

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2021.0102

田洁, 靳春玲, 贡力, 等. 基于 IPSO-PP 模型的渡槽病害安全性评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(5): 982-989.
TIAN J, JIN C L, GONG L, et al. Safety evaluation of aqueduct diseases based on IPSO-PP method[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(5): 982-989. (in Chinese)

基于 IPSO-PP 模型的渡槽病害安全性评价

田洁¹, 靳春玲¹, 贡力¹, 李燕¹, 朱桂勇²

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 兰州 730070; 2. 水利部海河水利委员会引滦工程管理局, 河北 迁西 064309)

摘要:为科学合理评价西北地区调水工程中渡槽在运行期的安全状态,分析渡槽在运行期间影响安全运行的各种病害问题,结合西北地区渡槽在运营期普遍存在的病害问题,选取 13 个渡槽病害评价指标建立渡槽病害安全性评价指标体系,采用改进粒子群优化算法(improved particle swarm optimization, IPSO)优化投影寻踪模型(projection pursuit, PP)最佳投影方向,确定渡槽各评价指标的权重,并结合逻辑斯蒂曲线函数,识别各渡槽病害评价等级。运用该优化模型以“引大入秦”工程中 6 个典型的渡槽为研究对象进行实证分析,得到 2、4、14 和 15 号渡槽病害评价等级为 B 级,5 号和 6 号渡槽病害等级为 C 级。评价结果切合工程实际情况,与 PSO-PP 和 DE-PP 模型的评价结果相吻合,并且该模型优化效果高于后两者,表明 IPSO-PP 评价模型及方法能确保评价结果的可靠性和客观性,可用于渡槽病害安全性评价的研究。

关键词:投影寻踪;渡槽;病害;指标体系;改进粒子群算法

中图分类号:TV672.3 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



我国所处的地理位置以及天然降水时空不均,使得我国水资源在空间和时间上分布不均衡,成为制约经济发展和限制人民生活水平提高的重要因素。为此,我国采用跨流域引调水的方法重新分配水资源,以解决缺水地区的用水需求,促进社会经济的协调发展^[1]。其中,渡槽作为一种交叉式水工建筑物,在长距离引水工程中发挥着重要的作用。我国西部地区地质环境复杂、气候条件恶劣,以及在长期运行中受到各种不良因素的影响,导致大部分已建的渡槽病害问题十分突出,部分渡槽安全运行也受到威胁。因此,有效合理地进行渡槽病害安全性评价研究,使引水工程长久高效地运行,具有极其重要的意义^[2]。

目前,已有不少的专家学者在渡槽安全评价指标体系及安全保障体系等方面做了深入研究:夏富洲等^[3]应用不确定型层次分析法对渡槽结构

进行状态评估,提出了基于变权理论和模糊综合评估的渡槽可靠性评估方法;张文剑等^[4]从功能性角度构建了渡槽的评价指标体系,采用层次分析法和统计学方法针对在役渡槽的健康状态构建了模糊综合评价模型;郭瑞等^[5]采用改进的模糊综合评价法对渡槽风险进行评价;刘尚坤^[6]从渡槽的适用性、耐久性、安全性等方面构建适用于钢筋混凝土渡槽的指标评价模型,并采用 AHP-模糊综合评价法对渡槽结构状态进行综合评价;王梦雅等^[7]提出了一种可拓评价方法,定性和定量地对渡槽老化程度进行了研究;潘洪科等^[8]结合检测信息进行三维数值模拟,从引起结构病害的深层次因素对渡槽进行综合分析并提出有针对性的治理方案;Francisco 等^[9]通过极限分析理论和蒙特卡罗方法对渡槽结构破坏进行了风险评价,分析了阿尔罕布拉渡槽的材料与结构的稳定性,并

收稿日期:2020-05-11 修回日期:2020-12-18 网络出版时间:2020-12-30

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20201230.1606.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(519699011;51669010)

作者简介:田洁(1996—),女,甘肃定西人,主要从事水利工程安全与管理研究。E-mail:tianjiejiyi@foxmail.com

通信作者:靳春玲(1976—),女,江苏丹阳人,教授,主要从事水利工程安全与管理研究。E-mail:522719061@qq.com

提出了优化方法;尚峰等^[10]针对大型灌区中输水渡槽普遍出现的病害现象,运用有限元软件对渡槽工程进行了多角度科学的评价与病害分析,并提出了有针对性的加固方案。随着科技的进步,计算机智能算法,例如差分进化算法^[11](differential evolution algorithm, DE)、BP 神经网络、投影寻踪(projection pursuit, PP)^[12-13]、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)^[14]等一些人工智能方法已应用于许多领域并且相对成熟,而在渡槽病害安全性评价领域研究较少。

本文借鉴其他相关领域的评价方法和理论,在既有渡槽病害评价研究的基础上结合相关资料,提出针对西北地区渡槽病害评价指标体系,利用投影寻踪模型进行安全性评价,在优化投影寻踪模型的最佳投影方向上采用改进的粒子群优化算法,计算渡槽病害各评价指标的权重,结合逻辑斯蒂曲线函数,构建基于 IPSO-PP 的渡槽病害安全性评价模型,并对评价结果进行验证和对比,以确定其合理性。

