

考虑风险关联的项目风险应对策略选择方法

关欣, 张尧[†], 金小丹

(东北大学 工商管理学院, 沈阳 110189)

摘要: 提出解决考虑风险关联的项目风险应对策略选择问题的优化方法. 首先给出风险关联的定义及风险关联程度的度量方法; 其次, 综合考虑项目工期、质量、项目风险应对成本3个因素, 构建考虑风险关联的项目风险应对策略选择优化模型, 通过求解模型得到满意的风险应对策略; 最后, 通过算例分析验证方法的可行性和有效性. 研究表明, 风险关联对项目风险应对决策有影响, 在项目管理过程中需要考虑风险之间的关联作用.

关键词: 项目风险管理; 风险应对策略; 风险关联; 优化模型

中图分类号: C931

文献标志码: A

Method of selecting project risk response strategies considering risk interdependence

GUAN Xin, ZHANG Yao[†], JIN Xiao-dan

(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110189, China)

Abstract: Aiming at the problem of selecting project risk response strategies considering risk interdependence, an optimization method is proposed. Firstly, the definition of risk interdependence is given and the method for measuring the degree of risk interdependence is proposed. Then, based on the analysis of risk interdependence, an optimization model with the consideration of project schedule, project quality and the implementation cost of risk response strategies is constructed. By solving this model, the desirable risk response strategies are obtained. Finally, a case study is given to illustrate the feasibility and effectiveness of the proposed method. The results show that the risk interdependence can impact the project risk response decisions and it is essential to consider the risk interdependence in the process of project risk management.

Keywords: project risk management; risk response strategy; risk interdependence; optimization model

0 引言

在项目实施过程中, 项目风险往往是客观存在的. 项目风险的发生会给项目完成带来不利影响, 如项目不能按期完成、项目质量验收不合格、项目预算超支等. 如果不能及时有效地采取措施来应对风险, 则会造成大量的经济损失, 影响项目的顺利进行. 因此, 如何制定或选择合适的风险应对策略来应对风险, 以减少风险带来的不利影响, 是一个具有现实意义的研究课题.

项目风险应对是在风险识别和风险分析的基础上, 制定或选择有效的风险应对策略来应对风险, 以减少风险带来的损失, 最大程度地满足项目目标. 多年来, 国内外学者对项目风险应对策略选择问题给

予了广泛关注, 并给出了相应的项目风险应对策略选择方法^[1-3], 如基于矩阵的方法^[4-8], 基于权衡的方法^[9-10], 基于相似案例的方法^[11-12], 基于优化的方法^[12,13-18]等. 其中, 基于矩阵的方法是选择两个度量风险的指标, 将其映射到二维空间的水平轴和竖直轴, 根据其指标值对应的区域选择相应的风险应对策略^[4]. 基于权衡的方法是通过权衡多个项目目标(如项目工期、成本和质量^[9], 或项目成功概率和项目总成本^[10]), 给出项目管理者满意的风险应对策略的方法. 基于相似案例的方法是通过分析与当前问题相似的历史案例给出解决当前问题的方案^[11-12]. 采用优化方法解决风险应对策略选择问题的思想最初是由Ben-David等^[2]提出的, 之后, 学者们构建了考虑不

收稿日期: 2016-08-11; 修回日期: 2016-11-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71471032); 高等学校博士学科点专项科研基金博导类项目(20130042110030); 辽宁省百千万人才工程项目([2015]18号).

作者简介: 关欣(1991—), 女, 博士生, 从事项目风险管理的研究; 张尧(1975—), 女, 教授, 博士生导师, 从事项目风险管理、服务运作管理等研究.

[†]通讯作者. E-mail: yzhang@mail.neu.edu.cn

同项目目标及约束条件的优化模型来选择最优的风险应对策略. 如以期望风险损失和风险应对成本最小为目标的优化模型^[13], 以最小化风险应对成本-风险大小的比例上界与成本-风险比例之间的偏差为目标、以有限的风险应对预算为约束的优化模型^[14], 以最小化风险应对成本为目标的风险应对策略选择优化模型^[15-16], 以项目风险应对成本和风险率为目标的多目标优化模型^[17], 以及以项目风险应对效果最大为目标, 项目工期、项目质量和项目风险应对成本为约束条件的优化模型^[18]等.

可以看出, 有关风险应对策略选择方法的研究已经取得了丰硕的研究成果. 然而, 需要指出的是, 上述提及的各种风险应对策略选择方法都假设风险是相互独立的. 而现实中, 风险之间往往存在着一定的关联性, 如一个风险的发生可能会增加另一个风险发生的可能性, 或增加另一个风险对项目目标的影响程度等. 同时, 一些研究也指出, 风险之间往往存在着相互关联关系^[19-22], 并给出了相应的风险关联评估方法, 如蒙特卡罗仿真方法^[23]、语言变量评估方法^[24]、基于设计结构矩阵的方法^[25-29]以及基于德尔菲的方法^[30-31]等. 已有的风险关联评估方法虽然能较好地识别和评估风险之间的关联程度, 但其中多数评估方法都是建立在定性分析的基础上, 将定性评估结果转化为定量结果时往往会存在信息流失, 而少数基于定量分析的风险关联评估方法难以准确地描述实际项目风险的复杂性.

从现有研究中可以发现, 多数与风险关联相关的文献从风险识别和分析的角度给出了风险关联评估方法, 但并未建立风险关联与风险应对之间的联系, 在考虑风险关联的基础上给出风险应对策略选择方法的研究还比较匮乏^[22,25]. Fang等^[25]采用设计结构矩阵方法来识别和评估风险关联, 并在此基础上提出了考虑风险关联的风险应对策略选择问题的研究框架. 然而, 其并未分析风险关联对于项目风险应对决策的影响, 针对这一问题, Zhang^[22]以项目管理者的期望效用最大化为目标, 构建优化模型来解决考虑风险关联的项目风险应对策略选择问题, 并分析了风险关联的存在对风险应对决策的影响. 但文献^[22]仅考虑了风险关联对风险应对效果的影响, 而实际中, 风险关联不仅影响应对策略的应对效果, 同时会影响项目质量、项目工期等项目绩效目标. 因此, 准确地识别并度量风险之间的关联程度, 同时考虑风险关联对应对效果及项目绩效目标的影响, 并在此基础上研究考虑风险关联的项目风险应对策略选择问题不仅具

有学术价值, 而且具有较强的现实意义.

基于此, 本文借鉴相关研究成果, 给出考虑风险关联的项目风险应对策略选择方法. 首先, 给出基于MACBETH的风险关联程度度量方法, 定量地度量风险关联程度; 其次, 综合考虑风险关联对风险应对效果及项目绩效指标的影响, 构建考虑风险关联的项目风险应对策略选择优化模型, 通过求解模型, 得到最优的项目风险应对策略集合; 最后, 通过算例分析验证所提出方法的有效性. 此外, 针对有无风险关联情形下的最优风险应对策略集合及最优应对效果进行比较, 并给出了相关研究结论.

