

南水北调中线明渠工程运行风险评价方法研究

胡丹, 郑良, 李硕, 史国坤

(华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450011)

摘要: 在分析南水北调中线明渠工程运行风险主要影响因素的基础上, 建立了明渠工程运行风险评价指标体系, 并引入了基于直觉模糊集理论的多属性评价模型, 对评价体系中各指标进行量化分析, 给出了隶属度、非隶属度和犹豫度, 最后利用得分函数和TOPSIS法进行综合评价, 得到风险等级。以南水北调中线一期工程总干渠潮河段工程风险评价为例, 验证了该风险评价方法的有效性和实用性, 为工程运行过程中的风险管理工作提供了依据。

关键词: 风险评价; 南水北调中线工程; 明渠; 直觉模糊集

中图分类号: TV 68; X 961 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)06-0098-04

Study on the Risk Evaluation Method for the Open Channel Operation in the Middle Route of South to North Water Diversion Project

HU Dan, ZHENG Liang, LI Shuo, SHI Guokun

(College of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: According to the analysis of the main factors affecting the operation risk of open channel in the Middle Route of South to North Water Diversion Project, a risk evaluation index system was developed for the open channel. A multiple attribute assessment model with intuitionistic fuzzy set theory was introduced to analyze each evaluation index quantitatively by providing the membership degree, non membership degree, and hesitancy degree. The scoring function and the "Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution" method were used to evaluate the results and to obtain the risk level. In this paper, the risk evaluation index system was applied to the Chaohe Section of the main channel in the Middle Route of South to North Water Diversion Project, which suggested that the evaluation system is effective and practicable; therefore it can provide references for the risk management of engineering operation.

Key words: risk evaluation; Middle Route of South to North Water Diversion Project; open channel; intuitionistic fuzzy set

南水北调中线工程从丹江口水库引水, 通过隧道穿过黄河, 沿京广铁路西侧北上, 自流至北京, 全长 1 276.41 km。根据工程构成特点及建筑物的功能, 可以将其分为四大系统: 交叉建筑物系统、输水干渠工程系统、穿黄穿漳工程系统和控制物系统。其中, 输水干渠工程系统主要指除去交叉建筑物外的明渠输水工程和暗渠输水工程。该工程大多采用明渠输水, 明渠输水线路长达 1 022.94 km, 涉及不同地质条件, 在运行过程中可能存在不同的失效模式。

目前工程尚处于建设阶段, 但通水运行后的风险评价研究已经成为专家学者关注的焦点。常用的风险评价方法如 AHP 法、模糊综合评价法等, 只考虑了隶属度单方面的信息, 具有一定的局限性。保加利亚学者 Atanassov 于 1983 年提出直觉模糊集的概念, 考虑了隶属度、非隶属度与犹豫度

三方面的信息, 处理模糊性和不确定性等方面问题时较传统方法有更强的表现力和科学性, 因此被应用于各个领域。本文针对南水北调中线明渠工程, 构建了风险评价指标体系, 并将工程的数据信息转换成直觉模糊信息, 据此确定风险等级, 为明渠工程的运行管理提供依据。

1 风险评价模型建立

1.1 直觉模糊集

设 X 是一个非空集合, 则称 $A = \{\delta, \mu_A(x), \nu_A(x) \mid x \in X\}$ 为直觉模糊集, 其中 $\mu_A(x)$ 和 $\nu_A(x)$ 分别代表 X 中元素 x 属于 A 的隶属函数和非隶属函数, 即:

$$\mu_A: X \rightarrow [0, 1], x \in X \rightarrow \mu_A(x) \in [0, 1]$$

收稿日期: 2013-06-25 修回日期: 2013-09-22 网络出版时间: 2013-10-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20131010.1028.021.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279064; 41061046); 中国水利水电科学研究院开发研究基金项目(IWHR-SKL-201110); 河南省基础科学基金项目(122300410029); 河南省软科学计划项目(102400450004)