1 评价模型的构建

投影寻踪^[12-13]是一种降维处理数据的统计方法,具有分析数据的能力,可以把高维数据投影到低维空间,自动找出数据内在的规律,解决非线性问题和超高维问题,在安全评价方面具有一定的优势。采用粒子群算法^[14]优化 PP 模型最佳投影方向,PSO 是一种随机搜索算法,存在早熟收敛、维数灾难、易于陷入局部极值等问题。为了避免这些问题,引入惯性权重系数法和加速因子动态调整法改进原始粒子群算法,利用改进的粒子群优化算法寻找 PP 模型的最佳投影方向时,更加准确高效^[15-18]。

1.1 投影寻踪模型

(1)设评价指标值为 C_{ij}^* ($i=1,2,\dots,n;j=1,2,\dots,m$)及对应的经验安全等级为 Y_i ($i=1,2,\dots,n$),其中 n 为评价对象数, m 为评价指标数;利用式(1)和式(2)将 C_{ij}^* 数据标准化处理为 C_{ij} ,从而消除量纲的影响。

$$C_{ij} = \frac{(C_{ij}^* - C_{j\min})}{(C_{j\max} - C_{j\min})} \quad (1)$$

$$C_{ij} = \frac{(C_{j\max} - C_{ij}^*)}{(C_{j\max} - C_{j\min})} \quad (2)$$

式中: $C_{j\max}$ 、 $C_{j\min}$ 分别为第 j 个评价指标的最大值、

最小值。

(2)将 C_{ij} 的 m 维数据投影到 $c=(c_1, c_2, \dots, c_m)$ 上,得到投影方向上的投影值

$$Z_i = \sum_{j=1}^m c_j C_{ij} \quad (i=1,2,\dots,n;j=1,2,\dots,m) \quad (3)$$

(3)构建投影目标函数

$$Q(c) = S(c)D(c) \quad (4)$$

$$S(c) = \left[\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z}_i)^2 / n \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$D(c) = \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^n (R - r_{il}) f(R - r_{il}) \quad (6)$$

式中: \bar{Z}_i 为 c 上的平均投影值; $r_{il} = |Z_i - Z_l|$ 为样本距离; R 为密度窗宽, $\max(r_{il}) + m/2 \leq R \leq 2m$; $f(R - r_{il})$ 为单位阶跃函数,取值为

$$f(R - r_{il}) = \begin{cases} 1, & (R > r_{il}) \\ 0, & (R \leq r_{il}) \end{cases} \quad (7)$$

(4)优化投影指标函数

$$\max Q(c) = S(c)D(c) \quad (8)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^m c_j^2 = 1 \quad (9)$$

1.2 改进粒子群算法

(1)设在一个 D 维的搜索空间中,有 n 个个体组成的种群 $\mathbf{X}=(X_1, X_2, \dots, X_n)$,记第 i 个个体的速度为 $\mathbf{T}=(T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{in})^T$,个体极值为 $\mathbf{P}=(P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})^T$,种群全局的极值为 $\mathbf{P}=(P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gD})^T$ 。

(2)个体通过动态跟踪个体极值和全局极值,进行迭代更新自身的速度和位置

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + s_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + s_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (10)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (11)$$

式中: $d=1,2,\dots,D$; $i=1,2,\dots,n$; k 为当前迭代次数; ω 为惯性权重系数; s_1 为自我学习因子, s_2 为社会学习因子; r_1 和 r_2 为均匀分布于 $[0,1]$ 的随机数。

(3)为了更好地平衡粒子群算法的搜索能力,采用系数法改进惯性权重系数

$$\omega(k+1) = \eta \omega(k) \quad (12)$$

式中: η 为惯性权重衰减系数。

(4)利用加速因子动态调整法改进 PSO 算法中的加速因子 s_1 和 s_2 ,扩大进化初期的搜索空间,在后期寻优过程中更高效准确

$$\begin{cases} s_1 = 2.5 + 2(k/T)^2 - 2(2k/T) \\ s_2 = 3 - s_1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: T 为最大迭代次数。

1.3 基于 IPSO-PP 模型的渡槽病害安全性评价

根据建立的渡槽病害安全评价指标体系和设计的评价等级,设两者之间具有一定的对应关系,即不同的指标值对应不同的渡槽病害等级,并且这种对应的关系是复杂的、非线性的。采用 IPSO-PP 模型获得渡槽病害影响因素的最佳投影方向 c^* ,计算投影值 Z_i^* ,利用式(14)逻辑斯蒂曲线(LCF)方程求解

