

前 言

根据中华人民共和国政府和德意志联邦共和国政府科学技术合作协定，中国国家科学技术委员会主任方毅和西德研究技术部长福尔凯·豪夫，于1979年11月20日在北京签订《关于联合进行能源调研议定书》，决定应用现代科学技术在中国一个地区联合进行能源建设的调查研究。

经国务院批准，这项能源调研在广东省进行，并列入国家重点科研项目。这项能源调研的主要内容是：系统地调研广东省宏观经济（即地区经济，下同）、社会发展、特别是能源经济的历史和现状；预测广东省1981—2000年各个时期宏观经济、社会发展及其能源需求；提出能源供应方案和能源资源开发中、长期规划的建议。通过这次合作，要为制定正确的能源政策提供科学依据，同时努力掌握现代科学技术在能源规划工作中的应用。

在能源调研开始之前，西德研究技术部派出专家，于1980年10月23日—11月22日在广州举办了能源调研培训班，并开始收集和整理有关资料。西德研究技术部委托拉玛亚国际咨询公司为此项合作的执行单位。中方在国家科学技术委员会和广东省人民政府领导下，成立以广东省副省长李建安、叶选平为首的能源调研领导小组，由省科委具体负责日常工作，并设立中、西德合作能源调研办公室，作为这项合作的执行单位。办公室由省的有关委、厅（局）、大专院校、科研、设计等单位 and 清华大学经济管理工程系、中国社会科学院数量技术经济研究所、水电部电力科学研究院动能经济研究所人员参加组成。能源调研工作于1981年9月正式开始：第一阶段，主要是全面进行宏观经济，社会发展、能源生产和消耗、能源资源和工艺等方面的调查研究，进行宏观经济、社会发展及其能源需求预测；第二阶段，主要是建立马尔可夫（MARKAL）能源供应模型，制订能源供应战略计划；第三阶段，主要是对调研结果进行评价，提出有关结论。整个能源调研工作历时一年半，于1983年2月基本结束。

1983年4月，国家科委邀请国内有关专家50余人，在广州召开中、西德合作广东能源模型评议会。会议认为：这项合作在我国首次比较全面地运用现代科学方法开展能源调研和模型工作，为广东省制定今后的能源供应战略和进行能源政策分析提供了有力的手段，并有向全国推广的价值。西德方面提供的MARKAL能源供应模型，是国际上比较先进的模型之一，功能较强，所用OMNI语言也比较先进。宏观经济模型成功地采用了联合国统计局推荐的“推导法”编制广东省投入产出表，并采用计量经济的回归模型与传统计划方法进行比较的办法，取得能源供应模型所需的需求数据，形成了一个能源-经济模型体系的雏形。同时，中方人员对于能源调研的程序、方法和组织管理工作，经过了全过程的实践锻炼，掌握和运用了MARKAL能源供应模型，并编制了广东省宏观经济模型，培训了一支能源调研队伍。两国政府间的这项合作是成功的。

为了向国内介绍这次中、西德合作能源调研的方法和模型技术，现将技术总结的基本内容分为三册陆续出版，内部发行：

第一册：《宏观经济及其能源需求预测》，主要介绍用投入产出法、回归分析法、传统

计划法相结合，以投入产出法为主预测 1981—2000 年各个时期、各个部门的经济和社会发展水平，以及各种能源的需求量。

第二册：《MARKAL 能源供应模型的应用》，主要介绍这种能源供应模型的原理、结构、方法及其特点，各种常规能源经济的分析，计算结果的分析 and 评价。

第三册：《MARKAL 能源供应模型导论与用户指南》（译文）。

本技术总结所用统计资料，有些是估算数，未经有关部门核实，1981—2000 年宏观经济、社会发展、能源需求和能源供应方案，也只是中、西德双方初步预测的结果，请勿引用。

由于时间和水平有限，编写工作存在许多缺点，也难免有错误，敬请各方面批评指正。

译者的话

根据我国政府和联邦德国政府科学技术协定及我国国家科委和联邦德国研究技术部 1979 年 11 月签订的《关于联合进行能源调研协定书》，两国共同对广东省的能源系统进行了调研。我方在与德方合作调研中，翻译了《MARKAL——能源系统分析线性规划模型——第一版导论》（以下简称《导论》）和《MARKAL 用户指南》等资料。

《导论》是 MARKAL 模型的数学描述，它阐述 MARKAL 模型的变量、约束条件和目标函数的技术及经济意义，使读者对能源供应模型——MARKAL 模型的数学表达有一个概括的了解。在使用 MARKAL 模型的过程中，各国的技术人员提出了不少改进意见，促进了 MARKAL 模型的不断完善，促使《MARKAL 能源供应模型用户指南》第一版、第二版、第二版修改版相继问世。由于对《导论》未作相应的修改，因此《导论》和《MARKAL 能源供应模型用户指南》之间不是前后呼应的，矛盾之处应以《MARKAL 能源供应模型用户指南》为准。

