DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.221009001

飞行器格栅结构电磁特性分析*

王一珺,艾俊强,崔 力,张维仁

(航空工业第一飞机设计研究院,西安 710089)

摘 要:飞行器格栅结构能够阻碍电磁波入射到腔体结构形成强的后向散射。为研究菱形栅孔的电磁屏蔽规律,采用波导传输理论和 Floquet 定理分析了均匀格栅的电磁屏蔽原理。针对孔径边长、线 宽和两边夹角等5组几何参数,建立变参数模型并计算了传输参数 S₂₁和可屏蔽带宽占比。仿真结 果表明,孔径边长和格栅深度对屏蔽效能影响较大;随着两边夹角增加,TE 和 TM 极化的屏蔽效能 呈现相反的增减趋势。最后,选取屏蔽效能较优的栅孔,构建了加装格栅的进气腔体模型,计算了掠 入射状态下的散射特性,结果表明,在水平极化和垂直极化下,格栅均能有效屏蔽腔体散射。 关键词:飞行器格栅;雷达散射截面(RCS);电磁屏蔽;电磁特性分析

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号:V218 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2024)03-0458-07

Electromagnetic Characteristics Analysis of Aircraft Grille Structure

WANG Yijun, AI Junqiang, CUI Li, ZHANG Weiren

(AVIC The First Aircraft Institute, Xi' an 710089, China)

Abstract: Aircraft grille structure can prevent electromagnetic waves from entering the cavity structure to bring about intense backward scattering. To study the electromagnetic shielding laws of the diamond-shaped cell grille, the principle of electromagnetic shield of the homogeneous grille is analyzed by using the theory of waveguide propagation and Floquet theorem. The variable parameter models are established referring to five geometrical parameters of the cell, such as the edge length, the wire thickness and the angle of adjacent edges, etc. And then both the propagation parameter S_{21} and the shielding bandwidth radio are calculated. Numerical simulations indicate that, the edge length and the grille depth are the main factors to influence the shielding effectiveness; with the angle of the adjacent edges increasing, the shielding effectiveness at TE and TM polarization shows inversion results. Finally, an inlet cavity covered by a grille based on the optimized cell is modeled, and the scattering characteristic is calculated at grazing angle. The results show that the grille can shield the scattering of the cavity to a quite low level at the horizontal polarization as well as the vertical polarization.

Key words: aircraft grille; radar cross section (RCS); electromagnetic shielding; electromagnetic characteristics analysis

0 引 言

通风冷却系统进排气结构具有典型的腔体散射

特征,常位于机身表面,也是飞行器主要散射源之 一^[1]。隐身性能是现代作战飞机的重要设计要求

^{*} 收稿日期:2022-10-09;修回日期:2023-01-05

通信作者: 王一珺 Email: wyj_603@126. com

之一,目前有多种手段缩减腔体结构的电磁散射,在 腔体前加装格栅也是主要措施之一。例如,RQ170 无人机和 F-117 飞机在进气道进口加装格栅,利用 格栅屏蔽绝大部分雷达波,使其无法进入进气道 腔体。

文献[2-3]采用多层快速多极子方法分析了格 栅结构典型几何参数的变化对电磁散射特性的影 响,并开展实验进行了初步验证,但其计算量较大, 仅适合有限频点的仿真分析。文献[4]从电磁屏蔽 与波导传输理论的角度解释了格栅的电磁屏蔽原 理,并基于多层快速多极子法对非均匀矩形格栅进 行了设计研究,该方法计算精准度高但研究周期较 长。另一方面,对于波在周期结构中的传播,前人已 经进行了充分的研究及成熟的理论成果转化,文献 [5-8]利用 Floquet 定理,将研究对象由周期特性的 格栅结构简化为一个格栅单元。

本文采用波导传输理论阐明格栅的电磁场屏蔽 功能,通过5组格栅单元设计参数描述均匀菱形格 栅特征,利用 Floquet 定理快速对不同参数组合模型 宽频带(0.3~18 GHz)进行仿真计算和极化分析, 定义可屏蔽带宽占比直观表征均匀格栅的隐身效 果。此外,在规律总结与参数优选的基础上,建立加 装优化参数格栅的进气腔体模型,并设计低散射载 体,采用多层快速多极子法进行散射特性仿真,验证 变参数规律及格栅对腔体散射屏蔽的有效性。

