

文章编号:1671-8879(2015)06-0024-09

路面压实度自动连续检测技术

黄志福^{1,2}, 梁乃兴¹, 赵毅^{1,3}, 翟晓静³

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230088;
3. 河北交通职业技术学院 土木工程系, 河北 石家庄 050091)

摘要:为了建立振动轮振动加速度与路面压实度之间的关系以检测路面压实,分析了振动轮与路面压实材料之间的动力学关系,建立了振动压路机-路面系统动力学模型,提出了路面压实度连续检测技术的设计方案,研究了采用振动轮垂直加速度有效值表示压实度的技术及方法,并进行了现场试验。研究表明:垂直振动加速度与路面材料刚度正相关,与阻尼负相关;路面基层、下面层、中面层的压实度与振动轮垂直加速度有效值之间存在较好的正相关对应关系,其相关系数 R^2 分别为 0.900 2、0.934 0、0.931 4;该连续检测系统可方便准确地进行测量,实时有效地控制路面质量,提高了压实效率。

关键词:道路工程;路面压实度;自动连续检测;振动轮加速度;动力学模型

中图分类号:U416 **文献标志码:**A

Automatic and continuous detection technology of pavement compaction degree

HUANG Zhi-fu^{1,2}, LIANG Nai-xing¹, ZHAO Yi^{1,3}, ZHAI Xiao-jing³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Anhui Transportation Holding Group Co. Ltd., Hefei 230088, Anhui, China; 3. Department of Civil Engineering, Hebei Jiaotong Vocational & Technical College, Shijiazhuang 050091, Hebei, China)

Abstract: In order to establish the relationship between vibration acceleration and the degree of pavement compaction for the detection of compactness, this paper analyzed dynamic relationship between vibration compaction and the pavement compacted material, and established dynamic mathematical model. On this basis the automatic and continuous detection technology of pavement compaction degree was put forward. Then the technique and method using vertical effective value of vibration acceleration to represent compaction degree was studied and the field test was conducted. The results show that the vertical vibration acceleration is positively related to pavement stiffness, and negatively related to damping. The compactness of base course, middle pavement and top pavement is positively related to wheel vertical vibration acceleration RMS, and the correlation coefficients R^2 are 0.900 2, 0.934 0, and 0.931 4. The continuous monitoring system can easily and accurately measure pavement compactness, control the quality of road in real time effectively, and thus improve the efficiency of compaction. 4 tabs, 18 figs, 18 refs.

收稿日期:2015-07-10

基金项目:安徽省交通科技项目(ahjtkj20130022)

作者简介:黄志福(1963-),男,安徽六安人,安徽省交通控股集团有限公司教授级高级工程师,重庆交通大学工学博士研究生,

E-mail:huangzf053@aehc.com.cn.

Key words: road engineering; compaction degree of pavement; automatic and continuous detection; acceleration; model of vibration compaction

0 引言

在公路工程中,路面直接承受车辆荷载作用,路面压实度对于工程质量的影响至关重要。传统的压实度检测方法不仅费时、费力,且准确度低,很难反映路面上每一点的压实情况。因此,只有开发新的压实度检测仪器,探索压实度连续检测新方法,才能实现施工过程中对路面压实质量的有效检测和控制。多年来国外一直以振动压路机振动加速度与压实度关系为原理研制检测压实度仪器^[1-3]。瑞典 Themer 等认为振动加速度波形是由振动轮固有的振动和杂波叠加而成的^[4-5],因此瑞典 DYNAPAC 公司与 GEODYNAMIK 公司共同开发的压实度仪,其工作原理是通过对振动压路机加速度的响应信号进行傅里叶变换,然后用二次谐波与基波之比来反映压实的程度^[6-8];20 世纪 90 年代德国 BOMAG 公司研制出 Omegameter 和 Terrameter 压实度仪,使机载压实度检测仪进入实际应用阶段^[9]。

中国 20 世纪 90 年代,徐州工程机械厂等研制的 SMC-960A 密实度测量仪,通过加速度传感器检取压路机振动轮上的振动加速度信号,经放大、滤波、转换后进行算法分析,然后在显示器上显示被压实材料的密实度^[10-11];江苏某仪器厂曾开发了机载压实度检测仪,该仪器采用数码管显示,没有应用计算机智能控制技术,尽管成本低,但在工程实践中效果并不明显^[12];河北工业大学张润利等基于振动轮的加速度与被压实材料压实度正相关关系得到压实度、振动频率、压路机行驶速度等参数^[8];长安大学居彩梅等利用振动轮的加速度与被压实材料压实度正相关关系,设计了振荡压实度计测量系统框图^[13-14]。为此,本文通过研究振动压路机振动轮与路面压实材料之间的动力学关系,建立振动压路机-路面系统动力学模型,给出振动加速度与压实材料刚度、阻尼的关系,分析了加速度有效值对路面压实度的自动连续检测技术。

1 路面自动压实技术

路面振动压实过程是一个复杂的随机过程,需要把不同形式结构复杂的振动压路机与路基看成同

一个振动系统,建立完整和接近实际的动力学模型,并简化成可进行数值分析的数学模型。

1.1 振动压路机-路面压实系统动力学模型

国内外许多研究者对振动压路机-被压实材料系统的动态特性及动力学模型进行了试验研究和理论分析。由最初的二自由度、线性、集中参数、弹簧-阻尼经典动力学模型,到三自由度非线性振动压路机-路面系统动力模型,再到机架-振动轮-路基系统的四自由度动力学模型,这些模型不断地修正不足,突破难点。本文建立的数学模型能够更准确地描述振动压路机振动轮振动参数与被压实材料压实质量之间的关系,研究振动轮的振动情况和被压实材料可压实性对路面压实的各种不同影响。

