

文章编号:1001-7372(2023)12-0022-12

基于探地雷达结构层厚度测量的 钢桥沥青路面车辙评价

王颢奇^{*1}, 冷真², 隋鑫², 张伟光¹, 朱俊清¹, 范剑伟¹

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 香港理工大学 土木与环境工程系, 香港 九龙 999077)

摘要:高温车辙是钢桥沥青路面的主要病害之一,可使用钻芯进行室内试验和现场测试表征;但钻芯取样采集的路面信息极其有限,现场车辙尺和激光剖面仪无法评价由于铺装层内部变形导致的车辙。基于探地雷达的沥青路面结构层厚度测量可进行车辙评价,但车辙导致的层间压缩会因有限的信号分辨率产生测量误差。钢桥面板的金属强反射和天线制式等影响因素尚未得到系统研究,缺乏控制试验验证。探讨了探地雷达在钢桥沥青路面车辙评价的可行性。基于室内加速加载试验条件建立沥青路面和空气耦合天线的数值模型,结果表明2 GHz空气耦合天线净空不超过50 cm可获得最佳测量速度和精度。采集室内加速加载设备不同荷载作用次数下的路面探地雷达电磁波信号,比较数值模拟探地雷达信号与室内实测信号,分析空气耦合天线探地雷达在钢桥面沥青路面反射信号中的特征。针对层间信号重叠,提出了信号重构和自动化厚度测量的非线性梯度下降算法;针对路面不平整度导致的振动效应,使用经验模式分解法进行信号降噪,钻芯取样验证算法的厚度测量精度。结果表明:在室内试验条件下,车辙宽度预测误差为4.9%,SMA层和MA层平均厚度预测误差分别为2.3%和3.8%,上面层SMA层变形大于下面层MA层。因此,使用先进的信号处理方法进行基于探地雷达结构层厚度测量的钢桥沥青路面车辙评价切实可行。

关键词:路面工程;钢桥路面车辙;探地雷达;结构层厚度;无损检测

中图分类号:U416.22

文献标志码:A

Rutting Characterization of Steel-bridge Asphalt Pavement Based on Layer-thickness Profiling Using Ground-penetrating Radar

WANG Si-qi^{*1}, LENG Zhen², SUI Xin², ZHANG Wei-guang¹,
ZHU Jun-qing¹, FAN Jian-wei¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

2. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic
University, Kowloon 999077, Hong Kong, China)

Abstract: Rutting at high temperature is one of the main asphalt pavement distresses on steel-bridge decks, which can be characterized using laboratory tests of in-situ cores or field tests. However, in-situ cores only cover limited pavement areas. A straight edge and laser profiler cannot be used to characterize rutting caused by subsurface layer deformations on the steel bridge. A ground-penetrating radar (GPR) can be implemented for rutting characterization based on layer-thickness profiling. However, rutting can cause layer compression, introducing layer-

收稿日期:2023-07-04

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52308444);江苏省卓越博士后计划项目(340635)

* 作者简介:王颢奇(1991-),男,江苏南京人,副教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:siqiwang@seu.edu.cn。

thickness prediction errors due to the limited signal resolution. The affecting factors such as strong reflections from the bridge deck and antenna specifications have not been thoroughly investigated. This study explores the feasibility of using GPR in such applications. A simulation model of pavement and air-coupled antenna were built based on the accelerated pavement testing (APT) facility. Results showed that an air-coupled antenna with a central frequency of 2 GHz and a maximum height of 50 cm can reach the optimal survey speed and accuracy. GPR signals under different loading cycles were collected using the APT facility, and were compared to the simulation signals to analyze the features of GPR reflection waveforms from the steel-bridge asphalt pavement using the air-coupled antenna. A super-resolution algorithm was developed to reconstruct the thickness of each layer under the effects of partial reflection overlapping and the strong reflection from the steel deck. The empirical mode decomposition approach was applied to remove the vibration effect due to pavement surface roughness. The GPR-predicted thickness results were compared with the in-situ straight-edge and core measurements. Results showed that the rutting width error was 4.9%, and the mean thickness prediction errors of SMA and MA layers were 2.3% and 3.8%, respectively. The SMA layer had larger deformation than the underlying MA layer after loadings. Hence, asphalt-pavement rutting caused by subsurface layer deformations on the steel bridge may be identified by GPR-predicted thickness profiles using advanced signal processing methods.

Keywords: pavement engineering; steel bridge paving rutting; ground-penetrating radar; layer thickness; non-destructive testing

Received 04 July 2023

Funding: National Natural Science Foundation of China (52308444); Jiangsu Funding Program for Excellent Postdoctoral Talent (340635)

* Corresponding author. *E-mail address:* siqiwang@seu.edu.cn.

<https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.12.003>

0 引言

钢桥面通常采用沥青混凝土路面铺装,提高行车舒适性,防止水损坏。在温差和重复交通荷载作用下,沥青铺装层易出现永久变形导致车辙病害^[1-2],影响行车舒适性,严重时引发交通事故。因此,需要定期评估钢桥沥青路面的车辙状况。钢桥面由于温差大,车辙多为失稳性车辙,沥青路面各层均可出现变形。当前常用的车辙检测方法主要包括钻芯室内测试和现场测试 2 种。室内测试通过测量现场不同位置芯样的结构层厚度,获取车辙信息^[3]。但取芯仅覆盖极为有限的路面区域,且具有破坏性,需封闭交通,效率低。现场测试方法包括传统的 3 m 车辙尺和快速的表面激光剖面仪^[4-5],其中车辙尺检测效率较低,覆盖面有限;激光剖面仪可搭载于检测车辆,在交通速度下进行毫米级高分辨率路表车辙轮廓数据采集。上述 2 种方法仅适用于路表车辙

形貌采集,无法获取钢桥沥青路面内部各层的变形信息。

探地雷达是一种探测地下目标和介质异常的近地遥感无损检测技术。通过发射穿透路面结构内部的电磁波,基于反射信号分析结构内部状况,计算路面结构各层厚度,进行车辙评价^[6-8]。通过计算电磁波在路面各层的双程走时和传播速度,可精确计算各层沿测试方向的厚度分布。使用单通道雷达多次扫描或阵列雷达大范围扫描可高效获取全路幅范围内厚度变化信息^[9-11]。基于探地雷达的路面结构层厚度测量已形成标准化的操作流程^[12-13]。使用与目标非接触的空气耦合天线,探地雷达可提供连续、快速、全路幅范围扫描。

基于探地雷达测量的结构层厚度变异性可用于车辙评价。研究表明使用探地雷达进行多测线扫描,获取测线方向横断面不同位置厚度,判断由于内部层间变形导致的车辙,其可行性与精度已通过现

场取芯结果验证^[14-15]。然而,在钢桥沥青路面车辙评价中,探地雷达电磁波信号因金属钢桥面板发生强反射,降低沥青路面反射的信噪比,造成钢桥沥青路面结构层厚度计算误差^[16]。钢桥面的沥青铺装结构层厚度在发生车辙变形时与探地雷达电磁波长相似或小于该波长,导致层间反射信号部分重叠,造成电磁波双程走时和介电常数的计算误差^[17]。同时,道路检测空气耦合天线在该应用中合理的制式和配置(安装高度和中心频率)尚未得到深入研究。中心频率影响最小可测量厚度以及最大探测深度^[15]。安装高度会影响测量速度和横向分辨率^[18]。现有文献中尚未开展基于室内控制试验研究探地雷达在钢桥沥青路面中车辙评价的可行性。

