

# 高空作业安全绳挂接状态自动监测技术进展与应用前景

李一鸣 左军

淮北万特科贸有限责任公司 安徽 淮北 235000

**【摘要】**：高空作业大量出现在建筑、电力、通信等高危行业，高空作业中不规范挂接安全绳属于造成坠落事故的风险因素之一。传统的依靠人工巡查、事后管理的安全监管模式，在实时性、覆盖面上存在缺陷，不能适应复杂作业环境下安全防控的需求。随着人工智能和边缘计算技术的发展，以图像识别为基础的高空作业安全绳挂接状态自动监测技术，也渐渐成为提高作业安全水平的一种重要方式。本文从安全绳挂接状态视觉识别技术的研究背景和发展现状入手，对安全绳挂接状态视觉识别方法及复杂环境应用特点进行评述，分析边缘计算在高精度、低延时安全监测体系构建中起到的作用，结合建筑施工、电力运维等典型场景来探讨该技术的应用效果和经济价值。对目前技术所遇到的难题和将来多源融合、智能化安全的发展趋势做了预测。

**【关键词】**：高空作业安全；安全绳挂接状态；图像识别；边缘计算；智能安全监测

DOI:10.12417/3083-5526.25.05.031

## 一、研究背景与问题提出

### (一) 高空作业安全风险的现实严峻性

高空作业在建筑施工、电力检修、通信铁塔维护、风电设备运维等高危行业都有广泛的应用，高空作业的环境普遍具有高度大、空间受限、环境复杂、作业连续性强等特点，一旦发生坠落事故就会造成严重的人身伤害甚至群死群伤。大量的事故调查表明，高空坠落事故的主要诱因之一就是安全防护装备没有规范使用，其中安全绳未正确挂接、未挂接或者作业过程中脱落的问题比较严重。虽然有关行业已经建立起比较完善的安全生产规章制度，通过岗前培训、作业审批、现场巡查等方式加强管理，但是由于作业点分散、人员流动频繁、人为因素干扰较多，传统的管理模式在实际执行中很难实现全过程、无盲区的有效监管。

### (二) 传统监管模式的局限性

目前高空作业安全管理仍然以人工监督、事后检查为主，依靠安全员现场巡查或者抽查视频回放来对违规行为进行追溯。该种方式在一定程度上起到警示作用，但是从实时性、持续性、覆盖面三个方面来说都存在明显的不足<sup>[1]</sup>。一方面人工巡查很难及时发现瞬时的违规行为，另一方面传统的视频监控系统只能停留在看得见的层面，缺少对安全行为的自动识别和智能分析的能力，不能在违规行为发生的时候立即触发有效的干预。另外，在大型工地或者电力线路长距离作业场合下，安全监管人员配置不足的问题更加严重，增大了监管盲区。

### (三) 智能化监测技术引入的必然性

伴随着人工智能、计算机视觉、物联网技术的迅速发展，把智能感知和自动分析融入到高空作业安全管理当中，已经成为行业发展的一种必然走向。通过对作业人员安全绳挂接状态的自动识别、实时监测，可以在事故发生之前发出预警，从事后追责变为事前预防<sup>[2]</sup>。在国家不断加强安全生产监管，推进智慧工地、数字化运维建设的大背景下，建立高精度、低延时

的高空作业安全绳挂接状态自动监测系统，不仅具有现实意义，而且有较好的政策、市场环境。

## 二、基于图像识别的安全绳挂接状态自动检测技术进展

### (一) 计算机视觉在安全行为识别中的应用演进

图像识别技术给目前的高空作业安全监测系统提供主要支持。早期安全监测主要是用传统的图像处理方法，用颜色、边缘或者形态特征对安全带等装备做简单的识别，在复杂背景、多变光照下准确率不高。随着深度学习的发展，以卷积神经网络为目标检测、行为识别的模型越来越成熟，也成了安全装备自动识别的重大突破。经过对施工现场大量的图像进行训练之后，模型就能够自动地学会安全绳、安全带、挂钩以及人体各个关键部位的视觉特征，从而实现对于是否佩戴、是否正确挂接等状态的判断<sup>[3]</sup>。

