

基于模糊相似的长距离输水管线系统 风险评价指标体系确立

李丹¹, 姚文锋², 郭富庆³, 王春艳³

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 水利部 南水北调规划设计管理局, 北京 100038;
3. 北京中水新华国际工程咨询有限公司, 北京 100053)

摘要: 长距离输水管道工程因其复杂性而存在诸多风险, 由于失事后果的严重性, 通过实践获取各风险事件的发生概率及事故造成的损失很不现实。鉴于评价指标的模糊性和关联性对评价结果的客观性影响很大, 通过引入模糊相似理论和三角模糊数, 提出了模糊相似评价方法。以东北某长距离埋地输水管道供水工程为例, 对初步识别的风险事件进行筛选, 并完成了对风险评价指标集的模糊相似评价。评价表明, 暴雪和山体滑坡、工程总体布局不尽合理和流量调整频繁、设备失灵和监控系统失效、管理设施不完善和资金保障不到位、人为破坏和通信故障等五组指标具有较高的相似度, 结果比较符合实际, 可剔除权重较小的相似指标, 新确立的风险指标体系能在一定程度上简化风险综合评价的复杂度, 方法简便可行。

关键词: 长距离输水管线; 模糊相似; 三角模糊数; 隶属度; 风险源; 指标体系; 评价

中图分类号: TV67 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0803-05

Development of risk evaluation index system of long distance water transmission pipeline based on fuzzy similarity

LI Dan¹, YAO Wenfeng², GUO Fugqing³, WANG Chunyan³

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan 430072, China;

2. Bureau of South-to-North Water Transfer of Planning, Designing and Management, Ministry of Water

Resources, Beijing 100038, China; 3. China Water International Engineering Consulting Co., Ltd, Beijing 100053, China)

Abstract: Various risks exist in the long distance water transmission pipeline project because of its complexity. Because the accident is usually disastrous, it is not realistic to obtain the frequency and induced loss of the risk event. Due to that the vagueness and correlation of risk indexes usually have significant impacts on the risk assessment results, a fuzzy similarity evaluation method was proposed based on the fuzzy similarity theory and triangular fuzzy number, and it was used to evaluate the risks for the long distance water transmission pipeline project located in the northeast of China. The initially identified risk events were selected, and the fuzzy similarity evaluation method was applied to the risk index system. The results showed that five groups of indexes have high similarity, including heavy snow fall and landslide, irrationality of the overall layout of the project and frequent flow adjustment, equipment failure and breakdown of monitoring system, incomplete management facilities, and inadequate fund guarantee. The results were consistent with the actual conditions and the indexes with lower weights can be eliminated. Consequently, the complexity of comprehensive risk assessment can be reduced using the newly constructed risk index system.

Key words: long distance water transmission pipeline; fuzzy similarity; triangular fuzzy number; membership; risk event; index system; evaluation

城市供水系统是保障居民安全饮用水和城市可持续发展的前提和基础。随着经济社会的发展, 长距离输水的供水工程相继增多, 且规模越来越大^[1-3]。影响城市供水系统正

常运行的因素较多, 导致存在诸多风险。从全国工程实践来看, 由于事先没有充分进行风险评估并采取行之有效的防范措施, 供水工程爆管等突发事故时有发生, 使国民经济蒙受

收稿日期: 2014-11-06 修回日期: 2015-04-28 网络出版时间: 2015-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.1126.010.html>

作者简介: 李丹(1980), 女, 湖北当阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文学及水资源配置、水资源管理等方面研究。E-mail: 54dli@163.com

巨大损失^[4-5]。因此,必须认识和避免工程在其运行中的潜在风险。要对长距离输水管道系统风险进行全面的评估,首先需要构建完善的风险指标体系。风险指标作为工程安全风险的指示器,应当能够全面指示管道系统在各个侧面的风险状况,并辅助管理人员进行相应的决策^[6-7]。

对于规模大、输水距离长、建设条件复杂的供水工程,在建设和运行过程中存在着更多的不确定因素,而这些因素往往具有一定的模糊性,很难用精确值表达,因此在很多研究中尝试引入模糊理论并取得了不错的效果^[8-11]。同时,各种影响因素之间通常存在一定程度的相关关系,从而使观测数据所反映的信息有所重叠,王乐清等^[12]曾对评估指标关联性的研究成果和存在问题进行了总结。鉴于评价指标的模糊性和相关性对评价结果的客观性有很大影响,本文尝试采用模糊相似理论来分析评价指标的相似性,并将方法应用于东北某长距离埋地管道输水系统的风险评价指标体系的确立。

