基于探地雷达的沥青面层压实度检测可行性分析

任仲山，马 辉

（江苏高速公路工程养护技术有限公司道路技术部，南京 211106）

摘要：为探讨探地雷达技术在沥青面层压实度无损检测中的可行性，通过选择合适的天线频率（1 600 MHz），系统地研究了天线高度、试件底部介质、试件尺寸限制及试件密度波动对沥青面层压实度检测精度的影响。室内试验建立了基于介电混合模型的沥青混合料密度预估模型，并通过现场试验进行验证。结果表明，模型的平均预估误差为0.77%，有效证明了该技术在沥青面层压实度无损检测中的可靠性，为沥青路面施工及维护提供了技术支持。

关键词：道路工程；沥青面层；压实度检测；探地雷达；介电常数；可行性

中图分类号：U418.6 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2024)22－0264－08

沥青路面施工的压实度是我国公路建设和验收过程中的关键质量控制指标，良好的压实度可以显著提高路面的抗渗性能和对长期车辆荷载的耐受性能，延长路面使用寿命，欠压或过压则会导致一系列早期病害，如渗水、坑槽、泛油和车辙等，严重影响路面性能和寿命。目前，常用的压实质量检测方法主要有两种：一种是通过钻取芯样进行密度测量，这种方法虽准确但会对路面造成破坏；另一种是使用成本高昂的核子密度仪，由于其使用放射性物质，在国内的应用并不广泛。

探地雷达技术作为一种电磁波勘探技术，以其高效、连续、无损、低成本等特点，已经成为道路无损检测技术的重要组成部分，在路面病害检测方面具有广阔的发展前景[1]。该技术向路面发射高频电磁波，还可以通过接收路面材料差异产生的反射信号特征，建立沥青面层介电常数和密度之间的关系，实现沥青面层密度的无损检测[2-3]。

然而，由于路面材料和结构的多样性以及内部介质对电磁波的强烈衰减，构建精确的密度预估模型仍面临技术挑战。为此，各国学者进行了大量研究，试图通过建立统计函数或理论关系模型解决这一问题，其中统计函数数学表达简单，但需要在室内成型不同压实度的沥青混合料，测量其密度和介电常数用于标定函数关系中的回归系数。理论关系模型基于混合料理论，数学表达较统计函数关系更为复杂，虽然绝大数参数可通过混合料设计参数获得，但很少有人使用实际沥青和集料的介电常数进行模型拟合，实际应用中的环境、材料特性及检测方式的多变性也使得这些模型的精确度有待提高[4-5]。因此，本文旨在通过室内试验和现场验证，优化理论关系模型，开发一套完整的数据分析流程，包括数据采集、信号处理和模型验证，为沥青路面的压实度检测提供全面而准确的技术方案，提高探地雷达技术在沥青面层压实度检测中的实用性和准确性，为沥青路面压实度的无损检测提供理论依据和技术支持。

1 设备选型及检测原理

1.1 天线选择

探地雷达天线作为探地雷达的重要组成部分，直接影响着探测深度和探测精度。探地雷达天线按耦合方式分类，可以分为空气耦合天线和地面耦合天线。其中地面耦合方式由于采用紧贴地面的检测方式，减少了空气层对电磁波的干扰，检测效果更佳，但考虑到现场应用场景为碾压过程中的压实度快速检测，采用地面耦合方式会与路面产生较大摩擦，从而对设备及碾压面造成破坏，因此选择空气耦合的方式开展试验检测工作。

探地雷达天线根据发射、接受电磁波方式的差异，通常分为喇叭式天线和屏蔽式天线两种。其中喇叭式天线信号发射接收范围广，能够在地面较远的距离（0.5～1 m）开展快速检测，但空气耦合天线由于离地距离较高，发射接受信号范围较广，较容易受到周围环境的影响。屏蔽式天线发射接受信

收稿日期：2024-06-14

作者简介：任仲山（1990—），男，山东济宁人，博士，工程师，研究方向为道路无损检测；马辉（1987—），男，江苏宜兴人，博士，高级工程师，研究方向为道路无损检测。

号较为定向不易受到周围环境的影响,抗干扰能力强,虽然要求距离地面较近(<10 cm),对设备的工程实际应用存在一定影响,但可以通过室内试验确定合适的压实度检测高度。

