

文章编号:1000-8055(2011)11-2563-08

混合排气二元收敛喷管气动与红外隐身 综合设计方法

李 娜¹, 吉洪湖¹, 黄 伟^{1,2}, 陈 俊¹, 斯 仁¹, 刘常春¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国人民解放军 徐州空军学院 航空四站系, 江苏 徐州 221000)

摘 要: 为使混合排气二元收敛喷管的设计在满足发动机推力性能要求的同时,也具有良好红外特征信号抑制效果,从固定式混合排气二元收敛喷管的设计要求出发,提出了一套混合排气二元收敛喷管气动与红外隐身综合设计的方法和流程,并通过算例计算验证了该设计方法的可行性。另外,计算结果表明:二元喷管的进口截面位置、喷管总长、出口面积以及出口宽高比等几何参数对实现喷管推力性能均起到关键作用;而合理确定出口宽高比,对实现喷管红外隐身性能具有重要作用。

关 键 词: 二元收敛喷管; 气动特性; 红外隐身; 流量匹配; 设计方法

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Comprehensive design of aerodynamic and infrared stealth of 2-D convergent nozzle with mixed flow

LI Na¹, JI Hong-hu¹, HUANG Wei^{1,2}, CHEN Jun¹,
Siren¹, LIU Chang-chun¹

(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Department of Aerial Four Stations, Xuzhou Air Force College,
The Chinese People's Liberation Army, Xuzhou Jiangsu 221000, China)

Abstract: A design method of two-dimensional convergent nozzle of mixed flow turbofan engine was developed to meet aerodynamic and infrared stealth requirements. The feasibility of the design procedures was verified by numerical simulation. And the results indicate that nozzle inlet section position, nozzle length, throat area and aspect ratio properly play a key role for the required nozzle gross thrust. Choosing a reasonable aspect ratio is important for meeting the infrared stealth requirement.

Key words: two-dimensional convergent nozzle; aerodynamic performance;
infrared stealth; mass matching; design procedures

随着探测技术和制导武器装备技术的快速发展,“隐身”已成为现代军用飞机设计的一项重要要求。红外隐身是飞机隐身设计的一个重要方面。由于排气系统是飞机在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段的主要红外辐射源,因此,尽可能降低排气系统红外辐射信号

是飞机红外隐身设计的关键技术之一。目前已经提出和发展了多种抑制技术来降低发动机排气系统的红外辐射强度,采用二元喷管是其中一项重要措施^[1-6]。目前世界上出现的先进隐身飞机大都采用了二元喷管,如隐身对地攻击战斗机 F-

收稿日期:2010-11-24; 修订日期:2011-02-18

作者简介:李娜(1980—),女,辽宁抚顺人,博士生,主要从事流体流动传热传质的研究。

117A、隐身战斗机 F-22 以及验证机 YF-23 等。

国内于上世纪 80 年代之后对二元喷管气动和红外辐射特性开展了分析、计算和试验研究。翟普和隋俊友等^[7]试验研究表明椭圆喷管的气动特性优于矩形喷管,但其红外抑制效果不如矩形喷管。宽高比为 10 的矩形喷管可以使涡喷发动机热喷流的红外辐射强度降低 66%~73%。李荣松、王强和额日其太^[8]对尾缘修形的二元喷管内外流场进行了数值模拟,结果表明二元喷管的尾缘修形处理对于加快热喷流温度沿流动方向的衰减具有明显的效果,对抑制热喷流的红外特征也有一定的好处。张勃^[9]、罗明东^[10]和黄伟等^[11]对不同宽高比(宽高比 1~16)二元喷管红外辐射特性的试验研究表明,喷管出口宽高比越大,红外抑制效果越好,但推力损失增大。二元喷管(特别是大宽高比二元喷管)的内部流场比轴对称喷管要更为复杂。二元喷管的不恰当设计不仅会引起喷管本身气动性能(总流量、总推力)下降,而且还会引起与发动机的匹配失调,严重影响发动机的总体性能。目前,在二元喷管与发动机性能匹配方面,以及综合考虑气动与红外隐身设计方面开展的工作较少,本文即从固定式混合排气二元收敛喷管的设计要求出发,提出了一套混合排气二元收敛喷管气动与红外隐身综合设计的方法和流程。该方法不仅适用于发动机喷管部件的初始设计,也同样适用于对已有发动机轴对称喷管改二元喷管的改型设计。本文最后通过算例计算验证了该设计方法的可行性。

