

阿牛巴流量计在氢氧火箭发动机 大流量气流试验中的应用

张茂森, 吴 涛, 张卫东, 李 超, 吴仲义
(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 为满足某型号氢氧火箭发动机大流量气流试验要求, 通过深入分析和调研, 决定采用阿牛巴质量流量计进行气体流量测量。介绍了阿牛巴流量计的结构组成、工作原理, 对流量计的管道安装、流量数据计算进行了详细描述, 将阿牛巴流量计与科里奥利质量流量计的测试数据进行比较, 结果表明阿牛巴流量计在试验中具有良好使用效果。最后对阿牛巴流量计的性能特点、应用前景进行了论述。

关键词: 气流试验; 流量测量; 阿牛巴流量计; 不可恢复压损; 对比试验

中图分类号: V434+.3-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 06-0065-07

Application of Annubar flowmeter in large air flow test of LOX/LH₂ rocket engine

ZHANG Mao-sen, WU Tao, ZHANG Wei-dong, LI Chao, WU Zhong-yi
(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: To meet the requirements of large air flow test for a LOX/LH₂ rocket engine, Annubar mass flowmeter is adopted to measure the air flow on the basis of comprehensive analysis and research. The structure and working principle of the Annubar flowmeter are introduced. The flowmeter installation on pipeline and its flow data calculation are described in detail. The test data of Annubar flowmeter and Corioris mass flowmeter is compared, and also the application effect of Annubar flowmeter in the air flow test is illustrated in this paper. The performance characteristics and application prospect of Annubar flowmeter are discussed.

Keywords: air flow test; flow rate measurement; Annubar flowmeter; permanent pressure loss; contrast test

收稿日期: 2012-10-30; 修回日期: 2013-05-02

作者简介: 张茂森 (1978—), 男, 高级工程师, 研究领域为火箭发动机地面试验测控技术

0 引言

气流试验是氢氧火箭发动机系统组件研制必不可少的基础试验。由于液氢价格昂贵、管理困难,试验存在很高的危险性,无论是美国、欧洲还是俄罗斯对氢氧发动机组件研制的冷态试验,在氢流道和燃气流道中大多采用以空气为模拟介质的气流试验,取得了很好的效果。发动机推力室、喷管、换热器、调节元件等组件,都通过气流试验来获得系统中气路各组件的流量特性和阻力特性,为系统中参数的精确匹配提供重要的依据。

气体流量测量的准确性对于气流试验而言至关重要,因此科学的流量测量方法非常关键。某型号氢氧火箭发动机是中国目前在研的最大推力氢氧发动机,其推力室氢路总体气流试验压力 3 MPa,流量 20 kg/s,要求流量测量精度为 $\pm 3.0\%$,是具有挑战性的气流试验要求。由于气

体流场变化的复杂性,高压、大流量气体流量测量的精度、稳定性提高一直是个不小的难题。目前,利用差压原理进行气体流量测量仍是当今世界上使用最多,同时也是最可靠的流量测量方法之一,其中代表产品就是孔板流量计。虽然孔板流量计有着简单可靠、加工方便等优点,但是其量程比仅为 3:1,精度为 $\pm 1.5\%$,同时有着不可恢复压损大、安装、调试不方便等缺点。根据以往在气流试验中使用孔板流量计、音速喷嘴流量计多年积累的经验,发现孔板流量计、音速喷嘴流量计现场使用精度最高能达到 $\pm 2.0\%$,一般情况在 $\pm 3.0\%$ 左右。由于不可恢复压损大,对上游的供气系统提出很高的要求,长期使用带来的能源损耗大,同时由于量程比小,难以适应推力室大范围气体流量变化过程测量需求。为满足该型号氢氧火箭发动机的气流试验要求,对适用于高压、大流量气体流量测量的流量计展开了深入的分析 and 调研,统计了各种气体流量计的技术参数及适用条件(具体数据如表 1 如示)。

表 1 各种气体流量计技术参数及适用条件
Tab. 1 Technical parameters and application conditions of various air flow meters

