

doi: 10.3969/j.issn.1000-7695.2014.02.047

基于贝叶斯网络的工程项目交易方式选择

陈勇强, 李德祯

(天津大学管理与经济学部, 天津 300072)

摘要: 将影响工程项目交易方式选择因素划分为内生因素和外生因素, 通过问卷调查所得数据构建了用于工程项目交易方式选择的贝叶斯网络, 在内生因素、外生因素与项目绩效间建立影响关系结构并得到参数; 探索影响工程项目交易方式选择因素之间的交互关系。所构建的贝叶斯网络不仅可以用于工程项目交易方式选择决策, 也加深对工程项目交易方式本质属性的认识。

关键词: 工程项目交易方式; 贝叶斯网络; 内生因素; 外生因素

中图分类号: F284; C934

文献标志码: A

文章编号: 1000-7695 (2014) 02-0220-06

Study on Project Delivery System Selection Based on Bayesian Network

CHEN Yongqiang, LI Dezhen

(School of Management, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The paper classified the factors in the selection of PDS into interior and exterior factors and built a Bayesian network for PDS selection that sets up ties among interior and exterior factors through data collected by a questionnaire survey. It also researched the interaction among the factors in the selection of PDS. The Bayesian network is useful not only in the decision making of the selection of PDS, but also contributes to the understanding the nature of PDS.

Key words: project delivery system; Bayesian network; interior factors; exterior factor

1 引言

工程项目交易方式国际上英文多称为 Project Delivery System (PDS), PDS 是对项目实施过程中涉及的融资、设计、施工、运营与维修等活动的统筹规划^[1]; 同时还包括了项目各参与方的职责划分^[2]、风险分担和利益分配方式^[3]。所以, 选择适合的 PDS 是影响工程项目成功的重要因素之一^[4]。

国内外学者提出了大量的理论模型以期能够帮助决策者更加系统、科学地选择适合的 PDS, 这些方法主要是通过识别影响 PDS 选择因素, 并建立其与项目绩效间的关系, 从而对那些对绩效有显著影响的因素予以关注, 进而选择适合的 PDS。PDS 的选择受很多因素影响, 如业主的目标、项目特征和外部环境等^[5], 同时这些影响 PDS 选择因素之间存在着交互关系^[1], 并非简单、直接地对项目绩效产生影响。然而, 学者们对影响 PDS 选择因素关系的研究较少, 缺乏对影响 PDS 选择因素与项目绩效间机理的考察, 无法分析影响 PDS 选择的各因素之间的交互影响。

本文将影响 PDS 选择因素划分为内生因素和外

生因素, 建立内生因素、外生因素与项目绩效间的影响关系图式, 通过样本数据学习得到用于 PDS 选择的贝叶斯网络结构及节点参数, 分析影响 PDS 选择因素之间的关系, 探索影响 PDS 选择因素与项目绩效间的内在关系, 为工程项目 PDS 选择决策方法在理论和实践上提供新的思路。

2 文献综述

国内外学者针对 PDS 选择的研究主要集中在两个方面: 一是识别影响 PDS 选择因素, 建立影响 PDS 选择因素指标体系; 二是在指标体系的基础上, 使用不同的数学方法, 构建 PDS 选择理论模型。

在进行影响 PDS 选择因素识别的过程中, 由于学者们的研究视角, 使用的数学方法不同, 所以识别的影响 PDS 选择因素不尽相同, 从最初简单的项目特征, 如项目规模, 项目范围、复杂性等, 到有些学者引入业主与承包商特征, 如业主经验、承包商能力等, 再逐渐包含外部环境因素, 如市场竞争性等。可以看出, 学者们所构建的影响 PDS 选择因素指标体系所涵盖范围越来越广, 所包含内容越来越系统, 如表 1 所示。为便于表述, 本文将学者们

收稿日期: 2013-03-28, 修回日期: 2013-06-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“重大工程项目风险识别、度量与控制的理论与方法研究”(71231006); 国家自然科学基金面上项目“面向过程的工程项目交易方式选择及其实证研究”(71072156)