1 风险关联分析

1.1 风险关联定义

现实中, 项目风险之间往往是相互作用的^[19-21], 这些作用可能体现在某一项目风险的发生会加重或减缓其他风险带来的损失, 或者某一风险的发生会使得另一风险的应对效果降低. 本文将风险之间的这种相互作用定义为风险关联. 风险之间的关联关系对项目本身的影响可能是正向的, 也可能是负向的. 比如, 在某通风系统和空调安装项目中, 通风管道可能会产生噪音风险和高电阻风险, 这些风险的发生会降低通风管道的质量, 而当通风管道发生残渣风险时, 由噪声风险或高电阻风险带来的质量降低程度会增加. 此时, 风险关联会对项目本身产生负面影响. 由于多数情况下, 风险的发生往往会增大其他风险对项目带来的损失, 本文仅考虑对项目有负面影响的风险关联情形.

给定一组风险 R_1 和 R_2 , 如果风险 R_1 的发生会对风险 R_2 产生影响, 则认为风险 R_1 和风险 R_2 存在关联关系, 记为: $R_1 \rightarrow R_2$. 此时, 称风险 R_1 与风险 R_2 是相互关联的, 也称风险 R_2 是 R_1 的紧后风险, 而风险 R_1 是 R_2 的紧前风险. 对于两个风险 R_1 和 R_2 , 若他们之间存在关联关系, 则他们之间的关联关系有3种可能, 即 $R_1 \rightarrow R_2$ 、 $R_1 \leftarrow R_2$ 和 $R_1 \leftrightarrow R_2$.

1.2 基于MACBETH的风险关联程度度量

风险关联程度是指风险之间的关联关系对风险的影响程度. 本文给出一种基于MACBETH的风险关联程度度量方法.

MACBETH方法是一种定性与定量相结合的多属性评价方法^[32]. MACBETH方法允许专家或决策者运用语言信息来定性地评估各个属性之间的差别, 然后对专家给出的语言信息进行一致性检验, 当满足信息一致性时, 将语言信息的评估矩阵转化为各个属性的相对权重值; 当信息不一致时, 会提示专家重新

评估并给出相应的调整建议,从而帮助决策者定量地判断每个属性的相对权重^[33].在风险关联程度度量中,可以将每个风险看成一个属性,首先,召集专家对风险之间关联程度进行定量评估;其次,将专家的评估结果放入MACBETH软件中,软件会对评估结果进行一致性检验并给出调整建议,直至所有评估结果都满足一致性;最后,MACBETH软件会定量地给出风险关联程度的度量结果.

基于MACBETH的风险关联程度度量方法将定性分析和定量分析相结合,使得评估过程相对简单便利,且避免了专家评估结果不一致的情形;因此,本文采用此方法进行风险关联程度的度量.具体的风险关联程度度量过程如下.

Step 1 识别风险.

项目风险管理小组成员及专家对项目进行过程中可能发生的风险进行识别,并确定出项目风险集合,记为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$,其中 R_j 为第 j 个风险, $j = 1, 2, \dots, n$.

Step 2 专家评估.

针对项目风险集合中任一风险 R_j ,每一专家都给出影响该风险的风险集合,并根据各个风险对风险 R_j 的影响程度对集合中的风险进行排序.在此排序基础上,采用语言信息no、very weak、weak、moderate、strong、very strong以及extreme给出风险关联的强度评估矩阵.记 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_U\}$ 为专家集合, E_u 为第 $u(u = 1, 2, \dots, U)$ 个专家, Θ_j^u 为专家 E_u 给出的对风险 R_j 有关联作用的风险集合. $R_{j'} \succ R_{j''}$ 表示与风险 $R_{j''}$ 相比,风险 $R_{j'}$ 与风险 R_j 的关联程度更强,即风险 $R_{j'}$ 对 R_j 的影响程度比风险 $R_{j''}$ 对 R_j 的影响程度大. $A_j^u = [a_{j',j''}^{j,u}]$ 为专家 E_u 给出的关于风险 R_j 的风险关联的强度评估矩阵,其中 $a_{j',j''}^{j,u}$ 表示对于风险 R_j 而言,专家 E_u 给出的风险 $R_{j'}$ 对 R_j 的影响比风险 $R_{j''}$ 对 R_j 的影响大的程度,当 $R_{j'} \succ R_{j''}$ 且 $j', j'' \in \Theta_j^u$ 时, $a_{j',j''}^{j,u} = \text{"no"}$;当 $R_{j'} \prec R_{j''}$ 时, $a_{j',j''}^{j,u}$ 为空.

Step 3 一致性判断及信息调整.

专家给出的评估矩阵可能会存在不一致情形,此时,MACBETH软件会自动识别矩阵中不一致的情形,并给出相应的调整建议,专家根据调整建议,对评估矩阵中的不一致元素进行调整,调整后的矩阵记为 $\hat{A}_j^u = [\hat{a}_{j',j''}^{j,u}]$.

Step 4 评估结果.

根据评估矩阵,MACBETH软件会给出各个风险

对待评估风险关联作用的定量度量结果,该度量结果是0~100之间的数值.将所有对待评估风险有关联作用的度量结果加和,即可得到待评估风险的风险关联程度.为了便于后续模型的构建,需要对度量结果进行处理,使其转化为0-1之间的数值.本文采用向量规范化方法对度量结果进行处理,即

$$\bar{\lambda}_j^u = \lambda_j^u / \sqrt{\sum_{j=1}^n (\lambda_j^u)^2}. \quad (1)$$

其中: λ_j^u 为专家 E_u 评估风险 R_j 的风险关联程度; $\bar{\lambda}_j^u$ 为数据处理后的结果, $\bar{\lambda}_j^u \in [0, 1]$.之后,对多个专家的评估结果进行集结,可得到最终的风险关联程度度量结果.本文采用加权平均法进行集结,即

$$\lambda_j = \sum_{u=1}^U w_u \bar{\lambda}_j^u. \quad (2)$$

其中: λ_j 为风险 R_j 的风险关联程度, w_u 为专家 E_u 的权重, $\sum_{u=1}^U w_u = 1$.

下面给出一个例子来说明基于MACBETH的风险关联程度的度量过程.

