

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518167

输电线路 U型三线圈 WPT 系统参数优化研究^{*}

程江洲^{1,2} 罗应权¹ 鲍刚^{1,2} 吕奥博¹ 杨静怡¹

(1.三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002; 2.湖北省微电网工程技术研究中心 宜昌 443002)

摘要: 针对在线监测设备在输电线路巡检中的续航不足、维护成本高以及巡检频次不足等问题,本文设计使用一种U型三线圈无线供电系统同时提出一种基于遗传算法的参数设计优化方法,以实现110 kV中远距离输电杆塔在线监测设备无线供电。在此基础上首先构建U型三线圈无线电能传输系统的电路模型,推导出输出功率、传输效率与负载阻抗、线圈互感、耦合系数之间的关系式,然后通过遗传算法对相关参数进行优化并得到最优解及其对应的参数值。最后根据仿真数据搭建实验平台,实验结果表明U型三线圈输电杆塔在线监测设备无线供电系统在380 kHz的工作频率及1.2 m传输距离下,系统输出功率达到81.19 W,验证了其能够满足在线监测设备的供能需求。

关键词: 无线电能传输;三线圈;遗传算法;传输功率;参数优化

中图分类号: TN99 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1020

Research on parameter optimization of U-shaped three-coil WPT system for power transmission lines

Cheng Jiangzhou^{1,2} Luo Yingquan¹ Bao Gang^{1,2} Lyu Aobo¹ Yang Jingyi¹

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Engineering Research Center for Microgrid, Yichang 443002, China)

Abstract: Aiming at the problems of insufficient range, high maintenance cost and insufficient inspection frequency of online monitoring equipment in transmission line inspection, this paper designs a U-type triple-coil wireless power supply system using a U-type triple-coil wireless power supply system and at the same time proposes a parameter design optimization method based on a genetic algorithm in order to realize wireless power supply of online monitoring equipment for 110 kV medium and long-distance transmission towers. On this basis, the circuit model of the U-type triple-coil wireless power transmission system is firstly established, and the relational equations between the output power, transmission efficiency and the mutual inductance of the coil, coupling coefficient, and load impedance are deduced, and then the genetic algorithm is used to search for the optimization of the parameters and obtain the optimal solution and its corresponding system parameter values. Finally, an experimental platform is built according to the simulation data, and the experimental results show that the wireless power supply system for on-line monitoring equipment of U-type triple-coil transmission towers achieves an output power of 81.19 W at an operating frequency of 380 kHz and a transmission distance of 1.2 m, which verifies that it can meet the power supply requirements of on-line monitoring equipment.

Keywords: wireless energy transmission; triple coil; genetic algorithm; transmission power; parameter optimization

0 引言

随着电力需求的不断增长,高压输电线路的安全性和稳定性对电力系统的正常运行至关重要。这些线路在复杂的自然环境中运行,易受多种因素的影响,从而增加了故障的风险。为了有效监控和维护这些线路,在线监测技术被

广泛应用,它们能够实时监测线路的工作状态,及时发现并处理潜在的安全隐患。

该技术的应用显著降低了因环境因素导致的线路故障风险、及时提供监测反馈,从而有效避免了高压输电线路故障的发生。然而,随着在线监测技术的持续发展,在线监测设备的供电问题成为了影响其设备性能的关键因素之一。

收稿日期:2025-02-25

*基金项目:国家自然科学基金(62476153)项目资助

传统的供电方式如锂电池、新能源发电等,尽管在某些场合得到了应用,但由于更换电池过程繁琐且受环境因素影响较大、供电的稳定性难以保障,已无法满足在线监测节点在电网中实际的应用需求。

针对上述问题,无线供电系统为其提供了一种新的解决方案^[1]。通过无线方式为监测设备提供能量,能避免传统有线供电方式的局限性,如电缆的敷设困难、维护成本高、易受环境影响等问题,同时无线供电技术的安全稳定、灵活可靠、电气隔离等优点,为在线监测设备续航提供了一种无线电能传输的解决方案^[2-3]。但在设计参数方面,无线电能传输(wireless power transfer, WPT)系统的性能依赖于其参数的合理配置^[4-6],包括传输功率、频率、天线设计等,这些参数的优化是提高输电线路在线监测设备 WPT 系统效率和稳定性关键^[7-8]。

文献[9]研究聚焦于高压杆塔设备无线供电技术,分析了供电系统组成、取电装置、磁耦合机构、补偿网络、电能变换器及控制方法。指出了无线供电技术在传输效率、抗偏移、鲁棒性以及产品化方面的发展趋势,并探讨了系统亟待解决的问题。文献[10]针对 110 kV 输电杆塔在线监测供电场景,通过加入不等数量的中继线圈改进中远距离无线电能传输系统的传输效率及功率,在保持传输距离不变的前提下,通过应用优化多米诺线圈的排列方式,测试出中继线圈的数量存在最优解,得到七线圈 WPT 系统的传输效率比八线圈 WPT 系统提升了 30%。文献[11]使用改进麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)进行参数设计的方法,对传统两线圈 WPT 系统的频率、耦合系数以及负载阻抗进行了优化调节。仿真结果显示,该方法能够使系统迅速实现最佳传输效率。文献[12]重点探讨了无线电能传输系统的传输效率问题。该研究将传输效率、传输距离以及电压增益等参数作为目标函数,以多目标优化算法进行参数寻优。文献[13]针对无人平台的无线电能传输系统进行了结构设计,并提出了一种利用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法的参数调优策略。这种方法能够有效减少系统在负载电阻和耦合系数变化时输出电压、功率和效率的波动幅度。除上述算法之外,遗传算法(genetic algorithm, GA)及其改进形式因其良好的全局搜索能力和鲁棒性,在 WPT 系统参数优化方面也得到了广泛应用和深入研究。文献[14]采用遗传算法对三线圈 WPT 系统的电路参数进行优化,以传输效率与输出功率乘积作为目标函数,在传输距离为 37.39 cm 的条件下,实现了输出功率 151.37 W 和传输效率 81.02% 的优化结果,充分体现了遗传算法在多变量非线性优化中的显著优势。文献[15]利用遗传算法优化多线圈 WPT 系统的结构参数,显著提升了特定应用场景下的能量传输性能,验证了该算法在物理结构设计优化中的适用性。文献[16]基于改进遗传算法优化六边形线圈的互感参数,通过自适应寻优提高了系统的抗偏移能力和传输效率,展示了算法对特定线圈

