

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.01.06

高压液体流量标准装置研制

刘彦军, 张永胜, 沈峰

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为解决民用飞机高压液压油流量计校准问题, 研制了高压液压油流量标准装置, 标准装置采用高压柱塞泵提供流量源, 通过变频调速和比例控制阀配合调节的方法实现流量装置的流量和压力宽范围调节, 标准装置以活塞式体积管作为主标准器, 实现了高压条件下的流量计校准。利用该标准装置对圆柱齿轮流量计在变压工况下进行校准试验, 高压工况下流量计仪表系数与常压工况相差超过 5%, 证明开展高压变压下流量计计量性能及修正方法研究的重要性, 该标准装置的建成为高压下流量计校准及计量性能研究提供了有效的手段, 具有很高的实用价值。

关键词: 高压; 体积管; 流量

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)01-0024-04

Development of High Pressure Fluid Flow Standard Device

LIU Yanjun, ZHANG Yongsheng, SHEN Feng

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

Abstract: In order to solve the calibration problem of high-pressure hydraulic oil flowmeter for civil aircraft, a high-pressure hydraulic oil flow standard device is developed. The standard device uses a high-pressure plunger pump to provide flow source. The flow rate and pressure of the flow device can be adjusted in a wide range by means of frequency conversion speed regulation and proportional control valve. A piston-type volume tube is used as the main standard in the standard device to realize the flowmeter calibration under high-pressure conditions. The calibration test of cylindrical gear flowmeter under variable pressure condition is carried out by using this standard device. The difference between the flowmeter coefficients under high pressure condition and atmospheric pressure condition is more than 5%, which proves the importance of the research on flowmeter measurement performance and correction method under high pressure and variable pressure. The establishment of this standard device provides an effective means for flowmeter calibration and measurement performance research under high pressure, and it has practical value.

Key words: high pressure; volume tube; flow rate

0 引言

液压系统和零部件性能试验过程中, 流量是非常重要的测试参数之一, 流量参数测量的准确性直接关系到液压产品的性能质量。在某些民用飞机液压部件(例如液压泵、伺服阀)的试验过程中, 需要测试压力流量特性, 部分测试流量计安装在高压管路上, 在高压的条件下进行流量测量, 常用的流量计有齿轮流量计、高压涡轮流量计等。在民用工程机械液压技术领域, 流量测试管路系统压力可达到 35 MPa 以上。目前, 液体流量计检定校准都是在常压下进行的, 流量装置的泵源系统扬程一般都在 0.5 MPa 左右, 最大工作压力一般不超过 1 MPa。高压工况下, 工作介质密度、黏度都将发生显著变化, 安装管路、流量计结构尺寸也将发生一定的变化。这些变化因素将对流量计的计量性能产生影响, 目前对高压条件下流量计校准

的研究材料很少, 压力对流量计性能的影响还不能量化评估, 因此研制高压流量标准装置, 开展高压流量计性能研究对液压工程测试及相关领域有重要意义。本文介绍的高压液体流量标准装置, 针对高压液压油流量计的校准需求, 实现了高压条件下的流量计校准。

1 高压液体流量标准装置

1.1 标准装置技术指标

工作介质为磷酸酯液压油 SKYDROL LD-4; 流量范围为 0.15~80 L/min(常压至 28 MPa); 流量测量的扩展不确定度为 $U=0.05\%$ ($k=2$)。

1.2 标准装置组成

高压液压流量标准装置系统组成如图 1 所示, 包括液压泵站、测试台、主标准器和测控系统四部分。关键部件包括液压油箱、柱塞泵、变频器、蓄能器、比例调速阀、被校准流量计、比例负载阀、参考流量

计、活塞式体积管、管道系统及计算机控制系统等。采用一台高压柱塞泵提供流量，油泵出口安装蓄能器，消除系统内流量和压力脉动，保证装置的流量稳定性。通过变频调速和比例调速阀组合实现流量宽范围的连续调节。通过被校流量计下游的比例负载阀调节被校流量计处的压力，模拟流量计实际使用条件下的压力。采用被动式活塞体积管作为主标准器。测量被校流量计和体积管处介质温度和压力参数，对体积管测量的体积流量进行修正。

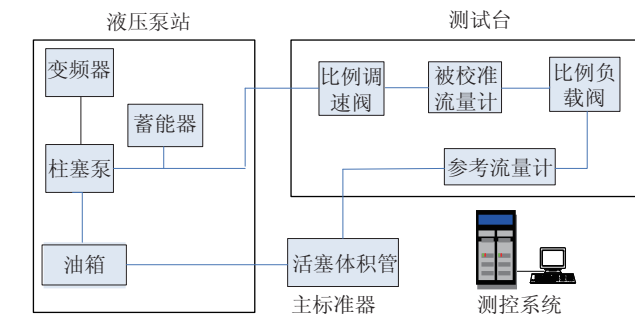


图1 高压液压油流量标准装置系统组成框图

1.2.1 标准油源设计

油源系统是液体流量标准装置的重要组成部分，保证了流量、压力的调节连续性与稳定性。利用高压柱塞定量泵产生流量，其中油泵为斜轴柱塞设计，适用于闭式液压回路系统。柱塞泵可提供 35 MPa 的持续工作压力和 45 MPa 的峰值压力，可耐受很高的径向和轴向负载冲击。油泵排量为 75 ml/r，配备变频电机，最大转速为 1450 r/min，最小稳定转速为 300 r/min，通过变频调

速可实现 21 ~ 100 L/min 的流量输出范围。小流量段采用分流式比例调速阀进行调节，在保证工作压差的条件下，调速阀可实现流量调节范围 0.1 ~ 30 L/min，耐压为 31.5 MPa。在电机最小稳定转速下，油泵直接输出流量 21 L/min，向比例调速阀输入电流信号，比例调速阀输出流量与输入控制电流成正比，多于流量通过回油口流入回油管道，实现小流量段的连续调节。在被校流量计下游安装了比例溢流阀，用于调节流量计下游的压力。在保证流量不变的条件下，通过给定比例溢流阀电流，调节比例溢流阀入口的压力。比例溢流阀最大流量为 150 L/min，最大调节压力为 35 MPa。

根据流量压力参数的要求，选择适合参数的液压蓄能器组安装在油泵出口，消除了柱塞泵的流量脉动，保证了流量的稳定。选用圆柱式齿轮流量计作为参考流量计，提供流量调节的指示依据，同时其也可作为标准流量计，实现标准表法流量计校准。

1.2.2 主标准器设计

选用被动活塞式体积管作为主标准器，分别设计了外置切换阀和内置提升阀两种体积管。表 1 列出了两种体积管相关参数。体积管采用精密光栅测量活塞位移，实现了变容积校准。同时也保留了光电开关，满足定容积校准。光栅位移测量允许误差为 ±5 μm/m，按照矩形分布计算，活塞位移在 60 mm 以上时，光栅位移测量引入不确定度小于 0.005%，采用光栅测量活塞位移可大大提高小流量下的工作效率。

表 1 体积管参数

活塞形式	体积管有效容积/L	活塞有效行程/mm	最大流量/(L·min ⁻¹)	最小流量/(L·min ⁻¹)	体积管材料	进出口法兰规格/mm	最大工作压力/MPa
外置切换阀	2.7	350	20	0.1	304 不锈钢	25	4
内置提升阀型	32	520	600	3	304 不锈钢	50	4

外置换向阀式体积管结构比较简单，活塞上没有提升阀，保证了活塞的密封性，减少泄漏，用于较小流量的测量，活塞运行一个行程时间较长，可保证活塞换向时流场稳定的时间。外置提升阀型体积管通过外部阀门切换控制介质流向和活塞运动方向，工作过程包括初始状态、正行程和逆行程三个状态，如图 2 所示。初始状态：F1，F2，F3 和 F4 关闭，F5 开启，流体未流经体积管。正行程状态：F2 和 F3 开启，F1，F4 和 F5 关闭，流体推动活塞向右运行，此行程的目的是实现流量测量。逆行程状态：F1 和 F4 开启，F2，

F3 和 F5 关闭，流体推动活塞向左运行。

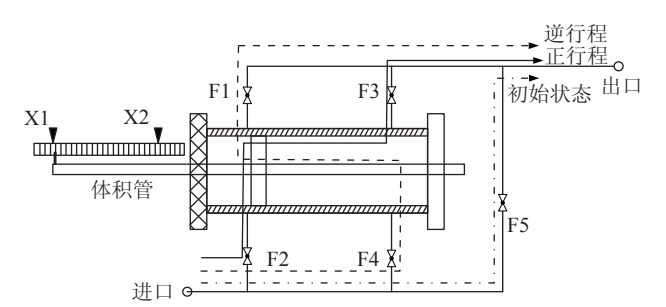


图2 外置切换阀式体积管原理示意图

内置提升阀体积管主要包括活塞、提升阀、体积管、回程机构、光栅等几部分，原理示意图如图 3 所示。活塞上安装提升阀，体积管包括三种工作状态：初始状态、复位行程和校准行程状态，如图 4 所示。初始状态：活塞位于体积管下游，提升阀被限位装置抵住，提升阀打开，液体流经活塞形成回路；准备行程：回程机构启动，将活塞拖拽至上游，在此过程中提升阀处于打开状态，流体流经活塞形成回路，在上游设定位置，回程机构自动释放活塞，复位行程结束；校准行程：活塞被释放后，提升阀在复位弹簧作用下关闭，堵住活塞内孔，流体无法通过活塞，推动活塞向下游移动。校准行程中通过光栅测量活塞位移，同时测量运行时间和被校流量计信号，活塞运行至限位

机构位置时自动打开回到初始状态。通过活塞提升阀的开、闭，保证了活塞运动过程中不改变流体的流向，最大程度减小活塞工作时对流体循环系统的影响。

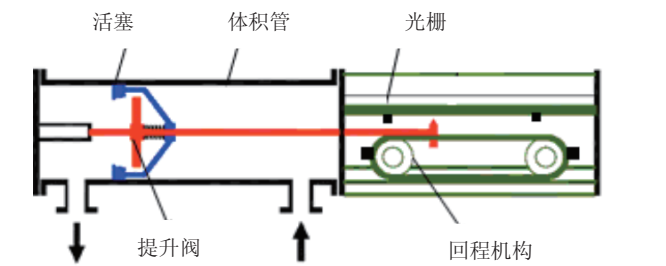


图 3 内置提升阀式体积管原理示意图

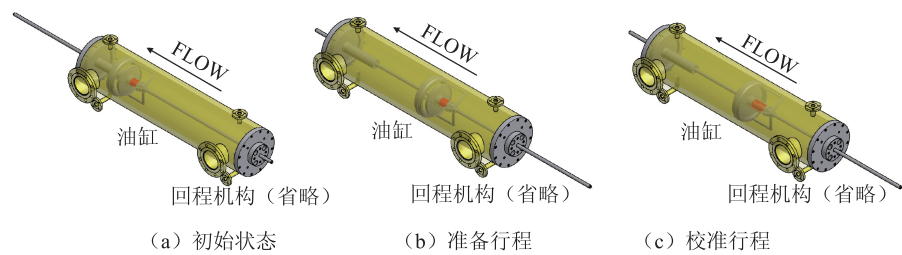


图 4 提升阀式体积管工作过程

1.2.3 装置流量稳定性试验

以参考齿轮流量计输出作为流量信号，计算各累积时间的流量稳定性。连续测量 $n(n \geq 10)$ 次流量 $q_i(i = 1, 2, 3 \cdots, n)$ ，按式(1)计算流量平均值 $\bar{q}$ 为

$$\bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n}$$

(1)

流量的稳定性 E_q 的计算公式为

$$E_q = \frac{k}{q} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n - 1}}$$

(2)

式中： k 为系数； q 为标准流量。
在 0.15 ~ 100 L/min 的流量范围内，当每条测试支路的流量在最大、最小值时，连续测量管路中参考流量计输出流量值，计算其流量稳定性，流量稳定记录见表 2。

表 2 装置流量稳定性试验记录

流量点 /(L·min ⁻¹)	测量值 /(L·min ⁻¹)										平均值 /(L·min ⁻¹)	稳定性/%
0.15	0.1482	0.1482	0.1483	0.1481	0.1481	0.1482	0.1482	0.1481	0.1482	0.1483	0.1482	0.049
1.0	1.043	1.043	1.043	1.042	1.042	1.043	1.043	1.042	1.043	1.043	1.043	0.045
5	5.350	5.349	5.350	5.345	5.344	5.350	5.347	5.344	5.350	5.350	5.348	0.037
10	10.453	10.453	10.454	10.444	10.442	10.453	10.448	10.443	10.453	10.454	10.45	0.034
20	20.866	20.865	20.867	20.847	20.844	20.866	20.855	20.845	20.867	20.867	20.86	0.028
50	50.68	50.67	50.68	50.63	50.62	50.68	50.65	50.61	50.68	50.68	50.66	0.045
80	80.40	80.40	80.41	80.33	80.32	80.4	80.36	80.31	80.41	80.41	80.38	0.035
100	100.33	100.33	100.34	100.23	100.22	100.33	100.28	100.21	100.33	100.34	100.3	0.042

空载流量稳定性试验结果表明，装置实现了流量的宽范围连续调节，流量稳定性优于 0.1%。

2 变压流量计校准试验

选用 GF1 型圆柱齿轮流量计作为被校流量计, 利用该高压流量标准装置进行校准试验。分别在多个压力点下进行校准试验, 设定压力分别为 5, 8, 10, 12, 15, 18, 20, 24, 28 MPa, 校准流量范围为 5 ~ 80 L/min。在校准过程中, 实时测量体积管处和被校流量计处温度和压力, 通过式(3)对体积管测量结果进行修正。

$$q_s = q[1 + \beta(t_m - t_s)][1 - \kappa(p_m - p_s)] \quad (3)$$

式中: q_s , q 分别为修正后标准流量和未修正体积管测量流量; β 为工作介质热膨胀系数; κ 为工作介质压缩系数; t_m , t_s 分别为被校流量计和体积管处液体温度; p_m , p_s 分别为被校流量计和体积管处液体压力。实验曲线图如图 5 所示。

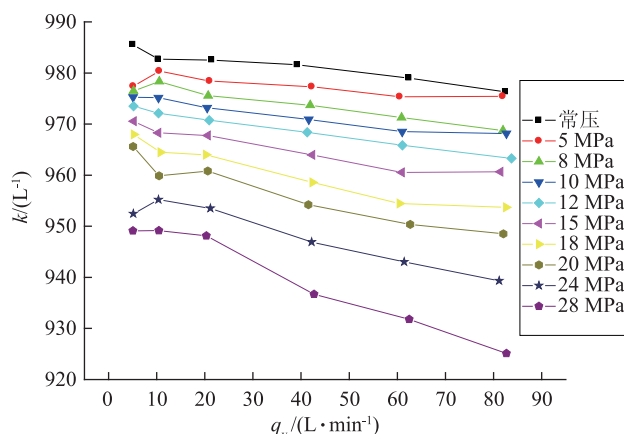


图 5 流量计变压校准仪表系数曲线图

同一流量点不同压力工况下, 仪表系数相差较大, 在 5, 10, 20, 40, 60, 80 L/min 六个流量点下, 与常压下校准结果比较, 因压力变化引起仪表系数改变分别为 3.8%, 3.5%, 3.6%, 4.7%, 4.9%, 5.4%。试验结果表明: 被校流量计仪表系数随工作压力升高而减小; 随流量增大, 仪表系数减小幅度增大。对于圆柱齿轮流量计而言, 流体除了通过计量室推动齿轮转动外, 还可通过齿轮与计量室壳体之间的间隙流过流量计。间隙流与流量计结构和流量计前后压降有关。齿轮流量计工作压力增大, 可能导致流量计间隙变大, 间隙流量增大, 造成仪表系数减小; 流量计前后压降

与流量值基本呈线性关系, 因此随流量增大, 仪表系数减小幅度增大。

3 总结

为了开展液体流量计高压条件下实流校准研究, 研制和建立了以磷酸酯液压油为介质的高压液体流量标准装置, 介绍了标准装置结构原理、关键部件、活塞式体积管设计及其特点, 试验结果表明, 此高压液体流量装置达到了预期的设计指标。并利用该装置对圆柱齿轮流量计进行了变压工况下实流校准试验, 结果显示, 被校流量计高压状态下仪表系数与常压下校准结果相比, 发生较大改变, 仪表系数变化达到 5% 以上。若将流量计在传统流量标准装置上的校准结果直接应用于高压工况, 将引入很大测量误差。以该高压流量标准装置为基础, 开展变压工况下流量传感器计量校准方法和修正方法的研究是非常必要的。

参考文献

- [1] 苏彦勋. 流量计量与测试[M]. 北京: 中国计量出版社, 1992.
- [2] 王池, 王自和, 张宝珠, 等. 流量测量技术全书[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [3] 信彦峰, 桑培勇. 高压液体流量标准装置设计方案[J]. 中国计量, 2012(5): 68-70.
- [4] 崔岩峰. 自动控制液体流量标准装置设计原理[J]. 品牌与标准化, 2010(2): 26-26.
- [5] 向丽萍, 赵普俊, 王海, 等. 一种高精度液体流量标准装置[J]. 中国测试, 2011, 37(4): 41-44.

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油品流量标准。