渡槽病害等级,对渡槽病害安全性作出相应的评价^[19],具体过程见图 1。

$$Y_i^* = N / (1 + e^{a_1 - a_2 Z_i^*}) \quad (14)$$

式中: Y_i^* 为样本 i 渡槽病害评价等级的计算值; N 为渡槽病害评价等级数; a_1 、 a_2 为待定参数,由最小化式(15)确定。

$$\min F(a_1, a_2) = \sum_{i=1}^n (Y_i^* - Y_i)^2 \quad (15)$$

对于式(15)的优化,同样采用改进粒子群算法。

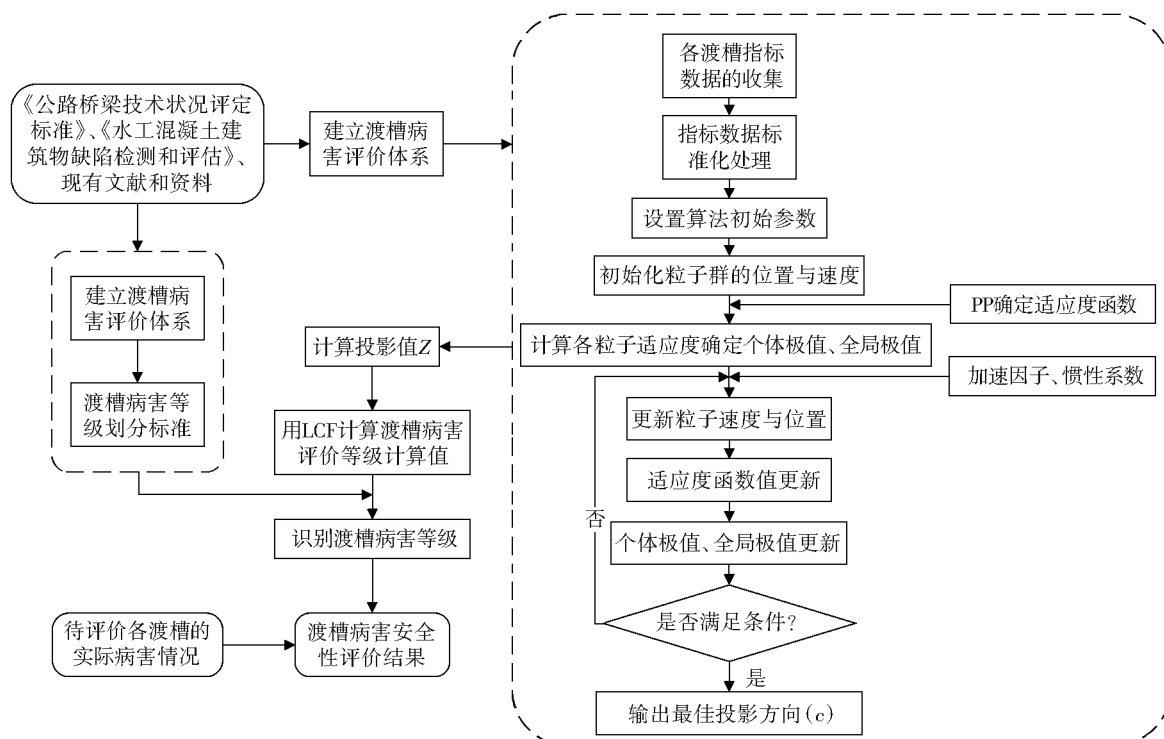


图 1 渡槽病害安全性评价流程

Fig. 1 Flow chart of aqueduct disease safety evaluation

2 西北地区渡槽病害安全性评价指标体系

西北地区具有相对特殊的地理特征和气候特点,受冻融交替环境因素的影响,渡槽结构及基础遭到严重的破坏,加之地面灌溉造成土地大量盐分的滞留和堆聚,对渡槽混凝土结构侵蚀严重,形成了一系列的病害问题。这些病害问题不仅威胁渡槽结构的安全而且严重影响了输水效率。基于《公路桥梁技术状况评定标准》《水工混凝土建筑物缺陷检测和评估》以及现有的文献和资料^[20-25],针对西北地区渡槽在运营期耐久性破坏表现出的病害问题,从材料劣化、表观破损、结构变形和渗漏水等 4 个方面构建渡槽病害安全性评价指标体系,并给出各指标的判定标准,见表 1。结合国内外渡槽病害等级划分研究,将渡槽病害安全评价等级划分为 A、B、C、D 等 4 个等级,其评价内容见表 2。

3 应用实例

3.1 指标数据收集

“引大入秦”工程是我国一项规模宏大的跨双流域调水工程,西起天祝县天堂寺,东至永登县秦王川,跨甘肃和青海两省。该工程东二干渠从总干渠香炉山总分水闸分流,全长 54.14 km,设计引水流量 18 m³/s,加大流量 21.5 m³/s,控制灌溉面积 2.47 万 hm²。东二干渠已建成运行多年,受所处地区地貌和气候特点的影响,该线大部分渡槽出现许多病害问题,选取位于东二干渠段的小沙沟渡槽(2 号)、林坪沟渡槽(4 号)、四湾沟渡槽(5 号)、庄浪河渡槽(6 号)、大干沙沟渡槽(14 号)和邓家嘴渡槽(15 号)等 6 个有病害渡槽进行安全评价,其指标数据见表 3。

