

/// 军队院校“2110工程”建设项目

作战飞机RCS的 静态与动态特性分析

岳奎志 著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

/// 军队院校“2110 工程”建设项目

作战飞机 RCS 的 静态与动态特性分析

岳奎志 著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是飞机总体与隐身技术领域的专著。本书共分6章,主要内容涉及RCS机理的研究现状、RCS数值模拟算法、作战飞机RCS静态特性、飞机隐身气动一体化概念设计、基于机动飞行的飞机动态RCS测量模型和飞机动态RCS特性等内容。

本书可作为航空科学与工程专业的师生的教学参考书,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

作战飞机 RCS 的静态与动态特性分析 / 岳奎志著. --

北京:北京航空航天大学出版社,2016.7

ISBN 978-7-5124-2161-5

I. ①作… II. ①岳… III. ①歼击机—静态特性—数值模拟②歼击机—动态特性—数值模拟 IV. ①V271.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 128363 号

版权所有,侵权必究。

作战飞机 RCS 的静态与动态特性分析

岳奎志 著

责任编辑 金友泉

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京艺堂印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:8.75 字数:186千字

2016年7月第1版 2016年7月第1次印刷 印数:1 000册

ISBN 978-7-5124-2161-5 定价:49.00元

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 隐身作战飞机发展现状概述	1
1.1.1 国外发展现状	1
1.1.2 国内发展现状	3
1.1.3 隐身作战飞机技术发展趋势	4
1.2 作战飞机的 RCS 机理研究现状	4
1.2.1 算法研究	4
1.2.2 多学科融合技术	6
1.3 作战飞机的 RCS 应用的研究现状	7
1.3.1 飞机隐身化设计研究	7
1.3.2 作战飞机基于 RCS 因素的作战使用研究	10
1.4 其他隐身技术研究现状	11
1.4.1 材料隐身	11
1.4.2 射频隐身	12
1.4.3 红外隐身	13
1.4.4 可见光隐身	13
1.4.5 声隐身	14
1.5 本书的研究内容	14
1.5.1 研究目的	14
1.5.2 研究内容	15
第 2 章 RCS 数值模拟算法研究	16
2.1 RCS 数值模拟算法的建立	16
2.1.1 理论基础	16
2.1.2 RCS 的定义	19
2.1.3 物理光学法测三角形面元的 RCS 公式推导	19
2.1.4 迭代物理光学法测腔体的 RCS 公式推导	26
2.1.5 等效电磁流法测劈边缘的 RCS 公式推导	28
2.1.6 综合数值模拟算法	30
2.2 微波暗室对飞机 RCS 数值模拟算法的验证	30
2.2.1 微波暗室实验的理论基础	30

2.2.2 实验过程	31
2.2.3 数值模拟与实验结果的对比分析	32
2.3 小 结	32
第3章 作战飞机 RCS 静态特性研究	34
3.1 三翼面战斗攻击机的 RCS 特性研究	34
3.1.1 三翼面战斗攻击机的概念设计	34
3.1.2 概念三翼面战斗攻击机的 RCS 特性分析	37
3.1.3 基于挂载任务的典型三翼面飞机之间的 RCS 特性分析	40
3.1.4 概念飞机与隐身飞机的 RCS 特性对比分析	43
3.2 舰载电子战飞机的 RCS 特性研究	45
3.2.1 舰载电子战飞机 3D 数字模型建立	46
3.2.2 舰载电子战飞机 RCS 特性数值模拟与分析	47
3.2.3 舰载电子战飞机爬升、俯冲时的 RCS 特性分析	50
3.3 舰载预警机的 RCS 特性研究	53
3.3.1 舰载预警机的概念设计	54
3.3.2 概念舰载预警机 RCS 特性分析	56
3.3.3 两款预警机的 RCS 特性对比分析	57
3.4 小 结	63
第4章 三翼面战斗攻击机隐身气动一体化概念设计数值模拟	65
4.1 一体化设计理论依据	65
4.1.1 RCS 算法	65
4.1.2 CFD 模型	66
4.1.3 分析流程	66
4.2 数值模拟	67
4.2.1 飞机概念设计模型	67
4.2.2 隐身特性	69
4.2.3 气动特性	72
4.3 对比分析	75
4.3.1 俄罗斯三翼面战斗机改装方案的几何模型	75
4.3.2 隐身特性分析	76
4.3.3 气动特性分析	79
4.4 小 结	82
第5章 基于机动飞行的飞机动态 RCS 测量模型	83
5.1 飞机与雷达入射波的几何关系时变模型	84
5.1.1 地面雷达探测飞机的几何关系时变模型	84

