

水力平衡阀流动与阻力特性实验研究

胡洪¹, 张伟程¹, 张博涵²

1. 上海建筑设计研究院有限公司, 上海 200041

2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093

DOI:10.61369/WCEST.2025080015

摘 要 : 实验测试分析了 MSV-D 静态平衡阀与 AB-QM 动态平衡阀在不同压差和开度下的流动与阻力特性。结果表明: 静态平衡阀的调节性能受阀前与阀后的压差影响显著, 流量随开度增大由等百分比型向快开型转变; 动态平衡阀则展现出优异的压差无关特性, 在不同压差下均能保持稳定流量, 且全开度范围内呈现理想线性特性。在阻力特性方面, 两种阀门的流阻系数均随开度增大而减小, 但动态平衡阀表现出更高的一致性。研究结论为暖通空调变流量水系统中水力平衡阀的科学选型提供了实验依据。

关 键 词 : 水力平衡阀; 流动特性; 阻力特性; 压力无关

Experimental Study on Flow and Resistance Characteristics of Hydraulic Balancing Valves

Hu Hong¹, Zhang Weicheng¹, Zhang Bohan²

1. Shanghai Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200041

2. College of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093

Abstract : This study experimentally tests and analyzes the flow and resistance characteristics of the MSV-D static balancing valve and the AB-QM dynamic balancing valve under different pressure differentials and valve openings. The results indicate that the regulating performance of the static balancing valve is significantly influenced by the pressure differential before and after the valve, with the flow rate transitioning from an equal percentage type to a fast-opening type as the valve opening increases. In contrast, the dynamic balancing valve demonstrates excellent pressure differential independence, maintaining a stable flow rate under varying pressure differentials and exhibiting ideal linear characteristics across the full range of valve openings. Regarding resistance characteristics, the flow resistance coefficients of both valves decrease with increasing valve opening, but the dynamic balancing valve exhibits higher consistency. The research findings provide experimental evidence for the scientific selection of hydraulic balancing valves in variable flow water systems in heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) applications.

Keywords : hydraulic balancing valve; flow characteristics; resistance characteristics; pressure-independent

引言

在中央空调水系统中, 水力失调是影响水系统能效与稳定性的关键问题^[1-2]。为改善系统性能, 水力平衡阀作为核心调节设备被广泛应用。根据水力调节原理, 平衡阀主要分为静态与动态两类: 前者通过预设开度实现稳态流量分配, 适用于定流量系统; 后者则能在外界压力波动时自动调节, 维持流量或压差稳定, 更适用于变流量系统。

目前, 针对平衡阀工程选型与控制策略的研究较多, 但对其流动与阻力特性的实验对比分析仍较为缺乏, 难以为阀门性能评估提供充分依据。为此, 选取丹佛斯 MSV-D 型静态平衡阀与 AB-QM 型动态平衡阀为研究对象, 按国家标准规定试验方法测定二者在不同工况下的流量系数与流阻系数^[3], 分析其流动与阻力特性, 以期为工程中的科学选型与系统优化提供实验支撑。

一、实验方案

图1为平衡阀流动与阻力特性测试实验装置，主要包括循环水系统、数据采集系统和待测阀件测试段三部分，各设备通过卡盘卡箍快装连接。实验流体为常温水。流经阀门的水流量通过电磁流量计测量；阀门的流阻由安装在阀门前后的压力传感器测量；水温由温度传感器测量，所有数据信号连接到数据采集仪并记录。

