

运载火箭复杂管路随机性压力跳变机理及抑制

陈二锋^{1,2}, 娄路亮¹, 田原³, 邵业涛³, 周智勇¹

(1. 中国航天科技集团有限公司 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;

2. 北京宇航系统工程研究所 深低温技术研究北京市重点实验室, 北京 100076;

3. 中国航天科技集团有限公司 北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 针对 3 种典型的管路随机性压力跳变现象, 通过仿真分析, 提出管路中的直角多通结构使管内流动具有非线性的流动多解特性, 在特定扰动条件下, 会产生多通内的大涡结构及沿分支管的螺旋流动, 引起额外的流阻, 并导致管路局部压力发生跳变, 从机理上复现了复杂管路内的随机性压力跳变现象; 在此基础上, 提出了增加导流结构/隔板结构抑制多通内大涡流动的改进方案, 并针对真实管路结构, 开展了管路压力跳变现象的地面复现及抑制改进试验, 试验结果表明: 3 种直角多通结构均存在流动多解特性, 增加导流结构可有效消除管路中的随机性压力跳变现象。

关 键 词: 随机性压力跳变; 流动稳定性; 螺旋流; 多通管路; 非线性

中图分类号: V431

文献标志码: A

Mechanism and suppression of random pressure jump in complex pipeline system of launch vehicles

CHEN Erfeng^{1,2}, LOU Luliang¹, TIAN Yuan³, SHAO Yetao³, ZHOU Zhiyong¹

(1. Beijing Institute of Astronautical systems Engineering,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100076, China;

2. Beijing Key Laboratory of Cryogenic Technology Research,

Beijing Institute of Astronautical systems Engineering, Beijing 100076, China;

3. Beijing Aerospace Propulsion Institute,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100076, China)

Abstract: In view of at three random typical pressure jump phenomena due to complex pipeline layout and high flow velocity, the nonlinear multi-solution flow characteristics in right-angle multi-way pipeline were proposed by numerical simulation. Under certain disturbance conditions, a large eddy in the multi-way cavity and spiral flow along the branch pipeline were formed, which caused additional flow resistance and local pressure jump in complex pipeline. On the basis, in order to eliminate the large eddy in the multi-way cavity, the suppression scheme by appending guide devices or baffles was proposed. With the actual pipeline layout, the ground recurrence test and suppression improvement test of random pressure jump phenomena were carried out. The experimental results indicated that the multi-solution characteristics of the three complex multi-way pipeline were validated, and the improved scheme can effectively eliminate the random pressure jump phenomena.

收稿日期: 2022-05-29

基金项目: 国家自然科学基金企业联合基金(U1937602)

作者简介: 陈二锋(1980—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为流体传动分析与设计。E-mail: xiaole3549@126.com

引用格式: 陈二锋, 娄路亮, 田原, 等. 运载火箭复杂管路随机性压力跳变机理及抑制[J]. 航空动力学报, 2022, 37(12): 2762-2770. CHEN Erfeng, LOU Luliang, TIAN Yuan, et al. Mechanism and suppression of random pressure jump in complex pipeline system of launch vehicles[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(12): 2762-2770.

Keywords: random pressure jump; flow instability; spiral flow; multi-way pipeline; nonlinear

运载火箭动力系统管路空间布局复杂、内部介质流速高,遥测及地面数据表明,对于特定的管路结构,在管路上下游边界确定的条件下,流场中局部压力会发生随机性的压力跳变现象,该现象既可以发生在气路,也可以发生在液路。

管路内单相介质的流动形态通常被认为是一种确定性流动,解是唯一的。近年来,随着认识的深入,管路内流动形态除了常见的正常流型外,还存在一种特殊的稳定流动形式——螺旋流。螺旋流通常由涡流发生器产生,并利用介质在管内的旋转特性,在工业中常被用于强化换热、清洗污垢^[1]。然而,日本学者 Horii 等^[2-3]试验发现一些特殊的管路结构会自发产生稳定的螺旋流现象,但对于为何会产生螺旋流以及管路结构形状、几何参数对螺旋流的形成与发展有何影响却不甚清楚;国内方面,熊鳌魁等^[4-5]针对子午面内径向向心射流的管路开展了介质水的验证试验,认为不对称的双涡在相互作用后卷并为一个涡是产生螺旋流的根源,同时开展了螺旋流流动现象的仿真分析,提出湍流模型是螺旋流数值模拟的一个主要障碍,并且对螺旋流的预测几乎暴露了现有湍流模型的不足。吴金星、郭永辉、梁俊等^[6-8]开展了螺旋流流型仿真及湍流模型适用性的研究,建议采用 2 阶的 RNG(renormalization group) $k-\varepsilon$ 模型。RNG $k-\varepsilon$ 模型是从瞬态 Naiver-Stokes(N-S)方程导出的,运用了一种叫 RNG 理论的数学技巧方法^[9],使 RNG $k-\varepsilon$ 模型比标准 $k-\varepsilon$ 模型对瞬变流和流线弯曲影响的预测能力得到了加强。谢福寿、孙善秀^[10-13]等通过仿真和试验,提出了输送管五通内存在的两个稳定流动解,并在随机性扰动激励下两种流型的切换导致了管路中的随机性压力跳变现象,但对于这种流动多解现象的机理及产生条件仍缺乏进一步的深入研究。对于低温火箭发动机多分支管路供给系统,许多国外学者^[14-19]开展了输送管路布局及优化设计的相关研究,提出在低温发动机供给系统中的不合理设计和微弱扰动容易产生不稳定的流动,从而造成管路损坏。