本文研究基于探地雷达的沥青路面结构层厚度测量评价钢桥沥青路面车辙的可行性,可用于现场开展交通速度下的钢桥面车辙测量。通过电磁波有限时域差分数值模拟^[19],使用理想化偶极子天线模拟空气耦合探地雷达天线,分析了影响钢桥面反射信号和厚度预测精确度的因素,包括天线中心频率、天线高度、各层介电常数差异性和厚度。该数值模拟消除现场噪声影响,获取理想工况下钢桥沥青路面信号的各部分组成和形成原因。通过室内加速加载控制试验设备,采集不同荷载作用次数下的路面探地雷达电磁波信号。数值模型中路面结构、天线制式均参考室内控制试验工况,比较数值模拟探地雷达信号与室内实测信号,分析空气耦合天线探地雷达在钢桥沥青路面反射信号中的特征。针对车辙部位层厚小于探地雷达波长导致的低分辨率问题,开发非线性优化算法,自动化分离重叠的探地雷达反射信号,并预测路面内部各层在不同荷载作用次数下的厚度变化。空气耦合探地雷达数据采集过程中由于沥青路面不平整度产生振动效应。由于电磁波在空间传播衰减特性,天线的机械高频振动导致离地高度高频变化,在计算的介电常数和厚度分布中引入高频噪音信号。本研究使用数据驱动的经验模式分解法抑制结构层厚度分布中的振动噪音。现场通过比较探地雷达与现场取芯的厚度预测结果以及车辙尺所测的路面车辙宽度,验证基于探地雷达的钢桥沥青路面内部变形车辙评价的可行性。

1 数值模拟

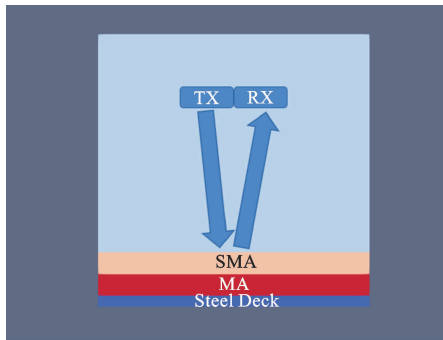
1.1 探地雷达信号

路面车辙可基于探地雷达电磁波反射信号计算的天线-地面距离或各结构层厚度进行评价。空气

耦合探地雷达天线的电磁波辐射模式导致其横向分辨率较低,因此本研究采用基于探地雷达计算的沥青路面结构内部各层厚度进行车辙评价。通过数值模拟,分析影响厚度计算精确度的因素。该数值模拟基于有限时域差分模型,可消除现场测试外部噪声的影响。

1.1.1 数值模型几何和材料信息

该二维模型共 3 层,模拟探地雷达测线方向垂直于轮迹带的数据采集模式,如图 1 所示。数值模型的高度和宽度均为 1.0 m。数值模型中各层几何和电性参数如表 1 所示。模型通过有限差分模拟平台 gprMax 建立,该软件中定义的完全匹配层(PML)作为模型边界防止不必要的反射^[20]。第 1 层和第 2 层模拟了现场室内试验铺装的沥青玛蹄脂(Stone Mastic Asphalt, SMA)和玛蹄脂沥青(Mastic Asphalt, MA)路面,该混合料粗集料多、矿粉多、沥青多、细集料少,具有较好的高温抗车辙、抗滑、施工厚度低等特点,是桥面铺装常用方案。2 层的初始厚度均为 8 cm。第 3 层模拟桥面钢板。模拟的路面为均质材料,该假设下探地雷达的结构层厚度预测精度已在前人研究中得到验证^[7,9-10]。当路面材料为非均质时,基于 gprMax 模拟发现材料非均质性影响电磁波在层间的传播波形,但对于综合介电常数以及电磁波在层间的平均双程走时影响较小,故使用均质模型可在保证模拟精度的同时大幅降低数值模拟计算量^[21-22]。模型假设沥青路面材料为非磁性、非分散性和非导电性,磁导率和电导率值定义为 1 和 0。该假设在探地雷达天线工作带宽范围内有效^[23]。gprMax 中的理想导体(PEC)模拟桥面钢板、即第 3 层材料。模型中除三层材料外定义为空气。



注:TX和RX分别是发射和接收天线。

图 1 数值模型示意

Fig. 1 The Numerical Model

1.1.2 天线

数值模型中模拟空气耦合天线与现场测试设备

表 1 数值模型中各层的特性
Table 1 Layer Properties in the
Simulation Model

模型各层	厚度/cm	介电常数	相对磁导率	电导率/ (S·m ⁻¹)	磁损耗/ (O·m ⁻¹)
空气	80	1	1	0	0
SMA 层	8	4~7	1	0	0
MA 层	8	4	1	0	0
钢桥面板	4	PEC			

一致。该天线类型允许交通速度和非接触式路面数据采集。数值模型中将空气耦合天线简化为一个发射和一个接收偶极子天线,相距 4 cm^[24-26]。数值模拟的步长设置为 2 mm,该步长在前人研究中得到验证,可实现精度和计算效率^[27]。由于天线极化方式对于路面结构层厚度测量影响较小,故将天线模拟为基于电磁偶极子的空气耦合方向性天线,该模拟方法合理性已得到验证^[10]。探地雷达天线测线方向对基于结构层厚度测量的车辙评估精度影响较大。若测线方向与荷载作用方向垂直,基于探地雷达计算的结构层厚分布可观察到车辙形貌;若测线与荷载作用方向平行,则需要多次平行测线数据采集,横向比较结构层厚度分布,判断车辙开展程度。本研究的数值模拟基于室内加速加载试验的测线方向,即与荷载作用方向垂直。

在本研究的室内现场试验和未来高速测量场景中,空气耦合探地雷达天线由于路面不平整度会产生振动噪音,影响结构层介电常数和厚度预测精度。由于路表纹理与 gprMax 模型中网格尺寸相当甚至更小,且难以根据真实路表粗糙度重构模型中路面不平整度,故在室内加速加载试验中仅考虑空气耦合天线的振动效应对于结构层厚度测量精度的影响,并使用数据驱动的经验模式分解法进行振动效应的消除。

1.1.3 电磁波传播时长

基于模型中电磁波的双程走时确定模拟的电磁波传播时长,该时长应大于模型底部反射信号的双程走时,基于式(1)计算

$$t=\frac{2\sqrt{\epsilon}h}{c}$$
 (1)

式中: t 为双程走时; h 和 ϵ 为路面层的厚度和相对介电常数; c 为电磁波在自由空间中的传播速度,为 $3\times10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

式(1)也可基于测得的电磁波在层间的传播时间计算对应层位厚度。根据式(2)和式(3)估计第 1 和第 2 层结构层的介电常数

$$\epsilon_1=\left[\left(1+\frac{A_0}{A_{\text{inc}}}\right)\bigg/\left(1-\frac{A_0}{A_{\text{inc}}}\right)\right]^2$$
 (2)

$$\epsilon_2=\left\{\left[\left(1-\frac{A_0}{A_{\text{inc}}}\right)^2\text{e}^{-\eta_0\frac{\sigma_1t_1c}{2\epsilon_1}}-\left(\frac{A_1}{A_{\text{inc}}}\right)\right]\cdot\left[1-\left(\frac{A_0}{A_{\text{inc}}}\right)^2\right]\text{e}^{-\eta_0\frac{\sigma_1t_1c}{2\epsilon_1}}+\left(\frac{A_1}{A_{\text{inc}}}\right)\right]^{-1}\right\}^2$$
 (3)

式中: ϵ_1 和 ϵ_2 分别为第 1 层和第 2 层的介电常数; A_0 为来自第 1 层的表面反射振幅; A_1 为来自第 1 层和第 2 层之间的界面的反射振幅; A_{inc} 为入射电磁波振幅,通过放置在路面上的金属板的反射获得; η_0 为自由空间的波阻抗; σ_1 为第 1 层的电导率; t_1 为第 1 层中的电磁波的双程走时。

