

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2020.0063

王芳,何勇军,李宏恩.基于系统动力学的引调水工程风险分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):184-191.  
WANG F,HE Y J,LI H E.Risk analysis of the water diversion project based on system dynamics;a case study of inverted siphon project[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(3):184-191.(in Chinese)

# 基于系统动力学的引调水工程风险分析

——以倒虹吸工程为例

王芳<sup>1</sup>,何勇军<sup>1,2,3</sup>,李宏恩<sup>1,2,3</sup>

(1.南京水利科学研究院,南京 210029;2.水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京 210029;  
3.水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室,南京 210029)

**摘要:**以引调水工程中倒虹吸管身失稳险情为研究对象,从自然、工程、人为及管理这四大因素出发,考虑其各风险因子间复杂、动态的关系,建立了基于系统动力学的风险分析反馈模型,分析影响倒虹吸工程稳定的因子的重要性程度,并采用层次分析法所得结果对构建的反馈模型进行验证,结果表明该模型具有良好的精度和一定的适用性,为将来引调水工程风险评估工作提供了一条新的途径。

**关键词:**风险分析;系统动力学;层次分析法;倒虹吸工程;引调水工程

中图分类号:TV68 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



## Risk analysis of the water diversion project based on system dynamics: a case study of inverted siphon project

WANG Fang<sup>1</sup>, HE Yongjun<sup>1,2,3</sup>, LI Hongen<sup>1,2,3</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 3. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Taking the risk instability of inverted siphon in the water diversion project as the research objective, considering the complex and dynamic relationship between the four factors such as nature, engineering, man-made and management, a risk analysis feedback model based on system dynamics was established. The importance of factor which may affect the stability of the inverted siphon project was analyzed. The results of the analytic hierarchy process were used to validate the feedback model. The results showed that the model had good accuracy and applicability, which may provide a new way for risk assessment of water diversion projects in the future.

**Key words:** risk analysis; system dynamics; analytic hierarchy process; inverted siphon projects; water diversion project

随着我国引调水工程数量的增加,在工程建设管理方面积累了丰富经验的同时,也出现了大量工

程安全问题。由于引调水工程大多跨度长,沿线所经地区的地理环境和气象条件差异较大,地质环境复杂

收稿日期:2019-07-11 修回日期:2019-10-14 网络出版时间:2019-11-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191120.0938.004.html>

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0405006)

作者简介:王芳(1996—),女,安徽芜湖人,主要从事大坝安全管理方面研究。E-mail:sukida04@qq.com

通信作者:何勇军(1963—),男,江苏南京人,教授级高级工程师,博士,主要从事水库大坝安全管理方面研究。E-mail:yjhe@nhri.cn

多变,工程运行过程中不可避免地会面临自然灾害、结构破坏、设备故障等各种风险的考验,这些风险都会影响总干渠的安全运行,可能导致供水中断,人员伤亡,造成生态环境影响、社会影响等。因此,对引调水工程交叉建筑物进行风险因子识别,分析其内部结构以及对系统功能的影响,有利于进一步提出可靠的风险控制措施,最大程度地减少各方面损失。