1 混合排气二元收敛喷管气动与红外隐身综合设计方法

固定式混合排气二元收敛喷管设计应当从喷管设计要求分析入手,根据喷管几何参数对气动与红外辐射特性的影响特点和规律,确定喷管初始设计方案。初步选定对喷管气动与红外隐身性能有重要影响的关键几何参数,并通过内、外涵流量匹配设计来确定其他几何参数,从而得到喷管的初步设计结果。然后,对喷管初步设计结果进行气动与红外隐身性能计算和分析,如果能够满足发动机的气动与红外隐身要求,则该混合排气二元收敛喷管的气动与红外隐身设计是成功的,否则修改喷管设计方案,调整几何参数取值,重新进行流量匹配设计,直至设计出同时满足气动与红外隐身要求的二元收敛喷管。

1.1 喷管设计要求分析与初始设计方案确定

喷管作为喷气式航空发动机的重要部件,承担着热喷流膨胀加速后高速排出喷管,为发动机提供反作用推力的作用。因此,满足发动机推力要求是喷管最重要的设计目标之一。对于固定式混合排气二元收敛喷管,在发动机设计点最佳工作过程参数选定后,发动机推力主要由可以通过喷管出口面积的气流质量流量决定,同时经过喷管流出的内、外涵气流流量之间必须匹配协调,以符合发动机设计点所选择的涵道比。因此,固定式混合排气二元收敛喷管气动设计的主要目标是使发动机设计点内、外涵气流质量流量满足设计要求,同时具有尽可能高的喷管效率(即尽可能提高喷管的推力系数),从而最终使得发动机的推力性能满足设计要求。

采用二元收敛喷管的一个重要目的是希望降低发动机的红外特征信号,提高飞机的生存力。本文中混合排气二元收敛喷管红外隐身设计的主要目标就是希望通过选择合适的喷管几何参数,使得发动机的红外特征信号得到有效抑制,达到所期望的红外隐身效果。罗明东^[10]和李娜^[12]研究表明,出口宽高比是影响混合排气二元收敛喷管红外辐射强度的主要几何参数。因此,在喷管与发动机内、外涵流量匹配设计之前应先初步选定出口宽高比,以保证排气系统的红外隐身要求。

图 1 给出了混合排气二元收敛喷管示意图。如图 1(a)所示,该混合排气二元喷管主要包括中心锥、内涵壁以及喷管部件(这里省略了支板等结构)。在内涵通道、中心锥以及内、外涵进口截面给定的前提下,二元喷管几何设计变量主要包括出口宽高比 $A_8 (W/H)$ 、长径比 L/D_7 、面积比 A_8/A_7 、进口截面位置参数 N/D_7 等无量纲参数。其中 W 和 H 分别为矩形出口的宽和高, L 为喷管长度, D_7 为喷管进口直径, A_7 为进口面积, A_8 为出口面积,详见图 1(b)和 1(c)。

根据对混合排气二元收敛喷管气动与红外隐身设计要求的分析,可基本确定其初始设计方案:

首先,在设计初期根据喷管红外隐身设计要求,结合宽高比对喷管红外辐射特性的影响特点和规律^[10,12],初步选定二元喷管出口宽高比。且在后续的气动设计过程中尽量不要改变这个宽高比,以保证排气系统的红外隐身要求。

