

面向卫星通信地面站点的自动除雪系统设计与安全保障策略研究

李志明, 李志宇, 尹小彬

国家管网集团北京管道有限公司山西输油气分公司, 山西 忻州 034000

DOI: 10.61369/SSSD.2025150042

摘 要 : 为应对高海拔高纬度地区突发性降雪对长输油气管道通信卫星运行的威胁, 本文针对现有除雪装置依赖人工、缺环境感知与自动响应的缺陷, 提出融合智能感知、动态决策与多重安全保障的自动除雪系统。当前长输油气管道站场除雪仅能人工远程启停, 无法在突发降雪时自动除雪。系统设计上, 通过多源传感器实时采集降雪、积雪及设备温度数据, 精准预测降雪风险并进行优先级调度。安全保障策略上, 构建“监测-控制-应急”三层防护机制, 建立动态优先级调度模型确保高负载信道优先除雪。本研究为长输油气管道卫星通信设施在极端气候下运行提供技术支撑, 提出的多级安全防护策略减少了卫星通信中断异常事件, 提高了 SCADA 系统数据稳定性, 保障了长输油气管道安全平稳运行。

关 键 词 : 卫星通信; 自动除雪; 安全保障; 异常事件

Satellite Communication Ground System Protection in Snow Environments: Automatic Removal System Design and Safety Strategies

Li Zhiming, Li Zhiyu, Yin Xiaobin

Shanxi Oil and Gas Transportation Branch, PipeChina Beijing Pipeline Company, Xinzhou, Shanxi 034000

Abstract : To address the threat of sudden snowfall in high-altitude and high latitude areas to the operation of communication satellites for long-distance oil and gas pipelines, this paper proposes an automatic snow removal system that integrates intelligent perception, dynamic decision-making, and multiple safety guarantees, addressing the shortcomings of existing snow removal devices that rely on manual labor, lack environmental perception, and automatic response. The current long-distance oil and gas pipeline stations can only be manually started and stopped remotely for snow removal, and cannot automatically remove snow in case of sudden snowfall. In terms of system design, real-time data on snowfall, snow accumulation, and equipment temperature are collected through multiple sensors to accurately predict snowfall risks and prioritize scheduling. In terms of security protection strategy, a three-layer protection mechanism of "monitoring control emergency" is constructed, and a dynamic priority scheduling model is established to ensure that high load channels prioritize snow removal. This study provides technical support for the operation of satellite communication facilities for long-distance oil and gas pipelines in extreme weather conditions. The proposed multi-level safety protection strategy reduces abnormal satellite communication interruptions, improves SCADA system data stability, and ensures the safe and stable operation of long-distance oil and gas pipelines.

Keywords : communication satellite; automatic snow removal; security guarantee; abnormal events

引言

长输油气管道卫星通信系统由通信卫星和地球站组成, 通过无线电通信实现地面站点与卫星双向信号传输。它是我国地面、海上油气生产 SCADA 系统数据主要传输方式之一。^[1] 地面站点作为关键终端, 由天线、馈源等构成, 承担信号发射、接收等功能。地面站点发射上行链路信号, 经卫星转发后通过下行链路传至目标站点或终端, 构成通信链路。地面站点性能决定通信质量, 其天线增益等参数受扰会导致信号衰减等问题, 如天线反射面形变、馈源受潮等情况。低轨卫星星座对地面站点动态跟踪能力要求极高, 所以地面站点是保障通信效能的核心基础设施。但雨雪等恶劣天气影响地面站点, 制约了卫星通信稳定性^[2]。

雨雪天气影响通信质量, 主要体现在物理覆盖、信号衰减和设备劣化三方面。积雪会降低天线增益、加剧电磁波散射; 降雨引发的

雨衰效应会恶化信噪比；雨雪渗透可能引发短路或绝缘失效，低温下馈源结冰会破坏极化匹配，融雪时冰水混合物会导致天线驻波比异常，威胁通信链路稳定，甚至造成关键服务中断。针对雨雪干扰，当前研究围绕预测预警、材料防护和主动除雪展开。预测预警方面，浙江大学的公路动态感知系统可用于地面站点环境监测，但依赖高精度传感器和高算力平台；材料防护上，相控阵天线采用复合材料与防水涂层补偿指向偏差；主动除雪有碳纤维电热膜融冰、激光清障仪气化冰雪，但存在能耗高和器件老化问题。现有保障研究存在能耗与成本高、极端偏远环境适应性差和系统集成性低等问题。因此，本文综合考虑地面站点工作机制，结合故障机制和类型，设计环境动态采集系统和自动除雪装置，实时采集数据；融合多源信息，自适应控制除雪装置，提升通信效能；构建多维高效的安全保障策略。

