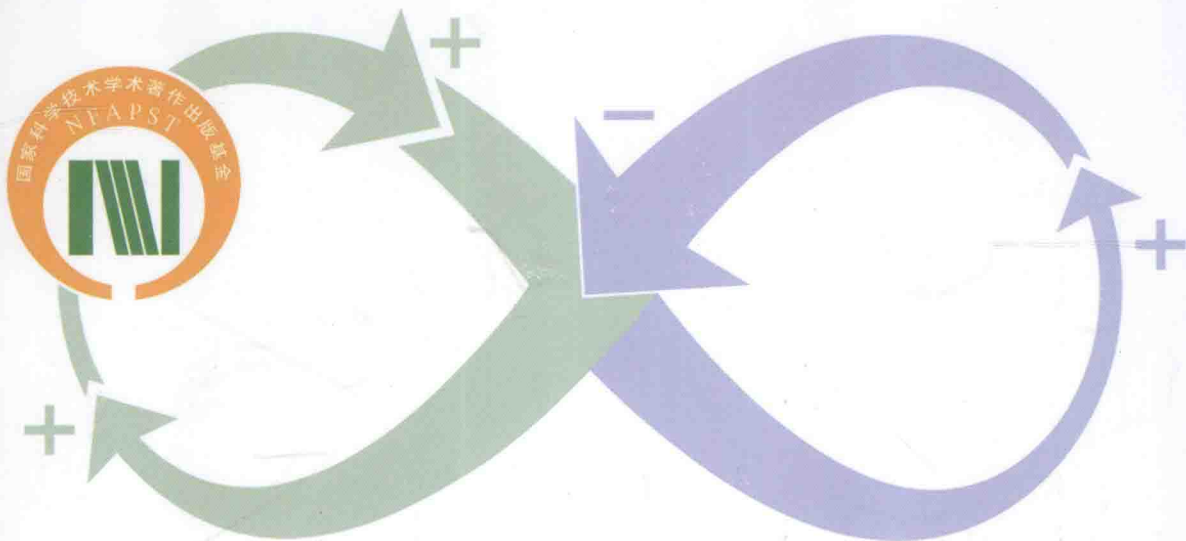




系统动力学前沿与应用

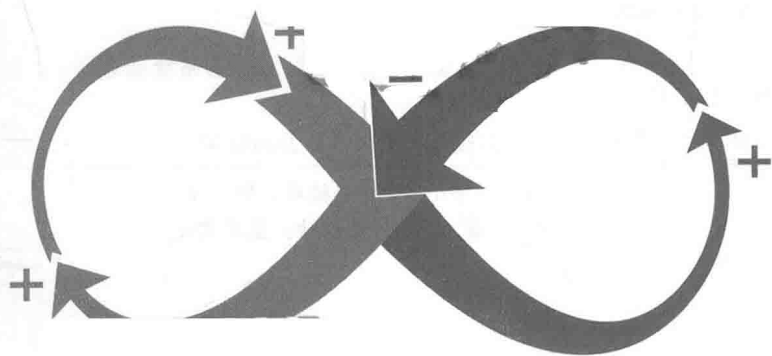
钟永光 贾晓菁 钱颖/著

 科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

系统动力学前沿与应用

钟永光 贾晓菁 钱颖 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书力图回答以下几个问题：①系统基模：作为共性结构重要组成部分的系统基模，其结构如何？可能的行为模式有哪些？②流率基本入树建模法。③模型有效性与模型检验。④Vensim 高级功能：Venapp 的 Controls 和 Commands 介绍、Venapp 应用实例。⑤系统动力学应用案例：传染病的传染过程建模、网络舆情态势涨落建模、北京城市发展建模、iPhone 用户发展建模、沼气产业养殖场至农户反馈供应链建模。

本书可供管理科学与工程、工商管理、公共管理、农林经济管理等专业研究生和系统动力学研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

系统动力学前沿与应用/钟永光, 贾晓菁, 钱颖著. —北京: 科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-050466-1

I. ①系… II. ①钟… ②贾… ③钱 III. ①系统动态学—文集 IV. ①N941.3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 258841 号

责任编辑: 方小丽 / 责任校对: 钟 洋
责任印制: 霍 兵 / 封面设计: 蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 11 月第一次印刷 印张: 17 3/4

