

基于无人机的废弃油气井甲烷检测

2026年3月17日



了解阿拉斯加大学安克雷奇分校 (University of Alaska Anchorage) 的研究人员如何利用 UgCS 和 SkyHub 构建可扩展的甲烷勘测系统，从而在偏远的阿拉斯加地区精准识别发生泄漏的废弃油气井。

- **数据来源：** Thomas, W.H. & Wang, C. (2026). Methane Detection for Abandoned Oil and Gas Wells. Preprints.org (预印本，未经同行评审). doi: 10.20944/preprints202602.0497.v1
- **研究资助：** 美国国家科学基金会 (NSF) EPSCoR 合作协议 OIA-2119689
- **所属机构：** 阿拉斯加大学安克雷奇分校，测绘学系，地理计算实验室 (GeoComputing Lab)

核心成果

- **受控释放测试：** 在 1.5 的偏度 (Skewness) 阈值下，实现零误报、零漏报。
- **现场验证：** 在阿拉斯加州休斯顿市的三口真实废弃井进行了实地测试，阿拉斯加州油气保护委员会 (AOGCC) 对其进行了独立确认。
- **高检出率：** 在 10 次现场勘测中，有 9 次成功检测到甲烷泄漏 (基于偏度分析) ，并且在 10 次勘测中有 8 次显示出具有统计学意义的空间聚类 (基于莫兰指数 Moran's I) 。
- **抗干扰性：** 即使在进行中的修复工作期间，系统仍能持续检测到活跃的泄漏。

挑战：390万口油气井与未受监控的甲烷排放

美国约有 390 万口记录在案的废弃和无主（orphaned）油气井。根据美国环保署（EPA）2024 年温室气体排放和吸收清单，其中约 300 万口被归类为废弃井。除此之外，截至 2023 年，有 117,672 口记录在案的无主井（即没有法定责任主体的井），另有约 31 万至 80 万口从未被正式登记的无记录无主井。

这些井并非单纯的历史遗物。未封堵的井为甲烷气体和其他污染物到达地表提供了直接通道。在 20 年的周期内，甲烷的全球变暖潜能值是二氧化碳的 86 倍。据 EPA 估计，废弃井每年产生相当于 850 万吨二氧化碳的排放量，约占美国油气行业甲烷总排放量的 3%。在宾夕法尼亚州的研究中，70% 的废弃井场地检测到了已知致癌物苯。密闭空间内的甲烷积聚甚至会导致爆炸。

这一问题的严重性吸引了巨额的联邦资金。2021 年《两党基础设施法案》第 40601 节拨款 46.75 亿美元，用于封堵、修复和恢复无主井场地。其中 42.75 亿美元分配给了拥有记录在案无主井的 28 个州。阿拉斯加州拥有 12 口记录在案的废弃井，在 2024 年和 2025 年的两个拨款阶段共获得了 2830 万美元。

但这其中存在一个核心挑战：在这数百万口井中，测量过排放量的不足 1200 口。如果在不知道哪些井正在活跃泄漏的情况下，就无法优先安排修复资金。现有的检测方法（主要基于航空磁力测量）依赖于寻找钢制井管的磁性特征。当井管缺失、被掩埋或被其他产生误报的金属碎屑包围时，该方法便会失效。阿拉斯加大学安克雷奇分校 GeoComputing 实验室的研究人员提出了一种截然不同的方法：驾驶搭载甲烷传感器的无人机飞越现场，直接测量真正关键的指标（甲烷本身）。



Figure 1. Hardware components of the methane survey system, excluding the UgCS software.

