不同飞行条件下反流控制矢量喷管的内流特性

邹欣华 王 强

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 利用数值模拟方法,分析了不同飞行条件下反流控制矢量喷管的内流特性. 结果表明:在所研究的范围内,静态条件下,不发生主流附着的情况下,所研究的2种缝宽喷管模型产生反向二次流的抽吸压强范围分别为60 795 ~ 87 139.5 Pa,50 662.5 ~ 91 192.5 Pa;且矢量角随着抽吸压强的增大而减小,推力系数则随之增大. 在外流马赫数为0.6和1.2时,对于较小缝宽的喷管模型,均有不同程度的主流附着现象发生,无法应用于实际的矢量流场控制. 对于较大缝宽喷管模型,在马赫数为0.6时,不发生主流附着的情况下,产生反流的抽吸压强为40 530 ~ 87 139.5 Pa. 而马赫数为1.2时在所研究的二次压强下都无反流产生.

关 键 词: 反流推力矢量; 主流附着; 内流特性

中图分类号: V 231.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)02-0227-04

Internal performance of counterflow thrust vectoring nozzle under different flight conditions

Zou Xinhua Wang Qiang

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: An analysis of the impact of internal performance on the counterflow thrust vectoring nozzle under different flight conditions was presented by numerical simulation. The results show in static conditions counterflow phenomena occurs on two nozzles of different slot hights when the secondary pressure is at 60 795-87 139.5 Pa and 50 662.5-91 192.5 Pa without jet attachment. And with the secondary pressure increasing, the pitch-thrust-vector angles decrease and thrust ratios increase. When the *Ma* number is 0.6 and 1.2, jet attachment occurs on the nozzle with smaller slot hight and can not apply to actual fluidic control. But to the nozzle with larger slot hight, when the *Ma* number is 0.6, counterflow phenomena occurs at secondary pressure 40 530-87 139.5 Pa without jet attachment. When the *Ma* number is 1.2, there is no counterflow phenomena at considered secondary pressure.

Key words: counterflow thrust vectoring; jet attachment; internal performance

反流推力矢量控制[1-3]是利用真空泵系统通过缝隙吸气,一定的条件下,使得主流发生偏转并产生与主喷流反向的二次流. 它是在20世纪80年代末才针对航空推进系统而新兴的研究方向,这种方案推力损失和二次流量都较小,且无需高压二次流,它比传统的机械式多轴推力矢量设备更加简便. 但是也存在一个较为严重的问题,在一定的条件下主流可能出现附着喷管壁面,而且不容易脱落导致无法形成反向二次流,即主流附着现象. 这样不利于实际中的流场控制. 国内主要对静态条件下反流控制矢量喷管的内流特性进行了研究. 而缺乏对亚音速和超音速飞行条件下其内流特性的研究.

本文采用商用计算软件,主要对二元反流控制矢量喷管内外流场进行了计算分析. 分别研究了静态条件下不同抽吸压强对推力矢量角的影响,并将计算结果与实验结果进行了对比分析,以验证计算方法的有效性;在此基础上,对二元反流

收稿日期: 2009-12-17

作者简介: 邹欣华(1982 -),女,山东青岛人,博士生,xinhua725@sina.com.

推力矢量喷管分别在亚音速和超音速飞行条件下进行了初步的数值模拟,从而对比分析了不同飞行条件下喷管的内流特性.

1 数值计算方法

1.1 计算格式和湍流模型

CFD(Computational Fluid Dynamics)算法为时间推进的有限体积法,控制方程选用一般曲线坐标系下的二维守恒形式的 N-S 方程,为提高收敛速度和求解精度,离散格式选用隐式二阶迎风格式[4].

湍流模型采用重整化群(RNG)k-ε 二方程模型[5],采用标准壁面函数.

