

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.03.008

进气道进口格栅电磁散射特性及试验验证

张乐¹ 周洲² 许晓平²

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

摘要:基于斜切 45° 规则进口直腔进气道, 设计了 5 mm×5 mm 格栅、15 mm×15 mm 格栅、进口开放和封闭 4 种模型。结合多层快速多极子方法(Multilevel fast multipole method, MLFMM)对格栅电磁散射特性进行仿真研究, 并制作了相同的试验模型进行验证, 获得了格栅特征几何参数, 如格栅孔间距、格栅倾角以及格栅厚度等对电磁散射特性的影响。研究表明:(1)格栅电磁散射特性数值计算结果在角域 -30°~30° 范围内与试验结果比较吻合, 验证了仿真计算的有效性;(2)10 GHz 下, 格栅孔间距为 $\lambda/2$ 时, 格栅电磁屏蔽效率约为 43%, 而孔间距达到 $\lambda/6$ 时, 接近于完全屏蔽;(3)随着格栅倾角增大, 格栅电磁屏蔽效果逐渐减弱;(4)随着格栅厚度增加, 格栅电磁屏蔽效率增加, 但增加的幅度逐渐减小。

关键词:进气道; 格栅; 电磁散射特性; 电磁屏蔽效率; 试验验证

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2017)03-0361-09

Electromagnetic Scattering Characteristics and Experimental Verification of Inlet Grille

ZHANG Le¹, ZHOU Zhou², XU Xiaoping²

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, 621900, China;

2. College of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China)

Abstract: Based on the oblique import inlet of 45° coupling with straight cavity, four inlets with intake open and close coupling 5 mm×5 mm grille and 15 mm×15 mm grille are designed. The numerical simulation is carried out on electromagnetic scattering characteristics of grille based on multilevel fast multipole method (MLFMM). And then the same inlet test models are made to verify the method for electromagnetic scattering calculation. Finally, the typical geometric parameters of electromagnetic scattering characteristics such as the grille hole spacing, grille inclination angle, and grille thickness are obtained. Results indicate that: (1) The calculated result of electromagnetic scattering characteristics of grille is close to the experimental data at the azimuth angle from -30° to 30°, indicating the validity of numerical simulation method. (2) At the frequency of 10 GHz, the electromagnetic shielding effectiveness can reach about 43% when the grille hole spacing is $\lambda/2$ (λ represents wavelength), and it will be shielding entirely while the grille hole spacing achieves $\lambda/6$. (3) With the increasing of the grille inclination angle, the electromagnetic shielding effectiveness reduces gradually. (4) With the increasing of the grille thickness increasing, the electromagnetic shielding effectiveness also increases gradually, but the increasing extent decreases.

Key words: inlet; grille; electromagnetic scattering characteristics; electromagnetic shielding effectiveness; experimental verification

基金项目: 国家预研基金资助项目; 国家自然科学基金(11302178)资助项目。

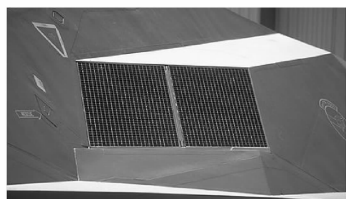
收稿日期: 2016-11-06; **修订日期:** 2017-02-17

通信作者: 张乐, 男, 博士, 工程师, E-mail: 568498886@qq.com。

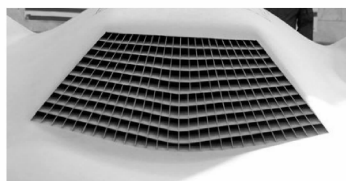
引用格式: 张乐, 周洲, 许晓平. 进气道进口格栅电磁散射特性及试验验证[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(3): 361-369. ZHANG Le, ZHOU Zhou, XU Xiaoping. Electromagnetic scattering characteristics and experimental verification of inlet grille[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(3): 361-369.

飞行器的发动机进气道通常为大口空腔结构,进入空腔的雷达波经腔体内壁的多次反射以及压缩机叶片的反射后,可在入射方向贡献 RCS 超过 10 dBsm,因而也就成为了飞行器机头方向区域的明显强散射源,分析并研究如何缩减进气道 RCS 已然成为国内外隐身飞机设计的重要课题,其中进气道隐身进口格栅技术是典型的措施之一。

目前,飞机进口格栅气动和隐身综合设计已见诸于工程应用,典型的成功应用案例为 F-117A 和 RQ170 飞机。F-117A 飞机发动机没有深埋机体,进气道基本没有弯曲,主要通过进气口格栅形成雷达屏障,且进气口是斜切的,能够避免和机头方向形成直角,网格状的格栅能够保证具有足够的进气流,满足发动机的正常工作。另外,其网格本身尺寸较小,相对于入射的雷达波,类似于倾斜的平面,F-117A 飞机就是这样通过采用斜置平面格栅阻止雷达波直接入射到发动机的。RQ170 飞翼无人机进气道则采用机头背部进气形式,当雷达波从飞行器前方入射时,机翼及机身会对进气道构成一定遮挡,同时为了机头方向进气道强散射源隐身缩减考虑,在进口设置了进口格栅,主要利用格栅屏蔽作用达到良好的隐身效果,并且重量代价小、综合费效比高,同时也几乎不会带来额外的维护使用问题。F-117A 与 RQ170 两种典型飞机进口格栅示意图如图 1 所示。



(a) Inlet grille of F-117A



(b) Inlet grille of RQ170

图 1 两种典型飞行器进口格栅

Fig. 1 Grille of two typical aircrafts

对于格栅的电磁散射特性研究,国内外做了大量的仿真研究和实验论证,如桑建华^[1]在论著中对格栅进行了一部分的阐述,并给出了格栅初步 RCS 测试结果,但格栅电磁散射特性方面的研究在公开期刊文献中发表仍极少。梁德旺等^[2]在进气道内部安装了格栅,并研究了其对进气道气动性能和电磁散射特性的影响。国外学者如 Rumpf 等^[3]研究了气动格栅技术在远程 Typhon 导弹和