无人机甲烷勘测系统

研究团队利用四个核心组件构建了他们的无人机甲烷检测平台：大疆 Matrice 300 RTK 无人机、Pergam Laser Falcon 甲烷传感器、UgCS SkyHub 机载计算机，以及在地面控制站运行的 UgCS 飞行计划软件。

甲烷检测传感器：Pergam Laser Falcon TDLAS 系统

Pergam Laser Falcon 采用可调谐二极管激光吸收光谱（TDLAS）技术来测量甲烷柱密度。它发射 $1.653\ \mu\text{m}$ 的红外激光，该波长仅被甲烷吸收（不被二氧化碳或水蒸气吸收），从而实现高精度的甲烷泄漏检测。传感器的测量范围跨度为 0 到 50,000 ppm·m（百万分比浓度乘米），精度为测量值的 $\pm 10\%$ 。它由一块独立的 3 芯 11.1V 锂聚合物电池供电。在搭载 Laser Falcon 和 SkyHub 后，M300 RTK 的飞行时间从其空载最高的 55 分钟降至约 35 分钟。

集成 SkyHub 实现无人机甲烷数据采集

UgCS SkyHub 机载计算机充当了无人机与甲烷传感器之间的桥梁。它负责记录甲烷传感器数据，将无人机位置的 GNSS 坐标与每次甲烷测量精确同步，并通过 UgCS 软件界面提供对无人机的直接控制。

这种 GNSS 同步至关重要。每个甲烷读数都需要一个精确的地理坐标，才能用于空间分析。如果没有坐标，你得到将只是一堆浓度数值的列表，根本无法将它们映射回地面的具体位置。

使用 UgCS 进行自动化甲烷勘测飞行计划

对于每个场地，团队都会进行任务前实地考察，以评估区域、确定安全的飞行高度并识别障碍物。他们使用测距仪测量障碍物的高度，因为甲烷勘测在较低高度飞行时效果最佳（可以在排放物消散前进行测量），但又不能太低（以免无人机螺旋桨产生的气流影响测量）。收集到的信息确定了在 UgCS 中规划的基于网格的区域扫描飞行边界。测线间距和所选飞行速度是根据传感器在特定高度的视场角（FOV）及其数据采集率计算得出的。这些参数确保了在整个勘测区域内大约每米进行一次甲烷测量。

论文指出了 UgCS 在多电池轮换作业中的实际优势：该软件允许中断航线以更换电池，并能从任何指定的航点恢复任务。对于超出单次飞行电池容量的大型勘测区域而言，这意味着可以实现无缝的系统性覆盖，既无盲区也不会重复飞行。

由于搭载的有效载荷遮挡了 M300 RTK 的向下避障传感器，团队禁用了这些传感器。为了确保设备和操作人员的安全，团队选择手动起飞和降落。一旦无人机升空，UgCS 便接管执行自动网格飞行。

验证无人机甲烷检测方法：受控释放测试

在部署到真实的井位之前，团队在阿拉斯加州帕尔默市的大学校区进行了试飞。选择该地点是因为它属于 G 类空域，并且拥有一大片空旷、平坦的场地，非常适合重复进行无人机飞行。

他们通过以 0.8 升/分钟的恒定速率释放 5% CH₄ 校准混合气体，来模拟废弃井的甲烷泄漏，并记录了精确的释放位置以与检测结果进行比对。共进行了四次飞行：一次无甲烷释放的基线飞行，以及三次模拟泄漏飞行。每次飞行覆盖了相同的约 160 米 x 160 米的网格，测线间距为 2 米，飞行速度为 2 m/s。飞行在不同高度进行以评估高度对检测的影响：基线飞行离地高度 (AGL) 为 17 米，三次泄漏飞行分别为 32 米、20 米和 25 米 AGL。

检测结果

团队对原始数据进行了预处理，以剔除起飞、降落和转弯期间的测量值（使用 1.8 m/s 的速度阈值进行过滤）。随后，团队应用了两种互补的统计方法。

- **偏度分析 (Skewness)**：测量甲烷读数分布的不对称性。在没有泄漏的干净勘测中，读数围绕背景甲烷水平呈大致的正态（对称）分布。当存在泄漏时，受到源头附近高读数的影响，分布会向右偏斜。基线飞行（测试 A）的偏度为 1.41。三次泄漏飞行的平均偏度为 9.61（各个值分别为：14.35、7.46 和 7.01）。1.5 的阈值完美区分了泄漏与无泄漏场景。
- **全局莫兰指数 (Global Moran's I)**：测试升高的读数是呈现空间聚类（正如在点源附近所预期的那样）还是随机散布。三次泄漏飞行的平均 z 得分为 4.78，这意味着聚类模式偶然发生的概率不到 1%。基线飞行显示出的模式与随机分布无显著差异。

