

一种基于电磁吸附原理的二次电缆 辅助穿引线机构

简川黔 董洪松 陈玉雪 陈鹏 李涛
(国网四川省电力公司遂宁供电公司, 四川 遂宁 629000)

摘要 针对二次电缆人工穿引线工作环境差、工作效率低的问题, 本文结合电磁吸附原理, 提出一种二次电缆辅助穿引线机构设计方法。首先, 分析电磁吸附原理, 设计牵引端、穿线端、电磁吸附结构; 然后, 构建吸附装置有限元模型, 分析内外磁极中的磁感应强度大小、吸附力大小与空气间隙的关系, 确定所设计吸附装置的吸附力为 77.8N; 最后, 搭建性能测试实验平台, 开展原理性验证、重复性、效率对比相关实验。实验结果表明, 所设计的辅助穿引线机构能够稳定工作 12h 左右, 比人工穿引线方法的效率提高了 87.99%。

关键词: 二次电缆; 电磁吸附; 有限元; 电力维护

A secondary cable auxiliary threading lead mechanism based on the principle of electromagnetic adsorption

JIAN Chuanqian DONG Hongsong CHEN Yuxue CHEN Peng LI Tao
(State Grid Suining Electric Power Supply Company, Suining, Sichuan 629000)

Abstract Aiming at the problems of poor working environment and low working efficiency of secondary cable manual threading, this paper proposes a design method of secondary cable auxiliary threading lead mechanism based on the principle of electromagnetic adsorption. Firstly, the principle of electromagnetic adsorption is analyzed, and the structure of traction end, threading end and electromagnetic adsorption are designed. Then, the finite element model of the adsorption device is constructed to analyze the relationship between the magnetic flux density in the inner and outer magnetic poles, the adsorption force and the air gap. The adsorption force of the designed adsorption device is determined to be 77.8N. Finally, the experimental platform is built to carry out related experimental studies such as primitive verification, repeatability and efficiency comparison. The experimental results show that the designed mechanism can work stably for about 12h, and the efficiency is increased by 87.99% compared with the manual threading method.

Keywords: secondary cable; electromagnetic adsorption; finite element; power maintenance

0 引言

目前, 由于变电站的智能化进程逐步推进^[1], 我国的城市化进程与电网的发展已形成一种新的矛盾, 城市规模越来越大, 城区土地资源愈发宝贵, 为缓解城市电网建设与土地资源的矛盾, 城区电力线路逐渐用电力电缆替代架空输电线路^[2-4]。在我国特大型城市的配电网中, 架空传输线越来越少, 取而代之的是地下高压电缆^[5-7]。电缆需求量日益增

加, 对二次电缆的安装需求也不断增大^[8-9]。在实际安装工程中, 电缆安装的难点在于二次电缆的穿线引线, 存在安装工作空间非常有限、穿引线效率低、工作环境差且通常无照明等问题^[10-12], 因此亟须设计一种灵活、高效的穿引线机构, 以解决上述问题。

在二次电缆穿引线工具设计方面, 林海明等^[13]发明了一种电力安装用电缆引线装置, 该装置通过摩擦滚珠接触电缆安装的管道来减少装置移动时产生的摩擦阻力, 同时防止电缆旋转缠绕, 便于电缆

穿线操作,但工作环境狭小;王圣昌等^[14]针对变电站电缆敷设及二次接线工艺进行改进,提出电缆盘驱动装置、滑轨、电缆固定方式等的改进措施,但装置操作过程复杂、工作效率低;王世超等^[15]提出一种高效电缆引线器,该引线器由引线螺杆、引线端头及保护套组成,结构简单,自动化程度高,虽然螺杆驱动装置提高了电缆引线器的引线效率,但效率仍较低,且螺杆驱动装置易磨损;罗玉堂等^[16]提出一种多功能二次电缆抓取工具的改进方案,实验结果表明,该方案使多功能二次电缆抓取工具具有更广泛的使用范围,可以满足不同场景下的抓取需求,但采用较大夹爪结构导致设备不易携带,降低了工作效率;宋大成等^[17]提出一种圆盘式电缆引线器,将电缆卡接在定位圆盘表面后,所设置的卡环可对电缆头起到定位卡接的作用,便于施工人员第一时间找到电缆头,进行引线操作,方便简单,但在使用该机构完成电缆卡接后,电缆头无法外露在表面,不便于工作人员拿取电缆,降低了操作效率。

