

## 复杂系统 DEMATEL 算法研究进展评述

孙永河<sup>†</sup>, 韩 玮, 段万春

(昆明理工大学 管理与经济学院, 昆明 650093)

**摘要:** 决策试行与评价实验室 (DEMATEL) 作为一种面向复杂社会经济系统问题的因素分析算法, 近年来已受到国内外学者的广泛关注, 对其进行系统深入的研究有着重要的理论意义和应用价值. 为此, 在简述该算法操作步骤的基础上, 从 DEMATEL 算法基本理论、群组 DEMATEL 多专家信息集成、该算法与其他方法交叉融合 3 个视角对近年来 DEMATEL 相关研究进展予以评述. 最后, 对该算法未来可能的研究方向进行了展望.

**关键词:** 决策试行与评价实验室; 复杂系统; 群组决策; 偏好判断; 影响矩阵

中图分类号: C934

文献标志码: A

## Review on research progress of DEMATEL algorithm for complex systems

SUN Yong-he<sup>†</sup>, HAN Wei, DUAN Wan-chun

(Faculty of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** The decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) as an algorithm targeted for the study and resolution of complicated socioeconomic system issues, has been widely applied by local and overseas scholars in recent years. The study of the algorithm has significant theoretical and practical importance. On the basis of summarization of the DEMATEL procedures, this paper presents a review of recent advances in the DEMATEL algorithm from three aspects, i.e., the basis theory, the integration of multiple expert information for group DEMATEL, and its connection with other methods. Finally, several possible future research directions of the DEMATEL algorithm are recommended.

**Keywords:** decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL); complex systems; group decision-making; preference judgment; influence matrix

### 0 引言

在当前科技发展日新月异的知识经济时代, 组织生存环境面临复杂性和不确定性, 竞争环境日益激烈, 给组织管理带来了更多难题. 如何在错综复杂的组织情境中, 迅速抓住管理的主要矛盾并对其采取行之有效的措施, 便成为组织管理和决策中的一个重要研究课题. 日内瓦研究中心的 Gabus 和 Fontela 两位教授于 20 世纪 70 年代所提出的决策试行与评价实验室 (DEMATEL) 是一种面向复杂系统因素分析的算法. 该算法基于图论通过构建分析结构模型来认知复杂社会因素之间的因果关联关系并辨析关键要素, 近年来因其普适性和机理简洁性而备受国内外学者尤其亚太地区学者的关注, 并在系统工程、管理科学诸多领域得以大量推广应用<sup>[1-14]</sup>.

伴随着该算法实践应用的热潮, 一些学者主要从

方法交叉融合、群组决策、系统层次结构等方面对传统 DEMATEL 理论予以了深入思考和完善<sup>[15-16]</sup>, 为进一步创新和发展该算法奠定了重要理论基础. 此外, Dytczak 等<sup>[17]</sup>对模糊 DEMATEL 算法引入专家模糊判断信息的必要性和有效性予以了质疑, 并通过实验分析指出, 如何科学使用模糊 DEMATEL 算法目前仍存在较大的学术争议. Lee 等<sup>[18]</sup>则更尖锐地指出, 传统 DEMATEL 算法因武断假设直接影响矩阵 (DIM) 的极限矩阵为零矩阵而可能导致基于 DIM 导出的综合影响矩阵 (TIM) 不收敛, 因此其算法机理的科学合理性也亟待进一步论证.

然而, 迄今为止, 从收集到的已有文献看, 学者们针对 DEMATEL 相关研究成果仍主要集中在应用层面, 从理论层面上开展的相关研究仍较为分散, 系统性较差. 鉴于此, 本文在 DEMATEL 算法概述的基础

收稿日期: 2016-08-26; 修回日期: 2016-11-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71561015, 71261013); 云南省应用基础研究面上项目 (2015FB137, 2015FB116); 昆明理工大学管经学院热点 (前沿) 科研支撑计划项目 (QY2015047).

作者简介: 孙永河 (1978—), 男, 教授, 博士, 从事复杂系统管理决策等研究; 韩玮 (1981—), 女, 讲师, 博士生, 从事复杂系统管理决策的研究.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: syhch@126.com

上,按分类辨识的分析思路对国内外相关研究现状与发展动态予以评述.

## 1 DEMATEL算法的基本步骤

DEMATEL算法是为解决实践中复杂社会经济系统问题而提出的,确切地说,是为现实社会中零散和对立的问题寻求一种整体解决方案,并探索这类问题的本质<sup>[18]</sup>.该算法的基本步骤如下:

1)构造直接影响矩阵.设某系统 $S$ 有 $n$ 个因素,记为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ ,先请专家对因素之间影响强度进行判断,并对专家的语言标度评价按照0、1、2、3、4共5级标度转化为非负整数,再由此绘制所有影响因素之间的关联关系有向图,从而构造出初始直接影响矩阵 $G = [g_{ij}]_{n \times n}$ , $g_{ij}$ 为因素 $s_i$ 对因素 $s_j$ 的直接影响程度, $g_{ii}=0, i = 1, 2, \dots, n$ .

