

文章编号: 1000-8055(2008)05-0822-08

基于数值模拟的轴对称矢量喷管内流特性研究

邵万仁^{1,2}

- (1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083;
2. 中国航空工业第一集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 采用三维有粘定常程序计算了轴对称矢量喷管的内流特性, 研究了尺寸缩比、冷热态的影响, 并与冷态缩比模型矢量特性试验结果进行了对比; 给出了设计工况的内流特性, 讨论了几何矢量角、喷管落压比对内流特性的影响. 研究表明, 尺寸缩比、冷热态对内流特性的影响均很小, 冷态缩比模型试验结果可以真实地反映设计工况的内流特性, 轴对称矢量喷管在设计工况下具有良好的内流特性, 并且几何矢量角、喷管落压比对内流特性均有影响.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 轴对称矢量喷管; 内流特性; 数值模拟

中图分类号: V345 11

文献标识码: A

Study of internal performance for an axisymmetric vectoring exhaust nozzle using numerical simulation

SHAO Warren^{1,2}

- (1. School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics Astronautics, Beijing 100083, China;
2. Shenyang Aeroengine Research Institute,
China Aviation Industry Corporation I, Shenyang 110015, China)

Abstract: A numerical simulation of internal performance for an axisymmetric vectoring exhaust nozzle was conducted by applying a 3-D viscous flow program. The effects of model scale and flow temperature on the results of simulation were investigated and the results of the simulation were compared to those of scale model experiments. The internal performance of a real engine in design condition was obtained and the effects of different geometrical angles and nozzle pressure ratios (NPR) on it were discussed. The investigation shows that: model scale and flow temperature have little effect on the internal performance; the results of scale model experiments can truly represent the internal performance of a real engine in design condition; the axisymmetric vectoring exhaust nozzle has excellent internal performance in design condition; and both geometrical angle and NPR affect the internal performance.

Key words: aerospace propulsion system; axisymmetric vectoring exhaust nozzle; internal performance; numerical simulation

收稿日期: 2007-05-16; 修订日期: 2007-07-31

作者简介: 邵万仁(1967-), 男, 辽宁开原人, 北京航空航天大学资源与动力工程学院博士生, 中国航空工业第一集团公司沈阳发动机设计研究所高级工程师, 主要从事航空发动机排气系统设计与研究.

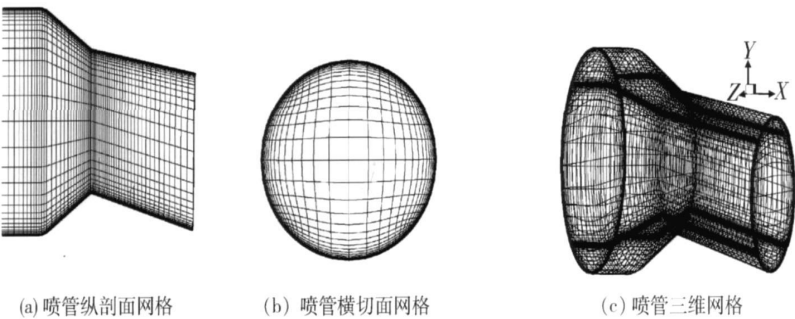


图 1 计算网格
Fig. 1 Computational grid

内流特性研究是轴对称矢量喷管(以下简称 AVEN)研究的重要组成部分,对 AVEN 结构设计、发动机/喷管控制规律匹配、飞/发匹配等的研究具有重要意义,而数值模拟是 AVEN 内流特性研究的有效手段^[1]. 为此,国内外利用 CFD 技术对 AVEN 的内流特性进行了数值分析^[1-3],但这些数值分析研究采用的几何和气动参数与试验验证的模型喷管参数一致,没有考虑参数不同对数值模拟精度的影响,并且缺少对 AVEN 偏转效率 η_b (推力矢量角 δ 与几何矢量角 δ_g 之比)、推力效率 η_F (偏转时总推力与不偏转时总推力之比)的研究. 本文采用专用程序对 AVEN 在非加力和加力两种特定工况下的内流特性进行了数值分析,研究了尺寸缩比和冷热态对计算结果的影响,并与 AVEN 的冷态缩比模型矢量特性试验结果进行了对比;比较全面地研究了 AVEN 的推力系数 C_F 、流量系数 C_d 、推力矢量角 δ 、偏转效率 η_b 和推力效率 η_F ,讨论了几何矢量角 δ_g 和喷管落压比 NPR 对内流特性的影响.

