

单向阀三维动态流场稳定性仿真研究

余武江, 王海洲, 陈二锋, 叶 超, 曾 斌

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要: 对单向阀自激振动机理进行研究, 采用线性分析方法提出了单向阀的临界稳定曲线。应用泵阀仿真软件 PumpLinx 的动网格技术, 开展了单向阀三维动态流场仿真分析, 数值研究了不同工作压力、不同质量流量条件下的单向阀动态稳定特性。结果表明: 在某一工作压力条件下, 小流量时单向阀工作不稳定, 会形成周期性的阀门颤振, 随着质量流量增大, 单向阀动态稳定性增强; 当质量流量足够大时, 单向阀工作稳定, 单向阀保持稳定开度工作; 质量流量一定时, 工作压力降低, 单向阀动态稳定性增强。单向阀三维动态流场仿真结果与线性稳定性结论相一致, 从三维动态流场角度验证了单向阀自激振动机理及线性稳定性分析方法的有效性。

关键词: 单向阀; 动网格; 动态稳定性; 自激振动

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 01-0082-08

Research on three-dimensional dynamic flow stability of check valve

YU Wu-jiang, WANG Hai-zhou, CHEN Er-feng, YE Chao, ZENG Bin

(Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The mechanism of the check valve self-excited vibration was studied. The critical stable curve of the check valve was obtained by linear analysis. The dynamic grid technology of the pump and valve simulation software PumpLinx was adopted to carry out simulation analysis for three-dimensional dynamic flow of the check valve. The dynamic stability of the check valve was analyzed respectively under the conditions of different working pressure and mass flow rate. The results indicate that, in a certain working pressure, the check valve works unstably when mass flow rate is small, and periodic valve vibration may generated; dynamic stability of the check valve becomes stronger with the increase of mass flow rate; when mass flow rate is large enough, the check valve works stably; when the mass flow rate is in a certain value, the work pressure is reduced and the dynamic stability of check valve is increased. Three-dimensional dynamic flow simulating results of

收稿日期: 2014-10-21; 修回日期: 2014-12-29

作者简介: 余武江 (1989—), 男, 硕士研究生, 研究领域为流体动力学仿真与结构优化设计

the check valve are consistent with the linear stability analysis results. The validity of the check valve self-excited vibration mechanism and linear stability analysis method was proved by three-dimensional dynamic flow simulation.

Keywords: check valve; dynamic grid; dynamic stability; self-excited vibration

0 引言

增压系统在生产验收、靶场测试、飞行过程中曾多次发生阀门的气固耦合自激振动, 引起阀门颤振、阀门鸣叫等问题, 严重时造成阀门破坏, 增压失效。增压系统的气固耦合自激振动不仅影响生产周期、增加成本, 还给飞行发射带来隐患。

阀门自激振动现象其本质是流体、结构间耦合的动力学不稳定问题, 目前, 国内外学者对阀门的自激振动机理及动态稳定性开展了大量研究, 研究内容主要集中在三个方面: (1) 阀门动力学建模及动态特性研究。主要采用集中参数法构建阀芯受力及运动微分方程组, 并利用时程分析数值研究阀门各变量随时间的变化规律, 获得了阀芯的运动规律及动态响应特性^[1-8], 从定性角度说明了阀芯的振动特性; (2) 阀门的自激振动机理及稳定性分析方法研究, 其核心是针对阀门动力学控制方程进行线性分析, 并根据特征根的情况对阀门稳定性进行量化分析, 其中, 典型的研究工作是北京宇航系统工程研究所王剑中、陈二锋、余武江等^[9]所提出的阀门自激振动机理及线性稳定性分析方法; (3) 阀门三维动态流场稳定性研究, 由于涉及到气固间的动态耦合作用, 阀门三维动态流场的研究仍处于起步阶段, 更多的是针对固定开度下的静态流场进行仿真研究^[10-12]。

本文以单向阀为研究对象, 应用线性分析方法提出了单向阀的临界稳定曲线, 并应用泵阀仿真软件 PumpLinx 的动网格技术, 开展了单向阀的三维动态流场仿真分析, 研究了不同工作压力、不同质量流量条件下的单向阀动态稳定特性, 从三维动态流场的角度验证单向阀自激振动机理及线性稳定性分析方法的有效性。