Triton 冲压发动机,以及其他相关的先进推进项目中的应用,并取得良好的整流效果;Chiccine 等^[4]则在 RJ43-MA-3 冲压发动机上使用了气动格栅,并将其置于燃烧室的进口处,研究表明了气动格栅可以降低燃烧室的进口流动畸变;Piercy 等^[5]在 NASA 开展了采用气动格栅降低进气道扩压器出口流动畸变的研究,结果表明效果良好。国内学者如康玉东等^[6]结合了数值模拟方法开展了气动格栅设计研究,利用其改善进气道出口流场畸变对亚燃冲压发动机燃烧室性能的不利影响;梁思^[7]和陈建华^[8]等结合试验开展了进气道下游安装气动格栅对性能的影响研究,明显减少了进气道出口流畅畸变。另一方面,国内外学者^[9-11]针对金属网栅开展了隐身技术和雷达波屏蔽效能等研究,实现网栅的隐身或屏蔽电磁干扰等功能。

以上研究都对本文工作提供了一定的参考,不过其主要集中在进气道或发动机内气动格栅整流效果,或者金属网栅的隐身技术和电磁屏蔽干扰等研究,针对进气道进口格栅电磁散射特性研究极少。因而本文研究工作将基于斜切 45°规则进口格栅耦合直腔进气道,开展进口格栅特征几何参数对电磁散射特性影响的研究,并进行隐身试验验证和分析。

1 格栅设计原理及建模

进气道进口格栅主要分为两类^[12]:反射性格栅和吸收性格栅。反射性格栅是用金属材料制成的网状格栅,而吸收性格栅则是在金属格栅表面(包括管状网眼内表面)施以涂覆型吸波材料,或者加入吸收剂的复合材料制造格栅。本文的研究工作是基于纯金属材料格栅开展的。

进口格栅技术就是在进气道进口安装金属网栅,其设计原理是:一方面使得雷达波在栅网上进行散射,将入射电磁波绝大部分能量反射到雷达接收不到的方向上,从而使得雷达波不进入进气道,也即格栅屏蔽作用;另一方面还迫使进入进气道的雷达波在腔体内部和格栅之间形成多次反射,既加强波的衰减,又加大腔体出口雷达波的散乱程度,从而使得回波强度减小。

斜切 45°规则进口格栅耦合直腔进气道模型如图 2 所示。直腔进气道几何参数如图 2(a)所示,进口平面斜切 45°(即格栅倾角),进口截面尺寸为 240 mm × 240 mm,直腔体下底面长度为 800 mm,进口格栅为 5 mm × 5 mm 和 15 mm × 15 mm 两种尺寸,直腔体壁板及进口格栅厚度均为 2 mm。

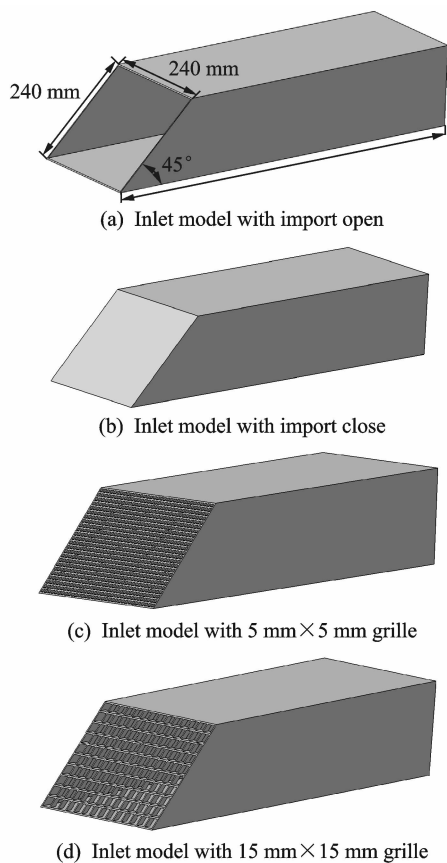


图 2 规则进口格栅耦合直腔进气道模型

Fig. 2 Regular grille coupling with straight cavity

图 3 为 15 mm×15 mm 格栅局部示意图。其中 15 mm 表示格栅平面之间距离为 15 mm,由于进口平面尺寸固定为 240 mm,因而格栅建模时第一层网栅间距为 12.7 mm,其余各层孔尺寸均为等间距 15 mm;5 mm×5 mm 格栅模型相应的第一层网栅间距为 4.7 mm;对于两种格栅模型,沿直腔流向方向尺寸均为 15 mm,格栅厚度均为 2 mm。

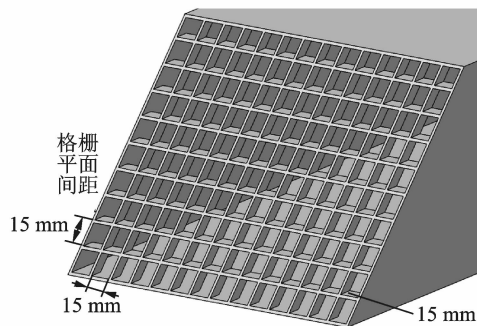


图 3 15 mm×15 mm 格栅进口局部示意图

Fig. 3 Import of 15 mm×15 mm grille

2 格栅隐身数值计算方法及表征参数定义

2.1 格栅电磁散射特性(隐身)数值计算方法

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:(1)高频近似算法;(2)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,从而造成极大的计算误差,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^[13-16](Multilevel fast multipole method, MLFMM)方法是目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。

