

# 探地雷达在高等级公路质量检测和管理中的应用

曹雪山,蔡 亮,郑长江

(河海大学交通与海洋工程学院,江苏 南京 210098)

**摘要** 利用探地雷达检测原理探测高等级公路路基、路面质量状况,能获知新修公路路面结构层的厚度、介电常数和旧公路路基、路面的病害与缺陷发育情况等详细信息,从而为公路管理部门对公路质量评定和养护决策优化提供科学的依据。

**关键词** 探地雷达,质量检测和管理,公路

中图分类号:U415.1 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2002)03-0068-04

近几年来,随着我国高等级公路的蓬勃发展,交通基础设施得到进一步完善,公路管理部门建、养、管一体化,极大地改善了交通状况,优化了对外开放的硬环境,为全社会带来了巨大的社会效益。但目前国家公路管理部门在高等级公路的质量检验评定及决策养护中,只通过钻芯取样和表面调查的传统方法很难全面而深入地了解新、旧路基、路面的全貌。这样势必给新建公路质量检验评定的结论带来误差。为此,英美等发达国家研究开发了商用探地雷达检测技术,为全面、快速、准确地获取路基、路面的质量状况提供了可能,也为公路管理部门作出合理、经济、科学的决策提供了可靠的依据。

## 1 探地雷达检测及其应用

### 1.1 检测原理

对路基、路面结构的质量检测是利用探地雷达所发射的高频电磁波穿透地下材料,部分从介电常数突变处反射,从而测得界面的位置和该层的介电常数,通过系统后处理分析和计算后,确定路面结构层厚度及路基、路面结构层内缺陷发育情况,进而全面了解路基路面工程质量状况。

#### 1.1.1 路面结构层的厚度检测

各向同性的新建沥青类路面结构层检测原理如图 1 所示。雷达波 1、2、5 分别从地表、二灰碎石基层及路床顶面反射,反射波波幅表现为增强,它们分别为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_5$ 。

沥青面层的介电常数

$$\epsilon_a = \left[ \frac{1 + A_1/A_m}{1 - A_1/A_m} \right]^2 \quad (1)$$

式中: $A_1$ ——沥青路面反射波波幅电压值, V;  $A_m$ ——用很大的金属板铺于路面时 100% 反射的波幅电压, V。

沥青路面层厚度

$$h_1 = c \times \Delta t_1 / \sqrt{\epsilon_a} \quad (2)$$

式中: $h_1$ ——沥青面层厚度;  $c$ ——雷达波在空气中的传波速度;  $\Delta t_1$ ——波幅  $A_1$ 、 $A_2$  之间的反射波时间延迟。同时可得基层的介电常数

$$\epsilon_b = \epsilon_a \left[ \frac{1 - \left[ \frac{A_1}{A_m} \right]^2 + A_2/A_m}{1 - \left[ \frac{A_1}{A_m} \right] + A_2/A_m} \right]^2 \quad (3)$$

