

系 统 工 程 讲 义

第 四 分 册

系 统 模 型 引 论

第二部分 大系统有限结构模型与网络

周 曼 殊

中国科学院农业现代化研究会
全国农业系统工程研究会学习班 编印
湖南省系统工程学会农业系统工程研究会

一九八一年九月

· S 2
2

第二部分“大系统有 限结构模型与网络”目录

第四章 系统模型一般介绍

§1 一般系统论的基本概念

1—1 系统结构思想.....	(1)
1—1.1 系统结构思想的普遍性	
1—1.2 总体性原则.....	(2)
1—1.3 层次结构	
1—2 开放系统与封闭系统.....	(3)
1—2.1 基本定义	
1—2.2 系统边界	
1—2.3 开放系统与熵减少	
1—2.4 系统追求多目标	
1—2.5 系统稳态与动平衡.....	(4)
1—2.6 开放系统等结局性与多途径	
1—2.7 系统内部结构的精制	
1—3 输入—输出变换模型.....	(5)
1—4 反馈与自动调节.....	(6)
1—4.1 反馈放大器	
1—4.2 负反馈的表示	
1—4.3 负反馈的功用.....	(8)

§2 系统模型

2—1 系统模型的基本概念.....	(9)
2—2 数学模型.....	(10)
2—3 结构模型.....	(12)

§3 数学模型的范畴

3—1 时基.....	(13)
3—2 状态变量.....	(15)
3—3 线性与非线性系统.....	(16)
3—4 常参数和变参数系统.....	(18)
3—5 静态和动态系统	
3—6 集中参数与分布参数系统	
3—7 连续与离散时基系统.....	(19)
3—8 动态系统的类别.....	(20)

第五章 大系统有限结构模型

§1 问题的提出

1-1 大系统复杂性	(21)
1-2 结构模型的现状和问题	
§2 结构模型	
2-1 结构模型通式	(22)
2-2 大系统超图结构模型	(23)
§3 大系统亚结构	
3-1 有限划分序列诱导层次结构	(30)
3-2 复盖序列诱导层次结构	(33)
3-3 系统结构的有限闭包	(35)
3-4 过程结构与逻辑结构	(37)
§4 大系统结构原则	
4-1 整体性原则	(38)
4-2 系统方向性原则	(39)
4-3 有效控制性原则	
4-4 测度性原则	
4-5 预见性原则	
4-6 合理的组织与结构原则	
§5 模糊结构模型	
5-1 模糊结构模型通式	(40)
5-2 模糊层次结构	(41)
5-3 模糊语言界限结构	(43)
§6 多因子模糊综合评审	
6-1 模糊聚类分析	(49)
6-2 多因子综合评审	(51)
6-2.1 单因子评审	(52)
6-2.2 综合评审与权衡	
6-3 系统结构综合评审	(53)
6-3.1 组合结构	
6-3.2 结构评审	(54)

第六章 网络模型

§1 问题的提起	
1-1 网络的普遍性	(58)
1-2 网络模型的优点	(58)
1-3 网络模型的现状和问题	(58)
§2 网络模型的统一表征	
2-1 网络模型的定义	(61)
2-2 网络统一表征的实例	(62)
2-2.1 物理网络	

2-2.2 有限状态机.....	(63)
2-2.3 PERT.....	(64)
§3 物理网络	
3-1 通用矩阵方程.....	(65)
3-2 网络函数.....	(73)
3-3 状态变量法.....	(78)
§4 建立数学模型的一般方法	
4-1 建模的层次.....	(85)
4-2 系统单元.....	(86)
4-3 系统描述变量.....	(87)
4-4 系统(网络)结构.....	(88)
4-5 系统约束.....	(89)
4-5.1 系统单元约束	
4-5.2 系统拓扑约束.....	(91)
4-6 建模的方法.....	(92)
§5 FORRESTER—图	
5-1 建模的过程和记号.....	(92)
5-2 假设.....	(94)
5-3 定义.....	(95)
5-4 公理.....	(97)
5-5 定理.....	(98)
5-6 应用实例.....	(99)
讲义小结——系统模型的同构.....	(103)
第二部分参考文献.....	(105)

第二部分大系统结构模型与网络

第四章 系统模型一般介绍

先介绍系统的概念。系统是由一组相互联系的单元组合起来的具有一定的功能的有组织整体。

这种广泛的系统定义适用于所有物理系统和非物理系统。电、机械、机电、水力、热工系统是物理系统的例子；经济系统、政治系统、军事系统、文教系统则属于社会系统；生物系统指：农、林、牧、渔、虫、微生物等各业构成的系统。按照上述系统的定义，一个系统既可以十分简单，也可以非常复杂。例如一个电网络就是一个系统，一台整流器是由二极管、变压器和若干电阻、电容构成，其功用是将交流电压整流成直流电压，并作为电源使用；而导弹是个十分复杂的系统，它由弹体结构、发动机、控制系统、弹头等部件构成，其功用是为了将装药运送到目标，以摧毁敌人的军事设施。从以上二个例子中可见，简单系统其构成单元可能是元件，或器件，而一个复杂系统构成单元本身仍然是一个系统（或者叫子系统）。

§ 1一般系统论的基本概念

GTS (General Systems Theory 的缩写) 是本世纪30年代开始发展，是关于广泛的科学知识进行综合的一门学科。它主张从整体（而不是局部），从单元的普遍联系（而不是割裂、孤立）去考察客观世界（真实系统）。GST原理、原则往往是具有普遍性、适用于物理、生物，人类社会系统〔1〕。GST的基本概念〔2〕概括如下：

1—1 系统结构思想

1—1.1 系统结构思想的普遍性

系统结构指：系统是由若干相互关联的单元组成；或者说系统是至少二个单元组成，单元之间互相联系。

系统结构思想是很普遍的，集中体现在：

“凡系统必有结构”

无论物理系统，生物系统，或者是社会系统，小至 10^{-8} 厘米尺度的微观世界，大至百亿光年的广漠宇宙，从基本粒子、原子、分子、化合物、细胞、病毒、细菌、动植物、人和人类社会，一切人工系统如飞机、导弹、汽车、轮船、各种机床、建筑物都没有例外。

1—1.2 总体性原则

系统结构思想派生出总体性原则，可表述为：

“系统总体不等于单元和”

总体不等于单元和，会出现二种情形，其一：总体小于单元和，形式化为 $1 + 1 < 2$ 。

例如：一个和尚挑水吃，二个和尚抬水吃，三个和尚没水喝。

其二：总体大于单元和，形式化为 $1 + 1 > 2$ 。

例如：三个臭皮匠，合成一个诸葛亮。

之所以出现上两种情形，原因是单元存在于一定结构中，结构好坏，效果迥异。第一种情形下，单元步调不一，不能很好协同；后一情形，结构良好，单元协同，众志成城。因此总体性原则也是协同论（Synergism）原则。

系统结构的重要性是显然的。

房子没有结构，剩下一堆砖、瓦、板、柱、梁、钢筋、混凝土等建筑单元，既不能住人，又不能防寒保暖或抵挡风吹雨打。

一本书如果一页一页折开来，然后乱七八糟地打乱次序，重新装订，尽管书的单元保留无余，书的结构被破坏了，就变成一堆废纸。

可见，对于一切系统：

“系统结构决定系统功能，破坏结构，就会完全破坏系统的总体功能。”

由于普遍性与重要性，系统结构思想也受到哲学界的重视，西方还出现“结构主义”的哲学流派。

系统结构与现代大农业系统关系也很密切。只搞片面性、围海、围湖造田、毁林造田，会使生态系统失去平衡，最后要受到自然界的惩罚，人民生活也得不到提高，因此要研究合理的农业生产结构。

1—1.3 层次结构

HS（Hierarchical Structures 的缩写）是生物界的普遍现象。它把分散的单元，组成集体的组织，分工合作，步调一致，形成集体力量。从低等生物藻类、菌类，直至花草、树木、飞鸟、爬虫、走兽，都是以细胞为单元的层次结构；人和人类社会也不例外。据考证，秘鲁的英卡王朝是个没有文字、没有车轮的原始社会，却有高度复杂的层次结构。人类社会中一切革命斗争，无非是由一种HS取代另一种。HS从生物界、人类社会研究中引出，后来从集合论传递关系角度，推广到无生命物质世界，使得HS成为研究现代大系统的基础。广义的层次思想可表述为：

“系统是由较低阶（级）的子系统组成，而该系统自己又是更大系统的一个单元（或子系统）”。

层次思想揭示系统与系统之间存在“包含”、“隶属”、“支配”、“权威”、“服从”关系，概括地讲，统称为传递关系。换句话说，系统並不孤立地出现，相反存在于某一层次结构中。广义的层次思想具有普遍性，无论政府、工厂、企业、学校、农村公

