

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.011

公路路基智能压实控制技术反馈模型优化

郑建中¹, 唐建亚², 何文政², 黎 享²

(1. 安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230088; 2. 江苏中路信息科技有限公司, 江苏 南京 211899)

摘要: 为提高基于碾压参数与填料属性建立的公路路基智能压实控制技术多元回归反馈模型的控制精度, 建立了仅考虑碾压参数的多元回归模型, 并在分析含水率对振动测值影响规律的基础上, 以含水率作为修正参数对模型进行优化。反馈模型和优化反馈模型的实例应用结果表明: 虽然采用 2 种反馈模型进行公路路基智能压实施工控制均满足规范压实质量要求, 但优化反馈模型的合格率高于反馈模型, 控制精度提升了 54.1%, 证明了优化反馈模型的科学性与可行性。

关键词: 路基填筑工程; 智能压实控制技术; 反馈模型; 多元回归分析; 含水率

中图分类号: U415.52⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)06-0084-06

Research on optimization of feedback model of intelligent compaction control technology for highway embankment

ZHENG Jianzhong¹, TANG Jianya², HE Wenzheng², LI Xiang²

(1. Anhui Province Communications Group Co., Ltd., Hefei 230088, China;

2. Jiangsu Sinoroad Information Technology Co., Ltd., Nanjing 211899, China)

Abstract: To improve the control accuracy of the multiple-regression feedback model of intelligent compaction control technology based on compaction parameters and filler properties, this study constructed the multiple regression model considering only the compaction parameters, and then optimized the feedback model with the moisture content as the correction parameter on the basis of analyzing its influence law on the observation value of vibrations. The results of previous feedback model and optimized feedback model show that although the intelligent compaction construction control using these two feedback models meet the requirements of specification, the qualified rate of the optimized feedback model is greater than the previous feedback model and the control accuracy is improved by 54.1%, which proves the scientificity and feasibility of the optimized feedback model.

Key words: filling project of road embankment; intelligent compaction control technology; feedback model; multiple regression analysis; moisture content

连续压实控制技术是由瑞典 Dynapac 和 Geodynamik 公司于 20 世纪 70 年代联合提出的一种填筑工程施工技术^[1]。与传统压实技术相比, 该技术凭借其“事中全域控制”的优点^[2]广泛应用于铁路、公路、机场、大坝等各种类型填筑工程中^[3-5]。随着科学技术的快速进步, 工程建设逐渐向工业化、数字化、智能化转型, 连续压实控制技术也取得了较大进步, 其技术发展也迈向了更高阶段——智能压实控制技术。

智能压实控制技术的压实效果是机械自身振动和土体振动 2 种振动模式的耦合作用结果, 也是填料属性与碾压参数共同作用的结果^[6-7]。填料属性主要为填料的类型以及土体的含水率, 碾压参数则包含机械振动频率与振幅、行驶速度与遍数等。与连续压实控制技术相比, 智能压实控制技术的提升核心在于通过决策和反馈控制体系的建立, 实现施工过程中对施工人员的科学引导与压路机的工艺参数的精准控制^[8-9]。国内外学者研究了各影响因素对振动测值的影响、不同振动测值的适用条件以及智能压实的评价方法等^[10-19], 为智能压实控制技术的进一步推广应用提供了规范性建议。

作者简介: 郑建中(1964—), 男, 正高级工程师, 主要从事公路工程智能化施工技术。E-mail: 2298808575@qq.com

通信作者: 何文政(1989—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事公路新材料、新技术、智慧工地技术研究。E-mail: h wz@sinoroad.com

引用本文: 郑建中, 唐建亚, 何文政, 等. 公路路基智能压实控制技术反馈模型优化研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 84-89.

ZHENG Jianzhong, TANG Jianya, HE Wenzheng, et al. Research on optimization of feedback model of intelligent compaction control technology for highway embankment[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(6): 84-89.