式中: $\epsilon_b$ ——基层的介电常数;  $A_2$ ——由基层顶面反射的雷达波波幅电压值, V。

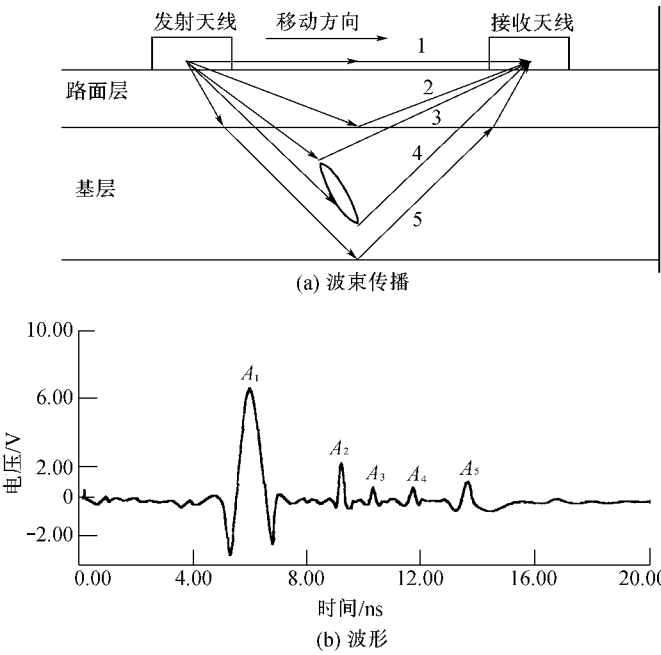


图 1 探地雷达公路工程检测基本原理  
Fig.1 Basic principle of road inspection with GPR

1.1.2 病害和缺陷检测

在公路工程中病害和缺陷主要是路基、路面基层的裂缝类和松散类破坏.在公路养护维修中应注重了解这些破坏的分布位置和影响深度,从而在决策时加以考虑.检测时,若层中有缺陷,如碎石等集料剥落和出现裂缝或在裂隙中贮有水体,层中介电值发生突变形成界面,就有另外的反射波出现.如图 1,基层中出现裂缝,当雷达波在裂缝顶部和底部发生反射时,界面反射波表现为在  $A_2$ 、 $A_5$  之间出现波幅增强为  $A_3$ 、 $A_4$ ,典型的经检波的回波图形如图 1(b),裂缝的深度与其顶部和底部的回波之间的时间差值  $\Delta t_2$  成正比.于是裂缝的深度

$$d = c \times \Delta t_2 / \sqrt{\epsilon_c} \tag{4}$$

式中: $d$ ——裂缝深度; $\Delta t_2$ ——反射波幅  $A_3$ 、 $A_4$  之间的时间延滞,ns; $\epsilon_c$ ——裂缝所在介质结构层的介电常数.

1.1.3 精度分析

对于新修路面结构层中采用二灰碎石作基层的柔性路面,运用公式(2)检测表面层厚度,与钻孔取芯结果相比,其精度约 3%~5%,对于基层,精度约 8%~10%<sup>[1]</sup>.用公式(4)检测缺陷深度时,影响精度的因素是缺陷处的介电值突变性.若层内缺陷已形成很多薄层构造,介电值逐渐变化,则其反射的雷达波就复杂,精度较差,需要配合挖验或其它地球物理方法.

1.2 质量评定的应用

1.2.1 路面系统质量评定中的应用

在高等级公路的路面评定中,路面结构层的厚度直接决定着路面结构层允许弯沉值、强度极限值和沥青材料的用量,同时又影响着路面破损及其最终使用寿命.在现行《公路工程质量检验评定标准》(JTJ071-98)<sup>[2]</sup>(下称《标准》)中,检查路面结构层厚度是每 200m 每车道 1 点进行挖验或钻芯取样,通过有限的厚度测试资料统计确定厚度代表值,评定时,若厚度代表值大于或等于设计厚度减去代表值允许偏差时,则按单个检查值的偏差是否超过极限值来评定.而利用探地雷达高频(1.0GHz 左右)天线检测路面,对于新修路面或无损路面,由于面层和基层的介电常数及厚度比较均匀,可由公式直接计算出厚度.对于现有公路网,由于面层和基层的介电常数及其变化与地下信息密切相关,其中影响表层介电常数主要因素是沥青层的密实度,影响基层介电常数是基层的湿度,这样,通过极少量的钻芯取样对雷达波标定后,检测路面结构层的质量,就可以由面层厚度及介电常数的变化情况,获知全方位的路面结构层的信息.总之采用探地雷达检测法,一方面可详细、全面地了解路面结构层的质量状况,另一方面可最大限度地保护路面结构层的完整性.

1.2.2 路基压实度评定

公路路基的压实度直接影响着路基变形、强度以及稳定性,而又间接影响着路面的损坏。《标准》对压实度的检查办法是以 1~3 km 长的路段为检验单元,通过每 2 000 m<sup>2</sup> 每压实层测 4 处做标准密度试验,通过所计算试验的密度代表值与设计值相比,确定是否合格。而利用探地雷达高频(100~400 MHz)天线检测路基,可探知路基土不同压实度的分界线,配合极少量的钻芯取样或其它地球物理检测方法,确定公路运营的任一阶段的路基密实度。

