

# 多初级绕组串联的动态无线电能传输 系统设计与特性分析

赵靖英<sup>1</sup>, 赵纪新<sup>1</sup>, 邢英翔<sup>1</sup>, 崔玉龙<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学电气工程学院, 天津 300130;  
2. 北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029)

**摘要:** 无线电能传输技术是一种安全、便利和自主的充电方式, 动态无线电能传输是解决电动汽车续航里程短、车载电池成本高的关键技术。本文设计了一种新颖的能量分布式动态供电系统, 高频逆变器连接多组开关控制的 LC 串联补偿可根据汽车位置自动分配能量。根据系统设计, 推导了单线圈和双线圈系统效率和功率表达式, 搭建了仿真电路和实验平台, 分析了传输距离、移动距离、耦合角度及负载大小对系统传输性能的影响。实验样机的输出功率为 3.3kW, 工作频率为 120kHz, 效率可超过 90%, 可为电动汽车提供连续供电。

**关键词:** 无线电能传输; 电动汽车; 动态供电; 磁耦合谐振

**DOI:** 10.12067/ATEEE1707013

**文章编号:** 1003-3076(2018)07-0067-08

**中图分类号:** TM72

## 1 引言

无线电能传输技术(WPT)是一种灵活、便利和安全的充电技术<sup>[1-3]</sup>, 其应用于电动汽车充电的趋势愈发乐观<sup>[4]</sup>。WPT 目前采用的供电方式主要包括静态充电方式和动态供电方式。电池的容量和能量密度限制了静态无线充电技术的发展<sup>[5]</sup>; 动态无线供电技术可将供电线圈铺设在道路下, 实现汽车搭载少量电池组在行使过程中的电能补给, 这种方式更加安全、便捷, 同时可提高续航里程<sup>[6]</sup>。

自 20 世纪 90 年代开始, WPT 成为了国际权威机构的研究热点。Auckland 大学在电磁感应式无线电能传输领域先后发表过数篇改进磁耦合机构的代表性论文<sup>[7]</sup>; 韩国高等科学技术学院(KAIST) Chun T. Rim 教授团队致力于研究动态在线供电技术的电动汽车(OnLine Electric Vehicle, OLEV), 其研究成果较成功地应用于商业化方案<sup>[8]</sup>; 美国 Oak Ridge 国家实验室的研究针对动态无线供电的传输特征、介质损耗、EMF 辐射、磁耦合元件等, 研究表

明传输功率和效率受充电位置的影响较大<sup>[9,10]</sup>。国内对于动态无线供电的研究较晚, 重庆大学研究了分段控制导轨式动态无线供电技术, 汽车直接依靠导轨能量驱动电机运行<sup>[11]</sup>; 哈尔滨工业大学研究了基于车辆磁场检测定位的多初级绕组单元并联电动汽车动态无线供电技术<sup>[12]</sup>; 天津工业大学研究了串串补偿的动态供电系统接收线路不同位置的耦合情况, 提高了传输效率<sup>[13]</sup>; 此外, 其他高校还研究了使用增强线圈增大耦合系数以提高传输距离<sup>[14]</sup>、提高  $Q$  值增大传输效率<sup>[15]</sup>等方法。

动态供电系统的本质是多组静态无线传输装置与能量导轨开关的组合, 通过检测汽车位置控制发射装置工作状态, 加入频率控制、功率调节和状态信息检测功能, 实时调整开关器件驱动信号保证频率在谐振范围内、功率达到传输要求, 并在器件过压、过流或过热时保护电路, 实现动态供电的高效性、可靠性。本文研究磁耦合谐振式动态供电的多初级绕组串联分段式导轨和能量传输结构, 分析分布式无线供电系统线圈工作模式, 设计动态能量传输系统,

**收稿日期:** 2017-07-04

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目(2015BAA09B00)、河北省高等学校科学技术研究项目(QN20131165)

**作者简介:** 赵靖英(1974-), 女, 河北籍, 教授, 博士, 研究方向为电器可靠性、无线电能传输技术;

赵纪新(1992-), 女, 河北籍, 硕士研究生, 研究方向为无线电能传输技术。

基于原边串联副边并联(Primary Series and Secondary Parallel, PSSP)补偿结构互感等效电路,推导传输功率和频率表达式并分析其最大值条件,搭建仿真模型和实验平台对传输性能进行验证。

