

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.04.014

一种三线圈磁谐振式无线能量传输系统的小型化设计

史晓荻, 李永烽, 郭庆功
(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

摘 要: 针对植入式医疗设备、无线传感器以及手机等便携式电子设备的特殊应用, 设计实现了一套基于三线圈结构的小型化非对称能量传输系统. 基于三线圈系统的等效电路模型, 推导了三线圈系统传输效率的表达式, 分析了三线圈系统的传输特性和最大效率传输的耦合匹配条件. 设计实现的系统接收线圈的外径仅为 38.0 mm, 厚度为 0.6 mm, 在 10 mm 距离下测得的传输效率达 79.4%, 在 100 mm 距离内传输效率超过 50%. 通过仿真和实验对比研究了接收端线圈垂直平移、水平平移和偏转对系统传输效率的影响.

关键词: 无线能量传输; 小型化; 三线圈系统; 传输效率

中图分类号: TM15 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)04-0671-06

A miniaturization design of 3-coil magnetic resonance coupling wireless power transfer system

SHI Xiao-Di, LI Yong-Feng, GUO Qing-Gong
(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper presents the miniaturization design of an asymmetric 3-coil magnetic resonant coupling wireless power transmission system for the special application of portable electronic devices such as implantable medical devices, wireless sensors and mobile phones. Based on the equivalent circuit model of 3-coil system, the expression of the transmission efficiency of the 3-coil system is deduced and the transmission characteristics of the 3-coil system and the condition of the maximum efficiency transmission are analyzed. The outer diameter of the receiving coil is only 38.0 mm and its thickness is 0.6 mm, the measured transmission efficiency is 79.4% at 10mm distance and above 50% within 100mm distance. The effects of the axial misalignment and deflection angle on transmission efficiency are studied by simulation and experiment.

Keywords: Wireless power transmission; Miniaturization; 3-coil system; Transmission efficiency

1 引 言

随着电子设备在日常生活中的增多, 无线能量传输技术的发展为现代日常生活带来了许多便利. 2007 年, 麻省理工学院的 Marin Soljacic 团队

提出了基于磁耦合谐振的无线能量传输技术^[1]. 磁耦合谐振式无线能量传输技术由于具有高效率、中距离和大功率等优点, 可以应用于植入医疗设备、电动汽车、消费电子等日常生活中的应用场景^[2-11], 还可以实现信息与能量同传^[6], 成为了目前最热门, 最具有市场前景的无线能量传输技术.

收稿日期: 2018-10-25
基金项目: 国家自然科学基金(61877041)
作者简介: 史晓荻(1993—), 女, 河北张家口人, 硕士生, 研究方向为无线能量传输. E-mail: sxd_scuee@foxmail.com
通讯作者: 郭庆功. E-mail: guoqingong@scu.edu.cn

在实际应用中,需要根据实际需求对系统接收端进行小型化设计. 目前大多数磁耦合谐振式无线能量传输系统采用的是四线圈系统^[7],保证了系统的传输效率,但不利于进行小型化设计,而传统的两线圈系统传输效率无法达到实际应用的指标要求. 由于三线圈系统的接收端只有一个线圈,同时可以获得比两线圈系统更高的传输效率^[8],综合考虑效率和尺寸,更适合应用于可穿戴设备、植入式设备以及手机、笔记本电脑等便携式设备^[9].

目前,对三线圈系统的研究主要集中在传输距离、源阻抗和负载对传输效率的影响上,关于系统接收端的小型化设计在国内外也已有一些研究成果. 文献[12]设计了一种基于三线圈结构的无线能量传输系统,系统接收端的外径为 32.34 mm,在 30 mm 距离下获得了 61.4% 的传输效率. 文献[13]在 PCB 上设计长度为 10 mm 的矩形线圈,传输效率为 85.6%,但传输距离仅为 3 mm. 文献[14]针对多负载系统,用 12 mm 直径的接收线圈在 40 mm 距离处获得 29% 的传输效率. 文献[15]针对植入式生物医学设备设计了一个无线能量传输系统,其接收端的直径为 20 mm,在 18 mm 的植入深度获得了 50.7% 的传输效率. 一方面,对系统接收端的小型化设计会引起发射线圈与接收线圈的失配等问题,导致传输效率降低;另一方面,当距离增大时,系统的传输效率会产生快速衰落现象,无法匹配小型化设备的实际应用. 如何在接收端小型化的同时满足更高的传输效率和更远的传输距离的要求,是目前磁耦合谐振式无线能量传输系统小型化设计的关键.