1 计算程序和计算方法

计算采用的是专为 AVEN 流场计算开发的三维有粘定常程序,程序采用结构网格方法生成三维结构网格,计算网格如图 1 所示,其中轴向网格用代数法生成并采用指数规律加密,周向网格用 TTM 法生成,计算中网格数目均为 $62 \times 37 \times 37$;采用 Jamson 有限体积法划分网格,湍流模型为 B-L 代数模型. 程序进口边界上给定亚声速来流的总温、总压和流动方向角,流动速度由内点一阶外插;出口边界上,当气流超声速流出时所有参数外推,当气流亚声速流出时给定出口反压,其他量采用与超声速出口边界类似的方法外推. 物面边界上速度采用无穿透边界条件,压力采用零法向梯度,壁面温度采用绝热壁面条件.

2 计算相关参数

AVEN 计算工况及参数见表 1,表中 p_H 为试验研究工况下的喷管出口反压, $0.533p_H$ 为设计工况下的喷管出口反压. 其中 AVEN 的设计工

表 1 计算的工况及喷管参数

Table 1 Computational engine status and nozzle parameters

计算 工况	非加力/ 加力	设计落 压比	全尺寸/ 缩比	冷态/ 热态	出口 反压	备 注
FJL1	非加力	3.2	全尺寸	热态(639 K)	$0.533p_H$	同时计算研究 NPR ($NPR = 2.6 \sim 3.5$) 的影响
FJL2				冷态(300 K)	$0.533p_H$	
FJL3			缩比 (1: 17)	热态(639 K)	p_H	与试验研究参数一致
FJL4				热态(639 K)	$0.533p_H$	
FJL5				冷态(300 K)	p_H	
JL1	加力	3.0	全尺寸	热态(1 970 K)	$0.533p_H$	同时计算研究 NPR ($NPR = 2.4 \sim 3.3$) 的影响
JL2				冷态(300 K)	$0.533p_H$	
JL3			缩比 (1: 17)	热态(1 970 K)	p_H	与试验研究参数一致
JL4				热态(1 970 K)	$0.533p_H$	
JL5				冷态(300 K)	p_H	