结构的适应能力。文献[17]针对 LCC-S 拓扑结构,提出了一种改进遗传算法,通过优化谐振参数和耦合系数,使系统传输效率达到 98.34%,并通过实验验证在 300 W 输出功率下效率为 97.98%,在宽负载范围内保持稳定。文献[18]设计专用于高压杆塔侧的在线监测设备的 WPT 系统,涵盖了安装位置、耦合机制和拓扑设计等多个方面,但传输效率较低,文献[19]深入分析了不同绝缘条件对传输效率的影响,并提出了一种新的谐振频率跟踪策略,但在传输距离达到 1.175 m 时,系统的效率依然未能突破 40%。

综上,传统的参数优化方法如试凑法、梯度下降法等,虽然在一定程度上能够优化系统性能,但此类方法通常效率较低,且较易陷入局部最优解,难以实现全局最优解的寻求。为了克服这些不足,本文使用 U 型三线圈无线电能传输系统并提出了一种基于遗传算法的高压输电杆塔在线监测设备 WPT 系统参数优化方法,通过种群的初始化、选择、交叉和变异等操作,旨在优化问题的解,不断进化出优良的解,最终在搜索空间中找到全局最优解,最终为本文参数实现优化。

1 高压输电杆塔无线供电系统模型

1.1 系统整体方案

高压输电杆塔在线监测设备无线供电系统结构如图 1 所示。

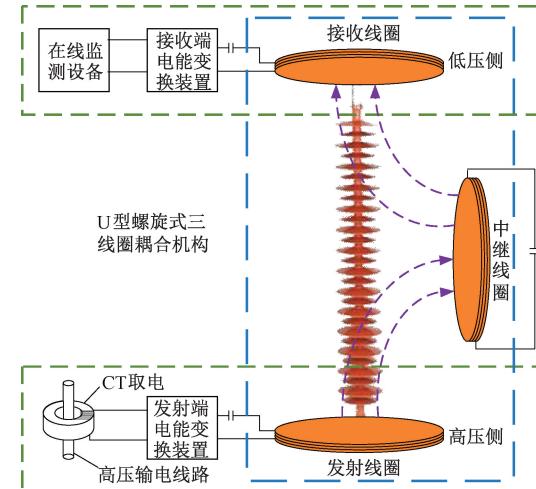


图 1 高压输电塔在线监测装置无线供电系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wireless power supply system for online monitoring device on high-voltage transmission tower

利用电流互感器(current transformer, CT)取电装置从 110 kV 高压输电线路获取电能,该装置基于电磁感应原理,使用电流互感器直接从高压母线上感应出交流电压,经过整流、滤波与稳压处理后,得到稳定的直流电压。经过高频逆变后转变为高频交流电,并通过 U 型三线圈组成的 WPT 系统传输至接收线圈,后由整流稳压模组转换为稳定的直流电,供输电杆塔在线监测设备使用。

1.2 系统等效电路模型分析

为简化分析,将 CT 取电装置部分等效为高频交流电压源 \dot{U}_{in} , 将接收端电能变换装置和高压在线监测设备等效为 R_L , 电路等效模型如图 2 所示。

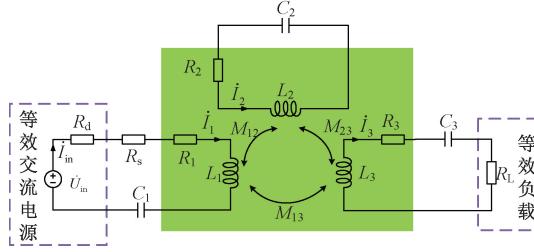


图 2 等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model

由基尔霍夫定律可知:

$$\begin{bmatrix} Z_1 & -j\omega M_{12} & -j\omega M_{13} \\ -j\omega M_{21} & Z_2 & -j\omega M_{23} \\ -j\omega M_{13} & -j\omega M_{23} & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: Z_1, Z_2, Z_3 和 $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ 分别为原边、中继和接收线圈的等效阻抗和流过线圈的电流, ω 为谐振的角频率, \dot{U} 为等效交流电源的电压大小。

上述公式中有:

$$\begin{cases} Z_1 = R_s + R_1 + j\omega L_1 + 1/(j\omega C_1) \\ Z_2 = R_2 + j\omega L_2 + 1/(j\omega C_2) \\ Z_3 = R_L + R_3 + j\omega L_3 + 1/(j\omega C_3) \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_s, R_1, R_2, R_3 分别为电源内阻和各线圈内阻, L_1, L_2, L_3 为各线圈的电感, C_1, C_2, C_3 为各线圈所匹配的谐振电容。

其中,系统进入谐振状态时,系统能够实现更高的能量传输效率,谐振状态下角频率满足:

$$\omega = \omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}} \quad (3)$$

