

多源信息融合诊断大坝安全监测资料合理性

李子阳¹, 马福恒¹, 华伟南²

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 浙江省水利水电工程质量与安全监督管理中心, 浙江 杭州 310009)

摘要: 大坝安全监测资料中不可避免地存在误差信息, 准确诊断监测资料的合理性对掌握大坝安全性态具有重要影响. 在对大坝安全监测资料数据特征分析的基础上, 结合多源信息融合技术, 构建了数值融合→特征融合→决策融合的信息合理性分析诊断的3级模式, 并对大坝安全监测资料合理性诊断各级融合的典型实现方法进行了研究, 由此给出了大坝安全监测资料合理性诊断的体系架构.

关键词: 大坝; 监测资料; 合理性; 多源信息融合

中图分类号: TV 698.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)01-0041-06

大坝安全监测自动化水平的不断提高, 给分析大坝运行现状、评估大坝安全性态提供了丰富、全面的信息资源. 然而, 受大坝结构性态复杂性、观测过程中的随机因素以及安全监测仪器精度、可靠性的限制等影响, 大坝安全监测所获取的数据并非反映大坝性态的“真值”, 不可避免地存在随机误差或系统误差等. 监测数据的准确性和合理性直接影响大坝安全诊断和决策的正确性^[1]. 因此, 大坝安全监测资料的合理性分析诊断具有重要意义. 本文从大坝安全监测资料的数据特征分析出发, 结合多源信息融合技术, 对大坝安全监测资料合理性诊断的模式及其典型方法进行了研究, 并对其诊断分析体系进行了架构.

1 大坝安全监测资料特征

1.1 监测资料的多元性

大坝结构性态的复杂性决定了大坝安全监测难以获取其性态的真实反映, 主要体现在以下几个方面:

(1) 结构的不确定性. 大坝坝基地质构造产状无法准确勘探, 坝体材料参数(尤其是土石坝)具有很大的分散性, 大坝的施工质量影响难以评判等, 这些都使得大坝的结构性态具有很大的不确定性, 如材料和非线性、坝体及坝基材料参数的非均匀性^[2]等, 监测设施难以准确全面反映.

(2) 力学特性的多元性. 由于大坝工作条件和结构极其复杂, 大坝系统呈现出多元特征^[3], 荷载的随机性、裂缝分布的随机性等, 使得大坝结构的力学机理极其复杂, 为高度非线性. 大坝力学特性的多元性使得其难以用定量概括, 监测数据结果与实际必然存在误差或失真.

(3) 性态的渐变性. 大坝结构在外界巨大荷载的作用下, 随着时间的推移和坝龄的增长, 性态不可避免产生变化并逐渐累积^[4], 直至演变成病变. 大坝安全监测仪器是否具有足够的敏感性以反映大坝性态变化, 或监测数据的变化是否与大坝性态渐变性吻合, 需要进行相关分析.

(4) 认知的未确知性. 由于大坝性态及作用环境的复杂性, 受人们认知水平的限制, 在监测设计及监测数据的获取上同时也存在主观性的不确定性^[5].

(5) 监测技术的限制性. 虽然大量程、高精度的原观仪器及监测技术在大坝安全监测中应用越来越广

收稿日期: 2012-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079086, 51139001, 51209144); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y712005, Y710006); 浙江省水利科技重点项目(RB1112)

