

# 基于 BIM 技术的变电站电缆敷设机械化装置联动控制方法

黄枞榕<sup>1</sup>, 余霁虹<sup>2</sup>, 何明<sup>1</sup>, 许燕燕<sup>1</sup>

- (1. 国网江西省电力有限公司景德镇供电分公司, 江西 景德镇 333000;  
2. 国网江西省电力有限公司景德镇市昌江区供电分公司, 江西 景德镇 333000)

**摘要:**针对变电站电缆敷设工作日益增长的复杂性和精确性要求,设计了一种基于 BIM 技术的电缆敷设机械化装置联动控制方法。该方法通过三维激光扫描技术构建成果点云模型,并分割处理构建 BIM 几何模型,选择通用性强的软件整合模型。实验测试表明,该方法能够实现智能放线架转速与牵引速度的同步,确保 4 条主要电缆线路敷设速度均衡,约为 15 m/min。相比原有方法,该方法使用的支持数据更准确,联动控制效果更佳,有助于提高电缆敷设机械化装置在复杂环境中的稳定性和运行效率。该方法对于变电站电缆敷设工作具有重要的应用价值。

**关键词:**三维激光扫描技术;BIM 技术;变电站;电缆敷设;机械化装置;联动控制

中图分类号: TP273;TN753.3 文献标志码: A 文章编号: 1003-7241(2025)12-0051-05

## Linkage control method for mechanized device of cable laying in substation based on BIM technology

HUANG Congrong<sup>1</sup>, YU Jihong<sup>2</sup>, HE Ming<sup>1</sup>, XU Yanyan<sup>1</sup>

- (1. State Grid Jingdezhen Electric Power Supply Company, Jingdezhen 333000, China;  
2. State Grid Jiangxi Changjiang District Electric Power Supply Branch Company, Jingdezhen 333000, China)

**Abstract:** In response to the increasing complexity and precision requirements of cable laying work in substations, this paper proposes a linkage control method for cable laying mechanization devices based on BIM technology. This method constructs a point cloud model using 3D laser scanning technology, and segments and processes it to construct a BIM geometric model, selecting a software integration model with strong universality. Experimental tests have shown that this method can achieve synchronization between the speed of the intelligent cable laying rack and the traction speed, ensuring a balanced laying speed of about 15 m/min for the four main cable lines. Compared to existing methods, this method uses more accurate supporting data and better linkage control effect, which helps to improve the stability and operational efficiency of cable laying mechanization devices in complex environments. Therefore, this method has important application value for cable laying work in substations.

**Keywords:** 3D laser scanning technology; BIM technology; substations; cable laying; mechanized equipment; linkage control

## 0 引言

电力行业的快速发展和变电站建设规模的不断扩大,使电缆敷设成为变电站建设的重要环节,其施工效率和质量对整体工程进度和后期运营维护具有重要影响。传统的电缆敷设方法主要依赖人工作业,不仅效率低下,而且容易受到人为因素的影响,导致施工质量和安全无法得到有效保障。近年来,随着机械化和自动化技术的不断进步,越来越多的机械化装置被引入到变电站电缆敷设施工中。这些机械化装置可以大幅提高电缆敷设的效率和准确性,降低施工成本,减少人为错误<sup>[1]</sup>。然而,这些机械化装置在实际应用中也面临着一系列问题,如设备之间的协同作业、施工过程的精确控制等。

因此,研究变电站电缆敷设机械化装置的联动控制方法显得尤为重要。通过实现机械化装置之间的协同作业

和精确控制,可以进一步提高电缆敷设的效率和质量,减少施工过程中的不确定性因素,提升整体工程的安全性和可靠性。同时,该研究还可以为相关领域的自动化和智能化发展提供理论支持和技术储备。

