

改进温度分量的高海拔混凝土坝位移监控模型

苏 荟^{1,2,3}, 胡 江^{3,4}, 李 星^{3,4}, 苏怀智^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029)

摘要:为改善传统大坝位移监控模型应用于高海拔混凝土坝时,模型中温度分量拟合难度高且极易出现欠拟合现象的问题,在分析气温、辐射、库水温、保温层对坝体边界温度的影响,同时考虑外界温度在坝体内部传递时坝体位移呈现出的滞后效应的基础上,引入瑞利分布构造滞后函数,采用粒子群优化算法对滞后天数进行寻优,构建了改进温度分量的高海拔混凝土坝位移监控模型。以某高海拔混凝土重力坝为例,选取该坝两个不同位置处的测点对改进模型进行验证,结果表明,与传统模型相比,改进模型的拟合精度高,预测效果好,适用于高海拔混凝土坝。

关键词:混凝土坝;高海拔;位移;监控模型;温度分量;欠拟合

中图分类号:TV642

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)02-0106-07

Displacement monitoring model of high-altitude concrete dam with improved temperature component//SU Hui^{1,2,3}, HU Jiang^{3,4}, LI Xing^{3,4}, SU Huaizhi^{1,2} (1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 4. *Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China*)

Abstract: To address the issues of high fitting difficulty and frequent underfitting of the temperature component in traditional dam displacement monitoring models when applied to high-altitude concrete dams. The effects of air temperature, radiation, reservoir water temperature, and insulation layers on the boundary temperature of the dam body were analyzed. Additionally, considering the lag effect of dam displacement caused by the transmission of external temperature within the dam body, a lag function was constructed using the Rayleigh distribution. The particle swarm optimization algorithm was employed to optimize the lag days, resulting in an improved displacement monitoring model for high-altitude concrete dams with improved temperature components. The improved model was validated using data from two monitoring points at different locations on a high-altitude concrete gravity dam. The results demonstrate that, compared to the traditional model, the improved model exhibits higher fitting accuracy and better predictive performance, making it suitable for application in high-altitude concrete dams.

Key words: concrete dam; high altitude; displacement; monitoring model; temperature component; underfitting

以青藏高原为代表的高海拔地区汇聚着我国一半以上的待开发水能资源。目前,在高海拔地区已经建成了拉西瓦、龙羊峡、李家峡、黄藏寺等一批高混凝土坝,并有叶巴滩、松塔、班达等一批重要的混凝土坝处于建设或规划中^[1]。相较于我国其他地区,高海拔地区具有环境温度低、日较差大、环境相对湿度低、空气稀薄、环境气压低等特征^[2]。在这些环境因素的影响下,部分位于高海拔地区的混凝土坝出现了异常变形、冻融损伤、开裂等病害问题^[3]。例如:龙羊峡混凝土拱坝由于坝址区全年冷

期长,气候条件恶劣,坝下游面出现明显裂缝,最大深度达到6 m^[4];大古水电站由于坝址区日照辐射强烈,显著影响了环境温差,加剧了坝体温度场时空分布的不均匀性,在坝体表面产生了拉应力,应力区影响深度达0.6 m^[5];刘家峡坝址区年均冻融循环次数达50次,坝后冻融冻胀破坏明显,出现了较大面积的表面疏松麻面和砂浆剥落现象^[6]。可见,高海拔地区的混凝土坝工作性态评判有待进一步深入研究。

变形可以直观反映混凝土坝的真实工作性态,

基金项目:国家自然科学基金项目(52239009,51879169,52209165)

作者简介:苏荟(1997—),女,硕士研究生,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail:1412857126@qq.com

