

景唤,王永智,宋志红,等.引江济淮工程(河南段)泵站系统长期服役风险评估[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(6):1174-1183. JING H, WANG Y Z, SONG Z H, et al. Long-term service risk assessment of pumping station system in the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach)[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1174-1183. (in Chinese)

引江济淮工程(河南段)泵站系统长期服役风险评估

景唤^{1,2},王永智³,宋志红¹,王辉³,方俊³,王永强¹

(1. 长江水利委员会长江科学院水资源与生态环境湖北省重点实验室, 武汉 430010; 2. 长江水利委员会流域水环境保护与治理创新团队, 武汉 430010; 3. 河南省引江济淮工程有限公司, 郑州 450003)

摘要:运用故障树分析法对引江济淮工程(河南段)泵站系统长期服役主要风险源及作用关系进行识别,以归纳的风险要素类别为基础,采用层析分析法和专家咨询法依次确定泵站系统长期服役风险评估指标、指标权重和风险率等级赋分标准,建立引江济淮工程(河南段)泵站系统长期服役风险评估方法;基于收集的泵站系统工程特性、防洪设计参数等资料,运用构建的评估方法对袁桥、赵楼、试量、后陈楼和七里桥泵站长期服役风险进行评估。结果表明:各级泵站长期服役风险率均在(1,2]级,总体风险较低。然而,由于泵站多为串联关系且上游泵站的设计规模往往大于下游泵站,一旦上游泵站失效,下游泵站均受影响,泵站设计规模的空间差异和结构关系将显著增加系统运行风险,在后续的风险控制及运行管理中需加以重视。

关键词:引江济淮工程(河南段);泵站系统;长期服役风险;指标体系;综合评估

中图分类号:TV675 **文献标志码:**A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0116

跨流域长距离调水工程受空间跨度大、沿线地理环境复杂多变、建筑物和机电金属结构繁多等因素影响,工程运行中不可避免地面临工程管理、自然灾害、调度运行、设备故障等多种风险^[1-3]。泵站系统作为跨流域长距离调水工程的核心基础设施与动力来源,运行任务繁重、设备种类多样、技术难度大,一旦发生故障,系统正常运行受到影响,可能造成供水异常,甚至引发生态环境、社会环境、人员伤亡等一系列不良后果^[4]。开展跨流域长距离调水工程泵站系统长期服役风险评估,充分预估各类风险,掌握工程总体风险水平,可为决策者制定科学、合理的风险管控措施提供依据。

目前,国内外关于泵站系统风险评估开展了大量研究。在施工过程方面的研究有:孙序营^[5]从技术、人员、管理、设备、材料、环境等角度探讨了大型调水工程抽水泵站电气、水机、通信、金属结构的安装风险及防范措施;曹金山等^[6]探讨了抽水泵

站机电设备安装工程的管理风险与技术风险等。在工程结构方面的研究有:Bhattacharjee等^[7-8]采用多项式逻辑回归(multinomial logistic regression, MLR)方法对潜水泵构件潜在失效风险因素间的作用关系进行了探讨,并依据多准则决策方法——比例风险评估模型(proportionate risk assessment model, PRASM)给出了潜水泵构件失效核心变量的风险贡献值;姜蓓蕾等^[9]运用层次分析法对南水北调东线工程的提水、输水、蓄水系统的风险因子进行了识别分析;Li等^[10]运用层次分析方法提出了综合考虑水工建筑物、机电设备、金属结构、综合管理的泵站老化状况评估体系,可为城市排水系统泵站改造和城市防洪提供决策支持;Gerlach等^[11]采用故障树分析方法对影响污水泵站运行稳定性、水力性能和效率的关键风险要素展开分析,并据此提出了包含失效概率和失效损失的泵站堵塞风险评估框架;Moeini等^[12]综合考虑机械因素、电气因

收稿日期:2023-06-21 修回日期:2023-10-02 网络出版时间:2023-11-14

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231113.0917.002

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202300);国家自然科学基金项目(52261145744);复杂调水工程全生命周期风险分析与管控关键技术项目(HNYJH/JS/FWKY 2021004)

作者简介:景唤(1993—),女,河南商丘人,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: 2574515425@qq.com

通信作者:王永强(1982—),男,河南新郑人,正高级工程师,博士,主要从事水资源调度与配置研究。E-mail: wangyq@mail.crsri.cn

素及控制因素,提出了基本风险事件的故障树组合及基于历史数据统计分析和专家咨询法的概率确定方法等。在运行管理方面的研究有:刘圣桥等^[13]从控制系统网络安全技术和网络安全管理的角度对现有泵站控制系统网络安全风险进行分析并制定泵站控制系统网络安全防护建设及管理方案;高玉琴等^[14]从“规范化管理”“设施设备管理”“信息化管理”“调度运行及应急处理能力”“水生态环境管理”等层面提出了大中型泵站管理现代化评估指标体系。

以往研究在泵站系统的运行风险管理方面已取得大量成果。但已有成果多侧重泵站系统运行风险的某一方面,如工程施工与设备安装、机电设备损坏与老化、渠道建筑物的老化与破损、运行管理、信息化程度等,难以全面、系统、客观地反映大型引调水工程泵站系统的长期服役风险状况;此外,已有成果多针对某单一泵站风险状况,较少关注跨流域长距离调水工程多级联动运行泵站系统问题,对于多级泵站的空间结构关系、提水设计规模等关键要素的考虑仍有不足。引江济淮工程是一个跨流域、跨区域的水资源配置和综合利用工程,其泵站系统规模大、结构复杂、供水范围广,在未来长期服役过程中面临多种不确定风险威胁。为此,本文以

