

基于 D-S 证据理论的土料压实质量多源信息融合评估方法

杨 钢¹,刘国庆²,李洪飞³,丁学赏²,常瑞峰³,刘东海¹

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室; 2. 天津水务投资集团有限公司; 3. 天津市水利工程集团有限公司)

摘要:为准确评估围坝土料压实质量,提出了一种基于碾轮加速度时域和频域等多源信息融合的压实质量综合评估方法。分别建立了单位体积压实功、频域指标 CV 及时频域指标 CWT-THD 等不同指标与土料压实度之间的定量关系模型;以 D-S 证据理论为信息融合框架,结合施工实际及 Murphy 规则对 3 种指标的基本概率分配值求解与冲突证据融合进行了优化。实例验证结果表明,所提出的方法可提高土料压实质量评价的准确率,避免单一指标评估的片面性,并可用于分析压实质量的空间均匀性,实现对土料压实质量的快速、准确评定。

关键词:土石坝施工;压实质量;多源信息融合;智能碾压;D-S 证据理论;综合评估

Multi-source information fusion evaluation method of soil compaction quality based on D-S evidence theory//Yang Gang¹, Liu Guoqing², Li Hongfei³, Ding Xueshang², Chang Ruifeng³, Liu Donghai¹ (1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University*; 2. *Tianjin Water Investment Group Co., Ltd.*; 3. *Tianjin Water Conservancy Engineering Group Co., Ltd.*)

Abstract: To accurately evaluate the compaction quality of embankment soil materials, a comprehensive assessment method based on multi-source information fusion of roller acceleration data in both the time and frequency domains is proposed. Quantitative relationship models between compaction degree and different indicators, including compaction energy per unit volume, frequency-domain indicator CV, and time-frequency-domain indicator CWT-THD, were established. Utilizing the Dempster-Shafer (D-S) evidence theory as the information fusion framework, the basic probability assignment values of the three indicators and conflicting evidence were optimized through integration with construction practice and Murphy's rule. The case validation results demonstrate that the proposed method can improve the accuracy of compaction quality evaluation, avoid the limitations of single-indicator assessments, and enable the analysis of spatial uniformity of compaction quality, thereby achieving rapid and accurate evaluation of soil compaction quality.

Key words: earth-rock dam construction; compaction quality; multi-source information fusion, intelligent compaction; D-S evidence theory; comprehensive evaluation

确保土料碾压施工过程中的压实质量是有效控制围坝工后沉降与不均匀沉降的关键。常规的土料压实质量检测采用人工试坑抽检,存在检测效率低、取样费时费力、样本点少、难以反映全仓面、难以及时反馈控制且干扰后续施工作业等不足。如何建立碾压质量高精度快速评估模型,在碾压过程中实现土料压实质量的综合评估,是该领域亟须解决的问题^[1-2]。

近年来,随着智能碾压技术^[3]的发展,基于实时监测指标来评估土料压实质量的方法已得到较多应用,主要包括基于碾轮振动加速度频谱分析的频域指标压实监测值(CV)^[4]、压实控制值(CCV)^[5]、

总谐波失真指标(THD)^[6]等、以及借助碾压机-土料动力学模型推导出的压实指标如刚度^[7]、单位体积压实功^[8]等。例如:Liu 等^[9]基于 CV 和单位体积压实功等指标,实现了全施工作业面压实质量的快速评估;Xu 等^[10]提出了自适应的质量控制集成系统,并利用智能碾压技术实时采集工作面的监测指标 CCV,实现了路面的压实质量评估;Yang 等^[11]提出将振动能量压实值(KECV)作为公路压实质量的实时监测指标,实现了全域压实质量合格率的快速评估。上述指标在一定程度上都能表征压实质量,但都存在各自的局限性,如频域指标通过土料不同密

实状态对碾轮的振动响应不同来间接评估土料的压实质量,但容易受到土料底层坚硬程度和底层压实均匀性的影响;刚度指标能够直接表征碾压过程中土料被压实的坚硬程度,但无法体现压实过程中土料对碾轮的动态响应;单位体积压实功可客观反映碾压机对土料的压实作用和土料接受外界施压的效果,但无法反映不同土料压实效果的均匀性。此外,基于频率分析方法得到的现有指标仅在时域或者频域内进行分类,但振动响应的时频域特征可以更全面地表示压实质量^[12],但相关研究目前仍较为匮乏。

Dempster-Shafer (D-S) 证据理论是一种处理多种不确定性信息的理论框架,可用于解决不确定性推理和多源信息融合问题,已广泛应用于人工智能、模式识别、决策分析等领域,近年来逐渐被用于隧道、基坑等工程领域^[13-16]。相较于最大熵、模糊集等不确定信息推断理论,D-S 证据理论能够处理多源证据的冲突性,聚焦多个具体证据的共同支持点,从而得到更加合理、准确的评估结果。

为降低单个评估指标在土料压实质量评估中的片面性,本文将 CV、单位体积压实功及 CWT-THD 作为多源证据信息,建立多源信息融合下的土料压实质量综合评估模型,结合 D-S 证据理论进行信息融合,以期实现土料压实质量的准确评定。

