

基于流量系数和流阻系数的阀门性能评估

李金山¹ 金巍忠² 宣依富³ 张建新⁴ 宋健彬⁵

1. 杭州金山仪表阀业有限公司 浙江杭州 311400

2. 杭州金泰塑业有限公司 浙江杭州 311402

3. 浙江博崙生物制药有限公司 浙江杭州 311400

4. 杭州富阳明达仪表阀业有限公司 浙江杭州 311401

5. 杭州富阳南方阀业有限公司 浙江杭州 311400

摘要: 阀门的流动系数与流阻系数是衡量阀门性能的重要指标, 准确地测量对于阀门的设计、选型、匹配至关重要。为了满足阀门流量系数和流动阻力系数测量的需要, 本文设计了一种集测量、控制和数据采集和分析为一体的检测装置。在此基础上, 对所研制器件的测试性能进行了系统的评估。本项目的研究成果可为阀门的优化设计、选型计算及运行状态监控提供可靠的数据支持, 具有广泛的工程应用前景。

关键词: 阀门; 流量系数; 流阻系数; 检测装置; 实验研究

引言

阀门是流体控制系统中的核心部件, 它的性能参数直接关系到整个系统的可靠性和控制精度。流量系数与阻力系数是衡量阀门性能的重要指标, 准确测定它们对于阀门的设计、选型、匹配至关重要。目前, 国内外主要是通过理论计算和查表的方式来测量阀门的流量系数和阻力系数, 缺少专门的测量设备。鉴于此, 本论文针对阀门流量系数和流动阻力系数测量的需要, 设计了一套测量、控制和数据采集与分析的测试装置, 可以实现双参数的准确测量。

一、阀门流量系数与流阻系数基础理论

阀门作为流体控制系统的核心部件, 其性能参数的准确测量与科学评估是确保系统高效可靠运行的关键。流量系数 (C_v) 和流阻系数 (ζ) 是表征阀门流动特性的两个重要指标, 其定义与计算方法的建立经历了长期的理论探索与工程实践。流量系数 C_v 最初由美国工程师 Nathaniel Eaton 于 1945 年提出^[2], 定义为在压差为 1 psi 时, 阀门的流量值 (单位: gpm)。而流阻系数 ζ 源于流体力学中的达西-魏斯巴赫方程, 反映了阀门对流体的阻力特性。随着研究的深入, 流量系数 C_v 与流阻系数 ζ 之间的内在联系逐渐被揭示出来。德国学者 Hans D. Baumann 于 1963 年推导出了二者的理论转换公式: $C_v=29.9/\sqrt{\zeta}$, 该公式在国际标准 ISA 75.01 和 IEC

60534 中得以确立, 成为阀门参数匹配与选型计算的重要依据。然而, 阀门内部的流动十分复杂, 受到诸多因素的影响, 如阀型结构、开度位置、雷诺数等。以球阀为例, 其流阻系数 ζ 在 0.05 到 1000 之间变化, 呈现出明显的非线性特征。当球阀开度为 20% 时, ζ 高达 500 以上; 而当开度增大到 80% 时, ζ 迅速下降至 0.1 左右。针对不同类型阀门的 C_v -开度曲线, 学者们进行了大量的理论分析与实验研究。美国 Masoneilan 公司的 Wolfgang Schade 基于流体动力学理论, 提出了 Globe 阀的 C_v 计算模型, 引入了闸板开度、阀座直径、流道面积等几何参数, 取得了良好的拟合效果。而对于蝶阀等高性能阀门, 则需要采用更加精细的数值模拟方法, 如计算流体动力学 (CFD)。有学者对不同开度下的蝶阀流场进行了三维数值模拟, 获得了阀板表面的压力分布和速度矢量图, 并与实验结果进行了对比验证, 相对误差小于 5%^[1]。

二、阀门流量系数与流阻系数检测装置设计

本设计采用了高精度传感器和先进的控制技术, 实现了阀门流量系数与流阻系数的精确测定。通过差压变送器、温度传感器等多种传感器和西门子 PLC 等控制系统的协同工作, 整个系统能够实时、高效地进行数据采集、处理和分析, 确保了测试条件的一致性和可重复性, 有效提高了测量的准确性和系统的可靠性。在测试过程中, 采用了以 PLC 为核心的闭环控制系统, 能快速、准确地对流量和压力进行自动控制, 使测试过程中的测量