引江济淮工程(河南段)泵站系统为研究对象,全面、系统地开展风险识别,明晰风险源和作用关系,据此确定泵站系统长期服役风险评估指标、指标权重和风险率等级赋分标准,提出引江济淮工程(河南段)泵站系统长期服役风险评估方法,并对多级泵站空间结构关系及设计规模对运行风险的影响展开探讨,为后续工程长期服役性能及失效风险调控奠定基础。

1 研究区域概况与数据

1.1 研究区域概况

引江济淮工程是以城乡供水和江淮航运为主,兼顾灌溉补水、巢湖及淮河水生态环境改善的跨流域、跨区域水资源配置和综合利用工程,由南向北分为引江济巢、江淮沟通、江水北送3部分。从行政区划看,工程包括河南段和安徽段2部分。引江济淮工程(河南段)供水范围涵盖周口、商丘的2个市9个县(市、区),规模庞大,结构复杂,主要工程设施包括2条输水河道、5座提水泵站和4座调蓄水库,工程布设见图1。其中,提水系统是工程的核心部分,包含梯级和加压泵站两类,梯级泵站有袁桥、赵楼、试量泵站3座,加压泵站有后陈楼和七里桥泵站2座。

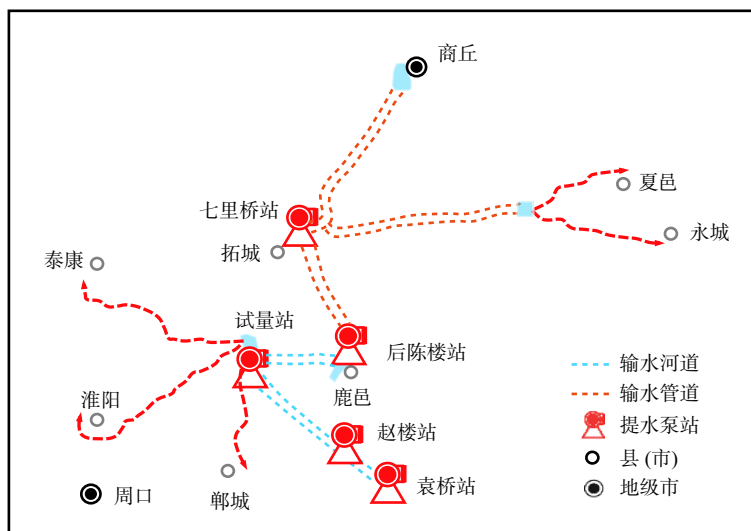


图1 引江济淮工程(河南段)工程布设

Fig. 1 Schematic diagram of projects in the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach)

1.2 研究数据选取

引江济淮工程(河南段)泵站系统风险评估的数据资料主要为袁桥、赵楼、试量、后陈楼和七里桥泵站的水工建筑物、机电设备、地基特性等工程特性资料、防洪设计资料及运行管理资料,其中,工程

特性资料和防洪设计资料通过《引江济淮工程(河南段)初设报告》等查阅得到,运行管理资料由现场调研、座谈等途径收集得到。各泵站基础信息见表1至表3。

表 1 引江济淮工程(河南段)各泵站装机情况

Tab. 1 Installation information of pumping stations in Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach)

泵站名称	泵站类型	单机功率/kW	总装机功率/kW	总机组数量/台	备用机组数量/台	设计流量/(m ³ ·s ⁻¹)
袁桥泵站		1 300	5 200	4	1	43.0
赵楼泵站	梯级泵站	500	2 000	4	1	42.0
试量泵站		1 100	4 400	4	1	40.0
后陈楼泵站		2 240	13 440	6	2	22.9
七里桥泵站(商丘机组)	加压泵站	2 240	6 720	3	1	6.6
七里桥泵站(夏邑机组)		2 600	10 400	4	1	13.8

表 2 引江济淮工程(河南段)泵站地基特性

Tab. 2 Pump station foundation characteristics in Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach)

泵站名称	泵站类型	地基类型	地基允许承载力[基底 平均应力]/kPa	基础稳定性		地基处理 方式
				抗滑稳定性系数 K_c	抗浮稳定性系数 K_f	
袁桥泵站		第⑥层粉砂层	195.40[63.09, 236.69]	[1.98, 3.41]	[1.36, 2.70]	CFG桩加固
赵楼泵站	梯级泵站	第④层粉砂层	195.40[98.44, 169.34]	[15.93, 73.74]	[2.39, 2.65]	—
试量泵站		④-2重粉质壤土	186.00[66.90, 225.50]	[2.71, 13.53]	[1.42, 3.37]	CFG桩加固
后陈楼泵站	加压泵站	第④层粉细砂层	130.00[73.47, 252.20]	[1.19, 17.51]	[1.52, 2.36]	CFG桩加固
七里桥泵站		第⑥层细砂层	160.00[80.11, 283.06]	[1.28, 7.06]	[1.53, 2.45]	CFG桩加固

表 3 引江济淮工程(河南段)泵站工程防洪设计参数

Tab. 3 Flood control designed parameters of pumping stations in Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach)

