

第一篇

理论篇

第1章

导论

学习目标

通过本章的学习,理解什么是系统,理解系统观念和系统思维的内涵以及二者之间的关系,掌握系统动力学及其建模方法,了解运用系统动力学方法训练系统思维的基本步骤,了解主要的系统动力学建模软件。能够根据所学的知识,完成本章的练习题。

1.1 系统观念与系统思维

1.1.1 什么是系统

1. 系统的概念

一般系统论创始人贝塔朗非将系统定义为:“系统是相互联系相互作用的诸元素的综合体。”1978年,美国系统学家 G. 戈登(G. Gordon)将系统定义为:“所谓系统,是指相互作用、相互依靠的所有事物,按照某些规律结合起来的综合。”和这些定义意思一致,中国系统科学的奠基人,著名学者钱学森认为:“系统是由相互作用相互依赖的若干组成部分结合而成的,具有特定功能的有机整体,而且这个有机整体又是它从属的更大系统的组成部分。”如图 1-1 所示。

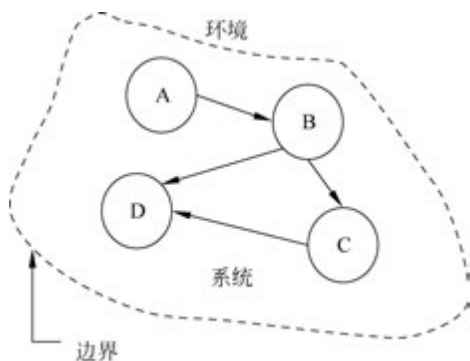


图 1-1 系统的定义

根据以上定义,我们知道,任何一个系统都包括三种构件——元素、连接、功能或目标

(如图 1-2 所示)。所以,当我们面对一个系统,首先需要弄清楚,组成这个系统的元素有哪些。例如,你的消化系统,包括肝、胃、小肠等,这些就是消化系统的元素。构成系统的元素是比较容易被发现的,因为大多数情况下,它们是可见、有形的事物,例如,一家企业的运营是一个系统,它由员工、管理者、办公楼或厂房、生产或服务设备、原材料、仓储设施等元素构成。当然,元素并不一定是有形的事物,一些无形的事物也可以是系统的元素,还是来看一下企业这个系统,企业的声誉、品牌、专利技术等都是该系统中至关重要的元素。

仅仅罗列出元素并不构成系统,我们应该从关注系统当中的各个元素本身,转向探究要素之间的内在联系,也就是要研究那些把各个元素整合在一起的关系是什么。例如,消化系统的各种元素要通过血液的流动和一系列化学反应来相互连接。在一家企业运营系统中,元素之间的关系包括材料的传递、客户的交接、产品质量标准、制度章程、操作规范、财务预算、现金流等。以上这些,我们称之为系统的连接。这些连接,有的是实实在在的物资流,有的是信息流,还有的是资金流。

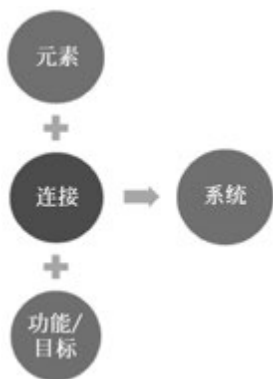


图 1-2 系统的构成

除了上述两点,还要明确,系统的元素连接在一起,必须具有一定的功能(或目标)。元素、连接、功能三者缺一不可,才构成了系统(如图 1-2 所示)。例如,消化系统中的功能是将食物转化为人体所需的基本营养成分,并将这些营养成分输送到人体的各个地方中,同时排出各种废物。企业作为一个系统,其战略就是这个系统的目标,只有明确了战略目标,才能围绕之建立企业经营系统,创造企业价值。

其实,早在系统这个概念被提出来之前,我们已经并且一直在和各式各样的系统打交道。例如,中医在很早以前就已经把人体作为一个系统来看待,人体这个系统的元素包括各种器官,各种器官之间相互连接,以某些方式协调运作、自我调节,实现人的生存。同样,我们所在的班级和学校、生活的家庭、工作的单位,自然界的森林、山川、河流,都是系统。相应的,这些系统出现的问题,例如个人健康问题、组织成长问题、国家发展问题等,都被称为系统问题。

2. 系统的特征

(1) 系统的涌现性(emergence)

人们常说:“三个臭皮匠,赛过诸葛亮。”意思是在一个团队工作的三名成员,即便单个人的智慧都低于诸葛亮智慧的 1/3,这三人组合在一起也能够远远超过诸葛亮的聪明才智。这句话要成立需要一个前提,那就是当这三个人不是各自独立行事,而是以某种方式和规则连接在一起,协调配合,群策群力,才能达到甚至超过诸葛亮的智慧。也就是说,这是一个团队工作的过程。之所以称其为团队,是因为整体绩效,是无法通过对团队成员个体绩效的了解而预测出来的。高效的团队工作能产生比团队成员个体能力大很多的成果,所以,每个组织都将“团队协作”作为组织的核心价值观之一,反之,每个组织都希望避免各自为战甚至南辕北辙的情况,也就是要防止“一个和尚挑水喝,两个和尚抬水喝,三个和尚没水喝”的状况出现。

从上面的例子,可以看出,团队作为一个系统,能够表现出和任何一个团队成员都不同

的状态。这种系统所展示出来,作为一个整体所拥有的特征,而不是任何一个部分所具有的特征,就是系统的“涌现性”。

其实,涌现的概念至少在亚里士多德时代就已经存在了。亚里士多德提出“整体大于部分之和”的著名命题,是古代朴素整体观最有价值的遗产,至今仍然是现代系统论的一条基本原则。当然,这种整体不等于部分之和的“涌现性”,也是系统的基本特征之一。



(2) 系统的动态性(dynamics)