5.1.2 机载雷达探测多架飞机的几何关系时变模型	87
5.2 基于动态飞行的多架飞机空间时变模型	88
5.2.1 飞机动力学与运动学方程	88
5.2.2 空气动力学方程	91
5.2.3 微分方程的数值解法	91
5.3 机动飞行的飞机动态 RCS 模拟流程	92
5.3.1 飞机动态 RCS 的影响因子	92
5.3.2 动态 RCS 特性数值模拟流程	92
5.4 飞机被雷达探测的发现概率	95
5.5 小 结	96
第 6 章 飞机动态 RCS 特性与被发现概率的数值模拟	97
6.1 机动飞行的作战飞机几何模型的建立	97
6.2 机动飞行作战飞机的动态 RCS 特性数值模拟	99
6.2.1 平 飞	99
6.2.2 平飞—爬升—平飞	103
6.2.3 平飞—俯冲—平飞	106
6.2.4 单机挂弹平飞	110
6.2.5 双机伙伴加油平飞	112
6.3 被发现概率的数值模拟	115
6.4 小 结	121
结 束 语	122
参考文献	124

第 1 章 绪 论

1.1 隐身作战飞机发展现状概述

隐身性是第五代作战飞机的主要特点之一,它与超声速巡航、超机动飞行和超级信息优势并称为第五代作战飞机的四大特点。先进的无人作战飞机也继承了隐身性的特点,在未来的作战飞机领域逐渐占有更大的比重。

1.1.1 国外发展现状

国外隐身作战飞机型号比较多,如美国的 F-117A、B-2、F-22A、F-35、X-45^[1]和 X-47^[2]等,俄罗斯的 Su-47、MiG-1.44 和 T-50 等,这些隐身作战飞机在过去、现在和可预见的未来都是主宰军事航空领域的利器。下面分别介绍具有代表性的隐身作战飞机(见图 1-1)的特点。

1. B-2 战略轰炸机的隐身技术

B-2 战略轰炸机是诺思罗普公司为美国空军研制的作战飞机^[3]。该飞机为飞翼构型,采用翼身融合技术,机翼后缘呈典型的锯齿状,无尾翼。B-2 战略轰炸机的机体表面涂有吸波材料,并且在机身和机翼中采用大量的蜂窝状结构和复合材料,在机翼上方安装发动机喷口^[4]。

2. F-22A 飞机采用的隐身技术

F-22A 战斗机是由洛克希德·马丁公司和波音公司联合研制的单座、双发高隐身性的第五代战斗机^[5]。该飞机具有超声速巡航、超视距作战、高机动性和高隐身性的特点。该型飞机采用的隐身技术为:

- ① 采用双立尾双发单座布局^[6];
- ② 机翼和平尾采用小展弦比的梯形翼,它们的前缘后掠角和后缘前掠角都各自相同^[7];
- ③ 进气道入口截面呈菱形,采用 S 弯形进气道^[8];
- ④ 发动机尾喷口采用二维矢量推力技术,可以在 $\pm 20^\circ$ 范围内上下偏转推力方向^[9];
- ⑤ 水泡型座舱盖凸出于前机身上部,中机身装有 2 个内置武器弹舱^[10];
- ⑥ 按重量计算,在机体上使用复合材料的比例达 35%。

3. F-35 战斗机采用的隐身技术

F-35 联合战斗攻击机由洛克希德·马丁公司研发^[11],为单座、单发的战斗攻

击机,具有高隐身、先进电子系统和超声速巡航的能力^[12]。

F-35 采用的隐身技术为:

- ① 机体表面采用连续曲面设计^[13];
- ② 武器采用内挂式^[14];
- ③ 在红外隐身方面,该机在推力损失仅有 2%~3% 的情况下,将尾喷管 3~5 μm 中波波段的红外辐射强度减弱了 80%~90%,同时使红外辐射波瓣的宽度变窄^[15-16];
- ④ 该飞机的隐身设计,不仅减小了被雷达发现的距离,还使全机 RCS 及红外辐射中心发生改变,导致来袭导弹的脱靶率增大^[17]。

