

# 导弹 系统分析与设计

文仲辉 编著



北京理工大学出版社

# 导弹系统分析与设计

文仲辉 编著

北京理工大学出版社

## 内 容 简 介

本书内容包括两部分。第一部分为导弹武器系统分析，讲授了系统分析的基本原理、方法、步骤及大系统的优化技术，导弹武器系统的命中精确性分析、可靠性分析与设计、效能分析与费-效分析等；第二部分研究导弹系统设计，包括总体方案设计、典型航迹分析与基准弹道设计、总体参数计算与确定、导弹外形设计及导弹动力特性分析等。

书中除理论分析、设计原理与工程计算方法之外，并引入了许多实例和技术数据、参考资料等。本书可作为导弹设计与飞行器工程专业的教科书，也可作为高等学校研究生和从事系统工程、管理工程、导弹设计与运用研究的技术干部的参考书。

## 导弹系统分析与设计

文仲辉 编著

\*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京通县向阳印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 22.75印张 563千字

1989年10月第一版 1989年10月第一次印刷

ISBN 7-81013-239-3/TJ·8

印数：1—1700册 定价：4.50元

# 前 言

本书是根据导弹设计专业教学计划安排的《导弹系统分析与设计》课程教学大纲编写的。全书共七章，用72至90学时讲授。

利用系统工程观点和方法研究导弹系统的系统分析与设计问题，是本书的一种尝试。但因导弹武器系统是一种复杂的大系统，包括的分系统很多，涉及的专业面广，技术综合性强，因此本书不可能把所有的问题都做深入的研究，而只着重探讨反坦克、反飞机及反舰(艇)等战术导弹的工程设计与系统分析问题，其中以反坦克及反飞机导弹的系统分析与设计为重点。

“导弹系统分析与设计”就其含义而言，不是一个单独的学科，是多种学科的综合运用。它本身以工程实践为基础，以数学、力学、自动控制理论等为主干，并以计算机科学及其应用为工具，因而具有鲜明的学科性和很强的理论基础。本书中既有深入的理论分析、原理探讨，又有丰富的概念描述，也有具体的工程方法介绍。

导弹系统分析是随着系统工程科学的发展而逐步发展形成的，但到目前为止，还很少有关导弹武器系统分析的专著问世。本书力求做些尝试，将系统工程的基本理论和方法与导弹武器系统分析的实际问题结合起来，这也正是许多工程技术人员所希望的。所以，在第一章介绍系统分析基本原理和基础知识的基础上，第二章分析研究了导弹系统的系统分析问题，着重研究导弹系统的费用-效能分析。首先讨论了命中精确性、系统可靠性及系统的效能及其量度等问题。

导弹系统设计，国内、外已有相当数量的专著做了研究，但多数是针对某一种类型，缺乏将一些共性的问题加以抽象与概括，本书在这方面做了探索，如第五章，导弹设计参数的分析与确定，有对地-空导弹、反坦克导弹的专门分析，也有对一般战术导弹都适用的方法论述；第七章导弹动力特性分析，力图将其一般化，使之对战术导弹都能适用；第三、四、六章都注意到兼顾超音速飞行器与亚音速飞行器，“滚转”导弹与“不滚转”导弹等各种特点和共性的结合。

本书中介绍了许多经验公式、技术数据、设计参考资料、导弹及目标的特性参数等，它来自实际研究工作的经验总结，对于工程技术人员无疑是很宝贵的；为了帮助读者加深对基本概念的理解，掌握设计原理和方法，在重点和难点地方引入了计算实例，并在每章提出了一些思考题。

本书第四章由张靖编写，其余全部由文仲辉编写并主编全书。北京航空航天大学过崇伟教授主审全书，提出了许多宝贵意见。北京理工大学万春熙教授、余超志副教授对本书进行了审阅与校对，苗瑞生教授、边淑英、夏咸松等同志对本书的出版给了很大的帮助和支持，仅向他们表示衷心的感谢。

由于编著者水平所限，书中的错误和不妥之处在所难免，衷心欢迎广大读者提出批评指正。

编著者

1988年6月.

# 目 录

## 绪论

### 第一章 系统分析基础

- § 1-1 系统和系统分析的概念 ..... ( 6 )
- § 1-2 系统分析的内容与步骤 ..... ( 9 )
- § 1-3 系统建模与仿真技术 ..... ( 14 )
- § 1-4 大系统优化技术 ..... ( 38 )
- § 1-5 系统预测方法 ..... ( 63 )

### 第二章 导弹系统分析

- § 2-1 战术技术要求分析 ..... ( 69 )
- § 2-2 导弹射击精确性分析 ..... ( 75 )
- § 2-3 导弹系统的可靠性分析 ..... ( 83 )
- § 2-4 导弹系统的效能分析 ..... ( 98 )
- § 2-5 导弹系统的费用-效能分析 ..... ( 107 )

### 第三章 导弹武器系统总体方案分析

- § 3-1 概述 ..... ( 115 )
- § 3-2 战斗部方案分析 ..... ( 115 )
- § 3-3 制导系统方案分析 ..... ( 129 )
- § 3-4 动力装置与推力方案分析 ..... ( 138 )
- § 3-5 发射方案分析 ..... ( 144 )
- § 3-6 导弹气动布局方案分析 ..... ( 149 )
- § 3-7 导弹总体部位安排 ..... ( 152 )