其次,选择高性能型面构型设计二元收敛喷管型面^[12],以获得高的喷管气动效率。

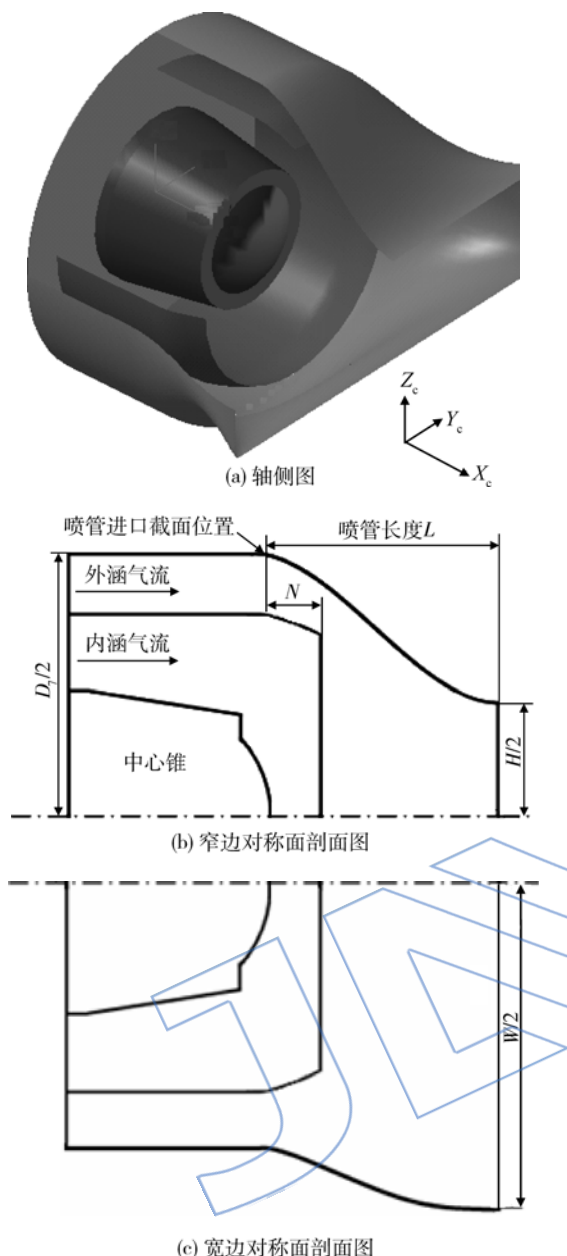


图 1 混合排气二元收敛喷管

Fig. 1 Two-dimensional (2-D) convergent nozzle of mixed flow

第三,确定喷管出口面积 A_8 。出口面积是影响喷管气动性能的一个关键参数。根据已选定的二元收敛喷管型面构型和出口宽高比,初步设定流量系数 C_d ,根据公式(1)

$$A_8 = A_{8i}/C_d \quad (1)$$

计算初始设计方案的实际出口面积,式中理论出口面积 A_{8i} 由喷管进、出口气动参数和总流量计算获得。

第四,二元收敛喷管型面构型、出口宽高比和实际出口面积 A_8 初步选定后,如图 1 所示,在内涵通道及中心锥等几何形状和尺寸一定的条件

下,只有二元喷管的长度 L 和进口截面位置 N 两个参数有待确定。而该几何参数将作为待定参数通过内、外涵流量匹配设计过程计算获得。

1.2 喷管与发动机内外涵流量匹配设计

与发动机内外涵流量匹配设计是实现混合排气二元收敛喷管气动设计目标的关键步骤。通过建立以喷管待定几何参数为未知量的非线性无量纲内、外涵气流质量流量匹配方程组,并采用逐步线性迭代法结合喷管三维黏性数值分析对该非线性方程组进行求解,得到满足发动机内、外涵流量和总流量要求的喷管设计方案,从而尽可能使发动机的推力性能满足设计要求。李娜^[12]论述了流量匹配设计的详细方法,本文不再赘述。

1.3 喷管设计结果的气动与红外隐身性能评估与设计优化

对混合排气二元收敛喷管初始设计方案进行流量匹配设计后,需要对流量匹配喷管的气动与红外隐身性能进行计算和评估。如果喷管的总推力偏低,说明流量匹配后的喷管效率偏低,需要修改喷管设计方案(如调整型面构型、喷管长度、出口面积等),重新进行流量匹配设计,直至喷管的总推力满足设计要求。如果喷管的红外隐身效果不满足要求,一方面可调整出口宽高比,另一方面可考虑对喷管壁面进行冷却,以降低其红外辐射强度。总之,要获得满足设计要求的混合排气二元收敛喷管,需要经过一个“设计—评估—修改设计—再评估”的反复设计迭代过程。

2 混合排气二元收敛喷管设计方法的应用实例与效果分析

本文拟为某发动机设计一个大宽高比二元收敛喷管,以取代其原有的轴对称喷管。要求二元收敛喷管能够满足该发动机的内、外涵流量要求(误差均小于 1%),并具有尽可能高的推力性能。另外要求该混合排气二元收敛喷管正后方的红外辐射强度比原喷管降低 40%。

基准发动机的喷管进、出口气动参数为:内涵进口总压为 180 kPa,总温为 850 K;外涵进口总压 170 kPa,总温为 360 K;外流场环境为地面状态标准大气压 101.325 kPa。

