

信息智能融合技术在曹娥江大闸 安全监测系统中的应用

王英禄¹, 马福恒², 刘成栋²

(1. 浙江省绍兴市曹娥江大闸建设管委会, 浙江 绍兴 312000; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 曹娥江大闸安全监控综合评价系统由若干个子系统组成, 其中安全监测系统的分层和分块特性使得系统更为复杂, 以往的局部监测、局部诊断和评价等技术手段已不适合本工程实际安全管理需要. 本文运用近年来才发展起来的信息融合技术, 将信息、人工智能、材料、工程与管理等多学科的理论和方法进行科学、有效、合理的融合, 并初步将其分为数据融合、分析融合、诊断融合和评价融合等4个层次, 从而建立曹娥江大闸安全监测评价系统, 实现大闸安全智能监控的目标.

关 键 词: 曹娥江大闸; 安全监测系统; 信息智能融合; 综合评价

中图分类号: TP273.5:TV698.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2009)02-0021-05

在信息化时代, 进入评价系统的信息越来越多、层次越来越复杂. 因此, 在信息处理中心, 绝不允许多源的观测信息仅仅是持续简单的堆积, 需要对其进行有效的融合处理. 所谓信息融合, 是指利用计算机技术对按时序获得的多源观测信息在一定准则下加以自动分析综合, 以完成所需决策而进行的信息处理过程. 由于信息融合具有突出的优点, 1988年美国国防部将它列为22项关键技术之一. 近年来多个国家投入大量人力和物力进行信息融合技术的研究, 并将其应用于众多军用和民用领域^[1-6], 其应用范围包括战场信息管理系统、智能制造、智能交通、医疗诊断和大坝监控系统等.

曹娥江大闸枢纽工程位于浙江省绍兴市曹娥江河口, 为国内第一河口大闸, 是一座具有防洪(潮)、治涝、水资源开发利用及航运、改善水环境和提高土地使用价值等多种功能的综合工程. 工程由挡潮闸、堵坝、导流堤等工程组成. 挡潮闸总宽705 m, 闸孔总数28孔, 堵坝长800 m, 导流堤长678 m. 为掌握挡潮闸和堵坝运行状况, 曹娥江大闸在挡潮闸、堵坝和下游导流堤布设了外部变形、内部变形、接裂缝、渗流、接触土压力以及钢筋应力等多个观测项目. 本文基于全方位思维模式, 应用海量数据综合处理、信息科学、人工智能理论、计算机技术等与传统坝工理论^[7]交叉融合的思想, 初步建立了曹娥江大闸安全监测评价系统.

1 信息智能融合体系核心构成

结合安全监控领域特点, 将曹娥江大闸信息智能融合体系分为数据融合层、分析融合层、诊断融合层和评价融合层四个层次.

1.1 数据融合层

数据融合层是指为了得到大闸安全性态准确一致的数据描述, 通过智能多传感器系统提取与诊断问题相关的原始数据, 对匹配的采集数据借助现代计算机技术, 运用数据变换、清洗、过滤、联合和合成等手段进

收稿日期: 2008-08-15

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目“水库大坝安全保障关键技术研究”(2006BAC14B04)

作者简介: 王英禄(1955-), 男, 山东武城人, 高级工程师, 主要从事水利工程建设管理工作. E-mail: sxswyl@163.com

行融合,以获得高质量的信息.该层属最低融合层,主要由四部分组成:功能辨识、数据清洗、特征提取和数据融合.

功能辨识模块包含变形监测子系统、渗流监测子系统、应力监测子系统及裂缝监测子系统等,主要将来自传感器信息按功能分类,为下一步各类系统的融合提供数据,使杂乱无章的数据初步系统化;数据清洗主要去除监测数据集中的噪声数据、无关数据,并填写空缺值、平滑噪声数据,识别、删除离群数据,以及知识背景上的白噪声;特征提取主要给出所测目标的某一方面特性,如最大值、最小值、变幅等;数据融合部分主要将各个传感器观测的数据依据某种规则进行融合.对于数据融合层来说,本系统采用的方法主要有模糊抗差处理和贝叶斯估计融合算法^[8].下面简要叙述其算法和步骤.