1.2 计算模型参数及工况

图 1 为计算所采用的喷管,其几何尺寸和气动参数的选定,通过参考文献[6]中所提供的实验数据得到的:其中主喷管出口截面高度 H 为 28.58 mm,缝宽 G 为 5.64 mm/11.9 mm,外套管轴向长度 L 为 362.86 mm,外套管横向高度 C 为 57.05 mm,外套管壁面出口边缘斜切角 θ 为 27.8°,下侧狭缝与外界大气相通.

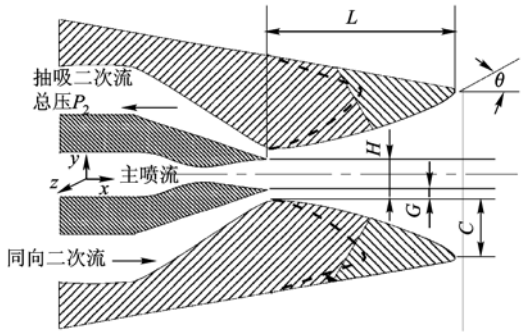


图 1 实验模型图

1.3 计算网格与边界条件

本文所采用的计算网格为局部加密的二维四边形结构化网格,如图 2 所示.

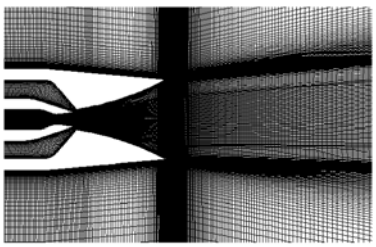


图 2 计算网格图

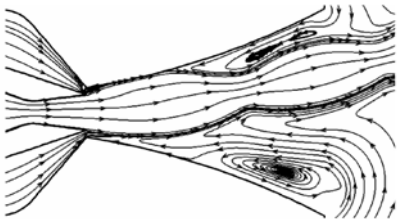
计算的边界条件:主喷管落压比为 8(喷管设计落压比),进口气流总温 T_0 = 294.4 K;二次流抽吸总压 P_2 = 10 132.5 ~ 91 192.5 Pa,温度均为 294.4 K;外界静止大气环境和同向二次流压强均为 P_∞ = 101 325 Pa;外流场马赫数分别为 0.07,0.6,1.2.

2 计算结果分析

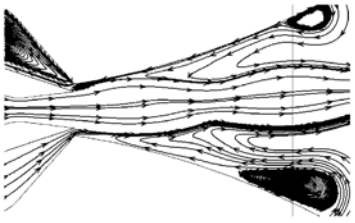
2.1 Ma = 0.07 工况(静态条件)

2.1.1 G = 5.64 mm 情况

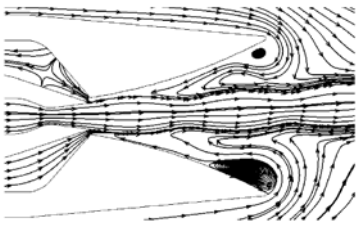
图 3 为静态条件(Ma = 0.07)下,不同二次抽吸压强下的喷管流线图.其中图 3a 当二次流压强为 40 530 Pa 的时候,上侧喷管并没有产生反向流.这是因为当二次抽吸压强增大到一定程度的时候,主流发生完全附着,同样无法产生反流,这时矢量角可达到 13.7°.而当二次抽吸压强增大为 60 795 Pa 时,如图 3b,可以看到主流未发生附着,同时上侧喷管产生了反向二次流,产生的推力矢量角为 4.6°与实验值的误差在 2% 之内.不断增加二次抽吸压强,直到 87 139.5 Pa 时,未发生主流附着现象,但上侧喷管也未产生反流,而是同向二次流.



a 二次抽吸流压强为 40 530 Pa



b 二次抽吸流压强为 60 795 Pa



c 二次抽吸流压强为 87 139.5 Pa

图 3 不同二次抽吸压强下的流线图
(Ma = 0.07, G = 5.64 mm)

