

# 系统工程与 无人驾驶飞行器设计

[苏] 且·且·谢维洛夫 著

于本水 张百忍 王泽厚 译 张百忍 校

T50955

宇航出版社

## 译 序

近年来在国内出版了许多有关系统工程方面的著作，但还没有一本系统论述无人驾驶飞行器（导弹、航天器等）系统工程的书。无人驾驶飞行器系统的研制工作迫切需要系统工程理论这个工具，谢维洛夫（Д. Н. Шеверов）所著的《系统工程与无人驾驶飞行器设计》一书可以满足这一要求。

全书共分十一章。前三章主要论述工程系统的结构和联系、系统准则和模型选择原则以及工程系统优化的数学方法。第四章和第七章论述系统参数预测问题。第五章和第六章主要介绍重量模型和经济模型。第八章和第九章主要论述飞行器优化设计的内容。第十章论述组织管理问题。第十一章论述计算机的辅助设计理论。

本书内容新颖，针对性强，得到苏联著名导弹专家米申（В. П. Мишин）院士很高的评价。值得我国从事导弹、航天器以及各种飞行器研制工作的专家、工程师、大专院校的师生和研究生阅读。

本书第一章至第四章由于本水翻译、第五章至第八章和第十一章由张百忍翻译，第九章和第十章由王泽厚翻译。由张百忍担任全书校对。译文难免有缺点错误，恳请读者批评指正。

# 目 录

前言 .....	1
<b>第一章 工程系统的基本概念和研究方法 .....</b>	<b>2</b>
1.1 工程系统的建立和控制原则 .....	2
1.2 基本概念——优化、数学模型、目标函数、约束条件 和控制参数 .....	6
1.3 结构和联系。选择准则的法则 .....	11
1.4 系统的划分及其建立原则 .....	14
1.5 迭代过程——研究工程系统的基础 .....	17
1.6 工程系统的数学模型概述 .....	22
1.7 工程系统参数优化的数学方法概述 .....	25
<b>第二章 系统研制过程, 工作计划拟订和技术要求论证 .....</b>	<b>30</b>
2.1 工程系统的研制阶段, 拟订计划和技术要求 .....	30
2.2 工程系统各种问题之间联系的分类和结构研究方法 .....	36
2.3 论证技术要求的迭代方法 .....	38
<b>第三章 工程系统的有效性及其评定准则 .....</b>	<b>49</b>
3.1 有效性和工程系统的品质特性 .....	49
3.2 飞行器系统有效性准则 .....	53
3.3 相对准则、类比准则和综合准则 .....	58
3.4 矢量准则和折衷优化方法 .....	63
<b>第四章 工程系统特性的预测 .....</b>	<b>69</b>
4.1 预测问题和预测的分类 .....	69
4.2 用外推法预测工程系统的主导参数 .....	73
4.3 确定飞行器主导参数的专家评定法 .....	84
4.4 综合等距外推法 .....	87

4.5 解决飞行器特性预测问题的一般程序 .....	90
<b>第五章 飞行器重量模型和重量系数预测 .....</b>	<b>93</b>
5.1 重量模型和飞行器组件的重量方程的构成 .....	93
5.2 装有液体火箭发动机的飞行器的导出型重量方程 .....	99
5.3 装有固体火箭发动机的飞行器的导出型重量方程 .....	103
5.4 重量储备和推进剂的安全贮备 .....	107
5.5 重量方程系数的精度 .....	112
<b>第六章 同型飞行器系统经济分析和经济模型 .....</b>	<b>118</b>
6.1 经济分析和经济方程 .....	118
6.2 同型飞行器系统的费用 .....	120
6.3 系统部件费用的确定 .....	123
6.4 确定飞行器费用的方程 .....	131
6.5 火箭系统和同型飞行器系统的费用 .....	137
6.6 系统部件费用预测 .....	143
6.7 经济计算精度评定 .....	146
<b>第七章 飞行器设计参数预测 .....</b>	<b>151</b>
7.1 设计参数、确定设计参数的标准模型 .....	151
7.2 飞行器级数预测 .....	155
7.3 最优级间重量比的确定 .....	158
7.4 装有液体火箭发动机的飞行器推重比系数的选择 .....	163
7.5 装有液体火箭发动机的飞行器长细比的选择 .....	170
7.6 发动机喷口截面的最优压力选择 .....	172
7.7 发动机的压力值预测 .....	177
7.8 装有固体火箭发动机的飞行器各级装药长细比选择 .....	182
<b>第八章 飞行器优化设计方法 .....</b>	<b>191</b>
8.1 飞行器总体设计及其模型 .....	191
8.2 用随机搜索法和离散迭代法求解飞行器参数优化问题 .....	199
8.3 两个迭代循环的飞行器参数优化题解的数学模型和程序 .....	203
8.4 飞行器的初步总体设计 .....	216
<b>第九章 飞行器参数优化的某些功能问题 .....</b>	<b>243</b>

9.1 多目标系统及其组成选择 .....	243
9.2 地面系统中的同型飞行器系统最优应用范围选择 .....	245
9.3 在系统发展的一定时机航天系统运载器组成的优化 .....	255
9.4 输送系统运载器组成的优化 .....	258
9.5 航天系统运载器组成按载荷和时间的二维优化问题 .....	261
<b>第十章 飞行器研制过程的组织与计划</b> .....	<b>263</b>
10.1 计划问题 .....	263
10.2 设计局的任务 .....	265
10.3 网络计划管理 .....	271
10.4 根据可靠性—时间—费用关系确定最优工作计划 .....	277
<b>第十一章 设计局工作自动化和计算机辅助设计理论</b> .....	<b>289</b>
11.1 设计过程自动化 .....	289
11.2 自动化管理系统和设计局的工作 .....	292
11.3 计算机辅助设计解题的结构和一般方法 .....	298
11.4 用电子计算机选择飞行器仪器舱的最优布局 .....	306
附图 .....	313
参考文献 .....	315

## 前 言

在飞行器设计过程中，传统的工程分析和经济分析方法日趋统一。预测和拟制计划的方法正在改进，工程系统理论和计算机的应用使繁重工作自动化的范围也正在扩大。

近年来，相继出现了许多论述工程系统理论方面的著作，但是，在这些著作中，对如何应用工程系统理论来设计无人驾驶飞行器的问题尚未得到充分的论述，并且也很少注意到参数预测、经济分析与设计过程的组织和自动化问题。

本书首次研究了工程系统的结构分析和联系、系统准则和模型选择规则，介绍了目标函数的综合方法。在使用分块模型和综合模型基础上，提出了预测参数的综合法和研究工程系统的迭代——归纳法。

本书非常注意飞行器各种数学模块的建立方法，其中包括重量、经济、有效性和弹道模块的建立。列举了使用电子计算机来确定装有液体火箭发动机和固体火箭发动机的飞行器的最优数学模型和计算方法。本书叙述了飞行器的多目标地面系统和航天运载器的功能、类型和参数选择的方法和算法，并附有计算例题。还研究了设计工作的组织问题以及飞行器的自动化设计方法。

本书将引起从事制造、研究无人驾驶飞行器和航天技术问题专家们的极大兴趣。

B. П. 米申院士

# 第一章 工程系统的基本概念 和研究方法

## 1.1 工程系统的建立和控制原则

解决复杂工程系统方面的具体问题与当时形成的条件有关,因此这种解法通常不是永久性的。与此同时其研究方法和所用的数学工具却具有一定的共性并有它自己的实际意义,而且,这些方法主要是在研究具体问题的基础上才能形成。本章在分析无人驾驶飞行器发展基础上论述工程系统的一般概念、原理和研究方法。

自然,没有对一般理论的深入研究,就不可能完全形成个别系统的任何理论。因此,像 А. 波格丹诺夫 (А. Богданов) 的“公共组织科学”, Л. 丰别尔塔兰非 (Л. фонберталандфи) 的“系统一般理论”和 Н. 维纳 (Н. Винер) 的“控制论”等理论和科学著作的出现并非偶然。遗憾的是至今在我们所知道的科学和理论著作中,还没有一本称得上复杂系统的一般理论,而这种理论正在形成。

为了使系统理论得到公认,首先必需让人们理解它,因此,在建立系统理论时要特别注意理论研究对象的定义、术语和研究方法。

我们已经知道了几个“系统”概念的定义<sup>[1]</sup>。系统是按某种条件划分的有相互联系的单体的集合,其中单体的性质表

现为这个集合的保持和发展的函数。

工程系统的特点是：任务(目标)的统一性；划分成各级子系统的可能性；联系结构的复杂性；在大量随机因素条件下的集中控制；消费巨大等。像飞行器这样的工程系统就具备有这种特性。

我们可以通过相容性、现实性、集中性和适应性等四项原则来说明系统的性质。**相容性**原则强调在系统中存在不同组件协同完成一定任务的必要性，相容性原则指出整个系统(例如新飞行器)的不同类型的结构及其功能。**现实性**原则表示为了维持和发展系统而完善那些最迫切和最重要的功能发展过程的方向。这个原则应用于飞行器上，表示完成主要任务的结构在数量和质量上完善的必要性。**集中性**原则是指系统的组件(装置)协同完成各项任务的必要性。设计飞行器时，这个原则使之能够借助几个装置以最好的协调方法来完成整个飞行器的任务。**适应性**原则(对外界干扰的敏感性)决定系统组织过程的方向——在外界因素作用下提高系统的组织程度。应该指出，系统的组件结构越好、维持整个系统工作和特性的功能越灵活，则系统组织性越高。根据适应性原则可以确信工程系统结构的可变性，它能够适应新的工作条件，比如飞行器结构可以适应各种气候条件等。适应性原则能够使系统在变化的条件下提高有效性。

系统的所有改变应当符合前面讨论过的相容性、现实性、集中性和适应性的各项原则。在建立新工程系统时，必须遵循这些原则。

系统只有在下述条件下才能成为系统，即当系统受到外界因素作用时，在结构内部能产生抵抗这些作用的过程和保持固有的发展状态。系统的这种性质叫做列·沙德里耶(Лe.



(Шателье) 法则,这时所发生的过程叫做调节过程。目前“控制”和“调节”这两个概念是不易分开的,一些作者认为前者的含义比后者更广泛,但是历史和现实都不能证实这种论点。只有在控制论发展过程中,“控制”概念才被推广到生物系统及其机理的调节过程。

“控制”这一概念有两种含义:一是指特殊的调节形式,二是指一般的调节形式。对于工程系统,从三个方面来研究控制过程:对一定的组成系统进行过程的控制(调节的第一种形式);系统组成的改进(调节的第二种形式);在一般调节过程中对系统进行控制。

第一种情况是维持和加强组件的功能特性,使系统能最好地完成任任务。工程系统的发展问题在于随着时间变化的使用条件,预测和对子系统参数控制,使系统能够完成任务。很少知道如何控制,但要以最优方式组织控制。工程系统控制在于实现最优措施以及使系统控制的执行者协同动作(调节)。由于“调节”一词不够普及,因此,以下将使用它的同义词“控制”。

鉴于前面所研究的控制问题的三个方面,复杂系统的统一理论应当考虑生物系统、工程系统和其它系统的特点。基于这些系统具体的物质组成,首先提出它们的结构、联系、功能和发展条件的区别。由于生物系统、工程系统、物理系统以及其它系统之间的共性较少,没有必要来建立复杂系统的统一理论<sup>[4]</sup>。然而通过复杂系统的个别理论的发展和哲学方面共性问题的概括,可能创造出相当完整的复杂系统的理论基础。那时,系统理论的关键问题就可留给哲学家来完成,这样,就接近于实际应用。具体实际问题将在工程系统理论(系统工程)、生物系统理论(生物工程)和动态系统理论(控制论)等

各个方面分别解决。

显然，系统的一般理论总是沿着从个别到一般的道路发展，首先是完善个别理论。从积累解决个别(具体)问题的经验，可以确定比较复杂系统和一般系统的发展规律，在发展个别理论过程中，其规律可应用到其它系统。这样，在应用归纳法和演绎法的基础上，即在从个别到一般和从一般到个别的发展认识基础上，既可建立个别科学分枝的理论，又可建立复杂系统的一般理论。

根据研究对象的规模来区分各级系统。例如，属于各级工程系统的有国家经营系统、国家部门系统(邮电、运输、动力和其它工程系统等)、各个企业、技术部门等。在研究各类对象(各种类型的系统)时使用“系统”这个概念。

如果应用“系统”、“级”和“系统类型”等概念，那么我们周围的世界可以被看作是互相联系的和处于不断发展着的各类各级系统的总和。如果认为系统结构是物质结构模型的基础，则可认为“系统一般理论”是一门科学，它包括“控制论”、“生物工程”和“工程系统理论”等等。“运筹学”是“控制论”的一个研究分支。运筹学是在第二次世界大战中为了解决战术和战略行动而产生的一门科学。它属于第一种调节形式的问题。为使指挥部作出决议，在战术和战略行动准备过程中，各专门小组准备了合理使用力量和手段的各种材料。事实证明了这些研究的重大实际意义。在战后年代里，“运筹学”方法和数学工具得到了改进。现在的动向是将运筹学的应用范围扩大到工程系统。可以认为<sup>[38]</sup>，“运筹学”是把其原理和方法应用到与系统功能有关问题的一门科学，其目的是按其发展来研究除具体系统范围外的各类问题解的方法，向那些承担最优控制问题和研究军事和非军事工程系统控制最优化的人提出

建议。

可以把运筹学问题分为两组:1) 力量和手段的应急使用或技术手段的最优方法选择; 2) 武器或技术设备的最优特性选择。第一组问题有时称为应用性问题, 第二组称为工程性问题。现在应用性问题通常可划分为下列问题: 贮备的分配和控制, 群众性服务的更替, 比赛和整顿, 最优运动规律选择。在解决第二组问题时, 不仅研究系统参数优化问题, 而且要确定工作条件。

参数优化和计算技术以及少数应用性问题要求综合研究每个具体工程系统的结构和联系。因此, “运筹学”只能帮助工程系统分析某些应用性问题。为此, 除“运筹学”外, 现在还形成了“工程系统理论”(系统工程) 这样一个独立的科学分支, 其中包括“无人驾驶飞行器设计”, 这里, 飞行器被视为是中级工程系统。

飞行器设计可分为应用设计和技术设计。应用设计问题包括建立有关飞行器使用条件各方面相互作用的模型, 以评价其最优参数。

技术设计包括战术技术要求、技术方案论证和草图设计各阶段有关飞行器最优参数选择的所有工作。下面主要研究技术设计问题。

## 1.2 基本概念——优化、数学模型、目标函数、约束条件和控制参数

优化——这是以确定提高系统的品质方法为目的的活动。因为工程系统的品质通过一系列特性来表示, 所以通常不能把优化问题归结为按单一的指标寻求最优解。因此, 优化问

• • •

题可分为两类：非折衷优化和折衷优化(或者称矢量优化)。

非折衷优化,或简称优化,通过众所周知的寻找品质指标的最大值(或最小值)的方法来实现。解这种优化的问题仅要求确定一个指标,具有影响该指标的控制因素,能够对指标进行定量评价。

在进行工程系统优化时要使用数学模型、目标函数、控制参数、状态参数和联系函数等概念。数学模型是指对模拟对象内部发生的现象的本质所做的数学描述,它能够预测控制参数变化时模拟对象的状况。数学模型的特点是用统一的方程组(关系式)中的各种参数,以这种或那种方式来描述被研究系统的结构、联系和发生的过程。

对于任何过程,如果不揭示其内部结构和联系,都可以用图 1.1 来表示,其中表示出各组的参数矢量: 输入参数  $\Pi_i^*(i=1, 2, \dots, m)$ ; 状态参数  $\Pi_i^*(i=1, 2, \dots, k)$ ; 控制参数  $\Pi_i^*(i=1, 2, \dots, r)$ ; 干扰参数  $\bar{\Pi}_i^*(i=1, 2, \dots, n)$  和输出参数  $\Pi_i^*(i=1, 2, \dots, n)$ 。输入参数是一组可以自由选择 的量或者是在一定范围内变化的量。约束条件也属于输入参数(例如以产量为指标的生产过程优化,其约束条件—限制条件—是生产用的原料量)。状态参数决定研究对象的内部联系和表示发展过程的动态特性。从数学观点来说,控制参数是自变量,它直接作用于受控过程,有时被称做可变参数或设计参数。在设计飞行器时属于控制参数的有:级数、各级长细比、各级发动机推重比等。干扰参数随着时间的变化是随机性的,如飞行器飞行过程中的大气干扰,飞行器在具体使用条件下的质量和动力特性偏差,以及在设计阶段的一些未知数等。最有意义的是输出参数,它们决定工程系统的质量特性、几何特性、动力特性及其费用和效率。在动力学方

面,控制过程就是要寻找保证最优输出参数(矢量  $\Pi^*$ ) 的控

制矢量  $\Pi^*$ 。为了不求解复杂的动力学问题,用简化为准动力学问题的办法,确定一定时期(设计实现期)的控制参数。在这种情况下,得到了

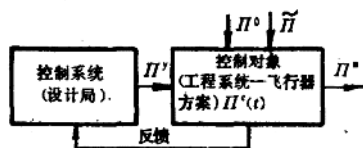


图 1.1 工程系统控制过程示意图

和时间有关的参数——状态参数  $\Pi^c$

为了综述输入参数、控制参数、状态参数,经常采用下述矢量形式:

$$\left. \begin{aligned} \Pi^0 &= \Pi(\Pi_1^0, \Pi_2^0, \dots, \Pi_n^0), \\ \Pi^y &= \Pi(\Pi_1^y, \Pi_2^y, \dots, \Pi_f^y), \\ \Pi^c &= \Pi(\Pi_1^c, \Pi_2^c, \dots, \Pi_k^c), \\ \tilde{\Pi} &= \Pi(\tilde{\Pi}_1, \tilde{\Pi}_2, \dots, \tilde{\Pi}_m), \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

考虑上述形式,输出参数和过程参数的关系可以写成矢量函数

$$\Pi^* = \Pi(\Pi^0, \Pi^y, \Pi^c, \tilde{\Pi}) \quad (1.2)$$

如果关系式(1.2)已知,则认为过程的数学模型已知。

控制品质由系统输出参数矢量来评定。当给对象性质分类时,借助矢量准则  $\Pi_i^*(i=1, 2, \dots, f)$  形式的有限个指标可以表示过程的品质,其中  $f$ ——准则数。确定型过程优化准则是输出参数的函数,而输出函数又依赖于输入参数、状态参数以及控制参数。

