

基于朴素贝叶斯的智能安全带设计

雷济坤, 陈国军, 周渊, 张延伟, 张明
华能甘肃能源开发有限公司, 甘肃 兰州 730070
DOI:10.61369/EPTSM.2025100016

摘 要 : 在发电行业与建筑行业的登高作业中, 坠落事故长期居于安全事故首位。传统安全带虽可提供物理防护, 但无法实时感知使用状态, 也不能自动识别违规行为与潜在风险。针对这一问题, 本文提出一种基于朴素贝叶斯分类模型的智能安全带设计方法。通过在安全带上集成多种传感器 (陀螺仪、加速度计、惯性测量单元), 实现登高作业人员多维姿态、受力与环境状态的实时监测, 为登高作业的智能防护与安全管理提供了一种可行解决方案。

关 键 词 : 朴素贝叶斯; 安全带; 传感器; 安全防护

Design of Intelligent Safety Belt Based on Naive Bayes

Lei Jikun, Chen Guojun, Zhou Yuan, Zhang Yanwei, Zhang Ming
Huaneng Gansu Energy Development Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730070

Abstract : In high-altitude operations in the power generation and construction industries, fall accidents have long ranked first among safety incidents. Although traditional seat belts can provide physical protection, they cannot sense the usage status in real time, nor can they automatically identify violations and potential risks. To address this issue, this paper proposes an intelligent seat belt design method based on the Naive Bayes classification model. By integrating multiple sensors (gyroscopes, accelerometers, inertial measurement units, Hall switches, tension sensors) on the safety belt, real-time monitoring of the multi-dimensional posture, force and environmental conditions of personnel engaged in high-altitude operations can be achieved, providing a feasible solution for intelligent protection and safety management of high-altitude operations.

Keywords : Naive Bayes model; seat belt; sensors; safety protection

引言

高空登高作业广泛存在于电力检修的杆塔操作、风电维护的机舱攀爬及建筑施工的外墙作业等场景, 这类作业环境复杂多变, 安全风险始终处于高位。据发电行业安全生产统计数据显示, 登高作业引发的事故约占行业安全事故总量的34%, 其中超过70%的事故根源直指安全带使用不当——如作业中擅自解开卡扣、挂钩未挂牢等, 或监管环节存在盲区, 无法及时发现违规操作^[1]。

传统安全带虽能在坠落发生时提供基础物理防护, 但其功能仅停留在“被动救援”层面, 既无法实时监测佩戴者的系带状态, 对于“未系带”“挂钩松脱”“低挂高用”等隐性危险, 往往难以提前预警, 导致安全防护存在明显滞后性^[2], 难以及时发现“未系带”“低挂高用”等危险行为^[3]。

随着 MEMS 传感技术与嵌入式人工智能的快速发展, 智能安全带的概念逐渐兴起并成为研究热点。这类设备通过在安全带上集成姿态传感器、拉力传感器等组件, 结合机器学习算法, 理论上可实现对佩戴状态、身体姿态变化及安全带受力情况的实时检测。然而现有研究中, 多数方案依赖复杂深度神经网络或固定规则判断方法, 前者需大量标注数据支撑模型训练, 且对硬件算力要求高, 后者则适应性差, 难以应对复杂作业场景的变量, 均难以满足现场作业的实时性与可靠性需求。

为此, 本文提出一种基于朴素贝叶斯分类的轻量化安全状态识别方法, 通过提取传感器采集的佩戴角度、挂钩拉力等数据构建特征向量, 利用朴素贝叶斯模型^[4]的概率推理优势, 对正常佩戴、低挂高用、未挂钩、跌落趋势及疲劳状态等典型场景进行快速分类判断。该方法无需复杂算力支持, 在保证实时预警的同时, 有效提升了安全状态监测的准确度, 为高空作业安全防护提供新路径。

