

中国电机工程学报
Proceedings of the CSEE
ISSN 0258-8013, CN 11-2107/TM

《中国电机工程学报》网络首发论文

题目: 动态无线充电系统自解耦型分段导轨及其双模切换策略研究
作者: 张献, 徐伟达, 王奉献, 苑朝阳, 杨庆新, 代中余
DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.230797
收稿日期: 2023-04-24
网络首发日期: 2023-07-24
引用格式: 张献, 徐伟达, 王奉献, 苑朝阳, 杨庆新, 代中余. 动态无线充电系统自解耦型分段导轨及其双模切换策略研究[J/OL]. 中国电机工程学报.
<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230797>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

动态无线充电系统自解耦型分段导轨及其 双模切换策略研究

张献¹, 徐伟达¹, 王奉献¹, 苑朝阳¹, 杨庆新², 代中余¹

(1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学), 天津市北辰区 300130;
2. 新能源电力变换传输与智能控制天津市重点实验室(天津理工大学), 天津市西青区 300382)

Research on Self-decoupling Segmented Coil Rail and Dual-mode Switching Strategy of Dynamic Wireless Charging System

ZHANG Xian¹, XU Weida¹, WANG Fengxian¹, YUAN Zhaoyang¹, YANG Qingxin², DAI Zhongyu¹

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment (Hebei University of Technology), Beichen District, Tianjin 300130, China; 2. Tianjin Key Laboratory of New Energy Power Conversion, Transmission and Intelligent Control (Tianjin University of Technology), Xiqing District, Tianjin 300382, China)

ABSTRACT: In this paper, a dynamic wireless charging system for electric vehicles with self-decoupling segmented transmitter coils is presented. To this end, based on the naturally decoupling orthogonal solenoid and square coils, the solenoid and square coils are hierarchically connected in series to form the transmitter coil, eliminating the cross-coupling effects of the adjacent transmitter coils on the design of the compensation topology. To obtain a stable charging performance, a two-mode working method, where one or two transmitter coils are activated, is proposed based on the optimal charging area. A solenoid-detecting coil orthogonal wounded on the receiver coil is designed to detect the position of the receiver. The natural decoupling feature avoids the interference between the detection signal and power delivery. The performance and effectiveness of the proposed design are evaluated based on a scaled-down prototype. The experimental results show that the stability of the system output power is improved by 19.5%, and the maximum efficiency of the system can reach 92.3%.

KEY WORDS: electric vehicles; dynamic wireless charging; self-decoupling; position detection; dual-mode switching

摘要: 为抑制电动汽车动态无线充电系统发射单元间的交叉耦合,降低其对系统谐振参数设计的影响,本文利用螺线管线圈与平面线圈正交解耦特性,提出一种自解耦分段发射导轨,其中螺线管为分级叠层绕制,实现了相邻发射单元间的自解耦。为降低系统输出参数波动,基于互感动态变化规律,确定了系统最佳充电区间,并提出一种双模

工作模式及其分段切换策略,实现对发射线圈实能顺序的实时控制。为实现双模工作状态的有序变换,设计了自解耦检测线圈结构,该检测线圈采用单层螺线管绕制并与接收线圈正交,避免了检测信号与电能传输之间的干扰。最后,搭建实验平台对所提方法的有效性进行了验证。实验结果表明,系统输出功率平稳性提升了19.5%,系统的最高效率可达92.3%。

关键词: 电动汽车; 动态无线充电; 自解耦线圈; 位置检测; 双模切换

0 引言

电动汽车动态无线充电技术可显著降低车载电池存储容量,进而提高电动汽车的续航能力,逐渐成为国内外研究团队的研究热点^[1-5]。平滑的耦合互感是实现稳定动态无线电能传输的关键,目前主流技术路线包括1.动态位置检测^[6-8]、2.耦合结构设计^[9,10]、3.高频开关电源设计^[11,12]。其中动态位置检测用于判定耦合机构发射端与接收端之间的相对位置,实现分段发射单元的有序实能。通过对耦合机构的优化设计,实现系统互感的平滑过渡^[13-15]。高效可靠的高频开关电源为耦合机构小型化提供技术支撑,同时也将面临强负载适应性与高过载能力的需求。如图1所示为电动汽车动态无线充电系统示意图。

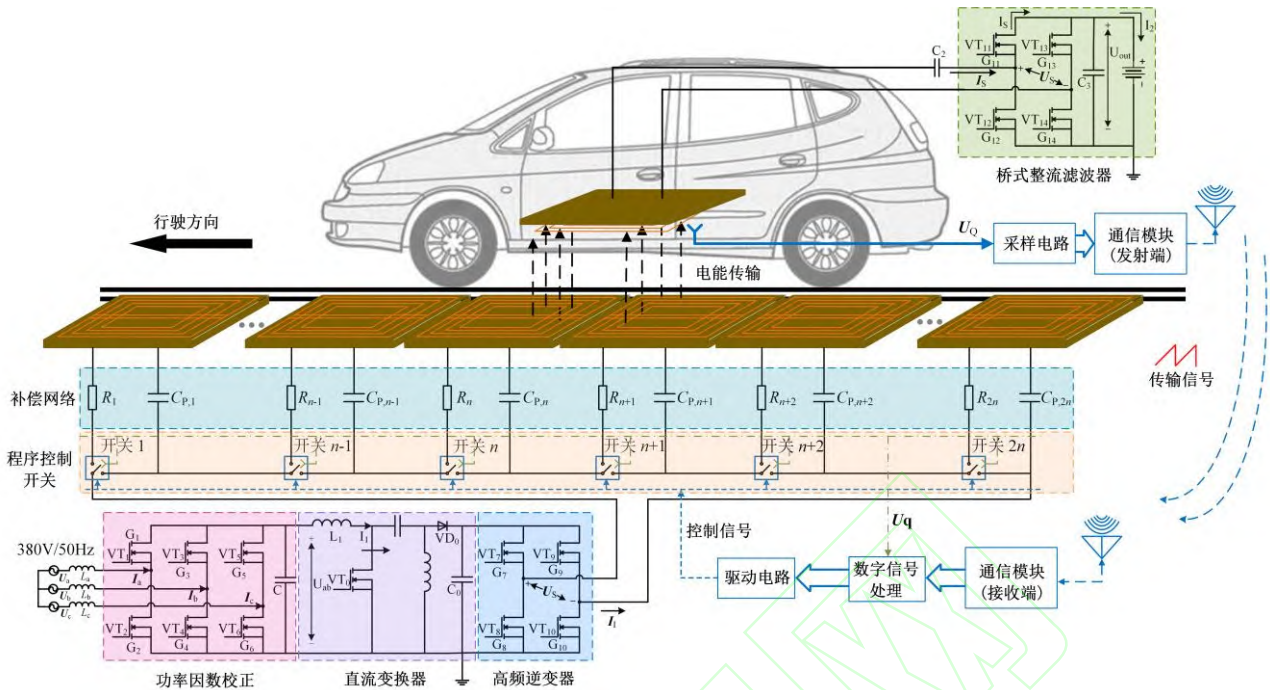


图1 电动汽车动态无线充电系统示意图

Fig.1 Diagram of a dynamic wireless charging system for electric vehicles

为实现动态充电过程中电能稳定接收,需保证发射与接收线圈间耦合强度处于动态平滑的状态,通常采取发射侧线圈阵列平铺的方案实现^[16-18]。为提高电能利用率,同时避免发射线圈空载时谐振电路承受大电流冲击,可对电能接收线圈的位置实时检测,同时采用逻辑单元对发射线圈的实能顺序进行实时控制^[19, 20]。位置检测方法可分为主动检测与被动检测,其中被动检测容易受外界干扰,而造成漏测、误测^[21];主动检测^[22-24]由于信号传输独立于电能传输特性,弥补了被动检测的缺陷,受到国内外学者的广泛关注。

目前,国内外研究机构对于电动汽车的位置检测已有较为成熟的研究,提出诸多位置检测方法及相关成果。武汉大学团队提出一种通过检测初级侧的电压和电流之间相角变化实现接收线圈定位与发射线圈启停切换的方法。然而检测信息仅在车辆离开第一发射单元之后才可用,在高速行驶的电动汽车场景下很难实施。此外,该方法中的切换控制策略一次仅能切换一个发射单元,不能保证在电动汽车行驶过程中功率的稳定^[25]。

使用辅助线圈可实现接收单元的位置检测。日本大阪工业大学提出了一种检测线圈结构,通过采集、分析探测线圈的电压差检测接收线圈位置。该方法通过简单的配置即可获得所需的检测精度,然而作为被动位置检测方法,易引起检测信息错误或丢失的情况,影响检测的准确性和可