我国现行规范 JT/T1127—2017《公路路基填筑工程连续压实控制系统技术条件》中的相关性校验采用对比试验方式建立振动压实值与常规质量检测指标之间的关系,未能全面考虑各影响因素对振动测值的影响,对此我国学者基于现场试验开展了大量研究。张宏杰等^[20]以土石混填路基为研究对象,重点研究了填筑层厚度和下卧层强度对智能压实质量的影响规律。沈泽元^[21]基于振动原理和信息采集与处理技术,采用室内试验,研究振动频率和工作振幅对压实效果的影响。吴龙梁等^[22-23]采用多元回归分析方法与克里金插值法对连续压实控制指标的目标值、实测值进行全面分析,建立了压实指标与碾压参数的多元回归模型。综上,现有研究较为全面地剖析了填料属性、碾压参数等因素对压实度的影响规律,在此基础上采用多元回归法进行了多影响因素与振动测值间的相关性分析,建立了智能压实技术的反馈模型,进一步明确了智能压实技术的适用情况。

大量工程经验表明,路基填料的含水率对碾压速度设定、压路机振动频率的选择等均有较大影响,若直接进行多元回归分析,容易导致控制模型与实际压实情况出现偏差。但现有研究在智能压实反馈模型建立过程中未考虑各个因素之间是否具有相关性,而是将填料属性与碾压参数统筹分析。因此,本文将填料属性与碾压参数分开考虑,建立基于碾压参数的控制模型,再以土体含水率对模型进行修正,优化智能压实反馈模型,通过与常用的多因素统筹回归模型进行对比分析,验证优化反馈模型的精确性。

1 智能压实反馈模型

1.1 模型构建

智能压实反馈模型可实时反馈施工效果,为压路机驾驶员提供操作引导。在实际的操作过程中,由于激振频率与振动幅度等机械参数在施工前已确定录入,故施工过程中驾驶员可控制的碾压参数为碾压速度与碾压遍数。因此,本文在试验段设置 3 条尺寸为 2 m×200 m 的碾压道(图 1),根据 JT/T 1127—2017《公路路基填筑工程连续压实控制系统技术条件》碾压速度依次设置为 2.5~3.0、3.0~3.5、3.5~4.0 km/h。碾压遍数则按照试验段施工方案,采用静压 1 遍+强振 8 遍模式。

为体现含水率的差异化,测试前对各碾压道土体分别进行 3、6、12 h 翻晒,以便将土样含水率分别控制在最优含水率 16.5% 的±3% 范围内,抽样测得含水率分别为 8.2%~20.3%、15.7%~17.4%、12.8%~14.2%。测试过程中,采集、统计碾压参数与振动测值(式(1)),并在碾压方向每 10 m 断面内设置 3 个测点区域,分别在完成第 2、4、6、8 遍强振后,按照规范要求采用灌砂法在测点区域内进行压实度检测。

$$S = C \frac{A_{2\Omega}}{A_{\Omega}}$$

(1)

式中: S 为振动测值; C 为与碾压设备相关的常数; $A_{2\Omega}$ 为振动轮竖直方向二次谐波成分的加速度幅值; A_{Ω} 为振动轮竖直方向基波成分的加速度幅值

统计测试结果,各碾压道抽取 40 个样本,建立累计 120 个样本的数据库,利用 SPSS 软件建立基于多元回归方法的反馈模型。考虑碾压参数和同时考虑碾压参数与填料属性的反馈模型分别为

$$K = 0.364S - 1.147v + 1.046t + 53.47$$

(2)

$$K = 0.251S - 1.29w - 1.842v + 3.255t + 74.08$$

(3)

式中: K 为传统压实控制指标压实度; v 为碾压速度; t 为碾压遍数; w 为填料含水率。

2 个反馈模型均通过 F 检验和 t 检验,标准差分别为 0.98 和 0.77,说明智能压实振动测值与 K 呈正相关关系,这与实际工程经验相符。

1.2 模型优化

现有研究通常采用式(3)作为智能压实技术反馈模型,但工程经验表明含水率对碾压参数同样具有影响,填料含水率过高或过低,均会造成土体承载能力的下降。压路机的振动碾压则会导致路基出现沉降现象,因此碾压速度与碾压遍数应控制在合适范围内。同时,统筹考虑碾压参数和填料属性建立的反馈模型,

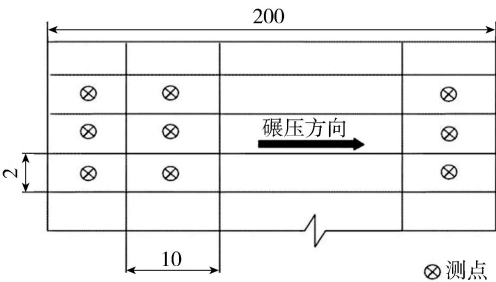


图 1 测试碾压道布置(单位:m)

