

目 录

译者的话	I
序 言	III
前 言	IV

第一部分 简单结构

第一章 因果回路图	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 因果回路图实例	(1)
1.3 因果回路关系的描述	(2)
1.4 因果回路图	(4)
1.5 注意 事 项	(5)
1.6 小 结	(6)
第二章 正反馈结构	(7)
2.1 概 述	(7)
2.2 一般 结 构	(10)
2.3 指 数 增 长 方 程	(11)
2.4 指数增长过程中的时间 坐 标 长 度	(15)
2.5 超指数增长	(15)
2.6 小 结	(18)
2.7 实例1——吸毒人数不断增加的系统	(18)
2.8 实例2——人口不断增加的系统	(20)
第三章 负反馈结构	(23)
3.1 概 述	(23)
3.2 简单负反馈回路的因果 回 路 图	(24)
3.3 流 图	(26)
3.4 系 统 行 为	(27)
3.5 斜 率 和 时 间 常 数	(30)
3.6 初 始 条 件	(30)
3.7 零 值 目 标 结 构	(31)
3.8 系 统 的 补 偿	(33)

3.9 小结	(36)
3.10 实例1——库存控制系统	(36)
3.11 实例2——液体冷却系统	(38)
3.12 实例3——污染消除系统	(41)
1. 基本的线性污染模型	(41)
2. 基本模型对常量POLGR的响应	(42)
3. 非线性污染模型	(43)
4. 非线性模型对常量POLGR的响应	(46)
第四章 S型增长结构	(49)
4.1 概述	(49)
4.2 S型增长结构	(51)
4.3 稳定和不稳定的平衡状态	(53)
4.4 小结	(56)
4.5 实例1——老鼠总量的增长模式	(56)
4.6 实例2——流行性疾病的传播模式	(63)
4.7 实例3——阻尼摆系统	(67)
第五章 简单结构的复习	
——工业用地模型	(71)
5.1 概述	(71)
5.2 增长模型	(72)
1. 文字描述	(72)
2. 画出流程图	(73)
3. 写出 DYNAMO 方程	(73)
4. 模型的行为	(74)
5. 模型分析	(74)
5.3 土地限制工业增长的模型	(78)
1. 文字描述	(78)
2. 写出 DYNAMO 方程	(81)
3. 模型的行为	(82)
4. 模型分析	(82)
5.4 建筑物被损和拆除模型	(85)
1. 文字描述	(85)
2. 画图	(86)
3. 写出 DYNAMO 方程	(87)
4. 模型的行为	(88)
5. 模型分析	(90)
5.5 结论	(91)

第二部分 简单结构练习

练习 1	因果回路图.....	(92)
	〔答案 1〕.....	(94)
练习 2	图示积分.....	(99)
	〔答案 2〕.....	(104)
练习 3	流图.....	(108)
	〔答案 3〕.....	(112)
练习 4	正反馈.....	(113)
	〔答案 4〕.....	(116)
练习 5	负反馈：在描述人口减少过程中的应用.....	(119)
	〔答案 5〕.....	(122)
练习 6	负反馈：生库存控制系统中的应用.....	(125)
	〔答案 6〕.....	(128)
练习 7	一阶线性系统.....	(132)
	〔答案 7〕.....	(139)
练习 8	简单结构.....	(143)
	〔答案 8〕.....	(146)

第三部分 分析和概念化练习

练习 9	延迟的练习和补充说明.....	(150)
	〔答案 9〕.....	(173)
练习 10	商品生产周期模型.....	(180)
	〔答案 10〕.....	(188)
练习 11	市场销售增长模型的分析.....	(198)
	〔答案 11〕.....	(214)
练习 12	住宅和人口模型.....	(221)
	〔答案 12〕.....	(222)
练习 13	未来电子公司模型.....	(246)
	〔答案 13〕.....	(247)
练习 14	黄热病传染模型.....	(257)
	〔答案 14〕.....	(259)
练习 15	凯巴布高原模型.....	(265)
	〔答案 15〕.....	(266)