待评估风险集合为 $R = \{R_1, R_2, R_3, R_4\}$,针对待评估风险 R_1 ,专家 E_1 给出的影响风险 R_1 的风险集合为 $\Theta_1^1 = \{R_2, R_3, R_4\}$,并判断各个风险对风险 R_1 的影响程度的排序为 $R_2 \succ R_3 \succ R_4$,即风险 R_1 受到风险 R_2 的影响最大,其次是风险 R_3 ,风险 R_4 对风险 R_1 的影响最小.在风险排序的基础上,专家 E_1 给出关于风险 R_1 的评估矩阵如下(其中upper和lower为评估的上下限):

$$A_1^1 = \begin{matrix} & R_1 & \text{upper} & R_2 & R_3 & R_4 & \text{lower} \\ \text{upper} & \left[\begin{array}{ccccc} \text{no} & \text{extreme} & \text{extreme} & \text{extreme} & \text{extreme} \\ R_2 & - & \text{no} & \downarrow \text{strong} & \uparrow \text{moderate} & \text{strong} \\ R_3 & - & - & \text{no} & \text{weak} & \text{weak} \\ R_4 & - & - & - & \text{no} & \text{weak} \\ \text{lower} & - & - & - & - & \text{no} \end{array} \right] \end{matrix}. \quad (3)$$

由矩阵(3)中可看出,对于风险 R_1 而言,风险 R_2 的作用比风险 R_3 的作用大的程度是“strong”,风险 R_2 的作用比风险 R_4 的作用大的程度是“moderate”,即相比于风险 R_3 ,风险 R_4 的作用更大,这与专家最初给出的风险排序不一致.此时,MACBETH软件进行一致性判断并给出调整建议.根据调整建议,专家 E_1 对矩阵进行调整,直至满足一致性.调整后的评估矩阵如下所示:

$$\hat{A}_1^1 = \begin{matrix} R_1 & \text{upper} & R_2 & R_3 & R_4 & \text{lower} & \text{current scale} \\ \text{upper} & \begin{bmatrix} \text{no} & \text{extreme} & \text{extreme} & \text{extreme} & \text{extreme} \end{bmatrix} & & & & 100.00 \\ R_2 & - & \text{no} & \downarrow \text{strong} & \uparrow \text{moderate} & \text{strong} & 45.45 \\ R_3 & - & - & \text{no} & \text{weak} & \text{weak} & 18.18 \\ R_4 & - & - & - & \text{no} & \text{weak} & 9.09 \\ \text{lower} & - & - & - & - & \text{no} & 0.00 \end{matrix} \quad (4)$$

此时, 风险 R_1 受其他风险关联的程度 $\lambda_1^1 = 45.45 + 18.18 + 9.09 = 72.72$. 同理, 可以得到其他专家对所有待评估风险的风险关联程度的度量结果, 通过式(1)和(2)对评估结果进行规范化处理及集结, 可以得到最终风险关联程度评估结果.

2 考虑风险关联的项目风险应对策略选择优化模型构建

2.1 问题描述与符号说明

考虑某工程项目, 该项目由多个工作活动组成, 工作活动之间有明确的紧前紧后关系, 每个工作活动都有自由时差. 经过专家评估, 项目存在多个风险, 风险之间可能存在关联关系, 每个风险都有备选的风险应对策略. 项目能否成功往往需要从项目成本、项目工期和项目质量3个因素上来判断; 因此, 本文要解决的问题是, 在项目风险之间存在关联作用的情形下, 如何从备选的风险应对方案集中选择风险应对策略集合, 使得风险应对效果最好, 同时能够满足项目工期、项目质量及项目成本的要求.

针对所研究的问题, 给出如下符号定义及说明:

W 为工作活动的集合, $W = \{W_1, \dots, W_l\}$, W_k 表示第 k 个工作活动, $k = 1, 2, \dots, l$;

R 为风险事件的集合, $R = \{R_1, \dots, R_n\}$, R_j 表示第 j 个风险事件, $j = 1, 2, \dots, n$;

A 为备选的风险应对策略集合, $A = \{A_1, \dots, A_m\}$, A_i 表示第 i 个风险应对策略, $i = 1, 2, \dots, m$;

B 为实施风险应对策略的总预算;

c_i 为风险应对策略 A_i 的实施成本;

$\lambda_{k,j}$ 为在进行 W_k 工作活动时, 其他风险事件对风险事件 R_j 的关联程度;

s_j^k 为在进行 W_k 工作活动时, 风险事件 R_j 的发生所造成的工期延迟;

q_j^k 为在进行 W_k 工作活动时, 风险事件 R_j 的发生所造成的质量缺陷;

e_{ij} 为实施风险应对策略 A_i 来应对风险事件 R_j 所产生的风险应对效果(减少的风险事件的预期损失);

s_{ij}^k 为实施风险应对策略 A_i 来应对风险事件 R_j 时, 可使工作活动 W_k 提前完成的天数;

q_{ij}^k 为实施风险应对策略 A_i 来应对风险事件 R_j 时, 可使工作活动 W_k 质量改善的程度;

ε^k 为工作活动 W_k 的完成时间与其紧后工作开始时间的间隔(自由时差);

δ^k 为不影响紧后工作活动正常进行的情况下, 工作活动 W_k 的质量缺陷上限;

$T_{\max}$ 为项目延期交付的工期上限;

$Q_{\max}$ 为项目质量缺陷的上限;

$\vec{M}$ 为相互排斥的成对策略集;

$\overline{M}$ 为相互依存的成对策略集;

x_{ij} 为决策变量, $x_{ij} = 0, 1$, $x_{ij} = 1$ 表示选择风险应对策略 A_i 来应对风险事件 R_j .

2.2 模型构建与求解

为了选择最优的项目风险应对策略集合, 同时考虑项目预算、项目工期和项目质量3个基本要求, 以最大化项目整体的风险应对效果来构建风险应对策略选择优化模型. 风险之间存在关联作用, 且风险之间的关联作用对于项目的影响是消极的, 因此本文在衡量风险关联对于项目工期和项目质量的影响时, 认为风险关联的存在会增加原有风险发生所造成的工期延迟时间以及质量缺陷程度, 同时风险关联的存在也会降低风险应对策略实施所带来的应对效果、工作活动提前完成的天数以及质量改善的程度. 此外, 在实际的项目风险应对过程中, 风险应对策略之间通常存在一些限制关系, 如两个策略之间相互排斥或相互协调. 因此, 在构建模型时设定3种成对风险应对策略集约束, 即弱排斥、强排斥和协调. 弱排斥是指成对风险应对策略集中最多选择一个应对策略; 强排斥是指成对的风险应对策略集中仅且仅能选择一个应对策略; 协调是指其中一个策略被选择, 则另一个应对策略也必须被选择.

