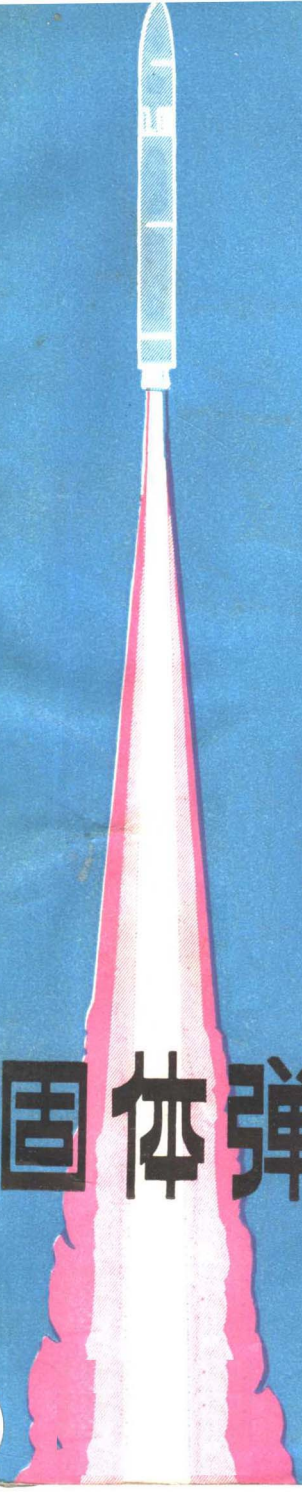


A stylized illustration of a missile launching vertically against a blue sky. The missile is white with a blue band near the tip. A large, bright white and pinkish-red plume of fire and smoke trails behind it, widening as it descends.

〔苏〕A. M. 西纽科夫 等著

赵儒源 黄寿康 吕玉麟 译

固体弹道式导弹

国防工业出版社

固体弹道式导弹

〔苏〕 A.M. 西纽科夫 等著

赵儒源 黄寿康 吕玉麟 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书专门论述固体弹道式导弹的设计和试验研制等内容。

全书分弹道设计、强度计算、可靠性与试验等三部分。主要探讨固体导弹弹道设计的任务与方法；给出了典型的结构图与重量分析方法；讨论了固体导弹的强度计算方法和弹体与装药在贮存、运输、飞行中的应力-应变的计算方法；并深入分析了全弹与各系统（弹体结构、发动机、分离系统）的试验研制和可靠性估算等问题。

本书内容丰富具体，论述详尽，有系统的公式和算例。因此适于从事导弹设计、试验、生产、使用等方面的科技人员使用，也可供有关大专院校师生教学参考。

БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ РАКЕТА НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ А. М. СИНЮКОВ и т. д.

Воениздат, 1972г.

*

固体弹道式导弹

〔苏〕А. М. 西纽科夫 等著

赵儒源 黄寿康 吕玉麟 译

*

国防工业出版社出版：

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 $1/32$ 印张 16 $18/16$ 428 千字

1984年3月第一版 1984年3月第一次印刷 印数：0,001—1,300册

统一书号：15034·2601 定价：2.50元

译者的话

固体弹道式导弹比液体弹道式导弹有许多优点。但目前，全面系统地论述固体弹道式导弹设计方法的书很少。本书则是一本论述固体弹道式导弹的设计与试验的专著。全书分为弹道设计、强度计算以及可靠性与试验等三部分。第一部分系统地阐述了固体弹道式导弹弹道设计的任务与设计方法，给出了固体弹道式导弹的典型结构图与重量分析方法。第二部分详尽地讨论了固体火箭强度计算的特点，以及在贮存、运输、飞行过程中的火箭壳体与固体推进剂装药的应力-应变状态的计算方法。最后一部分深入地叙述了固体弹道式导弹的可靠性问题和导弹结构、发动机与分离系统等各分系统可靠性的估算，以及介绍了导弹结构与发动机的试验和导弹在试验研制期间可靠性的统计评估。