字数: 353 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

系统动力学是系统科学与管理科学交叉融合的一门学科,它将系统理论与计算机仿真紧密结合研究复杂系统的结构与行为,揭示事物发展变化的内因,分析政策的有效性和副作用。系统动力学诞生 60 年来,其理论和应用研究涉及多个学科,如工业动力学 (Forrester J W. *Industrial Dynamics*. Cambridge MA: Productivity Press, 1961)、城市动力学 (Forrester J W. *Urban Dynamics*. Cambridge MA: Productivity Press, 1969)、世界动力学 (Forrester J W. *Urban Dynamics*. Cambridge MA: Productivity Press, 1969)、美国国家模型 (Forrester J W. *The system dynamics national model: macrobehavior from microstructure modelling growth strategy in a biotechnology startup firm*. *System Dynamics Review*, 1989, 7 (2): 93-116)、经济长波理论 (Sterman J D. *A behavioral model of the economic long wave*. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 1985, 6(1): 17-53; Sterman J D. *The economic long wave: theory and evidence*. *System Dynamics Review*, 1986, 2 (2): 87-125) 等,它在许多领域得到了广泛的应用。

本书力图回答以下几个问题。

1. 系统基模的结构与可能的行为模式

2007 年,为庆祝系统动力学创立 50 周年,在 *System Dynamics Review* 专刊上,系统动力学创始人 Forrester 发表了总结过去的 *System dynamics—a personal view of the first fifty years* 和展望未来的 *System dynamics—the next fifty years* 两篇论文,在这两篇论文里都提到了共性结构 (generic structure)。回顾系统动力学的发展历史,大部分系统动力学模型都是针对某一特定情况、条件构造出来的,其通用性、类推性较弱,这就大大降低系统动力学的建模效率。因此根据系统相似性,对一类或多类系统辨识和提取共性结构,对推动系统动力学的发展具有一定的理论和应用价值。作为共性结构重要组成部分的系统基模,其结构如何?可能的行为模式有哪些?

2. 流率基本入树建模法

系统动力学建模方法是通过因果关系图和流位流量来建立结构模型,然后建立方程模型,但迄今为止,这种建模方法都是通过对实际子系统的分析,建立流位流率对、逐步添加变量枝而累加成一个复杂的结构模型。所以对一个复杂结构模型是怎样逐步添加而成的,有时建模者自己也难以说清楚。因为中间建模过程

复杂，没有一个规范性方法，而一系列问题有待以规范的方法来解决。例如，这个复杂模型含有多少反馈环？各反馈环中又有何具体反馈关系？

改变建模和反馈分析过于依赖个人经验的状况，建立一套规范的建模体系是系统动力学建模理论的重要发展。我们采用系统动力学结构模型与微分方程组的对应关系，一个微分方程组对应一棵入树，创建了流率基本入树建模法。在此基础上，研发出系统动力学强简化流率基本入树建模法、枝向量行列式反馈环计算法、枝向量矩阵反馈环计算法、极小基模生成集法、顶点赋权图法等一套完整的方法体系。这些方法，将数学的图论理论用于系统动力学的研究，探索出一套建模规范化和反馈分析清晰化、深入化的新方法。这些研究成果，全部来源于中国学者的系统工程实践，既解决了实际管理问题，又提出了新的理论方法，成为系统动力学理论体系的重要组成部分。

3. 模型有效性与模型检验

系统动力学是从控制论和现代非线性动力学发展而来的，其建立的理论和模型都有严格的数学基础。系统动力学模型可作为实际系统，特别是社会、经济、生态复杂大系统的模拟“实验室”。系统科学领域的著名科学家钱学森院士在一次讲话中曾谈到：“要研究这么一个复杂的社会系统，过去的许多理论方法恐怕都不行。最老的所谓数量经济学，后来又由此衍化出来的回归法等，这些方法的一个共同毛病是太简单化了。那么，近十几年来，外国人又搞了所谓‘耗散结构理论’和‘协同学’理论，两位大师，一个是比利时的普利高津，一个是德国的哈肯。普利高津还为此得了‘诺贝尔奖’，都来我国讲过学，也很轰动。他们的这些理论，还是太简单，因为他们用的参数的数目大概是十几个，整个社会系统就用十来个参数描述，是不能反映社会系统的复杂性的。还有美国人搞的所谓系统动力学，代表人物是麻省理工学院教授福雷斯特（J.W. Forrester）。福雷斯特自己比较客观，他在‘系统动力学’这本书的序言中，很谦虚地说，他这套办法到底行不行？还得看。实际上也是太简单，因为系统动力学里用的参数也是那么十来个。所以耗散结构、协同学、系统动力学这些比较现代的理论，他们用十来个参数把这整个‘特殊复杂巨系统’——‘社会系统’里面的问题简化到那样一个程度是不合适的。如果你硬要那么简化，那当然是主观的，也就是唯心主义了，所以是不行的。我看了这些东西以后，觉得我们还是要用马克思主义哲学来指导我们的工作，就是要实事求是，而不能像他们那样。当然我也不是说耗散结构、协同学、系统动力学一点用处也没有，它们在处理简单的巨系统是可以的，复杂巨系统不行。”（见钱学森. 创建系统学. 太原：山西科学技术出版社，2001：43）。他进而警示大家：“系统动力学创始人 J. Forrester 自己就提出，对他的方法要慎重，要研究模型的可信度。但国内有些人对此却毫不担心，‘大胆’使用。”（见钱学森. 创建系统学. 太

