

拱坝变形监测模型的构建和优选

张利¹, 吴震宇²

(1. 华电金沙江上游水电开发有限公司波罗(岗托)水电站建设公司筹备处, 四川 成都 610095;

2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要:文章提出了基于分离式建模技术的变形统计模型,以缓解传统统计模型中的过拟合问题。采用 R^2-OC 准则选择最优模型,一方面通过 R^2 反映模型拟合精度,另一方面通过 OC 定量评价模型的过拟合程度,从而识别出拟合精度高、预测精度高的模型。结果表明,基于分离建模技术的变形监测模型具有更高的预测精度和更低的误报率。 R^2-OC 准则更好地反映了监测模型的过拟合程度和拱坝监测预警的实际情况,提高了模型选择的准确性。

关键词:拱坝;分离式建模技术;模型选择准则; R^2-OC 准则

中图分类号:TV642.4;U442.3+9

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2024)05-0154-04

Model Building and Optimization of Arch Dam Deformation Monitoring

ZHANG Li¹, WU Zhenyu²

(1. Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 610095;

2. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065)

Abstract: In this paper, the deformation statistical model based on separate modeling technology is proposed to mitigate the overfitting problem in traditional statistical models. R^2-OC criterion is applied to select the optimal model, which identifies models with high fitting and prediction accuracy by reflecting the model fitting accuracy through R^2 on the one hand, and quantitatively evaluating the overfitting degree of models through OC on the other hand. The results show that the deformation monitoring model based on the separated modeling technique exhibits higher prediction accuracy and lower false alarming rate. The R^2-OC criterion better reflects the degree of overfitting of the monitoring model and the real situation of arch dam monitoring and warning, which improves the accuracy of model selection.

Key words: Arch dam; Separate modeling technique; Model selection criterion; R^2-OC criterion

0 引言

建立拱坝安全监测数学模型,能用于识别拱坝变形的异常情况^[1-2]。笔者提出分离式建模技术,分别构建变形监控模型的静水、温度和时效分量,降低模型的过拟合程度。建立 R^2-OC 模型识别准则,通过可决系数 R^2 刻画模型的拟合精度,同时通过过度拟合系数 OC 定量评判模型的过度拟合程度,对监控模型进行有效优选。

1 拱坝变形监测模型构建及优选方法

1.1 分离式建模技术

(1) 传统统计模型

在传统的统计模型中,拱坝变形分为水压分量、温度分量和时效分量三个部分^[3],表示为:

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta + a_0 \quad (1)$$

式中: δ_H 为水压分量, δ_T 为温度分量, δ_θ 为时效分量, a_0 为待定常数项。

构建传统统计模型首先根据变形监测数据序列和环境量之间的关系,预先确定水压、温度和时效分量的数学表达形式,并将其相互组合来确定监控模型整体的表达形式;然后以模型拟合数据与原始监测数据序列的整体偏差最小为目标,通过回归分析确定各分量的对应系数,从而确定监控模型最终的数学表达式。传统统计模型在未知时效变形规律的情况下误设时效分量形式,为了保证整体模型对监测数据的拟合精度,传统统计模型各分量将相互补偿从而导致整体模型过度拟合,泛化能力和预测精度低。

收稿日期:2024-10-12

基金项目:国家重点研发计划子课题(2018YFC0407103)

(2)分离式建模技术

分离式建模技术采用 EMD 等信号分解算法,从原始监测数据序列中单独提取出与时间效应相关的拱坝变形(即分解重构后的趋势项),从剩余的周期项中进一步将水压变形和温度变形分离后,分别对各荷载变形构建分量表达式。

监测数据序列可以通过 EMD 被分解为一系列不同频率的本征模态函数(IMF)和残余分量^[4],且各 IMF 之间是相互独立的。

$$\delta(t)=\sum_{i=1}^n IMF_i(t)+r_n(t) \tag{2}$$

式中: $\delta(t)$ 为大坝变形监测的数据序列, $IMF_i(t)(i=1,2,\cdots,n)$ 为数据序列的第 i 个 IMF, $r_n(t)$ 为最后一个频率最低的残余序列,代表了数据序列的变化趋势,相当于与时间效应相关的变形。