### 第四章 导弹典型航迹分析及基准弹道设计

- § 4-1 导弹典型航迹的分析 ..... ( 160 )
- § 4-2 弹道优化与基准弹道 ..... ( 165 )
- § 4-3 导弹速度方案的设计 ..... ( 169 )
- § 4-4 导引弹道运动学分析及需用法向过载的计算 ..... ( 175 )
- § 4-5 遥控导弹导入段弹道的分析 ..... ( 189 )
- § 4-6 末段寻的导弹启控条件的分析 ..... ( 200 )

### 第五章 导弹设计参数分析与确定

- § 5-1 设计参数及其确定原则 ..... ( 207 )
- § 5-2 主要参数确定方法及优化的一般原理 ..... ( 208 )
- § 5-3 重量分析及质量方程 ..... ( 212 )
- § 5-4 战术导弹燃料质量比的计算方法 ..... ( 215 )
- § 5-5 导弹结构质量计算 ..... ( 225 )
- § 5-6 推重比的确定及推力方案设计 ..... ( 228 )
- § 5-7 翼载的确定 ..... ( 234 )
- § 5-8 反坦克导弹设计参数的选择 ..... ( 235 )

<b>第六章 导弹外形设计</b>	
§ 6-1 导弹外形设计的任务 .....	(243)
§ 6-2 导弹外形与总体参数的关系 .....	(243)
§ 6-3 导弹的可用攻角选择 .....	(245)
§ 6-4 弹翼平面形状设计 .....	(248)
§ 6-5 翼剖面设计 .....	(254)
§ 6-6 弹翼面积及几何尺寸计算 .....	(256)
§ 6-7 空气动力控制面设计 .....	(262)
§ 6-8 弹身外形设计 .....	(266)
§ 6-9 滚转导弹空气动力及外形设计 .....	(274)
<b>第七章 导弹动力特性分析与设计</b>	
§ 7-1 导弹系统动力学分析基础 .....	(281)
§ 7-2 弹体环节的传递函数 .....	(292)
§ 7-3 弹体环节的动力特性分析 .....	(298)
§ 7-4 弹体环节的动态特性参数选择 .....	(307)
§ 7-5 滚转导弹的运动特性 .....	(311)
§ 7-6 滚转导弹的动态特性分析 .....	(320)
§ 7-7 滚转导弹的转速选择 .....	(332)
<b>附录</b>	
1. 国外导弹性能表 .....	(337)
2. 国外军用飞机性能表 .....	(344)
3. 国外主战坦克的主要性能表 .....	(346)
4. 坐标系的规定 .....	(347)
5. 正态分布函数 $\Phi(x)$ 表 .....	(349)
6. 计算导弹滚转角速度的 $I(x)$ 函数表 .....	(350)
<b>复习思考题</b> .....	(351)
<b>主要参考文献</b> .....	(354)

# 绪 论

## §0-1 战术导弹发展现状

战术导弹系指用于攻击战术性目标的导弹。它包括反飞机、反坦克(装甲车辆),反舰(潜)艇及对付地面工事、桥梁、机场、武器库等活动及固定点目标的导弹。这些导弹有从地面(海面)发射的,也有从空中发射的;有固定发射阵地发射的,也有机载、车载发射的,还有单兵(兵组)携带与发射使用的。

二次世界大战以来,各类战术导弹不断更新,这一般都经历了两、三代或三、四代产品的发展研制过程。特别是七十年代后期至八十年代以来,随着科学技术的突飞猛进,现代新兴工业的迅速发展,使战术导弹的进步已达到了惊人的程度。激光、微光夜视、光纤通讯、光电成像技术及毫米波通讯与制导技术以及系统科学、计算机科学、复合材料科学、人工智能科学等等,都相继在战术导弹的发展研制中得到推广与应用。例如,新一代的反坦克导弹“坦克破坏者”(Tank Breaker)采用图象识别技术,进行自动导引,具有半智能的功能;美国的FOG-M计划和西欧的“独眼巨人”(Polyphème)导弹发展中,采用光纤电视制导,并可对目标锁定,实现自动导引,拟将代替“发射后不用管”(Fire and Forget)的导弹。具有专家系统的寻的器、人工智能驾驶仪的研究,微电脑在导弹制导系统中的应用,都推动了战术导弹的研制与发展。

根据不完全统计,截至1980年左右,世界各国用于发展、研制、采购战术导弹的经费达到700~800亿美元以上,其中以反飞机的防空(地-空和空-空)导弹耗资最多,在400亿美元以上,约占总经费的60%以上;发展、研究了战术导弹300~400种以上,共生产、装备战术导弹200~300万枚以上,其中以反坦克导弹最多,约达150~200万枚。

大量发展、研制和装备战术导弹,是世界各个军事强国的一个重要决策。他们不仅用于本国装备,同时还大量出口转让。根据几种导弹,如“米兰”(Milan)、“霍特”(HOT)、“陶”(TOW)、SS-10、SS-11、SS-12、“安塔克”(Entac)、“柯布拉”(Cobra)、“萨格尔”(Sagger)等反坦克导弹的不完全统计,截至八十年代初就已先后向数十个国家和地区出售或技术转让,销售量在50~60万枚以上。