本文针对运载火箭 3 种典型的管路随机性压力跳变现象,提出了直角多通结构存在的流动多解及强螺旋流流态,并通过仿真分析获得了两种稳定流型,从机理上复现了复杂管路内的压力跳变现象,在此基础上,提出了增加导流结构抑制

多通内大涡流动的改进方案,有效消除了管路中的压力跳变现象,目前均已通过试验验证。

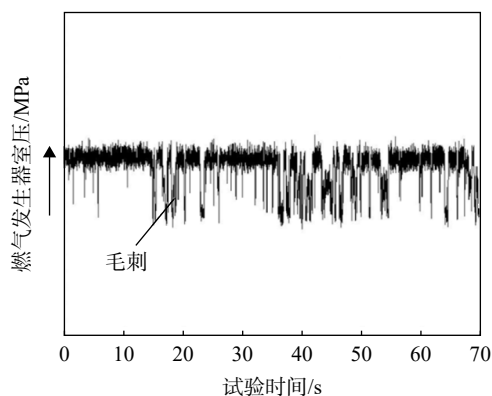
1 运载火箭复杂管路随机性压力跳变现象

运载火箭动力系统典型的多通管路随机性压力跳变现象如下:

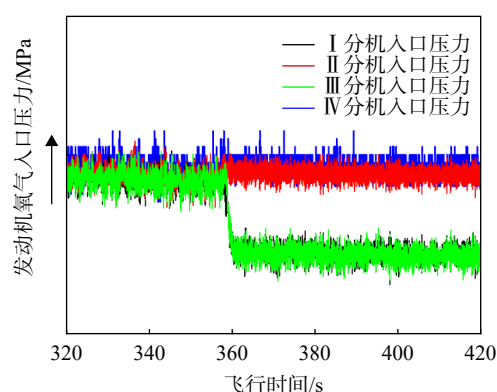
1) YF-77 发动机燃气发生器室压的随机性脉动现象。燃气发生器产生的燃气,通过直角燃气三通被分成两路,一路驱动氧涡轮泵,一路驱动氢涡轮泵;燃气三通为球底结构,试车及遥测数据表明,燃气发生器室压存在随机性的压力脉动现象,即压力测点在平稳段突然向下跳至一新的水平,然后持续较短的时间后又恢复为正常水平,压力脉动一般出现在发动机高、中工况条件,压力脉动幅值最大为 4%。由于单次压力跳动的持续时间较短,反映到全程压力曲线上,类似于“毛刺”现象,具体见图 1(a)。

2) 新一代低温运载火箭二级氧输送系统采用直角五通进行分流,将总管路中的液氧推进剂分别输送到 4 台发动机,多发遥测数据显示,在五通上、下游边界不变的条件下,两对称分支管发生了压力下跳的现象,且发生时刻及发生管路具有一定随机性,见图 1(b)。

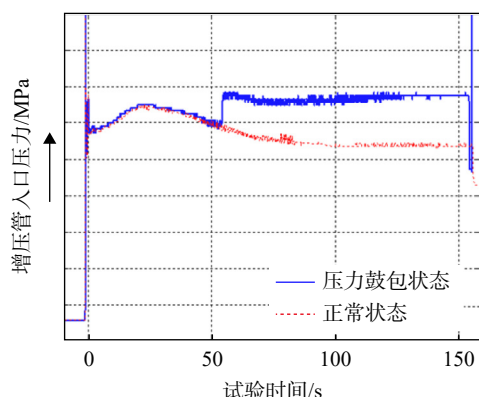
3) 常规在役液体运载火箭一级燃增压系统采用燃气自生增压,利用直角三通实现地面溢出排气与箭上增压管路的共用,遥测统计数据表明,约 30% 发次的燃增压管入口压力曾发生过压力鼓包现象,即入口压力在工作段某一时刻突然陡增并维持该压力水平一定时间,且发生时刻、发次具有一定的随机性,见图 1(c)。



(a) 燃气发生器室压随机性脉动现象



(b) 五通对称分支管压力下跳现象



(c) 一级燃增压管压力鼓包现象

图 1 典型的管路随机性压力跳变现象

Fig. 1 Typical random pressure jump phenomena in the pipelines

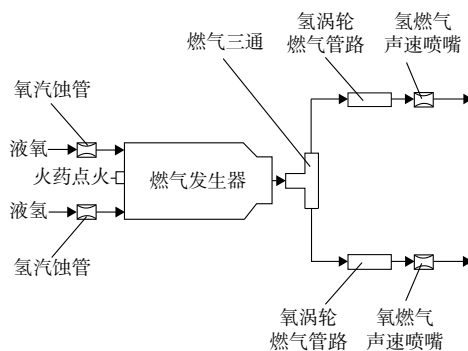
3 种典型的管路随机性压力跳变现象均具有以下共同点: ①管路中均存在直角多通结构; ②压力跳变现象发生具有随机性。考虑到管路的上、下游边界条件一定, 因此, 本文的研究对象将重点针对管路中的直角多通结构, 开展流动多解及螺旋流的仿真及试验验证。