第一部分 简单结构

第一章 因果回路图

预备知识：在学习第一章以前，读者应当对系统动态模型有一些初步了解。在 Jay W. Forrester 著的《系统原理》(Principles of Systems) 的第一章至第四章中，以及在他著的《工业动态学》(Industrial Dynamics) 的第五章和第六章中，介绍了有关系统动态学的基础知识。另外，在《系统原理》的第七章和《工业动态学》的第八章中讲述了有关流图的基础知识。

本章目的：通过建立单回路和多回路模型介绍因果回路图的绘制方法，其中的正反馈和负反馈回路是用它们的因果关系描述的。为了详细研究正反馈和负反馈回路的行为，在第二章和第三章中将讲述流图和 DYNAMO 方程式。本章所提供的基础知识将有助于对书中出现的较复杂模型的理解。

练习：练习1。

1.1 概述

系统动态学集中研究由相互作用的反馈回路组成的系统的结构和行为。DYNAMO 流图和因果回路图是在建立系统方程之前描述系统回路结构的一种简便形式。流图是一种由速率变量、水平变量和辅助变量构成的协调网络。因果回路图能够在没有区分出和互联系变量的性质的情况下确定出基本的反馈回路。因果回路图在系统动态学研究中具有两个重要的作用：第一，在建立模型的过程中，可以用因果回路图画出因果关系假设的初步草图。第二，因果回路图能使一个模型的表达简单化。由于因果回路图具有上述的两种功能，所以它能够使分析者迅速地将其模型中的所有结构假设连接起来。

由于建立因果回路不涉及流图知识，所以系统动态学的初学者能够比较容易地掌握这种方法。因果回路图将鼓励建模人员用反馈回路形式将现实世界中的系统概念化。尽管因果回路图起到了方便表达的作用，但是它还存在一些不足之处，这些不足之处将在本章 1.5 节中详细讨论。

1.2 因果回路图实例

图 1-1 所示的因果回路图描述了移民 M 和就业机会 JA 之间的反馈关系。在这个因果回路图中包含有几个简单的因果关系假设，这些假设说明了城市行为中的两个反馈回路之间的关系，假设包含：

1. 就业机会 JA 吸引移民 M 迁入该城市；
2. 新迁入该城市的移民扩大了劳动力 L 的数量；

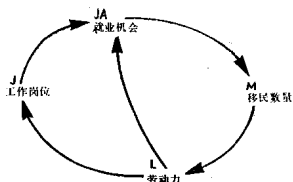


图 1-1 因果回路图

忽略了有关的雇佣形式、移民人口统计特性的形式、信息延迟和认识过程延迟的形式，以及其它一些可能影响移民数量的因素，如住宅、住宅位置和税收等。下面我们将逐步地绘出因果回路图，以便图式说明绘制因果回路图的技巧。

为了用图表示出系统的回路结构，并确定出每个回路符号极性的类型，我们必须首先建立出有关变量之间的耦合关系。在 1.3 节中将介绍确定一对因果变量之间极性的检验准则。在 1.4 节中，将各对因果变量连接在一起组成闭合回路，并建立确定回路极性的检验准则。

1.3 因果回路关系的描述

图 1-1 中各种变量的定义如下：

变量	定义
工作岗位 (J)	城市中空闲工作岗位和已就业人员占有的工作岗位的总数
就业机会 (JA)	空闲工作岗位
移民数量 (M)	迁入城市的移民中劳动者的净增数
劳动力 (L)	在这个地区居住的劳动者总数

我们假定就业机会JA的数值能够调节迁入该城区的人口流，例如，当该地区就业机会JA增加时，迁入该地区的移民数量也将增加；当就业机会JA减少时，则会导致移民数量的减少。在图 1-2 中表示出了这种假设的因果关系的描述方式。



图 1-2 表示JA-M之间关系的正环节

图 1-2 中的箭头表示作用的方向，符号（加号或减号）表示作用的类型。由于就业机会的增加能够导致移民数量M的增加，因此，两者之间的关系用一个加号表示，以说明这个环节具有“正”的特征。更一般地说，如果在所有其它条件不变的情况下，其中第一个变量的改变能够导致第二个变量在相同的方向上（相对于第一个变量来说）改变，那么，在两个变量之间的关系便为正。但在使用这个定义或这个检验准则时，我们