1 单向阀自激振动机理及线性稳定性分析

1.1 单向阀结构及工作原理

单向阀由阀芯、壳体、接管嘴、弹簧、阻尼圈等组成, 其结构如图 1 所示。其中弹簧刚度为 4 350 N/m, 弹簧预压缩量 z_0 为 6.2 mm, 阀芯质量 M_f 为 0.015 7 kg, 阀腔直径 D 为 23.9 mm, 阀腔入口直径 D_m 为 8 mm。

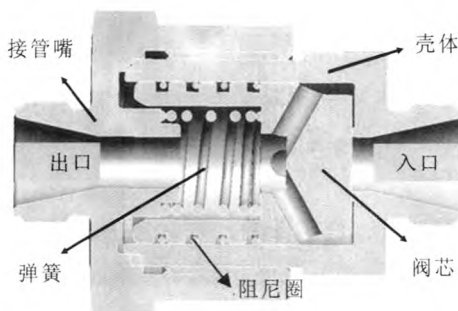


图 1 单向阀结构

Fig. 1 Structure of check valve

单向阀工作原理为: 当入口气源压力与出口压力差大于单向阀开启压力时, 工作介质由阀门入口推动阀芯克服弹簧力和摩擦力打开阀芯, 气体由阀门出口流出; 随着气源压力的降低, 入口压力与出口压力差小于单向阀开启压力时, 阀芯在弹簧力和出口压力的作用下回位, 实现密封。

1.2 单向阀自激振动机理

单向阀是典型的弹簧振子系统, 其动态稳定性将由弹簧振子的运动特性决定。弹簧振子的运动方程^[13]如下:

$$M_f \ddot{z} + c \dot{z} + k_s (z + z_0) = F_p \quad (1)$$

式中: z 为阀芯运动位移; M_f 为阀芯质量; c 为阻尼系数; k_s 为弹簧刚度; z_0 为弹簧预压缩量; F_p 为气体力。

该方程解的形式可表示为:

$$z(t)=C_0 \cdot e^{st}$$
(2)

式中: t 为时间; C_0 为常数。

1) 若 $F_p=0$, 阀芯运动的特征根为

$$s_{1,2}=-\frac{c}{2M_f}\pm\frac{1}{2}\left[\left(\frac{c}{M_f}\right)^2-4\frac{k}{M_f}\right]^{1/2}$$

由于阻尼 c 和刚度 k 为正值, s_1 和 s_2 为负实部根, 振动将是稳定的, 任何小的扰动经过有限的时间都将衰减至 0。

2) 若 $F_p\neq0$, 由于阀芯两侧的气体力随行程 z 变化, F_p 可表示为 $F_p=c_1z+F_{p0}$ 的函数, 此时, 阀芯运动的特征根则会出现以下情况:

① 为两正实根, 系统出现负阻尼, 阀芯运动将是发散的, 阀芯两侧的气体力提供自激振动的能量来源;

② 为具有非负实部的共轭复根, 阀芯运动将是发散的, 阀芯两侧的气体力提供自激振动的能量来源;

③ 为具有负实部的两共轭复根或两负实根, 系统仍为正阻尼, 阀芯运动将是稳定的, 任何小的扰动经过有限的时间都将衰减至 0。

因此, 判断单向阀动态稳定性的重要指标是动力学方程的特征根, 若特征根实部为负, 系统稳定, 反之, 系统不稳定。

1.3 单向阀线性稳定性分析

基于系统仿真软件 AMESim, 构建单向阀的 AMESim 仿真模型, 应用线性分析工具求解单向阀的特征根, 并根据特征根判断单向阀在各工况下的动态稳定性。

1.3.1 单向阀 AMESim 建模

根据单向阀的物理模型, 分别给定单向阀入口、出口管路长度, 可构建单向阀的 AMESim 模型如图 2 所示。图 2 中 Pipe1 为阀前管路, Pipe2 模拟阀芯上的 4 个小孔, Pipe3 为阀后管路; Source1 为阀前流量温度源, Source2 为阀后压力温度源。模型中的主要参数如表 1 所示。

1.3.2 单向阀线性稳定性分析

给定单向阀的工作压力 p_0 , 通过计算不同流

量下单向阀的特征根, 可判断单向阀的稳定性, 其中在给定的工作压力下, 使单向阀最大特征根为零的流量即为该工作压力下的临界流量 m_0 , 工作点 (P_0, m_0) 为临界稳定点, 由临界稳定点构成的曲线即为临界稳定曲线。图 3 展示了单向阀的临界稳定曲线。