1 基于智能碾压的土料压实质量表征指标分析

智能碾压技术可实时采集碾轮运行参数(如碾轮振幅、频率、加速度等)及碾压过程参数(如碾压遍数、铺层厚度、振动状态、行进速度等),利用车载压实质量实时监测装置(用于监测压实指标,如 CV、单位体积压实功等),动态监测和评估被压料的压实效果(如压实度、孔隙率、干密度),自适应调节碾压参数,实现在线监控和反馈指导施工,使碾压质量始终处于受控状态^[17]。实时计算的压实指标带有时间属性,与碾轮的实时位置坐标信息以及实时监测的碾压参数信息进行组合发送至数据库中,用于后续的压实质量评估^[18]。

单位体积压实功可客观反映碾压机对土料的压实作用和土料接受外界施压的效果,一定程度上可表征土料的压实程度。但该指标不能体现对不同土料的压实状态,不同土料在相同压实功下可能具有不同的压实效果。其计算公式如下^[8]:

$$E = \frac{2A(W + \pi F/4)fN}{Bhv} \quad (1)$$

式中: E 为碾压 N 遍后的单位体积压实功; A 为碾轮

工作振幅; W 为碾轮的径向荷载; F 为实际输出激振力; f 为振动频率; N 为碾压遍数; B 为碾轮宽度; h 为压实厚度; v 为碾压机行车速度。

将 CV 作为土料压实质量频域监测指标,可通过土料不同密实状态对碾轮的振动响应不同来间接评估土料的压实质量,但评估结果易受土料底层坚硬程度及压实均匀性的影响。CV 能够体现不同土料对碾轮振动的响应,可弥补单位体积压实功对不同土料压实效果辨别能力不足的问题,其计算公式如下^[19]:

$$I_{CV} = 300A_4/A_2 \quad (2)$$

式中: I_{CV} 为 CV 指标值; A_2 为碾轮振动加速度的基频谐波对应幅值; A_4 为二倍基频谐波对应幅值。

连续小波变换^[20] (CWT) 通过将振动加速度响应信号与不同尺度的小波函数(小波基)进行卷积得到小波系数,进而推导得到时频域指标。小波基的缩放变换结合了频率维度,而与振动加速度响应信号的卷积结合了时间维度。因此,CWT 可对频率和时间维度上的振动加速度响应信号进行分析,与其他监测指标相比,时频域指标可以更细致地表征不同压实状态下振动加速度响应信号的变化。

单位体积压实功仅量化了碾压机对土料施加的能量输入,不能反映不同土料在相同能量输入下的实际压实状态或压实效果差异;CV 关注碾轮振动加速度信号的基频与二次谐波之间的关系,但无法准确反映更复杂的频域成分,尤其是高频失真分量对压实质量的贡献。而时频域指标能够捕捉压实过程中振动信号的动态变化,同时提取振动信号中的高频失真分量,可进一步细化土料内部的响应特性。于是本文将考虑高频和低频的联合指标 CWT-THD 作为时频域指标,采用 Morse 小波函数作为小波基进行分析。其计算公式如下:

$$I_{CWT-THD} = \frac{50 \sqrt{\sum_{i=1}^{16} M_i^2}}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4} \quad (3)$$

式中: $I_{CWT-THD}$ 为 CWT-THD 指标值; M_i 为碾轮振动加速度信号高频部分的幅值小波系数模,用来反映高频失真分量; $F_1 \sim F_4$ 分别为 1~4 倍基频谐波范围内的小波幅值均值,共同表示信号在前 4 阶谐波上的主要能量分布。

2 基于 D-S 证据理论的多源信息融合方法

2.1 压实质量证据融合规则构建

设多源信息融合土料压实质量评估的 D-S 证据识别框架为 $\theta = \{Q_1, Q_2\}$, 分别代表压实质量合格与不合格;而土料压实质量证据集为 $\varphi = \{A_j, j = 1, 2,$

..., 5}, 分别代表单位体积压实功、CV、CWT-THD、土料特性参数级配和含水率。若有函数 $m: 2^\theta \rightarrow [0, 1]$ 满足如下条件:

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{Q_i \subseteq \theta} m(A_j(Q_i)) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\emptyset$ 为空集; $m(A_j(Q_i))$ 为证据 A_j 对识别框架中子集 Q_i 的基本概率分配。

称 m 为识别框架 θ 的基本概率分配函数, 计算结果为基本概率分配 (BPA)。当从多个信息源得到证据集中每个证据体的 BPA 后, 需要将这些证据按照一定的规则进行融合^[21]。常规 D-S 融合规则为:

$$m(F) = \begin{cases} \sum_{Q_1 \cap Q_2 = F} m(A_j(Q_i)) / (1 - K) & \forall F \subseteq \theta, F \neq \emptyset \\ 0 & F = \emptyset \end{cases} \quad (5)$$

式中: F 为融合后的焦元子集; K 为冲突系数, 被用于描述证据之间存在冲突性, 其值越大, 说明证据体之间的冲突越大, 也意味着所融合后的决策结果的可靠度越差。