2 典型复杂管路压力跳变现象仿真分析

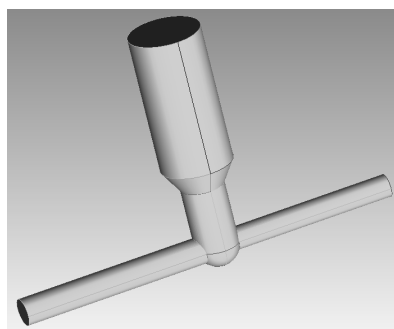
2.1 燃气发生器室压脉动现象仿真分析

2.1.1 研究对象

燃气发生器是 YF-77 发动机的一个重要组合件, 其工作原理示意如图 2(a) 所示。发动机的氢、氧推进剂通过发生器的喷嘴喷入燃烧室, 经过雾化、蒸发、混合、燃烧等过程, 产生高温燃气, 并通过燃气三通被分成并联的两路, 经声速喷嘴分别驱动氢、氧涡轮泵。为简化计算, 不考虑燃气喷嘴的建模, 燃气三通计算模型见图 2(b)。



(a) 燃气发生器工作原理



(b) 燃气三通结构

图 2 燃气发生器工作原理示意图及三通结构

Fig. 2 Schematic diagram of working principle of gas generator and three-way pipeline

2.1.2 仿真模型

采用结构化网格, 网格数量约为 50 万, 如图 3 所示。介质为燃气, 入口采用压力边界, 为 7.98 MPa; 两分支管为流量边界, 分别对应氧涡轮侧流量和氧涡轮侧流量。仿真软件分别采用 CFX、Fluent 两种软件, 其中 CFX 采用默认的全隐式耦合算法, 对流项采用高阶格式; Fluent 采用 Coupled 压力-速度耦合算法, 为捕捉三通内的复杂流型, 采用默认入口压力边界和施加瞬时旋转扰动入口压力边界两种方式。对于瞬时旋转扰动

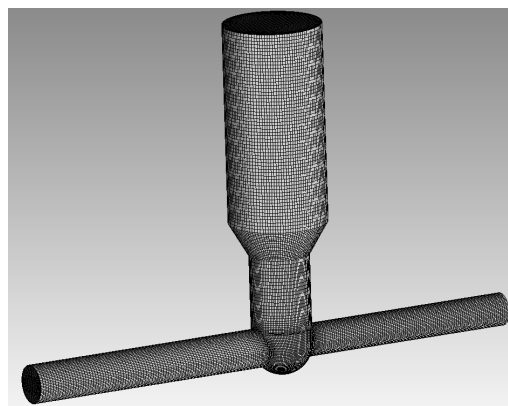


图 3 燃气三通计算网格

Fig. 3 Computational grid of three-way gas pipeline

边界,进口压力初始设定斜 45°入射方向,在三通内获得旋转初场,然后再改为默认的入口压力边界,继续计算;湍流模型均采用标准 $k-\varepsilon$ 模型。收敛残差均小于 6.0×10^{-6} 。

2.1.3 仿真结果分析

固定氧涡轮侧质量流量(文中简称为流量)为 1.926 kg/s,调整氢涡轮侧流量,可得到不同软件、不同算法、不同氧燃分流比条件下的三通内流型见图 4、图 5。从图中可以看出,燃气三通流型复杂,且随分流比变化存在两种流型:螺旋流和分叉流,前者三通内存在明显大涡结构(见图 4(a)),使得分支管内为螺旋流动,流速相比分叉流明显增加,氧、氢涡轮侧流阻分别增大 0.33、0.35 MPa。当三通内流型由螺旋流突变为分叉流时,管路流阻减小,下游燃气声速喷嘴前压力升高,流量增大,由于燃气发生器入口流量一定,因此会使得燃气发生器室压向下脉动,从机理上解释了图 1(a)中燃气发生器室压的随机性压力脉动现象。

另一方面,不同软件及算法对流型捕捉存在明显差异,螺旋流动仿真目前仍不成熟。采用 CFX 软件时,计算表明当氧、氢侧燃气分流比小

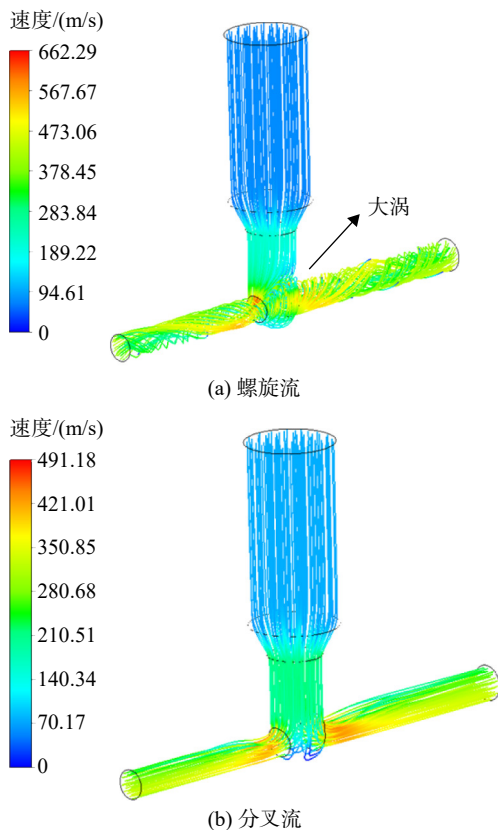


图 4 燃气三通两种典型流型

Fig. 4 Two flow patterns in three-way pipeline

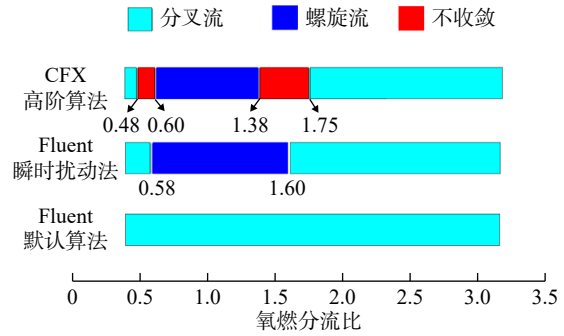


图 5 不同软件、不同分流比燃气三通仿真结果

Fig. 5 Three-way simulation result at different softwares and different split ratios