时效分量构建好后,进一步对剩余周期项中的水压变形和温度变形进行分离,并分别构建分量数学表达式。温度变形是在等水位条件下从周期项中分离出来。周期项是原始监测数据序列去除时效变形数据序列后得到的余项,代表了库水位和温度波动引起的拱坝变形。处于正常工作状态的拱坝,其结构行为处于弹性状态。因此在库水位相等的两个时间点,拱坝变形周期项的差值对应的是两个时刻温度变化引起的位移增量,即温度位移增量。在该技术中,采用一系列等水位条件下的温度位移增量来构建温度分量。周期项减去温度变形即可得到水压变形,从而构建水压分量。

分离式建模技术的优点在于对每个变形效应量均进行分解并独立地建模,各分量之间互不影响,从而减轻分量之间的相互补偿,在一定程度上能降低变形监控模型的过拟合程度。

1.2 R^2 -OC 准则

为了让监控区间准确合理,最优监控模型需要同时满足拟合精度较高且过度拟合程度较低这两项条件。笔者基于可决系数^[5] R^2 和过度拟合系数^[6] OC,提出了一种新的模型比选方式: R^2 -OC 准则,该准则一方面通过可决系数 R^2 反映模型的拟合精度,另一方面用 OC 定量评判模型的过度拟合程度。

可决系数 R^2 为监控模型的回归平方和与监测效应量总偏差平方和的比值,是一个衡量监控

模型拟合值与实测数据的拟合优度的指标,当 R^2 越大,监控模型的拟合序列就越接近原始监测数据,拟合效果越好。其表达式如下:

$$R^2=\frac{SSR}{SST}=\frac{\sum_{i=1}^n(\hat{y}_i-\bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y})^2} \\ =1-\frac{\sum_{i=1}^n(y_i-\hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y})^2} \tag{3}$$

式中: y_i 为实际监测数据, $\bar{y}$ 为监测数据均值, $\hat{y}_i$ 为监控模型计算值。

过度拟合是目前大坝安全监控模型研究中一个较难解决的问题,表现为模型在拟合段对历史数据的拟合精度较高,但预测段精度较低,从而导致大坝的安全监控系统发出虚假的预警信号。为使 OC 计算结果的鲁棒性更好,将 OC 定义为预测段和拟合段精度指标(RMSE、MAE、MAPE)比值的平均值。过度拟合系数 OC 是一个衡量监控模型的预测段与拟合段模型精度差异的指标,当 OC 越大,预测段的模型精度就越低,过度拟合程度越高。其表达式如下:

$$OC=\frac{1}{3}(\frac{RMSE_P}{RMSE_F}+\frac{MAE_P}{MAE_F}+\frac{MAPE_P}{MAPE_F}) \tag{4}$$

式中:OC 为监控模型的过度拟合系数;RMSE 为均方根误差,MAE 为平均绝对误差,MAPE 为平均绝对百分比误差,下标 P 和下标 F 分别代表模型预测段和模型拟合段。

RMSE、MAE、MAPE 是常用的误差评价指标。均方根误差 RMSE 是一个衡量实际监测数据和监控模型计算值之间偏差的指标,但对于远离监测数据均值的异常值很敏感,其表达式如下:

$$RMSE=\sqrt{\frac{SSE}{n}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(y_i-\hat{y}_i)^2}{n}} \tag{5}$$

平均绝对误差 MAE 采用偏差绝对值的形式降低了异常值的影响,能更好的反映拟合值误差的实际情况,但不能合理反映模型拟合的相对误差,其表达式如下:

$$MAE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n|y_i-\hat{y}_i| \tag{6}$$

平均绝对百分比误差 MAPE 反映了监控模型的拟合值与原始监测值的偏差占原始监测值的比值关系,适合评价相对误差,但原始监测值为 0 时,该式无意义,其表达式如下:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (7)$$

用 R^2 —OC 准则来优选模型时,为保证其满足拟合优度较高且过度拟合程度较低,选择满足 R^2 较大且 OC 值较小的模型。

2 工程实例

2.1 工程概况

JP 拱坝位于中国西南地区,坝高 305.00 m,坝顶宽度 16.0 m,坝底厚度 63.0 m,厚高比为 0.207,共由 26 个坝段组成。拱坝的水平位移采用正倒垂线进行监测,在左岸山体、1 号、5 号、9 号、11 号、13 号(拱冠梁)、16 号、19 号、23 号坝段共布置了 57 个测点。