社；生物分类的“门”、“纲”、“目”、“科”、“属”、“种”；交通运输、电力输配电、通讯系统、计算机网；以及分子、原子内部结构，都是划分层次。

农业系统是由农、林、牧、副、渔各业组成的复杂系统；农业、工业、商业、交通运输等业又构成更大的系统，叫国民经济系统；国民经济又与政治、军事、文化教育等构成社会大系统；社会大系统又与人类赖以生存的自然环境构成更大的系统。总之，呈现层次，相互联系。

1—2 开放系统与封闭系统

1—2.1 基本定义

开放系统 (Open Systems) 指系统与周围环境交换讯息、能量、物质。生物系统和人类社会属于开放系统。

封闭系统 (Closed Systems) 不与周围环境交换资源 (指讯息、能量、物质的统称)。物理系统一般属于封闭系统。

系统的开放性和封闭性是个模糊概念，不能绝对化，宁肯当作相对的程度衡量，更符合实际。

1—2.2 系统边界 (Boundary)

系统具有边界，边界将系统与其环境 (即包围系统的更大系统) 分隔。“边界”思想帮助我们理解开放系统与封闭系统的区别，封闭系统具有刚性的，不可贯穿的边界；反之开放系统与周围环境之间存在可渗透性。

对于物理系统、生物系统，边界相对讲容易定义，社会系统，例如社会组织，边界的定义比较困难。

1—2.3 开放系统与熵减少

按照经典热力学、封闭的物理系统，对于不可逆过程，系统朝熵增大方向运动，对应系统状态无序化。由于完全没有外界资源供应，系统最后到达熵极大，也即衰亡状态。因此，封闭系统，熵的变化总保持正值。

相反，开放系统因环境不断供应资源，系统内部产生的熵可以向环境转移，当输出的熵大于内部产生的熵，系统允许暂时的和局部的熵减少，甚至出现负熵，对应地系统状态有序化〔3〕。

开放系统与熵减少的论点，是有启发性的，打破了经典热力学的窒息气氛。

1—2.4 系统追求多目标

对于开放系统，系统追求多目标。人是有思想的动物，自觉的主观能动性，是人类区别于其他物种的显著标志，自觉的能动性中，追求目标是个重要因素。人类的实践活动，总带有目的性。如果把社会组织看成以人或小单位为单元，那么不仅总系统有总目标，小单位 (子系统) 还有子目标，无论系统或者子系统，目标呈现多样性。人类社会系统，一切人工系统，系统追求多目标是容易理解的。

生物的演化,物竞天择,适者生存。生物为生存而奋斗,也可看成追求多目标。按照GST观点,把目的性和有序性联系起来,开放系统之所以朝有序方向运动,原因是有序方向,正好是系统追求的目标方向。这个见解有些新颖。已经发现,追求有序化的现象不是生物界所独占,无机物质也存在朝有序化运动的现象,这就是说有些无机物质好像也有动机似的

1—2.5 系统稳态 (Steady State) 与动平衡

稳态思想与“熵”密切联系。

一封闭系统,系统运动的结局,最后总要到达平衡状态,对应地系统的熵为极大,相当于系统的衰亡。炸药爆炸,燃料的燃烧,人的死亡,作为系统的有机组织便消灭了。从热力学观点,聚集于系统的能量虽然没有消灭,但可供利用的能量差拉平,再也无法利用能量差做功。

相反对于开放系统,由于环境供应资源,系统趋向动态平衡。按GST,这个平衡态就是系统稳态。在一定的条件下,开放系统的平衡态(稳态)对应于有序化和熵的减少,不仅不是“衰亡”,而是“生气盎然”,是建设性的。

中医理论的八纲,最根本的是阴阳平衡,阴虚阳亢,平衡失调。人就要生病。系统的平衡态不是静止不变,而是动态平衡,是从某个平衡点过渡到另一新的平衡点的起伏或涨落。当某些因子发生变化时,系统具有适度抗干扰的自动调节能力,但系统保持稳定性的能力是有限的。以生态系统为例,利用森林资源要有限制,滥伐森林,破坏草原,超过限度,就会水土流失,洪水泛滥、绿洲变沙漠,气候恶化。自然界维持生态平衡的稳定性,有一定忍耐程度,超过这个程度,自然界要对人类采取报复。

GTS从总体角度把物理学、生物学、社会科学和现代自动控制理论,信息论、加以全面综合,把系统目标,有序性,熵减少,信息反馈和系统稳定性原理都联系起来,是很有启发的。

1—2.6 开放系统等结局性与多途径

对于封闭系统,在初始条件和最终结局间存在一定的因果关系,而且初始条件唯一决定系统的结局。相反开放系统具有等结局性。

等结局性指:对于不同的初条件,系统内部采取多种活动途径,可以得出相同的结局。等结局性对社会系统特别重要。等结局性的启示是:社会组织能针对不同输入,采取多种途径,实现同一目标。