于 0.48 或大于 1.75 时,流型倾向于分岔流状态;当氧、氢侧燃气分流比在 0.6~1.38 之间时,三通内存在明显大涡结构,分支管流型倾向于螺旋流状态;而当氧、氢侧燃气分流比介于 0.48~0.60、1.38~1.75 间时,同样的算法却不收敛(残差大于 1.0×10^{-4}),且通过调整算法、网格仍无法获得收敛解,因此,可认为流型处于螺旋流和分叉流的过渡区;而采用 Fluent 软件时,默认算法均可得到常见的分叉流流型,但在压力入口施加瞬时旋转扰动后,当分流比介于 0.58~1.60 间时,可得到稳定的螺旋流流型,即该分流比区间工况可能存在两种稳定流型。

图 6 中展示了研制阶段不同工况条件下,燃气发生器室发生压力脉动现象的试车统计结果。从试车结果中可以看出,当氧、氢侧的燃气分流比处于 0.49~0.60 的中、高工况时,燃气发生器易发生异常的压力毛刺现象(如图 1 所示),该流量比刚好落于 CFX 仿真结果中螺旋流和分叉流的过渡区(分流比为 0.48~0.60),因此,燃气发生器异常的压力脉动现象应与燃气三通在特定分流比范围内的流型突变相关,以下通过地面缩比试

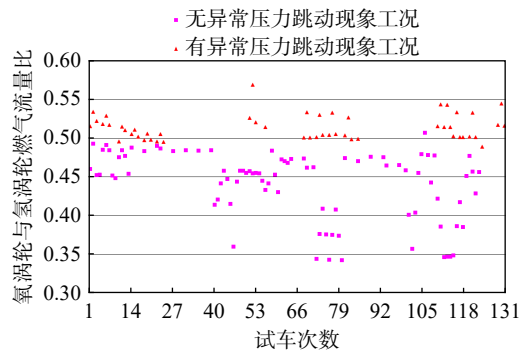


图 6 燃气发生器压力脉动试车统计结果

Fig. 6 Statistical results of pressure pulsation phenomena of gas generator's ground testing

验和试车开展了进一步验证。

2.2 五通分支管压力下跳现象仿真分析

2.2.1 研究对象

某新一代低温运载火箭二级氧输送管路示意图见图 7, 输送总管内径为 240 mm, 通过球形五通和分支管分流至 4 台发动机, 分支管内径为 120 mm。五通入口采用压力边界, 压力为 0.40 MPa; 出口为流量边界, 各分支管流量为 38.6 kg/s。



图 7 二级氧输送管路示意图

Fig. 7 Schematic diagram of two-stage liquid oxygen delivery pipeline

2.2.2 仿真模型

采用结构化网格, 网格数量约为 168 万, 如图 8 所示。介质为液氧, 五通入口为压力边界, 压力为 0.28 MPa; 出口为流量边界, 各分支管流量为 38.6 kg/s。仿真软件采用 CFX 默认的全隐式耦合算法, 对流项采用高阶格式, 湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型。收敛残差均小于 1.0×10^{-6} 。

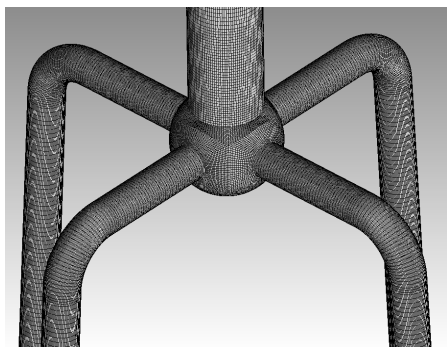


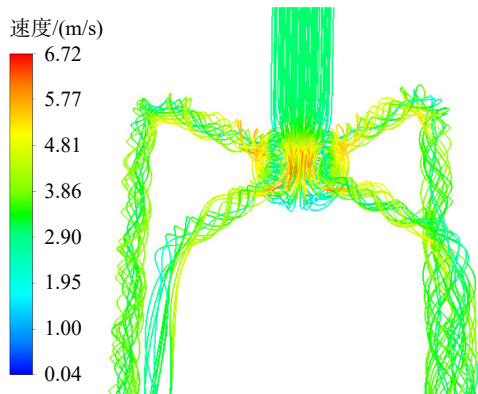
图 8 输送路五通计算网格

Fig. 8 Computational grid five-way delivery pipeline

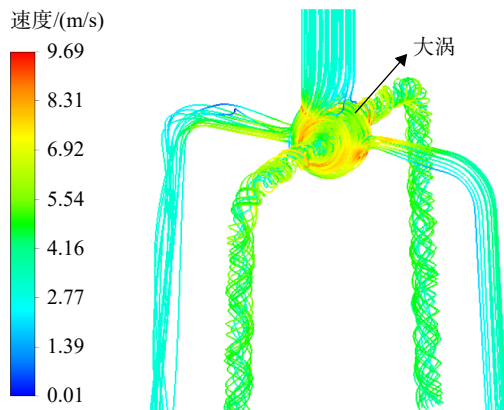
2.2.3 仿真结果分析

分别采用默认初场条件和瞬时初始扰动条件, 可分别得到两种稳定流型^[12], 见图 9(a)和图 9(b)。对于默认初场条件, 在五通内部形成了对涡结构,

五通内流场为镜面对称, 4 个分支管出口压力一致; 而在初始瞬时扰动条件下, 五通内形成了一个稳定的纵向大涡结构, 使得两对称分支管形成明显的螺旋流, 局部流阻明显增加, 由于五通入口压力不变, 从而使两分支管出口压力出现明显下跳。



