固冲发动机转级过程中进气道动态特性分析

杨石林*, 张晓旻, 齐红亮, 李璞

中国航天科技集团四院四十一所, 西安 710025

* E-mail: yamaz@163.com

收稿日期: 2014-08-30; 接受日期: 2014-11-04

摘要 针对进气道出口、入口打开的先后顺序, 开展了两种打开方案进气道流场数值模拟研究, 获得了两种方案进气道动态特性、起动时间及压强峰值. 研究表明, 出口先开、入口后开方案进气道起动时间短且压强峰值小, 更有利于固冲发动机的转级过程; 同时研究结果可为固冲发动机转级时序的确定提供参考, 为进气道结构设计提供依据.

关键词

进气道入口堵盖
出口堵盖
打开顺序
转级
数值模拟

1 引言

固体火箭冲压发动机通过转级实现助推段和冲压续航段的衔接, 转级过程包括进气道入口、出口的打开, 助推段时, 进气道入口封堵, 防止进气道处于兜风状态, 使进气道和发动机产生结构性破坏; 而在冲压续航段, 进气道入口需打开, 使进气道能够捕获来流. 转级过程中, 根据入口、出口打开的先后顺序, 有两种不同的方案, 即方案 A(入口先开、出口后开), 方案 B(入口先开、出口后开), 两种方案涉及进气道的非稳定工作特性和转级时序的确定.

目前针对冲压发动机进气道动态特性的研究多集中在入口瞬时打开、出口封堵状态^[1-4], 对进气道入口、出口的动态打开过程研究的较少. 本文对进气道出、入口两种打开方案的进气道流场进行数值模拟研究, 比较其动态特性, 为固冲发动机转级时序的确定提供参考.

2 问题描述

进气道入口封堵主要有两种方式, 用整流罩将

飞行器的头部包裹起来, 在适当的时候再将整流罩抛掉, 如澳大利亚的 Hyshot11 飞行试验^[5]; 或通过某种方式先将进气道入口封堵, 接力时再将进气道打开, 如美国的 X-43A^[6], 实现该种打开方式有破碎式、自燃式和机械式等多种方式.

本文进气道采用四波系超音速二元进气道, 入口打开方式采用机械式, 进气道压缩面分为固定部分和运动部分, 运动部分绕固定轴做旋转运动, 封堵状态时, 通过机械传动机构保证运动部分支撑到进气道上唇口部位, 发动机转级时, 运动部分从封堵状态在很短的时间内(10 ms)绕固定轴旋转到位, 进气道入口开启; 进气道出口根据不同方案按时序封堵或打开, 图 1 给出了二维计算模型示意图.

3 理论基础和计算方法

3.1 理论基础

由于入口打开过程涉及到计算边界的移动, 求解区域的网格必须随时间不断更新, 需要对包含动边界的流动控制方程进行特殊的离散格式. 控制方

引用格式: 杨石林, 张晓旻, 齐红亮, 等. 固冲发动机转级过程中进气道动态特性分析. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 25-30

Yang S L, Zhang X M, Qi H L, et al. Analysis on dynamic characteristics of the inlet during the transition of a solid rocket ramjet (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 25-30, doi: 10.1360/N092014-00281

图1 计算模型示意图

(a) 封堵状态; (b) 开启状态

程采用非定常可压流动的守恒型 $N-S$ 方程的积分形式; 入口打开过程采用基于 ALE 方法的非结构动网格适应调整技术, 将网格变形和局部网格重构方法相结合, 在每一时间步内对网格进行更新, 来适应流场计算域与对应网格的相应调整, 借助 UDF 模拟入口堵盖移动时流场及网格结构的不断改变, 建立入口堵盖打开工作过程的瞬态数值模型. 运动区域的运动通过刚体运动学来实现, 事先指定质心的初始位置和刚体的运动方向, 通过给定的质心运动线速度或角速度, 更新每个时间步长的方向, 相关公式如下.

$$\text{质心位置: } x_c^{n+1} = x_c^n + v_c \Delta t; \quad (1)$$

$$\text{质心方向: } \theta_c^{n+1} = \theta_c^n + G \Omega_c \Delta t; \quad (2)$$

$$\text{刚体的位置向量: } x_r^{n+1} = x_c^n + v_c \Delta t + x_r^{n+1}. \quad (3)$$

公式中 x_c^{n+1} , x_c^n 分别表示运动刚体质心在当前

时刻 n 及下一时刻 $n+1$ 的位置, v_c 表示运动刚体质心运动线速度; θ_c^{n+1} , θ_c^n 分别表示运动刚体质心在当前时刻 n 及下一时刻 $n+1$ 的方向, Ω_c 表示运动刚体质心运动角速度, Δt 表示时间步长, G 表示运动刚体的总能.