必须只考虑相邻的一对变量之间的关系。我们将这个定义稍加改变，就可以用来确定闭合（反馈）回路的极性。

第二个正关系的例子包括有移民数量 M 和劳动力人数 L 。我们用表示 $JA-M$ 关系相同的方式来描述这个关系，如图1-3所示。在 $M-L$ 关系中，移民速度增加能够使劳动力增加，从而使居民中的劳动力人口增加。



图 1-3 表示 $M-L$ 之间关系的正因果链



图 1-4 表示 $L-JA$ 之间关系的负因果链

当一个变量改变，能够导致第二个变量在相反的方向上改变时，两个变量之间的关系是负的因果关系，用一个负号表示。图1-4表示了这种负的关系。图1-4和图1-2一样也包含了一个因果假设。图1-4假定，增加城市劳动力人口最终将减少城市就业机会。因为在城市中新增加的劳动力将要获得新的工作岗位，这就减少了就业机会 JA 。反之，如果劳动力人口减少，则会出现更多可供利用的工作岗位。但不论是劳动力总数增加还是减少，都会使就业机会 JA 发生相反的改变^[1]。

让我们回过头来注意一下前面例子中的一个假设条件。我们在决定一对变量之间关系的正负符号时，必须使其它的因素保持不变，例如，在研究劳动力人数 L 和就业机会 JA 之间的连接关系时，我们就忽略了工作岗位数也在改变这个事实。当然这个地区工作岗位数量的变化也能引起就业机会的变化。在图1-5中图示说明了这种简单的正的关系。现假设所有其它因素（包括劳动力人数）都保持不变，如果工作岗位总数 J 增加，那么则能引起就业机会 JA 的增加。同理，当图1-2中的 JA 发生变化时，我们假定 M 也将产生相应的变化。在这里没有考虑影响移民的其他决定因素，也没有考虑各种可能的移民迁入总数。在确定因果关系的正负符号时，必须假定所有其它各种冲击变量保持不变。这对分析因果关系是非常重要的。

[1] 在分析一个多环节的链条时，连接在一起的两对负的关系能够产生一个正的关系。假设变量 A 、 B 和 C 是以负的关系连接在一起的，如下附图1-1所示。由于 A 增加减少 B ， B 减少增加 C ，因此从 A 到 C 的链则表示了一个正关系。



附图 1-1



图 1-5 表示 J-JA 之间关系的正环节

1.4 因果回路

图 1-6 是由 JA-M、M-L 和 L-JA 三对关系组成的反馈回路图。这个反馈回路描绘了在工作岗位数量不变的情况下，移民数量 M 和劳动力人数 L 对就业机会 JA 变化所引起的反应。现在，决定工作岗位数量的部分没有被包括在回路边界之内。

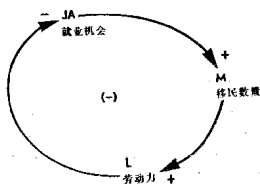


图 1-6 单因果回路

为了确定整个回路符号的正负：

我们要找出在回路中的一个变量发生任意一种变化后所引起的结果。例如，假设就业机会 JA 突然增大，那么 JA 的增大将引起向城市移民人数的增加，依次是，迁入移民又会引起劳动力人数的增加，即就业机会 JA 的增加引起了劳动力人数 L 的增加。但是由于新增加的劳动力能够占据各种工作岗位，因而使就业机会减少。外部原因引起的 JA 增加在系统内部引起

了一系列的反应和调节过程，这些变化对 JA 的变化产生了反作用，不管系统外部因素如何影响，这个反馈回路总是使 JA 保持在一个固定值或一个固定目标上。当一个反馈回路对一个变量的改变作出与初始扰动方向相反的反应时，这个回路是一个负回路或是一个寻求目标的回路；(2) 当一个回路所产生的反应增强初始扰动的作用时，这个回路是一个正回路。(3) 确定回路正负符号的简便方法是求出回路中负号个数的总和，然后根据其和数的奇偶确定回路符号的正负。如果其和数是偶数，该回路是正反馈回路；如果和数是奇数，该回路则是负反馈回路。图 1-6 是一个负反馈回路，在回路中心的负号表示回路符号为负。

