

军 用 飞 机 生存力与隐身设计

**Military Aircraft Survivability and
Stealth Design**

张 考 马东立 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

军用飞机生存力与隐身设计/张考,马东立编著.北京:
国防工业出版社,2002.6

ISBN 7-118-02718-9

I.军... II.①张...②马... III.军用飞机-隐身技
术 IV.V271.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 075713 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 11 $\frac{3}{4}$ 插页 1 298 千字

2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1-2000 册 定价:25.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植				
顾问	黄 宁				
主任委员	殷鹤龄				
副主任委员	王 峰	张涵信	张又栋		
秘书长	张又栋				
副秘书长	崔士义	蔡 镭			
委 员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成	
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生	
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同	
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇	
	崔尔杰	彭华良	韩祖南	舒长胜	

前 言

早在二次世界大战期间,提高飞机生存力的思想在飞机设计之中就已有体现。例如,采用双发动机、多发动机或双梁、多梁等有余度的设计,采用防弹风挡、防弹座椅等装甲结构,将管路、线路等易损且关键的元器件布置在坚固结构的掩护之下等。但是,这些只不过涉及了飞机生存力的一个方面——降低飞机的易损性,而在生存力更重要的另一个方面,即在降低飞机的敏感性方面,当时只不过考虑了降低飞机的视觉可见度,如飞机表面采用伪装涂色。随着技术的进步,特别是各种遥感技术在防空的预警系统、火力系统及在飞机的武器系统中的应用,使得降低飞机敏感性的措施变得更加复杂和更加迫切了。其中雷达的探测与制导对飞机生存力的威胁最大。

一切能降低飞机对雷达敏感性的技术都能提高飞机的生存力。越南战争及 1982 年的中东战争都证明,有源干扰、无源干扰等电子对抗技术能显著提高飞机的生存力。但是,要进一步发挥这两种干扰技术的效能,还有赖于飞机本身雷达散射截面(RCS)的降低。另外,并非在任何情况下都能使用这两种干扰技术。通过减缩飞机的 RCS 降低飞机的敏感性,早已是提高飞机生存力的研究方向。在不改变飞机外形的条件下,在飞机表面涂敷吸波材料以降低飞机 RCS 的研究,虽然已有几十年的历史,但收效不大,且飞机增重可观。直到 1981 年第一架隐身飞机的问世,以外形技术为基础,与多种材料技术相结合的 RCS 减缩技术显示了诱人的前景。飞机生存力设计进入了一个新的历史阶段。降低飞机 RCS 以提高生存力的设计,脱离了探索实验阶段,进入了广泛应用的阶段。这就是本书将低 RCS 设计作为重点讨论的原因。

到目前为止,国外已有十余种隐身飞机(或称“低可探测飞机”)的外形可从公开的刊物上获得,其中包括正在服役的、正在批量生产的、试飞后或论证后淘汰的、处于方案选择阶段的以及正在研究的。因此,国外隐身飞机虽然在吸波材料上仍处于保密状态,但在外形上早已不是秘密问题了。本书的作者就是从分析国外这些隐身飞机的外形入手,建立了“计算与分析飞机隐身性能的临界仰角图及临界俯角图”这一对隐身设计具有指导作用的理论,并进一步用此理论导出了飞机低 RCS 设计的基本原则。

本书共分七章。第一章、第二章讲述军用飞机生存力的概念及基本的计算方法。第三章讲述降低飞机敏感性的重要技术,在此章里,概括性地介绍了飞机隐身技术的各个方面。第四章介绍雷达目标 RCS 的基础知识,这对飞机设计专业是必要的。第五章讲述了 RCS 减缩的重点姿态角,上述对隐身设计具有指导作用的理论就包括在此章中。第六章、第七章详细讨论了飞机各部件及部件组合体的散射特性及与此有关的低 RCS 设计原则。

本书第二章由马东立撰写,张考撰写其余各章并对全书统稿。

在本书的编写过程中曾得到王宝发教授的帮助,特此表示感谢。

受作者水平所限,书中错误及不妥之处在所难免。恳请各方面专家提出批评,指正。

作 者

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1—1 实战中飞机的损失与生存	1
§ 1—2 飞机生存力的概念	3
§ 1—3 提高飞机生存力的技术	7
(一) RCS 减缩技术	7
(二) 战术规避技术	8
(三) 电子对抗技术	14
第二章 飞机生存力计算方法	18
§ 2—1 飞机的易损性	18
(一) 飞机对非爆炸穿透物或破片的易损性	19
(二) 飞机对外爆型高能炸药战斗部的易损性	23
§ 2—2 飞机的敏感性	26
(一) 雷达发现概率	26
(二) 入射体击中飞机的概率	30
§ 2—3 飞机的生存概率	35
(一) 单次射击击毁概率	35
(二) 一次遭遇经受单次射击及多次射击的生存力	37
(三) 一次出击中飞机经受多次遭遇的生存力	39
§ 2—4 算例与分析	39
(一) 防空系统与突防模式	39
(二) 计算结果与分析	43
第三章 降低飞机敏感性的重要技术——隐身技术	54
§ 3—1 雷达波隐身技术	54
(一) 外形隐身技术	55
(二) 材料隐身技术	56
§ 3—2 红外辐射隐身技术	63