1 计算方法

1.1 屏蔽原理与计算方法

格栅结构是一种典型的周期结构,Floquet 定理 可用于描述沿周期结构传播的电磁波特性。假设二 维周期延拓方向为 \tilde{T} ,其在x和y方向的周期分量 为 T_x 和 T_y , \tilde{F} 和F分别代表频域和时域下的电磁场 直角坐标表示量,则 Floquet 定理可分别表示为

$$\tilde{F}(x+mT_x, y+nT_y, z, \omega) = \tilde{F}(x, y, z) e^{-jmk_x T_x e^{-jnk_y T_y}}$$
(1)

$$F(x+T_{x}, y+T_{y}, z, t) = F\left\{x, y, z, t-\frac{T_{x}}{v_{\varphi_{x}}} - \frac{T_{y}}{v_{\varphi_{y}}}\right\} \quad (2)$$

式中: $k_x \pp k_y$ 为基波的传播常数; ω 为角频率;t为时间; $m \pi n$ 表示 $x \pi y$ 方向的周期数; $v_{\varphi_x} \pi v_{\varphi_y}$ 为 $x \pi y$ 方向的相速。借助式(1)和式(2)可以在计算周期性结构的空间电磁场分布时引入周期性边界条件^[6]。格栅材质为理想导体,单元形状选为菱形,格栅两端介质均为空气,可用 S 参数联系入射波与反射波^[9],将格栅对电磁波的屏蔽问题转化为入射波的透射问题,后续分析传输系数 S_{21} 。菱形格栅单元的屏蔽原理与文献[4]中矩形单元类似,同样可以利用波导模式传输理论进行分析。

1.2 格栅可屏蔽带宽占比定义

为了更直观地定量表征格栅屏蔽效果,本文将 定义一个参数——可屏蔽带宽占比η,见公式(3):

$$\eta = \frac{f_0 - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \tag{3}$$

式中:取屏蔽效能为-10 dB 的频点 f_0 为屏蔽频率, 相应的波长为屏蔽波长 λ_0 ; f_{max} 和 f_{min} 分别为入射频 带内最高和最低频点。

2 参数设计与模型设计

几何参数化建模是开展进气格栅隐身性能综合 优化的基础。根据菱形格栅单元的几何特点,单孔 模型见图1,定义特征几何参数如表1所示。本文 首先利用商业软件 HFSS 进行格栅的参数化几何建 模,采用 Floquet 端口激励,将模型作为理想导体处 理,所有模型自带 5°俯仰角。





表1 几何参数定义及符号

_	Tab. 1 Definitions and no	otations of geometric	al parameters
	参数名称	代表符号	单位
	格栅孔径边长	L	mm
	格栅线宽	w	mm
	格栅厚度	h	mm
	格栅倾角	arphi	(°)
_	格栅两边夹角	θ	(°)

3 结果分析

3.1 初步分析

格栅孔径边长是影响格栅电磁屏蔽效能的重要 参数。首先研究某一固定频率电磁波垂直 XOY 平 面入射时,孔径边长L电尺寸屏蔽效能,从而选定L 的初步研究范围。依照相关各型雷达统计数据,针 对飞行器 X 频段的雷达数量最多,约占总量的 30%。因此,将格栅能否屏蔽 X 频段频率作为首要 评价指标。在 X 频段范围内,选取频率为 9.375 GHz,波长 λ = 32 mm 电磁波进行研究, 仅改 变格栅孔径边长(分别令 $L = 4\lambda, 2\lambda, 3\lambda/2, 1\lambda$, $3\lambda/4,\lambda/2,\lambda/4,\lambda/8,\lambda/16$),仿真分析9组模型的 传输系数 S21,不同孔径边长不同极化下的屏蔽效能 见表2。从表中可以看出,屏蔽效能随着格栅孔径 边长的减小而逐渐增强,当L>λ/2时,格栅对于电 磁波没有屏蔽效果; $L < \lambda / 4$ 时,可以实现电磁波的完 全屏蔽。后续重点研究宽频带下, $\lambda/2>L>\lambda/4(8~$ 16 mm)范围内不同格栅孔径尺寸的电磁屏蔽特性。

