

## 调节阀多测点空化诱导振动敏感性分析

刘秀梅<sup>1</sup>, 韦建秋<sup>1\*</sup>, 龙正<sup>2</sup>, 李贝贝<sup>1</sup>, 孙深圳<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学机电工程学院, 江苏徐州 221116; 2. 山东中烟工业有限责任公司, 山东济南 250014)

**摘要:**针对调节阀阀体不同测点处对流动内空化敏感性存在差异问题,开展了不同测点处空化诱导振动的差异性研究和空化发展状态敏感程度分析。搭建了调节阀空化振动加速度信号采集试验平台,同步采集了多测点处调节阀空化诱导振动的加速度信号。提出了加速度级比率和重心频率两个表征参数,并利用1/3倍频程谱对调节阀空化振动信号频谱进行划分,最终得到对空化发展最敏感的频带和测点位置。结果表明:调节阀阀体同一表面测点振动信号呈现相似性,不同表面测点信号差异性较大,即调节阀振动信号表现为各向异性;空化状态的发展主要引起中心频率10 000 Hz以上的频带振动强度增大,适合作为监测调节阀空化状态的特征频带。

**关键词:**振动;调节阀;各向异性;加速度级比率;重心频率;1/3倍频程分析

**中图分类号:**TH137 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2024)04-125-08



论  
文  
拓  
展

## Analysis of cavitation-induced vibration sensitivity in regulating valve using multiple measuring points

LIU Xiumei<sup>1</sup>, WEI Jianqiu<sup>1\*</sup>, LONG Zheng<sup>2</sup>, LI Beibei<sup>1</sup>, SUN Shenzhen<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. China Tobacco Shandong Industrial Co., Ltd., Jinan 250014, China)

**Abstract:** Aiming at the difference in the cavitation sensitivity of the control valve at different measuring points of the regulating valve body, study on the difference of cavitation induced vibration and the cavitation sensitivity of different measuring points was carried out. A test platform for cavitation-induced vibration acceleration signal acquisition of regulating valve was built, and the acceleration signals of cavitation vibration of regulating valve at multiple measuring points were simultaneously collected. Two characterization parameters, the acceleration level ratio and the gravity frequency, were proposed. Frequency spectrum of the cavitation vibration signal of regulating valve was divided by the 1/3 octave frequency spectrum, and finally the frequency band most sensitive and location of measuring points to cavitation development was obtained. Results show that the vibration signals of measuring point on the same surface of the regulating valve body are similar, and the signals on different surface are significantly different. Vibration signals of the regulating valve are anisotropic. Development of cavitation extent mainly causes the vibration intensity of the frequency band above the center frequency of 10 000 Hz to increase. It is suitable for monitoring cavitation state of control valve.

**Keywords:** vibration; regulating valve; anisotropic; acceleration level ratio; gravity frequency; 1/3 octave analysis

调节阀在液压、制造等行业中占据着重要的地位<sup>[1]</sup>。在煤液化领域,调节阀长期工作在高温、高压、大流量的工况下,极易发生空化和磨损。空化泡形成、生长、溃灭的过程不仅冲蚀固体壁面,使阀芯、阀座失效,伴随着振动噪声,调节阀发生振动还会对与调节阀相连的元器件造成损伤,进而导致整个液压系统的破坏失效,造成巨大经

济损失。因此,开展调节阀空化诱导振动研究,有助于提高煤液化系统的安全性和稳定性。

调节阀振动分为外激振动和流激振动,空化振动属于流激振动<sup>[2]</sup>,空化现象通过两个途径使得调节阀发生振动:①空化从形成、发展到溃灭的过程中使流体处于不稳定状态,产生压力波动导致振动;②空泡溃灭时产生冲击波作用于固体壁

收稿日期:2022-05-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875559);江苏省优势学科平台资助项目

第一作者:刘秀梅(1982—),女,江苏盐城人,教授,博士,博士生导师,E-mail: liuxm@cumt.edu.cn

\*通信作者:韦建秋(1998—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,E-mail: TS20050168P31@cumt.edu.cn

引用格式:刘秀梅,韦建秋,龙正,等. 调节阀多测点空化诱导振动敏感性分析[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(4): 125-132.

**Citation:** LIU X M, WEI J Q, LONG Z, et al. Analysis of cavitation-induced vibration sensitivity in regulating valve using multiple measuring points[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(4): 125-132.

面产生振动。Mousmoulis 等<sup>[3]</sup>使用振动加速度计和声发射传感器对离心泵内空化现象进行了研究。研究发现:流场可视化技术难以观测到极小空泡的产生,而声发射信号和振动信号对极小空泡有很好的敏感性。吴姿宏等<sup>[4]</sup>对调节阀内空化现象进行了研究。结果表明,当进口压力固定不变,空化剧烈程度随空化数的增加而减小,流道中空化发展的轴向长度是空化数的函数。闵为等<sup>[5]</sup>通过对压力调节锥阀中空化现象进行研究之后发现,当流场发生空化时,压力波动幅值要明显大于无空化时。杨阳等<sup>[6]</sup>对超声空泡系统的振动进行研究,结果表明,气泡溃灭速率随气泡半径的增大而增大。王国玉等<sup>[7]</sup>对射流放水阀内的空化现象进行了研究,使用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)方法分析空化引起的振动并计算了信号的功率谱密度,结果表明,随着空化数的减小,空化诱导振动作用频率范围不会持续增大。蒲道林<sup>[8]</sup>针对空化诱导振动现象进行了实验研究,揭示空化初生时,振动强度有明显的上升。Li 等<sup>[9]</sup>研究空化对节流阀振动特性的影响,结果表明空化发展会引起阀体振动强度增加。Dong 等<sup>[10]</sup>研究空化诱导振动信号的振级与空化数的关系发现,振级随着空化数的减小呈现先增大后减小的趋势,指出空化流可减弱空泡溃灭对固体壁面的影响。

