

# 既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素分级

陈为公<sup>1,2</sup>, 张娜<sup>1</sup>, 张友森<sup>3</sup>, 张悦<sup>1</sup>, 程准<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 管理工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 山东省高校智慧城市建设管理研究中心, 山东 青岛 266520; 3. 山东省莒县自然资源和规划局, 山东 日照 276500)

**摘要:** 节能服务企业(ESCO)驱动力的充分调动对既有建筑节能改造工作具有重要意义。在归纳 ESCO 驱动因素的基础上,运用决策试验与评价实验法(DEMATEL)和解释结构模型法(ISM),确定关键 ESCO 驱动因素,探寻因素之间的关系及作用路径,研究各因素间的作用机理,绘制原因结果图,构建多级递阶结构模型,从而直观呈现关键驱动因素及作用路径。结果表明,既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素可划分为 6 级 3 阶的多级递阶结构,其中,激励政策是最关键的根本驱动因素,项目风险是最重要的中间驱动因素,企业社会责任感是最有效的直接驱动因素。将分析结果与既有建筑节能改造工作的实际情况相结合,对 ESCO 驱动力的调动提出了相应建议,为既有建筑节能改造工作提供理论依据。

**关键词:** 既有建筑; 节能改造; ESCO 驱动力; DEMATEL-ISM 法; 驱动因素

**中图分类号:** TU-023 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0985(2021)01-0016-08

**DOI:**10.13579/j.cnki.2095-0985.2021.01.003

## Classification of ESCO Driving Factors in Energy Efficiency Retrofit of Existing Buildings

CHEN Weigong<sup>1,2</sup>, ZHANG Na<sup>1</sup>, ZHANG Youshen<sup>3</sup>, ZHANG Yue<sup>1</sup>, CHENG Zhun<sup>1</sup>

(1. School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;  
2. University Research Center for Smart City Construction and Management of Shandong Province,  
Qingdao 266520, China; 3. Natural Resources and Planning Bureau of Ju Country,  
Shandong Province, Rizhao 276500, China)

**Abstract:** It is of great significance to fully mobilize the driving force of ESCO for the energy efficiency retrofit of existing buildings. Based on the summary of the driving factors of ESCO, the Decision-Making, Trial Evaluation Laboratory (DEMATEL) and Interpretative Structural Modelling Method (ISM) are applied to determine the key driving factors of ESCO and to explore the relations and action paths between them, so we can further study their action mechanism, draw the cause-effect diagram, and build a multilevel hierarchical structure model. Thus, the purpose of presenting key driving factors and action paths is achieved. The results show that the ESCO driving factors of existing building energy efficiency retrofit can be divided into six levels and three ranks. Among them, incentive policy is the most critical fundamental driver; project risk is the most important intermediate driver; and corporate social responsibility is the most effective direct driver. Combining the analysis results with the actual situation of the energy efficiency retrofit of existing buildings, this paper puts forward corresponding suggestions for the mobilization of ESCO driving force, providing a theoretical basis for the energy efficiency retrofit of existing buildings.

**Key words:** existing buildings; energy efficiency retrofit; ESCO driving force; DEMATEL-ISM method; driving factor

收稿日期: 2020-03-06 修回日期: 2020-06-17

作者简介: 陈为公(1971—),男,辽宁沈阳人,博士,教授,研究方向为工程项目管理(E-mail: ch.ylh@163.com)

通讯作者: 张娜(1997—),女,山东日照人,硕士研究生,研究方向为工程项目管理(E-mail: 812231966@qq.com)

基金项目: 国家自然科学基金(71471094)

我国超过 500 亿  $m^2$  的既有建筑中,节能建筑仅约为 69 亿  $m^2$ <sup>[1]</sup>。大量非节能建筑高排放、高耗能的情况日益严重,使得开展既有建筑节能改造工作成为建设环境友好型和资源节约型社会的必然选择。既有建筑节能改造工作的有效开展依赖于既有建筑节能改造市场的健康有序发展,而市场有序运行的关键在于节能服务公司(Energy Service Company, ESCO)、政府以及业主的多方主体协同作用,ESCO 作为核心运行主体,调动其改造积极性在节能改造市场发展中有举足轻重的地位。因此,探寻既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素,剖析其驱动机理及内在联系,是促进既有建筑节能改造市场健康发展的关键环节。

对于既有建筑节能改造 ESCO 的研究是一个多主体多目标的综合问题,相关文献中对 ESCO 的研究主要聚焦于主体协同作用和激励模式两大类。

推动既有建筑节能改造市场发展有赖于多主体行为协同下的整体改造有效性<sup>[2]</sup>。德国、法国、奥地利等国家的既有建筑节能改造市场运行较为稳定,因此 Okay 等<sup>[3]</sup>通过对其运行机理进行研究,发现其秘诀在于政府对于 ESCO 的有效监管。Bertoldi 等<sup>[4]</sup>也通过将欧洲各国 ESCO 的差异进行对比,同样揭示政府的监督与支持有利于节能改造市场的健康运行。除了政府外,业主对于 ESCO 也有很大影响,故而马兴能等<sup>[5,6]</sup>根据博弈论探究 EPC (Engineering Procurement Construction) 模式下双方主体的博弈行为,并基于此建立业主与 ESCO 的动态进化博弈模型。尽管国内外学者对既有建筑节能改造主体协同进行了一定的探究,但目前研究多局限于两方博弈行为,鲜有学者基于系统的视角整体考虑三方核心主体。而一方面,既有建筑节能改造具有正外部性,即改造产生的私人收益小于社会效益,因此 ESCO 和业主利益驱动力不足<sup>[7,8]</sup>;另一方面,改造市场具有信息不对称性,专业的 ESCO 相比业主而言更为有利,因此业主与 ESCO 双方的合作关系需要加以调节。但单纯依赖市场机制难以有效控制,必须要依靠政府的有形之手对两方的合作关系进行科学的引导和管制。前人为既有建筑节能改造主体协同发展奠定了理论基础,但综合考虑三方核心主体协同作用的研究略显匮乏,而这恰恰是探究既有建筑节能改造市场发展的重要视角,对于研究 ESCO 驱动因素意义重大。

