

燃气设备安全性能优化设计研究

祁泽远

北京鑫丰泰燃气设备有限公司江苏分公司, 江苏 盐城 224000

[摘要]针对家用燃气设备泄漏、意外熄火、干烧、一氧化碳积聚等常见隐患给出一种硬件防护结构和控制逻辑相结合的改进方案。对目前的安全装置响应滞后、单一判据容易误报等问题进行了梳理,提出了以快速关断、冗余检测、趋势预测为主要设计思路的方案。在具体的实现中给出了双路电磁阀泄漏切断装置、离子感应和热电偶复合熄火保护系统、温度梯度解析干烧过热防护模块、一氧化碳浓度和燃气阀门联动控制单元。制作样机并依照现行国标搭建测试平台,就泄漏切断时间、熄火反应速度、干烧温度把控以及一氧化碳联动这些方面展开比较试验。从试验数据可知,优化前的泄漏切断时间为 2.82s,优化后为 1.47s,熄火保护阀的时间由原来的 4.93s 变为现在的 2.68s,干烧最高温度由原来的 318℃降到现在的 203℃,一氧化碳联动阈值保持在 1.0×10^{-4} 体积分数以下。从结果可知,本设计中所优化的设备在保证运行可靠性的同时,也提高了安全阻断速度和异常工况的识别能力。

[关键词]燃气设备;安全性能;泄漏切断;熄火保护;干烧防护

DOI: 10.33142/ect.v4i7.20136

中图分类号: TK47

文献标识码: A

Research on Safety Performance Optimization Design of Gas Equipment

QI Zeyuan

Jiangsu Branch of Beijing Xinfengtai Gas Equipment Co., Ltd., Yancheng, Jiangsu, 224000, China

Abstract: An improved solution combining hardware protection structure and control logic is proposed for common hazards such as leakage, accidental flameout, dry burning, and carbon monoxide accumulation in household gas equipment. We have sorted out the problems of lagging response of current safety devices and easy false alarms caused by a single criterion, and proposed a solution with fast shutdown, redundant detection, and trend prediction as the main design ideas. In the specific implementation, a dual channel solenoid valve leakage cut-off device, an ion induction and thermocouple composite flameout protection system, a temperature gradient analysis dry burning overheat protection module, a carbon monoxide concentration and gas valve linkage control unit are provided. Produce a prototype and build a testing platform in accordance with current national standards to conduct comparative experiments on leakage cut-off time, extinguishing reaction speed, dry burning temperature control, and carbon monoxide linkage. From the experimental data, it can be seen that the leakage cut-off time before optimization was 2.82s, and after optimization it was 1.47s. The time for the shutdown protection valve has changed from the original 4.93s to the current 2.68s, and the maximum temperature for dry burning has decreased from the original 318 °C to the current 203 °C. The carbon monoxide linkage threshold remains below 1.0×10^{-4} volume fraction. From the results, it can be seen that the optimized equipment in this design can ensure reliable operation while also improving the ability to identify safety blocking speed and abnormal working conditions.

Keywords: gas equipment; safety performance; leakage cut-off; flameout protection; dry burning protection

引言

燃气设备是现代家庭不可缺少的能源终端,它的安全性能直接影响到用户的生命财产安全。据不完全统计,我国城镇燃气普及率已经超过了 98%,燃气用户数量不断增加,但是由于燃气泄漏、意外熄火、干烧过热、一氧化碳中毒等造成的安全事故仍然时有发生,暴露出目前的设

备对于异常工况识别和主动干预的能力还存在不足。现有的安全保护机制大多采取分立式、被动响应的工作方式,各个功能模块各自为政,没有对多物理量耦合信息进行综合判断的能力,传感器单一、阈值固定,很难在复杂的烹饪环境中做出及时准确的判断,经常处于“要么漏报、要么误报”的两难境地。由于微控制器算力提高以及传感器