《MARKAL 能源供应模型用户指南》是面向用户的使用手册，它以 PDS（问题描述系统）语言为工具，简捷而又精确地描述了 MARKAL 模型的所有向量（变量）和所有关系（约束方程或目标函数）以及编制 MARKAL 模型输入数据，即类和表的方法。使用 MARKAL 模型系统的分析人员可以通过本手册的学习和研究，全面掌握 MARKAL 模型的实质和使用方法。

MARKAL 模型是西方国家在 1976 年以后在能源系统分析领域中的重要研究成果之一，迄今为止已在美国、英国、西德、西班牙，日本等国应用。

MARKAL 模型在不同的计算机上可以采用不同的计算机语言实现。目前我们拥有的 MARKAL 模型软件是采用 OMNI 语言实现的。OMNI 语言具有很强的设计大系统线性规划问题的应用软件的能力，值得在国内推广应用，但这已超出本手册的描述范围了。

本书由吉训仁、姜彦福、郑易生同志翻译。叶焕庭和吉训仁同志分别校对了《导论》和《MARKAL 能源供应模型用户指南》，姜彦福同志对全书作了最后校对。参加翻译工作的还有王岚同志。由于水平所限，错误和不妥之处，切望读者批评指正。

目 录

前言

译者的话

一 MARKAL 能源系统分析线性规划模型第一版导论

1	引言	2
2	MARKAL 模型的功能	4
3	MARKAL 模型的结构	6
3.1	符号说明	6
3.2	变量	7
3.3	生成矩阵系数所需的参数	7
3.3.1	与工艺或资源无关的参数	8
3.3.2	与工艺或资源有关的参数	8
3.3.3	目标函数中与工艺或资源有关的参数	9
3.4	右端	9
3.5	约束	10
3.5.1	能载体平衡	10
3.5.1.1	电量平衡	10
3.5.1.2	低温热平衡	11
3.5.1.3	其他能载体的平衡	11
3.5.2	尖峰负荷发电关系	12
3.5.3	低温供热尖峰负荷关系	13
3.5.4	基负荷关系	14
3.5.5	抽汽式热电机组关系	14
3.5.6	可变产出的加工平衡	15
3.5.7	工艺利用关系	15
3.5.8	容量转移关系	16
3.5.9	需求关系	16
3.5.10	增长约束	17
3.5.11	能载体的累积界限	17
3.5.12	比例关系	17
3.6	目标函数	18
3.6.1	系统的总贴现费用	18
3.6.2	安全函数	20

3.6.3	斜率函数	20
3.6.4	环境函数	20
3.7	线性规划矩阵	21
4	优化结果	22

二 MARKAL 能源系统分析线性规划模型用户指南

(BNL/KFA 第二版修改版)

	概要	26
	前言	27
	二版前言	29
	致谢	30
5	引言	33
5.1	MARKAL 模型概貌	33
5.2	用户指南的结构	35
6	句法描述	36
6.1	类和表(CLASSES 和 TABLES)	36
6.1.1	类	37
6.1.2	类的访问	37
6.1.3	表	37
6.1.4	表的访问	37
6.1.5	构造	38
6.1.6	序数和基数	39
6.2	MARKAL 模型关系说明	39
6.2.1	关系类型	40
6.2.2	数学符号	40
6.2.3	关系的表示	40
6.2.4	条件	41
6.3	线性组合关系	44
6.4	界限集合	44
7	MARKAL 模型类的定义	45
7.1	按字母顺序排列的 MARKAL 类的定义	45
7.2	类的相互关系	49
7.2.1	转换工艺	49
7.2.2	能载体	51
8	MARKAL 向量	53
8.1	(T)(SRC)(ENC)(P)	53
8.2	ZSTK(ENC)(P)	53
8.3	(T) (PRC)ACT	54

8.4	(T)(PRC)(ENC).....	54
8.5	(T)(TCH)CAP.....	54
8.6	(T)(TCH)INV	54
8.7	(T)(CON)(Z)M	55
8.8	(T)(ELA)(Z)(Y)	55
8.9	(T)(CPD)(Z)(Y)H	56
8.10	(T)(HPL)(Z)	56
9	数据输入表.....	57
9.1	概貌介绍	57
9.1.1	单位	58
9.1.2	标准单位	58
9.1.3	数据表	59
9.2	表(ADRATIO)	60
9.3	表 CON(CON)	61
9.4	常数表	63
9.5	表 CPD(CPD)	67
9.6	表 DM(DM)	69
9.7	表 DMD (DMD)	70
9.8	表 ENV (ENV)	71
9.9	表 NEWTCH(KFA 不用).....	72
9.10	表 PEAK	73
9.11	表 PEAKDA.....	74
9.12	表 PRC(PRC)	74
9.13	表 REACTORS	77
9.14	表(SRC)(ENC)(P)	77
9.15	表 STRATEGY	81
9.16	表 TCH(TCH)	89
9.17	表 UNITS 和表 DECIMALS	94
10	关系和函数.....	98
10.1	关系和函数表.....	98
10.2	如何阅读关系和函数的说明.....	99
10.3	关系和函数说明.....	100
	参考文献.....	151
	附录 MARKAL 类和数据表的例子.....	153