在振动压实过程中,机架和振动轮基本不发生错位、变形和等效刚体运动,而减振器和被压实材料在压实过程中会发生弹性和塑性变形。因此,可用集中质量的动力学模型来描述机架和振动轮的运动规律,而用弹簧、阻尼来描述减振器,采用质量-弹簧-阻尼系统来近似表示振动压实时振动轮对被压实材料的动态作用。

振动压路机振动轮内旋转的偏心质量产生的横向离心力形成激振力,所以振动轮在压实作业中的运动是多方位的空间运动。但垂直方向的振动力和静重压力才会产生振动压实效果,尤其是对表层以下的压实效果起主要作用。因此建模时,可只考虑垂直方向的运动来简化模型。参考试验用振动压路机结构,振动压路机振动压实过程的动力学简化模型如图 1 所示。该模型将路基随动质量对压实动态响应的影响也考虑在内,较真实地反映了压实过程。

路面振动压实可分为 A、B、C 这 3 个阶段^[4,15]。

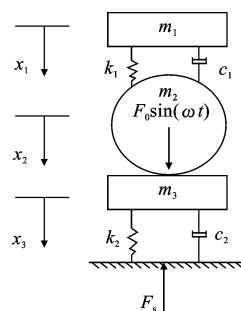


图 1 振动轮-路面系统动力学模型

Fig. 1 Dynamical model of vibration wheel-pavement system

压实过程中最关心的是路面最终的压实情况,因此分析重点为B阶段。

A阶段:非线性塑性应变阶段,该阶段路面产生大的塑性应变,压实度增加,沥青混合料弹性模量增加,阻尼减小,吸收能量。

B阶段:线性弹性应变阶段,该阶段路面材料进一步密实,弹性增加,塑性减少,振动能量由接触区域扩散到周围区域。振动压实中采用刚体质量-弹簧-阻尼系统等效振动轮对路面的压实作用(图1),它由2个等量参数系统组成,上部为振动压路机及振动轮,下部为路面沥青混合料。

C阶段:刚性应变阶段,该阶段路面已压实,基本不再产生变形,如继续振动压实,将产生跳振,容易对铺层形成不规则冲击,会把基层的大颗粒击碎,内部结构因此松动滑落,破坏了级配,对原有路面强度、结构、质量产生影响,应停止压实。

图1中: m_1 为车架质量; m_2 为振动轮质量; m_3 为土体随动质量; k_1 为振动轮减振器刚度; c_1 为振动轮减振器阻尼; k_2 为沥青混合料弹性刚度; c_2 为振动轮与沥青混合料的阻尼; $F_0 = M_e \omega^2$, M_e 为偏心块的静偏心矩, ω 为偏心块旋转角速度; x_1 为车架瞬时位移; x_2 为振动轮瞬时位移; F_s 为接触力。

模型中 m_1 、 m_2 、 F_0 可由振动压路机的技术资料中查找或计算得到。被振动压实区域分为接触区域和周围弹性状态区域,其中 m_3 在接触区域范围内可由确定的振动压实参数计算。对于被压实材料的质量,Lars给出不同的假设,通过分析比较振动轮-被压实材料系统的被测性能与等效参数系统的振动性能, m_3 可由前桥负荷的10%来等效代替。

1.2 路面振动压实系统动力学方程

当系统处于A或B阶段时,地面与振动轮接触,此时 m_2 与 m_3 接触, m_2 、 m_3 可看成一个整体;在一个振动周期内振动轮有一部分时间与地面不接触,此时系统处于C阶段, m_2 、 m_3 则不能看成一个整体,应分别分析。本文主要研究B阶段,故选 m_1 、 m_2 和 m_3 离开其静平衡位置的位移分别为 x_1 、 x_2 和 x_3 ,作为系统的广义坐标。由牛顿第二定律,可得该动力学模型的振动微分方程为^[5,16](此时 m_2 和 m_3 不分离,视为整体,并且 $x_2 = x_3$)

$$(m_2 + m_3) \ddot{x}_2 + (c_1 + c_2) \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_2 - c_1 \dot{x}_1 - k_1 x_1 = F_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_1 \dot{x}_2 - k_1 x_2 = 0 \quad (2)$$

$$F_0 = M_e \omega^2 \quad (3)$$

$$M_e = F_f r \quad (4)$$

式中: F_f 为偏心力(kN); r 为偏心块的偏心距(mm)。

解微分方程得

$$x_1 = F_0 \left(\frac{A_2^2 + B_2^2}{C^2 + D^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad x_2 = F_0 \left(\frac{A_1^2 + B_1^2}{C^2 + D^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

式中: $A_1 = k_1 - m_1 \omega^2$; $B_1 = c_1 \omega$; $A_2 = k_1$; $B_2 = c_1 \omega$;

$$C = (m_2 + m_3) m_1 \omega^4 - (m_2 + m_3) k_1 \omega^2 -$$

$$m_1 k_2 \omega^2 - c_1 c_2 \omega^2 + k_1 k_2 - m_1 k_1 \omega^2;$$

$$D = k_2 c_1 \omega + k_1 c_2 \omega - (m_2 + m_3) c_1 \omega^3 -$$

$$m_1 c_2 \omega^3 - m_1 c_1 \omega^3$$

受到简谐激振力作用的振动轮的垂直加速度为

$$|\ddot{x}_2| = \omega^2 |x_2| = \omega^2 F_0 \left(\frac{A_1^2 + B_1^2}{C^2 + D^2} \right)^{\frac{1}{2}} = f(k_2, c_2) \quad (5)$$