(a) 对涡流型 (默认初场)



(b) 螺旋流型 (瞬时扰动初场)

图 9 输送路五通的两种流型

Fig. 9 Two flow patterns in five-way delivery pipeline

2.3 燃增压管入口压力鼓包现象仿真分析

2.3.1 研究对象

常规在役液体运载火箭一级燃增压管路布局见图 10。发动机燃气通过底端的自生增压管入口流入管系, 经溢出管进入燃箱增压, 自生增压管内径为 63 mm, 通过三通与溢出管连接, 三通主

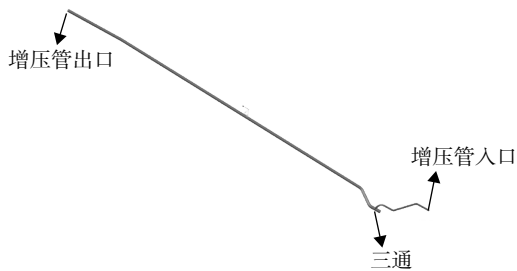


图 10 增压管路布局

Fig. 10 Pressurization pipeline layout

路内径为 104 mm, 三通另一端连接安溢阀; 溢出管内径为 100 mm, 长度为 9 m。

2.3.2 仿真模型

采用结构化网格, 网格数量约为 80 万, 如图 11 所示。介质为燃气, 入口为流量边界, 流量为 0.96 kg/s, 温度为 593 K; 出口为压力边界, 压力为 0.28 MPa。仿真软件采用 CFX 默认的全隐式耦合算法, 对流项分别采用迎风格式(upwind) 和高阶格式(high resolution), 湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型。收敛残差均小于 1.0×10^{-6} 。

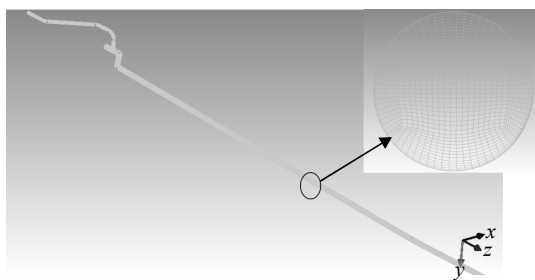
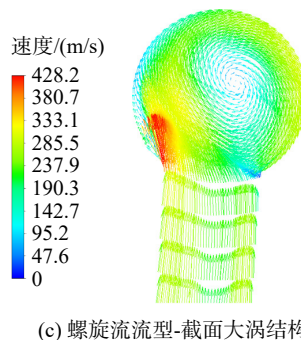
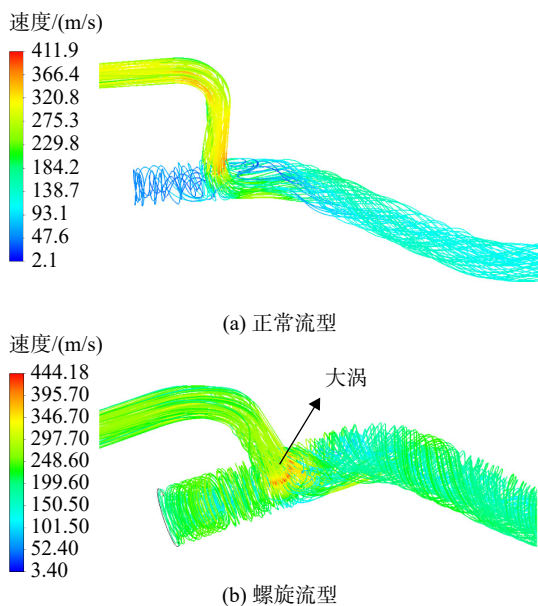


图 11 增压管计算网格

Fig. 11 Computational grid of pressurization pipeline

2.3.3 仿真结果分析

计算表明, 对流项分别采用迎风格式和高阶格式, 均能得到一个收敛的稳定解, 一种为正常流型, 管路流阻为 0.041 MPa; 一种为螺旋流型, 三通内存在明显大涡结构, 管路流阻为 0.078 MPa, 两种流型及截面大涡结构见图 12。当流型由正常流型过渡到螺旋流型时, 由于管路局部流阻增加, 导致增压管入口压力上升, 出现压力鼓包现象。



(c) 螺旋流流型-截面大涡结构

图 12 增压管内两种流型

Fig. 12 Two flow patterns in pressurization pipeline

对于 CFX 两种算法可以获得完全收敛的两个稳定解, 从常规仿真及认知角度, 这并不是一个正常现象。进一步地, 分别采用 Fluent 基于压力的算法和基于密度的算法, 计算表明, 也可以获得这两个收敛的稳定解, 结合遥测数据的压力跳变现象, 可认为这个管路系统是存在两种解的, 只不过不同算法捕捉到了不同流型。

