DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)07-0093-05

智能照明设备 BIM 布局优化方法

唐忠国[1], 王学富[2], 刘良旭[1], 刘国彦[2], 冀俊康[2]

(1.广西交通投资集团崇左高速公路运营有限公司,广西 崇左 532200;2.中铁一局集团电务工程有限公司, 西安 710038)

摘　要:为了优化照明设备的布局并降低能耗,研究一种基于 BIM 的智能照明设备布局合理性分析方法。该方法首先根据节能效果的标准计算组合权重值,然后结合节能效果的评价原则,定义光照度指标的条件,以实现照明布局的合理性,考虑相邻灯具的间隔距离,确定最远传输距离,利用 BIM 工具分析照明信号脉冲行为的响应区间,控制组合权重,并推导考虑节能效果的智能照明信号脉冲响应表达式,等效替代光功率特性曲线,进一步计算考虑节能效果的智能照明设备路径损耗量,并基于此确定了路径损耗量的计算结果,完成了对智能照明设备布局合理性的 BIM 建模分析。实验结果表明,通过 BIM 建模方法,可以有效地控制照明光功率在正、负方向上的传输最大值在 3 500 W 以内,为设置合理的照明布局环境提供了强有力的支持,为优化照明布局和节能提供可行方案,该方法具有很高的可行性和应用价值。

关键词:节能效果;智能照明设备;BIM 建模;组合权重;光照度;脉冲响应;路径损耗

中图分类号: TP273;TB858　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1003-7241(2026)07-0093-05

BIM layout optimization method for smart lighting devices

Tang Zhongguo[1], Wang Xuefu[2], Liu Liangxu[1], Liu Guoyan[2], Ji Junkang[2]

(1. Guangxi Communications Investment Group Chongzuo Expressway Operation Co., Ltd., Chongzuo 532200, Guangxi, China; 2. The Electrical Service Engineering Co., Ltd. of China Railway First Group, Xi′an 710038, China)

Abstract: In order to optimize the layout of lighting equipment and reduce energy consumption, a BIM based intelligent lighting equipment layout rationality analysis method is studied. This method first calculates the combined weight values based on the standards of energy-saving effects, and then defines the conditions for the illuminance index in combination with the evaluation principles of energy-saving effects, in order to achieve the rationality of lighting layout. In addition, the BIM tool is used to analyze the response interval of lighting signal pulse behavior, and based on this, the calculation results of path loss are determined, completing the BIM modeling analysis of the rationality of intelligent lighting equipment layout. The experimental results show that the BIM modeling method can effectively control the maximum transmission value of lighting power in the positive and negative directions to be within 3 500 W, providing strong support for setting a reasonable lighting layout environment. This method has high feasibility and application value.

Keywords: energy saving effect; intelligent lighting equipment; BIM modeling; combination weight; illuminance; impulse response; path loss

智能照明是一种结合了有线/无线通讯、电力载波通讯和嵌入式计算机智能化等技术的创新照明方式。通过分布式组件,智能照明能够实现基层照明设备的智能化控制。与传统的照明方式相比,智能照明的布局更为复杂,但能够同时对多个用电设备进行分区管理和同步控制,从而延长灯具的使用寿命。然而,随着灯具接入数量的增加,如何有效控制照明光功率的过度损耗成为了一个亟待解决的问题。

文献[1]针对工程系统中退化过程与随机冲击之间存在相依性的复杂可靠性问题,提出了一种基于逐段决定 Markov 过程(piecewise deterministic Markov process,PDMP)的建模方法。作者将系统退化视为连续过程,而冲击事件的发生服从泊松过程,并允许冲击强度与当前退化水平相互影响,从而构建了退化-冲击相依的耦合模型。文献[2]聚焦于基因调控网络中因转录、翻译及物质运输等过程产生的固有延时现象,利用时滞微分方程(delay differential equation,DDE)构建网络动力学模型。首先给出了具有多个时滞项的基因调控网络一般形式,然后基于 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法和线性矩阵不等式(linear matrix inequality,LMI)技术,推导了系统平衡点渐近稳定的充分条件。

为了解决这一困境,提出了一种考虑节能效果的智能照明设备布局合理性 BIM 建模方法。BIM 是一种数字化表达形式,用于描述建筑项目的物理和功能特性,其涉及三维建模、数据库管理、参数化设计和精度模拟等多个方面。简而言之,BIM 技术将所有信息整合到一个数据库

