

系统动力学

中国未来研究会

序

系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的，具有特定功能的有机整体。动力学探讨一定条件下系统的时变和调整过程。系统动力学适于研究非线性、多变量、有时延和放大以及生态社会经济性关系的复杂系统。系统动力学的中心思想是反馈理论，社会和个人的决策来源于周围系统状态的信息，决策导致行动，从而改变系统的状态。反映此状态的新信息又产生新的决策和变动。这种封闭的因果关系形成一个反馈环。系统动力学模型是由若干反馈环（正的和负的）相互联系起来所形成的封闭系统。系统动力学模型对数据的量化要求不高，不必需要精确的数字，主要是研究过程，它便于对社会经济和政策进行实验仿真，为制定政策提供科学依据。系统动力学方法有一套计算机模拟语言，称之为DYNAMO（意即动态模型），使用十分方便。

系统动力学是美国麻省理工学院史隆管理学校福莱斯特（Forrester）教授在五十年代创立的。它综合运用了控制工程、控制论和组织理论三方面的知识，着重研究一个系统在活动中的信息反馈特性，它尤其适用于长期的（数十年至一、二百年）社会经济的分析研究，是未来研究的有效工具。系统动力学作为未来研究的方法论，在国外已形成为一大学派，和计量经济学一样，受到各界的热烈争鸣和讨论，七十年代以来得到了越来越广泛的应用。我国现在已经开始进行这方面的研究，越来越多的科技工作者对它发生兴趣。因此，为了普及系统动力学的基本知识，争取及早推广系统动力学，我们编写了这本书籍，以飨读者。由于时间仓促，水平有限，书中定有不少差错，敬请读者批评指正。

——编者

1984年6月27日

目 录

第一章	系统	1
	1.1 知识的组织	2
	1.2 系统——开环与闭环系统	2
	1.3 反馈环	4
第二章	动态行为	7
第三章	因果关系环	10
	3.1 城市人口及经济增长因果关系环	10
	3.2 城市人口及土地使用因果关系环	12
第四章	负反馈环	19
	4.1 一阶负反馈环	19
	4.2 二阶负反馈环	35
	4.3 时间滞延	43
第五章	正反馈环	46
	5.1 正反馈环	46
	5.2 倍时	50
第六章	S形增长结构	52
第七章	模型与模拟	57
	7.1 模型	57
	7.2 模拟与数量分析	58
第八章	系统与组织	62
	8.1 系统边界	62
	8.2 反馈环——系统的构造	63
	8.3 状态与速率——反馈环的基本变量	64

8.4	目标, 系统情况, 差异, 行动——速率 变量的子构造	64
第九章	方程式与计算	66
9.1	计算程序	66
9.2	变量与常量的符号	70
9.3	状态方程式	71
9.4	速率方程式	72
9.5	辅助方程式	74
9.6	常量与起始值方程式	76
第十章	单位名称与单位计算时间间隔	77
10.1	单位名称	77
10.2	单位计算时间间隔DT	78
第十一章	流程图	85
第十二章	DYNAMO 编译语言(一般介绍)	90
第十三章	函数	104
13.1	函数——不含积分性质	105
13.2	函数——含积分性质	135
第十四章	DYNAMO 编译程序初步	131
14.1	程序书写格式	131
14.2	方程式语句	132
14.3	程序执行过程的命令语句与仿真控制 变量	152
附:	程序中变量的时间表示符号	163
	参考文献	164

第一章 系 统

在日常生活和工作中，存在着商业系统，交通系统，企业管理系统，电子工业系统……等等社会系统，电力输送系统，雷达警戒系统，导弹武器系统，航空运输系统等工程系统，以及环境保护系统，水利系统，生态系统等。在这里“系统”是表示一种“体系”，是指组织、机构、体制、方式、方法、秩序、规律、分类和系列，它是为实现某个目标而建立起来的。