表 1 西北地区渡槽病害评价指标体系及判定标准

Tab. 1 Evaluation index system and judgment standards of aqueduct diseases in northwest China

一级指标	二级指标	安全性等级			
		A	B	C	D
材料劣化 B_1	混凝土强度 I_1 (实际强度/设计强度)	≥ 1.00	$\geq 0.95 \sim < 1.00$	$\geq 0.85 \sim < 0.95$	< 0.85
	钢筋截面锈蚀率 $I_2/\%$		< 5	5~20	> 20
	混凝土碳化系数 I_3 (碳化深度/保护层厚)	< 0.40	$\geq 0.40 \sim < 0.70$	$\geq 0.70 \sim 1.00$	> 1.00
外观破损 B_2	钢筋保护层厚度 I_4 (实际厚度/设计厚度)	≥ 1.00	$\geq 0.95 \sim < 1.00$	$\geq 0.85 \sim < 0.95$	< 0.85
	裂缝宽度 I_5/mm	≤ 0.10	$> 0.10 \sim \leq 0.20$	$> 0.20 \sim \leq 0.40$	> 0.40
	裂缝深 $I_6/\text{结构厚度}$	< 0.25	$\geq 0.25 \sim < 0.30$	$\geq 0.30 \sim 0.60$	> 0.60
	混凝土剥蚀厚度 I_7/cm		< 1	1~5	> 5
	水流冲蚀 I_8 (水流冲蚀面积/总面积)	< 0.25	$\geq 0.25 \sim < 0.30$	$\geq 0.30 \sim 0.50$	> 0.50
结构变形 B_3	槽身挠曲变形 I_9 (实测挠度/允许挠度)	< 0.20	$\geq 0.20 \sim < 0.50$	$\geq 0.50 \sim 1.00$	> 1.00
	止水结构破损 I_{10}	完好	轻微破损	止水破损	破损严重
渗漏水 B_4	槽身漏水 I_{11}		浸渗	滴漏	涌流
	底板漏水 I_{12}		浸渗	滴漏	涌流
	冻融破坏 I_{13}	无冻融迹象	有冻融迹象	有破坏现象	破坏显著

表 2 渡槽病害等级评价及分级阈值

Tab. 2 Grade evaluation and grade threshold of aqueduct diseases

病害等级	分级阈值	评价内容
A	[0, 1.25)	无影响正常运行的缺陷,按常规维修保养即可保证正常运行
B	[1.25, 2.50)	结构存在轻微损坏,经局部维修后可达到正常运行
C	[2.50, 3.75)	结构存在较严重损坏,经大修后才能达到正常运行
D	[3.75, 5.00)	结构存在严重破坏,需报废重建或降低标准运用

表 3 东二干渠各渡槽评价指标数据

Tab. 3 Evaluation index data of each aqueduct in Donger main canal

渡槽 编号	指标												
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{12}	I_{13}
2号	0.97	2	0.1	0.99	0.13	0.02	0.4	0.03	0.03	止水破损	浸渗	浸渗	有冻融迹象
4号	0.98	1	0.2	0.97	0.11	0.06	1.2	0.05	0.02	轻微破损	浸渗	浸渗	有冻融迹象
5号	0.90	3	0.3	0.97	0.20	0.10	2.0	0.07	0.10	破损严重	浸渗	滴漏	有破坏现象
6号	0.85	20	0.9	0.85	0.40	0.50	7.0	0.30	0.30	破损严重	滴漏	滴漏	有破坏现象
14号	0.96	4	0.2	0.98	0.10	0.03	0.6	0.04	0.04	轻微破损	浸渗	浸渗	有冻融迹象
15号	0.95	7	0.4	0.96	0.36	0.20	4.0	0.09	0.05	止水破损	浸渗	浸渗	有冻融迹象

3.2 IPSO-PP 模型求解

将表 3 中的指标数据进行标准化处理,得表 4 所示的东二干渠各渡槽评价指标标准化矩阵。

设置各优化算法参数。IPSO 优化算法参数:惯性权重系数 ω 为 0.729;惯性权重衰减系数 η 为 0.99;进化最大迭代次数 T 为 1 000;群体规模 N 为 100;个体速度限制为 $[-0.5, 0.5]$;个体初始速度为 0。PSO 优化算法参数:惯性权重系数 ω 为 0.729;加速因子 s_1 和 s_2 均为 2.0;进化最大迭代次数 T 为 1 000;群体规模 N 为 100;个体速度限

制为 $[-0.5, 0.5]$;个体初始速度为 0。DE 优化算法参数:上下限尺度因子分别为 0.8, 0.2;交叉率 CR 为 0.2;进化最大迭代次数 T 为 1 000;群体规模 N 为 100;各算法搜索空间均为 $[0, 1]$,待优化维数 13 维。

