doi:10.3969/j.issn.1671−5152.2026.10.003

基于无线蓝牙技术的民用燃气表-报警器安全监测方法

徐海彬

上海燃气浦东销售有限公司

摘　要：针对当前民用燃气端燃气安全监测系统存在的感知孤立、联动迟滞与误报频发等痛点问题，本文开展基于无线蓝牙技术的民用燃气表-报警器安全监测方法研究。通过将高选择性激光甲烷传感器与本质安全型燃气表硬件进行异构集成，从源头提升检测准确性；设计具备边缘计算能力的自适应协同判据算法，实现多源信息融合与泄漏概率动态评估；优化低功耗蓝牙通信协议，确保在复杂家庭环境中的稳定传输与快速响应。实验结果表明，该方法在强干扰环境下仍能保持高可靠性，显著降低了误报/拒动次数，实现了闭环安全防护，为构建高效、可靠的户用燃气主动安全体系提供了切实可行的技术方案。

关键词：无线蓝牙技术；报警器；监测；安全；民用燃气表

Safety Monitoring Method for Residential Gas Meter-Alarm Based on Wireless Bluetooth Technology

XU Haibin

Shanghai Gas Pudong Sales Co., Ltd.

Abstract: To address the pain points of isolated perception, delayed linkage, and frequent false alarms in the current gas safety monitoring system at the residential gas terminal, this paper conducted a study on the safety monitoring method for residential gas meter-alarm based on wireless Bluetooth technology. This paper heterogeneously integrated a highly selective laser methane sensor with intrinsically safe gas meter hardware to improve detection accuracy from the source, designed an adaptive collaborative criterion algorithm with edge computing capability to achieve multi-source information fusion and dynamic assessment of leakage probability, and optimized a low-power Bluetooth communication protocol to ensure stable transmission and fast response in complex home environments. Experimental results indicate that this method still maintains high reliability under strong interference environments, significantly reduces the number of false alarms and missed operations, achieves closed-loop safety protection, and provides a practical technical scheme for constructing an efficient and reliable residential gas active safety system.

Keywords: wireless Bluetooth technology; alarm; monitoring; safety; residential gas meter

1　引言

民用燃气作为城市能源供应体系的重要组成部分，其使用安全直接关系到人民群众生命财产安全与社会公共安全。近年来，随着我国天然气消费量的持续攀升与居民用户规模的快速扩张，燃气安全事故，特别是因燃气泄漏引发的火灾、爆炸及中毒事件，已成为亟待解决的公共安全问题。传统民用燃气安全监测体系大多依赖独立安装的燃气泄漏报警器以及机械式或简单电子式燃气表，二者功能

[第一作者简介] 徐海彬，上海燃气浦东销售有限公司党委副书记、副总经理（主持工作），中级工程师，从事燃气管理工作。

相互割裂，形成了感知孤岛[1]。报警器仅能在本地发出声光警报，缺乏与气源切断装置可靠且智能的联动；而燃气表主要承担计量功能，对异常泄漏状态的响应较为迟滞[2]。

为突破上述技术瓶颈，顺应物联网与智能化技术在公共安全领域深度应用的趋势，本文开展了基于无线蓝牙技术的民用燃气表–报警器安全监测方法研究。

2 异构硬件集成设计

为实现报警器与燃气表的深度协同，本研究构建了如图1所示的总体架构。

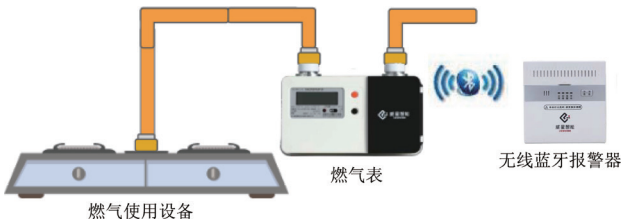

图1 总体架构示意图

在硬件层面，本方法采用了异构集成设计以兼顾高性能与高安全性。报警器端选用了基于可调谐二极管激光吸收光谱（TDLAS）技术的激光甲烷传感器[3]。该传感器发射特定波长的激光，并检测甲烷分子对该激光的特征吸收，以此实现对甲烷气体的高选择性检测，从根本上避免了厨房油烟、乙醇、水蒸气等常见干扰物引发的误报。其检测原理可表述为比尔–朗伯定律：

