

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222360

长距离加压重力流输水工程水锤防护研究

王开朗, 张 健, 姚天语, 王 燕

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对高点前泵站加压、高点后重力自流的长距离供水工程, 事故停电时末端阀门采用一段直线关闭, 为了满足压力控制标准需较长的关阀时间无形中加大了防护措施的规模、增加了投资。为此, 采用折线关阀规律, 在优化压力的同时减少防护措施体积, 采用特征线法通过 FORTRAN 编程对各方案进行验算, 并针对主要参数进行影响因素分析。实例应用结果表明, 在保证压力符合要求的前提下相同关阀时间内折线关阀相比于直线关阀可减少防护措施体积、降低工程造价。

关键词: 长距离加压重力流; 空气罐; 高位水池; 折线关阀

中图分类号: TV674

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)05-0076-05

1 引言

目前, 长距离、大流量供水工程已逐渐成为各国向缺水城市和地区供水的主要方式^[1]。当水泵机组发生抽水断电事故时, 管中心线较高的位置可能会受降压波的影响降至气化压力而发生液柱分离现象, 分离的水柱再度弥合产生的弥合水锤会严重破坏输水管道^[2,3]。为了保证供水工程安全稳定运行, 实际中往往会采取一定的防护措施, 如空气罐、单向塔和双向塔等。刘芳等^[4]提出泵后球阀兼作泄压阀防护正水锤的防护方案; 李楠等^[5]针对泵后正水锤提出空气罐与超压泄压阀的联合防护方案。然而对于折线关阀规律在加压型重力流供水工程中的应用研究相对较少, 事故停电工况其他参数不变的情况下折线关阀可通过一阶段快关削减降压波提高最小压力降低防护措施体积, 但也会产生较大的正压, 若折点开度选取不当极易造成爆管事故, 同时在阀门操作上不如直线关阀操作简便。本文针对某泵站加压型重力流长距离输水工程, 建立其水力过渡过程数学模型进行数值模拟, 分析末端阀门不同关阀方案下的防护效果以确定一个相对最优的关闭规律, 尽可

能优化防护措施规模, 为类似工程提供参考。

2 带有逆止阀的高位水池与单向塔数学模型

采用的主要防护措施为空气罐、单向塔、高位水池, 由于高位水池所在节点内水压力较大, 为避免高度过高需加设逆止阀, 图 1 为一带有逆止阀

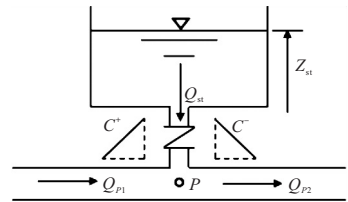


图 1 带有逆止阀的高位水池数学模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mathematical model of elevated tank with check valve

的高位水池数学模型示意图。其中, 流量连续性方程为:

$$Q_{P2} = Q_{P1} - Q_{st} \quad (1)$$

水头平衡方程为:

$$H_p = Z_{st} + R_k Q_{st} | Q_{st} | \quad (2)$$

流量与水位关系为:

$$dZ_{st}/dt = Q_{st}/A_{st} \quad (3)$$

收稿日期: 2022-11-09, **修回日期:** 2022-11-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401810); 江苏省第五期“333 工程”培养资金(BRA2018061)

作者简介: 王开朗(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为长距离、跨流域泵站输配水系统的供水安全, E-mail: 2510227192@qq.com

通讯作者: 张健(1970-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为长距离、跨流域泵站输配水系统的供水安全, E-mail: jzhang@hhu.edu.cn

压力管道相容性方程为:

$$\begin{cases} C^+ : H_P = C_{P1} - B_{P1} Q_{P1} \\ C^- : H_P = C_{M2} + B_{M2} Q_{P2} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $C_1 = Z_{st0} + \Delta t Q_{st0} / (2A_{st})$
 $C_2 = R_k |Q_{st0}| + \Delta t / (2A_{st})$

式中, Z_{st} 、 A_{st} 分别为高位水池水位、截面积; Q_{st} 为高位水池的流量, 假定流出时 Q_{st} 为负; R_k 为阻抗水头损失系数; C_{P1} 、 B_{P1} 、 C_{M2} 、 B_{M2} 均为时刻 $t - \Delta t$ 的已知量。

