

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2020.02.016

磁耦合谐振式无线电能传输 系统中锥形谐振线圈结构优化

倪晨睿¹, 陈海川^{1,2}, 李登帅¹, 周 聪¹

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 成都 610039;

2. 无线能量传输教育部重点实验室, 成都 610065)

摘 要: 在磁耦合谐振式无线电能传输系统中, 谐振线圈结构是影响电能传输效率的关键因素. 针对锥形谐振线圈结构, 基于电路理论, 推导了电能传输效率与电路参数的关系表达式; 采用数值计算方法, 对比研究了锥形谐振线圈与螺旋谐振线圈的电能传输效率. 结果表明, 轴向间距在一定范围内, 锥形谐振线圈电能传输效率更高; 进一步研究了锥形谐振线圈结构参数与电能传输效率的关系, 提出谐振线圈结构优化方案; 实验结果证明, 与螺旋谐振线圈比较, 锥形谐振线圈的电能传输效率更高.

关键词: 无线电能传输; 谐振线圈结构; 有限元分析; 效率

中图分类号: TM724

文献标识码: A

文章编号: 0490-6756(2020)02-0304-07

Structural optimization of tapered resonant coil in magnetically coupled resonant wireless power transfer system

NI Chen-Rui¹, CHEN Hai-Chuan^{1,2}, LI Deng-Shuai¹, ZHOU Cong¹

(1. College of Electrical and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. Key Laboratory of Wireless Energy Transfer Ministry of Education, Chengdu 610065, China)

Abstract: In the magnetically coupled resonant wireless power transfer system, resonant coil structure is the key factor affecting the power transmission efficiency. Based on the circuit theory, the expression is deduced for the relationship between power transmission efficiency and circuit parameters. The power transmission efficiencies of the tapered resonant coil and the helical resonant coil were comparatively studied by numerical calculation. The results show that the energy transmission efficiency of the tapered resonant coil is higher when the axial spacing is within a certain range. The relationship between the structural parameters of the tapered resonant coil and the power transmission efficiency was further studied, and the optimization criterion of the resonant coil structure was proposed. The experimental results demonstrate that the power transmission efficiency of the tapered resonant coil is higher than that of the helical resonant coil.

Keywords: Wireless power transfer; Resonant coil structure; Finite element analysis; Efficiency

收稿日期: 2019-03-13

基金项目: 无线能量传输教育部重点实验室基金(182626); 物理场生物效应及仪器四川省高校重点实验室基金(15209410)

作者简介: 倪晨睿(1996—), 男, 四川内江人, 汉族, 硕士生, 研究方向为电工理论与新技术. E-mail: 1939897337@qq.com

通讯作者: 陈海川. E-mail: chenhaichuan@mail.xhu.edu.cn

1 引言

2006 年, 美国物理学工业物理论坛上提出了磁耦合谐振式无线电能传输 (Magnetically Coupled Resonant Wireless Power Transfer, MCR-WPT) 概念, 2007 年美国麻省理工学院成功点亮了两米外的 60 W 灯泡, 传输效率达到 40%^[1]. 磁耦合谐振式无线电能传输是通过发射谐振线圈将电能转化为电磁场能, 通过磁耦合谐振作用隔空传输一段距离后, 再通过接收谐振线圈将电磁场能转化为电能的一种无线电能传输技术. 磁耦合谐振式无线电能传输是基于近场谐振强耦合的概念, 只有具有相同谐振频率的物体之间才可以实现高效的能量交换, 因此它在近场传输过程中损耗低^[2-4], 但随着传输距离的增加, 电能传输效率成指数下降^[5]. 且近几年随着磁耦合谐振式无线电能传输的发展, 其传输距离较远、效率高、功率大, 潜在的实用价值高等特点也越发凸显, 因而使其备受关注^[6-9].