$$I=I_0\exp(-\sigma(v)\cdot c\cdot L) \quad (1)$$

式中，I_0和I分别表示激光入射强度与透射强度，$\sigma(v)$表示甲烷在激光频率v处的吸收截面，c表示甲烷浓度，L表示激光吸收路径长度。通过测量I/I_0即可精确反演出甲烷浓度c，实现了定量检测且具有长期稳定性。

燃气表端严格遵循本质安全防爆认证的要求进行硬件设计与选型[4]。核心控制单元采用低功耗微控制器，并集成符合BLE 5.0协议的通信模块。为执行关阀动作，内置了低功耗永磁式步进电机阀。该阀门驱动电路进行了特殊的能量限制设计，确保在任何工况下，电路产生的电火花或表面温度均不足以引燃爆炸性环境中的气体。这种报警器端高精度探测与燃气表端本质安全执行的异构集成，为整个系统的可靠运行奠定了坚实的物理基础。

3 自适应协同判据算法与边缘智能决策机制

仅有可靠的硬件和通信链路，尚不足以应对复杂的现场环境。若仅采用简单的阈值触发机制，便难以规避瞬时干扰、传感器偶然发生漂移或施工误触发所导致的非泄漏性关阀情况，严重影响用户体验和系统可信度[5]。为此，本研究提出在燃气表端嵌入具备边缘计算能力的自适应协同判据算法，其核心思想在于融合多源信息并开展时序关联分析，进而做出更为精准的本地决策。

该算法定义了2种核心状态向量：报警器状态向量$\vec{S}_a=(C, M, L)$，其中C表示实时甲烷浓度，M表示传感器健康标志位，L表示链路连接状态；燃气表自身状态向量$\vec{S}_m=(F, V_s, B)$，其中F表示瞬时流量，V_s表示阀门状态，B表示电池电量。算法持续通过蓝牙链路获取$\vec{S}_a$，并结合本地$\vec{S}_m$进行联合判决[6]。

判决过程并非单一依赖浓度阈值，而是引入了1个多条件加权融合的置信度函数P_{leak}，用于量化当前发生真实燃气泄漏的概率：

$$P_{leak}=w_1\cdot f(C)+w_2\cdot g(\Delta F)+w_3\cdot h(T_{sustain}) \quad (2)$$

其中，$f(C)$表示关于浓度C的函数，当C超过一级报警阈值，如5%LEL时函数值显著增大；超过二级报警阈值，如15%LEL时接近饱和。ΔF表示考虑流量变化的函数，若在报警触发前后，燃气表检测到微小且持续的异常流量，该函数值会增加，这有助于区分燃气泄漏与空气背景中的微量气体干扰[7]。$h(T_{sustain})$表示浓度持续时间的函数，该约束要求报警浓度信号必须持续一段时间$T_{sustain}$，以此滤除瞬时尖峰干扰。权重系数w_1，w_2，w_3可根据长期运行数据通过机器学习方法进行自适应调整，初期可基于专家经验设定。

只有当置信度P_{leak}超过设定的高阈值P_{th_high}时，算法才会立即触发紧急关阀指令。若P_{leak}处于中间区间，系统可能仅上报预警信息至远程平台，而不