本文对喷管气动与红外隐身性能的分析主要涉及两个过程:①喷管内外流场、温度场和组分体积分数的计算;②红外辐射特性计算。其中,过程①采用商业软件 FLUENT 实现,该过程获得

了喷流的压力、温度和参与性介质的组分体积分数分布,以及喷管壁面的温度分布。过程②采用本课题组自行开发的红外辐射特征计算软件 NU-AA-IR 实现,该软件采用离散传递法计算喷管的红外辐射特征分布。计算时,首先根据辐射亮度传输方程、辐射照度方程、辐射边界条件方程求解得到喷管壁面的有效辐射照度,然后再根据辐射强度计算方程和辐射亮度传输方程得到整个红外计算域的红外辐射强度分布,具体过程见文献[13]。红外辐射计算时的输入参数为过程①计算得到的喷流的压力、温度和参与性介质的组分体积分数分布,以及喷管壁面的温度分布结果,喷管壁面作漫灰体假设,发射率取为 0.9。

步骤 1,为满足红外隐身设计要求,根据罗明东试验研究结果^[10],初步选定出口宽高比 $A_r = 8$ (记为 AR8)。文献[10]指出,AR8 二元喷管在各个方向的辐射强度可降低到相应轴对称喷管的 40%左右。

步骤 2,根据李娜^[12]关于喷管与发动机内外涵流量匹配的研究结果,选择超椭圆过渡的高性能二元收敛喷管型面。

步骤 3,在设计二元喷管出口面积时,初步选择原轴对称喷管的流量系数 $C_{d1} = 0.987$,并根据公式(1)来计算出口面积。

步骤 4,二元收敛喷管出口宽高比、型面构型和实际出口面积初步确定后,如图 1 所示,还有二元喷管的长度 L 和进口截面位置 N 两个参数有待确定。以 $\bar{g}_1 = L/D_7$, $\bar{g}_2 = N/D_7$ 为两个设计变量,通过内、外涵流量匹配设计来获得满足发动机内、外涵流量和总流量要求的喷管设计方案。

步骤 5,采用文献[12]中的流量匹配方法,根据基准发动机设计点的内、外涵流量要求,对上述 AR8 喷管初始设计方案进行流量匹配设计。而实

际上,在步骤 1~步骤 4 确定了关键几何参数值后,按照与发动机内、外涵流量相对误差均小于 1%的要求,经流量匹配迭代计算所得到的待定几何参数值并不能满足喷管的几何约束条件(即喷管进口截面位置参数 $\bar{g}_2 = N/D_7$ 过大,由该参数确定的喷管进口截面已前移超过了发动机涡轮出口截面,因此是不合理的)。

适当降低流量系数,分别选取 $C_{dII} = 0.950$ 和 $C_{dIII} = 0.850$,重复上述步骤 3~步骤 5。则经过流量匹配计算,可以获得满足发动机内、外涵流量和总流量要求的喷管设计方案,见表 1,表中的方案 I、II 和 III 分别对应流量系数 C_d 分别为 0.987、0.950 和 0.850 的喷管。由表 1 分析可知,方案 II 喷管长度接近方案 III 喷管长度的 2 倍,但方案 II 进口截面位置(向涡轮出口截面)的前移量比方案 III 大得多。最终,方案 II 和方案 III 经流量匹配设计得到的喷管几何模型如图 2 所示。

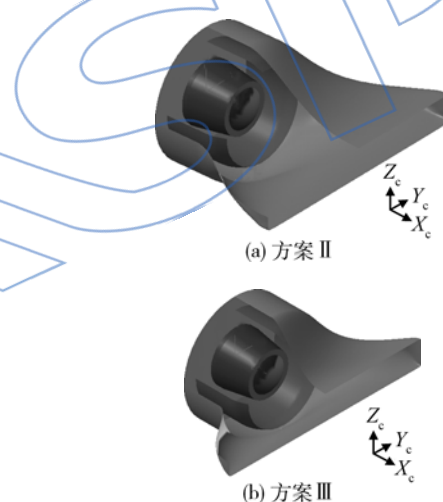


图 2 方案 II 和方案 III 的混合排气二元收敛喷管

Fig. 2 2-D convergent nozzle of mixed flow of case 2 and case 3

表 1 轴对称喷管和二元喷管的几何参数及喷管气动性能参数

Table 1 Geometric and aerodynamic parameters of axial nozzle and 2-D convergent nozzles