一、总体设计

为实现登高作业场景下对人员安全状态的高灵敏度、低功耗实时识别,本文构建了一套嵌入朴素贝叶斯推理的多模态智能安全带系统。系统遵循“感知-计算-判决-响应”的闭环流程(如图1所示),整体分为传感采集、信号处理、智能识别和云端管理四层结构,形成从终端数据采集到云端决策反馈的全链路管控。传感采集层在安全带卡扣、肩带及挂钩等关键部位布置六轴IMU、拉力传感器与霍尔传感器,实时捕捉作业人员加速度、角速度、安全带受力值等状态;信号处理层通过滤波去噪剔除环境干扰,提取时域、频域特征构建标准化数据集。智能识别层嵌入轻量化朴素贝叶斯模型,融合多维度特征向量完成安全状态概率分类;云端管理层则同步存储数据、生成评估报告,异常时触发本地声光报警与远端监管推送。系统采用低功耗芯片设计适配户外作业,通过连续监测与动态评估筑牢安全防线。

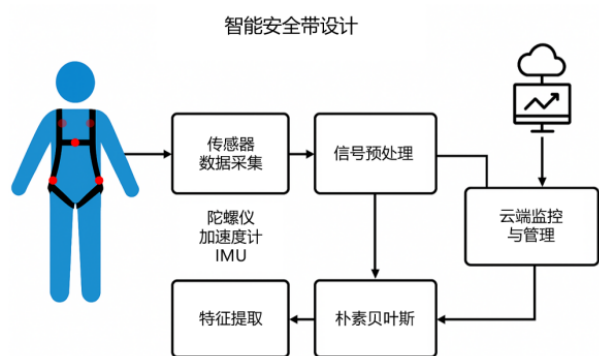


图1 智能安全带设计架构图

在硬件层面,安全带上集成了多组适配高空作业场景的高精度传感器模块,核心包含三轴陀螺仪、三轴加速度传感器及六轴惯性测量单元(IMU),所有模块均采用低功耗封装以满足全天作业需求。传感器依据监测重点差异化布置:腰部作为人体运动核心区域,同步嵌入陀螺仪与加速度传感器,二者通过卡尔曼滤波算法实现数据融合,实时计算出佩戴者的俯仰角、滚转角及偏航角,当俯仰角超过 45° 或滚转角瞬时变化量大于 $15^{\circ}/s$ 时,可快速识别倾斜、剧烈晃动等失稳状态;肩部位置则搭载IMU模块,重点捕捉人体纵向加速度与瞬时受力变化,结合力的变化率与姿态数据交叉验证,精准判断作业人员是否存在失衡趋势。这些传感器采集的多维度数据为后续信号处理与智能识别提供了高可靠性的硬件支撑。

在数据传输与处理方面,采集模块采用485总线模式进行有线通信,该模式抗电磁干扰能力强,能精准同步多点传感数据并实时传送至边缘计算单元,适配高空作业复杂的工业环境。边缘处理单元搭载低功耗微控制器(MCU),以高效算力完成数据处理核心流程:预处理阶段通过卡尔曼滤波滤除设备振动噪声,结合滑动平均算法实现信号平滑,再剔除极端异常值^[6],从源头保障数据稳定性与准确性;随后提取时域均值、方差及频域峰值等关键特征,构建符合模型输入要求的标准化特征向量。这些处理后的特征数据将即时输入朴素贝叶斯分类模型,通过概率推理完成安全状态实时识别,整个数据处理链路延迟控制在毫秒级,满足现场即时预警需求。

同时,系统配备云端监控平台,作为整个安全监测体系的上

层控制中心,承担数据汇聚与智能管控核心职责。云平台通过加密传输协议实时接收各安全带设备的监测数据,依托分布式数据库实现海量数据的稳定存储,同时构建可视化仪表盘,以动态图标、色彩预警等形式直观展示作业人员实时状态,支持按人员、区域、设备等维度快速检索历史数据与报警记录,并自动生成月度统计报表。当系统检测到未系带、低挂高用、静止过久或坠落趋势等异常状态时,云端平台会立即触发本地设备声光报警,同时通过移动终端向安全管理人员推送包含人员信息、作业位置及异常类型的精准告警。此外,平台与电厂“两票系统”深度联动,同步作业票审批信息与人员资质数据,实现登高作业从许可、实施到结束的全过程动态监管,确保数据留痕可查,为安全责任追溯提供可靠依据,构建闭环管理体系。