依据 IPSO-PP 渡槽病害安全性评价模型优化步骤,运用 MATLAB 软件,在各渡槽评价指标标准化矩阵的基础上计算 IPSO 优化投影寻踪模型最佳投影方向、投影值及渡槽病害评价等级的计算值。其中病害等级的计算值越大,说明该渡槽的病害越严重越危险。

表 4 东二干渠各渡槽评价指标标准化矩阵

Tab. 4 Standardization matrix of evaluation indexes for each aqueduct of Donger main canal

1 级指标	2 级指标	2 号	4 号	5 号	6 号	14 号	15 号
材料劣化 B_1	I_1	0.076 9	0	0.615 4	1.000 0	0.153 8	0.230 8
	I_2	0.052 6	0	0.105 3	1.000 0	0.157 9	0.315 8
	I_3	0	0.125 0	0.250 0	1.000 0	0.125 0	0.375 0
表观破损 B_2	I_4	0	0.142 9	0.142 9	1.000 0	0.071 4	0.214 3
	I_5	0.100 0	0.033 3	0.333 3	1.000 0	0.000 0	0.866 7
	I_6	0	0.083 3	0.166 7	1.000 0	0.020 8	0.375 0
	I_7	0	0.121 2	0.242 4	1.000 0	0.030 3	0.545 5
	I_8	0	0.074 1	0.148 1	1.000 0	0.037 0	0.222 2
结构变形 B_3	I_9	0.035 7	0	0.285 7	1.000 0	0.071 4	0.107 1
	I_{10}	0.575 0	0.100 0	1.000 0	0.725 0	0	0.475 0
渗漏水 B_4	I_{11}	0.250 0	0.403 8	0.615 4	1.000 0	0.173 1	0
	I_{12}	0.089 3	0.160 7	0.821 4	1.000 0	0	0.125 0
	I_{13}	0	0.142 9	0.857 1	1.000 0	0.085 7	0.057 1

3.3 评价结果分析

由表 5 可知,各算法优化 PP 模型迭代输出的最佳投影方向,其中各指标投影方向值的大小表明该指标对渡槽病害等级影响程度。从最佳投影方向来看,槽身挠曲变形(I_9)、裂缝宽度(I_5)、混凝土强度(I_1)及混凝土碳化(I_3)等指标对渡槽的安全性影响程度较大。

由表 6 可知,3 种方法得出的评价结果基本相符。其中,2、4、14 和 15 号渡槽病害计算等级为 B 级,5 号和 6 号渡槽病害计算等级为 C 级。工程实际检测结果:2、4、14 和 15 号渡槽均存在结构轻微破损、止水带老化破裂、填料局部脱落、渗漏水等问题,需要经局部维修后可达到正常运行;5 号和 6 号渡槽结构存在严重损坏,需要经过大修后才能达到正常运行,其中 6 号庄浪河渡槽病害问题更为严重,冻融破坏显著,在通水运行期间出现明显的漏水、结构裂缝和混凝土剥离等破坏现象,严重侵蚀钢筋,使得钢筋的支撑能力有所减损。对照渡槽病害等级评价的内容,可将 2、4、14 和 15 号渡槽的实际病害等级

划分为 B 级,5 号和 6 号渡槽的实际病害等级划分为 C 级,即其评价情况与实际情况相吻合,表明该方法具有一定的科学性和合理性。

表 5 各种算法投影寻踪模型优化结果

Tab. 5 Projection pursuit model optimization results of various algorithms

优化结果	IPSO-PP 模型	PSO-PP 模型	DE-PP 模型	
c_1	0.384 3	0.264 0	0.395 9	
c_2	0.355 0	0.311 1	0.459 1	
c_3	0.142 2	0.269 2	0.273 6	
c_4	0.310 2	0.316 5	0.275 5	
c_5	0.384 4	0.237 5	0.163 8	
c_6	0.223 9	0.237 2	0.136 5	
最佳投影 方向 c	c_7	0.076 8	0.193 3	0.365 5
	c_8	0.275 2	0.145 4	0.258 7
	c_9	0.386 1	0.514 1	0.275 4
	c_{10}	0.160 4	0.177 7	0.273 6
	c_{11}	0.009 3	0.041 6	0.095 3
	c_{12}	0.254 0	0.323 6	0.177 2
	c_{13}	0.301 5	0.295 7	0.210 7
适应度函数值 $Q(c)$	1.593 6	1.455 2	1.590 2	

表 6 投影值及病害等级

Tab. 6 Projection values and disease grades

渡槽 编号	IPSO-PP 模型			PSO-PP 模型			DE-PP 模型		
	投影值 Z_i	病害等级		投影值 Z_i	病害等级		投影值 Z_i	病害等级	
		计算值	等级		计算值	等级		计算值	等级
2 号	0.217 7	1.808 5	B	0.220 3	1.870 5	B	0.277 8	1.795 9	B
4 号	0.226 9	1.815 1	B	0.269 6	1.899 2	B	0.278 3	1.796 2	B
5 号	1.322 0	2.583 1	C	1.364 2	2.525 5	C	1.341 2	2.604 1	C
6 号	3.219 1	3.507 0	C	3.278 0	3.358 4	C	3.285 9	3.578 3	C
14 号	0.227 3	1.815 4	B	0.231 4	1.877 0	B	0.265 0	1.786 0	B
15 号	1.0073	2.370 3	B	0.957 3	2.298 4	B	1.0417	2.385 3	B

