

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.02.12

主动式活塞体积管流量标准装置阶跃特性研究

张毅治, 张永胜, 于华伟

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 动态流量测量在研发和生产过程中越来越重要, 为了开展流量计的动态响应特性相关试验, 使用激光干涉仪对燃油流量标准装置的活塞位移进行了动态测量, 并分析了该装置的阶跃特性。试验结果表明, 在一定阶跃流量范围内, 该装置的时间常数在 7 ~ 60 ms 之间。建议进一步优化装置的传动结构和伺服控制参数, 改善装置的阶跃特性。

关键词: 阶跃特性; 主动式活塞体积管; 流量; 动态测量

中图分类号: TB937

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)02-0064-04

Research on Step Characteristics of Active Piston Prover

ZHANG Yizhi, ZHANG Yongsheng, YU Huawei

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

Abstract: Dynamic flow measurement is becoming more and more important in the process of research and development of production. In order to test the dynamic response characteristics of the flowmeter, the dynamic measurement of the piston displacement of the active piston prover is carried out by using the laser interferometer, and the step characteristics of the prover are analyzed. The test results show that the time constant is between 7 ~ 60 ms in a certain step flow range. It is suggested that the transmission structure and servo control parameters of the prover be further optimized to improve the step characteristics of the device.

Key words: step characteristics; active piston prover; flowrate; dynamic measurement

0 引言

流量测量技术是伴随着科技工业快速发展起来的应用型测量技术, 应用于石油、天然气等能源流体的贸易结算, 也大量应用于工业过程控制、装备的生产和研制等方面^[1]。随着科技的迅猛发展, 动态流量的测量在产品的研发和生产过程中越来越重要^[2-3]。

流量计的检定或校准试验过程, 均是在稳态流量下进行, 而流量计的实际工况往往比较复杂, 可能在动态流量下工作, 此时会产生动态效应的流量误差。另一方面, 流量计的动态特性需要测试并量化评定。例如, 在某型发动机燃油流量调节装置设计中, 控制系统对燃油计量活门控制位移速度达到 100 ms 的量级, 但是燃油调节装置实际流量的变化速度和变化曲线情况并不清楚, 即所使用流量计测量结果并不能真实反映流量的动态变化曲线。因此需要在动态流量下对流量计的计量性能进行相关的试验研究。

航空工业北京长城计量测试技术研究所曾对文丘里管在脉动流量中的测量进行了理论分析^[4-6], 并使用主动式活塞体积管燃油流量标准装置, 对容积式刮

板流量计和科里奥利质量流量计进行了非稳态流量试验^[7]。

为了进一步开展流量计的动态响应特性相关试验, 本文使用激光干涉仪对主动式体积管燃油流量标准装置的活塞位移进行动态测量, 分析该装置的阶跃流量特性, 为未来优化装置的传动结构和伺服控制参数奠定基础。

1 试验装置

主动式体积管燃油流量标准装置是一种容积式流量标准装置, 依据相关规程^[8-10], 该装置标准流量的扩展不确定度为 $U = 0.05\%$ ($k = 2$)。该装置主要由电机及驱动器、联轴器、丝杠、导轨、体积管缸体及其活塞、阀门及管道、储油箱、温度传感器、压力传感器、过滤器、伺服控制系统、数据采集系统、控制计算机等组成。工作时, 控制系统发出指令, 伺服器驱动电机旋转, 经联轴器和滚珠丝杠带动标准体积管的活塞移动并排除燃油, 燃油经过控制阀门、被校流量计和过滤器后回到油箱, 油箱里的燃油通过下游管道

