

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.01.09

燃油流量计在非稳态下计量性能研究

刘彦军, 张毅治, 张永胜

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 在实际应用中, 燃油流量计常会工作于非稳定流量状态下, 此时流量计的计量性能可能会发生变化。利用燃油动态流量标准装置, 对科里奥利质量流量计和容积式刮板流量计分别进行非稳态流量试验, 分析了非稳态流量环境对这两种流量计测量结果的影响, 并给出了使用和校准建议。

关键词: 非稳态流量; 燃油流量计; 计量性能

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)01-0038-04

Research on Measurement Performance of Fuel Flowmeter at Unsteady Flow

LIU Yanjun, ZHANG Yizhi, ZHANG Yongsheng

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In practical applications, the fuel flowmeter will work in unsteady flow state, and the measurement performance of the flowmeter may change. Using the dynamic fuel flow standard device, the unsteady flow tests was performed on the Coriolis mass flowmeter and the volumetric scraper flowmeter. The influence of unsteady flow environment on the measurement results of the two kinds flowmeters is analyzed, and the use and calibration of recommendations are given.

Key words: nonstable flow; fuel flowmeter; measurement performance;

0 引言

目前, 实验室均是在稳态流量条件下, 对流量计进行检定或校准试验, 即通过流量标准装置提供稳定的标准流量, 将流量计的示值与标准流量值进行比较, 计算误差, 从而评价流量计的计量性能, 例如: 涡轮流量计检定规程要求在特定流量点下进行试验, 并且要求“在检定过程中, 每调整一个流量点, 都应待压力、温度、流量稳定后方可进行检定”^[1]。然而实际工况中的流量往往是非稳态的, 例如飞机在起飞、爬升、俯冲、巡航、加力、滑翔、降落等飞行状态时, 发动机的耗油速率、耗油量均会发生急剧变化, 燃油管道内会产生流场变化和压力变化, 因此有必要对流量计非稳态下的计量性能进行研究。

近年来, 国内学者针对涡轮流量计和科里奥利质量流量进行了动态响应的理论分析和仿真^[2-3], 但相关试验相对较少。本文利用燃油动态流量标准装置, 对科里奥利质量流量计和容积式刮板流量计分别进行非稳态流量试验。

1 流量计原理及数学模型

1.1 科里奥利质量流量计

科里奥利质量流量计基于科里奥利力效应, 直接

测量流体的质量流量, 简称科氏质量流量计 (Coriolis Mass Flowmeter, CMF)。该流量计内部设计有振动的测量管, 流体在测量管中的流动相当于直线运动, 而测量管的振动会产生一个角速度, 由于振动是受到外加电磁场驱动的, 有着固定的频率, 因此, 流体在管道中受到的科里奥利力仅与其质量和运动速度有关, 而质量和运动速度及流速的乘积就是需要测量的质量流量, 因此通过测量流体在管道中受到的科里奥利力, 便可以测量其质量流量。其数学模型为

$$\vec{F}_c = 2 \cdot \Delta m (\vec{v} \cdot \vec{\omega}) \quad (1)$$

式中: $\vec{F}_c$ 为科里奥利力; Δm 为流量的质量; $\vec{\omega}$ 为角速度; $\vec{v}$ 为旋转或振动的径向速度。

当流体流过振动的测量管时, 在测量管中产生的科里奥利力会引起振动管发生微小变形, 从而产生进口和出口的相位差, 如图 1 所示。当流量为零时, 即流体停滞不流动时, 入口 A 和出口 B 处的相位差为零。当有流体流过时, 测量管入口 A 处振动减速, 出口 B 处振动加速, 当质量流量增加时, 相位差也增加, 通过入口和出口的电感式相位传感器, 即可测量管子的振动相位。科里奥利质量流量计的 K 系数就是质量流量与相位差的特征数。