—

M A R K A L

能源系统分析线性规划模型

第 一 版 导 论

Leslie G. Fishbone

Günter Giesen

Heinz Vos

1 引言

自 1976 年起,十七个国家和两个国际组织* (国际事务办公室, 1976) 以美国布鲁克海文国家实验室 (BNL) 和西德于利希核研究中心 (KFA) 为核心致力于能源系统规划协作, 其基本目的是评价各参加国能源系统中新工艺的潜在作用, 从而提出当前研究和发展的课题。为了进行这种评价, 建立一个多周期的线性规划 (LP) 模型——MARKAL (“市场分配” 的字头) 模型。这项工作的许多成果用于比利时 (Altdorfer, 1980)、爱尔兰 (Kavanagh 和 Brady, 1980)、挪威 (Sira 和 EK, 1980)、瑞典 (Bergendahl, 1980; Bergendahl 和 Bergsfröm, 1981) 和联合王国 (Finnis, 1980), 很快还将用于美国 (Hill, Sailor 和 Fishbone, 1981)。

过去有两个 MARKAL 模型文本, 一个在 BNL (见 Fishbone 和 Abilock, 1980), 另一个在 KFA (见 Egberts, 1980 和 Giesen、Hymmen 和 Leimkühler, 1980)。在这本模型说明中, 我们将介绍现在 BNL 和 KFA 所用的公共版 I。

特别要指出, MARKAL 模型是用来帮助了解一个国家的能源系统将来可能的状况的 (Sailor 和 Rath-Nagel 1980 和 Kydes, 1980):

- 现有的和新的能源工艺, 新能源在满足将来的有用能需求方面的吸引力;
- 引用新工艺、新能源的时间和投资费用以及何时减少使用现有能源、特别是减少使用进口石油;
- 以系统费用、进口石油数量、核能、再生能源和化石资源的作用大小作为准则, 分析未来能源系统对不同的目标和目标调整的敏感性;
- 节能和改进技术效率对能源系统的长期影响。

MARKAL 模型是在 BNL 的两个能源模型——BESOM (Hoffmann, 1973) 和 DESOM (Marcuse 和 Cherniavsky, Juang 和 Abilock, 1979) 的基础上直接发展起来的。人们已用这两个模型帮助制定美国能源的研究和发展政策 (见美国能源研究和发展署, 1975), 同时也用它帮助构成 KFA 的能源模型。MARKAL 模型和 DESOM 模型极为相似。几位作者 (Hoffmann 和 Wood, 1976; Brock 和 Nesbitt, 1977; Kydes, 1978; Charles 河流联合公司, 1979; Manne, Richels 和 Weyant, 1979; 以及 Greenberger 和 Richels, 1979)**对早期的 BNL 的能源模型文本做了审核。简单说,

* 参加国有: 澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、丹麦、德意志联邦共和国、爱尔兰、意大利、日本、荷兰、新西兰、挪威、西班牙、瑞典、瑞士、英国和美国, 欧洲共同体亦为其成员。由于国际能源协会 (IEA) 领导这项工作, 所以也叫 “IEA 规划”。

** 有关使用 MARKAL 模型的问题, 请问美国 BNL 的规划董事 D·HILL 和西德 KFA 的 st. Rath-Nagel。

MARKAL 模型的主要特征 (根据 Kydes, 1978 和 1980 所做的部分比较) 有:

- 很强的多目标分析功能;
- 公式灵活、并可使问题的大小恰到好处;
- 改进了计划的以及非计划的工厂退役的表达方式;
- 改进了燃料加工的表示, 考虑了周期间燃料的滞后利用以及各种燃料的库存;
- 详细考虑了热电联产的构模;
- MARKAL 模型对输入数据可自动进行数据处理;
- 自始至终考虑了残值;
- 对某些精炼工艺, 可由模型选择各种联产品;
- 可利用系数的季节变化, 改善了对水电和抽水蓄能的构模;
- 最多有十六个时间周期。

从基本原理说, MARKAL 模型是严格的部门能源模型, 它和国民经济其他部门的联系主要是通过外生的有用能源需求来建立的, 模型和经济之间没有象投入产出分析那样的联系。能源和工艺费用数据仅在敏感分析研究中才变化, 而这种变化与需求水平是没有关系的。我们认为, 这一简单道理提供了一种评价新工艺潜力的好方法, 特别是用不确定参数表示新工艺的特性时, 更是如此。一言以蔽之, 这样新工艺就可和另一些工艺竞争以满足固定的有用能需求。

另一方面, 作为一个纯粹的能源部门模型, MARKAL 模型没有内生的经济模型, 没有地区的分布细节, 也没有考虑实际市场的许多因素, 它和其前身 DESOM 模型一样, 要用它制订详细的电力规划是不行的 (Patmore, 1978)。

有了数学模型, 就有验证它是否有效的问题 (Gass, 1977, Greenberger 和 Richards, 1979)。MARKAL 模型的前身 (第一版) 是由几个国家约四十人编制的, 并投入了使用。在分析各国的能源系统时, 通过详细了解模型的使用, 许多人都接受了模型的运算结果。目前 BNL 和 KFA 正在对新的 MARKAL (第一版) 进行验证, 同时也在几个国家投入了使用, 我们认为 MARKAL 模型确实做了我们想干的事情, 此外它还给出了各能源部门的经济情况的有效说明。