本文针对植入式医疗设备、无线传输器和手机等便携式电子设备的应用,从三线圈传输系统的理论分析与仿真入手,自主设计制作了一整套高效的基于三线圈结构的小型化非对称无线能量传输系统,在 100 mm 的传输距离内实现了大于 50% 的传输效率.

2 三线圈系统分析

小型化非对称的三线圈磁耦合谐振式无线能量传输系统如图 1 所示,其等效电路模型如图 2 所示,包括源线圈 L_1 ,发射线圈 L_2 和接收线圈 L_3 . 其中,源线圈 L_1 与激励源 V_s 相连; R_s 为激励源的内阻,接收线圈 L_3 与负载电阻 R_L 相连; R_1 、 R_2 和 R_3 分别为源线圈 L_1 、发射线圈 L_2 和接收线圈

L_3 的电阻; C_1 、 C_2 和 C_3 为谐振电容.

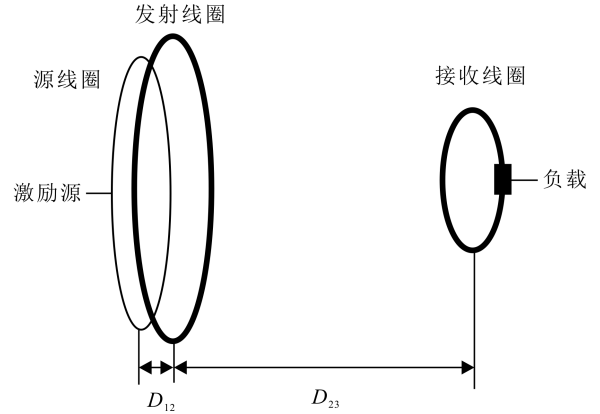


图 1 小型化非对称的三线圈磁耦合谐振式无线能量传输系统

Fig. 1 Diagram model of the three-coil MR-WPT system

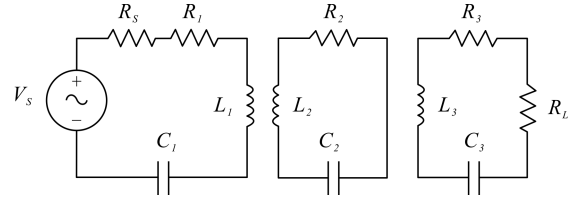


图 2 三线圈系统的等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of the three-coil MR-WPT system

根据图 2,忽略源线圈 L_1 与接收线圈 L_3 之间的耦合,运用基尔霍夫电压定律,建立三线圈系统的 KVL 方程如下.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & j\omega M_{12} & 0 \\ j\omega M_{12} & Z_2 & -j\omega M_{23} \\ 0 & -j\omega M_{23} & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中, Z_1 、 Z_2 和 Z_3 分别为源线圈 L_1 ,发射线圈 L_2 和接收线圈 L_3 的阻抗.

$$\begin{cases} Z_1 = R_s + R_1 + j\omega L_1 + 1/j\omega C_1 \\ Z_2 = R_2 + j\omega L_2 + 1/j\omega C_2 \\ Z_3 = R_L + R_3 + j\omega L_3 + 1/j\omega C_3 \end{cases} \quad (2)$$

可推导出接收线圈 L_3 中的电流 I_3 为

$$I_3 = \frac{\omega^2 M_{12} M_{23} V_s}{Z_1 Z_2 Z_3 + \omega^2 M_{23}^2 Z_1 + \omega^2 M_{12}^2 Z_3} \quad (3)$$

源电压 V_s 与负载 R_L 上的电压 V_L 之比为

$$\frac{V_L}{V_s} = \frac{I_3 R_L}{V_s} = \frac{\omega^2 M_{12} M_{23} R_L}{Z_1 Z_2 Z_3 + \omega^2 M_{23}^2 Z_1 + \omega^2 M_{12}^2 Z_3} \quad (4)$$