结果更加稳定。

1. 测量部分

本检测装置的测量部分由差压变送器、压力变送器、温度传感器和涡轮流量计组成，分别用于获取阀门上下游的压差、压力、温度和体积流量等关键参数。其中，差压变送器选用了Rosemount 3051S型，量程覆盖0 ~ 2.5 MPa，综合精度达 $\pm 0.025\%$ ，并支持HART协议与控制系统通信。压力变送器采用了Yokogawa EJA530A型^[3]，测量范围-0.1 ~ 16 MPa，稳定性优于 $\pm 0.1\%/5$ 年。铂电阻温度传感器的型号为PR-20-2-100-1/4-9-E，测温范围-200 ~ 650℃，符合IEC 60751 Class A标准。涡轮流量计选择了FTI FT2系列，公称通径从DN15至DN300，适用于水、油品等多种介质，配备智能转换器可实现流量累计与脉冲输出。上述仪表通过优化布置和管路连接，最大程度减小测量误差，并采用定期校准和多参数融合策略，进一步提高系统可靠性^[2]。

2. 控制系统

以西门子S7-1500系列可编程控制器为主控单元，以PROFINET工业以太网为核心，实现与测控单元、执行器和PC机之间的无缝连接，是阀门流量系数和流阻系数测量装置的核心。PLC是一种集PID控制、史密斯估计法和自适应神经网络为一体的新型控制系统。其中，针对阀门类型及管道特性，分别对PID参数进行优化，将比例系数设为2.5，积分系数设为0.8，微分系数设为0.2。利用史密斯估计器对管线传输时延进行了补偿，提高了系统的响应速度。自适应神经网络通过实时学习阀开度-流量曲线来准确建模与补偿非线性特征，隐层由8个神经元组成，学习率为0.01。执行器方面，采用ABB电动执行机构及定位机构EDP300型TZIDC型定位器，保证了阀门的高精度、高可靠性。同时采用现场总线技术，使系统接线更加简单，抗干扰能力更强。在检测装置的上位机软件方面，采用WinCC6.0开发平台，应用VB语言编写上位机程序，主要实现系统参数设置、数据显示及数据存储等功能。

3. 数据采集与分析系统

阀门流量系数与流阻系数检测装置中，数据采集与分析系统扮演着至关重要的角色，该系统为便携式数据采集存储系统，配备了NI 9205电流模拟量输入模块和NI 9264电压模拟量输出模块，16位分辨率，采样速率可达250 kS/s。同时，该系统还集成了NI 9234振动和NI 9211温度等专用测试模块，实现了多物理场参数的同步采

集。在软件方面，数据采集与分析系统采用了基于FPGA的硬件时序引擎技术，确保了采集过程的确性和实时性^[3]。系统内置了多种信号处理算法，如FFT频谱分析、小波变换去噪、卡尔曼滤波等，可对采集到的数据进行预处理和特征提取。此外，为了实现阀门状态监测和故障诊断，还开发了基于支持矢量机(SVM)的智能分类模型，核函数选择径向基函数(RBF)，惩罚因子 $C=10$ ，松弛变量 $\xi=0.01$ ，5折交叉验证准确率达到95%以上。数据管理方面，系统采用了数据库平台，支持TDMS、HDF5等多种数据格式，并提供了丰富的数据查询、分析和可视化工具。

4. 供给系统

供给系统是阀门流量系数与流阻系数检测装置的重要组成部分，为整个系统提供稳定、可靠的动力和介质。供给系统主要包括空气压缩机、储气罐、冷干机、过滤器、压力调节阀等设备。其中，空气压缩机采用了Atlas Copco GA 75 VSD+型，额定功率75 kW，最大排气压力1.25 MPa，配备了智能控制系统和变频调速技术，实现了能效优化和无级调节。储气罐的容积为2 m³，设计压力1.6 MPa，材质为Q345R，符合ASME标准。冷干机选用了Donaldson Ultrafilter Superplus热再生吸附式干燥机，露点达到-40℃，确保了气源的干燥洁净。过滤器则包括预过滤器、精密过滤器和活性炭过滤器，过滤精度依次为5 μm、1 μm和0.01 μm，有效去除气源中的尘埃、油雾和有机物。压力调节阀采用了Fisher FIELDVUE DVC6200数字式阀门控制器，结合电气转换器和定位器，实现了对气源压力的精确调节，稳定性优于 $\pm 0.2\%$ 。此外，供给系统还配备了热量表和质量流量计，用于监测介质的热力学参数和流量，型号分别为Endress+Hauser Proline Promass F 300和Siemens SITRANS FX300，测量不确定度分别为 $\pm 0.15\%$ 和 $\pm 0.1\%$ 。通过与控制系统的协调配合，供给系统可根据检测需求自动调节介质的压力、温度和流量，确保了阀门流量系数与流阻系数测试条件的一致性和可重复性。