基于进口格栅的电尺寸较小且外形较复杂,为了获取较高的计算精度和计算效率,本文格栅电磁散射特性计算均采用 MLFMM 算法。隐身计算采用成熟的商业软件 FEKO,其中频率 10 GHz 垂直极化下直腔耦合 5 mm×5 mm 格栅仿真角度示意图如图 4 所示,其中 φ 表示入射波角度,雷达波入射角度为 $-40^\circ\sim 40^\circ$,间隔 1° 入射,计算表面网格按照最大尺寸 $\lambda/8$ (λ 为电磁波长)剖分,使用三角形面元网格,网格数量为 46 178 个。

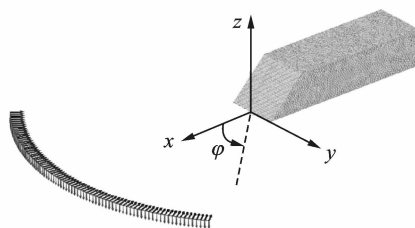


图 4 仿真角度示意图

Fig. 4 Incident wave coordinate system

2.2 格栅电磁屏蔽效率定义

为了更直观地定量表征格栅隐身效果,本文将定义一个参数——格栅电磁屏蔽效率 η ,其定义为“格栅模型”相对“进口开放”模型的 RCS 缩减量与“进口封闭”模型相对“进口开放”模型的 RCS 缩减量之比

$$\eta = \frac{RCS_{\text{格栅模型}} - RCS_{\text{进口开放}}}{RCS_{\text{进口封闭}} - RCS_{\text{进口开放}}} \times 100\%$$

3 格栅特征几何参数对电磁散射特性影响

格栅的设计尺寸与飞行器雷达隐身的主要设计频率是相关的,依照相关各型雷达数据统计来看^[1],针对飞行器在 L, S 和 X 波段下的雷达数量分别约占 20%, 25% 和 30%,其余波段约占 25%,因而通常解决 X 波段的隐身问题是首要的。本文格栅研究时选取 X 波段下 10 GHz 作为设计频率。

3.1 格栅孔间距影响

图5所示为10 GHz垂直极化下不同直腔进气道模型RCS对比,由图可知,使用进口格栅达到了良好的隐身效果,15 mm×15 mm格栅模型较直腔进口开放模型在入射角域-40°~40°内RCS值均更小,且角域0°~10°内RCS缩减约达15 dBsm以上,随着格栅尺寸进一步减小,隐身效果进一步增强;其中5 mm×5 mm格栅模型电磁屏蔽效能接近于直腔进口封闭模型,甚至在某些入射角度上格栅模型RCS值还要更小,这可能是由于进口格栅处散射与腔体外壁散射叠加造成的。

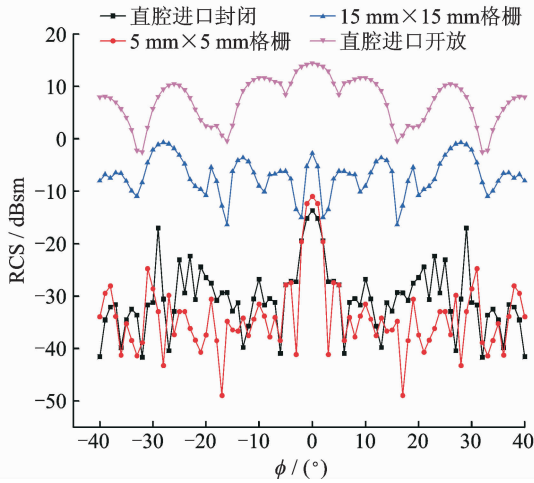


图5 10 GHz垂直极化下不同直腔进气道模型RCS
Fig.5 RCS of the inlet with different grilles(10 GHz-VV)

表1给出了10 GHz垂直极化下角域-40°~40°内4种直腔模型RCS均值对比,由表可知,格栅孔间距尺寸逐渐减小时,隐身效果明显增强。另外,格栅孔间距尺寸达到15 mm(也即 $\lambda/2$)时,格栅电磁屏蔽效率 η 约为43.13%,而格栅孔间距尺寸达到5 mm(也即 $\lambda/6$)时,电磁屏蔽效率 η 达到了99.7%,格栅能够几乎屏蔽所有电磁能量,达到非常良好的隐身效果。

表1 10 GHz垂直极化下-40°~40°角域RCS均值

Tab.1 Mean value of RCS of the inlet with different grilles at the azimuth angle from -40° to 40° (10 GHz-VV)

模型	进口封闭	5 mm×5 mm 格栅	15 mm×15 mm 格栅	进口开放
RCS均值/dBsm	-25.06	-24.96	-5.68	9.02

3.1.1 不同极化方式下影响

格栅的电磁屏蔽效果还可能与雷达波极化方式有关,图6给出了10 GHz水平极化下不同直腔进气道模型RCS对比。由图可知,水平极化下格

栅的电磁屏蔽效果总体上与垂直极化下基本一致,不过5 mm×5 mm格栅模型电磁屏蔽效能与直腔进口封闭模型更加接近;对比直腔进口开放与15 mm×15 mm格栅模型,在机头方向角域0°~15°内格栅模型取得良好的隐身效果,RCS缩减量最大值达到20.19 dBsm。不过随着入射角度逐渐增大时,格栅电磁屏蔽效果减小,甚至在入射角度33°时,格栅模型RCS值更大,这可能是由于入射角度较大时直腔外壁的散射影响逐渐增大造成的;同样,在水平极化下,随着格栅尺寸缩小,电磁屏蔽效果进一步增大。