2011年,刘恒等<sup>[1]</sup>提出将引调水工程运行风险来源分为工程、水文、环境、经济和社会五个方面。其中,工程风险是指工程内在本身质量问题,或在运行过程中,由于其他外在因子的变化影响工程稳定和安全运行所带来的风险。陈进等<sup>[2]</sup>从水文、建筑物、经济和社会等方面,分析了引调水工程系统的风险因子及影响方式,提出了其风险因子的分级和分类的原则。韩迅等<sup>[3]</sup>建立了南水北调工程中跨河建筑物的综合评价风险体系,将风险因子进一步分为静态和动态,分别进行风险计算,最终得到综合风险指数。目前,常用的风险分析方法包括层次分析法、模糊综合评价法、人工神经网络等,其中,层次分析法应用最为普遍。刘涛<sup>[4]</sup>等人基于层次分析法建立了南水北调汉江中下游干流供水风险综合评价模型。孙昊苏<sup>[5]</sup>针对PCCP管线管护中可能发生的问题进行风险识别,进而采用层次分析法定量比较各风险因子所占比例,找出薄弱环节并提出应对策略。赵然杭等<sup>[6]</sup>综合利用模糊意见集中决策和层次分析法对引调水工程突发事故分析进行评估。由于层次分析法自身存在主观性强、计算量大等缺陷,也无法深入分析各因子之间的相互作用关系,利用层次分析法进行风险分析的研究极少考虑到风险之间的关联问题,大多是分析相互独立的风险因子对工程的影响。Aloini等<sup>[7]</sup>认为如果不对风险之间的关系进行识别和管理,会对风险评估结果带来较大的误差。由此他提出了根据依赖性程度(被多少其他要素影响)和驱动性程度(影响多少其他要素)对风险因子进行分类并画出分布图,直观展现系统风险的层次结构和相互影响关系,从而避免忘记、忽视或低估某些因素,从侧面反映了风险之间的相互作用关系在进行风险分析时的重要性。如何对各风险因子间的相互作用关系进行定量评价一直是该领域研究的一个难点。

系统动力学(system dynamics,SD)理论为开展类似研究提供了一种有效的研究途径。王嵩等<sup>[8]</sup>基于系统动力学理论建立了大型水利工程应急管理系统的仿真模型,将保障系统、运作系统、激励系统、约束系统和目标系统作为系统模型的子系统,研究其

内部复杂的动态变化关系。华坚等<sup>[9]</sup>从政府支持、公众参与、第三方参与三个层面构建重大水利工程决策社会稳定风险评估有效性的协同驱动模型。目前,系统动力学在水利工程中常应用于水资源系统管理、项目经济评价分析等,用于结构稳定风险分析的研究较少。本文以系统动力学理论为基础,针对引调水工程中倒虹吸工程构建反馈模型,同时对比以层次分析法得出的结论,验证系统动力学在工程稳定分析中的适用性。

## 1 倒虹吸工程风险识别

在大型引调水工程中,倒虹吸以其独特功能成为最重要的建筑物之一,同时也是数量最多的河渠交叉建筑物类型,分布广、工程差异较大,具有输水能力强、允许水头损失小、管身长等特点<sup>[10]</sup>,一般由进口斜管段、水平管段与出口斜管段组成。本文选择倒虹吸管身失稳作为潜在的风险事件进行分析。倒虹吸管身失稳的模式主要有管身抗浮失稳、斜管段抗滑失稳、管身倾斜以及不均匀沉降等<sup>[11]</sup>。根据工程风险的定义,结合大量实际交叉建筑物工程运行过程中出现的问题,本文进一步将工程风险的风险源分为自然、工程、人为和管理四个方面。工程风险因子中,如暴雨洪水、地质灾害、日照、高温、沙尘天气、环境污染等极端气象为自然风险要素,材料特性、施工质量、闸门故障、机电设备故障等工程质量问题属于工程风险要素,地形变化、产汇流变化、水位流量关系变化、地下水位变化等设计条件的改变及人为破坏等则属于人为风险要素,调度运行、巡查检修等管理因素则属于管理风险因素。导致管身抗浮失稳的主要原因有暴雨洪水、河势变化、地形变化以及管顶防护质量差造成的管顶覆土冲刷,还和倒虹吸管排空检修选择的检修时期和检修前或汛后是否对管顶覆土进行检查有关。此外,冲刷严重时,管身两侧回填土受冲刷掏空后,可能导致管身倾斜,管节横向错位等。导致斜管抗滑失稳的主要原因有地震、地下水位变化、上部裹头冲淤等。导致管身不均匀沉降的主要原因有地震、地质缺陷<sup>[12]</sup>、河道冲淤引起的上部荷载变化、内水外渗、地基沉降<sup>[13-14]</sup>等。