价格降低,把多源检测、趋势预测和执行机构联合作为一个平台的趋势越来越接近。

1 燃气设备主要安全隐患梳理

泄漏隐患主要是气管接口、旋塞阀、喷嘴连接处。轻微泄漏会慢慢累积,当空气中燃气浓度达到爆炸下限(天然气约为5%体积分数)后,就进入了危险区间。目前大多数燃气灶本身没有在线浓度检测和主动关阀的能力,依靠用户警觉或者外挂报警器,外挂报警器从检测到发出声光信号再到人工处置,需要的时间一般都在30s以上,不能在关键窗口期完成阻断。意外熄火大多由于溢锅、风吹或者气压变化造成。熄火之后,如果保护装置不能及时关闭燃气通路,燃气就会持续溢出。热电偶式熄火保护受热惯性影响,从火焰消失到电磁阀释放一般需要30s~60s,这段时间内的泄漏量可以达到几十升。离子感应式方案可以缩短到几秒,但是电极表面积碳会逐渐降低信噪比,长期稳定性需要加强。干烧大多发生在无人看守的时候。锅具温度突然升高,超过油脂的燃点后很容易引起火灾。传统的防干烧设计是把双金属片或者热敏电阻安装在炉头附近,设定一个固定的温度阈值,例如270℃。该方法不能区分正常高温爆炒和干烧,正常的烹饪也会造成误关火,用户体验变差之后会人为地拆除或者屏蔽掉。一氧化碳风险是由燃烧不完全引起的^[1]。风门调节不好、排气通道被堵塞或者长时间使用后,烟气中一氧化碳体积分数会很快超过 4.0×10^{-4} 的危险值。现有的部分热水器内置一氧化碳报警模块,但是与燃气比例阀之间没有直接的联动,报警之后还需要人工干预,延时不可控。从以上分析可知,各项保护功能在响应速度、抗干扰能力、多条件复合判断等各方面都存在较大的不足。

2 安全优化设计总体思路

2.1 硬件防护结构调整

总体技术路线如下图1所示。以微控制器为中心,前端安装甲烷浓度传感器、离子感应针、热电偶、锅底温度热敏电阻和一氧化碳传感器,组成多物理量采集层。执行层有双路自保持电磁阀、脉冲点火器、排风接口继电器和蜂鸣报警器。电磁阀为常闭型,一并接在主气路的进气端,另一直接接在炉头支管上,构成双重物理隔离。当任意一路的关断条件都满足的时候,气路都可以被切断。检测、判断、执行三个环节都在一个控制板上完成,消除了外挂报警器的通信延时。

安全优化设计的硬件和控制逻辑结构图如下图1所示。各个传感器信号经过调理电路之后被传送到控制器当中,控制器按照预先设定的阈值以及趋势算法来发出驱动信号,从而控制电磁阀和报警装置。

2.2 控制逻辑优化方向

控制逻辑主要的改变有三点。第一,从单阈值判决改为多条件融合判决。泄漏检测不再只看浓度是否超过一个固定的值,还会加上浓度上升速率的判断标准,排除由于烹饪过程中醋、酒等干扰气体造成的短时间内信号波动。第二,用时间维度上状态记忆的方法。当离子感应针失掉火焰信号的时候,首先判定是暂时性的离焰,然后才采取关阀的措施,防止在脉冲点火阶段出现误报的情况^[2]。第三,形成跨传感器的关联规则。当一氧化碳浓度升高并且有火焰持续燃烧信号的时候,先判定为燃烧恶化而不是环境侵入,自动降低燃气比例阀开度并启动排风,如果浓度继续上升就彻底关阀。这些逻辑用有限状态机来实现,在保证确定性的同时,也使各个功能模块的响应次序可以自由设置。

