

多线圈无线能量传输方案的选择与比较

黄君涛, 陈乾宏

江苏省新能源发电与电能变换重点实验室(南京航空航天大学自动化学院), 江苏南京 211106

中图分类号: TM55 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517 (2016) 11-6-125

摘要: 多线圈系统凭借高效率、长距离传输的优势受到广泛关注。大多数相关研究都集中在中继线圈, 其本质是减小能量传输距离。本文基于不改变能量传输距离的原则, 分别提出了两种三线圈和三种四线圈系统。通过分析系统传输特性, 选择了最优的能量传输方案。比较反射阻抗 Z_{R2} , 指出相较于二线圈系统, 三线圈系统通过增大 Z_{R2} 提高能量传输效率; 四线圈系统保留了三线圈系统的 Z_{R2} , 而且有额外一个自由度(电源线圈)来调节效率 and 输出功率。最后, 构建了输出功率 10W 和输出功率 500W 的两个实验平台。前者验证了二、三、四线圈系统传输特性分析的正确性, 后者采用三线圈系统将效率由两线圈系统时的 50.0% 提高到 85.1% ($P_o=508.8W$, $d_{23}=25cm$)。

关键词: 二、三、四线圈系统; 反射阻抗 Z_{R2} ; 效率; 电压增益

The Selection and Comparison of Multi-coil Wireless Power Transmission Solutions via Magnetic Resonances

HUANG Juntao, CHEN Qianhong

Jiangsu Key-Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion(College of Automation Engineering, NanJing University of Aeronautics and Astronautics),
NanJing 211106, Jiangsu Province, China

Abstract: Multi-coil links are generally introduced to improve the efficiency and extend the energy transmission distance. However, most of them are relay solutions which are equivalent to reduce the distance. In this paper, two kinds of 3- and three kinds of 4-coil links unchanging the energy transmission distance are proposed respectively. Among these links, by comparing the characteristics, the appropriate coil arrangements of 3-, 4-coil links are selected. Through analyzing the reflected impedance Z_{R2} , it is pointed out that 3-coil link improves the efficiency by increasing Z_{R2} compared with 2-coil link, and the 4-coil link, remaining the increased reflected impedance Z_{R2} of 3-coil link, has another flexibility with the added power coil to adjust the efficiency and output power. Finally, two prototypes with different power levers are fabricated in the lab. The experimental results of the small power prototype can verify the analysis and comparison of efficiency, output power and voltage gain of 2-, 3- and 4-coil links. The big power prototype improves the efficiency from 50.0% in 2-coil link to 85.1% in 3-coil link with $P_o=508.8W$ and $d_{23}=25cm$.

Keywords: 2-, 3-, 4-coil links; the reflected impedance Z_{R2} ; efficiency; voltage gain

1 引言

2007年MIT提出的共振式无线能量传输系统, 由于其极大地延长了能量传输距离, 因而受到了广泛的关注和研究^[1]。近年来, 包括三、四线圈, 中继线圈、多米诺线圈等各种多线圈系统相继被提出, 目的都是为了提高系统

效率, 延长传输距离。

虽然中继线圈已有效地提升了二线圈系统的传输特性^[2], 但是在不能改变耦合传输距离的场合, 三、四线圈系统则更为合适。大量关于二、三、四线圈系统的研究都指出了三、四线圈系统有利于阻抗匹配^[3]; 然而,

关于综合考虑传输效率、输出功率等传输特性的研究并不足够。文献 [4][5] 比较了二、三、四线圈系统的传输效率和输出功率。分析表明,在大距离传输场合,四线圈系统以降低输出功率为代价,增加传输效率,而三线圈系统不仅能够达到和四线圈系统一样的高效率,而且输出功率远远大于二、四线圈系统。

本文针对二、三、四线圈系统,提出了所有组合的多线圈传输方案。通过分析反射阻抗 Z_{R2} , 选出最优方案,并综合比较了二、三、四线圈系统的传输效率、输出功率和电压增益特性。最后,构建了两个不同输出功率等级的实验平台,实验结果验证了分析的正确性。

2 多线圈无线能量传输方案

二线圈磁共振式无线能量传输系统如图 1(a) 所示,基于不改变耦合传输距离的原则,如果在二线圈系统基础上增加一个线圈,此线圈可放置于初级线圈之前,也可放置于次级线圈之后。因此,构成两种三线圈系统,分别命名