### (二) 安全绳挂接状态识别的关键技术难点

安全带佩戴情况的判定比安全绳挂接情况判定要简单得多，但判断安全绳挂接情况的技术难度要大得多。安全绳一般很细，在远处或者复杂的背景中容易被遮蔽或者误判；挂接状态有高挂、低挂、虚挂、挂钩未闭合等多种，不同的状态之间视觉上的差异很小，对模型的判别能力提出了更高的要求。近几年研究者利用多尺度特征融合、关键点检测、语义分割等方法，对安全绳、挂接点做了细致的建模，从而使系统能够从整体构型角度去判断是否形成了有效的防坠连接，而不仅仅是判断某个物体是否存在。

### (三) 深度学习模型与工程落地之间的适配

图像识别算法在工程应用中除了要具备较高的检测准确率之外，还要满足实时性、稳定性的要求。在研究中形成以轻量化深度学习模型为基础的技术路线，保证识别的精度，并且通过模型的剪枝、参数的量化和算子的优化来减少计算量。并且根据施工现场光照变化大、作业姿态多变等特点，系统一般

会采用多视角摄像头布置和数据增强的方式,使得模型能够在实际环境中泛化。这些技术进展给安全绳挂接状态自动监测进入大规模应用打下了基础。

### 三、边缘计算支撑下的高精度、低延时监测体系构建

#### (一) 边缘计算在安全监测中的角色定位

高空作业安全监测场景下系统能否发挥作用的关键指标就是实时性。如果识别的结果要靠远程的云端计算,受到网络带宽和传输延迟的影响,那么就很难对违规行为作出及时反应。边缘计算把图像分析和决策逻辑部署在现场设备中,实现了数据就在地、风险就在地监测模式,大大缩短了从感知到告警的时间链路。该架构适合于网络条件不好或者对安全响应时间要求很高的电力、建筑等作业环境。

#### (二) 边缘侧智能分析与系统协同

基于边缘计算的安全绳监测系统一般是由前端感知设备、边缘计算节点、后台管理平台这三部分构成的。前端摄像头不断地采集作业画面,边缘节点实时运行图像识别模型来分析安全绳挂接的状态,输出判断结果。系统一旦检测到不符合规范的挂接方法就会立即用声光报警、终端提示或平台推送等方式作出处理。边缘节点也可以把重要事件的数据上传到中心平台,供以后统计分析和安全管理决策使用。该种边缘实时决策、云端集中管理协同方式在保证响应速度的同时,也能考虑数据价值的深入挖掘。

#### (三) 系统可靠性与可扩展性设计

高危行业安全监测系统要有较高的可靠性、长期工作能力。边缘计算架构在一定程度上减少了对网络连续性的要求,在断网或者弱网时系统仍能维持基本的监测功能。同时模块化设计、标准化接口,使监测系统可以和已有的工地管理平台、电力运维系统无缝对接,不会造成重复建设。随着边缘算力和硬件成本不断下降,该类系统在大规模部署上所具有的经济可行性也越来越高。

### 四、典型应用场景分析及推广价值评估

#### (一) 建筑施工场景中的应用成效

高空作业点位多、人员构成复杂,是建筑施工领域安全事故的多发区。采用图像识别和边缘计算的方式对安全绳挂接状态进行自动检测,可以实现施工现场全天候、全方位的行为监管。系统对违规行为可以立即识别并记录下来,从而在现实操作中产生即时的威慑作用,也可以给后期的责任追溯和安全培训赋予客观的依据。经过实践证明,该类系统可以减轻安全员巡查的压力,也能提高工人对规范操作的重视程度,整体事故发生率呈下降趋势。

#### (二) 电力与通信运维场景中的应用潜力

电力检修和通信塔作业高空作业一般线路分散、环境恶劣

等特点明显,人工监管难度大。在作业区域布置智能摄像设备,同时使用边缘计算节点做本地分析,可以实现对作业过程中安全绳挂接状态的实时监测。在输电线路巡检、带电作业等高风险的环境下可以弥补传统监管的不足,提高作业的安全性。从长远来看,智能化监测的方式有利于创建出更加规范、可以复制的安全管理体系。