表 1 单向阀主要参数

Tab. 1 Major parameters of check valve		
参数名称	参数值	备注
气体介质	氮气 (N ₂)	/
单向阀前气体温度/K	293.15	/
单向阀前管路长度/m	0.07	C-IR-C
单向阀前管路直径/mm	8	
阀芯有效质量/kg	0.014	/
阀芯限位/mm	2.5	/
阀座直径/mm	8	/
阀芯直径/mm	24	/
弹簧刚度/N/m	4 350	/
弹簧预紧力/N	27	/
阀腔容积/L	0.002 7	/
单向阀流量阀口系数	0.72	/
粘性摩擦系数 (N/(m/s))	15	/
阀芯上 4 个 Φ4 小孔等效直径/mm	8	IR-C-IR
阀芯上小孔长度/m	0.008	
单向阀后管路直径/mm	8	IR-C-IR
单向阀后管路长度/m	0.1	
单向阀后气体温度/K	293.15	/

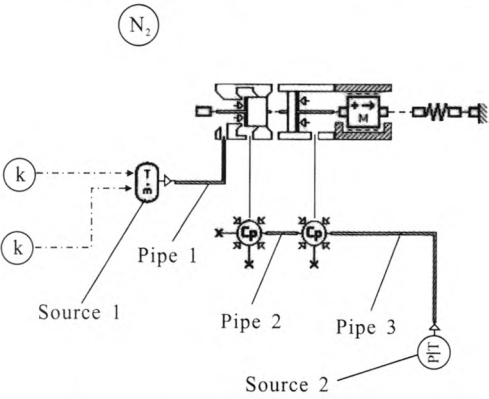


图 2 单向阀系统 AMESim 模型

Fig. 2 AMESim model of check valve system

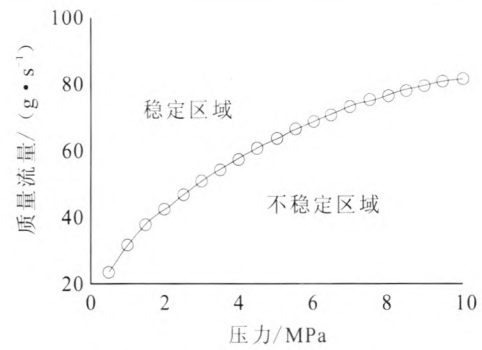


图 3 单向阀临界稳定曲线
Fig. 3 Critical stable curve of check valve

从图 3 可以看出, 在曲线左侧, 单向阀工作稳定, 任何一个扰动经过有限长的时间都将衰减至 0, 而在曲线右侧, 单向阀工作不稳定, 任何一个微小的扰动都会使阀芯在其平衡位置以某一固有频率振动。当工作压力一定时, 单向阀流量越大, 系统越稳定; 而当质量流量一定时, 随着工作压力的降低, 系统的稳定性增强。因此, 降低单向阀工作压力、增大单向阀流量均能提高系统稳定性。

2 单向阀三维动态流场稳定性仿真

2.1 单向阀 PumpLinx 仿真模型

2.1.1 物理模型

单向阀几何结构如图 1 所示。为验证单向阀自激振动机理及线性稳定性分析方法的有效性, 在开展单向阀 PumpLinx 三维动态流场仿真时, 其物理模型与边界条件与线性稳定性分析完全一致。按零维模型中阀前、阀后管路长度和直径, 采用 UG 建立单向阀及阀前后管路三维模型, 并提取流体计算区域 (图 4)。

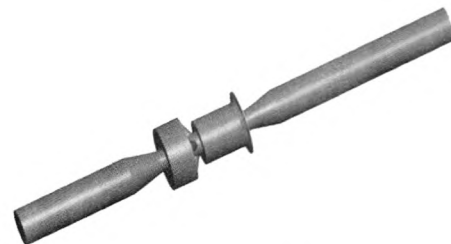


图 4 流体计算区域
Fig. 4 Liquid calculation region

2.1.2 计算网格

采用 PumpLinx 分块进行网格划分 (图 5), 并逐步定义阀芯、弹簧刚度系数、初始弹簧力、阻尼系数, PumpLinx 仿真分析中的参数设置与线性稳定性分析中的参数 (表 1) 一致。