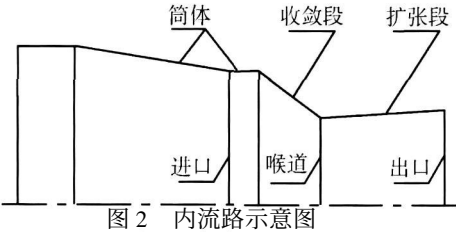


图 2 内流路示意图

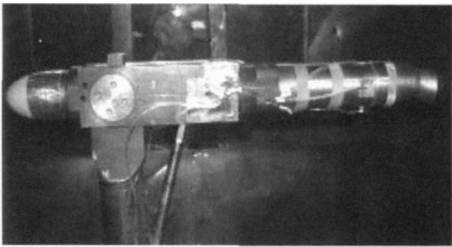


图 3 缩比模型试验照片

Fig. 3 Photo of scale model experiment

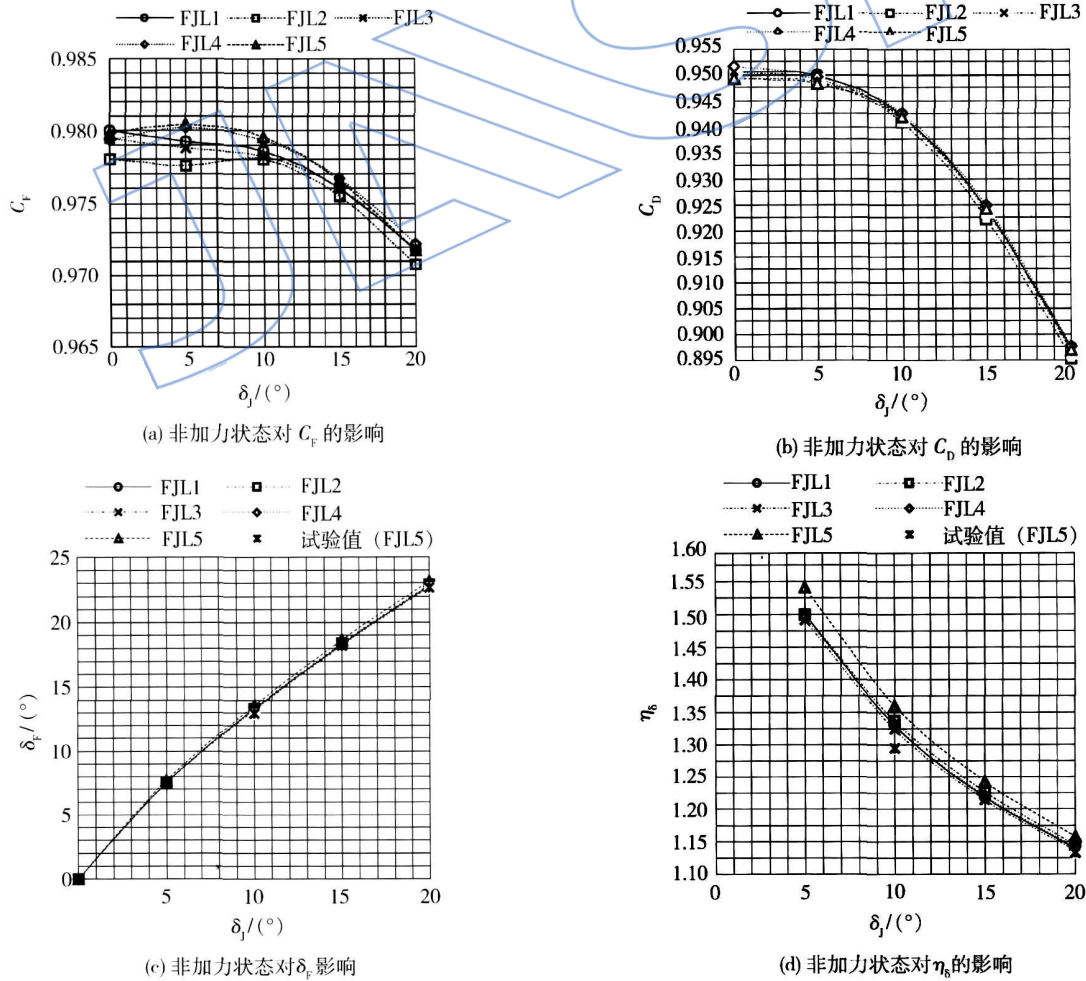
况在非加力和加力时分别为 FJL1 和 JL1; 缩比模型矢量特性试验采用台式六分力动力应变天平测力, 试验工况在非加力和加力时分别为 FJL5 和 JL5. AVEN 非矢量状态 (即 $\delta = 0^\circ$) 的内流路设计见图 2, 其中非加力和加力时喷管出口与喉道面积比分别为 1.15 和 1.10, 喷管进口与喉道面积比分别为 2.14 和 1.13; 缩比模型矢量特性试验照片见图 3.

3 计算结果及分析

3.1 尺寸缩比、冷热态对内流特性的影响

尺寸缩比、冷热态对 AVEN 内流特性影响的

计算结果见图 4. 由图 4 可以看出, 无论是非加力工况还是加力工况, 尺寸缩比、冷热态对 AVEN 内流特性的影响均很小, 若以在非加力和加力设计工况 (即 FJL1 和 JL1 计算工况) 为基准, 则尺寸缩比、冷热态对 C_F , C_D 和 η_F 的综合影响在 0.75% 以内, 对 η_b 的综合影响在 2.72% 以内, 其中尺寸缩比对 C_F , C_D 和 η_F 的影响在 0.70% 以内, 对 η_b 的影响在 2.52% 以内; 冷热态对 C_F , C_D 和 η_F 的影响在 0.58% 以内, 对 η_b 的影响在 0.63% 以内. 此外, 由图 4 可知, 在喷管落压比 NPR 保持不变的情况下, 喷管出口反压的改变对 AVEN 内流特性无影响. 上述计算结果与喷管缩



