

低空电网维护机器人多传感器信息融合技术研究

毛致杰 刘葳林 刘康 李扬扬

烟台南山学院智能科学与工程学院, 山东烟台, 265713;

摘要: 低空电网维护机器人在电网巡检、故障检测和设备维护方面发挥着关键作用, 其智能化水平直接影响电力设施的安全性与运行效率。多传感器信息融合技术作为提升机器人感知能力的重要手段, 通过整合视觉、激光雷达、电磁检测等多种传感器数据, 提高故障识别的精准度和环境感知能力。本文围绕低空电网维护机器人多传感器信息融合的关键技术展开研究, 包括传感器选型与配置、数据采集与预处理、特征提取及融合算法优化。通过优化信息融合策略, 降低传感器冗余, 提高数据可靠性, 使机器人能够在复杂电网环境中实现自主巡检与精确作业。研究表明, 多传感器信息融合技术可显著提升电网维护机器人的智能化水平, 为构建安全、高效的智能电网提供技术支撑。

关键词: 低空电网; 维护机器人; 多传感器信息融合; 智能巡检; 数据融合算法

DOI:10.69979/3041-0673.25.05.014

电网设备运行的稳定性对社会经济发展具有重要影响, 低空电网因空间受限、环境复杂, 使巡检与维护面临较大挑战。传统人工巡检方式效率低、安全风险高, 难以满足现代电网智能化需求。低空电网维护机器人借助多传感器信息融合技术, 提高故障检测精度, 实现智能导航与自主作业, 提升巡检的安全性和可靠性。传感器数据的异构性、冗余信息及噪声干扰等问题, 影响了机器人感知和决策的准确性。优化信息融合策略, 增强机器人对复杂电网环境的适应能力, 成为提高巡检智能化水平的关键。

1 低空电网维护机器人系统构成

1.1 感知模块

感知模块承担环境数据采集、目标特征识别和设备状态检测等关键任务, 视觉传感器包括RGB相机、红外相机和高光谱相机, 分别用于电网设施识别、设备温度异常检测以及材料成分分析。激光雷达负责构建三维环境模型, 提高机器人在复杂线路中的导航与避障能力。电磁传感器结合超声波传感器, 实现电流异常监测和障碍物感知, 增强机器人在密集电网环境中的适应能力。惯性测量单元与加速度计、陀螺仪配合, 确保机器人在飞行、巡检和悬停过程中保持稳定。

1.2 执行机构

执行机构决定了机器人在巡检和维护任务中的作业能力, 机械臂采用多自由度设计, 能够灵活调整姿态, 执行清洁绝缘子、拧紧螺栓等精准操作^[1]。电动夹爪提升设备抓取、固定和更换能力, 使机器人在维护作业中具备更高的自主性。旋翼飞行模块优化了机器人在架空

线路巡检时的机动性能, 使其能够在狭窄空间精准悬停, 提高维护任务的覆盖范围和灵活性。

1.3 控制单元

控制单元作为机器人任务执行的核心, 集成了数据处理、任务规划和智能决策功能, 嵌入式计算平台依托高性能处理器和GPU单元, 实现多传感器数据融合与高速计算, 提高环境感知的实时性和精准度。实时操作系统优化任务调度, 提高巡检作业的高效性。人工智能算法增强了机器人在目标识别、故障判断和路径规划中的自主学习能力, 使其能够适应复杂电网环境, 并优化巡检路线, 提高作业效率。

1.4 通讯模块

通讯模块确保机器人与远程控制中心保持稳定的数据交互, 5G网络支持大容量数据高速回传, 使高清巡检视频和设备状态信息能够实时传输, 提高电网监测的精确度。Wi-Fi技术用于局部范围内的数据互联, 提升短距离通信效率。卫星通信增强了机器人在信号覆盖薄弱区域的远程控制能力, 确保数据上传和任务指令的稳定执行, 提升巡检作业的可靠性和连续性。

2 多传感器信息融合的基本原理

2.1 多层级信息融合模式

多传感器信息融合可分为数据级、特征级和决策级融合, 每种方式针对不同的数据处理需求, 数据级融合直接整合多个传感器的原始数据, 以提高测量的稳定性和精度, 例如惯性测量单元(IMU)与GPS数据的联合使用能够增强机器人定位能力^[2]。特征级融合则对不同

传感器的数据进行特征提取，并整合关键信息，例如视觉相机提取的边缘信息结合激光雷达的空间结构数据，可提高障碍物检测精度。决策级融合则是在各个传感器独立分析后，根据各自的判断结果综合决策，如红外成像检测设备温度异常，同时可见光相机识别到污损，系统通过融合分析判断是否存在故障，提高决策可靠性。

