

文章编号: 1000-8055(2006) 02-0280-05

单斜面膨胀喷管几何参数对 流场和性能的影响

汪维娜¹, 王占学, 乔渭阳

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 基于 CFD 技术, 通过求解 Reynolds 平均 N-S 方程附以标准 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型, 数值研究了单斜面膨胀喷管 (SERN) 主要几何参数对其内部流场和性能的影响, 计算结果表明, SERN 扩张段上、下斜面长度和角度对喷管流场结构和性能有明显的影响, 随着上斜面长度的增加, 喷管从欠膨胀状态过渡到过膨胀状态, 在完全膨胀状态下, 推力系数最大, 存在某一最佳的上斜面角度, 在该角度下, 喷管推力系数最大, 同样地, 对于下斜面也存在最佳斜面长度和角度。

关键词: 航空、航天推进系统; 单斜面膨胀喷管; 斜面长度; 斜面角度

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Investigation of the Influence of Single Expansion Ramp Nozzle Geometric Parameters on the Flow Field and Performance

WANG Wei-na, WANG Zhan-xue, QIAO Wei-yang

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on CFD technology, the effects of major geometric parameters on performance of the single expansion ramp nozzle were numerically investigated by solving Reynolds average Navier-Stokes equations and standard two-equation $k-\epsilon$ turbulent models. The results show that upper ramp length, upper ramp angle, lower flap length, lower flap angle have evident effects on flow field structure and the performance of SERN. With the increase of upper ramp length, the expansion in SERN transits from under-expansion to over-expansion, thus an optimal upper ramp length is found to create maximal thrust coefficient. The upper ramp angle, lower flap length, and lower flap angle also have optimal values for SERN performance.

Key words: aerospace propulsion system; single expansion ramp nozzle; thrust coefficient; Navier-Stokes equations

对于飞行包线范围非常宽(高度0~30 km 或更高, 飞行 Ma 数从亚声、跨声、超声速扩展到高超声速)的高超声速飞行器来说, 基于飞行器/推

进系统/喷管一体化的考虑, 常常采用单膨胀斜面喷管 (Single Expansion Ramp Nozzle, 简称 SERN)^[1,2]。由于 SERN 属于非对称排气喷管, 几

收稿日期: 2005- 04- 28; 修订日期: 2005- 12- 22

基金项目: 国家863计划资助(2002AA723093)

作者简介: 汪维娜(1982-), 女, 陕西西安人, 西北工业大学动力与能源学院硕士生, 主要从事航空推进技术方面的研究。

何参数变化对其内部特有的流动结构、内外特性等都有非常重要的影响,因此,基于 CFD 技术,深入研究几何参数变化对 SERN 内外流场和特性的影响,寻找最优的 SERN 几何参数,对保证高速推进系统一体化性能具有非常重要的作用。关于 SERN 喷管内外流场数值计算的工作,国外已经发表了许多文章,但这些文章的工作都主要集中在对某一固定几何条件的 SERN 内部流场研究,很少涉及对 SERN 关键几何参数变化对喷管气动性能影响的详细计算研究^[3,4],为了深入研究 SERN 几何和气动参数的相互耦合影响关系,本文采用数值求解雷诺平均 N-S 方程附以湍流模型的方法,详细计算分析了 SERN 主要几何参数对其流场和特性的影响。从计算结果可发现,在一定的喷管膨胀比范围内,存在最优的几何参数。

1 物理模型和数值方法

本研究对 SERN 流场的数值模拟是通过求解 Reynolds 平均 Navier-Stokes 方程为基础进行研究的,湍流流动采用 $k-\epsilon$ 模型,时间上采用 Jameson 等人发展的变步长四步 Runge-Kutta 格式对控制方程进行时间域离散,对于粘性流动计算,尽管离散方程中包含了粘性扩散项,但是由于非线性效应,特别是在剪切层计算中采用高形状比的网格时,物理耗散项不足以保证计算稳定,因此,在计算中采用 Jameson 的人工粘性模型^[5]。为