根据上述描述构建如下整数规划模型:

$$\text{Max } z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[e_{ij} \left(1 - \sum_k \lambda_{k,j} \right) x_{ij} \right]. \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^m (c_i \max_j x_{ij}) \leq B, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n s_j^k (1 + \lambda_{k,j}) - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m [s_{ij}^k (1 -$$

$$\lambda_{k,j})x_{ij}] \leq \varepsilon^k, k = 1, 2, \dots, l-1; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \min \left[\sum_{j=1}^n q_j^k (1 + \lambda_{k,j}), 1 \right] - \\ & \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m [q_{ij}^k (1 - \lambda_{k,j}) x_{ij}] \leq \delta^k, \\ & k = 1, 2, \dots, l-1; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n s_j^l (1 + \lambda_{l,j}) - \\ & \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m [s_{ij}^l (1 - \lambda_{l,j}) x_{ij}] \leq T_{\max}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \min \left[\sum_{j=1}^n q_j^l (1 + \lambda_{l,j}), 1 \right] - \\ & \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m [q_{ij}^l (1 - \lambda_{l,j}) x_{ij}] \leq Q_{\max}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & x_{ij} + x_{i'j'} \leq 1, (A_i, A_{i'}) \in \vec{M}, \\ & i, i' = 1, 2, \dots, m, j, j' = 1, 2, \dots, n; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & x_{ij} + x_{i'j'} = 1, (A_i, A_{i'}) \in \overleftarrow{M}, \\ & i, i' = 1, 2, \dots, m, j, j' = 1, 2, \dots, n; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & x_{ij} - x_{i'j'} \leq 0, (A_i, A_{i'}) \in \overline{M}, \\ & i, i' = 1, 2, \dots, m, j, j' = 1, 2, \dots, n; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & x_{ij}, x_{i'j'} \in \{0, 1\}, \\ & i, i' = 1, 2, \dots, m, j, j' = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (14)$$

其中: 目标函数(3)为最大化风险应对效果; 约束(4)为预算约束, $\max_j x_{ij}$ 是为了保证每个风险应对策略的实施成本没有重复计算; 约束(7)和(8)是为了保证除最后一个工作活动外的每个工作活动都在计划期内完成且能达到一定的质量要求, 不影响紧后工作活动的正常进行, ε^k 和 δ^k 可根据项目的实际情况给出; 约束(9)和(10)是为了保证最后一个工作活动的完成时间在项目截止日期前且符合项目的质量标准; 约束(11)~(13)分别为成对风险应对策略集的弱排斥、强排斥及协调约束; 约束(14)表示决策变量为0-1变量. 可以看出, 该模型是整数规划模型, 可通过LINGO软件求解.

3 算例分析

3.1 模型构建与求解

为了便于与不考虑风险关联情形下的风险应对策略选择问题进行对比, 本文采用文献[18]的算例进行算例分析, 并对有无风险关联作用情形下的风险应

对效果及选择出的风险应对策略进行对比分析. 下面对算例背景进行简单介绍^[18].

某工程公司承接一个通风空调系统建设项目, 项目的总预算为470万元, 总工期为153天, 该项目共包括8个工作活动, 各个工作活动及其工期分别为通风管制造(W_1 , 62天)、排水管制造(W_2 , 58天)、支架制造(W_3 , 50天)、安装通风管道和系统(W_4 , 68天)、安装排水管道和系统(W_5 , 73天)、空气泄露实验(W_6 , 18天)、管道压力测试(W_7 , 18天)和安装空调设备(W_8 , 147天), 具体施工过程如图1所示.

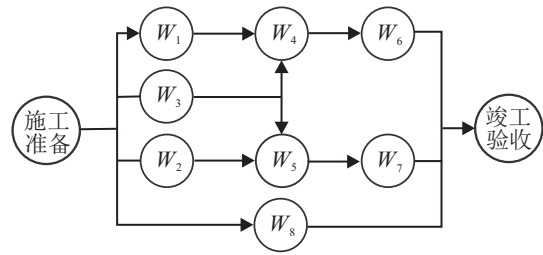


图1 项目施工过程

项目小组成员对该项目的质量及工期要求进行评估, 确定出每个工作活动都可以存在一定程度的质量缺陷及工期延迟, 每个工作活动的质量要求为90%~99%, 每个工作活动的延迟天数不能超过10天. 由项目经理、项目组风险管理人员及同行业有相关经验的风险管理专家组成的项目风险管理小组对项目进行风险识别、备选风险应对策略的制定, 并评估风险带来的损失、风险发生对工作活动的质量及工期上的影响、应对策略的实施成本及应对效果、应对策略对工作活动质量及工期上的改善作用. 经过专家评估, 最终确定的项目风险有10个, 备选的风险应对策略为20个, 风险应对预算为26万, 具体评估结果如表1所示(单位: 元). 在备选的风险应对策略中, 策略 A_7 和 A_{17} 是一对协调策略, 即 $\overline{M} = \{(A_7, A_{17})\}$; 策略 A_{14} 和 A_{15} 以及策略 A_{18} 和 A_{19} 是两对相互排斥的风险应对策略, 不能同时被选择, 即 $\vec{M} = \{(A_{14}, A_{15}), (A_{18}, A_{19})\}$.

3.2 计算结果及分析

在风险识别及风险评估后, 专家们针对风险事件之间的关联关系及关联程度进行了评估, 结合M-MACBETH软件, 可得到各个风险的关联程度, 如表2所示. 为了更清晰地表达风险之间的关联关系, 画出风险关联图如图2所示. 在图2中, $R_{k,j}$ 表示风险事件 R_j 发生在工作活动 W_k 上, 各个圆圈的大小表示风险关联程度.

表 1 风险及应对策略的评估结果

风险事件/发生风险的工作活动	期望损失	应对策略/实施成本/应对效果
管道壁腐蚀(R_1)/ W_1, W_2, W_3	316 600	在施工现场采取防潮和防腐保护措施(A_1)/156 900/257 500; 在设备采购时,提高设备的保护水平(A_2)/65 350/127 600; 购买除湿机器(A_3)/7 845/16 900
磨损(R_2)/ W_1	3 410	在相应的位置安装纤维板(A_4)/1 569/2 830
阀门接口不紧(R_3)/ W_6	15 690	安装阀门前进行压力测试(A_5)/785/7 350; 安装阀门前将阀门清洗干净(A_6)/313/6 120
通风管道中有杂物(R_4)/ W_4	18 700	当管口施工暂停时,关闭管嘴(A_7)/120/7 700; 当安装结构通风管道时,在管道的尾处安装钢网(A_8)/470/9 800
固件松动(R_5)/ W_4, W_5	13 500	在支撑结构和固定锚固件上进行轴承测试(A_9)/627/1 320; 改善支撑结构质量并使用减振支撑(A_{10})/12 600/10 510; 在支撑上用电钻钻螺栓孔,而不是使用气体焊接(A_{11})/7 800/11 400
管道内存有污水渣(R_6)/ W_5	2 460	压力测试后,运用空气吹扫的方式清洗管道(A_{12})/450/2 010
管道生锈(R_7)/ W_8	87 000	在施工现场采取防潮和防腐保护措施(A_1)/156 900/69 100; 在设备采购时,提高设备的保护水平(A_2)/65 350/7 800; 购买除湿机器(A_3)/7 845/5 900
空调或排水管道内出现水凝结(R_8)/ W_4, W_5	36 230	在外面箍上隔热层(A_{13})/4 800/28 640; 改善空调供风室的绝缘质量(A_{14})/78 450/13 750; 在设备室的内墙采取绝缘措施(A_{15})/21 500/31 450
通风系统有太大的噪音(R_9)/ W_6	7 930	在安装前清洗管道内壁(A_{16})/350/2 040; 安装完管道后暂时关闭管嘴(A_{17})/120/2 620; 在设备室的内墙上粘贴吸声材料(A_{18})/785/2 120; 在通风管道内安装消声器(A_{19})/7 060/6 530
排水系统的阻力过高(R_{10})/ W_7	27 470	安装自动排气阀和排水阀(A_{20})/3 920/22 180