倒虹吸管身失稳工程风险因子识别的鱼骨图见图1。倒虹吸管身失稳风险分析评价体系如图2所示。

## 2 倒虹吸管身失稳工程风险分析

### 2.1 层次分析法确定倒虹吸管身失稳风险因子的权重

为了对影响倒虹吸管身失稳的风险因子进一步

定量分析,采取层次分析法确定其权重。具体步骤分为如下。

(1)建立层次分析结构。

目标层为倒虹吸管身失稳 A,中间层为四类影响因素类型 B1 至 B4,因素层为风险因子 C11 至 C43。



图 1 倒虹吸管身失稳风险因子辨识鱼骨图

Fig. 1 Fishbone diagram of risk factors for inverted siphon instability



图 2 倒虹吸管身失稳风险分析评价体系

Fig. 2 Risk analysis and evaluation system for inverted siphon body instability

(2)构造判断矩阵。

结合专家经验和相关文献<sup>[15-19]</sup>,对 B 层和 C 层分别进行两两比较,运用表 1 中“九级标度法”构造判断矩阵。

表 1 九级标度

Tab. 1 Nine-level scaling method

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有同等重要性
3	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
7	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要
9	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素极端重要
2,4,6,8	上述两相邻判断的中值
倒数	因素 $i$ 与 $j$ 比较的判断 $a_{ij}$ , 则因素 $j$ 与 $i$ 比较的判断 $a_{ji}=1/a_{ij}$

(3)对判断矩阵进行一致性检验。

利用一致性指标  $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$  进行检验,其中  $\lambda_{max}$  为判断矩阵的特征向量最大值, $n$  为判断矩阵的阶数。利用随机一致性比例  $CR = \frac{CI}{RI}$  进一步检验,其中 RI 为引入的平均随机一致性指标。当  $CR < 0.1$  时,认为检验通过,否则重新修正判断矩阵。各层进行比较后得到的权重系数以及各风险因子最终权重见表 2。

表 2 各层权重及最终权重计算结果

Tab. 2 Calculation results of weights and final weights of each layer

类型	权重	一致性检验	风险因子	权重	一致性检验	最终权重
B <sub>1</sub>	0.152 4	RI=0.58; CI=0; CR=0<0.1	C <sub>11</sub>	0.428 6		0.065 3
			C <sub>12</sub>	0.142 9		0.021 8
			C <sub>13</sub>	0.428 6		0.065 3
B <sub>2</sub>	0.389 9	RI=0.90; CI=0.0145; CR=0.0161<0.1	C <sub>21</sub>	0.500 0		0.195 0
			C <sub>22</sub>	0.166 7		0.065 0
			C <sub>23</sub>	0.166 7		0.065 0
			C <sub>24</sub>	0.166 7		0.065 0
B <sub>3</sub>	0.389 9	RI=0.90; CI=0.0385; CR=0.0428<0.1	C <sub>31</sub>	0.399 4		0.155 7
			C <sub>32</sub>	0.081 2		0.031 7
			C <sub>33</sub>	0.359 9		0.140 3
			C <sub>34</sub>	0.159 4		0.062 2
B <sub>4</sub>	0.067 9	RI=0.58; CI=0.0193; CR=0.0332<0.1	C <sub>41</sub>	0.258 3		0.017 5
			C <sub>42</sub>	0.637 0		0.043 3
			C <sub>43</sub>	0.104 7		0.007 1

由表 2 可知,各判断矩阵计算得到的 CR 值均小于 0.10,判断矩阵具有令人满意的一致性,说明各指标权重分配是合理的。

通过计算结果可以看出,四种影响因素类型中,

工程因素和人为因素对倒虹吸管身失稳的影响最大,其次是自然因素和管理因素。工程因素中占有比重最大的是工程质量,由此可见工程质量是衡量一个工程好坏的重要因素,河道冲淤、河势变化、内

水外渗所占比重相同。地下水变化和地基变形在人为因素中所占比重最大,采砂活动和地形变化次之。不难发现,各风险因子所占权重与普遍性相关。例如,工程质量作为任何工程都需要严格把控的一部分,所占比重最大,而地震发生频率与倒虹吸工程所处地区联系紧密,各工程之间差异大,故其所占比重较小。

