

文章编号:1671-251X(2015)12-0035-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.12.010

田子建,杜欣欣,樊京,等.不对称磁耦合谐振式无线输电系统中继线圈研究[J].工矿自动化,2015,41(12):35-39.

不对称磁耦合谐振式无线输电系统中继线圈研究

田子建¹, 杜欣欣¹, 樊京², 曹阳阳¹

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083;

2. 南阳理工学院电子与电气工程学院, 河南 南阳 473004)

摘要:针对磁耦合谐振式无线输电系统在实际应用中发射线圈与接收线圈难以对称、系统传输效率较低的问题,搭建了发射线圈大、接收线圈小的不对称系统模型,提出在发射线圈和接收线圈间增加中继线圈的方法来提高系统传输效率,并提出一种中继线圈与发射线圈同轴同平面的结构;通过仿真对比了该方法与增加发射线圈匝数方法对系统传输效率的影响,结果表明增加中继线圈的方法能更有效地提高系统传输效率,且体积更小;在实验室环境下搭建了系统实验平台,验证了理论分析和仿真结论的正确性。

关键词:无线输电;磁耦合谐振;中继线圈;同轴同平面

中图分类号:TD67 文献标志码:A 网络出版时间:2015-12-04 15:39

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20151204.1539.010.html>

Research on repeating coil of asymmetric magnetic coupling resonant wireless power transmission system

TIAN Zijian¹, DU Xinxin¹, FAN Jing², CAO Yangyang¹

(1. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Department of Electronics and Electrical Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

Abstract: For asymmetric transmitting coil and receiving coil of magnetic coupling resonant wireless power transmission system in practical application and low system transmission efficiency, an asymmetric system model was built whose transmitting coil was larger than receiving coil. A method for improving system transmission efficiency was proposed which was by increasing repeating coil between the transmitting coil and the receiving coil. A structure was proposed, namely the repeating coil and the transmitting coil were coaxial and in the same plane. The simulation was done to compare the method with a method of increasing turn number of the transmitter coil about influence on system transmission efficiency. The simulation results show that the former can improve the transmission efficiency more efficiently with a smaller volume. Experimental platform of the system was built in laboratory to verify correctness of theoretical analysis and simulation.

Key words: wireless power transmission; magnetic coupling resonant; repeating coil; coaxial and in the same plane

0 引言

磁耦合谐振式无线输电技术是目前无线输电技

术^[1]领域的研究热点,其以电磁场作为传输媒介,利用电磁场的近场理论,使发射线圈和接收线圈高度谐振,从而实现能量的高效传输^[2],且传输效率受障

收稿日期:2015-10-10;修回日期:2015-11-03;责任编辑:李明。

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51134024);国家自然科学基金资助项目(U1261125)。

作者简介:田子建(1964—),男,湖南望城人,教授,博士,博士研究生导师,研究方向为矿井监控与通信,E-mail:tianzj0726@126.com。

碍物影响不大^[3-4],电磁辐射也较微波方式小很多。研究发现,使用超材料可提高 WPT (Wireless Power Transmission, 无线能量传输) 系统的传输效率,原因是超材料可改善系统谐振线圈的阻抗特性,增强 2 个谐振线圈的耦合^[5]。随着研究的不断深入,专家学者相继开发了大功率无线电能传输装置,如利用磁耦合谐振技术对电动汽车、无尾家电、手机等进行无线充电^[6-10]。目前磁耦合谐振式无线输电系统实验采用的发射线圈和接收线圈结构完全相同,以保证较高的传输效率,但在实际应用中,发射装置和接收装置很难达到完全对称,如煤矿井下密闭空间内,线圈尺寸受限,特别是在防爆壳中的接收线圈尺寸要求很小,因此有必要对不对称情况下的系统性能进行研究并进行优化。

本文针对发射线圈大、接收线圈小的不对称磁耦合谐振式无线输电系统进行研究,通过在发射线圈和接收线圈间增加中继线圈的方法提高系统传输效率,并通过理论计算和仿真找到中继线圈的最佳位置和最佳尺寸,使系统达到较高的传输效率。