进而,我们来考察一些有意思的系统,比如,迁徙的一队候鸟,通常它们会排列成“V”字形或“一”字形队列,一只鸟飞在前面,其他鸟儿整齐排在后面。在长途的旅程中,无论鸟儿怎样在空中高飞或盘旋,鸟群整体的队伍形状总能基本保持不变。令人好奇的是,这些鸟群系统是如何保持队形不变的?是头鸟告诉那些跟随的鸟儿,要求它们这样做的吗?它们之间是依靠什么进行信息交流的?也许你们会认为鸟儿之间确实有某种效率极高的沟通语言或者外部力量,用来保持队形。

然而,这种解释对于其他一些系统基本是“天方夜谭”般难以置信。比如,飓风。飓风是由无数从海洋中蒸发的,在空气中混合的微小水分子组成,尽管这些水分子看上去是彼此分离的实体,却表现出大规模、高度一致的结构。显然,水分子没有主动交流的“语言纽带”,可是飓风却形成了巨大的旋涡,也就是说,微小的单个水分子,通过某种不明的机理,形成了一致的、威力惊人的宏观结构,即飓风的巨型旋涡。

其实,这些现象背后的原因,是系统还有一个重要特征,那就是,系统不是静止的,而是动态变化的,或者说,系统具有动态性,从而表现出如上那些激动人心的行为。这种动态性特征同样体现在管理系统中,比如我们常常强调在企业中领导者行为的示范作用,所谓“上行下效,潜移默化”。在管理系统中,随着时间的推移,一些好的政策、做法得以在组织中运行,逐渐改变了整个系统的行为,这种效果是激动人心的。反之,有一些例子说明,一些刚开始微不足道的小差错,由于系统存在动态性,会在不知不觉中产生难以预料的后果,“千里之堤,溃于蚁穴”“温水煮青蛙”,说的就是由于系统动态性的存在,一点小问题或者一点小变化会随着时间的推移动态发展,导致系统行为发生巨大的波动或变化。这些现象,就是系统动态性的表现。



(3) 系统的反馈性(feedback)

除了涌现性和动态性,系统还有什么重要的内在性质?让我们来观察一个高水平运动团队,例如,中国女子足球队。在比赛场上,这样一支表现优异的球队由11位具有独立思考能力,渴望成功的队员组成。更为重要的是,为了使球队这个系统整体涌现出高水平,每一位队员的个体行为必然受到约束,也就是说,当一位球员面临选择,是自己带球突破还是传球的时候,她做出的选择是从球队的角度出发的最佳选择,而非个体表现。为了达成这种选择,每位球员需要不停地接收和处理信息流,例如队友的站位、对方球队队形分布、技战术安排等。正是这种对信息的持续处理,结合每位球员自我约束的意愿,使得整个球队能够有好的表现。系统内部这种信息流,就是反馈。

反馈有时候会使系统扩大或增强。有时候,反馈也会表达为系统控制、限制或约束,或



者表现为系统具有一种“自修正”的属性。比如，一个由骑车人和自行车构成的系统。自行车不能自我平衡，在静止的情况下，自行车和骑车人在一起，也不能平衡。但是，当系统动起来，自行车和骑车人就能保持与地面垂直，而不是在地面上随机倒卧。如果自行车和骑车人的系统遇上一个小小的颠簸，系统会摇晃，但是，它很快就会再次稳定下来，这就是系统具有“自修正”的属性，在处理小颠簸时，这种系统反馈机制就可以让系统回到稳定态。

(4) 自组织(self-organization)

具有自我修正能力的动态稳定的系统，有一个专门的概念来定义，那就是自组织。有时候，我们将自组织，称为复杂系统的另一个重要属性。自组织系统在获得空间、时间或者功能的过程中，是没有外界特定干涉的。系统内部元素彼此之间的连接，以及作为整体系统和周围环境的连接，构成了维持、创造这种自组织系统的主要原因。

当然，骑车人和自行车构成的自组织系统，如果遇到非常大的颠簸，骑车人和自行车就可能摔倒。这个过程，用系统的语言来描述，就是：最初处于有序、动态平衡状态的自组织系统，受到了其内部自修正机制无法处理的外部冲击，系统陷入混沌状态(就是自行车和骑车人倾斜歪倒的状态)，直到系统进入另一个稳定平衡状态。

1.1.2 系统观念与系统思维

1. 系统观念(system concept)

系统观念通常是指对于“系统”这个概念的理解和接纳，它包括了对系统的结构、功能、性质、规律等方面的认识。系统观念让我们理解和接受世界的复杂性，认识到事物之间的内在联系和相互依赖，这有助于我们从全局视角理解和处理问题。系统观念包括以下几方面。

(1) 还原论(reductionism)

不对研究对象的部分进行精细分解研究，无法达到研究目的，这样就产生了还原论。笛卡尔(R. Descartes)是还原论的奠基者之一。在这种方法论指导下，400年来，创造了一整套可操作的方法，取得了巨大的成功。还原论就是首先把系统从环境中分离出来，孤立起来进行研究，然后把系统分解为部分，把高层次还原到低层次，用部分说明整体，用低层次说明高层次。

还原论的基本信念在于，相信客观世界是既定的，存在一个由所谓“宇宙之砖”构成的基本层次，只要把研究对象还原到那个层次，搞清楚最小组分即“宇宙之砖”的性质，一切高层次的问题就迎刃而解。

(2) 整体论(holism)

无数事实表明，科学研究越来越深入到更小尺度的微观层次，我们对物质系统的认识越来越精细，但对整体的认识反而越来越模糊。为什么会这样？许多宇宙的奥秘来源于整体的宏观性，真正的整体宏观性在整体被分解为部分时已不复存在，整体的宏观性可表述为：“多源于少”“ $1+1>2$ ”。这样就产生了整体方法论，强调从整体上认识和处理问题。

(3) 系统论(system theory)

系统论是还原论与整体论辩证统一的方法论，是将还原论与整体论结合起来对系统进

行分析研究。

因此,系统科学的形成和发展,伴随着人们对世界认识和思考不断深化的过程。以下是系统科学的主要发展阶段。

(1) 形成: 20世纪30年代,科学家们开始意识到传统的、以分析和简化为基础的科学方法在处理一些复杂问题时存在局限性。生物学家、工程师和数学家开始探索一种新的研究方法,这就是系统科学的起源。

