

# Analysis of a Small Charging System for Wearable Devices Based on Magnetic Coupling Resonance

Jun Zhao, Jing Li, Nailiang Li, Yao Zhang

Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin  
Email: ashunjun@126.com

Received: Apr. 26<sup>th</sup>, 2017; accepted: May 14<sup>th</sup>, 2017; published: May 17<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

As more and more wearable devices come into people's lives, the short duration of the battery and charging difficulties of wearable devices need more focus. Magnetic coupling resonance wireless energy transmission technology can provide convenient and safe energy supply for wearable devices. Wearable devices are small in size, and it is necessary to design a small size wireless charging system. In this paper, the relationship between coil parameters and resonant frequency are modeled by simulation, and the key parameters are obtained. On the basis of simulation, two systems are designed, one consists of two same small size coils, the other consists of a big size coil and a small size coil, and the volume of the small size coil is only 0.675cm<sup>3</sup>, it can meet the requirements of wearable devices. In addition, the transmission efficiency of the two systems is analyzed, and the results show that this new system has high transmission performance and a good application prospect in the field of wearable devices.

## Keywords

Wearable Devices, Magnetic Coupling Resonance, Wireless Charging, Resonant Frequency, Transmission Efficiency

---

# 基于可穿戴设备的微型磁耦合谐振无线充电系统的分析

赵 军, 李 靖, 李乃良, 张 遥

河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室, 天津  
Email: ashunjun@126.com

收稿日期：2017年4月26日；录用日期：2017年5月14日；发布日期：2017年5月17日

## 摘要

近几年，越来越多的可穿戴设备走进人们的生活。但对大多数可穿戴设备而言，电池续航时间短，充电困难已经成为用户普遍反映的问题，磁耦合谐振无线能量传输技术能够为可穿戴设备提供方便，安全的能量供应。由于可穿戴设备体积小，因此设计一种小尺寸的无线充电系统十分必要。本文通过对谐振线圈进行仿真分析，得到了影响线圈谐振频率的关键设计参数。在此基础上设计出了小小匹配的谐振系统和新型的大小匹配的谐振系统，并且系统中小谐振线圈的体积仅为 $0.675 \text{ cm}^3$ ，能够满足可穿戴设备的体积需求。对两谐振系统的传输效率进行实验分析，结果表明大小匹配的谐振系统具有更好的能量传输性能，在可穿戴设备领域具有良好的应用前景。

## 关键词

可穿戴设备，磁耦合谐振，无线充电，谐振频率，传输效率

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

自从2012年4月谷歌眼镜发布以来，可穿戴设备成为了市场关注的的焦点，掀起了一股可穿戴设备的浪潮。目前，市场上的可穿戴设备种类繁多，如智能手表、手环、眼镜等，如图1所示。可穿戴设备极有可能成为继电视、电脑、手机之后的“第四平台”。随着越来越多的可穿戴设备进入市场，可穿戴技术将覆盖人们生活的方方面面[1] [2]。

目前的可穿戴设备主要有两种供电方式：电池供电和充电。由于可穿戴设备本身体积较小，很难承

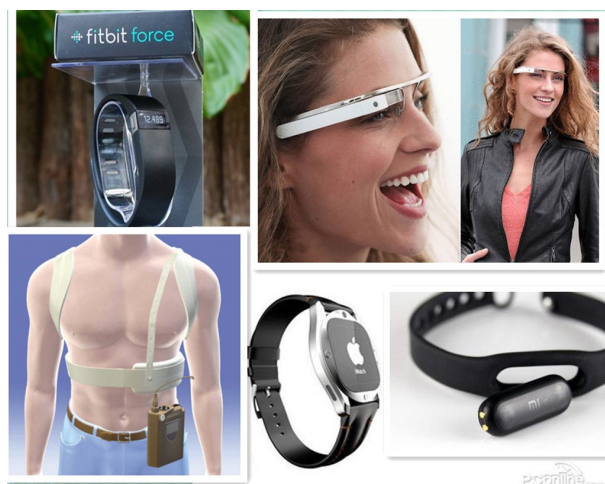


Figure 1. Wearable devices

图 1. 可穿戴设备

载大容量的电池，充电时往往需要对充电部分进行拆卸，因此，电池的续航时间短、充电困难已经成为用户普遍反映的问题，严重影响了用户体验[3]。在可穿戴设备实现复杂功能的过程中，能源问题也必将成为一个短板，制约可穿戴技术的发展。无线能量传输技术为解决可穿戴设备的能源问题提供了新的思路。

目前，主要可穿戴设备的能源问题主要通过降低系统功耗或配置高性能的电池来解决[4] [5]，而关于可穿戴设备无线能量供应问题的研究相对较少[6] [7]。2007年美国麻省理工学院(MIT)的科学家提出了磁耦合谐振无线能量传输技术，该技术具有十分显著的优点：相比于感应耦合式无线能量传输技术，其能量传输距离更远，传输性能更加稳定；相比于微波辐射式无线能量传输技术，其能量损耗更小，传输效率更高[8] [9] [10]。

本文基于磁耦合谐振无线能量传输技术对适用于可穿戴设备的小尺寸无线充电系统进行分析。对谐振线圈进行建模仿真，根据谐振线圈各设计参数与谐振频率之间的关系，得到了影响谐振频率的关键设计参数。设计了小小匹配和大小匹配的谐振系统，并对垂直位移，水平位移及旋转三种情况下，两谐振系统的传输效率进行实验分析，得到了性能更优的能量传输系统，为实现可穿戴设备的无线能量供应提供了有益的参考。

