

# 高速公路施工进度风险评价

蒋慧杰<sup>1,2</sup>, 吴慧博<sup>3</sup>, 夏立明<sup>4</sup>, 赵春雪<sup>4</sup>

(1. 天津大学 管理学院, 天津 300072; 2. 深圳出入境检验检疫局, 广东 深圳 518045;

3. 深圳市栋森工程项目管理有限公司, 广东 深圳 518004; 4. 天津理工大学 管理学院, 天津 300191)

**摘要:**通过高速公路项目施工进度的风险识别,将主要影响因素分为硬、软指标并建立风险指标体系。采用模糊逻辑与概率分析相结合的方法对识别出来的风险进行计算和评价;运用主成分分析法将风险指标体系中的各数据进行自动赋权并降维,使概率分析与模糊逻辑法的评价简单易行;最后经过实际案例检验,证实该方法可行并具有现实意义。

**关键词:**高速公路;施工进度;风险指标体系;主成分分析法;模糊概率分析;评价

中图分类号:F062.4

文献标志码:A

文章编号:1008-5831(2012)02-0087-07

在建设领域,项目能否在约定的工期内竣工交付使用是每一个投资者最关心的问题,因为项目工期对项目的收益高低起着很重要的作用,以一个13.5万千瓦的火力发电厂为例,每提前一天发电就可以生产300多万度的电,多创造价值几十万。因此,如何有效降低项目的施工进度风险,如期保质保量地完成项目,是理论界亟待解决一个的难题。

近年来,中国学者在项目的施工进度风险管理研究方面做了很多有益探索,取得了不少研究成果。成虎认为工程项目进度是一个综合概念,除了工期以外,还包括实物工作量、成本、资源的消耗量等因素,所以对进度的控制必须是综合的、多角度的<sup>[1]</sup>;刘洪波等考虑到单一资源冲突约束,建立项目的关键链,通过对各道施工工序的风险分析,实现对项目施工进度的监控管理<sup>[2]</sup>;高俊涛为了降低大型项目进度计划的复杂性,提出一种基于过程建模的项目进度计划方法<sup>[3]</sup>;张建设提出工程项目风险因素的多维特性描述方法,按照风险因素的重要度进行排序,使项目的风险管理更具有针对性<sup>[4]</sup>。由于项目的风险识别和估计是项目风险评价的基础,它需要综合考虑各单个风险的规律和特点、影响范围和大小,依据风险估计确定的风险大小或高低评价风险对工程项目目标的影响程度,区别于风险评估对风险因素或风险事件的预测,而是运用求得的数据对已发生的风险因素或事件参照风险评价准则得出风险值的一个过程<sup>[5]</sup>。这个风险值不仅是风险分析的结果,也是项目风险管理的基本依据。笔者对现有可查项目施工进度管理和风险管理资料的成果分析,认为高速公路施工进度风险管理在施工进度指标体系设计、评价标准的可量化程度、施工进度风险评价方法等方面还有较广阔的研究空间,因此笔者在该领域进行拓展性探究。在高速公路项目施工

收稿日期:2011-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目(70772058)

作者简介:蒋慧杰(1978-),男,天津大学管理学院博士研究生,注册造价工程师,注册咨询工程师,注册一级建造师,主要从事项目管理研究。

进度的风险识别和风险估计的基础上,采用主成分分析与模糊概率分析相集成的方法构建出高速公路施工进度风险评价模型进行高速公路施工进度风险的评价研究,并通过案例验证模型的可行性。

### 一、主成分分析法及模糊概率分析法

#### (一)主成分分析法

主成分分析,也称主量分析或 Karhunen - Love 变换,是由 Hotelling 于 1933 年首先提出的,它是利用降维的思想,在损失很少信息的前提下把多个指标转化为几个综合指标的多元统计方法,通常把转化生成的综合指标称之为主成分,其中每个主成分都是原始变量的线性组成,且各个主成分之间不相关,这就使得主成分比原始变量具有某些更优越的性能。它能将高维空间的问题转化到低维空间去处理,简化了变量系统的统计数字特征,同时还可以提供许多重要的系统信息,从数学角度来看,这就是降维的思想<sup>[6]</sup>。另外,主成分分析法还有一个特殊的优点即自动对数据进行无量纲化,使数据处理更便捷。正由于这一点,笔者利用该法的特性取其贡献值(特征值)为权重值,求各风险指标的概率,计算公式为:

