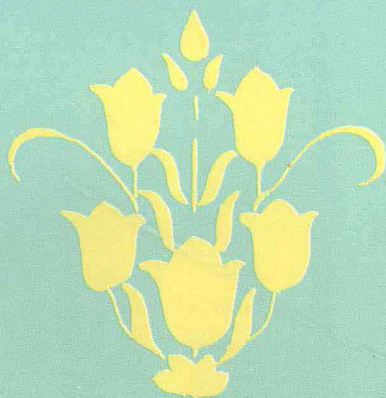


XITONGDONGLIXUEJIAOCHENG

系统动力学教程

贾仁安 编著



江西人民出版社

系统动力学教程

贾仁安 编著

江西人民出版社

(赣)新登字第 001 号

书 名: 系统动力学教程
作 者: 贾仁安 编著
出 版: 江西人民出版社(南昌市新魏路)
发 行:
经 销: 江西省新华书店
印 刷: 江西印刷公司
开 本: $787 \times 1092\text{mm}$ 1/32
印 张: 11.875
字 数: 25 万
版 次: 1992 年 10 月第 1 版 第 1 次印刷
印 数: 1—2000
定 价: 6.30 元
ISBN 7-210-01034-3/G.56

邮政编码: 330002 电报挂号: 3652 电话: 331044

前 言

本系统动力学(System Dynamics 简称 S · D ·)是通过建立流位流率系分析研究信息反馈系统的一门科学。它是系统科学的一个分支。是一门沟通自然科学和社会科学的边缘学科。

系统动力学国内又称为系统动态学。系统动力学是由美国麻省理工学院福雷斯特(Jay W · Forrester)教授于 1956 年创立的。随后,福雷斯特及其所领导的研究小组发表了一系列论著。

本书所述的系统动力学有以下特点。

(一)能实现计算机仿真技术与数学模型的有效结合。

S · D · 设计有通用 DYNAMO 专用仿真语言,并且这种语言在不断改进和发展。DYNAMO 语言便于建模人员学习和使用。一般备有 20 多种函数,包括表函数、延迟函数、逻辑函数、数学函数、调试函数等,使用者只要按 DYNAMO 使用手册的规定,把数学模型书写成动力学方程,设计好控制语句,就可以上机进行仿真运算,并以使用者指定的表和(或)图的形式打印输出一目了然的结果。

(二)建模方法适用于研究复杂系统

系统动力学模型本质上是带时滞的一阶微分方程组。但不要求建模者一开始就写出方程,而是从分析系统的结构出

发,先建立变量之间的因果关系图,然后通过建立流位流率系建立流图,根据流图再写出方程。这种方法便于将概念模型转化为定量模型,便于以定性分析为先导,定量分析为支柱,定性与定量相结合,具有很强的实用性。

(三)便于与其它数学方法结合建模

千千万万数学工作者都感到,用单一数学方法去研究复杂系统,存在许多一时难以解决的困难。所以这样,是因为单一的数学模型都是在许多特定条件下建立起来的,而一个复杂系统常不可能只是某一单一数学模型的特定条件。 $S \cdot D \cdot$ 虽然具有特有的数学方程,并有表函数,延迟函数等,但同时允许使用者结合实际,用多种类型的数学表达式进行定量描述。这样就可以借用其它数学方法建立这些表达式,或确定这些表达式的有关参数。如数理统计方法,投入产出法,图论,模糊数学,灰色理论等等。

(四)应用范围广

这个特点是上面三个特点的结果。

$S \cdot D \cdot$ 首先是应用于企业经营管理,之后,其应用范围日益扩大,几乎遍及各个领域,而以在社会经济领域中,在宏观与微观两方面的研究与应用为著称。

