

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.4.228

中图分类号: TM910.6

文献标志码: A

电动汽车动态无线充电系统弯道互感跌落 研究及改进

朱郭福, 李建贵, 王隆扬, 李 强, 陈 晨, 刘 珊

(武汉理工大学机电工程学院, 武汉 430070)

摘要: 针对目前电动汽车动态无线充电系统的发射线圈多采用分段导轨结构实现接力式动态无线充电, 但系统在导轨切换处存在较大的互感跌落导致系统传输效率降低且在弯道处更加突出这一问题, 建立弯道动态无线充电模型, 通过理论分析推导原、副线圈互感与偏转角度的关系, 提出1种弯道处导轨发射线圈的改进结构并进行仿真分析, 搭建基于共振磁耦合的弯道动态无线充电平台并进行实验。仿真与实验结果表明, 采用改进型导轨发射线圈结构后无线充电系统互感跌落现象显著减小, 在偏移角度最大处系统传输效率提升了8.66%, 验证了改进型线圈结构的有效性。

关键词: 电动汽车; 动态无线充电; 弯道; 互感跌落; 改进线圈结构

Research and Improvement of Mutual Inductance Drop at Corner in Dynamic Wireless Charging System for Electric Vehicles

ZHU Guofu, LI Jianguai, WANG Longyang, LI Qiang, CHEN Chen, LIU Shan

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: At present, the transmitting coil in a dynamic wireless charging system for electric vehicles usually adopts a segmented guide rail structure to realize the relay dynamic wireless charging. However, the problem of mutual inductance drop will occur at the switching of the guide rail and result in the reduction of the system transmission efficiency, and this is more prominent at the corner. A corner dynamic wireless charging model was established, and the relationship between the mutual inductance of primary and secondary coils and the deflection angle was deduced through theoretical analysis. An improved structure of the guide rail transmitting coil at the corner was proposed and simulated, and a corner dynamic wireless charging platform based on resonance magnetic coupling was built. Simulation and experimental results show that by using the improved guide rail transmitting coil structure, the mutual inductance drop of the wireless charging system was significantly reduced, and the system transmission efficiency was improved by 8.66% at the maximum deflection angle, thereby verifying the effectiveness of the improved coil structure.

Keywords: Electric vehicle; dynamic wireless charging; corner; mutual inductance drop; improved coil structure

近年来, 全球电动汽车保有量快速增长, 我国也将电动汽车确定为国家战略性新兴产业。在推广过程中, 电动汽车的续航里程和充电时间成为制约其发展的重要瓶颈, 而无线充电技术的应用为解决这些问题提供了新途径^[1]。

现有的电动汽车行驶动力来自于电池组供电(如电动小汽车)或由天线供电(如无轨电车)。前者充电费时且电池自重耗能, 后者行驶路径受限, 常作为运营使用。若在道路下铺设能进行无线充电的轨道, 让带有小容量电池的电动汽车在这种道路上边充电边行驶^[2], 即可从根本上解决电动汽车续航里程短、充电时间长的问题。

收稿日期: 2021-10-10; 修回日期: 2021-11-25; 录用日期: 2021-12-20; 网络首发日期: 2022-03-01

近年来,国内外诸多企业与学者针对电动汽车动态无线充电问题进行了研究。美国橡树岭国家实验室对电动汽车动态无线充电系统的频率选择、磁场泄露、通信速度及材料损耗进行了详细分析^[3-5];韩国科学技术院 KAIST(Korea Advanced Institute of Science and Technology)研发了 2 条在线电动公交线路,能够在 24 km 线路上传输 100 kW 的功率^[6-8];文献[9]针对电动汽车动态无线充电过程中耦合系数随汽车位置偏移而发生变化的情况,提出 1 种基于加权平均效率的 LCC-S 拓扑结构参数优化设计方法,提高了系统在不同偏移情况下的综合效率;文献[10-11]针对分段式发射线圈导轨结构,提出 1 种具有分散控制逻辑的接力方法,设计了 1 种具有在宽偏移范围内保持传输功率稳定特性的 T 型补偿拓扑,并搭建了 500 W 原理样机;文献[12]针对动态无线充电过程中原、副线圈互感下降问题,提出接收端采用内嵌圆形线圈进行补偿,并通过遗传算法、理论推导和仿真验证,得到了补偿线圈最优匝数和统一规格参数。