通信作者:苏怀智(1973—),男,教授,博士,主要从事涉水工程安全防控与提能延寿研究。E-mail:su_huaizhi@hhu.edu.cn

是混凝土坝变形监测中最主要的项目之一。根据已有的监测数据,可建立相应的数学模型,对大坝的变形性态进行解释和判断。现有大坝位移监控模型体系考虑了水压、温度、时效等因素对坝体变形的影响^[7]。在此基础上,通过引入智能优化算法与机器学习算法,又进一步发展了大坝位移监控和预测模型^[8-13]。此后,上述模型应用到实际安全监控中,并不断优化和改进。大坝变形统计模型中温度分量的确定一直备受关注。例如:袁冬阳等^[14]以实测边界温度作为温度因子,提出了基于实测边界温度的严寒地区混凝土坝变形行为分析模型;李明军等^[15]以环境温度确定大坝边界温度,并采用三维有限元数值分析方法计算大坝温度场,建立了混凝土拱坝位移模型;陈波等^[16]引入温度滞后效应和幅值削减效应,提出了寒区混凝土坝考虑滞后和削减效应的变形预测模型;华倩宇等^[17]以热传导方程构建水化热分量来拟合温度分量,提出了考虑水化热影响的混凝土坝位移监控模型;Kang等^[18]基于长期气温监测数据,提出了HT_AT混凝土坝变形统计模型;Tatin等^[19]通过考虑水温分布和坝体厚度,用有限元方法对拱坝建模,提出了混凝土坝变形预测模型。上述模型多采用坝内温度监测数据、外部气温监测数据或谐波因子拟合温度荷载对大坝变形的影响,应用于高海拔混凝土坝时有一定的局限性。相较于常规地区,高海拔混凝土坝温度场受到更复杂的环境条件的影响,且由于环境条件的严酷性,许多高海拔混凝土坝温度计被损坏。在高海拔混凝土坝位移监控模型中,采用坝内温度实测数据,其精度和量级难以满足要求;采用外部气温数据时若不考虑坝体边界和温度滞后效应,则无法准确反映大坝温度变化。

针对上述问题,本文基于混凝土坝传统位移监控模型HTT(hydrostatic-thermal-time),考虑气温、辐射、库水温、保温层对高海拔混凝土坝边界温度的影响,用瑞利分布函数反映坝体位移在外界环境温度作用下表现出的滞后效应,提出温度分量的改进方法,并用粒子群优化算法对滞后天数进行寻优,建立了改进温度分量的高海拔混凝土坝位移监控模型,并用某高海拔地区混凝土重力坝对改进模型进行验证。

1 高海拔混凝土坝位移监控模型

1.1 传统模型及其温度分量欠拟合原因分析

混凝土坝传统位移监控模型HTT由水压分量、温度分量、时效分量构成,表达式为

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta \quad (1)$$

式中: δ 为混凝土坝某点顺河向位移; δ_H 为水压分量; δ_T 为温度分量; δ_θ 为时效分量。

水压分量 δ_H 用于描述上游静水压力引起的变形:

$$\delta_H = \sum_{i=1}^{m_1} a_i H^i \quad (2)$$

式中: a_i 为系数因子; H 为上游水深; m_1 为指数因子,重力坝取3,拱坝取4。

考虑坝体内部温度滞后于边界温度,选取多组前期气温平均值的线性组合建立温度分量表达式:

$$\delta_T = \sum_{i=1}^{m_2} b_i \bar{T}_i \quad (3)$$

式中: b_i 为系数因子; \bar{T}_i 为观测日前*i*日环境气温的平均值; m_2 为温度项数。

大坝时效分量由线性和非线性两部分组成:

$$\delta_\theta = c_1 \theta + c_2 \ln \theta \quad (4)$$

式中: c_1 、 c_2 为系数; θ 为起测日开始的天数除以100。

大坝长期运行后,混凝土水化热已散发,坝体内部温度已趋于稳定。此时,坝体温度的改变主要受外界温度的影响,而高海拔地区的混凝土坝又受特殊环境条件的影响。高海拔地区的年均日照辐射总量明显高于中低纬度温和区和高纬度寒区,而太阳辐射会使混凝土表面温度高于当地气温^[20]。此外,水库水温是坝体上游最大的温度边界,对坝体运行期的稳定温度场有直接影响,太阳辐射会对库水温产生一定的影响^[21]。为了保证混凝土坝的安全运行,高海拔地区的许多混凝土坝在坝面设置了保温层,由于坝体导热系数小,热传导需要经过一定的时间才能完成。此过程中坝体内部热量传递时的缓慢性与持续性会导致不同时段内外界温度对坝体内部温度的影响相互叠加。因此,相较于外界温度,坝体内部温度呈现滞后效应。

目前,在大坝位移监控模型中,大坝位移的影响因素常用水压、温度和时效等因子来反映。其中水压分量和时效分量的拟合效果较好,占坝体位移较大比重的温度分量拟合效果欠佳^[22]。在大坝位移监控模型中,因子选取和量化的准确性及分析方法的适宜性对模型的准确性有重要影响。而高海拔地区混凝土坝边界条件复杂,且许多高海拔混凝土坝坝体温度计较少或仪器损毁,缺少坝体温度实测资料。因此,混凝土坝位移监控模型中温度分量拟合难度高且极易出现欠拟合现象。