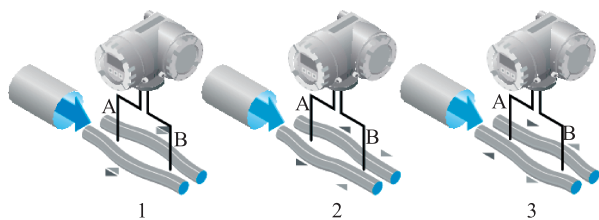


图 1 科里奥利质量流量计测量原理

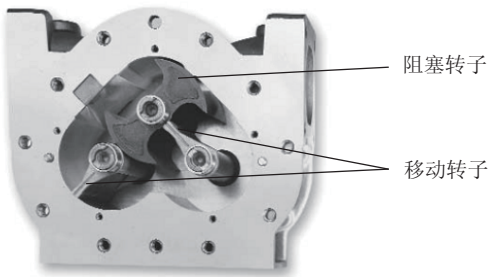


图 2 刮板流量计内部结构

1.2 容积式流量计

容积流量计是一种利用定容积器件连续测量流体总量的仪表，亦称为正排量流量计 (Positive Displacement Flowmeter, PDF)^[4]。本试验选用的容积式刮板流量计的结构如图 2 所示，其结构由柱形计量腔体、一个阻塞转子 (Blocking rotor) 和两个移动转子 (Displacement rotors) 构成。在转子转动的一个周期内的任何位置，计量腔体、阻塞转子以及至少一个位移转子之间始终保持着连续的密封。

当流体通过流量计时，会推动计量腔内部的转子转动，转动中的转子将流体分割，流体的流动与转子的转动同时进行。当流体进入计量腔时，流体不断的被分割和测量，与此同时前部的流体通过流量计并进入下游管道。由于计量腔的容积是已知的，且阻塞转子的每一次旋转中通过流量计的体积量都是相同的，通过测量转子的转数，即可得到通过流量计的累积流量。容积式流量计的理论公式为

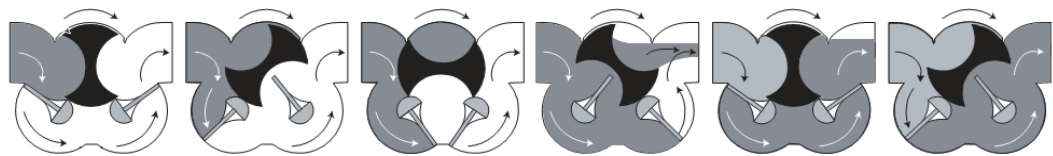


图 3 刮板流量计测量过程

$$Q = Kn \tag{2}$$

式中： Q 为流体总量； K 为仪表系数； n 为分割流体机构的转数。

2 非稳态流量源

本次试验所使用的标准装置为燃油动态流量标准装置，该装置采用主动式活塞体积管作为标准器，其扩展测量不确定度 $U = 0.05\% (k = 2)$ ，原理如图 4 所示。

燃油动态流量标准装置的工作原理为：工作过程中电机旋转，驱动滚珠丝杠带动标准体积管活塞左行，排出液体流经控制阀门及被检流量计后经过过滤器回到储油箱；同时，储油箱里的油经过下游管段进入标准体积管^[5-6]。本文通过设置电机的转速实现非稳态流量，通过采集光栅值来确定活塞的移动位置，由于截面积已知，可准确计算得到标准流量值。

3 试验结果分析

本次试验选用直管式科里奥利质量流量计和容积式刮板流量计作为试验对象，分别进行稳态流量试验和非稳态流量试验。试验流量计选型如表 1 所示。试验介质为航空燃油 RP-3，密度约为 780 kg/m^3 ，运动粘度约为 $1.591 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

3.1 稳态下试验

在稳态流量下，参照国家检定规程分别对科里奥利质量流量计和刮板流量计进行校准试验，得到的试验数据如表 2 与表 3 所示。

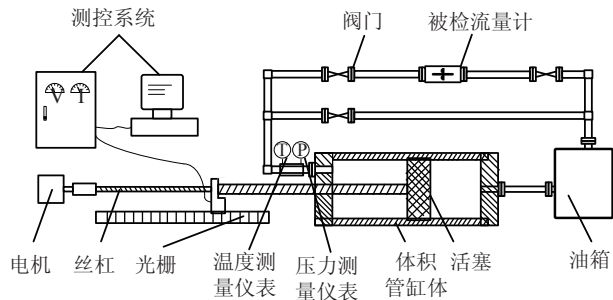


图 4 标准装置原理图

表 1 试验流量选型

型号	口径	流量范围 /(L·min ⁻¹)	流量计类型
83F40	DN40	0.25~5	科里奥利
M-5	DN25	0.5~16	容积式

表 2 科里奥利质量流量计稳态流量下的试验数据

序号	标准流量值 /(L·min ⁻¹)	仪表系数 /(L ⁻¹)	重复性 /%	相对误差 /%
1	39.844	1199.8	0.06	-0.02
2	80.432	1199.3	0.05	-0.06
3	200.51	1198.9	0.03	-0.09
4	398.47	1197.7	0.04	-0.19