综上所述,原、副线圈偏移带来的系统效率跌落是制约电动汽车动态无线充电发展与应用的难点。现有研究大多针对直线供电导轨结构及供电控制策略方面进行优化设计,对弯道处的功率跌落问题考虑较少。在弯道动态无线充电过程中,传统的矩形线圈导轨因其内外半径不同,使得相邻导轨之间产生更大的间距,导致拾取功率进一步降低。针对此问题,本文提出一种基于共振磁耦合的动态无线充电策略及弯道发射线圈改进结构,较好地降低了动态无线充电弯道处的互感波动,提高了弯道处充电效率。

1 基于共振磁耦合的电动汽车动态无线充电系统理论分析

根据发射线圈结构与铺设方式的差别,可将充电轨道分为长导轨式和分段导轨式^[13]。长导轨式方案抗偏移能力强,能保证较长距离内的功率稳定传输,但同时也带来了电磁泄露、能量损耗严重等问

题^[14]。相较于长导轨式布局,分段导轨式布局采用局域供电方式,实现接力式的动态无线充电,其电磁泄露和能量损耗大大降低,因此该布局常被应用于电动汽车动态无线充电^[15-16]。

1.1 LCC-S 型无线充电系统模型

共振磁耦合无线充电系统补偿机构常通过直接在线圈上串、并联电阻来实现,常见的拓扑结构可分为串-串结构(S-S)、串-并结构(S-P)、并-并结构(P-P)和并-串结构(P-S)^[17]。这 4 种基本形式的拓扑结构简单易于实现,但存在谐振容量小、开关器件损耗严重的问题^[18],同时其接收端的状态变化会对发射端电流造成较大影响,因此不适用于电动汽车动态充电。针对电动汽车动态无线充电过程的动态偏移特性,LCC-S 补偿结构因其具有较好的恒流特性,同时能减少系统开关器件的损耗,提高系统整体效率,更适合对电池进行大功率充电^[19-20],其等效模型如图 1 所示。

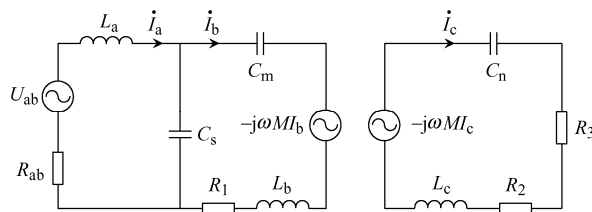


图 1 LCC-S 等效模型

Fig. 1 LCC-S equivalent model

图 1 中: U_{ab} 为电源电压; L_a 为发射线圈侧补偿电感; L_b 和 L_c 分别为发射线圈和接收线圈电感; C_s 和 C_m 为发射线圈侧补偿电容; C_n 为接收线圈侧补偿电容; M 为线圈互感; R_1 和 R_2 分别为发射侧和接收侧线圈内阻; R_3 为负载的阻值; R_{ab} 为电源内阻; ω 为系统谐振频率; i_a 、 i_b 和 i_c 分别为流经补偿电感、发射线圈和接收线圈电感的电流。

1.2 基于 LCC-S 拓扑结构的无线充电系统效率影响因素探究

系统的谐振频率仅与系统补偿结构的电感、电容有关,与线圈之间的互感无关,因此 LCC 补偿结构及 S 拓扑结构的谐振条件构成了集成线圈 LCC-S 的谐振条件,即

$$\begin{cases} \omega^2 L_a C_s = 1 \\ \omega L_b - \frac{1}{\omega C_m} = \frac{1}{\omega C_s} \\ \omega^2 L_c C_n = 1 \end{cases} \quad (1)$$