## 2. 系统分析

磁耦合谐振无线能量传输系统主要包括四个部分：高频发射源、发射线圈、接收线圈、负载线圈，如图2所示。其中高频发射源与一单匝线圈相连，单匝线圈与发射线圈紧贴但未连接，未发生谐振。负载线圈也为单匝线圈与接收线圈紧贴，未发生谐振。其中能量发射线圈和能量接收线圈是整个系统的核心部分，通过谐振传递能量。

为简化分析，仅对发生谐振的发射线圈和接收线圈进行等效分析，其等效互感耦合模型如图3所示。其中 $L_S, L_D$ 分别为发射线圈和接收线圈的电感量( $S$ 代表发射， $D$ 代表接收)。 $u_{in}$ 为高频发射源等效到发射线圈的感应电动势， $R_S, R_D, C_S, C_D$ 分别表示发射线圈和接收线圈高频下的等效寄生参数， $R_W$ 为负载反映到接收线圈的电阻，近似等于负载电阻， $M$ 为线圈互感， $D$ 为发射线圈与接收线圈之间的距离。

当能量传输系统的角频率为 $\omega$ 时，发射线圈的自阻抗 $Z_S$ 和接收线圈的自阻抗 $Z_D$ 为：

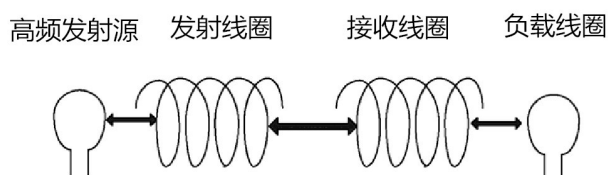


Figure 2. The model of wireless energy transmission system

图2. 无线能量传输系统模型

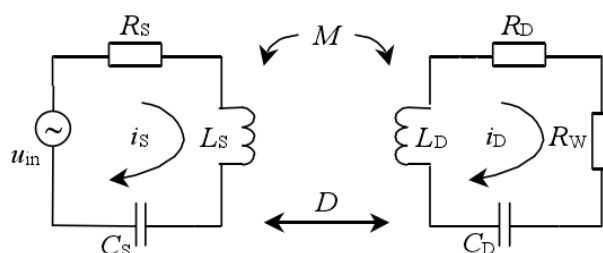


Figure 3. Equivalent mutual inductance coupling model of the system

图3. 系统的等效互感耦合模型

$$\begin{cases} Z_s = R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} \\ Z_D = R_D + R_w + j\omega L_D + \frac{1}{j\omega C_D} \end{cases} \quad (1)$$

根据 KVL 回路方程得到发射线圈等效回路电流  $i_s$  和接收线圈等效回路电流  $i_D$  分别为:

$$\begin{cases} i_s = \frac{Z_D u_{in}}{Z_s Z_D + (\omega M)^2} \\ i_D = \frac{-j\omega M u_{in}}{Z_s Z_D + (\omega M)^2} \end{cases} \quad (2)$$

计算得系统的传输效率公式为:

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 R_w}{Z_D [Z_s Z_D + (\omega M)^2]} \times 100\% \quad (3)$$

可见线圈谐振时, 发射线圈回路阻抗  $Z_s$  和接收线圈回路阻抗  $Z_D$  达到最小值, 传输效率公式的分母最小, 传输效率最高[11]。因此, 在设计谐振线圈时, 其谐振频率对整个系统的传输效率至关重要。

### 3. 谐振线圈的仿真分析

考虑用于可穿戴设备的谐振线圈体积应尽量小, 本文采用方形平面螺旋谐振线圈, 由三层组成: 顶层为方形螺旋铜片, 中间层为环氧树脂板, 底层为长方形铜片, 如图 4 所示。顶层与底层导体形成的电容和电感能够构成复杂的串并联电路, 通过谐振实现线圈之间能量的有效传递。

应用 Ansoft HFSS 软件对谐振线圈进行建模仿真, 通过改变谐振线圈的边长, 铜片的厚度、宽度, 中间层的厚度等因素, 得到各参数对线圈谐振频率的影响, 仿真结果如图 5~图 8 所示。

仿真结果表明, 当谐振线圈边长增大时, 谐振频率明显下降, 当中间层厚度及铜片宽度增大时, 谐振频率明显上升, 铜片的厚度对谐振频率几乎没有影响。因此, 谐振线圈的边长, 铜片的宽度及中间介质的厚度为影响谐振频率的关键设计参数, 在设计谐振线圈时, 主要通过改变这三个参数来调节谐振频率, 这为谐振线圈的设计提供了指导。

### 4. 谐振线圈的设计及系统传输效率分析

一般的磁耦合谐振无线能量传输系统具有两个相同的谐振线圈, 本文设计了新型的谐振系统, 它具有一个大发射谐振线圈与一个小接收谐振线圈, 称为大小匹配的谐振系统。在实验中, 建立了两套无线能量传输系统, 一套具有相同小谐振线圈的谐振系统(system1), 另一套具有大小匹配谐振线圈的谐振系统(system2), 如图 9 所示。

