

1-8-2019

## Area and Centerline Distribution on Stealth Design of S-shaped Inlet

Le Zhang

1. *Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China;*

Zhou Zhou

2. *College of Aeronautics, NWPU, Xi'an 710072, China;*

Xiaoping Xu

2. *College of Aeronautics, NWPU, Xi'an 710072, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Area and Centerline Distribution on Stealth Design of S-shaped Inlet

### Abstract

**Abstract:** *Based on the conformal inlet's size requirement of flying wing unmanned aerial vehicle (UAV), s-shaped inlets are designed with super-ellipse equation, and they are also designed in three typical centerline and area distributions of "beginning fast and end slow", "beginning and end the same", and "beginning slow and end fast". The numerical simulation is verified on electromagnetic scattering characteristics of the inlet with straight cavity based on multilevel fast multipole method (MLFMM), and the stealth analysis is also carried out. And then the mechanism is analyzed combining with electric current distribution. Results indicate that with the inlet terminator open, there is little difference of the stealth characteristics on different centerline and area distributions; the centerline distribution exerts greater influence than the area distribution on the stealth characteristics of inlet; adopting the centerline distribution of "beginning fast and end slow" and area distribution of "beginning and end the same" in the s-shaped inlet designs lead to both good aerodynamic and stealth performance.*

### Keywords

s-shaped inlet, centerline distribution, area distribution, stealth, electric current distribution

### Recommended Citation

Zhang Le, Zhou Zhou, Xu Xiaoping. Area and Centerline Distribution on Stealth Design of S-shaped Inlet[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 2999-3006.

## S弯进气道隐身设计中截面积和中心线影响

张乐<sup>1</sup>, 周洲<sup>2</sup>, 许晓平<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 基于飞翼无人机保形进气道尺寸要求, 结合超椭圆方程, 设计了前急后缓、缓急相当、前缓后急三种典型中心线和截面积规律的 S 弯进气道; 采用多层快速多极子方法对直腔进气道进行了电磁仿真验证, 对 S 弯进气道进行了隐身计算, 并结合电流分布进行了机理分析。结果表明: 进气道终端开放时, 不同中心线和截面积的进气道隐身性能差异较小; 截面积规律比中心线规律对进气道隐身性能影响更小; 采用前急后缓的中心线和缓急相当的截面积规律能同时获得良好的气动和隐身性能。

**关键词:** S 弯进气道; 中心线; 截面积; 隐身; 电流分布

中图分类号: V211.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 08-2999-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808022

## Area and Centerline Distribution on Stealth Design of S-shaped Inlet

Zhang Le<sup>1</sup>, Zhou Zhou<sup>2</sup>, Xu Xiaoping<sup>2</sup>

(1. Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China; 2. College of Aeronautics, NWPU, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Based on the conformal inlet's size requirement of flying wing unmanned aerial vehicle (UAV), s-shaped inlets are designed with super-ellipse equation, and they are also designed in three typical centerline and area distributions of "beginning fast and end slow", "beginning and end the same", and "beginning slow and end fast". The numerical simulation is verified on electromagnetic scattering characteristics of the inlet with straight cavity based on multilevel fast multipole method (MLFMM), and the stealth analysis is also carried out. And then the mechanism is analyzed combining with electric current distribution. Results indicate that with the inlet terminator open, there is little difference of the stealth characteristics on different centerline and area distributions; the centerline distribution exerts greater influence than the area distribution on the stealth characteristics of inlet; adopting the centerline distribution of "beginning fast and end slow" and area distribution of "beginning and end the same" in the s-shaped inlet designs lead to both good aerodynamic and stealth performance.

**Keywords:** s-shaped inlet; centerline distribution; area distribution; stealth; electric current distribution

## 引言

进气道是飞行器前向重点姿态角域的强散射源, 进入空腔结构的电磁波经内壁的多次反射及压

缩机叶片的反射后, 其在入射方向可贡献 RCS (Radar Cross Section) 超过 10 dBsm<sup>[1-2]</sup>。对进气道 RCS 缩减的典型方法之一是设计成 S 弯, 通过增加电磁波在管道内反射次数, 减少后向回波。

针对 S 弯进气道设计方法、气动和隐身特性等研究, 国内外开展了大量工作。Lee C C 等<sup>[3]</sup>率先提出了一种大偏距、短扩压 S 弯进气道设计方法, 并提出了前急后缓、缓急相当、前缓后急三种中心



收稿日期: 2016-11-17 修回日期: 2017-04-06;  
基金项目: 国家自然科学基金(11302178);  
作者简介: 张乐(1988-), 男, 江西, 博士, 工程师, 研究方向为飞行器总体设计、气动隐身一体化; 周洲(1966-), 女, 湖南, 博士, 教授, 研究方向为飞行器总体设计、飞行力学与飞行控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 2999 •