实验程序及实验系统中各装置之间的安装间距均按 GB/T28636-2012《采暖与空调系统水力平衡阀》的规定设置。

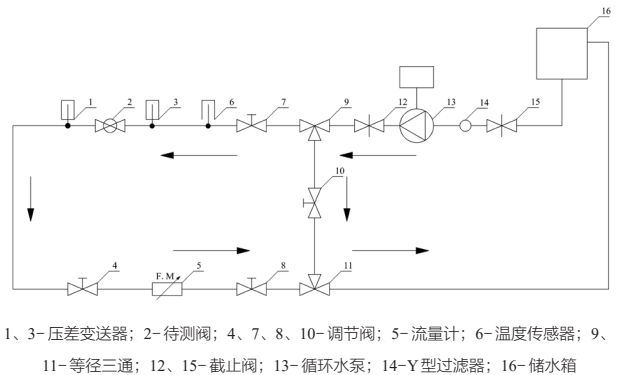


图1 平衡阀性能测试实验系统图

实验装置主要部件参数和技术指标见表1，待测阀件具体参数见表2，主要设备参数见表3。

表1 测试实验台主要部件参数			
参数名称	技术指标	参数名称	技术指标
快装直管	Φ25 卡盘 Φ50.5 L=300mm	截止阀	Φ51/ 卡盘 Φ64mm
编织网软管	Φ32 卡盘 Φ50.5 L=500mm	调节阀	Φ25/ 卡盘 Φ50.5mm
等径三通	Φ51 厚度 1.5/ 卡盘 Φ64	Y型过滤器	Φ51 卡盘 Φ64mm
水箱尺寸	1000×1000×1000mm	开关电源	24V AC/DC

表2 待测阀具体参数					
类型	材质	公称直径 / mm	最大压差 / kPa	最大流量 /m³/h	控制方式
静态平衡阀	CW617N	25	250	9.5	手动设定
动态平衡阀	CW602N	25	600	1.7	电动执行器

表3 主要设备参数			
辅助设备	型号	量程范围（额定参数）	精度
循环水泵	PX404ER型	750W、32m、4m³/h	/
数据采集仪	Keysight DAQ970A	20通道温度	/
	DAQM901A	2通道模拟量	/
电磁流量计	OPTIFLUX4100C 型	0 ~ 3.0 m³/h	± 0.5%
	LDG-SUP型	3.0 ~ 35.0m³/h	± 0.5%
压差变送器	OHR-M2G型	0 ~ 1.6Mpa	± 0.5%
温度传感器	TY2511型	-50 ~ 150℃	± 0.3%
信号发生器	SIN-C703型	4 ~ 20mA	± 0.2%
电动执行器	AME-110-NLX 型	24V	± 20%

二、实验方法及数据处理

（一）实验方法

通过实测两种不同类型水力平衡阀的性能参数，对比分析流动与阻力特性。具体如下：

①在平衡阀两端不同压差条件下，测量并计算不同相对开度下的流通能力与流量系数，从而评价并对比两种平衡阀的流量调节特性。

②在平衡阀两端不同稳定压差条件下，测量并计算不同相对开度下的阻力系数，从而评价并对比两种平衡阀的阻力特性。

实验测试原理见图 1。通过调节平衡阀的相对开度，测量平衡阀前后的压差及流过阀门的流量。对于静态平衡阀，其相对开度通过阀门上的数字设定值确定；对于动态平衡阀（实验时配备相应执行器），其相对开度通过信号发生器向电动执行器输出标准信号来调节，实际开度由阀芯上的百分比刻度盘读取。

实验时，通过调节测试段待测平衡阀前后的调节阀以调整平衡阀入口与出口之间的压差并稳定在预设值（静态、动态平衡阀压差分别选定为10、20、30、40kPa；10、15、20、25、30 kPa）。待流量稳定后，分别设定两种平衡阀的相对开度（25%、43%、55%、67%、84%、97%、100%；20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%）进行测试。每种实验条件（即固定的压差与相对开度组合）均进行3次重复测试，最终取平均值作为该工况下的有效数据。

平衡阀前后净压差 $\Delta p^{[1]}$ 计算

$$\Delta p = \Delta p_1 - \Delta p_2$$

式中： Δp 平衡阀的净压差，kPa； Δp_1 平衡阀前取压点压差，kPa； Δp_2 平衡阀后取压点压差，kPa。

（二）数据处理

平衡阀的数据处理涵盖流量系数、流通能力、流阻系数等关键参数。其中，前两个是评判阀门流动性能的核心指标，而流阻系数则是评估阀门阻力性能的指标。根据 GB/T 30832-2014《阀门流量系数和流阻系数试验方法》^[12]的要求并基于实验数据的采集，进一步得出不同压差下平衡阀流量系数、流通能力、流阻系数随相对开度的变化。