1 理论分析

1.1 系统原理及结构分析

图 1 为不对称磁耦合谐振式无线输电系统结构,发射线圈比接收线圈尺寸大。 U_s 为系统等效电压源, R_s 为电压源内阻, R_L 为负载电阻。

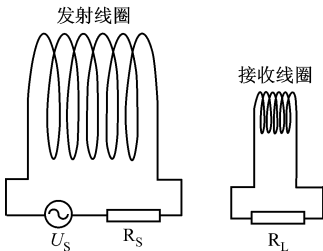


图 1 不对称磁耦合谐振式无线输电系统结构

由于发射线圈和接收线圈尺寸不同,系统传输效率会比相同尺寸时小。本文提出在发射线圈和接收线圈间增加一个中继线圈,对源级电流进行放大,进而提高传输效率。加入中继线圈的磁耦合谐振式无线输电系统结构和等效电路如图 2 所示。发射端和接收端均采用串联结构。 M_{12} 为发射线圈和中继线圈的互感系数; M_{23} 为中继线圈和接收线圈的互感系数;发射线圈和接收线圈的互感系数相对于 M_{12} 和 M_{23} 来说很小,可忽略不计; R_1, R_2, R_3 分别为发射线圈、中继线圈和接收线圈的等效内阻; C_1 ,

C_2, C_3 分别为 3 个线圈的外接电容; L_1, L_2, L_3 分别为 3 个线圈的自感。

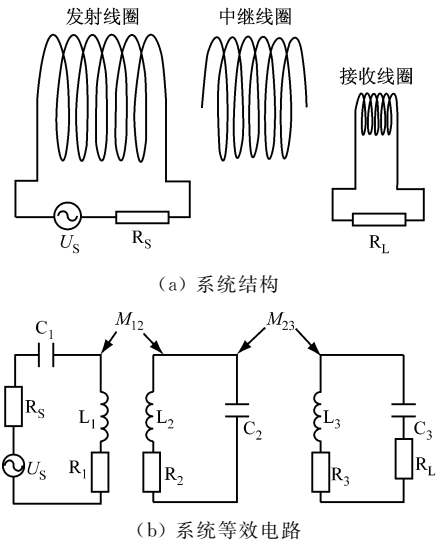


图 2 加入中继线圈的磁耦合谐振式无线输电系统结构和等效电路

线圈的等效内阻为

$$R = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \frac{l}{4\pi r} \quad (1)$$

式中: ω 为系统角频率; μ_0 为真空磁导率; σ 为铜的电导率; l 为线圈长度; r 为铜线半径。

发射线圈、中继线圈、接收线圈等效阻抗分别为

$$Z_{11} = R_s + R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (2)$$

$$Z_{22} = R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \quad (3)$$

$$Z_{33} = R_3 + j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega C_3} + R_L \quad (4)$$

根据基尔霍夫定律,可得到以下方程:

$$Z_{11} i_1 + j\omega M_{12} i_2 = U_s \quad (5)$$

$$Z_{22} i_2 + j\omega M_{12} i_1 + j\omega M_{23} i_3 = 0 \quad (6)$$

$$Z_{33} i_3 + j\omega M_{23} i_2 = 0 \quad (7)$$

式中: i_1, i_2, i_3 分别为发射线圈、中继线圈和接收线圈电流。

系统工作在谐振状态下,满足式(8)~式(10):

$$\omega L_1 = \frac{1}{\omega C_1} \quad (8)$$

$$\omega L_2 = \frac{1}{\omega C_2} \quad (9)$$

$$\omega L_3 = \frac{1}{\omega C_3} \quad (10)$$

可求得发射线圈、中继线圈和接收线圈的电流分别为

$$i_1 = \frac{U_s [\omega^2 M_{23}^2 + R_2 (R_3 + R_L)]}{\omega^2 M_{23}^2 (R_1 + R_s) + \omega^2 M_{12}^2 (R_3 + R_L) + (R_1 + R_s) R_2 (R_3 + R_L)} \quad (11)$$

$$i_2 = \frac{\omega M_{12}(R_3 + R_L)R_S}{\omega^2 M_{23}^2(R_1 + R_S) + \omega^2 M_{12}^2(R_3 + R_L) + (R_1 + R_S)R_2(R_3 + R_L)} \quad (12)$$

$$i_3 = \frac{\omega^2 M_{12} M_{23} U_S}{\omega^2 M_{23}^2(R_1 + R_S) + \omega^2 M_{12}^2(R_3 + R_L) + (R_1 + R_S)R_2(R_3 + R_L)} \quad (13)$$