1.3 养护决策优化中应用

公路养护是公路质量管理的重要组成部分。所谓养护决策,就是根据所提供的各种信息,对路况进行分析、回答,合理分配有限养护资金等资源,确定最佳养护对策和实施时间的过程。目前在公路管理部门中判断一个路段是否要养护,首先根据路表病害的大小,即目测初步判断,接着进行路面强度等检测,根据检测结果,依据一定的规范和标准,通过综合分析,为各个路段选择最佳的处置措施<sup>[3]</sup>。这样在对同一路段进行处置决策时,就不会因时间和工程师经验等的不同,而产生太大的差异。但由于没有对所有路段进行数据采集和客观分析,决策的依据主要是实地工程师的经验,因而还是不可避免因工程师之间的经验不同造成判断结果的差异。如果实地工程师的经验丰富,判断正确,其结果就比较合理,否则,就难以保证决策的准确性和合理性。应用探地雷达无损检测技术,可以快速而全面地对所有路段进行检测和分析,这样就从路基、路面结构的深度和广度上全面了解路面下的各结构层的详细工作信息。与此同时,若对比公路运营不同时期的路基、路面结构层的工作性能差异,可进一步了解路基、路面各种破坏的发展状态,从而大大减少养护决策中经验差异,使决策进一步得到优化。

2 实例分析

公路从竣工至投入使用一段时间后,路基、路面就开始有各种各样的破坏,其中路基变形破坏包括沉降、波浪,局部存在路基开裂现象,而路面破坏则为纵缝、横缝、网裂、龟裂,形成这些病害与缺陷的原因<sup>[4,5]</sup>有气候、施工质量、养护维修措施、交通量、超载等。这不仅使经济效益受到损失而且社会影响也不好。下面两个例子说明在公路工程检测中可以利用探地雷达全面快速地认识这些缺陷与病害。

用美国劳雷公司 SIR-10H 型探地雷达(1.5 GHz 地面耦合天线)对某公路进行检测<sup>[6]</sup>,结果如图 2。由图 2 可看出,在公路 900~990 m 处沥青层底部存在较严重的剥落现象。这实际上是沥青路面的最大问题,即为面层间或面层内沥青混凝土剥落,它表明沥青和碎石间的连接作用已遭到破坏,形成不稳定的非紧密结构层或结构块。沥青混凝土的密度不均一则促使介电常数发生变化,从而出现虚假的结构界面。由探地雷达检测出这种界面存在的状况,确定沥青混凝土是否需要置换。雷达技术探测过程中,路面结构分层或厚度的变化反映了面层剥落情况,区分层间与层内的剥落可对照钻芯取样的检测数据来解译。