## 2 分布式动态无线供电系统设计

### 2.1 系统结构分析

单逆变源、多初级绕组串联工作的分段导轨模块化动态供电系统结构框图如图1所示。发射部分从电网获取电能,经可控整流、全桥 MOSFET 高频逆变后,接变压器调整电压,再串联连接能量发射装置。每个能量发射装置由利兹线圈和谐振电容串联组合,能量发射装置的工作状态由车辆位置检测传感器和逻辑控制开关产生的信号控制,能量通过耦合谐振的方式传输到 LC 并联接收装置,高频交流电能通过不控整流部分和滤波电容为负载供电。其中发射、接收部分电压、电流的检测信号经控制电路后产生调节系统功率、频率的 PWM 信号,在故障时停止产生驱动信号以保护器件。

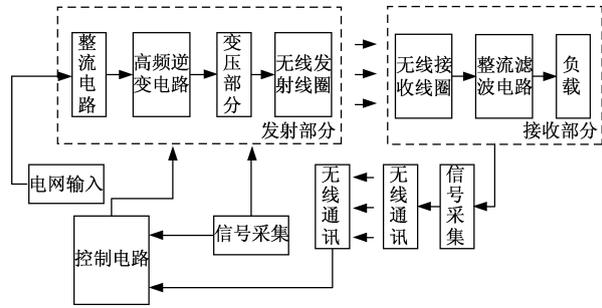


图1 动态磁耦合无线供电系统整体结构图  
Fig. 1 Dynamic magnetic coupling WPT structure

### 2.2 动态能量传输系统设计

交流电通过整流后,连接三个高频逆变装置,每个逆变器接五个发射线圈。电动汽车驶过铺设发射装置的路面,发射线圈根据汽车的行驶位置,同时有一个或两个开启,接收线圈通过耦合接收磁场能转变为电能,实现连续供电。

在相同面积下,圆形线圈提供的可充电区域大于矩形、六边形和组合型线圈,因为线圈折角处存在磁场失真,故本系统采用圆形线圈。当接收线圈位于发射线圈正上方时,其正下方的线圈为开启状态;当接收线圈位于两个发射线圈中央时,两个发射线圈同为开启状态,如图2所示。发射线圈的工作状态由安装在接收线圈中央的永磁体和发射线圈两端

的高灵敏度三轴磁传感器 T11 ~ T52 控制。接收线圈位置通过设置敏感度,检测传感器输出信号判断,信号传递到处理器产生开关导轨控制信号,控制继电器动作。

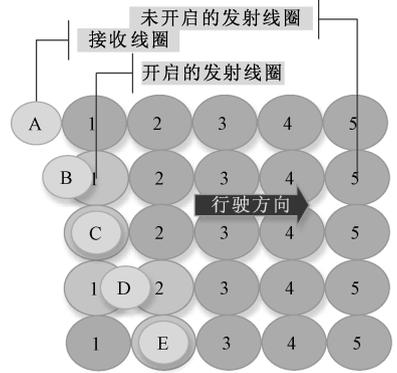


图2 接收线圈不同位置示意图  
Fig. 2 Different location of receiving coils

图3为动态能量传输系统拓扑图。发射线圈和接收线圈的半径均为20cm,相邻发射线圈间距为20cm,接收线圈以10cm等距排列。当两个发射线圈同时工作时,开关控制器接收前一发射线圈末端和后一发射线圈前端的位置信号,当接收线圈位于发射线圈4和发射线圈5中间时,开关S41、S4、S52闭合,其余开关为开启状态,如图3所示。不同发射线圈1和2的工作状态如表1所示。