路用探地雷达天线的中心频率一般为 500~2 000 MHz,根据雷达波传播理论,天线频率越高,空间垂直分辨率越高但电磁波能量衰减越严重,即探测精度高但探测深度浅。考虑到路面压实度检测时仅针对施工层位(上面层一般为 4 cm),因此不需要太深的探测深度,而需要较高的探测精度从而更有效地提高检测数据质量。空间最小垂直分辨率 ΔR 计算如公式(1)所示,表 1 为三种常见的探地雷达天线频率对比,均衡考虑探测精度和深度要求,宜选用中心频率为 1 600 MHz 的探地雷达进行检测。

$$\Delta R = v/4f_c = \lambda/4 \tag{1}$$

式中:f_c 为雷达中心频率;v 为电磁波在真空中的传播速度;λ 为波长。

表 1　不同天线频率的检测效果对比

天线频率 f_c /MHz	波长 λ / cm	空间最小垂直分辨率 ΔR /cm	衰减程度	探测精度
1 000	30	7.5	慢	低
1 600	18.75	4.69	较慢	较高
2 000	15	3.75	快	高

1.2　压实度检测原理

沥青路面最大理论压实度是由沥青混合料的毛体积密度与最大理论密度之比计算得到,当混合料配合比一定时,最大理论密度恒定不变,因此沥青混合料毛体积密度是压实度检测的关键指标。虽然探地雷达不能直接获取路面密度、压实度等指标,但由于面层密度的差异会引起材料介电常数的差异,进而反映不同的反射波特征尤其是反射波最大振幅值。因此,实现压实度检测的整体思路是通过探地雷达采集路面反射波最大振幅,根据振幅数据计算混合料介电常数,进一步建立介电常数与密度之间的数学关系,最后根据相应的数学模型计算路面压实度,如图 1 所示。

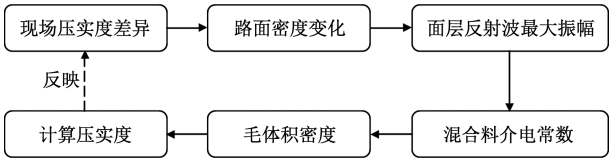


图 1　沥青面层压实度检测原理

1.2.1　沥青混合料密度预估模型

沥青混合料是一种复合材料,主要由集料、沥青和空气混合而成,以固相、液相和气相组成的多相体存在。当非均质混合材料的组分尺寸相对电磁波的波长较小时,组分的散射效应忽略不计,可将混合料视为均质的,此时满足麦克斯韦-加内特混合规则使用条件。

基于广义介电混合模型,将连续相沥青作为背景介质,散射体矿料和空气空隙均匀分布于背景介质,则沥青混合料的理论密度预估模型如式(2)所示。

$$\gamma_f = \left[\frac{\varepsilon_{AC}-\varepsilon_b}{(1+v)\varepsilon_{AC}+(u-v)\varepsilon_b} - \frac{1-\varepsilon_b}{1+(u-v)\varepsilon_b+v\varepsilon_{AC}}\right] \Big/ \left[\frac{\varepsilon_S-\varepsilon_b}{\varepsilon_S+(u-v)\varepsilon_b+v\varepsilon_{AC}}\frac{1-P_b}{\gamma_{se}} + \frac{1-\varepsilon_b}{1+(u-v)\varepsilon_b+v\varepsilon_{AC}}\frac{1}{\gamma_t}\right] \tag{2}$$

式中:γ_f、γ_t、γ_{se} 分别是沥青混合料毛体积的相对密度、理论最大相对密度和集料有效相对密度;ε_{AC}、ε_b、ε_S 分别是沥青混合料介电常数、沥青介电常数和集料介电常数;P_b 为沥青用量;u 为组分散射体形状因子;v 为相邻散射体间的影响系数。

瑞雷混合模型假定散射体统一为球形,即 $u=2$,且只考虑组分的一维散射,即 $v=0$;ALL(Al-Qadi Lahouar Leng)模型基于波特切尔混合模型($v=2$),并通过最小二乘法回归分析确定了形状因子 $u=-0.3$[6];ISO(influence coefficient and shape factor optimization)模型通过不同类型沥青混合料介电特性试验数据的优化分析,确定适用于悬浮密实结构的沥青混合料密度预估的影响系数 $v=5.1$ 和形状因子 $u=-4.5$[7]。

综上,现有预估模型认为路面材料是由沥青、集料和空气组成的三相复合材料,并没有考虑矿粉、纤维等外掺剂。因此,为了进一步修正模型,假设矿粉、纤维能够完全溶于沥青中,通过测量沥青胶浆的介电常数来替代公式中沥青的介电常数,对现有公式进行修正,修正后模型如式(3)所示。

$$\gamma_f = \left[\frac{\varepsilon_{AC}-\varepsilon_{Am}}{(1+v)\varepsilon_{AC}+(u-v)\varepsilon_{Am}} - \frac{1-\varepsilon_{Am}}{1+(u-v)\varepsilon_{Am}+v\varepsilon_{AC}}\right] \Big/ \left[\frac{\varepsilon_S-\varepsilon_{Am}}{\varepsilon_S+(u-v)\varepsilon_{Am}+v\varepsilon_{AC}}\frac{1-P_b}{\gamma_{se}} + \frac{1-\varepsilon_{Am}}{1+(u-v)\varepsilon_{Am}+v\varepsilon_{AC}}\frac{1}{\gamma_t}\right] \tag{3}$$