研究人员从微观上对主体间相互作用进行剖析后,进而在宏观视角下剖析 ESCO 发展的激励

模式,对激励模式的研究大致分为经济性激励措施和管理性激励措施。首先,既有建筑节能改造存在投资大、回收期长、经济外部性强等特点,这些特点决定了经济性激励政策是引导既有建筑节能改造主体积极行为的重要手段<sup>[9]</sup>,Vamosi<sup>[10]</sup>指出《美国能源政策法案》中规定若建筑经改造后能耗降低 50%,则对负责改造的 ESCO 实施零税收政策。Roy 等<sup>[11]</sup>认为根据不同建筑规模的需求制定相应的财政补贴等经济政策,有助于企业增加经济效益和整体节能。激励政策的制定作为初始环节,其后续能否有效落实更是重中之重,激励运行过程依赖于激励政策执行、反馈、完善等各环节的联动,因此管理性激励措施不可或缺。Zhang 等<sup>[12]</sup>强调可以通过建立建筑能效标识制度公开市场能耗信息来提高业主服务需求,从而促进改造市场的良性发展。张印贤等<sup>[13]</sup>建议搭建既有建筑节能改造市场信息官方平台,以改善当前我国改造市场发展激励运行缺乏信息反馈与互动要素问题。总体来看,已有研究为既有建筑节能改造 ESCO 激励模式提供了理论框架,但其多聚焦于政府政策支持以及相关的措施实施,角度较为单一,而既有建筑节能改造受多个因素影响,且因素间相互作用、耦合,应从系统的角度进行研究,以期整体、全面的对既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素进行剖析,并找出各关键因素间的相互作用机理,才能找到节能改造的根本所在,进而有所针对的提出有效措施。

部分学者逐渐意识到对关键因素进行细致剖析的重要性,且对因素的研究方法种类繁多。乔志春等<sup>[14]</sup>运用 4M1E (Man, Machine, Material, Method, Environments) 理论对影响建设工程施工质量的关键因素进行研究,4M1E 理论作为一种定性方法,其科学性和实用性较为薄弱,同时其客观性也受到限制。杨秋月<sup>[15]</sup>则使用计量经济学模型对因素进行剖析,定量分析的方法增强了研究的客观性,使得其具有一定的工程贴切度,但计量经济学模型需要有足够多的面板数据,而研究所采用的数据质量往往难以保证,因而会出现一定的分析偏差。范琪等<sup>[16]</sup>提出运用灰色关联模型进行关联度排序来判断各因素的影响程度,该法克服了需要大量数据的缺陷,但仅依靠因素间关联程度进行分析,对因素间的复杂逻辑关系研究较少。尤完等<sup>[17]</sup>采用 ISM (Interpretative Structural Modeling) 法进行产业链协同影响因素的研究,该方法能充分考虑各因素间的相互作用关系,但往往容易忽略关键因素的确定。

综上所述,目前对 ESCO 的研究中,微观层面上大多局限于两方主体的行为博弈,缺乏对三方核心主体进行全面系统的考虑;宏观层面上拘泥于单一角度如政府政策等,鲜有研究细致整体的对影响既有建筑节能 ESCO 驱动因素及影响机理进行剖析;在因素的研究中许多方法难以有效识别关键因素并考虑其作用机理。鉴于此,为更有效探索既有建筑节能改造 ESCO 驱动力问题,本文采用既能明确关键因素,又能梳理因素间逻辑关系的 DEMATEL (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory)-ISM 法对 ESCO 驱动因素进行类型归类与影响强度评判、探明复杂因素间内在联系和层次结构,进而针对性地制定发展对策,以期增强 ESCO 节能改造驱动力、促进既有建筑节能改造市场的健康发展提供理论依据。

### 1 既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素确定

既有建筑节能改造 ESCO 驱动力的研究是一个复杂的系统性问题,各项驱动因素呈多层次分布。为了科学合理地确定既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素,本文大量分析了目前我国学者在既有建筑节能改造 ESCO 驱动力方面的研究,通过在 CNKI 检索主题“既有建筑节能改造 ESCO”,检索出近三年 198 篇文献。对上述文献中有关 ESCO 驱动力的关键词进行频数统计,并计算出各关键词的出现频率,统计结果如图 1 所示。由图 1 可知,近三年内学者对 ESCO 驱动因素的研究多集中于企业技术创新能力等 20 个因素。其中,1~15 号因素研究频数较高,表明这些因素对既有建筑节能改造 ESCO 的驱动力较强;而 16~20 号因素占比不到 1%,即此类因素影响较弱。根据统计结果,本文将 16~20 号因素剔除,筛选出 15 个驱动因素,并基于系统完整、层次分明、简明科学的原则<sup>[18]</sup>,系统的考虑到三方主体协同作