1 工程概况

本次选取的 M 工程位于东北 H 市,为有压重力流双管输水,单管设计流量 5.53 m³/s。该工程由水库工程、输水管道工程、净水厂工程和市区配水管网工程四大部分组成。其中,输水管道工程沿线地形起伏大、工程地质条件复杂,管线全长近 177 km,穿越较大河流 3 次,穿越铁路 5 次,穿越等级公路 10 次,穿越沙石路面公路 46 次,穿越市区道路 3 次。双管平行埋地敷设,输水管道采用钢管和预应力钢筒混凝土管(PCCP)两种,管径均为 2.2 m,沿线共设有 2 座稳压井,4 个调流调压阀,221 个排气阀,22 个排泥阀,35 个手动蝶阀,6 个连通管。管线埋深随地形变化而变化,坡地多数在 20 m 以下,平原地区为 1.35~8.5 m 左右。输水管道跨越二个不同等级的地震基本烈度区,其中大部分地区基本烈度为 0 度,属区域稳定地区,仅个别地段按 X 度设防。输水管道示意图 1。

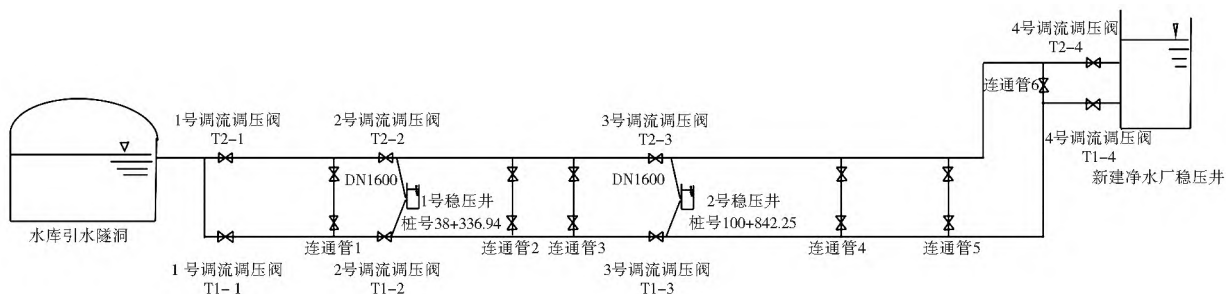


图 1 管线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pipeline

2 风险评价指标体系初步构建

2.1 风险源识别

目前,比较常用的工程风险识别方法主要有专家调查法、核查表法、幕景分析法、图解法、故障树分析法等^[13]。结合工程的实际情况,考虑有些风险及其损失情况在短期内采用数理统计方法加以验证非常困难,本次主要采用专家调查法和故障树分析法。

从工程风险管理目标出发,通过风险调查和信息分析、专家咨询等手段,按照工程的开展过程进行分解,认识工程

运行及管理风险,建立风险清单。依据输水管道工程概况,区域气象、水文和工程地质条件,资源及公用设施条件,工程的设计、施工方案,工程的质量控制及功能目标要求,资金筹措方案,工程对邻近环境的可能影响评估,工程的管理组织结构,各项合同及有关批文等条件,类似工程的经验及数据等,完成工程的风险源识别。

根据已有的实践经验,对工程的前期及现状调查评价提出的主要问题,以及在工程运行中遇到的风险事例,将风险因素划分为自然环境风险(X1)、技术风险(X2)、组织管理风险(X3)和第三方风险(X4)四大类,各项具体风险因子构成见图 2。

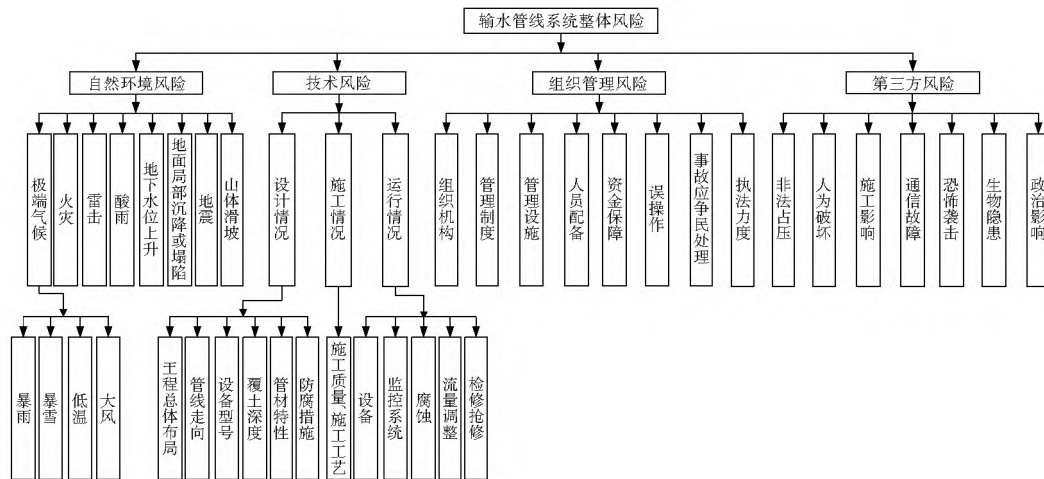


图 2 系统风险因子构成示意

Fig. 2 Risk index system of the pipeline project

2.2 指标初步筛选

结合工程所承担的任务、所处环境、生产工艺流程及地理位置的实际特点,本着“灵敏性、独立性、协调性”原则,对提出的风险因子集进行初步筛选,剔除那些对评价目标明显不敏感或不产生影响的指标,最终设定 27 项具体指标(见表 1),其中,自然环境风险 6 项,技术风险 9 项,组织管理风险 7 项,第三方风险 5 项。

