

基于最优发射半径的锥形线圈 WPT 系统优化

王红¹, 荆凡胜², 李颖³

(1. 临沂科技职业学院 智能制造学院, 山东 临沂 276000;

2. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094;

3. 天津工业大学 电气与电子工程学院, 天津 300387)

摘要: 在无线电能传输系统中盘式发射线圈存在一个使传输功率最大的最优半径值, 并且传输距离的改变也会造成发射线圈最优半径值的变化。针对这一问题, 提出了量化发射线圈最优半径与传输距离关系的方法, 继而指导发射线圈的优化设计。首先从系统空间磁场的分析上, 证明了最优发射半径的存在性, 然后探究并拟合出最优发射半径与传输距离之间的表达式, 设计了每匝线圈半径均为最优值的锥形螺旋发射线圈。最后经有限元仿真验证, 优化的锥形线圈系统较传统的柱形线圈系统互感提升了 140.16%, 周围环境的漏磁更少, 证明了优化的锥形螺旋线圈的优越性。

关键词: 无线电能传输; 最优发射半径; 锥形螺旋线圈; 柱形螺旋线圈; 传输性能

中图分类号: TM724 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22976

Optimization of Tapered Coil Wireless Power Transfer System Based on Optimal Transmitter Radius

WANG Hong¹, JING Fansheng², LI Ying³

(1. School of Intelligent Manufacturing, Linyi Vocational University of Science and Technology,

Linyi 276000, Shandong, China; 2. School of Automation, Nanjing University of Science and

Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China; 3. School of Electrical and Electronic

Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In the wireless power transfer system, there is an optimal radius value for the disc transmitter coil to maximize the transmission power, and the change of the transmission distance will also cause the change of the optimal radius value of the transmitter coil. To solve this problem, a method to quantify the relationship between the optimal radius of the transmitter coil and the transmission distance was proposed, and then the optimization design of the transmitter coil was guided. First, from the analysis of the system space magnetic field, the existence of the optimal transmitter radius was proved, and then the expression between the optimal transmitter radius and the transmission distance was explored and fitted, and the tapered spiral transmitter coil with the optimal coil radius of each turn was designed. Finally, it was verified by finite element simulation that the optimized tapered coil system increase the mutual inductance by 140.16% compared with the traditional cylindrical coil system, and the surrounding environment has less magnetic leakage, which prove the superiority of the optimized tapered spiral coil.

Key words: wireless power transfer; optimal transmitter radius; tapered spiral coil; cylindrical spiral coil; transmission performance

无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术作为一种新型的非接触式充电技术, 它的出现极大地带动了人类生活和生产方式的重大变革, 也使得电能的分配方式更加多样化、使用途径更加宽广^[1-2], 为解决植入式医疗设备^[3]、电动汽车^[4]以及各类电子消费品^[5]的能量供应问题提

供了新的技术方案。自 2006 年美国麻省理工学院 Marin Soljacic 科研小组首次提出磁共振式无线输电理论^[6]以来, 磁耦合谐振式无线电能传输技术(magnetically-coupled resonant wireless power transfer, MCR-WPT)凭借着其传输距离较远、传输效率高、传输功率大等多种优势^[7]一直被作为

无线充电领域的研究热点。

为追求无线电能传输系统更佳的传输性能和更广的应用场景,多种优化理论和线圈拓扑结构相继被提出。张焱强等^[8]提出一种基于负载阻抗匹配的最大传输效率追踪方案,用于解决充电中电池阻抗变化导致无线电能传输系统工作点偏移的问题。文献[9]从磁场分布和最佳功率传输的角度,设计了一种适合潜航器几何形状的截顶线圈耦合结构,并对基于该耦合结构的水下机器人无线充电系统进行效率分析。文献[10]根据航行器形状提出一种变形的圆柱线圈结构,用于研究水下自主航行器的磁耦合式无线充电系统,实验结果表明该系统在水下 100 W 的传输功率和 72% 的效率下能够较好地工作。尽管目前针对无线电能传输技术在不同的应用场景下,提出了各式各样的新型线圈结构,但如何在适应具体应用场合的同时又尽可能地进行线圈的最优设计,最大限度地提升系统的充电性能,是无线电能传输技术应用中不可忽视的问题。