表 3 刮板流量计稳态流量下的试验数据

序号	标准流量值 /(L·min ⁻¹)	仪表系数 /(L ⁻¹)	重复性 /%	线性误差 /%
1	21.648	322.53	0.06	0.23
2	71.571	321.77	0.04	
3	115.67	321.52	0.06	
4	160.23	321.36	0.05	
5	216.49	321.04	0.06	

试验数据表明,选用的科里奥利质量流量计和刮板流量计在稳态流量下误差很小,具有较好准确度。

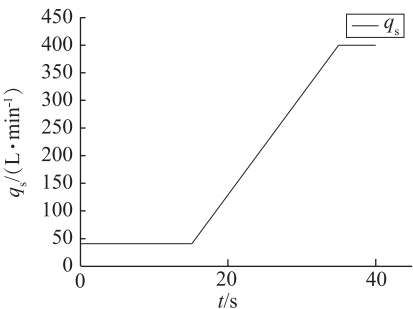
3.2 非稳态下试验

调节燃油流量标准装置中的电机转速,使装置产生的流量按照一定的斜率逐渐变化,流量变化如图 5 所示。

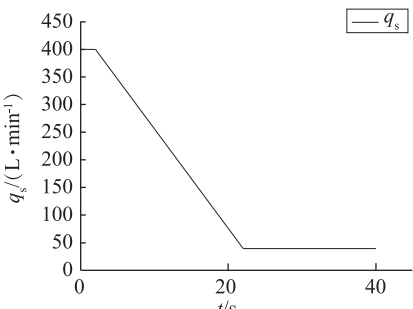
此时,对科里奥利质量流量计分别进行流量递增校准测试和流量递减校准测试,重复测试 3 次,得到试验数据如表 4 所示。

同样的对刮板流量计分别进行流量递增校准测试和流量递减校准测试,重复测试 3 次,得到试验数据如表 5 所示。

上述试验数据表明,在瞬时流量 q_s 连续增大的过程中,科里奥利质量流量计的仪表系数会减小,其显示流量值小于标准流量;在瞬时流量 q_s 连续减小的过程中,科里奥利质量流量计的仪表系数会增大,其显示流量值大于标准流量。而对于刮板流量计,无论瞬



(a) 流量递增



(b) 流量递减

图 5 标准流量变化曲线

时流量 q_s 增大还是减小,其仪表系数未发生明显变化。

表 4 非稳态下科里奥利质量流量计试验数据

瞬时流量 q_s /(L·min ⁻¹)	仪表系数/(L ⁻¹)	误差/%
40 → 400	1172.6	-2.29
	1172.9	-2.26
	1172.5	-2.29
400 → 40	1221.1	1.76
	1221.6	1.80
	1221.7	1.81

表 5 非稳态下刮板流量计试验数据

瞬时流量 q_s /(L·min ⁻¹)	仪表系数/(L ⁻¹)
21.6→216	321.69
	321.62
	321.66
216→21.6	321.25
	321.31
	321.35

4 结论

在非稳态流量条件下,容积式流量计的计量性能要优于科里奥利质量流量计,在非稳态流量测量时,推荐优先选择容积式流量计。对科里奥利质量流量计进行检定或者校准试验时,要求标准装置必须提供稳定流量源,否则会产生非稳态下的测量误差。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 1037-2008 涡轮流量计检定规程[S]. 2008.
- [2] 戈伟群, 刘彦军, 韩义中. 涡轮流量计动态响应特性校准技术研究[J]. 计测技术, 2000, 20(3): 3-4.
- [3] 纪爱敏. 流体脉动对直管科氏流量计测量性能的影响分析[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(21): 64-66.
- [4] 王池, 王自如, 张宝珠, 等. 流量测量技术全书[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.