#### (三) 经济效能与行业推广前景

从经济效能上看,安全绳挂接状态自动监测系统投入成本主要是前期设备购置、系统集成费用,产生的收益体现在事故损失减少、人工成本降低、安全管理水平提高等各方面。随着应用规模的扩大,单位点位的边际成本就会不断地下降。智慧工地、数字化安全监管成为建筑业的发展方向,给该类技术的推广创造了良好的发展环境。因此,以图像识别、边缘计算为基础的高空作业安全监测体系,在高危行业里有很高的推广价值和广阔前景。

### 五、面临的主要挑战与未来发展趋势

#### (一) 复杂作业环境下识别可靠性的挑战

虽然基于图像识别的高空作业安全绳挂接状态自动监测技术,在实验以及部分工程应用中取得较好的效果,但是它在复杂的现实作业环境中,对于识别的可靠性仍然存在诸多困难。高空作业场景的光照条件变化剧烈,逆光、夜间施工、雨雪雾等恶劣的气象因素都会使图像质量受到很大影响,从而削弱模型对于安全绳细小结构、挂接细节的识别能力。施工现场还存在构件遮挡、人员交叉作业、视角受限等情况,造成安全绳、挂钩被遮挡或者部分可见,增大了误判和漏判的风险。另外不同的厂家安全绳、防护装备颜色、材质、形状不同也加大了模型泛化应用的难度。所以在保证实时性的基础上,怎样不断提高系统在复杂环境中的稳定性和鲁棒性,仍然成为该领域需要重点突破的技术难题。

#### (二) 系统工程化与规模部署中的现实约束

高空作业安全绳挂接状态自动监测系统从实验验证到大规模工程应用,还要面对系统工程化层面的现实约束。一方面边缘计算节点、摄像设备的部署要考虑到现场的空间条件、电源保障、网络架构等因素,老旧工地、偏远电力作业区由于基础设施条件的限制,会造成系统性能不能充分发挥。长期使用时要对设备进行维护、更新模型、保证系统的稳定性,因此还会产生管理费用。另外,不同项目、不同企业安全管理流程、信息化水平不一样,在对接现有管理平台的时候需要做定制化开发工作,在一定程度上提高初期推广的技术和资金门槛。在保证功能完整、性能可靠的基础上,怎样实现系统标准化、模块化设计,成为推动该技术规模化应用的关键问题之一。

#### (三) 多源融合与智能安全管理的发展趋势

高空作业安全绳挂接状态自动监测技术的发展趋势,将会

由原来的单视觉识别发展为多源信息融合。将图像识别结果同可穿戴设备、张力传感器、惯性测量单元等各类感知数据融合，可以对安全绳的实际受力状况及作业人员行为从多角度做出综合评估，进而大幅度削减单一传感方法造成的误差。同时边缘计算、人工智能算法不断发展，系统具有了更强的自主学习、自适应能力，可以按照作业场景、历史数据的变化自动调节识

别策略。从管理上看，未来的安全监测系统会和企业数字化管理系统融合，对监测数据进行长时间分析，从而达到高空作业安全预警的目的，也将高空作业安全管理工作由被动的监督转变为积极的选择。在技术成熟度、政策环境、行业需求三者共同驱动之下，本领域仍然具有广阔的发展前景，研究与应用价值将在高危行业安全生产实践中不断体现出来。

### 参考文献:

- [1] 刘大巍,于子章,李慧颖.无人机辅助输电高空作业防坠装置机械结构设计与应用研究 [J].标准生活,2025,(08):329-331.
- [2] 罗东岳. 智能吊篮的安全监测与预警系统的研究[D].山东建筑大学,2024.
- [3] 曹陇鑫.高危作业异常行为视频监测算法研究及实现[D].西安建筑科技大学,2020.