由于沥青混合料电导率为 0,导致式(3)中的项 $\text{e}^{-\eta_0\frac{\sigma_1t_1c}{2\epsilon_1}}$ 为 1。式(2)被称为计算介电常数的表面反射法^[12]。式(3)基于第 1 层来预测第 2 层的介电常数。在使用式(1)~(3)的模型中,SMA 和 MA 层的双程走时为 1.1~1.3 ns。电磁波在空气中的双程走时为 5.3 ns。因此,从模型底部边界开始的电磁波传播时间约为 9 ns,故将电磁波传播总时长设置为 10 ns,确保在信号窗口内获取钢桥沥青路面结构内部所有反射。

1.2 路面反射和金属板标定信号

数值模拟获取的探地雷达电磁波波形表明,耦合脉冲的振幅明显大于路面层间反射振幅。这是由于简化的空气耦合天线中发射器和接收器偶极子缺少电磁屏蔽,掩盖路面层和桥面钢板反射信号,如图 2 所示。与 1 ns 处的耦合脉冲相比,4、6 ns 处的反射几乎不可见。针对该现象,使用整个数值模型域中的自由空间构建了一个额外的模型,称为耦合信号。该信号模拟现场测试中将天线射向天空。通过从路面信号[图 2(a)]中减去耦合信号[图 2(b)],获得路面反射信号,称为解耦路面反射信号,如图 3(a)所示。路面反射波形显示了 SMA 层表面(图 3 中所示反射 1)和 MA 层-桥面钢板界面(图 3 中所示反射 3)的波形。5.3 ns 处的反射 2 来自 SMA 和 MA 层之间的界面,当层厚度等于或小于探地雷达入射信号波长时该界面反射可能消失。9 ns 处的反射 4 来自 SMA 和 MA 层内的反射 3 引起的多次反射。电磁波传播和反射路径如图 3(b)所示。

式(2)中使用的金属板标定信号通过使用 PEC 替换数值模型中的 3 层材料生成。发射器和接收器偶极子定位高度与路面模型相同,模拟天线垂直射向放置在路面表面金属板,获取标定信号工况。

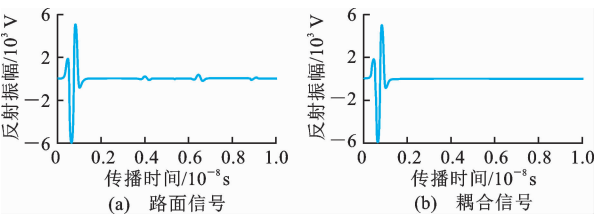


图 2 具有强耦合脉冲的模拟信号波形
Fig. 2 Simulated Signal Waveforms with Strong Coupling Pulses

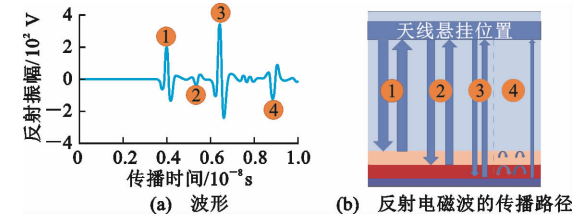


图 3 解耦合路面信号

Fig. 3 Decoupled Simulated Signal

1.3 探地雷达厚度预测精度影响因素分析

探地雷达反射回波信号受天线安装高度、中心频率、沥青层间介电常数差异性和各层厚度等因素的影响。本节研究上述因素对沥青层厚度预测精度的影响。

1.3.1 天线安装高度

探地雷达空气耦合天线的安装高度可能会影响天线离地距离和层厚预测精度^[28]。探地雷达不同供应商的安装要求或探地雷达在高速检测期间的高频振动导致天线高度的变化。在数值模型中考虑从 20~60 cm 的天线-路面距离。图 4 是获得的路面反射和相应天线高度的金属板标定信号。结果表明,不同高度之间的波形是相同的,偏移量约为 0.7 ns,符合电磁波传播规律;基于式(1)可得高度变化 10 cm 导致双程走时变化 0.67 ns。

对于不同频率天线的每个悬挂高度,使用来自各层顶部和底部反射信号之间的双程走时计算 SMA 和 MA 层的厚度,与预设厚度误差如图 5 所示。结果表明,当天线高度增加时,SMA 和 MA 两层的预测误差都会增加。探地雷达天线频率升高,改变悬挂高度导致的层厚计算误差变化更为明显。对于 3 种频率天线,厚度预测在悬挂高度不超过 50 cm 情况下误差较低,这符合喇叭式空气耦合天线的原理,即主瓣能量在路面结构内传播并反射被天线接收^[29]。因此,建议现场测试悬挂高度在 50 cm 之内。

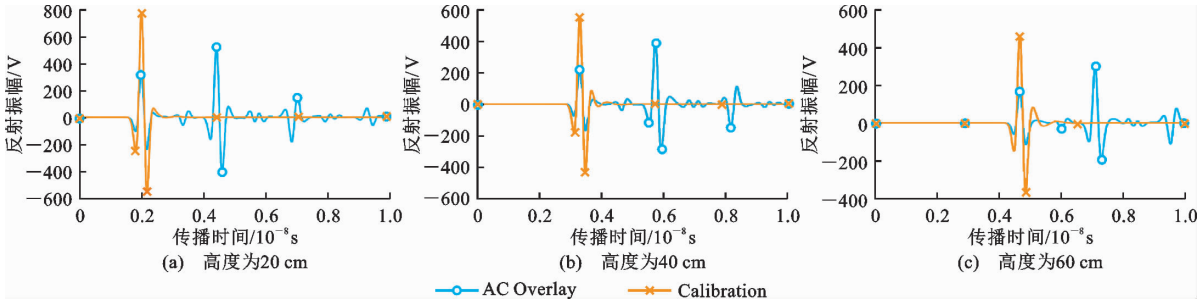


图 4 不同天线安装高度的探地雷达信号波形

Fig. 4 GPR Signal Waveforms Using Antenna Installation Height

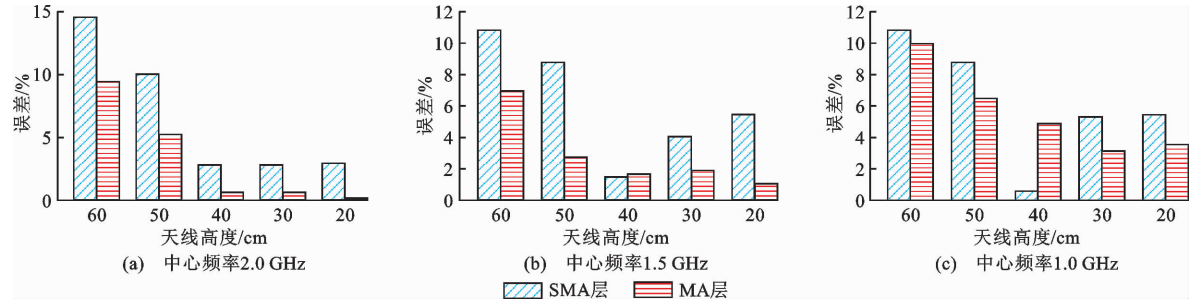


图 5 改变 2、1.5、1 GHz 天线悬挂高度的厚度预测误差

Fig. 5 Thickness Prediction Errors Under Various Antenna Heights Using Antennas with Frequencies of 2 GHz, 1.5 GHz, and 1 GHz

