水　利　学　报
2018年7月　　SHUILI　XUEBAO　　第49卷　第7期

文章编号:0559-9350(2018)07-0775-12

基于实时监控的混凝土坝振捣施工质量动态评价研究

钟登华，沈子洋，王佳俊，崔　博，任炳昱，王　栋
（天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室，天津　300072）

摘要：混凝土坝仓面振捣质量评价是混凝土坝施工质量控制的重要手段。传统方法采用事中人工经验控制振捣参数与事后有限的钻芯取样点检测相结合来控制混凝土坝振捣施工质量；此外，现有的振捣台车振捣监控研究中仅采用单个测距仪进行测距，且缺乏仓面振捣质量评价方法。针对混凝土坝仓面内振捣施工实时质量动态评价和反馈控制的挑战和难点，本文提出了基于双测距仪联合测距方案的混凝土坝振捣施工质量实时监控方法，并基于该方法建立了考虑混凝土特性参数不确定性的混凝土振捣质量动态评价模型，该模型主要包括以下内容：(1)引入“信息熵”理论对混凝土特性参数的不确定性进行量化分析；(2)在考虑参数不确定性的情况下基于随机森林算法提出了混凝土抗压强度动态计算方法，并将计算结果应用于混凝土坝全仓面振捣质量评价。将该模型与多元线性回归和人工神经网络算法建立的评价模型进行了对比分析，验证了本模型的一致性和优越性。应用本文提出的评价方法对我国某西南碾压混凝土坝工程仓面变态混凝土区域的振捣质量进行了动态评价，结果表明，该方法能够准确评价仓面混凝土振捣质量，为混凝土坝振捣施工质量控制提供了理论依据。

关键词：混凝土坝；振捣质量评价；振捣实时监控方法；不确定性；随机森林算法
中图分类号：TV512　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.13243/j.cnki.slxb.20180122

1　研究背景

混凝土振捣质量控制是混凝土坝施工质量控制的重要环节，混凝土坝振捣质量的主要评价指标为混凝土抗压强度[1]。振捣台车施工作业现场通常采用人工经验控制施工过程中的振捣参数(插入点坐标、插入深度和振捣时间)与事后钻芯取样检测混凝土抗压强度相结合的方法来控制混凝土坝振捣施工质量，但该方法存在以下局限：(1)振捣参数的控制主要依靠驾驶员的主观判断，不能保证参数控制的准确性；(2)有限数量的取样点无法反映出全仓面的振捣质量；(3)钻芯取样结果无法实时获得，在出现振捣质量缺陷时不能及时补救。因此，有必要研究出一种实时、连续的混凝土坝振捣施工质量监控和动态评价方法，以实现振捣施工参数的准确采集和全仓面混凝土振捣质量的精细化控制，确保混凝土坝工程的施工质量。

混凝土振捣质量主要受混凝土特性参数(水灰比和坍落度)和振捣参数的影响，但由于振捣密实机理较为复杂，近年来关于混凝土坝振捣施工质量控制的研究数量较少且主要集中在振捣参数的实时监控方面。Gong等[2]利用UWB定位技术实现了手持式振捣棒的实时精确定位和振捣作用范围的可视化展示，提出了一种混凝土振捣效应的实时监控方法。田正宏等[3-4]利用GPS定位技术和电信号转换技术进行振捣轨迹、振捣时间和插入深度等振捣参数的实时监控，实现了人工振捣施工质量控制。成都勘测设计研究院[5-7]针对大坝施工现场广泛使用的振捣台车开发出了一套基于计算机图形技

收稿日期：2018-02-02；网络出版日期：2018-06-27
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180627.1041.004.html
基金项目：国家自然科学基金项目(51439005，51339003)；国家自然科学基金创新研究群体项目(51621092)
作者简介：钟登华(1963-)，男，江西赣州人，教授，博士生导师，中国工程院院士，主要从事水利水电工程施工仿真与实时控制分析技术研究。E-mail：dzhong@tju.edu.cu

术的混凝土振捣可视化监控系统，实时监控振捣机架多个振捣棒的位置、倾角、插入深度和振捣时间等参数。天津大学[8]基于振捣台车施工提出了常态混凝土振捣质量实时监控方法，并建立了一套振捣参数报警反馈控制机制。在大坝施工质量评价领域，现有的考虑参数不确定性的质量评价研究主要集中在基于碾压质量实时监控系统评价大坝的压实质量[9-11]。王晓玲等[12]采用遗传算法改进的神经网络方法，建立了利用碾压监控参数和料源参数预测面板堆石坝坝体干密度的模型，并基于干密度和可靠度间的二元耦合关系提出了全仓面压实质量动态评价方法；王瑞等[13]在考虑料源参数不确定性的基础上，通过改进的Bootstrap方法和多层前向的神经网络算法提出了利用料源参数和碾压参数预测干密度的动态评价模型，实现了全仓压实质量评价；钟登华等[14]在考虑混凝土特性参数不确定性的基础上，利用熵-盲数理论和线性回归分析方法提出了考虑压实质量影响的全仓面层间结合质量动态评价方法。

在混凝土坝振捣质量实时监控研究中，缺乏关于振捣台车施工质量监控方法的研究。由于人工振捣和台车振捣存在较大的差异，田正宏等[3-4]提出的人工振捣监控理论无法适用于振捣台车施工中。成都勘测设计研究院[5-7]提出的振捣台车施工监控方法是采用单个测距仪进行距离测量，测距方案的稳定性较差，此外该研究没有提出仓面振捣质量验收管理方法，因而无法对现场施工质量进行有效地控制。目前关于振捣质量评价的研究仍是空白，作为振捣质量的影响因素之一的混凝土特性参数存在一定的不确定性，这种不确定性一方面来源于现场浇筑混凝土料分为不同批次生产再加上现场人工和环境的影响，导致仓面不同位置混凝土特性参数存在变异性；另一方面来源于采用有限的取样点数据随机模拟全仓面的混凝土特性参数分布情况时产生的随机性，因而在进行全仓面混凝土振捣质量评价时需要对混凝土特性参数的不确定程度进行量化分析。另外，目前大坝施工质量评价主要采用线性回归和人工神经网络等算法构建评价模型，拟合精度有待进一步提高。

针对上述问题，本文开展实时监控下考虑参数不确定性的混凝土坝振捣质量动态评价研究，其主要包括三个方面内容：(1)针对目前研究中测距方案稳定性较差以及缺乏仓面质量验收管理方法的不足，基于GNSS技术、物联网技术、无线数据传输技术和计算机图形学技术，提出了一种结合双测距仪联合测距方案的考虑振捣质量验收管理的混凝土坝振捣施工质量实时监控方法，实时、连续、精确地获取振捣台车的振捣参数；(2)为了验证考虑参数不确定性的必要性，引入“信息熵”[15]理论对混凝土特性参数的不确定性进行量化分析。(3)针对如何构建混凝土抗压强度全仓面动态评价模型并验证其有效性的问题，在分析混凝土特性参数和振捣参数与混凝土抗压强度相关性的基础上，采用随机森林算法(Random Forst，RF)建立混凝土抗压强度全仓面动态评价模型。最后，结合振捣质量实时监控方法对某碾压混凝土坝变态混凝土区的仓面振捣质量进行评价，并与线性回归、人工神经网络模型进行对比。