Fig.1 Layout of test lapping path(unit:m)

由于各变量之间存在一定的相关性,可能造成多重共线性问题。

因此,对碾压参数建立多元回归模型(式(2))后,以含水率作为修正参数对模型进行优化,以期进一步提升智能压实反馈模型的控制精度。

1.2.1 含水率影响分析

对试验段的土体进行室内土工试验,结果显示其含水率为 21.3%,最优含水率为 17.2%。在试验段布设 5 条尺寸为 2 m×50 m 的碾压道,在松铺前对 5 条碾压道的填料依次进行翻晒处理,并测得含水率(表 1),碾压模式采用静压 1 遍+强振 8 遍,碾压速度均设置为 2.5 km/h。

本文振动频率为 30 Hz,故以 0.03 s(一个振动周期)为一个计算单元,得到一个振动测值 S ,共可得 14 400 个振动测值,完成强振碾压时长为 7 min。本文将每分钟的振动测值均值作为代表值,则不同含水率下的振动测值随时间变化如图 2 所示。

由图 2 可知,随着振动碾压的进行,不同含水率填料的振动测值整体呈现先快速增大至峰值,后逐渐稳定的发展趋势,在振动压实 300 s(即碾压 5 遍左右)后,振动测值开始趋于稳定。因此,以振动碾压 5 遍以后的数据作为稳定振动状态的分析数据,得到了稳定状态下不同含水率的振动测值(表 2)。

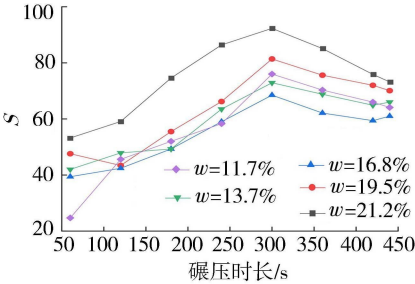


图 2 含水率与振动测值的关系

Fig.2 Relationship between moisture content and observation of vibrations

由表 2 可知,不同含水率下振动测值的波动情况有所差异,其变异系数与含水率具有相关性,在最优含水率(17.2%)附近的变异系数最小,仅为 0.02,含水率可用于模型的优化。

1.2.2 模型参数优化

由式(2)可知,其相关模型为一次线性函数,可用式(4)表示。分析模型组成可知,其关键参数为模型常数 M ,即对反馈模型的优化就是对 M 的修正。

$$K = Mf(S, v, t) \tag{4}$$

以 M' 表征含水率对参数 M 的影响,同时为了简化模型及计算过程,将函数表示为与原始参数 M 的乘积,则修正模型可表示为

$$M' = g(w)M \tag{5}$$

基于式(2),分别针对不同含水率计算参数 M' ,并将其与 M 进行比较,得到 M' 与 w 之间的相关函数 $g(w)$,结果如图 3 所示。

由图 3 可知, w 与 M' 间的相关函数为

$$M' = 1.67 - 0.516\exp\left[-\frac{(w - 15.37)^2}{77.37}\right] \quad (R^2 = 0.961) \tag{6}$$

对式(6)进行 F 检验,结果显示在 $\alpha=0.05$ 置信度下模型的显著性水平为 0.01,表明拟合公式通过检验,且公式决定系数为 0.961,表明拟合结果良好,可以作为表征含水率对回归公式参数的修正公式。

当 M 初值为 1 时,得到智能压实控制技术的优化反馈模型为

$$K = M'f(S, v, t) = g(w)f(S, v, t) \tag{7}$$

表 1 现场实测含水率

Table 1 Measured moisture contents in field

碾压道编号	晾晒时间/h	含水率均值/%
1	0	21.2
2	3	19.5
3	6	16.8
4	12	13.7
5	24	11.7

表 2 稳定状态下振动测值与含水率的关系

Table 2 Relationship between moisture content and measured value of vibrations at stable state

$w/\%$	振动测值平均值	振动测值变异系数
11.7	66.80	0.05
13.7	66.57	0.03
16.8	60.83	0.02
19.5	72.60	0.04
21.2	78.10	0.08