作者简介: 胡丹(1988-), 女, 河北鹿泉人, 硕士研究生, 主要从事水工结构工程方面的研究。E-mail: 18605821517@163.com

$$v_A: X \rightarrow [0, 1], x \in X \rightarrow v_A(x) \in [0, 1]$$

且对于 A 上 $\forall x \in X$, 有 $0 \leq \mu_A(x) + v_A(x) \leq 1$ 成立。

$\pi_A(x)$ 为 $x \in X$ 的直觉指数, 是对犹豫程度或不确定程度的一种测度。当 $\pi_A(x) = 0$ 时, A 退化为 Zadeh 的模糊集^[1]。

$$\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - v_A(x) \quad (1)$$

此外, 称 $\alpha = (\mu_\alpha, v_\alpha)$ 为直觉模糊数, 其中 $\mu_\alpha \in [0, 1]$, $v_\alpha \in [0, 1]$, $\mu_\alpha + v_\alpha \leq 1$ 。

1.2 指标属性集

在多指标多层次的评价体系中, 设 A 为评价对象, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 为二级指标属性集; $C_i = \{C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{im}\}$ 为三级指标属性集。在进行指标 C_i 多属性评价中, 设 μ_{ij} 为评价对象对评价指标属性 C_{ij} 的满足程度, 即隶属程度; 设 v_{ij} 为评价对象对评价指标属性 C_{ij} 的非满足程度, 即非隶属程度, $\alpha_{ij} = (\mu_{ij}, v_{ij})$, $\pi_{ij} = 1 - \mu_{ij} - v_{ij}$ 。直觉指数 π_{ij} 越大, 对于风险识别的犹豫边际越高。 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 为二级指标属性权重集, $W_i = \{w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}\}$ 为三级指标属性权重集, 且满足 $\sum_{j=1}^m w_{ij} = 1$ 。

1.3 TOPSIS 法

TOPSIS 法, 即逼近理想点的排序方法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), 基本思想是将各评价对象与正理想点及负理想点的距离进行比较, 以靠近正理想点和远离负理想点两个评价依据为基准, 以得分函数值作为评价尺度, 计算各评价对象的综合评价指数, 对各备选方案进行排序^[5]。其中, 直觉模糊数 α 的得分函数 $S(\alpha)$ 与直觉模糊数 β 的得分函数 $S(\beta)$ 之间的距离为:

$$d(S(\alpha), S(\beta)) = \frac{1}{2} |S(\alpha) - S(\beta)| = \frac{1}{2} |(\mu_\alpha - v_\alpha)(1 + \pi_\alpha) - (\mu_\beta - v_\beta)(1 + \pi_\beta)|$$

得分函数 $S(\alpha_i)$ 计算公式为:

$$S(\alpha_i) = (\mu_i - v_i) + (\mu_i - v_i)\pi_i = (\mu_i - v_i)(1 + \pi_i) \quad (2)$$

考虑各指标权重后目标 A 的得分向量与直觉模糊正理想点 A^+ 得分向量之间的距离为:

$$d(S(A), S(A^+)) = \sum_{i=1}^n w_i d(S(\alpha_i), S(\alpha_i^+)) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n w_i |(\mu_i - v_i)(1 + \pi_i) - 1| \quad (3)$$

目标 A 的得分向量与直觉模糊正理想点 A^- 得分向量之间的距离为:

$$d(S(A), S(A^-)) = \sum_{i=1}^n w_i d(S(\alpha_i), S(\alpha_i^-)) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n w_i |(\mu_i - v_i)(1 + \pi_i) + 1| \quad (4)$$

综合评价指数 R 计算公式为:

$$R = \frac{d(S(A), S(A^-))}{d(S(A), S(A^+)) + d(S(A), S(A^-))} \quad (5)$$

R 越大, 则风险等级越高。

2 评价指标体系

明渠工程运行风险评价的关键是建立能够量化的风险评价指标体系, 本文基于完整性、系统性和科学性三个原则, 参考南水北调中线明渠工程相关规范, 通过 Delphi 法构建了具有三级指标的风险评价指标体系^[8] (如图 1), 并进行各指标间的比较, 确定每个指标的最终权重值。

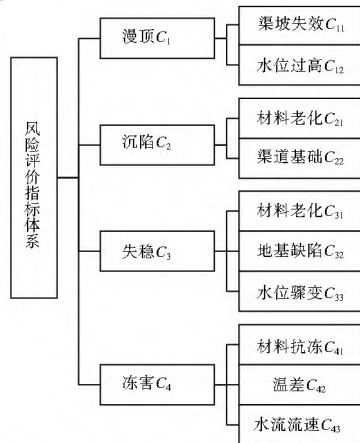


图 1 明渠工程运行风险评价指标体系

Fig. 1 Risk evaluation index system of the operation

3 风险等级划分

科学进行风险等级的划分, 可为制定各种预案、救援措施提供科学依据, 避免灾害或最大限度降低灾害造成的损失, 保障明渠工程运行安全。风险等级的划分是根据明渠工程运行时内部和外部的条件变化, 设定相对应的等级阈值来进行的。风险等级划分时必须要把握好尺度, 如果等级设置过松, 则可能忽视现实中存在的风险, 如果设置过严, 则会导致误报或者夸大风险严重程度。

