

# 小流量气体流量的测量方法及应用

曹智程, 费立森

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 介绍了小流量气体流量测量装置的原理和应用背景, 建立了小流量气体测量系统。采用两种实验方法, 即质量流量计串连孔板测量法和孔板配合差压测量法, 进行了测量, 得到小流量拟合公式。比较了不同实验方法的精度和特点。结果表明, 第二种方法重复性好, 测量精度高。

**关键词:** 地面试验; 流量计; 气体小流量

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2009) 03-0034-04

## The method and application of small gaseous mass flow rate measurement system

Cao Zhicheng, Fei Lisen

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** New approach to the control and measurement of small gaseous mass flow rate is needed when the mass flow rate is too small to be measured by traditional flow meter. In this paper, the background and principle of the instrumentation system for small gaseous mass flow rate measurement are presented. The instrumentation system were set up. Two means, namely, the small mass flow rate measurement by tandem arranged orifice plate and mass flow rate meter, and small mass flow rate measurement with orifice plate and differential pressure were tested. Different fitting equations were obtained. The accuracy and characteristics of the two methods were also compared. The results show that the second method has reasonable repeatability and the accuracy has improved effectively.

**Key words:** ground test; flow meter; small gaseous flow rate

收稿日期: 2009-03-31; 修回日期: 2009-04-17。

作者简介: 曹智程 (1968—), 男, 工程师, 研究领域为喷雾燃烧技术。

0 引言

在液体火箭发动机地面性能实验中, 需准确控制气体流量, 但经常会遇到气体流量较小, 超出现有流量计量程的情况。因此, 需研究可靠的小流量测量方法。音速节流孔板是测量流体流量和控制流体的一种重要方法, 广泛应用于大流量气体测量, 它基于临界流量原理, 即在来流的滞止压力  $p_0$  和滞止温度  $T_0$  一定时, 流量可以达到临界流量 (最大流量)。大多数文献介绍的孔板流量测量主要针对大流量气体, 对气体小流量的测量并不适用。本文针对地面性能实验中小流量气体测量问题, 介绍了小流量气体流量测量装置的设计原理与设计方法。

1 测量原理及系统组成

1.1 基本原理

管路中气体一维定常等熵流动应满足以下假

设: (1) 所有流动参数在管道的各个截面是均匀的; (2) 流动过程中流动参数的大小不随时间而改变; (3) 不考虑流动摩擦, 并且与外界绝热。当气体通过节流孔板小孔时, 气流速度加快, 在节流孔处达到临界流, 其速度为该处的音速, 此时下游压力出现脉动, 小孔处的压力将维持不变, 气体流量保持恒定。

1.2 计算方法

在超临界状态下, 一维定常理想气体的流量按下式计算:

$$\dot{m} = \frac{C_d p_0 A}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{K \left( \frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K+1}{K-1}}} \quad (1)$$

式中,  $\dot{m}$  为气体质量流量;  $p_0$  为孔板入口压力;  $T_0$  为气体总温;  $A$  为孔板小孔面积;  $R$  为气体常数;  $C_d$  为流量系数;  $K$  为空气绝热指数。

1.3 系统组成

小流量气体流量测量装置的组成见图 1。测量段由节流孔板、球形接头、外套螺母、压力传感器接头、温度传感器接头和直管段等组成。

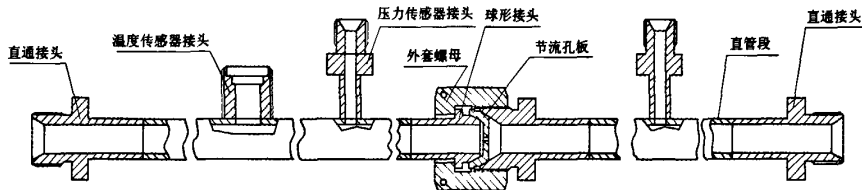


图 1 系统测试原理图

Fig.1 Schematic of the instrumentation system for small mass flow rate

2 实验方法

2.1 质量流量计串联孔板测量方法

在实验中用质量流量计测量气体流量, 但实验室现有质量流量计下限量程为 20g/s, 为将其应用于小流量测量, 以水为介质, 在量程外对其进行了流量值标定。结果表明: 质量流量计在 1.7~20g/s 区间内精度较好, 可用于小流量测量。质量流量计用于气体流量测量时, 流量测量值不稳定。为准确测量气体小流量, 采用孔板加测压