2 MARKAL 模型的功能

MARKAL 模型是一个受需求驱动的多周期的能源供应和需求的线性规划模型。它的意图是用于国家一级的能源系统。MARKAL 模型本质上是用外生提供的有用能需求来确定满足该需求的最佳能源供应以及使用终端设备网络（见 Beller, 1975）。可行解必须满足每一周期的需求。最优解的确切性质既依赖于优化的判别准则，同时也依赖于用户在描述国家的能源工艺时给出的工艺和经济数据或其估计值。

图 1 是用 MARKAL 模型构模的一个周期的普通类能源工艺和资源的能流图^①，其中最重要的有：

- 能载体，如一次及二次燃料；
- 加工工艺，它将一种能载体变为另一种能载体；
- 转换工艺，它生产电能或地区供热，或两者都生产；
- 需求设备，它将某种形式的能变成有用的服务，如运输。

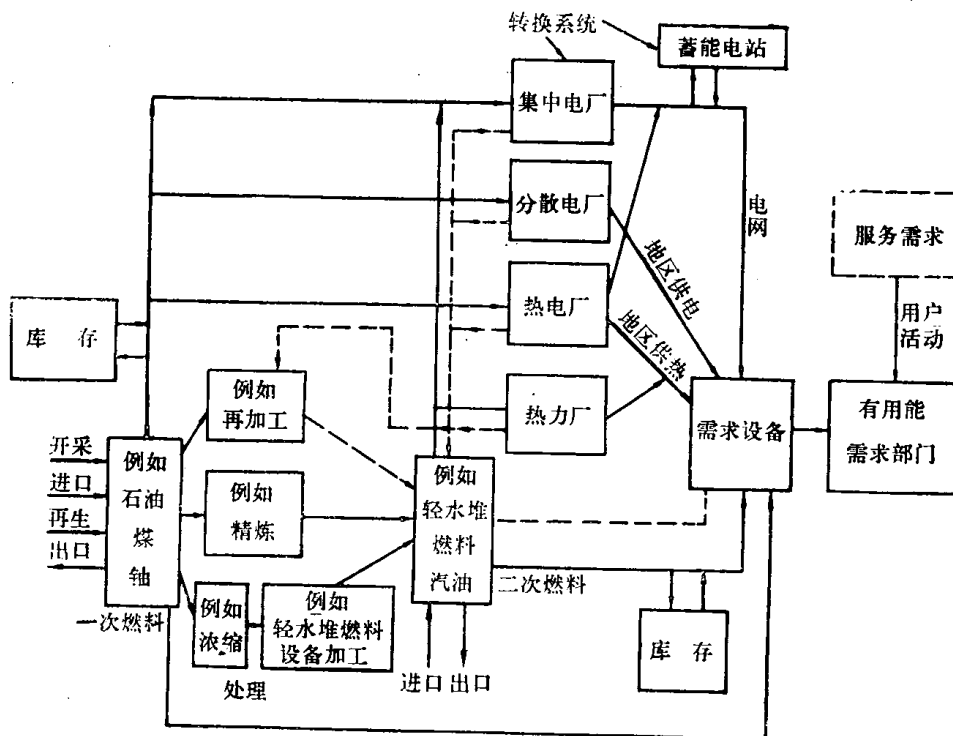


图 1 MARKAL 模型年能流图（经 V.L.Sailor 修改）

此图描绘了工艺（加工工艺 π 、转换系统 k ，需求设备 δ ）和能载体（一次和二次燃料、电力、低温供热）。

只要资料允许，用户可以提供诸如此类的更多的成员。例如为需求设备类列出多种家用

^① 译者注：有关“类”的概念请看《MARKAL》能源供应模型用户指南》第六章。

暖气和隔热设备并给出有关参数。用户可以详细地列出一国能源系统民用部门的各种选择方案 (Bergendahl, 1980)。这种灵活性还表现在模型的周期数和每一周期的年数; 虽然 IEA 规划只做 9 个周期, 每周期 5 年, 但这个模型可以处理 1~16 个周期, 每周期年数可任意取, 但各周期的年数应相等。

图 2 是美国在进行 IEA 规划时在模型中核燃料循环利用的部分情况 (Hill, Sailor 和 Fishbone, 1980)。这里极为重要的是 MARKAL 模型具有处理延迟燃料流的能力。