2.2 概率分配函数选择

考虑既定工况下土料不同压实度条件下评估指标的波动性, 对评估指标进行统计分析, 得到不同评估指标的取值区间。评估指标值越大, 支持压实度合格的概率越高。结合压实度控制要求, 计算得到不同评估指标的控制阈值, 则评估指标的 BPA 可按线性分配计算:

$$m(A_j(Q_1)) = \begin{cases} 0.5(A_j - A_{jmin}) / (A_{jthreshold} - A_{jmin}) & A_j \in [A_{jmin}, A_{jthreshold}] \\ 0.5 + 0.5(A_j - A_{jthreshold}) / (A_{jmax} - A_{jthreshold}) & A_j \in (A_{jthreshold}, A_{jmax}] \end{cases} \quad (6)$$

$$m(A_j(Q_2)) = 1 - m(A_j(Q_1)) \quad (7)$$

式中: A_j 为评估指标的实际值; A_{jmax} 和 A_{jmin} 分别为评估指标的最大值和最小值; $A_{jthreshold}$ 为控制阈值; $m(A_j(Q_1))$ 和 $m(A_j(Q_2))$ 分别为评估指标支持压实度合格和不合格的 BPA。

2.3 冲突程度弱化处理

通常, 随着不同评估指标数量的增加, 其冲突概率会不断提高。而土料压实质量往往受到多来源、多指标的综合影响, 采用不同指标进行综合评估十分必要。因此, 为提高多源信息融合结果的准确性, 需要对这种潜在的冲突性进行优化处理。

本文采用 Murphy 规则^[22]进行多源证据评价指标间冲突程度的弱化。该方法首先将多个评估指标

值的 BPA 进行均值计算以及权重调整, 再使用 D-S 组合规则进行信息融合。该方法可以处理冲突数据, 且收敛速度较快。评估指标的平均 BPA 计算公式为:

$$m_{avg}(Q_1) = \sum_{j=1}^5 m(A_j(Q_1)) / 5 \quad (8)$$

$$m_{avg}(Q_2) = \sum_{j=1}^5 m(A_j(Q_2)) / 5 \quad (9)$$

式中: $m_{avg}(Q_1)$ 和 $m_{avg}(Q_2)$ 分别为压实度合格与不合格的平均 BPA。

进一步地, 将所有指标证据体的概率值进行权重调整, 使每个指标证据体的支持概率值都趋于一致, 减少冲突对结果的影响。调整指标概率分配值公式如下:

$$m'(A_j(Q_1)) = \alpha m_{avg}(Q_1) + (1 - \alpha) m(A_j(Q_1)) \quad (10)$$

$$m'(A_j(Q_2)) = \alpha m_{avg}(Q_2) + (1 - \alpha) m(A_j(Q_2)) \quad (11)$$

式中: $m'(A_j(Q_1))$ 和 $m'(A_j(Q_2))$ 分别为调整后评估指标支持压实度合格与不合格的 BPA; α 为调整系数, 一般取 0.5。

计算得到调整后的 BPA 后, 继续利用式 (5) 进行 $j-1$ 次融合迭代, 即可得到最终的融合结果。

3 围坝土料压实质量综合评估步骤

为实现对土料压实质量的综合评估, 首先, 利用压实质量实时监控系统^[23]实时采集每个采样位置处的碾轮振动加速度信号以及碾压参数, 计算得到采集位置处的多个压实质量评估指标; 然后, 基于 D-S 证据理论对计算得到的多个评估指标值进行信息融合, 得到每个采集位置处融合后的概率值; 最后, 利用空间插值方法对任意位置处压实度合格概率值进行插值, 得到全工作面压实度合格概率值分布云图, 同时进行压实质量均匀性评价, 并结合现场压实度控制标准要求, 指导现场施工, 对不合格区域进行补碾, 保证压实质量达标。土料压实质量综合评估实施步骤具体如下:

a. 任意位置处压实质量评估指标实时采集与计算。利用智能碾压技术, 在碾压过程中实时采集碾轮振动加速度、行车速度、碾压遍数、压实厚度等数据, 结合式 (1) ~ (3) 计算得到每个采集位置处 (一般是每隔 1 s 采样频率, 考虑 3 ~ 4 km/h 的行车速度, 故相邻采集点距离约 1 m) 的单位体积压实功、CV 和 CWT-THD。

b. 压实质量评估指标标准化。针对单位体积压实功、CV 和 CWT-THD 指标不同的量纲和取值范

围,采用线性归一化方法将不同评估指标取值转换为无量纲数值。

c. 基于改进 D-S 证据理论进行多个指标的信息融合。首先,利用式(6)和式(7)计算得到每个采集位置处不同评估指标支持压实度合格与不合格的概率值;然后,利用式(8)~(11)得到每个采集位置处弱化冲突后,每个评估指标支持压实度合格与不合格的概率值;接着,利用式(5)进行融合迭代,得到每个采样位置处(每个位置间隔约 1 m)最终的融合概率值。