由图 1 可列基尔霍夫电流定律方程

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_0} \\ \dot{I}_b = \frac{1/j\omega C_s}{R_1 + Z_r + j\omega L_b + 1/j\omega C_s + 1/j\omega C_m} \\ \dot{I}_c = \frac{j\omega M \dot{I}_b}{Z_1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Z_0 为发射侧的输入阻抗; Z_r 为接收侧在发射侧的折射阻抗; Z_1 为接收侧电路阻抗。

则该系统下输入功率 P_{in} 、输出功率 P_{out} 及系统效率 η 可分别表示为

$$\begin{cases} P_{in} = U_{ab}^2 \sqrt{\left[R_{ab} + \frac{(\omega L_a)^2 (R_2 + R_3)}{R_1 R_3 + R_1 R_2 + (\omega M)^2} \right]} \\ P_{out} = |\dot{I}_c|^2 R_3 = \frac{(\omega^2 L_a M)^2 U_{ab}^2 R_3}{[Z_1 Z_0 (R_1 + Z_r)]^2} \\ \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{(\omega^2 L_a M)^2 R_3}{Z_1 Z_0^2 (R_1 + Z_r)^2} \times 100\% \end{cases} \quad (3)$$

分析式(3)可得, 在 LCC-S 补偿结构中, 在原、副线圈间电压、线圈内阻和系统角频率等电路参数不变的情况下, 线圈互感的变化会显著影响系统输入、输出功率, 进而影响系统传输效率。原、副线圈间的互感越大, 系统传输效率越高。因此, 在发射电路参数基本不变的前提下, 提高动态无线充电过程中的原、副线圈的互感, 能有效增大该系统的输出功率, 提高电能传输效率。

2 弯道耦合机构互感计算

由上文分析可知, 磁耦合机构是无线充电系统的关键组成部分, 系统输出功率和传输效率的大小与互感有极大关系。考虑到在分段式导轨动态无线充电原、副线圈互感会随相对偏移的变化而改变, 因此有必要建立模型分析偏移对线圈互感的影响。动态无线充电系统中, 导轨弯道发射线圈结构拓扑如图 2 所示。

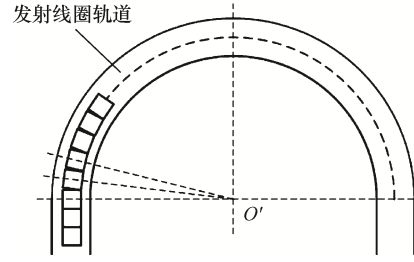


图 2 导轨弯道处动态无线充电发射线圈结构拓扑
Fig. 2 Transmitting coil topology of dynamic wireless charging system at corner of guide rail

在原、副线圈发生偏移时, 线圈相对位置的变化导致耦合面积变小, 进而导致接收线圈拾取的磁通量减小。线圈互感与磁通量的关系可表示为

$$M = \frac{\varphi_s}{\dot{I}_b} = \frac{\iint_{S_1} B dS}{\dot{I}_b} \quad (4)$$

式中: φ_s 为磁通; S_1 为耦合面积; B 为磁场强度。

在弯道耦合过程中, 原、副线圈将出现偏移和偏转, 此时仅考虑横向偏移的互感计算公式将不再适用。依据 Neumann 公式, 矩形平面螺旋线圈间的互感 M 为 4 条边互感之和, 即

$$M = \frac{N_1 N_2 \mu_0}{4\pi} \times \oint \oint \frac{dl_1 dl_2}{r_{12}} \quad (5)$$

式中: N_1 、 N_2 分别为原、副线圈匝数; μ_0 为磁常量; dl_1 、 dl_2 分别为原、副线圈回路上的微小线元素; r_{12} 为 2 个微小线元素之间的距离。

发射、接收线圈的空间关系如图 3 所示。以发射线圈 $ABCD$ 平面建立空间直角坐标系, 原点 O 位于发射线圈 $ABCD$ 中心。设 O' 为弯道圆心, R 为弯道半径; 发射线圈 $ABCD$ 、接收线圈 $A'B'C'D'$ 为正方形且等大, 边长为 l ; $\angle AO'O$ 为 α , $\angle BO'O$ 为 β , 接收线圈 $A'B'C'D'$ 相对于发射线圈 $ABCD$ 的偏转角度为 θ ; $O'A=a$, $O'B=b$, 发射、接收线圈垂直高度为 h 。