不论在什么激振力作用下,公式中参数除了 k_2 、 c_2 发生变化,其他均未改变。由此可得振动轮的垂直加速度只受 k_2 、 c_2 (铺层的刚度和阻尼)的影响。

相关资料表明,振动压路机作业时沥青混合料的刚度为

$$k_2 = 0.253 \frac{(2.5 - e)^{\frac{1}{2}}}{(1 + e)(1 - v^2)} \sqrt{\sin(\beta)} \sqrt{RL} \cdot (\sigma_0)^{\frac{1}{3}} \epsilon_d^{-1} \quad (6)$$

式中: e 为孔隙比; v 为土的泊松比; β 为振动轮触地角($^\circ$); R 为振动轮半径(mm); L 为振动轮宽(mm); σ_0 为平均固结压力; ϵ_d 为应变。

由式(6)可以得出,沥青混合料的刚度随孔隙比的减小而增大。显然压实度随孔隙比的减小而增大,所以路面压实度随沥青混合料刚度的增大而增大;随沥青混合料刚度的减小而相应减小。

沥青混合料的阻尼计算式为

$$c_2 = 0.265 - 2.33 \times 10^{-3} \frac{m_2}{\rho R^3} \quad (7)$$

式中: ρ 为振动压实时沥青混合料的密度(g/cm^3)。

由式(7)可得,振动沥青混合料的密度越大,其阻尼越小,而沥青混合料密度与路面压实度成正比,所以路面压实度随其阻尼的减小而增大。

由上述分析可得,振动轮的垂直加速度随土的刚度增加而增加,随沥青混合料阻尼的减小而增大。振动压路机压实过程中,被压实材料密度变化反作用于振动轮,其垂直加速度能够可靠地反映路面的压实情况。

1.3 压实度连续检测系统方案设计

设计方案采用标准系列硬件,功能齐全模块,

可运行软件丰富的嵌入式标准模块结构系统。

振动压实过程是一个错综复杂的过程^[17],包含很多不确定因素,选择的硬件应具有较强的适应能力。该压实度自动连续检测系统硬件部分由信号CPU处理器、输入通道、A/D转换模块、信号调理电路、LCD液晶显示屏、操作面板及串行通信接口等模块组成。在这些模块中,CPU处理器、A/D转换模块、调理电路及电源模块必须采用国家标准结构。选用的传感器是压电式 YD63 系列加速度传感器和 HE-205 红外温度传感器。

系统的基本构成如图2所示,主要包含了信号输入、信号处理和信号输出3个单元。

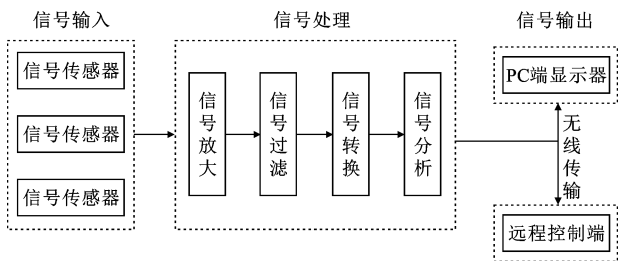


图2 压实度连续检测系统的结构

Fig. 2 Structure of compaction degree detection system

信号输入单元:主要包括加速度传感器和温度传感器。

信号处理单元:是系统的核心部分,包括信号放大、过滤、转换和分析,最后以电压信号输出。

信号输出单元:主要提供数据实时显示,便于现场人员查看,同时也可通过无线传输供远程监控。

信号处理分析后,还需用大量传统方法来核实压实度准确性,因此在分析处理基础上不断地改进计算方法,并对这些算法进行对比分析,反馈后再进行算法改进。

该自动连续检测系统可安装在振动压路机的驾驶室中或放在专用的自行车架上,可以在压实过程中连续显示被压实材料的压实度,自动打印出分施工段分层次的压实数据或结果曲线等。在检测过程中为了使压实材料受到均匀的激振力,要求振动压路机匀速行驶,振幅和振动频率平稳。

2 试验测试

压实度连续检测技术的核心是对振动压路机激振信号的分析。国外大多采用间接法(谐波比法)来判定材料的压实度^[4]。然而,当被压实材料未被压实处于松软状态时,压路机的振动频率是其压实频

率,不含高频率,只有压实不松软的路面或经过一定压实的材料再进行压实时才会产生高次谐波。因此,用谐波比来反映压实度的方法具有一定的局限性。本文通过有效值法,即直接分析压实过程中振动轮加速度有效值的变化来判定压实度。

通过实验室及现场进行一系列试验,证实压实度连续检测系统是否运行可靠、稳定,以及方案设计是否可行。首先,在实验室内对系统进行标定,提高系统的准确性、稳定性,考虑到施工现场的环境因素,又通过振动台试验验证仪器功能的完善性和工作适应能力;然后,在施工现场采集加速度信号,检测被压实材料的压实效果;最后,在实验室做进一步分析和研究。

2.1 系统标定试验

在实验室内将仪器测出的数据与实际数值进行比较、修正,完成标定任务。标定任务是为了让仪器能更精确地测量数据。采用静态标定和波形显示2种试验来完成标定。

2.2 振动台试验

现场施工受到各种环境因素影响,如噪音等,所以采集振动轮的垂直加速度信号不如实验室里精确,且不易处理。为了应对现场施工的各种影响,用实验室里的振动试验台来模拟现场各种不确定因素,让试验环境与施工现场更接近,增加试验的可靠性,也可鉴定产品承受环境影响的能力。