2)将矩阵 $G$ 规范化.记规范化后的直接影响矩阵为 $X$ ,则其计算式为

$$X = G / \max_{1 < j < n} \sum_{j=1}^n g_{ij}. \quad (1)$$

3)构造综合影响矩阵 $T$ .具体算式为

$$T = (t_{ij})_{n \times n} = \lim_{l \rightarrow \infty} (X + X^2 + \dots + X^l) = X(I - X)^{-1}. \quad (2)$$

其中: $t_{ij}$ 反映的是因素 $s_i$ 对因素 $s_j$ 的综合影响程度, $I$ 为单位矩阵.

4)求解系统因素的中心度和原因度.首先,计算综合影响矩阵 $T$ 的行和 $f_i$ 与列和 $e_i$ .这里: $f_i$ 表示因素 $s_i$ 对其他因素的直接和间接影响之和,称为 $s_i$ 的影响度; $e_i$ 表示因素 $s_i$ 受到其他因素的直接和间接影响之和,称作 $s_i$ 的被影响度.在此基础上,最终得出因素 $s_i$ 的中心度 $f_i + e_i$ (该指标表征因素 $s_i$ 在系统中的相对重要程度)和原因度 $f_i - e_i$ (若 $f_i - e_i > 0$ ,则 $s_i$ 为原因因素,反之为结果因素).

## 2 DEMATEL算法基础理论进展分析

目前,DEMATEL已在供应链管理<sup>[5-7]</sup>、项目投资<sup>[1,19]</sup>、安全管理<sup>[20]</sup>等诸多领域得到了广泛应用.然而,从方法创新视角看,相关研究成果却为数不多.

### 2.1 关于专家偏好判断信息表达方式的研究进展

目前,在DEMATEL及其拓展的方法中,有如下3类专家判断信息的表达方式:点估计判断信息<sup>[19-21]</sup>、模糊数估计信息<sup>[22-26]</sup>和灰数估计信息<sup>[27-29]</sup>.尤其是后两种表达方式近年来应用频率较高.一些学者考虑到DEMATEL分析过程中专家偏好判断的不确定性和模糊性,形成了将模糊数及灰数估计直接添加到DEMATEL算法中的诸多“简单集成型”研究成

果.这类成果虽然从表象上看似乎合理,但它们片面追求模型机理的复杂性,试图用复杂的方法(模糊或灰色DEMATEL)研究复杂的客体.然而,复杂的方法是否能真正科学反映复杂客体的内在机理,是否较之简单的方法(传统DEMATEL)更为科学有效,是否比简单方法对于复杂事物机理的阐释更为精辟?这类问题目前鲜有学者予以系统的理性思考.比如,同样是基于三角模糊数估计信息而导出的模糊DEMATEL算法,在采用5级标度对反映系统因素之间存在较低影响关系时却出现了 $(0, 1.5, 2.5)$ <sup>[22]</sup>、 $(0.1, 0.3, 0.5)$ <sup>[23-24]</sup>、 $(0, 0.25, 0.5)$ <sup>[25-26]</sup>3种截然不同的三角模糊数表达.那么究竟何种三角模糊数能更好地反映实际决策情境、更为有效,迄今仍是困惑专家学者的一个重要问题.文献[30]认为,二重模糊语言专家信息表达方式在信息处理过程中能够有效避免信息损失,因此它较之现有模糊DEMATEL通常采用的三角模糊数专家信息表达形式更为合理.为检验上述问题,Dytczak等<sup>[17]</sup>进一步通过一系列数值实验验证指出,基于一种常用的模糊DEMATEL得出的分析结果与传统DEMATEL得出的结果几乎完全相同,继而他们质疑“引出模糊判断信息是否必要的问题”,并建议DEMATEL算法引入模糊数专家信息表达方式需进行彻底的再思考.对此问题,作者认为,机理相对复杂的模糊或灰色DEMATEL算法目前仅停留在算例验证的层面而缺乏严密的数理有效性论证,显然难以保证其分析结果的可靠性.事实上,正如著名运筹学家Saaty教授以及模糊数学专家Tran在研究模糊AHP时所指出的,AHP所采用的1-9标度本身就已经很模糊了,再度模糊化已无任何意义<sup>[31-32]</sup>.文献[33-34]在对模糊AHP进行评述时也认同上述观点.因此,与之类似,模糊或灰色DEMATEL算法在专家信息的表达时实质上已经体现出模糊或灰色理论在DEMATEL理论中的应用价值,再度模糊化或灰色化可能存在“画蛇添足”之嫌疑.