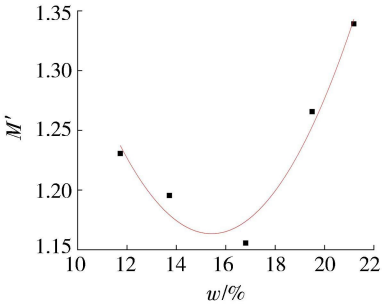


图 3 w 与 M' 的关系

Fig.3 Relationship between moisture content w and M'

基于依托工程工况的优化模型具体为

$$K = g(w)(0.364S - 1.147v + 1.046t + 53.47)$$

(8)

2 实例验证

2.1 工程概况

以德州至上饶高速公路合肥至枞阳段为依托工程,于 K114+600 ~ K114+700 处设置试验段(93 区),试验段全长约 100 m。根据设计要求,该工程分层填筑厚度为 30 cm。振动压路机为 XS223JE 型号,工作质量为 22 t,激振频率为 28 ~ 33 Hz,激振力范围为 290 ~ 374 kN,工作宽度为 2 130 mm。碾压遍数采用静压 1 遍+强振 8 遍模式,碾压速度控制在 2.5 ~ 3.0 km/h。智能压实系统由定位、采集和显示系统三部分组成,其中定位系统是基于 GNSS 技术对实时信息采集并上传;采集系统包括加速度传感器和 DCA 型压实分析仪;显示系统显示碾压参数和智能压实 CMV。智能压实设备通过记录振动碾压过程中振动轮的运动状态,进行解调分析和指标计算,实现全区域内的压实指标采集显示。压实设备与现场施工如图 4 所示。



图 4 智能压实试验施工现场

Fig. 4 Construction site of intelligent compaction

2.2 模型验证与对比

2.2.1 压实质量验证

智能压实技术的评估核心在于振动目标值的确定以及控制准则的设定,科学求解适合实际工况的目标值,并合理设置评估方法,可有效展示碾压面的实际压实情况。由前文可知,目标值可根据反馈模型得到,本文对评估方法的设置参考相关文献^[13-15]与现行规范 JTG/T 3610—2019《公路路基施工技术规范》。

a. 通过比较任一位置处的实测值与目标值进行评估; $T_s \leq T_i$ 为合格, $0.9 T_s < T_i \leq T_s$ 为基本合格, $T_i < 0.9 T_s$ 为不合格 (T_s 为智能压实的目标值; T_i 为压实的实测值)。

b. 合格率计算及验收标准。计算压实合格率 Q (压实合格部分与整个碾压面的面积之比。对于一般工程,合格部分的面积包含基本合格部分的面积,对于关键工程,仅包含合格部分的面积),并以压实合格率作为评价压实质量的指标。

参考我国现行规范 JTG/T 3610—2019《公路路基施工技术规范》中对压实度的要求,确定质量评估模型以 $Q \geq 95\%$ 为合格。以第 8 遍为最终压实次数,并分别对最后 3 次碾压合格率进行统计。通过智能压实技术得到施工全域的实时碾压效果,对碾压后的区域进行压实度检测,结果均满足规范要求,表明由两反馈模型控制施工的路基压实质量达到规范标准。根据压实质量评估方法与验收标准对试验段内的压实质量进行评价,具体评价结果见表 3。

由表 3 可知,各反馈模型的最终压实质量评价结果均为合格,但从合格率来看,碾压完成后,优化反馈模型的合格率为 98.4%,高于反馈模型的 96.2%,并且与实测压实度合格率更为接近,表明本文优化反馈模型效果优于反馈模型。

2.2.2 精度对比

对模型验证区间段落的填料进行含水率抽样试验,试验结果为 19.3%,则优化反馈模型的修正系

表 3 压实质量评价结果

Table 3 Compaction quality evaluation results

反馈模型	合格率/%			评价结果
	第 6 遍	第 7 遍	第 8 遍	
优化反馈模型 (式(8))	91.3	94.5	98.4	合格
反馈模型 (式(3))	88.5	92.6	96.2	合格
实测压实度 合格率	92.6	96.7	98.8	合格

数为

$$g(w)=1.67-0.516e^{-\frac{(\omega-15.37)^2}{77.37}}=1.25$$

(9)