泵站名称	泵站类型	防洪方式	防洪标准		防洪特征水位/m	
			设计标准	校核标准	设计洪水位	校核洪水位
袁桥泵站			50年一遇	200年一遇	39.65	41.00
赵楼泵站	梯级泵站	站身挡洪	50年一遇	200年一遇	40.77	40.91
试量泵站			50年一遇	200年一遇	43.01	44.10
后陈楼泵站	加压泵站	—	50年一遇	200年一遇	39.45	39.95
七里桥泵站			50年一遇	200年一遇	45.50	46.00

2 泵站系统长期服役风险率评估方法

2.1 泵站系统长期服役风险因子识别

影响引江济淮工程(河南段)泵站系统正常服役的风险源主要集中于提水效率和泵站系统工程安全 2 个方面,即内因或外因作用下提水量难以满足设计要求或存在防洪要求的泵站,汛期遭遇洪水难以正常运行^[9]。关于泵站提水效率,扬程变化、泵站设备老化、管理维护不善等均可能造成提水量不能满足受水区需求,类型可归纳为 3 个主要方面:运行条件、设备质量、技术状况^[15-17]。结合引江济淮工程(河南段)区域特点,运行条件方面,考虑到工程流经大量人口密集区域,汛期生活垃圾及农作物秸秆存在入渠可能,故而侧重拦污清污设备装置不完

善或运行状况不佳改变水泵扬程造成提水效率降低情景。另外,考虑因运行管理或人员操作不当等原因导致前池水位偏低或后池水位偏高进而造成水泵提水扬程增加,使水泵的上水量和效率降低的不利情景。设备质量方面,关注泵站设备老化造成的提水效率降低或机组备用不足而难以应对突发的机组失效情景。技术状况方面,关注安装、调节不当造成的水泵叶片角度和形状误差或管理维护不利造成的工况变化^[17]。同样地,关于泵站系统工程安全,则侧重与工程位置有关的地基失稳、洪水漫堤威胁工程安全等^[17]。从以上思路出发,本文运用故障树分析法对引江济淮工程(河南段)泵站系统的风险源进行识别,风险源识别清单及结果见图 2 和图 4。

表4 引江济淮工程(河南段)泵站系统风险源识别清单
Tab.4 Risk identification list of pumping stations in Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach)

一级风险类别	二级风险类别	风险要素	风险事件
提水效率	运行条件	拦污清污设备	(1)拦污清污设备锈蚀、变形
			(2)拦污清污设备设置不足
	(3)来流污物增多		
	(4)监督力度不够		
	(5)人员技能不足		
		前后池水位	(6)前池水位偏低
			(7)后池水位偏高
	设备质量	机组备用状况	(8)备用机组损坏
			(9)备用机组设置不足
		机组设备老化	(10)电机构件老化
			(11)构件磨损、噪音、渗漏、振动
			(12)叶片、泵壳气蚀
			(13)叶片、轴承变形
			(14)绝缘部件老化
技术状况	水泵特性误差	(15)水泵叶片角度减小	
		(16)水泵叶片形状异常	
	管理维护状况	(17)管理维护制度不完善	
		(18)制度执行不规范化	
		(19)自动化监测程度不高	
		(20)运行调度信息化程度不高	
		(21)管理人员结构不合理	
		(22)专项资金落实不到位	
工程安全	工程位置	(23)地基承载力低于设计值	
		(24)地基出现流土、流砂	
		(25)承压水突涌	
		(26)边坡支护、衬砌设施损坏	
		(27)边坡不均匀沉降	
	地基特性	(28)边坡坡脚淘刷严重	
		(29)边坡坡体裂缝发育	
		防洪条件	(30)洪水频率超工程设计标准
			(31)进水渠道淤积严重
(32)进水渠道障碍物阻水			
		(33)地基沉降大,堤防高度不足	

2.2 泵站系统长期服役风险率评价体系建设

借鉴南水北调工程提水系统风险评估指标体系的构建思路,从运行条件、设备质量、技术状况和工程安全多维度入手^[17],采用层析分析法和专家咨询法构建引江济淮工程(河南段)泵站系统长期服役风险评估指标体系。

运行条件。考虑到引江济淮工程(河南段)泵站系统均为新建泵站,机电设施运行状况较好,主要考虑入渠污染物对泵站正常运行的影响,历经文献调研与指标遴选,侧重拦污清污设施设计合理性与设施锈蚀或变形程度,设置拦污清污设施拦污能力和拦污清污设施完好程度描述泵站拦污清污设施

拦污效果^[18-19]。

设备质量。设备质量对于保障引江济淮工程(河南段)泵站系统安全至关重要。为确保按照设计流量完成江水北送,泵站系统的机组备用状况、机组设备老化情况以及泵站附属建筑物安全状况是需要考虑的关键要素。在满足能够综合反映设备特性、易于操作等原则基础上,历经文献调研与指标遴选,设置泵站机组备用比例、泵站投产使用年限和附属建筑物完好程度描述泵站系统的设备质量^[17,20-24]。

技术状况。技术状况的好坏直接关乎泵站提水效率及安全性,影响主要集中在水泵特性和管理维护状况2个方面^[17,25]。因引江济淮工程(河南段)泵站均为新建泵站,安装调试较为完备,主要关注设备管理与维护方面,考虑水利工程管理现代化的发展下对高质量工程管理的需求,拟从“管理制度规范化”“管理手段信息化”“人员结构合理性”“资金落实状况”几个方面开展评估^[26-28]。历经文献调研与指标遴选,设置管理制度规范化程度、管理手段信息化程度、人员结构合理化程度和管理维护资金落实程度描述泵站技术状况。