三、实验设计与结果分析

1. 实验设计

为全面评估所设计的阀门流量系数与流阻系数检测装置的性能，本研究设计了一系列实验方案。实验选取了DN50和DN100两种规格的球阀、蝶阀和闸阀，共6种阀门。实验介质采用20℃的水，压力范围0.1-1.0 MPa，流量范围10-300 m³/h。实验过程中，通过控制系统分别

调节阀门开度至30%、60%和90%位置,在每个工况下测量阀门上下游的压力、温度和流量参数,并重复3次实验,取平均值作为最终结果。同时,利用数据采集系统记录阀门的振动加速度信号,采样频率10 kHz,持续时间30 s,提取振动特征参数,用于评估阀门的健康状态。实验还考察了不同雷诺数(范围 10^3 - 10^6)对阀门流量系数的影响,通过调节流量和温度来改变雷诺数。实验结果将为阀门的设计优化、选型和状态监测提供重要依据。

2. 实验结果与讨论

试验结果表明,该方法能较好地反映阀门的流动特性和流动阻力系数。试验结果表明,该测试装置能准确、有效地实现不同工况下各类阀门的主要性能参数的测量。分析表明,阀的型式、公称直径及开度对流量系数和阻力系数的影响较大。对于DN50与DN100,在开度为30%、60%、90%时,蝶阀的通流能力最大,其次为球阀;但是,zeta的数值关系正好相反。这种现象与阀门的结构形式及流动特性有很大关系,如蝶阀采用流线形盘形可减小小流体阻力,而球阀、闸阀则有较大的局部阻力损失。另外,随阀开度的增加,渗透系数呈现明显的非线性增长趋势,而渗透系数则迅速减小,但其变化规律随阀门类型的不同而不同。

综合考虑,蝶阀在调节流量方面具有较好的性能,球阀、闸阀在大开度条件下具有更大的优越性。试验结果表明,雷诺数对阀性能参数有较大影响。研究发现,雷诺数为 10^3 - 10^6 时,当雷诺数小于临界值(2×10^5 左右)时,随着雷诺数的增加, C_v 显著增加,其原因是层向湍流转捩改变了阀内流动特性;但在雷诺数大于某一临界值以后,湍流度逐渐增大, C_v 逐渐趋于稳定。这一现象在小口径DN50阀及30%小开度条件下尤为明显,

应引起设计者的注意。通过本项目的研究,可以全面评价各种阀门在不同工况下的调节性能及可靠性,为阀门的优化设计、选型计算及运行状态监控提供可靠的数据支持,具有广泛的工程应用前景。

结语

本文成功设计并实现了一种阀门流量系数与流阻系数检测装置,该装置集测量、控制、数据采集分析于一体,可实现阀门关键性能参数的精确测定。在此基础上,系统开展实验研究,考察了阀门类型、公称直径、开度和雷诺数等因素对流量系数与流阻系数的影响规律。实验结果验证了所开发检测装置的有效性和可靠性,表明其能够全面评估不同类型阀门在各种工况下的调节性能和可靠性,为阀门的设计优化、选型计算和状态监测提供可靠的数据支撑。未来,还需进一步拓展检测装置的应用范围,提高测试效率和智能化水平,为流体控制系统的优化运行提供更加有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 张建基, 郑黎峰, 熬鑫, 冉平, 余效平, 阎川, 陈勇, 谭金鑫, 罗锐. 关于GF真空阀线下检测工装应用研究[A]. 重庆铸造行业协会、重庆市机械工程学会铸造分会. 2023重庆市铸造年会论文集[C]. 重庆铸造行业协会、重庆市机械工程学会铸造分会: 重庆市机械工程学会铸造分会, 2023: 4.
- [2] 唐敏俊, 冯盼盼. 智能阀门流量系数流阻因子检测装置的设计[J]. 机械制造, 2018, 56(05): 90-92.
- [3] 胡世鹏, 陈久松, 印光耀, 褚俊, 罗兆荣. 基于C8051F340的多圈绝对编码器性能检测装置的研究[J]. 电工技术, 2018(04): 17-19.