我国在70年代引进 $S \cdot D \cdot$ 学科以来,发展非常迅速。在应用研究方面已具有国际上应用研究的广度,已覆盖社会、经济、工程众多的领域。由于国内四化建设热潮的推动,软科学研究与决策科学化的日益受重视, $S \cdot D \cdot$ 在长远发展战略研究与区域规划方面,已在全国范围内取得突出成绩;在理论研究方面也有可观的进展;在企业管理方面的应用正在不断深入。

本书是在我所带研究生和信息专业的讲稿的基础上撰写而成的,其中有些定义及论述是第一次在书中提出。包含了本人的部份研究成果。系统动力学教材建设是系统动力学发展的关键之一,盼本书能对此起到抛砖引玉的作用。

本人在系统动力学的有关科研工作中,曾得到复旦大学王其藩教授及同行许多专家的关心和帮助,在这里表示衷心感谢。

本书撰稿,除列出的主要参考书目外,还参阅了其它部分资料,在此一并表示谢意。由于时间仓促,水平有限,疏漏讹误之处在所难免,敬请读者批评指正。

贾 仁 安

1992年10月于江西大学

目 录

前言

第一章 信息反馈系统	(1)
第一节 系统	(1)
§ 1.1.1 系统的概念	(1)
§ 1.1.2 系统的结构与功能	(4)
第二节 信息与反馈	(12)
§ 1.2.1 信息	(12)
§ 1.2.2 反馈	(20)
第三节 系统模型与系统分类	(26)
§ 1.3.1 模型	(26)
§ 1.3.2 系统的分类	(30)
§ 1.3.3 三论是系统动力学的基础	(32)
第二章 二图模型	(36)
第一节 因果关系图	(36)
§ 2.1.1 因果链	(37)
§ 2.1.2 反馈环	(40)
§ 2.1.3 因果关系图的建立	(46)
第二节 流图	(49)
§ 2.2.1 物流和信息流	(49)
§ 2.2.2 变量的分类	(50)
§ 2.2.3 流图及其分析	(54)

第三章 流位流率系下的数学方程	(69)
第一节 流位流率系及其流率基本式	(69)
§ 3.1.1 流位流率系	(69)
§ 3.1.2 流位及基本流率表达式	(71)
第二节 流位流率系下微分方程组	(90)
§ 3.2.1 辅助变量式	(90)
§ 3.2.2 微分方程组	(93)
第四章 DYNAMO 语言基本规则及语句	(99)
第一节 基本规则	(100)
§ 4.1.1 基本规定	(100)
§ 4.1.2 时间标记	(101)
第二节 语句	(103)
§ 4.2.1 方程语句	(104)
§ 4.2.2 控制语句	(115)
§ 4.2.3 其它语句	(126)
第五章 DYNAMO 仿真技术	(130)
第一节 仿真程序设计	(130)
§ 5.1.1 欧拉方法及 DT 的确定	(130)
§ 5.1.2 仿真计算	(138)
第二节 设备与文件	(143)
§ 5.2.1 设备	(143)
§ 5.2.2 文件	(144)
第三节 MDPC 的功能	(148)
§ 5.3.1 功能	(149)
§ 5.3.2 操作环境	(151)
第四节 仿真运行模型	(155)
§ 5.4.1 新旧模型仿真运行流程图	(155)