1.3.2 层间介电常数差异性

SMA 层和 MA 层间的介电常数差异性影响界

面反射信号强度,即式(3)中的 A_1 。图 6 显示了路面反射信号。MA 层和 SMA 层的介电常数区间相

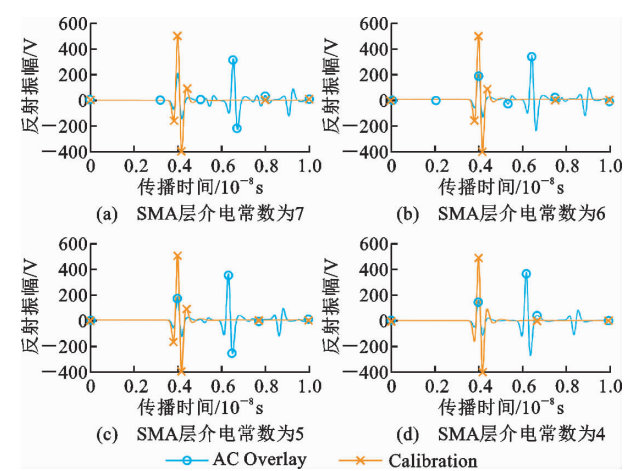


图 6 MA 层介电常数为 4,不同 SMA 层介电常数的路面反射信号

Fig. 6 GPR Signal Waveforms Using MA Dielectric Constant of 4 and Different SMA Dielectric Constants

近,为简化层间介电常数差异性模拟的计算量,假定 MA 层的相对介电常数为 4,SMA 的相对介电常数由 4 变为 7,使得介电常数差在 0~3 波动。天线高度设置为 40 cm,与后文中现场测试悬挂高度一致。图 6(c)、(d)中的波形显示,当介电常数差异性小于 1 时,5.3 ns 的 SMA-MA 界面反射较弱。

图 7 总结了不同 SMA 层介电常数值时的层厚度预测误差。SMA 介电常数值为 4 时,界面反射振幅(A_1)不可见。结果表明:当介电常数差异性小于 1 时,界面反射较弱,导致难以预测每层的厚度;改变 2 层之间的介电常数差异性对 2 层的厚度预测精

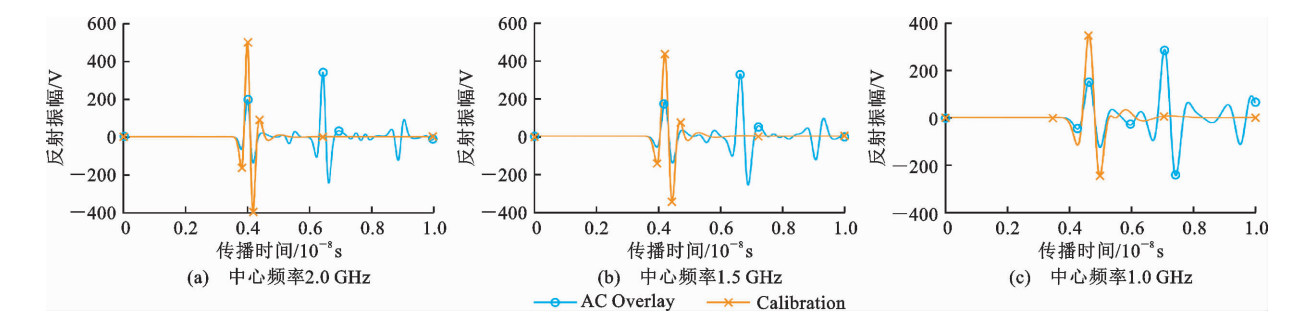


图 8 不同中心频率的电磁波接收信号波形

Fig. 8 GPR Signal Waveforms Using Antennas with Central Frequency

1.3.4 层位设计厚度

基于式(1)~(3)计算层厚时,需获取电磁波在沥青路面各层界面的反射振幅。当层厚等于或小于探地雷达入射信号波长时,层间界面反射出现部分重叠,难以准确获取反射振幅和双程走时,导致介电常数和厚度的预测误差^[17]。在数值模型中,SMA 和 MA 层的厚度设置为 8~5 cm,间隔 1 cm,模拟

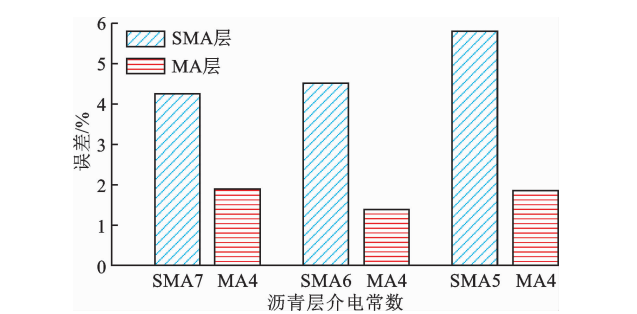


图 7 关于各种 SMA 和 MA 层介电常数差异的厚度预测误差

Fig. 7 Thickness Prediction Errors with Different SMA and MA Layer Dielectric Constant Contrasts

度影响较小,SMA 和 MA 层的平均预测误差分别为 4.8%和 1.7%。

1.3.3 天线中心频率

天线中心频率影响探地雷达入射和反射波信号的波长,从而影响层厚的计算精度。图 8 为 2、1.5、1 GHz 中心频率的探地雷达波形。上述中心频率为路面工程常用探地雷达制式频率^[6]。图 8(c)表明,当中心频率为 1 GHz 时,SMA-MA 界面反射与入射信号部分重叠。图 9 表明,随着天线中心频率的降低,MA 层的预测厚度误差变大。这是由于层间反射随着天线中心频率的降低出现部分重叠,干扰该反射振幅。2 GHz 天线的厚度预测精度最高,且穿透深度达到 1 m,足以覆盖桥面沥青路面厚度。因此,建议使用 2 GHz 作为该应用场景下的中心频率。

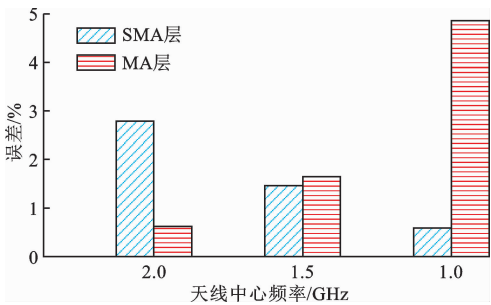


图 9 不同中心频率信号下结构层厚度的预测误差

Fig. 9 Thickness Prediction Errors Under Various Antenna Central Frequencies

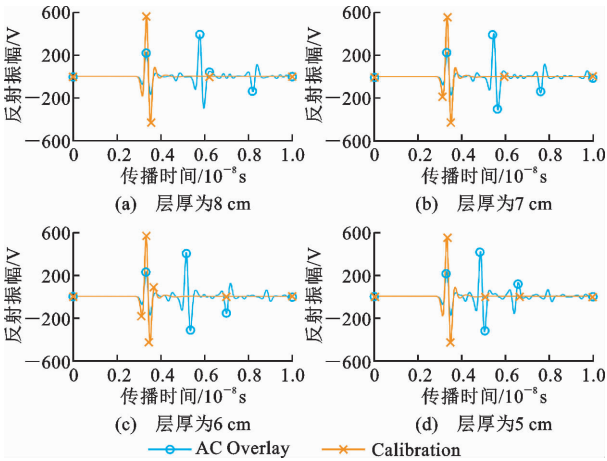


图 10 来自不同层厚 SMA 和 MA 层的探地雷达信号波形

Fig. 10 GPR Signal Waveforms from Different SMA and MA Layer Thicknesses

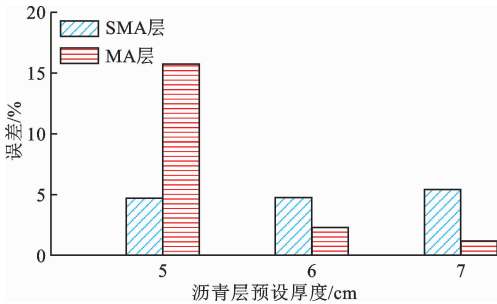


图 11 关于模型中各种预设厚度的预测误差

Fig. 11 Thickness Prediction Errors Under Various Pre-Set Thicknesses

厚度的预测误差。SMA 层的结果不受层厚度的影响,而当层厚度从 6 cm 减小到 5 cm 时,MA 层的预测误差显著增加。因此,建议在厚度小于 6 cm 时,使用超分辨率算法分离部分重叠的层间反射信号。本文使用基于非线性回归的梯度下降法计算部分重叠反射作用下 2 层的介电常数和厚度,在后文现场测试中得到验证。