国内外有众多关于谐振线圈结构的研究. 文献[10]中 Zhang 提出新型的哑铃形线圈具有提高传输距离和效率的能力; 文献[11]中宁峰提出一种新型的 3D 线圈, 并成功点亮了四个方向的灯泡; 文献[12]表明螺旋谐振线圈结构参数是影响电能传输效率的主要因素; 文献[13]中 Hacrinia 计算得到了锥形谐振线圈、螺旋谐振线圈与平面谐振线圈的磁场、电场、磁通密度和电流密度; 文献[14]中 Nagi 提出锥形谐振线圈与螺旋谐振线圈相比, 更具有将电能集中在一个方向上的能力; 文献[15]中 Shi 提出锥形谐振线圈能有效抑制频率分裂. 国内外相关文献表明, 锥形谐振线圈与螺旋谐振线圈的电能传输效率关系尚未深入讨论. 因此, 本文针对锥形谐振线圈结构, 开展了系统的理论研究; 并采用数值计算方法, 比较研究了锥形与螺旋结构谐振线圈的电能传输效率; 同时探讨了锥形谐振线圈结构参数与电能传输效率的关系, 提出谐振线圈结构优化准则; 通过实验表明, 与螺旋谐振线圈比较, 锥形谐振线圈电能传输效率高 5%.

2 电路理论分析及建模

串联-串联型(SS)结构相较于其它结构更适合磁耦合谐振式无线电能传输系统^[16], 故本文的等效电路采用 SS 结构, 其等效电路如图 1.

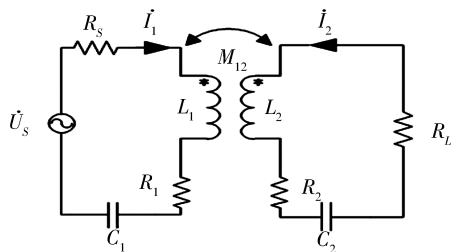


图 1 磁耦合谐振式无线电能传输系统等效电路模型
Fig. 1 Equivalent circuit model of magnetically coupled resonant wireless power transfer system

设系统角频率为 ω , \dot{U}_s 为恒压源, R_s 为其内阻, L_1 、 L_2 分别代表发射谐振线圈与接收谐振线圈, C_1 、 C_2 分别代表原、副边串联谐振电容, R_1 、 R_2 分别代表发射谐振线圈与接收谐振线圈的内阻, R_L 为系统的负载, M 为两谐振线圈间的互感.

列出图 1 两个回路 KVL 方程组, 如下式.

$$\begin{bmatrix} R + j\omega X & j\omega M_{12} \\ j\omega M_{12} & R' + j\omega X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, 电阻 R 和 R' 分别为

$$\begin{cases} R = R_1 + R_s \\ R' = R_2 + R_L \end{cases} \quad (2)$$

电抗 $j\omega X$ 为

$$j\omega X = j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (3)$$

副边映射到原边的等效电阻为

$$R_{eq} = \frac{(\omega M_{12})^2}{R_L + R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} \quad (4)$$

为了消除无功功率, 必须使发射端与接收端 LC 谐振, 即 $j\omega L = -\frac{1}{j\omega C}$, 才能达到最大传输效率. 电路谐振时可通过原副边回路的电阻之比来计算各自回路的效率, 系统的总效率 η 等于原边回路效率 η_1 与副边回路效率 η_2 相乘, 即:

$$\begin{cases} \eta_1 = \frac{R_{eq}}{R_{eq} + R} \\ \eta_2 = \frac{R_L}{R'} \end{cases} \quad (5)$$

其中, 等效电阻 R_{eq} 简化为

$$R_{eq} = \frac{(\omega M_{12})^2}{R'} \quad (6)$$

则, 系统总传输效率表达式为

$$\eta = \frac{(\omega M_{12})^2 R_L}{(\omega M_{12})^2 R' + R R'^2} \quad (7)$$

其中, 互感 M_{12} 的表达式为^[15]

$$M_{12} = \sum_{i=1}^{n_t} \sum_{j=1}^{n_r} M_{12}(r_i, r_j, D) \quad (8)$$

其中, $M_{12}(r_t, r_r, D)$ 的表达式为

$$M_{12}(r_t, r_r, D) = 2 \mu_0 \sqrt{r_t r_r} / k \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K(k) - E(k) \right] \quad (9)$$