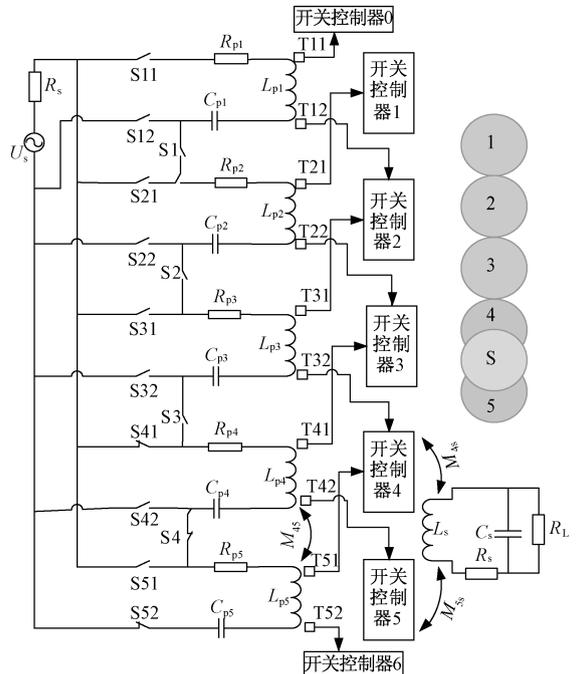


图3 动态能量传输系统拓扑图  
Fig. 3 Topology of dynamic power transmission system

表 1 发射线圈状态

Tab. 1 State of transmitting coil

位置区间	AB	BC	CD	DE
发射线圈 1	开	开	开	开
发射线圈 2	关	关	开	开

### 3 能量传输系统特性分析

#### 3.1 单线圈电路拓扑模型及传输特性分析

动态供电时, 单发射线圈开启时等效电路拓扑如图 4 所示, 采用 PSSP 补偿拓扑。

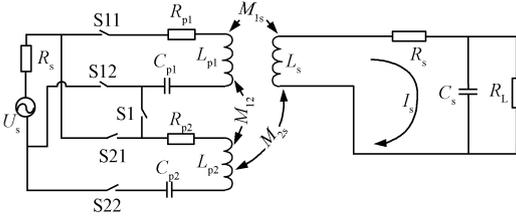


图 4 单发射线圈等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of single transmitting coil

根据麦克斯韦方程的法拉第定律、安培定律和互感耦合理论, 发射端阻抗  $Z_p$  为:

$$Z_p = R_p + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} \quad (1)$$

接收端阻抗  $Z_s$  为:

$$Z_s = R_s + j\omega L_s + \frac{R_L}{1 + j\omega R_L C_s} \quad (2)$$

式中,  $R_p$ 、 $R_s$  为发射、接收线圈内阻;  $R_L$  为负载电阻;  $L_p$ 、 $L_s$  为发射、接收线圈自感;  $C_p$ 、 $C_s$  为发射端、接收端谐振电容。

当系统的谐振频率很高时, 可忽略比负载电阻小得多的线圈内阻, 则接收线圈反射到发射线圈的阻抗  $Z_f$  为:

$$Z_f = \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} = \frac{\omega^2 M^2 R_L + j\omega^3 M^2 [C_s R_L^2 (1 - \omega^2 L_s C_s) - L_s]}{R_L^2 (1 - \omega^2 L_s C_s)^2 + \omega^2 L_s^2} \quad (3)$$

式中,  $\omega$  为谐振角频率;  $M$  为发射、接收线圈间的互感。系统发射端和接收端谐振时, 谐振条件为  $\omega^2 L_s C_s = 1$ , 反射阻抗为:

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{M^2 R_L}{L_s^2} - j \frac{\omega M^2}{L_s} \quad (4)$$

式中,  $R_f$  为反射阻抗实部;  $X_f$  为虚部。发射端补偿谐振电容  $C_p$  为:

$$C_p = \frac{1}{\omega^2 (L_p - M^2/L_s)} \quad (5)$$

发射端电流  $I_p$  为:

$$I_p = \frac{U_s}{Z_p + Z_f} = \frac{U_s}{R_p + M^2 R_L / L_s^2} \quad (6)$$

式中,  $U_s$  为发射端输入电压。接收端电流  $I_s$  为:

$$I_s = \frac{j\omega M I_p}{Z_s} \quad (7)$$

输出功率  $P_L$  为:

$$P_L = |I_p^2 R_f| = \left| \frac{U_s^2 L_s^2 M^2 R_L}{(R_p L_s^2 + M^2 R_L)^2} \right| \quad (8)$$

在串并谐振结构中, 发射线圈品质因数为  $Q_p = \omega L_p / R_p$ , 负载品质因数为  $Q_s = \omega L_s / R_s$ , 系统效率  $\eta$  为:

$$\eta = \frac{k^2 R_L^2 Q_p (1 + Q_s^2)}{Q_s [R_L (1 + Q_s^2) + R_L]^2 + k^2 Q_s R_L (1 + Q_s^2) [R_s (1 + Q_s^2) + R_L]} \quad (9)$$

互感  $M$  近似计算公式为:

$$M \approx \frac{\pi \mu_0 R_p^2 R_s^2 N_p N_s}{2(R_p^2 + D^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (10)$$

式中,  $N_p$ 、 $N_s$  为发射、接收线圈匝数;  $D$  为垂直传输距离;  $\mu_0$  为真空磁导率。

线圈自感  $L$  计算公式为:

$$L = N^2 r \mu_0 [\ln(\frac{8r}{a}) - 1.75] \quad (11)$$

式中,  $r$  为线圈圆盘半径;  $a$  为线径。输出功率对负载的一阶偏导数为:

$$\frac{\partial P_L}{\partial R_L} = \frac{U_s^2 L_s^2 M^2 (R_p L_s^2 + M^2 R_L) (R_p L_s^2 - R_L M^2)}{(R_p L_s^2 + M^2 R_L)^4} \quad (12)$$