根据中线工程风险分析和监测过程中的数值及计算信息, 将明渠工程运行风险分为五级, 特别严重的是一级, 严重的是二级, 较严重的是三级, 一般的是四级, 运行正常是五级。依次用红色 (特别严重, 一级), 橙色 (严重, 二级), 黄色 (较严重, 三级), 蓝色 (一般, 四级) 和绿色 (运行正常, 五级) 表示。本文将风险等级划分和直觉模糊集的结合, 定义综合评价指数 R 为风险等级划分的参照标准, 具体见表 1。

表 1 风险等级划分

Table 1 Risk classification

风险等级	严重程度	综合评价指数 R	工程运行状况
红色 (一级)	特别严重	$0.8 < R \leq 1$	工程存在危及安全的严重缺陷, 运行中出现重大险情的数量众多, 需立即采取除险加固措施
橙色 (二级)	严重	$0.6 < R \leq 0.8$	工程功能和实际工况不能完全满足规范、标准和设计要求, 可能影响工程正常使用, 险情数量较多
黄色 (三级)	较严重	$0.4 < R \leq 0.6$	工程功能个别不满足要求, 监测数据不正常, 无明显险情
蓝色 (四级)	一般	$0.2 < R \leq 0.4$	各项监测数据及其变化规律处于正常状态, 按照常规的运行方式和维护条件即可以保证工程的安全性
绿色 (五级)	运行正常	$0 \leq R \leq 0.2$	工程实际工况和各种功能达到规范、标准和设计的要求

4 实例分析

4.1 工程概况

选取南水北调中线一期工程总干渠潮河段工程为例,进行风险综合评价。潮河段位于河南省新郑及中牟境内。设计段长 45.847 km,其中明渠长 45.244 km,建筑物长 0.603 km,共布置各类建筑物 78 座,起点设计桩号 SH(3)133+308.8,终点设计桩号 SH(3)179+227.8,设计水位 121.145 m。

4.2 风险识别

本渠段属温带季风气候区,冬季湿度最小,夏季湿度最大。降水年际变幅大,年最大与最小降水量之比达 3~4 倍;降水年内分配不均,60%~70%集中在汛期 6 月~9 月,多以暴雨型式出现,年降水量从南到北、从山区到平原呈递减的趋势。

表 2 风险识别结果

Table 2 The results of risk identification

风险因素	暴雨、洪水	地震	地质	意外事故	人为因素
干渠明渠	高边坡开挖冲刷、漫顶、沉陷	抗震能力达不到标准	膨胀土造成边坡坍塌、开裂	边坡滑坡、渗漏、垮堤、裂缝	施工质量不合格,严重裂缝

4.3 风险评价

在运行风险评价中,评估专家构建是不确定性评价的基础,将直接影响到评价结果。在组建评估专家组时应遵循以下基本原则:(1)科学客观。专家组要能够科学地识别不同风险,对不同状况下的风险带来的损失能做有效的判断,判断依据要符合实证性;(2)系统全面。在科学客观的基础上,专家组能系统全面的识别明渠输水系统可能出现的风险种类,组成范围应包括但不局限于水工、测量、环保、水保、金结、机电、安全等方面。

基于以上原则,首先构建专家组。然后,根据现场调查总干渠潮河段的资料,采用多属性评价算法对工程运行风险进行评价。对评价指标的直觉模糊数 α_{ij} 和指标的权重 w_i 、 w_j 进行专家赋分,加权平均后求得二级指标评价价值 α_i ,按公式(1)求得二级指标下的犹豫度 π_i ;然后按公式(2),计算出得分函数 $S(\alpha_i)$,计算结果见表 3。

最后,利用 TOPSIS 法,按公式(3)、(4)、(5)求得各评价对象的综合评价指数 R ,参照表 1,进行风险等级确定。结果如下: $d(S(A), S(A^+)) = 0.624$, $d(S(A), S(A^-)) = 0.376$, $R = 0.376$, 风险等级为蓝色(四级),表明潮河段明渠工程各项监测数据及其变化规律处于正常状态,运行正常。

