

基于遗传算法的双边LCC拓扑IPT系统的抗偏移性能研究

陈凯¹, 高艺霖², 鲁扬³, 陈蒙蒙³, 唐琦⁴, 孟联⁵

(1. 南京能迪电气技术有限公司, 江苏 南京 211100; 2. 湖北经济学院旅游与酒店管理学院, 湖北 武汉 430205; 3. 中国矿业大学电气工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 国网黑龙江信通公司, 黑龙江 哈尔滨 150090; 5. 国网安徽省电力有限公司阜阳供电公司, 安徽 阜阳 236017)

摘要: 针对 AGV 无线电能传输过程中存在的位置偏移情况, 提出一种基于双边 LCC 拓扑的新型磁耦合结构, 并基于遗传算法进行了优化设计以进一步提升 IPT 系统在水平方向的抗偏移性能。首先, 详细推导了双边 LCC 拓扑的补偿网络参数和各支路的电流表达式; 其次, 介绍了在双极性平面绕组 4D 线圈的基础上增加一个正交 Q 线圈的新型复合磁路机构, 以提高系统的抗偏移性能和传输性能; 然后以 S_M 作为优化目标, 采用遗传算法对 4D 线圈各物理参数进行迭代优化, 进一步提升系统的性能; 最后, 搭建实验样机对该新型磁耦合结构进行了验证, 实验结果表明: 正对时新型磁耦合结构传输功率为 300 W, 传输效率为 87.12%; 接收线圈在水平向偏移百分比 $\delta < 20\%$ 的范围内输出功率最大波动率小于 48%, 并保持传输效率始终高于 80%, 满足实际的需求。

关键词: AGV; 双边 LCC 拓扑; 抗偏移; 双极性平面线圈; IPT 系统

Genetic algorithm based anti-offset performance of IPT system with bilateral LCC topology

CHEN Kai¹, GAO Yilin², LU Yang³, CHEN Mengmeng³, TANG Qi⁴, MENG Lian⁵

(1. Nanjing Energy Digital Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 2. School of Tourism and Hospitality Management Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China; 3. School of Electrical Engineering China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 4. State Grid Heilongjiang Information & Telecommunication Co., Ltd., Harbin 150090, China; 5. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Fuyang Power Supply Company, Fuyang 236017, China)

Abstract: A new magnetic coupling structure based on bilateral LCC topology is proposed and optimized based on the genetic algorithm (GA) to tackle the horizontal offset in the wireless power transfer (WPT) system process of AGVs. Firstly, the parameters of the compensation network and current expressions of each branch for the bilateral LCC topology are derived in detail; Then, a novel composite magnetic coupling mechanism, adding a quadrature Q coil to a bipolar planar-wound 4D coil, is presented to improve the displacement flexibility and transmission performance of the WPT system. Further, the GA is used to iteratively optimize physical parameter of the 4D coil with S_M as the optimization objective in order to further improve the performance of the WPT system. Finally, an experimental prototype is built to validate the power transfer performance. The results show that when the transmitting and receiving coils are fully aligned, the output power of the new magnetic structure is 300W, and the transfer efficiency is 87.12%; The maximum output power fluctuation of the receiving coil is less than 48% within the horizontal offset percentage δ of less than 20%, and the transfer efficiency is maintained consistently higher than 80%. Hence, the new magnetic structure and optimized design method satisfy the needs of AGV wireless charging.

Key words: AGV; bilateral LCC topology; displacement flexibility; bipolar planar coils; IPT

0 引言

自动引导车 (Automated Guided Vehicle, AGV) 作为一种具备移栽功能的运输设备, 凭借其高精度自动巡航、高效快速的工作特性, 被广泛用于超级港口、商超、立体仓库和物流中心等高密度空间内进行货物搬运^[1-2]。随着新一代互联网技术的成熟, 无人化、智能化作为未来行业的发展趋势, 使得传统的人工插拔式有线充电逐渐不适用于AGV整体的高效工作。此外, 传统的有线充电方式难以兼容潮湿、腐蚀等环境, 存在较大安全隐患^[3-4]。应用在AGV中的感应式无线电能传输 (Inductive Power Transfer, IPT) 技术实现了供电系统与AGV之间的电气与机械隔离, 保障了AGV不间断工作, 提高了充电系统的安全性, 并节约了人力成本^[5]。

在AGV的工程应用中, 难以使地面发射线圈与车载接收线圈完全对准, 耦合机构的偏移会使得接收端的电压、电流发生变化并偏离其标准输出值, 造成系统输出功率的剧烈波动。现阶段无线电能传输系统中常用于维持系统输出性能稳定的方法包括磁耦合机构的优化设计、补偿拓扑的优化措施及采取合理的控制手段等^[6-8]。