表 1 供水工程管道系统风险事件列表

编号	风险指标	编号	风险指标	编号	风险指标
X11	暴雨	X24	施工质量、施工工艺欠缺	X34	人员配备不合理
X12	暴雪	X25	设备失灵	X35	资金保障不到位
X13	低温	X26	监控系统失效	X36	事故应急预案不完善
X14	大风	X27	腐蚀	X37	执法力度弱
X15	地震	X28	流量调整频繁	X41	非法占压
X16	山体滑坡	X29	检修抢修效率低	X42	人为破坏
X21	工程总体布局不尽合理	X31	组织机构不健全	X43	施工不当
X22	管线走向复杂	X32	管理制度不完善	X44	通信故障
X23	管材特性差异	X33	管理设施不完善	X45	政治影响

目前,指标权重的确定方法有多种,本次选用实用性强、计算简便的层次分析法(AHP)确定指标权重。根据专家调查数据,计算得到各类指标的权重向量如下:

$$W(X1) = (0.2482, 0.0739, 0.0988, 0.0409, 0.2546, 0.2835)$$

$$W(X2) = (0.1685, 0.0671, 0.0736, 0.1199, 0.1897, 0.1504, 0.0430, 0.1276, 0.0602)$$

$$W(X3) = (0.1294, 0.0952, 0.0832, 0.1579, 0.1751, 0.2116, 0.1476)$$

$$W(X4) = (0.1949, 0.3253, 0.2219, 0.1857, 0.0722)$$

3 模糊相似评价方法原理

3.1 数学基础

对任何 $x \in X$, 都有一个数 $\mu(x) \in [0, 1]$ 与之对应, 则 $\mu(x)$ 称为 x 对 X 的隶属度, $\mu(x)$ 称为隶属函数, 其集合表示为 $A = \{x, \mu_A(x) | x \in X\}$ 。

任给评判方案: $\forall u, v \in X$, 对于指标 $s, t \in G$, 设 c_{us}, c_{vs}, c_{ut} 和 c_{vt} 分别为方案 u 和 v 关于指标 s 和 t 的正规化后的属性值, 设 c_{us}, c_{vs}, c_{ut} 和 c_{vt} 的中心到原点的距离分别为 d_{us}, d_{vs}, d_{ut} 和 d_{vt} , 若 $D_s(u, v) = d_{us} - d_{vs} > 0$, 都有 $D_t(u, v) = d_{ut} - d_{vt} > 0$ 成立, 则称指标 t 是关于指标 s 的同向增长变量, 记为 $s \rightarrow t$ 。显然 $s \rightarrow t$ 是等价关系, 满足自反性、对称性和传递性。在实际应用中, 考虑到指标常常是非严格等价的, 因此将此定义进行相应的扩展, 称为指标的相似。即对于指标 $s, t \in N$, 若关系 $s \rightarrow t$ 在样本集上几乎处处成立, 则称指标 t 是关于指标 s 的相似变量, 记为 $s \overset{a.c.}{\rightarrow} t$ 。

3.2 指标模糊化

采用三角模糊数 $A = (a, b, c)$ 来表示各风险事件的发生概率, 其隶属度函数为

$$\mu_A(x) = \begin{cases} (x-a)/(b-a) & x \in [a, b] \\ (c-x)/(c-b) & x \in [b, c] \\ 0 & x \in \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

式中: b 为模糊数的中值; a 和 c 分别为模糊数的左值和右值。

在对风险事件模糊化时, 同时考虑风险的发生概率和重要程度, 将引起长距离输水管道工程失效的事件风险划分为 11 个等级^[1+16], 并用语言变量直观表达风险因素的相对重要性, 各语言变量的三角模糊数见表 2。

表 2 以三角模糊数表示的事件风险等级

风险等级	语言变量		三角模糊数
	发生概率	重要程度	
1	极其低	极其不重要	(0, 0, 0.1)
2	非常低	非常不重要	(0, 0.1, 0.2)
3	很低	很不重要	(0.1, 0.2, 0.3)
4	低	不重要	(0.2, 0.3, 0.4)
5	较低	较不重要	(0.3, 0.4, 0.5)
6	中等	中等	(0.4, 0.5, 0.6)
7	较高	较重要	(0.5, 0.6, 0.7)
8	高	重要	(0.6, 0.7, 0.8)
9	很高	很重要	(0.7, 0.8, 0.9)
10	非常高	非常重要	(0.8, 0.9, 1)
11	极其高	极其重要	(0.9, 1, 1)