基于依托工程工况的优化反馈模型为

$$K=1.25(0.364S-1.147v+1.046t+53.47)$$

(10)

通过反馈模型(式(3))和优化反馈模型(式(8))进行智能压实,以每10m统计一组碾压数据,累计得到10组数据,对试验结果进行误差分析。以均方根、标准均方根以及相对误差作为可靠性分析指标,均方根越小,标准均方根则越接近1,其反馈模型越可靠,相对误差越小,则说明由反馈模型求解的目标值与实测值越接近,精度越高。误差分析结果见表4。

由表4可知,优化反馈模型的均方根较小,标准均方根更接近于1,表明优化后的反馈模型具有较高可靠性。分析原因可知,2种反馈模型核心差别在于含水率参数的引入步骤,由于验证段未进行翻晒处理,导致填料含水率对碾压参数产生影响,造成反馈模型的目标值出现偏差,与实测值差距变大。另一方面,虽然2种反馈模型的平均相对误差均小于9%,具有较好的控制精度,但相较于反馈模型,优化反馈模型的平均相对误差降低了54.1%,表明优化后的反馈模型精度有较大提升。

表4 不同反馈模型误差分析

Table 4 Error analysis of different feedback models

数据样本	压实度目标值与实测值之间误差		
	均方根/%	标准均方根	平均相对误差/%
优化反馈模型	2.45	1.24	3.97
反馈模型	3.18	1.88	8.65

3 结 论

- a. 土质路基含水率对智能压实振动测值影响较大,稳定状态下的振动测值对不同含水率呈现出较好的稳定性,以最佳含水率附近的稳定性最优,变异系数为0.02,并提出了基于含水率的模型参数修正公式。
- b. 采用优化后的反馈模型进行智能压实施工控制,并遵循本文设定的评估方法及验收标准,其压实质量合格率*Q*达到98.4%,满足设计要求,且应用效果优于反馈模型,表明优化反馈模型具有一定的工程可行性。
- c. 优化后反馈模型测得的智能压实振动测值,其标准均方根为1.24,平均相对误差为3.97%,均优于反馈模型,表明优化反馈模型具有较高的可靠性与模型精度。

参考文献:

[1] 冯永乾,江辉煌,吴龙梁,等. 填筑工程连续压实控制技术研究进展[J]. 铁道标准设计,2020(7):50-58. (FENG Yongqian, JIANG Huihuang, WU Longliang, et al. Research progress of continuous compaction control technology for filling project[J]. Railway Standard Design,2020(7):50-58. (in Chinese))

[2] 王成青,孔纲强,吴跃东,等. 既有公路路基工程检测方法与工程实例分析[J]. 水利水电科技进展,2016,36(2):69-73. (WANG Chengqing, KONG Gangqiang, WU Yuedong, et al. Analysis of existing highway roadbed engineering inspection methods and engineering examples[J]. Advances in Water Conservancy and Hydropower Science and Technology,2016,36(2):69-73. (in Chinese))

[3] 蔡德钧,叶阳升,闫宏业,等. 基于现场试验的高铁路基智能压实过程中振动波垂向传播机制[J]. 中国铁道科学,2020,41(3):1-10. (CAI Degou, YE Yangsheng, YAN Hongye, et al. Mechanism of vibration wave vertical propagation during intelligent compaction of high speed railway roadbed based on field test[J]. China Railway Science,2020,41(3):1-10. (in Chinese))

[4] 徐光辉,高辉,雒泽华,等. 连续与智能压实控制技术在高速铁路建设中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化,2017,34(1):30-34. (XU Guanghui, GAO Hui, LUO Zehua, et al. Application of continuous and intelligent compaction control technology in high-speed railroad construction[J]. Road construction machinery and construction mechanization,2017,34(1):30-34. (in Chinese))

[5] 陈嘉锡,张勇,卢吉,等. 基于 Hilbert-Huang 变换的机场路基智能压实振动信号分析[J]. 土木工程与管理学报,2022,39(3):133-139. (CHEN Jiayi, ZHANG Yong, LU Ji, et al. Intelligent compaction vibration signal analysis of airport roadbed based on Hilbert-Huang transform[J]. Journal of Civil Engineering and Management,2022,39(3):133-139. (in Chinese))

[6] 段兵. 路基智能压实过程含水率实时测试影响因素分析[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2021.