根据图 3 所示空间关系, 可得各点坐标:
 $A\left(-\frac{l}{2}, \frac{l}{2}, 0\right)$ 、 $B\left(-\frac{l}{2}, -\frac{l}{2}, 0\right)$ 、 $C\left(\frac{l}{2}, -\frac{l}{2}, 0\right)$ 、 $D\left(\frac{l}{2}, \frac{l}{2}, 0\right)$;
 $A'[a \sin(\theta - \alpha), R - a \cos(\theta - \alpha), h]$ 、 $B'[b \sin(\theta - \alpha), R - b \cos(\theta - \alpha), h]$ 、 $C'[b \sin(\theta + \beta), R - b \cos(\theta + \beta), h]$ 、 $D'[a \sin(\theta + \alpha), R - a \cos(\theta + \alpha), h]$ 。

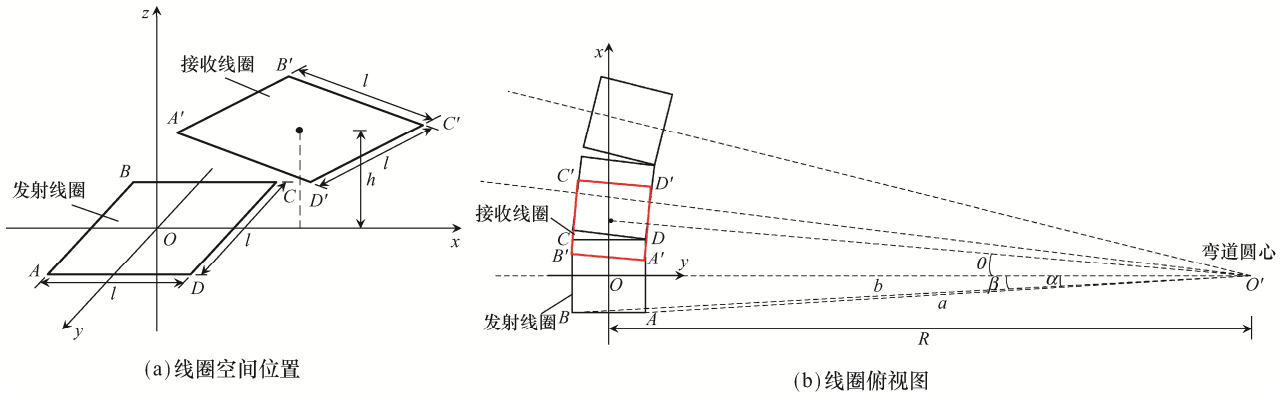


图3 发射、接收线圈空间关系

Fig. 3 Spatial relationship between transmitting and receiving coils

根据图中几何关系, 可得: $\sin \alpha = \frac{l}{2a}$ 、 $\cos \alpha =$

$$\frac{R-l/2}{a}$$

$\sin \beta = \frac{l}{2b}$ 、 $\cos \beta = \frac{R+l/2}{b}$ 。

利用两点式可求得各直线表达式为

$$y_{C'D'} = -\cot \theta \cdot x + \frac{l}{2 \sin \theta} + R \quad (6)$$

$$y_{D'A'} = \tan \theta \cdot x - \frac{R-l/2}{\cos \theta} + R \quad (7)$$

以 $A'B'$ 边为例, 分别对 AB 、 BC 、 CD 、 DA 这 4 条边求互感得

$$M_{A'B'|AB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_{\frac{l}{2} \sin(\theta-\alpha)}^{a \sin(\theta-\alpha)} \frac{dy_1 dx_2}{\sqrt{(x_2 + l/2)^2 + [-\cos \theta \cdot x_2 - l/(2 \sin \theta) + R - y_1]^2 + h^2}} \quad (8)$$