为此本文提出了无线电能传输系统中发射线圈最优半径的理论,研究了发射线圈的最优半径与传输距离之间的关系。通过改进空间螺旋形线圈,设计了锥形螺旋发射线圈,将每匝发射线圈的半径限定在该传输距离下的最优值,通过对线圈自身参数的优化设计从而最大程度地提高系统的传输功率。

1 系统传输原理及磁场分析

1.1 无线传输原理

图 1 为磁耦合式无线电能传输系统的基本组成,主要包括高频电源、发射线圈、接收线圈、收发侧补偿电容及负载,收发线圈之间存在能量传输的空间通道,对于直流负载还需要在接收侧设置整流装置。供电电源经过高频逆变电路产生频率较高的交流电通入发射线圈中,发射线圈经过电容的补偿作用可在该频率下发生谐振,线圈呈现纯阻性,使得电路中的无功损耗为零,极大地降低了传输过程中的能量损失。在谐振状态下,发射线圈将高频电能最大化地转化为高频磁场能,即在空间间隙中能量传输的介质为磁场^[11]。同样接入补偿电容的接收线圈也工作在谐振状态,在接收线圈中磁场能又最大限度地转换为电能,供给接收侧的整流装置和负载,此过程即完成了电能-磁场能-电能的转化。

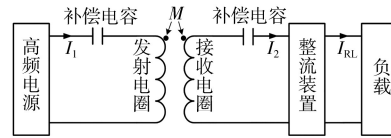


图1 磁耦合无线电能传输系统的组成

Fig.1 Composition of magnetically coupled wireless power transfer system

1.2 系统建模与磁场分析

图 2 为由平面盘式发射线圈和接收线圈组成的无线电能传输系统。设发射线圈最外侧线匝的半径为 R_1 , 匝数为 n_1 , 匝间距为 d_1 , 最内侧线匝的半径为 $R_1 - (n_1 - 1)d_1$, 通入线圈的电流为 I ; 接收线圈的内半径为 r_2 , 匝数为 n_2 , 匝间距为 d_2 , 收发线圈之间的传输距离为 H 。

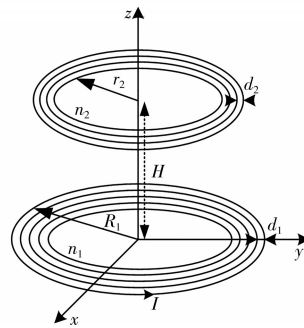


图2 盘式线圈无线电能传输系统

Fig.2 Disc coil wireless power transfer system

根据毕奥萨法尔定律^[12]可计算出发射线圈在空间任意一点所产生的磁感应强度 B ：

$$dB = \frac{\mu_0 I dl \times r}{4\pi r^3} \quad (1)$$

其中

$$r = |r|$$

式中： μ_0 为真空磁导率,其值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb}/(\text{A} \cdot \text{m})$; $I dl$ 为发射线圈某点处的电流源; r 为发射线圈某点与空间某点之间的矢量半径。

由于沿 x 轴和 y 轴的磁感应强度分量 B_x 和 B_y 均平行于接收线圈,而沿 z 轴方向的磁感应强度分量 B_z 垂直于接收线圈,因此只需要计算 B_z 在接收线圈上所产生的磁通量,而且磁感应强度 B_z 在圆形接收线圈的大小处处相等。磁通量的计算公式如下：

$$d\Phi = B \times dS \quad (2)$$

式中： S 为积分过程中每匝圆形接收线圈的面积。

根据式(2),可以叠加得到通过 n_2 匝接收线圈的总磁链 Ψ ,如下式所示：

$$\Psi = \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{i=1}^{n_1} \int_0^{R(i)} 2\pi r \frac{\mu_0 I}{2\pi \sqrt{[r + R(i)]^2 + H^2}} \cdot \left\{ \frac{R(i)^2 - r^2 - H^2}{[R(i) - r]^2 + H^2} E(k) + K(k) \right\} dr \quad (3)$$