书中所介绍的计算方法，大部分用数例作了说明。

原书叙述中有前后颠倒、提法与符号不统一以及遗误等现象。我们在译校过程中都一一作了相应的更正。

张远君、蔡峨与鲁守华等同志为本书作了仔细地审校，吴文娟与王金瑞同志为本书插图作了精细地描绘，在此一并表示致谢！

由于我们水平有限，难免有遗误之处，恳请读者指正。

前言 (摘译)

二十世纪后期, 火箭技术得到了突飞猛进的发展, 并开始征服宇宙。1957年10月4日, 苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星, 而且1961年4月12日世界上第一个宇航员Ю. А. 加加林驾驶“东方号”宇宙飞船首次绕地球飞行。随后, 研制了一系列有人驾驶的或自动控制的宇宙飞船, 并且借助于这些飞船, 进行了许多科学研究工作。然而, 火箭不仅是人类进入空间的工具, 而首先还是一种现代化的尖端武器。

固体导弹长期以来被用作为战术武器。在第二次世界大战期间和结束不久, 固体火箭发动机用的是无烟火药。

随着复合固体推进剂的出现及其生产技术的完善, 使固体火箭应用范围的扩大有了可能。目前, 固体火箭实际上已应用在各种类型的武器中。

与液体火箭相比, 固体火箭的可靠性高、射前准备时间短、弹上设备简单与紧凑、操作简便、地面设备与维护简单、贮存期长、重量推力比低等。

固体火箭的缺点是, 发动机特性与装药的初始温度密切相关。与液体火箭相比, 环境温度与湿度对它的影响过于敏感, 解决发动机的控制和再起动问题比较复杂。

然而, 尽管固体火箭有上述缺点, 但其应用范围却在不断的扩大。

在一本书中, 不可能全部阐述各类固体导弹的设计特点, 所以作者仅限于阐述推进剂药柱牢固地与燃烧室粘结在一起的、多级地-地固体弹道式导弹设计的有关问题。本书的目的在于帮助读者对固体火箭工作的物理过程与工作条件进行彻底的了解, 使读者通晓整个火箭及其部件与组件工作的理论基础, 以及把正确

展望固体火箭发展趋势的资料介绍给读者。

本书分三部分，它根据苏联和国外书刊已公开发表的资料，系统地阐述了固体导弹弹道设计的问题，给出了固体弹道导弹典型结构的设计，以及与弹道设计问题有关的弹道诸元的计算方法。介绍了弹道设计的近似方法和精确方法的有关概念。给出了各种工作状态下，作用在固体导弹上的主要静载荷与动载荷的计算方法。详细地研究了固体导弹强度计算的特点。简要地给出了固体推进剂和固体导弹构件材料的物理-机械特性与强度标准。介绍了在贮存期间、运输当中、发动机工作阶段以及在外界温度影响的情况下，固体火箭壳体与装药的强度计算方法。阐明了确定固体导弹动态特性的问题。

书中研究了固体导弹的可靠性及其统计计算问题，而且也讨论了固体导弹的试验问题。给出了导弹分系统可靠性的计算方法。大多数计算方法都用数例作了说明。

目 录

第一部分 固体导弹的弹道设计

第一章 导弹设计问题	1
§ 1.1 对固体弹道式导弹、导弹系统以及导弹武器系统的要求	1
§ 1.2 固体弹道式导弹的效能指标与经济指标	6
§ 1.3 固体弹道式导弹的研制程序	11
§ 1.4 设计固体弹道式导弹时要解决的问题	14
第二章 固体弹道式导弹的构造	19
§ 2.1 固体推进剂简述	19
§ 2.2 固体推进剂装药的形状	23
§ 2.3 固体推进剂发动机的构造	31
§ 2.4 固体导弹的控制机构	37
§ 2.5 固体导弹的结构布局	41
§ 2.6 固体导弹的发展方向	47
第三章 导弹的飞行弹道	51
§ 3.1 导弹在主动段弹道上的运动方程	51
§ 3.2 导弹在主动段弹道上的飞行程序	59
§ 3.3 导弹弹头在被动段弹道上的运动方程	66
§ 3.4 在主动段弹道上, 导弹质心的坐标与速度的近似计算方法	70
第四章 固体导弹的重量分析与设计参数	77
§ 4.1 固体导弹的重量分析	77
§ 4.2 固体导弹的设计参数	92
§ 4.3 固体导弹级数的选择	95
§ 4.4 确定最佳的每级质量比	101
§ 4.5 发动机燃烧室压力与喷管出口压力的选择	109
§ 4.6 装药形状与相对长度的选择, 推进剂燃速的最佳化	115
第五章 固体导弹的弹道设计方法	120
§ 5.1 弹道设计问题概述	120