式中：ε_{Am} 为沥青胶浆介电常数；P_{Am} 为沥青胶浆用量。

1.2.2　介电常数检测方法

目前测量沥青面层介电常数主要有厚度反算法、共中心点法和金属板反射法三种方法。其中，厚度反算法假设沥青面层的各测点厚度一致，但现实中由于施工变异性，可能导致检测误差。共中心点法通过不同间距的天线收发反射信号差异计算介电常数，但设置工况复杂，不利于施工检测。金属板反射法则通过标定后，使用全反射波形与实时反射波形计算介电常数，不受厚度波动影响，适合进行连续性检测，其主要利用金属的高电导率能够抵消入射波并导致其全反射的原理，通过界面介电常数变化造成的反射系数 R 的差异，进而计算沥青混合料介电常数 ε_2，如式(4)和式(5)所示。

$$R=\frac{\sqrt{\varepsilon_1}-\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1}+\sqrt{\varepsilon_2}}=-\frac{A_0}{A_p} \tag{4}$$

$$\varepsilon_2=\left(\frac{1+A_0/A_p}{1-A_0/A_p}\right)^2 \tag{5}$$

式中：ε_1 为空气介电常数，其值为 1；A_0 为沥青面层最大反射振幅，在检测中通过雷达采集获取；A_p 为金属板最大反射振幅，在检测前进行标定试验获取。

2　压实度检测方案

为探究探地雷达在工程实践中准确评估沥青路面压实质量的可行性，采用室内外试验相结合的方式，室内通过制备混合料试件建立介电常数与毛体积密度之间的关系模型，现场通过取芯对模型预估精度进行验证。

2.1　室内检测方案

2.1.1　雷达检测高度

雷达发射器发射电磁波时，一部分电磁波传播到路表反射至接收器，形成反射波；一部分电磁波则会直接到达接收器，形成直达波，如图 2 所示。当天线离路表距离过近时，直达波会与反射波产生重叠干扰反射波波形特征；当距离过远时，电磁波的衰减则会造成反射波信号变弱。

采用高度可调节的透明框架盒，将 1 600 MHz 雷达天线置于金属板上方不同高度处，采用时间模式进行采集，如图 3 所示。不同检测高度的单道波波形如图 4 所示，当检测高度为 0 cm 时，存在明显的电磁波叠加现象；当检测高度为 19 cm 时，两波波峰明显分离，但依旧存在小部分叠加，当检测高度达到 30 cm 时，叠加现象消失。

