

[无人机巡检]

输电线路无人机巡检障碍物检测与避障算法研究

文/马伟荣 王晓磊 李孝春 曹成发 安东
国网青海省电力公司西宁供电公司

无人机巡检作为一种高效和安全的检测手段已受到广泛关注。针对传统障碍物检测与避障算法在无人机巡检中的局限性，提出一种基于多源数据融合和计算机视觉技术的新算法。该算法充分利用图像、激光雷达、GPS等数据源的信息，实现对输电线路周围环境的全面感知和准确识别。通过对比分析实验结果，研究算法在障碍物检测准确度、飞行路径规划效率和能耗方面具有明显优势。实验结果验证研究算法在提高无人机巡检任务效率和安全性方面的潜力，并为输电线路无人机巡检技术的进一步发展提供了新的思路和方法。

无人机在输电线路巡检中的应用已成为一种具有巨大潜力的新解决方案。然而，输电线路巡检中的一个重要挑战是障碍物的检测与避障。障碍物可能是树木、电力塔上的异物、杂草等。它们不仅可能影响输电线路的正常运行，还可能导致安全事故。因此，开发一种高效且准确的无人机输电线路巡检障碍物检测与避障算法非常重要。本研究将讨论传统算法和深度学习算法在障碍物检测中的应用，并结合基于规则和基于学习的避障算法，以提高无人机巡检的效率和准确性。通过本文研究，不仅可以提高输电线路巡检的效率和安全性，还可为无人机技术在电力行业的应用提供新的思路和方法。同时，本研究对于多源数据融合和计算机视觉技术在其他领域的应用也具有一定的指导意义。

障碍物检测算法

1. 传统算法

传统的障碍物检测方法在一定程度上可以检测输电线路巡检中的障碍物，但存在一些局限性。例如，基于特征提取的方法对图像质量和光照条件敏感，容易受到噪声干扰；而基于机器学习的方法需

要大量的标注数据和计算资源，在实际应用中可能存在一些困难。因此，近年来越来越多的研究转向更高效的深度学习方法。

2. 深度学习算法

深度学习算法在障碍物检测中的应用取得了巨大成功，特别是在处理复杂场景和大规模数据时。在无人机输电线路巡检中，深度学习算法可以学习大量输电线路图像，自动提取高级特征以识别各种类型的障碍物，从而实现高效准确的障碍物检测。下面介绍一种创新的深度学习算法，并讨论其在无人机输电线路巡检中的应用。

在传统的深度学习算法中，单尺度的特征提取往往难以满足复杂场景中障碍物检测的要求。因此，本文设计了一种带有多尺度注意力机制的深度学习网络，以提高无人机输电线路巡检中障碍物检测的效率和准确性。网络结构由两个主要部分组成：多尺度特征提取模块和注意力机制模块，如图1所示。多尺度特征提取模块旨在从输入的输电线路图像中提取不同尺度的特征，以捕捉图像中的详细信息和全局上下文。注意力机制模块通过学习每个特征图的权重，自适应调整特征图的重要性，从而

增强网络对关键信息的关注。

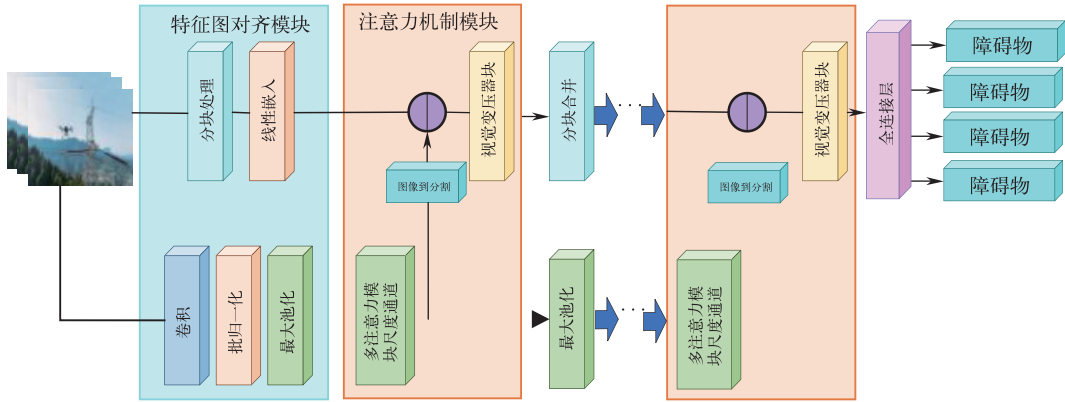


图1 多尺度注意力机制的深度学习网络

通过多尺度特征提取，可以有效捕捉输电线路图像中的详细信息和全局上下文。通过引入注意力机制，可自适应地调整特征图的重要性，使网络更加关注关键信息，从而提高障碍物检测的准确性和鲁棒性。