2.3 压实度连续检测室内试槽试验

在修建的试槽试验路上进行试验,研究路面各结构层的振动轮加速度与压实度的分布和主要影响因素的作用规律。

2.3.1 试槽试验的施工准备

该试槽试验路总长16 m,宽3 m,有效长度12 m,铺筑3种典型沥青路面结构,分别为水泥稳定碎石基层沥青混凝土路面结构、级配碎石基层沥青混凝土路面结构和沥青稳定碎石基层沥青混凝土路面,路面结构总厚度均为78 cm。首先要检测原材料性质,然后根据路面结构设计进行混合料配合比设计,为铺筑室内试槽试验路做好准备。

2.3.2 试槽试验

为了测试车载式压实仪工作性能,通过试槽试验对影响测试的因素进行压机分析,包括对传感器、检测时间、压路机的振动频率等特性的分析,找出最适合、最准确的检测方法。

试验路各层结构主要是由垫层、基层及面层组

成。根据试验路面结构方案,将试槽开挖至顶层以下 78 cm,保留余下 222 cm 厚的砂性土,模拟路基。对土基进行整平压实,直接在上面铺筑天然砂砾,再铺筑半刚性基层、柔性基层及面层,在每层铺筑完毕后,对其进行压实,并测试压实度。

2.3.3 信号分析

为了找到正确的信号检查方法,对传感器的不同安装位置和方向、采样频率、压路机行驶方向和压路机工作时的振动频率等相关影响因素进行处理,然后通过分析信号的正弦规律来确定信号的真实性和准确性。

(1) 传感器安装位置的影响

以基层为例,分析传感器不同位置对加速度信号的影响,传感器的位置如图 3 所示,为 1 号、2 号、3 号传感器。



图 3 传感器的安装位置

Fig. 3 Installation location of sensor

对基层材料压实时,3 个传感器采集不同振动方向的信号频谱和滤波,见图 4~下页图 6。其中 1 号传感器为垂直方向,由图中可得,垂直方向采集的信号最能满足要求,这与压路机在垫层和面层进行压实时采集的信号结果相符。所以,沥青路面压实度检测需要检测振动轮垂直方向的加速度信号。

(2) 采样频率对信号的影响

为了研究采样频率对测试结果的影响,分析不同采样频率下信号的准确性和可靠性,选取合适的采样频率。已知压路机的工作振动频率约为 30 Hz,在相同检测时间下选取 3 种采样频率,500、350 和 200 Hz。

同样以基层为例,分别在不同压实遍数之后进行信号分析,试验结果如下页图 7~图 10 所示。

从图中可以看出,信号值随着压实遍数的增加而增大,采样率为 200 Hz 的信号变换明显不符合要求;采样频率 350 Hz 的信号整体上呈现正弦变换,但每个周期的幅值变化很大,峰值相差较大,与采样频率 500 Hz 的信号相比存在明显不足;当振动压路

