规律;TAKEHIRO IMURA 等<sup>[60-63]</sup>则对发射线圈接收线圈进行了优化设计,为新型线圈的设计提供了宝贵经验。

从目前有关 MCR-WPT 技术领域的相关研究不难看出,MCR-WPT 技术尚处于起步阶段,相关研究也主要集中于理论建模分析、传输基本特性研究、效率优化研究、传输单元设计研究等基础理论方面,相关应用也较少。但 MCR-WPT 技术的前景无疑是广阔的,相比于目前应用最为广泛的 MCI-WPT 技术,MCR-WPT 技术最大的优势在于对位置要求低,只要保证发射线圈和接收线圈在一定范围内就可以进行能量的高效传输,不但提高了电能传输系统的有效传输距离,还增加了传输系统的设计灵活性,因此 MCR-WPT 技术是以后无线电能传输系统的主要研究方向之一。

### 4 结语

超声辅助加工技术是难加工材料领域一种行之有效的先进加工技术,基于 WPT 技术的超声辅助加工系统更是超声辅助加工设备的主要发展方向之一,解决了传统碳刷-导电滑环方式供电带来的诸多弊端。目前基于电磁感应原理的无线电能传输超声辅助加工系统是应用的主流,但仍存在精度要求高、改装成本高、通用性差等问题。

相比于目前应用最为广泛的 MCI-WPT 技术,MCR-WPT 技术最大的优势在于对位置要求小,只要保证发射线圈和接收线圈在一定范围内就可以进行能量的高效传输,不但提高了电能传输系统的有效传输距离,还增加了传输系统的设计灵活性,对于超声

辅助加工领域,共振式无线电能传输技术显然是一种更为灵活、更为理想的供电模式,不用对机床本身进行改装,并且一套无线电能传输系统可以适用于不同型号的传统镗铣设备。

目前针对共振式无线电能传输技术的研究主要集中于兆赫兹级以上频率段,超声加工所需低频条件下(20~50 kHz,不同领域对于中高低频的划分有所区别,在机械加工领域千赫兹属高频段,在电子信息领域千赫兹属中低频段,此处归于电子信息领域进行讨论)MCR-WPT技术是否可行,特别是在任意位置是否都可以进行有效传输仍有待研究。对于低频段MCR-WPT技术的传输性能研究是共振式无线电能传输系统能否大规模推广和应用的前提,也是对MCR-WPT技术基础理论框架的重要补充。

### 参考文献

[1] 郭昉,田欣利,等. 超声振动在非金属硬脆材料加工中的应用[J]. 新技术新工艺, 2009, 39(9):14-19.

[2] 张坤领. 硬脆材料加工技术发展现状[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2008(5):1-6, 15.

[3] 房丰洲,倪皓,宫虎. 硬脆材料的旋转超声辅助加工[J]. 纳米技术与精密工程, 2014, 12(3):227-234.

[4] 张厚江. 碳纤维复合材料(CFRP)钻削加工技术的研究[D]. 北京航空航天大学, 1998.

[5] 张菡英,刘明. 碳纤维复合材料的发展及应用[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(11):132-135.

[6] 李威,郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(3):200-212.

[7] 赵艳荣,胡平,等. 碳纤维复合材料在汽车工业中的应用[J]. 合成树脂及塑料, 2015, 32(5):95-98.

[8] XIE BAOCHENG, et al. Numerical simulation of titanium alloy machining in electric discharge machining process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(s2):434-439.

[9] 刘全明,等. 钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3):1-4.

[10] 金和喜,魏克湘,等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2):280-292.

[11] 李中. 钛及钛合金在汽车上的应用[J]. 中国有色金属学报, 2010, 1(10):1034-1038.

[12] 叶勇,王金彦. 钛合金的应用现状及加工技术发展概况[J]. 材料导报, 2012, 26(s2):360-363.

[13] 李富长,宋祖铭,杨典军. 钛合金加工工艺技术研究[J]. 新技术新工艺, 2010(5):66-69.

[14] 林子皓,熊计,等. 高温合金切削刀具的研究现状及进展[J]. 硬质合金, 2013, 30(6):351-358

[15] 郭建亭. 高温合金在能源工业领域中的应用现状与发展[J]. 金属学报, 2010, 46(5):513-527.

[16] 康仁科,马付建,等. 难加工材料超声辅助切削加工技术[J]. 航空制造技术, 2012, 412(16):44-49.

[17] KADIVAR M A, et al. Investigating the effects of vibration method on ultrasonic-assisted drilling of Al/SiC<sub>p</sub> metal matrix composites[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(3):344-350.

[18] PUJANA J, et al. Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(6):500-508.

[19] BAGHLANI, et al. Ultrasonic assisted deep drilling of Inconel 738LC superalloy[C]. The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), Procedia CIRP6(2013):571-576.

[20] PHADNIS V A, et al. Silberschmidt. Experimental and numerical investigations in conventional and ultrasonically assisted drilling of CFRP laminate[J]. Procedia Cirp, 2012, 1(7):455-459.

[21] CONG W L, PEI Z J, et al. Rotary ultrasonic machining of CFRP/Tistacks using variable feedrate[J]. Composites Part B Engineering, 2013, 52(52):303-310.

[22] 马付建. 超声辅助加工系统研发及其在复合材料加工中的应用[D]. 大连理工大学, 2013.

[23] MARINICIC A, BUDIMIR D. Tesla's contribution to radio wave propagation[C]. TELSIS 5<sup>th</sup> International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service. Nis, Serbia: IEEE Computer Society, 2001:327-331.