李洋等<sup>[11]</sup>指出,使用多个传感器信息可以获得被测对象的一致性解释或描述。潘灵永<sup>[12]</sup>使用多个振动加速度传感器对单向阀进行了状态研究,结果表明,基于多个传感器可以获得完整的单向阀状态信息,用于故障诊断时准确率较高。但是对空化诱导振动研究主要集中在泵中,Čeretić<sup>[13]</sup>等通过单侧点振动信息对空化现象进行研究,结果表明,空化主要引起泵体发生 4 000 Hz 以上频率的振动。Siano 等<sup>[14]</sup>通过泵体的振动信号对泵进行状态监测研究,研究发现空化的存在将信号频谱范围扩展到高频,特别是在 10 000 Hz 以上的频率范围内,振动信号表现出与空化效应相对应的高振幅。吴登昊等<sup>[15]</sup>开展不同测点处空化诱导振动信号的差异性研究,在泵五个敏感区域安装加速度传感器对空化现象进行分析。研究结果表明:不同传感器安装位置对测试结果有较大影响。

综上所述,目前针对调节阀空化诱导振动特性的研究较少,并且尚未研究传感器的安装位置对研究结果的影响。当空泡从节流口处开始生长,向下游扩张段发展以及溃灭的过程中,节流口

处和扩张段处空化诱导振动信号存在差异,同时因为调节阀自身结构,调节阀不同表面振动信号也存在差异,需要对阀体不同测点处空化诱导振动信号的差异性进行分析。因此,提出在调节阀的不同位置设置多个传感器测点,分析对比不同测点处的空化诱导振动信号的差异性以及对空化初生的敏感性,同时利用 1/3 倍频程方法划分频谱,研究对空化状态敏感的频谱范围,为调节阀空化状态监测提供借鉴和理论支撑。

## 1 调节阀空化振动分析模型

### 1.1 空化诱导振动机理

空泡溃灭引起阀体振动取决于流场中空泡溃灭的频率,流场中空泡溃灭频率可以通过 Rayleigh-Plesset<sup>[9]</sup>推导得出:

$$T_c = 0.915 \times \left( 1 + 0.41 \frac{R_{\max}}{2l} \right) R_{\max} \sqrt{\frac{\rho}{P}} \quad (1)$$

$$f_c = \frac{1}{T_c} = \frac{1}{1.83 R_{\max} (1 + 0.25 R_{\max}/l)} \sqrt{\frac{P}{\rho}} \quad (2)$$

式(2)表明空化诱导振动频率和空泡半径成反比。其中, $R_{\max}$ 为理想球形空泡的半径, $P$ 为无穷远处的流场的压强, $l$ 为空泡中心与壁面之间的距离, $\rho$ 为流场中液体的密度, $f_c$ 为无穷域中理想球形单空泡的溃灭频率。

空化诱导振动还与空泡群有关<sup>[16]</sup>。空泡群的半径可通过下式计算:

$$R_A = \sqrt[3]{\frac{3 \int_{t_{\text{incipient}}}^{t_{\text{collapse}}} Q(t) dt}{4\pi}} \quad (3)$$

式中, $Q(t)$ 为流量, $t_{\text{incipient}}$ 为空化泡初生时刻, $t_{\text{collapse}}$ 为空化泡溃灭时刻。

### 1.2 振动信号特征参数

振动分为随机振动和确定振动,确定振动可以用明确的时间函数来描述振动信号随时间的变化,随机振动的特点是无规律性,只能通过计算其统计特征来描述。由柱塞泵引起的阀体振动属于确定振动,空化诱导振动为随机振动,且由式(2)指出,空化诱导振动频率和空泡半径有关,因此空化诱导振动不存在固定峰值,只能用统计特征对其进行描述。加速度级比率描述振动信号的强度,重心频率描述功率谱曲线下的面积重心,用来表示空化诱导振动的带宽。本文通过计算振动信号的加速度级比率和重心频率描述调节阀内流场的空化发展过程。