图 4 所示是一组喷管在不同的二次抽吸压强下,主射流矢量角的计算结果与文献[6]中实验结果的对比,对应的二次抽吸压强的范围为 60 795 ~ 91 192.5 Pa. ΔP 为当地大气压 P_∞ 与上侧狭缝抽吸静压 P_{slot} 之差($\Delta P = P_\infty - P_{slot}$),$\delta$ 为喷管矢量角,其中负值代表上侧喷管产生的是反向

二次流. 整体上,计算与实验结果的趋势跟大小基本相符. 同时可以看到矢量角是随着上侧狭缝抽吸压强的减少,即 ΔP 的增大,矢量角呈减小的趋势,呈近乎正比的线性关系.

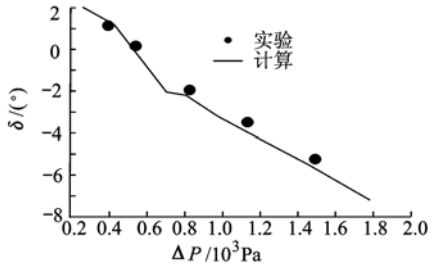
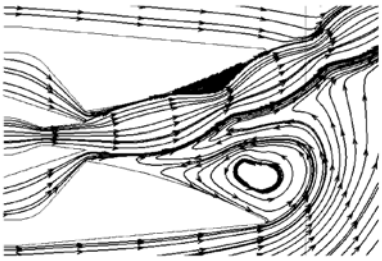


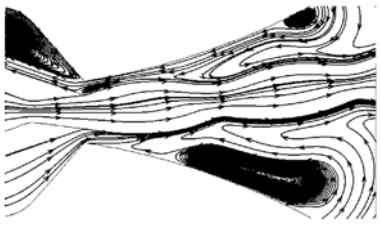
图 4　喷管矢量角对比分布图

2.1.2　$G=11.9$ mm 情况

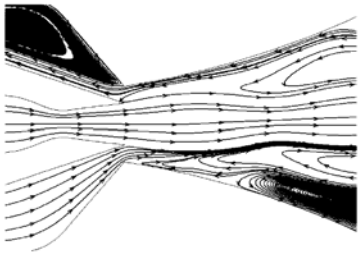
图 5 所示的是各个抽吸压强下喷管内部的流线图. 可以看到与前面较小缝宽的喷管模型类似的是,在较小的二次抽吸压强 40 530 Pa 时,如图 5a 所示,虽然偏转角度较大可以达到 30.02°,但同样主流发生了附着现象,并无反向二次流产生. 另外如图 5b 较大二次抽吸压强下,可产生反流且主流未附体. 略有不同的是,二次抽吸压强直到增大到 91 192.5 Pa 时,如图 5c 所示上侧喷管仍有反流产生,此时矢量角为 3.97°.



a　二次抽吸流压强为 40 530 Pa



b　二次抽吸流压强为 60 795 Pa



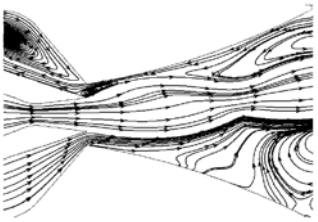
c　二次抽吸流压强为 91 192.5 Pa

图 5　不同二次抽吸压强下的流线图
($Ma=0.07, G=11.9$ mm)

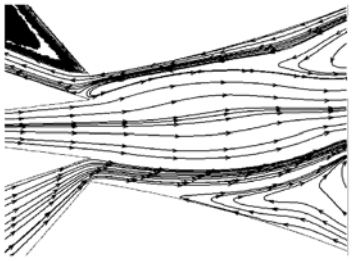
2.2　$Ma=0.6$ 工况

经过计算,在 $Ma=0.6$ 的工况下,缝宽 $G=5.64$ mm 时,各个二次抽吸压强下不但均无反向二次流产生,而且发生了较为严重的主流附着现象,不能达到实际的要求. 因此根据参考文献[6]中提供的几何参数以及结论,改变参数缝宽,增加 G 为 11.5 mm.