1.2 边界温度分量表达式

1.2.1 太阳辐射热

坝体温度场的边界条件有4类^[23],太阳辐射产生的热量主要以第二类边界条件施加,气温以第三类边界条件施加。计算时,将太阳辐射热以第二类

边界条件施加到第三类边界条件,折合为等效的气温升高值。

考虑太阳辐射的混凝土第三类边界条件可表示为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_{a0}) - R \quad (5)$$

式中: λ 为导热系数; T 为混凝土表面温度; n 为表面外法线方向; β 为表面放热系数; R 为混凝土吸收辐射热; T_{a0} 为混凝土周围气温。

太阳辐射的影响相当于混凝土周围的空气温度增高了 ΔT_{a0} :

$$\Delta T_{a0} = R/\beta \quad (6)$$

综合等效气温可表示为

$$\Delta T_{a0}^* = \Delta T_{a0} + T_{a0} \quad (7)$$

1.2.2 库水温

混凝土与水接触的边界属于第一类边界条件,即坝面温度等于水温。任意深度的平均水温为^[24]

$$T_m(y) = c + (T_s - c)e^{-0.04y} \quad (8)$$

其中 $c = (T_b - T_s g)/(1 - g)$ $T_s = T'_{am} + \Delta b$
 $g = e^{-0.04H}$

式中: y 为水深; T_s 为水库表面年平均水温; T_b 为库底年平均水温,寒冷地区一般取 $6 \sim 7^\circ\text{C}$; T'_{am} 为水库所在地年平均气温; Δb 为温度增量,为 $0 \sim 4^\circ\text{C}$; H 为水库深度。

1.2.3 坝面保温

当混凝土结构的表面覆盖或喷涂保温层或者模板时,可按第三类边界条件来考虑。此时混凝土表面温度为

$$T = fA \sin[2\pi(\tau - m)/P] \quad (9)$$

其中 $f = 1/\sqrt{1 + 2u + 2u^2}$ $u = \lambda/\beta\sqrt{\pi/aP}$

$$m = P/2\pi \tan^{-1}(1 + 1/u)^{-1}$$

式中: A 为气温日变幅; P 为气温变化周期($P=1\text{d}$); τ 为混凝土龄期; a 为混凝土导温系数。

2 高海拔混凝土坝位移监控改进模型

2.1 基于粒子群优化的参数寻优方法

大坝服役期间,坝体温度场处于稳定或准稳定状态,其变化主要受外界环境温度影响。由于混凝土介质的热传导过程较慢,外界温度与坝体内部温度的变化存在一定滞后时间,从而导致大坝热变形的滞后现象。这一过程并非呈完全对称的正态分布,而是先逐渐上升,后逐渐下降。这与瑞利分布概率密度函数曲线相近。

瑞利分布概率密度函数的表达式为

$$\rho(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$

式中: x 为自变量; σ 为瑞利分布标准差。

瑞利分布概率密度函数 $\rho(x)$ 能较好地反映温度在坝体内传导时的滞后效应。 σ 越小, $\rho(x)$ 曲线越陡,外界温度在坝体内部完成传导所需要的时间越短,坝体位移受温度效应的影响表现在温度变化后的较短时域内; σ 越大, $\rho(x)$ 曲线越平缓,坝体受外界温度影响的滞后时域越长,在坝体内温度传导越慢。因此,采用瑞利分布考虑滞后效应的模型更为合理。

利用瑞利分布考虑温度滞后效应的温度荷载表达式如下:

$$\delta_T = \int_{t_0}^t \frac{t - t_0}{\sigma^2} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} \delta(t) dt \quad (11)$$

式中: $\delta(t)$ 为坝在 t 时刻的温度分量; σ 为温度滞后影响的最大滞后天数; t_0 为滞后天数。

t_0 用粒子群优化算法优化求解, σ 由瑞利分布函数的标准差确定,计算公式如下:

$$\sigma = t_0 \sqrt{2 - \pi/2} \quad (12)$$

为提高模型拟合的准确度,利用参数寻优算法改进考虑滞后的高海拔混凝土坝位移监控模型。本文采用粒子群优化算法,适应度函数为最优解的条件函数。设实测的混凝土重力坝水平位移为 δ ,由模型计算得到的混凝土重力坝水平位移为 $\bar{\delta}$,适应度函数为

$$f = \min \sqrt{\sum (\bar{\delta} - \delta)^2} \quad (13)$$

2.2 改进温度分量的高海拔混凝土坝位移监控模型

在实际工程中,考虑温度滞后效应的式(11)中 dt 取值无法取到微小的时间段。一般取 $dt=1\text{d}$,将连续积分转化为离散型积分。则温度分量表达式为

$$\delta_T = \sum_{t=t_0}^t \frac{t - t_0}{\sigma^2} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} \delta(t) \quad (14)$$