近年来,随着国家对工业自动化和智能制造的大力支持,国内的研究机构和企业纷纷投入到该领域的研究中。其中文献[2]提出变电站数字化电缆敷设建模及电缆载体相关计算研究,该研究整合汇总了变电站中最常用的电缆埋管,电缆沟和电缆支架的敷设方式,通过结合三维模型构建和配置标准化计算应用模块,实现电缆敷设。文献[3]研究了知识驱动的复杂产品多目标电缆敷设序列自动规划,基于电缆的走线位置,几何特征,基本属性等敷设优先级影响要素,构建敷设序列规划知识的表示模型,实现电缆敷设。相比之下,国内在装置联动控制方法的研究方面虽然起步较晚,但发展迅速。其中文献[4]中研究了一种基于混合进化算法的海上风电场电缆路由方法,基于

\* 基金项目:国网江西省电力科技项目(5218H0230006)

收稿日期:2024-03-05

角度升序的贪婪分组算法生成初始种群,结合基于路由表和禁忌搜索的局部搜索算子和全局搜索算子,实现电缆敷设规划。文献[5]中提出一种电力网络安全多层协同联动控制系统,该系统由协同联动控制子系统等构成。以上方法使用的支持数据为测量数据,不够准确,导致联动控制效果不佳,设计基于 BIM 技术的变电站电缆敷设机械化装置联动控制方法。

## 1 变电站电缆敷设机械化装置联动控制方法设计

### 1.1 基于三维激光扫描技术的成果点云模型构建

基于三维激光扫描技术构建变电站电缆敷设机械化装置的成果点云模型。实施步骤具体如下。

#### 1) 现场勘察

现场勘察是对变电站电缆敷设场地及其电缆敷设机械化装置的细致调查,旨在深入了解现场情况,为外业数据采集工作作好充分准备。这一过程中,需预先规划扫描路径、确定测站点的大致位置及数量。明确扫描路径旨在确保数据采集不受障碍物干扰,同时保证数据的完整性,从而避免重复或遗漏扫描。预先确定测站点位置则有助于简化测站布设流程,减少因多站点配准造成的坐标转换误差<sup>[6]</sup>。

此外,根据扫描站点数量、数据量大小及是否使用标靶等因素,可以确定模型配准方式。

#### 2) 选取三维激光扫描仪

比较现有的三维激光扫描仪参数,选用无需设置测站点的华泰天宇三维光扫描仪,同时该扫描仪可实施连续扫描,具体型号为 Trimble-FX。

#### 3) 采集外业数据

通过选取的三维激光扫描仪实施外业数据采集。

#### 4) 内业数据处理

通过服务器互联实现点云数据共享,并对外业采集的点云数据实施配准、去噪处理,获得电缆敷设机械化装置的成果点云模型。

其中点云配准的具体流程如下。

1) 选择控制点。从每个待配准的点云数据集中选择明显的、易于识别的特征点作为控制点。

2) 手动粗配准。初步估计点云间的相对位置和旋转,使它们大致对齐。

3) 自动精配准。利用迭代最近点算法 (Iterative Closest Point, ICP) 使点云数据进一步精确对齐。

假设有两个点云  $S$  和  $Z$ ,  $S$  中的点经过变换矩阵  $T$  后,与  $Z$  中的点对齐<sup>[7]</sup>。则 ICP 算法的目标是最小化下式的目标函数为

$$W(T) = \sum_{i=1}^n S_i \|s - (T * Z_s)\|^2 \quad (1)$$

式中,  $n$  指的是点云  $S$  中的点数;  $S_i$  为  $S$  的点集;  $s$  是指点云  $S$  中的点;  $Z_s$  是指点云  $Z$  中与  $S$  最近的点;  $W(T)$  指

