

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2024.09.004

复杂空间燃气管道 辅助无人巡检技术的研究及展望

李 雪¹, 谢 波², 李昱昂¹

1.中国航天科工集团第二研究院二〇三所; 2.广西新奥能源发展有限公司

摘要: 燃气管道日常运行维护中, 在保证人员安全的前提下提高对复杂空间燃气管道巡检工作效率及巡检范围全覆盖显得尤为重要。本文通过对复杂空间燃气管道辅助无人巡检技术可行性研究, 评估3种无人设备在复杂空间燃气管道巡检工作场景中的性能指标, 找到最优无人巡检技术方案为无人机+履带式机器人联合巡检模式, 以此实验性结论指导优化开发辅助无人巡检技术, 有效提升复杂空间燃气管道的巡检质量, 保障燃气设施安全稳定运行。

关键词: 复杂空间; 燃气管道; 无人巡检; 巡检机器人; 管道巡检

1 引言

在燃气日常运行维护工作过程中, 既要确保人员的安全与健康, 又要确保巡检工作到位, 降低安全管理的风险, 提高巡检工作的效率及巡检范围全覆盖显得尤为重要。

复杂空间就是例如地下室、半地下室、设备层的室内有限空间, 巡检人员在复杂空间燃气管道的巡检工作中, 会遇到作业环境通风不畅、狭窄、管道布局复杂、地面有杂物、积水、光照不足、无线通信信号传输差、巡检人员携带各类检测装备进出困难等问题, 使得巡检项难以完全覆盖, 不利于巡检人员确定管线运行情况, 易产生误检、漏检现象, 巡检效率及质量降低, 巡检人员的安全存在一定风险。因此, 通过复杂空间燃气管道辅助无人巡检技术可行性研究, 评估3种无线型无人设备在复杂空间燃气管道巡检工作场景中的各项性能指标, 找到可用于复杂空间燃气管道巡检的最优无人巡检方案, 以实验性结论针对性开发研制相关无人巡检技术, 加强对复杂空间燃气管

道安全管理, 缓解巡检人员工作强度, 降低企业用工成本, 提升燃气管道的巡检质量, 巡检覆盖率, 有效提高燃气管道的安全运行能力。

2 国内外无人巡检相关技术现状及发展趋势

2.1 无人巡检技术

上世纪80年代, 工业强国先后开始了无人巡检技术的研究, 该项技术已应用到工业各领域, 例如美国、日本等。随着科学技术的进步, 自动巡检机器人已经成为取代传统人类作业的有效方式, 并获得了全球的广泛认可。

Ocean Infinity公司开发的自主海上风电场检测技术, 利用5G和卫星连接, 通过无人机群来自动检查风力涡轮机, 从而无需手动控制和人工检查。ABB公司生产的瓦斯检测机器人可以在石化厂、天然气厂站等场所进行气体泄漏检测, 帮助企业提高安全性和减少气体泄漏的损失。

国外无人巡检技术目前在安防巡检、电力巡检等

方面均已进入商业产业化程度。在石化燃气领域，开发更加有效的测量传感器和复杂环境下有效避障执行作业技术是目前仍需要解决的问题。

国内无人巡检技术虽起步较晚，但经过多年研究，相关技术也逐步取得了一定的发展成果，尤其是无人巡检技术在电力、煤矿行业中的应用逐步趋于成熟，显著减轻了巡检人员的工作负担，提升了工业生产安全性，并带来可观的社会及经济效益。

我国电力公司推出的第5代巡检机器人同时搭载了可见光、红外热成像、激光雷达、智能控制、高精度气体传感器等功能技术，能够快速、高效地巡检电网，实现了集中监控、信息交流归一化、识别电力设备异常状态等多类功能，大大提高了电力巡检效率和准确率，同时也减少了人工巡检中可能出现的疏漏和安全隐患。某泵房在2016年实现无人化巡检，采用巡检机器人的方式进行全天候巡检，故障检测率能够达到100%，不仅提高了环境内巡检的自动化程度，还提高了安全性。某煤矿2020年在矿井内引入了防爆式移动巡检机器人，实现对井下的无人巡检，搭载着多种传感器，能够进行自主判断、环境感知监测、系统联动移动等功能，提高了矿井内的自动化和智能化程度^[1]。

此外，国内无人巡检技术还在铁路巡检领域广泛应用，巡检对象包括线路设备、桥隧设备、防洪地段、路外环境，以及接触网外观、接触网零部件状态、外部环境和弓网配合运行状态^[2]。

2.2 复杂空间防撞击技术

国外的工业机器人技术相对成熟，起步较早并且在多种应用场景中都有成熟产品。针对无人巡检技术方向中的防撞击技术发展主要集中在两个方向：一是通过规划算法避开障碍物，二是使用防撞外壳来减轻碰撞影响。