由于时间步长很小, 式(2)、(3)可简化为:

$$H_P = Z_{st} + R_k Q_{st} |Q_{st0}| \quad (5)$$

$$Z_{st} = Z_{st0} + \Delta t (Q_{st} + Q_{st0}) / (2A_{st}) \quad (6)$$

联立式(1)、(4)~(6)求解, 可得:

$$H_P = \left(\frac{C_1}{C_2} + \frac{C_{P1}}{B_{P1}} + \frac{C_{M2}}{B_{M2}} \right) / \left(\frac{1}{C_2} + \frac{1}{B_{P1}} + \frac{1}{B_{M2}} \right) \quad (7)$$

其他瞬变量也相应可求出, 由于逆止阀的存在, 若 Q_{st} 求解出为正值, 则令 $Q_{st} = 0$ 。单向塔数学模型、基本方程及求解与带有逆止阀的高位水池完全一致。

3 工程实例应用

某供水工程输水线路长 82.02 km, 设计流量 2.55 m³/s, 水锤波速约 800 m/s, 共设有 4 台双吸式离心泵(三用一备), 单泵设计流量 0.85 m³/s, 设计扬程 95 m。当机组发生掉电事故时, 要求管线不出现负压且正压须满足设计要求(≤ 1.6 MPa)。管道主要参数见表 1。

表 1 管道参数

Tab. 1 Pipeline parameters

管径/m	起点桩号/m	长度/m	材质
1.6	0+000.0	1 100.0	S
1.4	1+100.0	5 020.0	GRP
	6+120.0	57 100.0	GRP
1.2	63+220.0	4 800.0	GRP
	68+020.0	14 000.0	GRP

该输水系统的管中心高程线及稳态工况下测压管水头线见图 2。在输水系统无水锤防护措施条件下, 当水泵发生抽水断电事故时, 管道沿线压力包络线见图 3。

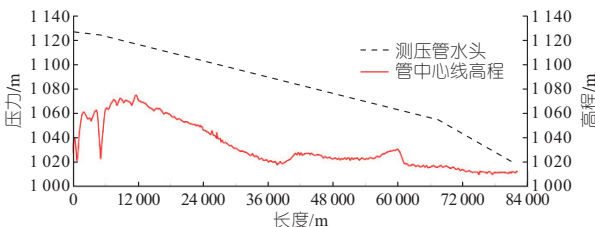


图 2 管中心线高程及测压管水头

Fig. 2 Elevation and manometer headline of pipeline

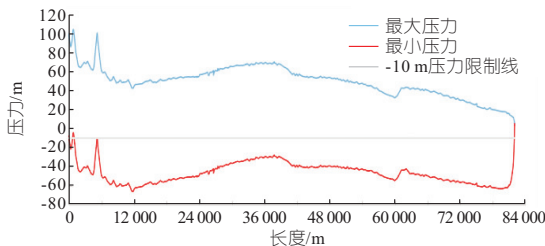


图 3 管道无防护掉电压力包络线

Fig. 3 Pressure envelope curves along pipeline without protective measures

无防护工况水泵掉电后泵后压力快速下降, 管道几乎全线降至负压, 最大负压达 -66.1 m, 位于桩号 11+840 处, 沿线管道需采取防护措施(实际工程中当压力水头降至 -10 m 时, 管道中的水体已发生气化, 图 3 中数据代表负压的严重程度, 仅具有理论意义)。

3.1 空气罐单向塔高位水池联合防护

泵站加压型重力流供水工程水锤防护主要包括加压段与自流段, 其中, 加压段主要通过水锤防护措施削减降压波提高最小压力, 由于事故掉电后泵后压力下降非常迅速, 拟采用在泵后设置空气罐减缓压力降, 为了充分发挥空气罐反射水锤波作用的同时减小空气罐体积, 泵后阀门应快速关闭, 拟采用 10 s 一段直线关闭; 自流段除提高最小压力外, 需按一定规律关闭末端调流阀防止管段放空, 同时还要预防关阀产生的升压波超出管道承压标准发生爆管事故。在发生事故掉电后, 下库阀门响应可能会存在一定滞后, 针对此供水工程取 60 s(60 s 为考虑工程调度的滞后时间及事故响应速度, 实际运行中该值越小系统越安全)。此工程水锤波传播相长约 200 s, 为避免关阀时间太短而产生直接水锤, 调流阀拟采用 480 s 一段直线关闭, 同时最高点加设高位水池。考虑到最高点的内水压力为 42 m, 为了降低高度需要加设逆止阀。高位水池的具体参数见表 2。

