

路基智能压实评价指标研究进展综述

钱劲松^{1,2}, 庞劲松^{1,2}, 费伦林³, 郑晓光⁴

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室, 上海 201804;
3. 江西省高速公路投资集团有限责任公司, 江西 南昌 330025; 4. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 系统总结了智能压实评价指标(ICMV)迄今为止的主要研究成果, 讨论了ICMV的发展历程、计算原理、优势与缺陷、填料适用性以及与原位指标拟合的影响因素。分析表明: ICMV与路基填料之间存在一定的匹配机制, 工程上应尽量按照该机制选择ICMV以提升检测效果; 拟合分析时, 应综合考虑填料类型、ICMV类型和原位指标以确定影响因素, 避免回归特征的冗余或缺失; 鉴于部分特征对预测值存在非线性影响, 不建议使用线性模型对智能压实数据进行预测。针对上述问题, 本文在ICMV与填料的匹配关系、拟合因素的重要性、回归算法的选择策略三个方面给出了具体的建议及未来的研究方向, 以期作为ICMV后续应用及研究的参考。

关键词: 路基工程; 智能压实; 评价指标; 研究综述

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

A Review of Research Progress on Intelligent Compaction Measurement Values for Subgrade

QIAN Jinsong^{1,2}, PANG Jinsong^{1,2}, FEI Lunlin³, ZHENG Xiaoguang⁴

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, 201804, China; 2. Key Laboratory of Durability and Operation Safety of Civil Aviation Flight Area Facilities, Tongji University, Shanghai, 201804, China; 3. Jiangxi Provincial Expressway Investment Group Co., Ltd., Nanchang Jiangxi, 330025, China; 4. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai, 200092, China)

Abstract: The major achievements of intelligent compaction measurement value (ICMV) are systematically summarized in this paper. The following contents of ICMV are discussed: development history, calculation mechanisms, advantages and disadvantages, filler applicability and influencing factors between ICMV

and in-situ test values. The analysis indicates that there are the matching mechanisms between ICMV and subgrade materials and ICMV should be selected according to these mechanisms to improve the detection effect. During the fitting analysis, the types of subgrade ICMV and in-situ measurement values should be considered comprehensively to determine the influencing factors, so as to avoid the redundancy or the loss of regression features. Since some features have nonlinear effects on labels, it is not recommended to use linear models to predict the labels of intelligent compacted data. In view of the above problems, specific suggestions, including matching relationship between ICMV and materials, the importance of influence factors and the selection strategies of regression algorithms, are presented here in order to serve as references for the future research and application of ICMV.

Keywords: subgrade engineering; intelligent compaction; evaluation indicator; research review

在道路工程中, 需要通过压实使得路基具有足够的强度及稳定性, 从而为上覆结构提供支撑, 保证工程的质量, 延长道路结构的使用寿命。压实质量检测可以有效地判定路基密实程度是否达到要求, 是路基施工的重要环节。传统的路基压实质量检测方法(环刀法、灌砂法、FWD/PWD等)存在较多问题: ①测点抽样随机, 缺乏代表性; ②检测范围有限, 漏判压实薄弱区; ③无法判断压实质量的均匀性; ④检测滞后于施工, 实时性不强; ⑤检测费时, 受人为因素干扰。上述缺陷, 促成了智能压实技术的出现。

智能压实技术(intelligent compaction, IC), 又称为连续压实控制技术(continuous compaction control, CCC), 其本质是在路基填筑过程中, 根据路

收稿日期: 2022-06-16

基金项目: 江西省交通运输厅科技项目(2020C0002); 云南省重点研发计划(202303AA080016); 河北省交通运输科技项目(TH201901)

第一作者: 钱劲松, 教授, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程。E-mail: qianjs@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

基与振动压路机的相互作用原理,通过连续测量振动压路机的工作参数、振动响应信号,获得相应的智能压实评价指标(intelligent compaction measurement value, ICMV),并结合空间定位系统与显示系统,实现对路基压实质量实时、全面的评价。

长期以来,国内外学者从智能压实的测评原理^[1]、评价指标^[2-3]、检测设备^[4]、评价方法^[5]等不同角度进行了广泛研究,取得了丰硕的成果,并对相关进展进行了总结^[6-8]。然而,现有综述更多聚焦于智能压实的发展历史^[7]、计算方程^[6,9]、评价规范^[7,9]等方面成果,对于ICMV优缺点的成因、ICMV对填料的适用性、ICMV的拟合分析影响因素等方面的讨论较少。实际上,由于各类ICMV计算方程与计算参数不同,使得它们的优势、适用性、回归影响因素都不同。当ICMV与填料和影响因素不匹配时,使用ICMV所获得的检测效果往往远低于预期。

鉴于此,本文从以下几个方面对这些问题进行深入探讨:首先,详细梳理ICMV的发展脉络及分类方法;进一步地,以各类ICMV的计算原理为切入点,深入讨论它们的优势与局限,并基于此对ICMV的填料适用性提出建议;然后,将ICMV与原位指标的拟合影响因素(即回归特征)分为三类进行讨论,针对不同工况给出各因素的考虑优先级,且就回归分析中的算法选择问题提供建议;最后,基于以上分析,对ICMV的未来研究方法进行了展望。

1 智能压实评价指标的发展及分类

早在20世纪30年代,Losenhausen公司提出了利用压路机振动信号检测压实质量的思想雏形^[6,10],且在1974年实现了利用压路机振轮加速度的二次谐波幅值和基频幅值之比来反映路基的压实状况^[11],即压实测量值(compaction measurement value, CMV)。随后,Ammann公司、Bomag公司、Caterpillar公司与Sakai公司分别从力学平衡、能量守恒、信号畸变的角度入手,获得了土体刚度值(soil stiffness value, k_s)、振动模量(vibration modulus, E_{vib})^[2,12]、机械传动功率(machine drive power, MDP)^[3]、连续压实值(continuous compaction value, CCV)^[13]等指标。

我国则在80年代引入CMV以后,于2005年建立了较为完整的路基智能压实评价体系^[14],随后考虑到利用CMV检测的局限性,提出了振动压实测量

值(vibration compaction value, VCV)、单位体积压实功 E 等评价指标^[15],至今依然应用于铁道、道路等领域的实际检测中^[16]。