	设计变量			喷管的无量纲性能参数			
	C_d	L/D_7	N/D_7	内涵流量	外涵流量	总流量	总推力
基准轴对称收敛喷管	0.987	0.6	0.129	1	1	1	1
AR8 喷管方案 I	0.987	2.774	0.880				
AR8 喷管方案 II	0.950	0.955	0.285	0.998	0.996	0.997	0.966
AR8 喷管方案 III	0.850	0.532	0.146	0.995	1.000	0.998	0.893

2.1 气动特性分析

表 1 给出了原轴对称收敛喷管和 AR8 二元收敛喷管的无量纲流量和无量纲推力,无量纲流量定义为

$$\text{无量纲流量} = \frac{\text{二元(轴对称) 喷管流量}}{\text{轴对称喷管流量}} \quad (2)$$

无量纲推力定义为

$$\text{无量纲推力} = \frac{\text{二元(轴对称) 喷管推力}}{\text{轴对称喷管推力}} \quad (3)$$

由表 1 分析可知,经流量匹配设计后,方案 II 和方案 III 的 AR8 喷管总流量均基本达到设计目标(即基准轴对称收敛喷管的总流量),但总推力与设计目标(即基准轴对称收敛喷管的总推力)存在一定差距.其中出口面积较小的方案 II 喷管的总推力比设计目标低 3.4%,推进效率相对较高.而出口面积较大的方案 III 喷管的总推力比设计目标低 10.7%,推进效率明显低于方案 II 喷管.由此可见,确定喷管初始设计方案时,实际出口面积的选取非常重要.实际出口面积选取的偏小(如方案 I),可能无法通过流量匹配设计得到合理的设计结果;实际出口面积选取的偏大(如方案 III),则流量匹配设计后,喷管的推进效率会偏低,喷管总推力将无法满足要求.

2.2 红外辐射特性分析

为分析喷管的红外辐射特性,本文计算了基准轴对称喷管和方案 II、方案 III AR8 喷管的宽边探测面和窄边探测面 $0^\circ \sim 90^\circ$ 探测方向上 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射强度.宽边探测面、窄边探测面及探测角度的定义如图 3 所示.

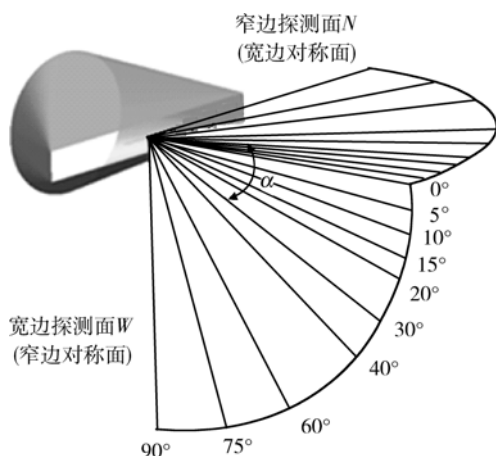
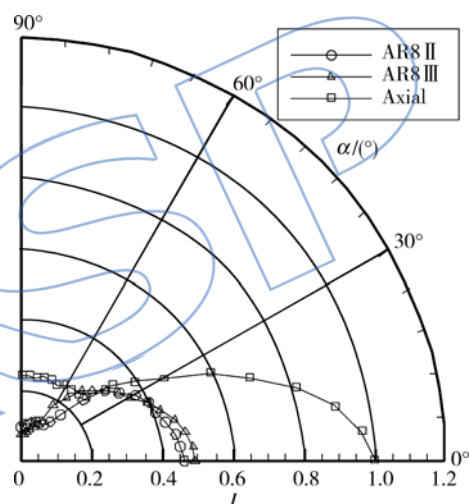