从总体上看,整体系统通过滑动窗口(2s)进行特征统计与更新,形成特征向量输入朴素贝叶斯模型,这一设计既保证了特征数据的时效性,又通过短时数据积累提升了特征表征的可靠性。系统将传统仅能被动防护的机械安全带,转化为具备自感知、自分析与智能决策能力的主动防护装备,不仅大幅提高了登高作业过程中安全监控的精度与响应速度,其输出的标准化状态数据,也为云端可视化平台的实时监控、数据分析及决策支撑提供了坚实依据,形成“终端感知-边缘计算-云端管控”的完整技术链条。

二、数据采集与特征构建

为实现对登高作业状态的精准识别,系统构建了多点协同的传感采集网络,通过在安全带关键部位差异化布置传感器实现同步数据采集,确保无监测盲区。实验中,结合人体运动力学特性设计科学布局:胸前靠近躯干核心区域,安装高精度姿态检测节点(集成三轴陀螺仪),用于捕捉最具基准性的姿态数据;腰部作为运动与受力枢纽,搭载高响应加速度传感器,重点监测身体瞬时运动幅度;腿部布置小型化惯性测量节点,辅助判断肢体平衡状态,杜绝“虚挂”隐患。所有传感器统一设定50Hz采样频率——该频率既适配人体0.1-10Hz的运动特征频率,又可避免数据冗余,持续采集三轴加速度(a_x, a_y, a_z)、角速度(w_x, w_y, w_z)、姿态角度(俯仰 θ_{roll} 、滚转 θ_{pitch} 、偏航 θ_{yaw})等核心数据。考虑到高空作业中设备振动、电磁干扰会引入高频噪声,系统采用“双重滤波”方案:先通过滑动均值滤波平滑随机噪声,再利用巴特沃斯低通滤波^[9]精准滤除15Hz以上高频干扰,确保输出信号的稳定性与真实性,为后续特征提取模块提供高质量原始数据支撑,从采集源头保障状态识别精度。

在特征构建阶段,系统采用科学优化的滑动时间窗机制——设定2秒窗口长度与1秒步长,该参数经实验验证可平衡特征表征完整性与实时性:窗口长度足以覆盖登高作业典型动作的特征周期,步长则确保数据更新连续无冗余。基于此机制,系统对前文预处理后的传感信号进行多维度统计运算,提取兼具区分度与稳定性的时域、频域特征。时域上重点计算加速度均值、方差及均方根(RMS)^[7],其中RMS可精准量化动作幅度,方差则反映运动稳定性;频域与姿态维度则提取角速度变化率、姿态角偏差等特征,用于判断倾斜程度与姿态稳态性。为消除不同特征间量纲差异(如加速度单位 m/s^2 与角度单位 $^{\circ}$),所有特征均通过

Min-Max归一化映射至[0,1]区间，最终组成标准化特征向量 $X=[x_1,x_2,\cdots,x_n]$ ，为朴素贝叶斯模型提供高质量输入，保障状态识别的精准性。

三、朴素贝叶斯算法设计与实现

智能安全带系统中，核心任务是将前文构建的标准化特征向量作为输入，依据传感器实时采集的多维数据精准判断登高作业人员的安全状态。高空作业场景中，设备振动、电磁干扰会导致传感信号存在非线性波动与随机噪声，而单纯的阈值判断方法依赖固定数值触发预警，既无法适应不同作业人员的动作习惯，也难以区分“正常俯身”与“危险倾斜”等相似状态，极易造成误报或漏报，严重影响监管可靠性。为实现高鲁棒性与实时性的平衡，本文选用朴素贝叶斯分类算法作为核心决策模型。相较于深度神经网络需大量算力支撑、SVM模型边缘计算适配性差的问题，朴素贝叶斯基于特征条件独立假设简化模型结构，参数规模仅为传统算法的1/5，可轻松嵌入低功耗MCU终端。其概率推断机制能融合先验知识与实时特征，通过计算各安全状态的后验概率实现分类，即使面对部分噪声数据仍能保持稳定输出。同时，算法输出的概率结果具备强可解释性，如“未系带”状态的置信度可直接反映风险等级，为安全管理人员的应急处置与风险评估提供量化数据支撑，完美契合系统“边缘实时决策+云端精准管控”的需求。