DGS 拱坝最大坝高为 210 m,坝顶高程为 1 135.00 m。水库正常蓄水位 1 130.00 m,死水位 1 120.00 m。DGS 拱坝共由 29 个坝段组成。拱坝的水平位移采用正倒垂线进行监测,在 6 号、10 号、14 号(拱冠梁)、19 号、24 号坝段以及两岸坝肩灌浆廊道共布置了 31 个测点。

2.2 计算方案

在该研究中,收集 JP 拱坝 13 号坝段坝顶垂线测点 PL13—1 自 2016 年 9 月 2 日至 2019 年 7 月 23 日的径向位移建立监控模型,用 2019 年 7 月 24 日至 2019 年 10 月 23 日的数据对各模型的预测效果验证;收集 DGS 拱坝 14 号坝段坝顶垂线测点 PL14—1 自 2018 年 10 月 1 日至 2021 年 5 月 15 日的径向位移建立监控模型,用 2021 年 5 月 15 日至 2021 年 8 月 15 日的数据对各模型的预测效果验证。

3 计算结果分析

3.1 模型精度评价

运行警戒值界限通过模型误差的概率分位值确定,笔者选取 2.5% 的分位值设置监控下限 $\Delta_{2.5\%}$,选取 97.5% 的分位值设置监控上限 $\Delta_{97.5\%}$,得到预警界限。由于案例中的拱坝在验证时段内处于正常运行状态,日常巡视检查未见任何异常变形迹象,因此验证时段内的监测数据不应超出预警界限,当新的监测位移超过预测区间时,系统将发出警报。但是当监控模型存在过度拟合时(即预测精度低于拟合精度),其泛化能力和预测精度降低,则可能出现虚警现象,且过度拟合程度越高,其虚警率越大。将监控模型虚警率

F_{AR} 定义如下:

$$F_{AR} = \frac{N_F}{N} \quad (8)$$

式中: N_F 为验证时段内被误判为异常数据的测值数量, N 为验证时段内的测值总数。

垂线测点径向位移监控模型评价指标见表 1。传统统计模型的拟合精度要优于 SMT 模型,但前者的预测精度明显低于后者。从模型过拟合程度来看,SMT 模型的过拟合程度低于传统统计模型,预测精度更高。两测点 SMT—T 模型的 OC 值均小于 1,表明 SMT—T 模型不存在过拟合,其对应的虚警率值分别为 0% 和 1.09%;而传统模型的 OC 值均大于 1,表明传统模型存在过拟合,从而导致其预测精度较低,虚警率较高。传统的统计模型在在预测精度方面不如 SMT 监控模型,分析其原因为分离式建模技术先对各变形效应量进行提取,再独立建立分量表达式,使得各分量的表达更加合理,能更准确地模拟拱坝变形量的水压、温度与时间效应,避免了分量之间的相互补偿影响,在一定程度上可以降低模型的过拟合程度,因此其预测精度往往较高。

由表 1 可看出 PL13—1 传统统计模型的 OC 值明显高于 PL14—1,表明其过拟合程度相对更高,其虚警率也更大;同时 SMT 模型相较于传统统计模型的预测精度更高的优势在 PL13—1 中更为明显,分析其原因为两工程气温和上游水位时间序列之间的相关性不同,JP 拱坝两环境量的线性关系较强,因此建模时多重共线问题更为明显,故预测效果较差;在传统模型中,测点 PL13—1 的三个分量间的互相补偿效应相对更严重,从而使得模型过度拟合程度更大。

3.2 模型优选结果

由表 1 可看出,当无过拟合现象时($OC \leq 1$),模型虚警率接近 0;当出现过拟合情况时($OC > 1$),OC 值越大,其虚警率越高,模型虚警率与 OC 值大致呈正相关关系。当模型 OC 值越大时,其模型过拟合程度越高, R^2 —OC 准则可以弥补传统模型识别方法不能定量比较和评价模型过度拟合程度的缺陷。

