

文章编号: 1000-8055(2007)08-1325-05

复杂形式球型收敛调节片喷管内 流场计算及分析

宋 洁, 王 强

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了分析复杂形式球型收敛调节片喷管(SCFN)三维内流场特性, 对六角形和领结形的 SCFN 进行几何建模, 并利用 N-S 方程和 S-A 模型, 对两种喷管在不同落压比(NPR)下进行了内流场数值模拟. 研究表明, 计算结果与实验结果吻合较好; 在此基础上, 对两种喷管的流场特性及性能进行了比较分析.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 球型收敛调节片喷管; 内流场; 数值模拟

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Numerical investigation on internal flow of a spherical convergent flap nozzle with complex geometry

SONG Jie, WANG Qiang

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To analyze three dimensional internal flow characteristic of spherical convergent flap nozzles with hexagonal and bowtie geometries, the geometric models were established and N-S equation and S-A model were employed in the numerical simulation. The simulation was developed at different NPR (nozzle pressure ratio). The calculated results are compared favorably well with experimental data. Furthermore, the internal flow characteristic and performance of two nozzles are compared and analyzed.

Key words: aerospace propulsion system; spherical convergent flap nozzle; internal flow field; numerical simulation

球型收敛调节片喷管(SCFN)凭借自身的优点迅速得到发展^[1], 该喷管结合了轴对称矢量喷管和二元矢量喷管的特点, 既可实现全方位推力矢量, 又有很好的红外隐身能力, 是一种可以实现俯仰/偏航/反推力/隐身功能的推力矢量喷管, 因此, 对球型收敛片喷管的气动性研究也就占有很重要的地位. 国内外除了广泛开展模型试验外^[2], 还充分利用CFD技术, 对SCFN的内部流场进行了数值分析^[3], 但是许多研究都是在简化模型的基础上得出的结论.

本文即是在此基础上, 通过求解三维 N-S 方程, 对两种扩张段外形不同的球形收敛片喷管(扩张段为六角形和领结形)的几种 NPR 下的内流场进行了精确的数值模拟, 并与模型试验结果进行分析和比较, 给出了喷管流场特性和其性能分析, 这为 SCFN 的进一步研究奠定了理论基础.

1 几何结构及计算网格

1.1 几何结构

本文的几何参数与模型喷管的几何参数完全

收稿日期: 2006-07-13; 修订日期: 2006-10-09

作者简介: 宋洁(1982), 女, 河北承德人, 硕士生, 主要从事飞机发动机内流场和红外辐射的研究.

一致^[2]. 图 1 与图 2 分别给出了 SCFN 的三维几何结构图及出口投影图. 由两图的出口投影图可以明显的看出: 两种外形喷管的区别是前者出口的左视图投影是一个六角形, 而后者出口的左视图投影是一个领结形.

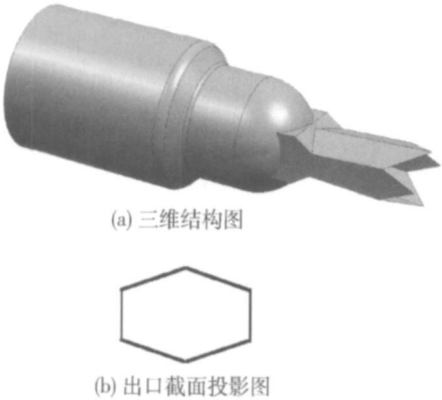


图 1 六角形 SCFN 的几何结构图
Fig. 1 Hexagonal geometry configuration of three dimensional SCFN and flow path exit geometry

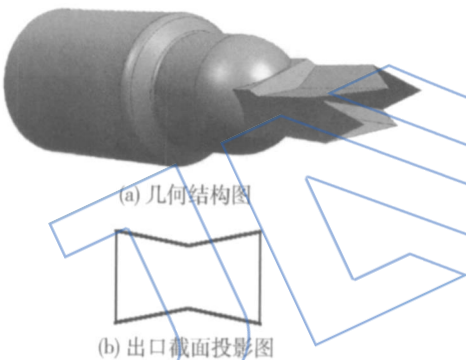


图 2 领结形 SCFN 的几何结构图
Fig. 2 Bowtie geometry configuration of three dimensional SCFN and flow path exit geometry

两种 SCFN 的进口直径都为 132.080mm, 收敛段长度为 63.144mm, 扩张段的长度为 90.424mm, 扩张角为 3.2°, 出口为六角形 SCFN 喷管的出口宽高比为 0.704, 而领结形 SCFN 的出口宽高比为 0.436

1.2 网格生成

图 3 与图 4 分别给出了上述两种 SCFN 计算所使用的三维网格图, 由于 SCFN 为对称的, 本模型只取了 SCFN 的四分之一空间域进行数值模拟, 采用了六面体结构网格, 并对壁面、球面收敛段以及非矩形扩张段进行加密, 两图的局部网格示意图清楚地展现出了加密情况.