1. 流动特性的数据处理

（1）流量系数 K_v 计算^[4]：

$$K_v = 10 \times Q \times \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p \times \rho_0}} \tag{1}$$

式中： K_v -平衡阀流量系数， $m^3/(h \cdot kPa^{1/2})$ ； Q -测量水流量， m^3/h ； Δp -平衡阀前后压差，kPa； ρ -水的密度， kg/m^3 ； ρ_0 -15℃时水的密度， kg/m^3 ，本实验中 ρ / ρ_0 的比值取1。

（2）流通能力 C 计算^[5]：

$$C = 316 \frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} \tag{2}$$

式中： C 流通能力， m^3/h ； Δp 平衡阀的净差压，Pa； Q -通

过平衡阀的介质流量，m³/h。

2. 阻力特性的数据处理

(1) 流阻系数 ζ 计算^[6]：

$$\zeta = \frac{2000\Delta p}{\rho \times v^2} \quad (3)$$

式中：v—测试段中水的平均流速，m/s。

(2) 流速 v 计算^[1]

$$v = \frac{4 \times Q}{\delta \times d^2} \quad (4)$$

式中：d—测试段的内径，m。

三、实验结果与分析

(一) 流动特性数值分析

阀门的流动特性，即固有流量特性，是评估其调节性能优劣的关键指标，通常不受外部管路阻力影响。典型的流量特性主要包括直线型、等百分比型及快开型^[7]。其中，直线型阀门指流量与阀门开度呈线性关系，即在整个开度范围内具有良好的控制精度与灵敏度；等百分比型阀门指单位行程变化引起的流量变化率与当前流量成正比，即在小开度时灵敏度高，大开度时调节能力强；而快开型阀门指阀芯微小位移即可使流量急剧增大，特性曲线初始段斜率极大，因此仅适于关断，不宜用于调节。

流量系数是衡量阀门流通能力的关键指标。一般而言，流量系数与流通能力正相关，数值越大，流通能力越强。平衡阀流动特性数据如表4和5所示。

表4 静态平衡阀流动特性数据

指标	开度 /%	压差 /kPa			
		10	20	30	40
流量系数 / m ³ /(h·kPa ^{1/2})	25	1.90	1.79	1.77	1.76
	43	3.13	3.04	3.05	3.05
	55	4.08	3.94	4.01	4.00
	67	5.67	5.81	5.25	4.99
	84	7.85	6.82	6.14	6.09
	97	8.28	7.13	6.79	6.74
流通能力 / m ³ /h	100	8.28	6.99	6.89	6.84
	25	1.90	1.78	1.77	1.75
	43	3.13	3.03	3.04	3.05
	55	4.08	3.94	4.01	4.00
	67	5.66	5.81	5.25	4.99
	84	7.85	6.81	6.14	6.08
	97	8.27	7.13	6.79	6.73
	100	8.27	6.98	6.89	6.83

表5 动态平衡阀流动特性数据

指标	开度 /%	压差 /kPa				
		10	15	20	25	30
流量系数 / m ³ /(h·kPa ^{1/2})	20	0.47	0.42	0.37	0.33	0.31
	30	0.95	0.90	0.80	0.72	0.66
	40	1.46	1.36	1.23	1.12	1.02
	50	1.99	1.87	1.71	1.56	1.44
	60	2.64	2.45	2.28	2.11	1.95
	70	3.19	2.98	2.78	2.58	2.37
	80	3.55	3.40	3.13	2.95	2.74
	90	3.83	3.70	3.44	3.25	3.05
	100	4.03	3.91	3.67	3.45	3.27