考虑气温、库水温、辐射、保温层对高海拔混凝土坝温度场的影响

$$\delta(t) = b_1 T_1 + b_2 T_2 + b_3 \Delta T_a + b_4 \Delta T_s \quad (15)$$

式中: T_1 为气温; T_2 为库水温; ΔT_a 为辐射增温; ΔT_s 为保温层增温。

最终建立的改进温度分量的高海拔混凝土坝位移监控模型为

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta = \sum_i^{m_1} a_i H^i + \sum_{t=t_0}^t \frac{t - t_0}{\sigma^2} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} \cdot (b_1 T_1 + b_2 T_2 + b_3 \Delta T_a + b_4 \Delta T_s) + c_1 \theta + c_2 \ln \theta \quad (16)$$

3 工程实例验证

某混凝土重力坝位于我国西藏自治区,2013年10月下旬大坝开始浇筑混凝土,2014年11月23日

浇筑完成。2015年11月初下闸蓄水。河床坝基高程3338m,坝顶高程3421m。坝顶宽8m,最大底宽72m,最大坝高83m,坝顶全长235.5m,大坝从左至右共13个坝段(图1)。在坝顶上下游面铺设5cm厚的聚苯乙烯保温层以削减温度荷载对大坝位移的影响。

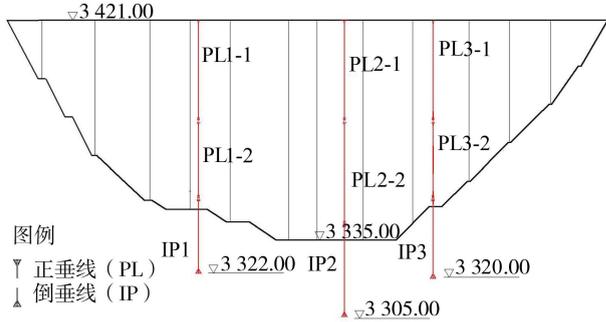


图1 大坝垂线布置

根据地质条件、大坝结构特征和布置特征等,建设期在左岸取水坝段坝横0+085.00m桩号、河床溢流坝段坝横0+132.25m桩号和右岸挡水坝段坝横0+168.75m桩号断面,布置3组垂线进行坝体水平位移监测。该坝自蓄水运行以来运行正常,工作性态良好,巡视检查和安全监测未发现异常现象。

2号垂线组从3381m廊道钻孔至3340m高程廊道形成正垂测点PL2-2。该测点靠近大坝中部且测点覆盖的深度范围较大,能更好地分离对坝体位移起主要影响的水位、温度等环境量,因此选取了PL2-2测点的监测数据。基于式(1),利用最小二乘法构建了测点的位移统计模型,并分离了实测位移中的水压、温度与时效分量。分离结果如图2所示,测点位移实测值与主要环境量变化关系如图3所示。从图2和图3可以看出,随着水位和环境温度的变化,坝体位移实测值也会发生变化。其中温度在坝体位移的影响因素中占较大比重,且坝体位移变化与环境温度曲线在时间上具有一定相位差,存在明显的滞后现象。