$$\Pi_i^* = \Pi(\tilde{\Pi}, \Pi^0, \Pi^c, \Pi^y). \quad (1.3)$$

(1.3)式右部在一般情况为泛函形式。因此,工程系统参数优化问题通常成为矢量变分问题。

在解单准则参数空间问题时，控制品质可按一定有效性  $W^A$  情况下的系统总经费  $C_x$  来评价，那么在这种情况下，(1.3) 式可写成

$$C_x = C(\Pi^0, \Pi^0, \Pi^y, W^A) \quad (1.4)$$

式中  $W^A$ ——限制条件

上述方程的解是控制函数随输入参数变化的关系式，在某些情况下也是随时间  $t$  和部件空间坐标  $z$  变化的关系式。

$$\Pi_{\text{opt}} = \Pi(\Pi_0, t, z). \quad (1.5)$$

表示被研究系统品质的 (1.4) 式叫做目标函数。

如剖析过程的内部结构和联系，可以看到其中有联系函数和状态参数，为了表示状态参数和联系函数，采用矢量表达形式：

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{opt}} &= \Pi(\Pi_1^c, \Pi_2^c, \dots, \Pi_p^c), p \in k, \\ F(\Pi^0) &= F[F_1(\Pi^0), \dots, F_l(\Pi^0)], f \in k, \end{aligned} \quad (1.6)$$

式中  $F(\Pi^0)$ ——功能联系矢量。

为了强调时间联系和功能联系的内目标函数以及限制条件的存在，目标函数(例如飞行器发射费用)写成下式：

$$C_n^c = C[\Pi^0, \Pi^0(t), F(\Pi^0), \Pi^y, W^A]. \quad (1.7)$$

复杂系统发展过程用数学模型来描述，其优化目的在于寻求使目标函数 (1.7) 得到需要值 (通常为最大值或最小值) 的控制参数矢量。因此可以说，最优系统是改变可变参数使函数值达到最大或最小的系统。可见，为了成功的使用数学模型，必须使它完全符合被模拟的对象。因此，在实际应用中必须考虑数学模型只是近似地符合研究对象。

数学模拟方法的优点是不同性质的过程可以具有相同的数学模型和研究方法。通常，现代工程系统的数学模型是大量代数方程和微分方程的集合，因而只有使用电子计算机才

能进行研究。现在，为了减少用电子计算机研究时的程序设计的困难，设计了各种可以用符号书写模型程序的算法语言。在使用算法语言时，电子计算机上装有编译系统，它的任务是将写成语言形式(例如 FORTRAN 语言)的程序转换成具体机器的指令。用算法语言可以把程序写得相当简单，因此，设计人员就不必研究现代计算机设备和工作的细节。

在一般情况下，(1.7) 式等号右边为含有形式上未知的、表现各种确定型过程和离散过程的函数。在函数符号下，可能是同级或更低级目标函数的分解式，它们对控制参数相当敏感。

我们以选择飞行器设计参数的目标函数为例来说明：

$$C_{i,3}^{p, \varepsilon} = C [ C_{i,3}^{p, \varepsilon}(N, \bar{l}_i), C_n^{\varepsilon, \lambda}(\varepsilon_i, \lambda_i), m_0(p_{ki}, p_{si}), L_{\max}^A, m_{n-n}^A ] \quad (1.8)$$

式中  $C_{i,3}^{p, \varepsilon}(N, \bar{l}_i)$ ——典型任务的费用，是级数  $n$  和长细比  $\bar{l}_i$  的函数；

$C_n^{\varepsilon, \lambda}(\varepsilon_i, \lambda_i)$ ——飞行器发射费用，是各级质量比  $\varepsilon_i$  和推重比  $\lambda_i$  的函数；

$m_0(p_{ki}, p_{si})$ ——飞行器质量，是燃烧室压力  $p_{ki}$  和各级发动机喷口截面压力  $p_{si}$  的函数；

$L^A, m_{n-n}^A$ ——最大射程和有效载荷质量(限制条件)。

通常，像(1.8) 式那样把复杂函数的优化问题转化为研究更为简单的函数，例如  $C(\Pi^y)$  型函数，这里， $\Pi^y$  是控制参数矢量， $\Pi^y = \Pi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_r)$  或者是自变量  $x = f(x_1, \dots, x_r)$  的矢量，在约束条件下研究函数  $f(x)$  的极值叫做数学规划问题。

寻找最小值(或最大值)的大多数优化问题的命题表示如下：求出属于  $M$  范围的自变量矢量  $x^*$  (求  $x^* \in M$ )，对于

所有的  $x \in M$ , 则有  $f(x^*) \leq f(x)$ . 如果这样的  $x^*$  存在, 当  $f(x^*) < f(x)$  时, 有强总体极值; 当  $f(x^*) = f(x)$  时, 有弱总体极值。满足这个条件的矢量  $x^*$  便称做解。通常, 为了不使求解复杂化, 在研究大多数飞行器参数优化的实际问题时, 在  $x^*$  点周围(在  $E$  区域内)求解。通常求解局部极值。此时, 在求最小值时, 需求解  $x^* \in M$ , 对于所有的  $x \in E \cap M$ ,  $f(x^*) \leq f(x)$ . 这里  $x$  既属于  $M$ , 也属于  $E$ , 即属于  $E$  和  $M$  的交集。

数学规划问题通常写成下列形式:

$$\left. \begin{aligned} f(x^*) &= \min_{x \in M} \{f(x)\} \\ x &= (x_1, x_2, \dots, x_r) \\ g^j(x) &= 0; \quad j = 1, 2, \dots, m, \\ g^k(x) &\geq 0, \quad j = m+1, \dots, m+k, \quad k < r \end{aligned} \right\} (1.9)$$

(1.9) 式的约束条件分为直接的和函数的。直接的具有  $x_i > 0$  形式, 函数的具有  $g(x) \geq 0$  或  $g(x) = 0$  形式。第一种情况叫做不等式型约束条件, 第二种叫做等式型约束条件。目标函数自变量集合被看成  $n$  维空间矢量。矢量端点表示为空间一点  $x \in R^n$ . 目标函数作为点的集合是  $n$  维空间的超曲面。根据极值的个数分为多极值函数和单极值函数(单峰函数), 而多极值函数研究, 尤其在有约束条件的情况下, 是一个非常复杂的问题。飞行器的目标函数按其物理实质通常是单峰函数, 这就极大地简化了求解过程。

### 1.3 结构和联系. 选择准则的法则

工程系统的研究从它的结构研究开始, 在工程系统的结构中可以看出其共同点。我们以图 1.2 所示的系统结构图为



例进行研究。从图上可以看出，所研究的系统具有分级递阶性质。工程系统的特点是存在着各级子系统和有五种联系：1) 分级递阶的参数联系；2) 直接参数联系；3) 分级递阶功能联系；4) 某些组件和高级系统之间的直接功能联系；5) 外部联系。

参数联系是指系统参数之间的联系，功能联系决定系统完成自己任务的可能性。例如，在所研究的例题中，认为影响系统可靠性、准备程度和生存能力的联系属于分级递阶●的功能联系。把系统有效性和弹头装置之间以及和控制设备的工作精度之间的联系归于直接功能联系等。

把复杂系统划分成子系统的程度与所研究问题的性质有关，其中系统的单体应理解为在研究本问题的范围内都不必再分解的组成部分。

低级系统的联系数比较少，系统的品质指标比较明确。随着系统的复杂化，联系和反映质量的指标更为复杂，这些系统控制问题的意义和复杂性也就增加了。由此可知，在研究高级系统时，工作计划、使用方法、组成和结构选择等方面的运用性问题有着重大意义，而在研究中级和低级系统时，只需着重注意技术设备最优特性的选择和功能测算。

在研究分级递阶系统的各阶段中，使用下述优化原则<sup>[21]</sup>：如果从比较高级系统的优化准则来看，系统中所有级的单体和子系统最优，则整个系统最优。如把图 1.2 的系统看作是纯分级递阶系统，则可证明，根据导弹武器系统各部件的优化准则，如果武器系统各部件具有符合武器系统品质优化准则的最优参数，则所研究的系统为最优。在这种情况下，似乎已实

---

● иерархический——分级递阶。——译者