收稿日期:2026-01-13;**录用日期**:2026-03-04

基金项目:广西交通投资集团有限公司项目(HG2021-GL301)

作者简介:唐忠国(1981—),男,硕士,高级工程师,研究方向为建筑与土木工程管理,高速公路机电工程施工与管理等。

引用本文:唐忠国, 王学富, 刘良旭,等. 智能照明设备 BIM 布局优化方法[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(7):93-97. (Tang Zhongguo, Wang Xuefu, Liu Liangxu, et al. BIM layout optimization method for smart lighting devices[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(7):93-97.)

中,经过核心控制设备的批准,通过特定的计算机软件,对存储的数据进行获取、修改和增删[3]。在建筑施工和设备布局等应用场景中,BIM 能够将工程物理、三维空间、资源成本和施工时间等信息集成到一个完整的信息化模型中,通过精准定位来确定这些数据信息的实际位置,旨在为建筑全生命周期提供决策依据和管理建议,从而降低建筑风险并提高工程实施效率[4]。此外,为了确保模型信息的完整性和一致性,BIM 模型要求信息保持一致,避免在不同建筑生命周期的各个阶段出现不一致的信息,并且相同的信息无需重复输入。

1 照明布局合理性分析

照明布局的合理性分析应根据组合权重值指标的取值范围,确定节能效果的评价标准,再以此为基础,确定光照度参量的表达形式,本章节将针对上述内容展开研究。

1.1 组合权重值

组合权重就是指包含主观权重与客观权重的照明节能效果描述条件。主观权重就是能够反映出智能照明设备布局形式的主观变量指标,与客观权重所反映出的客观变量标准不同,主观权重体现的就是完整的照明布局情况。客观权重可以理解为能够反映出智能照明设备布局形式的客观变量指标,受其他因素的干扰,若单纯参考该项指标对智能照明设备进行布局,则会导致真实布局结果的合理性出现较大偏差[5]。主观权重 u_1 的求解表达式为

$$u_1 = \frac{\beta i_1}{\sum_{\alpha=1}^{n} | r_n - r_1 |^2} \tag{1}$$

客观权重 u_2 的求解表达式为

$$u_2 = \sum_{\alpha=1}^{n} (i_2 - 1) \frac{(r_1 \times r_n)}{\bar{r}^2} \tag{2}$$

其中,i_1 表示主观变量,i_2 表示客观变量,β 表示参考系数项,α 表示变量限制条件的初始条件,n 表示限制条件的最大取值,r_1 表示照明设备布局特征的最小值,r_n 表示布局特征的最大值,$\bar{r}$ 表示特征值 r_1 与 r_n 的平均值。

设 $\boldsymbol{I}$ 表示智能化条件下的照明设备组合向量,联立式(1)、(2),可将组合权重值求解结果表示为

$$U = \boldsymbol{I}^2 \times \frac{u_1}{u_2} \tag{3}$$

在智能化布局环境中,为突出灯具设备摆放合理性的同时,凸显出光功率节能效果,应将组合权重指标控制在(0,1]之内。

1.2 节能效果评价

对于节能效果的评价所涉及指标较多,除了要参考组合权重值标准,还要根据智能照明设备所处摆放位置,对照明光功率的实时输出水平进行统计,从而在避免光功率过度浪费的同时,确保整体布局保持合理性状态[6-7]。设 δ 表示标准节能系数,χ 表示节能效果度量值,q_1、q_2、…、q_n 表示 n 个不同的照明设备摆放节点定义参数,ΔP 表示光功率的瞬时累积量。在上述物理量的支持下,联立式(3)推导节能效果评价表达式为

$$E = \frac{-\frac{1}{\delta U}\sum_{\chi=1}^{+\infty} q_1 \cdot q_2 \cdot \cdots \cdot q_n}{n \times (\Delta P)^2} \tag{4}$$

对于智能照明设备节能效果的评价还需参考如下几方面内容。

1)单位布局环境中,不宜串联过多的照明灯具,以避免单一设备损坏,对其他灯具造成影响,并列或相邻布局环境中的照明灯具必须采取并列连接方式,且为避免电压信号与电流信号的不平均负载,相关并联区域之间的物理间隔距离应相等。