§ 5.2	导弹弹道的近似设计	136
§ 5.3	确保射程和推进剂安全余量的计算	145
§ 5.4	弹着点的散布	155

第二部分 固体火箭的强度计算

第六章	固体火箭强度计算的特点	170
§ 6.1	计算情况	170
§ 6.2	固体推进剂物理机械性能简述; 固体推进剂混合物 的强度准则	172
§ 6.3	固体火箭的结构材料及其强度校核准则	187
第七章	固体火箭壳体的强度计算	192
§ 7.1	非均匀受热薄壁旋转壳体的轴对称弹性变形	192
§ 7.2	非均匀受热薄壁壳体工作于弹塑性变形区时的 应力-应变状态	198
§ 7.3	玻璃纤维增强塑料制造的固体火箭壳体的应力-应变状态	207
§ 7.4	前后封头的强度计算	213
第八章	固体火箭壳体与装药在温度变化时的应力- 应变状态的计算	223
§ 8.1	绪论; 问题的提出	223
§ 8.2	二维热弹性问题	224
§ 8.3	薄壳增强的各向异性圆柱体三维热应力问题的解析方法	235
§ 8.4	考虑固体推进剂流变性质时温度应力问题的解	246
第九章	固体导弹发动机装药与壳体在贮存期间的 应力-应变状态	251
§ 9.1	问题简述及计算方法的选择	251
§ 9.2	固体导弹垂直贮存时装药与壳体的应力-应变计算	252
§ 9.3	固体导弹水平贮存时装药与壳体的应力-应变计算	264
§ 9.4	固体导弹装药在贮存期中热效应的计算方法	274
第十章	在动载荷条件下, 固体导弹装药和弹体的 应力-应变状态	282
§ 10.1	结构动力计算问题; 计算模型	282
§ 10.2	弹体的纵向振动	284

§ 10.3	固体导弹弹体弯曲振动的固有振型和振频	292
§ 10.4	运输过程中固体导弹装药和弹体应力-应变状态的计算	304
§ 10.5	压力随时间变化时固体导弹装药和弹体的动力特性	311
§ 10.6	与弹体粘结的装药在运输过程中的动力特性; 精确解	316
第十一章 固体导弹装药和壳体在飞行中的应力-应变		
	状态计算	331
§ 11.1	导弹壳体应力-应变状态的近似计算; 发动机在弹道上工作时装药的强度计算; 二维问题	331
§ 11.2	计及固体推进剂的流变特性时用弹性公式求解边值问题的可能方法	343
§ 11.3	具有复杂形状内孔时固体推进剂装药的应力集中	347

第三部分 固体导弹的可靠性和试验

第十二章 固体导弹的可靠性			360
§ 12.1	固体导弹的可靠性特征; 导弹零部件的故障	360	●
§ 12.2	零部件的可靠性特征	365	
§ 12.3	可靠性方块图	372	
§ 12.4	用临界参数计算部件的可靠性	379	
§ 12.5	可靠性标准化	388	
第十三章 固体导弹结构、发动机和分离系统的可靠性			393
§ 13.1	计算结构零部件可靠性的准静态法	393	
§ 13.2	计算例题	403	
§ 13.3	用相关法计算结构零部件的可靠性	405	
§ 13.4	固体推进剂装药和包覆层的可靠性	409	
§ 13.5	分离系统的可靠性	415	
第十四章 导弹结构和发动机的试验			420
§ 14.1	结构材料机械性能的统计特性	420	
§ 14.2	导弹舱段的静力试验	422	
§ 14.3	温度对固体导弹可靠性的影响; 导弹试验时温度的测量	426	
§ 14.4	固体发动机试车台的点火试验	429	
§ 14.5	固体发动机的长期贮存和环境试验	436	