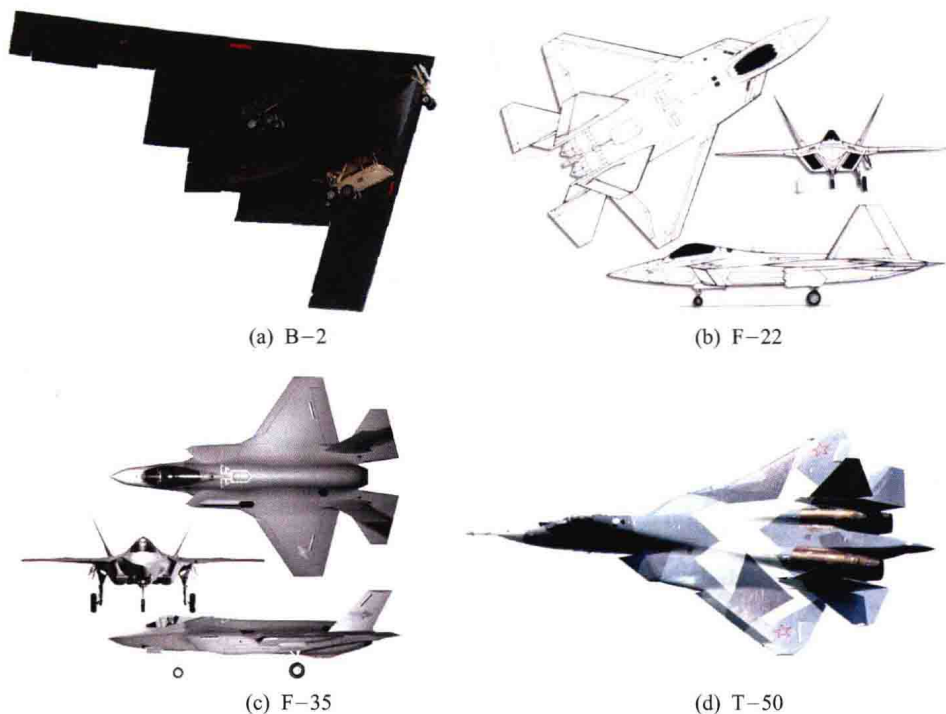


图 1-1 国外典型隐身作战飞机

4. T-50 战机采用的隐身技术

T-50 飞机是俄罗斯第五代单座、双发重型战斗机,具备隐身、短距离起降、超机动和超声速巡航等特点。该飞机长为 22 m,翼展为 14.2 m,空重为 17.5 t,最大起飞重量为 36 t,超声速巡航速度为 1450 km/h,作战半径为 1100 km,战斗负荷为 6 t。该飞机于 2010 年首飞^[18]。该型飞机采用的隐身技术为:

- ① 飞机采用了大量复合材料,其比例占飞机外壳的 70%,整体结构的 40%;
- ② 采用等离子体隐身技术^[19];
- ③ 采用完全内置的导弹舱;

④ 机鼻雷达罩在前部稍微扁平,底边为水平,其目的是将它的反尾旋性能最优化;

⑤ 机尾保留了大尾锥,主要是为了减阻;

⑥ 采用了菱形翼,菱形翼是平衡隐身、机动和航程等方面要求的较好方案;

⑦ 机翼和尾翼前、后缘平行,使雷达反射信号指向几乎垂直与侧面的方向反射,避开了正前方和正后方;

⑧ 两个垂直尾翼向外倾斜,避免侧向的雷达反射信号发生镜面反射;

⑨ 采用了S弯进气道,降低了整机的RCS。

1.1.2 国内发展现状

我国隐身作战飞机的研发刚刚起步,也取得了颇丰的研究成果。媒体公开报道国内隐身飞机的型号有J-20和J-31等,如图1-2所示。下面分别就这两种隐身飞机的概况进行介绍:

1. J-20 飞机采用的隐身技术

J-20飞机是成飞研制的单座、双发重型隐身战斗机,首架原型机于2011年1月11日在成都实现首飞^[20]。

J-20采用的隐身技术为:

① 采用菱形机头和整体式黄金镀膜舱盖;

② 采用可调无附面层隔道的超声速进气道(DSI);

③ 机腹下部为内埋式主弹舱,机腹两侧为格斗弹舱,并且使用了锯齿形舱门;

④ 采用可动大边条及翼身一体化设计;

⑤ 采用全动差动垂尾、垂直尾翼向外倾斜,采用三维矢量推力技术;

⑥ 采用光电分布式孔径系统;

⑦ 采用主动控制技术;