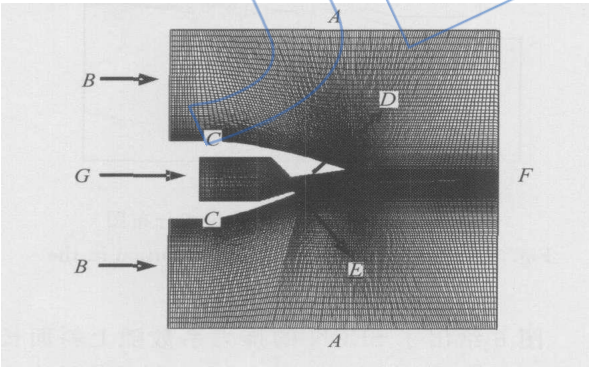


图1 单斜面膨胀喷管网格图

Fig.1 SERN grid

A — 侧远方边界; B — 喷管外流进口边界;
C — 壁面; D — 喷管出口上斜面;
E — 喷管出口下斜面; F — 喷管后远方边界;
G — 喷管内流进口边界

了加速收敛,采用了当地时间步长加隐式残差的加速收敛技术^[6]。由于本文所研究的 SERN 横截面为矩形,流动特征主要以二维为主,因此对三维

SERN 来说,采用二维模型进行数值模拟是合理的。考虑到远场对 SERN 流场的影响,在数值计算的过程中,扩大了计算的区域,预先的计算结果表明:沿高度方向和长度方向分别向外延伸的长度等于3倍的喷管入口高度,对于计算机内存、计算速度和计算结果是可行的。计算网格的数目对流场有一定的影响,本文的研究中,网格数为 150×160 ,采用代数法生成的计算网格如图1所示。

2 边界条件和喷管性能计算

2.1 边界条件

在计算中,涉及到的边界条件有:喷管内流进口边界条件、喷管外流进口边界条件、壁面边界条件、侧远方边界条件、喷管后远方边界条件,各边界条件的具体定义如下:

- (1) 喷管内流进口边界条件:气流为亚音速气流,只需给定进口总压 $P^* = 794\,388\text{ Pa}$, 总温 $T^* = 302\text{ K}$ 和气流角 $\alpha = 0^\circ$ 。
- (2) 喷管外流进口边界条件:与内流进口边界条件相似,其中总压 $P^* = 129\,240.4\text{ Pa}$, 总温 $T^* = 288.15\text{ K}$, 气流角 $\alpha = 0^\circ$ 。
- (3) 壁面边界条件:壁面边界采用无滑移边界条件,并假定物面是绝热壁面。
- (4) 侧远方边界条件:侧远方边界离主流较远(参看图1),边界条件为自由边界。
- (5) 喷管后远方边界条件:给定压力为环境压力。

2.2 SERN 性能计算方法

与常规喷管类似,本文也以推力系数来衡量几何参数变化对 SERN 的影响,其中,SERN 的实际推力可由下式求出:

$$\vec{F} = \sum [\rho \vec{V}(\vec{V} \cdot \vec{n}) + (P - P_\infty) \cdot \vec{n}] \Delta A \quad (1)$$

式中: ΔA 是喷管出口单元的表面积。

理想状态推力可由一维等熵流动方程确定:

$$F_i = \frac{\frac{2\gamma R}{\gamma-1} W_p}{T_j^* \left[1 - \left(\frac{P_\infty}{P_j^*} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (2)$$