表 2 各个风险的关联程度

$\lambda_{4,4}$	$\lambda_{4,5}$	$\lambda_{4,8}$	$\lambda_{5,5}$	$\lambda_{5,6}$	$\lambda_{5,8}$	$\lambda_{6,3}$	$\lambda_{6,9}$	$\lambda_{7,10}$	$\lambda_{8,1}$	$\lambda_{8,7}$
0.16	0.53	0.03	0.42	0.29	0.03	0.16	0.51	0.34	0.11	0.19

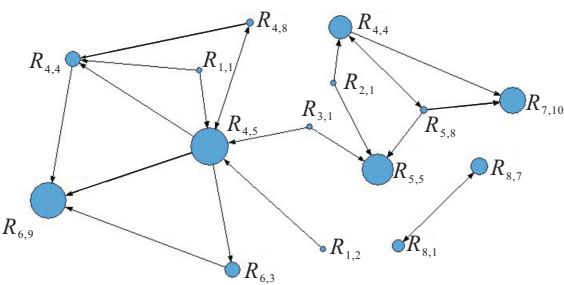


图 2 风险关联图

基于算例背景及上述分析,依据式(3)~(12),可构建考虑风险关联的项目风险应对策略选择优化模型. 由于该模型是整数规划模型,可通过 LINGO 软件进行求解. 下面给出相应的计算结果及其分析.

能带来较高质量改善和工期提前的风险应对策略往往会伴随有高额的成本,为了在有限的预算内获得最理想的项目风险应对效果,需要在预算、工期、质量之间作出权衡,最终选择出一组最优的风险应对策

略. 为了分析预算、工期和质量参数的变化对于项目整体风险应对效果的影响,分别计算了不同预算、工期、质量参数下的风险应对效果,如图3所示. 为了与不考虑风险关联情形下的风险应对效果进行对比,计算了不考虑风险关联情形时不同参数设置下的风险应对效果,如图4所示.

图3和图4中横轴表示风险应对效果,左纵轴表示允许的工期延误天数、右纵轴表示允许的质量缺陷程度,不同线型表示不同的风险应对预算. 为了比较不同参数设置下,选择出的风险应对策略集合及所应对的风险,将部分计算结果列出,如表3所示.

对图3进行分析,可以得到如下结论:

- 1) 整体来看,随着预算的增加,风险应对效果呈递增趋势,且当预算增加到一定值时,风险应对效果保持不变,即存在使风险应对效果达到最大的最优预算.
- 2) 在不同的质量和工期要求下,风险应对效果不同. 为了更清晰地分析风险应对效果与质量要求、工期要求之间的关系,分以下3种情况进行讨论:

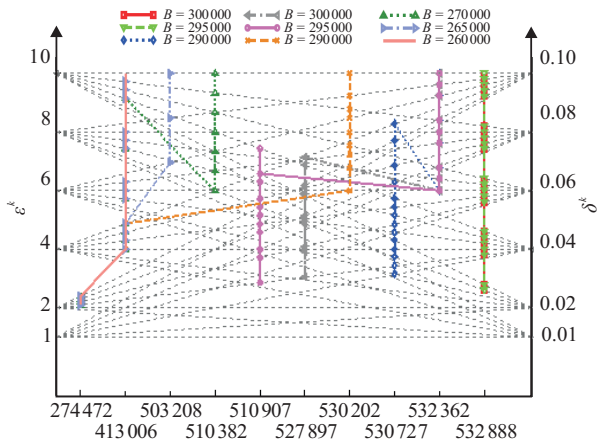


图3 考虑关联时,不同参数设置下的应对效果

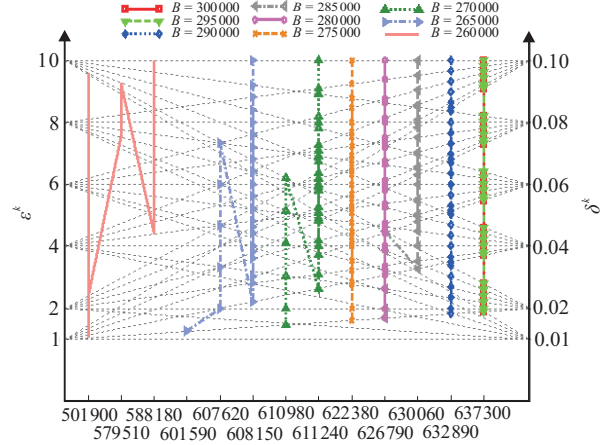


图4 不考虑关联时,不同参数设置下的应对效果

表3 不同参数设置下的部分计算结果

No.	是否考虑 风险关联	风险应对 预算	工期要求	质量要求	应对效果	应对策略及其所应对的风险
1	是	任意值	任意值	0.01	0	没有应对策略被选出
2	是	275 000	2	0.04/0.06/0.08/1	247 742	$A_2(R_1, R_7), A_3(R_1, R_7), A_4(R_2), A_5(R_3), A_6(R_3), A_7(R_4), A_8(R_4), A_9(R_5), A_{10}(R_5), A_{11}(R_5), A_{12}(R_6), A_{13}(R_8), A_{15}(R_8), A_{16}(R_9), A_{17}(R_9), A_{19}(R_9), A_{20}(R_{10})$
3	否	275 000	2	0.04	622 380	$A_1(R_1, R_7), A_2(R_1, R_7), A_3(R_1, R_7), A_4(R_2), A_5(R_3), A_6(R_3), A_7(R_4), A_8(R_4), A_9(R_5), A_{11}(R_5), A_{12}(R_6), A_{13}(R_8), A_{15}(R_8), A_{16}(R_9), A_{17}(R_9), A_{18}(R_9), A_{20}(R_{10})$
4	是	275 000	4	0.04	413 006	$A_1(R_1, R_7), A_3(R_1, R_7), A_4(R_2), A_5(R_3), A_6(R_3), A_7(R_4), A_8(R_4), A_9(R_5), A_{10}(R_5), A_{11}(R_5), A_{12}(R_6), A_{13}(R_8), A_{15}(R_8), A_{16}(R_9), A_{17}(R_9), A_{19}(R_9), A_{20}(R_{10})$
5	是	280 000	2	0.04	510 907	$A_1(R_1, R_7), A_2(R_1, R_7), A_4(R_2), A_5(R_3), A_6(R_3), A_7(R_4), A_8(R_4), A_9(R_5), A_{10}(R_5), A_{11}(R_5), A_{12}(R_6), A_{13}(R_8), A_{15}(R_8), A_{16}(R_9), A_{17}(R_9), A_{18}(R_9), A_{20}(R_{10})$
6	是	$\leq 280\,000$	1/2/4	0.02	0	没有应对策略被选出
7	是	285 000	6/8/10	0.02	527 897	$A_1(R_1, R_7), A_2(R_1, R_7), A_3(R_1, R_7), A_5(R_3), A_6(R_3), A_7(R_4), A_8(R_4), A_9(R_5), A_{10}(R_5), A_{11}(R_5), A_{12}(R_6), A_{13}(R_8), A_{15}(R_8), A_{16}(R_9), A_{17}(R_9), A_{18}(R_9), A_{20}(R_{10})$
8	否	295 000	4	0.04	532 888	$A_1(R_1, R_7), A_2(R_1, R_7), A_3(R_1, R_7), A_4(R_2), A_5(R_3), A_6(R_3), A_7(R_4), A_8(R_4), A_9(R_5), A_{10}(R_5), A_{11}(R_5), A_{12}(R_6), A_{13}(R_8), A_{15}(R_8), A_{16}(R_9), A_{17}(R_9), A_{19}(R_9), A_{20}(R_{10})$
9	否	295 000	4	0.04	637 300	$A_1(R_1, R_7), A_2(R_1, R_7), A_3(R_1, R_7), A_4(R_2), A_5(R_3), A_6(R_3), A_7(R_4), A_8(R_4), A_9(R_5), A_{10}(R_5), A_{11}(R_5), A_{12}(R_6), A_{13}(R_8), A_{15}(R_8), A_{16}(R_9), A_{17}(R_9), A_{19}(R_9), A_{20}(R_{10})$
10	是	295 000	4	0.06	532 888	$A_1(R_1, R_7), A_2(R_1, R_7), A_3(R_1, R_7), A_4(R_2), A_5(R_3), A_6(R_3), A_7(R_4), A_8(R_4), A_9(R_5), A_{10}(R_5), A_{11}(R_5), A_{12}(R_6), A_{13}(R_8), A_{15}(R_8), A_{16}(R_9), A_{17}(R_9), A_{19}(R_9), A_{20}(R_{10})$
11	否	295 000	4	0.06	637 300	$A_1(R_1, R_7), A_2(R_1, R_7), A_3(R_1, R_7), A_4(R_2), A_5(R_3), A_6(R_3), A_7(R_4), A_8(R_4), A_9(R_5), A_{10}(R_5), A_{11}(R_5), A_{12}(R_6), A_{13}(R_8), A_{15}(R_8), A_{16}(R_9), A_{17}(R_9), A_{19}(R_9), A_{20}(R_{10})$
12	是	295 000	4	0.08	532 888	$A_1(R_1, R_7), A_2(R_1, R_7), A_3(R_1, R_7), A_4(R_2), A_5(R_3), A_6(R_3), A_7(R_4), A_8(R_4), A_9(R_5), A_{11}(R_5), A_{12}(R_6), A_{13}(R_8), A_{15}(R_8), A_{16}(R_9), A_{17}(R_9), A_{19}(R_9), A_{20}(R_{10})$
13	否	295 000	4	0.08	637 300	$A_1(R_1, R_7), A_2(R_1, R_7), A_3(R_1, R_7), A_4(R_2), A_5(R_3), A_6(R_3), A_7(R_4), A_8(R_4), A_9(R_5), A_{11}(R_5), A_{12}(R_6), A_{13}(R_8), A_{15}(R_8), A_{16}(R_9), A_{17}(R_9), A_{19}(R_9), A_{20}(R_{10})$
14	是	295 000	6/8/10	0.02	532 888	$A_1(R_1, R_7), A_2(R_1, R_7), A_3(R_1, R_7), A_4(R_2), A_5(R_3), A_6(R_3), A_7(R_4), A_8(R_4), A_9(R_5), A_{10}(R_5), A_{11}(R_5), A_{12}(R_6), A_{13}(R_8), A_{15}(R_8), A_{16}(R_9), A_{17}(R_9), A_{19}(R_9), A_{20}(R_{10})$

i) 当质量要求很严格时($\delta^k = 0.01$),在任何预算和工期要求下都没有风险应对策略被选出,此时风险应对效果为0.

ii) 当质量要求较严格时($\delta^k = 0.02$),只有预算大于等于285 000元,工期要求大于等于6天时,才有风险应对策略被选出,且随着工期要求的不断放松,风险应对效果保持不变.

iii) 当质量要求不严格($\delta^k \geq 0.04$)且工期较严格($\varepsilon^k \leq 4$)时,随着质量要求的不断放松,风险应对效果保持不变,而随着工期要求的不断放松,风险应对效果发生变化,且这种变化在预算较紧时更加明显;当质量要求不严格($\delta^k \geq 0.04$)且工期要求也不严格($\varepsilon^k \geq 6$)时,随着工期要求的不断放松,风险应对效果保持不变,随着质量要求的不断放松,风险应对效果将发生细微变化.

可以看出,当工期要求较严格时,质量要求对风险应对效果的影响可以忽略,而当工期要求较宽松时,质量要求的变化对风险应对效果的影响较大,此时应该更加关注质量要求带来的影响.

对考虑风险关联情形下选择出的最优风险应对策略集(表3)进行分析,可以得到如下结论:

1) 当项目管理者比较关注预算和质量要求时,即项目的风险应对预算和质量要求较严格时($B \leq 275\ 000, \delta^k = 0.04$),随着工期要求的不断变化,被选出的风险应对策略有细微变化.当工期延误天数由2天增加到4天时,在选择出的风险应对策略集中,用来应对风险 R_1 和 R_7 的策略却由 A_2 变为 A_1 ,且风险应对效果增加.这是因为,相比于策略 A_2 ,策略 A_1 的实施能够提前的天数较少,但其能够带来更好的应对效果.所以,当工期要求较宽松时,选择策略 A_1 ,不仅可以满足项目工期的要求,而且可以达到更大的风险应对效果.即在预算和质量约束较紧时,若要获得更好的应对策略集合来应对项目风险,则需要适当地放松对项目工期的要求.

2) 当项目管理者比较关注工期和质量要求时($\varepsilon^k = 2, \delta^k = 0.04$),随着预算的不断变化,被选出的风险应对策略也不断变化.当预算增加到280 000元时,用来应对风险 R_1 和 R_7 及风险 R_9 的策略由 A_3 和 A_9 变为 A_1 和 A_{18} ,且整体风险应对效果也增加.这是因为,相比于策略 A_3 和 A_9 ,策略 A_1 和 A_{18} 的实施成本较高,其应对效果较好.显然,当预算较大时,选择 A_1 和 A_{18} 来应对风险 R_1 、 R_7 和 R_9 ,能够达到更好的应对效果.即在工期和质量约束较紧时,可以通过投入更多的预算来获得更好的风险应对效果.