(2) 发展: 20世纪40—60年代,系统科学的研究方法逐渐成形。科学家们开始使用一些新的工具,如系统动力学和网络理论,来研究复杂系统的行为。此时,系统科学逐渐被诸如生态学、生物学、社会学和经济学等许多领域所接受。

(3) 成熟: 20世纪70—80年代,随着计算机技术的发展,系统科学开始使用更复杂的模型来模拟系统的行为。同时,随着混沌理论和复杂性科学的出现,系统科学得到了进一步的发展。

(4) 现代系统科学: 20世纪80年代之后,特别是21世纪以来,系统科学已经成为了一个成熟的、跨学科的研究领域。现代系统科学不仅在理论上进行研究,而且也在诸如气候科学、生态学、经济学、社会学、生物学等许多实际领域中得到了应用。

2. 系统思维(systems thinking)

系统思维强调看待问题的全局视角、各个组成部分之间的相互影响和联系,以及事物的不断变化发展,是基于系统观念的一种理解和解决问题的方法。沃顿商学院荣誉教授、系统科学家罗素·艾克夫指出:“现代经理人应该学会综合性(synthetic)的思维方式来理解复杂系统,而不是解析式思维方式。解析思维和综合思维的整合就是系统思维。”系统思维是唯物辩证法所体现的物质世界普遍联系及整体性的思想,系统思维的方法把还原论和整体论结合起来。正如钱学森所说:“系统论是还原论和整体论的辩证统一”。

在实际应用中,系统思维可以帮助我们更好地理解复杂问题,找到问题的解决方案,使我们能够在处理问题时考虑到更多的可能性和影响,从而做出更明智的决策。

系统思维具备不同于传统思维范式的三大特征。

(1) 整体思考: 看到全貌而非局部

系统思维的第一个特征是整体思考。正如丹尼斯·舍伍德(Dennis Sherwood)所说,系统思维要“见到树木又见森林”。要想了解、预测甚至影响一个系统,必须将系统看作一个整体,而不能将其割裂来看或者取其部分来观测。

(2) 深入思考: 看透结构而非表象

在系统思维中,用冰山模型来说明系统的结构和设计如何决定其行为。这个模型帮助用户看到问题的表面之下,理解导致这些可观察事件的潜在结构和心智模式。如图1-3所示,著名的冰山模型揭示了思维的四个层次。

① 事件(events)

冰山模型最顶部一个层次,位于水面之上,是我们需要立即关注的可观察的事件。这些是在表面上直接看到的,通常是更深层次问题的症

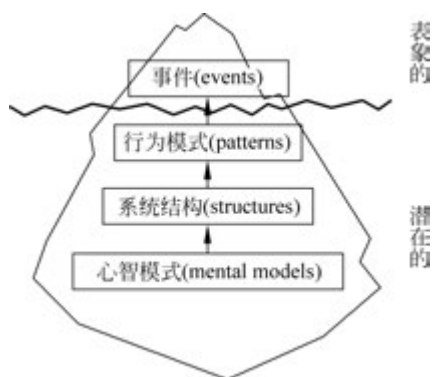


图 1-3 系统思维的冰山模型

状。例如，一次汽车事故。

② 行为模式(patterns)

冰山模型的表面之下第二个层次，就是模式。这里是与手头问题相关的时间趋势或重复事件。如上面提到的汽车事故的例子，如果事故频繁地在同一个地点发生，那就是一个行为模式。

③ 系统结构(structures)

冰山模型的第三层，是影响或创建行为模式的物理、组织或甚至看不见的结构。在我们的汽车事故例子中，可能是那个地方的道路设计有危险，或者交通规则没有有效地执行。

④ 心智模式(mental models)

冰山模型的底部，即整个模型第四层，是心智模式。这里是我们常常认为理所当然的深层次的信念、价值观和假设，然而，它们影响了我们如何看待世界，从而影响了我们创建的系统结构。对于汽车事故的情境，可能是对限速规定的普遍漠视，或者一种文化信念，认为“事故不会发生在我身上”。

冰山模型促使我们思考问题时比立即的事件挖掘得更深，识别出正在发挥作用的系统和心理因素。这有助于找到可持续的解决方案，而不只是解决症状。

(3) 动态思考：看到变化而非静止

系统思维的第三个特征是动态思考。它可以让人看清事物的发展变化，而不是只看到一个又一个静止的片段或侧面。尤其是借助系统动力学等系统思维的方法，可以帮助我们在行动或对策实施之前，提前预见到系统可能的变化或结果。

动态思考的原理是，在系统中各组成部分之间存在着相互连接及动态影响。对于动态性复杂系统，“因”和“果”在时间和空间上并不是紧密相连的。因此，如果人们缺乏系统思维，过去为了解决一个问题而采取的措施往往会产生副作用，从而使得在另外一个时间或另外一个地点产生另一个问题，如图 1-4 所示，假设企业中存在沟通不良的问题，原因可能是多方面的，包括部门责任不清、人际关系复杂、缺乏沟通技巧等，并且，随着时间推移，沟通不良导致误会增加，误会的增多让人际关系更加复杂。所以，在图 1-5 的动态思考中，因果之间是环形互动的，与传统的线性思考相比，这种环形思考让人们看清影响系统行为的关键因素及其之间的相互联系，有助于把握关键，应对变化。

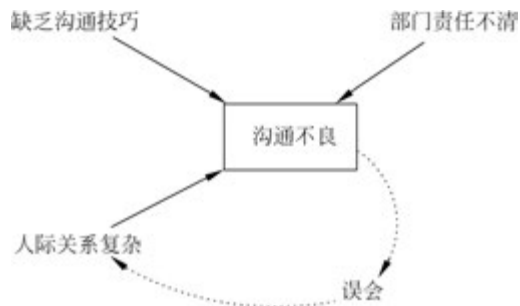


图 1-4 对沟通不良的思考



图 1-5 从线性思考走向环形思考^①

^① 资料来源：邱昭良. 系统思考实践篇[M]. 北京：中国人民大学出版社，2009. 12.