图 5 计算网格
Fig. 5 Calculation grid

2.1.3 边界条件

确定仿真出入口边界条件: 进口为流量边界, 出口为压力边界。

2.1.4 计算工况

考虑到进行三维动态流场仿真的计算量大, 仅选取工作压力为 8 MPa 和 4 MPa 两个压力工况开展单向阀三维动态流场稳定性分析, 两个压力工况对应的流量工况如表 2 所示。

表 2 PumpLinx 仿真分析工况表

Tab. 2 Simulated analysis conditions of PumpLinx					
出口压力/ MPa	阻尼系数/ N/(m/s)	质量流量 /(g·s ⁻¹)			
8	15	66	76	86	96
4	15	56	66	76	86

2.2 单向阀 PumpLinx 仿真结果分析

2.2.1 工作压力 8 MPa 工况

单向阀工作压力为 8 MPa, 质量流量分别为 66 g/s, 76 g/s, 86 g/s 和 96 g/s 时, 单向阀阀芯位移随时间的变化如图 6 所示。从图中可看出:

- 1) 随着单向阀流量的增加, 单向阀由不稳定变为稳定, 表明在相同条件下, 流量越大单向阀越稳定;
- 2) 随着单向阀流量的增加, 单向阀平衡位置处对应的阀芯开度也随之增大, 表明阀芯静平衡

时开度越大,单向阀越稳定。

质量流量为 66 g/s 和 76 g/s 时,单向阀处于周期性颤振状态,单向阀对称面上各时刻的压力云图分别如图 7 和图 8 所示。质量流量为 86 g/s 和 96 g/s 时,单向阀处于稳定状态,单向阀稳定后对称面上的压力云图分别如图 9 和图 10 所示。

1) 从图 7~图 10 中三维压力云图可知,不论单向阀处于稳定或不稳定状态,尽管在单向阀阀座后与背压腔前之间的区域压力变化明显,但是

单向阀入口处和阀瓣出口压力作用面上的压力分布都较均匀,即在一定条件下,将单向阀入口腔和背压腔简化为零维模型是合理的;

2) 从图 7 和图 8 的压力分布云图可知,流量工况为 66 g/s 和 76 g/s 时,单向阀处于自激振动状态,单向阀前后及阀腔内的压力在工作过程中形成周期性的压力波动;