(一)飞机设计中的红外隐身技术	63
(二)降低喷焰的红外敏感度	66
§ 3—3 可见光隐身技术	66
(一)可见光隐身技术的演变	67
(二)飞机飞行尾流及飞机停放状态的光学隐身	68
(三)飞机外形与视觉隐身	69
§ 3—4 声波隐身技术	70
§ 3—5 电磁辐射隐身技术	71
附录 隐身飞机(或低可探测飞机)简介	72
第四章 雷达散射截面	97
§ 4—1 雷达散射截面的定义及影响因素	98
(一)雷达散射截面的定义	98
(二)雷达散射截面的频率特性	100
(三)电磁波的极化及雷达散射截面的极化特性	102
(四)雷达散射截面的空间特性	109
(五)雷达目标的散射源及总 RCS	111
§ 4—2 雷达目标 RCS 近似计算	120
(一)几何光学近似法	121
(二)物理光学近似法	125
(三)几何绕射理论	130
§ 4—3 简单几何形体的雷达散射截面	138
(一)球体	139
(二)长球体、扁球体、椭球体	140
(三)任意闭合光顺曲面	144
(四)平板	145
(五)半无限薄尖劈	147
(六)椭圆柱、圆柱、导线	148
(七)锥球体	150
(八)偶极子	152
§ 4—4 雷达散射截面测量	154
(一)RCS 测量的基本原理与概念	154
(二)RCS 测量的目的与测量系统的选择	163

(三)模型设计与制造需满足的要求	168
第五章 RCS 减缩的重点姿态角	171
§ 5—1 计算与分析飞机隐身性能的临界仰角图 及临界俯角图	171
(一)飞机的坐标系	171
(二)临界仰角图及临界俯角图的构成及应用	174
(三)通过临界仰角或临界俯角计算目标的曝露距离或近盲区距离	183
(四)飞机可探测范围图的绘制	187
§ 5—2 RCS 减缩的无效与有效俯仰角	191
(一)在 $\pm 90^\circ$ 附近绝对值较大的俯仰角范围内减缩 RCS 是无效的	191
(二)在绝对值小的或中等的俯仰角范围内减缩 RCS 是有效的	194
§ 5—3 进行 RCS 减缩的重点姿态角	195
(一)在平视照射下 RCS 减缩的重点姿态角	195
(二)在仰视照射下 RCS 减缩的重点姿态角	199
(三)在俯视照射下 RCS 减缩的重点姿态角	201
§ 5—4 飞机预期临界仰角及预期临界俯角的确定	202
(一)确定预期临界仰角及预期临界俯角的原则	203
(二)确定预期临界仰角及预期临界俯角的方法	205
第六章 飞机散射源及散射特性分析	209
§ 6—1 整机强散射源部件分析	209
(一)部件分解实验	210
(二)整机二维成像分析	212
§ 6—2 部件散射源及散射特性分析	215
(一)机翼及平尾	216
(二)立尾	220
(三)机身	224
§ 6—3 部件组合体散射源及散射特性分析	238
(一)正交尾翼的角反射器效应	238
(二)倾斜式双立尾的散射源及散射特性	241
(三)翼身组合体的行波效应	247
第七章 飞机低 RCS 设计基本原则	251
§ 7—1 采用斜置外形,将散射方向图主瓣及若干副瓣	