线和截面积变化规律,之后国内外学者进气道设计大多基于此。对进气道而言,中心线变化规律决定了横截面方向上的压力梯度,进而决定了截面二次流特性;截面积变化规律则决定了管道内沿流动方向的压力梯度,也就决定了进气道内流动的分流情况。为使进气道内流性能达到最优,需充分兼顾这两个变化规律,大量实验结果和数值仿真<sup>[4-7]</sup>均已阐述了中心线和截面积变化规律对S弯进气道气动特性的影响,而其对隐身性能的影响研究极少。姬金祖等<sup>[8]</sup>通过对不同相对弯度和弯折方式的进气道进行RCS测试,研究了S弯进气道隐身设计中弯度参数影响;李岳峰等<sup>[9]</sup>研究了不同进口形状如圆形、椭圆形、矩形、W形等对唇口边缘及腔体内部RCS影响;石磊等<sup>[10]</sup>研究了蛇形进气道RCS随迎角、方位角和终端的变化。

综上国内外学者对于S弯进气道隐身特性的影响研究,给本文隐身设计中截面积和中心线变化规律影响研究提供了很好的参考,但上述列举或未列举的研究主要集中在S弯进气道唇口形状、弯度参数、弯道长度等对隐身性能影响,暂时未开展中心线和截面积变化规律影响研究。本文将基于方转圆(矩形进口转圆形出口)规则形状S弯进气道,结合微波暗室测试进行隐身特性数值方法验证,系统地开展中心线和截面积变化规律对电磁散射特性的影响研究,为S弯进气道隐身设计提供相关参考。

## 1 方转圆S弯进气道仿真建模

S弯进气道尺寸与保形进气道<sup>[11]</sup>基本一致,其中出口面积等于发动机进口面积,进气道进、出口面积比和截面纵向偏距相同。S弯进气道基本几何参数如表1所示,其中 $d_1$ 为进气道出口直径,出口形状为圆形。

进气道进出口参数确定后,再选取文献[3]提出的三种中心线和截面积变化规律,其中横截面形状过度方法采用文献[12]中详细阐述的超椭圆方程进行控制,利用其生成进气道进、出口之间控制的横截面形状,超椭圆方程数学表达式为:

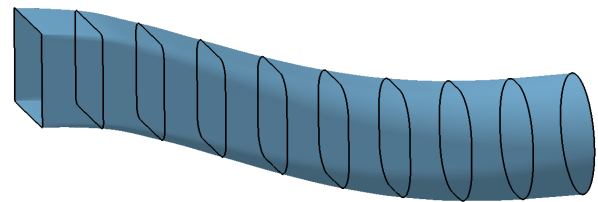
$$\left(\frac{x^2}{a^2}\right)^s + \left(\frac{y^2}{b^2}\right)^s = 1 \quad (1)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $s(s=0.5n)$ 都是大于零的实数。

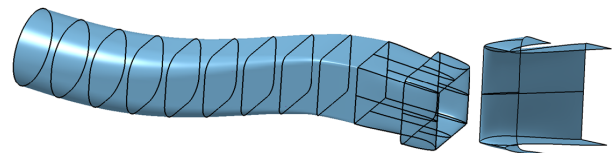
表1 规则形状S弯进气道基本外形参数

| 纵向偏距                 | 进气道长度(不含过渡段)  | 进出口面积比(扩压比)       | 进口形状     |
|----------------------|---------------|-------------------|----------|
| $\Delta Y = 0.97d_1$ | $L = 2.37d_1$ | $A_2 / A_1 = 1.2$ | 长方形(小圆角) |

然后利用CATIA软件曲面造型功能进行S弯进气道造型,得到进气道基本外形,其中中心线为前急后缓、截面积为缓急相当变化规律的模型如图1(a)所示。再进一步进行内管道中唇口形状设计,内唇口设计时采用长短轴之比为3的椭圆曲线,外唇口设计则采用典型的NACA-1系列曲线,带有唇口规则形状S弯进气道如图1(b)所示。



(a) 方转圆规则形状S弯进气道基本几何外形



(b) 带有唇口S弯进气道及唇口局部示意图

图1 S弯进气道仿真建模

Fig. 1 Simulation modeling of s-shaped inlet

针对方转圆规则形状S弯进气道,建立了不同中心线和截面积变化规律组合下的进气道模型,共计5种不同进气道,其中截面积为缓急相当下,中心线分别为前缓后急、缓急相当、前急后缓的方转圆S弯进气道如图2所示。