为三线圈 1、三线圈 2 系统,如图 1(b)(c) 所示。同理,可以得到三种四线圈系统,分别命名为四线圈 1、四线圈 2、四线圈 3 系统,如图 1(d)(e)(f) 所示。以此类推,可以得到五、六等更多线圈系统。

2.1 选择最优方案

图 1 给出了两种三线圈系统和三种四线圈系统。在上述方案中,通过比较传输效率、输出功率、电压增益,选择合适的三线圈和四线圈系统。 $P_o = |G_v \cdot V_{in}|^2 / R_E$ 当输入电压一定时,电压增益和输出功率能够同时达到最大值条件。因此下面分析只考虑电压增益。

第零线圈、电源线圈、初级线圈、次级线圈、负载线圈、第五线圈的阻抗表示为 $Z_i = j\omega L_i + 1/j\omega C_i + R_i, i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$, Z_{Ri} 是 $i+1$ 线圈到 i 线圈的反射阻抗。由于交叉线圈间耦合很弱,因此分析中只考虑相邻线圈间的互感。假设系统工作在

表 1 二、三、四线圈系统的反射阻抗 Z_{R2} 、传输效率 η 、电压增益 G_v 的表达式

	Z_{R2}	η
二线圈	$\frac{\omega^2 k_{23}^2 L_2 L_3}{R_E + R_3}$	$\frac{1}{R_2 / Z_{R2} + 1} \frac{R_E}{R_3 + R_E}$
三线圈 1	$\frac{\omega^2 k_{23}^2 L_2 L_3}{R_E + R_3}$	$\eta_{3,1-coil} < \eta_{2-coil}$
三线圈 2	$\frac{\omega^2 k_{23}^2 L_2 L_3}{\omega^2 k_{14}^2 L_1 L_4 + R_3} + R_3$	$\frac{1}{R_2 / Z_{R2} + 1} \frac{Z_{R3}}{R_3 + Z_{R3}} \frac{R_E}{R_4 + R_E}$
四线圈 1	$\frac{\omega^2 k_{23}^2 L_2 L_3}{R_E + R_3}$	$\eta_{4,1-coil} < \eta_{2-coil}$
四线圈 2	$\frac{\omega^2 k_{23}^2 L_2 L_3}{\omega^2 k_{14}^2 L_1 L_4 + R_3} + R_3$	$\frac{Z_{R1}}{R_1 + Z_{R1}} \frac{1}{R_2 / Z_{R2} + 1} \frac{Z_{R3}}{R_3 + Z_{R3}} \frac{R_E}{R_4 + R_E}$
四线圈 3	$\frac{\omega^2 k_{23}^2 L_2 L_3}{\omega^2 k_{14}^2 L_1 L_4 + R_3} + R_3$	$\frac{1}{R_2 / Z_{R2} + 1} \frac{Z_{R3}}{R_3 + Z_{R3}} \frac{Z_{R4}}{R_4 + Z_{R4}} \frac{R_E}{R_5 + R_E}$
	G_v 选择	
二线圈	$\frac{V_{in}}{R_2 + Z_{R2}} \frac{\omega k_{23} \sqrt{L_2 L_3} R_E}{R_3 + R_E}$	$ V_{in} $ ✓
三线圈 2	$\frac{V_{in}}{(R_1 + Z_{R1})} \frac{\omega k_{23} \sqrt{L_2 L_3}}{R_2 + Z_{R2}} \frac{\omega k_{14} \sqrt{L_1 L_4}}{R_3 + R_E} R_4$	$ V_{in} $ ✓
四线圈 2	$\frac{V_{in}}{(R_1 + Z_{R1})} \frac{\omega k_{23} \sqrt{L_2 L_3}}{(R_2 + Z_{R2})} \frac{\omega k_{14} \sqrt{L_1 L_4}}{(R_3 + Z_{R3})} \frac{\omega k_{45} \sqrt{L_4 L_5}}{(R_4 + R_E)} R_5$	$ V_{in} $ ✓
四线圈 3	$\frac{V_{in}}{(R_2 + Z_{R2})} \frac{\omega k_{23} \sqrt{L_2 L_3}}{(R_3 + Z_{R3})} \frac{\omega k_{14} \sqrt{L_1 L_4}}{(R_4 + Z_{R4})} \frac{\omega k_{45} \sqrt{L_4 L_5}}{(R_5 + R_E)} R_5$	$ V_{in} $