3.2 网格及边界条件

采用 ICEM 进行网格生成, 为了提高计算精度及效率, 计算域分两部分, 以转轴为中心的压缩面运动区域采用非结构网格填充, 其余区域采用结构化网格进行填充, 计算域的网格总数约 4.9 万左右, 如图 2 所示, 计算中用到了压力远场边界、压力出口边界及无滑移绝热固壁边界.

为了考察进气道的动态特性, 在进气道不同位置布置了 P1~P6 六个测压点, 其中 P1 为一级楔面起点, P2 为二级楔面起点, P3 为三级楔面起点, P4 为进气道喉部, P5 为上唇口, P6 为进气道出口堵盖.

3.3 湍流模型

采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 一阶迎风格式离散, 壁面附近采用标准壁面函数进行处理. 时间步长为 0.1 ms. 计算的收敛准则为: 连续方程、动量方程及能量方程的残差下降 3 个数量级以上, 且监测面压强趋于稳定. 计算中比热取为定值, 分子黏性采用 Sutherland 公式计算.

4 结果分析

选取典型状态 $H=10$ km, $Ma=2.5$, $\alpha=0^\circ$, $\beta=0^\circ$, 计算的初场为入口封堵状态的收敛结果.

图2 (网络版彩图)网格示意图

4.1 入口堵盖封堵状态

图 3 给出了进气道入口封堵时的马赫数等值线, 进气道采用三级外压缩, 由于进气道入口封堵, 气流转折角过大导致在进气道前方形成脱体激波。

4.2 方案 A(入口先开、出口后开)

方案 A 入口打开后, 出口呈封堵状态(出口设为固壁), 入口打开后(10 ms), 出口打开, 补燃室背压为 0.2 MPa。

图 4(a)~(c)给出了入口堵盖打开过程(2~10 ms)进气道马赫数等值线分布图, 随着入口逐渐打开, 气流不断进入内流道, 前方的脱体激波迅速后移, 且强度逐渐减弱, 第一、二道外压斜激波逐步形成。由于出口封堵, 随着空气的持续涌入, 进气道内流量累积, 压力进一步升高, 高反压的影响沿亚声速流场上溯至进气道入口, 使得当地气流速度逐渐降低。从图 4(c)可以看出, 进气道内气流已经完全处于倒流状态, 气流流出进气道后进一步膨胀加速, 马赫数最高达到了 2.5, 弓形波已经移到进气道前缘之前, 进气道压缩面形成的斜激波完全消失。图 4(d)~(h)给出了入口打开后(10~24.5 ms)进气道起动过程中进气道波系变化情况, 出口打开后, 进气道随着时间的增加, 弓形波后移, 第一、二、三道外压斜激波逐步形成(图 4(d)~(f)), 正激波形成(图 4(g)), 最后结尾正激波稳定在进气道扩张段(图 4(h)), 进气道完全起动。

图 5 给出了监测点的压力随时间的变化历程, 具体分析如下:

1) 入口堵盖打开过程中(0~10 ms), 进气道完成了一次充填和释放, 对应 P4, P6 点压强先升高后降低, 在 7.5 ms 时 P4 点压强峰值为 0.2 MPa, P6 点压强峰值为 0.43 MPa 左右, 接近来流总压; P2, P3, P5 压强随弓形激波经过而产生突变;

图 3 进气道入口封堵时马赫数等值线

2) 出口打开后(10~30 ms), 由于反压总体上降低, 弓形激波逐渐后移, 当移过某个监测点时, 会带来各监测点压强突变, 在 11.15, 16.5, 19.5 ms 时分别形成第一、二、三道斜激波, 在 19.5 ms 左右形成上唇口斜激波, 在 21 ms 开始形成正激波, 最后结尾正激波稳定在 24.5 ms, 进气道完全起动; 从第一道斜激波形成到进气道完全起动时间为 13.15 ms。

4.3 方案 B(出口先开、入口后开)

方案 B 出口先开、入口后开, 在本文中简化为入口打开时, 出口位置补燃室背压为 0.2 MPa。0 给出了进气道马赫数等值分布图以及进气道起动过程中进气道波系的变化情况。