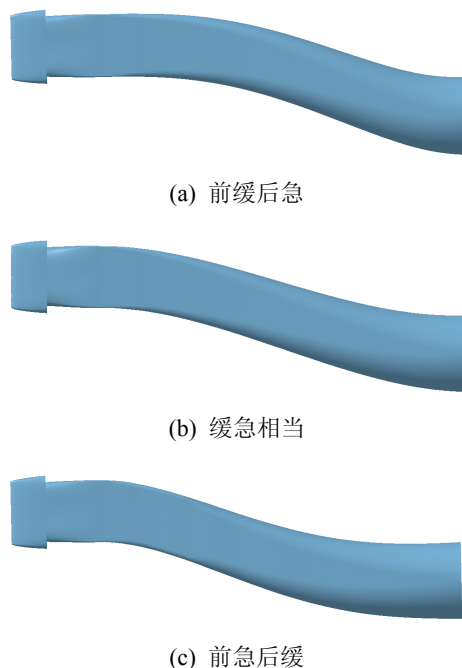


图2 不同中心线变化规律下S弯进气道模型  
Fig. 2 S-shaped inlets with different centerline distributions

## 2 进气道电磁隐身仿真方法及验证

近年来,国内外针对各种电尺寸目标电磁散射特性的数值算法主要分为两类:高频近似算法和低频积分方法。其中高频近似算法在计算电尺寸较小的复杂结构目标时,会忽略目标各个子散射体之间极强的电磁互耦,从而造成极大计算误差,而低频算法则将该极强的电磁互耦进行了考虑,能够精确地求解任意复杂形状目标的电磁散射问题。多层快速多极子<sup>[13-14]</sup>方法是日前发展最为成熟并且应用最为广泛的一种低频算法,它既能加快积分方程的求解速度,又能够保持矩量法的计算精度。

本文为了获取更高的计算精度,选取 MLFMM 算法(基于成熟商业隐身计算软件 FEKO 中算法)进行电磁仿真计算,为了表明算法的可靠性,加工制作了斜切 45°进口进气道直腔模型,进口轮廓为 240 mm×240 mm,下底边长度为 800 mm,板厚度为 2 mm,其实体测试模型如图 3 所示,测试过程中将模型外部侧边、上底及尾端端面用吸波材料包裹以消除外端面的散射影响。该模型隐身测试在隐身微波暗室进行,测试频率为 10 GHz,并且采

用水平极化方式(HH)。其中 RCS 是用来定量描述目标散射强度的物理量,一般用  $\sigma$  表示,其定义式为<sup>[15]</sup>:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\bar{E}^s|^2}{|\bar{E}^i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\bar{H}^s|^2}{|\bar{H}^i|^2} \quad (2)$$

式中:  $\bar{E}^i$ 、 $\bar{H}^i$  分别代表入射雷达波在目标位置的电场和磁场强度,而  $\bar{E}^s$ 、 $\bar{H}^s$  分别为探测目标散射在接收雷达位置的电场和磁场强度,  $R$  是目标与雷达天线的距离。本文 RCS 计算中表面电流值通过 MLFMM 计算得到。

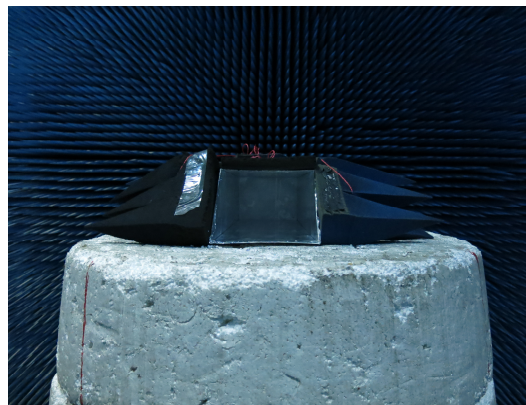


图3 斜切 45°进口进气道直腔模型  
Fig. 3 Test model of the oblique import inlet of 45° coupling with straight cavity

使用三角形面元网格计算,最大尺寸为  $\lambda/8$ 。沿水平面入射,雷达波入射角度为  $\varphi=40^\circ \sim 40^\circ$ ,间隔  $1^\circ$ 入射,且基于单站雷达进行计算,并基于 Inter@ Core i7-2600 CPU、32G 内存计算机计算。

图 4 为采用 MLFMM 算法仿真与实验测试 RCS 对比,由图 4 可知,随着电磁波入射角变化,仿真结果与实验测试 RCS 变化趋势较一致,尤其表现在各波峰与波谷处入射角度基本吻合,且仿真计算 RCS 与实验测试在角域  $-30^\circ \sim 30^\circ$  范围内较吻合。不过随着电磁波入射角度增大,计算结果差值逐渐增大,这主要是由于入射角度增大时腔体外壁散射效应加剧而腔体内散射减弱造成的。总体来看,采用 MLFMM 进行隐身仿真计算是可靠的,并可重点关注  $-30^\circ \sim 30^\circ$  角域 RCS 变化。