当系统中包含有多个回路时，我们应该首先按照上述的方法确定出每一个闭合回路的符号。在确定一个回路的符号时，应使这个闭合回路以外的所有其他变量（并因此使其它所有回路）保持不变。用这样的方法便可以逐步确定每一个闭合回路的符号。为了便于说明起见，在图 1-7 中的劳动力人数 L 和工作岗位数量 J 之间加入了一个正的因果

(2) 第三章讨论负反馈回路的行为。

(3) 第二章讨论正反馈回路的行为。

链。这个因果链假定劳动力的增加最终将导致雇佣的增加。其理由是,在劳动力增加后势必引起城市服务设施、住宅、基本建设和娱乐设施的增加。现在,此模型包括有两个闭合回路,一个是由前面讲述的JA、M和L构成的负反馈回路,另一个是新构成的包含有四个(全部)变量的正反馈回路。新加入的这个正因果链不会影响由JA、M和L组成的回路的符号。我们在不考虑回路以外的所有其它因果链影响的情况下,可以根据观察就业机会JA的瞬态增加在回路中引出的结果来确定新回路的符号。例如,当回路中就业机会增多时,则会吸引更多的移民迁入该地区,并因此使劳动力人数增多,劳动力人数增多最终会使该地区的雇佣(工作岗位)基数增大。其结果是使就业机会进一步增多。在这个回路中,由于系统内部因果机制的作用使得JA的瞬态增加进一步加强,因此这个回路是一个正反馈回路。正反馈回路在图中是用加号标注的。

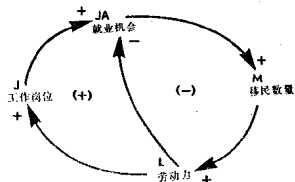


图 1-7 具有两个回路的因果关系统图

1.5 注 意 事 项

由于因果回路图能够帮助我们识别和组织所研究的系统中的主要组成部分和反馈回路,因此,因果回路图在模型概念化的初级阶段是非常有用的。但是在建立模型和列写方程阶段中,DYNAMO 流图则是必不可少的。由于因果回路图不能精确和详细地描述在流图中出现的速率变量、水平变量和辅助变量,因此在流图中能够显示出的一些概念错误,在因果回路图中则不容易被发觉。例如,在因果回路中人们可能在不注意的情况下组成没有水平变量的闭合回路。然而,这样的错误在流图中则能够很容易检查出来。

流图与因果回路图比较,流图则能够提供更多关于系统结构和系统行为的信息。由于流图描绘了系统的速率—水平结构,因此它常常能够预示出系统行为的可能型式或模式。例如,系统的阶次(系统水平变量的个数)则能限定其系统可能的行为模式。因此,系统阶次的知识在预测系统行为的过程中是非常重要的。在流图中清楚地包含了这方面的信息,但在因果回路图中却没有包含。

因果回路图也常常掩盖那些有助于理解一个独立的反馈回路结构的行为所必需的信息。为了简便起见,因果回路图常常略去一些模型结构,如延迟和平滑过程等模型结构。然而,这些部分是非常重要的,它们将能够连接成为对系统行为有重要影响的负反

反馈回路。流图能够使我们注意到这些附加的回路。

1.6 小 结

在绘制因果回路图时，首先要确定每一对变量之间的关系。当第一个变量改变导致第二个变量在相同的方向上改变时，则确定两者之间的关系为正。反之，当第二个变量在相反方向上改变时，则确定两者之间的关系为负。在将多个变量连接在一起时则能够构成其系统的反馈回路。确定一个反馈回路符号的方法是，在假定所有其他变量保持不变的情况下，寻求在回路中的任意一种改变所产生的结果：