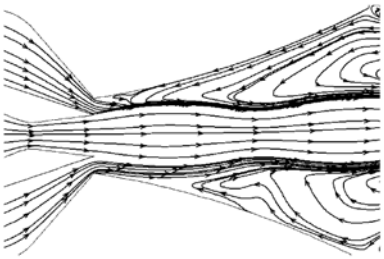
从图 6 所示的喷管内部的流线图可以看到,当外流马赫数增大到 0.6 时,如图 6a 所示,二次抽吸压强为 40 530 Pa 的情况下,喷管内部未出现主流附着现象且上侧喷管形成了反向二次流,此时矢量角为 10.5°. 直到二次抽吸压强增大至 87 139.5 Pa时,与静态条件下相似,如图 6c 上侧喷管无反流产生而是同向二次流.



a　二次抽吸流压强为 40 530 Pa



b　二次抽吸流压强为 60 795 Pa



c　二次抽吸流压强为 87 139.5 Pa

图 6　不同二次抽吸压强下的流线图
($Ma=0.6, G=11.9$ mm)

图 7 和图 8 所示的是 $Ma=0.6$ 时,在不发生主流附着的情况下,两种喷管模型的 δ 和推力系数 η 的对比图. 其中 P/P_0 为二次抽吸压强与当地大气压的比值. 图中可看到,随着二次抽吸压比的增大,矢量角随之减小;而推力系数逐渐增大,最大可达到 0.95. 且较为明显的是,相同的二次抽吸压比下,较大缝宽的喷管模型可以得到较大的推力矢量角,最大可达到 10.03°,但是其推力

系数则相对较低. 这与文献中的实验结论也是相符.

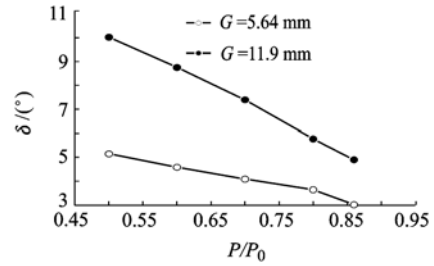


图 7 两种喷管模型矢量角对比分布图($Ma=0.6$)

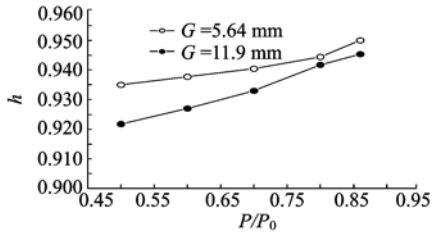
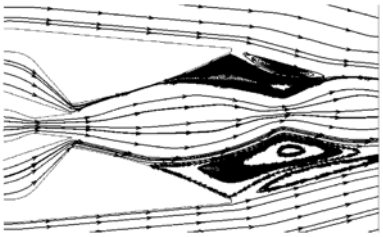


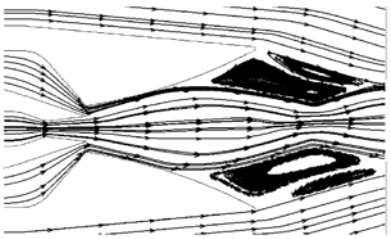
图 8 两种喷管模型推力系数对比分布图($Ma=0.6$)

2.3 $Ma=1.2$ 工况

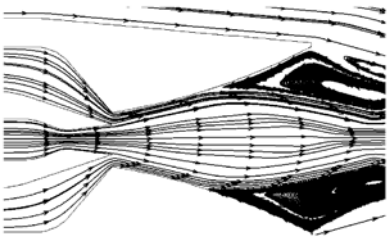
经过计算,当 $Ma=1.2$ 时,对于缝宽为 5.64 mm的喷管模型,所研究的各二次抽吸压强下,均发生了较为严重的主流附着现象. 对于 $G=11.9$ mm的喷管模型,其内部流线图如图 9 所示.



