

堤坝多集中渗漏通道位置温度探测研究

王新建, 潘纪顺

(华北水利水电学院资源与环境学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 把渗漏通道虚拟为线热源, 参数化渗漏通道的位置, 利用迭加原理, 推导了多个渗漏通道的温度场解析, 再利用 BURSA-WOLF 模型进行坐标转化, 最后运用最优化方法迭代出集中渗漏通道位置的数值解。结合工程实例, 建立多个虚拟线状集中渗漏通道位置温度探测的二维模型。首先进行单个集中渗漏通道位置的最优化, 如果残差平方和 (SSE) 足够小, 则终止计算; 否则计算下一个渗漏通道位置, 直到残差平方和足够小。计算结果确定了陡河水库左坝肩中的两个较强的集中渗漏位置, 估计了三个微弱的集中渗漏大致位置。该方法较同位素及综合示踪法定性分析更为精确。根据计算对主要渗漏进行了进一步治理, 水库漏水量明显减小, 说明该方法是有用的。

关键词: 温度场测试; 堤坝; 渗漏探测; 渗流; 钻孔, 反问题; 坝肩

中图分类号: TV698.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)11-1800-06

作者简介: 王新建(1970-)男, 河南遂平人, 博士, 副教授, 主要从事岩土体渗漏理论与测试研究。E-mail: xinjianwang@163.com。

Location detection of concentrated-leakage passages in dam by groundwater temperature

WANG Xin-jian, PAN Ji-shun

(Faculty of Geotechnical Engineering, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: With concentrated leakage passages linearized and the locations parameterized, a temperature analytic formula for multi-passage leakage is established. The optimum solution to locations of leakage passages is got by use of inverse analysis. In case study, the two-dimensional temperature detection model for linear leakage passages is set up by simplification. Firstly, the location of single concentrated-leakage passage is calculated by optimization. If the SSE is less than the specific value, the calculation is terminated. Otherwise, the location of the next concentrated-leakage passage is calculated and so on until the SSE is small enough. Two intense-leakage passages are located and three slight-leakage passages are roughly located at the left abutment of Douhe Reservoir in this calculation. The proposed method is more accurate than the qualitative investigation such as isotopic tracer. It indicates that the method is effective that the leakage loss of water in Douhe Reservoir distinctly decreases after the abutment is repaired.

Key words: temperature measurement; dam; leakage detection; seepage; borehole; inverse problem; abutment

0 引言

利用温度探测堤坝集中渗漏不需要人工形成特定的物理场及相应的设备和装置, 减少了探测工序。与同位素及综合示踪法相比, 避免了昂贵的测定成本; 与人工同位素示踪法相比不会对环境造成污染及可能对投放人员产生辐射等; 与地震和电法相比, 避免了复杂的信号处理。温度场探漏对地质体产生附加效应甚微, 同时温度在岩土体中普遍存在, 并可以穿透地下水渗流不连续的地带。因此运用温度场对渗漏通道探测具有成本低、效率高、无污染及较大的广泛性等优点。

目前, 温度探测集中渗漏研究分为 3 个阶段^[1]。

集中渗漏通道定位研究主要运用热源法^[2], 采用定性分析^[3-6], 常作为其他示踪法的辅助手段^[3], 所建模型往往依赖其它方法的测试数据, 其中的参数难以确定^[4-5]。文献[7]利用热传导理论建立了单个集中渗漏通道的稳定温度场探漏模型, 文献[8]用数值实验证明了该方法的有效性。当出现强弱不同的多个渗漏通道时, 如果不能全部探测出, 部分渗漏通道治理后, 其它渗漏仍会进一步发展, 将继续危及堤坝安全, 因此有必要对堤坝中所有渗漏通道进行完全探测, 以彻底整治。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50809024); 华北水利水电学院高层次人才启动项目(200716)