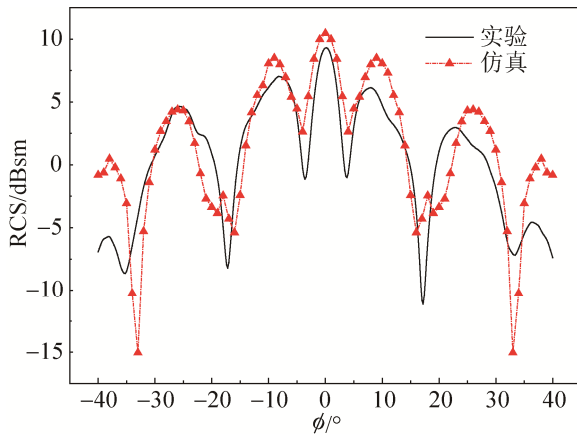


图4 斜切进口直腔进气道仿真计算与实验测试对比  
Fig. 4 RCS value comparison between simulation and test

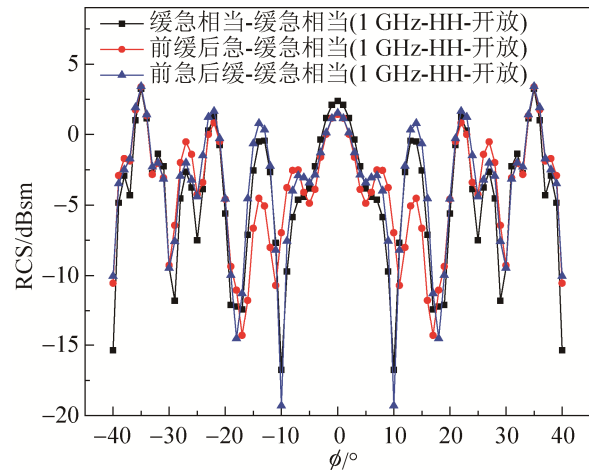


图5 1 GHz 水平极化下不同中心线进气道 RCS 对比  
Fig. 5 RCS curves of the inlets with different centerline distributions at the frequency of 1 GHz (HH)

### 3 S 弯进气道隐身特性仿真分析

由于发动机进口压气机叶片未知,数值计算时采用进气道终端开放和封闭两种形式(终端封闭指利用平面填充)。仿真计算分别选取了 L、S 波段下典型频率 1 GHz、3 GHz,采用水平极化方式,仿真角度与网格剖分等与上一节相同。

#### 3.1 中心线变化规律对隐身特性影响

##### 3.1.1 进气道隐身特性对比

###### (1) 进气道终端开放下 RCS 对比

图 5 给出了 1 GHz 水平极化下不同中心线进气道 RCS 对比(进气道终端开放),其中图标中第一项为中心线变化规律,第二项为截面积变化规律,如“前缓后急-缓急相当”表示为中心线为“前急后缓”,而截面积为缓急相当,图中三种进气道模型截面积变化相同,后文图中均采用此表示方法。

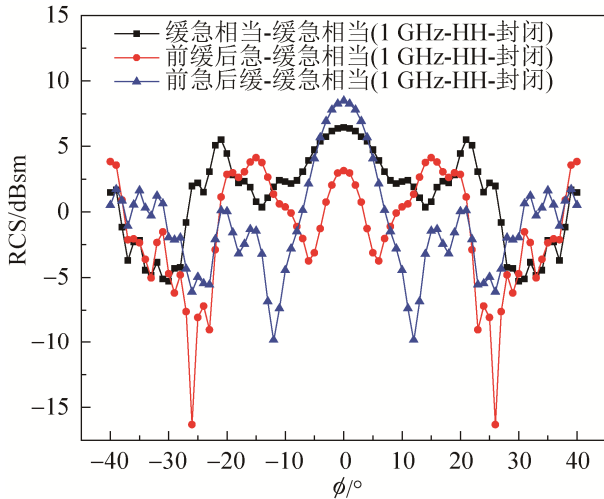
由图 5 可知,截面积变化保持不变时,终端开放下三种中心线进气道 RCS 在 $-40^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 角域下基本一致,RCS 变化不大,且 RCS 值均较小,这主要是因为入射的电磁波通过进气道内管道后极少反射回来,腔体内部反射较弱。

通过数值计算与分析发现,截面积恒定下不同中心线进气道和中心线恒定时不同截面积进气道终端开放模型在相同频率下 RCS 值变化均较小,可以认为隐身特性基本保持不变,因而在后文将不再赘述,将重点关注终端封闭下 RCS 变化。