a 二次抽吸流压强为 40 530 Pa



b 二次抽吸流压强为 60 795 Pa



c 二次抽吸流压强为 87 139.5 Pa

图 9 不同二次抽吸压强下的流线图
($Ma=1.2$, $G=11.9$ mm)

在此工况下,如图 9a 所示,较小二次抽吸压强下,喷管内部产生了对上下壁面的主流附着现象. 图 9b 和 9c 中可以看到,较大二次抽吸压强下未发生主流附体,但是上侧喷管均产生的是同向二次流,此时矢量角最大为 3.54°.

2.4 3 种工况的对比分析

由于 $G=5.64$ mm 时,$Ma=0.6$ 和 1.2 的情况下均发生了主流附着. 这样针对缝宽 G 为 11.9 mm的喷管模型,不同飞行条件下产生得推力矢量参数进行了对比分析. 图 10 为 3 种飞行条件下,$G=11.9$ mm 时,各工况喷管矢量角和推力系数的综合对比. 其中矢量角均随着二次抽吸压强的增加而减小,且相同抽吸压强下,静止条件下的矢量角大于亚音速($Ma=0.6$)和超音速($Ma=1.2$)飞行条件下的矢量角. 此外在二次抽吸压强为 40 530 Pa 时,静态和超音速飞行条件下,喷管内部均发生了主流附着现象,而静态条件下主流偏转最大为 30.02°.

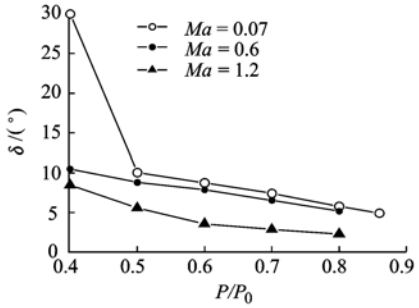


图 10 不同马赫数下各工况矢量角对比图($G=11.9$ mm)

3 结 论

通过对不同飞行条件下反流控制矢量喷管流场的数值模拟,得到以下结论:

1) 静态条件($Ma=0.07$)下,较小尺寸的缝宽 $G=5.64$ mm 时,在主流不发生附着的情况下,随着二次抽吸压强的增加,矢量角逐渐减小,所得的计算结果与实验数据基本相符. 在所研究的范围内,当二次抽吸压强过小($\leqslant$40 530 Pa)时,主流严重附体. 当二次抽吸压强过大($\geqslant$87 139.5 Pa)时,主流未附体,但上侧喷管产生的是同向二次流. 当 60 795 Pa$\leqslant$二次抽吸压强 $<$87 139.5 Pa 时,主流未有附着现象,上侧喷管壁产生了反向二次流. 缝宽 $G=11.9$ mm 时,产生反向二次流的抽吸压强范围为 50 662.5 ~ 91 192.5 Pa. 较大缝宽的喷管模型虽然可以得到较大的偏转矢量角,但存在的不足是推力系数降低了.

(下转第 236 页)

5 结束语

虚拟维修产生自虚拟现实技术与维修性工程专业领域的紧密结合,目前已成为一种先进的维修性设计与分析技术. 虚拟维修着重于在产品设计阶段或使用阶段如何通过虚拟化方式来促进产品维修性设计和分析工作. 它是以“虚拟仿真”为手段,以预测产品维修性设计特性,进而获得产品“最优”维修性特性为设计目标的一种方法. 虚拟维修具有并行化、虚拟化、预测化和优化等特点,作为一种可操作的并行工程技术,虚拟维修综合设计过程可有效使产品维修性设计与性能设计并行展开,互相反馈,相互作用. 结合维修性工程应用实际,基于过程模型的建模方法,建立了维修任务仿真管理模型 MTN. MTN 一方面可以描述表达上层的维修任务方案,另一方面可以驱动虚拟场景进行维修仿真和控制. 论文也从实际运行角度出发,采用网络传输方式建立 MTN、虚拟场景显示系统和数据库之间连接方式,形成一个完整的系统,并通过案例应用有效验证了虚拟维修技术方法的可行性和有效性.