3) 当项目管理者比较关注预算和工期时($B \leq 275\ 000, \varepsilon^k = 2$),随着质量要求的不断变化,被选出的风险应对策略和风险应对效果均保持不变.此时,最优应对策略集合为 $\{A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}, A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{15}, A_{16}, A_{17}, A_{19}, A_{20}\}$,其中策略 A_1 (应对风险 R_1 和 R_7), A_{14} (应对风险 R_8), A_{18} (应对风险 R_9)没被选择.在风险识别及备选风险应对策略确定时,应对 R_1 和 R_7 的策略有 A_1 、 A_2 和 A_3 ,应对 R_8 的策略有 A_{13} 、 A_{14} 和 A_{15} ,应对 R_9 的策略有 A_{16} 、 A_{17} 、 A_{18} 和 A_{19} .以风险 R_8 为例,相比于策略 A_{14} ,策略 A_{13} 和 A_{15} 的实施成本较小,且质量改善空间和工期提前天数较大,即应对策略对质量约束的变化并不敏感,此时,放松项目质量要求,所选择的应对策略并不会发生变化,即在预算和工期约束较紧时,质量要求的变化对风险应对策略选择影响较小.

综上所述,当项目工期、质量及预算要求都较为严格时,不能获得使风险应对效果达到最大的风险应对策略集合.因此,需要项目经理在三者之间进行权衡,若更关注项目质量和预算,则应对项目工期要求进行适当地放松;若更关注项目质量和项目工期,则应给予充足的项目风险应对预算.

比较图3与图4,以分析考虑风险关联情形与不考虑风险关联情形时的风险应对决策的区别,可以得到如下结论:

1) 整体来看,与不考虑风险关联情形下的结果相比,考虑风险关联情形下的风险应对效果的变化趋势更不稳定.即风险关联的存在会对风险应对效果产生影响,在项目风险管理中,有必要考虑风险之间存在的关联作用.

2) 在相同的预算、工期及质量要求下,考虑风险关联情形下的风险应对效果小于不考虑风险关联情形下的风险应对效果.这是由于风险关联作用下,一个风险的发生会增加另一个风险带来的损失,以致于项目工期更大程度地延长或质量存在更多的缺陷,从而导致风险应对效果降低.即不考虑风险关联情形下的风险应对策略选择会高估应对策略带来的应对效果.

3) 不考虑风险关联情形下,当质量或工期要求很严格时($\delta^k = 0.01$ 或 $\varepsilon^k = 1$),在任何预算下,都没有风险应对策略被选出,风险应对效果为0;考虑风险关联情形下,当质量和工期要求较严格时($\delta^k \leq 0.02, \varepsilon^k \leq 2$),在任何预算下,都没有风险应对策略被选出,风险应对效果为0.即在质量和工期要求较严格时,风险之间存在关联作用,使得风险不能被有效地

应对. 因此,项目管理者在制定工期计划及质量标准时,应适当地放松项目工期及质量要求,以避免风险关联给项目带来的不必要的损失.

4) 当预算较大且工期要求较宽松时 ($B \geq 295\,000, \varepsilon^k \geq 4$),随着质量要求的不断变化,考虑风险关联情形下选择出的风险应对策略和不考虑关联情形下的应对策略是相同的;当预算较小且工期要求较紧时 ($B \leq 290\,000, \varepsilon^k = 2$),随着预算的不断变化,两种情形下的风险应对策略不同. 比如,当 $B = 275\,000, \varepsilon^k = 2, \delta^k = 0.04$ 时,不考虑风险关联情形下,选择的应对策略集合为 $\{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{15}, A_{16}, A_{17}, A_{18}, A_{20}\}$,应对策略 A_{10}, A_{14} 和 A_{19} 没有被选出;考虑风险关联情形下,选择的应对策略集合为 $\{A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}, A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{15}, A_{16}, A_{17}, A_{19}, A_{20}\}$,应对策略 A_1, A_{14} 和 A_{18} 没有被选出. 对比两种情形可以发现,考虑风险关联时,应对策略由 A_1 (应对风险 R_1 和 R_7) 变为 A_{10} (应对风险 R_5), A_{18} (应对风险 R_9) 变为 A_{19} (应对风险 R_9). 这是由于在考虑风险关联情形下(参照图2),风险 R_5 与风险 $R_1, R_2, R_3, R_4, R_8, R_9$ 都存在关联作用,且 R_5 是风险 R_3, R_4, R_8, R_9 的紧前风险,而风险 R_7 仅与风险 R_1 存在关联;同时,与风险 R_1 和 R_7 相比,风险 R_5 的关联性更强,有效地应对风险 R_5 不仅能够达到更好的应对效果,还能避免由于风险 R_5 应对不当而影响其他关联风险,进而导致更大程度的项目工期延误或质量下降. 因此,在考虑关联情形下,选择策略 A_{10} 来替换 A_1 . 此外,比较应对策略 A_{18} 和 A_{19} 可以发现,两者实施后的工期提前和质量改善程度是一样的,但是策略 A_{19} 的应对效果较大且实施成本较高;同时,应对策略 A_{10} 的成本小于应对策略 A_1 的成本,将应对策略 A_1 换为应对策略 A_{10} 节省了一些预算,使得有足够的预算来选择成本高但效果更好的应对策略 A_{19} 来应对风险 R_9 . 因此,当项目预算和工期要求比较严格时,项目管理者需要考虑风险关联作用,识别关键风险从而选取更合适的风险应对策略集合,达到更好的风险应对效果.

4 结 论

针对考虑风险关联的项目风险应对策略选择问题,本文首先提出了基于 MACBETH 的风险关联程度度量方法,在此基础上,综合考虑项目质量、项目工期、项目风险应对成本3个影响因素,构建了考虑风险关联的项目风险应对策略选择优化模型,通过求解模型,可以得到最优的风险应对策略集合. 最后,本文以某通风空调系统建设项目为应用背景进行了算

例分析,以验证所提出方法的可行性和有效性. 通过本文的研究,可以得到如下结论:

1) 在考虑风险关联情形下,随着预算的增加,风险应对效果呈递增趋势,且当预算增加到一定值时,风险应对效果保持不变,即存在最优预算,使风险应对效果达到最大.

2) 项目工期和质量要求对项目应对效果有影响,在不同的情形下,该影响程度不同;项目工期、质量、项目风险应对预算,3个项目绩效目标不能同时兼得. 为了得到满意的风险应对策略,项目管理者需要在3个目标之间作出权衡.