收稿日期: 2009-06-03

本文建立多个集中渗漏通道温度场探漏模型, 以探测堤坝中的所有集中渗漏, 为彻底、经济地整治堤坝集中渗漏提供更为科学的依据。

1 理论模型

在周围温度环境一定的条件下, 岩土体温度场是由岩土体自身换热特性决定的。当集中渗漏发生后, 它与岩土体渗流及导热共同控制温度场的分布。从集中渗漏影响的异常温度中要提取渗漏位置信息包括两方面的内容: ①集中渗漏产生的温度场分布特征; ②由已知温度场反求集中渗漏的位置, 后者以前者为前提。

1.1 温度场理论公式

文献[7]把堤坝中的单个集中渗漏通道虚拟为线性的, 并建立了一般传热物理问题的温度场数学模型。温度是标量, 运用叠加原理得到 n 个渗漏通道的堤坝中 j 测点的温度值为

$$T_j(t) = \sum_{i=1}^n M_i [p(b_i), \bar{X}_i, t] \quad (1)$$

式中 $T_j(t)$ 为堤坝测点 j 处 t 时刻的温度; i 为渗漏通道的序号; n 为渗漏通道的总数; M_i 第 i 个虚拟热源到 j 点的映射关系, $p(b_i)$ 对应第 i 个虚拟热源的参数向量结构体, 可以包括热传导系数、密度、热容、温度边界条件或热源位置等。 \bar{X}_i 为点 j 在以第 i 个虚拟热源点为坐标原点的坐标向量。

1.2 集中渗漏中心位置参数化

在渗漏通道中心为坐标原点的坐标系 O' 中, 式 (1) 成立。事实上的渗漏通道位置正是需要求解的, 因而在求解之前应建立勘探坐标系, 必须把式 (1) 从渗漏通道中心为原点的坐标系转换到勘探坐标系。图 1 是以集中渗漏通道中心为原点的坐标系 O' 和勘探 (测量) 坐标系 O 相互转换关系图。直角坐标系统之间的转换可采用无尺度变化的 6 参数 Bursa-Wolf 模型, 转换参数包括了 3 个平移参数、3 个旋转参数。其转化公式为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{R}(mx, my, mz) \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中 mx, my, mz 为欧勒角; X_0, Y_0, Z_0 为模型坐标系原点 O' 在勘探坐标系 O 中的坐标分量; 矩阵 \mathbf{R} 为

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & mz & -my \\ -mz & 1 & mx \\ my & -mx & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

于是集中渗漏通道的中心在探测坐标系统中的位置就可以用参数 X_0, Y_0, Z_0 来表示, 这样就完成渗漏通道中心位置的参数化。

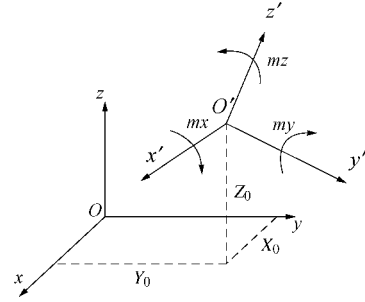


图 1 两坐标转换关系

Fig. 1 Transform between two coordinate systems

1.3 分步反分析求解

通过坐标转化后, 温度公式里包含有虚拟热源(集中渗漏)位置的未知参数。工程中的反分析就是利用工程中观测数据与产生数据的数学物理模型求出未知参数, 即: 观测数据 → 反演数学物理模型 → 场源模型参数。

当考虑难以避免的人为偶然误差和测量仪器的系统误差时。温度观测值可以表示为

$$T_j(t) = \hat{T}_j(t) + e \quad (4)$$

式中 $\hat{T}_j(t)$ 为温度观测值; $T_j(t)$ 为温度理论值; e 为误差。

通过坐标转换, 考虑误差, 并把方程中代表渗漏通道位置的参数向量 \bar{X}_0 分离出来, 由式 (1) ~ (4) 可得

$$\sum_{i=1}^n A_i(b_i, \bar{X}_0, t) = \hat{T}_j(t) + e \quad (5)$$

式中 A_i 为坐标转换后的第 i 个集中渗漏到 j 点温度的映射关系。

不同的测点温度误差组成了误差列向量 e , 以残差平方和 (SSE) 为目标函数:

$$f = e \cdot e^T = \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^n [A_i(b_i, \bar{X}_0, t) - \hat{T}_j(t)] \right\} \quad (6)$$

