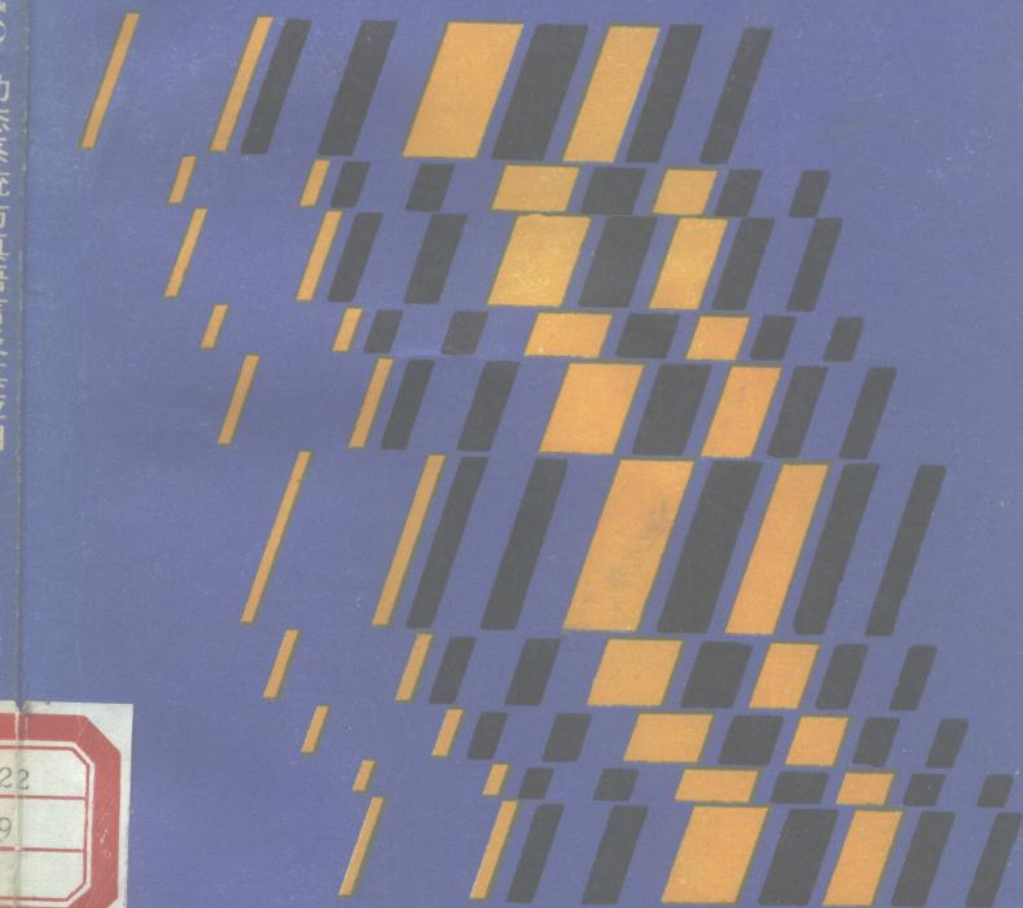


Micro-DYNAMO

# 动态系统仿真语言 及其应用

王宝琛 廖四鸣 编  
杨 杰 杨 竹



光明日报出版社



73.202  
117  
Morci—DYNAMO.

# 动态系统仿真语言及其应用

王宝琛 廖四鸣 编著  
杨杰 杨竹

光明日报出版社

8810494

13263.122

# **动态系统仿真语言及其应用**

王宝琛 等编著

**光明日报出版社出版**

北京永安路 106 号

**光明日报出版社软件出版部编辑**

上海长乐路 1230 号

\*

商务印书馆上海印刷厂常熟分厂印刷

新华书店上海发行所发行 各地新华书店经售

开本 850×1168 1/32 印张 9.25 字数 249

1986 年 12 月第 1 版 1986 年 12 月第 1 次印刷

印数：1—2,000

**书号：13263.122 定价：2.70 元**

## 编者的话

系统动力学(System Dynamics)是一门新兴的应用学科,它是研究复杂系统动态行为的方法。

五十年代中期,美国麻省理工学院(MIT)斯隆(Sloan School)管理学院 J. Forrester 教授创立了这门学科。他在系统论关于系统分析方法的基础上,基于维纳开创的经典控制论的成就,另辟蹊径,创立了这种颇有特色的建立复杂系统动态模型的方法。同时,他还利用了电子计算机高速的计算能力,有效地跟踪了复杂大系统的状态行为随时间变化的过程,使动态系统仿真有实施可行性,且成为易于推广的方法。

