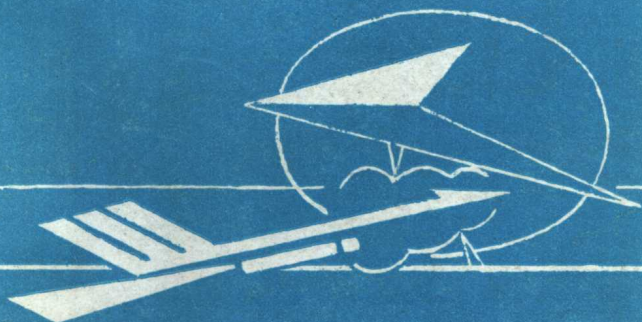


防空导弹武器系统

# 射击效率



北京航空學院出版社

防空导弹武器系统

# 射 击 效 率

李廷杰 编著

北京航空學院出版社

## 内 容 简 介

防空导弹的出现，为战争提供了一种射击精度高、威力大而造价昂贵的武器。

射击效率是防空导弹武器系统的总性能，是研制、生产和使用此武器系统所追求的总目标。

本书的主要内容是分析各种因素对防空导弹武器系统射击效率的影响、讨论计算射击效率的基本方法和探讨提高射击效率的各种途径。

本书是为导弹设计专业编写的一本教科书，也可作为导弹战斗部、引信和制导等专业的参考书，同时，还可供从事导弹研制、使用的有关技术人员和作战指挥人员参考。

凡具备工科大学高等数学基础和学过概率论，并具有一定导弹技术知识的读者，一般都可以看懂这本书。

### 防空导弹武器系统射击效率

李廷杰 编著

责任编辑 许传安

北京航空学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京海淀东升印刷厂印装

\* \* \*

850×1168 1/32 印张：13.75 字数：370 千字  
1987年6月第一版 1987年6月第一次印刷 印数：1500 册  
统一书号：15432·046 定价：2.60 元

# 前 言

防空导弹武器系统的出现，为防空部队提供了一种射击精确度高、威力大，但造价昂贵的武器。

防空导弹武器系统包括地空导弹武器系统和空空导弹武器系统两大类型。它的任务是保卫国家的领空，歼灭入侵的敌方飞行器。这些飞行器可能是飞机（有人驾驶的或无人驾驶的），也可能是导弹（巡航导弹或其它导弹）。

入侵的敌方飞行器大多具有速度高、机动性大，并且携带制导精度高和破坏威力大的兵器。防空作战时间极其短促，情况瞬息万变。这就要求防空导弹武器系统具有很高的射击效率。

防空导弹武器系统的射击，是指整个武器系统作战行动的全部过程。它包括搜索-跟踪目标、发射前准备、发射、制导、…一直到与目标遭遇。

防空导弹武器系统的射击效率，是指整个武器系统完成给定战斗任务的有效程度。它可用许多数量指标来描述。

防空导弹武器系统的射击效率是由许多复杂因素所决定的。这些因素主要有：

- ①空中目标的类型、数量、飞行性能和易损性；
- ②空中目标对抗措施的种类和有效程度；
- ③制导误差规律；
- ④战斗部、引信的类型、参数和引战配合特性；
- ⑤导弹的类型和性能；
- ⑥射击的方式和条件等。

射击效率是防空导弹武器系统的总性能，是研制、生产和使

用导弹所追求的最终目标。随着科学技术的高速度发展和防空的需要，研究防空导弹武器系统射击效率的重要性越来越突出。世界各主要国家为这项研究工作投入了大量的人力和物力，并且取得了显著的成绩。但是，这些成果一般是不公开发表的。

本书的任务是分析影响防空导弹武器系统射击效率的各种因素、探讨提高射击效率的各种途径、讨论计算射击效率的基本方法。

射击效率问题涉及到大量的数学基础和各种导弹技术专门知识。它所用到的数学基础主要有：概率论、规划论、对策论、排队论、误差理论等。它所用到的导弹技术专门知识主要有：制导原理、飞行力学、发动机原理、战斗部和引信工作原理、目标性能、整个导弹武器系统的工作原理等。