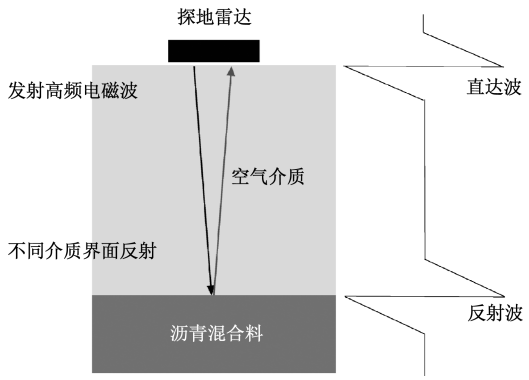


图 2　雷达回波信号示意图

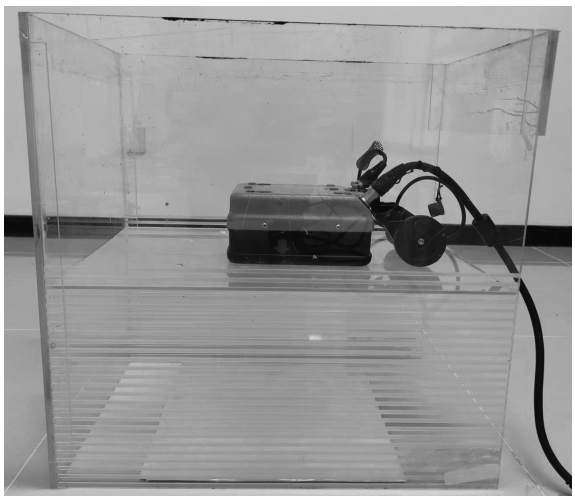


图 3　雷达检测高度试验

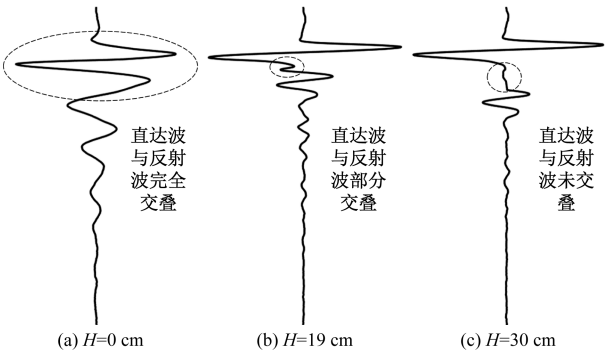


图 4　不同检测高度时的单道波

以 1 cm 为增量，将天线高度从 19 cm 逐渐增加到 30 cm，研究反射波峰值随天线高度的变化趋势，如图 5 所示，可以看出，当高度小于 21 cm 时界面反射波存在小部分波形叠加问题，导致反射波振幅明显偏大；当高度从 25 cm 升到 30 cm 时，振幅大小呈下降趋势，这是由于电磁波衰减增加，导致的能量耗散；21～25 cm 范围内反射波振幅波动不明显，因此宜采用(23±2)cm 作为天线检测高度(表 2)。

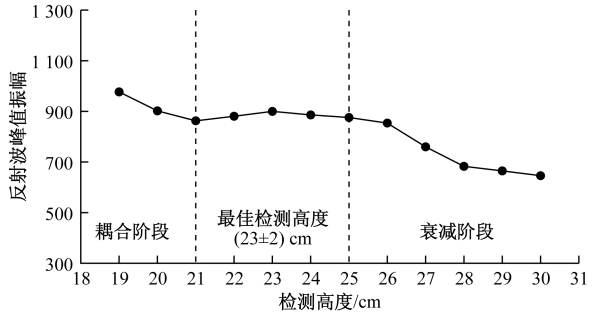


图 5　反射波峰值随检测高度变化

表 2　不同检测高度最大振幅及时间

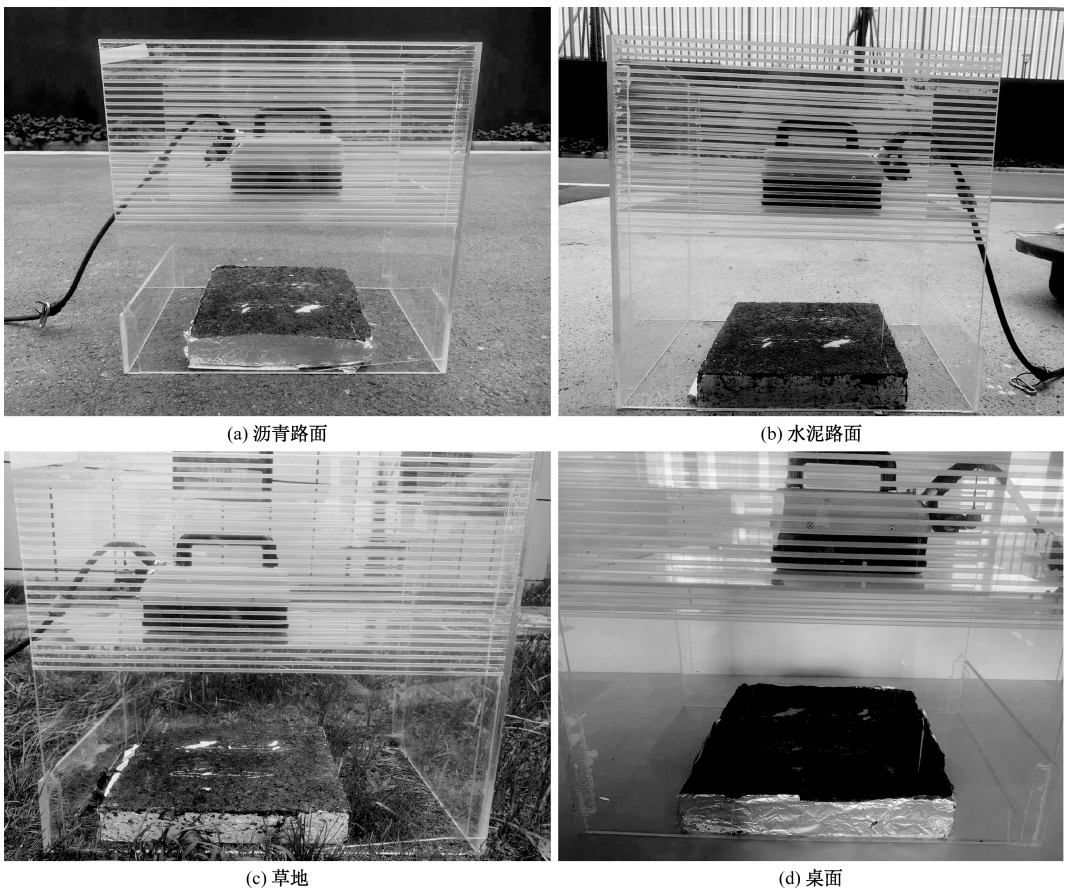
检测高度/cm	直达波峰值	直达波峰值时间/ns	反射波峰值	反射波峰值时间/ns	时差/ns
19	2 373	0.33	937	1.55	0.610
20	2 375	0.33	912	1.58	0.625
21	2 359	0.33	863	1.65	0.660
22	2 355	0.33	881	1.73	0.700
23	2 351	0.33	900	1.80	0.735
24	2 364	0.33	886	1.86	0.765
25	2 320	0.33	876	1.93	0.800
26	2 356	0.32	854	2.00	0.840
27	2 348	0.33	760	2.07	0.870
28	2 365	0.32	683	2.13	0.905
29	2 337	0.33	665	2.20	0.935
30	2 352	0.32	646	2.28	0.980