2)当布局环境较大时,首先应将其划分成多个面积较小的子区域区间,然后再通过并列连接的方式,将这些小区域关联起来,最后在既定位置上放置照明灯具。

1.3 光照度描述

光照度表示智能照明设备在单位时间内提供的光通量,在智能化布局环境中,光照度越强表示灯具设备的照明能力越强。考虑到节能效果,对于智能照明设备光照度标准的选取应参考阶段性标准[8-9]。所谓阶段性标准是指光照度曲线不能完全闭合,当照明时长达到一个标准单位时长时,光照度曲线不会继续上升,而是会在另一个单位时长由反向极值点继续上升,如图 1 所示。

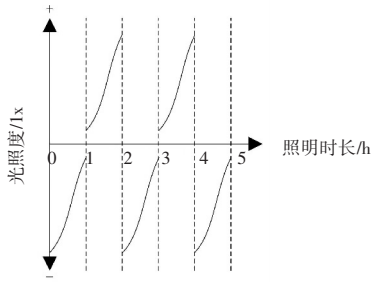


图 1 光照度曲线

Fig. 1 Illuminance curve

在图 1 光照度曲线中,一个单位时长为 1 h,即 ΔT = 1 h。设 φ 表示智能化布局环境中的标准节能系数,R 表示当前情况下的光照频度,$\dot{p}$ 表示基于节能效果标准的照明设备合理化布局特征指标,联立式(4),可将考虑节能效果的智能照明设备光照度求解表达式定义为

$$W = \dot{p} \times \frac{1 - (\phi \cdot E)}{R \cdot | \Delta T |} \tag{5}$$

光照度指标的正负符号只影响其照射方向,不对其值大小造成影响。

2 智能照明设备布局的 BIM 模型

在 BIM 应用工具的支持下,求解照明信号脉冲响应指标的取值范围,再通过计算路径损耗条件的方式,完成考虑节能效果的智能照明设备布局合理性 BIM 建模分析[10-12]。

2.1 BIM 应用工具

BIM 应用工具是能够创建三维模型的软件工具,可以

根据智能照明设备的布局形式,确定关联照明灯具之间的间隔距离,从而避免涉及不相关数据参量,从根本上解决照明光功率过度损耗的问题[13]。规定 a_1、a_2、…、a_n 表示 n 个相互并联但不重合的灯具布局位置坐标,其定义式为

$$\begin{cases} a_1 = \gamma_1 \times s_1 \\ a_2 = \gamma_2 \times s_2 \\ \vdots \\ a_n = \gamma_n \times s_n \end{cases} \tag{6}$$

联立公式(5)、公式(6),可将 BIM 应用工具对于智能照明设备布局特征的管理作用表达式定义为

$$D = \frac{W \cdot \prod_{i=1}^{n} a_i}{\varphi \times (\varepsilon_1 \prod_{j\neq 1} a_j + \varepsilon_2 \prod_{j\neq 2} a_j + \cdots \varepsilon_n \prod_{j\neq n} a_j)} \tag{7}$$

式中,ε_1、ε_2、…、ε_n 分别表示与 a_1、a_2、…、a_n 坐标匹配的 BIM 管理系数,且 $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 \neq \cdots \neq \varepsilon_n$ 的不等式条件恒成立,φ 表示综合调度参量,考虑到照明光功率的节能效果,$\varphi \in (0,1)$ 的取值条件恒成立。

为实现对照明光功率损耗量的有效控制,设置智能照明设备布局环境时还需考虑相邻灯具的间隔距离。

1) 灯具间隔距离小于光功率的最远传输距离:由于当前情况下,相邻灯具的间隔距离较小,所以照明光功率的实时损耗量相对较小,应用 BIM 工具对照明设备布局进行建模管理时,应控制综合调度参量的取值,使其尽量趋近最小值结果。

2) 灯具间隔距离等于光功率的最远传输距离:相邻灯具的间隔距离与预设光照距离相等,在不考虑其他干扰条件的情况下,光功率实时损耗量也与预期数值相等,应用 BIM 工具对照明设备布局进行建模管理,只需按照预设标准将所采集到的指标参量组合起来[14-16]。