各风险因子最终所占权重大小排序为:工程质量>地下水变化>地基变形>暴雨洪水=地质缺陷>河道冲淤=河势变化=内水外渗>采砂活动>日常巡查>地形变化>地震>运行调度>极端事件后巡查。

## 2.2 基于SD理论的倒虹吸管身失稳工程风险分析

### 2.2.1 系统动力学基本理论

系统动力学(system dynamics,SD)理论最早由美国麻省理工学院J W Forrester 教授<sup>[20]</sup>在1956年最先提出的,是一门以反馈控制论、信息论、系统论、决策过程论为基础,通过软件模拟研究信息反馈系统进而解决其内部复杂动态行为与结构的综合学科,常用来处理非线性、高阶、多重反馈的动态系统问题<sup>[21-22]</sup>,目前常用的分析软件有Vensim、Anylogic等。

通过分析软件建立的仿真模型能够清晰反映系统内各个量之间的正负因果反馈关系<sup>[23]</sup>,用箭头指向代表两个量之间的作用关系,正号代表影响是正向的,即起增强作用,负号代表影响是反向的,即起减弱作用。图3为两个典型的反馈回路。从某一个量出发,经过一系列决策、规则、物理法则或者行动,作用到下一个量,以此类推,回到初始量,形成反馈回路,即一条闭合的因果关系链。正反馈回路具有自我强化的效果,使得回路中变量的偏离增强,正反馈回路过多会使系统不稳定,而负反馈回路则具有稳定、自我校正的特性,能够抑制由于正反馈过多造成的系统不稳定。

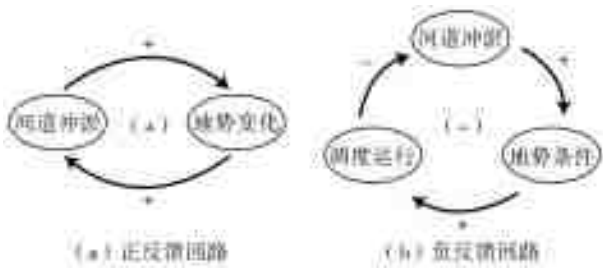


图3 倒虹吸管身失稳典型反馈回路

Fig. 3 Typical feedback loop for inverted siphon body instability

### 2.2.2 SD反馈模型构建

构建SD反馈模型具体步骤如下。

(1)明确研究对象,确定系统边界。系统边界包括时间和空间两部分,时间边界考虑某一特定时间范围内系统内部的变化,空间边界通常以地域范围进行区分。明确研究对象及系统边界能够有效提高建模的效率,同时减小因建模者自身水平限制而产生的误差。本文以某引调水工程内的倒虹吸为研究对象,即空间边界。

(2)系统内部结构分析。此步主要建立在针对研究对象展开的大量文献阅读、资料收集等工作的基础上。为了更好的解释研究对象的行为特征,必要时需要提出动态假说。本文构建模型的基础主要来源于实地调研资料,收集了某引调水工程中近50处倒虹吸工程,利用前面提到的风险评价体系进行分析归纳并梳理其各风险因子间存在的客观因果关系。

(3)绘制SD反馈模型因果关系图。

(4)仿真实验及结果分析,并对模型进行修改。建模是反复性的,需要在实践中不断完善、学习以减少误差,最终达到良好的模拟精度。最终建立的倒虹吸管身失稳工程风险识别反馈模型如图4所示,图中正号代表增强倒虹吸风险发生的可能性,负号代表减弱风险发生可能性。



图4 倒虹吸管身失稳工程风险识别反馈模型

Fig. 4 Risk recognition feedback model for inverted siphon instability project

### 2.2.3 反馈回路分析

利用Vensim软件中反馈回路分析的功能,对反馈模型进行分析,通过比较各个风险因子反馈回路的数量得到其重要程度的相对大小。由于反馈模型较为复杂,回路众多,此处只列举反馈回路数量较多的三个因子及其反馈回路,见表3。