系统的基本概念是由两个或两个以上，有着相互联系的元素（或称要素元件）组成的，执行特定功能，达到特定目的的有机综合体。又可把系统更一般地看成是，相互关连而组合在一起的元素的集合，或称为执行特定功能而达到特定目的（目标）的相互关连着的元素集。

根据它的涵义，我们说汽车是一个系统，因为汽车是许许多多机件的组合，这些机件工作的结果用来为交通运输服务；飞机与飞行员也构成一系统，因为这两个组件配合运用的结果使得飞机在一定的高度飞行；仓库、装卸场地和机器也构成一系统，因为这些组件的构成使得货物可搬到卡车上。

从上述的飞机与飞行员构成一系统的例子，可知系统除实质的东西（飞机）外，也可包括人。例如，搬运工人是仓库系统的一个组件；学生是构成学校系统的一个组件。

在原始社会里，所有存在的系统（尤其是指自然系统），不管是系统的本质或它的特性，常常被认为是神圣不可侵犯；人们只能调整他们自己来适应周围的自然环境。同样也得适应他们家族或种族的社会系统，而这些社会系统并不是经过预先

设计而来的，而是经过长期的逐步演变而形成的，所以，人类一直学着去适应环境（或说系统），在漫长的社会发展过程中来了解系统。

1.1 知识的组织

如果我们不能很有组织地说明我们所观察的系统，那就是说，我们对于这个系统的了解很有限。哈佛大学 Jerome S. Bruner 教授说过“抓住某一系统的组织，是了解系统的主要方法……”，正如我们一直用物理学的法则来探讨我们所观察的自然世界，这种物理知识的组织，也就构成今日科学技术的基础。

在社会系统里，它的组织远比物理系统、生物系统复杂得多，而“反馈”（Feed back）原理已成为我们观察社会系统的组织所不可缺乏的观念。

本书所讨论的系统原理，将提出如何根据信息反馈的原理来研究我们所处的社会系统。

1.2 系统——开环系统与闭环系统

系统可分成两种，一种是开环系统（Open system），另一种是闭环系统（Closed System）。

开环系统的最大特点是行动影响系统所产生行为的结果，没有反馈再影响系统的行动，换言之这种系统的输出（Output）没有影响其输入（Input）。如图 1.1 所示，开环系统并不考虑输出对其系统本身的状态如何。

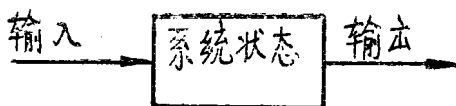


图1.1 开环系统

汽车是一种开环系统，因汽车本身无法控制它去过什么地方，以及未来它要往什么地方去。手表也是一种开放系统，因手表本身无法知道它是否走得准确，自动调整快慢。

闭环系统也称为反馈系统（Feedback system），这种系统的特点是具有一封闭环组织，如图 1.2 所示，由系统的过去行动所产生的结果，再回到系统以控制未来的行动。

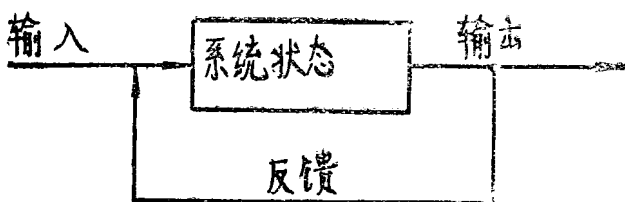


图1.2 闭环系统

在反馈系统中，控制系统下一步的行动取决于系统过去的行为所产生的结果。如室内的暖气系统是由恒温器所控制，其目的在于维持室内某一适当的温度，所以它放出热量的多少是受室内现有温度的影响，因而形成一个反馈系统；手表和人亦构成一反馈系统，因手表表示准确的时间，人看手表的时间与标准时间相差多少而进行快慢的调整；又如发动机加上一个调速器后，就可以调整发动机以获得即定速度的目标，所以也称为一个反馈系统。以上三个例子所说明的系统都有一确定的目标——如维持室内适量的温度、使手表的走时准确及获得原定速度的目标等，我们称这种系统为负反馈系统（Negative Feedback System）。另外有一种反馈系统，它不追求某一既定的目标，而是呈现了不断增长的过程，既对前一步行动的结果，不断产生更大的行动。如细菌的繁殖过程，是一种无限增长的过程，这种