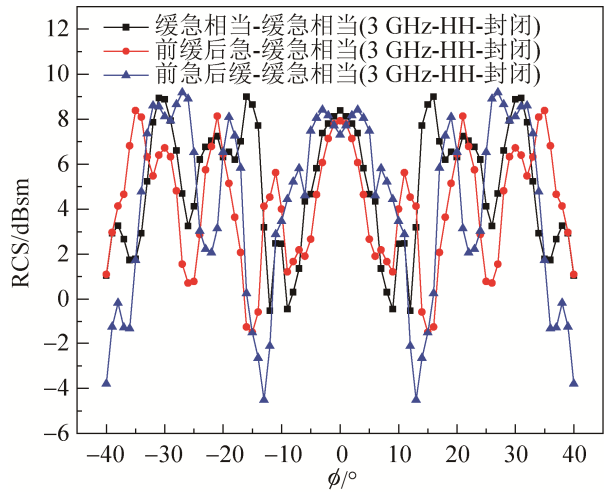
###### (2) 进气道终端封闭下 RCS 对比

图 6 给出 1 GHz 和 3 GHz 水平极化下不同中心线进气道 RCS(终端封闭),对比图 5 可见,进气道终端封闭 RCS 较终端开放明显增大,充分表现了腔体内部强电磁反射效应,且在终端封闭下,进气道腔体散射效应随着中心线变化规律不同逐渐体现出差异。

由图 6(a)可知,在小角域 $-4^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 内,中心线为前急后缓进气道模型 RCS 最大,随着中心线前段逐渐变化,RCS 逐渐减小,这是由于中心线前段变化较缓不利于雷达波在通过进气道腔体及终端后反射至进气道进口;不过随着入射角进一步增大时(如角域 $8^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ),前急后缓(中心线变化)进气道 RCS 急剧下降,RCS 最低,而前缓后急进气道则反而逐渐升至最大,这是因为入射角偏大时,进气道终端强镜面反射在减弱,而进气道前段逐渐变缓时,前段的腔壁反射逐渐增强,且侧壁与底部形成的二面角散射区也更长,因而易导致 RCS 增大较快;当入射角进一步增大时,由于腔体外壁散射干扰逐渐增强,RCS 随中心线变化呈现较不规律变化;另外,3 GHz 下不同中心线进气道 RCS 变化与 1 GHz 较相似,不再详细阐述。



(a) 1 GHz 水平极化下不同中心线进气道 RCS



(b) 3 GHz 水平极化下不同中心线进气道 RCS

图 6 不同频率下不同中心线进气道 RCS 对比  
Fig. 6 RCS curves of the inlets with different centerline distributions at the frequencies of 1GHz and 3 GHz (HH)

表 2 给出水平极化下不同中心线进气道前向  $-30^{\circ}\sim 30^{\circ}$  RCS 均值, 由表 2 可知, 两种频率下 RCS 均值表现的规律一致, 中心线为前缓后急时进气道 RCS 最低, 前急后缓次之, 缓急相当时则最高; 结合进气道中心线气动特性研究表明<sup>[7]</sup>, 中心线采用前缓后急时出口流动畸变较大, 总压恢复相对较低, 而选择前急后缓时, 流动畸变较低且总压恢复较高, 综合考虑, 前缓后急虽然隐身性能最优, 但气动性能相对较差, 而前急后缓隐身性能略差, 但气动性能较优, 相对来说更适合于进气道设计。

表 2 不同中心线进气道前向  $-30^{\circ}\sim 30^{\circ}$  RCS 均值  
Tab. 2 Mean values of RCS of different centerline distribution inlets with the azimuth angles from  $-30^{\circ}$  to  $30^{\circ}$

| 频率/<br>GHz | 缓急相当-<br>缓急相当 | 前缓后急-<br>缓急相当 | 前急后缓-<br>缓急相当 |
|------------|---------------|---------------|---------------|
| 1          | 3.097         | 0.449         | 1.374         |
| 3          | 6.139         | 4.572         | 6.031         |

