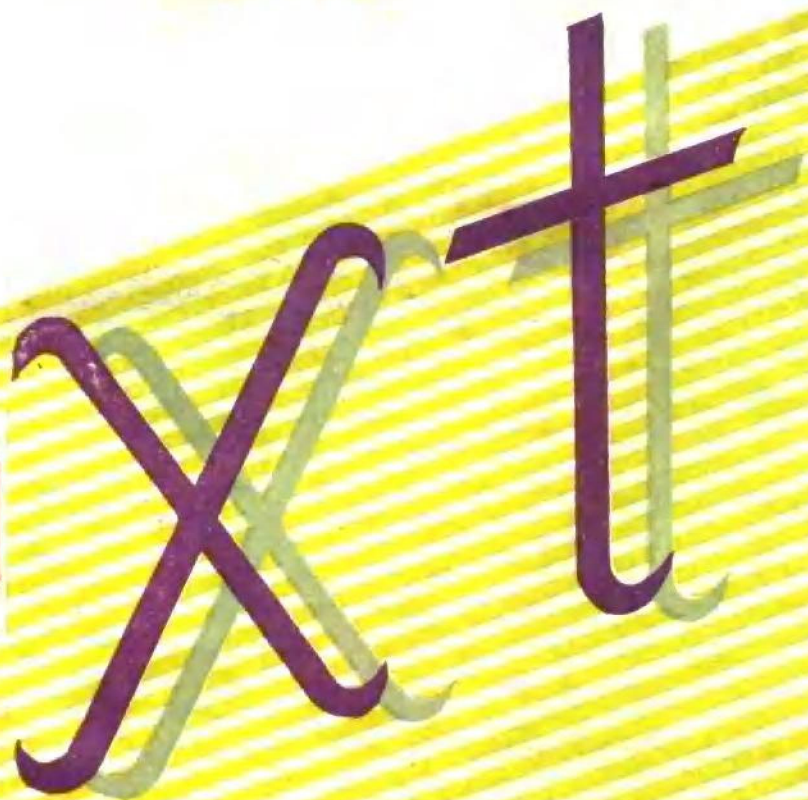


系统动力学原理 及应用

苏懋康 编著



上海交通大学出版社

系统动力学原理及应用

苏 懋 康 编 著

上海交通大学出版社

内 容 简 介

系统动力学是一种以反馈控制理论为基础,以数字计算机仿真技术为手段的研究复杂社会经济系统的定量方法。本书论述了系统动力学的方法论、基本概念及原理,并附有由浅入深的应用实例。全书内容共分七章,书末附录介绍了系统动力学专用的流图和 DYNAMO 语言。本书所论述的原理对一切复杂系统具有通用性,可用于经济、生态、人口、城市、企业、能源、交通、生物及医学等系统的分析和预测,并对这些系统的组织结构设置、重大问题决策及政策制订具有指导意义。

本书可作为大专院校系统工程和经济管理等专业的研究生和本科生的教材或参考书,也可供我国从事计划和管理工作的干部、决策咨询机构的研究人员、企业经理和其他有兴趣的读者阅读。

系统动力学原理及应用

苏懋康 编著

上海交通大学出版社出版
(淮海中路 1984 弄 19 号)

新华书店上海发行所发行
江苏常熟文化印刷厂印装

开本 787×1092 毫米 1/32 印张 9.125 字数 203,000

1988 年 6 月第 1 版 1988 年 6 月第 1 次印刷

印数 1—2,650

ISBN 7-313-00150-9/N94

科技书目: 171-271

定价: 1.50 元

序 言

系统动力学是美国麻省理工学院斯隆管理学院的福雷斯特教授于本世纪 50 年代中期创立的。它在社会经济系统中的第一个实践领域是工业企业的经营管理。从动态观点系统地研究管理问题是对传统管理科学的一个突破，福雷斯特的早期名著《工业动力学》因而荣膺 1962 年美国管理学会的最佳管理书籍奖。系统动力学博采众长，融控制论、系统论、信息论、决策论、管理科学及计算机仿真技术于一体，近 30 年来在企业经营管理、城市问题、全球问题及美国经济等一系列社会经济领域的应用中得到成功。