2　研究框架

根据混凝土坝仓面振捣台车振捣施工工艺，提出考虑振捣质量验收管理的混凝土坝振捣施工质量实时监控方法获取振捣参数，结合振捣参数和现场试验采集的混凝土特性参数和混凝土抗压强度，在考虑混凝土特性参数不确定性条件下构建基于随机森林算法的混凝土坝振捣质量评价模型。评价框架如图1所示，分为评价指标体系的构建、评价模型的建立和实际工程应用。

(1)第一步。根据振捣质量实时监控方法和现场试验获取原始数据集，构建评价指标体系。本文振捣质量评价体系分为三个层次：①第一层为质量评价目标。本文反映仓面振捣质量的评价指标为混凝土设计龄期抗压强度，采用现场抽样监测的方式获取抗压强度样本数据；②第二层为影响质量评价指标的参数类型，包括振捣参数和混凝土特性参数。振捣参数通过振捣质量实时监控方法采集获得，与传统的人工控制方法相比，该方法能够实现振捣参数的实时精细化控制、减少人为因素的干扰，因而在混凝土坝振捣质量控制方面更具可靠性；混凝土特性参数通过现场设备取样检测的方式获取；③第三层为具体的特征参数，其中振捣参数包括振捣时间和振捣深度，混凝土特性参数包

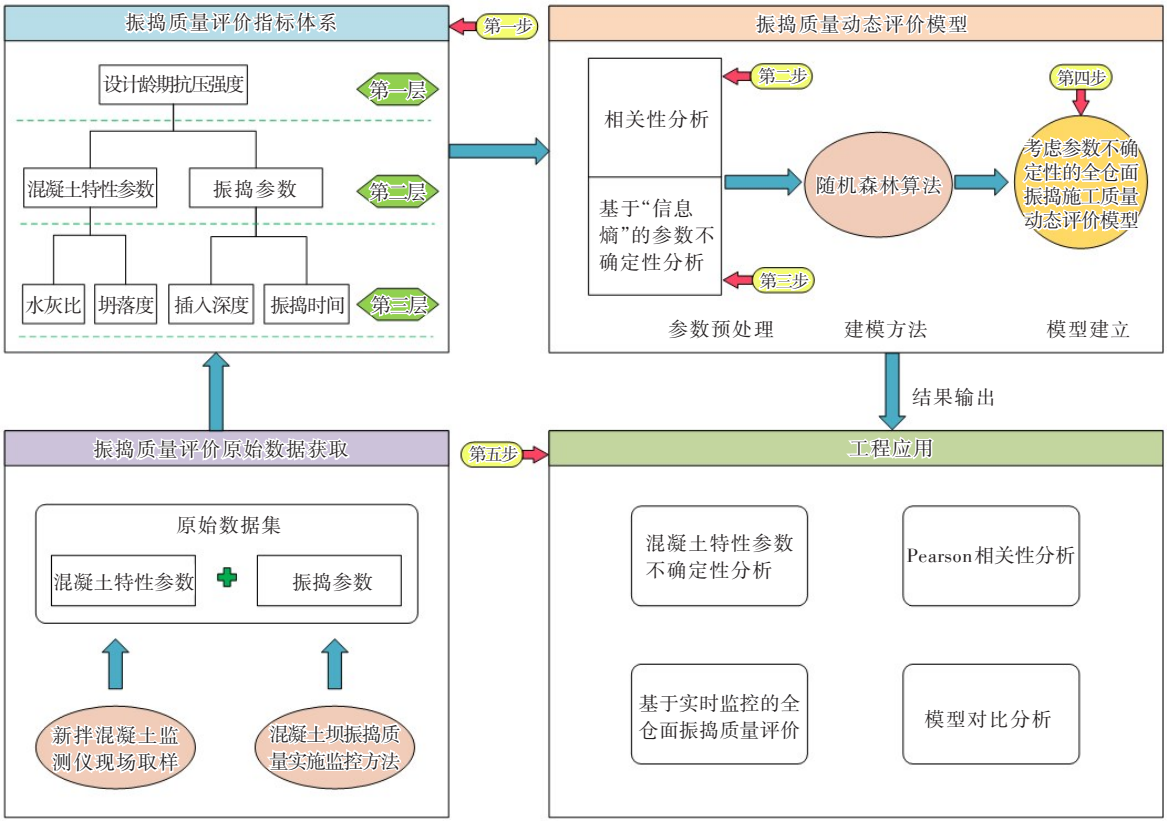


图1　评价框架

括水灰比和坍落度。

(2)第二步。相关性分析。通过SPSS软件对振捣参数、混凝土特性参数等特征参数与混凝土抗压强度进行相关性分析，从而得到各特征参数与抗压强度的Pearson相关系数和显著性水平，选定与抗压强度显著相关的参数作为模型的输入变量。

(3)第三步。不确定性的量化分析。计算混凝土特性参数的信息熵值，据此分析混凝土特性参数的不确定程度，从而验证振捣质量评价需要考虑参数不确定性的必要性。

(4)第四步。建立混凝土坝全仓面振捣施工质量评价模型。在第一步构建的评价数据集的基础上，建立基于随机森林算法的全仓面振捣质量动态评价模型，并对模型的评价精度进行五折交叉验证。

(5)第五步。工程应用。利用本文提出的实时监控下考虑混凝土特性参数不确定性的混凝土坝全仓面压实质量评价模型，对某碾压混凝土坝工程变态混凝土区振捣质量进行评价分析，验证本文压实质量评价方法的有效性和可靠性，并与线性回归和人工神经网络模型进行对比分析，验证本文评价模型的一致性和优越性。

3　混凝土坝振捣施工质量评价模型与方法

3.1　振捣质量评价数学模型　基于实时监控的混凝土坝振捣施工质量动态评价的数学模型由目标函数、质量评价特征参数集、基于信息熵的参数不确定性量化分析模型、振捣参数获取感知模型、振捣质量评价指标及特征参数的约束控制原则和振捣质量随机森林评价模型6个部分组成。

