

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2025.06.008

“陆空一体化”智能巡检模式 在城镇燃气管线泄漏检测中的探讨与实践

曹连伟, 王 君, 赵修智
山东港华燃气集团有限公司

摘 要: 天然气作为清洁能源伴随城市发展不断扩大, 燃气管网规模日益庞大, 燃气泄漏风险与日俱增。本文通过分析传统燃气管线泄漏巡检方式的优势及不足, 就人、车、犬、无人机为一体的“陆空一体化”新型智能巡检模式的应用及实践进行论述, 通过高精度巡检、智能化管理、AI识别等技术, 全方位建立数字化、信息化燃气管线巡检工作新模式, 有效防范和遏制燃气泄漏爆炸等安全事故发生。

关 键 词: 燃气安全; 泄漏检测; 无人机巡检; 智能巡检

1 前言

根据住房和城乡建设部发布的《2023年中国城市建设统计年鉴》, 截至2023年年底, 我国城市天然气管道长度已超103.9万km, 城市天然气用气人口已超4.71亿人。随着城镇燃气规模化发展进程加速, 由管道腐蚀引发的密闭空间燃气聚集等泄漏隐患日益凸显, 如何实现泄漏隐患的高效检测与精准识别, 已成为提升燃气企业本质安全水平的必由之路。针对城市燃气管线高效泄漏检测与精准化定位的迫切需求, 山东港华创建了人、车、犬、无人机为一体的“陆空一体化”精细化智能巡检模式, 创新了燃气管线巡视、检测、处置和管理一体化的工作流程。

2 传统燃气泄漏检测方式

传统燃气泄漏检测方式主要有人工徒步检测和检

测精度为PPM级车载泄漏检测方式, 这两类检测方式的原理、优缺点如下。

2.1 人工徒步检测的优势与不足

人工徒步检测主要是利用检测人员手持全量程甲烷气体检测仪、乙烷分析仪、激光甲烷摇距仪等泄漏检测设备, 沿敷设于人行道、绿地、庭院等区域的燃气管线进行泄漏检测。作业人员对运行管道及附属设施以及3m范围内的道路接缝、路面裂痕、土质地面或草地、其他市政管道井或管沟等进行检测, 当全量程甲烷气体检测仪或激光甲烷摇距仪进行报警后, 再利用乙烷分析仪对气体进行分析, 其中存在乙烷成分即判定为燃气泄漏。

人工徒步检测是当前城燃企业普遍使用的泄漏检测方式, 该方式操作简单、设备成本低, 可以检测庭院、绿地及车载检测仪无法检测的其他狭小空间。不足的是面对庞大的管网系统, 该检测方式检测区域范围小、检测效率低。

[第一作者简介] 曹连伟, 山东港华燃气集团主要负责人, 高级工程师, 一级建造师, 注册安全工程师, 从事燃气企业工程建设、技术管理、安全管理工作。

2.2 PPM级车载泄漏检测方式的优势与不足

2012年—2018年间,公司陆续引进PPM级泄漏车载检测设备6辆,包括1辆FID火焰电离检测设备、1辆激光遥距对射检测设备、1辆泵吸式车载燃气检测设备、2辆车载式OMD光学甲烷检测设备及1辆车载式顶置激光甲烷检测设备。其中激光类设备主要采用红外激光脉冲原理,不同的是顶置激光检测设备可以360度旋转,对周边各角度范围内燃气管道进行检测,而其他车载激光检测设备只能检测单一方向。FID检测设备是以氢气在空气中燃烧的火焰为能源的机动车,利用化学电离,产生正负离子,在电场作用下,定向运动形成微弱的离子流,经过高电阻后形成电压信号,测量放大后得出甲烷气体的浓度。

相比人工徒步检测方式,PPM级车载泄漏检测方式具有以下优势:

(1) 检测效率较高,PPM级车载系统检测时速一般为30km/h,远远高于徒步测量检测速度,提高了检测效率。

(2) 检测范围较大,PPM级车载检测系统可对市政主干路、次干路等车辆密集,人员难以巡检的区域进行快速检测,有效避免徒步检测人员在市政马路上检测的不安全行为,与徒步测量的有效配合是保障燃气管网全覆盖检测的必要手段。

在实际使用过程中,PPM级车载泄漏检测方式仍存在很多不足,主要表现在:

