

面向智能运检管理的变电站运动目标立体匹配算法研究

林国贤¹, 林峰², 黄金魁², 陈闽江², 林力辉¹, 陈跃飞²

(1. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350001; 2. 国网福建检修公司, 福建 福州 350013)

摘要: 针对目前变电站运动目标的立体匹配算法存在匹配点少、误匹配等问题, 提出一种结合 A-KAZE(Accelerated KAZE)算法和改进的 SURF(Speeded Up Robust Features)算法的智能变电站运动目标立体匹配算法。采用 A-KAZE 算法用于提取两个图像的匹配特征点, 利用二阶多尺度改进的 SURF 特征向量进一步计算二次响应, 采用高阈值算法增加匹配点, 随机采样一致算法消除不匹配点, 完成匹配工作。通过实验比较, 验证了该算法的有效性。实验结果表明, 相对于未改进前匹配点对从 908 对提高到 1 202 对, 匹配准确率从 92.51%提高到 96.17%, 具有一定的实用价值。

关键词: 变电站; 立体匹配; A-KAZE 算法; SURF 算法; 检修区域

Research on a stereo matching algorithm for substation moving goal oriented to intelligent transportation inspection management

LIN Guoxian¹, LIN Feng², HUANG Jinkui², CHEN Minjiang², LIN Lihui¹, CHEN Yuefei²

(1. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350001, China; 2. State Grid Fujian Overhaul Company, Fuzhou 350013, China)

Abstract: Among the current stereo matching algorithms for moving targets in substations, there are a few matching points and mismatching problems. This paper proposes a three-dimensional matching algorithm for moving targets in smart substations that combines the A-KAZE algorithm and the improved Speeded Up Robust Features (SURF) algorithm. The A-KAZE algorithm is used to extract the matching feature points of two images, and second-order multi-scale heating is added to the SURF feature vector to further calculate the secondary response. A high threshold algorithm is used to increase the matching points, and the random sampling consensus algorithm eliminates the mismatch points to complete the matching. The effectiveness of the algorithm is verified through experimental comparison. The experimental results show that, compared with the previous matching point pairs from 908 to 1202 pairs, the matching accuracy is increased from 92.51% to 96.17%, which has definite practical value.

This work is supported by the Science and Technology Project of Fujian Province (No. 52130A170006).

Key words: substation; stereo matching; A-KAZE algorithm; speeded up robust features (SURF) algorithm; inspection area

0 引言

随着智能电网的发展, 智能变电站作为智能电网建设的重要组成部分, 是实现电网智能、安全运行的基础^[1]。对变电站的检修也是必不可少的, 当维修人员由于精神松懈进入危险区域时, 无法及时得到警告, 极易发生安全事故^[2]。随着计算机技术和视频监控技术的飞速发展, 实现立体匹配算法对

变电站安全工作区域相邻视频帧进行立体匹配, 从而计算三维坐标, 实现人员定位。因此对智能运检管理的变电站运动目标立体匹配算法进行研究具有重要的实际意义。

目前, 国内外许多研究人员对变电站安全监控技术进行研究, 大部分的研究集中于图像监控设备、巡查机器人等, 而关于智能变电站运动目标的立体匹配技术研究较少。文献[3]提出了一种用于变电站巡查机器人的视觉精确定位算法, 采用尺度不变特征匹配算法获取当前图像和参考图像的视觉反馈信