流量计类型	测量精度/%	量程比	管道通径 D/mm	直管段要求	适用条件	压力 损失	购置 费用
孔板流量计	± 1.5	3:1	50~1 000	上游 10~30D; 下游 2~8D	雷诺数 $>2\times 10^4$	大	低~中
音速喷嘴流量计	± 1.5	3:1	15~300	上游 10~30D; 下游 4D	临界背压比 ≤ 0.528 雷诺数 $>2\times 10^5$	大	中
阿牛巴流量计	± 1.0	10:1	50~2 400	上游 8~30D; 下游 4D	雷诺数 $>1\times 10^4$	小	中
涡街流量计	± 2.0	10:1	15~300	上游 10~40D; 下游 5D	雷诺数 $>1\times 10^4$	中	中
质量流量计	± 0.5	40:1	2~300	不要求	流速 $\leq 61\text{m/s}$;不适 用于低密度气体	中	高

综合考虑各方面因素,在该推力室氢路总体气流试验中采用 3051SFA 型阿牛巴流量计进行了气体流量测量。近年来,随着均速管流量测量技术的不断发展,阿牛巴流量计解决了孔板流量计在大口径流量测量上的很多问题,具有测量精度高、量程比大、不可恢复压损小、调试方便、安装成本低等优点。与目前精度最高的科里奥利质

量流量计相比,阿牛巴流量计具有较高的性价比优势。

1 流量计结构及工作原理

阿牛巴流量计是基于皮托管 (Pitot) 测速原理发展起来的一种差压式均速管流量计,其原理

与皮托管的测量原理类似, 都是根据伯努利方程推导出来的。阿牛巴流量计由美国 DSI 公司在 20 世纪 60 年代开发, Annubar® 为其注册商标, 中文译为阿牛巴。现在该公司已成为罗斯蒙特

(ROSEMOUNT) 公司的一个子公司。阿牛巴流量计在 20 世纪 70 年代随成套设备引入我国, 由于制作简单、计算方便、性能良好, 目前已经在国内取得了广泛的应用。

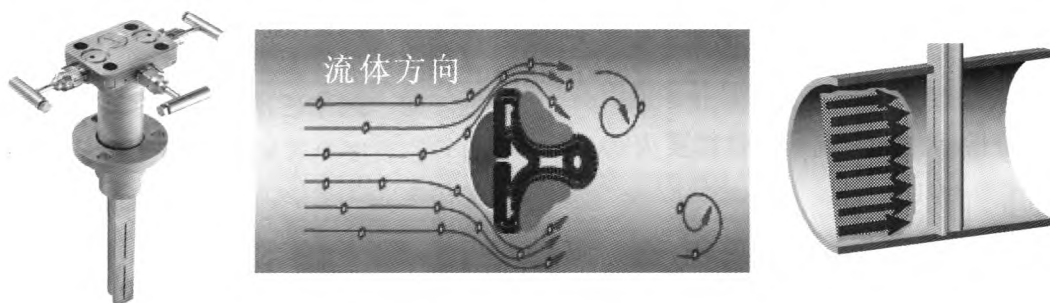


图 1 3051SFA 型阿牛巴流量计

Fig. 1 3051SFA Annubar flowmeter

罗斯蒙特 3051SFA 型阿牛巴流量计结构如图 1 所示, 采用皮托管测量原理, 测量阿牛巴流量传感器 (T 形杆) 上游的总压与下游的静压之间形成的差压, 从而达到测量流量的目的。由于管道壁摩擦力的存在, 管道内的压力、流速分布并不均匀, 而是呈抛物线规律分布。为了准确计量, 需获得流体的正确平均流速, 将整个管道圆截面分成单元面积相等的两个半圆。传感器是一根中空 T 形金属杆, 迎流面为一对总压取压槽, 它们对称位于管道的中央, 分别反映了其单位面积内的流速大小。由于两个总压槽是相通的, 传至取压槽的总压值平均后, 由总压引出管引至高压接头, 送到差压变送器的高压腔。当传感器正确安装在有足够长度直管段的工艺管道上时, 流量截面上应没有漩涡, 整个截面的静压可认为是常数, 在传感器的背面或侧面设有检测孔, 代表了整个截面的静压。经静压引出管由低压接头引至差压变送器的低压腔, 同时内置的绝压变送器可以测量管道的静压值。高、低压腔差压与流量截面的平均流速的平方成正比, 从而获得差压与流量的平方成正比的关系。在此关系的基础上, 可由伯努利方程和连续性方程推导出流量计算公式。

$$Q_m = F_{na} \cdot K \cdot D^2 \cdot Y_a \cdot F_{aa} \cdot \sqrt{\rho_f} \cdot \sqrt{D_p} \quad (1)$$