$$M_{A'B'|BC} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_{\frac{l}{2} \sin(\theta-\alpha)}^{a \sin(\theta-\alpha)} \frac{dx_1 dx_2}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + [-\cos \theta \cdot x_2 - l/(2 \sin \theta) + R + l/2]^2 + h^2}} \quad (9)$$

$$M_{A'B'|CD} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_{\frac{l}{2} \sin(\theta-\alpha)}^{a \sin(\theta-\alpha)} \frac{dy_1 dx_2}{\sqrt{(x_2 - l/2)^2 + [-\cos \theta \cdot x_2 - l/(2 \sin \theta) + R - y_1]^2 + h^2}} \quad (10)$$

$$M_{A'B'|DA} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_{\frac{l}{2} \sin(\theta-\alpha)}^{a \sin(\theta-\alpha)} \frac{dx_1 dx_2}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + [-\cos \theta \cdot x_2 - l/(2 \sin \theta) + R - l/2]^2 + h^2}} \quad (11)$$

式中: x_1 、 y_1 分别为副线圈微小线元素的横、纵坐标; x_2 为原线圈 AD 、 BC 边上微小线元素的横坐标。

依据 Neumann 公式, 矩形平面螺旋线圈间的互感为 4 条边互感之和与匝数 N_1 、 N_2 的乘积, 则原、副线圈互感 M 可表示为

$$M = N_1 N_2 (M_{A'B'|AB} + M_{A'B'|BC} + M_{A'B'|CD} + M_{A'B'|DA} + M_{B'C'|AB} + M_{B'C'|BC} + M_{B'C'|CD} + M_{B'C'|DA} + M_{C'D'|AB} + M_{C'D'|BC} + M_{C'D'|CD} + M_{C'D'|DA} + M_{D'A'|AB} + M_{D'A'|BC} + M_{D'A'|CD} + M_{D'A'|DA}) \quad (12)$$

分析式(12)可知, 弯道动态无线充电过程中, 发射、接收线圈互感 M 随偏转角度 θ 的增大而减小, 从而导致系统传输效率降低。为提高动态无线充电过程中弯道处系统传输效率, 可针对发射线圈导轨结构进行一定的优化, 减少两相邻发射线圈之间的外边间距, 从而减小弯道处的互感跌落, 以达到提高系统传输效率的目的。

3 导轨弯道处发射线圈结构的改进

3.1 弯道发射线圈结构的改进

为减小弯道处导轨切换过程中由原、副线圈互感跌落造成的充电效率跌落问题带来的影响, 在不改变弯道半径大小及弯道处分段式发射线圈导轨基本尺寸的情况下, 本文提出 1 种改进型弯道处发射线圈导轨结构。通过改变发射线圈导轨外边形状, 使之贴合弯道半径变化趋势, 在不改变发射线圈导轨宽度的同时减小两相邻发射线圈导轨间的间距, 达到减小漏

磁现象与互感跌落,进而减小充电效率跌落的目的。改进后的弯道发射线圈拓扑如图 4 所示。

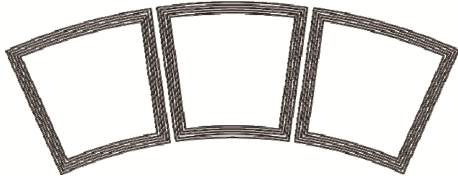


图 4 改进后的弯道发射线圈拓扑

Fig. 4 Improved transmitting coil topology at corner

3.2 改进前、后原副线圈互感波动仿真研究

为验证改进后的发射线圈导轨结构是否可达到减小互感波动,本文基于有限元仿真软件,设计了表 1 所示的线圈结构参数,对改进前、后发射线圈导轨与接收线圈的互感进行了仿真分析。

表 1 线圈结构参数

Tab. 1 Parameters of coil structure

参数	数值
发射线圈尺寸(改进前)/mm	200×200(线圈边长)
发射线圈尺寸(改进后)/mm	200(宽)×200(内边长)
接收线圈尺寸/mm	200×200(线圈边长)
线圈匝数	10
发射、接收线圈间距/mm	75
弯道半径/mm	1 750

