

# 导弹武器系统的效能及其分析

## Effectiveness Analysis for Missile Weapon Systems

---

李廷杰 编著

国防工业出版社

导弹武器系统的效能  
及其分析  
Effectiveness Analysis  
for Missile Weapon Systems

李廷杰 编著

国防工业出版社

·北京·

## 图书在版编目(CIP)数据

导弹武器系统的效能及分析/李廷杰编著. —北京:  
国防工业出版社, 2000. 8

ISBN 7-118-02278-0

I. 导… II. 李… III. 导弹-系统分析  
IV. TJ760.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 14009 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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 12 306 千字

2000 年 8 月第 1 版 2000 年 8 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:24.00 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,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. 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,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防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,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,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,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工业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 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾铎
秘书长	崔士义			
委员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

## 前 言

武器系统的效能是该系统完成给定作战任务的能力,它是规划、研制、生产和使用武器系统所追求的总目标。

美国和苏联从 20 世纪 60 年代起,投入了大量的人力和财力,对武器系统的效能进行了系统深入的研究。其成果在武器系统的规划、研制、配置、部署和作战应用中起了显著的作用,大大推动了武器装备的发展。

效能是整个武器系统的综合性指标,它涉及到大量的数学基础和武器装备的各种专门知识。它所用到的数学基础,主要有概率论及数理统计、对策论、排队论、误差理论等。它所用到的武器装备专门知识,以导弹武器系统而言,主要有空气动力学、飞行力学、制导原理、发动机原理、战斗部和引信的工作原理、目标的辐射特性和反射特性以及易损特性等。

本书自始至终以携带破片杀伤型战斗部的防空导弹武器系统为例,比较系统、深入地讨论了该系统效能所涉及的各方面的问题。之所以选取这类导弹作为武器系统效能的研究对象,是因为它涉及的问题比较广泛和复杂。尽管如此,书中所用的分析问题的方法和处理问题的思路仍不失一般性。

导弹武器系统的杀伤概率计算在系统的效能计算中起着关键的作用。在国际上,真正意义上的导弹杀伤概率计算方法一直是保密的,几乎看不到这方面公开发表的书籍和资料。针对具体导弹实际具有的杀伤概率的计算方法,是本书讨论的主要内容之一。

导弹武器系统的效能只有与发射区和杀伤区紧密地结合在一起,才能真正反映武器系统的综合作战能力,才能成为评价武器系统优劣的最主要的综合性指标。也只有这样,才能使武器系统的

效能得到充分的发挥。因此,效能和杀伤概率发射区或杀伤区也是本书讨论的主要内容之一。

本书主要讨论三个问题:其一是导弹武器系统的效能及其分析(第1,6,7章);其二是导弹武器系统的杀伤概率计算模型(第2~5章);其三是效能和杀伤概率发射区或杀伤区(第7章)。

无论是从事武器装备研制的人员,还是部队从事武器装备论证、订货的人员,以及作战指挥的人员,都应该了解和掌握武器系统的效能及其分析。

本书主要以导弹武器研制的总体设计人员,部队论证、订货和作战指挥人员为对象,它可作为上述人员和其他武器装备的研制和使用人员以及高等院校有关专业本科生和研究生的一本有益的参考书。

在本书的编著过程中,作者曾参阅了国内外许多专家学者的文章和书籍,在此谨向他们表示感谢。

由于水平所限,书中定有不妥甚至错误之处,恳请读者不吝指正。

作者



# 目 录

第 1 章 武器系统的效能 .....	1
1.1 基本概念 .....	1
1.1.1 系统效能的概念 .....	1
1.1.2 系统效能的结构 .....	4
1.1.3 系统效能的量度准则 .....	10
1.1.4 系统效能的数学模型 .....	14
1.1.5 系统效能的计算方法 .....	34
1.1.6 武器系统效能计算的主要内容 .....	47
1.1.7 武器系统的“效能”与“射击效率”之比较 .....	55
1.2 地空导弹武器系统效能的计算模型 .....	58
1.2.1 导弹波道不能转换的武器系统 .....	59
1.2.2 导弹波道能够转换的武器系统 .....	63
1.2.3 多发导弹同时合用一个波道的武器系统 .....	67
1.3 攻防对抗及其模拟 .....	68
1.3.1 攻防对抗与战争 .....	68
1.3.2 攻防对抗与武器系统效能 .....	69
1.3.3 攻防对抗的方式 .....	70
1.3.4 对抗武器的选择和分配 .....	70
1.3.5 攻防对抗物理模型的确定 .....	75
1.3.6 攻防对抗的模拟 .....	76
1.4 防空导弹武器系统杀伤概率的基本表达式 .....	84
1.4.1 目标相对速度坐标系 .....	84
1.4.2 单发导弹杀伤概率的基本表达式 .....	84
第 2 章 导弹武器系统的制导精度 .....	88
2.1 制导误差产生的原因和弹道的分类 .....	88