式中: Q_m 为质量流量, kg/s; F_{na} 为单位转换因

子; K 为流量系数; D 为管道内径, mm; Y_a 为气体膨胀因子; F_{aa} 为热膨胀因子; ρ_f 为流体密度, kg/m³; D_p 为差压, kPa。

流量系数 K 为

$$K = \frac{(1 - C_2 B)}{\sqrt{1 - C_1 (1 - C_2 B)^2}} \quad (2)$$

式中: C_1 , C_2 为厂家给出的试验常数; B 为阻塞

比, $B = \frac{4d}{\pi D}$; d 为阿牛巴 T 形杆宽度, mm。

气体膨胀因子 Y_a 为

$$Y_a = 1 - \left(Y_1 \cdot (1 - B)^2 - Y_2 \right) \frac{D_p}{p_f \cdot \gamma} \quad (3)$$

式中: Y_1 , Y_2 为常数; p_f 为管道绝对静压值, kPa; γ 为比热比。

在阿牛巴流量计的下游管道中安装一个铂电阻温度传感器, 用来测量管道中的静温值。通过对管道内的平均总压、静压、静温的准确测量, 即可求出管道内气体的质量流量。3051SFA 多参数流量变送器内置了 $\pm 0.04\%$ 精度的差压变送器、 $\pm 0.04\%$ 精度的绝压变送器、高速 CPU 和大容量数据储存器, 对流体流量进行实时、动态的补偿计算。内置的大容量数据储存器储存了流体在不同压力、温度下计算公式中所需要使用的物性数

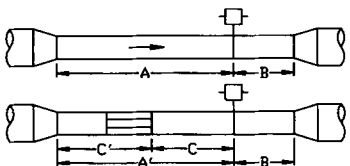
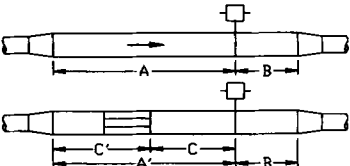

据，包括密度、气体常数、压缩系数、比热比等数据，根据流体实际变化的工作压力、温度，从数据库中取出对应的数据放入公式(1)中计算。这个流量计算公式还对管道和流量传感器在不同压力、温度下的热胀冷缩和膨胀等各种影响进行补偿计算，最大程度地消除引起流量测量误差的各种因素。3051SFA 型阿牛巴流量计技术说明书中给出了测量指标：质量流量测量精度为±0.8%，流量量程比为 14:1。

2 流量计安装及对比试验

阿牛巴流量传感器的安装位置是影响测量精度的关键因素。对于不同的安装管道，阿牛巴流量传感器的上下游直管段均有最小的要求：一般上游为管道直径的 8 倍，下游为管道直径的 4 倍。阿牛巴流量计在不同管道安装的最小直管段长度要求见表 2，表中数值表示管道直径的倍数。

表 2 3051SFA 型阿牛巴流量计安装直管段要求

Tab. 2 Requirements of 3051SFA Annubar flowmeter's installation on straight pipeline

不同管道安装示意图	上游尺寸				下游尺寸	
	不带整流器		带整流器		C'	B
	在平面 A 内	不在平面 A 内	A'	C		
	12	12	-	-	-	4
	-	-	8	4	4	4
	18	18	-	-	-	4
	-	-	8	4	4	4
	30	30	-	-	-	4
	-	-	8	4	4	4

阿牛巴流量计的安装与密封要求非常严格。流量计所附带的焊接件与管道上的开孔必须保持同心，保证流量传感器定位在管道的直径上，安装允许最大的偏心角度为 3°。为了正确地排气和排液，对于气体流量的测量，传感器应该安装在管道的上半部分，同时确保差压变送器高于流量传感器，以避免接触引压管和差压测量腔室冷凝产生的液体。