加速度级比率  $L_{\text{val}}$  和重心频率  $X_{fc}$  由下式

计算:

$$L_{val} = \lg \frac{a_{rms}}{a_0} \quad (4)$$

$$X_{lc} = \frac{\sum f_i F(f_i)}{\sum F(f_i)} \quad (5)$$

式中: $a_0$  是参考加速度值,一般取值为  $10^{-6}$ ;  $f_i$  是频率,  $F(f_i)$  是幅值;  $a_{rms}$  是振动加速度有效值,其计算如式(6)所示。

$$a_{rms} = \sqrt{\int_0^T a^2(t) dt / T} \quad (6)$$

式中,  $a(t)$  是实测振动加速度。

### 1.3 1/3 倍频程分析

空化诱导振动频谱范围广,空化发展对不同频率范围内的信号影响也不相同。本文通过将振动信号的频谱按照 1/3 倍频程带进行划分,分析空化发展对不同频带内信号的影响。根据 GB/T 3241—2010,表 1 列出 1/3 倍频程的部分中心频率和频率范围。

表 1 1/3 倍频程部分中心频率和频率范围

Tab.1 Partial 1/3 octave center frequency and frequency range

中心频率/Hz	范围/Hz
5 000	4 467 ~ 5 623
6 300	5 623 ~ 7 079
8 000	7 079 ~ 8 913
10 000	8 913 ~ 11 200
12 500	11 200 ~ 14 130
16 000	14 130 ~ 17 780
20 000	17 780 ~ 22 390

## 2 实验方法

实验系统如图 1 所示,轴向柱塞泵为整个系统提供动力,其额定压力为 31.5 MPa,在信号采集过程中,由于长时间运行,油液的温度会对流场空化状态以及传感器的测试性能产生影响,因此使用风冷却器对油液进行降温。使用溢流阀和节流阀控制实验阀的入口压力和背压,并由压力表显示,流量计显示实时流量,溢流阀和节流阀的最大工作压力为 31.5 MPa,压力表的量程为 0 ~ 16 MPa,精度等级为 0.4,流量计量程为 10 ~ 100 L/min,精度等级为 0.5。

振动加速度信号采集系统如图 2 所示,主要包括振动测试诊断与动力学分析系统、加速度传感器以及信号采集软件。本文所用信号采集设备振动

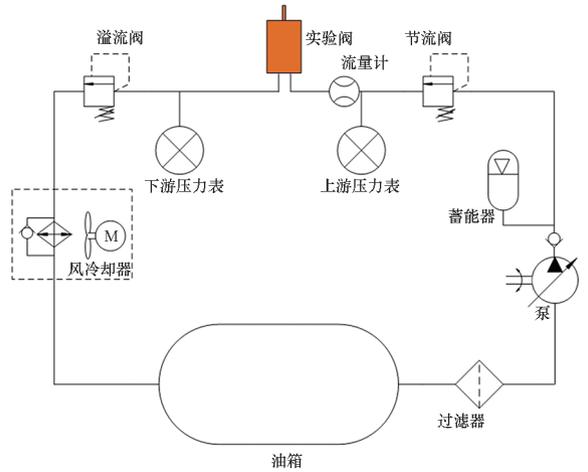


图 1 实验系统

Fig.1 Experiment system

测试诊断与动力学分析系统由比利时 LMS 公司生产,型号为 LMS SCADA,有 24 个动态信号输入通道和 2 个转速脉冲信号输入通道,每个通道的最大采样频率可达 102.4 kHz,可实现对阀体表面振动加速度的测量。加速度传感器型号为 PCB: 621B51,量程为  $\pm 50g$ ,灵敏度为  $(100 \pm 5\%) \text{ mV/g}$ ,非线性度为  $\pm 1\%$ 。通过控制柜启动液压实验台,调节溢流阀至合适工况,加速度传感器通过头部的磁铁吸附在阀体表面,加速度传感器数据通过振动测试诊断与动力学分析系统连接至电脑进行显示并保存。设置采样频率为 40 980 Hz,采样时间为 2 s,频率分辨率为 0.5 Hz。

调节阀的阀体是长方体结构,如图 2 所示,调节阀阀体内部存在入口流道,  $X$  方向和  $Y$  方向上振动信号存在差异。调节阀流道在轴向上依次有节流口和扩张段,当流场中发生空化时,从节流口处开始生长,节流口处是空化形成区。当空化泡发展到下游扩张段处被压溃,扩张段对应空化溃灭区<sup>[4]</sup>。空化泡在形成、生长、溃灭的过程中对节流口和扩张段的影响最大,因此节流口和扩张

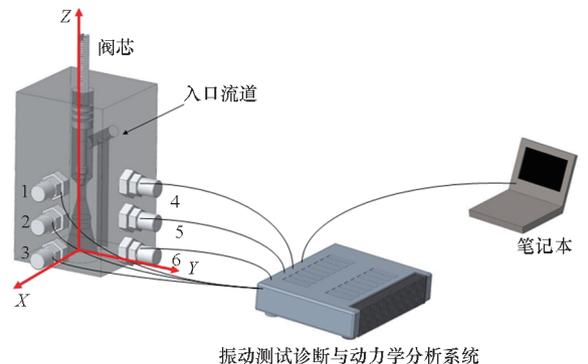


图 2 振动加速度信号采集系统

Fig.2 Vibration acceleration signal acquisition system

段处需要安装传感器。如图 2 所示,在  $X$  方向上放置传感器 1、2、3,分别正对节流口和扩张段;在  $Y$  方向上放置传感器 4、5、6,分别正对节流口和扩张段。各传感器安装位置距阀体底部高度如表 2 所示。

