

燃气热值计量标准的尾气收集装置精度设计

竺林坤, 胡佳成, 李东升, 张洪军

(中国计量学院 计量测试工程学院, 杭州 310018)

摘要: 针对基于燃烧法的燃气热值计量标准的尾气收集装置的缸体容积精确测量问题, 应用现代仪器精度与误差理论, 对该尾气收集装置的各项误差源进行分析, 得到各分量的传递系数表达式, 并按工程实际情况对精度指标进行了分配与调整; 对分配的精度指标进行了合成计算, 结果表明所设计的燃气热值计量尾气收集装置的最大允许误差为 0.24%, 完全满足尾气体积的测量精度要求; 论文研究对建立我国新一代天然气热值计量标准有很好的指导意义和工程实用前景。

关键词: 燃气热值计量; 尾气收集装置; 气缸传动误差; 精度设计

Accuracy Design of Exhaust Gas Collecting Device about Gas Caloricity Gaging

Zhu Linkun, Hu Jiacheng, Li Dongsheng, Zhang Hongjun

(College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem of accurate measurement of cylinder volume of the exhaust gas collection device based on the combustion method of gas calorific value measurement standard, the error sources of the tail gas collecting device are analyzed and the expression of the transfer coefficient is obtained by using the modern instrument precision and error theory, and according to the actual situation of the project, the accuracy index is allocated and adjusted. Index distribution accuracy is synthesized. The results show the designed maximum permissible error calorific value of gas metering exhaust collector means 0.59%, to fully meet the requirements of exhaust gas volume measurement accuracy. Thesis has a good guide for the establishment of the new generation of natural gas calorific value measurement standards, and has a good prospect of engineering application.

Keywords: gas calorific value measurement; exhaust gas collecting device; cylinder transmission error; accuracy design

0 引言

以热值作为贸易结算的依据已成为国际上天然气贸易交接的发展趋势^[1-2], 以德国为代表的欧洲发达国家用十余年时间联合研发了天然气热值计量标准装置, 已投入使用。我国已是天然气进口大国, 目前还是以体积(质量)计量^[3-4]的方式作为天然气贸易结算的依据, 无法与国际标准实现互认, 造成较大的潜在损失。为缩短同国际先进计量技术的差距, 保障天然气贸易交接的公正公平, 在我国建立天然气热值计量标准装置已势在必行^[5]。天然气热值计量标准装置如图 1 所示。

天然气热值计量标准装置包括燃气热值测量主体容器及相适应的温控系统、高精度燃气质量测量系统、配气系统、尾气收集装置中的尾气成分检测系统和整体系统操作与控制软件^[6]; 天然气热值计量标准装置采用燃烧法来获得燃气的实际热值, 但因为燃气燃烧时无法保证完全燃烧, 对燃气热值计量的准确性造成了影响, 所以对尾气进行收集并对其成分加以分析, 可对热值数据进行补偿修正, 以便于提高天然气热值计量标准装置的整体精度^[7-8]。为此, 本文设计了用于对燃烧产物进行收集及测量的燃气热值计量尾气收集装置。

1 尾气收集装置工作原理与结构

本文设计的应用于燃气热值计量标准的尾气收集装置的工作原理及结构是: 燃气燃烧前, 设定储气罐及燃烧池的初始压强; 待燃气体点燃后, 尾气从燃烧池流出, 并进入干燥装置中,