3) 灯具间隔距离大于光功率的最远传输距离:在当前情况下,相邻灯具的间隔距离较大,照明光功率的实时损耗量也就相对较大,应用 BIM 工具对照明设备布局进行建模管理时,要求所选灯具布局位置坐标必须处于同一区域平面之内。

2.2 照明信号脉冲响应

了解智能照明设备的光功率特性可以更好地为光线照明系统设计提供依据,主要通过照明信号脉冲响应形式来表现,用于解决节能效果引起的光照信号畸变、光波干扰等影响。对于遵循调制解调技术布局的智能照明设备应用环境而言,由于照明光功率的数值水平相对可控,在布局过程中光波信号发射器、接收机所处位置也基本不会发生改变,所以可认为照明信号脉冲响应在数值水平上可以等效替代光功率特性曲线[17]。规定 ι 表示一个随机选取的照明信号脉冲系数,且 $\iota \neq 0$ 的不等式条件恒成立,g_ι 为基于系数 ι 的光功率特性度量值,其求解表达式为

$$g_\iota = \frac{\sum_{k=1}^{+\infty} D \cdot h_\kappa^{\,2}}{f \times |\ \Delta L\ |} \tag{8}$$

其中,k 表示脉冲向量的初始取值,h_κ 表示干扰强度为 κ 时的照明信号光波向量,ΔL 表示光波长度的单位累积量,f 表示光波信号的导向系数。

在公式(8)的基础上,设 x 表示照明光波的响应系数,λ 表示照明信号的脉冲波动强度,θ 表示相邻灯具光波之间的物理夹角,联立上述物理量,推导出考虑节能效果的智能照明信号脉冲响应表达式为

$$J = \frac{x+1}{\lambda g_\iota} \cos^2 \theta \tag{9}$$

完成布局后,智能照明设备的摆放位置基本不会再发生变化,所以对于照明信号脉冲响应表达式的求解必须同时满足节能效果与 BIM 建模要求。

2.3 路径损耗

路径损耗是指照明光功率在传输路径内的损耗情况,出于节能性考虑,在智能照明设备布局环境中,要求路径损耗指标的取值应尽可能接近其最小值结果。在 BIM 建模思想认知中,若路径损耗量过大极易导致重复照明区间的出现,这不但会造成光功率的过度浪费,还会导致照明信号脉冲响应表达式取值无法达到理想数值标准。对于照明光功率最大损耗量 $\mu_{\max}$、最小损耗量 $\mu_{\min}$ 的计算表达式为

$$\mu_{\max} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (\dot{C} - \dot{Z})^{\,2} \nu^2 \vec{j}}{\int_{-\infty}^{+\infty} \vartheta \cdot \tilde{j}_{\max}}} \tag{10}$$

$$\mu_{\min} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \vec{j} \cdot \dot{C}^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \vartheta \cdot \tilde{j}_{\min}}} \tag{11}$$

式中,$\dot{C}$ 表示光照特征,$\dot{Z}$ 表示光波信号传输特征,ν 表示单位布局环境中的照度系数,$\vec{j}$ 表示单位照明向量,ϑ 表示 BIM 建模建模参数,$\tilde{j}_{\max}$ 表示全面布局向量的最大取值,$\tilde{j}_{\min}$ 表示全面布局向量的最小取值。

联立式(9)、(10)、(11),可将考虑节能效果的智能照明设备路径损耗量求解结果表示为

$$B = \left| J \cdot \sqrt{\frac{\mu_{\min}}{\mu_{\max}}} \right| \cdot \frac{v}{\tilde{\omega}^2} \tag{12}$$

其中,$\tilde{\omega}$ 表示光功率在光照区域内的作用强度,v 表示照明光功率的单位传输速率。至此,完成对各项指标参量的计算与处理,在不考虑其他干扰条件的情况下,实现考虑节能效果的智能照明设备布局合理性 BIM 建模分析。

3 实例分析

3.1 实验环境

人为划分出如图 2 所示的 4 块待照明区域,在其两侧分别设置 8 盏照明灯具,每侧放置 4 盏,且其摆放位置完

全对称。实验过程中,驱动照明灯具所需电压保持为定频状态,且所有灯具均不会发生损坏,故而为降低实验难度,同侧灯具之间采用串联方式,同侧灯具之间的连接方式如图 3 所示。