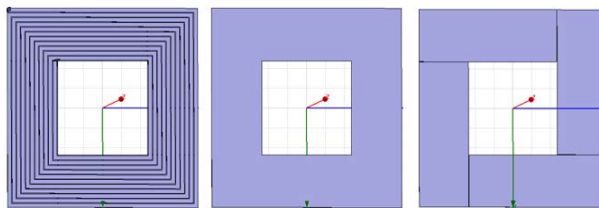
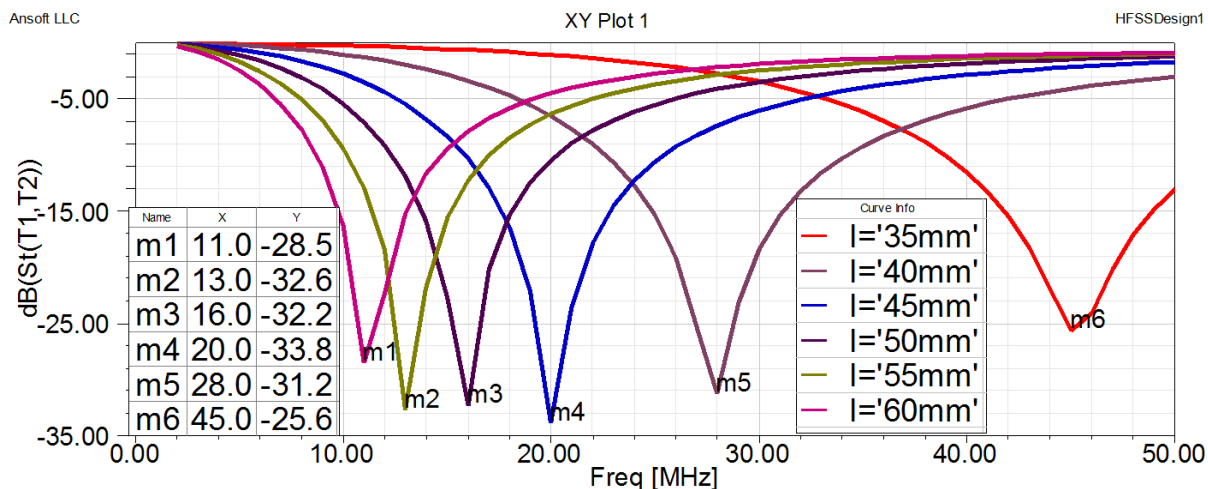
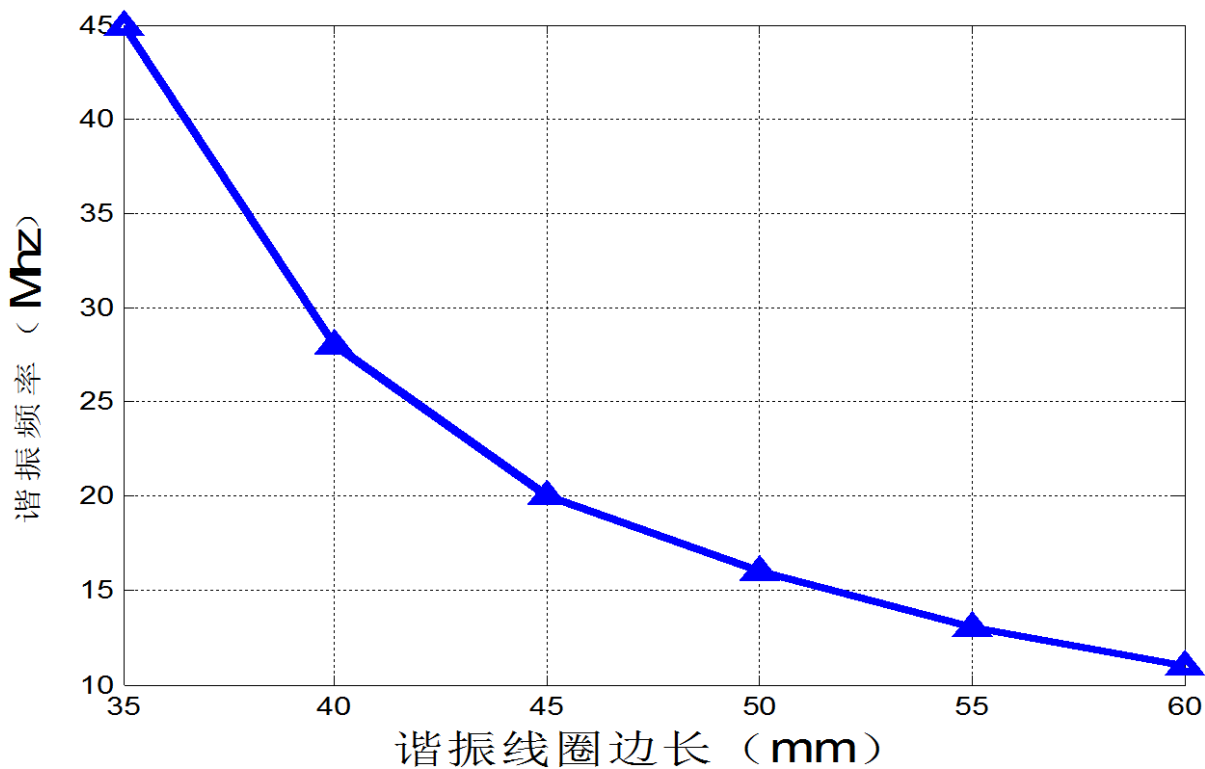


Figure 4. The plane square spiral resonant coil (top layer, middle layer, bottom layer)

图 4. 平面螺旋谐振线圈(顶层, 中间层, 底层)