式中 m 为测点数量; n 为集中渗漏通道数量; e^T 为 e 的转置。 m 至少应大于或等于要反演的参数 (包括渗漏通道位置参数 n) 个数。

根据测井温度随深度分布确定渗漏通道是高温或低温补给类型^[9], 再考虑测井最低温分布设置第一个渗漏通道位置的初始值。若渗漏为低温型的, 则在最低温测点的最小处的两侧 (测点处为奇异点) 设置第一个集中渗漏通道位置的两个初始值, 高温补给的正好相反。分别优化后, 计算结果代入公式 (1) 得到优化函数, 它对应的曲线为优化曲线。据补给类型把优化曲线整体上下移动, 使所有的测点在拟合曲线一侧 (实际中的一个工程岩土体中的集中渗漏补给水温度高低一般只有一种类型), 分别计算两种情况下的测点

与修改后的优化曲线残差值，修正残差平方和较小者对应的渗漏通道位置作为真实值。如果 SSE 足够小，计算结束；否则，在修正残差绝对值最大的测点两侧选取两个值作为下一个渗漏通道位置的初始值，同上计算下一个渗漏通道的位置，直到总残差平方和足够小为止。

2 工程实例

陡河水库位于唐山市区东北约 15 km 的陡河上，总库容 5.152 亿 m³。1959 年最高库水位达 34.33 m，导致主坝下游覆盖层出现涌水现象，经处理后，未再发现类似破坏。2006 年，水库水量损失严重，并且在左坝肩下游出现两处跌窝。经过初步推断：坝肩岩层破碎及岩溶作用下形成了集中渗漏。为了探明裂隙岩体中的绕坝渗漏，在左坝肩布置了 10 个探测孔，孔底标高达 0m 高程，钻孔分布见图 2。在压水试验和孔中渗透流速测定效果不佳的情况下，文[2]通过钻孔水温及库水温度定性分析了强渗漏通道大致位置，较大的钻孔孔距导致该方法估计的位置范围过大，以及存在渗漏是否完全探测的问题。

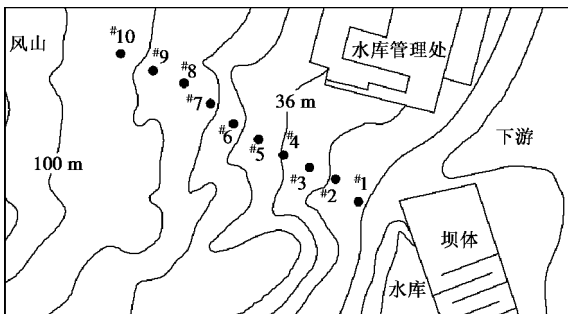


图 2 左坝肩钻探工程布置

Fig. 2 Arrangement of boreholes at left abutment

为了有效地、彻底整治该坝肩的集中渗漏，科学、准确地提供集中渗漏的位置，依据上述理论计算通道的位置。拟采用各孔内最低温^[7-8]数据计算，以减少原始竖向温度梯度的影响。各探测孔在约 10 m 高程处温度最低，其温度数据见表 1(以钻孔 #10 为 0 距离点)。

2.1 温度公式

单个虚拟线状集中渗漏在无限大、初始温度均匀岩土体中的稳态温度场解析解为^[7-8]

$$T = b_1 \ln X' + b_2 \quad (7)$$

式中 b_1, b_2 是与渗漏通道流水的初始温度及地质体传热性质有关的参数； X' 表示渗漏通道中心至测点的距离。

把测井的最低温平面^[8]近似为初始温度均匀，则第 i 个渗漏通道在 j 点产生的温度可表示为

$$T_{ji} = b_{1i} \ln X'_{ji} + b_{2i} \quad (8)$$

其中 b_{1i}, b_{2i} 为第 i 个渗漏通道产生的温度场解析方程的未知参数； X'_{ji} 为第 i 个集中渗漏通道的中心至测点 j 的距离。将式 (8) 以坐标的形式表示