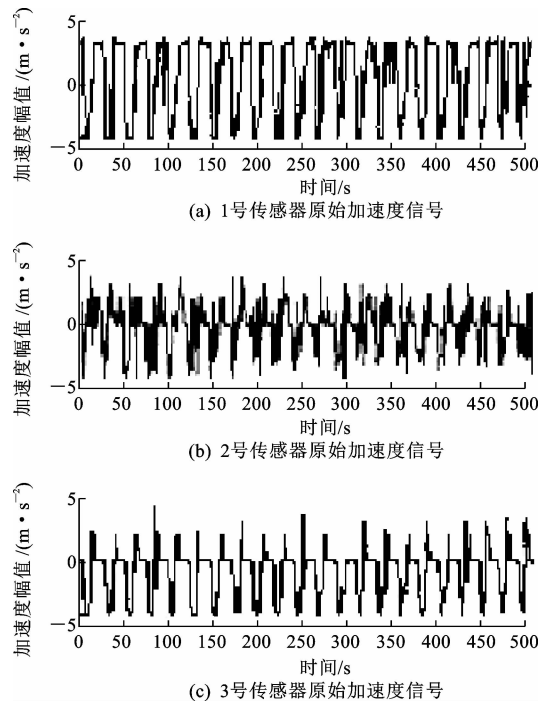


图 4 基层材料下传感器不同位置的原始加速度信号

Fig. 4 Original signal of sensors at different locations of base material

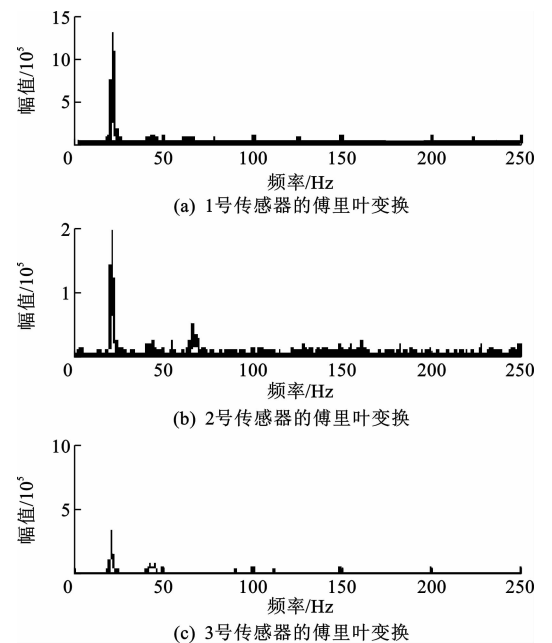


图 5 基层材料下传感器不同位置的信号频谱

Fig. 5 Spectrogram of sensors at different locations of base material

机的振动频率为 30 Hz 时,500 Hz 采样频率采集的信号更有效。因此,建议信号采样频率应大于 10 倍振动压路机的振动频率。

(3) 行驶方向的影响

压路机工作时不会一直正向行驶,是以正向和

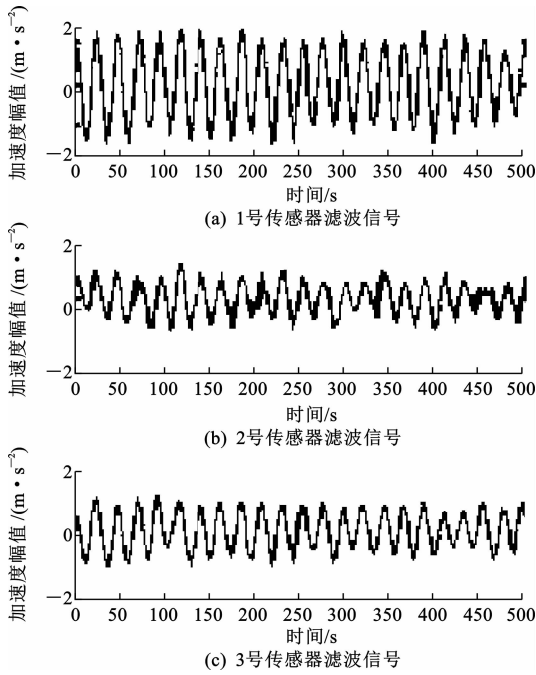


图 6 基层材料下传感器不同位置的信号滤波
Fig. 6 Stickogram of sensors at different locations of base material

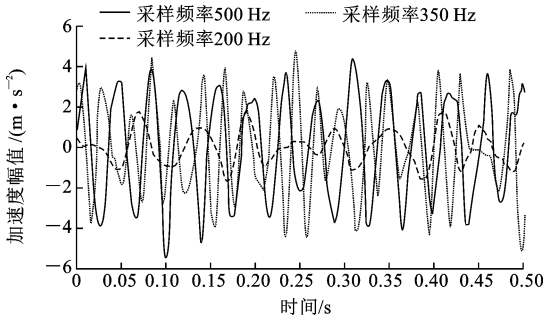


图 7 第 1 遍压实后不同采样频率的信号对比
Fig. 7 Comparison of different sampling rates signal after the first pass compaction

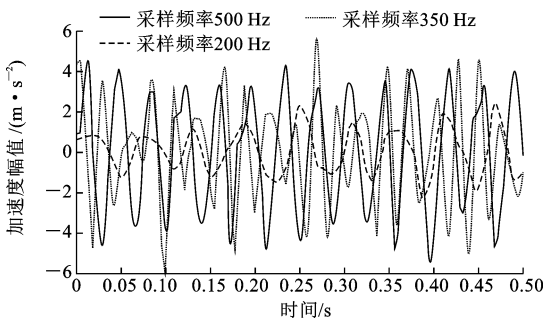


图 8 第 2 遍压实后不同采样频率的信号对比
Fig. 8 Comparison of different sampling rates signal after the second pass compaction

反向行驶相结合的方式进行了压实。为了分析压路机行驶方向对信号采集的影响,选取在相同材料压实情况下,对不同行驶方向的信号进行分析比较,找出

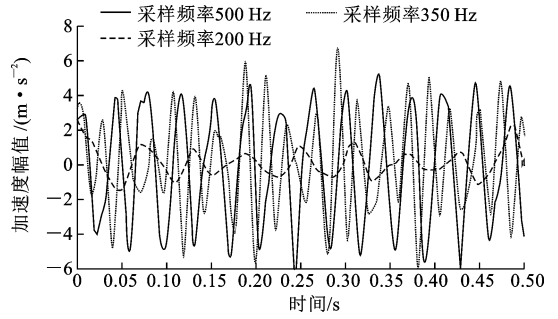


图 9 第 3 遍压实后不同采样频率的信号对比
Fig. 9 Comparison of different sampling rates signal after the third pass compaction

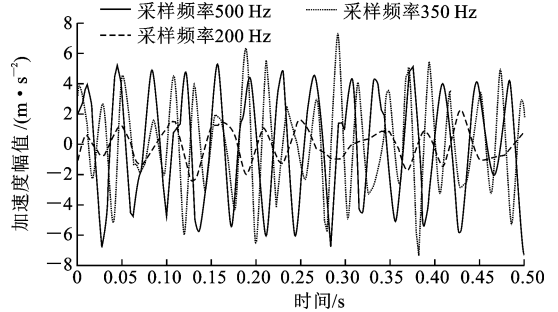


图 10 第 4 遍压实后不同采样频率的信号对比
Fig. 10 Comparison of different sampling rates signal after the fourth pass compaction