由于国内许多智能压实的研究与应用都建立在VCV指标上^[17],部分文献将VCV进行了单独分类^[7,9];同时加入了利用人工智能算法得到的ICMV。但考虑到VCV在结果上仍表现为经过信号处理后的振轮加速度值^[17],且VCV在某些应用实例中是对智能压实测量指标的统称,并不特指某个具体指标;而人工智能算法更多是应用在ICMV的回归任务上,直接将其视为ICMV的计算方法并不常见。因此,本文未对VCV和人工智能类ICMV作深入讨论,仍将ICMV分为经验类、力学类、和能力类三种^[18]。

2 智能压实评价指标的优势及不足

2.1 经验类指标

经验类ICMV本质上是利用傅立叶变换将加速度传感器所传输的时域信号转化为频域信号,然后通过寻找基频与各个谐频之间的关系计算而得^[19],其代表指标为CMV、CCV、RMV。

CMV(C_{MV})的定义为加速度一次谐波分量幅值与基频幅值之比,如式(1)所示。实际使用中,CMV一般采用时域曲线中两个周期的计算结果平均值(例如,当压路机振频为30Hz时,可在1s内计算出15个CMV值),也可根据实际需求改变CMV的输出频率^[6]。

$$C_{MV} = C \frac{A_1}{A_0} \quad (1)$$

式中: A_1 为加速度一次谐波分量的幅值; A_0 为加速度基频的幅值; C 为比例扩大系数,一般取值为300。

随着路基刚度的增大,振轮与路基之间存在某时刻脱离的“跳振”现象,引起的路基—振轮的接触非线性行为,Adam^[20]引入了RMV(R_{MV})对此进行描述,如式(2)所示。将RMV与CMV结合共同来充当智能压实的检测指标,可较好地描绘出压实过程中的跳振现象^[21]。

$$R_{MV} = \frac{A_{0.5}}{A_0} \quad (2)$$

式中, $A_{0.5}$ 为加速度半谐波分量的幅值。

与RMV的出发点相似,Sakai公司认为跳振会导致更多高次谐波分量的出现,提出了利用0.5 Ω , 1.5 Ω , 2.5 Ω , 3 Ω 等4种不同的谐波分量的加速度幅

值进行计算的指标 $CCV(C_{CV})$, 如式(3)所示^[13]。

$$C_{CV} = \left[\frac{A(0.5\Omega) + A(1.5\Omega) + A(2.5\Omega) + A(3\Omega)}{A(2.5\Omega) + A(3\Omega)} \right] \times 100 \quad (3)$$

式中, $A(i\Omega)$ 为 $i(i=0.5, 1.5, 2.5, 3)$ 倍基频下对应的幅值。

对振轮与路基实测振动响应的数值仿真与现场实测研究发现^[22-23], 仅在路基为纯线弹性材料时, 高次谐波(即频率为 $0.5\Omega, 1.5\Omega, 2.5\Omega$) 才能反映出接触非线性; 而当路基材料引入塑性时, 高次谐波消失而只留下了高次谐波。即高次谐波的幅值具有丰富的信息量, 而高次谐波在具有一定塑性的路基上所带来的信息量较少, 甚至是无序的、干扰性的杂波。因此, 虽然在 RMV、CCV 的计算原理中考虑了刚度增大而引起的谐波现象, 但检测精度的实际提升效果不会十分理想; 而对于塑性指标可忽略的材料(如二灰碎石等粒径较大的填料), 使用 RMV、CCV 则会较好地提升相应的检测效果。

2.2 能量类指标

能量类 ICMV 的计算基于能量守恒定律, 按具体的计算原理可进一步分为两大类: ①根据压实机械碾压行驶能量损耗计算的 MDP; ②根据振动作用下路基所吸收能量推导的 CEV(compaction energy value)与 DMV(dissipation measured value)^[10]。

其中, MDP 是目前认可程度最高的能量类

ICMV, 如式(4)所示。当振轮沉入土体后, 路基会阻碍振轮从而使得向前行驶所耗能量增加(图 1a), 这种额外耗能与路基强度相关(强度越大, 沉入量越少, 额外耗能越少)^[18]。本质上, MDP(M_{DP}) 是一个促使压路机通过被压实路基所需的净功率, 不需要获得振轮竖向的振动信息, 这也使得 MDP 适用于各类压路机上^[24]。

$$M_{DP} = P_g - Mv \left(\sin \alpha + \frac{a}{g} \right) - (mv + b) \quad (4)$$

式中: P_g 为驱动压路机工作所需的总功率; v 为压路机行驶速度; a 为压路机的行驶加速度; α 为压实面倾角; M 为压路机总质量; m, b 为压实器械内部损耗参数, 根据压路机型号确定。

第二类能量 ICMV 的原理为: 已知压实机械内燃机的能量 E_1 , 通过振轮的竖向振动信号计算机械自身耗散的能量 E_2 , 确定被压路基的所吸收的能量 E_3 (图 1b)。当 E_2 增大, 表明 E_3 在逐渐减小, 代表路基逐渐被压实。吴龙梁^[10]认为, 由于土体含水率对路基(特别是细粒土路基)的力学性能影响较大, 而对土体的能量吸收能力基本无影响, 因此使用第二类能量 ICMV 可以较好地剥离土体含水率对检测精度的影响。但刘俊新等^[25]的研究表明, 能量吸收不仅与土体含水率的相关性不大, 与压实度的相关性也不显著, 使得第二类能量 ICMV 的检测效果还有待进一步考证。

