

基于 AMESim 的液氮供给系统液击仿真

张 伟^{1,2}, 孙德文¹, 陈万华¹, 高 荣¹, 陈建业³, 谢军龙³

(1. 中国空气动力研究与发展中心 设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000;

2. 国防科技大学 空天科学学院, 长沙 410073;

3. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 基于系统级仿真平台 AMESim, 建立了大型低温风洞(CWT)液氮供给系统(LNSS)的动态仿真模型。实验对比结果显示, 仿真结果的平均误差在 6.8% 以内, 验证了模型的准确性, 并进一步对比开展了喷嘴瞬时全关和喷嘴有序关闭两种典型工况下的液击分析。结果表明液击模型能够较好地反映管路系统中的液击过程。喷嘴瞬时全关工况下, 液击峰值压力可达 2.98 MPa; 而当喷嘴分四组有序关闭时, 液击峰值压力能有效降低, 峰值压力为 2.3 MPa 且出现在最后一组喷嘴关闭时。同时, 傅里叶分析(FFT)表明液击发生时压力波动存在一定周期性, 且由多种频率组成, 但喷嘴关闭模式对频率几乎没有影响。仿真研究结果可为大型低温风洞液氮供给系统提供设计校核和安全运行支撑。

关 键 词: 液氮供给系统; 低温风洞; 液击; 喷嘴; AMESim 仿真平台

中图分类号: V211

文献标志码: A

Simulation of water hammer in liquid nitrogen supplying system based on AMESim

ZHANG Wei^{1,2}, SUN Dewen¹, CHEN Wanhua¹, GAO Rong¹,
CHEN Jianye³, XIE Junlong³

(1. Facility Design and Instrumentation Institute,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;

2. College of Aerospace Science and Engineer,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. School of Energy and Power Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A dynamic model of liquid nitrogen supplying system (LNSS) for a large cryogenic wind tunnel (CWT) was built based on the advanced modeling environment for simulation of engineering systems (AMESim) platform. The accuracy of the model was verified by the experimental data with the mean deviation less than 6.8%. Accordingly, numerical simulation on water hammer was carried out under two working conditions of instantaneously complete close-down and orderly close-down of the nozzles at the end of the LNSS. Numerical results illustrated that the dynamic model can characterize the features of water hammer in the complex LNSS. The peak

收稿日期: 2021-03-07

基金项目: 中国空气动力研究与发展中心基础和前沿技术研究基金探索项目(PJD20200240)

作者简介: 张伟(1988—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事低温两相流及流固耦合方面的研究。

通信作者: 高荣(1974—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事低温系统设计。E-mail: youy624@163.com

引用格式: 张伟, 孙德文, 陈万华, 等. 基于 AMESim 的液氮供给系统液击仿真[J]. 航空动力学报, 2022, 37(2): 366-374. ZHANG Wei, SUN Dewen, CHEN Wanhua, et al. Simulation of water hammer in liquid nitrogen supplying system based on AMESim [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(2): 366-374.

pressure at water hammer reached 2.98 MPa under the condition of instantaneous close-down of all the nozzles. By contrast, the peak pressure reached maximum with the value of 2.3 MPa at the last close-down when the nozzles were shut down orderly following four steps. Moreover, fast fourier transform (FFT) analysis illustrated that different frequencies existed in the pressure fluctuations during water hammering. However, the frequencies showed inconspicuous distinct under these two working conditions. The simulation results provide a support for the design check and safe operation of the large CWT.

Key words: liquid nitrogen supplying system; cryogenic wind tunnel; water hammer; nozzles; AMESim simulation platform

大型低温高雷诺数风洞是检验飞行器飞行状态流动特性的最佳地面实验设备^[1]。低温风洞依靠布置在喷射排架上的大量喷嘴向洞内喷射液氮,并迅速汽化,降低气流总温从而开展大型客机、运输机的飞行雷诺数真实模拟^[2-4]。对于大型低温风洞,为满足大型客机研制对飞行雷诺数模拟实验的需求,低温风洞的设计运行范围宽,实验段马赫数(Ma)范围为0.15~1.30;稳定段总压范围为 $(1.15\sim4.5)\times10^5$ Pa,实验段气流总温范围为110~323 K,且控制精度优于0.5 K^[5]。为满足上述要求,低温风洞配套的液氮供给系统需提供0.6~280 kg/s大范围的流量。设计及实验表明液氮喷射流量的精确控制和快速调节是风洞总温控制、有序降温的基础和前提^[6-7],是实现风洞安全运行的必要条件。

在喷射压力或流量调节过程中,当喷嘴在短时间内大量关闭时,可能会发生液击,使得流体内部压力在极短时间内发生急剧变化^[8],最高压力可达额定工作压力的数倍甚至上百倍,管道以及管道上的阀门等附件承受巨大应力,致使其破损甚至断裂,威胁系统的安全运行。国内外都曾发生过低温管路系统的液击事故,如美国土星5号液氧加注系统由于液击事故,造成液氧储罐严重损坏、加注主管路断裂^[9],国内某液氢加注系统由于液击事故导致管道连接法兰漏液^[10]。