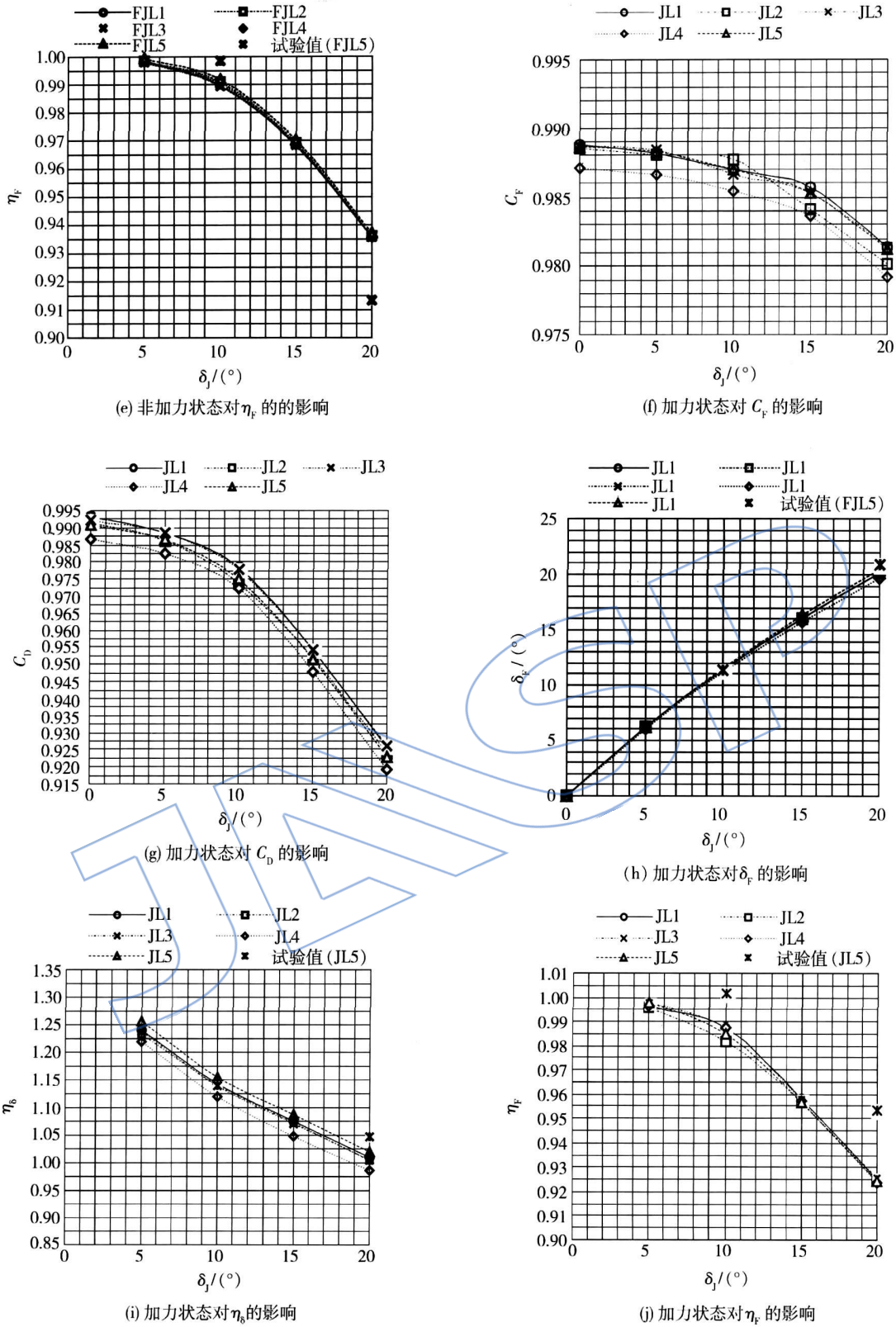


图 4 尺寸缩比、冷热态对内流特性的影响

Fig. 4 Effect of model scale and flow temperature on internal performance

比模型试验的相似理论^[4]相符合,即只要模型喷管与全尺寸喷管几何相似、喷管落压比相同,则冷态缩比模型的试验结果(即 C_f 、 C_d 、 η_b 、 η_r)就可以比较真实地反映 AVEN 在设计工况下的内流特性。

3.2 设计工况下的内流特性

AVEN 在非加力和加力设计工况(即 FJL1 和 JL1)下的内流特性计算结果见表 2 和图 4,由

计算结果可以看出: 在非矢量状态, 非加力工况 $C_F = 0.980\ 0$, $C_D = 0.950\ 5$; 加力工况 $C_F = 0.988\ 8$, $C_D = 0.993\ 1$. 在矢量状态, δ_F 随着 δ_i 的加大而增大, $\delta_F > \delta_i$, 同时内流特性变差, 其中 C_D 和 η_b 的变化相对显著, 但在 $\delta_i \leq 20^\circ$ 情况下仍具有较好的内流特性, 即: 非加力工况 $C_F \geq 0.971\ 7$, $C_D \geq 0.897\ 3$, $\eta_b \geq 1.139\ 5$, $\eta_F \geq 0.936\ 0$; 加力工况 $C_F \geq 0.981\ 4$, $C_D \geq 0.925\ 8$, $\eta_b \geq 1.009\ 8$, $\eta_F \geq 0.925\ 3$, 并且 η_b 比 δ_F 与 δ_i 的差值更能反映出 AVEN 的矢量偏转效果, 而 η_F 也比 C_F 的变化更能直接地体现 AVEN 矢量偏转造成的推力损失. 矢量特性的计算结果与试验数据非常接近, 计算误差很小, 其中非加力工况 $\eta_b \geq 2.72\%$, $\eta_F \geq 2.47\%$; 加力工况 $\eta_b \geq 3.57\%$, $\eta_F \geq 2.94\%$. 由此可见, δ_i 对 AVEN 内流特性影响明显, η_b 和 η_F 能够更直观地反映 AVEN 的矢量偏转特性, AVEN 在设计工况下具有良好的内流特