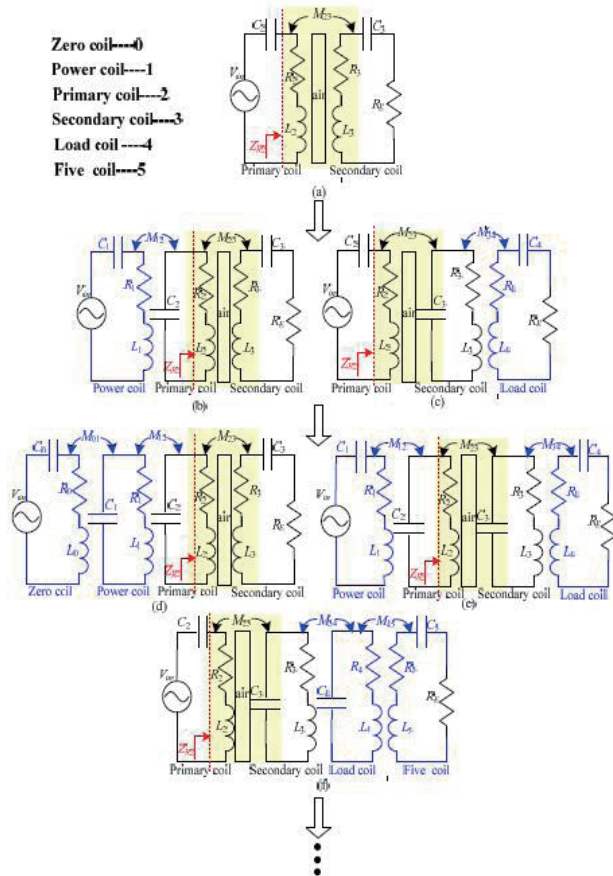


图 1 传输方案 (a) 二线圈 (b) 三线圈 1 (c) 三线圈 2 (d) 四线圈 1 (e) 四线圈 2 (f) 四线圈 3

谐振频率, 传输效率 η 和电压增益 G_v 如表 1 所示。

观察表 1 可以发现, 对于所有的多线圈系统, 反射阻抗 Z_{R2} 与效率 η 呈正相关, 与电压增益 G_v 呈负相关。所以, 次级线圈到初级线圈的反射阻抗 Z_{R2} (表 1 中红色强调的参数) 是一个用于分析系统传输特性的关键参数。对于二线圈系统, 低耦合系数 k_{23} 使反射阻抗 Z_{R2} 变小, 导致低效率。因此, 为了提高低耦合系数 k_{23} 时的效率, 必须增大 Z_{R2} 。提高工作频率是一种普遍认可的方法, 反射阻抗 Z_{R2} 与 ω^2 成正比, 即频率越高, 反射阻抗 Z_{R2} 越大; 采用高 Q 线圈材料, 降低线圈交流电阻也是一种有效的方法, 减小二线圈系统 Z_{R2} 表达式中 R_3 项, 增大反射阻抗 Z_{R2} , 同时减小二线圈系统传输效率表达式中 R_2 、 R_3 项; 此外, 采用多线圈传输方案同样是一种可行的方法, 通过减少二线圈系统 Z_{R2} 表达式中“ R_E ”项, 增大反射阻抗 Z_{R2} 。

2.1.1 优选三线圈系统

显然, 在初级线圈前增加了电源线圈的三线圈 1 系统, 并没有增大反射阻抗 Z_{R2} , 而且电源线圈还带来了额外的功率损耗。因此, 三线圈 1 系统不能提高效率, 应舍弃。

在次级线圈后增加负载线圈的三线圈 2 系统, 改变了反射阻抗 Z_{R2} , 也就表明, 三线圈 2 系统有提高效率的可能性。(在下面分析中, 三线圈 2 系统改称为三线圈系统)

2.1.2 优选四线圈系统

在初级线圈前增加了第零线圈、电源线圈的四线圈 1 系统, 并没有增大反射阻抗 Z_{R2} , 而且新增两个线圈还带来了额外的功率损耗。因此, 四线圈 1 系统不能提高效率, 应舍弃。

接下来讨论四线圈 3 系统。二线圈和四线圈 3 系统的反射阻抗 Z_{R2} 都与 k_{23}^2 呈正相关, 区别在于分母。

$$\text{当 } \frac{\omega^2 k_{34}^2 L_3 L_4}{\omega^2 k_{45}^2 L_4 L_5 + R_4} = R_E \text{ 时 (因为 } R_E \gg R_3, \frac{\omega^2 k_{34}^2 L_3 L_4}{R_3 + R_E} = R_E$$