3 典型复杂管路压力跳变现象地面复现及抑制

3.1 燃气发生器室压随机性脉动现象的地面复现及抑制

3.1.1 地面缩比复现试验及抑制

燃气发生器结构尺寸按 40% 缩比, 采用氮气介质, 分流比试验结果见图 13。从图中可以看出, 当三通两分支路分流比小于 0.51 时, 燃气路无随机性压力脉动现象; 当分流比在 0.51~0.63 之间时, 燃气发生器室压会出现随机性的压力毛刺。当分流比大于 0.63, 压力毛刺又消失。该试验结果与仿真结果基本相一致, 即: 燃气三通在特定分流比范围内呈现流动多解的特征, 两种流型的随机性切换导致了燃气发生器室压及燃气路压力的脉动现象。当在三通内增加筛孔式整流栅后, 燃气发生器室压的压力毛刺现象消失, 见图 13(b) 和图 13(c)。

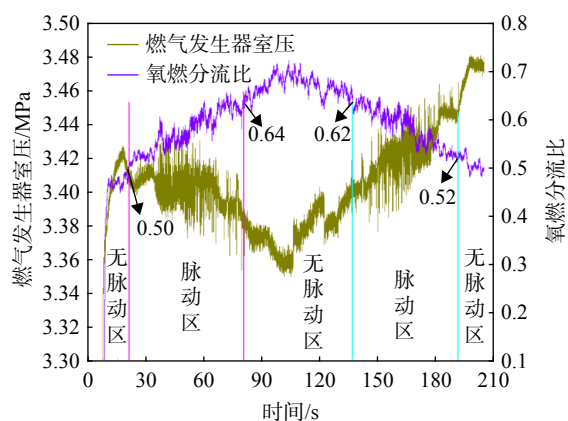
3.1.2 试车验证

燃气三通内增加整流栅后, 试车结果见图 14, 从图中可以看出, 整流栅结构可有效消除燃气发生器室压的随机性脉动现象。

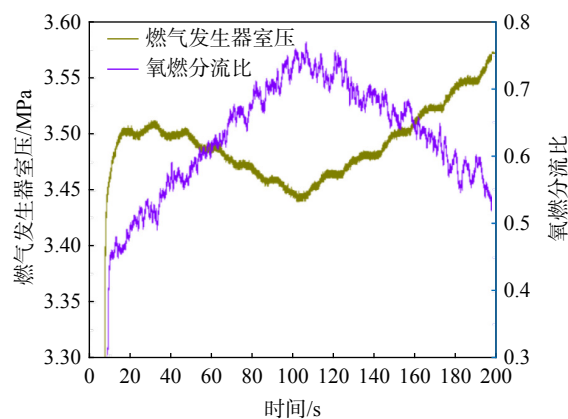
3.2 五通对称分支管随机性压力跳变现象地面复现及抑制

地面复现试验采用真实输送管路及五通结构、液氧介质、挤压出流方案, 典型试验结果见图 15, 从图中可以看出, 地面试验过程中两对称分支管

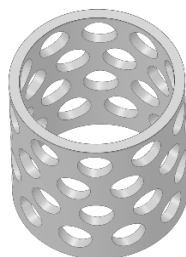
出现了压力下跳现象,且具有随机性,第一次试验为 I、III 分机入口压力下跳,重复试验时,为 II、



