二次扩张型射流矢量喷管的设计及性能计算

张永升 王延奎 于晓伟 邓学蓥

(北京航空航天大学 流体力学教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 应用数值模拟的方法对二次扩张型射流矢量喷管进行设计并研究了其推力矢量性能,探讨了二次扩张段注入射流产生推力矢量的机理,分析了二次扩张角度以及次主流压力比(SPR,Secondary to Primary total pressure Ratio)的变化对喷管主喷流偏转特性的影响.计算结果表明:在二次扩张段上注入二次射流可使喷管的出口段在不同区域产生不均匀的压强分布并且迫使主喷流发生偏转产生推力矢量;二次扩张型喷管比无二次扩张型喷管具有更好的推力矢量性能;二次扩张角度越大喷管产生的气动矢量角越大,在文中设计条件下二次扩张型喷管的气动矢量角最大可达 39°;气动矢量角随次主流压比 SPR 的增大而增大.

关 键 词: 矢量喷管; 射流; 气动矢量角; 数值模拟

中图分类号: V 435.23

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)03-0261-04

Design of secondary-divergent vectoring nozzle based on secondary fluidic injection

Zhang Yongsheng Wang Yankui Yu Xiaowei Deng Xueying

(Ministry-of-Education Key Laboratory of Fluid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Secondary-divergent vectoring thrust nozzle based on secondary fluidic injection was designed and the performance of vectoring thrust nozzle was studied by using computer simulation method. Several parameters, such as the angle of secondary-divergent section, the ratio of secondary fluidic injection pressure to main flow pressure, were taken into consideration in analysis of the nozzle performance. As a result, several conclusions were drawn from the above investigations. Firstly, the vectoring thrust is mainly caused by the secondary fluidic injection on the secondary-divergent section. The performance of nozzle with secondary-divergent section is better than that of nozzle without secondary-divergent section. Secondly, vectoring angle increases with the increasing of angle of secondary-divergent section and the maximum of vectoring angle reaches 39°. Finally, the vectoring angle increases with the increasing of the ratio of secondary fluidic injection pressure to main flow pressure.

Key words: vectoring thrust nozzle; fluidic injection; vectoring angle; computer simulation

现代先进战斗机的研制和发展目标是增强攻击能力和提高生存能力,而近代发展的推力矢量技术对增强和改善战斗机这两类能力表现出十分重要的作用.目前传统的机械式推力矢量喷管存在着执行机构复杂、重量较重、成本昂贵等问题.近年来发展的射流控制推力矢量喷管因其结构简单、重量较轻、造价较低和易于维护等方面的优势而备受关注.其工作原理是在喷管的扩张段上开孔或开缝,并注入二次射流,主流就会受到射流的扰动而发生偏转,从而产生推力矢量.

近年来,国内外研究人员对射流矢量喷管进行了大量的实验和计算研究工作,研究内容包括喷管落压比(NPR,Nozzle Pressure Ratio)(表示喷管主喷流总压与环境压力的比值)、次主流压比(SPR,Secondary to Primary total pressure Ratio)(表示二次射流总压和主喷流总压的比值),喷

收稿日期: 2006-04-27

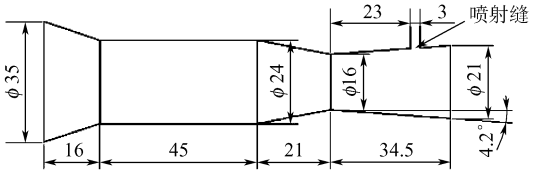
作者简介: 张永升(1980—),男,山西寿阳人,硕士生,zhangys@ase.buaa.edu.cn

射孔形状、大小、角度、位置等对气动矢量角的影响[1-6]. 计算与实验研究取得了一致的结果，当射流流量和射流压强增加以及射流位置靠近喷管出口时所产生的气动矢量角增大. 但这些研究主要集中在收敛－扩张喷管和收敛－扩张－再收敛喷管这两种喷管形式上，对其它形式的喷管少有研究.

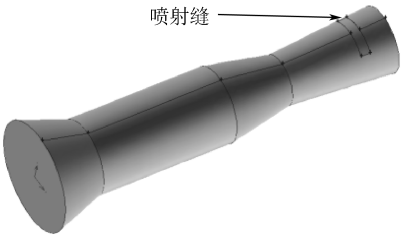
本文的目的是在射流控制轴对称收敛－扩张矢量喷管的基础上发展一种新型高效的矢量喷管. 针对传统的射流控制轴对称收敛－扩张矢量喷管，本文提出了在喷管扩张段上进行二次扩张，同时在二次扩张段上开缝射流的矢量喷管模型. 以无二次扩张和有二次扩张的周向开缝射流矢量喷管模型为研究对象，采用数值计算的方法，分析了射流对二次扩张型矢量喷管内部流场结构的影响；研究了二次扩张角及 SPR 的变化对矢量喷管气动矢量角 δ 的影响；分析比较了二次扩张型喷管与无二次扩张型喷管的推力矢量性能.

