DOI：10.13245/j.hust.250361

液氧输送管路系统瞬变流动特性研究

李 翠 段小兴 厉彦忠 李晨烁 杜飞平
(西安交通大学能源与动力工程学院，陕西 西安 710049)

摘要 针对当液体火箭发动机运行时，阀门的开启与关闭会使推进管路系统发生水击现象，诱发结构振动、恶化部件工作环境的问题，以双机并联液氧输送管路系统为研究对象，研究发动机启动、关机等不同瞬态过程压力、流量的脉动规律，分析推进剂流量、蓄压器压力体积乘积(PV)值、主路长度与阀门流量特性等对振荡峰值、频率的影响．结果表明：关机水击峰值达稳定压力的5倍，且为开机峰值的2.6倍；当流量从210 kg·s^{-1}增至290 kg·s^{-1}时，开、关机水击最大振幅分别增大7倍与4倍；当蓄压器PV值由1.5 MPa·L增至3.5 MPa·L时，关机峰值降低63%；当主路长度由7.4 m倍增至14.8 m时，开、关机峰值分别升高24%与75%；快开阀关机峰值达等百分比阀的5.3倍，后者能够有效削弱水击；敏感性分析显示，流量与主路长度分别对峰值压力和脉动频率相关性最强．

关键词 液氧输送系统；瞬变流动；水击；蓄压器；阀门特性
中图分类号 V434 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2026)10-0009-07

Study on transient flow characteristics of liquid oxygen delivery system

LI Cui DUAN Xiaoxing LI Yanzhong LI Chenshuo DU Feiping
(School of Energy and Power Engineering，Xi’an Jiaotong University，Xi’an 710049，China)

Abstract Aiming at the problem during the operation of a liquid rocket engine，the opening and closing of valves would cause a water hammer phenomenon in the propulsion pipeline system，inducing structural vibration and deteriorates the working environment of components，a dual parallel liquid oxygen delivery pipeline system was taken as the research object，the pulsation characteristics of pressure and flow rate during different transient processes such as engine startup and shutdown were studied，and the effects of propellant flow rate，pressure-volume (PV) product of the accumulator，main path length，and valve flow characteristics on the oscillation peak value and frequency were analyzed．Calculation results show that the peak value of the shutdown water hammer reaches 5 times the stable pressure，and is 2.6 times the startup peak value．When the flow rate is increased from 210 kg·s^{-1} to 290 kg·s^{-1}，the maximum amplitudes of the startup and shutdown water hammer are increased by 7 times and 4 times，respectively．The shutdown peak value is decreased by 63% when the PV value of the accumulator is increased from 1.5 MPa·L to 3.5 MPa·L．The startup and shutdown peak values are increased by 24% and 75%，respectively，when the main path length is doubled from 7.4 m to 14.8 m．The shutdown peak value of the quick-opening valve reaches 5.3 times of that of the equal percentage valve，and the water hammer can be effectively weakened by the latter．It is shown by the sensitivity analysis that the flow rate and the main path length are most strongly correlated with the peak pressure and the pulsation frequency，respectively．

Key words liquid oxygen delivery system；transient flow；water hammer；accumulator；valve characteristic

发展液体运载火箭是我国建设航天强国的重要方向[1]．低温推进系统作为液体火箭动力来源，其工作特性直接影响系统稳定性与安全性．推进系统运行过程中，受结构振动、阀门启闭及含气率变化等因素影响，管路内流速会发生快速变化，进而诱发水击．水击导致局部压力急剧波动，可能引起推

收稿日期 2025-07-30．
作者简介 李 翠(1982—)，女，副教授，E-mail：xjtucli@mail.xjtu.edu.cn．
基金项目 国家自然科学基金资助项目(52576021，52376013)．

进剂泄漏、推力下降甚至发动机失效，严重威胁系统安全，相关事故在国内外均有报道[2-4].