原：山西科学技术出版社，2001：201）。

钱老的话可谓真知灼见。以中国系统工程学会主办的综合科技期刊《系统工程理论与实践》为例，它集系统科学、管理科学和信息科学等为一体，已经成为系统工程、系统科学和管理科学等领域最有影响力的杂志之一，也是中国在管理类期刊中唯一进入国际 EI 检索的科技期刊。使用关键词“系统动力学”检索，从 1986 年创刊至 2009 年 12 月共搜索到 41 篇文章，有 13 篇论文属于建模理论范畴，研究内容不涉及检验，剩下 28 篇论文需要研究模型的可信度，但仅有 7 篇进行了模型可信度检验，也就是说仅仅有 25% 的学者研究了模型的可信度。其中相对较全面的是王家远、袁红平发表在 2009 年第 7 期的《基于系统动力学的建筑废料管理模型》，该文进行了机械错误检验、量纲的一致性检验、模型的有效性检验以及方程式极端条件检验；王灵梅、张金屯、倪维斗发表在 2005 年第 7 期的《火电厂生态工业园的系统动力学模拟与调控》，利用 Vensim 软件（系统动力学建模的常用软件之一）提供的真实性检验功能进行了检验；施国洪、朱敏发表在 2001 年第 12 期的《系统动力学方法在环境经济学中的应用》也进行了理论检验和历史仿真检验；而其他学者全部进行的是将模型运行结果与历史实际值比较的检验方法，这种检验方法存在一定的问题：能够拟合历史数据的系统动力学模型其结构不一定正确，而如果模型结构不正确，将差之毫厘，谬以千里，这里面存在许多种情况。从检索结果来看，模型检验没有引起学者的重视，模型检验的方法也相对不多。我们力图在模型检验方面有所贡献。

4. 系统动力学应用

系统动力学建模案例如下：传染病的传染过程建模、网络舆情态势涨落建模、北京城市发展建模、iPhone 用户发展建模、沼气产业养殖场至农户反馈供应链建模。

5. Venapp 高级功能

Venapp 的高级功能介绍包括 Venapp 的 Controls 和 Commands 介绍、Venapp 应用实例。

本书获国家软科学研究计划资助，项目名称“系统动力学理论与方法若干问题研究”，项目编号 2012GXS4D109。由青岛大学钟永光教授负责拟定大纲及统稿工作，并撰写第 1、6 章和附录（研究生李世杰参与撰写第 1 章）。中央财经大学贾晓菁教授撰写第 2~4 章（贾晓菁及其团队撰写的文稿是在“钟永光，贾晓菁，李旭. 系统动力学. 北京：科学出版社，2009：198-254”基础上修订而成，为系统动力学建模方法和系统反馈分析方面取得的系列原创性成果）；毕业于挪威卑尔根大学系统动力学专业的钱颖博士撰写第 5 章；北京邮电大学齐佳音教授、屈启

兴博士和张一文博士撰写第7章；中国科学技术信息研究所佟贺丰研究员撰写第8章和第11章；北京邮电大学黄逸珺副教授及其研究生郑铭兴撰写第9章，中央财经大学贾晓菁教授、南昌大学贾仁安教授合作撰写第10章。

饮水思源，感恩导师复旦大学王其藩教授，是他把我引入了充满探索色彩的系统动力学研究领域。王老师1935年11月生，福建泉州人，早年侨居缅甸仰光，1958年12月加入中国共产党，1959年毕业于清华大学电机系，1959年3月至1980年1月在清华大学任教，1980年2月至1988年12月在上海机械学院任教，1987年晋升为教授，1989年1月起在复旦大学管理学院管理科学系任教，2001年退休后任同济大学发展研究院院长。1981年赴美国麻省理工学院斯隆管理学院访问，师从系统动力学创始人Forrester，1983年被吸收为麻省理工学院系统动力学研究中心终身成员，并代表我国首次正式参加在美国召开的国际系统动力学会议，回国后推动系统动力学在国内外的的发展，于1987年在上海主持了第五届国际系统动力学年会。他曾40余次赴40多个国家和地区、百余所大学和研究机构进行访问、讲学，出席国际学术会议40余次，主持和组织国际和国内系统动力学等学术会议20余次，如每两年举办一次的“系统科学、管理科学和系统动力学”国际学术会议等。其专著《系统动力学》获1990年第五届全国优秀科技图书奖二等奖。王老师是中国系统工程学会系统动力学专业委员会创始人、国际系统动力学会中国系统动力学分会创始人，曾任*System Dynamics Review*杂志副主编、全国系统动力学学会（筹）主任、中国系统工程学会系统动力学专业委员会第一届至第三届理事会主任委员、国际系统动力学学会主席（2006~2008年）等职。在复旦大学读硕士期间，王老师就给我讲授“系统动力学”等课程，使用的仿真语言为DYNAMO，建模法为书写方程式。他总是骑着自行车很早就赶到教室，黑板板书非常工整，讲课总能深入浅出，声音至今回荡在耳畔。令人悲痛的是，2016年5月31日，王老师因病于上海逝世，享年82岁。中国系统工程学会系统动力学专业委员会敬献挽联：“治学求真，依反馈回路研复杂系统，道启中国一脉；教书育人，由因果关联寻最优决策，薪传学界千秋。”王老师用毕生心血为中国系统动力学学科的建立和发展作出了不可磨灭的贡献。王老师曾自撰一联曰：“人生极乐何处觅，海角天涯尽己任。”感恩导师带给我的家国情怀和对系统动力学的无限热爱。