表 2 传感器距阀体底部高度

Tab.2 Height of sensor location from bottom of valve body

传感器编号	距离/mm
1	55
2	36
3	15
4	55
5	36
6	15

空化数是用来表征空化发展状态的参数,空化数越小,表示空化程度越剧烈。实验中,设置开度为 30%,保持背压为 0.2 MPa 不变,入口压力为 0.8 MPa 至 3.0 MPa,依次递增 0.1 MPa,空化数计算公式如下:

$$\sigma = \frac{p_{out} - p_v}{p_{in} - p_{out}} \quad (7)$$

式中,  $p_{in}$ 、 $p_{out}$ 、 $p_v$  分别是调节阀的入口压力、背压以及饱和蒸气压(为 0.000 4 MPa)。当流场出现空化初生时的空化数定义为临界空化数,用  $\sigma_c$  表示。当空化数大于临界空化数时,流场处于无空化状态,当空化数小于临界空化数时,流场处于空化状态。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 阀体不同测点处空化诱导振动特征差异性分析

图 3 为无空化状态(空化数为 0.33)下,  $X$  方向 1 测点和  $Y$  方向 4 测点的振动加速度时域信号。图中结果表明,当流场内无空化时,阀体振动主要由流体脉动引起,振动频率约为 2 000 Hz。结合图 2 可知,由于  $X$  方向测点正对进油口,受到来自入口流道液压冲击的影响,而  $Y$  方向测点受到液压冲击的影响较小,所以 1 和 4 两个测点处振动形式不同,  $X$  方向 1 测点处为简谐式振动,且振动加速度幅值高于  $Y$  方向 4 测点。因此,合适的测点位置对于调节阀的振动特性研究非常重要。

当调节阀内发生空化初生时,空化泡出现在节流口附近且数量较少,此时的空化形态属于游

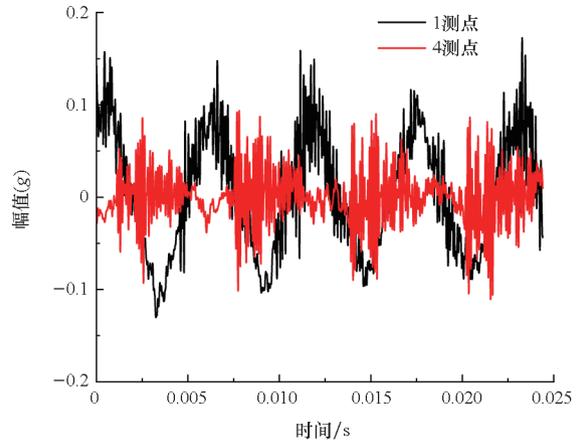
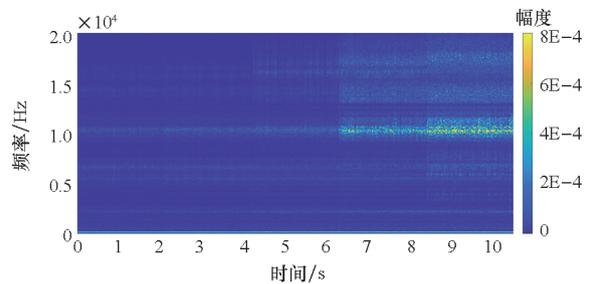


图 3 无空化状态下 1、4 测点时域信号

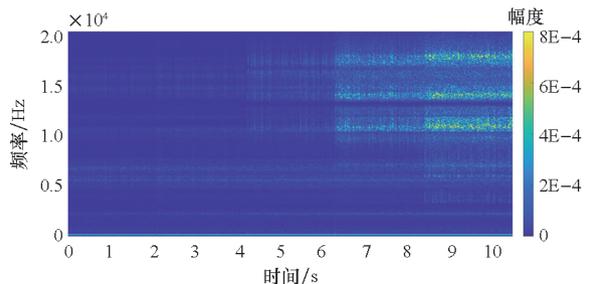
Fig.3 Time signal of no cavitation of No. 1 and No.4 measuring point

离态空化<sup>[4]</sup>。文献[3,14]指出,当流场内发生空化时,主要引起 10 000 Hz 以上的振动,高速摄影技术难以捕捉到极微小空化泡的产生,但是固体壁面振动信号对空化初生有较好的敏感性。本文计算了各测点位置处入口压力 0.7 ~ 1.1 MPa 的时频谱,每个入口压力值获取 2 s 的数据,如图 4 所示。在第 6 s 末,  $X$  方向 3 个测点处在 10 000 Hz 以上的频率范围振动强度明显增强,该频率范围与文献[14]报道一致。相比较而言,  $Y$  方向 3 个测点在 10 000 Hz 以上的频率范围振动强度增强不明显,但是依然可以发现振动强度也在变大。此时,在第 6 s 末入口压力为 0.9 MPa,根据式(7)计算可得临界空化数为 0.28。