息, 并使用随机样本一致性算法解析两个图像之间的仿射变换。实验证明了该方法的有效性。文献[4]提出了一种用于精确定位变电站运动目标的新方法, 根据锚点提供的测量信息, 初始定位使用两步线性最小二乘法, 误差概率算法用于对初始定位结果进行两次处理, 以找到最佳位置。通过仿真验证了该算法的可行性。结果表明, 定位误差在 30 cm 以内, 并且与传统方法相比, 定位精度提高了 50%。文献[5]提出了一种特征匹配算法, 该算法将改进的 A-KAZE 和边缘采样一致性方法相结合。使用 FREAK 描述符描述特征点, 通过汉明距离粗匹配, 使用边缘采样均匀法对通过粗略匹配获得的特征点进行精细匹配, 从而消除误匹配点。实验证明了该方法的有效性。文献[6]提出了一种基于 OpenPos 的多人姿势估计算法的危险行为检测模型, 该模型包括三个子任务, 识别和标定安全区域、分析变电站人员的姿势、检测危险行为。通过训练和测试, 该模型在实验环境中获得了很好的识别和检测效果。以上研究为智能变电站中运动目标定位技术的研究提供了依据, 但存在耗时较长, 累计误差等问题。

文中提出了一种立体匹配算法, 该算法将 A-KAZE(Accelerated KAZE)算法和改进的 SURF (Speeded Up Robust Features)算法结合在一起。A-KAZE 算法用于提取两幅图像的匹配特征点, 利用二阶多尺度改进的 SURF 特征向量进一步计算二次响应。通过试验对算法改进前后性能进行分析。

1 立体视觉概述

文中使用立体视觉技术实现变电站工作人员的实时定位^[7]。双目立体视觉从多个图像中通过视差获取三维信息。立体视觉包括图像采集、相机标定、视频图像预处理、特征立体匹配和三维立体重建, 如图 1 所示。

(1) 图像采集通常由两个相机布置在同一水平线上, 位置和角度不同。(2) 相机校准使用辅助标定作为拍照的基准^[8]。(3) 图像预处理是图像灰化、二值化、滤波和去噪、目标分割和边缘检测等过程。(4) 立体匹配是使用相关算法来查找图像目标点对应的不同像点的坐标。(5) 立体重建是使用相关算法处理三维点云的表面结构, 重建目标的三维模型。本文主要研究立体匹配算法。

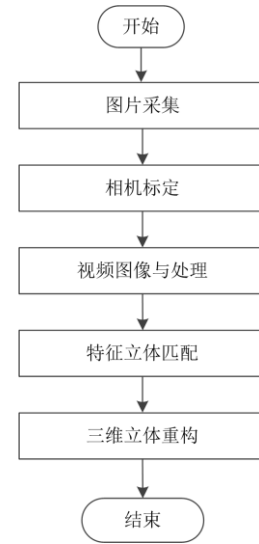


图 1 立体视觉流程

Fig. 1 Stereo vision process

2 运动目标匹配算法

针对目前变电站中运动目标的立体匹配算法存在匹配点少、误匹配等问题, 文中提出了一种结合了 A-KAZE 算法和改进的 SURF 算法的立体匹配算法。

2.1 A-KAZE 算法特征点提取

KAZE 算法于 2012 年提出。KAZE 算法最重要的功能是通过非线性扩散滤波器建立边缘细节, 以保持良好的非线性比例空间^[9]。A-KAZE 算法也称为加速 KAZE 算法^[10]。

非线性偏微分方程如式(1)所示。

$$\frac{\partial L}{\partial t} = \text{div}(c(x, y, t) \cdot \nabla L) \quad (1)$$

式中: L 为图像在不同比例空间中的亮度; div 为散度; ∇ 为梯度; t 为尺度参数, 与复杂度成反比; $c(x, y, t)$ 为传导函数, 在非线性扩散过程中非常重要, 对图像边缘细节的保留较为完好。