(1)目标函数。根据《水工混凝土施工规范(SL 677-2014)》中的规定[1]，现场混凝土应以设计龄期抗压强度作为主要的质量检验标准。因此选定混凝土设计龄期抗压强度作为评价混凝土振捣质量好坏的指标，以尽可能精确地得到抗压强度评价结果为目标建立目标函数。

$$Opt(\sigma)=f(C,\ Z) \tag{1}$$

式中：σ为混凝土设计龄期抗压强度，MPa；C为混凝土特性参数指标集；Z为振捣参数指标集。

(2)质量评价特征参数集。确定用于评价混凝土抗压强度的特征参数输入数据集，包括混凝土特性参数和振捣参数。

$$\begin{cases} C=[CR,\ CS] \\ Z=[ZD,\ ZT] \end{cases} \tag{2}$$

式中：CR为混凝土水灰比；CS为混凝土坍落度，mm；ZD为振捣台车施工时振捣棒的插入深度，cm；ZT为振捣棒的振捣时间，s。

(3)基于信息熵的参数不确定性量化分析模型。由于混凝土特性参数存在一定的不确定性，故采用信息熵理论将不确定性转化为熵值进行度量，直观判断参数的不确定程度。

$$E=-k\sum_{j=1}^{m}p_j\ln p_j \tag{3}$$

式中：E为熵值；k的取值为$1/\ln m$，m为混凝土特性参数的分组数；p_j为样本中第j组数值出现的频率。

(4)振捣参数获取感知模型。选取振捣台车插入点坐标、插入深度、振捣时间和振捣开关状态作为实时监控对象，对振捣台车的施工参数进行实时控制。

$$\begin{cases} W(t)=W\left(x(t),\ y(t),\ z(t),\ ZD(t),\ ZT(t)\right) \\ S(t)=\begin{cases}1,\ \text{振捣开关开启}\\ 0,\ \text{振捣开关关闭}\end{cases} \end{cases} \tag{4}$$

式中：t为状态获取时刻；$W(t)$为振捣台车插入点的状态函数；$\left(x(t)、y(t)、z(t)\right)$为$t$时刻插入点的三维坐标；$ZD(t)$为$t$时刻插入点的插入深度，cm；$ZT(t)$为$t$时刻插入点的振捣时间，s；$S(t)$为$t$时刻振捣开关状态，$S(t)$=1时振捣开关为开启状态，$S(t)$=0是振捣开关为关闭状态。

(5)质量评价参数的约束原则。建立混凝土设计龄期抗压强度、混凝土特性参数和振捣参数的约束条件，控制仓面浇筑的混凝土材料质量和振捣施工质量，进而确保混凝土抗压强度满足现场质量控制要求。设计龄期抗压强度的控制标准经由现场实验室标准试块养护检测试验给出，混凝土特性参数和振捣参数控制标准可分别通过混凝土生产部门和监理部门相关资料获取。

$$\text{S.T.}\begin{cases} \sigma\geqslant\sigma_{\min} \\ CR\in[CR_{\min},\ CR_{\max}] \\ CS\in[CS_{\min},\ CS_{\max}] \\ ZD\in[ZD_{\min},\ ZD_{\max}] \\ ZT\in[ZT_{\min},\ ZT_{\max}] \end{cases} \tag{5}$$

式中：$\sigma_{\min}$为混凝土容许设计龄期抗压强度最小值，低于此值则认为混凝土振捣质量不合格，MPa；$[CR_{\min},\ CR_{\max}]$为混凝土水灰比控制区间；$[CS_{\min},\ CS_{\max}]$为混凝土坍落度控制区间，mm；$[ZD_{\min},\ ZD_{\max}]$为振捣棒插入深度控制区间，cm；$[ZT_{\min},\ ZT_{\max}]$为振捣棒振捣时间控制区间，s。

(6)振捣质量随机森林评价模型。确定随机森林的决策树数量和随机特征数量，以混凝土特性参数和振捣参数为输入指标，设计龄期抗压强度为输出指标，基于随机森林算法建立振捣质量动态评价模型。

$$\sigma=randomforest(C,\ Z,\ Ntree,\ Mtry) \tag{6}$$

式中：$randomforest(\ )$为随机森林算法；$Ntree$为随机森林模型中的决策树数量；$Mtry$为决策树每次分裂时选取的随机特征数量。

3.2 基于实时监控的混凝土坝振捣施工质量评价方法

3.2.1 *混凝土坝仓面振捣施工质量实时监控方法* 针对已有的振捣台车监控研究仅采用一个超声波测距仪导致测距稳定性较差的不足，本文提出了一种双测距仪联合测距方法：采用超声波测距仪和

激光测距仪联合进行插入深度的测量，当其中一个测距仪被混凝土浆覆盖或出现故障进而导致无法正常工作时，另一个测距仪能够保证距离数据能够正常采集，从而增强了测距方案的稳定性。另外，针对现有研究没有提出仓面振捣质量验收管理方法的不足，本文将在3.2.3节中全仓面混凝土振捣质量动态评价方法的评价结果以图形报告的形式输出，将图形报告中的振捣质量合格率作为验收的标准从而实现混凝土坝现场仓面振捣质量验收管理。综上，本文结合双测距仪联合测距方案提出了考虑振捣质量验收管理的混凝土坝振捣施工质量实时监控方法，其基本原理为：采用GNSS技术、物联网技术、无线数据传输技术、数据库技术和计算机图形学技术等高新技术，结合双测距仪联合测距方法获取高精度测距数据，以仓面振捣台车振捣参数为监控对象，实时获取混凝土坝浇筑振捣过程中的振捣参数(插入点坐标、插入深度、振捣时间)；随后结合振捣参数利用后文中提出的振捣施工质量动态评价模型输出仓面混凝土抗压强度图形报告，将监控图形报告作为仓面振捣质量验收标准指导现场验收，从而实现混凝土坝振捣施工质量的实时精细化控制。

基于振捣质量实时监控方法的基本原理建立相应的监控系统，系统主要由定位基准站、无线电差分定位网络、振捣台车流动站、无线通讯网络、总控中心、现场分控站和机房服务器等部分组成(图2)。定位基准站负责接收GLONASS、GPS和BDS三星定位信号，并通过无线电差分定位网络发送RTK差分定位信号。振捣台车流动站上装有GPS定位设备负责接收卫星信号和差分信号实现高精度差分定位，并采用双测距仪联合测距方法进行测距，同时还部署了倾角传感器(内置电子罗盘)和振捣开关状态传感器等设备用于实时采集振捣监控数据，并通过自主研发的DTU无线数据传输模块将采集到的原始数据经无线通讯网络发送至远程服务器。应用服务器负责将接收到的原始数据分析解算成具体的振捣参数(插入点坐标、插入深度、振捣时间)，数据库服务器负责将数据进行存储备份。现场分控站盯仓人员通过电脑上的客户端对仓面振捣过程进行实时可视化监控，从而对振捣参数进行及时有效地控制，并且在当输出的图形报告结果达到验收标准时向现场施工人员发出收仓指令；总控中心负责对监控系统进行维护和管理，确保系统正常运行。

3.2.2　基于信息熵的混凝土特性参数不确定性分析　从数据获取的角度进行分析，混凝土坝振捣施工质量实时监控方法能够对全仓面施工区域振捣作业进行连续不断监控，因而可以准确获取仓面施工区任一位置的振捣参数。然而，混凝土特性参数是通过现场取样检测获得，当用这些有限数量的取样点信息推求全仓面的混凝土特性参数情况时，由于这些取样点数据集是不完备的，因而在进行振捣质量评价时需要考虑混凝土特性参数的不确定性。

