

# 风险链视角下建设项目进度风险评估

曹吉鸣<sup>1</sup>, 申良法<sup>1</sup>, 彭 为<sup>1,2</sup>, 马 腾<sup>1</sup>

(1. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092; 2. 马里兰大学 土木与环境工程学院, 马里兰 20742)

**摘要:** 归纳出风险链的概念, 并提出以风险链为评估对象的进度风险评估方法; 利用去主观化的方法, 分析由专家小组给出的进度风险因素间关联关系的评价信息, 确定项目进度风险因素间的关联关系; 根据关联关系建立风险关联网络, 并阐述将风险关联网络分割为独立风险链的方法; 将项目进度计划、风险链属性等信息纳入到蒙特卡洛仿真过程进行模拟, 并提出以仿真输出结果为计算依据的风险链评估公式。在算例中, 阐述并分析该方法的可行性和有效性。

**关键词:** 建设项目; 风险链; 风险关联; 进度风险; 风险评估

**中图分类号:** F294; C934

**文献标志码:** A

## Novel Method for Schedule Risks Assessment in Construction Projects from Perspective of Risk Chain

CAO Jiming<sup>1</sup>, SHEN Liangfa<sup>1</sup>, PENG Wei<sup>1,2</sup>, MA Teng<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, Maryland 20742, U.S.A.)

**Abstract:** The concept of risk chain is put forward, and a novel approach was proposed for assessing schedule risks. First, in order to find out the interrelationships among risks, the evaluation information provided by a panel of experts was analyzed by an objectifying process; secondly, a risk-interaction network was established based on the identified interrelationships, and the method to divide a risk-interaction network into some unattached risk chains was explained; thirdly, a formula was provided to assess the various risk chains, according to obtained parameters from a simulation process taking the information of project schedule and properties of risk chains into consideration. Finally, a numerical example was analyzed to illustrate the feasibility and effectiveness of the proposed approach.

**Key words:** construction projects; risk chain; risk

interrelationships; schedule risks; risk assessment

建设项目在实施过程中伴随着各种风险<sup>[1-3]</sup>, 各种风险造成的后果会直接或间接地影响项目进度, 从这一角度讲, 任何风险都可能是进度风险<sup>[4]</sup>。由于建设项目实施过程往往需要应对较多的风险因素, 而项目的人、财、物等资源是有限甚至是稀缺的, 因此有必要对各进度风险因素进行评估, 以确定哪些风险需要优先分配资源以采取应对措施<sup>[5]</sup>。另外, 不同组织在不同项目中对可能发生进度延误及其他后果的风险容忍度是不同的<sup>[6]</sup>, 进度风险评估结果是组织在项目实施过程中决策的参考依据。

随着建设项目复杂性日益提高, 项目风险管理的难度随之提高, 各类风险评估方法的相关研究受到国内外学者的重视, 大量研究成果随之出现。Pmboka<sup>[7]</sup>阐述了概率影响矩阵这一主流方法, 利用风险发生概率和量化后的风险影响相乘得出风险系数, 据此进行风险评估; Zayed T 等<sup>[8]</sup>定义了风险的  $R$  系数, 构建指标体系运用层次分析法计算  $R$ , 并通过四个实际案例验证其结果的稳健性; 而 Wang Y M 等<sup>[9]</sup>指出, 当风险因素过多时, 层次分析法的评估结果不准确, 他们提出一种综合层次分析法和数据包络分析的评估方法; Bahli B 等<sup>[10]</sup>选取指标, 通过偏最小二乘回归计算风险危害度指标进行风险评估。另外, 贝叶斯网络<sup>[11]</sup>、模糊集<sup>[12]</sup>、人工神经网络<sup>[13]</sup>等理论和方法也被引入到项目风险评估中。

需要指出的是, 上述方法虽然从不同角度解决了多种风险评估问题, 但针对进度风险评估问题, 存在缺陷: ①绝大多数方法依据定量方法得出的各种系数, 这些系数能否准确刻画各风险因素对项目进度影响的重要性程度, 值得商榷<sup>[14]</sup>; ②进度风险对项目进度的影响不仅与风险因素的属性有关, 还与项

收稿日期: 2014-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(70972072); 上海市重点学科建设项目(B310)

第一作者: 曹吉鸣(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为建设工程管理与设施管理。E-mail: caojm@tongji.edu.cn

通讯作者: 申良法(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为建设工程管理。E-mail: shenliangfa@sina.com

目各工序之间的逻辑关系有关,脱离工序间的逻辑关系对进度风险因素进行评估,不尽合理;③这些方法大多没有考虑风险之间存在的关联关系,实际上风险间存在诱发、相依等关系,这一事实已经被很多学者注意<sup>[15]</sup>。

基于对进度风险评估中风险关联关系和工序逻辑关系的关注,本文归纳出风险链的概念,并结合仿真技术,提出以风险链为评价对象的进度风险评估方法。在算例中,阐述该方法的应用过程,并分析其结果的有效性。