3 计算结果分析

3.1 程序考核

为了考核本文发展的单斜面膨胀喷管几何参

数对流场和性能影响的数学模型和方法的正确性,本文选取了文献[7]的算例,网格的处理方法、求解器的选择等均与本文的相同。

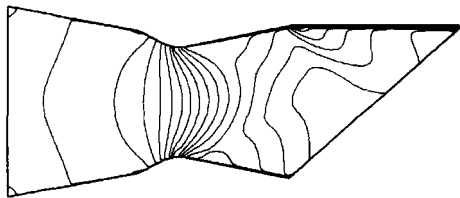


图2 等马赫数分布图

Fig. 2 Mach number contour distribution

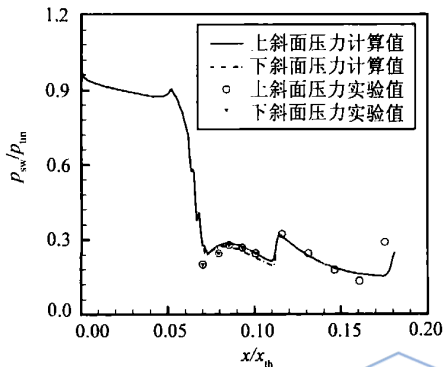


图3 上下壁面压力图

Fig. 3 Upper ramp and lower ramp wall pressure

图2表示了 SERN 等马赫数线的分布图,图3表示了 SERN 上下斜面静压的分布图,可以看出在所采用的数学模型和方法下,文献[7]SERN 的数值模拟结果和实验值吻合较好,从而说明本文发展的单斜面膨胀喷管几何参数对流场和性能影响的数学模型和方法正确可行。

3.2 上斜面长度对 SERN 流场和性能的影响

本文在计算 SERN 上斜面长度对流场和性能的影响时,保持上斜面角度 8.75° 、下斜面轴向长度 0.11 m 、下斜面角度 -6.25° 不变,而上斜面长度从 $0.25\sim 0.87\text{ m}$ 变化。

图4给出了上斜面长度分别为 $0.25, 0.36, 0.87\text{ m}$ 时,SERN 的等马赫数分布,可以明显看到当上斜面长度为 0.25 m 时,喷管处于欠膨胀状态,在喷管上斜面后方,由于出口气流的压力大于背压,内流与外流形成的自由边界向外扩张。当喷管上斜面长度为 0.36 m 时,喷管处于近似完全膨胀状态。当上斜面长度为 0.87 m 时,喷管过膨胀程度增加,上斜面尾缘处有激波出现,并且随着上斜面长度的增加,激波强度增加。