表 2 高位水池体型参数

Tab. 2 Body parameters of elevated tank

桩号	面积/m ²	高度/m	连接管直径/m	底部安装高程/m
11+840.0	78.54	13.0	1.4	1 075.3

3.1.1 加压段水锤防护

针对加压段设计了两种方案: ①方案 A。空气罐单独防护; ②方案 B。泵后设空气罐, 局部高点设置单向塔。两种方案具体参数见表 3、4, 计算结果见表 5。

表 3 空气罐体型参数

Tab. 3 Body parameters of air tanks

方案	面积 /m ²	气室 高度/m	水深 /m	连接管 直径/m	底部安装 高程/m	总体积 /m ³
A	24.63	3.9	4.4	0.6	1 028.5	204.43
B	18.10	3.0	3.6	0.5	1 028.5	119.43

表 4 #1 单向塔体型参数

Tab. 4 Body parameters of #1 one-way tower

方案	桩号	面积 /m ²	高度 /m	初始水位/m	底部安装高程/m	连接管直径/m
B						
单向塔	7+620.0	12.57	10.0	1 081.0	1 072.0	1.4

表 5 两种方案计算结果

Tab. 5 Calculation results of two numerical solutions

方 案	最大压力/m	最小压力/m	空气罐最低水位/m	单向塔最低水位/m
A	104.51	0.87	1 028.71	
B	104.51	0.74	1 028.66	1 074.64

由表 5 可知,方案 A 最大压力 104.51 m(位于桩号 0+840.0),最小压力 0.87 m(位于桩号 7+620.0),压力满足防护要求;方案 B 最大压力与方案 A 相同,同样位于桩号 0+840.0,最小压力 0.74 m(位于桩号 2+039.395),相较于方案 A 最小压力低 0.13 m,空气罐体积减少 95 m³。考虑到空气罐造价高昂,方案 B 经济性上优于方案 A。

3.1.2 自流段水锤防护

在加压段采用方案 B,水泵掉电 60 s 后末端调流阀 480 s 一段直线关闭的基础上计算重力自流段在事故掉电工况下的内水压力,计算结果见图 4。由图 4 可知,管线末端从 367 节点桩号 76+320.0 开始出现负压,最大负压 -11.57 m 位于 391 节点桩号 81+600.0;最大压力 126.79 m 位于 392 节点桩号 81+780.0。管线最高点 78、391 节点的压力变化过程线见图 5。

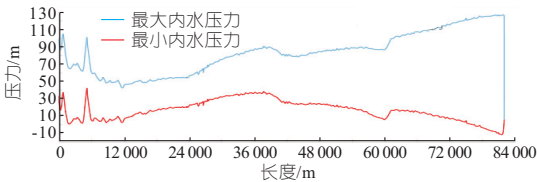


图 4 管道沿线最大最小内水压力包络线

Fig. 4 Maximum and minimum pressure envelope curve along pipeline

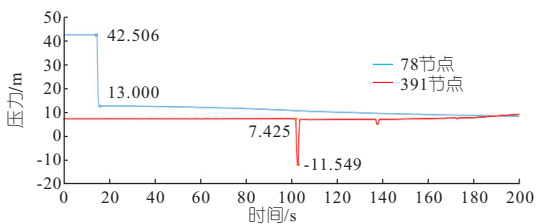


图 5 两节点压力变化过程线

Fig. 5 Pressure change hydrograph of two nodes

由图 5 可看出,14.6 s 降压波传播到 78 节点,压力降幅约为 29.5 m,降压波经高位水池削减后继续向下游传播,101.9 s 传播到 391 节点,压力迅速降至负压,降幅约 19.0 m,波速约 800 m/s,两节点相距 69.76 km,水锤波传播衰减率

约为 5.1%,计算结果准确无误^[6]。现有防护措施无法满足防护要求,对此提出两种解决方案:①方案 A'。在管线末端增补防护措施(单向塔、空气阀等);②方案 B'。加大现有防护措施体积(加大空气罐体积,增加高位水池高度)。从经济性角度看方案 A' 优于方案 B',且管线末端内水压力相对较小,地势平缓,采用单向塔是相对较优的选择。经试算比较后,选定在 369 节点加设一个单向塔,具体参数见表 6,为便于区分命名为 #2 单向塔,管线内水压力计算结果见图 6。