Forrester 教授用这种方法成功地研究了大型工业企业经营管理问题、城市问题、国家社会经济问题以及世界范围内的工业、农业、人口、资源及环境问题,先后发表《工业动力学》、《城市动力学》、《世界动力学》等有名的专著。

本书介绍的 Micro-DYNAMO 语言是在 IBM-PC/XT 微型电子计算机上实现的系统动力学建模和系统仿真语言。它是面向用户的语言,使用方便,简单易学。

全书共分十二章及三个附录。

第一章介绍反馈系统的原理及描述系统的状态空间方法。第二章介绍系统动力学方法的基本原理。这两章是本书的基础篇,是为对这门学科不熟悉的读者写的。

顺便说明一下,在描述系统动力学基本原理方面,我们引入了现代控制论中状态空间的概念,这与 Forrester 教授传统的描述方法有所不同。状态空间概念特别适合于描述时变系统。社会经济系统是时变系统,用状态空间描述有其优越性。关键的问题是站在状态空间的高度如何来统一 Forrester 传统的描述方法,而不失

其独到之处。我们作了这样的尝试,并通过推广系统动力学实践收到了较好的效果。实践说明,这样做不仅能清晰地阐述其原理,而且也有利于系统动力学这门新学科的发展。

第三章介绍 Micro-DYNAMO 系统,对其软硬件支持和技术指标作了说明。第四章向读者说明如何将一个新的模型送入计算机。第五、六、七章详细说明了 Micro-DYNAMO 语言的各条语句及若干语法规则。第八章讲述 DYNAMO 程序设计的若干问题及应用实例。第九、十、十一章分别介绍了 Micro-DYNAMO 系统的三个主要程序:编辑程序、文件管理程序以及服务程序的命令及其应用。

第十二章介绍作者用系统动力学方法解决四川省大邑县农村经济结构调整的动态仿真模型。

第十三章介绍复合控制原理在系统动力学模型中的应用。

附录 A 列出 Micro-DYNAMO 系统自动查找模型错误的各种可能的信息,并分析了产生错误的原因及解决的方法。附录 B 列出了该系统设置的 23 种函数的流程图符号。附录 C 列出了 Micro-DYNAMO 语言主要语法,便于用户查寻。

第一、二、八、十一章以及附录 B、C 由王宝琛编写。第三、五、六、七章由廖四鸣编写。第四、九章由杨杰编写。第十章、第十一章的 §11.1 节以及附录 A 由杨竹编写。第十二章由上述四位同志共同编写。第十三章由廖四鸣和王宝琛共同编写。全书由王宝琛同志修改定稿。

由于编者水平所限,谬误之处敬请教正。

国家计委计算中心江道琪对本书的编写工作给予了热情的支持和鼓励,并详细审阅了书稿,提出许多宝贵的修改意见。清华大学高云鹏副教授对本书的编写给予热情的关注,借此表示感谢。