传感器获取的监测数据难免存在一定的粗差,且粗差具有随机性和模糊性.粗差的这种随机—模糊二重性决定了粗差识别需用随机模糊处理方法.本系统采用的粗差识别方法如下.

$$A \text{ 的隶属度函数为: } \mu_A(x_i) = \mu_i = \exp[-D_{i_l}(x_i)] \quad (1)$$

$$\text{随机模糊概率密度函数为: } p_i = -\lambda_l \exp[-(1 + \lambda_0) - \lambda_l \mu_i] \quad (2)$$

取论域 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 上的一个 F 子集 A , x_i 为 A 中的一个 $R-F$ 变量,其隶属度函数如(1)式, $R-F$ 的概率分布密度模型如(2)式.给定检验置信因子 β ,则有 $R-F$ 分布函数

$$F(\mu_\beta) = \int_{-\infty}^{\mu_\beta} f(\mu) d\mu = \beta \quad (3)$$

$$f(\mu) = -\lambda_l k \exp[-(1 + \lambda_0) - \lambda_l \mu] \quad (4)$$

(3)式中的 μ_β 为检验阈值.如果存在 x_j ,其隶属度为 μ_j ,且 $|\mu_j| < |\mu_\beta|$,则认为该观测数据具有显著的离群特征,为粗差,应加以剔除.(4)式中设置系数的目的是为了容纳隶属度函数的模型误差、权重因子的取值误差及观测值中非随机因素造成的影响,应满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(\mu) d\mu = 1$.

为度量曹娥江大坝各建筑物观测数据的偏差程度,设计以置信距离测度作为融合度,有效支持临界数作为有效数据提取准则,从而得出所有有效数据融合集,并运用 Bayes 估算法融合集中数据,得出最佳融合值.

大坝监测数据优化融合算法步骤:

- ①给出置信距离测度界线值和有效支持临界数,输入大坝同一指标参数的传感器观测数据;
- ②计算距离测度;
- ③应用有效数据提取准则,确定融合集和最佳融合数;
- ④以 Bayes 估计理论为基础,对融合集中的数据进行优化融合,得到测量参数的最优融合值,作为分析、评价大坝运行性状的依据.

1.2 分析融合层

分析融合层主要建立效应集与荷载集的确定性和非确定性关系模型,模拟大坝的动态行为和内在作用机理.其层次结构见图1.由于采用单一模型来对挡潮闸系统结构及输入、输出进行模拟、预测,具有一定的局限性,很难精确模拟受各种复杂规律影响的大闸实际结构性态.本系统采用多个不同的模型,并加以有效融合,充分地利用各种信息,达到提高拟合和预测精度的效果.本系统主要采用线性和非线性融合模型.

1.2.1 线性融合模型 线性融合模型建立思路:先建立并优选几个统计模型,然后选取一组最优的权重将它们线性组合,从而得到融合模型.建立融合模型的关键是合理确定权系数向量.

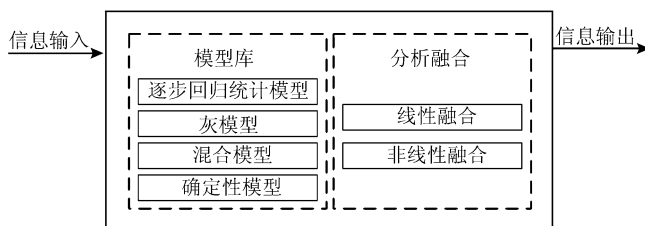


图1 分析融合层结构图

Fig.1 Structure of fusion layer for analysis

给定 m 个权系数组成的权向量 $K = [k_1, k_2, \dots, k_m]$, 并取 $\sum_{i=1}^m k_i = 1$. 记 $\hat{Y} = [\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_m]$, 可以构成下列融合模型:

$$\hat{y} = K\hat{Y}^T \quad (5)$$

式中: $\hat{y}$ 为融合模型的拟合向量.