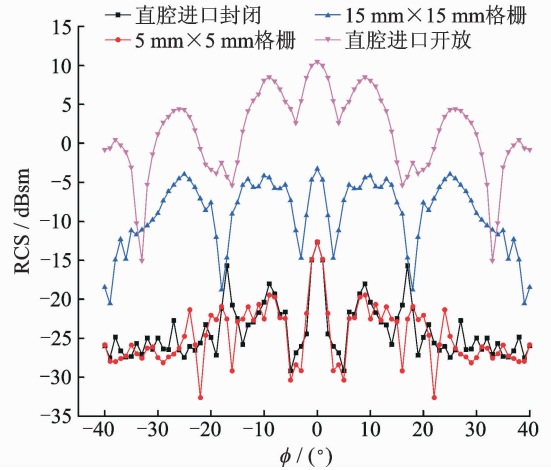


图6 10 GHz水平极化下不同直腔进气道模型RCS
Fig.6 RCS of the inlet with different grilles(10 GHz-HH)

表2所示为10 GHz水平极化下角域-40°~40°内模型RCS均值对比,由表可知,15 mm×15 mm格栅模型电磁屏蔽效率约为43.11%,与垂直极化下效率非常接近,而5 mm×5 mm格栅模型隐身效果从均值来看,甚至要略微优于直腔进口封闭模型,达到了相当好的隐身效果。

表2 10 GHz水平极化下-40°~40°角域RCS均值

Tab.2 Mean value of RCS of the inlet with different grilles at the azimuth angle from -40° to 40° (10 GHz-HH)

模型	进口封闭	5 mm×5 mm 格栅	15 mm×15 mm 格栅	进口开放
RCS均值/dBsm	-22.2	-22.74	-7.37	3.87

3.1.2 不同雷达频率下影响

格栅的电磁屏蔽效果与雷达波频率是密切相关的,为了进一步研究不同频率下格栅隐身效果,选取了L和S波段下的典型频率1 GHz和3 GHz进行仿真计算。

图7所示为3 GHz垂直极化下不同直腔进气

道模型 RCS 对比。由图可知,进口开放时,内腔为明显强散射点,尤其是正机头方向会形成较强的镜面反射,具有最大峰值;对比两种格栅模型,其 RCS 变化趋势与数值基本一致,在 3 GHz 下,15 mm×15 mm 格栅已经具有非常良好的电磁屏蔽效果,随着格栅尺寸进一步缩小,格栅电磁屏蔽效能基本不变,这主要是因为 3 GHz 下对应的波长为 100 mm,15 mm×15 mm 格栅模型其孔间距尺寸约为 $\lambda/7$,格栅孔间距尺寸相对于雷达波长已经足够小,电磁波会被格栅屏蔽于腔体之外;另外对比两种格栅模型与进口封闭模型,在角域 $0^\circ\sim 7^\circ$ 范围内,格栅隐身效果逐渐与进口封闭模型接近,表明格栅隐身效果逐渐变好,而角域增大时,格栅模型 RCS 与进口封闭模型基本一致,某些角域隐身效果甚至更好,这是由于随着入射角度增大,直腔外壁散射对于格栅的影响越来越大造成的。

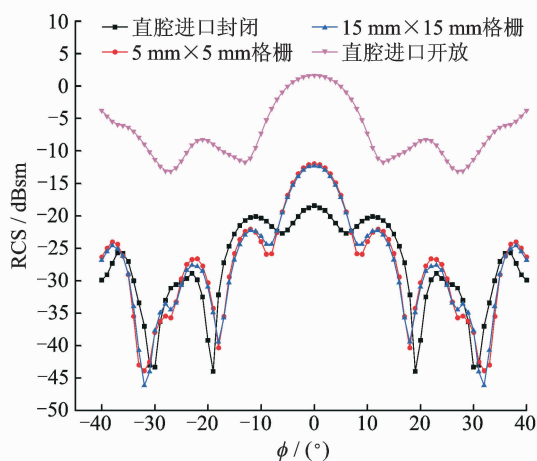


图 7 3 GHz 垂直极化下不同直腔进气道模型 RCS
Fig. 7 RCS curves of the inlet with different grilles
(3 GHz-VV)

图 8 为 1 GHz 垂直极化下不同直腔进气道模型 RCS 对比。由图可知,两种格栅模型与进口封闭模型电磁屏蔽效果已基本完全一致,这是因为 1 GHz 下对应波长为 300 mm,两种格栅模型格栅孔间距尺寸已远小于波长,雷达波由于波长过长而被格栅完全屏蔽于腔体之外,也即两种格栅模型在 1 GHz 下基本达到了完全屏蔽电磁波的效果。不过随着雷达波入射角度的增大,腔体外壁的散射影响会逐渐加剧,格栅进口处散射与腔体外壁散射叠加的效应也会逐渐增强,这可能也就导致了在角域 $-38^\circ\sim -32^\circ$ 和 $32^\circ\sim 38^\circ$ 内进口开放模型隐身效果较另 3 种模型甚至更好,这也充分表明了格栅进口的电磁屏蔽效果主要还是体现在正机头方向附近较小的角域内(如 $-20^\circ\sim 20^\circ$)。

3.2 格栅倾角影响

格栅倾角作为格栅特征几何参数之一,其定义

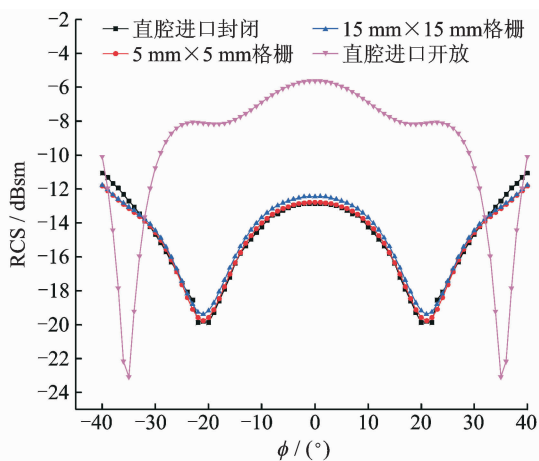


图 8 1 GHz 垂直极化下不同直腔进气道模型 RCS
Fig. 8 RCS curves of the inlet with different grilles
(1 GHz-VV)