## 1 风险链概念

某一事件发生,可能诱发一连串的次生、衍生突发事件发生,这种现象称为事件链<sup>[16]</sup>。事件链是对已发生的事件间连锁反应现象的描述,在灾害管理<sup>[17]</sup>、生命医学<sup>[18]</sup>、气象预报<sup>[19]</sup>等领域,事件链造成类似多米诺骨牌的效应引起了学者的重视,相关研究方兴未艾。

在项目进度风险管理中,某个风险事件诱发另一风险事件发生,形成风险元(即独立的风险因素)作用构成链结构而传递的现象,与事件链十分类似。近年来,国内外学者对风险之间的关联现象进行了研究,其中较有影响的研究成果有:Büyüközkan G 等对软件开发过程中开发环境风险、编码约束风险和工程风险之间存在关系进行研究,并提出一种基于 Choquet 积分的软件开发风险评估方法<sup>[20]</sup>;张磊等针对存在关联现象的风险评估问题,通过构建综合关联矩阵识别风险之间的影响关系,并依据风险层次结构的可划分性,分情形对关系风险进行了评估<sup>[21]</sup>;李存斌等阐述了工程项目中风险元传递的理论,通过仿真方法证明通过项目内部结构传递的影响随风险元增加而加速增长<sup>[22]</sup>。

通过对相关研究进行归纳和类比,本文提出如下概念:某一风险元导致风险事件发生,可能诱发另一风险元造成风险事件发生的现象,称为风险链。风险链在实践中显而易见,例如:施工图审查可能延误,造成开工时间推迟,引起劳动力需求变化、资金流变化等,可能诱发一系列新的风险;降水偏多会给雨季开展土方工程带来延误风险,而降水较多的年份又更容易爆发鼠灾和白蚁灾害,极易给供电线路施工造成不利影响导致延误;考虑到施工的安全性,多层钢架结构应避免各层垂直施工,不在同一层的工序延误导致多层垂直施工,可能造成安全事故影

响项目进展;等等。

提出风险链概念,实质就是放松风险独立发生这一假设,将风险之间的相依性纳入考虑,以期风险评估结果更加准确。

## 2 风险链进度风险评估方法

本文提出的方法以独立风险链为评估对象,流程如图1所示,主要包括:①建立项目进度网络计划图;②识别风险链,包括进度风险元及其关联关系识别、建立风险关联网络并将其分割成独立风险链;③仿真及评估,建立仿真模型对项目进度多次模拟,依据仿真结果进行定量评估并重点关注较重要的风险集合(即风险链);④进度风险监控、反馈,并随着项目进展调整应对措施。

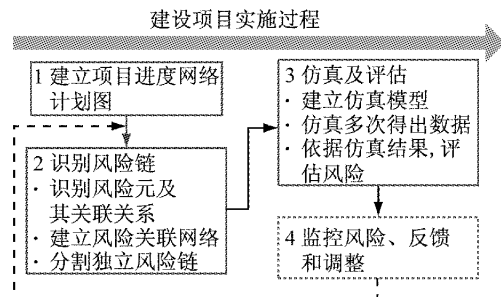


图1 风险链进度风险评估方法流程

Fig.1 Process of assessing schedule risks

### 2.1 识别风险链

识别风险链过程主要包括识别单个独立风险元、确定风险元关联关系、建立风险关联网络和分割风险链等四个步骤。

风险因素识别的主要方法有头脑风暴法、专家会议法、德尔菲法、风险分解结构(risk breakdown structure, RBS)法等,相似项目历史资料和文献<sup>[1,3]</sup>提供的风险列表也是重要依据。

确定风险元之间关联关系一般是依据专家小组的知识和经验确定,需采取一定的去主观化方法以消除专家小组群体决策过程的主观性。Nasir D 等<sup>[23]</sup>提供了一种适用的去主观化方法:专家会议小组根据知识和经验对风险元间两两关联关系情况做出评价,以0,1,2,3四个数字表示(0—无关联,1—少数情况下关联,2—大多数情况下关联,3—必然关联),依据表1提供的步骤判定任意两两风险因素间是否具有关联关系。表中, $\bar{X}$ 表示所有专家给出数字的均值, $W$ 表示0和1的总个数, $S$ 表示2和3的总个数。

表 1 关联关系评价步骤

Tab.1 Steps of risk interrelationships evaluation

| 步骤 | 评价条件                        | 是否满足评价条件 |           |
|----|-----------------------------|----------|-----------|
|    |                             | 是        | 否         |
| 1  | $\bar{X} < 1.01$            | 风险不关联    | 跳转步骤 2    |
| 2  | $\bar{X} < 1.5, (W-S) > 4$  | 风险不关联    | 跳转步骤 3    |
| 3  | $\bar{X} < 1.5, S > 0$      | 风险不关联    | 跳转步骤 4    |
| 4  | $\bar{X} > 2.49$            | 风险关联     | 跳转步骤 5    |
| 5  | $\bar{X} > 1.99, (S-4) < 0$ | 风险关联     | 跳转步骤 6    |
| 6  | $\bar{X} > 1.99, S < 0$     | 风险关联     | 跳转步骤 7    |
| 7  | 没出现 0 值                     | 风险关联     | 跳转步骤 8, 9 |
| 8  | 评分更多倾向 3                    | 风险关联     | 风险不关联     |
| 9  | 评分更多倾向 0                    | 风险不关联    | 风险不关联     |