仿真过程模拟了接收线圈从进入到离开发射线圈充电工作区域的全过程,偏转角度为 $-3.5^\circ \sim 3.5^\circ$ 。改进前、后原副线圈互感与线圈偏转角度的关系如图 5 所示。可知,采用改进型线圈拓扑结构,弯道处原、副线圈间互感明显提升。

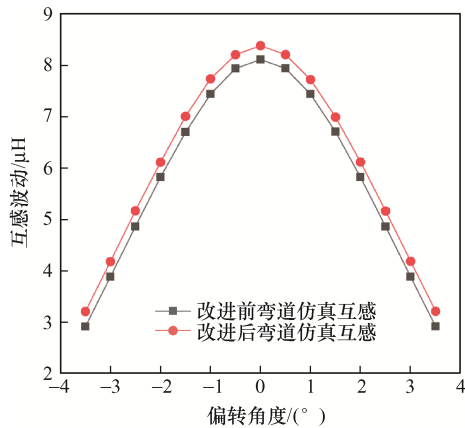


图 5 改进前、后原副线圈互感与偏转角度关系曲线
Fig. 5 Curve of mutual inductance vs deflection angle before and after improvement

4 实验分析

为了验证上述改进型弯道线圈拓扑结构对系统传输效率的影响,本文基于仿真尺寸与参数搭建了 1 套电源电压为 30 V、系统工作频率为 85 kHz 的系统实验平台。平台由直流电源、信号发生器、逆变电路、LCC-S 补偿电路、电磁耦合机构、整流电路及电子负载组成。实验平台如图 6 所示,系统参数见表 2。

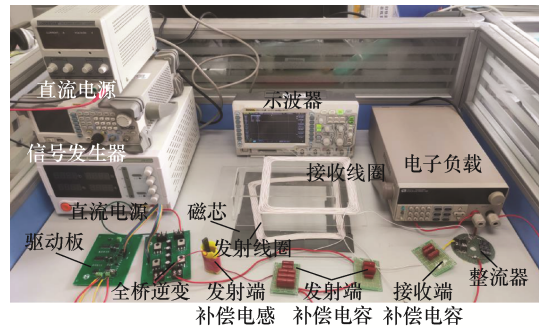


图 6 实验平台

Fig. 6 Experimental platform

表 2 无线充电系统参数

Tab. 2 Parameters of wireless charging system

位置	参数	数值
发射端 (改进前)	发射线圈自感 $L_b/\mu\text{H}$	52.157
	发射线圈补偿电感 $L_a/\mu\text{H}$	5.216
	发射线圈侧补偿电容 C_s/nF	672.148
	发射线圈侧补偿电容 C_m/nF	74.687
发射端 (改进后)	发射线圈自感 $L_b/\mu\text{H}$	54.393
	发射线圈补偿电感 $L_a/\mu\text{H}$	5.439
	发射线圈侧补偿电容 C_s/nF	644.590
	发射线圈侧补偿电容 C_m/nF	71.617
接收端	接收线圈自感 $L_c/\mu\text{H}$	34.316
	接收线圈侧补偿电容 C_n/nF	102.166

为测得系统最优负载 R_3 ,通过调整电子负载大小,分别测量了发射线圈结构改进前、后的无线充电系统在偏转角度为 0° 处的系统传输效率。系统传输效率与负载大小关系如图 7 所示。可见,发射线圈改进前、后的无线充电系统均在负载 $R_3=10 \Omega$ 时,传输效率达到最大。故设置 $R_3=10 \Omega$ 为系统最

优负载, 测得 2 种结构下偏转角度最大(3.5°)与最小(0°)时无线充电系统的传输性能参数, 系统输出功率与传输效率随偏转角度变化曲线如图 8 所示。可见, 在偏转角度最小(0°)时, 分别采用改进前、后 2 种发射线圈结构的无线充电系统的传输效率差别