靠性^[26]。奥克兰大学团队提出一种基于三线圈的辅助检测线圈设计方案,该方案增设两个信号检测线圈,通过获取车辆运行过程中发射端和接收端线圈电压的相位差来计算车辆的实时位置。然而,由于相位和互感变化较小,易受系统失谐和电磁干扰的影响,难以实现精准、实时的位置监测^[23]。此外,其他检测设备如传感器^[27]、GPS^[28]以及图象识别^[29]等也可用于负载位置检测,然而这些传统位置检测装置受环境因素如雨、阴影或污垢的影响很大,并且在多个充电单元之间快速切换过程中可能导致误判。

值得注意的是,由于发射线圈阵列平铺,相邻发射单元之间的交叉耦合不可避免的被引入谐振回路中,不仅增加补偿参数设计与系统分析的复杂程度^[30],而且导致动态无线充电系统的传输特性具有不确定性^[31-33]。本文利用双模切换实现动态的功率平稳。存在不同数量的发射线圈接入系统情况,若不考虑交叉耦合影响,将造成系统谐振点偏移,影响系统输出性能。抑制交叉耦合可简化补偿参数设计与系统分析,同时保证系统输出性能。

本文针对电动汽车动态无线充电分段式发射单元交叉耦合问题,提出一种自解耦式分段导轨。其中,所提出的分级叠层绕制于平面发射线圈的螺线管线圈结构,通过调节螺线管线圈匝数和线间距实现相邻发射单元之间的自然解耦。针对动

态充电系统输出参数波动较大的问题，基于互感动态变化规律，提出一种双模分段切换策略。同时为实现双模工作状态的有序变换，设计了解耦检测线圈结构，实现对接收线圈的实时位置检测，同时避免了检测过程中电能传输通道和信号传输通道之间的电磁干扰，确保检测准确、可靠。本文所提出的耦合线圈结构及分段切换控制策略，考虑交叉耦合带来的影响，改善动态充电系统输出特性，实现恒流输出的同时提升系统效率。

1 自解耦分段发射导轨设计与分析

1.1 相邻发射线圈耦合特性分析

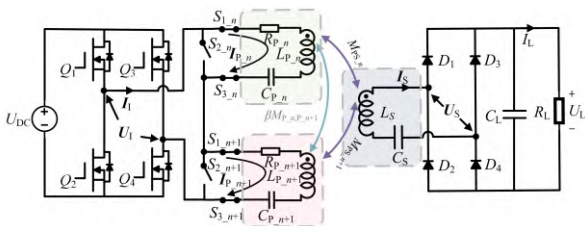


图2 双发射单元SS补偿拓扑电路模型

Fig.2 Dual emitter based SS compensation topology circuit model

当系统工作在谐振频率，双发射单元的SS补偿拓扑电路模型如图2所示，图中 $\beta = 0$ 或 $\beta = 1$ ，分别代表忽略 $M_{P_n, P_{n+1}}$ 和存在 $M_{P_n, P_{n+1}}$ 两种情况。根据电路模型列写回路方程为

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{13} & Z_{14} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_S \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $Z_{11} = R_{P_n} + R_{P_{n+1}} + 2j\omega\beta M_{P_n, P_{n+1}}$; $Z_{12} = -j\omega M_{PS_n} - j\omega M_{PS_{n+1}}$; $Z_{13} = -j\omega M_{PS_n} - j\omega M_{PS_{n+1}}$; $Z_{14} = R_L$ 。进而可求得系统的输入、输出功率为

$$P_{IN} = \frac{U_1^2 (\omega^2 \sum M^2 + R_L \sum R) R_L}{4\beta^2 M_{P_n, P_{n+1}}^2 R_L^2 + (\omega^2 \sum M^2 + R_L \sum R)^2}$$

$$P_{OUT} = \frac{\omega^2 \sum M^2 U_1^2 R_L}{4\beta^2 M_{P_n, P_{n+1}}^2 R_L^2 + (\omega^2 \sum M^2 + R_L \sum R)^2} \quad (2)$$

式中 $\sum M = M_{PS_n} + M_{PS_{n+1}}$; $\sum R = R_{P_n} + R_{P_{n+1}}$ 。令 $U_1 = 50 \text{ V}$, $R_{P_n} = R_{P_{n+1}} = 2 \Omega$, $R_L = 15 \Omega$ ，基于表1参数可得系统工作在双发射-单接收模式下输入、输出功率随接收线圈运动的变化曲线如图3所示。当系统相邻发射单元之间存在交叉互感 $M_{P_n, P_{n+1}}$ 时，系统输入、输出功率明

显低于忽略 $M_{P_n, P_{n+1}}$ 的情况，相邻发射单元之间的交叉耦合会破坏系统原有谐振状态，降低系统传输性能。因此，需抑制发射单元间的交叉耦合现象，保证各发射单元间的独立性。

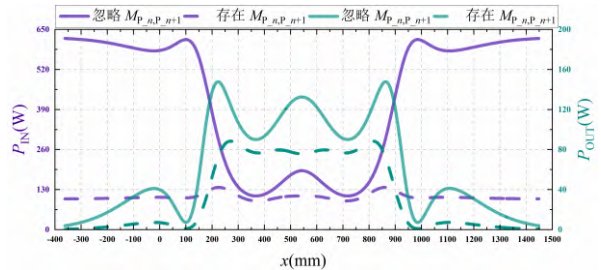
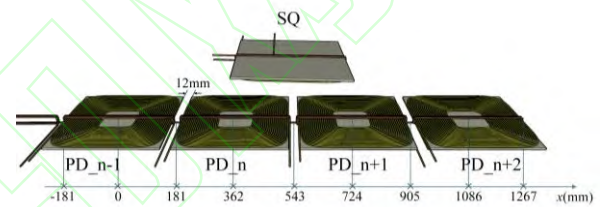


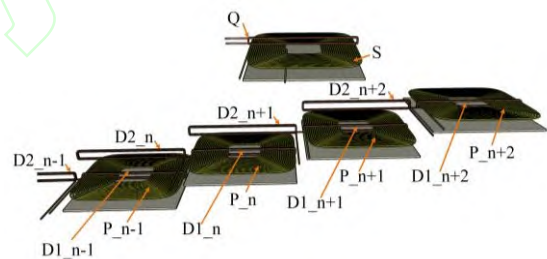
图3 相邻发射单元交叉互感对系统性能影响

Fig.3 Cross-sensing of adjacent transmitter units on system performance

1.2 自解耦分段发射线圈结构设计



(a) 线圈位置示意图



(b) 线圈结构展开示意图

图4 线圈结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the coil structure

图4所示为所提出的自解耦分段发射线圈结构，该结构由4个发射单元组成，即图4(a)所示的 PD_{n-1} 、 PD_n 、 PD_{n+1} 和 PD_{n+2} ，同时标记出4个发射单元所对应的具体位置信息。图4(b)中 $D1_{n-1}$ 、 $D1_n$ 、 $D1_{n+1}$ 、 $D1_{n+2}$ 和 $D2_{n-1}$ 、 $D2_n$ 、 $D2_{n+1}$ 、 $D2_{n+2}$ 表示信号发射线圈，用于发射单元解耦和负载定位，S为接收线圈，Q为接收侧信号检测线圈。图中，电能发射线圈下方及电能接收线圈的上方均与铁氧体紧密贴覆；线圈 P_n 、 $D1_n$ 和 $D2_n$ 同向串联且作为最小发射单元 PD_n ，其中 $D1_n$ 正交绕制于 P_n 上， $D2_n$ 正交绕制于前一个发射单元的

D1_{n-1} 上, 其他发射单元线圈结构同理; Q 作信号检测线圈正交绕制于电能接收线圈 S。线圈结

构参数如表 1 所示。

表 1 线圈结构参数

Table 1 Coil structure parameters

参数	描述	参数值	参数	描述	参数值
D_p	P 线圈尺寸	350 mm × 350 mm × 3 mm	N_p	线圈 P 的匝数	20
D_{d1}	D1 线圈尺寸	356 mm × 11 mm × 14 mm	N_{d1}	线圈 D1 的匝数	3
D_{d2}	D2 线圈尺寸	362 mm × 11 mm × 20 mm	N_{d2}	线圈 D2 的匝数	3
D_s	S 线圈尺寸	350 mm × 350 mm × 3 mm	N_s	线圈 S 的匝数	20
D_q	Q 线圈尺寸	356 mm × 11 mm × 14 mm	N_q	线圈 Q 的匝数	3
s_1	线圈 P 和 S 的线间距	3 mm	d'	线径	3 mm
s_2	线圈 D1、D2 和 Q 的线间距	1 mm	s_3	相邻发射线圈间距	12 mm