- 1) 当这种改变被增强时，其回路是一个正反馈回路；
- 2) 当这种改变被削弱时，其回路是一个负反馈回路。

因果回路图是把文字描述转变成反馈回路结构的简单方法。对于不熟悉流图或 DYNAMO 方程标记的人来说，因果回路图也能够容易地帮助他们理解复杂模型的回路结构。尽管因果回路图作为其联系手段是十分有价值的，但是因果回路图不能代替具有其详细描述的流程。在进一步进行仿真分析之前，必须首先绘制出详细的流程图。

第二章 正反馈结构

预备知识：读者在学习后面各章节反馈结构知识以前，应当掌握下列建立系统动态模型的技巧：

1. 绘制因果回路图的方法；
2. 图表积分的方法；
3. 绘制流图的方法；
4. 书写DYNAMO方程的方法。

在练习1到练习4中复习了与上面几项有关的系统动态学知识。

本章目的：第一章介绍了因果回路图在描述系统反馈回路结构中的应用，同时在没有考虑正反馈和负反馈回路行为的情况下，引入了正反馈和负反馈回路的概念。在第二章中详细论述正反馈回路的行为特性。在第三章中将考察负反馈回路的行为特性。在第四章中将研究正反馈和负反馈回路相结合所组成的简单结构的系统。

在第二章中将提供研究正反馈过程的实例，并着重研究正反馈的最简单形式——单水平变量结构 (the single-level structures)。通过数字仿真说明单水平变量结构能够产生指数型增长的原因。本章还将讲述有关动态系统的时间常数和倍增时间 (doubling time) 的基本概念，本书将大量地使用这些概念。另外，在本章的最后部分将讲述两个简化了的正反馈回路结构的实例，这两个实例描述了吸毒人数增加和人口增长过程。

练习：在第五章的5.1节中对本章内容做了补充。读者在学习后面几章以前就能够比较容易地掌握本章内容。

2.1 概 述

在正反馈的过程中，变量不断地实现自身反馈，使其本身的增长过程或崩溃过程不断加剧。一些熟悉的短语反映了这种正反馈现象的特点。例如，“获胜效应” (band wagon effect) 树立了“攻击获胜者”的人们崇拜的偶像，使他们跟随原有“支持获胜者”的人们接受候选人的主张，或支持后选人。随着其政治运动的不断发展，吸引支持者的声望和能力也不断加强。

“雪球滚动效应” (snowball effect) 用从山上向下滚动的雪球不断增大的过程，描述了某些观念的加深过程或某些反应模式的增长过程。随着雪球的滚动，雪球粘带起的雪将使雪球体积和外圈不断增大，从而粘带起的雪越多，雪球体积的增长速度也就越快。

正反馈回路既能产生“良性循环”，也能产生“恶性循环”。在恶性循环中，因果链中的某一因素发生恶化，将会导致该因素的进一步恶化。反之，在良性循环中，系统

中某一因素的转机会导致该因素的进一步好转。一个正反馈系统产生良性循环还是产生恶性循环取决于回路中的诸因素是相互促进还是相互恶化。

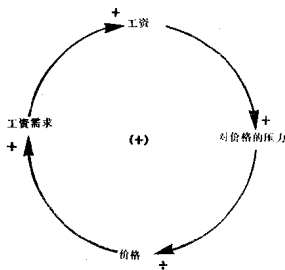


图 2-1 工资—价格关系的因果回路图

由通货膨胀引起的工资—物价螺旋（spiral）上升过程是恶性循环的典型实例。在这个实例中，由于物价上涨，要求增加工资，工厂主人则抬高商品价格以弥补由于增加工资而受到的损失。当工人感觉到物价再次上涨时，便再一次要求增加工资，弥补其增加的支出，这个不断要求增加工资的过程形成了这个闭合的回路。图 2-1 给出了这种螺旋上升过程的因果回路图。在图 2-1 中，回路里的每个变量都将显示出相同的定性行为。在这个系统中，一个变量的增加，可引起

另外三个变量的增加，而三个变量中最后一个变量的增加依次会导致第一个变量的再次增加，而产生第二次增长循环。在这个回路中，四个变量相互增强，形成无限制的增长过程。在图 2-1 中，回路中心的加号“（+）”表明该回路的性质为正反馈。