$$p = \frac{g}{\sum_1^n g} \quad (1)$$

其中,  $p$  为概率值,  $g$  为贡献率,  $n$  为风险指标个数。

用较少的综合指标  $z_i (i = 1, 2, \dots, p, p \leq m)$  反映  $m$  个原指标  $x_j (j = 1, 2, \dots, m)$  所包含的信息,实际就是建立用标准化指标  $x_j^*$  表示的综合指标  $z_i$  的方程。

$$\begin{cases} z_1 = b_{11}x_1^* + b_{12}x_2^* + \dots + b_{1m}x_m^* \\ z_2 = b_{21}x_1^* + b_{22}x_2^* + \dots + b_{2m}x_m^* \\ \dots \\ z_p = b_{p1}x_1^* + b_{p2}x_2^* + \dots + b_{pm}x_m^* \end{cases} \quad (2)$$

其中  $z_1, z_2, \dots, z_p$  分别称为第一主成分,第二主成分, ..., 第  $p$  主成分。 $z_1$  包含原有指标的总信息最多,即方差最大,且与其他的  $z_i (i = 2, 3, \dots, p)$  无关;  $z_2$  是除  $z_1$  外的方差最大者,且与其他的  $z_i (i = 1, 3, \dots, p)$  无关;其余类推。

该法的核心就是通过主成分分析,选择  $p$  个主成分  $z_1, z_2, \dots, z_p$ , 以每个主成分  $z_i$  的方差贡献率  $a_i$  作为权数,构造综合评价函数:

$$Z = a_1Z_1 + a_2Z_2 + \dots + a_pZ_p \quad (3)$$

其中  $Z_i (i = 1, 2, \dots, p)$  为第  $i$  个主成分的得分。

#### (二)模糊概率分析法

##### 1. 概率分析法

概率分析法是通过研究不确定因素按照一定概率分布变动,找出风险因子变动情况,以判别项目可能发生的损益或风险,是建立在对风险因素的概率描述基础上的<sup>[7]</sup>。一般风险包括 2 个因素——风险事件发生的概率和风险事件潜在损失的后果,项目风险的大小  $R$  是这 2 个因素的函数,即:

$$R = f(p, q) \quad (4)$$

其中,  $R$  表示风险(风险事件),  $p$  表示风险事件发生的可能性,  $q$  表示风险事件发生后可能引起的后果。

函数  $R$  则表示风险事件发生概率和潜在损失后果的函数。由于这种描述方法与概率论基本相似,因此,后来一些学者进行了规范化处理,即:

$$R = p \times I \quad (5)$$

$I$  表示相对风险后果。这样,风险度就表示为风险概率  $p$  和相对风险后果  $I$  的乘积。

从概率论角度看,风险  $R$  实际上变成了风险后果的概率期望值。在实际工程项目的风险分析中,对各个风险因子采用函数  $R$  计算后,根据  $R$  大小排序,从而排出各风险因子的风险度优先顺序<sup>[8]</sup>。

而这种方法在实际中存在一定的局限性:一方面,要确定风险发生的概率和风险发生所产生的后果,仅靠项目风险管理人员与专家的知识 and 经验是不够的,还必须有大量的历史资料可供参考,这一点在实际工程中很难满足;另一方面,无论是项目风险管理人员与专家的知识 and 经验还是历史资料,在对风险因素进行描述时,要做到严格的定量化或准确是不现实的,都具有较强的主观性。

##### 2. 模糊逻辑方法

由于概率分析方法存在缺陷,模糊逻辑的风险分析方法应运而生。当对风险的发生概率和后果缺乏足够的历史数据,需要风险分析人员和有关专家做出主观估计,或者对风险因素的估计难以用数字精确给定时,往往用大小、强弱、高低等文字语言对风险概率和后果进行描述<sup>[9]</sup>。模糊逻辑概念的引入,使得能够对文字语言估计进行计算和分析。