3) 图 9 和图 10 中单向阀处于稳定状态,从图中可知,随着流量的增大,单向阀阀芯开度增大,单向阀稳定性增强。

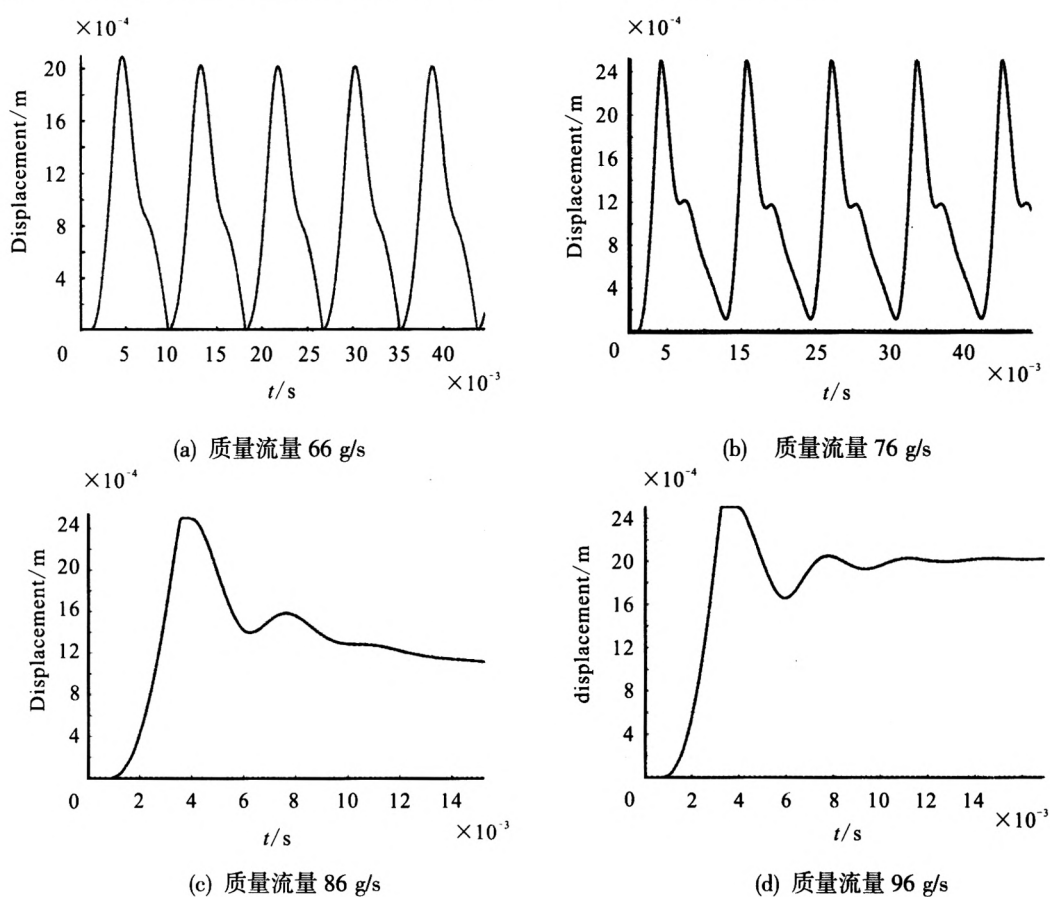


图 6 工作压力为 8 MPa 时,不同质量流量下阀芯位移变化曲线

Fig. 6 Curves of check valve spool displacement at different mass flow rate when working pressure is 8 MPa



(a) $t=0.000$ s 时单向阀压力云图



(b) $t=0.002$ s 时单向阀压力云图

(c) $t=0.004$ s 时单向阀压力云图(d) $t=0.014$ s 时单向阀压力云图

图 7 流量为 66 g/s 时, 单向阀不同时刻的压力云图

Fig. 7 Pressure nephogram of check valve at different times when mass flow rate is 66 g/s

(a) $t=0.000$ s 时单向阀压力云图(b) $t=0.002$ s 时单向阀压力云图(c) $t=0.005$ s 时单向阀压力云图(d) $t=0.014$ s 时单向阀压力云图

图 8 流量为 76 g/s 时, 单向阀不同时刻的压力云图

Fig. 8 Pressure nephogram of check valve at different times when mass flow rate is 76 g/s

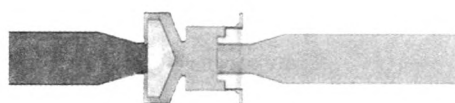


图 9 流量为 86 g/s 时, 单向阀稳定时压力云图

Fig. 9 Pressure nephogram of check valve when mass flow rate is 86 g/s



图 10 流量为 96 g/s 时, 单向阀稳定时压力云图

Fig. 10 Pressure nephogram of check valve when mass flow rate is 96 g/s

2.2.2 工作压力 4 MPa 工况

单向阀工作压力为 4 MPa, 质量流量分别为 56 g/s, 66 g/s, 76 g/s 和 86 g/s 时, 单向阀阀芯位移随时间的变化如图 11 所示。从图中可以看出, 工作压力为 4 MPa 时, 单向阀的稳定特性随工作流量的变化同工作压力为 8 MPa 时的规律一致, 即:

1) 随着单向阀流量的增加, 单向阀由不稳定变为稳定, 表明在相同条件下, 流量越大单向阀

越稳定;

2) 图 11 中质量流量为 76 g/s 时, 阀芯达到了最大开度, 当阀芯开度小于最大开度时, 随着单向阀流量的增加, 单向阀平衡位置处对应的阀芯开度也随之增大, 表明阀芯静平衡时开度越大, 单向阀越稳定。

工作压力为 4 MPa 时, 单向阀不稳定工况和稳定工况下的压力分布云图分别与工作压力 8 MPa 下的不稳定工况和稳定工况相似, 在此未详加展示。

3 单向阀线性稳定性与三维动态流场结果对比分析

由 2.2 节三维动态流场分析中压力分布云图可知, 单向阀入口腔和背压腔内的压力分布均匀, 因而在自激振动机理和线性稳定性分析中采用的零维模型合理性好, 二者可比性强。单向阀线性稳定性与三维动态流场分析的结果对比如图 12 所示。从图 12 可以看出, 单向阀三维动态流场仿真结果与线性分析结果一致, 从三维动态流场的角度验证了阀门自激振动机理及线性分析的有效性。