1.3 相邻发射线圈的解耦分析

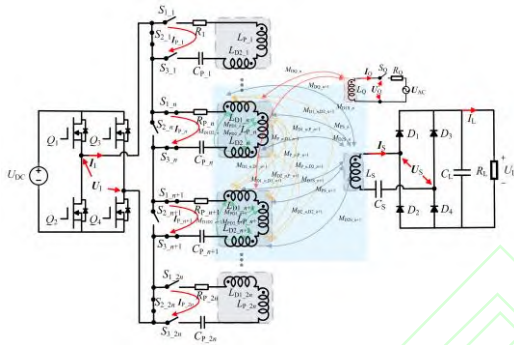


图 5 动态无线充电系统电路模型

Fig.5 Dynamic wireless charging system circuit model

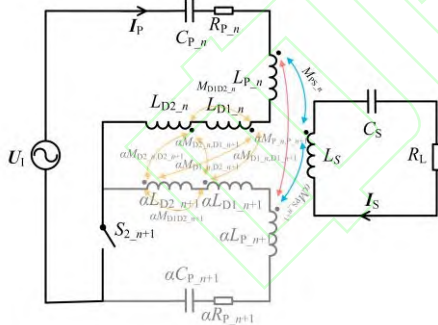


图 6 双发射-单接收耦合 SS 等效模型

Fig.6 Dual transmit-single receive coupled SS equivalence model

基于 SS 补偿拓扑的动态无线充电系统电路模型如图 5 所示。其中, 线圈 D1_n、D2_n 和 Q 分别与 P_n 和 S 正交, 因此它们之间的互感为 0, 即 $M_{D2S_{n+1}} = M_{PD1_n} = M_{PD2_n} = M_{PD1_{n+1}} = M_{PD2_{n+1}} = M_{P_n, D1_{n+1}} = M_{P_n, D2_{n+1}} = M_{D1_n, P_{n+1}} = M_{D2_n, P_{n+1}} = 0$, 避免了信号与电能传输之间的干扰。

通过简化图 5 所示电路, 系统等效电路模型可由图 6 表示。由于分段供电模式下, 双发射-单

接收系统可反映动态磁耦合过程中每个时间点的耦合状态, 因而可作为最小动态耦合 SS 模型进行分析研究。如图 6 所示, $\alpha = 0$ 时, 表示系统处于单发射-单接收模式下运行, $\alpha = 1$ 时, 表示系统处于双发射-单接收模式下运行。

根据基尔霍夫电压定律和欧姆定律, 可得图 6 所示等效电路模型的回路方程为

$$\begin{cases} U_1 = \left(\frac{1}{j\omega C_{P_n}} + j\omega L_{P_n} + \frac{1}{j\omega a C_{P_{n+1}}} + j\omega a L_{P_{n+1}} + 2j\omega a M_{P_n, P_{n+1}} + \sum R_P \right) I_P \\ \quad + j\omega (L_{D1_n} + L_{D2_n} + 2M_{D1D2_n}) I_P \\ \quad + j\omega \left(\begin{matrix} aM_{D1_n, D1_{n+1}} + aM_{D2_n, D1_{n+1}} \\ + aM_{D2_n, D2_{n+1}} + aM_{D1_n, D2_{n+1}} \end{matrix} \right) I_P \\ \quad + j\omega (aL_{D1_{n+1}} + aL_{D2_{n+1}} + 2aM_{D1D2_{n+1}}) I_P \\ \quad - j\omega \sum M_{PS} I_S \\ 0 = \left(\frac{1}{j\omega C_S} + j\omega L_S + R_L \right) I_S \\ \quad - j\omega \sum M_{PS} I_P \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\sum M_{PS} = M_{PS_n} + \alpha M_{PS_{n+1}}$; $\sum R_P = R_{P_n} + \alpha R_{P_{n+1}}$ 。

令 $L_{D_n} = L_{D1_n} + L_{D2_n} + 2M_{D1D2_n}$; $aM_{D_n, D_{n+1}} = aM_{D1_n, D1_{n+1}} + aM_{D1_n, D2_{n+1}} + aM_{D2_n, D1_{n+1}} + aM_{D2_n, D2_{n+1}}$; $aL_{D_{n+1}} = aL_{D1_{n+1}} + aL_{D2_{n+1}} + 2aM_{D1D2_{n+1}}$ 。因此, 图 6 所示系统等效电路模型可简化为图 7 所示。

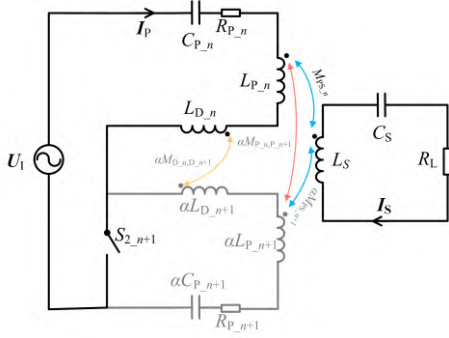
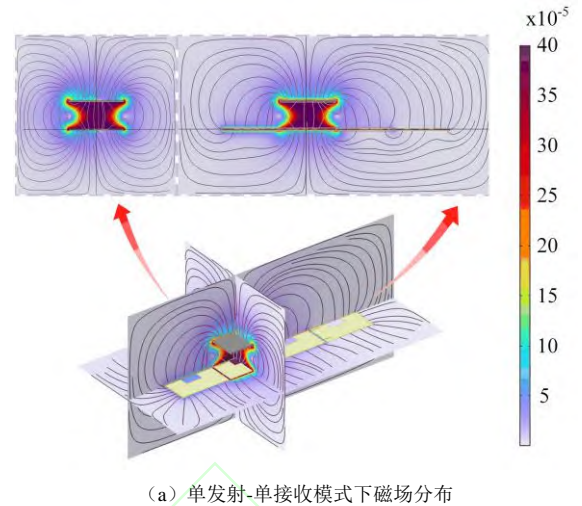


图7 双发射-单接收简化等效电路模型

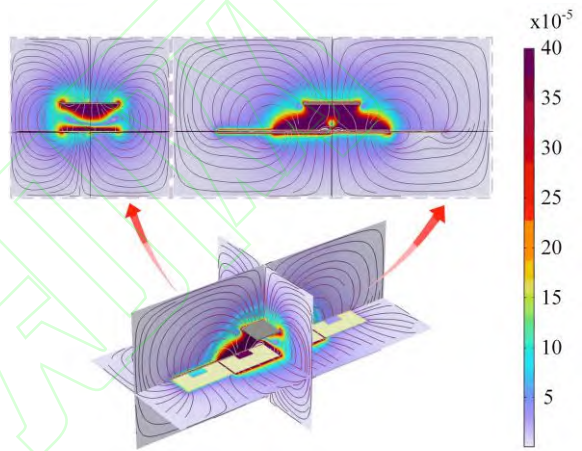
Fig.7 Dual transmit-single receive simplified equivalent circuit model

搭建如图 8 所示的耦合机构分别处于两种不同模式下运行的磁场仿真模型，其中，图 19 (a) 所示为发射单元 PD_n 激励且接收单元位于其正上方时，耦合机构的磁场强度及磁力线分布情况，图 19 (b) 所示为发射单元 PD_n 和 PD_{n+1} 同时激励且接收单元位于位于两个发射单元的交界位置时，耦合机构的磁场强度及磁力线分布情况。令信号发射线圈 D_n 和 D_{n+1} (其中, D_n 由 D1_n 和 D2_n 组成, D_{n+1} 由 D1_{n+1} 和 D2_{n+1} 组成。) 的匝数 N_d 变化范围为 [1, 5], 变化步长为 1, 线圈匝间距 d' 分别为 1 mm、2 mm、3 mm 时, 信号发射线圈与发射线圈之间的互感仿真结果如图 9 所示, 其中 M_{D_n,D_{n+1}} 为 D_n 与 D_{n+1} 的互感, M_{P_n,P_{n+1}} 为两个相邻发射线圈之间的互感。由图 9 结果可知, 当信号发射线圈 D_n 的匝数 N_d = 3 且匝间距 d' = 1 mm 时, M_{D_n,D_{n+1}} + M_{P_n,P_{n+1}} = 0, 此时 αM_{D_n,D_{n+1}} 与 αM_{P_n,P_{n+1}} 相互抵消, 实现相邻发射线圈之间的解耦。