针对止水材料老化、结构轻微破损等病害问题的渡槽,及时更换老化材料并对破损部位进行局部修理使其达到正常运行;针对冻融破坏显著,在通水运行期间出现明显的漏水、结构裂缝和混凝土剥离等破坏现象的渡槽,对其冻蚀、露筋严重段槽身进行主要修改,加强渡槽槽身材料的防渗耐磨性能,使其长久高效地运行。

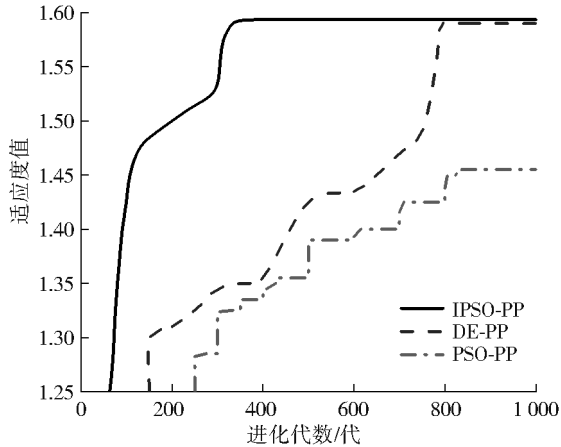


图2 3种算法模型求解进化过程

Fig. 2 Schematic diagram of evolutionary process of three algorithm models

由图2所示的3种算法的进化过程可知,IPSO算法的优化效果明显优于PSO算法和DE算法,其寻优能力强且具有较好的求解精度,优化算法相对稳定。DE算法相对于PSO算法优化效果更好,PSO算法的寻优能力弱,且不太稳定。

4 结论

(1)针对西北地区调水工程中渡槽在运行期普遍出现的病害问题,充分考虑其复杂的地理特征和气候特点,从渡槽材料劣化、外观破损、结构变形和渗漏水等4个病害方面建立了一套完整的西北地区渡槽病害安全性评价指标体系。

(2)引入IPSO-PP智能优化算法模型确定指标的权重,运用逻辑斯蒂曲线函数建立数学模型,对“引大入秦”工程中东二干渠6个典型渡槽进行安全性评价并识别出各渡槽病害安全性评价等级,得到2、4、14和15号渡槽病害评价等级为B级,5号和6号渡槽病害评价等级为C级,且评价结果与实际情况相吻合。

(3)在实例中,将IPSO-PP模型与PSO-PP和DE-PP两种模型比较,评价结果基本一致,并且优化效果高于后两者,表明改进的粒子群算法在求解精度、极值寻优能力和算法稳定性方面具有明显的优势,也验证了IPSO-PP评价模型及方法能确保评

价结果的可靠性和客观性,用于渡槽病害安全性评价研究是有效可行的。

参考文献(References):

- [1] 靳春玲,贡力.基于PSR模型的西部干旱地区引水明渠安全评价研究[J].城市道桥与防洪,2015(10):168-170,204,22.(JIN C L,GONH L. Evaluation and study on safety of diversion canal in western dry and cold area based on pressure-state-response model[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2015(10): 168-170, 204, 22. (in Chinese)) DOI: 10. 16799/j. cnki. csdqyfh. 2015. 10. 051.
- [2] 祁英弟,靳春玲,贡力.基于ANP-灰色关联TOPSIS法的引水隧洞病害安全性评价[J].水资源与水工程学报,2019,30(1):143-149.(QI Y D,JIN C L,GONG L. Safety evaluation of railway tunnel surrounding rock based on ANP-KL-TOPSIS method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(1): 143-149. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2019. 01. 22.
- [3] 夏富洲,陈栋梁,刘富奎.基于模糊变权法的渡槽可靠性评估的研究[J].中国农村水利水电,2012(9):96-100.(XIA F Z,CHEN D L,LIU F K. Research on reliability evaluation of aqueduct based on fuzzy variable weight method[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(9): 96-100. (in Chinese)) DOI:CNKI: SUN: ZNSD. 0. 2012-09-032
- [4] 张文剑,杜应吉,张岩.渡槽健康状态的模糊综合评价[J].灌溉排水学报,2018,37(6):86-91,116.(ZHANG W J,DU Y J,ZHANG Y. Fuzzy comprehensive evaluation of aqueduct health state[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(6): 86-91, 116. (in Chinese)) DOI:10. 13522/j. cnki. ggps. 2017. 0374.
- [5] 郭瑞,李同春,宁昕扬,等.改进的模糊综合评价法在渡槽风险评价中的应用[J].水利水电技术,2018,49(4):109-116.(GUO R,LI T C,NING X Y, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method in risk assessment of aqueduct[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(4): 109-116. (in Chinese)) DOI:10. 13928/j. cnki. wrahe. 2018. 04. 016.
- [6] 刘尚坤.钢筋混凝土渡槽结构健康诊断与安全评估研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2015.(LIU S K. Research on health diagnosis and safety assessment of reinforced concrete aqueduct structure [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015. (in Chinese))
- [7] 王梦雅,夏富洲.基于可拓理论的渡槽结构老化评价[J].武汉大学学报(工学版),2014,47(2):211-216,254.(WANG M Y,XIA F Z. Evaluation of aqueduct structure aging based on extension theory[J]. Engi-