表 6 #2 单向塔体型参数

Tab. 6 Body parameters of #2 one-way tower

桩号	面积 /m ²	高度 /m	初始水位/m	底部安装高程/m	连接管直径/m
76+780.0	3.14	12.5	1 024.7	1 013.2	1.4

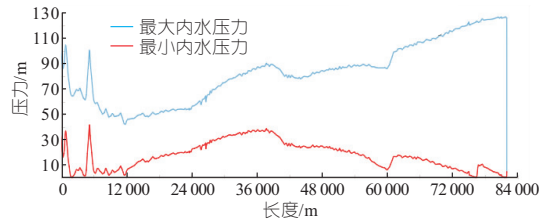


图 6 管线内水压力包络线(加设 #2 单向塔)

Fig. 6 Pressure envelope curve along pipeline (add #2 one-way tower)

由图 6 可知,管线最大压力 126.73 m,位于桩号 81+780.0;加压段最小压力 0.74 m,位于桩号 2+039.395,自流段 0.60 m,位于桩号 76+320.0。

3.2 影响因素分析

3.2.1 不同直线关阀规律计算结果分析

为进一步分析末端调流阀关阀规律对管线压力的影响,关阀规律采用 360、420 s 一段直线关闭,各防护措施参数保持不变,计算结果见表 7。

表 7 直线关阀方案计算结果

Tab. 7 Calculation results of straight line valve closing schemes

关阀时间/s	最大压力/m	最小压力/m	#1 单向塔水位下降值/m	高位水池水位下降值/m	#2 单向塔水位下降值/m
360	146.59	0.74+0.61	5.19	8.09	1.91
420	138.30	0.74+0.61	6.04	9.06	1.92
480	126.73	0.74+0.60	6.36	9.90	1.92

注:最小压力为加压段+自流段最小压力。

由表 7 可知,随着直线关阀时间逐渐减小,管线最大压力逐渐增大,#1 单向塔及高位水池水位下降值逐渐减小但对最小压力及 #2 单向塔几乎无影响。这说明在一定范围内随着直线关阀时间的缩短,所需防护措施的体积逐渐减小;伴随着最大压力的升高,意味着在留有一定安全余量的前提下,关阀时间不能无限缩短,一定会存在一个计

算结果相对较优的取值。

3.2.2 折线关阀规律计算结果分析

折线关阀包括先快后慢、先慢后快两种形式。降压波传递到尾端约需 100 s,若采用先快后慢在降压波到达前将阀关至小开度,形成的升压波向上游传播,在节点内水压力降至负压前到达就可达到消除负压的目的,一定程度上可代替防护措施发挥作用进而减少防护措施规模。但若快关速率过大或折点开度过小也可能会产生过大的正压造成爆管事故,由此选择合适的方案十分重要。事故掉电工况防护措施主要在第一相内发挥作用,而先慢后快虽然也通过产生一定的升压波来发挥作用,但效果十分有限也就无法减少防护措施规模,同时最大正压主要来源于后期快速关阀,速率和折点的选取需非常慎重。为比较二者优越性,通过控制变量分别计算了多种方案下的管线压力。

(1)先快后慢。选取快关时间为 20 s,慢关时间为 350、400、450 s,不同折点开度下管线压力及防护措施水位下降值计算结果见表 8。

表 8 不同关阀方案计算结果

Tab. 8 Calculation results of different valve closing schemes

折点开度	慢关时间/s		
	350	400	450
0.2	175.59+(0.74+5.53) 4.70+3.54+0	165.3+(0.74+5.53) 4.70+3.54+0	161.56+(0.74+5.53) 4.70+3.54+0
0.3	145.83+(0.74+5.53) 4.70+3.77+0	142.58+(0.74+5.53) 4.70+4.10+0	139.66+(0.74+5.53) 4.71+4.34+0
0.4	133.2+(0.74+5.53) 4.71+4.56+0	128.53+(0.74+5.53) 4.72+4.97+0	124.37+(0.74+5.53) 4.74+5.32+0
0.5	118.38+(0.74+5.53) 4.78+5.37+0	111.08+(0.74+5.53) 4.78+5.86+0	105.31+(0.74+5.53) 4.78+6.38+0
0.6	113.8+(0.74+5.53) 4.80+6.30+0	104.51(99.85)+(0.74+5.53) 4.80+6.81+0	104.51(94.91)+(0.74+5.53) 4.84+7.41+0
0.7	126.63+(0.74+3.72) 4.82+7.03+0.72	114.12+(0.74+3.40) 5.09+7.63+0.75	104.51(102.75)+(0.74+3.16) 5.33+8.25+0.78
0.8	135.27+(0.74+1.34) 4.85+7.60+1.55	125.84+(0.74+1.25) 5.50+8.25+1.60	114.88+(0.74+1.22) 5.80+8.94+1.63

