

徐浩军 郭辉 等著

# 空中力量体系对抗 数学建模与效能评估

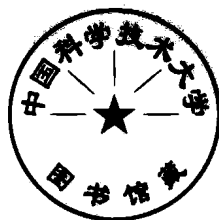


国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 空中力量体系对抗 数学建模与效能评估

徐浩军 郭辉 刘凌 李颖晖  
华玉光 张艳华 龚胜科 著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

空中力量体系对抗数学建模与效能评估/徐浩军等著. —北京:国防工业出版社,2010.10

ISBN 978-7-118-07027-9

I. ①空… II. ①徐… III. ①空战-数学模型 IV.  
①E844

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第182139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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 9 $\frac{1}{8}$  字数 236千字

2010年10月第1版第1次印刷 印数1—3000册 定价24.00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

# 前 言

在现代高技术战争条件下,随着战争立体性和纵深性的空前提高,空中力量已成为战争中首先使用、大规模使用和全过程使用的多功能力量,空中战场成为决定性的战场,制空权成为战争主动权的集中表现,空中火力成为联合作战火力打击的骨干和中坚,这已成为现代高技术战争的一条基本规律。空中力量是军事体系的重要组成部分,世界各军事强国都把空中力量的重要性提到一个非常高的位置上。在现代高技术条件特别是信息化条件下的局部战争中,空中力量的交战双方不再只是航空武器装备之间的对抗,更多情况下是空中力量体系与体系之间的对抗。空中力量体系对抗由于其重要性和复杂性,成为了复杂军事系统领域研究的热点和难点。空中力量体系对抗过程的数学建模和空中力量体系对抗的效能评估等问题,是空中力量体系对抗迫切需要解决的关键问题。这些问题的研究来自于对物理层面军事学问题的理论提炼,经过典型化、数理化与模型化的数学提炼,在数学层面上对体系对抗过程建模与效能评估开展理论研究,理论研究成果又可对物理层面的军事学问题提供实际指导。

本书综合考虑空中力量体系对抗过程中的随机性和模糊性等复杂性因素,应用军事概念建模和主动元建模等理论与方法,建立了空中力量体系对抗的军事概念模型和主要作战阶段的主动元模型,进而利用马尔科夫状态转移链和元胞自动机理论分别建立了相应的空中力量体系对抗过程的动态聚合模型。提出了军事复杂体系效能空间的概念,对空中力量体系对抗的效能空间进行了探

索性分析,建立了空中力量体系对抗效能的探索性评估仿真框架。建立了预警机作战效能评估指标体系,应用区间数理论对预警机的作战效能评估问题进行了研究,建立了航空信息支援系统能力评估的指标体系,提出了区间加权矢量和的指标聚合方法,采用不确定语言对想定的航空信息支援系统进行了能力评估。对多元兰彻斯特方程和战役优势参数进行了改进,在此基础上分别对空战进程预测和作战飞机的优化配置问题进行了研究。建立了几种新的空战目标威胁的不确定性评估模型和智能评估模型。提出了一种改进的自适应混合粒子群优化算法,并利用其对协同多目标攻击空战决策问题进行了研究。

本书的编撰,是根据作者在飞行器作战效能评估领域多年的科研实践所做的总结、浓缩和提炼。作者希望此书能为读者提供军事复杂体系建模和效能评估等方面的参考。

本书第1、2、10章由徐浩军和郭辉主笔,第3、4章由李颖晖和华玉光主笔,第8、9、11、12章由郭辉和张艳华主笔,第5、6、7、13章由刘凌和龚胜科主笔。全书由徐浩军统一定稿。