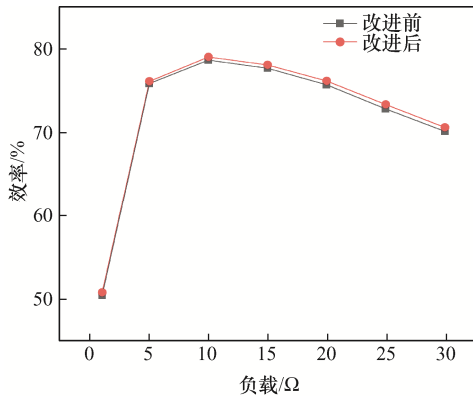
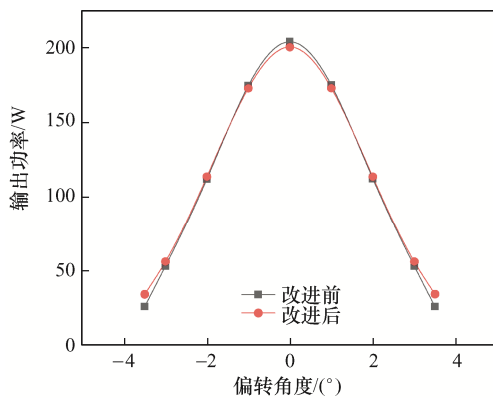
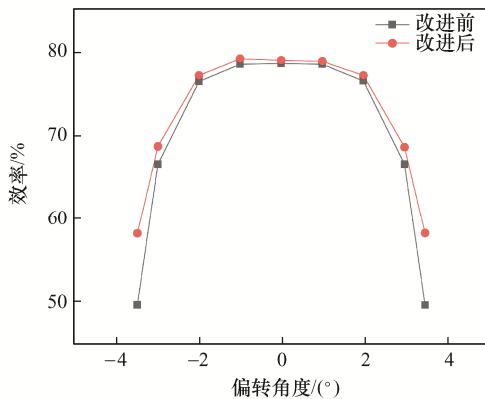


图 7 改进前、后系统传输效率-负载关系曲线

Fig. 7 Curve of system transmission efficiency vs load before and after improvement



(a) 输出功率-偏转角度关系



(b) 传输效率-偏转角度关系

图 8 改进前、后系统功率和效率对比

Fig. 8 Comparison of system power and transmission efficiency before and after improvement

较小, 仅为 0.38%; 但在偏转角度最大(3.5°)时, 采用改进发射线圈结构的无线充电系统传输效率为 58.21%, 未采用改进发射线圈结构的无线充电系统传输效率为 49.55%, 前者相较后者提升了 8.66%。多次实验, 改进后较改进前系统效率提升在 8%~9%。

通过以上实验可以看出, 动态无线充电导轨切换处会不可避免地产生系统效率跌落, 但通过改变弯道处的发射线圈导轨结构, 适配对应的弯道半径, 使内外导轨间距保持一致, 能显著提高动态无线充电过程中弯道导轨处的系统充电效率, 减小能量损失。

5 结语

本文通过理论推导得出了电动汽车动态无线充电过程中分段式发射线圈导轨与接收线圈的互感、偏转角度之间的关系; 从理论上分析了弯道处线圈间互感进一步跌落的原因, 并针对其互感跌落问题提出了 1 种改进型弯道无线充电发射线圈导轨结构, 通过有限元仿真分析得到了改进前、后结构的互感特性并进行了实验验证。实验结果表明, 改进型弯道处发射线圈导轨结构能显著降低弯道导轨切换处的互感跌落, 进而较大程度地提高无线充电系统的充电效率, 效率提升了 8.66%, 可为电动汽车动态无线充电的应用提供参考。

参考文献:

- [1] 张献, 王杰, 杨庆新, 等. 电动汽车动态无线供电系统电能耦合机构与切换控制研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15): 3093-3101.
Zhang Xian, Wang Jie, Yang Qingxin, et al. The power coupling mechanism and switching control for dynamic wireless power supply system of electric vehicle [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15): 3093-3101 (in Chinese).
- [2] Lee S, Huh J, Park C, et al. On-line electric vehicle using