- [5] 刘彦军, 韩义中, 刘福川. 活塞式液体流量标准装置[J]. 工业计量, 2002(S1): 34-36.
- [6] 董磊, 于华伟, 刘彦军, 等. 主动式活塞液体流量标准装置设计中测量不确定度评估[J]. 计测技术, 2008, 28(S1): 108-109.

收稿日期: 2018-09-11

作者简介



刘彦军(1972-), 男, 高级工程师, 长期从事流体流量计量技术研究。先后承担了国防技术基础、民机等多项计量技术课题研究, 在油品流量校准技术及标准装置、气体小流量校准技术及标准装置研制方面取得了优秀的科研成果, 为国防二级技术机构研制建立了多套军用品流量标准。

NIST 找到了一种快速测量燃料电池“打印”的方法

只要照明控制得当, 该团队的样机(左上图所示)就能够扫描含有铂纳米颗粒(一种用于燃料电池的催化剂)的液体薄层(下方中心图所示)。通过扩展(右图所示), 这种方法有助于满足行业的质量控制需求。

如果你还在怀疑氢动力汽车到底什么时候才能成为一个可行的选择, 那么, 现在的你可以有足够的信心了。包括美国国家标准与技术研究院(NIST)科学家在内的研究团队已经克服了氢燃料电池制造业的一项重大障碍, 他们找到了一种方法, 可以检查这种电池所需的昂贵催化剂是否已得到了迅速有效的吸附。改进的测量方法是促使氢动力实现经济量产的关键。

目前为止, 氢动力汽车还没有像电动汽车那样得到大规模应用, 但这并不是因为其效率不够高或环境不够友好。氢气所含的能量是相同质量化石燃料的三倍, 而且燃料电池唯一的副产品是水。但是, 尽管用氢填充燃料箱的速度很快, 但发动机的构建速度却跟不上, 至少从工业标准角度来看是如此。燃料电池需要通过铂基催化剂薄层将氢转化为电能, 而该行业一直缺乏一种有效评估这种催化剂薄层性能的方法。正是出于这个原因, 一年多前只有 1800 辆氢动力汽车上路, 而且它们的价格是传统汽车的两倍。

这种催化剂最终呈现为覆盖在聚合物薄片两面上的两个薄层, 类似于塑料包装的薄膜, 所以业界一直像处理墨水一样对待这种催化剂。首先将铂颗粒和碳混合形成一种深黑色的液体, 看起来就像墨水。然后, 利用一台类似于报纸印刷机的机器对这些混合物进行铺设, 从一个巨大的卷筒中抽出薄片。但问题是, 这种“墨水”中的铂的价格高达每克 35 美元, 所以制造商需要有一种方法来确保铺设的量恰好足够完成任务就行, 不会因过量使用而造成成本增加。而且这个过程必须足够快, 以满足每年为成千上万辆汽车生产燃料电池的需求, 这意味着这种“塑料”必须快速滚动。

来自 NIST 和工业界的科学家们找到了答案, 而这却源于他们在一个毫不相干的行业测量一些小型物件的经验, 这个行业就是计算机芯片制造。他们通常采用的方法是基于从芯片表面反射激光的原理, 但这个方法需要重新考虑。NIST 物理学家 Michael Stocker 介绍说: “我们已经有专门的光学方法来测量芯片上小于 10 纳米颗粒的特征, 而铂颗粒的尺寸恰好在这个范围内。目前这种方法我们已经基本上掌握了, 但是芯片不会以每分钟 30 米的速度飞行, 所以速度是一个挑战。另外, 你面对的东西是黑色的, 所以我们没有多少反射光可供测量。”在通过一系列研发解决了这一挑战之后, 该团队利用现有的技术制造了一种新型仪器, 当薄片以每分钟 1 米或 2 米的速度移动时, 它可以探测到微小铂颗粒反射出的低亮度光。

Stocker 表示, 为了满足行业未来的需求, 需要对这种方法进行扩展或提速, 这并没有什么太大的障碍。例如, 制造商可以将许多这样的仪器排列成一排, 扫描一米宽的薄片, 每一台仪器都能识别出特定区域的故障点。Stocker 指出, 这种方法虽然可能需要结合 X 射线荧光等其他技术才能形成一套完整的解决方案, 但燃料电池制造商将因此获得有利地位。看来, 这个领域剩下的问题只是一项光学工程。

(摘自计量测控)