当系统的阻抗满足共轭匹配时,系统的传输效率为系统 S_{21} 的平方,通过分析系统的 S_{21} 来简

化分析系统的传输效率. 由于源线圈 L_1 的电阻 R_1 非常小, 相对于 R_S 可以忽略不计. 因此可以得到三线圈系统 S_{21} 的绝对值为

$$|S_{21}| = \frac{2k_{12}k_{23}Q_2\sqrt{Q_1Q_3}}{1+k_{23}^2Q_2Q_3+k_{12}^2Q_1Q_2} \cdot \sqrt{\frac{R_L}{R_L+R_3}}$$

(5)

由式(5)可以得出, 三线圈系统的传输效率同样主要由线圈之间的耦合系数和线圈自身的品质因数决定. 三线圈系统的最大效率传输的耦合匹配条件为式(6), 由式(6)可以推导出线圈之间的耦合匹配关系为式(7).

$$\frac{d|S_{21}|}{dk_{12}}=0$$

(6)

$$k_{12}=\sqrt{\frac{1+k_{23}^2Q_2Q_3}{Q_1Q_2}}$$

(7)

为了研究三线圈磁耦合谐振式无线能量传输系统的传输特性, 根据理论推导得出的 S_{21} 的表达式, 运用 Matlab 对三线圈系统的 S_{21} 进行仿真分析. 假设三线圈系统的参数如表 1 所示.

表 1 三线圈系统的仿真参数

Tab. 1 Parameters of the coils used in simulation

参数	设定值	参数	设定值	参数	设定值
L_1	0.5 μH	C_1	2 nF	R_1	0.1 ohm
L_2	100 μH	C_2	10 pF	R_2	1 ohm
L_3	10 μH	C_3	100 pF	R_3	5 ohm

假设 k_{12} 为 0.5 时, R_S 和 R_L 为 50 ohm, 得出三线圈系统 S_{21} 的绝对值与工作频率 f 和耦合系数 k_{23} 的三维关系图, 如图 3 所示.

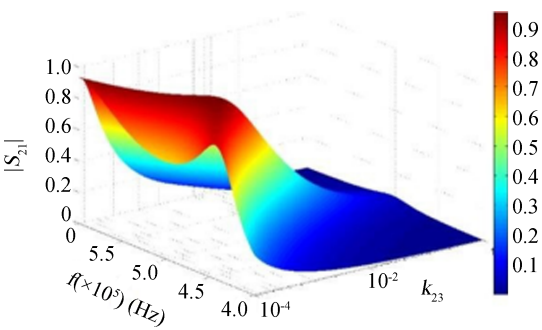


图 3 三线圈系统的 S_{21} 与 f 和 k_{23} 的三维关系图
Fig. 3 3-D view of $|S_{21}|$ as functions of frequency and k_{23}

由图 3 可以得出, 三线圈系统的 S_{21} 与 f 和 k_{23} 的关系与四线圈系统相似, 当 k_{23} 较大时, 三线圈系统同样会出现双峰效应, 双峰合并后系统的传输效率快速衰减, 最终谐振频率稳定在 5 MHz 左右, 与理论计算值相吻合. 图 4 展示了 k_{23} 为 0.1

和 0.01 时, 三线圈系统 S_{21} 的绝对值随 k_{12} 变化的曲线. 当 k_{23} 为 0.1 时, S_{21} 的绝对值在 k_{12} 为 0.43 附近达到最大; 当 k_{23} 为 0.01 时, S_{21} 的绝对值在 k_{12} 为 0.06 附近达到最大. 三线圈系统的线圈之间存在耦合匹配, 系统最佳匹配的 k_{12} 随着 k_{23} 的减小而减小, 在数值上三线圈系统的耦合匹配关系满足式(7).

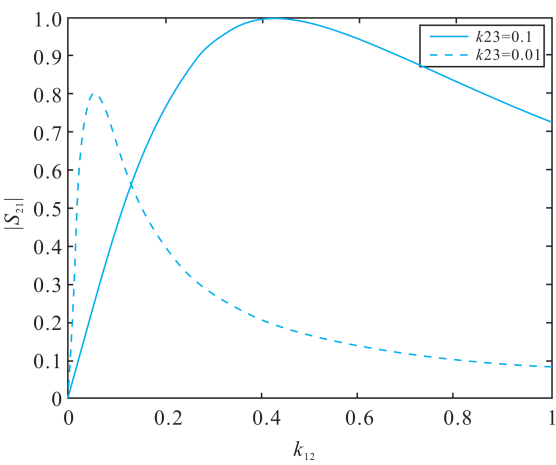


图 4 $|S_{21}|$ 随 k_{12} 的变化曲线
Fig. 4 $|S_{21}|$ curves change with k_{12}

3 小型化三线圈系统设计

根据要求设计制作的接收端线圈如图 5 所示, 接收线圈采用两股直径为 0.3 mm 的漆包铜线绕制, 其厚度为 0.6 mm, 外直径为 38.0 mm, 内直径为 28.0 mm, 满足设计要求. 其电感值为 15.2 μH , 串联 78 pF 的谐振电容.