d. 土料压实质量全域快速评估。利用步骤 c 得到的采样点处的压实度合格概率和空间插值方法(如克里金插值),对其他任意位置处压实度合格概率值进行插值,可得到全工作面支持压实度合格概率值分布云图;以支持压实度合格的概率值 p 作为控制标准要求,当支持压实度合格的最终融合概率值大于 p 时,可认为压实度合格,一般 p 取值为 0.5。此外,可现场随机抽取若干检测点,对每个点的融合评估结果与实际压实度检测结果进行对比分析。通过计算的压实度合格概率值来判断各点的压实质量是否符合要求。随后,将模型预测结果与实测数据进行对比分析,采用准确率、召回率、假阴性率等评价指标^[24]对模型的性能进行定量评估,以反映其优劣性。

e. 压实质量均匀性分析。通过步骤 d 利用克里金空间插值法构建半变异函数模型,结合模型的关键参数分析全域压实质量的空间均匀性,以避免工后沉降的不均匀性。半变异函数值的计算和拟合公式分别为^[25]:

$$\gamma(h) = \sum_{i=1}^{N_h} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 / 2N_h \quad (12)$$
$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c[3h/2a - (h/a)^3/2] & 0 < h < a \\ c_0 + c & h \geq a \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\gamma(h)$ 为半变异函数; h 为取样间隔; N_h 为取样间隔为 h 时检测点的对数; $z(x_i)$ 为空间位置 x_i 处的实际观测值; c_0 为块金值,反映了微小尺度的变异性; c 为基台值,反映了整体的空间变异程度; a 为变程,反映了变量的空间影响范围及空间分布的连续性。

4 实例验证

4.1 碾压试验方案

天津市某水库围坝扩建工程,增容后水库总库容为 9525 万 m^3 ,坝顶高程为 10.8 m,全长 14.2 km,土方填筑量约 600 万 m^3 ,施工工期约 1 年。采用就

近取土筑坝方式,取土料场建在原水库库区内。筑坝土料主要为粉质黏土,其塑限和液限分别为 21.0%和 34.6%,最优含水率为 18.6%,最大干密度为 1.68 g/cm^3 。该土料的粒径分布见表 1。

表 1 土的粒径分布

粒径(mm)	>0.250	0.250~0.075	0.075~0.005	<0.005
质量分数(%)	3.8	17.6	52.1	26.5

碾压试验设置 1 个碾压条带,条带长 35 m、宽 2.5 m,松铺厚度约为 40 cm,条带上标记 6 个试验点,每个试验点间距为 5 m,如图 1 所示。使用柳工 CLG622 单钢轮振动碾压机振动压实土料,条带先静碾 1 遍,再高频低振 4 遍,碾压机前进后退一次算碾压 2 遍。试验过程中碾压机行进速度与实际施工一致,维持在 2.5 km/h 左右。每遍振碾后,利用环刀对试坑检测点进行取样;最后一遍振碾后,额外随机选择 4 个试坑检测点进行取样,并用手持 RTK 设备记录所有试坑检测点的位置坐标。考虑到现场施工土料来自同一料场,且土料较为均匀,可认为其级配与含水率基本一致。



图 1 现场试验布置(单位:m)

4.2 多源信息融合下压实质量综合评估

根据试坑检测点的坐标位置匹配远程数据库中的振动加速度信号以及碾压参数,利用式(1)~(3)计算试坑检测点的 CV、 E 以及 CWT-THD,并分析上述指标与压实度 D 之间的相关性(图 2)。由图 2 可知,3 个指标与压实度之间均存在较好的相关性,其决定系数 R^2 分别为 0.78、0.75 和 0.71。

基于 CV、 E 、CWT-THD 3 个指标的关系模型得到的计算值与实测值之间的最大相对误差分别为 1.71%、1.85%以及 2.05%,其平均相对误差分别为 0.85%、0.95%以及 0.97%。由此可见,上述 3 个评估指标能够较好地表征土料的压实质量。为进一步提升评估精度,采用 D-S 证据理论对其进行融合处理,以实现土料压实质量的综合评估。针对试验条带,根据第 3 节评估步骤,得到支持压实度合格概率值分布云图,如图 3 所示。