$$T_{ji} = b_{1i} \ln |X'_{ji}| + b_{2i} \quad (9)$$

式中 X'_{ji} 为第 i 个集中渗漏通道的位置坐标。

2.2 目标函数

对于渗漏通道是线状的，仅仅在某一探测剖面上探测渗漏通道的位置，则两坐标只有平移没有旋转——即式 (2) 中除 X_0 以外的参数皆为 0，只需平移坐标即可。两坐标系间转换关系为

$$x = x' + X_0 \quad (10)$$

运用迭加原理， n 个渗漏通道在某测点 j 产生的温度可以表示为

$$T_j = \sum_{i=1}^n T_{ji} = \sum_{i=1}^n M_i(x_j - X_{0i}) \quad (11)$$

式中 X_{0i} 为第 i 个集中渗漏通道中心在测量坐标系中的水平坐标值。

一般的目标函数为

$$f = \sum_{j=1}^m (T_j - \hat{T}_j)^2 = \sum_{j=1}^m [\sum_{i=1}^n M_i(x_j - X_{0i}) - \hat{T}_j]^2 \quad (12)$$

把式 (9) 代入式 (12)，可得优化目标函数为

$$f = \sum_{j=1}^m [\sum_{i=1}^n (b_{1i} \ln |x_j - X_{0i}| + b_{2i}) - \hat{T}_j]^2 \quad (13)$$

2.3 计算过程及结果

该工程的集中渗漏补给为低温类型^[2]，勘探坐标系以 #10 孔中的最低温度点为坐标原点，以最低温度所处水平方向为 x 轴，指向 #1 孔为正；以竖直向上为 y 轴正方向。温度分布如图 3 或 4 中序号所示。其中 #9 孔的温度最低，在 #9 孔两侧可设渗漏通道的初始值，进行单集中渗漏通道位置优化。利用式 (13) 建立目标函数

$$f = \sum_{j=1}^{10} (b_1 \ln |x_j - X_0| + b_2 - \hat{T}_j)^2 \quad (14)$$

基于 MATLAB 编写优化程序，采用内部影射牛顿的子空间置信域法进行优化。集中渗漏位置初始值分别取在 #9 右左两边， b_1, b_2 初始值经过试算选取，各参数取值和计算结果如表 2。两种情况都是计算到残差平方和的变化小于设定的 10^{-8} 而停止。把两种优化结果分别代入温度方程，得到优化曲线如图 3、4 中虚线所示，测量数据分布在优化曲线的上下两侧。由于本例中的集中渗漏通道的温度属于低温热源，其它渗漏通道在各测点会导致各测点温度进一步降低，把优化曲线向上整体移动，使所有的测点温度均处于优化曲线以下，移动量分别为 1.1677 及 1.0288，移动

表 1 测井最低温度及距离

Table 1 Lowest temperatures and distances of holes

探测井编号	#10	#9	#8	#7	#6	#5	#4	#3	#2	#1
距#10 距离/m	0	50	100	140	180	220	260	300	340	380
最低温度/°C	13.3	9.7	13.5	14.1	14.2	16.4	17.5	18.6	19.1	19.7

表 2 单通道位置计算各参数取值

Table 2 Values of parameters for single leakage location calculation

相对#9 孔位置	初始值			迭代次数	计算结果				
	X_0	b_1	b_2		X_0	b_1	b_2	SSE	修正 SSE
右	55	2	2	7	63.6611	3.0635	1.3255	6.4908	20.1270
左	45			7	38.1649	2.8316	2.1508	8.7133	19.2982