可以化简为 $\omega^2 k_{34}^2 L_3 L_4 = \omega^2 k_{45}^2 L_4 L_5 + R_4 R_E$, 如果 $k_{34} \approx k_{45}$, 则 $L_5 < L_3$, $Z_{R2,2\text{-coil}} = Z_{R2,4,3\text{-coil}}$ 。因此, 二线圈和四线圈 3 系统的初级线圈效率一样。但是考虑到四线圈 3 系统比二线圈系统增加的两个线圈的功率损耗, 四线圈 3 系统效率低于二线圈系统。

至于电压增益, 因为 $Z_{R2,2\text{-coil}} = Z_{R2,4,3\text{-coil}}$, 所以二线圈和四线圈 3 系统初级线圈电流值相等。 $G_{v,4,3\text{-coil}}$ 除以 $G_{v,2\text{-coil}}$ 可得式 (1)。

$$\Delta = \frac{\omega k_{34} \sqrt{L_3 L_4}}{(R_3 + Z_{R3})} \frac{\omega k_{45} \sqrt{L_4 L_5}}{(R_4 + Z_{R4})} = \frac{1}{\frac{R_3 (R_4 + Z_{R4})}{\omega^2 k_{34} k_{45} L_4 \sqrt{L_3 L_5}} + \frac{\omega^2 k_{34}^2 L_3 L_4}{\omega^2 k_{34} k_{45} L_4 \sqrt{L_3 L_5}}} \quad (1)$$

由于假定条件 $L_5 < L_3$, 式 (1) 分母其中一项 $\frac{\omega^2 k_{34}^2 L_3 L_4}{\omega^2 k_{34} k_{45} L_4 \sqrt{L_3 L_5}} > 1$, $\Delta < 1$, 所以 $G_{v,4,3\text{-coil}}$ 小于 $G_{v,2\text{-coil}}$ 。也

就是说, 在 $Z_{R2,2\text{-coil}} = Z_{R2,4,3\text{-coil}}$ 条件下, 四线圈 3 系统的效率和电压增益都比二线圈系统低。如果减小 L_5 满足

$\frac{\omega^2 k_{34}^2 L_3 L_4}{\omega^2 k_{45}^2 L_4 L_5 + R_4} > R_E$, 则 $Z_{R2,2\text{-coil}} > Z_{R2,4,3\text{-coil}}$ 。此时, 四线圈 3

系统初级线圈效率低于二线圈系统, 再考虑到四线圈 3 系统电源线圈和负载线圈的损耗, 四线圈 3 系统效率更低;

如果增大 L_5 满足 $\frac{\omega^2 k_{34}^2 L_3 L_4}{\omega^2 k_{45}^2 L_4 L_5 + R_4} < R_E$, 则 $Z_{R2,2\text{-coil}} < Z_{R2,4,3\text{-coil}}$ 。

此时, 四线圈 3 系统初级线圈电流小于二线圈系统, 最终, 四线圈 3 系统电压增益会低于二线圈系统。综上所述, 四线圈 3 系统特性差于二线圈系统, 应舍弃。

最后讨论四线圈 2 系统。四线圈 2 系统通过在次级线圈后增加负载线圈的方式, 如同三线圈系统, 改变了反射阻抗 Z_{R2} , 再者在初级线圈之前增加了电源线圈, 提供了一个自由度用于均衡传输效率和电压增益。(在下面分析中, 四线圈 2 系统改称为四线圈系统。)

3 二、三、四线圈系统的比较

3.1 二、三线圈系统的比较

从表 1 可以看出二线圈系统在低耦合系数 k_{23} 时效率低。为了提高效率, 必须增大反射阻抗 Z_{R2} 。三线圈系统通过减小二线圈系统 Z_{R2} 表达式中“ R_E ”来增大 Z_{R2} 。三线圈与二线圈系统的反射阻抗 Z_{R2} 区别在于表达式中红色部分。

$$1) \frac{\omega^2 k_{34}^2 L_3 L_4}{R_E + R_4} = R_E, \quad Z_{R2,2\text{-coil}} = Z_{R2,3\text{-coil}};$$

$$2) \frac{\omega^2 k_{34}^2 L_3 L_4}{R_E + R_4} > R_E, \quad Z_{R2,2\text{-coil}} > Z_{R2,3\text{-coil}};$$

$$3) \frac{\omega^2 k_{34}^2 L_3 L_4}{R_E + R_4} < R_E, \quad Z_{R2,2\text{-coil}} < Z_{R2,3\text{-coil}};$$