参考文献(References)

[1] 郝建平. 虚拟维修仿真理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008
Hao Jianping. Virtual maintenance simulation theory and technique[M]. Beijing: National Defence Industry Press,2008(in Chinese)

[2] 何剑彬,苏群星,刘鹏远. 基于过程建模的复杂装备虚拟维修训练仿真[J]. 军械工程学院学报, 2009,21(4):6-14
He Jianbin, Su Qunxing, Liu Pengyuan. Complex equipment virtual maintenance training simulation based on process modeling [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2009, 21(4):6-14(in Chinese)

[3] 刘佳,刘毅. 虚拟维修技术发展综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2009,21(11):1520-1534
Liu Jia, Liu Yi. A survey of virtual maintenance technology[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(11):1520-1534(in Chinese)

[4] Marcos Paulo Alves de Sousa, Manoel Ribeiro Filho. Maintenance and operation of a hydroelectric unit of energy in a power system using virtual reality[J]. Electrical Power and Energy Systems,2009,11:1-8

[5] Abate A F,Guida M,Leoncini P. A haptic-based approach to virtual training for aerospace industry[J]. Journal of Visual Languages and Computing,2009,20:318-325

[6] Ben Elzendoorna,Marco de Baara,Rene Chavanb. Analysis of the ITER ECH upper port launcher remote maintenance using virtual reality[J]. Fusion Engineering and Design,2009,84:733-735

[7] 闻邦椿. 产品全功能与全性能的综合设计[M]. 北京:机械工业出版社,2008
Wen Bangchun. Integrating design of product full function and full performance[M]. Beijing: Mechanical Industry Press,2008(in Chinese)

(编 辑:娄 嘉)

(上接第 230 页)

2) 当 $Ma=0.6$ 时,$G=5.94$ mm 时,各种工况下均发生了较静止条件下更为严重的主流附着现象,这样都无法产生反向二次流. $G=11.9$ mm 时,40 530 Pa≤二次抽吸压强 <87 139.5 Pa,可以产生反流. 当 $Ma=1.2$ 时,这两种喷管模型均不能产生反向二次流. $G=11.9$ mm 时,未发生主流附体的情况下,有同向二次流产生,但产生的推力矢量角相对较小.

3) 综合几种飞行条件下的工况,所研究的反流控制矢量喷管在静止条件下可以达到较为理想的推力矢量效果. 在亚音速飞行条件下,增加缝宽可以产生较为理想的反向二次流. 在超音速飞行条件下,无法产生反向二次流. 说明了这种推力矢量喷管对工作条件和几何参数非常敏感,并且较难控制,从而对于飞机上的应用带来了困难.

参考文献(References)

[1] Strykowski P J, Krothapalli A, Forliti D J. Counterflow thrust vectoring of supersonic jets[R]. AIAA96-0115,1996

[2] Vanderveer M R,Strykowski P J. Counterflow thrust vector control of subsonic jets:continuous and bistable regimes [J]. Journal of Propulsion and Power,1997,13(3):412-413

[3] Hunter C A , Deere K A. Computational investigation of fluidic counterflow thrust vectoring [R]. AIAA99-2669,1999

[4] Barth T J, Jespersen D. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes[R]. AIAA89-0366,1989

[5] Choudhury D. Introduction to the renormalization group method and turbulence modeling[R]. Fluent Inc Technical Memorandum TM-107,1993

[6] Flamm J D. Experimental study of a nozzle using fluidic counterflow for thrust vectoring [R] . AIAA98-3255,1998

(编 辑:张 嵘)