我国引进系统动力学只是最近六年的事，但它已在区域经济规划、宏观经济定量分析预测及城市问题研究等方面有了广泛的应用。在学习系统动力学的过程中，许多同志痛感到中文资料的缺乏是一个障碍。确实，目前系统动力学国外名著的中译本寥寥无几，中文教材更付阙如。这种情形成了作者编著本书的一个直接推动力。本书是作者在近四年的教学和科研实践的基础上完成的，其基本内容曾作为讲义对上海交通大学及上海海运学院的三届研究生讲授过四次，也曾在长沙、牡丹江等地举办的学习班上讲过。如果本书对于读者学习系统动力学有所裨益的话，那么这就是作者最大的欣慰。作者还希望本书的出版能起到抛砖引玉的作用。

本书的内容分为七章。第一章从社会经济模型体系的概念出发，阐述了引进系统动力学方法的必要性及其该方法的

五个特点。第二章主要从系统工程的角度论述了系统动力学的方法论。第三章深入浅出地介绍了信息反馈系统的动力学基础。该章首先阐述系统动力学的基本概念,然后从一阶系统入手详细讨论了系统结构与其行为特性的关系,引出了正反馈环、负反馈环、主导反馈环转移及纯流率-流位关系图等重要概念与实例。第四章讨论系统动力学的若干理论与应用问题,涉及参数估计、灵敏度分析和最优化等众多的方面。第五章专门讨论系统动力学中的重要概念延迟。延迟的存在往往对信息反馈系统的动态行为有重大的影响。第六章列举了六个不同领域的应用实例,包括著名的“世界模型II”。这些案例规模由小及大,难度由浅入深,是特地为读者安排的,因为作者在教学实践中听到的最强的呼声就是增加应用实例。把握系统运行机制建立数学模型是十分困难的事情,而研读经典的案例是学习掌握建模技巧,消化并巩固理论知识的有效手段。案例模型清单中的疑难之处,作者都一一作了注释。第七章则简介了作者参加的一项课题的研究成果。对于已经学习过系统动力学的读者可顺着章节阅读本书,而对于尚未接触过系统动力学的读者,最好先阅读书末的附录。附录中介绍了系统动力学中专用的流图和 DYNAMO 语言。

作者在参加新疆宏观社会经济发展战略咨询课题的过程中,得到导师吴健中教授、王浣尘教授(后者又为我的博士生导师)的热情鼓励和指导,也得到课题组全体同志的合作与帮助。吴健中教授、王浣尘教授大力推荐并支持本书的出版,学部委员张钟俊教授也十分关心本书的编著,作者谨在此向他们表示衷心的感谢。

苏 懋 康

于上海交通大学

1987年11月

目 录

第一章 社会经济模型体系与系统动力学	1
§ 1-1 社会经济模型体系概述	1
§ 1-2 社会经济模型体系的特性	3
§ 1-3 从模型体系的观点看系统动力学	12
第二章 系统动力学方法论	15
§ 2-1 系统动力学发展简史	15
§ 2-2 社会经济系统建模与系统动力学的方法论 ...	18
第三章 信息反馈系统的动力学基础	24
§ 3-1 系统动力学中若干重要概念	24
§ 3-2 系统结构及图示	29
§ 3-3 一阶正反馈系统	35
§ 3-4 一阶负反馈系统	42
§ 3-5 一阶系统中主导反馈环的转移	51
§ 3-6 线性增长或衰减——一阶线性系统的 临界行为.....	71
§ 3-7 二阶及高阶系统行为概述	73
第四章 系统动力学的若干理论与应用问题	78
§ 4-1 两个简单的例子	78
§ 4-2 仿真与解析求解	85
§ 4-3 控制、校正与政策试验	93
§ 4-4 SBB 型预测和 SST 型预测	96

§ 4-5	参数估计	98
§ 4-6	灵敏度分析	109
§ 4-7	系统动力学与最优化方法	118
第五章	延迟	126
§ 5-1	概述	126
§ 5-2	物流延迟	128
§ 5-3	信息流延迟	140
§ 5-4	延迟环节的增益与相移	149
第六章	案例	156
§ 6-1	零售商店模型	156
§ 6-2	销售增长模型	163
§ 6-3	凯巴布高原生态模型	170
§ 6-4	天然气模型	179
§ 6-5	新兴城镇模型	190
§ 6-6	世界模型 II	202
第七章	系统动力学在新疆维吾尔自治区 2000 年 社会经济发展规划中的应用	227
§ 7-1	新疆宏观社会经济模型-SD 简介	227
§ 7-2	新疆社会经济发展的若干制约因素之探讨	233
§ 7-3	新疆 21 世纪发展中的潜在问题之研究	243
附录 A	流图	253
附录 B	DYNAMO 语言	256
	参考文献	281