Anthony Stenz在A*算法的基础上进行了改进，通过只检查最短路径上的下一节点或临近节点变化，优化了机器人在动态环境中的连续避障表现，Yun等人将遗传算法应用到机器人的路径规划中，显著提高了机器人在未知环境中避障的能力^[3]。另外，美国亚利桑那州立大学开发的SoBar充气式无人巡检设备，在碰撞障碍物时能够反弹并使用特质抓手抓住固定物，以防止坠毁。这种设备的4个螺旋桨采用可充气的聚氨酯涂层尼龙密封织物，有效吸收意外敲击和重击造

成的冲击伤害。Skycopte公司研发的Skycopte室内无人机以其球形整体设计和碳纤维材质覆盖，有效保护桨叶免受损坏，提高了其防撞能力。

国内的防撞击技术基本围绕着主动探测障碍物的功能，在防撞击材料或防撞击外罩等方式的被动式方式中鲜有涉足。国内无人巡检设备的主流防撞击系统均使用视觉传感器和超声波传感器来检测障碍物。但这些传感器在某些情况下可能会受到光照、颜色等因素的干扰。为了提升障碍物检测的可靠性和避障功能，国内开始引入激光雷达等高精度传感器^[4]。通过扫描周围环境，得到精确的障碍物位置和距离信息，从而帮助无人巡检设备在高速飞行中更好地避免碰撞。

通过对无人巡检技术、复杂空间防撞击技术的现状及发展趋势分析，当前无人巡检技术已经较为成熟，我们需要利用现有技术资源，跨界整合，解决目前复杂空间燃气管道巡检工作中存在的巡检人员难以到达、发生事故难以快速撤离等痛点问题，在复杂空间燃气管道巡检工作中辅助使用无人巡检技术进行巡检工作，从而保障复杂空间燃气管道设施安全运行，巡检人员人身安全。

3 无人设备性能对比及分析

3.1 产品说明书技术指标对比分析

结合复杂空间燃气管道巡检工作特点，通过对分析无线型无人设备各自在复杂空间燃气管道巡检工作中的技术指标优势，无人机、履带式机器人和六足机器人这3种无线型无人设备较为适合复杂空间内燃气管道的巡检，如图1所示。

对比3种无线型无人设备的最大速度、爬坡能力、设备体积、续航时间、导航能力、信号能力等性能指标，如表1所示。

通过对比，3种无线型无人设备各有优势，无人机能够在空中巡航，地形适应性更好，但在复杂空间中信号传输能力需要实测评估。履带式机器人因其优良的地面爬行能力和稳定性，适用于复杂地形的移动，但其在狭窄空间中的灵活性和避障能力可能受到限制。六足机器人则结合了良好的地面适应能力和灵活的运动方式，适合在复杂和不平整的地面上工作，



图1 无线型无人设备

表1 无线型无人设备性能指标

指标列表	无人机	履带式机器人	六足机器人
最大速度 (km/h)	7.2	6	1.2
爬坡能力	无限制	45° 越障30cm	45° 越障20cm
设备尺寸 (mm)	轴直径 352 高 138	长690 宽390 高190	长513.5 宽486.6 高198.8
续航时间 (h)	1	4	2
导航能力 (cm)	悬停定位精度 ± 2	定位精度 ± 20	定位精度 ± 50
信号能力	5G信号传输, 可跨墙通讯, 通讯距离100m	可跨墙通讯, 控制距离200m	可跨墙通讯, 控制距离50m

但其速度和续航能力需要实测综合评估。

3.2 实测技术指标性能对比分析

通过现场实地测试, 对比3种无线型无人设备的重量及体积、运动性能(速度、爬坡角度、越障能力和续航时间)、定位导航及信号传输能力等项指标验证, 情况如下。

3.2.1 重量及体积

(1) 无人设备的重量对其移动性能和应用范围具有直接的影响。无人机及六足机器人重量相较于履带式机器人较轻, 通常在复杂的地形条件下表现出更好的灵活性和通过性, 例如在地下室中, 无人机可以轻松地在管道和支撑结构间、爬梯穿梭, 或在复杂空间内进行上下移动, 而履带式机器人面对需要上下移动的地形单一或障碍物, 缺乏足够的机动性和适应能力, 限制了其在多变环境中的应用灵活性。然而, 较轻的重量也带来了一定的局限性。由于负载能力较小, 这些设备可能无法承载大型或重量较重的传感器, 限制了其在某些特殊应用场合的能力。例如, 设备可能无法配备高分辨率摄像头或重型传感器, 这在需要进行详细数据采集或高精度检测的任务中可能成为一个限制因素。

(2) 无人设备的体积大小直接影响到复杂空间燃气管道巡检现场的可达性和操作的灵活性。无人机及六足机器人体积相较于履带式机器人较小, 更易于

携带和部署, 能够适应狭窄或有限空间的巡检要求。这种特性使得设备能够进入常规手动巡检难以到达的区域, 例如管道夹缝、管廊入口等狭小环境。通过降低设备的体积, 巡检人员可以更为便捷地操控和操作设备, 减少在复杂工作环境中的安全风险, 同时提高操作的精准度。

无人设备的重量和体积对无人设备的整体性能和效用的影响巨大, 这直接决定了设备在巡检场地的通过性以及现场巡检人员的携带和运输能力。通过无人设备重量和体积实测分析对比, 无人机在巡检范围及场景适应性, 优于其它两种设备。

