

# 球面收敛二元矢量喷管气动/RCS优化研究

郭霄<sup>1</sup>, 杨青真<sup>2</sup>, 李树豪<sup>1</sup>, 文振华<sup>1</sup>

(1. 郑州航空工业管理学院 航空发动机学院, 郑州 450046;

2. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710029)

**摘要:** 为研究球面收敛二元矢量喷管几何设计参数对喷管气动性能和电磁散射特性的影响,以喷管喉道宽高比和扩张段长度为优化对象,采用遗传算法,对喷管的气动性能和气动/电磁散射特性进行优化分析,获得了最优的喉道宽高比和扩张段长度。研究表明:优化后得到的综合优化目标函数最优模型与样本中气动性能最优的模型相比,在损失0.90%推力系数的前提下,偏航探测面内的RCS均值降低了29.93%,有效提升了其在偏航平面内的隐身性能。

**关键词:** 航空发动机;球面收敛矢量喷管;隐身技术;雷达散射截面;气动性能;遗传算法

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-2620 (2021) 04-0044-05

## Research on the aerodynamic and RCS characteristics of spherical convergent flap nozzle

GUO Xiao<sup>1</sup>, YANG Qing-zhen<sup>2</sup>, LI Shu-hao<sup>1</sup>, WEN Zhen-hua<sup>1</sup>

(1. School of Aero-engine, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China; 2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to study the influence of design parameters of spherical convergent flap nozzle(SCFN) on the aerodynamic and electromagnetic scattering characteristics, taking the nozzle throat aspect ratio and the expansion section length as optimization objects, the genetic algorithm was applied to optimize and analyze the aerodynamic characteristics and radar cross section of the spherical convergent flap nozzle to obtain the optimal throat aspect ratio and expansion section length. The results show that the integrated optimized SCFN model reduced the 29.93% of the mean RCS in the yaw plane when the thrust coefficient was lost by 0.90% compared to the best model of aerodynamic performance in the sample.

**Key words:** aero-engine; spherical convergent flap nozzle; stealth technology; radar cross section; aerodynamic performance; genetic algorithm

## 1 引言

航空发动机排气系统作为飞行器后向最重要的雷达散射源,对实现飞行器全方位雷达隐身具有重大影响<sup>[1-2]</sup>。随着隐身性能对飞行器重要性的提升,气动性能与隐身性能对飞行器设计因素的需求差异日益明显,为此学者们针对飞行器气动/隐身的综合优化问题开展了相关的研究。Kanazaki<sup>[3]</sup>、Forrester<sup>[4]</sup>等提出了多种用于处理多目标优化问题的模型算

法。龙腾等<sup>[5]</sup>采用自适应径向基函数代理模型对某翼型的气动/隐身优化问题进行了研究,使翼型的升阻比和重点方位角的隐身性能都得到了有效提升。樊华羽等<sup>[6]</sup>将动态超体积期望改善加点的动态Kriging代理模型与ASMOPSO算法相结合,对某型飞翼布局无人机的气动和隐身特性进行优化分析,提高了优化效率。王荣等<sup>[7]</sup>通过多目标优化给出了双后掠翼飞翼布局无人机气动升阻性能相对隐身性能的

收稿日期: 2020-10-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(72001192);河南省高等学校重点科研项目计划(20B590005、21B590002);河南省青年人才托举工程(2021HYTP017)