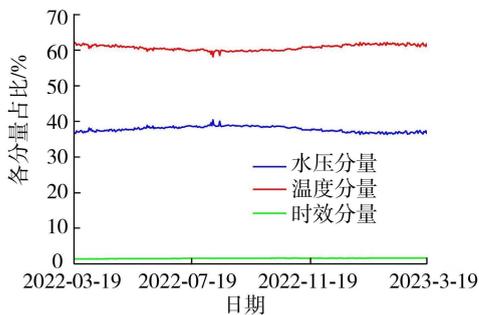


图2 位移实测值各分量占比

为了验证改进模型的全面性与适用性,选取大坝不同坝段和不同高程处的测点作为典型测点进行

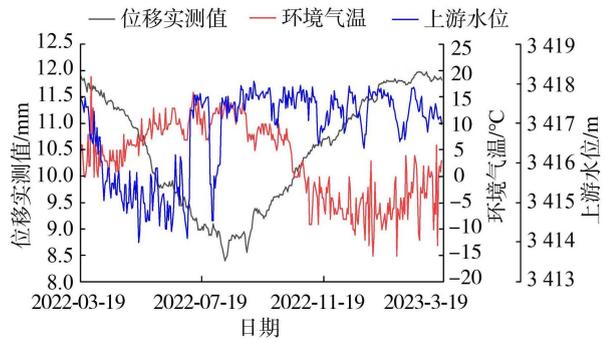


图3 位移实测值与主要环境量变化关系

验证。本文选取了5号坝段正垂线测点PL1-1和10号坝段正垂线测点PL3-2的径向位移监测数据(上下游方向)进行分析,两测点高程分别为3381、3350m,分析时段为2022年3月19日至2023年3月19日,监测数据共366组。分别采用传统大坝位移监控模型和改进温度分量的大坝位移监控模型进行拟合。其中前85%监测数据作为模型训练集,后15%作为模型预测集。

用粒子群优化算法对滞后天数寻优,算法参数设置如下:初始种群规模取100,最大迭代次数为1000,学习因子 c_1 和 c_2 取值为2,迭代终止精度为100万。求得适应度函数最小时的待定系数,取其作为滞后天数。

将监测资料分别代入传统大坝位移监控模型和改进温度分量的大坝位移监控模型中进行计算,得到二者的拟合结果,两类监控模型的结果与实测值对比见图4,图中绿色虚线为拟合部分和预测部分的分割线。

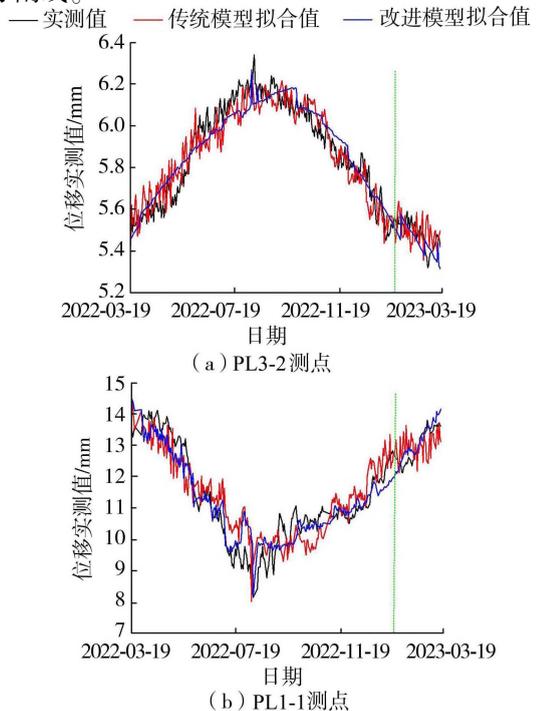


图4 位移实测值与模型拟合值对比

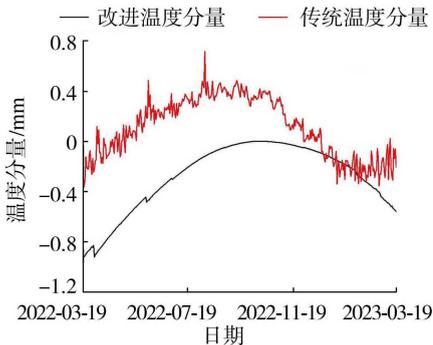
本文用决定系数(R^2)和均方根误差(E_{RMS})评估模型精度。表1列出了PL3-2和PL1-1测点在采用传统大坝位移监控模型和改进温度分量的大坝位移监控模型的精度对比。

表1 模型精度对比

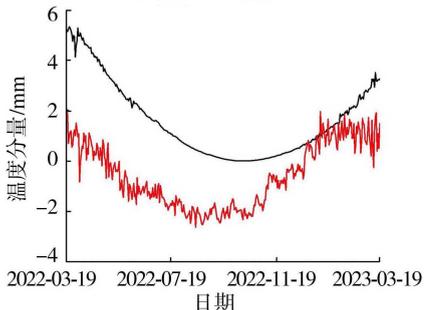
测点	模型	R^2		E_{RMS}/mm	
		拟合	预测	拟合	预测
PL3-2	传统	0.914	0.902	0.099	0.102
	改进	0.956	0.930	0.090	0.097
PL1-1	传统	0.849	0.818	0.833	0.791
	改进	0.929	0.902	0.619	0.776

整体来看,改进温度分量的大坝位移监控模型决定系数更高,均方根误差更小。针对高海拔地区混凝土坝,采用本文提出的改进温度分量的大坝位移监控模型拟合精度更高,且预测效果较好。