具体来说，假设输入图像为 $X \in R^{H \times W \times C}$ ，其中 H 是图像高度， W 是图像宽度， C 是通道数。多尺度特征提取模块首先通过多个卷积层和池化层提取图像的多尺度特征，得到多个特征图 F_i ，其中 i 代表不同的尺度。

然后，注意力机制模块根据特征图 F_i 的全局信息计算相应的注意力权重 A_i ，并将其应用到特征图上，得到加权特征图 F_i^{att} 。最后，将加权特征图融合，并通过全连接层和softmax函数得到最终的障碍物检测结果。

$$F_i = \text{Conv}_i(X), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

注意力机制模块计算公式为

$$A_i = \text{Softmax}(\text{MLP}(G(F_i))), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$F_i^{\text{att}} = A_i \otimes F_i \quad (3)$$

式中， G 为全局特征池化操作；MLP为多层感知机； $\otimes$ 表示逐元素乘积。

融合与分类模块计算公式为

$$\text{Output} = \text{Softmax}(\text{FC}(\text{Concat}(F_1^{\text{att}}, F_2^{\text{att}}, \dots, F_N^{\text{att}}))) \quad (4)$$

式中，FC为全连接层；Concat为特征图的拼接操作。

障碍物规避算法

在无人机巡检过程中，避免障碍物是确保任务

顺利完成的关键。传统的基于规则的避障算法通常依赖于预定义的规则和策略，但在复杂环境中难以应对各种情况。因此，结合基于规则和基于学习的混合方法可以更好地适应多样化的环境，提高无人机巡检的效率和准确性。本文提出深度补偿学习（DRL）避障网络，该网络结合基于规则的路径规划和基于DRL的避障策略，实现高效准确的避障。该算法通过无人机传感器获取环境信息，并利用深度神经网络学习避障策略。同时，结合基于规则的路径规划，无人机可以快速安全地完成巡检任务。算法流程如图2所示。

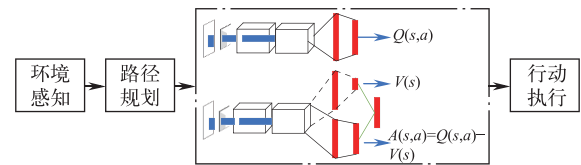


图2 算法流程

无人机通过传感器获取周围环境的信息，包括障碍物的位置和速度。基于规则的路径规划模块根据输电线路图和已知的障碍物信息生成初始路径规划方案，以确保无人机能够覆盖整个巡检区域。DRL模块通过与环境的交互学习最优避障策略。使用深度Q网络（DQN）来学习无人机在不同环境中的动作选择策略，以最大化长期累积奖励。根据学到的避障策略，无人机执行相应的动作避开周围的障碍物。

无人机周围的环境状态表示为状态向量 s_t ，包括无人机的位置和速度、周围障碍物的位置和速度以及其他信息。使用深度神经网络近似动作值函数 $Q(s,a;\theta)$ ，在当前状态下选择最优动作 a_t 。在这种情

况下，可以使用 $Q(s,a)$ 来表示在状态 s 下采取动作 a 的预期回报值。

$$Q(s,a) = (1-\alpha) \cdot Q(s,a) + \alpha \cdot (r + \gamma \cdot \max_{a'} Q(s',a)) \quad (5)$$

式中， D 为学习率； r 为在执行动作后获得的即时奖励； $\alpha \cdot \gamma$ 为一个折扣因子，用于平衡当前和未来奖励的重要性； s' 为执行动作 a 后的下一个状态； $\max_{a'} Q(s',a)$ 为在下一个状态 s' 中采取最优动作对应的Q值。