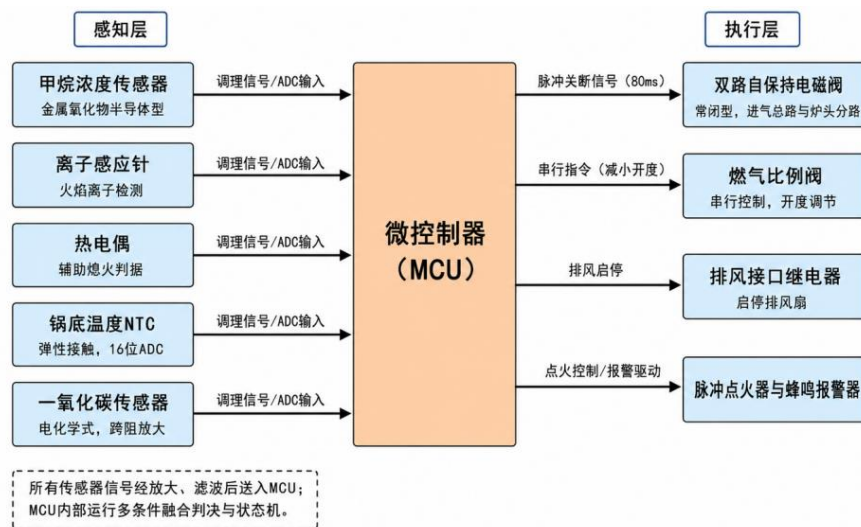


图1 安全优化设计硬件与控制逻辑架构

3 核心安全功能的具体设计

3.1 泄漏自动切断装置

选择金属氧化物半导体型甲烷传感器,安装在灶具底板下方进气口附近,用防护罩形成半封闭气室,加快泄漏初期气体的聚集。传感器输出经过两级放大、低通滤波后,微控制器用 100ms 周期采样。判定规则为:浓度持续大于 5%LEL 并且上升速率大于 0.3%LEL/s 时,立刻设置泄漏标志位。为了防止由于电磁干扰造成的误触发,在连续三个采样周期中都满足条件时才认为是有效的。执行机构使用双线圈自保持电磁阀,正常工作时不耗电,只在开关瞬间供给脉冲电流。当泄漏标志位置位时,控制器把 80ms 正向脉冲发送给进气总阀和炉头分阀,阀门关闭。该设计把检测到关断的电子链路总延迟控制在 200ms 以内,不受机械惯性限制。阀体关闭之后需要手动复位才能再次开启,防止自动复燃。

3.2 熄火保护感应系统

在炉头外侧布置离子感应针,针尖在火焰外焰区。火焰导电特性使针与地之间产生微弱的电流,交流耦合之后再由运算放大器转换成逻辑电平。当离子电流小于设定的阈值 0.5 μ A 时,触发熄火判断流程。为了提高可靠性,保留了原来的热电偶作为辅助判据。热电偶输出电压经过冷端补偿之后,和 2.5mV 阈值值进行比较。离子信号消失的时候,如果热电偶在 1s 内电压下降幅度大于 30%,立即判定为熄火并发出关阀信号;如果热电偶的电压比较稳定,则暂时不动作,再检测 200ms。该策略兼具快速反应、抗瞬态干扰的能力。火焰正常脉动造成离子信号瞬间低于阈值时,系统不做出响应,以避免频繁的阀门关闭。电磁阀关断后,控制器会记录下这次动作,并且只有当旋钮转到关闭位置时才可消除故障码,符合现有的用户习惯。

3.3 干烧与过热防护模块

干烧防护的热源对象是锅具底部。将 NTC 热敏电阻贴在炉头中心盖下部,用弹簧机构保证和锅底有弹性接触。传感器信号经过 16 位模数转换器采样,每秒 10 次。单一固定阈值温度 T_s 设为 260 $^{\circ}$ C,这是最后一道防线。更重要的就是温度梯度保护,连续秒内温升大于 25 $^{\circ}$ C,且当前温度大于 180 $^{\circ}$ C,就判定为干烧状态。该判据可以区分正常高功率烹饪和锅体失水后急剧升温^[3]。为了防止误关,加入了火焰检测以及旋钮位置辅助校验。只有火焰正常、旋钮在大火档位时才进行强制关阀,如果火焰已经熄灭就先进入熄火保护程序,防止重复动作。关阀之后系统发出蜂鸣声提示,防止用户疏忽大意。测试结果表明,