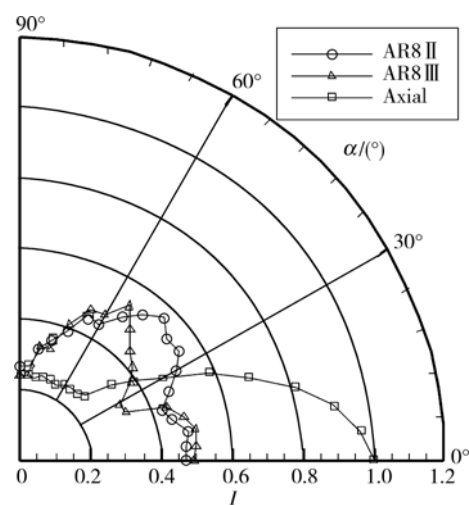
图 3 喷管红外辐射强度探测面和探测角度示意图

Fig. 3 Setting of detect orientations in the simulation

红外辐射强度分布计算结果见图 4,图中辐射强度数值均是以基准轴对称收敛喷管正后方 0° 探测方向上的红外辐射强度为单位进行无量纲化的结果.从图 4 可以看出,方案 II、方案 III AR8 喷管正后方的红外辐射强度均小于基准轴对称喷管的 50%,达到了设计要求.在窄边探测面,两种 AR8 喷管的红外辐射强度基本均小于基准轴对称喷管的红外辐射强度.但在宽边探测面 $30^\circ \sim 90^\circ$ 探测方向上两种 AR8 喷管的红外辐射强度又逐渐大于基准轴对称喷管.这主要是由于两种喷管出口宽边壁面存在较大的高温区导致的(如图 5 所示).这也进一步说明,对于出口宽高比较大的二元收敛喷管,仅从喷管结构和几何设计上来



(a) 窄边探测面



(b) 宽边探测面

图 4 轴对称喷管和 AR8 二元喷管红外辐射强度空间分布

Fig. 4 Spatial infrared radiate intensity distribution of axial nozzle and 2-D convergent nozzles

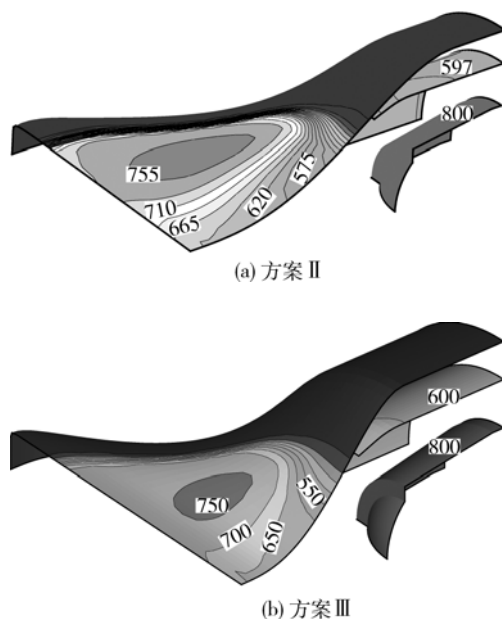


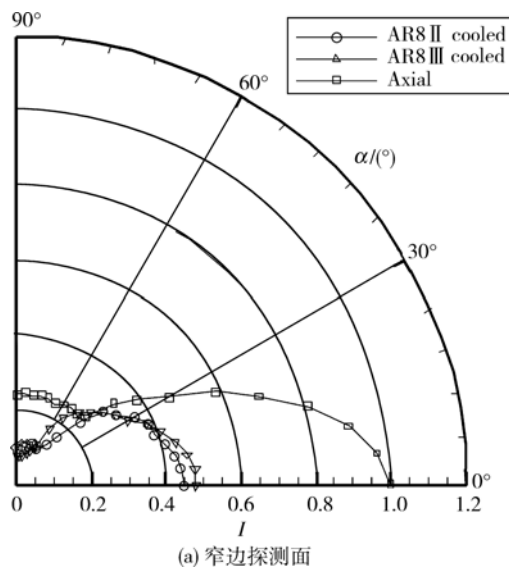
图5 方案Ⅱ和方案Ⅲ二元喷管壁面温度分布(单位:K)
Fig. 5 Temperature distribution of 2-D convergent nozzles for case 2 and case 3 (unit:K)

抑制红外辐射信号是不够的,还需要对喷管壁面进行冷却,这不仅有利于提高红外隐身效果,也有利于提高喷管的强度和可靠性.为了说明喷管壁面冷却带来的红外隐身效果收益,图6给出了两种AR8喷管壁面冷却至外涵气流温度(约360K)后的红外辐射强度分布计算结果.从图中可以看出,AR8喷管壁面冷却后,红外辐射抑制效果得到明显改善.