根据系统工程理论解释结构模型(interpretative structural modeling, ISM)的相关知识<sup>[24]</sup>,给出将风险关联网络分割为独立的风险链的方法.该方法包含四个概念和两个定理.

**概念 1** 一个项目全部进度风险元的全集定义为  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ .显然,集合  $R$  中每个元素构成风险关联网络的全部节点.复杂项目中的风险关联网络往往有较多风险元,如图 2 所示.

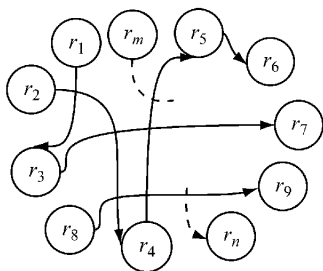


图 2 风险关联网络示例

Fig.2 An example of risk interaction network

**概念 2** 对于集合中任意一个元素  $r_i$ ,定义该风险元的影响集为  $I(r_i) = \{r_j | r_j \text{ 为风险元 } r_i \text{ 能够影响的所有集合 } R \text{ 风险元(包含本身)}\}$ .例如,在图 2 中,  $I(r_4) = \{r_4, r_5, r_6\}$ .

**概念 3** 对于集合中任意一个元素  $r_i$ ,定义该风险元的前缘集为  $F(r_i) = \{r_j | r_j \text{ 为集合 } R \text{ 中所有能够影响风险元 } r_i \text{ 的风险元(包含本身)}\}$ .例如,在图 2 中,  $F(r_5) = \{r_2, r_4, r_5\}$ .

**概念 4** 对于集合中任何一个风险元  $r_i$ ,定义该风险元的共同集为  $C(r_i) = \{r_j | r_j = I(r_i) \cap F(r_i), r_j \in R\}$ .例如,在图 2 中,由于  $I(r_5) = \{r_5, r_6\}$  且  $F(r_5) = \{r_2, r_4, r_5\}$ ,可知共同集  $C(r_5) = I(r_5) \cap F(r_5) = \{r_5\}$ .

**定理 1** 在全集  $R$  中,遍历所有风险元,如果存在风险元  $r_i$ ,满足  $F(r_i) = C(r_i)$ ,那么该风险元为某一风险链的起始风险元.在一个风险关联网络中,起

始风险元至少存在一个.

**定理 2** 在风险关联网络中,如果起始风险元有不止一个,那么:①对于其中的任何两个起始风险元  $r_j, r_k$ ,如果  $I(r_j) \cap I(r_k) \neq \emptyset$ ,则  $I(r_j), I(r_k)$  所有元素属于同一风险链,该风险关联网络不可分割;②如果存在至少一对起始风险元  $r_j, r_k$ ,使得  $I(r_j) \cap I(r_k) = \emptyset$ ,则进度风险关联网络可分割,并且分割后独立风险链的起始点就是  $r_j, r_k$ ,且独立风险链的组成元素分别为  $I(r_j)$  和  $I(r_k)$ .

以图 2 风险关联网络中的有限部分(即  $r_1, r_2, \dots, r_9$ )为例,说明该风险关联网络的分割过程.该风险关联网络的起始风险元搜索过程,如表 2 所示.

表 2 风险关联网络分割过程

Tab.2 Dividing process of risk interaction network

| $r_i$ | $I(r_i)$             | $F(r_i)$             | $C(r_i)$ | 判定依据                 | 是否起始元 |
|-------|----------------------|----------------------|----------|----------------------|-------|
| $r_1$ | $r_1, r_3, r_7$      | $r_1$                | $r_1$    | $F(r_1) = C(r_1)$    | 是     |
| $r_2$ | $r_2, r_4, r_5, r_6$ | $r_2$                | $r_2$    | $F(r_2) = C(r_2)$    | 是     |
| $r_3$ | $r_3, r_7$           | $r_1, r_3$           | $r_3$    | $F(r_3) \neq C(r_3)$ | 否     |
| $r_4$ | $r_4, r_5, r_6$      | $r_2, r_4$           | $r_4$    | $F(r_4) \neq C(r_4)$ | 否     |
| $r_5$ | $r_5, r_6$           | $r_2, r_4, r_5$      | $r_5$    | $F(r_5) \neq C(r_5)$ | 否     |
| $r_6$ | $r_6$                | $r_2, r_4, r_5, r_6$ | $r_6$    | $F(r_6) \neq C(r_6)$ | 否     |
| $r_7$ | $r_7$                | $r_1, r_3, r_7$      | $r_7$    | $F(r_7) \neq C(r_7)$ | 否     |
| $r_8$ | $r_8, r_9$           | $r_8$                | $r_8$    | $F(r_8) = C(r_8)$    | 是     |
| $r_9$ | $r_9$                | $r_8, r_9$           | $r_9$    | $F(r_9) \neq C(r_9)$ | 否     |