表 2 不同格栅孔径边长屏蔽效能

Tab. 2 The shielding effectiveness of various cell edge lengths							
I /	S ₂₁ /	∕dB	屏蔽	屏蔽效能			
L/ mm	TE 极化	TM 极化	TE 极化	TM 极化			
$2(\lambda/16)$	-113.85	-79.50	1.0000	1.0000			
$4(\lambda/8)$	-55.03	-52.24	1.0000	1.0000			
$8(\lambda/4)$	-23.13	-21.82	0.9950	0.9930			
$16(\lambda/2)$	-3.84	-3.22	0.5900	0.5230			
$24(3\lambda/4)$	-0.25	-0.21	0.0600	0.0470			
$32(\lambda)$	-0.20	-0.05	0.0400	0.0100			
$64(2\lambda)$	-0.17	-0.02	0.0300	0.0040			
$128(4\lambda)$	-0.01	-0.01	0.0023	0.0023			

3.2 不同格栅孔径边长的电磁散射特性

令格栅孔径边长 L 分别为 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 其他参数为 w = 1 mm, h = 5 mm, $\varphi = 60^{\circ}$, $\theta = 90^{\circ}$, 分析 0. 3~18 GHz 的屏蔽效能, S_{21} 曲线 • 460 • 见图 2,屏蔽频率和可屏蔽带宽占比见表 3。



图 2 孔径边长 8~16 mm TE 和 TM 极化 S₂₁ 曲线 Fig. 2 S₂₁ curve of cell edge lengths ranging from 8 mm to 16 mm for TE and TM polarization

表 3	不同格栅孔径边长 TE 和 TM 极化屏蔽性能
Tab.	3 Shielding effectiveness of different cell edge
	longthe for TE and TM relarization

fonguis for the unit this polarization									
I /	$f_0/0$	GHz	η						
L/ mm	TE 极化	TM 极化	TE 极化	TM 极化					
8	18.00	17.52	1.000	0.972					
10	12.88	12.12	0.711	0.667					
12	9.29	8.89	0.507	0.485					
14	6.93	6.74	0.374	0.363					
16	5.41	5.24	0.288	0.279					

随着 L 增大,谐振频点向低频移动,屏蔽性能呈 现逐渐减弱的趋势。当孔径尺寸 L=8 mm,TE 极化 和 TM 极化几乎可以屏蔽考察频段;10 mm 可以屏 蔽 X 频段;12 mm,14 mm,16 mm 屏蔽频率低于 X 频段且可屏蔽带宽占比不足 0.5。

3.3 不同格栅倾角的电磁散射特性

腔体结构的波导模型,在改变腔体倾角 φ 后, 会改变电磁波在空腔内壁的反射路径,从而改变散 射回入射方向的反射场。本节探究不同倾角下格栅 结构的电磁屏蔽能力,分别计算倾角 φ = 90°,60°, 50°,40°,30°,20°的格栅传输系数 S_{21} 。此时, $L = 10 \text{ mm}, h = 5 \text{ mm}, w = 1 \text{ mm}, \theta = 90°$ 。图 3 给出了 $\varphi = 30°$ 的格栅侧视图。 S_{21} 曲线见图 4,屏蔽频率和可屏蔽带宽占比见表 4。



图 3 $\varphi = 30^{\circ}$ 格栅侧视 Fig. 3 The side view of cell when $\varphi = 30^{\circ}$



(a) TE 极化



(b)TM 极化

图 4 格栅倾角 20°~90°TE 和 TM 极化 S₂₁ 曲线 Fig. 4 S₂₁ curves of cell tilt angles ranging from 20° to 90° for TE and TM polarization

表 4	格栅倾角 TE 和 TM 极化屏蔽性能	
Tab. 4 Sh	ielding effectiveness of cell tilt angles for	C
	TE and TM polarization	

The unit The polarization								
(())	$f_0/0$	GHz	η					
$\varphi/(\gamma)$	TE 极化	TM 极化	TE 极化	TM 极化				
90	11.31	11.19	0.622	0.615				
60	12.72	12.30	0.701	0.677				
50	14.06	12.60	0.777	0.694				
40	16.24	13.75	0.901	0.759				
30	18.00	15.20	1.000	0.841				
20	18.00	16.30	1.000	0.903				

随着格栅倾角的减小屏蔽效能逐渐改善,但格 栅倾角从 90°~60°性能提升微弱,60°~20°时屏蔽效 能提升明显。 φ <60°时,TE 极化和 TM 极化均可实 现 X 频段内的完全屏蔽;倾角 φ <30°时,TE 和 TM 极化下,考察频带内的完全屏蔽。

3.4 不同格栅深度的电磁散射特性

选取格栅深度 h 从 3~9 mm, 以 2 mm 为间隔 的 4 组模型, 其余参数为 L = 10 mm, w = 1 mm, $\varphi = 60^{\circ}$, $\theta = 90^{\circ}$, 计算结果 S_{21} 曲线见图 5, 屏蔽频率和 可屏蔽带宽占比见表 5。