其中

$$R(i) = R_1 - (i - 1)d_1$$

$$R(j) = r_2 + (j - 1)d_2$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \frac{4rR(i)\sin^2(\varphi)}{[R(i) + r]^2 + H^2}} \cdot d\varphi$$

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \frac{4rR(i)\sin^2(\varphi)}{[R(i) + r]^2 + H^2}}}$$

式中: $R(i)$ 为第*i*($i=1,2,\dots,n_1$)匝发射线圈的半径(由内向外计数); $R(j)$ 为第*j*($j=1,2,\dots,n_2$)匝接收线圈的半径(由内向外计数); φ 为积分变量角; $E(k)$ 、 $K(k)$ 分别为第一类和第二类完全椭圆积分^[13]。

2 基于最优发射半径的锥形螺旋线圈设计

2.1 发射线圈的最优半径

基于WPT系统的磁链表达式(3),取发射线圈的匝数为10,匝间距为2 mm,流过发射线圈的电流为5 A;接收线圈的匝数为10,匝间距为2 mm,内半径为10 mm,收发线圈之间的传输距离为100 mm,探究通过接收线圈的总磁链随发射线圈外半径的变化关系。

图3为穿过接收线圈的磁链 Ψ 随发射线圈外半径 R_1 变化的曲线,可知磁链 Ψ 随着 R_1 的增大先增大后减小,即发射线圈存在一个最优的半径 R_0 ,能够使得穿过接收线圈的磁链取得最大值 Ψ_{max} 。

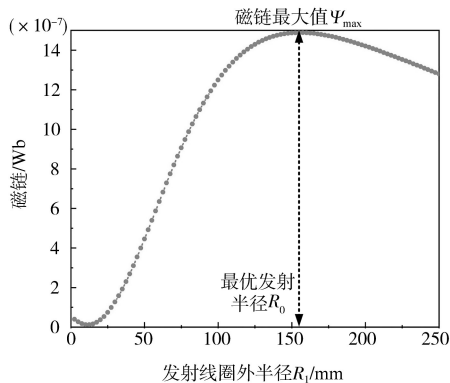


图3 磁链随发射线圈外半径变化的曲线
Fig.3 The curve of the flux linkage with the outer radius of the transmitter coil change

图4为发射线圈的最优半径及对应的磁链最大值随系统传输距离变化的曲线,左侧纵轴为发射线圈的最优半径,圆形标注曲线为最优发射半径与传输距离的关系曲线,可知两者为正相关性,随着传输距离的增大,最优发射半径也在增大。左侧纵轴为最优发射半径所对应的磁链最

大值,图4中方形标注曲线为磁链最大值与传输距离的关系曲线,可知两者为负相关,随着传输距离增加,磁链最大值下降严重,这也验证了无线电能传输系统对传输距离的灵敏性。

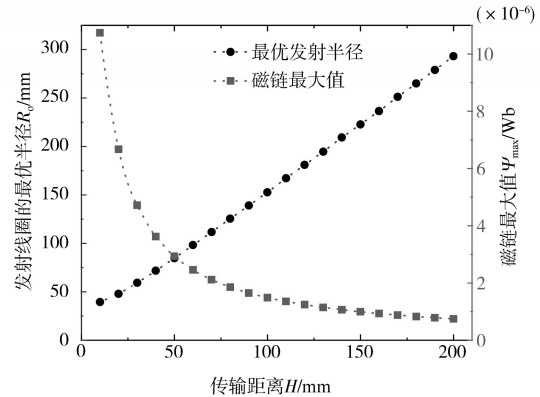


图4 发射线圈的最优半径及磁链最大值与传输距离的关系

Fig.4 The relationships between the optimal radius of the transmitter coil and the maximum value of the flux linkage and the transmission distance

