DOI: 10.3901/JME.2020.22.256

消防炮自适应炮头射流系统自由振动分析*

袁晓明^{1,2,3} 王 储^{1,2} 赵士宜^{1,2} 张立杰^{1,2}

- (1. 燕山大学河北省重型机械流体动力传输与控制重点实验室 秦皇岛 066004;
2. 燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室 秦皇岛 066004;
3. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 消防炮自适应炮头可根据流体压力和流量变化自动调整炮口开度,从而提高消防炮的射流性能,快速高效地扑灭大型火灾。但炮头末端的自适应机构使射流系统具有流固耦合特性,在高速高压作用下,射流系统可能会发生振动乃至共振,进而影响灭火效率。考虑射流系统中流体域和固体域间的流固耦合效应以及炮头内连续体芯杆和端盖与其他离散结构间的连续离散耦合效应,通过集中质量法确定了芯杆和端盖结构的刚度矩阵,采用集中参数法建立了消防炮自适应炮头射流系统的动力学模型及方程。对射流系统进行了自由振动分析,确定了系统各阶固有频率及模态振型,分析了流体初始体积含气量和流体压力对系统固有频率的影响规律。由样机模态试验可知,理论与试验确定的一阶固有频率偏差仅为0.51%,验证了消防炮自适应炮头射流系统动力学模型的准确性。本研究可为消防炮自适应炮头射流系统的动力学优化提供理论依据。

关键词: 消防炮; 自适应炮头; 射流系统; 自由振动; 模态试验

中图分类号: TG156

Analysis of Free Vibration of Adaptive Head Jet System of Fire Water Monitor

YUAN Xiaoming^{1,2,3} WANG Chu^{1,2} ZHAO Shiyi^{1,2} ZHANG Lijie^{1,2}

- (1. Hebei Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;
2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science, Ministry of Education of China, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;
3. State Key Laboratory of Fluid Power & Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: The adaptive head of the fire water monitor can automatically adjust the muzzle opening according to the change of fluid pressure and flow rate. Thus, the jet performance of fire water monitor can be improved, and large fires can be put out quickly and efficiently. However, the adaptive mechanism at the end of the adaptive head makes the jet system have the characteristics of fluid-structure coupling. And under the action of high speed and high pressure jet, the vibration even resonance of the jet system may occur, which will affect the efficiency of fire extinguishing. Considering the fluid-structure coupling effect between the fluid and solid domains in the jet system and the discrete-continuum coupling effect between the core rod and end cap of the continuous body and other discrete structures in the adaptive head, the stiffness matrix of the mandrel and end cap structure is determined by the lumped mass method and the dynamic model and equation of the adaptive head jet system of fire water monitor are found by the lumped parameter method. The free vibration analysis of the jet system is carried out, and the natural frequencies and mode shapes of the system are determined. The influence of initial volumetric gas content and fluid pressure on the natural frequency of the system is analyzed. According to the modal experiment of the sample machine, the error between the theoretical and experimental result of first-order natural frequency is only 0.51%, which verifies the accuracy of the dynamic model of adaptive head jet system of fire water monitor. This research can provide the theoretical basis for the dynamic optimization of the adaptive head jet system of the fire water monitor.

Key words: fire water monitor; adaptive head; jet system; free vibration; modal experiment

* 国家自然科学基金青年科学基金(51805468)、河北省自然科学基金青年科学基金(E2017203129)、浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金课题(GZKF-201820)和燕山大学基础研究专项青年课题(16LGB001)资助项目。20191204收到初稿,20200420收到修改稿

0 前言

消防炮以其流量大、射程远、灭火效率高等突出优点, 逐渐成为消防实战中的主力装备之一^[1]。作为消防炮的末端执行装备, 炮头是将流体压力势能转化为射流动能的关键部件。根据结构形式的不同, 炮头主要分为直流式炮头和导流式炮头。传统导流式炮头的炮口开度不变, 已明显限制其射流性能的提升。自适应炮头在传统导流式炮头的基础上引入了自适应机构, 能够根据炮头入口流量和压力的变化自动调整炮口开度, 使其在较宽流量范围内均能达到更优的射流性能, 提高了灭火效率。