2.2 信息融合模型

多传感器数据融合过程中，需要采用数学模型进行优化处理，减少噪声干扰并提高数据一致性。贝叶斯估计通过计算先验概率和后验概率，提高数据的可信度，例如在电网巡检时，红外传感器可能会检测到设备过热点，但如果结合环境温度和历史数据，系统可以更准确判断异常是否由设备故障引起。卡尔曼滤波广泛应用于动态环境下的数据预测和误差修正，例如机器人巡检过程中，GPS数据可能因信号遮挡产生偏差，系统通过卡尔曼滤波结合IMU数据进行误差补偿，提高定位精度。粒子滤波适用于更复杂的非线性系统，在多源数据融合时，能够有效减少测量误差，提高巡检数据的稳定性。

2.3 时空同步与数据校准

多传感器信息融合依赖时间和空间的一致性，以确保数据精准匹配，不同传感器的采样频率存在差异，需要采用高精度时钟同步，统一时间戳，使数据时序保持一致。软件层面可利用插值算法对数据流进行对齐，例如调整视觉相机与激光雷达的数据同步，使其匹配同一时间维度，提高融合精度。空间校准通过标定传感器相对位置，减少测量误差^[3]。静态标定利用固定参考点计算传感器间的转换矩阵，如激光雷达与摄像头的联合扫描优化空间对齐。动态标定在机器人运行过程中通过实时测量和自适应调整，提高复杂作业环境下的融合精度，使机器人在巡检过程中保持稳定感知能力。

2.4 信息融合的可靠性

低空电网环境复杂，传感器数据可能受到外界干扰，甚至出现部分数据缺失，信息融合系统需要具备较强的鲁棒性，以确保巡检任务的稳定性。噪声抑制技术能够提高数据质量，常见方法包括均值滤波、小波变换等，例如视觉传感器在不同光照条件下可能会出现识别误差，可通过图像增强算法提高目标检测的可靠性。数据冗余补偿技术提高了系统的稳健性，当某个传感器失效或数据丢失时，可以利用其他传感器的信息进行补偿，如GPS信号丢失时，机器人可以依靠IMU和激光雷达数据维持定位能力，确保任务正常执行。

3 低空电网维护机器人多传感器信息融合技术

3.1 传感器选型与配置

低空电网维护机器人需要适应复杂的作业环境，因此必须选用高精度、高可靠的传感器来满足巡检与维护需求，视觉传感器采用500万像素以上的工业级RGB相机进行电力设备图像采集，同时配置640×512分辨率的红外相机，以精确测量设备温度分布，检测局部过热或绝缘损坏问题。高光谱相机可分辨材料光谱特性，筛查绝缘层老化迹象，提升故障预判能力。

激光雷达采用32线或64线机械式LiDAR，具备360°扫描能力，测距精度可达±2cm，为机器人提供高精度三维环境建模，确保路径规划的精准性。电磁传感器用于探测电网设备的局部放电信号，其检测频段覆盖10kHz-1GHz，可识别微弱电磁波异常，结合超声波传感器检测绝缘子微裂纹，实现精确诊断。IMU选用六轴惯性测量单元，结合GPS数据，定位精度控制在±5cm以内，确保机器人在巡检过程中保持稳定姿态，提高导航精度。

不同传感器的合理搭配能够弥补单一传感器的局限性，提高巡检效率和数据准确性，为了减少设备重量对飞行能力的影响，巡检机器人需采用轻量化传感器，例如将RGB相机与红外相机集成在同一模组中，以减少硬件负荷，提升续航能力。传感器的安装位置和角度需经过严格校准，以避免测量误差，提高系统的整体稳定性。

3.2 数据采集与预处理

多传感器数据的采集需要高效的同步机制，以保证不同数据流的时间和空间一致性，巡检过程中，RGB相机以30fps的帧率采集图像，红外相机以15fps的速率获取温度信息，而激光雷达的点云数据更新频率为10Hz，各传感器之间的数据差异需要通过时间同步系统进行调整。采用IEEE 1588 PTP（精确时间协议）进行全局时钟同步，确保各传感器的数据时间戳一致，提高融合精度。

数据预处理涉及去噪、异常值检测、数据对齐和格式转换，去噪处理采用自适应中值滤波和小波变换方法，以消除环境噪声，例如在激光雷达点云数据中，风雨等外部干扰可能会引入噪点，通过自适应滤波可去除无效数据，提高障碍物检测的稳定性^[4]。异常值检测利用基于统计模型的方法剔除GPS信号的短时漂移，防止因信号干扰导致机器人路径偏移。数据对齐方面，通过最近邻插值法补偿不同传感器的数据差异，例如激光雷达点云数据与摄像头图像的空间匹配，确保巡检信息在相同参考系下进行融合。