作者简介: 郭霄(1988-),男,河南南阳人,讲师,博士,从事航空发动机进排气系统气动、隐身特性数值模拟研究。

最优设计边界。焦子涵等<sup>[8]</sup>建立了基于直接全局优化算法、二次曲线参数化方法和Kriging代理模型的多学科优化设计平台,并对典型高超声速布局升力体外形开展了综合优化研究。何开锋等<sup>[9]</sup>采用少量样本计算和Kriging响应面模型建模的优化策略,对类X-47气动布局的飞翼飞行器的外形进行了优化计算。张乐等<sup>[10]</sup>基于隐身反设计思路,提出了一种减小翼型前缘半径的机身前缘类“鹰嘴”形飞翼布局优化构型,该构型不仅能够提升在俯仰平面的气动特性,还可有效提升在主要威胁入射角区域的隐身性能。蒋相闻<sup>[11]</sup>借助代理优化策略开展了直升机布局对气动/隐身综合性能影响评估研究,结果表明静态翼面类部件在前飞状态下会产生有益的向上升力,但会增大不同姿态下重要角域范围RCS的均值和总的散射水平。

球面收敛二元矢量喷管(SCFN)由于其优异的性能,可满足先进战机对航空发动机气动、隐身性能提出的需求,研究人员对其气动性能以及电磁散射特性开展了大量研究。王宏亮等<sup>[12]</sup>研究了俯仰和偏航矢量角对SCFN气动性能参数的影响,结果表明在俯仰矢量状态下几何矢量角对喷管气动性能的影响要大于偏航矢量状态下的。郭霄等<sup>[13]</sup>就俯仰和偏航矢量角对SCFN后向RCS的影响进行了研究,发现俯仰矢量角比偏航矢量角对后向RCS的影响程度要大。杨胜男等<sup>[14]</sup>采用迭代物理光学法对SCFN在不同入射雷达波频率下的散射机理、空间散射场分布及频率特性进行了数值模拟与分析,表明SCFN在高频下其RCS对姿态角的敏感性更强。

综上所述,国内外学者针对目标综合优化的数值模拟算法及其在飞行器综合优化中的应用已经开展了大量的工作,但针对航空发动机喷管这类电大尺寸腔体目标气动/RCS综合优化展开的研究相对较少。本文以SCFN的几何设计参数为优化对象,采用遗传算法,对SCFN的气动性能和电磁散射特性进行了综合数值模拟优化。

## 2 SCFN气动/隐身特性优化方法

### 2.1 物理模型

SCFN的主要几何设计参数,包括喷管进口面积、喉道面积、喷管出口面积、扩张段长度、球面直径等。对SCFN进行优化时,在保证喷管长度、进出口面积、喉道面积、球面直径等参数不变的前提下,选择喷管的喉道宽高比及扩张段长度作为优化参数。

其中,喉道宽高比的变化范围为1.0~3.0,变化幅度为0.1;扩张段长度的变化范围为462~902 mm,变化幅度为22 mm。据此,结合 $U_{21}^*(21^T)$ 均匀设计表<sup>[15]</sup>,得到21个样本模型的主要设计参数,如表1所示。

表1 样本模型主要设计参数

Table 1 The main design parameters of the sample model

样本号	喉道宽高比	扩张段长度/mm
1	1.0	726
2	1.1	528
3	1.2	814
4	1.3	616
5	1.4	902
6	1.5	704
7	1.6	506
8	1.7	792
9	1.8	594
10	1.9	880
11	2.0	682
12	2.1	484
13	2.2	770
14	2.3	572
15	2.4	858
16	2.5	660
17	2.6	462
18	2.7	748
19	2.8	550
20	2.9	836
21	3.0	638

### 2.2 目标特性计算方法

SCFN的RCS数值模拟计算采用迭代物理光学法(IPO)<sup>[16]</sup>。迭代物理光学法是在物理光学法基础上发展出来用于计算腔体电磁散射的一种计算方法。与其他高频近似方法相比,IPO方法考虑了电磁波在腔体内部的多次散射,且计算时只需较少的网格就可以满足计算精度,内存消耗相对较少。在计算SCFN气动特性时,采用商业CFD软件完成对SCFN气动性能的计算与分析。