在表 2 中,应用定理 1,可得该风险关联网络的有且只有三个起始元  $r_1, r_2$  和  $r_8$ .对于三个起始风险元,应用定理 2,对于起始风险元  $r_1$  和  $r_2$ ,  $I(r_1) \cap I(r_2) = \emptyset$ ,因此  $r_1$  和  $r_2$  是两条独立风险链的起始风险元,两条风险链的全部元素分别为  $I(r_1)$ ,  $I(r_2)$ ;同理,第三条独立风险链的全部元素为  $I(r_8)$ .最终,表 2 过程的分割结果为三条独立的风险链,分别为:  $r_1 \rightarrow r_3 \rightarrow r_7$ ,  $r_2 \rightarrow r_4 \rightarrow r_5 \rightarrow r_6$ ,  $r_8 \rightarrow r_9$ .

## 2.2 仿真模型

采用仿真技术评估风险链对进度影响的重要性程度,主要基于两方面原因:①风险的本质是不确定的,风险因素对项目进度的影响在一次模拟中不一定能够显现,采用仿真技术可多次模拟,能够直接、客观地得出项目风险影响期望和工序时间波动值等各项参数;②各工序总时差、自由时差等参数不同,因此项目总工期对不同工序延误的敏感性是不同的,采用仿真技术能够准确模拟项目在风险链影响下的总工期变化,便于揭示各风险链对项目工期的影响程度.

仿真模型如图 3 所示,主要包含两层结构:风险层主要为风险信息;项目层主要为项目进度计划信息,其中  $A_n (n=1, 2, \dots, 7)$  表示项目的不同工序活

动。图3以风险链  $R_1$  为例,说明风险链上的风险元 对多个工序时间造成影响。

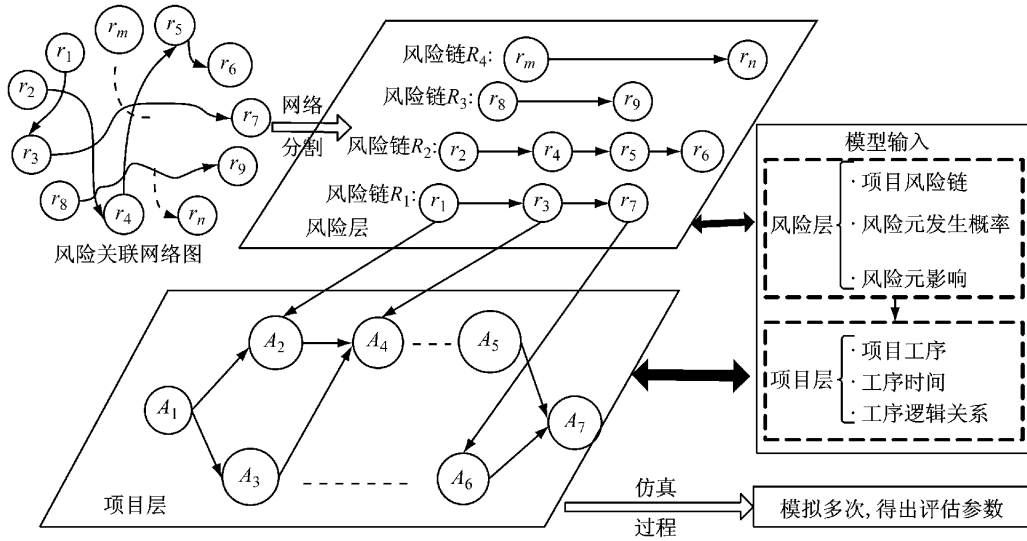


图3 风险、项目双层网络仿真模型

Fig.3 Simulation model: risk-project double-layer network

### 2.3 评估算法

为刻画风险链的重要性,需将风险链影响的所有工序的累积效果体现在评估结果中,据此评价公式为

$$D_{\text{cum}, R_j} = \sum_{i=1}^m (D'_i - D_i) k_i \quad (1)$$

式中:  $D_{\text{cum}, R_j}$  为风险链  $R_j$  的排序系数(系数越大,表示风险链越需要重视);  $D_i$  为风险链  $R_j$  影响的某一项目工序在风险不发生情况下的合理工期,工期为概率分布时,取期望值;  $D'_i$  为风险链  $R_j$  影响的某一项目工序在风险发生情况下的工期;  $k_i$  为工序  $A_i$  与总工期的相关程度。