此图亦是图 1 的供应端的一部分, 应当注意某些流的先导和滞后时间; 对加工和转换系统, 可以有一个周期的提前或延迟。

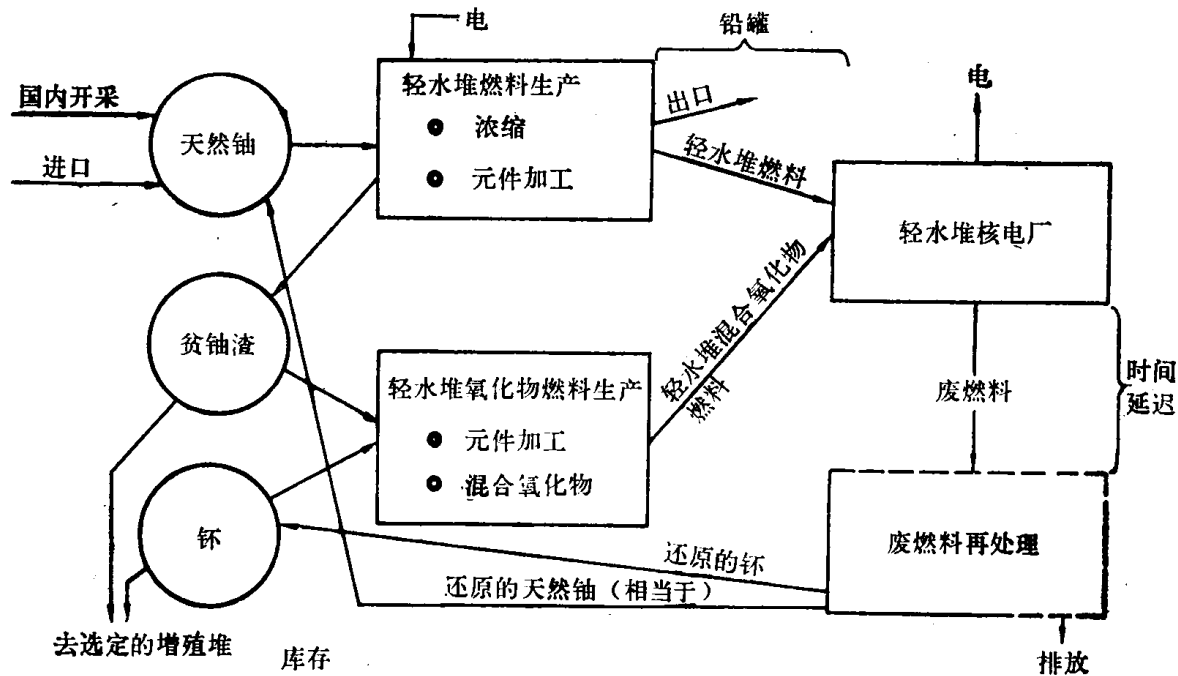


图 2 美国能源系统 IEA 规划核燃料循环的 MARKAL 模型能流图
(此图经 V.L.Sailor 同意发表)

MARKAL 模型所要的数据, 有技术方面的, 经济方面的, 也有政策方面的。一般说, 对每一个能载体以及每一个可用周期, 用户必须提供下列信息: 资源费用、第一个可用周期、安全的权重值 (Security Weight)。对于每一个加工工艺, 每一个转换系统以及需求设备, 需要的数据有: 寿命, 第一个可用周期, 可用系数、能源转换效率、投资费用以及固定的和可变的运行维护费用。使用能载体的最小、最大界限是可以选择的; 同样, 加工工艺、转换系统以及需求设备的最大、最小容量也是可以选择的。由于 IEA 规划的目的是现实地评价新能源工艺的优缺点, 因此, 刻划其可能的工艺特性和经济特性也是模型最重要的一部分 (Sailor, 1979; Manthey, 1980 以及 Manthey 和 Tosato, 1980)。

MARKAL 模型的优化过程在本质上是同时对整个能源网络和全部时间周期寻找诸如图 1 的最佳图^①。另一个 BNL 模型 (Kydes 和 Rabinowitz, 1979) 一次优化几个周期, 实际上是用不同的方式展望未来 (Kydes, 1980)。

① 译注: 原文为“寻找诸如图 2 的最佳图”, 疑系笔误。

3 MARKAL 模型的结构

MARKAL 模型是一个化成一般形式的线性规划问题的模型 (见 Dantzig, 1963):

$$\text{求最小值} \quad \sum_i c_i x_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\text{使满足} \quad \sum_i a_{ji} x_i \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} b_j \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$\text{和} \quad x_i \geq 0$$

目标函数的系数 c_i 、系数 a_{ji} 和右端项 b_j 是已知参数。变量 x_i 是待求的未知量, 即规划问题的解。变量的个数是 n , 约束的个数是 m 。

在以下各段中, 我们将阐述模型中的变量和构成系数的参数的含义以及和这些系数及变量有关的目标函数与约束方程的实质。我们要强调, 这些说明尽管详细但并非详尽无遗。它体现的是模型的概念性的特征, 而不是那些 (虽然有用) 不大要紧的技术性问题。

要知道全部说明, 必须参阅 MARKAL 能源供应模型用户指南 (即本书第二篇)。

3.1 符号说明

解释数学关系前, 先要说明一下模型中使用的符号, 下面包括模型中所用的各种符号, 每个符号的数值须由用户给定。

t —— 时间周期 (t 从 1 到 T , 这里 T 代表模型最后一个周期);

z —— 季节 (即夏季、冬季和中间季节);

y —— 昼夜符号 (即白天和夜晚);

f —— 能载体 (如: 燃料、电、低温热等);