其中, k 的表达式为

$$k = \sqrt{4 r_t r_r / [(r_t + r_r)^2 + D^2]} \quad (10)$$

其中, $K(k)$ 为第一类完全椭圆积分; $E(k)$ 为第二类完全椭圆积分; n_t 和 n_r 分别是发射端线圈和接收端线圈的匝数; r_t 和 r_r 分别是发射器线圈和接收器线圈的线圈半径; D 是线圈之间的距离。

由式(7)和式(8)可知,系统总效率随恒压源的内阻、线圈内阻以及负载的增大而减少,且与谐振线圈间的互感有关,而互感与线圈的直径、匝数以及线圈间的距离有关。因此,本文在分析谐振线圈结构对系统传输效率影响的时候保证了恒压源内阻、负载、线圈直径、匝数以及线圈间的距离相同。

3 仿真分析

3.1 谐振线圈结构建模

本文在理论分析基础上,设计了锥形谐振线圈和螺旋谐振线圈,并运用有限元仿真软件进行了建模,它们的模型如图 2 和图 3 所示,具体参数如表 1 所示。

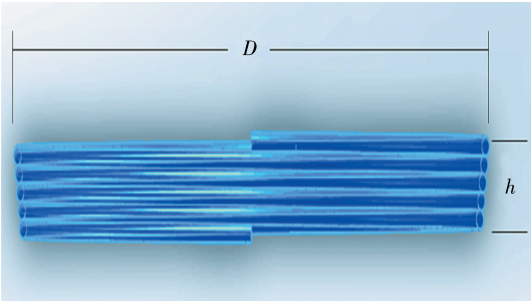


图 2 锥形谐振线圈
Fig. 2 Tapered resonant coil

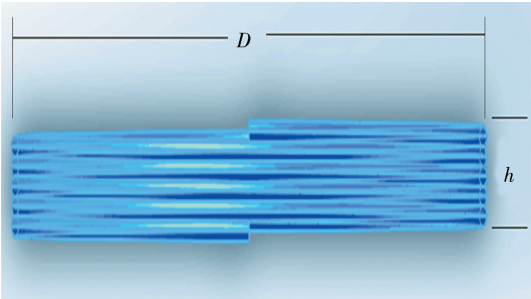


图 3 螺旋谐振线圈
Fig. 3 Spiral resonant coil

表 1 锥形谐振线圈和螺旋谐振线圈的参数

Tab. 1 Parameters of tapered resonant coil and helical resonant coil

参数	锥形谐振线圈	螺旋谐振线圈
频率/kHz	6500	6500
电感量/ μH *	4.24	4.93
匝数	5	5
铜线半径/mm	0.75	0.75
最小半径/mm	44	50
最大半径/mm	50	50
高度/mm	7.5	7.5

* 表中的电感量是频率为 6 500 kHz 条件下的计算值。

从表 1 可以看出,锥形谐振线圈和螺旋谐振线圈的高度和最大半径相等,但锥形谐振线圈的最小半径小于螺旋谐振线圈,故锥形谐振线圈材料使用更少,能够节约成本。

3.2 谐振线圈结构的比较

为了避免近距离时系统出现频率分裂现象^[17],本文采用电容追踪法,即改变谐振电容以保证系统处于谐振状态,利用有限元仿真软件计算出两个谐振线圈的磁通密度,如图 4 和图 5。

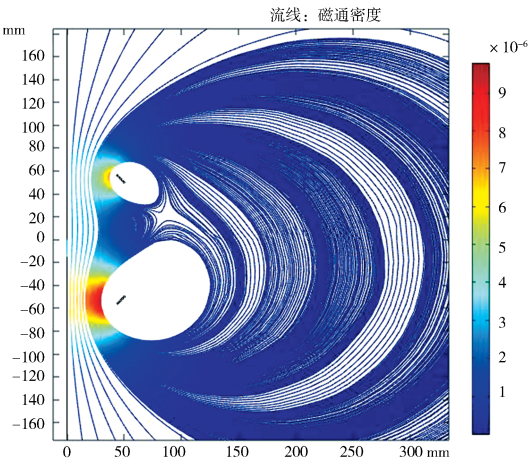


图 4 锥形谐振线圈的磁通密度图
Fig. 4 Magnetic flux density map of a tapered resonant coil

从图 4 和图 5 可以看出,锥形谐振线圈磁通密度明显高于螺旋谐振线圈,表明锥形谐振线圈电流耦合更强。在仿真模型中通过提取电压、电流等参数计算得到了两个谐振线圈的电能传输效率。

从图 6 可以看出,传输距离在 50~200 mm 之间时,螺旋谐振线圈的效率比锥形谐振线圈的效率高约 15%。传输距离在 200 mm 之后效率下降变缓,且锥形谐振线圈的效率逐渐趋于螺旋谐振线圈

效率.