第一章 社会经济模型体系与系统动力学

§1-1 社会经济模型体系概述

在自然科学和工程技术的领域中，人们可以在实验室中进行各种试验以检验理论是否符合客观实际。而在社会经济领域中，各种理论上的设想一般都不宜直接在实际系统上作试验。于是，人们就希望有社会经济系统的“实验室”。随着科学技术的进步，这样的实验室终于出现了，它就是“社会经济模型+电子计算机”。社会经济模型通常是指以社会经济系统为研究对象的数学模型。它把社会经济过程内部各种因素之间的关系及其它们同外部因素之间的关系抽象成一套数学式子和算法，用来进行预测或政策、方案等的分析。电子计算机的出现使得社会经济模型的运用如虎添翼。运用社会经济模型具有如下的优点：一是能够给社会经济现象以定量描述和定性解释；二是能够综合考虑多种因素的交互作用，描述客观社会经济过程中复杂的因果关系，分析出哪些因素及关系是主要的；三是能够充分利用各种信息，在想定的方案或政策下，对社会经济发展趋势进行预测；四是能够利用电子计算机仿真，在几秒钟内显示出某个方案在几十年实施过程中可能产生的后果，以便在科学的评价指标下进行多方案比较，提出最优的发展方案，供决策参考。

那么什么是社会经济模型体系呢？社会经济模型体系是

为了达到某一目的而按照大系统的思路 and 观点建立的一组相互联系的社会经济模型。根据建模的原则，数学模型有机理型(或称结构型)和参数型之别。从系统内在规律出发建立的模型称机理型模型。有些系统的内部机制比较复杂且难以搞清，则可通过收集或测量系统的大量有关数据建立参数型模型。不管哪类模型都只是复杂的实际系统的简化与抽象。它所容纳的变量是有限的，所研究的关联作用与影响只是局部的，所擅长的功能也是有所侧重的。单个模型往往只能解决社会经济系统某一层面上的某些问题。要比较完整地描述社会经济系统单纯依靠一个模型是不行的。社会经济模型在国内外已得到广泛的应用。从应用范围上看，已经包括经济、人口、能源、交通、军事、环保、教育、农业、生态等领域；从层次上看，已涉及国际级、国家级、省区级、地市级、县级等；从模型方法上看，已经用到投入产出、计量经济学、经济控制论及系统动力学等。近年来人们在实践中体会到，要全面深入地研究社会经济系统，应当针对客观要求的多样性，博采众模型之长并充分利用其互补性，构造适当的模型体系。

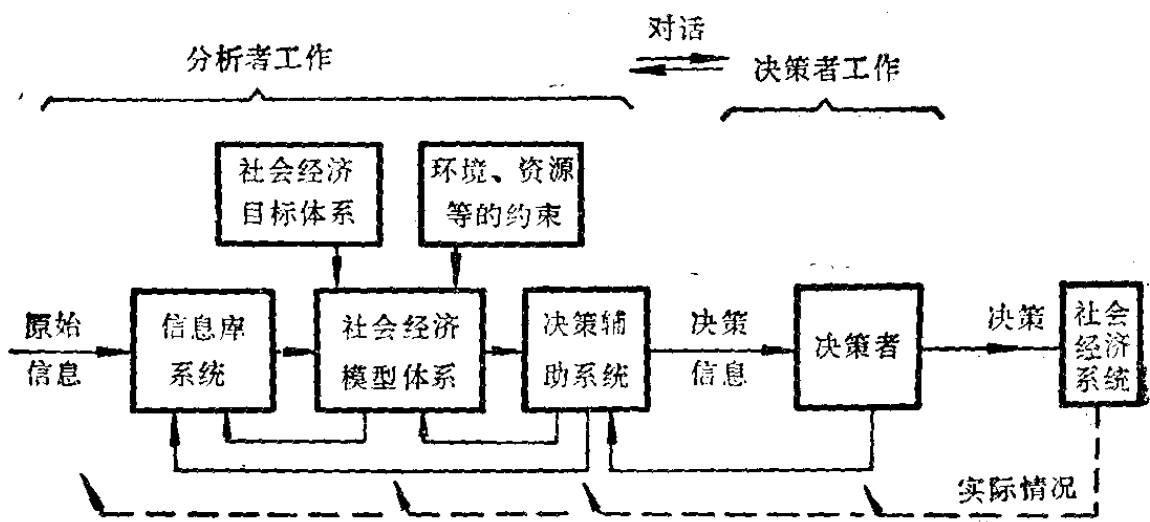


图 1-1 分析——决策复合系统

社会经济模型体系要能很好地工作，前面需要有信息库系统作为信息支持，后面需要有决策辅助系统以便同决策者接口，如图 1-1 所示。这是一个“分析-决策复合系统”。有了这样一个系统，分析者才能有效地同决策者对话，才能有效地为实际服务。