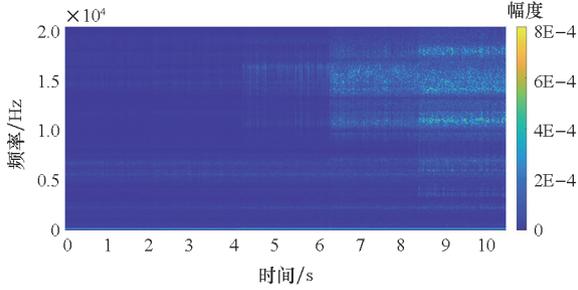
(a) 测点 1

(a) No. 1 measuring point



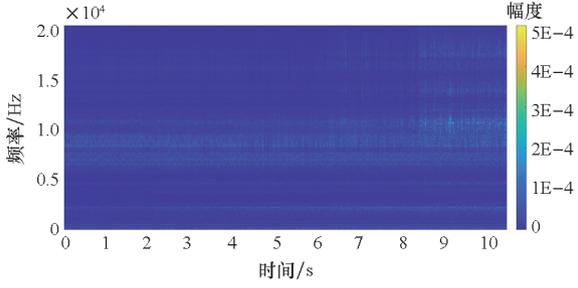
(b) 测点 2

(b) No. 2 measuring point



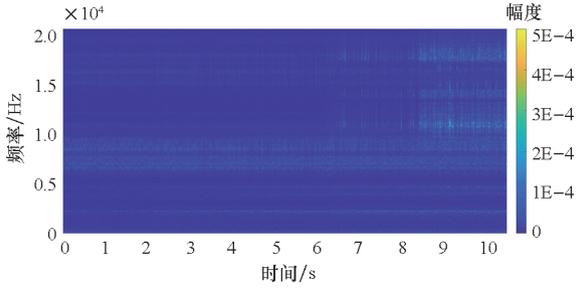
(c) 测点3

(c) No. 3 measuring point



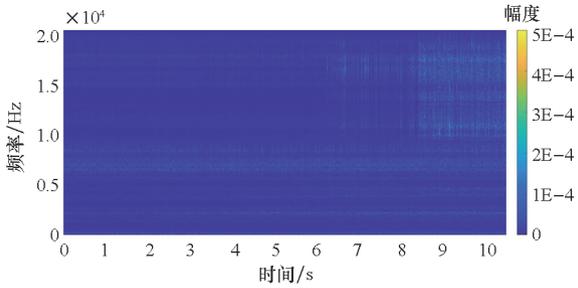
(d) 测点4

(d) No. 4 measuring point



(e) 测点5

(e) No. 5 measuring point



(f) 测点6

(f) No. 6 measuring point

图4 各测点处时频谱图

Fig. 4 Time-frequency spectrum of each measuring point

随着空化程度越来越剧烈,原始时域信号包含大量空化泡溃灭引起的高频信号,从时域信号无法反映不同测点处空化诱导振动的差异性。通过引入重心频率和加速度级比率,可以获得空化对不同测点处的影响。重心频率可以描述空化诱导振动功率谱面积的重心,空化程度加剧会诱导

阀体产生高频振动,重心频率的变化趋势可以表明调节阀内空化的剧烈程度。

图5为不同测点处重心频率。结果表明:随着空化数的减小,每一个测点处的重心频率都是先急剧升高,后保持不变或者波动稳定。式(2)指出,空化诱导振动频率和空化泡半径成反比。空化初生时,空化泡半径小,引起的振动频率较高,所以相对于无空化状态时,重心频率会有所升高。文献[4, 17]指出,随着空化数的持续减小,空化泡数量增多,空化程度加剧,空化形态由游离型空化向云状空化转变,较大尺度云状空泡团的形成、脱落和溃灭,云状空化泡团的不稳定特性,引起高频振动幅值急剧增大,重心频率急剧升高。所以重心频率在空化数为0.21至0.28范围内急剧增大是由云状空化的溃灭引起。随着空化数进一步减小,空化程度更加严重<sup>[17]</sup>,气液两相流覆盖整个流场,空化泡团保持稳定的形态,空化振动幅值达到最大值,同时,气液两相流降低了空化泡溃灭对固体壁面的影响,频谱的面积重心随之保持稳定<sup>[10]</sup>。

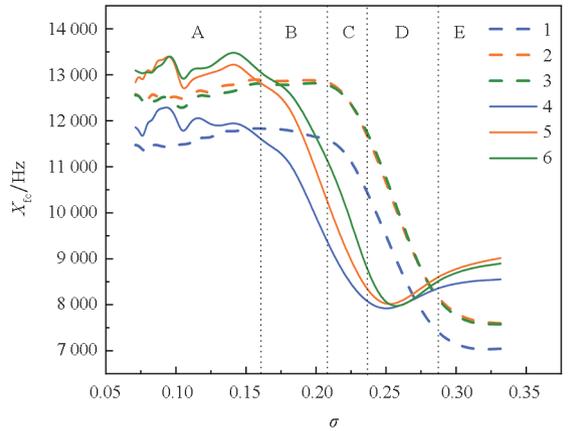


图5 不同测点处重心频率

Fig. 5 Gravity frequency of different measuring points

此外,从图5还可以看出:同一空化数下, $X$ 方向流场中空化形态和 $Y$ 方向存在差异。将重心频率随空化数减小而增大的变化趋势分为5个阶段。当重心频率处于E阶段时( $\sigma > 0.28$ ),6个测点虽然均未监测到调节阀内的空化现象,但是1、2和3测点处重心频率已经有明显上升趋势,即游离型空化首先发生在 $X$ 方向流场中。当重心频率处于B阶段时( $0.21 > \sigma > 0.16$ ),1、2、3测点处重心频率已经保持稳定,即 $X$ 方向流场中空化泡团已经保持稳定,但是4、5、6测点处重心频率仍然处于上升阶段,空化形态为云状空化。上述差异性表明,调节阀内空化形态在 $X$ 和 $Y$ 方向上存在差异,为各向异性。不仅如此,当重心频

