轴对称塞式喷管电磁散射特性数值模拟*

陈玲玲,杨青真,陈立海,施永强

(西北工业大学 动力与能源学院,陕西西安 710129)

摘 要:为研究塞锥存在对喷管雷达隐身特性的影响,以涡扇发动机轴对称喷管为基础,设计了加 有不同锥度塞锥的塞式喷管;运用自主开发的基于物理光学迭代(IPO)和等效边缘电磁流(EEC)方 法的程序对各型塞式喷管的雷达散射特性进行了数值计算并与原轴对称喷管特性进行对比分析。结果表 明:塞式喷管能够有效降低喷管雷达散射截面(RCS);但0°仰俯角附近会有局部升高,在水平极化和 垂直极化方式下RCS值分别比原喷管最大增大8.14%,11.77%;存在最优锥度,在水平和垂直极化方式 下都能够最大程度减小喷管总场RCS均值,使得其比原喷管分别减缩13.2%,15.2%。

关键词: 塞式喷管; 塞锥; 后锥半锥顶角; 雷达散射截面 (*RCS*) 中图分类号: V218 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2018) 01-0086-06 DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2018. 01. 009

Numerical Simulation of Radar Scattering Characteristics of Axisymmetric Plug Nozzle

CHEN Ling-ling, YANG Qing-zhen, CHEN Li-hai, SHI Yong-qiang

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: To investigate the radar stealth characteristics of the nozzle with plug, based on the axisymmetric nozzle from a certain turbofan engine, a series of nozzles with plugs of different taper were studied in the current work. The radar scattering characteristics of the nozzles were calculated by a program developed from Iterative Physical Optics (IPO) and Equivalent Edge Current (EEC). Compared with the baseline nozzle, except for the condition of zero degree elevation angles, in which the radar cross-section (RCS) increases by 8.14% and 11.77% under the condition of horizontal and vertical polarization, respectively, the RCS with plugs decreases effectively. And with the plug of the optimal taper, the RCS of the nozzle can be decreased by 13.2% and 15.2% under the condition of horizontal and vertical polarization, respectively.

Key words: Plug nozzles; Plug; Half cone-apex angle of rear plug; Radar cross-section (RCS)

1 引 言

现代战争中的电子对抗,各种雷达探测技术、雷达制导武器的快速发展,使得飞行器尾向隐身成为提高飞机生存力的重要因素^[1]。喷管作为典型电大腔体结构,是飞机尾向强雷达散射源,对飞机的整体雷达散射截面(*RCS*)贡献巨大。因此,对喷管的*RCS*

特性进行计算分析具有重要的军事意义。

近年来,相关学者已经开始重视并开展了该方面的研究^[2~10]。文献[2~7]分别对轴对称喷管、二元喷管以及球型收敛喷管的*RCS*特性进行了数值模拟,结论表明,二元喷管的宽高比^[4]以及喷管的出口形状^[3]对喷管的*RCS*有影响;合理的雷达吸波材料涂覆方案可以有效缩减*RCS*,并降低吸波材料的使用

 ^{*} 收稿日期: 2017-07-08; 修订日期: 2017-07-25。
 作者简介:陈玲玲,女,博士,研究领域为发动机总体设计。E-mail: chen.lingling@outlook.com
 通讯作者:施永强,男,博士,副教授,研究领域为叶轮机械气动热力学、发动机内流气动热力学、发动机隐身。
 E-mail: yqshi@nwpu.edu.cn

量^[7]。李岳峰等^[8]、郭宵等^[9]以及高翔等^[10],分别对S 形进排气系统的*RCS*特性进行了计算分析,结论表 明S形进气系统的进口形状^[8],排气系统的出口宽高 比^[9]对系统的*RCS*有较大影响;而合理的介质涂覆方 案可以有效地抑制系统的*RCS*,同时兼顾经济性、重 量,并且涂覆方便^[10]。