是目标函数,它依赖于变换矩阵  $T$ 。

点云去噪<sup>[8]</sup>的流程具体如下。

1) 统计滤波。基于点的邻域内点的数量实施滤波,去除孤立的噪声点。

2) 体素滤波。将点云数据划分为多个小立方体 (体素),对每个体素内的点实施统计和重采样,去除冗余的点。

3) 移动最小二乘法。对点云数据实施平滑处理,去除小的噪声和毛刺,具体步骤如下。

a) 定义局部窗口。对于每个点  $C_i$ ,定义一个局部窗口  $\tilde{\omega}_i$ ,它包含点  $C_i$  及其邻近  $C_i$  的点<sup>[9]</sup>。

b) 构造局部多项式。在局部窗口  $\tilde{\omega}_i$  内,构造一个多项式  $c(x, y)$  来逼近  $\chi$  值。其中  $\chi$  是点云数据集  $C$  的竖轴坐标。

c) 权重函数。选用高斯权重函数  $\omega(x, y)$  作为权重函数,用于确定局部窗口内每个点对拟合的贡献。

d) 最小二乘拟合。在局部窗口  $\tilde{\omega}_i$  内,通过最小化加权残差平方和来求解多项式系数,具体公式为

$$\delta = \min_{v_1, v_2, v_3} \sum_{j \in \tilde{\omega}_i} \omega(x_j - x_i, y_j - y_i) [c(x, y) - \chi_j]^2 \quad (2)$$

式中,  $v_1, v_2, v_3$  指的是局部多项式的系数;  $\chi_j$  是指点云数据集  $C$  中第  $j$  个点的竖轴坐标;  $x_j$  是第  $j$  个点的横轴坐标;  $y_j$  是第  $j$  个点的纵轴坐标;  $x_i$  是第  $i$  个点的横轴坐标;  $y_i$  是第  $i$  个点的纵轴坐标<sup>[10]</sup>。

e) 平滑处理。得到多项式系数后,用多项式在原始数据点处的值来替换原始  $\chi$  值,从而实现平滑处理。

f) 遍历所有数据点。重复上述步骤,对每个数据点均实施局部拟合和平滑处理。

### 1.2 变电站电缆敷设机械化装置 BIM 三维模型构建

在创建复杂的 BIM 几何模型时,由于成果点云模型的细部结构较为复杂,因此需实施分割处理。这一步骤至关重要,需按照既定规则进行,并分配给不同的建模人员。待各部分 BIM 几何模型构建完成后,在同一环境下实施整合、完善、校验及调整,从而得到最终的复杂 BIM 几何模型<sup>[11]</sup>。

成果点云模型的具体分割流程如图 1 所示。将各区域的主要设备部分导入 Revit 软件中实施精准建模,在 Realworks 软件中利用拉伸等命令实施各区域次要设备的粗略建模。对于各区域的电缆点云部分,则在 Sketchup 中实施建模<sup>[12]</sup>。

在完成各个部分的 BIM 几何模型构建后,由于不同的建模软件有不同的输出格式,需要选择一款通用性较强的软件来整合这些模型。选用 Revit 软件作为整合工具。然而,即使 Revit 支持多种 BIM 几何模型输出格式,由于某些格式兼容性的问题,有时仍然会导致部分模型构件丢失。因此进一步将模型导入至 SketchUp 软件中,以添加丢失的构件,并对模型细节,特别是关键部位实施进一