率处于 D 阶段时 ( $0.28 > \sigma > 0.24$ ), 1、2、3 测点均监测到调节阀内的空化现象, 即重心频率已经产生明显上升, 但是 4、5、6 测点未监测到调节阀内的空化现象, 所以空化现象首先在流场中 X 方向发生。实验结果表明, 相比较于 4、5、6 测点, 1、2、3 测点空化程度更剧烈。

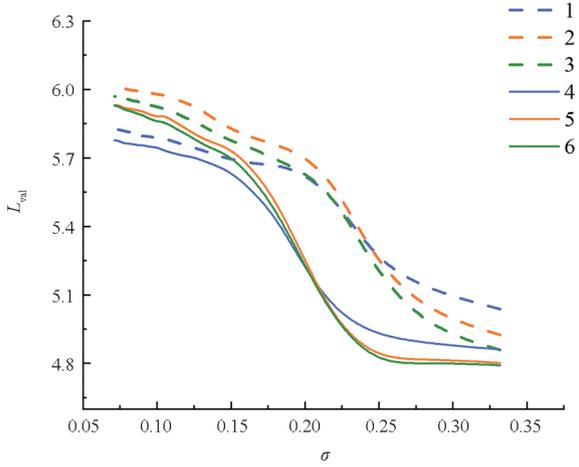


图 6 不同测点处加速度级比率

Fig. 6 Acceleration level ratio of different measuring points

图 6 为实验获得的不同测点处加速度级比率。结果表明: 1、2、3 测点处加速度级比率分别高于 4、5 和 6 测点处。由上文可知, 流场中空化形态为各向异性。在相同空化数下, X 方向空化程度更加剧烈, 由空化引起的高频振动幅值更大, 因此加速度级比率更大。当空化数较大时, 节流口处振动强度大于扩张段处。因为当空化数较大时, 阀体振动的主要激励源为流体脉动和液压冲击, 油液流经节流口处会产生强烈振动。当空化数较小时, 流场内充满大量空泡, 阀体振动主要激励源为空化泡的溃灭, 下游扩张段为空化溃灭区, 振动强度大于节流口处。

各测点加速度级比率的变化率计算公式如下:

$$C = \frac{|L_{val}(\sigma) - L_{val}(\sigma_a)|}{L_{val}(\sigma_a)} \quad (8)$$

式中,  $\sigma_a$  为未发生空化时的空化数。

为了定量分析各测点对空化程度发展的敏感度, 分别选取流场中空化数为 0.28、0.24、0.21、0.05 时各测点加速度级比率相对于无空化时(空化数为 0.33)的加速度级比率变化率, 分析各测点对空化程度发展的敏感度, 结果如表 3 所示。在空化程度加剧的过程中, 调节阀内各测点对空化发展程度的敏感度存在差异, X 方向上 1、2、3 测点处对空化程度发展的敏感性整体大于 Y 方向 4、5 和 6 测点处。

表 3 各测点对空化程度变化敏感度

Tab. 3 Sensitivity of each measuring point to cavitation degree change

空化数	测点位置						%
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	
	0.28	1.6	1.9	1.8	0.5	0.3	
0.24	4.0	6.1	6.7	1.2	0.9	1.0	
0.21	9.5	13.3	13.6	3.3	3.5	3.8	
0.05	15.7	21.9	22.6	18.7	23.5	23.7	

总之, 从上述分析加速度级比率和重心频率的变化趋势可以看出, 对调节阀进行状态监测, 传感器的安装位置对调节阀状态监测结果有较大影响。当流场内空化程度加剧时, 相比较于 4、5、6 测点处, 1、2、3 测点处对空化程度的发展更敏感, 因此适合用来监测调节阀空化现象。

### 3.2 空化诱导振动 1/3 倍频程带差异性分析

1/3 倍频程常用于对振动和噪声信号的分析中。将各频带的振动频域信号进行傅里叶逆变换, 然后计算各个频段内的加速度级比率。通过 1/3 倍频程可以有效地分析振动信号各频带对空化形态变化的响应特性。

图 7 为有无空化状态下振动信号频谱。结果表明, 空化现象对阀体振动信号的影响主要集中在高频段。选取 X 方向三个测点的振动信号, 并通过 1/3 倍频程带将各测点振动信号划分为不同频带范围, 为了对比空化程度发展对 10 000 Hz 以下振动信号的影响, 选取 X 方向各测点振动信号中心频率为 5 000 Hz 及以上频段的加速度级比率进行分析, 各频段中心频率及上下限频率如表 1 所示。

