

文章编号:0559-9350(2010)06-0720-07

实时监控下土石坝碾压质量全仓面评估

刘东海,王光烽

(天津大学 建筑工程学院 天津 300072)

摘要:采用常规监理旁站方式监控土石坝碾压参数以及事后试坑取样检测的质量管理手段,往往有较大的人工误差。依托土石坝施工质量实时监控技术,获得了施工仓面任意位置处的碾压参数值(碾压速度、激振力、碾压遍数和压实厚度)。在分析碾压参数与压实质量标准(干密度或压实度)之间相关性的基础上,采用三层前向式ANN模型,建立碾压参数和压实质量标准之间的非线性映射关系,并提出了全仓面碾压质量评估的具体流程,获得仓面任意位置处的压实度以及全仓面的碾压质量达标率。该方法可有效避免以有限个试坑检测样本评价整体仓面碾压质量的片面性,为现场施工质量控制提供了新的途径。

关键词:土石坝施工;碾压;质量控制;质量评估;实时监控;神经网络模型

中图分类号:TV523

文献标识码:A

加强填筑碾压过程中碾压参数的控制是保证心墙堆石坝施工质量的关键。根据规范要求,在施工过程中,主要通过碾压参数(包括激振力、行进速度、铺料厚度、加水量、碾压遍数等)对碾压质量进行控制;在仓面施工结束后,通过试坑采样检测填筑体的干容重、含水量和级配等,来分析是否满足设计的压实质量标准^[1-2]。但是,采用常规的监理旁站方式监控碾压参数以及事后试坑取样检测的质量管理手段,往往有较大的人工误差,而且用有限个离散试坑检测样本也难以全面描述整个仓面的施工质量情况。目前研究尚无涉及土石坝整个施工仓面碾压质量的评估与分析。Thompson和White通过实时监控碾压机械对土层的作用功率(MDP),来动态估计道路施工中土的压实效果^[3]。文献[4-5]针对混凝土面板堆石坝施工特点,开发了混凝土面板堆石坝填筑施工质量的GPS实时监控系统,用于监测堆石体的碾压参数,但不涉及全仓面碾压质量的评估。本文依托于全天候的心墙堆石坝施工质量实时监控技术^[6],获得施工仓面任意位置处的碾压参数值(碾压速度、激振力、碾压遍数和压实厚度)。在此基础上,建立起碾压参数和压实质量标准之间的映射关系,为进一步分析全仓面的碾压质量提供可能。对于这种非线性的映射关系,可采用具有的自组织、自适应、自学习能力的人工神经网络(ANN)来表述^[7]。

1 土石坝碾压质量参数的实时采集与分析

为实时自动采集心墙堆石坝填筑碾压的过程参数,采用GPS技术、GPRS技术、自动控制技术和计算机网络技术等,研制开发了心墙堆石坝填筑碾压质量实时监控系统^[6]。该系统由GPS基准站、碾压机械监测终端、总控中心、现场分控站和现场PDA终端等部分组成。填筑碾压参数实时采集与分析流程如图1所示,具体如下。

(1)通过安装在碾压机械上的监测终端,实时采集碾压机械的动态坐标(经GPS基准站差分,精度可提高至厘米级)和激振力输出状态,经GPRS网络实时发送至远程数据库服务器中。

收稿日期:2009-07-02

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(50709024);教育部新世纪优秀人才计划资助(NCET-08-0391)

作者简介:刘东海(1974.12-),男,浙江舟山人,博士,副教授,主要从事水利工程系统分析与管理和施工质量实时监控研究。

E-mail: liudh@tju.edu.cn

(2) 根据预先设定的控制标准,服务器端的应用程序实时分析判断碾压机的行车速度、激振力输出是否超标,并通过驾驶室报警器和相关人员的 PDA 发出相应报警。

(3) 同时,现场分控站和总控制中心的监控终端计算机通过有线网络或无线 WiFi 网络,读取上述数据,进行进一步的实时计算和分析,包括坝面碾压质量参数(含行车轨迹、碾压遍数、压实高程和压实厚度)的实时计算和分析。