立即关阀，由后台人工介入研判[8]。这种基于置信度的分级响应机制，彰显了边缘智能决策的优势，在保障安全的同时，显著降低了误关阀率。

4 基于无线蓝牙技术的低功耗通信优化与多态交互协议

无线通信的稳定性与低功耗特性，是实现长期可靠联动的关键所在。本方法对低功耗蓝牙通信进行了针对性优化[9]。在物理层，通过实测，确定了在典型居民厨房环境中，蓝牙信号可靠传输距离为4m~5m，完全满足报警器与燃气表的间距要求，如表1所示。

表1 典型环境下蓝牙通信距离测试

安装位置环境	通信距离	可靠性评估
空旷无遮挡环境	7m～8m	极高
典型厨房，有非金属橱柜遮挡	4m～5m	高，满足应用需求
全金属密闭环境	严重衰减	不适用，需调整安装方案

在协议与应用层，本研究设计了精简而高效的多态交互协议。报警器作为外围设备，周期性地向燃气表广播其状态数据包，内容包含加密的浓度值、报警标志、传感器自检状态等。这种周期广播结合燃气表端监听的方式，功耗极低。同时，燃气表可随时发起连接请求，以读取更详细的数据或发送配置指令。

针对连接稳定性，定义多态交互逻辑。正常态：燃气表定期与报警器进行1次心跳确认握手，确保链路畅通。若连续丢失心跳达到预设次数，则触发报警器断线状态，并报警至平台；报警态：一旦报警器检测到浓度超标，其广播包中的报警标志位立即置位。燃气表在毫秒级时间内接收到该信息后，立即启动前述自适应协同判据算法[10]。若判定为真实泄漏，则立即执行关阀操作，并同步通过NB-IoT网络上报警情；对于因施工等导致的误关阀，系统设定了严格的恢复流程，必须由授权人员现场确认安全无误后，通过长按燃气表功能键进行本地人工复位以开启阀门；对于因报警器断电导致的断线故障，恢复供电后，报警器与燃气表能自动重连并同步状态，无需人工干预。

5 实验

本次验证采用分层递进的实验策略，在受控的实验室环境中，针对核心部件的基础性能以及联动功能的正确性开展标准化测试与校准工作。

在模拟的干扰环境中，引入多种类型的干扰源，测试系统在接近真实复杂场景下的抗干扰能力以及算法的有效性。通过实地试点应用，在真实用户家庭环境中进行为期数月的长周期挂网运行，收集系统在实际工况下的可靠性、稳定性及用户行为相关数据，完成从技术可行性到工程可用性的闭环验证。

为精确控制变量并模拟真实场景，本实验采用了一系列专业设备，其详细配置与核心参数如表2所示。

除表2所列设备外，选用高速数据记录仪，同步记录传感器原始信号、蓝牙通信数据包、阀门动作信号及时间戳。后台监控平台实时接收并存储NB-IoT上传的报警、状态及故障数据。

6 实地试点应用与长周期运行评估

根据项目计划，在上海市浦东新区选定多个居民小区，共试挂200套联动设备，并进行为期6个月的持续监测。

试挂期间，共发生6起有效联动关阀事件。经后台记录与现场核实，这些事件均由楼栋公共管道施工引发，而非用户户内泄漏导致燃气短暂释放触发。表3为实地试点中联动功能有效性事件记录。

表3详细记录了试点期间所有触发联动关阀的真实事件，这6起事件均非误报，而是由可核查的外部施工活动引发实际燃气释放。该检测方法在事件中表现出高度一致的可靠性：正确感知报警状态，稳定执行关阀动作，并成功将报警信息远程上报至管理平台。

针对无线蓝牙方案与有线方案在抗干扰性能上的核心差异，本实验设计了专门的控制变量对比测试，以获取可量化的客观数据。测试主要聚焦于2类典型干扰环境：传导性电磁干扰与空间辐射干扰。记录测试结果，如表4所示。