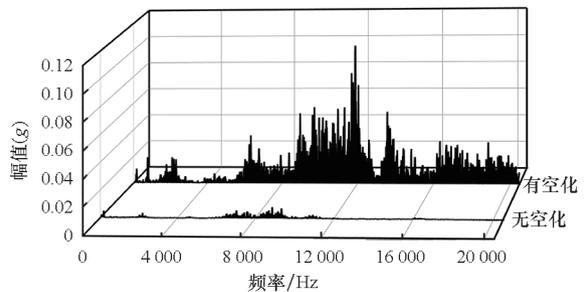


图 7 有无空化状态下振动信号频谱

Fig. 7 Vibration signal spectrum of cavitation and without cavitation

图8为各测点处不同频带信号的加速度级比率随空化数的变化趋势。从图中可以看出,相比于直接计算各测点振动信号的加速度级比率,通过先划分不同频段再计算各个频段的加速度级比率,可以更加明显地观察到不同频带内的振动信号对调节阀内空化现象发展的响应特性。结果表明:空化对不同频带的影响存在差异。随着空化的发展,中心频率大于10 000 Hz的频带的加速度级比率表现出先急剧增大,然后上升变缓的趋势

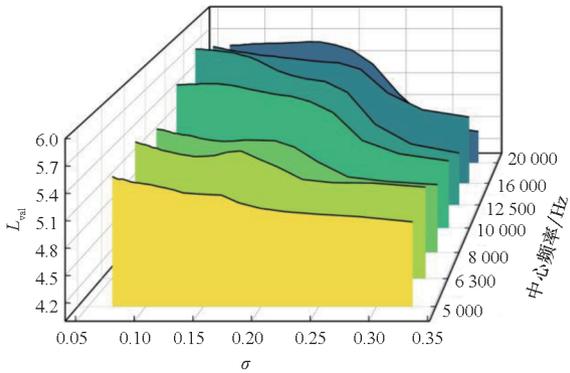
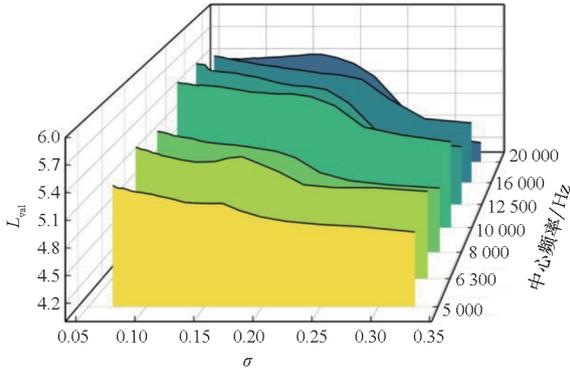
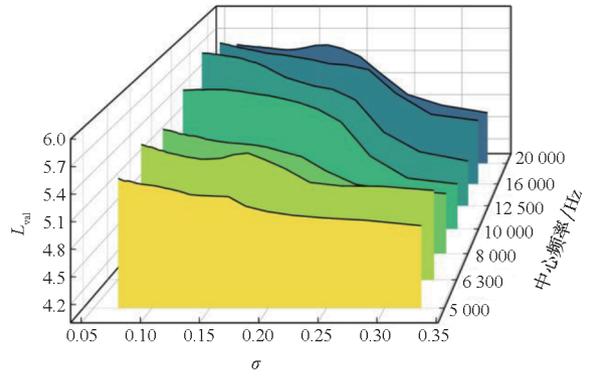


图8 1、2、3测点处1/3倍频程带加速度级比率

Fig. 8 1/3 octave band vibration acceleration level of 1, 2 and 3 measuring point

势,敏感度较大,中心频率小于10 000 Hz的频带范围对空化程度发展的敏感性较弱,变化较小。

为了进一步了解不同频段振动信号对空化程度发展的敏感性,同表3一样,选取不同空化数下,各频带的加速度级比率相对于无空化时加速度级比率的变化率,分析各频带对空化程度变化的敏感度结果如表4所示。从上述分析结果表明,同一方向上测点的重心频率和加速度级比率的变化趋势呈现相似性,因此本文在X方向上选择测点1的振动信号分析各频带对空化程度变化的敏感性。结果表明:空化发展过程中,空化发展主要引起中心频率为10 000 Hz及以上频段加速度级比率的变化,空化数为0.28时,游离型空化的振动强度低,引起各频带加速度级比率的变化不明显。随着空化数减小,空化增强,各频带加速度级比率对空化程度变化敏感性明显上升,且中心频率10 000 Hz以上频带的变化率明显大于低频范围。

表4 测点1各频带对空化程度变化敏感度

Tab. 4 Sensitivity of each frequency band of No. 1 measuring point to cavitation degree change

空化数	中心频率/Hz						
	5 000	6 300	8 000	10 000	12 500	16 000	20 000
0.28	0.9	0.8	0.7	1.6	1.1	1.1	1.8
0.24	1.8	1.0	0.8	3.5	4.0	6.4	11.7
0.21	2.4	1.5	3.8	8.7	11.8	11.8	20.6
0.05	10.6	10.2	12.3	16.3	20.5	18.1	26.2