(a) 线圈边长与谐振频率的关系图

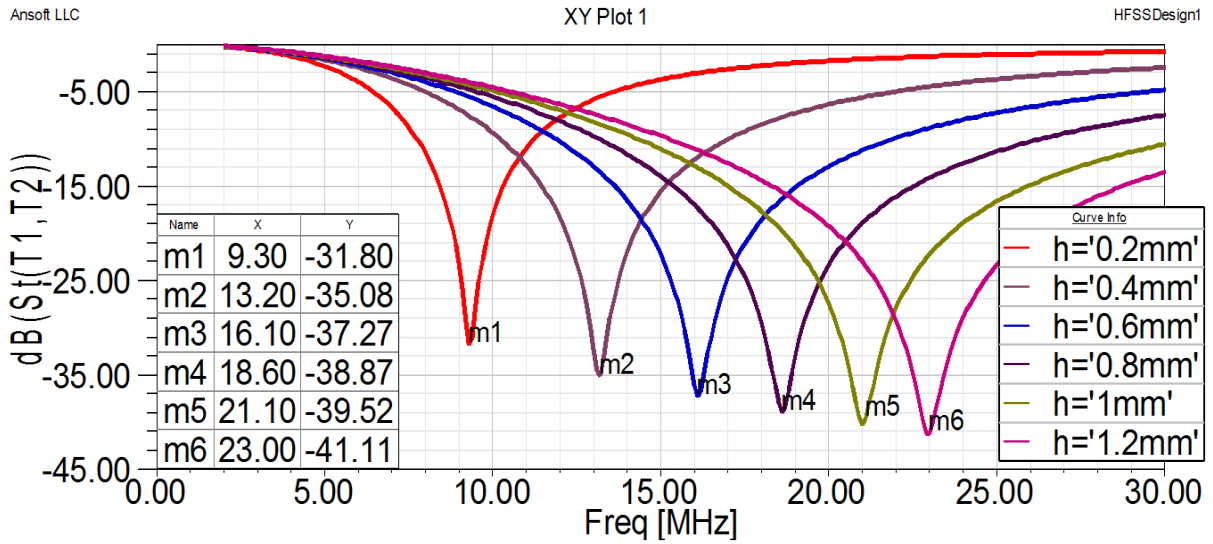


(b) 线圈边长与谐振频率的折线图

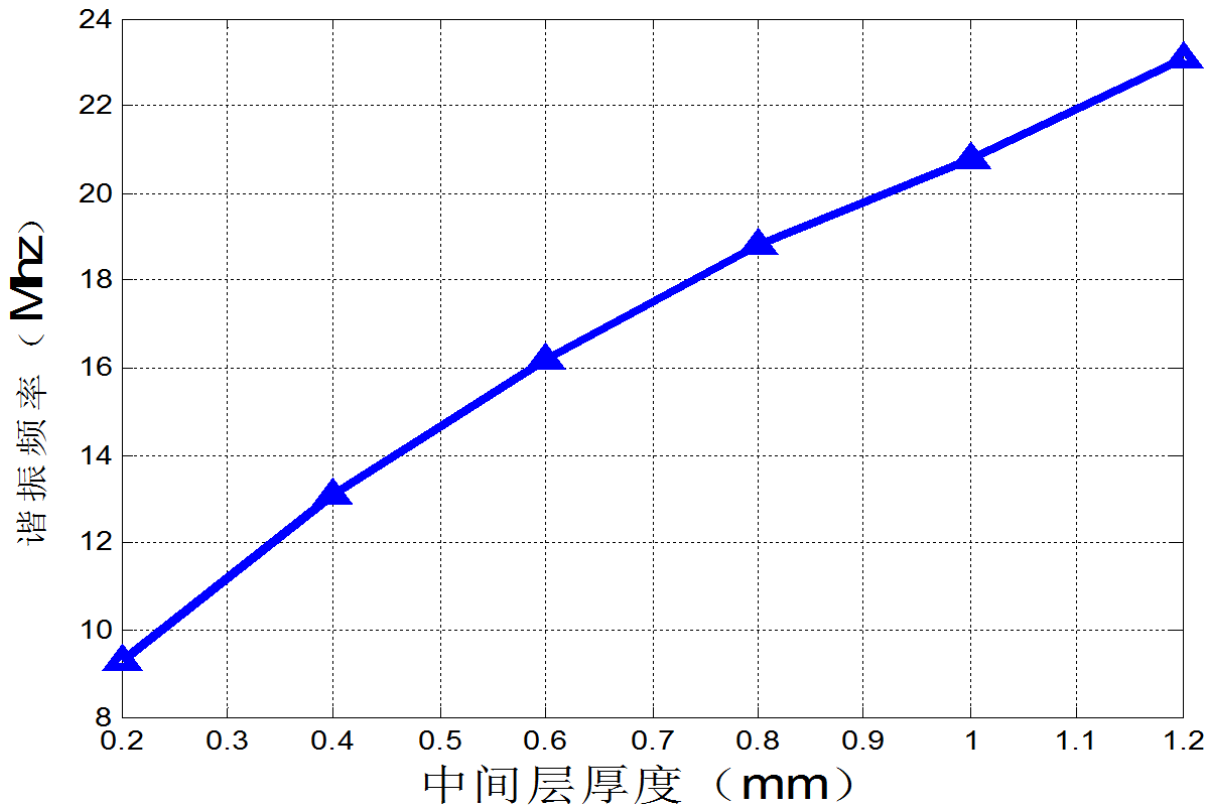
**Figure 5.** Resonant frequency varies with the length of coil**图 5.** 谐振频率随线圈边长的变化关系

两谐振系统具有相同的小接收谐振线圈，其体积为  $0.675 \text{ cm}^3$ ，谐振线圈的自谐振频率均为  $13 \text{ Mhz}$ ，具体设计参数如表 1 和表 2 所示。