本书是为导弹设计专业编写的一本教科书，也可作为导弹战斗部、引信和制导等专业的参考书，同时，还可供从事导弹研制、使用的有关技术人员和作战指挥人员参考。凡具备工科大学高等数学基础，学过概率论并具有一定防空导弹技术知识的读者，一般都可以看懂这本书。

本书共分七章：前四章重点讨论影响单发导弹射击效率的各种因素和在理想条件下单发导弹杀伤概率的计算方法；第五章讨论武器系统的战斗使用可靠性；第六章讨论在各种影响因素（尤其是反导弹机动、电子对抗和火力对抗）下武器系统射击效率的计算方法；第七章讨论武器系统的战斗综合性能。

西北工业大学曾颖超和温炳恒两位副教授审阅了全稿，北京航空学院门长华同志描绘了全部图稿，在此表示衷心感谢。

由于作者的知识、经验和水平有限，书中定有不妥甚至错误之处，恳请读者不吝指正。

**作者于北京航空学院**

一九八六年十月

# 目 录

## 第一章 防空导弹武器系统射击概述

- § 1.1 空袭飞行器的主要特征…………… ( 1 )
- § 1.2 防空导弹武器系统…………… ( 10 )
- § 1.3 防空导弹武器系统的射击效率…………… ( 25 )
- § 1.4 常用坐标系和空中目标的运动参数…………… ( 29 )
- § 1.5 导弹杀伤空中目标的概率…………… ( 46 )

## 第二章 制导系统和制导误差

- § 2.1 防空导弹的制导系统…………… ( 59 )
- § 2.2 防空导弹的导引规律概述…………… ( 67 )
- § 2.3 自动寻的导弹的导引方法…………… ( 70 )
- § 2.4 遥控导弹的导引方法…………… ( 82 )
- § 2.5 制导误差的一般特性…………… ( 89 )
- § 2.6 制导误差的分布规律…………… ( )
- § 2.7 制导误差的确定方法…………… ( 101 )
- § 2.8 动态误差…………… ( )
- § 2.9 起伏误差和仪器误差…………… ( 117 )
- § 2.10 单发导弹命中给定区域的概率…………… ( 120 )

## 第三章 战斗部、引信和引战配合特性

- § 3.1 战斗部的特性…………… ( 135 )
- § 3.2 引信的特性…………… ( 148 )
- § 3.3 破片的运动规律…………… ( 154 )

§ 3.4 战斗部的动态杀伤区·····	( 160 )
§ 3.5 引战配合特性·····	( 171 )
§ 3.6 引战配合特性所决定的导弹发射区·····	( 192 )
§ 3.7 分析引战配合特性的其它方法·····	( 204 )

#### **第四章 目标坐标杀伤规律**

§ 4.1 影响目标坐标杀伤规律的因素·····	( 210 )
§ 4.2 目标的易损性·····	( 211 )
§ 4.3 破片杀伤型战斗部对目标的杀伤方式·····	( 214 )
§ 4.4 单块破片的杀伤概率·····	( 217 )
§ 4.5 目标坐标杀伤规律·····	( 221 )
§ 4.6 命中舱段破片数的数学期望·····	( 227 )
§ 4.7 目标条件坐标杀伤规律的近似公式·····	( 239 )

#### **第五章 防空导弹武器系统的可靠性**

§ 5.1 可靠性理论的基本概念·····	( 247 )
§ 5.2 可靠性的计算方法·····	( 263 )
§ 5.3 防空导弹武器系统的战斗使用可靠度·····	( 291 )

#### **第六章 防空导弹武器系统的射击效率**

§ 6.1 影响射击效率的各种因素·····	( 309 )
§ 6.2 火力对抗下的射击效率·····	( 315 )
§ 6.3 电子对抗和反导弹机动下的射击效率·····	( 326 )
§ 6.4 射击效率总的表达式·····	( 331 )
§ 6.5 对目标群的射击效率·····	( 335 )