根据仿真结果搭建实物模型并测得两个相邻发射单元之间的互感如表 2 所示。相邻发射单元的互感在 0.3 μH 左右, 相比于解耦之前的相邻发射单元的互感 10 μH, 可见相邻发射单元之间的交叉耦合明显被抑制。将交叉耦合互感 0.3 μH 代入公式 (2), 同时赋值与图 3 相同。当接收线圈位置处于 543 mm 时, 计算得输入功率和输出功率分别为 195.23 W 和 134.21 W。与交叉耦合完全被抑制时输入功率 195.35 W 和输出功率 134.29 W 的误差分别为 0.1% 和 0.06%。表明此结构实现相邻发射单元之间的自然解耦, 满足实际工程需要。



(a) 单发射-单接收模式下磁场分布



(b) 双发射-单接收模式下磁场分布

图8 两种模式下耦合机构磁场仿真模型

Fig.8 Simulation model of the magnetic field of the coupling mechanism in two modes

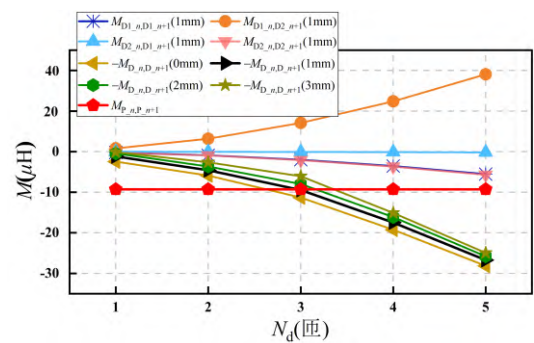


图9 相邻发射单元的解耦仿真分析

Fig.9 Simulation analysis of decoupling of adjacent emission units

表2 实际测量相邻发射单元互感值

Table 2 The measured mutual inductance of adjacent transmitter coils

参数	描述	参数值
M_{PD_{n-1},PD_n}	线圈 PD _{n-1} 和 PD _n 的互感	0.286 μH

M_{PD_n,PD_n+1}	线圈 PD _n 和 PD _{n+1} 的互感	0.291 μH
M_{PD_n+1,PD_n+2}	线圈 PD _{n+1} 和 PD _{n+2} 的互感	0.305 μH

2 动态无线充电系统建模分析

2.1 输出功率和系统效率分析

解耦后的双发射-单接收系统等效电路模型如图 10 所示, U_1 为经过逆变后的输入电压, I_P 为电能发射线圈电流, I_S 为电能接收线圈电流, R_{P_n} 为发射线圈内阻, R_L 为负载电阻, L_{P_n} 、 $L_{P_{n+1}}$ 分别为相邻发射线圈的电感, L_{D_n} 、 $L_{D_{n+1}}$ 分别为相邻发射线圈的信号发射线圈自感, L_S 为接收线圈自感, M_{PS_n} 、 $M_{PS_{n+1}}$ 分别为相邻发射线圈与接收线圈之间的互感, C_{P_n} 、 $C_{P_{n+1}}$ 分别为相邻发射线圈的补偿电容, C_S 为接收线圈的补偿电容。

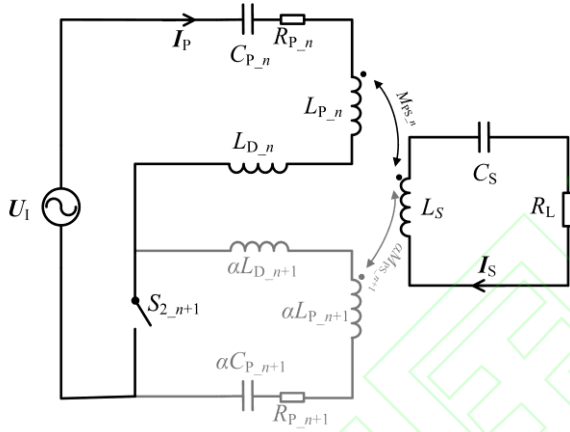


图 10 解耦后 SS 补偿拓扑的等效电路模型

Fig.10 Equivalent circuit model of the decoupled SS compensation topology

根据基尔霍夫电压定律, 可列出相量形式的状态变量方程为

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{21} & Z_{22} \\ Z_{23} & Z_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_P \\ I_S \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $Z_{21} = j\omega L_{P_n} + j\omega L_{D_n} + 1/j\omega C_{P_n} + j\omega L_{P_{n+1}} + \alpha + j\omega L_{D_{n+1}} + 1/j\omega C_{P_{n+1}} + R_{P_n} + R_{P_{n+1}}$; $Z_{22} = -j\omega M_{PS_n} - j\omega M_{PS_{n+1}}\alpha$; $Z_{23} = -j\omega M_{PS_n} - j\omega M_{PS_{n+1}}\alpha$; $Z_{24} = 1/j\omega C_S + j\omega L_S + R_L$ 。

当系统处于谐振状态, 系统的工作频率与原、副边谐振频率相同。即 $\omega = 1/[(L_{P_n} + L_{D_n})C_{P_n}]^{1/2} = 1/[(L_{P_{n+1}} + L_{D_{n+1}})C_{P_{n+1}}]^{1/2} = 1/(L_S C_{P_n})^{1/2}$ 。此时 (4) 满足

$$\begin{cases} \omega L_{P_n} + \omega L_{D_n} = \frac{1}{\omega C_{P_n}} \\ \omega L_{P_{n+1}}\alpha + \omega L_{D_{n+1}}\alpha = \frac{1}{\omega C_{P_{n+1}}} \\ \omega L_S = \frac{1}{\omega C_S} \end{cases} \quad (5)$$

由此可解得电能发射线圈电流 I_P 、电能接收线圈电流 I_S 分别为

$$\begin{cases} I_P = \frac{U_1 R_L}{\omega^2 \sum M_{PS}^2 + R_L \sum R_P} \\ I_S = \frac{j\omega \sum M_{PS} \cdot U_1}{\omega^2 \sum M_{PS}^2 + R_L \sum R_P} \end{cases} \quad (6)$$

系统输入、输出功率分别为

$$\begin{cases} P_{IN} = \frac{|U_1|^2 R_L}{\omega^2 \sum M_{PS}^2 + R_L \sum R_P} \\ P_{OUT} = \frac{|U_1|^2 \omega^2 \sum M_{PS}^2 R_L}{(\omega^2 \sum M_{PS}^2 + R_L \sum R_P)^2} \end{cases} \quad (7)$$

根据上述分析计算, 系统传输效率为

$$\eta = \frac{\omega^2 \sum M_{PS}^2}{\omega^2 \sum M_{PS}^2 + R_L \sum R_P} \quad (8)$$

2.2 检测线圈上的感应电压分析

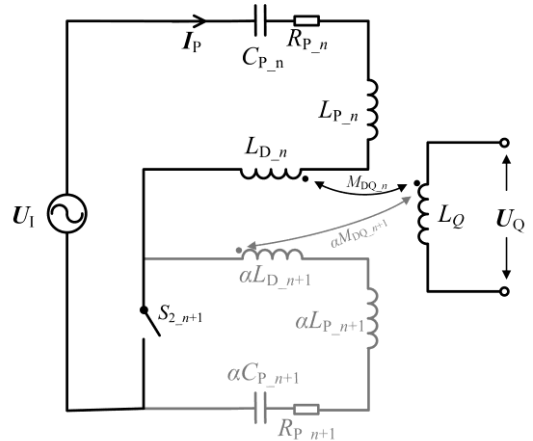


图 11 信号传输电路等效模型

Fig.11 Equivalent circuit model for signal transmission

信号传输电路等效模型如图 11 所示。其中, L_Q 为信号检测线圈电感, M_{DQ_n} 、 $M_{DQ_{n+1}}$ 分别为相邻信号发射线圈与信号检测线圈之间的互感。 U_Q 为检测线上的感应电压, 其值为

$$U_Q = j\omega \sum M_{DQ} \cdot I_P \quad (9)$$

式中 $\Sigma M_{DQ} = M_{DQ_n} + \alpha M_{DQ_{n+1}}$

将式 (6) 代入式 (9) 并化简, 可得

$$U_Q = \frac{j\omega \Sigma M_{DQ} \cdot U_I R_L}{\omega^2 \Sigma M_{PS}^2 + R_L \Sigma R_P} \quad (10)$$

3 位置检测及双模切换控制策略

由式 (7)、(8)、(10) 可知, 影响系统性能 (输出功率、传输效率、检测线圈上的感应电压) 的主要因素是耦合线圈的互感、系统内阻、工作频率以及负载。当系统内阻、工作频率和负载一定时, 耦合线圈之间的互感作为影响系统主要性能的单一因素。