后的曲线分别如图 3, 4 中的实线所示。移动后残差平方和分别如表 3 中修正残差所示。

结果为所求第一个渗漏通道位置。两种情况的残差绝对值都较大, 需要考虑第二个集中渗漏的影响, 其通道位置的初始值可取在#6 测点附近。

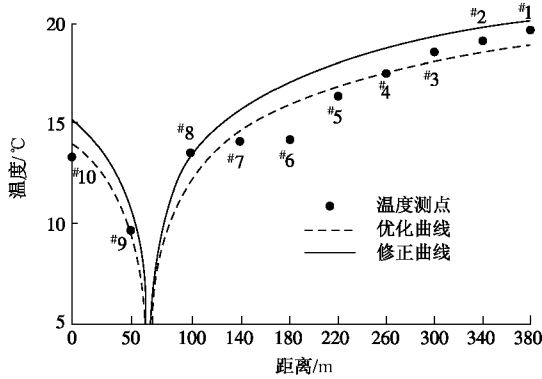


图 3 $X_0=55$ 时的优化温度

Fig. 3 Optimized temperature at $X_0=55$

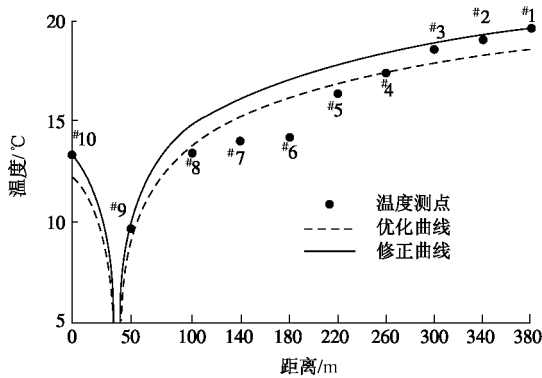


图 4 $X_0=45$ 时的优化温度

Fig. 4 Optimized temperature at $X_0=45$

计算结果显示, 两种情况修正残差绝对值都是#6 测点最大; 渗漏通道在#9 测点右侧的 SSE 较小, 通过修正残差作样条插值曲线如图 5, 以直观模拟总体连续差异情况。从图 5 可以看出, 残差的最大幅度基本一致, 变化范围在-3 到 0 之间。初始值 $X_0=55$ 的样条曲线呈现两个不同程度的低谷, 初始值 $X_0=45$ 的样条曲线呈现一个低谷, 最小值都位于#6 测点附近。后者的修正残差平方和较小, 可以确定初始值为 45 的优化

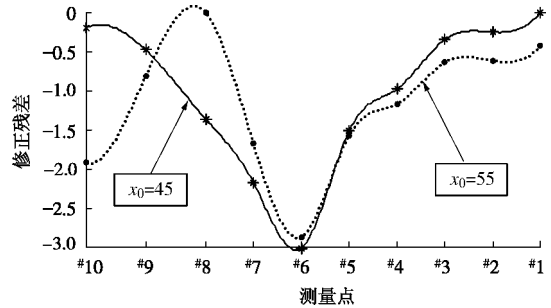


图 5 $X_0=45, 55$ 的修正残差及样条曲线

Fig. 5 Rectified residuals and fitting curves at $X_0=45, 55$

通过式 (13) 得两通道优化目标函数

$$f = \sum_{j=1}^{10} (b_{11} \ln |x_j - X_{01}| + b_{12} \ln |x_j - X_{02}| + b_3 - \hat{T}_j)^2 \quad (15)$$

其中, X_{01} 和 X_{02} 分别为第一个和第二个集中渗漏通道的位置, 第一个集中渗漏通道位置已知, 即 $X_{01} = 45$; 第二个通道位置初始值分别取在#6 孔两侧。根据以上计算结果及试算确定的初始值、迭代次数以及计算结果见表 3, 其中, I 代表的 $X_{01} = 38.1649$; $X_{02} = 175$ 情形; II 代表 $X_{01} = 38.1649$; $X_{02} = 185$ 的情形。

I、II 情况的优化曲线及修正曲线分别如图 6, 7 所示, 第 I 种情况的修正 SSE (0.2974) 比第 II 种情况的 (1.4679) 小得多, 认为第一种计算结果更接近实际, 即: 渗漏最严重的集中渗漏通道中心位于#10 与#9 测点之间、距离#10 测点 37.9103 m 处; 另一个位于#7 与#6 测点之间、距离#10 测点 166.7730 m 处。此时的 SSE 很小, 如只保留小数点后 4 位, 则两种情况下的各点的残差和修正残差完全相同, 说明其他的渗漏已经很微弱, 所以可以确定本例中的较大规模的集中渗漏只有 2 个。为了对比各种可能解的误差及其它次要集中渗漏通道分布情况, 进一步计算当 $X_{01}=55$, $X_{02}=175$ 时的第 III 种情况和当 $X_{01}=55$, $X_{02}=185$ 时的第