(4) 再将这些实时计算和分析的结果与预先设定的标准作比较,根据偏差,通过相关人员的 PDA 以及总控制中心和现场分控站的监控计算机发出报警,指导相关人员做出现场反馈与控制措施。

(5) 将施工仓面任意位置上监测到的碾压机械轨迹、行车速度、激振力状态、碾压遍数、压实后高程和厚度保存至数据库,以供查询和后续全仓面质量估算应用。

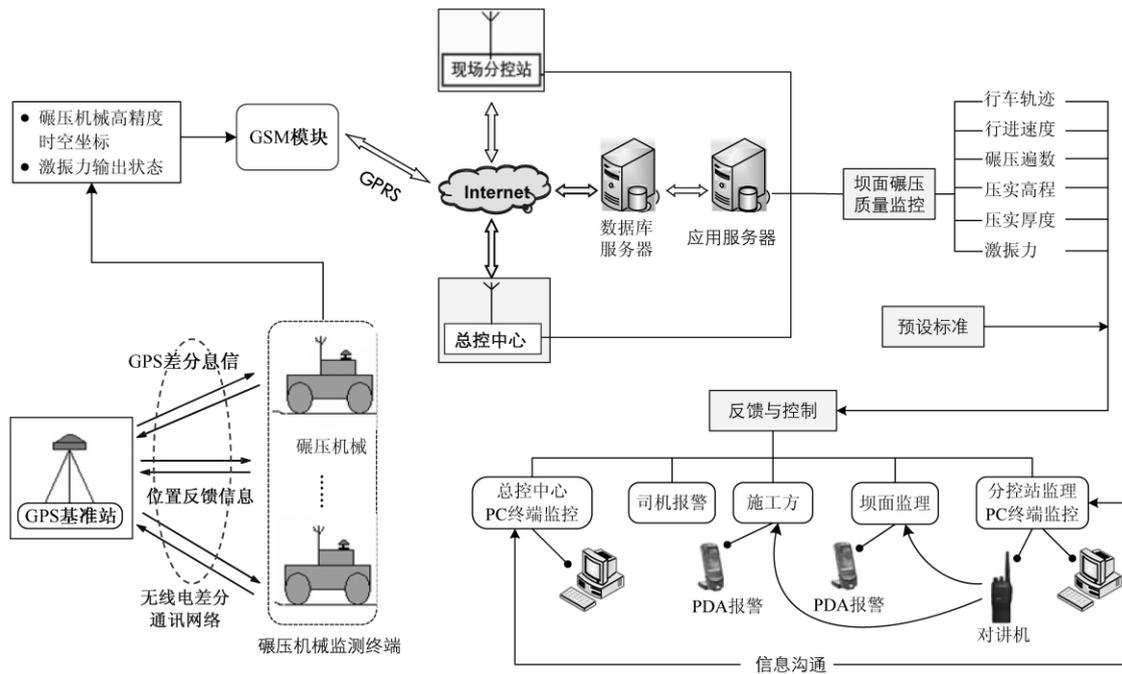


图 1 土石坝碾压质量参数实时采集与分析流程

2 碾压参数与压实质量的相关性分析

把整个施工仓面划分成 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 的网格,采用心墙堆石坝填筑碾压质量实时监控系统,可采集到每个网格的碾压遍数 n 、压实厚度 h 、每次碾压机械通过该网格时的行进速度 v (本文采用多次通过的平均值) 以及激振力状态 J (有低频高振、高振低频或不振等三种状态,分别赋值 2、1、0, $J = \sum_{i=1}^n J_i$, 其中 J_i 为该网格第 i 次碾压时激振力状态值)。同时,根据实际工程中的挖坑试验,可确定该试坑位置处的压实质量 γ (压实度或干密度)。然后,由试坑位置可确定该点对应的碾压参数 (n, h, v, J) 。

分析碾压参数与压实质量的相关性,根据相关性大小,来确定压实质量估算模型的因子。若压实质量和任一碾压参数采用简单相关分析,就无法考虑其他参数对这两者之间相关性的影响,而通过偏相关分析,可以消除其他参数的影响,能真实地反映这两个变量之间相关性程度的大小^[8]。