对影响 PDS 选择因素进行了整理和整合，将一些名称不同，但表达意思相近的影响 PDS 选择因素合并，如“风险分配”与“业主承担风险的意愿”。

在建立影响 PDS 选择因素指标体系后，学者们将影响 PDS 选择因素量化，并采用多种方法构建 PDS 定量选择模型，例如多属性效用方法^[12]、多元统计分析方法^[13]、层次分析法 (Analytical Hierarchical Process, AHP)^[8]和模糊逻辑方法^[14-15]等；这些方法主要是识别影响 PDS 选择因素，并建立其与项目绩效间的关系，从而对那些对绩效有显著影响的因素予以关注。此外，还有非参数的方法，如基于案例的推理方法 (Case Based Reasoning, CBR)^{[5] [11] [16]}，通过选择与待评价项目“距离”最近的案例项目，作为业主选择 PDS 的参考。

表 1 影响 PDS 选择因素

影响 PDS 的因素	文献						
	a	b	c	d	e	f	g
建设速度	√	√					
竣工时间	√		√	√	√	√	√
成本确定性	√	√		√	√	√	√
质量水平	√	√		√	√	√	
责任	√	√	√				
价格竞争度	√	√	√				
风险分配/风险管理	√	√		√	√		√
争端与仲裁	√				√		
公共责任	√						
政治问题	√						
项目范围			√	√	√	√	
项目规模				√	√	√	√
项目类型					√	√	√
灵活性	√	√			√		
复杂性	√	√		√	√		√
可施工性			√				
价值工程			√	√			
独特性				√			
总包合同			√				
可行性			√				
设计控制			√				
授予合同后业主参与			√		√		√
业主经验				√			
自身能力					√		
财务保证				√			
外部许可				√			
文化				√			
承包商能力					√	√	
市场竞争性					√	√	√
法规可行性					√	√	√
技术水平					√	√	√

注：a = Ng et al (2002)^[6]；b = Cheung et al (2001)^[7]；c = Al Khalil (2002)^[8]；d = Mafakheri et al (2007)^[9]；e = Chen et al (2011)^[10]；f = Luu et al (2005)^[5]；g = Luu et al (2003)^[11]。

然而，影响 PDS 选择因素分布在项目执行的过程中，而且这些影响 PDS 选择因素与项目绩效的关系是动态变化的，或是不确定的。现有的 PDS 选择模型只是描述了各个影响 PDS 选择因素与项目绩效

之间的关系，但影响 PDS 选择因素并非独立存在，而是存在交互作用关系，如“业主对同类项目的管理经验”会影响“项目管理方式”。目前的研究尚缺乏对影响 PDS 选择因素间关系的研究，无法分析各影响 PDS 选择因素之间的交互影响，也就无法对 PDS 选择的机理进行更深入的分析。

本文将影响 PDS 选择因素划分为内生因素和外生因素，通过对内生因素、外生因素和项目绩效指标的识别和筛选，确定贝叶斯网络的各节点；然后通过问卷调查的方式获取数据，利用获取的数据作为训练样本习得贝叶斯网络的结构和参数，构建 PDS 选择模型，探索影响 PDS 选择因素间的交互作用。

3 研究方法

贝叶斯网络是结合了图论及概率理论元素的图式模型，以一张有向无环图 (Directed Acyclic Graph, DAG) 表示。这种概率图模型能够表示一组变量间的因果关系 (物理的或贝叶斯的)，表示变量间的条件独立关系及联合概率分布，借此分析变量之间的相互关系，实现统计推断、预测、因果分析等功能^[17]。

关于一组变量 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的贝叶斯网络由两部分组成：(1) 一个 X 表示中变量 (节点) 间相关或独立关系的有向无环图 S ；(2) 与每一个变量相联系的局部概率分布集合 P 。二者共同定义了 X 的联合概率分布。 S 中的节点与 X 中的变量一一对应，节点间的有向弧表示变量间存在因果关系，而缺失弧则表示变量间条件独立，节点 A 通过有向弧指向节点 B ，则称节点 A 为节点 B 的父节点，节点 B 为节点 A 的子节点；则贝叶斯网络所表示的变量的联合概率分布为：

$$p(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n) = p(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n p(x_i | x_{pa(i)})$$

其中， $p(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示 X 取一组特定值 x_1, x_2, \dots, x_n 的概率， $x_{pa(i)}$ 表示 X_i 的父节点向量。对于表示为一张有向无环图 S 的贝叶斯网络，其各节点的概率分布可表示为参数：

$$\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\} = \{[\theta_{ik}(j)]_{k=1}^{r_i} \}_{j=1}^{q_i}$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 标识了贝叶斯网络中的各变量 X_i ， $j = 1, 2, \dots, q_i$ 标识了变量 X_i 的父节点 ($x_{pa(i)}$) 各种可能取值组合情况， $k = 1, 2, \dots, r_i$ 标识了变量 X_i 各种可能的取值情况；则对于给定的 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，贝叶斯网络的联合概率分布可表示为：

$$p(x | \theta, S) = \prod_{i=1}^n p(x_i | x_{pa(i)}, \theta_i, S) = \prod_{i=1}^n \theta_{ik}(j)$$