综上,在钢桥面板金属强反射作用下,基于探地

雷达可预测 SMA 和 MA 层的厚度,通过厚度变化表征车辙。应注意,如果 2 层之间相对介电常数差小于 1,或者厚度与入射信号波长相当或小于入射信号波长,则 SMA 和 MA 层之间的界面反射可能消失。建议使用 2 GHz 空气耦合天线,天线高度建议不超过 50 cm,以确保 SMA 和 MA 层的厚度预测精度。

2 现场试验

2.1 室内加速加载设备

室内修建加速加载试验设施,提供评价钢桥沥青铺装层性能的可控环境。每个加载轮质量为 5 000 kg。加载过程包括若干加载阶段,每个阶段 10 000 转,因此对于同一路面,每次加载阶段轮载作用 20 000 次。2 个 MA 混合料部分上部铺筑旋转 90°的 SMA 混合料部分。因此,整个加载区域分为 4 个部分,每部分上下层不同的 SMA 和 MA 混合料组合,如图 12 所示。MA1/SMA1 和 MA2/SMA2 的沥青含量相差 1%。SMA 和 MA 层的设计厚度均为 4 cm,故钢板底座上方沥青路面铺装层总厚度为 8 cm。根据数值模拟结果,该层厚会导致探地雷达反射信号重叠。

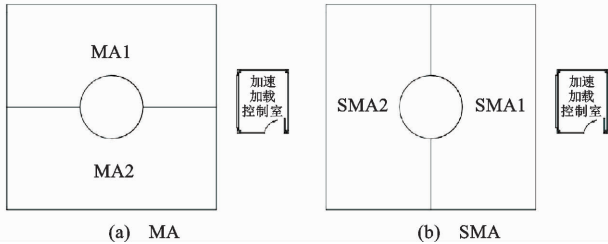


图 12 SMA 和 MA 路面结构区域

Fig. 12 SMA and MA Pavement Section Layouts

2.2 探地雷达和车辙仪数据采集

由地球物理测量系统公司(GSSI)制造的空气耦合探地雷达系统用于室内加速加载设备的数据采集。该系统包括一个 2 GHz 空气耦合天线、控制单元和其他配件,均安装于手推车上,如图 13(a)所示。探地雷达天线安装位置距离地面 40 cm。该高度考虑基于数值模拟的建议安装高度以及现场有限的操作空间^[30]。在收集路面反射信号之前,通过获取平坦路面上的金属板反射获取标定信号,如图 13(b)所示。数据采集定位使用测距轮,采样率为 40 道·m⁻¹,即 2 个连续探地雷达信号之间间隔 2.5 cm。

测试过程中,操作人员步行推动手推车采集探

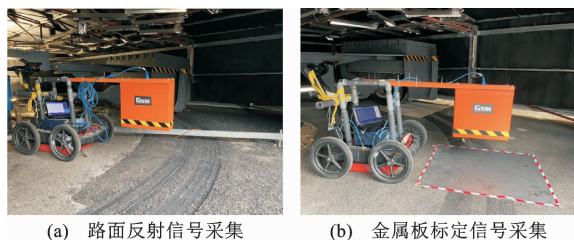


图 13 安装空气耦合探地雷达系统的手推车支架系统

Fig. 13 A Customized Frame Installing the Air-coupled GPR System

地雷达数据。雷达测量路径垂直于加载轮作用轮迹,如图 14 所示。因此,探地雷达与车辙尺测量方向一致,保证车辙区域完全被天线电磁波信号覆盖。在未加载时采集探地雷达和车辙尺数据,而后每个加载阶段,即 20 000 次荷载作用完成后采集数据。获取车辙尺测点与路面的垂直距离作为路表变形剖面,如图 15 所示。需要注意的是,本研究仅分析图 14 中测试路径 1~7 的数据,因为其他部分存在早期严重车辙,需要在加载周期期间进行铣刨和重铺。

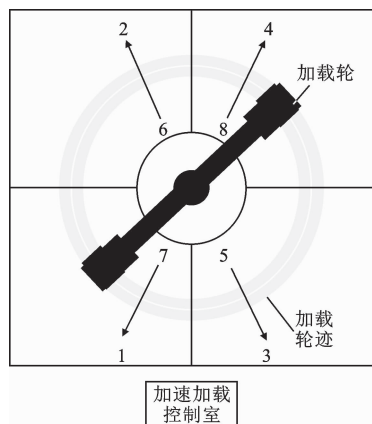


图 14 探地雷达测试覆盖横断面

Fig. 14 GPR Survey Paths

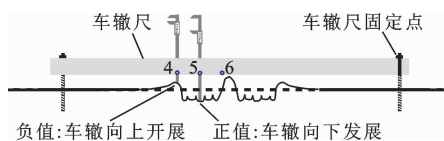


图 15 车辙尺测量路表横断面轮廓示意

Fig. 15 Measurement Points of the Asphalt Pavement Surface Rutting Profile

基于各加载周期与未加载阶段车辙尺测点距离路面的垂直距离变化,可获得各测点的车辙随加载周期变化情况,如图 16 所示,正值表示车辙向下传播。结果表明,车辙在 60 000 次加载前迅速发展。车辙深度峰值位于测点 5 和 8 之间、加载轮印下方。

2.3 探地雷达数据处理

数据采集完成后,探地雷达数据在控制单元中

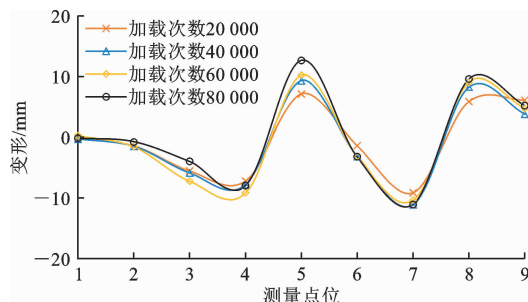


图 16 车辙尺获取的路表变形随加载周期变化曲线

Fig. 16 Rutting Depth Profiles at Each Measurement Point on the Straight Edge

传输至配对的笔记本电脑。使用供应商提供的配套软件将源数据格式转换为 CSV 格式,使用 Python 中的数据处理函数进行信号处理。CSV 文件原始格式为二维矩阵,每个列向量为该位置探地雷达信号,如图 17 所示。该信号波形中含有 2 ns 的耦合脉冲(波形 1)、4.3 ns 的 SMA 层表面反射(波形 2)和 6 ns 的钢板反射(波形 3)。该波形与数值模拟结果吻合。