自适应炮头的炮口开度自动调节过程中存在流体、喷芯和弹簧间的相互作用, 使炮头射流系统具有流固耦合动力学特性, 在一定程度上增加了自适应炮头射流系统分析与优化的难度。流固耦合动力学主要研究固体运动或变形条件下流固两相的力学行为以及交互作用规律的一门科学^[2], 按照流固两相耦合机理, 流固耦合问题可分为两大类: 第一类问题中流体域和固体域部分或完全交织在一起, 难以将二者明显区分开来, 从而导致其物理现象的描述方程, 尤其本构方程的建立需要针对特定问题具体分析, 对应的耦合关系通常由微分方程描述, 如土壤渗流问题^[3]; 第二类问题中流固两相域的耦合关系仅体现在两者的交界面上, 这种耦合关系可由交界面的平衡条件和协调关系来描述, 如海洋输油管道与海水的耦合振动^[4], 海水与船体的耦合振动^[5]等问题。随着流固耦合问题研究的深入, 目前已可以对考虑固体单元材料非线性^[6-7]和结构几何非线性^[8]的问题进行计算; 并从最初的流体不可压缩流体假设模型^[9], 发展到带有黏性及空化等效应的流体模型, 从而更加准确地模拟流固耦合现象中流体的晃动、空化和飞溅等现象^[10]。

在自适应炮头射流系统动力建模中, 炮头内的喷芯仅沿轴向运动, 可以简化为集中质量块, 属于离散体; 芯杆为细长杆, 与端盖固定连接, 可简化为自由端带有附加质量的悬臂梁, 属于连续体。因此, 该射流系统动力学问题属于连续-离散耦合问题。针对离散体-连续体耦合系统动力学问题主要有两大类分析方法, 一类是将连续体离散, 使耦合系统简化为单一的离散系统, 但将在一定程度上降低求解难度, 且计算精度随连续体离散后自由度数的增多而提高; 另一类是保留耦合关系, 对于侧重微观细节的问题, 一般可采用基于离散体的离散元法

进行分析, 对于侧重宏观表象的问题, 一般采用基于连续介质的有限元法进行分析, 同时, 也有学者通过结合离散元法和有限元法各自的优势, 提出了离散元-有限元耦合分析方法, 其中, 如何保持离散体-连续体耦合系统在耦合边界上位移、速度和力等物理信息的连续性, 仍是难于解决的实际问题, 限制了该方法的应用^[11]。

综上所述, 自适应炮头是一种能够提高灭火性能的新结构炮头, 其射流系统动力学问题涉及流固耦合效应、连续体和离散体耦合效应, 国内外学者暂未对该问题开展研究。因此, 拟在考虑自适应炮头及其上游内部流体可压缩性的基础上, 利用集中参数法, 建立一种消防炮自适应炮头射流系统轴向振动动力学模型及方程, 求解该系统的各阶固有频率和主振型, 分析流体初始体积含气量和流体压力对射流系统固有频率的影响规律, 并通过自适应炮头射流系统物理试验对动力学模型进行验证, 从而为提高消防炮系统的射流流性能提供一定的理论依据。

1 射流系统动力学模型

消防炮自适应炮头的结构如图 1 所示, 其中由喷芯 9、端盖 10、芯杆 11 和弹簧 12 组成的自适应机构是自适应炮头的核心部件。当炮头入口流量增大时, 自适应机构的喷芯左侧所受压力增大, 当喷芯所受流体的作用力大于喷芯所受弹簧的作用力时, 喷芯向右运动, 炮口开度增大; 反之, 当入口流量减小时, 喷芯向左运动, 炮口开度减小。自适应机构使自适应炮头能够根据入口流量和压力的变化自动调节炮口开度, 从而在各种工况下均能达到较高的射流性能, 快速有效地扑灭大型火灾。

图 1 消防炮自适应炮头结构图

1. 接头 2. 螺母 3. 稳流器 4. 垫圈 5. 外壳 6. 挡圈
7. 外喷嘴 8. 内喷嘴 9. 喷芯 10. 端盖 11. 芯杆 12. 弹簧
13. 芯套 14. 密封圈