图5给出了上斜面长度为 0.60 m 时,计算流域内的等马赫数分布图,可以看出在喷管后方的流场呈“麻花”状,这是由于喷管出口膨胀气流和自由边界相互作用形成的。

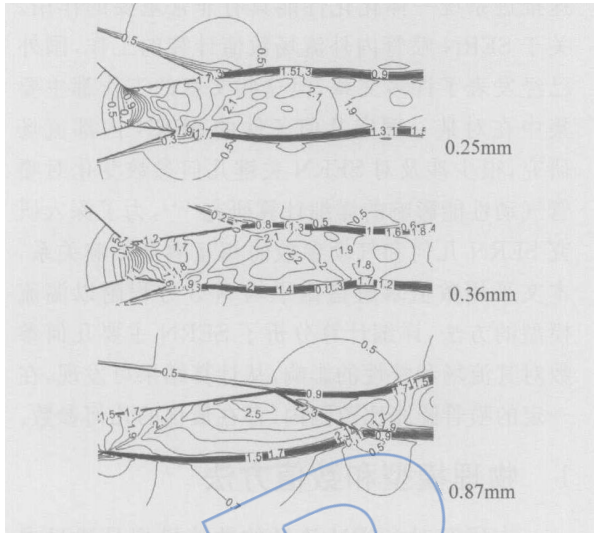


图4 上斜面长度变化时马赫数分布图

Fig. 4 Mach number contour distribution with variety of upper ramp length

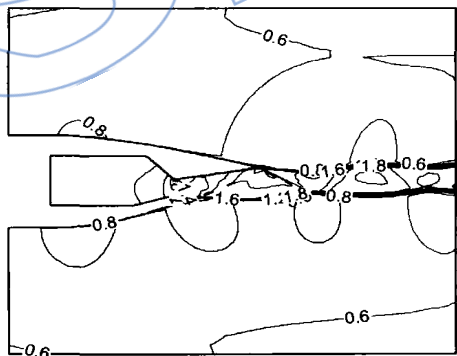


图5 计算流域内等马赫数线分布图

Fig. 5 Mach number contour distribution in the whole region

图6给出了 SERN 的推力系数随上斜面长度的变化关系,从图可以看出,当上斜面的长度为 0.36 m 时,喷管的推力系数最大,上斜面长度小于 0.36 m 时,SERN 处于欠膨胀状态,推力系数较小;当上斜面长度大于 0.36 m 时,SERN 处于过膨胀状态,也会使推力系数下降。

3.3 上斜面角度对 SERN 流场和性能的影响

计算 SERN 上斜面角度对流场和性能的影响时,保持上斜面轴向长度 0.558 m 、下斜面轴向长度 0.11 m 、下斜面角度 -6.25° 不变,而上斜面

角度从 $5^{\circ} \sim 12.5^{\circ}$ 变化。

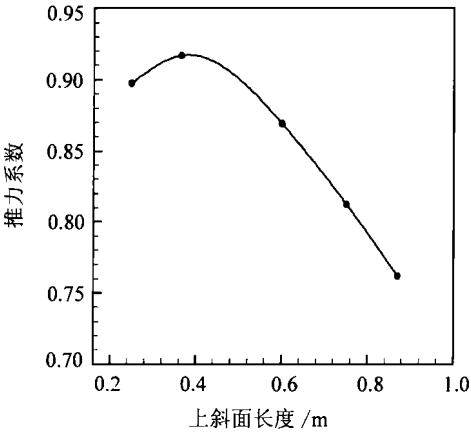


图6 推力系数随上斜面长度变化关系

Fig. 6 Thrust coefficient with variety of upper ramp length

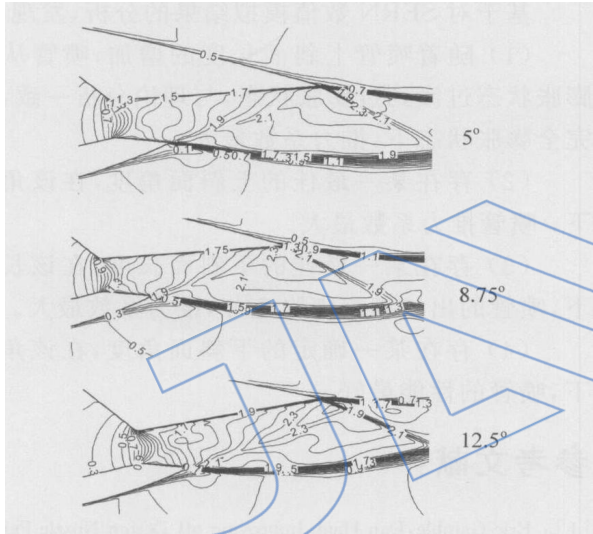


图7 上斜面角度变化时马赫数分布图

Fig. 7 Mach number contour distribution with variety of upper ramp angle

图7给出了上斜面角度分别为 5° 、 8.75° 、 12.50° 时,SERN 的等马赫数分布。当上斜面角度较小时,喷管内膨胀(气流从喷管喉口到下斜面尾部的膨胀过程)面积比较小,内膨胀后的气流压力较高,膨胀程度较差,压力较高的内膨胀气流迫使下气体边界向下扩张。随着SERN 上斜面角度增加,内膨胀面积增加,下气体边界向上偏转。

图8给出了SERN 的推力系数随上斜面角度的变化关系,可以看出,当上斜面角度为 8.75° 时,推力系数最大。

3.4 下斜面长度 SERN 对流场和性能的影响

计算 SERN 下斜面长度对喷管流场和性能

的影响时,保持上斜面轴向长度 0.558 m 、上斜面角度 8.75° 、下斜面角度为 6.25° 不变,而下斜面长度从 $0.05 \sim 0.2\text{ m}$ 变化。