信息库能够把大量的原始信息加工整理并储存起来，使之成为较系统的历史的或现状的基础信息，其中有些能直接为领导者——决策者应用，但是大量的往往不便直接应用。这时，模型就能对这些基础信息进行加工，派生出大量有用的数据信息。包括带有一定特征的现状的或未来的数据信息。不过，有时由于数据过多，决策者被淹没在信息的海洋里，反而一筹莫展。这时，就需要进一步借助于决策辅助系统，把基础数据和派生数据加工成较为“浓缩”的决策信息，提供给决策者进行分析、比较、研究，以便作出决策。从分析-决策复合系统来看，信息库系统和决策辅助系统都要同模型体系接口，因此它们之间就应该有相互适应的结构和接口。

信息库系统、模型体系、决策辅助系统、决策者，再加上相互之间的反馈耦合，构成了分析者和决策者的一个庞大的工作系统。它能够为决策的科学化与民主化提供有效的支持。

§1-2 社会经济模型体系的特性

社会经济模型体系与单个模型相比具有多层次、多形式和多功能等三个特性，现分述如下：

一、模型体系的多层次性

社会经济系统是多层次的，因而相应的模型体系也应当

是多层次的。不同层次的模型解决不同层次的实际问题。比如我国是世界大系统中的子系统，而世界模型不能用来解决我国的社会经济问题。不过，系统的各层次之间又存在着相互关联。因此，研究我国社会经济系统时，一方面要作为世界模型中的子系统，同时还要进一步划分子子系统。

一种划分是按块块划分，即有国家级、省区级（包括省、自治区、直辖市）、地市级（包括地区、自治州、市）以及县等层次。国家级模型的输出可作为省区级模型的输入，有的可作为下层模型的约束条件，比如全国经济的发展状况直接制约了中央对各省区的投资水平。同时，省区级模型的输出信息也可作为国家级模型的输入。比如山西省煤炭产量对全国工业生产就有举足轻重的影响。

另一种划分是按条条划分，即有众多分门别类的部、局、公司、企业等条条系统。比如冶金部、交通部、文化部等条条系统。这些条条系统相互之间也存在着关联，而各条条内部又可有上下多层次的划分。

按块块原则建立的分级宏观社会经济模型一般都是综合型的。这类模型大多考虑总量问题，难以涉及细节。而按条条原则建立的模型大多是专题型的，诸如人口模型、能源模型、教育模型、农业模型和交通运输模型等。这类专题模型同样还可以分级。因此，社会经济系统的模型可以是分级综合型的，也可以是分级专题型的。对某一级或某一层来说，可以涉及人口、能源、生产、消费、教育、交通、财政、科技、环保、贸易等，光靠一个模型也是无能为力的。这就得借助于模型体系。

二、模型体系的多形式性

有人以为所谓模型体系就是模型库。这是一种误解。首

先，模型库中的模型是形式的模型，它具有普遍适用的意义，而模型体系中的模型却已被运用于某个特定的场合，它是在形式的框架里充实了内容的模型。其次，模型库中存有的各种模型之间并没有有机的联系，而模型体系则是依据一定的建模目的，从模型库中选择合适的类型加以组织的，它表现出整体功能性。模型库中的某一模型与模型体系中的同一模型的关系恰如武器库中的高射炮与防空系统中的高射炮的关系一样。

社会经济模型的多形式性是世界各国的学者都注意到的问题。以国际级模型为例，最近一二十年以来就出现许多个，有的是综合型的，有的是专题性的。例如，美国克莱因与希克曼主持的世界联结模型，始于1968年，计量经济学方法；美国福雷斯特的世界模型II，1971年，系统动力学方法；美国梅多斯等的世界模型III，1972年，系统动力学方法；荷兰汉斯等的农业国际关系模型(MOIRA)，1975年，计量经济学与最优化方法；美国列昂惕夫的联合国世界模型，1977年，投入产出方法；日本茅阳一等的全球未来依存关系模型(FUGI)，1977年，投入产出、数学规划及系统动力学等的混合方法。