利用式(2)计算三角模糊数的中心坐标^[17]如下:

$$\begin{cases} x = \frac{1}{3}(a+b+c) \\ y = \frac{1}{3} \end{cases} \quad (2)$$

据此可求得各中心点到原点的距离 D 为

$$D = \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{1}{3} \sqrt{1 + (a+b+c)^2} \quad (3)$$

3.3 相似指标判定

设 $\overset{m}{A}(x_i)$ 为专家评判集, P_s 和 P_t 分别为指标 s 和指标 t 数值关于评判序号由小到大的排列, 排列 P_s, P_t 的第 i 个元素分别记为 $P_s(i), P_t(i)$, 并构造辅助点 $P_s(m+1)$ 和 $P_t(m+1)$ 如下:

$$P_s(m+1) = (2P_s(m) - P_s(m-1)) \vee (P_{s, \max} + \varepsilon) \quad (4)$$

$$P_t(m+1) = (2P_t(m) - P_t(m-1)) \vee (P_{t, \max} + \varepsilon) \quad (5)$$

式中: $P_{s, \max}, P_{t, \max}$ 分别为 P_s 和 P_t 中的最大值; ε 为一个任意小的正数; m 为评判集个数。

则若 s 和 t 为相似指标, 必同时满足^[18]:

$$\begin{cases} D_s(P_t(i+1), P_t(i)) \overset{a.c.}{>} 0 \\ D_t(P_s(i+1), P_s(i)) \overset{a.c.}{>} 0 \end{cases} \quad (6)$$

3.4 指标相似的隶属度计算

选取待检测的指标 $s, t \in N$, 按照指标 s 的属性值由小到大对 X 中的样本进行排序, 得到排列 P_s , 将集合 $\{i | D_t(P_s(i+1), P_s(i)) > 0\}$ 中的元素个数记为 N_t ; 按照指标 t 的属性值由小到大对 X 中的样本进行排序, 得到排列 P_t , 将集合 $\{i | D_s(P_t(i+1), P_t(i)) > 0\}$ 中的元素个数记为 N_s , 按下式计算指标相似的隶属度为

$$u(s, t) = \frac{\min(N_s, N_t)}{m} \quad (7)$$

从而得到相似隶属度矩阵 $U = (u_{ij})_{n \times n}$ 。若 $u(s, t)$ 等于或接近 1, 则认为 s 和 t 为相似指标, 可对其中之一进行剔除。

4 模糊相似性评价分析

4.1 模糊相似性评价

首先邀请多个专家根据项目背景资料以及工程实践经验判断不同风险事件的风险等级, 得到模糊评判矩阵 P (限于篇幅仅列出第一类风险的结果, 以下同):

$$P1 = \begin{pmatrix} (0.55, 0.65, 0.75) & (0.65, 0.75, 0.85) & (0.60, 0.70, 0.80) \\ (0.60, 0.70, 0.80) & (0.75, 0.85, 0.95) & (0.85, 0.95, 1.00) \\ (0.65, 0.75, 0.85) & (0.70, 0.80, 0.90) & (0.70, 0.80, 0.90) \\ (0.60, 0.70, 0.80) & (0.75, 0.85, 0.95) & (0.70, 0.80, 0.90) \\ (0.65, 0.75, 0.85) & (0.70, 0.80, 0.90) & (0.60, 0.70, 0.80) \\ (0.30, 0.40, 0.50) & (0.45, 0.55, 0.60) & (0.55, 0.65, 0.75) \\ (0.35, 0.45, 0.55) & (0.50, 0.60, 0.65) & (0.60, 0.70, 0.80) \\ (0.35, 0.45, 0.55) & (0.45, 0.50, 0.55) & (0.45, 0.55, 0.65) \\ (0.05, 0.15, 0.25) & (0.50, 0.60, 0.65) & (0.50, 0.60, 0.70) \\ (0.25, 0.35, 0.45) & (0.45, 0.50, 0.55) & (0.45, 0.55, 0.60) \end{pmatrix}$$

由于各风险事件均为成本型指标, 采用式(8)^[19]进行规范化处理后得到正规化矩阵如下:

$$r_{ij} = \left[\frac{\min a_{ij}}{c_{ij}}, \frac{\min b_{ij}}{b_{ij}}, \frac{\min c_{ij}}{a_{ij}} \wedge 1 \right] \quad (8)$$

$$R1 = \begin{pmatrix} (0.733, 1, 1) & (0.765, 1, 1) & (0.75, 1, 1) \\ (0.688, 0.929, 1) & (0.648, 0.882, 0.95) & (0.6, 0.737, 0.941) \\ (0.647, 0.867, 1) & (0.722, 0.938, 1) & (0.667, 0.875, 1) \\ (0.688, 0.929, 1) & (0.684, 0.882, 1) & (0.667, 0.875, 1) \\ (0.647, 0.867, 1) & (0.722, 0.938, 1) & (0.75, 1, 1) \\ (0.05, 0.158, 0.833) & (0.75, 0.909, 1) & (0.6, 0.846, 1) \\ (0.091, 0.333, 0.714) & (0.692, 0.833, 1) & (0.563, 0.786, 1) \\ (0.091, 0.333, 0.714) & (0.818, 1, 1) & (0.692, 1, 1) \\ (0.2, 1, 1) & (0.692, 0.833, 1) & (0.643, 0.917, 1) \\ (0.111, 0.429, 1) & (0.818, 1, 1) & (0.75, 1, 1) \end{pmatrix}$$

