

外形修形对球面收敛矢量喷管 RCS 的影响

郭霄¹, 文振华¹, 方鹏亚¹, 李树豪¹, 李恒²

(1. 郑州航空工业管理学院航空工程学院, 郑州, 450000; 2. 中国航发集团燃气涡轮研究院, 成都, 610500)

摘要 航空发动机是飞行器后向电磁散射的主要贡献源, 对其采用雷达散射截面缩减措施能够有效地提升飞行器后向隐身性能。球面收敛矢量喷管能够满足新一代战斗机对于机动性和隐身性的综合需求。基于迭代物理光学法, 研究了对喷管扩张段进行不同角度斜切、修齿后球面收敛矢量喷管的后向雷达散射截面分布。研究结果表明: 斜切在俯仰平面上的 RCS 缩减能力较强, 斜切角度为 30° 具有最佳的 RCS 缩减效果; 修齿修形能够在两个探测面均体现较好的 RCS 缩减能力, 发动机出口齿角为 100° 时具有最佳的 RCS 缩减效果; 对航空发动机进行外形修形需要在飞机设计阶段进行综合考虑。

关键词 球面收敛矢量喷管; 外形修形; 斜切; 修齿; 雷达散射截面

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.03.003

中图分类号 V231 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)03-0013-06

Influence of Shape Modification on RCS of Spherical Convergent Flap Nozzle

GUO Xiao¹, WEN Zhenhua¹, FANG Pengya¹, LI Shuhao¹, LI Heng²

(1. School of Aeronautical Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China; 2. Sichuan Gas Turbine Research Establishment, Aero Engine Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract The aero-engine is a main contribution to the backward electromagnetic scattering of the aircraft, and the radar cross section(RCS) reduction measures adopted enable to effectively improve the aircraft stealth performance. The spherical convergent flap nozzle (SCFN) can meet the comprehensive needs of new generation fighters for maneuverability and stealth. The iterative physical optics method is used to calculate the backward RCS of the spherical convergence vector nozzle under different angles of beveling and tooth modification. The results show that the beveling modification has a better RCS reduction ability at the pitch plane. When the beveling is at an angle of 30°, the reduction ability is better than that of the other beveling angle. The tooth modification has RCS reduction-ability at the both plane. When the tooth angle is at an angle of 100°, the reduction ability is better than that of the other tooth angle. The shape modification of aero engines requires comprehensive consideration in the aircraft design stage.

Key words spherical convergent flap-nozzle; shape modification; beveling modification; tooth modification; radar cross section

收稿日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(51975539); 河南省青年人才托举工程(2021HYTP017); 河南省高等学校重点科研项目计划(20B590005); 河南省科技攻关项目(212102210342)

作者简介: 郭霄(1988—), 男, 河南南阳人, 讲师, 研究方向为航空发动机隐身特性模拟与分析。E-mail: guoxiao@zua.edu.cn

通信作者: 文振华(1976—), 男, 湖北天门人, 教授, 研究方向为航空发动机健康管理。E-mail: zhenhuawen@zuq.edu.cn

引用格式: 郭霄, 文振华, 方鹏亚, 等. 外形修形对球面收敛矢量喷管 RCS 的影响[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022, 23(3): 13-18.
GUO Xiao, WEN Zhenhua, FANG Pengya, et al. Influence of Shape Modification on RCS of Spherical Convergent Flap Nozzle[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(3): 13-18.

航空发动机尾喷管是发动机的产生推力关键部位,同时也是典型的电大尺寸单端开口深腔体,是飞行器后向电磁散射的主要贡献源。尾喷管的隐身性能的优劣对于整机隐身性能、作战性能的好坏具有十分重要的作用。球面收敛矢量喷管(spherical convergent flap nozzle, SCFN)的收敛段采用万向节的球形结构,扩张段则采用矩形截面。SCFN可以兼顾轴对称截面结构矢量效率高、压力分布均匀以及矩形截面结构易于与机身进行一体化设计,是唯一列入美国 IHPDET 计划的矢量喷管^[1]。在美军提出的对第六代战斗机发动机的要求中明确提出采用机械式推力矢量喷管和流体式推力矢量喷管,推力矢量喷管对满足战斗机常规机动性、过失速机动性、敏捷性、短距起落、超声速巡航、隐身等性能都有非凡的贡献^[2]。