第 i 个模型的拟合误差向量 $e_i^T = (e_{it} = y_t - \hat{y}_{it} | t = 1, 2, \dots, n)$; 各模型的拟合误差矩阵 $E = [e_1, e_2, \dots, e_m]$; 那么融合模型的拟合误差为:

$$e^T = KE^T \quad (6)$$

根据残差平方和最小的原则, 可以构造以下数学规划模型:

$$\min Q = e^T e = [KE^T][KE^T]^T = KE^T EK^T = K\bar{E}K^T \quad (7)$$

$$\text{S. t. } RK^T = 1$$

运用拉格朗日求条件极值方法, 残差平方和 Q 可以写成:

$$Q = K\bar{E}K^T + \lambda(RK^T - 1) \quad (8)$$

式中: λ 为拉格朗日乘数. 假设向量 $e_1, e_2, \dots, e_m$ 线性独立, 则 $\bar{E}$ 必为对称正定矩阵, 从而其逆阵 $\bar{E}^{-1}$ 存在. 求出了权重就可以形成融合模型.

1.2.2 非线性融合模型 人工神经网络^[9]是一种基于模仿大脑神经网络结构和功能而建立的新型信息处理系统, 由大量简单处理单元连接而成的自适应非线性动力学系统, 具有大规模的并行处理、分布式的信息存储、自适应、自组织及自学习功能. 因此, 基于三层 BP 神经网络进行融合非线性建模有较好的效果. 其步骤为: 第一层为输入层, 若要对 m 个较优模型进行组合, 则输入结点数为 m 个, 输入为单个模型的拟合值; 第二层为中间层, 中间层的结点个数需通过试验比较; 第三层为输出层, 结点数为 1 个, 输出响应即为组合模型的拟合值(期望输出值). 由于 BP 神经网络存在自身的限制和不足, 如收敛速度慢、陷入局部最小值等缺点. 因此在进行网络训练时采用以下措施: ①采用动量法. 网络训练时, 不仅考虑误差在梯度上的作用, 而且考虑在误差曲线上变化趋势的影响, 从而找到更优的解; ②采用自适应学习速率, 缩短训练的时间; ③限定输入、输出值在 $[-1, 1]$ 之间变化.

1.3 诊断融合层

为了克服传统方法(多依据专家经验)确定大坝病变可能成因的盲目性, 设置诊断融合层(见图 2), 对曹娥江大坝将来可能出现的病因自适应进行挖掘和提炼, 获取大坝病变与病因的逻辑关系的过程. 该层核心内容是利用融合逻辑诊断与数据挖掘技术. 数据挖掘不但能够学习已有的知识, 而且能够发现未知的知识; 不但可以处理时间序列数据, 还可以处理文本数据、多媒体数据等大量数据; 对数据背后隐藏的特征和规律进行分析. 研究思路如下: 首先, 调查收集与病变产生有关的各种资料, 包括设计、施工、运行、管理等各阶段的记录资料以及各种实测、试验、科研成果等资料; 在分析整理收集资料的基础上, 对某种出现的病状的成因进行逻辑诊断, 建立故障树, 分析其产生的可能原因; 在此基础上, 应用粗集理论, 挖掘病态产生原因的潜在规律或主要成因.