由于编者的水平有限,书中难免有错漏之处,敬请读者批评指正。

编者

2010年4月于西安

# 目 录

<b>第1章 空中力量体系概述</b> .....	1
1.1 空中力量的重要性 .....	1
1.2 空中力量体系的组成 .....	2
1.3 空中力量体系对抗过程的复杂性 .....	3
1.3.1 复杂性分析的相关概念 .....	3
1.3.2 空中力量体系的静态复杂性 .....	4
1.3.3 空中力量体系对抗过程的动态复杂性 .....	5
<b>第2章 空中力量体系对抗过程的军事概念建模</b> .....	7
2.1 军事概念建模理论 .....	7
2.1.1 军事概念建模的相关概念 .....	7
2.1.2 军事概念建模需求的提出 .....	9
2.2 面向仿真模型的军事概念建模方法 .....	10
2.3 基于信息获取的概念模型结构化描述 .....	12
2.3.1 组成描述 .....	12
2.3.2 功能描述 .....	12
2.3.3 行为描述 .....	14
2.4 基于图论的概念模型形式化描述 .....	16
2.4.1 图论基本理论 .....	17
2.4.2 基于UML的静态形式化描述 .....	18
2.4.3 基于Petri网络的动态形式化描述 .....	20
2.5 基于相对时间尺度法的概念模型数理化描述 .....	22
2.5.1 主要作战阶段的划分 .....	24

2.5.2	作战阶段持续时间标么值 .....	24
2.5.3	作战过程的影响因素处理 .....	26
2.5.4	相关限制条件和简化假设 .....	27
<b>第3章</b>	<b>主要作战阶段的主动元建模 .....</b>	<b>28</b>
3.1	元建模理论 .....	28
3.1.1	元建模的相关概念 .....	28
3.1.2	元建模需求的提出 .....	29
3.1.3	传统的元建模方法 .....	30
3.2	主动元建模理论 .....	32
3.2.1	主动元建模框架 .....	32
3.2.2	主动元模型结构 .....	33
3.2.3	作战因果关系的知识来源 .....	34
3.3	主要作战阶段的主动元建模方法 .....	35
3.3.1	选择关键输入因子 .....	36
3.3.2	建立因子关系树 .....	38
3.3.3	分析内部数学规律 .....	39
3.3.4	确定模型数学形式 .....	40
3.3.5	校验模型一致性 .....	42
3.4	空地对抗阶段主动元建模实例 .....	43
<b>第4章</b>	<b>空中力量体系对抗过程的动态聚合建模的探索 .....</b>	<b>49</b>
4.1	模型聚合基本理论 .....	49
4.2	基于马尔科夫链的动态聚合模型探索 .....	51
4.2.1	马尔科夫链基本理论 .....	51
4.2.2	基于马尔科夫链的动态聚合模型描述 .....	52
4.3	基于元胞自动机的攻防对抗聚合建模方法探索 .....	56
4.3.1	元胞自动机基本理论 .....	57
4.3.2	基于元胞自动机的攻防对抗聚合模型描述 .....	61
4.4	基于马尔科夫链的动态聚合建模实例 .....	65

<b>第 5 章 军事复杂体系的效能空间</b>	68
5.1 系统效能分析方法	68
5.1.1 SEA 方法的基本原理	68
5.1.2 SEA 方法的分析过程	69
5.1.3 SEA 方法存在的难点与不足	70
5.2 复杂体系的效能空间	70
5.2.1 效能空间的概念	70
5.2.2 效能空间的拓扑模型	71
5.3 效能空间分析	77
5.3.1 效能空间的宏观分析	77
5.3.2 非对抗态势下的效能空间分析	78
5.3.3 对抗态势下的效能空间分析	78
<b>第 6 章 空中力量体系对抗效能空间的探索性分析和建模</b>	81
6.1 探索性分析方法概述	81
6.1.1 基本概念与背景	81
6.1.2 探索性分析的类型	83
6.1.3 探索性分析方法的主要过程	84
6.2 空中力量体系对抗的效能空间	87
6.2.1 效能空间的构建	87
6.2.2 效能空间的拓扑模型	88
6.2.3 对抗态势下空中力量体系效能空间分析	88
6.3 效能空间的探索性分析	89
6.3.1 确定体系对抗效能空间的决策目标	90
6.3.2 确定探索性分析关键因素	90
6.4 效能空间的不确定性处理和探索	90
6.4.1 不确定条件下的决策	90
6.4.2 多元、全过程不确定性处理	93
6.4.3 基于鲁棒决策的效能空间探索	99
6.5 效能空间的探索性分析模型框架	108