现有的液击现象研究大多针对简单的部件展开,如单段管路或单只阀门。王英浩^[11]对火箭推进剂输送系统中的波纹管内液击影响开展了研究,得到了水击发生时波纹管形变和压力吸收特性。程谋森等^[12]提出了一种计算管腔互联结构形式的液体推进剂供应管路中瞬变流的一维有限元方法,并对推进剂供应管路内的瞬变流动开展了数值计算。Zhang等^[13]针对排水管路开展了一维三维混合模拟,能够有效应用于模拟水电站管路

系统中水力学响应动态研究。表明增压速率对推进剂供应系统有着重要影响,可能导致液击发生^[14]。Ayed和Hafsi^[15]通过储罐-管路-阀系统的液击研究,认为主导频率取决于壁厚与管径之比、初始流量和摩擦因数等3个因素。任孝文等^[16]基于MWorks仿真平台建立了弱可压缩流体及可压缩流体的一维管路有限体积法模型,针对水击这一瞬态流动现象分别进行了液氢、液氧和液态甲烷的流动仿真研究。

近年来,为了应对日益增长的复杂的管网系统仿真需求,例如液体火箭发动机管网,基于模块化建模思想的有限体积法得到了更多的应用。其中由美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)马歇尔太空飞行中心开发的通用流体系统仿真程序(general fluid system simulation program, GFSSP)^[17]和欧洲航空航天局开发的欧盟太空推进系统仿真软件(European space propulsion system simulation software, ESPSS)^[18]具有较好的代表性^[19]。Majumdar等^[20]采用GFSSP预测了供液系统中一只快速阀关闭过程中水、液氢、液氧的瞬态压力变化,并且波的传播是联合求解带压缩因子的真实流体状态方程和守恒方程,而不是使用给定的波传播速度。

AMESim软件已广泛用于管网系统流动计算。白晓瑞^[21]基于AMESim软件开展了液体火箭推进系统动态特性的仿真研究,结果表明该仿真测试平台能够较好地模拟液击现象。晏政等^[22-23]采用AMESim软件环境,对包含复杂部件的典型推进系统充填和关机过程的液击开展了仿真研究,并探讨了节流孔和弯管对液击的抑制作用。张峥岳和康乃全^[24]利用AMESim对挤压式供应系统的火箭发动机的液击现象进行了仿真模拟,发现轨控发动机的工作是引起大液击的主要因素。

低温风洞的液氮供给系统管路分段较多,部件繁杂,阀门和喷嘴响应时间短等因素,使得系统中液击产生的压力波动与单管内的液击特性呈现出较大差别。本文基于 AMESim 环境,搭建了低温风洞液氮供给系统的动态仿真模型。探究了典型工况下的液击特性,获得了液击压力峰值。并根据供给系统特点,探究了喷嘴瞬时全关和有序关闭两种方式对液击现象的抑制作用。

1 系统建模

低温风洞的液氮供给系统如图 1 所示,主要由液氮储槽、液氮泵组、喷前调节支路、回流调节支路、液氮喷射排架、单独调试支路和顶部排气支路构成。液氮通过四台扬程为 180 m 的离心泵从液氮储槽里输出,进入液氮管网,通过喷前调节阀组后,进入喷射排架。通过回流调节支路可实现液氮供给流量的精确调节;当风洞液氮需求量大时,减小回流阀开度,从而减少液氮泵工作范围,反之亦然。单独调试支路是为了满足风洞运行之前的管路调试,在排架顶部,还设置了排气支路,以排出管路中可能产生的氮气。图 1 点 A 处为主管路压力,点 B 处为喷前管路压力,点 C 处为喷嘴入口压力。VT101~VT105 为调节阀。

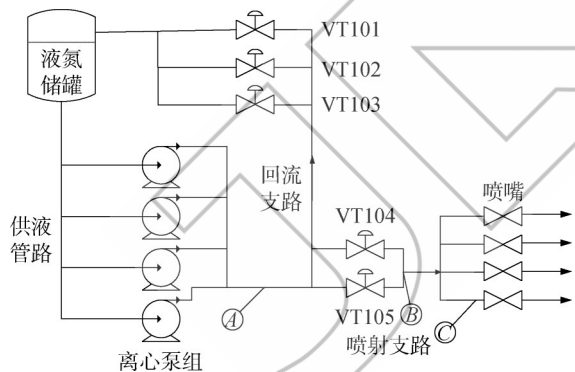


图 1 液氮供给系统示意图

Fig.1 Schematic of liquid nitrogen supplying system

基于模块化建模思想,分别建模了液氮供给系统中的离心泵、调节阀、管路、喷嘴等模型,搭建了液氮供给系统管网模型。

1.1 离心泵

根据离心泵流容方程,出口压力 p_{out} 为入口压力 p_{in} 和压头 dp 之和。

$$p_{out} = p_{in} + dp \quad (1)$$

压头 dp 与泵功 w_p 的关系为

$$w_p = \frac{q_{vp} dp}{\eta_e} \quad (2)$$

式中 η_e 为全局效率, q_{vp} 为离心泵体积流量。在 AMESim 仿真计算中,已知参考工况下的特性,离心泵在其他工况下的特性基于切割定律来求解。为求解 dp ,首先将流量、压力和功率通过乘以式(3)中的各系数来无量纲化,从而得到无量纲曲线,进而通过插值法可以得到 dp 值。