⑧ 采用上反鸭翼,与下反主翼等翼面配合,共同产生涡升效应。

不足之处:J-20战斗机空中机动时前端鸭翼的偏转,以及机尾固定的腹鳍,都

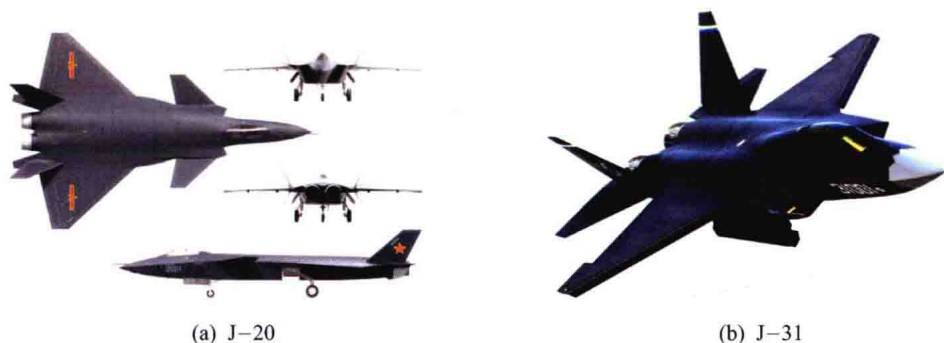


图1-2 我国典型的隐身作战飞机

会在飞机前向和侧向形成较大的 RCS。

2. J-31 飞机采用的隐身技术

J-31 飞机是由沈飞研制的一款中型单座、双发隐身作战飞机^[21],首架原型机于 2012 年 10 月 31 日在阎良实现首飞。J-31 采用的隐身技术为:采用常规气动布局、DSI 进气口、S 弯进气道^[22]、梯形主翼及内置弹舱,倾斜双立尾,前移的菱形平尾,J-31 的外形总体布局类似于 F-35,但 J-31 采用了双发动机设计。

1.1.3 隐身作战飞机技术发展趋势

隐身作战飞机的发展趋势总体上表现为从有人隐身作战飞机向无人隐身作战飞机发展^[23]。

作战飞机采用的隐身技术发展趋势为:

① 采用菱形机头。

② 机体表面采用连续曲面设计,机翼和平尾采用小展弦比的梯形翼,它们的前缘后掠角和后缘前掠角都各自相同,机身表面和转折处设计成使反射波集中于水平面内的几个窄波束。

③ 水泡型座舱盖,密封式玻璃舱罩采用了金属镀膜技术,使雷达波无法穿透舱体,造成漫反射。

④ 进气道呈 S 弯形通道,采用可调 DSI 进气口或采用“网状格栅隐蔽”式进气口。

⑤ 采用锯齿状口盖,并让锯齿边缘与某些窄波束方向垂直。

⑥ 采用埋入式武器舱、可伸缩的天线等。

⑦ 采用双立尾向外倾斜布局。

⑧ 采用三维矢量推力技术。

⑨ 采用复合材料、等离子体隐身技术。

⑩ 机翼前缘的包覆物后部,有不规则的蜂巢式空穴,可以吸收雷达波,机翼的前缘还全部包覆上了一层特制的吸波材料及吸波油漆^[24]。

⑪ 缩减红外隐身。

1.2 作战飞机的 RCS 机理研究现状

作战飞机的 RCS 机理研究包括两个环节:算法研究和多学科融合技术。

1.2.1 算法研究

飞机的 RCS 数值模拟常用的算法有 9 种,分别是:物理光学法、几何光学法、射线追踪法、几何绕射理论、物理绕射理论、等效电磁流法、矩量法、时域有限差分方法和快速多极子法,各种方法都有各自的优缺点及适应范围。

物理光学法适用于远场、电大(即目标尺寸除以波长之值大于20)、光滑、理想导体、远目标、平面波照射。其优点为对任意复杂凸目标可通过划分表面单元进行计算,且效率高;其缺点为计算结果与极化方向无关,不能处理交叉极化,阴影边界处表面电流不连续且有错误贡献,无法处理边缘散射,不能处理耦合效应。

几何光学法缺点是对不连续的特征不能计算,射线管会聚时失效,不能计算全空间散射场,RCS只取决于镜面反射点处的曲率半径;其优点是适用于尺寸远大于入射波长的粒子光散射的RCS。

射线追踪法是处理复杂飞行器目标RCS耦合散射的经典方法之一,具有计算精度高、物理概念简单、易于实现等优点,同时也具有计算效率低、对计算机硬件性能要求高、耗时巨大等缺点。

几何绕射理论的缺点是反射边界、阴影边界失效,焦散区失效,不能计算内劈角的RCS;其优点是能得到开普勒锥上的场,能计算半无限长尖劈的RCS。

物理绕射理论的优点是能得到开普勒锥上的场;其缺点是焦散区失效,不能计算内劈角的RCS。

等效电磁流法的优点是适合求劈边缘的RCS,其缺点是绕射系数在阴影边界和反射边界上出现奇异问题。

矩量法的优点是计算RCS精度高,其缺点是需要计算机的内存特别大。

时域有限差分法的优点是计算RCS精度高,其缺点是计算时间特别长。

快速多极子法是一种基于矩量法的快速算法,是通过对近、远场分别处理来加速迭代过程中的矩阵和向量相乘,实现快速计算目的,其优点是计算精度高,其缺点是需要计算机的内存大。