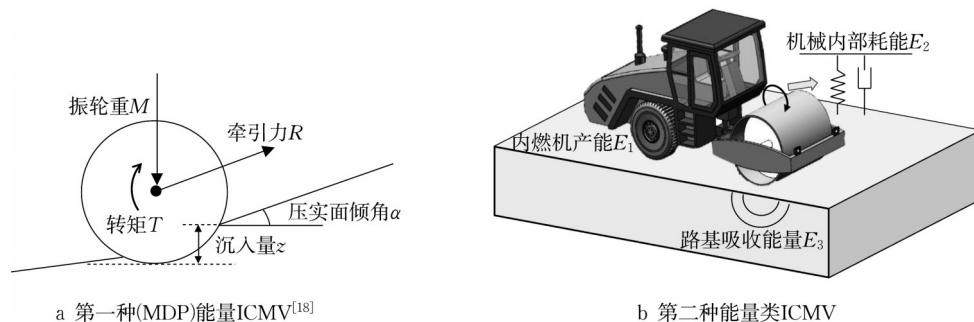


图1 能量类 ICMV 计算原理

Fig.1 The calculation principle of energy ICMV

2.3 力学类指标

2.3.1 振动压实的力学解析模型

从力学角度看, 振动压实过程中振轮与被压填料形成一个相互作用的系统, 针对每一时刻的力学平衡方程, 可利用振轮的受力状态对路基的材料属性进行求解, 这也是力学类 ICMV 的基本计算理念。由于振轮-路基振动系统的复杂程度较高, 研究人员

建立了各种模型对其进行表征与求解, 主要包括以下三类: 弹簧-阻尼耦合模型、钢轮与半空间耦合模型、钢轮与半空间冲击模型, 并由此衍生出了不同的力学类 ICMV。

在弹簧-阻尼耦合模型体系中, 以二自由度线性集中参数模型最为经典, k_s 便是基于此模型体系计算而来^[9]。后续的集中参数模型则添加了不同的影

响因素,主要包括:跳振、偏振^[26]、随振土体质量以及水平力。实际上,集中参数模型对振轮-路基系统进行了高度简化,即便考虑了不同的影响因素,也难以充分表征振压过程的力学行为以及接触行为^[27],而且单纯的弹簧器与阻尼器也无法体现路基的实际材料属性。

钢轮与半空间耦合模型是将层状路基简化为半空间体计算振轮作用下的力学响应,并产生了如 E_{vib} 和压实功 E 等指标^[12,9]。由于该模型相应的控制方程是一组含有时间变量的偏微分方程,其动态求解十分困难,因此一般假设加速度项为零从而转化为静力学问题。钢轮与半空间冲击模型则是在上述耦合模型的基础上考虑了钢轮弹跳的作用,进一步加大了获得相应解析解的难度。但得益于计算机仿真技术的发展,钢轮与半空间路基模型的动力学求解已变得简单,同时还可自行判断钢轮是否存在弹跳行为^[23],使得耦合模型与冲击模型在数值解方面不再存在严格意义上的区别。此外,数值仿真还能很好地融合土体本构模型的相关研究成果^[28],包括非线性本构、弹塑性本构等^[29-30]。

尽管仿真模型的精细化对计算结果是有利的,但也会提升相应的计算成本,因此某些对求解效果的提升偏小的改进可适当降低其优先级。例如,在路基参数相同的条件下,压路机的上车(包括驾驶室、行驶轮)、下车中橡胶减震器的阻尼对智能压实检测的影响可忽略不计^[27],使用单一刚体圆柱滚轮与压路机整机仿真的效果差距不大。此外,Mooney等认为^[31],振动压实下路基可以近似看作平面应力状态,如无特殊需求,可采用二维模型以降低仿真的计算成本。

2.3.2 力学类指标的计算

目前主要使用的力学类ICMV主要为 E_{vib} 与 k_s ^[2,12,21],如式(5)与式(6)所示。

$$k_s = \frac{F_s|_{\dot{x}_s=0} - (m_1 + m_2)g}{A} = 4\pi^2 f^2 \left[m_2 + \frac{F_0 \cos \omega t}{A} \right] \quad (5)$$

式中: m_1 、 m_2 分别为上架、振动轮的等效质量; A 为振轮位移最大值; F_0 为激振力幅值; F_s 为振动轮与土体间的动态作用力, $F_s = F_0 \cos \omega t$; ω 为激振力与垂直向的夹角。

$$E_{vib} = \frac{1 - \nu^2}{z_d} \cdot \frac{F_s}{L} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left(1.8864 + \ln \frac{L}{b} \right) \quad (6)$$

式中: ν 为土体泊松比; b 为振动轮与土体(沿压路机行进方向的)接触宽度,可通过Lundberg方程进行求解; R 为碾压轮半径; L 为碾压轮(垂直于压路机行进方向)宽度; z_d 为土体变形量。

基于力学平衡方程分析的力学类ICMV贴近于振动压实的力学本质^[9],更容易为人们所接受的同时,也有着与路基刚度或模量十分相似的物理意义与量纲。但主要问题在于:一方面,振动轮与土体接触宽度 b 是一个关于 E_{vib} 的函数,则式(6)是一个超越方程,其求解时间难以满足ICMV高频输出的实时性需求。为此,Mooney、Tehrani等^[6,18]提出采用图解法的方式获取 E_{vib} (图2a),大大提升检测的实时性。然而,图2a仅基于某特定土体获得,其普适性有待商榷。另一方面, F_0 与垂直向的夹角 ω (即振轮激振力与位移的相位差,如图2b所示)准确测量的难题,增加了实时获取 F_s 的难度。