工程安全。工程安全状况直接关乎引江济淮工程安全。结合引江济淮工程(河南段)泵站工程特性,即泵站均采用站身挡洪,承担一定防洪、排涝任务,因而认为可能影响泵站系统工程安全的因素主要为:泵站地基状况、基础整体稳定性和防洪条件。历经文献调研与指标遴选,设置地基承载力状况、站身稳定状况(侧重抗滑稳定性和抗浮稳定性)和防洪条件等级描述泵站工程安全状况^[17,29-30]。

引江济淮工程(河南段)泵站系统长期服役风险评估指标及赋分标准见表5。为实现引江济淮工程(河南段)泵站系统长期服役风险率评估,还需确定评估指标权重。层次分析法是工程风险评估的常用方法,其基本原理为将待评估目标分解为多个层级,依据行业专家/决策制定者经验对评估层指标相对重要程度进行判断的定量与定性相结合的综合方法,评估指标权重确定的核心为判断矩阵构造,在对两评估要素进行比较时,常以1~9描述不同的影响程度,判断矩阵元素1、3、5、7、9对应表征同等重要、稍微重要、明显重要、强烈重要、极端重要,倒数则表示相反含义,判断矩阵元素值常通过专家咨询获得,这里据此确定泵站系统评估指标体系权重。

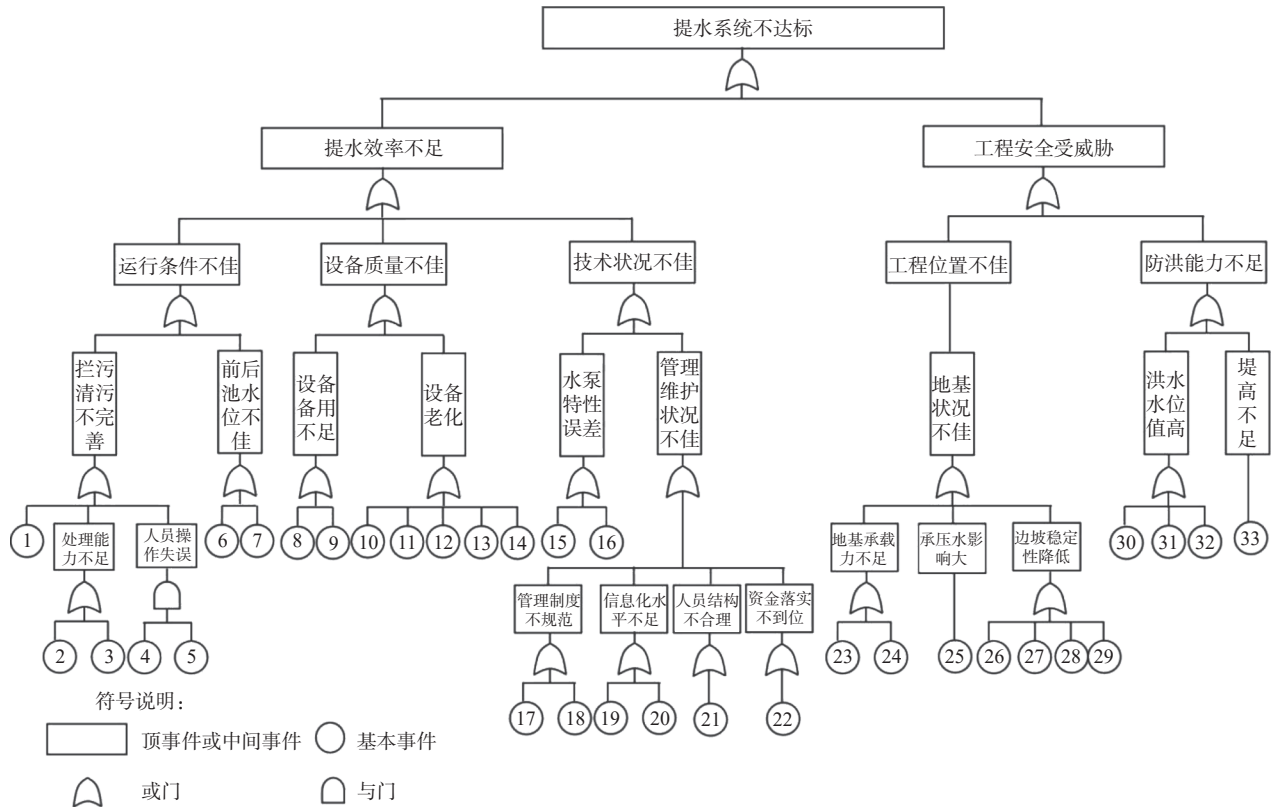


图 2 引江济淮工程(河南段)泵站系统故障树

Fig. 2 Fault tree of pump station system in Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach)

对一级评估指标提水效率和工程安全构造判断矩阵 C , 表达式为

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

计算得出一致性比率 $R_c=0<0.1$, 满足一致性要求, 则提水效率和工程安全权重分配为 $\omega_i = (0.75 \ 0.25)$ 。

对提水效率的二级评估指标运行条件、设备质量、技术状况构造判断矩阵 C_1 , 表达式为

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

计算得出一致性比率 $R_c=0.028<0.1$, 满足一致性要求, 则运行条件、设备质量、技术状况权重分配为 $\omega_i = (0.66 \ 0.16 \ 0.18)$ 。