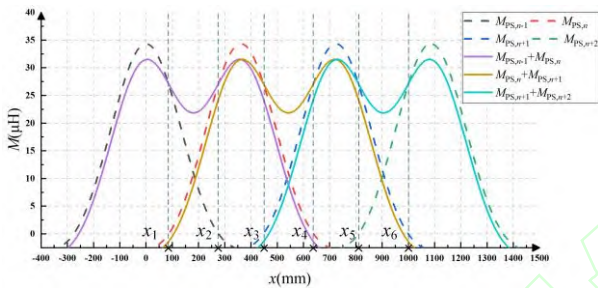


图 12 仿真互感随接收线圈运动变化曲线

Fig.12 Simulated mutual inductance variation curve with receiver coil motion

在耦合全周期下, 即接收线圈沿 x 方向由 $x = -362 \text{ mm}$ 运动至 $x = 1448 \text{ mm}$ 处, 仿真计算所得系统互感变化情况如图 12 所示, 其中实线为双发射-单接收模式下的互感变化曲线, 虚线为单发射-单接收模式下的互感变化曲线。为使系统实现平滑、稳定输出, 采用双发射-单接收和单发射-单接收交替工作模式, 由式 (8) 可知, 耦合互感 ΣM_{PS} 越大系统效率越高, 为保证系统以较高的效率运行, 因此将两种运行模式下互感变化曲线的交点作为分段式导轨最佳切换位置, 即图 12 所示的位置 $x_1 - x_6$ 。当接收线圈运动至 $x = x_1$ 位置时, 打开第二个发射线圈, 使系统进入双发射-单接收模式; 当接收线圈运动至 $x = x_2$ 位置时, 关闭第一个发射线圈使系统恢复至单发射-单接收模式, 依此类推, 实现发射单元各线圈轮流切换。根据上述分析, 当 $x = x_1, x_3, x_5$ 时完成单发射向双发射切换, 当 $x = x_2, x_4, x_6$ 时完成双发射向单发射切换。

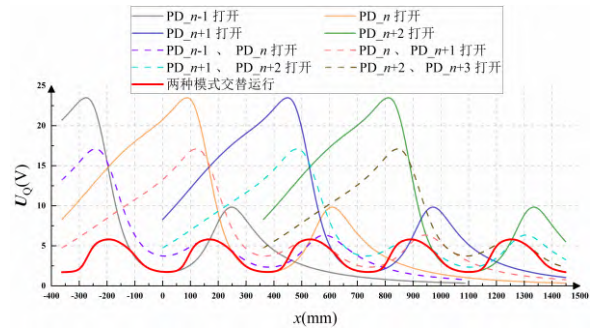


图 13 检测电压随接收线圈运动变化曲线

Fig.13 Detected voltage variation curve with receiver coil movement

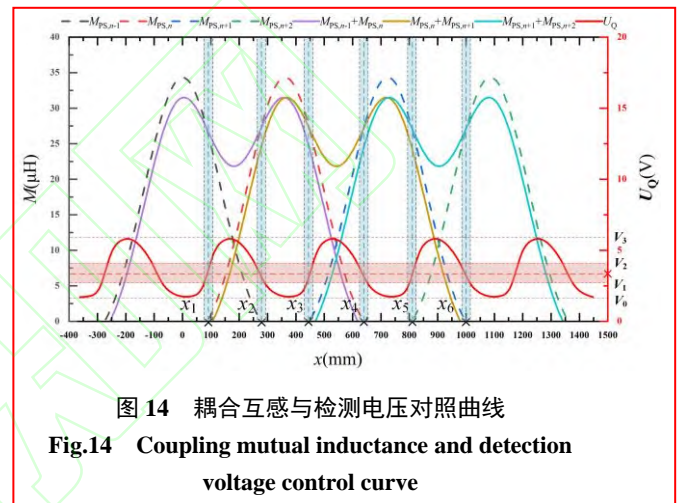


图 14 耦合互感与检测电压对照曲线

Fig.14 Coupling mutual inductance and detection voltage control curve

将 $U_I = 50 \text{ V}$, $R_{P_n} = R_{P_{n+1}} = 2 \Omega$, $R_L = 15 \Omega$, 及仿真互感结果代入式 (10) 中, 对比了单发射-单接收模式、双发射-单接收模式、双发射-单接收和单发射-单接收交替工作模式下检测线圈上的感应电压随位移 x 的变化情况如图 13 所示。通过分析双发射-单接收和单发射-单接收交替工作模式下耦合互感和检测线圈上的感应电压随位移变化的对照曲线, 如图 14 所示。得到最优切换位置 $x_1 - x_6$ 所对应的检测线圈上的感应电压 U_Q 的阈值 V_1 、 V_2 , 以及系统正常运行时, 感应电压 U_Q 的最小值 V_0 和最大值 V_3 , 其中红色阴影部分为感应电压 U_Q 阈值的取值范围, 该范围越小所对应的 U_Q 阈值的取值越准确, 即图 14 中蓝色阴影面积越小, 导轨切换位置越接近上文所提出的最佳切换位置 $x_1 - x_6$ 。根据上文所述设计如图 15 所示的模式切换控制流程。具体步骤如下:

- 1) 系统开机, 给车载端的信号检测线圈施加激励 U_{AC} , 同时采集地面端每个发射单元的电压值 U_q , 当采集到某个单元的感应电压 $U_q > V_q$ 时, 系统判定该接收线圈位于该发射单元上方, 若不满足 $U_q > V_q$, 则重新施

加激励 U_{AC} 。

- 2) 数据初始化, 此时 $i=1, j=0$, 并将步骤 1) 中系统所判定的发射单元设置为 PD_1, 同时触发系统电源 U_{DC} 。
- 3) 采集检测电压 U_Q , 并判断其模值是否在设定的 U_Q 最大值和最小值之间, 若满足则进行下一步判断, 若不满足则重启系统并返回至步骤 1)。
- 4) 判断是否执行关机操作, 若满足此条件, 则关闭充电系统, 若不满足, 则进行下一步操作。
- 5) 判断 i 和 j 是否更新, 若 i 已更新, 则打开发射单元 PD_ i , 若 j 已更新, 则关闭发射单元 PD_ j 。
- 6) 检测电压 U_Q , 并判断其模值是否在设定的阈值之间, 若满足则进行下一步判断, 若不满足则返回至步骤 3)。
- 7) 判断 U_Q 的变化趋势, 若 U_Q 呈上升趋势, 则令 $i = i + 1$, 若 U_Q 呈下降趋势, 则令 $j = i + 1$, 最后返回至步骤 3), 继续循环整个控制流程。

其中, 流程 1) 中 U_{AC} 为信号检测开口线圈施加的激励, 利用车载电源为 D/A 电源模块供电, 其目的是考虑车辆在随机位置进入充电位置或某个发射线圈发生故障导致充电中断, 重新判定车辆终点位置, U_{AC} 只是一个短暂的激励, 当发射单元的采集到 $U_q > V_q$ 后立即断开, V_q 的设定是根据车载端激励电源的大小来确定; 流程 3) 中 U_Q 最大值 V_3 和最小值 V_0 , 通过图 13 所示检测电压在系统正常运行时 U_Q 的范围来设定, 其目的为针对由发射线圈故障引起的控制逻辑乱序问题; 流程 4) 则主要针对车辆在随机位置驶离及车载电池以充满而停止充电。

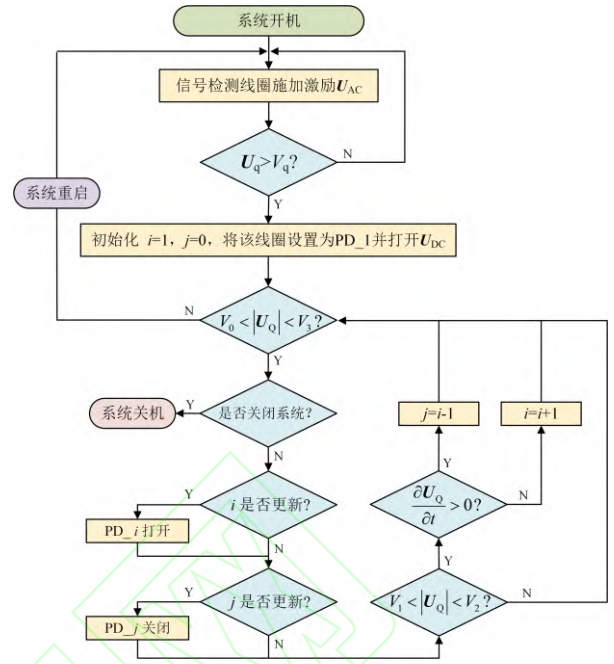


图 15 模式切换控制流程图

Fig.15 Mode switching control flow chart

图 16 所示为发射单元与接收线圈的相对位置及控制时序, 更加清晰的展现了在接收线圈沿发射单元水平方向运动过程中, 接收线圈与发射线圈的位置关系, 以及发射线圈的切换顺序。