综上所述,穿引线工具的使用仍存在工作环境差、施工人员操作效率低的问题。为解决上述问题,本文提出一种基于电磁吸附原理的二次电缆辅助穿引线机构。

1 电磁吸附原理与结构设计

1.1 电磁吸附原理

在由高导磁率特种钢制成的金属圆管内装配电磁线圈,使用移动直流电源供电产生强大磁力,电磁吸附装置线圈产生的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} \quad (1)$$

式中: B 为磁感应强度; μ_0 为真空磁导率; N 为线圈匝数; I 为电流大小; L 为线圈长度。

结合虚功原理,磁感应强度大小主要受电流大小、线圈匝数及空气间隙宽度的影响,因此牵引端电磁吸附装置的吸附力为

$$F = \frac{(NI)^2 \mu_0 S}{2\delta^2} \quad (2)$$

式中: F 为电磁吸附力; S 为磁极表面总面积; δ 为气隙宽度。

当线圈匝数和电流大小确定时,式(2)可改写为

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (3)$$

应用式(3)时,气隙区域内的磁场分布必须均匀。在正常工作状态下,牵引端圆管式电磁吸附装置与接线端端部的空气间隙非常小,此时可将内、外磁极的磁场看作均匀磁场^[18],满足式(3)的应用条件。电磁吸附装置产生的电磁吸附力为内磁极与外磁极的电磁吸附力之和,即

$$F = F_{in} + F_{out} = \frac{\pi}{8\mu_0} \left[B_{\delta 1}^2 r_1^2 + B_{\delta 2}^2 (r_3^2 - r_2^2) \right] \quad (4)$$

式中: F_{in} 为内磁极产生的电磁吸力; F_{out} 为外磁极产生的电磁吸力; $B_{\delta 1}$ 为内磁极所对应的磁感应强度; $B_{\delta 2}$ 为外磁极所对应的磁感应强度; r_1 为内磁极半径; r_2 为外磁极内径; r_3 为外磁极外径。

1.2 二次电缆辅助穿引线机构设计

本文研究的二次电缆辅助穿引线机构主要包括穿线端、牵引端、电磁吸附装置三部分。穿线端负责二次电缆的穿线连接。牵引端用于对穿线端的精确引导,以确保二次电缆能够准确到达目标位置。电磁吸附装置旨在保证穿线端与吸附端满足正常工作吸附要求。

1) 穿线端结构设计

穿线端结构示意图如图1所示,主要包括穿线器、发光灯带、万向节和磁金属端头。由于电缆要能随意弯曲且穿孔结构不确定,故选用兼具柔韧性和强度且带有橡胶外层的钢丝材料作为穿线器材料,以便能在各种位置进行穿线,并能避免穿线过程中发生卡塞;设计万向节连接后端与穿线端端头,使穿线端具有足够的自由度,适应不同穿线位置。穿线端端头选用磁金属材料,易于被磁体吸合。针对电缆沟内环境光照不足的情况,在穿线端嵌入发光灯带,以提高环境能见度,便于施工人员查看穿线器的位置。

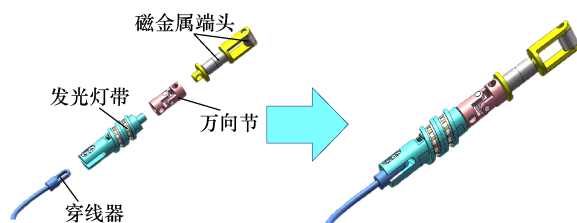


图1 穿线端结构示意图

2) 牵引端结构设计

牵引端结构示意图如图2所示,主要包括拨爪、储存槽、内嵌式摄像头、盖板、多级节状可嵌套式手柄。牵引端利用强磁吸附原理,使拨爪在未使用状态下保持直立。当穿线端的电磁铁接近牵引端时,