文献[9]针对AGV充电过程中输出功率鲁棒性较差的问题, 以降低传输功率波动为目标, 提出适用于动态无线充电的一次侧T形补偿拓扑及其参数设计方法。所设计T形补偿拓扑具有在宽偏移范围内保持传输功率稳定的特性, 降低了一次侧控制系统的调控负担, 同时还具有空载限流保护功能。文献[10]提出一种基于LCC-S型WPT系统的参数补偿设计方案, 即通过使一次补偿网络失谐, 降低系统对线圈互感变化的敏感度, 从而降低输出功率的波动, 最终搭建了一台100 W的实验样机, 证明该设计方案可以使系统在发生偏移时, 输出功率波动小于6.1%, 同时整机效率保持在90%以上。文献[11]通过改变发射端和接收端的补偿网络参数, 即分别在发射端加入非线性电容和接收端加入非线性电感, 进而改善WPT系统对磁耦合结构偏移的敏感性, 提高系统

抗偏移能力, 最终搭建了一台工作频率600 kHz的实验样机, 证明了该补偿网络参数设计相比较于传统SS补偿网络具有较高的抗偏移能力。文献[12]基于粒子群优化算法对双边LCC补偿网络的一次补偿电感和一次补偿电容进行优化设计, 实现一次电流随磁耦合结构互感变化的自调节, 进而抑制线圈偏移所引发的输出功率波动现象, 最终搭建了一台200 W的实验样机。结果表明该补偿网络优化设计可以在系统发生侧向偏移近40%时, 仍能保证输出功率的波动率小于10%; 相同条件下, 传统双边LCC补偿网络输出功率波动率接近40%。

文献[13]将传统的圆形接收线圈改成六边形几何线圈, 与传统两线圈结构对比, 该新型磁耦合结构可实现更高的传输效率和更轻的重量。基于有限元仿真软件, 预测线圈间互感获得最佳线圈参数, 实验装置可以在85 kHz时获得7.7 kW的额定功率输出。文献[14]将AGV导轨设计成共面的内外两层, 并依次改变内外层导轨间距和匝数比, 通过有限元仿真预测线圈间互感, 最终获得内外层匝数比和导轨间距参数。实验结果表明系统负载电流提高近40%, 节省充电时间。文献[15]提出一种具有切换性的中继线圈的无线充电系统, 通过分别分析两线圈和三线圈不同偏移条件下的系统工作情况, 结合两种磁耦合结构设计优势, 提高系统整体抗偏移能力。文献[16]基于锥形线圈的磁场分布提出一种混合新型发射线圈, 并推导磁场均匀性与相关尺寸参数之间的关系, 最终得出最佳参数设计。仿真结果表明, 在接收线圈水平偏移25 mm时, 系统效率波动仅9.4%, 提高了系统的抗偏移能力。文献[17]针对无线输电系统中传统线圈抗偏移能力较弱的现象, 设计一种带有大中继线圈的无线充电磁耦合器, 通过有限元仿真软件, 研究了相关补偿参数与传输性能的变化规律, 并最终制作了传输距离200 mm、线圈尺寸为400 mm×400 mm的带有大中继线圈的磁耦合机构。实验结果表明, 在输出功率为3 kW的情况下, 当偏移尺寸达到线圈尺寸50%时, 系统传输效率仍可达95%以上, 与

同传能条件下的两线圈磁耦合机构相比,系统传输效率提高近5%。文献[18]提出将感应式能量传输技术与电容式能量传输技术串联结合,利用两种技术的不同偏移特性,互补两者优势以实现高偏移特性的混合系统。实验结果表明,600 W 的实验样机在50%的偏移程度时,输出功率的波动率仅为6.6%。

综上所述,以上研究针对耦合机构间的互感波动,需要增加电路补偿拓扑甚至复杂的控制策略,磁路机构的设计也较为复杂且缺乏系统优化方案。因此,本文基于双极性平面线圈绕组提出一种新型磁耦合机构,并且利用遗传算法对该磁耦合结构进行优化分析,以尽可能地提升系统抗偏移性能。此外,采用双边LCC补偿网络以保证在完整充电过程中负载电流的恒定,从而提高了电池的使用寿命。

1 LCC-LCC型IPT系统的补偿参数设计

本文采用的双边LCC补偿拓扑IPT系统的电路结构如图1所示。为简化分析系统各参数选取范围,忽略电路中电感和电容的寄生电阻。其中, U_p 为逆变器电路输出电压的基波分量; $I_{L_{f1}}$ 为逆变器的输出基波相电流; I_T 、 I_R 分别为流经一次线圈和二次线圈的相电流; $I_{L_{f2}}$ 为流经负载的相电流; Z_{in} 为一次输入阻抗; 补偿电感 L_{f1} 、补偿电容 C_{f1} 和 C_T 构成一次LCC型谐振补偿网络; 补偿电感 L_{f2} 、补偿电容 C_{f2} 和 C_R 构成二次LCC型谐振补偿网络; L_T 和 L_R 分别为磁耦合机构一次、二次的谐振线圈; R_L 为直流负载; R_{eq} 为等效交流负载。