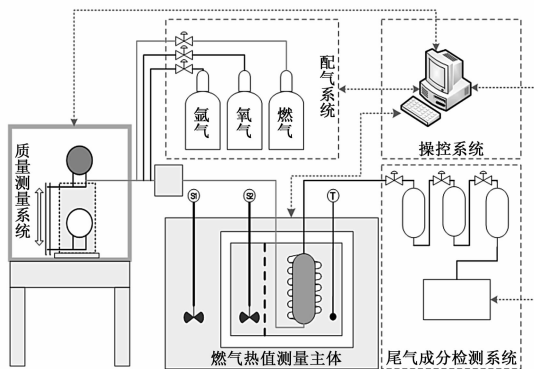


图 1 天然气热值计量标准装置示意图

经干燥装置进行充分干燥后的尾气流经气体流量计, 使气体流量计显示数值, 接着将进入与气体流量计一侧相连的储气罐中, 由安装在储气罐顶部上的压力传感器检测到罐中的压强, 此时的压强值高于初始压强值, 由于将压强值反馈到下位机中存在时间差, 则不能实时控制伺服电机抽取气体的多少, 故设定某个大于初始压强值为中间压强值。

根据气体流量计传送出的流量值, 来控制伺服电机的转速, 并带动与伺服电机相连接的活塞杆, 抽取管路中的尾气, 使储气罐中的压强值始终趋于设定的中间压强值。当燃烧结束后, 气体流量计将变成数值为 0, 停留一段时间后, 继续转动电机, 使装置的中管路的压强值趋向于设定的初始压强值。然后充一定量的惰性气体洗涤装置后, 伺服电机将停止转动, 根据光栅尺获取活塞缸内收集气体的位移测量示数, 进而对活塞缸收集气体体积计算^[9]。尾气收集装置基本结构如图 2 所示。

2 尾气收集装置的误差分析

天然气热值计量标准装置的不确定度为 0.3%, 尾气收集

收稿日期: 2015-10-21; 修回日期: 2015-11-23。

基金项目: 国家质检公益性行业科研专项项目(201410133)。

作者简介: 竺林坤(1990-), 男, 浙江绍兴人, 硕士研究生, 主要从事气体流量计量和智能化仪表的研制方向的研究。

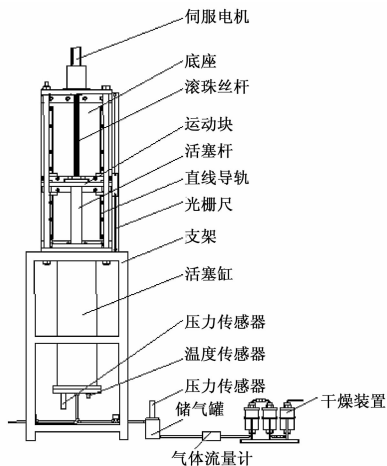


图 2 燃气热值计量尾气收集装置

装置在整个标准装置不确定度分配中所占权重较小，初步确定本文中研究设计的尾气收集装置部分的不确定需要达到 0.5% (k=2)。为此必须对该尾气收集装置在收集过程中的误差源进行全面分析，对各个误差源进行合理的精度设计。

尾气收集装置的体积数学模型：

$$V_{\text{标}} = \frac{\pi D^2 T_{\text{标}} P_0 L}{4 T_0 P_{\text{标}}} \quad (1)$$

式中， $V_{\text{标}}$ 为标准状况下的活塞缸内收集的体积，单位为 (mm^3) ； $T_{\text{标}}$ 为标准状况下的活塞缸内的温度 (k)； T_0 为工作环境下的活塞缸内的温度 (k)； $P_{\text{标}}$ 为标准状况下的活塞缸内的压力 (Pa)； P_0 为工作环境下的活塞缸内的压力 (Pa)； D 为工作环境下的活塞缸内径值 (mm)； L 为光栅尺在工作环境下的读数 (mm)。