根据所设计的谐振线圈构建磁耦合谐振无线能量传输系统并进行实验。固定发射线圈，调整接收线圈使两线圈在同一轴线上，通过移动接收线圈，分别改变两线圈之间的垂直距离，水平距离及偏转角度。输入端电压和电流保持不变，输入功率均为  $2.45 \text{ W}$ ，通过测量输出端电压和电流，对两套谐振系统的传输效率进行计算，所得结果如图 10~图 12 所示。



(a) 中间层厚度与谐振频率的关系图

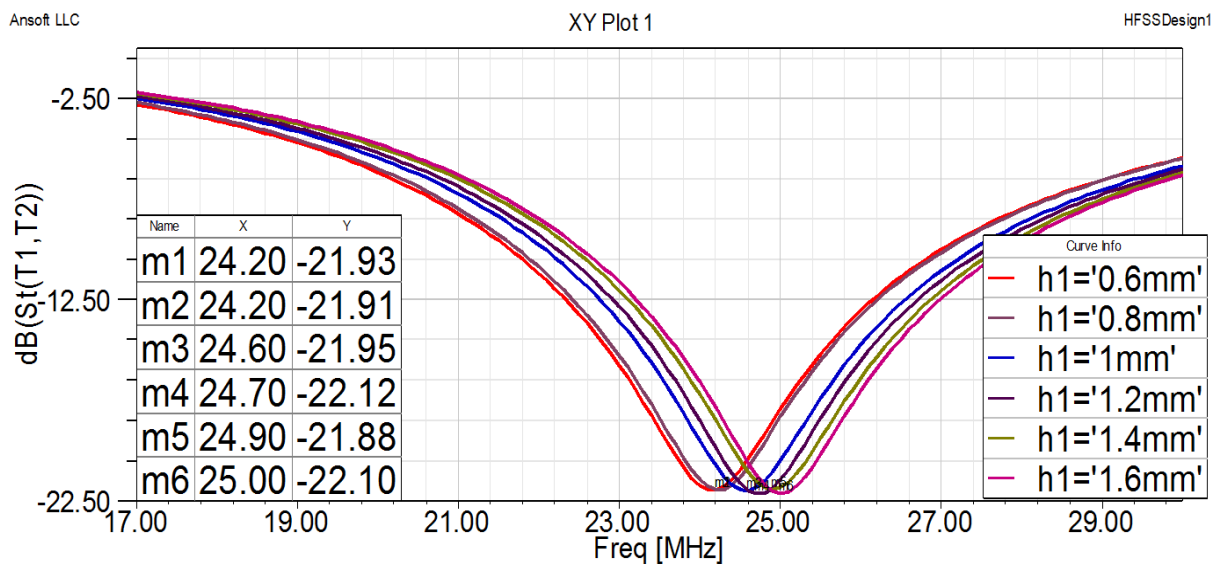


(b) 中间层厚度与谐振频率的折线图

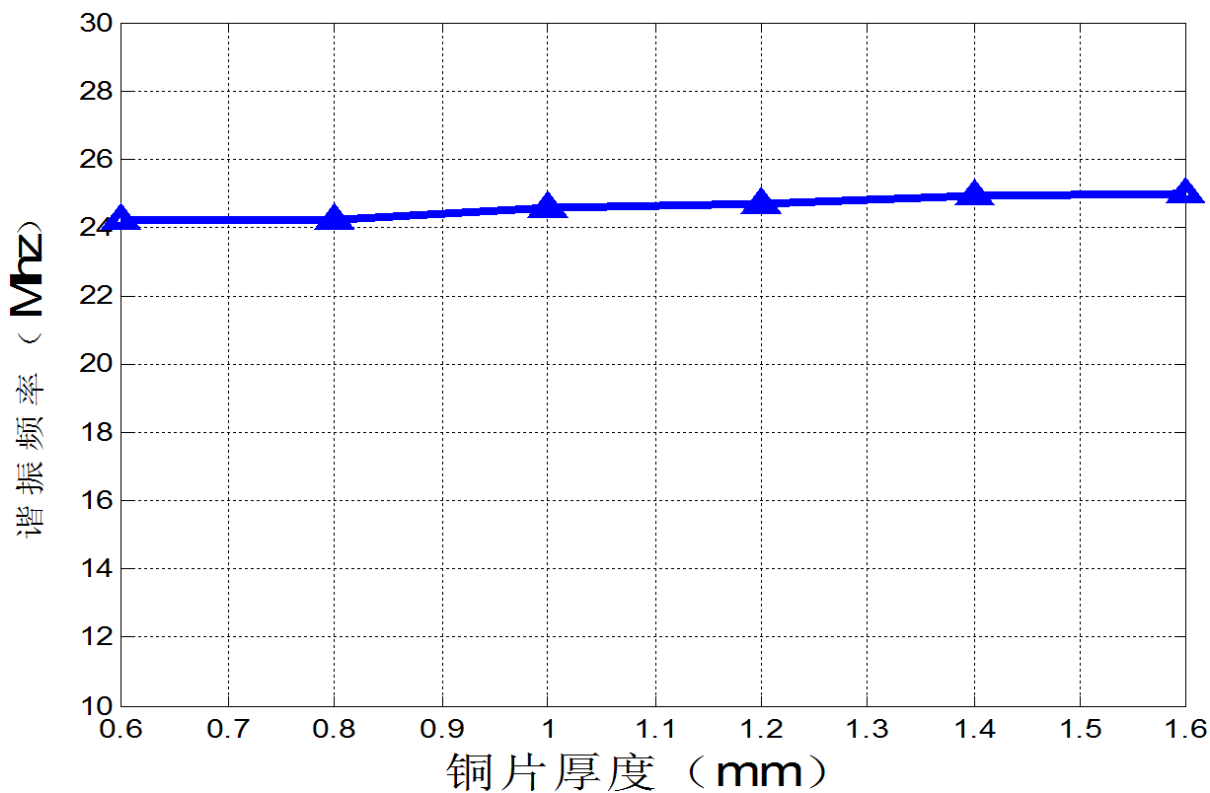
Figure 6. Resonant frequency varies with the thickness of the middle layer