可参考图 2(a),该模型格栅倾角为 45° ,本文共建立了 4 个不同格栅倾角模型,分别为 30° , 45° , 60° 及 90° ,不同倾角的格栅模型保持进口边界尺寸为 $240\text{ mm}\times 240\text{ mm}$,其中格栅倾角为 30° 及 90° 模型如图 9 所示。选取 3.1 节 5 mm×5 mm 格栅作为孔间距,并研究频率 10 GHz 垂直极化下格栅电磁散射特性。

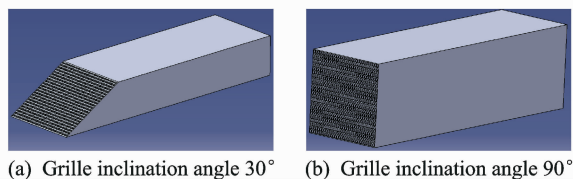


图 9 不同格栅倾角模型示意图
Fig. 9 Inlets of different grille inclination angle

图 10 为 10 GHz 垂直极化下不同格栅倾角模型 RCS 对比。由图可知,格栅倾角为 90° 时格栅屏蔽效果明显较差,其在角域 $-40^\circ\sim 40^\circ$ 内较其他倾角模型 RCS 均要更大。对比格栅倾角 30° , 45° 和 60° 模型,在正机头方向附近小角域 ($0^\circ\sim 2^\circ$),随着格栅倾角增大,格栅屏蔽效果逐渐减弱;由于入射角度增大时,直腔外壁散射影响会逐渐增大,因而重点关注 $0^\circ\sim 30^\circ$ 角域内 RCS 的变化,在此角域内格栅倾角 30° 与 45° 模型电磁屏蔽效能变化不显著,随着入射角度变化两种倾角模型 RCS 成波动趋势,RCS 值大小交替变化,而对比格栅倾角 45° 与 60° 模型,格栅倾角 60° 模型 RCS 基本都大于 45° 模型,隐身效能明显减弱。

为了更明确分析不同格栅倾角模型 RCS 变化,表 3 给出了机头方向 $-30^\circ\sim 30^\circ$ 角域 RCS 均值对比,由表可知,格栅倾角 90° 模型由于正机头方

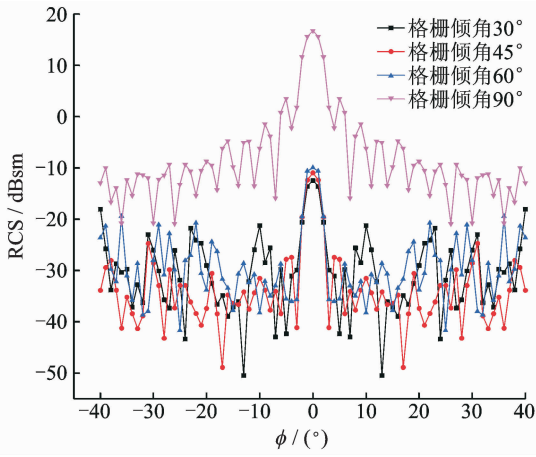


图10 10 GHz垂直极化下不同格栅倾角模型 RCS

Fig. 10 RCS curves of the inlet with different grille inclination angles (10 GHz-VV)

向存在较强的镜面反射, RCS 均值明显较高; 对于 4 个格栅倾角模型, 随着倾角逐渐增大, 倾角 45° 模型较 30° 模型 RCS 均值略微增大, 仅增加了 0.312 dBsm; 而倾角 60° 模型较 45° 模型 RCS 均值增幅变大, 增加了 1.762 dBsm; 格栅倾角由 60° 向 90° 变化时, RCS 均值剧增 26.476 dBsm; 综上可知, 随着格栅倾角逐渐增大, 格栅电磁屏蔽效果是逐渐减弱的, 且在小倾角下格栅屏蔽效能仅略微减弱, 倾角进一步增大时, 屏蔽效果减弱且减弱的幅度逐渐增大, 格栅倾角为 90° 时隐身效果最差。

表 3 不同格栅倾角模型机头方向 $-30^\circ \sim 30^\circ$ RCS 均值

Tab. 3 Mean value of RCS of the inlet with different grille inclination angles at the azimuth angle from -30° to 30°

格栅倾角/ $^\circ$	30	45	60	90
RCS 均值/dBsm	-23.144	-22.832	-21.07	5.406

3.3 格栅厚度影响

格栅厚度定义如图 11 所示。

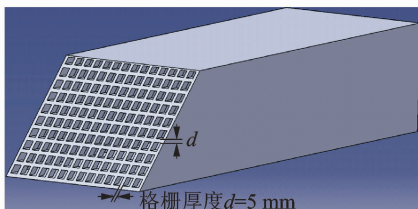


图 11 格栅厚度定义示意图

Fig. 11 Definition of grille thickness

由于格栅孔间距为 5 mm 时电磁屏蔽效果接近进口封闭模型, 基本达到了完全屏蔽的效果, 采用 5 mm 格栅孔间距模型进行格栅厚度的影响对

比时可能差异较小, 因而选取格栅孔间距为 15 mm 模型, 格栅倾角为 45° , 并选取 3 个格栅厚度进行研究, 分别为 2 mm, 3.5 mm 及 5 mm; 仿真频率为 10 GHz, 极化方式为垂直极化, 雷达波入射角度同样为 $-40^\circ \sim 40^\circ$ 。