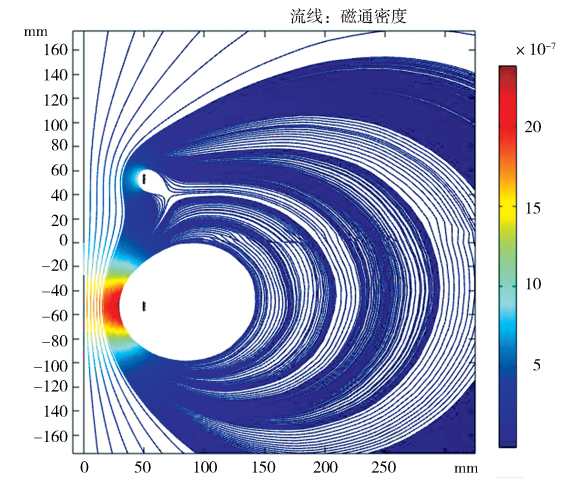


图 5 螺旋谐振线圈的磁通密度图
Fig. 5 Magnetic flux density diagram of helical resonant coil

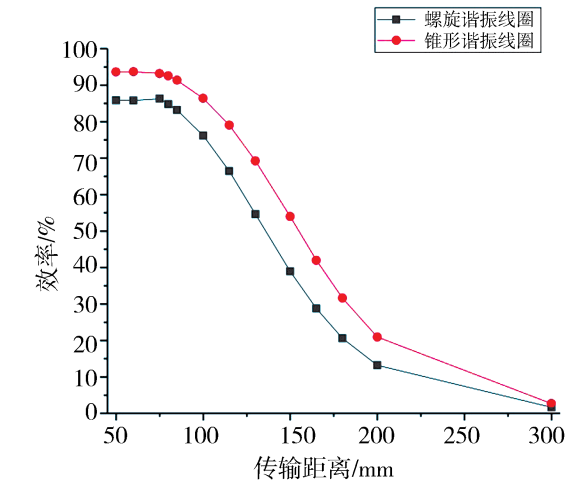


图 6 螺旋谐振线圈与锥形谐振线圈电能传输效率的比较图
Fig. 6 Comparison of electrical energy efficiency between helical resonant coil and tapered resonant coil

由于锥形谐振线圈与螺旋谐振线圈结构类似, 在不同线匝间, 仅改变了线圈直径, 故本文提出将匝间距分成径向间距和纵向间距的概念, 以便于区别锥形谐振线圈和螺旋谐振线圈. 当径向间距为 0 时, 谐振线圈直径不变, 此时系统结构为螺旋谐振线圈; 当径向间距不为 0 时, 谐振线圈的不同线匝间, 直径逐渐减少, 此时系统结构为锥形谐振线圈. 锥形谐振线圈之间可以通过锥度来区分, 其公式表达为

$$\arctan \theta=\frac{D}{h}$$

(10)

其中, h 为纵向间距; D 为径向间距. 通过仿真得到表 2.

表 2 匝间距对谐振线圈结构的电能传输效率的关系表
Tab. 2 Relationship between the spacing of the turns and the power transmission efficiency of the resonant coil structure

D/mm	h/mm	锥度/ $^{\circ}$	效率/ $\%$
0	1.5	0	76.18
	1.7	0	85.81
	1.8	0	86.93
	1.9	0	87.71
	2.2	0	89.10
	1.5	18.4	80.41
0.5	1.7	16.4	85.45
	1.8	15.5	87.14
	1.9	14.7	87.41
	2.2	12.8	88.42
	1.5	33.7	85.23
	1.7	30.5	85.75
1	1.8	29.1	86.94
	1.9	27.8	87.10
	2.2	24.4	88.12
	1.5	50.2	87.02
	1.7	46.6	87.33
	1.8	45.0	87.45
1.8	1.9	43.5	87.58
	2.2	39.3	87.88
	1.5	55.7	87.20
	1.7	52.3	87.28
	2.2	50.7	87.32
	1.9	49.2	87.36
2.2	2.2	45.0	87.43

