



基于解释结构模型的能源需求影响因素分析

王敬敏, 康俊杰

(华北电力大学 经济与管理学院, 河北 保定 071003)

摘要: 能源需求系统不仅受能源系统内部各种因素的影响, 还受经济发展、社会自然环境、人口因素、技术进步等诸多因素的影响, 是一个典型的非线性系统, 各种影响因素之间的关系非常复杂。利用解释结构建模方法对影响能源需求的各种因素进行分析, 理清能源需求产生变化的各层次原因, 总结影响能源需求的表面因素、中间因素、核心因素和源头因素。分析表明, 影响能源需求变化的直接因素包括能源消费结构、能源利用效率、人口因素、城镇化水平和居民生活水平, 核心因素是经济发展水平, 而源头因素可分为国际经济形势、各种相关政策和重大活动三大类。

关键词: 能源需求; 影响因素; 解释结构模型

中图分类号: TK01

文献标志码: A

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.201607096

0 引言

能源是经济社会发展与人民生活的重要物质保障, 包括原煤和原油及其制品、天然气、电力及各类可再生能源。随着中国经济的快速发展, 对各类能源的需求也越来越高, 同时化石能源储量及环境因素的制约以及各种新能源技术的快速发展, 迫切需要更为完善的能源系统规划和能源调度方案。能源需求分析与预测是各类能源系统规划和调度的基础, 其中能源需求影响因素分析是能源研究的起点。除了系统内部各种因素的影响, 能源需求也受经济发展状况、社会环境、自然环境、人口因素、技术进步等诸多因素的影响, 是一个典型的非线性系统, 各种因素相互影响, 如何采用系统分析方法, 理清能源需求影响因素之间的关系非常重要。

目前国内外学者的相关研究主要集中在预测方法的改进和创新、单一能源的预测与调度, 关于深层次原因与能源需求变化背后影响因素的关系研究较少。文献[1]采用支持向量回归机模型预测中国能源需求量, 支持向量机对数据样本较小的非参数估计问题有着一定的优势, 在预测模型

中输入部分(能源需求影响因素)总结为经济增长、城市化、能源消费结构、产业结构、技术进步、人口、居民生活消费水平7个部分。文献[2]基于投入产出法对能源需求量和能源强度问题进行研究, 在不同的情景分析中考虑了人口、城市化水平、居民消费模式、技术进步、人均收入等因素, 其中技术进步对能源强度影响最大, 人口和收入因素对能源消费的影响最大。文献[3]采用了粒子群优化算法, 选取经济增长、总人口、产业结构(第二产业占GDP的比重)、城市化率、能源结构(煤炭消费占一次能源消费的比重)、技术进步(能源效率)6个因素作为能源需求预测的输入变量。文献[4]采用了自回归的时间序列模型, 对中国的电力需求进行了预测, 将电力消费分解为居民生活、农业、工业、建筑业和服务业用电5个部分, 分别构建了不同的需求方程, 最后进行加总。文献[5]采用小波分析模型对中国煤炭需求情况进行了波动分析, 认为煤炭需求的长期波动主要与经济发展有关, 同时受电力需求的季节性波动而呈现出一定的季节周期。

本文利用解释结构建模方法对能源需求影响因素进行分析, 首先找到系统因素集, 明确各因

收稿日期: 2016-07-12

基金项目: 北京社科基金项目(京津冀产业协同下的能源效率提升策略研究)(15JGB050); 河北省软科学项目(16454302D)

作者简介: 王敬敏(1955—), 女, 河北安国人, 教授, 博士生导师, 从事电力市场与需求侧管理、能源规划与能源管理研究。E-mail: 405395600@qq.com



素之间的二元关系并建立邻接矩阵，之后通过矩阵的推移率特性，得到表示因素间传递关系的可达矩阵，绘制有向连接图来表示影响因素之间的递阶层次关系，理清能源需求产生变化的各层次原因，为能源需求分析提供依据。