1.1 芯杆的离散化

将芯杆及与其通过螺纹连接的端盖从图 1 中分离出来, 芯杆-端盖结构示意图如图 2 所示。图 2 中, L 为芯杆长度, m 为芯杆质量, A 为芯杆横截面积, m_d 为端盖质量。

图 2 芯杆-端盖结构示意图

应用集中质量法, 将芯杆平均分成四段, 每段的分布质量按杠杆原理换算成位于该段两端的集中质量, 各集中质量之间通过无质量的弹性杆相连, 同时将端盖与芯杆自由端的集中质量块等效为一个新的质量块。离散后的芯杆-端盖结构如图 3 所示。

图 3 芯杆-端盖结构离散化示意图

图 3 中, m_1 、 m_2 和 m_3 的质量均为 $0.25m$, m_4 的质量为 $(0.125m+m_d)$, 图 3 所示结构的质量矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0.25m & & & \\ & 0.25m & & \\ & & 0.25m & \\ & & & 0.125m + m_d \end{pmatrix} \quad (1)$$

根据匀质杆拉伸或压缩时的变形可得离散后的芯杆-端盖结构纵向振动柔度矩阵为

$$\boldsymbol{\delta} = \begin{pmatrix} \frac{1}{4}\delta & \frac{1}{4}\delta & \frac{1}{4}\delta & \frac{1}{4}\delta \\ \frac{1}{4}\delta & \frac{1}{2}\delta & \frac{1}{2}\delta & \frac{1}{2}\delta \\ \frac{1}{4}\delta & \frac{1}{2}\delta & \frac{3}{4}\delta & \frac{3}{4}\delta \\ \frac{1}{4}\delta & \frac{1}{2}\delta & \frac{3}{4}\delta & \delta \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{L}{AE} \quad (3)$$

式中, E 为芯杆的弹性模量。

离散后的芯杆-端盖结构的振动方程为

$$\boldsymbol{\delta} \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{X} = \mathbf{0} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{X}$ 为位移列矢量。令该方程的主振动为

$$\mathbf{X} = \boldsymbol{\Phi} \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

式中, $\boldsymbol{\Phi}$ 为模态列矢量; ω 为主振动固有角频率; φ 为主振动相位角。

芯杆-端盖各参数如表 1 所示。

表 1 芯杆-端盖参数

参数名称	数值
芯杆长度 L/m	104.7
芯杆横截面积 A/mm^2	124.7
芯杆质量 m/kg	0.035 4
端盖质量 m_d/kg	0.117 7
体积弹性模量 E/MPa	70 000

结合表 1 的芯杆-端盖参数, 联立式(1)~(5), 可得离散后的芯杆-端盖结构的各阶固有频率, 同时由连续系统的振动理论可得其连续系统的各阶固有频率, 两组固有频率及对比如表 2 所示。

表 2 离散系统固有频率和连续系统的固有频率对比

固有频率	一阶	二阶	三阶	四阶
离散系统/Hz	26 023	152 742	276 145	358 832
连续系统/Hz	26 057	157 271	307 445	459 134
误差(%)	0.130 5	2.879 7	10.180 7	21.845 9

由表 2 可知, 离散系统与连续系统的一阶和二阶固有频率相差不大, 两者的三阶和四阶固有频率的误差相对较大, 且随着阶数的增加, 两者的误差逐渐增大。芯杆-端盖结构的一阶固有频率已经达到了 2.6 万 Hz 左右, 离散系统的一阶固有频率与对应的连续系统所确定的精确解几乎相等。所研究的自适应炮头射流系统的机械弹簧刚度和流体刚度均较小, 射流系统的固有频率较低, 且射流系统的激励频率一般在 1 000 Hz 以下。因此, 将芯杆-端盖连续结构采用上述方法离散得到的离散系统可以满足射流系统动力学分析精度的要求。

由于芯杆-端盖结构的柔度矩阵非奇异, 将柔度矩阵转化为刚度矩阵, 以用于自适应炮头射流系统的动力学建模。将图 3 中的无质量弹性杆改为拉压弹簧, 则芯杆-端盖离散结构如图 4 所示。