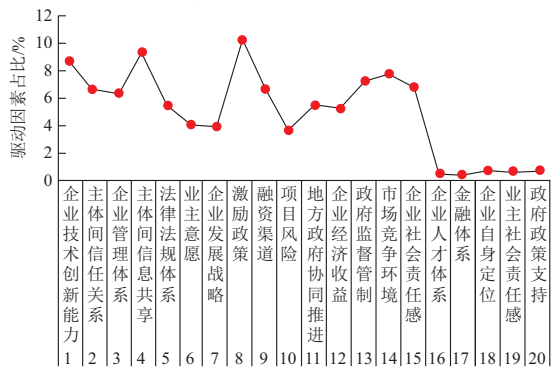


图 1 驱动因素折线图

用,按照企业自身因素、三方主体协同以及外部环境影响将驱动因素分类,确定出既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素体系,如图 2 所示。

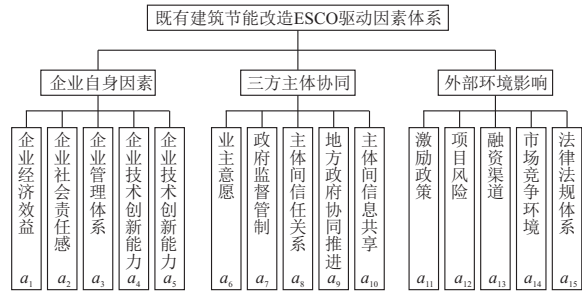


图 2 既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素体系

### 2 基于 DEMATEL-ISM 综合建模方法介绍

既有建筑节能改造 ESCO 驱动力受多重因素影响,且各因素并不是孤立存在的,其相互之间的作用机制较为复杂。因此,要有效识别出关键驱动因素,并梳理出各 ESCO 驱动因素间的作用机制,需寻求能同时满足关键因素识别与相互关系明晰的方法。

决策实验分析 (DEMATEL) 法通过运用矩阵论与图论对复杂系统进行要素分析,该方法通过计算各因素的中心度等指标,进行驱动因素强度评判<sup>[19]</sup>;解释结构模型法 (ISM) 着眼于变量众多、关系复杂的系统,可通过建立可达矩阵等,将各驱动因素划分为若干层次,把复杂系统分解为直观、结构清晰、条理化的多层递接结构模型<sup>[20,21]</sup>。

尽管 DEMATEL 法可以有效确定出复杂系统的关键驱动因素,但无法确定因素内在联系和结构层次,因此需要运用 ISM 法将因素间的逻辑关系清晰直观的呈现出来,且两者结合还可将矩阵运算难度降低。与此同时,两种方法均针对复杂系统进行因素分析,因此基于二者的共性将其集成,可以实现优势互补,为复杂系统定量分析和科学决策提供强有力的支持。而既有建筑节能改造 ESCO 驱动力问题本身就是涉及多方主体、作用关系繁琐的复杂系统,因此相较于其他方法,DEMATEL-ISM 法在处理既有建筑节能改造 ESCO 驱动力问题时更加具有优势<sup>[22]</sup>。其具体步骤如下:

(1) 根据已确定的 ESCO 驱动因素体系获得直接影响关系矩阵 B,初步确定各 ESCO 驱动因素之间的作用关系;

(2) 将矩阵  $B$  进行规范化处理得到标准化矩阵  $C$ , 以消除量纲对结果的影响;

(3) 计算综合影响矩阵  $T$ , 以此确定各项驱动因素对于既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素体系中其他因素的影响程度;

(4) 求取系列相关指标, 明确各因素在系统中的总影响程度、总被影响程度、类别属性及重要程度;

(5) 计算整体影响矩阵  $H$ , 以考虑因素自身影响;

(6) 引入阈值  $\lambda$  剔除冗余信息, 精简矩阵;

(7) 获得可达矩阵  $F$ , 以表明各驱动因素之间的一种指向性的链接与影响方式;

(8) 层次化处理, 获得清晰地层级化结构;

(9) 绘制原因结果图, 构建既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素多层递接结构模型。

基于 DEMATEL-ISM 的既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素研究流程如图 3 所示。

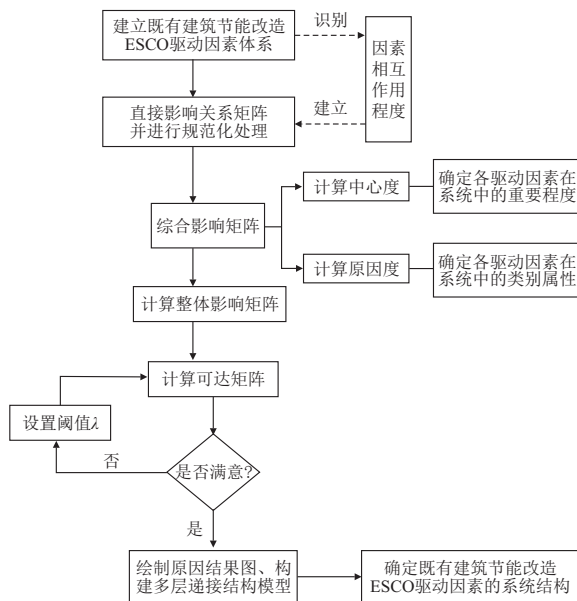


图 3 基于 DEMATEL-ISM 的既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素研究流程

### 3 基于 DEMATEL-ISM 的既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素模型建立

#### 3.1 计算综合影响矩阵 $T$

在对各 ESCO 驱动因素间影响程度数据的收集上, 根据图 2 中已确定的驱动因素体系, 采用德尔菲法邀请 20 位既有建筑节能改造相关领域的专家及从业人员对各因素之间的作用关系进行打分。本文选取 0~4 打分法, 即 0, 1, 2, 3, 4 分别为无影响、低影响、中影响、较高影响以及高影