(1) 检测盲区多,PPM级车载泄漏检测方式受限于检测原理及检测方式,仅适用于市政主、次干道下方敷设的燃气管道及附属设施检测,不适用于辅路、绿化带及小区内管道及燃气附属设施的检测,无法自主完成管线全覆盖检测。

(2) 无法检测气源中是否含有乙烷气体,天然气泄漏需要人员利用乙烷分析仪进一步识别,而往往泄漏报警时,检测区域是一个较大范围,难以精确定位,后续燃气识别工作量大,对人员素质要求高。

目前该类型检测车辆的使用主要配合人工徒步检测方式,完成徒步检测困难且效率低的市政主干路、次干路埋地管线的检测任务,出现报警时再由检测人员进行泄漏判别,确定泄漏位置,人车配合达到燃气管网全覆盖检测。

3 “陆空一体化”智能巡检模式

“陆空一体化”智能巡检模式是利用无人机空中巡检、PPB级车载检测系统和燃气嗅探犬灵敏的嗅觉,搭建的“陆空一体化”新型联合泄漏检测模式。通过作业规划、智能调度、智能监测、AI识别等技术方式,达到立体感知、精准查源等功能,助力管网巡检工作提质增效,实现高效巡检和便捷管理。

3.1 无人机空中巡检

无人机空中巡检是指根据各类燃气巡检场景需求,综合使用复合翼智能机系统、多旋翼智能机系统、小型旋翼无人机系统等,搭载双光吊舱、机载激光甲烷监测设备等载荷,实现全天候对燃气管线安全运行情况进行巡视巡检。无人机空中巡检依托移动运营商4G/5G宽带网络通信能力和自组网能力,互联网集中控制和载荷数据传输,将无人机飞行状态信息、设备监测数据和视频数据实时上传;在固定机场端,机场依托既有有线网络系统实现与平台互联,上报状态信息,同时接收指挥中心的管控任务指令,实现航线智能规划、任务智能调度、隐患自动识别,如图1所示。

3.1.1 无人机空中巡检执飞准备工作

无人机空中巡检执飞准备工作通常分为3个阶段:

(1) 线路勘探。首先,通过燃气管网GIS地图信息获取巡检片区燃气管线分布图,明确巡检重点区域和重要设施,掌握地形地貌资料。然后,由具备相关飞行资质证书的无人机操控人员联合燃气巡线人员进行现场航线勘探,排查可能影响无人机飞行的障碍物,确定障碍物的位置、高度、范围等信息,并综合考虑空域申请以及现场环境等因素,制定飞行方案,确保安全执飞。