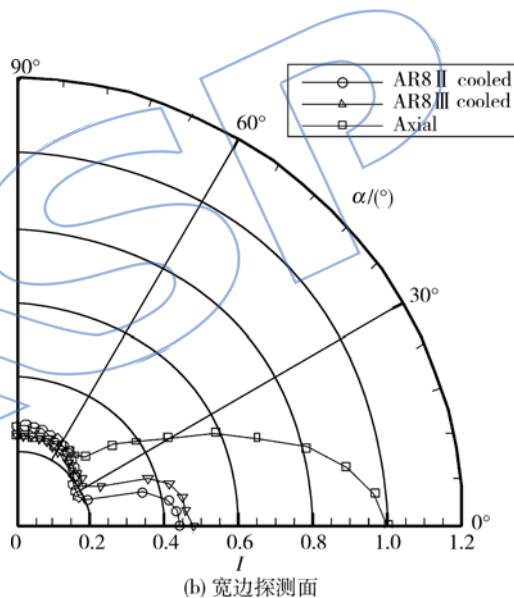
2.3 发动机非设计点的喷管气动特性

为了进一步评价AR8喷管的设计结果,对方案ⅡAR8喷管和基准轴对称喷管在非设计点时的气动性能进行了计算.性能计算所选取的非设计点及内、外涵总压、总温数值见图7,图中所示的7个状态点中,状态点5为上述的喷管设计点,状态点1~4的总压参数小于设计点总压,状态点6~7的总压参数大于设计点总压.

轴对称喷管和AR8喷管的不同设计点性能计算结果见表2,表中的无量纲流量和推力均是以原轴对称喷管的流量和推力进行无量纲化的.从表中可以看出,随着喷管总压的增大,AR8喷管内涵流量逐渐减小,外涵流量逐渐增大.即与轴对称喷管相比,AR8喷管的涵道比是随着总压升高而逐渐增大的.AR8喷管的总流量和总推力随总压升高而逐渐减小.压力较低时,AR8喷管的总流量大于轴对称喷管;当压力增大后,AR8喷管的总流量又逐渐小于轴对称喷管,而AR8喷管



(a) 窄边探测面



(b) 宽边探测面

图6 采用冷却方法后的轴对称喷管和AR8二元喷管红外辐射强度空间分布

Fig. 6 Spatial infrared radiate intensity distribution of axial nozzle and 2-D convergent nozzles with cooling

的总推力均小于轴对称喷管.

从轴对称喷管和AR8喷管的非设计点性能对比可以看出,在设计点时,轴对称喷管和AR8喷管的内、外涵流量基本相同,即使得安装该轴对称喷管和AR8喷管的发动机在设计点的工作状态基本相同;但当偏离设计点后,由于轴对称喷管和AR8喷管特性的差别,使得发动机安装轴对称喷管和AR8喷管后的工作状态将具有一定差异.总的来讲,在不同状态点,AR8二元喷管与轴对称喷管的流量偏差在1%以内,推力偏差在4%

以内。

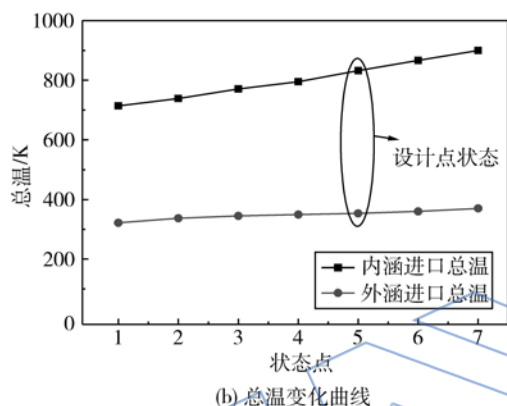
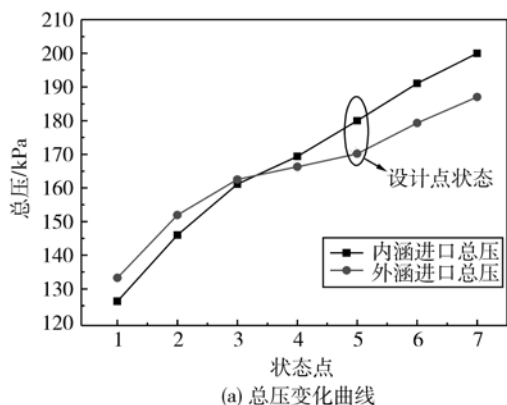


图 7 不同状态点的总压、总温参数变化
Fig. 7 Pressure and temperature of different state points

表 2 AR8 二元喷管不同状态点无量纲流量及推力性能参数

Table 2 Dimensionless mass flux and thrust of AR8 2-D convergent nozzle of different state points