1 解释结构模型建模步骤

解释结构建模(interpretative structural modeling, ISM)将复杂系统分解为若干子系统，以分析构成复杂系统的大量元素之间的因果、大小、相关性等关系，并最终将复杂系统表示为多级递阶的层次结构模型。

解释结构模型在系统工程中发挥着重要作用，是从概念模型过渡到定量模型的中间部分，在难以直接量化的系统中有着广泛的应用，已成功应用于风险管理^[7]、电力需求^[8]等领域，其建模步骤如下。

(1) 确定系统因素集。收集系统相关的各构成因素，并对其进行分类和整理，构成一个含有 n 个元素的集合，确定为系统因素集 S ，记为

$$S=\{r_i|(i=1, 2, \dots, n)\} \quad (1)$$

(2) 建立知识模型。将系统因素集中的每一个元素与其他 $(n-1)$ 个元素进行关联，判断之间是否存在直接二元关系，其直接二元关系可表示为

$$a_{ij}=\begin{cases} 1 & (S_i \text{ 对 } S_j \text{ 有影响}) \\ 0 & (S_i \text{ 对 } S_j \text{ 无影响}) \end{cases} \quad (2)$$

(3) 形成邻接矩阵。将所有直接二元关系进行排列，得到一个 n 阶的矩阵，这个矩阵被称为邻接矩阵 A ，表示为 $A=(a_{ij})_{M \times N}$ 。

(4) 计算可达矩阵。邻接矩阵是元素间的直接二元关系，经过传递某些元素之间可能会建立起间接的影响关系，找出所有的间接传递关系，得到可达矩阵 M ，其计算公式为

$$(A+I) \neq (A+I)^2 \neq \dots \neq (A+I)^m = (A+I)^{m+1} = M \quad (3)$$

依据布尔代数运算法则，邻接矩阵 A 首先加上单位矩阵 I ，然后进行自乘，当自乘结果不会再发生改变时，此时得到的矩阵 M 即为可达矩阵。

(5) 递阶层次划分。找到所有元素的可达集 P 和前因集 Q ，如果 $P(r_i) \cap Q(r_i) = P(r_i)$ ，这个元素为高层元素，满足该条件的元素为同一层次，以此类推，得到不同的递阶层次。

(6) 生成层次结构图。递阶层次划分完成后，

绘制有向连接图，可以直观明了表示系统的层次结构。

2 能源需求影响因素的 ISM 模型

2.1 确定能源需求影响因素集并建立知识模型

能源需求系统是一个复杂系统，变量多并且非线性，受到经济发展环境、社会自然环境、人口因素、技术进步等诸多因素的影响。本节首先通过文献检索法，结合国内外相关的研究成果，收集能够对能源需求产生影响的因素，之后通过专家咨询法，确定影响因素集并明确其中各影响因素之间的直接二元关系。

文献[9]对美国能源消费与经济发展之间的关系进行了研究，首次发现 GDP 与能源消费之间存在着因果关系，之后各国相关学者在区域和国家层面上对能源消费与经济增长之间的因果关系进行了广泛的实证研究。文献[10]立足中国国家层面，对能源消费与经济增长之间的关系进行了协整检验和因果分析，并得到中国 GDP 增长与能源消费之间存在着双向的因果关系，但二者之间不具有长期的协整性。文献[11]利用能源库兹涅茨曲线模型研究了中国的能源消费和 GDP 增长之间的动态关系，结果表明中国能源消费和经济增长之间呈现先倒 U 型后正 U 型(总体 N 型)的趋势。大量研究表明，经济增长是影响能源消费增加最重要的因素，但并不是唯一的因素。2007 年，中国发布《中国的能源状况与政策》白皮书，其中提到，在中国总的能源资源相对丰富，但分布不均匀、开采难度大，能源供应在一定程度上对能源消费形成约束，能源供需矛盾突出，能源消费结构不合理、能源利用效率低、能源技术装备落后等原因进一步加剧了此矛盾；在中国煤炭消费占了能源总消费的七成左右，环境保护压力大，需要积极促进能源与环境协调发展；加强提高能源效率的各项前沿技术和关键技术的研究，提升能源装备水平；深化能源体制改革，充分发挥市场的作用，鼓励各种经济要素进入能源领域，合理配置资源，推动能源价格体制改革；加强能源领域的国际合作，营造出一个公平开放的外商投资环境。综合以上国内外学者的研究成果，确定能源需求影响因素集包括能源需求、经济发展水平、产业结构、财政和货币政策、人口、城镇化水平、



