

南水北调工程输水渠道运行安全风险评价

董玉增

中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司

摘要 南水北调工程对缓解中国南部和北部地区水资源分布不均、促进区域经济和生活协调发展具有突出贡献,然而其具有调水距离长、范围广、地质情况复杂、不确定因素众多等特点,使得其安全运行存在风险。因此,识别南水北调工程运行中的故障模式,有效开展安全评价工作,对工程安全高效运行、保障供水安全意义重大。基于此,本文展开了相关的分析,期望带来一定的借鉴。

关键词 南水北调工程; 输水渠道运行; 安全风险评价

DOI 10.12252/j.issn.2096-6261.2021.12.161

1 概述

近年来,长距离输水工程风险识别和评估研究受到国内学者的高度关注^[1]。已有研究大都为定性分析或针对特定故障模式进行定量评估,而对于考虑环境风险、工程技术风险、运行管理风险和社会风险的综合风险评估研究较为罕见。因此,本文在故障模式与影响分析(FMEA)原始模型中引入模糊推理理论,确定工程运行安全的故障模式,通过模糊推理系统(FIS)对南水北调工程输水渠道运行安全风险进行了评价。

2 评价模型

2.1 模糊集合基本理论

模糊集合用于处理决策过程中专家评判的模糊性和不确定性^[2]。模糊集的元素取值区间为[0, 1],模糊化过程是将准确的变量x转化为模糊集合A,通过隶属度函数来表示论域U向模糊集合A的映射关系:

$$\mu(x): U \rightarrow [0, 1]$$

在故障模式与影响分析中,O(Occurrence)、S(Severity)、D(Detectiondifficulty)分别为风险优先数(RPN)函数的3个输入值,即发生频度、严重度、不易探

测度。采用三角模糊数 $\tilde{A} = (a, b, c; \omega)$ 进行模糊化处理时,隶属度 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 表示一个实数R到闭区间[0, ω]的连续映射。当 $x=b$ 时, $\mu_{\tilde{A}} = \omega$, $0 < \omega \leq 1$,隶属度最大值为1时 $\omega=1$,从而 $A \sim (a, b, c)$ 的隶属度为。

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0(x \leq a \text{ 或 } x \geq c) \\ \frac{x-a}{b-a} (a < x \leq b) \\ \frac{c-x}{c-b} (b < x \leq c) \end{cases} \quad (1)$$

2.2 模糊评语集与隶属函数的建立

(1) 建立模糊评语集。每个变量即发生频度(O)、严重度(S)、不易探测度(D)的评分为0~10分,对应5个评价术语,分别为很低(R)的模糊数为(0, 0, 2.5)、低(L)的模糊数为(0, 2.5, 5)、中等(M)的模糊数为(2.5, 5, 7.5)、高(H)的模糊数为(5, 7.5, 10)、很高(VH)的模糊数为(7.5, 10, 10),这3个变量具体归为5个等级,即很低(R)、低(L)、中(M)、高(H)、很高(VH)。3个变量的评价标准见表1。

表1 O、S、D评价标准

| 评分 | 发生频度等级 | 严重度等级 | 不易探测度等级 | 模糊数 |
|------|-----------------|---------|----------------------|---------------|
| 9-10 | 发生概率很高: 几乎不可避免 | 非常严重的影响 | 有很低概率能够通过各种手段检测出潜在风险 | (7.5, 10, 10) |
| 7-8 | 发生概率高: 反复发生 | 产生严重影响 | 有较低概率能够通过各种手段检测出潜在风险 | (5, 7.5, 10) |
| 4-6 | 发生概率中等: 偶尔发生 | 产生中度影响 | 有中等概率能够通过各种手段检测出潜在风险 | (2.5, 5, 7.5) |
| 2-3 | 发生概率低: 相对较少发生 | 产生轻微影响 | 有较高概率能够通过各种手段检测出潜在风险 | (0, 2.5, 5) |
| 1 | 发生概率很低: 几乎不可能发生 | 几乎没有影响 | 有很高概率能够通过各种手段检测出潜在风险 | (0, 0, 2.5) |

(2) 建立隶属函数。隶属函数的输出值被称为风险优先数^[3-4]。进一步在模糊推理的输出端定义了5个语言优先级术语,即很低(N)、低(Mi)、中(Co)、高(Ma)、很高(C)。风险优先数的评价标准及语义变量函数分别见表2。

表2 O、S、D评价标准

| 语言优先级术语 | 解释说明 | 模糊数 |
|---------|--------------|----------------|
| C | 情景模式的优先等级为很高 | (7.5, 8.5, 10) |
| Ma | 情景模式的优先等级为高 | (5.5, 7, 8.5) |
| Co | 情景模式的优先等级为中等 | (3, 5, 7) |
| Mi | 情景模式的优先等级为低 | (1.5, 3, 4.5) |
| N | 情景模式的优先等级为很低 | (0, 1.5, 3) |

2.3 风险因素的评估

针对不同故障模式的3个变量的评估数据主要通过工程检测数据和专家评估获得^[5]。对于具有检测数据的工程,首先根据工程质量评估规范、工程运行管理规范等,结合构建的三角模糊隶属函数,确定其风险评估等级。对于无法通过工程检测获得评估数据的工程^[6],则通过邀请行业内设计、施工和运行管理单位的专家进行评估,获得相应评分数据,评估过程如下:专家参考表1对O、S、D进行评估,按照专家在岗工作时间为其分配权重 W_i ,工作3~5、6~10、11~20a及20a以上权重分别为0.1、0.2、0.3及0.4,利用式(2)计算