$$C_q = \frac{1}{N \cdot D^3} \quad (3a)$$

$$C_p = \frac{1}{\rho \cdot (N \cdot D)^2} \quad (3b)$$

$$C_w = \frac{1}{\rho \cdot N^3 \cdot D^5} \quad (3c)$$

式中 C_q 、 C_p 、 C_w 分别为体积流量、压力和功率的无量纲系数; ρ 为流体的密度; N 为转速; D 为泵径。

1.2 调节阀

在液氮供给系统中采用了多只调节阀来控制进入喷嘴前压力与流量。衡量调节阀流通能力最重要的指标为流量系数 C_v ,其计算公式如下:

$$C_v = 1.156 q_v \sqrt{\frac{10G}{p_1 - p_2}} = 1.156 q_v \sqrt{\frac{10G}{\Delta p_v}} \quad (4)$$

式中 q_v 为阀门体积流量 (m^3/h); G 为比重(以水为参照,即水的比重 1); p_1 和 p_2 分别为进口和出口压力 (MPa); Δp_v 为阀门前后压差 (MPa)。对式(5)进行如下变换:

$$Q_v = \frac{C_v}{1.156} \sqrt{\frac{0.1 \Delta p_v}{G}} \quad (5)$$

在 AMESim 中采用可变节流孔模块来等效调节阀,其体积流量特性函数为 $q_v = f(x, \Delta p)$,式中 x 为阀门开度 (0~1), Δp_v 采用插值法,根据各调节阀的 $x \sim C_v$ 表格,从而建立阀门的流量特性曲线。调节阀均为等百分比形式,规格如表 1 所示。

表 1 调节阀主要参数

Table 1 Main parameters of control valves

编号	规格
VT101	DN50
VT102	DN100
VT103	DN300
VT104	DN300
VT105	DN150

1.3 管 路

液氮供给系统中的管路基本特性除压降外,还需考虑管路容抗、阻抗、惯性及漏热的影响。液氮供给系统中管路各异,管路连接处有三通、四通以及弯管等各种类型管路,管路的准确建模对于模拟管网系统的沿程压力、压降与流量波动有重要意义。如图 2 所示的一段长度 L 的流体管路,入口处的压力和质量流量为 p_1 和 q_{m1} ,出口处的压力和质量流量为 p_2 和 q_{m2} ,流体管路中任意位置 x 处的压力和质量流量为 p 和 q_m 。

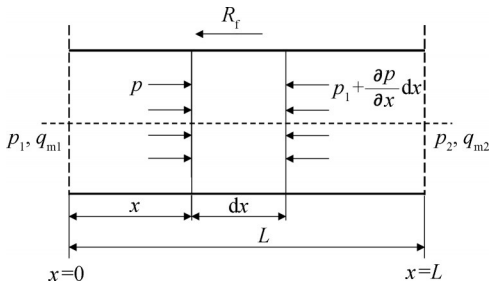


图 2 管内流体力学分析示意图

Fig.2 Schematic of fluid mechanics analysis in a pipe

取流体微元 dx , 建立其运动微分方程如下:

$$\rho dx \frac{\partial q_m}{\partial t} = \left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] A - R_f \quad (6)$$

整理得

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\rho}{A} \left(\frac{\partial q_m}{\partial t} + R_v q_m \right) = 0 \quad (7)$$

流体连续性方程为

$$q_m - \left(q_m + \frac{\partial q_m}{\partial t} dx \right) = \frac{A dx}{K_e} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \quad (8)$$

其中

$$K_e = K_y / \left[1 + \frac{D_o}{b} \cdot \frac{K_y}{E} (1 - 0.5\epsilon) \right] \quad (9)$$

整理得

$$\frac{\partial q_m}{\partial x} + \frac{A}{K_e} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

式中 A 为流体管路的横截面积(m^2); R_f 为频率相关流体摩擦阻力(N); K_e 为流体的表观体积弹性模量(Pa); K_y 为流体的体积弹性模量(Pa); D_o 为管道外直径(m); b 为管壁厚度(m); E 为管材的弹性模量(m); ϵ 为管材的泊松比。管路参数和弯头与三通的主要参数分别如表 2~表 3 所示。

1.4 喷 嘴

液氮供给系统中共四类喷嘴,不同类型的喷嘴个数及流量如表 4 所示,喷嘴喷射流量与工作

表 2 不同管路的参数

Table 2 Parameters of different branches

参数	主管路	回流 总管路	喷前 管路	喷嘴前 管路
管径/m	0.4	0.4	0.4	0.2
管长/m	84.1	95.6	5	20

表 3 不同弯头和三通的参数

Table 3 Parameters of different elbows and tees

类别	规格	数量
弯头	DN250	6
	DN200	10
	DN400	9
	DN400~50	2
三通	DN400~100	2
	DN400~150	2
	DN400~200	6
	DN400~250	6
	DN400~300	4
	DN400~400	1