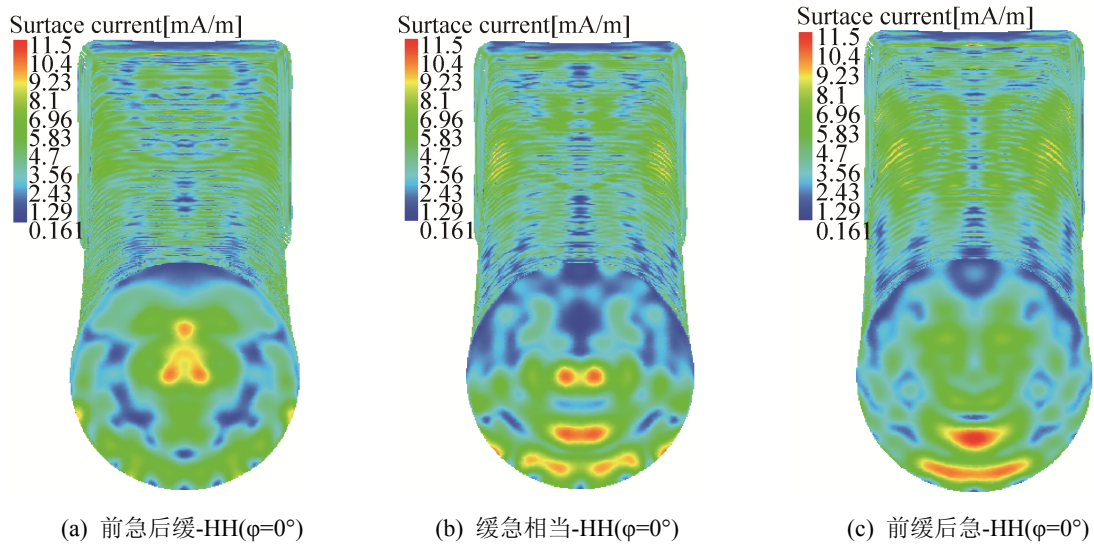
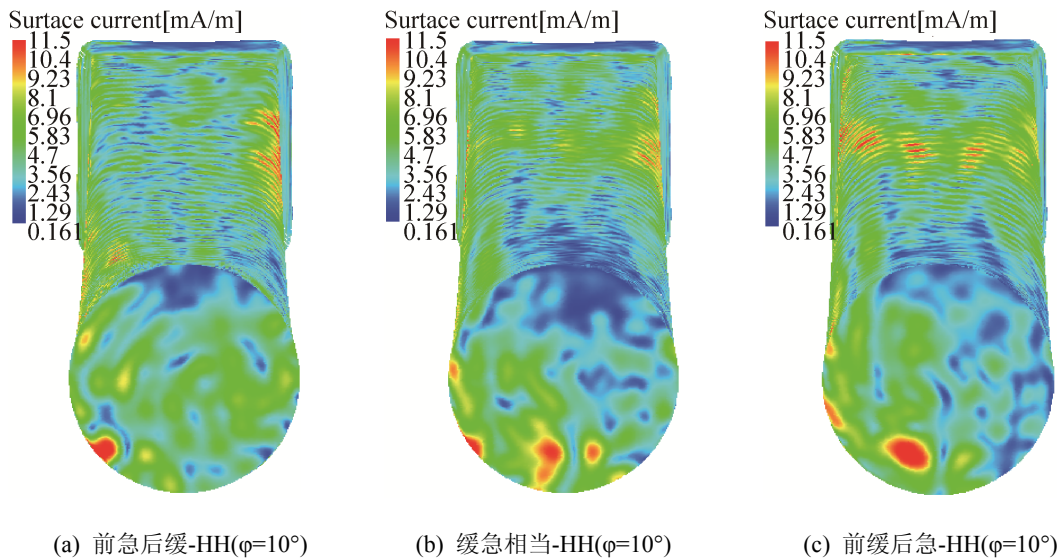
### 3.1.2 进气道电流分布分析

为了更清晰地分析进气道表面及出口处电磁散射点的分布, 图 7 给出了 3 GHz 水平极化下入射角  $\varphi=0^{\circ}$  时不同中心线进气道电流分布对比, 其中截面积变化规律仍保持缓急相当不变。

由图 7 可知, 在水平极化下, 三种中心线进气道腔壁表面大部分区域均分布中等强度电流; 中心线由前急后缓、缓急相当、前缓后急依次变化时, 进气道前段的腔壁表面较强电流分布区域逐渐扩大, 这将导致进气道 RCS 逐渐有所增大; 再对比进气道出口截面上电流分布, 前急后缓进气道在出口截面最强电流分布位于中上部区域, 当中心线由前急后缓、缓急相当、前缓后急依次变化时, 最强电流分布区域逐渐向截面中下部转移, 且最大电流值略微增大, 这也是导致进气道 RCS 逐渐增大的一个原因, 其表面电流变化与前文 RCS 曲线变化是相对应的。

图 8 所示为 3 GHz 水平极化下入射角  $\varphi=10^{\circ}$  时不同中心线进气道表面电流分布对比。

由图 8 可知, 在入射角  $10^{\circ}$  时进气道右侧壁面(沿反向来流方向看)形成了明显较强电流分布区域, 其主要是因为该区域处于雷达波迎面照射区域; 随着雷达波入射角的偏转, 进气道表面电流分布明显不对称, 再对比进气道出口截面电流分布可以发现, 中心线由前急后缓、缓急相当、前缓后急依次变化时, 出口截面表面电流分布不对称加剧, 强电流分布区域在逐渐减小, 但是电流强度有所增加。