区别于上述研究对象,本文着力于新型加有塞 锥的排气系统的 RCS 特性数值模拟和分析。塞式喷 管可以通过改变塞锥的几何形状以及轴向位置来调 节喷管的喉道与出口面积,使得发动机能在不同的 工况下正常工作;塞锥与喷管壁的相互配合还可以 实现发动机的矢量和反推功能;在航天领域,塞式喷 管因其高度补偿能力可被用于可重复使用单级入轨 火箭发动机;因而塞式喷管受到了航空航天领域众 多研究者的关注^[11~14]。国内外先后有 Hiley 等^[15]、 Banken 等^[16]、Chu 等^[17]、戴梧叶等^[18]、王长辉等^[19]以及 陈俊^[20]对塞式喷管的气动和红外辐射特性开展了数 值和试验方面的大量研究工作,结果表明,塞锥的存 在确实会降低喷管的效率至90%~96%[18,19],但塞式 喷管的高补偿特性[18,19]以及塞锥对喷管内部热部件 的有效遮挡使其在红外隐身方面产生的优势[20]都使 得塞式喷管在航空航天领域有着独特的使用价值。 根据几何学和物理学知识推断,喷管内塞锥的存在 极有可能有效遮挡喷管内的各种镜面反射回波,从 而削弱喷管对飞机总的 RCS 的贡献,有利于军用飞 机的雷达隐身;因而对塞式喷管的雷达隐身研究也 有着重要的军事意义。

本文以涡扇发动机尾喷管为参考,设计了轴对称塞式喷管,采用物理光学迭代法(IPO)^[2,21]和等效边缘电磁流方法(EEC)^[22,23]对喷管腔体散射场和棱边绕射场进行计算分析,研究了不同锥度的塞锥对喷管 *RCS*特性的影响。

2 物理模型和计算方法

2.1 物理模型

以涡扇发动机尾喷管为蓝本,改型设计了九型 塞式喷管。为了与基准喷管进行比较分析,塞式喷 管的喉道和出口流通面积保持与原喷管一致,塞锥 由前锥与后锥组合光滑过渡而成。本文根据参考文 献[20]中塞锥几何参数对气动和红外特性影响分析 以及本课题组在喷管后部几何形状对电磁散射特性 影响方面的研究,塞锥设计参数选择为:塞锥前锥半 锥顶角β固定为30°,塞锥半径比固定为0.5(塞锥最大 半径r与内涵进口半径R之比)^[20],塞锥后锥半锥顶 角 α 分别为7.5°,10°,11.25°,13°,15°,17°,18.75°, 20°,22.5°。所有喷管分别编号,不加塞锥的轴对称 喷管编为 M_0 号,依次随 α 的递增,喷管编号为 $M_1 \sim M_9$,如表1所示。图1为原始喷管与加塞喷管的 对比,以及塞锥剖面的示意图。



Fig. 1 Illustration of original nozzle, plug nozzle and the plug section

2.2 计算方法

本文的电磁散射特性采用自主开发程序进行计算。程序主要采用物理光学迭代法(IPO)对腔体雷达散射特性进行模拟,采用等效边缘电磁流方法(EEC)对喷管棱边绕射场进行模拟。

由于喷管的进口端有高速旋转涡轮,仅有少量 的电磁波能够穿越涡轮,因此可将进口端视为壁面, 作短路处理,即喷管作为单端开口腔体进行计算。 2.2.1 物理光学迭代法(IPO)

物理光学迭代法是分析腔体散射特性的一种行 之有效的高频近似方法,这种方法能够有效模拟目 标对电磁波的多次反射,从金属表面的磁场积分方 程出发,进行迭代求解出表面电流的分布,进而求解 其电磁散射特性。

2.2.2 等效边缘电磁流方法(EEC)

等效边缘电磁流法的概念是将边缘等效为电 (磁)流源^[24]。这种方法主要是将等效边缘电(磁)流 与边缘绕射场联系起来,用前者的辐射场来近似焦 散区边缘绕射场,从而求解焦散处的场值。其基本 思路是假设在环绕表面奇异性(边缘回路)的各点处 存在线电流 *I*和线磁流 *M*,通过远场辐射积分形式对 *I*和*M*求和,得到绕射场场值。