按照式(2)和(3)分别得到中心矩阵 C 和距离矩阵 D 如下:

$$C1 = \begin{pmatrix} (0.911, 0.333) & (0.922, 0.333) & (0.917, 0.333) \\ (0.872, 0.333) & (0.856, 0.333) & (0.759, 0.333) \\ (0.838, 0.333) & (0.887, 0.333) & (0.847, 0.333) \\ (0.872, 0.333) & (0.856, 0.333) & (0.847, 0.333) \\ (0.838, 0.333) & (0.887, 0.333) & (0.917, 0.333) \\ (0.347, 0.333) & (0.886, 0.333) & (0.815, 0.333) \\ (0.380, 0.333) & (0.842, 0.333) & (0.783, 0.333) \\ (0.380, 0.333) & (0.939, 0.333) & (0.897, 0.333) \\ (0.733, 0.333) & (0.842, 0.333) & (0.853, 0.333) \\ (0.513, 0.333) & (0.939, 0.333) & (0.917, 0.333) \end{pmatrix}$$

$$D1 = \begin{pmatrix} 0.970 & 0.980 & 0.975 & 0.481 & 0.947 & 0.881 \\ 0.934 & 0.918 & 0.829 & 0.505 & 0.905 & 0.851 \\ 0.902 & 0.947 & 0.910 & 0.505 & 0.997 & 0.957 \\ 0.934 & 0.918 & 0.910 & 0.806 & 0.905 & 0.916 \\ 0.902 & 0.947 & 0.975 & 0.612 & 0.997 & 0.975 \end{pmatrix}$$

最后按照式(4) - 式(7)计算得到四类评价指标的相似隶属度矩阵 U 。

$$U1 = \begin{pmatrix} 1 & 0.4 & 0.6 & 0.4 & 0.4 & 0.4 \\ 0.4 & 1 & 0.4 & 0.4 & 0.4 & 0.8 \\ 0.6 & 0.4 & 1 & 0.6 & 0.6 & 0.4 \\ 0.4 & 0.4 & 0.6 & 1 & 0.4 & 0.6 \\ 0.4 & 0.4 & 0.6 & 0.4 & 1 & 0.4 \\ 0.4 & 0.8 & 0.4 & 0.6 & 0.4 & 1 \end{pmatrix}$$

$$U2 = \begin{pmatrix} 1 & 0.6 & 0.4 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 1 & 0.6 \\ 0.6 & 1 & 0.4 & 0.6 & 0.6 & 0.4 & 0.6 & 0.6 & 0.4 \\ 0.4 & 0.4 & 1 & 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0.4 & 0.4 \\ 0.6 & 0.6 & 0.4 & 1 & 0.6 & 0.6 & 0.4 & 0.6 & 0.6 \\ 0.6 & 0.6 & 0.2 & 0.6 & 1 & 0.8 & 0.6 & 0.6 & 0.6 \\ 0.6 & 0.4 & 0.4 & 0.6 & 0.8 & 1 & 0.4 & 0.6 & 0.4 \\ 0.6 & 0.6 & 0.4 & 0.4 & 0.6 & 0.4 & 1 & 0.6 & 0.4 \\ 1 & 0.6 & 0.4 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 1 & 0.6 \\ 0.6 & 0.4 & 0.4 & 0.6 & 0.6 & 0.4 & 0.4 & 0.6 & 1 \end{pmatrix}$$

$$U3 = \begin{pmatrix} 1 & 0.6 & 0.4 & 0.6 & 0.6 & 0.4 & 0.4 \\ 0.6 & 1 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.4 & 0.4 \\ 0.4 & 0.6 & 1 & 0.6 & 0.8 & 0.4 & 0.4 \\ 0.6 & 0.6 & 0.6 & 1 & 0.6 & 0.2 & 0.4 \\ 0.6 & 0.6 & 0.8 & 0.6 & 1 & 0.6 & 0.6 \\ 0.4 & 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0.6 & 1 & 0.4 \\ 0.4 & 0.4 & 0.4 & 0.4 & 0.6 & 0.4 & 1 \end{pmatrix}$$

$$U4 = \begin{pmatrix} 1 & 0.6 & 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0.6 & 1 & 0.4 & 0.8 & 0.6 \\ 0.2 & 0.4 & 1 & 0.4 & 0.4 \\ 0.4 & 0.8 & 0.4 & 1 & 0.4 \\ 0.4 & 0.6 & 0.4 & 0.4 & 1 \end{pmatrix}$$