响<sup>[23]</sup>, 从而得出直接影响关系矩阵  $B=[b_{ij}]_{n \times n}$ ,  $b_{ij}$  表示 ESCO 驱动因素  $a_i$  对 ESCO 驱动因素  $a_j$  的影响程度。其中, 当  $i=j$  时,  $b_{ij}=0$ 。由此得到既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素直接影响矩阵  $B$  后, 为消除量纲不同带来的影响, 对矩阵进行规范化处理得到标准化矩阵  $C=[c_{ij}]_{n \times n}$ 。从而使  $C_{ij}$  处于  $[0, 1]$  区间内, 即

$$C = \frac{B}{\max_{1 \leq i \leq 15} \sum_{j=1}^{15} b_{ij}} \quad (1)$$

继而, 为明确驱动因素间直接影响关系和间接影响关系的综合累加, 从而确定每个驱动因素对于既有建筑节能改造过程中对其他因素的影响大小, 因此计算综合影响矩阵  $T$ <sup>[24]</sup>:

$$T = C + C^2 + \dots + C^n = C \frac{I - C^{n-1}}{I - C} \quad (2)$$

式中:  $I$  为单位矩阵。由于  $C_{ij}$  属于  $[0, 1]$ , 因此  $n \rightarrow \infty$  时,  $C^{n-1} \rightarrow 0$ , 故

$$T = C(I - C)^{-1} \quad (3)$$

据此得出的既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素综合矩阵  $T$  的求解结果如表 1 所示。

#### 3.2 计算影响程度 $r_i$ 、被影响程度 $e_i$ 、中心度 $m_i$ 、原因度 $n_i$

求出既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素综合影响矩阵  $T$  后, 在此基础上求取各 ESCO 驱动因素对其他因素的影响程度  $r_i$ 、被影响程度  $e_i$  以及中心度  $m_i$  和原因度  $n_i$ 。其中, 影响程度  $r_i$  越大表示驱动因素  $a_i$  对其他因素的作用程度越大; 被影响程度  $e_i$  越大则说明驱动因素  $a_i$  受其他因素的作用程度越大; 中心度  $m_i$  表示因素  $a_i$  在所有驱动因素中的重要程度, 故其值越大说明该驱动因素重要程度越大; 而原因度  $n_i$  则体现因素属性, 若  $n_i$  为正, 称其为原因因素, 反之则为结果因素。计算公式为:

$$r_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, i = 1, 2, \dots, 15 \quad (4)$$

$$e_i = \sum_{j=1}^n t_{ji}, i = 1, 2, \dots, 15 \quad (5)$$

$$m_i = r_i + e_i, i = 1, 2, \dots, 15 \quad (6)$$

$$n_i = r_i - e_i, i = 1, 2, \dots, 15 \quad (7)$$

既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素的各项指标分析结果如表 2 所示。

#### 3.3 求取整体影响矩阵 $H$ 和可达矩阵 $F$

3.2 中求取的四类指标展现了各驱动因素与其他因素之间的关系, 为了将各因素自身的影响充分考虑, 因而计算整体影响矩阵  $H$ 。其计算公

表1 既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素综合影响矩阵 T

因素	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
$a_1$	0.057	0.268	0.106	0.034	0.006	0.063	0.146	0.050	0.068	0.150	0.030	0.171	0.160	0.048	0.198
$a_2$	0.049	0.078	0.090	0.029	0.005	0.053	0.124	0.043	0.058	0.128	0.025	0.146	0.136	0.041	0.169
$a_3$	0.262	0.148	0.040	0.025	0.005	0.032	0.066	0.030	0.055	0.069	0.131	0.098	0.085	0.026	0.073
$a_4$	0.073	0.219	0.071	0.069	0.070	0.115	0.147	0.098	0.122	0.272	0.040	0.348	0.326	0.089	0.238
$a_5$	0.068	0.187	0.063	0.115	0.013	0.088	0.344	0.078	0.100	0.357	0.066	0.235	0.206	0.210	0.181
$a_6$	0.084	0.066	0.022	0.137	0.010	0.032	0.045	0.029	0.035	0.061	0.020	0.128	0.067	0.080	0.061
$a_7$	0.075	0.040	0.013	0.012	0.002	0.018	0.028	0.017	0.021	0.029	0.016	0.087	0.029	0.069	0.033
$a_8$	0.072	0.267	0.168	0.094	0.012	0.106	0.190	0.053	0.114	0.201	0.043	0.125	0.105	0.062	0.091
$a_9$	0.085	0.231	0.142	0.077	0.070	0.102	0.214	0.257	0.113	0.223	0.065	0.279	0.254	0.199	0.184
$a_{10}$	0.078	0.203	0.125	0.074	0.014	0.148	0.131	0.144	0.168	0.139	0.115	0.277	0.251	0.187	0.173
$a_{11}$	0.088	0.186	0.082	0.130	0.025	0.118	0.203	0.135	0.301	0.218	0.041	0.421	0.334	0.103	0.136
$a_{12}$	0.180	0.327	0.088	0.065	0.016	0.194	0.188	0.195	0.200	0.196	0.036	0.164	0.196	0.082	0.181
$a_{13}$	0.096	0.231	0.137	0.187	0.024	0.212	0.250	0.162	0.223	0.272	0.060	0.315	0.176	0.157	0.197
$a_{14}$	0.037	0.082	0.035	0.098	0.011	0.055	0.139	0.050	0.090	0.151	0.198	0.148	0.129	0.049	0.180
$a_{15}$	0.069	0.189	0.066	0.065	0.013	0.150	0.225	0.090	0.156	0.233	0.037	0.268	0.290	0.086	0.105