2.2 最优发射半径与传输距离的关系

由图4可知,发射线圈的最优半径与传输距离的变化近似为线性相关的关系,因此可通过Matlab近似拟合得到两者之间的函数表达式。图5为最优发射半径与传输距离之间的Matlab拟合曲线。

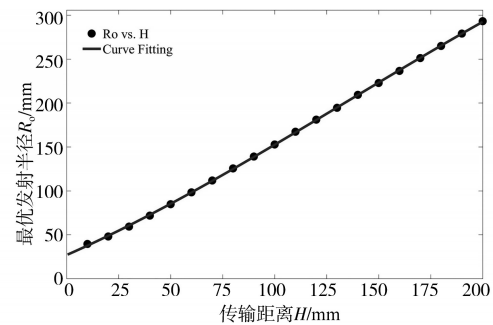


图5 发射线圈的最优半径与传输距离的拟合曲线

Fig.5 The fitting curve of the optimal radius of the transmitter coil and the transmission distance

为尽可能的使散点分布在拟合曲线上,采用线性的3次方多形式逼近(linear model polynomial3)拟合方式,得到最优发射半径 R_0 与系统传输距离 H 的表达式为

$$R_0 = -7.053H^3 + 2.834H^2 + 1.043H + 0.0269 \tag{4}$$

其中,拟合中的和方差SSE为1.063e-5,确定系数R-square为0.999 9,SSE较为接近于0,R-square接近于1,表明式(4)实现了对数据的较好拟合,数据的预测也能够达到较好的效果。

由式(4)可知,在固定的传输距离下均存在发射线圈的最优半径从而使得通过接收线圈的磁链达到最大值。由此可知,可依据最优发射半径与传输距离的表达式来指导发射线圈的设计,保持每匝发射线圈的半径均取得最优值,从而最大限度地提升系统的传输性能。

2.3 优化的锥形螺旋发射线圈设计

为使得每匝发射线圈的半径均能够取到最优值,将发射线圈设计为如图6所示的锥形螺旋结构。

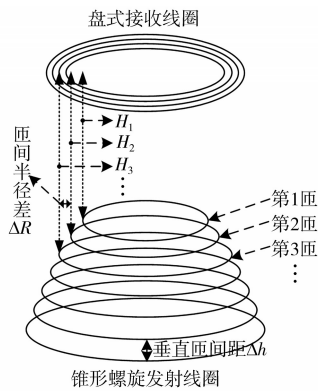


图6 锥形螺旋发射线圈WPT系统

Fig.6 The tapered spiral transmitter coil WPT system

取螺旋线圈的垂直匝间距 Δh 为 15 mm,匝数为 10 匝,定义空间螺旋线圈最上侧的线匝为发射线圈的第 1 匝线圈,取螺旋发射线圈第 1 匝线圈与平面盘式接收线圈之间的传输距离 H_1 为 50 mm,则第 2 匝发射线圈与接收线圈之间的传输距离 H_2 为 65 mm,由此可推第 10 匝发射线圈与接收线圈的距离 H_{10} 为 185 mm。根据发射线圈最优半径与传输距离的关系,继而可确定每匝发射线圈对应传输距离下的最优发射半径,由式(4)可列出每匝锥形螺旋发射线圈的最优半径,如表 1 所示。