对于节点 i ，每一种其父节点的取值组合，都对应一个该节点取值分布的参数向量 $\theta_i(j) = \{\theta_{i1}$

$(j), \theta_{i_2}(j), L, \theta_{i_r}(j)$, 所以构建贝叶斯网络的过程, 即是确定有向无环图 S 及参数 θ 的过程。大部分关于贝叶斯网络的研究都针对离散型随机变量, 由于影响 PDS 选择因素及项目绩效具有模糊性、不易测量等特点^[18], 本文将构建的贝叶斯网络也采用离散型随机变量。

4 模型建立

4.1 影响 PDS 选择因素的识别与分类

为了建立影响 PDS 选择因素间的联系, 本文将影响 PDS 选择因素划分为内生因素和外生因素。内生因素指在 PDS 选择过程中, 由 PDS 所决定的因素, 将对项目绩效产生影响的因素, 包括如设计与施工的工作搭接、融资方式等; 外生因素指在 PDS 选择过程中, 不是由 PDS 所决定的, 但对 PDS 选择有影响, 同时也将对项目绩效产生影响的因素, 包括管理因素和环境因素, 如业主单位的经验、法律法规等。在这样的划分下, 内生因素的不同取值组合, 即代表了工程项目所选择的 PDS。反之, 如果能够知道在一定的绩效目标、环境限制下的工程项目所要求的内生因素的取值组合, 也就知道了该项目所应选取的 PDS。

本文所构建的用于对 PDS 选择进行决策支持的贝叶斯网络, 其变量包括影响 PDS 选择因素及项目绩效两类, 其中影响 PDS 选择因素又分为内生因素和外生因素两类。利用贝叶斯学习方法建立这些因素与项目绩效间的关系, 并用样本数据挖掘获得变量的条件概率分布。

在初步识别出表 1 所示的影响 PDS 选择因素后, 本文采取专家讨论的方式对初步识别的影响 PDS 选择因素体系进行修正。修正的目的有两个: 1) 删减或合并部分影响 PDS 选择因素, 降低问题维度, 减轻最终模型的计算负担; 2) 识别内生因素及外生因素。通过与拥有丰富的工程管理学术知识, 并具有工程项目实践经验的专家进行讨论, 对初步识别出的影响 PDS 选择因素体系进行了修正, 得到 17 个影响 PDS 选择因素, 其中内生因素 7 个, 外生因素 10 个, 详见表 2 及表 3。

表 2 内生因素

编号	内生因素	描述
1	设计责任归属	项目中哪一方对设计负责, 是否存在有独立的设计合同;
2	项目管理方式	项目中是否存在 CM 或 PM, 业主在管理项目时是否得到协助;
3	工作顺序	项目全生命周期中的各项工作是线性进行的 (一项完成才开始下一项), 或是允许工作、任务的搭接;
4	早期采购	项目所需的机械、设备等是否在设计阶段即开始采购;
5	融资方式	用于支付工程款得资金来源, 或为业主自有资金, 或为业主通过融资、贷款等方式获得的资金;

续上表

编号	内生因素	描述
6	允许变更的程度	是否允许设计、工作范围、预算的变更, 允许这种变更的程度;
7	分包关系	业主是否与单一承包商签订合同, 或与多个承包商签订合同。

表 3 外生因素

编号	外生因素	描述
1	详细设计的复杂程度	项目详细设计的标准化程度、复杂程度。反映了项目是否存在大量的有针对性的设计, 特殊设计;
2	施工的复杂程度	项目施工作业流程是否明确、简单, 施工作业的复杂程度。反映了项目施工是否大量采用新工法, 特种工程的多寡;
3	业主同类项目的管理经验	业主单位是否具备此类项目的管理经验, 管理此类项目的熟悉程度;
4	承包商完成同类工程项目的经验	承包商单位主营业务是否为此类项目, 对于此类项目的建造、管理经验是否丰富;
5	承包商的技术水平及设备先进性	承包商单位是否拥有成熟的针对此类工程的技术和工法, 工程设备是否先进;
6	专业分包商的经验和能力	专业分包商对于部分工程的施工经验是否丰富, 技术水平的高低;
7	交流沟通机制	项目参与方向是否建立了良好的沟通机制, 以实现信息快速及时的反馈和调整。
8	劳动力价格的变动	项目实施过程中, 劳动力价格的波动程度的大小。
9	主要材料和设备价格的变动	项目实施过程中, 主要材料和设备价格的波动是否明显。
10	法律法规	项目所在地区法律和税收等规定对项目的影晌。