2.1.1	制导误差产生的原因 .....	88
2.1.2	弹道的分类 .....	89
2.2	制导误差及其分类 .....	90
2.2.1	制导误差和脱靶量 .....	90
2.2.2	制导误差的分类 .....	90
2.2.3	制导误差与其各个组成部分之间的关系 .....	93
2.2.4	与制导误差有关的名词和术语 .....	95
2.3	制导误差的分布规律 .....	97
2.3.1	一般情况 .....	97
2.3.2	特殊情况 .....	99
2.4	制导误差的各种表示方法 .....	101
2.4.1	系统误差的表示 .....	101
2.4.2	随机误差的表示 .....	101
2.4.3	随机误差各主要指标之间的关系 .....	104
2.5	制导误差的确定方法 .....	106
2.5.1	实验统计法 .....	106
2.5.2	实验—理论法 .....	108
2.5.3	解析法 .....	108
2.5.4	计算机仿真法 .....	108
2.6	动态误差的数学模型 .....	109
2.6.1	遥控制导导弹的动态误差 .....	109
2.6.2	自动寻的导弹的动态误差 .....	118
2.7	单发导弹命中给定区域的概率 .....	121
2.7.1	单发导弹命中给定半径圆内的概率 .....	122
2.7.2	单发导弹命中复杂图形区域的概率 .....	129
<b>第3章</b>	<b>战斗部、引信及引战配合特性 .....</b>	<b>131</b>
3.1	战斗部特性 .....	131
3.1.1	破片杀伤型战斗部 .....	131
3.1.2	连续杆型战斗部 .....	141
3.1.3	定向破片杀伤型战斗部 .....	144
3.2	引信特性 .....	145
3.2.1	无线电引信 .....	145

3.2.2	红外线引信	148
3.2.3	激光引信	150
3.3	破片的运动规律和战斗部的动态杀伤区	151
3.3.1	静态下破片的运动规律	152
3.3.2	动态下破片的运动规律	156
3.3.3	战斗部的动态杀伤区	157
3.4	引战配合特性	166
3.4.1	战斗部有效启爆区	166
3.4.2	引信实际引爆区	171
3.4.3	引战配合特性及其量度	178
<b>第4章</b>	<b>目标坐标杀伤规律</b>	<b>184</b>
4.1	影响因素	184
4.2	目标的易损性	185
4.3	破片杀伤型战斗部的杀伤方式	188
4.3.1	爆轰杀伤	188
4.3.2	破片杀伤	190
4.4	单块破片的杀伤概率	192
4.4.1	单块破片的击穿杀伤概率	192
4.4.2	单块破片的引燃杀伤概率	193
4.4.3	单块破片的引爆杀伤概率	194
4.5	目标坐标杀伤规律的表达式	194
4.6	击中某舱段破片数的数学期望	199
4.6.1	应用球形投影仪的模拟试验法	199
4.6.2	解析法	201
4.6.3	几何作图法	207
4.7	目标条件坐标杀伤规律的近似公式	208
<b>第5章</b>	<b>防空导弹杀伤概率的计算模型</b>	<b>211</b>
5.1	积分限的确定	211
5.1.1	$x$ 积分限的确定	211
5.1.2	$y$ 和 $z$ 积分限的确定	212
5.1.3	$r$ 和 $\eta$ 积分限的确定	212
5.2	单发导弹对单个目标的杀伤概率	213

5.2.1	无系统误差的情况	213
5.2.2	有系统误差的情况	218
5.3	多发导弹对单个目标的杀伤概率	220
5.4	多发导弹对群目标的杀伤概率	223
5.4.1	多发导弹对疏散型群目标的杀伤概率	224
5.4.2	多发导弹对密集型群目标的杀伤概率	226
<b>第 6 章</b>	<b>导弹武器系统的可靠性和维修性</b>	<b>228</b>
6.1	基本概念	228
6.1.1	可靠性与维修性的定义和意义	228
6.1.2	故障、失效及其分类	229
6.1.3	可靠性和维修性的主要指标	231
6.1.4	可靠性主要指标的数学表示	234
6.1.5	可靠性工程与维修性工程	240
6.2	系统可靠性的计算模型	242
6.2.1	系统的可靠性框图	242
6.2.2	串联系统的可靠性计算模型	251
6.2.3	并联系统的可靠性计算模型	254
6.2.4	旁联系统的可靠性计算模型	257
6.2.5	$n$ 取 $r$ 系统的可靠性计算模型	258
6.2.6	表决系统的可靠性计算模型	261
6.2.7	组合系统的可靠性计算模型	262
6.2.8	复杂系统的可靠性计算模型	264
6.3	维修性常用指标的表达式和关系	272
6.3.1	维修度 $M(\tau)$	272
6.3.2	维修密度函数 $m(\tau)$	273
6.3.3	修复率 $\mu(\tau)$	273
6.3.4	平均修复时间 MTTR	275
<b>第 7 章</b>	<b>效能和杀伤概率发射区与杀伤区</b>	<b>276</b>
7.1	地空导弹武器系统的杀伤区和发射区	276
7.1.1	杀伤区	276
7.1.2	发射区	295
7.2	空空导弹武器系统的攻击区	300

7.2.1	攻击区的概念	300
7.2.2	影响攻击区的主要因素	301
7.3	引战配合特性确定的导弹发射区	326
7.3.1	特征相对速度	326
7.3.2	导弹的发射区	329
7.3.3	实例	332
7.4	杀伤概率发射区和效能发射区	338
7.4.1	杀伤概率发射区	338
7.4.2	效能发射区	351
附录 1	$P=1-e^n$ 数值表	353
附录 2	椭圆散布且无系统误差时给定圆内的落入概率表	
	$\left[ a = \frac{R}{E_y} \text{ 或 } \frac{R}{E_z}; b = \sqrt{1 - \frac{E_z^2}{E_y^2}} \text{ 或 } \sqrt{1 - \frac{E_y^2}{E_z^2}} \right]$	355
附录 3	拉普拉斯函数 $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 数值表	358
附录 4	一阶汉克尔函数表	359
附录 5	$J_e(K, \tau) = \int_0^\tau e^{-t} \cdot I_0(K, t) dt$ 函数表	360
	参考文献	361

# Contents

<b>Chapter 1 Effectiveness of Weapon Systems</b> .....	1
1.1 Basic Concepts .....	1
1.1.1 Concepts of System Effectiveness .....	1
1.1.2 Structure of System Effectiveness .....	4
1.1.3 Measure Standards of System Effectiveness .....	10
1.1.4 Mathematic Models of System Effectiveness .....	14
1.1.5 Calculating Methods of System Effectiveness .....	34
1.1.6 Main Calculating Contents of Weapon System Effectiveness .....	47
1.1.7 Compare Effectiveness with Fire Effectiveness for Weapon System .....	55
1.2 Calculating Models of Effectiveness for the Surface to Air Missile Weapon System .....	58
1.2.1 Unchangeable Guiding Way of the Missile .....	59
1.2.2 Changeable Guiding Way of the Missile .....	63
1.2.3 One Guide Way Used as Multiple Missile .....	67
1.3 War Gaming and Its Simulation .....	68
1.3.1 War and War Gaming of Offensive and Defensive .....	68
1.3.2 Effectiveness of Weapon System and War Gaming of Offensive and Defensive .....	69
1.3.3 Methods of War Gaming of Offensive and Defensive .....	70
1.3.4 Selectic ns and Distributions for War Gaming Weapon System .....	70
1.3.5 Determining Physics Model of War Gaming for Offensive and Defensive .....	75
1.3.6 War Gaming Simulation for Offensive and Defensive .....	76

1.4	Basic Expressions of Kill Probability for the Air Defence Missile .....	84
1.4.1	The Target Relative Velocity Coordinate System .....	84
1.4.2	Basic Expressions of Kill Probability for One-Missile .....	84
<b>Chapter 2</b>	<b>Guidance Accuracy for Missile Weapon System .....</b>	<b>88</b>
2.1	Occurring Causes of Guidance Deviation and Classifications of Trajectories .....	88
2.1.1	Occurring Causes of Guidance Deviation .....	88
2.1.2	Classifications of Trajectories .....	89
2.2	Guidance Deviation and Its Classifications .....	90
2.2.1	Guidance Deviation .....	90
2.2.2	Classifications of Guidance Deviation .....	90
2.2.3	Relations of Guidance Deviation with Its Components .....	93
2.2.4	Terminologies of Guidance Deviation .....	95
2.3	Distributions of Guidance Deviation .....	97
2.3.1	General Case .....	97
2.3.2	Special Case .....	99
2.4	Expression Methods of Guidance Deviation .....	101
2.4.1	Expression Methods of System Deviation .....	101
2.4.2	Expression Methods of Random Deviation .....	101
2.4.3	Relations of Main Indexes for Random Deviation .....	104
2.5	Determination Methods of Guidance Deviations .....	106
2.5.1	The Experiment Statistics Method .....	106
2.5.2	The Experiment—Theory Method .....	108
2.5.3	The Analytic Method .....	108
2.5.4	The Computer Simulation Method .....	108
2.6	Mathematic Models of Dynamic Deviation .....	109
2.6.1	Dynamic Deviation of the Telecontrol Guidance Missile .....	109
2.6.2	Dynamic Deviation of the Homing Guidance Missile .....	118
2.7	Hitting Probability of One-Missile for the Given Region .....	121
2.7.1	Hitting Probability of One-Missile for a Circular-Shaped	

Region .....	122
2.7.2 Hitting Probability of One-Missile for a Complicated Shped Region .....	129
<b>Chapter 3 Warhead, Fuze and Coordination of Fuze and Warhead</b> .....	131
3.1 Characteristic of Warhead .....	131
3.1.1 The Fragmentation Kill Warhead .....	131
3.1.2 The Continuons Rod Warhead .....	141
3.1.3 The Orientation Fragment Warhead .....	144
3.2 Characteristic of Fuze .....	145
3.2.1 The Radio Fuze .....	145
3.2.2 The Infrared Fuze .....	148
3.2.3 The Laser Fuze .....	150
3.3 Movement of a Fragment and Dynamic Lethal Area of Warhead .....	151
3.3.1 Static Movement of a Fragment .....	152
3.3.2 Dynamic Movement of a Fragment .....	156
3.3.3 Dynamic Lethal Area of Warhead .....	157
3.4 Coordination of Fuzy and Warhead .....	166
3.4.1 Effective Starting Area of Warhead .....	166
3.4.2 Real Detonating Area of Fuze .....	171
3.4.3 Coordination of Fuze and Warhead and Its Measurement .....	178
<b>Chapter 4 Coordinate Kill Law of Target</b> .....	184
4.1 Influences of Various Factors .....	184
4.2 Target Vulnerability .....	185
4.3 Kill Methods of the Fragmentation Kill Warhead .....	188
4.3.1 Detonation Effect .....	188
4.3.2 Fragmentation Effect .....	190
4.4 Kill Probability of One-Fragment .....	192
4.4.1 Penetrating Kill Probability of One-Fragment .....	192
4.4.2 Incendiary Kill Probability of One-Fragment .....	193
4.4.3 Initiating Kill Probability of One-Fragment .....	194
4.5 Expressions of Target Coordinate Kill Law .....	194



4.6	Expectation Value of Fragments of Hitting	
	Arbitrary Cabin .....	199
4.6.1	The Simulation Method Used Spherical Projector .....	199
4.6.2	The Analytical Method .....	201
4.6.3	The Geometric Figuration Method .....	207
4.7	Approximation Formulas of Target Coordinate	
	Kill Law .....	208
<b>Chapter 5</b>	<b>Calculating Models of Kill Probability for the</b>	
	<b>Antiaircraft Missile Weapon</b> .....	211
5.1	Determination Methods of Integral Interval .....	211
5.1.1	The Integral Interval of $x$ Coordinate .....	211
5.1.2	The Integral Interval of $y$ and $z$ Coordinates .....	212
5.1.3	The Integral Interval of $r$ and $\eta$ Coordinates .....	212
5.2	Kill Probability of One-Missile to One-Target .....	213
5.2.1	Case of Non-Existing System Deviation .....	213
5.2.2	Case of Existing System Deviation .....	218
5.3	Kill Probability of Multi-Missiles to One-Target .....	220
5.4	Kill Probability of Multi-Missiles to Group	
	of Targets .....	223
5.4.1	The Group of Dispersed Targets .....	224
5.4.2	The Group of Concentrated Targets .....	226
<b>Chapter 6</b>	<b>Reliability and Maintainability of Missile Weapon System</b> ..	228
6.1	Basic Concepts .....	228
6.1.1	Definitions and Significances of Reliability and	
	Maintainability .....	228
6.1.2	Failure and Its Classification .....	229
6.1.3	Main Indexes of Reliability and Maintainability .....	231
6.1.4	Expressions of Reliability Main Indexes .....	234
6.1.5	Reliability Engineering and Maintainability Engineering .....	240
6.2	Calculating Models of System Reliability .....	242
6.2.1	Reliability Block Diagram of a System .....	242
6.2.2	Reliability Calculating Model of the Series System .....	251