根据式(4)~(11),计算 4 个位置处的试坑检

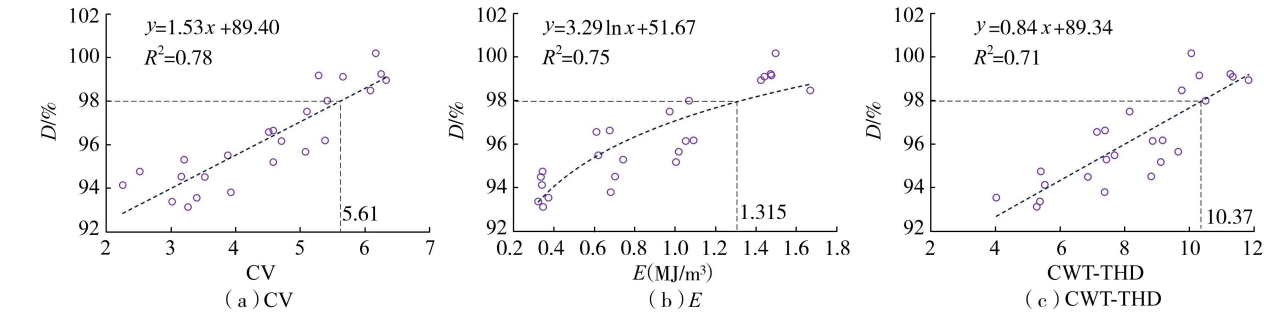


图2 不同评估指标与压实度的关系

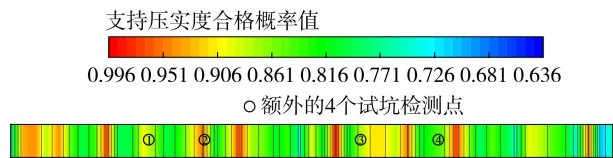


图3 支持压实度合格概率值分布云图

测压实度合格概率值,见表2。如采集位置①处,最终融合结果为[0.901,0.099],表示压实度合格概率为0.901,不合格概率为0.099。根据设定的概率阈值,当支持压实度合格概率值大于0.5时,认为压实质量合格。由表2可知,基于D-S证据理论的多源信息融合结果中,支持压实度合格概率值均大于0.5,表明评定结果均为合格,与试坑实测压实度值大于98%为合格的评定结果一致。

表2 试坑压实度实测值与合格概率值对比

采集位置	实测值/%	最终融合结果	融合评定结果
①	99.03	[0.901,0.099]	合格
②	100.14	[0.954,0.046]	合格
③	100.60	[0.910,0.090]	合格
④	98.88	[0.856,0.144]	合格

4.3 全仓面压实质量综合评估

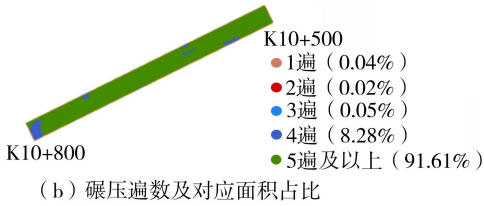
以该工程第4标段K10+500~K10+800的某待测仓面为例,其仓面位置及施工参数(总遍数和压实厚度)数据如图4所示,其中压实厚度的平均值为0.31m,标准差为0.05m。

根据第3节评估步骤,得到该仓面不同评估指标分布云图以及支持压实度合格概率值分布云图(图5),现场压实度控制标准不低于98%,图中阴影部分表示不合格区域。按SL/T848—2025《碾压式土石坝施工规范》要求每100~200m³取样一次(本文研究中200m³取样一次),并将随机检测的10个试坑检测点位置标注在云图中。

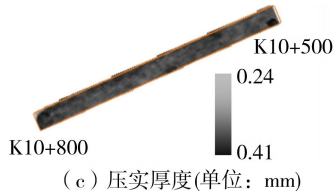
试坑检测结果与其云图对应位置处的不同指标评估结果如表3所示。由表3可知,实测结果中10号试坑压实质量不合格,其余试坑均合格;3种不同评估指标的单一评定结果中除10号试坑外还分别存在其他试坑不合格(2号、7号和1号)的情况,这可能是由于施工速度的波动以及加速度振动信号



(a) 仓面位置示意图



(b) 碾压遍数及对应面积占比



(c) 压实厚度(单位: mm)

图4 待测仓面位置及施工参数

表3 压实度实测值和不同指标计算的压实度评估结果对比

试坑编号	压实度实测值/%	基于不同指标计算的压实度/%			融合结果
		CV	E	CWT-THD	
1	98.58	98.83	98.96	97.48*	[0.761,0.239]
2	98.78	97.85*	98.69	99.16	[0.749,0.251]
3	98.67	98.14	99.42	99.06	[0.809,0.191]
4	98.82	99.26	98.16	99.94	[0.848,0.152]
5	99.14	99.71	98.24	98.35	[0.857,0.143]
6	99.32	98.67	98.69	99.16	[0.829,0.171]
7	98.44	99.41	97.35*	99.67	[0.737,0.263]
8	99.61	98.32	98.26	98.44	[0.818,0.182]
9	98.82	98.44	99.79	99.43	[0.827,0.173]
10	97.66*	97.34*	97.26*	97.21*	[0.468,0.532]*

注: *表示不合格。

的不稳定导致了单一评定结果的误判。而基于D-S证据理论的多源信息融合结果中只有10号试坑压实度合格概率小于0.5,其余均大于0.5,评定结果与实测结果保持一致。这表明基于多源信息融合后的压实质量评定结果平衡了各个指标之间的敏感性和抗干扰性,相较于单一指标的评定结果准确性更高。