作者简介: 李子阳(1983-), 男, 安徽亳州人, 工程师, 博士, 主要从事大坝安全监控与预警研究. E-mail: zyli@nhri.com

泛,但仍然存在诸如仪器现场埋设成活率、信号输出及接受的可靠性和长期稳定性,以及仪器的系列化、标准化等问题^[6],影响大坝安全监测成果的可靠性和合理性。

1.2 误差特征分析

水库大坝根据其建筑物分布及监测项目的不同,常需要布置大量的监测仪器和实施多项目观测,包括大坝变形观测,坝体、坝基渗流观测,应力应变观测等。根据上述分析,受大坝复杂性态和作用环境影响,以及监测仪器及监测手段等限制,监测数据不可避免地存在误差或失真信息。根据误差理论,大坝安全监测值 x 由所监测性态的“真值” $[x]$ 和误差 e 组成,误差 e 根据其成因不同可大致分为随机误差、粗大误差和系统误差(图1)。随机误差主要由各种随机和偶然因素引起,符合均值为0的正态分布,在大坝安全监测数据中普遍存在;粗大误差由于观测过程中的操作疏忽在数据的记录、复制和计算处理过程中所产生的过失错误,往往表现出明显的异常,严重偏离真实值或既定统计模型;系统误差由相互独立的偶然因素作用引起的监测仪器故障等所造成的误差,也严重偏离真实值或既定统计模型,常表现为单侧点数据异常波动,并可能具有一定的连续性和阶段性。

由于仪器监测方式的不同及多重因素的干扰作用,在大坝安全监测原位资料中上述3种误差或失真信息均有可能存在,往往难以简单从数据形态上进行准确判断。大坝安全监测资料合理性分析的主要任务就是要根据监测数据的数据特征,结合大坝性态、所处环境、外界荷载、监测仪器、监测方法等多源信息,采用多源信息融合分析方法判别误差信息,并对异常信息进行准确识别和处理。

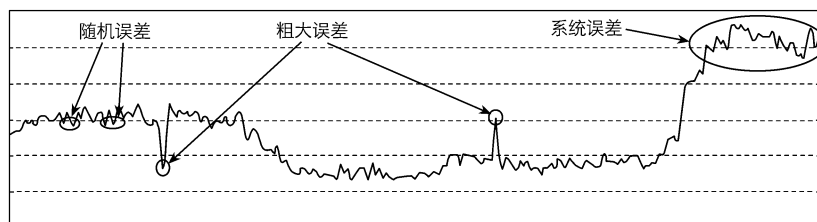


图1 误差特征示意图

Fig. 1 Error characteristics

2 信息合理性诊断融合模式

多源信息融合是指协调使用多个传感器,把分布在不同位置的多个同质或异质传感器所提供的局部不完整观测量及相关数据库中的相关信息加以综合,消除多传感器信息之间可能存在的冗余和矛盾,并加以互补,降低其不确定性,获得对物体或环境的一致性描述的过程。多源信息融合可有效利用多源信息提供的互补性,进行多级别、多方面、多层次的处理,从而可以获得被测目标更为全面的信息。

多源信息融合诊断大坝安全监测资料的合理性即利用信息融合技术,通过对不同监测环境、监测仪器、监测类别测点在信息上存在的相互印证、补充关系,运用多种数据融合方法,完成对原始监测信息的可靠性检验及信息融合,从而对大坝安全监测资料的合理性进行综合诊断。

按照分析的顺序及信息融合程度,大坝安全监测资料合理性的融合诊断模式可分为3个层次进行,即数值融合、特征融合与决策融合,采用混联型数据融合结构^[7],即一种类型的监测数据先通过同一数据融合中心进行融合分析,所得出的初级融合结果与其他类型融合结果再进行融合分析,组合得出信息合理性的最终融合诊断分析结果。其融合诊断模式如图2所示。

2.1 数值融合

数值融合是直接对原始监测数据进行的处理分析,是一种最低层次的融合,主要是对单测点数据本身进行的融合分析。其主要任务是实现原始监测数据的预处理,包括实时判断并处理上传时出现的非法、错误或不合理数据,以及监测数据的粗差初步识别等。数值融合尽可能多的保持了监测的原始信息,能够提供细微信息,其处理数据量大。由于在最低层进行,数值融合对原始信息的不确定性、不完全性和不稳定性缺少较为