[24] KURS A, KARALIS A, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834):83-86.

[25] 杨庆新,张献,等. 无线电能传输技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.

[26] SYR HUI, ZHONG W, LEE C K. A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9):4500-4511.

[27] 范兴明,莫小勇,张鑫. 无线电能传输技术的研究现状与应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10):2584-2600.

[28] 戴卫力,费峻涛,等. 无线电能传输技术综述及应用前景[J]. 电气技术, 2010(7):1-6.

[29] 杨庆新,陈海燕,徐桂芝,等. 无接触电能传输技术的研究进展[J]. 电工技术学报, 2010(7):6-13.

[30] IMURA T, HORI Y. Maximizing air gap and efficiency of magnetic resonant coupling for wireless power transfer using equivalent circuit and neumann formula[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10):4746-4752.

[31] 张建华,黄学良,等. 利用超声波方式实现无线电能传输的可行性的研究[J]. 电工电能新技术, 2011, 30(2):66-69.

- [32] KAUF A, TICHY S, et al. Device with ultrasound adapter[P]. US,6731047B2. 2004-05-04.
- [33] 久保田治, 由井隆行, 古川英雄. 超声波加工主轴装置[P]. CN,CN101213042. 2008-7-2.
- [34] ULTRASONIC 超声加工第二代. [Online] Available: <http://cn.dmgmori.com/blob/248234/7b5001617ea866d8a74b7085c2292e15/put8cn-ultrasonic-pdf-data.pdf>.
- [35] DMU/DMCduoBLOCK. [Online] Available: <http://cn.dmgmori.com/blob/344222/44819b229b73b7d9ba56858f9f13bbfb/pm8cn14-dmu-dmc-duoblock-4-pdf-data.pdf>.
- [36] HSC20/55/75/105linear. [Online] Available: <http://cn.dmgmori.com/blob/412158/dccafc28089078a31dc872fa2a7d2f05/pm8cn15-hsc-20-55-75-105-pdf-data.pdf>.
- [37] 黄浩. 超声辅助加工非接触式电能传输系统仿真分析[D]. 大连理工大学, 2013.
- [38] 陈曦. 旋转超声无线电能传输系统研究[D]. 河南理工大学, 2015.
- [39] 董颖怀, 张晓锋, 等. 硬脆材料超声辅助复合加工机床及其工艺研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(s2):113-116.
- [40] 杜鹃. 难加工材料复杂零件旋转超声辅助加工工艺与机理研究[D]. 天津大学, 2012.
- [41] 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.
- [42] 程丽敏, 崔玉龙. 磁耦合谐振式无线电能传输技术研究进展[J]. 电工电气, 2012(12):1-5.
- [43] 闫卓, 陈海燕, 等. 磁共振无线传能技术及其应用探讨[A]; 天津市电机工程学会 2009 年学术年会论文集[C]. 天津市电机工程学会(Tianjin Society of Electrical Engineering)、天津市电工技术学会, 2009.
- [44] SAMPLE A P, MEYER D T, et al. 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.
- [45] 李阳. 大功率谐振式无线电能传输方法与实验研究[D]. 河北工业大学, 2012.
- [46] 李阳, 张雅希, 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.
- [47] KYRIAKA FOTOPOULOU, FLYMN B W. Wireless power transfer in loosely coupled links; coil misalignment model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(2):416-430.
- [48] 陈琛, 黄学良, 等. 金属障碍物对磁耦合谐振无线电能传输系统的影响[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9):22-26.
- [49] CANNON B L, HOBURG J F, et al. Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7):1819-1825.
- [50] 傅文珍, 张波, 丘东元, 等. 自谐振线圈耦合式电能无线传输的最大效率分析与设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18):21-26.
- [51] 张献, 杨庆新, 等. 电磁耦合谐振式无线电能传输系统的建模、设计与实验验证[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(21):153-158.
- [52] 李凤娥. 磁共振无线电能传输系统最大传输距离的电路参数分析[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2012, 26(3):48-51.
- [53] 朱晓凯. 基于 WiTricity 的 WPT 的等效电路理论研究[D]. 南昌大学, 2012.
- [54] 李政, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统建模与分析[J]. 电器与能效管理技术, 2017(2):12-16.
- [55] 田子建, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统功率优化[J]. 工矿自动化, 2016, 42(6):33-37.
- [56] 罗斌, 生茂棠, 等. 磁谐振耦合式单中继线圈无线功率接力传输系统的建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013(21):170-177.
- [57] 陈逸鹏, 聂一雄. 谐振式无线电能传输系统谐振线圈优化设计[J]. 厦门理工学院学报, 2012, 20(3):62-66.
- [58] 田子建, 林越, 等. 具有中继谐振线圈的磁耦合谐振无线电能传输系统[J]. 电工技术学报, 2015(S1):168-174.
- [59] 张鹏. 电磁耦合谐振式无线电能传输系统的仿真与实验[D]. 东北电力大学, 2015.
- [60] TAKEHIRO IMURA, et al. Basic Experimental study on helical antennas of wireless power transfer for electric vehicles by using magnetic resonant couplings[J]. IEEE Vehicle Power & Propulsion Conference, 2009:936-940.
- [61] 宁峰. 基于磁耦合谐振的无线电能传输多方向性传输线圈研究[D]. 南昌大学, 2015.
- [62] 宋波. 高效率磁共振式无线电能传输[D]. 电子科技大学, 2015.
- [63] 杨西同. 非辐射共振耦合无接触电能传输系统研究与开发[D]. 浙江大学, 2014.