表2 实验核心设备与参数配置清单

设备类别	设备/模块名称	关键型号/规格	核心参数与配置
感知与执行单元	激光甲烷报警器（蓝牙款）	JT-WX001d	检测原理：TDLAS（激光） 测量范围：0 %LEL-100% LEL 通信协议：Bluetooth Low Energy 5.0 广播间隔：2s 工作电压：AC 220V
	NB-IoT超声波燃气表（蓝牙接口款）	定制型号	通信方式：NB-IoT+BLE 5.0 阀门类型：内置本质安全型电机阀 心跳检测周期：1h 工作电压：DC 3.6V 静态电流：＜47μA
测试与干扰设备	标准气体配气装置	动态体积法配气系统	气源：高纯CH_4（99.99%），高纯空气配气范围：0.1% LEL ～ 50% LEL 配气不确定度：≤1.5% 流量控制精度：±1% F.S.
	综合环境测试舱	步入式恒温恒湿箱（定制）	内部容积：1m^3 温度范围：-10℃ ～ +55℃ 湿度范围：5% RH ～ 95% RH 控制精度：温度±0.5℃，湿度±3% RH
	电磁干扰模拟系统	信号发生器、通讯综合测试仪	频段覆盖：800MHz ～ 2.5GHz 干扰类型：连续波（CW）、GSM/CDMA突发信号、Wi-Fi 2.4GHz调制信号 场强范围：1V/m ～ 30V/m （可调）

表3 实地试点中联动功能有效性事件记录

序号	发生时间	试点楼栋/户号	触发原因（经核实）	现场处置与结果	有效性评估
1	2025.10.21	1203室	楼栋公共燃气管道施工作业，导致少量燃气释放入室。	售后人员接报后上门核查，确认无持续泄漏风险后，进行本地人工按键复位开阀。系统恢复正常。	成功
2	2025.10.21	1204室		处置方式同事件1。	成功
3	2025.10.21	1302室		处置方式同事件1。	成功
4	2025.10.21	1303室		处置方式同事件1。	成功
5	2025.10.21	1403室		处置方式同事件1。	成功
6	2025.10.28	902室	户内燃气设施检修施工，导致短暂燃气释放。	售后人员上门核查并人工复位开阀。	成功

表4 抗干扰性能定量对比测试结果

测试场景	无线蓝牙方案误报/拒动	有线方式误报/拒动
场景A：强传导干扰测试	0次	误动率40%
场景B：同频带空间辐射干扰测试	0次	0次
场景C：复合干扰环境测试	0次	误动率60%，1次响应延迟

在存在传导干扰的测试中（场景A、C），有线方案的误动率高达40%~60%，而蓝牙方案为0%，说明本文所采用方法的无线通信不受传导干扰影响。这是因为本文通过“高选择性传感”与“抗传导干扰无线通信”的结合，从根本上切断了主要干扰信号的入侵路径，从而在实验室严格测试和复杂模拟场景中实现了“0误动”的优异表现。

为更直观体现本文所提方法在鲁棒性、实时性、准确率等方面的优势，将各维度测试获得的原始数据进行归一化处理，转化为0到1之间的评分，分值越高代表该维度性能越优。绘制该方法综合性能评估雷达图，并将传统有线方式作为参照，如图2所示。

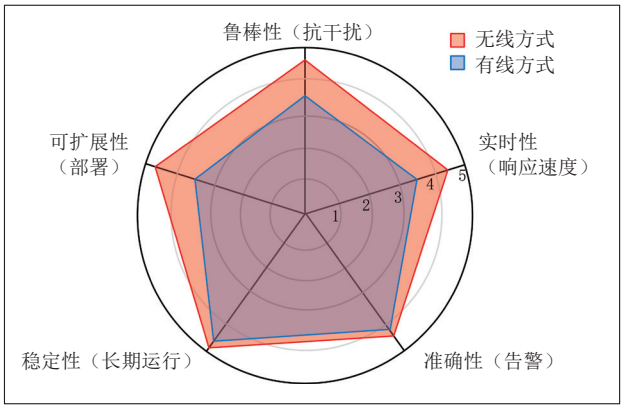

图2 无线方式与有线方式综合性能归一化评估雷达图

从图2可以看出，本文提出的基于无线蓝牙技术的安全监测方法，在鲁棒性、实时性、准确率3个关键安全性能指标上全面超越了传统有线方案，证明了本文所提技术路线的先进性与工程适用性，为解决传统燃气安全系统“感知孤立、联动迟滞、误报频发”的痛点提供了有效的综合解决方案。

