不同形式喷管红外抑制特性试验研究

张 勃,李经警,袁 帅,吉洪湖

(南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘 要:设计了相同进出口面积、长度条件下的轴对称、矩形以及 S 弯三种收敛喷管,在相同气动条件下进行对比试验研究,测试其水平与垂直平面上的红外辐射强度特征分布,分析不同探测面上轴对称喷管、矩形喷管与 S 弯喷管的红外抑制效果随方位角与高度角的变化规律。结果表明,在水平探测面上,三者变化规律相同,红外辐射强度均随方位角增大而减小,S 弯喷管红外抑制效果最好;而在垂直探测面上, S 弯喷管红外抑制效果依然最好,在上方探测面,S 弯喷管红外辐射强度随高度角先增大后减小,在高度角为 10°时红外辐射强度最大,在喷管正后方,相对轴对称喷管,矩形喷管与 S 弯喷管红外抑制效果分别达到 35.2%和 80.2%;

关键词: S 弯喷管; 矩形喷管; 轴对称喷管; 红外抑制; 高温部件; 尾喷流

中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0404005

Experimental investigation of infrared suppressing characteristics of different nozzles

Zhang Bo, Li Jinjing, Yuan Shuai, Ji Honghu

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Three different convergent nozzles(axis symmetrical, rectangular, and S -curved)with the same inlet, outlet areas and lengths, the radiation characteristics in different detecting planes of which were experimentally investigated. The results show that in the horizontal plane, the thermal radiation intensity of three nozzles all decreased with the increase of detecting angle, the S-curved nozzle has the best infrared suppressing characteristics; in the vertical plane, the S-curved nozzle also has the best infrared suppressing characteristics. While being detected from upwards, the intensity of S-curved nozzle increased first then decreased with the increase of angle, and the largest radiation magnitude appeared in the detecting angle 10°. Compared with the axis nozzle, the thermal radiation intensity of rectangular and S-curved nozzles decreased in turn. In the direction of right behind the nozzles, the thermal radiation of rectangular and S-curved nozzles decreased by 33.2% and 80.2% separately, compared with the axis nozzle.

Key words: S-curved nozzle; rectangular nozzle; axis symmetrical nozzle; infrared suppressing; hot parts; plume

收稿日期:2016-08-05; **修订日期:**2016-09-03

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(NS2016020)

作者简介:张勃(1976-),副教授,博士,主要从事强化换热、红外隐身等方面的研究。Email:zhangbo_pe@nuaa.edu.cn

0 引 言

对于现代高性能飞行器而言,红外隐身特性是影响战场生存力的主要因素之一。研究发现,在红外辐射的中、长波两个波段,飞机蒙皮对长波,即8~14 μm 波段范围的红外辐射贡献较大。黄伟[1]对飞机蒙皮反射的背景辐射的影响开展了研究,李俊山[2],娄和利[3],张晓龙[4]分别对背景对红外辐射特征的影响进行了进一步探讨。

而在中波波段(3~5 μm)内,飞机排气系统是主要红外辐射源,其主要源于高温尾喷流和高温壁面的贡献[5-7]。对喷管进行红外抑制是飞机后向红外隐身的必要手段,目前主要的红外抑制措施包括:异形喷管、高温部件冷却以及低发射率涂层技术[8-9]。相对于常规的轴对称喷管,矩形喷管是一种典型的异形喷管。它能够强化热喷流与环境大气的掺混,并利用其形状特征缩小高温部件可视面积,降低尾喷流与高温部件的辐射特征,这种抑制作用在宽高比较大的情况下更加明显,但是宽高比的增大会带来一定的气动损失[10-11]。

为了进一步降低发动机的红外辐射特征,国内外研究者发展了一种 S 弯形喷管,在几何结构上,S 弯喷管不具有轴对称喷管的圆周对称性,且在垂直方向上不具有矩形喷管的对称性,针对 S 弯喷管多参数的复杂特性,王卫斌[12]对双 S 弯喷管的参数化设计方法进行了研究。研究者分析了 S 弯喷管的红外辐射特征,张叶川、王占学[13]等对双 S 弯喷管的红外辐射特性进行了研究,丁娟、杨青真[14]则对 S 弯喷管的不同出口形式对红外辐射特性的影响开展了数值分析,但是关于 S 弯喷管红外辐射特征的试验研究开展较少,且与轴对称喷管、矩形喷管红外辐射特征的综合比较未见文献报道。