图 16 发射单元与接收线圈的相对位置及控制时序图

Fig.16 Relative position of transmitter unit and receiver unit and control timing diagram

4 实验验证

为验证本文所提出的结构及方法的有效性, 依据表 1 所示线圈结构参数搭建动态无线充电实验平台, 如图 17 所示, 发射端由直流电源、上位机、逆变器、原边补偿电容、发射线圈和信号发射线圈组成。逆变器通过上位机触发, 并将数据反馈给上位机, 经控制模块运算处理后完成对分段导轨的实时控制, 其中控制芯片采用 STM32F103RCT6, 开关器件采用 HF115F/012-1ZS1 功率继电器。接收端主要包括电能接收线圈、信号检测

表 3 实验参数

Table 3 Experimental parameters

参数	描述	参数值	参数	描述	参数值
d	电能耦合线圈的纵向距离	175 mm	L_Q	线圈 Q 的自感	13.65 μH
f	谐振频率	84.8 kHz	$C_{PD_{n-1}}$	线圈 PD _{n-1} 的补偿电容	18.07 nF
$R_{P_{n-1}}$	线圈 PD _{n-1} 的内阻	0.919 Ω	C_{PD_n}	线圈 PD _n 的补偿电容	17.16 nF
R_{P_n}	线圈 PD _n 的内阻	1.139 Ω	$C_{PD_{n+1}}$	线圈 PD _{n+1} 的补偿电容	16.71 nF
$R_{P_{n+1}}$	线圈 PD _{n+1} 的内阻	1.221 Ω	$C_{PD_{n+2}}$	线圈 PD _{n+2} 的补偿电容	16.78 nF
$R_{P_{n+2}}$	线圈 PD _{n+2} 的内阻	1.187 Ω	C_S	线圈 S 的补偿电容	19.24 nF
R_S	线圈 S 的内阻	0.604 Ω	U_1	输入电压	50 V
R_Q	线圈 Q 的内阻	0.242 Ω	V_q	U_q 限值	0.5 V
$L_{PD_{n-1}}$	线圈 PD _{n-1} 的自感	194.01 μH	V_0	U_Q 最小值	1 V
L_{PD_n}	线圈 PD _n 的自感	204.35 μH	V_1	U_Q 阈值下限	2.5 V
$L_{PD_{n+1}}$	线圈 PD _{n+1} 的自感	209.97 μH	V_2	U_Q 阈值上限	3.5 V
$L_{PD_{n+2}}$	线圈 PD _{n+2} 的自感	208.96 μH	V_3	U_Q 最大值	7 V
L_S	线圈 S 的自感	182.25 μH			

线圈、副边补偿电容、整流器、电子负载、DC/AC 电源模块及信号采集传输模块，其中信号采集传输模块将采集到的信号通过无线通讯模块 HF-LPT270 发送上位机，实现接收端与发射端的信息交互，系统参数如表 3 所示，其中 U_q 限值、 U_Q 阈值、 U_Q 最大值以及 U_Q 最大值依据第 3 节中的分析以及本实验所采用线圈尺寸和线圈位置所设定的特定值。

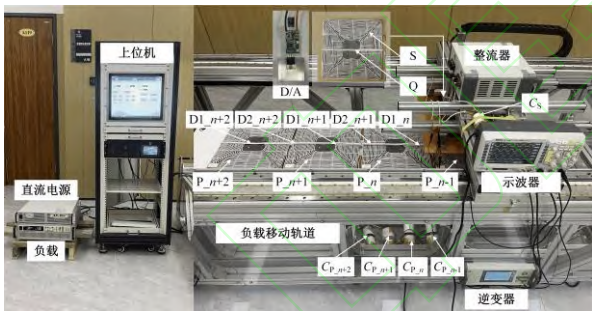


图 17 动态无线充电系统实验平台

Fig.17 Experimental platform for dynamic wireless charging systems

本文实验时接收线圈的移动速度为 1m/s。影响分段导轨切换速度的因素主要包括采样模块，采样模块采样速度、控制模块指令执行速度。本文采用的控制芯片执行速度为 90MIPS/MHz，处理单条指令的执行时间约为 11ns。实验的采集模块的采集速度为 100kpsps，综上分析，从信号检测到完成导轨切换所需时间约为 100ms。两个相邻切换点间的距离为 362mm，实验 1m/s 的线圈移动速度小于相邻切换距离与信号检测到完成导轨切换所需时间的比值。本实验仅为功能验证实验，

在实际工程中可以通过增加线圈大小和线圈间距来延长接收线圈从一个切换点到下一个切换点的时间来适应车辆更高的行驶速度。

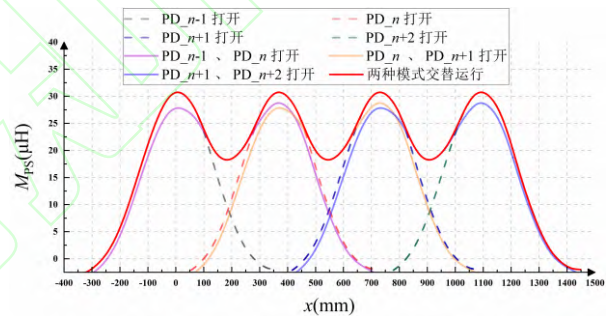


图 18 实验互感随接收线圈运动变化曲线

Fig.18 Experimental mutual inductance variation curve with receiver coil motion

图 18 所示为系统工作在单发射-单接收模式、双发射-单接收模式以及双发射-单接收和单发射-单接收交替工作模式下实验测量的互感随位移 x 的实时变化曲线，图中 M_{PS} 为电能发射线圈 P 与电能接收线圈 S 之间的互感，与上述图 12 所示仿真互感结果基本吻合，最大误差为 4.41%，因此证明了仿真分析的准确性。在接收线圈运动的过程中，双发射-单接收和单发射-单接收交替工作模式下实验测量的互感随位移 x 的实时变化曲线，明显比其他两种模式更加平滑、稳定，满足动态运行的稳定性要求。

以 4 个发射单元为例完成实验验证，在系统初始状态，即 t_1 时刻，第一个发射单元常开，接收线圈位于第一个发射单元的正上方 175 mm 处，此时接收线圈开始沿水平方向向第二个发射单元

运动，到 t_2 时刻，第二个发射单元打开，系统由单发射-单接收模式转化为双发射-单接收模式，并在此模式下运行至 t_3 时刻，第一个发射单元关闭，再次回归单发射-单接收模式，依此类推，系统实现在双发射-单接收和单发射-单接收交替工作模式下连续稳定运行。

图 19 所示为系统工作在谐振频率时，接收线圈沿水平方向运动过程中发射端和接收端的输

入、输出电压和电流波形。 U_I 为系统输入电压， I_I 为发射端电流， I_S 为接收线圈的电流， U_Q 为检测线圈上的感应电压。在接收线圈运动过程中，输出电流 I_S 波动较小，由此验证了输出功率的稳定性，证明了系统供电的稳定性和连续性。 U_Q 在整个运动过程中周期性变化，证明了位置检测方法和模式切换策略的正确性和有效性。