信息熵理论可用于对系统的不确定程度进行量度，系统熵值和不确定性呈正相关，熵值越大，系统的不确定性就越大[16]。本文利用信息熵对混凝土特性参数的不确定性进行量化分析，其分析步骤如下。

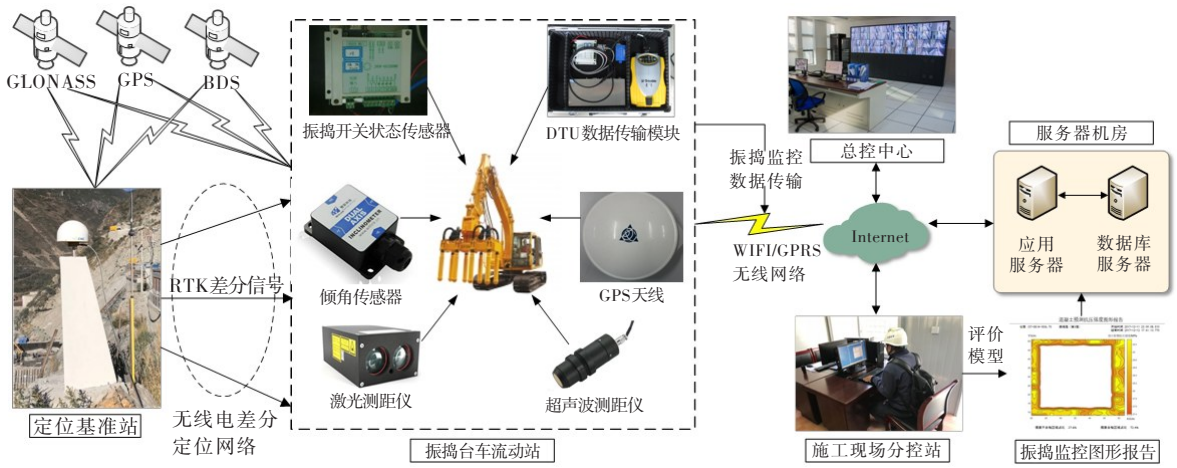


图2　混凝土坝振捣施工质量实时监控系统

（1）根据样本数据中混凝土特性参数的取值范围，按照大小顺序依次对所有数据平均分为n组，各组频数为x_i（i=1，2，3，…，n）。

（2）利用下式计算每组数据出现的频率p_i

$$p_i = \frac{x_i}{X} \times 100\% \tag{7}$$

（3）根据信息熵理论，通过式（3）计算混凝土特性参数的熵值。

（4）重复上述步骤直至得到所有混凝土特性参数的熵值，根据熵值的计算结果判断混凝土特性参数的不确定程度。

3.2.3 *基于随机森林算法的振捣质量评价方法* 随机森林是一种融合了Bagging算法和Subspace算法的统计学习理论[17]，其本质上是一种将多棵CART决策树模型$\{h(x, \theta_k), k=1, 2, 3, \cdots\}$（$x$为输入变量；$\theta_k$为服从独立同分布的随机向量）进行组合，对样本进行训练并加以预测的非线性组合式分类器[18]。随机森林主要包含随机分类森林和随机回归森林两大类，其类型视决策树的类别而定。本文的目的是通过混凝土特性参数和振捣参数的输入预测混凝土设计龄期抗压强度值，因此构建的是随机回归森林模型。随机森林模型的主要生成步骤为：①通过Bagging算法（又称装袋法）获得训练样本集，即利用Bootstrap重抽样方法（又称拔靴法）从原始样本集D中抽取k个子训练样本集D_1，D_2，…，D_k；②对k个子样本集分别建立k个决策树模型，在决策树的每个节点上随机地从M个特征参数中选取m个，选取最优分裂点进行分裂得到回归结果；③重复步骤②，遍历预建的k棵决策树；④最后将每棵树得到的k个预测值对取算数平均即可得出随机森林模型的预测值。大量的研究成果表明，随机森林算法作为一种自然的非线性建模工具，能够很好地适应异常值和噪声且不容易出现过拟合，具有较高的预测精度和鲁棒性，泛化误差小且无需对训练样本进行预处理，被称作是当前最好的机器算法之一[19]。

（1）随机森林的泛化误差。从给定的原始数据集（X，Y）中随机抽取训练样本集构成一组决策树模型$\{h_1(X, \theta_1), h_2(X, \theta_2), \cdots, h_k(X, \theta_k)\}$，为方便描述计$h_k(X, \theta_k) = h_k(X)$。定义余量函数来描述模型平均正确分类数超过平均错误分类数的程度，其表达式为：

$$mg(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}) = avg_k I\left(h_k(X) = Y\right) - \max_{j \neq k} avg_k I\left(h_k(X) = \boldsymbol{j}\right) \tag{8}$$

式中：$mg(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y})$为余量函数；$\boldsymbol{Y}$表示正确的类别向量；$\boldsymbol{j}$表示不正确的类别向量；$I$为示性函数。

余量值的大小可用于度量模型的预测的可靠度，余量值越大，预测结果越可靠。基于余量函数进一步定义泛化误差的表达式：

$$PE^* = P_{X, Y}\left(mg(X, Y) < 0\right) \tag{9}$$

当决策树数量最够多时，$h_k(X)$将服从强大数定律，此时伴随着决策树数量的增加，PE^*将会趋近于一个上界，这说明随机森林模型不易随着决策树的增加而产生过拟合问题，但可能会产生一定限度内的泛化误差[20]。

（2）随机森林中决策树的强度和相关度。在随机森林中，单棵决策树的强度越高，模型的分类性能越好；决策树间的相关性越强，模型的分类性能越差，即随机森林模型的分类性能与决策树强度呈正相关，与决策树间的相关性呈负相关。因而为了提高模型的性能、减少总体预测的误差，随机森林通过分裂特征随机选取和单棵树不剪枝的方式增强了模型的噪声容忍度，并在提高分类强度的同时降低了树与树之间的相关度。

（3）随机森林中树的数量和候选特征数。在构建随机森林模型时，决策树的数量*Ntree*和节点分裂的随机特征数*Mtry*是决定模型性能的两个重要参数。当*Ntree*过小时，模型容易陷入过拟合，导致预测误差较大；反之，*Ntree*过大则会使得模型构建的时间过长，造成模型的可解释性减弱[21]。决策树在进行分裂时，在每个分裂节点需从原始样本数据的特征集中随机抽取一个特征子集，子集中包含*Mtry*个特征（*Mtry*即为随机特征数，一经确定则保持不变），再从随机特征中选择最优特征作为该节点的分裂特征。*Mtry*过大会导致随机森林的多样性降低，过小则会使模型过于随机进而降低预测精度。

(4)基于随机森林的振捣质量评价方法。针对混凝土坝振捣施工质量动态评价的问题，在考虑混凝土特性参数不确定性的基础上提出了基于随机森林的振捣质量评价方法。首先通过相关性分析结果选定显著相关的影响参数构建原始样本数据集，然后利用R软件进行误差分析确定随机森林的*Ntree*和*Mtry*，最后根据选定的样本数据和重要参数结合式(6)计算得到混凝土设计龄期抗压强度值，从而得出混凝土振捣质量动态评价结果。