一、卫星通信地面站点故障分析

卫星通信系统中地面站点作为天地信息交互的核心节点，其运行稳定性直接决定了通信链路的可靠性。根据系统运行机理与故障诱因，地面站点故障可归纳为硬件失效、软件异常、环境干扰等，各类故障的产生与应对机制呈现出显著的差异性。

（一）故障分类与产生机制

硬件失效源于卫星通信系统物理器件性能衰退或结构损伤，是地面站点主要故障类型。天线机械形变或装配偏差会使波束指向失准，引发信号强度衰减与信噪比劣化；电缆组件接头氧化与屏蔽层破损会引入寄生电容与电磁泄漏，导致信号畸变与误码率攀升。软件异常表现为参数配置失当与系统兼容性冲突，有隐蔽性与可复现性。卫星调制解调器频率设置错误会导致信号解调失败，极化模式参数失配会使电磁波能量利用率骤降。环境干扰对地面站点影响有时空异质性，作用机理涉及电磁波传播特性改变与设备物理状态劣化，如 Ku/Ka 频段信号在雨雪天气受水滴散射效应影响，导致链路预算余量不足。

（二）积雪对地面站点的影响机制

积雪覆盖影响卫星通信地面收发系统，表现为改变电磁波传播特性和劣化设备物理状态。积雪环境下，天线系统的机械结构与电磁性能受显著干扰，积雪层破坏电磁波口面场分布均匀性，高频段卫星通信系统受雪层散射和吸收效应更明显，信号衰减随积雪厚度增加非线性增长，严重时中断通信链路。在信号传输上，积雪干扰天线极化特性，水平极化信号因散射致极化失配，垂直极化信号因介质各向异性产生极化旋转，积雪融化形成的液态水膜会加剧电磁波吸收，使信号传输质量恶化，上行链路等效全向辐射功率下降，下行链路接收系统品质因数降低。

为解决积雪影响，需抑制积雪对天线电磁特性的扰动并快速除雪。当前策略结合加热干预与智能监测，在天线反射面背面预埋电热膜或安装加热吹风装置，用温控系统调节热场分布加速融雪。自动除雪装置融合物联网传感网络与边缘计算平台，部署传感器实时监测积雪厚度与结冰状态，主控单元触发加热器或高压气流喷射系统，如用空气储能装置驱动多向喷射器除雪，或通过旋角机构调整热风输送路径，形成全链路闭环控制体系，实现全天候自适应智能除雪。

二、地面站点自动除雪系统设计

针对高海拔高纬度偏远恶劣环境下的长输油气管道卫星通信

地面站点，人工除雪处理卫星通信系统故障有极高安全运营风险，如雨雪天工作人员及车辆往返站点易发生人员摔伤和交通事故，且效费比低、时效性低、成本高。结合雨雪自动感知、远程控制 and 智能除雪构建自动除雪系统意义重大。当前除雪装置仅能远程启停，无法自动检测突发性降雪并启动除雪系统。冬季降雪频繁时，为保障“冬供”期间长输油气管道通信卫星安全平稳运行，减少降雪致卫星异常中断事件，提高通信卫星安全稳定运行时长。

（一）自动除雪系统架构设计

自动除雪系统框架如图1所示，本系统采用模块化分层架构设计，围绕传感器数据采集、逻辑控制与执行终端协同构建，通过工业通信协议实现多组件互联。系统核心为 PLC（可编程逻辑控制器），作为中央控制单元，负责整合传感器输入信号并协调执行机构动作。传感器模块通过 485 转 232/IC 接口适配器接入 PLC，完成环境参数（如积雪厚度、温度、湿度）的数字化转换与协议兼容，其通信链路符合工业 RS-485 标准，支持多点连接与长距离抗干扰传输。下位机采用单片机作为辅助控制器，与 PLC 形成主从冗余控制模式，通过 RS485 转 USB 模块实现与上位机的数据交互，构成“传感 - 控制 - 人机交互”三层架构。