§ 14.6	试验确定固体发动机流量和推力特性, 飞行中导弹的静载荷	439
§ 14.7	动载荷对固体导弹可靠性的影响, 导弹的动态试验	448
第十五章	试验研制期间固体导弹可靠性的统计评估	454
§ 15.1	导弹试验研制任务和解决途径	454
§ 15.2	研制过程中固体导弹可靠性变化模型	460
§ 15.3	可靠性变化函数的统计确定	467
§ 15.4	可靠性变化模型的实际运用	476
§ 15.5	根据最后地面试验台试验和飞行试验的试验数据确定导弹和导弹部件的可靠性	483
§ 15.6	最终试验和更改试验的信息综合	493
§ 15.7	导弹地面试验和最终飞行调试容量的最优化	500
附录 1		518
附录 2		519
参考文献		520

第一部分

固体导弹的弹道设计

第一章 导弹设计问题

§ 1.1 对固体弹道式导弹、导弹系统 以及导弹武器系统的要求

固体弹道式导弹是一种用来摧毁远处重要目标的武器。

为了进行导弹的检测与发射，以及在发射之前保护导弹，免遭对方攻击，需要建造专用建筑物，并配备一套检测设备、发射装置与地面设备。所有这些与导弹一起构成导弹系统●。

导弹是一次使用的产品，而导弹系统的其余部分，一般都可以多次使用。固体弹道式导弹的战斗性能，主要取决于整个导弹系统的组成与性能。

导弹系统应当满足对导弹战斗能力与性能提出的要求。这些要求也大体上预定了导弹的性能。

对导弹系统与导弹的基本要求之一是确保规定的射程范围。我们通常根据在给定的精度情况下弹头所能达到的距离，把射程分为最大射程 $L_{\max}$ 与最小射程 $L_{\min}$ 。所要求的最大射程多大？这取决于导弹系统发射场的位置及其离所对付可能目标的距离。当弹头重量给定后，导弹的最大射程就基本上决定了导弹的总尺寸与质量。显然，要求最大射程越大，则导弹越重、越复杂，并且研制导弹所花的经费越多。因此，当射程范围很宽时，采用一种导弹系统并不有利，更有利的是研制几种导弹系统，而每一种导弹系统有它自己的射程范围，例如 8000~12000 公里，2000~5000

● 原文为 ракетный комплекс。——译者

公里，等等^{〔26〕〔31〕}。

最大射程大于 8000 公里的弹道式导弹称为洲际弹道导弹，而射程为 2000~5000 公里的称为中程弹道导弹。

一种具体型号的导弹，其射程与弹头质量的关系很大，所以当发射同一型号的导弹时，采用不同质量的弹头，可以保证摧毁位于很宽一段范围内的目标。

对导弹系统与导弹的另一个重要要求，是确保弹头具有给定的威力。现在的固体导弹，弹头一般采用核装药，通过爆炸时所形成的冲击波、光辐射、放射性辐射以及穿透辐射摧毁目标。弹头威力的大小，或者说核装药威力的大小，用 TNT 当量值 q 即黑色炸药的质量来表征。意思是在这样多的黑色炸药作用下，其效果与核装药的作用效果相等。当采用一种具体的裂变材料后，TNT 的当量值首先取决于弹头装药的多少，同时也取决于装药的构造和发火装置的完善程度。现在的洲际与中程弹道式导弹所携带的装药量，其 TNT 当量值可达几十万吨至几百万吨^{〔31〕}。

弹头对目标的破坏作用不仅取决于装药的威力，而且还取决于弹头的投掷精度。因此，对导弹系统与导弹的再一个重要要求，是弹头的弹着点散布（爆心偏移）要小（不能大于给定值）。