牵引端的电磁铁会自动吸附，导致拨爪向侧后方倾斜，并将穿线端的电磁金属稳固地卡入牵引端的凹槽中，确保穿线端在使用过程中能够牢固地固定在牵引端；内嵌摄像头用于观察电缆沟内部引线状况；储存槽用于储存内嵌式摄像头的 DC 24V 锂电池供电电源及控制电路；多级节状可嵌套式手柄可调节长度，扩大了工作范围且便于携带和存放。

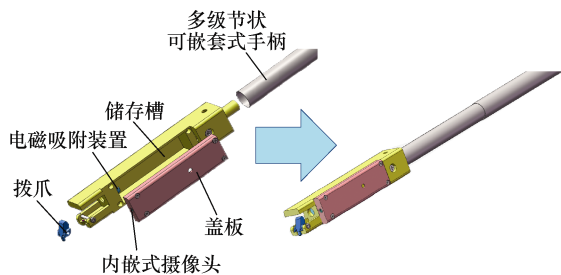


图2 牵引端结构示意图

3) 电磁吸附装置结构设计

电磁吸附装置采用电磁吸附的方式，使用牵引端查找并自动连接穿线端头，达到牵引穿线端的目的。牵引端的电磁吸附装置采用圆形吸盘电磁铁，其结构包括铁心、线圈和线圈框架等。铁心由内、外磁极和磁轭构成，励磁线圈绕制在线圈框架上，线圈框架紧固在铁心上。

图3为电磁铁二维剖视图，其中 H_1 为线圈窗口截面高度； H_2 为磁轭厚度； a 为空气间隙宽度。

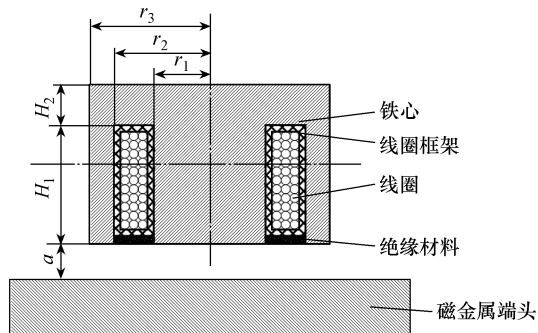


图3 电磁铁二维剖视图

4) 整体结构设计

二次电缆穿引线工具整体结构示意图如图4所示。牵引端通过控制电路来调节电磁吸附装置的磁性状态及其产生的吸力，确保其与穿线端端头的吸附强度相匹配。当达到预设的吸附强度时，穿线端与牵引端对接，从而完成二次电缆穿引线操作。

2 电磁吸附装置有限元仿真分析

2.1 构建电磁吸附装置模型

使用有限元软件对电磁吸附装置进行仿真计算，

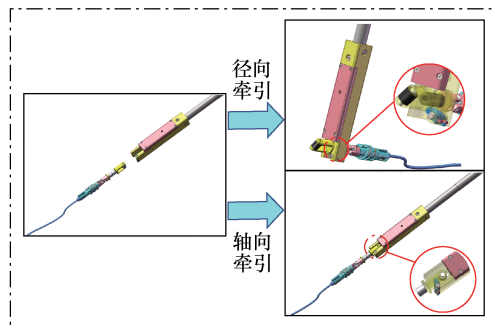


图4 二次电缆穿引线工具整体结构示意图

首先构建装置的几何模型，选择合适的材料和物理场，然后进行网格划分，选择适当的求解器，最后进行后处理。由于电磁吸附装置可以视为二维轴对称几何体，因此可以建立其二维模型，以降低计算复杂度。