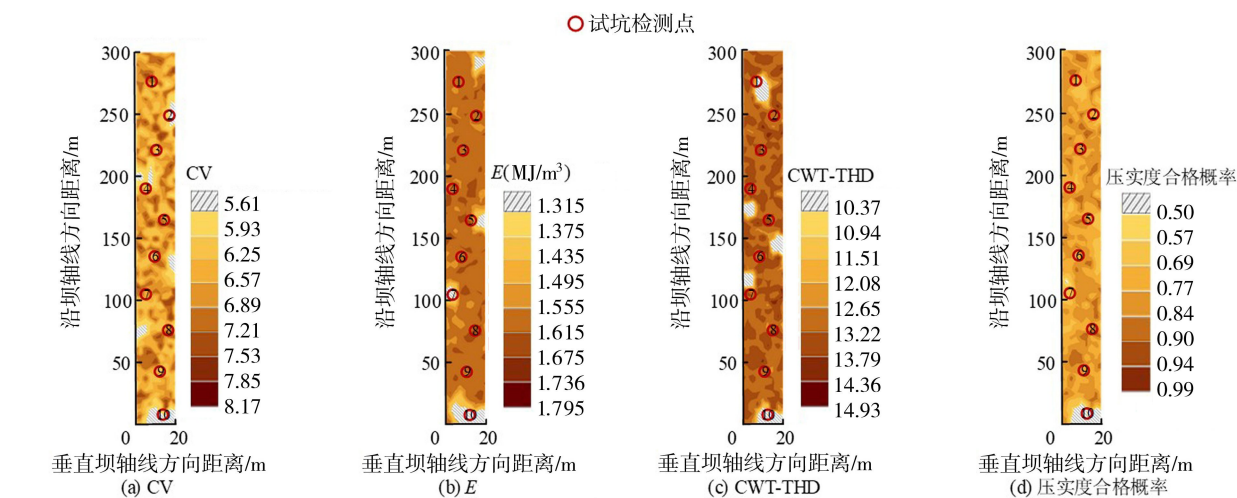


图5 待测仓面不同评估指标分布云图

待测仓面不同评估模型的评价指标如表4所示。由表4可知,总体上3种不同指标的单一评估模型准确率和召回率均达到0.85以上,且假阴性率较低,表明3种不同的评估指标能够较好地表征压实质量,模型精度较高;而基于多源信息融合的评估模型评价指标结果表现更好,可实现对土料压实质量的准确评定。

表4 不同评估模型的评价指标

评估模型	准确率	召回率	假阴性率
CV	0.90	0.89	0.11
E	0.90	0.89	0.11
CWT-THD	0.90	0.89	0.11
融合结果	1.00	1.00	0.00

根据第3节步骤e,针对多源信息融合的压实度融合概率值构建半变异函数,比较沿方位角0°、45°、90°和135°方向上的半变异函数值(图6)。由图6可知,不同方向上的半变异函数值之间没有显著差异,表明该仓面压实质量在各个方向上没有明

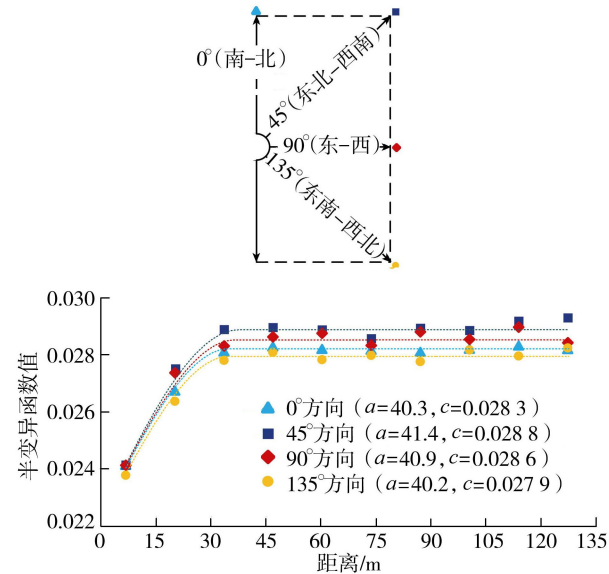


图6 不同方向上的压实度融合概率值半变异函数值

显差异,仓面在施工过程中的压实质量得到了较好的控制,空间均匀性较好。

5 结 语

为解决单一指标表征土料压实质量的局限性,本文将频域指标 CV、单位体积压实功 E 及时频域指标 CWT-THD 作为表征土料压实质量的多源信息,提出了一种基于多源信息融合的围坝土料压实质量综合评估方法,利用 D-S 证据理论对多种评价指标进行了信息融合,结合施工实际情况以及 Murphy 规则对基本分配概率值求解与冲突证据融合进行了优化,从而实现了土料压实质量的快速、准确评定。实例验证结果表明,本文方法评定的压实质量结果与试坑检测结果一致,相较于单一指标评定结果的准确率更高,同时可用于分析压实质量的空间均匀性,为土料碾压质量控制提供了新的途径。

参考文献:

[1] 崔博,闫辰博,王佳俊. 基于 FOA-RF 算法的心墙砾石土压实质量预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 42-48. (Cui Bo, Yan Chenbo, Wang Jiajun. Research on compaction quality prediction model of core wall gravel soil based on FOA-RF algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 42-48. (in Chinese))