步地丰富和完善,从而完成变电站电缆敷设机械化装置 BIM 几何模型的构建。

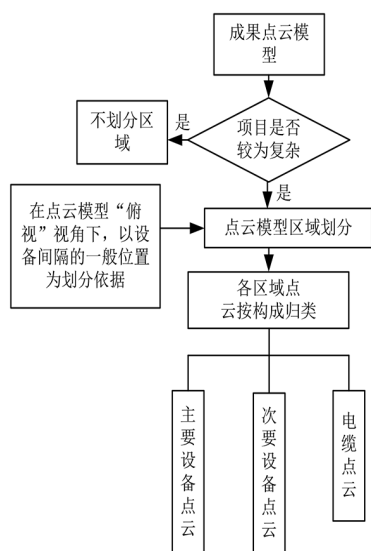


图1 成果点云模型的具体分割流程

### 1.3 联动控制方案设计

根据构建的变电站电缆敷设机械化装置 BIM 几何模型设计敷设机械化装置的联动控制方案。

该方案的设计具体如下。

#### 1) 作出假设

在电缆放线过程中,电缆的出盘位置会在电缆盘内部左右方向反复横移。这种横移是在每一层都动态变化的,从电缆盘的一端移动到中间,然后再从中间移动到另一端。然而,这个过程并不会对电缆造成任何损伤。因此,忽略这种动态变化的出盘位置,并假设在同一层的电缆出盘位置始终位于该层的中心。同时,假设在同一层内,电缆的放线速度是恒定的。

#### 2) 电缆盘上各层电缆的总长度计算

依据变电站电缆敷设机械化装置 BIM 几何模型计算电缆盘上各层电缆的总长度,具体计算公式为

$$K_p = 2\pi T_Q m \quad (3)$$

式中,  $m$  指的是每层缠绕圈数;  $T_Q$  是指  $Q$  层电缆的缠绕半径。

其中,  $T_Q$  可以根据 BIM 几何模型,在将电缆调整至  $Q$  层后获得。

参数  $m$  的计算公式为

$$m = \frac{0.95L_0L_1}{\chi} \quad (4)$$

式中,  $L_0$  指的是筒体直径;  $\chi$  是指线缆外径;  $L_1$  指的是  $Q$  层电缆的长度。根据 BIM 几何模型将电缆调整至  $Q$  层后获得  $L_1$  的值。

#### 3) 计算驱动电缆盘的驱动轮转速

驱动电缆盘主要由驱动电机、电缆盘构成,加装了电滑环、光滑环、旋转接头等,其驱动轮转速的计算公式为

$$k_b = \frac{V_0\delta_1}{2\pi T_Q\delta_a} \quad (5)$$

式中,  $V_0$  是设定的电缆牵引速度;  $\delta_a$  是驱动电缆盘的对应驱动轮直径;  $\delta_1$  是侧板直径。

#### 4) 实现动态同步联动控制

根据计算获得的  $K_p$  与  $k_b$  建立一种对应关系。利用 BIM 几何模型进一步构建电缆盘上各层电缆的总长度与放线长度之间的对应关系,基于这种关系输出驱动轮的转速,利用 PLC 驱动牵引机伺服电机的转动,实现牵引装置的机伺服电机转速与智能放线架转速的联动控制,解决因电缆层数变化导致的与牵引速度不同步的问题。电缆牵引装置和放线装置如图 2 和图 3 所示。

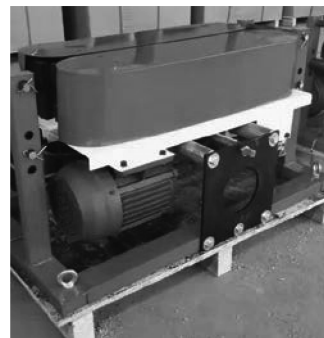


图2 电缆牵引装置

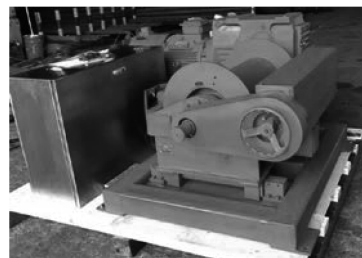


图3 电缆放线装置

图 2 的电缆牵引装置主要由牵引电机、承重支架、卷线盘、编码轮、编码器、控制箱组成。图 3 的电缆放线装置主要由驱动装置、放线轮、底座、支撑柱、紧急制动器组成,其安装于防惯性电缆盘支架前,配备自动敷设模式。