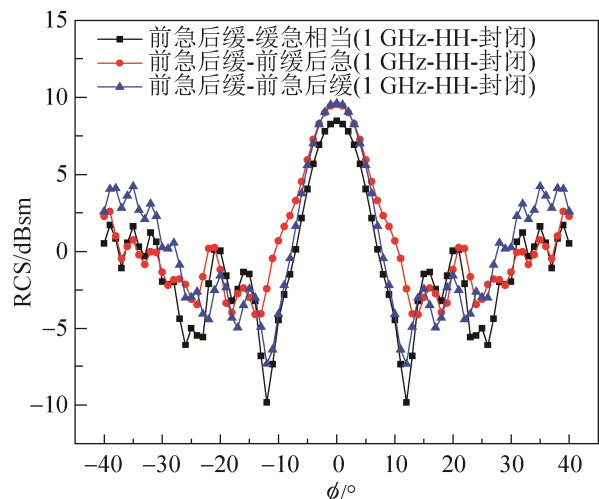
图7 3 GHz 不同中心线进气道电流分布(HH,  $\varphi=0^\circ$ )Fig. 7 Surface current of inlets with different centerline distributions at the frequency of 3 GHz (HH,  $\varphi=0^\circ$ )图8 3 GHz 不同中心线进气道电流分布(HH,  $\varphi=10^\circ$ )Fig. 8 Surface current of inlets with different centerline distributions at the frequency of 3 GHz (HH,  $\varphi=10^\circ$ )

### 3.2 截面积变化规律对隐身特性影响

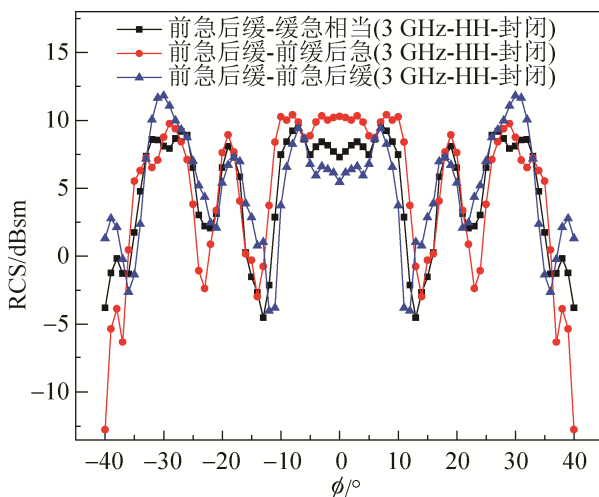
图9分别给出了1GHz和3GHz水平极化下不同截面积进气道RCS对比(终端封闭),由图9可知,截面积相比中心线对于进气道隐身性能影响相对较小,三种截面积进气道RCS总体来说差异相对更小。由图9(a)可知,在1GHz水平极化下角域 $-12^\circ\sim 12^\circ$ 内缓急相当(截面积变化规律)进气道RCS最低,前急后缓次之,而前缓后急最大,这表明缓急相当的截面积变化规律具有良好的隐身性能;当

入射角进一步增大时,随着进气道腔体外壁散射干扰逐渐增强,三种截面积进气道RCS互有交替,但相对来说,缓急相当进气道RCS仍最小。由图9(b)可知,随着频率的增加,不同截面积进气道表征出一定的目标频率特性,如在角域 $-12^\circ\sim 12^\circ$ 内前急后缓进气道逐渐表现出良好的隐身性能,缓急相当次之,前缓后急进气道RCS仍最大;不过随着入射角的进一步增大,前急后缓进气道局部角域RCS最大,会降低进气道整体隐身性能。





(a) 1 GHz 水平极化下不同截面积进气道 RCS



(b) 3 GHz 水平极化下不同截面积进气道 RCS

图 9 不同频率下不同截面积进气道 RCS 对比  
Fig. 9 RCS curves of the inlets with different area distributions at the frequencies of 1GHz and 3 GHz (HH)

为了更明确分析水平极化下不同截面积进气道隐身性能, 表 3 给出了频率 1 GHz 和 3 GHz 下前向 $-30^{\circ}\sim 30^{\circ}$ RCS 均值, 由表 3 可知, 两个频率下三种截面积进气道 RCS 均值表现的趋势完全一致, 缓急相当进气道 RCS 均值最小, 而前缓后急进气道 RCS 均值最大, 不过三种截面积进气道 RCS 均值总体上均较接近, 水平极化下缓急相当进气道隐身性能相对更好。