### 2.3 综合优化的目标函数

SCFN的气动/隐身性能优化是一个典型的多目标优化问题,本文选取评价函数法中的线性加权法<sup>[17-18]</sup>构造优化目标函数。以SCFN的推力系数作为气动特性优化目标函数,选取俯仰探测面水平极化方式下 $0^\circ \sim 20^\circ$ 和偏航探测面垂直极化方式下 $0^\circ \sim 10^\circ$ 探测角范围内的RCS均值作为电磁散射特

性优化目标函数。SCFN 进行综合优化的目标函数如下式所示:

$$F(\mathbf{X}) = \frac{w_1}{\sigma_{\text{HH}}} + \frac{w_2}{\sigma_{\text{VV}}} + w_3 C_F \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{X}$  为设计变量的矢量;  $w_1, w_2, w_3$  为权重系数, 且满足  $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$ ;  $C_F$  为 SCFN 的推力系数;  $\bar{\sigma}_{\text{HH}}, \bar{\sigma}_{\text{VV}}$  分别为归一化后的俯仰探测面和偏航探测面的 RCS 均值。

本研究中,  $w_1=0.3, w_2=0.3, w_3=0.4$ 。为消除目标函数的量纲影响, 对俯仰探测面和偏航探测面的 RCS 均值进行归一化处理:

$$A = \frac{\bar{\sigma} - \bar{\sigma}_{\text{min}}}{\bar{\sigma}_{\text{max}} - \bar{\sigma}_{\text{min}}} \quad (2)$$

式中:  $A$  为归一化后的 RCS 均值;  $\bar{\sigma}_{\text{max}}, \bar{\sigma}_{\text{min}}$  分别为 21 个样本俯仰探测面或偏航探测面 RCS 均值的最大值和最小值;  $\bar{\sigma}$  为某一样本在俯仰探测面或偏航探测面的 RCS 均值。

### 3 结果与分析

采用评价函数法将 SCFN 的气动/RCS 多目标优化问题转换成求解式(1)的最大值问题, 因此分别计算 21 个样本点模型的气动性能与 RCS 分布特性。采用遗传算法对喷管的气动性能和气动/隐身综合性能进行优化计算, 得到气动最优模型和综合优化目标函数最优模型对应的喉道宽高比和扩张段长度。

#### 3.1 气动单目标优化结果与分析

为研究优化参数对气动性能的影响, 从样本群中选取 4 个样本与气动最优模型进行比较分析。图 1 为模型示意图。图中, A~D 为样本模型, 分别对应表 1 中样本 1、样本 6、样本 11 以及样本 16; E 为气动最优模型。为易于分析 SCFN 的气动特性, 将喷