由表 2 可以看出, 纵向间距小于 1.8 mm 时, 锥形谐振线圈的电能传输效率高于螺旋谐振线圈, 纵向间距大于 1.8 mm 时, 锥形谐振线圈电能传输效率低于螺旋谐振线圈. 本文在纵向间距一定的条件下, 通过改变径向间距来改变锥度, 仿真计算得到了锥度与电能传输效率的关系图, 如图 7 所示.

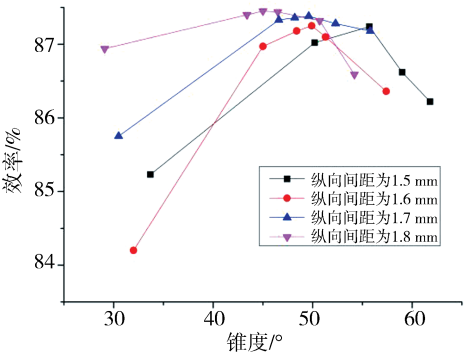


图 7 锥度与锥形谐振线圈电能传输效率的关系图
Fig. 7 Relationship between taper and energy transmission efficiency of tapered resonant coil

从图 7 可以看出,最优锥度随纵向间距的增大而减少。

综上所述,在某些环境因素的限制下,比如谐振线圈高度因素,锥形谐振线圈相对于螺旋谐振线圈在电能传输效率方面更高。

从图 6 可以看出电能传输效率随传输距离的变化分为稳定区(近场传输)和下降区(远场传输),故本文在两个区间各取一个点,分别为 60 mm 和 130 mm,来分析匝数、最大直径、铜线半径等对锥形谐振线圈电能传输效率的影响,以便于优化锥形谐振线圈结构。

3.3 锥形谐振线圈优化

设定系统工作频率为 6500 kHz,谐振线圈间距离为 60 mm 和 130 mm,在 3.2 节研究的基础上,本文对谐振线圈匝数、谐振线圈最大直径和铜线半径等结构参数对系统电能传输效率的影响进行了优化设计。

3.3.1 优化锥形谐振线圈的匝数 保持谐振线圈最大直径为 100 mm,改变谐振线圈匝数仿真计算得到锥形谐振线圈电能传输效率,如图 8 所示。

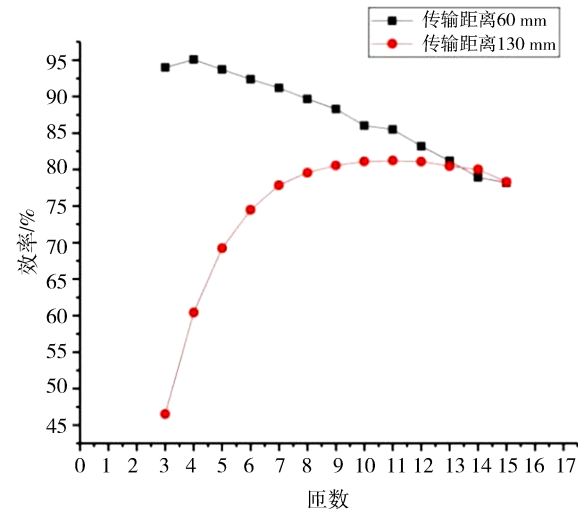


图 8 匝数与锥形谐振线圈电能传输效率的关系图
Fig. 8 Relationship between the number of turns and the power transmission efficiency of the tapered resonant coil

从图 8 可以看出,系统传输效率是随匝数的增加而先上升后下降。在传输距离为 60 mm,匝数为 4 匝时,系统传输效率最高;在传输距离为 130 mm,匝数在 11 匝时,系统传输效率最高。故不同传输距离下最优匝数是不同的。