从相似隶属度矩阵可以看出, 自然环境风险中, 指标 2 和指标 6 具有较高的相似度; 技术风险中, 指标 7 和指标 14、指标 11 和指标 12 具有较高的相似度; 组织管理风险中, 指标 18 和指标 20 具有较高的相似度; 第三方风险中, 指标 24 和指标 26 具有较高的相似度。

4.2 合理性分析

(1) 指标 2(暴雪)和指标 6(山体滑坡)。由于工程地处东北, 暴雪发生的概率很高, 并且降雪量通常远远大于全国其他地区。据了解, 该区 2010 年初单日降雪量曾达到 306 mm, 为近 50 多年来最大值。暴雪是引起山体滑坡的主要因素之一, 随着暴雪发生频率和强度的增大, 山体滑坡的风险相应增大, 可见结果比较符合实际情况。由于 $W(X12) < W(X16)$, 可删除权重较小的指标 2。

(2) 指标 7(工程总体布局不尽合理)和指标 14(流量调整频繁)。M 工程设计时确定采用双管埋地重力有压流输水方式。此方案是在综合考虑经济较优和技术可行的基础上拟定的, 短期的运行实践也证明了方案的正确性。然而, 从实际供水量分析, 供水城市年内需水受季节、气候、节假日影响波动非常大, 由于工程设计时未考虑备用管道, 在约 177 km 的输水距离内未设置调节库(池), 用户用水需求必须通过调流阀的调节来满足。据统计, 2010 年全年管线流量调节达 80 余次, 平均 4 天半调节一次。可见指标 7 直接导致了

指标 14 的发生,两个指标的分析结果符合实际。由于 $W(X21) > W(X28)$,可删除权重较小的指标 14。

(3) 指标 11(设备失灵)和指标 12(监控系统失效)。工程沿线阀门众多,同时根据运行管理需要,沿线共设置了 6 个压力控制点和 26 个压力检测点。自供水工程运行以来,这些阀门经常启闭的是少数,如果长时间不操作,由于锈蚀、磨损、污物嵌住很容易引起失灵,而设备的失灵将直接影响输水管线的控制和数据监测的有效性,可见分析结果比较符合实际。由于 $W(X25) > W(X26)$,可删除权重较小的指标 12。

(4) 指标 18(管理设施不完善)和指标 20(资金保障不到位)。据调查了解,2010 年工程输水管道运行维护资金实际下达仅占预算的 20.4%,资金缺口很大。资金保障不到位也是导致管理设施不完善的主要原因,可见分析结果比较符合实际。由于 $W(X33) < W(X35)$,可删除权重较小的指标 18。

(5) 指标 24(人为破坏)和指标 26(通信故障)。据调查,由于一些非工程管理单位的人员或单位不了解输水管道的具体位置或忽视输水管道事故的危险性,对管道造成的无意或故意破坏时有发生。此外,受利益驱使,偷盗现象也非常突出,曾多次出现排气阀零件被盗、管线沿线井室内设备丢失事件,特别是在同一地点井室内的蓄电池、发射天线屡屡丢失。这些人为破坏行为常常导致管线系统的通信故障,对工程的实时监控造成重大影响,可见分析结果比较符合实际。由于 $W(X42) > W(X44)$,可删除权重较小的指标 26。