系统，我们称为正反馈系统(Positive Feedback System)。

一个系统是属于开环系统或闭环(反馈系统)，并不是取决于其系统内在的各种组件的集合，而是根据观察者对于该系统所持的观点而定。这句话是什么意思呢？我们可由考虑一个汽油发动机系统为例，以下列观察者所持的观点来决定这个系统是开环的，还是闭环的。

发动机如不装调速器，而观察者就速度调节的观点来看，发动机系统是一个开环系统；因此如果装上调速器后，就维持某一固定速度的目标而言，这系统变为一闭环系统。

但是假如个发动机是属于铲草机的一部分，而观察者从调整速度的目标转移到割草的目标，就泛指割草这个目标来看，铲草机是一开环系统，因为它本身并不知道割什么样的草或下一步应割什么地方的草。但如铲草机加上工人来操作，就割草的观点来看，它又变成一追求目标的闭环系统(或反馈系统)。

又如果铲草机与工人这一系统是属于一个服务公司的组件，从满足是客户需要的观点来看，铲草机与工人属于一个开环系统，因而它并未受到这服务公司管理部门指示其工作的次序。因此，如果再加上管理机构后，经由客户的需要所得到的指示做为工作的指导方针，适当地安排工作的次序目标，那么铲草机、工人与服务公司的经理即构成一闭环系统。

1.3 反馈环

反馈环(Feedback Loop)的基本结构如图 1.3 所示，它是连接着几个要素而形成的一个回路：决策、行动、系统的状态情报，又回到决策的一点。

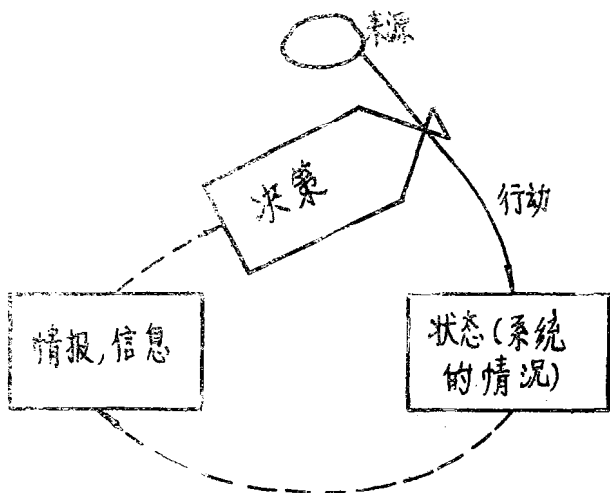


图1.3 反馈环

如图1.3 示，我们可以看出有关系统状态的情报，无论在什么时间均做为决策的依据。所谓情报（Information），如仓库存货的盘点记录单或说明城市人口多少的户籍资料等，这些情报做为我们在进出货，以及希望城市人口增减等决策的基本数据。然后根据决策付诸行动；由于行动的结果，又改变了系统的状态，如进货比出货多则增加仓库的存量；迁入的人口比迁出人口多，则增加城市的人数等，这些行动均改变原来仓库系统的存货或城市人口系统的人口数。

在这里有一点必需澄清的，系统的状态与系统的情报两者的不同，前者是系统真实的情况而后者是表示前者的情报，因此在时间上可能有所滞延（Delay）。例如，我们现在想知道某市的人口，必须等一年或数月后经过资料统计的结果才能得到，因此，情报只是系统真实情况的外表，而这外表与实际

的情况是有点距离。既然情报无法即时表示系统的真实情况，我们又何必用它做为决策的依据呢？这是因为我们很难把时间停下来而去了解系统的真实情况，例如要想知道某市在某年某月某日某时某分的人口有多少，这几乎是无法办到的。