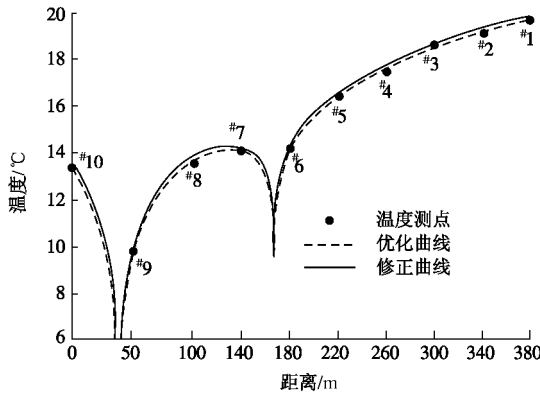


图6 情况I的计算结果

Fig. 6 Optimized temperature of case I

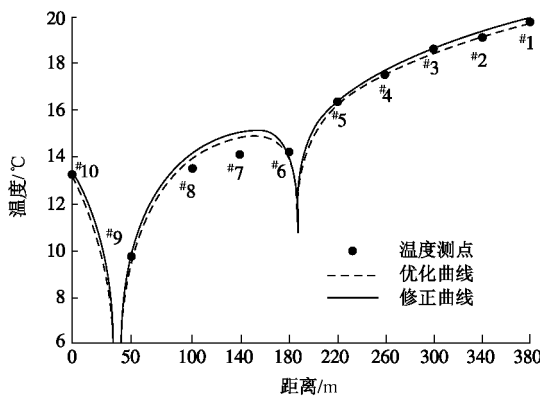


图7 情况II的计算结果

Fig. 7 Optimized temperature of case II

IV种情况。计算的SSE分别为2.4677及2.5215,修正SSE分别为6.3845及6.9247。4种情况下的修正残差

及样条插值曲线如图8所示。 X_{01} 取45比取55时总体修正残差较小;第I种情况的插值曲线的变化幅度明显小于其他三条的。所有曲线都表现出3个修正残差的低谷,第一个在#1和#2测点之间;第二个在#4测点附近;第三个在#7或#8测点附近,可以推断在这些位置附近存在微弱渗漏,从情况I的插值来看,其强度也基本一致。

3 结论

基于分步优化及残差分析的堤坝多个集中渗漏温度探测方法不仅能计算出强渗漏通道的位置,还能够推测出强渗漏附近的微弱渗漏的位置。本例中的微弱渗漏发生在#1和#2测点间、#4测点附近以及#7或#8测点附近。#1和#2测点间的渗漏最为微弱,但受强渗漏影响小,易被其他方法探测到^[2],而利用分步优化及残差分析还能发现类似本例中#4, #7, #8测点附近受强渗漏影响大的微弱渗漏。该法还能突破探测区地下水渗流不连续的限制^[2],在透水性弱的基岩中采用此方法优势更加明显。根据上述计算,对该工程主要渗漏进行了进一步灌浆加固,防渗效果明显,库水损失量明显减少。

总之,本法利用温度定量计算岩土体中的多个集中渗漏通道位置,提高了温度探测集中渗漏研究的模型化及量化程度,相对于同位素及综合示踪法提高了探测精度,为彻底、有效整治集中渗漏提供了更为可靠的科学依据。

表3 两通道位置计算各参数取值

Table 3 Values of parameters for 2-leakage-location calculation

状况	初始值					迭代次数	计算结果					SSE	修正SSE
	X_{02}	X_{01}	b_{11}	b_{12}	b_3		X_{01}	X_{02}	b_{11}	b_{12}	b_3		
I	175	38.1649	2.8316	0.8495	1.4158	5	37.9103	166.7730	2.8056	1.1004	-2.5507	0.0604	0.2974
II	185					13	37.5343	187.3492	2.9757	0.9406	-2.6235	0.8333	1.4679