图 6. 谐振频率随中间层厚度的变化关系

图 10 中，发射线圈固定不动，接收线圈垂直移动，移动距离为 1 cm~10 cm。可见随着两线圈垂直距离的增加，两系统的传输效率均明显下降，但在两系统位于同一垂直距离时，系统 2 的传输效率始终高于系统 1 的传输效率，且在垂直距离为 1 cm 时，系统 2 的传输效率高达 93%，说明大小匹配的能量传输系统传输效率更高。



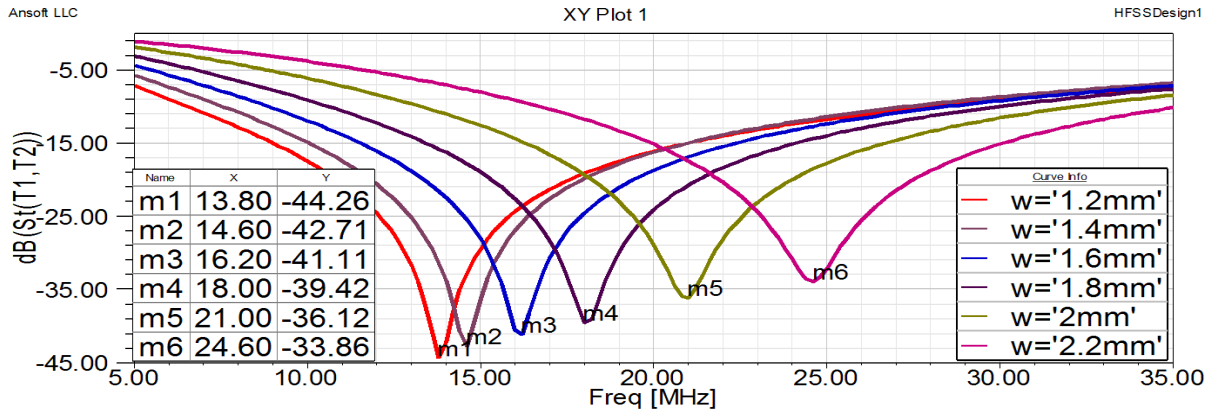
(a) 铜片厚度与谐振频率的关系图



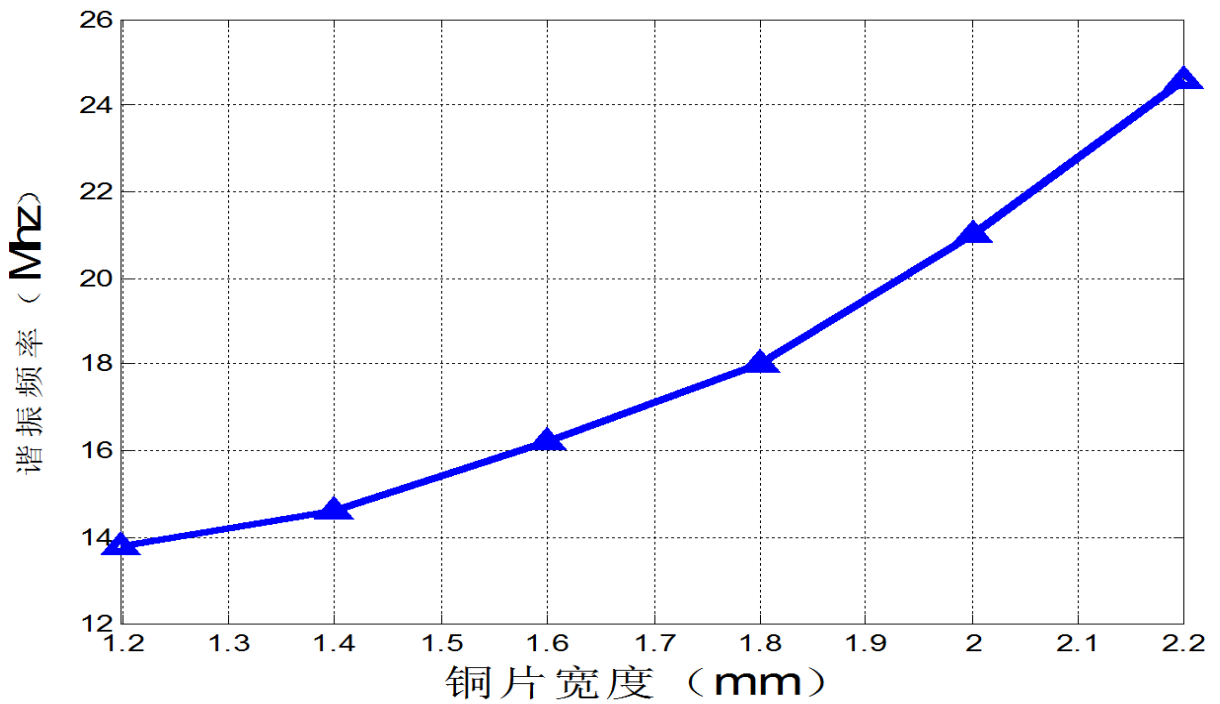
(b) 铜片厚度与谐振频率的折线图

**Figure 7.** Resonant frequency varies with the thickness of the copper**图 7.** 谐振频率随铜片厚度的变化关系

图 11 中, 发射线圈固定不动, 两线圈的垂直距离为 3 cm, 接收线圈水平移动, 移动距离为 0.5 cm~5 cm。可见随着两线圈水平距离的增加, 两系统的传输效率均下降, 但系统 2 的传输效率下降趋势更平缓, 且系统 2 的传输效率始终高于系统 1 的传输效率, 说明水平位移对系统 2 的传输效率影响较小, 大小匹配的能量传输系统具有更好的适应性。