(2) 航线任务规划

①确定巡检目标。明确需要巡检的任务类型,如市政管线、庭院管线等。

②航线设计

市政管线(以龙鼎大道为例):南至二环南路高架入口,北至旅游路,规划直线巡检航线、“之”字形航线,巡检覆盖管线两侧各5m范围,计划用时35min。

庭院管线(以济南市某小区为例):将小区划分

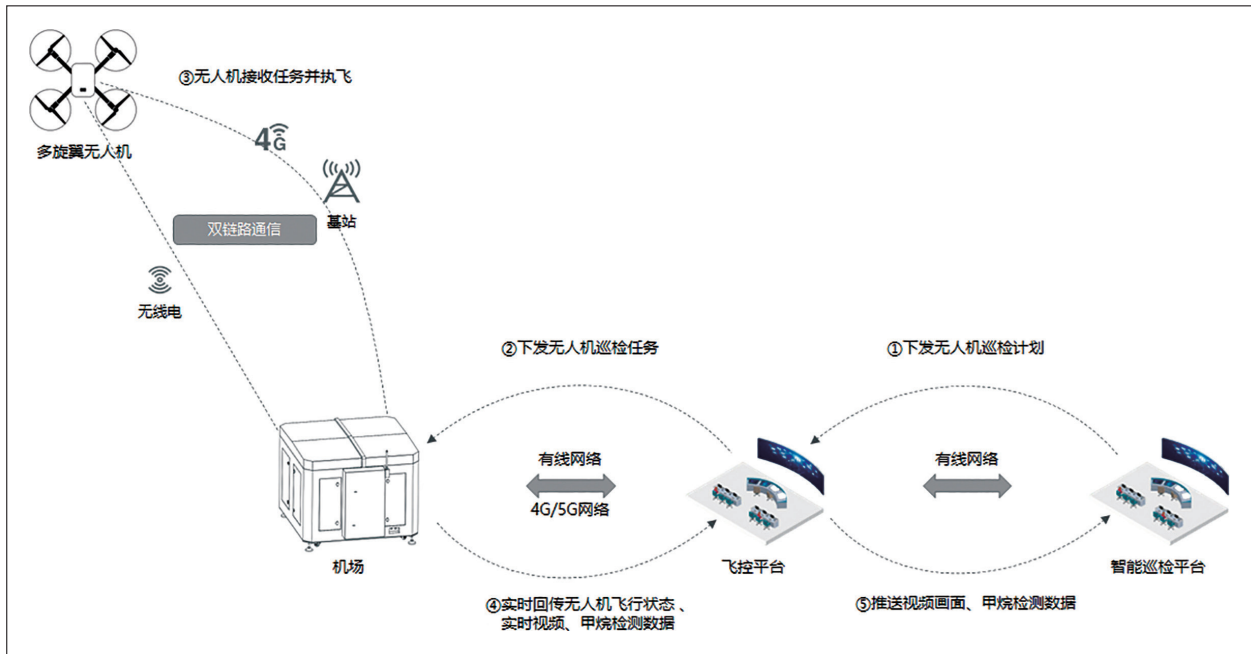


图1 无人机巡视巡检业务流程图

5个片区，根据分区情况规划巡检航线，确保小区内全部管线、调压箱等重要设施全覆盖。

（3）航线验证与优化

①航线验证。通过实地测试飞行，验证航线的安全有效性，并根据测试结果，对航线进行优化和改进。

②航线优化。

市政管线：经试飞验证，线状航线无法满足空中检测泄漏气体的要求，调整为“之”字形航线。

庭院管线：经过测试阶段经验总结，结合任务片区空域管理要求，无人机飞行高度不得超过80m。

无人机空中巡检视角如图2所示。

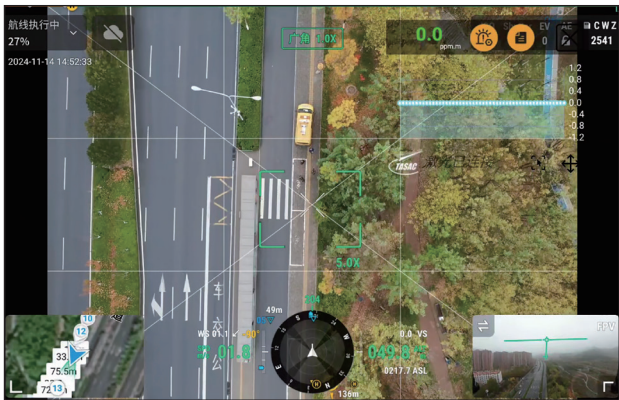


图2 无人机空中巡检视角

3.1.2 无人机空中巡检飞行调度流程

（1）前期准备工作

①制定巡检任务。公司管网运行部门结合业务实际制定周期性、区域性的燃气管线巡检计划，明确巡检对象、范围、时间等需求，通过智能巡检平台下发至飞控平台，飞控平台值班人员接收巡检计划并执行。

②任务评估。一是空域合规性评估。分析任务区域是否存在无人机禁飞区、军事管理区、政府机构及重点场所等，判断任务空域是否可飞。二是净空条件评估。进行实地勘察线路，巡检片区是否涉及超高层建筑、风筝（风筝线）等影响飞行安全的因素，在航线规划中标注此类安全因素并设法规避。三是电磁环境测试。为防止电磁环境异常干扰无人机的通信及导航、降低无人机性能，对任务区域进行电磁环境测试，判断该区域是否适合飞行。

（2）飞行调度流程

①提交飞行计划申请。根据当地空管部门要求，飞行前向属地民航空管部门提出飞行申请，经批准同意后实施。

②起飞前确认情况。一是天气因素。综合M350无人机性能，规定风力7级以上、雨量小雨以上、雷暴等恶劣天气禁止飞行，并由飞控平台值班员反馈至智能巡检平台。二是设备情况。起飞前核对M350无

