

WRSNs 中接收线圈间互感对传能的影响分析

王 旭 林志贵 刘晓峰 孟德军

(天津工业大学电子与信息工程学院 天津 300387)

(天津市光电检测技术与系统重点实验室 天津 300387)

摘 要 从磁耦合谐振电路模型原理出发,理论分析了接收线圈间互感系数对接收节点能量传输效率和功率的影响,进一步分析了影响接收线圈间互感系数的影响因子,其分别为接收线圈间距离、高度和角度,并建立了 3 个影响因子与节点能量传输效率和功率之间的关系。分析了基于磁耦合谐振 WRSNs 一对二的充电过程中,当接收线圈位于同侧时,3 个影响因子对接收线圈间互感系数、节点能量传输效率和功率的影响关系。结果表明两个接收线圈相对距离越近、夹角和高度越小,其间互感越大,对节点能量接收的相互抑制性越强。

关键词 无线可充电传感网络(WRSNs),磁耦合传能,一对多充电方式,互感

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Analysis of Influence of Mutual Inductances on Energy Transmitting Between Receiving Coil in WRSNs

WANG Xu LIN Zhi-gui LIU Xiao-feng MENG De-jun

(School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

(Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and Systems, Tianjin 300387, China)

Abstract Based on the principle of coupled magnetic resonant circuit model, this paper theoretically analyzed the influence of mutual inductance between receiving coils on the energy transmitting efficiency and power of receiving nodes. The influence factors affecting the mutual inductance between the receiving coils are the distance, height and angle between the receiving coils. The relationship between three factors and energy transmitting efficiency and power of the node is established and theoretically analyzed. Through the research of the one-to-two charging process of the wireless rechargeable sensor networks based on magnetic coupling resonance technology, the relationships between the three factors and the mutual inductance of the receiving coil, the energy transmitting efficiency of the node and the power are analyzed. The results show that when the receiving coils are on the same side, the closer the relative distance between the two receiving coils is, the greater the mutual inductance is, and the stronger of the mutual inhibition energy reception of the node is.

Keywords Wireless rechargeable sensor networks (WRSNs), Coupled magnetic energy transmitting, One-to-many charging method, Mutual inductance

自从 2007 年 Kurs 等^[1]利用磁耦合谐振技术成功实现距离 2 m 外 60 W 灯泡供电以来,一些学者^[2-3]将磁耦合谐振技术与无线传感网络结合,通过一对一充电方式,构建基于磁耦合谐振的无线可充电传感网络(WRSNs),实现网络节点能量的补充。2010 年, Kurs 等^[4]基于磁耦合谐振实现了单个发射线圈为 2 个接收线圈同时充电,实验结果表明:单个线圈的传输效率不高,但系统总体能量的传输效率得到提高。Kim 等^[5]利用耦合模理论,研究了多个负载线圈的能量传输情况,发现多个接收线圈的总体能量传输效率高于单个接收线圈;随着接收线圈数量增加,系统的整体效率趋于饱和。这些实验结果引起一些学者^[6-7]的注意,他们将其应用到 WRSNs 中实现节点一对多充电。

在一对多的 WRSNs 中,目前主要研究携带能量的可移

动节点(MC)的路径规划或充电调度模型,如 Khelladi 等^[6]定义每个节点有一个圆形的能量接收区域,每当 MC 到达一个节点集合时,根据集合内节点的不同距离计算出各节点的圆形能量接收区域的相交区域,为该区域内所有节点同时进行充电。Shi 等^[7]定义 MC 的充电圆半径为 D ,将圆内接边长为 D 的正六边形作为一个充电单元,MC 能够为六边形里面所有节点同时进行充电。文献[6-7]中的能量分配模型都是基于距离因素进行仿真,没有考虑一对多充电过程中节点的不同距离、高度或角度对能量均衡分配的影响,因为节点间的距离、高度和角度影响了线圈间互感。

实际上,一对多磁耦合谐振式无线能量传输时,能量传输效率不仅受发射线圈和耦合线圈互感的影响,还会受到接收线圈之间互感的影响。Ahn 等^[8]通过单发射多接收端实验分

析发现,接收端互感直接影响谐振频率。张波等^[9]针对两个接收端情况,分别研究接收线圈与发射线圈同时时系统的输出功率和传输效率的情况。当两个接收线圈位于发射线圈两侧且3个线圈同轴放置的时候,在固有谐振频率处,系统的输出功率和效率最大,即不受接收线圈之间互感的影响。当两个接收线圈位于发射线圈同侧同轴放置时,受接收线圈之间互感的影响,系统的频率会产生漂移,效率最大点并不是系统的固有谐振频率点。