从二次世界大战以后,至今,各类战术导弹从未停止使用。并在各种局部和地区性战争中,发挥了重要作用。如1973年的中东战争中,以反坦克导弹反坦克取得了惊人的效果。1982年的英、阿马岛战争及以后的两伊战争等局部和地区性战争中,战术导弹都起了重要的作用。以致使战术导弹的研究、发展和装备越来越受到重视。

现代战术导弹的发展过程中,反映出具有倾向性的特点是:

(1)简化设备,提高战术机动性能和地面机动能力。

(2)发展“电子对抗”设施,提高抗干扰能力。

(3)发展多用途和多功能的导弹。例如,既能用于反坦克,又能用于反飞机(美国与瑞士联合研制的ADATS导弹系统即是一例);既能攻击中、高空目标,也能攻击低空、超低空目

标(如苏联的Goblet)。

(4)采用多模式或复合制导。为了提高抗干扰能力和作战使用(范围),许多空-空和空-地导弹都采用两种或两种以上的寻的器(如R530、Maverick、AA-6等)。空-地(舰)和地(舰)-空导弹,则采用中制导加末段寻的组成复合制导(如美国的“爱国者”、苏联的SA-4等)。

(5)力求降低成本,提高导弹的作战效能,使全武器系统的效-费比达到最理想的水平。即使是很发达的国家,现在也很注重武器系统的效能与费用研究,寻求发展“廉价导弹”、“高效能导弹”的计划。

## §0-2 战术导弹的特点

战术导弹作为一种武器系统,与战略导弹及其它武器系统相同,要求尽可能达到“远、准、狠”地打击敌人;是为政治服务的工具;一个完整的系统,是由若干子系统构成的,它涉及的学科广、技术领域宽,导弹系统的设计、研制与发展是复杂的系统工程问题;与其它飞行器一样,技术复杂,综合性强…。但是,战术导弹本身也具有自己的特点。

首先,战术导弹主要用于攻击点目标,有的(如反坦克导弹)要求必须直接命中目标。导弹的命中精度必须很高,脱靶距离很小。例如,反坦克导弹,其射程为2000~3000m,重型反坦克导弹射程为4000~5000m,而坦克的最小横向尺寸(高度)约2.0m左右,如果瞄准中心与目标中心重合,则允许导弹的最大横向偏差必须小于1.0m,考虑系统误差和散布特征后,允许导弹的横向偏差为0.5m左右。对导弹的精度要求就相当于1/4000~1/10000;反飞机的地空导弹,如果战斗部的杀伤半径为30~50m,射程在50km以内,则精度要求比反坦克导弹要低几倍。对于大型战略导弹,尽管其射程可达几千公里到一万公里以上,然而其核战斗部的威力半径可达几十公里,因而其精度要求远低于反坦克导弹和地-空导弹,甚至可能低1~2个数量级。

其次,战术导弹主要是用于攻击活动点目标,如反飞机、反坦克、反舰(艇)等。目标本身具有一定的机动能力,有的(如飞机)具有很高的机动性能。因而,导弹必须具有更大的机动性能,才能捕获并跟踪目标,直至最后命中并摧毁目标。这就要求战术导弹能够提供较大的法向过载,并具有良好的动态响应特性。

第三,由上述两方面的特点,决定了战术导弹的结构和系统组成都是比较复杂的。就弹上的制导设备而言,对于战术导弹,既要有导引设备,又有控制设备,一般都具有三个通道的控制系统。而且,战术导弹大都是体积小,内部设备多,结构复杂。尤其是反坦克导弹,反飞机的空-空导弹和超低空的地-空导弹,都具有“麻雀小,五脏全”的特点。

第四,战术导弹大多数和常规武器装备技术联系比较密切,某些性能受常规武器装备的影响,技术与常规武器装备互相渗透。例如,有的反坦克导弹和单兵发射使用的超低空防空导弹,利用弹体滚转特性,进行单通道控制,是利用并发展了线膛炮发射炮弹的技术成就;采用火炮或无座力炮发射反坦克导弹,则是常规武器技术的进一步发展与提高,这种方法将使导弹受到高达几千到一万个g以上的过载;用飞机、车辆和舰(艇)作为导弹的发射平台,既利用了常规武器装备的成就,同时也给导弹带来了许多复杂的技术问题。

除上述特点之外,战术导弹还具有生产量大,重量轻,体积小,相对成本低等特点。由于这些特点,使战术导弹的设计、研究、发展、生产都具有其相应的特征。

## §0-3 导弹的研制过程

导弹的研制过程或研制程序，随着类型不同，研制的程序是有差别的。新型号的设计与研制和仿制、改型设计其研制程序也是不同的。不同的国家，有不同的条件和体制，研制过程也大不相同。所以，在这里只能就设计研制一种新产品的大致过程和各阶段的主要工作进行简要的分析。一般的讲，从提出任务开始，到设计定型与生产列装之前的研制过程，可以大致划分为以下几个阶段：

### 一、提出任务和设想

发展一种新的武器系统，常常开始于两种情况：一是由军队使用部门，即军事技术装备部门根据作战任务的需要，首先提出任务和设想的技术要求；另一种是由武器装备的研究部门或工业生产部门，根据科学技术的发展与进步，提出一种具有创新的概念，进行探索与研究，逐步形成一种新武器概念的设想。以上两种情况，在提出新的任务或新概念设想之前，都经过对客观情况的调查研究，和一定程度的科学分析。它必须对战争环境、目标特性、技术基础、经济能力等进行分析研究。换句话说，提出任务设想必须有明确的目标，有充分的依据，有周密调查和系统分析的结果。既考虑到需要和可能性，又看到技术发展的前景。