以下是具体的电缆敷设联动控制方案。

**步骤 1 准备工作。**清理工具、测量工具;作用。清除障碍物,测量线路距离,为敷设作准备。

**步骤 2 规划线路。**设计软件、施工图纸;作用。根据需求和实际情况确定电线路径,避开障碍物;控制内容。线路规划数据;联动控制。将规划数据输入到 PLC 中,为后续的自动化敷设作准备。

**步骤 3 电缆敷设机器准备。**准备电缆敷设机器、驱动电机、放线轮;准备电缆敷设机器,设置驱动电机参数。设备参数设置。驱动电机。设置合适的转速和转向。放线轮。调整放线轮的张力,确保电缆平稳放出。控制内容。驱动电机的转速和转向,放线轮的张力。联动控制。PLC 根据电缆牵引装置的速度反馈,实时调整驱动电机的

转速,确保电缆的平稳放出。

**步骤 4 电缆放线。**该步骤涉及电缆放线装置、编码器、牵引电机,通过放线装置放出电缆,编码器实时监测电缆长度和速度,在开始前设置设备参数:编码器:设置合适的采样频率和精度;牵引电机:根据放线速度需求设置转速;该步骤主要控制电缆的放线速度和长度。在联动控制方面,PLC 接收编码器的数据,实时计算电缆的放线速度和长度,并根据这些数据调整牵引电机的转速,确保电缆的放线速度与牵引速度同步。

**步骤 5 电缆固定与连接。**采用固定卡夹、连接器、焊接设备固定电缆,连接不同段电缆,此步骤主要依赖人工操作。

**步骤 6 功能测试。**通过测试仪器对电缆进行功能测试,确保敷设质量。

在整个联动控制方案中,PLC 是核心控制单元。它根据电缆牵引装置的速度反馈、编码器的电缆长度和速度数据,实时调整驱动电机的转速和转向,确保电缆的平稳放出和与牵引速度的同步。同时,PLC 还可以与其他辅助设备(如张力传感器、温度传感器等)进行联动,实现对电缆敷设过程的全面监控和优化。

需要注意的是,联动控制方案的具体实现可能因不同的电缆敷设场景和设备而有所不同。在实际应用中,需要根据具体情况进行方案的设计和调整,以确保电缆敷设的质量和效率。

## 2 案例测试

### 2.1 实验过程

利用设计的变电站电缆敷设机械化装置联动控制方法实施某变电站电缆敷设机械化装置的联动控制,测试设计方法的联动控制性能。本次实验选择的变电站为某市郊区的中型变电站,主要负责为周边工业区及居民区供电。该变电站设有 4 条主要的电缆线路,总长度约为 8 km。考虑到电缆敷设作业的高效性与安全性,决定采用设计的变电站电缆敷设机械化装置实施电缆的敷设工作。实验现场如图 4 所示。



图 4 实验现场

利用设计方法实施四条主要电缆线路的敷设控制,具体流程如下。首先基于三维激光扫描技术构建变电站电缆敷设机械化装置的成果点云模型。扫描时实验三维激光扫描仪器的扫描配置如表 1 所示。

表 1 三维激光扫描仪器的扫描配置

序号	项目	具体配置
1	尺寸	1 024×4 267
2	MPts	43.7
3	点距离	6.136 mm/10 m

其中移动最小二乘法中的参数设置情况如下。

部窗口大小:5×5。

局部多项式系数:0.35、0.35、0.3。

接着基于成果点云模型构建变电站电缆敷设机械化装置的 BIM 三维模型,构建结果的细节展示如图 5 所示。

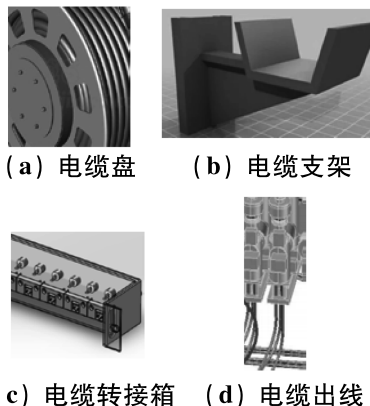


图 5 构建结果的细节展示

最后利用设计的敷设机械化装置联动控制方案实施联动控制。将输出的驱动轮的转速导入到 PLC 中,驱动牵引机伺服电机的转动,实现牵引机伺服电机转速与智能放线架转速的联动控制。