图 12 所示为 10 GHz 垂直极化下不同格栅厚度模型 RCS 对比, 由图可知, 随着格栅厚度的增加, 格栅电磁屏蔽的效果是逐渐变优的; 在正机头方向 0° 附近, 3 种不同格栅厚度模型 RCS 值较接近, 这可能是由于 3 种模型在正机头方向 0° 附近格栅进口处产生较强的镜面反射与腔体内部多次反射叠加效果较接近, 随着雷达波入射角度增大, 格栅厚度的电磁屏蔽效果逐渐凸显; 另外, 还可发现, 格栅厚度由 2 mm 变化到 3.5 mm 时, RCS 值减小较明显, 而格栅厚度由 3.5 mm 变化到 5 mm 时, RCS 值虽然也是减小的, 但是缩减幅度明显降低, 甚至局部角域 RCS 值还略微增加。综上可知, 随着格栅厚度的增加, 格栅电磁屏蔽性能是增强的, 但是增强的幅度逐渐减小。

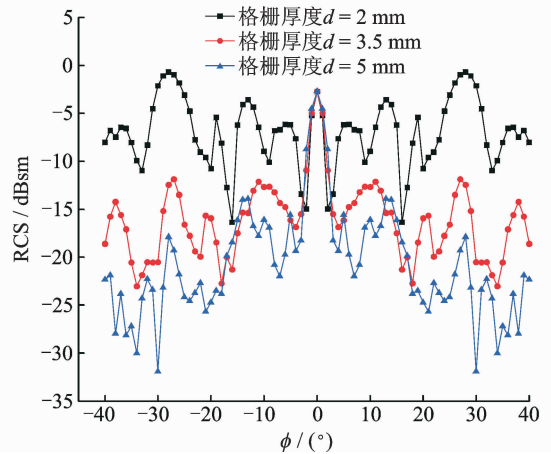


图 12 10 GHz 垂直极化下不同格栅厚度模型 RCS

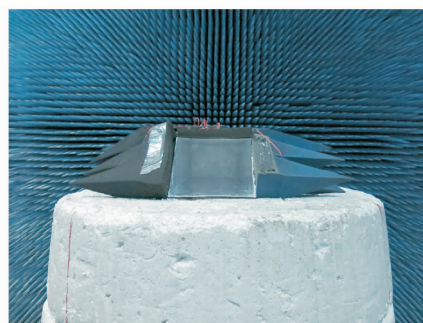
Fig. 12 RCS curves of the inlet with different grille thickness (10 GHz-VV)

4 格栅电磁散射特性计算方法验证与分析

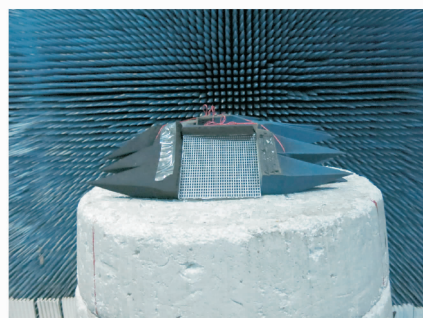
4.1 试验模型

为了验证格栅电磁散射特性数值计算的可靠性, 基于第 3 节的研究, 加工制作了相同的 4 个试验模型, 模型制作选取 2 mm 椴木板作为腔体边框及进口格栅板, 使用激光切割机进行模型的分割, 并分别贴上铝箔, 最终组装出试验模型, 隐身测试在西北工业大学国防科技重点实验室微波暗室进行。测试时模型入射角度为 $\varphi = -60^\circ \sim 60^\circ$, 角度

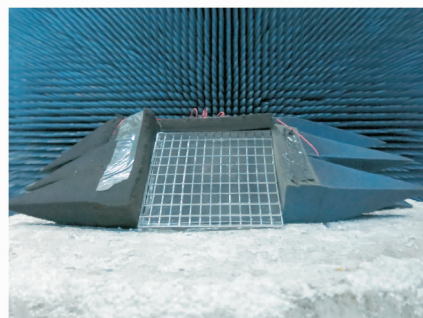
间隔为 0.2° , 采用水平极化方式(HH), 测试频率为 10 GHz。其中进口开放直腔进气道测试模型、 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 和 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 进口格栅直腔进气道测试模型如图 13 所示, 为了更真实地模拟进气道模型, 选取的模型为斜切式进口, 进气道下底面长度为 800 mm, 直腔外使用吸波材料包裹。



(a) Test model with import open



(b) Test model of $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ grille



(c) Test model of $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ grille

图 13 斜切 45° 进口耦合直腔进气道试验测试模型

Fig. 13 Oblique import grille of 45° coupling with straight cavity

4.2 验证结果与分析

4 种直腔体模型测试 RCS 对比如图 14 所示。由图可知, 腔体会形成明显的强散射, 对比进口开放与封闭模型, 在机头方向 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 大部分角域内, 腔体 RCS 较进口封闭模型增大约 20 dBsm, 这也是研究进口格栅屏蔽效能的意义所在。由图还可知, $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ($\lambda/2$) 进口格栅模型电磁屏蔽效率已达到约 50%, 而随着格栅尺寸进一步减小至 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ($\lambda/6$) 时, 格栅模型的散射特性与进口封闭模型相当接近, 几乎达到了完全屏蔽的

效果。另外, 随着雷达波入射角度的增大(如角域 $-60^\circ \sim -40^\circ$ 和 $40^\circ \sim 60^\circ$), 测试结果对称性减弱且 4 个模型 RCS 变化较不规律, 这主要是由于入射角度增大时, 腔体内部电磁散射影响逐渐减弱, 且腔体外部吸波材料包裹可能存在一定缝隙, 以及存在一定的外壁散射影响, 因而在研究进口格栅的屏蔽效能时, 可重点关注机头方向稍小角域范围(如 $-40^\circ \sim 40^\circ$ 角域)散射特性。