再回到标准体积管，与此同时，系统同步采集传感器信号^[11-12]。该装置通过测量活塞的位移和对应的移动时间，得到标准瞬时流量。通常开展稳态下的流量试验。

由于体积管缸体的截面积已知，本次试验通过测量活塞的移动速度，可准确计算得到标准流量值，试验原理如图 1 所示。

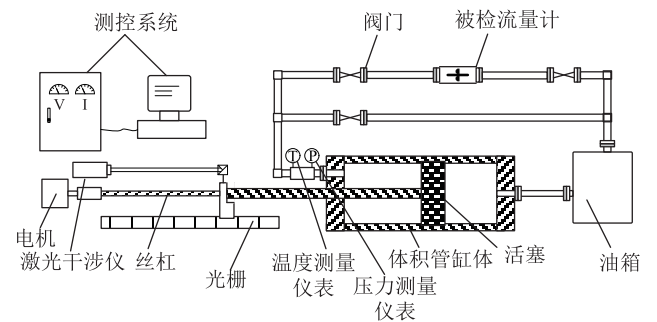


图 1 试验原理图

2 激光干涉仪

本次试验过程中，使用激光干涉仪动态测量体积管活塞的移动速度。该激光干涉仪的技术指标如表 1 所示。

表 1 激光干涉仪的技术指标

功能	最大误差	分辨力
线性测量	$\pm 0.5 \times 10^{-6}$	0.02 nm
线性速度	$\pm 0.005\%$	20 nm/s

测量光路如图 2 所示。光线 1 由激光干涉仪主机发出，进入分光镜后被分成两路光线：一路为测量光线 2，另一路光为参考光线 3；测量光线 2 在穿过分光镜后到达后方的反射镜，参考光线 3 在分光镜处折射到上方的反射镜；两路光线分别被反光镜反射回来，并汇合成一路干涉光 4，最终返回到激光干涉仪主机，主机内的探测器可以监测到返回的干涉光，进而计算得到反射镜的距离。

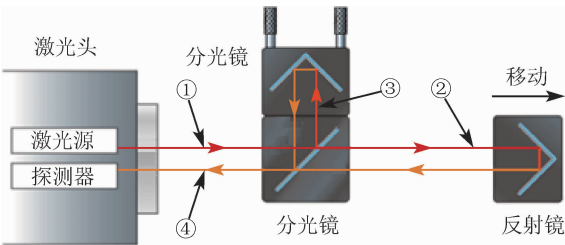


图 2 激光干涉仪的光路

试验时，在活塞杆上固定安装了分光镜和反射镜组，在地面固定激光干涉仪主机，对装置活塞杆的位移进行动态测量。在测量过程中，反射镜组随着活塞杆直线运动，激光干涉仪主机保持静止不动，发出光束并探测返回的干涉光束，计算得到活塞杆的位移。

主动式活塞体积管的活塞在启动位置静止，设定目标流量后开始启动，目标流量分别设定为 1, 2, 10, 50, 100, 200, 400, 600, 800 L/min，使用激光干涉仪动态测量活塞的位移，活塞位移对时间求导得到活塞的速度。设置激光干涉仪的采样频率为 10000 Hz。

3 试验结果

试验结果如图 3 ~ 图 11 所示。纵坐标为目标流量的百分比，方形标记为阶跃起始点，圆形标记为装置达到 63.2% 目标流量的时间点，三角标记为装置稳定在 $(100 \pm 1)\%$ 目标流量的时间点。

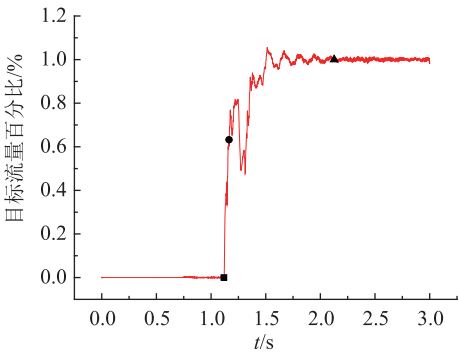


图 3 目标流量 800 L/min 的阶跃响应

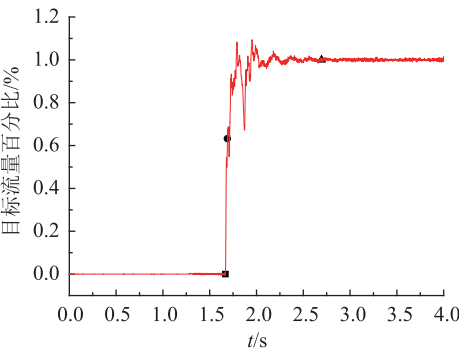


图 4 目标流量 600 L/min 的阶跃响应

从图 3 ~ 图 11 可以看出，主动式活塞体积管燃油流量标准装置在 100 ~ 800 L/min 的阶跃响应过程中存在明显的振荡和超调，而在 1 L/min 和 2 L/min 的阶跃响应过程中，持续震荡，稳定时间较长。不同阶跃流量下的时间常数和稳定时间如表 2 所示。

