

国家自然科学基金项目
教育部“新世纪优秀人才支持计划”
中国地质大学(武汉)“摇篮计划”资助
中国地质大学(武汉)“腾飞计划”

能源经济与环境系统建模： 软计算方法及应用

Energy Economics and Environmental System Modeling:
Soft Computing Method and Its Application

於世为 魏一鸣 孙涵◎著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

国家自然科学基金项目

教育部“新世纪优秀人才支持计划” 资助

中国地质大学(武汉)“摇篮计划”

中国地质大学(武汉)“腾飞计划”

能源经济与环境系统建模

——软计算方法及应用

Energy Economics and Environmental System Modeling
—Soft Computing Method and Its Application

於世为 魏一鸣 孙 涵 著

图书在版编目(CIP)数据

能源经济与环境系统建模——软计算方法及应用/於世为,魏一鸣,孙涵著. —武汉:中国地质大学出版社,2014.7

ISBN 978-7-5625-3175-3

I. ①能…

II. ①於…②魏…③孙…

III. ①能源需求-市场预测-研究-中国②碳-市场交易-计算方法-研究-中国

IV. ①F426.2②F724.741

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 149909 号

能源经济与环境系统建模
——软计算方法及应用

於世为 魏一鸣 孙涵 著

责任编辑:姜 梅

责任校对:代 莹

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×960 毫米 1/16

字数:280 千字 印张:14.25

版次:2014 年 7 月第 1 版

印次:2014 年 7 月第 1 次印刷

印刷:武汉教文印刷厂

印数:1—500 册

ISBN 978-7-5625-3175-3

定价:32.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础,是国民经济的基础和战略性资源,对保障和促进经济增长与社会发展具有重要的作用。改革开放以来,中国在经济和社会方面取得了巨大的进步,1978—2009年间GDP年均增长率高达9.8%。未来随着中国经济的进一步发展、城镇化率进一步提高,较高的人均GDP增长导致的电力、汽车和生活能源需求快速扩张,将进一步加剧能源需求的增长,而较低的人均能源消费量现状使得我国能源需求具有持续增长的刚性特征。因此,能否准确预测中国能源需求总量,对中国乃至全球经济的发展都有重要的指导意义。据统计,中国已于2007年超过美国成为全球最大的CO₂排放国,面临的减排压力越来越大。中国政府积极应对气候变化,2009年在哥本哈根会议上承诺,到2020年中国单位GDP的CO₂排放在2005年的基础上下降40%~45%。2010年更是将其作为约束性指标纳入国家“十二五”规划。为顺利完成这一目标,一方面,需对中国现阶段的各地区碳排放特征及产生的原因进行深入分析;另一方面,应根据各省份经济发展水平、碳排放量、排放增长因素来对国家整体的减排目标进行合理分配。

能源、与能源消费相关的环境功能、经济组成一个相对独立的、开放的能源-环境-经济复合系统。该系统是典型的非线性复杂系统,其运动规律涵盖了数学、化学与经济、环境及社会等系统。本书针对这一系统的复杂性,充分利用软计算相关技术(神经网络、进化算法、模糊系统)在处理非均匀性、非线性、不精确性和不确定等方面的能力,主要研究了中国一次能源预测 PSO-GA-EDE模型的建立、煤炭生产-环境污染量的 GA-SD 仿真模型的建立、MPSO-RBF 网络的城市电力需求预测、中国省际区域碳排放 PSO-FCM 聚类以及碳减排的

PSO-FCM-Shapley 目标分解方法等问题。

本书主要解决了如下几个问题。

(1)提出了一种基于实数编码的改进 PSO-GA 混合优化算法,并将其应用于中国一次能源预测模型的参数优化中。该算法在进化过程中能进行多次信息交换,使两种算法互补性得到更充分的发挥,有效地解决了 PSO 算法进化模式单一,GA 求解冗余迭代、计算时间长、求解效率低等问题。将其应用于中国一次能源预测模型中,所得的预测结果与现有方法相比,具有更高的准确度和可靠度。