的流量测量方法。在空气管路中布置节流孔板, 实验中保证孔板处于超临界状态, 通过调节上游的总压控制空气流量。假设实验中需模拟 0.6MPa 的背压, 为保证孔板始终处于超临界状态, 要求  $p_0$  大于 1.5MPa; 根据超临界状态下流量公式 (1) 计算得: 孔板的直径  $d=0.753\text{mm}$ , 空气的流量和来流总压见表 1。

图 2 为实验系统图。空气由高压气源提供并经减压阀后产生 3MPa 左右空气。减压阀下游布置截止阀, 调节来流总压。截止阀下游布置质量流量计, 孔板上游布置压力传感器和温度传感

器，分别测量入口压力  $p_0$  和入口温度  $T_0$ 。孔板下游布置压力传感器监测背压，保证实验中孔板始终处于超临界状态。管路出口布置截止阀调节背压。压力、温度传感器和质量流量计与数采系统相连，采样时间 5s，采样率 10Hz。

表 1 实验工况参数

Tab.1 Experimental parameters			
工 况	$p_0/\text{MPa}$	$p_f/\text{MPa}$	$\dot{m}_{\text{air}}/(\text{g}\cdot\text{s}^{-1})$
1	2.52	0.6	2.67
2	2.10	0.6	2.23
3	1.72	0.6	1.83
4	1.56	0.6	1.65
5	3.70	0.6	3.92

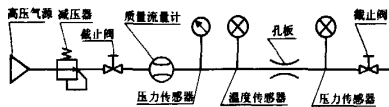


图 2 孔板串联质量流量计测量小流量系统图  
Fig.2 Small mass flow rate measurement by tandem arranged orifice plate and mass flow rate meter

图 3 给出了孔板质量流量与来流总压关系的离散数据和拟合直线图。从图中看出：数据点分布比较分散。这是由于质量流量计在额定量程外工作，测量结果漂移较大。采用该方法进行实验时，数据的重复性差。流量与压力的拟合关系式为： $\dot{m}=0.90532p_0$ 。

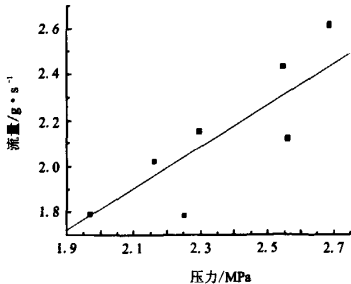


图 3 流量压力关系数据点分布及拟合直线图  
Fig.3 Fitting curve of the the mass flow rate and pressure relationship

2.2 孔板配合差压法测量方法

由于在量程外使用质量流量计，测量结果的可重复性差。因此需研究其它测量方法。孔板配合差压法是一种非常有效的测量方法。该方法的思路是：在管路中布置孔板，使其工作在超临界状态，在固定来流总压下游将空气喷入容积已知的密闭容器，通过测量实验前后容器内的差压  $\Delta p$ ，计算喷入容器内的空气质量为  $dm=\frac{dP\cdot V}{RT}$ 。实验中精确控制空气喷射时间  $t$ ，得到质量流量