Menabrea最早开展水击理论研究[5]，随后李文勋[6]、Wylie等[7]与侯咏梅[8]建立水击微分方程，奠定水击理论基础．随着计算机技术发展，特征线法、有限元法及其耦合方法逐渐应用于火箭管网瞬变流分析．Ren等[9]、魏鑫等[10]对液体火箭推进剂管路瞬态水击压力及流固耦合振动进行了仿真分析．针对推进系统关机水击问题，已有研究通过仿真与试验结合优化分析方法[11]，考察节流孔、弯管等结构的抑制作用[12]，分析关机速率、启动贮箱及节流元件等参数对水击特性的影响[13-15]．此外，部分学者从流动介质[16]和管路结构[17]角度研究水击机理，并提出增设容腔[18]、安装泄压阀[19]及优化管路布局[20]等抑制措施，为水击控制提供依据．

以上研究主要聚焦单台发动机或局部管路的关机水击分析，对双机并联液氧输送管路等复杂系统的整体启动与关机瞬变过程研究相对不足；同时，已有成果多关注水击压力峰值，对脉动频率特性的研究较少．另一方面，特征线法在复杂发动机系统分析中存在边界条件处理繁琐、建模复杂等问题[21]．相关研究表明：AMEsim软件能够有效开展推进系统动态特性分析[22-23]；通过简化建模可揭示关阀速率与压力波动的关系[24]；结合多管路部件理论分析则证实了阀控方法在瞬变过程模拟与水击控制中的有效性[25].

对于大推力液氧煤油推进系统，水击及不稳定流动引起的低频振荡现象可能会诱发共振进而危害系统安全．尽管现有措施能够抑制单机系统振荡，但双机并联系统仍存在振荡幅值较大的低频振荡现象[26]，因此开展双机并联液氧输送管路系统瞬变特性研究具有重要意义．本研究基于AMEsim建立双机并联液氧输送管路模型，通过阀门控制实现推进剂瞬变流动过程模拟，分析推进剂流量、蓄压器PV(压力体积乘积)、主路长度及阀门流量特性对水击压力峰值和脉动频率的影响，为液氧输送系统水击抑制与优化设计提供参考．

1　液氧输送管路系统方案

双机并联发动机液氧输送管路系统包含气枕增压、贮箱供液、推进剂流动与发动机燃烧等过程的复杂管网系统．利用AMEsim软件建立液氧输送管路系统仿真模型，首先须要对系统建立基本的物理模型，再依据模块化思想建立涵盖贮箱增压、液位变化、推进剂流动、阀门控制的液氧输送管路系统模型．液氧输送管路系统AMEsim模型如图1所示，其模块构成包括贮箱模块、推进剂输送模块、发动机模块以及三通管、弯管、过滤器等流阻元件.

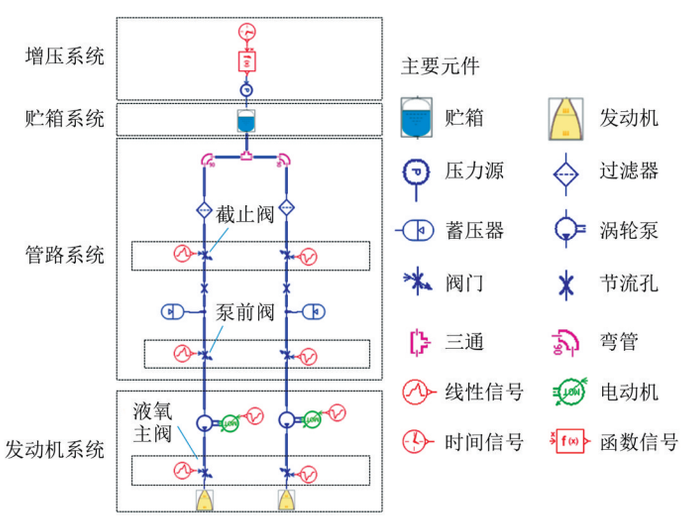


图1　液氧输送管路系统仿真模型

本研究采用的工质为过冷液氧，外界漏热会使液体升温，但不足以导致相变现象，且液氧沿管路流动过程中升温较小，故未考虑温度变化和传热过程，以显著减少计算时间.

1.1　流动方程

液氧输送管路系统瞬变过程涉及多个阀门的连续动作，从而影响系统中压力变化，甚至引起压力振荡．管路的连续性方程与动量方程分别为

$$\frac{\partial(\rho S)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u S)}{\partial x}=0;$$

$$\frac{\partial(\rho u S)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u^2 S+pS)}{\partial x}+C_{\mathrm{g}}+C_{\mathrm{f}}=p\frac{\partial S}{\partial x},$$