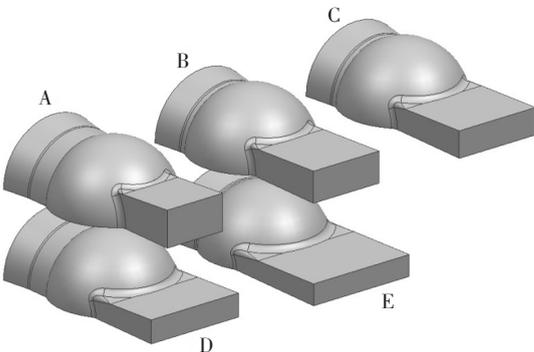


图 1 样本模型示意图

Fig.1 The CAD model of the sample

管内部的对称面分为 A 和 B, 具体设置如图 2 所示。

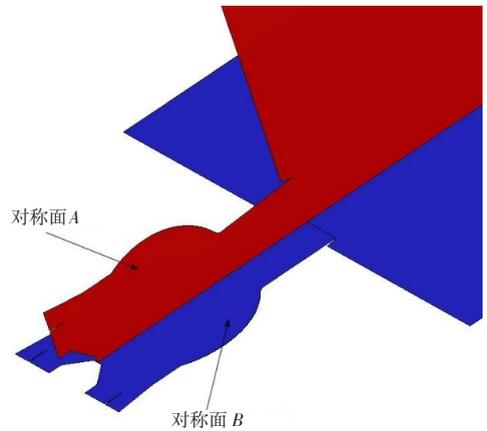


图 2 对称面设置示意图

Fig.2 The setting diagram of the symmetrical planes

图 3 和图 4 所示为 5 种模型对称面 A 和对称面 B 上的马赫数分布云图。由图可知, 5 种喷管喉道处马赫数均为 1, 且气流在扩张段内继续加速, 出口马赫数均大于 1, 都工作在超临界状态。但受几何设计参数的影响, 虽然模型进口条件一致, 各喷管工作状态仍然存在差异, 喷管射流核心区的长度并不相同。从图 4 可看出, 5 种模型的气动喉道均落后于几何喉道; 在喷管球面收敛段和中心锥后部各存在一个低速区域, 其中模型 C 球面收敛段的低速区域面积最大。

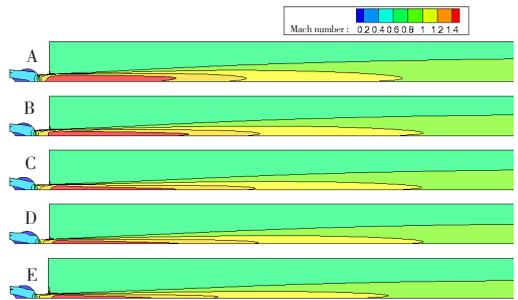


图 3 对称面 A 马赫数分布云图

Fig.3 The Mach number distribution of the symmetrical plane A

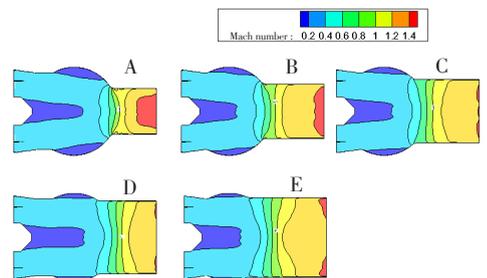


图 4 喷管内部对称面 B 马赫数分布云图

Fig.4 The Mach number distribution of the symmetrical plane B

表2示出了使用遗传算法对SCFN气动性能进行优化后的结果。由表可知,优化后的SCFN与样本中的气动性能最优模型相比,推力系数提升0.49%,性能提升幅度较小。

表2 球面收敛喷管气动性能优化结果

Table 2 Results of the aerodynamic optimization

	气动优化模型	样本最优模型
喉道宽高比	3.0	2.4
扩张段长度/mm	900	858
推力系数	0.966 0	0.961 2

### 3.2 气动/RCS综合优化结果与分析

在3.1节样本气动性能计算的基础上,采用IPO方法对21个样本模型的电磁散射特性进行了计算,得到了样本模型在俯仰和偏航探测面内的RCS角向分布。雷达探测角设置如图5所示。计算频率设置为10 GHz。采用遗传算法对SCFN的气动/RCS特性进行计算,得到综合优化目标函数最优模型。

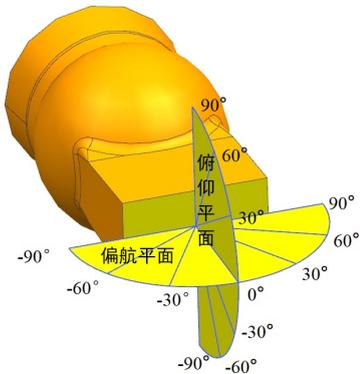


图5 雷达探测角设置示意图

Fig.5 Setting of radar detecting angles

图6为俯仰探测面水平极化方式下综合优化目标函数最优模型与样本模型的后向RCS角向分布曲线。由图可知,综合优化目标函数最优模型的RCS角向分布规律与4个样本模型的角向分布规律相似,喷管的RCS随着探测角的增加波动减小。在20°探测角附近,喷管的RCS角向分布曲线存在一个波峰。这主要是因为在该探测角附近,球面收敛二元矢量喷管入口的轴对称端壁面与入口端面形成一个二面角结构,而二面角结构是典型的强散射源。在0°~10°探测角范围内,综合优化目标函数最优模型的RCS幅值小于4个样本模型的RCS幅值,样本模型的RCS幅值随着喉道宽高比的增大而减小。在10°~20°探测角范围内,综合优化目标函数最优