通过二次电缆牵引时所需要的工作拉力，可以确定电磁吸附装置相关参数，采用文献[19]中的电磁仿真数据开展相关研究。其中，电磁铁的参数为 $r_1=5\text{mm}$ ， $r_2=7.5\text{mm}$ ， $r_3=9\text{mm}$ ， $H_1=7.5\text{mm}$ ， $H_2=9\text{mm}$ ， $\mu_0=1.25\times 10^{-8}\text{H/m}$ 。线圈由直径为 0.115mm 的铜导线绕制而成，匝数为728，施加直流电压24V。考虑到穿线端中磁金属端头可能由于铁锈等杂质而导致电磁铁与穿线端头间存在间隙，因此设定气隙宽度 $a=0.1\text{mm}$ ，穿线端磁金属端头高度为 8mm 。基于以上参数构建的电磁铁二维模型如图5所示。

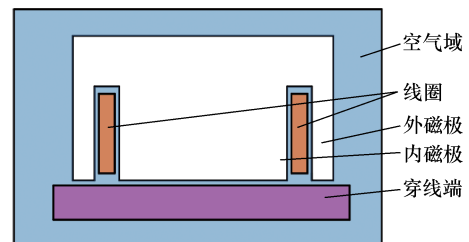


图5 电磁铁二维模型

2.2 仿真分析

通过控制气隙的宽度，可以得到内、外磁极气隙中的磁感应强度分布，如图6所示。图6反映了内、外磁极气隙中磁感应强度的高度均匀性，这一特性满足式(3)的应用前提。此外，考虑到内磁极表面磁化强度的相对优势，在维持恒定气隙宽度的条件下，内磁极气隙的磁感应强度显著高于外磁极气隙的磁感应强度。

不同气隙宽度下，内、外磁极气隙中平均磁感应强度的变化曲线如图7所示。图7表明，随着气隙宽度从 0.1mm 逐渐增大至 0.5mm ，内、外磁极气

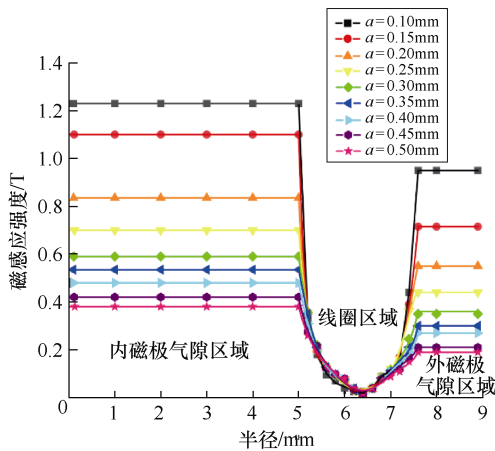


图 6 内、外磁极气隙中的磁感应强度分布

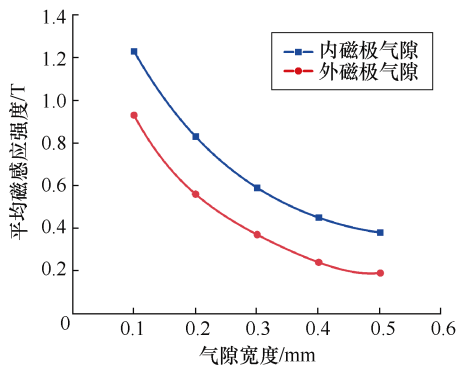


图 7 内、外磁极气隙中平均磁感应强度变化曲线

内、外磁极气隙的平均磁感应强度均呈现显著下降趋势，外磁极气隙的平均磁感应强度由 0.93T 降低至 0.19T，内磁极气隙的平均磁感应强度从 1.23T 减少至 0.38T，说明内、外磁极的平均磁感应强度均随气隙宽度的增大而呈现出逐渐减弱的特性。