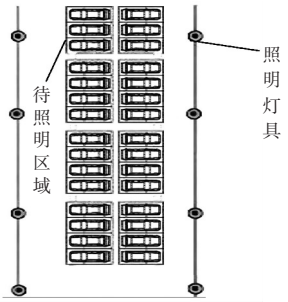


图 2 照明区域划分

Fig. 2 Division of lighting areas

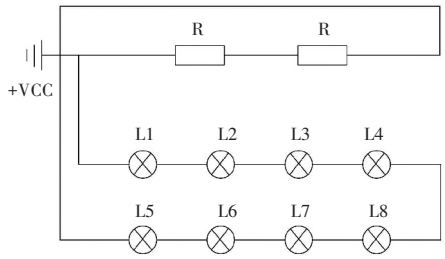


图 3 同侧灯具连接方式

Fig. 3 Connection method of lamps on the same side

相关实验设备型号如表 1 所示。

表 1 实验设备选型

Tab. 1 Selection of experimental equipment

设备参数	名称与数值
灯具类型	E27 白炽灯
线路型号	BV2.5 铜芯硬线
开关型号	G07K111C 面板型开关
灯具最大串联数量	8 盏
额定电压	220 V
额定电流	3.2~3.5 A
额定功率	704~770 W

为突出实验结果的公平性,实验组、对照组所选实验设备型号完全一致。

3.2 步骤与流程

本次实验的具体实验流程如下:

1) 选择考虑节能效果的智能照明设备布局合理性 BIM 建模方法作为实验组分析方法。

2) 选择基于随机流网络与 Markov 过程的建模方法、基于交流电流下垂特性控制的 VSC 建模方法作为两个对照组分析方法。

3) 利用实验组方法,监测图 2 所示照明布局环境,记录照明光功率在正方向、负方向上的传输数值。

4) 断开实验电路,待 E27 白炽灯再次冷却至初始温度时,二次闭合电路。

5) 分别利用两种对照组方法监测图 2 所示照明布局环境,记录照明光功率在正方向、负方向上的传输数值。

6) 对比实验组、对照组照明光功率的记录数值,总结实验规律。

3.3 实验结果

照明光功率传输数值即照明光功率损耗情况,能够反映出智能照明设备的布局合理性,在其他实验条件不发生变化的情况下,照明光功率在正方向、负方向上的最大传输数值若始终不会超过所选照明灯具的额定功率总和,则表示当前照明设备布局合理,若照明光功率最大传输数值极为接近或超过额定功率总和,则表示当前照明设备布局不合理。

下图反映了实验组、对照组照明光功率在正、负传输方向上的具体损耗数值。

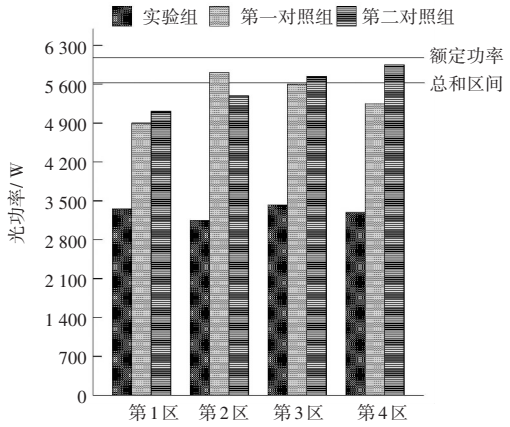


图 4 正方向上的光功率损耗

Fig. 4 Optical power loss in the positive direction

正向传输情况下,第 3 区实验组光功率损耗量最大,达到了 3 476 W,远低于额定功率总和的最小值 5 632 W;第 2 区第 1 对照组(基于随机流网络与 Markov 过程的建模方法)光功率损耗量最大,达到了 5 777 W,超过了额定功率总和的最小值 5 632 W,但并未达到额定功率总和的最大值 6 160 W;第 4 区第 2 对照组(基于交流电流下垂特性控制的 VSC 建模方法)光功率损耗量最大,达到了 5 951 W,超过了额定功率总和的最小值 5 632 W,但并未达到额定功率总和的最大值 6 160 W。