图 4 芯杆-端盖结构离散化示意图

对式(2)所示柔度矩阵求逆, 得到芯杆-端盖离散结构的刚度矩阵为

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} 8k & -4k & 0 & 0 \\ -4k & 8k & -4k & 0 \\ 0 & -4k & 8k & -4k \\ 0 & 0 & -4k & 4 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$k = \frac{AE}{L} \quad (7)$$

图 4 所示芯杆-端盖离散结构的刚度矩阵为

$$K = \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 \end{pmatrix} \quad (8)$$

综合式(6)、(8)可知, k_1 , k_2 , k_3 和 k_4 均为 33 346 kN/m。

1.2 射流系统动力学模型的建立

自适应炮头射流系统中流体单元与固体单元的耦合关系发生在二者的交界面上, 该射流系统各单元间的相互作用关系如图 5 所示。

图 5 自适应炮头射流系统各单元间相互作用关系

图 5 中, 流体单元 2 为喷芯内侧与芯杆-端盖结构所包围体积内的全部流体, 流体单元 1 为除流体单元 2 之外炮头、炮身及炮身所连管道内的全部流体。流体单元与固体单元间相互耦合, 相互作用, 使自适应炮头射流系统的动力学建模和分析更为复杂。该射流系统的整体动力学建模采用以下假设。

(1) 除流体单元及弹簧外, 认为喷芯、炮头外壳、炮身及管道外壁等零部件均为刚体, 不考虑其变形。

(2) 喷芯、芯杆-端盖结构及各流体单元等仅受轴向力作用, 流体单元对固体单元的作用力等效为轴向的线性弹簧力。

(3) 流体单元与固体单元间的阻尼等效为轴向的线性阻尼, 喷芯上均布小孔结构所形成的阻尼等效为轴向的线性阻尼。

(4) 忽略各零部件的加工、安装误差。

图 6 所示为消防炮自适应炮头射流系统动力学模型。其中, m_5 、 m_6 、 m_7 分别为流体单元 2、喷芯和流体单元 1 的质量, k_{f1} 、 k_{f2} 和 k_{f3} 均为流体刚度, k_{f1} 为流体单元 1 的刚度, k_{f2} 和 k_{f3} 在数值上相等, 且二者并联后的总刚度为流体单元 2 的刚度。 k_5 为炮头自适应机构中弹簧的刚度, c_1 为流体单元 1

图 6 消防炮自适应炮头射流系统动力学模型

的阻尼, c_2 和 c_3 在数值上相等, 且二者并联后的总阻尼为流体单元 2 的阻尼与喷芯小孔结构阻尼之和。

2 射流系统动力学方程

根据文献[12]所述的体积弹性模量理论, 令流体的体积弹性模量为 B_f , 其定义式为

$$B_f = -\frac{V \Delta p}{\Delta V} \quad (9)$$

式中 V ——气液混合流体总体积(m^3);

ΔV ——气液混合流体体积变化量(m^3);

Δp ——气液混合流体压力变化量(MPa)。

假设流体单元的过流截面平均面积为 S_a , 流体域轴向长度为 L , 则流体域体积为

$$V = S_a L \quad (10)$$

刚度的定义式为

$$k_f = -\frac{\Delta F}{\Delta L} \quad (11)$$

式中 ΔF ——流体单元所荷载荷变化量(N);

ΔL ——流体域轴向长度变化量(m)。

联立式(9)~(11), 则流体等效刚度可由流体体积弹性模量表示为

$$k_f = \frac{B_f S_a}{L} \quad (12)$$

消防炮自适应炮头射流系统内部结构如图 7 所示。

图 7 消防炮自适应炮头内部结构示意图

由图 7 可知, 流体单元 1 和流体单元 2 的外形较为复杂, 为提高流体等效刚度计算精度, 按照结构形状的不同, 将流体单元 1 分成 6 段, 流体单元 2 分成 3 段, 其中, 流体单元 1 的第 1 段为消防炮身和前端所连接的管道。两个流体单元各段的尺寸参数如表 3 所示, 由流体等效刚度计算公式可单独计算每段的等效刚度, 再根据各段流体弹簧的串并联关系, 得到两个流体单元的等效刚度。