将式(1)与式(3)联立得到三回路电路满足:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{(Z_2 Z_3 - \omega^2 M_{23} M_{13}) \dot{U}}{Z_1 (Z_2 Z_3 - \omega^2 M_{23} M_{13}) - \omega^2 M_{12}^2 Z_3 + \omega^2 M_{12} M_{23} M_{13} - \omega^2 M_{13}^2 Z_2} \\ \dot{I}_2 = \frac{(\omega^2 M_{21} Z_3 - \omega^2 M_{23} M_{12}) \dot{U}}{Z_1 (Z_2 Z_3 - \omega^2 M_{23} M_{13}) - \omega^2 M_{12}^2 Z_3 + \omega^2 M_{12} M_{23} M_{13} - \omega^2 M_{13}^2 Z_2} \\ \dot{I}_3 = \frac{(\omega^2 M_{13} Z_2 - \omega^2 M_{21} M_{12}) \dot{U}}{Z_1 (Z_2 Z_3 - \omega^2 M_{23} M_{13}) - \omega^2 M_{12}^2 Z_3 + \omega^2 M_{12} M_{23} M_{13} - \omega^2 M_{13}^2 Z_2} \end{cases} \quad (4)$$

根据功率计算式:

$$\begin{cases} P_1 = |\dot{I}_1|^2 R_1 \\ P_2 = |\dot{I}_2|^2 R_2 \\ P_3 = |\dot{I}_3|^2 R_3 \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_1, P_2, P_3 为各线圈的功率。

代入后得到:

$$\begin{cases} P_1 = \left(\frac{(Z_2 Z_3 - \omega^2 M_{23} M_{13}) \dot{U}}{Z_1 (Z_2 Z_3 - \omega^2 M_{23} M_{13}) - \omega^2 M_{12}^2 Z_3 + \omega^2 M_{12} M_{23} M_{13} - \omega^2 M_{13}^2 Z_2} \right)^2 R_1 \\ P_2 = \left(\frac{(\omega^2 M_{21} Z_3 - \omega^2 M_{23} M_{12}) \dot{U}}{Z_1 (Z_2 Z_3 - \omega^2 M_{23} M_{13}) - \omega^2 M_{12}^2 Z_3 + \omega^2 M_{12} M_{23} M_{13} - \omega^2 M_{13}^2 Z_2} \right)^2 R_2 \\ P_3 = \left(\frac{(\omega^2 M_{13} Z_2 - \omega^2 M_{21} M_{12}) \dot{U}}{Z_1 (Z_2 Z_3 - \omega^2 M_{23} M_{13}) - \omega^2 M_{12}^2 Z_3 + \omega^2 M_{12} M_{23} M_{13} - \omega^2 M_{13}^2 Z_2} \right)^2 R_3 \end{cases} \quad (6)$$

系统效率如下:

$$\eta = \frac{M_{12}^2 M_{23}^2 R_L}{(R_s + R_1) L_1^2 L_3^2} \quad (7)$$

依据上述公式,可以绘制出线圈电流、传输效率与负载电阻之间的关系如图 3 所示。

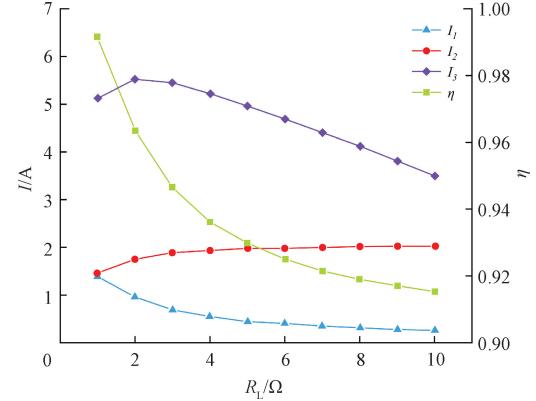


图 3 线圈电流和传输效率与负载电阻关系图

Fig. 3 Relationship between coil current, transmission efficiency, and load resistance

利用 Matlab 对上述三线圈系统的输出功率进行三维可视化分析如图 4 所示。从图中可以看出,系统输出功率在一定范围内存在最优值,因此,本文拟对系统输出功率进行寻优。

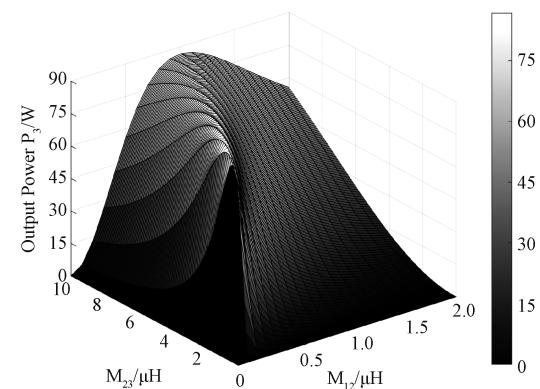


图 4 输出功率与互感 M_{12}, M_{23} 三维可视图

Fig. 4 Three-dimensional visualization of output power with mutual inductances M_{12} and M_{23}

2 基于遗传算法的 WPT 系统参数优化

2.1 优化目标

通常, 无线电能传输系统会分别对传输功率或传输效率进行独立优化。然而, 在线监测设备执行任务需求各异。因此, 本文将系统输出功率和系统输出效率作为共同的优化目标, 并根据任务需求为两者赋予不同的权重, 旨在实现高压在线监测设备 WPT 系统性能的最优化。优化目标可表述为一个加权的综合目标函数:

$$\text{Maximize}(F) = \alpha \cdot \eta + \beta \cdot P_3 (\alpha < \beta) \quad (8)$$

式中: α 和 β 分别为效率 η 和系统输出功率 P_3 的权重系数, 考虑到输电杆塔在线监测设备更为重要的是传输功率的稳定性故定义功率的权重系数大于效率权重系数。