数据格式转换是预处理的重要环节，不同传感器的

数据格式需标准化为统一的数据结构,以匹配信息融合算法的输入需求。例如,将RGB相机的图像数据转换为灰度图,与红外相机的温度数据进行像素级匹配,以便进行设备表面温度异常分析,通过这些数据处理步骤,确保传感器数据的质量,提高巡检任务的精准性和稳定性。

3.3 特征提取与融合算法

特征提取是多传感器数据融合的核心环节,直接影响设备状态的识别精度和故障检测能力。视觉数据的特征提取采用Canny边缘检测、HOG(方向梯度直方图)等算法,从图像中提取绝缘子裂纹、金属氧化等关键特征。激光雷达点云数据通过DBSCAN聚类算法识别电网设施的三维结构,提高目标识别的准确性。电磁数据则采用FFT(快速傅里叶变换)分析信号频谱,检测高频放电特征,辅助识别电缆局部放电故障。

信息融合算法的选择决定了数据融合的精准度和计算效率。卡尔曼滤波适用于多传感器状态估计,结合IMU和GPS数据进行轨迹预测,提高机器人在复杂电磁环境中的导航能力。粒子滤波能够在非线性系统中优化数据,例如在高压线周围GPS信号受干扰时,结合激光雷达与惯性测量数据补偿定位误差,确保路径精确性。深度学习方法如卷积神经网络(CNN)能够对多模态数据进行特征提取,提高巡检目标识别的准确率,特别是在复杂环境下,提高设备缺陷检测的可靠性。

在多传感器融合过程中,采用基于信息熵的加权融合策略,提高数据融合的稳定性。例如,在故障检测中,红外相机与电磁传感器的融合采用权重调整机制,如果红外检测到的异常区域与电磁波异常信号重叠,则提高该区域的故障风险评分,使系统能够更精准地判断设备状态。

3.4 智能感知与自主决策

多传感器信息融合的最终目的是提升机器人自主感知能力,使其能够在复杂环境中进行智能决策,机器人在巡检过程中,通过实时环境感知模块分析电力设备状态,智能识别绝缘子污染、导线损伤、高温异常等故障。基于融合数据,机器人可自动评估故障等级,并调整巡检路径,以优先检查可能存在安全隐患的区域。

自主导航是巡检机器人的核心功能之一,机器人结合激光雷达、视觉SLAM和GPS数据进行路径规划,在电力设施密集区域,使用Dijkstra算法进行最短路径优化,提高巡检效率^[5]。在动态环境下,机器人采用基于强化学习的A*算法进行实时避障调整,确保巡检任务

顺利完成。例如,在风速达到5m/s以上时,机器人通过IMU实时调整姿态,以维持飞行稳定性,提高巡检数据的可靠性。

智能故障预警系统基于多传感器信息融合与历史数据分析,利用时间序列预测模型对设备状态进行趋势分析,提前识别潜在故障。例如,机器人根据红外相机的温度数据,结合电磁传感器的电流波动信息,通过LSTM(长短时记忆网络)预测设备可能存在的过载风险,并在系统中生成维护建议,确保电网设施的长期安全运行。

4 总结

低空电网维护机器人依托多传感器信息融合技术,实现了电网巡检与维护的智能化、精准化和高效化发展。多源数据的融合提升了机器人对复杂环境的适应能力,使其在高压线路、密集电网区域及恶劣天气条件下依然能够稳定作业。信息融合算法的优化推动了自主导航、故障检测和智能决策的进步,为电网智能运维提供了可靠保障。未来,随着人工智能、边缘计算及新型传感技术的深入发展,低空电网维护机器人将进一步提升数据处理能力,强化智能巡检模式,并在电网数字化转型中发挥更重要的作用。高效、智能、精准的巡检技术不仅提高了电力系统的安全性,也为能源行业的智能化升级奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 田亚娟,付大平,伍世辉.多传感器信息融合技术在机器人中的应用研究[J].自动化与仪表,2023,38(02):51-53+75.
- [2] 潘圆媛.多传感器信息融合技术在移动机器人障碍探测中的应用策略[J].产业与科技论坛,2023,22(2):45-47.
- [3] 何友,刘瑜,李耀文,等.多源信息融合发展及展望[J/OL].航空学报,1-27[2025-03-14].
- [4] 邵明志,何涛,朱永平,等.基于多传感器信息融合移动机器人导航定位研究[J].机床与液压,2023,51(05):8-13.
- [5] 常欢.基于多传感器信息融合的机器人技术研究与应用[D].西安理工大学,2023.

作者简介:出生年月:1997年8月2日,性别:男,民族:汉,籍贯:重庆,学历:研究生,职称:讲师,研究方向:低空电网维护机器人多传感器信息融合技术研究