压力特性关系如下:

$$q_{vj} = 0.06k \sqrt{\Delta p_n} \quad (11)$$

式中 q_{vj} 为喷射体积流量(m^3/h), Δp_n 为喷嘴工作压力差(MPa), k 为流量系数。

供给系统中喷嘴数量多达 248 个,如果对所有喷嘴逐个建模,会造成模型复杂,求解困难。建模过程中将喷嘴等效为四类等比例调节阀来建模,用阀门的开度表示喷嘴的个数。以等效 72 个超大喷嘴的等比例调节阀为例,其最大开度设置为 7.2,每 0.1 的开度表示数量为 1 的超大喷嘴,每打开 1 个超大喷嘴,该调节阀的开度就增加 0.1,同理,每关闭 1 个超大喷嘴,该调节阀的开度即减少 0.1。调节阀开度为 0 时表示没有超大喷嘴打开,而调节阀开度为 7.2 时表示所有超大喷嘴均打开。

在上述关键部件建模基础上,搭建了图 3 所示的液氮供给系统仿真模型。

表 4 不同喷嘴的质量流量及个数

Table 4 Different nozzles's mass flow rate and numbers

参数	超大喷嘴	大喷嘴	中喷嘴
个数	72	144	10
质量流量/(kg/s)	1.5	1.3	0.45

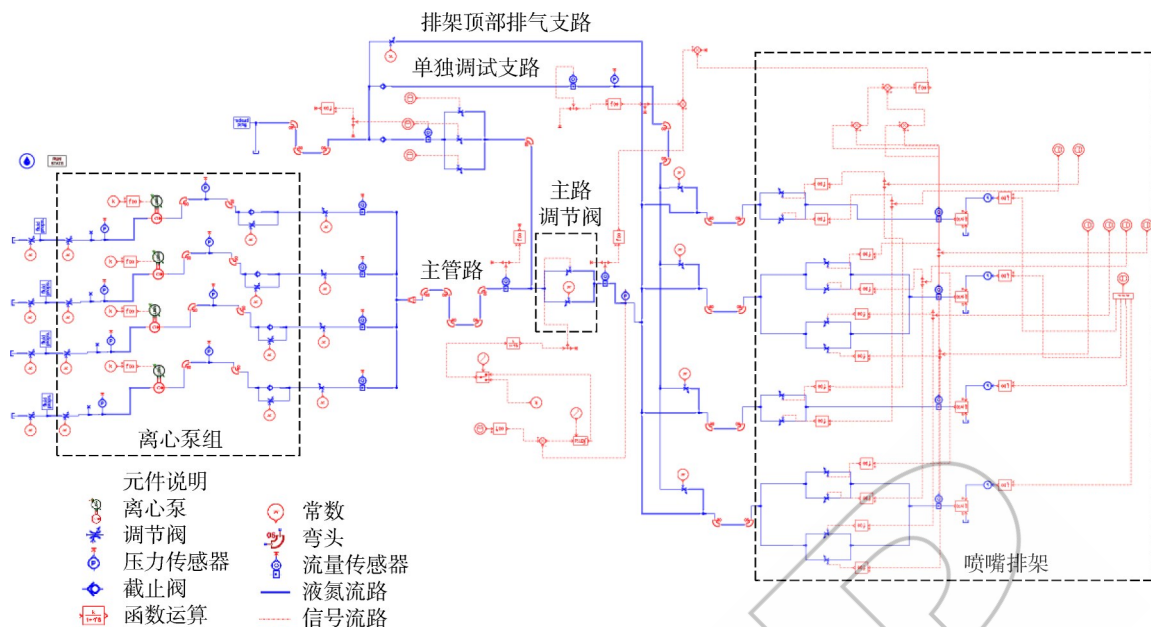


图3 液氮供给系统仿真模型

Fig.3 Simulation model of liquid nitrogen supplying system

2 模型验证

基于已有的0.3 m低温风洞液氮供给系统^[7,25]实验数据,开展了仿真模型验证。采用相同的建模方法,搭建了对应的管网动态仿真模型。图4

为仿真分析获得的管路压力、质量流量与实验值对比,可见模拟值和实验值吻合较好,压力平均误差为6.8%,质量流量计算值平均误差为6.5%,从而验证了AMESim软件对于管路系统流量变化仿真的可行性。

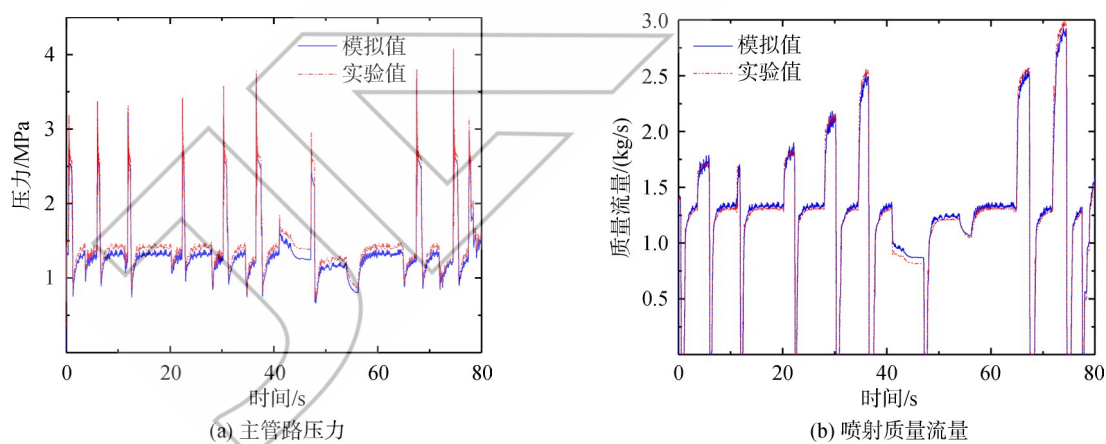


图4 0.3 m低温风洞液氮供给系统模拟值与实验值对比

Fig.4 Simulated results vs. experimental data in the liquid nitrogen supplying system of 0.3 m cryogenic wind tunnel