军备竞赛过程是正反馈过程的另一个实例。随着某一国家军备的增加，这个国家的敌对国家感到的威胁也在增加。敌对国家为了消除威胁也会增加其军备。其结果是使首先扩充军备的国家感到了更大的威胁，这样它又再一次更大规模地扩充了军备。图 2-2 说明了这种恶性循环过程。

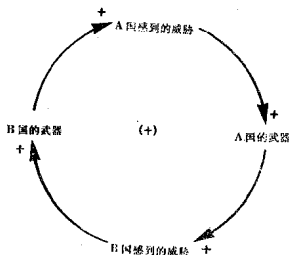


图 2-2 军备激增的因果回路图

在图 2-3 中的指数增长曲线表示了绝大多数正反馈系统的行为特征。⁽¹⁾ 世界人口、粮食生产、工业建设、环境污染及非再生资源消耗都呈现为指数增长过程。⁽²⁾ 指数增长开始产生的影响并不显著，但在此之后的短时间内就会发生剧增。下面讲述一个珠宝商与其店员的寓言故事，说明指数增长的爆发性特征。

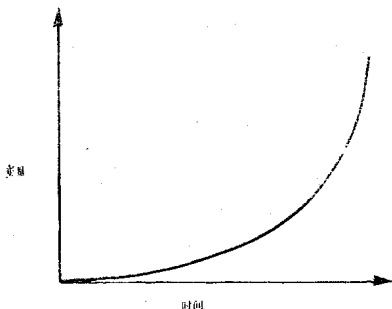
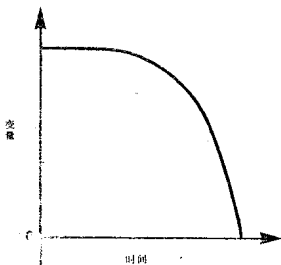


图 2-3 指数增长曲线

有一个店员愿意在一个珠宝商店工作一年，他的工资条件是，第一周为1里拉（0.2 C），以后每周工资要增加一倍。珠宝商对店员的条件立即表示同意，认为他得到了——

(1) 另一部分正反馈系统的行为特性的一般形式是加速衰减或加速指数崩溃形式，如下面图中的曲线所示。



附图 2-1 指数崩溃模式

(2) D.L. 米格斯等著，《增长的极限》（New York: Universe Books, 1972）, p.25.

个廉价的劳动力。在第五周时，珠宝商付给店员的工资为16里拉；在第十周时为512里拉；在第十五周时为16384里拉；在第二十五周达到16,717,220里拉。在第二十七周时，珠宝商需要付给店员67108864里拉工资。这时他必须卖掉珠宝商店，才能恰好支付其店员的工资。

在本章中着重论述基本的正反馈回路。在正反馈回路中应用单水平和单速率结构解释了指数增长发生的原因，描述了决定指数增长速率的机制。在描述世界人口增长和吸毒人数增长过程的实例中，用饶有趣味的指数增长特性说明了简单正反馈回路的重要特性。

2.2 一般结构

图2-4中表示了一个非常简单的正反馈例子。图中单向的物质流在水平变量LEV中进行积累，依次，反映水平变量中物质数量的信息量又始终通过速率量RT控制着流入水平变量中的物质流。RT通过常数CONST建立了同水平变量LEV成比例的关系。在取任意常数CONST值为0.2，水平变量LEV的初始值为1的情况下，可获得下面系统方程：

$$LEV \cdot K = LEV \cdot J + (DT)(RT, JK) \quad 1, L$$

$$LEV = 1 \quad 1.1, N$$

式中：LEV——水平变量（单位）

RT——速率变量（单位/年）

$$RT \cdot KL = CONST * LEV \cdot K \quad 2, R$$

$$CONST = 0.2 \quad 2.1, C$$

$$DT = 1 \quad 2.2, C$$

式中：RT——速率变量（单位/年）

CONST——常数（百分数/年）

LEV——水平变量（单位）

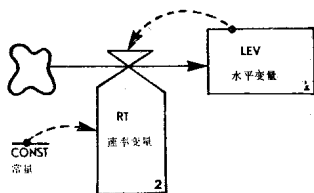
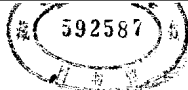