另有一个符号考虑了能载体供应费用的变化, 但本文中没有使用。 f_a 和 f_s 也用作能载体符号, 例如在一项中有两个不同的能载体时, 就须使用它们);

s —— 能载体来源 (如国内开采、库存、再生、进口或能载体的出口);

d —— 需求部门 (如民用采暖);

r —— 工艺

又分为:

k —— 转换工艺 (如转换成电能或低温热能或二者兼有。转换活动一般随季节和昼夜的变化而变化);

π —— 加工工艺 (活动不随季节、昼夜变化的工艺);

δ —— 需求工艺 (把能载体转换成满足外生给定的有用能需求)。

在下面的数学表达式中, 把这些符号放在括弧内 (这是诸如 FORTRAN 之类的程序设计语言使用的一种技术) 这样写公式时困难就少些。

3.2 变 量

全部变量是求解线性规划问题必须确定的未知数的集合。

MARKAL 模型中有 7 组变量, 根据符号的多样性, 每组变量又都具有多个变量。如无另外说明, 这些变量都指的是年值:

$R(t, f, s)$

表示在 t 周期内来源于 s 的能载体 (燃料) f 的流量。当 s 指库存时, R 就是 t 周期可以从上一周期得到的可用量; 只有 R 包括了规划周期末的库存时, 才能取 $T+1$ 。

$S(t, \tau)$

表示在周期 t 内工艺 τ 的可以利用的装机容量, 以年能量为单位给出。

$A(t, \tau)$

工艺 τ 在 t 周期之初的新增容量, 以年能量为单位, 可在工艺寿命期内使用。

$P(t, \pi)$

表示在周期 t 内, 加工工艺 π 把能载体从一种形式加工成另外几种形式的年活动量。通过加工工艺的能流是 $P(t, \pi)$ 与投入 (或产出) 系数的乘积。

$P(t, \pi, f)$

表示在周期 t 中, 加工工艺 π 每年产出的燃料 f 的数量。这个与 (具体) 燃料有关的产出能载体取代与具体燃料无关的产出活动量 $P(t, \pi)$, 因而线性规划能够选择联产品。

$E(t, z, y, k)$

表示在周期 t 、季节 z 的昼夜 y 、电厂 k 每年生产的电量。基荷电站不受昼夜影响。而所有蓄能电站夜间都不发电。背压式热电机组产出的热量正比于它产出的电量 (见图 4)。

$H(t, z, y, k)$

表示在 t 周期、季节 z 的昼夜 y 、抽气式热电机组 k 每年产出的热量。电与热不是按比例产出的。

$H(t, z, k)$

代表 t 周期、每年 z 季节纯热力厂 k 产出的热量。

$M(t, z, k)$

代表 t 周期、每年 z 季节内转换工艺 k 的计划检修 (计划检修和强迫停机代表不能用于生产的不可用容量) 容量。

如果适当选择工艺的可用系数, 那么计划检修的安排也成为线性规划所要求解的问题之一。

3.3 生成矩阵系数所需的参数

要计算模型所需的系数, 需要知道三类参数。第一类包括与工艺、资源有关的参数, 但这些参数不牵涉到目标函数; 第二类包括与工艺、资源无关的常数; 第三类参数包括与工艺或资源有关的参数, 但这些参数仅用以定义各种不同的目标函数。

3.3.1 与工艺或资源无关的参数

模型的关系中具有若干与工艺及资源无关的参数:

n ——每一周期的年数。

$\xi(z, y)$ ——季节 z 的白天与夜晚占全年时间的比例。MARKAL 的用户把一年时间分成六部分(夏季、冬季、中间季节、白天、夜晚), 以此精确划分系统的电、热需求负荷。

$\xi(z, y, d)$ ——需求部门 d 每年在季节 z 的白天与夜晚 y 的能载体需求量(包括电力和低温供热)与全年需求量之比。

$\lambda(d)$ ——即 $\max[\xi(z, y, d)/\xi(z, y)]$, 它是需求部门 d 在最大需求量时段计算该部门的需求系数。在 MARKAL 模型(第 I 版)中, 近似地假定需求装置的容量必须满足需求量与系数 $\lambda(d)$ 的乘积。做这种假定的原因是因为模型没有明确地给出需求设备的活动量。

$e_H(z)$ ——与季节有关的低温供热分配效率。

m_e ——电力部门的备用容量与具有最大负荷的那个时段的平均电力需求之比。

b ——基荷电站夜间发电量占夜间整个发电量的最大比例。

m_h ——低温供热部门的备用容量与具有最大负荷的那个时段的平均热能需求容量之比。

r ——年贴现率。

σ ——增长参数, 用以计算每年总投资的允许增长。

q ——费用-安全折衷参数, 用来确定某一目标函数。

3.3.2 与工艺或资源有关的参数

除了模型本身外, 还有大量与工艺或资源有关的技术、经济参数, 用以表征给定的问题。的确, 以统一方式汇编这些参数(Sailor, 1979; Manthey, 1980; Manthey 和 Tosate, 1980。)曾是 IEA 规划的主要任务之一。线性规划矩阵的元素就是这些参数的某种组合。

这些与工艺或资源有关但不用于目标函数的参数有:

$i(t, f_D, f, s)$ ——每生产一单位能载体 f (来源于 s) 所需的能载体 f_D 的数量。

$e(f)$ ——能载体 f 的传输效率。

$i_i(f, \pi)$ ——加工工艺 π 每增加单位容量所需能载体 f 的量。

$i(t, f, \pi)$ ——投入加工工艺 π 的能载体 f 的投入系数。

$i_-(t, f, \pi)$ ——加工工艺 π 在 t 周期的活动所需 $t-1$ 周期的能载体 f 的投入系数。

$o(t, f, \pi)$ ——产自加工工艺 π 的能载体 f 的产出系数。

$o_+(t, f, \pi)$ ——加工工艺 π 在 t 周期生产而在 $t+1$ 周期才能使用的能载体 f 的产出系数;

$e(t, \pi)$ ——加工工艺 π 的综合效率。

$a(t, \pi)$ ——加工工艺 π 的可用系数。

$i_i(f, k)$ ——转换工艺 k 每增加单位容量所需能载体 f 的数量。

$i(t, f, k)$ ——转换工艺 k 中能载体 f 的投入系数。

$i_-(t, f, k)$ ——转换工艺 k 在 t 周期的活动所需 $t-1$ 周期的能载体 f 的投入系数。

$o(t, f, k)$ ——转换工艺 k 的副产品燃料 f 的产出系数。
 $o_+(t, f, k)$ ——转换工艺 k 在 t 周期生产的但延迟到下一周期使用的副产品燃料 f 的产出系数。
 $\phi(k)$ ——抽气式热电机组 k 的电力损失极限（小数）。
 $h(k)$ ——背压式热电机组 k 产出的电与热的比例。
 $h(t, z, y, k)$ ——抽气式热电机组 k 由于产热所招致的电量减少量与产热量之比。
 $e_E(k)$ ——转换工艺 k 的输电效率。
 $e_H(z, y, k)$ ——转换工艺 k 与各季、日有关的热传输效率（热力厂无输热损失）。
 $k(t, k)$ ——转换工艺 k 可用于电力峰荷时段发电的容量占工艺 k 全部容量的百分数。
 $a(t, k)$ ——转换工艺 k 的可用系数。
 $p_{Fo}(k)$ ——转换工艺 k 强迫停机的时间与全部停机时间（包括计划停机与强迫停机）之比。
 $i(t, f, \delta)$ ——在 t 周期内，投入到需求工艺 δ 的能载体 f 的市场分配（份额）。
 $o(t, f, \delta)$ ——在 t 周期，需求工艺 δ 的能载体 f 的产出系数。
 $o_{DM}(t, d, \delta)$ ——在 t 周期，需求工艺 δ 的产出供应需求部门 d 的部分占工艺 δ 的全部产出的百分数。
 $l(\tau)$ ——工艺 τ 的寿命（按周期算）。

3.3.3 目标函数中与工艺或资源有关的参数

最后，我们给出费用、安全权重值以及环境参数，以使目标函数参数化。

$c_R(t, f, s)$ ——来源于 s 的单位能载体 f 的费用。
 $c_s(t, \tau)$ ——取决于工艺 τ 之容量的运行维护费用。
 $c_P(t, \pi)$ ——与活动有关的加工工艺 π 的可变运行维护费用。
 $c_D(t, f, \tau)$ ——工艺 τ 的单位能载体的输送费用。
 $c_D(t, f_D, f, s)$ ——与来源于 s 的能载体 f 的供应有关的单位能载体 f_D 的输送费用。
 $c_E(t, k)$ ——与生产有关的电力转换工艺 k 的可变运行维护费用。
 $c_H(t, k)$ ——与生产有关的纯热力转换工艺 k 的可变运行维护费用。
 $c_{TE}(k)$ ——与电力生产有关的转换工艺 k 的输配电费用。
 $c_{TH}(k)$ ——与低温热能生产有关的转换工艺 k 的传输费用。
 $c_A(t, \tau)$ ——工艺 τ 的单位投资费用（包括输配系统的投资费用）。
 $\psi(t, f, s)$ ——来源于 s 的能载体 f （不包括电力和热能）的安全权重值。
 $w_a(t, f, s, v)$ ——在 t 周期，来源于 s 的单位能载体的 f 环境污染物 v 的量。
 $w_i(t, \tau, v)$ ——在 t 周期，工艺 τ 的单位投资的环境污染物 v 的量。
 $w_a(t, \tau, v)$ ——在 t 周期，工艺 τ 的单位活动的环境污染物 v 的量。
 $w_c(t, \tau, v)$ ——在 t 周期，工艺 τ 的单位容量的环境污染物 v 的量。

3.4 右端

右端（如果它们不是零）如下：

$D(t, d)$ ——需求部门 d 的有用能源需求。

$R_c(f, s, j)$ ——在整个规划期中，能源系统可以使用且来源于 s (下标为 j) 的能载体 f 的累积量。

$S_R(t, \tau)$ ——在规划期之初可以使用的工艺 τ 之逐步退役后的残余容量，即不再需要投资费用的装机容量。

$R_0(f, s)$ ——用户对来源于 s 的能载体 f 规定的增长极限。

$S_0(\tau)$ ——用户对工艺 τ 规定的增长极限。

$N(t)$ ——用户提供的比例关系值。

3.5 约 束

MARKAL 模型的核心是由用户所提供的参数生成关系集合——等式或不等式。现在我们介绍这些关系。本文暂且撇开技术上的问题不谈，这些关系式包括了符号的各种可能的取值。对某个特定符号来说，关系式中可能没有该特定项。我们先讨论约束。请注意，几乎全部关系都是不等式（虽然很多关系都可写成等式）。这样做有助于 LP 的求解算法，因为优化程序本身将消去大部分不必要的松弛变量。