编 者

1985 年 8 月 4 日

于成都

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第一章 反馈系统概论 .....                | 1  |
| §1.1 系统 .....                   | 1  |
| §1.2 反馈系统 .....                 | 2  |
| §1.3 反馈回路(环) .....              | 4  |
| §1.4 系统仿真 .....                 | 5  |
| §1.5 系统的因果关系图 .....             | 6  |
| §1.6 系统的状态及其描述 .....            | 9  |
| §1.6.1 系统的状态空间 .....            | 9  |
| §1.6.2 状态方程 .....               | 10 |
| 第二章 系统动力学基本原理 .....             | 13 |
| §2.1 反馈动力学基础 .....              | 13 |
| §2.1.1 系统的行为 .....              | 13 |
| §2.1.2 一阶负反馈环 .....             | 13 |
| §2.1.3 一阶正反馈环 .....             | 15 |
| §2.1.4 二阶反馈环 .....              | 16 |
| §2.1.5 多重反馈环的耦合 .....           | 19 |
| §2.1.6 行为——结构定理 .....           | 27 |
| §2.2 时间延滞的系统 .....              | 27 |
| §2.2.1 纯滞后时间延滞 .....            | 28 |
| §2.2.2 一阶指数延滞 .....             | 28 |
| §2.2.3 三阶指数延滞 .....             | 29 |
| §2.3 系统的 SD 流程图 .....           | 30 |
| §2.3.1 流图的基本构造元素 .....          | 30 |
| §2.3.2 DYNAMO 语言中函数的流程图符号 ..... | 33 |
| §2.3.3 速率的子构造 .....             | 33 |
| §2.3.4 流程图设计中的几个问题 .....        | 34 |
| §2.4 系统动力学数学模型 .....            | 36 |

|        |                                  |    |
|--------|----------------------------------|----|
| §2.4.1 | 系统动力学的数学模型 .....                 | 36 |
| §2.4.2 | 数学模型的求解 .....                    | 39 |
| §2.4.3 | DYNAMO 编译对 SD 模型的计算 .....        | 41 |
| 第三章    | Micro-DYNAMO 系统介绍 .....          | 43 |
| §3.1   | 系统的基本设备要求 .....                  | 43 |
| §3.2   | Micro-DYNAMO 的若干技术指标 .....       | 45 |
| §3.3   | Micro-DYNAMO 系统的启动与使用 .....      | 47 |
| 第四章    | 模型的编辑、编译及调试 .....                | 56 |
| §4.1   | 建立新的模型文件 .....                   | 56 |
| §4.1.1 | 进入编辑环境 .....                     | 56 |
| §4.1.2 | IBM 键盘 .....                     | 57 |
| §4.1.3 | 输入模型 .....                       | 59 |
| §4.2   | 修改模型 .....                       | 60 |
| §4.2.1 | 移动光标 .....                       | 60 |
| §4.2.2 | 插入字符 .....                       | 60 |
| §4.2.3 | 删除字符 .....                       | 61 |
| §4.2.4 | 插行 .....                         | 61 |
| §4.2.5 | 删行 .....                         | 62 |
| §4.3   | 存储模型 .....                       | 63 |
| §4.4   | 编译模型 .....                       | 64 |
| §4.5   | 调试模型 .....                       | 65 |
| 第五章    | Micro-DYNAMO 语言 .....            | 69 |
| §5.1   | 仿真与仿真语言 .....                    | 69 |
| §5.2   | DYNAMO 语言的特征 .....               | 70 |
| §5.3   | 各种 DYNAMO 语言 .....               | 71 |
| §5.4   | DYNAMO 语言与系统动力学 .....            | 73 |
| §5.4.1 | 系统动力学的系统结构层次 .....               | 73 |
| §5.4.2 | Micro-DYNAMO 语言与系统动力学的对应关系 ..... | 74 |
| §5.5   | Micro-DYNAMO 语言的结构和语法 .....      | 75 |
| §5.5.1 | Micro-DYNAMO 语言的结构 .....         | 75 |
| §5.5.2 | Micro-DYNAMO 语言的基本语法 .....       | 76 |
| 第六章    | Micro-DYNAMO 语句 .....            | 84 |