5 结语

南水北调中线干线工程是一个庞大而复杂的串联系统,任何子系统都存在一定运行风险,本文分析了明渠工程运行期的主要影响因素,提出了判断风险的依据,建立了明渠工程运行风险评价指标体系。并基于直接模糊集理论,建立了风险评价模型,对指标评价体系中各指标进行量化分析,给出了隶属度,非隶属度和犹豫度,借助 TOPSIS 法,利用得分函数求得综合评价指数 R ,进而得出工程风险等级,为今后工程运行初期的管理提供了一定的依据。

渠段地基以黄土状土均一结构和上黏性土、下软弱膨胀泥岩双层结构为主。其中黄土状土均一结构渠段以半挖半填为主,部分为填方,渠底板位于黄土状轻壤土中,渠坡由黄土状轻壤土构成。黄土状土的湿陷性不利于渠坡和地基稳定,为中等透水性;其中上黏性土、下软弱膨胀泥岩双层结构渠段以半挖半填为主,渠坡主要由黄土状轻壤土、局部砂壤土、黏土岩构成。黄土状土的湿陷性和黏土岩的膨胀性,影响渠坡和地基稳定,黄土状轻壤土和砂壤土具弱~中等渗透性,存在渗漏问题。

南水北调中线一期工程总干渠潮河段工程的风险管理目标是预防运行过程中出现各种风险,尽最大努力减少和弥补风险一旦发生所造成的损失。通过对工程参与人员进行了问卷调查、实地考察等方法和手段,识别出关于明渠的主要风险因素,具体见表 2。

表 3 各指标值计算结果

Table 3 The calculated results of each index

C_i	$(\bar{\mu}_i, \bar{\nu}_i)$	w_i	s_i	C_{ij}	$(\bar{\mu}_{ij}, \bar{\nu}_{ij})$	w_{ij}
漫顶	(0.32, 0.36)	0.3	-0.0528	渠坡失效	(0.2, 0.4)	0.6
				水位过高	(0.5, 0.3)	0.4
沉陷	(0.25, 0.65)	0.3	-0.44	材料老化	(0.2, 0.8)	0.5
				渠道基础	(0.3, 0.5)	0.5
失稳	(0.31, 0.46)	0.2	-0.1845	材料老化	(0.3, 0.5)	0.3
				地基缺陷	(0.4, 0.4)	0.4
				水位骤变	(0.2, 0.5)	0.3
冻害	(0.25, 0.50)	0.2	-0.3125	材料抗冻	(0.1, 0.8)	0.4
				温差	(0.4, 0.4)	0.3
				水流流速	(0.3, 0.2)	0.3

参考文献(References):

- [1] 徐泽水. 直觉模糊信息集成理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (XU Ze shui. Intuitionistic Fuzzy Information Aggregation[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 岳中亮. 基于直觉模糊集的城市环境质量模糊综合评判[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(8): 51-57. (YU E Zhong liang. The Comprehensive Evaluation of Urban Environmental Quality Based on Intuitionistic Fuzzy Set[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2008, 38(8): 51-57. (in Chinese))
- [3] Szmidi E, Kacprzyk J. Distances between Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 114(3): 505-518.
- [4] 龚艳冰, 梁雪春. 基于组合模型的直觉模糊集多属性决策方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(3): 469-472. (GONG Yan bing, LIANG Xue chun. Intuitionistic Fuzzy Sets Multir attribute Decision Making Method Based on Combined Model[J]. Control and Decision, 2010, 25(3): 469-472. (in Chinese))
- [5] 王开荣, 杨红. 基于直觉模糊集的多属性决策方法[J]. 模糊系统与数学, 2010, 24(3): 114-118. (WANG Kai rong, YANG