A-KAZE 算法使用快速显式扩散来计算扩散方程。Fed 算法首先建立图像金字塔(O 组、 S 层), M 为两者的乘积, $M = O \times S$, 每个循环必须完成 n 次迭代, 并且第 j 次迭代的步长如式(2)所示^[11]。

$$\tau_j = \frac{\tau_{\max}}{2 \cos^2(\pi \frac{2j+1}{4n+2})} \quad (2)$$

式中, $\tau_{\max}$ 为最大的迭代步骤。通过显式扩散, 将式(1)转换为式(3)所示^[12]。

$$\frac{L^{i+1} - L^i}{\tau} = A(L^i)L^i \quad (3)$$

式中: $A(L^i)$ 为图像传导矩阵; τ 为迭代步长, 通过 Fed 算法得到图像亮度的近似解 τ , 如式(4)所示^[13]。

$$L^{i+1,j+1} = (I + \tau_j A(L^i))L^{i+1,j} \quad j = -0, 1, L, n-1 \quad (4)$$

式中: I 为单位矩阵; $L^{i+1,0} = L^i$ 先验信息的初始化。

A-KAZE 算法每一层的分辨率与原始图像都相同。式(5)给出了尺度参数、组数 O 、层数 S 的关系。

$$\begin{aligned} \sigma_i(o, s) &= 2^{o+s/S} \\ o &\in [0, O-1], s \in [0, S-1], i \in [0, M] \end{aligned} \quad (5)$$

式中, σ 为当前层尺度参数 σ_i 的整数值。

A-KAZE 算法构造一个以时间为尺度的非线性尺度空间。因此, 将高斯尺度参数转换为时间尺度, 如式(6)所示^[14]。

$$t_i = \frac{1}{2} \sigma_i^2 \quad (6)$$

非线性尺度空间构造完成后, A-KAZE 算法使用非最大抑制方法来计算每个像素的 Hessian 矩阵的特征值^[15]。同时, 对上下层同一位置的 26 个像素与当前层进行比较, 找到在不同比例尺上归一化的 Hessian 矩阵的最大值, 并完成局部特征点的提取。如式(7)所示^[16]。

$$L_{\text{Hessian}} = \sigma_{i,n}^2 (L_{xx}L_{yy} - L_{xy}L_{xy}) \quad (7)$$

式中: $\sigma_{i,n}^2$ 为归一化比例; L_{xx} 、 L_{xy} 、 L_{yy} 分别为图像 $I(x, y, \sigma)$ 经高斯滤波后的二阶微分。选择该像素点, 通过泰勒扩展法计算特征点坐标, 如式(8)所示。

$$L(x) = L + \left(\frac{\partial L}{\partial x} \right)^T x + \frac{1}{2} x^T \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} x \quad (8)$$

式中: x 为特征点的像素坐标; $L(x)$ 为空间尺度函数。当公式(8)的导数为零时, 子像素坐标位置如式(9)所示^[17]。

$$\hat{x} = - \left(\frac{\partial^2 L}{\partial x^2} \right)^{-1} \frac{\partial L}{\partial x} \quad (9)$$

2.2 改进 SURF 算法特征向量的建立

Herbert Bay 根据 SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 算法, 提出了 SURF 匹配算法。SURF 用盒式滤波器替换 DOG 高斯滤波器^[18]。这样可以确保准确性并减少计算时间。

在邻域中使用 Harr 小波对水平和垂直于方向上的一阶偏导数 d_x 、 d_y 进行计算, 接着对各子区域不同方向上的响应值和绝对值进行计算^[19]。由一阶偏导函数得到特征向量, 匹配精度和鲁棒性有待提高。最终得到四维向量, 如式(10)所示。

$$V = \left[\sum d_x, \sum d_y, \sum |d_x|, \sum |d_y| \right] \quad (10)$$

文中提出一种多尺度二次响应改进的 SURF 特征向量提高点对数和准确率。使其鲁棒性以及匹配点数量和准确性都得到提高。二阶响应模板由一阶模板推导, 一阶模板由梯度矢量 w 和垂直方向 v 成, 如式(11)所示^[20]。

$$\begin{cases} w = \left(\frac{\partial L}{\partial x}, \frac{\partial L}{\partial y} \right) = \frac{1}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \cdot (L_x, L_y) \\ v = \left(\frac{\partial L}{\partial y}, \frac{\partial L}{\partial x} \right) = \frac{1}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \cdot (L_y, -L_x) \end{cases} \quad (11)$$