(a) 无整流栅状态



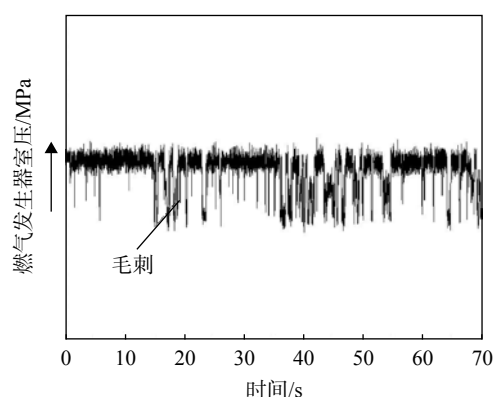
(b) 带整流栅状态



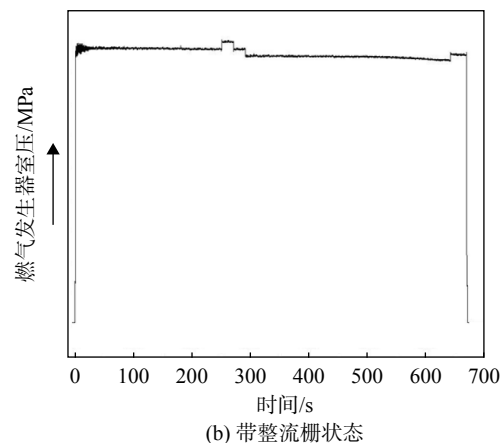
(c) 筛孔式整流栅

图 13 燃气发生器地面分流比试验

Fig. 13 Ground experiment of gas generator split ratio



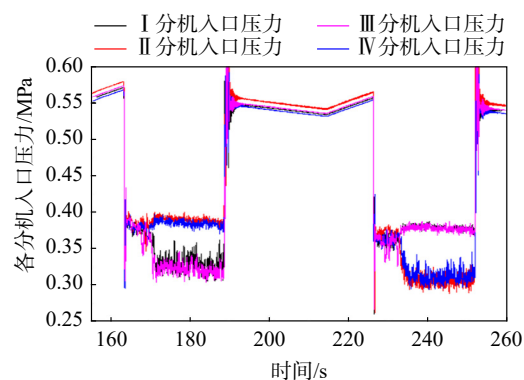
(a) 无整流栅状态



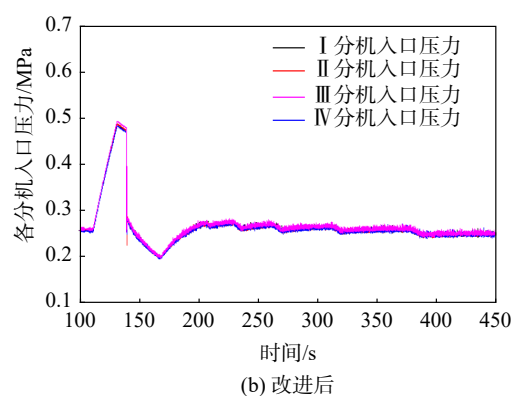
(b) 带整流栅状态

图 14 燃气三通流动稳定性抑制及验证

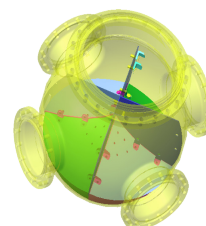
Fig. 14 Design improvement and verification of flow stability in three-way gas pipeline



(a) 改进前



(b) 改进后



(c) 五通内导流结构

图 15 输送路五通流动稳定性抑制及验证

Fig. 15 Design improvement and verification of flow stability in five-way delivery pipeline

IV 分机入口压力下跳。在输送路五通内增加导流后, 同样试验边界下, 各分支管压力变化规律趋于一致, 有效消除了五通对称分支管的随机性压力跳变现象, 目前, 已通过飞行试验考核验证。

3.3 燃增压管入口压力随机性鼓包现象地面复现及抑制

地面复现试验采用真实增压管路结构、氮气介质, 三通安溢阀侧采用电控调节, 典型试验结果见图 16, 从图中可以看出, 在安溢阀侧流量变

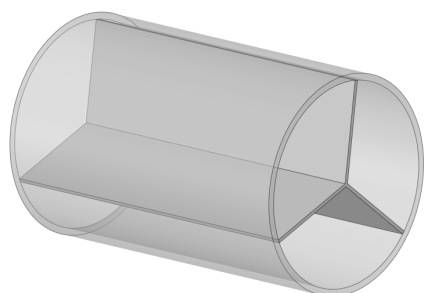
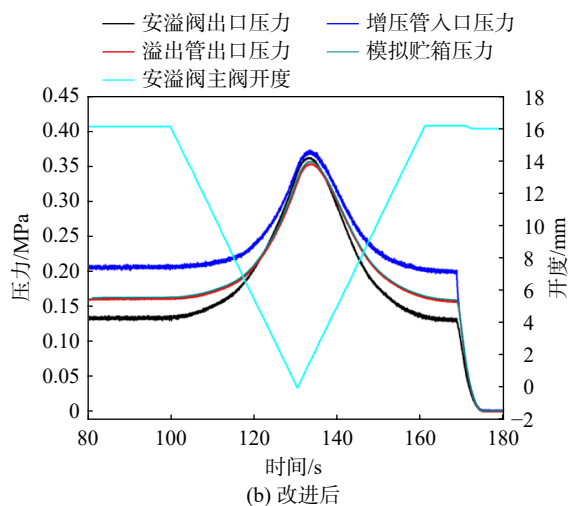
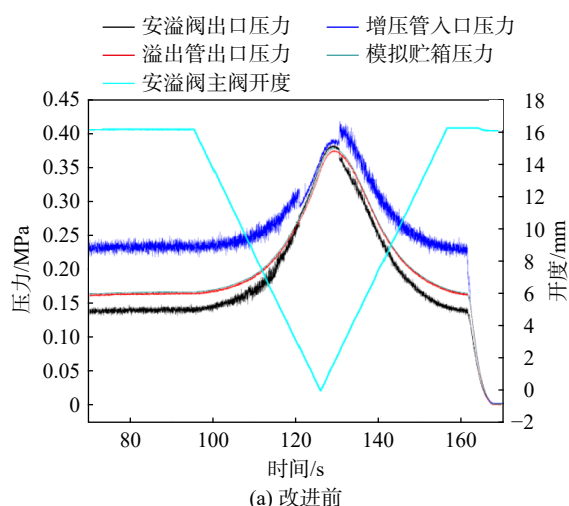


图 16 增压路三通流动稳定性抑制及验证

Fig. 16 Design improvement and verification of flow stability in three-way pressurization pipeline

化的扰动下, 增压管入口压力出现了随机性的压力鼓包现象, 当增压管内增加隔板后, 具体结构见图 16(c), 同样试验边界下, 增压管入口压力鼓包现象消失, 各压力曲线变得平滑。

4 结 论

本文针对 3 种典型的复杂管路随机性压力跳变现象, 通过理论分析、数值仿真和试验验证, 开展了复杂管路流型及流动多解特性的研究, 得到了以下结论:

1) 提出了复杂管路直角多通的流动多解及螺旋流流态, 从机理上解释了特殊管路内发生的随机性压力跳变现象。

2) 针对 YF-77 发动机燃气发生器室压的随机性脉动现象, 通过仿真分析、试验验证, 获得了燃气路三通在特定分流比范围内存在的两种流型, 当受某特殊扰动后, 管路内流型突变为螺旋流, 局部流阻增加, 燃气发生器室压发生随机性跳变。