(2)构建了中国“煤炭生产-环境污染量”遗传算法(GA)-系统动力学(SD)混合模型。将 GA 全局智能优化能力应用于 SD 模型相关参数的优化中,有效地解决了人为设定参数的主观性及难度;通过情景仿真分析,设计了现阶段中国煤炭矿区生态环境污染量减缓的政策与路径。

(3)提出基于 MPSO-BP 的 RBF 自构建城市电力需求预测模型。该模型采用二进制与实数混合粒子群编码,首先用 MPSO 优化 RBF 径向基的个数及相关参数。然后,为了在一定的网络结构下获得更合适的相关参数,粒子的实数部分,采用 BP 算法进行快速局部优化,混合实数 PSO 进行全局优化,避免用 BP 快速局部逼近时可能陷入的局部极。同时,构建了一种特殊的适应度函数,在保证精度的前提下,使网络的结构相对简单(较少的输入节点数、隐层节点数),以增强网络的自适应能力,减少人为主观因素对网络设计的影响。最后,将该模型成功应用于武汉市 2014—2020 年的电力需求预测中,预测结果表明,无论哪种情景,武汉市的电力需求在 2014—2020 年间仍将持续高速增长,其中规划情景下武汉市的电力消费需求最高,将达到 884.5 亿千瓦时,比 2013 年高出 1 倍多,预测期间年均增长约 11%。

(4)建立了基于支持向量——回归机的煤炭需求组合预测模型。针对中国煤炭需求系统具有非线性、不确定性和历史数据较少以及需求影响因素众多等特征,用经济增长(GDP)、城市化(城市人口数量占总人口数量)和产业结构(第二产业占整个产业的比重)3 个变量来作为输入,煤炭消费量作为输出,建立了一个多输入、单输出的支持向量——回归机(Support Vector Regression,简称 SVR)组合预测模型。对我国煤炭需求进行预测的结果表明,中国煤炭需

求可能在 2017 年出现峰值(拐点),而不同变量的变化改变了煤炭需求倒“U”形曲线峰值的高度和位置,其中经济增长率影响最大,其次是第二产业,最后是城市化。

(5)提出一种基于 PSO 优化的 FCM 聚类方法(PSO-FCM),利用 PSO 的全局优化能力,获得 FCM 中的最佳聚类数与隶属度,并应用于中国省际间碳排放特征的聚类分析中。结果表明:中国 30 个省区碳排放特征可分为 5 类,特征明显,相对于其他的聚类方法,PSO-FCM 聚类结果更具有解释性; CO_2 排放强度与人均排放量是影响区域碳排放特征的最重要指标,单位能源碳排在聚类中作用不明显。此外,针对不同类别的排放特征,本书提出了地区减排目标设定的政策建议。

(6)提出了一种基于 PSO-FCM-Shapley 的地区间碳减排目标分解方法。该方法将碳排放总量分解为生存排放、发展排放与预留排放 3 部分,在对中国各省碳排放宏观因素 PSO-FCM 聚类的基础上,各类选择一个代表性省份,通过对代表性省份碳排放增长的 Shapley 值法分解,识别出各类别省份排放增长的关键因素。在充分考虑各省经济发展水平、产业结构、排放总量的基础上,通过设定相关减排调控政策的重点及程度实现国家整体减排目标。

由于著者学识和水平有限,内容方面会存在许多不如人意的地方,书中缺点和错误在所难免,敬请广大同行、读者批评指正。

感谢中国地质大学(武汉)经济管理学院严良教授、吕军教授、诸克军教授以及王开明教授,北京理工大学管理经济学院王兆华教授、王科副教授等相关研究给予的指导和帮助;感谢中国地质大学出版社姜梅、蒋海龙编辑。同时也特别感谢中国地质大学(武汉)经济管理学院博士生李兰兰在相关数据收集上提供的帮助。最后,感谢国家自然科学基金项目(71103016,71103164)、教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-12-0952)、中国地质大学(武汉)“摇篮计划”和“腾飞计划”对相关研究工作的支持。