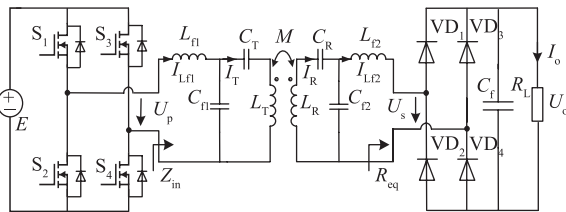


图1 双边 LCC 型谐振补偿电路拓扑示意图

Fig. 1 The equivalent circuit of bilateral LCC topology

为了便于分析,可将一次侧回路阻抗和互感反映到二次侧,从而形成一次侧等效电路。

双边LCC型谐振补偿电路简易等效示意图如图2所示。图中, Z_r 为负载侧折算到一次侧的反射阻抗, $Z_r = (\omega M)^2 / Z_s$, Z_s 为实际二次阻抗; U_{oc} 为二次等效电路的参数开路电压, $U_{oc} = j\omega M I_T$; $R_{eq} = 8R_L / \pi^2$ 。

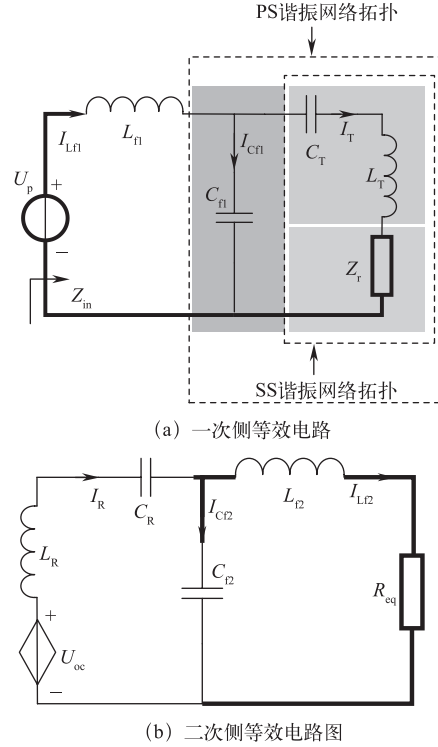


图2 双边 LCC 型谐振补偿电路简易等效示意图

Fig. 2 Simple equivalent circuit of the bilateral LCC-type compensation network

根据基尔霍夫定理可得

$$\begin{cases} U_p = I_{L_{f1}} j\omega L_{f1} + \left(I_{L_{f1}} - I_T \right) \frac{1}{j\omega C_{f1}} \\ \quad = I_{L_{f1}} j\omega L_{f1} + I_T \left(j\omega L_T + \frac{1}{j\omega C_T} + Z_r \right) \\ U_{oc} = I_R \left(j\omega L_R + \frac{1}{j\omega C_R} \right) + \left(I_R - I_{L_{f2}} \right) \frac{1}{j\omega C_{f2}} \\ \quad = I_R \left(j\omega L_R + \frac{1}{j\omega C_R} \right) + I_{L_{f2}} (j\omega L_{f2} + R_{eq}) \end{cases} \quad (1)$$

一次侧输入阻抗 Z_{in} 和二次侧等效阻抗 Z_s 分别为

$$Z_{in} = j\omega L_{f1} + (j\omega L_T + \frac{1}{j\omega C_T} + Z_r) // \frac{1}{j\omega C_{f1}} \quad (2)$$

$$Z_s = j\omega L_R + \frac{1}{j\omega C_R} + \frac{1}{j\omega C_{f2}} // (j\omega L_{f2} + R_{eq}) \quad (3)$$

式中, 符号//表示阻抗并联; $\omega=2\pi f$, f 为逆变器的开关频率。

当系统的一、二次侧都处于谐振状态时, 各电路补偿参数满足以下关系

$$\begin{cases} \frac{1}{\omega_0^2} = L_{f1} C_{f1} \\ \frac{1}{\omega_0^2} = L_{f2} C_{f2} \\ \frac{1}{\omega_0^2} = (L_T - L_{f1}) C_T \\ \frac{1}{\omega_0^2} = (L_R - L_{f2}) C_R \end{cases} \quad (4)$$

将上式参数条件代入原KVL方程, 可得到系统各回路电流分别为

$$\begin{cases} I_{L_{f1}} = U_p \frac{M^2 R_{eq}}{\omega_0^2 L_{f1}^2 L_{f2}^2} \angle 0^\circ \\ I_T = U_p \frac{1}{\omega_0 L_{f1}} \angle -90^\circ \\ I_R = U_p \frac{M C_{f2} R_{eq}}{L_{f1} L_{f2}} \angle 0^\circ \\ I_{L_{f2}} = U_p \frac{M}{\omega_0 L_{f1} L_{f2}} \angle -90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