表 3 流体单元各分段尺寸数据

流体单元	分段	过流截面平均 面积 S_a/mm^2	流体域轴向 长度 L/mm
流体单元 1	第 1 段	6 221	1 534.6
	第 2 段	6 200	38
	第 3 段	3 200	39
	第 4 段	3 800	35.5
	第 5 段	4 400	38
	第 6 段	3 700	64
流体单元 2	第 1' 段	300	46.1
	第 2' 段	800	11
	第 3' 段	2 800	40.5

多个弹簧串联时总刚度的计算公式为

$$\frac{1}{k_a} = \frac{1}{k_{a1}} + \frac{1}{k_{a2}} + \cdots + \frac{1}{k_{an}} \quad (13)$$

式中, k_a 为多个弹簧串联时的总刚度, k_{an} 为第 n 个

$$k = \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_{f3} + k_5 & -k_{f3} & -k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_{f3} & k_{f3} + k_{f2} & -k_{f2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & -k_{f2} & k_{f2} + k_5 + k_{f1} & -k_{f1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{f1} & k_{f1} \end{pmatrix} \quad (17)$$

3 射流系统模态分析

自适应炮头射流系统物理参数如表 4 所示, 其中射流流体为常温常压下含有一定量空气的水。

对自适应炮头射流系统进行模态分析, 将表 4 所示各参数代入射流系统动力学方程式(15)中, 确定系统各阶固有频率及对应的模态振型如表 5 所示。

由表 5 可知, 自适应炮头射流系统的前三阶固有频率在 1 000 Hz 以下, 易与入射流体的自身脉动频率重合而发生共振, 因此在后续模态影响因素分析时, 仅考虑前三阶固有频率。由射流系统的一阶

串联在系统中弹簧的刚度。

多个弹簧并联时总刚度的计算公式为

$$k_b = k_{b1} + k_{b2} + \cdots + k_{bn} \quad (14)$$

式中, k_b 为多个弹簧并联时的总刚度, k_{bn} 为第 n 个并联在系统中弹簧的刚度。

综合式(12)~(14), 以常温常压下含有一定量空气的水的体积弹性模量 B_f 为 161.143 2 MPa 进行计算, 可得 k_{f1} 为 538.05 kN/m, k_{f2} 和 k_{f3} 均为 424.07 kN/m。

基于自适应炮头射流系统动力学模型, 建立其自由振动动力学方程为

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (15)$$

式中, 系统质量矩阵为

$$m = \text{diag}(m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7) \quad (16)$$

系统刚度矩阵为

表 4 自适应炮头射流系统物理参数

参数名称	数值
喷芯质量 m_6/kg	0.316 3
流体单元 1 质量 m_7/kg	16.459 3
流体单元 2 质量 m_5/kg	0.136 2
流体等效刚度 $1k_{f1}/(\text{kN/m})$	354.05
流体等效刚度 $2k_{f2}/(\text{kN/m})$	424.07
流体等效刚度 $3k_{f3}/(\text{kN/m})$	424.07
弹簧刚度 $k_5/(\text{kN/m})$	18
流体压力 p/MPa	0.6
流体初始体积含气量 $x(\%)$	2
流体体积弹性模量 B_f/MPa	161.143 2
温度 T/K	293

表 5 射流系统各阶固有频率及模态

阶数	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶	七阶
固有频率 f_{ni}/Hz	f_{n1}	f_{n2}	f_{n3}	f_{n4}	f_{n5}	f_{n6}	f_{n7}
	19.6	230.8	427.4	4 040	24 276.9	43 906	57 146.6
各阶模态主振型 Φ_{ni}	0.000 4	0.001	0.001 3	0.261	0.723 1	1	-0.704 4
	0.000 9	0.002	0.002 5	0.517 6	1	-0.018 6	1
	0.001 5	0.003	0.003 8	0.765 3	0.659 7	-0.999 7	-0.715 3
	0.001 9	0.004 1	0.005	1	-0.087 7	0.037 2	0.015 5
	0.354 9	0.757 8	1	-0.004 9	0	0	0
	0.706 2	1	-0.320 5	0.000 1	0	0	0
	1	-0.025 2	0.002 3	0	0	0	0