对于同轴放置的圆型密绕线圈的互感量 M 、耦合系数 K 的计算,文献[10-11]通过不同的方法,推导出计算任意两共轴圆线圈间互感系数的函数表达式。对于空间中任意位置的两个线圈的互感,罗焱等^[12]推导了斜轴空心矩形截面圆柱线圈之间的互感计算;Babic^[13]使用 Grover 公式计算两个位于同一平面上的倾斜轴的密绕型圆形线圈之间的互感。这些互感计算方法比较复杂。

本文依据电路理论,分析一对多磁耦合谐振无线能量传输过程中,WRSNs 节点接收线圈间互感对能量传输性能的影响,推导出节点接收线圈间互感和传输效率之间的理论公式,以简化计算过程;通过实验进一步验证节点接收线圈间互感对能量传输的影响规律,为 WRSNs 中一对多能量传输的建模、分配提供理论依据。

1 一对二磁耦合谐振电路模型理论分析

一对二磁耦合谐振单发送端双接收端等效电路如图1所示,AC表示发送端电源, L_{TX} 和 L_{RX} 分别是发射线圈和接收线圈的等效电感,发送端等效电容为 C_1 ,两个接收端电路参数相同,等效电容为 C_2 。假定发射线圈与单个接收线圈间耦合系数为 k ,两个接收线圈的耦合系数为 k_{RX} ;发送端固有频率 $\omega_{TX} = 1/\sqrt{L_{TX}C_1}$,接收端固有频率 $\omega_{RX} = 1/\sqrt{L_{RX}C_2}$ 。

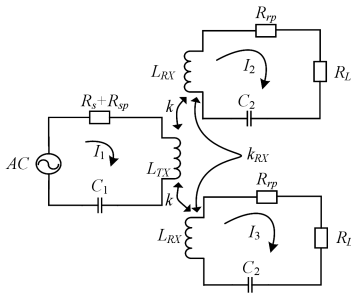


图1 基于磁耦合谐振的单发双收等效电路

接收线圈间相互耦合产生互感,使接收端达到最大功率以及相应地驱动频率发生变化。设发送端的驱动频率 ω ,发射线圈的等效回路电流 I_1 ,接收线圈的等效回路电流为 I_2 和 I_3 ,则发射线圈和接收线圈基尔霍夫电压回路(KVL)方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} \left(\frac{R_{TX}}{j\omega L_{TX}} + 1 - \frac{\omega_{TX}^2}{\omega^2} \right) I_1 + kI_2 \sqrt{\frac{L_{RX}}{L_{TX}}} + kI_3 \sqrt{\frac{L_{RX}}{L_{TX}}} = \frac{V_s}{j\omega L_{TX}} \\ kI_1 \sqrt{\frac{L_{TX}}{L_{RX}}} + \left(\frac{R_{RX}}{j\omega L_{RX}} + 1 - \frac{\omega_{RX}^2}{\omega^2} \right) I_2 + k_{RX} I_3 = 0 \\ kI_1 \sqrt{\frac{L_{TX}}{L_{RX}}} + \left(\frac{R_{RX}}{j\omega L_{RX}} + 1 - \frac{\omega_{RX}^2}{\omega^2} \right) I_3 + k_{RX} I_2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, V_s 是发送端交流电压有效值, $R_{TX} = R_s + R_{sp}$, $R_{RX} = R_L + R_{rp}$ 。

将 I_{RX} 表示为两相同接收端电路的电流,相应地, $I_{RX} = I_2 = I_3$, I_{RX}/I_1 计算如下:

$$\frac{I_{RX}}{I_1} = - \frac{k \sqrt{L_{TX}/L_{RX}}}{\frac{R_{RX}}{j\omega L_{RX}} + \left((1+k_{RX}) - \frac{\omega_{RX}^2}{\omega^2} \right)} \quad (2)$$

$\left| \frac{I_{RX}}{I_1} \right|$ 决定决定了传能效率,由式(2)可知,当传能效率最大时,驱动频率为:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\sqrt{2} L_{RX} \omega_{RX}^2}{\sqrt{(1+k_{RX}) 2L_{RX}^2 \omega_{RX}^2 - R_{RX}^2}} \\ &\approx \frac{\omega_{RX}}{\sqrt{1+k_{RX}}} \end{aligned} \quad (3)$$

随着两个接收线圈的耦合变强,驱动频率 ω 随之降低。

设品质因数 $Q_{RX} = \frac{\omega_{RX}}{R_{RX}}$,将式(3)代入式(2),得到:

$$\frac{I_{RX}}{I_1} = -jk \frac{Q_{RX}}{\sqrt{1+k_{RX}}} \sqrt{L_{TX} \cdot L_{RX}} \quad (4)$$