[7] 徐靖,叶华洋,朱晟. 粗粒料颗粒破碎三维离散元模型及其在密度桶试验中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):127-134. (XU Jing, YE Huayang, ZHU Sheng. Three-dimensional discrete element model of coarse particle

breakage and engineering application in density barrel test[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4): 127-134. (in Chinese))

[8] 叶伟,马福恒,胡江,等. 压实黏土干缩裂缝扩展规律试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):102-109. (YE Wei,MA Fuheng,HU Jiang,et al. Experimental study on propagation law of shrinkage cracks in compacted clay[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1):102-109. (in Chinese))

[9] 刘东海,吴优. 基于 t 分布烟花算法的土石坝碾压参数多目标优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):243-250. (LIU Donghai,WU You. Multi-objective optimization of earth-rock dam compaction parameters based on the t distribution mutation-firework algorithm[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(3):243-250. (in Chinese))

[10] 徐光辉. 路基连续压实控制动力学原理与工程应用[M]. 北京:科学出版社,2016.

[11] BARMAN M, NAZARI M, IMRAN S A, et al. Quality control of subgrade soil using intelligent compaction[J]. Innovative Infrastructure Solutions,2016,1:23.

[12] 马源,方周,韩涛,等. 路基智能压实关键控制参数动态仿真及演变规律[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(7): 2246-2257. (MA Yuan,FANG Zhou,HAN Tao,et al . Dynamic simulation and evolution of key control parameters for intelligent compaction of subgrade [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021 , 52 (7) : 2246-2257. (in Chinese))

[13] LIU Donghai, LI Zilong, LIAN Zhenghong. Compaction quality assessment of earth-rock dam materials using roller-integrated compaction monitoring technology[J]. Automation in Construction,2014,44:234-246.

[14] 解一鸣,张涵. 土石混填路基智能压实现场试验研究[J]. 交通科技,2019(5):15-18. (XIE Yiming,ZHANG Han. Intelligent compaction field test study of soil-rock mixed roadbed [J]. Transportation Science and Technology,2019(5):15-18. (in Chinese))

[15] 焦倏,聂志红,王翔. 基于连续压实质量检测的压实薄弱区域评价指标研究[J]. 铁道学报,2015,37(8):66-71. (JIAO Tan,NIE Zhihong,WANG Xiang. Research on evaluation index of compaction weak area based on continuous compaction quality inspection[J]. Journal of Railway,2015,37(8):66-71. (in Chinese))

[16] 杨鹏,刘东海,刘强,等. 高填方推土机铺筑推平作业远程实时协同监控[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6): 559-566. (YANG Peng,LIU Donghai,LIU Qiang,et al. Real-time and collaborative monitoring of bulldozer paving and leveling for high filled embankment[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(6):559-566. (in Chinese))

[17] 田利锋. 路基连续压实质量评价方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.

[18] 张忠强. 基于 CMV 值的路基智能压实评价试验分析研究[D]. 保定:河北大学,2017.

[19] 刘东海,高雷,林敏,等. 公路沥青层振动压实质量实时监控与评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):307-313. (LIU Donghai,GAO Lei,LIN Min,et al. Real-time monitoring and assessment of compaction quality for highway asphalt pavements[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(4):307-313. (in Chinese))

[20] 张宏杰,陈立生,周毅恒. 基于智能压实的路基压实质量影响因素分析[J]. 交通科技,2020(5):66-70. (ZHANG Hongjie, CHEN Lisheng,ZHOU Yiheng. Analysis of factors affecting the compaction quality of roadbed based on intelligent compaction [J]. Transportation Science and Technology,2020(5):66-70. (in Chinese))

[21] 沈泽元. 压实度在线连续检测影响因素的研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.

[22] 吴龙梁. 基于能量耗散的路基连续压实控制技术研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2020.

[23] 吴龙梁,江辉煌,唐建伟,等. 基于多元回归分析的连续压实监控技术[J]. 岩土力学,2020,41(6):2081-2090. (WU Longliang,JIANG Huihuang,TANG Jianwei,et al. Continuous compaction monitoring technique based on multiple regression analysis[J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(6):2081-2090. (in Chinese))

(收稿日期:2022 - 09 - 23 编辑:刘晓艳)