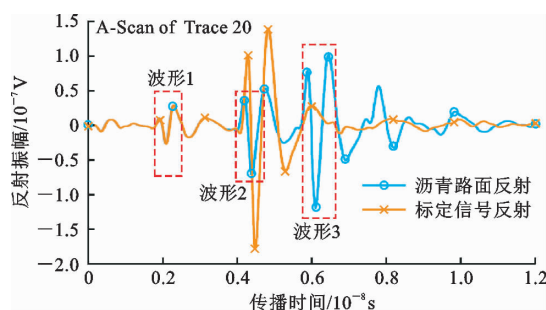


图 17 现场探地雷达路面反射和金属板标定信号

Fig. 17 Collected GPR Signals of Pavement and Calibration Reflections

在路面反射信号中,SMA 和 MA 层在 5 ns 的层间反射信号在图 17(a)中无法识别。这是由于 2 层的设计厚度值为 4 cm,导致部分层间反射重叠。数值模拟结果表明,当层厚小于 6 cm 时,厚度预测误差显著增大。因此,需要分离 SMA 和 MA 层的界面反射信号。

2.4 层厚计算

本文改进文献[26]中提出的非线性优化方法,分离由于天线径向分辨率不足导致的 SMA 和 MA 层部分重叠信号,分别获取 2 层厚度。路面结构反射的探地雷达信号可以假设为线性时不变系统。因此,获取的路面反射信号 $r(t)$ 是缩放和平移后入射信号 $x(t)$ 的叠加^[31]

$$r(t) = \sum_{i=1}^N R_i x(t - \Delta t_i) \quad (4)$$

式中: N 为层间反射个数; R_i 为比例因子, 表示界面 i 处的反射系数; Δt_i 为平移因子, 即从空气-路面界面到界面 i 的电磁波双程走时(TWTT)。

采用非线性优化方法确定 R_i 和 Δt_i , 使重构后的 $r(t)$ 与现场获取的探地雷达信号 $y(t)$ 之间的欧几里得距离最小。由式(4)中 $r(t)$ 与 $y(t)$ 的平方误差生成代价函数 z

$$z = \operatorname{argmin}_{R_i, \Delta t_i} \left\{ \left\| \sum_{i=1}^N R_i x(t - \Delta t_i) - y(t) \right\|^2 \right\} \quad (5)$$

式中: argmin 返回 R_i 和 Δt_i , 它们将代价函数最小化。为了识别代价函数的局部最小值, 使用梯度下降法

$$z^{(n+1)} = z^{(n)} - \gamma \nabla_z C(z) \quad (6)$$

式中: $z(n)$ 为代价函数的第 n 次迭代结果; γ 为步长; $\nabla_z C(z)$ 为代价函数的梯度。

得到的 R_i 和 Δt_i 对入射信号 $x(t)$ 进行缩放和平移, 重建路面反射 $y(t)$ 。采用重构移位因子 Δt_1 、 Δt_2 、 Δt_3 , 以及缩放因子 R_1 、 R_2 计算 SMA 和 MA 层的厚度

$$\epsilon_1 = \left(\frac{1+R_1}{1-R_1} \right)^2 \quad (7)$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_1 \left(\frac{1-R_1^2-R_2}{1-R_1^2+R_2} \right)^2 \quad (8)$$

$$R_1 = A_0 / A_{\text{inc}} \quad (9)$$

$$R_2 = A_1 / A_{\text{inc}} \quad (10)$$

$$h_{\text{SMA}} = \frac{2 \sqrt{\epsilon_1} (\Delta t_2 - \Delta t_1)}{c} \quad (11)$$

$$h_{\text{MA}} = \frac{2 \sqrt{\epsilon_2} (\Delta t_3 - \Delta t_2)}{c} \quad (12)$$

式中: h_{SMA} 和 h_{MA} 分别为 SMA 和 MA 层厚度; A_0 、 A_1 分别为空气-路表界面和 SMA-MA 界面的反射振幅; A_{inc} 为入射电磁波振幅; ϵ_1 和 ϵ_2 分别为 SMA 层和 MA 层的介电常数。

边界条件是保证 $z^{(n)}$ 收敛的必要条件。比例因子 R_i 和移位因子 Δt_i 分别影响对应层介电常数和电磁波双程走时。因此, 采用 3~10 的介电常数值和 1~8 cm 的层厚值来约束优化后的 R_i 和 Δt_i 。该介电常数和层厚值是现场 SMA 和 MA 层的合理区间。沥青混合料的介电常数分布在 4~9, 现场各层的初始和荷载作用后层厚区间在 1~8 cm 内。非线性优化梯度下降算法分离第 1 层和第 2 层部分重叠的探地雷达反射信号, 引用该算法前由于第 1 层与第 2 层的层间反射与第 2 层的底部反射有重叠, 无法直接从雷达图谱中获取准确的界面反射位置和振幅, 故而无法通过信号处理计算第 2 层的介电常数和厚度。图 18 显示了使用该算法后不同加载阶段下计算的 SMA 和 MA 厚度沿轮迹横断面分布。可得到如下结论:

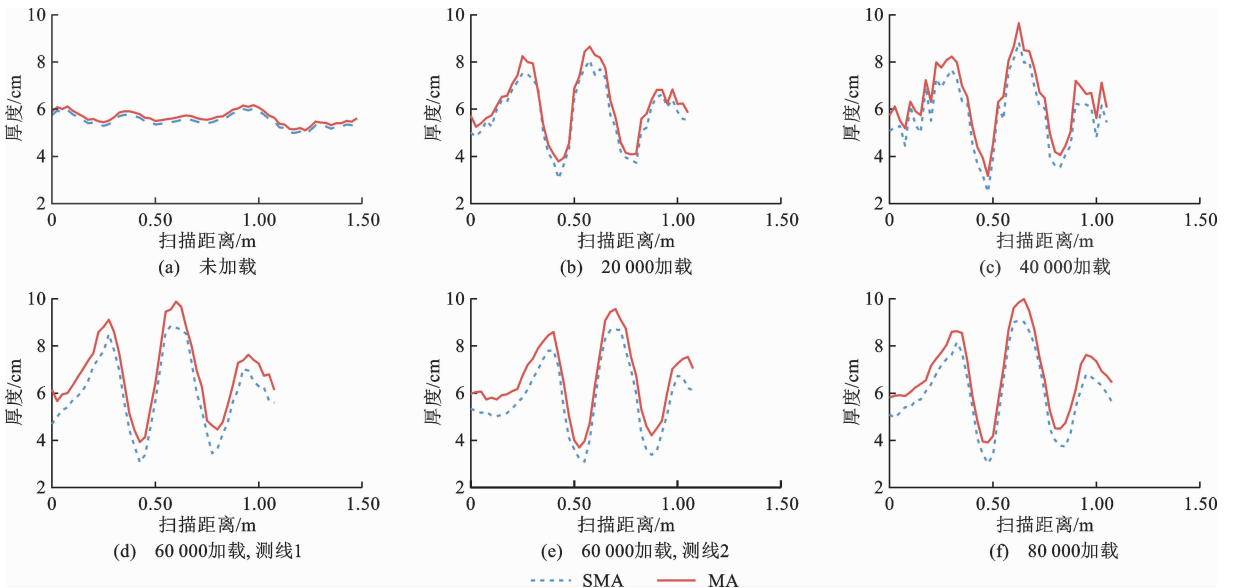


图 18 不同加载次数下基于探地雷达的 SMA 和 MA 厚度沿扫描距离分布

Fig. 18 Thickness Profile Progressions After Different Loadings

(1) 波形中 0.45 m 和 0.75 m 处的局部极小值为加载轮迹下方的车辙。在 60 000 次加载之前, 碗形波形迅速开展, 这与图 16 中直线边缘的测量结

果一致。SMA 和 MA 层之间的厚度差在最大值(0.25、0.65、0.95 m)和最小值(0.45、0.75 m)位置迅速增加。这是由于使用加速加载试验, 加快了沥