图 2-4 正反馈回路的视图



为了揭示图 2-4 结构中产生指数增长的原因，我们可以用“数字方式”（numerically）仿真系统行为。该系统采用上面的速率方程和水平方程进行计算的步骤如下：

1. 借助水平变量LEV的初始值，计算出初始速率RT的值；
2. 用DT乘以速率RT的值，DT是计算流速率的时间间隔；
3. 用DT和RT的乘积加上水平量的初始值，求出新的水平变量值。而后用求出的水平变量新值更换水平变量的初始值。按仿真的时间区间重复前述计算过程，一直计算到要求的DT区间数为止。

在图 2-5 中图示说明了数字仿真的过程，图 2-5 可以用来表示按年度结算（DT=1），年利率为20%（CONST），存期为15年的储蓄金本利水平的增长过程。储蓄金的水平值积累了以前全部的利息值，起到了“储存器”（memory）的作用。由于利息RT是同水平变量值成正比的，利息（速率量）是连续增大的，因此对水平变量来说，每一个新的增量都大于前一个增量。^{〔3〕} 如果绘出水平变量LEV随时间变化的函数曲线，其结果即为预期的指数曲线：如图2-6所示，图中的RT曲线同样也呈现为指数增长的形式。

时间	水平变量值	速率值	新的增量
0	1.00 ①	0.20 ②	0.20
	③		↓
1	1.20	0.24	0.24
			↓
2	1.44	0.29	0.29
3	1.73	0.35	0.35
4	2.08	0.42	0.42
5	2.50	0.50	0.50
6	3.00	0.60	0.60
7	3.60	0.72	0.72
8	4.32	0.86	0.86
9	5.18	1.04	1.04
10	6.22	1.24	1.24
11	7.46	1.49	1.49
12	8.95	1.79	1.79
13	10.74	2.15	2.15
14	12.89	2.58	2.58
15	15.47	3.09	3.09

图 2-5 数字仿真的过程

〔3〕 指数增长和线性增长是不同的，线性增长在每个时间间隔中产生一个不变的增量，图2-4中的结构永远不会产生线性增长。

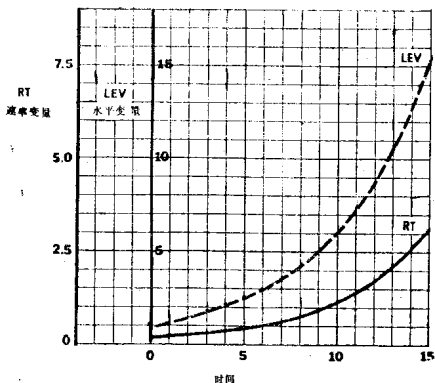


图 2-6 LEV和RT的指数增长曲线

2.3 指数增长方程

我们可以用解析形式表示上述行为，如方程 (2.1) (4) 所示。

$$\text{LEV}(t) = \text{LEV}(0)e^{\text{CONST} \cdot t} \quad (2.1)$$

(4) 方程 (2.1) 可以根据下述推导出：

$$\text{LEV}_K = \text{LEV}_J + (\text{DT})(\text{RT}_{JK})$$

$$\text{或 } \frac{\text{LEV}_K - \text{LEV}_J}{\text{DT}} = \text{RT}_{JK}$$

去掉DYNAMO符号并取其DT趋近于零时的极限，可得到：

$$\frac{d\text{LEV}(t)}{dt} = \text{RT}(t)$$

其中 $\text{RT}(t) = \text{CONST} \cdot \text{LEV}(t)$

进行代换得到

$$\frac{d\text{LEV}(t)}{dt} = \text{CONST} \cdot \text{LEV}(t)$$

通过分离变量并对等式两边积分得到：

$$\int \frac{\text{LEV}(t)}{\text{LEV}(0)} \frac{d\text{LEV}(t)}{d(t)} = \int_0^t \text{CONST} \cdot dt$$

(续下页)