2.1.2　试件底部介质

在室内试验中,考虑到混合料试件与现场沥青上面层底部材料(中面层或应力吸收层)的区别,探究在不同底部材料介质对路面反射波最大振幅的影响。图 6 为试件分别放置在沥青路面、水泥路面、草地以及桌面上的检测场景,其中草地上测得的平均振幅最低,变异系数最大,这可能是由于草地表面的粗糙程度较大导致反射信号接收减弱导致的。对比 4 种振幅数据可知,试件底部材料介质的变化对反射波振幅有一定影响,为保证测量准确性,应将混合料试件放置在沥青路面进行测试(表 3)。

表 3　不同底部材料介质试件振幅数据

底部材料	沥青路面		水泥路面		草地		桌面	
试验次数	振幅	时间/ns	振幅	时间/ns	振幅	时间/ns	振幅	时间/ns
1	494	1.81	484	1.82	459	1.8	501	1.82
2	493	1.79	477	1.82	472	1.8	497	1.82
3	478	1.81	505	1.83	467	1.8	492	1.81
4	477	1.79	491	1.82	501	1.8	486	1.81
5	494	1.81	525	1.80	510	1.77	489	1.81
平均值	487.2	1.802	496.4	1.818	481.8	1.794	493	1.814
变异系数/%	1.82	—	3.84	—	4.64	—	1.23	—



(a) 沥青路面　(b) 水泥路面

(c) 草地　(d) 桌面

图 6　不同底部材料介质试件振幅采集

2.1.3　试件尺寸限制

由于试件尺寸的限制(标准车辙板尺寸为 300 mm×300 mm),电磁波实际覆盖范围大于单块试件尺寸。当测点位置靠近试件边缘时,会导致电磁波透过试件表面后,在试件侧壁发生反射,与路面反射波发生重叠,进而影响路面反射波振幅。在振幅采集时,除了正下方车辙板提供的大部分反射信号,周围地面也会提供小部分反射信号,这会造成室内振幅测值与现场振幅测值的偏差,如图 7 所示。为了提高室内模型的可靠性,采用 9 块试件拼制成大车辙板进行振幅数据采集,以模拟实际路面环境,如图 8 所示。

2.1.4　试件密度波动

完成试件振幅采集后,还需要获取试件毛体积密度,以建立混合料介电常数与毛体积密度之间的关系。但由于试件材料分布不完全均匀,试件不同区域的毛体积密度存在差异(表 4)。因此在采用表干法测毛体积密度时,应选取试件的雷达测点区域进行测量。