表2 既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素的 DEMATEL 分析结果

因素	影响因素	影响度 $r_i$	被影响度 $e_j$	中心度 $m_i$	中心度排序	原因度 $n_i$	因素属性
$a_1$	企业经济效益	1.557	1.373	2.930	11	0.184	原因因素
$a_2$	企业社会责任感	1.173	2.721	3.895	6	-1.548	结果因素
$a_3$	企业管理体系	1.144	1.248	2.392	14	-0.105	结果因素
$a_4$	企业技术创新能力	2.297	1.211	3.508	7	1.085	原因因素
$a_5$	企业发展战略	2.311	0.296	2.607	13	2.015	原因因素
$a_6$	业主意愿	0.877	1.484	2.361	15	-0.607	结果因素
$a_7$	政府监督管制	0.489	2.439	2.928	12	-1.950	结果因素
$a_8$	主体间信任关系	1.700	1.431	3.132	9	0.269	原因因素
$a_9$	地方政府协同推进	2.494	1.823	4.318	4	0.671	原因因素
$a_{10}$	主体间信息共享	2.227	2.699	4.927	3	-0.472	结果因素
$a_{11}$	激励政策	2.519	0.921	3.440	8	1.598	原因因素
$a_{12}$	项目风险	2.308	3.209	5.517	1	-0.901	结果因素
$a_{13}$	融资渠道	2.700	2.743	5.443	2	-0.044	结果因素
$a_{14}$	市场竞争环境	1.450	1.488	2.939	10	-0.038	结果因素
$a_{15}$	法律法规体系	2.041	2.198	4.238	5	-0.157	结果因素

式为:

$$H = (h_{ij})_{15 \times 15} = I + T \quad (8)$$

不难发现,整体影响矩阵  $H$  中包含部分影响程度较小的指标,为将系统结构加以简化,因此引入阈值  $\lambda$  去除矩阵  $H$  中的冗杂信息。而  $\lambda$  取值不同对应的影响因素逻辑关系也随之变化, $\lambda$  取值的选取较多根据专家经验,有较强的主观性,而用基于统计分布的均值与标准差之和代替更具有客观性,可降低主观性影响<sup>[25,26]</sup>。计算公式如下:

$$\lambda = \alpha + \beta, \lambda \in [0,1] \quad (9)$$

式中: $\alpha, \beta$  分别为综合影响矩阵  $T$  中所有因素的均值和标准差。据此求解出阈值  $\lambda: \alpha = 0.121, \beta = 0.085, \lambda = \alpha + \beta = 0.206$ 。

确定  $\lambda$  取值后对整体影响矩阵  $H$  加以简化操作,求取可达矩阵  $F$ 。在可达矩阵中, $f_{ij}$  表示因素  $a_i$  与  $a_j$  的影响程度, $f_{ij} = 1$  表示因素  $a_i$  与  $a_j$  有

直接影响,若  $f_{ij} = 0$  则表示因素  $a_i$  与  $a_j$  没有直接影响,其计算公式如下:

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & h_{ij} \geq \lambda \\ 0, & h_{ij} < \lambda \end{cases}, i, j = 1, 2, \dots, 15 \quad (10)$$

### 3.4 划分驱动因素级别

根据可达矩阵进行层次化处理获得可达集合  $S(a_i)$ 、前因集合  $Q(a_i)$  以及最高集要素集合  $L(a_i)$ ,若  $S(a_i) = S(a_i) \cap Q(a_i)$  成立,则取  $S(a_i)$  为最高层因素,将已分层因素删除后重复上述操作,直至所有 ESCO 驱动因素层次划分完毕。

$$\begin{cases} S(a_i) = \{a_j \mid a_j \in A, f_{ij} = 1\} \\ Q(a_i) = \{a_j \mid a_j \in A, f_{ji} = 1\} \\ L(a_i) = \{a_j \in A \mid S(a_i) \cap Q(a_i) = S(a_i)\}, \\ i, j = 1, 2, \dots, 15 \end{cases} \quad (11)$$