式中：ρ为密度；u为速度；S为横截面积；C_{g}为重

力源；C_f为阻力源；p为绝对压力；t为描述系统瞬态演化过程的时间变量．

1.2　空化模型

当液氧从贮箱中流出进入管道进行输送时，由于支路管弯管、节流孔与发动机泵的存在，部分区域液氧压力降低到空化不稳定的临界压力，因此出现空化现象．对低温液体来说，饱和蒸汽压随温度的变化比常温流体要大得多，因此液氧即使温度变化很小，但是饱和蒸汽压却有很大变化，实际过程中无法忽略其空化带来的影响．本研究采用AMEsim内置空化模型，能够模拟管路分支、阀门等处的空化现象．

空化输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v\rho_v)+\frac{\partial(\alpha_v\rho_v u_1)}{\partial x_1}=m=m^+-m^-;$$

$$\rho_m=\rho_l(1-\alpha_v)+\rho_v\alpha_v,$$

式中：α_v为气相体积分数；ρ_v为气相密度；u_1为速度矢量分量；x_1为空间坐标分量；m^+为凝结源相质量传输率；m^-为蒸发源相质量传输率；ρ_m为混合相密度；ρ_l为液相密度．

1.3　阀门特性

阀门的流量特性及其开启速度与水击强度密切相关．根据阀门开度指数的不同，针对快开阀，线性阀和等百分比阀门三种阀门特性开展研究，其流通面积与阀门开度指数的关系分别为

$$S_{QO}=S_{max}[\beta(t)]^{0.5};$$

$$S_L=S_{max}\beta(t);$$

$$S_{EP}=S_{max}[\beta(t)]^{1.5},$$

式中：S_{QO}，S_L，S_{EP}分别为快开阀、线性阀和等百分比阀流通面积；S_{max}为阀门的最大流通面积；β为阀门开度．

2　液氧输送系统仿真模型验证

为了确保氧输送系统仿真结果的正确性，采用图1所示的双机并联液氧输送管路系统与文献[26]中双机并联火箭在实际飞行中发生振荡时的实测值作比较．仿真模拟结果与文献[26]实测结果对比如图2所示．

瞬变过程中，支路1与支路2对应的振幅与实测结果的平均相对偏差分别小于3%和11%．仿真条件下，支路1的压力脉动传播到支路2会经过支路上的流阻元件，因此支路2发动机前压力振荡幅值会略小于支路1的振幅．另外，当双机并联火箭发动机在实际飞行中出现低频振荡现象时，两台发动机的氧入口压力会呈现相位差180°、幅值相当的振荡[26]，仿真时各支路在发动机泵前也出现了两支路相位差180°的振荡现象，结果与文献实测结果整体符合良好，建立的模型能够反映复杂管路系统内的推进剂流动情况，可以用来模拟液氧输送管路系统的非稳态流动特性与水击脉动．

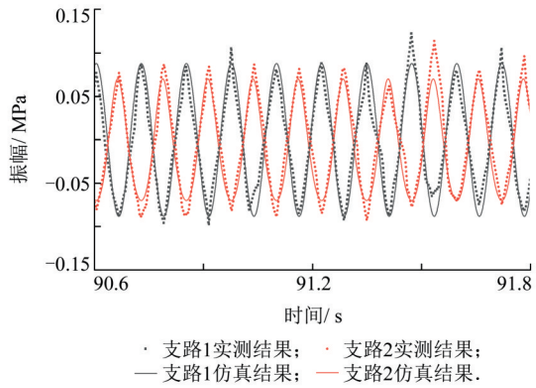


图2　仿真结果与文献[26]实测结果对比

3　液氧输送管路系统流动特性

针对双机并联发动机液氧输送管路系统，采用图1的仿真模型，系统主要几何参数见表1，当开、关机时，所有阀门同时开启或关闭，阀门响应时间为50 ms，贮箱气枕压力为0.3 MPa．