目前,常用于提升航空发动机尾喷管隐身性能的措施主要有两种,一种是采用外形修形,降低在重点入射角域范围内的雷达散射截面(radar cross section, RCS)值;另外一种则是涂覆吸波材料^[3]。航空发动机排气系统的主要型面是腔体的几何型面,腔体的几何型面设计受到多种因素的制约,例如飞行器的后向红外隐身特性和发动机推力损失。航空发动机排气系统外形修形主要是在考虑与后机身进行融合的基础上,对发动机喷管出口进行修形。从目前现役的 B-2、F-117A、F-22 以及 F-35 等隐身飞机的喷管出口形状可以看出,针对发动机喷管出口的隐身修形主要存在两种形式:一是对喷管出口进行斜切以满足机身/排气系统一体化;二是对喷管出口进行锯齿修形,锯齿修形要满足平行设计原则。平行设计原则是飞行器隐身设计中一个重要原则。一般意义上平行设计原则是对飞机上的棱边的俯视投影进行平行设计。在平行设计时,需要结合飞机所受的雷达波探测威胁扇区来确定具体的角度设置。飞机上有大量的棱边,包括机翼和尾翼的边缘、翼尖、进气道唇口、喷管出口等。棱边散射是飞机上强散射源之一,对其进行平行设计能够减少雷达波散射波峰数量^[4]。

国内外学者对于外形修形对于腔体电磁散射特性的影响开展了研究。CHOI W H 等人设计了一种用于航空发动机进气道的宽频雷达吸收复合材料,通过实验测试表明其设计的这种吸波材料能够在较宽的频段范围内及较大的人射角范围内保持良好的 RCS 缩减效果,在 60° 入射角范围内仍降低目标 10 dBsm 的 RCS 值^[5]。赵京城等人基于矩形波导和远场关系理论,以矩形进口的单端开口腔体为目标,推导得到了进气道散射只与口面场有关,并通过数值模拟分析验证了结论的正确性^[6]。余龙舟等

人基于波导传输理论阐述了用于单端开口腔体的电磁屏蔽格栅的屏蔽原理,采用数值模拟的方法,研究了格栅尺寸、入射雷达波极化角、格栅布局对腔体 RCS 的影响,研究表明,采用非均匀布局的格栅能够进一步提升格栅的电磁屏蔽能力,双层格栅间距小于半波长时,格栅的屏蔽效果与单层格栅效果类似^[7]。邓雪娇等人分别采用迭代物理光学法和矩量法研究了航空发动机排气系统内中心锥的锥顶角对于发动机后向电磁散射特性的影响,数值模拟结果表明在较小的探测角范围内,中心锥的锥顶角为 40° 和 60° 时,发动机的后向 RCS 均值较小^[8]。王俊华采用数值模拟的方法分别计算了轴对称喷管、二元喷管以及单 S 弯喷管的气动性能、红外隐身性能以及电磁隐身性能,研究表明与二元喷管相比,单 S 弯二元喷管有效地提升了喷管的综合隐身性能,采用缓急相当的中心线变化规律和面积变化规律可同时取得良好的气动和隐身性能^[9]。姚伦标等人分析了计算电大尺寸单端开口腔体电磁散射特性的数值算法以及现存的问题,采用多层快速多极子加速的矩量法计算分析了腔内含叶片的单端开口腔体的 RCS,计算结果表明在综合考虑计算精度以及计算效率时,结合多层快速多极子的矩量法在计算电大尺寸单端开口腔体时存在较大的优势^[10]。杜凯等人对含锥轴对称单端开口腔体进行了实验测试和数值模拟分析,验证了迭代物理光学(iterative physical optics, IPO)方法对单端开口腔体电磁散射特性计算的可靠性,基于 IPO 方法计算了不同锥顶角含锥腔体在 L 波段、X 波段下的 RCS,计算结果表明,探测角域 $\pm 12^\circ$ 内锥顶角增大可缩减腔体 RCS, 60° 锥角缩减效果较好^[11]。李岳峰等人研究了 S 形流道偏心比对腔体电磁散射特性的影响,研究表明与偏心比为 0 的流道相比,偏心比改变了波的相位、振幅,偏心比越大,其相位越滞后、振幅越小^[12]。王俊琦等人采用了数值模拟的方法研究了不同齿角对轴对称喷管的散射场的影响,计算结果表明对出口边缘进行锯齿修形可有效降低喷管全局探测角范围的绕射场雷达散射截面,且修齿齿角越小,效果越明显^[13]。