由负载电流可知, 双边LCC补偿网络具有负载恒流输出特性, 这有利于提高AGV所用锂电池的使用寿命。但需要关注的是, 负载电流与互感 M 近似成正比。因此为提高实际工况中AGV的使用寿命, 有必要对磁耦合结构进行优化, 即当AGV不完全对准时, 互感 M 需要保持相对稳定。

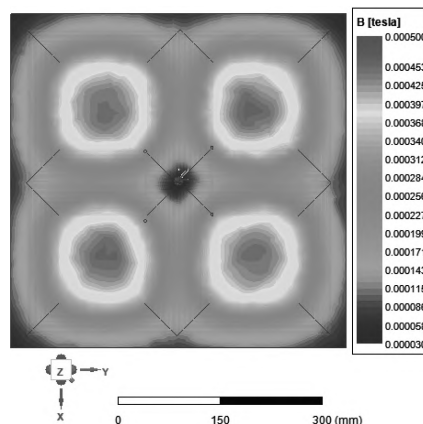
2 基于4DQ线圈的抗偏移性能的分析与优化

在AGV的工程应用中, 地面发射线圈与车载接收线圈相对位置易受外界影响且较难完全对准, 进而影响系统传输特性。从负载电流关系可知, 当耦合机构不完全对准或发生偏移时, 会使得负载电流发生剧烈变化, 造成系统输出功率的剧烈波动, 进而降低AGV的使用寿命。因此本文基于双极性平面线圈绕组提出一种具有抗偏移能力的新型磁耦合结构, 并基于遗传算法对该结构进行优化, 以提高系统的抗偏移能力和AGV

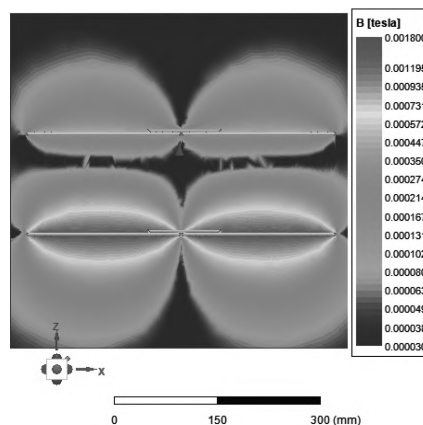
的使用寿命。

2.1 4DQ线圈的结构介绍

为提高系统水平抗偏移能力, 本文提出一种新型双极性平面线圈绕组——4DQ线圈, 可提高水平各方向的抗偏移性能。该新型双极性平面绕组的磁场能量分布云图如图3所示。



(a) 4D线圈俯视图



(b) 4D线圈主视图

图3 4D线圈磁场云图

Fig. 3 4D coil magnetic field cloud

由图3可知, 4D线圈磁场能量主要分布在线圈平面附近, 用于实现 x 轴和 y 轴方向的抗偏移性能, 即系统水平方向磁场分布均匀; 进一步地, 增加一个Q线圈, 可以弥补4D线圈在 z 轴方向传输能力不足的弱点, 实现磁耦合机构整体高效的抗偏移性能和传输性能。因此, 本文采用4DQ线圈作为供给AGV无线充电的磁耦合机构, 如图4所示。

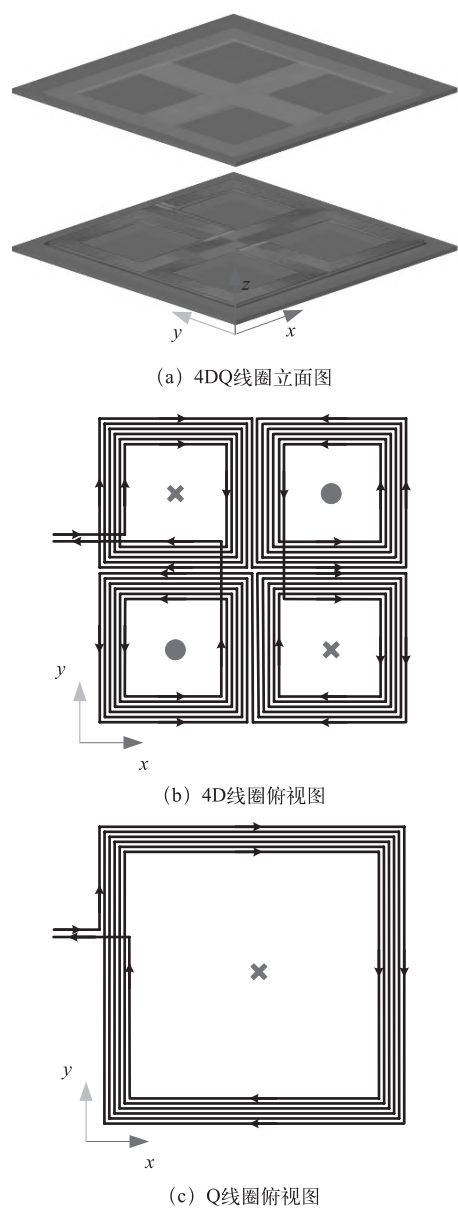


图 4 4DQ 线圈结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of 4DQ coil structure