3 结果与讨论

3.1 喷嘴瞬时全关

液氮喷射喷嘴由气控阀控制启闭,响应时间为ms级。在喷嘴全部开启的初始状态下,设定0.025 s内线性关闭全部喷嘴,运行10 s后,在0.04 s内线性打开所有喷嘴。图5~图6为该过程

中管路内部压力和流量的变化,可以看出整个过程分为3个阶段:

1) 启动阶段,持续时间为0~5 s。离心泵启动,管路压力经短暂波动后逐渐稳定。稳定后主管路压力比喷前管路压力高约0.4 MPa,此压差来自管阻和阀阻等。

2) 喷嘴关闭阶段,持续时间为5~15 s。管路

系统末端喷嘴全部关闭瞬间,主管路质量流量急剧减小,甚至出现负值(如图7所示),表明阀门的关闭使得液氮回流。对比图6,此时管路中压力陡升至峰值,表明液击发生。随后管路中形成振荡的压力波,并导致质量流量也出现周期性振荡。从图5可以发现,液击压力峰值达到2.98 MPa。随后,振荡逐渐减缓。由于喷嘴关闭,管内液氮不流动,导致主管路和喷前压力趋于一致,并在1.6 MPa附近小幅波动。

3) 喷嘴复开阶段,时间范围为15~25 s。在第15 s,喷嘴全部打开,主管路质量流量瞬间陡增(如图6),导致管路压力陡降,最低降至0.7 MPa。随后,压力在较短时间内又恢复平稳,最终稳定在1.02 MPa附近,接近系统初始状态。

喷嘴入口(图1点C处)压力波动如图7所示。各喷嘴因液击现象能达到的最高入口压力为3.5 MPa,大于喷前压力所能达到的最大值2.98 MPa,可见该处管路系统承受的液击压力峰值更大。这是由于喷嘴入口前管路相较于前端管路而言,其管径较小,更接近液击发生点,因此当喷嘴全部关闭时,管路内液体波动更加剧烈,也使得其与喷前管路的压力峰值的差值更大。