国内外学者针对单端开口腔体目标的电磁散射特性分析开展了大量的研究,针对外形修形措施对球面收敛二元矢量喷管 RCS 影响研究较少。本文以迭代物理光学为基础,研究了修齿和斜切两种外形修形措施对喷管腔体电磁散射特性的影响。

1 计算方法

迭代物理光学法是在物理光学法基础上发展起

来的^[14]。该方法的基本思想是在物理光学法的基础上,通过迭代计算的思想考虑入射电磁波在腔体内部的多次反射过程,其基本思想如式(1)所示:

$$J = J_0 + J_1 \quad (1)$$

式中: J_1 为对初始电流的修正项。

迭代物理光学方法采用积分的方法求解磁场积分方程。修正电流的计算公式如下所示:

$$J_N(\mathbf{r}_C) = J_0 + 2\mathbf{n} \times \text{P. V.} \int_{S_C} J_{N-1}(\mathbf{r}_C) \times \nabla G(\mathbf{r}_C - \mathbf{r}'_C) dS_C \quad (2)$$

式中: P. V. 为主值积分号; N 为迭代次数; ∇ 为哈密顿算子; \mathbf{r}_C 、 \mathbf{r}'_C 为腔体壁面上不存在遮挡的面元位置矢量。

在 IPO 方法中只有不存在遮挡关系的面元之间才能产生等效感应电流,因此在使用 IPO 方法计算修正电流时,需要考虑壁面面元之间的遮挡关系。IPO 方法通过迭代计算这一方式考虑了电磁波在腔体中的多次散射对远场 RCS 的影响;与其它高频近似方法相比,IPO 方法只需用较少的壁面网格数目就可以满足计算的精度要求。

2 算法验证

本文的主要研究对象是球面收敛二元矢量喷管,为了获得其完整的电磁散射特性,需要研究其对带有一定弯折的单端开口腔体的适用性。本文对文献^[15]中的提到的弯折矩形单端开口腔体进行了数值模拟。模型尺寸如图 1 所示,计算频率为 10 GHz,计算角度为 $-30^\circ \sim 30^\circ$,计算角度间隔 1° 。

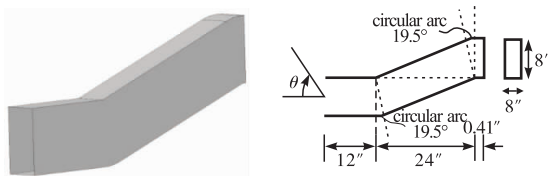
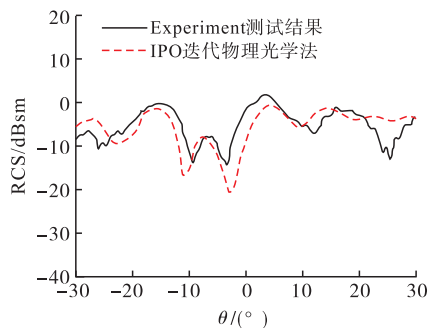
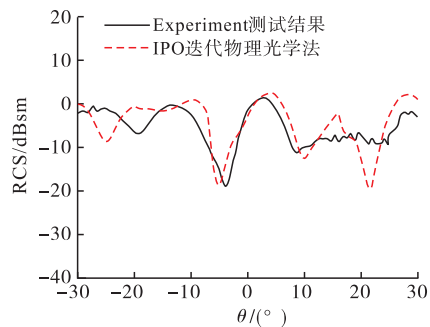