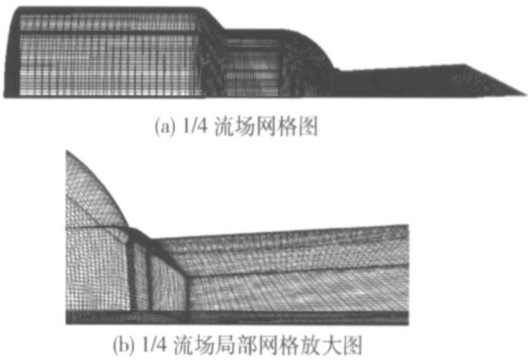


图 3 六角形 SCFN 的三维网格图
Fig. 3 Three-dimensional grid of hexagonal SCFN

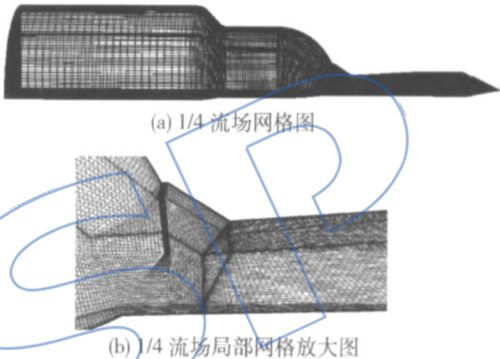


图 4 领结形 SCFN 的三维网格图
Fig. 4 Three-dimensional grid of bowtie SCFN

2 数值计算方法

2.1 计算格式和湍流模型

CFD 算法为时间推进的有限体积法, 控制方程选用了一般曲线坐标系下强守恒形式的 N-S 方程, 为提高收敛速度和求解精度, 空间离散格式采用二阶迎风格式^[4].

本文湍流模型选用了 S-A 模型^[5], 该模型是一种随时空演化的单方程涡粘系数模型, 既保持了涡粘模型的简单形式, 又能包含雷诺应力的松弛性质^[6]. 由文献 6 中的计算与试验结果可以得知, 采用 S-A 模型能更好的模拟喷管内流场的真实流动情况.

2.2 计算的边界条件

本文计算所采用的边界条件包括: 喷管上游来流为亚声速, 热力学参数由滞止状态确定, 即给定总压力 p_0 、总温 T_0 以及速度方向. 由于流动的对称性, 在两个对称面上给定为对称边界条件, 喷管出口的静压给定与环境压力. 壁面边界给定为无滑移条件.

2 3 计算有关参数

为了便于计算结果与试验结果对比, 计算时喷管的气动参数与模型喷管参数完全一致^[2]. 喷管出口直排大气, 其中环境压力为 101 325 Pa, 气流的进口总温为 290 K, 而进口总压由喷管的落压比(NPR) 决定. 本文计算的六角形 SCFN 的 NPR 分别为 2 497, 4 497 和 6 000, 领结形 SCFN 的 NPR 分别为 2 492, 4. 493 和 6. 999.

3 计算结果及分析

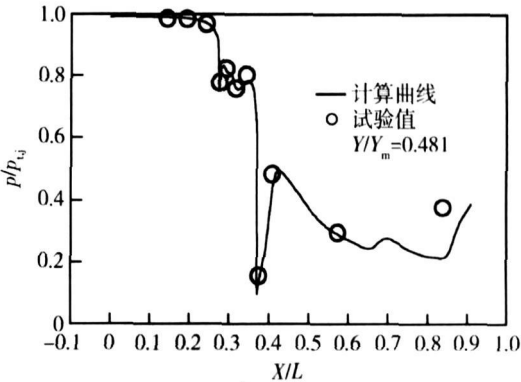
3 1 计算结果与试验结果的比较

图 5 给出了六角形 SCFN 在 NPR 为 2. 497, 位置分别为 $Y/Y_m = 0.074$, $Y/Y_m = 0.481$ 和 $Z/Z_m = 0$ 时的壁面静压分布的试验值^[2]和计算曲线的对比. 其中坐标原点取在球型收敛段的起始位置, X 为几何结构图的轴线方向, Y, Z 分别为与 X 轴垂直的水平方向和竖直方向. p 为当地壁面静压, p_0 为进口总压, X/L 为喷管收敛-扩张段轴向相对距离, Y_m 为 Y 最大值, Z_m 为 Z 最大值.