§ 5.4.2	S、E、C 状态	(157)
§ 5.4.3	再运行	(175)
第五节	文件管理	(188)
§ 5.5.1	F 功能的内容	(188)
§ 5.5.2	F 功能的子命令	(189)
第六章	DYNAMO 函数	(196)
第一节	数学、逻辑、测试函数	(196)
§ 6.1.1	数学函数	(196)
§ 6.1.2	逻辑函数	(198)
§ 6.1.3	测试函数	(202)
第二节	表函数	(206)
§ 6.2.1	Micro-DYNAMO 两类表函数	(206)
§ 6.2.2	世界模型 I 程序及其表函数分析	(209)
§ 6.2.3	建立表函数的基本步骤	(223)
第三节	延迟函数	(228)
§ 6.3.1	一阶物流指数延迟函数 DELAY1	(228)
§ 6.3.2	三阶物流指数延迟函数 DELAY3	(234)
§ 6.3.3	DELAY1、DELAY2、DELAY3 的输出比较	(239)
§ 6.3.4	n 阶物流指数延迟函数 DELAYN	(247)
§ 6.3.5	一阶信息延迟函数 SMOOTH	(252)
§ 6.3.6	三阶信息延迟函数 DLINF3	(259)
§ 6.3.7	延迟与测试函数应用例	(262)
第七章	模型的建立	(274)
第一节	基本模型的建立	(274)
§ 7.1.1	建立基本模型的步骤	(274)
§ 7.1.2	简单动态管理 S. D. 基本模型的建立	(280)
第二节	图论分析方法	(291)
§ 7.2.1	基本概念	(292)

§ 7.2.2	生成出树存在条件	(296)
§ 7.2.3	确定流图极大出树的方法	(298)
§ 7.2.4	增量 Δx 产生对应增量的一般规律	(303)
第三节	基本模型的调试与进一步开发	(305)
§ 7.3.1	仿真分析基本模型	(306)
§ 7.3.2	模型的进一步开发	(312)
第四节	系统动力学与其它理论的结合	(332)
第八章	检验、结果分析及研究报告编写	(341)
第一节	检验	(341)
§ 8.1.1	检验的分类	(341)
§ 8.1.2	S. D. 模型的灵敏度分析	(342)
第二节	结果分析与研究报告编写	(353)
§ 8.2.1	输出结果综合分析	(353)
§ 8.2.2	S. D. 模型研究报告的编写	(355)
附录	错误信息表	(364)
参考文献		(368)

第一章 信息反馈系统

第一节 系统

§ 1.1.1 系统的概念

关于系统的定义,现表述不一。

有的把“系统”一词定义为:“有组织的或被组织化的整体”;“结合着的整体所形成的各种概念和原理的综合”;“由有规则的相互作用、相互依存的形式组成的诸要素的集合”等。

福雷斯特在《系统原理》一书中说:“系统是为了一个共同的目的而一起运行的各部分的组合”。

钱学森把系统定义为“极其复杂的研究对象称为系统,即系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合的具有特定功能的有机整体。”“‘系统’本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分。”

这些都是用直接表述的方法给系统的定义(还有其它直接表示的定义)。我们采用钱学森所给的表述。

我们把组合的整体称为系统的内部,整体以外的部分称为该系统的环境。在系统内部与其环境之间可以勾画出该系统的边界。如图 1.1.1。

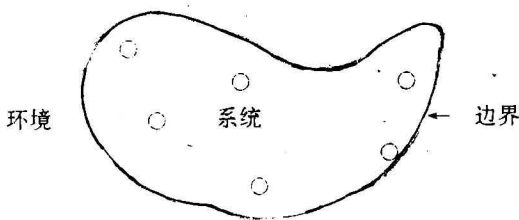


图 1.1.1

在数学上定义系统的方法也有多种。我们选择联立微分方程组来描述系统。

设有 n 个要素变量 $L_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, n$), 每个 $L_i(t)$ 在其定义域内为可微函数, 并

$$\begin{cases} \frac{dL_1}{dt} = f_1(L_1, L_2, \dots, L_n) \\ \frac{dL_2}{dt} = f_2(L_1, L_2, \dots, L_n) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dL_n}{dt} = f_n(L_1, L_2, \dots, L_n) \end{cases} \quad (1)$$

则这 n 个要素变量构成一个系统。

自然, 若要考虑到 L_i 同时依赖时间和空间, 则(1)就应该用偏微分方程表示。方程组(1)表示了动力学的一般原理。

以后我们又将系统中的要素变量简称为变量。

由定性描述定义和数学式描述定义都可以看出, 我们平时所研究的、讨论的许多对象都是系统。系统无处不有, 无处不见。由原子核和各层电子所构成的原子是一个系统; 一部理论专著、一台设备、一个专业、一个行政区域、一个学科领域、一个国家也是一个系统; 由太阳和几大行星构成的太阳系以