3) 与不考虑风险关联情形下的应对效果相比,考虑风险关联情形下的风险应对效果较小,且变化趋势更不稳定. 即风险关联的存在对风险应对决策有影响,在项目风险应对中,有必要考虑风险之间的关联作用.

4) 在项目目标要求较为严格时,项目管理者需要考虑风险关联,以识别关联度较大的风险,进而提高风险应对效果.

本文的研究弥补了已有风险应对策略选择方法较少考虑风险关联作用的不足,提出了考虑风险关联的项目风险应对策略选择方法,以帮助项目管理者进行更好地项目风险应对. 未来的研究可以考虑风险关联作用的方向性,风险应对策略之间的协同作用等.

参考文献(References)

- [1] Seyedhoseini S M, Noori S, Hatefi M A. An integrated methodology for assessment and selection of the project risk response actions[J]. Risk Analysis, 2009, 29(5): 752-763.
- [2] Ben-David I, Raz T. An integrated approach for risk response development in project planning[J]. J of the Operational Research Society, 2001, 52(1): 14-25.
- [3] Hatefi M A, Seyedhoseini S M. Comparative review on the tools and techniques for assessment and selection of the project risk response actions(RRA)[J]. Int J of Information Technology Project Management, 2012, 3(3): 60-78.
- [4] Hatefi M A, Seyedhoseini S M, Noori S. Risk response actions selection[J]. The Int J of Applied Management and Technology, 2007, 5(1): 385-408.
- [5] Flangan R, Norman G. Risk management and construction [M]. New Jersey: Wiley-Blackwell, 1993.
- [6] Elkjaer M, Felding F. Applied project risk management-introducing the project risk management loop of control[J]. Project Management, 1999, 5(1): 16-25.
- [7] Piney C. Risk response planning: Select the right

- strategy[C]. The 5th Project Management Conf. Cannes: PMI France Sud, 2002: 1-7.
- [8] Pipattanapiwong J, Watanabe T. Multi-party risk management process(MRMP) for a construction project financed by an international lender[C]. Proc of the 16th ARCOM Conf. Glasgow, 2000: 219-228.
- [9] Klein J H. Modelling risk trade-off[J]. J of the Operational Research Society, 1993, 44(5): 445-460.
- [10] Kujawski E. Selection of technical risk responses for efficient contingencies[J]. Systems Engineering, 2002, 5(3): 194-212.
- [11] 李永海, 陈曦, 张尧, 等. 基于CBDT的新产品开发项目风险应对方案选择方法[J]. 管理工程学报, 2015, 29(3): 257-264.
(Li Y H, Chen X, Zhang Y, et al. Methods for selecting NPD project risk response alternatives using case-based decision theory[J]. J of Industrial Engineering and Engineering Management, 2015, 29(3): 257-264.)
- [12] Fan Z P, Li Y H, Zhang Y. Generating project risk response strategies based on CBR: A case study[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(6): 2870-2883.
- [13] Ben-David I, Rabinowitz G, Raz T. Economic optimization of project risk management efforts[D]. Israel: Faculty of Management, Tel Aviv University, Israel, 2002.
- [14] Kayis B, Arndt G, Zhou M, et al. A risk mitigation methodology for new product and process design in concurrent engineering projects[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(1): 167-170.
- [15] Fan M, Lin N-P, Sheu C. Choosing a project risk-handling strategy: An analytical model[J]. Int J of Production Economics, 2008, 112(2): 700-713.
- [16] 张尧, 陈曦, 刘洋, 等. 考虑两个风险情形的项目风险应对策略选择方法[J]. 运筹与管理, 2014, 23(3): 252-256.
(Zhang Y, Chen X, Liu Y, et al. A method for selecting project risk response strategy considering two risks[J]. Operations Research and Management Science, 2014, 23(3): 252-256.)
- [17] 杨莉, 李南. 项目风险应对措施优选的区间模型及其算法[J]. 控制与决策, 2011, 26(4): 530-534.
(Yang L, Li N. Interval model and its algorithm for optimal selecting of software project risk response actions[J]. Control and Decision, 2011, 26(4): 530-534.)
- [18] Zhang Y, Fan Z P. An optimization method for selecting project risk response strategies[J]. Int J of Project Management, 2014, 32(3): 412-422.
- [19] Badenhurst K P, Eloff J H P. TOPM: A formal approach to the optimization of information technology risk management[J]. Computers & Security, 1994, 13(5): 411-435.
- [20] Teller J, Kock A. An empirical investigation on how portfolio risk management influences project portfolio success[J]. Int J of Project Management, 2013, 31(6): 817-829.
- [21] Kwan T W, Leung H K N. A risk management methodology for project risk dependencies[J]. IEEE Trans on Software Engineering, 2011, 37(5): 635-648.
- [22] Zhang Y. Selecting risk response strategies considering project risk interdependence[J]. Int J of Project Management, 2016, 34(5): 819-830.
- [23] Rao G N, Grobler F. Integrated analysis of cost risk and schedule risk[C]. Proc of the 2nd Congress on Computing in Civil Engineering. Atlanta: ASCE, 1995: 1404-1411.
- [24] Wirba E N, Tah J H M, Howes R. Risk interdependencies and natural language computations[J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 1996, 3(4): 251-269.
- [25] Fang C, Marle F, Xie M, et al. An integrated framework for risk response planning under resource constraints in large engineering projects[J]. IEEE Trans on Engineering Management, 2013, 60(3): 627-639.
- [26] Fang C, Marle F. A simulation-based risk network model for decision support in project risk management[J]. Decision Support Systems, 2012, 52(3): 635-644.
- [27] Fang C, Marle F, Zio E, et al. Network theory-based analysis of risk interactions in large engineering projects[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2012, 106(2): 1-10.
- [28] Marle F, Vidal L A. Project risk management processes: improving coordination using a clustering approach[J]. Research in Engineering Design, 2011, 22(3): 189-206.
- [29] Marle F, Vidal L A, Bocquet J C. Interactions-based risk clustering methodologies and algorithms for complex project management[J]. Int J of Production Economics, 2013, 142(2): 225-234.
- [30] Aloini D, Dulmin R, Mininno V. Modelling and assessing ERP project risks: A petri net approach[J]. European J of Operational Research, 2012, 220(2): 484-495.
- [31] Aloini D, Dulmin R, Mininno V. Risk assessment in ERP projects[J]. Information Systems, 2012, 37(3): 183-199.
- [32] Dhouib D. An extension of MACBETH method for a fuzzy environment to analyze alternatives in reverse logistics for automobile tire wastes[J]. Omega, 2014, 42(1): 25-32.
- [33] Bana e Costa C A, Vansnick J C. Applications of the MACBETH approach in the framework of an additive aggregation model[J]. J of Multi-Criteria Decision Analysis, 1997, 6(2): 107-114.

(责任编辑: 孙艺红)