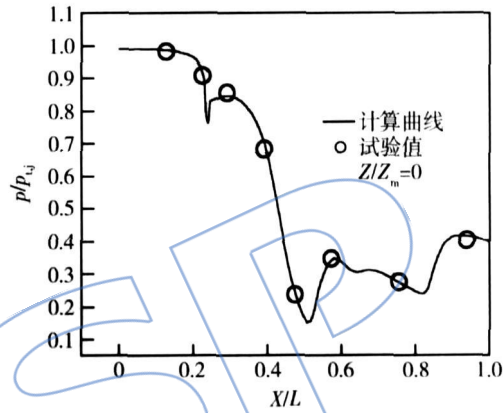
由图 5 可以看出壁面静压力分布的计算结果与试验结果能较好的吻合, 并且在喷管扩张段产生了很强的激波. 其中 (a), (b) 两图进行比较得出: 喷管 XZ 平面在不同 Y/Y_m 其收敛段的流动情况相似, 但是在扩张段有明显的差异. (b), (c) 两图进行比较得出: 喷管 XZ 平面与 XY 平面的流动情况相似.

图 6 给出了领结形 SCFN 喷管在 NPR 为 6 999, 位置分别为 $Y/Y_m = 0.074$, $Y/Y_m = 0.481$ 和 $Z/Z_m = 0$ 时的壁面静压分布的试验值和计算值的对比曲线.

由图 6 可以看出在大 NPR 时壁面静压力分布的计算结果与试验结果也能较好的吻合, 但是在图中没有看到压力的突跃, 即喷管内部没有产生激波. 其中 (a), (b) 两图进行比较得出: 喷管



(b) $Y/Y_m = 0.481$ 的壁面压力分布图

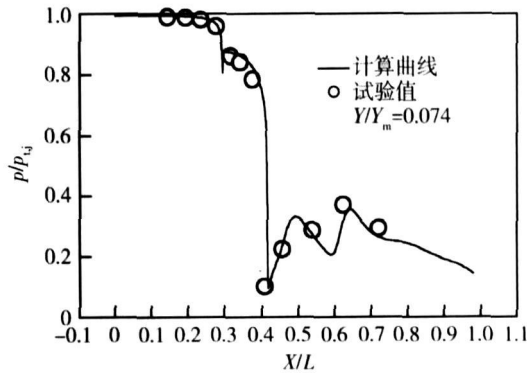


(c) $Z/Z_m = 0$ 的壁面压力分布图

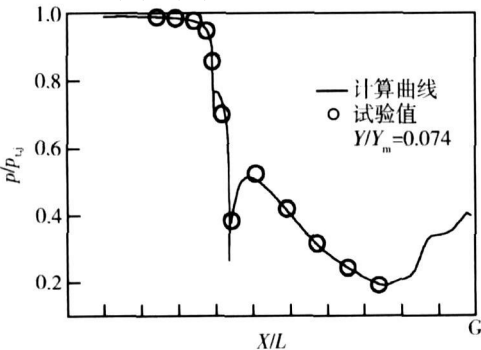
图 5 六角形 SCFN 在 $NPR = 2.497$ 时不同截面不同位置的壁面静压力分布的计算结果与试验结果对比图

Fig. 5 Comparison of calculation and experimental data for surface pressure distribution of hexagonal SCFN at $NPR = 2.497$ with different section and position

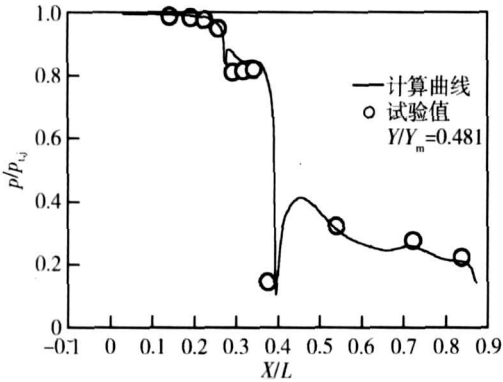
XZ 平面在不同 Y/Y_m 时其收敛段的流动情况相似, 但是在扩张段有明显的差异. 对 (b), (c) 两图进行比较得出: 喷管流场 XZ 和 XY 平面的流动情况有很明显的差异.