表 1 锥形螺旋发射线圈的半径设计

Tab.1 Radius design of tapered spiral transmitter coil

匝数 序号	传输距离 H/mm	最优发射 半径 R_0/mm	匝间半径差 $\Delta R/mm$	半径差平均值 $\Delta R_{av}/mm$
1	50	85.253 375	19.478 345	20.77
2	65	104.731 720	20.134 744	
3	80	124.866 464	20.648 320	
4	95	145.514 784	21.019 073	
5	110	166.533 857	21.247 002	
6	125	187.780 859	21.332 109	
7	140	209.112 968	21.274 392	
8	155	230.387 360	21.073 851	
9	170	251.461 211	20.730 488	
10	185	272.191 699	/	

由表 1 可知,每匝锥形螺旋线圈的半径差值接近 20 mm,取 9 组匝间半径差的平均 20.77 mm 作为优化的锥形螺旋发射线圈的匝间半径变值,使得锥形线圈的每匝线圈的半径尽可能接近应传输距离下的最优半径值,则锥形螺旋线圈每匝的实际半径如表 2 所示。

表 2 优化的锥形螺旋发射线圈的最优半径

Tab.2 Optimal radius of the optimized tapered spiral transmitter coil

匝数序号	传输距离 H/mm	每匝半径 R/mm
1	50	85.25
2	65	106.02
3	80	126.79
4	95	147.56
5	110	168.33
6	125	189.10
7	140	209.87
8	155	230.64
9	170	251.41
10	185	272.18

考虑到对比实验,同时设计传统的柱形螺旋线圈作为优化的锥形螺旋线圈的对照组,为最大限度地表明锥形线圈的设计优势,柱形螺旋线圈的半径应由锥形螺旋线圈的最大半径而决定。即取锥形螺旋线圈的第 10 匝的半径值 272 mm 作为柱形螺旋线圈的半径值,且线圈的匝数、垂直匝间距均与锥形螺旋发射线圈的参数保持一致。

3 仿真实验分析

3.1 仿真参数设置

为验证本文所设计的优化锥形螺旋发射线圈的可行性,本节基于有限元仿真软件 ANSYS Electronics 平台中的涡流场(eddy current)分别搭建了柱形螺旋发射线圈 WPT 系统和锥形螺旋发射线圈 WPT 系统,接收线圈采用相同尺寸和材料的平面盘式线圈,如图 7 所示。

系统的仿真参数设置如表 3 所示。表 3 中,柱形和锥形螺旋发射线圈的匝数为 10、垂直匝间距为 15 mm、通入的电流 5 A、第 1 匝线圈的传输距离为 50 mm,均与前文保持一致,其中锥形线圈以初始线匝半径 85.25 mm,半径差 20.77 mm 逐匝递增,至第 10 匝时与柱形线圈半径 272 mm 一致;盘式接收线圈参数与 2.1 节中的参数保持一致,设定流过的电流为 5 A,三个线圈的绕线直径采用相同的规格,均为 10 mm。

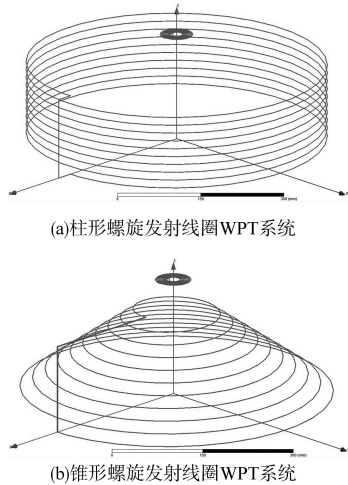


图7 WPT系统的ANSYS仿真模型

Fig.7 ANSYS simulation model of WPT system

表3 系统仿真参数设置

Tab.3 System simulation parameter setting

参数	柱形螺旋发射线圈	锥形螺旋发射线圈	平面盘式接收线圈
匝数 n	10	10	10
垂直匝间距 $\Delta h/mm$	15	15	0
第1匝线圈半径/mm	272.00	85.25	10.00
匝间半径差 $\Delta R/mm$	0.00	20.77	10.00
电流 I/A	5	5	5
线径 D/mm	10	10	10
第1匝线圈传输距离 H_1/mm	50	50	/