电磁吸附力与气隙宽度的关系如图 8 所示。当气隙宽度为 0.1mm 时，电磁吸附装置的电磁吸附力最大，其值约为 77.8N；当气隙宽度增至 0.5mm 时，电磁吸附力降至最低，约为 6N。经过仿真数据分析发现，在气隙宽度从 0.1mm 增至 0.25mm 的范围内，

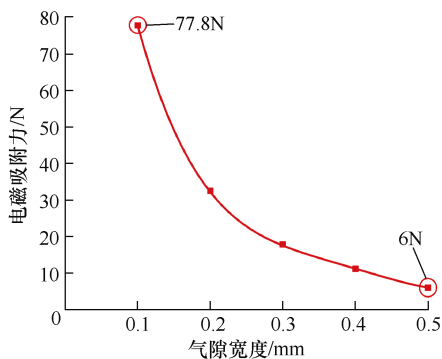


图 8 电磁吸附力与气隙宽度关系

电磁吸附力的下降速率较快；在气隙宽度从 0.25mm 增至 0.5mm 的区间内，电磁吸附力的下降速率减缓。以上结果表明，当气隙宽度在某一范围内时，电磁吸附装置具备足够的吸附力来实现对二次电缆的有效牵引及精确对接。因此，该电磁吸附装置产生的电磁吸附力可以满足实际应用需求。

利用图 7 所示内、外磁极气隙平均磁感应强度的仿真数据，结合式 (4) 进行计算并推导出电磁吸附力的理论值，并将其与仿真结果进行对比。电磁吸附力理论值与仿真值对比如图 9 所示。

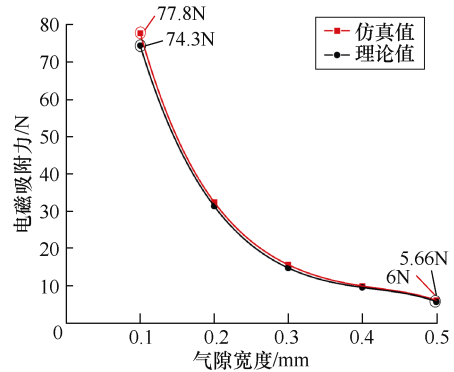


图 9 电磁吸附力理论值与仿真值对比

由图 9 可知，电磁吸附力的理论值与仿真值基本一致，表明所构建的电磁吸附装置模型能够准确地反映电磁吸附装置在实际运行时的电磁性能。

3 实验验证

二次电缆辅助穿引线机构实物如图 10 所示，为验证其工作效率，搭建如图 11 所示性能参数测试实验平台。其中，拉力测量仪用于测量电磁吸附装置的吸附力；高精度恒流电源为电磁吸附装置供电，维持电磁吸附装置的吸附力；功率测量综合测试仪（general purpose measurement, GPM）用于测量和分析电功率，即功率计，它能够测量交流或直流电源的电压、电流和功率等参数；上位机用于监测电