2.2 约束条件

1) 功率约束

在线进行无线供电时, 输出功率需要控制在一定的范围内, 过小的输出功率会导致充电时间过长, 影响监测设备的任务执行效率; 过大的输出功率则可能引起输出电压或电流过大, 导致电路温度升高, 增加系统的安全隐患且对系统中元件造成损坏。因此, 本文在优化目标中纳入功率约束保证系统的可靠性与安全性。具体的功率约束条件如下:

$$P_{\min} < P < P_{\max} \quad (9)$$

式中: P_{\min} 和 P_{\max} 分别为系统输出功率的最小值和最大值。

2) 频率约束

无线电能传输的工作频率需要在允许的范围内, 以避免干扰其他设备和满足监管要求, 无线电能传输系统的工作频率不得低于某个最低值, 以确保天线和其他元件的正常工作; 系统的工作频率不得超过某个最高值, 以避免超出设备的设计能力:

$$f_{\min} \leqslant f_r \leqslant f_{\max} \quad (10)$$

式中: f_{\min} 和 f_{\max} 分别为系统的最小和最大的工作频率。

3) 安全绝缘距离约束

中继线圈在传输系统中作用主要体现在其能够有效地提高传输效率, 并且延长传输的有效距离, 但其工作电压和电磁场强度需要保持与绝缘子之间的安全距离, 以确保系统的安全性:

$$d_{\min} \leqslant d \quad (11)$$

式中: d_{\min} 为最小绝缘距离, d 是中继线圈与绝缘子之间的实际距离。

4) 电流约束

在对在线监测设备进行无线供电时, 通常使用利兹线和铁氧体磁芯绕制的耦合线圈, 但利兹线存在一定的耐流等级和温度限制, 若电路中的电流过大, 可能会引起耦合线圈过热并导致熔断。因此, 无线电能传输系统需增设电流约束条件:

$$I_1, I_2, I_3 < I_{\max} \quad (12)$$

式中: 下标 1、2 和 3 分别表示发射线圈的电流、中继线圈的电流以及接收线圈的电流。

3 遗传算法

3.1 算法流程

GA 是一种由 Holland 提出的启发式优化方法, 其设计思想源自生物进化过程中的遗传机制。算法通过种群中个体的遗传操作(如选择、交叉和变异), 从初始种群中随机生成的个体出发, 迭代优化寻找最优解。适应度函数是一种用于评估个体解在特定问题背景下所提供解决方案质量的指标, 通过遗传操作逐步引导整个种群演化, 从而不断提升解的优越性, 除此之外该方法具备强大的全局搜索能力且适用于复杂的多维问题, 能够有效避免所优化的目标陷入局部最优解的特点。算法流程如图 5 所示。

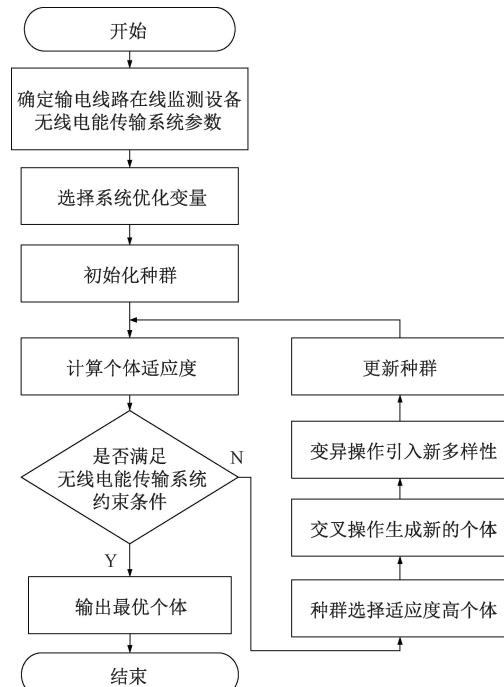


图 5 GA 算法流程图

Fig. 5 Flowchart of the GA

1) 确定输电线路在线监测设备无线电能传输系统参数如表 1 所示。

表 1 在线监测设备无线电能传输系统参数表

Table 1 Parameter list of wireless energy transmission
system for online monitoring equipment

参数	数值
线圈内阻 R_i/Ω	0.388
线圈自感 $L_i/\mu\text{H}$	247.41
线圈互感 $M_{12}, M_{23}/\mu\text{H}$	1.830 5
谐振电容 C_i/pF	580.39
耦合系数 k	0.09

2) 编码与种群的初始化

通常情况下,初始种群的规模越大,算法的搜索时间也相应增加,由于搜索空间的广泛性算法难以全面覆盖,因此,该算法容易陷入局部最优解,如果初始种群规模设置过小,可能会导致算法过早收敛进而引发种群多样性不足的问题。最终采用二进制编码对变量进行编码,设置种群规模为 100,遗传代数为 50。

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9] = (N_1, N_2, N_3, I_1, I_2, I_3, P, f_r, D) \quad (13)$$

3) 计算个体适应度

根据在线监测设备无线电能传输系统的数学模型,利用优化目标函数对其评价,通过计算适应度识别哪些个体在当前种群中表现较好,有助于筛选出更优质的个体,同时为后续的选择、交叉和变异操作提供依据。

本文中个体适应度函数设置为:

$$F = \alpha P + \beta \eta - \lambda \sum_{i=1}^n \max(0, g_i(x)) \quad (14)$$

式中: α 和 β 为功率与效率的权重系数($\alpha=0.7, \beta=0.3$),体现功率优先的优化目标, $g_i(x)$ 约束条件函数,包括功率上下限、频率范围、安全距离、电流限制等, λ 为惩罚因子(10^4),用于对违反约束的个体进行降权。

4) 判断是否满足在线监测设备无线电能传输系统约束条件

在此阶段,需要检查当前解是否满足所有的约束条件,功率约束、频率约束、安全绝缘距离约束以及电流约束,在满足所有约束条件时,并被保留在种群中用于进一步优化。

如果不满足选择条件,则在适应度较高的个体中使用交叉操作生成新的个体,再引入变异对其染色体随机更改,增加多样性条件下同也可以避免过早产生收敛,从而提升算法的全局优化能力,结束后返回设定的循环重新判断是否符合条件。在本文中选择父代融合使用几种选择方法可以更好地平衡选择压力和种群多样性同时结合几种交叉方法会产生更好的效果。