居民生活水平、重大活动、技术进步、研发投入、全社会投资、国际经济形势、外商投资与国际贸易、能源消费结构、能源利用效率、能源供给、能源价格、能源政策、环保政策等 19 项影响因素。

在确定了影响因素集之后，对影响因素进行描述，并且通过专家咨询和头脑风暴法，建立知识模型，得到能源需求影响因素之间的相关关系，如表 1 所示。

2.2 邻接矩阵与可达矩阵

将表 1 中所列的 19 个影响因素及其相互之间的直接二元关系用式(2)进行表述，得到 19×19 的矩阵 A ，这个矩阵就是影响因素集的邻接矩阵，如图 1 所示。

在上文得到的邻接矩阵 A 的基础上，依据式(3)，邻接矩阵 A 加上单位矩阵 I 后进行自乘，当幂次 $m=5$ 之后，自乘结果不会再发生改变，此

时得到的矩阵 M 即为可达矩阵。然后，将矩阵 M 按照行进行升序排列，同时对列向进行相应调整，再进行阶层划分，得到阶层明确的可达矩阵，如图 2 所示。

2.3 递阶结构图及分析

根据图 2 的可达矩阵，绘制了能源需求的层次结构，如图 3 所示。所有的能源需求因素相互作用，形成了一个复杂的系统，系统结构中的 19 个因素分布于 9 个层次，箭头代表各要素之间的可达关系。

如图 3 所示，根据对能源需求影响的不同层次，将能源需求影响因素分为 4 类，分别是直接因素、中间因素、核心因素和源头因素。

人口因素、城市化水平、居民生活水平、能源消费结构和能源利用效率是影响能源需求的直接因素。这个层次是表面原因，也是最容易观察

表 1 能源需求影响因素之间的相关关系
Table 1 Correlation between energy demand factors

影响因素	符号	影响因素描述	直接影响因素
能源需求	s_1	经济社会发展和人民生活所需要的各类能源	
经济发展水平	s_2	经济发展与能源需求之间存在着很强的相关性,能源是经济发展的动力,经济发展水平是影响能源消耗的关键因素	s_1, s_6, s_7, s_{10}
产业结构	s_3	中国正处在产业结构调整的重要时期,逐步转身以第三产业为主,势必将改变经济增长方式,影响国民经济的发展;同时,第二产业的能源强度要远远高于第一、第三产业,产业结构会显著影响能源需求	s_2, s_{15}
财政和货币政策	s_4	采用扩张性的或者紧缩性的财政和货币政策会对国家经济运行产生不同的影响	s_2, s_{11}, s_{13}
人口	s_5	人口规模与能源需求直接相关,其他条件不变,人口基数越大,能源需求越大	s_1
城镇化水平	s_6	由于城镇居民和农村居民的能源利用方式差异,导致城镇居民和农村居民的能源消耗水平差距很大,大部分城镇居民的能源消耗比农村居民多,所以城镇化水平是能源需求相关因素	s_1
居民生活水平	s_7	家庭收入的增加使人均住房面积,家用电器使用率逐渐上升,居民家庭能源消费会增加;同时也会提高居民交通出行的能源消费	s_1
重大活动	s_8	奥运会、世博会等重大活动会推动城市经济的发展。在能源需求方面,一方面,重大活动需要更好的能源保障(主要是电力保障);另一方面,有一些重大活动需要更严格的环保要求,从而影响到一些高耗能高排放行业的生产	s_2, s_{16}, s_{19}
技术进步	s_9	新技术的研发和应用能有效提高能源的传输和利用效率	s_7, s_{15}, s_{16}
R&D 投入	s_{10}	研究与开发投入反映一国的科技实力和核心竞争力,是技术进步的基本,受到宏观经济的影响	s_9
全社会投资	s_{11}	全社会投资是 GDP 的组成部分,会影响到经济发展,同时关于能源基础设施方面的投资会为能源供给保障提供基础	s_2, s_{16}
国际经济形势	s_{12}	国际经济形势的变化会对我国的经济产生较大影响,同时影响到外商投资与国际贸易	s_2, s_{13}
外商投资与国际贸易	s_{13}	外商投资与国际贸易受国际经济形势影响,影响到我国的经济运行、能源供给与能源价格	s_2, s_{16}, s_{17}
能源消费结构	s_{14}	能源消费结构的变化会影响到能源需求	s_1
能源利用效率	s_{15}	能源利用效率主要受技术进步影响,最终影响到能源需求	s_1
能源供给	s_{16}	能源供给是能源消费结构的基础保障,同时影响到能源价格	s_{14}, s_{17}
能源价格	s_{17}	直接影响能源消费结构	s_{14}
能源政策	s_{18}	影响能源供给和能源价格	s_{16}, s_{17}
环保政策	s_{19}	对能源消费结构有一定影响;可能会受到一些重大活动的影响	s_{14}