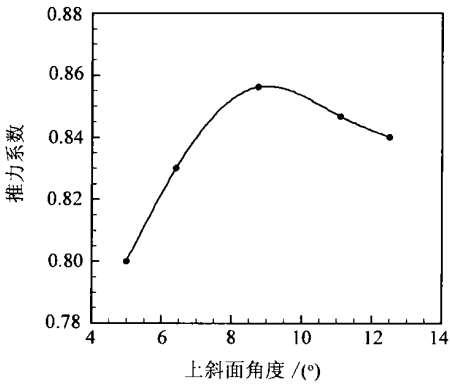


图8 推力系数随上斜面角度变化关系

Fig. 8 Thrust coefficient with variety of upper ramp angle

图9给出了下斜面长度分别为 0.05 、 0.09 和 0.174 m 时,SERN 的等马赫数分布。可以看到,下斜面长度越短,下自由边界下移现象严重。

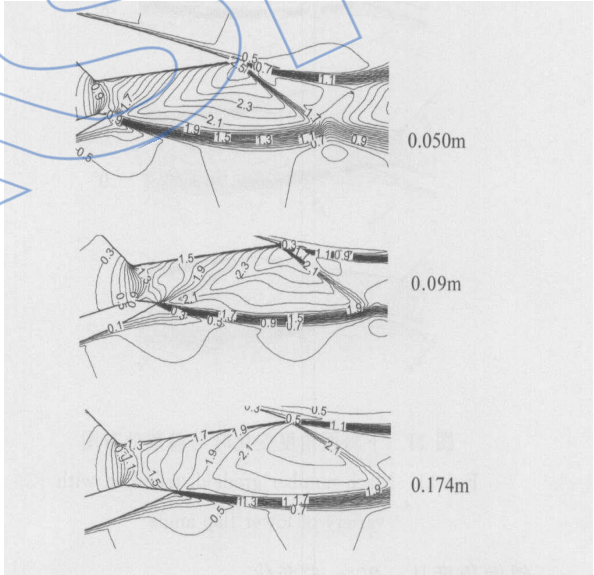


图9 下斜面长度变化时马赫数分布图

Fig. 9 Mach number contour distribution with variety of lower flap angle

图10给出了SERN 的推力系数随下斜面长度的变化关系,可以看出,当下斜面长度为 0.15 m 时,推力系数取得最大。

3.5 下斜面角度对 SERN 流场和性能的影响

计算 SERN 下斜面角度对喷管流场和性能的影响时,保持上斜面轴向长度 0.558 m 、上斜面角度 8.75° 、下斜面轴向长度 0.11 m 不变,而下

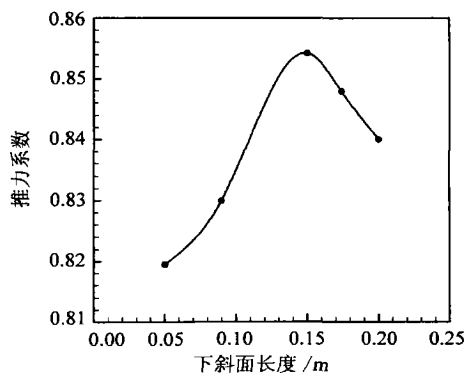


图 10 推力系数随下斜面长度变化关系

Fig. 10 Thrust coefficient with variety of lower flap length

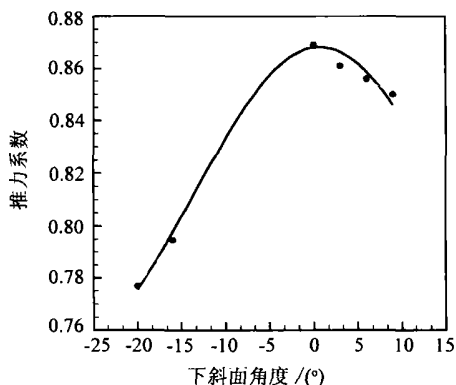


图 12 推力系数随下斜面角度变化关系

Fig. 12 Thrust coefficient with variety of lower flap angle

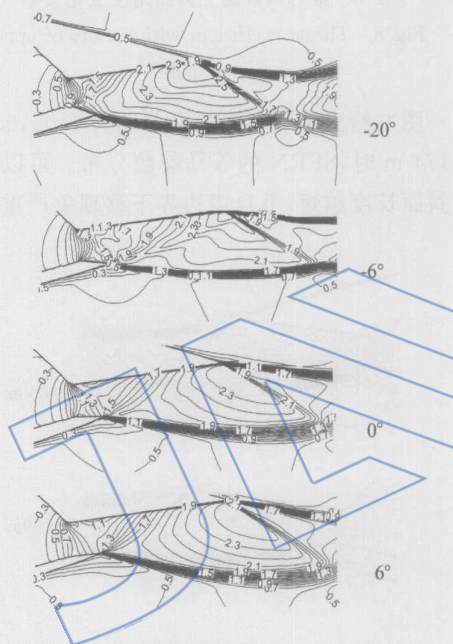


图 11 下斜面角度变化时马赫数分布图

Fig. 11 Mach number grade distribution with variety of lower flap angle

斜面角度从 $-20^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 变化。

图 11 给出了下斜面角度分别为 -20° 、 -6° 、 0° 和 6° 时, SERN 的等马赫数分布, 可以看出, 当下斜面角度小于 0° 时, 角度越小, 下自由边界下移现象越明显; 当下斜面角度大于 0° 时, 角度越大, 内膨胀程度越差, 下自由边界下现象越明显。

图 12 给出 SERN 的推力系数随下斜面角度的变化关系。从图可以看出, 当下斜面角度小于 -3° 时, 喷管的推力系数随着角度的增加而增加, 下斜面角度大于 -3° 时, 随着角度的增加推力系数减小。

4 结 论