图 1 弯折腔体模型尺寸及入射角度示意图

图 2 所示为单端开口腔体的试验测试结果与数值模拟结果 RCS 角向分布曲线,图中“Experiment”为文献^[15]中的试验结果,“IPO”为本文的数值模拟结果。由图可知,IPO 方法对于该腔体的后向 RCS 的角向分布规律有着较好的预测精度。在较小的探测角范围内,IPO 方法得到的腔体的 RCS 幅值与试验测试值能够较好的吻合。在水平极化方式下,在较大的探测角下,IPO 方法得到的腔体 RCS 与试验测试值得到较好的吻合;在垂直极化方式下,在较大的探测角下,IPO 方法得到的腔体 RCS 与试验测试值吻合的较差。



(a) 水平极化



(b) 垂直极化

图 2 弯折腔体 RCS 数值模拟与试验测试结果对比

3 边界条件

本文中雷达探测角设置如图 3 所示。计算条件设置如下:计算频率 10 GHz;斜切修形俯仰探测面 $-30^\circ \sim 30^\circ$,修齿修形俯仰探测面为 $0^\circ \sim 30^\circ$;偏航探测面均为 $0^\circ \sim 30^\circ$;角度间隔 1° 。

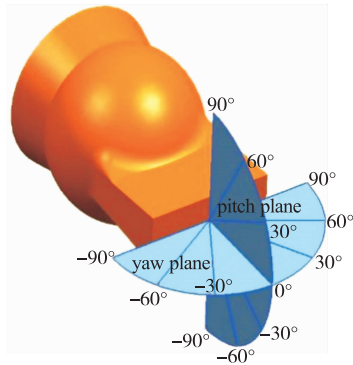


图 3 探测角设置示意图

对 SCFN 的扩张段出口部分进行斜切修形,斜切角度为 $10^\circ \sim 30^\circ$,角度间隔 10° 。斜切修形角度如图 4 所示。

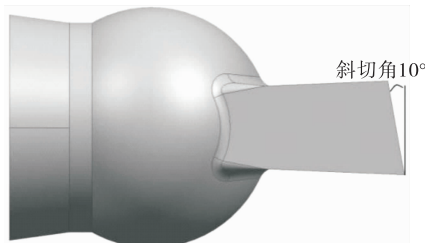


图 4 SCFN 斜切修形示意图

本文参照美国 F-22 战斗机采用的 F-119 发动机喷管出口锯齿的形式,对 SCFN 扩张段壁面进行了相应的锯齿修形,锯齿采用向内修形,保持喷管的长度一致。喷管出口处共有一个大齿,研究了齿尖角度对于喷管后向 RCS 的影响。齿角度变化范围为 $100^\circ \sim 120^\circ$,角度间隔 10° 。锯齿修形后 SCFN 如图 5 所示。