5) 判断终止

这一步是为了确定遗传算法是否已经找到了足够好的解或是否达到了预定的优化次数。常见的终止条件包括适应度值不再显著提升、达到最大迭代次数或其他预定标准,当终止条件满足时,输出当前最优解,同时输出 4 个次优解,作为最终的优化结果。

3.2 仿真分析

设定系统参数 U_{in} 为 36 V, 系统频率 f 为 380 kHz, 最小输出功率 P_{min} , 最大输出功率 P_{max} 和最小输出效率 η_{min} 。在具体实验验证中,考虑到风偏和舞动现象的存在,发射线圈、中继线圈以及接收线圈的相对位置会有动态变化,耦合系数会在 0~0.3 之间变化,图 6 为最优解遗传优化迭代曲线图。

由于有 9 个待优化的变量,因此不可避免地会产生多

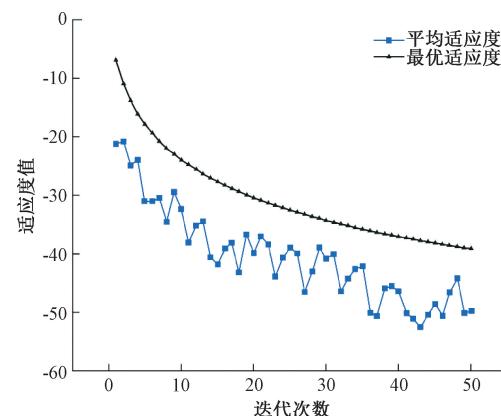


图 6 最优解遗传优化迭代曲线图

Fig. 6 Iteration curve of genetic optimization for optimal solution

个接近的最优解。虽然实现最优解的变量组合可能不止一种,但它们对应的值通常相差不大。通过遗传算法计算后所得到的最优解和对应的次优解如表 2 所示。相较于次优方案,其线圈设计在有限匝数下最大化磁场耦合效率,避免次优方案中因匝数冗余或不足导致的材料浪费或磁场强度失衡,同时传输距离的合理设定既抑制了过近耦合引发的涡流损耗,且规避了过远距离下的功率衰减,从而维持稳定的能量传输;电流分布的优化进一步降低了能量损耗。

表 2 最优解与其次优解

Table 2 Optimal and suboptimal solutions

变量	最优解	次优 1	次优 2	次优 3	次优 4
N_1 /匝	28.14	26.27	27.13	25.13	26.01
N_2 /匝	27.36	26.89	25.78	25.14	26.47
N_3 /匝	27.65	26.12	27.65	25.57	26.83
P/W	78.247	79.356	76.765	80.45	79.346
f_r/kHz	380.11	379.23	378.56	379.98	378.34
d/m	0.52	0.54	0.46	0.52	0.53
I_1/A	5.45	4.53	5.87	5.21	4.78
I_2/A	4.87	4.12	5.16	4.36	3.66
I_3/A	4.53	3.98	4.63	2.25	2.31

根据最优解参数,之后对三线圈无线电能传输系统进行有限元仿真,下图分别为 U 型三线圈和双线圈在 COMSOL 中的磁场 3D 模型辅助分析线圈的有限元模型;

根据图 7 和 8 的结果分析,三线圈和传统两线圈耦合模型的磁场均表现出较为均匀的特性,磁场能量分布主要集中在线圈的周围区域。然而,U 型三线圈无线供电系统在参考线上的磁场强度明显高于传统两线圈系统。结果显示 U 型 WPT 系统在能量传输能力上实现了显著提升。

导致两种传输系统性能差异的主要原因在于,传统两线圈无线供电系统的磁场路径呈直线分布,并贯穿绝缘子串。当受到风雨或严寒等气候条件的影响,绝缘子表面易

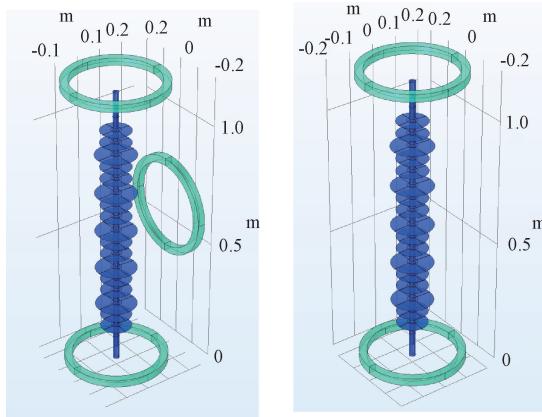


图 7 有限源仿真模型

Fig. 7 Simulation model of finite source

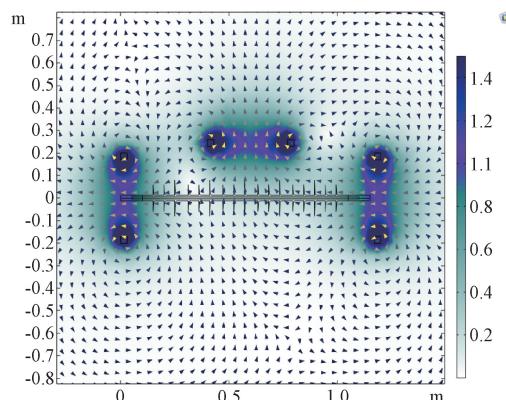
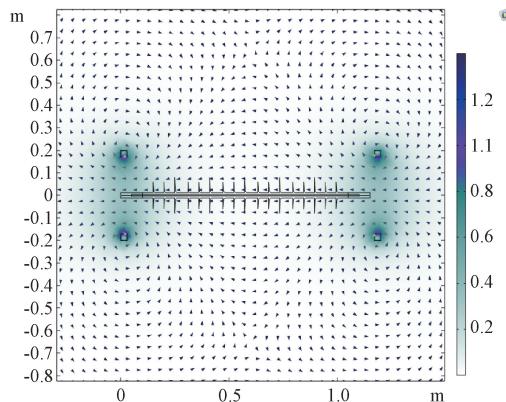