采用模糊逻辑法对风险进行分析时,首先要建

立各指标的模糊隶属度函数,一般表示为:

$$A = [x/\mu_A(x)] \quad (6)$$

其中,A 是风险指标的等级集合,比如可以把风险发生概率用很大、大、中、低、很低分为五个等级,每一个等级对应一个隶属度函数。 $x$  是指标的取值, $\mu_A(x)$  为  $x$  对应的模糊隶属度。显然,不同风险因素的风险发生概率及其后果的隶属度函数是不同的。

隶属度函数建立后,就可将风险分析人员和有关专家对风险的文字性估计结果与隶属度函数对应起来,文字描述性估计结果转化为数字描述。然后,

按照模糊关系运算规则进行各风险因素的组合,获得整个工程项目的风险度模糊逻辑数字描述。最后,将该结果与隶属度函数进行对照,得出整体风险度。这种方法避开了精确描述风险概率及其后果的困难,同时文字性的估计结果在某种程度上会比概率方法包含更多的信息,不仅包含风险因素发生的概率及后果,还包含其他不确定性内容。但该方法在实际操作中也存在一些问题,如隶属度函数确定有一定的困难等。综上分析可知,概率分析法和模糊逻辑法有很好的互补性,两者的对比见表 1。

表 1 概率方法和模糊逻辑方法对比表

	概率分析法	模糊逻辑法
优点	<ul style="list-style-type: none"> <li>①风险发生概率和后果估计值为数字描述,有成熟的计算方法</li> <li>②可以利用各种概率分析对随机变量进行模拟,还可以对随机变量进行概率组合计算</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①模糊估计可以涵盖更多的不确定性</li> <li>②可以处理对变量估计值的文字性描述</li> <li>③直观,容易理解</li> </ul>
缺陷	<ul style="list-style-type: none"> <li>①随机变量的组合数学期望值法会降低信息量,结果有偏差</li> <li>②不能涵盖风险因素的诸多不确定性</li> <li>③需要大量相关历史资料引入估计值</li> <li>④对变量的估计描述要求精确</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①隶属度函数的获得比较困难</li> <li>②风险因素的组合模糊算法尚不成熟</li> <li>③运算结果的含义解释有一定难度</li> </ul>
适用条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>①有大量相关历史资料可供引用</li> <li>②能对变量的估计进行精确描述</li> <li>③变量间相关关系要求明确</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①无大量相关历史资料可供引用</li> <li>②不易对变量进行精确描述</li> <li>③有相关经验和知识</li> </ul>

基于此,笔者将两者结合,扬长避短,既利用概率分析法比较成熟的计算方法,又利用模糊逻辑法处理文字估计性描述的优势,运用于高速公路施工进度风险的评价。

## 二、高速公路项目施工进度风险评价模型

### (一)影响高速公路项目施工进度风险指标体系的构建

高速公路项目施工进度风险指标建立在风险识别的基础上,而风险的识别是从系统的观点出发,从项目所涉及的各个方面以及项目建设过程,将引起风险的复杂事物进行简化分解,找出其中的主要因素单元。风险识别方法有许多常规的技术和工具,如赵振宇、刘伊生<sup>[10]</sup>,赵鑫等<sup>[11]</sup>提出运用可靠性工程研究中的故障树分析法,卢有杰、卢家仪<sup>[12]</sup>提出的风险识别专题讨论会、头脑风暴法、德尔菲法、WBS法、敏感性分析法,T. M. Williams<sup>[13]</sup>提出的风险登记表法等。笔者根据高速公路项目的特点,结合对相关文献的研究,根据全面、动态、经济的原则,运用头

脑风暴法、风险登记表法对高速公路施工进度风险进行识别,分别从硬、软两方面,结合质量、安全、成本以及收益四个层次风险构建出高速公路施工进度风险指标体系,如图 1 所示。

### (二)高速公路施工进度风险评价的模型

上述构建的高速公路施工进度风险评价指标体系为大量定性和定量指标构成的大型复杂综合评价体系,同时,由于高速公路建设项目是一个多主体参与、多因素影响的复杂开放系统,因此,各级指标之间的关系比较模糊和复杂,另外指标原始数据的获得均为现场调查的第一手资料数据,样本空间相对较小。基于此,笔者构建的高速公路施工进度风险评价模型如图 2 所示。该模型既考虑了将庞大繁杂的指标体系适当整合归并,以反映不重叠且重点的信息,也适应了当前在中国进行高速公路施工进度风险管理的约束条件,同时,利用相应计算机软件可以使评价简便易行,可以预见在实际应用中能取得较为理想的评价结果。