2.2.3 程序校验

为了验证本文计算方法的正确性,以文献[25]

中三角形三面角反射器为对象,计算其电磁散射特性,并与实验数据^[25]对比。图2所示为该模型形状及网格划分,组成其顶角的三个棱边长度均为5λ,其中 λ为入射波长。图3是其水平极化方式下总场*RCS*计算结果与相应实验数据的对比曲线,由图可以看出, 使用本程序计算的结果与文献中实验数据吻合相 当好。



Fig. 2 Geometry and mesh of triangle trihedral corner reflector



Fig. 3 *RCS* of trihedral corner reflector (experimental data from Ref. [25])

3 计算结果与讨论

本文计算了十种模型的RCS,包括原喷管和九种 加塞喷管,腔体内壁均视为理想导电体。计算的重 点仰俯角^{□1}范围为-40°~40°,其中正值表示俯视照射,负值表示仰视照射。入射波波长为λ(物理模型特征尺寸10λ),计算分析了水平极化和垂直极化两种极化方式下,不同形状塞锥对喷管单站*RCS*特性的影响规律。

3.1 各模型 RCS 均值分析

表1是加不同形状塞锥的喷管雷达散射总场 RCS在-40°~40°仰俯角范围内的算术平均值以及各 模型喷管 RCS均值相对原喷管的减小百分率,其中 M₀号模型为不加塞锥原始尺寸喷管。由表可以看 出,在两种极化方式下,所有加塞喷管都比原喷管的 RCS值有所减小。这主要是因为塞锥在某些仰俯角 范围内有效遮挡了喷管进口处简化平面的镜面反射 回波,从而使得加塞锥喷管的 RCS均值比不加塞锥 的小。图4是两种极化方式下喷管的总场 RCS均值 随α增大的变化柱状图。由图可以看出,两种极化方 式下,加塞锥都能有效降低喷管的 RCS,并且在两种 不同极化方式下,喷管模型 M₈(α=20°)的 RCS 减缩 效果均最好:与原喷管相比,水平极化方式下可减小 4.48dB,减小13.2%;垂直极化方式下可减小5.18dB, 减小15.2%。

3.2 各模型 RCS 随仰俯角变化分析

图 5 是 M₀~M,模型总场 RCS 随仰俯角的变化曲线,其中黑色加粗曲线为原喷管的 RCS 分布。从图中可以看出,各模型的 RCS 总场曲线基本不按 0°仰俯角对称,原因是该型喷管具有 5°安装角。从图中还可看出,在 0°仰俯角附近,所有喷管模型 RCS 都会出现一个较强且较宽的波峰,这是因为在 0°仰俯角附近,雷达入射波会在涡轮端壁面形成很强的垂直入射镜面反射波,因此在此仰俯角范围内喷管 RCS 值较大。另外,在 0°仰俯角附近,加塞锥的各型喷管 RCS 值较不加塞锥喷管略有增大。这是因为加塞锥 在 0°仰俯角附近不仅不能有效遮挡涡轮端壁面的强 镜面反射,而且由于塞锥与喷管壁面的耦合作用,散 射回波加强,使得 RCS 值更高。为了更清楚地了解

 Table 1
 RCS comparison of different plug nozzles

	\mathbf{M}_{o}	\mathbf{M}_{1}	M_2	M ₃	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M ₉
α/(°)	_	7.5	10	11.25	13	15	17	18.75	20	22.5
Horizontal polarization /dB	33.90	30.82	31.08	30.33	29.84	29.65	30.09	30.05	29.42	30.52
Vertical polarization /dB	33.98	29.88	30.41	30.51	30.36	29.45	29.37	29.55	28.80	29.38
Horizontal polarization RCS: $(M_0 - M_i)/M_0 /\%$	0	9.1	8.3	10.5	12.0	12.5	11.2	11.4	13.2	10.0
Vertical polarization RCS: $(M_0 - M_i)/M_0 /\%$	0	12.1	10.5	10.2	10.7	13.3	13.6	13.0	15.2	13.5