著 者
2014 年 7 月

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 能源经济与环境系统	(1)
1.2 能源经济与环境系统建模	(6)
1.3 基于软计算的能源经济与环境系统建模	(23)
1.4 研究目的和研究内容	(28)
2 能源需求 PSO-GA 预测模型	(30)
2.1 引 言	(30)
2.2 文献综述	(31)
2.3 遗传算法与粒子群算法	(36)
2.4 一种改进的 PSO-GA 算法	(49)
2.5 能源需求影响因素及通径分析	(60)
2.6 PSO-GA-EDE 模型应用	(64)
2.7 能源需求情景设置与预测	(69)
2.8 本章主要结论	(76)
3 煤炭生产-环境污染量 GA-SD 预测模型	(77)
3.1 引 言	(77)
3.2 系统动力学仿真模型	(79)
3.3 煤矿矿区节能减排系统动力学建模与仿真	(83)
3.4 煤炭生产-环境污染量 GA-SD 预测模型	(94)
3.5 本章主要结论	(105)
4 基于 MPSO-RBF 网络的电力需求预测研究	(106)
4.1 引 言	(106)

4.2	影响电力需求的主要因素及预测模型	(108)
4.3	RBF 预测模型和学习算法	(114)
4.4	一种基于 MPSO-BP 的 RBF 网络自构建学习算法	(119)
4.5	基于 MPSO-RBF 的电力需求预测	(130)
4.6	本章主要结论	(135)
5	基于回归支持向量机的煤炭需求预测	(137)
5.1	引 言	(137)
5.2	文献综述	(138)
5.3	支持向量机	(141)
5.4	煤炭需求的支持向量回归机预测模型	(145)
5.5	本章主要结论	(151)
6	基于 PSO-FCM 的区域能源碳排放聚类分析	(152)
6.1	引 言	(152)
6.2	PSO-FCM 聚类方法	(155)
6.3	碳排放量计算与数据	(158)
6.4	聚类结果与分析	(160)
6.5	结论与政策建议	(170)
7	基于 FCM-Shapley 分解的碳减排目标的区域分解	(172)
7.1	引 言	(172)
7.2	碳强度排放及影响因素	(174)
7.3	碳强度目标 FCM-Shapley 分解	(175)
7.4	结果与分析	(179)
7.5	本章主要结论与启示	(191)
8	结论与展望	(192)
8.1	研究的主要结论	(192)
8.2	研究展望	(193)
	参考文献	(195)

1 绪 论

能源是支撑社会经济发展和人民生活的重要物质资料,与食物和淡水一样是人类赖以生存的物质基础,对保障和促进经济增长与社会发展具有重要的作用。安全、可靠的能源供应和高效、清洁的能源利用,是社会经济持续发展的基本保证。从薪柴时期到煤炭时期再到石油时期,以及目前可能向太阳能、核能为主体转变的新能源时期,每一次能源的更迭都标志着文明进步的飞跃,从而使人类生存发展的观念得到根本性转变。随着世界经济的发展,世界能源需求量的逐渐增加,全球1965年能源消费量为37.6亿吨标油,增长到1980年的66.3亿吨标油,而到2012年高达124.86亿吨标油(BP,2013),以当前政策情景预计,2035年全球能源消费量将达到183亿吨标油,年均增长1.6%(IEA,2011b)。能源问题已经成为当今国际政治、经济、军事、外交关注的焦点。