不幸的是，2016年11月16日，Forrester 与世长辞，享年98岁。这是国际系统动力学界的又一重大损失。Forrester 出生于1918年7月，在麻省理工学院攻读电子工程专业研究生之后，一直在麻省理工学院工作了77年。第二次世界大战后，他协助建立了麻省理工学院林肯实验室，并担任该实验室数字计算机部的负责人，领导了“旋风项目”（Whirlwind），即世界上首个高速实时计算系统。在此期间，他发明了磁芯随机存储器，是今天RAM的先驱。之后，他开发了北美SAGE（semi-automatic ground environment）防空系统，于20世纪50年代后期启用，服

务了将近 25 年。20 世纪 70 年代初,拥有来自 26 个国家 75 名科学家的罗马俱乐部,困惑于世界面临人口增长与资源日益枯竭的前景。鉴于当时一些惯用的工具难能胜任对此复杂问题的研究,于是他们寄希望于系统动力学。在 1970 年 6~7 月,经过一个多月的酝酿和学习讨论,俱乐部对 Forrester 教授提出的世界模型雏形(WORLD II)产生浓厚的兴趣并深受鼓舞,决定提供财力支持,在麻省理工学院成立一个由 Forrester 教授的学生梅多斯(Dennis Meadows)为首的国际研究小组,承担世界模型的研究任务。这项研究的报告 *The Limits to Growth* (《增长的极限》) 受到广泛关注,拥护者有之,批评之声也从未断绝,被西方称为“70 年代的爆炸性杰作”。《增长的极限》的结论是“悲观主义”的,似乎给人们描绘了一幅“世界末日”式的图景,然而它的内容既包含着警告,也饱含着希望,敲响了可持续发展的警钟。在第 1 版出版 20 年后的 1992 年, Meadows 等又出版了 *Beyond the Limits: Confronting Global Collapse, Envisioning A Sustainable Future* (《超越极限: 正视全球性崩溃, 展望一个可持续的未来》), 对 1972 年在《增长的极限》中的研究进行了 20 年来的更新。在第 1 版出版 32 年后的 2004 年, Meadows 等出版了 *The Limits to Growth: The 30-Year Update* (《增长的极限 30 年版》), 该书对第 1 版进行了 30 年来的更新。第 1 版出版 40 年后的 2012 年, Randers 出版了 *2052: A Global Forecast for the Next Forty Years* (《2052: 未来四十年的全球性预测》), 该书更多地是作者相信从 2012 年起到 2052 年宏观层面将要发生的事情。Forrester 及其团队探索的脚步从未停止……他感召着我们, 我们每个人都应有点执着, 都应该为历史、为未来、为永恒、为终极做点什么……

由于 Forrester 在系统动力学领域的杰出贡献, 国际系统动力学学会自 1983 年起设立 Jay Wright Forrester 奖。该项奖为年度奖, 每年评选一次, 用于奖励国际范围内过去 5 年里在系统动力学领域有突出贡献者, 获奖者将获得一枚奖章和 5000 美元的奖励。深切缅怀 Forrester 教授! 愿大师安息!