4 工程应用

4.1 原始评价指标数据的获取 某碾压混凝土坝是位于中国西南地区的Ⅱ等大(2)型水利水电工程，本文以该碾压混凝土坝仓面变态混凝土施工区域为研究对象，基于本文考虑振捣质量验收管理的混凝土坝仓面振捣质量实时监控方法，建立相应的监控系统进行仓面振捣施工的控制和管理。采用差分定位设备实时获取振捣台车的空间坐标；再通过分析计算大臂、小臂和振捣机架上的倾角传感器采集到的倾角和航向角数据实现振捣棒的空间定位；采用激光测距仪和超声波测距仪联合采集距离数据，当其中一个测距仪出现故障时，另一台正常工作的测距仪能够确保距离数据的顺利采集，从而保证了现场测距的稳定性。根据振捣台车流动站在现场实时采集到的施工数据，通过分析计算得到振捣参数(插入深度、振捣时间)。随后采用随机森林算法构建混凝土特性参数、振捣参数与混凝土抗压强度间的映射关系，建立了大坝仓面振捣施工质量评价模型，从而实现了仓面振捣质量的动态控制。

本文利用新拌混凝土综合性能检测仪获取仓面内混凝土特性参数和抗压强度数据，该仪器根据扭力原理可检测得出混凝土的水灰比、坍落度和标准养护下28 d抗压强度，具有较高的检测精度，并在建筑工程混凝土质量预控中得到了应用[22]。由于在标准养护条件下，混凝土强度的发展大致与其龄期的常用对数成反比关系，故混凝土设计龄期抗压强度可通过28 d抗压强度经下式转换得到：

$$f_{\mathrm{cu,\ N}}=\frac{\lg N}{\lg 28}f_{\mathrm{cu,\ 28}} \tag{10}$$

式中：$f_{\mathrm{cu,\ N}}$为混凝土标准养护设计龄期的抗压强度，MPa；$f_{\mathrm{cu,\ 28}}$为混凝土标准养护28 d的抗压强度，MPa；N为混凝土设计龄期，按照碾压混凝土坝工程现场的实际情况选定，N=90 d。

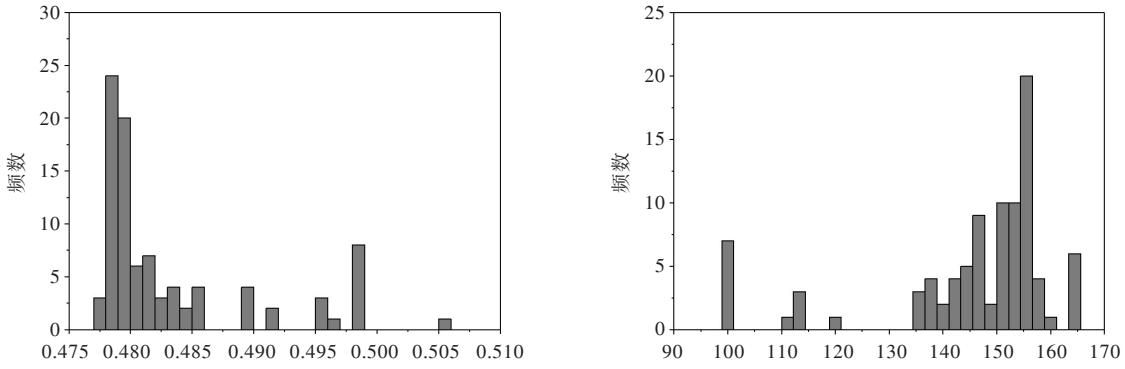
通过振捣质量实时监控系统和新拌混凝土检测仪获取92组大坝振捣质量数据构成样本数据集，并以此为基础建立该碾压混凝土坝全仓面振捣质量动态评价模型。

4.2 混凝土特性参数不确定性分析 将92组混凝土特性参数数据和混凝土设计龄期抗压强度数据按照从小到大的顺序依次排列，然后平均分成若干组，统计每组出现的频数并绘制频数分布直方图(图3)。利用SPSS软件对混凝土水灰比和坍落度样本数据分布情况进行拟合，结果表明二者样本数据均不符合已有的概率假设，因而在进行混凝土坝振捣质量评价时需考虑混凝土特性参数的不确定性。Bootstrap方法的作为一种通过再抽样构造自助样本的方法，常用于样本容量较小，不符合常规的概率分布(如正态分布、指数分布等)的情况，因而在工程实践中成为克服数据有限性的一种有效手段[13]。基于随机森林的混凝土坝振捣质量动态评价模型采用Bootstrap方法构建训练样本数据集，因而在全仓面振捣质量评价时能够较好地用于生成随机混凝土特性参数。

采用式(3)分别计算混凝土水灰比和坍落度的熵值，计算得到水灰比的熵值为0.6061，坍落度的熵值为0.6530，两种混凝土特性参数的熵值均大于0.5，因而混凝土特性参数不确定程度较高，在建立仓面振捣质量评价模型时需要考虑其不确定性。

4.3 混凝土坝振捣质量评价模型的建立

4.3.1 相关性分析 振捣质量评价模型是通过建立混凝土特性参数、振捣参数与混凝土设计龄期抗压强度间的映射关系，从而实现抗压强度的动态解算。为了验证混凝土特性参数、振捣参数确实同混凝土抗压强度间存在一定的相关关系，利用现场采集的92组样本数据通过SPSS软件对水灰比、坍



(a)水灰比频数分布直方图　　(b)坍落度频数分布直方图

图3　混凝土检测指标参数频数分布直方图

落度、振捣时间、插入深度和设计龄期抗压强度进行Pearson相关性分析，分析结果以相关性矩阵图的形式进行展示，如图4所示。图4中，右上方数字表示参数间的显著性数值；左下方“○”的半径表示参数间相关性的大小，“○”颜色表示正、负相关，颜色偏暖为正相关，颜色偏冷为负相关。

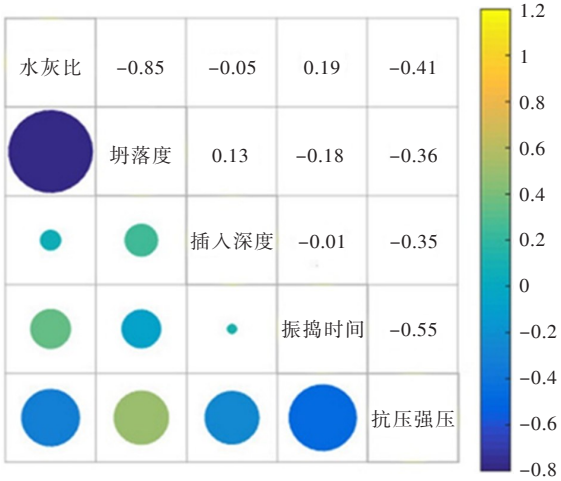


图4　Pearson相关性分析矩阵图

由图4可以看出，水灰比和设计龄期抗压强度相关性为-0.41，显著性为0.000，呈显著的中等负相关关系；坍落度和设计龄期抗压强度相关性为0.36，显著性为0.000，呈显著的中等正相关关系；振捣时间和设计龄期抗压强度相关性为-0.35，显著性为0.001，呈显著的中等负相关关系；插入深度和设计龄期抗压强度相关性为-0.55，显著性为0.000，呈显著的高度负相关关系。相关性分析的结果在一定程度上符合实际情况，故认为将水灰比、坍落度、插入深度和振捣时间作为预测设计龄期抗压强度的特征指标是可信的。