系统观念和系统思维是相互促进,共同发展的。系统观念是一种基础理念,它提供了一个框架,使我们能够理解和接受世界的复杂性,理解各个元素之间的相互联系和依赖。有了这样的理念,我们就能更好地理解 and 接受系统思维这种解决问题的方法。在理解了系统观念之后,我们可以通过系统思维的训练和实践,进一步深化我们对系统的理解,使我们的系统观念更为深入、全面。这种理解可以帮助我们在面对复杂问题时,能够看到问题的全局,理解各个部分之间的相互影响,从而更有效地解决问题。另外,系统思维的训练和实践也可以帮助我们更好地理解 and 接纳系统观念。因为在使用系统思维解决问题的过程中,我们会直观地感受到世界的复杂性,理解到事物之间的相互联系和依赖,这有助于我们接纳并理解系统观念。

1.2 系统动力学

1.2.1 系统动力学的产生与发展

系统动力学(system dynamics,SD)是系统科学理论和计算机仿真紧密结合,研究系统反馈结构和行为的一门科学。是一种通过模型来理解复杂系统的行为的方法,其主要关注的是系统中的反馈循环和延时等结构,以及这些系统结构如何影响系统的行为。

系统动力学诞生于20世纪50年代,由美国麻省理工学院的杰伊·W.福瑞斯特教授(Jay W. Forrester,1918—2016)创立。福瑞斯特教授的一生充满了传奇色彩,在计算机、系统动力学和教育领域都有伟大的建树。20世纪40年代,他发明了随机存储磁介质存储器(random-access magnetic-core memory),也就是我们通常所说的RAM。因此,他的名字被列入了美国杰出发明者殿堂(National Inventors Hall of Fame)。

最初,福瑞斯特为了分析生产管理及库存管理等企业问题而提出一种系统仿真方法,叫工业动态学。1958年,他在《哈佛商业评论》发表了论文《工业动力学——决策的一个重要突破口》,这使得系统动力学开始闻名于世,也是首次把系统动力学运用于工业研究;1965年,他又发表论文《企业的新设计》,进一步深化了系统动力学在工业中的运用;1968年,他出版的《系统原理》一书,全面论述了系统动力学的基本原理和方法,至此,系统动力学从理论上整体得到了完成。1971年,福瑞斯特教授把系统动力学的研究对象拓展到了世界范围,出版《世界动力学》一书,提出了研究全球发展问题的“世界模型”(world model)。

这一方面,最为人所知的,是福瑞斯特教授团队为罗马俱乐部所做的研究工作。在20世纪60—70年代,全球知名的智囊组织——罗马俱乐部集合了一批世界顶尖的科学家、政治家,探讨全人类生存和发展问题的宏大命题时,试图找到一种方法,对这一全球性的命题建立一个完整的模型。在经过很多次尝试之后,终于,罗马俱乐部邀请到福瑞斯特和他的研究团队,运用系统动力学理论,建立了“世界模型Ⅱ”,成功模拟了世界人口、能源、环境、粮食,以及工业生产系统,提出了“增长的极限”这一重要理念。1972年,德内拉·梅多斯等福瑞斯特的学生们出版《增长的极限》一书,这本探讨人类困境的未来学著作,在世界范围内引起了极大的反响,成为当年的最畅销书,用29种语言出版了900万册。继《增长的极限》一书出版20年之后,原作者梅多斯等人于1992年出版了《超越

限制：面对全球性崩溃》，设想一个可持续发展的未来。该书写道：“当年所指出的地球在百年内物质增长方面可能遇到的瓶颈，其中某些问题已经超过地球的承载限度；若已有的增长趋势继续不变，在下一个世纪人类将面临全球性的崩溃。”作者还运用原模型“世界模型Ⅱ”作进一步分析研究，提出了一系列让我们的星球从现状过渡到可持续发展社会的战略性对策。时至今日，《增长的极限》系列仍然是管理科学和系统科学领域，以及可持续发展领域的经典著作。

其实，系统动力学在社会经济管理领域的应用非常广泛，除了上面介绍的之外，还有，麻省理工学院约翰·斯特曼(John D. Sterman)教授以系统思考为基础，建立了商务动态学(business dynamics)，斯特曼教授的著作《商务动态分析方法：对复杂世界的系统思考与建模》，介绍了系统动力学在企业管理领域的很多应用案例，例如企业的成长和萧条、新技术的传播、商业周期、投机泡沫、预测的应用和可靠性、供应链的设计和协调、服务质量管理、项目管理和产品开发等。其中，在对供应链系统动态变化的研究中，斯特曼教授诠释了供应链牛鞭效应的内涵及其系统原理，并设计了啤酒游戏来模拟供应链的牛鞭效应，这些成就，都已经成为管理课程的核心内容。我们也会在后面加以具体介绍。

系统动力学另一个广为认知的应用成果，同样来自福瑞斯特的学生，美国麻省理工学院(MIT)斯隆管理学院的彼得·圣吉(Peter M. Senge)教授，彼得·圣吉以系统思考为核心，创建了五项修炼(个人超越、心智模式、共同愿景、团队学习、系统思考)，进而以五项修炼为基础提出了“学习型组织”的概念及其建设方法。1990年，他出版著作《第五项修炼：学习型组织的艺术和实务》。此书一出，反响强烈，被《哈佛商业评论》评为过去20年来五本最有影响的管理书籍之一，被誉为：“21世纪的管理圣经”。彼得·圣吉本人也被称为继彼得·德鲁克之后，最具影响力的管理大师。《第五项修炼》是继“全面质量管理”(TQM)“流程重组”“团队战略”之后，出现的又一项管理新模式。一些国际知名企业，例如，壳牌石油、福特汽车、克莱斯勒、摩托罗拉、苹果电脑等等，都按照“第五项修炼”的论述，在企业内开展了建设学习型组织的活动。