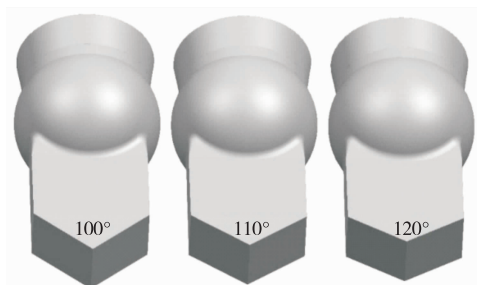


图 5 锯齿修形 SCFN 几何示意图

3.1 斜切修形对 SCFN 后向 RCS 的影响

图 6 为水平极化方式下俯仰探测面不同斜切角度 SCFN 模型的 RCS 角向分布曲线。由图可知,在 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 探测角范围内,斜切修形破坏了 SCFN 在后向的 RCS 角向分布的对称性,斜切后喷管在较大的正向探测角范围内的 RCS 幅值大于在负向探测角下的 RCS 幅值。在 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 探测角范围内,斜切修形对于腔体 RCS 的影响较小,这主要是在该探测角范围内,斜切对腔体内壁面之间的几何关系并没有发生较大的影响。在 $-30^\circ \sim -10^\circ$ 探测角范围内,斜切 SCFN 与基准 SCFN 的 RCS 幅值相差较小,与基准 RCS 的差异主要是 RCS 峰值对应的探测角所在的方位角。在 $10^\circ \sim 30^\circ$ 探测角范围内,斜切修形对于 SCFN 腔体的主要体现在 RCS 幅值上,斜切修形后 SCFN 与基准喷管的 RCS 幅值差别变大,这主要是因为斜切修形改变了 SCFN 扩张段上壁面的长度,进而改变了扩张段上壁面在该探测角范围内与腔体内壁面的几何遮挡关系。

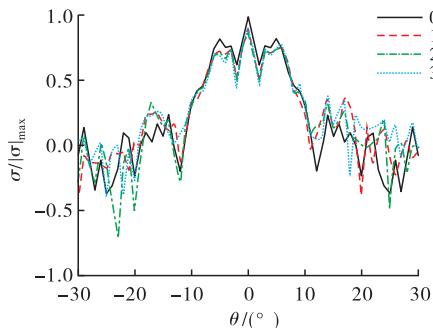


图 6 水平极化方式下俯仰探测面不同斜切角 SCFN 的 RCS 角向分布曲线

图 7 为垂直极化方式下偏航探测面不同斜切角度 SCFN 模型的 RCS 角向分布曲线。由图可知,斜切修形对于 SCFN 偏航平面的 RCS 角向分布的影

响较小,不同斜切角度的 SCFN 的后向 RCS 角向分布规律接近,幅值相差较小,这主要是因为斜切修形对 SCFN 扩张段侧壁面的面积影响较小,在小角度下对入射电磁波的影响较小。在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 探测角范围内,不同斜切喷管的后向 RCS 幅值与基准喷管的后向 RCS 幅值差异增大,斜切会增大 SCFN 的后向 RCS,这主要是因为修形减小了扩张段侧壁面的长度,从而改变电磁波在腔体内部的传播路径。

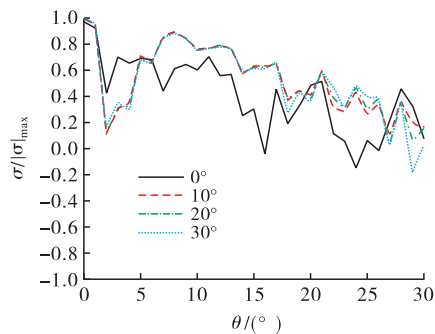


图 7 垂直极化方式下偏航探测面不同斜切角 SCFN 的 RCS 角向分布曲线

图 8 为水平极化方式下俯仰探测面内 15° 探测角下 SCFN 的壁面感应电流密度分布云图。由图可知,斜切修形对于壁面高密度感应电流分布区域的位置的影响较小,在该探测角下,SCFN 壁面的高密度感应电流分布主要集中在喷管进口端面靠近收敛段侧壁面的位置,这主要是因为喷管的进口端面和侧壁面构成了一个二面角结构,二面角结构是电磁波的强反射构型之一。在该探测角下,斜切修形对 SCFN 扩张段上壁面的面积的缩减导致与喷管腔体内壁面之间遮挡关系的变化体现的并不明显。

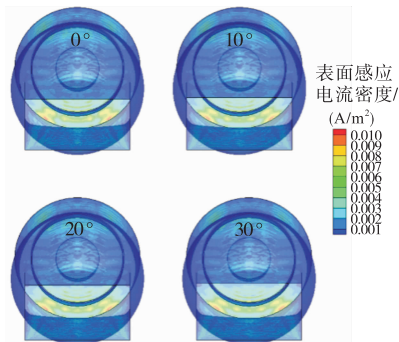


图 8 水平极化方式下俯仰探测面内 15° 探测角下壁面感应电流密度分布云图

图 9 为垂直极化方式下偏航探测面内 15° 探测角下 SCFN 的壁面感应电流密度分布云图。由图可知,在偏航平面可以看到斜切修形对 SCFN 扩张段侧壁面面积的修改进而导致的扩张段侧壁面与喷管腔体内部壁面之间的遮挡关系的改变,但是这种改变从遮挡面积上来看影响是较小的,相比俯仰探测面更不明显。在该探测角下,SCFN 壁面的高密