对工程安全的二级评估指标工程位置和防洪条件构造判断矩阵 C_2 :

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

计算得出一致性比率 $R_c=0<0.1$, 满足一致性要求, 则工程位置和防洪条件权重分配为 $\omega_i = (0.75 \ 0.25)$ 。三级指标权重计算过程省略, 见表 5。

3 泵站系统长期服役综合风险评估

3.1 泵站系统长期服役风险率评估

依据上文构建的引江济淮工程(河南段)泵站系统长期服役风险率评估方法对泵站系统长期服役风险率进行计算, 公式为

$$X = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (4)$$

式中: X 为评估对象的风险率等级; X_i 为某一指标的风险率等级; W_i 为相应指标所占权重。为更加简洁、明了地反映工程风险率水平, 这里将风险率等级描述分为低、较低、中等、较高、高 5 个等级, 对应风险率范围依次为 $(0, 1]$ 、 $(1, 2]$ 、 $(2, 3]$ 、 $(3, 4]$ 、 $(4, 5]$ 。根据《引江济淮工程(河南段)初设报告》及现场调研、座谈等资料收集结果, 对袁桥、赵楼、试量、后陈楼和七里桥泵站各指标赋值, 结果见表 6。可以发现, 引江济淮工程(河南段)各泵站系统长期服役风险率等级均在 $(1, 2]$, 总体风险水平较低, 其中, 后陈楼泵站、七里桥泵站(商丘机组)因泵站机组备用比例略高(33%), 风险率等级略低于其他泵站。

3.2 泵站系统长期服役综合风险探讨

由于引江济淮工程(河南段)运行风险受风险率与风险损失共同影响, 仅探讨风险率难以综合反映

工程运行风险,还需对风险损失加以考虑。显然,泵站系统失效后果与泵站设计规模关系密切,设计流量大的泵站失效后果比小泵站严重。这里以泵站设计流量表征失效后果严重程度,将各泵站的设计流量划分为若干区间,依次为(0, 10]、(10, 20]、(20, 30]、(30, 45] m³/s,表征失效后果严重、较严重、

一般、较轻微、轻微;与此同时,结合风险率等级划分结果,将引江济淮工程(河南段)泵站长期服役风险率-风险损失矩阵表(表7)划分为5类区域,颜色由深至浅依次表示综合风险高、较高、中等、较低、低,由此对泵站系统运行综合风险进行评估。

表5 泵站系统长期服役风险评估指标体系及赋分标准

Tab. 5 Long-term service risk assessment index system and assignment standard of pumping station system

一级指标 (A_k)	权重 (ω_k)	二级指标 ($R_{k,m}$)	权重 ($\omega_{k,m}$)	三级指标 ($R_{k,m,n}$)	权重 ($\omega_{k,m,n}$)	赋分标准		
提水效率	0.75	设备质量	0.66	泵站机组备用比例	0.69	计算方式: $N_{备}=(Q_{实}-Q_{设})/Q_{单}$, 备用比例= $N_{备}/N_{总}$ (其中, $Q_{实}$ 为泵站总装机流量; $Q_{设}$ 为泵站设计流量; $Q_{单}$ 为单机流量; $N_{备}$ 为备用机组数量; $N_{总}$ 为总机组数量)。按照机组备用比例>30%、(15%, 30%]、(10%, 15%]、(5%, 10%]、(0, 5%], 风险等级依次为1级~5级		
				泵站投产使用年限	0.16	泵站机组投产使用年限在[0, 10)、[10, 15)、[15, 20)、[20, 25)、>25年时, 风险等级依次为1级~5级		
				附属建筑物完好程度	0.15	附属建筑物设施完好且运行安全、偶尔出现问题但不影响正常功能、偶尔出现问题但抢修后可安全运行、经常出现事故且影响安全运行、无法正常运行, 风险等级依次认定为1级~5级		
		运行条件	0.16	拦污清污设施拦污能力	0.50	拦污清污设施拦污能力达设计能力90%以上风险等级为1级, 每减少10%, 风险等级增加1级, 小于设计值50%以上, 均为5级		
				拦污清污设施完好程度	0.50	拦污清污设施完好风险等级为1级, 锈蚀或变形面积大于15%为5级, 其余内插		
		技术状况	0.18	管理制度规范化程度	0.28	具备完善的日常管理维护制度及应急预案、完善的日常管理维护制度、较完善的日常管理维护制度、初步的日常管理维护制度、无日常管理维护制度, 风险等级为1级~5级		
				管理手段信息化程度	0.30	基础硬件设施及监测-监控-调度-管理业务系统完善、基本完善、部分完善、初步具备、无, 风险等级为1级~5级		
				人员结构合理化程度	0.24	人力资源技术结构合理化程度高、较高、一般、较低、低, 风险等级为1级~5级		
		工程安全	0.25	工程位置	0.75	地基承载力状况	0.33	天然地基承载力完全满足设计要求、天然地基承载力基本满足设计要求、未满足但处理后满足设计要求、未满足且处理后基本满足设计要求、地基承载力不足, 风险等级依次为1级~5级
						站身稳定状况	0.67	泵站抗滑、抗浮及不均匀系数均满足设计要求, 风险等级为1级, 其中任一参数低于标准10%, 风险等级增加1, 若不同参数评估结果不同取最差值
防洪条件	0.25			防洪条件等级	1.00	参照泵站的防洪设计标准200年一遇、100年一遇、50年一遇、20年一遇和无确切水文设计标准, 风险等级依次为1级~5级		