当等效电阻等于发射部分的内阻时, 达到阻抗匹配, 负载获得最大输出功率。令  $\partial P_L / \partial R_L = 0$ , 可得功率峰值对应的负载阻值  $R_L^*$  为:

$$R_L^* = \frac{R_p L_s^2}{M^2} \quad (13)$$

当负载阻值  $R_L = R_L^*$  时, 输出功率达到最大值, 当  $R_L > R_L^*$  时, 负载增加功率减小。

当负载较大、 $Q_s$  大于 1 时, 系统的传输效率会随负载阻值的增加而减小, 此时传输效率表达式 (9) 可近似为:

$$\eta \approx \frac{k^2 Q_p (1 + Q_s^2)}{Q_s [R_s R_L (\omega C_s)^2 + 1]^2 + k^2 Q_p (1 + Q_s^2) [R_s R_L (\omega C_s)^2 + 1]} \quad (14)$$

输出功率对互感的一阶偏导数为:

$$\frac{\partial P_L}{\partial M} = \frac{2U_s^2 L_s^2 R_L (R_p L_s^2 + M^2 R_L) (R_p L_s^2 - R_L M^2)}{(R_p L_s^2 + M^2 R_L)^4} \quad (15)$$

令  $\partial P_L / \partial M = 0$ , 输出功率峰值对应的互感值  $M^*$  为:

$$M^* = L_s \sqrt{\frac{R_p}{R_L}} \quad (16)$$

负载的峰值输出功率对应的耦合系数  $k_p^*$  为:

$$k_p^* = \sqrt{\frac{R_p L_s}{R_L L_p}} = \sqrt{\frac{1}{Q_p Q_L}} \quad (17)$$

式(9)对互感求一次偏导数为:

$$\frac{\partial \eta}{\partial M} = \frac{2MR_p R_L L_s^2}{(R_p L_s^2 + M^2 R_L)^2} \quad (18)$$

式中, 由于  $\partial \eta / \partial M > 0$ , 故系统效率随着互感值的增加而增加。品质因数和耦合系数对系统效率的影响如图5所示。可以看出, 系统效率随着品质因数和耦合系数的增加而增加, 在品质因数接近100、耦合系数接近1的时候, 效率接近100%。在实际工程中, 耦合系数一般为0.1~0.3, 故可从提高线圈的品质因数的角度提高效率。

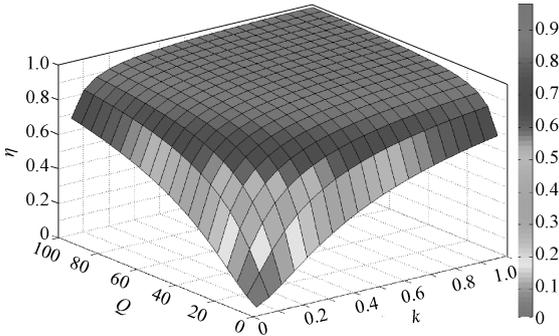


图5 品质因数和耦合系数对系统效率的影响

Fig. 5  $Q$  and  $k$  vs. efficiency

### 3.2 双线圈电路拓扑及传输特性分析

当接收线圈位于两发射线圈中央时, 等效电路图如图6所示。此时  $L_{p1}$  与  $L_s$  的互感等于  $L_{p2}$  与  $L_s$  的互感, 即  $M_{1s} = M_{2s}$ , 忽略互感  $M_{12}$ 。

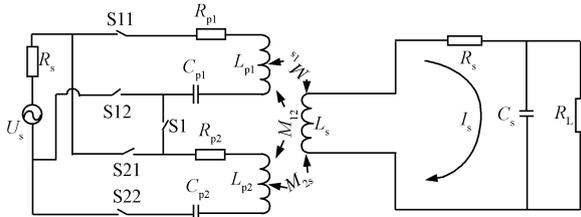


图6 两发射线圈同时开启时的等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of two transmitting coils

根据互感耦合理论, 系统状态方程为:

$$\begin{bmatrix} U_s \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p + 2j\omega M_{12} & -2j\omega M_{1s} \\ -2j\omega M_{2s} & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} \quad (19)$$

阻抗表达式为:

$$\begin{cases} Z_p = R_{p1} + j\omega L_{p1} + R_{p2} + \frac{1}{j\omega C_{p1}} + \frac{1}{j\omega C_{p2}} \\ Z_s = R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} \end{cases} \quad (20)$$

系统等效阻抗  $Z_T$  为:

$$Z_T = \frac{U_s}{I_p} = \frac{U_s Z_p}{U_s + 2j\omega M} = \frac{Z_p}{1 + 2j\omega M / U_s} \quad (21)$$

负载输出功率  $P_L$  为:

$$\begin{aligned} P_L &= \left| \frac{I_s}{j\omega C R_L + 1} \right|^2 R_L = \left| \frac{(U_s + 2j\omega M) 2j\omega M}{Z_p Z_s (j\omega C R_L + 1)} \right|^2 R_L \\ &= \left| \frac{(U_s + 2j\omega M) 2j\omega M}{2R_p R_L (j\omega C R_L + 1)} \right|^2 R_L \end{aligned} \quad (22)$$