#### **第七章 防空导弹武器系统的战斗 综合性能**

§ 7.1 地空导弹武器系统的杀伤区和发射区·····	( 347 )
-----------------------------	---------

§ 7.2	空空导弹武器系统的发射区 (攻击区) ……	( 375 )
§ 7.3	防空导弹武器系统的数次射击能力 ……	( 407 )
§ 7.4	地空导弹武器系统保卫己方要地的能力 ……	( 413 )
附录一	一阶亨格尔函数表 ……	( 418 )
附录二	$J_c(K, \tau) = \int_0^{\tau} e^{-t} I_0(K, t) dt$ 数值表 ……	( 419 )
附录三	$P = 1 - e^{-n}$ 数值表 ……	( 420 )
附录四	无系统误差和椭圆散布时落入给定圆内的 概率 ……	( 422 )
附录五	拉普拉斯函数 $\phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 数值表 ……	( 424 )
附录六 (A)	$P_{a_i} = 1 + 2.65e^{-0.34E_i} - 2.96e^{-0.14E_i}$ 数值表 ……	( 425 )
(B)	$P_{b_i} = 1 + 1.083e^{-4 \cdot 1^0 u_i} - 1.963e^{-1.46 u_i}$ 数值表 ……	( 428 )
参考文献	……	( 431 )



# 第一章 防空导弹武器系统射击概述

## §1.1 空袭飞行器的主要特征

防空导弹武器系统总的任务是保卫领空、杀伤空袭的敌方飞行器。这些空袭飞行器就是防空导弹武器系统所要攻击的空中目标。

空中目标按其数量可分为单个目标和目标群。单个目标是指单个的气球、飞艇、飞机、导弹等。目标群是指飞机群、导弹群等。

空中目标按其重量可分为轻于空气的目标和重于空气的目标。轻于空气的目标包括气球、飞艇等。重于空气的目标包括飞机、导弹等。重于空气的目标大多具有速度高和机动性大的特点，

空中目标按其所在空域可分为航天目标和航空目标。航天目标是指弹道式导弹。航空目标包括飞机、飞艇、气球等。

弹道式导弹按其射程可分为近程（小于或等于1000公里）导弹、中程（1000~5000公里）导弹、远程（5000~8000公里）导弹和洲际（大于8000公里）导弹。

弹道式导弹按其用途可分为战略导弹和战术导弹两种。

中程、远程和洲际弹道式导弹属于战略导弹。战略导弹又可分为地面配置的和海上配置的两种。前者由发射井或活动的发射架发射，后者由导弹核潜艇发射。

地面配置的洲际弹道式导弹是用发射井发射的。其用途是摧毁大型的军政、工业要地、导弹发射阵地和它的战略目标。这

种导弹的射程可达12000公里，速度可达7.5公里/秒，飞行高度在1000公里以上。这种导弹的战斗准备度高，不受气象条件的限制。它能在任何季节、昼夜的任何时刻对目标进行突然袭击。如“民兵-2”、“民兵-3”、“大力神-2”等导弹都属于现代洲际弹道式导弹。

地面配置的中程弹道式导弹可以在发射井中发射，也可以在活动的发射架上发射，它的用途是摧毁各种军事基地和工业目标。

海上配置的洲际弹道式导弹，是由导弹核潜艇驶入发射点并在30公尺以下的水中发射。压缩空气把导弹从发射筒内推出海面20~30公尺高度，第一级发动机起动。这种导弹的用途是摧毁大型的行政要地、工业目标和各种军事要地。它的射程为8000~12000公里。在这类导弹中，较有前途的是“三叉戟-1”和“三叉戟-2”。

海上配置的中程弹道式导弹可用于摧毁5000公里以内的大型行政要地、工业目标、港口和各种军事基地等。“北极星A-3”、“海神C-3”、“M-2”、“M-20”等导弹都属于现代海上配置的中程弹道式导弹。

战术弹道式导弹用于摧毁1000公里以内的目标。它的用途是直接对军队进行火力支援，摧毁飞机难以袭击的目标。这种导弹是从地面活动发射架上发射的。“长矛”、“潘兴”导弹都属于现代战术弹道式导弹。

弹道式导弹的性能如表1.1所列。

航空目标主要包括战略轰炸机、战术轰炸机、战术歼击机、舰载攻击机、侦察机、无人驾驶飞机、陆军航空兵所属的飞机和直升机等。

重型战略轰炸机是当代战争的主要战略空袭兵器之一。它可载弹30余吨，配有可摧毁目标和敌方防空系统的各种武器、侦察设备和各种电子对抗设备。这种轰炸机的航程可达18000公里。