设共有 m 个观测样本,碾压参数与压实质量之间的两级偏相关系数的计算方法如下。

首先,计算简单相关系数,即直线相关系数 r_{ij} :

$$r_{ij} = \frac{SP_{ij}}{\sqrt{SS_i SS_j}}, \quad i, j = n, h, v, J, \gamma$$

其中, $SP_{ij} = \sum_{k=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)$, $SS_i = \sum_{k=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_i)^2$, $SS_j = \sum_{k=1}^m (x_{jk} - \bar{x}_j)^2$ 。

由 r_{ij} 组成相关系数矩阵 R , 进而求 R 的逆矩阵 C :

$$C = R^{-1} = \begin{bmatrix} c_{nn} & c_{nh} & c_{nv} & c_{nJ} & c_{ny} \\ c_{hn} & c_{hh} & c_{hv} & c_{hJ} & c_{hy} \\ c_{vn} & c_{vh} & c_{vv} & c_{vJ} & c_{vy} \\ c_{Jn} & c_{Jh} & c_{Jv} & c_{JJ} & c_{Jy} \\ c_{yn} & c_{yh} & c_{yv} & c_{yJ} & c_{yy} \end{bmatrix}$$

则不考虑其他因素的影响, 碾压参数 n, h, v, J 与压实质量 γ 的两级偏相关系数的计算公式为:

$$r_{ny} = \frac{-c_{ny}}{\sqrt{c_{nn}c_{yy}}}; \quad r_{hy} = \frac{-c_{hy}}{\sqrt{c_{hh}c_{yy}}}; \quad r_{vy} = \frac{-c_{vy}}{\sqrt{c_{vv}c_{yy}}}; \quad r_{Jy} = \frac{-c_{Jy}}{\sqrt{c_{JJ}c_{yy}}} \quad (1)$$

偏相关显著性检验可采用 t 检验法^[8]。当碾压参数与压实质量的偏相关性显著时, 则该碾压参数可作为压实质量估算模型的因子。

3 基于 ANN 的全仓面碾压质量评估方法

3.1 全仓面压实质量估算的 ANN 模型 不失一般性, 可建立如图 2 所示的全仓面压实质量估算的三层前向 ANN 模型。模型输入为每个网格上碾压遍数、压实厚度、平均行进速度和激振力状况, 输出为该网格处的压实度或干密度。当然, 具体工程中, 模型输入的碾压参数取决于其与压实质量之间的相关性水平, 相关性低的碾压参数就不应作为模型输入。同时, 考虑到不同坝料情况下, 压实质量与碾压参数的关系并不相同, 故需针对不同的坝料分区建立不同的 ANN 模型。

模型训练样本来源于实测试坑数据以及对应该处的碾压参数值。为消除输入参数的量纲影响, 对训练样本的输入进行归一化处理。该模型采用一个隐层, 并通过试算法确定合适的隐节点数。隐含层神经元传递函数选择双曲正切 S 传递函数, 可将训练样本中的输入量映射到 $(-1, +1)$ 之间。输出层神经元的传递函数选用 S 型对数函数。为克服 BP 算法存在的训练时间较长和在极值点附近收敛速度慢的不足, 采用基于高斯-牛顿法改进得到的 Levenberg-Marquardt 算法^[9]训练模型。

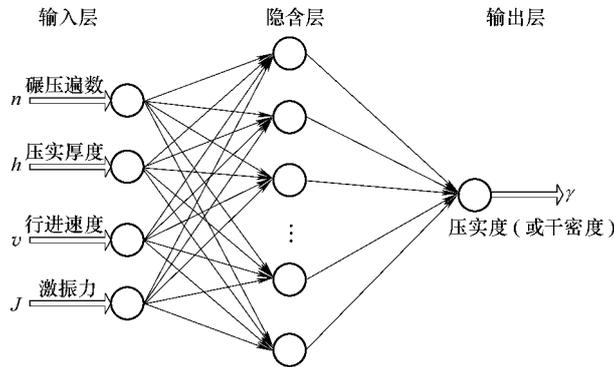


图 2 全仓面压实质量估算的 ANN 模型

3.2 全仓面碾压质量评估流程 以填筑碾压质量实时监控系统中采集得到的仓面碾压参数作为模型的输入, 估算仓面任意位置处的压实度(干密度), 从而得到整个仓面的压实度(干密度)分布。全仓面碾压质量动态评估流程见图 3。