将既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素可达矩

阵按照式(11)进行层次化处理,第一层 ESCO 驱动因素分解如表 3 所示,并将其依次分层处理直至结束。因篇幅有限,本文不将各层次分解过程在此赘述,最终层次化处理结果为: $L_1 = \{2, 6, 7, 14\}$ ;  $L_2 = \{1, 12\}$ ;  $L_3 = \{3, 10, 13\}$ ;  $L_4 = \{5, 8, 15\}$ ;  $L_5 = \{4, 9\}$ ;  $L_6 = \{11\}$ 。

表 3 既有建筑节能改造第一层 ESCO 驱动因素分解

因素	可达集合 $S(a_i)$	前因集合 $Q(a_i)$	交集
$a_1$	1, 2	1, 3	1
$a_2$	2	1, 2, 4, 8, 9, 10, 12, 13	2
$a_3$	1, 3	3	3
$a_4$	2, 4, 10, 12, 13, 15	4	4
$a_5$	5, 7, 10, 12, 13, 14	5	5
$a_6$	6	6, 13	6
$a_7$	7	5, 7, 9, 11, 13, 15	7
$a_8$	2, 8, 10	8, 9	8
$a_9$	2, 7, 8, 9, 10, 12, 13	9, 11, 12, 13	9, 12, 13
$a_{10}$	2, 10, 12, 13	4, 5, 8, 9, 10, 11, 13, 15	10, 13
$a_{11}$	7, 9, 10, 11, 12, 13	11	11
$a_{12}$	2, 9, 12	4, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 15	9, 12
$a_{13}$	2, 6, 7, 9, 10, 12, 13	4, 5, 9, 10, 11, 13, 15	9, 10, 13
$a_{14}$	14	5, 14	14
$a_{15}$	7, 10, 12, 13, 15	4, 15	15

### 3.5 绘制原因结果图,构建多层递接结构模型

为了将前文所得结果清晰地呈现出来,本文根据 3.2 求得的原因度和中心度,构建以中心度为横坐标、以原因度为纵坐标的既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素原因结果图(图 4)。在此基础上,将此原因结果图与 3.4 节得出的层次化处理结果相结合,构建既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素多层递接结构模型,从而实现直观清晰的反映各层次间 ESCO 驱动因素影响途径的目的,如图 5 所示。

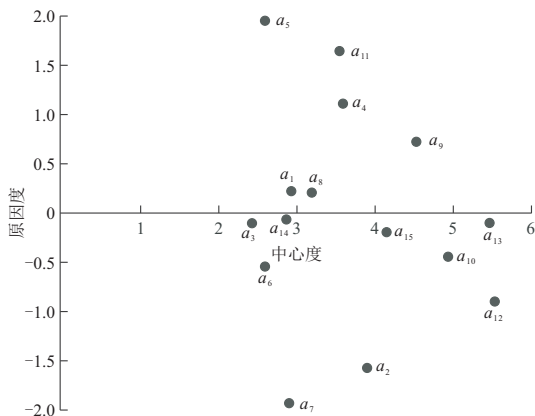


图 4 既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素原因结果图

由图 4 可发现,中心度指标值最大的因素为项目风险  $a_{12}$ ,该指标能反映出各驱动因素的重要程度,说明项目风险因素重要度最高,应充分重视风险的管控。原因度是划分因素属性的重要指标,根

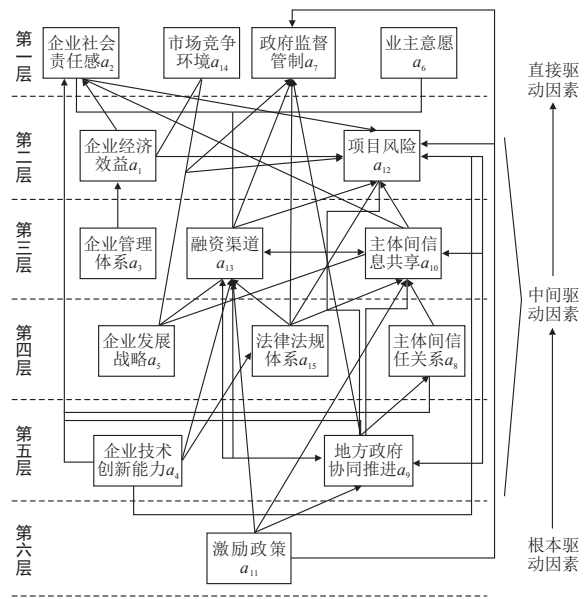


图 5 既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素多级递阶结构模型

据原因度大于 0 归为原因因素,小于 0 为结果因素的原则,将所有既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素划分为 6 个原因因素和 9 个结果因素。原因因素通常是影响 ESCO 驱动力的间接因素,结果因素则是直接因素,因此需要在改造过程中科学把控。

多层递阶结构模型(图 5)表明,所有 ESCO 驱动因素被划分为三阶六层,位于第一层的因素称为直接驱动因素,其余因素通过作用于本层发挥作用,因此本层是影响节能改造 ESCO 驱动力的直接因素;第二~五层为中间驱动因素,起中间过渡的作用;位于第六层的因素称为根本驱动因素,对 ESCO 驱动力有着决定性作用。通过各层级因素间的作用路径,可知根本驱动因素  $a_{11}$ (激励因素)通过中间层过渡驱动因素的传导作用,多种途径影响到直接驱动因素,从而增强 ESCO 驱动力,其中一条重要的途径是“激励政策→融资渠道→项目风险→企业社会责任感”。