表1.1

名称	发射重量 (吨)	战斗部	射程 (公里)	制导系统	动力装置	发射装置
		威力(百万吨)				
大力神 LGM-25C	150	整体 10	15000	惯性	二级液体火箭 发动机	地下发 射井
民兵-2 LGM-30F	32	整体 1~2	11000	惯性	三级固体火箭 发动机	地下发 射井
民兵-3 LGM-30	35	分导式多弹头 $3 \times 0.2$	13000	惯性	三级固体火箭 发动机	地下发 射井
北极星 A-3	16	分导式多弹头 $3 \times 0.1$	4600	惯性	二级固体火箭 发动机	潜艇
海神 C-3	29	分导式多弹头 $10 \times 0.05$	4600	惯性	二级固体火箭 发动机	潜艇
三叉戟-1	32	分导式多弹头 $8 \times 0.1$	8000	惯性	三级固体火箭 发动机	潜艇
三叉戟-2	57	分导式多弹头 $14 \times 0.15$	12000	惯性	三级固体火箭 发动机	潜艇
M-2	20	整体 0.5	3000	惯性	二级固体火箭 发动机	潜艇
M-20		整体 1.5	3000	惯性	二级固体火箭 发动机	潜艇
S-2	32	整体 0.15	3000	惯性		地下发 射井

它能在高、中、低空活动，能自行搜索目标和投掷各种命中率较高的炸弹。为了提高战斗效率和电子对抗能力，战略轰炸机正在装备新式的近程攻击导弹、空中发射的巡航导弹、空中发射的新型战略导弹。这种轰炸机的主要用途是在核战争中突击敌后方纵深的重要大型目标，如核基地、空军基地、海军基地、舰队和大型舰艇、指挥机关以及重要的交通设施等。各种改进型的B-52、新研制的B-1、图-20、米亚-4等都属于重型战略轰炸机。

中型战略轰炸机用来执行核战争和有限战的各项任务。可用它摧毁2000~4000公里以上的目标。为了增大航程，这种轰炸机可以在空中进行补充加油。这种飞机的投掷方案比较灵活，根据任务可以投掷核弹、普通炸弹、空地导弹，也可以施放积极干扰和消极干扰。导航设备可保证这种轰炸机作低空飞行。新型FB-111可变翼飞机、“幻影”ⅣA超音速轰炸机、“火神”B-2亚音速轰炸机、图-16、图-22、图-26等都属于中型战略轰炸机。

轻型战术轰炸机主要是用于攻击战役战术纵深内的目标（包括核武器库、空军基地、海军基地、防空导弹发射阵地、交通枢纽、车站、大型桥梁、城镇和部队等）和对战斗、战役中的陆军进行航空火力支援。这种飞机装备的武器有：普通炸弹、核弹、火箭弹、导弹、电子对抗设备和侦察设备等。“掠夺者”（海盗）、“秃鹰”、苏-17、苏-20、苏-24、苏-25、米格-27等都属于轻型战术轰炸机。

战术歼击机是用来消灭核武器及其运载工具，击毁机场上的飞机和防空兵器，攻击军事目标和工业目标，对陆军进行直接的航空兵火力支援、战术侦察、野战防空等。这种飞机可载普通炸弹和核弹、战术空地导弹、空空导弹和电子对抗设备。现代战术歼击机的航程约为2700~6100公里，速度约为1000~2500公里/小时，飞行高度约为60~18000公尺。它可载弹2~9吨。F-4、F-15、F-111A、“鹞式”、“美洲豹”、“幻影”ⅢE、“幻影”5F等都属于这种飞机。而有发展前途的歼击机是F-16、“旋风”、“幻影”2000等。

舰载攻击机是从航空母舰上起飞，用来攻击地面和海上目标。不同型号的航空母舰可载的飞机数量也不同。有的航空母舰可载近100架各种类型的飞机，其中舰载攻击机可达50~60架。现代舰载攻击机活动距离可达5000公里，能以760~2200公里/小时的航速在60~14000公尺的高度上飞行。它的载弹量可达7吨。A-6、A-7和A-4等都属于舰载攻击机。

侦察机能在短时间内获得敌方宽大正面和纵深的情报。一般侦察机都是由轰炸机、歼击机、舰载攻击机和运输机装上专用的侦察设备改装而成的。当然，也有专用的侦察机，如战略侦察机SR-71、U-2等。另外，RF-4、RA-5C、雅克-25、雅克-26、雅克-28P、伊尔-28P等都属于侦察机。

无人驾驶飞机的用途是进行空中侦察，对敌方防空体系的雷达施放无线电干扰，对目标进行攻击和制造复杂的空中情况等。这种飞机在地面发射架或飞机上均能发射。其飞行既可以进行程序控制，也可以在地面站或飞机上进行控制。近年来，国外极为重视研制小型遥控飞行器，用于侦察和抑制雷达。BQM-34A、147J等都属于无人驾驶飞机。

陆军航空兵所属的飞机的主要用途是对战场上的步兵进行直接火力支援、运送步兵、空投战术空降兵、运送武器和物资、接送伤员、进行空中侦察等。

主要军用飞机的性能如表1·2所列。

表1·2

名称	乘员	最大航速	实际升限 (公里)	航程 (公里)	武器		
		公里/小时 高度(公尺)			炮,门-口径(毫米)	导弹和炸弹	最大载弹量(公斤)
B-52	6	$\frac{1020}{6300}$	15000 以上	18000	4-20	20枚“近程攻击导弹”或空中发射巡航导弹	30000
B-1A	4	$\frac{2330}{15000}$	15000 以上	11000	—	24枚“近程攻击导弹”或空中发射巡航导弹和战略导弹	35000
图-20	11	$\frac{870}{12000}$	14000	12500	6-23	10~25吨普通炸弹或1枚1000万吨级的核弹	25000

续表

名称	乘员	最大航速	实际升限	航程 (公里)	武器		
		公里/小时 高度(公尺)	(公里)		炮,门-口 径(毫米)	导弹和炸弹	最大载弹 量(公斤)
米亚-4	10	$\frac{1000}{12000}$	17400	6000	10-23	4.5~12吨普通炸弹,或1枚1000万吨级氢弹,或1枚空地导弹	12000
FB-111	2	$\frac{2330}{12000}$	近20000	6600	—	6枚近程攻击导弹	16000
图-16	7	$\frac{938}{10000}$	12800	6000	7-23	1枚50万吨级核弹,或两枚空地导弹	9000
图-26		$\frac{3000}{14500}$	20000	11000	1-23	15枚500公斤的普通炸弹,或1枚核弹,或2枚远程攻击导弹	10000
苏-17	1	$\frac{2300}{12000}$	17000	1600	2-30	100、250、500公斤的炸弹8枚,或2枚空地导弹	2000
苏-25	1			1205	1-30	50~500公斤的炸弹、各种火箭弹、空空导弹、激光制导武器和反雷达导弹	4500
米格-27	1	$\frac{2000}{12000}$	15000	2420	1-23 六管炮	6枚500公斤以下的炸弹,或空地导弹	3000
F-4	2	$\frac{2330}{12000}$	近19000	4020	1-20 六管炮	4枚“小斗犬”或“百舌鸟”,或3枚“麻雀”	近7000

续表

名称	乘员	最大航速 公里/小时 高度(公尺)	实际升限 (公里)	航程 (公里)	武器		
					炮;门-口径(毫米)	导弹和炸弹	最大载弹量(公斤)
F-111	2	$\frac{2655}{12000}$	18000 以上	6100	1-20 六管炮	4~8枚空地导弹或空空导弹	13600
F-15	1	$\frac{2655}{12000}$	21000	4800	1-20 六管炮	4~6枚空空导弹或空地导弹	5500
F-16	1	$\frac{2300}{11000}$	18000 以上	近3700	1-20 六管炮	6枚“幼畜” 导弹或空空导弹	3600 以上
旋风	2	$\frac{2100}{12000}$	15000	4800	2-27	空空导弹和空地导弹	5000
A-7A	1	$\frac{940}{12000}$	12000	5400	1-20	4枚“小斗犬” 和2枚“百舌鸟”	6800
雅克-26	2	$\frac{1290}{11000}$	15200	3000	1-30	载弹1000公斤	
伊尔-28P	3	$\frac{900}{10000}$	12300	3040	4-23	4枚500公斤或 8枚250公斤炸弹	

空中目标的用途、类型不同，其特征所包含的内容自然也不相同。以飞机类目标为例，尽管用途和种类相差甚远，但从防空导弹武器系统射击效率的角度来看，飞机类目标共同的主要特征有：飞行高度、飞行速度、机动性、大小和形状及结构、要害部位的形状及大小、易损性及分布情况、辐射或反射电磁波和红外线的的能力、抗击防空导弹攻击的能力等。

初看起来，要说明空中目标的特征似乎并不困难。其实，这是最难解决的问题之一。在防空导弹武器系统射击效率的分析中，对空中目标的描述必须用数量指标表示方能有效，才能用到射击效率的计算中去。用数量指标表示空中目标的困难在于：首先，由于空中目标的运动参数随着飞行条件、飞行时间而改变，

就难以用确定的数量来表示目标特征；其次，我们所考虑的未必是现有的已知目标，而往往是在未来战争中的新型目标。后者对空中目标尤为突出。研究估计中的问题，显然是十分困难的事。要想科学地预见未来目标的数量指标，首先必须对敌方的科学技术水平的现状和发展趋势、战略思想和战术原则、空中目标目前的水平和发展动向、资源及其利用情况等有比较深入的了解，其次还需有一套科学而有效的方法。当我们了解到在不久的将来，敌方不会取得重大的技术突破时，可用统计方法预测表示未来目标特征的数量指标的水平。

根据未来战争方式的变化（例如：更加强调分散兵力、机动作战和攻击后续目标；利用高度发展的信息技术，以对方来不及反应的速度在运动中攻击目标之后立即转移等）和科学技术的发展，未来空中目标的主要特点如下：

①在突防高度上向两极集中——高空超音速巡航和超低空超、亚音速飞行。从数量上看，超低空飞行将占多数；

②各种有人驾驶飞机都将配置有全向攻击能力的空空导弹，自卫能力显著增强；

③将广泛采用“隐身”技术和电子对抗，使被发现的距离缩短；

④由于空中目标采用远投、制导精度高的武器、使空中目标的破坏威力明显地增大。

未来各类空中目标的主要特征如表1·3所列。

在预测未来目标的性能指标时，建议应用回归分析方法。这种方法的优点是比较可靠，缺点是比较繁琐。

回归分析是数理统计中的一种常用方法，它是研究相关关系的一种数学工具，它能帮助我们从一个变量取得的值去估计另一个变量的取值。

根据我们对美国、苏联、英国、法国、西德、意大利、瑞典等国几十种战斗机（歼击机）用回归分析方法统计的结果，现代



表1.3

目 标	主 要 特 征
超音速巡航战斗机	雷达反射面积 <math>< 0.5\text{公尺}^2</math> 巡航高度 15000~20000 公尺 巡航M数约为 2 配置先进的中距离空空导弹 具有远投空地导弹的能力 同型跟进护航
制空战斗机	雷达反射面积约 1 公尺 <sup>2</sup> 具有超音速和非常规机动能力 最大平飞M数约为 2.5 巡航M数约在 1.5~2.2 之间 配置先进的全向攻击的近距和中距空空导弹 配置有全向攻击能力的机炮
轰 炸 机	雷达反射面积 > 1 公尺 <sup>2</sup> 配置自卫的中距空空导弹 具有全向目标探测能力 普遍采用中远投制导精度高的空地武器 具有高的干扰能力 可能配置激光炮
战术无人机	雷达反射面积相当于一只鸟 红外线特征极低 前线附近活动 亚音速
巡航导弹	雷达反射面积约为 0.1~0.5 公尺 <sup>2</sup> 红外线特征比较低 超、亚音速低空或超音速高空入侵 战斗机接近时有自动躲避能力

战斗机的最大平飞速度（公里/小时，用Y表示）随着开始服役的时间（年，用X表示）的变化趋势服从如下的双曲线公式：

$$\frac{1}{Y} = -0.00472 + 10.18 \frac{1}{X}$$