式(4)表明多个接收线圈间的耦合将降低传能效率的峰值。在两个接收线圈的情况下,单节点接收端的接收功率为:

$$P_{RX} = R_L |I_2|^2 = R_L |I_3|^2 \quad (5)$$

发送端发送功率为:

$$P_{TX} = (R_s + R_{sp}) |I_1|^2 \quad (6)$$

系统传能效率可以被定义为:

$$\eta = \frac{R_L |I_2|^2 + R_L |I_3|^2}{(R_s + R_{sp}) |I_1|^2} \quad (7)$$

将式(4)代入式(7)中,得到接收端耦合系数 k_{RX} 与传能效率的关系:

$$\eta = \frac{2R_L (jkQ_{RX})^2 L_{TX} \cdot L_{RX}}{(1+k_{RX})(R_s + R_{sp})} \quad (8)$$

从式(8)可知,基于磁耦合谐振的无线传能效率与多接收端电感线圈间的耦合系数 k_{RX} 有直接关系。当线圈参数及负载 R_L 一定,磁耦合谐振,接收线圈之间的耦合系数 k_{RX} 直接影响传能效率。当 k_{RX} 逐渐增大时,传能效率逐渐变小。

已知空间中一对线圈的互感 M 和耦合系数 k_{RX} 的关系为:

$$k_{RX} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (9)$$

其中, L_1, L_2 分别为两个线圈自感。当线圈是空间中一对密绕圆形线圈时,自感与线圈的线径、匝数、线圈半径等参数有关;当这些参数固定,相应地自感 L_1 和 L_2 固定,互感 M 与耦合系数 k_{RX} 呈正相关。将式(9)代入式(8)中,得:

$$\eta = \frac{2R_L (jkQ_{RX})^2 L_{TX} \cdot L_{RX} \sqrt{L_1 L_2}}{(\sqrt{L_1 L_2} + M)(R_s + R_{sp})} \quad (10)$$

通过式(10)得出:多接收端电感线圈间的互感 M 与传能效率成反比;接收端线圈间互感越大,传能效率越低。

互感 M 通过磁通量来计算,文献[10-11]采用椭圆积分法,推导出任意两共轴圆线圈间互感系数的函数表达式,虽然准确但不便于计算。因此,本文假定磁场恒定,磁通量均匀分布且无漏磁现象,当完全相同的两线圈 L_1, L_2 同轴且重叠放置时,其匝数为 n ,半径为 r ,两线圈水平距离 x 为 D ,则两线圈互感 M 可简化为:

$$M \approx \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\mu_0 r^4 n^2}{D^3} \quad (11)$$

其中, μ_0 为真空磁导率, r 为线圈半径, n 为线圈匝数, D 为传输距离。当 μ_0, r, n 参数均为定值, M 与 D 的三次方成反比; 当 D 逐渐增大时, M 减小, 传能效率逐渐变小。

线圈 L_1, L_2 不同轴或不重叠放置时, 互感 M 不仅受线圈间距离影响, 也受线圈间相对位置的影响。不重叠即线圈之间存在角度差, 不同轴即存在高度差。

接收线圈在发射线圈上的投影面积决定了其接收的磁通量, 影响了互感值。当两个线圈存在一定的位置关系时, 互感 M 应与比例系数(投影面积与发射线圈面积的比值)有关。当两个线圈同轴且重叠放置时, 比例系数为 1。当两个圆形线圈高度相同, 但线圈轴线之间有一夹角 θ 时, 相应的比例系数为 $\cos \theta$ 。因此高度相同, 同轴但存在一定夹角 θ 的两圆形线圈的互感为:

$$M \approx \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\mu_0 r^4 n^2}{D^3} \cdot \cos \theta \quad (12)$$

其中, θ 为线圈轴线夹角, 当 $\theta=0$ 时 M 最大; 当 $\theta=\pi/2$ 时, $M=0$ 。

当两个线圈平行($\theta=0$), 但两线圈有一高度差 h 时, 其互感同样应乘以比例系数, 如图 2 所示, 即两圆重叠面积占发射线圈圆面积的比例为 $S/\pi r^2$, S 表示两个圆形线圈的重叠面积:

$$S = 2r^2 \cos^{-1} \left(\frac{h}{2r} \right) - \frac{1}{2} h \sqrt{4r^2 - h^2} \quad (13)$$

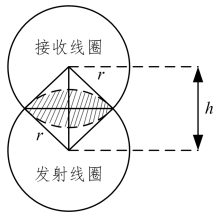


图 2 接收线圈在发射线圈平面的投影

因此, 相互平行但不同轴, 存在一定高度差 h 的两圆形线圈的互感为:

$$M \approx \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\mu_0 r^4 n^2}{D^3} \cdot \frac{S}{\pi r^2} \quad (14)$$