$$\dot{m}=\frac{dm}{t}=\frac{dP\cdot V}{RTt} \tag{2}$$

图 4 给出了孔板配合差压法的实验系统图，在高压气源出口布置减压器，产生 3MPa 左右的实验气源。减压器下游布置截止阀，调节来流总压。截止阀下游布置孔板，孔板上游布置压力传感器和温度传感器，分别测量  $p_0$  和  $T_0$ 。孔板下游布置压力传感器监测背压，保证实验中孔板始终处于超临界状态。利用通断电磁阀控制气路通断。由于通断电磁阀打开时孔板前后压力相等，系统随着流动进行逐渐达到稳定的超临界状态。为减少孔板启动过程造成的实验误差，在通断电磁阀前布置排气电磁阀，实验进行时首先打开排气电磁阀对大气排气，工作 10s 后孔板已处于稳定的超临界状态，此时关闭排气电磁阀，打开通断电磁阀，开始向密闭容器内充气。10s 后关闭通断电磁阀，实验结束。

利用压力传感器和温度传感器监测容器内气体状态，当压力和温度均达到稳定后，测量容器内压升  $\Delta p$ ，计算质量流量。利用截止阀泄放容器内的高压气，进行下一步实验。压力、温度传感器和质量流量计与数采系统相连，采样时间 10s，采样率 10Hz。

图 5 给出了孔板流量与来流总压关系的数据点分布和拟合直线图。从图中看出：实验数据点集中，流量和压力间线性度好。此外，在多次标定实验中，数据重复性很好。得到的流量与压力拟合关系式为

$$\dot{m}=0.9422p_0$$

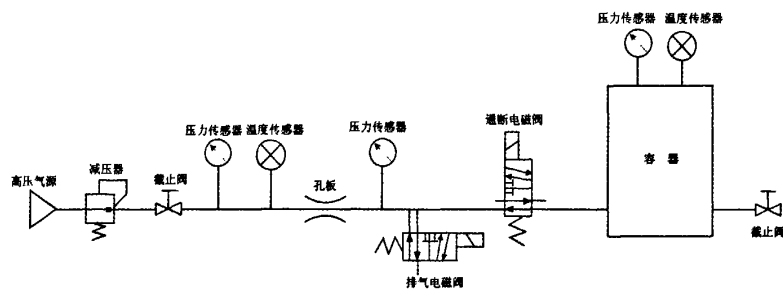


图 4 孔板配合差压法测量小流量

Fig.4 Schematic of the instrumentation system for small mass flow rate with orifice plate and differential pressure measurement

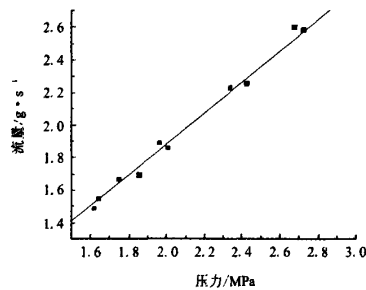


图 5 流量-压力关系数据点分布及拟合直线图

Fig.5 Fitting curve of the mass flow rate and pressure relationship

3 结论

为解决液体火箭发动机地面性能实验中气体小流量的测量问题,开展了专门的实验研究,采用理论计算式设计了孔板,建立了孔板串联质量流量计测量系统和孔板配合差压法测量系统,实验结论如下:

(1) 孔板串联质量流量计流量测量方法所得

结果波动大,主要因为测量气体流量时超出了质量流量计的额定下限量程,孔板配合差压法流量测量装置测量结果线性度较好,可重复性好。

(2) 孔板配合差压法流量测量装置测量小流量气体是可行的。

本实验假设温度是恒定值,由于受环境温度和来流气体流速等影响,温度会略有变化,为使测量数据更为准确,后续实验应考虑温度变化的影响。

参考文献:

[1] 梁国伟,蔡武昌. 流量测量技术及仪表[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.  
[2] 潘锦珊. 气体动力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.  
[3] 米勒 R W. 流量测量工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.  
[4] 李正兵, 吴锦凤, 宋秋凤. 液体火箭发动机实验测量系统状态检测程序设计[J]. 火箭推进, 2007, 33(5): 59-62.

(编辑: 王建喜)