### 2.2 关于DEMATEL系统因素自依赖的研究进展

Tamura等<sup>[35-36]</sup>最先指出DEMATEL算法因忽视因素内在强度(因素内在的力量或重要性)而导致该算法存在本质理论缺陷的问题,并创新性地提出了基于复合重要性概念内涵的改进DEMATEL算法(即随机DEMATEL).显然,该算法在探索DEMATEL自我影响(自依赖)机理方面具有重要理论价值,但Michnik<sup>[37]</sup>随即指出随机DEMATEL在理论推导时割裂了系统因素自依赖与因素之间影响的内在关联关系,从方法论上看仍体现的是“ $1 + 1 = 2$ ”的

还原论思想,因此难以反映蕴含在复杂系统内部因素之间的复杂性、非线性关系。基于上述理论认识,Michnik在著名的欧洲运筹学刊物(EJOR)上给出一种改进的DEMATEL算法(即WINGS算法——weighted influence non-linear gauge system),对于科学分析复杂系统关联因素之间的作用机理以及完善结构建模理论均奠定了坚实的研究基础。遗憾的是,WINGS目前看存在以下不足:

1)算法仍停留在案例验证层面,其科学有效性尚需进一步给出严密的数理推证,且仍有待与其他同类考虑系统因素自依赖的方法(如网络分析法、Choquet积分等),予以对比验证和实践应用检验;

2)因素之间的负向影响尚未予以考虑。

### 2.3 关于DEMATEL影响矩阵的研究进展

传统DEMATEL实质上默认规范化后的DIM极限矩阵为零矩阵,否则TIM无解<sup>[38]</sup>。但是这一假设经常与实际决策情境不符,例如,当DIM的所有行和与列和均等值时,TIM矩阵无解<sup>[37]</sup>。对于此问题,Lee等<sup>[18]</sup>予以了推理验证,指出当且仅当DIM的规范化矩阵所有行和都小于1时,TIM才收敛,然而他们给出的DIM规范化方法仅是TIM收敛的充分而非必要条件。与之类似,Michnik<sup>[37]</sup>虽然也通过计算DIM所有元素之和提出了一种新的DIM规范化处理方法,但尚未给出任何数理推导过程,因此其科学性也亟待进一步验证。由此可见,关于“如何对DIM矩阵进行规范化数学处理”这一DEMATEL核心问题目前学术界仍未达成共识。不仅如此,文献[14]和文献[30]分别结合研发项目选择以及IT外包风险因素辨识问题对传统DEMATEL影响矩阵的构造方式提出了质疑。他们认为,在DEMATEL系统分析过程中既要考虑构造DIM,也要考虑构造非直接影响矩阵,从而在方法机理上对传统DEMATEL的科学合理性予以了颠覆性创新。虽然这种创新模式体现出一定的合理性,但是将系统因素之间的综合影响机理还原成直接影响与非直接影响的简单之和,仍难以有效反映复杂系统因素之间相互作用所产生的涌现性、突变性等特征。

### 2.4 关于DEMATEL阈值确定的研究进展

DEMATEL算法通过中心度和原因度两个核心指标的计算,不仅能够对系统因素的相对重要性进行排序,而且也能揭示出系统因素之间的因果关系,并将其直观地用因果图予以表达。为降低问题的复杂性、抓住事物的主要矛盾以及简化因果图表达,一些学者提出系统决策者应设定一个阈值。若TIM矩

阵中元素小于该值,则说明其对系统中其他元素的影响可忽略不计,即视为无影响。从已有相关成果看,目前阈值的确定有3种方式。第1种是多专家共同确定法<sup>[39-40]</sup>。它笼统地强调要请多位专家共同予以确定,但对于如何确定的具体过程机理却未作任何解释,显然该处理方式仅停留在初步认知层面而缺乏实际应用的可操作性。第2种是均值法<sup>[4,41]</sup>,即通过求解TIM矩阵元素的平均值来予以确定。若按此处理方式,则有近半数的因素影响关系被人为删除,显然是对系统因素因果机理关系的认知歪曲。不难发现,该方式因具有较强的主观武断性而显得过于牵强。第3种是基于统计分布的确定法<sup>[42]</sup>。它将均值法进行了拓展,提出采用 $\mu + 1.5\sigma$ 计算阈值,其中 $\mu, \sigma$ 分别为TIM矩阵元素的均值与标准差。虽然该方式考虑了TIM数据的统计分布规律,但它实质上是假设TIM数据呈现正态分布的内在规律,与现实情况可能不相符。因此,目前关于DEMATEL阈值确定的方法仍是学术界面临的一个悬而未决的理论难题。

### 2.5 关于DEMATEL评价标度的研究进展

DEMATEL算法最初采用0,1,2,3标度(0表示无影响,1、2、3分别表征影响小、影响大、影响极大)反映因素之间的直接影响关系<sup>[43-44]</sup>。此外,Wu等<sup>[8]</sup>、Lin等<sup>[45]</sup>、Chen等<sup>[46]</sup>将其进行了拓展,提出采用0,1,2,3,4评价标度(0仍表征无影响,1、2、3、4分别表示影响小、影响适中、影响大、影响极大)分析复杂问题,迄今该标度已被专家学者广泛采用。与上述评价标度不同,文献[42]给出了一种新的DEMATEL标度方法,即使用0~10(即从无影响到极高的影响按整数逐级递增)对系统因素之间的影响关系进行分析。鉴于此,文献[17]进一步给出了更具一般性的标度,认为反映因素之间影响强度的评价标度可记为 $0 - N$ , $N$ 为任意假定的正整数。最近,Wu等<sup>[43]</sup>则提出了另一种新的DEMATEL标度法即1-5标度(1为因素之间无影响、2为极低影响、3为低影响、4为高影响、5为极高影响),创新性地将无影响用1来标度。