需要说明的是, 当前仓面的训练样本来自于其所属坝料分区的所有已施工仓面的试坑数据, 以及试坑位置处监测所得的碾压参数值; 检验样本来源于该施工仓面的试坑检测数据及其对应的碾压参数。其中, 第 j 个仓面的碾压参数为 (n_j, h_j, v_j, J_j) , $j=1, 2, \dots, m$, m 为仓面离散后的网格数目, 且第 i 点的坐标为 (x_i, y_i, z_i) 。

以当前仓面试坑试验数据为依据,对模型输出的仓面干密度值(压实度)采用距离反比法进行修正。对仓面任一点*i*的干密度(压实度)值 γ_i 修正公式为

$$\gamma'_i = \begin{cases} \gamma_i + \frac{(\gamma'_k - \gamma_k) \cdot (r - d)}{r} & \text{当 } d \leq r \text{ 时} \\ \gamma_i & \text{当 } d > r \text{ 时} \end{cases} \quad (2)$$

其中 γ'_k 为试坑试验检测干密度(压实度)值; γ_k 为 ANN 模型输出的试坑点压实度(干密度);*d*为仓面任一点*i*距试坑点*k*的距离;*r*为试坑试验数据对周围仓面点的压实度(干密度)的影响范围。

根据以上流程,随着试坑检测数据的不断增加,神经网络模型进行不断地训练,形成动态的神经网络模型,对后续施工仓面的碾压质量进行估算。与此同时,随着样本代表性的增强,模型的泛化能力也随之增加。