- neering Journal of Wuhan University, 2014, 47(2): 211-216, 254. (in Chinese)
- [8] 潘洪科,李业学,王爱勤. 渡槽工程的病害分析与防治研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2015, 45(4): 493-498. (PAN H K, LI Y X, WANG A Q. Disease analysis and prevention of aqueduct engineering[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2015, 45(4): 493-498. (in Chinese)) DOI: 10. 15991/j. cnki. 411100. 2015. 04. 020.
- [9] FRANCISCO J S, RAFAEL B. Historical and probabilistic structural analysis of the royal ditch aqueduct in the Alhambra (Granada)[J]. Journal of Cultural Heritage, 2014, 15(5): 499-510. DOI: 10. 1016/j. culher. 2013. 11. 010.
- [10] 尚峰,祝彦知,纠永志. 在役钢筋混凝土渡槽安全评价与病害处理[J]. 水利水电技术, 2018, 49(12): 208-214. (SHANG F, ZHU Y Z, JIU Y Z. Safety evaluation and disease treatment of reinforced concrete aqueduct in service[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(12): 208-214. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2018. 12. 028.
- [11] 涂莹,舒丹丹,张银行. 动态差分进化算法在梯级水库优化问题中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 194-197. (TU Y, SHU D D, ZHANG Y H. Dynamic differential evolution algorithm and its application in optimal operation of cascade reservoirs[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 194-197. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2014. 04. 043.
- [12] 祁英弟,靳春玲,贡力. 基于 GSA-PP 模型的寒区引水隧洞结构健康状态评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(12): 3078-3085. (QI Y D, JIN C L, GONH L. Evaluation of structural health status of diversion tunnel in cold region based on GSA-PP model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(12): 3078-3085. (in Chinese)) DOI: 10. 19713/j. cnki. 43-1423/u. 2019. 12. 022.
- [13] 马峰,王千,蔺文静,等. 基于指标体系投影寻踪模型的水资源承载力评价:以石家庄为例[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 62-66. (MA F, WANG Q, LIN W J, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on index system with parameter projection pursuit model: A case study in Shijiazhuang[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(3): 62-66. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2012. 03062.
- [14] FARSHAD R, HAMID R S, ALI M, et al. F-MOPSO: an alternative multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use management[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2017, 14: 1-18. DOI: 10. 1016/j. jher. 2016. 05. 007.
- [15] 白栩嘉,苏敏杰. 基于改进 PSO-PP 模型的区域水资源利用效率评价[J]. 人民长江, 2016, 47(23): 38-43. (BAI X J, SU M J. Evaluation of regional water resource utilization efficiency based on improved PSO-PP model[J]. Yangtze River, 2016, 47(23): 38-43. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2016. 23. 009.
- [16] 闻昕,王志,方国华,等. 基于改进多目标粒子群算法的南水北调东线江苏段工程联合优化调度研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 110-116. (WEN X, WANG Z, FANG G H, et al. Study on the joint optimization scheduling of Jiangsu section of the East Line of South-to-North Water Transfer Project based on the improved multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(3): 110-116. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2017. 03. 21.
- [17] RAINER S, KENNETH P. Differential evolution: A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359. DOI: 10. 1023/A: 1008202821328.
- [18] 丁根宏,曹文秀. 改进粒子群算法在水库优化调度中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 118-121. (DING G H, CAO W X. Application of improved particle swarm optimization algorithm in reservoir optimal operation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 118-121. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2014. 01118.
- [19] 徐飞,徐卫亚,温森,等. 基于 PSO-PP 的围岩稳定性评价[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3651-3655. (XU F, XU W Y, WEN S, et al. Projection pursuit based on particle swarm optimization for evaluation of surrounding rock stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3651-3655. (in Chinese)) DOI: 10. 16285/j. rsm. 2010. 11. 036.
- [20] 孟祥敏,孙明权. 钢筋混凝土渡槽病害及老化问题分析研究[J]. 人民黄河, 1995(10): 30-34. (MENG X M, SUN M Q. Analysis and research on the diseases and aging of reinforced concrete aqueduct[J]. Yellow River, 1995(10): 30-34. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN;RMHH. 0. 1995-10-009.
- [21] 宋轩,刘恒,耿雷华,等. 南水北调中线工程交叉建筑物风险识别[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(4): 13-15. (SONG X, LIU H, GENG L H, et al. Risk identification of crossing buildings in the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(4): 13-15. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1683. 2009. 04. 004.