其雷达散射特性,本文取两种极化方式下0°仰俯角 附近 RCS峰值最大(在水平极化和垂直极化方式下 分别比原喷管增大8.14%,11.77%)的 M₁模型与原始 喷管模型 M₀进行比较。

图 6 分别为水平极化与垂直极化 0° 仰俯角时喷 管壁面感应电流面密度(Φ)分布云图。从图中可以 看出,加塞锥导致原中心锥表面感应电流密度局部 变大,由此可见,由于塞锥与喷管壁面多次反射耦合 作用,使得喷管中心锥上的感应电流密度增大,从而 造成其回波也相应增大,导致喷管 0° 仰俯角时的 RCS 值比不加塞锥喷管略大。由图 5 可看出,加塞锥模型 在重点仰俯角范围内几乎都能达到减缩喷管 RCS 的 目的:对于两种不同极化方式,在多个仰俯角的波峰 处,幅值都有大幅度的降低;同时在多个仰俯角处也 有相对原型喷管 RCS 值低得多的波谷,这与均值特 征一致。

3.3 最优模型 RCS 分析

从均值表中可以看出, 塞式喷管 M_s (α=20°)在

两种极化方式下 RCS 均最小。为此,取 M_s 模型与原 始喷管进行比较分析。图 7 为 M_o, M_s 模型总场 RCS 随仰俯角变化曲线。由于 M_s 模型塞锥末端并未超 出喷口,因此 M_o 与 M_s 模型喷管出口边缘形状、尺寸 均一致,计算结果也表明两者的出口边缘绕射场 RCS 数值相同,因而在总场中其变化原因主要是喷管腔 体散射场的差别。

从图中可以看出,在-10°~-22°以及19°~40°仰俯 角内,水平极化方式下减缩效果较明显;在-9°~-31° 以及1°~37°仰俯角内,垂直极化方式下减缩效果较 明显。这主要是因为在这些角度范围内,塞锥的存 在有效遮挡了涡轮端壁的镜面反射回波,从而降低 了这些方向的*RCS*。但也存在某些角度由于塞锥与 喷管壁面的耦合作用而使得回波加强,如图7(a)所 示的0°~-9°,图7(b)所示的-32°~-34°,0°附近以及 40°附近,喷管 M₈的*RCS*大于原始喷管 M₀。但总体 而言,在大多数仰俯角内,加塞锥后喷管的*RCS*得到 了有效的减缩。









Fig. 5 RCS of different models

 $\begin{array}{c} 0.0051 \\ 0.0042 \end{array}$

0.0033 0.0023 0.0014 0.0005



Front view of model M₁

Front view of model M_0

Perspective of model M₁

ve of model M_1 Perspective of model M_0

(b) Vertical polarization

Fig. 6 Induction current comparison of model M₁ and original one



Fig. 7 RCS comparison of model M₈ and original one

4 结 论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)本文采用物理光学迭代法和等效边缘电磁 流法对腔体和棱边的散射特性进行耦合计算。与文 献中三角形三面角反射器的实验结果对比验证表明 计算方法可靠。

(2) 塞式喷管能够有效降低喷管的雷达散射截 面,但在0°仰俯角附近会有局部的升高,在水平极化 和垂直极化方式下 RCS 值分别最大增大 8.14%, 11.77%;在本文所有塞式喷管算例中,后锥半锥顶角 20°的塞式喷管 RCS 均值减缩效果最好,与原喷管相 比,水平和垂直两种极化方式下,在-40°~40°仰俯角 范围内 RCS算术平均值可分别减小13.2%,15.2%。

参考文献:

- [1] 张 考,马东立. 军用飞机生存力与隐身设计[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [2] 杨 涛,杨青真,李岳峰. 轴对称及二元喷管 RCS的数值模拟研究[J]. 航空动力学报,2011,26(8): 1819-1823.
- [3] 陈立海,杨青真,陈玲玲,等.不同喷口修形的二元 收敛喷管 RCS 数值模拟[J].航空动力学报,2012,27 (3):513-520.
- [4] 高 翔,杨青真,母鸿瑞,等.不同宽高比的二元喷 管电磁散射特性数值研究[J].推进技术,2014,35
 (6):735-741. (GAO Xiang, YANG Qing-zhen, MU Hong-rui, et al. Numerical Simulation of Radar Scattering Characteristics for 2-D Nozzles with Different Aspect Ratios [J]. Journal of Propulsion Technology, 2014,35(6):735-741.)
- [5] Cui Jinhui, Shang Shoutang, Yang Qingzhen, et al. Numerical Simulation of RCS for a Spherical Convergent Flap Nozzle with a Non-Rectangular Divergent Duct
 [C]. Korea: 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2016.
- [6] 杨胜男,尚守堂,邵万仁,等.球面收敛二元喷管电磁散射特性[J].航空动力学报,2015,30(12):2983-2991.
- [7] 郭 霄,杨青真,施永强,等.介质涂覆位置对球面 收敛喷管电磁散射特性影响[J].航空学报,2017,38
 (4):1-9.
- [8] 李岳锋,杨青真,高 翔,等.基于迭代物理光学和等效边缘电流方法的S形进气道雷达散射截面研究
 [J].推进技术,2013,34(5):577-582. (LI Yue-feng, YANG Qing-zhen, GAO Xiang, et al. Investigation on Radar Cross-Section of S-Shaped Inlets Using IPO and EEC Method [J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(5):577-582.)
- [9] 郭 霄,杨青真,李岳锋,等.大宽高比S形二元喷 管电磁散射特性研究[J].电子设计工程,2014,22 (12):13-17.
- [10] 高 翔,施永强,杨青真,等.介质涂覆位置对双S 弯排气系统电磁散射特性影响研究[J].物理学报, 2015,64(2):1-10.

- [11] Harmon T. System Engineer and Integration Strategy on the X-33 Linear Aerospike Engine [R]. AIAA 97-3317.
- [12] Aguilar R. Real Time Simulation of the X-33 Aerospike Engine[R]. AIAA 2001-3562.
- [13] Zebbiche T. Supersonic Plug Nozzle Design [R]. AIAA 2005-4490.
- [14] Georgiadis N J, DallBello T W, Trefny C J, et al. Aerodynamic Design and Analysis of High Performance Nozzles for Mach 4 Accelerator Vehicles [R]. AIAA 2006– 16.
- [15] Hiley P E, Wallace H W, Booz D E. Study of Noz-Axisymmetric Nozzles Installed in Advanced Fighter Aircraft [R]. AIAA 75-1316.
- [16] Banken G J, Cornette W M, Gleason K M. Investigation of Infrared Characteristics of Three Generic Nozzle Concepts[R]. AIAA 80-1160.
- [17] Chu C W, Der J J, Wun W. A Simple 2D-Nozzle Plume for IR Analysis[R]. AIAA 80-1808.
- [18] 戴梧叶,刘 宇,马 彬. 塞式喷管三维流场的数值 模拟[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(5): 601-604.
- [19] 王长辉,刘 宇,覃粒子. 塞式喷管设计和性能验证[J]. 空气动力学学报, 2008, 26(2): 139-144.
- [20] 陈 俊. 涡扇发动机塞式喷管气动与红外辐射特性 研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.
- Basteiro F, Rodriguez J L, Burkholder R J. An Interactive Physical Optics Approach for Analyzing the Electromagnetic Scattering by Large Open-Ended Cavities [J].
 IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1995, 43(4): 356-361.
- [22] Michaeli A. Equivalent Edge Currents for Arbitrary Aspects of Observation[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1984, 32(3): 252-258.
- [23] Michaeli A. Elimination of Infinities in Equivalent Edge Currents, Part I: Fringe Current Components [J]. IEEE Transaction Antennas and Propagation, 1986, 34 (7): 912-918.
- [24] 汪茂光.几何绕射理论[M].西安:西北电讯工程学 院出版社,1985.
- [25] Polycarpou Anastasis C, Balanis Constantine A, Birtcher Craig R. Radar Cross Section of Trihedral Corner Reflectors Using PO and MEC[J]. Annals of Telecommunications, 1995, 50(5): 510-516.

(编辑:朱立影)