|        |                          |     |
|--------|--------------------------|-----|
| §6.1   | 方程式语句 .....              | 85  |
| §6.1.1 | 状态方程式 .....              | 85  |
| §6.1.2 | 速率方程式 .....              | 86  |
| §6.1.3 | 辅助方程式 .....              | 88  |
| §6.1.4 | 增补方程式 .....              | 89  |
| §6.1.5 | 初始值方程式 .....             | 90  |
| §6.1.6 | 常数方程式 .....              | 92  |
| §6.1.7 | 表方程式 .....               | 93  |
| §6.2   | 控制语句 .....               | 94  |
| §6.2.1 | RUN 语句 .....             | 95  |
| §6.2.2 | 表格输出语句 .....             | 96  |
| §6.2.3 | 绘图输出语句 .....             | 100 |
| §6.2.4 | 随机数初值语句 .....            | 105 |
| §6.2.5 | 控制参数指定语句 .....           | 106 |
| §6.2.6 | 存贮语句 .....               | 109 |
| §6.2.7 | 选择语句 .....               | 109 |
| §6.3   | 非执行语句 .....              | 115 |
| §6.3.1 | 标识语句 .....               | 115 |
| §6.3.2 | 注释语句 .....               | 115 |
| §6.3.3 | 继续语句 .....               | 116 |
| §6.4   | 关于重运行 .....              | 117 |
| 第七章    | Micro-DYNAMO 函数 .....    | 122 |
| §7.1   | 数学函数 .....               | 124 |
| §7.2   | 表函数 .....                | 125 |
| §7.3   | 逻辑函数 .....               | 127 |
| §7.4   | 时滞函数 .....               | 130 |
| §7.5   | 试验函数 .....               | 136 |
| 第八章    | DYNAMO 程序设计 .....        | 143 |
| §8.1   | 用 DYNAMO 描述系统动力学模型 ..... | 143 |
| §8.2   | 仿真的运行及控制 .....           | 145 |
| §8.3   | 仿真实例 .....               | 146 |
| §8.3.1 | 流感模型 .....               | 147 |
| §8.3.2 | 天然气开采模型 .....            | 151 |



|          |                     |     |
|----------|---------------------|-----|
| § 8.3.3  | 一个简化的小卖部模型          | 159 |
| 第九章      | 编辑程序                | 165 |
| § 9.1    | 输入字符                | 165 |
| § 9.2    | 数字键及光标移动键           | 166 |
| § 9.2.1  | 数字键                 | 166 |
| § 9.2.2  | 光标移动                | 167 |
| § 9.3    | 简单的修改               | 169 |
| § 9.4    | 高级功能键               | 170 |
| § 9.4.1  | 请求中断                | 170 |
| § 9.4.2  | 发出警铃声的原因            | 174 |
| § 9.4.3  | 查找功能键               | 174 |
| § 9.4.4  | 替换功能键               | 176 |
| § 9.4.5  | 剪切功能                | 177 |
| § 9.4.6  | 粘贴功能键               | 178 |
| § 9.5    | 出口键                 | 178 |
| 第十章      | 磁盘文件管理程序            | 180 |
| § 10.1   | 修改软盘的名字             | 180 |
| § 10.2   | 调整软盘                | 181 |
| § 10.2.1 | 突然事件的处理             | 181 |
| § 10.2.2 | 盘目录                 | 182 |
| § 10.2.3 | 盘空间的调整              | 184 |
| § 10.3   | 文件的传送               | 186 |
| § 10.4   | 设置日期                | 186 |
| 第十一章     | 服务程序                | 188 |
| § 11.1   | 软盘初始化               | 188 |
| § 11.2   | 软盘的复制               | 190 |
| § 11.3   | 系统配置命令              | 192 |
| § 11.3.1 | 对打印机设置              | 193 |
| § 11.3.2 | 对硬盘的配置              | 195 |
| § 11.3.3 | 从硬盘上运行 Micro-DYNAMO | 200 |
| § 11.3.4 | 辅助卷                 | 201 |
| § 11.3.5 | 硬盘损坏的恢复             | 202 |
| § 11.3.6 | 内存盘                 | 203 |

|      |                           |     |
|------|---------------------------|-----|
| 第十二章 | 县区域农村经济动态仿真模型 .....       | 206 |
| 第十三章 | 复合控制及其在 SD 模型中的应用 .....   | 251 |
| 附录 A | 错误信息 .....                | 265 |
| 附录 B | Micro-DYNAMO 函数流图符号 ..... | 279 |
| 附录 C | Micro-DYNAMO 语法表 .....    | 282 |

# 第一章 反馈系统概论

系统动力学是研究集中参数连续系统动态行为的方法。所谓集中参数指的是系统中所考察的变量皆可以视为随时间变化的量，而随空间坐标的变化可忽略不计。所谓连续系统指的是系统中所考察的变量是随时间流逝连续变化的。我们所研究的大多数复杂系统都可以视为集中参数连续系统，如社会经济系统、生态系统等。