压路机工作时不同行驶方向对结果的影响。

图 11、下页图 12 为压路机工作中不同行驶方向时信号的频谱和滤波。

由图可知,信号频谱主要都集中在 30 Hz,其他

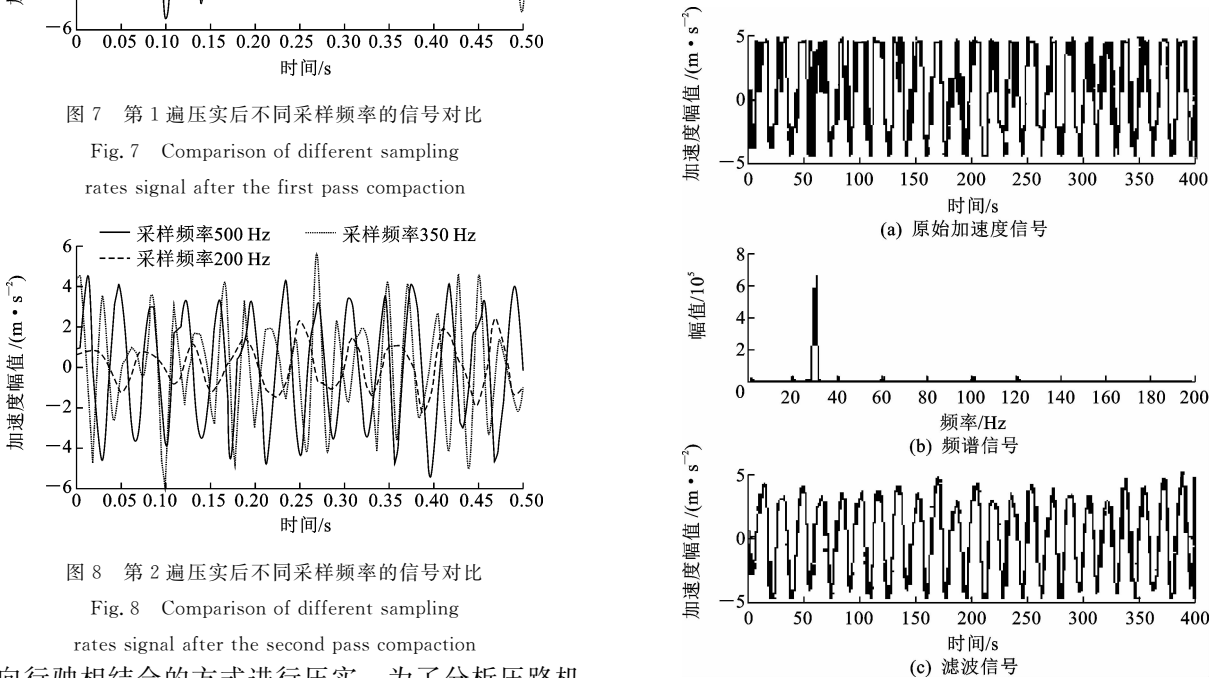


图 11 正向行驶时信号的频谱
Fig. 11 Spectrum analysis of forward direction signal

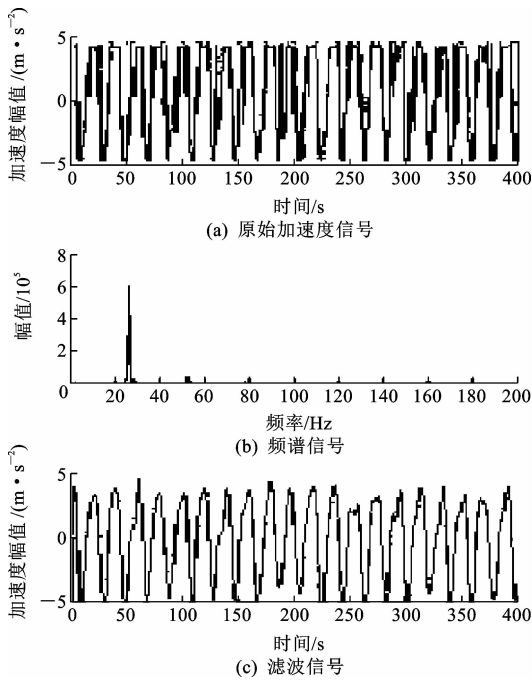


图12 反向行驶时信号的频谱

Fig. 12 Spectrum analysis of reverse direction signal

部分也很相近,没有太大区别。压路机正向工作时采集的信号与反向工作时采集的信号并没有明显的不同。因此,行驶方向对加速度信号没有太大的影响。

(4) 振幅的影响

为了提高压路机工作效率,在不同压实阶段常使用不同振幅对材料进行压实,施工现场称为弱振和强振,试验所用的振动压路机强、弱振幅分别为 2.0 mm 和 1.0 mm。

图 13、图 14 为不同振幅信号的频谱和滤波。由图可知,信号频率小于 10 Hz 和大于 50 Hz 的成分滤掉后,得到的波形是正弦(存在奇异点)波,弱振信号的频率大于强振信号的频率,信号滤波后的振幅大小并没有明显区别。