### 二、战术技术论证阶段

战术技术论证阶段主要解决两个方面的问题，即：从作战使用要求考虑，研制一个新武器系统应该满足哪些要求，达到什么样的指标；另一方面是从技术、经济等方面考虑，研制该类武器系统可能达到哪些要求和技术指标。当然，这两方面是互相联系的。

战术技术论证是将提出的任务设想具体化。这个阶段的工作应该由军队装备使用部门和工业生产部门共同承担。工作过程中应对该武器系统的先进性，装备使用的迫切性，军方采购的可能性，技术上的复杂性，生产制造的现实性以及部队装备编制、生产研制周期、技术经济效益等，作深入的调查研究和全面的分析论证。弄清楚提出发展该武器系统的必要性，武器系统的优越性，装备后的生命力，在此基础上，再进一步研究如何规定战术技术要求指标更合理、更现实。在分析论证过程中，应进行系统分析与系统预测工作，以便最后能为发展新武器系统提出一整套比较确切的、合理的战术指标和技术要求。

### 三、方案论证、预研阶段

方案论证或方案设计(Concept Design)又称为初步设计，有的国家(如苏联)或学者又把这个阶段的工作称为草图设计。其基本任务就是在发展新武器系统的任务设想和战术技术要求初步确定的基础上，全面设计整个导弹武器系统的总体方案，包括各子系统和各组成部分的选择与初步确定。通过系统分析、方案评比，确定导弹系统的总体性能和主要参数，并对各子系统的特点、性能参数等进行初步计算分析，提出指标和技术要求。

预研阶段的任务是对关键技术问题进行分析研究和试验研究。根据总体方案设计或战术技术要求论证过程中提出的重要技术问题，或对方案确定带有关键性的技术问题，开展专题研究，通过研究取得的结果和结论，为总体方案和战术技术要求的确定提供依据。

方案论证(或方案设计)、预研工作和战术技术要求的分析论证,彼此之间是互相联系的。它们之间的阶段划分并不是截然分开的,常常需要互相交错,反复进行。为了研究问题方便,大致划分的这种研制程序,并非绝对不变的。例如,预研阶段,与每个国家的技术储备、工业技术基础等均有关,这个阶段或长或短,或先或后都可根据具体情况决定。但是,方案论证阶段是很重要的,必须有充分的时间,对总体方案进行充分的论证。很多经验都已经证明,一个武器系统发展研制工作的好坏与成败,很大程度上取决于总体方案的正确性与合理性及其论证工作的充分程度。

#### 四、技术设计阶段

技术设计是设计工作全面深入开展的阶段。在这个阶段中,承担设计研究的各单位,要根据总体方案的要求,对各分系统、各部件及组件进行具体设计和试验、试制及实验研究,以保证实现战术技术要求和总体方案。

技术设计阶段,各分系统需要进行大量的实验研究。例如,动力系统进行地面实验,测量内弹道特性参数,并进行调整;制导系统进行室内模拟试验,各制导部件进行联合实验,协调制导系统的输入输出特性;导弹弹体通过风洞模拟试验,测量气动力和力矩特性参数,为最佳外形设计提供依据;通过结构强度实验,合理确定结构尺寸等。通过大量的试验和模拟,考核各子系统及各部件的性能,并对设计进行修改与完善,最后完成各分系统及各部件的图纸设计与样品试制。

技术设计阶段的后期即可进行全系统和各子系统的仿真试验,为飞行试验做好准备。

#### 五、试制与试验阶段

经过技术设计,各部件、零组件的工艺设计即可进行。各部件可同时投入生产试制,并组装供试验用的样机。试制过程中可以考核设计的合理性与工艺性。同时,应对设计中采用的新材料和新工艺方法进行试验研究。

样机试制过程中,应严格控制质量,保证提供符合要求的高质量的试验样机。

制造的样机,首先应在地面进行联合试验,弹上各分系统在发动机不点火的情况下进行通电联试,整个制导系统在地面进行实物联合试验,通过联试考核全系统的工作可靠性。

导弹系统经过全系统的仿真和地面联试之后,即可进行飞行试验。

飞行试验是综合检验全武器系统设计和加工质量的最后一个环节,也是最重要,最真实和最有效的检验环节。飞行试验中可以考核设计的成功率,同时也可以测得大量的数据,取得很多在地面试验中不可能获得的数据资料,因此,飞行试验也是一个很重要的研究阶段。

因为许多大气中的飞行条件无法真实模拟,仿真也不可能准确到接近真实飞行试验的程度,因此,飞行试验中发生故障和失败是正常的,飞行试验不可能一次成功,但是,每次试验的成败都应当深入分析研究,要发现矛盾,寻找规律,总结经验,指导试验;另一方面要尽量做好地面联试及分析研究,为飞行试验打好基础,以减少飞行试验中的失败率。