[2] 田正宏,苏伟豪,郑祥,等. 基于 GA-BP 神经网络的碾压混凝土压实度实时评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 81-86. (Tian Zhenghong, Su Weihao, Zheng Xiang, et al. Real-time evaluation method of compaction degree for roller-compacted concrete based on GA-BP neural network[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3): 81-86. (in Chinese))

[3] Wang Xuefei, Li Xiangdong, Li Jiale, et al. Training strategy and intelligent model for in-situ rapid

- measurement of subgrade compactness[J]. Automation in Construction,2024,165:105581.
- [4] Li Jianhua, Wang Xuefei, Li Jiale, et al. A generative adversarial learning strategy for spatial inspection of compaction quality [J]. Advanced Engineering Informatics,2024,62:102791.
- [5] Ling Jianming, Lin Sheng, Qian Jinsong, et al. Continuous compaction control technology for granite residual subgrade compaction [J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2018,30(12):04018316.
- [6] Mooney M A, Gorman P B, Gonzalez J N. Vibration-based health monitoring of earth structures[J]. Structural Health Monitoring,2005,4(2):137-152.
- [7] Rahman F, Hossain M, Hunt M M, et al. Soil stiffness evaluation for compaction control of cohesionless embankments[J]. Geotechnical Testing Journal,2008,31(5):442-451.
- [8] 刘东海,李子龙,王爱国. 基于碾压机做功的堆石坝压实质量实时监测与快速评估[J]. 水利学报,2014,45(10):1223-1230. (Liu Donghai, Li Zilong, Wang Aiguo. Roller working-based real-time monitoring and rapid assessment of rock-fill dam compaction quality [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45 (10): 1223-1230. (in Chinese))
- [9] Liu Donghai, Lin Min, Li Shuai. Real-time quality monitoring and control of highway compaction [J]. Automation in Construction,2016,62:114-123.
- [10] Xu Qinwu, Chang G K. Adaptive quality control and acceptance of pavement material density for intelligent road construction[J]. Automation in Construction,2016,62:78-88.
- [11] Yang Xian, Wu Chuping, Qiao Lan, et al. Compaction quality assessment of highway using roller-integrated positive maximum kinetic energy increment detection technique[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024,21:e03411.
- [12] Wang Xuefei, Lu Wei, Li Jiale, et al. Multi-domain adaptive analysis of intelligent compaction measurement value for subgrade construction [J]. Automation in Construction,2024,163:105413.
- [13] 丘伟兴,赵炼恒,吴波,等. 基于证据推理的隧道坍塌多源信息融合评估[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024,51(1):190-200. (Qiu Weixing,Zhao Lianheng,Wu Bo,et al. A multi-source information fusion assessment for the tunneling collapse disaster based on evidential reasoning [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2024,51(1):190-200. (in Chinese))
- [14] 刘素艳,乔一鸣,董一林,等. 改进 D-S 证据理论的高冲突多信息融合方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025,22(7):3328-3338. (Liu Suyan,Qiao Yiming,Dong Yilin,et al. High conflict multi source information fusion method for improving D-S evidence theory [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22 (7): 3328-3338. (in Chinese))
- [15] 林威伟,张君,王晓玲,等. 基于改进证据理论的土石坝碾压质量综合评价方法[J]. 水利学报,2025,56(1):117-129. (Lin Weiwei,Zhang Jun,Wang Xiaoling,et al. A comprehensive evaluation method for rolling quality of earth-rock dam based on improved evidence theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56 (1): 117-129. (in Chinese))
- [16] 李卓,孙屹,姜鑫,等. 低围压与不同温度作用下土石坝护坡土石混合体力学特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):90-96. (Li Zhuo,Sun Yi,Jiang Xin, et al. Study on mechanical properties of earth-rock mixture for earth-rock dam slope protection under low confining pressure and different temperatures [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (6): 90-96. (in Chinese))
- [17] Ma Yuan, Lu Wei, Luan Yingcheng, et al. Research on global optimization mechanism of intelligent compaction parameters of soil subgrade based on difference method [J]. Journal of Building Engineering,2024,82:108381.
- [18] 屈嘉程,田正宏,孙啸,等. 基于瑞雷波速的碾压混凝土压实效果评价[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):58-64. (Qu Jiacheng, Tian Zhenghong, Sun Xiao, et al. Evaluation of compaction effect of RCC based on Rayleigh wave velocity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):58-64. (in Chinese))
- [19] Wang Xuefei, Wang Tingkai, Zhang Jianmin, et al. Autonomous soil vision scanning system for intelligent subgrade compaction [J]. Automation in Construction, 2024,158:105242.
- [20] 孙增寿,李晓鹏,韩培琰,等. 基于小波包样本熵的连续梁桥损伤识别[J]. 振动、测试与诊断,2018,38(5):916-921. (Sun Zengshou,Li Xiaopeng,Han Peiyan,et al. Damage Identification for continuous girder bridge based on wavelet packet sample entropy [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38 (5): 916-921. (in Chinese))
- [21] 李德春,练继建,苏芳,等. D-S 证据理论的改进算法及其在导墙结构损伤定位中的应用验证[J]. 水利水电科技进展,2015,35(1):78-84. (Li Dechun, Lian Jijian, Su Fang,et al. An improved method based on D-S evidence theory and its verification in damage location for guide wall structure [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(1):78-84. (in Chinese))

(下转第 92 页)

200. (Wu Zaiqiang, Lin Yatao, Guan Yingbo, et al. Study on vortex zone of draft tube and improvement measures of Francis turbine[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(7):197-200. (in Chinese))

[5] Presas A, Valero C, Valentín D, et al. Water saving options in hydropower by means of variable speed operation; a prototype study in a mid-head Francis turbine[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 291:117296.