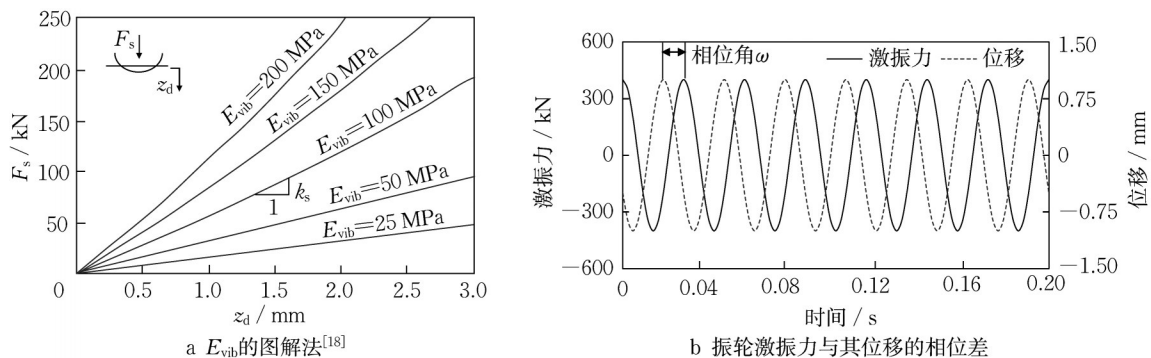


图2 力学类ICMV的计算原理及方法

Fig.2 The calculation principle and method of mechanics ICMV

实际工程中,振轮位移的时域曲线可通过加速度计获得;而激振力曲线的获取则较为麻烦,目前主

要使用三种方法:①人为定义相位差 ω 。根据Mooney的研究^[32], ω 与振动频率的关联性较强,因

此将 ω 取固定值为 $\pi/2^{[15]}$ 或 $\pi/4^{[10,32]}$,并作为智能压实机械的固定出厂参数。但 ω 与被压路基的阻尼相关,而土体的阻尼是一个随着路基密实程度而改变的变量(特别是在黏性较强的填料中),因此将 ω 视作常数不是一种科学的做法;②采用安装互相成一定角度的双加速度计的方式计算 $\omega^{[6]}$ 。实际上,在振动压路机的下车结构设计中,一般会采用橡胶块完全削减水平方向上的振动,以保证器械行驶的稳定性。在现场的加速度测量结果中也发现,振轮的水平振动几乎为零,很难通过布设双传感器去测量相位差;

③在振轮手轮安装一圈电磁铁,实时获取偏心块的位置^[4],从而构建并延展激振力的时域曲线。但该方法的适用性会受到振动压路机型号、振轮内部结构的影响(如部分器械振轮不存在电磁铁的安装空间);且于偏心块的旋转频率较高、振轮电磁屏蔽效应等影响,使得外部测量 ω 的准确性存疑。最有效的做法可能是,在振轮内部的偏心块中添加相应的位置传感器,实时获取偏心块的位置。但这也使得力学类 ICMV 只能在特定的智能压实专用器械中获得,无法在现有的普通振动压路机中获取。

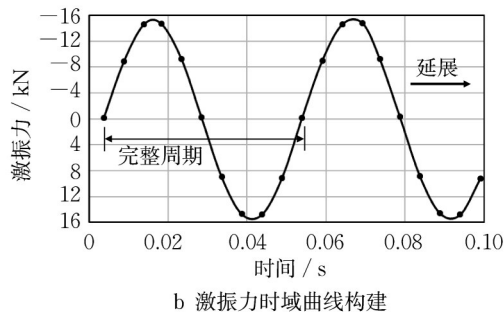
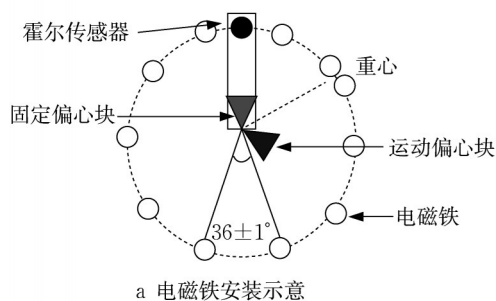


图3 相位差的测试方法^[4]

Fig.3 Test methods of phase lag^[4]

总的来说,现有的三大 ICMV 的计算理论较为完善,许多文献中所提出的新型 ICMV 也未脱离该范畴,目前尚未出现在计算原理上存在突破性贡献的新型 ICMV。三类 ICMV 在实际应用中均有着自己的优势与不足:测量方便的经验类 ICMV 理论基础薄弱,检测精度偏低;计算视角独特的能量类 ICMV 貌似推广性良好,但受到施工环境及检测设备的制约较大;理论内涵丰富的力学类 ICMV 计算原理复杂、参数获取难度较大,而在其计算方程上做出的妥协或采用图解的方式,则会影响 ICMV 的检测精度。实际上,ICMV 的计算原理还决定了其对于某类路基填料的适用性。本文在上述分析的基础上进一步总结各类 ICMV 对填料的适用性,并分析各类因素、算法对 ICMV 检测效果的影响。

3 智能压实评价指标与原位指标的回归分析

现行的道路工程规范中,路基压实状态的验收依然以点式检测(主要包括压实度、路基模量)为准。一般而言,为了路基施工的现场控制会建立 ICMV 与压实度之间的回归关系,以便实时把控每层路基的压实度;而路面设计中会对路基的回弹模量提出

要求,则在路基顶的验收中建立 ICMV 与路基模量相关关系,可以更好地为后续的路面施工服务。由于压实度在本质上是路基的物理指标,而模量是表征力学性能的指标,计算原理的差异往往导致两者与 ICMV 的相关性不同,因此后续讨论中将对两种原位指标加以区分。

在智能压实中,设立试验段,建立可靠的 ICMV 与原位指标拟合模型,是使用 ICMV 进行检测的重要前提。尽管Xue等^[33]对 ICMV 检测中的分类算法进行了研究,并取得了一定成果,但将 ICMV 与原位指标的拟合视为回归问题仍是目前的主流。各国智能压实规范均推荐采用相关系数对回归模型的效果进行定量评价^[8,16],即:当试验段的 ICMV 与原位指标的相关系数达到 0.6~0.7 时(决定系数 R^2 达到 0.36~0.49),才允许在实际工程中使用该 ICMV 进行压实质量控制。由于 ICMV 与原位指标的回归效果越好,代表 ICMV 预估路基原位指标的准确度越高,检测效果越好,因此拟合相关性一直是智能压实技术的重要探讨对象^[1,18,34]。以下分别从指标适用性、回归影响因素以及模型算法三个方面对该问题进行讨论。

3.1 ICMV 的适用性分析

由于 ICMV 计算机理的差异,各类 ICMV 在不

同填料中的拟合相关性差别较大^[35],如表 1 所示。具体而言,对于经验类 ICMV,在粉质土、黏土等存在一定塑性行为的路基土上,使用 CMV 会获得不错的回归效果^[36-37],可以满足规范的 ICMV 使用需求($R^2 \in 0.4 \sim 0.6$),如图 4a 所示;而在碎石类路基和压