通过初选及修正, 得到了用于构建贝叶斯网络的 17 个影响 PDS 选择因素变量; 在选择项目绩效指标时, 为了更好地说明贝叶斯网络应用于 PDS 选择的原理, 本文只选择成本超支率、工期延误率、返工率三个绩效指标作为贝叶斯网络的绩效指标。为了满足贝叶斯网络对于变量的离散分布要求, 统一规定三个绩效变量为二分变量, 即取值或为“高”, 或为“低”; 同理, 各影响 PDS 选择因素变量的取值亦为“高”或“低”。需要注意的是, 对于不同的变量, 取值“高”、“低”的内涵是不同的, 如内生变量中的“融资方式”取值为“高”, 表示“业主用于支付工程价款的资金来自于贷款或融资的比例较高”; 而外生变量中的“法律法规”取值为“高”则表示“项目所在地的法律法规对于项目目标的实现起推动和促进的作用”。

4.2 模型构建的算法与步骤

本文通过学习方法构建用于 PDS 选择的贝叶斯网络, 学习贝叶斯网络就是要寻找一种网络结构, 能按某种测度最好地与给定的数据集拟合, 并对网络参数进行估计。另一种做法是给定贝叶斯网络的结构, 利用样本数据学习网络的参数; 在难以断定变量间关系的情况下, 网络结构也是不确定的, 这就需要利用样本数据学习网络结构及其参数。本文

应用学习法构建用于 PDS 选择决策支持的贝叶斯网络，分为以下四个步骤。

(1) 对识别出的变量进行降维，因为学习贝叶斯网络需要较大的样本量，过多的变量将导致样本无法支持计算；本文在第 4.1 节中已经对识别出的影响 PDS 选择因素变量进行了降维处理。

(2) 为了尽可能扩大样本容量，需对丢失数据进行替换和补充，同时重新调整数据取值，如将 1~5 取值的变量调整为二分变量，这一步骤也是出于降低计算复杂度的考虑。假设每一个节点平均拥有 3 个父节点，那么有 20 个节点的二分变量贝叶斯网络需要对 160 个 (20×2^3) 参数进行估计，如果每个节点有 5 个可能取值，则需对 2500 个 (20×5^3) 参数进行估计，根据以往工程行业调查问卷的发放和回收情况，收集 200 份以上的有效问卷已经比较困难，这是本文采用离散型二值变量贝叶斯网络，及对变量进行降维的主要原因。

(3) 定义语义限制。在网络结构不确定的情况下，通过启发式方法对贝叶斯网络的网络结构空间进行搜索^[19]，然而某些网络结构是可以透过实践知识与经验直接否定的，如将项目绩效指标节点通过有向弧指向影响 PDS 选择因素节点，在本文的研究中并不意义。因此需要人为地规定某些限制条件，使得满足这些条件的网络结构不被考虑，以减少计算时间。本文采用限制矩阵的方式定义了语义限制规则，矩阵中的每一个元素表示所在行列节点关系的父子关系，若元素值为 1 则表示该关系是无意义的，所有包含该关系的网络结构都将被剔除。

(4) 搜索及评分。搜索即找出满足语义限制条件的网络结构，评分则是对网络结构与样本数据的相合性进行评价。本文采用局部贪婪法进行搜索，采用传统的基于似然函数的贝叶斯—狄利克雷评分标准。局部贪婪搜索方法从给定的初始网络结构开始，通过增加、删除和转向操作使得局部评分函数值最大化，再逐渐扩展到整个网络。贝叶斯—狄利克雷评分标准则是使“某网络结构下，样本数据发生的条件概率”最大化作为评价网络结构的标准，即：

$$\max(p(D|S_C)) = \max\left(\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{q_i} \frac{\Gamma(N_{ij}^c)}{\Gamma(N_{ij}^c + N_{ij})} \prod_{k=1}^{r_i} \frac{\Gamma(N_{ijk}^c + N_{ijk})}{\Gamma(N_{ijk}^c)}\right)$$