- Hong. Multiple Attribute Decision Making Method Based on Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2010, 24(3): 114-118. (in Chinese)
- [6] 熊雁晖, 漆文刚, 王衷静. 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 Weirgang, 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))
- [7] Xu Z S, Yager R R. Some Geometric Aggregation Operators Based on Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. International Journal of General Systems, 2006, 35(4): 417-433.
- [8] 杜霞, 耿雷华. 南水北调中线工程运行风险分析[J]. 水利水电技术, 2011, 42(3): 85-88. (DU Xia, GENG Leihua. Risk analysis on operation of Mid-route of South to North Water Transfer Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(3): 85-88. (in Chinese))
- [9] 耿雷华, 刘恒, 姜蓓蕾, 等. 南水北调东线工程运行风险分析[J]. 水利水运工程学报, 2010, (1): 17-22. (GENG Leihua, LIU Heng, JIANG Beilei, Operating Risk Analysis on the East Route of South North Water Diversion Project[J]. Hydro Science and Engineering, 2010, (1): 17-22. (in Chinese))
- [10] 聂相田, 郭春辉, 张湛. 南水北调中线工程风险管理研究[J]. 中国水利, 2011, (22): 37-39. (NIE Xiangtian, GUO Chunhui, ZHANG Zhan. Study on the Risk Management of Middle Route Project of the South to North Water Diversion[J]. China Water Resources, 2011, (22): 37-39. (in Chinese))
- [11] 贺海挺, 吴剑国, 张爱晖. 跨流域调水工程失效概率的模糊事件树分析方法[J]. 中国农村水利水电, 2005, (3): 40-45. (HE Haiting, WU Jianguo, ZHANG Aihui. Fuzzy Event Tree Failure Probability Analysis Method for Inter-basin Water Transfer Project[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005, (3): 40-45. (in Chinese))
- [12] 刘恒, 耿雷华. 南水北调运行风险管理研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(4): 1-6. (LIU Heng, SENG Leihua. Risk Management of the South to North Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(4): 1-6. (in Chinese))
- [13] 耿雷华, 姜蓓蕾, 刘恒. 南水北调东中线运行工程风险管理研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010. (GENG Leihua, JIANG Beilei, LIU Heng. Research on Risk Management in Middle Route Project of South North Water Diversion[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010. (in Chinese))
- [14] 王本德, 徐玉英. 水库洪水标准的风险分析[J]. 水文, 2001, 21(6): 8-10. (WANG Bendei, XU Yuying. Analysis of Risk for Reservoir Flood Standard[J]. Journal of China Hydrology, 2001, 21(6): 8-10. (in Chinese))
- [15] 罗云, 樊运晓, 马晓春. 风险分析与安全评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 89-112. (LUO Yun, FAN Yunxiao, MA Xiaochun. Risk Analysis and Safety Evaluation[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 89-112. (in Chinese))

(上接第 89 页)

- [9] 邓宗才. 高性能合成纤维混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (DENG Zongcai. High Performance Synthetic Fiber Concrete[M]. Beijing: Press of Science, 2003. (in Chinese))
- [10] 王强, 阎培渝, 陈志诚. 粉煤灰掺量对高强混凝土自生收缩的影响[J]. 商品混凝土, 2007, (5): 47-50. (WANG Qiang, YAN Peiyu, CHEN Zhicheng. The Influence of Fly Ash Addition on the Autogenous Shrinkage of High Strength Concrete[J]. Ready mixed Concrete, 2007, (5): 47-50. (in Chinese))
- [11] 魏凤艳, 吕忆农, 兰祥辉, 等. 粉煤灰水泥基材料的水化产物[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(1): 25-29. (WEI Fengyan, LYU Yinong, LAN Xianghui, et al. Hydration Products of Fly Ash Cement-based Material[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2005, 33(1): 25-29. (in Chinese))
- [12] Sidney Mindess, J. Francis Young, David Darwin. 混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. (Sidney Mindess, J. Francis Young, David Darwin. Concrete[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [13] 林秀华. 粉煤灰对混凝土收缩性能的影响与控制[J]. 福建建筑, 2009, (5): 50-52. (LIN Xiuhua. The Influence and Control of Fly Ash to Concrete Shrinkage[J]. Fujian Construction, 2009, (5): 50-52. (in Chinese))
- [14] 刘建忠, 孙伟, 缪昌文, 等. 矿物掺合料对低水胶比混凝土干缩和自收缩的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(3): 580-587. (LIU Jianzhong, SUN Wei, MIAO Changwen et al. Effect of Mineral Admixtures on of Concrete with Low Drying and Autogenous Shrinkage Water to binder Ratio[J]. Journal of Southeast University (Nature Science Edition), 2009, 39(3): 580-587. (in Chinese))
- [15] 林晖. 掺 PVA 纤维混凝土的力学及变形性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006. (LIN Hui. Mechanics and Deformation Behavior of PVA Fiber Concrete[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese))