

用于 pVTt 的快速切换三通阀设计与验证

屠亲帅, 张文翰, 林天然, 周彬, 张高明, 徐志鹏*

中国计量大学, 浙江省流量计量技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310018

摘要: 本文探讨了适用于 pVTt 法气体流量标准装置中的快速切换三通阀的设计与验证。在对多种驱动方式的特性进行比较后, 我们决定采用响应迅速且具有高负载刚度的液压驱动作为三通阀的驱动方式。设计过程中, 我们构建了一个包含过滤器、节流阀、液压泵、二位四通阀、蓄能器、溢流阀、单活塞液压缸以及液压缸阀体等元件的系统, 并通过实验确认了三通阀的气密性和切换时间。结果表明, 三通阀在气密性试验中表现良好, 且在标准容器和缓冲容器间切换迅速可靠。

关键词: pVTt 法; 流量标准装置; 快速切换三通阀; 气密性; 切换时间

Design and Verification of a Fast Switching Three-Way Valve for pVTt Measurements

Tu Qinshuai, Zhang Wenhan, Lin Tianran, Zhou Bin, Zhang Gaoming, Xu Zhipeng*

Zhejiang Provincial Key Laboratory of Flow Measurement Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018

Abstract: This article discusses the design and verification of a fast-switching three-way valve suitable for use in pVTt gas flow standard devices. After comparing the characteristics of various driving methods, we decided to adopt a hydraulic drive that responds quickly and has high load stiffness as the driving method for the three-way valve. During the design process, we constructed a system that includes components such as a filter, throttle valve, hydraulic pump, two-position four-way valve, accumulator, relief valve, single-piston hydraulic cylinder, and the valve body of the hydraulic cylinder, and confirmed the air tightness and switching time of the three-way valve through experiments. The results show that the three-way valve performed well in air tightness tests and switched quickly and reliably between the standard container and the buffer container.

Keywords: pVTt method; flow standard device; rapid switching three-way valve; airtightness; switching time

引言

在现代工业生产以及科学研究中, 精确控制和测量气体流量是一项至关重要的任务。特别是在涉及高频次气流路径切换的应用场合, 如 pVTt 法气体流量标准装置中, 对阀门的响应速度和密封性能提出了极高的要求。pVTt 法作为一种用于测量气体体积流量的常用方法, 其工作原理依赖于精确控制气体在标准容器和缓冲容器之间的切换。然而, 传统的三通阀在高压差环境下往往难以保证良好的气密性, 且响应速度受限, 这直接影响了测量的准确性和效率^[1]。

随着工业自动化水平的不断提高, 对阀门的响应速度、密封性能以及使用寿命提出了更高的要求。现有的三通阀虽然能够满足一定的工作需求, 但在特定条件下 (如高压差、高频次切换等), 它们的局限性逐渐显现出来。例如, 当阀门处于关闭状态时, 如果密封不良, 则会导致气体泄漏, 影响测量结果的准确性; 而当阀门需要快速开启或关闭时, 缓慢的响应速度会增加测量误差, 降低工作效率。

为了克服上述问题, 本研究旨在开发一种适用于 pVTt 法气体流量标准装置的快速切换三通阀。通过对不同驱动方式的比较分析, 考虑到响应速度、负载刚度等因素, 最终选择了液压驱动作为三通阀的驱动方式。液压驱动以其卓越的响应速度和负载刚度, 成为了实现快速切换的理想选择^[2]。

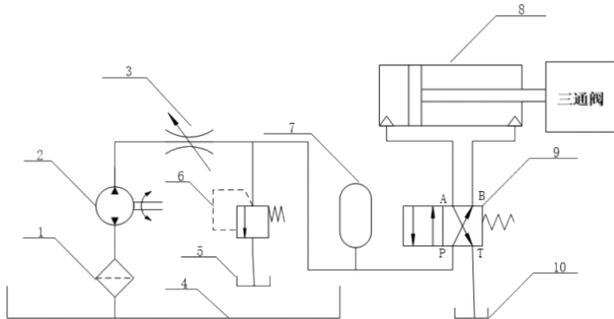
在本研究中, 我们详细探讨了三通阀的设计方案, 包括其内部结构、液压系统的配置以及相关组件的选择。设计中特别注重了密封件的选择与安装, 以确保在高压差条件下的气密性。此外, 我们还通过计算机辅助设计 (CAD) 软件建立了三通阀的三维模型, 并在此基础上进行了物理原型的制造与初步测试^[3]。

通过一系列实验验证, 本文评估了三通阀的气密性和切换速度, 结果表明, 所设计的三通阀不仅能够在保证气密性的前提下实现快速切换, 而且在不同的工作压力和温度条件下均表现出优异的性能。这些实验成果为三通阀的设计提供了坚实的基础, 并指明了进一步改进设计的方向。

本研究的创新点在于, 通过采用液压驱动技术, 成功实现了三通阀的快速响应, 并且通过精心设计的密封结构, 保证了在高压差条件下的良好密封性能。该研究成果有望为提高 pVTt 法气体流量标准装置的准确性和可靠性提供新的解决方案^{[4][5]}。

一、结构设计

阀门驱动方式包括机械、液压、机电和气压等类型。为实现三通阀快速切换，选择能够快速响应且拥有高负载刚度的液压驱动。构成快速切换三通阀系统的液压组件众多，涵盖了油缸、过滤器、节流阀、液压泵、二位四通阀、蓄能器、溢流阀、单活塞液压缸以及液压缸阀体等部分。该系统通过液压缸内活塞杆的往复运动实现管路切换。过滤器确保液压油清洁，蓄能器存储液压油以快速响应，溢流阀控制油压确保系统安全运行。二位四通阀用于控制油路切换。



1. 过滤器 2. 液压泵 3. 节流阀 6. 溢流阀 7. 蓄能器 8. 单活塞液压缸 9. 二位四通阀 其中元件 4、5、10 均为油缸

> 图 2.1 快速切换三通阀的工作原理简图

二、工作原理

当活塞杆需向前移动时，引擎点火，液压泵启动，液压油从油箱中被吸入并送至蓄能器中储存。此时，控制系统发出信号，导致二位四通阀位置变动，液压泵输出的压力油进入液压缸的无杆侧，而有杆侧则与回油道相连。随着无杆侧液压油量的增加，腔内压力逐步升高，直至能够超越活塞杆与缸筒间的摩擦力及油液与缸壁的粘滞阻力，活塞杆便开始向右移动，这便是活塞杆前进的过程。反之，若活塞杆需后退，引擎同样启动，液压泵继续抽取并储存液压油至蓄能器。控制系统再次发出指令，二位四通阀位置改变，压力油进入液压缸的有杆侧，无杆侧则与回油道相通。有杆侧液压油压力的提升，使得活塞杆克服阻力向左移动，完成活塞杆后退的动作^[6-8]。

三、实验验证

(一) 快速切换三通阀的气密性实验

为保证三通阀在 pVTt 法气体流量标准装置中能够可靠且迅速地切换，避免在真空状态下压差引起气体泄漏，从而影响测量的精确性，本研究对三通阀进行了气密性检验，并依照检定规程，实施了相应的检定流程^[9]。

- (1) 将标准容器抽真空以达到既定的压力标准。
- (2) 迅速将三通阀切换至缓冲容器一侧，开启连接至标准容器的阀门，并确保所有其他阀门均处于关闭状态。
- (3) 在标准容器内的气体达到热力学平衡状态后，定期采集并

记录容器内的压力与温度数据，利用这些参数来评估快速切换三通阀的泄漏率。

(4) 采用公式法计算泄漏率，以评估该阀门是否符合标准要求。

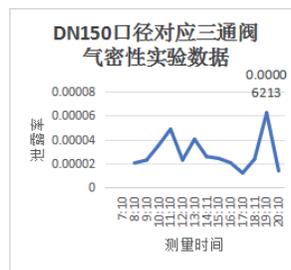
泄漏率计算公式：

$$\omega_i = \frac{\left(\frac{p_{i+1}}{T_{i+1}} - \frac{p_i}{T_i} \right)}{\left(\frac{p_F}{T_F} - \frac{p_E}{T_E} \right)}$$

式中：

ω_i 是第 i 次的泄漏率， p_i 和 T_i 分别是第 i 次测量的标准容器内的压力和温度，而 p_{i+1} 、 T_{i+1} 是第 $i+1$ 次测量标准容器内的压力和温度， p_E 、 T_E 是标准容器抽气后得到的压力和温度， p_F 、 T_F 是标准容器进气后的压力和温度。其中温度和压力的单位均取 k 和 kPa。

评价阀门密封性的标准是泄漏率应该低于装置不确定度的 1/4。对于准确度为 0.05% 的装置，泄漏率应不大于 0.000125。若计算出的泄漏率低于此值，则三通阀密封性合格。实验分两组，分别在 26 立方米和 6 立方米容器中测试 DN150 和 DN100 口径的三通阀。实验测试数据如图 4.1.1 和 4.1.2 所示：



> 图 4.1.1



> 图 4.1.2

实验结果表明，DN150 和 DN100 口径对应的三通阀泄漏率均低于 0.0000983，因此满足气密性标准。

(二) 快速切换三通阀切换时间实验

为评估三通阀在 pVTt 法气体流量标准装置中的切换性能，进行了快速切换时间实验。实验利用 pVTt 法装置进行检定，采用 PLC 时钟指令测量快速切换三通阀的时间。实验中，通过曲拐上的拨片和两个光电脉冲传感器记录阀门切换时间。拨片经过传感器触发 PLC 记录，两次触发的时间差即为三通阀的切换时间。

快速切换三通阀切换时间的实验分别两组：

第一组：蓄能器不连续放电。

DN150 对应的三通阀进行的实验测量。实验数据为，当喷嘴喉径为 43.08 毫米时，标准容器的打开时间均为 56 毫秒，缓冲容器的打开时间分别为 57 毫秒和 56 毫秒；当喷嘴喉径为 30.446 毫米时，标准容器的打开时间为 55 毫秒和 54 毫秒，缓冲容器的打开时间均为 55 毫秒；而当喷嘴喉径为 21.553 毫米时，标准容器的打开时间均为 54 毫秒，缓冲容器的打开时间同样为 55 毫秒。

DN150 口径对应的三通阀得到的实验数据如下，在喷嘴喉径为 21.553 毫米的情况下，标准容器开启时间记录了两次，分别是 54 毫秒和 55 毫秒；而缓冲容器的开启时间分别为 56 毫秒和 55 毫

秒。当喷嘴喉径缩小至15.233毫米时,标准容器每次开启均耗时54毫秒,而缓冲容器则稳定在55毫秒。进一步将喷嘴喉径减小到10.763毫米时,标准容器依然保持54毫秒的开启时间;缓冲容器的开启时间在这两组数据中分别为54毫秒和55毫秒。

从两组实验数据可以得出:

(1) 由于液压油作用于活塞杆两侧面积的不同,标准容器的开启时间稍长于缓冲容器的关闭时间。

(2) 检定不同口径喷嘴时,大口径喷嘴流量大,对阀芯切换冲击大,切换时间较长。

(3) 三通阀理论切换时间为50ms,但实际最快切换时间是54ms,这是由于结构设计中的机械碰撞导致能量损失,进而延长了切换时间。

第二组:蓄能器连续放能。

采用喉径为21.553mm的音速喷嘴进行实验, DN150对应的三通阀连续切换实验数据如下,当标准容器首次打开时间为55毫秒时,缓冲容器的打开时间为106毫秒,标准容器第二次打开的时间为169毫秒。标准容器首次打开时间为54毫秒的情况出现了两次:

第一次,缓冲容器的打开时间为107毫秒,标准容器第二次

打开的时间为169毫秒。第二次,缓冲容器的打开时间仍然是107毫秒,但标准容器第二次打开的时间增加到了170毫秒。

DN150所对应的三通阀得到的实验数据和 DN150对应的三通阀实验数据一样。

从以上两表实验数据可以得出:

(1) 音速喷嘴的三通阀切换时间仅受液压系统参数影响,与校验系统及连接管道的直径无关^[10]。

(2) 连续切换时需等待蓄能器完成蓄能后方可进行下一次切换,故切换过程不能连续进行。

四、结论

论文比较了不同驱动方式后,选定液压驱动用于快速切换三通阀。实验显示,设计的三通阀气密性良好,最大泄漏率低于0.000125,符合pVTt法标准。尽管有能量损失,切换时间依旧约54毫秒,接近理论值。实验表明,喷嘴口径影响切换时间,口径大则切换时间略长。该三通阀能满足pVTt法对流量控制精度和响应时间的要求,为气体流量标准装置的改进提供了新方案^[11-12]。

参考文献

- [1] Wright J D, Moldover M R, Johnson N. Volumetric Gas Flow Standard With Uncertainty of 0.02% to 0.05% [J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(11): 1058-1066.
- [2] 孙彩虹, 赵作广, 石建荣. 基于pVTt法气体流量标准装置的标准流量计溯源设计 [J]. 工业计量, 2019, (1): 37-39.
- [3] 徐志鹏, 郭婧, 李澜吉, 等. pVTt用液压驱动快开三通阀设计与流场仿真 [J]. 传感技术学报, 2019, (2): 201-205.
- [4] 梁月, 刘智林, 冯倩倩, 万大川. 基于pVTt法气体流量标准装置高速切换三通阀的研制 [J]. 工业计量, 2019, (2): 39-41.
- [5] 罗园庆. 三通切换阀关键零部件数字化设计平台的开发 [D]. 辽宁科技大学, 2016.
- [6] 李澜吉. pVTt法气体流量标准装置快速切换三通阀研究 [D]. 中国计量大学, 2018.
- [7] 孙基成, 冯书安. 阀门不同关闭时间液压冲击的解析研究 [J]. 机械工程师, 1987, (06): 5-7.
- [8] 白瑞琴. pVTt法气体流量标准装置关键技术的研究 [D]. 中国计量学院, 2012.
- [9] 裴叶琴. 浅析阀门设计领域中的知识构成问题 [J]. 科技创新导报, 2010, (22): 53. 2017-09-07. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098x.2010.22.001.
- [10] 柳志彬, 何庆中, 张应迁. 阀门快速设计分析方法研究 [J]. 机械设计与制造, 2010, (10): 4-6. 2017-09-07.
- [11] 丁小艺. 基于快速开关阀的压力机快速液压系统的研究 [D]. 广东工业大学, 2003.
- [12] 刘海燕. 三通阀漏泄自动检测装置简介 [D]. 郑州铁路职业技术学院, 2006.