发射能量耦合到接收部分的系统效率  $\eta$  为:

$$\begin{aligned} \eta &= \left| \frac{P_L}{U_s I_p} \right| \\ &= \left| \left[ \frac{(U_s + 2j\omega M) 2j\omega M (1 + \omega^2 C^2 R_L^2)}{2R_p R_L (j\omega C R_L + 1)} \right]^2 \frac{R_L Z_p U_s}{U_s + 2j\omega M} \right| \end{aligned} \quad (23)$$

双线圈系统的耦合系数和品质因数如表2所示, 线圈自感和互感对耦合系数  $k_{12}$  的影响如图7所示。由图7可以看出,  $k_{12}$  随着自感的增加明显变大, 而随着互感  $M_{12}$  的增加变化不明显, 故可忽略  $M_{12}$  对系统传输能力的影响。

表2 双线圈系统的耦合系数和品质因数

Tab. 2  $k$  and  $Q$  of two coils

参数	初级绕组1	初级绕组2	次级绕组
耦合系数	$k_{1s} = \frac{M_{1s}}{\sqrt{L_{p1} L_s}}$	$k_{2s} = \frac{M_{2s}}{\sqrt{L_{p2} L_s}}$	$k_{12} = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_{p1} L_{p2}}}$
品质因数	$Q_{p1} = \frac{\omega L_{p1}}{R_p}$	$Q_{p2} = \frac{\omega L_{p2}}{R_p}$	$Q_s = \frac{R_L}{(1 + \omega^2 C_s^2 R_L^2) \omega L_s}$

动态互感模型的互感计算公式为:

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r^2 \cos(\theta - \varphi)}{\rho} d\theta d\varphi \quad (24)$$

式中,  $\theta - \varphi$  为两线圈元素线夹角;  $\rho$  为两线圈元素线的距离。故  $M$  的大小与匝数、传输距离、移动距离和耦合角度有关。由表2可知, 根据互感计算公式可确定动态供电系统中的耦合系数。将表2中的耦合系数、品质因数表达式带入功率、效率表达式, 分别得到:

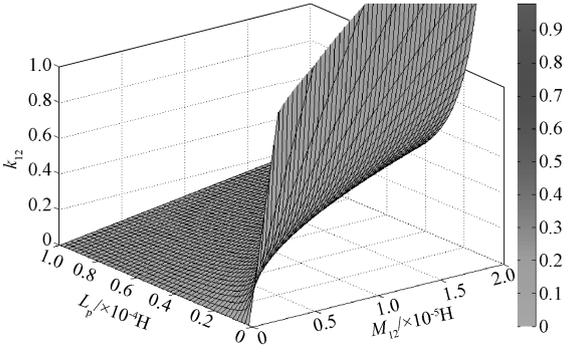


图7 线圈自感和互感对耦合系数  $k_{12}$  的影响

Fig. 7  $L_p$  and  $M$  vs.  $k_{12}$

$$P_L = \left| \frac{(U_s + 2jkQ_p R_p) 2jkQ_p R_p}{2R_p Q_s \omega L_s (j\omega C_s R_L + 1)} \right|^2 R_L \quad (25)$$

$$\eta = \left| \left[ \frac{(U_s + 2jkQ_p R_p) 2jkQ_p R_p (1 + \omega^2 C^2 R_L^2)}{2R_p Q_s \omega L_s (j\omega C_s R_L + 1)} \right]^2 \frac{2R_L R_p U_s}{U_s + 2jkQ_p R_p} \right| \quad (26)$$

## 4 仿真和实验分析

### 4.1 仿真分析

本文利用 SIMULINK 中的 SimPowerSystems 构建系统的仿真电路, 采用 50Hz、220V 的三相电源, 负载阻值  $R_L = 45\Omega$ , 谐振频率为 125kHz, 滤波电容  $4\mu\text{F}$ , 设定 POWERGUI 模块为连续仿真, 运行仿真模型, 得到仿真结果。图 8 为 MOS 开关管电压和电流的波形。可以看出, 开通时电流为零, 开关管的电压钳位在零后按正弦变化, 关断时电压为零, 实现了软开关。负载电流和电压波形如图 9 所示。负载电压均值为 380V, 负载电流均值为 8.7A, 功率为 3.3kW, 符合电动汽车供电的设计要求。