及整个宇宙都是一个系统。

系统的定义中核心条件是“要素的互相关系”。也就是各定义中“运行”、“组织化”、“相互作用”、“相互依赖”等条件。

下面我们进一步说明这一核心问题。

对于处理“元素”的复合体有三种方法：

1、按它们的数目；2、按它们的种类；3、按元素的关系。下列简单图示可以说明这一点，见图 1.1.2。

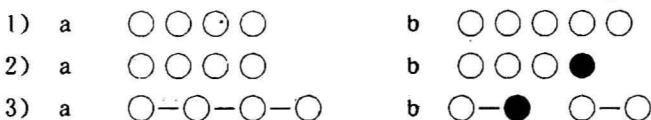


图 1.1.2 复合体的三种情况

图 1.1.2 中第 1 和第 2 种处理属于第一类处理。复合体可以理解为孤立考虑元素之和；第 3 种属于第二类处理，不但要知道孤立的元素，而且应知道它们之间的关系。第一类的特征可以叫做“累积的”，第二类的特征叫做“构成的”。累积特征可以通过孤立时已知的元素特征和行为的累加来获得。构成特征不仅要知道各个部分，还必须知道关系。

物理特征属累积特征。如总重量为各元素重量之和，分子量为各原子量之和。化学特征属结构特征，例如，异构物原子团个数相同，但分子中原子团排列结合不同。

系统属于第二类，因此，系统的特征属构成特征，不能只由孤立的各部分的特征来说明。只有同时知道各部分和它们间的关系，系统的行为才能推导出来。而且我们一定要明确“整体大于部分”，两个系统，其组成部分相同，但部分之间的

关系不同,所表现出的特征将会大不相同。同一类企业,其部门近似相同,但由于管理不同,所产生的经济效益大不相同,同一类省市,其部门构成基本相同,但是社会经济发展完成不同都属于这个原因。

系统这一由元素(即系统要素)构成的复合体,属第二类复合体,系统的特征属构成特征,这些是系统动力学建立的基础,系统动力学在确定系统要素以后,研究的目标就是建立系统要素的关系模型。

§ 1.1.2 系统的结构与功能

一、系统结构与功能的概念

定义1 构成系统的要素的排列组合顺序及相互作用称为系统的结构。

一般言,在系统中,受环境作用的要素 $x_i (i=1,2,\dots,m)$ 称为系统的输入,作用于环境的系统要素 $y_j (j=1,2,\dots,n)$ 称为系统的输出。

系统的输入又可称为原因变量或激励因子,有时也称为输入变量。

系统的输出又可称为结果变量或系统对环境激励的响应因子,有时也称为输出变量。

实际系统可能是非常复杂的,因此其输入输出也是非常复杂的。一方面,系统中包含子系统,子系统也存在输入输出,另一方面,输入输出可以同时发生,也可以滞后相当一个时间再发生;输入输出有时直接相关,甚至是同一类变量的不同时刻值,而有时不直接相关;输入输出可以是离散变量,也可以是连续变量,也可能是向量,也可能是某种集合。

例如,一个社会经济系统,其输入是 t_0 年中的人口、资金、资源、污染量。而其输出是 $t_0 + \Delta t$ 年间的人口、资金、资源、污染量。

定义 2 一定结构的系统在特定的环境下所具有的能力,称为该系统的功能。

系统的功能具体体现在对输入的响应能力(输出)。有的企业系统能做到投入少(输入小),如投入资金、能源少,而产出大(输出大),如产品质量高、产值高、利润大。而有的企业系统则投入大(输入大),产出小(输出小)。前者企业系统功能大,后者企业系统的功能少。