由于导弹的性能以及飞行的环境条件与设计值有出入，故导弹及弹头在飞行中会偏离连接发射点与瞄准点（目标）的计算弹道。此外，由于对目标和发射点的坐标缺乏准确的了解，以及计算中的不精确，也给计算弹道带来某些误差。这同样会增大弹头的弹着点散布。一般可通过导弹的控制系统来减小弹头偏离计算弹道的偏差量。固体弹道式导弹可以采用自主式控制系统或者组合式控制系统。当采用组合式控制系统时，在发射场的场区，必须配有专用雷达控制站，这样一来就使导弹系统复杂化，并且限制了导弹更换目标的可能性。此外，雷达控制线会受到对方发出的干扰。然而，运用雷达控制将提高发射精度。

弹道式导弹的弹头，其弹着点围绕瞄准点的散布实际上遵从

正态圆形分布律，所以它可由均方差 σ 来确定。对于现代洲际与中程弹道式导弹来说，当采用自律式控制系统时，所能达到的投掷精度为 $\sigma = 0.6 \sim 1.2$ 公里。在未来几年内，致力于降低这些导弹的散布，达到 $\sigma = 0.3 \sim 0.7$ 公里^[81]。

对导弹系统与导弹的再一个重要要求，是确保导弹在飞行中的高度可靠性。由于导弹是一次使用的产品，在飞行中不可复原，故它的可靠性是由沿弹道飞行的可靠性确定。导弹的可靠性在数量上用导弹在发射与飞行中不失去作用的概率 P 表征。为简单起见，通常把这个值又称为导弹飞行的可靠性。概率 P 可看作为导弹数量的比值，即发射以后，在符合标准偏差的情况下，将弹头投到目标区的导弹数与为进行此发射所准备的导弹总数之比。这个特性取决于导弹的设计水平与生产技术水平、整个导弹系统的完备程度，而且也取决于导弹系统在进行发射之前的工作状态与持续时间。还应指出，一枚导弹不是在弹道上飞行失败，就是成功地将弹头投到目标区，故导弹飞行的可靠性表征了这种导弹系统的总性能。发射固体洲际与中程弹道式导弹的经验表明，对于一种研制较好的导弹系统来说， P 值在 $0.85 \sim 0.95$ 的范围内变化^[81]。

对现代的导弹系统，还应要求它有能突破对方导弹防御的高度可靠性。导弹弹头能成功地进入目标区的可能性的多少，不仅取决于对方反导系统的质量，而且也决定于导弹的设计特性，以及导弹弹道的形状。在数量上，此可能性用导弹弹头不被对方反导系统所摧毁的概率 P_{np} 表征。概率 P_{np} 可以看作为导弹弹头数量的一个比值，即在对方有反导系统的情况下，能到达目标区并符合标准偏差的弹头数量与对方没有反导系统，而能完成这个任务的弹头总数之比。此概率与上面所探讨的 P 值一样，它反映了一种导弹系统的总性能，只是该种导弹系统所对付的目标是由一特定反导系统保护的。

以上所探讨的对导弹系统的要求也是对导弹基本性能的要

求。除此以外，对导弹系统还有另一些重要要求，这些要求与其说是决定着导弹的特性，倒不如说决定着导弹系统运用于作战的能力，以及为此所需要耗费的人力和物力。

这些要求之一是保证导弹系统具有高度的战斗准备状态。一个已投入使用的导弹系统（包括固体导弹）可以工作好几年，然而，由于自然的老化过程，随着时间的推移，它的性能会显著下降。因此，经过一段时间以后，要进行例行的检查维护，检测导弹系统的性能并排除已发现的故障。在进行例行的检查过程中，导弹系统可能暂时处于一种不能发射导弹的状态。导弹系统服役的总时间愈长，并且例行的检查维护所占据的时间愈短，则其战斗准备状态愈好。导弹系统的战斗准备状态，在数量上用战斗准备状态系数 K_r 来评定。此系数可定义为导弹系统处于准备发射状态的时间与其服役的总时间之比。系数 K_r 取决于设计水平、生产技术、导弹系统各部分所允许的工作条件，并且也取决于勤务人员的数量以及他们的训练水平。对于现代的导弹系统来说（包括固体洲际与中程弹道式导弹）战斗准备状态能达到很高的程度^[31]。有趣的是，当用潜艇发射固体导弹时，战斗准备状态系数大大降低，其原因是在港口或基地维护潜艇就需要相当长的时间，从而缩短了固体导弹在潜艇上的总工作时间^[31]。