3.2 仿真结果分析

3.2.1 互感

由于有限元仿真中并不能直接比较WPT系统的磁链大小情况,因此可通过将磁链转化为收发线圈之间的互感进行间接比较,其中磁链与互感之间的关系式如下:

$$M_{12} = M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{I_T} \quad (5)$$

式中: M_{12}, M_{21} 分别为收发线圈之间的互感,两者大小相等; Ψ_{21} 为由发射线圈产生的通过接收线圈的总磁链; I_T 为发射线圈侧的电流。

由表3可知,涡流场仿真中的柱形发射线圈和锥形发射线圈WPT系统中,流过发射线圈的电流均设定为恒定值5 A。因此由式(5)可知,通过测量收发两线圈之间的互感值即可反映出系统

的总磁链的大小,从而评价WPT系统的传输性能。图8为采用有限元分析分别仿真得到的两种WPT系统的互感值。

Freq[kHz]	Matrix I.L.(Current1,Current2)[nH] Setup1:LastAdaptive
1	85.185010

(a)柱形螺旋发射线圈WPT系统互感

Freq[kHz]	Matrix I.L.(Current1,Current2)[nH] Setup1:LastAdaptive
1	204.578608

(b)锥形螺旋发射线圈WPT系统互感

图8 WPT系统的互感仿真值

Fig.8 Mutual inductance simulation values of WPT system

设定系统的工作频率为200 kHz,柱形螺旋发射线圈WPT系统互感值为85.185 01 nH,锥形螺旋发射线圈WPT系统互感值为204.578 608 nH,可知锥形螺旋发射线圈WPT系统在具有更少的耗材和更小的体积下具有更高的互感值。相较于柱形螺旋发射线圈WPT系统,锥形发射线圈的耗材降低了34.3%,互感值反而提升了140.16%,即说明本文所提出的优化的锥形螺旋发射线圈WPT系统具备更佳传输性能。

3.2.2 电磁环境

在无线电能传输系统中电磁环境也是评价系统应用价值的重要指标,因为电磁环境关系到WPT系统正常工作时对生物体的影响,在理想的情况下总是希望系统周围环境的漏磁量越小越好^[14]。

图9为WPT系统的电磁环境分布图,分别给出了柱形和锥形螺旋发射线圈WPT系统的电磁环境分布情况,可知两系统的磁场分布相对集中,主要分布在收发线圈周围。在通入电流相同

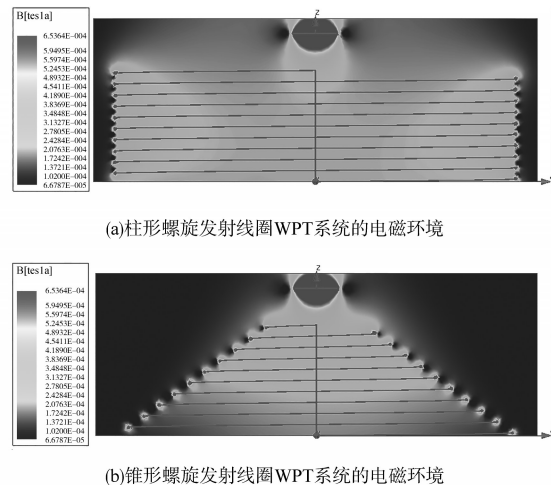


图9 WPT系统的电磁环境分布

Fig.9 Distribution of electromagnetic environment of WPT system

的条件下,设置两种WPT系统的磁场为相同的上、下限值,即 $B \in [6.678 \times 10^{-5}, 6.5364 \times 10^{-4}]$ T,可知相较于柱形螺旋发射线圈,锥形螺旋发射的聚磁效果更好,系统的磁场更加集中在发射和接收线圈上,使得周围环境中的漏磁量大幅度减少。