无论飞行试验进行的情况顺利与否,研制一个新的导弹系统都需要进行多次不同条件下的飞行试验。必须对飞行试验很好地计划安排,加强科学性,合理地组织管理。每次试验不可能测得所需要的全部数据,也不可能对全部分系统和零部件进行考核,因此,每次试验之前应确定明确的目标和预期的目的,并制订详细的试验大纲,按照一定的要求,有计划、有

步骤地进行。飞行试验与样弹试制工作应同时交错进行，通过试验，进行修改。所以，试验与试制阶段也不是截然分开的。

## 六、设计定型阶段

通过飞行试验，需要根据发现的问题对设计进行审查、修正，并按照修改后的设计再进行试制与试验。这样，经过若干次反复之后，就可以比较完满地达到战术技术要求，实现总体方案，在这种情况下即可进行设计定型。

设计定型之前，应根据军队装备要求，在模拟各种实战环境条件下，进行装运、转载和实弹射击试验。按照试验、验收技术规范进行抽样试验与检验，全面综合地考核与鉴定导弹系统的战术技术性能。

经过全面的试验与鉴定之后，即可整理、总结全部设计、试验、生产的图纸及有关技术资料，制订各种技术文件，形成一整套供定型的技术文献。

定型试验成功地通过之后，在资料整理也已完备的条件下，即可提出申请，并上报有关文件资料，召开定型会议。经有关领导部门批准定型后，即可转入试生产。

## 七、生产定型与列装使用

通过设计定型之后，武器系统即可转入工业生产部门，进行生产。生产阶段的初期，应先经过小批量的试生产，待产品的生产质量稳定之后，通过生产(工艺)定型，才能转入大批生产。最后，由军方向工业生产部门订购，并装备投入使用。

# 第一章 系统分析基础

## §1-1 系统和系统分析的概念

### 1-1-1 系统

在人们的日常生活中，经常接触到许多被称为“系统”的事物。“系统”这个词也早已被人们所熟悉和应用。可以说系统到处皆有，系统的概念也早已形成。但是，各种书籍和文献中，对系统的定义并不完全相同。按照人们通常的理解，“系统就是由相互作用和相互依赖的若干组成部分有机地结合成具有特定功能的综合体”<sup>[1]</sup>。这样定义的系统其组成仍可以有千差万别，大小规模也可能相差十分悬殊，其功能也可能各不相同，但它们都应当具有一些基本的共同特性。各种系统所应具备的共同特性就是：

#### 一、系统组成的集合性与层次性

任何一个系统它必须由两个以上的部分或单元(element)所组成，一个单元或一个独立的事件不成其为系统。一个系统是由大量的事物，设备或环节构成的集合体。

系统由若干组成部分结合而成，而每一个组成部分一般又都自成一个系统，该组成部分(或单元)称为原系统的子系统。这些子系统又是由比它更下一层的子系统(也称为亚子系统)所组成。原系统又可能是它所从属的一个更大系统的组成部分。例如，研制一种战略核导弹，就是研制由弹体、弹头、动力装置、制导装置、遥测设备、外弹道测量和发射等子系统组成的一个复杂系统。每一个子系统又是由更下一层的亚子系统构成的，如弹头子系统是由引信装置、保险装置和热核爆炸装置等组成。而战略核导弹本身又是与核动力潜艇、战略轰炸机等组成战略防御武器系统。甚至，亚子系统(如引信装置)还可能由再下一层的若干个电气或机械元件(或单元)所构成。所以在观察、研究一个系统时，要注意分析系统的组成结构及其相互关系，注意其集合特性和层次性。

#### 二、系统各组成部分的相关性

系统是由各组成部分的有机联系而构成的整体。系统的各个组成部分有它自身的独立性和独自的功能，但它们不是简单的机械混合体，而是相互作用、相互依赖、相互影响和相互共存的有机联系的整体。由各个组成部分的特性及其之间的相互作用与影响而构成了整个系统的特性。例如，太阳系中的行星、卫星、彗星、流星等，它们之间存在着一定的力学关系和运动关系，彼此互相影响、相互作用、相互共存而形成完整的太阳系。

研究一个系统时，不仅要研究各个组成部分的性能，还需要研究在各组成部分之间相互作用和相互影响下形成全系统的总体特性和功能。往往有这种情况，系统各个组成部分并不先进，但它们组成一个系统总体后，却具有足够的先进性或优越性。反之，也有各个组成部分是先进的，但它们组成的系统总体却不具备先进性或优越性。例如，苏联的米格-25型飞机，有些零件和部件并不是最先进的，但其总体性能中的爬高能力和飞行速度达到了世界第一流水平；又如Viper型导弹上的制导部件并不是最先进的，但构成导弹武器系统后，可以

达到很高的制导精度，并具有较长的生命周期。所以，系统设计师应着眼于总体性能最优，而不要追求个别零、部件或子系统的最佳性能。

### 三、系统的特定功能和目的性

每个系统都有独自的功能，随功能不同使各个系统具有不同的特性。构成系统的各组成部分或子系统也分别具有各自的特定功能，并由于它们之间相互作用、相互影响、合作而形成整个系统的功能。正如电子计算机的功能是由输入、输出设备，软件系统，硬件系统、操作系统、控制设备及人等各子系统的特定功能组合而成一样。导弹武器系统的功能是由战斗部、制导、推进、发射等各子系统的特定功能综合形成的。