全面的认识,在融合过程中对复杂原因引起的数据变化难以把握,纠错处理能力不强,仅能处理一些单一的粗大误差数据。

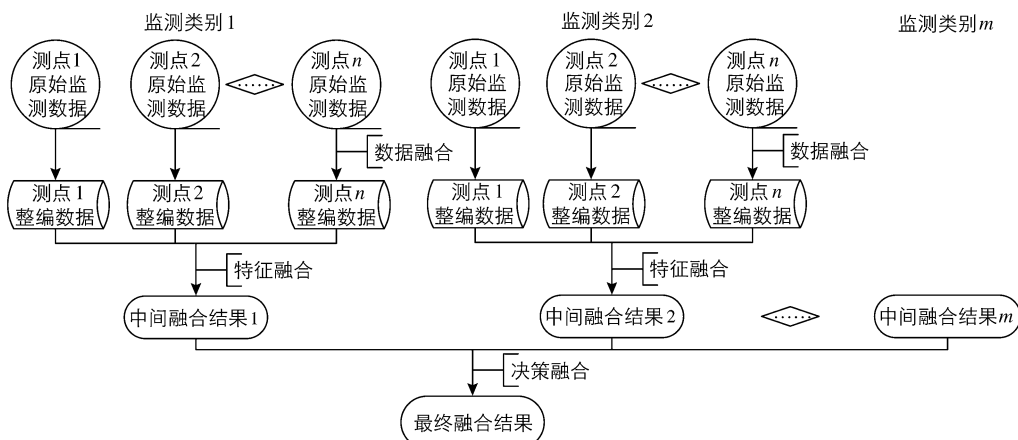


图2 信息融合诊断模式

Fig. 2 Pattern of information fusion diagnosis

2.2 特征融合

特征融合是将各个数据源中提取的整编信息进行综合处理和分析的过程,是中层融合,主要是对同类型测点数据借助特征值分析、相关性分析等方法进行的融合分析。其功能在于实现信息的统计分析,提供的特征信息直接与合理性分析相关。特征融合分析信息和合理性的基本步骤一般是:首先对单测点进行特征值统计、相关性分析及建模分析(统计建模、时间序列建模、灰模型及混合模型等),并融合同类型测点监测信息,构建坝体空间模型,从时空角度量化分析大坝工作性态。

2.3 决策融合

决策融合属最高层次上的融合分析,是对所有监测类型监测信息的融合分析。通过相关处理对不同监测类型的特征融合结果应用模式识别或模糊评判等方法,分析每一数据类型支持某种大坝综合性态决策的程度,通过综合推理求解方式对所有信息源数据的支持程度进行证据组合,将定量分析和定性分析结果综合起来,对大坝安全监测资料合理性进行综合评价。由于决策融合是对信息的综合调用,可以实现不同监测类型的信息互补,因而具有良好的容错性,在一个或几个传感器同时失效时仍能给出准确判断。

3 典型诊断方法

借助多种信息融合方法,可以有效实现监测资料是否失真及误差的判定,对监测资料的合理性进行诊断。结合大坝监测数据特点和多源信息融合分析方法,可采取多种方法进行监测数据合理性的分析诊断,主要采用的方法有比较法、绘图法、特征值统计、统计模型及统计诊断、力学模型以及证据组合分析法等。

3.1 比较法

水库大坝各建筑物在一定外界条件下的性态具有相对稳定性和规律性,表现在同一类监测项目之间存在一定的内在联系,这种内在联系的规律,在日常监测数据的处理中,可以将其作为衡量监测数据合理性、可靠性的依据。如在一定条件下大坝的变形、渗流、应力应变以及温度等的大小应在一定范围内,相差甚大、符号相反、超越仪器测量范围(量程)的测值即首先予以剔除。此外,与水库大坝工作状况明显不符的也为测值不合理。

比较法主要包括监测物理量的相互对比、监测成果与理论或试验成果的对比、与警戒界限值的对比等,如与设计计算值比较、同一物理量的各次测值比较、同一测次邻近同类物理量的比较等。此外,还包括与类似工程的类比。比较法可贯穿于从数值融合到决策融合的全过程,是监测资料和理性分析最实用的方法之一,

不仅可以实现粗差的判断,而且对由测点或基点的不稳定造成的系统误差也有很好的识别能力。

3.2 绘图法

由测值绘制相应的过程线、相关图、分析图、综合分析图等,可直观地了解和分析测值变化大小和规律,包括测值随时间变化的过程线、测值沿坝轴线分布、测值沿断面分布、测值空间分布、测值沿坝高分布等。以渗流压力监测为例,可以绘制渗压计测值与库水位的过程线、渗压计测值与库水位的相关图、沿坝轴线法向分布的渗压计测值分布图、沿断面分布的渗压计测值(类似于浸润线)、整个枢纽区的渗压计测值分布图(可表征渗流场)等,可直观了解渗流压力监测物理量的变化规律,辨识监测资料有无异常。

