

飞机作战生存力 计算理论与方法

AIRCRAFT COMBAT SURVIVABILITY
CALCULATION THEORY
AND METHODS

宋笔锋 裴扬 郭晓辉 韩庆 高宏建 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

飞机作战生存力 计算理论与方法

Aircraft Combat Survivability Calculation
Theory and Methods

宋笔锋 裴扬 郭晓辉 韩庆 高宏建 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

飞机作战生存力计算理论与方法 / 宋笔锋等著. —
北京:国防工业出版社,2011.3

ISBN 978-7-118-07253-2

I. ①飞... II. ①宋... III. ①军用飞机—计算方法
IV. ①V271.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 015576 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 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 9½ 字数 232 千字

2011 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

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列选出版。

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

第六届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海			
副主任委员	宋家树	蔡 镭	程洪彬	
秘书长	程洪彬			
副秘书长	邢海鹰	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)				
	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波

前 言

飞机的作战生存力是军用飞机躲避或者承受人为敌对威胁环境的能力。从广义的角度讲,飞机的作战生存力包含飞机对敌方武器系统的敏感性(含飞机被探测、被识别和被跟踪的特性等)、被敌方武器击中后的易损性以及损伤飞机的战场被修复特性等三个方面。

目前在国外,生存力已是作战飞机设计中要考虑的非常重要的因素之一。最新的文献甚至将生存力与飞机的性能、经济性、可靠性、维修性与保障性一起作为未来作战飞机的主要设计因素。最典型的例子是美国的 F-22,在设计与研制过程中全面实现了飞机的高生存力设计。美国在下一代作战飞机(包括固定翼飞机与旋翼机等)指标体系中更是提出了具体的生存力指标要求。

本书是西北工业大学飞机生存力技术研究所的全体研究人员近十年研究成果的结晶。与国内外同类著作相比,本书的特色之一是在吸收前人研究成果的基础上,解决了一些前人未解决的基本方法,建立了系统化的飞机易损性基本理论体系与方法;特色之二是考虑到未来作战飞机是在信息战条件下作战的实际情况,重点研究和提出了在分布式雷达探测系统下飞机被发现的时间和距离模型以及作战飞机的电子对抗特性评估模型与方法。对于目前飞机的信号特征(含雷达、红外、光和声响等)及相关的隐身技术等研究很少。对于作战飞机的战伤修复问题则由于篇幅所限没有涉及。

全书共分为 10 章。第 1 章介绍飞机生存力的基本概念与研究现状。第 2 章给出了飞机易损性建模方法。第 3 章是关于飞机的目标几何描述方法。第 4 章介绍飞机在非爆穿透物单次打击下

的易损性计算方法。第5章是关于飞机在非爆穿透物多次打击下的易损性计算方法。第6章给出了飞机杀伤的期望打击次数计算方法。第7章是关于飞机在导弹威胁下的易损性计算与分析方法。第8章给出了雷达恒虚警技术及探测概率计算的基本模型。第9章是关于飞机在分布式雷达探测下的探测概率计算方法。第10章是关于电子对抗保护下的大型军用运输机生存概率计算方法。

与同类研究相比,本书突出特点如下:

(1)提出了基于有限元模型的易损性建模方法,该方法可以考虑多种金属材料模型的建立、液体模型的建立、杀伤逻辑关系的表达等因素,同时将致命性部件与非致命性部件分别建模,所建立的模型客观且人为因素影响小。

(2)提出了飞机在非爆穿透物沿着平行射击线威胁下的几何描述方法——“平面射击线扫描法”,解决了目前几何描述方法的通用性问题,可以进行飞机遭受任意威胁方向攻击时部件之间存在任意重叠的几何描述。所提出的方法中,考虑了威胁的跳弹现象,使易损性计算更反映真实情况。该几何描述方法将易损性分析程序 FASTGEN(美国射击线发生程序)和 COVART(美国易损面积及维修时间计算程序)的部分功能融为一体,这样提供的几何描述结果比 FASTGEN 简单,易于分析人员使用,并可为后续章节易损性定量计算的进行提供预处理数据。