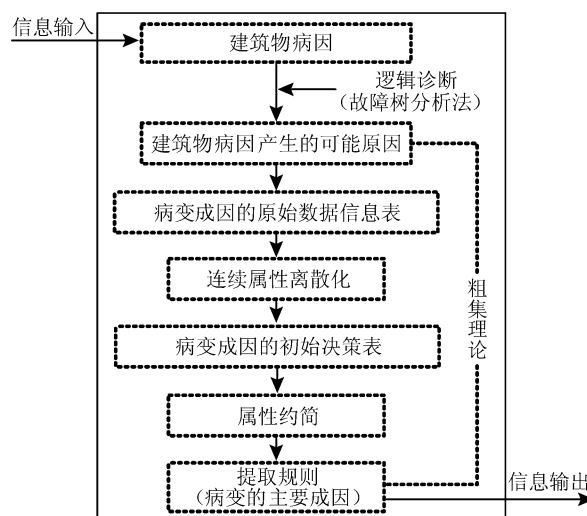


图2 建筑物诊断融合层实现流程图

Fig. 2 Realization flowchart of fusion layer for buildings diagnosis

1.4 评价融合层

对建筑物健康状况的评价不仅取决于对单个测点单个项目实测性态的评价,更重要的是对建筑物不同部位不同项目所反映出的整体安全性态的综合评价。但由于建筑物安全相关信息具有多样性、可变性、不确定性(随机性、模糊性)和不完全性。因此,对曹娥江大坝这样的复杂系统进行分析评价,首先构建合理的评价指标体系和制定指标度量规则,并在考虑各专家的权威性权和专业熟悉性权的基础上,采用 Delphi 法与层次分析法相结合的方法求出各指标权重值,采用多层次模糊综合评价模型^[10]对曹娥江大坝安全性态进行综合评价。下面仅给出应用模糊理论实现大坝安全状态综合评价的基本步骤的流程(见图 3)。

2 曹娥江大坝安全监控信息智能融合

根据智能融合的基本原理和方法,建立曹娥江大

坝安全监控智能融合流程图(见图 4)。应用先进的数据融合技术从海量的感知数据源中提炼出准确、可靠的数据;应用数学、力学、坝工理论以及融合的方法,分析并从中发现异常因素;基于系统、全局的观点,自适应地诊断成因和评价建筑物的安全状况,快速作出辅助决策的建议,返回给决策部门。

3 结 语

应用前沿的人工智能技术和现代计算机技术,对曹娥江大坝监测信息(数据、规则、知识、方法等)进行智能融合,探讨了数据预处理、观测资料分析、病因诊断和安全评价等 4 个层次智能融合思想和典型方法,进而构建了曹娥江大坝安全监测评价体系。目前,信息融合技术在我国监控领域的应用研究还不多,系统的体系和功能还需不断完善和提高。

参 考 文 献:

- [1] 唐汝臻, 钱寒峰. 智能交通信息采集中数据融合技术探讨[J]. 科技咨询导报, 2007, (26): 17-19. (TANG Ru-sang, QIAN Han-feng. Discussion on data fusion technology of intelligent transportation information gathering[J]. Science and Technology Report, 2007, (26): 17-19. (in Chinese))
- [2] 李 斌, 李文峰. 智能物流中面向 RFID 的信息融合研究[J]. 电子科技大学学报, 2007, (6): 1329-1331. (LI Bin, LI Wen-feng. Research on RFID oriented information fusion in intelligent logistics[J]. Journal of University of Electronic Science