综合上述观点可知,目前关于DEMATEL评价标度不仅存在较大的学术争议,而且也缺乏标度之间的对比评价研究成果。因此,类似于AHP、ANP描述因素相对重要性权重的评价标度,虽然学术界进行了较长时间的争论和探讨,但1-9标度因其建立在严格的心理测试基础上而逐步得到人们的高度认可。同理,DEMATEL的评价标度从有效反映专家的偏好判断信息来看实质上也不应是任意假设的,而是依据分

析问题的复杂性、心理学实验结果进行标度选择,这也是将来创新和发展 DEMATEL 算法亟待解决的一个核心环节。

### 3 群组 DEMATEL 算法多专家信息集成进展分析

Tindale 等<sup>[47]</sup>指出,重要的组织决策通常是通过集成群组专家(如高层管理团队、决策咨询委员会等)的信息而最终作出的。然而,如何紧密结合不同组织的差异化决策情境选择科学的群组信息集成方法(规则或模式)迄今仍是学术界面临的一个重要研究挑战<sup>[48]</sup>。针对群组信息集成的规则问题,事实上学者们已经进行了诸多的前期探索研究。例如, Hastie 等<sup>[49]</sup>研究提出 9 种集成规则(包括专家委员会商讨、多数人赞同投票法、均值法等),并探讨了这些集成规则的绩效。然而,他们的研究是建立在线索值线性结合的测试环境假设基础上,在该情境下由于均值法(即将多位专家的判断值取算术平均)能够反映线性环境的假设特性,因此它是相对最优的集成规则;并且在线性假设情境下,他们认为多数人赞同的投票法因类似于均值法而优于专家委员会商讨的集成规则。Kameda 等<sup>[50]</sup>指出,多数人赞同的投票规则即使群组成员是利己主义者并且部分成员决定逃避投票责任的情况下也能够有效地提取专家的共有信息。Cai 等<sup>[51]</sup>则随即对该观点进行了有力地反驳,他们通过实验模拟分析指出,多数人赞同的投票规则在管理实践应用中并不可靠,实质表现为一只“纸老虎(paper tiger)”。与此同时,一些学者对哪种群组专家信息集成规则更为合理、有效也进行了积极的理性反思,如 Larrick 等<sup>[52]</sup>认为,均值法因经常出现反直觉的现象而难以刻画真实的客观世界。进一步,他们提出建立一个规范化的集成规则选择框架,并通过实验测试确定出该框架的适用人群<sup>[53]</sup>,遗憾的是该选择框架目前仍局限于概念模型层面内,实践操作性较差。在此基础上,Csaszar 等<sup>[48]</sup>明确指出,已有专家信息集成规则的有效性主要取决于个体专家的相关知识积累(或称作知识宽度)和环境变革两个关键因素,但诚如他们所言,在确定这两个关键因素时,需要测度专家判断的相对准确性并有效提取专家判断信息。因此,从已有成果看,如何科学地解决群组 DEMATEL 多专家信息集成问题学术界仍未达成共识。

作者认为,关于专家信息集成规则的科学选择,不仅要考虑专家信息的准确性、易获得性,而且要考虑不同组织专家选取的结构特征、专家之间的关联

性影响、内外界环境的动态变化性,更重要的是,不能简单用纯粹的量化思维替代复杂性思维,也不能用简单的线性思维替代非线性思维。就群组 DEMATEL 多专家信息集成规则而言,从收集到的文献看无一例外采用的都是均值法集成规则<sup>[2,4,5,20,54-55]</sup>。这不仅忽视了均值法使用的线性环境假设及其他规则适用条件,而且也未考虑到均值法在群组信息集成时只能取 DEMATEL 标度值(如 0、1、2、3 等)而可能出现近似计算误差,并且均值集成结果极有可能取标度值的中值(如 0.5、1.5、2.5 等)而导致算法失效。由此可见,目前关于群组 DEMATEL 多专家信息的集成机理研究尚处于起步阶段,更多的群组 DEMATEL 信息集成规则的适用范围、条件需结合不同组织结构特征、组织环境的动态变化规律、群组成员之间信息交互模式等要素进行深入探索研究。

### 4 DEMATEL 与其他方法的交叉融合进展分析

#### 4.1 与多准则决策方法交叉融合的研究进展

从方法集成创新视角,Michnik<sup>[37]</sup>最先提出了融合多准则决策的 DEMATEL 算法,但正如他所言,这种交叉融合目前仍处于案例探索阶段,尚缺乏规范的方法理论推证。事实上,融合多准则决策的 DEMATEL 算法在分析系统因素的影响程度时仍建立在固权假设(即因素之间影响强度不因系统方案的变化而变化)的基础上,在一般情况下与实际不符。因此,从有效反映复杂系统事物之间的非线性本质联系看,DEMATEL 变权决策算法研究是一项有重要学术前景的前沿课题。