(a) 铜片宽度与谐振频率的关系图



(b) 铜片宽度与谐振频率的折线图

Figure 8. Resonant frequency varies with the copper wire width

图 8. 谐振频率随铜片宽度的变化关系



(a) 小小匹配的谐振系统

(b) 大小匹配的谐振系统

Figure 9. System 1 and system 2

图 9. 谐振系统 1 与谐振系统 2



**Table 1.** The small coil parameters**表 1.** 小谐振线圈参数

正面导体层	形状	方形螺旋
	圈数	11
	铜片厚度	0.035 mm
	铜片宽度	1 mm
	铜片间距	0.2 mm
中间层	材料	环氧树脂板
	介质厚度	0.2 mm
	介质边长	50 mm
	孔洞边长	23.6 mm
背部导体层	形状	方形铜片
	数量	4
	铜片厚度	0.035 mm
	铜片长度	36.7 mm
	铜片宽度	13.2 mm

**Table 2.** The big coil parameters**表 2.** 大谐振线圈参数

正面导体层	形状	方形螺旋
	圈数	10
	铜片厚度	0.07 mm
	铜片宽度	3.8 mm
	铜片间距	0.5 mm
中间层	材料	环氧树脂板
	介质厚度	0.4 mm
	介质边长	100 mm
	孔洞边长	14 mm
背部导体层	形状	方形铜片
	数量	4
	铜片厚度	0.07 mm
	铜片长度	56.9 mm
	铜片宽度	43 mm

图 12 中，发射线圈固定不动，两线圈的垂直距离为 4 cm，接收线圈绕轴心在竖直面内旋转，旋转角度为  $0^\circ \sim 90^\circ$ 。可见随着两线圈旋转角度的增加，两系统的传输效率均明显下降，当旋转角度为  $90^\circ$  时，

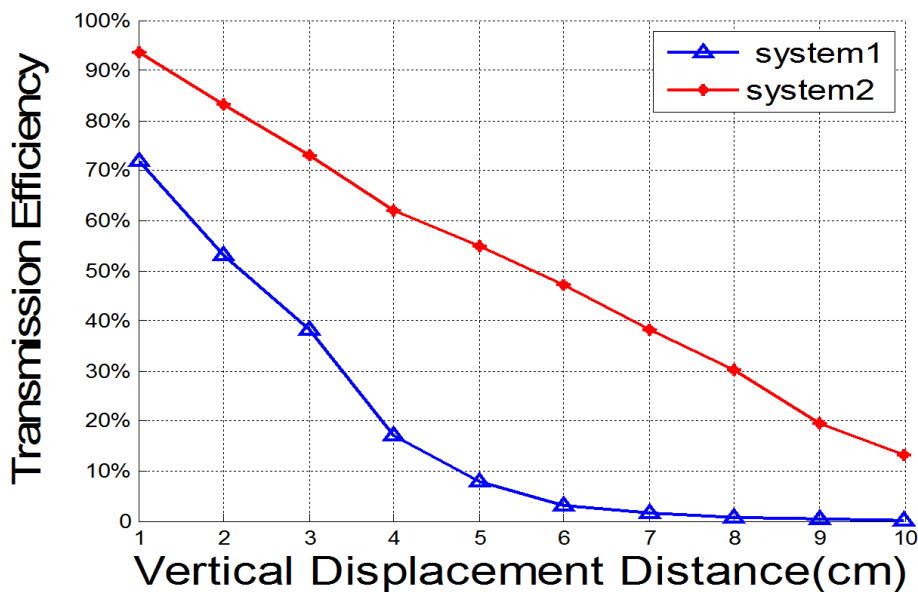


Figure 10. Transmission efficiency varies with the vertical displacement distance

图 10. 传输效率随垂直位移的变化关系

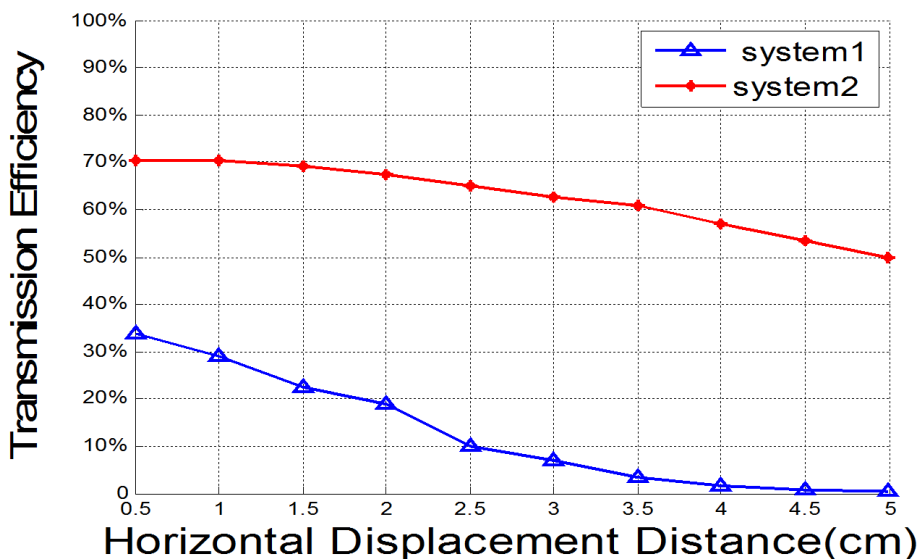


Figure 11. Transmission efficiency varies with the horizontal displacement distance