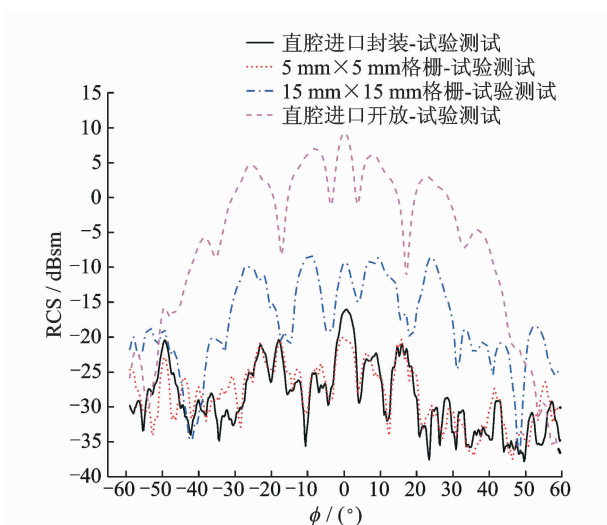


图 14 斜切进口直腔进气道耦合格栅模型

RCS 测试对比

Fig. 14 RCS comparison of grille coupling with straight cavity

为了验证所建立的数值计算方法的可靠性, 分别针对 4 种斜切进口直腔进气道模型进行数值计算与试验 RCS 对比, 如图 15 所示。由对比结果可知, 在机头方向角域 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 内, 4 种模型测试与仿真结果均吻合得较好, 验证了所建立的电磁散射特性数值计算方法是可靠的。其中直腔进口开放计算结果与试验最接近, 然后是 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 格栅和直腔进口封闭模型, 这 3 种模型与试验相对吻合更好的原因是格栅与腔体内、外壁之间的散射叠加相对较小 ($5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 格栅模型电磁波几乎无法进入腔体内部), 而 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 格栅模型误差稍大, 这是因为此格栅不能完全屏蔽电磁波进入腔体, 未进入腔体的电磁波在格栅表面的散射、部分进入腔体内部的电磁波经多次反射回来的散射以及在腔体外壁电磁波的散射相互叠加, 导致散射更加复杂, 计算精度略有下降。另外还需要指出的是, 计算结果数值上整体略高于试验结果, 这主要是因为仿真计算时, 腔体外壁未设置全吸波特性, 而试验时在外壁均包裹了一层尖劈式吸波材料, 计算时外壁散射会导致数值略有增加。