表 6 泵站系统长期服役风险率综合评估结果

Tab. 6 Comprehensive evaluation result of long-term service risk rate of pumping station system

评价指标		袁桥泵站	赵楼泵站	试量泵站	后陈楼泵站	七里桥泵站(商丘机组)	七里桥泵站(夏邑机组)		
提水效率 A_1	设备质量 $R_{1,1}$	$R_{1,1,1}$	2	2	2	1	1	2	
		$R_{1,1,2}$	1	1	1	1	1	1	
		$R_{1,1,3}$	1	1	1	1	1	1	
	运行条件 $R_{1,2}$	$R_{1,2,1}$	1	1	1	1	1	1	
		$R_{1,2,2}$	1	1	1	1	1	1	
	技术状况 $R_{1,3}$	$R_{1,3,1}$	2	2	2	2	2	2	
		$R_{1,3,2}$	2	2	2	2	2	2	
		$R_{1,3,3}$	1	1	1	1	1	1	
		$R_{1,3,4}$	1	1	1	1	1	1	
	工程安全 A_2	工程安全 $R_{2,1}$	$R_{2,1,1}$	2	1	2	3	3	3
			$R_{2,1,2}$	1	1	1	1	1	1
			$R_{2,1,3}$	3	3	3	3	3	3
综合评估		1.61	1.54	1.61	1.33	1.33	1.67		

可以发现,在引江济淮工程(河南段)各泵站系统长期服役风险率等级相近的情况下,由于各泵站设计规模的差异,综合风险存在显著差别。袁桥、赵楼和试量梯级泵站因设计流量大(依次为 43、42 和 40 m^3/s),长期服役综合风险中等;后陈楼加压泵

站设计流量居中(为 22.9 m^3/s),长期服役综合风险较低;七里桥泵站(商丘机组)与七里桥泵站(夏邑机组)设计流量小(仅为 6.6 和 13.8 m^3/s),长期服役综合风险低。

表 7 引江济淮工程(河南段)泵站长期服役风险综合评估

Tab. 7 Comprehensive risk evaluation of long-term service of pumping station in Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach)

设计流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	(4, 5]	(3, 4]	(2, 3]	(1, 2]	(0, 1]
(30, 45]				袁桥泵站、赵楼泵站、试量泵站	
(20, 30]				后陈楼泵站	
(10, 20]				七里桥泵站(夏邑机组)	
(0, 10]				七里桥泵站(商丘机组)	

不仅如此,除七里桥泵站商丘机组、夏邑机组为并联结构外,引江济淮工程(河南段)其余泵站均为串联结构,若中间某一环节出现问题,其下游泵站均将受到影响,对工程系统功能发挥产生叠加风险。因此,有必要就泵站空间结构关系对引江济淮工程(河南段)长期服役综合风险的影响加以探讨。

依据南水北调中线工程对风险率等级及风险概值的描述,风险率等级(0, 1]、(1, 2]、(2, 3]、(3, 4]、(4, 5]对应的风险概值依次为(0.000 001, 0.001]、(0.001, 0.01]、(0.01, 0.1]、(0.1, 0.5]、(0.5, 0.99)^[17]。考虑到当风险率等级在(1, 3]时,风险概值随风险率等级增加近似成指数规律变化,这里根据引江济淮工程(河南段)各级泵站风险率等级曲线插值获得其风险概值,风险概值计算结果依次为 0.004、0.003、

0.004、0.002、0.002、0.005。考虑各泵站风险事件相互独立,认为若某一泵站出现问题,其下游串联泵站均无法正常运行但并联泵站不受影响,

据此结合泵站空间结构关系对其失效风险率加以修正。引江济淮工程(河南段)泵站风险概值修正结果见表 8。

以修正的风险率等级为基础,引江济淮工程(河南段)泵站长期服役风险综合评估结果见表 9。可以发现,相比于未考虑泵站间的空间结构关系影响的综合风险评估结果,除袁桥泵站、赵楼泵站位于上游受影响较小外,各泵站的风险率等级均增加为(2, 3]级,修正后试量泵站长期服役综合风险较高,袁桥泵站、赵楼泵站和后陈楼泵站风险中等。可见,引江济淮工程(河南段)泵站以串联关系为主的空间

结构显著增加了提水系统长期服役风险,在后续的风险控制及运行管理中需加以重视。

表 8 引江济淮工程(河南段)泵站风险概值修正

Tab. 8 Risk probability correction of pumping station in Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach)

泵站名称	修正后风险概值	风险率等级
袁桥泵站	0.004	(1, 2]
赵楼泵站	0.007	(1, 2]
试量泵站	0.011	(2, 3]
后陈楼泵站	0.013	(2, 3]
七里桥泵站(商丘机组)	0.015	(2, 3]
七里桥泵站(夏邑机组)	0.018	(2, 3]

表 9 引江济淮工程(河南段)泵站长期服役风险综合评估

Tab. 9 Comprehensive evaluation of long-term service risk of pumping station in Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach)

设计流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	风险率等级				
	(4, 5]	(3, 4]	(2, 3]	(1, 2]	(0, 1]
(30, 45]			试量泵站	袁桥泵站、赵楼泵站	
(20, 30]			后陈楼泵站		
(10, 20]			七里桥泵站 (夏邑机组)		
(0, 10]			七里桥泵站 (商丘机组)		