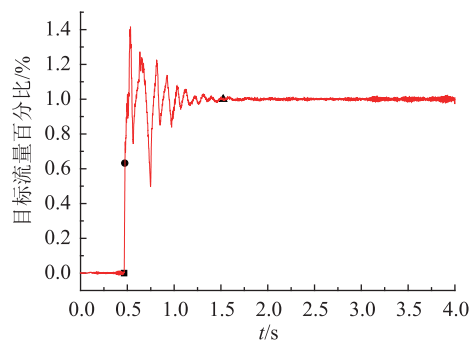


图5 目标流量 400 L/min 的阶跃响应

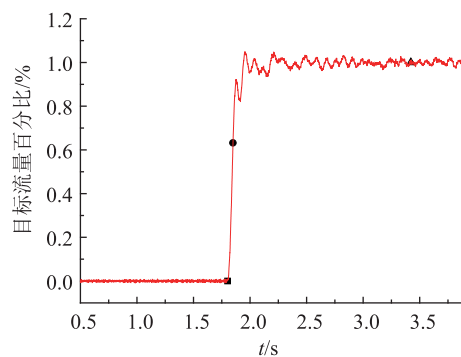


图9 目标流量 10 L/min 的阶跃响应

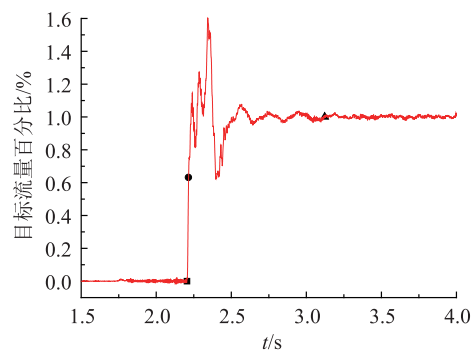


图6 目标流量 200 L/min 的阶跃响应

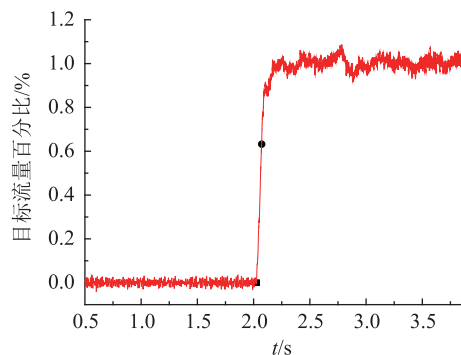


图10 目标流量 2 L/min 的阶跃响应

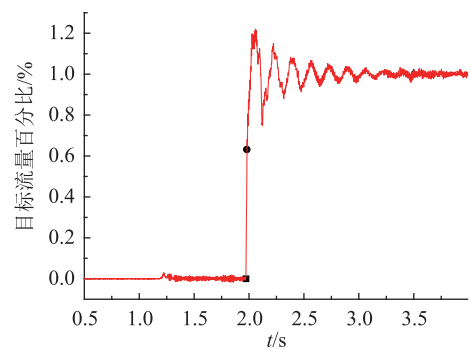


图7 目标流量 100 L/min 的阶跃响应

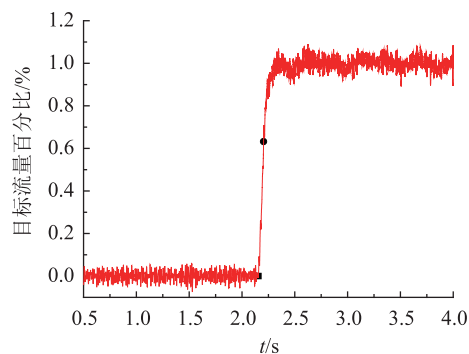


图11 目标流量 1 L/min 的阶跃响应

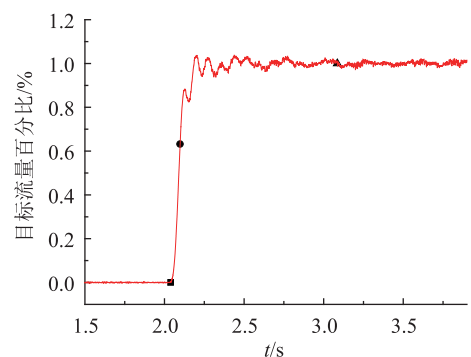


图8 目标流量 50 L/min 的阶跃响应

表2 不同阶跃流量的时间常数和稳定时间

序号	流量 q $/(L \cdot \min^{-1})$	时间常数 τ/ms	稳定时间 $\Delta t/\text{ms}$
1	800	46.8	1008.2
2	600	31.7	1025.8
3	400	7.5	1058.7
4	200	9.4	917
5	100	7.5	1527.5
6	50	59.1	1047.3
7	10	46.9	1620.1
8	2	45.5	—
9	1	48.3	—