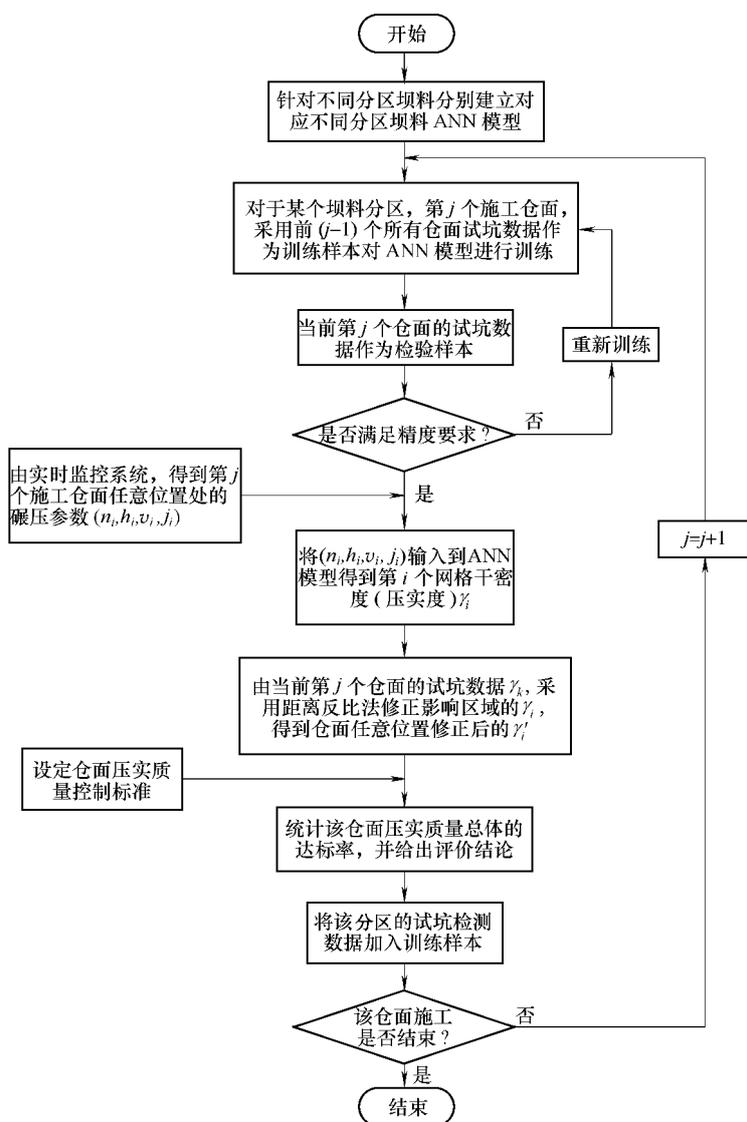


图 3 基于 ANN 模型的全仓面碾压质量评估流程

4 工程实例应用

澜沧江糯扎渡水电站心墙堆石坝最大坝高 261.5 m,在同类坝型中坝高居国内第一,世界第四。利用该工程大坝碾压质量实时监控系统采集的基础数据,对全仓面碾压质量进行实时评估。

4.1 碾压参数与压实度的相关性分析 选取心墙区已施工仓面的 20 个试坑试验数据,并根据试坑坐标位置,在实时监控数据库中获得对应的碾压参数。其中,行车速度取多次通过该点的平均值;此外,由于实时监控的有效性,使得碾压机械激振力输出基本都符合要求(不变化),故在相关性分析中不再考虑激振力。各试坑碾压参数及对应的压实度见表 1。

由式(1)可得 $r_{ny} = 0.9270$ $r_{hy} = -0.9595$ $r_{vy} = -0.6169$ 。

分别求 t 检验指标值 $t_{r_{ny}} = 9.8864$ $t_{r_{hy}} = -13.624$ $t_{r_{vy}} = -3.1353$,均大于 $t_{0.01(16)} = 2.921$,所以 n 、 h 、 v 与 γ 有显著的相关性,故上述 3 个参数可作为 ANN 模型的输入。

4.2 心墙区全仓面碾压质量评估 以表 1 中 20 个历史实测数据为训练样本,经试验发现隐含层神经元为 7 时模型的逼近效果最好(一般 100 次左右网络收敛),且发现相对误差很小,见表 1,说明模型具有很好的拟合度。然后,采用该模型分别对仓面 11_575.2_1、仓面 11_575.5_1 和仓面 11_575.8_1 共 3 个仓面的压实度进行估算。以当前仓面 2 个试坑数据为检验样本,并将其加入到下一施工层估算模型的训练样本中。各施工仓面的碾压质量估算结果及精度见表 2,由表 2 可以看出模型估算的误差很小,能满足工程应用的要求。

同时,采用式(2)对当面仓面的估算结果进行修正,进而得到修改后的压实度分布图,如图 4。表 3 为心墙区上述 3 个仓面的全仓面碾压质量评估结果。心墙部位碾压参数控制要求:碾压遍数以不小于 10 遍,压实厚度不大于 25cm,速度不大于 3km/h;全仓面达标率为质量达标区域的面积与总仓面面积之比。考虑到仓面边界误差以及仪器设备埋设占地无法碾压等情况,一般要求全仓面的碾压参数和压实度的达标率不小于 90%。据此,可用于指导现场施工质量的控制。