6.5.1	多分辨率模型 .....	108
6.5.2	探索性分析模型 .....	114
6.5.3	探索性分析元模型 .....	124
<b>第7章</b>	<b>空中力量体系对抗效能的探索性仿真和评估 .....</b>	<b>132</b>
7.1	探索性评估指标体系 .....	132
7.1.1	效能评估指标的选取原则 .....	132
7.1.2	效能评估指标体系的层次 .....	133
7.1.3	常用的军事复杂体系效能指标 .....	133
7.1.4	空中力量体系对抗效能的评估指标体系 .....	134
7.2	探索性仿真评估模型的建立 .....	135
7.2.1	探索性仿真的多分辨率建模方法 .....	135
7.2.2	探索性仿真评估框架 .....	139
7.2.3	探索性评估模型 .....	140
7.3	探索性仿真评估模型的校准 .....	141
7.3.1	高、低分辨率模型相互校准 .....	141
7.3.2	探索性仿真评估模型评价准则 .....	146
<b>第8章</b>	<b>基于区间数的预警机作战效能评估研究 .....</b>	<b>147</b>
8.1	区间数及其运算 .....	148
8.1.1	区间数概念 .....	148
8.1.2	区间数的运算 .....	148
8.2	预警机作战效能评估指标体系的建立 .....	149
8.2.1	预警机的主要任务 .....	149
8.2.2	预警机的系统组成 .....	150
8.2.3	预警机作战效能评估指标体系 .....	152
8.3	效能指标的规范化与聚合 .....	153
8.3.1	定性指标的规范化 .....	154
8.3.2	定量指标的规范化 .....	154
8.3.3	指标的聚合 .....	156
8.4	指标权重的确定 .....	158

8.4.1	定性指标权重的确定 .....	158
8.4.2	定量指标权重的确定 .....	160
8.5	评估实例 .....	163
<b>第9章</b>	<b>基于不确定语言的航空信息支援系统能力评估研究 .....</b>	<b>165</b>
9.1	语言变量 .....	165
9.1.1	语言评估标度及其运算 .....	166
9.1.2	语言变量的转换 .....	167
9.2	不确定语言变量的运算 .....	167
9.3	基于不确定语言的航空信息支援系统能力评估 .....	168
9.3.1	航空信息支援系统能力评估指标体系的建立 .....	168
9.3.2	指标体系中各指标权重的确定 .....	172
9.3.3	指标的聚合方法 .....	173
9.4	评估实例 .....	174
<b>第10章</b>	<b>空战进程预测与作战飞机优化配置研究 .....</b>	<b>176</b>
10.1	兰彻斯特方程理论 .....	176
10.1.1	经典兰彻斯特方程 .....	177
10.1.2	兰彻斯特方程的推广 .....	179

10.3.3	模型的求解方法 .....	195
10.3.4	算例.....	196
<b>第 11 章 空战目标威胁的不确定性评估和智能评估方法</b>		
	<b>研究 .....</b>	<b>201</b>
11.1	空战目标威胁评估问题描述 .....	201
11.1.1	空战目标威胁评估的影响因素 .....	201
11.1.2	空战目标威胁评估的不确定性 .....	203
11.1.3	空战目标威胁评估的常用方法 .....	204
11.1.4	空战目标威胁评估指标的确定 .....	204
11.2	基于区间数的空战目标威胁评估 .....	208
11.2.1	区间数的排序 .....	208
11.2.2	基于区间数的空战目标威胁评估模型 .....	209
11.2.3	威胁评估实例 .....	210
11.3	基于区间数 TOPSIS 法的空战目标威胁评估 .....	212
11.3.1	TOPSIS 方法原理.....	212
11.3.2	基于区间数 TOPSIS 法的空战目标威胁评估 模型.....	214
11.3.3	威胁评估实例 .....	216
11.4	基于离差最大化的空战目标威胁评估 .....	217
11.4.1	离差最大化方法原理 .....	217
11.4.2	基于离差最大化的空战目标威胁评估 模型.....	220
11.4.3	威胁评估实例 .....	220
11.5	基于回归型支持向量机的空战目标威胁评估.....	221
11.5.1	统计学习理论 .....	222
11.5.2	回归型支持向量机 .....	227
11.5.3	基于回归型支持向量机的空战目标威胁评估 模型.....	232
11.5.4	威胁评估实例 .....	232