1.1 能源经济与环境系统

1.1.1 能源与能源系统

关于能源的定义,目前约有20种。例如,《科学技术百科全书》:能源是可从其获得热、光和动力之类能量的资源;《大英百科全书》:能源是一个包括着所有燃料、流水、阳光和风的术语,人类用适当的转换手段便可让它为自己提供所需的能量;《日本大百科全书》:在各种生产活动中,我们利用热能、机械能、光能、电能等来做功,可用来作为这些能量源泉的自然界中的各种载体,称为能源;我国的《能源百科全书》:能源是可以直接或经转换提供人类所需的光、热、动力等任一形式能量的载能体资源。可见,能源是一种呈多种形式的,且可以相互转换的能量的源泉。确切而简单地讲,能源是自然界中能为人类提供某种形式能量的物质资源。即能源指人类取得能量的来源,包括已开采出来可供使用的自然资源与经过加工或转换的能量的来源。尚未开采出的能量资源只称为资源,不列入“能源”的范畴,以免混淆。

能源种类可以按图 1-1 所示分类。



图 1-1 能源分类

一次能源与二次能源：自然界现成存在、可直接取得而又不改变其基本形态的能源称为一次能源，或称初级能源；由一次能源经过加工转换成另一种形态的能源产品叫二次能源，也称次级能源。

常规能源与新能源：在一定历史时期和科学技术水平下，已经被人们广泛应用的能源，称之为常规能源；许多古老的能源若采用先进的方法加以广泛利用，以及用新发展的先进技术利用的能源，称之为新能源。

可再生能源与非再生能源：在自然界中可以不断再生并有规律地得到补充的能源，称之为可再生能源；经过亿万年形成的、短期内无法恢复的能源，称之为非再生能源，随着大规模地开采，其储量越来越少，总有枯竭之时。

能源系统是指人类生产生活过程中包括能源开发、供应、转换等各种环节的大系统，能源相关战略、规划、法律法规的制定，都离不开对能源系统的分析研究工作。能源系统各环节（勘探、开发、生产、加工、转换、运输、分配、储备、使用以及环境保护）均由国民经济的若干部门组成，这些环节彼此制约和相互影响而形成一个复杂的整体，起着为国民经济发展和人民生活需要提供能量及原料等物质基础的作用，如图 1-2 所示。

直观地讲，能源系统可分为如下层面。

(1) 能源层面：能源图是由抽象的能源物理量——能载体和对能载体进行转换的能源技术组成，能载体是能源上的节点，而能源技术为连接线。通过能源图可清晰地了解到一个国家、地区、部门或企业的能源系统中各类能源从能源资源的开采（或收集调入），经运输、加工、转换（包括二次能源的转换）、分配到最终使用的实际途径和各个环节上能源转化、损耗和使用的情况。

(2) 环境层面：包括化石能源、水资源、可再生能源等在内的各种能源和资源及在能源系统中各环节释放出的污染物的地理分布，以及气候气象数据等。

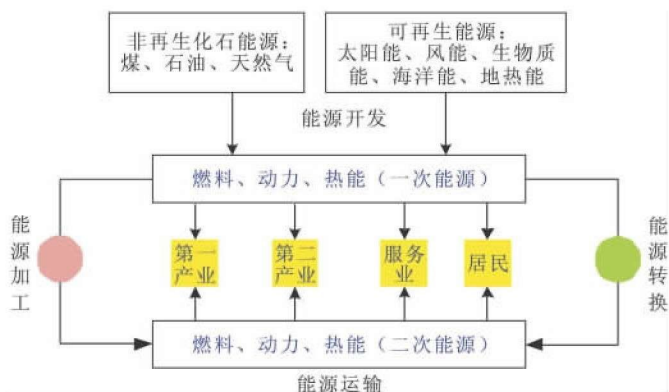


图 1-2 能源系统构成

(3)经济层面:在宏观层面上,经济包括能源相关行业、产业的生产、运输、销售等各种企业和家庭。能源层面的能载体和能源技术分别在这里对应企业和消费者所需要的能源产品、能源生产工艺、消费手段等。