通过以上分析可得,幅值变化对加速度值影响不大,车载式压实度仪可以在不同幅值下测量压实度,但要考虑不同的振幅和振频对压实材料和周围环境的影响。

2.4 压实度连续检测现场试验

试验在不同压实次数下,通过传感器进行振动轮加速度信号采集,并用灌沙法对压实路面的压实度进行检测,最后拟合出两者的回归方程,从而为压实度连续检测系统提供可靠依据。

2.4.1 路面材料结构参数

依托泗许(泗县—许昌)、济祁(济南—祁门)2

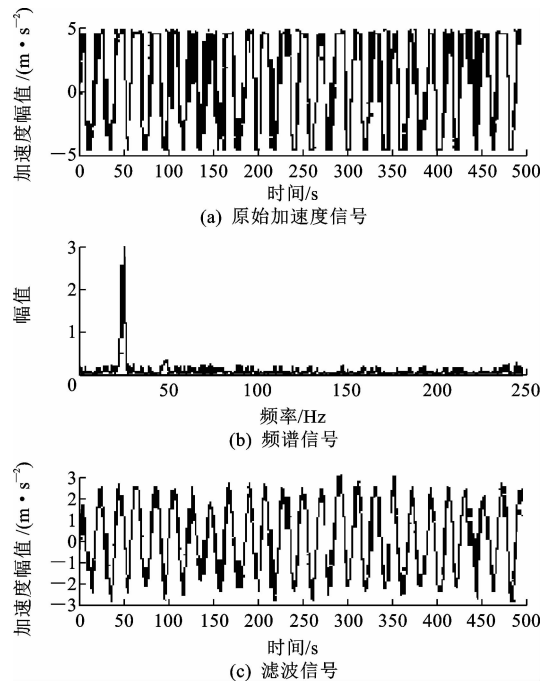


图13 弱振幅信号的频谱和滤波

Fig. 13 Spectral and filter views of weak amplitude of signal

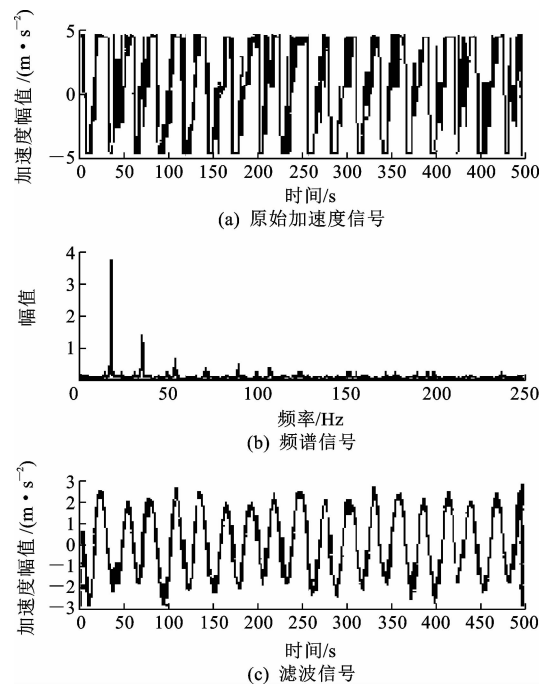


图14 强振幅信号的频谱和滤波

Fig. 14 Spectral and filter views of high amplitude of signal

条高速公路,沥青面层采用 3 层式,材料为密级配沥青混凝土,上面层采用 AC-13,中面层采用 AC-20,下面层采用 AC-25,路面基层采用单层式,材料为水泥稳定碎石,路面结构参数见下页表 1。

表 1 路面结构参数

Tab. 1 Parameters of pavement structure

结构层	厚度/cm	材料
上面层	4	AC-13
中面层	6	AC-20
下面层	8	AC-25
基层	36	水泥稳定碎石
垫层	20	灰土
土基		

2.4.2 振动压路机和数据采集仪

现场采用悍马 HD130 型振动压路机对基层进行振动压实,沃尔沃 DD138HF 型振动压路机对面层进行振动压实,其主要工作参数如表 2 所示。信号采集仪型号为 YE6263,8 通道动态数据采集,通道带宽 0~200 kHz,A/D 分辨率 12 bit、最大静态误差不大于±0.3%。

表 2 压路机技术参数

Tab. 2 Technology parameters of vibratory roller

悍马 HD130		沃尔沃 DD138HF	
工作质量/kg	14 200	工作质量/kg	13 752
前轮静线载荷/ (kg·cm ⁻¹)	33.2	振动频率/Hz	53.3
振动频率(前轮/后轮)/ Hz	42/50	激振力/kN	97.1~188.0
名义振幅(前轮/后轮)/ mm	0.75/0.4	钢轮宽度/mm	2 135
激振力(前轮/后轮)/ kN	528/416	行驶速度/ (km·h ⁻¹)	0~12
行驶速度/(km·h ⁻¹)	0~12		
额定功率/ (kW/(r·min ⁻¹))	98/2 300		
尺寸	长/mm	6 145	
	宽/mm	2 440	
	高/mm	3 400	

2.4.3 测试方法

文献[17-18]表明,垂直安装的传感器更能反映振动加速度的变化,采用磁吸盘安装方式将传感器安装于振动轮垂直位置,用数据传输线将传感器和数据采集仪相连、固定。在试验路段压实时,压路机保持恒速、恒振幅、恒频率行驶。通过观察频谱和统计信息栏采集数据。要及时保存采集的数据,再用传统方法测量路面每层结构压实度(表 3),每次采集分别取 5 个测点进行压实度测量(表 3 中数据为平均值)。

表 3 压实度

Tab. 3 Compaction data

结构层	不同压实遍数(次)的压实度/%			
	1	2	3	4
基层	93.7	96.4	97.2	97.8
下面层	93.9	94.8	96.7	98.4
中面层	94.6	96.9	97.3	98.1

3 结果分析-有效值法

参考文献[18],对压路机激振信号进行滤波、消除多项式趋势项,平滑处理后,计算路面各结构层每遍压实后的加速度有效值,结果如表 4 所示。

表 4 加速度有效值

Tab. 4 Virtual value of vibration acceleration

结构层	不同压实遍数(次)的加速度有效值/(m·s ⁻²)			
	1	2	3	4
基层	34.901	36.523	37.269	38.778
下面层	34.143	35.964	36.698	38.518
中面层	37.942	39.888	40.702	42.420

由表 4 和图 15 可以看出,碾压遍数与基层压实度成正比,振动轮加速度也与压实度成正比。得到图 16 中曲线的回归方程为: $y=1.0654x+56.995$, $R^2=0.9002$ 。其中 y 为压实度, x 为加速度。

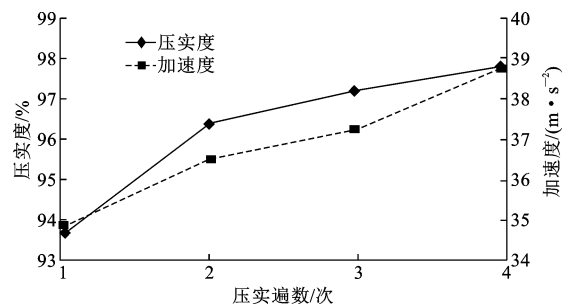


图 15 基层压实度、振动加速度随压实遍数的变化

Fig. 15 Compaction, acceleration change under number of times of compaction of base course