北京航空航天大学(简称北航)的姬金祖在文献[25]中,研究了物理光学法的算法及其优化,将面元投影在与电磁波入射方向垂直的平面上进行分组,使同组的面元距离相近,在计算时仅需对同组的面元判断遮挡关系,避免了所有面元的两两遮挡判断,从而节省了计算时间,并对分组进行优化,使计算时间最少。姬金祖在文献[26]中,针对射线追踪法中反射路径的计算,提出了采用张量表示单次和多次反射作用的方法,并进行了详细推导。姬金祖在文献[27]中,为了消除几何绕射理论所带来的奇异值,采用物理绕射理论计算尖劈绕射;导出两种绕射系数的另一种表达式,用以说明奇异值消除情况;物理绕射理论在绝大多数情况下消除了几何绕射理论的奇异值,但是绕射波沿着劈面且双站角为 180° 时仍然存在奇异值。姬金祖在文献[28]中,研究时域有限差分法连接边界电磁泄漏的问题,用等效原理将二维散射场进行远场外推,得到RCS,以此衡量电磁泄漏的大小。姬金祖在文献[29]中,采用物理光学法研究导体表面电流密度误差,将二维导体圆柱和方柱等构型在不同入射频率、极化方式下对物理光学表面电流密度与精确解或矩量法结果进行比较;分析结果表明,横磁波照射时物理光学法除在顶点处有较大误差外,基本上能够正确反映表面的电流密度分布情况。

1.2.2 多学科融合技术

飞行器隐身方向的多学科融合技术主要是指飞行器的隐身、气动、结构、强度和重量等学科相互关联、相互影响的技术,它们是通过飞行器的外形等因素联系在一起的。

南京航空航天大学(简称南航)的余熊庆在文献[30]中,建立了在威胁区域内目标 RCS 大于临界 RCS 的目标函数,为气动与隐身一体化设计提供合理而有效的目标函数。

北航的李敬在文献[31]中,研究了飞机气动力与隐身一体化外形参数模糊优化,建立了模糊优化的综合加权模型和模糊判决模型。李敬还在文献[32]中,建立了线性约束、综合加权、多个目标的总满意度函数,研究了气动力/隐身一体化模糊优化设计,采用罚函数将约束优化转化为无约束优化,并用单纯形方法求解。李敬还在文献[33]中,将汪培庄提出的一组变权公式应用于飞机外形参数的气动力与隐身一体化模糊优化设计。

北航的吁日新在文献[34]中,采用确定性及遗传优化算法,分析了适应函数的等值线谱,并分象限构造出相应的函数,进而构造出适用于双目标优化的适应函数。

西北工业大学(简称西工大)的何开锋在文献[35]中,探索了翼身组合体飞行器的气动/隐身一体化设计,采用面元法计算气动性能及物理光学方法计算 RCS,进行了基于遗传算法的气动、隐身目标函数的并行优化,采用了神经网络构造了响应函数模型。

西工大的夏露在文献[36]中,针对飞行器外形设计的多目标问题,采用 Pareto 的系统分解法,得到均匀分布的 Pareto 解集,来解决气动/隐身一体化问题。

西工大的苏伟在文献[37]中,将 Pareto 方法与遗传优化搜索相结合,采用了群体排序、共享机制的小生境技术和 Pareto 解集过滤器等技术,使解集具有良好分布特性,并建立了一套可满足飞行器外形气动/隐身一体化综合设计的优化模型。

西工大的车竞在文献[38]中,采用多目标混合遗传算法,实现了类乘波体高超声速巡航飞行器机身的总体性能多目标优化设计,考虑的性能指标包括:机身气动升阻特性、推阻特性、配平特性、雷达隐身特性、机身容积以及驻点温度等,通过优化设计得到了 Pareto 最优前沿面,获得了比基本构型飞行器总体性能更优的构型方案。

南航的胡添元、余雄庆在文献[39]中基于多学科设计优化(MDO)方法研究飞翼飞机总体设计,根据二级优化方法提出飞机总体 MDO 实时流程,确定优化全局设计变量、使系统目标最优的系统级优化任务,研究子系统优化,涉及的学科包括气动、隐身、结构、总体布置、重量和性能,其任务是调整局部设计变量,满足本学科的设计要求,建立根据飞机外形几何模型自动生成各学科分析模型的多学科模型生成器。

北航的游思明在文献[40]中,采用结构化网格和求解 Navier-Stokes 方程的方法,进行了无人机和巡航导弹气动性能计算,用数值模拟了气动流场,建立了无人机

和巡航导弹的曲面及面劈模型,根据图形算法-劈边模型方法,计算了 RCS 值,并基于灰色系统的灰关联度分析理论,提出了气动/隐身综合性能的量化评估模型。

西工大的张彬乾在文献[41]中,基于参数化、基函数、遗传算法和代理模型,建立了多目标优化设计翼型的平台,同时考虑气动与隐身性能要求,对飞翼的翼型进行了优化设计。

南航的邓海强在文献[42]中,考虑飞机的气动、RCS、结构、配平约束、重量和机翼弯矩等因素,基于优化方法,研究了亚声速飞翼概念设计。

北航的徐敏在文献[43]中,在研究飞机方案设计时考虑重量、气动和隐身等因素,基于遗传算法,采用动态指标函数,进行了多目标优化,用以设计飞机。

1.3 作战飞机的 RCS 应用的研究现状

1.3.1 飞机隐身化设计研究

飞机隐身化设计又分为机身气动外形隐身设计、机翼气动外形隐身设计、进气道隐身设计、结构细节隐身设计和整机隐身设计五个方面。

1. 机身气动外形隐身设计

北航的张考早在 20 世纪 80 年代就开始研究飞行器隐身技术,他在文献[44]中分析了军用飞行器战术技术隐身能力的主要内容:

- ① 飞行器的散射特性及辐射特性;
- ② 飞行器的电子干扰能力;
- ③ 飞行器所用的战术隐身技术。

南航的潘家正、王一飞在文献[45]中对圆形、三角形、菱形、五边形机身进行了 RCS 和低速气动特性测试与研究,结果表明多边形截面机身隐身性能良好,其 RCS 值比相同截面积的圆截面机身降低一个数量级,而且其气动特性不比圆截面机身差。

南航的王略、章仲安在文献[46]中对鸭翼、翼身融合体、尖头机身、 30° 双立尾的飞机总体外形布局进行研究,其 RCS 值很小,隐身性能好,且其气动性能也较好,其研究结果对 MiG-1.44 等飞机的气动外形设计有一定的参考价值。

北航的黄敏杰、黄俊在文献[47]中对保形油箱的隐身与气动进行了设计,以 Su-27 系列飞机为背景,对保形油箱安装在进气道中间和进气道下方这两种方案进行研究,结果表明保形油箱在 RCS 及气动方面比普通外挂油箱性能优秀。

北航的朱自强、王晓璐在文献[48]中对无人机气动特点和设计进行了综述,介绍了无人机的意义,研究了高空长航时无人机:捕食者、全球鹰、暗星、太阳神、探路者、探险者等,以及无人战斗机:X-45A、X-45C、X-47B 和 X-36 等,介绍它们气动特点、控制舵面和隐身设计等方面的内容。

北航的白振东、刘虎在文献[49]中研究了机身剖面参数化造型方法,用 B 样条

表示出机身和座舱盖的典型剖面,包括尖劈及凹凸曲线等,考虑飞机隐身性能,以飞机概念设计系统为基础,采用模版参数生成机身外形,实现快速造型。

2. 机翼气动外形隐身设计

飞翼布局飞机为了改善隐身特性,取消了平尾和垂尾,飞翼操纵面一般包括:开裂式方向舵、外侧升降副翼、内侧升降副翼和海狸尾俯仰控制面。

北航的李林、王立新在文献[50]中研究了小展弦比的飞翼布局飞机的稳定特性,针对小展弦比飞翼布局飞机,研究了飞行状态下纵向和横航向的静、动稳定特性,分析了飞翼构型参数、飞行状态与气动稳定性间的量化规律,并分析了纵向短周期模态及横向荷兰滚模态发散的具体成因。

北航的高洁、王立新在文献[51]中研究了大展弦比飞翼飞机的阵风载荷减缓控制,分析了新型多操纵面的典型配置方案,应用直接升力方法对阵风减缓控制时新的操控及控制原理进行分析。

北航的孙奕捷、申功璋在文献[52]中采用遗传算法和近似模型,研究了飞翼的控制、气动与隐身多学科优化策略与流程。

北航的王磊、王立新在文献[53]中研究了飞翼的开裂式方向舵的偏航操纵非线性、小偏角偏航舵效率低、附加力效应显著和 3 轴操纵耦合等特点,并分析了偏转对飞机气动特性和稳定特性的影响。

南航聂毅在文献[54]中研究了翼面隐身结构的设计方案。该方案由玻璃钢蒙皮、三层含碳聚苯乙烯、铝箔尖劈、腹板和金属翼等组成翼面隐身结构,可在吸收电磁波的同时增加翼面前缘刚度,该文献同时应用代理模型对翼面隐身结构的电磁散射特性进行优化设计。

北航的鲍君波、武哲在文献[55]中提出综合考虑飞翼布局隐身性能和气动性能的平面形状特征参数,分析了方案优选中的约束关系,构建了三维曲面模型,研究了飞翼的气动、隐身性能,并对飞翼进行了风洞试验。

北航的孔繁美、邱栋在文献[56]中研究 V 型尾翼的气动设计,通过风洞试验,探索机翼不同上反角和副翼位置对 V 型尾翼的飞机全机气动特性的影响,比较了两种 V 型尾翼与常规尾翼的纵横向气动特性。

北航的李修懿、宁涛在文献[57]中研究了飞行器 RCS 的预估计算,论述了利用计算机图形学方法,使用 NURBS 曲面和 Bezier 曲面进行飞行器 RCS 预估计算前置处理方法来实现几何模型的消隐、拼合以及 NURBS 曲面向 Bezier 曲面的转化。