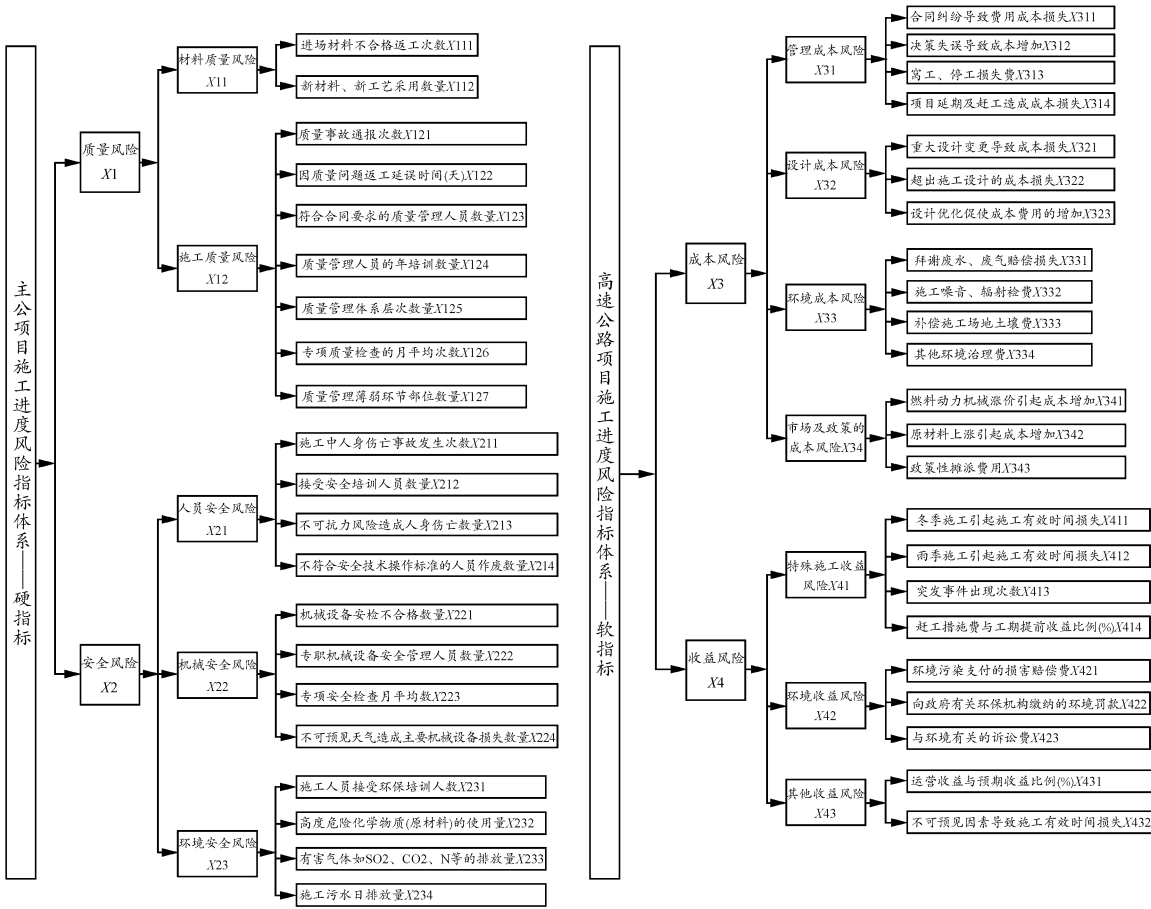


图1 高速公路施工进度风险指标体系

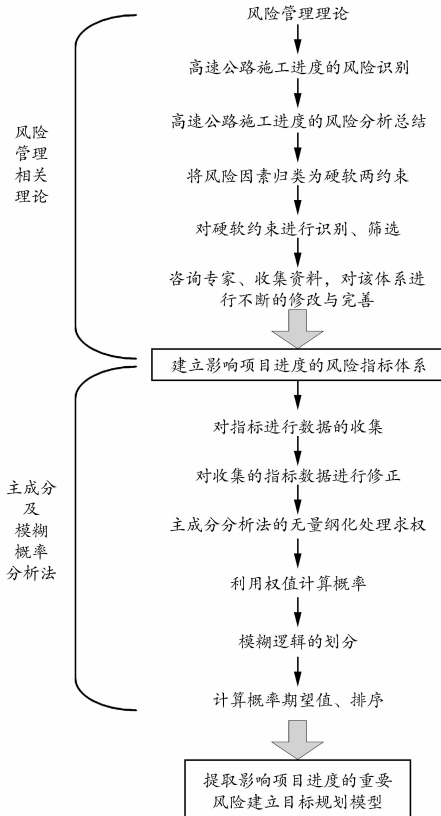


图2 高速公路施工进度风险评价模型

### 三、实证分析

京沪高速公路(天津段)是交通部规划的“五纵七横”国道主干线之一,是天津市公路发展规划确定的“一环、七射、四主、二连”主构架的重要组成部分。该工程自西青区京沪高速一、二期分界点(当城互通),终止于静海县大张屯南(京沪高速公路津冀主线收费站北侧渐变段起点),路线全长 55.406 公里(其中京沪正线 48.536 公里,丹拉支线 6.870 公里)。该工程作为国家立项重点工程,于 2004 年 11 月底开工,2006 年 11 月底通车,工程总投资 41.21 亿人民币。

通过对已构建的高速公路施工进度风险指标体系的分析,考虑到其风险的变化特点,根据施工过程中以及以往的施工经验并且考虑评价的可比性和客观性,采集到有关风险评价值的原始数据。

由于高速公路施工项目进度风险指标体系由 4 个一级指标、12 个二级指标、44 个三级指标组成,指标数量较多并且关系复杂。笔者首先利用主成分分析法将得到的原始数据进行降维处理,同时利用贡献率值得到各风险的概率。具体的操作步骤

如下。

SPSS13.5 软件中提取主成分;首先进行指标的相

第一步,将质量风险 9 个指标的数据代入到 相关性分析,指标的相关性矩阵表如表 2 所示。

表 2 相关矩阵表

	X111	X112	X121	X122	X123	X124	X125	X126	X127
X111	1.000	0.028	-0.235	0.861	0.943	-0.775	0.420	-0.890	0.289
X112	0.028	1.000	0.113	0.511	-0.236	-0.592	0.805	-0.439	-0.734
X121	-0.235	0.113	1.000	-0.287	-0.451	-0.147	0.420	-0.025	0.426
X122	0.861	0.511	-0.287	1.000	0.714	-0.905	0.683	-0.939	-0.202