本章首先简述系统动力学中有关系统的定义。然后，介绍反馈系统的概念及其结构。最后介绍描述系统状态的状态空间方法。

## § 1.1 系 统

一切研究对象皆可视为系统。本节简要说明系统动力学有关系统的定义以及系统与环境的相互关系。

### 1. 系统的概念

一般系统论的创始人贝塔朗非(L. U. Bertalanffy)从理论生物学角度发现，一切有机体与生物有机体类似，都是由要素组成的有机整体，于是撇开一切对象的具体物质、能量和形态，仅仅把研究对象作为由部分组成的整体而加以考察。他把这些对象称之为系统。经典控制论创造人维纳(Winners)也把研究对象作为系统来考察。目前，“系统”这个词已成为非常流行的术语了。

很难对系统作出一个精确的定义，既足以概括其全部属性，又能表述其实用目的。系统动力学定义系统为：由相互作用的可识别的各部分组成，并以达到某种目的而有机地联结在一起的集合体。

这个定义概括了系统的下列属性：

• 1 •

8810494

(1) 集合性：定义中可识别的部分称之为系统的要素。系统是要素的集合。

(2) 相关性：系统的各要素之间既相互区别又相互作用、互相关联形成了一个整体。

系统内部各要素相互联系和作用的方式和秩序称为系统的结构。

(3) 目的性：系统对其发展目标具有选择能力，并通过主动（控制）或被动的方式来实现。

## 2. 系统的边界

系统动力学把研究的对象作为系统来处理。然而，任何一个系统都是在更大的系统的包围之中。把研究对象从周围的系统中划分出来，确定给出的系统的边界范围，同时确定它与外部系统的相互作用，这是研究系统的首要问题。

与给定系统有关的外部系统叫做系统的环境。因此，系统总是处在环境之中，它既有赖于环境的给定输入，又以输出的形式反作用于环境。系统与环境的相互联系和作用过程的秩序和能力称为系统的功能。

## § 1.2 反馈系统

如上所述，系统的输入是环境对系统的作用，系统的输出是系统对环境的作用。现在，我们来研究一个工业系统，把资金与劳动力

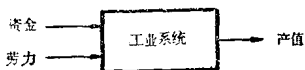


图 1.1 工业系统

作为系统的输入，产值作为系统的输出，如图 1.1 所示。对于这样的系统，给定了资金和劳力的投入，系统便有一定的产出。也就是说，对于给定的输入，系统便有一定的输出与之响应。

如果系统的输出对输入没有影响，这样的系统就是所谓开环系统。一个开环系统不能观察到自己的行为，并不能对它的行为有所反应。如手表是一个开环系统，一个手表靠自己既不会观察

到自己的不精确度,也不会自行调整。

如果系统的输出反过来影响系统的输入,这样的系统就是所谓的反馈系统(也称“闭环”系统)。在反馈系统中有一个闭环回路结构,它把系统过去行动的结果带回给系统,以控制未来的行动。

我们来考虑手表和人构成的系统。这时人可以观察手表是否精确,并参照标准时间对之进行调整。这就构成了一个反馈系统。这里,人的作用表现在以下几个方面:观测系统状态(手表指示的时间)、传递信息,并与标准时间进行比较,然后产生调整的决策行动作用于手表,并引起系统状态新的改变。

又如工业系统中,如果把产值通过利润留成形成的自有资金作为该系统的要素,则如图 1.2 所示构成了闭环回路结构。该闭环回路结构描述了工业系统扩大再生产的过程。这时,该系统就是一个反馈系统。

由上述可知,一个系统是开环系统还是反馈系统在于对系统边界的划定。而系统边界的划定又取决于在定义系统目标时观察者的着眼点。

有两类反馈系统:负反馈系统和正反馈系统。从系统的行为

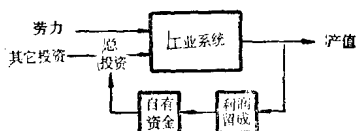


图 1.2 反馈工业系统

来看,负反馈系统会自动寻找目标,并在达不到目标时产生偏差响应;而正反馈系统会产生增长的过程,在此过程中行动所产生的结果将引起更大的行动。

手表和人构成了一个负反馈系统。该系统以标准时间为目标。而图 1.2 所示的工业系统是个正反馈系统。

我们古老的东方哲学对于变化着的物质世界的反馈特性早就给予了精辟的阐述。东方哲学认为,我们周围的一切都是瞬息即逝的,“一切都有产生和消亡”,这种生与死由周而复始的无穷尽因果链构成循环圈——佛教中称之为“轮回”(Samsara)。这就是说,我们周围的一切都是所谓的反馈系统。