系统的目的性体现为任何系统都是为实现一定的目的而构成的。即将系统各组成部分集合为一个整体以达到共同的目的。系统至少有一个目的，也可以有多个目的。为了研究通过某种策略或手段而达到目的的程度，常将目的量化为目标。人造系统和可改造的自然复合系统均具有明确的目标性。

### 四、系统对环境的适应性

系统是由若干个组成部分结合而成的集合体，在系统以外的各种因素或事物常常会对系统或其中的子系统产生影响。在研究系统时，必须对系统的环境予以充分的考虑。系统的环境对系统的影响和作用，没有达到使系统的功能和性质发生根本变化时，可以认为系统是处于相对稳定状态，它对环境是适应的，或者说系统具有环境适应性。当环境的影响使系统的性质发生根本性的质变，甚至使系统被破坏或形成另一个新系统时，系统不具有环境适应性。在研究系统时，必须注意环境的影响和作用，有时要将环境作为一个重要因素加以充分的考虑。

环境对系统的作用可以看作是对系统的输入，系统对输入进行工作后产生输出，把输入转换为输出这也是系统的功能。

导弹在大气中飞行时，由于阵风及其它扰动因素的作用，将使导弹产生扰动运动，偏离理想弹道。但在导弹系统的制导子系统作用下，通过稳定与控制，仍能使导弹系统准确地命中目标，这种作用过程，正是导弹系统对环境的适应性的一种体现。此外，导弹武器系统在贮存、运输过程中，都将受到大气和地理环境等各种因素的影响和作用，在分析导弹武器系统的成本、效能、生命周期等时，都应当仔细考虑。

在系统特性的基础上，人们又定义了“系统思想”、“系统观点”的概念。“系统思想”就是按照系统的基本特性分析处理问题的思想。所谓“系统观点”就是分析处理问题时，要统筹全局，一切有利于全局，局部服从全局的观点。按照“系统观点”，在导弹武器系统设计与分析时，要正确处理局部与全部的辩证关系。正如钱学森同志所说“……局部与全部的辩证统一，事物内部矛盾的发展与演变等，本来是辩证唯物主义的常理；而这就是“系统”概念的精髓”。<sup>[1]</sup>

## 1-1-2 系统分析

由系统的概念可知，“系统”是一种极其复杂的研究对象。而“系统工程”是组织管理“系统”的工程技术，它是在“系统”的规划、研究、设计、制造、试验和使用过程中应用了近代科学的组织管理方法。这种组织管理方法是一种对所有“系统”都具有普遍意义的科学方法。但在系统工程的实现过程中，有一个基本的处理方法，它对各个门类的系统工程，对整个系统或是某一个子系统而言，都必须应用的。这个系统工程的基本处理方法，是根据系统的概念与

系统的基本组成和特性，把对象作为系统进行充分调查了解与分析，并将分析结果加以综合、评价，以寻求最有效地实现目标。系统工程的基本处理方法的具体化就是系统分析、系统设计。

系统分析(Systems Analysis)这个名词是美国的兰德(RAND)公司提出的。1944~1945年间，美国国防部为美国空军与道格拉斯飞机公司签订了名称为兰德(RAND)项目的合同(RAND是Research And Development的缩写)。它的第一个研究报告题目是“实验性环球空间飞行器的初步设计”。这个工作被认为是典型的系统工程的工作，此后成立了兰德公司，他们没有实验室，专门进行系统分析工作，不制造硬件。他们将数学方法与工程方法结合，创造了“系统分析”方法，称为兰德型系统分析法。二次世界大战后，在系统工程方面人们常引用兰德公司的工作为例证。它也是美国政府的一个咨询单位，被誉为智囊团。

系统分析是一种辅助决策的工具。它是由系统分析人员按照系统思想、观点和理论，用科学的分析方法和工具，探索出一些可供选择的方案，并从各个角度对各方案进行评价，将结果和结论提供给决策者，使决策者能选择最理想的方案进行决策。因此，概括地说“系统分析”就是：按照系统观点，用科学的分析方法，对确定的目标进行综合分析评价，寻求最佳可行方案，帮助决策者进行决策。系统分析的目的就是寻求最合理的最优系统。

系统工程研究的对象一般是复杂的大系统，系统中各因素有确定性的因素，有不确定的(但可预测的)因素，也有不确定的且不可预测的因素。因此，对这样的系统要进行正确的决策是困难的，必须采取合理的方法和适当的措施进行有效的系统分析与处理。系统分析过程中，在解决或处理系统的基本问题时，要处理好各种因素间的关系，要遵循一定的原则。系统分析的基本原则是：

### **一、外部条件与内部条件相结合**

构成一个系统，不仅受到内部因素的影响，也受到外部条件的制约。例如，设计一个导弹武器系统，不仅受到导弹武器系统各子系统本身的技术基础、研制力量、试验条件、技术储备、元件、材料、试制手段、检测设备等的限制，而且还受到许多外部条件诸如：使用部队、战士操作、战斗环境、自然气候、对付的目标、敌人对策等的影响。在进行系统设计与系统分析时，必须把所有能考虑到的内部和外部的各种有关因素结合起来，进行综合分析研究。