在实际应用场合中, 参数通常满足 $\frac{\omega^2 k_{34}^2 L_3 L_4}{R_E + R_4} \ll R_E$, 且 $R_3 \ll R_E$, 因此 $Z_{R2,2\text{-coil}} \ll Z_{R2,3\text{-coil}}$ 。这意味着三线圈系统的初级线圈效率远远高于二线圈系统。而且三线圈系统中初级线圈减少的功率损耗大于电源线圈带来的功率损耗, 因此提高了三线圈系统效率。

在固定气隙 (即固定 k_{23}) 条件下, 对三线圈系统效率表达式求导, 可得效率最大化时的 k_{34} , 如式 (2)。

$$k_{34} = \sqrt{\frac{R_E + R_4}{\omega^2 L_3 L_4}} \sqrt{\frac{\omega^2 k_{23}^2 L_2 L_3 R_2 + R_3^2}{R_2}} \quad (2)$$

反射阻抗 $Z_{R2,3-coil}$ 增大, 确实提高了低耦合系数时的传输效率, 但是减小了初级线圈电流 ($G_{v,3-coil}$ 中第一项), 可能导致低电压增益。

二线圈和三线圈系统的 Z_{R2} 都与 k_{23}^2 成正比。虽然 $Z_{R2,3-coil}$ 远远大于 $Z_{R2,2-coil}$, 但是当 k_{23} 很小时, $Z_{R2,3-coil}$ 和 $Z_{R2,2-coil}$ 都远小于初级线圈交流电阻 R_2 , 那么 $Z_{R2} + R_2 \approx R_2$, 此时二线圈和三线圈系统的初级线圈电流几乎相同。在这种情况下, $G_{v,3-coil}$ 相较于 $G_{v,2-coil}$ 只多了一项 $\frac{\omega k_{34} \sqrt{L_3 L_4}}{R_3 + Z_{R3}}$,

- 1) $\frac{\omega k_{34} \sqrt{L_3 L_4}}{R_3 + Z_{R3}} > 1$, $G_{v,3-coil} > G_{v,2-coil}$;
- 2) $\frac{\omega k_{34} \sqrt{L_3 L_4}}{R_3 + Z_{R3}} = 1$, $G_{v,3-coil} = G_{v,2-coil}$;
- 3) $\frac{\omega k_{34} \sqrt{L_3 L_4}}{R_3 + Z_{R3}} < 1$, $G_{v,3-coil} < G_{v,2-coil}$;

随着 k_{23} 增大, Z_{R2} 增大。 Z_{R2} 加上 R_2 不再约等于 R_2 。因为 $Z_{R2,3-coil} \gg Z_{R2,2-coil}$, 那么 $Z_{R2,3-coil} + R_2 \gg Z_{R2,2-coil} + R_2$ 。这就导致三线圈系统的初级线圈电流远远小于二线圈系统, 此时, 三线圈系统电压增益急剧下降低于二线圈系统。

上述分析揭示了三线圈优于二线圈系统的关键点, 那就是在低耦合系数 k_{23} 时传输效率 $\eta_{3-coil} \gg \eta_{2-coil}$ 且电压增益 $G_{v,3-coil}$ 达到最大值, 该值远远大于 $G_{v,2-coil}$; 但是随着 k_{23} 增大, 电压增益 $G_{v,3-coil}$ 和输出功率 $P_{o,3-coil}$ 急剧减小。

3.2 三、四线圈系统的比较

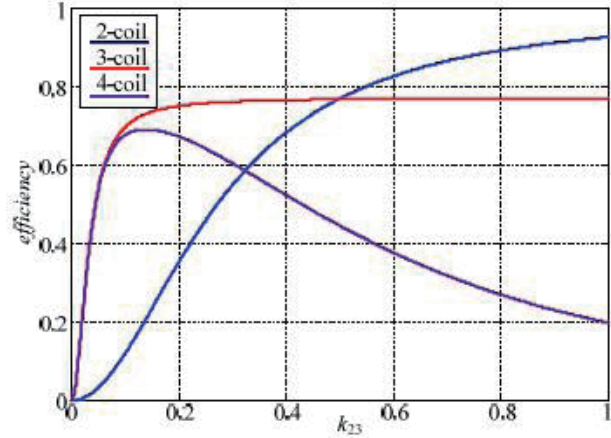
相较于三线圈系统, 四线圈系统有等值的 Z_{R2} 和 Z_{R3} , 因此四线圈系统初级、次级、负载线圈的电压增益、传输效率与三线圈系统一致。两个系统区别在于四线圈系统的电源线圈提供了一个自由度去均衡传输效率和电压增益。下面式 (4)(5) 给出了四线圈系统中电源线圈效率 $\eta_{1,4-coil}$ 和电压增益 $G_{v,4-coil}$ 表达式。

$$Z_{R1} = \frac{\omega^2 k_{12}^2 L_1 L_2}{\frac{\omega^2 k_{23}^2 L_2 L_3}{R_3 + Z_{R3}} + R_2} \quad (3)$$