统计学上,衡量两个变量之间增减相依赖程度的系数主要有两种:皮尔逊相关系数(Pearson correlation)和斯皮尔曼秩相关系数(Spearman rank correlation)。此处采用后者衡量工序工期和总工期的相关程度,原因如下:①前者以变量服从二维正态分布为前提假设,而后者对变量的分布无要求;②前者仅仅适用于刻画两变量服从直线形态的线性相关关系,而后者能够刻画两变量同增同减单调性吻合程度,因此更适用于描述进度计划中具有交叉、复杂逻辑关系的工序时间与项目总工期的相关关系;③本方法需要衡量的是项目工序各自与总工期的偏相关关系,而后者更加适用于衡量多个同质变量中某一变量与另一特定变量的偏相关系数。

采用后者计算相关系数需要两变量的仿真数据,生成过程如下:设模拟进度次数为  $S$ ,在第  $n$  次中,某工序  $A_i$  模拟时间为  $T_{n,i}$  和项目模拟工期  $T_{n,t}$

构成行向量  $[T_{n,i}, T_{n,t}]$ ,仿真结束后会得到一个  $S \times 2$  的矩阵,对矩阵两个列向量的元素分别独立排序,同一行不同列的数字在各自列向量序列的秩次可能不同,其差为  $d_n$ ,因此,  $S$  行矩阵共有  $S$  个差值,在公式(1)中

$$k_i = 1 - \frac{6 \sum_{n=1}^S d_{n,i}^2}{S(S^2 - 1)} \quad (2)$$

式中:  $k_i$  为工序  $i$  的时间与项目总工期的斯皮尔曼秩相关系数;  $S$  为模拟次数;  $d_{n,i}$  为工序  $A_i$  在第  $n$  次模拟中工序时间和项目总工期的秩序差。

该方法与经典的概率影响矩阵方法不同,基于概率影响矩阵思想风险链上评估系数为该链上所有风险的风险系数(风险影响与风险概率的乘积)的和,为说明与两种结果的差异,在算例中利用以下公式阐述概率影响矩阵评估风险(链)的原则:

$$D_{\text{sum}, R_j} = \sum_{i=1}^m (D'_i - D_i) P_i \quad (3)$$

式中:  $D_{\text{sum}, R_j}$  为风险链  $R_j$  的利用概率影响矩阵方法计算得出的排序系数(系数越大,表示风险链越需要重视);  $P_i$  为影响工序  $A_i$  的风险发生概率。

### 3 算例

算例采用上海某知名机场扩建工程中机场航站区项目的简化数据。该机场始建于上世纪60年代,随着社会经济和经济发展,无法满足现代服务需求,因此亟需扩建。该项目投资大,参与单位多,社会影响大。

包括机场跑道区、行李监测中心、绿化区、配套服务区等几十项,其中机场航站区是一个关键子项目,以该子项目的进度风险评估为例阐述该方法的应用过程,并对评估结果进行分析。

### 3.1 项目进度计划

算例项目进度网络计划中工序逻辑关系及时间估计,如表 3 所示。

### 3.2 风险链识别结果

风险链识别主要是通过专家会议法识别出风险因素,结合去主观化群体决策方法判定风险元之间的关联关系,形成风险元关联网络并对其分割。

专家会议小组 8 名人员都具有 15 年以上机场工程实践经验,预先阅读相关的工程资料,并参阅本项目管理团队梳理的机场项目风险列表和风险分解结构 RBS,梳理出关键的风险:拆迁延误( $r_1$ )、初始资金未及时到位( $r_2$ )、审批延误( $r_3$ )、雨季降水( $r_4$ )、劳动力短缺( $r_5$ )、业主管理经验不足( $r_6$ )、跨组织沟通不畅( $r_7$ )、分包商支付延误( $r_8$ )、安全保障不足( $r_9$ )、进口设备采购延误( $r_{10}$ )、调试人员到位延误( $r_{11}$ )、坍塌事故( $r_{12}$ )、鼠灾和白蚁灾害( $r_{13}$ )、关键技术不成熟( $r_{14}$ )、设备调试延误( $r_{15}$ )、关键技术易发安全事故( $r_{16}$ )。随后专家会议小组分析了业主代表办公室、拆迁小组、土建设备室、工艺设备室等各职能部门的前期调研信息和相关技术资料,确定了风险事件发生的概率及其对进度的影响,详见表 4。以降水较多( $r_4$ )为例说明分析过程:气象数据显示,历年