4.3.2　决策树数量(*Ntree*)和随机特征数(*Mtry*)的确定　在进行相关性分析后，选定水灰比、坍落度、插入深度和振捣时间作为建立随机森林评价模型的输入特征参数，总候选特征数*M*为4。利用R软件对92组样本数据进行分析计算，进而确定*Ntree*和*Mtry*。图5为随机森林模型的*MSE*(均方误差)随决策树数量的变化规律，从图5可以看出，当决策树数量增至200时，*MSE*降至接近最低的水平并趋于稳定，因此为保证模型预测精度，减少系统运算量，选定*Ntree*=200。图6为在确定决策树数量为200的基础上，随机森林模型的OOB误差(袋外误差)与随机特征数间的关系。由图6可以看出，当随机特征数为2时，模型的OOB误差最小，这也间接验证了Breiman提出的一般情况下*Mtry*取$\sqrt{M}$的建议[17]，因而选定*Mtry*=2。

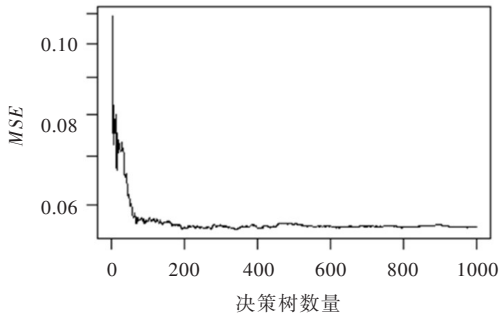


图5　决策树数量与均方误差的关系

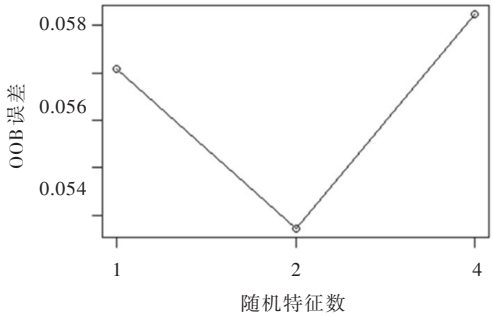
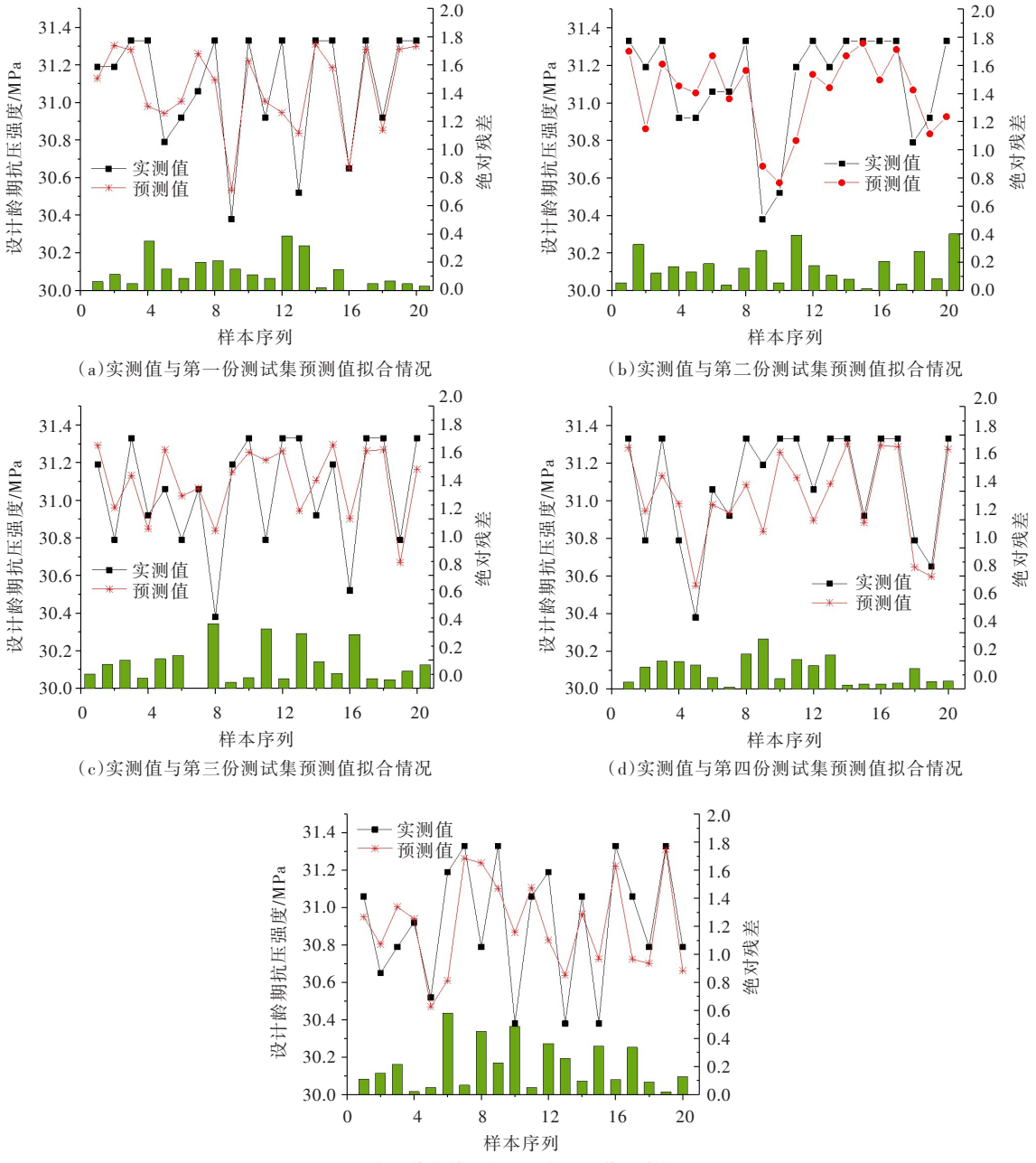


图6　随机特征数与OOB误差的关系

4.3.3　随机森林评价结果分析　虽然随机森林算法内置了自评估功能，可不进行交叉验证或单独测试，但为了对模型的预测精度进行客观评价并与后文中传统算法模型的性能进行比较，本文采用五折交叉验证法对建立的随机森林模型评价结果进行分析，首先将原始样本数据集按照随机抽样分为5份，将其中4份作为训练集建立随机森林模型，剩余的1份作为检验集测试模型算法精度，然后根据预测结果计算得到*R*(相关系数)、*RMSE*(均方根误差)和*MAE*(平均绝对误差)，重复上述步骤5次得到每次的精度分析结果，并将所有结果取平均作为对随机森林算法精度的评估依据。