由于差压值测量的准确与否将决定流量测量精度，因此必须保证引压管直径相同，走向一致，高、低压引压管安装在同一水平面上，而且在进行流量测试之前，应对连接管道进行密封检

测，以尽量减小因泄漏带来的误差。

参考表 2 的安装直管段要求，推力室氢路总体气流试验实际的试验工艺管道符合第 3 种布局形式，所以流量传感器上游直管段为管道直径的 30 倍，下游为管道直径的 4 倍，实际的气流试验管道安装如图 2 所示。

推力室气流试验工艺管道采用 DN120 的高压不锈钢管，具体规格为 Φ159×20，管道内径为 119 mm，壁厚为 20 mm。为了确保流量计选型的准确，及气流试验参数的合理、可靠，采用了罗斯蒙特公司的 Instrument Toolkit 软件进行气体流量参数计算，具体流量计算数据如表 3 所示。

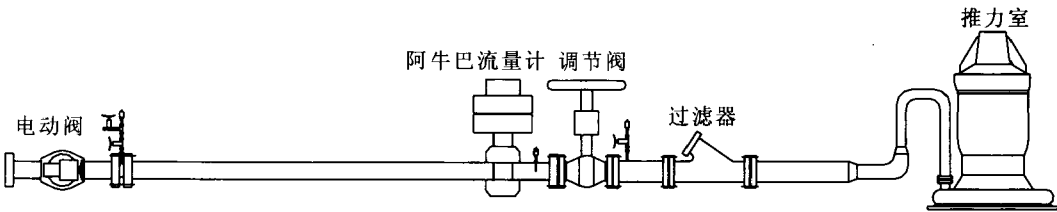


图 2 推力室气流试验管道安装图

Fig. 2 Pipeline installation schematic diagram for air flow test of thrust chamber

表 3 3051SFA 阿牛巴流量计计算数据

Tab. 3 Calculation data of 3051SFA Annubar flowmeter

流量系数	压力/MPa	温度/℃	密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	差压/kPa			最大流量时 流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
				$Q_m=3\text{ kg/s}$	$Q_m=20\text{ kg/s}$	$Q_m=30\text{ kg/s}$	
0.479 6	5	20	62.021	2.543	113.069	254.565	43.681
0.479 6	8	20	99.934	1.578	70.173	157.988	27.109
0.479 6	12	20	152.355	1.035	46.028	103.629	17.782
0.479 6	16	20	207.183	0.761	33.848	76.205	13.076

由表 3 计算数据可知, 在 5~16 MPa 的工作压力下, 气体流量在 3~30 kg/s 范围内变化, 产生的差压为 0.761~254.565 kPa, 高精度的差压变送器能充分满足测量精度要求, 而且因流量计带来的不可恢复压损非常小。流量计在 30 kg/s 的最大流量时气体流速在 13~44 m/s 范围内变化, 气体流动在一个非常好的状态, 能保证气流试验

中流量测量的准确和可靠。

为验证阿牛巴流量计气体流量测量的准确性, 在完成流量计管道安装后, 在其下游串联型号为 F300H 的科里奥利质量流量计进行比对试验, 同时为模拟推力室试验状态, 在管道最下游安装 $\Phi 45$ 的孔板, 实际的管道安装如图 3 所示。

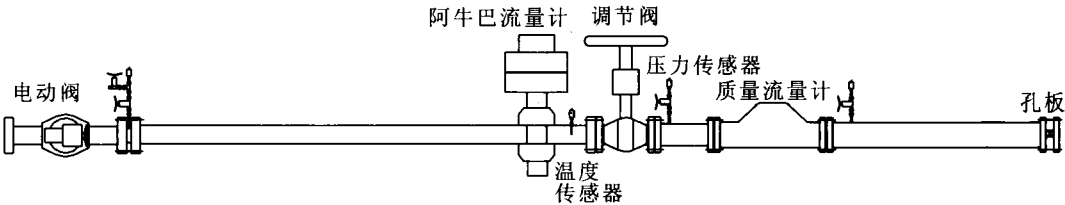


图 3 阿牛巴流量计与科里奥利质量流量计对比试验管道安装图

Fig. 3 Pipeline installation schematic diagram of contrast test between Annubar flowmeter and Corioris mass flowmeter