	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{14}	s_{15}	s_{16}	s_{17}	s_{18}	s_{19}	
s_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s_2	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s_3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
s_4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
s_5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s_6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s_7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s_8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
s_9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
s_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s_{11}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
s_{12}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
s_{13}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
s_{14}	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s_{15}	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
s_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
s_{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
s_{19}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

图 1 邻接矩阵

Fig.1 Adjacency matrix

	s_1	s_6	s_6	s_7	s_{14}	s_{16}	s_{17}	s_{19}	s_{16}	s_{18}	s_9	s_{10}	s_2	s_5	s_{11}	s_{15}	s_8	s_{12}	s_4	
s_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
s_6	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
s_6	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
s_7	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
s_{14}	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
s_{16}	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
s_{17}	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
s_{19}	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
s_{16}	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
s_{18}	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
s_9	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
s_{10}	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	6
s_2	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	7
s_5	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	8
s_{11}	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	
s_{15}	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	
s_8	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	
s_{12}	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	9
s_4	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	

图 2 可达矩阵

Fig.2 Reachable matrix

到，可以说明能源的最终消费多用于居民生活和经济生产中。

中间影响因素包括能源价格、能源供给、能源政策、环保政策、技术进步、研发投入、经济

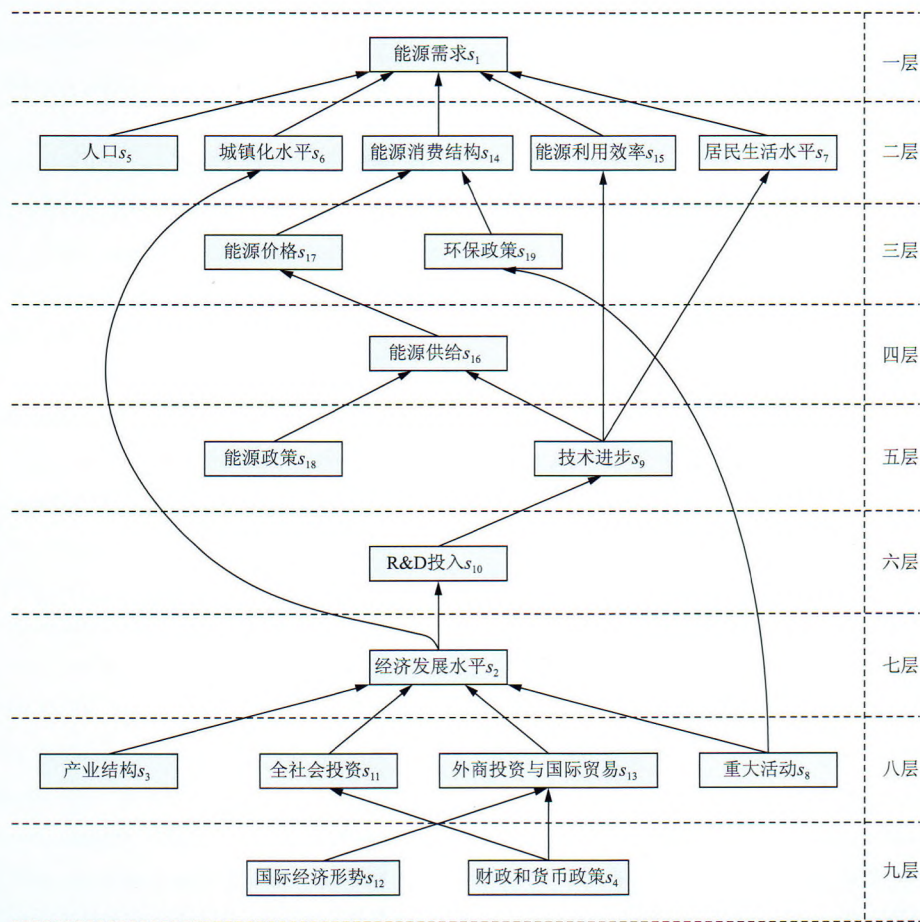


图 3 能源需求的递阶结构

Fig.3 Hierarchical structure of energy demand factors

发展水平、全社会投资、外商投资与国际贸易等因素，由源头因素引起，形成不同的传递链，并最终影响到直接因素。其中，经济发展水平是影响能源需求的核心原因，在 19 个影响因素中，只有人口、能源政策和环保政策 3 个因素与经济发展水平不是可达关系，其他因素都直接或者间接与经济发展水平有关系，在一定程度上说明经济发展与能源需求增长变化紧密相关。经济发展不仅使人民生活水平得到提高，加快了我国城镇化进程，而且持续推进能源技术进步，提高能源效率，对能源需求产生影响。

从图 3 还可以看出，源头影响因素有人口、能源政策、产业结构、国际经济形势、财政和货币政策、重大活动 6 个因素，这些源头因素形成了不同的传递源，并与中间影响因素、直接影响因素构成了完整的传递链，最终对能源需求产生影响，对这类源头因素进行分析，可以看出主要

对能源需求产生影响的因素为国际经济形势、各类相关政策和重大活动 3 类，对能源需求进行分析预测时需要将这些因素考虑在内。

3 结语

本文分析了影响能源需求的各种因素，采用系统工程方法分析各种因素之间的关系，通过解释结构建模方法，获得了层次清晰的结构化模型，并且依此找出了影响能源需求变化的各层面因素，给出了能源需求影响因素的分析框架，为能源需求量化分析提供依据。

解释结构模型只能从定性的角度运用经验和知识分析能源需求的影响因素，是从概念模型过渡到定量模型的中间部分，在进一步研究中需要在定性分析的基础上进行定量分析，以便取得更好的适用性和可推广性，这将是下一步的研究方向。



参考文献:

- [1] 孙涵,杨普容,成金华,等. 基于 Matlab 支持向量回归机的能源需求预测模型[J]. 系统工程理论与实践,2011,31(10):2001-2007.
SUN Han, YANG Purong, CHENG Jinhua, *et al.* Forecasting model of energy demand based on Matlab support vector regression[J]. Journal of Systems Engineering and Practice, 2011, 31(10): 2001-2007.
- [2] 梁巧梅,魏一鸣,范英,等. 中国能源需求和能源强度预测的情景分析模型及其应用[J]. 管理学报,2004,1(1):62-66.
LIANG Qiaomei, WEI Yiming, FAN Ying, *et al.* Situational analysis model and application of energy demand and energy intensity prediction in China [J]. Chinese Journal of Management, 2004,1(1): 62-66.
- [3] 陈卫东,朱红杰. 基于粒子群优化算法的中国能源需求预测[J]. 中国人口·资源与环境,2013,23(3):39-43.
CHEN Weidong, ZHU Hongjie. Energy demand forecast in China based on particle swarm optimization algorithm [J]. China Population Resources and Environment, 2013, 23(3): 39-43.
- [4] 林卫斌,陈彬,俞燕山,等. “十二五”及 2020 年电力需求预测研究[J]. 中国人口·资源与环境,2011,21(7):1-6.
LIN Weibin, CHEN Bin, YU Yanshan, *et al.* Research on forecasting electricity demand of the 12th Five-year and 2020 [J]. China Population Resources and Environment, 2011, 21(7): 1-6.
- [5] 刘满芝,高晓峰,屈传智,等. 中国煤炭需求波动规律研究[J]. 资源科学,2013,35(4):681-689.
LIU Manzhi, GAO Xiaofeng, QU Chuanzhi, *et al.* Patterns of coal demand fluctuation in China [J]. Resources Science, 2013, 35(4): 681-689.
- [6] WARFIELD J N. Participative methodology for public system planning[J]. Computer and Electric Engineering, 1973, 1(1): 23-40.
- [7] 李韩房,谭忠富,王成文,等. 电力市场环境下基于解释结构模型的发电企业风险结构分析[J]. 电网技术,2007,31(13):59-64.
LI Hanfang, TAN Zhongfu, WANG Chengwen, *et al.* Interpretative structural model based risk structure analysis of power generation company in electricity market [J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 59-64.
- [8] 徐敏杰,胡兆光,单葆国,等. 电力需求影响因素的解释结构模型分析[J]. 中国电力,2009,42(4):1-5.
XU Minjie, HU Zhaoguang, SHAN Baoguo, *et al.* Analysis on influencing factors of power demand by using interpretative structural modeling [J]. Electric Power, 2009, 42(4): 1-5.
- [9] KRAFT J, KRAFT A. On the relationship between energy and GNP [J]. Energy Development, 1978, 3: 401-403.
- [10] 韩智勇,魏一鸣,焦建玲,等. 中国能源消费与经济增长的协整性与因果关系分析[J]. 系统工程,2004,22(12):17-21.
HAN Zhiyong, WEI Yiming, JIAO Jianling, *et al.* On the cointegration and causality between Chinese GDP and energy consumption [J]. Systems Engineering, 2004, 22(12): 17-21.
- [11] 赵晓罡,薛继亮. 基于库兹涅茨曲线模型的能源消费与经济增长动态关系研究[J]. 统计与决策,2011(11):130-131.
ZHAO Xiaogang, XUE Jiliang. Study on dynamic relationship between energy consumption and economic growth based on Kuznets curve model [J]. Statistics and Decision, 2011(11): 130-131.

(责任编辑 辛培裕)

Analysis on Influencing Factors of Energy Demand Based on Interpretative Structural Modeling

WANG Jingmin, KANG Junjie

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The energy demand system is not only affected by various factors inside energy system, but also influenced by various other factors including economic development, social natural environment, population factor, technological progress. It is a typical nonlinear system with very complex relationship among various factors. System engineering methods are used to analyze influencing factors of energy demand and relationship among them. The interpretative structural model is used to analyze hierarchical relationship among influencing factors of energy demand. Surface factors, intermediate factors, core factors and source factors that affect energy demand are summarized. The analysis shows that population, urbanization level, living standard, energy consumption structure and energy use efficiency are direct influencing factors of energy demand change. The economic development level is the core factor, and the source factors can be divided into three categories: international economic situation, various related policies and major activities.

This work is supported by Beijing Social Science Fund (No. 15JGB050); Heibei Province Soft Science Project (No. 16454302D)

Keywords: energy demand; influencing factors; interpretative structural modeling