采用 R^2 —OC 准则选取模型时,挑选出的最优模型应符合可决系数较大且过拟合系数较小,因此两测点使用 R^2 —OC 准则选出的最优模型

表 1 垂线测点径向位移监控模型评价指标

测点	监控模型	R^2	拟合段指标			预测段指标			过度拟合系数	虚警率
			$RMSE$ /mm	MAE /mm	$MAPE$ /%	$RMSE$ /mm	MAE /mm	$MAPE$ /%	OC	F_{AR}
PL13-1 (JP)	$SMT-S$	0.998	0.668	0.537	6.31	0.560	0.487	7.40	1.02	0%
	$SMT-T$	0.996	0.963	0.777	14.79	0.379	0.297	6.34	0.36	0%
	$HST-lnt$	0.998	0.594	0.476	5.10	1.258	1.175	24.24	3.11	60%
	$HST-e$	0.998	0.596	0.477	5.15	1.256	1.183	24.90	3.14	60%
	$HTT-lnt$	0.998	0.608	0.505	8.44	1.694	1.631	24.65	2.98	77%
	$HTT-e$	0.998	0.594	0.494	8.53	1.664	1.611	25.09	3.00	83%
PL14-1 (DGS)	$SMT-S$	0.958	0.754	0.589	0.657	0.911	0.728	0.802	1.22	7.61%
	$SMT-T$	0.909	1.118	0.868	0.965	0.785	0.627	0.691	0.71	1.09%
	$HST-lnt$	0.958	0.754	0.585	0.650	1.292	1.111	1.227	1.83	28.26%
	$HST-e$	0.958	0.757	0.587	0.652	1.325	1.145	1.264	1.88	28.26%
	$HTT-lnt$	0.920	1.046	0.813	0.903	1.324	1.130	1.250	1.35	11.96%
	$HTT-e$	0.921	1.039	0.808	0.897	1.279	1.082	1.197	1.30	9.78%

均为 $SMT-T$ 模型,模型不存在虚假预警或虚警率较低(1.09%)。

4 结 语

(1) 根据案例研究,分离式建模技术构建的监控模型的模型拟合精度略低于传统的统计模型,但其解决了传统建模方法在未知时效分量变化规律情况下误设时效因子函数的问题,弱化了各模型分量之间不合理的相互补偿效应对模型预测能力的影响,与传统变形监测模型相比有效降低了模型的过拟合程度,提高了模型泛化和预测能力,降低了安全监控虚警率。

(2) 案例研究表明,过度拟合系数 OC 和虚警率 F_{AR} 存在密切关系,当无过拟合现象时($OC \leq 1$),模型虚警率接近 0;当出现过拟合情况时($OC > 1$), OC 值越大,其虚警率越高,模型虚警率与 OC 值大致呈正相关关系。 R^2-OC 准则能定量比较和评价模型过度拟合程度,既保证了模型的拟合精度,又限制了模型的过度拟合程度,更能反映拱坝监控预警的真实情况,提高了模型识

别的准确度。

参考文献:

[1] 费新峰,袁占荣,马基栋,等.特高拱坝垂线位移监控的混合模型研究[J].陕西水利,2022,(9):6-8,18.

[2] 陈锴,滕世敏,郑晓红.杨房沟水电站拱坝安全监测设计[J].水力发电,2021,47(11):104-107,117.

[3] 欧斌,吴邦彬,袁杰,等.基于 LSTM 的混凝土坝变形预测模型[J].水利水电科技进步,2022,42(1):21-26.

[4] 杨宇,于德介,程军圣.基于 EMD 与神经网络的滚动轴承故障诊断方法[J].振动与冲击,2005,(1):87-90,138-139.

[5] 赵耀,虞莉娟,苏义鑫,等.基于聚类分析和 Pearson 相关系数法的电网负荷数据清洗与去重[J].船电技术,2023,43(6):69-75.

[6] 张博,刘健,吴震宇,等.大坝变形监控模型识别的 $R-OC$ 准则[J].工程科学与技术,2023,55(3):175-185.

作者简介:

张 利(1984-),女,贵州习水人,工程师,管理学硕士,从事水利水电工程招标及合同管理工作;

吴震宇(1981-),男,四川宜宾人,工学博士,主要从事水工结构工程领域的研究工作.

(编辑:廖益斌)