由此可见，目前社会经济模型主要有四大类，即投入产出、计量经济学、经济控制论和系统动力学。这些方法的理论基础和技术手段是各不相同的。所谓“尺有所短，寸有所长”，它们各有优缺点，各有适用的场合，这些在组织模型体系时都是必须加以考虑的。现分别将四大类模型方法简介如下。

1. 投入产出模型

这是由俄裔美籍经济学家瓦西里·列昂惕夫于30年代首次提出的。从50年代开始，西方资本主义国家用它来分析

经济结构,进行经济预测和制定经济上的政策和措施。在50年代末和60年代初,苏联和东欧各国也开始应用,并称之为“部门间联系平衡分析”。目前世界上已有近百个国家在经济工作上应用了这个方法。我国在60年代初开始研究投入产出分析。1974年至1976年,国家计委在有关单位协助下,用了两年时间试编了我国1973年61种产品的实物型投入产出表。此后,这项工作在全国各省市得到推广。

投入产出表是投入产出模型的核心。它有多种类型。按编制的任务和计量单位区分,有实物型和价值型;按编制的范围分,有国际表、全国表、地区表、部门表和企业表。投入产出模型按时间变量区分,有静态模型和动态模型。

投入产出模型简明,经济意义直观,容易为人们所掌握和应用。它充分注意到中间产品“迂回生产”所形成的周转在经济发展中的重要性,清晰地反映出国民经济各部门、各层次、各种产品之间的联系。因此,它是搞好综合平衡的一个重要工具。它擅长于剖析社会经济的横断面。

但是,投入产出模型将生产函数看作为线性的,这与实际情况不尽相符;它也没有真正解决技术变化、生产和收入中的时间滞后等一系列动态问题;同时,编制投入产出表又需要耗费大量人力物力,特别在分类很细的情况下费用将会急剧增加。由于存在上述种种缺点。投入产出分析很难在中长期预测中得到应用。

2. 计量经济学模型

“计量经济学”一词是由挪威的经济学家弗里希在1926年提出的。1930年,一些国家的经济学家成立了计量经济学会。计量经济学发展初期的10多年中,主要是研究微观经济,40年代到70年代主要用于研究宏观经济。计量经济学

主要是在资本主义国家里发展起来的。我国开展这项工作虽然较迟,但由于各级政府部门的重视和专业人员的努力,目前已建立了一定数量的不同层次的宏观经济计量模型,并已加入了“世界联结”模型的项目。

计量经济学是经济学、统计学和数学有机结合的产物。在研究中有两个基本部分,一是理论,二是事实。美国著名的计量经济学家克莱因所建立的计量经济模型就是以凯恩斯主义作为理论基础的。建立计量经济模型的目的有三个:一是结构分析,即对经济变量之间的关系作出定量的量度;二是预测未来,即预报未来时期某些经济变量的数值;三是政策评价,通过各种政策的仿真对各种政策方案进行分析和比较。对于某个具体的计量经济模型来说,其研究目的可以是其中的一个或两个。

应用计量经济模型去预测未来的基本思路是依据过去的发展趋势去推测未来。当经济处于平衡发展时期时,这种方法能取得较好的效果。但是当经济结构发生较大变化时,若还按历史数据构造定常参数的模型去推测未来,就会产生较大的误差。目前尚无成熟的方法来处理时变参数的计量模型,因而在实用中它们的预测期限都较短。

计量经济分析成败的关键是统计资料的数量与质量。在我国建国以来的 30 多年来,由于种种历史原因造成了统计制度的不完善和统计资料的不完整,这就给计量经济模型的应用带来了局限性。当前我们应当在充分利用现有统计基础的同时,努力促进统计制度和方法的改革。

3. 经济控制论模型

1952 年在巴黎召开的世界控制论大会上首次提出了“经济控制论”一词。1953 年英国图斯丁教授把伺服机构的控制

理论应用于宏观经济系统。翌年，美国数学家菲力普讨论了宏观经济系统的开环控制与闭环控制问题，并用 PID 控制来改进经济政策的稳定性。东欧国家对经济控制论的研究也开展得较早。1965 年波兰的兰格出版了《经济控制论导论》一书，这是最早的经济控制论专著之一。罗马尼亚前总理曼内斯库在其任职期间曾用经济控制论的理论和方法，制定了若干个宏观经济模型。