1.2 互感分析

互感系数由线圈的几何形状、尺寸、匝数以及线圈间的相对位置决定^[11-15]。设发射线圈、中继线圈、接收线圈的半径分别为 a, b, c , 发射线圈与接收线圈的间距为 D , 发射线圈与中继线圈的间距为 d , 则中继线圈与接收线圈的间距为 $D-d$ 。发射线圈与中继线圈间的互感为

$$M_{12} = \mu_0 \sqrt{ab} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(2\sin^2\theta - 1)d\theta}{\sqrt{1 - k_1^2 \sin^2\theta}} \quad (14)$$

$$k_1^2 = \frac{4ab}{d^2 + (a+b)^2} \quad (15)$$

式中: θ 为发射线圈和接收线圈各自所取增量的方向向量间的夹角。

中继线圈与接收线圈间的互感为

$$M_{23} = \mu_0 \sqrt{bc} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(2\sin^2\theta - 1)d\theta}{\sqrt{1 - k_2^2 \sin^2\theta}} \quad (16)$$

$$k_2^2 = \frac{4bc}{(D-d)^2 + (b+c)^2} \quad (17)$$

1.3 最大功率与传输效率分析

当 $\omega = \omega_0$ (ω_0 为系统共振时的角频率) 时, 接收线圈电流为

$$i_3 = \omega_0^2 M_{12} M_{23} U_S [\omega_0^2 M_{23}^2(R_1 + R_S) + \omega_0^2 M_{12}^2(R_3 + R_L) + (R_1 + R_S)R_2(R_3 + R_L)]^{-1} \quad (18)$$

当满足式(19)时, 接收线圈电流如式(20)所示。

$$(R_1 + R_S)R_2(R_3 + R_L) \ll \omega_0^2 M_{23}^2(R_1 + R_S) + \omega_0^2 M_{12}^2(R_3 + R_L) \quad (19)$$

$$i_3 \approx \frac{\omega_0^2 M_{12} M_{23} U_S}{\omega_0^2 M_{23}^2(R_1 + R_S) + \omega_0^2 M_{12}^2(R_3 + R_L)} = \frac{M_{12} M_{23} U_S}{M_{23}^2(R_1 + R_S) + M_{12}^2(R_3 + R_L)} \leq \frac{U_S}{2\sqrt{(R_1 + R_S)(R_3 + R_L)}} \quad (20)$$

当 $M_{23}^2(R_1 + R_S) = M_{12}^2(R_3 + R_L)$ 时, 等式成立, 即接收线圈最大电流为

$$i_{3\max} \approx \frac{U_S}{2\sqrt{(R_1 + R_S)(R_3 + R_L)}} \quad (21)$$

接收线圈最大功率为

$$P_{\max} = i_{3\max}^2 R_L \approx \frac{U_S^2 R_L}{8(R_1 + R_S)(R_3 + R_L)} \quad (22)$$

传输效率为

$$\eta = \frac{R_L i_3^2}{R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2 + (R_3 + R_L) i_3^2} \quad (23)$$

2 系统仿真分析

2.1 加入中继线圈的仿真分析

仿真参数设置: 发射线圈半径 $a = 30$ cm, 接收线圈半径 $c = 10$ cm, 匝距 $p_0 = 2$ cm, 发射线圈和接收线圈的匝数 $N = 8$ 匝, 所有铜线半径 $r = 3$ mm, 谐振线圈的谐振频率为 10.6 MHz, 激励源频率 $f_0 = 10.6$ MHz, 发射线圈与接收线圈间距 $D = 1$ m。