不同权重专家问卷分数。

$$S_{O、S、D} = \bar{X}_{O、S、D} \times W_i \quad (2)$$

其中，

$$\bar{X}_{O、S、D} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

2.4故障模式排序

在利用模糊规则库进行模糊推理时，令假言模糊命题“if x is A then y is B”（x为输入语义变量，A为推理前件的模糊集合，y为输出语义变量，B为模糊规则的后件）为模糊推理规则^[7]，进一步采用Mamdani的直接推理法（或MIN-MA X法）进行基于模糊规则的推理。用R_c表示模糊关系：

$$R_c = A \times B = \int_{x \times y} \mu_A(x) \vee \mu_B(y) f(x, y) \quad (3)$$

当x为A'且模糊关系的合成运算采用“极小极大”运算时，模糊推理的结论计算式为

$$B' = A' \times R_c = \int_y \vee x \in X \{ \mu_{A'}(x) \wedge [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \} / y \quad (4)$$

式中：∧、∨分别表示求小和求大；X、Y为论域。

2.5风险评估步骤

(1) 步骤1，确定南水北调工程输水渠道风险因子的O、S、D分值。收集O、S、D初始评价数据，通过整理分析初始评价数据，得到故障模式风险因子最终的O、S、D分值^[8]。

(2) 步骤2，模糊化。根据专家知识定义语言变量，分别为O、S、D确定5个语言变量，输入/输出变量的语言表达式采用三角隶属函数表示。

(3) 步骤3，构建规则库。基于模糊推理系统FMEA方法构建规则库。

(4) 步骤4，风险评价。基于模糊推理规则，运用式(3)、式(4)对南水北调中线工程输水渠道运行风险进行评价。

(5) 步骤5，去模糊化及故障模式风险因子排序。在模糊推理过程中应用加权平均法去模糊化^[9]。

2.6案例分析

南水北调中线工程辉县段位于一期工程总干渠IV渠段中部。渠道总长48.951 km，渠道开挖方式中全挖方断面约占渠道总长度的63%，其中1.5 km的渠道挖深超过15m，半挖半填段约占37%。渠段气候属暖温带大陆性季风型，年度降水量变幅大，且多集中于夏季，年均降水量达589.1mm。

确定输入、输出等级及隶属度函数之后，基于专家知

识及经验的方法确定模糊规则。将模糊规则库中的“关注优先度”定义为“风险优先等级”，作为风险因子隶属函数对应的输出值，即模糊结论。风险故障模式中暴雨洪水风险最为重要，主要原因是辉县市西部紧邻太行山脉，地势由西北向东南呈阶梯形下降，汇水迅速，暴雨洪水可能会引起渠堤塌陷、滑坡，必须重点防护；其次排序为地基缺陷风险、填筑质量风险、异常渗流风险、设备维护风险、渠坡失效风险等；而排序的最后3个为交通事故风险、堤顶超高风险、水事纠纷风险。可以发现，工程技术风险因子排序靠前，应重点加强对工程质量的把控，做好工程建设遗留问题的排查，同时运行管理中及时发现风险源头，而对于其他风险，也应该因地、因时制宜，制定相应的管理制度进行防范。

结束语

南水北调工程输水渠道具有输水距离长、影响范围广、地质条件复杂等特点，为保证工程正常运行，有效识别并评估其运行安全风险，从环境风险、工程技术风险、运行管理风险及社会风险4个方面识别了输水渠道运行风险的故障模式，进而建立了基于模糊推理系统的FMEA风险评估模型，依据模糊假言规则建立了模糊规则库，通过模糊推理计算风险优先级并排序。以南水北调中线工程辉县段为例，运用该模型进行了输水渠道运行风险评价及分析，验证了该模型具有一定的适用性和有效性。

参考文献

[1] 孙庆宇, 朱清帅, 王泽宇. 南水北调工程安全运行监管检查常见问题分析[J]. 河南水利与南水北调, 2021, 50(09): 35-37.

[2] 刘帅鹏. 南水北调中线禹州段工程安全保卫工作实践与思考[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(12): 188-190.

[3] 李庆中. 南水北调工程保障国家水安全的作用探析[J]. 水利发展研究, 2020, 20(09): 9-12.

[4] 郭凤杰, 刘杰. 南水北调中线工程安全运行风险防范[J]. 中国水利, 2020(16): 29-30.

[5] 赵鹏, 魏芳. 南水北调工程运行期的安全管理分析[J]. 河北农机, 2020(07): 35.

[6] 李庆义, 桑晋惠, 高正. 南水北调山东段工程运行期防汛度汛安全措施浅析[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(08): 61-64.

[7] 庞晓明, 林云. 南水北调工程运行期的安全管理分析[J]. 现代经济信息, 2019(20): 317.

[8] 张国栋. 南水北调工程运行期的安全管理分析[J]. 低碳世界, 2019, 9(01): 136-137.

[9] 董浩, 范天雨, 田振兴, 王博. 基于Delphi专家法的南水北调工程运行安全风险因子优选[J]. 项目管理技术, 2017, 15(07): 14-19.