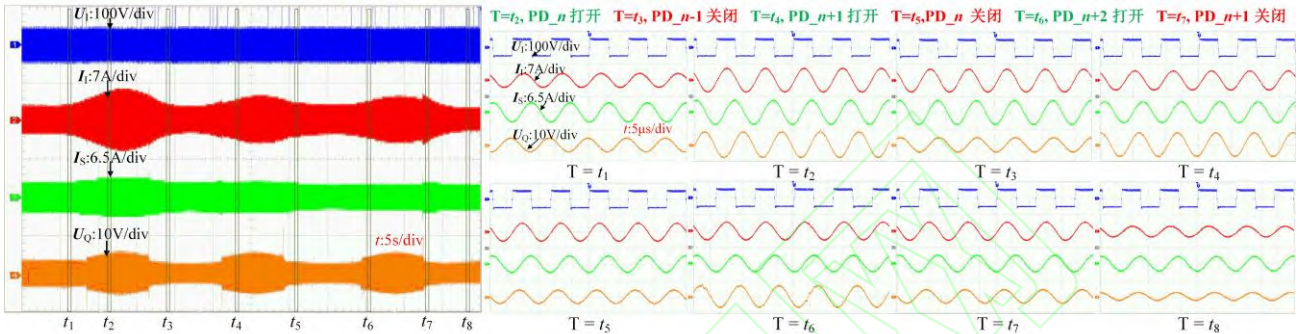
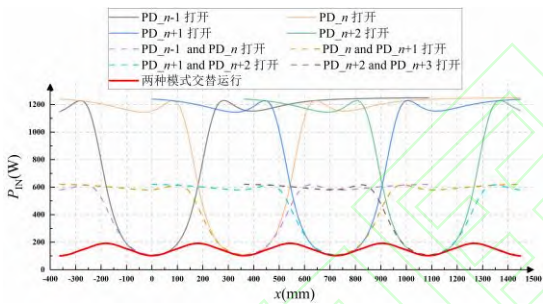
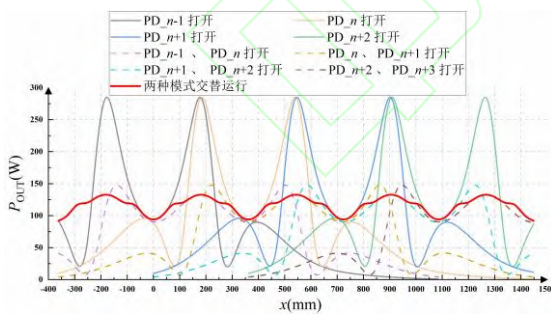


图 19 接收线圈沿着发射单元运动的动态响应

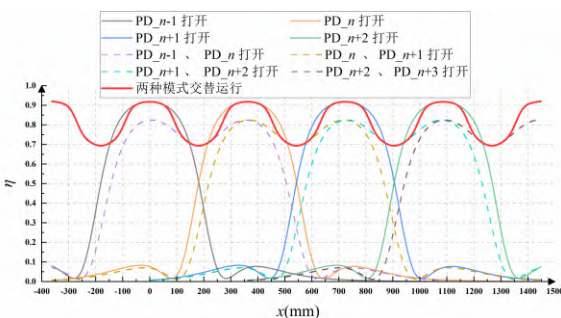
Fig.19 Dynamic response of the receiver unit along the motion of the transmitter unit



(a) 输入功率变化曲线



(b) 输出功率变化曲线



(c) 系统效率变化曲线

图 20 系统功率和效率随接收线圈运动变化曲线

Fig.20 System output power and efficiency curves with receiver coil motion

根据实验结果绘制系统在不同模式下输入、输出功率和效率随接收线圈运动得变化曲线，如图 20 所示。在单发射-单接收模式下，输出功率波动较大，导致系统的平均效率较低。双发射-单接收模式下，尽管输出功率相比于单发射-单接收模式较为平稳，但是其系统效率的峰值有所降低，造成系统的平均效率降低。双发射-单接收和单发射-单接收两种模式轮流交替作用时，输出功率和系统效率相比与以上两种模式单独作用时均有所改善，相比于单发射-单接收模式，其输出功率波动下降了 19.5%，系统的整体效率提升了 9.8%，相比于双发射-单接收模式，其输出功率波动下降了 9.5%，系统的整体效率提升了 5%。因此，双发射-单接收和单发射-单接收交替工作模式为系统运行的最佳选择，系统在此模式下运行效率最高可达到 92.3%。

5 结论

本文提出了一种自解耦式分段导轨及其双模式切换策略。首先，利用螺线管线圈与平面线圈正交解耦特性，设计了螺线管为分级叠层绕制于平面耦合线圈的螺线管线圈结构，有效抑制了电动

汽车动态无线充电系统发射单元间的交叉耦合,实现了相邻发射单元间的自解耦。其次,基于电动汽车无线充电的互感动态特性,为降低系统输出参数波动,分析了系统工作在不同模式下互感波动情况,并提出分段式导轨双模切换策略。为实现双模工作状态的有序变换,再次,设计了采用单层螺线管绕制并与接收线圈正交的自解耦检测线圈结构,避免了检测信号与电能传输之间的干扰,增强了检测的可靠性,并保证了双模工作状态的有序变换。最后,搭建实验平台对所提方法的有效性进行了验证。证明了所提出的自解耦型分段发射导轨的耦合线圈结构和位置检测方法,及模式切换策略的可行性。实验结果表明,采用该耦合结构及分段导轨控制策略,系统输出功率平稳性提升了19.5%,系统的最高效率可达到92.3%。确保电动汽车动态无线充电更加高效、连续、稳定。

参考文献

- [1] 杨庆新, 张献, 章鹏程. 电动车智慧无线电能传输云网[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 1-12.
YANG Qingxin, ZHANG Xian, ZHANG Pengcheng. Intelligent wireless power transmission cloud network for electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 1-12 (in Chinese).
- [2] 朱春波, 姜金海, 宋凯, 等. 电动汽车动态无线充电关键技术研究进展[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 60-65, 72.
ZHU Chunbo, JIANG Jinhai, SONG Kai, et al. Research progress of key technologies for dynamic wireless charging of electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 60-65, 72 (in Chinese).
- [3] 苏玉刚, 侯信宇, 戴欣. 磁耦合无线电能传输系统异物检测技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 715-727.
SU Yugang, HOU Xinyu, DAI Xin. Review of foreign object detection technology in magnetic coupling wireless power transfer system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 715-727 (in Chinese).
- [4] CHOI S Y, GU B W, JEONG S Y, et al. Advances in wireless power transfer systems for roadway-powered electric vehicles[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 18-36.
- [5] 黄学良, 王维, 谭林林. 磁耦合谐振式无线电能传输技术研究动态与应用展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 2-14, 141.
HUANG Xueliang, WANG Wei, TAN Linlin. Technical progress and application development of magnetic coupling resonant wireless power transfer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 2-14, 141 (in Chinese).
- [6] XUE Ming, YANG Qingxin, ZHU Gaojia, et al. A position detection method for dynamic wireless inspection robots charging[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2022, 17(1): 97-110.
- [7] 刘登伟, 周坤卓, 刘野然, 等. 基于双拾取结构的恒功率输出动态无线电能传输系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3899-3906.
LIU Dengwei, ZHOU Kunzhuo, LIU Yeran, et al. Research on constant output power based on double pick-up in dynamic wireless power transfer system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3899-3906 (in Chinese).
- [8] 夏晨阳, 李晓丽, 韩满左, 等. IPT系统线性自抗扰恒压输出和最大效率跟踪复合控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 6042-6052.
XIA Chenyang, LI Xiaoli, HAN Xiaozuo, et al. A hybrid control method for achieving constant voltage output with LADRC and maximum efficiency tracking for IPT systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 6042-6052 (in Chinese).
- [9] LIU Yeran, MAI Ruikun, LIU Dengwei, et al. Efficiency optimization for wireless dynamic charging system with overlapped DD coil arrays[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 2832-2846.
- [10] 李阳, 石少博, 刘雪莉, 等. 磁场耦合式无线电能传输耦合机构综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S2): 389-403.
LI Yang, SHI Shaobo, LIU Xueli, et al. Overview of magnetic coupling mechanism for wireless power transfer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S2): 389-403 (in Chinese).
- [11] ZHOU Hong, CHEN Jing, DENG Qijun, et al. Input-series output-equivalent-parallel multi-inverter system for high-voltage and high-power wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 228-238.
- [12] 梁留欢, 刘志珍, 范书静, 等. 应用于双负载同步供电的双频无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3297-3309.
LIANG Liuhan, LIU Zhizhen, FAN Shujing, et al. Dual-band wireless power transmission system for dual-load synchronous power supply[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3297-3309 (in Chinese).
- [13] ZHU Qingwei, WANG Lifang, GUO Yanjie, et al. Applying LCC compensation network to dynamic wireless EV charging system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6557-6567.
- [14] 陈庆彬, 杨丰钢, 陈为. 具有可变增益恒压特性的三线圈WPT系统补偿网络结构及参数确定新方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2277-2288.
CHEN Qingbin, YANG Fenggang, CHEN Wei. A new compensation network structure and parameter determination method with variable constant voltage gain characteristics based on three-coil WPT system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2277-2288 (in Chinese).