对液击发生过程的压力变化进行快速傅里叶变换(FFT)分析,如图8所示。可以发现,液击发生时,喷嘴前端压力振荡呈现出明显的周期性,且

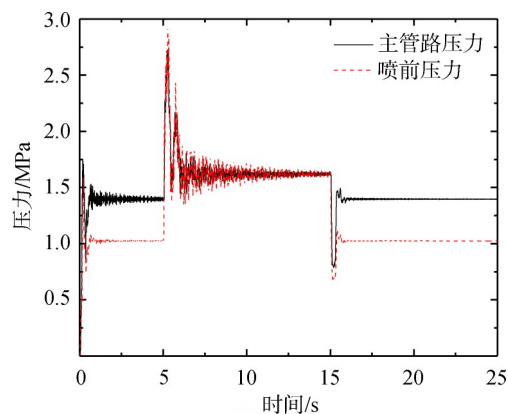


图5 喷前压力和主管路压力变化

Fig.5 Variations of pressures at the inlet of nozzles and main branch

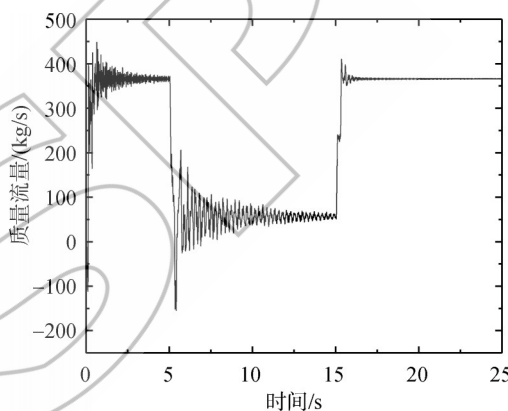


图6 主管路质量流量变化

Fig.6 Variation of mass flow rates in the main branch

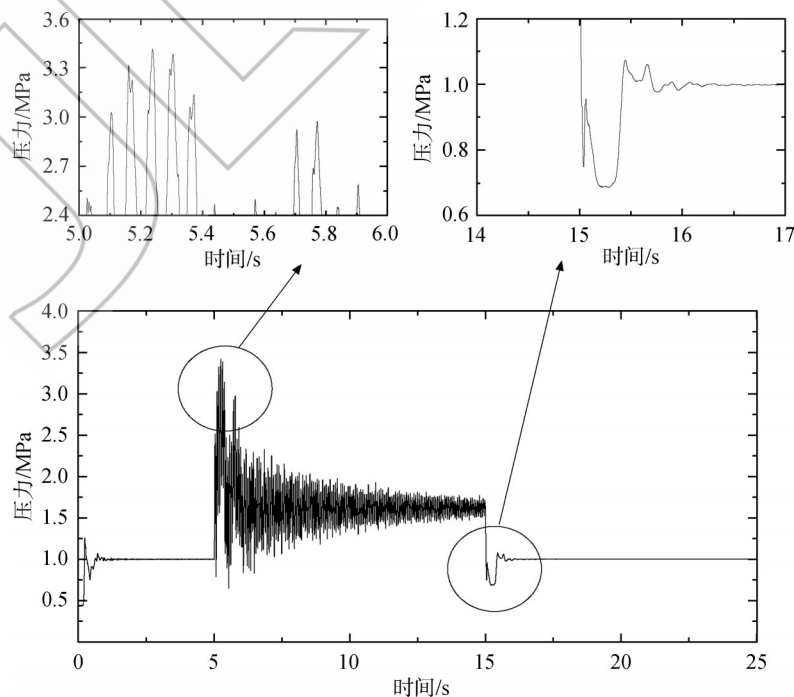


图7 喷嘴入口压力变化

Fig.7 Pressure variation at the inlet of the nozzle

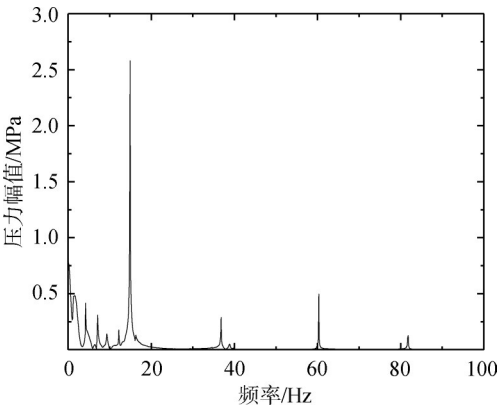


图8 喷嘴瞬时关闭下液击过程压力FFT分析
Fig.8 FFT analysis of pressure variation during water hammer with nozzles shutting down instantaneously

包含不同频率,其最大波动幅值对应的主导频率约为 15 Hz。

3.2 喷嘴有序关闭

将喷嘴按流量均分成 4 组,有序关闭喷嘴,探究液击峰值压力的变化。每个阶段关闭的喷嘴和减少的质量流量如表 5 所示,每阶段间隔时间为 2 s(该间隔时间用于保证压力恢复到平稳值),在 5~12 s 内完成喷嘴的全部关闭动作。

表 5 不同阶段关闭的喷嘴数量及质量流量
Table 5 Number of nozzles closing down and respective mass flow rate under different stages

时序/s	喷嘴个数				喷射流量/ (kg/s)
	小 喷嘴	中 喷嘴	大 喷嘴	超大 喷嘴	
5~5.025	2	3	38	18	77.89
7~7.025	2	3	38	18	77.89
9~9.025	9	2	38	18	77.93
11~11.025	9	2	38	18	77.93
合计	22	10	144	72	311.64

管路系统压力和质量流量变化分别如图 9~图 10 所示。随着喷嘴阶梯式关闭,供给管路流量呈现阶梯式减小,压力呈阶梯式增大,每个阶段喷嘴动作变化始都会形成液击现象。各阶段喷前压力的峰值、稳定值、再稳定时间如表 6 所示。可见,随着各组喷嘴的顺序关闭,峰值压力、稳定压力和再稳定时间都逐渐上升,尽管每次减小的质量流量值几乎相同,但是峰值压力和再稳定时间的增大幅度都逐渐增大,这是因为每次变动的相

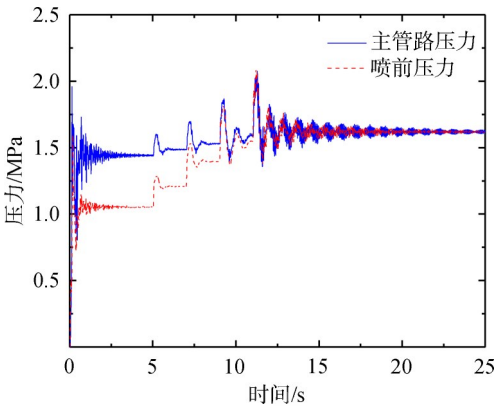


图9 喷嘴有序关闭时喷前压力和主管路压力变化
Fig.9 Variations of pressures at the inlet of nozzles and main branch with orderly close-down of nozzles

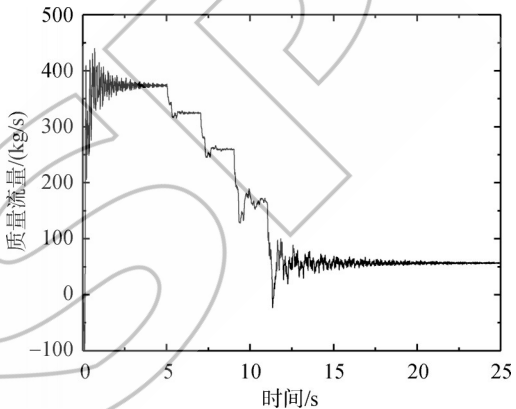


图10 喷嘴有序关闭时主管路质量流量变化
Fig.10 Variation of mass flow rates in the main branch with orderly close-down of nozzles