经济控制论是控制论在社会经济领域中的应用，其内容十分广泛。一般可以区分为控制论(cybernetics)和控制理论(control theory)。前者着重讨论基本原理，后者侧重技术。由于经济行为是人类有理性的行为，人们在经济活动中自然而然地存在着谋求最大经济效益的愿望，这就引导出经济系统的最优控制问题。

近年来，我国对经济控制论的研究也已取得了一些可喜的成果。王浣尘教授开发的 DYPEOM 模型就是结合我国国情以便充分反映一系列社会经济活动动态滞后而开发的一种社会经济模型，是以离散形式表示的状态空间模型，可归属于现代形式的经济控制论模型。

4. 系统动力学模型

系统动力学(system dynamics)，简称 SD，是一种以反馈控制理论为基础，以数字计算机仿真技术为手段的研究复杂社会经济系统的定量方法。它是由美国麻省理工学院的福雷斯特教授于 50 年代中期创立的。系统动力学模型本质上是带时滞的一阶微分方程组。但是这种方法在建模时借助于流图，其中流位变量、流率变量、辅助变量等都具有明确的物理(经济)意义，可以说是一种面向实际的建模方法。系统动力学模型一般用 DYNAMO 语言书写。这种专为 SD 设计的

通用的连续系统仿真语言,使用方便,它备有 20 多种函数,包括表格函数,延迟函数、阶跃函数、脉冲函数和随机函数等供选用。用户只需按 DYNAMO 用户手册上的规定书写系统的动力学方程,并设置仿真参数,即仿真时间、步长、输出打印间隔、输出表式和图式等。配上 DYNAMO 编译程序的计算机接受上述程序后,一般能在数十秒至数分钟内完成一次仿真运算,并以用户指定的图和(或)表的形式打印输出结果。

系统动力学模型的一大特点是能作长期的、动态的、战略性的定量分析研究。系统工程一般要求从将来的观点、长期的观点出发,来研究当前的、近期的问题。系统动力学恰恰具有这样的特长,这也就是它能在系统工程模型方法库中占有一席之地依据。

在我国,系统动力学的研究和应用已经兴起,并受到各方面的重视。

现把以上介绍的四大类型模型的主要特点、局限性和应用范围等归纳成表 1-1。

应当客观地科学地评价模型库中各类模型方法的优缺点,不要将不同学派的模型方法对立起来,而应充分研究并利用它们的互补性。目前各种模型方法相互渗透,例如系统动力学模型的参数估计有时也采用计量经济模型的方法,计量经济模型的预测有时也采用“IF...THEN...”的形式,即系统动力学模型常用的有条件的预测。这是一个值得注意的趋向。

三、模型体系的多功能性

有的同志以为,所谓模型体系就是由若干个子模型组成的大模型。应该承认,模型体系与大模型有相同点,即它们都是由相互联系的部分组成的。但是它们之间存在如下两个

表 1-1 四大类社会经济模型

模型类别	模型形式	主要特点	局 限 性	主要应用范围
投入产出	以投入产出表为核心的代数方程组(静态)或差分方程组(动态)	能清晰地反映出各部门间的生产联系, 模型简明	较难处理经济活动中的动态问题; 没有考虑最终需求的确定以及生产与收入之间的反馈联系	是搞好综合平衡的重要工具, 主要应用于生产系统的平衡问题
计量经济学	线性或非线性联立差分方程组	将经济理论、统计学、数学和计算机仿真技术有机地结合在一起	高质量的有一定时间跨度的经济统计数据难以获得; 当经济结构等变化较大时, 模型难以及时作出反映	经济结构分析; 经济政策评价; 经济预测, 但预测期限不长
经济控制论	以离散形式的状态空间模型为主	能充分反映国民经济的调节控制机制, 可充分利用控制理论的现代成果	目前实用的模型还处于开发阶段	能进行各种期限的预测; 能进行战略研究和制定最优经济政策; 能作为制订五年计划的辅助工具
系统动力学	可带有时滞的一阶微分方程组	能方便地处理非线性和时变现象, 能作长期的、动态的、战略性的仿真分析与研究	预测精度不高, 较适用于分析研究系统的结构与动态行为	在制订国民经济的中远期发展规划时作战略研究和政策分析