青混合料的挤压。此外,加载后 SMA 层厚度下降速度快于 MA 层,这表明探地雷达可用于计算钢桥沥青路面各结构层厚度变化,进而评价路面车辙。

(2)如图 18(d)、(e)所示,在 60 000 次加载下,2 条测线之间观察到最大值和最小值位置存在偏移。这是由于 2 条测线的起始位置偏移造成的,这表明基于厚度测量的车辙评价与探地雷达测线起始点无关,保证现场车辙检测的可重复性。

(3)在图 18(b)、(c)中观察到一个小的锯齿形波形,这是由于路面上的松散集料卡住了探地雷达测量车。这表明路面不平整度导致的车辆和空气耦合天线振动,会影响结构层厚度预测精度。

(4)比较图 16 车辙尺结果和图 18 探地雷达结果,发现荷载次数增加后波峰与波谷位置 2 层的厚度差距最大,峰谷之间(即加速加载双轮中间位置)厚度差距较小。由此可得下承层(本文中 MA 层)与上覆层(本文中 SMA 层)在多次荷载作用下变形的差异性可基于探地雷达获取,以便分析车辙形成原因,指导混合料和路面结构设计。

探地雷达获取的 2 层总厚度平均值为 11 cm,该厚度在后文中得到了现场钻芯取样厚度的验证。这与设计厚度(8 cm)不同,原因是有限的加速加载区域内使用手持式设备无法做到混合料的充分碾压。

图 18 中厚度分布波形存在锯齿状波动,在 20 000 次和 40 000 次加载中较为明显。该波形由测量过程中沥青路面不平整度导致的振动效应所致。电磁波传播过程中反射目标距离接收天线越远,接收电磁反射能量越小。数据采集过程中天线由于高频振动,离地高度出现高频变化,导致接收电磁波能量中出现高频振荡,引入介电常数和厚度结果中的高频噪音。本研究使用的经验模式分解法,消除振动效应,效果已被验证^[26-27]。将图 18 中基于探地雷达计算的结构层厚度分布进行希尔伯特-黄变换,分解为若干内涵模态分量,并根据已有研究中消除振动效应的内涵模态分量级数原则截取低频分量,重构结构层厚度分布,消除振动效应^[26]。希尔伯特-黄变换如式(13)、(14)所示

$$x_a(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (13)$$

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (14)$$

式中: $\hat{x}(t)$ 和 $x_a(t)$ 分别为源信号 $x(t)$ 的希尔伯特-黄变换信号和分析信号,其中分析信号由式(14)获取的分级内涵模态分量,包含以分布曲线包络线形

式的频率变化信息。

图 19 为重构的 40 000 次加载后结构层厚度分布曲线,可以看出锯齿状波形被消除,且波形中波峰波谷的位置和宽度信息得到保留,有效抑制振动效应。后文总结比较了消除振动效应前后探地雷达的结构层厚度预测与现场芯样厚度误差。将探地雷达厚度预测结果得到的车辙宽度与车辙尺测量的加载轮迹带下表面变形宽度进行比较,如图 15 所示。车辙尺位于轮迹带下方的测点 4 与 6 之间的距离为 598 mm。探地雷达预测的车辙宽度通过计算厚度值沿路面横断面碗状波形中 2 个最小值间距离获取。基于探地雷达的车辙宽度与车辙尺获取车辙宽度的平均误差为 4.9%。该误差来源于信号采集过程中有限的横向采样率,即厚度分布曲线 2 个相邻数据点距离。提高探地雷达横向采样率,厚度分布中相邻数据点之间的空间距离缩短,可提高厚度分布测量精度,降低车辙宽度预测误差。

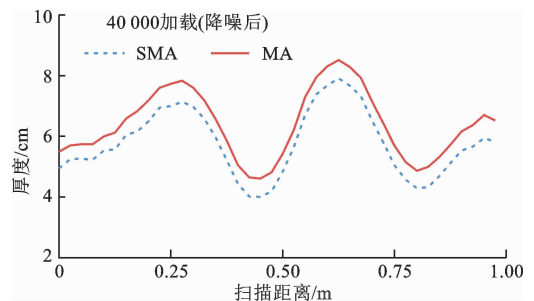


图 19 使用经验模式分解法消除振动效应后的 SMA 和 MA 层厚沿扫描距离分布(40 000 次加载)

Fig. 19 Predicted SMA and MA layer Thickness Profiles After Removing the Vibration Effect Using the Empirical Mode Decomposition Approach (40 000 Loadings)

2.5 现场厚度测量验证

通过比较现场探地雷达与钻芯取样获取的沥青路面结构层厚度进行验证。在 4 个位置进行数据采集和厚度计算,对应位置天线正下方钻芯,如图 20(a)所示。由于部分钻芯位置车辙开展较大,无法钻取完整的芯样,故通过测量钻芯位置内壁层厚度进行层厚测量,如图 20(b)所示。SMA 和 MA 厚度预测误差总结如图 21 所示。结果表明,消除振动效应后结构层厚度计算误差下降。在取芯位置,SMA 层的平均预测误差由 4.1% 下降到 2.3%,MA 层的平均预测误差由 5.2% 下降到 3.8%。上述结果表明,探地雷达测量过程中的振动效应可使用经验模式分解法消除,以提高结构层厚度预测精度。厚度沿道路横断面变化曲线可提供车辙位置、宽度和深度信

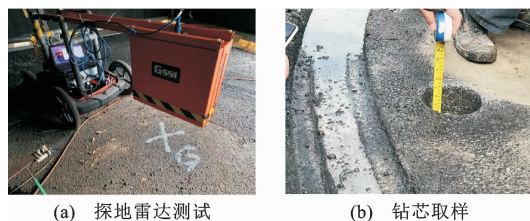


图 20 现场探地雷达厚度测量验证

Fig. 20 Field Validations

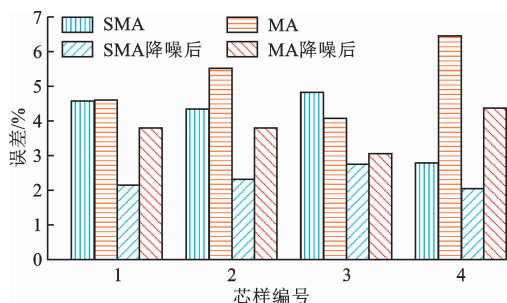


图 21 振动效应消除前后探地雷达预测与芯样厚度误差

Fig. 21 Thickness Predictions Errors from GPR

Compared to In-situ Cores Before and After

Removing the Vibration Effect

息,提供车辙成因分析,相较于路表激光剖面仪可获得钢桥面铺装内部变形信息。

3 结 语

本文研究了基于探地雷达预测的钢桥沥青路面结构层厚度,进行车辙评价的可行性,使用有限时域差分模型,基于 gprMax 软件平台进行数值模拟,使用室内加速加载设备进行现场试验验证。结论如下:

(1)钢桥沥青路面由于内部层厚变化引起的车辙,可通过基于探地雷达的结构层厚度测量进行识别。可以使用本研究提出的非线性梯度下降算法,进行部分重叠反射信号的分离和各层厚度的计算。在钢桥面金属板强反射作用下沥青路面层间反射可见,提出的算法可分离厚度小于 6 cm 的重叠信号,进行结构层厚度计算。

(2)基于探地雷达预测的钢桥沥青路面结构层厚度可同时评价车辙深度、宽度和位置。沥青层厚分布不受探地雷达测线起始位置影响,证明使用探地雷达进行多测线扫描提供现场全路幅二维厚度测量的可行性。探地雷达的车辙宽度预测误差为 4.9%,提高探地雷达数据采集的横向采样率可提高基于结构层厚测量的车辙宽度预测精度。