3.3.2 优化锥形谐振线圈的最大直径 谐振线圈匝数设置为对应传输距离的最优匝数,即 4 匝和

11 匝时,改变最大直径和铜线半径计算得到锥形谐振线圈电能传输效率,如图 9 所示。

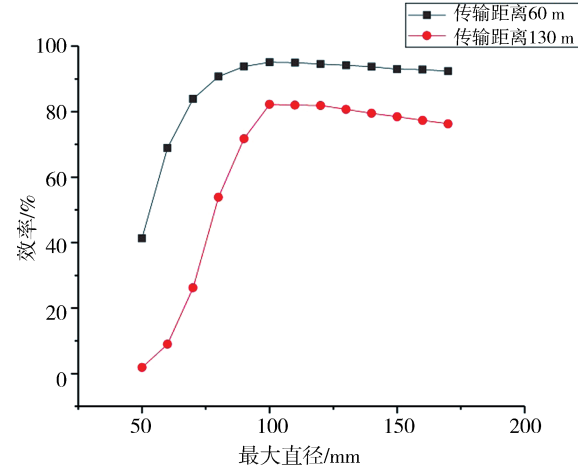


图 9 最大直径与锥形谐振线圈电能传输效率的关系图
Fig. 9 Relationship between the maximum diameter and the power transmission efficiency of the tapered resonant coil

从图 9 可以看出,系统电能传输效率随最大直径的增加先增加后减少,即存在一个最优最大直径使系统电能传输效率最高;在传输距离为 60 mm,最大直径为 100 mm 时,系统传输效率最高;在传输距离为 130 mm,最大直径为 100 mm 时,系统传输效率最高;下降区的电能传输效率上升速度要快于稳定区的电能传输效率上升速度。

3.3.3 优化锥形谐振线圈的铜线半径 谐振线圈匝数设置为对应传输距离的最优匝数,即 4 匝和 11 匝,最大直径为对应传输距离的最优直径,即 100 mm 和 100 mm 时,改变铜线半径计算出锥形谐振线圈电能传输效率,得到图 10 所示。

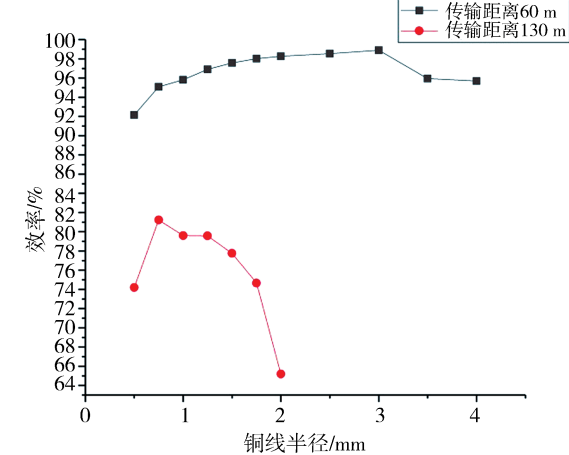


图 10 铜线半径与锥形谐振线圈电能传输效率的关系图
Fig. 10 Relationship between copper wire radius and the power transmission efficiency of the tapered resonant coil

从图 10 可以看出, 系统电能传输效率随铜线半径的增加先增加后减少; 在传输距离为 60 mm, 铜线半径为 3 mm 时, 系统传输效率最高; 在传输距离为 130 mm, 铜线半径为 0.75 mm 时, 系统传输效率最高。

4 实验验证

实验绕制了 2 种谐振线圈, 其参数如表 1。其中锥形谐振线圈电感量实际测量值为 $5.81 \mu\text{H}$, 螺旋谐振线圈电感量实际测量值为 $6.42 \mu\text{H}$ 。

磁耦合谐振式无线电能传输系统包含四个模块: 信号发生器(Agilent 33220A)、直流稳压电源(Chroma 62150H-1000S)、自制宽频功率放大器、示波器(Tektronix DPO3054)以及电流探头(Tektronix TCP0150)。实验配置如图 11 所示。



图 11 磁耦合谐振式无线电能传输实验平台
Fig. 11 Experimental platform for magnetically coupled resonant wireless power transfer

实验结果表明: 当传输距离为 100 mm 的情况下, 锥形谐振线圈的电能传输效率比螺旋谐振线圈的电能传输效率高约 5%。由此可见, 锥形谐振线圈的电能传输效率高于螺旋谐振线圈。