度感应电流分布区域主要集中在中心锥侧壁面位置,且该区域面积较小,这是因为中心锥侧壁面区域直接受入射电磁波照射且其自身曲率较大,SCFN 进口端面上则存在一个中等强度感应电流密度分布区域。在 $\theta=15^\circ$ 下,斜切修形对于 SCFN 内部腔体的感应电流密度分布的影响较小。

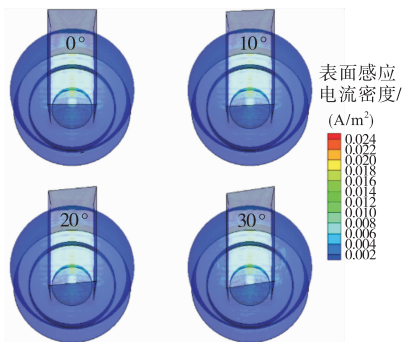


图 9 垂直极化方式下偏航探测面 15° 探测角下壁面感应电流密度分布云图

表 1 为斜切修形 SCFN 在不同探测面不同极化方式下的无量纲 RCS 均值和缩减效果,其中俯仰平面均值计算范围为 $-30^\circ \sim 30^\circ$,偏航平面均值计算范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 。由表可知,斜切修形在两个探测平面内均能降低 SCFN 的后向 RCS 均值,其中在俯仰探测面下的 RCS 缩减能力要大于在偏航探测面下缩减能力。SCFN 的 RCS 均值会随着斜切角度的增加而逐渐下降, 30° 斜切 SCFN 具有最小的 RCS 均值。

表 1 SCFN 在不同探测面不同极化方式下的无量纲 RCS 均值和缩减效果

| 斜切角度/ $^\circ$ | 俯仰平面水平极化 | | 偏航平面垂直极化 | |
|----------------|----------|--------|----------|--------|
| | RCS 均值 | 缩减效果/% | RCS 均值 | 缩减效果/% |
| 0 | 0.687 8 | | 1.000 0 | |
| 10 | 0.545 5 | -20.68 | 0.965 9 | -3.41 |
| 20 | 0.527 6 | -23.29 | 0.936 0 | -6.40 |
| 30 | 0.477 4 | -30.59 | 0.936 2 | -6.38 |

3.2 锯齿修形对 SCFN 后向 RCS 的影响

图 10 为水平极化方式下俯仰探测面内不同锯齿角度 SCFN 模型的 RCS 角向分布曲线。由图可知,锯齿修形对于 SCFN 后向 RCS 的影响与斜切修形的影响规律相似,锯齿修形对于 SCFN 的 RCS 影响主要体现在较大的探测角范围内。在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 探测角范围内,基准喷管的 RCS 幅值大于锯齿修形之后腔体 RCS,这主要是因为锯齿修形减小了扩张段壁面的面积。在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 探测角范围内,锯齿修形后的 SCFN 的 RCS 幅值及角向分布规律与基准喷管的差异较大,这主要是因为修形缩减了扩张段的面积,在较大的探测角范围内对电磁波在腔体内部的传播路径存在影响。