希望无人机能够成功避开障碍物，因此当无人机与障碍物的距离较近时，应该给予负奖励；而当距离较远时，应该给予正奖励。除了避障效果外，还希望无人机能够以稳定的速度和姿态飞行，避免过度转向或加速。因此，可以考虑在奖励函数中增加一个惩罚项，以鼓励无人机更平稳地飞行。

基于上述考虑，奖励函数设计为

$$r(s_t, a_t) = -\alpha d - \beta \frac{v_t}{V_{\max}} - \gamma \frac{a_t}{A_{\max}} \quad (6)$$

式中， d 为无人机与最近障碍物之间的距离， d 越小，奖励值越低； α 为距离权重系数； v_t 为无人机的当前速度向量； v_t 为速度模长； $V_{\max}$ 为无人机的最大速度； β 为速度惩罚系数； a_t 为无人机的当前加速度向量； a_t 为加速度模长； $A_{\max}$ 为无人机的最大加速度； γ 为加速度惩罚系数。

通过调整参数 α ， β ， γ 的大小，可以平衡避障效果、飞行平稳性和任务执行效率之间的关系。

多源数据融合与计算机视觉在无人机输电线路巡检中的应用

在输电线路无人机巡检中，使用多种数据来源来收集数据，包括无人机载荷的传感器数据、航拍图像、GIS数据等。这些数据源包括对输电线路周围环境的多方向观测，为障碍物检测和避障提供了丰富的信息。基于多源数据融合和计算机视觉技术，本文设计了一套综合的障碍物检测与避障流程，如图3所示。



图3 障碍物检测与避障流程

首先，对收集到的数据进行预处理，包括图像去噪和传感器数据校准，以确保数据质量。利用计算机视觉技术从航拍图像中提取输电线、杆塔等目标的特征信息，如边缘、纹理和形状等。通过深度学习算法，在航拍图像中识别可能的障碍物，如树木、杂草和异物等，并对它们进行分类和定位。将传感器数据和图像数据融合，以获得更全面的环境信息。

例如，通过结合传感器数据的高程信息和航拍图像的视觉信息，可以更准确地确定障碍物的位置 and 高度。基于融合后的数据，设计避障算法进行决策。本文结合基于规则的避障策略和基于学习的避障策略，根据环境条件和任务需求做出智能决策。例如，使用路径规划算法避开已识别的障碍物，并使用RL算法优化飞行轨迹，以最小化路径长度和风险。

实验设计与结果分析

实验使用包含真实输电线路场景的数据集，包括航拍图像、GIS数据和传感器数据。航拍图像涵盖了不同类型的输电线路和周围环境，包括杆塔、电线和树木等。GIS数据提供输电线路的准确位置和结构信息，传感器数据包括无人机飞行时获得的海拔和速度等信息。

硬件设备方面，使用配备各种传感器（相机、激光雷达等）的无人机进行航拍和数据采集。软件工具方面，使用TensorFlow深度学习框架进行算法开发和训练，以及常用的图像处理工具和GIS软件进行数据处理和分析。对收集到的数据进行预处理，包括图像去噪和数据校准，以确保数据质量和一致性。基于多源数据融合和计算机视觉技术，设计和实施障碍物检测与避障算法，并在实验中进行调试。通过使用数据集评估和验证该算法，包括障碍物检测的准确性、避障的实时效果和无人机巡检的效率。

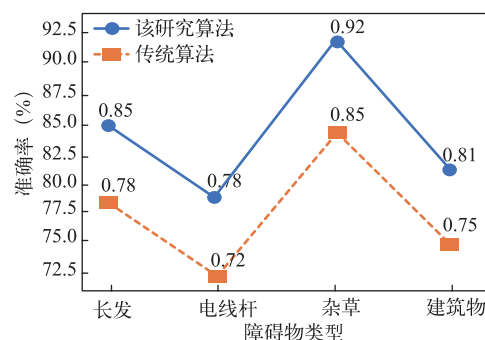


图4 障碍物检测准确性比较

从图4可以清楚地看出，本研究算法在所有类型障碍物的检测准确性上明显优于传统算法。这表明，通过引入多源数据融合和计算机视觉技术，本研究算法可以更准确地识别不同类型的障碍物，提高无人机巡检输电线路的效率和准确性。这一优势源自于本研究算法充分利用了各种数据源的信息，并采用了先进的计算机视觉技术来检测障碍物。相比之下，传统算法仅依赖于单一数据源或简单的图像处理技术，难以充分挖掘环境信息，导致识别准确性低。