人机各设备状态及机场状态，如检查H20T镜头、埃尔夫U10甲烷检测仪等载荷、无人机信号连接、电池电量是否正常，确保无人机起飞前状态良好。

③航线检查。起飞前再次核对任务航线，检查航线速度、高度等参数情况，确保任务航线情况正常。

④执行任务。将制定的飞行任务及航路航线数据录入飞控平台，同步至智能巡检平台，无人机、机库按照指令执行巡检任务。

⑤实时监控。一是监控飞行状态。通过飞控平台实时监控无人机的飞行状态。包括位置、高度、速度、电池电量、信号强度等。实时观察无人机的飞行轨迹（设定报警机制），确保其按照预设的任务规划飞行。二是应对突发情况。如遇恶劣天气、信号干扰、电池电量不足、设备故障等突发情况，飞控平台值班员应及时发出指令，调整飞行参数或改变飞行任务，让无人机采取相应的应对措施。

⑥实时反馈。执行任务中巡检视频、检测数据由飞控平台实时推流到智能巡检平台，如检测到疑似泄漏，上报预警信息。

（3）任务结束

任务完成后，由飞控平台值班员向智能巡检平台反馈任务完成情况，并向无人机、机库下达返航指令，无人机降落至智能机库，由维护人员检查无人机、机库工作状态，确保可随时执行巡检任务。

无人机通过搭载激光甲烷监测设备并融合完善的地理数据库（GIS），形成具有智能化决策能力和处置能力的高时效性监控系统，不仅提高了巡检效率，还能够实时采集高精度影像资料防范三方破坏，并监测燃气管线的泄漏情况，实现实时监测、快速响应，为燃气管线巡检提供了全流程、精细化、标准化的“智能巡检”新模式。

3.2 “车+犬”泄漏检测新模式

该巡检模式是利用高精度检测车辆精细化判定泄漏范围，配合嗅探犬进行泄漏点精准定位的新型燃气泄漏检测方式。

3.2.1 高精度车载激光天然气泄漏巡检系统

高精度车载激光天然气泄漏巡检系统是新一代PPB级甲烷、乙烷检测系统，该系统采用中红外激光吸收光谱技术，大幅提高了甲烷、乙烷检测的静态检测限，甲烷可达到1ppb灵敏度，乙烷可达到0.5ppb灵

敏度。该系统与传统PPM级激光车载检测系统相比，具有以下优势：

①PPM级车载激光检测车灵敏度最高为甲烷1ppm；高精度车载激光天然气泄漏巡检系统静态检测限为甲烷1ppb、乙烷0.5ppb，在PPM基础上提升1 000倍，大大提升了漏点检出率；

②检测速度更快，效率更高，传统激光车载巡检一般不高于30km/h，由于不能区分甲烷、乙烷气体，往往还需要更多的泄漏判别时间；高精度车载激光天然气泄漏巡检在日常实际使用中可不小于50km/h进行检测，并可同时检测甲烷、乙烷气体，仅需简单泄漏判别时间，大大提高了使用效率。

③检测范围更大，传统激光车载巡检需尽可能靠近燃气管线巡检，尤其是泵吸式的检测设备，需要在埋地管线上方行驶，检测局限性较大，大部分管线很难满足；高精度车载激光天然气泄漏巡检系统由于是泵吸式采样系统，依靠高精度中红外光谱吸收技术，只要燃气分子吸入超过一定数量，系统即可做出反应进行报警，使可检测的管线范围更大，无需靠近管线也可检测。

3.2.2 燃气嗅探犬

燃气嗅探犬依靠识别天然气中特殊添加剂四氢噻吩（THT），对燃气泄漏进行判别和定位。四氢噻吩是一种具有类似臭鸡蛋味的化学物质，通常被添加到天然气中以帮助人们察觉泄漏。当嗅探犬嗅到这种气味时，会通过特定的动作（如扑地、趴卧、用爪子刨地等）向工作人员发出信号，提示存在燃气泄漏点。与传统的人工检测相比，燃气嗅探犬能够更快地发现泄漏点，减少检测时间，提高工作效率。燃气嗅探犬进行泄漏检测如图3所示。