## 4 结果分析与发展对策

### 4.1 DEMATEL 分析

通过 DEMATEL 法可确定出 ESCO 关键驱动因素,根据 DEMATEL 相关指标计算结果可分析得出如下结论。

(1)影响度方面:影响度排在前三位的因素分别是融资渠道、激励政策、地方政府协同推进,说明以上三项因素对其他驱动因素的影响较大,因此应注重制定合适的激励政策、拓宽融资渠道解决经济来源问题以及加强地方政府的推动作用。

(2)被影响度方面:其得分值最高的前三位是项目风险、融资渠道、企业社会责任感,即该三项因素受其他因素影响较大,故而可通过这三项因素判断其他驱动因素是否有效。

(3)中心度方面:中心度排名前三位的驱动因素分别为项目风险、融资渠道、主体间信息共享,而中心度很好地体现了各 ESCO 驱动因素的重要程度,因此结果表明承受项目风险的能力、扩大融资渠道、相关主体间的信息共享程度都是决定 ESCO 是否具有较强驱动力的重要因素,要加大相关指标的完善力度。

(4)原因度方面:结果因素中得分最高的因素为市场竞争环境,说明其最易受其他因素影响;原因因素中排名最高的因素为企业发展战略,即最易影响其他因素。

综上,可通过 DEMATEL 方法从 15 个因素中筛选出 8 个关键因素,即激励政策、融资渠道、地方政府协同推进、项目风险、企业社会责任感、主体间信息共享、市场竞争环境以及企业发展战略。通过对以上 8 个关键因素的科学把握可有效增强 ESCO 驱动力。

#### 4.2 ISM 分析

ISM 法以 ESCO 驱动因素多级递阶结构模型为介质将各因素间的相互影响关系和层级结构进行直观的呈现,本文从以下两方面进行探析。

(1)多级递阶结构模型将所有驱动因素划分为三阶六层,激励政策因素位于第六层,属于根本驱动因素,对既有建筑节能改造 ESCO 驱动力有关键影响力;第二~五层属于中间驱动因素,包括企业经济效益等;企业社会责任感等第一层因素被归为直接驱动因素,对 ESCO 驱动力有着直接推动作用。

(2)根本驱动因素激励政策的实施一方面会直接影响到政府监督管制,同时也会通过影响地方政府协同推进、主体间信息共享、项目风险以及融资渠道等间接影响直接因素,从而影响 ESCO 驱动力大小。这表明要想从根本上加强 ESCO 驱动力,制定科学有效的激励政策并切实落实必不可少。第二~五层中间因素的存在会引发直接驱动因素的出现,而直接驱动因素中,企业社会责任感决定了企业的发展方向与定位;健康有序的竞争环境才能为 ESCO 提供公平公正的发展空间;业主、政府对于节能改造的支持程度与主体间的信息共享程度影响着 ESCO 的改造动力,上述这些都对 ESCO 驱动力有着最直接的影响作用。

#### 4.3 DEMATEL-ISM 综合分析

对 DEMATEL-ISM 进行综合分析可发现,ISM 中分析出的根本驱动因素“激励政策”是 DEMATEL 筛选出的关键因素,同时也是影响度排名前三的因素;ISM 分析得出的直接驱动因素均对应着 DEMATEL 中的结果因素;DEMATEL 中心度排名前三的因素与 ISM 模型的中间驱动因素相一致。由上述分析可发现两种方法在对 ESCO 驱动因素的重要程度和类型划分上有高度的一致性,也进一步验证了模型分析的准确性及科学性。

综合分析结果表明激励政策是最关键的根本驱动因素;在中间驱动因素层中,项目风险重要度最高,企业管理体系重要性最差;在直接驱动因素中,企业社会责任感最有效,业主意愿有效性最低。

#### 4.4 发展对策

(1)增强根本因素,落实激励政策。激励政策因素作为最关键的根本因素,首先根据 ESCO 的需求制定并落实切实可行的经济激励政策,可通过实施税收优惠、贷款补贴、财务补助等政策减轻企业负担,从而调动其积极性;其次,为刺激市场服务需求,应完善改革供热体制和市场能源产品价格机制;同时可实行声誉激励政策,通过对 ESCO 授予不同等级的信誉度、建立服务项目示范、规范行业认证与标准等激发企业的声誉需求,提高节能改造的能动性。

(2)保障中间因素,强化风险管理。由分析结果可知项目风险因素应重点考虑,而重要性最差的企业管理体系因素可以忽略,针对此提出风险管理措施。针对项目投融资风险,ESCO 应与设备供应方签署分期付款合约以减轻资金周转压力,同时向保险公司就改造项目进行投保,保险担保措施能够有效实现风险转移;针对项目运行风险,建设方应设立节能服务管理机构,专门对节能服务企业进行项目监管,从管理层面确保项目的正常进行。

(3)落实直接因素,提升企业社会责任感。企业社会责任感作为最有效的直接因素,在实际发展中应充分重视,而业主意愿因素有效性较差,因此不予考虑。要提升企业社会责任感,一方面应制定科学有效的报告机制对企业履行社会责任进行监督,规定企业以完成度报表、目标报告等形式体现职工人权、环境保护等社会责任履行情况,并颁布法规政策等保障企业社会责任报告机制的实施;同时可参考国际社会责任组织制定的 SA8000 等国际标准,并充分结合我国节能服务行业实际发展情况,建立规范化、量化的企业社会责任标准。