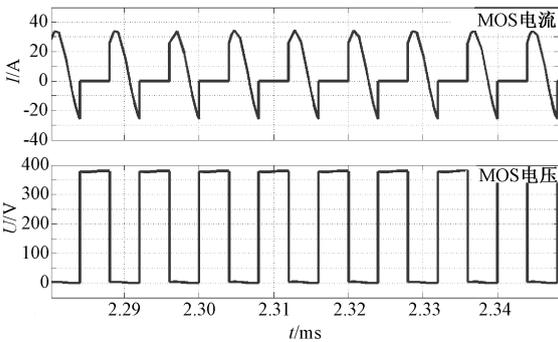


图8 MOS 开关管电压、电流仿真波形图

Fig. 8 Voltage and current of MOSFET

### 4.2 实验平台的搭建与传输性能验证

由第 3 节公式可知, 影响传输系统性能的主要

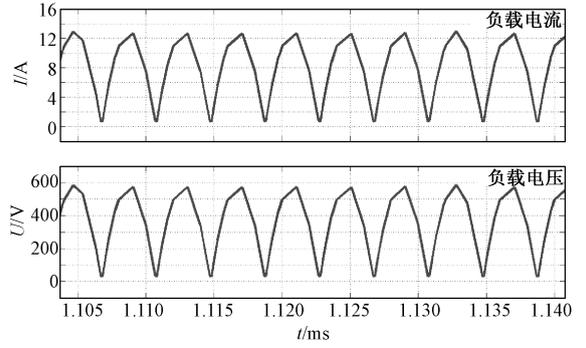


图9 负载电压和电流仿真波形

Fig. 9 Voltage and current of load

因素是耦合系数、负载大小和谐振频率。在电动汽车动态无线供电系统中, 耦合系数会随着接收线圈位置的移动而变化, 故耦合系数是影响系统传输效率的主要因素。本文搭建了电动汽车动态无线供电实验平台验证传输距离、移动距离、耦合角度和负载大小对传输性能的影响。实验平台如图 10 所示, 包括能量发射箱、双发射线圈、接收线圈、能量接收箱、碘钨灯阵列、控制电路和测量仪器等, 具体的参数值如表 3 所示。

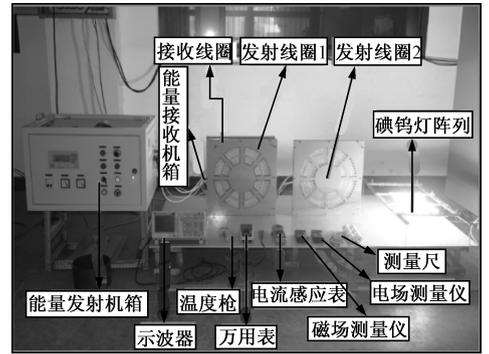


图10 动态无线电能传输体系实验平台

Fig. 10 Experimental set-up

表3 系统参数

Tab. 3 Parameters of system

参数	数值	参数	数值
传输距离/cm	12	线圈匝数	14
谐振频率/kHz	125	线圈半径/cm	20
线圈自感/ $\mu\text{H}$	81	电网电压/V	220
线圈内阻/ $\Omega$	0.054	负载电阻/ $\Omega$	45
输出功率/kW	3.3	谐振电容/nF	20
滤波电容/ $\mu\text{F}$	4	变压器变比	12:7
可控硅	H3P150FYB	逆变 MOS	HR-WX3KW
接收整流模块	DSEI60-06A	接收滤波电感/ $\mu\text{F}$	4

电动汽车在路面行驶时,会因为路况问题而出现电动汽车垂直离地间隙波动的情况。保持发射线圈1开启、发射线圈2关闭,接收线圈与发射线圈1垂直正对、无偏移夹角,系统工作在谐振频率。在8~20cm范围内改变两线圈距离,测量电网端输入功率、负载端输出功率,输入、输出功率和效率如图11所示。由于功率和效率是传输距离的二次函数,由图11可以看出,功率和效率随着传输距离的增加会先变大后变小。系统在传输距离12cm处获得负载功率3.3kW,对应峰值效率为91.85%,耦合系数为临界耦合。功率峰值处为传输距离13cm的3.4kW,对应的效率为79.95%。当传输距离在12cm的15%范围波动时,负载获得功率基本稳定,可保证电动汽车的动态供电稳定性。