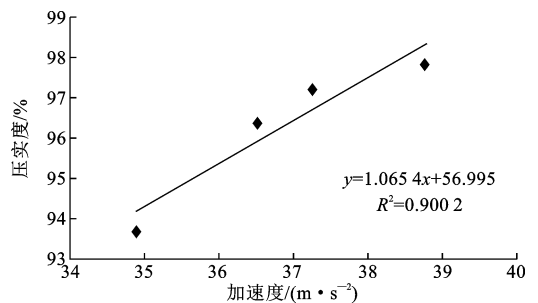


图 16 基层压实度与振动轮加速度的关系

Fig. 16 Relation between compaction and vibration wheel of base course

采用同样方法对下面层、中面层进行分析,得到图 17、图 18 所示的下面层、中面层压实度与振动轮加速度的关系曲线,其压实度与振动轮加速度的回归方程为:下面层 $y = 1.0713x + 57.029$, $R^2 = 0.9340$;中面层 $y = 0.7796x + 65.357$, $R^2 = 0.9314$ 。

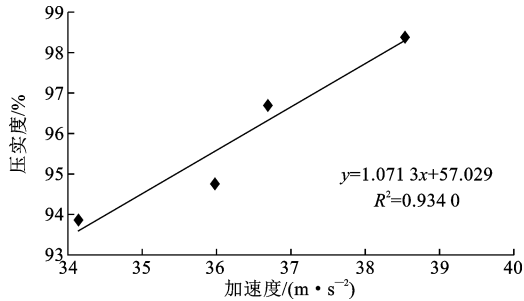


图 17 下面层压实度与振动轮加速度的关系

Fig. 17 Relationship between compaction and vibration wheel of middle surface

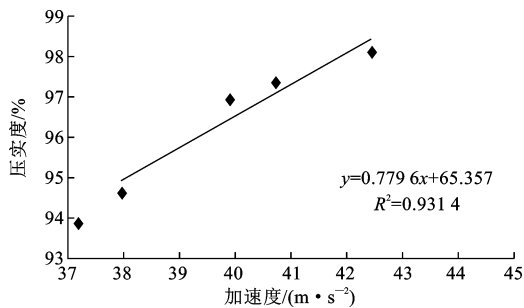


图 18 中面层压实度与振动轮加速度的关系

Fig. 18 Relationship between compaction and vibration wheel of top surface

4 结 语

(1)通过分析振动压路机振动轮与路面压实材料之间的动力学关系,建立了振动压路机-路面系统动力学模型,发现振动加速度与压实材料刚度呈正相关、与阻尼呈负相关的关系。

(2)通过理论分析和现场试验,验证了振动压路机激励信号-加速度有效值与路面各结构层压实度之间存在较好的正相关对应关系,得到其回归公式和相关系数,可应用在实际工程中。

(3)路面压实度连续检测系统可以方便、准确地测量路面压实度,可以实时、有效地控制路面压实质量,提高压实效率,减轻压实度检测工作量,在公路工程中具有广阔的应用前景。

参考文献:

References:

[1] 路 晶,郭 涛. 宝马振动压路机智能压实控制系统

[J]. 筑路机械与施工机械化,2006,23(7):51-53.

LU Jing, GUO Tao. Intelligent compacting control system for BOMAG vibrating compactor[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2006, 23(7):51-53. (in Chinese)

[2] 谭忆秋,王海朋,马韶军,等. 基于光纤光栅传感技术的沥青路面压实监测[J]. 中国公路学报,2014,27(5):112-117.

TAN Yi-qiu, WANG Hai-peng, MA Shao-jun, et al. Asphalt pavement compaction monitoring based on fiber grating sensing technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(5): 112-117. (in Chinese)

[3] 刘志坤,唐小明,朱洪伟. 基于改进谱减法的语音增强研究[J]. 计算机仿真,2009,26(6):363-366.

LIU Zhi-kun, TANG Xiao-ming, ZHU Hong-wei. Speech enhancement based on modified spectral subtraction method[J]. Computer Simulation, 2009, 26(6):363-366. (in Chinese)

[4] 易 飞,曹源文. 小波去噪在振动压路机振动信号处理中的应用[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2011,30(1):162-165.

YI Fei, CAO Yuan-wen. Application and research of wavelet de-noising in the data processing of vibratory roller[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2011, 30(1):162-165. (in Chinese)

[5] 祁隽燕,葛恒安. 振动压路机与振动压实前沿技术[J]. 建筑机械,2002(9):35-38.

QI Jun-yan, GE Heng-an. Frontier technology on vibratory roller and vibratory compaction[J]. Construction Machinery, 2002(9):35-38. (in Chinese)

[6] 归少雄,马丽英,曹源文. 智能型轮胎压路机的探索[J]. 筑路机械与施工机械化,2011,28(8):90-92.

GUI Shao-xiong, MA Li-ying, CAO Yuan-wen. Study on Intelligent tyred roller[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(8): 90-92. (in Chinese)

[7] 李 冰,焦生杰. 振动压路机与振动压实技术[M]. 北京:人民交通出版社,2001.

LI Bing, JIAO Sheng-jie. Vibratory roller and vibratory compaction [M]. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese)

[8] 张润利,贺 杰,刘力松,等. 压实度连续检测系统信号处理的探讨[J]. 河北工业大学学报,2003,32(4):99-102.

ZHANG Run-li, HE Jie, LIU Li-song, et al. Analysis of signal disposal for continuous detector of compaction degree[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2003, 32(4):99-102. (in Chinese)

(下转第 55 页)