受控释放结果表

测试	条件	偏度 (Skewness)	莫兰指数 z 得分 (Moran's I)
A	存在泄漏, 32m AGL	14,35	3,23
B	存在泄漏, 32m AGL	14,35	3,23
C	存在泄漏, 20m AGL	7,46	8,67
D	存在泄漏, 25m AGL	7,01	2,44

泄漏判定阈值：偏度 > 1.5，且结合具有统计学意义的莫兰指数 z 得分。所有泄漏飞行均超过了这两项指标；而基线飞行两者均未超过。

现场验证：阿拉斯加休斯顿市的三口废弃井

在受控条件下验证了无人机甲烷检测方法后，团队转入实际场地测试。阿拉斯加州油气保护委员会 (AOGCC) 提供了休斯顿市三口距离较近的废弃井的信息，使得在一次实地勘测中覆盖这三口井成为可能。

测试井况

- **1 号井** 高出地面约 2 米，靠近高速公路。根据工程咨询公司的进度摘要报告，光离子化检测器 (PID) 测量显示井管外部存在低浓度的气体。未提供确切的泄漏率。
- **2 号井** 位于树林中，埋在地下约 0.5 米处。已被挖掘出来进行 PID 测量，结果表明井管存在活跃泄漏，同时井管还在漏水。该井在本研究前被重新掩埋，未记录确切的泄漏率。
- **3 号井** 同样位于树林中，最初被认为是水井。挖掘后被确认为气井。PID 测量表明存在气体泄漏，同样未提供确切速率。

勘测设计

团队在三个勘测周期内部署了十次飞行：修复前两次，进行积极修复工作期间一次。每次勘测包括两次飞行：一次是在 25m AGL 覆盖所有三口井，另一次是在 20m AGL 聚焦于 1 号井，以规避现场障碍物。

25m AGL 的勘测数据在后处理中进行了划分，以反映地面条件：2 号井和 3 号井位于树冠下方，而 1 号井位于开阔地面。这种划分有助于研究人员评估树冠干扰是否影响了甲烷扩散和激光路径长度。修复期间进行的 25m AGL 勘测未被划分，因为到那时现场已被夷为平地，所有植被已被清除。

勘测发现

- 在 10 次现场测试中，有 9 次偏度超过了 1.5 的阈值。唯一的例外 (测试 E-1，将 1 号井从第一次修复前勘测中隔离出来) 显示的偏度为 1.16。研究人员将此归因于动态风的干扰，指出该地点靠近繁忙的高速公路，路过汽车产生的阵风偶尔会压倒盛行风模式。
- 莫兰指数表明 10 次测试中有 8 次存在具有统计学意义的空间聚类。两个例外再次来自第一次勘测的划分数据 (测试 E-1 和 E-2)。覆盖树林中 2 号和 3 号井的测试 E-2，仅比 90% 的聚类置信阈值低 6%，表明其结果处于边缘状态，而非明确的否定。
- 当研究人员观察两次修复前勘测的划分数据时，偏度值一致指出更高的甲烷读数源自 2 号井和 3 号井 (位于树林中、未封堵的井)，而不是 1 号井。这与 AOGCC 事先掌握的信息 (即 2 号和 3 号井未封堵且泄漏了更多甲烷) 完全吻合。
- 在积极修复期间进行的测试 I 和 J，依然显示现场存在泄漏的井。其偏度值均超过了 1.5 阈值，莫兰指数 z 得分也表明具有统计学意义的聚类。