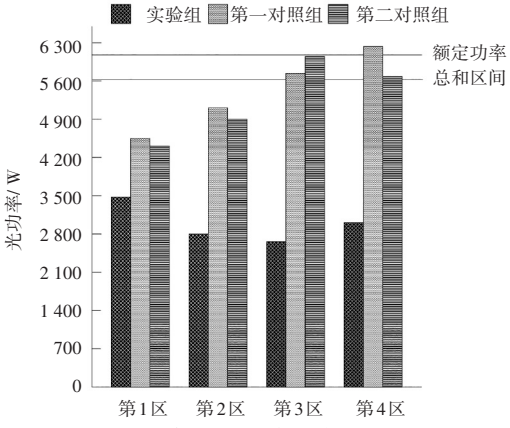


图 5 负方向上的光功率损耗

Fig. 5 Optical power loss in negative direction

负向传输情况下,第 1 区实验组光功率损耗量最大,达到了 3 495 W,依然低于额定功率总和的最小值 5 632 W;第 4 区第 1 对照组光功率损耗量最大,达到了 6 207 W,超过了额定功率总和的最大值 6 160 W;第 3 区

第 2 对照组光功率损耗量最大,达到了 6 159 W,极为接近额定功率总和的最大值 6 160 W。

综上可知,在基于随机流网络与 Markov 过程的建模方法、基于交流电流下垂特性控制的 VSC 建模方法的作用下,照明光功率在正方向、负方向上的传输最大值会超过所选照明灯具的额定功率总和,这就表示在上述两种方法作用下,当前照明设备有可能出现不合理布局的情况;在考虑节能效果的智能照明设备布局合理性 BIM 建模方法的作用下,照明光功率在正方向、负方向上的传输最大值都始终小于所选照明灯具的额定功率总和,即在该方法作用下,当前照明设备不存在不合理布局的情况。

4 结论

与基于随机流网络与 Markov 过程的建模方法、基于交流电流下垂特性控制的 VSC 建模方法相比,智能照明设备布局合理性 BIM 建模方法在考虑节能效果的同时,重新描述了光照度指标,又借助 BIM 应用工具,对照明信号的脉冲响应行为进行分析。随着这种新型 BIM 建模方法的应用,照明光功率不再出现过度损耗的情况,这对于建立更加合理的照明设备布局环境能够起到一定的促进性影响作用。

参考文献

[1]陈卓谦, 雷慧华. 基于逐段决定 Markov 过程的退化-冲击相依过程建模及可靠性分析[J]. 数学的实践与认识, 2025, 55(5):164-181.
[2]周芷伊, 孟国艳. 时滞微分方程在基因调控网络建模中的稳定性分析[J]. 科技与创新, 2025 (24):44-46.
[3]赵佳微, 邹大云, 陈根军, 等. 基于 CIM 的城市轨道交通供电系统交直流供电计算[J]. 电气化铁道, 2025, 36(5):67-72.
[4]陈世鸿, 梁雅玲, 梁国湛, 等. 梭式窑节能技术应用现状与发展路径研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(11):118-120.
[5]焦乐. 基于光纤传感技术的矿山巷道变形实时监测与稳定性分析[J]. 工矿自动化, 2025, 51(增刊 2):146-150.
[6]金杰, 高增恩, 张中伟, 等. 智能制造车间多自动导引车无冲突路径规划研究[J]. 制造技术与机床, 2025 (11):73-82.
[7]刘洋, 但斌斌, 易灿灿, 等. 基于改进 SAGGAN 模型的齿轮故障分类方法研究[J]. 机电工程, 2024, 41(12):2185-2194.
[8]梁敏欣, 张琦. 新型电力系统建设中技术适应性工程造价管理研究——基于柔性直流输电技术的换流站项目工程量清单计价模式探析[J]. 价格理论与实践, 2025(8):105-109,265.
[9]郑舜熙. 建筑工程智能照明系统施工技术要点探究[J]. 新城建科技, 2025, 34(12):116-118.
[10]黄枞榕, 余霁虹, 何明, 等. 基于BIM 技术的变电站电缆敷设机械化装置联动控制方法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(12):51-55.
[11]李生, 张坚, 李飒. 基于 BIM 设计的科研项目计划管理系统研究[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(7):143-147.
[12]朱劲磊, 谢剑翔, 梁均海, 等. 引入偏离度概念的变电站施工进度估计 BIM 模型设计[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(04):174-177.
[13]邓香生. 面向新能源供电场景的 LED 照明系统储能优化与功率调控策略研究[J]. 中国照明电器, 2025(12):121-123.
[14]仝霞, 程鹏申, 李雪城, 等. 数字化电力计量智慧实验室构建与关键技术探讨[J]. 电测与仪表, 2025, 62(1):89-100.
[15]李贵民, 张淞珲, 徐新光, 等. 基于随机几何的智能电网计量设备时空动态定位模型[J]. 计算机应用与软件, 2025, 42(3):311-318.
[16]冯小峰, 冯霞山, 张正峰, 等. 基于最大似然法和决策树的智能电能表计量误差检测方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(12):205-211.
[17]丁玉贤, 刘皓威, 王静波. 基于 BIM 技术的建筑能耗分析与节能设计[J]. 上海节能, 2024(12):1991-1996.