#### 4 结论

为了更加准确地捕捉调节阀内空化发展状

态,并探究空化状态的变化对调节阀内不同位置振动信号的影响。本文在调节阀不同表面不同位置设置了多个测点,对各测点空化诱导振动信号

差异性进行分析,并得到如下结论:当调节阀内发生空化时,重心频率会有明显上升趋势。云状空化的产生,使得重心频率和加速度级比率急剧上升,当调节阀内流场空化程度继续加剧,空化泡团形态保持稳定,重心频率保持不变,同时加速度级比率上升速度变慢。此外,阀体上 X 方向 1、2、3 测点对空化发展更敏感。因此对调节阀进行空化监测研究,应选择 1、2、3 测点处。空化形态的变化主要引起中心频率 10 000 Hz 以上频带信号的变化。

### 参考文献 (References)

[1] QIAN P F, PU C W, LIU L, et al. Development of a new high-precision friction test platform and experimental study of friction characteristics for pneumatic cylinders [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33: 065001.

[2] 钱锦远, 吴嘉懿, 金志江. 调节阀振动特征的研究进展[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(11): 1-13, 21.  
QIAN J Y, WU J Y, JIN Z J. Research progress on vibration characteristics of regulation valve [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(11): 1-13, 21. (in Chinese)

[3] MOUSMOULIS G, KARLSEN-DAVIES N, AGGIDIS G, et al. Experimental analysis of cavitation in a centrifugal pump using acoustic emission, vibration measurements and flow visualization [J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2019, 75: 300-311.

[4] 吴姿宏, 刘秀梅, 李贝贝, 等. 基于图像灰度统计的调节阀空化分布特性研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(2): 307-316.  
WU Z H, LIU X M, LI B B, et al. Research on cavitation distribution characteristics in regulate valve based on image gray statistics[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(2): 307-316. (in Chinese)

[5] 闵为, 王东, 郑直, 等. 低压下锥阀振荡空化的可视化试验研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(20): 139-144.  
MIN W, WANG D, ZHENG Z, et al. Visualization experiment of vibration and cavitation in poppet valve under low pressure condition [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(20): 139-144. (in Chinese)

[6] 杨阳, 宗丰德. 单泡空化振动系统的动力学数值模拟[J]. *浙江师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 31(3): 295-299.  
YANG Y, ZONG F D. Numerical simulations of dynamics in the vibration of single cavitation bubble [J]. *Journal of Zhejiang Normal University (Natural Sciences)*, 2008, 31(3): 295-299. (in Chinese)

[7] 王国玉, 刘淑艳, 曹树良, 等. 高速水流中旋涡空化所引起的空蚀和振动[J]. *工程热物理学报*, 2002, 23(6):

707-710.  
WANG G Y, LIU S Y, CAO S L, et al. Study on vibration and erosion induced by vortex cavitation around a hollow-jet valve [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2002, 23(6): 707-710. (in Chinese)

[8] 蒲道林. 空化诱发离心泵振动特性的试验研究[J]. *水泵技术*, 2015(3): 6-8.  
PU D L. Experimental study on vibration characteristics of centrifugal pump induced by cavitation [J]. *Pump Technology*, 2015(3): 6-8. (in Chinese)

[9] LI B B, ZHAO Q, LI H Y, et al. Analysis method of the cavitation vibration signals in poppet valve based on EEMD[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2021, 13(2): 1687814021998-114.

[10] DONG L, ZHAO Y Q, DAI C. Detection of inception cavitation in centrifugal pump by fluid-borne noise diagnostic[J]. *Shock and Vibration*, 2019, 2019: 9641478.

[11] 李洋, 赵鸣, 徐梦瑶, 等. 多源信息融合技术研究综述[J]. *智能计算机与应用*, 2019, 9(5): 186-189.  
LI Y, ZHAO M, XU M Y, et al. A survey of research on multi-source information fusion technology [J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2019, 9(5): 186-189. (in Chinese)

[12] 潘泳永. 基于多特征融合的 MLP 压裂泵单向阀故障诊断研究[J]. *机电工程*, 2021, 38(10): 1299-1304, 1310.  
PAN L Y. Fault diagnosis method of fracturing pump valve based on MLP of multi-feature fusion [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021, 38(10): 1299-1304, 1310. (in Chinese)

[13] Ćeretić J. The use of noise and vibration signals for detecting cavitation in kinetic pumps[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2009, 223(7): 1645-1655.

[14] SIANO D, PANZA M A. Diagnostic method by using vibration analysis for pump fault detection [J]. *Energy Procedia*, 2018, 148: 10-17.

[15] 吴登昊, 张婷, 祝之兵, 等. 双叶片离心泵自吸过程的气液流态及振动特性[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(8): 1-6.  
WU D H, ZHANG T, ZHU Z B, et al. Gas-liquid flow states and vibration characteristics of a double-blade centrifugal pump during self-priming process [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(8): 1-6. (in Chinese)

[16] 陈亮, 金迎村. 内流式阀件中的空化抑制新方法探究[J]. *液压与气动*, 2015(10): 115-119.  
CHEN L, JIN Y C. New method to limit cavitation in internal flow valve [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2015(10): 115-119. (in Chinese)

[17] 吴钦. 非正常空化流动及其诱导振动特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.  
WU Q. Physical and numerical investigation of cavitating flow-induced vibrations [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)