模态振型可知,当外部激励频率达到系统一阶固有频率从而使系统发生共振时,流体单元 1 的振幅最大,其次为喷芯,再次为流体单元 2,说明在流固耦合作用的影响下喷芯可能会发生较为剧烈的振动,而喷芯的剧烈振动会严重影响系统射流的稳定性,导致射流性能变差,降低灭火效率。

在不改变消防炮自适应炮头机械结构形式、各零部件外形及尺寸的前提下,流体单元的等效刚度在很大程度上对射流系统的各阶固有频率及模态振型起决定性作用,而流体初始体积含气量及流体压力是影响流体单元等效刚度的关键因素,因此拟通过改变流体初始体积含气量和流体压力,确定两者对射流系统各阶固有频率的影响规律。

3.1 初始体积含气量对射流系统模态特性的影响

在保持流体压力不变的前提下,流体初始体积含气量对射流系统前三阶固有频率的影响见图 8。

图 8 射流系统前三阶固有频率随初始体积含气量变化

由图 8 可知,射流系统前三阶固有频率均随流体初始体积含气量的上升而逐渐下降。当流体压力保持不变时,随着初始体积含气量的上升,流体体积弹性模量逐渐下降,导致流体单元等效刚度逐渐降低,同时流体单元的等效质量不断减小,但由于等效质量的下降幅度远低于等效刚度的下降幅度,因此,系统的前三阶固有频率随流体初始体积含气量的上升而逐渐下降。

3.2 流体压力对射流系统模态特性的影响

在保持流体初始体积含气量不变的前提下,流体压力对射流系统前三阶固有频率的影响如图 9 所示。

由图 9 可知,当流体初始体积含气量相同时,射流系统的前三阶固有频率均随流体压力的上升而逐渐增大。这是因为流体内以气泡形式存在的游离空气随流体压力的增大而逐渐溶解,而流体中游离空气的减少将引起流体体积弹性模量的增大,流体等效刚度增大,从而使系统的固有频率随流体压力的上升而增大。

图 9 射流系统前三阶固有频率随流体压力变化

4 试验验证

为验证射流系统模态分析的准确性,搭建了消防炮自适应炮头射流系统动力学试验台,采用锤击法对工作过中的射流系统进行了模态测试,试验台如图 10 所示,试验射流系统中喷芯质量、机械弹簧刚度及流体单元各属性参数均与表 4 所示参数一致。

图 10 消防炮自适应炮头射流系统动力学试验台

采用快速傅里叶变换对射流系统输出的加速度信号进行频域分析,得到射流系统在流体自身脉动激励与力锤阶跃激励叠加作用下加速度信号的幅频特性如图 11 所示。图中 A 点坐标为(19.5, 0.143 8), B 点坐标为(46.8, 0.158 8)。

图 11 消防炮自适应炮头射流系统幅频特性曲线

由图 11 可知,射流系统的幅频特性曲线在频率

为 19.5 Hz 和 46.8 Hz 位置出现相对明显的峰值,而在其他频率位置处则变化相对较小,波动较为平缓。其中 B 点所示 46.8 Hz 与为试验系统提供水源的离心泵的轴频频率(2 800 r/min)相对应,则 A 点所示应为试验条件下射流系统的一阶固有频率。同时由于消防炮内流体湍流等因素的影响,该幅频曲线叠加了白噪声幅频特性,增加了频谱识别的难度,因此暂无法通过试验确定射流系统一阶固有频率以外的其他各阶固有频率。试验测试所确定的射流系统一阶固有频率与理论计算结果对比如表 6 所示。

表 6 试验与理论计算结果对比

固有频率/Hz	试验结果	理论结果	误差(%)
一阶	19.5	19.6	0.51

由表 6 可知,理论计算所得一阶固有频率与试验所得结果非常接近,误差仅为 0.51%,验证了所提出的消防炮自适应炮头射流系统动力学模型的准确性。

5 结论

(1) 在考虑消防炮自适应炮头射流系统中的流固耦合和连续离散耦合的基础上,通过集中质量法确定了芯杆和端盖结构的刚度矩阵,采用集中参数法建立了射流系统的动力学模型及方程。