物理系统往往能够利用物理规律的因果关系,找到实现目标的唯一最优解。而社会系统往往没有硬性的唯一最优解,相反要求适度的灵活性,在不同的输入和多种途径中进行选择。社会系统的单元是有思想的人和人组成的单位,复杂性大得多。按照Ch—1不相容原则的推论,解决社会问题的答案是更加模糊的,不能照搬物理系统求唯一解的简单化做法。

1—2.7: 系统内部结构的精制

封闭系统朝熵增大运动,系统随时间流朝无序方向发展,最后结局是系统组织(结

构)的消亡。开放系统正相反,开放系统的运动具有目的性,目标追求的结局是熵减少,有序化程度更高,系统内部器官分工更细,更精致,结构更复杂,一句话系统从低级向高级发展。

地球上的生命现象,大约经过数十亿年的演化历史,从混沌中演变出第一批生命单元细胞,发展到今天数不清的物种,直到出现人类,这一幅欣欣向荣的,上升的生物进化历史,正是开放系统内部结构不断变异、分化、精制的生动写照。同理、人类社会从原始社会开始,也是从低级向高级发展,一定会走向美好的共产主义。

开放系统从低级向高级发展,要有二个基本条件,即环境对系统供应资源和系统内部单元的精心、协同努力。这两个条件相辅组成,缺一不可。如果把人看作系统,把人关进真空箱里,很快会死亡;即使允许呼吸空气,不给饭吃,也活不了几天;如果供给氧气,又给饭吃,但关在深山老林、与世隔绝(没有讯息交流),长大了也会变成白痴。当然系统内部努力也十分关键。没有努力,自发的运动倾向总是朝熵增大,水从高往低流;不扫地,几天积满灰尘,结局是拉平能量差(差)。拉平了,就不会有运动和发展,退化成混沌状态。不做功,水不会自发从低往高流。只有不断地精心、协同努力,扩大势差,才能不断提供运动的动力。

要区别有益和有害输入。“病从口入”是说食物中渗杂病菌,但不能因为食物有病菌,就“因噎废食”。好的通讯接收装置能放大有用讯号,抑制干扰(噪音)。对外开放,可以吸收先进科学技术,但要抑制腐朽思想毒害。

总之,开放系统的基本特点是:

要从更大的系统(环境)中吸取有益资源,抑制有害的输入,经过系统内部单元精心协同的努力,使系统不断地向上运动,从低级向高级发展,欣欣向荣,把世界推向美好的未来。这就是开放系统熵减少原理所揭示的美好前景。

1—3 输入—输出变换模型

古典系统论把系统当成输入—输出变换模型。这个模型提供系统理论研究,建立数学模型的简捷方法。首先确定系统描述变量,並区分为二组变量:

——外部作用于系统的变量,叫作原因变量或叫输入变量、驱动变量等等。

——系统对外部作用的响应,这一类变量,叫作结果变量或输出变量、响应变量等等。

由于某个原因作用,引起系统作出一定的响应,于是在系统的输入与输出之间形成了因果关系。因果关系的例子示于表(4—1)。

用输入—输出模型研究物理系统,很有成效,后来推广应用于农业系统,畜牧业系统、生态系统、工厂企业、教育系统,同样取得可喜结果。具有多个输入,输出的系统框图示于图(4—1)。

表 4—1 因果关系举例

原因变量	系 统	结果变量
交流电压 $\sim u$	整 流 器	直流电压 $\bar{u}$
加速器位置 s	汽 车	前进速度 v
水平舵偏转 δ_H	导 弹	俯仰角 θ
垂直舵偏转 δ_V		偏航角 ψ
环境温度降低 T	人	加衣服

1—4 反馈 (feedback) 与自动调节

反馈在网络与系统中有重要应用。这一节以放大器为例，介绍基本概念。

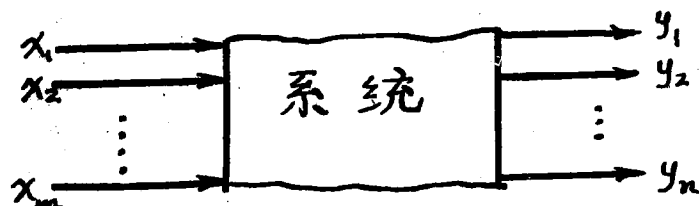


图 (4—1) 多输入，多输出系统框图

1—4.1 反馈放大器

对于反馈放大器来讲，反馈，就是将放大器的输出讯号（电流或电压），通过一定的电路（即反馈电路）送还到输入迴路。

例如，单管放大器接上一个射极电阻 R_f ，就形成一个反馈放大器，讯号交流分量通路示于图 (4—2)。图中，虚线框 N_1 代表基本放大器，虚线框 N_2 代表反馈网络，当 N_1 与 N_2 以四端网络串连接，就变成反馈放大器，记做 N 。

现在比较一下 N 和 N_1 （相当于 R_f 短路），如果输入信号 u_{sr} 加在 N_1 的入端则晶体管基、射极间压降：

$$u_{be} = u_{sr}$$

但对 N 来讲，由于加了 R_f ，输出迴路的一部分电压 u_f 反馈到输入迴路，结果：

$$u_{be} = u_{sr} - u_f \quad (4-1)$$

(4—1) 式中， u_{be} 是 u_{sr} 与 u_f 之差，这种反馈叫负反馈。(4—1) 式是负反馈的基本条件。

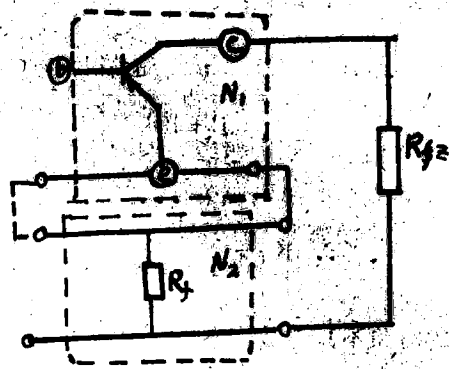
1—4.2 负反馈的表示

一个负反馈网络，习惯上采用框图表示，並示于图 (4—3)。

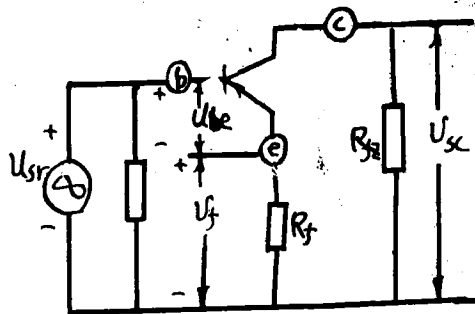
图中， $\Delta u = u_{sr} - u_f$ 叫负反馈，而 $\Delta u = u_{sr} + u_f$ 叫正反馈。

假定 N_1 的放大倍数为 K ，则：

(a) 网络 N_1 和 N_2 串联



(b) 网络 N



(4-2) 单管反馈放大器

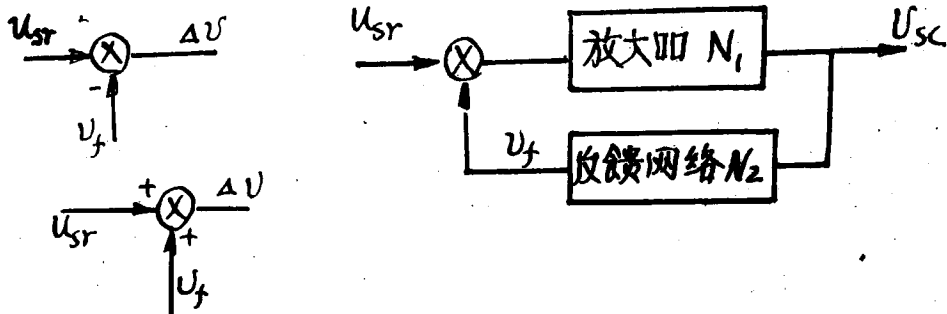


图 (4-3) 用框图表示反馈

$$K = \frac{U_{sc}}{U_{be}} = \frac{U_{sc}}{U_{sr}}$$

加上反馈网络后, 设 N 的放大倍数为 K_f , 则

$$K_f = \frac{U_{sc}}{U_{sr}} = \frac{U_{sc}}{U_{be} + U_f}$$

令 $U_f = B U_{sc}$ B 为反馈系数, 且 $0 < B \leq 1$

B 的概念是很清楚的, 即从 U_{sc} 中取出 $B U_{sc} \leq U_{sc}$ 送回到输入通路, 起到负反馈作

用。将 $B v_{sc}$ 代入 v_f 中, 即得:

$$K_f = \frac{v_{sc}}{u_{be} + B v_{sc}} = \frac{v_{sc}/u_{be}}{1 + B \frac{v_{sc}}{u_{be}}}$$

$$\therefore K_f = \frac{K}{1 + BK} \quad (4-2)$$

如果研究的对象不只是放大器, 而是更一般的反馈系统, 则将 K_f 改为 $G_f(S)$, K 改为 $G(S)$, 可得更一般的公式:

$$G_f(S) = \frac{G(S)}{1 + BG(S)} \quad (4-3)$$

式中, $G(S)$ 为系统的开环传导函数

$G_f(S)$ 为闭环传导函数

1-4.3 负反馈的功用

负反馈对放大器性能的影响是多方面的, 这里着重介绍一点, 即负反馈放大倍数的稳定性提高, 使得放大器抗干扰能力增强。

将 (4-2) 式左右两端取对数后, 进行微分, 可得

$$\frac{dK_f}{K_f} = \frac{dK}{K} - \frac{B}{1 + BK} dK = \frac{1}{1 + BK} \frac{dK}{K} \quad (4-4)$$

B 、 K 均为正, 故 $\frac{1}{1 + BK} < 1$

$$\therefore \frac{dK_f}{K_f} < \frac{dK}{K}$$

由于某个干扰作用, 使得开环放大倍数 $K \downarrow$, 则反馈放大器能够自动维持放大倍数稳定。即:

$$K \downarrow \xrightarrow{u_{sr} = \text{常数}} v_{sc} \downarrow \xrightarrow{B = \text{常数}} B v_{sc} \downarrow \longrightarrow \Delta U = U_{be} = U_{sr} - B v_{sc} \uparrow \longrightarrow U_{be} \uparrow$$

图 (4-4) 负反馈的自动调节作用

图 (4-4) 中

“ $\uparrow$ ”表示数值增大, “ $\downarrow$ ”表示数值下降

“→”表示“引起”或者“导致”

从(4—4)式和图(4—4)，显然加负反馈后，稳定放大倍数是由于网络能够自动调节，用不着人的干预，系统本身起自动调节作用。

反馈思想广泛应用于电子技术，企业生产，经营管理等系统。据文献[4]介绍，战后日本恢复经济，取得惊人发展，与运用反馈技术有关。产品不可靠，竞争能力很低，日本电子产品畅销世界各地，与产品质量稳定、可靠有关，采取的办法是质量控制，中心环节是信息反馈系统实施自动调节。

反馈还应用于市场行情的调查，企业必需事先了解计划产品的市场需求，在市场与企业间设置反馈回路，以保证供销与需求协调一致。前面提到生态系统平衡，维持生态稳定性，也靠反馈的自动调节作用。因此反馈思想的应用十分广泛。

人类科学文化的发展，是在前人成就基础上，继承与创新相结合的进步历史。GST也不例外，输入—输出模型和反馈思想，都是古典系统论的贡献，由于这些概念的普遍意义，被GST继承下来。

§ 2 系统模型

2—1 系统模型的基本概念

模型是反映客观真实世界若干有关侧面的反映像。如把客观真实世界简称为“原型”，则要求模型与原型尽量相似，相似指工程需要所允许的近似。建立模型的必要性是显然的：

例—1：用飞机模型在风洞中吹风，这是真实飞机在大气中飞行的试验仿真，目的是预测所要设计的新型号性能，提供气动力特性。

例—2：和平时期要居安思危，用军事演习来模拟真实战争，训练干部，战士。

例—3：种试验田是大面积推广的增产措施。

例—4：太阳系模型有地球中心说和日中心说。

以上几例表明，凡模型必有原型，原型是反映的对象，模型是反映像。建立模型的目的，服务于认识世界和改造世界，具体讲是了解世界，预察事变的趋势。

按照辩证法，客观世界是运动变化的，因此模型必须反映原型的运动过程。原型和模型不能彼此孤立，相反应互相联系。这种联系就是相似关系。相似不是相等，飞机模型是真实飞机的缩小，种试验田与大面积推广也不完全相等。最后，模型对原型的反映，並不反映一切方面，仅仅反映有关的侧面。或者说不是眉毛，胡子一把抓，要选择重点。重点取决于建模目的。飞机模型是原型的外形缩模，真实飞机的内部结构就不必反映，因为建模目的，是为了确定飞机外形的气动力性能。下面引出系统模型的定义。