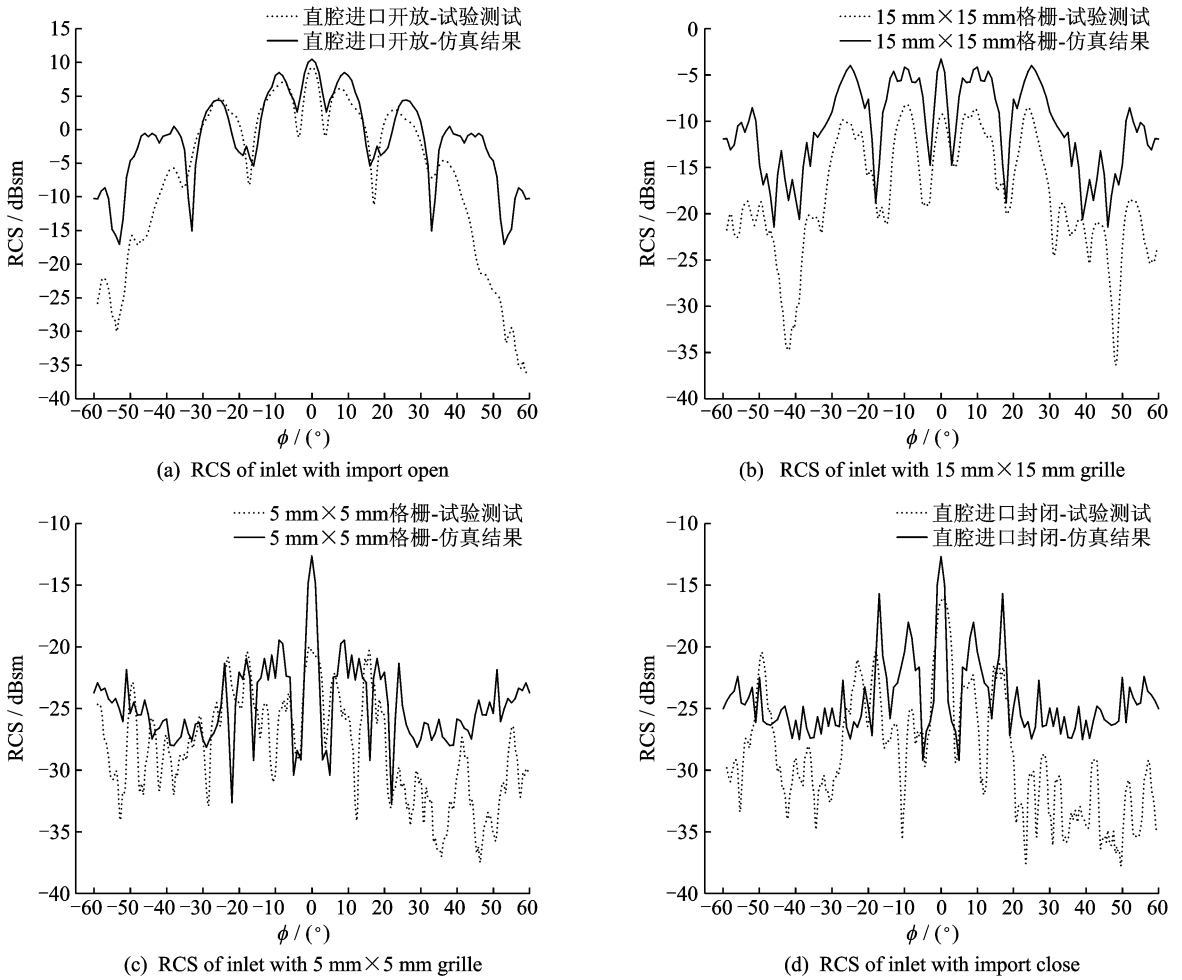


图15 不同格栅孔间距模型试验测试与仿真RCS对比

Fig. 15 RCS comparison on models with different grille hole spacing between simulation and experiment

由图还可知,随着雷达波入射角度的增大(如角域 $-60^{\circ}\sim-30^{\circ}$ 和 $30^{\circ}\sim60^{\circ}$),测试与仿真结果的数值误差越来越大,这也主要是由于腔体外壁镜面反射、边缘绕射等影响逐渐增大造成的。对于斜切进口直腔格栅的电磁散射特性研究,由于腔体内部散射主要影响机头方向较小角域,并结合仿真计算的精度,可仅计算 $-40^{\circ}\sim40^{\circ}$ 角域RCS值,并重点关注角域 $-30^{\circ}\sim30^{\circ}$ 内RCS变化。

5 结 论

通过对斜切 45° 规则进口格栅耦合直腔进气道进行电磁散射特性影响研究,并制作模型进行隐身试验验证和分析,可以得到以下结论:

(1)随着格栅孔间距(尺寸)逐渐变小,电磁屏蔽效果逐渐增强,且在格栅孔间距小于或等于 $\lambda/6$ 时,格栅隐身效果则基本保持一致;格栅孔间距尺寸达到 $\lambda/2$ 时,格栅电磁屏蔽效率约达到43%;

(2)随着格栅倾角逐渐增大,格栅电磁屏蔽效果逐渐减弱,且在小倾角下格栅屏蔽效能仅略微减弱,倾角进一步增大时,屏蔽效果减弱且减弱的幅

度逐渐增大;

(3)随着格栅厚度的增加,格栅电磁屏蔽性能增强,但增强的幅度逐渐减小;

(4) $5\text{ mm}\times5\text{ mm}$ 格栅, $15\text{ mm}\times15\text{ mm}$ 格栅,进口开放和封闭模型计算与试验结果在机头方向角域 $-30^{\circ}\sim30^{\circ}$ 内吻合较好,验证了所建立的格栅数值计算方法是可靠的。

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] 梁德旺, 郭荣伟, 赵明桂. 格栅对进气道的气动性能和电磁散射特性的影响[J]. 航空学报, 1998, 9(5): 567-569.
LIANG Dewang, GUO Rongwei, ZHAO Minggui. Effect of honeycomb on aerodynamic performance and radar cross section of inlet [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 9(5):567-569.
- [3] RUMPF R L, SHIPPEN W B. Comparison of aerogrids and punched plates for smoothing flow from

- short annular diffusers [R]. NASA CR-120960, 1972.
- [4] CHICCINE B G, ABDALLA K L. Experimental investigation of expanded duct sections and screens for reducing flow distortions at subsonic flows [R]. NASA MEMO 1-9-59E, 1959.
- [5] PIERCY T G, KLANN J L. Diffuser-exit total-pressure profiles for side-inlet model at mach3.05 [R]. NASA RME55F24, 1955.
- [6] 康玉东, 邓远灏, 钟世林, 等. 亚燃冲压发动机气动格栅整流效果研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2014, 27(4):22-26.
KANG Yudong, DENG Yuanhao, ZHONG Shilin, et al. Flow smoothing effect of aerodynamic grid for ramjet combustor[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2014, 27(4):22-26.
- [7] 梁思, 张传民, 张龙. 气动格栅改善进气道流场的实验研究[J]. 推进技术, 1992, 2(1):8-13.
LIANG Si, ZHANG Chuanmin, ZHANG Long. An experimental investigation of the inlet exit flow field improved by aerodynamic grid[J]. Journal of Propulsion Technology, 1992, 2(1):8-13.
- [8] 陈建华, 李龙飞, 周立新, 等. 液氧/煤油补燃火箭发动机整流栅应用研究[J]. 火箭推进, 2007, 33(2):1-6.
CHEN Jianhua, LI Longfei, ZHOU Lixin, et al. Application of the perforated distribution plate in the LOX/kerosene staged combustion rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2007, 33(2):1-6.
- [9] POMPOSO J A, RODRIGUEZ J, GRANDE H. Polypyrrole- based conducting hot melt adhesives for EMI shielding applications [J]. Synthetic Metals, 1999, PII(104):107-111.
- [10] DAS N C, KHASTGIR D, CHAKI T K, et al. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon black and carbon fibre filled EVA and NR based composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2000, 31(10):1069-1081.
- [11] 王长伟. 金属网栅用于隐身技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.
WANG Changwei. Research on the metallic mesh for stealth technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [12] 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.
- [13] LU C C, CHEW W C. A multilevel algorithm for solving a boundary integral equation of wave scattering[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1994, 7(10):466-470.
- [14] 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.
- [15] ZHANG Kedi, JIN Jianming. Parallelized multilevel fast multipole algorithm for scattering by objects with anisotropic impedance surfaces [J]. International Journal of Numerical Modeling: Electronic Networks, Devices and Fields, 2015, 28(1):107-119.
- [16] WU Yueqian, YANG Minglin, SHENG Xinqing, 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.