表 3 机场航站区工序逻辑关系及时间估计

Tab. 3 Logical relationships and time estimation of activities in terminal project

| 序号 | 名称        | 时间估计/d<br>(乐观-最可能-悲观) | 紧前工序<br>序号 |
|----|-----------|-----------------------|------------|
| A  | 拆迁收尾及现场清理 | 28-42-56              | —          |
| B  | 基础开挖      | 28-35-56              | A          |
| C  | 地下管线铺设    | 14-21-35              | B          |
| D  | 地下设备安装    | 14-21-35              | B          |
| E  | 基础施工      | 7-14-28               | C,D        |
| F  | 外围配套工程    | 105-140-210           | E          |
| G  | 主体外部结构    | 56-70-98              | E          |
| H  | 一般设施安装    | 21-28-56              | E          |
| I  | 通信系统安装调试  | 28-42-56              | E          |
| J  | 采暖通风系统    | 21-35-56              | G,H,I      |
| K  | 主体结构顶部吊装  | 49-56-105             | G,H        |
| L  | 幕墙和地板铺装   | 70-98-140             | I,J        |
| M  | 弱电接入调试    | 21-35-56              | L          |
| N  | 专用设备安装    | 56-70-105             | L          |
| O  | 专用设备调试    | 21-28-42              | M          |
| P  | 外立面装饰     | 28-35-56              | K          |
| Q  | 安装灯具      | 14-21-35              | L          |
| R  | 内部门安装     | 21-28-42              | N,Q        |
| S  | 内部装修      | 35-42-56              | O,R        |
| T  | 水电接入      | 7-14-28               | S          |
| U  | 外部交通道路    | 21-35-56              | F          |
| V  | 景观工程      | 28-35-49              | U          |
| W  | 收尾工作      | 21-28-42              | R,T,V      |

6 月至 8 月期间存在强降水天气的概率约为 40%,而在该期间基础工程(工序 E)施工过程采用强降水措施会造成施工时间延长 20%。

表 4 风险链识别结果

Tab. 4 Identification results of risk chains

| 风险链序号                                                                    | 风险元属性                |        |            |        |         |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------|------------|--------|---------|
|                                                                          | 风险元                  | 影响工序序号 | 工序 $k_i$ 值 | 发生概率/% | 造成影响    |
| $R_1$<br>( $r_1 \rightarrow r_3 \rightarrow r_5$ )                       | 拆迁延误( $r_1$ )        | A      | 0.27       | 20     | 延误 21 d |
|                                                                          | 审批延误( $r_3$ )        | B      | 0.25       | 30     | 延误 14 d |
|                                                                          | 劳动力短缺( $r_5$ )       | V      | 0          | 10     | 延长 15%  |
| $R_2$<br>( $r_2 \rightarrow r_3 \rightarrow r_9 \rightarrow r_{12}$ )    | 初始资金未及时到位( $r_2$ )   | D      | 0.03       | 10     | 延误 7 d  |
|                                                                          | 分包商支付延误( $r_8$ )     | F      | 0.02       | 5      | 延误 14 d |
|                                                                          | 安全保障不足( $r_9$ )      | H      | 0          | 10     | 延长 20%  |
|                                                                          | 坍塌事故( $r_{12}$ )     | G      | 0.38       | 15     | 延长 40%  |
| $R_3$<br>( $r_4 \rightarrow r_{13} \rightarrow r_{15}$ )                 | 降水较多( $r_4$ )        | E      | 0.14       | 40     | 延长 20%  |
|                                                                          | 鼠灾和白蚁灾害( $r_{13}$ )  | J      | 0.55       | 10     | 延长 7 d  |
|                                                                          | 设备调试延误( $r_{15}$ )   | N      | 0.17       | 30     | 延长 7 d  |
| $R_4$<br>( $r_{14} \rightarrow r_{16}$ )                                 | 关键技术不成熟( $r_{14}$ )  | K      | 0          | 20     | 延长 30%  |
|                                                                          | 安全事故( $r_{16}$ )     | L      | 0.44       | 10     | 延长 28 d |
| $R_5$<br>( $r_6 \rightarrow r_7 \rightarrow r_{10} \rightarrow r_{11}$ ) | 业主管理经验不足( $r_6$ )    | C      | 0.12       | 20     | 延长 14 d |
|                                                                          | 跨组织沟通不畅( $r_7$ )     | I      | 0          | 15     | 延长 30%  |
|                                                                          | 进口设备采购延误( $r_{10}$ ) | M      | 0          | 5      | 延长 28 d |
|                                                                          | 调试人员到位延误( $r_{11}$ ) | O      | 0          | 30     | 延长 14 d |

随后采用前文所述的群体决策去主观化方法,判定风险元间的关联关系。依据风险关联关系建立

风险关联网络,根据定理 1 和定理 2 进行分割,结果如表 4 所示。5 条风险链确定过程依据项目背景信

息,由于篇幅所限,本算例中以风险链  $R_1$  为例简要说明:① $r_1 \rightarrow r_3$ ,拆迁工作延误不仅会影响工程进度,而且审批部门签发施工许可证的必要条件之一是拆迁进度符合相关法规的要求;② $r_3 \rightarrow r_5$ ,进度计划设计时,刻意将劳动力需求高峰避开每年施工工人短缺的农忙季节,一旦原计划延误,项目劳动力需求高峰时将很可能出现施工工人短缺的情况。