表 6 各阶段喷前压力
Table 6 Pressure at the inlet of nozzles at different stages

时序/s	峰值压力/ MPa	稳定压力/ MPa	再稳定 时间/s
5~5.025	1.26	1.19	1
7~7.025	1.52	1.38	1.3
9~9.025	1.84	1.5	1.9
11~11.025	2.3	1.6	10

对流量值都在增大,从减少流量占最大流量的比重从 0.25 到 1,从而使得波动逐渐变得更加剧烈;而稳定压力的增大幅度逐渐减小,这是因为虽然喷前管路的流阻一直在增大,但是回流管路的流阻保持不变,因此虽然喷前管路的流阻每次变动一定的值,但是其对稳定时总流阻的影响却越来越小,所以稳定压力的增大幅度越来越小。

从图9还可以发现,在第4阶段喷嘴全部关闭的情况下,喷嘴前压力峰值降至约2.3 MPa,低于图5中的峰值为2.98 MPa。因此流量均分,阶梯式关闭喷嘴的方式可以减小液击现象引起的压力峰值,从而降低管道被高压冲击损坏的风险。

对喷嘴进口压力进行FFT分析,得到图11。和图8对比可以发现,喷嘴有序关闭显著减小了压力振幅,但对振荡频率几乎没有影响,其一阶频率仍在15 Hz附近。分析发现压力波周期和频率与压力波传递速率和管路长度有关,及压力波动在管网中的传递时间有关。压力波传递速率如式(12)所示^[26],可见喷嘴有序分组关闭虽降低了压力振幅,但对压力波传递速率无直接影响,因此振荡频率几乎没有变化。

$$a = \sqrt{\frac{K_y/\rho}{1 + [(K/E)(D_i/b)]C}} \quad (12)$$

式中 D_i 是管内径(m); C 为修正系数,与管道的约束条件有关。

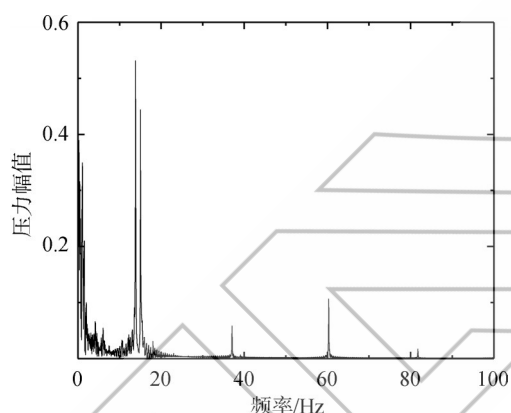


图11 喷嘴有序关闭下液击过程压力FFT分析
Fig.11 FFT analysis of pressure variation during water hammer with nozzles shutting down orderly

4 结 论

本文基于AMESim,建立了大型低温风洞液氮供给系统的仿真模型,对比开展了喷嘴瞬时全关和喷嘴有序关闭两种典型工况下的液击分析。

1) 采用0.3 m低温风洞液氮供给系统对仿真模型进行了验证,模拟值与实验值的平均误差在6.8%以内,表明了模型的可靠性。

2) 喷嘴瞬时全关工况下,液击峰值压力达到2.98 MPa;而当喷嘴分4组有序关闭时,液击压力峰值有效降低至2.3 MPa,且发生在最后一组喷嘴关闭时。

3) 液击发生时的压力波动呈现出明显周期性,由多种频率组成,主频为15 Hz,喷嘴关闭方法对频率分布几乎没有影响。

参考文献:

- [1] GREEN J, QUEST J. A short history of the European transonic wind tunnel ETW[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2011, 47(5):319-368.
- [2] 周廷波, 高超, 张正科, 等. NF-6风洞液氮降温系统研制[J]. 航空动力学报, 2018, 33(2):327-337.
ZHOU Tingbo, GAO Chao, ZHANG Zhengke, et al. Development of liquid nitrogen injection cooling system of NF-6 wind tunnel[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(2): 327-337. (in Chinese)
- [3] 孙皖, 徐涛, 刘秀芳, 等. 凝结相变对低温风洞雷诺数试验的影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(9):1893-1899.
SUN Wan, XU Tao, LIU Xiufang, et al. Effect of condensation phase transient on Reynold number test for cryogenic wind tunnel[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(9): 1893-1899. (in Chinese)
- [4] 陈振华, 张伟, 高荣, 等. 液氮抽真空制冷的理论与试验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(9):1971-1976.
CHEN Zhenhua, ZHANG Wei, GAO Rong, et al. Theoretical and experiment studies of vacuum cooling of liquid nitrogen[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9):1971-1976. (in Chinese)
- [5] 黄知龙, 周平, 顾正华. 大型低温风洞中的测控技术设计需求[C]//中国空气动力学会测控专业委员会第6届6次全国学术交流会议论文集. 广东惠州:中国空气动力学会, 2015: 168-171.
- [6] 廖达雄, 黄知龙, 陈振华, 等. 大型低温高雷诺数风洞及其关键技术综述[J]. 实验流体力学, 2014, 28(2):1-6.
LIAO Daxiong, HUANG Zhilong, CHEN Zhenhua, et al. Review on large-scale cryogenic wind tunnel and key technologies[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(2):1-6. (in Chinese)
- [7] 张伟, 高荣, 张双喜, 等. 0.3 m低温风洞液氮供给系统研制[J]. 航空动力学报, 2020, 35(5):118-126.
ZHANG Wei, GAO Rong, ZHANG Shuangxi, et al. Development of liquid nitrogen supplying system of 0.3m cryogenic wind tunnel[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(5): 118-126. (in Chinese)
- [8] GHIDAQUI M S, ZHAO M, MCINNIS D A, et al. A review of water hammer theory and practice[J]. Applied Mechanics Reviews, 2005, 58(1):49-76.
- [9] MOORE W I, ARNOLD R J. Failure of Apollo Saturn V liquid oxygen loading system[C]//Advances in Cryogenic Engineering. Boston, US:Springer, 1995:533-544.
- [10] 刘照智, 丁鹏飞, 田青亚. 液氢加注系统水击问题数值分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2010(4):10-12.
LIU Zhaozhi, DING Pengfei, TIAN Qingya. Numerical analysis on water-hammer of liquid hydrogen loading system[J].