3.3 特征值统计

特征值统计法的一般内容是对各观测历年的极值(包括出现时间)、变差、周期、年均值及年变化率等进行统计,此外还包括极端环境量下的测值统计等。将测值与特征值出现的时间进行相互间的对比,考察各观测物理量之间在数量变化方面具有的一致性,从而判定测值的合理性。

3.4 统计模型及统计诊断

建立表达观测物理量的原因量(库水位、气温、降雨量、时效等)与效应量(变形、渗流、应力应变等)之间关系的数学模型,对于观测资料序列较长的大坝,可建立统计模型进行回归分析,定量分析测值的规律性和合理性。对于一般监测序列,可建立考虑水压、温度、降雨及时效等综合影响的统计模型。对于测值中出现的因更换观测仪器引起的测点测值突变,可在时效分量公式中引用单位阶跃函数。另外,通过对监测项目时空影响因素的分析,利用监测资料,也可以建立时空分布模型及空间位移场模型^[8]等。

建立时空统计模型后,即可借助统计诊断的多种方法进行合理性分析,如最常用 3 准则,或将残差进行标准化处理后根据其值大小采用假设检验判别误差类型^[9]等;也可通过集成多测点的信息来模拟专家思维,完成异常诊断和分析,包括对观测值进行异常值探测以及异常趋势识别,利用多传感器数据融合进行系统误差识别和监测故障判别^[10]等。

3.5 力学模型

对于不符合一般规律但测值稳定性较好的测值,可结合相应的力学知识分析,从而评价其合理性。以某工程心墙部位的渗压计为例,测值过程线非常稳定,但表现出测值高于库水位的“异常”现象^[11]。鉴于此,利用土力学知识,首先利用有限元模型模拟相应的施工及加载过程,计算该部位的孔隙水压力分布情况,从而得到真正库水位的影响程度,得到描述心墙防渗能力的渗压计测值过程线。通过计算结果可判定:心墙渗压计测值高于库水位的现象是由于施工时产生的超静孔隙水压力未完全消散引起的,测值是合理的。

3.6 证据组合

由于影响大坝安全因素的复杂性和影响不确定性,仅凭特定的理论分析对大坝安全监测资料合理性进行评价有时难以达到预期效果,还需运用诸如证据组合等其他模糊分析评价手段进行综合分析^[12]。

D-S 证据理论应用对于处理不确定性、模糊性问题具有明显优势,其计算可以通过计算机实现,计算方法较为简单;D-S 合成公式可以综合不同专家的知识或不同数据源数据,而且评价更为准确。因此,以 D-S 证据理论方法来综合评价大坝安全监测资料合理性是一种更加有效的手段。其基本实现流程为:在评价过程中首先根据系统工程理论与层次分析法,确定需要评价的监测项目和监测资料,根据不同方法来确定信息的合理性程度,然后通过证据组合规则合成,确定最终的合理性程度(如可采用隶属函数获得其总的合理性概率等)。证据组合评价模型如图 3 所示。

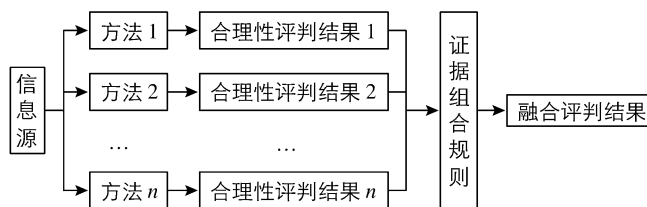


图 3 证据组合评价模型

Fig. 3 Model of evidence combination evaluation

4 信息合理性诊断体系架构

根据上述分析,从大坝安全监测资料特征分析出发,结合多源信息融合技术,构建大坝安全监测资料合理性融合诊断的体系框图见图4。

通过单测点数据的数值融合分析,可以实现粗差识别;通过同一监测类型数据的特征融合,可以实现对系统误差的判断和识别,尤其是单测点仪器故障等造成的测值变化等;对于由观测基点造成的系统误差或由于大坝病变等复杂原因造成的测值的特殊变化,可通过决策融合予以评判。多种融合方法相结合,更能增加监测资料合理性诊断的直观性和准确性。