实遍数较高的砂土路基上,由于填料的塑性行为不显著,考虑高次谐波的指标(如 RMV 等)则效果更好^[21,35],如图 4b 所示。需要说明,图 4b 展示的是使用 RMV 和 E_{FWD} 拟合 CMV 的结果,本质上与 CMV 联合 RMV 预测模量是一致的。

表 1 不同 ICMV 对填料的适用性
Tab.1 Applicability of different ICMVs on fillers

指标分类	指标	建议使用填料	不建议使用填料	内在机理
经验类	CMV	粉质土、级配良好砂 ^[36-37]	弹性显著的填料 ^[35]	在终压出现跳振时精度变差
	RMV、CCV	塑性行为弱的填料 ^{[38][21,35]}	具有显著塑性的填料 ^[22-23]	塑性会使得半次谐波信息量减少
能量类	MDP	黏土、淤泥、砂土 ^[23,34]	碎石	硬度大的填料不符合计算原理
	CEV、DMV	暂不明确	暂不明确	缺少一定的实测结果
力学类	E_{vib} k_a	碎石、砾石 ^[12,32]	黏性填料	考虑了相位角实测的难题 ^[2]

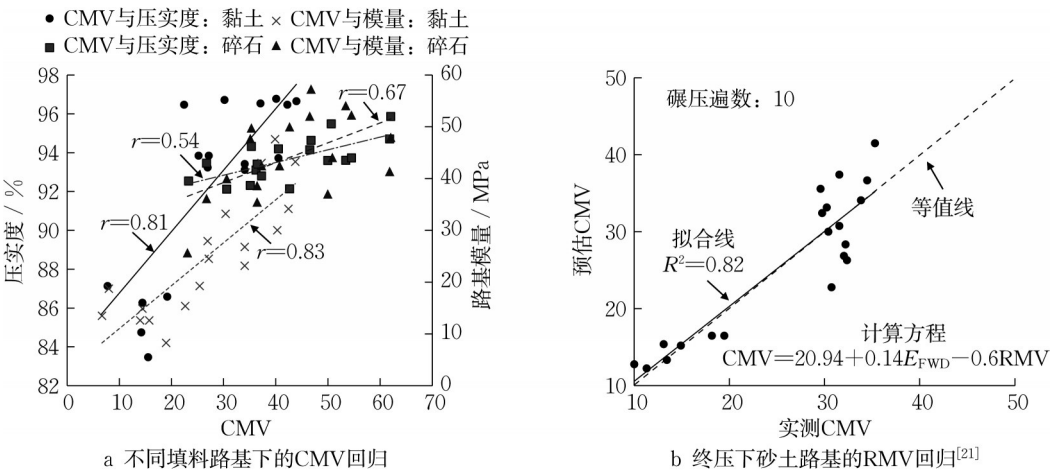


图 4 经验类 ICMV 的适用性分析
Fig.4 Applicability analysis of empirical ICMV

图 5 展示了力学类与能量类 ICMV 的回归分析结果。与经验类 ICMV 相比,力学类和能量类 ICMV 与原位指标的相关性分析效果更好,且不同文献所得到的结论更趋于一致^[24,29,39-41],鲁棒性更强。其中,力学类 ICMV 在碎石、砾石等黏性较弱的材料上表现更佳^[12,32](图 5a),这可能是由于材料颗粒较粗使得其阻尼作用不显著,可以不考虑相位角 ω ^[14],或将其视为定值对检测精度影响不大。还可以看出,力学类 ICMV 与模量的相关性要远高于压实度,其原因为力学类 ICMV 的计算原理与模量更为接近^[42]。而在黏性材料中, ω 看作定值则会影响力学类 ICMV 的测试结果。如果利用特定器械在压实过程中连续测定相位角,则力学类 ICMV 在黏性材料中也同样有着较为良好的效果^[2,40]。

MDP 则在淤泥质土、黏土、砂土上的检测效果较好^[24,36],但在碎石路基中 MDP 的表现较差(图 5b)。这是由于振轮更容易“陷入”这些材料导致压

路机存在向前行驶的阻力;而碎石路基较硬,压路机不存在上述阻力,这便与 MDP 的计算原理存在矛盾,弱化了其检测效果。同时,由于振动轮的陷入量以及行驶阻力与土体水分密切相关,导致 MDP 对土体含水率的变化比较敏感^[41]。此外,MDP 与压实度的相关性往往高于与路基模量的相关性^[24,39,41],这是由于其计算过程不涉及竖向力学响应而更多关注水平向的功率消耗所导致的。考虑到 DMV 等第二种能量类 ICMV 缺乏足够的实际应用数据,在此不作进一步探讨。

3.2 其他影响因素

除了 ICMV 本身对路基填料的适用性以外,还会有许多其他因素对回归关系产生显著影响。按各类因素的影响机制,本文将其分为三大类:不可量化因素、可量化因素、特殊因素。

(1)可量化因素,包括含水率^[43]、下卧层刚度^[44]、压实器械参数等,一般作为回归算法中的特征使用,

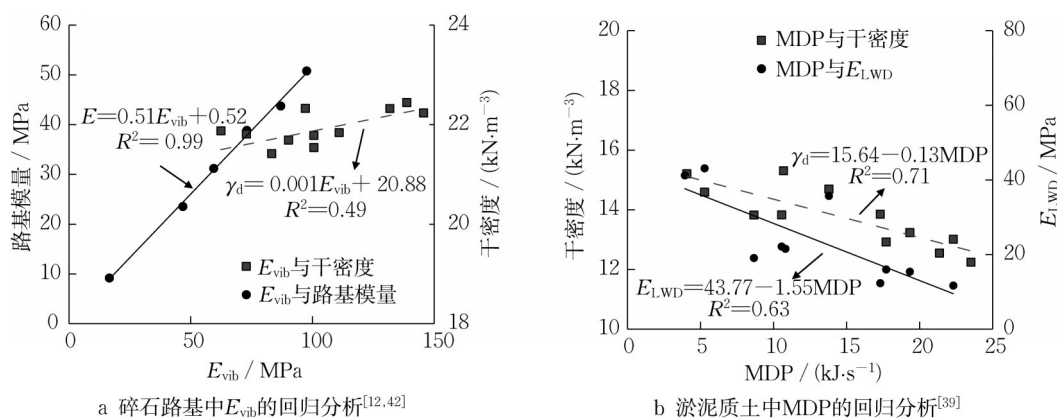


图5 力学类ICMV与能量类ICMV的适用性分析

Fig.5 Applicability analysis of mechanical ICMV and energy ICMV

可较为有效地提升回归效果^[17]。其主要问题为:进行路基整体智能压实检测时,如何连续地获得各个影响因素的实测值,否则即便能在试验段中得到了良好的回归模型,也难以使用该模型控制全路段的压实质量。