#### 4.2 与 ISM(解释结构模型)交叉融合的研究进展

DEMATEL 与 ISM 方法有如下两个共同特征,其一是反映事物之间影响关系的传递性;其二是通过影响矩阵表达专家信息。周德群等<sup>[56]</sup>指出,DEMATEL 算法中的 TIM 较之于 ISM 中的可达矩阵(RM)能够获得更多有价值的信息(如因素之间的影响强度信息、因素自我依赖信息),考虑到 RM 矩阵计算的复杂性,建议使用 TIM 替代 RM 矩阵来进行复杂系统层次结构划分,从而真正实现两种方法的优势互补和全新融合。遗憾的是,该文尚未考虑 DEMATEL 因素自依赖影响关系,因此有待于进一步深化。

#### 4.3 与 ANP 等方法交叉融合的研究进展

近年来,学术界涌现出诸多 DEMATEL 结合 ANP、模糊 DELPHI、Choquet 积分、平衡记分卡、VIKOR 等方法的诸多研究成果<sup>[57-62]</sup>。分析上述成果可知,绝大多数文献仅是 DEMATEL 与一些方法的简

单集成,并没有实现真正意义上的方法交叉融合.文献[19,63-65]试图通过构造DEMATEL综合影响矩阵来替代ANP内部依存矩阵或加权矩阵(cluster-weighted matrix),虽然从方法创新融合视角有一定理论价值,但目前看不仅普遍存在缺乏“方法信息融合的科学严密性论证”这一内在不足,而且从实践操作效果看也过于牵强.事实上,Wu<sup>[66]</sup>也有类似的想法,他指出DEMATEL和ANP标度使用的不匹配会使专家在运用两种方法进行评判时存在较大的心理感知差异,因此这两种方法交叉融合的合理性问题也不容忽视.

作者认为,除标度不匹配问题外,两种方法对系统因素之间的“影响”认知也截然不同.DEMATEL中的“影响”概念,是指一般意义上因素之间存在的“影响”关系,而对于ANP中的“影响”概念,鉴于Saaty

教授在给出定义时存在的含糊性<sup>[67]</sup>,即在界定ANP支配、依赖、影响概念内涵时尚未从主客观本质上揭示它们之间的内在联系而仅是给出了难以用理性或有限理性思维理解的、反直觉的硬性规定.对此问题,Khademi等<sup>[68]</sup>进一步给出了理论解释,他们认为ANP中的“影响”与一般意义上的影响存在反向关系,它是指“因素之间存在的重要性影响(influence on importance)”,显然两者表征的概念内涵截然不同,若不加以区分混合使用必然导致系统概念逻辑混乱.

### 5 结论与展望

从DEMATEL算法研究现状看,目前该算法无论在理论层面还是应用方面均处于探索阶段,在因素自依赖关系科学界定、专家判断信息表达合理引入、群组专家信息集成、与其他方法的有机融合等方面仍不成熟,具体观点参见图1.