(2) 对消防炮自适应炮头射流系统进行了模态分析,确定了射流系统在给定条件下的各阶固有频率和模态振型,分析了流体初始体积含气量和流体压力对射流系统固有频率的影响规律:在相同压力下,初始体积含气量越高,射流系统各阶固有频率越低;在相同初始体积含气量下,流体压力越高,射流系统各阶固有频率越高。

(3) 通过所搭建的消防炮自适应炮头射流系统动力学试验平台,对射流系统进行了模态试验,理论和物理试验所确定的射流系统一阶固有频率误差仅为 0.51%,验证了所建立的射流系统动力学模型的准确性。

参 考 文 献

- [1] 闵永林,陈晓阳,陈池,等.考虑俯仰角的消防水炮射流轨迹理论模型[J].机械工程学报,2011,47(11):134-138.
MIN Yonglin, CHEN Xiaoyang, CHEN Chi, et al. Pitching angle-based theoretical model for the track simulation of water jet out from water fire monitors[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 134-138.
- [2] WALHORN E, KÖLKE A, HÜBNER B, et al. Fluid-structure coupling within a monolithic model involving free surface flows[J]. Computers & Structures, 2005, 83(25-26): 2100-2111.

- [3] SONG Fuquan, HU Xiao, JI Kai, et al. Effect of fluid-solid coupling on shale mechanics and seepage laws[J]. Natural Gas Industry B, 2018, 5(1): 41-47.
- [4] YUE Qianbei, LIU G R, LIU Jubao, et al. Analyses of fluid-solid coupling dynamics of elastic tubes vibrating in cross flows[J]. European Journal of Mechanics / A Solids, 2019, 73: 248-259.
- [5] AKKERMAN I, BAZILEVS Y, BENSON D J, et al. Free-surface flow and fluid-object interaction modeling with emphasis on ship hydrodynamics[J]. Journal of Applied Mechanics, 2012, 79(1): 1-11.
- [6] LANGER U, YANG H. Robust and efficient monolithic fluid-structure-interaction solvers[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2016, 108(4): 303-325.
- [7] ZHANG Xue, OÑATE E, TORRES S A G, et al. A unified Lagrangian formulation for solid and fluid dynamics and its possibility for modelling submarine landslides and their consequences[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 343(1): 314-338.
- [8] NI Qiang, WANG Yikun, TANG Min, et al. Nonlinear impacting oscillations of a fluid-conveying pipe subjected to distributed motion constraints[J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 81(1-2): 893-906.
- [9] TANG Yuehao, JIANG Qinghui, ZHOU Chuangbing. A Lagrangian-based SPH-DEM model for fluid-solid interaction with free surface flow in two dimensions[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 62: 436-460.
- [10] 牟介刚,陈莹,谷云庆,等.不同空化程度下离心泵流固耦合特性研究[J].振动与冲击,2016,35(23): 203-208.
MOU Jiegang, CHEN Ying, GU Yunqing, et al. Fluid-solid interaction characteristics of a centrifugal pump under different cavitation levels[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(23): 203-208.
- [11] OWEN D R J, FENG Y T, DE Souza N, et al. The modelling of multi-fracturing solids and particulate media[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 60(1): 317-339.
- [12] 魏超,周俊杰,苑士华.液压油体积弹性模量稳态模型与动态模型的对比[J].兵工学报,2015,36(7): 1153-1159.
WEI Chao, ZHOU Junjie, YUAN Shihua. Comparison of steady and dynamic models for the bulk modulus of hydraulic oils[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(7): 1153-1159.

作者简介:袁晓明,男,1984年出生,博士,讲师,硕士研究生导师。主要研究方向为流体传动与控制。
E-mail: xiaomingbingbing@163.com
张立杰(通信作者),男,1969年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要研究方向为液压测控技术、机器人技术。
E-mail: ljzhang@ysu.edu.cn