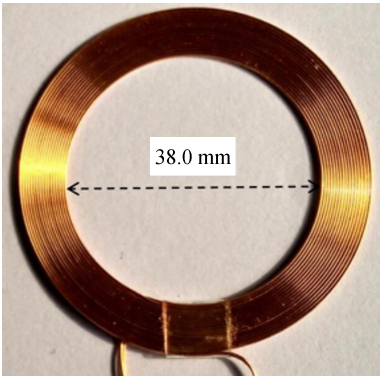
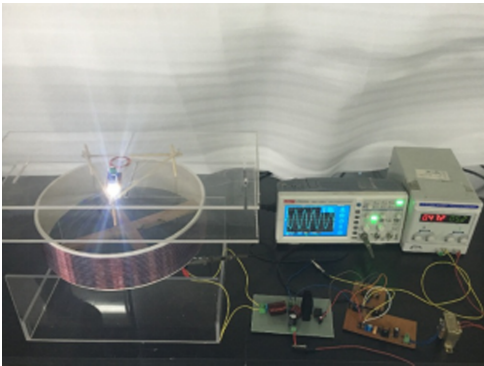


图 5 三线圈系统的接收线圈
Fig. 5 Receiver of three-coil MR-WPT system

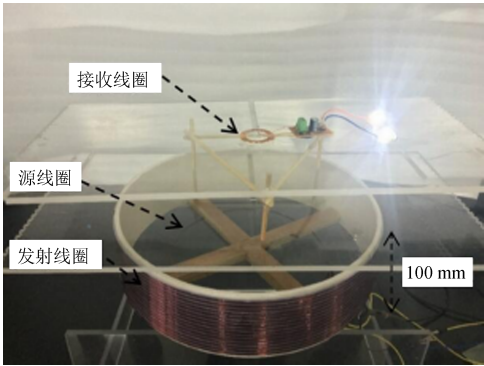
由于接收线圈与负载相连, 其品质因数较低, 为了使三线圈系统获得较高的传输效率, 应该尽可能的增加发射线圈的品质因数. 发射线圈采用分布参数的自谐振线圈, 其电感值为 100.7 μH ,

分布电容约为 12.5 pF, 理论品质因数高达 2360. 由于接收线圈的小型化设计, 使得发射线圈与接收线圈之间的耦合系数较小, 根据理论分析, 源线圈与发射线圈之间的耦合系数也应相应的减小, 以保持系统的耦合匹配. 综合考虑传输效率和传输距离后, 决定源线圈采用 2.5 mm 线径漆包铜线绕制的半径为 10 cm 的圆环, 其电感值为 0.42 μ H, 串联 3.3 nF 的谐振电容.

采用 E 类功率放大器作为激励电路, 搭建实验测试平台, 如图 6 所示, 在 100 mm 的传输距离内点亮了两个 1 W 的 LED 灯, 系统的谐振频率为 4.48 MHz, 接收端的全桥整流电路使用了 4 个肖特基二极管 IN5819.



(a)



(b)

图 6 小型化非对称三线圈磁耦合谐振式无线能量传输实验系统
Fig. 6 Experiment system of three-coil MR-WPT system

4 仿真与实验测试

在手机等便携式电子设备进行无线充电的过程中, 接收端可能会发生移动和偏转, 如图 7 所示. 系统的传输效率主要受以下三个参数的影响: (1) 发射线圈和接收线圈之间的垂直距离 D_{23} ; (2)

接收线圈的轴向偏离 A_{23} ; (3) 接收线圈的偏转角 θ_{23} . 通过仿真和实验测试来分别研究这三个参数对系统传输效率的影响.