性, 本文计算采用的 AVEN 三维流场计算程序具有很高的计算精度, 该程序的计算结果可信, 可以满足 AVEN 内流特性研究的需要.

C_F , η_b 和 η_F 随着 δ_i 加大而减小的原因可用图 5 来解释, 即: 随着 δ_i 的加大, 喷管出口附近的壁面单边扩张角最小处(即上壁面)的气流静压越来越大(大于喷管出口反压), 使该处气流处于欠膨胀状态; 而单边扩张角最大处(即下壁面)的气流静压则越来越小(小于喷管出口反压), 使该处气流处于过膨胀状态. 这表明, 喷管出口附近的内流场随 δ_i 的加大而变得越来越复杂, 既可能存在膨胀波和激波, 也可能会因气流分离而产生回流区, 从而使流动损失增加, 推力减小, 气流偏转能力降低^[2-3].

C_D 随着 δ_i 加大而减小的原因可用图 6 来解释, 即: 喷管扩张段的偏转使几何喉道处的气流方向相应偏转, 导致气流实际喉道位置($Ma = 1$) 偏

表 2 AVEN 在设计工况下的内流特性计算结果
Table 2 Numerical results of internal performance in designing condition

设计工况	$\delta_i / (^\circ)$	C_F	C_D	$\delta_F / (^\circ)$		η_b		η_F	
		计算值	计算值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值
非加力	0	0.980 0	0.950 5	0	0	—	—	—	—
	5	0.979 3	0.949 9	7.502	—	1.500 5	—	0.998 6	—
	10	0.978 6	0.942 2	13.296	12.944	1.329 6	1.294 4	0.989 8	0.998 6
	15	0.976 0	0.924 2	18.288	—	1.219 2	—	0.968 4	—
	20	0.971 7	0.897 3	22.789	22.657	1.139 5	1.132 8	0.936 0	0.913 4
加力	0	0.988 8	0.993 1	0	0	—	—	—	—
	5	0.988 2	0.988 5	6.202	—	1.240 4	—	0.996 8	—
	10	0.987 0	0.978 4	11.432	11.397	1.143 2	1.139 7	0.987 5	1.001 5
	15	0.985 6	0.954 3	16.126	—	1.075 1	—	0.957 9	—
	20	0.981 4	0.925 8	20.188	20.936	1.009 4	1.046 8	0.925 3	0.953 3

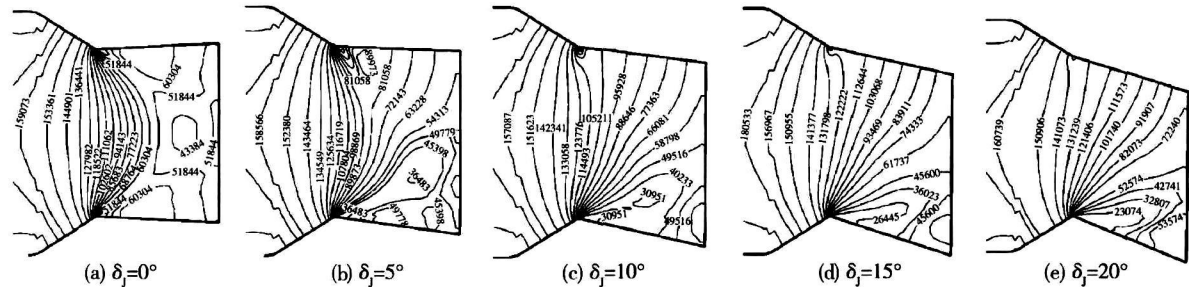


图 5 非加力状态等静压线分布图(单位= Pa)
Fig. 5 Static pressure contour distribution in nonr afterburning condition(Unit: Pa)