通过固定的梯度向量 (L_x, L_y) 计算一阶模板,

对 v 与 w 求其一阶偏导, 则有垂直分量 $L_v = 0$ 和梯度分量 $L_w = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为不变量。

基于一阶模板, 得出文中二阶响应算子 L_{ww} 、 L_{vv} 。用 Hessian 矩阵表示, 如式(12)所示^[21]。

$$\begin{cases} L_{ww} = \frac{1}{L_x^2 + L_y^2} \cdot (L_x \quad L_y) \begin{pmatrix} L_{xx} & L_{xy} \\ L_{yx} & L_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_x \\ L_y \end{pmatrix} \\ L_{vv} = \frac{1}{L_x^2 + L_y^2} \cdot (L_y \quad -L_x) \begin{pmatrix} L_{xx} & L_{xy} \\ L_{yx} & L_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_y \\ -L_x \end{pmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

最终, 得到四维向量如式(13)所示。

$$V_L = \left[\sum L_{ww}, \sum L_{vv}, \sum |L_{ww}|, \sum |L_{vv}| \right] \quad (13)$$

改进的 SURF 特征向量使特征点对具有旋转和平移不变性, 对图像灰度变换较为敏感。

2.3 特征向量的匹配

SURF 算法通常使用近邻欧氏距离比例法 (Best Bin First, BBF) 进行特征匹配^[22]。假定 $A = (x_{i1}, x_{i2}, L, x_{iN})$ 与 $B = (x_{r1}, x_{r2}, L, x_{rN})$ 为左右图像上匹配的特征向量。如式(14)所示该匹配点的欧氏距离^[23]。

$$D_{\text{near}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{li} - x_{ri})^2} \quad (14)$$

假设向量 C 和 A 之间的欧式距离次近于向量 B , 被称为次近欧氏距离 $D_{\text{sub_near}}$, 式(15)给出了两者之比 η_1 ^[24]。

$$\eta_1 = \frac{D_{\text{near}}}{D_{\text{sub_near}}} \quad (15)$$

如果 η 高于设置的阈值, 则意味着最近点距离次近点太近, 被认为是误匹配。通过测试选择高阈值匹配 $\eta_1 = 0.8$, 在 BBF 匹配过程中不可避免会有误匹配点存在^[24]。用于变电站定位会产生较大偏

差, 从而影响预警效果。匹配准确率应达到 100%, 才能满足移动目标的定位要求。匹配后通过随机样本一致性(Random Sample Consensus, RANSAC)算法消除了不匹配点。

3 试验结果与分析

3.1 试验参数

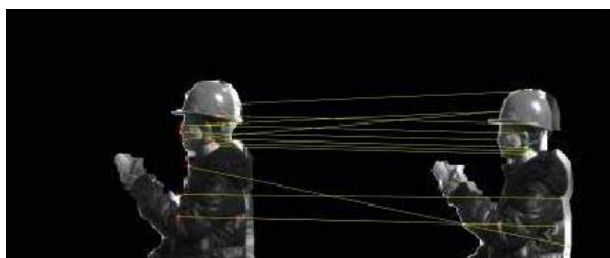
试验重点对变电站运动目标图像匹配算法进行了研究, 将其与未改进前的匹配效果进行比较。实验中使用的计算机是 Intel i5 处理器, 8G 内存和 win7 系统, 通过 Matlab 2018a 软件进行仿真^[25]。将 SURF 算法, A-KAZE 算法和文中算法的性能进行对比分析。在试验中, 通过不断地调整实验得到相关参数, 尺度空间组数 $O=3$, 层数 $S=4$, 尺度参数初值为 $\sigma_0=1.2$ 。