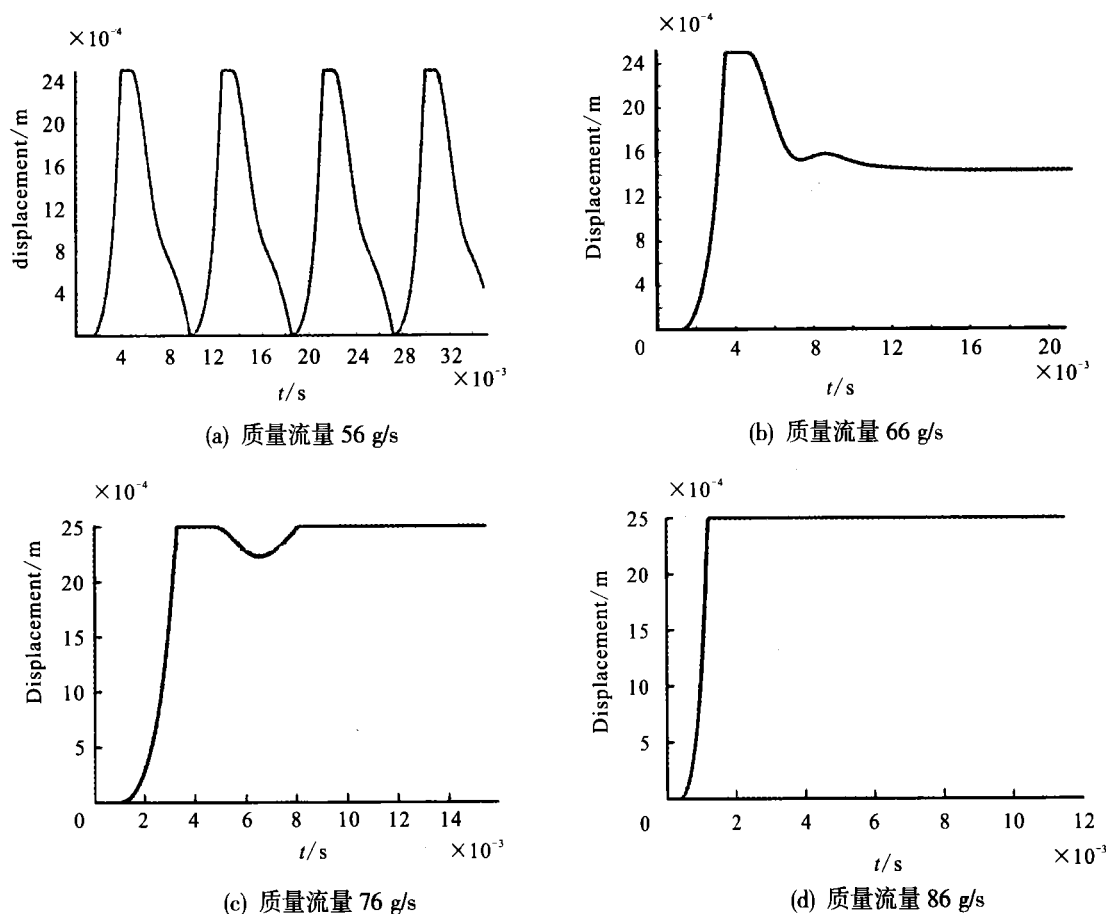


图 11 工作压力为 4 MPa 时,不同质量流量下阀芯位移变化曲线

Fig. 11 Displacement of check valve spool at different mass flow rate when work pressure is 4 MPa

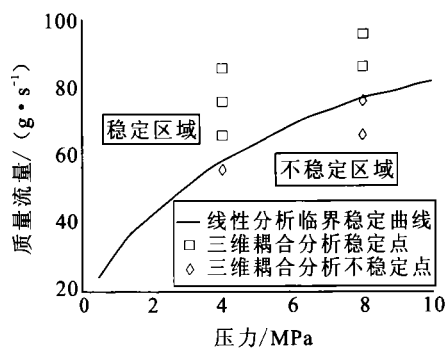


图 12 线性分析与三维动态流场分析结果对比图

Fig. 12 Comparison of linear analysis results and three-dimensional dynamic flow simulation results

4 结论

对单向阀自激振动机理进行研究,采用线性分析方法获得了单向阀的临界稳定曲线,利用泵阀仿真软件 PumpLinx 的动网格技术,开展了单向阀的三维动态流场仿真分析,研究了单向阀不

同工作压力、不同质量流量条件下的动态稳定性。结果表明:

1) 在某一工作压力下,小流量时单向阀工作不稳定,会形成周期性颤振,随着流量增大,单向阀动态稳定性增强,当流量足够大时,单向阀能稳定工作。图 12 中,工作压力为 4 MPa 和 8 MPa,流量分别低于 56 g/s 和 76 g/s 时,单向阀不稳定,当流量分别大于 66 g/s 和 86 g/s 时,单向阀工作稳定。

2) 质量流量一定时,随着工作压力的降低,单向阀动态稳定性增强。图 12 中,流量为 66 g/s 和 76 g/s,工作压力为 8 MPa 时,单向阀不稳定,但当工作压力减小为 4 MPa 时,单向阀能稳定工作。

3) 单向阀三维动态流场仿真结果与线性分析结果一致,从三维动态流场的角度验证了阀门自激振动机理及线性分析的有效性。

参考文献:

- [1] 张绍春. 阀门结构在复杂引水管道中引起的自激振动[J]. 云南水力发电, 2012, 14(3): 20-23
- [2] 叶复萌, 朱渊岳, 樊红刚, 等. 抽水蓄能电站复杂管系的自激振动研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 135-140.
- [3] 叶奇昉, 陈江平, 陈芝久, 制冷系统用两级先导式电磁阀动力学特性的仿真与实验[J]. 低温工程, 2008, (4): 51-56.
- [4] 叶奇昉, 陈江平, 陈芝久. 两级先导式电磁阀主阀芯动力学分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 215-220.
- [5] 叶奇昉, 严诗杰, 陈江平, 等. 气动先导式电磁阀的自激振荡[J]. 机械工程学报, 2010, 46(1): 115-121.
- [6] 柳长安, 张蒙正. 弹道变轨对冲压动力反舰导弹的影响[J]. 火箭推进, 2012, 38(2): 20-26.
- [7] 韩新苗, 聂松林, 葛卫, 等. 先导式水压溢流阀静态特性的仿真研究[J]. 机床与液压, 2008, 36(10): 106-108.
- [8] 赵春云, 张石燕, 焦金成. 电磁气动阀四机集成设计[J]. 火箭推进, 2014, 40(3): 52-56.
- [9] 王剑中, 陈二锋, 余武江, 等. 气动阀门自激振动机理及动态稳定性研究[J]. 航空动力学报, 2014, 29(6): 1490-1497.
- [10] SALVADOR Guillermo Palau, VALVERDE Jaime Arviza. Three-dimensional control valve with complex geometry: CFD modeling and experimental validation, AIAA 2004-2422 [R]. USA: AIAA, 2004.
- [11] AHUJA Vineet, CAVALLLO P A, SHIPMAN J D, et al. Modeling chatter in a pressure regulator valve with a multi-physics simulation framework, AIAA2008-4669 [R]. USA: AIAA, 2008.
- [12] GRINIS L, HASLAVSKY V, TZADKA U. Self-excited vibration in hydraulic ball check[J]. Engineering and Technology, 2012, 68: 1261-1266.
- [13] 李欣业, 张明路, 机械振动[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

(编辑: 王建喜)

(上接第 62 页)

4 结束语

文章所使用的 RBCC 发动机性能迭代算法通过对进气道、混合段和燃烧室三者参数的迭代计算, 实现了混合段入口与混合段出口两个截面上参数的耦合, 并通过验证算例, 证明了方法的可行性。虽然文章所使用的 RBCC 发动机模型中存在诸多假设, 会使计算结果与实际流动发生一定的偏离, 但是能够快速分析 RBCC 发动机在引射模态和亚燃冲压模态下的主要性能参数, 为 RBCC 发动机性能模型的研究与设计工作提供一定的参考。

参考文献:

- [1] STEMLER J N, BOGAR T J, FARRELL D J, et al.

Assessment of RBCC-powered VTHL SSTO vehicles, AIAA 99-4947[R]. USA: AIAA, 1999.

- [2] HUETER U. Rocket-based combined-cycle propulsion technology for access-to-space applications, AIAA 99-4925[R]. USA: AIAA, 1999.
- [3] BARDFORD J E, OLDS J R. SCCREAM v.5-A web-based airbreathing propulsion analysis tool, AIAA 99-2104[R]. USA: AIAA, 1999.
- [4] HAN Sam, PEDDIESON John, Jr., GREGORY David. Ejector primary flow molecular weight effects in an ejector-ram rocket engine[J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(3): 25-39.
- [5] 张蒙正. 关于 RBCC 动力系统的思考[J]. 火箭推进, 2013, 39(1): 1-7.

(编辑: 陈红霞)