X123	0.943	-0.236	-0.451	0.714	1.000	-0.526	0.098	-0.691	0.344
X124	-0.775	-0.592	-0.147	-0.905	-0.526	1.000	-0.898	0.978	0.036
X125	0.420	0.805	0.420	0.683	0.098	-0.898	1.000	-0.787	-0.203
X126	-0.890	-0.439	-0.025	-0.939	-0.691	0.978	-0.787	1.000	-0.066
X127	0.289	-0.734	0.426	-0.202	0.344	0.036	-0.203	-0.066	1.000

注:X111:进场材料不合格返工次数,X112:新材料、新工艺采用数量,X121:质量事故通报次数,X122:因质量问题返工延误时间,X123:符合合同要求的质量管理人员数量,X124:质量管理人员的年培训数量,X125:质量管理体系层次数量,X126:专项质量检查的月平均数,X127:质量管理体系层次薄弱环节部位数量。

第二步,计算质量风险评价指标的特征值及其贡献率和累计贡献率(表 3)。

第四步,利用模糊逻辑法,请专家对经过降维并得出概率值的各风险进行估计(表 5)。

表 3 质量风险特征值及其贡献率和累计贡献率

指标	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)
X111	0.4982	55.354	55.354
X112	0.2395	26.611	81.965
X121	0.1623	18.035	100.00
X122	$3.146E-16$	$3.496E-15$	100.00
X123	$2.139E-16$	$2.377E-15$	100.00
X124	$-8.497E-17$	$-9.441E-16$	100.00
X125	$-1.239E-16$	$-1.377E-15$	100.00
X126	$-5.879E-16$	$-6.532E-15$	100.00
X127	$-9.360E-16$	$-1.040E-1$	100.00