(上接第 80 页)

4 结论

本文提出了一种基于 CSABO-TVFEMD-LSSVM 的 GIS 局部放电信号识别诊断方法,将 TVFEMD 分解应用于 GIS 局放信号的分解处理,并采用 CSABO 优化算法对其进行参数寻优,通过收敛曲线证明了该分解方法的准确性和优越性。采用峭度、裕度、脉冲、波形、峰值 5 项特征指标,能够较好地涵盖局放信号的故障特点。利用 CSABO-LSSVM 对 CSABO-TVFEMD 分解提取后的特征向量进行分类,通过对比体现本方法的优越性。对某 110 kV 变电站 GIS 现场的局放信号应用该方法进行诊断验证,本方法对 GIS 设备故障诊断的效果良好,也为电气设备故障诊断研究提供了参考。

参考文献

[1]吴宁,王世旭,杨宏宇,等. 基于 MDF-BSRNet 的变压器声纹故障诊断方法[J]. 自动化技术与应用,2026,45(2):21-26.
[2]苑超, 陈寿龙, 丁晓森, 等. 基于 GADF 和 SE-MSCNN 的 GIS 局部放电故障诊断[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(5):93-96.
[3]Liu Z, Ding K, Lin H, et al. A novel impact feature extraction method based on EMD and sparse decomposition for gear local fault diagnosis [J]. Machines, 2022, 10(4): 242.
[4]Li H, Li Z, Mo W. A time varying filter approach for empirical mode decomposition[J]. Signal Processing, 2017(138):146-158.
[5]Guermoui M, Gairaa K, Ferkous K, et al. Potential assessment of the TVF-EMD algorithm in forecasting hourly global solar radiation: Review and case studies[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 385: 135680.
[6]孙冬宁, 曾小飞, 莫贞凌. 参数自适应 TVF-EMD 的滚动轴承故障诊断[J]. 机械设计与制造, 2020(4):171-176.
[7]曹蔚, 苟臻元, 韩昭, 等. 基于 GWO-TVF-EMD 方法的行星齿轮箱齿面剥落故障诊断[J]. 航空动力学报, 2021, 36(11):2418-2429.
[8]Trojovsky P, Dehghani M. Subtraction-average-based optimizer: a new swarm-inspired metaheuristic algorithm for solving optimization problems[J]. Biomimetics, 2023, 8(2): 149.
[9]唐贵基, 周翀, 庞彬, 等. 基于参数优化时变滤波经验模态分解的转子故障诊断[J]. 振动与冲击, 2019, 38(10):162-168.
[10]王伟生, 郭新帅, 武照云. 基于改进乌燕鸥算法优化 LSSVM 的滚动轴承故障诊断方法[J/OL]. 轴承, 1-10[2026-04-24]. https://link.cnki.net/urlid/41.1148.TH.20231219.0954.002.
[11]李嘉琪, 夏尚飞, 李东民. 基于多传感器融合的农业机械轴承半监督故障诊断方法[J]. 农机化研究, 2026, 48(3):94-102.
[12]李雷军, 吴超, 付华, 等. 基于油中溶解气体分析的 ISSA 优化 LSSVM 变压器故障诊断研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(10): 84-94.
[13]栾云飞, 张禄亮, 季天瑶, 等. 基于直方图和余弦相似度的光伏电站主变压器励磁涌流识别[J]. 电测与仪表, 2025, 62(7):181-189.
[14]邓飞跃, 唐贵基, 王晓龙. 谐波分解结合自互补 Top-Hat 变换的轴承微弱故障特征提取方法[J]. 振动工程学报, 2015, 28(6):981-989.