注:每一组方案的数据中第一行表示管线最大压力+加压段、自流段最小压力,第二行表示三种防护措施水位下降值,单位均为 m;加粗数字表示管线最大压力出现在加压段,如慢关时间 400 s,折点开度 0.6 的方案:104.51/0.74 表示加压段最大/最小压力,99.85/5.53 表示自流段最大/最小压力。

由表 8 可看出,当快关时间及折点开度一定时,延长慢关时间有利于减小最大压力但防护措施水位下降值逐渐增大,同时折点开度超过某一阈值后最小压力也随时间慢关延长逐渐减小,主要原因是快关结束后降压波尚未到达,不同慢关时间在相同时间间隔内产生的升压波大小不同从而对降压波的抑制作用也不同。当快关时间及慢关时间一定时,随折点开度的增大,最大压力呈先减后增的趋势。这是因为折线关阀产生的水锤波是由阀两阶段操作产生的升压波相互叠加而成的结果,即快关阶段产生的升压波向上游传播,受管

道摩阻影响衰减后经阀门等水力元件反射和慢关阶段产生的水锤波相互叠加,小开度情况下前者起主导作用,而大开度情况下后者占据主导地位。现阶段尚无完整系统的理论与公式说明折线关阀规律与最大最小压力之间的关系,唯有通过试算选优来确定。

同理,选取慢关时间为 400 s、折点开度 0.20,不同快关时间下管线压力及防护措施水位下降值计算结果见表 9。

表 9 不同快关时间计算结果

Tab. 9 Calculation results of different quick close-down times

快关时间/s	计算结果/m	快关时间/s	计算结果/m
20	165.3+(0.74+5.53) 4.70+3.54+0	100	146.32+(0.74+1.62) 4.81+5.00+0.99
40	162.6+(0.74+5.53) 4.73+3.83+0	120	140.18+(0.74+1.09) 4.81+5.35+1.28
60	159.25+(0.74+5.53) 4.75+4.21+0	160	159.25+(0.74+5.53) 4.75+4.21+0
80	155.05+(0.74+3.65) 4.81+4.60+0.41	200	124.84+(0.74+0.68) 4.83+6.90+1.84

由表 9 可看出,在慢关时间及折点开度一定的情况下,随快关时间延长,最大最小压力均逐渐减小,同时防护措施水位下降值逐渐增大,为了达到保证一定压力裕度的同时尽可能减少防护措施规模的目的,需综合考虑确定一个快关时间。

(2)先慢后快。同理,采用快关时间为 20 s 计算不同关阀方案管线内水压力,发现先慢后快的关阀方式并不能起到优化压力的同时降低防护措施规模的效果,甚至不当的方式会使管线出现负压或防护措施漏空管线进气,实际工程中关阀时需谨慎操作。

3.3 折线关阀防护方案比较

末端调流阀采用 20 s 关至 0.3 开度,400 s 关至 0 的关闭规律进行计算,比较分析后确定空气罐和 #1 单向塔参数不变,高位水池面积调整为 38.48 m²,删去 #2 单向塔,管线内水压力包络线见图 7,计算结果见表 10。

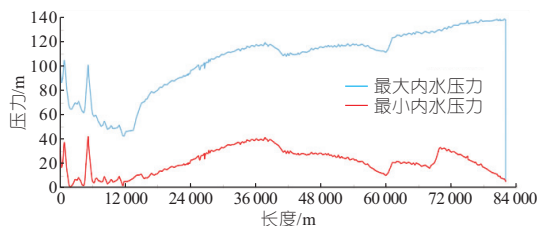


图 7 折线关阀方案下管线内水压力包络线

Fig. 7 Pressure envelope curve along pipeline under broken line valve closing scheme