3.2 算法性能分析

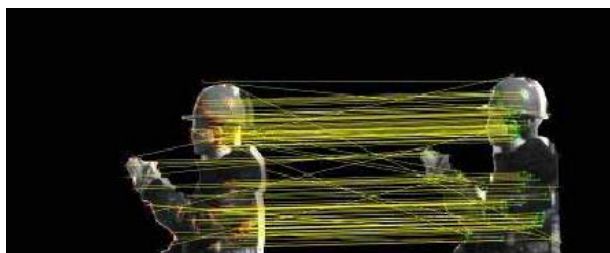
为了对文中算法的鲁棒性进行验证, 试验提取变电站视频帧图像, 比较匹配效果, 并选择两帧进行算法匹配。图 2 所示各算法对变电站视频第 70 帧的匹配效果, 该帧中的运动物体是维修人员的侧照, 目标信息较少, 无纹理区域较多。



(a) 原图



(b) SURF 算法匹配图



(c) A-KAZE 算法匹配图



(d) 文中算法匹配图

图 2 变电站视频 70 帧不同算法匹配效果

Fig. 2 Matching effect of different algorithms for 70 frames of substation video

表 1 为变电站视频第 70 帧处各算法在匹配点对总数、误匹配数、匹配准确率和匹配时间方面的性能比较。

表 1 视频 70 帧不同算法匹配点对

Table 1 Video 70 frames different algorithms matching point pair

算法	匹配点数	误匹配点	准确率/%	匹配时间/s
SURF	14	4	71.43	0.58
A-KAZE	131	18	86.26	0.92
文中算法	204	12	94.12	1.13

图 2 和表 1 中的数据表明, SURF 算法匹配时间最快(0.58 s), 但是只有 14 对匹配点, 不能满足目标定位要求。A-KAZE 算法具有足够的匹配点, 但是准确率仅为(86.26%)。文中匹配算法匹配点的数量达到 204 对, 准确率达到 94.12%, 满足了系统要求。

图 3 所示变电站视频第 100 帧各算法的匹配效果。该画面中的运动目标是两名维修人员的正视图, 纹理丰富, 光线好。



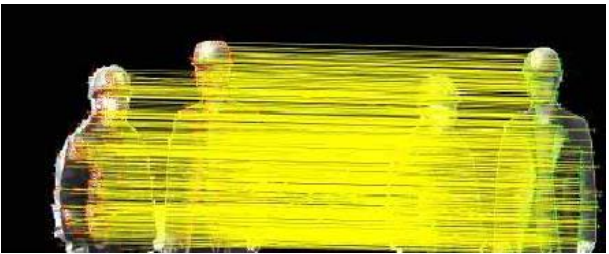
(a) 原图



(b) SURF 算法匹配图



(c) A-KAZE 算法匹配图



(d) 文中算法匹配图

图 3 变电站视频 100 帧不同算法匹配效果

Fig. 3 Matching effect of different algorithms for 100 frames of substation video

表 2 为变电站视频第 100 帧处各种算法的匹配总数、误匹配数、匹配精度和匹配时间方面的性能比较。

表 2 视频 100 帧不同算法匹配点对

Table 2 Video 100 frames different algorithms matching point pair

算法	匹配点数	误匹配点	准确率/%	匹配时间/s
SURF	16	3	81.125	0.64
A-KAZE	908	68	92.51	1.03
文中算法	1 202	46	96.17	1.18

从图 3 和表 2 的数据来看,相比于图 2,图 3 的匹配中几种算法都在一定程度上提高了匹配点对和匹配精度,但 SURF 算法匹配点只有 16 对,准确率为(81.125%)。不能满足目标定位要求。A-KAZE 算法具有适当数量的匹配点对(908 对),准确率为 92.51%。文中算法的匹配点数和匹配精度最高,匹配点数为 1 202 对,准确率为 96.17%。传统 SURF 运算符的匹配速度最快(0.64 s),A-KAZE 算法(1.03 s),文中算法(1.18 s)最慢。总的来说,文中算法仍然综合性能最优。

