

[带电作业]

基于多目视觉与注意力机制的配电带电作业危险行为识别

文/徐哲彬 杨文杰

内蒙古电力（集团）有限责任公司包头供电分公司

提出基于多目视觉与注意力机制的配电带电作业危险行为识别方法。采用多目视觉方法采集多视角配电带电作业环境图像，并进行画面对齐，以消除单目视觉的局限性，提高图像分析的准确性。建立行为特征融合的时序卷积模型，并引入注意力机制以优化模型的动态感知能力，从而更准确地提取作业人员的行为特征。结合分类回归问题的求解，输出危险行为的分类识别结果。

为保障电力供应服务的质量，在电力系统发生故障时，往往会采用不停电的作业方式进行维修，避免造成长时间的停电故障。由于电力系统高压的环境，使得配电网的带电作业过程存在较大的危险性，极大危害了作业人员的人身安全。然而，传统人工巡检的方式并不能时刻监测作业人员是否有危险行为，存在较大的监测盲区，无法满足配网带电作业安全管理工作的实际需求。基于此，为改善人工监测的局限性，需要采用更加智能的方法对作业人员的危险行为进行识别分析。对此，领域内很多研究人员提出了危险行为识别方法。

白心爱等^[1]提出基于CNN的危险行为识别方法。采集人员行为视频，并以帧图像的形式建立RGB图像集。通过逐帧求解，计算人员行为动作速度。结合CNN神经网络，识别出人员的危险行为。该方法能够解析人员行为的时序动态性。但该方法在实际应用中受数据质量影响较大，若采集的视频图像存在遮挡，模型将无法提取有效行为特征，从而降低识别准确度。刘斌等^[2]提出基于改进OpenPose算法的危险行为识别方法。在原有的OpenPose网络结构基础上，引入一个MobileNet v3模块，改进原有网络的参数，提取出有效的行为特

征。结合ST-GCN时空图卷积网络将提取的特征分类，实现危险行为的识别。该方法能够大幅度降低原有OpenPose的参数量，因此对算力的要求也较低。然而，OpenPose仅能针对单帧图像提取行为特征，难以捕捉动作的时间序列特征，因此在连续动作的危险行为识别上准确度不高。高治军等^[3]提出基于CNN-LSTM的危险行为识别方法。采用CNN网络提取出人员运动的动静态特征。结合LSTM网络的时序特征分析，融合识别出人员的危险行为。该方法能够提取出不清晰的行为动作特征，实现危险行为的模糊识别。但融合模型可能无法捕捉深层次的行为特征，对细微动作变化的有效识别能力不足，进而导致识别准确度下降。王鸿等^[4]提出基于深度学习的危险行为识别方法。采用OpenPose算法提取出作业人员的骨骼点，以此感知人员的实时姿态。构建基于深度神经网络的深度学习模型，实现危险行为的识别。该方法能够在同一场景下，同时对多人的危险行为进行识别。但若实践应用中存在数据标注不准确的问题，模型可能误判边界模糊的行为特征，从而降低识别准确度。

考虑到上述研究人员所提出的危险行为识别方法在实际应用中的性能并不理想，无法准确识别出

作业人员的危险行为，无法满足当前配电带电作业的安全保障需求。为了缓解这一问题，本研究提出了一种基于多目视觉与注意力机制的配电带电作业危险行为识别方法。该方法通过分析多目视觉下的作业人员行为特征，融合识别出危险行为，避免单一视角的局限性，有效提高危险行为识别的准确性。

配电带电作业危险行为识别方法设计

1. 基于多目视觉的多视角画面对齐

在配电带电作业环境中，部署多个计算机视觉设备，采集得到多个视角下的作业环境图像。以图像生成时间为基准，融合多目视觉的图像信息，将多视角画面至对齐到同一坐标系，便于后续分析。

以不同的计算机视觉点建立图像坐标系，其坐标原点位于所采集图像的中心位置^[5]。根据该坐标系的二维性质，本研究采用齐次坐标的方法，建立其与世界坐标系之间的转换关系。

$$\hat{z} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f/d_x & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & f/d_y & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， (X,Y,Z) 表示世界坐标系的坐标值； (x,y) 表示多目视觉下的图像坐标系； (x_0,y_0) 表示该坐标系的坐标原点； $\hat{z}$ 表示某一坐标点在相机坐标系下的表达； d_x 和 d_y 表示图像像素点在坐标系中的坐标长度，即像素点的尺寸； R 表示旋转矩阵； f 表示计算机视觉设备的相机焦距； t 表示平移向量。