表 1 试坑碾压参数与压实度样本及训练结果

样本编号	碾压遍数 n	压实厚度 h /m	行走速度 v /(km/h)	压实度 γ /%		相对误差 /%
				实测值	拟合值	
1	10	0.250	1.800	98.7	98.71	-0.0101
2	10	0.300	1.445	97.9	97.82	0.0817
3	10	0.350	2.408	96.9	96.79	0.1135
4	8	0.250	2.356	98.0	98.09	-0.0918
5	8	0.300	2.645	96.8	96.87	-0.0723
6	8	0.350	2.334	96.3	96.25	0.0519
7	6	0.250	2.595	96.0	95.92	0.0833
8	5	0.272	2.410	95.4	95.34	0.0629
9	7	0.328	1.891	96.0	96.08	-0.0833
10	9	0.394	3.183	95.8	95.78	0.0209
11	12	0.159	2.628	99.7	99.64	0.0602
12	13	0.212	3.512	99.1	99.13	-0.0303
13	10	0.100	1.922	99.9	99.78	0.1201
14	11	0.150	1.198	99.9	99.86	0.0400
15	10	0.200	2.129	99.4	99.34	0.0604
16	8	0.100	2.708	99.2	99.28	-0.0806
17	9	0.150	1.598	99.6	99.65	-0.0502
18	6	0.230	2.264	97.5	97.46	0.0410
19	8	0.400	2.110	95.7	95.76	-0.0627
20	8	0.385	2.590	95.6	95.57	0.0314

表 2 各施工仓面的碾压质量估算结果

试坑编号		实测 γ /%	模型估算 γ /%	相对误差 /%
11_575.2_1 仓面	1 [#]	99.2	99.306 0	0.106 9
	2 [#]	99.5	99.455 8	-0.044 5
11_575.5_1 仓面	1 [#]	99.2	99.177 2	-0.023 0
	2 [#]	99.6	99.377 6	-0.223 3
11_575.8_1 仓面	1 [#]	99.3	99.472 8	0.174 0
	2 [#]	99.2	99.337 3	0.138 4

表 3 心墙区各仓面碾压质量分析评估结果

仓面编号	10 遍以上 达标率	压实厚度 $\leq 0.25\text{m}$ 达标率	速度 $\leq 3\text{km/h}$ 达标率	压实度 $\geq 98\%$ 达标率	综合评定
11_575.2_1 仓面	0.9153	0.8843	0.9156	0.8943	略欠,超厚区域补碾
11_575.5_1 仓面	0.9283	0.9122	0.9316	0.9203	碾压合格
11_575.8_1 仓面	0.9698	0.9236	0.9233	0.9518	碾压合格