图1.3 是反馈系统最简单的单环（Single Loop）形式，实际系统都比较复杂，如在这简单的系统另加时间滞延（Time Delay）的因素，则可能有许多的环相互连在一起。如以订货决策环为例，

图1.4 中送货物的滞延，包括订货送达的延迟，以及货物送达在交通运输中的延迟。

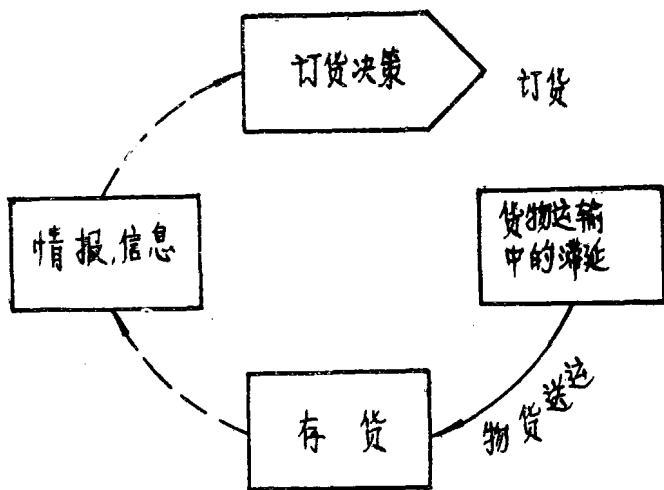


图1.4 存货——订货反馈环

第二章 动态行为

动态是静态的相对语，说明一个系统的变量（或组件）随时间的改变而改变，这种改变的行为称为动态行为（Dynamic Behavior），我们可以用曲线表示系统的变量的数值随着时间而改变的情形如图2.1。

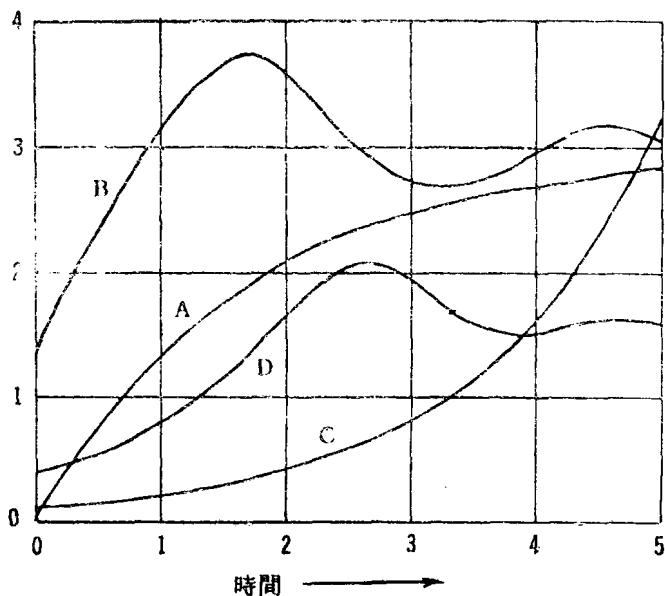


图2.1 动态行为

曲线A为最简单反馈系统的典型例子，当时间 $t = 0$ 时，其变量值也从 0 开始； $t = 1$ 时，变量值为 1.3； $t = 2$ 时，变量值为 2.05，然后随着 t 增加而变量值也逐渐增加，而增加

的速率越来越小（或称递减率），最后趋近于 3，但实际上却没有达到 3（这里的数值 3 是作为一个目标数值，表示这系统所追求的目标值）。我们在这儿可以举抽水马桶的系统为例，从马桶的水用完时开始注入水，一直到趋近注满的过程说明曲线 A 的动态行为，当马桶内的水漏光后开始注水时，其注水的速度很快，随着马桶里的水渐渐增加，则水的流速也就缓慢下来，一直到马桶的水趋于注满时，水注入率渐近于 0。（在本例，我们假设马桶的水量为 3 个单位）