通过表3的信息可以得到以下结论。

(1)从回路的数量来看,人为因素产生的影响最大,地下水变化有20条正反馈环,地形变化和地基

表 3 倒虹吸管身失稳风险因子反馈回路

Tab. 3 Back-siphon body instability risk factor feedback loop

风险类型	风险因子	回路编号	回路描述
自然因素 $B_1$	地质缺陷 $C_{13}$	1	$C_{13} \rightarrow +C_{31}$
		2	$C_{13} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31}$
		3	$C_{13} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{24}$
		4	$C_{13} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{31}$
		5	$C_{13} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31}$
		6	$C_{13} \rightarrow +C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{24}$
		7	$C_{13} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{24} \rightarrow +C_{31}$
		8	$C_{13} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31}$
		9	$C_{13} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31}$
		10	$C_{13} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31}$
		11	$C_{13} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{24}$
		12	$C_{13} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31}$
		13	$C_{13} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{24}$
		14	$C_{13} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31}$
		15	$C_{13} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{24}$
工程因素 $B_2$	河势变化 $C_{23}$	1	$C_{23} \rightarrow +C_{22}$
		2	$C_{23} \rightarrow +C_{32}$
		3	$C_{23} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{22}$
		4	$C_{23} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32}$
		5	$C_{23} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31} \rightarrow +C_{33}$
		6	$C_{23} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31} \rightarrow +C_{13}$
		7	$C_{23} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{33}$
		8	$C_{23} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31} \rightarrow +C_{33}$
		9	$C_{23} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31} \rightarrow +C_{13}$
		10	$C_{23} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{22}$
		11	$C_{23} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{22}$
		12	$C_{23} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{33}$
		13	$C_{23} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{24} \rightarrow +C_{13}$
		14	$C_{23} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32} \rightarrow +C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{24} \rightarrow +C_{13}$
人为因素 $B_3$	地下水变化 $C_{31}$	1	$C_{31} \rightarrow +C_{33}$
		2	$C_{31} \rightarrow +C_{13}$
		3	$C_{31} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{32}$
		4	$C_{31} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{24}$
		5	$C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{24}$
		6	$C_{31} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{32}$
		7	$C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32}$
		8	$C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{32}$
		9	$C_{31} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{24}$
		10	$C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{24} \rightarrow +C_{13}$
		11	$C_{31} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32}$
		12	$C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{32}$
		13	$C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32}$
		14	$C_{31} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{32}$
		15	$C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{24} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{32}$
		16	$C_{31} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32}$
		17	$C_{31} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32}$
		18	$C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{24} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{32}$
		19	$C_{31} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{32}$
		20	$C_{31} \rightarrow +C_{33} \rightarrow +C_{24} \rightarrow +C_{13} \rightarrow +C_{23} \rightarrow +C_{22} \rightarrow +C_{32}$

变化各有 18 条正反馈环。其次是工程因素,河势变化有 14 条正反馈环,河道冲淤有 13 条正反馈环,内水外渗有 8 条正反馈环。自然因素中,地质缺陷有 15 条正反馈环。根据模型回路数量,影响最小的是管理因素。

(2)在建立的模型中,绝大多数风险因子之间的影响都是正向的,甚至是双向的,形成正反馈环。正反馈环具有自我强化的效果,使得回路中变量的偏离增强。如河势变化与河道冲淤,这两个风险因子很少有单独出现的情况。不论是由何种原因使得河势改变,都会带来冲淤条件的改变,继而再次影响河势,形成一个循环,最终两者都逐渐偏离初始状态。

(3)在图 2 所列出的四种风险类型中,管理因素的引入起到了平衡整个反馈模型的作用。由于管理水平的提高,能够对其他因子产生负反馈作用,降低其风险水平,使得系统具有一定自我调节的能力。但从整个反馈模型来看,由于绝大多数都是正反馈环,明显这个系统的自我调节能力不足。一旦有风险发生,仅靠管理水平的提高是远远不够的。