### **二、当前和长远目标相结合**

选择一个良好的方案，不但要考虑目前的状况，以及近期能够达到的目标，同时必须估计到发展速度，经过一定时期的努力奋斗以后，将来(某一个时期)能达到的水平、照顾到长远利益和奋斗目标。尤其是武器系统的设计与分析，要充分注意目标的发展，要跟踪国外新技术水平。如果选择的方案当前是可行的、对国民经济是有利的，但方案本身的生命周期不长，很快就需要改进、换代，对国家总投资不利，这样的方案就是不可取的。或者所选择的方案具有足够的先进性，但目前难于实现，或者虽能实现，但国家投资过大，会导致难以承受的困难，这也是不可取的。

### **三、局部效益与整体效益相结合**

一个系统由许多子系统(或亚子系统)组成，如果每个子系统的效益是好的，加起来使整个系统的效益也是好的，这固然是最优，但实践中往往不可能达到这种程度。很多情况下，一个大系统中有些子系统从局部看是合理的、经济的、先进的，但从全系统看它便是不合理、

不经济的，显然，这种方案是不可取的。在某些情况下从局部子系统看是不合理、不经济、落后的，但组成大系统后，从整个系统看是先进的、经济的，那么这种方案是可取的。系统分析时，要从整个大系统的全局出发，使全系统达到最经济、最合理、效益最佳。

#### 四、定量分析与定性分析相结合

系统工程的特点之一就是要求定量分析，尽可能将各种因素进行量化。由于实践中有许多因素很难量化，不能完全避免定性分析的方法，因此，在系统分析时，对于不能量化的指标，如政治因素、人的精神、政策影响、环境变化等通过定性分析与定量分析很好地结合而加以评价。但是，无论是定量还是定性分析，都要确定一定的准则或标准，用这些明确的准则和标准作为共同的量度，以便对参加评比的方案或因素进行评定。

## §1-2 系统分析的内容与步骤

### 1-2-1 系统分析的内容要点

关于系统分析的过程和内容要点的解释，目前是众说纷纭。有一位著名科学家曾做过这样的解释：“……系统分析是指对若干可供选择的执行特定任务的系统方案进行比较选择；如果这种比较选择着重在成本费用与效果方面，则称为费用效果分析”<sup>[2]</sup>。推广一点讲，系统分析是研究决策者的意图，为决策者提供依据。为此，要对可供选择的若干方案从费用、性能、有效性、技术可行性、风险性等方面进行分析评比，最后提出最佳选择方案和备选的首席方案。

系统分析是一个有目的、有步骤的探索与分析过程。在此过程中，分析人员要对研究对象的目的、功能、环境等进行充分的调查研究，搜集资料、数据，建立模型，利用科学的方法和工具进行分析处理，并根据各种模型进行评审、仿真或试验。最后整理出完整的系统分析报告(或论证报告)，提出建议作为决策者进行决策的主要依据。

此外，社会系统或大型工程发展项目在进行开发之前，制订发展规划或计划，与需要系统分析人员通过各种科学的系统分析方法进行系统预测，这也是系统分析的重要内容之一。

美国陆军工程设计指南DARCOM-P706-102号报告<sup>[2]</sup>将系统分析的内容要点概括为七个方面，即：目标、方案、费用、准则或效能量度、模型、结果和建议，并将其称之为系统分析的基本要素。

导弹武器系统分析与上述基本内容相同，但在各种不同情况下(或不同阶段)的着重点有所不同，系统分析内容的深度与广度有所区别。为了发展新型导弹武器系统，在系统设计之前进行系统分析，着重于各种方案的比较与选择，寻求满足战术技术要求的最优方案；对现有导弹武器系统装备之前进行系统分析，着重于研究其最佳战斗使用方案，寻求最大限度地发挥导弹武器系统的效能；生产、制造或产品改进换代过程中，进行系统分析，需要对各分系统、部件、设备及各环节进行分析研究，应着重于费用、效能的分析比较，寻求满足导弹武器系统总体性能的要求并达到最佳费-效比的指标；制订规划、计划，在确定发展研究方向之前进行系统分析，应在考虑技术基础、环境、条件、费用、寿命周期等各种因素之下，进行全面深入的分析研究，寻求最理想的方案选择与决策。

系统分析的各项内容中，系统的目标(目的)分析与确定、系统的模型化、是系统分析的

关键。

### 一、系统的目标(目的)分析与确定

系统的目标和目的是建立(或设计)系统的依据,也是系统分析的出发点。系统的目的是指系统的决策者(包括组织者、使用者)希望系统达到的结果状态的定性描述;用定量指标或近似标准量度所表示的系统最终达到的状态就是目标。一般情况下,目的和目标是一致的,通常不予严格区别。但在系统分析时,为了合理的决策,必须明确目的和目标,并尽量以定量指标表示。

系统目的和目标的分析、确定,包括以下几个内容:

(1) 分析明确建立系统的目的。一个系统有多个或多重目的时,应分清主要目的和次要目的,并可利用目的树的形式进行排列,以定性形式进行分析与确定。

(2) 在保证达到目的要求的前提下,分析约束条件或外部环境。通过分析明确求解问题时哪些是约束条件,哪些是影响系统的因素,对它们的影响和关系均应进行深入的分析。例如环境、资金、材料、技术、期限等对系统的影响和限制,通过分析后,提出相应的措施。

(3) 分析确定为达到目的的各种目标。当需要用具体指标将目的表现清楚时,必须深入具体分析已经考虑到的各种因素,包括确定性的因素和可预测与不可预测的不确定因素,通过定量分析与研究加以确定。