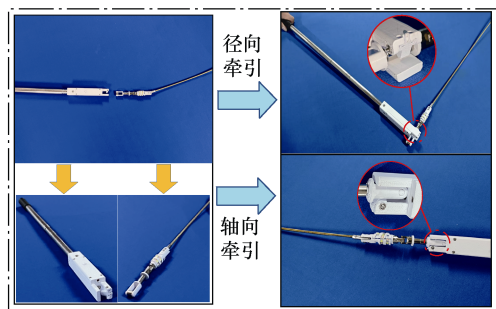


图 10 二次电缆辅助穿引线机构实物

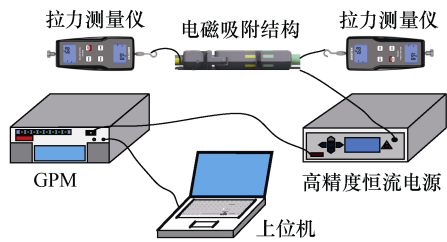


图 11 性能参数测试实验平台

磁吸附结构的实时状态，定量测量电磁吸附力、工作时间、工作范围等。二次电缆辅助穿引线机构性能参数见表 1。

表 1 二次电缆辅助穿引线机构性能参数

参数	数值
牵引端工作长度/cm	30~100
接线端长度/cm	30
最大吸附力/N	73.5
稳定工作时间/h	12
机构最大牵引力/N	120.5

3.1 原理性验证实验

为验证仿真及理论的准确性，对单个电磁吸附装置进行原理性验证实验。在气隙范围 0.1mm 到 0.5mm 内进行测量，所得电磁吸附力的仿真值、理论值与实验值对比如图 12 所示。由图 12 可知，电磁吸附力的仿真值、理论值、实验值基本一致，验证了仿真与理论的正确性。

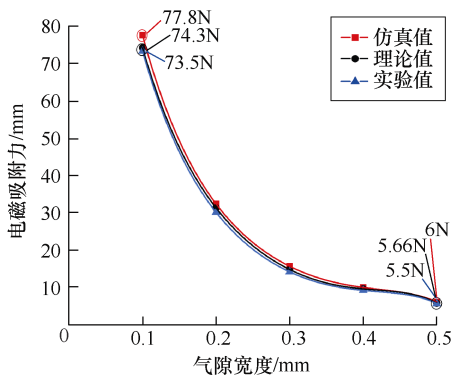
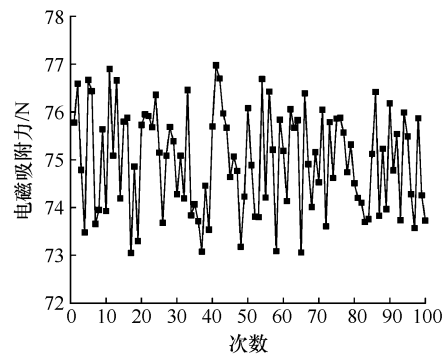


图 12 电磁吸附力仿真值、理论值与实验值对比

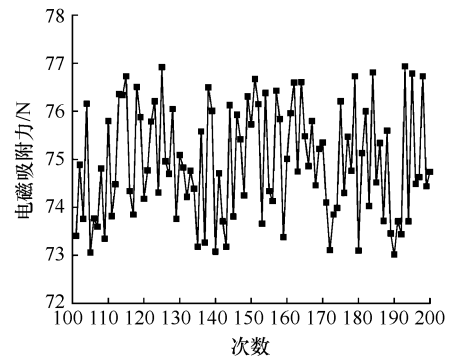
3.2 重复性实验

为验证二次电缆辅助穿引线机构工作的稳定性，对其进行重复性实验，选定工作次数 400 次，对电磁吸附装置进行电磁吸附力测试，实验结果如图 13 所示。

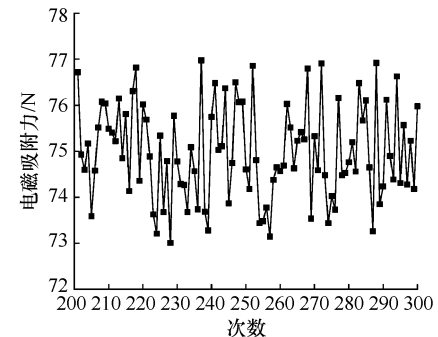
由图 13 可知，电磁吸附力在第 350 次工作之前基本稳定，自 350 次之后持续下降，在第 386 次降