汪应洛院士在其《系统工程简明教程》(第3版)中指出，系统动力学是最早和最有代表性的系统工程方法。系统动力学作为一种有代表性的系统工程方法，具有以下特点。

(1) 应用系统动力学研究社会系统，能够容纳大量变量，一般可以达到数千个，而这正好符合社会系统研究的需要。

(2) 系统动力学模型，既有描述系统各个要素之间因果关系的结构模型，又有专门形式表现的数学模型，由此进行仿真试验和计算，以掌握系统的未来动态行为。因此，系统动力学是一种定性分析和定量分析相结合的技术。

(3) 系统动力学的仿真试验能起到实际实验室的作用。它通过人和计算机的结合，既能发挥人对社会系统的了解、分析、推理、评价、创造等能力的优势，又能利用计算机高速计算和迅速跟踪的功能，以此试验和剖析实际系统，从而获得丰富而深化的信息，为选择最优或者满意的决策提供有力的依据。

(4) 系统动力学通过模型进行仿真试验的结果，仿真未来一定时期内各种变量随时间而变化的数字和曲线。因此，系统动力学能处理高阶次、非线性、多种反馈的复杂时变社会系统的相关问题。

综上所述可以看出,系统动力学研究处理复杂系统问题的方法采用定性定量相结合、系统综合推理的方法,其建模过程是一个学习、调查、研究的过程,系统动力学的主要功用在于向人们提供一个进行学习和政策分析的工具,并且使得决策群体或整个组织逐步成为学习型组织。因此,系统动力学可以作为实际系统,特别是社会、经济、生态复杂大系统的“实验室”。在广泛的应用中,系统动力学通过系统思考和建模分析等方法,提供了理解和解决复杂问题的强大工具,对决策制定、政策设计、战略规划等许多领域产生了深远影响。它提供了一种能够考虑系统复杂性和动态性的分析工具,使得决策者可以更好地理解和应对复杂的动态的问题和挑战。

1.2.2 系统动力学建模

1. 模型

运用系统动力学来进行系统思考,首先需要用模型来刻画系统。福瑞斯特教授认为“描述某些事物的一组法则与关系就是该事物的模型,人们的想法都依赖于模型”。

随着计算机的普及,数学模型逐渐成为许多系统研究和应用的主要方法。从数学建模角度来说,模型由变量、参数和函数关系三项要素构成。一般情况下,变量分为内生变量、外生变量和状态变量。所谓内生变量是指系统输入作用后在系统输出端所出现的变量,属于不可控变量。外生变量是一个可控变量,形成系统的输入。而状态变量是系统内全体属性的一个表征量。一般来说,将所有状态变量在某个时点的取值视为系统当时的状态。系统的环境设置可以通过参数来描述,而系统内各要素之间的关系可以采用函数表示。此外,一些变量既是时间变量的函数,还可以用来表示要素在系统中不断演化的效果。

2. 系统动力学建模步骤

系统动力学模型是基于从现实世界中收集的信息和人的心智模式而构建的。在现实世界中使用的策略、结构和决策规则可在模型代表的虚拟世界中表达和测试。模型中所做的实验和测试反过来改变我们的心智模式,并导致新策略、新结构和新决策规则的设计。接着,这些新的策略在现实世界中实施,他们的反馈效果引出我们新的洞察,并对定量模型和心智模式进一步改进。因此,建模不是产生绝对答案的一次性活动,而是在模型代表的虚拟世界和行动代表的现实世界之间的持续循环过程。图 1-6 显示了有效的建模是在现实世界与虚拟世界之间不断反复实验和学习的。

建模的本质是创造性的,不同的建模者有不同的风格和方法。但是所有成功的建模者都遵循一个包含下列活动的严格步骤:

- (1) 明确地表达要解决的问题,确定系统的边界。
- (2) 提出关于问题因果关系的一个动态假说或理论。
- (3) 写方程来测试动态假说。
- (4) 测试模型直到你满意,认为它已经达到你的目标。
- (5) 政策设计和评估。