5 结 语

本文结合大坝安全监测资料的数据特征,从结构的不确定性、力学特性的多元性、性态的渐变性、认知的未确定性、监测技术的限制性等方面分析了大坝监测资料的不确定性,并由此对误差组成和分类进行了分析研究。继而结合多源信息融合技术,构建了大坝安全监测资料合理性分析的数值融合→特征融合→决策融合的3级模式,并给出了各级融合的典型实现方法,包括比较法、绘图法、特征值统计、统计模型及统计诊断、力学模型以及证据组合分析法等。由此构建了大坝安全监测资料合理性诊断的体系架构,以结合监测数据之间的互补性,实现多种复杂原因形成的监测数据的合理性分析,为大坝现状分析提供合理可信的依据,对评估大坝安全具有重要意义。

参 考 文 献:

- [1] 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. (WU Zhong-ru. Safety monitoring theory & its application of hydraulic structure[M]. Beijing: China Higher Education Press, 2003. (in Chinese))
- [2] DODAGAUDAR G R, VENKATACHALAM G. Reliability analysis of slopes using fuzzy sets theory[J]. Computer and Geotechnics, 2000(27): 101-115.
- [3] 苏怀智, 吴中如, 戴会超. 初探大坝安全智能融合监控体系[J]. 水力发电学报, 2005, 24(1): 122-126. (SU Huai-zhi, WU Zhong-ru, DAI Hui-chao. System of theories and methods monitoring intelligently dam safety[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(1): 122-126. (in Chinese))
- [4] 李子阳, 郭丽, 顾冲时. 大坝监测资料的时变 Kalman 预测模型[J]. 武汉大学学报: 自然科学版, 2010(8): 991-995. (LI Zi-yang, GUO Li, GU Chong-shi. Time-varying Kalman model for dam monitoring data prediction[J]. Journal of Wuhan University, 2010(8): 991-995. (in Chinese))
- [5] 李子阳. 大坝病险预警的盲分析模型和方法[D]. 南京: 河海大学, 2009. (LI Zi-yang. The models and methods of blind analysis for early warning of ill-condition dam[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))
- [6] 李君纯. 土石坝工程论文集[M]. 南京: 河海大学出版社, 2006. (LI Jun-chun. Selected papers of Li Junchun on embankment-dams engineering[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2006. (in Chinese))
- [7] 贾永红. 多源遥感影像数据融合技术[M]. 北京: 测绘出版社, 2005. (JIA Yong-hong. Data fusion technique for multisource remotely sensed images[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2005. (in Chinese))
- [8] 李凤珍, 郑东健, 肖浩波. 拱坝空间位移场安全监控模型应用研究[J]. 红水河, 2006, 25(1): 38-40, 45. (LI Feng-zhen, ZHENG Dong-jian, XIAO Hao-bo. Application research of safety monitoring model on radial spatial displacement field of arc dam[J]. HongShui River, 2006, 25(1): 38-40, 45. (in Chinese))