南航的黄爱风、余熊庆在文献[58]中研究了在翼面前、后和梁腹板之间填充的含有石墨的发泡聚苯乙烯对 RCS 的影响,针对无人侦察机隐身性能,应用时域有限差分方法建立了隐身结构电磁散射的数值模型,对两种低成本的翼面隐身结构方案的 RCS 进行了计算和比较分析。

西工大的孙秦、田薇在文献[59]中论述了采用复杂介质的二维电磁散射有限元数值计算方法,对介质体机翼剖面的缩比模型电磁散射规律进行了数值计算研究。

3. 进气道隐身设计

飞机的进气道隐身技术一般采取的措施有:

- ① 采用 S 弯进气道;
- ② 采用无附面层隔道的超声速进气道;
- ③ 采用“网状格栅隐蔽”式进气口。

南航的何志强、郭荣伟在文献[60]中对双斜切双压缩面进气道进口波系结构进行了研究,生成三维进气道的计算网格,采用数值计算的方法对该型进气道进口波系结构进行了研究,分析了进气道进口流场特性,总结了斜切口、压缩角、来流马赫数等多种影响参数对进气道进口波系结构的影响规律。

南航的孙姝、郭荣伟在文献[61]中研究了平面埋入式进气道的口面,同时进行了高速风洞试验验证。

余安远、乐嘉陵在文献[62]中研究了隐身外形飞行器的埋入式进气道和 S 弯进气道,其关键技术包含中心线设计、横截面面积变化规律、横截面形状设计,并进行了试验验证。

南航的石磊、郭荣伟在文献[63]和[64]中研究了蛇形、平面埋入式进气道的电磁散射特性,该进气道进口与机身保形,并对进气道在 Ku 波段选择入射频率 15 GHz 的情况下进行电磁散射特性的实验,取得了蛇形进气道 RCS 随方位角和迎角的变化规律。

北航的姬金祖在文献[65]中研究 S 弯进气道隐身设计中弯度参数,在微波暗室内进行了测试,研究了进气道相对弯度对散射的影响。S 弯进气道的作用:增加电磁波在进气道内反射次数,减少向后回波。

4. 细节隐身设计

飞机的细节隐身设计主要包括缝隙、台阶、铆钉和螺钉等表面不连续结构散射机理的研究。

北航的黄沛霖、刘战合在文献[66]中研究了飞行器表面缝隙电磁散射特性,并通过 RCS 测试,试验得出了电磁散射随缝隙宽度、间距的变化规律,以及其极化特性。

北航的刘战合、武哲在文献[67]中研究了飞行器锯齿边散射特性,采用混合场积分方程、多层快速多极子算法和共轭梯度算法的迭代技术,总结了锯齿边相对于直角边板在不同角域内的 RCS 缩减特性以及 RCS 缩减与入射波频率变化之间的关系。

北航的高旭、武哲在文献[68]中研究了锯齿缝隙的电磁散射特性,在微波暗室内对锯齿缝隙分别沿俯仰角变化、方位角变化的缩减效果进行测试。俯仰角变化时,锯齿缝隙有较好的缩减作用,以 114° 锯齿缝隙在试验中缩减效果最好。方位角变化时,对 114° 锯齿缝隙进行了多频段测试,并与相应直缝隙进行比较研究。

中航工业飞机设计研究院的柴建忠在文献[69]中,研究了平板和杏仁体表面缝隙的 RCS 特性,并进行了试验测试。结果表明:直缝比直槽的 RCS 小,锯齿缝比直缝的 RCS 小,杏仁体能够模拟飞机某些曲面的 RCS 特性。

5. 整机隐身设计

整机隐身技术是对各个分系统进行综合隐身技术的呈现。

北航的包晓翔在文献[70]中研究了通用直升机的 RCS 特性及 RCS 缩减策略,采用物理光学法和等效电磁流法,测试了某通用直升机的几何外形,并进行了机身外形和旋翼的 RCS 缩减研究,提出了通用直升机的隐身外形设计方法。

北航的臧京在文献[71]中,考虑隐身能力,基于仿真手段,研究了战斗机反舰有效性评价方法,用以满足在战斗机设计的早期阶段的指标要求。

北航的岳奎志在文献[72]中,对比分析常规作战飞机外挂导弹和概念飞机内埋式挂载导弹的飞机系统的 RCS 特性。岳奎志在文献[73]中研究了常规作战飞机的双立尾对等外倾对飞机 RCS 特性的影响。岳奎志在文献[74]中基于物理光学法和等效电磁流法,研究了 EA-18G“咆哮者”电子战飞机和 Su-33 可能的衍生型号电子战飞机的 RCS 特性,建立了动态飞行的飞机三维(3D)数字模型,考虑了舵面偏转、外挂导弹和电子干扰吊舱对飞机 RCS 特性的影响,并分析了在电子干扰条件下舰载电子战飞机被敌方雷达发现的概率。岳奎志在文献[75]中概念设计携带大型导弹的具有隐身性能的三翼面战斗攻击机,并基于物理光学法和等效电磁流法对概念飞机进行了 RCS 特性分析。