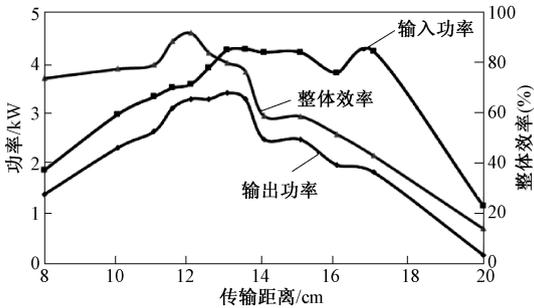


图11 传输距离对输入、输出功率和效率的影响

Fig. 11 Vertical distance vs. input power, output power and efficiency

电动汽车行驶时,车辆底盘会因为路况问题而与路面产生不同的夹角,由式(24)可知,耦合角度影响互感的大小。保持发射线圈1开启、发射线圈2关闭,接收线圈右端与发射线圈1保持12cm的距离,移动左端,使得接收线圈与发射线圈1的平面延长线呈不同角度,系统功率和效率随着耦合角度变换而变化,如图12所示。可以看出,在夹角大于30°后,系统传输性能快速下降,故应保证实际供电过程中汽车底盘与地面的夹角不大于30°。

以20cm间距固定两个发射线圈,保持12cm的垂直传输距离,将接收线圈与发射线圈1垂直正对,以10cm为步长水平移动,系统输入、输出功率和效率值如图13所示。可以看出,当接收线圈位于30cm处时,发射端谐振电容值为10nF,电感值为162 $\mu$ H,系统为谐振状态,但因耦合系数减小,负载功率变为0.94kW,对应47.7%的效率,但在整个周期内,负载可获得连续的电能供应,适用于电动汽车动态无线供电系统。

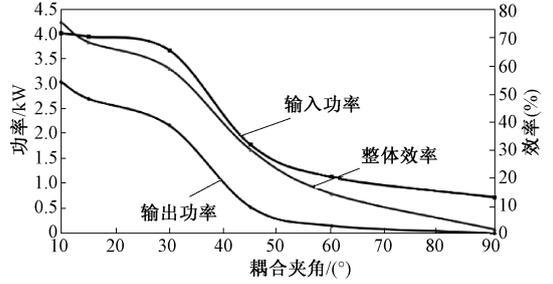


图12 耦合角度对系统功率和效率的影响

Fig. 12 Coupling angle vs. output power and efficiency

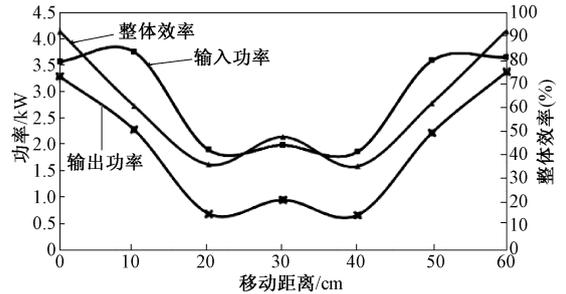


图13 移动距离对功率和效率的影响

Fig. 13 Movement distance vs. output power and efficiency

基于传输距离的实验中,传输距离固定为12cm,负载阻值从45~120 $\Omega$ 递增,系统输出功率和效率的变化如图14所示。由式(12)和式(14)可知,负载功率和效率分别有其最佳负载,当负载大于45 $\Omega$ 时功率和效率随着负载增加而减小,负载为120 $\Omega$ 时功率降到1.2kW,效率降为60%,所以通过增加阻抗匹配电路可以减小负载对输出性能的影响。

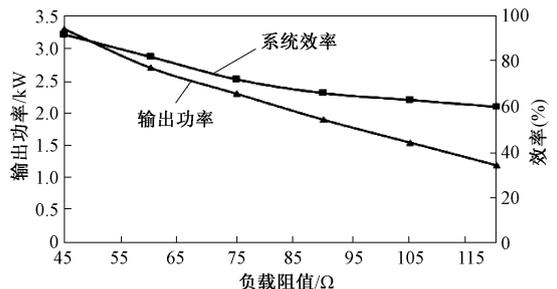


图14 负载阻值对系统输出功率和效率的影响

Fig. 14 Load vs. output power and efficiency

## 5 结论

本文研究了用于电动汽车的磁耦合谐振式动态无线电能传输系统,采用了PSSP补偿、多初级绕组串联的分布式能量耦合装置。根据电路原理和互感

理论推导了单线圈和双线圈系统输出功率和效率的表达式, 分析可知, 输出功率和效率均存在最佳负载值, 提高耦合系数  $k$  和品质因数  $Q$  均可增大传输效率, 双线圈工作时, 发射线圈间互感对耦合系数  $k_{12}$  的影响可以忽略。搭建仿真模型和实验平台, 分析得出输出功率和效率均存在最佳传输距离, 耦合角度超过  $30^\circ$  后系统性能快速下降。设计的动态无线供电系统实现了 12cm 传输 3.3kW 电能, 在移动距离内整体效率最高为 92%, 可为电动汽车无线动态供电。研究结果对于电动汽车动态无线电能传输系统的设计具有一定的参考价值。