基于实际工况，Q线圈作为传能线圈，保障系统具有较高的传输效率，并用同一根利兹导线绕制4D线圈，可增加 x 轴方向和 y 轴方向的抗偏移性能。此外，由于4D线圈和Q线圈各自产生的流经彼此线圈的净磁通量为零，因此4D线圈和Q线圈产生的磁通交链互不影响，从而可以实现解耦特性各自独立传能。4DQ线圈磁场能量分布云图如图5所示。为了保障系统具有较高的传输效率，本文首先根据实际应用背景设定Q线圈的相关物理尺寸参数，具体参数见表1。

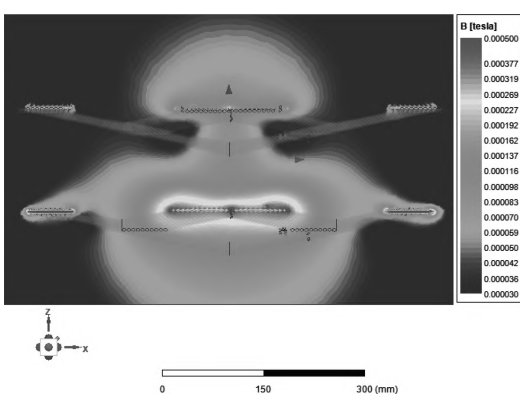


图 5 4DQ 线圈磁场云图
Fig. 5 4DQ coil magnetic field cloud

表 1 Q 线圈的物理尺寸参数

Tab. 1 Physical parameters of Q winding size

Q 线圈	线径 d / mm	利兹线 规格	线间距 / mm	长 $\times$ 宽 / mm $\times$ mm	距离 h / cm	Q 线圈 匝数
数值	3.96	0.1 $\times$ 800	1	450 $\times$ 450	15	10

2.2 4D线圈的优化设计

由上述分析可知，4D线圈具有更为均匀的水平磁场，可以有效地提高系统在水平方向的抗偏移能力。因此本文拟基于遗传算法优化设计4D线圈尺寸参数，在原有传输性能的基础上，尽可能提高系统的抗偏移性能，操作流程如图6所示。

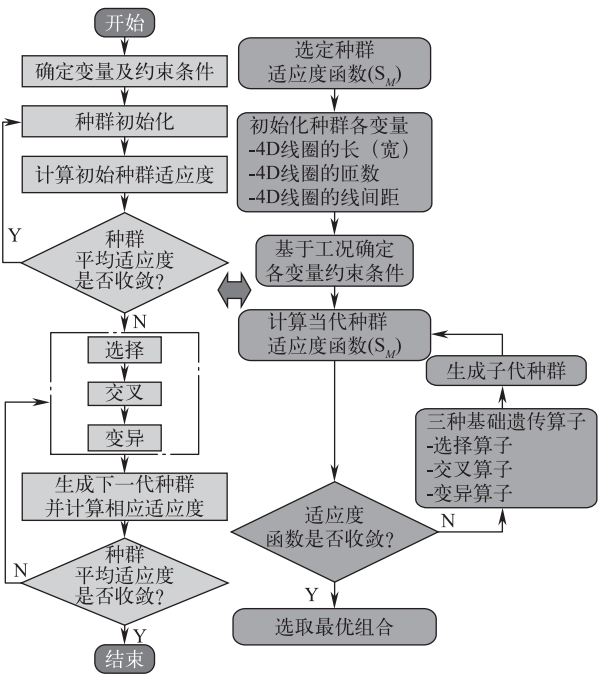


图 6 优化流程图
Fig. 6 Optimization flow chart

由图3~图5分析可知,4D线圈的抗偏移能力与其尺寸、匝数和匝间距等变量有关。因而,基于实际工况考虑,本文提出的边界约束条件限制如下

$$\begin{cases} 400 \leq l \leq 500 \\ 400 \leq w \leq 500 \\ 0.5 \leq a \leq 1.5 \\ 5 \leq n \leq 13 \end{cases} \quad (6)$$