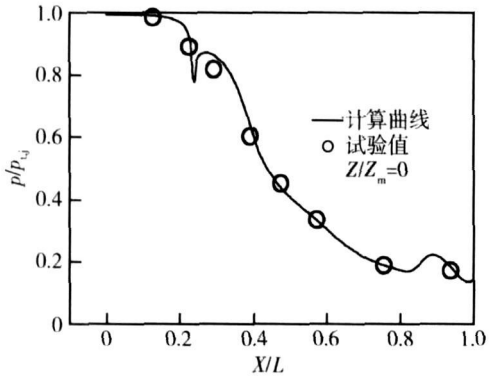
(a) $Y/Y_m = 0.074$ 的壁面压力分布图



(a) $Y/Y_m = 0.074$ 的壁面压力分布图



(b) $Y/Y_m = 0.481$ 的壁面压力分布图



(c) $Z/Z_m = 0$ 的壁面压力分布图

图 6 领结形 SCFN 在 $NPR = 6.999$ 时不同截面不同位置的壁面静压力分布的计算结果与试验结果对比图

Fig. 6 Comparison of calculation and experimental data for surface pressure distribution of bowtie SCFN at $NPR = 6.999$ with different section and different position

3.2 SCFN 流场特性分析

图 7 给出了六角形的 SCFN 在 NPR 为 2.497 时的 XY 截面的等马赫数 (Ma) 图. 图 8 给出了喷管 NPR 为 2.497 时, 不同流向位置的 YZ 截面等 Ma 图.

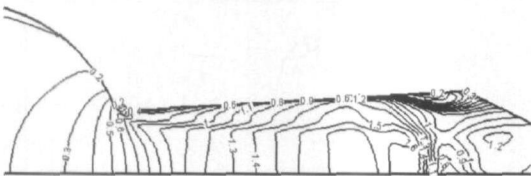
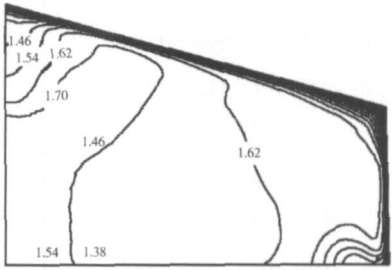


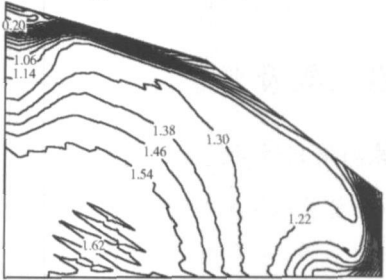
图 7 六角形的 SCFN 流场在 XY 对称面上的 Ma 等值线图

Fig. 7 Ma contour of hexagonal SCFN at $NPR = 2.497$ in XY plain

图 7 给出了马赫数在喷管内部的变化, 即 Ma 逐渐增大的过程, 由图 7 还可以清楚的看到



(a) $X/L = 0.8$ 时的等 Ma 图



(b) $X/L = 0.9$ 时的等 Ma 图

图 8 不同流向位置 YZ 截面等 Ma 图

Fig. 8 Ma contours of hexagonal SCFN at $NPR = 2.497$ with different position in YZ plain

扩张段有一道强烈的激波, 激波后有很大面积的低速区并附有马赫盘的产生.

由图 8(a) (b) 均可以看到喷管内不同 X 位置 YZ 截面 Ma 的变化. 图 7、8 中 XY 截面与 YZ 截面 Ma 的不同也可以体现出喷管的三维特性.

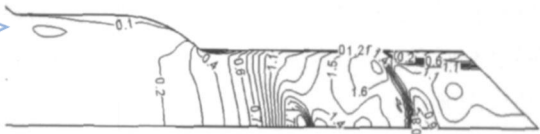


图 9 领结形的 SCFN 流场在 XY 对称面上的 Ma 等值线图

Fig. 9 Ma contours of bowtie SCFN at $NPR = 2.492$ in XY plain



图 10 领结形的 SCFN 流场在 XZ 对称面上的 Ma 等值线图

Fig. 10 Ma contours of bowtie SCFN at $NPR = 6.999$ in XZ plain

图 9 和图 10 分别给出了领结形的 SCFN 在 NPR 为 2.492 和 6.999 时其对称面上的等 Ma 图.