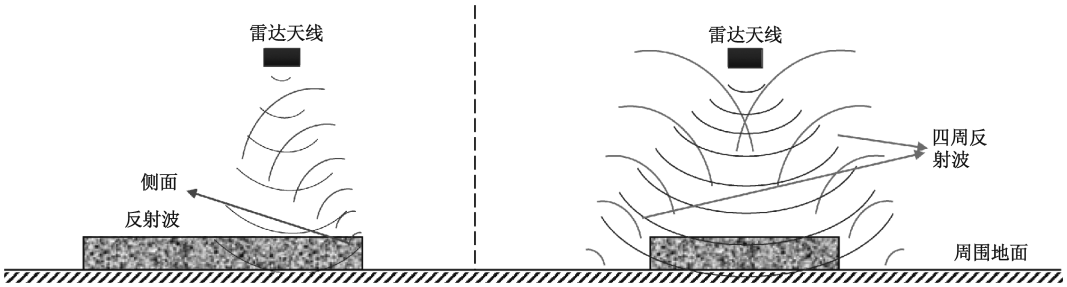


图 7　试件尺寸因素对反射波的影响

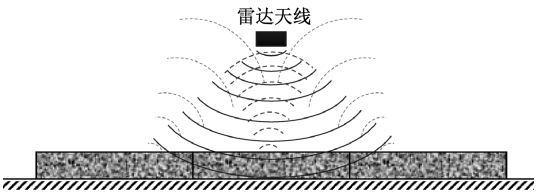


图 8　九块车辙板示意图

2.1.5　方案制定

基于上述分析,选用 1 600 MHz 的探地雷达进行数据采集,检测高度为(23±2)cm,测点间距为 1 cm。采用轮碾法成型车辙板试件,并通过改变碾压遍数成型不同毛体积密度的试件;针对待检路面的生产配合比,制备沥青胶浆试件,采用距离模式对车辙板以及沥青胶浆试件,按照中间区域(10 cm×10 cm)十字交叉测线进行振幅数据采集,每条测线采集 3 次,最后对测点振幅取平均值,进而结合金属板反射法计算混合料和沥青胶浆的介电常数,如图 9和图 10 所示。取试件中间区域(10 cm×10 cm)测量毛体积密度(图 11),基于公式(3)反算集料介电常数[8],进而建立混合料毛体积密度预估模型。

表 4　试件切割后不同尺寸的毛体积密度

试件编号	试件尺寸/(mm×mm)	空气中质量/g	水中质量/g	表干质量/g	毛体积相对密度/(g·cm^{-3})	密度差异/(g·cm^{-3})
1	200×200	5 943.0	3 583.2	5 960.9	2.499	0.045
	100×100	1 286.7	765.4	1 289.8	2.454	
2	200×200	6 018.0	3 634.2	6 029.7	2.512	0.039
	100×100	1 268.3	758.7	1 271.6	2.473	
3	200×200	5 721.4	3 418.7	5 742.2	2.462	0.038
	100×100	1 325.5	798.6	1 328.7	2.500	
4	200×200	5 802.8	3 480.8	5 823.3	2.477	0.030
	100×100	1 371.7	827.7	1 374.9	2.507	

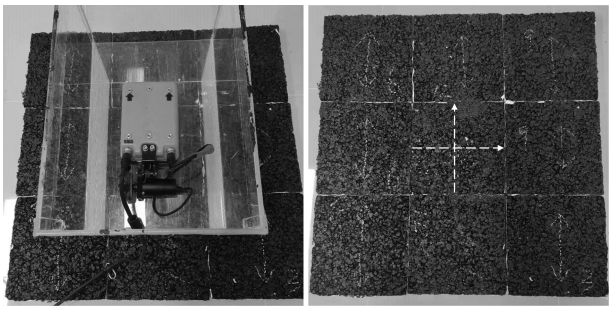


图 9　车辙板振幅采集及测线布置

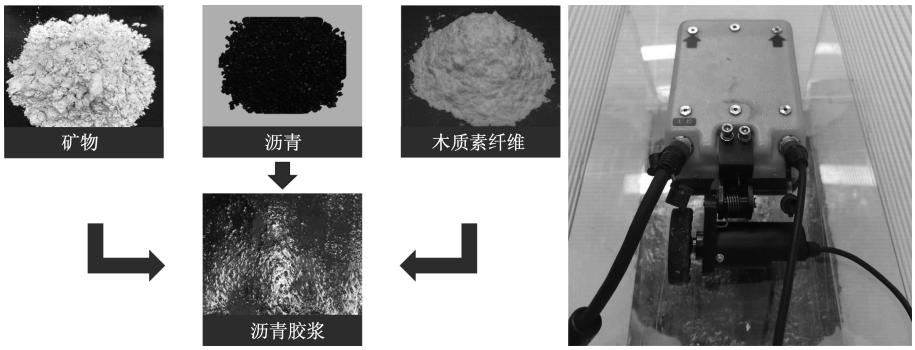
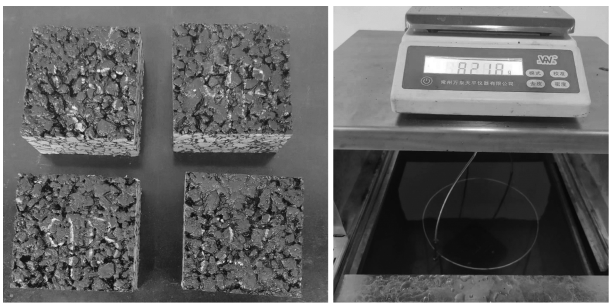


图 10　沥青胶浆制备及振幅采集



(a) 切割后的试件　　(b) 表干法测密度

图 11　切割后试件毛体积密度测量

2.2　现场检测方案

2.2.1　检测设备

由于现场检测路段长,周围环境复杂,检测高度受限,采用室内方案很难实现快速、连续、稳定地检测,因此采用手推式检测设备将探地雷达固定在一定高度进行数据采集,如图 12 所示。相较于直接将雷达挂载压路机上的采集方案,时间成本和经济成本降低,采集操作更加便捷,采用测距轮标定的方式可以更好地将获取对应桩号上的压实信息,并且不需要考虑压路机振动的影响,采用此方案可以对成品路面或老路进行压实度检测。