巴西航空工业研究院的 Andrade L. A. 在文献[76]中采用 CATIA 软件,设计了战斗机的 3D 数字模型,并在此基础上研究了飞机的外形隐身和涂吸波材料后的飞机隐身效果。

1.3.2 作战飞机基于 RCS 因素的作战使用研究

飞机隐身技术作战使用的效果主要表现在降低飞机被探测的概率,降低飞机被杀伤的概率,提高飞机的生存力上^[77]。

空军工程大学的陈中起在文献[78]中研究了基于战术隐身的突击精细规划,采用勒让德伪普法搭建精细规划策略实现框架,建立战术隐身模型,采用 CFSQP 软件包,实现了对大规模非线性规划问题的解算。

北航的张云飞在文献[79]中建立了箔条云对飞机隐身特性的影响分析与计算方法,通过例子计算了箔条干扰及目标 RCS 对飞行器隐身性能的影响。

南航的胡添元在文献[80]中研究了飞行器隐身优化设计中 3 种目标函数,即威胁区域内 RCS 的平均值、大于临界 RCS 值的概率和被雷达检测的平均概率,分析了不同目标函数对隐身优化结果的影响。

北航的莫松在文献[81]中,为了提高无人机生存力,考虑无人机的 RCS 随姿态变化的情况,在航迹规划中采用了改进快速扩展随机树方法进行隐身飞行突防作战。

国防科技大学的戴崇在文献[82]中基于三自由度空气动力学理论,针对飞机在平飞、爬升、俯冲和盘旋等的动态飞行条件下,计算了雷达入射波对飞机的姿态角,进行了飞机动态 RCS 特性数值模拟。

电子工程学院的王凯在文献[83]中研究了用 HF 频段的天波超视距雷达探测 F-22 战斗机的效果,在不同的频率、极化和角度条件下,天波超视距雷达的反隐身战机的能力较好。

1.4 其他隐身技术研究现状

其他隐身技术包括材料隐身、射频隐身、红外隐身、可见光隐身和声隐身五个方面,现分别介绍这些隐身技术的研究现状。

1.4.1 材料隐身

飞行器的材料隐身技术主要包括:

- ① 采用复合材料,采用不规则的蜂巢式空穴^[84];
- ② 玻璃舱罩采用了金属镀膜处理^[85-87];
- ③ 飞机表面涂上吸波材料及吸波油漆。

采用这些材料隐身技术后,飞行器表面可以有效地吸收雷达波^[88-89]。

南航的余熊庆、杨景佐在文献[90]中将多层介质材料的电磁反射系数与优化技术相结合,提出了复合板材低 RCS 优化设计的方法,编制了优化复合板材几何参数和每层电磁参数的计算机程序。

航空工业总公司的彭艳萍在文献[91]中研究了飞机隐身技术及隐身材料,介绍了 F-117、B-2 和 F-22 等隐身飞机技术发展状况,介绍了国外隐身材料的发展状况:雷达吸波涂料、纳米、多晶铁纤维、导电高聚物、结构吸波材料、可见光、红外及雷达兼容隐身材料。

国防科技大学的常雨在文献[92]中针对非均匀等离子体在飞行器隐身中的应用,采用分段线性电流密度递归卷积时域有限差分方法计算等离子体涡及涡串电磁散射特性,分析了等离子体涡对飞行器的影响,对 L、S 和 C 波段电磁波所具有的不同吸收、反射特性进行了研究。

中国科学研究院的朱华新在文献[93]中设计了频率选择表面组合膜,该组合膜在测试雷达频段中平均传输系数小于 -7.51 dB,在长波红外平均透射率达到 87.95 % 时,满足红外、雷达复合制导飞行器带外隐身的要求。

南京理工大学的何湘在文献[94]和[95]中研究了雷达隐身等离子体参数的优化,针对等离子体对雷达波的吸收、衰减问题,采用求解波动方程的方法,计算了等离子体目标对雷达波的反射。结果表明,当等离子体电子数密度受限时,通过对等离子体的碰撞频率和厚度的参数优化,可以达到最佳的隐身效果。

沈阳航空航天大学的许卫锴在文献[96]中,叙述了在隐身领域使用超材料理念,综述了在航空隐身领域中的应用超材料现状和前景。

海军工程大学的刘冶在文献[97]中,基于坐标变换,设计了波长变换器装置,在