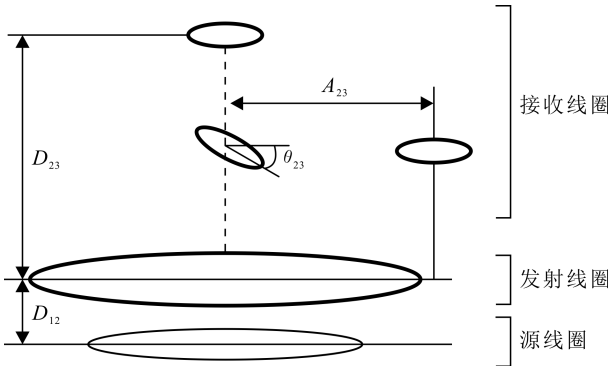


图 7 接收端的相对位置变化
Fig. 7 The relative position of the receiver changes

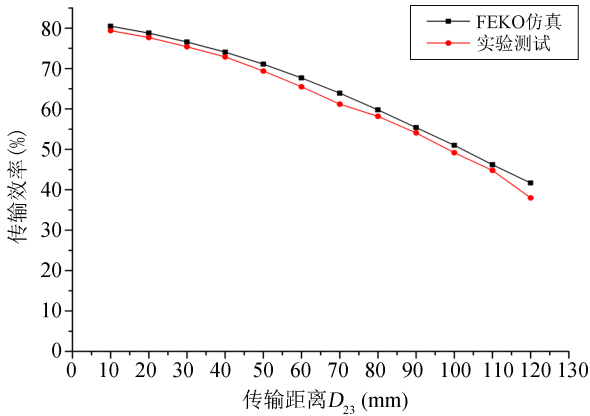


图 8 传输效率随 D_{23} 的变化
Fig. 8 Transmission efficiency of different D_{23}

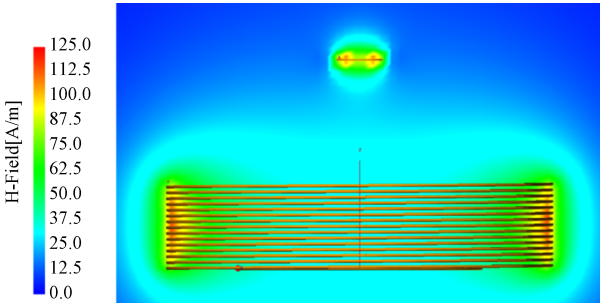


图 9 传输距离 D_{23} 为 100 mm 时的磁场分布
Fig. 9 Magnetic field of the three-coil system when $D_{23}=100$ mm

研究传输距离 D_{23} 对系统传输效率的影响, 选用 100 Ω 的电阻作为负载. 传输距离 D_{23} 的测试范围为 10 mm 至 120 mm, 测试步进为 10 mm. 将实验测试得到的传输效率与 FEKO 7.0 的仿真结果相对比, 如图 8 所示, 实验测试结果与仿真结果吻合良好. 由图 8 可以得出, 当传输距离为 10 mm

时, 系统获得最大传输效率为 79.4%; 当传输距离为 100 mm 时, 传输效率为 50.1%, 系统的传输效率随着传输距离 D_{23} 的增加而减小. 当 D_{23} 为 100 mm 时, 通过 FEKO 7.0 仿真得到了谐振时三线圈系统的磁场分布图, 如图 9 所示, 系统通过磁场将能量高效的从发射线圈传输到接收线圈.

保持轴向传输距离 D_{23} 为 100 mm 不变, 轴向偏离 A_{23} 的变化范围为 -16 cm 至 16 cm, 其变化步进为 2 cm. 通过实验测试和仿真, 系统传输效率随轴向偏离 A_{23} 变化的结果如图 10 所示. 系统的传输效率随着 A_{23} 绝对值的增加而减小, 当 A_{23} 的值在 -8 cm 到 8 cm 之间时, 系统的传输效率大于最大传输效率的 80%, 实验测试结果与仿真结果吻合良好. 当轴向偏离 A_{23} 为 8 cm 时, 系统的磁场分布如图 11 所示.