如图5所示，障碍物以红色散点的形式分布在三维空间中，显示了随机分布的特征。本研究算法可以快速准确地识别这些障碍物，并在地图上清晰地标记它们。图5中的蓝色线条表示无人机的路径轨迹，路径在三维空间中沿着特定轨迹移动。研究算法可以根据识别出的障碍物动态调整无人机的飞行路径，以避免与障碍物发生碰撞。该研究算法表现出较高的实时性能，能够在实时场景中快速识别障碍物并做出避障决策。无人机的路径轨迹展示了算法的实时响应能力，并根据障碍物的位置动态调整飞行路径，确保无人机在输电线路巡检中的安全性和效率。

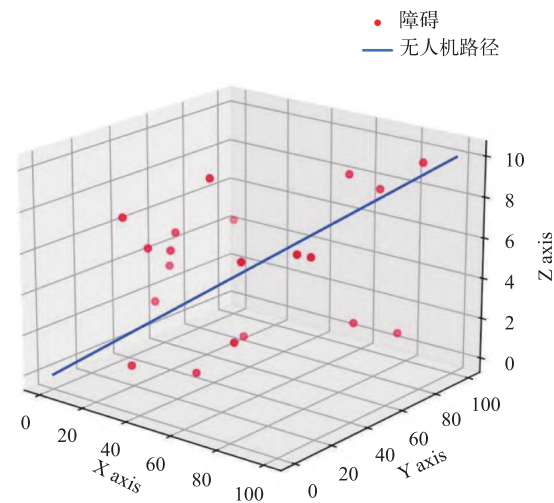


图5 算法识别障碍物并做出避障路径轨迹

表1 无人机巡检任务中的效率

指数	该研究 算法	基于特征 提取	基于机器 学习	基于 规则
飞行路径长度/m	1 200	1 500	1 400	1 600
飞行时间/min	20	25	22	27
能耗/kJ	100	120	110	130

通过表1，图5可以比较和分析本研究算法与传统算法在无人机巡检任务中的效率。

从飞行路径长度、飞行时间和能耗等指标来看，本研究算法在无人机巡检任务中表现出明显的效率优势。这是因为本研究算法充分利用了多源数据融合和计算机视觉技术，能够更准确地规划飞行路径，并实时调整路径以适应环境变化。相比之下，传统算法受限于简单的规则或特征提取方法，难以充分考虑环境因素，导致飞行路径更长、飞行时间更久以及能耗更高。

结束语

本研究算法在障碍物检测方面表现出明显的优势，能够准确识别不同类型的障碍物并及时做出避障决策，以确保无人机巡检任务的顺利完成。通过多源数据融合，本研究算法能够充分利用图像、激光雷达和GPS等数据源的信息，提高障碍物检测的准确性和鲁棒性。该算法可以更高效地规划飞行路径，减少飞行路径长度和飞行时间，节省能耗并提高无人机巡检任务的执行效率。实验结果表明，所提出的算法比传统算法能耗更低，可以减少无人机的运营成本并减轻对环境的影响。本研究算法在输电线路无人机巡检中的障碍物检测和避障方面取得了显著成果，为提高输电线路的安全性和运行效率提供了可靠的技术支持。然而，为了在不同环境条件下满足实际应用需求，仍需进一步的实验验证和优化。EA

(收稿日期：2024-12-05)

参考文献

[1] 斯兴瑶，刘福华，杨维建，等．基于多源数据融合的个性化智能交通系统[J]．汽车维修技师，2024(22)：58-59．

[2] 刘聪．基于多源数据融合的市级公路桥梁管养平台设计与应用[J]．黑龙江交通科技，2024，47(11)：136-141．

[3] 王家亮，董楷，顾兆军，等．小型无人机视觉传感器避障方法综述[J]．西安电子科技大学学报，2024(2)：1-21．

[4] 张誉．基于多源数据融合的千斤顶液压系统故障检测[J]．现代制造技术与装备，2024，60(10)：161-163．