文中以轴对称喷管为原型,设计了圆转矩形喷管和 S 弯喷管,对三种喷管在水平、垂直探测平面上的红外辐射强度分布进行了对比试验和分析。

1 模型设计

文中以轴对称收敛喷管为基础,其进、出口直径分别为 450 mm、230 mm,喷管长度 960 mm。在此基础上,保证喷管进、出口面积、长度不变,设计了出口宽高比为 4 的圆转矩形喷管与 S 弯喷管。S 弯喷管沿程截面面积变化采用缓急相当[15]的变化规律,截面面积变化方程图公式(1)所示。

$$\frac{A}{A_e}=\left(\frac{A_0}{A_e}-1\right)\left[3\left(\frac{x}{l}\right)^4-8\left(\frac{x}{l}\right)^3+6\left(\frac{x}{l}\right)^2\right]+1 \qquad (1)$$

式中:A 为轴向 x 距离处喷管截面面积;A_0、A_e 分别为喷管进口与出口面积;l 为喷管长度。

对于 S 弯喷管而言,其关键设计参数还包括中心型线方程、偏径比 H/D。图 1 中给出了文中 S 弯喷管结构示意,图中,AG 为喷管进口,CE 为喷管出口,喷管截面积沿程收敛,喷管偏径比 H/D=0.9。为了减少气动损失,喷管进出口在同一水平面上。图中 AA' 与 GG' 分别给出了喷管进口射线传输的边界,均中止于喷管壁面上。

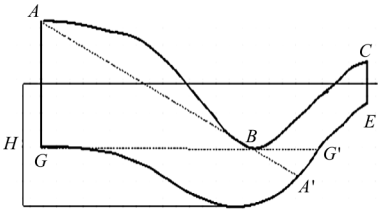
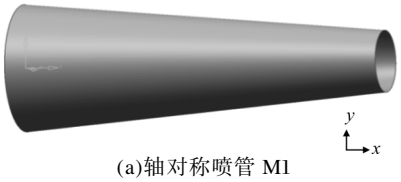


图 1 S 弯喷管结构图

Fig.1 Sketches of S-curved nozzle

图 2 中则给出了文中研究的三种喷管的物理模型图。



(a)轴对称喷管 M1

(a) Axis symmetrical nozzle M1

(b) 矩形喷管 M2

(b) Rectangular nozzle M2

(c) S 弯喷管 M3

(c) S-curved nozzle M3

图 2 不同喷管模型结构图

Fig.2 Sketches of different nozzle models

试验中为了模拟发动机的实际结构,在喷管入口前部安装了混合器、中心锥以及涡轮等部件,如图 3 所示,上述部件温度较高,正后方小角度范围内红外辐射特征较强,是主要辐射源之一。在轴对称喷管与矩形喷管中,上述高温部件在正后方探测面积较大,辐射较强,而在 S 弯喷管中,对应高温部件后向探测面积较小。

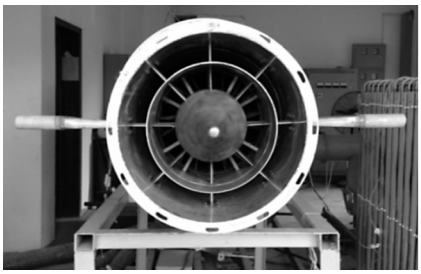


图 3 喷管前部部件图

Fig.3 Front view of nozzle

2 试验环境与参数

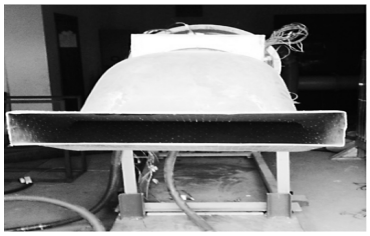
对于发动机红外隐身技术而言, 涡扇发动机相比涡喷发动机更为有效。文中试验模拟涡扇发动机进行,设计了内、外涵气流系统,如图 4 所示。试验台的内涵气流由内涵风机产生, 经过燃烧室后流入混合段;外涵气流则由外涵风机提供,在混合段内与内涵气流充分混合后进入试验段。