### 2.3 结果分析

从影响因素类型来看,两种分析方法得出的结果基本一致,均为人为因素 $\geq$ 工程因素 $>$ 自然因素 $>$ 管理因素。从风险因子来看,两种分析方法得出的结果差异较大。工程质量、暴雨洪水在层次分析法得出的结果中所占比重最大,但在反馈模型中的回路数量较少,重要性程度较低。地形变化在反馈模型中的回路数量较多,但在层次分析法中得出的权重较小。

通过对比两种结果,结合两种分析方法自身的特点,推测造成这种差异的原因有以下三点。

(1)层次分析法与 SD 反馈模型本质上的差别。采用层次分析法构建判断矩阵进行两两比较,实际上是一个“优胜劣汰”的过程,依靠的是专家主观的判断,并没有考虑因素之间的联系。SD 反馈模型只需确定风险因子间客观存在的因果关系,使模型局部关系简洁清晰,相较于层次分析法,省去了大量依靠主观判断的步骤,如比较两两风险因子间重要性程度等,极大程度上减少了人为干扰,因而更为客观真实。

(2)层次分析法具有较强的主观性,分析过程中需要有完备的专家系统支持,主要指标把握不合理、经验不足或者调查不够充分等原因都可能使结果产生较大误差。其次,这种方法在指标过多时统计量大,后续增减指标操作复杂。

(3)基于 SD 理论的反馈模型在建模阶段对风险因子的识别要求较高。SD 反馈模型尽管具有一定的拟合程度,但为了使得模型具有普适性,需要分析到基层次,模型变量的数目随着分析的深入增加,SD 模型增减变量操作简单。风险因子越全面、与工程系统的关联性越高,构建的反馈模型仿真精度越高,得出的结论越精确。

## 3 结论

(1)本文针对引调水工程中倒虹吸工程构建了以系统动力学为基础的反馈模型,通过与层次分析法得到的结论进行对比验证,分析结果显示该反馈模型能够较为准确地反映影响倒虹吸工程的风险因子的相对重要性程度,利用 SD 反馈模型进行引调水工程中倒虹吸工程的风险评估工作是可行的。

(2)SD 反馈模型适用于对复杂系统进行仿真模拟,能够充分考虑系统内部一因多果及一果多因的情况,且计算量较小、易于修改。实际工程中往往存在多重反馈,既包括正反馈也包括负反馈。例如,工程出现问题时通过应急控制预案排除险情,通过增加系统中的负反馈回路来维持其稳定。SD 反馈模型不仅能够帮助管理人员快速找到问题所在并做出决策,同时体现出人为控制的效果。

(3)由于引调水工程复杂且易受多方面影响,其复杂性和动态性使得简单的静态模型或线性分析难以对其进行高精度模拟,而系统动力学的建模要求及特点则与其较为契合,可作为引调水工程风险评估工作的一种新的途径。

总之,本文对引调水工程中倒虹吸工程的分析结果显示,利用 SD 反馈模型进行工程稳定风险评估工作是十分有潜力的。但需要指出的是,目前将系统动力学原理应用到工程结构稳定的研究工作还不足以使 SD 反馈模型独立于其他风险评价方法单独使用,如何提高 SD 模型的仿真精度及可靠程度,仍需进一步研究。

### 参考文献(References):

- [1] 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 H,GENG L H,PEI Y S,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)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1683. 2007. 05. 002.