(4)政治层面:国家级、省级、市县级行政区域,各级政府及其制定的相关能源政策、政策的执行情况和结果等。

能源系统具有下述一些特点。

(1)能源系统与非能源系统存在着极其密切的联系。能源系统是一个通过人加工和改造的自然能量系统的人为系统。该系统的活动向非能源系统提供所需能源,同时提出对非能源产品的需求,非能源系统依靠自身的运行为能源系统提供所需产品,同时向能源系统提出能源需求量,因此,能源系统是一个开放系统,不能离开国民经济大系统去孤立地进行能源系统分析。

(2)能源系统是一个具有惯量的系统。能源工业资金密集、建设工期长,关系国计民生,是一个大惯量系统,在该系统中,某一决策一经实施,改造起来非常困难,因此,对能源系统的分析应立足于长远性和战略性。

(3)能源系统分析对象具有可变性。由于技术、资金等方面因素的制约,常规能源系统在相当长的一段时间内(50~100年)还是能源系统分析的主要对象。但随着资源的耗竭和人类对环境质量要求的提高,新能源系统取代常规能源系统是能源系统发展的必然趋势。

(4)能源系统具有全局性。各种能源之间的可替代性的特点决定了在进行能源系统分析时,必须着眼于在宏观能源系统下各子系统之间的比较和优化,避免把各种形式的能源子系统当成一个封闭系统去分析。

1.1.2 能源经济与环境系统

能源系统不是独立的系统,能源系统作为整个国民经济系统的一个子系统,它并不是孤立的,它与经济、环境紧密地联系在一起,三者相互支撑、相互制约。它和自然环境、技术水平、社会经济活动、生态系统都有着极其密切的联系。同时,技术进步与能效的改善都应该被纳入国家整体的能源规划中(Nakata, 2009)。能源系统是依赖于自然环境和社会环境而发展的,用以满足自然环境和环境发展的需要。根据研究需要,可以把能源和经济、环境综合起来,形成如图 1-3 所示的能源-经济-环境系统。能源系统也可根据能源品种分成若干子系统进行研究,如煤炭系统、石油系统、核能系统、电力系统、热力系统等。能源系统也可根据研究的地域大小和范围分成世界能源系统、国家能源系统、城市能源系统、农村能源系统以及企业能源系统等。

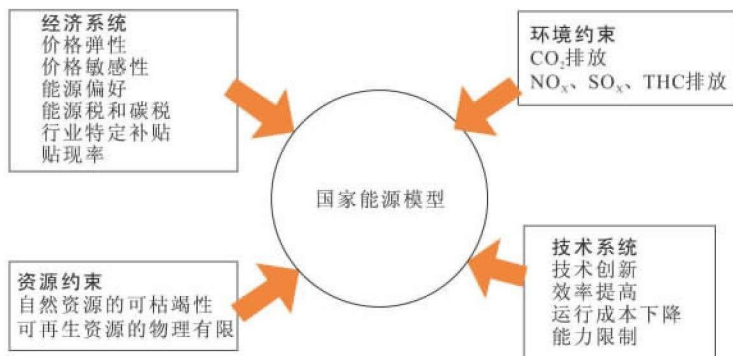


图 1-3 国家能源模型示意图

1.1.3 能源经济与环境系统复杂性

能源、与能源消费相关的环境功能、经济组成一个相对独立的、开放的能源-环境-经济复合系统(Energy-Environment-Economy Compound System, 以下简称为 3E 复杂系统)(魏一鸣等, 2005; 朱达, 2000)。3E 复杂系统是一个多要素和多层次的系统,与外界环境不断进行资源、资金、人员和技术等要素的交换。这种交换对于降低系统的内部熵增和提高系统的有序度产生重要影响,是系统维持“耗散结构”状态,形成有序的自组织的基础和前提。而且 3E 复杂系统的子系统之间、子系统与外部环境、系统与外部环境之间存在非线性和不可逆的联系,这是系统有序的根本原因,正是它们的“协同作用”,推动整个系统朝着持久、有序、稳定和协调的方向发展(张海云, 2013)。

能源经济与环境系统是典型的非线性复杂系统,其运动规律涵盖了数学、化学与经济、环境及社会等系统。具体地讲,能源经济与环境系统的非线性特征主要体现在以下几个方面(顾陪亮,1998;王晓明,2002)。