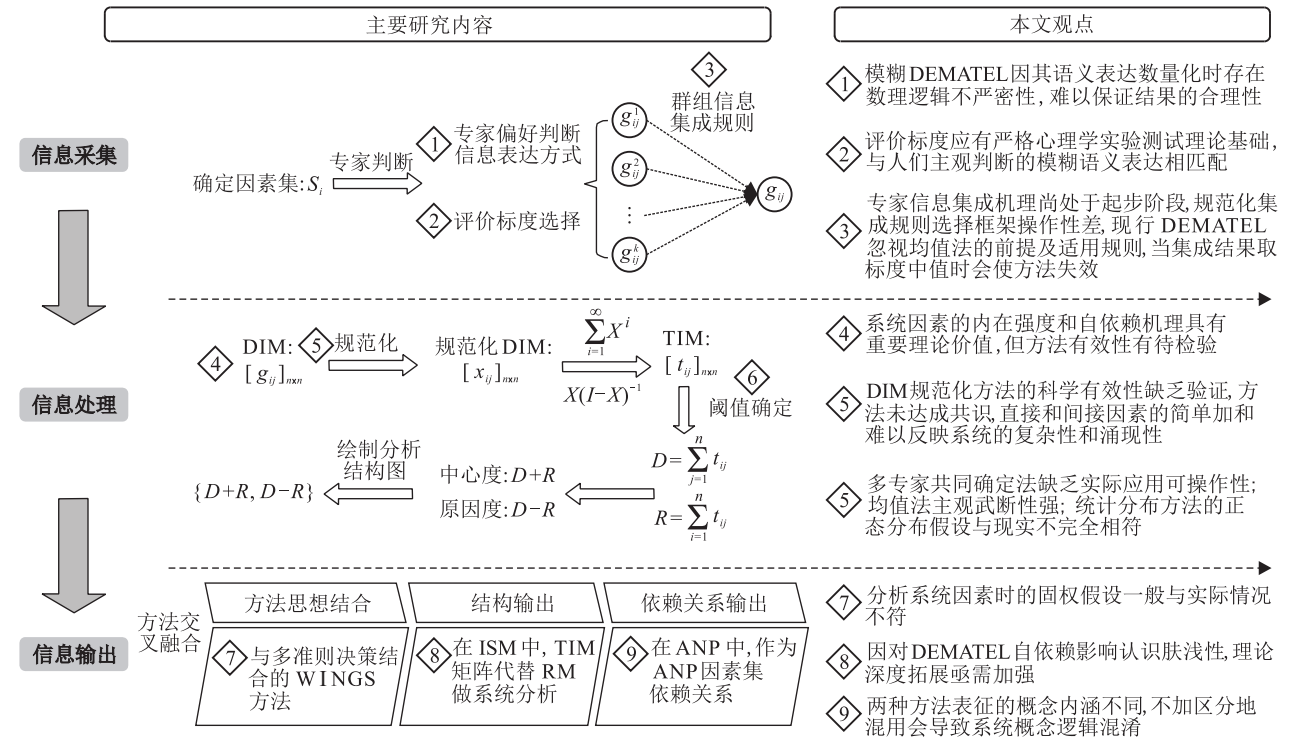


图1 DEMATEL研究进展框架

未来研究可以从以下几方面重点开展:

1)从复杂性科学、复杂系统视角认知DEMATEL算法.首先,充分考虑拟解决复杂系统问题的复杂性与关联性,在分析问题阶段,重点关注问题与DEMATEL算法的匹配性,如依据问题的复杂性合理选择群组专家的数量,分析组织环境的动态变化性,注重群组专家行为状态变化、交互模式对决策判断的影响.另外,DEMATEL群组专家信息集成时要有效运用非线性思维替代简单的线性思维,运用综合集成思维方法论替代简单还原论.其次,要考虑复杂系

统的层次性、涌现性特征与DEMATEL算法分析结构的契合,重点研究多层次多因素DEMATEL的算法机理.最后,考虑不同方案情境下DEMATEL算法的系统因素非线性影响特征,进一步系统研究融合方案情境下的变权DEMATEL算法,使算法机理能够有效反映待解决复杂问题的组织目标战略、组织资源约束等复杂决策环境.

2)从深度融合视角探析DEMATEL算法与其他算法的集成创新应用.虽然目前DEMATEL算法与ANP、ISM、Choquet积分、VIKOR等方法进行综合应

用的成果较为丰富,但部分研究成果存在较为明显的“拼凑”现象,不同算法之间的有机交叉融合仍难以实现.因此,未来应关注不同算法内涵的差异和融合机理的科学性,面向实际应用问题对DEMATEL相关算法进行融合创新,真正实现算法之间的优势互补,在管理实践中体现出更强的应用价值.

#### 参考文献(References)

- [1] Altuntas S, Dereli T. A novel approach based on DEMATEL method and patent citation analysis for prioritizing a portfolio of investment projects[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(3): 1003-1012.
- [2] Shaik M N, Abdul-Kader W. Comprehensive performance measurement and causal-effect decision making model for reverse logistics enterprise[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 68: 87-103.
- [3] Huang C N, Liou J J H, Chuang Y C. A method for exploring the interdependencies and importance of critical infrastructures[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2014, 55: 66-74.
- [4] Cebi S. Determining importance degrees of website design parameters based on interactions and types of websites[J]. *Decision Support Systems*, 2013, 54(2): 1030-1043.
- [5] Hsu C W, Kuo T C, Chen S H, et al. Using DEMATEL to develop a carbon management model of supplier selection in green supply chain management[J]. *J of Cleaner Production*, 2013, 56: 164-172.
- [6] Uysal F. An integrated model for sustainable performance measurement in supply chain[C]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. Antalya, 2012, 62: 689-694.
- [7] Rahman S, Subramanian N. Factors for implementing end-of-life computer recycling operations in reverse supply chains[J]. *Int J of Production Economics*, 2012, 140(1): 239-248.
- [8] Wu H H, Tsai Y N. A DEMATEL method to evaluate the causal relations among the criteria in auto spare parts industry[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2011, 218(5): 2334-2342.
- [9] 孙永河, 宋晓莹, 段万春, 等. 开放存取对期刊论文学术交流系统的影响因素分析[J]. *图书情报工作*, 2011, 55(24): 132-136.  
(Sun Y H, Song X Y, Duan W C, et al. Factors analysis of the influence of open access on scholarly communication system for journal articles[J]. *Library and Information Service*, 2011, 55(24): 132-136.)
- [10] Shieh J I, Wu H H, Huang K K. A DEMATEL method in identifying key success factors of hospital service quality[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2010, 23(3): 277-282.
- [11] Li C W, Tzeng G H. Identification of interrelationship of key customers' needs based on structural model for services/capabilities provided by a semiconductor-intellectual-property mall[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2009, 215(6): 2001-2010.
- [12] Lee Y C, Li M L, Yen T M, et al. Analysis of adopting an integrated decision making trial and evaluation laboratory on a technology acceptance model[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(2): 1745-1754.
- [13] Wu H Y. Constructing a strategy map for banking institutions with key performance indicators of the balanced scorecard[J]. *Evaluation and Program Planning*, 2012, 35(3): 303-320.
- [14] Lin C J, Wu W W. A causal analytical method for group decision-making under fuzzy environment[J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 34(1): 205-213.
- [15] Bai C G, Sarkis J. A grey-based DEMATEL model for evaluating business process management critical success factors[J]. *Int J of Production Economics*, 2013, 146(1): 281-292.
- [16] Su C M, Horng D J, Tseng M L, et al. Improving sustainable supply chain management using a novel hierarchical grey-DEMATEL approach[J]. *J of Cleaner Production*, 2015, 134: 469-481.
- [17] Dytczak M, Ginda G. Is explicit processing of fuzzy direct influence evaluations in DEMATEL indispensable?[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(12): 5027-5032.
- [18] Lee H S, Tzeng G H, Yeih W, et al. Revised DEMATEL: Resolving the infeasibility of DEMATEL[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(10/11): 6746-6757.
- [19] Lee W S, Huang A Y, Chang Y Y, et al. Analysis of decision making factors for equity investment by DEMATEL and analytic network process[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(7): 8375-8383.
- [20] Liou J J H, Yen L, Tzeng G H. Building an effective safety management system for airlines[J]. *J of Air Transport Management*, 2008, 14(1): 20-26.
- [21] Wu H H, Chang S Y. A case study of using DEMATEL method to identify critical factors in green supply chain management[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2015, 256(C): 394-403.
- [22] Gigovic L, Pamucar D, Lukic D, et al. GIS-Fuzzy DEMATEL MCDA model for the evaluation of the sites for ecotourism development: A case study of "Dunavski kljuc" region, Serbia[J]. *Land Use Policy*, 2016, 58: 348-365.
- [23] Jeng J F. Generating a causal model of supply chain collaboration using the fuzzy DEMATEL technique [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 87: 283-295.