图 6(a)~(d)给出了入口堵盖打开过程(2~10 ms)进气道马赫数等值线, 随着入口堵盖的逐渐打开, 气流不断进入内流道, 前方的脱体激波后移, 在来流和背压的相互作用下, 弓形波在二级压缩面附近来回振荡; 图 6(e)~(h)给出了入口堵盖打开后(10~19 ms)进气道起动过程中进气道波系的变化情况, 由于 0.2 MPa 的反压小于进气道再起起动反压, 随着时间的增加, 远场来流的影响逐渐向下游传递, 弓形波后移, 第一、二、三道外压斜激波逐步形成(图 6(e)~(g)), 最后结尾正激波稳定在进气道扩张段(图 6(h)), 进气道完全起动。

图 7 给出了监测点的压力随时间的变化历程, 具体分析如下:

1) P1, P6 位置压强不随时间变化, P1 点位于进气道前沿, 其压强与来流静压保持一致这是由于弓形波一直在一级楔面起点之后变化; P6 点压强与补燃室压强一致;

2) P2~P5 点在各自斜激波形成前, 压强呈现不规则振荡, 其中 P4, P5 点振幅较大, 在 12 ms 左右, P4 最大压强为 0.23 MPa, P2~P5 点在各自斜激波形成后, 压强几乎不变; 同时可以看出, 随着各监测点压强突变, 在 9, 15.5, 18.5 ms 分别形成第一、二、三道斜激波, 在 18.5 ms 左右形成上唇口斜激波, 最后结尾正激波稳定在 19 ms, 进气道完全起动; 从第一道斜激波形成到进气道完全起动时间为 10 ms 左右。

5 结论

本文根据进气道入口、出口堵盖打开先后顺序, 研

图 4 方案 A 马赫数等值线

(a) 2 ms; (b) 7 ms; (c) 10 ms; (d) 11.5 ms; (e) 21 ms; (f) 24.5 ms; (g) 16.5 ms; (h) 19.5 ms

图 5 方案 A 进气道监测点的压力随时间变化历程

图 6 方案 B 进气道转级过程马赫数等值线

(a) 2 ms; (b) 4.5 ms; (c) 9 ms; (d) 10 ms; (e) 13 ms; (f) 15.5 ms; (g) 18.5 ms; (h) 19 ms

图 7 方案 B 进气道监测点的压力随时间变化历程

究了两种打开方案进气道的动态特性, 主要结论如下:

1) 方案 A(入口先开、出口后开), 入口打开过程中, 进气道气流完成了一次充填和释放, 压强峰值为 0.43 MPa, 从入口打开到进气道完全起动所需时间 24.5 ms; 在工程应用中, 该方案必须合理设置进气道入口、出口打开间隔时间, 避免由于间隔时间过长产生的激波振荡导致进气道结构性破坏;

2) 方案 B(出口先开、入口后开), 各监测点压强

呈现不规则振荡, 压强峰值为 0.23 MPa 左右, 从入口打开到进气道完全气动所需时间 19 ms;

3) 综合比较, 相对方案 A(入口先开、出口后开), 方案 B(出口先开、入口后开)进气道起动时间短且压强峰值小, 更有利于固冲发动机的转级过程;

4) 两种方案进气道启动时间可为固冲发动机转级时序的确定提供参考、压强峰值可为进气道结构设计提供依据.

参考文献

- 1 Nishizawa U, Kameda M. Computational simulation of shock oscillation around a supersonic air-inlet. AIAA 2006-3042
- 2 Lu P J, Jain L T. Numerical investigation of inlet buzz flow. J Propul Power, 1998, 14: 90–100
- 3 刘占生, 张云峰, 田新. 冲压发动机超声速进气道流动自激振荡研究. 航空动力学报, 2008, 23: 1595–1602
- 4 孙振华, 吴催生. 冲压发动机加速阶段进气道内动态特性. 固体火箭技术, 2011, 34: 285–289
- 5 Hass N E, Smart M K, Paull A. Flight Data Analysis of Hyshot2. AIAA 2005-3354
- 6 Emami S, Trexler C A. Experimental Investigation of Inlet-combustor isolators for a Dual Mode Seramjet at a Mach Number of 4. NASATP3502, 1995

Analysis on dynamic characteristics of the inlet during the transition of a solid rocket ramjet

YANG ShiLin, ZHANG XiaoMin, QI HongLiang & LI Pu

The 41st Institute of the Fourth Academy of CASC, Xi'an 710025, China

According to the opening sequence of air inlet port cover and entrance closure, two opening methods were studied by numerical simulation. Dynamic characteristics, start time and pressure peak in the inlet were acquired. Results show the method of air inlet port cover opened first and entrance closure opened later has the advantage of shorter start time and lower pressure peak, which is of benefit to the transition of the solid rocket ramjet. Furthermore the results are valuable for the transition sequence selectness and inlet structure design.

inlet entrance closure, port cover, opening sequence, transition, numerical simulation

doi: 10.1360/N092014-00281