1 喷管模型结构

无二次扩张型喷管和二次扩张型喷管的模型分别如图 1 和图 2 所示.



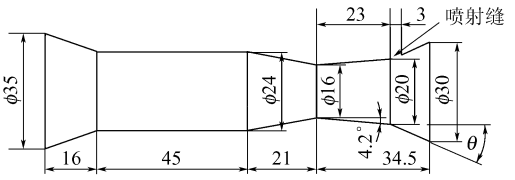
a 无二次扩张型喷管几何模型(单位：mm)



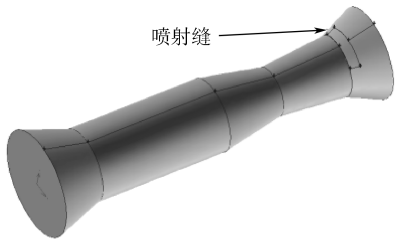
b 无二次扩张型喷管计算模型

图 1 无二次扩张型喷管模型

两种喷管都是轴对称的矢量喷管，其在喉道之前的几何尺寸是完全相同的，不同的是二次扩张型喷管是在喉道后面 23 mm 处进行了二次扩张. 两种喷管都是在喉道后面 23 mm 处沿周向开角度为 90°且宽度为 3 mm 的缝，二次扩张型喷管正好在二次扩张段起始处开缝(见图 1 和图 2). 通过改变二次扩张的角度 θ 可以研究其对喷管主喷流偏转特性的影响，另外通过改变喷管主流总压和二次射流的总压研究 SPR 的变化对喷管主喷流偏转特性的影响.



a 二次扩张型喷管几何模型(单位：mm)



b 二次扩张型喷管计算模型

图 2 有二次扩张型喷管模型

前人研究发现射流矢量喷管的性能与喷管喉道结构及喷射缝几何参数等相关. 本文根据前人的研究结果优先选取了本文所计算模型的开缝位置、大小和角度等参数以获得较好的喷管性能，对于喷管喉道结构和喷射缝几何参数等对射流矢量喷管性能的影响将在后续工作中深入研究.

2 数值计算方法

2.1 数值格式和湍流模型

采用有限体积法对控制方程进行离散化，耦合连续性方程、动量方程和能量方程求解，离散格式选用显式一阶迎风格式.

本次计算选用 Standard k-ε 湍流模型.

2.2 网格生成与边界条件

本次计算选用非结构化网格. 喷管的网格分布如图 3 所示.

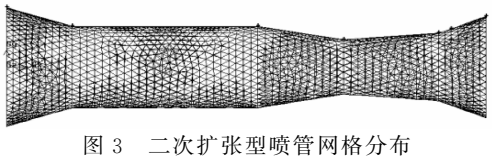


图 3 二次扩张型喷管网格分布

在喷管的主喷流和二次射流的进口边界设定为压力入口边界，均给定总压、总温大小、速度方向以及湍流参数；喷管出口设定为出风口边界，给定静压和总温；壁面条件设定为无滑移条件.

2.3 计算参数及结果处理

两类喷管模型的基本几何参数见图 1 和图 2. 无二次扩张型喷管的扩张段扩张角度为 4.2°；二次扩张型喷管的一次扩张段扩张角度为 4.2°，二次扩张角度参数 θ 为 10.6°，14°，18°，21.8°，23.

5°.

主次流的计算参数见表 1.

表 1　两类喷管主次流计算参数

主喷流总压/MPa	R_{NP}	二次射流总压/MPa	R_{SP}	出口压力/MPa
0.15	1.5	0.15	1	0.1
0.15	1.5	0.3	2	0.1
0.15	1.5	0.45	3	0.1
0.3	3	0.15	0.5	0.1
0.3	3	0.3	1	0.1
0.3	3	0.45	1.5	0.1
0.45	4.5	0.15	0.33	0.1
0.45	4.5	0.3	0.67	0.1
0.45	4.5	0.45	1	0.1

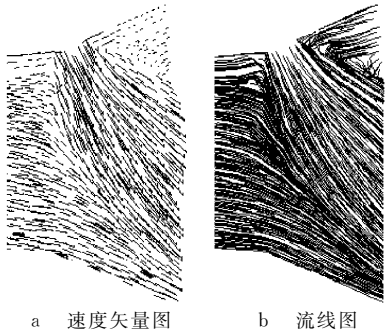
注:R_{NP}—NPR;R_{SP}—SPR.