完成坐标系的转换后，融合多目视觉的图像坐标信息，对配电带电作业环境图像进行立体标定。在转换后的世界坐标系下，建立多目视觉融合的立体匹配关系，公式为

$$e(X,Y,Z) = |I_R(x,y) - I_T(x+a,y)| \quad (2)$$

式中， e 表示多目视觉图像的立体匹配； a 表示不同视觉点相机在世界坐标系下的坐标距离； I 表示代价函数。

在代价函数的约束下，以代价聚合的方式融合多目视觉图像，从而在同一个坐标系下描述配网带电作业环境，实现多视角画面的对齐。

2. 基于注意力机制的时序特征融合

以对齐后的多视角作业场景图像数据作为输入数据，建立基于注意力机制的特征融合模型。通过

对连续输入数据的时序分析，输出作业人员行为姿态的时序特征。

通过语义编码，输入配电带电作业环境的实时图像信息，在时间戳的排序下，得到特征融合模型的输入序列，公式为

$$S = (e_1, e_2, \dots, e_m) \quad (3)$$

式中， S 表示带电作业环境图像数据的语义编码输入序列； e_1 等表示某一时刻下，多视角融合得到的立体匹配图像； m 表示模型数据分析序列的批次大小。

经过批归一化后，在模型的时序通道上对输入的图像数据序列进行时序卷积运算，实现作业人员连续动作行为特征的拼接^[7]。这一运算过程为

$$F = E(c \otimes (\lambda, S)) \quad (4)$$

式中， F 表示输出的时序卷积运算结果； E 表示激活函数； λ 表示膨胀系数； c 表示卷积层的感受野； $\otimes$ 表示时序卷积运算。

考虑到这一运算过程可能存在跨尺度特征偏移的问题，本研究在模型中引入了注意力机制，构建一个自适应融合模块。将计算的注意力权值输入到模型的激活函数中，实现时序特征之间的交互感知，消除特征偏移的问题^[8]。在注意力机制的优化下，建立作业行为时序特征注意力感知的特征融合模块，公式为

$$I(m) = E(A(T(S(B)))) \quad (5)$$

式中， $I(m)$ 表示模型输出的融合时序特征； A 表示注意力权值； T 表示输入数据的时序关联； B 表示批归一化。

其中，注意力权值的计算方法为

$$A = H(w^T F + b) \quad (6)$$

式中， H 表示打分函数； w 表示特征向量相关性权重； b 表示误差项。

在注意力机制的优化下，改进时序卷积模型的动态调节能力，使其能够适应跨尺度特征，输出正确拼接的作业行为时序特征。

3. 分类回归的带电作业危险行为识别

根据配电带电作业过程中存在的危险源，通过分类回归，识别出作业人员在带电作业环境中的危险行为。

考虑到配电带电作业场景中，人员的危险行为可能分为不同的种类，基于此，为实现对作业危险

行为的分类识别，本研究建立基于逻辑回归的分类回归问题。其数学表达式为

$$Q = \sum_{i=1}^m \frac{kI(m)}{\alpha I(X,Y,Z)} \tag{7}$$

式中， Q 表示作业危险行为识别的分类回归； k 表示比例权重的扩大因子； α 表示二值掩码； i 表示时序卷积模型的神经元； $I(X,Y,Z)$ 表示模型输出的作业人员位置掩码。

为确保分类回归问题的求解精度，为其定义一个分类回归损失函数，公式为

$$L = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (1 - I(X,Y,Z)) \log(C_i)^\beta \tag{8}$$

式中， L 表示分类回归的损失函数； C_i 表示核偏移； β 表示惩罚因子。

在损失函数的约束下，训练该分类回归过程将分类损失降低至理想水平，输出带电作业危险行为的识别结果。

通过上述步骤，完成基于多目视觉与注意力机制的配电带电作业危险行为识别方法的研究设计。

实验

1. 配电带电作业场景

为了检验本文方法在实践应用中的危险行为识别性能，开展了面向不同配电带电作业场景的应用测试。

本次实验所依托的作业场景为（110 kV，0.4 kV）的高压配电网，含有风能等分布式能源，能够为大范围的区域提供配电服务。针对其日常运维管理工作，本次实验主要对四类作业场景的九项带电作业内容进行了实践测试，见表1。

表1 配电带电作业内容

作业类型	作业内容
设备类作业	变压器台架维护
	带电更换柱上设备
电缆类作业	电缆中间接头检修
	带电穿刺线夹安装
杆塔类作业	避雷器维修
	带电更换电杆横担
导线类作业	带电断/接引线
	修补导线损伤
	更换导线或绝缘子

基于本文方法的应用需求，在上述作业场景中布设多个工业相机进行实时图像数据的采集。所采

用设备为MV-XGL164M线阵工业相机，其主要技术参数见表2。

表2 工业相机主要技术参数

名称	规格参数
传感器类型	CMOS
像元尺寸/ μm	5×5
光学尺寸/mm	81.92
动态范围/dB	63.5
AD宽度/bit	12
像素输出宽度/ bits	10
最大增益	6
曝光时间范围/ms	0.004~5

利用该设备，采集不同视角下的配电带电作业图像，作为本次实验的数据来源。

2. 危险行为识别性能分析

在所依托的带电作业场景中，对本文方法的识别性能进行识别分析。

将采集的多目视觉图像进行统一坐标系的对齐后，将其输入到基于注意力机制的时序卷积模型中进行特征融合。在分类回归问题的求解下，分析本文方法在实践应用中的分类识别损失，结果如图1所示。