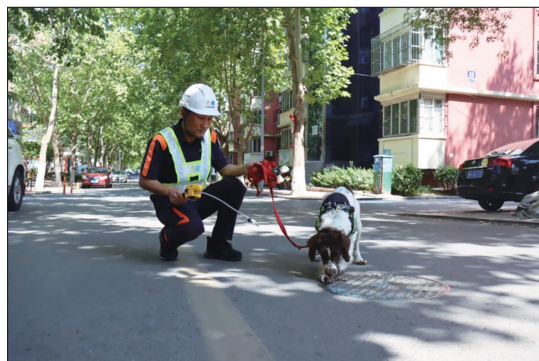


图3 燃气嗅探犬进行泄漏检测

3.3 “陆空一体化”智能巡检方案

2023年底,山东港华燃气集团经过不断探索优化,首创“陆空一体化”智能巡检方案,开启了“天上飞、地面巡、犬定位”巡检新模式。

2023年11月公司购置2辆高灵敏PPB级别检测车,分别针对城市道路、小区庭院进行快速、高灵敏度巡检。根据PPB级别检测车性能,22时至次日5时进行城市道路巡检,9时至17时对小区庭院和村村通进行巡检,除去休息时间,每天有效巡检工作12h,巡检时速平均40km/h,行驶里程为约480km/d,覆盖管线里程约280km/d,检测周期为30d。

PPB级别检测车与无人机空中巡检形成互补,实现对各类管网泄漏检测全覆盖。无人机空中通过扩展高清摄像头巡视,利用AI视频识别和图像处理,对管网上方的施工开挖识别,形成真正的“巡+检”组合,可有效防范和遏制第三方施工破坏燃气管线事故的发生。

针对PPB级别检测车与无人机空中巡检发现的疑似泄漏的区域,燃气嗅探犬通过捕捉空气中有无四氢噻吩气味,判断有无天然气泄漏,并对地表燃气泄漏点进行快速精准定位。

4 “陆空一体化”巡检模式应用效果分析

自2023年底全面实施“陆空一体化”智能巡检模式以来,我公司在管网泄漏检测工作中取得突破性进展。2020年—2024年泄漏自查情况如表1所示,通过对泄漏数据进行系统性分析发现:在埋地管、引入管、阀井等关键部位的泄漏检出量呈现持续增长态势。值得注意的是,2020年—2023年度漏点发现总

表1 2020年—2024年泄漏自查情况表

年份 泄漏类型	2020 (处)	2021 (处)	2022 (处)	2023 (处)	2024 (处)
埋地管线	19	20	20	22	34
引入管	58	58	60	63	79
阀、水井	16	14	15	14	20
调压器	20	24	23	24	32
总计	113	116	118	123	165

量保持相对平稳波动,而智能化巡检模式实施后的2024年,漏点检出量呈现显著跃升,较历史同期增幅达29.9%,如图4所示。为验证该巡检模式的有效性,公司选取15处2024年检测发现的埋地管线泄漏部位进行对比测试。当PPB高精度泄漏检测车发出报警后,同步采用传统PPM级检测车辆以30km/h的速度对相同区域复检,15处泄漏区域均未能触发传统PPM级检测车报警。这一验证对比有力印证了“陆空一体化”智能检测体系在提升检测效能、强化风险预警方面的技术优势,充分彰显了智能化巡检模式在燃气安全管理中的创新价值。

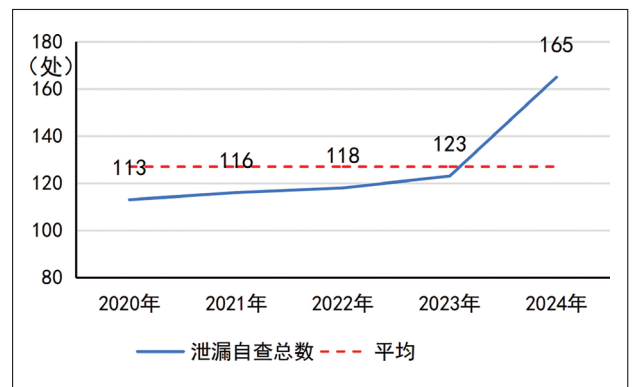


图4 2020年—2024年泄漏自查折线图

5 结束语

“陆空一体化”智能巡检模式通过陆、空巡检的有效配合,构建起立体化、全方位、多功能的燃气巡检系统。该系统建立了快速响应机制,实现了“陆+空”无盲区监测,能及时发现燃气泄漏的安全隐患。经过在实践中的不断应用与改进,此模式已成为确保燃气管网安全平稳运行的高效、先进管理措施。

参考文献

- [1]苏日提,刘鑫,陈洞杉.燃气管道高效泄漏检测及定位方法探讨与实践[J].煤气与热力,2023,43(01):33-36+43.
- [2]马瑞莉,崔涛,张雪娇,等.城市燃气管网高效泄漏检测及定位方式探讨[J].全面腐蚀控制.
- [3]高岚.城市燃气管网系统泄漏风险的模糊综合评价研究[D].哈尔滨工业大学,2018.