(1)维数高。对于能源经济与环境系统来说,从驱动其运动的独立变量数及影响其变化的因素种类来看,具有维数高的特性。这种“高维性”是能源系统产生和发展非线性、复杂性的直接机制之一。

(2)开放程度高。能源经济与环境系统是由众多构成要素组成的,它与社会、自然环境之间存在着多层次、多角度、多渠道的相互关系。因此,社会系统中某一方面的变化,如环保要求、战争爆发、利率变化、人口变迁、产业结构调整等都会对能源系统产生或大或小的冲击;同时,能源系统运行的波动,也会对社会环境的各个方面产生相互影响。因此,能源系统与其环境之间存在着全方位、跨时空的开放,充分体现为具有非线性的相互作用特性。

(3)自组织性。能源系统亦属于复杂系统演化的范畴,有其特殊发展方式,即在一定的范围内,以某种形式发展的系统,能够保持原来发展的态势,应付环境与经济条件的变化,开拓更大的发展空间可能性。能源系统与一般其他系统相比,其特殊性在于着眼点是与经济、社会、人口、科技、环境、资源紧密相关,但又不能简单地把它与经济系统中某一个子系统等同起来。要想深入研究这个复杂系统,就应研究适应能源发展的各种因素,把握新形势下的能源发展的规律性和内部机制,分析这个复杂系统中的其他子系统与能源之间的协调关系,从复杂系统的演化机理出发,探讨可持续发展能源系统的这一复杂系统演化规律。

从理论上讲,能源、经济和环境三者之间存在着复杂的相互影响机理。其相互作用如图 1-4 所示。

首先,能源资源是经济发展的重要动力保障,经济的持续快速发展都必须有长期稳定的能源供给作为保证;其次,在经济发展过程中,对扩大生产规模以及提高人民福利等的要求不断增加对土地、矿产、水资源、生物资源和能源的需求,为了满足这些需求,就必须加大对能源资源的开采力度,而能源消费的增加必然伴随着污染物排放数量的增加,由此给环境带来了不容忽视的压力,一旦污染物的排放超出环境自身承受能力的临界点,环境质量就会恶化;再次,环境质量的恶化反过来必然影响能源资源的质量、劳动力质量等基础生产要素,并最终对经济造成一定的负面影响。