5 结语

长距离输水管道工程风险评价指标体系的合理确定是综合风险评价的重要基础,本文采用三角模糊数表示事件的风险等级,并基于相似性理论提出了模糊相似评价方法,通过在东北某长距离输水管道系统风险评价指标体系中的应用,找出了 5 组相似度较高的风险指标并按权重进行剔除,能在一定程度上简化指标体系,进而降低风险综合评价的复杂度,得到的评价结果比较符合实际,可将该方法在类似评价体系中推广应用。本方法不足之处是对专家系统的依赖程度较高,如何提高主观评级的可靠性有待进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] 陈涌城,张洪岩.长距离输水工程有关技术问题的探讨[J].给水排水,2002,28(2): F4.1. (CHEN Yongcheng, ZHANG Hongyan. Discussion on long distance water transportation[J]. Water & Wastewater Engineering, 2002, 28(2): F4.1. (in Chinese))
- [2] 刘家宏,魏娜,牛存稳,等.复杂水资源系统调蓄计算的时变耦合模型[J].科学通报,2014,59(30): 2989-2996. (LIU Jiahong, WEI Na, NIU Cunchen, et al. Time variant coupling model for regulation and storage calculation of complex water resources system[J]. Chin Sci Bull, 2014, 59(30): 2989-2996. (in Chinese))
- [3] 张成,李庆国,钱俊.大型输水渠道的区间调度方式研究[J].水力发电学报,2014,33(2): 116-121. (ZHANG Cheng, LI Qingguo, QIAN Jun. Study on partition schedule for large water transfer channel[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 116-121. (in Chinese))
- [4] 刘恒,耿雷华,裴源生,等.南水北调运行风险管理关键技术问题研究[J].南水北调与水利科技,2007,5(5): 4-7. (LIU Heng, GENG Leihua, PEI Yuansheng, et al. Research on key technology in risk management during operation of South to North Water Diversion Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(5): 4-7. (in Chinese))
- [5] 冯平,王仲珏,刘增明.长距离输水工程综合水毁风险的估算方法及其应用[J].水利学报,2007,38(11): 1388-1392. (FENG Ping, WANG Zhongjue, LIU Zengming. Method for assessing integrated failure risk due to flood in long distance water transfer project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(11): 1388-1392. (in Chinese))
- [6] 崔建磊,文云峰,郭创新,等.面向调度运行的电网安全风险管理系统(二)风险指标体系、评估方法与应用策略[J].电力系统自动化,2013,37(10): 92-97. (CUI Jianlei, WEN Yunfeng, GUO Chuangxin, et al. Design of a security risk management system for power system dispatching and operation(part 2) Risk index, assessment methodologies and application strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 92-97. (in Chinese))
- [7] 熊雁晖,漆文刚,王忠静.南水北调中线运行风险研究(一)——南水北调中线工程风险识别[J].南水北调与水利科技,2010,8(3): 1-5. (XIONG Yanhui, QI Weigang, WANG Zhongjing. Operation risk study on the middle route of the South to North Water Diversion Project (part I) — Risk identification in the middle route of the South to North Water Diversion Project [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3): 1-5. (in Chinese))
- [8] 李高扬.工程项目风险模糊综合评价研究[J].人民长江,2012,43(7): 98-101, 107. (LI Gaoyang. Evaluation on project risk based on fuzzy comprehensive method[J]. Yangtze River, 2012, 43(7): 98-101, 107. (in Chinese))
- [9] 范英,李辰,晋民杰,等.三角模糊数和层次分析法在风险评价中的应用研究[J].中国安全科学学报,2014,24(7): 70-74. (FAN Ying, LI Chen, JIN Minjie, et al. Research on application of triangular fuzzy number and AHP in risk evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(7): 70-74. (in Chinese))
- [10] LIU J L, CHEN Q Y, LI Y L, et al. Fuzzy synthetic model for risk assessment on Haihe River basin [J]. Ecotoxicology, 2011, 20(5): 1131-1140.
- [11] Jamshidi A, Yazdani Chamzini A, Yakhechi S H, et al. Developing a new fuzzy inference system for pipeline risk assessment [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(1): 197-208.
- [12] 王乐清,阮拥军,牛国祥,等.评估指标关联性处理方法研究[J].计算机与数字工程,2011,39(9): 65-67+131. (WANG Leqing, RUAN Yongjun, NIU Guoxiang, et al. Research on disposal method of evaluation indexes correlation [J]. Computer & Digital Engineering, 2011, 39(9): 65-67+131. (in Chinese))
- [13] 黄振平.水文水资源系统风险分析[M].北京:中国水利水电出版社,2013. (HUANG Zhenping. Risk analysis of hydrology and water resources system [M]. Beijing: China Water Power Press, 2013. (in Chinese))
- [14] Huey Ming L. Applying fuzzy set theory to evaluate the rate of aggregative risk in software development [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 79(3): 323-336.
- [15] Shahriar A, Sadiq R, Tesfamariam S. Risk analysis for oil & gas pipelines: a sustainability assessment approach using fuzzy based bow-tie analysis [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(3): 505-523.

(下转第 816 页)

根据正态分布与数理统计的知识,进行建筑物结构诊断是概率统计应用的一个重要方面,特别是控制均值图,不仅用于土木工程结构质量诊断,还广泛用于企业全面质量管理,金融风险分析与管理等各个方面。

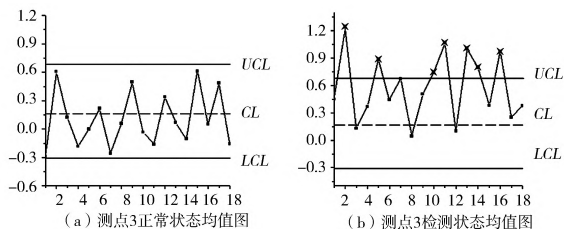


图 4 测点 3 均值控制图

Fig. 4 The mean control chart of measuring point 3

5 小结

(1) 检测输出的数据通过 AMRA 时序模型的转换计算确定 ARMA(n, m) 模型的最佳阶数;通过长自回归模型计算残差法和最小二乘法的结合来估计模型参数;采用主成分分析法缩减参数,降低模型计算的复杂程度,又能够同时保证参数的原有信息含量。

(2) 均值控制图作为判别指标的一种构造方法,相比其他方法有着很大的优势。建立正常状态和待检测状态的两种统计识别模式,进行描点比对,能直观准确地识别结构的健康状况。通过识别结果分析,1 号压力管道测点 1 处和测点 3 处存在结构损伤。