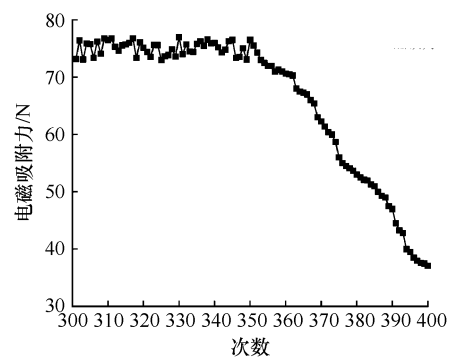
(a) 1~100 次实验结果



(b) 100~200 次实验结果



(c) 200~300 次实验结果



(d) 300~400 次实验结果

图 13 电磁吸附力重复性实验结果

至工作所需最低吸附力，其原因为电池电量不足。重复性实验表明，机构在工作次数不大于 350 时，电磁吸附力能稳定保持工作所需拉力，远高于正常

工作所需次数；在工作次数不大于 386 时，机构能满足工作所需最低要求。该二次电缆辅助穿引线机构具有较好的吸附稳定性。

3.3 效率对比实验

为验证二次电缆辅助穿引线机构相较于传统穿引线方法在工作效率方面的提升效果，进行效率对比实验。在相同工作量条件下，比较两种方法完成任务所需的时间。

选取 220kV 双堰变电站和 220kV 文武变电站作为实验地点，采用传统穿引线方法与二次电缆辅助穿引线机构分别进行 4 次相同的改造项目，对 20 根二次电缆进行穿线，确保实验条件一致，排除如人员技能、环境因素等其他变量的干扰。二次电缆穿引线工作现场如图 14 所示。效率对比实验结果见表 2。



(a) 人工穿引线 (b) 本文设计机构穿引线

图 14 二次电缆穿引线工作现场

表 2 效率对比实验结果

实验次数	人工穿引线 所用时间/min	本文设计机构穿引线 所用时间/min
1	58.0	7.0
2	59.8	6.5
3	55.0	6.4
4	60.0	7.7
5	57.6	7.4
6	61.0	7.9
7	56.0	6.2
8	54.0	6.3

由表 2 可知，人工穿引线方法所用时间最大值与最小值相差 7min，二次电缆辅助穿引线机构所用时间最大值与最小值相差 1.7min。人工穿引线所用时间平均值为 57.675min，二次电缆辅助穿引线机构所用时间平均值为 6.925min，效率提高了 87.99%。

4 结论

针对二次电缆人工穿线工作环境差、工作效率低的问题，本文设计了基于电磁吸附原理的二次电缆辅助穿引线机构，并进行了原理性验证实验、重复性实验和效率对比实验。结果表明，在气隙为 0.1mm 时，该机构可产生 77.8N 的吸附力，满足工作要求，并可在连续 350 次操作内保持稳定；机构将原本平均耗时 1h 左右的穿线工作缩短至 6~8min 完成，使工作效率提高了 87.99%，减少了工作时间并降低了难度。

参考文献

- [1] 郭红斌, 马驰, 文正其. 预制舱式模块化变电站关键技术及展望[J]. 电气技术, 2023, 24(9): 1-10, 19.
- [2] 陈维江. “高压电缆绝缘基础理论与关键技术”专题特约主编寄语[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 1-2.
- [3] 陶宇航, 张熹, 宫祥龙. 10kV 电缆故障测距及定位典型案例[J]. 电气技术, 2022, 23(2): 88-93.
- [4] 严有祥, 朱婷, 张那明, 等. 交直流电缆共沟敷设电磁环境影响因素[J]. 电工技术学报, 2022, 37(6): 1329-1337.
- [5] 董章, 李思尧, 陈雅旒, 等. 计及罕见变量的配电网电缆线路故障风险预警方法[J]. 电气技术, 2023, 24(5): 35-40.
- [6] 梁钟颖, 周凯, 孟鹏飞, 等. 基于频域反射系数谱的电缆故障定位与故障类型识别方法研究[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(8): 79-88.
- [7] 叶海, 李彩云, 任旭超, 等. 变电站二次电缆瞬态电磁骚扰的特征统计方法与不确定度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 166-174.
- [8] 雷佳成, 杨鑫, 秦睿, 等. 高压电缆接头防爆保护装置的泄能孔优化设计方法[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(3): 83-92.
- [9] CALCARA L, D' ORAZIO L, DELLA CORTE M, et al. Faults evaluation of MV underground cable joints[C]// 2019 AEIT International Annual Conference (AEIT), Florence, Italy, 2019: 1-6.
- [10] 朱晓中, 张勇, 王瑞刚, 等. 基于小波奇异熵和 BP 神经网络的电力电缆故障识别方法[P]. 中国: CN 202111617851.7, 2022-05-20.
- [11] 朱克平, 何英静, 倪瑞君, 等. 浅谈变电站电缆敷设与二次接线的工艺改进策略[J]. 电工材料, 2019(2): 46-48.