表 4 安全、成本、收益指标层概率值表

指标	特征值	贡献率(%)	概率值
安全风险指标	0.661	55.039	0.551
	0.341	28.415	0.284
	0.197	16.546	0.199
成本风险指标	0.782	55.852	0.559
	0.381	27.162	0.272
	0.238	16.986	0.170
收益风险指标	0.431	47.914	0.479
	0.382	42.404	0.424
	0.087	9.682	0.097

注:各指标层的其余风险概率值也都近乎为零,忽略不计。

表 5 模糊逻辑法估计值表

因素	风险指标	风险估计	风险损失值
质量	进场材料不合格返工次数	小	87.5
	新材料、新工艺采用量	中	100
	质量事故通报次数	大	115
安全	施工中人身伤亡事故发生次数	很大	147.5
	接受安全培训人员数量	很小	72.5
	不可抗力风险造成人身伤亡	大	137.5
成本	合同纠纷	较大	65
	决策失误导致费用成本损失	大	82.5
	窝工、停工损失	较大	65
收益	冬季施工引起施工时间损失	大	80
	雨季施工引起施工时间损失	大	80
	突发事件出现	很大	100

根据表 3,可以看到前面的两个指标的贡献率和累计贡献率的比例为 81.965%,选取 X111 作为第一主成分,X112 作为第二主成分,且这两个主成分的累计贡献率为 81.965%,接近 85%,即基本保留了原来指标的信息,解释了大部分方差的信息量,是影响质量风险的主要成分。同时,质量风险的前三个指标概率值为 0.554、0.266、0.180,而其余的概率值很小,近乎为零。

第三步,本研究中对于安全风险、成本风险和收益风险三个层次指标的主成分提取方法和上述质量风险的相同,限于文章篇幅省略掉计算过程。安全、成本和收益指标的贡献率和概率值见表 4。

第五步,对文字性模糊估计进行量化,量化公式采用常用的平均数法,即:

$$q = \frac{(q_{\max} + q_{\min})}{2} \quad (7)$$

$q$  为风险损失值,  $q_{\min}$  为估计风险损失最小值,  $q_{\max}$  为估计风险损失最大值。具体见表 6。

表 6 模糊逻辑风险损失值表

因素	风险估计	风险损失值划分(万元)
质量	小	[85 ~ 90]
	中	[95 ~ 105]
	大	[105 ~ 125]
安全	很大	[135 ~ 160]
	很小	[65 ~ 80]
	大	[125 ~ 150]
成本	较大	[55 ~ 75]
	大	[75 ~ 90]
	较大	[55 ~ 75]
收益	大	[75 ~ 85]
	大	[75 ~ 85]
	很大	[95 ~ 105]

第六步,根据得到的概率值和风险损失值,利用概率分析法给出的公式计算风险概率期望值并排序,对影响高速公路施工进度较大的风险因素进行严密管理与控制,以保证施工进度顺利进行(表 7)。

表 7 高速公路施工进度风险期望值表

因素	风险指标	风险期望值(万元)
质量	进场材料不合格返工次数	47.6
	新材料、新工艺采用量	26.6
	质量事故通报次数	20.7
安全	施工中人身伤亡事故发生次数	81.27
	接受安全培训人员数量	20.59
	不可抗力风险造成人身伤亡	27.36
成本	合同纠纷导致费用成本损失	36.34
	决策失误导致费用成本损失	22.44
	窝工、停工损失	11.05
收益	冬季施工引起施工时间损失	38.32
	雨季施工引起施工时间损失	33.92
	突发事件出现	9.7

表 7 可以得出安全风险和质量风险对高速公路施工进度的影响最大,且安全风险中的施工人身伤

亡事故的发生对施工进度的影响最大,风险期望值为 81.27;质量风险中的进场材料不合格所造成的风险次之,期望值为 47.6;其次冬季施工造成的进度拖延和合同纠纷导致费用成本损失也是不可小视的风险因素。