图 4 试验内外涵气路系统

Fig.4 Primary and bypass flow systems

试验中,燃烧油气比控制在1.21 左右。喷管内涵进口气流流量 0.7 kg/s,温度 715 K,压力 1.2 atm,喷管外涵进口流量 0.9 kg/s,温度 305 K,压力为 1.3 atm,喷管出口处气流温度为 440~450 K 之间。

图 5 分别给出了 S 弯喷管 M3 在试验台上水平和垂直方向的照片, 分别测量喷管水平与垂直面上的红外辐射强度变化规律,矩形喷管安装方法相同。图 6 则给出了不同形式喷管的试验模型照片。



(a) 水平安装

(a) Horizontal arrangement

(b) 垂直安装

(b) Vertical arrangement

图 5 喷管不同安装位置图

Fig.5 Different arrangement of nozzle

图 6 三种喷管模型照片

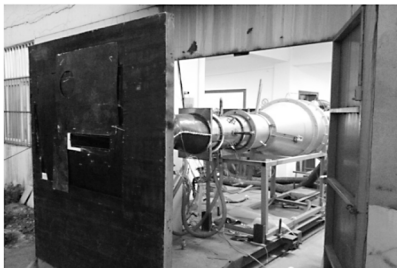
Fig.6 Photos of the three different nozzle model

图 7(a)所示为试验场地为半径 35 m 的半圆型场地(即喷管出口距离探测器距离为 35 m),不同平面测量角度分布见图 7(b)。试验中采用 MR101 型傅立叶变化红外光谱辐射计测量喷管的红外辐射特征,为了减少背景辐射对测量结果的影响,选择在夜晚太阳辐射较小的条件下进行,并且,为了避免试验设备的红外辐射对试验结果的影响, 试验中采用黑色背景板对设备进行遮挡,如图 7(b)所示。试验分别测量了喷管在方位角为 0°~20°(间隔 5°),30°~90°(间隔 15°)范围的红外辐射特征分布。对于轴对称喷管,测量针对水平探测面展开;矩形喷管则分别测量水平探测面上不同方位角与垂直探测面上的上方探测面上不同高度角下的红外辐射强度特征 (方位角与高度角定义如图 8 所示);而对于 S 弯喷管,由于其特殊的几何特征,测量了水平探测面、上方探测面

与下方探测面的红外辐射强度特征。为了提高测量精度,避免燃气瞬时脉动带来的误差,测量红外辐射特征时,在同一角度连续测量 10 次,求取平均值作为测量值。

(a) 试验场地图

(a) Sketch of test field



(b) 背景遮挡示意图

(b) Sketch of background shelter

图 7 测量场地与系统布置图

Fig.7 Sketch of test field and system arrangement

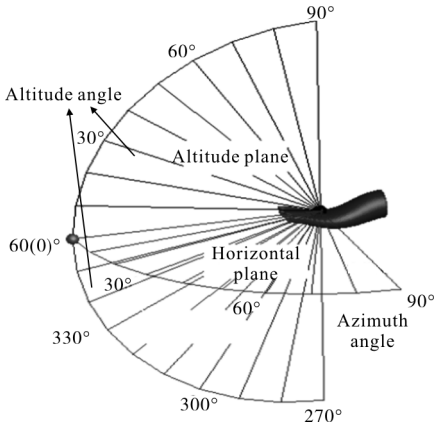


图 8 测量角度布置图

Fig.8 Sketch of measuring angles

3 试验结果与分析

试验中对轴对称模型(记做 M1)、矩形喷管模型(记做 M2)以及 S 弯喷管模型(记做 M3)3~5 μm 波段上的红外辐射强度分布进行了研究。

3.1 红外光谱辐射强度分布

图 9 中给出了 M1、M2 以及 M3 喷管正后方(方位角 0°)的红外光谱辐射亮度分布。以轴对称喷管(M1)为例进行说明,3~4.16 μm 波段上的红外辐射主要来源于喷管固体壁面,而在 4.16~4.6 μm 波段上的红外辐射主要来源于尾喷流中的吸收性气体介质辐射,其中尾喷流中 CO_2 与 H_20 气体的吸收与发射使得红外光谱辐射强度量值随波段表现出较大的起伏变化,在 4.16 μm 与 4.6 μm 附近出现两个峰值;在波段 4.6~5 μm 之间的红外辐射同样来源于喷管壁面,辐射强度较大。矩形喷管(M2)与 S 弯喷管(M3)的红外光谱辐射强度随波长的变化趋势均与 M1 相同,但是相同波段上的量值逐渐降低。