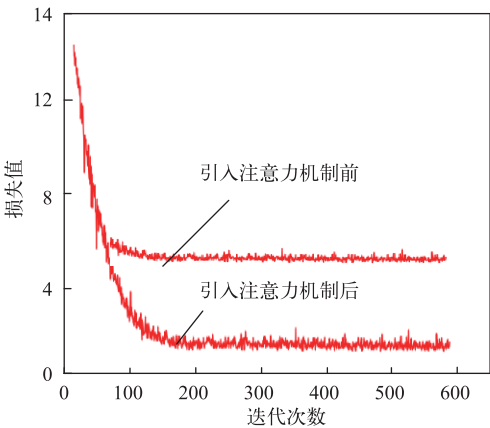


图1 配电带电作业危险行为识别的分类损失

从图1可以看出，在本次测试中，对于多类型配电带电作业危险行为的分类有着较低损失水平。这一结果说明本文方法通过引入注意力机制，能够有效消除特征偏移的问题，实现更优的多视角作业行为特征融合处理。为后续分类回归问题的求解减小了初始误差，从而能够大幅度降低分类识别的损失水平。

为进一步检验本文方法的识别性能，本次实验

结合基于改进OpenPose算法以及CNN-LSTM两种危险行为识别方法进行对比分析。通过统计各方法在不同带电作业内容下的识别结果，将其与相应作业人员的真实行为进行对比，计算出识别结果的F1分数。

经过测试与计算，得到如图2所示的对比结果。

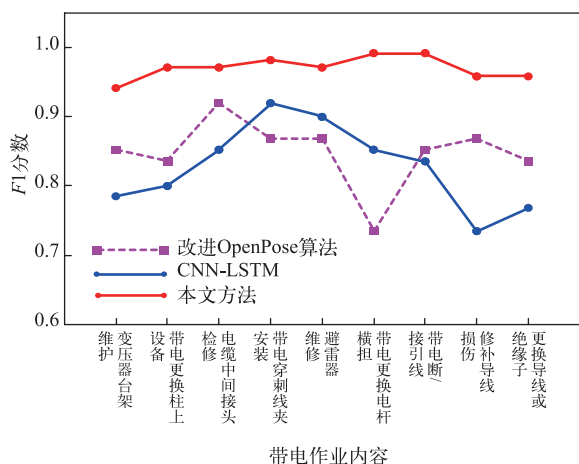


图2 各方法危险行为识别性能对比

从图2可以看出，在不同的配电带电作业类型中，本文方法均表现出了更高的F1分数，平均能够达到0.97，与其他两种方法相比，有着更高的识别准确度。这一高准确度的识别优势主要在于本文方法利用多目视觉的方法，有效避免单一视觉的局限性，消除车档问题的干扰，能够更加准确地分析出作业人员的行为特征，并在注意力机制的优化下，实现高质量的特征融合，从而实现准确性较高的配电带电作业危险行为识别分析。

结束语

本研究所设计的基于多目视觉与注意力机制的配电带电作业危险行为识别方法，通过采集多视角下的配电带电作业环境图像，有效避免了物体遮挡对于目标人员特征分析的影响，在注意力机制的支持下，能够更加准确地融合提取出作业人员的行为特征，进而得到了精度较高的危险行为识别结果。

在本文方法的应用下，能够为配电带电作业的安全监管工作提供数据参考，帮助管理人员及时发现作业过程中的危险行为，并向其发出预警，以保障作业人员的人身安全。EA

(收稿日期: 2025-07-07)

参考文献

- [1] 白心爱, 雒珊. 基于CNN的人体动作建模及危险行为识别研究[J]. 吕梁学院学报, 2024, 14 (2): 15-19.
- [2] 刘斌, 贾浩强, 杨一, 等. 基于改进OpenPose算法的矿工危险行为识别研究[J]. 电视技术, 2023, 47 (2): 20-23.
- [3] 高治军, 顾巧瑜, 陈平, 等. 基于CNN-LSTM双流融合网络的危险行为识别[J]. 数据采集与处理, 2023, 38 (1): 132-140.
- [4] 王鸿, 邓元实, 常政威, 等. 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术[J]. 四川电力技术, 2022, 45 (3): 23-28.
- [5] 蓝剑, 王旭杰, 郑扬义, 等. 基于JACK仿真的10 kV配网带电作业人员生物力学分析[J]. 电工材料, 2025(3): 87-91, 95.
- [6] 王巍, 闫源, 刘伊军, 等. 面向未知环境的带电作业机器人动态目标定位方法[J]. 电子设计工程, 2025, 33 (7): 12-15, 21.
- [7] 冯兴龙, 吴田, 万亚旭, 等. 基于人-物交互关系检测的带电作业人员行为识别方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20 (9): 205-211.
- [8] 吴田, 万亚旭, 王申华, 等. 基于改进ST-GCN的10 kV带电作业人员视频异常行为识别方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18 (10): 31-39, 72.
- [9] 张晓璐. 基于可见光机器视觉的危险行为图像识别方法[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2024, 40 (9): 24-30.