最后,对于以上两组文中算法处理过的图像,采用 RANSAC 算法对不匹配点进一步去除。处理效果如图 4 所示。

在图 4 中,通过 RANSAC 算法消除了差异之后,准确率 100%。改进算法点对数量多、精度高、耗时短,满足实时定位要求。



(a) 文中算法最终效果 1



(b) 文中算法最终效果 2

图 4 文中算法最终匹配效果

Fig. 4 Final matching effect of the algorithm in this paper

4 结论

文中提出了一种变电站运动目标的三维匹配算法,该算法结合了 A-KAZE 算法和改进的 SURF 算法。A-KAZE 算法用于从两幅图像中提取匹配特征点,利用二阶多尺度改进的 SURF 特征向量进一步计算二次响应。采用 BBF 算法增加匹配点,RANSAC 算法消除不匹配点,完成匹配工作。通过试验分析改进前后算法的可行性。结果表明,文中算法匹配点数为 1 202 对,准确率为 96.17%,消除误匹配点,准确率达 100%。在后续研究中,变电站复杂的室外环境和不断变化的天气会导致图像的灰度值出现较大的波动并丢失匹配点,下一步工作的重点是多种视觉算法的融合。

参考文献

- [1] 何奉禄,陈佳琦,李钦豪,等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69.
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things technology in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [2] 彭丽苹,吕晓丹,蒋朝惠,等. 基于 Docker 的云资源弹性调度策略[J]. 计算机应用, 2018, 38(2): 557-562.
PENG Liping, LÜ Xiaodan, JIANG Chaohui, et al. Flexible scheduling strategy of cloud resources based on Docker[J]. Computer Application, 2018, 38(2): 557-562.

- [3] 刘晶, 钟力强, 董娜. 变电站巡检机器人视觉精确定位算法研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2019, 6(6): 8-13.
LIU Jing, ZHONG Liqiang, DONG Na. Research on precise positioning algorithm of substation inspection robot vision[J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2019, 6(6): 8-13.
- [4] 杨伟敏, 周文俊, 李良, 等. 变电站非视距环境移动目标实时精准定位方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(22): 46-54.
YANG Weimin, ZHOU Wenjun, LI Liang, et al. eal-time accurate positioning method for moving targets in non-line-of-sight environment in substations[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(22): 46-54.
- [5] 程禹, 王晓华, 王文杰, 等. 基于改进 AKAZE 算法的图像特征匹配方法[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(8): 51-56.
CHENG Yu, WANG Xiaohua, WANG Wenjie, et al. Image feature matching method based on improved AKAZE algorithm[J]. Journal of Xi'an Engineering University, 2020, 34(8): 51-56.
- [6] 朱建宝, 许志龙, 孙玉玮, 等. 基于 OpenPose 人体姿态识别的变电站危险行为检测[J]. 自动化与仪表, 2020, 35(2): 47-51.
ZHU Jianbao, XU Zhilong, SUN Yuwei, et al. Detection of dangerous behaviors in substations based on OpenPose human posture recognition[J]. Automation and Instrumentation, 2020, 35(2): 47-51.
- [7] 张文嘉, 王荃荃, 李海坤, 等. 基于对称双极接线的全桥型 MMC-HVDC 直流侧短路故障穿越控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 48(16): 147-154.
ZHANG Wenjia, WANG Quanquan, LI Haikun, et al. DC side short circuit fault ride through control method for full bridge MMC-HVDC based on symmetrical bipolar connection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 48(16): 147-154.
- [8] 陈江兴, 梁良, 付俊峰, 等. 基于大数据的智能电网数据调度与快速分发方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(6): 88-93.
CHEN Jiangxing, LIANG Liang, FU Junfeng, et al. Research on smart grid data scheduling and fast distribution method based on big data[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(6): 88-93.
- [9] 顾志祥, 孙思宇, 孔飞, 等. 燃气冷热电分布式能源系统设计优化综述[J]. 华电技术, 2019, 41(3): 8-13, 42.
GU Zhixiang, SUN Siyu, KONG Fei, et al. Overview of design optimization of gas-fired cooling, thermal power and distributed energy system[J]. Huadian Technology, 2019, 41(3): 8-13, 42.
- [10] 谢黎, 周华良, 于同伟, 等. 一种智能变电站新型双网冗余设备及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 151-156.
XIE Li, ZHOU Hualiang, YU Tongwei, et al. A new dual network redundant equipment and its implementation for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 151-156.
- [11] NAHMAN J, SALAMON D. Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 41(12): 151-156.
- [12] MOSES V, HATHERLEY R, BISHOP Ö T. Bioinformatic characterization of type-specific sequence and structural features in auxiliary activity family 9 proteins[J]. Biotechnology for Biofuels, 2016, 9(1): 88-94.
- [13] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [14] PATEL G K, DABHI V K, PRAJAPATI H B. Clustering using a combination of particle swarm optimization and K-means[J]. Journal of Intelligent Systems, 2017, 12(3): 457-469.
- [15] GAUTAM J V, PRAJAPATI H B, DABHI V K, et al. Empirical study of job scheduling algorithms in Hadoop MapReduce[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2017, 21(1): 146-163.
- [16] CAETANO C E F, LIMA A B, PAULINO J O S, et al. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 46(5): 159-162.
- [17] HU Jianjiang, FICHTNER M, BARICCO M. Preparation of Li-Mg-N-H hydrogen storage materials for an auxiliary power unit[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(27): 17144-17148.
- [18] JIA Zhiwei, WANG Lijun, ZHANG Jinchuan, et al. High efficiency, low power-consumption DFB quantum cascade lasers without lateral regrowth[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 88-95.
- [19] 张婕, 曾国辉, 赵晋斌, 等. 基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 92-99.