由图 12 可以看出, 主动式活塞体积管燃油流量标准装置在各阶跃流量下的时间常数在 7 ~ 60 ms 范围内, 稳定时间随着流量的增大在 1000 ms 附近收敛。经初步分析, 产生这种现象的原因主要是由装置的机械结构和控制系统性能所导致的。结构方面, 该装置的伺服电机通过联轴器、丝杠导轨和活塞杆驱动活塞运动, 各部件之间的间隙或者微小形变吸收了部分驱动力。在控制方面, 该装置使用交流伺服电机产生流量源, 装置的控制系統通过 PLC 及电机伺服控制器控制电机达到指定转速。控制过程中 PLC 输出的脉冲频率并非阶跃曲线, 而是先由零阶跃到某一频率, 然后按照一定加速比率逐步增加到目标频率, 这个输出过程可以保护电机防止突然过载, 但是平滑了阶跃曲线。

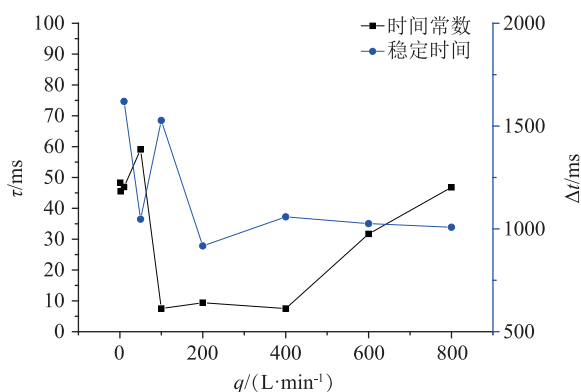


图 12 不同阶跃流量的时间常数和稳定时间

4 结论

通过上述试验, 主动式活塞流量标准装置从静止分别到 1 L/min 至 800 L/min 的阶跃流量的时间常数在 7 ~ 60 ms 范围内, 部分阶跃曲线存在超调和振荡的情况; 在 0 ~ 100 L/min, 0 ~ 200 L/min, 0 ~ 400 L/min 的阶跃流量的时间常数小于 10 ms。

未来将优化主动式体积管流量标准装置的传动结构, 并对 PLC 和电机伺服的控制参数进行调试, 进一步优化装置的阶跃特性。在此基础上, 开展流量计在

阶跃流量条件下的误差试验, 进行流量计动态特性研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张志宏. 发动机试验涡轮流量计测量不确定度评定方法[C]// 2012 航空试验测试技术学术交流会议论文集. 2012.
- [3] 李建军. 涡轮流量计在火箭发动机试验中的应用[J]. 火箭推进, 2007, 33(3): 52-55.
- [4] 张永胜, 张毅治, 王鹏. 取压口位置对文丘里管脉动流量测量的影响[J]. 计测技术, 2019, 39(3): 69-72.
- [5] 张永胜, 刘彦军, 张毅治, 赵伯涛. 正弦脉动流对文丘里流量计影响研究[J]. 计量技术, 2019, 39(4): 42-44.
- [6] 张永胜, 张毅治, 王鹏. 利用流体仿真研究文丘里流量计瞬变流动模型[J]. 计测技术, 2019, 39(1): 10-13.
- [7] 刘彦军, 张毅治, 张永胜. 燃油流量计在非稳态下计量性能研究[J]. 计测技术, 2019, 39(1): 38-41.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 209-2010 体积管检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2010.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1586-2016 主动活塞式流量标准装置校准规范[S]. 北京: 中国质检出版社, 2016.
- [10] 国家国防科技工业局. JJG(军工)46-2014 主动式活塞体积管液体流量标准装置检定规程[S]. 北京: 国防科工局军标出版发行部, 2014.
- [11] 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.
- [12] 张毅治, 张永胜, 刘彦军. 前后直管内径对涡轮流量计的影响研究[J]. 计测技术, 2019, 39(1): 47-50.

收稿日期: 2020-03-25

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2017205A005)

作者简介

张毅治(1986-), 男, 黑龙江牡丹江人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为流量计量及标准装置研制。