#### 四、结语

笔者提出了新的高速公路施工进度风险评价方法——基于主成分分析法和模糊概率分析法的高速公路施工进度风险评价模型,并结合京沪高速公路(天津段)二期工程进行了实证应用。

在充分收集和整理资料的基础上,针对高速公路施工进度风险管理的现状,构建出以软硬两个方面,质量、安全、成本、收益四个层次为主体的高速公路施工进度风险评价指标体系。

依据对构建的指标体系的分析,充分利用主成分分析法和模糊概率分析法处理噪声数据和复杂、模糊、不确定的指标关系的优势,同时,在一定程度上克服了指标取值的主观性,评价过程的逻辑性较强,建立了适应指标体系特征并考虑数据约束条件的高速公路施工进度风险评价模型。

在理论分析的基础上,针对京沪高速公路(天津段)二期工程,按照已构建的指标体系采集原始数据,运用主成分分析法和模糊概率分析法相结合构建的高速公路施工进度风险评价模型进行实证分析,得出安全风险中的施工人身伤亡事故的发生和质量风险中的进场材料不合格对高速公路施工进度风险的影响最大,根据该评价结果,制定出针对性的预防措施,为现场的施工进度风险管理提供了一条有操作性的途径。

#### 参考文献:

- [1]成虎. 工程项目管理[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [2]刘洪波,丰景春,周阳. 基于关键链的建设项目进度风险管理[J]. 科技管理研究,2007(10):138-143.
- [3]高俊涛,张莉. 基于过程建模的项目进度计划方法[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(9):1099-1102.
- [4]张建设. 面向过程的工程项目风险动态管理方法研究[D]. 天津:天津大学,2002.
- [5]NIKANDER I O, ELORANTA E. Project management by early warnings[J]. International Journal of Management, 2004(19):384-399.
- [6]夏立明,王亦虹. 基于因素重构分析法和主成分分析法的企业安全文化评价模型[J]. 中国安全科学学报,2007(12):70-75.
- [7]梁晶. 概率分析法在水运建设项目经济评价中的应用

- [J]. 水运管理,2009,31(9):25-27.
- [8] HE zhi. Risk management for overseas construction projects [J]. International Journal of Project Management, 2003, 13(4):231-237.
- [9] 曹渝昆,王海林,张德进,等. 基于模糊逻辑的发供电企业供应商评价方法[J]. 控制工程,2009,16(3):379-382.
- [10] 赵振宇,刘伊生. 故障树法引入工程项目风险管理研究[J]. 现代电力,2002,19(2):95-99.
- [11] 赵鑫,杨强,张磊,等. 故障树与蒙特卡罗法在起重机主梁可靠性分析中的应用[J]. 东北大学学报(自然科学版),2011,32(4):843-845.
- [12] 卢有杰,卢家仪. 项目风险管理[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [13] WILLIAMS T M. Using a risk register to integrate risk management in project definition [J]. International Journal of Project Management,1994,12(1):17-22.

## The Application of CPA and Fuzzy Probability Analysis on Risk Evaluation of Highway Construction Schedule

JIANG Hui-jie<sup>1,2</sup>, WU Hui-bo<sup>3</sup>, XIA Li-ming<sup>4</sup>, ZHAO Chun-xue<sup>4</sup>

(1. School of Management, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China;

2. Shenzhen Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Shenzhen 518045, P. R. China;

3. Shenzhen Dong Sen Project Management Co., Ltd, Shenzhen 518004, P. R. China;

4. School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, P. R. China)

**Abstract:** Through the risk identification of highway project's progress of construction, the authors divide the major factors into strong index and soft index, and then establish a risk index system. Using the fuzzy logic combined with probability analysis, the authors calculate and evaluate the identified risk. They make the evaluation on probability analysis and fuzzy logic method simple by using the principal component analysis, and automatically empowering and reducing dimensionality of the data for risk index system. Finally, it will confirm the feasibility of the method and practical significance through the test on actual cases.

**Key words:** highway; construction schedule; risk indicators system; principal component analysis; fuzzy probability analysis; evaluation

(责任编辑 傅旭东)