将PL3-2和PL1-1测点在两种不同模型拟合结果中的温度分量进行分离,如图5所示,二者温度分量大小与变化幅值存在着一定的差别,但改进后的温度分量能较好地反映温度的滞后效应。相比PL1-1测点,接近坝基的PL3-2测点滞后效应越明显,其滞后天数增加约10d。这主要是因为改进模型中考虑了坝体最大温度边界水温的影响。雷兆星^[24]比较分析外界温度对混凝土坝温度场的影响得出结论,随着水深增加,水温滞后期显著增大,从而使温度变化响应滞后。



(a) PL3-2测点



(b) PL1-1测点

图5 温度分量分离对比

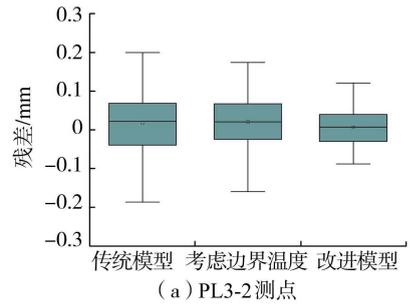
为了分析边界温度对坝体位移的影响,以式(15)为温度分量构建了考虑边界温度的大坝位移监控模型,选取上文同一时段内监测数据,对

PL3-2和PL1-1测点进行拟合。拟合精度结果列于表2。从表2可以看出,考虑边界温度的大坝位移监控模型精度相较传统大坝位移监控模型有所提高,即考虑边界温度能在一定程度上改善模型中的欠拟合问题。

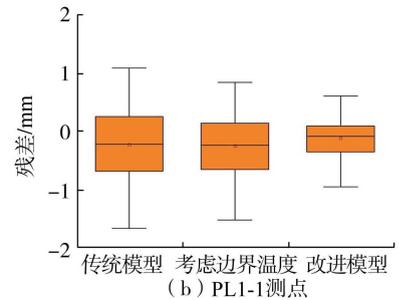
表2 考虑边界温度的模型精度

测点	R^2		E_{RMS}/mm	
	拟合	预测	拟合	预测
PL3-2	0.927	0.903	0.095	0.097
PL1-1	0.862	0.823	0.807	0.976

三种模型残差箱型对比如图6所示。从图6可以看出,考虑边界温度与滞后效应的改进模型相较其他两种模型残差上下限更小。因此,采用改进模型能更好地解决传统模型的欠拟合问题。



(a) PL3-2测点



(b) PL1-1测点

图6 模型残差箱型对比图

模型各分量平均占比如表3所示。从表3可以看出,水压分量和温度分量占有较高比重。其中在传统模型中温度分量占比60.80%,水压分量占比37.76%。改进模型中温度分量占比33.30%,水压分量占比34.81%。

表3 各分量占比对比

模型	分量占比/%		
	温度	水压	时效
传统	60.80	37.76	1.44
改进	33.30	34.81	31.89

为进一步分析不同模型与分量变化间的关系,绘制了温度和水压分量及其占比变化对比图(图7)。从图7可以看出,在选取的监测时间段内温度分量先下降再上升,相应的温度分量占比也先下降再上升。传统模型的温度分量在2022年8月7日出现最小值28.060mm,此时温度分量占比59.64%。同一时间水压分量为-18.311mm,占比

38.79%。改进模型的温度分量在2022年9月1日出现最小值10.694 mm,此时温度分量占比31.66%。同一时间水压分量为-12.141 mm,占比35.95%。两种不同模型下温度分量极值出现时间相差约25 d。相较传统模型,改进模型温度分量变化幅值削减17.366 mm。