对于轴对称喷管和矩形喷管而言,在正后方探测,喷管腔体的固体辐射主要来自中心锥、涡轮、混合器以及喷管壁面,矩形喷管由于具有较大的宽高比,对高温部件形成了一定的遮挡,使得探测得到的固体辐射的量值较小。

而对于 S 弯喷管,其 S 弯流道的特殊结构对喷管进口前部高温部件形成了有效遮挡,固体辐射进一步减小,使得喷管整体红外光谱辐射强度减小。

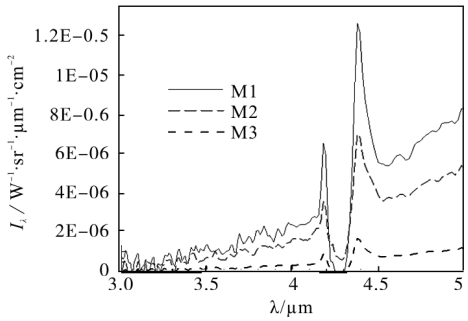


图 9 方位角 0°时光谱辐射强度分布

Fig.9 Distribution of spectrum radiation intensity at 0° azimuth angle

3.2 红外辐射强度分布

光谱辐射强度反映了红外辐射特征随波长变化的特点,为了研究红外辐射强度随方位角的变化规律,文中定义了红外辐射强度 $I=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_\lambda \mathrm{d}\lambda$,式中 λ_2、λ_2 分别为 3 μm 和 5 μm。

图10 中给出了轴对称喷管(M1)、矩形喷管(M2)

以及 S 弯喷管(M3)在水平探测面上的红外辐射强度随方位角的变化。由于在此探测面上,三种喷管均具有对称性, 图中只给出了其在 0°~90°范围内的红外辐射强度,其中 0°为喷管正后向。

可以看出, 轴对称喷管的红外辐射强度随方位角增大逐渐减小,正后向红外辐射强度为 91.2 W/sr。对于矩形喷管, 其随方位角的变化规律总体上与轴对称喷管相同,但是相同角度下的辐射量值略小,在喷管正后方红外辐射强度为 59.2 W/sr。

S 弯喷管随方位角的变化趋势与矩形喷管相同,在相同方位角下量值进一步降低,喷管正后方红外辐射强度降低为 18.2 W/sr。

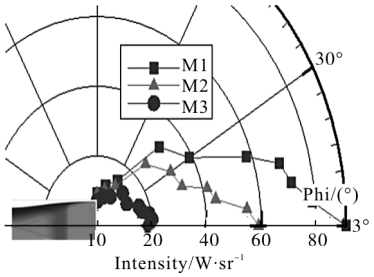


图 10 不同喷管水平面红外辐射强度变化

Fig.10 Change of infrared radiation intensity in horizontal plane of different nozzles

图 11 给出了轴对称喷管(M1)、矩形喷管(M2)以及 S 弯喷管(M3)在垂直探测面上红外辐射强度随高度角的变化,图中以模型 M3 为例,给出了其布置形式。

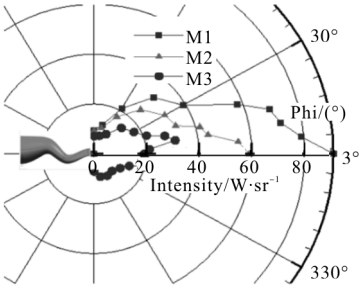


图 11 不同喷管垂直面红外辐射强度变化

Fig.11 Change of infrared radiation intensity in vertical plane of different nozzles