(3)发展了马尔可夫链法(Markov-Chain)及树图法(Tree-Diagram),解决了部件之间存在重叠情况的飞机多击中易损性精确计算问题。其次,提出飞机易损性分析的“放球入盒模型”及基于该模型的飞机多击中易损性计算的数值模拟方法,解决了精确计算方法(Markov-Chain 和 Tree-Diagram)当飞机多重易损部件(例如,余度部件)总数较多情况下的“组合爆炸”问题。在飞机的多击中易损性定量计算过程中,应根据计算机的配置,精确计算方法与数值模拟方法结合使用。

(4)对目前“飞机杀伤的期望打击次数”计算解决得不完善的

地方进行了研究,提出了两种改进的计算方法。一种为基于“放球入盒模型”的数值模拟方法,另一种是根据飞机多次打击累积杀伤概率推导的计算方法。这两种方法均解决了飞机存在多组多重易损部件、每组多重易损部件中的部件具有不同的易损面积、部件之间存在重叠情况下的“飞机杀伤期望打击次数”通用计算问题。

(5)根据导弹碎片的喷射状弹道,提出了导弹喷射碎片威胁下的飞机几何描述方法——“曲面射击线扫描法”,进而解决了导弹喷射碎片威胁下的多击中易损性精确计算问题。另外,基于等效单一易损面积,对飞机在导弹喷射碎片威胁下易损性计算的简易化方法进行了改进,使改进后的简易化方法计算误差大大减小。

(6)提出了飞机在爆炸冲击波威胁下的易损性包线绘制方法——“圆周扫描法”。该方法考虑了装药爆炸高度、装药质量及装药类型等因素的影响,可以提供在飞机典型爆炸平面上的冲击波易损性包线,直观地显示外部爆炸冲击波威胁下的飞机易损区域。

(7)用重要度抽样方法对探测系统在 Weibull 背景下的探测问题进行模拟求解,解决了常规方法无法对 Weibull 背景下的探测问题进行计算的问题。对海杂波背景下的探测问题进行了全面、系统的研究,对双门限处理器在海杂波背景下的探测概率求解方法进行了总结,并推导了适用于求解分布式探测系统探测性能的探测概率和虚警概率计算公式。

(8)推导了两种具有重要应用前景的分布式探测系统探测概率的具体算法——非相关累积情况和复合 K 杂波情况。分析了分布式探测系统组成单元被摧毁或失效情况下系统探测性能的变化情况。

(9)提出了红外诱饵保护下的大型军用运输机生存概率计算方法和基于脱靶距离的红外诱饵弹发射参数优化法。建立了红外干扰机对抗旋转扫描导引头的情况,指出了干扰可能出现的各种情况,并分析了每种情况下的干扰效果。

在本书中,关于飞机易损性相关章节的研究主要是由博士生裴扬和韩庆等具体完成的;关于飞机敏感性相关章节的研究主要是由博士生郭晓辉和高宏建等具体完成的。在本书的研究中,硕士生王晓红、杨文青、胡一繁、朱兵等都有自己的贡献。

本书中的研究得到了国家自然科学基金(No. 10372082)、航空基础科学基金(No. 97B53007)、航天科技创新基金和西北工业大学基础研究基金(No. NPU-FFR-JC200804 &No. NPU-FFR-JG20100221)、教育部博士点基金(No. 200806991002)、陕西省自然科学基金(No. SJ08A11)、中国博士后基金(No. 20060400301)以及国家相关预先研究计划的资助,在此表示感谢!

