

冲压发动机点火前内流场数值仿真研究

王玉峰, 段小龙

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 冲压发动机在点火前由于燃烧室的压力较低, 内通道流场状态与发动机正常工作时的差别很大。因此, 在发动机设计时, 必须要考虑形成正常点火条件对发动机结构的约束。本文利用有限体积法对 N-S 方程进行空间离散, 对发动机点火前的不同内通道结构下的冷流场进行了数值模拟, 结果表明稳定器和喷油装置对形成合理的点火条件很重要, 稳定器的布局对点火状态有很大影响。

关键词: 冲压发动机; N-S 方程; 内流场

中图分类号: V439

文献标识码: A

文章编号: (2006) 06-0020-03

Numerical study of the ramjet engine inner flow before ignition

Wang Yufeng, Duan Xiaolong

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Inner flow states of a ramjet engine before ignition is very different from those under normal operation conditions because of the low chamber pressure. So when design an engine, the limits for the engine structure has to be considered so as to form an appropriate ignition condition. This paper simulates the flow field with different inner configurations using finite volume method discretization N-S equations. The simulation results show that the flame holder and injector are important to a proper ignition condition, and the arrangement of a flame holder has great effect on ignition conditions.

Key words: ramjet engine; N-S equation; inner flow field

收稿日期: 2006-04-07; 修回日期: 2006-04-21。

作者简介: 王玉峰 (1980—), 男, 硕士, 研究领域为发动机系统设计。

1 引言

冲压发动机在点火前由于燃烧室的压力较低,内通道流场状态与发动机正常工作时的差别很大。因此,在发动机设计时,必须要考虑形成正常点火条件对发动机结构的约束。我们知道,影响成功点火的因素很多。对结构一定的发动机来说,主要取决于来流条件、内流场品质、点火供油规律等。其中能否形成满足点火条件的内流场,是发动机在结构设计中必须考虑和重视的问题。因此在发动机方案确定过程中,有必要对点火时的冷流状态进行模拟计算,来检验结构参数设置是否合理,是否会对正常点火带来困难。

本文对冲压发动机的通流模型、带稳定器模型和带喷油环的模型分别进行了数值模拟。计算结果表明,对稳定器和喷油环进行合理的设计布局,可以在燃烧室前形成较适合的点火流场。

2 计算方法

在笛卡尔坐标系下控制方程可以表述为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \mathbf{W} dV + \oint [\mathbf{F} - \mathbf{G}] \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (1)$$

其中矢量 \mathbf{W} 、 \mathbf{F} 、 \mathbf{G} 定义为:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u u + P_i \\ \rho u v + P_j \\ \rho u w + P_k \\ \rho u E + P_u \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{xi} \\ \tau_{xi} \\ \tau_{xi} v_j + q \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, \mathbf{u} 为速度矢量; u 、 v 、 w 分别为它沿三个坐标轴的分量; q 为与导热相关的热通量。

将式(1)用有限体积法进行空间离散并求解。物面边界条件采用无滑移绝热壁面条件;远场边界条件应用特征边界条件处理。

3 计算模型与结果分析

为了了解冲压发动机点火时的内部流场及影

响因素。本文分别针对通流模型、带稳定器模型和带喷油环模型进行了模拟。

3.1 通流模型数值模拟

对冲压发动机而言,尾喷管的节流作用可以调节燃烧室的工作状况。但在点火时喷管的节流作用是否能够使得燃烧室前的环境满足点火要求仍需要检验。

图1所示为在发动机点火前,通道内部的马赫数等值线分布。

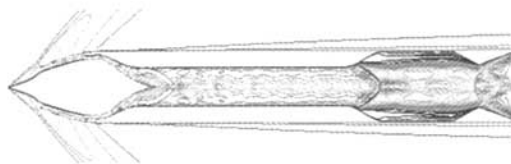


图1 通流时发动机内流场的马赫数等值线图

Fig.1 Contours of Mach number in inner flow field

由图中可以看出,在通流情况下整个内通道处于超声速流动状态,等直通道中充满了反射波。在燃烧室入口处由于通道扩张使得气体加速,此时由于气流速度很高,压力很低,对于发动机的点火是很不利的。因此,冷流情况下仅靠喷管的节流作用是不足以改善燃烧室前的点火状况的。