7 结束语

本研究提出的基于无线蓝牙技术的民用燃气表–报警器安全监测方法，成功将高选择性激光传感、智能边缘决策与低功耗无线通信深度融合，构建了1套完整的户用燃气主动安全防护体系。通过开展理论分析、算法设计、实验验证以及规模化试点应用等一系列系统工作，充分证明了该方法在提升监测准确性、增强系统鲁棒性和优化用户体验方面具有显著优势。未来可进一步探索运行数据驱动的算法自适应优化，并将其应用延伸到更广泛的智能家居安全场景。

参考文献

[1]赵辉,王和勇,卢鸿飞. 多元融合下的燃气电厂对标综合评价模型构建及应用[J]. 南方能源建设,2025,12(S1):127–135.

[2]谷昭鹏,王维民,刘炳成,等. 基于叶尖间隙时频特征融合的转子碰摩诊断方法[J]. 振动与冲击,2024,43(23):94–101.

[3]李永华,陈伟华,谢英柏. 基于数据驱动的燃气轮机性能监测方法[J]. 动力工程学报,2024,44(12):1845–1853.

[4]陈公达,傅诗万,蔡秀霞,等. 燃气电厂碳排放量在线监测法不确定度评定[J]. 热力发电,2025,54(1):145–152+161.

[5]黄泳如,卢志民,刘泽明,等. 燃气电厂在线监测碳排放数据偏差分析[J]. 热能动力工程,2025,40(4):171–179.

[6]王梓宇,李胜林,李黎,等. 隧道爆破地震作用下燃气管道动力响应规律研究[J]. 爆破,2024,41(3):212–221+247.

[7]邱勇,孙萍,刘雪洁,等. 基于时序监测数据的企业生产碳排放因子本地化研究[J]. 环境污染与防治,2024,46(10):1396–1401.

[8]栾俊奇,李淑英,曹云鹏,等. 基于Hammerstein–Wiener的燃气轮机非线性建模方法研究[J]. 热能动力工程,2024,39(11):186–194.

[9]唐蓝馨,王芳,周治,等. Gd3+掺杂调控BiFeO3–BaTiO3高温无铅压电陶瓷的结构与性能[J]. 材料工程,2024,52(4):43–53.

[10]凌晓,王昕越,郭凯,等. 基于UNet模型燃气管道高后果区分割方法研究[J]. 中国安全生产科学技术,2024,20(4):157–162.

工程信息

天津老旧燃气管网改造完成410km，预计 11月底全面竣工

2026年8月19日从天津市城市管理委员会获悉，2026年以来天津大力推进老旧燃气管网改造，截至目前累计完成410km，所有改造项目将于11月底全面竣工，实现老旧管网隐患动态清零、燃气设施全面升级。

据了解，2026年天津细化600km管网改造、200km民心工程改造任务，全年共布局实施14项改造工程，健全市区两级联动机制，实行清单化、台账式动态管理。

位于南开区华苑街道的安华里小区燃气管网已运行29年。2026年8月17日，该小区老旧管网更新改造正式启动，共计对35个楼座、约7 039m低压庭院燃气管线、315个入户引入口进行更新改造，受益用户2 015户，预计9月下旬全面竣工。

据悉，为减轻民众负担，天津积极争取国家政策补贴，剩余建设资金由企业统筹承担，实现民众“零费用”享受民生改造成果。

（本刊通讯员供稿）