### 2.2 测试结果分析

测试设计方法在电缆层数的变化下智能放线架转速是否与牵引速度同步。并测试设计方法控制下的速度。

在测试中,将变电站数字化电缆敷设建模方法(文献 2)与知识驱动的复杂产品多目标电缆敷设序列自动规划方法(文献 3)作为对比方法,共同参与测试。对比 3 种方法的联动控制性能。具体测试结果如表 2 所示。

表 2 同步情况测试结果

电缆 缠绕 层数	同步情况		
	基于 BIM 技术的变电站 电缆敷设机械化装置	变电站数字化 电缆敷设建模	知识驱动的复杂产品 多目标电缆敷设序列
	联动控制方法	方法	自动规划方法
6	同步	同步	同步
5	同步	不同步	不同步
4	同步	不同步	同步
3	同步	同步	同步
2	同步	同步	同步
1	同步	同步	同步

根据上表测试结果,无论电缆缠绕层数是几层,在设计方法的联动控制下,智能放线架转速均能与牵引速度保持同步,说明设计方法的联动控制性能较好。而变电站数字化电缆敷设建模方法在电缆缠绕层数大于 3 层时无法保持智能放线架转速牵引速度的同步,知识驱动的复杂产品多目标电缆敷设序列自动规划方法在电缆缠绕层数大

于4层时无法保持智能放线架转速牵引速度的同步。

基于BIM技术的变电站电缆敷设机械化装置联动控制方法、变电站数字化电缆敷设建模方法、知识驱动的复杂产品多目标电缆敷设序列自动规划方法实验工程中4条主要电缆线路的敷设速度测试结果如图6所示。

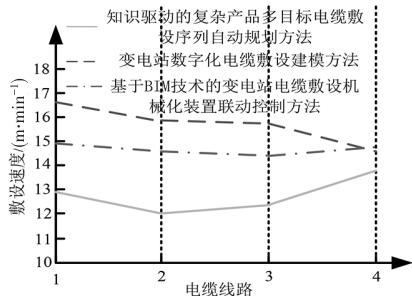


图6 敷设速度测试结果

测试结果表明,基于BIM技术的变电站电缆敷设机械化装置联动控制方法下,4条主要电缆线路的敷设速度在15 m/min上下,整体敷设速度较为均衡,而变电站数字化电缆敷设建模方法、知识驱动的复杂产品多目标电缆敷设序列自动规划方法下,4条主要电缆线路的敷设速度差异较大,敷设速度不均衡。以及基于BIM技术的变电站电缆敷设机械化装置联动控制方法下,其敷设速度较为适当,既不会像变电站数字化电缆敷设建模方法一样过快,出现速度涌动现象引发电缆受力不均,也不会像方法知识驱动的复杂产品多目标电缆敷设序列自动规划方法一样过慢,影响工程进度。

### 3 结束语

本研究以BIM技术为基础,深入探讨了变电站电缆敷设机械化装置的联动控制方法。在当前变电站建设规模不断扩大、电缆敷设施工要求日益提高的背景下,传统的电缆敷设方法已难以满足现代电力行业的需求。因此,本研究旨在通过引入BIM技术,实现变电站电缆敷设机械化装置的智能联动控制,提高施工效率和质量,确保电力系统的安全稳定运行。

在研究过程中,取得了以下主要成果:首先,通过三维激光扫描技术与BIM技术的运用,实现了变电站电缆敷

设机械化装置三维模型的构建,为电缆敷设提供了精确的数据支持;其次,设计了基于BIM模型的电缆敷设机械化装置联动控制算法,解决了因电缆层数变化导致的与牵引速度不同步的问题;最后,通过实际工程案例的验证,证明了该联动控制方法的有效性和可行性。