考虑优先级方面,含水率对于填土压密性的影响显著,对于碎石等粒径较大、黏性较弱的填料影响作用下降,因此在填土材料中需要重点考虑,而在大粒径填料中则可视具体情况决定;土体级配应在依据填料适用性选择ICMV时重点关注,而不建议作为回归特征纳入分析;由于ICMV的检测深度为1.0~1.2m,而路基的填筑高度一般为0.4~0.6m,除去分层填高大于1m的特殊情况,均应在ICMV的检测中对下卧层刚度进行考虑;现有研究表明^[17],压实器械的行驶速度确实影响着回归分析的结果(尽管影响机制并不清晰),出于保守考虑,建议将其作为回归的参数之一;而振动频率与振动幅值作为压实器械工作的固定参数,不建议将其纳入ICMV检测的考虑范围内。

(2)不可量化因素,包括跳振与偏振^[45-46]、检测深度、检测面积^[31,41]等。常规的做法是使用CCV、RMV等畸变指标对跳振进行衡量,但受限于高次谐波与路基弹塑性之间的复杂关系,其实际应用效果可能低于预期。实际上,随着路基密实度的增加发生跳振是不可避免的,在工程中最好将其纳入考虑范围。偏振是因为振轮沿宽度方向上的路基刚度不均匀而引起的,较为可靠的方法是在振轮左右两端均安装加速度传感器,用两侧的振动响应信号加权计算最终的ICMV^[24]。但考虑到工程中许多压路机只在其振轮一侧存在振动轴,此时应尽量保证路基填料的均匀性从而减少偏振的出现。检测深度和面

积差异则是不同检测方法所采用的设备不同引起的,目前并无相应的消除手段。

(3)特殊因素,主要指路基的应力状态。与其他影响因素不同,应力状态改变了智能压实中回归方程的输出目标值。目前一般采用现场原位检测结果(压实度、FWD模量等)作为目标输出,而引入应力状态后,结合回弹模量预估模型(如NCHRP 1-28A三参数模型)^[28],则可将室内动三轴试验所得到的回弹模量作为预测目标,这种方法被称为VIC(validated intelligent compaction)技术^[28]。考虑到路基模量具有应力依赖性,因此在建立ICMV与回弹模量的关系时应优先考虑应力状态;而压实度是路基的物理特性,与应力状态几乎没有关联,分析其与ICMV的相关关系时不需要过多关注路基的应力状态。值得一提的是,VIC技术不仅重点考虑了不同检测方法之间的应力差异,更好地获得预期应力状态下路基的力学行为^[40,31,34],还使ICMV与输出目标值的计算理论更为贴近,提高了两者的相关性。但Rinehart、Mooney、Cao等人的研究表明^[35,31,47],振压下路基的应力状态与土质类型、压路机工作参数等密切相关,且变化范围广,很难用固定的一组荷载幅值进行表征。而现阶段VIC技术一般采用Mooney^[40]所测试的振动压实下的应力状态进行分析^[38],可能会影响回弹模量预估模型的准确性;另一方面,不同土体适合于不同的回弹模量预估模型^[48],单纯采用NCHRP 1-28A模型进行分析可能会使预测结果具有一定的片面性。因此,尽管VIC技术在理论层面上破除了不同检测方法间应力状态差异的壁垒,但其具体的使用规则和适用性还需进一步探究。

3.3 回归算法

回归算法是挖掘 ICMV 与原位指标内在联系的工具。考虑到工程应用的使用方便以及回归中各参数的可解释性,各国智能压实规范推荐的方法为一元线性模型。但在智能压实数据分析中,各回归特征的影响机制不是纯线性的,因此利用非线性算法所得到的模型可以更好地获得 ICMV 与点式检测指标之间的关系。

相比于线性回归,非线性算法(如深度学习、梯度提升树等^[33,37,47])的优势在于可充分考虑各特征的非线性影响机制,从而使得预测结果更逼近于真实值。但这些算法的缺点都在于,回归方程以隐式的方式呈现,没有传统意义上用数理表征的方程(尽管树模型也可利用其流程图进行解释);而线性回归模型可以显式地获得每个特征所对应的权重,可解释性更强。然而,由于智能压实中各类特征的影响机制不仅局限于线性规律^[43],仍然建议在 ICMV 与原位指标的相关关系分析中使用非线性模型代替线性模型进行回归。

4 总结与展望

本文以 ICMV 的发展史与计算原理为切入点,就 ICMV 填料适用性、拟合影响因素的重要性、拟合算法选择三个方面的研究成果进行了分析与探讨。鉴于现有的 ICMV 三大计算体系已经十分完善,后续 ICMV 的研究应基于现有体系,重点针对 ICMV 的以下几个方面进行进一步探索:

(1)ICMV 的填料适用性。ICMV 的填料适用性很大程度上取决于其计算原理,如 CMV 适用于塑性较为显著的填料,CCV 和 RMV 适用于弹性材料;MDP 适用于“柔软”的填料(如黏土); E_{vib} 与 k_s 适用于可忽略阻尼的填料等。本文的分析是建立在 ICMV 计算原理以及相关文献数据统计的基础上,难免存在一定的局限性,因此将来应针对 ICMV 的填料适用性,采集大规模数据进行更为系统的分析工作。