本书的出版得到了中国工程院陈一坚院士和空军工程大学张恒喜教授的支持和推荐,并提出了许多宝贵意见,特此致谢!感谢国防科技图书出版资金对本书出版的资助,也感谢国防工业出版社诸位对本书出版所付出的辛勤劳动。

由于时间仓促,水平有限,书中一定存在许多缺点和不足,恳请读者批评指正。

作者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 飞机作战生存力基本概念	1
1.2 易损性量度	3
1.2.1 碎片和弹丸冲击时的 $P_{k/h}$	4
1.2.2 易损面积描述	5
1.2.3 外部爆炸的易损性描述	6
1.3 易损性发展现状及计算的一般过程	8
1.3.1 飞机易损性建模	9
1.3.2 飞机几何描述方法	11
1.3.3 非爆穿透物单次打击易损性	12
1.3.4 非爆穿透物多次打击易损性	13
1.3.5 导弹威胁下的易损性	14
1.4 飞机敏感性概念	16
第 2 章 飞机易损性建模方法	21
2.1 收集资料	22
2.2 选择飞机的杀伤等级	22
2.2.1 损耗杀伤	22
2.2.2 迫降杀伤	23
2.2.3 任务放弃杀伤	23
2.3 飞机致命性部件与非致命性部件辨识	23

2.3.1	致命性部件分析的基本原则	24
2.3.2	飞行与任务基本功能	25
2.3.3	系统功能—基本功能关系	26
2.3.4	损伤模式及其影响分析 DMEA	27
2.3.5	损伤模式影响及致命性分析(DMECA)	34
2.3.6	部件杀伤与飞机杀伤的逻辑关系表达	38
2.4	飞机外形模型及部件模型的建立	39
2.4.1	建立飞机外形几何模型	40
2.4.2	建立部件模型	40
2.5	易损性模型的数据组织方法	40
2.5.1	飞机外形模型数据文件	40
2.5.2	部件模型数据文件	41
2.6	算例	42
第3章	飞机的通用几何描述方法	45
3.1	易损性定量计算对飞机几何描述的基本要求	45
3.2	几何描述的平面射击线扫描法	46
3.2.1	建立投影坐标系	47
3.2.2	确定平面网格的范围并产生射击线	47
3.2.3	判断射击线是否击中飞机或部件	49
3.2.4	穿透及跳弹方程	49
3.2.5	网格单元内飞机独立存在状态分析方法	56
3.2.6	射击线停机准则	62
3.2.7	几何描述数据计算	62
3.3	算例	65
3.3.1	算例 1	65
3.3.2	算例 2	68
3.3.3	算例 3	69

第 4 章	非爆穿透物单次打击的飞机易损性计算方法	73
4.1	26 个标准攻击方向定义	73
4.2	经典的单次打击易损性四种计算模型	74
4.2.1	无余度无重叠模型	76
4.2.2	无余度有重叠模型	79
4.2.3	有余度无重叠模型	81
4.2.4	有余度有重叠模型	83
4.3	飞机单次打击的易损性通用计算方法	84
4.4	部件单次打击的易损性定量计算方法	86
4.5	飞机单次打击下的“等杀伤概率图谱”绘制	87
4.6	算例	88
4.6.1	算例 1	88
4.6.2	算例 2	91
第 5 章	非爆穿透物多次打击的飞机易损性定量计算方法	93
5.1	经典的 Tree-Diagram 法	94
5.1.1	无余度情况	94
5.1.2	有余度情况	96
5.2	经典的 Markov-Chain 法	98
5.3	基于飞机独立存在状态的 Markov-Chain 法	102
5.4	基于飞机独立存在状态的 Tree-Diagram 法	104
5.5	解决组合爆炸问题的多击中易损性计算的 数值模拟法	107
5.5.1	建立分析模型及参考坐标系	108
5.5.2	部件杀伤判据	109
5.5.3	飞机杀伤判据	110
5.5.4	数值模拟法计算飞机多击中易损性	110