(3)现场试验表明,多次加载后沥青结构层厚度

出现变化,上层 SMA 变形大于下层 MA。空气耦合天线数据采集过程中由于路表不平整度导致的振动效应,影响结构层厚计算精度,基于数据驱动的经验模式分解方法可有效抑制振动效应。与现场芯样比较,振动效应降噪后 SMA 层的平均预测误差由 4.1% 下降到 2.3%,MA 层的平均预测误差由 5.2% 下降到 3.8%。

(4)现场建议使用空气耦合脉冲雷达或阵列雷达系统进行多测线的数据采集。空气耦合天线建议使用离地高度不超过 50 cm 的 2 GHz 制式达到最佳的分辨率、足够的穿透深度和高速测量。探地雷达可提供快速、大覆盖面的钢桥面车辙信息采集,获取重复多次荷载作用下不同层位变形的差异性,同时与路表病害调查方法如激光剖面仪、高清相机等结合,提高车辙评价的准确性和完整性,分析车辙形成原因,指导钢桥面铺装层设计和养护决策。

本文使用的有限时域差分数值模拟分辨率较低,后续研究将使用高分辨率数值模拟方法探讨探地雷达在本文场景下多因素影响作用下的可行性;由于室内试验沥青路面材料和探地雷达设备限制,本文只讨论了上层 SMA、下层 MA 的常规钢桥沥青路面结构形式,后续可开展不同混合料类型、层厚、探地雷达制式、测试工况在本文场景中的研究。

参考文献:

References:

- [1] JIA X Y, HUANG B S, CHEN S J, et al. Comparative investigation into field performance of steel bridge deck asphalt overlay systems [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20 (7): 2755-2764.
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2020 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66. Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's pavement engineering Research: 2020 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (10): 1-66.
- [3] WALUBITA L F, ZHANG J, DAS G, et al. Hot-mix asphalt permanent deformation evaluated by Hamburg wheel tracking, dynamic modulus, and repeated load tests [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012 (2296): 46-56.
- [4] ASTM E 1703, Standard test method for measuring rut-depth of pavement surfaces using a straight edge [S].
- [5] ZHANG D J, ZOU Q, LIN H, et al. Automatic pavement defect detection using 3D laser profiling technology [J]. Automation in Construction, 2018, 96: 350-365.
- [6] 杜豫川, 岳光华, 刘成龙, 等. 探地雷达多特征融合的城市空洞自动识别方法 [J]. 中国公路学报, 2023, 36(3): 108-119. DU Yu-chuan, YUE Guang-hua, LIU Cheng-long, et al.

- Research on automatic detection of urban cavity based on multi-feature fusion of GPR [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36 (3): 108-119.
- [7] SOLLA M, PÉREZ-GRACIA V, FONTUL S. A review of GPR application on transport infrastructures: Troubleshooting and best practices [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13 (4): 672.
- [8] WANG S Q, LENG Z, ZHANG Z Y, et al. Automatic asphalt layer interface detection and thickness determination from ground-penetrating radar data [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 357: 129434.
- [9] 王大为,吕浩天,汤伏蛟,等. 基于三维探地雷达的沥青路面层间接触状态智能诊断技术[J]. *北京工业大学学报*, 2022, 48 (6): 572-579.
- WANG Da-wei, LV Hao-tian, TANG Fu-jiao, et al. Intelligent detection technology of contact state between asphalt pavement layers based on 3D ground penetrating radar technology [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2022, 48 (6): 572-579.
- [10] AL-QADI I L, LAHOUE S. Measuring layer thicknesses with GPR - Theory to practice [J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19 (10): 763-772.
- [11] WANG S Q, ZHAO S, AL-QADI I L. Continuous real-time monitoring of flexible pavement layer density and thickness using ground penetrating radar [J]. *NDT & E International*, 2018, 100: 48-54.
- [12] 王大为,吕浩天,汤伏蛟,等. 三维探地雷达道路隐性病害检测分析与数字化技术综述[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(3): 1-19.
- WANG Da-wei, LV Hao-tian, TANG Fu-jiao, et al. Road structural defects detection and digitalization based on 3D ground penetrating radar technology: A state-of-the-art review [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(3): 1-19.
- [13] DE COSTER A, VAN DER WIELEN A, GRÉGOIRE C, et al. Evaluation of pavement layer thicknesses using GPR: A comparison between full-wave inversion and the straight-ray method [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 168: 91-104.
- [14] ASTM D4748, Standard test method for determining the thickness of bound pavement layers using short-pulse radar [S].
- [15] HONG F, CHEN D. Evaluation of asphalt overlay permanent deformation based on ground-penetrating radar technology [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2016, 44(4): 20130241.
- [16] TOSTI F, BENEDETTO A, CIAMPOLI L B, et al. Prediction of rutting evolution in flexible pavement life cycle at the road network scale using an air-launched ground-penetrating radar system [C] // IEEE. 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). New York: IEEE, 2016: 1-7.
- [17] DINH K, GUCUNSKI N, TRAN K, et al. Full-resolution 3D imaging for concrete structures with dual-polarization GPR [J]. *Automation in Construction*, 2021, 125: 103652.
- [18] WANG S Q, ZHAO S, AL-QADI I L. Real-time density and thickness estimation of thin asphalt pavement overlay during compaction using ground penetrating radar data [J]. *Surveys in Geophysics*, 2020, 41 (3): 431-445.
- [19] WAI-LOK LAI W, DÉROBERT X, ANNAN P. A review of ground penetrating radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis [J]. *NDT & E International*, 2018, 96: 58-78.
- [20] PLATI C, LOIZOS A, GKYRTIS K. Assessment of modern roadways using non-destructive geophysical surveying techniques [J]. *Surveys in Geophysics*, 2020, 41 (3): 395-430.
- [21] WARREN C, GIANNPOULOS A, GIANNAKIS I. GPRMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar [J]. *Computer Physics Communications*, 2016, 209: 163-170.
- [22] CAO Q Q, AL-QADI I L. Development of a numerical model to predict the dielectric properties of heterogeneous asphalt concrete [J]. *Sensors*, 2021, 21 (8): 2643.
- [23] WANG D W, YE C S, LV H T, et al. Dielectric model of asphalt pavement materials towards the future electrified road [J]. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2023, 381 (2254): 20220164.
- [24] GEDNEY S D. An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996, 44 (12): 1630-1639.
- [25] PLATI C, LOIZOS A, GKYRTIS K. Integration of non-destructive testing methods to assess asphalt pavement thickness [J]. *NDT & E International*, 2020, 115: 102292.
- [26] SHANGGUAN P C, AL-QADI I L. Calibration of FDTD simulation of GPR signal for asphalt pavement compaction monitoring [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53 (3): 1538-1548.
- [27] WANG S Q, AL-QADI I L. Impact and removal of ground-penetrating radar vibration on continuous asphalt concrete pavement density prediction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-14.
- [28] WANG S Q, AL-QADI I L, CAO Q Q. Factors impacting monitoring asphalt pavement density by ground penetrating radar [J]. *NDT & E International*, 2020, 115: 102296.
- [29] FRID A, FRID V. Features of a large-scale survey of highways with georadar [C] // Springer. *Lecture Notes in Civil Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2021: 851-860.
- [30] VALLE S, ZANZI L, SGHEIZ M, et al. Ground penetrating radar antennas: Theoretical and experimental directivity functions [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39 (4): 749-759.
- [31] SUI X, WANG S Q, LENG Z, et al. Clogging evaluation of porous asphalt pavement using ground-penetrating radar [J]. *Measurement*, 2023, 216: 112939.