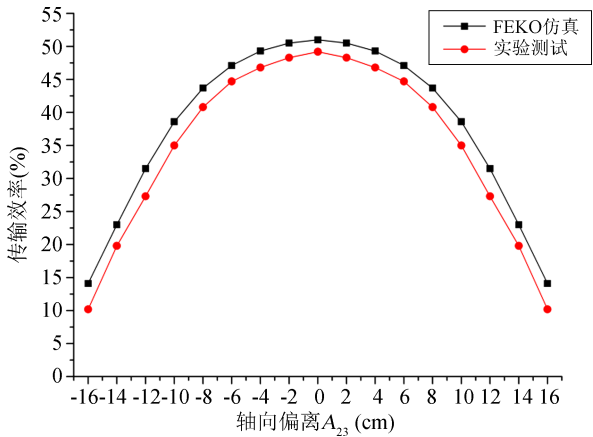


图 10 传输效率随轴向偏离 A_{23} 的变化
Fig. 10 Transmission efficiency of different A_{23}

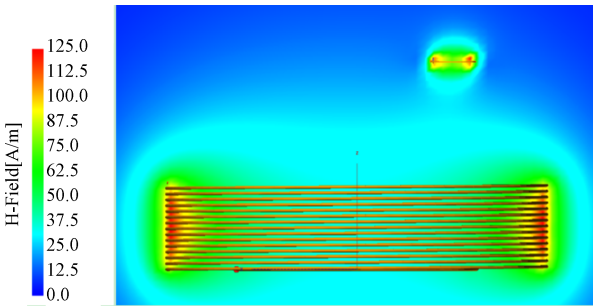


图 11 轴向偏离 A_{23} 为 8 cm 时的磁场分布
Fig. 11 Magnetic field of the three-coil system when $A_{23}=8$ cm

保持轴向传输距离 D_{23} 为 100 mm 不变, 偏转角度 θ_{23} 的变化范围为 -70° 至 70° , 其变化步进为 10° . 通过实验测试和仿真, 系统传输效率随偏转角度 θ_{23} 变化的结果如图 12 所示. 由图 12 可以得出, 系统的传输效率随着 θ_{23} 的绝对值的增加而减

小, 当 θ_{23} 的值在 -30° 到 30° 之间时, 系统的传输效率大于最大传输效率的 84%, 实验测试结果与仿真结果吻合良好. 当偏转角度 θ_{23} 为 40° 时, 系统的磁场分布如图 13 所示.

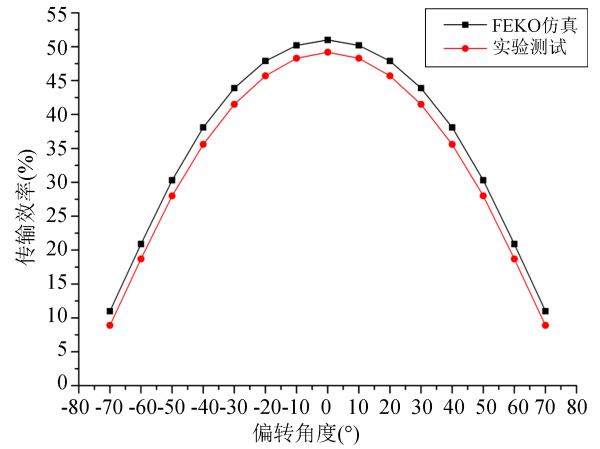


图 12 传输效率随偏转角度 θ_{23} 的变化
Fig. 12 Transmission efficiency of different θ_{23}

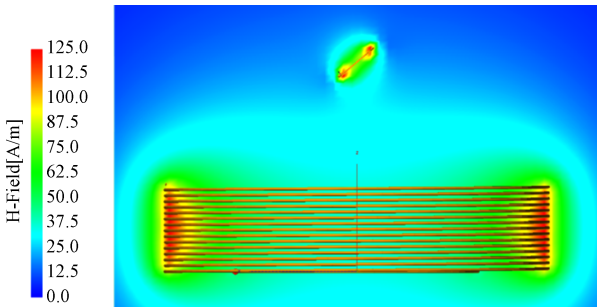


图 13 偏转角度 θ_{23} 为 40° 时的磁场分布
Fig. 13 Magnetic field of the three-coil system when $\theta_{23}=40^\circ$

表 2 是近几年内国内外磁耦合谐振式无线能量传输小型化设计的研究成果, 与表中的研究成果相对比, 本文所设计的系统在传输距离、传输功率和传输距离上均有一定的优势, 可以更好地适用于手机、笔记本电脑等大多数便携式电子设备.