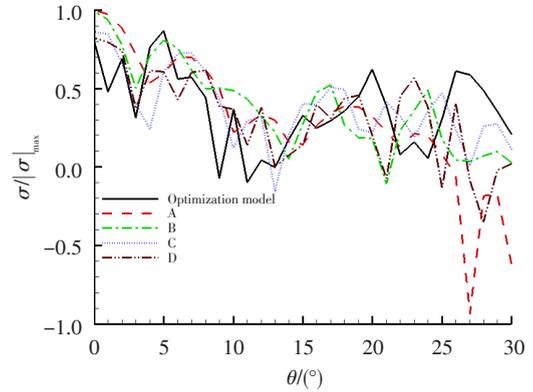


图6 俯仰探测面水平极化方式下模型的RCS角向分布曲线

Fig.6 The RCS curves of different model under the horizontal polarization in the pitch plane

模型和4个样本模型的RCS幅值相互交错,但在大范围内综合优化目标函数最优模型的RCS幅值小于4个样本模型的RCS幅值。

图7为偏航探测面垂直极化方式下综合优化目标函数最优模型与样本模型的RCS角向分布曲线。由图可知,在全部探测角范围内,综合优化目标函数最优模型和4个样本模型的RCS角向分布规律相似,其RCS幅值都随着探测角的增加而波动减小。根据综合优化目标函数,在偏航探测面垂直极化方式下重点关注探测角在0°~10°范围内。在该探测角范围内,综合优化目标函数最优模型的RCS幅值并非小于所有样本模型的RCS幅值。在5°~10°范围内,综合优化目标函数最优模型的RCS幅值比样本A和C的小,但是比样本B和D的大。在10°~30°范围内,综合优化目标函数最优模型的RCS幅值与4个样本模型的RCS幅值相互交错,综合优化目标函数最优模型的RCS幅值并没有明显降低。

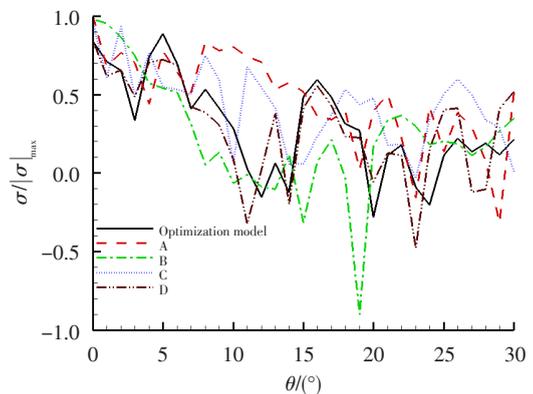


图7 偏航探测面垂直极化方式下模型的RCS角向分布曲线

Fig.7 The RCS curves of different model under the vertical polarization in the yaw plane

表3示出了对SCFN的气动/RCS进行综合优化后得到的结果。表中,俯仰探测面为 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 探测角范围内的RCS均值,偏航探测面为 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 探测角范围内的RCS均值。由表可知,与样本中气动性能最优模型相比,综合优化后目标函数最优模型在损失0.90%推力系数的前提下,有效降低了SCFN在两个探测面内的RCS均值,提升了隐身性能。在俯仰探测面,综合优化目标函数最优模型的RCS均值降低了7.05%。在偏航探测面,综合优化目标函数最优模型的RCS均值降低了29.94%。综合优化目标函数最优模型在偏航探测面的RCS缩减效果,要优于在俯仰探测面的RCS缩减效果。