<b>第 12 章 基于改进粒子群算法的协同多目标攻击空战决策</b>	235
12.1 粒子群优化算法	236
12.1.1 算法原理	236
12.1.2 数学描述	238
12.1.3 算法流程	239
12.2 粒子群优化算法的改进	239
12.2.1 惯性权重的自适应调节	240
12.2.2 交叉和变异操作的引入	241
12.2.3 算法测试	242
12.3 协同多目标攻击空战决策数学模型	243
12.3.1 空战决策数学模型的建立	243
12.3.2 空战决策数学模型的简化	244
12.4 基于 AHPSO 的协同多目标攻击空战决策	249
12.4.1 算法步骤	249
12.4.2 仿真实例	250
<b>第 13 章 空中力量体系对抗效能的探索性仿真评估实例</b>	253
13.1 仿真实例的研究背景	253
13.1.1 仿真实例需求的提出	253
13.1.2 仿真实例要实现的目标	255
13.2 体系攻防对抗战役探索性分析仿真模型	256
13.2.1 模型基本假设	256
13.2.2 仿真模型的构建	257
13.2.3 探索性仿真评估系统	260
13.3 体系攻防对抗战役探索性仿真及结果分析	262
13.3.1 仿真实验条件	262
13.3.2 作战想定方案	263
13.3.3 攻防对抗战役高分辨率仿真结果分析	265

13.3.4	攻防对抗战役低分辨率模型计算结果 分析.....	267
13.4	体系攻防对抗探索性评估与优化分析 .....	268
13.4.1	空中力量体系攻防对抗效能探索性评估 .....	268
13.4.2	空中力量体系结构参数优化 .....	269
13.4.3	空中力量体系优化建议 .....	272
<b>参考文献</b>	.....	<b>274</b>

# 第 1 章 空中力量体系概述

军事体系对抗构成的系统是一个开放的复杂巨系统。当前,随着新军事变革的不断深入,装备逐渐向集约化、集成化和复杂化的方向发展,战场环境和作战条件日趋错综复杂,在对抗过程中各类军事装备将会构成一个庞大的复杂系统。军事体系对抗过程具有规模巨大、层次多样、开放性和动态变化等特点。特别是在信息化条件下,体系对抗过程是在信息和网络基础上进行的,中间存在着大量的不确定因素,这些因素具有随机性和模糊性等特点,它们相互影响,牵一发而动全局。对于这种军用复杂开放巨系统过程建模与总体效能评估等问题的理论研究,由于其重要的军事意义,近几年以来在数理军事学界掀起了一股强劲的学术高潮,相关的研究理论和方法多种多样,但大多还不够成熟,有待于进一步探索、研究和完善。

## 1.1 空中力量的重要性

空中力量是军事体系中重要组成部分。美国的兰德(RAND)公司采用联合一体化应急作战模型,对中国台湾海峡可能发生的战争推演结果表明,空中力量是其中 7 个影响因素中的首要因素,空中力量的取胜与否几乎决定了战争全局的胜负。近 20 多年来的局部战争也表明,空中力量起到了影响全局胜负的关键作用。世界各军事强国都把空中作战的重要性提到一个非常高的位置上。兰德公司在《恐怖的海峡》报告中提出了“在整个战役中,争夺制空权的战斗是关键的关键,制空权是成功实施两栖登陆和空

降作战绝对必需的先决条件”的论断。在海湾战争中,空中战场的较量成为具有决定意义的较量,战争空中化凸现;在科索沃战争中,实现人类历史上第一场仅由空袭便达成战争目的的大规模战争;在阿富汗战争中,仅仅使用空中力量在 20 天内就漂亮地结束了战争。从海湾战争的基本以空中力量参战,科索沃战争的主要以空中力量参战,到阿富汗战争的完全以空中力量参战,这些局部战争表明:空中力量已经不再是其他军种的附庸,它自己就可以打赢一场战争。

随着当前军事斗争形势的日益严峻,未来的战争一旦打响,夺取制空权、压制敌防空火力和远程攻击重要目标将成为获胜与否的决定性因素,空中力量则是必须首先使用和全程使用,甚至是唯一使用的重要手段。可以预见,在一体化战争条件下,随着现代战争立体性和纵深性的空前提高,空中力量将成为战争中首先使用、大规模使用和全过程使用的多功能力量,大量高新技术引入航空领域,空中力量的强弱几乎可以决定一场战争的胜负。