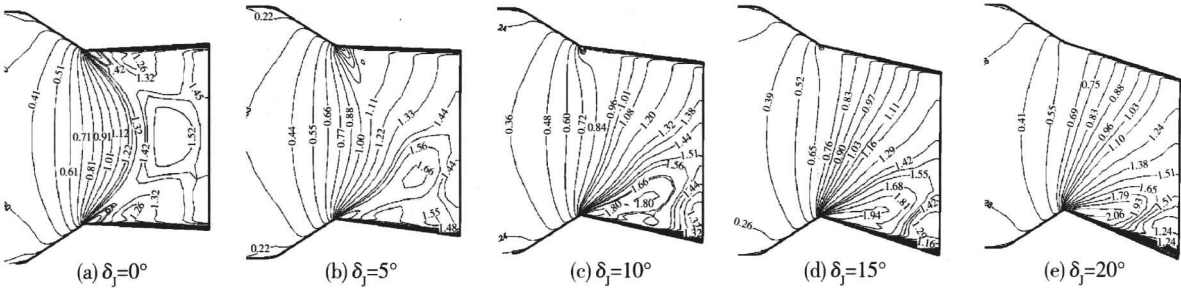


图 6 非加力状态等马赫数线图

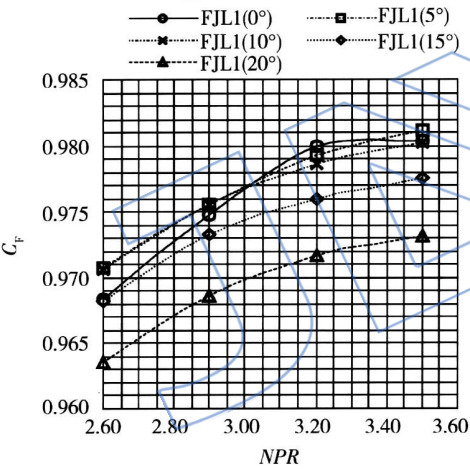
Fig. 6 Mach number contour distribution in non afterburning condition

转,并且随着 δ_j 的加大,气流实际喉道位置相对于几何喉道位置的偏转也越来越显著,有效喉道面积加速减小^[5],从而导致 C_D 减小。

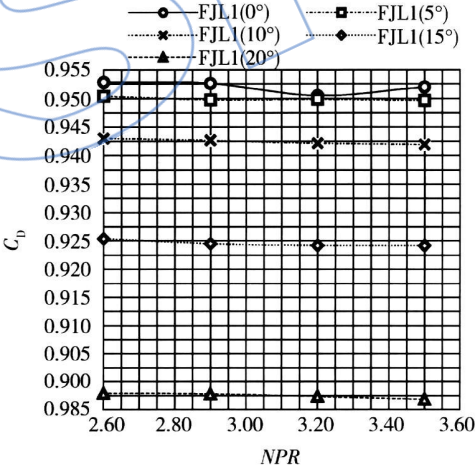
3.3 喷管落压比对内流特性的影响

由于尺寸缩比和冷热态对 AVEN 内流特性的影响均很小,并且为使喷管落压比 NPR 对 AVEN 内流特性影响的图示更加清晰,本文只对非加力和加力的设计工况(即 FJL1 和 JL1 计算工况)进行了 NPR 的影响研究,计算结果见图 7。由图 7 可知, NPR 对

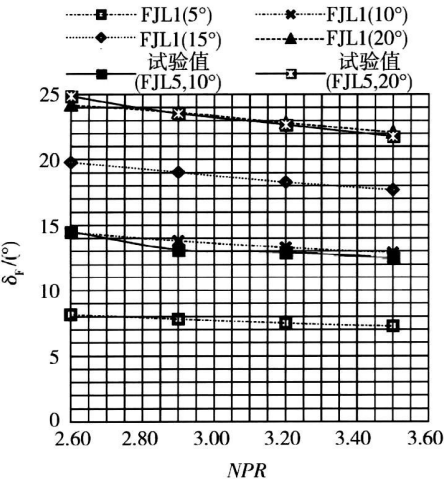
AVEN 的内流特性有影响,随着 NPR 的增大(即由过膨胀→完全膨胀→欠膨胀),非加力工况和加力工况内流特性的变化趋势基本相同,即: C_F 明显增大, C_D 和 η_F 略有减小, δ_j 和 η_b 明显减小。此外, NPR 对 AVEN 矢量特性(即 δ_j , η_b 和 η_F)影响的计算结果与缩比模型矢量特性试验结果吻合较好,其中非加力工况 δ_j 相差的最大值为 0.679°, η_b 和 η_F 的最大误差分别为 5.17% 和 2.47%;加力工况 δ_j 相差的最大值为 0.987°, η_b 和 η_F 的最大误差分别为 4.47% 和 4.06%。