(2)ICMV 与原位指标拟合分析的影响因素。本文将 ICMV 与原位指标回归的影响因素分为三类:可量化因素、不可量化因素以及特殊因素,并较为详细地给出了各影响因素的使用工况与优先级。在将来的 ICMV 检测中,建议根据具体指标及填料类型引入适当的影响因素进行分析,而非盲目地将所有可获得的因素全部纳入,这对拟合分析效果不一定是有益甚至是负面的。此外,尽管线性回归的显式表达使得其可

解释性较强,但考虑到智能压实数据中部分特征存在非线性影响机制,因此使用诸如梯度提升树或者 ANN 等非线性模型进行拟合分析可能会取得理想的效果。

(3)ICMV 的现场测量技术。目前制约着 ICMV 测评路基压实质量的最大问题之一是现场连续测量技术存在不足,特别是对于力学类 ICMV,振子相位角测定的困难使得其理论效果与实际效果具有较大的差异。此外,部分拟合特征,如路基含水率、填料级配、下卧层刚度等也难以在现场实时获取,这也导致了通过试验段获取的预测模型无法真正地应用于实际工程中。因此,如何更准确、连续地获得 ICMV 及其拟合算法中所需要的数据,使得智能压实技术从理论有效到实际有效,应该作为将来的重要研究目标之一。

(4)ICMV 的应用场景。传统的智能压实技术一般建立 ICMV 与压实度的关系以实时把控路基的压实程度,进而实现路基压实过程的控制。但随着路基路面一体化设计理念的提出,以及公路设计体系从静态向动态的转变,如何使用 ICMV 测评动态回弹模量,从而为路基设计更好地服务,也逐渐成为研究重点。目前针对 ICMV 与压实度关系的研究较为成熟,而使用 ICMV 测评动态回弹模量的 VIC 技术潜力尚未能得到充分挖掘,还存在诸如所使用应力水平不具有代表性、所采用的模型对路基应力大跨度条件下动力特性的描述不够贴切等问题,因此未来使用 ICMV 准确测评路基动态回弹模量还拥有较为广阔的探索空间。

作者贡献声明:

钱劲松:思路提供,审阅全文;
庞劲松:论文撰写、修改;
费伦林:数据整理;
郑晓光:论文规划。

参考文献:

- [1] JEAN L B, JEONGBOK S. Intelligent compaction: overview and research needs[M]. Texas A&M University, College Station, Texas, US, 2003.
- [2] ANDEREGG R, KAUFMANN K. Intelligent compaction with vibratory rollers: feedback control systems in automatic compaction and compaction control[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1868: 124.
- [3] THOMPSON M J, SCHMITT R L. Calibration of roller-integrated machine drive power measurements using soil compaction forecasting model[J]. Geotechnical testing journal, 2013, 36(5): 1.
- [4] RINEHART R V, MOONEY M A. Instrumentation of a roller

- compactor to monitor vibration behavior during earthwork compaction[J]. *Automation in Construction*, 2008, 17(2): 144.
- [5] BEAINY F, COMMURI S, ZAMAN M. Quality assurance of hot mix asphalt pavements using the intelligent asphalt compaction analyzer [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2012, 138(2): 178.
- [6] MOONEY M, ADAM D. Vibratory roller integrated measurement of earthwork compaction: an overview[C]// *Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*. Boston: Geo-Institute of ASCE, 2007: 1-12.
- [7] 冯永乾, 江辉煌, 吴龙梁, 等. 填筑工程连续压实控制技术进展[J]. *铁道标准设计*, 2020(7): 50.
- FENG Yongqian, JIANG Huihuang, WU Longliang, *et al.* Research progress of continuous compaction control technology for filling projects[J]. *Railway Standard Design*, 2020(7): 50.
- [8] 唐建伟, 江辉煌, 张道修, 等. 欧美连续压实控制技术规程的技术特点和借鉴[J]. *土木工程与管理学报*, 2020(3): 59.
- TANG Jianwei, JIANG Huihuang, ZHANG Xiudao, *et al.* Technical features and references of european and american continuous compaction control technical regulations[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2020(3): 59.
- [9] LIU D H, WANG Y, CHEN J, *et al.* Intelligent compaction practice and development: a bibliometric analysis[J]. *Engineering Construction & Architectural Management*, 2020, 27(5): 1213.
- [10] 吴龙梁. 基于能量耗散的路基连续压实控制技术[D]. 北京: 中国铁道科学院, 2020.
- WU Longliang. Research on continuous compaction control technology of roadbed based on energy dissipation[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2020.
- [11] THURNER H, FORSSBLAD L. The compaction meter — a modern method for the surveillance and control of compaction[J]. *Revue Generale des Routes et des Aerodromes*, 1979, 36(549): 67.
- [12] KRÖBER W, FLOSS E, WALLRATH W. Dynamic soil stiffness as quality criterion for soil compaction[J]. *Geotechnics for Roads, Rail Tracks And Earth Structures*, 2001(1): 189.
- [13] NOHSE Y, KITANO M. Development of a new type of single drum vibratory roller[C]// *International Society for Terrain-Vehicle Systems (ISTVS) Conference*. [S.l.]: Sakai Heavy Industries Ltd., 2002: 1-10.
- [14] 徐光辉. 路基系统形成过程动态监控技术[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- XU Guanghui. Dynamic monitoring technology of roadbed system formation process[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [15] LIU D H, LIN M, LI S. Real-time quality monitoring and control of highway compaction[J]. *Automation in Construction*, 2016, 62: 114.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基填筑工程连续压实控制系统技术条件: JT/T 1127-2017[S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2017.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical requirements for continuous compaction control system of fill engineering of subgrade for highway: JT/T 1127-2017[S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2017.
- [17] 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.
- WU Longliang, JIANG Huihuang, TANG Jianwei, *et al.* Continuous compaction monitoring technology based on multiple regression analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(6): 2081.
- [18] TEHRANI F S. An investigation of continuous compaction control systems[D]. Delaware: University of Delaware, 2009.
- [19] LING J M, LIN S, QIAN J S, *et al.* Continuous compaction control technology for granite residual subgrade compaction[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(12): 04018316.1.
- [20] ADAM D. Continuous compaction control (CCC) with vibratory rollers [C]// *Environmental Geotechnics*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997: 245 - 250.
- [21] VENNAPUSA P K R, WHITE D J, SIEKMEIER J, *et al.* In situ mechanistic characterisations of granular pavement foundation layers[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2012, 13(1): 52.
- [22] 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, 172(3): 3.
- CAI Degou, YE Yangsheng, YAN Hongye. Vertical propagation mechanism of vibration wave in intelligent compaction process of high-speed railway subgrade based on field test[J]. *China Railway Science*, 2020, 172(3): 3.
- [23] 马涛, 方周. 路基振动压实动力学响应仿真分析[J/OL]. *中国公路学报*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.u.20211028.1531.003.html>.
- MA Tao, FANG Zhou. Simulation analysis of vibratory roller response on subgrade[J/OL]. *China Journal of Highway And Transport*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.u.20211028.1531.003.html>.
- [24] CACCIOLA D V, MEEHAN C L, BAKER W J, *et al.* A comparison of continuous compaction control measurements with localized in situ test results[C]// *American Society of Civil Engineers IFCEE 2018*. Orlando: American Society of Civil Engineers, 2018(5): 64-74.
- [25] 刘俊新, 陈忠富, 徐伟芳, 等. 压实度和含水率对压实黏性土动态力学性能的影响试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(6): 9.
- LIU Junxin, CHEN Zhongfu, XU Weifang, *et al.* Experimental study of dynamic properties of compacted clay under different compaction degrees and water contents [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(6): 9.
- [26] FACAS N W, SUSANTE P J, Mooney M A. Influence of rocking motion on vibratory roller-based measurement of soil stiffness [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2010, 136(7): 898.
- [27] KENNEALLY B, MUSIMBI O M, WANG J, *et al.* Finite