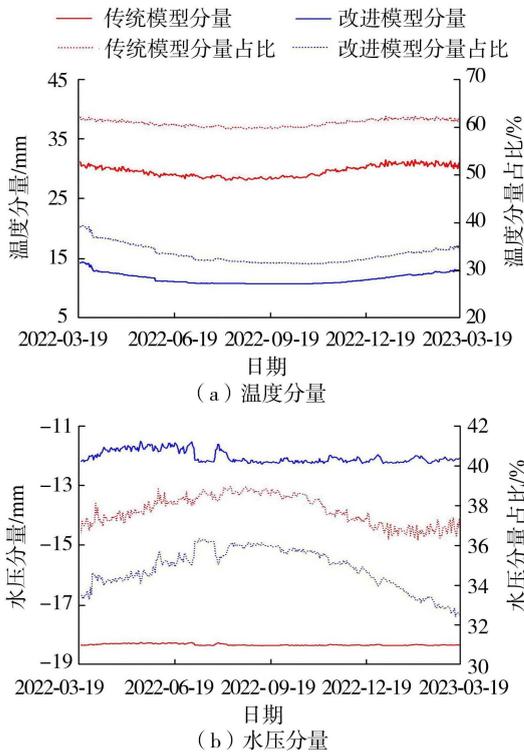


图7 温度和水压分量及其占比对比

综合表3和图7可知,在同一时段,在外界气温和水位相同的情况下,两种模型中温度分量占比和幅值均不同,水压分量也会发生相应的变化。因此,高海拔混凝土坝若不考虑边界温度和滞后效应的影响,拟合结果难以准确反映实际位移情况。

4 结语

高海拔混凝土坝服役环境恶劣,通过安全监控实时掌握大坝工作性态尤为重要,本文针对环境温度对坝体温度场的影响,考虑高海拔混凝土坝受特殊边界条件的影响,结合瑞利分布函数和粒子群优化算法,引用到常规混凝土坝位移监控模型中,建立了考虑温度滞后效应和外界环境温度影响的高海拔混凝土坝位移监控模型。工程实例分析表明,相较于传统模型,改进模型能更好地分离高海拔混凝土坝水平位移的影响。高海拔混凝土坝传统位移监控模型温度分量出现的欠拟合问题,在改进模型中也得到了一定的改善。改进模型对高海拔混凝土坝有更好的拟合和预测效果,可为高海拔混凝土坝位移监控提供参考。

高海拔混凝土坝在复杂的边界温度条件下,除本文研究的滞后现象,坝体变形还会呈现出其他不同的特征效应和现象。后续研究将综合考虑高海拔混凝土坝在低温、低湿度的边界温度条件下出现的冻胀变形、非协调性变形等现象,以提高现有的大坝监控模型在高海拔环境下的评估和预测精度。

参考文献:

- [1] 姚可夫,田始光,漆一宁,等. 高海拔区特征环境驱动下混凝土坝服役性能研究进展[J]. 水利学报,2023,54(6):717-728. (YAO Kefu, TIAN Shiguang, QI Yining, et al. Performance of concrete dams impacted by characteristic climate in high-altitude area: a review[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(6): 717-728. (in Chinese))
- [2] 葛昕. 高原气候条件对混凝土性能及开裂机制影响的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [3] 汪在芹,梁慧,李珍,等. 西藏水利工程劣化现状及防护措施研究进展[J]. 水力发电,2016,42(2):42-45. (WANG Zaiqin, LIANG Hui, LI Zhen, et al. Advances on the study of deterioration and protection measures for water conservancy projects in Tibet[J]. Water Power, 2016, 42(2):42-45. (in Chinese))
- [4] 曹光明. 龙羊峡大坝下游面裂缝成因分析[J]. 水利水电技术,2004,35(9):139-142. (CAO Guangming. Genetic analysis of cracks on downstream face of Longyangxia dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(9): 139-142. (in Chinese))
- [5] 晏国顺,陕亮,李家正. 日照强热辐射对西藏大古水电站碾压混凝土重力坝的影响分析[J]. 水利水电快报,2021,42(10):47-51. (YAN Guoshun, SHAN Liang, LI Jiazhen. Influence of sunlight strong heat radiation on RCC gravity dam of Dagu hydropower station in Tibet[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, 42(10):47-51. (in Chinese))
- [6] 苏怀智,谢威. 寒区水工混凝土冻融损伤及其防控研究进展[J]. 硅酸盐通报,2021,40(4):1053-1071. (SU Huaizhi, XIE Wei. Review on frost damages of hydraulic concrete in cold region and its preventive control[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(4): 1053-1071. (in Chinese))
- [7] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2003:1-128.
- [8] 赵二峰,李章寅,袁冬阳. 基于双阶段注意力机制的大坝变形深度学习预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):44-52. (ZHAO Erfeng, LI Zhangyin, YUAN Dongyang. Deep learning model for deformation prediction of dam based on dual-stage attention mechanism[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6):44-52. (in Chinese))