- [22] 朱怀. 基于 AHP-熵权法的渡槽健康状态模糊综合评价研究[D]. 长沙:湖南大学,2014. (ZHU H. Fuzzy comprehensive evaluation of aqueduct health state based on AHP entropy weight method[D]. Changsha:Hunan University,2014. (in Chinese))
- [23] 陈广洲,汪家权,解华明. 粒子群算法在投影寻踪模型优化求解中的应用[J]. 计算机仿真,2008(8):159-161,165. (CHEN G Z,WANG J Q,XIE H M. Application of particle swarm optimization in the optimization of projection pursuit model[J]. Computer Simulation,2008(8):159-161,165. (in Chinese)) DOI:10.3969/j. issn. 1006-9348. 2008. 08. 041.
- [24] 顾培英,王岚岚,邓昌,等. 我国渡槽结构典型破坏特征研究综述[J]. 水利水电科技进展,2017,37(5):1-8. (GU P Y,WANG L L,DENG C, et al. Review of typical failure characteristics of aqueduct structures in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (5): 1-8. (in Chinese)) DOI:10.3880/j. issn. 1006-7647. 2017. 05. 001.
- [25] 中国水利学会. 渡槽技术管理规程: T/CHES 0037-2020[S]. 北京:中国水利水电出版社 2020. (Chinese Hydraulic Engineering Society. Code for technical management of aqueduct: T/CHES 0037-2020[S]. Beijing, China Water&Power Press,2020. (in chinese))

Safety evaluation of aqueduct diseases based on IPSO-PP method

TIAN Jie¹, JIN Chunling¹, GONG Li¹, LI Yan¹, ZHU Guiyong²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. The Administration of the Luanhe Diversion Project, Haihe River Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Qianxi 064309, China)

Abstract: To scientifically and reasonably evaluate the safety status of an aqueduct in the water diversion project operation period in northwest China, it is of great significance to put forward an objective and reliable aqueduct disease safety evaluation system and method by analyzing the influence of geology, complex environment, climate conditions and various adverse factors during the operation period of an aqueduct.

On the basis of the existing aqueduct disease evaluation research, combined with the common disease problems of aqueducts in the operation period, the evaluation index system of aqueduct disease is put forward in northwest China. Thirteen aqueduct disease evaluation indexes are constructed from four aspects of material deterioration, apparent damage, structural deformation and leakage, and the judgment standards of each index are given. The safety evaluation grade of aqueduct disease is divided into four grades: A, B, C, and D. Grade A indicates that the structure has no defects that affect normal operation, and normal operation can be ensured by routine maintenance. Grade B indicates that the structure is slightly damaged and can reach normal operation after partial maintenance. Grade C indicates that the structure is seriously damaged, and the normal operation can only be achieved after overhaul. Grade D indicates that the structure is seriously damaged and needs to be scrapped, rebuilt, or reduced to standard. The projection pursuit model is used for safety evaluation, and the improved particle swarm optimization (IPSO) algorithm is used to optimize the best projection direction of the projection pursuit (PP) model. The weight of each evaluation index of aqueduct disease is calculated. Combined with the logistic curve function, the aqueduct disease safety evaluation model based on IPSO-PP is constructed, and the evaluation grade of each aqueduct disease is identified.

The optimization model is used for empirical analysis by taking six typical aqueducts as the research objects. According to the value of projection direction of each index, the sensitivity factors affecting aqueduct safety, such as deflection deformation of aqueduct body, crack width, concrete strength, and concrete carbonation, are identified. The disease evaluation grade of aqueducts No. 2, No. 4, No. 14 and No. 15 are grade B. The disease grade of No. 5 and No. 6 aqueduct are grade C, and the evaluation results are consistent with the actual situation, which shows that the method is scientific and reasonable. The results show that IPSO is better than Particle Swarm Optimization Algorithm and Differential Evolution Algorithm, and it has strong optimization ability and better solution accuracy, and the optimization algorithm is relatively stable.

Given the common diseases of aqueducts in the operation period of water diversion projects in northwest China, a complete set of safety evaluation index system of aqueduct diseases is established from four aspects of aqueduct material deterioration, apparent damage, structural deformation and water leakage, fully considering its complex geographical and climatic characteristics. Referring to the evaluation methods and theories in other related fields, the IPSO-PP aqueduct safety evaluation model based on an intelligent optimization algorithm is constructed. The established safety evaluation index system of aqueduct disease in northwest China and IPSO-PP aqueduct safety evaluation model is introduced into an example to obtain the evaluation results which are consistent with the actual situation of the project and the analysis and comparison model. It shows that the proposed safety evaluation index system and evaluation method for an aqueduct in northwest China can ensure the reliability and objectivity of the evaluation results. It provides a reference for the safety evaluation of aqueduct diseases in northwest China.

Key words: projection pursuit; aqueduct; disease; index system; improved particle swarm optimization