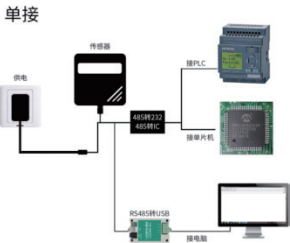


图1 面向地面站点的自动除雪系统架构

供电模块为全系统提供 10 - 30V 直流电源，通过独立电路保障传感器、通信模块与执行机构稳定运行。人机交互层依托电脑端组态软件，可实时显示传感器数据流等信息，还支持通过 USB - C 接口进行程序烧录与参数配置。系统扩展性体现在 485 总线拓扑结构，预留接口可增补除雪执行单元。整体设计结合工业级硬件与标准化通信协议，实现对卫星地面站天线积雪状态监测和执行终端闭环控制，为全天候通信保障提供可靠自动化解决方案。

此外，本系统可多个传感器组合在一条 485 总线使用，接入带有 485 接口的 PLC 或通过 485 接口芯片连接单片机，用转筒传感器配置工具配置和测试。系统通过 RS - 485 总线协议实现多传感器数据融合与设备协同控制。传感器阵列通过 485 转 232/IC 模块完成信号接口适配，将环境参数转换为标准电信号输入 PLC，形成多点通信网络。其中，485 转 232 模块解决长距离传输电磁兼容

性问题, 485 转 IC 模块用于协议芯片电气隔离。

PLC 作为中央决策单元，通过 Modbus RTU 协议与下位单片机建立主从通信链路，优化控制指令冗余校验与执行逻辑。单片机与上位机通过 RS485 转 USB 模块双向通信，可上传传感器原始数据和接收阈值参数更新指令。系统扩展性体现在 485 总线开放式架构，可灵活扩展传感器数量，预留执行终端接口支持多元除雪装置接入。整体设计融合分层控制与模块化通信，构建闭环链路，为卫星地面站天线积雪自适应清除提供标准化解决方案。

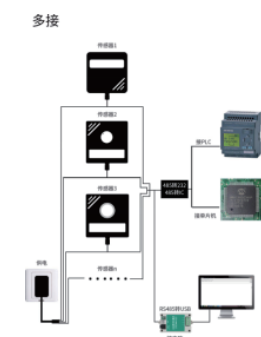


图 2 基于传感器多接的自动除雪系统架构

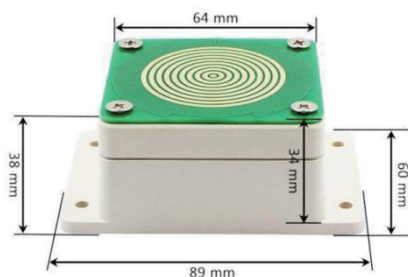


图 3 系统选用的雨雪传感器

系统选用的雨雪传感器如图3所示,用来检测自然界中是否出现了降雨或者降雪。该传感器采用交流阻抗测量方式,电极使用寿命长,不会出现氧化问题,可广泛应用于环境、温室、养殖、建筑、楼宇等的雨雪有无的定性测量。

（二）地面站点自动除雪系统特点

面向地面站点的自动除雪系统具有如下突出优势：(1) 可有效避免待机值班期间站场及阀室突发性降雪导致的卫星通信中断等异常事件；(2) 可有效避免地处高海拔高纬度偏远恶劣环境下的站场阀室异常降雪导致的卫星通信中断异常事件的发生；(3) 可有效提高地面站点现有卫星除雪系统的寿命和安全性，降低和消除系统长时间加热带来的设备老化以及用电安全隐患；(4) 可有效降低目前长期投运卫星除雪装置能源消耗从而降低企业能源碳排放指标。

（三）自动除雪系统外场实验与结果分析

为验证所设计自动除雪系统的有效性和在偏远地面站点的适应性,选取通信卫星实际站点,完成了自动除雪实验。其中,实验地点为山西省大同市浑源县东坊城乡常柴岭村陕京一线郝家寨2# 阀室,实验日期为:2025年3月15日,具体实验时间为9:00-12:00。实验站点环境变化过程为天气中雪转晴,气温 $-15\sim-5^{\circ}\text{C}$,湿度:82%,海拔高度为1232米。外场实验过程如

图4所示。



图 4 外场站点自动除雪系统实验图

首先清洁系统雨雪传感器表面,放置于通信卫星地面站点位置,观测并记录自动除雪系统状态。实验时间9:00,探测器在中雪中持续两分钟后设备发出有雨雪的报警提示,随之加热继电器启动电伴热带加热融雪。随后清理掉传感器表面积雪一分钟后设备发出无雨雪提示,随之加热继电器停止电伴热带加热融雪。