表 1-1 列出了这些步骤,同时给出每步包含的某些问题和使用的主要工具。

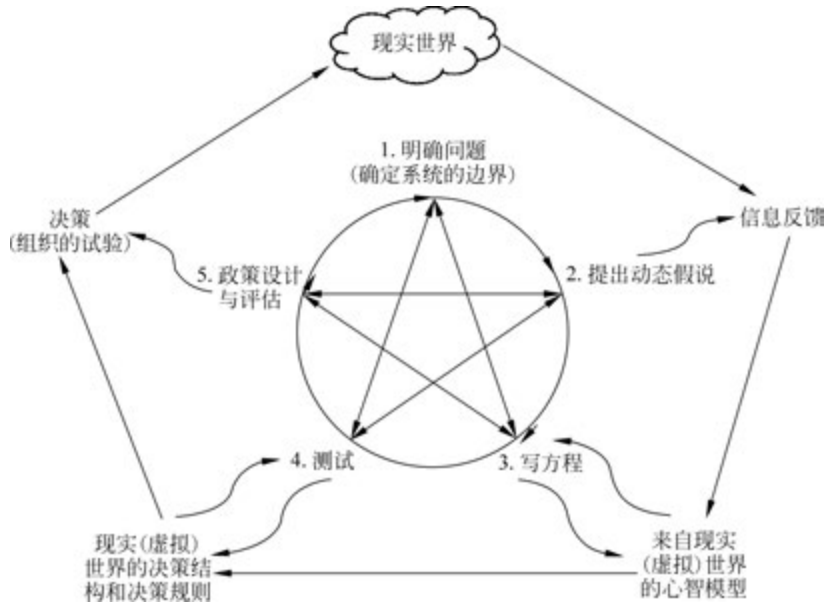


图 1-6 系统动力学建模过程

表 1-1 建模的步骤

建模的步骤	包含的问题和使用的主要工具
1. 明确问题,确定系统的边界	① 选择问题: 问题是什么? 为什么它是一个问题? ② 关键变量: 关键变量是什么? 我们必须考虑的概念是什么? ③ 时限: 问题的根源应追溯过去多久? 我们应考虑多远的将来? ④ 参考模式: 关键变量的历史行为是什么? 将来他们的行为会怎样?
2. 提出动态假说	① 现有的理论解释: 对存在问题的行为现在的理论解释是什么? ② 聚焦于系统的内部: 提出一个由于系统内部的反馈结构导致动态变化的假说。 ③ 绘图: 根据初始假说、关键变量、参考模式和其他可用的数据建立系统的因果结构图,这一过程中可使用的工具包括系统边界图、子系统图、因果回路图、存量流量图、政策结构图以及其他可利用的工具。
3. 写方程	① 明确决策规则。 ② 确定参数、行为关系和初始化条件。 ③ 测试目标和边界的一致性。
4. 测试	① 与参考模式比较: 模型能完全再现过去的行为模式吗? ② 极端条件下的强壮性分析: 在极端条件下模型的行为结果符合现实吗? ③ 灵敏度: 模型的各个参数、初始化条件、模型边界和概括程度的灵敏度如何? ④ 其他测试。
5. 政策设计与评估	① 具体化方案: 可能产生什么样的环境条件? ② 设计策略: 在现实世界中我们可以实施哪些新的决策规则、策略和结构? 它们怎样在模型中表示? ③ “如果-则”分析: 如果实施这些政策,则效果如何? ④ 灵敏度分析: 不同的方案和不确定性条件下,各种政策的强壮性如何? ⑤ 政策的耦合性: 这些政策相互影响吗? 相互抵消吗?

3. 系统动力学建模的基本原则

在建立和运用系统动力学模型的过程中,需要遵循以下原则:

(1) 不要为了建模而建模,开发一个模型是为了解决特定问题。

一个模型必须有一个清楚的目的,而这个目的必须是为了解决客户关心的问题。建模者必须排除所有与问题不相关的因素,以确保项目范围的可行性以及结果的时效性。目标是要改善客户所定义的那个系统的表现,要关注结果。

(2) 从一开始就把建模与整个系统改进工作整合起来。

建模过程的价值早在对问题进行定义的阶段就开始了。建模过程帮助人们把注意力集中在对系统结构的诊断上。

(3) 系统动力学并不是孤立的,在适当的时候配合使用其他工具和方法往往效果显著。

大多数系统建模只是一个更大的工程的一部分,而这个更大的工程还涉及传统的战略和业务分析,包括标杆分析、统计工作、市场研究等。有效的建模取决于强大的数据资源和对问题的充分了解。建模工作在与其它工具相互补充而不是纯粹地取代其它工具时,效果最好。

(4) 尽快建立可用的初步模型,然后逐步加入必要的细节。

尽快建立一个可行的模拟模型。在模拟模型形成之前,不要试图搭建详尽的概念模型。概念模型只是些假设,而且必须接受检验。定性和模拟通常能揭露概念图的不足之处,从而提高人们的理解。模拟试验的结果提供了概念上的理解,并且帮助建立人们对结果的信心。最初的结果为客户提供了即时的价值,而且向他们证明值得为该模型继续投入。

(5) 宽广的模型边界比大量的细节更重要。

模型必须在两方面取得平衡,一方面是要对客户所处的机构和可用的杠杆政策作出有用且可操作的表述,另一方面是要捕捉那些在客户的心智模型中未被解释的反馈。一般来说,当系统各组成部分交互作用时,系统就会出现动态变化,这比对各组成部分进行大量的细节表述,并捕捉它们之间的反馈要重要得多。

(6) 邀请业务专家而非初学者加入建模团队。

建模并不是设计计算机程序,你不可能只是开发一个定性的图表,然后就将它交给程序设计员,请他编译成一个模拟模型。建模要求使用严谨的方法,并且对业务有深入的了解,同时还需要在学习和经验中形成的技能。因此,从专家那里得到你所需要的帮助,从而发展建模队伍及客户组织中其他成员的技能,效果比邀请初学者更好。

(7) 建模是一个发现的过程,避免黑箱建模。

当客户和建模者共同对过程反复质疑的时候,建模最有效。其目标是要对问题如何产生形成新的理解,然后用新的理解来设计高杠杆作用的政策,以求改善现实。如果客户看不到建模过程,那么这个模型绝不会给深植脑海的心智模型带来任何改变,因此就无法改变客户的行为。应该让客户尽可能早、尽可能多地融入建模过程,让他们看到模型,鼓励他们向模型提出建议,亲自检测并提出批评。

(8) 从一开始就留意决策的实施。

实施工作必须从建模第一天就已经开始。经常问一下,模型将如何帮助客户来制定决策?利用模型来设定优先级,并决定政策实施的顺序。利用模型来回答,我们如何从这里到达那里?在考虑采用各种政策杠杆时,仔细想想现实世界的问题。对政策产生的所有成本和收益进行量化,而不仅仅考虑现有会计系统已经报告的信息。

(9) 务必对模型进行检验,这是一个持续的过程。

模型的完成并不能证明它的正确性,仅仅一个测试,比如检测模型对历史数据的拟合能力,也不能证明它的正确性。客户和建模者需要寻找机会来挑战模型再现各种历史经验的能力,通过不断让模型面临数据和专家意见(建模者自己和其他专家)的挑战,逐步建立起对它的信心。在这个过程中,专家的看法和模型都会发生改变和深化。

(10) 模型的实施不因一个单一项目的结束而结束。

建模工作在初始项目结束之后仍会持续产生很久的影响,可以适用于其他系统中相同的问题。在处理相关问题和客户的时候,建模者积累了技术专长,他们带着这些技术专长,带着在处理事务过程中所获得的见解,有时候甚至带着新的思考方法进入新的职位或组织。因此,模型的实施是个人、组织和社会变化中的一个长期过程。