曲线 B 则为较复杂的系统，它随着时间而震荡，然后趋于目标值 3，在震荡的过程中，有时候超越（Overshoot）目标值，有时又降在目标值之下，以抑制原来过速的震荡。这种现象如工业生产，随着经济环境而改变，当需求量增加时工业生产超过既定的目标值，而需求量减少时则生产值降至目标值以下；又如物价随供需的影响而波动，当需求超过供给时，则价格超过原均衡价格点，而供给超过需求时，则价格低于原均衡价格点。

曲线 C 表示系统随时间作指数成长的情形，在图 2.1 中的曲线 C，每隔一单位时间，其变量值即增一倍，这种增长称为指数增长（Exponential Growth）。如世界人口的增长、工业化及非耐久性自然资源的消费等，都是指数增长的现象。

曲线 D 表示一系统，在刚开始的阶段，其增长为指数增长，如同曲线 C 早期的阶段，然后就缓慢下来而振荡的情形如同曲线 B，然后渐渐趋近某一既定的目标值。如核动力厂，为达到其可操作的情况前，其核分裂的速率增加非常急速，一直到可以操作的标准后，即可通过控制系统使核分裂的速率缓和下来，所以在动态行为过程中，在达到操作标准以前是指数增长（如曲线 C），而后以曲线 B 的增长趋近于缓和；此外又如一

个小孩学习某一种新的学科或技术时，开始阶段，由于他懂得某些知识，所以，很容易学到其它新的知识，因此在这初期，他获得知识的速度非常快，一直到他的学习能力达到某一限度的时候，他就会渐渐地觉得不起劲，失去兴趣，这是因为他不象以前那么快的速度一学就会了。所以曲线 D 可以说明这小孩的学习过程。

曲线 D 的形状如同 S 形，因此，系统的动态行为属于曲线 D 的，一般称 S 形的系统增长结构。

第三章 因果关系环

因果关系环 (Causal Loop) 是为探讨系统组织最简单的方法，其目的在于说明系统的主要反馈环，指出构成系统的主要变量，它们相互间的关系。因此当我们在建立模型，说明某一系统时，可用因果关系环做为该系统有关因果假设的初步描述，并藉此表示模型简化的方法。

下面就城市人口及经济增长的关系与城市人口及土地使用的关系来探讨系统的因果关系环。

3.1 城市人口及经济增长环

在一个城市里，如果该市就业机会增多时，就会吸引别的地区的人口迁入，这个城市的就业机会对移入这城市的人口数存在着正的关系，如下图：

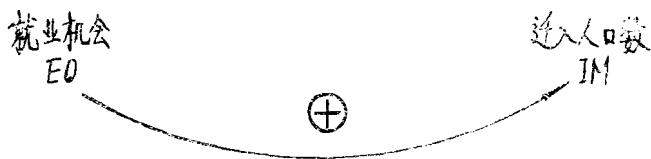


图 3.1

这里，我们称就业机会是包括这城市内所有工作的数目。

就上图看：好象城市内一有就业机会，立即会吸引人口进来，没有任何时间的滞延，这种假设与实际系统并不相符，因

为，需就业者对于能就业的消息并不是立刻得到，常常是通过报纸，或者是在和亲戚、朋友相聚时，大家互相通消息之后才能知道哪里有招工的告示。所以就业机会与迁入人口数两个变量之间，存在着时间上的滞延。现假设其滞延时间为1至2年。如下图：