- [24] Jeng J F, Tzeng G H. Social influence on the use of clinical decision support systems: Revisiting the unified theory of acceptance and use of technology by the fuzzy DEMATEL technique[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, 62(3): 819-828.
- [25] Akyuz E, Celik E. A fuzzy DEMATEL method to evaluate critical operational hazards during gas freeing process in crude oil tankers[J]. *J of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 38: 243-253.
- [26] Wu W W. Segmenting critical factors for successful knowledge management implementation using the fuzzy DEMATEL method[J]. *Applied Soft Computing*, 2012, 12(1): 527-535.
- [27] Xia X, Govindan K, Zhu Q. Analyzing internal barriers for automotive parts remanufacturers in China using grey-DEMATEL approach[J]. *J of Cleaner Production*, 2015, 87(1): 811-825.
- [28] Rajesh R, Ravi V. Modeling enablers of supply chain risk mitigation in electronic supply chains: A grey-DEMATEL approach[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 87: 126-139.
- [29] Tseng M L. A causal and effect decision making model of service quality expectation using grey-fuzzy DEMATEL approach[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(4): 7738-7748.
- [30] Fan Z P, Suo W L, Feng B. Identifying risk factors of IT outsourcing using interdependent information: An extended DEMATEL method[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(3): 3832-3840.
- [31] Saaty T L, Tran L T. On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the analytic hierarchy process[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2007, 46(7/8): 962-975.
- [32] Saaty T L, Tran L T. Fuzzy judgments and fuzzy sets[J]. *Int J of Strategic Decision Sciences*, 2010, 1(1): 23-40.
- [33] 朱克毓, 杨善林. 关于 Saaty 对模糊逻辑不适用于 AHP 观点的评述[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(1): 197-206.  
(Zhu K Y, Yang S L. Research review on Saaty's comments on fuzzy logics is not applicable to analytic hierarchy process[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2014, 34(1): 197-206.)
- [34] Zhu K Y. Fuzzy analytic hierarchy process: Fallacy of the popular methods[J]. *European J of Operational Research*, 2014, 236(1): 209-217.
- [35] Tamura H, Akazawa K, Tamura H, et al. Structural modeling and systems analysis of uneasy factors for realizing safe, secure and reliable society[M]. Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2005: 36-48.
- [36] Tamura H, Akazawa K. Stochastic DEMATEL for structural modeling of a complex problematique for realizing safe, secure and reliable society[J]. *J of Telecommunications and Information Technology*, 2005(4): 139-146.
- [37] Michnik J. Weighted influence non-linear gauge system (WINGS) — An analysis method for the systems of interrelated components[J]. *European J of Operational Research*, 2013, 228(3): 536-544.
- [38] Papoulis A, Pillai S U. Probability, random variables, and stochastic processes[M]. New York: Mcgraw-Hill, 2002: 122-127.
- [39] Li Y, Hu Y, Zhang X, et al. An evidential DEMATEL method to identify critical success factors in emergency management[J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 22(5): 504-510.
- [40] Hsu C C. Evaluation criteria for blog design and analysis of causal relationships using factor analysis and DEMATEL[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(1): 187-193.
- [41] Wu H H, Chen H K, Shieh J I. Evaluating performance criteria of employment service outreach program personnel by DEMATEL method[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(7): 5219-5223.
- [42] Tzeng G H, Huang C Y. Combined DEMATEL technique with hybrid MCDM methods for creating the aspired intelligent global manufacturing & logistics systems[J]. *Annals of Operations Research*, 2012, 197(1): 159-190.
- [43] Wu K J, Liao C J, Tseng M L, et al. Exploring decisive factors in green supply chain practices under uncertainty[J]. *Int J of Production Economics*, 2014, 159: 147-157.
- [44] Uygun O, Kacamak H, Kahraman U A. An integrated DEMATEL and fuzzy ANP techniques for evaluation and selection of outsourcing provider for a telecommunication company[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 86: 137-146.
- [45] Lin W R., Wang Y H, Hung T E. Selecting mobile banking system service for consumers by using a combined DEMATEL and ANP approach[J]. *J of Accounting, Finance & Management Strategy*, 2012, 7(1): 1-14.
- [46] Chen F H, Hsu T S, Tzeng G H. A balanced scorecard approach to establish a performance evaluation and relationship model for hot spring hotels based on a hybrid MCDM model combining DEMATEL and ANP[J]. *Int J of Hospitality Management*, 2011, 30(4): 908-932.
- [47] Tindale R S, Kameda T, Hinsz V B. Group decision making[M]. London: Sage Publications, 2003: 86-94.
- [48] Csaszar F A, Eggers J P. Organizational decision making: An information aggregation view[J]. *Management Science*, 2013, 59(10): 2257-2277.
- [49] Hastie R, Kameda T. The robust beauty of majority rules in group decisions[J]. *Psychological Review*, 2005,