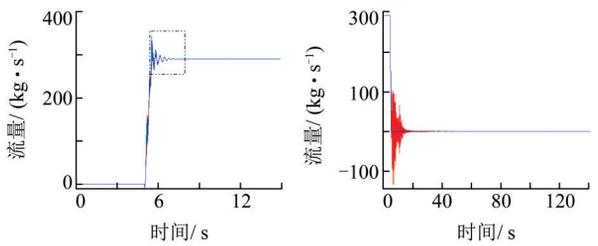
表1　输送管路系统模型参数

管路	长度/m	管径/mm
主路	7.40	300
泵前阀前管路	1.00	
泵前阀到泵	0.48	235
发动机泵管路	1.05	190

3.1　流量时空变化规律分析

推进剂从贮箱分别流入两条发动机管道支路，瞬变过程中支路流量变化情况如图3所示，其中图3(a)展示了氧输送系统启动过程流量变化情况，初始前5 s管网系统充满了推进剂，随着第5 s突然打开阀门，单支路各处的流量出现短暂的负值之后迅速上升，并发生频率f=3 Hz的流量脉动，经过约3 s稳定，如图3(a)虚线框内所示．流量为正表示管路内推进剂流动方向与重力方向相同，管路内推进剂来源芯级贮箱．三通管支路段与泵前管路均出现了开机水击现象，流量的峰值在阀门开度最大时出现，峰值流量为346 kg·s^{-1}，流量脉动频率为3 Hz，在9 s处，流量脉动结束，单支路管路流量稳定在290.6 kg·s^{-1}．图3(b)展示了氧输送系统关机过程流量变化情况，当关闭所有阀门时，三通管支路段内

出现流量振荡现象，下游泵前管路由于过滤器等阻尼元件的存在，因此流量在关机过程中较为稳定．



(a) 启动过程　　(b) 关机过程

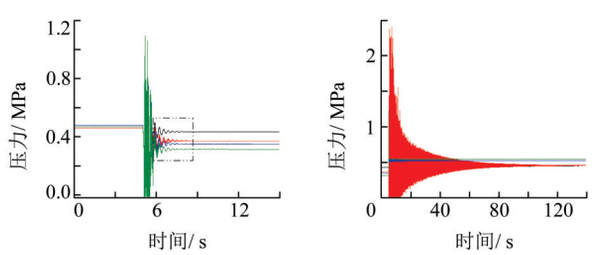
—三通管支路段；— 泵前管路．

图3　瞬变过程管路各处流量脉动图

3.2　压力振荡及水击现象分析

瞬变过程管路各处的压力变化情况如图4所示．图4(a)展示了系统启动过程的压力脉动情况，初始前5 s内氧输送管路系统中充满流体，第5 s阀门开启瞬间推进剂流动使管路内产生压力冲击，管道各处压力先短暂下降后急剧上升，各位置产生了明显的开机水击压力波动，其中三通管、截止阀、泵前阀与发动机泵处的最高压力峰值分别达到了0.6，0.92，0.87，1.1 MPa．在氧输送过程中，开阀1 s后，在阻力元件作用下，剧烈压力振荡被削弱为稳定衰减的频率f=3.3 Hz的压力脉动，如图4(a)虚线框内所示．开阀4 s后，各管路的压力逐渐趋于稳定，推进剂受到过滤器和节流孔等流阻元件的阻力过大的影响，克服重力带来的增益，使得压力沿推进剂流动方向减小，从三通管处基准压力由0.39 MPa到截止阀阀前降为0.37 MPa，到泵前阀阀前处降为0.35 MPa，到发动机泵前降为0.31 MPa．图4(b)展示了关机过程管道系统的压力脉动情况，关机后，管内流体压力随流速减小而上升，过程中管内发生水击现象，可以观察到关机后管路系统内各处都出现了明显的关机水击，这说明了阀门动作产生的压力脉动将会在管内传播，且在传播过程中，由于过滤器与节流孔等阻尼元件的削弱作用，因此压力脉动幅值不断衰减．

表2展示了不同瞬变过程中截止阀阀前压力与频率的变化情况，其中最大振幅为最大峰值压力与稳定压力的差值．关机过程水击峰值压力为2.42 MPa，约为稳定压力的5倍．当推进剂充满管道开机启动时，峰值压力比稳定压力高约0.56 MPa．开机启动过程的脉动频率为3.3 Hz，关机过程脉动频率为4.8 Hz．由于启动过程压力脉动是在整个支路空间振荡，而关阀过程压力脉动只在阀门上游与三通管间传播，因此此时压力脉动振荡空间缩小，振荡介质等效刚度提高，导致脉动频率上升．此外，关机过程中流量骤降，流动瞬间截止，引起剧烈压力波动，而开机过程工质流速增加较缓和，引起的压力脉动幅值及变化程度较小，因此关机水击峰值及频率显著强于开机水击效应．