2.2.2　测线布置

根据检测目进行测线布置,主要沿行车方向、垂直行车方向进行雷达数据采集,测点间距为 1 cm,其中沿行车方向测线布置在距中央分隔带 50 cm处、各车道右轮迹线以及距边坡 50 cm 处,垂直行车方向测线布置为每 100 m 桩号一道,横跨整个路幅,以此获取检测路段的整体压实状况,如图 13所示。另外在钻芯位置处布置十字交叉测线(图 14),测点间距为 1 cm,采集芯样直径范围内的测点振幅取平均值计算芯样介电常数,并通过测量芯样上面层毛体积密度,对室内密度预估模型进行验证。

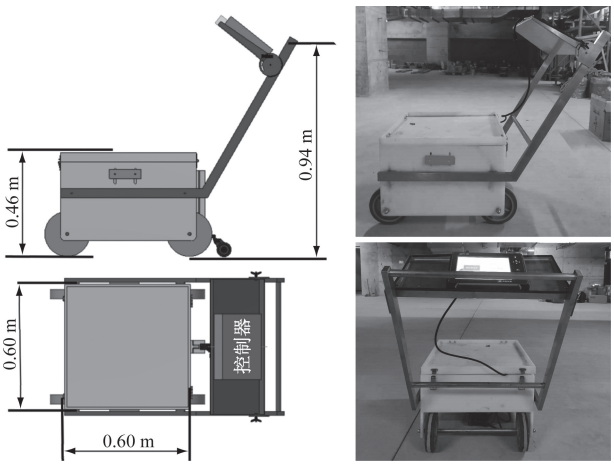


图 12　手推式检测设备

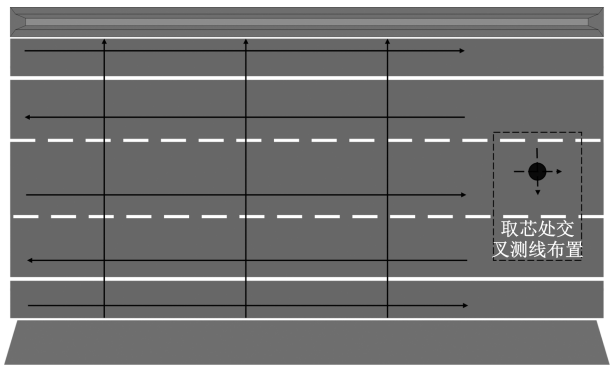


图 13　测线布置示意图

3　现场验证及效果评价

依托 2023 年宿淮盐高速大修工程进行现场验证,基于检测路段上面层 SMA-13 的生产配合比(表 5)开展室内试验,采用 ALL 介电混合模型建立混合料密度预估模型,如式(6)所示。表 6 为模型关键参数,其中集料有效密度、最大理论密度和沥青胶浆含量是由生产配合比资料计算得到,实测金属板最大振幅为 1 003,沥青胶浆介电常数为 5.0,集料介电常数反算值为 7.69。表 7 与图 15 分别展示

图 14　现场雷达数据采集

表 5　检测路段上面层 SMA-13 生产配合比

混合料类型	油石比/%	集料级配,下列筛孔(mm)的通过率/%									
		16.0	13.2	9.5	4.8	2.4	1.2	0.6	0.3	0.2	0.1
SMA-13	5.9	100.0	94.6	62.1	27.2	23.0	19.0	15.2	12.7	11.6	10.0

表 6　密度预估模型关键参数

关键参数	SMA-13
集料有效密度(γ_{se})/(g·cm^{-3})	2.893
最大理论密度(γ_t)/(g·cm^{-3})	2.614
沥青胶浆含量(P_{Am})/%	5.57
沥青胶浆介电常数(ε_{Am})	5.00
集料介电常数(ε_S)	7.69

表 7　芯样实测数据及模型预估数据

编号	桩号	取芯位置	实测毛体积密度/(g·cm^{-3})	实测压实度/%	实测振幅	实测介电常数	预估毛体积密度/(g·cm^{-3})	预估压实度/%	预估误差/%
S1	K158+900	距中 1.2 m	2.521	96.5	423.2	6.05	2.495	95.5	−1.05
S2	K158+900	距中 4.8 m	2.504	95.9	416.9	5.87	2.483	95.1	−0.85
S3	K158+900	距中 5 m	2.505	95.9	427.7	6.19	2.504	95.9	−0.03
S4	K146+420	一车道	2.503	95.8	417.9	5.90	2.485	95.1	−0.72
S5	K146+100	一车道	2.405	92.1	401.2	5.45	2.455	94.0	2.06
S6	K146+300	二车道	2.512	96.2	424.7	6.10	2.498	95.6	−0.56
S7	K144+820	应急	2.448	93.7	413.6	5.78	2.477	94.8	1.17
S8	K144+820	一车道	2.488	95.3	413.6	5.78	2.477	94.8	−0.46
S9	K145+700	一车道	2.475	94.8	416.9	5.87	2.483	95.1	0.32
S10	K145+600	一车道	2.519	96.5	422.1	6.02	2.493	95.4	−1.04
S11	K145+400	二车道	2.451	93.8	408.7	5.64	2.468	94.5	0.70
S12	K145+500	二车道	2.475	94.8	416.9	5.87	2.483	95.1	0.32