- [2] 陈进,黄薇. 跨流域长距离引调水工程系统的风险及对策[J]. 水利水电技术, 2004(5): 95-97. (CHEN J, HUANG W. Risks and countermeasures of long-distance water transfer projects across river basins[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004(5):95-97. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0860. 2004. 05. 030.
- [3] 韩迅,安雪晖,柳春娜. 南水北调中线大型跨(穿)河建筑物综合风险评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018,58(7): 639-649. (HAN X, AN X H, LIU C N. Comprehensive risk assessment of large cross-river buildings in the Middle Route of South-to-North Water Transfer[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58 (7): 639-649. (in Chinese)) DOI: 10. 16511/j. cnki. qhdxxb. 2018. 25. 030.
- [4] 刘涛,邵东国,顾文权. 基于层次分析法的供水风险综合评价模型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(4): 25-28. (LIU T, SHAO D G, GU W Q. Comprehensive evaluation model of water supply risk based on AHP [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006, 39(4): 25-28. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-8844. 2006. 04. 006.
- [5] 孙昊苏. 基于层次分析法的南水北调 PCCP 管线路管护风险分析[J]. 河南水利与南水北调, 2018, 47(2): 33-35. (SUN H S. Risk analysis of PCCP pipeline protection for South-to-North Water Transfer Based on analytic hierarchy process[J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2018, 47(2): 33-35. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-8853. 2018. 02. 016.
- [6] 赵然杭,陈超,李莹芹,等. 南水北调东线工程山东段突发事故风险评估[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 180-186. (ZHAO R H, CHEN C, LI Y Q, et al. Risk assessment of sudden accidents in Shandong section of the East Route Project of South-to-North Water Transfer[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15 (4): 180-186. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 04. 029.
- [7] ALOINI D, DULMIN R, MININNO V. Risk assessment in ERP projects[J]. Information Systems, 2012, 37(3): 183-199. DOI: 10. 1016/j. is. 2011. 10. 001.
- [8] 王嵩. 大型水利工程突发事件应急管理系统构建与评价研究[D]. 天津: 天津大学, 2008. (WANG S. Construction and evaluation of emergency management system for large-scale water conservancy project[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)) DOI: 10. 7666/d. y1532060.
- [9] 华坚,李晶晶. 基于系统动力学的重大水利工程项目决策社会稳定风险评估有效性分析[J]. 水利经济, 2017, 35(2): 11-15, 30, 75. (HUA J, LI J J. Effectiveness analysis of social stability risk assessment for decision-making of major water projects based on system dynamics[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35 (2): 11-15, 30, 75. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 10039511. 2017. 02. 003.
- [10] SL 482-2011. 灌溉与排水渠系建筑物设计规范[S]. (SL 482-2011. Design code for design of irrigation and drainage canal system structures[S]. (in Chinese))
- [11] 段文刚,陈端,黄国兵,等. 河道排水倒虹吸进口布置试验研究和设计原则[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 369-373. (DUAN W G, CHEN D, HUANG G B, et al. Experimental study and design principles of inverted siphon inlet layout for river drainage [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7 (6): 369-373. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1683. 2009. 06. 098.
- [12] 张劲松,徐云修. 倒虹吸管的破坏分析及修补措施[J]. 中国农村水利水电, 2000(3): 6-8. (ZHANG J S, XU Y X. Damage analysis and repair measures of inverted siphon[J]. China Rural Water and Hydropower, 2000(3): 6-8. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2000. 03. 003.
- [13] 洪振国. 云南省某引水工程穿山隧洞间大流量倒虹吸方案选择[J]. 水电能源科学, 2016, 34(8): 120-123, 119. (HONG Z G. Selection of large flow inverted siphon scheme between tunnel crossing a diversion project in Yunnan Province [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(8): 120-123, 119. (in Chinese))
- [14] 裴松伟,刘树玉,赵顺波,等. 地质变化对大型预应力混凝土倒虹吸结构受力影响的分析[J]. 长江科学院院报, 2006(1): 38-41. (PEI S W, LIU S Y, ZHAO S B, et al. Analysis of the influence of geological changes on the mechanical behavior of large-scale inverted siphon structures[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006 (1): 38-41. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-5485. 2006. 01. 011.
- [15] 谭聪睿,王庆新,单杰,等. 倒虹吸结构混凝土裂缝成因及防治措施分析[J]. 水利水电工程设计, 2015, 34(3): 26-27. (TAN C R, WANG Q X, SHAN J, et al. Causes of concrete cracks in inverted siphon structure and analysis of preventive measures [J]. Design of Water Resources and Hydroelectric Engineering,