有时，在导弹战斗使用期间，会遇到恶劣的气象条件（强风、湿度大、雷电等等），这将妨碍发射的顺利进行。因此，应要求导弹系统在任何气象条件下，都能保证导弹的发射。由于在任意气象条件下进行发射的可能性受到限制，系数 K_r 减小，自然就影响了导弹系统的战斗准备。

当然，导弹系统应受到可靠的保护，以免遭受对方的攻击。为了满足此项要求，一般是将固体洲际与中程弹道式导弹放在对核爆炸具有强大保护能力的地下井中。导弹系统的发射控制部分也应进行保护，免遭核爆炸所产生的破坏作用。导弹发射阵地彼此之间的位置配置应保证一次核爆炸不会同时摧毁几个导弹系统。对核爆炸的主要破坏因素所进行的保护程度，在数量上通常用能

承受冲击波阵面超压 ΔP_{Φ} 的能力来评定。目前,所设计的发射设施能承受几巴至几百巴的超压。导弹系统有了这样高的保护效果,实际上对方是破坏不了的。然而,在保护导弹系统免遭预料中的攻击上,还有其它的方式。如果,能够做到在很短时间内发射导弹的话,那对方的来袭弹头并不能妨碍我方进行回击。当采用现在的探测手段时,可在受到打击之前的 3~10 分钟发现对方弹头⁽⁸¹⁾。这个时间足以用来进行判定、发射准备以及发射自己的导弹。因此,缩短发射导弹所需要的时间,也是一种防御导弹系统免受对方核导弹攻击的极好方法。

保护导弹系统免受对方攻击的状况,在数量上可用导弹系统在发射前与发射中间不被摧毁的概率 P_{Σ} 来评定。这个特性确定了导弹系统的所谓“生存能力”。 P_{Σ} 值的大小不仅与导弹系统的特性有关,而且也与其作战使用的原则有关。对于先发制人的攻击来说, $P_{\Sigma} = 1$; 而对于进行反击来说, $P_{\Sigma} \leq 1$ 。

上面所探讨的,对导弹系统与导弹的要求决定了它们的作战性能。然而,研制同一种战斗能力的导弹系统,在人力、物力以及时间的耗费上却或多或少地不一样。因此,在研制一种导弹系统与导弹时,必须使它们既能保证完成给定的战斗任务,而耗费的时间与经费又最少(或者有限)。此要求的重要性并不次于前面所探讨过的要求。实际上,如果研制一个具有特定战斗性能的导弹武器系统●(同一类导弹系统的全体),当所要求的经费超过为此项计划而规定的指标时,或者需要的时间很长时,那么就要重新考虑或修改整个武器方案。必须指出,为了降低总的费用,若只减少导弹的经费则始终是不行的。在导弹系统的总生产费用中,固体导弹的生产费用一般不超过 15~20%,而导弹系统多年的维护使用费用,可以超过它的生产费用好几倍⁽⁸¹⁾。

在研制一项固体导弹及导弹系统的工程期间,可以采用各种措施来降低导弹武器系统的研制与维护使用费用。这样,在设计

● 原文为 ракетная система。——译者

中, 设计人员就应使导弹的检查、发射的准备与进行等工作实现高度自动化。导弹系统的自动化以及维护起来简单化, 可以大大减少用于导弹作战使用所需要的人员数量, 从而也大大降低维护使用费用。此外, 导弹系统维护起来简单, 对于它的战备状态以及导弹飞行中的可靠性都有积极的作用。在研制导弹系统的组件、装置与系统时, 为了降低生产费用, 必须使设计具有良好的加工性能和高度的继承性、不采用短缺的材料而一定要采用国产材料、以及采用既能用于这种导弹系统又能用于其他导弹武器系统的标准化零件。正确地组织最终的调整试验过程, 即仔细地安排试验大纲和内容, 也有助于节省研制一个导弹系统所需要的经费与时间。