为什么精确的无人机飞行计划对甲烷气体检测至关重要

该论文记录了几个因素，这些因素表明飞行计划的质量与甲烷检测的准确性直接相关。这些绝非抽象的理论要求，而是实实在在体现在了数据中。

激光路径长度

Pergam Laser Falcon 测量的甲烷是沿路径长度积分的浓度 (ppm·m)。无人机在飞行过程中因侧倾、俯仰或偏航引起的激光路径上的任何变化，都会使传感器偏离其正下视 (天底) 位置并改变测量结果。如果背景甲烷水平较高，较长的路径长度会捕获更多背景甲烷，从而可能引发误报。

现场数据清晰地展示了这种影响。当研究人员隔离出 1 号井周围无植被的区域 (在此激光拥有更长、更一致的到达地面的路径) 时，与全区域勘测相比，偏度值下降了。当他们隔离出 2 号和 3 号井周围的植被区 (树木造成了多变且较短的激光路径) 时，偏度值上升了。莫兰指数 z 得分对路径长度的不一致性更为敏感。

在修复人员清除植被并平整场地后，修复期间勘测的 z 得分达到了统计学显著水平，这进一步强化了一致的激光路径长度对这种方法学的重要性。

网格设计与速度

勘测网格必须精确匹配传感器的能力。飞行线间距和速度是根据 Laser Falcon 在规划高度的视场角 (FOV) 及其数据采集率计算得出的，目标是达到大约每米测量一次甲烷。太快或太宽，就会漏掉羽流；太慢，则会白白消耗电池而无法改善覆盖率。

低空飞行

甲烷排放物一旦离开地面就会迅速消散。飞得越低，检测概率就越高，但碰撞风险也随之增加，尤其是在有植被、碎屑或建筑物的场地。受控测试的飞行高度在 17 米到 32 米 AGL 之间；现场验证使用了 20 米和 25 米 AGL。任务前使用测距仪测量障碍物，结合 UgCS 桌面规划 (可以在到达现场前验证飞行边界和高度)，是团队平衡这一权衡取舍的关键方法。

多电池轮换作业

搭载有效载荷后，M300 RTK 的飞行时间约为 35 分钟，而风力条件可能会进一步缩短该时间。对于单块电池无法覆盖的大型勘测区域，UgCS 能够中断航线以更换电池并从指定航点精准恢复的能力，意味着团队可以覆盖整个网格，而无需重新飞行已完成的部分或留下盲区。

宏观视角：亟需可扩展检测方案的 47 亿美元难题

目前有 28 个州正在动用联邦资金进行废弃井的修复。核心瓶颈不在于封堵本身，而在于如何寻找并确定应优先封堵哪些井。磁力测量只能检测钢制井管，而非排放物。一个套管完好的井未必在泄漏；而一个没有套管的井，磁力仪根本无法发现。

基于无人机的甲烷检测颠覆了这一传统路径。该方法不再去寻找物理基础设施 (它们可能被掩埋、缺失，或其他金属物体难以区分)，而是直接测量实际的环境风险。正在活跃释放甲烷的井，其修复优先级理应高于未释放甲烷的井，无论其套管状态如何。

研究人员指出，该方法学的适用范围远超废弃井。同样的系统和统计方法也完全适用于垃圾填埋场监测、天然气管道泄漏检测与修复 (LDAR)，以及多年冻土甲烷勘测。任何使用 TDLAS 传感器从无人机上检测甲烷的应用场景，都可以采用本研究中验证的“偏度+莫兰指数”框架。

系统规格

组件	详细信息
无人机	大疆 Matrice 300 RTK
飞行时间 (挂载载荷)	约 35 分钟
甲烷传感器	Pergam Laser Falcon (TDLAS)
传感器范围	0 - 50,000 ppm·m
传感器精度	测量值的 $\pm 10\%$
激光波长	1.653 μm (甲烷特异性)
机载计算机	UgCS SkyHub
飞行计划软件	UgCS
勘测网格 (受控测试)	约 160m x 160m , 间距 2m , 速度 2 m/s
测量密度	约每米 1 个读数
测试的飞行高度	17m, 20m, 25m, 32m AGL
偏度阈值	1.5 (判定泄漏与否的分水岭)