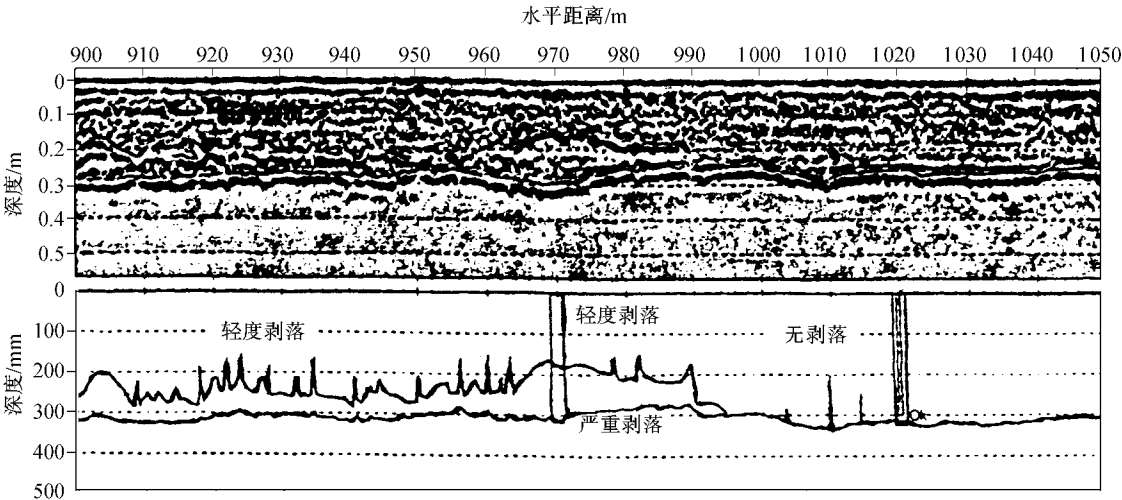


图 2 某公路 1.5 GHz 地面耦合天线雷达检测结果

Fig.2 Detected data of a road by GPR with 1.5 GHz ground-coupled antenna

深圳深南大道福田段<sup>[7]</sup>跨越一条河道修筑时,在河床内用片石充填,上面再覆砂石层、填土层与碎石层.图 3 是在公路运行一年后检测的结果.从图 3 可知,河床在地表位置 5~28 m 之间,河床深度 2~4 m 范围内所填片石质量总体是好的,但在地表 5~12 m 与 25~28 m 位置,深度 2~3 m 范围内,片石由于欠密实,在公路运行过程中受压引起不均匀沉降,这同时引起了上覆的砂层、填土层变形,但未影响到碎石填层,所以还不会引起公路路面损坏.但随着公路投入使用,路基介质可能在经历再压实或其它外来扰动影响而发生变化,因此在养护决策中注意这种缺陷的发展.

3 结 论

(a)由探地雷达对新修路面的检测结果可直接获知面层的厚度及介电常数.(b)通过极少量的钻芯取样标定,利用探地雷达检测技术的后处理分析系统,对所采集的数据进行解译,可从路基、路面的深度和广度上全面了解路基、路面结构层的病害与缺陷发育情况等详细信息.(c)利用探地雷达检测,进行路面工程质量评定,即全面深入地了解路面概貌,又最大限度地保护路面结构层的完整性.(d)养护决策中,利用探地雷达对所有路段进行无损检测,从而了解路基路面结构层详细工作信息,大大减少决策分析中的经验成分,进一步优化决策.

参考文献:

[1] Saarenketo T, Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar[J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 43: 119~138.  
[2] JTJ071-98,公路工程质量检验评定标准[S].  
[3] 潘玉利.路面管理系统原理[M].北京:人民交通出版社,1988.211~237.  
[4] 李祝龙.青藏公路路基路面病害机理研究[J].公路,2001(8):105~109.  
[5] 李淑明.防止反射裂缝的沥青加铺层设计方法[J].华东公路,2001(4):3~6.  
[6] Hugenschmidt J, Partl M N, De Witte H. GPR inspection of mountain motorway in Switzerland[J]. Journal of Applied Geophysics, 1998, 40: 95~104.  
[7] 李大心.公路工程质量的探地雷达检测技术[J].地球科学——中国地质大学学报,1996,21(6):661~663.

Application of Ground Penetrating Radar to Quality Inspection and Management of High-Grade Roads

CAO Xue-shan, CAI Liang, ZNENG Chang-jiang

(College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on the inspection theory of Ground Penetrating Radar (GPR), the quality of subgrade and pavement of high-grade roads is detected, and some detailed information is obtained, such as the thickness and dielectric constant of new asphalt pavements and defects in subgrades and pavements and their development of old roads, providing a scientific basis for decision making optimization of road quality evaluation and surface maintenance for road management departments.

**Key words:** Ground Penetrating Radar (GPR); quality examination and management; highway

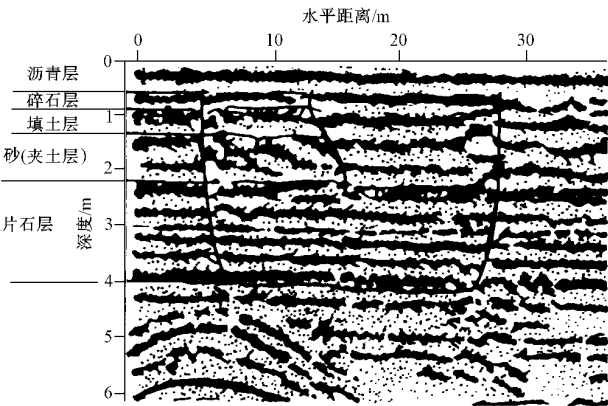


图 3 深圳深南大道福田公路路基雷达检测  
Fig.3 Subgrade inspection with GPR for Shennan Road Futian section in Shenzhen City