深度不同时, TE 极化和 TM 极化衰减趋势相 同;随着深度的增加, 屏蔽频率带宽相应增大、屏蔽 频率显著提高, 但截止频率由于 L 没有发生改变从 而不发生改变。深度 h>5 mm 后, 可以实现 X 频段 的完全屏蔽;随着格栅厚度的增加, 观测频带内 S₂₁ 均值降低, 格栅屏蔽效能提升。

表 5 格栅深度 TE 和 TM 极化屏蔽性能

Tab. 5 Shielding effectiveness of cell depths

for TE and TM polarization								
1. /	f_0/c	GHz	η					
<i>n/</i> mm	TE 极化	TM 极化	TE 极化	TM 极化				
3	8.99	8.78	0.490	0.479				
5	12.88	12.20	0.710	0.667				
7	14.31	13.50	0.791	0.748				
9	15.47	14.20	0.857	0.792				

3.5 不同格栅线宽的电磁散射特性

其余格栅参数不变情况下,改变格栅线宽w,研 究格栅线宽改变对电磁屏蔽的影响程度。令w从 0.5~1.5 mm,以 0.5 mm 为间隔进行仿真, L=10 mm,h=5 mm, $\varphi=60^\circ$, $\theta=90^\circ$,计算结果 S₂₁ 曲线 见图 6,屏蔽频率和可屏蔽带宽占比见表 6。随着格 栅线宽的增大,模型屏蔽频率提高,同时可屏蔽带宽 所占比例也在增加。然而对比w=0.5 mm 与w=1.5 mm,在w增大 3 倍的情况下,格栅可屏蔽带宽 占比增加缓慢。因此可以发现,格栅线宽改变对电 磁屏蔽的影响程度较小。



图 6 格栅线宽 0.5~1.5 mm TE 和 TM 极化 S₂₁ 曲线 Fig. 6 S₂₁ curves of cell wire thicknesses ranging from 0.5 mm to 1.5 mm for TE and TM polarization

	表 6	格栅线宽 TE 和 TM 极化屏蔽性能
Tab.	6 Shie	ding effectiveness of cell wire thicknesses
		for TE and TM polarization

	f_0/c	GHz	η					
<i>w/</i> mm	TE 极化	TM 极化	TE 极化	TM 极化				
0.5	12.52	11.65	0.69	0.641				
1.0	12.88	12.12	0.71	0.667				
1.5	13.17	12.51	0.727	0.689				

3.6 不同格栅两边夹角的电磁散射特性

为研究不同两边夹角时格栅的电磁散射特性, 建立 θ =70°,90°,110°3组仿真模型。如前所述,经 历4组参数变参数分析后,模型参数定义为L= 10 mm,w=1 mm, φ =60°,h=5 mm,仿真结果如图7 和表7所示。



图 7 格栅两边夹角 70°~110°TE 和 TM 极化 S₂₁ 曲线 Fig. 7 S₂₁ curves of cell adjacent edges ranging from 70° to 110° for TE and TM polarization

表 7 格栅两边夹角参数影响

Tab.	7	The	impact	of	parameters	on	the	angle	of	cell	adjacent	edges

0/(0)	f_0/c	GHz	η		
0/(*)	TE 极化	TM 极化	TE 极化	TM 极化	
70	9.93	15.90	0. 544	0.881	
90	12.88	12.12	0.710	0.667	
110	18.00	9.48	1.000	0.518	

TE 极化和 TM 极化结果呈现相反的增减趋势。即随着两边夹角的增加,TE 极化下格栅屏蔽性能越来越强,TM 极化下格栅屏蔽性能越来越差。 θ = 110°时,TE 和 TM 极化屏蔽效能相差近 50%; θ = 70°时,TE 和 TM 极化屏蔽效能相差大于 30%; θ = 90°时,TE 和 TM 极化屏蔽效能相差 5% 左右,且可以实现 X 频段内完全屏蔽。

4 带格栅腔体散射特性分析

前文已讨论并总结出了 5 组计算范围内的最优 参数,即 $L=8 \text{ mm}, w=1.5 \text{ mm}, \varphi=20^\circ, h=9 \text{ mm}, \theta=$ 90°,在腔体前采用该组格栅单元参数建立格栅模 型,并设计低散射载体,计算带格栅腔体在掠入射下 的散射特性,以验证格栅对腔体的屏蔽效能。