[6] 王李科, 姚亮, 冯建军, 等. 水泵水轮机 S 特性区能量损失及流动特性研究[J]. 水利学报, 2024, 55(3):344-354. (Wang Like, Yao Liang, Feng Jianjun, et al. Energy loss and flow characteristics analysis of a model pump turbine in the S-shape region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(3):344-354. (in Chinese))

[7] Ohiemi I E, Yang Sunsheng, Singh P, et al. Evaluation of energy loss in a low-head axial flow turbine under different blade numbers using entropy production method[J]. Energy, 2023, 274:127262.

[8] 周罗香, 张志兵, 孙政, 等. 基于熵产理论的水泵水轮机驼峰区内部水力损失特性研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1):62-67. (Zhou Luoxiang, Zhang Zhibing, Sun Zheng, et al. Study on internal hydraulic loss characteristics of pump-turbine hump region based on entropy generation theory[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1):62-67. (in Chinese))

[9] Qin Yonglin, Li Deyou, Wang Hongjie, et al. Investigation on hydraulic loss component and distribution in hydraulic machinery: a case study of pump-turbine in pump mode[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52:104932.

[10] 朱强, 龚莉, 袁玲丽, 等. 某低水头混流式水轮机叶道涡特性数值分析[J]. 水电站机电技术, 2023, 46(3):6-10. (Zhu Qiang, Gong Li, Yuan Lingli, et al. Numerical analysis of blade passage vortex characteristics in a low head mixed flow turbine[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2023, 46(3):6-10. (in Chinese))

[11] Pang Jiayang, Yao Bing, Liu Xiaobing, et al. Influence of guide vane opening on channel vortex and pressure pulsation in Francis turbine runners[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(4):043325.

[12] Gao Yisheng, Liu Chaoqun. Rortex and comparison with eigenvalue-based vortex identification criteria[J]. Physics of Fluids, 2018, 30(8):085107.

[13] Wilhelm S, Balarac G, Métais O, et al. Analysis of head losses in a turbine draft tube by means of 3D unsteady simulations[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2016, 97(4):1255-1280.

[14] Liu Chaoqun, Gao Yisheng, Tian Shuling, et al. Rortex: a new vortex vector definition and vorticity tensor and vector decompositions[J]. Physics of Fluids, 2018, 30(3):035103.

[15] 阚闯, 张清滢, 黄佳程, 等. 叶顶泄漏流动对轴流泵反向发电能量特性的影响研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(9):2416-2422. (Kan Kan, Zhang Qingying, Huang Jiacheng, et al. Tip Leakage flow on energy performance for an axial flow pump as turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(9):2416-2422. (in Chinese))

[16] Celik I B, Ghia U, Roache P J, et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(7):078001.

[17] 李桂林, 冯陈, 张玉全, 等. 基于特性曲线的水轮机调速器新型功率调节模式研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6):110-118. (Li Guilin, Feng Chen, Zhang Yuquan, et al. Research on a novel power regulation mode of water turbine governor based on characteristic curve[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6):110-118. (in Chinese))

(收稿日期:2025-05-11 编辑:熊水斌)

(上接第 78 页)

[22] 彭浩, 韩玉, 梁铭, 等. 基于多源信息融合的隧道施工综合安全动态评估技术研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(9):1893-1902. (Peng Hao, Han Yu, Liang Ming, et al. Research on dynamic safety assessment technology for tunnel construction based on multi-source information fusion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(9):1893-1902. (in Chinese))

[23] 刘东海, 王爱国, 柳育刚, 等. 基于碾轮振动动态分析的土石坝压实质量实时监测与评估[J]. 水利学报, 2014, 45(2):163-170. (Liu Donghai, Wang Aiguo, Liu Yugang, et al. Real-time monitoring and assessment of compaction quality for earth-rock dam basing on roller vibration behavior analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(2):163-170. (in Chinese))

[24] Deng Naifu, An Zaizhan, Hao Jiawang, et al. Few shot intelligent assessment method for compaction quality of earthwork considering uncertainty[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 256:125000.

[25] 钱劲松, 杨以诚, 凌建明. 路基智能压实的地统计分析与空间均匀性评价[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(10):2859-2869. (Qian Jinsong, Yang Yicheng, Ling Jianming, et al. Geostatistical analysis and evaluation of subgrade spatial uniformity based on intelligent compaction technology[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(10):2859-2869. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-20 编辑:俞云利)