式中, l 和 w 分别为4D线圈的长和宽; a 为4D线圈内部的线间距; n 为4D线圈的匝数。

此外,考虑到AGV在停车时,系统 x 轴方向和 y 轴方向偏移的概率一致,因此加入以下非线性约束条件

$$l = w \quad (7)$$

为具体量化系统抗偏移性能,本文基于发射线圈与接收线圈间的互感 M ,提出 S_M 作为优化目标,即种群适应度函数,其表达形式如下

$$S_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (M_i - M_0)^2}{M_0}} \quad (8)$$

式中, M_i 为接收线圈在不对准情况下,其与发射线圈之间的互感; M_0 为接收线圈在完全对准情况下,其与发射线圈之间的互感。

一般而言,适宜的种群数量与迭代次数有利于算法计算的快速收敛,并能有效地保证收敛结果的全局性。因此,在利用遗传算法对该磁耦合结构进行优化设计之前,有必要对种群个体及迭代次数等进行相关限制。由以往的经验与多次实验可知,本文最终确定种群个体为400,迭代次数为1 000次。

遗传算法通过选择、交叉和变异等模拟自然界中生物种群繁衍方式,不断产生子代个体,最终得到最优子群,即得到最优解。因此,遗传算子包含的选择、交叉和变异算子是遗传算法进行随机全局搜索优化的关键。交叉通过对任意两组个体进行交换组合,产生新的优良品种,因此交叉算子的取值对于筛选种群中最优个体有着较大影响,过高不利于种群中最优基因的延续,过低则导致种群整体进化速率较慢。变异以较小的

概率随机改变个体组成,以此模拟生物在繁衍中存在的基因突变等现象,因此变异算子取值不应过高。选择算子用于选择当前子代最优个体并直接复制产生下一代,因此当最优个体的占比提高时,种群逐渐适应环境,宏观表现在种群的平均适应度逐渐收敛。综上所述,本节基于实际经验,最终选取交叉算子为0.65,变异算子为0.002,以此保证系统可以较快收敛的同时,又能避免算法早熟。

经过算法迭代后的最终收敛结果如图7所示。从图7中可以看出,最优适应度 $S_M=0.212\ 09$ 。在该系统的最优解解码后,可得出4D线圈的物理尺寸参数见表2。

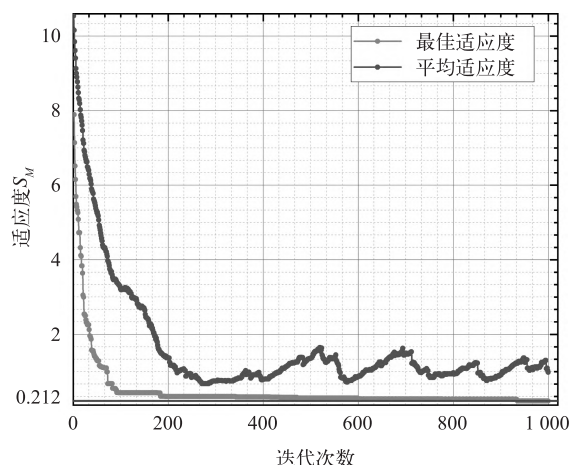


图7 优化迭代曲线

Fig. 7 Optimization iteration curve

表2 4D线圈的物理尺寸参数

Tab. 1 Physical parameters of 4D winding size

4D线圈	线径 d /mm	利兹线 规格	线间距 /mm	长×宽 /mm×mm	4D线圈匝数
数值	3.96	0.1×800	1	446.4×446.4	9

2.3 磁路机构偏移时的耦合系数变化情况

为了验证4DQ双极性平面绕组线圈抗偏移能力的有效性,本节基于Maxwell等有限元仿真软件对耦合机构发生偏移过程中的耦合系数 k 的变化情况进行探究,并与传统两线圈进行对比。

4DQ线圈与传统圆形两线圈沿水平任一轴方向以一定的步长偏移时,耦合系数 k 随偏移步长

的变化曲线如图8所示。

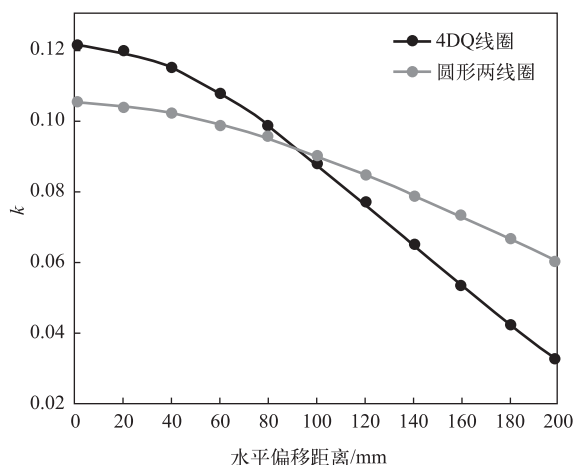


图8 耦合系数与水平偏移距离的关系

Fig. 8 Coupling coefficient with horizontal offset distance

图8中,在线圈完全对准时,新型磁耦合结构耦合系数 k 约为0.122 1,圆形两线圈耦合系数仅为0.104 9。此外,当接收线圈偏移量为19%时,新型磁耦合结构仍能保证较高的耦合系数,进而确保系统具有较大的输出功率和传输效率。