其中, $S/\pi r^2$ 定义为高度比例系数。当 $h=0$ 时 M 最大; 当 $h=2r$ 时, $M=0$ 。

当空间中两个线圈距离为 D , 且存在角度差 θ 和高度差 h 时, 任意两圆形线圈不平行不同轴时的互感 M 为:

$$M \approx \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\mu_0 r^4 n^2}{D^3} \cdot \frac{S}{\pi r^2} \cdot \cos \theta \quad (15)$$

通过式(15)看出, 距离、角度、高度因素与互感 M 直接关系, 结合式(10)可知, 这些因素与传能效率直接关系。

2 接收线圈间互感对传能影响的实验分析

2.1 一对二磁耦合无线传能实验平台

基于磁耦合的 WRSNs 一对二传能实验平台如图 3 所示。各模块电路参数如下: 发射端和接收端电路参数相同, 线圈匝数为 15、线圈电感值 78 μH 、线圈直径 19 cm、电容 470 nF, 谐振频率 83 kHz。发射端采用 LC 串联结构, 电源电压为 +8 V、电源电流 1 A; 接收端采用 LC 并联结构, 对电池充电。发射端线圈发送能量, 两个接收端各自搭载 840 mAh 可充电锂电池, 通过线圈接收能量为其补充能量。

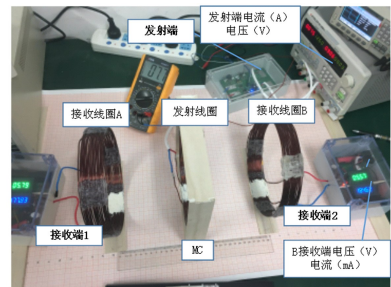


图 3 基于磁耦合的 WRSNs 一对二传能实验平台

在 WRSNs 磁耦合谐振一对二充电实验平台的基础上, 将两个 Sensor 节点接收线圈位于 MC 发射线圈的同侧, 从 Sensor 节点间距离、角度、高度 3 个方面进行实验, 研究接收线圈之间互感对能量分配的影响关系。

2.2 单线圈距离变化情况下互感对节点传能的影响

初始时, 两个接收线圈和发射线圈位置固定, 3 个线圈的圆心处于同一条水平线上, 线圈间距离如图 4 所示。实验中每次移动 Sensor 节点 B(接收线圈)使其距离 Sensor 节点 A 增加 20 mm, 当 MC 同时为节点 A 和 B 充电时, 记录节点 B 接收线圈与 MC 的距离、MC 发送电压和电流、节点 A 的接收电压及电流、节点 B 的接收电压及电流等参数, 计算 MC 发送功率、节点 A 和 B 的接收功率及传输效率, 节点 A、节点 B 间的互感 M 用 $M=U_A/\omega I_B$ [14] 计算, 结果如表 1 所列。

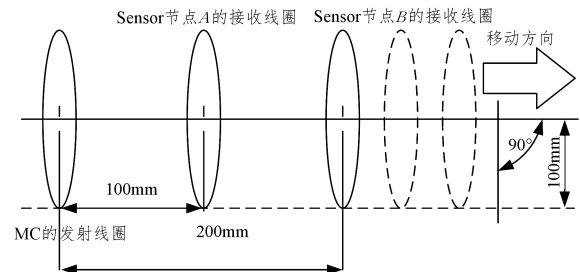


图 4 单线圈距离变化的情况下节点间互感影响示意图

表 1 单个节点距离变化时各项指标变化情况

距离/ mm	发送 电压/V	发送 电流/mA	A 接收 电压/V	A 接收 电流/mA	B 接收 电压/V	B 接收 电流/mA	功率 A /W	功率 B /W	效率 A /%	效率 B /%	互感/ $\times 10^{-3}/\text{mH}$
200	7.63	933	5.78	210	5.75	47.2	1.21	0.27	17.05	3.81	525
220	7.65	941	5.80	221	5.71	37.3	1.28	0.21	17.81	2.96	496
240	7.66	934	5.83	227	5.67	31.8	1.32	0.18	18.50	2.52	479
260	7.67	931	5.85	230	5.62	26.2	1.35	0.15	18.84	2.06	468
280	7.67	934	5.85	232	5.59	21.7	1.36	0.12	18.95	1.69	462
300	7.69	917	5.85	232	5.58	17.6	1.36	0.10	19.25	1.39	461
320	7.69	919	5.85	233	5.58	12.4	1.36	0.07	19.29	0.98	459
340	7.69	913	5.85	232	5.58	10.6	1.36	0.06	19.33	0.84	461
360	7.68	916	5.85	233	5.58	10.3	1.36	0.06	19.38	0.82	459

依据表 1 数据,以距离为横坐标,分别以节点 A 和 B 互感系数 M 、传输效率和接收功率作为纵坐标,得到距离和 M 及传能性能的关系曲线,如图 5 所示。

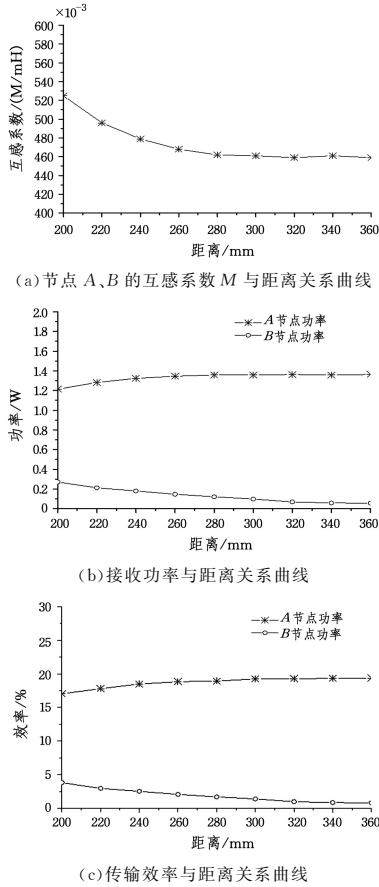


图 5 单节点等间隔变化的情况下互感和节点间的传能关系

从图 5(a) 中看到,互感 M 在最初 200 mm 的距离时取最

大值为 525 mH;随着 B 节点距离增加,互感逐渐减小,节点 A 的传输效率和接收功率却逐渐增大,到 280~360 mm 逐渐平稳,如图 5(b)、图 5(c) 所示;节点 A 与 MC 距离不变,相应地二者之间互感不变,说明节点 A、B 间互感抑制节点 A 的能量接收。从图 5(b)、图 5(c) 看出,节点 B 的接收功率和效率随其距离增加而降低,受节点 A 和 B 间互感影响较小,主要受节点 B 与 MC 间距离影响较大。

2.3 单线圈角度变化情况下互感对节点传能的影响

从角度方面进行实验,分析接收端互感对节点节能的影响,具体实验结构如图 6 所示。两接收线圈与发射线圈共轴,3 个线圈距离位置固定,即 Sensor 节点 A 的接收线圈与 MC 发射线圈的距离为 150 mm, Sensor 节点 B 的接收线圈与 MC 发射线圈的距离为 300 mm。初始时,节点 A 接收线圈与水平面夹角为 0° ,转动节点 A 接收线圈,使其角度从 0 依次增大到 90° (步长为 5°);当 MC 同时为节点 A 和 B 充电时,记录节点 A 接收线圈转动角度、MC 发送电压和电流、节点 A 的接收电压及电流、节点 B 的接收电压及电流等参数,计算 MC 发送功率、节点 A 和 B 的接收功率及传输效率,结果如表 2 所列,相应地互感、接收功率、传输效率与角度的关系如图 7 所示。

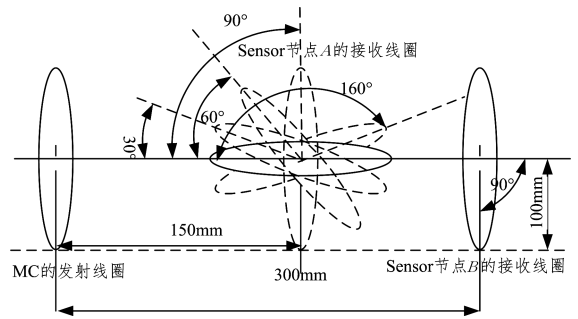


图 6 单线圈角度变化情况下节点间互感影响示意图

表 2 单个 A 节点角度变化时各项数据变化情况

转动角度/ $^\circ$	发送电压/V	发送电流/mA	A 接收电压/V	A 接收电流/mA	B 接收电压/V	B 接收电流/mA	功率 A/W	功率 B/W	效率 A/%	效率 B/%	互感 $\times 10^{-3}$ /mH
0°	7.76	850	0.58	0.62	5.38	36.5	0.00	0.20	0.01	2.98	30.5
5°	7.76	870	3.49	19.5	5.38	37.1	0.07	0.20	1.01	2.96	180
10°	7.77	882	5.72	65.4	5.38	36.4	0.37	0.20	5.46	2.86	301
15°	7.78	875	5.79	106	5.38	32.5	0.61	0.17	8.98	2.57	342
20°	7.79	851	5.96	142	5.38	28.1	0.85	0.15	12.77	2.28	407
25°	7.80	849	5.98	170	5.38	25.1	1.02	0.14	15.35	2.04	457
30°	7.81	831	6.01	191	5.38	22.4	1.15	0.12	17.69	1.86	515
35°	7.81	812	6.10	206	5.38	20.6	1.26	0.11	19.81	1.75	568
40°	7.81	793	6.14	217	5.38	19.3	1.33	0.10	21.51	1.68	610
45°	7.82	801	6.17	224	5.38	18.5	1.38	0.10	22.06	1.59	640
50°	7.82	802	6.18	228	5.37	18.1	1.41	0.10	22.47	1.55	655
55°	7.82	796	6.19	230	5.37	17.8	1.42	0.10	22.87	1.54	667
60°	7.82	801	6.19	231	5.37	17.8	1.43	0.10	22.83	1.53	667
65°	7.81	807	6.19	233	5.37	17.9	1.44	0.10	22.88	1.53	663
70°	7.81	810	6.19	231	5.37	18.1	1.43	0.10	22.60	1.54	656
75°	7.81	806	6.19	229	5.37	18.3	1.42	0.10	22.52	1.56	649
80°	7.81	807	6.17	229	5.37	18.4	1.41	0.10	22.42	1.57	643
85°	7.81	810	6.17	229	5.37	18.4	1.41	0.10	22.33	1.56	643
90°	7.81	809	6.19	229	5.37	18.4	1.42	0.10	22.34	1.56	645

从图 7(a) 所示,节点 A 和 B 接收线圈间互感随节点 A 线圈角度的增大而增大,在 55° 时达到最大,随后趋于稳定;相应地,节点 B 的接收功率和效率随节点 A 线圈角度的增大而减小,在 50° 时趋于稳定,如图 7(b) 和图 7(c) 所示。这说明节点 A 和 B 接收线圈间互感对节点 B 的接收功率和效率是有

影响的;对于发射线圈同轴同侧的两个节点,接收线圈之间的角度变化使得互感随之改变,抑制其能量接收;当两个接收线圈平行时,对系统的能量接收性能的抑制作用最强。

从图 7(b) 和图 7(c) 看出,节点 A 的接收功率和效率初始为 0,随着角度的增加而增大,在 55° 时达到最大,随后趋于稳

定。在接收功率和效率方面,节点 A 与节点 B 有所不同,主要因为节点 A 接收线圈角度变化,导致节点 A 接收线圈与 MC 发射线圈间磁通量变化,且这个变化比节点 A 和 B 接收

线圈间互感对节点 A 的接收功率和效率影响大,相应地节点 A 和 B 接收线圈间互感对节点 A 的接收功率和效率的影响比较弱。

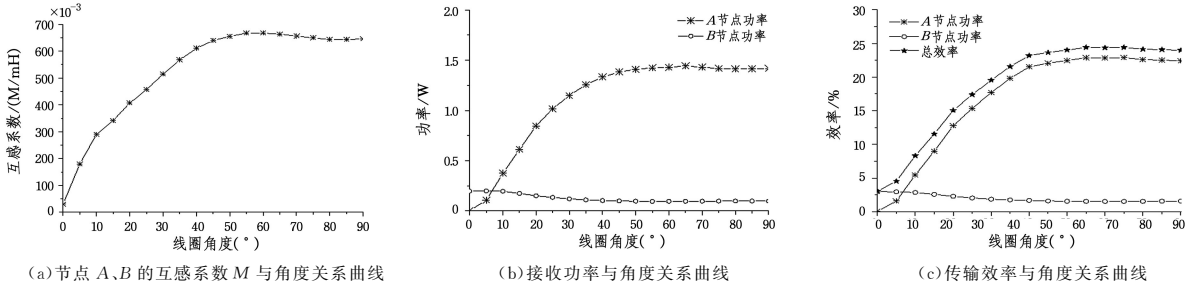


图 7 单节点等角度变化情况下互感变化和节点间传能关系

2.4 单线圈高度变化情况下互感对节点传能的影响

从高度方面,实验分析接收端互感对节点传能的影响,具体实验结构如图 8 所示。Sensor 节点 A 和 B 的接收线圈与 MC 发射线圈同轴且同时垂直于水平底面,3 个线圈位置固定,节点 A 和 B 的接收线圈与发射线圈的距离分别为 150 mm 和 300 mm。实验过程中,节点 A (A 接收线圈) 水平位置不变,其高度依次增加(幅度为 20mm);当 MC 同时为节点 A 和 B 充电时,记录节点 A 接收线圈与水平面的高度、MC 发送电压和电流、节点 A 的接收电压及电流、节点 B 的接收电压及电流等参数,计算 MC 发送功率、节点 A 和 B 的接收

功率及传输效率,结果如表 3 所列。

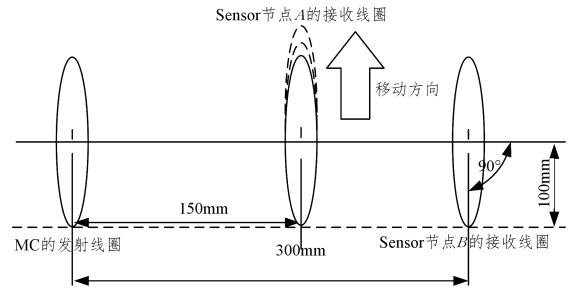


图 8 单线圈高度变化的情况下互感影响示意图

表 3 一对二 A 节点高度变化下节点 A 和 B 充电数据表

高度/mm	发送电压/V	发送电流/mA	A 接收电压/V	A 接收电流/mA	B 接收电压/V	B 接收电流/mA	功率 A /W	功率 B /W	效率 A /%	效率 B /%	互感 $\times 10^{-3}/\text{mH}$
0	7.31	962	5.83	234	5.59	20.1	1.36	0.11	19.40	1.60	556
20	7.33	963	5.78	224	5.59	21.0	1.29	0.12	18.34	1.66	528
40	7.36	944	5.76	215	5.62	22.1	1.24	0.12	17.82	1.79	500
60	7.34	963	5.73	191	5.64	24.7	1.09	0.14	15.48	1.97	445
80	7.34	975	5.73	170	5.68	27.7	0.97	0.16	13.61	2.20	397
100	7.33	1000	5.70	148	5.73	31.6	0.84	0.18	11.51	2.47	346
120	7.22	1000	5.63	113	5.74	36.3	0.64	0.21	8.81	2.89	298
140	7.24	1000	5.62	79.3	5.75	39.5	0.45	0.23	6.16	3.14	273
160	7.07	1000	5.40	43.1	5.75	42.5	0.23	0.24	3.29	3.46	244
180	7.32	981	5.37	21.9	5.75	43.9	0.12	0.25	1.64	3.52	235
200	7.34	948	5.28	9.1	5.75	43.0	0.05	0.25	0.69	3.55	236

依据表 3 数据,节点 A 和 B 的互感系数、接收功率和效率与节点 A 的高度之间关系如图 9 所示。

和功率增加。从图 9(b)和图 9(c)看出,节点 A 的能量接收效率和功率随节点 A 高度增加而降低,虽然节点 A 和 B 的互感系数随节点 A 的高度增加而降低,说明节点 A 和 B 互感对节点 A 能量接收影响有限,但节点 A 能量接收主要受节点 A 和 MC 之间磁通量的影响。随着节点 A 的位置升高,节点 A 和 MC 之间磁通量降低,相应地节点 A 的能量接收效率和功率降低。

从图 9(a)看出,节点 A 和 B 的互感系数随节点 A 的高度增加而降低,特别是在节点 A 高度为 0~160 mm 段,互感系数下降较快;相应地位置不变的节点 B 的接收效率和功率随节点 A 的高度增加而缓慢增加。这说明随着节点 A 的高度增加,两接收节点的互感降低促使节点 B 的能量接收效率

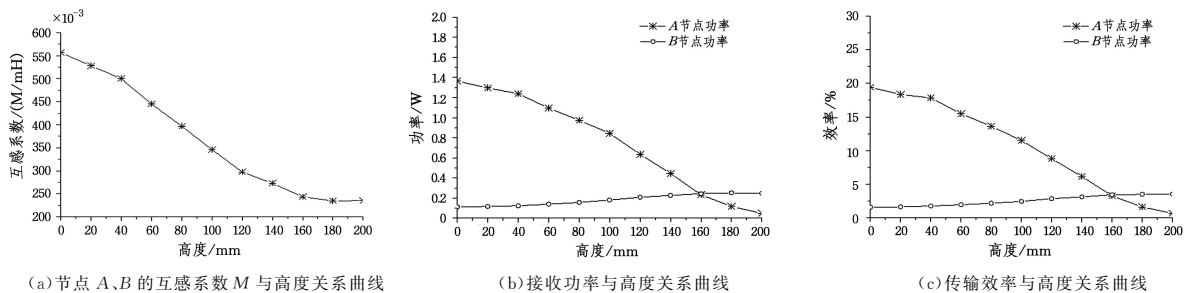


图 9 单个节点等高度变化情况下互感变化和节点间传能关系

结束语 本文从磁耦合谐振无线传能的基本原理出发,

理论分析了接收线圈间互感系数对能量传输的影响,分析了

影响接收线圈间互感系数的因素。最终得出,接收线圈间距离、角度和高度直接影响接收线圈间的互感系数。

基于磁耦合谐振 WRSNs 一对二的充电过程,实验分析接收线圈间距离、角度和高度 3 个因素对接收线圈间互感影响,得出接收线圈间距离和高度与接收能量效率和功率成正比,接收线圈角度与接收能量效率和功率成反比。实验结果表明,位于同侧的接收线圈间互感系数对接收节点能量传输的影响较大。

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] XU W Z, LIANG W F, JIA X H, et al. Maximizing Sensor Lifetime with the Minimal Service Cost of a Mobile Charger in Wireless[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018, 17(11): 2564-2577.
- [3] GUO S T, WANG C, YANG Y Y. Joint mobile data gathering and energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, 13(12): 2836-2852.
- [4] KURS A, MOFFATT R, SOLJACIĆ M. Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(4): 044102-044104.
- [5] KIM J W, SON H C, KIM D H, et al. Analysis of wireless energy transfer to multiple devices using CMT[C]// *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)*. Yokohama, 2010: 2149-2152.
- [6] KHELLADI L, DJENOURI D, LASLA N, et al. MSR; Minimum-Stop Recharging Scheme for Wireless Rechargeable Sensor Networks[C]// *IEEE International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing (UIC)*. Denpasar, Bali, Indonesia, 2014: 378-383.
- [7] SHI Y, XIE L, HOU Y T, et al. On renewable sensor networks with wireless energy transfer[C]// *IEEE INFOCOM*. Shanghai, 2011: 1350-1358.
- [8] AHN D, HONG S. Effect of Coupling Between Multiple Transmitters or Multiple Receivers on Wireless Power Transfer[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(7): 2602-2613.
- [9] 张波, 张青. 两个负载接收线圈的谐振耦合无线输电系统特性分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(10): 152-158.
- [10] 皇甫国庆. 两圆线圈间互感及耦合系数讨论[J]. *渭南师范学院学报*, 2015(14): 24-29.
- [11] 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.
- [12] 罗垚, 陈柏超, 袁佳歆, 等. 倾斜轴空心矩形截面圆柱线圈互感计算[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(5): 132-136.
- [13] BABIC S I, AKYEL C. Calculating Mutual Inductance Between Circular Coils With Inclined Axes in Air[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44(7): 1743-1750.
- [14] 李荣华. 测定互感器互感系数的方法[J]. *实验技术与管理*, 2005, 22(8): 33-35.
- [15] (上接第 358 页)
- [13] DENG K, REN K, ZHU M, et al. A Data and Task Co-scheduling Algorithm for Scientific Cloud Workflows[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2015: 1-1.
- [14] WANG M, ZHANG J, DONG F, et al. Data Placement and Task Scheduling Optimization for Data Intensive Scientific Workflow in Multiple Data Centers Environment[C]// *International Conference on Advanced Cloud & Big Data*. IEEE, 2014: 77-84.
- [15] 程慧敏, 李学俊, 吴洋, 等. 云环境下基于多目标优化的科学 workflow 数据布局策略[J]. *计算机应用与软件*, 2017, 34(3): 1-6.
- [16] 王东亮, 衣俊艳, 李时慧, 等. 融合负载均衡和蝙蝠算法的云计算任务调度[J]. *信息安全*, 2017(1): 23-28.
- [17] ZHAO Q, XIONG C, ZHAO X, et al. A Data Placement Strategy for Data-Intensive Scientific Workflows in Cloud[C]// *IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing*. IEEE, 2015: 928-934.
- [18] ZHANG X X, HU Z G, ZHENG M G, et al. A novel cloud model based data placement strategy for data-intensive application in clouds[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2018.
- [19] 彭晓波, 桂卫华, 黄志武, 等. GAPSO: 一种高效的遗传粒子混合算法及其应用[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(18): 5025-5031.
- [20] 马小平. 私有云存储系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [21] 林兵, 郭文忠, 陈国龙. 多云环境下带截止日期约束的科学 workflow 调度策略[J]. *通信学报*, 2018, 39(1): 56-69.
- [22] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]// *IEEE International Conference on Neural Networks*. IEEE, 2002: 1942-1948.
- [23] HOLLAND J H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [M]. Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Press, 1975.
- [24] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer [C]// *IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings*. IEEE World Congress on Computational Intelligence, 1998: 69-73.
- [25] BHARATHI S, CHERVENAK A, DEELMAN E, et al. Characterization of scientific workflows [C]// *Third Workshop on Workflows in Support of Large-Scale Science*. IEEE, 2008: 1-10.
- [26] CUI L, ZHANG J, YUE L, et al. A Genetic Algorithm Based Data Replica Placement Strategy for Scientific Applications in Clouds[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2015.