- inductive power transfer system [C]// 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, GA, USA, 2010: 1598-1601.
- [3] Miller J M, Onar O C, Chinthavali M. Primary-side power flow control of wireless power transfer for electric vehicle charging [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 147-162.
- [4] Onar O C, Miller J M, Campbell S L, et al. A novel wireless power transfer for in-motion EV/PHEV charging [C]// 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach, CA, USA, 2013: 3073-3080.
- [5] Miller J M, Onar O C, 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.
- [6] Mi Chunting, Buja G, Choi S Y, et al. Modern advances in wireless power transfer systems for roadway powered electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10) : 6533-6545.
- [7] 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.
- [8] Park C, Lee S, Jeong S Y, et al. Uniform power I-type inductive power transfer system with DQ-power supply rails for on-line electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6446-6455.
- [9] 田勇, 朱泽, 田劲东, 等. 基于 LCC-S 补偿的电动汽车动态无线充电系统拓扑参数优化[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 150-159.
- Tian Yong, Zhu Ze, Tian Jindong, et al. Parameters optimization of electric vehicles dynamic wireless power transfer system based on LCC-S compensation topology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 150-159 (in Chinese).
- [10] 赵锦波, 蔡涛, 段善旭, 等. 适用于分段式动态无线充电的 T 型抗偏移补偿拓扑[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 36-43.
- Zhao Jinbo, Cai Tao, Duan Shanxu, et al. A T-type high misalignment tolerant compensated topology for sectional track-based dynamic wireless power transmission system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 36-43 (in Chinese).
- [11] 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).
- [12] 骆强, 胥飞. 电动汽车无线充电系统中弯道互感优化研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(1): 91-98.
- Luo Qiang, Xu Fei. Research on the optimization of bend mutual inductance in electric vehicle wireless charging system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(1): 91-98 (in Chinese).
- [13] 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).
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Covic G A, Boys J T. Modern trends in inductive power transfer for transportation applications [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(1): 28-41.
- [17] 范兴明, 莫小勇, 张鑫. 无线电能传输技术的研究现状与应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2584-2600.
- Fan Xingming, Mo Xiaoyong, Zhang Xin. Research status and application of wireless power transmission technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10):

2584-2600 (in Chinese).

- [18] 孙跃, 张欢, 唐伟, 等. LCL 型 ICPT 系统电路拓扑分析及参数设计方法[J]. 电源学报, 2016, 14(5): 1-6.

Sun Yue, Zhang Huan, Tang Wei, et al. Topology analysis and parameter design methods of LCL type ICPT system [J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(5): 1-6 (in Chinese).

- [19] 王宁, 张恒军, 杨庆新, 等. 动态载荷下 WPT 系统的特性分析与实验研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(7): 104-110.

Wang Ning, Zhang Hengjun, Yang Qingxin, et al. Characteristic analysis and experimental study of WPT system with dynamic load [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7): 104-110 (in Chinese).

- [20] 廖鸿飞, 帅定新. 开环控制的宽范围恒流 LCC 谐振变换器研究[J]. 电源学报, 2021, 19(4): 178-186.

Liao Hongfei, Shuai Dingxin. Research on open-loop controlled constant-current LCC resonant converter with wide output voltage range [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(4): 178-186 (in Chinese).



朱郭福

作者简介:

朱郭福(1996—), 男, 硕士研究生。研究方向: 无线电能传输技术。E-mail: zgf960823@qq.com。

李建贵(1983—), 女, 通信作者, 博士, 教授。研究方向: 新型电机及控制、电动汽车驱动及控制、新型磁性材料与可再生能源发电。E-mail: jianguli@whut.edu.cn。

王隆扬(1995—), 男, 博士研究生。研究方向: 无线电能传输技术。E-mail: 741740427@qq.com。

李强(1995—), 男, 硕士研究生。研究方向: 无线电能传输技术。E-mail: 1245305151@qq.com。

陈晨(1996—), 男, 硕士研究生。研究方向: 无线电能传输技术。E-mail: 1310118324@qq.com。

刘珊(1997—), 女, 硕士研究生。研究方向: 电动汽车有序充电。E-mail: 1063871010@qq.com。