3 实验样机设计与验证

本节首先根据表1和表2绕制了优化后的4DQ线圈,并测定了相关自感参数,其次根据式(4)得出优化后的双极性4DQ线圈的补偿网络参数,见表3。最后搭建了IPT系统的样机模型,并对基于4DQ磁路机构的双边LCC拓扑IPT优化系统的抗偏移性能进行了研究。实验平台如图9所示,包括直流电源、信号发生器、逆变器、磁耦合结构、一二次侧补偿网络、整流器、电阻负载及相关实验测量仪器。

表3 补偿网络的电路参数

Tab. 3 Circuit parameters of the compensation network

一次侧参数	数值	二次侧参数	数值
$L_{n1}/\mu\text{H}$	44.39	$L_{n2}/\mu\text{H}$	47.63
C_{n1}/nF	78.7	C_{n2}/nF	73.23
$L_T/\mu\text{H}$	217	$L_R/\mu\text{H}$	219.42
C_T/nF	20.53	C_R/nF	20.43
R_L/Ω			32.6

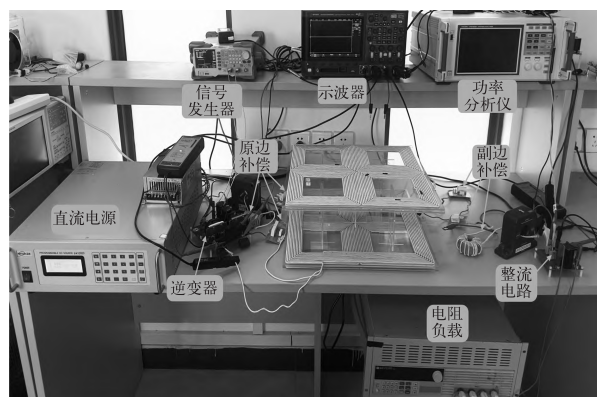
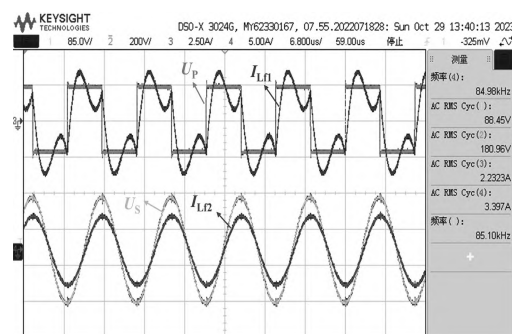


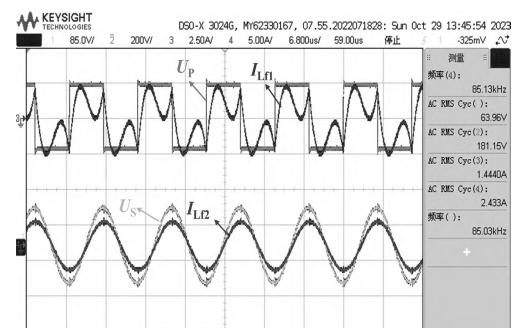
图9 优化后的双边 LCC 型磁耦合实验样机图

Fig. 9 Experimental prototype of optimized bilateral LCC-type magnetic structure

不同偏移条件下逆变器输出电压、输出电流波形和负载侧电压、电流波形如图10所示。由于双边LCC补偿网络的特性,逆变器的输出电流波形并不是完整的正弦波形,因此,可以通过利用功率分析仪测量系统传输效率。由图10可以看出,当接收线圈偏移85 mm时,传输效率仅从87%变化到81.05%。



(a) 耦合机构正对时的波形



(b) 耦合机构偏移85 mm时的波形

图10 不同偏移条件下,实验样机初次电压电流波形

Fig. 10 Original and secondary voltage and current waveforms of the experimental prototype with different lateral offset

磁耦合机构偏移过程中,系统传输特性仿真和实验结果变化情况如图11所示。由于电容制造工艺及制作加工过程带来的误差,仿真结果和实验结果略有不同。此外,从图11可以看出,该新型磁耦合机构具有较强的水平抗偏移能力,即在磁耦合结构发生较大水平偏移时,系统仍能保证较高的传输效率及负载输出功率。