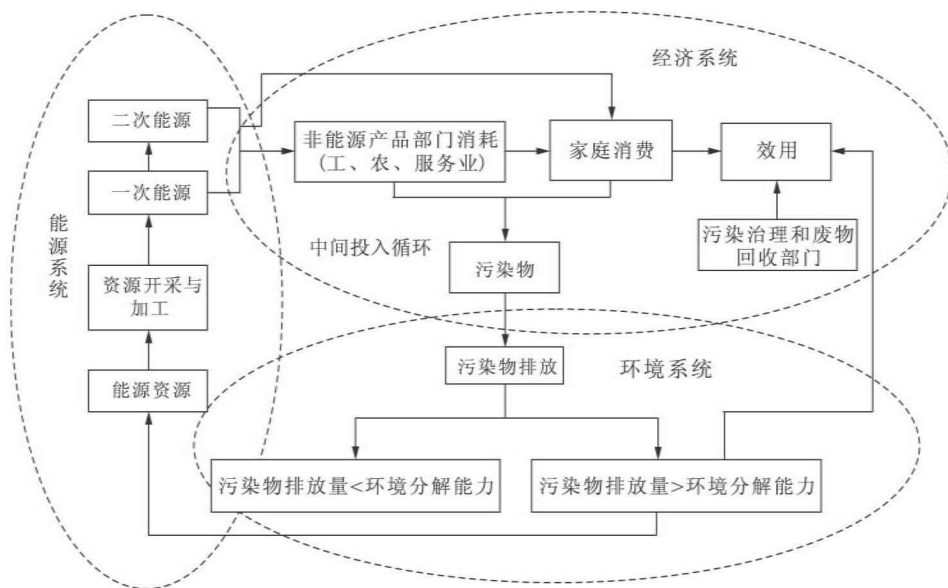


图 1-4 能源-经济-环境系统相互作用示意图

1.2 能源经济与环境系统建模

1.2.1 能源经济与环境系统建模发展历程

对能源系统进行建模的研究始于 20 世纪 70 年代中期,当时,第四次中东战争爆发,国际油价飞涨,能源模型主要用来理解和分析第一次石油禁运带来的影响(Nakata, 2004)。这次石油危机的冲击使人们认识到,要解决能源问题,就必须从长计议。近期看,能源要求的增长必须满足不同程度的经济增长,以及促进迅速增长的全球人口的福利要求。而为这一事业投入的人力和自然资源都是稀缺的。远期看,世界各国必须建立持久的、公平的和有弹性的能源系统,以满足全世界和更遥远的将来全球人口的需求(刘豹等, 1991)。因此,第一次石油危机之后,为应对能源安全问题,学者们开始对能源系统进行建模分析,其中较为著名的是用以计算美国能源部门的均衡价格和数量的 PIES 模型(Project Independence Evaluation System)(Ahn, 1979),该模型以线性规划和计量需求方程为基础。此外,还包括壳牌公司下属的规划情景分析小组提出的能源发展情景模型(Schoemaker 等,

1992),以及对国家能源部门的优化规划模型(Finon, 1974)。

20 世纪 80 年代以来,随着世界能源供应总体平稳,能源供应安全问题有所缓解,而全球气候变暖问题成为决策者们关注的重要议题之一。环境安全与能源供应安全一样成为研究者们关注的重要议题。正如物理模型可以预测二氧化碳增加对气候的影响一样,能源经济模型可以揭示为减少碳排放而采用替代性经济策略对经济和技术的影响。1985 年国际社会《保护臭氧层维也纳公约》的签订,极大地激发了各国能源环境模型的开发与研究,环境模型成为这一时期能源模型的主流,一些著名的能源系统建模工具相继出现,如 MARKAL 模型(Market Allocation)(Fishbone, 1981)、LEAP 模型(Long-range Energy Alternatives Planning)(Raskin, 1986)、AIM 模型(Asian Pacific Integrated Model)(Matsuoka 等, 1995)。

进入 20 世纪 90 年代后,随着发展中国家的经济增长,世界各国的能源需求量逐步增加,能源供应及环境压力加大,为实现可持续发展目标,所关注的焦点已从单一的能源问题转变为多个重点领域(能源经济、能源环境、能源技术、能源安全),能源系统建模也向着能源、经济、环境、技术、安全等多因素和多领域发展,建模方法也从单一建模方法转变为多方法、多模块组合式建模。因此,这一时期的能源模型多为能源-经济-环境模型,如 POLES 模型(Prospective Outlook on Long-term Energy Systems)(Criqui, 1996b)、MESSAGE 模型(Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact)(Messner 等, 1995),以及欧盟开发的 HERMES 模型(Harmonised European Research for Macro Sectorial and Energy Systems)、GEM-E3 模型(General Equilibrium Model for Economy-Energy-Environment)、E3ME 模型(Energy-Environment-Economy Model for Europe)(Henning, 1997)、CGE 模型(Computational General Equilibrium Model)(Nestor 等, 1995),还有混合模型(Mixed Energy Model),如 NEMS 模型(National Energy Modeling Systems)(Gabriel 等, 2001)、IIASA 2W EC E3 模型(IIASA 2W EC Energy Economic Environment)等。

近十多年以来,气候变化已经从一个有争议的科学问题,转化为一个经济、环境、政治甚至是道德问题(Walther 等, 2002; Watson, 2003)。将因人类化石能源消费所带来的温室气体排放问题纳入到能源经济系统建模中,形成气候变化的综合评估模型是其主要特点。