### 3.3 仿真结果分析

根据项目进度网络计划和确定风险链结果,基于 MATLAB R2012b 平台建立仿真模型并输入参数.运行仿真 1 500 次,关于每工序  $A_i$  都得到一个  $1\,500 \times 2$  的矩阵,依据公式(2)计算每个工序的时间和项目总工期的斯皮尔曼秩相关系数  $k_i$ ,结果见表 4 中“工序  $k_i$  值一列”的结果。

根据公式(1)得

$$D_{\text{cum},R_1} = \sum_{i=1}^m (D'_i - D_i)k_i = (D'_A - D_A)k_A + (D'_B - D_B)k_B + (D'_V - D_V)k_V = 9.17$$

同理,  $D_{\text{cum},R_2} = 11.8$ ,  $D_{\text{cum},R_3} = 5.95$ ,  $D_{\text{cum},R_4} = 12.32$ ,  $D_{\text{cum},R_5} = 1.68$ 。

为比较风险链进度风险评估方法与经典的概率影响矩阵方法的差异,根据公式(3)对表 5 中五条风险链进行评估,两种方法的评估结果对比如表 5 所示。

表 5 两种评估方法结果对比

Tab.5 Comparison of results of two different approaches

| 风险链   | 风险链方法 |    | 概率影响矩阵 |    |
|-------|-------|----|--------|----|
|       | 得分    | 排序 | 得分     | 排序 |
| $R_1$ | 9.17  | 3  | 9.00   | 2  |
| $R_2$ | 11.80 | 2  | 6.58   | 4  |
| $R_3$ | 5.95  | 4  | 4.29   | 5  |
| $R_4$ | 12.32 | 1  | 7.00   | 3  |
| $R_5$ | 1.68  | 5  | 10.29  | 1  |

通过比较分析,可以发现相对于后者概率影响矩阵方法,前者风险链进度风险评估方法具有以下优势:

(1) 前者更加关注与总工期相关性较大的工序,并在计算式中以斯皮尔曼秩相关系数的形式赋予其较大权重,而后者以风险发生概率与造成进度影响的乘积为评估依据,得到的结果很难客观地说明各风险(链)相对重要性.以风险链  $R_5$  为例,该风险链总共对 C、I、M 和 O 等四个工序造成一定影响,貌似对项目进度影响较大,在表 5 后者得到结果中,得分排序第一;但实际上,由于 I、M 和 O 等三个工序具有较大的自由时差和总时差,其时间波动与总

工期相关性很小(表 5 中,  $k_I = k_M = k_N = 0$ ),这三个工序延误对项目总工期影响并不大,在表 5 前者中得分最低,因此在实际项目实施过程中,管理者不宜给予风险链  $R_5$  过多的注意力。

(2) 在进度风险评估方面,前者结合了仿真过程,其评价依据更加客观.不妨假设存在两个风险因素,其发生概率分别为 10% 和 5%,造成进度延误为 5 d 和 10 d,后者的计算方法认为这两个风险因素重要性等同( $D_{\text{sum}} = 0.5$ ).然而,如果考虑这两个风险因素影响的不同工序在进度计划中的逻辑关系、总时差及自由时差、工序时间波动与项目总工期的相关性等差异,两个风险因素的相对重要性可能大不相同.而这些重要差异结合仿真过程进行评估,能够在前者的评估结果中得以体现。

(3) 前者引入风险链概念,更加符合实际项目实施过程中风险管理的组织形态.在实践中,对不同风险因素分配的人、财和物等资源并不是割裂的,某一风险管理小组往往同时应对若干风险因素,这就涉及到项目管理团队中不同风险管理小组对不同风险集合的职能分工问题.以同一风险链上关联密切的风险因素集合整体作为各风险管理小组管理职能的任务对象,这有利于对各种管理资源的整合,因而其得到的结果在实践应用中也能带给决策者更多的支持.而后者方法暗示管理过程面向单个风险因素,这给管理工作的科学组织带来不便。

## 4 结语

(1) 关注风险因素间的关联关系,提出风险链的概念,相对于风险因素是独立的这一假设,风险因素关联现象更符合实际情形,因此评估结果更加精确,这在进度管理方面,尤其对于复杂项目实施过程,具有不可忽略的意义。

(2) 进度目标的本质是确保项目的投入使用时间,因此保障项目总工期应是进度风险管理的重要思路.与其他方法不同,风险链进度风险评估方法的重要性得分中纳入了风险影响的工序时间与总工期的相关系数,因此其评估结果是依据风险因素对总工期带来的影响,相对于以往的方法,这一评估原则更加合理。

(3) 在强调进度风险评估需要结合项目进度工序间逻辑关系基础上,结合仿真技术进行风险评估,方法实现较为方便,结果比较精确.该方法的评估结果可为项目进度风险评估和相关管理决策提供参考。