首先设置中继线圈的半径 $b = 30$ cm, D 固定不变, 改变发射线圈与中继线圈的间距 d , 得到系统传输效率 η 与 d 之间的关系曲线, 如图 3 所示。

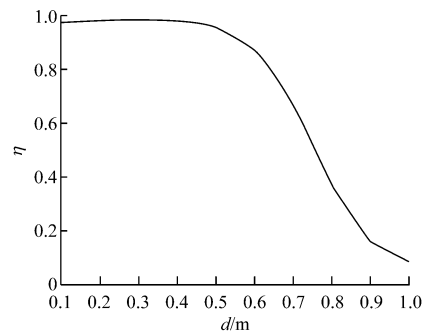


图 3 系统传输效率 η 和发射线圈与中继线圈间距 d 的关系曲线

从图 3 可看出, 当发射线圈与中继线圈的间距 d 较小时, 系统传输效率较高, 即此时系统传输效率对 d 的变化不敏感; 当 d 较大时, 系统传输效率急剧下降。鉴此, 本文采用发射线圈和中继线圈同轴同平面的空间结构, 如图 4 所示。该结构不仅能提高系统传输效率, 而且在很大程度上节省了空间尺寸, 更有利于实际应用。

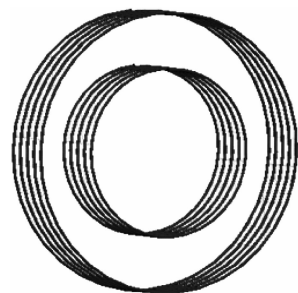


图 4 发射线圈和中继线圈同轴同平面的空间结构

发射线圈和中继线圈同轴同平面的空间结构相当于式(15)和式(17)中的 $d = 0$, 此时改变中继线圈的半径 b , 分析 b 对系统传输效率的影响, 结果如图 5 所示。

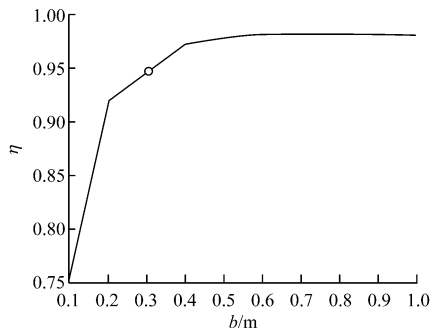


图 5 系统传输效率 η 与中继线圈半径 b 的关系曲线

中继线圈半径 $b=0.3\text{ m}$, 即中继线圈与发射线圈半径相同的情况不存在, 所以不讨论该种情况。从图 5 可看出, 中继线圈半径 $b<0.5\text{ m}$ 时, 随着 b 增大, 传输效率不断增大; $b>0.5\text{ m}$ 时, 随着 b 不断增大, 传输效率基本不变。可见在发射线圈和中继线圈同轴同平面的条件下, $b=0.5\text{ m}$ 时可达到较高的传输效率。

固定中继线圈半径 $b=0.5\text{ m}$, 在发射线圈和中继线圈同轴同平面的条件下, 观察和分析中继线圈匝数 N' 对系统传输效率的影响, 结果如图 6 所示。

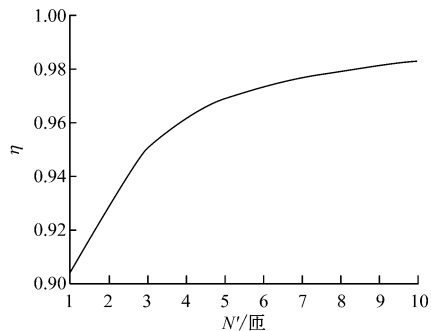


图 6 传输效率 η 与中继线圈匝数 N' 的关系曲线

从图 6 可看出, 中继线圈匝数越多, 系统传输效率越大。但线圈匝数过多会影响系统的方便性, 不利于实际应用。本文中系统中继线圈选为 8 匝, 使系统既能达到较高的传输效率, 又不会体积过大。