在能源系统研究的发展过程中,斯坦福大学的能源建模论坛(Energy Modeling Forum, 简称 EMF)起到重要的作用。该论坛从 1977 年开始,约每年组织一次全世界的能源系统研究学者研究讨论相关能源经济的重要议题,至 2013 年已成功举办了 31 届,各届主题如表 1-1 所示。

表 1-1 斯坦福能源建模论坛历届研究议题(EMF, 2013)

论坛	议题	论坛	议题
EMF01	能源与经济	EMF17	电力市场重构后的价格和排放
EMF02	煤炭转型	EMF18	气候政策的国际贸易维度
EMF03	电力负荷预测:问题的模型探究	EMF19	气候变化:技术战略与国际贸易
EMF04	能源需求的总弹性	EMF20	天然气、燃料多样性和北美能源市场
EMF05	美国石油与燃气供应	EMF21	多气体减排与气候变化
EMF06	世界石油	EMF22	气候变化控制情景
EMF07	能源冲击的宏观经济影响	EMF23	世界天然气市场和贸易
EMF08	工业能源需求、节约与燃料替代	EMF24	实现气候政策目标的技术战略
EMF09	北美天然气市场	EMF25	能源效率与气候变化减缓
EMF10	电力市场与规划	EMF26	改变游戏? 新型天然气供应带来的排放和市场影响
EMF11	国际石油需求与供应	EMF27	全球模型的比较运用
EMF12	控制全球碳排放:成本与政策选择	EMF28	技术选择对欧盟气候政策的影响
EMF13	能源效率市场	EMF29	边境碳调整在单边候政策中的作用
EMF14	气体变化综合评价	EMF30	短暂的气候驱动因子/空气质量与生物燃料/土地利用模式间的比较
EMF15	电力产业竞争性	EMF31	北美天然气和能源市场转型
EMF16	京都议定书的成本		

从历届会议主题的变化可以看出能源系统建模分析从能源供应安全到能源市场、能源经济评估、碳排放问题再到全球气体变化的研究重点变化。

1.2.2 典型的能源经济与环境系统模型

经过近半个世纪的发展,目前比较成熟的能源经济与环境系统模型多达 40 多个,研究内容涵盖了能源的需求、供应、消费各个领域,各模型在结构、功能、方法上大同小异,因此,难以清楚地界定模型的分类。目前国际上对能源模型还没有比较统一的分类标准。图 1-5 给出了常见的几种划分方法及其有代表性模型的一些特征。



图 1-5 能源经济环境模型的常见分类

研究者们一般按照建模方法的分类来对各类模型进行比较分析,即将其分为自顶向下(Top-down Model)、自底向上(Bottom-up Model)和混合模型(Mixed Energy Model)。下面将对目前应用最为广泛的几种模型进行介绍。

1.2.2.1 MARKAL 模型

MARKAL 模型(Market Allocation)是自底向上模型中应用最为广泛的一种动态线性优化模型,由国际能源署(International Energy Agency,简称 IEA)“能源技术分析体系计划”(Energy Technology System Analysis Program,简称 ET-SAP)领导,通过美国、德国等多国于 1976—1981 年开发设计的(Fishbone 等, 1981)。MARKAL 模型是基于能源、环境、经济的综合模型,以多目标线性规划方式为主的能源系统分析工具,是一个部分均衡模型,主要由能源数据库和线性规划软件组成(Lavagno, 2004)。目前来自 27 个国家的 50 多个机构选择使用 MARKAL 模型对各类能源问题进行研究。对于 MARKAL 模型较早的研究有 Fishbone 和 Abilock (1981)、Berger 等(1991)、Loulou 和 Lavigne (1996)等。通过对能源流动的过程进行线性最优化求解,MARKAL 模型能够在整个能源系统内实现成本贴现值的最小化,这一成本的概念包涵了能源技术在应用过程中产生的各项成本(如投资成本、操作和维护成本等),因此参考该模型进行政策规划能够