对于样本数据 D ，变量 X_i 的全部观测值为 $\{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^L, x_i^{r_i}\}$ ， $\pi(x_{pa(i)})$ 为变量 X_i 的配置情况， S_C 表示某网络结构， N_{ijk} 是样本库 D 中满足 $x_i = x_i^k$ 且 $\pi(x_{pa(i)}) = j$ 的样本数量， $N_{ij} = \sum_{k=1}^{r_i} N_{ijk}$ ， $N_{ijk}^c > 0$ 是先验分布的指数 $N_{ij}^c = \sum_{k=1}^{r_i} N_{ijk}^c$ 。

搜索与评分的过程为：从初始网络结构开始，对网络结构进行评分，然后通过增加、删除、转向操作生成新的网络结构并对其进行评分，

如果新的网络结构得分高于之前的，则将新生成的网络用于下一步的网络生成操作，依次进行直到得到评分最高的网络结构。最后通过最大先验估计得到网络参数的估计值^[20]。

4.3 数据收集及模型建立

为了得到用于学习贝叶斯网络结构及参数的数据，本文设计了调查问卷，并向从事工程行业的相关人员发放问卷。问卷中包含了对 7 个内生因素、10 个外生因素及 3 个绩效指标进行调查的问题，答卷人需依据本人实际参与过的某项目的情况对 20 个问题进行 1 至 5 分的打分。问卷共计发放 250 份，回收 112 份，经筛选得到有效问卷 87 份。问卷采用 1 至 5 分打分的方式，回收后对各问题的调查结果进行了二分化，即将得分 1 分至 3 分的规定为“低”，将得分为 4 分或 5 分的规定为“高”。通过对节点可能取值的降维，减少结构学习和参数学习所需的数据量，提高模型构建的精度。

本文采用美国匹兹堡大学 Decision System Laboratory 开发的贝叶斯网络建模计算专用软件 GeNIe 对数据进行处理分析。GeNIe 的选择基于两点：第一，GeNIe 软件内建的种结构、参数学习方法满足本文的要求；第二，GeNIe 软件通过可视化操作建立和调整贝叶斯网络模型，相对于 Matlab 的贝叶斯网络工具包 BNT 较简单。

通过前文所述的搜索、评分方案，本文根据 87 份有效问卷的数据得到了如图 1 所示的用于 PDS 选择的贝叶斯网络。

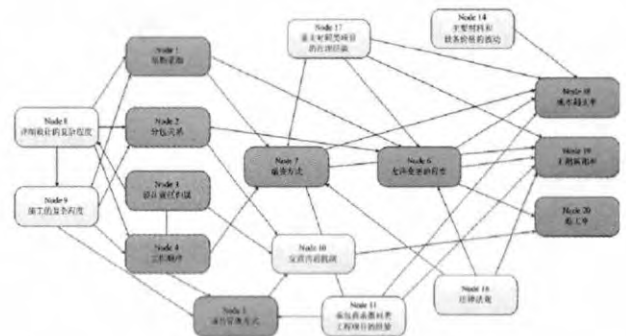


图 1 工程项目交易方式 (PDS) 选择的贝叶斯网络

图 1 中第 1 号至第 7 号节点为项目内生因素节点，第 18 号至第 20 号节点为项目绩效节点，注意到项目外生因素节点中“承包商的技术水平及设备先进性”、“专业分包商的经验和能力”和“劳动力价格的变动”没有出现在图 1 所示的贝叶斯网络中，原因可能是这三个外生因素与其他内外生因素及本文所选的绩效相关性不大，在学习网络结构的过程中没有被纳入，也可能是由于问卷数据的误差所致。

5 模型解释及分析

由于两个节点通过有向弧相连说明这两个节点

存在概率上的因果关系。在图 1 中，第 4 号节点“工作顺序”的父节点为“详细设计的复杂程度”、“施工的复杂程度”和“设计责任归属”，其子节点为“项目管理方式”；其统计含义为项目的工作顺序受设计的复杂程度、施工的复杂程度和设计责任归属的影响，工作顺序影响项目的管理方式。