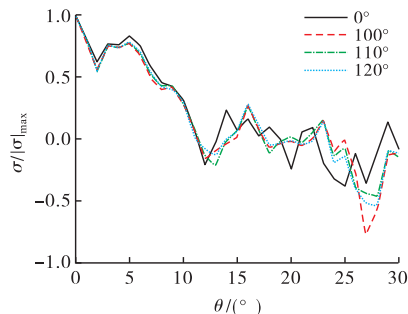


图 10 水平极化方式下俯仰探测面内不同锯齿修形 SCFN 的 RCS 曲线

图 11 为垂直极化方式下偏航探测面内不同锯齿修形角度 SCFN 模型的 RCS 角向分布曲线。由图可知,在大部分探测角范围内,基准喷管的 RCS 幅值都会大于锯齿修形后的 SCFN 的 RCS 幅值,这说明锯齿修形对于喷管后向 RCS 存在一定的缩减作用。只有在小部分探测角例如 14° 和 25° 探测角附近,锯齿修形后的喷管 RCS 幅值会大于基准喷管。3 种锯齿修形的 SCFN 的后向 RCS 角向分布规律接近,RCS 幅值相差不大。在大部分探测角范围内, 100° 锯齿修形的 SCFN 具有较小的 RCS 幅值。

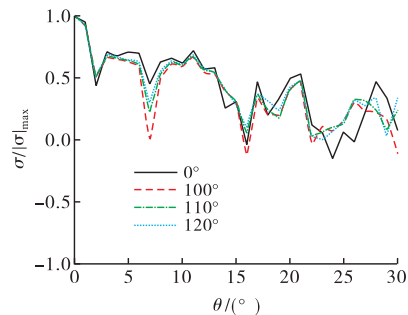


图 11 垂直极化方式下偏航探测面内不同锯齿修形 SCFN 的 RCS 曲线

图 12 为水平极化方式下俯仰探测面内 10° 探测角时 SCFN 壁面感应电流密度分布云图。由图可知,锯齿修形对于喷管壁面上的高密度感应电流分布的区域位置及面积影响较小,但是锯齿修形会在一定程度上略微降低高密度感应电流分布区域的强度。锯齿修形会缩短扩张段上下壁面的长度,在该探测角下,缩短的扩张段壁面对于喷管腔体内壁面的遮挡作用改变并不明显。

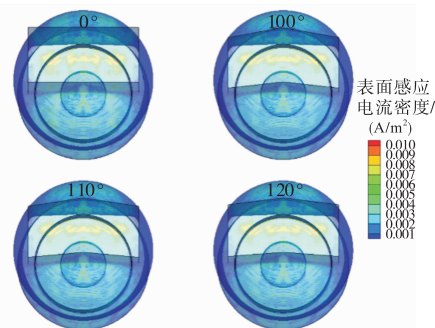


图 12 水平极化方式下俯仰探测面内 10° 探测角 SCFN 壁面感应电流密度分布云图

图13为垂直极化方式下偏航探测面内 20° 探测角时SCFN壁面感应电流密度分布云图。由图可知,锯齿修形改变了喷管扩张段侧壁面的长度,进而改变了对喷管腔体内壁面之间的遮挡关系,随着锯齿角度的增加,扩张段侧壁面对于腔体进口端面的遮挡随之减小。

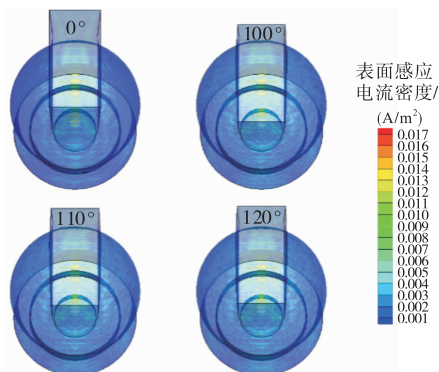


图13 垂直极化方式下偏航探测面内 20° 探测角时SCFN壁面感应电流密度分布云图

表2为不同锯齿修形喷管在不同探测面不同极化方式下 $0^\circ\sim 30^\circ$ 探测角范围内的无量纲RCS均值。由表可知,锯齿修形对于SCFN具有RCS缩减作用,锯齿修形后喷管相比基准SCFN可以减少10%以上RCS均值。 100° 锯齿修形具有最好的RCS缩减效果,在两个探测面内,两种极化方式下均能保证16.43%以上的RCS缩减效果;SCFN的RCS均值随着锯齿角度的增加而逐渐增大。