表3 球面收敛二元矢量喷管的气动/RCS综合优化设计结果

Table 3 The results of the comprehensive optimization

	综合优化目标 函数最优模型	样本气动性 能最优模型	变化量
喉道宽高比	2.3	2.9	
扩张段长度/mm	814	839	
推力系数	0.951 7	0.960 9	-0.90%
俯仰探测面 RCS 均值/ $m^2$	14.001 2	15.065 1	-7.05%
偏航探测面 RCS 均值/ $m^2$	17.986 6	25.674 4	-29.94%
优化目标函数值	2.285 9	1.964 3	16.37%

## 4 结论

采用遗传算法对球面收敛二元矢量喷管的气动性能进行了优化分析。在此基础上,采用评价函数法构造了气动性能与雷达散射性能综合优化的目标函数,对球面收敛二元矢量喷管的气动与雷达散射性能进行了综合优化。研究表明:

(1) 设计的球面收敛二元矢量喷管在优化参数范围内具有较好的气动性能,采用遗传算法对喷管进行气动优化的效果并不明显,气动性能优化后的模型的推力系数与样本中气动性能最优模型相比仅提升了0.49%。

(2) 综合优化目标函数最优模型有效降低了其在主要探测角范围内的RCS幅值。与样本中的气动性能最优的模型相比,球面收敛二元矢量喷管在损失0.90%推力系数的前提下,偏航探测面的RCS均值降低了29.93%,有效提升了其偏航探测面内的隐身性能。

## 参考文献:

- [1] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京:航空工业出版社, 2013.
- [2] 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.
- [3] Kanazaki M, Jeong S, Tanaka K, et al. Multi-objective aerodynamic exploration of elements' setting for high-lift airfoil using Kriging model[J]. Journal of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2006, 54(632): 419—426.
- [4] Forrester A I J, Keane A J. Recent advances in surrogate-based optimization[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2009, 45(1):50—79.
- [5] 龙 腾,李学亮,黄 波,等. 基于自适应代理模型的翼型气动隐身多目标优化[J]. 机械工程学报, 2016, 52(22): 101—111.
- [6] 樊华羽,詹 浩,程诗信,等. 高效粒子群算法研究及飞翼无人机气动隐身优化设计[J]. 航空工程进展, 2019, 10(6):735—743.
- [7] 王 荣,闫 溟,白 鹏,等. 飞翼无人机平面外形气动隐身优化设计[J]. 航空学报, 2017, 38(S1):721532—1—8.
- [8] 焦子涵,邓 帆,刘 辉,等. 高超声速飞行器气动/隐身优化设计方法[J]. 宇航学报, 2016, 37(9): 1031—1040.
- [9] 何开锋,钱炜祺,陈坚强,等. 基于流体力学和电磁学方程数值求解的飞行器气动隐身一体化设计[J]. 空气动力学学报, 2009, 27(2): 180—185.
- [10] 张 乐,周 洲,许晓平. 隐身反设计下飞翼布局气动与隐身综合设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(10): 22—30.
- [11] 蒋相闻. 直升机气动/雷达隐身特性综合优化设计及应用[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
- [12] 王宏亮,张靖周,单 勇,等. 球型收敛调节片喷管静态内性能数值研究[J]. 推进技术, 2008, 29(4):443—447.
- [13] 郭 霄,杨青真,施永强,等. 几何矢量角对球面收敛矢量喷管 RCS 的影响研究[J]. 推进技术, 2018, 39(4): 785—791.
- [14] 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.
- [15] 王兆军,陈 彬. 某些二维均匀设计表[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2001, 34(1): 78—82.
- [16] 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.
- [17] 郑成忠. 多目标半定规划的一类评价函数法[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010.
- [18] 吴卫东,黄洪钟,李海滨. 对称模糊优化模型评价函数解法[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(3): 315—319.