4.1 载体和腔体模型

设计低散射载体如图 8 所示,基于进气要求在

· 462 ·

格栅下端连接一段进气腔体,其中载体和格栅均为 理想导体。由于飞机头向±30°一般为重要雷达威 胁角域,采用多层快速多极子算法计算 9.375 GHz 远场平面波大角度斜入射的 RCS;与此同时,依照其 入射角度(天顶角 85°,方位角 0°),对格栅按照周期 边界条件进行屏蔽性能仿真。





4.2 结果对比分析

封闭载体、开口空腔以及加装格栅空腔 3 种情况 的散射特性,计算结果见图 9,格栅的屏蔽性能见图 10。



Fig. 9 The comparison of RCS curves of three models: fully enclosed carrier, open cavity on the carrier, and adding a grille on the cavity based former carrier



图 10 格栅结构 TE 和 TM 极化 S_{21} 曲线 Fig. 10 S_{21} curves of cell structure at TE and TM polarization

从图 9 中可以看出, HH 极化下, 加装格栅后 RCS 与封闭载体较为吻合, 比开口空腔散射均值降 低约 20 dB, VV 极化下加装格栅后 RCS 均值降低约 37 dB。同时可以发现, 在 45°附近存在一个波峰(C 峰), 初步分析为格栅边界形成的波峰。此外, 还存 在 A 峰和 B 峰, 可能为栅瓣。

从图 10 可以看出,格栅在同样入射角下的模型 电磁屏蔽效率,可实现观测频带内的完全屏蔽,且传 输系数 S_{21} 在 18 GHz 时最差,为-34.8 dB,屏蔽效 能大于 99%;入射波频率 9.375 GHz 时,TE 和 TM 极 化 下 传 输 系 数 S_{21} 分 别 为 -139.5 dB 和 -69.17 dB,与表 2 中 L=8 mm 相比,分别降低近 7 倍与 4 倍。

综合上述分析可知,优选单元参数的格栅屏蔽 效能较好,应用其到加装格栅的腔体中能够在水平 极化和垂直极化下将腔体散射抑制到低 RCS 水平。

5 结束语

本文基于 Floquet 定理计算了格栅的屏蔽性能, 分析比较了菱形格栅单元的 5 个典型参数不同极化 下电磁屏蔽的变化规律,得到如下结论:参数对格栅 电磁屏蔽效能的影响不同,屏蔽效能与格栅孔径尺 寸、格栅倾角呈负相关,与格栅深度、格栅线宽呈正 相关;格栅两边夹角变化导致 TE 极化模式和 TM 极 化模式呈现相反变化趋势。采用优化后参数建立加 装格栅的腔体模型分析斜入射的散射特性,验证了 上述规律的有效性。本文提出的方法可以为后续格 栅结构隐身设计提供参考。

格栅在侧向存在边界峰值和栅瓣,在后续研究 中需要关注。

参考文献:

- [1] 王利敏,黄河源,米百刚,等.飞行器内埋式通风冷却 系统四边形进排气口格栅气动特性分析研究[J].西 北工业大学学报,2021,39(6):1179-1187.
- [2] 张乐.飞翼布局耦合进排气的气动与隐身综合设计研 究[D].西安:西北工业大学,2016.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 王建伟.周期格栅及其夹层结构弹性波传播特性研究 [D].长沙:国防科学技术大学,2014.
- [6] 蒋诗才,邢丽英,李斌太,等.格栅结构吸波性能探索 研究[C]//第七届先进材料研讨会暨北京航空材料研 究院建院 50周年学术论文集.北京:中国航空学会, 2006:196-198.

- [7] 蒋诗才,石峰晖.碳纤维复合材料格栅结构的吸波/承载性能研究[J]. 舰船电子工程,2019,39(3):82-86.
- [8] FAN H L, YANG W, CHAO Z M. Microwave absorbing composite lattice grids [J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(15):3472-3479.
- [9] 梁昌洪,谢拥军,官伯然.简明微波[M].北京:高等教 育出版社,2018.

作者简介:

王一珺 女,1997 年生于陕西西安,2019 年获学士学位,现为硕士研究生,主要从事飞机总体设计工作。

艾俊强 男,1961 年生于陕西西安,硕士,研究员,主要 从事飞行器总体设计工作。

崔力 男,1989 年生于山西偏关,硕士,高级工程师, 主要从事飞机总体设计工作。

张维仁 男,1989 年生于河北沧州,硕士,工程师,主要 从事飞行器总体设计工作。