## 5 结 论

(1)结合既有建筑节能改造工作的实际问题以及相关文献研究,构建了由外部环境、企业自身和三方主体协同三大部分组成的既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素指标体系,为既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素研究奠定了理论基础。

(2)运用 DEMATEL-ISM 法对既有建筑节能改造 ESCO 驱动因素进行剖析与探寻,对各驱动因素的属性和重要性进行划分,并以多级递阶结构模型的形式直观地展现了其层次结构与内在机理。结果表明,激励政策是根本驱动因素;企业经济效益、主体间信任关系、企业发展战略、项目风险、企业管理体系、地方政府协同推进、融资渠道、法律法规体系和企业技术创新能力是中间驱动因素;企业社会责任感、业主意愿、政府监督管制、主体间信息共享以及市场竞争环境是直接驱动因素。

(3)从根本因素、中间因素以及直接因素三个层面出发,分别对如何增强既有建筑节能改造 ESCO 驱动力进行了针对性的阐述,提出发展对策。

### 参 考 文 献

- [1] 住房和城乡建设部科技发展促进中心. 中国建筑节能发展——既有建筑节能改造报告(2014年)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.
- [2] 乔婉贞, 郭汉丁. 既有建筑绿色改造多主体多目标集成优化机理研究综述——基于市场运行视角[J]. 生态经济, 2019, 35(9): 88-93.
- [3] OKAY N, AKMAN U. Analysis of esco activities using country indicators[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 2760-2771.
- [4] BERTOLDI P, REZESSY S, VINE E. Energy service companies in European countries: current status and a strategy to foster their development[J]. Energy Policy, 2006, 34(14): 1818-1832.
- [5] 马兴能, 郭汉丁, 尚 伶. 基于市场特征的既有建筑节能改造中业主的行为分析[J]. 建筑科学, 2012, 28(4): 52-56.
- [6] 刘晓君, 张晨曦. 既有居住建筑节能改造中业主与 ESCo 进化博弈分析——基于合同能源管理模式(EMC)[J]. 建筑经济, 2015, 36(9): 100-103.
- [7] 刘晓君, 赵 琰, 赵翠芹. 既有商品住宅节能改造外部性及其测算研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(1): 137-142.
- [8] 江 汇, 赵景柱, 赵晓丽, 等. 中国火电行业环境外部性量化分析[J]. 中国电力, 2013, 46(7): 126-132.
- [9] 郭汉丁, 马兴能, 尚 伶. 既有建筑节能改造市场培育实践与理论研究综述[J]. 科技进步与对策, 2012, 29(18): 151-156.
- [10] VAMOSI S J. The true cost of LEED-certified green buildings[J]. Heating/Piping/Air Conditioning Engineering, 2011, 83(1): 10-11.
- [11] ROY A M, SERASPE R L, DESAI T. Using building size to optimize electric utility energy efficiency incentives[J]. Strategic Planning for Energy and the Environment, 2016, 36(1): 18-31.
- [12] ZHANG L M, LI Y, STEPHENSON R, et al. Valuation of energy efficient certificates in buildings[J]. Energy and Buildings, 2018, 158: 1226-1240.
- [13] 张印贤, 王 星, 陶 凯, 等. 既有建筑节能改造市场发展协同激励有效性评价[J]. 科技进步与对策, 2017, 34(9): 69-76.
- [14] 乔志春, 孙迎春, 赵建昭. 影响建设工程施工质量的关键因素研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(8): 144-147.
- [15] 杨秋月. 基于区域创新环境的产学研协同创新影响因素研究[J]. 江淮论坛, 2016, (6): 84-88.
- [16] 范 琪, 蒋浩鹏. 基于灰色关联理论的山区公路线形影响因素分析[J]. 公路, 2020, (5): 51-54.
- [17] 尤 完, 刘学之. 基于 ISM 的绿色建造产业链协同影响因素研究[J]. 建筑经济, 2020, 41(1): 100-103.
- [18] 胡立伟, 李林育, 古含焱, 等. 山区长大下坡路段货车行车风险因素识别[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(1): 116-126.
- [19] 张仕廉, 聂李琴. 基于 DEMATEL 方法的建筑施工安全管理行为影响因素分析[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(1): 121-125.
- [20] 杨 姝, 李俊龙. 基于 DEMATEL-ISM 法的民航飞行员综合安全能力结构模型研究[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(4): 169-174.
- [21] 姜沁瑶, 李 洁. 基于 ISM 的建筑工人安全意识影响因素[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(3): 106-110.
- [22] 张涑贤, 杨元元, 范 鑫. 基于 DEMATEL-ISM 的建筑供应链低碳化影响因素分析[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(19): 18-27.
- [23] 杨传明, 李晓峰. 多粒度复杂产品供应链低碳设计[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(7): 1717-1725.
- [24] 曾凡奎, 王 婷. 基于 DEMATEL 和 ISM 的支模脚手架高处坠落事故致灾因素建模[J/OL]. 沈阳工业大学学报, 2018: (2018-11-20)[2020-03-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1189.T.20181116.1636.002.html>.
- [25] 孙 晶. 复杂系统 DEMATEL 阈值确定方法研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2018.
- [26] 薛 伟, 耿志伟, 王海滨, 等. 集成 DEMATEL/ISM 的木材产业园消防风险影响因素研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2019, 52(6): 99-104.