- [15] 王懿杰, 陆凯兴, 姚友素, 等. 具有强抗偏移性能的电动汽车用无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3907-3916.
WANG Yijie, LU Kaixing, YAO Yousu, et al. An electric vehicle (EV)-oriented wireless power transfer system featuring high misalignment tolerance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3907-3916 (in Chinese).
- [16] 赵锦波, 蔡涛, 段善旭, 等. 适用于分段式动态无线充电的接力方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 64-70.
ZHAO Jinbo, CAI Tao, DUAN Shanxu, et al. Relay control method for sectional track based dynamic wireless charging system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 64-70 (in Chinese).
- [17] 宋凯, 朱春波, 李阳, 等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4445-4453.
SONG Kai, ZHU Chunbo, LI Yang, et al. Wireless power transfer technology for electric vehicle dynamic charging using multi-parallel primary coils[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4445-4453 (in Chinese).
- [18] SONG Beibei, CUI Shumei, LI Yong, et al. A narrow-rail three-phase magnetic coupler with uniform output power for EV dynamic wireless charging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 6456-6469.
- [19] LIU Jia, LIU Zhitao, SU Hongye. Passivity-based PI control for receiver side of dynamic wireless charging system in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 783-794.
- [20] SHIN J, SHIN S, KIM Y, et al. Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 1179-1192.
- [21] HAN Wei, CHAU K T, JIANG Chaoqiang, et al. Accurate position detection in wireless power transfer using magnetoresistive sensors for implant applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 4001205.
- [22] PATIL D, MILLER J M, FAHIMI B, et al. A coil detection system for dynamic wireless charging of electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(4): 988-1003.
- [23] NAGENDRA G R, CHEN Liang, COVIC G A, et al. Detection of EVs on IPT highways[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(3): 584-597.
- [24] 苏玉刚, 张帅, 徐勇, 等. 电动汽车无线供电系统电能发射线圈设计与切换控制[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(1): 168-176.
SU Yugang, ZHANG Shuai, XU Yong, et al. Design and switching control of power supply coils applied to ICPT-based electric vehicles[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(1): 168-176 (in Chinese).
- [25] DENG Qijun, LIU Jiangtao, CZARKOWSKI D, et al. Edge position detection of on-line charged vehicles with segmental wireless power supply[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(5): 3610-3621.
- [26] SENJU R, OMORI H, UCHIMOTO D, et al. A new position detecting method for wireless EV chargers[C]//Proceedings of the 2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. Brasov: IEEE, 2019: 810-814.
- [27] ZHANG Chunlei, LI Bingran, YE Peiqing, et al. Analog-hall-sensor-based position detection method with temperature compensation for permanent-magnet linear motor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9512111.
- [28] CUI Youjing, GE S S. Autonomous vehicle positioning with GPS in urban canyon environments[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(1): 15-25.
- [29] HUANG Zhiyong, YU Yuanlong, GU J, et al. An efficient method for traffic sign recognition based on extreme learning machine[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(4): 920-933.
- [30] LI Xiaofei, HU Jiefeng, WANG Heshou, et al. A new coupling structure and position detection method for segmented control dynamic wireless power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 6741-6745.
- [31] DAI Xin, JIANG Jincheng, WU Jianqing. Charging area determining and power enhancement method for multiexcitation unit configuration of wirelessly dynamic charging EV system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 4086-4096.
- [32] 高立克, 肖静, 姚知洋, 等. 电动汽车无线充电系统的输出功率动态解耦控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 153-159.
GAO Like, XIAO Jing, YAO Zhiyang, et al. Dynamic decoupling control of output power in wireless charging system for electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 153-159 (in Chinese).
- [33] CHEN Kaiwen, CHENG K W E, YANG Yun, et al. A fast self-positioning-based optimal frequency control for inductive wireless power transfer systems without communication[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1): 334-343.



张献

收稿日期: 2023-04-24

作者简介:

张献(1983), 男, 博士, 教授, 无线电能传输技术专业委员会副主任委员兼秘书长, 主要研究方向为无线电能传输技术, 工程电磁场与磁技术, zhangxian@tjpu.edu.cn;

徐伟达(1996), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无线电能传输技术, 15731750300@163.com;

王奉献(1995), 男, 博士研究生, 主要研究方向为无线电能传输技术, 本文通信作者, fx-wang@outlook.com;

中国知网

Research on Self-Decoupling Segmented Coil Rail and Dual-Mode Switching Strategy of Dynamic Wireless Charging System

ZHANG Xian¹, XU Weida¹, WANG Fengxian¹, YUAN Zhaoyang¹, YANG Qingxin², DAI Zhongyu¹

(1. Hebei University of Technology, 2. Tianjin University of Technology)

KEY WORDS: electric vehicles; dynamic wireless charging; self-decoupling; position detection; dual-mode switching

To suppress the cross-coupling effects between the adjacent transmitter coils of the dynamic wireless charging system for electric vehicles on the topology parameters' design, a self-decoupled segmented transmitter rail based on the naturally decoupling orthogonal solenoid and square coils is proposed, in which the solenoid coils are hierarchically wound on the square coils. Moreover, a solenoid-detecting coil orthogonal wound on the receiver coil is designed to detect the receiver's position, as shown in Figure 1. The natural decoupling feature avoids the interference between the detection signal and power delivery.

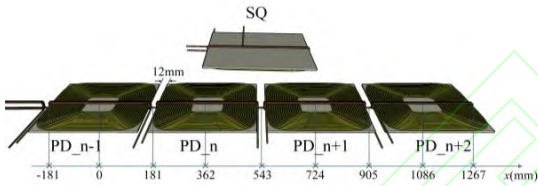


Fig.1 Schematic diagram of the coil structure

The self-decoupling between adjacent transmitter coils is analyzed, and the simulation results are shown in Figure 2.

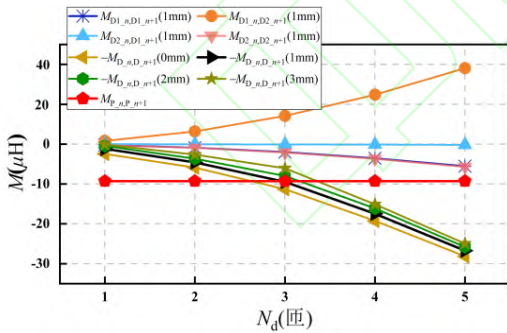


Fig.2 Simulation analysis of decoupling of adjacent emission units

In order to obtain a stable charging process, the optimal charging areas of the system are determined based on the performance of mutual inductance. A two-mode working method and its segmented strategy are proposed, where one or two transmitter coils are activated based on the optimal charging area, as shown in Figure 3.

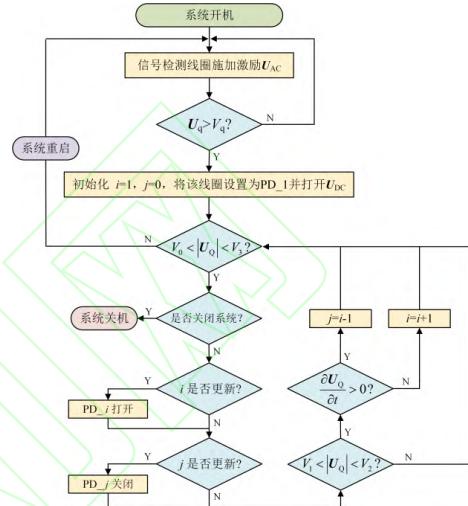


Fig.3 Mode switching control flow chart

A dynamic wireless charging experimental platform based on the proposed method is built to validate the feasibility and practicality. The experimental results are shown in Figure 4.

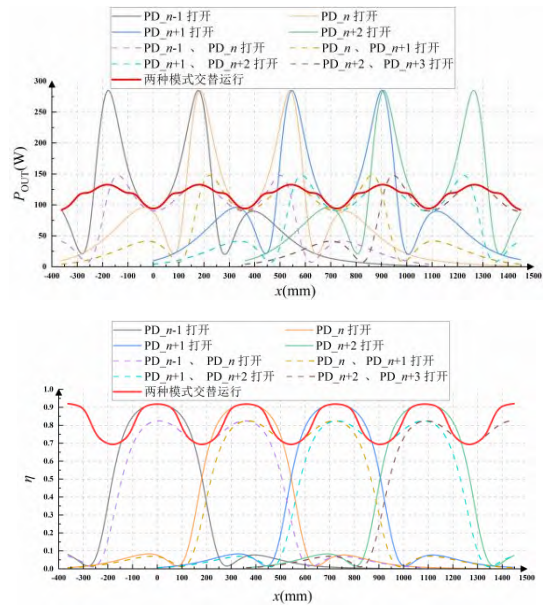


Fig.4 System output power and efficiency curves with receiver coil motion