(a) 启动过程　　(b) 关机过程

—三通管处；—截止阀前；—泵前阀处；—发动机泵．

图4　瞬变过程管路各处压力脉动图

表2　截止阀不同过程中压力与频率变化

工况	开机水击	关机水击
稳定压力/MPa	0.37	0.46
峰值压力/MPa	0.93	2.42
最大振幅/MPa	0.56	1.96
脉动频率/Hz	3.3	4.8

4　水击压力波影响因素分析

4.1　推进剂流量的影响

表3与表4展示了不同流量瞬变过程的水击脉动变化情况．随着推进剂流量的增大，管内压力变化变得更为剧烈，启动与关机过程引起的水击峰值与水击幅度都明显增加．具体而言，当启动过程中推进剂流量由210 kg·s^{-1}增大至290 kg·s^{-1}时，水击

表3　不同流量下启动过程水击压力与稳定时间变化

推进剂流量/ (kg·s^{-1})	稳定压力/ MPa	峰值压力/ MPa	最大振幅/ MPa	稳定时间/ s
210	0.41	0.49	0.08	3.9
230	0.40	0.53	0.13	4.3
250	0.39	0.60	0.21	4.4
270	0.38	0.71	0.33	4.5
290	0.37	0.93	0.56	4.6

表4　不同流量下关机过程水击压力与稳定时间变化

推进剂流量/ (kg·s^{-1})	稳定压力/ MPa	峰值压力/ MPa	最大振幅/ MPa	稳定时间/ s
210	0.41	0.94	0.53	116.7
230	0.40	1.01	0.61	124.8
250	0.39	1.58	1.19	129.2
270	0.38	1.72	1.34	130.1
290	0.37	2.42	2.05	132.4

最大振幅由0.08 MPa增大至0.56 MPa，增大7倍；关机过程中对应的水击峰值从0.94 MPa增大为2.42 MPa，水击最大振幅由0.53 MPa增大至2.05 MPa，增大约4倍．大流量使得推进剂振荡更剧烈，恢复到稳定压力所需时间随之增大，因此流量的增大会使输送系统水击增强，使用大流量管系须要考虑削弱水击现象．

4.2　蓄压器PV值的影响

表5与表6展示了不同蓄压器PV值下液氧输送系统瞬变过程的水击变化情况，随着蓄压器PV值不断增大，发动机启动与关机过程峰值压力与最大振幅不断减小．当蓄压器PV值从1.5 MPa·L增大到3.5 MPa·L时，对应的开机水击峰值从0.93 MPa降低为0.74 MPa；关机水击峰值从2.42 MPa降低为0.89 MPa，分别降低了20%与63%．这说明增大蓄压器PV值可以抑制水击现象，尤其对发动机关机水击抑制效果明显．

表5　不同PV值下启动过程水击压力与脉动频率变化

PV值/(MPa·L)	稳定压力/MPa	峰值压力/MPa	最大振幅/MPa	脉动频率/Hz
1.5	0.37	0.93	0.56	3.3
2.0	0.37	0.81	0.44	2.8
2.5	0.37	0.79	0.42	2.4
3.0	0.37	0.76	0.39	2.1
3.5	0.37	0.74	0.37	1.7

表6　不同PV值下关机过程水击压力与脉动频率变化

PV值/(MPa·L)	稳定压力/MPa	峰值压力/MPa	最大振幅/MPa	脉动频率/Hz
1.5	0.46	2.42	1.96	4.8
2.0	0.46	1.44	0.98	4.3
2.5	0.46	1.01	0.55	3.7
3.0	0.46	0.95	0.49	3.4
3.5	0.46	0.89	0.43	3.1

PV值的增大会导致压力脉动频率的降低，对于开机过程，当PV值从1.5 MPa·L增大为3.5 MPa·L时，对应频率由3.3 Hz降低为1.7 Hz，下降了48%；对于关机过程，当PV值从1.5 MPa·L增大为3.5 MPa·L时，对应频率由4.8 Hz降低为3.1 Hz，下降了35%．

4.3　主路长度的影响

不同主路长度下输送系统瞬变过程水击变化情况如表7与表8所示．长管路瞬变过程发生的水击更为显著，随着主路长度的增加，启动与关机过程的基准压力、峰值压力与最大振幅均不断增加，分析认为：随着主路长度增加，流动工质质量增加，所携带的总动能增加，开关机过程中更多动能转化为压力能，导致压力幅值提高．关机过程对管路长度的变化更为敏感．当主路长度从7.4 m增加至14.8 m时，启动与关机的峰值压力分别由0.76 MPa与0.95 MPa增大为0.94 MPa与1.66 MPa，分别增大了19%与43%．