移出重点方位角范围或重点俯仰角范围	251
(一)倾斜式双立尾	252
(二)平板形表面机身(或多面体机身)	259
(三)斜切进气口	264
(四)斜切翼尖	274
(五)其它斜置外形	277
§ 7—2 用弱散射部件占位或遮挡强散射部件	279
(一)用占位作用减缩 RCS 的概念	279
(二)利用占位作用设计低 RCS 机身	280
(三)利用占位作用设计低 RCS 翼身组合体	289
(四)用弱散射部件遮挡强散射部件	294
§ 7—3 消除或减弱角反射器效应,避开耦合波峰	315
(一)飞机上产生角反射器效应及耦合波峰的部位	315
(二)消除或减弱角反射器效应及控制耦合波峰的一般方法	316
(三)倾斜式双立尾避开耦合波峰的设计	317
§ 7—4 将全方位分散的波峰统筹安排在非重点 方位角范围内	322
(一)机翼前后缘后掠角的确定	323
(二)机翼前后缘及翼尖波峰的合并	324
(三)平尾波峰合并于机翼波峰	326
(四)倾斜式双立尾或 V 型尾翼波峰合并于机翼波峰	328
(五)进气口或喷口唇边波峰合并于机翼波峰	333
§ 7—5 尽量消除表面台阶及缝隙,将舱门、舱口对缝 斜置或锯齿化	334
(一)消除蒙皮对接处的缝隙	335
(二)消除蒙皮对缝处的台阶或其它不连续	335
(三)将舱门舱口对缝斜置或锯齿化	335
§ 7—6 在关键部位使用吸波材料	339
(一)低 RCS 外形飞机局部使用吸波材料	339
(二)常规外形飞机局部使用吸波材料	346
参考文献	348

Contents

Chapter 1 Introduction	1
§ 1—1 Loss and Survival of Aircraft in Actual Combat	1
§ 1—2 The Concept of Aircraft Survivability	3
§ 1—3 Techniques Used for Enhancing Survivability	7
1. RCS Reduction Techniques	7
2. Tactical Evasion Techniques	8
3. Electronic Countermeasures	14
Chapter 2 Methods of Aircraft Survivability analysis	18
§ 2—1 Aircraft Vulnerability	18
1. Aircraft Vulnerability to Nonexplosive Penetrators or Fragments	19
2. Aircraft Vulnerability to Externally Detonating HE Warheads	23
§ 2—2 Aircraft Susceptibility	26
1. The Probability of Radar Detection	26
2. The Probability a Propagator Hits an Aircraft	30
§ 2—3 The Survival Probability of an Aircraft	35
1. The Probability of Kill Caused by a Single Shot	35
2. The Probability That an Aircraft Survives an Encounter with a Single Shot and N Shots	37
3. The Probability the Aircraft Survives Multiple Encounters on a Sortie	39
§ 2—4 An Example	39
1. The Air-Defence System and the Penetrating mode	39
2. Calculated Results and Analysis	43
Chapter 3 The Important Techniques for Reducing Aircraft Susceptibility—Stealth Technology	54
§ 3—1 Radar Signal Stealth Technology	54

1. Configuration Techniques for Stealth	55
2. Material Techniques for Stealth	56
§ 3—2 Infra-red Signal Stealth Technonogy	63
1. Infra-red Signal Stealth Technology in Aircraft Design	63
2. The Reduction of Susceptibility to Infra-red of Exhaust Frame	66
§ 3—3 Optical Signal Stealth Technology	66
1. Development of Optical Signal Stealth Technology	67
2. The Visual Signal Reduction of The Contrail of an Aircraft and the Camouflage of Aircraft on Airfields	68
3. The Relation between Aircraft Configuration and Visual Stealth	69
§ 3—4 Acoustic Signal Stealth Technology	70
§ 3—5 Electromagnetic Radiation Signal Stealth Technology	71
Appendix A Brief Introduction to Stealth Aircraft/	
Low-observable Aircraft	72
Chepter 4 Radar Cross Section	97
§ 4—1 Definition of Radar Cross Section and the Parameters Influencing It	98
1. Definition of Radar Cross Section(RCS)	98
2. The Frequency Characteristics of RCS	100
3. Polarization of Electromagnetic Wave and the Polarization Characteristics of RCS	102
4. The Space Characterisics of RCS	109
5. Scattering Elements of Radar targets and Their tatol RCS	111
§ 4—2 Approximate Calculation of Radar Target RCS	120
1. The Geometrical Optics Approximation	121
2. The Physical Optics Approximation	125
3. The Geometrical Theory of Diffraction	130
§ 4—3 Radar Cross Section of Simple Shapes	138
1. Sphere	139
2. Prolate Spheroid, Oblate Spheroid and Ellipsoid	140
3. Arbitrary Closed, Smooth and Curved Surface	144
4. Flat Plates	145