计算结果是由速度矢量图、流线图和压力云图等给出.气动矢量角 δ 一般是由气流对喷管表面作用力的矢量分析($\arctan(F_N/F_A)$)给出,本文根据动量定理将其改变为通过对喷流出口速度的矢量分析($\arctan(V_N/V_A)$)给出.式中 F_A 为轴向力(axial force);F_N 为法向力(normal force);V_A 为轴向速度(axial velocity);V_N 为法向速度(normal velocity).

3　计算结果与分析

3.1　二次射流对喷管流场结构的影响

图 4 给出二次扩张型喷管在二次射流条件下二次喷射缝附近局部放大的速度矢量图和流线图(θ=23.5°,主喷流总压 0.15 MPa 且二次射流总压 0.45 MPa).

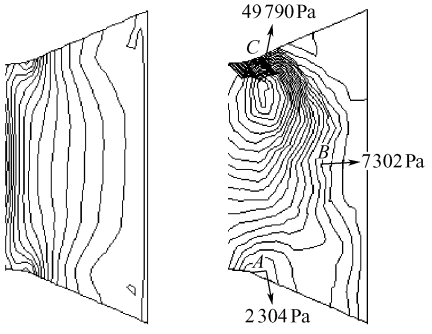


a　速度矢量图　　b　流线图

图 4　喷射缝附近局部放大的速度矢量图和流线图

由图 4 可见,在喷管的二次扩张段喷射次流,会在二次射流的附近形成气流分离区,喷管出口的上半部分会出现反流.分离区对二次喷射缝下游的流场影响很大,二次射流迫使主喷流的流动方向发生偏转即产生了推力矢量.本文取喷流的气动矢量角 δ 向下偏转为正.

图 5 给出二次扩张型喷管在有无二次射流条件下二次喷射缝附近局部放大的静压图(θ=23.5°,主喷流总压 0.15 MPa,二次射流总压 0.45 MPa).



a　无二次射流　　b　有二次射流

图 5　有无二次射流下喷射缝附近局部放大的静压图

由图 5 可见,在无二次射流下,喷管出口的静压分布是比较均匀的,则其流动不会发生偏转;而在有二次射流下,射流缝附近区域的静压高于喷管中心区域的静压,喷管中心区域的静压又高于出口段下面没有射流缝的壁面附近区域的静压,这种压强差会导致流动发生偏转,如图 5b 比较 A 和 C 两点的静压可以看出 C 点的静压大于 A 点,则会由压强差导致流动向 A 点的方向偏转.

因此,二次射流能够使流动偏转而产生推力矢量是由于二次射流在喷管出口段不同区域所形成的不均匀的压强分布引起的.

3.2　二次扩张角度对气动矢量角的影响

图 6 给出不同 θ 的二次扩张型喷管其 δ 随 θ 的变化特性曲线.

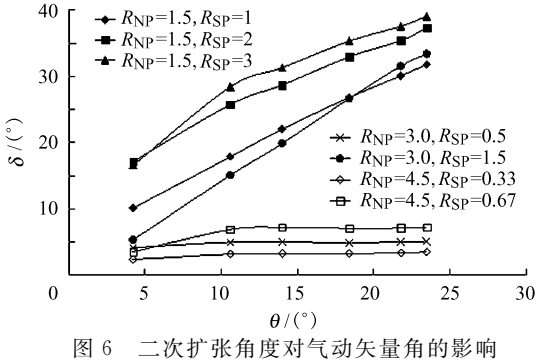


图 6　二次扩张角度对气动矢量角的影响

由图 6 可见,在同一主次流状态参数下,无二次扩张型喷管(即图中 θ=4.2°的点)的 δ 是最小的;随着 θ 的增大,δ 也增大.在 SPR 小于 1 的情况下 δ 增大的趋势不是很明显,说明 SPR 的大小对 δ 有影响.无二次扩张型喷管的最大气动矢量角是 17°,而 θ=23.5°的二次扩张型喷管在 NPR 为 1.5 和 SPR 为 4.5 的条件下,δ 可达 39°,是无

二次扩张型喷管的两倍多.因此二次扩张型喷管比无二次扩张型喷管具有更好的推力矢量性能,是一种高效的推力矢量喷管,在本文的计算条件下 θ 越大推力矢量性能越好.

3.3 二次扩张角度对喷管压强分布的影响

图7给出不同 θ 的二次扩张型喷管在相同的主次流参数状态下(主喷流总压 0.15 MPa 且二次射流总压 0.45 MPa)的静压图.