基于对 SERN 数值模拟结果的分析, 发现:

- (1) 随着喷管上斜面长度的增加, 喷管从欠膨胀状态过渡到过膨胀状态, 与理论分析一致, 在完全膨胀状态下, 推力系数最大。
- (2) 存在某一最佳的上斜面角度, 在该角度下, 喷管推力系数最大。
- (3) 存在某一最佳的下斜面长度, 在该长度下, 喷管的出口气流膨胀充分, 推力系数最大。
- (4) 存在某一确定的下斜面角度, 在该角度下, 喷管的性能最好。

参考文献:

- [1] Eric Gamble, Dan Haid. Improving off Design Nozzle Performance Using Fluidic Injection [R]. AIAA 2004-1206.
- [2] Karen A Deere. Experimental and Computational Investigation of a Translating-Throat, Single-Expansion-Ramp Nozzle [R]. NASA/TP-1999-209138.
- [3] Carlson J. Prediction of Static Performance for Single Expansion Ramp Nozzles [R]. AIAA 93-2571, 1993.
- [4] Vladimir N Zudov, Anatoliy V Lokotko, Anatoliy I Rylov. Numerical and Experimental Investigation of Two-Dimensional Asymmetric Nozzles [R]. AIAA 96-3141, 1996.
- [5] Jameson A. Numerical Calculation of the Three Dimensional Transonic Flow over a Yawed Wing [R]. Proceeding AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Palm Spring, A., July 1973.
- [6] Jameson A, Schmidt W, Turkel E. Numerical Solution of the Euler Equations by Finite Volume Methods Using Runge-Kutta Time Stepping Schemes [R]. AIAA-81-1259.
- [7] Wilmoth R G, Leavitt L D. Navier-Stokes Predictions of Multifunction Nozzle Flows [R]. SAE-871753, 1987.