3.5.1 能载体平衡

有三类能载体“平衡”（不等式），它们保证能源系统每种能载体的年消费量小于系统可用量。第一类能载体平衡用于电力的生产和消费，第二类能载体平衡用于低温热能的生产 and 消费，而第三类平衡用于其他所有能载体（一般指燃料）的生产和消费。

3.5.1.1 电量平衡

电量由两个关系予以平衡。它们要求白天和夜晚的生产大于(或等于)消费。夜间的电量平衡关系如下：

$ \begin{aligned} & \sum_{k \in \{\text{蓄能}\}} e_E(k) \cdot E(t, z, y = \text{夜间}, k) \\ & - \sum_{\substack{k \in \{\text{蓄能}\} \\ f = \text{电}}} e_E(k) \cdot i(t, f, k) \cdot E(t, y = \text{白天}, z, k) \\ & - \xi(z, y = \text{夜间}) \cdot \sum_{f, s} i(t, f_D = \text{电}, f, s) \cdot R(t, f, s) \\ & - \xi(z, y = \text{夜间}) \cdot \sum_{f = \text{电}} [i(t, f, \pi) \cdot P(t, \pi) + i_-(t+1, f, \pi) \\ & \quad \cdot P(t+1, \pi)] \\ & - \sum_d [[\xi(z, y = \text{夜间}, d) / \lambda(d)] \cdot \sum_{f = \text{电}} [O_{DM}(t, d, \delta) \cdot i(t, f, \delta) / e(t, \delta)] \\ & \quad \cdot S(t, \delta)] \\ & \geq 0 \end{aligned} $	<u>电力生产</u> 转换系统的发电。 <u>耗 电</u> 蓄能工艺耗电。 资源的耗电。 加工工艺（当即周期和延迟一个周期）的耗电。 需求装置的耗电 <u>右 端</u>
--	---

对每一周期 t 的每一季节 z 都成立。

为了简化起见, 这里未对电力的进出口构模予以介绍, 对夜晚蓄能的加工工艺和需求工艺的电力消耗亦不作直接说明。

白天的电量平衡如下:

$$\sum_k e_E(k) \cdot E(t, z, y = \text{白天}, k)$$

$$- \xi(z, y = \text{白天}) \cdot \sum_{f,s} i(t, f_D = \text{电}, f, s) \cdot R(t, f, s)$$

$$- \xi(z, y = \text{白天}) \cdot \sum_{f=\text{电}} [i(t, f, \pi) \cdot P(t, \pi) + i_-(t+1, f, \pi) \cdot P(t+1, \pi)]$$

$$- \sum_d [[\xi(z, y = \text{白天}, d) / \lambda(d)] \cdot \sum_{\substack{\delta \\ f=\text{电}}} [O_{DM}(t, d, \delta) \cdot i(t, f, d) / e(t, \delta)] \cdot S(t, \delta)]$$

$$\geq 0$$

对每一周期 t 的每一季节 z 都成立。

3.5.1.2 低温热平衡

低温热能仅有季节平衡, 但包括三类工厂的生产:

$$\sum_{k \in \{\text{热力厂}\}} H(t, z, k)$$

$$+ \sum_{\substack{k \in \{\text{抽汽式热电机组}\} \\ y}} e_H(z, y, k) \cdot H(t, z, y, k)$$

$$- \sum_d [[\sum_y \xi(z, y, d) / [e_H(z) \cdot \lambda(d)]] \cdot \sum_{\substack{\delta \\ f=\text{热}}} [O_{DM}(t, d, \delta) \cdot i(t, f, \delta) / e(t, \delta)] \cdot S(t, \delta)]$$

$$\geq 0$$

对每个周期 t 的每个季节 z 都成立。

3.5.1.3 其它能载体的平衡

模型中最多的关系大概就是能载体(燃料)平衡。除了电力和低温供热以外, 这些平衡关系还适用于各种能载体。为了满足需求, 燃料的生产至少要等于消费。一般说来, 线性规划绝对不会产生多余的东西, 除非生产关键燃料时不可避免地生产了价值不大的副产品。各种燃料在各周期所采用的关系如下:

$$R(t, f, s = \text{开采}) \cdot e(f)$$

$$+ R(t, f, s = \text{进口}) \cdot e(f)$$

$$- R(t, f, s = \text{出口})$$

电力生产

转换工艺的发电。

耗电

资源耗电。

加工工艺(当即周期和延迟一个周期)的耗电。

需求装置耗电。

右端

低温热能生产

热力厂。

抽汽式热电机组。

低温热能消耗

需求装置

右端

资源流

国内开采;

进口;

出口;