由于轴对称喷管以及矩形喷管垂直平面上具有对称性, 图中只给出其在 0°~90°范围内的红外辐射强度。矩形喷管的红外辐射强度小于轴对称喷管,在喷管后方小角度范围内,两者区别较为明显,而随着高度角增大,两者区别减小。

S 弯喷管由于其特殊的几何结构,其在垂直探测面上的红外辐射强度值并不对称。可以看出,在上方探测面(0°~90°),范围内,红外辐射强度随高度角的增大先增大后减小,在高度角为 10°时出现一个峰值,这是由于 S 弯喷管内部壁面反射辐射导致的;而在下方探测面上,红外辐射强度逐渐减小。

3.3 不同喷管红外抑制率比较

此节研究了矩形喷管以及 S 弯喷管相比轴对称喷管,其红外辐射强度在相同方位角下的抑制规律。定义外抑制率为 $\xi=(I_{M1}-I_{Mi})/I_{Mb}$,式中,$I_{Mi}(i=1,2,3)$对应三种模型的红外辐射强度。

图 12(a)、(b)分别给出矩形喷管 M2 在水平与垂直面上的红外抑制率随探测角度变化曲线,从中可以看出,喷管正后方抑制率达到 35.2%,在 0°~20°之间,红外抑制率略有增大,这是由于喷管固体部件辐射减小导致的,在 20°~60°之间,红外抑制率略有波动,这是由于对应角度范围内,喷管固体壁面的探测面积逐渐减小, 而尾喷流辐射逐渐增大,两者共同作用导致的。而在 60°~90°范围内,抑制作用逐渐减小,这是由于对应角度范围内,喷管红外辐射主要由尾喷流贡献,这部分辐射变化相对较小。

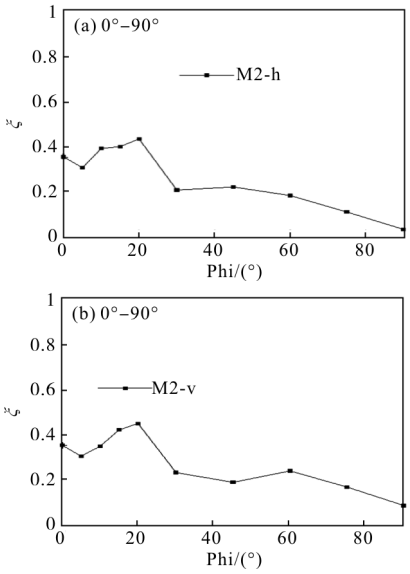


图 12 模型M2 红外抑制率随方位角变化

Fig.12 Change of model M2 infrared suppressing ratio with azimuth angle

图 13 给出了 S 弯喷管(M3)垂直探测上的红外抑制率随高度角分布。在喷管正后方,红外抑制率达到 80.2%, 在 0°~30°之间, 壁面探测面积增大,发射有所增强,S 弯喷管遮挡带来的红外抑制效果逐渐下降,另外,尾喷流的偏移也使得对应角度下红外辐射强度较大, 综合作用使得红外抑制率下降;而在 30°~60°范围内,喷管红外辐射由壁面和尾喷流共同贡献, 随着高度角增大,S 弯喷管抑制作用变化较小。而在 60°~90°范围内,抑制率出现起伏变化。而在下方探测面上(270°~360°),红外抑制率则是逐渐增大, 而后在 345°~360°范围内出现波动。总体而言,随着探测方向与水平面夹角的增大,红外抑制率总体是逐渐降低的。

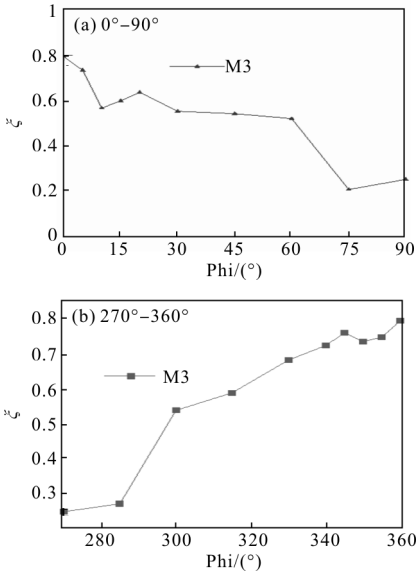


图 13 模型 M3 红外抑制率随高度角变化

Fig.13 Change of model M3 infrared suppressing ratio with altitude angle

4 结 论

文中对轴对称喷管、矩形喷管以及 S 弯喷管在 3~5 μm 波段上的红外辐射强度分布特征进行了对比试验研究, 分别得到了三种喷管在不同对称面上的红外辐射特征。主要结论如下:

(1) 在水平探测面上,相应方位角下,相比轴对称喷管,矩形喷管、S 弯喷管的红外辐射强度依次降低;在喷管正后方,矩形喷管降低了 35.2%,而 S 弯喷管则降低了 80.2%, 这主要是由于其对高温部件的有效遮挡导致的。三种喷管的红外辐射均具有明显的对称性。

(2) 在垂直探测面上,轴对称喷管红外辐射强度与水平方向相同,矩形喷管则略有增大,两者均具有几何对称性;而 S 弯喷管表现出较强的非对称性,在上方探测面(0°~90°)范围内,红外辐射强度先增大后减小,在高度角为 10°时出现一个峰值;而在下方探测面上,红外辐射强度逐渐减小。

(3) 矩形喷管红外抑制率随探测角度总体上先减小后增大,而后再逐渐减小。S 弯喷管在垂直探测面上的红外抑制率随着其与水平面夹角增大逐渐减小。

参考文献:

[1] Huang Wei, Ji Honghu. Effect of reflected background radiation by skin on infrared signature of subsonic aircraft (I): methodology[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(6): 1699-1703. (in Chinese)

[2] Li Junshan, Chen Xia, Li Jianhua. Infrared radiation characteristics contrast between target and background on different grounds[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(2): 424-428. (in Chinese)

[3] Lou Heli, Lv Xiangyin, Zhou Yuanpu. Infrared radiation contrast between ground target and background [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(8): 2002-2007. (in Chinese)

[4] Zhang Xiaolong, Liu Ying, Sun Qiang. Radiometric calibration of uncooled long-wave infrared thermal imager with high-precision[J]. ***Chinese Optics***, 2012, 5(3): 235-241. (in Chinese)

[5] Shang Jianhua, Zhang Zongbin. Development trend of infrared stealth technology[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(1): 107-112. (in Chinese)

[6] Sang Jianhua. The Stealth Technology of Aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2012. (in Chinese)

[7] Dusa D, Speir D W, Rowe R K. Advanced technology exhaust nozzle development [R]. AIAA, 83-1286.

[8] Liu Changchun. The designing technology of low detectable S-shaped nozzle[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)

[9] Zhang Bo, Ji Honghu, Zhang Zongbin, et al. Numerical investigation of infrared radiation characteristics [J]. ***Journal of Aerospace Power***, 2012, 27(3): 560-565. (in Chinese)

[10] Zhang Bo, Ji Honghu, Luo Mingdong, et al. Investigation of the effect of aspect ratio to infrared suppressing

characteristics of rectangular nozzles[J]. ***Journal of Aerospace Power***, 2007, 22(11): 1820-1825. (in Chinese)

[11] Burley J R, Carlson J R. Circular-to-rectangular transition ducts for high-aspect-ratio non axisymmetric nozzles [R]. AIAA, 85-1346.

[12] Wei Yongbin, Ai Junqiang. Parameter design method of double Juxtaposition 3-D asymmetric several-S-shaped nozzles[J]. ***Journal of Aerospace Power***, 2015, 30(2): 271-280. (in Chinese)

[13] Zhang Yechuan. Analysis on flow and infrared radiation characteristics of double S-nozzle [J]. ***Journal of Aerospace Power***, 2013, 28(11): 2468-2474. (in Chinese)

[14] Ding Juan, Yang Qingzhen, Li Xiang. The investigation of thermal radiation of different S-style nozzle [J]. ***Science Technology and Engineering***, 2003, 14(7): 273-276. (in Chinese)

[15] Lee C C, Boekicker C. Subsonic diffuser design and performance for advanced fighter aircraft [R]. AIAA-85-3073, 1985.