图 9 可以看到扩张段有一道强烈的激波, 激

波后有很大面积的低速区并附有马赫盘的产生. 图 10 也可以看到喷管内流场 Ma 的变化, 但在扩张段并没有激波的产生, 这是因为流体并没有在喷管内达到完全膨胀.

3.3 SCFN 喷管性能分析

表 1 为两种外形喷管在不同 NPR 下的推力系数 η_t 的计算值和实验值, 其中

$$\eta_t = F_r / F_i \tag{1}$$

式中, F_r 为喷管实际推力, F_i 为喷管的理想等熵完全膨胀推力.

表 1 不同 NPR 下的推力系数计算值和试验值的比较

Table 1 Comparison between calculation and experiment for η_t at different NPR

喷管类型	落压比	计算值	试验值
六角形的 SCFN	2.497	0.915	0.924
	4.497	0.982	0.973
	6.000	0.989	0.978
领结形的 SCFN	2.492	0.920	0.936
	4.493	0.982	0.975
	6.999	0.983	0.976

从表 1 可以看出, 推力系数计算值和试验值能基本吻合. 当 NPR 小于设计落压比 4.64 时^[2], 喷管的推力系数明显减小. 这主要是因为过膨胀过程中推力损失增加.

表 2 为两种外形喷管在不同 NPR 下的流量系数 C_d 的计算值, 其中

$$C_d = m_p / m_i \tag{2}$$

式中 m_p 为实际流量, m_i 为喷管的理想等熵流量.

表 2 不同 NPR 下的流量系数 C_d 的计算值

Table 2 Calculation for C_d at different NPR

	落压比	计算值
六角形的 SCFN	2.497	0.955
	4.497	0.954
	6.000	0.954
领结形的 SCFN	2.492	0.951
	4.493	0.953
	6.999	0.952

从表 2 可以看出, 两种外形的 SCFN 的流量系数与 NPR 没有明显关系, 因为喷管在喉道附近已经达到了声速.

由表 1, 2 可以看出, 两种喷管的性能没有明显差别, 要比较两者的优劣, 还要进一步研究两喷管的出口结构对尾喷流掺混的影响.

4 结 论

本文采用数值方法对复杂形式球型收敛调节片喷管内流场进行了三维数值模拟. 结果表明:

(1) 两种喷管计算结果与试验结果能较好的吻合, 这说明本文所采用的计算方法和程序可以较真实的模拟两种 SCFN 内流场的三维流动情况.

(2) 两种喷管的扩张段流场在小 NPR 情况下均会有激波产生, 并伴有回流现象. 不同位置及不同截面静压力分布的差异体现了喷管的三维流动特性; 其中两喷管的结构不同也导致了其内流场流动的差异.

(3) 对于本文模拟的两种喷管, 当 NPR 小于设计压比 4.64 时, 喷管的推力系数较小; 随着 NPR 的增加, 喷管推力系数逐渐增大. 而流量系数与落压比无明显对应关系.

参考文献:

[1] 梁春华, 靳宝林, 李雨桐. 球形收敛调节片推力矢量喷管的发展[J]. 航空发动机, 2002, (3): 55-58
LIANG Chunhua, JIN Baolin, LI Yutong. Development of spherical convergent flap nozzle[J]. Journal of Aeroengine. 2002, (3): 55-58

[2] Wing D J. Static thrust and vectoring performance of spherical convergent flap nozzle with a nonrectangular divergent duct[R]. National Aeronautics and Space Administration TP-1998-206912, 1998

[3] 赵一鹏, 余少志. 复杂几何形状喷管内外三维流场的数值模拟[J]. 推进技术, 2000, 21(3): 30-33
ZHAO Yie, YU Shaozhi. Numerical simulation on internal and external flow fields of nozzle with complex geometry[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(3): 30-33

[4] Barth T J, Jespersen D. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes[R]. AIAA 89-0366, 1989

[5] Spalart P R, Allmaras S R. A one equation turbulence model for aerodynamic flows [R]. AIAA 93-0880, 1993.

[6] 罗静, 王强, 额日其太. 轴对称矢量喷管内流场特性的不同湍流模型计算[J]. 推进技术, 2003, 24(4): 326-329
LUO Jing, WANG Qiang, Eriqitai. Computation for the effect of turbulence models on internal performance for axisymmetric vectoring exhaust nozzles[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(4): 326-329