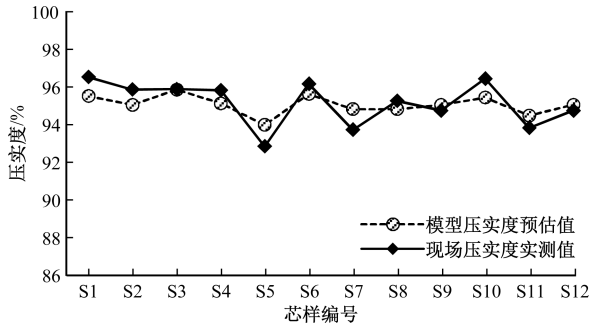


图 15　模型预估压实度与现场实测压实度对比

了现场芯样实测数据及模型预估数据及对比效果,可以看出,基于室内试验建立的密度预估模型的预估效果良好,压实度平均预估误差仅为 0.77%,能够有效地评价沥青上面层压实情况,并为碾压施工提供指导建议。

$$\gamma_f = \frac{\dfrac{\varepsilon_{AC}-5}{3\varepsilon_{AC}-11.5}+\dfrac{4}{2\varepsilon_{AC}-10.5}}{\dfrac{0.878}{2\varepsilon_{AC}-3.81}+\dfrac{1.53}{2\varepsilon_{AC}-10.5}} \tag{6}$$

4　结论

(1)通过室内试验,考虑了检测高度、试件底部介质、试件尺寸以及试件毛体积密度波动等因素,并通过控制天线高度和优化测试环境,进一步提高了室内数据采集的准确性。

(2)基于 ALL 介电混合模型,成功建立了沥青混合料的密度预估模型。通过现场实测数据验证,模型显示较好的预估精度,平均预估误差仅为 0.77%,有效证明了探地雷达技术在评估沥青面层压实度中的可行性。

(3)未来研究可以进一步优化数据处理方法以及预估模型,提高其在不同沥青混合料类型和环境条件下的适用性。

参考文献

[1] 潘贵,侯忠非. 三维探地雷达技术在沉陷成因探测及处治效果评价中的应用[J]. 科技和产业,2024,24(3):180-186.

[2] AL-QADI I L, LENG Z, LAHOUAR S, et al. In-place hot-mix asphalt density estimation using ground-penetrating radar[J]. Transportation Research Record, 2010(1): 19-27.

[3] CUI L, LING T, ZHANG Z, et al. Development of asphalt mixture density estimation model applicable to wide air void content range using ground penetrating radar[J]. Con-

struction and Building Materials, 2021, 293: 123521.
[4] 凌天清, 崔立龙, 陈巧巧, 等. 基于路面雷达测定沥青混合料压实度及空隙率研究综述[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(6): 2467-2480.
[5] WANG S, AL-QADI I L, CAO Q. Factors impacting monitoring asphalt pavement density by ground penetrating radar [J]. Ndt & E International, 2020, 115: 102296.
[6] WANG S, SUI X, LENG Z, et al. Asphalt pavement density measurement using non-destructive testing methods: current practices, challenges, and future vision[J]. Construction and Building Materials, 2022, 344: 128154.
[7] 熊学堂, 谭忆秋, 肖神清, 等. 基于介电特性的沥青混合料密度预估优化模型[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 180-188.
[8] 罗蓉, 杨洋, 于晓贺, 等. 沥青混合料介电特性与密度关系研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(12): 133-139.

Feasibility Analysis of Asphalt Layer Compaction Detection Based on Ground Penetrating Radar

REN Zhongshan, MA Hui

(Jiangsu Expressway Engineering Maintenance Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: Aiming at exploring the feasibility of ground penetrating radar technology in nondestructive testing of asphalt surface layer compaction, the effects of antenna height, medium at the bottom of the specimen, specimen size limitation and specimen density fluctuation on the compaction testing accuracy of asphalt surface layer were systematically investigated by selecting the appropriate antenna frequency (1 600 MHz). An asphalt mixture density prediction model based on the dielectric mixing model was established based on lab tests and validated by field tests. The result shows that the average prediction error of the model is 0.77%, which effectively proves the reliability of the technology in the nondestructive testing of asphalt surface layer compaction and provides technical support for asphalt pavement construction and maintenance.

Keywords: pavement engineering; asphalt layer; compaction detection; ground penetrating radar; dielectric constant; feasibility