实验时间 11:00, 在小雪环境下重复了以上实验步骤, 设备均在预期时间内发出降雪报警并启动电伴热带加热融雪, 误报率为零。报警提示界面如图 5 所示, 在雨雪实验场景下, 系统正常报警并发出提示, 实现了预期的雨雪报警功能。依据以上实验数据, 该设备可有效减少高海拔高纬度地区异常降雪导致的卫星数据中断异常事件的发生, 提高长输油气管道 SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) 系统数据的稳定性, 为长输油气管道的安全平稳运行提供技术保障。

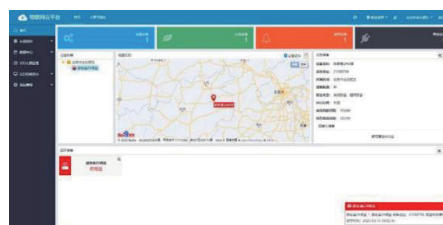


图 5 自动除雪系统报警提示界面

三、面向地面站点的安全保障策略

聚焦卫星通信系统全流程,结合自动除雪系统和现有环境安全策略^[5],构建面向地面站点的“监测-控制-应急”三层安全保障策略,提升卫星与地面信号传输效能。

（一）监测层：多源数据融合与精准感知

监测层是安全保障体系核心前端,融合多类型传感器与数据处理技术,构建全时段、全场景动态感知网络。雨雪传感器可测积雪厚度与密度。预警机制分级响应,积雪覆盖超阈值或温度场异常时,触发多级联动。还集成自检功能,定期校准传感器精度,通过冗余通道设计降低单点失效影响^[6-8]。

（二）控制层：动态调控与设备健康管理

控制层以系统运行稳定性与能效优化为核心,通过多闭环反馈机制精准调控。对高能耗设备,采用自适应功率分配策略,依积雪状态动态调整输出功率,低强度降雪用低功率辐射加热模式,暴雪时切换全功率融雪模式。过载保护模块监测供电线路

参数，结合预设模型自动执行负载均衡，防范设备损坏或电路故障。

（三）应急层：多模态协同与快速恢复

应急响应体系分级处置，针对不同突发状况制定差异化方案。常规应急场景，优先用高压气泵或温水喷淋装置局部除雪。遇设备级故障，自动切换机械除雪模式，向运维团队发送信息与报告。极端恶劣天气引发复合型故障，调用备用电源与应急通信链路，确保核心设备运行与远程控制通道畅通^[9-10]。

四、结 论

本文针对高寒地区卫星通信地面站点在突发性降雪环境中的运行稳定性问题，开展了面向自动除雪的系统设计与安全保障策

略研究。通过整合智能感知、动态决策与多重防护机制，构建了适应极端气候条件的自动化解决方案。在系统设计层面，提出多源传感器协同监测技术，实现对降雪强度、积雪厚度及设备运行状态的实时感知与精准预测，结合动态优先级调度模型优化除雪效率。在安全保障策略上，建立了“监测－控制－应急”三层防护体系，通过数据融合算法提升环境感知可靠性，为卫星通信系统的全天候可靠性提供更全面的技术保障。

参考文献

[1] 林敏，安康，欧阳键. 基于多天线中继的卫星－地面混合无线通信系统上行链路性能分析 [J]. 宇航学报，2013，34(8):7.
[2] 漆小刚，刘雷，尹曙明. 卫星通信应急管理人员胜任力评价指标体系研究 [J]. 安全，2023，44(01): 17-22+31.
[3] 刘朝曦. 基于嵌入式光纤光栅的智能蒙皮天线电补偿系统设计与实现 [D]. 西安电子科技大学，2017.
[4] 牟书香，吴芮，陈淳，等. 基于高分子电热膜的风电叶片复合材料试验件电热除冰性能研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料，2014(6): 6..
[5] 张振海，田小芳，蒋建伟，等. 城市轨道交通车站环境安全策略研究 [J]. 安全，2018，39(09): 26-28.
[6] 陈爱军. 应用 AMSU 资料监测中国地区积雪的初步研究 [D]. 南京气象学院，2003.
[7] 彭冬生，刘富，王震. 多功能除雪机的设计 [J]. 湖北汽车工业学院学报，2011.DOI:CNKI:SUN:HQCG.0.2011-02-020.
[8] 郭泉. 光伏组件发电效率影响因子的优化研究 [D]. 内蒙古工业大学，2015.DOI: 10.7666/d.D781784.
[9]Guangjun Gao,Jiabin Wang. 高速列车转向架防积雪导流结构研究 [C]// 第十届全国风工程与工业空气动力学学术会议 .2018.
[10] 杨有为 . 军用机场除雪车工作装置设计方案研究 [D]. 哈尔滨工业大学，2010.DOI:10.7666/d.D266209.