非常感谢中国航天科技集团公司第 710 研究所于景元研究员, 我先后无数次向其请教《创建系统学》中的系统科学与工程问题, 于老总是笑容可掬, 侃侃而谈, 用凝练而通俗的语言剖析一个个复杂而深刻的问题, 每次聆听我都深受启发。

非常感谢南昌大学贾仁安教授, 贾教授一直生活在系统动力学的世界里, 心无旁骛的探索精神一直激励着我。自 1986 年在南昌大学开设“系统动力学”课程以来, 贾教授 30 年里一直从事系统动力学的理论和应用研究, 先后建立了四个系统工程教学与科研创新基地, 对丘陵地区规模养种生态能源系统工程进行跟踪研究, 取得了一系列原创性成果, 对推动农村经济和社会可持续发展产生了重大影响。以信息产业和农业等社会经济系统为研究对象, 在江西科学技术出版社、科学出版社等出版了系列著作, 2002 年贾教授在高等教育出版社出版的《系统动力学——反馈动态性复杂分析》也使我深受启发。2014 年, 贾仁安教授与中国科学

院数学与系统科学研究院陈锡康研究员荣获中国系统工程学会“系统科学与系统工程应用贡献奖”。

非常感谢复旦大学张显东教授，第 1.3 节系统基模存量流量图的初始模型来自张教授，我对系统基模的兴趣、认识，源于张教授的“系统动力学”课堂教学。他感召着我既要仰望星空，又要关心脚下；既要有科研梦想、科研追求，又要从点滴小事做起。

非常感谢 Sterman, Sterman 现任麻省理工学院斯隆管理学院和工程学院工程系统系“Jay W. Forrester”讲席教授，麻省理工学院系统动力学研究中心主任以及刊物 *System Dynamics Review* 的副主编，先后于 1988 年和 2002 年两次荣获 Jay Wright Forrester 奖。我们在翻译其专著 *Business Dynamics, Systems Thinking and Modeling for a Complex World* 的过程中，他给过无数次修正，无数次暖心的交流。

在我学习系统动力学的路上，中国系统工程学会系统动力学专业委员会第四届理事会主任委员徐波教授、复旦大学李旭教授、上海交通大学蔡雨阳副教授和杨文斌博士等都给予了无私的帮助；九思艺术设计工作室刘洋博士为本书设计了别致典雅极具学科特色的标志；科学出版社马跃编辑、方小丽编辑和赵微微编辑也给予细致入微的帮助，在此一并致谢。

需要相关仿真程序者请联系 yongguang99@126.com。本书首稿完成于 2010 年 12 月，此后不断完善，由于认识水平的限制，不当之处恳请批评指正，请将建议发至邮箱。

薪火相传，上下求索。

系统动力学专业委员会第五届理事会主任委员：钟永光

2016 年 11 月

目 录

前言

第 1 章 系统基模	1
1.1 系统动力学的文献计量学分析	1
1.1.1 文献量分析	1
1.1.2 作者分析	2
1.1.3 期刊分析	4
1.1.4 被引分析	5
1.1.5 国家地区及机构分析	5
1.1.6 研究方向分析	6
1.1.7 关键词分析	7
1.2 系统基模的概念	9
1.3 系统基模的结构与行为模式	10
1.3.1 成长上限基模	10
1.3.2 舍本逐末基模	12
1.3.3 反应迟缓基模	13
1.3.4 目标侵蚀基模	17
1.3.5 恶性竞争（两败俱伤）基模	19
1.3.6 富者愈富基模	20
1.3.7 共同悲剧基模	24
1.3.8 饮鸩止渴基模	25
1.3.9 成长与投资不足基模	27
第 2 章 流率基本入树建模法	32
2.1 流率基本入树建模理论	32
2.1.1 流率基本入树建模法的基本概念	32
2.1.2 流率基本入树建模法的建模步骤	33
2.1.3 流率基本入树模型概念的拓展	34
2.2 流率基本入树模型构建实例	35
2.2.1 模型实际背景	36
2.2.2 建立流位流率系	36
2.2.3 兰坡村规模养种生态能源系统结构流率基本入树模型	37

2.2.4 兰坡村规模养种生态能源系统结构存量流量图	47
第3章 反馈环计算法	49
3.1 枝向量行列式反馈环计算法	49
3.1.1 枝向量行列式反馈环计算法的基本概念	49
3.1.2 用枝向量行列式法计算系统全部反馈环的步骤	51
3.1.3 枝向量行列式反馈环计算实例	52
3.2 枝向量矩阵反馈环计算法	59
3.2.1 枝向量矩阵反馈环计算法的基本概念	59
3.2.2 枝向量矩阵反馈环计算法的步骤	60
3.2.3 枝向量矩阵反馈环计算实例	62
3.3 复杂系统极小基模分析	85
3.3.1 二阶极小基模矩阵生成法	85
3.3.2 二阶极小基模生成集方法进行基模分析的步骤	88
3.3.3 极小基模矩阵生成集方法实例	89
第4章 顶点赋权反馈因果关系图分析法	96
4.1 顶点赋权因果关系图分析法概念	96
4.2 顶点赋权因果关系图模型	97
4.2.1 确定系统发展中遇到的问题	97
4.2.2 建立增长上限因果关系图	98
4.3 顶点赋权因果关系图模型各顶点权值的确定	99
4.3.1 关键变量顶点值	99
4.3.2 规模养殖利润值的计算与分析	100
4.3.3 规模养殖猪粪尿量的计算与分析	100
4.3.4 规模养殖产沼气量的计算与分析	101
4.3.5 规模养殖产沼气能源效益的计算与分析	102
4.3.6 规模养殖对大气污染量的计算与分析	103
4.3.7 规模养殖沼肥养分含量的计算与分析	104
4.3.8 无公害蔬菜地面积及产量的计算与分析	105
4.3.9 沼肥的水稻生产效益的计算与分析	106
4.3.10 沼液与清水混合灌溉水稻减产率的计算与分析	106
4.3.11 需承载水稻田面积的计算与分析	107
4.3.12 消纳沼液水稻田不足面积的计算与分析	107
4.3.13 冬闲沼肥浪费值的计算与分析	107
4.3.14 沼液二次环境污染量的计算与分析	108
4.4 兰坡村规模养殖系统顶点赋权因果关系图模型	109