5 结 论

本文通过仿真软件平台, 对比研究了锥形谐振线圈和螺旋谐振线圈的效率, 并详细研究了锥形谐振线圈的参数对系统传输效率的影响规律, 通过实验验证了对比研究的正确性。主要结论如下:

(1) 谐振线圈的纵向间距小于 1.8 mm 时, 锥形谐振线圈的传输效率高于螺旋谐振线圈, 谐振线圈的纵向间距大于 1.8 mm 时, 锥形谐振线圈传输效率低于螺旋谐振线圈。

(2) 在谐振线圈高度受限的某些特殊工程应用情况, 螺旋谐振线圈可以通过增加径向距离(即增加锥度)来增加匝间距, 以此来提高电能传输

效率。

(3) 系统传输效率随锥形谐振线圈的匝数、最大直径、铜线半径以及匝间距的增大先增大后减少, 所以锥形谐振线圈存在最优匝数、最优最大直径、最优铜线半径以及最优匝间距。

(4) 当锥形谐振线圈间的传输距离给定时, 可优化设计谐振线圈匝数、谐振线圈最大直径和铜线半径等结构参数来获得最优的电能传输效率。本文中, 当传输距离为 60 mm 时, 可将谐振线圈电能传输效率由原来的 93.7 % 提高到 98.9 %; 当传输距离为 130 mm 时, 可将谐振线圈电能传输效率由原来的 69.2 % 提高到 81.2 %。可见, 下降区的电能传输效率提升率要高于稳定区的电能传输效率提升率, 故优化传输距离在下降区的谐振线圈更有价值。

(5) 锥形谐振线圈相较于螺旋谐振线圈而言, 材料使用更少, 能够节约成本。

参考文献:

- [1] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, *et al.* Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. *Science*, 2007, 317: 83.
- [2] 杨庆新, 张献, 李阳, 等. 无线电能传输技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [3] 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, 25: 6.
- [4] 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: 68.
- [5] Park B C, Lee J H. Adaptive impedance matching of wireless power transmission using multi-loop feed with single operating frequency [J]. *IEEE T Antenn Propag*, 2014, 62: 2851.
- [6] 李永峰, 郭庆功. 基于铁氧体反射器的磁谐振无线能量传输效率的优化[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2017, 54: 742.
- [7] 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: 1559.
- [8] 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: 1.
- [9] 徐毅非, 蒋文波, 程雪丽. 基于谱聚类的无功电压分区和主导节点选择[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44: 73.
- [10] Zhang X X, Luo B, Hu Y. A novel dumbbell-shaped coil featured with cross coupling suppression

for long distance relay wireless power transfer applications [J]. IEICE Electron Expr, 2017, 14: 1.

[11] 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: 南昌大学, 2015.

[12] 肖思宇, 马殿光, 张汉花, 等. 耦合谐振式无线电能传输系统的线圈优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30: 221.

[13] Haerinia M, Mosallanejad A, Afjei E S. Electro-magnetic analysis of different geometry of transmitting coils for wireless power transmission applications [J]. Prog Electromagn Res M, 2016, 50: 161.

[14] Nagi B, Salim T, Mohammed A. Design of innovative conical coil transmitter for efficient delivery of wireless power in inductive communication systems [C]. Libya: 1st Conference of Industrial Technology, 2017.

[15] Shi Y Y, Liang J, Wang M. Efficient magnetic resonant coupling wireless power transfer with a novel conical-helix resonator[J]. IEICE Electron Expr, 2017, 14: 1.

[16] 钟晨明, 罗斌, 刘婉. MCR-WPT 四种经典传输结构的性能比较[J]. 电子技术应用, 2015, 41: 141.

[17] 孙跃, 廖志娟, 叶兆虹, 等. 基于振动理论的 MCR-WPT 系统频率分裂特性研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33: 3140.

引用本文格式:

中文: 倪晨睿, 陈海川, 李登帅, 等. 嵌入社区半径的力引导与径向树混合布局算法 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2020, 57: 304.

英文: Ni C R, Chen H C, Li D S, *et al.* Structural optimization of tapered resonant coil in magnetically coupled resonant wireless power transfer system[J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2020, 57: 304.