### 二、系统的模型化

#### (一) 系统模型的概念

工程技术中很多地方早就应用了模型,如汽车制造中,外形初步设计后就用简易代用材料制造一个缩小比例后的模型,以观察外形是否美观;飞机和导弹研制中,常用硬木或金属材料制造按比例缩小的模型供风洞试验用,也有用于观察外形、内部设备安装调整的结构模型。这些例子都是实物模型或称为实体模型,是模型中的一种型式。在系统工程中用得最多的还是用图、表、符号、代码、文字等表示的抽象模型。这些模型都能代表实物的某些特征、形状、参量或功能。因此,可以说模型是实体系统的简化表示,是实体系统的一部分抽象或模仿。也就是说,模型是把对象实体通过适当的过滤,用适当的表现规则描绘出来的简洁的模仿品。模型能表征对象实体系统的重要事项和功能特性。因此,系统的模型化就是为表明系统的结构、行为和性能而用适当的数学、物理方式或图象表达实体系统的一种科学方法。

模型所给出的信息必须能选择并确定在物理和数学方面已经公式化的规则。模型要表明所分析问题的有关因素,以及这些因素之间的关系。模型必须反映实际,但又不能太复杂,若近乎实体系统就难以处理,失去了模型的作用。一般模型总是要比实体系统简洁得多,它所表达的因素也只是实体系统中因素的主要部分。

模型比实体容易操作或处理,尤其是一些参数值的改变,在模型中操作处理容易得多。有些因素在现实情况中要很长时间才能看出其变化情况,但用模型研究则可以很快看出变化规律,因而能迅速抓住问题的本质特征。通过对模型灵敏度的分析,可看出各个因素对系统的影响情况。在系统分析中,模型化之所以起着重要作用,其原因还在于没有建立实体系统以供观测和试验之前,可以凭借模型有效地求得系统的设计参数并确定各种约束条件。因此,对大规模的复杂系统模型化尤其重要。

例如,二次世界大战后,国外对战略核武器的发展有两种不同的观点:一种观点主张提

高杀伤力，并提出要制造几吨级的氢弹；另一种观点主张提高导弹的精度。两种观点的争论，通过构造战略核武器杀伤力模型进行系统分析后得出结论。杀伤力 $K$ 与威力 $y$ ，精度 $c$ 的关系模型为

$$K = y^{2/3}/c^2 \quad (1-2-1)$$

由这个模型得知，若 $c$ 不变，当 $y^*=8y$ 时

$$K^*=4K$$

即导弹的威力增加8倍时，杀伤力只增加4倍；若保持威力 $y$ 不变，当 $c^*=c/8$ 时

$$K^*=64K$$

即导弹精度提高8倍时，杀伤力可以增加64倍，这说明提高精度是合理的。

## (二) 系统模型的分类

按照不同的观点，系统模型主要有以下四种分类方法：

(1) 按模型构成的实质，分为实体模型与抽象模型；

(2) 按模型的表达形式，分为数学模型、图示模型、逻辑模型、仿真模型(模拟程序)、探索推理模型；

(3) 按变量性质，分为确定性模型、随机性模型、连续性模型、离散性模型；

(4) 按照模型的功用，分为结构模型、功能(性能)模型、评审模型、计划模型、预测模型、网络模型、优化模型等。

由于系统的复杂性和每个系统分析人员构造模型的经验、艺术、水平有千差万别，所以对于同一系统，为了同一目的，每个人所构造的系统模型不尽相同，甚至不能归并为上列任何一类，通常情况是各类模型的混合或组合。下面对比较常用的按第四种分类方法所列各种模型做简单说明，以便系统分析之前选择模型时参考。

**结构模型** 它是描述系统的结构组成及各单元(或子系统)之间的关系的定性描述模型，可以用框图或表列形式给出，也可用关系式表示为

$$S = (\Omega, R, R^3, \dots, R^n, R(2)) \quad (1-2-2)$$

式中， $\Omega$ 为系统要素集(组成单元集)； $R, R^3, \dots, R^n, R(2)$ 为要素间的关系。

**功能模型** 又称性能模型或行为(预测)模型，可以定量地描述系统的性能或行为，反映系统的工作过程状况与特性。通常根据实体系统输入参数和环境条件、影响因素等建立数学模型，通过分析，输出有关性能的参数及其变化情况，如导弹的质量模型、速度与射程模型等。

**评审模型** 通过该模型可以评审系统的功能、费用、效能、可靠性等，从而评价整个系统或某一部分的优劣，以便选择最优系统，做出最优决策。评审模型随评审对象而异，根据评审对象的目标不同，评审模型可分为单目标和多目标两种型式。

**网络分析模型** 这种模型主要是用于科学管理的一种模型。它是把要开发研制的发展规划和实施过程作为一种系统，利用系统工程的基本处理方法进行处理，其基本原理是把组成系统的各项任务按时间序列展开，通过网络图的形式，统筹规划，全面安排，协调控制，以达到最有效地利用资源(人力、物力、资金、技术等)，从而最快完成工程任务的目的。导弹武器系统是庞大而复杂的系统工程，应用网络分析模型拟订发展研制规划是很有意义的。

**计划模型** 是用于生产组织管理，以计划、调度为目的的一种模型，根据其内容亦可由结构模型或网络模型构成。