4.5 基于顶点赋权图分析法的管理对策研究	109
第5章 模型检验	112
5.1 模型检验的理论	112
5.2 直接结构检验	117
5.3 针对结构的行为检验	123
5.3.1 极限情况测试	123
5.3.2 敏感性测试	126
5.3.3 积分错误检验	130
5.4 行为检验	131
5.5 模型验证访谈	132
5.5.1 使用结构化访谈的理由	132
5.5.2 访谈手册	134
5.5.3 访谈过程	135
5.5.4 访谈手册举例	137
第6章 传染病的传染过程建模	154
6.1 案例背景	154
6.2 传染病传染过程的因果回路图	154
6.3 传染病传染过程的存量流量图	155
6.4 模型测试	157
6.4.1 单位一致性的检测	157
6.4.2 现实性测试	157
6.4.3 极限测试	158
6.4.4 敏感性测试	160
6.5 政策设计	161
6.5.1 在既定参数下传染病模型的运行结果	161
6.5.2 政策分析	163
第7章 网络舆情态势涨落建模	166
7.1 边界确定与基本假设	167
7.2 网络舆情系统因果回路图	168
7.3 网络舆情系统存量流量图	169
7.4 模型仿真	174
7.4.1 模型数据来源	174
7.4.2 模型变量的函数关系确定	174
7.4.3 模型可靠性分析	174
7.4.4 政策分析	176

第 8 章 北京城市发展建模	184
8.1 建模目的	184
8.2 模型结构	185
8.3 模型的主要反馈回路	186
8.3.1 家庭经济情况	187
8.3.2 政府投资	187
8.3.3 环境和资源	189
8.3.4 劳动力和生产	189
8.4 应用案例——北京市能源需求的情景分析	190
8.4.1 电力模块	192
8.4.2 石油模块	198
8.4.3 其他主要模块	201
8.4.4 模型检验	202
8.4.5 情景分析	204
第 9 章 iPhone 用户发展建模	206
9.1 案例背景	206
9.2 iPhone 用户发展的因果回路图	206
9.3 iPhone 用户发展的存量流量图	209
9.4 模型测试	211
9.4.1 极端条件测试	211
9.4.2 行为灵敏度测试	211
9.4.3 行为重现测试	213
9.5 政策设计	215
9.5.1 在既定参数下模型运行的结果	215
9.5.2 政策分析	215
第 10 章 沼气产业养殖场至农户反馈供应链建模	220
10.1 生物质沼气产业的养殖场至农户反馈供应链及待研究的问题	220
10.1.1 生物质沼气产业的养殖场至农户供应链	220
10.1.2 待研究的问题	221
10.2 沼气产业的养殖场至农户反馈供应链基本存量流量图模型及微分方程组模型	221
10.2.1 沼气产业的养殖场至农户反馈供应链基本存量流量图模型	222
10.2.2 反馈供应链三阶常系数微分方程组模型	222
10.3 沼气产业的养殖场至农户反馈供应链微分方程组的 $L_3(t)$ (米 ³)高阶微分方程	224