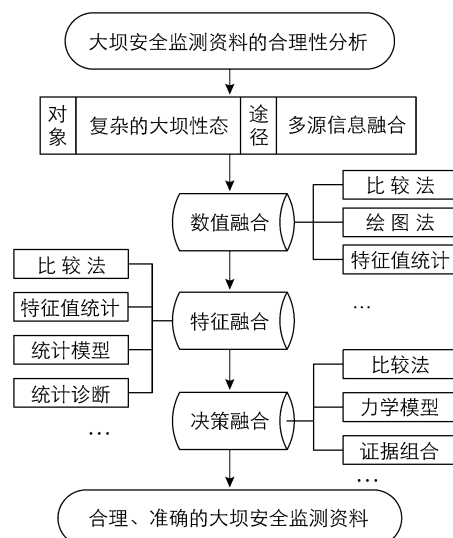


图4 大坝安全监测资料合理性融合诊断体系

Fig. 4 System of dam safety monitoring data rationality fusion diagnosis

- [9] 韦博成, 鲁国斌, 史建清. S 统计诊断引论[M]. 南京: 东南大学出版社, 1990. (WEI Bo-cheng, LU Guo-bin, SHI Jian-qing. S statistical diagnostics introduction[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1990. (in Chinese))
- [10] 王建, 伍元, 郑东健. 基于多传感器信息融合的大坝监测数据分析[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2004, 37(1): 32-35. (WANG Jian, WU Yuan, ZHENG Dong-jian. Analysis of dam safety monitoring data based on multi-sensor data fusion theory[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2004, 37(1): 32-35. (in Chinese))
- [11] 刘成栋, 马福恒, 向衍, 等. 大坝安全监测系统鉴定及其软件研制[J]. 水利学报, 2007(增刊1): 214-219. (LIU Cheng-dong, MA Fu-heng, XIANG Yan, et al. Appraisal of safety monitoring system of dam and development of the software[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(Suppl1): 214-219. (in Chinese))
- [12] 陶丛丛, 徐波, 王校利. D-S 证据理论在大坝安全监控中的应用[J]. 红水河, 2010, 29(2): 34-37. (TAO Cong-cong, XU Bo, WANG Xiao-li. Application of D-S evidence theory to dam safety monitoring[J]. HongShui River, 2010, 29(2): 34-37. (in Chinese))

Diagnosis of dam safety monitoring data rationality based on multiple-source information fusion

LI Zi-yang¹, MA Fu-heng¹, HUA Wei-nan²

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China; 2. Zhejiang Provincial Water Conservancy and Hydropower Engineering Quality Supervision and Safety Management Center, Hangzhou 310009, China)

Abstract: The deviations exist in dam safe monitoring data inevitably. Whether it is reasonable has a significant impact on the accuracy of analysis and diagnosis of dam safety situation. On the basis of data characteristics analysis, the multiple-source information fusion technology is introduced to construct a 3-level analysis model of information rationality that is from numerical-fusion to characteristics-fusion and then to decision-fusion. Then typical methods of each level are given, and from which the system structure is made up for dam safety monitoring data rationality analysis in this study.

Key words: dam; monitoring data; rationality; multiple-source information fusion

国家农业科技成果转化资金项目“农村灌区节水小型水闸 除险加固技术转化”顺利通过验收

2012 年 11 月 10 日,水利部国际合作与科技司在江苏省南京市主持召开由我院承担的国家农业科技成果转化资金项目“农村灌区节水小型水闸除险加固技术转化”验收会。验收专家组由江苏省水利厅、安徽省水利厅、河海大学、水利部水工金属结构安全监测中心、安徽省水利水电勘测设计院、中水淮河规划设计研究院有限公司、南京市水利局等单位的专家组成。水利部推广中心张金宏副主任、石贵余教高、我院蔡跃波副院长以及科研处、项目组成员参加了会议。

验收专家组听取了项目承担单位的执行情况汇报,审查了有关技术文件和相关资料,经质询和讨论,一致认为:项目提供的验收资料齐全,内容翔实,项目组织管理规范,资金按合同规定到位,经费使用符合有关规定。项目分析了农村灌区不同结构型式和运行环境的小型水闸建筑物的老化病害特点与成因,应用结构损伤振动诊断、高密度电阻率法检测、粘钢加固、粘碳纤维加固等成果,提出了针对小型水闸的检测、安全评价、修复设计和施工等成套技术,并在安徽省亳州市和江苏省靖江市的农村水利灌区 4 个小型水闸进行了示范应用,项目的社会效益、经济效益、生态效益显著,推广应用前景广阔。项目全面完成合同规定的各项任务 and 经济技术指标,验收专家一致同意通过验收。

验收会后,水利部推广中心张金宏副主任、石贵余教高在安徽省亳州市水务局领导和我院科研处和项目组成员陪同下,对安徽省亳州市示范运用情况进行了检查,并给予了高度评价。

摘自南京水利科学研究院网站