5. Thin Infinite Wedges	147
6. Elliptic Cylinders, Cylinders and Thin Wires	148
7. The Cone-Sphere	150
8. Dipoles	152
§ 4—4 Measurement of Radar Cross Section	154
1. The Basic Principle and Concept of RCS Measurement	154
2. The Purpose of RCS Measurement and The Selection of Measurement Systems	163
3. Requirements for Designing and making models Used for RCS Measurement	168
Chapter 5 The Important Attitude Angles of an Aircraft for RCS Reduction	171
§ 5—1 The Critical Elevation/ Depression Angle Graph Used to Calculate and Analysis an Aircraft Stealth-Performance	171
1. The Coordinate System of an Airplane	171
2. Construction and Application of the Critical Elevation Angle Graph and the Critical Depression Angle Graph	174
3. Calculation of the Exposed Range and the Near Blind Range of a Target by Means of the Critical Elevation Angle and the Critical Depression Angle	183
4. Methods of Plotting a Detectable Zone Graph of an aircraft	187
§ 5—2 Ineffective and Effective Elevation Angles or Depression Angles for RCS Reduction	191
1. Ineffective RCS Reduction in Increasing Stealth-Performance	191
2. Effective RCS Reduction in Increasing Stealth-Performance	194
§ 5—3 The Important Attitude Angles for Reducing an Aircraft's RCS	195
1. An Aircraft Illuminated by a Radar Horizontally	195
2. An Aircraft Illuminated by a Radar with an Elevation Angle	199
3. An Aircraft Illuminated by a Radar with a depression Angle	201
§ 5—4 Determination of the Expectant Critical Elevation/	

Depression Angle	202
1. The Principles	203
2. The Methods	205
Chapter 6 Analysis of Scattering Sources and	
Scattering Characteristics of Aircraft	209
§ 6—1 Scattering Sources Analysis of a Whole Aircraft	209
1. Experiments With Separated Components from An Aircraft	210
2. Two Dimensional Image Measurements With a Whole Aircraft	212
§ 6—2 Analysis of Scattering Sources and Scattering	
Characteristics of Some Components	215
1. Wings and Horizontal Tails	216
2. Vertical Tails	220
3. Fuselages	224
§ 6—3 Analysis of Scattering Sources and Scattering	
Characteristics of Composed Bodies of Components	238
1. Corner Reflector Effectiveness of Aircraft's Tail Surfaces	238
2. The Scattering Sources and Scattering Characteristics of	
Canted Vertical Surfaces	241
3. Travelling Wave Effectiveness of Composed Wing-fuselage Bodies	247
Chapter 7 The Basic Principles of Low RCS Design	
for Aircraft	251
§ 7—1 Adopt Canted Configuration to Remove the Main Beam	
and Sidelobes of a Scattering Pattern Away from the	
Impartant Attitude Angle zone	251
1. Canted Vertical Tails	252
2. Plane Surface – Shaped Fuselage/Faceted Fuselage	259
3. Obliquely Cut Air Intakes	264
4. Obliquely Cut Wingtips	274
5. Other Canted Configuration	277
§ 7—2 Make the Strongly Scattering Components Occupied	
Partially or Shaded by Weakly Scattering Components	279

1. The Concept of RCS Reduction Using the Effect of Partial Occupation	279
2. Low RCS Designs Using the Effect of Partial Occupation for Some Fuselages	280
3. Low RCS Design Using the Effect of Partial Occupation for Composed Wing-fuselage Bodies	289
4. Strongly Scattering Components Are Shaded by Weakly Scattering Components	294
§ 7—3 Eliminate or Weaken the Corner Reflector	
Effectiveness; Avoid the Coupled wave peaks	315
1. Positions Where Corner Reflector and Coupled Wave Peaks Appear	315
2. General Measures to Eliminate or Weaken the Corner Reflector Effectiveness and to Control the Coupled Wave Peaks	316
3. The Design to Avoid the Coupled Wave Peaks for Canted Vertical tails	317
§ 7—4 Make an Overall Arrangement to concentrate the Spreading Wave Peaks on the Unimportant Azimuth Zone	
1. Determination of the Leading/Trailing Edge Sweep Angle of Wings	323
2. Concentration of Wave Peaks Caused by Wing Leading/ Trailing Edges and Wingtips	324
3. Merge the Wave Peaks of Horizontal Tail into Those of Wings	326
4. Merge the Wave Peaks of Canted Vertical Tails or V-Tail into Those of Wings	328
5. Merge the Wave Peaks of Intake or Exhaust Nozzle Edges into Those of Wings	333
§ 7—5 Make Efforts to Eliminate Steps and Gaps on Aircraft Surfaces	
1. The Gaps Between Two Pieces of Skin	335
2. The Steps and Other Uncontinuity on Some Surfaces	335
3. Canted or Saw-tooth Shaped Gaps Used for Various Bay doors	335
§ 7—6 Use Radar-absorbent Material at Critical Areas	
1. The Areas of Radar-absorbent Material Used for Low RCS	