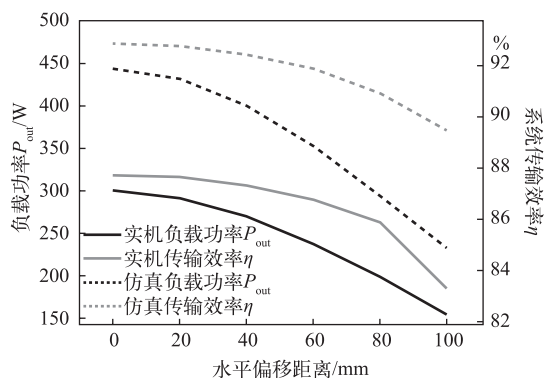


图 11 传输特性的实验和仿真结果对比

Fig. 11 Comparison of experimental and simulation results of transfer performance characteristics

4 结束语

针对于AGV无线电能传输过程中所面临的线圈偏移问题,本文提出了一种新型磁耦合结构4DQ线圈平面绕组,并基于遗传算法对该磁耦合结构进行优化,以在实际工况中增强IPT系统线圈的抗偏移能力。此外,为提高AGV的使用寿命,本文采用双边LCC结构作为该新型磁耦合结构的补偿网络,以尽可能地实现负载侧的恒流充电。与此同时,4DQ线圈也保障了AGV在不完全对准时负载电流的相对稳定,进而较大地提高了电池的使用寿命,为后期的工程应用提供了可靠依据。最后,通过一台300 W的实验样机对所提双边LCC型IPT系统的抗偏移性能进行了实验验证,所制作的实验样机可以在线圈的横向偏移百分比 $\delta < 20\%$ 的范围内,实现系统输出功率最大波动率保持在48%以内,整机效率保持在80%以上。相对于传统的两线圈模型,该新型磁耦合结构具有优秀的抗偏移能力,可以使得接收端在水平偏移百分比为0%~20%的范围内,实现系

统传输效率波动率小于10%的抗偏移能力。

参考文献

- [1] 冯鸿运,林飞,杨中平,等.应用于自动导引小车无线充电系统的导航与供电一体化线圈研究[J/OL]. 电工技术学报: 1-12.
- [2] 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.
- [3] 陈阳,杨斌,彭云尔,等.感应式无线电能传输系统抗偏移技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5537-5557.
- [4] 李建坡,李烁,王一钧,等.磁耦合谐振式无线电能传输技术研究综述[J/OL]. 电测与仪表: 1-12.
- [5] 曾玉凤,丘东元,张波.磁谐振无线电能传输系统线圈设计综述[J]. 电源学报, 2019, 17(4): 94-104.
- [6] 秦镜,刘宜成,涂海燕,等.基于E类逆变器的WPT系统线圈抗偏移研究[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(10): 48-51.
- [7] 常雨芳,李飞,唐杨,等.基于补偿拓扑切换的MCR-WPT最大效率追踪方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2023, 45(5): 559-564.
- [8] 姚友素,曾明,李刚,等.无线电能传输系统恒流/恒压输出切换方法[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(6): 8-17.
- [9] 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.
- [10] 戴沃锰,李志忠,张皓南,等.基于LCC-S型WPT系统的抗偏移参数补偿方法[J]. 电力电子技术, 2023, 57(8): 82-85.
- [11] WANG M, SONG G, YIN R, et al. Design and analysis of an anti-misalignment wireless power transfer system[J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2023, 33: 228-231.
- [12] 徐文强,钱祥忠.双边LCC拓扑抗偏移性能的参数优化[J]. 电器与能效管理技术, 2021(5): 17-24, 29.

- [13] CASTILLO-ZAMORA I U, HUYNH P S, VINCENT D, et al. Hexagonal geometry coil for a WPT high-power fast charging application[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(4): 946-956.
- [14] LU Y, XIA C, RONG C, et al. Optimization design of coupling mechanism for dynamic static hybrid AGV WPT systems[J]. Electrical Engineering, 2022, 104(6): 4509-4520.
- [15] 葛凯梁, 仇钧, 朱海. 基于中继线圈的电动汽车静态无线充电系统抗偏移性能提升研究[J/OL]. 电源学报: 1-14.
- [16] 李享, 李欣岩, 黄卡玛, 等. 基于均匀磁场的 WPT 系统抗偏移方法仿真与优化[J]. 真空电子技术, 2023(3): 56-60.
- [17] 程少宇, 王钰博, 张雪莹, 等. 带有大中继线圈的无线充电磁耦合器抗偏移特性研究[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 213-219.
- [18] 武杰文, 孙冰. 具有抗偏移特性的 IPT 与 CPT 结合的 WPT 系统[J]. 电力电子技术, 2021, 55(2): 8-11.

作者简介

陈凯 (1990—), 男, 助理工程师, 研究方向为电力电子、无线电能传输。

高艺霖 (2000—), 女, 研究方向为多目标优化算法、中距离无线输电。

(收稿日期: 2023-11-07)