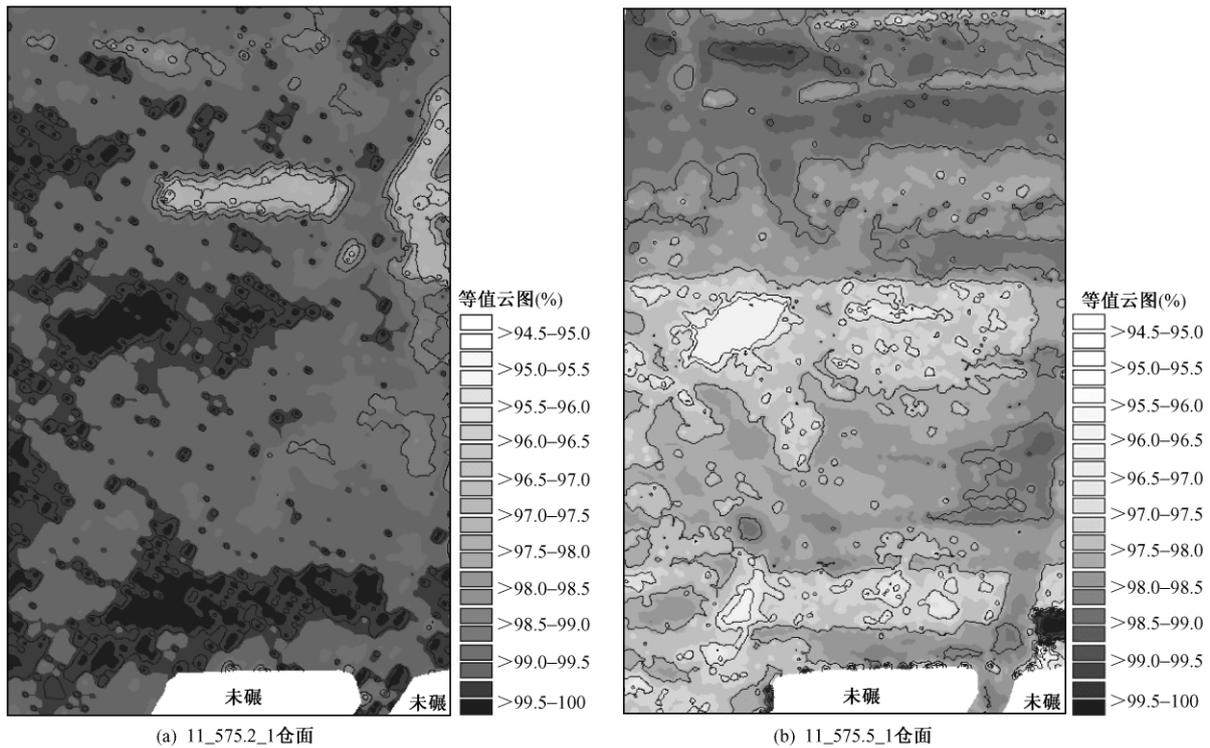


图 4 心墙区施工仓面压实度分布

5 结束语

依托于心墙堆石坝施工质量实时监控技术,获得了施工仓面任意位置处的碾压参数值(碾压速度、激振力、碾压遍数和压实厚度)。在分析碾压参数与压实质量标准(干密度或压实度)之间相关性的基础上,建立了全仓面碾压质量估算的 ANN 模型,提出了全仓面碾压质量的评估方法。该方法可有效避免以有限个试坑检测样本评价整体仓面碾压质量的片面性,为现场碾压质量控制提供了科学的依据。由于数据获取的困难性,本文全仓面碾压质量估算模型没有考虑含水率、坝料级配等因素的影响,但在假设整个施工仓面这些因素均无较大变化的情况下,模型是适用的,具有很高的精度。

参 考 文 献:

- [1] 王柏乐. 中国当代土石坝工程 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [2] 徐玉杰. 土石坝施工质量控制技术 [M]. 郑州:黄河水利出版社,2008.
- [3] Mark J Thompson, David J White. Estimating compaction of cohesive soils from machine drive power [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2008, 134 (12): 1771 - 1777.
- [4] 黄声享,刘经南. GPS 实时监控系统及其在堆石坝施工中的初步应用 [J]. 武汉大学学报,2005,30(9):813 - 816.
- [5] 吴晓铭,黄声享. 水布垭水电站大坝填筑碾压施工质量监控系统 [J]. 水力发电,2008,34(3):47 - 50.
- [6] 天津大学水利水电工程系. 心墙堆石坝施工质量实时监控与系统集成技术及工程应用研究报告 [R]. 天津:天津大学,2009.
- [7] Hornik K. Approximation capabilities of multilayer feedforward Networks [J]. Neural Networks, 1991, 4(2):251 - 257.
- [8] 王静龙. 多元统计分析 [M]. 北京:科学出版社,2008.
- [9] Hagan M T, Menh M B. Training feed-forward networks with the Marquardt algorithm [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1994, 5(6):989 - 993.

Compaction quality evaluation of the entire rolled unit of earth dam based on real-time monitoring

LIU Dong-hai, WANG Guang-feng
(Tianjin University, Tianjin, 300072)

Abstract: Site supervision of roller compacting parameters and pits sampling are conventional ways for the quality control of earth dam construction. However, personal errors and slips of quality management may often appear. By using real-time quality monitoring technology of earth dam construction, the real-time compaction parameters at any position of the working area including rolling speed, vibration force, rolling passes and compacted thickness can be collected. Based on the correlation analysis between compaction parameters and quality index (dry density or compaction degree), the nonlinear mapping relationship between input (compaction parameters) and output (quality index) was established using an three layers feed-forward artificial neural networks model, and a process of compaction quality evaluation of the entire rolled working unit was suggested to estimate the compaction degree at any position and the proportion of the acceptable area. This method can effectively avoid the incorret assessment for the rolling quality of the entire working unit according to limited observations of pit sampling.

Key words: Earth dam construction; compaction; quality control; quality evaluation; real-time monitoring; artificial neural networks

(责任编辑:王冰伟)