图 8 两种模型下的磁场矢量分布

Fig. 8 Magnetic field vector distribution under two models

附着异物,从而降低磁场的清洁度。同时,该系统原边与副边线圈之间的耦合系数较低。上述因素共同作用,可能显著削弱系统的传输性能。相比之下,本文所使用的 U 型三线圈无线供电系统采用“U”形能量传输路径,使磁场集中于绝缘子串之外的空间。对于无线供电系统,较高的磁场空间清洁度意味着磁场集中区域内受到的干扰更少,尤其是避免了灰尘、水分或其他污染物的影响,从而维持较高的能量传输效果和稳定性。

4 实验验证

为验证前述方法合理性,本文搭建了 U 型三线圈 WPT 系统的实验平台,对实际优化性能进行测试。实验样机参数如表 3 所示,考虑到发射线圈和接收线圈距离较远,故将 M_{13} 忽略不计。实验平台包括直流电源、高频逆变模块、U 型三线圈耦合机构、整流模块和电子负载等模块,实验平台如图 9 所示。为简化验证过程,将 CT 取能部分使用直流电源替代,负载部分使用电子负载代替,以便更好观察负载端的电压及传输功率。

表 3 U型三线圈 WPT 系统参数

Table 3 Parameters of U-shaped three-coil WPT system

参数	数值
R_L/Ω	15
$L_1/\mu\text{H}$	280.34
$L_2/\mu\text{H}$	279.89
$L_3/\mu\text{H}$	280.12
C_1/pF	600.92
C_2/pF	599.87
C_3/pF	600.53
$M_{12}/\mu\text{H}$	12.572
$M_{23}/\mu\text{H}$	16.611
U/V	36.0

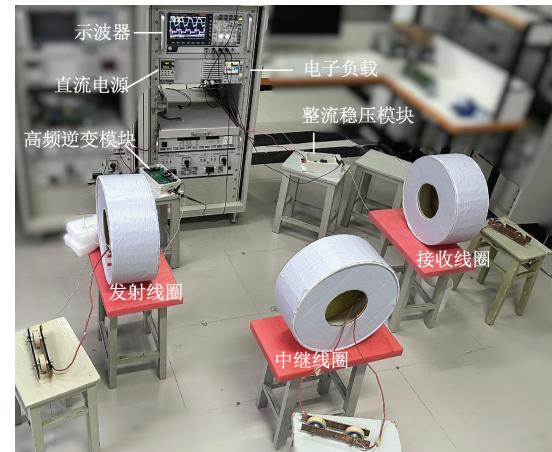


图 9 U型三线圈 WPT 系统实验平台

Fig. 9 Experimental platform of U-shaped three-coil WPT system

为更好地验证系统的传输参数,在测试完本文设定的 1.2 传输距离实验,同时测试该系统 1~1.4 m 范围内的传输参数同时做出与传统两线圈的对比实验,并对所得数据进行整理和可视化分析,如图 10~12 所示。

实验结果表明,U型三线圈无线电能传输系统的传输效率随传输距离增加呈轻微下降趋势,整体效率维持在 40% 以上,且在 1.0~1.3 m 范围内效率波动幅度较小,表