10.3.1	微分方程组的 $L_3(t)(\text{米}^3)$ 的三阶微分方程	224
10.3.2	农户沼气应用量流位 $L_3(t)(\text{米}^3)$ 三阶微分方程特点	225
10.4	农户沼气应用量 $L_3(t)(\text{米}^3)$ 三阶常系数非齐次微分方程	225
10.4.1	$T=0.5$ 供不应求时 $L_3(t)(\text{米}^3)$ 的三阶常系数非齐次微分方程	225
10.4.2	$T=0.5$ 供不应求时 $L_3(t)(\text{米}^3)$ 的通解	226
10.4.3	$T=0.5$ 供不应求时 $L_3(t)(\text{米}^3)$ 的三阶非齐次微分方程特解函数式	226
10.5	系统动力学仿真解及其与微分方程解一致性证明	228
10.5.1	仿真解	228
10.5.2	微分方程解曲线	229
10.5.3	系统动力学仿真解与微分方程解一致性证明	231
10.6	供不应求反馈供应链的波动规律及危害	232
第 11 章	Venapp 高级功能使用介绍	234
11.1	建立新的 Venapp 文件	234
11.2	Venapp 的 Controls 和 Commands 介绍	238
11.2.1	文字和图片	238
11.2.2	输入	239
11.2.3	输出	241
11.3	Venapp 应用实例	242
11.3.1	欢迎界面	243
11.3.2	主菜单界面	244
11.3.3	模型结构界面	244
11.3.4	输入界面	246
11.3.5	输出界面	247
11.3.6	详细分析界面	248
11.3.7	复合模拟界面	249
参考文献		251
附录		263

第1章 系统基模

1.1 系统动力学的文献计量学分析

使用 Web of Science 核心数据库,我们对收录于 Web of Science 数据库中有关系统动力学的文献进行主题检索,检索时间为 1993~2015 年,检索式为 ("system dynamic "or" system dynamics")NOT("power system dynamic" or "nonlinear system" or "-system dynamic" or "nucleon system" or "expert system dynamic" or "elastic system dynamics" or "system dynamic stability" or "system dynamic stabilities" or "refrigeration system dynamic"),共检索到文献 10 963 篇,为了更好地突出文献蕴含的信息,我们对 10 963 篇文献进行筛选,取出其中类型为 article 和 review 的文献,共 7015 篇,对该 7015 篇文献进行文献计量学分析。

1.1.1 文献量分析

系统动力学最早出现于 1956 年,创始人是美国麻省理工学院 Forrester 教授,经过半个多世纪的发展,系统动力学已经发展成为多个领域研究复杂系统的重要方法。由于 Web of Science 数据库的限制,仅检索到 1993~2015 年发表的有关系统动力学的文献,1993 年之前发表的论文,Web of Science 数据库尚没有收录。通过整理得到 1993~2015 年每年的发文量,见图 1-1。

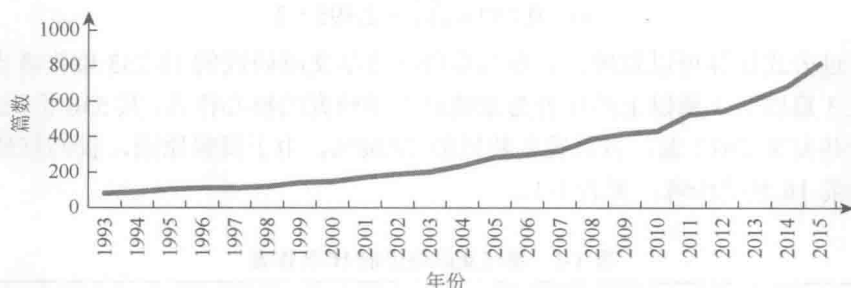


图 1-1 1993~2015 年年发文量

期刊文献发表的数量可以最直观地看出某一领域目前的水平、规模和研究速度。从表 1-1 中可以看出,近几年收录于 Web of Science 数据库有关系统动力学的文献数量较大,且增长速度较快,仅 2015 年一年就发表了 811 篇文献,这一定程度上表明目前系统动力学的发展较快,预计未来几年发文量还将有较大提升。

1.1.2 作者分析

1. 核心作者分析

通过整理得到 7015 篇文献, 涉及参与作者 18 233 位, 其中, 发文数量最多的作者是 Andersen, 共撰写了 12 篇^[1-12], 其次是 Ahmad, 共撰写 11 篇^[13-23], Sterman 共撰写 11 篇^[24-34], Morecroft 共撰写 11 篇^[35-45], Ortega 共撰写 9 篇文献^[46-54]。由于检索时间的限制, 国际上系统动力学较为知名的学者中, Forrester 共撰写 3 篇^[55-57], Moxnes 共撰写 2 篇^[58, 59], Meadows 共撰写 1 篇^[60], Saeed 共撰写 6 篇^[61-66], Abdel-Hamid 共撰写 4 篇^[67-70], Disney 共撰写 1 篇^[71], Marquez 共撰写 5 篇^[72-76]。国内学者中, 发文较多的学者是四川大学徐玖平教授, 共撰写 8 篇^[77-84], 中国科学院新疆生态与地理研究所李兰海研究员共撰写 7 篇^[85-91], 北京师范大学杨志峰教授共撰写 4 篇^[92-95], 四川大学任佩瑜教授共撰写 4 篇^[96-99], 中山大学徐红罡教授共撰写 4 篇^[100-103], 大连理工大学徐凌副教授共撰写 3 篇^[104-106], 上海大学钱颖副教授共撰写 3 篇^[107-109], 曲阜师范大学周长春教授共撰写 2 篇^[110, 111], 天津大学毛国柱副教授共撰写 2 篇^[112, 113]。