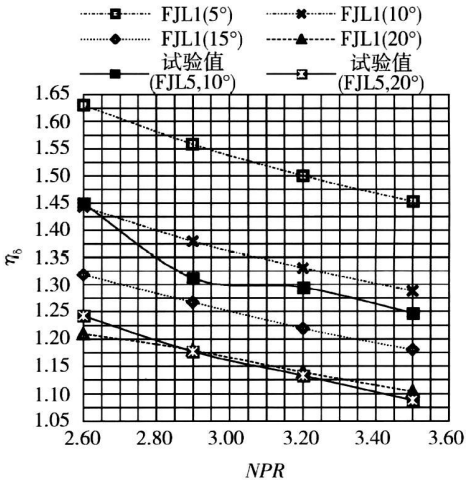
(a) 非加力状态 NPR 对 C_F 的影响



(b) 非加力状态 NPR 对 C_D 的影响



(c) 非加力状态 NPR 对 δ_j 的影响



(d) 非加力状态 NPR 对 η_b 的影响

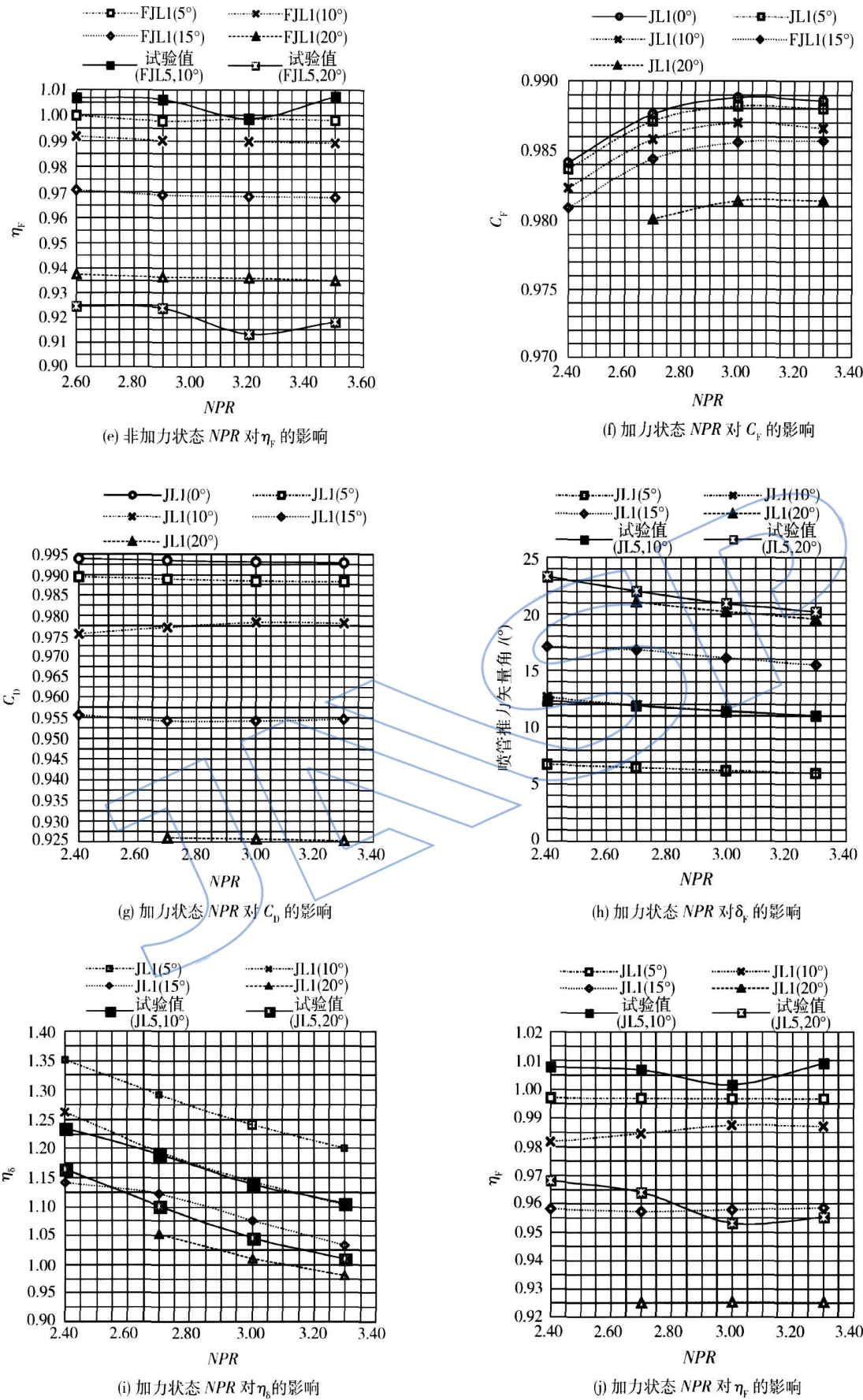


图 7 喷管落压比 NPR 对内流特性的影响
Fig. 7 Effect of NPR on internal performance

本文的 NPR 对 C_F 、 δ_f 的影响分别是单调增大和单调减小, 此结果与文献[2] 的非单调变化不同, 主要原因有两个: 一是本文研究的 NPR 变化范围(非加力工况 $NPR=2.6\sim 3.5$, 加力工况 $NPR=2.4\sim 3.3$)均选在设计落压比附近, 远小于文献[2]/ $NPR=2\sim 8$ 的范围; 二是本文研究的 AVEN 内流路设计参数和气动参数与文献[2] 不同。

4 结 论

1) 无论是非加力工况还是加力工况, 尺寸缩比和冷热态对 AVEN 内流特性的影响均很小, 以非加力和加力设计工况为基准, 则尺寸缩比和冷热态对 C_F 、 C_D 和 η_F 的综合影响在 0.75% 以内, 对 η_b 的综合影响在 2.72% 以内。因此只要满足几何相似、喷管落压比相同的条件, 则冷态缩比模型的试验结果就可以比较真实地反映 AVEN 在设计工况下的内流特性。

2) δ 对 AVEN 内流特性影响明显, η_b 和 η_F 能够更直观地反映 AVEN 的矢量偏转特性, AVEN 在设计工况下具有良好的内流特性, 其中在非矢量状态, 非加力工况 $C_F=0.980\ 0$, $C_D=0.950\ 5$, 加力工况 $C_F=0.988\ 8$, $C_D=0.993\ 1$; 在矢量状态, δ_f 随着 δ 的加大而增大, $\delta_f>\delta$, 同时内流特性变差, 但在 $\delta\leq 20^\circ$ 情况下, 非加力工况 $C_F\geq 0.971\ 7$, $C_D\geq 0.897\ 3$, $\eta_b\geq 1.139\ 5$, $\eta_F\geq 0.936\ 0$, 加力工况 $C_F\geq 0.981\ 4$, $C_D\geq 0.925\ 8$, $\eta_b\geq 1.009\ 8$, $\eta_F\geq 0.925\ 3$ 。计算结果与冷态缩比