3.2.2 运动性能

(1) 速度是衡量无人设备在执行任务时的基本运动能力。实测中无人机及履带式机器人拥有较高的移动速度, 可以显著提高设备的响应速度和任务执行效率, 而六足机器人相对运动速度较慢。

(2) 爬坡角度及越障能力是无人设备能够攀爬斜坡或不平地面的能力指标。这一指标直接影响设备在不同地形上的通过性和操作灵活性。无人机这类空中巡检设备越障能力极强, 对于爬坡角及越障高度基本无限制, 能够有效地穿越障碍物或避开障碍物, 适应各类地形, 履带式机器人和六足机器人相较于无人机的地形适应性相对较弱, 但也具备较大的爬坡角度

及越障高度，意味着设备能够应对较为复杂和崎岖的地形，提升了其在实际巡检环境中的适用性和设备的自主运行能力。

(3) 续航时间是评估无人设备在单次充电或能源供给下可以持续运行的时间长度。3种无人设备实测续航时间均满足说明书额定时间。履带及六足机器人实测续航时间长，从而提高了设备的工作效率和使用便捷性。而无人机这类空中巡检设备由于续航时间过短可能会限制设备的应用范围和操作时间，特别是在长时间或大面积巡检任务中。

通过设备运动性能实测分析对比，这些指标相互作用，无人机综合能力最强，履带式机器人稍弱，2种无人设备能够适应绝大部分复杂空间燃气管道巡检工作的需求。

3.2.3 定位导航及信号传输能力

(1) 无人机相对于履带式及六足机器人具有更加精确的厘米级的定位技术，能够精确定其自身位置，从而更加有效地规划巡检路径并定位管线问题，提高了巡检的效率和准确性，有助于及早发现潜在的安全隐患。

(2) 信号传输能力直接影响了数据的实时性和完整性。履带机器人相对于无人机及六足机器人具有更加稳定的信号传输系统，确保无人巡检设备能够及时传输巡检过程中收集到的数据和影像，这对于后续分析和决策制定至关重要。稳定的远距离信号传输还可以支持远程操作和监控，使操作人员能够实时了解设备的状态和环境变化。

通过无人设备在定位导航和信号传输能力实测分析对比，无人机及履带机器人各有优势，综合能力优秀，在复杂空间环境表现出色。

综上所述，3种无线型无人设备在复杂空间燃气管道巡检工作应用中各有优势和限制。①无人机主要优势在于其空中巡航能力和设备的轻便灵活，这使其适合于需要精确定位、快速响应和灵活覆盖的任务，例如大型工业设施的初步巡视或高空难以接触的点位巡检中，快速获取高分辨率的图像数据，帮助检测人员识别潜在的问题区域，但需要注意环境影响和飞行稳定性的问题，以及在长时间运行或大范围巡检任务中，无人机需要频繁的充电或更换电池，影响任务的连续性，并且其起飞时产生的噪声和扬起的灰尘会对

周围环境的空气质量和成像造成一定影响。②履带式机器人具有较长的续航里程、信号通信能力以及强大的运动负载能力，在不规则地形和大坡度上都能保持稳定运行状态，具备良好的牵引力和通过能力，能够有效克服地面上的常见障碍，如积水、堆积杂物和地面坑洼。然而，遇到爬梯和围栏等障碍物难以通过。③六足机器人相对于履带式机器人，其设备体积更小，通过性更强，运动姿态更为灵活，6条腿部关节结构赋予其优异的运动适应性，能够在复杂的地形中采用匍匐、攀爬等多种形式进行稳定移动并克服障碍物，例如狭窄的地下通道、支架密集的设备层或其他难以进入的空间，能够有效地探测管道壁面的状态、损坏或其他异常情况。然而，由于运动速度相对较慢以及信号传输距离有限，在长距离大面积巡检中存在效率较低、及时性差、通讯断联的问题，以及同样在遇到上下爬梯或围栏等需要垂直爬升的场景时存在难以通过的问题。

4 无人巡检技术优化开发研制展望

本文通过3种无线型无人设备的各项指标、现场测试实验的对比分析，建议复杂空间燃气管道巡检需求下最优的无人巡检技术方案为无人机+履带式机器人联合巡检模式。未来的研究将进一步探讨智能识别方法、激光雷达点云成像以及密闭空间信号传输等技术与无人巡检技术的有效融合，通过此次无人设备实验性结论指导优化开发无人机+履带式机器人联合巡检作业技术，解决复杂空间燃气管道巡检的痛点问题，使其能够适应复杂空间燃气管道巡检工作，有效检测管道泄漏、环境数据及设备设施的运行状态，确保燃气设施和巡检人员的安全，为各类工业和公共设施的安全运行提供辅助技术支撑，推动无人机+履带式机器人联合巡检作业技术在燃气行业巡检工作中的应用。

5 结语

本研究通过对比分析复杂空间燃气管道巡检工作下的3种无线型无人设备核心性能指标评估及现场实测情况的分析对比，对3种无线型无人设备的应用效