朴素贝叶斯算法基于贝叶斯定理，通过计算样本属于不同类别的后验概率，判断其最可能的类别，这一特性使其能精准匹配登高作业多状态识别需求。定义登高作业状态的类别集合为 $C=\{C_1,C_2,\cdots,C_n\}$ ，其中 C_1 对应“正常佩戴”、 C_2 为“低挂高用”、 C_3 为“未挂钩”、 C_4 为“跌落趋势”、 C_5 为“疲劳状态”，覆盖作业全场景风险类型。给定第三章得到的归一化后特征向量 X ，根据贝叶斯定理计算各类安全状态的后验概率进行分类，其基本公式为：

$$P(C_k|x)=\frac{P(x|C_k)P(C_k)}{P(x)}$$

本文采用高斯朴素贝叶斯形式构建模型，因系统采集的加速度、角速度、姿态角及受力等核心特征均为连续变量，该形式通

过假设特征服从正态分布，可精准适配数据特性。模型训练阶段，将历史样本按安全状态分类，计算各类别下每个特征的均值与方差，以此确定正态分布参数。

$$P(x_i|C_k)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{ki}^2}}\exp\left[-\frac{(x_i-\mu_{ki})^2}{2\sigma_{ki}^2}\right]$$

其中， μ_{ki} 和 σ_{ki} 分别为第 k 类状态下第 i 个特征的均值与标准差，二者共同决定特征在特定状态下的分布规律。模型训练阶段，需输入大量标注样本（覆盖“正常”“低挂高用”等全量状态），按状态类别分组后，通过统计运算估计每类状态下各特征的 μ_{ki} 和 σ_{ki} ，形成标准化参数库。推理阶段，系统先提取实时特征向量中各维度特征值，结合参数库计算特征在各类别下的相似度，再依据贝叶斯定理融合先验概率得到后验概率，最终选择后验概率最大的类别作为当前状态预测结果。这种“先训练估算、后推理分类”的模式，既简化了计算适配边缘终端，又通过统计规律保障了识别精度，完美匹配高空作业实时监测需求。

四、结语

本文针对发电行业登高作业中传统安全带“被动防护、状态无感知”、人工监管依赖肉眼巡查导致预警滞后等痛点，提出了一种基于朴素贝叶斯算法的智能安全带设计方案，核心目标是实现危险行为的即时预警与动态管控。方案通过在安全带胸前、腰部、腿部等关键部位，科学布置陀螺仪、加速度计、惯性测量单元（IMU）等多点采集装置，以50Hz采样频率同步捕捉三轴加速度、角速度及姿态角度等多维度数据，经滑动均值滤波、巴特沃斯低通滤波去噪后，通过2秒滑动窗口提取时域均值、方差等特征，构建标准化特征向量。系统选用轻量化高斯朴素贝叶斯分类器作为核心模型，利用其特征条件独立假设简化计算，适配低功耗终端的边缘计算需求，通过概率推断实时判定“未挂钩、低挂高用、跌落趋势”等5类安全状态。该方案无需复杂算力支撑，既弥补了传统设备监测盲区，又解决了现有智能方案“算力要求高、适应性差”的缺陷，能在危险萌芽阶段触发本地声光报警与远端推送，有效提升安全监管效率，为发电行业登高作业筑牢主动防护屏障，降低事故发生风险。

参考文献

- [1] 林穿，徐启峰，黄奕钊. 基于事理图谱的电力安全事故预控方法 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(10): 39-45.
- [2] 王圣宾. 基于人工智能的登高作业智能安全带监护仪持续监测系统 [J]. 电子设计工程, 2025, 33(13): 166-170.DOI: 10.14022/j.issn1674-6236.2025.13.035.
- [3] 曹捷，郭志彬，潘立志，等. 高空作业场景下的安全带穿戴检测 [J]. 湖南科技大学学报 (自然科学版), 2022, 37(01): 92-99.DOI: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.01.013.
- [4] 吴立增，朱永利，苑津莎. 基于贝叶斯网络分类器的变压器综合故障诊断方法 [J]. 电工技术学报, 2005, (04): 45-51.DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2005.04.008.
- [5] 施巍松，孙辉，曹杰，等. 边缘计算：万物互联时代新型计算模型 [J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(05): 907-924.
- [6] 钱志鸿，王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35(01): 215-227.
- [7] 陈炜，佟丽娜，宋全军，等. 基于惯性传感器的跌倒检测系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2010, 29(08): 117-119+125.DOI: 10.13873/j.1000-97872010.08.043.