经多次调整后得到图 1 的贝叶斯网络结构，这

种调整包括去掉某些明显违背常识的关系和根据专业背景知识规定的某两个节点间的关系。在利用问卷数据学习得到贝叶斯网络结构的同时，得到了各节点的条件概率分布表，以第 6 号节点“允许变更的程度”和第 10 号节点“交流沟通机制”为例，见表 3 及表 4。

表 3 第 6 号节点“允许变更的程度”条件概率分布

业主经验	高								低							
	高				低				高				低			
分包关系	高				低				高				低			
早期采购	高		低		高		低		高		低		高		低	
法律法规	高	低	高	低	高	低	高	低	高	低	高	低	高	低	高	低
高	0.57	0.9	0.25	0.45	0.74	0.45	0.2	0.4	0.5	0.9	0.4	0.45	0.6	0.45	0.3	0
低	0.43	0.1	0.75	0.75	0.26	0.55	0.8	0.6	0.5	0.1	0.6	0.55	0.4	0.55	0.6	1

注“业主经验”为第 17 号节点“业主对同类项目的管理经验”

表 4 第 10 号节点“交流沟通机制”条件概率分布

项目管理方式	高				低			
	高		低		高		低	
设计责任归属	高	低	高	低	高	低	高	低
分包关系	高	低	高	低	高	低	高	低
高	0.79	0.75	0.83	0.60	0.80	0.75	0.91	0.64
低	0.21	0.25	0.17	0.40	0.20	0.25	0.09	0.36

第 6 号节点“允许变更的程度”的父节点为“业主对同类项目的管理经验”、“分包关系”、“早期采购”和“法律法规”，表 3 表示的是，对于“允许变更的程度”的各父节点的不同取值，该节点取不同值的概率。不同节点的取值对应不同的含义，以“业主对同类项目的管理经验 = 高，分包关系 = 低，早期采购 = 高，法律法规 = 高”为例，在此种父节点取值的组合下，“允许变更的程度”取值“高”的概率为 0.74，取值为“低”的概率为 0.26。由于“允许变更的程度”的父节点也有父节点（即受其他因素影响），所有存在父节点的节点取值都受到其父节点取值的影响，这就在节点间建立了相互影响的定量的联系。结合图 1 的贝叶斯网络结构，上例的取值组合实际描述的是一般意义的 DBB 交易方式，对于这类项目，允许变更的程度较高是符合实际工程经验和认识的。

利用本文构建的 PDS 选择贝叶斯网络，可以对各内生因素对于项目绩效的影响进行独立的分析，即在 GeNIe 中对待分析内生因素赋值，查看待分析内生因素的不同取值对绩效及其他因素的影响；对于 PDS 选择的决策问题，可以将已经观测到的外生因素值和希望得到的项目绩效取值固定，采用“what - if”的方式对各待定的内生因素进行分析，得到项目内生因素取值的组合。这种内生因素取值的组合，一般情况下对应于某种 PDS 如 DB 方式、DBB 方式、BOT 方式等，也可能在实践中并无特定的名称，或是某种交易方式的变种，决策者可以根据实际需要和情况，在实际中安排各内生因素的取值组合，创造出“新的”PDS；同时贝叶斯网络并

非给出某个决策方案，而是描述了采用不同方案对于决策目标的影响。这就避免了一般的决策方法只能在既有的几种 PDS 中给出决策建议，给出的决策结果由于 PDS 方案有限不能很好地适用于实际的工程项目。

6 结论

本文将影响 PDS 选择因素划分为内生因素与外生因素，同时考虑到影响 PDS 选择因素并非单一地影响项目绩效，这些影响 PDS 选择因素之间是存在交互关系的。本文应用贝叶斯网络的方法，通过问卷调查收集数据，采用局部贪婪法进行搜索，传统的基于似然函数的贝叶斯-狄利克雷评分标准对贝叶斯网络的结构和参数进行了学习，构建了影响 PDS 选择内生因素、外生因素与项目绩效间的网络关系图，用于 PDS 选择。

该贝叶斯网络模型可用于对单个项目内生因素进行分析，对内生因素与外生因素的变化做“what - if”分析及敏感度检测，对于深入探讨工程交易方式的本质和属性有一定的助益；同时该模型可用于 PDS 选择的决策，给出的是项目内生因素取值的组合，以及在这种取值组合下项目绩效较好的概率，这种“柔性”的决策结果为决策者提供了更为深入考察和分析问题的可能性。