该复合判据在空锅干烧试验中可以触发保护,在 192 $^{\circ}$ C 到 215 $^{\circ}$ C 之间。

3.4 一氧化碳联动控制单元

一氧化碳传感器采用电化学式,安装在灶具后方墙体的可拆卸模块中,用有线接口和主控板连接,保证信号稳定。传感器输出电流经过跨阻放大器转换后,以 1s 为间隔进行读取。联动策略分为两阶段。第一阶段,一氧化碳体积分数在 $5.0\times 10^{-5}\sim 1.5\times 10^{-4}$ 之间,火焰燃烧信号存在时,主控器通过串行接口给燃气比例阀发减小开度指令,并闭合排风继电器,启动抽油烟机或者排风扇。当浓度降到 3.0×10^{-5} 以下的时候,比例阀就回到原来的位置,排风延时 60s 停止。第二阶段,当浓度大于 1.5×10^{-4} 或者第一阶段启动后浓度继续上升,就不需要等待延时,直接关闭主电磁阀,排风一直运行到手动复位为止。本设计防止低浓度频繁关阀造成的可用性降低,保证高浓度时的果断切断。本单元还有传感器寿命监测的功能。电化学传感器的输出基线会随着时间的推移而逐渐漂移,当零偏电压超过初始值 ± 2 mV 的时候,系统就会发出清洁或者更换的提示,避免由于灵敏度下降而造成漏报。

4 样机测试与优化效果评价

4.1 测试标准与条件

按照现行国家标准 GB 16410、GB 6932 中有关灶具安全性能试验方法的规定,参照 IEC 60730 有关自动电气控制装置功能安全要求。所有的时序、浓度数据都在环境温度为 20 $^{\circ}$ C $\pm 3^{\circ}$ C、相对湿度为 45%~65%的条件下采集。样机使用天然气 12T,额定压力 2000Pa。泄漏试验所用标准试验气为甲烷,用气相色谱仪标定。熄火保护试验用高速摄像机和同步电压记录仪来确定火焰熄灭到电磁阀断电所用的时间。干烧测试用标准铝锅,加入定量的水,加热至沸腾,再将水烧干,记录温度曲线和关阀动作点。一氧化碳联动测试在容积为 10m³ 的密闭试验室内进行,用燃烧器产生不充分燃烧气体,监测浓度和关阀动作。

4.2 安全性测试流程

测试过程为四个独立序列,没有工况交叉的影响。泄漏切断测试就是在样机气管接口处人为造成每分钟 0.1L 的微小泄漏,然后记录从泄漏开始到传感器采集到阈值,再到电磁阀动作的全过程时间。共做了 30 次试验,取平均值。熄火保护测试,稳定燃烧之后突然切断气源模拟意外熄火,记录离子信号消失时刻和电磁阀引脚电压下降沿的时间差。干烧防护测试,空锅在炉头上点火,持续加热,记录锅底温度及动作触发温度。每次做 10 次检测动作温

度以及误动。一氧化碳联动试验,将风门调节使烟气中一氧化碳浓度慢慢升高,观察两阶段控制动作实际浓度点及关阀延时。

4.3 实测数据对比

将原机配置和优化样机在相同条件下测试结果进行汇总。表1为优化前后安全性能指标对比。泄漏切断时间不包括优化前外置报警和手动关闭的平均耗时,这里优化前是指采用单一机械式联动模拟的方式,其理论最小切断时间为2.82s,优化后平均为1.7s。熄火保护阀时间从4.93s缩短至2.68s。干烧触发温度原机依靠双金属片,温控点分散,实测平均318℃,优化之后用温度梯度的判据在203℃就动作^[4]。一氧化碳关阀浓度原机没有此功能,优化后当体积分数达到 1.5×10^{-4} 时可靠关阀,在低速上升阶段在 9.8×10^{-5} 时就启动了比例阀调小和排风。