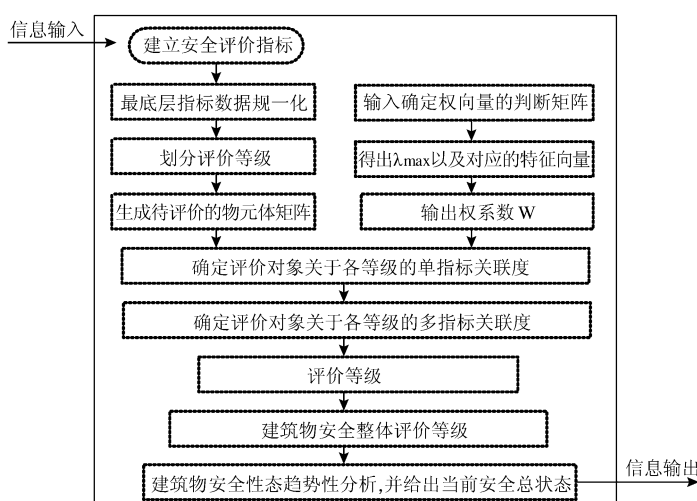


图 3 建筑物安全综合评价层实现流程图

Fig. 3 Realization flowchart of synthetic evaluation layer for buildings safety

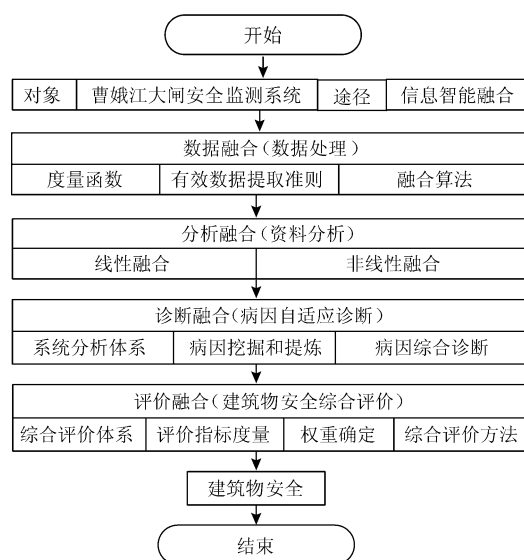


图 4 曹娥江大坝安全监控信息智能融合流程图

Fig. 4 Flowchart of Cao'e river floodgate safety monitoring system based on information intelligent fusion

- and Technology of China, 2007, (6): 1329-1331. (in Chinese))
- [3] 边建良. 一种混合式的实时智能信息融合系统设计[J]. 各界·科技与教育, 2008, (2): 35-37. (BIAN Jian-liang. Design of mixed style real-time intelligence information merging system[J]. GEJIE · KEJIYUJIAOYU, 2008, (2): 35-37. (in Chinese))
- [4] 孙大林, 蒋大明. 信息融合技术在智能交通安全系统中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, (4): 62-65. (SUN Da-lin, JIAN Da-ming. Applications of the information fusion technique in intelligent traffic safety system[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2006, (4): 62-65. (in Chinese))
- [5] 黄洪琼, 汤天浩, 金永兴. 基于信息融合的船舶智能运输系统[J]. 上海造船, 2008, (1): 51-53. (HUANG Hong-qiong, TANG Tian-hao, JIN Yong-xing. Ships intelligence transportation system based on information fusion[J]. Shanghai Shipbuilding, 2008, (1): 51-53. (in Chinese))
- [6] 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, (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 Ennineering, 2005, (1): 122-126. (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. (WU Zhong-ru. Hydraulic Engineering Structure Safety Monitoring Theory and Application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese))
- [8] 苏怀智, 顾冲时, 吴中如. 综论人工智能技术在大坝安全监测中应用[J]. 大坝观测与土工测试, 2000, 24(3): 7-9. (SU Huai-zhi, GU Chong-shi, WU Zhong-ru. Application of artificial intelligence theory to dam safety monitoring[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2000, 24(3): 7-9. (in Chinese))
- [9] 张青. 基于神经网络最优组合预测方法的应用研究[J]. 系统工程理论与实践, 2001, (9): 90-93. (ZHANG Qing. Application research on an optimal mix forecasting method based on ANN[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2001, (9): 90-93. (in Chinese))
- [10] 李祝龙, 章金钊. 青藏公路冻土路基沉降的模糊综合评判[J]. 公路, 2000, (2): 21-24. (LI Zhu-long, ZHANG Jin-zhao. Fuzzy synthesis evaluation of Qinghai-Tibet highway frozen earth roadbed subsidence[J]. Road, 2000, (2): 21-24. (in Chinese))

Application of information intelligence fusion technology in the Cao'e river floodgate safety monitoring system

WANG Ying-lu¹, MA Fu-heng², LIU Cheng-dong²

- (1. Shaoxing Municipal Cao'e River Floodgate Construction Administration Committee, Shaoxing 312000, China;
2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The Cao'e river floodgate safety monitoring and appraisal system is composed of some sub-systems. The system lamination and the piecemeal characteristics make the system very complex. Former partial monitoring methods, partial diagnosis and appraisal can not meet this actual safety control need of the project. The information fusion technology, developed in recent years, is used to fuse the information, the artificial intelligence, the material, the project management data and so on effectively. The fusion has four levels: the data fusion, the analysis fusion, the diagnosis fusion and the appraisal fusion. The Cao'e river floodgate safety monitoring system is thus established and the floodgate security intelligence monitoring goal is accomplished.

Key words: Cao'e river floodgate; safety monitoring system; information intelligence fusion; synthetic evaluation