五折交叉验证下混凝土设计龄期抗压强度实测值和随机森林模型预测值的拟合情况如图7所示。将预测值和实测值进行Pearson相关性分析得到相关系数*R*为0.7358，在置信度下的显著性为0.0014，低于显著性水平0.01，二者呈显著的线性相关关系。经五折交叉验证得到的均方根误差*RMSE*为0.2078，平均绝对误差*MAE*值为0.0034，二者均处于较低的水平，表明模型能够很好地对实测值和预测值进行拟合，对故认为随机森林模型通过检验，能够用于混凝土坝仓面振捣质量评价。



(a)实测值与第一份测试集预测值拟合情况　(b)实测值与第二份测试集预测值拟合情况

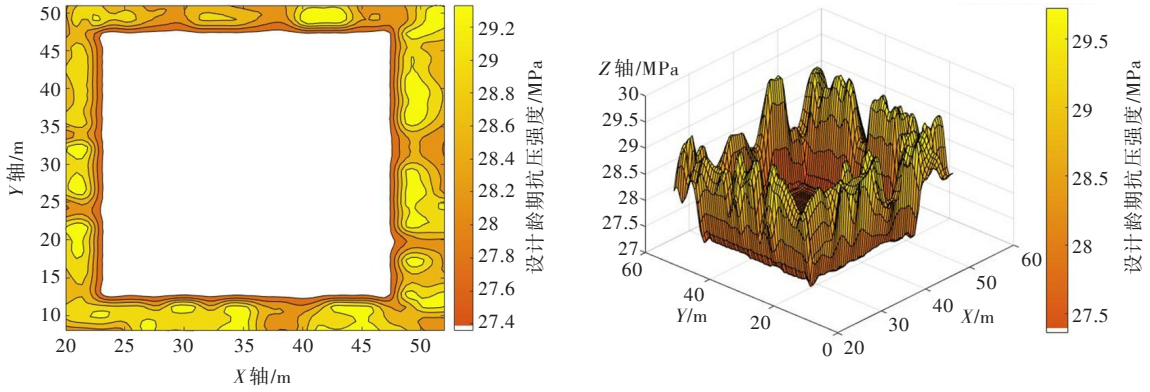
(c)实测值与第三份测试集预测值拟合情况　(d)实测值与第四份测试集预测值拟合情况

(e)实测值与第五份测试集预测值拟合情况

图7　五折交叉验证下设计龄期抗压强度实测值与预测值拟合情况

4.4　混凝土坝全仓面振捣质量评价　基于振捣施工质量实时监控系统和随机森林模型，在考虑混凝土特性参数不确定性的前提下进行混凝土坝全仓面振捣质量动态评价。将50 m×50 m的碾压混凝土坝仓面划分为若干1.5 m×1.5 m的正方形网格，排除非振捣区域后通过振捣质量实时监控系统获取仓面内各个网格的振捣参数，然后利用Bootstrap方法根据该仓混凝土检测得到的样本数据随机给每个网格分配一组混凝土特性参数，在此基础上建立该仓面基于随机森林的振捣施工质量动态评价模型，对全仓面振捣质量进行评价。

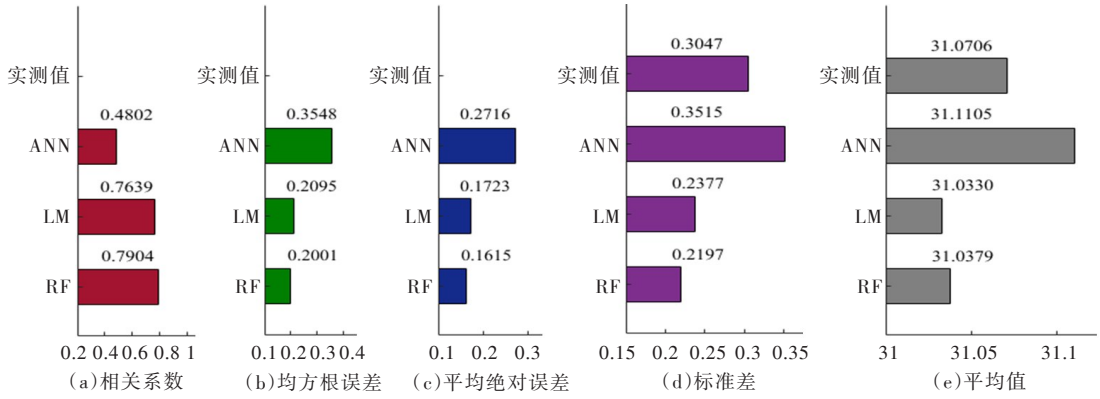
首先将各网格的振捣参数和混凝土特性参数输入随机森林模型，计算得到每组数据的混凝土抗压强度评价值，然后将抗压强度值分配给对应的网格，最后结合网格中心点的平面坐标(X，Y)，以混凝土抗压强度值为Z坐标生成全仓面混凝土设计龄期抗压强度等值线云图(见图8)。从大坝现场实验室获取的该仓混凝土试件检测平均设计龄期抗压强度为28.5 MPa，以此为仓面振捣质量控制标准。从图8中可以得到，排除仓面中间大部分的碾压区域后，该仓面混凝土设计龄期抗压强度的达标率为72.4 %，表明仓面整体振捣质量较好。将全仓面抗压强度等值线云图连同达标率的统计结果作为混凝土坝振捣施工质量实时监控方法中输出的图形报告，依据图形报告进行仓面质量验收评定。



(a)抗压强度等值线　　(b)抗压强度云图

图8　全仓面混凝土设计龄期抗压强度等值线云图

4.5　振捣质量评价方法的对比分析和讨论　将本文基于随机森林算法的动态评价模型(RF)与基于多元线性回归(LM)和人工神经网络算法(ANN)建立的振捣质量评价模型的评价精度进行对比分析，三者使用相同的样本数据进行五折交叉验证，采用相关系数(R)、均方根误差($RMSE$)、平均绝对误差(MAE)、标准差和预测平均值，结果如图9所示。



(a)相关系数　(b)均方根误差　(c)平均绝对误差　(d)标准差　(e)平均值

图9　三种评价模型拟合精度对比分析

(1)一致性分析。从图9中可以看出，三种模型评价结果的平均值与实测值平均值较为接近，相对误差不超过0.13%，标准差均小于0.5，且平均绝对误差都低于0.3。分别比较RF、ANN、LM对于各预测点的拟合精度，结果表明，RF和ANN预测值间的误差不超过2 %的点占总点数的94 %，RF