4 结论

从提水效率不足和工程安全受到威胁造成正常提水功能难以发挥的角度入手,运用故障树分析法对引江济淮工程(河南段)泵站系统的风险源进行识别,明确威胁泵站系统安全运行主要风险源及相互作用关系。

以归纳的长期服役风险要素类别为基础,从运行条件、设备质量、技术状况和工程安全多维度入手,采用层析分析法和专家咨询法确定泵站系统长期服役风险率的评价指标、指标权重和风险率等级赋分标准,建立引江济淮工程(河南段)泵站系统长期服役风险率评价方法。

基于收集的引江济淮工程(河南段)泵站工程特性、防洪设计参数等数据资料,对引江济淮工程(河南段)泵站系统长期服役风险率加以评估,结果表明:各级泵站长期服役风险率接近,均在(1, 2],处于风险较低水平。

但值得注意的是,综合风险受风险损失与风险

率共同影响。就风险损失而言,设计流量大的泵站失效后果比小泵站严重,引江济淮工程(河南段)上游泵站设计规模往往大于下游泵站,上游泵站风险损失更大;而就风险率而言,除七里桥泵站商丘机组、夏邑机组为并联关系外,其余均为串联关系,一旦上游泵站失效,下游泵站均受影响,泵站系统失效风险率沿程叠加。若以设计流量表征风险损失,探讨泵站设计规模和空间结构关系对泵站长期服役综合风险的影响,可以发现,在泵站设计规模沿程减小与串联结构特性共同作用下,试量泵站综合风险最高,等级为较高,袁桥、赵楼和后陈楼泵站次之,等级为中等,在后续的风险控制及运行管理中需加以重视。

参考文献:

- [1] 聂相田, 范天雨, 董浩, 等. 基于IOWA-云模型的长距离引水工程运行安全风险评价研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(2): 151-160. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.02.022.
- [2] 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: 以倒虹吸工程为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(3): 184-191. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0063.
- [3] 汤洪洁, 赵亚威. 跨流域长距离调水工程风险综合评价研究与应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 29-38. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0004.
- [4] 李扬, 田扬, 齐进, 等. 南水北调泵站工程实体问题分析判定[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(S1): 271-278. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.S1.051.
- [5] 孙序营. J泵站机电设备安装工程安全风险管理问题研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2021. DOI: 10.27262/d.cnki.gqda.2021.000610
- [6] 曹金山, 付明伟. 抽水泵站机电设备安装工程技术与管理风险分析[J]. 科技资讯, 2012(17): 167. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2012.17.128.
- [7] BHATTACHARJEE P, DEY V, MANDAL U K, et al. Quantitative risk assessment of submersible pump components using interval number-based Multinomial Logistic Regression (MLR) model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 226: 108703. DOI: 10.1016/j.ress.2022.108703.
- [8] BHATTACHARJEE P, HUSSAIN S A I, DEY V, et al. Failure mode and effects analysis for submersible pump component using proportionate risk assessment model: A case study in the power plant of Agartala[J]. International Journal of System Assur-

- ance Engineering and Management, 2023(14): 1778-1798. DOI: 10.1007/s13198-023-01981-6.
- [9] 姜蓓蕾, 刘恒, 耿雷华, 等. 层次分解法在南水北调东线工程风险因子识别中的运用[J]. 水利水电技术, 2009, 40(3): 65-67, 73. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2009.03.015.
- [10] LI X, LI Y, LIANG H, et al. Research on evaluation of urban pumping station engineering aging based on AHP and IAHP[A]. 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)[C]. Berkeley, 2017. DOI: 10.1109/ICISCE.2017.127
- [11] GERLACH S, UGARELLI R, THAMSEN P U. Case study on the functional performance of a Large wastewater pumping station[C]//16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Honolulu, 2016, 1-8.
- [12] MOEINI S S, BAI L, USHER J S, et al. Reliability study for pump stations in Louisville, KY[C]//IIE Annual Conference: Proceedings. Institute of Industrial and Systems Engineers. San Juan, 2013, 3355-3364.
- [13] 刘圣桥, 谷峪, 郑英. 调水工程泵站控制系统网络安全风险评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(S1): 403-406. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.S1.066.
- [14] 高玉琴, 汤宇强, 黄祚继, 等. 大中型泵站管理现代化评价指标体系及其应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 31-35, 39. DOI: 10.13393/J.CNKI.ISSN.1672-948x.2016.04.007.
- [15] 蒋一鸣, 陈世阳, 冯沧, 等. 城市污水泵站服务效能综合评价研究[J]. 给水排水, 2019, 55(9): 41-45. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2019.09.008.
- [16] 王发廷, 高里. 抽水泵站机电设备安装工程技术与管理风险分析[J]. 水利水电技术, 2003, 34(8): 15-17. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2003.08.005.
- [17] 耿雷华, 姜蓓蕾, 刘恒, 等. 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.
- [18] 孙双科, 柳海涛, 李振中, 等. 抽水蓄能电站侧式进出水口拦污栅断面的流速分布研究[J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1329-1335. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2007.11.016.
- [19] 高学平, 袁野, 刘殷竹, 等. 拦污栅结构对进出水口水力特性影响试验研究[J]. 水力发电学报, 2023, 42(2): 74-86. DOI: 10.11660/slfdx.20230208.
- [20] 骆辛磊, 高占义, 冯广志, 等. 泵站工程老化评估研究[J]. 水利学报, 1997(5): 43-49. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.1997.05.007.
- [21] 姜成启. 大中型泵站老化模糊层次综合评估体系研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2005.
- [22] 徐艳茹, 陈坚. 泵站工程老化评价浅析[J]. 中国农村水利水电, 2009(11): 92-94.
- [23] 杨露. 基于层次分析法的城市排水泵站老化评估系统研究与开发[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
- [24] 周琪慧, 方国华, 吴学文, 等. 基于遗传投影寻踪模型的泵站运行综合评价[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 985-989. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2015.05.034.
- [25] 姚林碧, 张仁田, 朱红耕, 等. 大型泵站选型合理性评价体系研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(3): 150-154. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.03150.
- [26] 方国华, 高玉琴, 谈为雄, 等. 水利工程管理现代化评价指标体系的构建[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(3): 39-44. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2013.03.009.
- [27] 贾梧桐, 韦楚来, 符向前. 泵站信息化的评价体系与指标的研究[J]. 水利信息化, 2016(3): 16-20, 39. DOI: 10.19364/j.1674-9405.2016.03.004.
- [28] 谭运坤, 关松, 赵娜. 水利工程管理现代化评价指标体系及其方法研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 36-39.
- [29] 冯峰, 倪广恒, 何宏谋. 基于逆向扩散和分层赋权的黄河堤防工程安全评价[J]. 水利学报, 2014, 45(9): 1048-1056. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.09.005.
- [30] 顾冲时, 苏怀智, 刘何稚. 大坝服役风险分析与管理研究述评[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 26-35. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170721.