本世纪 40 年代末,经典控制论的创始人维纳在他的名著《控

制论或动物、机器中的控制和通讯》中提出了两个重要论点：一是，世界上的一切系统都是信息反馈系统；二是，所有系统内都存在着反馈机制。这两个论点是上述东方哲学思想的延伸。其重要性就在于为进一步考察反馈系统的性质提供了更广泛的概括形式和处理方法，并提供了模型化工具。

§ 1.3 反馈回路(环)

一个反馈系统至少包括一个反馈回路(环)。反馈环是反馈系统的基本组件。下面我们分析一下反馈环的基本结构。

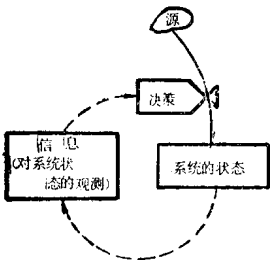


图 1.3 反馈环的基本构造

图 1.3 表明了一个反馈环的基本结构。它由决策点（图中阀门符号）、物质流（带箭头实线）、系统状态（用矩形框表示）、有关系统状态的信息流（用带箭头虚线表示）以及再回到决策点的闭合路径所组成。

系统动力学对于物质世界的千变万化，引入各种“物质流”来加以描述。“物质流”是对具有某种特性的物质存在状态的动态变化的描述。追溯起来，用“流”的概念来描述动态的客观世界，正是古老的东方哲学的特点。

例如，我们考察人口系统。描述系统状态的人口总数的动态变化是人从生到死的“物质流”引起的。

决策产生行动，引起了物质流的改变，因而形成了“行动流”。所以说，行动流引起了系统状态的改变。而系统的行动流又受着系统决策机制的控制。正如图 1.4 中水箱系统，系统中的阀门的控制作用所产生的行动流引起水流改变；从而使系统状态——水箱水位变化，水流又受着阀门的控制。决策对于物质流的作用恰如阀门对水流的作用一样，

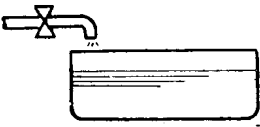


图 1.4 水箱系统

故在图 1.3 中决策用阀门状的图形来表示。决策是状态的变化率，亦称为速率。

反馈环是靠信息流来封闭的，它是控制行动流的决策依据。

信息是对系统状态的观测结果。它一旦被采集就成为过去。因此，信息不是由目前的真实状况所决定，而是由观察到的、传递到的并被分析和消化过的过去状态所决定。

最后，对图 1.3 所示的反馈环的基本结构的运动归纳如下。来自“源”的物质流形成系统状态的量 (level)。通过观测系统状态得到的信息由信息链通道(虚线表示)传递给决策机制，决策机制便产生决策的行动流，使物质流改变。因此，新的行动流又引起系统状态新的变化。如此周而复始不断循环下去。

一个复杂的反馈系统由若干反馈环组成，反馈环之间的相互作用使系统呈现出复杂的行为特征。各反馈环之间的相互作用叫做环的耦合。系统动力学认为，反馈环及环的耦合是系统的重要结构。

## § 1.4 系 统 仿 真

### 1. 模型(Model)

模型是对现实系统的临摹。这种临摹是对现实系统去粗取精、去伪存真的科学的，同时又是艺术的加工过程。因此，模型本身不是现实系统的复制品，但能用它代表现实系统，作为我们认识现实的结构。

人类对客观世界的认识形成概念，我们把这些概念使用到新的结构中去，便形成了对于现实的思维模型。思维模型是不定的、模糊不清的，且存于人的头脑之中得不到应有的批评和鉴别。因此，它是主观的、片面的，甚至是对现实系统的错误构造。