表1 优化前后安全性能指标实测对比

项目	优化前	优化后
泄漏切断时间/s	2.82	1.47
熄火保护关阀延时/s	4.93	2.68
干烧关断触发锅底温度/℃	318	203
CO浓度联动关阀阈值/ 10^{-6}	无此功能	150
CO浓度一级联动排风阈值/ 10^{-6}	无此功能	98
泄漏误报率/%	无自动检测	0.2
干烧误动率/%	12	1.5

4.4 优化效果判定

从实测数据可以看出,泄漏切断时间缩短了47.9%,给危险浓度的积累留出了关键的阻断窗口。熄火保护关阀时间提前了将近一半,减少意外熄火后未燃气体的释放量。干烧防护动作温度保持在203℃左右,离油脂自燃点较远,使正常烹饪误动率由原来的12%降低到1.5%,大大提高了可用性。一氧化碳联动把监测和控制融为一体,克服了原来机器完全依靠人工控制的缺陷。各个模块在测试中都没有出现器件损坏、逻辑混乱的情况,硬件电路与状态机策略配合得当。整套优化设计的工程可实施性得到了初步验证。

重复性测试时泄漏切断时间标准差为0.11s,电子链路延迟比较稳定,但是离子感应针连续燃烧10h之后信号

幅值衰减到原来的8%,虽然没有达到阈值但是需要考虑长时间积碳对熄火响应裕度的影响。干烧梯度判据对锅具材质敏感,铸铁锅由于热容量大造成温升斜率低,触发温度平均上浮1℃左右,后续可以采用材质自适应基线来减小离散^[5]。一氧化碳联动过程中比例阀调小开度时火焰出现短时闪动,但是没有引起熄火误报,说明跨传感器关联逻辑有一定的鲁棒性。

5 结束语

本文针对燃气灶建立了一个包含泄漏、熄火、干烧、一氧化碳这四种典型危险的安全体系。利用双电磁阀物理隔离、离子感应加热电偶冗余熄火判据、温度梯度提前识别干烧、一氧化碳浓度两阶段闭环联动,使设备在响应速度和误报控制方面都比传统的设计要好。样机试验数据证明各项功能得到了实际的改善。传感器长期漂移、电磁阀机械寿命仍然是以后要跟踪的问题。量产下甲烷传感器一致性校准、电化学传感器寿命终点准确预测、整个控制板在高温高湿环境下的可靠度还有待检验。后续工作会进行累计运行2000小时的加速老化试验,加入自诊断和故障输出功能,使得设备的安全状态可以对外传递。

[参考文献]

- [1]刘治国.燃气设备安全检查机制与风险防控措施研究[J].石化技术,2026,33(4):453-454.
 - [2]赵子康.关于城镇燃气管道工程建设及其设备安全管理分析[J].中国化工贸易,2026,18(2):148-150.
 - [3]周宇.城镇燃气管网输配安全管控与应急调度协同机制研究[J].中国化工贸易,2026,18(19):140-142.
 - [4]叶子龙,郝学军,张世达.基于AHP-模糊综合评价法的城市平房区燃气改造风险分析[J].建筑节能(中英文),2026,54(6):100-105.
 - [5]杨宁波.工业企业燃气固化炉全链条安全管理与智慧化应用研究[J].河北安全生产,2026(6):109-111.
- 作者简介:祁泽远(1992—),毕业于江苏理工学院机械设计制造及其自动化专业,当前就职于北京鑫丰泰燃气设备有限公司江苏分公司,质保工程师,助理工程师。