展望未来,将继续深化BIM技术在变电站电缆敷设领域的应用研究,探索更加智能、高效的联动控制方法。同时,也期望通过不断的技术创新和实践探索,为电力行业的持续发展和智能化转型贡献更多的智慧和力量。相信在不久的将来,基于BIM技术的变电站电缆敷设机械化装置联动控制方法将成为电力行业的主流技术之一,为电力系统的安全稳定运行提供更加坚实的保障。

### 参考文献

- [1] 王根成, 丛赞, 张振鹏, 等. 桥梁敷设电缆伸缩补偿过程动力学建模及动态响应分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(4):1466-1474.
- [2] 周伟, 黎伟, 何文武, 等. 变电站数字化电缆敷设建模及电缆载体相关计算研究[J]. 现代电子技术, 2022, 45(19):166-172.
- [3] 蒋科, 李海峰, 邢峻豪, 等. 知识驱动的复杂产品多目标电缆敷设序列自动规划[J]. 机械设计与制造, 2023, 42(8):295-298, 303.
- [4] 蔡智超, 李星存, 吴庆华. 基于混合进化算法的海上风电场电缆路由方法[J]. 计算机仿真, 2023, 40(8):120-124.
- [5] 翟柱新, 严欣. 电力网络安全多层协同联动控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(9):99-102.
- [6] 郑维刚, 赵振威, 唐红, 等. 基于三维激光点云的隧道电缆敷设质量参数自动检测方法[J]. 半导体光电, 2023, 44(3):460-466.
- [7] 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.
- [8] 李岩, 刘玉娇, 胡凡, 等. 电力电缆接头温度异常故障远程在线监测系统[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(6):90-93, 102.
- [9] 颜龙, 王文强, 赵雯筠, 等. 电缆敷设数量和间距对电缆燃烧特性的影响分析[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(3):293-297.
- [10] 罗楚军, 王亚婕, 岳浩, 等. 埋地高压电缆与金属管道邻近敷设时电磁影响模型及计算方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(3):57-66.
- [11] 李泽科, 林静怀, 李军良, 等. 基于调控云平台的变电站二次系统故障主动预警技术[J]. 电子设计工程, 2024, 32(3):88-91, 96.
- [12] 雷佳成, 杨鑫, 董盼, 等. 基于均衡应力分布的高压电缆接头保护装置安全裕度提升方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(7):27-36.

作者简介:黄枫榕(1991—),女,硕士,高级工程师,研究方向:电网工程设计、技术管理。

(上接第25页)

[8] 许锋, 方劲舟, 王启航, 等. 基于相对增益阵的多变量系统辅助解耦控制系统设计[J]. 化工自动化及仪表, 2023, 50(4):411-418.

[9] LIU Z Y, BAO H, DU J L, et al. Adaptive reduced dimension fuzzy decoupling control method with its application to a deployable antenna panel[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018, 1(2018):1-10.

[10] KOROMPILI A, MONTI A. Review of modern control technologies for voltage regulation in DC/DC converters of DC microgrids[J]. Energies, 2023, 16(12):1014-1027.

[11] 高云龙, 王志豪, 潘金艳, 等. 基于自适应松弛的鲁棒模糊C

均值聚类算法[J]. 电子与信息学报, 2020, 7(42):1774-1781.

[12] 张强, 周水生, 张颖. 自适应密度峰值聚类算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2023, 16(10):1-13.

[13] BEN Z H, JAVAD M F, ZAFER B. A study of anti-swing fuzzy LQR control of a double serial link rotary pendulum[J]. IETE Journal of Research, 2023, 69(6):3443-3454.

作者简介:刘志勇(1978—),男,教授,工学博士,研究方向:控制与容错控制。