依据。

事件链作用机理和风险关联建模等相关研究在国内外仍是一个较新的课题,结合两方面的相关成果,提出风险链概念,是一种理论上的尝试。尽管目前风险链进度风险评估方法在实际项目中取得了较好的应用效果,但可以肯定,这一概念被正式接纳并完善发展还需要开展大量的学术研究和实践应用。未来可探讨风险因素间存在的复杂关联关系及其显著性检验,以及项目工序同时受到不同风险链上多个风险元影响的情形,可开展进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] Zou P X W, Zhang G, Wang J. Understanding the key risks in construction projects in China[J]. *International Journal of Project Management*, 2007, 25(6): 601.
- [2] Lam K C, Wang D, Lee P T K, *et al.* Modelling risk allocation decision in construction contracts[J]. *International Journal of Project Management*, 2007, 25(5): 485.
- [3] Schatteman D, Herroelen W, Van de Vonder S, *et al.* Methodology for integrated risk management and proactive scheduling of construction projects[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2008, 134(11): 885.
- [4] Ökmen Ö, Öztaş A. Construction project network evaluation with correlated schedule risk analysis model[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2008, 134(1): 49.
- [5] Baccarini D, Archer R. The risk ranking of projects: A methodology[J]. *International Journal of Project Management*, 2001, 19(3): 139.
- [6] Lyons T, Skitmore M. Project risk management in the Queensland engineering construction industry: A survey[J]. *International Journal of Project Management*, 2004, 22(1): 51.
- [7] Pmbok A. Guide to the project management body of knowledge [M]. Newtown Square: Project Management Institute, 2000.
- [8] Zayed T, Amer M, Pan J. Assessing risk and uncertainty inherent in Chinese highway projects using AHP [J]. *International Journal of Project Management*, 2008, 26(4): 408.
- [9] Wang Y M, Liu J, Elhag T. An integrated AHP - DEA methodology for bridge risk assessment [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2008, 54(3): 513.
- [10] Bahli B, Rivard S. Validating measures of information technology outsourcing risk factors[J]. *Omega*, 2005, 33(2): 175.
- [11] Luu V T, Kim S Y, Tuan N V, *et al.* Quantifying schedule risk in construction projects using Bayesian belief networks [J]. *International Journal of Project Management*, 2009, 27(1): 39.
- [12] Carr V, Tah J H M. A fuzzy approach to construction project risk assessment and analysis: Construction project risk management system[J]. *Advances in Engineering software*, 2001, 32(10): 847.
- [13] Khashman A. Neural networks for credit risk evaluation: Investigation of different neural models and learning schemes [J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(9): 6233.
- [14] 阮欣, 尹志逸, 陈艾荣. 风险矩阵评估方法研究与工程应用综述[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(3): 381. RUAN Xin, YIN Zhiyi, CHEN Airong. A review on risk matrix method and its engineering application[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2013, 41(3): 381.
- [15] Zafra-Cabeza A, Ridao M A, Camacho E F. Using a risk-based approach to project scheduling: A case illustration from semiconductor manufacturing [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 190(3): 708.
- [16] 李藐, 陈建国, 陈涛, 等. 突发事件的事件链概率模型[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2010, 50(8): 1173. LI Miao, CHEN Jianguo, CHEN Tao, *et al.* Probability for disaster chains in emergencies [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2010, 50(8): 1173.
- [17] Cozzani V, Gubinelli G, Antonioni G, *et al.* The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 127(1): 14.
- [18] 张维忠. 控制心血管危险因素的现代概念[J]. *中华内科杂志*, 2004, 43(10): 721. ZHANG Weizhong. Modern concept of controlling dangerous factors of angiopathy [J]. *Chinese Journal of Internal Medicine*, 2004, 43(10): 721.
- [19] Antonioni G, Spadoni G, Cozzani V. A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 147(1): 48.
- [20] Büyüközkan G, Ruan D. Choquet integral based aggregation approach to software development risk assessment [J]. *Information Sciences*, 2010, 180(3): 441.
- [21] 张磊, 樊治平, 乐琦. 考虑风险关联情形的风险评估方法研究[J]. *运筹与管理*, 2011(6): 188. ZHANG Lei, FAN Zhiping, LE Qi. A method for estimating risks considering the interrelationships among risks [J]. *Operations Research and Management Science*, 2011(6): 188.
- [22] 李存斌, 陆龚曙. 工程项目风险元传递的系统动力学模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 32(12): 2731. LI Cunbin, LU Gongshu. System dynamics model of construction project risk element transmission [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2013, 32(12): 2731.
- [23] Nasir D, McCabe B, Hartono L. Evaluating risk in construction-schedule model (ERIC-S): Construction schedule risk model [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2003, 129(5): 518.
- [24] Raj T, Shankar R, Suhaib M. An ISM approach for modelling the enablers of flexible manufacturing system: The case for India[J]. *International Journal of Production Research*, 2008, 46(24): 6883.