表 2 小型化设计相关研究对比

相关研究	接收端外直径(mm)	传输距离 (mm)	传输功率 (W)	传输效率 (%)
文献[2]	9	20/100	—	32.43/0.165
文献[3]	17.65	10	1	78
文献[10]	32.34	30	5.61	61.4
文献[12]	12	42.7	—	28.84
文献[13]	20	18	—	72.6
文献[14]	50	10	约 2	79
文献[15]	30	10	0.543	43.41
本文	38	10/100	2	79.4/50.1

5 结 论

本文通过建立三线圈系统的等效电路模型,分析和推导了三线圈系统 S_{21} 绝对值的表达式和最大效率传输的条件. 自主设计制作了包括发射、接收线圈以及激励电路在内的一整套小型化非对称的三线圈磁耦合谐振式无线能量传输系统,其接收端的外直径仅为 38.0 mm,厚度仅为 0.6 mm,在 100 mm 的传输距离内,可以传输 2 W 以上的传输功率,获得 50% 以上的传输效率,最大效率为 79.4%. 通过实验测试和 FEKO 仿真研究了传输距离、轴向偏离和偏转角度对系统的传输效率的影响,实验测试结果与仿真结果吻合良好. 与国内外现有的小型化研究的文献相对比,本文所设计的系统在传输距离、传输功率和传输距离上均有一定的优势,可以更好地适用于手机、笔记本电脑等大多数便携式电子设备.

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] NaK, Jang H, Ma H, *et al.* Tracking optimal efficiency of magnetic resonance wireless power transfer system for biomedical capsule endoscopy [J]. IEEE T Microw Theory, 2015, 63: 295.

[3] Campi T, Cruciani S, Palandrani F, *et al.* Wireless power transfer charging system for AIMDs and pacemakers [J]. IEEE T Microw Theory, 2016, 64: 633.

[4] Campi T, Cruciani S, De Santis V, *et al.* EMF safety and thermal aspects in a pacemaker equipped with a wireless power transfer system working at low frequency [J]. IEEE T Microw Theory, 2016, 64: 375.

[5] Moon S C, Kim B C, Cho S Y, *et al.* Analysis and design of a wireless power transfer system with an intermediate coil for high efficiency [J]. IEEE T Ind

Electron, 2014, 61: 5861.

[6] 董明昊, 雷维嘉. 功率分裂的无线信息与能量同传中继方案的优化 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2017, 29: 657.

[7] 李永烽, 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.

[8] Zhang J, Yuan X, Wang C. A study of three-coil magnetically coupled resonators for wireless power transfer [C]//Proceedings of the 2015 IEEE International Wireless Symposium (IWS 2015). Shenzhen, China: IEEE, 2015.

[9] Kiani M, Jow U M, Ghovanloo M. Design and optimization of a 3-coil inductive link for efficient wireless power transmission [J]. IEEE T Biomed Circ S, 2011, 5: 579.

[10] Zhong W, Zhang C, Liu X, *et al.* A methodology for making a three-coil wireless power transfer system more energy efficient than a two-coil counterpart for extended transfer distance [J]. IEEE T Power Electr, 2015, 30: 933.

[11] Kim S, Jung D H, Kim J J, *et al.* High-efficiency PCB- and package-level wireless power transfer interconnection scheme using magnetic field resonance coupling. [J] IEEE T Comp Pack Man, 2015, 5: 863.

[12] Kim Y J, Ha D, Chappell W J, *et al.* Selective wireless power transfer for smart power distribution in a miniature-sized multiple-receiver system [J]. IEEE T Ind Electron, 2016, 63: 1853.

[13] Liu Z, Zhong Z, GuoY X. In vivo high-efficiency wireless power transfer with multisine excitation [J]. IEEE T Microw Theory, 2017, 65: 3530.

[14] 杨新生, 赵军, 徐桂芝. 一种小尺寸磁谐振耦合无线能量传输系统的实验研究 [J]. 电工技术学报, 2016, 31: 13.

[15] 彭康, 刘修泉, 黄平. 心脏起搏器无线能量传输装置的设计与研究 [J]. 机械设计与制造, 2017, 3: 119.

引用本文格式:

中 文: 史晓获, 李永烽, 郭庆功. 一种三线圈磁谐振式无线能量传输系统的小型化设计 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2019, 56: 671.

英 文: Shi X D, Li Y F, Guo Q G. A miniaturization design of 3-coil magnetic resonance coupling wireless power transfer system [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2019, 56: 671.