- 2015,34 (3):26-27. (in Chinese))
- [16] 唐献富. 沁河倒虹吸预应力混凝土结构分析[J]. 南北水调与水利科技, 2008(4):34-35, 57. (TANG X F. Structural analysis of inverted siphon prestressed concrete in Qinhe River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008 (4):34-35, 57. (in Chinese))
- [17] 张晓雷, 朱玉祥, 孙东坡. 洪河倒虹吸交叉工程河段二维水沙数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(4):431-435. (ZHANG X L, ZHU Y X, SUN D P. Two-dimensional numerical simulation of water and sediment in the Honghe inverted siphon crossing project[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45 (4): 431-435. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; WSDD. 0. 2012-04-007.
- [18] 邵建国. 大体积混凝土施工技术分析和裂缝预防措施[J]. 安徽建筑, 2015, 22(3):69-70. (SHAO J G. Construction technology analysis of mass concrete and crack prevention measures[J]. Anhui Architecture, 2015, 22 (3): 69-70. (in Chinese)) DOI: 10. 16330/j. cnki. 1007-7359. 2015. 03. 031.
- [19] 苑晓明. 大型倒虹吸技术在施工中的应用及缺陷处理分析[J]. 交通标准化, 2008(14):33-36. (YUAN X M. Application of large inverted siphon technology in construction and defect treatment analysis[J]. Communications Standardization, 2008 (14): 33-36. (in Chinese)) DOI: 10. 3869/j. issn. 1002-4786. 2008. 12. 003.
- [20] FORRESTER W J. Industrial dynamics[J]. Journal of the Operational Research Society, 1997, 48(10): 1037-1041. DOI: 10. 1057/palgrave. jors. 2600946.
- [21] 王其藩. 系统动力学理论与方法的新进展[J]. 系统工程理论方法应用, 1995(2):6-12. (WANG Q F. New progress of system dynamics theory and method[J]. Application of system engineering theory and method, 1995(2):6-12. (in Chinese))
- [22] 钟永光, 钱颖, 于庆东, 等. 系统动力学在国内外的发展历程与未来发展方向[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2006(4):101-104, 0. (ZHONG Y G, QIAN Y, YU Q D, et al. The development course and future development direction of system dynamics at home and abroad[J]. Journal of Henan University of Science & Technology(Natural Science), 2006(4): 101-104, 0. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-6871. 2006. 04. 030.
- [23] 唐伟, 雷星晖, 李玲玲. 系统动力学在战略风险评价及控制中的适用性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(4):645-649. (TANG W, LEI X H, LI L L. Applicability of system dynamics in strategic risk assessment and control[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40 (4): 645-649. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0253-374x. 2012. 04. 025.

(上接第 157 页)

- [22] WHALEN P J, TOTH L A, KOEBEL J W, et al. Kissimmee river restoration: A case study[J]. Water science & technology, 2002, 45 (11): 55-62. DOI: 10. 1016/S0043-1354(01)00232-9.
- [23] 陈栋, 梁敏, 仇春光, 等. 基于水质模拟分析的生态补水方案研究[J]. 人民长江, 2018, 41 (S1): 34-37. (CHEN D, LIANG M, QIU C G, et al. Study on ecological water supply scheme based on water quality simulation analysis[J]. Yangtze River, 2018, 41 (S1): 34-37. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2018. S1. 008.
- [24] 过杰, 郭琦, 何文浩. 城市景观水生态修复方法研究进展与发展趋势[J]. 水资源开发与管理, 2017(3):42-44, 79. (GUO J, GUO Q, HE W H. Research progress and development trend of urban landscape water ecological restoration method [J]. Water Resources Development and Management, 2017(3): 42-44, 79. (in Chinese)) DOI: 10. 16616/j. cnki. 10-1326/TV. 2017. 03. 013.