系统的功能大小决定于系统的结构。有什么样的内在结构就会产生什么样的功能。例如企业系统的功能不同,也是由于企业系统结构不同(包括人员素质、技术素质、管理素质不同)。另外,系统的功能反过来能作用于系统的结构。当系统不能有效地适用环境,功能不能正常发挥或处于低效率时,就会刺激并逼迫结构的改革。企业就向前发展。

对社会经济系统的历史、现状分析、预测、战略研究,就是对系统的结构、环境和功能的综合研究。就是分析系统过去和现在的输入与输出结构。根据系统的过去、现在的输入、输出,结构及环境将发生的变化来预测系统未来的输出。如果这种输出不能令人满意的话,还可以研究一套如何通过改变输入及改变结构,来使系统输出达到优化。

上面分析告诉我们,对系统结构的研究是非常重要的。

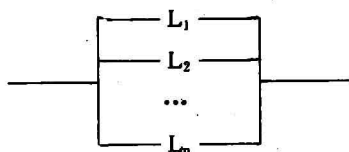
二、系统结构的类型

1、串、并联结构是系统的基本结构。

所谓系统的串联结构,就是系统的要素 $L_i (i=1, 2, \dots, n)$

为 $L_1-L_2-\cdots-L_n$ 连结。

所谓系统的并连结构,就是系统的要素 $L_i (i=1,2,\cdots,n)$ 为



连结。

定义 3 系统在规定的的时间和条件下,无故障地完成规定功能的概率,称为系统的可靠度。用 R_p 表示。

串联结构相当于一个环环相扣的链环,只要有一个要素发生故障,整个系统就会发生故障,其可靠度计算如下:

设共有 n 个要素,每个要素的可靠度为 R_i ,按串联概率乘法定律,串联结构的可靠度 R_p 为

$$R_p = \prod_{i=1}^n R_i \quad (1)$$

表示为时间的函数

$$R_p(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2)$$

鉴于 $R_i(t) < 1$,可知:

- ① 串联结构的可靠度低于要素的可靠度;
- ② 要素件数 n 越增多,串联系统可靠度越低;
- ③ 系统的寿命则由构成系统的要素中最早失效者决定。

即串联系统结构是最小寿命结构。

并联结构相当于多股绳拧成的粗绳。如果我们假设只要其中有一个要素处于正常状态,整个系统就处于非故障状态,则只有所有的要素都同时发生故障,整个系统才会发生故障。

按照概率乘法定律,并联结构的不可靠度 F_q 为

$$F_q(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (3)$$

其中 $F_i(t)$ 为第 i 个要素的不可靠度。

并联结构的可靠度 $R_q(t)$ 为:

$$R_q(t) = 1 - F_q(t) = 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (4)$$

而 $F_i(t) = 1 - R_i(t)$, 故

$$R_q(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (5)$$

由(3)可知,当假设条件成立时并联结构的不可靠度 F_q 小于各要素的不可靠度 F_i , 故有

- ① 并联结构的可靠度高于要素的可靠度;
- ② 并联结构要素件数 n 越增大,系统的可靠性越高;
- ③ 并联结构的寿命由其要素中最后失效者决定。即并联结构是“最大寿命结构”。

由上述原理可知,可以利用并联结构来增加系统的可靠度。

利用并联结构来增加系统的可靠度,在系统工程中称为“冗余法”。冗余法具有极大的实用意义,例如,某些关键部件要求具有极高的可靠度,但现在所制造出的元件无法达到此水平时,那么就可采用并联结构来提高其可靠度,使可靠度不十分理想的元件也可能装配出可靠度非常高的整体系统。这种冗余技术在阿波罗登月等宇航工业中已得到实用。

2、层次结构

一个系统包含有子系统,子系统又包含自己的子系统,甚至一层层如此递推,各层子系统之中,层与层之间又用串、并