图 11. 传输效率随水平位移的变化关系

两系统传输效率基本为 0，但在旋转过程中，系统 2 的传输效率仍高于系统 1 的传输效率。

通过对比可知，在以上三种不同的情况下，大小匹配的谐振系统传输效率均高于小小匹配的谐振系统传输效率，说明大小匹配的谐振系统传输效率更高，传输性能更加稳定，适应性更强。

## 5. 结论

本文通过对谐振线圈设计参数的仿真分析，得到了影响谐振频率的关键设计参数，通过调节关键设计参数使系统工作在适当的频率，设计了传统的具有相同小谐振线圈的谐振系统及新型的具有大发射谐振线圈和小接收谐振线圈的谐振系统，其中小接收谐振线圈的体积仅为  $0.675 \text{ cm}^3$ ，能够满足可穿戴设备的体积需求。对两谐振系统的传输效率进行实验分析，结果表明在垂直位移，水平位移，旋转三种情况

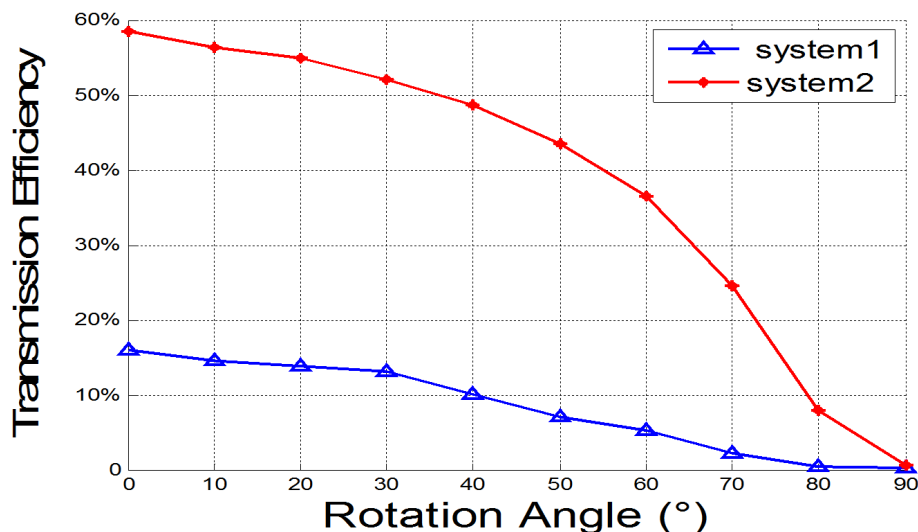


Figure 12. Transmission efficiency varies with the rotation angle

图 12. 传输效率随旋转角度的变化关系

下, 大小匹配的谐振系统传输效率均高于小小匹配的谐振系统传输效率, 且在垂直位移为 1 cm 时, 大小匹配的谐振系统传输效率高达 93%, 说明大小匹配的谐振系统传输效率更高, 传输性能更加稳定, 适应性更强, 更适合用于可穿戴设备。

## 基金项目

国家自然科学基金(No. 51407058)、河北省高等学校科学技术研究项目(No. QN2014072)资助。

## 参考文献 (References)

- [1] Patel, M.S., Asch, D.A. and Volpp, K.G. (2015) Wearable Devices as Facilitators Not Drivers of Health Behavior Change. *JAMA*, **313**, 459-460. <https://doi.org/10.1001/jama.2014.14781>
- [2] Case, M.A., Burwick, H.A., Volpp, K.G., et al. (2015) Accuracy of Smartphone Applications and Wearable Devices for Tracking Physical Activity Data. *JAMA*, **313**, 625-626. <https://doi.org/10.1001/jama.2014.17841>
- [3] Song, B.L. (2014) Current Status and Future Development Direction of Wearable Devices. *Silicon Valley*, **25**, 9-10.
- [4] Yu, N.X., Chen, D.Y. and Xiahou, S.J. (2012) The New Development of Wearable Computing Technology and Its Application. *Digicom*, **4**, 13-20.
- [5] Starner, T. (2001) The Challenges of Wearable Computing. *IEEE Micro*, **7**, 44-52. <https://doi.org/10.1109/40.946681>
- [6] 赵军, 徐桂芝, 张超, 等. 一种适用于磁耦合谐振无线能量传输系统的新型小尺寸谐振器的仿真与实验[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 208-214.
- [7] Yang, X.S., Zhao, J., Xu, G.Z., et al. (2016) The Experimental Research on a Small Size Magnetic Coupling Resonance Wireless Energy Transmission System. *Transactions of China Electro-Technical Society*, **31**, 13-17.
- [8] 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(7): 6-13.
- [9] Yang, Q.X., Xu, G.Z. and Jin, J.Q. (2010) Optimal Design of Energy Transmission System for Implantable Device Base on Witricity. *Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, 10-13.
- [10] Zhao, J., Yang, X.S., Xu, G.Z., et al. (2013) Research on Electromagnetic Environment to Chest via Witricity. *Transactions of China Eleetrotechnical Society*, **28**, 200-203.
- [11] 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.

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[jee@hanspub.org](mailto:jee@hanspub.org)