科里奥利质量流量计是目前精度最高的质量流量和密度测量仪表, 可实现对液体、气体或浆液最精确的质量流量测量。F300H 型质量流量计具有 $\pm 0.5\%$ 气体质量流量测量精度, 40:1 的流量量程比。在进行比对试验前, 将 F300H 质量流量计采用静态容积法水流量标准装置进行检定, 检定结论为: 合格, 准予该流量计作为 0.5 级使用。

在阿牛巴流量计与科里奥利质量流量计进行

串联对比试验过程中, 调节系统工作压力由低到高, 保证两个流量计在多点进行流量数据比对, 并且每种试验工况重复 2 次以检查数据重复性。比较测量结果发现 2 个流量计的测量数据最小偏差为 -0.270% , 最大偏差为 1.863% , 试验数据一致性非常好, 见图 4。以质量流量计为标准流量计, 阿牛巴流量计为被校流量计, 可以认定阿牛巴流量计的气体质量流量测量精度优于 $\pm 2.0\%$ 。

在图 3 所示的对比试验系统中，由于试验环境相同，理论上气体质量流量与压力成正比。

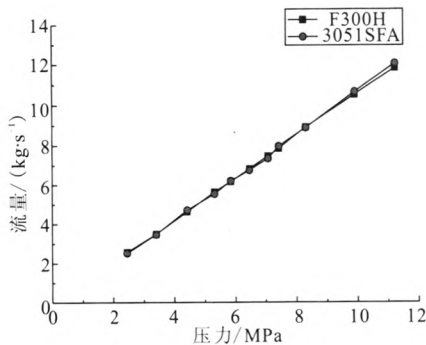


图 4 对比试验压力-流量关系图
Fig. 4 Pressure versus flow in contrast test

采用最小二乘法拟合压力、流量数据，判读流量计线性误差，F300H 为±1.158%，3051SFA 为±1.754%，测量精度高于孔板和音速喷嘴流量计。对比试验系统，由于在阿牛巴流量计后科里奥利质量流量计前安装有调节阀，产生气流旋涡和速度分布畸变，带来气体流场变化的复杂性，影响了流量计的测量精度，未达出厂标称精度。

3 在发动机气流试验中的使用

在推力室气流试验中，采用图 2 的试验系统，使用压力传感器、温度传感器、阿牛巴流量计、DC24V 线性电源、I/V 转换电路及 Nicolet VisionXP 瞬态记录仪组成测量系统，对发动机气流试验中的压力、温度、流量参数进行测量。

在试验过程中，Nicolet VisionXP 瞬态记录仪采用 1 kS/s 的采样速率进行数据采集，图 5 为获得的火箭发动机推力室气流试验曲线，横坐标为时间，纵坐标为气流试验各参数值。

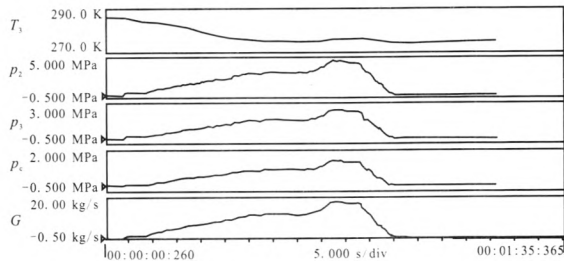


图 5 火箭发动机推力室气流试验曲线
Fig. 5 Curves of air flow test for rocket engine thrust chamber

表 4 阿牛巴流量计及推力室气流试验数据
Tab. 4 Air flow test data of Annubar flowmeter and thrust chamber

试验序号	差压/kPa	静压/MPa	温度/℃	推力室内部压力 p_t /MPa		流量 G /($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	
				实测值	圆整值	实测值	圆整值
1	6.211	16.53	24.8	0.741	0.700	8.597	8.121
	8.458	15.72	23.9	0.847	0.800	9.782	9.239
	10.630	15.41	23.4	0.930	0.900	10.86	10.51
	13.408	15.17	22.8	1.035	1.000	12.11	11.70
2	7.165	15.62	24.7	0.777	0.800	8.956	9.221
	9.138	15.36	23.5	0.866	0.900	10.05	10.44
	11.446	15.19	23.1	0.961	1.000	11.19	11.64
	14.628	14.25	22.8	1.053	1.100	12.23	12.78
	30.346	13.27	22.1	1.454	1.500	16.98	17.52
	34.317	13.03	21.5	1.537	1.500	17.98	17.55
3	7.568	15.54	25.0	0.791	0.800	9.204	9.309
	9.841	15.33	24.1	0.895	0.900	10.44	10.50
	11.237	14.95	23.2	0.947	0.900	11.03	10.48
	12.972	14.32	22.5	0.997	1.000	11.60	11.63