应用方程 (2.1) 一次即可计算出任一时刻的水平值。此外, 由方程 (2.1) 还可以推导出描述指数增长特性的一些重要参数: 时间常数T 和 倍增时间Td

时间常数T被定义为CONST的倒数, 或 $T = 1/\text{CONST}$ 。时间常数T有时间单位的量纲。如果时间t等于T, 根据方程 (2.1) 可计算出在时间为T时的水平变量值:

$$\begin{aligned}\text{LEV}(T) &= \text{LEV}(0) e^{\left(\frac{1}{T} \cdot T\right)} \\ &= \text{LEV}(0) e^1 \\ &= 2.72 * \text{LEV}(0)\end{aligned}$$

从此方程的计算中可以看到, 在时间变量t等于时间常数T时, 水平变量值LEV(T)是水平变量初始值LEV(0)的2.72倍。同样, 在时间变量t等于2倍时间常数T时, 水平变量值LEV(2T)将是水平变量初始值的2.72 * 2.72倍或7.40倍。在反馈系统中, 时间常数T值越大 (或常数CONST值越小), 所产生的水平变量增长曲线越平缓。

倍增时间Td与时间常数T有直接关系。倍增时间是指按照指数形式增长的变量, 当其值增加一倍时所需要的时间。根据方程 (2.1), 我们可以推导出Td与时间常数T之间存在如下关系:

$$\begin{aligned}2 * \text{LEV}(0) &= \text{LEV}(0) e^{\text{CONST} * T_d} \\ 2 &= e^{\text{CONST} * T_d}\end{aligned}$$

或者,

$$\ln(2) = \text{CONST} * T_d$$

常数CONST用时间常数T表示得:

$$0.69 = (1/T) T_d$$

整理后得:

$$T_d = 0.69 * T$$

倍增时间Td大约为时间常数T的70%。在每个等于Td的时间区间中, 水平变量值都将增加一倍。在图2-7中表示了时间常数T和倍增时间Td之间的关系。

方程 (2.1) 表明, 在单速率—水平系统中常数CONST可以是任意的正值, 它都将产生其指数增长过程。同样, 只要表示速率变量RT和水平变量LEV之间关系的直线的斜率为正值, 如图2-8中绘出的直线, 系统则将呈现由指数增长特性表现的正反馈过

(其中τ是一个虚设变量)

积分后求得结果为:

$$\ln \frac{\text{LEV}(t)}{\text{LEV}(0)} = \text{CONST} * t$$

或者写为:

$$\text{LEV}(t) = \text{LEV}(0) e^{\text{CONST} * t}$$

式中

LEV(t) = t时刻的水平值

LEV(0) = 水平量的初始值

CONST = 比例常数

t = 时间

e = 自然对数的底

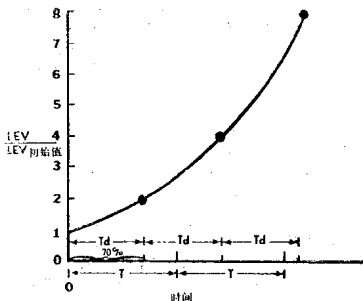


图 2-7 时间常数T和倍增时间Td的关系

程。任何大于零的水平变量初始值都将产生正的增长速率值，这个速率值在下一个DT时间区间中将产生一个更大的水平变量值。这是一个无限制的连续增长过程。在图2-8中，不论直线的斜率值如何，速率变量和水平变量的起始点都是速率—水平曲线图的座标原点。(5) 图中曲线的斜率等于时间常数T的倒数。

(5) 在下面图中给出了在能够产生指数崩溃和指数增长特性的系统中速率—水平关系直线，其直线的斜率仍然是正的。当系统在不稳定平衡点左侧的区域中运行时，不断增大的负的速率值产生了崩溃模式。

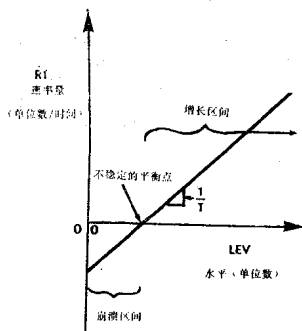


图 2-2 产生崩溃或增长模式的速率—水平曲线