- element analysis of vibratory roller response on layered soil systems [J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 67(6): 73.
- [28] WHITE D J, VENNAPUSA P K R, TUTUMLUER E, *et al.* Spatial verification of modulus for pavement foundation system[J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2018, 2672(52): 333.
- [29] CARRASCO C, TIRADO C, WANG H. Collaborative proposal: numerical simulation of intelligent compaction technology for construction quality control [R]. Washington D C: U. S Department of Transportation/Research and Innovative Technology Administration, CAIT-UTC-029, 2014.
- [30] MA Y, LUAN Y C, ZHANG W G, *et al.* Numerical simulation of intelligent compaction for subgrade construction[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(7): 2173.
- [31] MOONEY M A, RINEHART R V, BERGER J R. Advances in Transportation Geotechnics Part 10, Chapter 8: In-ground stress-strain condition beneath center and edge of vibratory roller compactor[M]. London: CRC Press, 2008.
- [32] MOONEY M A, RINEHART R V. Field monitoring of roller vibration during compaction of subgrade soil [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133: 257.
- [33] XUE Z C, CAO W D, LIU S T, *et al.* Artificial neural network-based method for real-time estimation of compaction quality of hot asphalt mixes[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(15): 7136.
- [34] WHITE D J, VENNAPUSA P K R, DUNN M. Road map for implementation of intelligent compaction technology [C]// Atlanta: Geo-congress, 2014: 2010-2018.
- [35] 张家玲. 连续压实无砟轨道路基结构支承刚度均匀性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- ZHANG Jialing. Study on the uniformity of the bearing rigidity of continuously compacted subgrade structure of ballastless tracks[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [36] MAZARI M., BELTRAN J., TIRADO C., *et al.* Evaluating stiffness parameters of unbound geomaterial layers using intelligent compaction, plate load test, and light weight deflectometer[C]// International Conference on Highway Pavements and Airfield Technology. Philadelphia: American Society of Civil Engineers, 2017: 186-194.
- [37] FATHI A, TIRADO C, ROCHA S, *et al.* A machine-learning approach for extracting modulus of compacted unbound aggregate base and subgrade materials using intelligent compaction technology [J]. *Infrastructures*, 2021, 6(10): 142.
- [38] BARMAN M., NAZARI M., IMRAN S. A., *et al.* Quality control of subgrade soil using intelligent compaction[J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2016, 1(1): 23.
- [39] THOMPSON M J, WHITE D J. Estimating compaction of cohesive soils from machine drive power [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(12): 1771.
- [40] MOONEY M. A., RINEHART R. V. In situ soil response to vibratory loading and its relationship to roller-measured soil stiffness [J]. *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(8): 1022.
- [41] MEEHAN C L, CACCIOLA D V, TEHRANI F S, *et al.* Assessing soil compaction using continuous compaction control and location-specific in situ tests [J]. *Automation in Construction*, 2017, 73(1): 31.
- [42] WHITE D J, VENNAPUSA P K R, HEATH G, *et al.* Accelerated implementation of intelligent compaction technology for embankment subgrade soils, aggregate base, and asphalt pavement materials [R]. Springville: Final Report ER10-01 of US219, 2010.
- [43] KUMAR S A, ALDOURI R, NAZARIAN S, *et al.* Accelerated assessment of quality of compacted geomaterials with intelligent compaction technology[J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 113: 824.
- [44] MOONEY M A, FACAS N W. Extraction of layer properties from intelligent compaction data[R]. Washington D C: Colorado School of Mines, Final Report for Highway IDEA Project 145, 2013.
- [45] KIM K, CHUN S. Finite element analysis to simulate the effect of impact rollers for estimating the influence depth of soil compaction[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016, 20(7): 2692.
- [46] IMRAN S A, COMMURI S, BARMAN M, *et al.* Modeling the dynamics of asphalt-roller interaction during compaction [J]. *Journal of Construction Engineering And Management*, 2017, 143(7): 1.
- [47] CAO L, ZHOU J, LI T, *et al.* Influence of roller-related factors on compaction meter value and its prediction utilizing artificial neural network[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 268(1): 121078.
- [48] 张军辉, 彭俊辉, 郑健龙. 路基土动态回弹模量预估进展与展望 [J]. *中国公路学报*, 2020, 33(1): 1.
- ZHANG Junhui, PENG Junhui, ZHENG Jianlong. Progress and Prospect of the Prediction Model of the Resilient Modulus of Subgrade Soils[J]. *China Journal of Highway And Transport*, 2020, 33(1): 1.