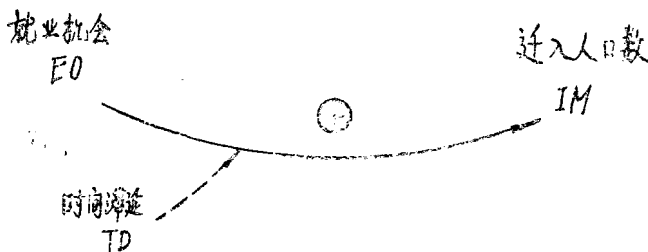


图 3.2

迁入人口数使城市人口数增加，人口增加将影响城市中的商业活动。下面我们再考虑两个新的变量，如下图：

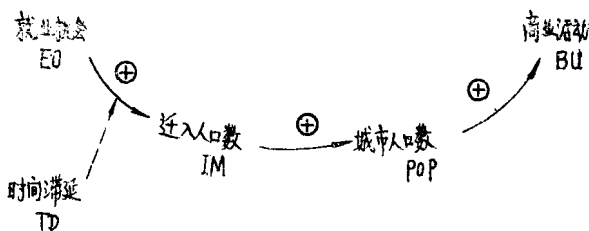


图 3.3

商业活动受到人口增加的影响之后，即产生了对增加职工的需求，这样又会促使就业机会增加。这样我们可构成一个因果关系环，图3.4为城市人口与经济增长环：

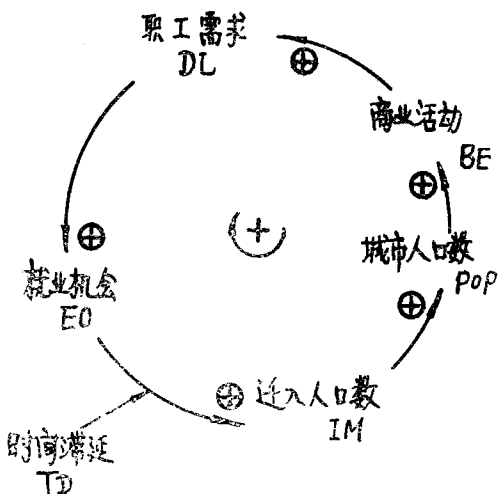


图3.4 城市人口与经济增加因果关系

上图是一个封闭环路 (Closed Loop)，而这封闭环有一正的关系，我们用 ⊕ 表示。在上图内所有的变量是相互影响的，任何一个变量的数值增加，终将使所有其他变量的数值增加，而且将增加得更多，所以是一个正的因果关系环。

当然上图只是基于简单假设所构成的环路，实际系统要比图3.4 复杂的多。因为连续的商业活动扩张并不能维持得太久，从长期来看，城市自然资源的限制也影响经济的增长。我们通过下面的例子就可以看到土地资源的限制因素对城市商业活动的影响。

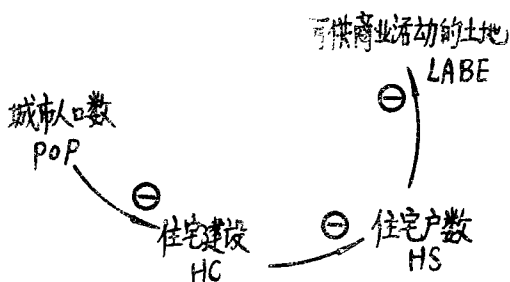
3.2 城市人口及土地使用环

随着城市人口的增加，住宅需求量也不断增长，因此住宅

的扩建工作要适应新增人口的需要，如下图



假设城市土地只有一部份可供住宅与工业使用，因此当住宅兴建，住宅户增加后，则反而使可供商业活动的土地面积减少，如下面：



当可供商业活动的土地面积减少的时候，则开始抑制城市商业的发展，这样职工的需求量减少，结果使就业机会减少，则迁入人口数减少，使整个城市人口数减少，如图3.5。

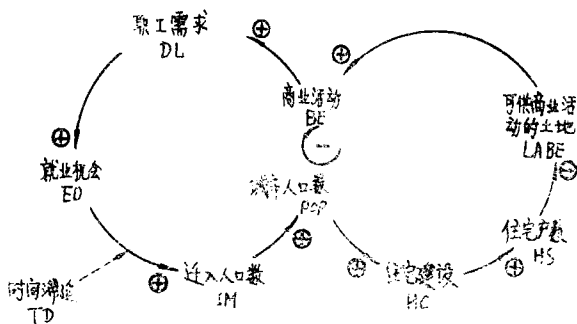


图3.5 城市人口与土地使用因果关系环