§ 1.2 固体弹道式导弹的效能指标与经济指标

一个导弹系统的质量是用它的有效性, 即用它对完成给定的战斗任务的适用性来表征的。导弹系统的效能指标是有效性在数量上的计量方法。

为了平均估计新研制的导弹系统的质量, 必须计算一下在对典型目标进行规定数量的发射时, 导弹系统的效能。对于固体弹道式导弹系统来说, 这可以分成两种情况来研究:

对一个目标进行 N_1 次单独的发射;

对 r 个相同的目标发射 N 枚导弹。

在第一种情况下, 效能指标是当进行 N_1 次单独发射时, 完成战斗任务的概率 $W^{(25), (26), (80), (99)}$;

$$W = 1 - (1 - P_{*}K_r PP_{np0} P_s W_1)^{N_1} \quad (1.1)$$

式中 P_s ——在 $P_{*}K_r PP_{np0} = 1$ 的情况下, 弹头爆炸时的威力不小于规定值的条件概率;

W_1 ——在一次发射和 $P_{*}K_r PP_{np0} P_s = 1$ 的情况下, 完成战斗任务的效能指标。

应该指出, 概率 K_r 、 P 、 P_{np0} 也是条件概率, 并相应地在 $P_{*} = 1$ 、 $P_{*}K_r = 1$ 以及 $P_{*}K_r P = 1$ 的情况下来确定。

对小目标 (点目标) 进行发射时, 指标 W_1 是目标的摧毁概

率，而对大目标（面目标）进行发射时，指标 W_1 则是目标被破坏部分的数学期望。在推导效能指标 W_1 的关系式时，通常采用以下假设：

爆心距离瞄准点偏差的分布密度是正态的，其数学期望等于零，均方差为 σ ；

目标是一个圆，其半径 $R_n \leq 2\sigma$ ；

目标的分布密度是均匀的；

所有的爆炸威力是相同的。

在这些假设下，

$$W_1 = 1 - \exp\left[-\frac{R_n^2}{2\sigma^2 + 0.5R_n^2}\right] \quad (1.2)$$

式中 R_n ——破坏区域的半径，它取决于目标的保护程度以及弹头的威力（TNT当量）。

在对小目标进行发射的情况下，指标 W_1 是目标的摧毁概率，并且在表达式（1.2）中，取 $R_n = 0$ ；而对大目标进行发射时， W_1 的值是目标被破坏部分的数学期望，并且 $0 < R_n \leq 2\sigma$ 。

将表达式（1.2）代到表达式（1.1）中去，我们得到

$$W = 1 - \left\{ 1 - P_{\kappa} K_r P P_{np0} P_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{R_n^2}{2\sigma^2 + 0.5R_n^2}\right) \right] \right\}^{N_1} \quad (1.3)$$

当对 r 个小目标发射 N 枚导弹时，导弹系统的效能指标是导弹对目标进行最佳分布时（此最佳分布是预先计划好的并在发射过程中不改变），被破坏的目标数的数学期望 M 。在上述假设条件下^[26]，

$$M = r \left\{ \left\{ 1 - (1 - P_{\kappa} K_r P P_{np0} P_1 W_1)^{E\left(\frac{N}{T}\right)} \left\{ 1 - \left[\frac{N}{r} - E\left(\frac{N}{r}\right) \right] P_{\kappa} K_r P P_{np0} P_1 W_1 \right\} \right\} \right\} \quad (1.4)$$

式中 $E\left(\frac{N}{r}\right)$ ——数 $\frac{N}{r}$ 的整数部分。