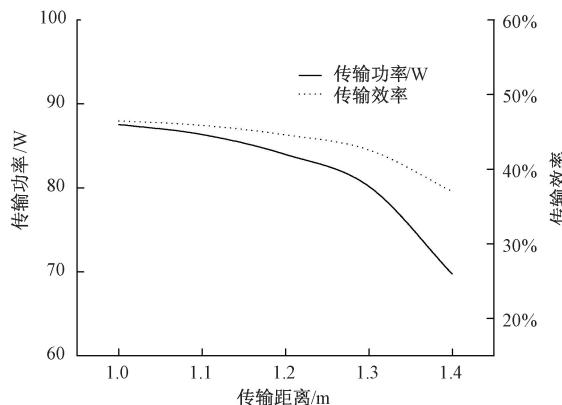


图 10 本文三线圈输出功率及效率图

Fig. 10 Output power and efficiency of the three-coil system in this paper

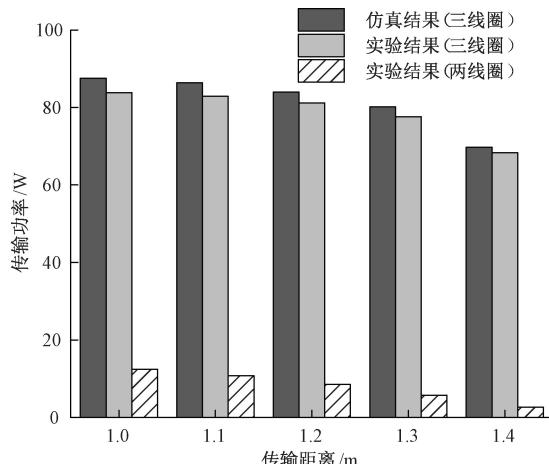


图 11 传输功率随传输距离变化图

Fig. 11 Variation of transmission power with transmission distance

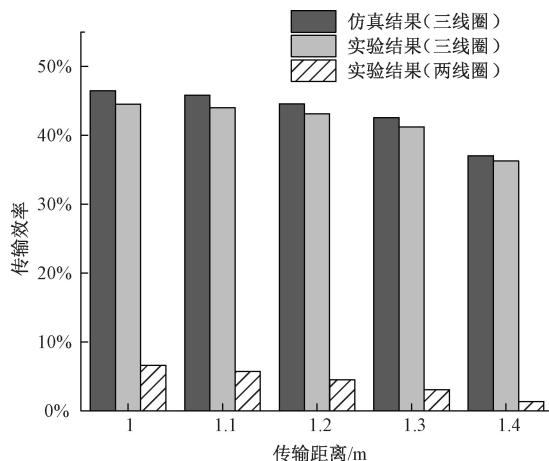


图 12 传输效率随传输距离变化图

Fig. 12 Variation of transmission efficiency with transmission distance

现出较好的稳定性。与之相比，两线圈系统的传输效率显著偏低，且随传输距离增加下降更为显著，进一步验证了三

线圈结构在中距离传输中的性能优势。功率特性方面，三线圈系统在 1.0~1.3 m 范围内输出功率波动仅为 7.4%，而两线圈系统功率降幅达 53.7%，表明三线圈系统呈现更好的稳定性，对传输距离变化的鲁棒性更强。需指出的是，仿真模型因未充分考虑实际线圈材料的非理想特性，同时实验环境周围存在金属物体或外部电磁场干扰，对实验数值产生一定的影响导致仿真效率与功率值较实验测量值偏高。图 13 展示了传输距离 1.2 m 时的关键波形：直流电源侧电压为 36.3 V，如图 13(a)所示，经逆变器输出的电压波形如图 13(b)中下方波形所示，再经过发射线圈、中继线圈和接收线圈的无线传输后得到图 13(b)中上方波形，最终经整流器输出的负载端直流电压为 27 V，如图 13(c)所示，波形畸变率低于 5%，符合系统设计要求。

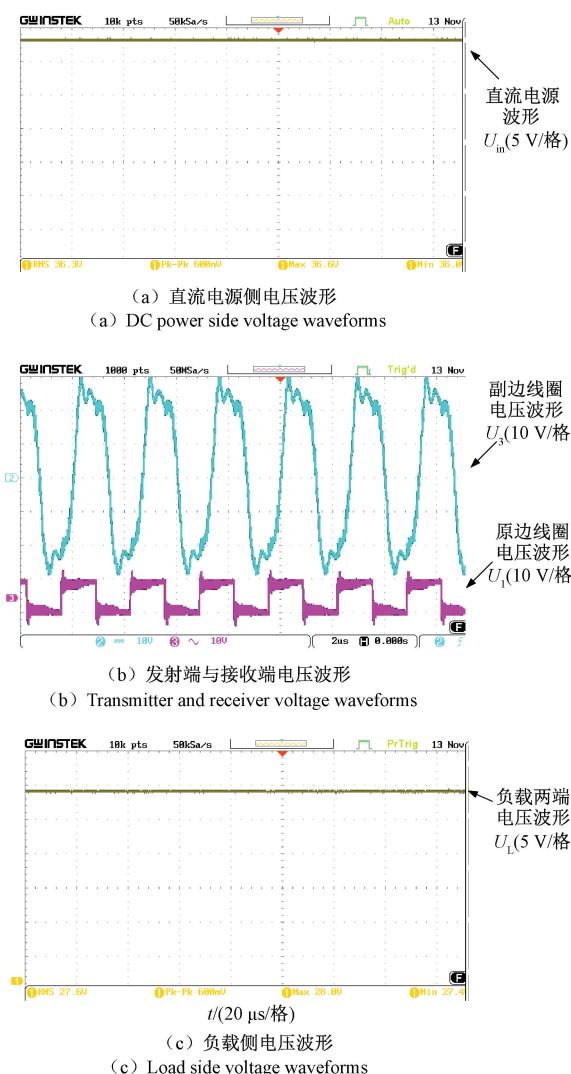


图 13 示波器波形图

Fig. 13 Oscilloscope waveform diagram

在高压输电线路中，绝缘子串的绝缘性能直接关系到电力系统的安全运行。本文设计的 U 型三线圈无线供电

系统采用“U”形磁场路径(如图7~8所示),将磁场能量集中于绝缘子串外侧空间,避免磁场贯穿绝缘子内部。通过有限元仿真分析,当传输距离为1.2 m时,中继线圈与绝缘子之间的实际距离为0.52 m,高于标准规定的最小安全绝缘距离0.3 m,并满足GB/T 311.2-2013《绝缘配合第2部分:高压输变电设备的绝缘配合使用导则》的要求。此外,线圈采用环氧树脂封装结构,耐压等级达110 kV,并通过COMSOL仿真验证了系统在最大电场强度(<10 kV/cm)下的绝缘可靠性。实验测试中,系统在连续运行24 h后未出现局部放电现象,表明所提方案对绝缘子串的绝缘性能无负面影响。

5 结 论

本文研究了在线监测设备无线电能传输系统在远距离传输中面临的问题,使用了一种基于U型三线圈结构的无线电能传输系统,并提出了一种利用遗传算法优化系统传输参数的解决方案,通过仿真分析和实验验证,证明了该设计方案的理论可行性和实际效果,并得到了以下主要结论:U型三线圈WPT系统显著增强了中远距离传输的能量功率和稳定性。与传统两线圈系统相比,该结构在传输距离相同或增加的情况下均能保持较高的功率输出。同时实验结果显示,该系统在1.2 m的传输距离下,能实现了81.19 W的输出功率,充分满足110 kV输电杆塔上在线监测设备对稳定无线供电的需求;基于遗传算法的优化方法有效提高了无线电能传输系统的参数匹配效率,优化后的系统在不同条件下均能实现高效传输性能。