5.6	算例	110
5.6.1	算例 1	110
5.6.2	算例 2	117
5.6.3	算例 3	120
第 6 章	导致飞机杀伤的期望打击次数计算方法	123
6.1	基本概念	123
6.2	简单情形下的导致飞机杀伤的期望打击次数 经典公式	125
6.2.1	一组相同易损面积的多重易损部件情形	125
6.2.2	多组相同易损面积的多重易损部件情形	126
6.2.3	一组相同易损面积的多重易损部件情形 下的公式推导	127
6.3	导致飞机杀伤的期望打击次数计算的 Monte- Carlo 法	130
6.3.1	建立分析模型及参考坐标系	130
6.3.2	部件杀伤判据	132
6.3.3	飞机杀伤判据	133
6.3.4	数值模拟法计算导致飞机杀伤的 期望打击次数	133
6.4	基于飞机多次打击杀伤概率的计算方法	134
6.5	算例	135
6.5.1	算例 1	135
6.5.2	算例 2	137
6.5.3	算例 3	139
6.5.4	算例 4	139
第 7 章	导弹威胁下的飞机易损性计算方法	141
7.1	导弹威胁下的飞机易损性	141

7.2	导弹喷射碎片打击下的易损性计算方法	142
7.2.1	基本输入数据	142
7.2.2	碎片初速度及衰减规律	143
7.2.3	碎片与飞机交会分析	143
7.2.4	“曲面射击线扫描法”进行飞机几何描述	144
7.2.5	网格大小确定	146
7.2.6	喷射碎片多次打击易损性计算	147
7.2.7	一种改进的简化方法	147
7.2.8	方法适用范围说明	147
7.3	飞机的爆炸冲击波易损性分析方法	148
7.3.1	爆炸冲击波威胁下的飞机杀伤准则	149
7.3.2	飞机爆炸冲击波易损性包线的绘制流程	150
7.3.3	建立飞机原始模型	150
7.3.4	典型爆炸平面的选择	153
7.3.5	飞机表面面元致命性半径的确定	153
7.3.6	典型爆炸平面内截圆的绘制	153
7.3.7	“圆周扫描法”绘制易损性包线	154
7.4	算例	155
7.4.1	算例 1	155
7.4.2	算例 2	157
7.4.3	算例 3	158
第 8 章	雷达恒虚警技术及探测概率算法研究	161
8.1	雷达恒虚警技术	161
8.1.1	雷达检测原则	161
8.1.2	杂波干扰	163
8.1.3	恒虚警处理技术	165

8.2	雷达探测概率算法研究	167
8.2.1	探测概率求解方法	167
8.2.2	典型恒虚警处理器探测概率求解方法	170
8.2.3	重要度抽样方法	171
8.2.4	Weibull 背景杂波下探测概率计算方法	175
8.2.5	海杂波背景下探测概率计算方法	179
第9章	分布式雷达探测下的飞机探测概率算法研究	186
9.1	分布式探测系统的探测概率算法研究	186
9.1.1	分布式探测系统	186
9.1.2	分布式探测系统优化	187
9.1.3	分布式探测系统的探测概率	194
9.1.4	非相关累积情况	199
9.1.5	海杂波背景	203
9.2	飞机-雷达探测系统对抗分析若干模型研究	207
9.2.1	探测概率随距离的变化	208
9.2.2	发现时间和发现距离	211
9.2.3	相对发现时间和相对扫描次数	213
9.3	算例	215
9.3.1	探测概率-信噪比曲线	215
9.3.2	探测概率随距离的变化曲线	216
第10章	电子对抗 (ECM) 保护下的大型军用运输机	
	生存概率研究	231
10.1	威胁告警	232
10.2	红外对抗	237
10.2.1	红外诱饵弹对抗	237
10.2.2	红外干扰机对抗	246
10.3	雷达对抗	254

10.3.1	箔条干扰	254
10.3.2	箔条干扰效果评估	258
10.4	算例	259
10.4.1	算例 1	259
10.4.2	算例 2	262
10.4.3	算例 3	268
10.4.4	算例 4	270
参考文献		273