图 5 中, T_3 为推力室温度, p_2 , p_3 和 p_c 为推力室各压力, G 为气体质量流量, 从图 5 中曲线可以看出流量跟随压力变化的动态响应能力较好, 测得滞后压力的响应时间为 0.1 s。为了验证阿牛巴流量计流量测量的准确性和重复性, 我们在该试验系统上共进行了 3 次试验, 在 Nicolet VisionXP 瞬态记录仪采集的同时, 采用罗斯蒙特 375 型现场手操器连接到流量计的模拟输出端, 通过 HART 协议实时读取阿牛巴流量计的差压、静压、温度、流量的多变量输出值。流量计的相关数据及推力室内部压力数据如表 4 所示。在相同的试验环境中, 推力室气体质量流量与内部压力存在线性关系。因此, 对 3 次试验流量数据以推力室内部压力为参考按照线性关系进行圆整, 数据重复性均优于 $\pm 1.0\%$, 而且阿牛巴流量计产生的压损很小, 取得了良好的试验效果。

4 结论

阿牛巴流量计在氢氧火箭发动机大流量气流试验中的应用是一个非常成功的测量方案。实际气流试验应用表明, 阿牛巴流量计性能良好, 工作可靠, 质量流量测量精度优于 $\pm 2.0\%$, 满足氢氧火箭发动机的气流试验测量要求。与传统的节流式流量计相比, 阿牛巴流量计具有测量精度高、量程比大、不可恢复压损小等优点, 给今后类似的大流量气流试验流量测量提供了一个很好的参考和借鉴。与目前流量精度最高的科里奥利质量流量计相比, 阿牛巴流量计具有较高的性价比优势, 同时具有耐压高、不可恢复压损小的优

点, 因此在大口径气体流量测量方面是一个极具吸引力的选择。

参考文献:

- [1] Rosemount Inc. Rosemount 485 Annubar flow handbook, reference manual, 00809-0100-1191[M]. USA: Rose mount Inc, 2006.
- [2] Rosemount Inc. Rosemount 485 Annubar flanged assembly, quick installation guide, 00825-0100-4809[M]. USA: Rosemount Inc, 2009.
- [3] 贺正勤, 林捷. 一体化, 无导压管, 带温、压补偿的 T 型阿牛巴流量计[J]. 医药工程设计, 2005, 26(4): 32-35.
- [4] 李前虎. 基于 Annubar 流量计测试固冲发动机进气流量[J]. 航空兵器, 2010 (2): 35-41.
- [5] 贺正勤, 姚为奇. T 型阿牛巴流量计与孔板能耗损失计算[J]. 医药工程设计, 2006, 27(3): 50-51.
- [6] 王国富. 一体化阿牛巴流量计在煤气流量测量中的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2010 (2): 87-88.
- [7] 张秉海, 张弘韬. 阿牛巴流量变送器安装方式改进[J]. 化工自动化及仪表, 2006, 33(5): 77-80.
- [8] 吴刚, 陈玉银. 罗斯蒙特 3051SFA 型 Annubar 流量计和 PVDF 在氯碱工业中的应用[J]. 中国氯碱, 2007 (4): 29-31.
- [9] 王秋红. 差压式 T 型阿牛巴流量计的应用[J]. 石油化工自动化, 2005 (6): 82-84.
- [10] 姜蕾. 影响多种流量计选择的主要因素[J]. 医药工程设计, 2007, 28(2): 45-47.
- [11] 张丽敏, 孙立军, 杨彬. 一体化智能均速管流量计研制[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [12] 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲. 流量测量方法和仪表的选用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

(编辑: 陈红霞)