	无量纲 内涵流量	无量纲 外涵流量	无量纲 总流量	无量纲 总推力
设计点	0.998	0.996	0.997	0.966
非设计点①	1.136	0.970	1.026	0.997
非设计点②	1.088	0.976	1.018	0.991
非设计点③	1.037	0.978	1.002	0.977
非设计点④	1.020	0.988	1.002	0.975
非设计点⑤	0.983	0.996	0.990	0.960
非设计点⑥	0.981	1.002	0.992	0.961

3 总 结

本文提出了一套混合排气二元收敛喷管气动与红外隐身综合设计的方法和流程,并通过算例计算验证了该设计方法的可行性。数值计算分析表明:

1) 二元喷管的进出口截面位置、进出口面积以及出口宽高比等几何参数对实现喷管推力性能均起到关键作用。出口面积是影响喷管气动性能的一个关键参数,在满足流量匹配设计要求的前提下,出口面积取值越小,喷管推进效率越高。

2) 合理确定出口宽高比,对实现喷管红外隐身性能具有重要作用。

3) 在设计点,分别安装满足相同气动性能设计要求的二元收敛喷管和轴对称收敛喷管的发动机在设计点的工作状态基本相同;但当偏离设计点后,由于轴对称喷管和二元喷管特性的差别,使得发动机安装该轴对称喷管和二元喷管后的工作状态将具有一定差异。

参考文献:

- [1] Capone F J. The nonaxisymmetric nozzle; it is for real[R]. AIAA-1979-1810, 1979.
- [2] Hiley P E, Wallance W. Nonaxisymmetric nozzles installed in advanced fighter aircraft[J]. J. Aircraft, 1976, 13(12): 1000-1006.
- [3] Stevens H L. F-15/Nonaxisymmetric nozzle system integration study support program[R]. NASA-CR-135252, 1978.
- [4] Banken G J, Cornette W M, Gleason K M. Investigation of infrared characteristics of three generic nozzle concepts[R]. AIAA-1980-1160, 1980.
- [5] Chu C W, Der J J, Wun W. A simple 2D-nozzle plume model for IR analysis[R]. AIAA-1980-1808, 1980.
- [6] Chu C W, Der J J. ADEN plume flow properties for infrared analysis[R]. AIAA-1982-44750, 1982.
- [7] 翟普, 隋俊友, 崔杰, 等. 弹用航空发动机尾喷流红外抑制技术研究[J]. 推进技术, 1996, 17(4): 17-20.
ZHAI Pu, SUI Junyou, CUI Jie, et al. A research on radiation restriction technique of a nozzle flow of aero-engine for missile[J]. Journal of Propulsion Technology, 1996, 17(4): 17-20. (in Chinese)
- [8] 李荣松, 王强, 额日其太. 尾缘修形的二元喷管内外流场数值研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 389-393.
LI Rongsong, WANG Qiang, Eriqitai. Numerical investigation of two-dimensional nozzle with trailing edge modification[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3): 389-393. (in Chinese)
- [9] 张勃. 大宽高比矩形喷管的射流掺混与红外抑制特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.

- ZHANG Bo. Investigation of jet mixing characteristics and radiation restriction technology of rectangular nozzle with high aspect ratio[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [10] 罗明东. 无人机排气系统红外隐身技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- LUO Mingdong. Investigation of infrared stealth technology of the exhaust system for unmanned aerial vehicle[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [11] 黄伟, 吉洪湖, 罗明东, 等. 低速排气非对称二元喷管红外辐射特性实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(1): 16-20.
- HUANG Wei, JI Honghu, LUO Mingdong, et al. Experimental investigation on IR characteristics of unsymmetrically two-dimensional nozzle at low exhaust velocity[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 40(1): 16-20. (in Chinese)
- [12] 李娜. 混合排气二元收敛喷管气动与红外隐身综合设计方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- LI Na. Aerodynamic and infrared stealth comprehensive design of 2D convergent nozzle of mixed flow[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [13] 罗明东, 吉洪湖, 黄伟. 非加力涡轮发动机排气系统红外辐射强度的数值计算[J]. 航空动力学报, 2007, 22(10): 1609-1616.
- LUO Mingdong, JI Honghu, HUANG Wei. Numerical evaluation on infrared radiant intensity of exhaust system of turbine engine without afterburning[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(10): 1609-1616. (in Chinese)