表 3 不同截面积进气道前向 $-30^{\circ}\sim 30^{\circ}$ RCS 均值  
Tab.3 Mean values of RCS of different area distribution inlets with the azimuth angles from  $-30^{\circ}$  to  $30^{\circ}$

| 频率/<br>GHz | 前急后缓-<br>缓急相当 | 前急后缓-<br>前缓后急 | 前急后缓-<br>前急后缓 |
|------------|---------------|---------------|---------------|
| 1          | 1.374         | 2.871         | 2.457         |
| 3          | 6.771         | 7.769         | 6.849         |

## 4 结论

通过对方转圆规则形状 S 弯进气道开展中心线和截面积变化规律对隐身特性影响研究, 可以得到以下几点结论:

1) 进气道终端开放时, 进气道 RCS 较小, 且水平极化下不同中心线和截面积变化进气道隐身性能差异均较小;

2) 截面积为缓急相当且终端封闭时, 中心线为前急后缓进气道 RCS 在水平极化下介于另两种进气道之间; 中心线为前急后缓且终端封闭时, 截面积为缓急相当进气道 RCS 在水平极化下最小; 截面积变化规律较中心线变化规律对于进气道隐身性能影响相对更小;

3) 综合文献[4-7]中大量对 S 弯进气道气动特性的实验和数值仿真研究结果表明, S 弯进气道设计采用前急后缓的中心线和缓急相当的截面积变化规律能同时获得良好的气动和隐身性能, 可以为无人机 S 弯进气道设计提供相关参考。

## 参考文献:

- [1] Knott E F. Radar Cross Section [M]. Dedham: Artech House Inc, 1985.
- [2] 甘文彪, 周洲, 许晓平, 等. S 弯进气道优化设计及分析[J]. 推进技术, 2014, 35(10): 1317-1324.  
Gan Wenbiao, Zhou Zhou, Xu Xiaoping, et al. S-duct inlet optimal design and analysis [J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(10): 1317-1324.
- [3] Lee C C, Chris Boedicker. Subsonic diffuser design and performance for advanced fighter aircraft[R]. AIAA-85-3073: 1-11.
- [4] D W Mayer, B H Anderson, T A Johnson. 3D subsonic diffuser design and analysis[R]. AIAA-98-3418, 1998.
- [5] 马高建. 一种无人机 S 弯进气道设计与气动特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

- Ma Gaojian. Design and aerodynamic study of an s-shaped inlet of the UAV [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [6] 刘雷, 宋彦萍, 陈焕龙, 等. S 弯进气道优化对其内流场及性能影响研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 1(1): 50-54.
- Liu Lei, Song Yanping, Chen Huanlong, et al. Investigation on effect of s-shaped inlet optimization to internal flow characteristic and aerodynamic performance [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 1(1): 50-54.
- [7] Vooren A, Kewenter H, Edefur H. Top mounted air inlet for supersonic and transonic military aircraft [R]. London: Royal Institute of Technology Department of Aeronautics, 2001.
- [8] 姬金祖, 武哲, 刘战合. S 弯进气道隐身设计中弯度参数研究[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2009, 36(4): 746-750.
- Ji Jinzu, Wu Zhe, Liu Zhanhe. Research on the curvature parameter in the s-shaped inlet's stealth [J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(4): 746-750.
- [9] 李岳峰, 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 Yuefeng, Yang Qingzhen, 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.
- [10] 石磊, 郭荣伟. 蛇形进气道的电磁散射特性[J]. 航空学报, 2007, 28(6): 1296-1301.
- Shi Lei, Guo Rongwei. Electromagnetic scattering characteristics of serpentine inlet, [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2007, 28(6): 1296-1301.
- [11] 张乐, 周洲, 许晓平, 等. 飞翼无人机 3 种保形进气口进气道气动与隐身综合特性对比研究[J]. 航空动力学报, 2015, 30(7): 1651-1660.
- Zhang Le, Zhou Zhou, Xuxiaoping, et al. Comparison on aerodynamic and stealthy performance of flying wing unmanned aerial vehicle with three conformal intake inlets [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(7): 1651-1660.
- [12] 李岳峰, 杨青真, 孙志强. 超椭圆 S 形进气道的设计及气动性能研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(3): 82-85.
- Li Yuefeng, Yang Qingzhen, Sun Zhiqiang. Design of super-elliptic s-shaped inlet and analysis of aerodynamic performance [J]. Computer Simulation, 2011, 28(3): 82-85.
- [13] Song J M, Chew W C. Multilevel fast-multipole algorithm for solving combined field integral equations of electromagnetic scattering [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1995, 10(10): 14-19.
- [14] Yueqian Wu, Minglin Yang, Xinqing Sheng, et al. Computation of scattering matrix elements of large and complex shaped absorbing particles with multilevel fast multipole algorithm [J]. Journal of quantitative spectroscopy & radiative transfer, 2015, 156(1): 88-96.
- [15] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- Huang Peikang, Yin Hongcheng, Xu Xiaojian. Radar target signature [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.