模型试验数据非常吻合, 说明计算采用的三维流场计算程序具有很高的计算精度, 可以满足 AVEN 内流特性研究的需要。

3) NPR 对 AVEN 内流特性有影响, 在本文研究的 NPR 变化范围内, 随着 NPR 的增大(即由过膨胀 $\rightarrow$ 完全膨胀 $\rightarrow$ 欠膨胀), 非加力工况和加力工况的内流特性变化趋势基本相同, 即: C_F 明显增大, C_D 和 η_F 略有减小, δ_f 和 η_b 明显减小。

参考文献:

[1] Matesanz A, Velazquez A, Rodriguez M. Numerical study on some fluid dynamics aspects of axisymmetric thrust vectoring nozzles[R]. AIAA-94-3365.

[2] 罗静, 王强, 额日其太. 轴对称矢量喷管内流特性的不同湍流模型计算[J]. 航空动力学报, 2003, 24(4): 327-340.

LUO Jing, WANG Qiang, Eriqitai. Computation for the effect of turbulence models on internal performance for axisymmetric vectoring exhaust nozzles[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 24(4): 327-340.

[3] 马会民, 樊思齐, 卢燕. 分离流动对矢量喷管性能的影响[J]. 推进技术, 2003, 24(5): 421-424.

MA Huimin, FAN Siqi, LU Yan. Effects of flow separation on the performance of thrust vectoring nozzle[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(5): 421-424.

[4] Сосунов В. А., Чепкин В. М. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок[М]. Москва: Издательство МАИ, 2003.

[5] 刘大响主编. 航空发动机设计手册: 第 7 册[М]. 北京: 航空工业出版社, 2000.