参考文献

- [1] 吴金龙,高楚珊,唐小波.基于遗传模拟退火算法的无线电能传输系统[J].电子测量技术,2024,47(22):19-24.
WU J L, GAO CH SH, TANG X B. Wireless power transfer system based on genetic simulated annealing algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(22): 19-24.
- [2] LU C H, NI Y L, SONG K L, et al. Analysis and design of U-shaped wireless power transfer system for humanoid robots[J]. Journal of Power Electronics, 2025, 25: 724-734.
- [3] MA Q, XU J, PANG S, et al. High efficiency three-dimensional wireless power transfer system using cylindrical transmitting coil [J]. IET Power Electronics, 2024, 17(15): 2288-2300.
- [4] YUE Y, YANG J, LI R. A three-coil constant output wireless power transfer system based on parity-time symmetry theory [J]. Applied Sciences, 2023, 13(22): 12188.
- [5] 司庆贺,李建贵,王隆杨,等.基于偶极线圈的高抗偏移性无线电能传输系统[J].电子测量技术,2024,47(16):33-40.
SI Q H, LI J G, WANG L Y, et al. High offset-resistant wireless power transfer system based on dipole coils[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(16): 33-40.
- [6] 李振杰,白玉鸿,刘一琦,等.基于IPSO-BP算法的WPT系统结构参数优化方法[J/OL].电源学报,1-12[2024-12-19].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240426.0903.004.html>.
- [7] LI ZH J, BAI Y H, LIU Y Q, et al. Structural parameter optimization method for WPT system based on IPSO-BP algorithm [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-12 [2024-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240426.0903.004.html>.
- [8] 谢诗云,官涵宇,黄杰,等.基于旋转磁场耦合的非对称式无线电能传输系统[J].仪器仪表学报,2024,45(8):193-206.
XIE SH Y, GUAN H Y, HUANG J, et al. Asymmetric wireless power transfer system based on rotating magnetic field coupling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(8): 193-206.
- [9] 李阳,黄悦蓬,刘雪莉,等.动态无线电能传输系统多目标粒子群优化方法[J].电工电能新技术,2022,41(8):41-50.
LI Y, HUANG Y P, LIU X L, et al. Multi-objective particle swarm optimization method for dynamic wireless power transfer system[J]. Electric Power and Energy New Technology, 2022, 41(8): 41-50.
- [10] 胡青云,张波.高压杆塔设备无线供电技术剖析[J].电工技术学报,2024,39(20):6257-6269.
HU Q Y, ZHANG B. Analysis of wireless power supply technology for high-voltage tower equipment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(20): 6257-6269.
- [11] 王维,曾振炜,王勘恣,等.输电杆塔无线供电系统非均匀多米诺单元性能分析与优化[J].电工技术学报,2022,37(17):4315-4325.
WANG W, ZENG ZH W, WANG J R, et al. Performance analysis and optimization of non-uniform domino units in wireless power supply system for transmission towers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4315-4325.
- [12] 常雨芳,唐杨,李飞,等.基于麻雀算法的MCR-WPT系统传输特性研究[J].传感器与微系统,2022,41(6):65-69.
CHANG Y F, TANG Y, LI F, et al. Study on transmission characteristics of MCR-WPT system

- based on sparrow search algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(6): 65-69.
- [12] 魏曙光, 许非凡, 李嘉麒, 等. 基于 PSO 算法的无人平台无线电能传输系统参数优化[J/OL]. 电源学报, 1-15 [2024-08-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240511.1542.003.html>.
- WEI SH G, XU F F, LI J Q, et al. Parameter optimization of wireless power transfer system for unmanned platforms based on PSO algorithm[J/OL]. Journal of Power Supply, 1-15 [2024-08-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240511.1542.003.html>.
- [13] CAI C, WANG J, LIU R, et al. Resonant wireless charging system design for 110-kV high-voltage transmission line monitoring equipment [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(5): 4118-4129.
- [14] 杨云虎, 梁大壮, 洪若飞, 等. 遗传算法对三线圈无线电能传输系统参数优化[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(8): 122-129, 141.
- YANG Y H, LIANG D ZH, HONG R F, et al. Parameter optimization of three-coil wireless power transfer system using genetic algorithm [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(8): 122-129, 141.
- [15] 何祥瑞, 荣灿灿, 刘明海. 基于无线电能传输系统多线圈结构参数优化设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S2): 404-411.
- HE X R, RONG C C, LIU M H. Optimal design of multi-coil structure parameters for wireless power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S2): 404-411.
- [16] 谭平安, 许文浩, 上官旭, 等. 无线电能传输系统中组合串绕六边形线圈的互感建模及参数优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2299-2309.
- TAN P AN, XU W H, SHANGGUAN X, et al. Mutual inductance modeling and parameter optimization of combined series-wound hexagonal coils in wireless power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2299-2309.
- [17] 杨阳, 章治, 吴雪钰, 等. 采用改进遗传算法的无线电能传输系统参数优化设计[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(4): 93-104.
- YANG Y, ZHANG ZH, WU X Y, et al. Parameter optimization design of wireless power transfer system using improved genetic algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(4): 93-104.
- [18] 陶炳权, 汪超, 曲皓玥, 等. 基于垂直中继的 U 型高压线路无线电能供电系统设计[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3): 217-224.
- TAO B Q, WANG CH, QU H Y, et al. Design of U-shaped high-voltage line wireless power supply system based on vertical relay[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 217-224.
- [19] 张鹏飞, 龚立娇, 马欣欣, 等. 具有可变增益恒压特性的双线圈无线电能传输系统补偿网络设计与分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1256-1269.
- ZHANG P F, GONG L J, MA X X, et al. Design and analysis of compensation network for dual-coil wireless power transfer system with variable gain and constant voltage characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1256-1269.

作者简介

程江洲, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为电气设备状态评估及故障诊断技术和无线电能传输等。

E-mail: chengjiangzhou@ctgu.edu.cn

罗应权(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向无线电能传输系统。

E-mail: lyqmessi@163.com