3.2 带稳定器模型数值模拟

实际上发动机内部并非是通过流的,在燃烧室前一般都有火焰稳定装置。其作用就是使火焰在高速气流中能够持续稳定。本文中的火焰稳定装置是火焰稳定器。

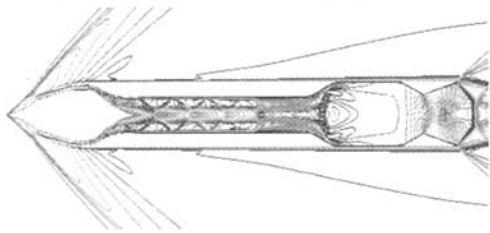


图2 稳定器布置在扩张段中部时的马赫数等值线图

Fig.2 Contours of Mach number when placing flame holder in the mid-diffuser

图2、图3所示为稳定器布置在燃烧室入口

扩张段中部和后部时马赫数等值线的分布。

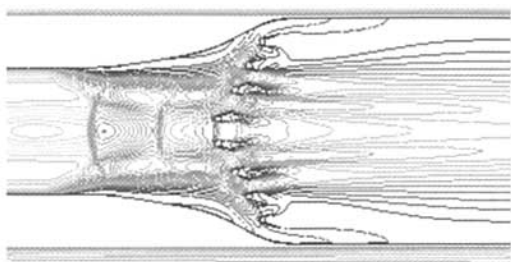


图 3 稳定器布置在扩张段后部时的
马赫数等值线图

Fig.3 Contour of Mach when placing flame holder
in the aft-diffusor

由图 2、3 可以看出,当燃烧室扩张段布置稳定器后,会在稳定器前形成一道弓形激波,经过激波后气流速度降低。由于为弓形波,因此激波后的气流并不均匀,靠近中间的主流为亚音速流,两侧为低超音速流。这种情况下当激波与稳定器之间的距离较大时,如图 2 的计算情况,亚音速流与超音速流有充分的距离进行能量交换,使气流混合均匀,到扩张段前变成亚音速流。经过扩张段的减速,到稳定器前气流的速度已基本降到点火范围以内。而对于图 3 这种情况,由于激波与稳定器之间的距离太短,从而在扩张段气流并不均匀,高亚音速流在扩张段并没有经过减速扩压就直接到达稳定器前缘。这就导致稳定器边缘的绕流速度过高。

因此,当通道中有一定阻塞比的稳定器时,只有布置的位置合理,才能使稳定器边缘的气流速度降低,从而有利于点火。

3.3 带喷油环模型数值模拟

一般在稳定前的一段距离要布置喷油装置。由于喷油装置布置在扩张段中前部,喷油装置也许可以起到一定作用,使得激波沿通道向发动机头部推进。以下对扩张段前部布置喷油环,后部布置稳定器(图 4)的情况进行数值模拟。

比较图 4 和图 3 可以看出,当扩张段前部带有喷油装置时,激波的位置会向中心通道推进很多。这时稳定器处的速度比不带喷油装置且稳定器布置靠近燃烧室的情况已大为降低,也就是

说,其点火环境已大为改善。

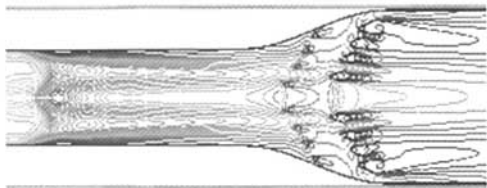


图 4 带喷油装置时稳定器处的马赫数等值线图

Fig.4 Contour of Mach with injector and flame holder

4 结论

从以上计算分析可以得到如下结论:

(1) 在发动机点火状态下,仅靠尾喷管的节流作用不足以使得燃烧室前的环境满足点火要求;

(2) 当扩张段有稳定器时,在发动机点火状态下,内通道将出现一道弓形激波。经过激波后气流速度降低,但并不均匀,中心气流速度低而两侧气流速度高。如果要使稳定器前的流场适合点火,弓形波和稳定器之间必须要有一定的距离,以使气流充分混合,否则两侧的高速流会使稳定器局部流速过高,从而影响正常点火;

(3) 当稳定器布置位置靠前时,可以使激波前移从而改善稳定器处的流场;

(4) 稳定器前的喷油装置可以起一定的阻塞作用使激波的位置前移,从而改善稳定器处的流场。

参考文献:

- [1] 刘兴洲等. 飞航导弹动力装置[M]. 北京: 宇航出版社, 1992.12.
- [2] 张志博, 张振鹏, 等. 火箭冲压发动机掺混流场数值方法研究 [J]. 推进技术, 1998, 8.
- [3] J M Weiss, J P Maruszewski, W A Smith. Implicit Solution of the Navier-Stokes Equations on Unstructured Meshes [R]. AIAA-97-2103.

(编辑: 王建喜)