表 10 折线关阀方案计算结果

Tab. 10 Calculation result of broken line valve closing scheme

最大压力/m	最小压力/m	单向塔水位下降值/m	高位水池水位下降值/m
138.56	0.74+5.0	5.07	7.85

由表 10 可看出,在关阀总时间相同的基础上采用折线关阀管线加压段最小压力和直线关阀相同,自流段高 4.39 m,最大内水压力高 0.26 m,同时相比于 420 s 直线关阀时单向塔+高位水池总体积为 $10 \times 12.57 + 13 \times 78.54 + 12.5 \times 3.14 = 1\,185.97 \text{ m}^3$,采用折线关阀仅需 $10 \times 12.57 + 13 \times 38.48 = 625.94 \text{ m}^3$,极大地减少了工程量,降低了造价。

4 结 论

对于长距离加压重力流供水工程,采用空气罐单向塔高位水池联合防护可保证压力满足要求,末端阀门采用直线关闭便于操作但不利于减少防护措施体积;先慢后快关阀并不能起到优化内水压力的同时降低工程规模的作用,选取合适的先快后慢关阀规律可保证压力满足要求的同时极大地减少防护措施体积。

Study on Water Hammer Protection of Long-distance Pressurized Gravity Flow Water Conveyance Project

WANG Kai-lang, ZHANG Jian, YAO Tian-yu, WANG Yan

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For the long-distance water supply project where the pump station pressurizes before the high point and gravity flows after the high point, when the end valve is closed in a straight line in case of power failure in an accident, a longer valve closing time is required to meet the pressure control standard, which virtually increases the scale of the protective measures and increases the investment. In order to solve this problem, a broken line valve closing rule is proposed to reduce the volume of protective measures while optimizing the pressure. The characteristic line method is used to check each scheme through FORTRAN programming, and the general rule is summarized by analyzing the influencing factors of the main parameters. The case results show that the broken line valve closing can reduce the volume of protective measures and reduce the project cost compared with the straight line valve closing within the same valve closing time under the premise of ensuring that the pressure meets the requirements.

Key words: long distance pressurized gravity flow; air vessel; elevated tank; polyline valve closing

(上接第 70 页)

参考文献:

[1] 贾义鹏,吕庆,尚岳全. 基于粒子群算法和广义回归神经网络的岩爆预测[J]. 岩石力学与工程学报,

参考文献:

[1] 朱记伟,蒋雅丽. 国内外跨流域调水工程建设管理经验及启示[J]. 陕西水利,2016(1):55-56.
 [2] STOKES Y M, MILLER A, HOCKING G. Pressure drop in pipelines due to pump trip event[J]. ANZI-AM journal, 2016, 57: M163-M204.
 [3] MIAO D, ZHANG J, CHEN S, et al. Water hammer suppression for long distance water supply systems by combining the air vessel and valve[J]. Journal of water supply: research and technology-AQUA, 2017, 66(5): 319-326.
 [4] 刘芳,张健,石林,等. 泵后球阀兼作泄压阀的水锤防护研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(9): 184-187, 119.
 [5] 李楠,张健,石林,等. 空气罐与超压泄压阀联合水锤防护特性[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(3): 254-260.
 [6] 张健,黎东洲,结少鹏,等. 考虑摩阻的停泵水锤传播公式[J]. 水力发电学报, 2015, 34(9): 92-97.

2013, 32(2): 343-348.

[2] 崔智伟,沈振中,徐力群,等. 基于 AHP-GA 的某混凝土面板堆石坝渗透参数反分析方法[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12): 90-93.

Inversion of Permeability Coefficient for Concrete Face Rockfill Dam Based on PSO-GRNN and Its Application

LI Hao-xuan¹, SHEN Zhen-zhong¹, ZHANG Wen-bing^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Considering the characteristics of inversion problems of concrete face dam, including high dimensionality, complex calculation and excessive calculation time, the orthogonal experimental design was used to construct the learning sample composed of the combination of permeability coefficient and the water head of pressure measuring point. The non-linear mapping relationship between the water head at monitoring points and permeability coefficient was established by general regression neural network (GRNN), and the particle swarm optimization (PSO) algorithm was used to search for the smoothing factor σ suitable for the specific project to improve the generalization and convergence speed of the model. The PSO-GRNN model for the inversion of the permeability coefficient of concrete face dam was established, and was applied on an engineering example. The results show that the value of permeability coefficient obtained by inversion based on the model is reasonable, and the maximum relative error between the calculated value of water head at monitoring points obtained by seepage analysis and the measured value is 3.64%, and the accuracy meets the needs of engineering.

Key words: concrete face dam; permeability coefficient; inversion analysis; GRNN; PSO