流通能力 / m ³ /h	20	0.46	0.42	0.37	0.33	0.30
	30	0.95	0.90	0.80	0.72	0.66
	40	1.46	1.36	1.23	1.12	1.02
	50	1.99	1.87	1.71	1.56	1.44
	60	2.63	2.45	2.28	2.11	1.94
	70	3.19	2.98	2.78	2.58	2.37
	80	3.55	3.40	3.12	2.95	2.74
	90	3.83	3.69	3.44	3.25	3.04
	100	4.03	3.91	3.66	3.45	3.26

根据表4和5中的数据绘制出不同压差下，静态平衡阀与动态平衡阀的流量系数（K_v）及流通能力（C）随相对开度的变化关系，分别如图2和3所示。

两种平衡阀呈现出截然不同的流动特性：静态平衡阀的 K_v 与 C 均随相对开度增大而显著提升，且在相同开度下，数值随阀门前后压差的增大而明显增加，表明流动特性受系统压差影响显著；从曲线形态来看，在20%~50%相对开度时，特性曲线呈轻微下凹，介于直线与等百分比型之间，调节灵敏度较高，而当开度超过50%后，曲线转为上凸，表现出快开特性，调节精度有所下降。与此形成鲜明对比的是，动态平衡阀在不同入口压差（10 kPa~30 kPa）下，其同一开度对应的 K_v 与 C 基本保持一致，曲线几乎重合，这充分验证了其电动执行器有效抵消了外部压力波动，具备优异的压差无关特性；其流量特性曲线在整个开度范围内更接近理想的直线型，从而保证了在全行程内具有稳定、可预测的调节性能。综上所述，静态平衡阀的调节性能与工作压差和开度均密切相关，而动态平衡阀因其压力无关设计，在各种压差下均能保持流动特性的高度一致与稳定，在变流量系统中展现出更优越的调节保障能力。

(二) 阻力特性数值分析

流阻系数由阀门自身的结构、尺寸及内腔形状所决定，并直接决定了阀门对流体产生的阻力大小，流阻系数与流体通过阀门时的阻力呈正相关。平衡阀阻力特性数据如表6和7所示。

根据表6和7中的数据绘制出不同压差下，动态平衡阀的流阻系数（ ζ ）随相对开度的变化，如图4所示。

静态平衡阀与动态平衡阀的 ζ 均随相对开度的增大而呈现减小趋势，但与 K_v 的变化规律相反。静态平衡阀在相对开度小于55%时，其 ζ 受系统压差与雷诺数的共同影响较为显著，不同压差下的数值差异明显；而当开度超过55%后， ζ 曲线趋于聚拢，数值稳定且变化微小，表明此时阀门内部流道已充分发展，阻力主要受 v 主导。相比之下，动态平衡阀在不同压差（10 kPa~30 kPa）下的 ζ 曲线在整个开度范围内彼此更为接近，尤其在70%~100%大开度区间内基本重合，这与电动执行器有效稳定阀芯前后压差、削弱外界波动影响的机制密切相关，体现出高度一致的阻力性能。综上所述，静态平衡阀在小开度时阻力大且易受压差干扰，在大开度时趋于稳定；而动态平衡阀则在全开度范围内均表现出良好的阻力一致性。在工程实践中，为降低系统运行能耗并避免高流阻阀门成为水力“瓶颈”，宜优先选用在常用工况下 ζ 较低且稳定的平衡阀。

表6 静态平衡阀阻力特性数据

指标	开度 /%	压差 /kPa			
		10	20	30	40
流阻系数	25	1.74	1.96	2.00	2.03
	43	0.64	0.68	0.67	0.67
	55	0.38	0.40	0.39	0.39
	67	0.19	0.19	0.23	0.25
	84	0.10	0.13	0.17	0.17
	97	0.09	0.12	0.14	0.14
	100	0.09	0.13	0.13	0.13

表7 动态平衡阀阻力特性数据

指标	开度 /%	压差 /kPa				
		10	15	20	25	30
流阻系数	20	2.89	3.58	4.54	5.61	6.71
	30	0.69	0.78	0.98	1.21	1.44
	40	0.29	0.34	0.41	0.50	0.60
	50	0.16	0.18	0.21	0.26	0.30
	60	0.09	0.10	0.12	0.14	0.17
	70	0.06	0.07	0.08	0.09	0.11
	80	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08
	90	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07
	100	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06