4 结论

本文基于磁耦合式无线电能传输技术的原理,通过对盘式线圈无线电能传输系统的建模和磁场分析,提出了盘式发射线圈最优半径的理论,探究并量化了最优发射半径与系统传输距离之间的关系,以用于指导优化的锥形螺旋发射线圈的设计。经有限元仿真验证,优化后的锥形螺旋发射线圈WPT系统相较于传统的柱形螺旋发射线圈WPT系统,耗材降低了34.3%,互感值提升了140.16%,系统周围环境中的漏磁量更少,整体达到了较好的传输性能。

参考文献

[1] Lee W, Yoon Y K. Wireless power transfer systems using metamaterials: a review[J]. IEEE Access, 2020, 8: 147930-147947.
 [2] 高世萍,冯玉明. 感应式和电场式结合的无线电能传输系统研究[J]. 电气传动, 2020, 50(12): 88-92.
 [3] 徐晨洋,张强,李岳,等. 体内植入装置的磁耦合谐振无线电能传输分析[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(10): 49-51, 55.
 [4] 吴丽君,李冠西,张朱浩伯,等. 一种具有恒流恒压输出自切换特性的电动汽车无线电能传输系统拓扑[J]. 电工技术学报, 2020, 35(18): 3781-3790.
 [5] 王帅,薛寒寒. 小功率磁耦合谐振式无线供电系统的研究[J].

电子技术应用, 2020, 46(2): 109-113, 120.
 [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] 董纪清,杨上苹,黄天祥,等. 用于磁耦合谐振式无线电能传输系统的新型恒流补偿网络[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4468-4476.
 [8] 张焱强,金楠,唐厚君,等. 无线电能传输基于负载阻抗匹配的最大效率追踪[J]. 电力电子技术, 2018, 52(5): 25-27.
 [9] Rosu G, Marinescu A, Samoilescu G, et al. The efficiency of an underwater inductive charging system for AUVs based on truncated coils[C]//2019 6th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), 2019.
 [10] Song B, Wang Y, Zhang K, et al. Research on wireless power transfer system for torpedo autonomous underwater vehicles[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(9): 1-8.
 [11] Sun G, Muneer B, Li Y, et al. Ultracompact implantable design with integrated wireless power transfer and RF transmission capabilities[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2018, 12(2): 281-291.
 [12] Gulzar H, Ain N U, Zahid T, et al. A comprehensive electromagnetic design, simulation and analysis of wireless charging coils for large power applications[C]//2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), 2018.
 [13] 汪泉弟,康健炜,王赢聪,等. 磁谐振无线电能传输系统空间磁场的时空特性[J]. 电工技术学报, 2018, 33(19): 4486-4495.
 [14] 沈栋,杜贵平,丘东元,等. 无线电能传输系统电磁兼容研究现状及发展趋势[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2855-2869.

收稿日期:2021-01-17

修改稿日期:2021-02-09

~~~~~  
 (上接第56页)

[11] 李跃先. 基于小波变换与神经网络的GIS局部放电故障诊断研究[D]. 沈阳:东北大学, 2011.  
 [12] 薛茹,常岐海,吴宗胜. 基于Gabor小波与HOG特征的目标检测方法[J]. 电视技术, 2014, 38(7): 182-185.  
 [13] 包晓敏,任文静,吕文涛. Gabor小波与HOG特征融合的行人识别算法[J]. 无线电工程, 2017, 47(10): 25-29.  
 [14] 范国娟,范国卿,柳絮青. HOGG: 基于Gabor变换与HOG特

征的人体检测[J]. 微型机与应用, 2016, 35(21): 14-15, 19.  
 [15] 李正明,钱露先,李加彬. 基于统计特征与概率神经网络的变压器局部放电类型识别[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 55-60.

收稿日期:2020-07-05

修改稿日期:2020-07-24