2.2 增加发射线圈匝数与插入中继线圈的方法比较

通过研究和查阅资料发现, 增加发射线圈匝数能够提高系统传输效率。为了比较该方法与插入中继线圈方法的性能, 在与前文相同的系统中只增加发射线圈匝数而不插入中继线圈, 得到系统传输效率 η 与发射线圈匝数 N 的关系, 如图 7 所示。

从图 7 可看出, 增加发射线圈匝数能够提高系统传输效率, 但与插入中继线圈的方法相比, 传输效率仍较小, 且发射线圈匝数过多会使系统体积过大, 影响其方便性。

为了更直观地比较 2 种方法的优缺点, 以频率

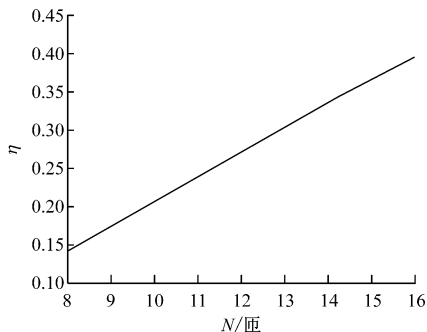


图 7 系统传输效率 η 与发射线圈匝数 N 的关系曲线为变量, 观察 2 种系统模型的传输效率随频率 f 的变化规律。设置中继线圈半径为 0.5 m , 匝数为 8 匝, 与发射线圈同轴同平面; 在增加发射线圈的系统模型中, 设置发射线圈匝数为 16 匝, 其余参数设置与 2.1 中相同。仿真结果如图 8 所示。

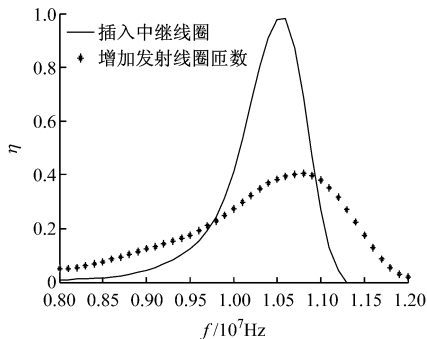


图 8 插入中继线圈与增加发射线圈匝数后系统传输效率对比

从图 8 可看出, 与增加发射线圈匝数的方法相比, 插入与发射线圈同轴同平面的中继线圈的方法大大提高了系统传输效率, 且体积更小, 更有利于实际应用。

3 实验验证

为了验证理论和仿真分析的正确性, 搭建了不对称磁耦合谐振式无线输电系统实验模型。系统实验仪器主要包括发射线圈、中继线圈、接收线圈、电路板、信号发生器、功率放大器、示波器、频谱分析仪、功率计、矢量网络分析仪、阻抗分析仪等。发射线圈、接收线圈半径分别为 $a=30\text{ cm}$, $c=10\text{ cm}$, 匝距 $p_0=2\text{ cm}$, 匝数 $N=8$ 匝, 所有铜线半径 $r=3\text{ mm}$, 激励源频率 $f_0=10.6\text{ MHz}$, 发射线圈与接收线圈间距 $D=1\text{ m}$ 。发射线圈、接收线圈与电容构成 LC 串联谐振电路, 使线圈谐振发生在 10.6 MHz 附近。图 9 为插入与发射线圈同轴同平面的中继线圈的结构模型。

利用信号发生器产生 10.6 MHz 正弦波信号, 经 R&SBBA100 功率放大器放大后加载到源线圈。为消除源线圈对输入能量的反射, 事先将源线圈接

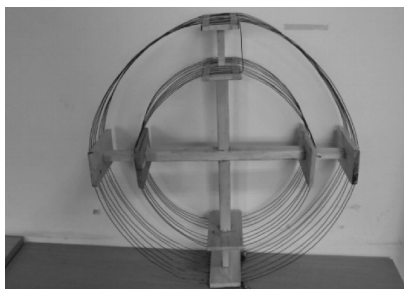


图9 与发射线圈同轴同平面的中继线圈的结构模型

到矢量 R&S ZNB 网络分析仪上进行端口特性测试,得到源线圈的 S 参数和反射系数,由此得到输入功率。将负载线圈连接功率计,通过功率计测量输出功率。输出功率与输入功率的比值即系统传输效率。图 10 为实验测量值与仿真值对比。