### 参考文献 (References):

- [1] Onar O C, Miller J M, Campbell S L, et al. A novel wireless power transfer for in-motion EV/PHEV charging [A]. 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [C]. New York, USA, 2013. 3073-3080.
- [2] Moon H, Ahn S, Chun Y. Design of a novel resonant reactive shield for wireless charging system in electric vehicle [A]. IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC) [C]. New York, USA, 2014. 220-223.
- [3] 陈文仙, 陈乾宏 (Chen Wenxian, Chen Qianhong). 共振式无线电能传输技术的研究进展与应用综述 (Review and research progress of magnetic resonance wireless) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (9): 35-47.
- [4] Campi Tommaso, Cruciani Silvano, Maradei Francesca, et al. Near-field reduction in a wireless power transfer system using LCC compensation [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59 (2): 686-694.
- [5] Maglaras L A, Topalis F V, Maglaras A L. Cooperative approaches for dynamic wireless charging of electric vehicles in a smart city [A]. 2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON) [C]. New York, USA, 2014. 1365-1369.
- [6] Thai Van X, Choi Su Y, Choi Bo H, et al. Coreless power supply rails compatible with both stationary and dynamic charging of electric vehicles [A]. 2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC) [C]. New York, USA, 2015. 1-5.
- [7] Covic G A, Boys J T. Modern trends in inductive power transfer for transportation applications [J]. Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1 (1): 28-41.
- [8] Choi S, Huh J, Lee W Y, et al. New cross-segmented power supply rails for roadway-powered electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (12): 5832-5841.
- [9] Miller J, Onar O, White C, et al. Demonstrating dynamic wireless charging of an electric vehicle: The benefit of electrochemical capacitor smoothing [J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2014, 1 (1): 12-24.
- [10] 孙跃, 夏晨阳, 戴欣, 等 (Sun Yue, Xia Chenyang, Dai Xin, et al.). 感应耦合电能传输系统互感耦合参数的分析与优化 (Analysis and optimization of mutual inductance for inductively coupled power transfer system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2010, 30 (33): 44-50.
- [11] 苏玉刚, 张帅, 徐勇, 等 (Su Yugang, Zhang Shuai, Xu Yong, et al.). 电动汽车无线供电系统电能发射线圈设计与切换控制 (Design and switching control of power supply coils applied to ICPT-based electric vehicles) [J]. 西南交通大学学报 (Journal of Southwest Jiaotong University), 2016, 51 (1): 168-176.
- [12] 宋凯, 朱春波, 李阳, 等 (Song Kai, Zhu Chunbo, Li Yang, et al.). 用于电动汽车动态供电的多初级绕组并联无线电能传输技术 (Wireless power transfer technology for electric vehicle dynamic charging using multi-parallel primary coils) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (17): 4445-4453.
- [13] 吴晓康, 杨庆新, 张献, 等 (Wu Xiaokang, Yang Qingxin, Zhang Xian, et al.). 电动汽车动态充电中耦合结构研究及其效率分析 (Coil structure study and efficiency analysis for the driving wireless charging system of electric car) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (9): 8-13.
- [14] 邓亚峰, 薛建国, 乔向杰, 等 (Deng Yafeng, Xue Jianguo, Qiao Xiangjie, et al.). 谐振式无线供电系统最大有效传输距离研究 (Study on maximum effective transmission distance of electromagnetic resonant wireless power supply) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2013, 32 (2): 82-86.
- [15] 汤伟, 杨瑞霞, 郭志涛, 等 (Tang Wei, Yang Ruixia, Guo Zhitao, et al.). 一种高 Q 值的谐振式无线能量传输技术的应用 (Applied research on a high-Q resonant wireless power transmission technology) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2012, 31 (4): 75-78, 91.

## Design and characteristics analysis on dynamic wireless power transfer system with multi-serial primary coils

ZHAO Jing-ying<sup>1</sup>, ZHAO Ji-xin<sup>1</sup>, XING Ying-xiang<sup>1</sup>, CUI Yu-long<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. School of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Wireless power transmission (WPT) technology is a kind of safe, convenient and autonomous way to charge. Dynamic wireless power transmission technology is the key to solve the problems of the electric vehicle's short mileage and high cost of battery. In this paper, the new energy distributed dynamic power supply system is designed. The independent high-frequency inverter is connected in series with multiple sets of LC-series compensated structures controlled by switches. The energy is automatically assigned according to the position of the vehicle. According to the design, the formulas of the output power and the efficiency are obtained. The simulation model and the test platform are built up. The influences of transition distance, movement distance, coupling angle and load on transition performance of system are analyzed. The prototype can realize that output power is 3.3kW, frequency is 120kHz and the efficiency is higher than 90%, which satisfies the continuous electric power supply for electric vehicles.

**Key words:** wireless power transfer(WPT); electric vehicle(EV); dynamic charging; magnetically coupled resonance