- 112(2): 494-508.
- [50] Kameda T, Davis J H. The function of the reference point in individual and group risk decision making[J]. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 1990, 46(1): 55-76.
- [51] Cai J, Garner J L, Walkling R A. A paper tiger? An empirical analysis of majority voting[J]. *J of Corporate Finance*, 2013, 21(1): 119-135.
- [52] Larrick R P, Soll J B. Intuitions about combining opinions: Misappreciation of the averaging principle[J]. *Management Science*, 2006, 52(1): 111-127.
- [53] Soll J B, Larrick R P. Strategies for revising judgment: How(and how well) people use others' opinions[J]. *J of Experimental Psychology Learning Memory & Cognition*, 2009, 35(3): 780-805.
- [54] Liu H, You J, Lu C, et al. Evaluating health-care waste treatment technologies using a hybrid multi-criteria decision making model[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 932-942.
- [55] Seyed-Hosseini S M, Safaei N, Asgharpour M J. Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2006, 91(8): 872-881.
- [56] 周德群, 章玲. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统层次划分研究[J]. *管理科学学报*, 2008, 11(2): 20-26. (Zhou D Q, Zhang L. Establishing hierarchy structure in complex systems based on the integration of DEMATEL and ISM[J]. *J of Management Sciences in China*, 2008, 11(2): 20-26.)
- [57] Golcuk I, Baykasoglu A. An analysis of DEMATEL approaches for criteria interaction handling within ANP[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 46(C): 346-366.
- [58] Shafiee M, Lotfi F H, Saleh H. Supply chain performance evaluation with data envelopment analysis and balanced scorecard approach[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(21/22): 5092-5112.
- [59] OuYang Y P, Shieh H M, Tzeng G H. A VIKOR technique based on DEMATEL and ANP for information security risk control assessment[J]. *Information Sciences*, 2013, 232(5): 482-500.
- [60] 章玲, 周德群, 高岩, 等. 基于 DEMATEL 和 Choquet 积分的文明城市测评方法研究[J]. *科研管理*, 2012, 33(9): 71-77. (Zhang L, Zhou D Q, Gao Y, et al. The evaluation method of civil cities based on DEMATEL and Choquet integral[J]. *Science Research Management*, 2012, 33(9): 71-77.)
- [61] Buyukozkan G, Ozturkcan D. An integrated analytic approach for six sigma project selection[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(8): 5835-5847.
- [62] Tsai W H, Chou W C. Selecting management systems for sustainable development in SMEs: A novel hybrid model based on DEMATEL, ANP, and ZOGP[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(2): 1444-1458.
- [63] Liou J J H, Chuang Y C, Tzeng G H. A fuzzy integral-based model for supplier evaluation and improvement[J]. *Information Sciences*, 2014, 266(5): 199-217.
- [64] Lu M T, Lin S W, Tzeng G H. Improving RFID adoption in Taiwan's healthcare industry based on a DEMATEL technique with a hybrid MCDM model[J]. *Decision Support Systems*, 2013, 56: 259-269.
- [65] Yang J L, Tzeng G H. An integrated MCDM technique combined with DEMATEL for a novel cluster-weighted with ANP method[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(3): 1417-1424.
- [66] Wu W W. Choosing knowledge management strategies by using a combined ANP and DEMATEL approach[J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 35(3): 828-835.
- [67] Saaty T L. *The analytic network process: Decision with dependence and feedback*[M]. Pittsburgh: RWS Publications, 2004: 109-123.
- [68] Khademi N, Mohaymany A S, Shahi J, et al. An algorithm for the analytic network process (ANP) structure design[J]. *J of Multi-Criteria Decision Analysis*, 2012, 19(1/2): 33-55.

(责任编辑: 曹洪武)