由公式 (1) 可知：装置的主要误差来源有：位移测量误差、缸体内径测量误差和温度与压力测量误差等 4 个因素。

2.1 位移测量误差

经上述装置的工作原理介绍，位移测量误差的具体表现如表 1 所示。

表 1 位移测量误差的具体误差分类

误差类型	表达方式	说明
标准量误差 $\delta_1(x)$	测量光栅的示值误差 $\delta_{12}(x)$ 连接件定位误差 $\delta_{12}(x)$	
阿贝误差 $\delta_2(x)$	$\delta_2(x) = A \times \sin\varphi$ (2)	A 为光栅尺与运动块之间的距离； φ 为运动块在平面内竖直方向上的摆动角。
导轨垂直度误差 $\delta_3(x)$	$\delta_3(x) = \Delta\gamma \times L$ (3)	$\Delta\gamma$ 为垂直角度偏差；L 为纵向最大收集行程。
环境温度误差 $\delta_4(x)$	$\delta_{41}(x) = \alpha_1 \times \Delta T \times L$ (4) $\delta_{42}(x) = \alpha_2 \times \Delta T \times L$ (5) $\delta_{43}(x) = \alpha_3 \times \Delta T \times L$ (6)	α_1, α_2 和 α_3 分别为测量光栅、导轨、支座的材料热胀系数；L 为纵向最大收集行程； ΔT 温度变化值。
其他误差 $\delta_5(x)$	由环境中的振动、测量软件以及测量人员而引起对位移测量过程中的误差	

2.2 缸体内径引起的体积误差分量

2.2.1 缸体内壁加工误差

尾气收集装置中的活塞采用盘状形结构，其活塞缸内壁被加工后实际得到的内径大小与理论上的内径值存在差异，因此产生了活塞缸内壁加工误差。活塞缸内壁加工误差 $\delta_6(x)$ 是影响收集到的尾气体积精度至关重要的因素之一。

2.2.2 环境温度引起的缸体变形误差

环境温度变动引起装置中活塞缸的直径测量误差 $\delta_7(x)$ ，其与活塞缸的材料热胀系数 α_1 及最大收集行程 L 、温度变化值 ΔT 有关，计算公式如下：

$$\delta_7(x) = \alpha_1 \times \Delta T \times L \quad (7)$$

2.2.3 其他误差

其他误差主要包括环境中的振动、测量人员而引起对缸体内径测量过程中的误差，设这些误差量大小为 $\delta_8(x)$ 。

2.3 温度与压力测量误差

活塞缸盖底部安装有温度传感器与压力传感器，用来实时检测活塞缸内的气体温度与压力，便于计算标准状况下的尾气体积，因此温度传感器的误差 $\delta_T(x)$ 及压力传感器的误差 $\delta_P(x)$ 也是成为尾气收集装置的标准量误差的主要来源。

3 尾气收集装置的精度设计

3.1 等作用原则的初步精度设计

根据上述对尾气收集装置的机械结构和装置的误差来源以及具体精度要求的分析，对尾气收集装置进行精度设计。根据上述的数学模型计算得： $V_{\text{标}} = 1.05 \times 10^7 \text{ mm}^3$ ，故装置对收集的尾气体积误差为 $\delta_{\text{标}} = 0.53 \times 10^5 \text{ mm}^3$ 。

因测量项目有四项，即 $n = 4$ 。依据等作用原则分配误差，可得出长度 L 测量的极限误差为：

$$\delta_L(x) = \frac{\delta_{\text{标}}}{\sqrt{n}} \frac{1}{\frac{\partial V_{\text{标}}}{\partial L}} \approx 1.63 \text{ mm} \quad (8)$$

依据等作用原则和最大允许误差 δ_L 的要求，可利用方和根法求得：

$$\begin{aligned} \delta_{11}(x) &= \delta_{12}(x) = \delta_2(x) = \delta_3(x) = \\ \delta_{41}(x) &= \delta_{42}(x) = \delta_{43}(x) = \delta_5(x) = \\ &\frac{\delta_L(x)}{\sqrt{8}} \approx 0.57 \text{ mm} \end{aligned} \quad (9)$$

依据等作用原则分配误差，可得出直径 D 测量的极限误差为：

$$\delta_D(x) = \frac{\delta_{\text{标}}}{\sqrt{n}} \frac{1}{\frac{\partial V_{\text{标}}}{\partial D}} \approx 0.17 \text{ mm} \quad (10)$$