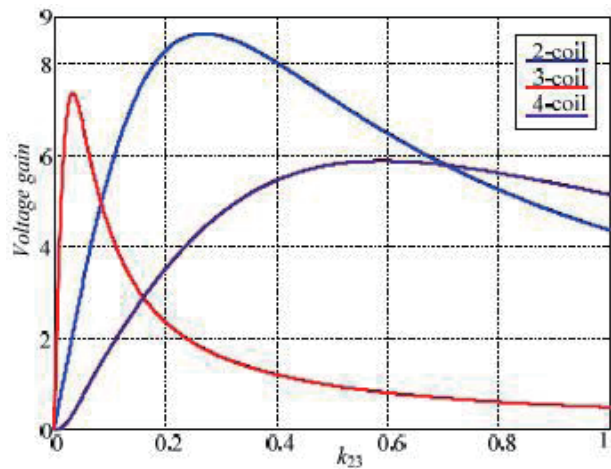
$$\eta_{1,4-coil} = \frac{1}{R_1 / Z_{R1} + 1} \quad (4)$$

$$G_{v,4-coil} = \frac{\omega k_{12} \sqrt{L_1 L_2}}{(R_1 + Z_{R1})} \left[\frac{1}{\frac{R_3}{\omega k_{23} \sqrt{L_2 L_3}} + \frac{\omega k_{13} \sqrt{L_1 L_3}}{\omega^2 k_{23}^2 L_2 L_3 + (\omega^2 k_{34}^2 L_3 L_4 / (R_4 + R_5) + R_2)} + R_2} \right] \quad (5)$$

根据式 (4)(5), 可以粗略认为电源线圈效率与 Z_{R1} 成正比, 电压增益与 Z_{R1} 成反比。因此, 应根据实际应用需求,



(a)



(b)

图2 计算曲线 (a) 效率 (b) 电压增益

表2 二、三、四线圈系统的传输特性

效率	
二线圈	关于 k_{23} 单调递增, 低耦合系数, 低效率 相较于二线圈系统, 效率极大提高
三线圈	$k_{23} < \sqrt{\frac{R_2(Z_{R3}R_E - Z_{R3}^2 - R_3^2 - Z_{R3}R_3)}{\omega^2 L_2 L_3 R_3}}$, $\eta_{3-coil} > \eta_{2-coil}$; 反之则 $\eta_{3-coil} < \eta_{2-coil}$
四线圈	$Z_{R1} \gg R_1$, $\eta_{1,4-coil} \approx 1$, $\eta_{4-coil} \approx \eta_{3-coil}$; 否则 $\eta_{4-coil} < \eta_{3-coil}$
输出功率/电压增益	
二线圈	输出功率能力强
三线圈	在低耦合系数 k_{23} 时, 电压增益达到峰值, 大于二、四线圈; 随着耦合系数 k_{23} 增长, 电压增益急剧下降。
四线圈	$G_{v,4-coil} > 1$, $G_{v,4-coil} > G_{v,3-coil}$; 反之则 $G_{v,4-coil} < G_{v,3-coil}$

选择合适的 Z_{R1} 。如果要求高效率，则增大 k_{12} 和 L_1 ；如果要求高电压增益，则反之。

根据表 3 中参数（采用最后一行的交流电阻值），运用 mathcad 计算出三种系统关于 k_{23} 的传输效率和电压增益曲线，如图 2 所示。表 2 给出了三种系统的传输特性总结。

4 实验验证

4.1 多线圈系统的搭建

四线圈共振式无线能量传输系统如图 3 所示，电源线圈、初级线圈、次级线圈和负载线圈选择相同的平面螺旋线圈固定在有机玻璃板上，参数如表 3 所示（由于大电流，二线圈系统的交流电阻增大）^[6]。电源线圈和初级线圈、次级线圈和负载线圈分别紧紧系在一起，因此， d_1 、 d_3 即两块有机玻璃板的厚度 0.5cm， d_2 在 0~30cm 范围内变动（当 $d_2=0$ 时， $k_{23}=0.51$ ）。