## 1.2 空中力量体系的组成

武器装备体系是为适应军事斗争需要,由相互关联、功能互补的各种武器装备,按照作战原则综合集成的有机整体。相应地,空中力量体系是为达到空中战役目的,由空空、空地、地空作战和信息支援等装备子系统构成的既相互联系又相互制约的复杂系统,它是具备火力打击和信息对抗等作战能力的空中力量整体。

从战役层次上来说,空中力量体系在未来战争中承担的主要任务是:夺取制空权、空中进攻、空中封锁和防空作战等。为完成这些作战任务,空中力量体系的战役行动可归结为空中进攻战役和防空战役两种。空中进攻战役主要包括情报侦察、指挥控制、电子战、空空作战、空地突防、对地攻击等主要作战阶段;防空战役主要包括预警探测、指挥控制、反电子干扰与压制、空中拦截、地面防空等主要作战阶段。在主要作战阶段中,部分空中进攻作战阶段

与防空作战阶段对空中力量的需求是基本相同的。所以,从空中力量体系建设的角度,以上两种典型战役的作战过程可以概括为:情报侦察、预警探测、指挥控制、电子对抗、空空作战、对地攻击和地面防空等主要作战阶段,而每一个作战阶段都要有相应的装备来支撑,这就构成了完成该作战阶段任务的装备子系统。按照作战过程各主要阶段构成的装备子系统组合,就是空中力量体系。

## 1.3 空中力量体系对抗过程的复杂性

由于空中力量体系的综合程度高,组成成分多,展开的空域宽广,还由于体系对抗过程时空变化快、随意性大等特点,它既具有静态复杂性,还具有动态复杂性,因此空中力量体系是一个特殊的复杂军事系统。它的特殊复杂性决定了要对其对抗过程建模问题进行研究,就需要在对其复杂性进行分析的基础上,提出空中力量体系对抗研究方法。

### 1.3.1 复杂性分析的相关概念

困扰军事仿真深入发展的“瓶颈”,毫无疑问,就是军事系统本身、军事行为过程的复杂性。要攻克和解决军事仿真的本质难题,就必须敢于直面和攻克军事系统的复杂性。

这里首先对复杂性分析中的相关概念进行解释。

#### 1. 复杂性

钱学森认为“所谓复杂性实际是开放的复杂巨系统的动力学”,即构成元素不仅数量巨大,而且种类极多,彼此差异很大。它们按照等级层次方式整合起来,不同层次之间往往界限不清,甚至包含哪些层次有时并不清楚。

#### 2. 复杂系统

复杂系统是指具有大量交互成分,内部关联复杂、不确定,总体行为具有非线性,即不能通过系统的局部特性形式或抽象地描述整个系统特性的系统。复杂系统的概念包括以下几个要点:系



统的子系统间可以有各种方式的通信;子系统的种类多,各有其定性模型;各子系统中的知识表达不同,以各种方式获取知识;系统中的子系统的结构随着系统的演化会有变化,所以系统的结构是不断改变的。

### 3. 军事系统复杂性

军事系统复杂性是指军事系统内部结构、关系、组分、演化规律的认识困难程度或局限于现有方法、手段、工具的制约对象本身的难以理解性,或者隐含“涌现性”、反“还原性”的品质特性。

### 4. 复杂军事系统

复杂军事系统是指复杂性高的,能够独立履行军事职能的系统,如空战系统、陆战系统、海战系统、信息对抗系统、后勤保障系统等。

空中力量体系是一个特殊的复杂军事系统,是因为它除了具有静态复杂性之外,其对抗过程还具有动态复杂性。下面就从空中力量体系的静态复杂性和体系对抗过程的动态复杂性两个方面进行分析。

## 1.3.2 空中力量体系的静态复杂性

空中力量体系的静态复杂性主要是从系统的结构和组成等方面来讲,它的复杂性主要包括以下几个方面。

### 1. 系统组成复杂

空中力量体系包括主要的作战平台,如战斗机、歼击机、轰炸机、歼击轰炸机、运输机、加油机、预警机等;包括侦察监视、预警探测和电子对抗等信息化装备设施;还包括综合保障、人为决策、战场环境等,组分数量为庞大,构成极为复杂。

### 2. 组分关系复杂

空中力量体系所包括的装备设施之间有着错综复杂的相互关系,如作战平台之间的协同关系、信息化装备的辅助关系、综合保障、人为决策和战场环境的影响关系等,不能用简单的方法来描述。