依据等作用原则和最大允许误差 δ_D 的要求，可利用方和根法求得：

$$\delta_6(x) = \delta_7(x) = \delta_8(x) = \frac{\delta_D(x)}{\sqrt{3}} \approx 0.1 \text{ mm} \quad (11)$$

依据等作用原则分配误差，可得出温度 T 和压力 P 测量的极限误差为：

$$\delta_T(x) = \frac{\delta_{\text{标}}}{\sqrt{n}} \frac{1}{\frac{\partial V_{\text{标}}}{\partial T_0}} \approx 0.75 \text{ k} \quad (12)$$

$$\delta_P(x) = \frac{\delta_{\text{标}}}{\sqrt{n}} \frac{1}{\frac{\partial V_{\text{标}}}{\partial P_0}} \approx 252.5 \text{ Pa} \quad (13)$$

3.2 位移测量误差设计

3.2.1 标准量误差设计

根据选用的光栅尺测量精度,取测量光栅的示值误差 $\delta_{11}(x) = 1.0 \times 10^{-3}$ mm。收集尾气的过程通过运动块的移动来实现,则运动件的定位误差 $\delta_{12}(x)$ 可控制在 1.0×10^{-2} mm。

3.2.2 阿贝误差设计

活塞杆与所设计的测量光栅之间的距离为 $A = 200$ mm,收集过程中运动块的最大摆角控制在 $\varphi = 8'$,则产生的阿贝误差为:

$$\delta_2(x) = 200 \times \sin\varphi \approx 0.47 \text{ mm}$$

由于在收集尾气过程中,运动块带动活塞杆沿导轨上下移动,运动块的摆角大小较难控制,故应适量放宽对阿贝误差的限制。

3.2.3 导轨垂直度误差设计

根据所需要收集的尾气总体积要求,尾气收集装置的收集行程为 650 mm。导轨与运动块的垂直角度偏差不超过 $1.2''$,可应用角度器进行测量,则垂直度误差大小计算如下:

$$\delta_3(x) = \Delta\gamma \times L = 0.22 \text{ mm}$$

由于收集尾气的行程较长,难以减小导轨的垂直度误差,因此可以适量放宽对垂直度误差的精度要求。

3.2.4 环境温度误差设计

根据实际测量情况,要求环境温度最大允许偏差为 0.5°C ,选用的玻璃测量光栅的线膨胀系数 α_1 为 $8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$;导轨的材料主要为碳钢,取线膨胀系数 α_2 为 $1.16 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$;尾气收集装置的支座主要是选用不锈钢材料制作,取线膨胀系数 α_3 为 $1.44 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,则由于环境温度变化引起的测量误差计算如下:

$$\delta_{11}(x) = \alpha_1 \times \Delta T \times L = 3.0 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\delta_{12}(x) = \alpha_2 \times \Delta T \times L = 4.0 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\delta_{13}(x) = \alpha_3 \times \Delta T \times L = 5.0 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

3.2.5 其他误差设计

其他测量误差具体主要包含环境振动对测量引起的误差以及其他未知误差。由于其他未知误差难以获取,对其无法进行修正,因此分配给该项的误差应该较大,取 $\delta_5(x) = 0.5$ mm。

3.3 缸体内径引起的体积误差分量设计

3.3.1 缸体内壁加工误差设计

为了保证尾气收集装置在收集气体过程中不影响燃气热值计量的整套系统中的燃烧池所排出的气体流量大小,所要设计的尾气收集装置中的活塞缸内壁的直径不能过大,否则将难以控制维持燃烧池到尾气收集装置的管路中的压强恒定,因此设计活塞缸内壁为 150 mm。取活塞缸内壁加工误差为 $\delta_6(x) = \pm 0.02$ mm,且可应用高精度的三坐标测量仪进行测量。