1.3 常用的建模软件

1.3.1 常用软件介绍

为了思考系统结构及模拟系统行为,我们需要一些建模软件的帮助。市面上有一些商业软件为我们进行系统建模和仿真提供了成熟的工具。常用的系统动力学软件有四种。

1. AnyLogic

AnyLogic 公司是由美国和欧洲的跨国团队运营,该公司推出的 AnyLogic 是一款应用广泛的,对离散、系统动力学、多智能体和混合系统建模和仿真的工具。系统动力学建模与仿真是该软件中的一部分功能组件。它的应用领域包括物流、供应链、制造生产业、行人交通仿真、行人疏散、城市规划建筑设计、Petri 网、城市发展及生态环境、经济学、业务流程、服务系统、应急管理、GIS 信息、公共政策、港口机场、疾病扩散等。AnyLogic 以复杂系统设计方法论为基础,将 UML 语言引入模型仿真领域的工具,也是唯一支持混合状态机这种能有效描述离散和连续行为的语言的商业化软件。

AnyLogic 的最大优势在于其功能的广泛和强大,AnyLogic 可以建立各种主要的模型,除了系统动力学模型 system dynamics model (SD),还有离散事件或流程中心模型 discrete event or process-centric model (DE),以及基于主体的模型 agent-based model(AB)等。除了包含图形化建模语言外,也允许用户用 Java 代码去扩展模拟模型。Java 是 AnyLogic 的原生语言,AnyLogic 不但支持通过编写 Java 程序来扩展制模型,还可以用 Java applets 来建立模型,并可以通过任何标准的网络浏览器来开启模型。

2. Powersim

Powersim 在用虚拟电脑模型帮助用户找出实际问题的解决方法并加强对问题作出分析、理解和制定策略方面,也具有很完善的功能和适用性。新一代 Powersim 系列为 Powersim Studio 10,其仿真模块包括 Studio Enterprise、Studio Expert 和 Studio Professional。Powersim Studio 通过随时间变化模拟模型,而不必人为地模拟模型中所对应的时间轴。除了减少模型的复杂性之外,也使理解变得更容易,可以看到模型变量在运行过程中随着时间变化的发展进程。Powersim 模型以图形化的方式来建立,每一变量都用现实生活中的要素来命名。更加透明化的建模有助于理解,各变量的定义也变得通俗易懂。

3. Stella

Stella 是 isee systems(前 HPS)公司开发的一种系统动力学工具软件,主要为教育学家和研究人员使用。它的商业版本叫做 iThink。Isee 成立于 1985 年,是世界领先的系统思维软件的制造商。Isee 开发的 Stella 是第一个将系统思维方式带入桌面系统的软件。除了 Stella 这样主要为教育学家和研究人员使用的软件以外,Isee 提供 iThink 软件来进行商业仿真。

Stella 软件现在分为以下三个版本:Stella Architect 高级建模和互动仿真软件;Stella Designer 动态系统思考呈现、网络分发和应用创建;Stella Professional 系统动力学软件包,用于教学和科研。

4. Vensim

Vensim 应该是当前全球范围内用于系统动力学建模与仿真最广泛的软件了。1985 年,Ventana 系统公司在美国马萨诸塞州哈佛大学成立,主要开发大型仿真模型,集成业务和技术元素,以解决复杂的管理问题。为了减少模型开发时间,Ventana Systems 开始创建自己的仿真语言。这种语言叫作 Vensim。从 1988 年开始,Vensim 语言和支持系统被移植到 C 语言和 X-Window 图形环境中。1991 年,Vensim1.50 版本发布。版本 1.50 被称为一个技术版本,主要面向具有开发和使用动态仿真模型经验的建模专家。

此后,Vensim 不断发展,定期发布带有更多功能和错误修复的新版本,其版本系列逐渐成熟,形成了包括 Vensim Professional、Vensim DSS、Vensim Standerd、Vensim PLE Plus 和 Vensim PLE 的完整系列,适合不同人群。其中,Vensim Professional 适合管理大型复杂模型,它提供了结构和行为的因果追踪,并具有蒙特卡罗灵敏度、优化和下标(数组)功能。Vensim DSS 添加了一个接口开发工具,用于创建管理飞行模拟器、外部函数和宏、编译模拟等。用户可以使用 Venapp builder,或使用 Visual Basic、C、c++、Visual c++、Delphi、Excel 和多媒体创作工具等编程语言定制开发 Vensim 应用程序(飞行模拟器和和其他模型接口)。Vensim PLE Plus 介于免费的 PLE 和更高配置之间,它的价格低于 Profesional 和 DSS,但是具有数据连接、多视图、蒙特卡罗敏感性模拟、游戏模拟功能和新的模型-用户界面(输入和输出控制)。

在本书中选用的是 Vensim PLE。Vensim PLE 是专门为系统动力学的个人学习而准备的免费建模软件,具备了基本的功能,并且支持中文变量,模型可以保存,简单易学,所以很适合作为学习系统动力学的入门工具。

1.3.2 Vensim 软件界面与功能

接下来,我们来逐步学习 Vensim 软件,并在这个过程中进一步加深对系统动力学建模和系统思维的学习和理解。

进入 Vensim 公司的官网 www.vensim.com,在网站上提交个人注册信息之后,就可以进入下载页面,选择适合自己计算机操作系统的软件,你们可以把安装文件下载到本地,安装完成之后,桌面上会生成一个 Vensim PLE 的图标,双击它,就开始运行 Vensim PLE 软件了。

打开 Vensim PLE 软件之后,首先出现的是主界面,如图 1-7 所示。



图 1-7 Vensim PLE 用户界面

主界面由以下部分构成。

1. 菜单栏

最上方一行菜单栏 menu。Vensim 中的很多操作都是由菜单栏完成的。

- (1) File,文件。下拉菜单包括一些基本的功能,如打开模型、保存、打印等。
- (2) Edit,编辑。下拉菜单可以复制和粘贴选择的模型,也可以在此查找模型中的变量。
- (3) View,查看。下拉菜单可以选择以图形方式或文本方式浏览模型(后者 PLE 版本不提供)。
- (4) Layout,布局。下拉菜单可以移动模型元素的位置和调节其大小比例。
- (5) Model,模型。下拉菜单提供模拟控制、时间范围对话框、模型检查、输出和输入数据集合等功能。