- [9] 胡江,王春红,李星.改进的特高拱坝分区变形预测模型[J].水力发电学报,2023,42(7):69-83. (HU Jiang, WANG Chunhong, LI Xing. Improved zonal deformation prediction model for super-high arch dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42 (7): 69-83. (in Chinese))
- [10] LI Yanlong, YIN Qiaogang, ZHANG Ye, et al. Deformation prediction model of concrete face rockfill dams based on an improved random forest model [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(4): 390-398.
- [11] 欧斌,张才溢,陈德辉,等.基于改进EMD-LSTM的混凝土坝变形预测模型[J].水利水电科技进展,2024,44(6):93-99. (OU Bin, ZHANG Caiyi, CHEN Dehui, et al. Deformation prediction model for concrete dams based on improved EMD-LSTM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 93-99. (in Chinese))
- [12] 张才溢,傅蜀燕,欧斌,等.基于APSO和TWSVM的特高拱坝变形预测模型[J].水利水电科技进展,2023,43(4):46-51. (ZHANG Caiyi, FU Shuyan, OU Bin, et al. Deformation prediction model of ultra-high arch dams based on APSO and TWSVM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(4): 46-51. (in Chinese))
- [13] 刘伟琪,陈波,葛盼猛,等.基于聚类分区和MO-LSSVR的高拱坝变形预测模型[J].水利水电科技进展,2023,43(2):102-108. (LIU Weiqi, CHEN Bo, GE Panmeng, et al. Deformation prediction model of a high arch dam based on clustering and MO-LSSVR [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (2): 102-108. (in Chinese))
- [14] 袁冬阳,顾冲时,顾昊.严寒地区混凝土重力坝变形行为分析与预测模型[J].水利学报,2022,53(6):733-746. (YUAN Dongyang, GU Chongshi, GU Hao. Displacement behavior analysis and prediction model of concrete gravity dams in cold region [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (6): 733-746. (in Chinese))
- [15] 李明军,王均星.混凝土拱坝位移确定性监控模型研究[J].中国农村水利水电,2019(1):115-119. (LI Mingjun, WANG Junxing. Research on the deterministic displacement monitoring model of concrete arch dams [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(1): 115-119. (in Chinese))
- [16] 陈波,陈伟楠,龚学贤,等.考虑滞后与削减效应的寒区混凝土坝变形预测预报模型[J].岩土工程学报,2021,43(12):2315-2322. (CHEN Bo, CHEN Weinan, GONG Xuexian, et al. Prediction model for deformation of concrete dams in cold regions considering hysteresis and reduction effects from environment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43 (12): 2315-2322. (in Chinese))
- [17] 华倩宇,苏怀智,杨立夫.考虑水化热影响的混凝土坝位移监测统计分析模型及其解析[J].水利水电科技进展,2021,41(5):62-70. (HUA Qianyu, SU Huaizhi, YANG Lifu. Qualification and statistical analysis of residual hydration heat influence on concrete dam displacement [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 62-70. (in Chinese))
- [18] KANG Fei, LI Junjie, DAI Jianghong. Prediction of long-term temperature effect in structural health monitoring of concrete dams using support vector machines with Jaya optimizer and salp swarm algorithms [J]. Advances in Engineering Software, 2019, 131: 60-76.
- [19] TATIN M, BRIFFAUT M, DUFOUR F, et al. Statistical modelling of thermal displacements for concrete dams: influence of water temperature profile and dam thickness profile [J]. Engineering Structures, 2018, 165: 63-75.
- [20] 蒋建华,袁迎曙.考虑日照影响的环境温度作用谱修正方法[J].建筑材料学报,2014,17(1):78-83. (JIANG Jianhua, YUAN Yingshu. Revised method of temperature action spectrum in natural climate environment with consideration of sunlight exposure [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(1): 78-83. (in Chinese))
- [21] 胡江,王春红,马福恒.特高拱坝运行初期变形预测模型温度因子选取方法[J].长江科学院院报,2021,38(1):59-65. (HU Jiang, WANG Chunhong, MA Fuheng. Selecting temperature factor for deformation prediction model for super-high arch dams during initial operation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(1): 59-65. (in Chinese))
- [22] 刘贝贝,陈坤城,佟剑杰.大坝位移监控模型温度分量的欠拟合原因及改进[J].水电能源科学,2009,27(6):72-75. (LIU Beibei, CHEN Kuncheng, TONG Jianjie. Causes of less fitting and improvement of temperature component in dam displacement monitoring model based on Rayleigh distribution and numerical integration [J]. Water Resources and Power, 2009, 27 (6): 72-75. (in Chinese))
- [23] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2012:18-19.
- [24] 雷兆星.基于改进统计模型的混凝土坝运行性能参数识别及变形监控方法[D].南昌:南昌大学,2023.

(收稿日期:2024-03-24 编辑:俞云利)