- ZHANG Jie, ZENG Guohui, ZHAO Jinbin, et al. Capacitor voltage equalization strategy for modular multilevel converter based on improved bubble sorting[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 92-99.
- [20] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 1-10.
- DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Fault characteristics analysis of circular DC distribution network under different grounding modes based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 1-10.
- [21] 王利平, 庞晓艳, 朱雨, 等. 基于物联网和移动互联的二次设备运维技术研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 177-184.
- WANG Liping, PANG Xiaoyan, ZHU Yu, et al. Research and application of secondary equipment operation and maintenance technology based on internet of things and mobile interconnection[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 177-184.
- [22] 唐耀华, 郭为民, 崔杨. 水-火发电机组频率控制策略研究[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 153-161.
- TANG Yaohua, GUO Weimin, CUI Yang. Study on frequency control strategy of water thermal power unit[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 153-161.
- [23] 叶波. 基于负载均衡度的云计算任务调度算法[J]. 东北电力大学学报, 2019, 39(1): 88-95.
- YE Bo. Cloud computing task scheduling algorithm based on load balancing degree[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2019, 39(1): 88-95.
- [24] 陈思宇, 柴庆宣, 李延松, 等. 综合能源系统潮流及最优潮流计算模型与方法综述[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 1-12, 20.
- CHEN Siyu, CHAI Qingxuan, LI Yansong, et al. Overview of power flow and optimal power flow calculation models and methods of integrated energy system[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 1-12, 20.
- [25] CORREA-POSADA C M, SANCHEZ-MARTIN P. Security constrained optimal power and natural-gas flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1780-1787.

收稿日期: 2020-11-12; 修回日期: 2020-12-26

作者简介:

林国贤(1961—), 男, 本科, 高级工程师, 主要变电站智能运检技术; Email:linggx1961@163.com

林峰(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究电力系统自动化;

黄金魁(1978—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究电力系统自动化、计算机科学技术。

(编辑 张爱琴)