- Missiles and Space Vehicles, 2010(4):10-12. (in Chinese)
- [11] 王英浩. 火箭推进剂输送系统中波纹管对水击压力的吸收分析[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2004.
- WANG Yinghao. Analysis of bellows absorb water hammer in rocket propellant conveyer pipeline[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [12] 程谋森, 刘昆, 张育林. 推进剂供应管路内液体瞬变流一维有限元计算[J]. 推进技术, 2000, 21(4):12-15.
- CHENG Mousen, LIU Kun, ZHANG Yulin. One-dimensional finite element solutions for liquid transients in propellant feedlines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(4):12-15. (in Chinese)
- [13] ZHANG X X, CHENG Y G. Simulation of hydraulic transients in hydropower systems using the 1-D-3-D coupling approach[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 22(4):595-604.
- [14] KUMAR A, PRASAD S P, RAO M R. Experimental studies of water hammer in propellant feed system of reaction control system[J]. Propulsion and Power Research, 2018, 7(1):52-59.
- [15] AYED L, HAFSI Z. Revisiting frequency domain analysis method for water hammer effects on pipeline systems[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(11):1-9.
- [16] 任孝文, 陈宏玉, 李平, 等. 弱可压缩流体与可压缩流体模型的管路水击研究[J]. 推进技术, 2020, 41(8):1880-1886.
- REN Xiaowen, CHEN Hongyu, LI Ping, et al. Investigation on water hammer in pipes by slightly compressible fluid model and compressible fluid model[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(8):1880-1886. (in Chinese)
- [17] DARR S R, HARTWIG J W. Two-phase convection heat transfer correlations for liquid hydrogen pipe chilldown[J]. Cryogenics, 2020, 105:102999.1-102999.10.
- [18] ISSELHORST A, SUSLOV D, RICCIUS J. Liquid hydrogen tests of a sub-scale launcher upper stage feed line evaporation cooler[J]. Acta Astronautica, 2019, 158:231-243.
- [19] REN X W, LI P, CHEN H Y. Numerical simulation of water hammer in liquid methane feedline based on two compressible fluid models[J]. Cryogenics, 2020, 109:103122.1-103122.8.
- [20] MAJUMDAR A K, FLACHBART R H. Numerical modeling of fluid transients by a finite volume procedure for rocket propulsion systems[C]//Proceedings of ASME/JSME 2003 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference. Honolulu, US:ASME, 2003:2967-2974.
- [21] 白晓瑞. 液体火箭推进系统动态特性仿真研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.
- BAI Xiaorui. Numerical analysis on dynamic characteristics of liquid rocket propulsion system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [22] 晏政, 刘泽军, 程玉强, 等. 航天器推进系统模块化建模方法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(4):28-32.
- YAN Zheng, LIU Zejun, CHENG Yuqiang, et al. Modular modeling of spacecraft propulsion system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(4):28-32. (in Chinese)
- [23] 晏政, 彭小辉, 程玉强, 等. 航天器推进系统水击及其抑制方法[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9):2028-2034.
- YAN Zheng, PENG Xiaohui, CHENG Yuqiang, et al. Research of water hammer and its suppression methods for spacecraft propulsion system[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(9):2028-2034. (in Chinese)
- [24] 张峰岳, 康乃全. 轨姿控液体火箭发动机水击仿真模拟[J]. 火箭推进, 2012, 38(3):12-16.
- ZHANG Zhengyue, KANG Naiquan. Simulation of water hammer in liquid rocket engine of orbit and attitude control system[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2012, 38(3):12-16. (in Chinese)
- [25] 赖欢, 陈万华, 孙德文, 等. 0.3 m 低温连续式跨声速风洞结构设计[J]. 实验流体力学, 2020, 34(5):89-96.
- LAI Huan, CHEN Wanhua, SUN Dewen, et al. The structural design for 0.3 m cryogenic continuous transonic wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2020, 34(5):89-96. (in Chinese)
- [26] 刘海飞, 陈虹, 王天祥, 等. 液氢和液氧低温推进剂加注系统中的管路瞬变特性研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2014, 29(6):642-648.
- LIU Haifei, CHEN Hong, WANG Tianxiang, et al. Study on the transient flow characteristics of the filling pipe of liquid hydrogen/liquid oxygen cryogenic propellants[J]. Chinese Journal of hydrodynamics, 2014, 29(6):642-648. (in Chinese)

(编辑:张 雪)