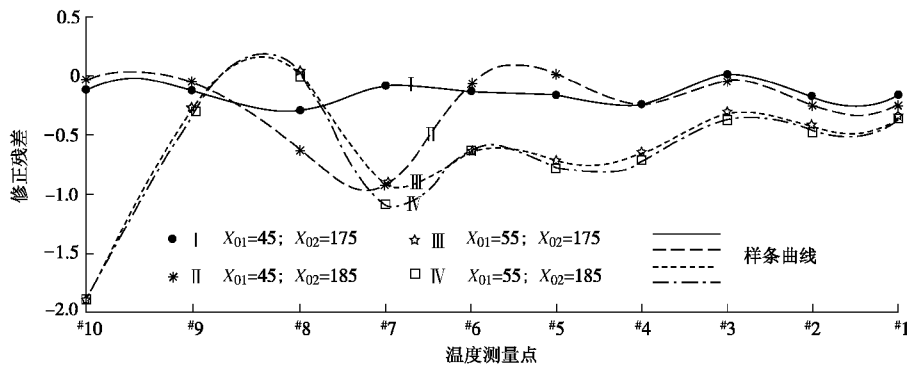


图8 两通道渗漏修正残差及插值曲线

Fig. 8 Rectified residuals and fitting curves

参考文献:

- [1] 王新建, 陈建生. 温度场探测堤坝集中渗漏研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2008, **28**(3): 89 - 94. (WANG Xiao-jina, CHEN Jian-sheng. Status and prospects of research on temperature tracer method used in leakage detection[J]. Advance in Science and Technology of Water Resources, 2008, **28**(3): 89 - 94. (in Chinese))
- [2] 陈建生, 樊哲超, 董海洲, 等. 热源法探测陡河水库左坝肩绕坝渗漏通道[J]. 水文地质工程地质, 2006, **34**(5): 61 - 65. (CHEN Jian-sheng, FAN Zhe-chao, DONG Hai-zhou. Detecting the dam-detouring leakage passage in the left dam abutment of Douhe Reservoir with the method of heat source[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, **34**(5): 61 - 65. (in Chinese))
- [3] 焦月红, 陈建生, 陈亮, 等. 天然示踪方法在深基坑渗漏监测中的应用[J]. 河海大学学报, 2001, **29**(增刊): 176 - 178. (JIAO Yue-hong, CHEN Jian-sheng, CHEN Liang. Application of nature trace method to monitoring seepage in excavation in deep foundation pits[J]. Journal of Hohai University, 2004, **29**(S0): 176 - 178. (in Chinese))
- [4] 董海洲, 陈建生. 利用孔中温度场分布确定堤坝渗透流速的热源法模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2003, **29**(5): 40 - 43. (DONG Hai-zhou, CHEN Jian-sheng. Model research of heat source method by using water temperature distribution in borehole to determine seepage velocity of dyke[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, **29**(5): 40 - 43. (in Chinese))
- [5] 陈亮, 吴勇, 陈建生. 坝基集中渗漏通道的温度场分析与试验研究[J]. 东华理工学院学报, 2007, **30**(4): 354 - 257. (CHEN Liang, WU Yong, CHEN Jian-sheng. Study on temperature field inverse analysis and experiment of concentrated leakage passage in dam base[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2007, **30**(4): 354 - 257. (in Chinese))
- [6] JOHANSSON S. Localization and quantification of water leakage in ageing embankment dams by regular temperature measurements[C]// Proc ICOLD 17th Congress in Vienna, 1991, **65**(54): 991 - 1005.
- [7] WANG Xin-jian, CHEN Jian-sheng. Research of temperature tracer method to detect tubular leakage passage in earth-dam[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, **16**(3): 353 - 358.
- [8] 王新建, 陈建生. 堤坝集中渗漏温度场探测模型及数值试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 2): 3795 - 3800. (WANG Xin-jian, CHEN Jian-sheng. Model for detecting of concentrated leakage in dam and its numerical experiment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 3794 - 3801. (in Chinese))
- [9] SHEMIN G. Estimation of groundwater velocity in localized fracture zones from well temperature profiles[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1998, **84**: 93 - 101.