本文也存在一定的局限性。本文对全部 20 个节点的取值进行了二分化，这是出于计算复杂性及数据收集可行性方面的考虑，如条件允许应增加节点的取值范围，考虑采用连续取值的节点或构建混合型贝叶斯网络，以求更客观地描述内生因素与外生因素，构建更贴近实际情况的贝叶斯网络模型。

参考文献:

[1] IBBS W, CHIH Y Y. Alternative methods for choosing an appropriate project delivery system (PDS) [J]. Facilities ,2011 ,29 (13/14) : 527 - 541

- [2] MILLER J B , GARVIN M J , IBBS C W , et al. Toward a new paradigm: simulation use of multiple project delivery methods [J]. *Journal of Management in Engineering* , 2000 , 16 (3) : 58 - 67
- [3] ASCE. *Quality in the Construction Project: A Guide for Owners , Designers and Constructors (Section Edition)* [M]. American Society of Civil Engineers , Reston , Virginia , 2000
- [4] OYETUNJI A A , ANDERSON S D. Relative effectiveness of project delivery and contract strategies [J]. *Journal of Construction Engineering and Management* , 2006 , 132 (1) : 3 - 13
- [5] LUU D T , NG S T , CHEN S E. Formulating procurement selection criteria through case - based reasoning approach [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering* , 2005 , 19 (3) : 269 - 276
- [6] NG S T , LUU D T , CHEN S E. Fuzzy membership functions of procurement selection criteria [J]. *Construction Management and Economics* , 2002 , 20 (3) : 285 - 296
- [7] CHEUNG S , LAM T , WAN Y , et al. Improving objectivity in procurement selection [J]. *Journal of Management in Engineering* , 2001 , 17 (3) : 132 - 139
- [8] AL KHALIL M I. Selecting the appropriate project delivery method using AHP [J]. *International Journal of Project Management* , 2002 , 20 (6) : 469 - 474
- [9] MAFAKHERI F , DAI L , SLEZAK D , et al. Project delivery system selection under uncertainty Multi - criteria multilevel decision aid model [J]. *Journal of Management in Engineering* , 2007 , 23 (4) : 200 - 206
- [10] CHEN Y Q , LIU J Y , LI B G , et al. Project delivery system selection of construction projects in China [J]. *Expert System with Applications* , 2011 , 38 (5) : 5456 - 5462
- [11] LUU D T , NG S T , CHEN S E. Parameters governing the selection of procurement system: an empirical survey [J]. *Engineering , Construction and Architectural Management* , 2003 , 10 (3) : 209 - 218
- [12] LOVE P E D , SKITMORE M , FARL G. Selecting a suitable procurement method for a building project [J]. *Construction Management and Economics* , 1998 , 16 (2) : 221 - 233.
- [13] KONCHAR M , SANVIDO V. Comparison of U. S. project delivery systems [J]. *Journal of Construction Engineering and Management* , 1998 , 124 (6) : 435 - 444
- [14] CHAN C T W. Fuzzy procurement selection model for construction projects [J]. *Construction Management and Economics* , 2007 , 25 (6) : 611 - 618
- [15] MOSTAFAVI A , KARAMOUZ M. Selecting appropriate project delivery system: fuzzy approach with risk analysis [J]. *Journal of Construction Engineering and Management* , 2010 , 136 (8) : 923 - 930
- [16] LUU D T , NG S T , CHEN S E. A strategy for evaluating fuzzy case - based construction procurement selection system [J]. *Advances in Engineering Software* , 2006 (37) : 159 - 171
- [17] CAMPOS L M D , CASTELLANO J G. Bayesian network learning algorithms using structural restrictions [J]. *International Journal of Approximate Reasoning* , 2007 , 45 (2) : 233 - 254
- [18] HASHIM M , LI M C Y , YIN N C , et al. Factors influencing the selection of procurement systems by clients [C]. *International Conference on Construction Industry 2006*
- [19] 林士敏, 田凤占, 陆玉昌. 贝叶斯学习、贝叶斯网络与数据挖掘 [J]. *计算机科学* , 2000 , 27 : 69 - 72
- [20] 李玮玮. 贝叶斯网络结构学习方法的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008

作者简介: 陈勇强 (1964—), 男, 河北冀州人, 管理学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为国际工程项目管理、合同管理、现代信息技术在工程项目管理中的应用研究; 李德祯 (1987—), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 硕士研究生, 主要研究方向为国际工程项目管理。