表7　不同主路长度下启动过程水击压力与脉动频率变化

主路长度/m	稳定压力/MPa	峰值压力/MPa	最大振幅/MPa	脉动频率/Hz
3.7	0.34	0.64	0.30	3.3
7.4	0.37	0.76	0.39	2.1
11.1	0.40	0.86	0.46	1.9
14.8	0.43	0.94	0.51	1.8

表8　不同主路长度下关机过程水击压力与脉动频率变化

主路长度/m	稳定压力/MPa	峰值压力/MPa	最大振幅/MPa	脉动频率/Hz
3.7	0.42	0.82	0.40	3.8
7.4	0.46	0.95	0.49	3.4
11.1	0.50	1.31	0.81	3.2
14.8	0.54	1.66	1.12	3.0

随着主路长度的增加，启动过程与关机过程对应的压力脉动频率均明显降低，这是由于随着主路长度增加，结构等效刚度下降，因此压力脉动频率降低．当主路长度由7.4 m增加1倍时，启动与关机的脉动频率分别降低了14%与12%．

4.4　阀门流量特性的影响

阀门流量特性对输送系统瞬变过程水击的影响如表9与表10所示，两种瞬变过程下快开阀引起的水击现象严重．对于启动过程，快开阀的峰值压力分别是线性阀与等百分比阀的1.42倍与1.83倍，三

表9　不同阀门特性下启动过程水击压力与稳定时间变化

阀门特性	稳定压力/MPa	峰值压力/MPa	最大振幅/MPa	稳定时间/s
快开阀	0.37	1.08	0.71	5.2
线性阀	0.37	0.76	0.39	4.2
等百分比阀	0.37	0.59	0.22	4.1

表10　不同阀门特性下关机过程水击压力与稳定时间变化

阀门特性	稳定压力/MPa	峰值压力/MPa	最大振幅/MPa	稳定时间/s
快开阀	0.37	4.37	4.00	139.8
线性阀	0.37	0.95	0.58	116.6
等百分比阀	0.37	0.83	0.46	113.3

者对应的稳定时间分别为5.2，4.2，4.1 s；对于关机过程，快开阀的峰值分别是线性阀与等百分比阀的4.6倍与5.3倍，三者对应的稳定时间分别为139.8，116.6，113.3 s．

4.5　敏感性分析

采用响应面的方法对瞬变过程中氧输送管道的峰值压力与脉动频率进行敏感性分析，首先将上述所有工况的计算结果作为设计点自定义创建试验设计表，将推进剂流量、蓄压器PV值、主路长度与阀门开度指数四个影响因素作为输入量，启动过程与关机过程截止阀阀前的峰值压力与脉动频率作为输出量，响应面求解方法选择Kriging方法进行求解分析[27]．表11展示了四种因素对于启动与关机瞬变过程中峰值压力与脉动频率的敏感性．对于峰值压力，两种瞬变过程中，推进剂流量与主路长度呈现正相关，蓄压器PV值与阀门开度指数呈现负相关，四种因素中，推进剂流量对于峰值压力影响最强，主路长度对于峰值压力的影响最弱．对于脉动频率，蓄压器PV值与主路长度呈现负相关，并且蓄压器PV值与主路长度对脉动频率影响显著而推进剂流量与阀门开度指数对其影响较小．

表11　瞬变过程峰值压力与脉动频率敏感性

敏感因素	峰值压力		脉动频率	
	开机	关机	开机	关机
推进剂流量	0.61	0.63	0.01	0.01
蓄压器PV值	−0.11	−0.29	−0.60	−0.93
主路长度	0.08	0.05	−0.72	−0.30
阀门开度指数	−0.20	−0.33	0.01	0.01