表2 锯齿修形SCFN的无量纲RCS均值及缩减效果

| 斜切角 度/ $^\circ$ | 水平极化俯仰平面 | | 垂直极化偏航平面 | |
|--------------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | RCS 均值 | 缩减效 果/% | RCS 均值 | 缩减效 果/% |
| 0 | 0.687 8 | | 1.000 0 | |
| 100 | 0.553 7 | -19.49 | 0.835 7 | -16.43 |
| 110 | 0.582 8 | -15.26 | 0.870 0 | -13.00 |
| 120 | 0.593 7 | -13.69 | 0.888 3 | -11.17 |

4 结论

1)斜切修形对SCFN在整个探测角范围内的RCS角向分布曲线的波峰、波谷所对应的探测方位影响较小,在俯仰探测面较大的雷达探测角下对RCS值有一定的影响。在俯仰探测面内,随着斜切角度的增加,斜切修形对SCFN的RCS缩减能力随之增加。在偏航探测面内,当斜切角等于 20° 和 30° 时,斜切修形对于SCFN的后向RCS的缩减能力基本一样。

2)对SCFN的扩张段采取与F-22装备的发动机喷管类似的大角度锯齿修形能够降低SCFN的后向RCS幅值。在本文的计算范围内, 100° 锯齿修

形具有最好的RCS缩减效果,在2个平面内都能够达到16.43%以上的RCS缩减效果。在对喷管进行大角度锯齿修形时需要与飞机整体设计进行综合考虑,以满足平行设计准则。

3)对于球面收敛矢量喷管而言,采用修齿和斜切修形方式在俯仰探测面内RCS缩减效果要优于在偏航探测面内缩减效果。

参考文献:

- [1] 梁春华,靳宝林,李雨桐.球形收敛调节片推力矢量喷管的发展[J].航空发动机,2002,28(3):55-58.
- [2] 孙明霞,梁春华,索德军,等.美国第6代战斗机发动机进展分析[J].航空发动机,2021,47(3):1-7.
- [3] 艾俊强,陈如山,陈晓盼,等.电磁计算十大问题[J].电波科学学报,2020,35(1):3-12.
- [4] 桑建华.飞行器隐身技术[M].北京:航空工业出版社,2013:72-73.
- [5] CHOI W H, KIM T I, LEE W J. Broadband Radar Absorbing Sandwich Composite with Stable Absorption Performance for Oblique Incidence and Its Application to an Engine Duct for RCS Reduction[J]. Advanced Composite Materials, 2021, 30(1): 76-90.
- [6] 赵京城,姜长玉,李家碧,等.一种方形腔体目标散射特性及测量方法[J/OL].北京航空航天大学学报:1-11 [2021-10-26]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0120>.
- [7] 余龙舟,陈宪,黄江涛,等.腔体格栅的电磁屏蔽原理与方法[J].航空学报,2022,43(1):455-465.
- [8] 邓雪姣,李晓明,马健,等.中心锥锥角对航空发动机腔体RCS的影响[J].燃气涡轮试验与研究,2019,32(6):31-35.
- [9] 王俊华.航空发动机尾喷管的气动/隐身特性研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2019:45-49.
- [10] 姚伦标,李宁,张琪,等.单端开口复杂终端腔体RCS算法研究[J].航空科学技术,2018,29(10):58-63.
- [11] 杜凯,姚伦标,张尧硕,等.内锥顶角修形对腔体电磁散射特性的影响研究[C]//第九届中国航空学会青年科技论坛论文集.西安:中国航空学会,2020:46-50.
- [12] 李岳峰,廖华琳,卿太木,等.偏心比对S形流道雷达散射特性的影响[J].燃气涡轮试验与研究,2016,29(4):13-16.
- [13] 王俊琦,晁晓亮,高翔,等.出口锯齿修形对轴对称喷管雷达散射截面的影响研究[J].科学技术与工程,2016,16(15):301-306.
- [14] 潘艳兰.基于IPO的含卷浪海面与目标复合电磁散射研究[D].西安:西安电子科技大学,2020:20-23.
- [15] 罗威.三维电大复杂腔体电磁散射问题的混合快速算法研究[D].成都:电子科技大学,2007:11-12.

(编辑:姚树峰)