人类用文字或图象表述现实系统的才智是杰出的。但是，面临现代社会系统的复杂性，人类在这方面的才智不足以构造与解释复杂系统中随时间变化的动态过程。

系统动力学作为构模的方法，它是在人类认识取得光辉成就

的基础——即系统论、控制论、信息论的基础上，借助现代数学工具，建立起描述现实系统的一组常微分方程，这一组常微分方程就称为系统的数学模型。它描述了系统的动态过程，即系统的状态随时间变化的过程，因此，也称为系统的动态模型。

数学模型把现实系统中的客观规律、法则用数量形式表述出来，因此，它较之文字模型或图象模型都更加精确。

在物质社会中，我们没有，也不可能得到所谓完整的信息。因此，我们不能证明任何模型是“真实化”的准确代表。相反地，在我们意识到的这些事物中，我们也不是毫无所知。故我们总是处理中等质量的信息——这比什么信息都没有更强，比完整的信息要差。于是，在识别模型时，不应在绝对的尺度上责备它们的不完整，而应该在相对的尺度上证实它们是否成功地阐明了我们对系统的知识与见解。

## 2. 仿真(Simulation)

人们把系统的动态模型存于电子计算机中，借助计算机高速求解的优势，逐步求出系统随时间变化的状况，以跟踪系统动态行为。这样的过程，称之为系统仿真。

系统仿真实际上是一种人-机系统。它有利于发挥人、机各自的优点。人观察敏锐，富于创造，但对复杂系统跟踪能力很差。而计算机有高速运算能力和巨大的存贮量，可胜任跟踪复杂系统动态过程的任务。因此，仿真过程实现了如下的人-机协作：由人观测现实系统，掌握其构造，构筑仿真模型，而由计算机完成系统的动态跟踪，其结果分析再次交由人来完成。

近年来，系统仿真被用于工程管理、对策分析、政策实验、制定规划、历史研究以及生态环境等各种领域，有着相当广泛的应用。

## § 1.5 系统的因果关系图

### § 1.5.1 反馈系统的结构

系统动力学根据反馈动力学原理把对系统结构分析的重点放



在系统内反馈环的构造及相互作用的分析上。它认为，系统的基本组件是反馈环，复杂系统往往由多个反馈环组成，其中有一主环决定着系统的行为特征。根据系统结构动态性原理：在系统与外界的相互作用和系统内各要素的相互作用下，系统总是处于不断异化的过程中，其结构亦将发生变化。系统动力学认为，系统结构的动态性主要表现在系统主环的转移，而这种转移主要是由于系统反馈环之间非线性耦合作用的结果。所谓的非线性耦合作用，从本质上来讲是相互耦合的反馈环之间不断发生着能量、物质和信息的交换。

如何分析和描述系统的反馈环及其耦合？这正是下面要讨论的问题。系统动力学给我们提供了这种手段——因果关系图。

### §1.5.2 因果关系的表示

系统动力学假设，系统组成要素间相互作用的关系符合因果定律。在系统动力学中，因果关系用一个箭头表示。一般说来，系统中的要素用封闭轮廓线表示，中间标以要素名称或符号。如图 1.5 所示，劳动生产率与产量的因果关系以及治理工程与污染量的关系。图中因果关系键旁正号

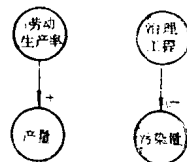


图 1.5 因果关系表示

表示，这两个要素之间有正的因果关系，即劳动生产率愈高产量就愈多，这两个要素之间变化方向一致。因果关系键旁负号表示，这两个要素之间有负的因果关系，即治理工程规模愈大污染量就愈小，它们之间变化方向相反。

应该说明，因果关系键只表示系统要素间逻辑上的联系。而没有任何计量的含义。

### §1.5.3 因果关系反馈环

两个以上的因果关系键首尾串联而成封闭的环路，就是因果关系反馈环(Causal Feedback loop)。

图 1.6 是因果关系反馈环示意图，其中 a) 是最简单的因果关系环。我们可以看出，A、B 两要素互为因果。

我们来看图中的 b)。如果 A 要素增加  $\Delta A$ ，B 要素就同向增