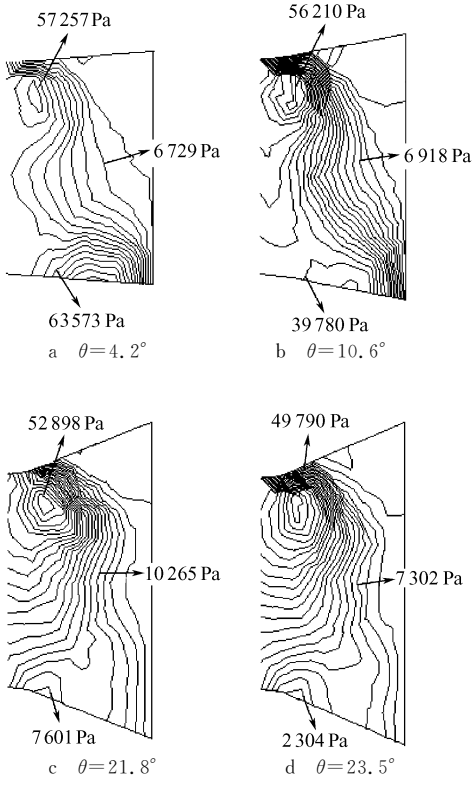


图7 二次扩张角度对喷管静压分布的影响

由图7可以看出,在较大的二次扩张角度下,在二次射流缝附近区域的静压高于喷管出口段下面没有射流缝的壁面附近的静压,这种不均匀的压强分布会导致流动向下发生偏转.而在较小的二次扩张角度下,在二次射流缝附近区域和喷管出口段下面没有射流缝的壁面附近区域都是整个出口段静压相对较高的区域.这样两个静压相对较高的区域使喷管出口段产生不均匀的压强分布,这种不均匀的压强分布对喷管主喷流的流动产生影响.射流缝附近较高的静压使得流动向下偏转,而喷管出口段下面没有射流缝的壁面附近区域也较高的静压又阻挡流动向下偏转,所以这种阻挡作用使气动矢量角变小.

随着 θ 的增大,喷管出口段下表面没有射流缝的壁面附近的区域由喷管出口段压强分布中静压相对较高的区域变为静压相对较低的区域,如图7中 $\theta=10.6°$ 的静压分布到 $\theta=21.8°$ 时静压分布的转变,则没有射流缝的壁面附近区域对喷管主喷流向下偏转的阻挡作用减小.因此 θ 越大,喷管的推力矢量性能越好.但是二次扩张角太大可能会在"肩点"之后产生分离区,造成流动损失,因此本文中二次扩张角没有取太大,二次扩张角的最大允许值将在以后进行深入研究.

3.4 次主流压力比对气动矢量角的影响

根据前面的分析,二次扩张型喷管所产生的推力矢量偏转是由于二次射流对主喷流的干扰效应引起的,因此主次流参数的变化会对 δ 产生影响.将主次流参数的变化用 SPR 来表示,根据表1的计算内容分析了 SPR 对二次扩张型喷管 δ 的影响.图8给出的是不同 θ 下的二次扩张型喷管在 NPR 为 1.5 时其 δ 随 SPR 的变化特性曲线.由图8可见,在不同的 θ 下,随着 SPR 的增大 δ 也增大.说明随着 SPR 的增大,二次射流对二次扩张型喷管流场形态的影响也增大.

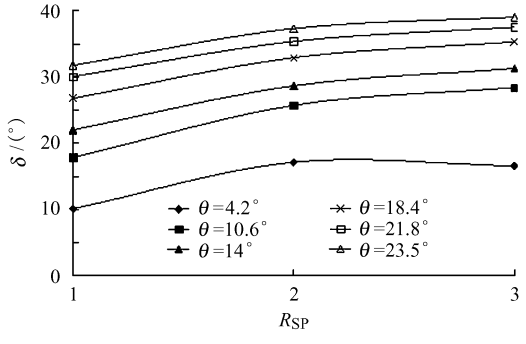


图8 SPR 对气动矢量角的影响

4 结 论

1) 在喷管的二次扩张段注入二次射流,会在喷管出口段不同区域方向产生压强差,压强差迫使喷管主喷流发生偏转,产生推力矢量.

2) 二次扩张型矢量喷管比无二次扩张型具有更好的推力矢量性能,是一种高效的推力矢量喷管.在本文的计算条件下,二次扩张角度越大,气动矢量角越大,二次扩张型矢量喷管的最大气动矢量角可达 39°.

3) 气动矢量角随次主流压力比增大而增大.

本文初步研究了二次扩张型喷管的推力矢量性能.对于喷管喉道结构和喷射缝几何参数等对射流矢量喷管的性能的影响以及二次扩张角的最大允许值等问题将在后续工作中进行深入研究.

(下转第 318 页)