3.3.2 环境温度引起的缸体变形误差设计

活塞缸的材料选用不锈钢制作,取线膨胀系数 α_4 为 $1.44 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。由于环境温度变化引起的测量误差计算如下:

$$\delta_7(x) = \alpha_4 \times \Delta T \times L = 5.0 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

3.3.3 其他误差设计

其他测量误差具体主要包含环境振动对测量引起的误差以及其他未知误差。这些误差一般比较难以获取,从而无法修正,因此分配给该项的误差应该较大,取 $\delta_8(x) = 0.05$ mm。

3.4 温度与压力测量误差设计

选用安装在活塞缸底部的温度传感器测量误差为 $\delta_T(x) = \pm 0.25$ k,且压力传感器测量误差为 $\delta_P(x) = 101$ pa。

3.5 测量误差的合成

根据误差独立作用原理,按照方和根公式对上述误差进行合成,可得尾气收集装置在长度方向的最大允许误差为:

$$\delta_L(x) = \sqrt{\sum \delta_i^2} = \sqrt{\delta_{11}^2 + \delta_{12}^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_{11}^2 + \delta_{12}^2 + \delta_{13}^2 + \delta_5^2} \approx 0.72 \text{ mm} < 1.63 \text{ mm}$$

尾气收集装置在直径方向上的最大允许误差为:

$$\delta_D(x) = \sqrt{\sum \delta_i^2} = \sqrt{\delta_6^2 + \delta_7^2 + \delta_8^2} \approx 0.06 \text{ mm} < 0.17 \text{ mm}$$

尾气收集装置的最大允许体积误差为:

因此,燃气热值计量尾气收集装置的相对最大允许体积误差为 $\frac{0.25 \times 10^5}{1.05 \times 10^7} \times 100\% = 0.24\%$,满足设定的精度要求。

4 结论

本文对应用于燃气热值计量标准的尾气收集装置进行了设计,主要从装置的位移测量、缸体内径测量和温度以及压力测量 4 个方面进行对其主要误差源分析,同时对尾气收集装置的主要误差源进行了精度设计。结合实际测量条件,经计算可得出该尾气收集装置的精度能达到 0.24% ,完全满足装置的设计要求。这为指导尾气收集装置的实际结构设计以及进行误差修正实现装置的尾气体积收集精度要求提供了扎实的理论基础。同时分析得到的结论也可用于具有类似结构的主动式驱动活塞装置的精度分析。

参考文献:

- [1] 杨红,董事尔,彭雪锋,等.我国天然气能量计量的现状与发展趋势[J].硅谷,2012(3):44-46.
- [2] 张伟,周进生.关于利用能量计量天然气的经济技术分析[J].中国矿业,2012,21(5):30-34.
- [3] 李鹭光,周志斌.中国天然气按量计价实施方案研究[J].天然气工业,2011,31(12):110-114.
- [4] 陈康良.对天然气能量计量方法实施的认识[J].石油规划设计,2001,17(5):1-3.
- [5] 马立强,李郝鹏.浅析天然气能量计量系统的检定现状[J].工业计量,1997,17(4):71-73.
- [6] Schley P, Bech M, Uhrig M, et al. Measurement of the calorific value of methane with the new GERG reference calorimeter[J]. International Journal of Thermophysics, 2010(31):665-679.
- [7] Hasselbarth W, Rauch J, Sarge S M. Uncertainty evaluation for the adiabatic temperature rise in isoperibol calorimetry[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2012,(109):1597-1617.
- [8] Haloua F, Hay B, Foulon E. Uncertainty analysis of theoretical methods for adiabatic temperature rise determination in calorimetry[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2013,(111):985-994.
- [9] 李东升,竺林坤,胡佳成,等.一种恒压式闭环控制的尾气自动收集方法及装置:201410759557.3[P].2015-03-25.