(下转第 74 页)

究。通过增加应用隔离技术进行优化设计,使系统的电气隔离性能和抗干扰能力显著提升,电池簇对地电压和绝缘检测值恢复正常。这一案例充分说明在高压储能系统设计中,合理选择并应用隔离技术对提高系统安全性和可靠性至关重要。未来研究将进一步关注这些优化措施的长期效果,包括系统性能提升的定量分析和长期可靠性测试,以持续完善高压储能系统的设计方案。

参考文献

- [1] 许梦阳, 郑蓬, 贺春. GW级储能电站能量管理系统关键技术试验研究[J]. 电气技术, 2023, 24(7): 56-63.
- [2] Devices for isolation for high voltage: IEC 61140—2016[S].
- [3] 电力储能用电池管理系统: GB/T 34131—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [4] 电化学储能系统储能变流器技术要求: GB/T 34120—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [5] 程正年, 汤海松, 马锟, 等. 一种直流绝缘诊断装置及其检测方法[J]. 电气技术, 2024, 25(3): 58-62.
- [6] Addressing high-voltage design challenges with reliable and affordable isolation technologies[Z]. Texas Instruments, 2021.
- [7] ZHANG Haitao, ZHANG Yunjie. Recent advances in DC-DC converters for electric vehicles[J]. MATEC Web Conf., 2023, 386: 02008.
- [8] 杨向真, 王锦秀, 孔令浩, 等. 电压不匹配运行条件下双有源桥变换器的效率优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6239-6251.
- [9] 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.
- [10] SCALETM-2 IGBT gate drivers[Z]. Power Integrations, Inc., 2022.
- [11] 林华梁, 彭松. 配电终端绝缘性能自动测试系统的研究与应用[J]. 电气技术, 2023, 24(5): 65-70.
- [12] 李建林, 李雅欣, 刘海涛, 等. 计及储能电站安全性的功率分配策略研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 5976-5986.
- [13] 夏向阳, 陈贵全, 刘俊翔, 等. 储能系统直流侧纹波电流对锂离子电池寿命影响分析及优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6218-6229.
- [12] 杨拯, 温才权, 刘炜, 等. 500kV GIS变电站隔离开关操作对二次电缆的影响[J]. 南方电网技术, 2022, 16(6): 147-155.
- [13] 林海明, 魏美玲, 张源, 等. 一种电力安装用电缆引线装置[P]. 中国: CN218040474U, 2022-12-13.
- [14] 王圣昌, 徐剑峰, 王晓飞. 变电站电缆敷设及二次接线的工艺改进[J]. 流体测量与控制, 2024, 5(4): 62-65.
- [15] 王世超, 王世全, 许靖, 等. 一种高效电缆引线器[P]. 中国: CN217984301U, 2022-12-06.
- [16] 罗玉堂, 侯雁峰, 段志珍, 等. 多功能二次电缆抓取工具改进分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41(1): 150-151.
- [17] 宋大成, 张健, 陈卫宇, 等. 一种电缆引线器[P]. 中国: CN220273173U, 2023-12-29.
- [18] 李扬. 高速强力电磁铁的设计与仿真[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [19] 洪晓玮, 陈勇. 一种新型电磁吸附式爬壁机器人的研制[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(3): 337-343.

收稿日期: 2024-09-23

修回日期: 2024-10-21

作者简介

徐志华(1982—), 女, 河北省石家庄市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事变压器设计及电器可靠性研究工作。

收稿日期: 2024-09-20

修回日期: 2024-10-22

作者简介

简川黔(1995—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为继电保护。

(上接第68页)