和LM预测值间的误差不超过2 %的点共占总点数的100 %，可以认为，RF与LM、ANN在振捣质量预测方面具有一致性。

(2)优越性分析。从图9可以看出，RF相关系数R为0.7904，预测结果同实测值拟合程度较高，而ANN的R系数仅为0.4802，远小于RF的R系数；此外，RF的$RMSE$为0.2001、MAE为0.1615，均低于ANN的$RMSE$和MAE，由此不难看出，虽然ANN与RF同为进行非线性预测的“黑箱”算法，但是由于ANN易陷入局部最优解从而产生过拟合现象，因而其预测精度明显差于RF。LM在R、$RMSE$、MAE、标准差等指标的分析结果方面表现的预测精度稍逊于RF，但由于LM在拟合时仅考虑所有输入参数的特性对抗压强度进行拟合，忽略了施工过程中其他不可测参数对抗压强度的影响，因而LM预测值与实测值绝对残差大于0.1的情况比RF多11 %，故RF的拟合结果更贴近实测值的分布情况。从以上分析可以看出，RF不易过拟合且考虑了质量评价过程中的已知和未知的不确定因素，因而比ANN和LM更具优越性，能更精确地拟合混凝土设计龄期抗压强度值，从而能更好地评价仓面振捣质量。

5 结论

振捣施工质量是混凝土坝施工质量控制的重要环节，针对混凝土坝仓面内振捣施工质量动态评价和反馈控制问题，提出了双测距仪联合测距方案，并基于该方案提出了考虑振捣质量验收管理的混凝土坝仓面振捣质量实时监控方法，确立了振捣质量评价指标体系，引入信息熵理论对混凝土特性参数的不确定性进行了量化分析，选定水灰比、坍落度、插入深度和振捣时间作为振捣质量评价的特征指标，并基于随机森林算法建立了考虑混凝土特性参数不确定性的振捣质量评价模型最后结合实际工程利用该模型对某碾压混凝土坝仓面振捣质量进行了动态评价，评价结果表明，基于实时监控的混凝土坝振捣施工质量随机森林评价模型能够实现全仓面混凝土振捣质量的精细化动态评价，而且相比于利用传统方法(多元线性回归、人工神经网络)建立的质量评价模型更具优越性。

参 考 文 献：

[1] 水工混凝土施工规范，SL 677-2014[S]. 北京：中国水利水电出版社，2014.

[2] GONG Jie，YU Yi，KRISHNAMOORTHY R，et al. Real-time tracking of concrete vibration effort for intelligent concrete consolidation[J]. Automation in Construction，2015，54：12-24.

[3] TIAO Zhenghong，BIAN Ce. Visual monitoring method on fresh concrete vibration[J]. Construction Management，2014，18(2)：398-408.

[4] 田正宏，边策，毛龙，等. 混凝土振捣动态可视化监测系统开发研究[J]. 建筑材料学报，2013，16(3)：508-513.

[5] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院有限公司. 振捣机实时监测定位系统及方法[P]. 中国：CN103711127A，2014-04-09.

[6] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院有限公司. 基于计算机图形技术的混凝土振捣可视化监控方法[P]. 中国：CN104008272，2014-08-27.

[7] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院有限公司. 一种振捣有效深度智能检测方法[P]. 中国：CN103148824A，2013-06-12.

[8] 天津大学. 一种常态混凝土振捣质量可视化实时监控系统及方法[P]. 中国：CN106707932A，2017-05-24.

[9] 钟登华，刘东海，崔博. 高心墙土石坝碾压质量实时监控技术及应用[J]. 中国科学(技术科学)，2011，41(8)：1027-1034.

[10] LIU Y，ZHONG D，CUI B，et al. Study on real-time construction quality monitoring of storehouse surfaces for RCC dams[J]. Automation in Construction，2015，49：100-112.

[11] 钟桂良. 碾压混凝土坝仓面施工质量实时监控理论与应用[D]. 天津：天津大学，2011.

[12] 王晓玲，周龙，任炳昱，等. 基于实时监控的堆石坝碾压质量二元耦合评价[J]. 水力发电学报，2015，34

(2): 164-170.
[13] 王瑞, 钟登华, 吴斌平, 等. 实时监控下考虑料源不确定性的堆石坝压实质量评估[J]. 水力发电学报, 2015, 34(9): 146-152.
[14] 钟登华, 鄢玉玲, 崔博, 等. 考虑压实质量影响的碾压混凝土坝层间结合质量动态评价研究[J]. 水利学报, 2017, 48(10): 1135-1146.
[15] 孙光辉. 信息熵与不确定性[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2000(3): 50-51.
[16] 覃远翔. 基于信息熵的不确定性数据清理[D]. 昆明: 云南大学, 2013.
[17] BERIMAN L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
[18] 康有, 陈元芳, 顾圣华, 等. 基于随机森林的区域水资源可持续利用评价[J]. 水电能源科学, 2014, 32(3): 34-38.
[19] 赖成光, 陈晓宏, 赵仕威, 等. 基于随机森林的洪灾风险评价模型及其应用[J]. 水利学报, 2015, 46(1): 58-66.
[20] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 等. 随机森林方法研究综述[J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(3): 32-38.
[21] 刘敏, 郎荣玲, 曹永斌. 随机森林中树的数量[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(5): 126-131.
[22] 刘俊岩, 周波, 曲华明. 新拌混凝土质量检测技术的应用[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2002, 16(3): 251-253.

Study on dynamic evaluation of vibration quality of concrete dam based on real-time monitoring

ZHONG Denghua, SHEN Ziyang, WANG Jiajun, CUI Bo, REN Bingyu, WANG Dong

(*State Key Laboratory of Civil Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*)

Abstract: The vibration quality evaluation of concrete dam is an important means for the quality control of the concrete dam construction. Traditional method combines artificial experience control with postmortem finite core sampling point detection to control the vibration quality of concrete dam; in addition, the existing vibration monitoring research on vibrator only uses a single rangefinder to range and lacks evaluation method of vibration quality. Taking into account the challenges and difficulties of real-time vibration quality dynamic evaluation and feedback control in concrete dam storehouse, this paper puts forward a real-time monitoring method of the vibration quality of concrete dam considering vibration quality acceptance management based on a ranging scheme with two rangefinders, and establishes a dynamic evaluation model for concrete dam vibration quality considering parameter uncertainty on the basis of this method. The model mainly includes the following contents: (1) conducting quantitative analysis of the uncertainty of concrete characteristic parameters by introducing the "information entropy" theory; (2) proposing the dynamic evaluation method of concrete compression strength based on random forest algorithm in the case of parameter uncertainty, and the evaluation results are applied to the whole dam storehouse surface vibration quality evaluation. The evaluation model are compared with the models built by multiple linear regression and artificial neural network algorithm, which verifies the consistency and superiority of the random forest model. The dynamic evaluation of the vibrating quality of the abnormal concrete area of a RCC dam project in southwest China is carried out by the evaluation method proposed in this paper. The results show that the method can accurately evaluate the vibration of concrete storehouse surface quality, and it also provides a theoretical basis for the vibration quality control of the concrete dam.

Keywords: concrete dam; vibration quality evaluation; vibration real-time monitoring method; uncertainty; random forest

(责任编辑: 王冰伟)