根据文献计量学的普赖斯定律可知, 某一领域中核心作者的最低发文数量应满足如下公式:

$$m \cong 0.749 \times \sqrt{n_{\max}} \quad (1-1)$$

式中, $n_{\max}$ 为最高产的作者的发文数; m 为核心作者的最低发文数。

根据此公式, 可得到系统动力学相关研究的核心作者的最低发文量为

$$m \cong 0.749 \times \sqrt{12} = 2.595 \approx 3$$

通过公式计算可以发现, 在参与系统动力学文献研究的 18 233 位作者当中, 发文在 3 篇以及 3 篇以上的作者为系统动力学研究的核心作者, 共 536 位, 这 536 位作者共发文 2012 篇, 占总发文数量的 28.68%。由于篇幅原因, 我们整理了发文数量前 16 名的作者, 见表 1-1。

表 1-1 参与文献数量前 16 名作者

作者	参与文献量	作者	参与文献量
David F. Andersen	12	Cong Wang	10
Sajjad Ahmad	11	Arunk Misra	10
John D. Sterman	11	Frank L. Lewis	9
John Morecroft	11	Romeo Ortega	9

续表

作者	参与文献量	作者	参与文献量
V.J. Modi	8	Peter Eberhard	8
Jiuping Xu	8	Tae H. Woo	8
Ricardo Pietrobon	8	Hyun-soo Lee	8
Hak-Keung Lam	8	Ahmed A. Shabana	8

2. 核心作者共现

共现分析是文献计量学常用的分析方法，通过共现分析，我们可以清晰地看出相应元素之间的亲疏关系。我们使用 Bibexcel 软件对作者进行共现分析，目的是通过共现分析了解目前作者群体之间的合作情况。通过软件的分析，得到了 18 233 名作者相互之间的共现情况，为了使读者更直观地了解作者之间的合作情况，同时由于全部的共现信息信息量过于庞大，这里仅对共现次数 ≥ 3 的数据进行了可视化操作，得到图 1-2。

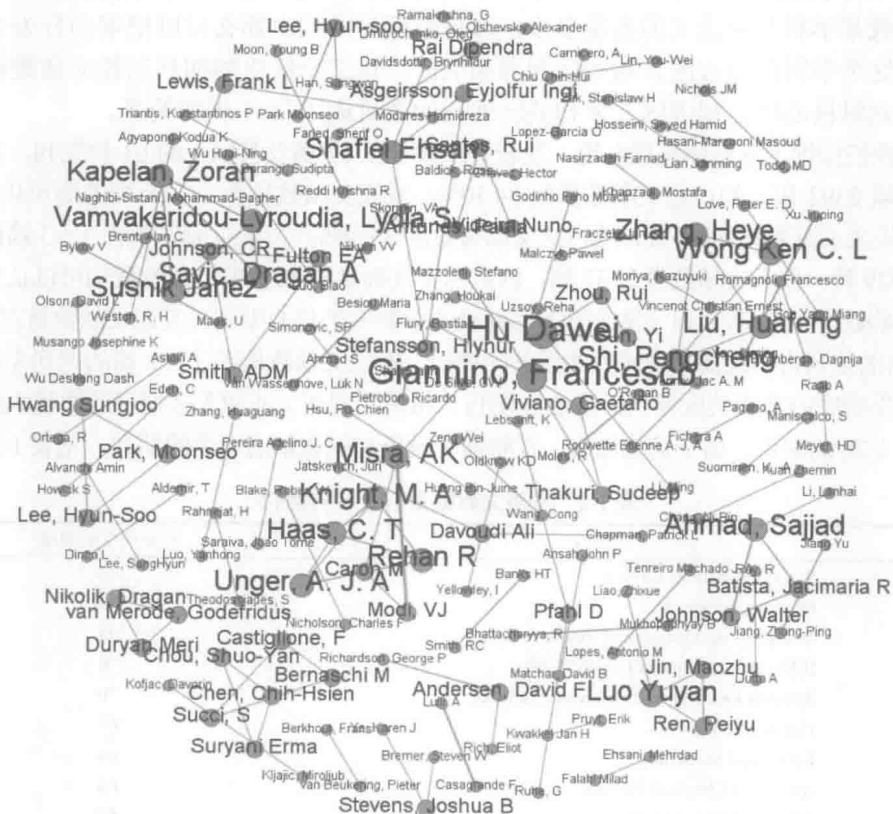


图 1-2 作者共现