5　结论

a．氧输送管路系统启动过程三通管支路段与泵前管路均出现了开机水击现象，峰值流量约为稳定流量的1.2倍；关机过程三通管支路段出现流量振荡而下游泵前管路流量振荡不明显．关机过程水击峰值约为稳定压力的5倍，且峰值压力与脉动频率均大于开机启动过程．

b．推进剂流量、主路长度与瞬变过程中水击压力呈现正相关作用，蓄压器PV值、阀门开度指数与水击压力呈现负相关作用，其中推进剂流量的相关性最强．当流量由210 kg·s^{-1}增大至290 kg·s^{-1}时，启动与关机对应的水击最大振幅分别增大7倍与4倍．

c．推进剂流量与阀门流量特性对瞬变过程中脉动频率的影响较小，蓄压器PV值与主路长度对于脉动频率呈现负相关作用且相关性较强．当主路长度由7.4 m增加1倍时，启动与关机过程的脉动频率分别降低了14%与12%．

d．工程上可以通过增大蓄压器PV值、使用等百分比阀等措施，降低瞬变过程中水击峰值压力进而削弱水击现象．

参　考　文　献

[1] The State Council Information Office of the People′s Republic of China．China′s Space Activities in 2016[R]．Beijing：The State Council Information Office of the People′s Republic of China，2016．

[2] KLEIN S，TRAUDT T，BOMBARDIERI C，et al．Damping of water hammer with cavitation in rocket engine feed lines[C]// Proc of 32nd International Symposium on Space Technology and Science．Fukui：[s.n.]，2019：2019-e-40．

[3] KUMAR A，SATYA PRASAD P，RAGHAVENDRA RAO M．Experimental studies of water hammer in propellant feed system of reaction control system[J]．Propulsion and Power Research，2018，7(1)：52-61．

[4] 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．

[5] 董晨钟．水击基本理论研究[D]．郑州：郑州大学，2014：24-27．

[6] 李文勋．水力学中的微分方程及其应用[M]．上海：上海科学技术出版社，1982．

[7] WYLIE E B，STREETER V L，SUO L S．Fluid transients in systems[M]．Englewood Cliffs，NJ：Prentice Hall，1993．

[8] 侯咏梅．水击理论与计算研究[D]．郑州：郑州大学，2003：33-37．

[9] 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．

[10] 魏鑫，孙冰，于子文，等．火箭推进系统充液管路的流固耦合动响应分析[J]．航空动力学报，2010，25(4)：852-856．

[11] 周晨初，李舒欣，陈宏玉，等．液体火箭发动机关机水击特性仿真[J]．火箭推进，2021，47(1)：70-75．

[12] 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．

[13] 高远皓，张晓光，马冬英，等．大推力液氧煤油发动机半系统装置降水击关机方案研究[J]．载人航天，2022，28(5)：683-689．

[14] 石奇玉，方晓辉，张伟．发动机试验台管路关机水击仿真[J]．机械工程与自动化，2022，51(4)：100-102．

[15] 徐峰，刘英元，陈海峰．火箭发动机水击压力数值模拟分析[J]．火箭推进，2012，38(1)：72-75．

[16] KLEIN S，TRAUDT T，OSCHWALD M．Comparison of water and cryogenic fluid hammer experiments for rocket engine feed line systems[J]．Experiments in Fluids，2023，64(2)：30．

[17] MOORE J D，GILBERT J，BRINDLE B，et al．Priming event peak pressures in liquid propulsion systems[J]．Journal of Spacecraft and Rockets，2019，56(3)：899-909．

[18] 何康康，娄振．基于AMESim的姿控发动机推进剂供应管路优化设计[J]．导弹与航天运载技术，2016(3)：9-12．

[19] 李树勋，王虎斌，范宜霖，等．氮气式水击泄压阀初启阶段动态特性研究[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2016，44(7)：10-13．

[20] 张鹏，程云开，杨志松，等．液体火箭发动机供应系统水击特性仿真[J]．现代机械，2023(3)：6-10．

[21] 张育林，刘昆，程谋森．液体火箭发动机动力学理论与应用[M]．北京：科学出版社，2005．

[22] 李翠，程亦薇，庄钰涵，等．液体火箭压差控制交叉输送特性研究[J]．西安交通大学学报，2020，54(4)：165-172．

[23] 杜飞平，李翠，程亦薇，等．液体火箭推进剂交叉输送系统方案对比研究[J]．航空动力学报，2025，40(4)：20220666．

[24] 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．

[25] 陈勇，李隆键，程静．液氧输送管路中阀控瞬变的数值计算[J]．哈尔滨工业大学学报，2013，45(9)：75-81．

[26] 张淼，李程，王飞，等．液氧煤油发动机氧系统双机耦合振荡频率特性[J]．导弹与航天运载技术，2022(2)：38-43．

[27] 杜晓佳，朱显明，丁凡，等．基于Kriging代理模型的舰船桅杆雷达隐身优化[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2020，48(10)：109-113．