(6) Tools, 工具。下拉菜单可设置 Vensim 的全局选项, 让你能设置分析工具、绘图工具和全局选项。

(7) Window, 窗口。下拉菜单可以切换打开的不同窗口。

(8) Help, 帮助。下拉菜单可以提供在线帮助。

2. 标题栏

第二行被称为标题栏 Title Bar。标题行主要显示两种主要项目: 打开的模型和工作台变量。如图 1-7 所示, 这个工作台截图来自 Vensim PLE 10. 2. 1。当前工作台变量是 TIME。工作台变量就是当前模型中任何一个被选中作为研究对象的变量, 可以通过对变量的操作得到更多信息变量, 比如变量的动态行为。工作台变量的选择可以通过点击变量或者使用控制面板上的变量选择按钮来实现, 这些在后面会介绍。

3. 主工具栏

第三行是主工具栏 Main Toolbar。工具栏提供一些最常用的菜单选项和模拟功能。如图 1-8 所示, 第一行工具栏可以分为三组, 左边第一组按键设置主要是文件和编辑菜单选项。例如新建模型 New、打开模型 Open、保存 Save、打印 Print、剪切 Cut、复制 Copy、粘贴 Paste 等。中间第二组从 simulation control 仿真设定开始, 然后是仿真文件名编辑栏 Run Name 以及文件夹浏览 Browse, 第三组包括模拟 Simulate 和交互式模拟 SyntheSim 等。



图 1-8 工具栏

4. 绘图工具栏

在工具栏下面是绘图工具 Sketch Tools, 如图 1-9 所示, Vensim PLE 提供的绘图工具包括:

- (1) Lock, 锁定。点击这个按钮时, 图形和工作变量可以被选择, 但是不可以被移动。
- (2) Move, 移动。可以移动绘图对象或改变其尺寸。
- (3) Variable, 变量。创建变量, 包括常量、辅助变量和数据。
- (4) Stock, 状态变量。用方框形式创建状态变量(也就是流位变量或积分量)。
- (5) Arrow, 箭头。创建直的或者弯曲的箭头。
- (6) Flow, 速率变量。建立速率变量。
- (7) Shadow Variable, 影子变量。在图形中加入已经存在的变量作为影子变量。
- (8) Comment, 注释。用于添加注释或者图片。
- (9) Delete, 删除。用于删除模型的结构, 变量、箭头、注释等都可以删除。
- (10) Equation, 方程。使用这个方程编辑器来创建和编辑模型方程。



图 1-9 绘图工具

在构建模型时, 我们先使用鼠标点击绘图工具来选择它, 然后将鼠标移动到绘图面板 Sketch Drawing Area 上, 再次点击来使用工具。注意这些绘图工具选择是黏性的, 也就是

说,你选择的绘图工具一直保持活跃状态,直到重新选择其他工具。

5. 状态栏

在主界面最下方是状态栏 Status Bar。通过状态栏按钮,可以改变当前模型或者对象相关的一些格式和属性,例如字体、字号、连接的颜色、背景颜色等。

6. 分析工具栏

主界面左侧还有着一列按钮,这些是分析工具条 Analysis Tools。通过点击分析工具就可以产生输出窗口。分析工具从模型收集信息,并在一个窗口中以图表、曲线图或文本的方式显示这些信息。可以同时打开十几个窗口,并且单个窗口可以通过按左上角或者右上角的 close 按钮单独关闭。

在 Vensim PLE 中提供的分析工具如图 1-10 所示,为了排版方便,图中我们将软件中纵向排列的分析工具按钮改成了横向排列。

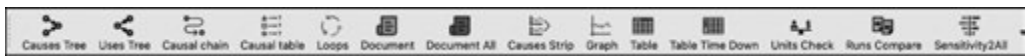


图 1-10 分析工具栏

(1) 原因树, Causes Tree。建立一个树状图,对选定变量进行直接原因追踪分析,也就是找到其所有的直接原因变量。

(2) 结果树, Uses Tree。建立一个树状图,对选定变量进行直接结果追踪分析,也就是找到其所有的直接结果变量。

(3) 回路图, Loops。列出所有通过选定变量的反馈回路。

(4) 文档, Document。列出选定变量的方程式、定义、测量单位,以及选择的数值。

(5) 所有文档, Document All。列出模型中全部变量的方程式、定义、测量单位,以及选择的数值。

(6) 原因线条图, Causes Strip。用曲线图形式同时显示选定变量以及其直接原因变量的仿真结果,以便进行原因追踪分析。

(7) 曲线图, Graph。用曲线图形式显示选定变量的仿真结果,从而表达其在行为模式。

(8) 数据表, Table。用数据表的形式显示选定变量的仿真结果。

(9) 时间数据列表, Table Time Down。用时间为列顺序的方式显示选定变量的仿真结果。

(10) 单位检测, Units Check。检查模型的单位设置是否正确。

本章小结

系统是由相互作用相互依赖的若干组成部分结合而成的,具有特定功能的有机整体。系统思维,就是基于系统观念的一种思维方式。系统思维注重研究系统各构成部分如何相互关联,以及系统如何在更大的系统背景下随时间运作。系统思维具有整体思考、深入思考和动态思考三大特征。系统方法论历经几十年的发展,形成一整套科学体系。系统动力学是一种基于系统建模仿真分析的系统思维理论和方法,可被广泛用于从生物学、计算机

科学、工程和商业,到社会服务和环境科学等各个领域,被誉为进行系统思维和系统决策的“策略实验室”。借助系统动力学的建模和分析,人们在规划和决策中可以更具战略性,找出问题的根本原因。本章还介绍了系统动力学的主要仿真软件。

练 习 题

1. 什么是系统? 系统包含哪几个部分?
2. 阐述系统思维的三个主要特征,并举例说明。
3. 系统动力学的建模过程包括哪些步骤?
4. 当前主要的系统动力学建模和仿真软件有哪些?



即练即测