定义2—1.1系统模型是反映客观真实系统运动过程若干有关侧面的反映像，要求模型与原型尽量相似。

从定义可知，系统模型指原型是客观真实系统。

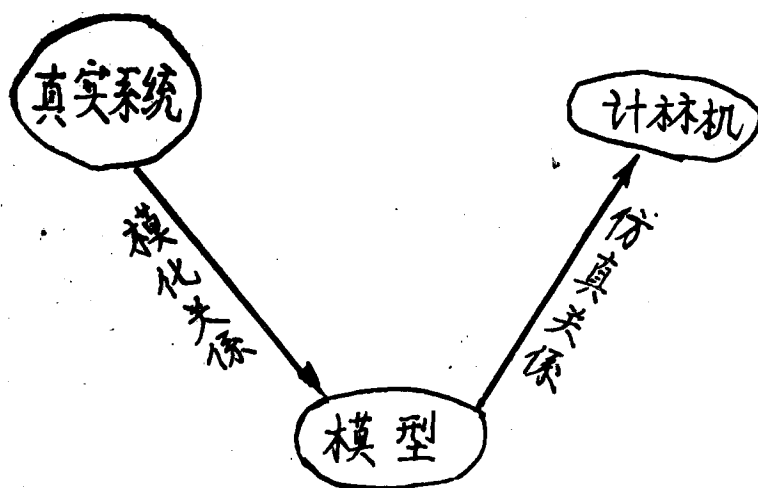
2-2 数学模型

模型又分实物模型和理论模型。实物模型指模型本身是客观存在的实物；理论模型是主观的，观念形态的模型。上节前三例是实物模型，第四例属理论模型。无论实物模型，理论模型，共同本质都是原型的反映像。按照唯物论的反映论，这两者最后都必须经受真实系统实践的检验。

定量的理论模型就是数学模型。数学模型在建立经典力学、量子力学、相对论、理论化学中发挥过重要作用。近年来数学模型在研究生物学、人类社会、政治、军事、生态、人口等方面，又取得进展。特别是计算机的发展、模型方法又有了新的提高，数学模型成为一切计算机仿真的基础。

定义 2-2.1：模型化与仿真指从客观真实系统到模型的反映，和从模型在计算机上的实现，后一过程称为仿真〔5〕。

从上述定义可知，我们面对的整个过程是由三个要素与二个关系组成，如图（4-5）所示：



图（4-5）三要素与二个关系

三要素是：真实系统；模型；计算机

二个关系：模化关系；仿真关系。

模化关系建立模型与客观真实系统之间的对应；仿真关系建立计算机与模型之间的对应。

从计算机仿真角度，可把真实系统行为（Behavior）看作数据源，模型是系统描述变量的函数关系式。仿真就是用计算机解函数式，重现数据源所表现的系统行为。以飞行器为例，导弹飞行试验实测数据，可以当作真实系统行为数据源。用弹道方程刻划的模型和在计算机上的再现，是对真实系统的近似模拟。

函数 $f: [t_0, t_k] \rightarrow X, \forall \bar{x} \in X, \bar{x} = [x_1, x_2, x_3]^T, t_0, t_k \in R^1$ ，其中

t_0 为飞行起始时刻，

t_k 为飞行落点的时刻。

显然 $X \subset R^3 = R^1 \times R^1 \times R^1$, X_i 代表飞行坐标点集合, $[t_0, t_k] \subset T = R^1$, T 代表时间集合, R^1 为实数集合。

$f(t)$ ($t_0 \leq t \leq t_k$) : 表征数据源对应的飞行轨迹, 示于图 (4—6)

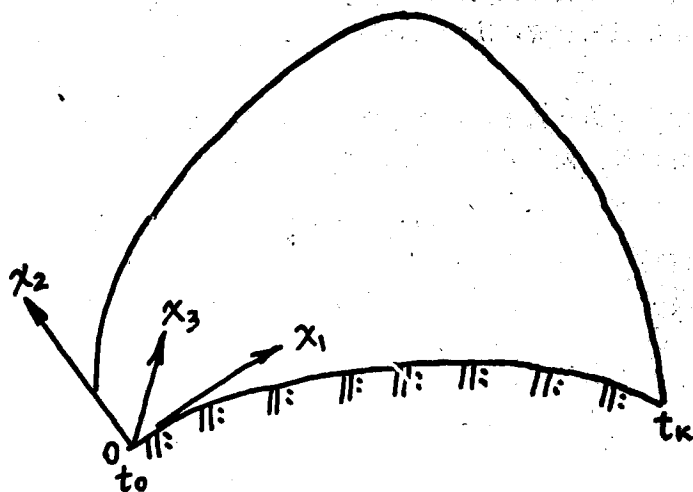


图 (4—6) 飞行试验产生的数据源

有了数学模型, 就可进行计算机仿真。仿真技术广泛应用于系统分析与系统设计。系统分析指: 单元和结构给定, 通过数学模型求系统行为。

在系统分析中采用仿真技术, 其目的是评估所研制的系统, 其性能是否满足设计要求。系统分析中的仿真框图见图 (4—7) :

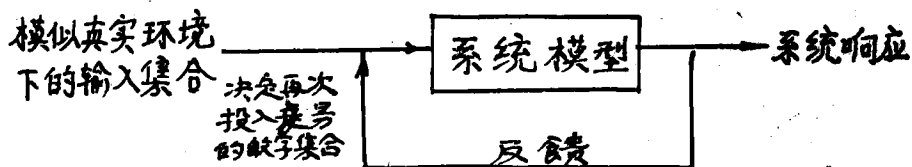


图 (4—7) 系统分析用的仿真框图

系统综合是系统分析的逆过程, 即给定了系统行为, 要求设计出满足给定行为的系统单元与系统结构。这个逆过程要比正过程复杂和困难, 因为系统综合通常没有唯一解。

例如, 按照战术, 技术要求, 设计一种型号导弹, 给定:

射程 $L = 1000$ 公里

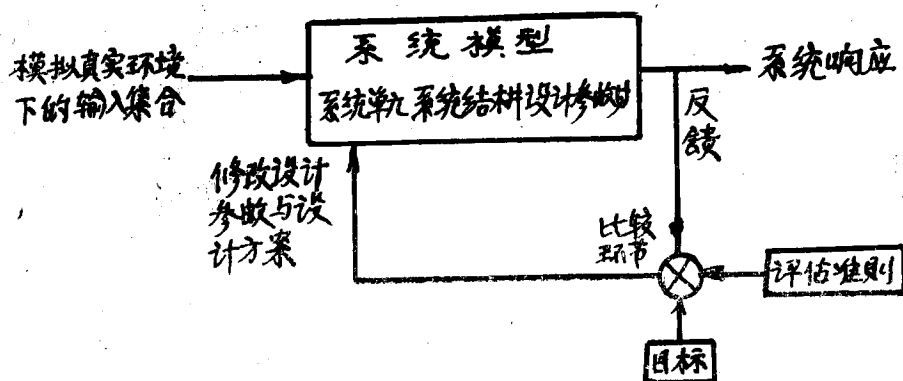
弹头重量 $G = 1$ 吨

命中精度 $B_b = 0.5$ 公里, $B_g = 1$ 公里

满足上述性能要求, 所设计的导弹, 其设计方案可以有許多不同选择, 例如: 发动

机可取液体或固体；制导方案可取平台计算机或捷联式；弹体结构可取化铰结构或薄壁蒙皮结构；使用的燃料又可取多种不同选择，由于系统单元有多种不同方案，导弹的总体方案是单元方案的各种不同组合，这个组合数的数量就很大。最后，多种设计方案，其形状尺寸，重量参数，结构形式可以差别很大，结果却都满足同一战术、技术要求。要在众多的设计方案中权衡利弊，决定一种较优的设计方案，存目前，主要还停留在经验的设计方法上。

在系统综合中采用仿真技术，使得设计方案可以比较接近于多目标下综合优化，这就是一般所谓闭环设计。闭环设计的仿真框图示于图（4—8）：



图（4—8）系统综合的仿真框图

注意，闭环设计与系统分析不同，反馈线路，经比较环节后是指向模型本身。通过对仿真试验的结果分析，并与目标要求，评估准则相比较，用来修改开始选择的设计方案（或设计参数）。经过多次仿真试验与反复比较与评估，使得修改后的设计方案，比较地接近于多目标下的综合优化设计方案。

由于大系统十分复杂，实物模型试验往往化费巨大，要投入大量人力、物力，而且试验周期很长（如种试验田）。正在出现一种动向，即用数学模型取代或者部分取代实物模型。取代军事演习的作战仿真，已经着手研究；用计算机仿真预测市场变化，经济规律等，也广泛进行。数学模型与计算机仿真的结合，会不会提供如下前景，例如把种试验田搬到计算机上进行？有待于人们继续努力。

应当强调，数学模型无疑会广泛应用数学，但数学模型与理科纯数学有区别，表现在前者反映原型，后者不必反映原型。纯数学可以从概念、定义、公理出发研究，前者必须从原型出发，并最终受原型检验。因此，建立模型时，要对数学进行选择，服务于更好反映原型。其次，客观世界都是数量与质量的有机结合，研究物理过程时，如果物理模型错了，数学模型也要受牵连。因此，建立数学模型更强调工程性，和多学科的综合性。

2—3 结构模型

用数学来描写工程系统，优点是：

- 第一 保证系统理论模型的精确性，尽量排除模棱两可。
- 第二 便用于现代计算机辅助处理，人机结合。