3) 采用增加导流或隔板的方式, 抑制多通内的大涡结构, 可有效消除管内的螺旋流动及压力跳变现象, 目前, 3 种抑制方案均已得到了试验验证; 其中, YF-77 发动机燃气发生器三通增加整流栅方案已通过全系统试车验证, 有效消除了燃气发生器室压的随机性脉动现象。

4) 螺旋流作为一种典型的非线性流体力学现象, 目前认为是由 Coanda 效应与流动不稳定性产生的。在三通、五通类结构内部, 流体存在向凹表面吸附的趋向, 在某种条件下会形成沿内壁的大涡结构, 进而导致螺旋流的产生, 目前的研究多偏重于工业应用, 对内部机理及流场突变条件仍有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 张琳, 钱红卫, 宣益民, 等. 自转螺旋扭带管内三维流动与传热数值模拟[J]. 化工学报, 2005, 56(9): 1633-1638.
ZHANG Lin, QIAN Hongwei, XUAN Yimin, et al. 3D numerical simulation of fluid flow and heat transfer in self-rotating twisted-tape-inserted tube[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2005, 56(9): 1633-1638. (in Chinese)
- [2] HORII K, MURATA T, TAKARADA M, et al. A study of spiral flow: phenomenon in a cylindrical pipe[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 1985, 28: 123-131.
- [3] HORII K, MURATA T, TAKARADA M, et al. A study of spiral flow: vortex phenomenon in a specially shaped bend[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 1988, 31: 71-78.
- [4] 熊鳌魁, 魏庆鼎. 一种强螺旋流现象的试验研究[J]. 流体力学

- 学试验与测量, 1999, 13(4): 8-13.
- XIONG Aokui, WEI Qingding. Experiment study on a sort of strong swirling flow[J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 1999, 13(4): 8-13. (in Chinese)
- [5] 熊鳌魁, 魏庆鼎. 一种强螺旋流现象的数值试验研究[J]. *空气动力学学报*, 2001, 19(1): 83-90.
- XIONG Aokui, WEI Qingding. Numerical studies on a sort of strongly swirling flows[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2001, 19(1): 83-90. (in Chinese)
- [6] 吴金星, 王超, 王明强, 等. 内置扭带管内湍流流动与传热数值模拟[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2017, 38(3): 10-14.
- WU Jinxing, WANG Chao, WANG Mingqiang, et al. Numerical Simulation of turbulent fluid flow and heat transfer in a circular tube with twisted tape inserts[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2017, 38(3): 10-14. (in Chinese)
- [7] 郭永辉, 刘朝. 圆管螺旋流的流动与传热数值模拟[J]. *工业加热*, 2007, 36(3): 27-31.
- GUO Yonghui, LIU Chao. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in the Spiral flow in pipe[J]. *Industrial Heating*, 2007, 36(3): 27-31. (in Chinese)
- [8] 梁俊, 饶永超, 王树立, 等. 天然气水合物管道螺旋流动与传热数值模拟[J]. *油气田地面工程*, 2018, 37(2): 6-11.
- LIANG Jun, RAO Yongchao, WANG Shuli, et al. Numerical simulation of spiral flow and heat transfer in natural gas hydrate pipe[J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2018, 37(2): 6-11. (in Chinese)
- [9] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence I: basic theory[J]. *Journal of Scientific Computing*, 1996(1): 1-15.
- [10] XIE F S, XIA S Q, CHEN E F, et al. Numerical simulation on instability flow behaviors of liquid oxygen in a feeding pipeline with a five-way spherical cavity[J]. *Energies*, 2020, 13(4): 926-947.
- [11] XIE F S, LI Y Z, WANG X B, et al. Experimental investigation of abnormal pressure drop in branch feed lines with a five-port spherical cavity in liquid oxygen engines[J]. *Cryogenics*, 2019, 104: 102994-103005.
- [12] XIE F S, MAO H W, LI Y Z, et al. Experimental investigation of pressure drop of feeding pipes of liquid oxygen in a five-way distribution cavity under different working states[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 163: 120458-120469.
- [13] 孙善秀, 叶超, 范稀木, 等. 复杂管路压力跳变的螺旋流解释[J]. *导弹与航天运载技术*, 2019, 5(2): 31-37.
- SUN Shanxiu, YE Chao, FAN Ximu, et al. Spiral flow explanation of internal flow pressure jump in complex pipeline[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2019, 5(2): 31-37. (in Chinese)
- [14] KIRIS C C, KWAK D, CHAN W, et al. High-fidelity simulations of unsteady flow through turbopumps and flowliners[J]. *Computers and Fluids*, 2008, 37(5): 536-546.
- [15] HARRIS CE, CRAGG CH, RAJU IS, et al. Orbiter LH₂ feedline flow liner cracking problem[R]. Hampton, US: NASA Langley Research Center, 2005.
- [16] KOBAYASHI K, OOWADA Y, ARITA M, et al. Development status of H-IIB launch vehicle propulsion system[R]. AIAA-2007-5451, 2007.
- [17] CHO IH, JUNG TK, JUNG YS, et al. Development of Korea sounding rocket: III propulsion feeding system[R]. AIAA-2003-4899, 2003.
- [18] SEKITA R, KUBOTA I. Flow analyses and test results for the H-IIA first stage LH₂ feedline[R]. AIAA-2002-3844, 2002.
- [19] VU B, GARCIA R. Flow analysis of X-34 main propulsion system feedlines[R]. AIAA-2000-3722, 2000.

(编辑: 王碧珺)