(3) 基于统计模式识别的结构监测在土木工程结构监测领域有很广的应用前景,本文提供的检测方法同时可以为桥梁和其他建筑提供参考。

参考文献 (References):

[1] 陈志为. 基于统计模式识别技术的结构异常检验[D]. 福建: 福州大学, 2005. (CHEN Zhi wei. The test of structural abnormalities based on statistical pattern recognition techniques [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005. (in Chinese))

[2] 刘毅, 李爱群. 基于结构响应的损伤诊断方法及其应用[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(4): 810-815. (LIU Yi, LI Ai qiong. structural response based damage detection method and its application [J]. Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(4): 810-815. (in Chinese))

[3] 黄斌, 史文海. 基于统计模型的结构损伤识别[J]. 工程力学, 2006, 23(12): 47-54. (HU ANG Bin, SHI Wen hai. Damage identification of structures using stochastic models. Engineering me-

chanics, 2006, 23(12): 47-54. (in Chinese))

[4] Birkenheuer G, Brinkmann A, Hogqvist M, et al. Infrastructure federation through virtualized delegation of resources and services[J]. J Grid Computing, 2011(9): 355-377.

[5] 何书元. 应用时间序列分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003. (HE Shuyuan. Applied Time Series Analysis [M]. Beijing: Peking University Press, 2003. (in Chinese))

[6] 朱军华. 基于时间序列分析与高阶统计矩的结构损伤检测[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(1): 7-13. (ZHU Jun hua. Damage detection based on time series analysis and higher statistical moments [J]. Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42(1): 7-13. (in Chinese))

[7] 周丙常, 师义民, 于蕾. 有偏总体的均值控制图[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2005, 30(3): 123-126. (ZHOU Bing chang, SHI Yi min, YU Lei. Biased population mean control chart [J]. Kunming University of Technology: Science & Engineering Edition, 2005, 30(3): 123-126. (in Chinese))

[8] Sergios Theodoridis, Konstantinos Koutroumbas. 模式识别(第二版)[M]. 李晶皎译. 北京: 电子工业出版社, 2004. (Sergios Theodoridis, Konstantinos Koutroumbas. Pattern Recognition (second edition) [M]. Jing Jiao Beijing: Electronic Industry Press, 2004 (in Chinese))

[9] Abraham wald. Contributions to the theory of statistical estimation and testing of hypotheses[J]. Annals of mathematical Statistics, 10: 299-326, 1939.

[10] Wilbur H Highleyman. Linear decision function, with application to pattern recognition[J]. Proceedings of the IRE, 50: 1501-1504, 1962.

[11] 接标, 刘冠晓, 冯乔生. 统计模式识别的研究[J]. 云南师范大学学报, 2005, 25(6): 19-21. (JIE Biao, LIU Guan xiao, FENG Qiao sheng. Statistical pattern recognition research [J]. Yunnan Normal University, 2005, 25(6): 19-21. (in Chinese))

[12] 童佳威. 基于主成分的特征提取方法研究[D]. 杭州: 浙江树人大学, 2011. (TONG Jia wei. Study of Structural Abnormalities Based on Statistical Pattern Recognition Techniques [D]. Hangzhou: Zhejiang Shuren University, 2011. (in Chinese))

[13] 王真, 杜利珍, 程远胜. AR 参数灵敏度及结构损伤控制图识别[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(4): 394-399. (WANG Zhen, DU Li zhen, CHENG Yuan sheng. AR parameter sensitivity and structural damage control pattern recognition [J]. Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(4): 394-399. (in Chinese))

[14] 王真, 程远胜. 基于时间序列模型自回归系数灵敏度分析的结构损伤识别方法[J]. 工程力学, 2008, 25(10): 38-43. (WANG Zhen, CHENG Yuan sheng. Structural damage identification based on sensitivity analysis of autoregressive coefficients of time series models [J]. Engineering mechanics, 2008, 25(10): 38-43. (in Chinese))

(上接第 807 页)

[16] 於孝春, 贾朋美, 张兴. 基于模糊 Bow-tie 模型的城镇燃气管道泄漏定量风险评价[J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 134-139. (YU Xiao chun, JIA Peng mei, ZHANG Xing. Quantitative risk assessment of urban gas pipelines based on the fuzzy Bow-tie model [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(7): 134-139. (in Chinese))

[17] Wang Y M, Yang J B, Xu D L, et al. On the centroids of fuzzy numbers[J]. Fuzzy sets and systems, 2006, 157(7): 919-926.

[18] 吕智颖, 黄天民, 靳凤霞. 模糊多属性序决策的冗余指标的

消除策略[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(10): 173-181. (LV Zhi ying, HU ANG Tian ming, JIN Feng xia. Fuzzy multiple attribute lattice decision making method based on the elimination of redundant similarity index [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2013, 43(10): 173-181. (in Chinese))

[19] Cher-Tung C, Ching-Torng L, Sue-Fn H. A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management [J]. International Journal of Production Economics, 2006, 102(2): 289-301.