Long-term service risk assessment of pumping station system in the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach)

JING Huan^{1,2}, WANG Yongzhi³, SONG Zhihong¹, WANG Hui³, FANG Jun³, WANG Yongqiang¹

(1. Hubei Key Laboratory of Water Resources & Eco-Environmental Sciences, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. Innovation Team for Basin Water Environmental Protection and Governance of Changjiang River Resources Commission, Wuhan 430010, China;

3. Henan Water Diversion Engineering Co., Ltd, Zhengzhou, 450003, China)

Abstract: The Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project is a significant strategic water resources allocation

and comprehensive utilization project across river basins and regions. In this project, the pumping station system is characterized by its large scale, complex structure, and wide range of water supply areas. During the long-term service duration, the system faces various uncertainties and risks. When the fault occurs, the normal operation of the system will be affected, which may cause abnormal water supply, and even lead to a series of ecological and social problems, or even casualties. Therefore, the long-term service risk assessment of the cross-basin long-distance water diversion engineering's pumping station system is crucial to adequately estimate various risks and understand the overall risk level, which is essential for the development of scientific and rational risk management measures.

Aiming at the long-term service risk assessment of the pumping station system of the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach), the fault tree analysis method is employed to identify the major long-term service risk sources and corresponding relationships that may impede the normal pumping function, considering the insufficient water lifting efficiency and safety threat to engineering. Based on the categorized long-term service risk factors, considering operational conditions, equipment quality, technological status, and engineering safety, a multidimensional approach is adopted, in which the analytic hierarchy process and expert consultation methods are utilized to determine the evaluation indicators, indicator weights, and risk rating criteria for the long-term service risks of the pumping station system. This establishes an assessment method for the long-term service risks of the pumping station system of the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach).

Based on the collected measurements consisting of engineering characteristics and design flood control parameters of the pumping station system in the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach), the developed long-term service risk assessment method is applied to evaluate the long-term service risk of the Yuanqiao pump station, Zhaolou pump station, Shiliang pump station, Houchenlou pressurized pump station and Qiliqiao pressurized pump station. The results indicate that the long-term service risk rates of the pumping stations are all greater than 1 less than or equal to 2. Among them, Houchenlou pressurized pumping station and Qiliqiao pressurized pumping station (Shangqiu unit) have slightly lower risk levels (around 1.33) due to a slightly higher proportion of backup units (around 33%). The risk rates of the other pumping stations are higher, ranging from 1.50 to 1.70. Overall, the risk levels remain relatively low.

However, it is worth noting that risk is the result of the combined effect of risk rates and failure consequences. Pumping stations with larger design discharge are bound to have more severe consequences in the event of failure compared to smaller ones. In the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach), the upstream pumping stations have significantly larger design scales than the downstream pumping stations. This characteristic increases the safety risks of the pumping station system. Furthermore, except for the Shangqiu unit and Xiayi unit at Qiliqiao pressurized pumping station, which are in parallel, all other pumping stations in the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach) are in series. Considering that the risk events at each pumping station are independent and once the upstream pump station fails, the downstream series-connected pumping stations will be unable to operate normally, while the parallel-connected pumping stations will remain unaffected. Taking this into account, the risk rate is revised. The results reveal that, except for Yuanqiao pumping station and Zhaolou pumping station, which are located upstream and are less affected, the risk levels of all the other pumping stations increase to a range greater than 2 and less than or equal to 3. Therefore, the spatial difference and structural relationship of the pump station design scale will significantly increase the service risk of the pumping station system, which should be paid more attention in the subsequent risk control and operation management.

Key words: Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan Reach); pumping station system; long-term service risk; index system; comprehensive evaluation