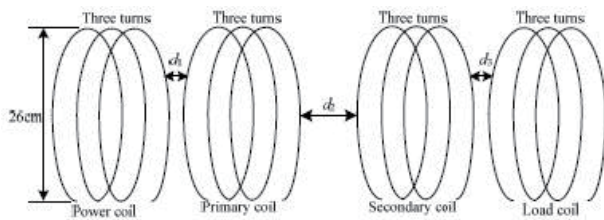


图 3 共振式无线能量传输系统结构示意图

表 3 线圈参数

	电源线圈	初级线圈	次级线圈	负载线圈
电感/ μH	5.974	5.989	6.047	6.029
电容/ nF	146.7	146.3	144.9	145.4
交流电		0.249	0.247	
阻/ Ω	0.190	0.134	0.127	0.151
耦合系数		$k_{12}=0.495$	$k_{34}=0.511$	

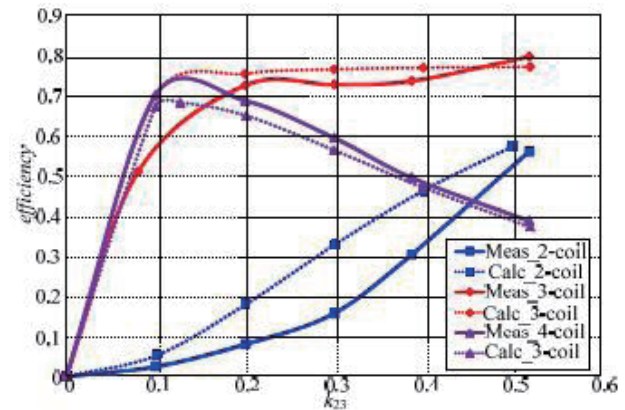
4.2 小功率模型的实验验证

采用 Agilent33210A 信号发生器和 AR 功率放大器作为高频交流输入电源，YOKOGAWA PX8000 power analyzer 用于测量三种系统的效率、电压增益、输出功率来验证上述分析比较的正确性。

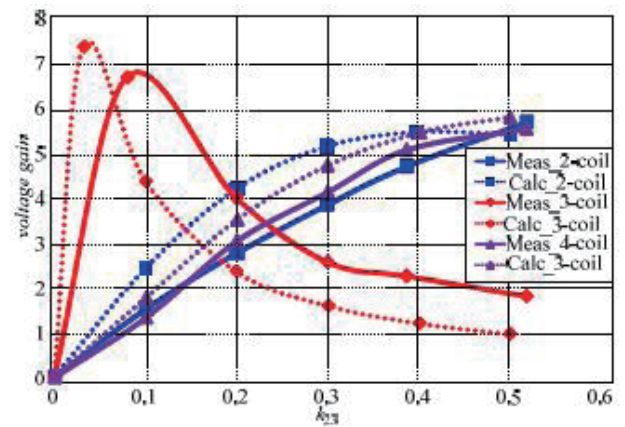
图 4(a)(b) 分别给出了实测和计算的二、三、四线圈系统关于耦合系数 k_{23} 的传输效率曲线、电压增益曲线。注意到实测曲线和计算曲线有轻微偏差，这是因为四个线圈的谐振频率并非完全相同。

通过图 4(a) 观察到，当耦合系数 k_{23} 从 0 到 0.51 变化

时，二线圈系统效率逐渐提高，但一直低于三线圈系统效率。在 $k_{23}=0.1$ 处，二线圈系统效率仅 2.3%，三线圈系统效率则达到 69.8%，充分证明了，三线圈系统通过加入负载线圈的方式，增大了反射阻抗 Z_{R2} ，传输效率明显提高。对于三、四线圈系统，当 k_{23} 低于 0.1 时， $\eta_{3\text{-coil}}$ 和 $\eta_{4\text{-coil}}$ 几乎重合，这是因为 Z_{R1} 足够大，电源线圈效率接近为 1。随着 k_{23} 变大， Z_{R1} 减小导致电源线圈效率降低，四线圈系统效率低于三线圈系统。通过图 4(b) 观察到，当耦合系数 $k_{23}=0.08$ ，三线圈系统电压增益达到最大值，此值远远大于二、四线圈系统电压增益。随着耦合系数 k_{23} 增大， Z_{R2} 增大，三线圈系统电压增益急剧下降，最终低于二、四线圈系统电压增益。因此，仅考虑效率，耦合系数 k_{23} 在较大范围内（从 0 开始），三线圈系统是一个极佳的选择，但若综合考虑效率、电压



(a)



(b)

图 4 测量和计算值比较 (a) 效率 (b) 电压增益

增益, 三线圈系统适合于低耦合系数 k_{23} 场合, 对于高耦合系数, 二、四线圈系统是更好的选择。

4.3 大功率模型的实验验证

目前, 关于多线圈系统的大多数研究都属于低于 $60\text{W}^{[1]}$ 甚至是 $100\text{mW}^{[3]}$ 的低功率应用场合, 工作频率也都集中在 MHz。但是在实际应用中, 比如电动汽车等大功率能量传输场合, 目前普遍采用二线圈系统, 注意到当耦合传输距离 d_{23} 增大或者原副边错位, 耦合系数 k_{23} 减小, 系统效率降低。针对上述问题, 采用三线圈系统解决。大功率实验模型线圈参数如表 4 所示。

表 4 线圈参数

	初级线圈	次级线圈
电感/ μH	506.69	487.83
电容/ nF	9.919	10.3
交流阻抗/ Ω	0.79	0.78
直径/ cm	50	

当 $d_2=25\text{cm}$, $k_{23}=0.11$, $R_L=678\Omega$ 时, 二线圈系统效率理论值为 52.5%, 测量值为 50.0% ($P_o=68.6\text{W}$, 由于 MOSFET 的电流幅值限制了输出功率能力)。

同样条件下, 采用三线圈系统提高效率。在固定耦合传输距离 d_{23} 时, 由式 (2) 得到最大化效率的 k_{34} 。式中有两个未知量 k_{34} 和 L_4 , 且 k_{34} 和 L_4 呈负相关。以使用最少利兹线为目的, 最大化 k_{34} 到 0.55 (在实验中, 两个线圈 (无磁芯) 紧靠, 其耦合系数是 0.5~0.6), 所以得到 $L_4=560\mu\text{H}$ 。实验中, 负载线圈参数是 $L_4=561.97\mu\text{H}$, $R_4=0.85\Omega$, $C_4=8.942\text{nF}$, $k_{34}=0.58$ 。三线圈系统效率理论值为 93.1%, 测量值为 85.1% ($P_o=508.8\text{W}$)。

实验结果说明采用三线圈系统将效率由二线圈系统时 50.0% 提高到 85.1%。充分证明了, 在大功率能量传输场合, 可以采用三线圈系统来解决二线圈系统在错位或耦合传输距离增大带来的效率降低的问题。

5 结论

本文分别提出了两种三线圈系统和三种四线圈系统。通过分析比较传输效率、电压增益, 选出了合适的多线圈

能量传输方案, 并总结了二、三、四线圈系统的传输特性。最后小功率模型实验结果验证了二、三、四线圈系统的传输特性分析的有效性, 大功率模型实验采用三线圈系统将效率由二线圈系统时 50.0% 提高到 85.1% ($P_o=508.8\text{W}$, $d_{23}=25\text{cm}$)。

参考文献

- [1] Soljačić M, Kurs A, Karalis A, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Scienceexpress, 2007, 112(6): 1-10.
- [2] Fei Zhang, et al. Relay effect of wireless power transfer using strongly coupled magnetic resonances[J], IEEE Transactions On Magnetics, 2011, 47(5), 1478-1481.
- [3] Sanghoon cheon, Yong-hae kim, Seung-Youl Kang, Myung Lae Lee, Jong-Moo Lee, Circuit-Model-Based analysis of a wireless Energy-Transfer system via Coupled Magnetic Resonances[J], IEEE Trans, 2011:2906-2914.
- [4] Mehdi Kiani, Vei-Ming Jow, Maysam Ghovanloo, Design and optimization of a 3-coil inductive link for efficient wireless power transmission[J], IEEE Transactions On Biomedical and Systems, 2011:579-591.
- [5] S.Y.R. Hui, Wenxing Zhang, C.K. Lee, A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer[J], IEEE Transactions On Power Electronics, 2014:4500-4511.
- [6] G.Coatache, Finite element method applied to skin effect problems in strip transmission lines[J], IEEE Trans, 1987, MTT-35(11):1009-1013.

作者简介

黄君涛 (1990—), 女, 工学硕士, 主要从事非接触能量供电系统的研究工作。

陈乾宏 (1974—), 女, 博士生导师, 教授, 主要研究方向: 功率因数校正变换器, 磁集成技术以及非接触能量供电系统。