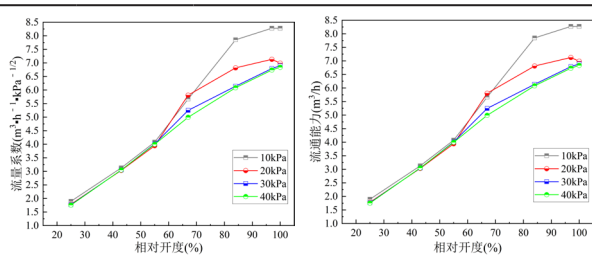


图2 静态平衡阀相对开度与流量系数、流通能力之间的关系

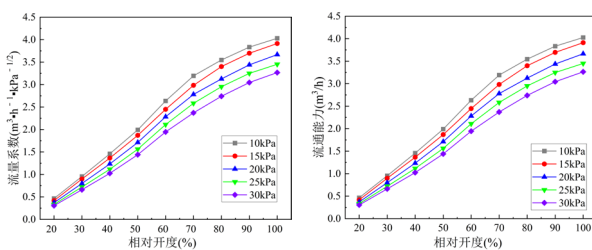


图3 动态平衡阀相对开度与流量系数、流通能力之间的关系

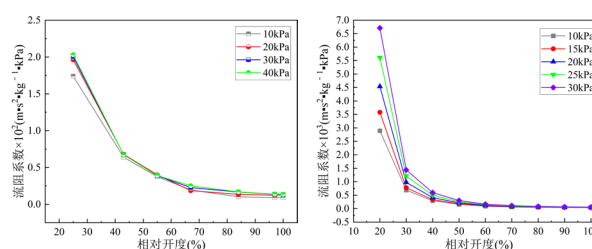


图4 平衡阀相对开度与流阻系数之间的关系

四、结论

通过对不同压差和开度下两类平衡阀流动与阻力特性进行分析,得出以下结论:

(1) 对于流动特性,MSV-D静态平衡阀的调节性能易受系统压差影响,在20%~50%开度时具有较高调节灵敏度,但大开度下特性趋于快开,精度下降;而AB-QM动态平衡阀凭借其压差无关特性,在不同压差下均保持流量稳定,且全开度范围内呈现理想的直线特性,调节性能更优。

(2) 对于阻力特性,两种阀门的流阻系数均随开度增大而减小。MSV-D静态平衡阀在小开度时流阻系数受流体流态影响显著,大开度后趋于稳定;AB-QM动态平衡阀则在全开度范围内均表现出高度一致的阻力特性,进一步验证了其内部压差控制机制的有效性。

(3) 对于工程应用,静态平衡阀适用于工况稳定的系统,而动态平衡阀因其卓越的稳定性和节能潜力,是实现变流量系统精确水力平衡的更优选择。

参考文献

- [1] 陈颂. 供热系统水力失调和水力平衡的分析 [J]. 硅谷, 2012, (04): 177-178.
- [2] 罗军, 李乐, 鲍金平. 中央空调系统水力平衡分析 [J]. 国外建材科技, 2005, (05): 79-82.
- [3] 王改, 樊越胜, 张婧, 等. 静态平衡阀流量特性和阻力特性的实验研究 [J]. 煤气与热力, 2016, 36(05): 9-12.
- [4] 全国阀门标准化技术委员会 (SAC/TC 188). 阀门 流量系数和流阻系数试验方法: GB/T 30832-2014[S]. 中国标准出版社, 2014.
- [5] 全国暖通空调及净化设备标准化技术委员会 (SAC/TC 143). 采暖与空调系统水力平衡阀: GB/T 28636-2012[S]. 中国标准出版社, 2012.
- [6] Chern M J, Wang C C, Ma C H. Performance test and flow visualization of ball valve[J]. Experimental thermal and fluid science, 2007, 31(6): 505-512.
- [7] 隋忠伟. 动态平衡阀调节特性分析与实验研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.