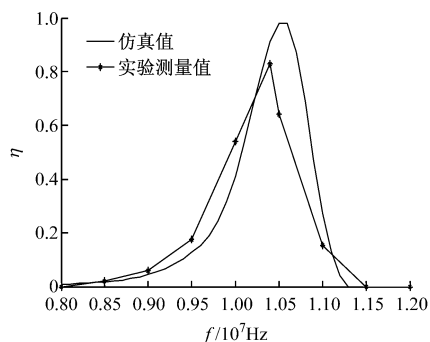


图 10 实验测量值与仿真值对比

从图 10 可看出,仿真与实验数据基本吻合,且与理论分析结果一致,证明仿真结论是可靠的,在不对称磁耦合谐振式无线输电系统中,插入与发射线圈同轴同平面的中继线圈的方法能够提高系统传输效率。

4 结语

通过对发射线圈大、接收线圈小的不对称磁耦合谐振式无线输电系统进行分析,提出在系统中加入中继线圈来提高其传输效率。利用等效电路理论分析中继线圈的位置、尺寸以及匝数等因素对系统传输效率的影响,并将其与增加发射线圈匝数的方法进行比较,得到以下结论:

(1) 当中继线圈距离发射线圈较近时,系统传输效率较高;距离变远时,系统传输效率急剧下降。提出的中继线圈与发射线圈同轴同平面的结构不仅提高了系统传输效率,而且在很大程度上节省了空间尺寸,更利于实际应用。

(2) 将插入中继线圈与增加发射线圈匝数 2 种方法进行对比,发现插入与发射线圈同轴同平面的中继线圈的方法更具有优越性,系统传输效率更大,体积更小,在实际应用中更加方便。

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(5834): 83-86.
- [2] 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.
- [3] 田子建,杜欣欣,朱元忠,等. 障碍物对磁耦合谐振无线输电系统传输效率的影响[J]. *工矿自动化*, 2015, 41(1): 49-53.
- [4] 陈琛,黄学良,孙文慧,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.
- [5] 田子建,陈健,樊京,等. 基于磁负超材料的无线电能传输系统[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(12): 1-6.
- [6] LEE S H, LORENZ R D. Development and validation of model for 95% efficiency 220-W wireless power transfer over a 30-cm air gap [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, 47(6): 2495-2504.
- [7] KIM S, HO J S, CHEN L Y, *et al.* Wireless power transfer to a cardiac implant[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(7): 073701-073704.
- [8] MUSAVI F, EDINGTON M, EDERLE W. Wireless power transfer: a survey of EV battery charging technologies[C]//*IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Raleigh*, 2012: 1804-1810.
- [9] 张剑韬,朱春波,陈清泉. 应用于无尾家电的非接触式无线能量传输技术[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(9): 33-37.
- [10] YU C, LU R, CUI S, *et al.* Research on resonance based wireless energy transfer device for small mobile equipment[C]//*International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing*, 2011: 1-3.
- [11] 史继翠,谭平安,易灵芝,等. 便携式电子产品的无线电能传输技术[J]. *电源技术*, 2014, 38(11): 2155-2158.
- [12] 谭林林,黄学良,黄辉,等. 基于频率控制的磁耦合共振式无线电力传输系统传输效率优化控制[J]. *中国科学:技术科学*, 2011, 41(7): 913-919.
- [13] 左晓旺,刘淑静,马春林,等. 两共轴平行圆线圈互感系数的讨论[J]. *淮阴师范学院学报:自然科学版*, 2010, 9(5): 414-416.
- [14] 陈俊斌,朱霞. 任意同轴圆线圈互感系数的近似解析公式[J]. *后勤工程学院学报*, 2010, 26(5): 86-91.
- [15] KARALIS A, SOLJACIC M, JOANNOPOULOS J D. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer[J]. *Annals of Physics*, 2008, 323(1): 34-48.