基于探地雷达和高速弯沉仪的结构内部状态评价

臧国帅[1]，金光来[1]，蔡文龙[1]，陆海珠[2]
（1.江苏中路工程技术研究院有限公司，江苏 南京 211086；2.江苏高速公路工程养护技术有限公司，江苏 南京 211112）

摘要： 为准确判别高速公路沥青路面结构内部状态，采用探地雷达和高速弯沉仪进行联合检测，分别从结构完整性和结构强度提出结构内部状态评价方法、评价指标和评价标准，并进行实例分析。探地雷达实测表明，路面存在不密实、层间接触不良、松散等 3 种隐性病害时，可采用路面内部破损状况指数 *IPCI* 进行评价；高速激光弯沉仪检测结果可线性转化为贝克曼梁值，采用结构强度指数 *PSSI* 进行评价；路面养护及时时，路面结构内部状态较好，需维修路段较少。

关键词： 公路；沥青路面；探地雷达；高速激光弯沉仪；结构内部状态

中图分类号：U416.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－2668(2020)03－0059－03

目前国内主要依据《公路技术状况评定标准》对路面状况进行评定，主要采用破损（*PCI*）、平整度（*RQI*）、车辙（*RDI*）、抗滑（*SRI*）、结构强度（*PSSI*）指标。其中平整度、车辙、抗滑均是针对路表功能性的评价，与路面结构层状态关系较小；破损指标虽可以根据路表病害对结构内部状态进行推测，但并不直观、准确，且对路表完好而结构内部存在缺陷的情况无法进行评价。

路面结构内部状态主要是对路面结构内病害状况和有效性能的统一描述，可用来评价路面结构的整体性能。该文从路面结构完整性和结构强度两个角度研究路面结构内部状态，其中结构完整性主要考虑路面结构层间粘结状况、松散程度、密实情况及有无裂缝等，结构强度则考虑路面结构的承载力。路面结构完整性采用探地雷达检测，路面结构强度采用高速激光弯沉仪检测。

1 结构内部状态检测设备及基本原理

1.1 探地雷达检测设备及基本原理

探地雷达是用高频无线电波确定介质内部物质分布规律的一种地球物理方法，它通过发射天线将宽带电磁波以脉冲形式辐射到地下，探测地表之下或不可视物体的内部结构。由于电磁波在介质中传播时因地下不同物体或介质的差异会对电磁波进行反射，接收波的双程走时、幅度、相位等波形特征形成连续的雷达剖面图像，对该图像进行分析可得到结构层厚度、目标的深度和地下介质的构造等信息（见图 1）。

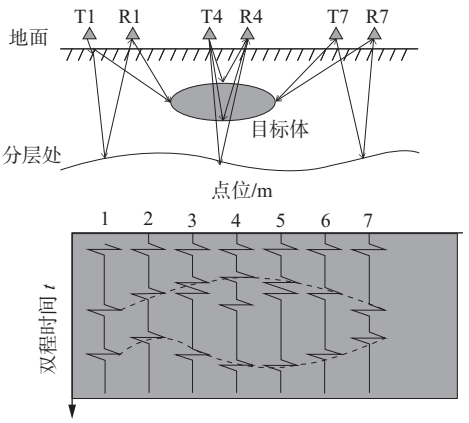

图 1 雷达检测示意图

利用探地雷达，通过选择不同频率的天线可实现从面层、基层到路基不同深度的探测，探测过程连续，探测生成的数据包括灰度图及振幅、走时等原始数据，可采用直观判识和数据分析两个途径对结果进行分析。

该文采用高动态探地雷达，其检测速度达 80 km/h，可实现快速检测。它基于最新的实时采样技术，只需发射一次雷达脉冲信号，即可采集完整波形。天线频率取为 750 MHz，检测车道及位置为车道右轮迹。

1.2 高速弯沉仪检测设备及基本原理

激光式高速弯沉测定仪是以正常车流速度利用多普勒激光传感器测量由标准载货汽车行驶所致的路面变形速度，通过预设在不同位置上的传感器采集路面变形速度反演出动态荷载作用下路面弯沉盆的一种路面结构强度测量仪器（设备、系统）。

路面在重载车轮碾压下产生沉降，其中沉降速度反映路面结构强度。高速弯沉仪采用 4～7 个传

感器测量路表变形速度，其中 3～6 个传感器位于弯沉盆内部，1 个传感器在弯沉盆外部（作为参考值）。采用角速度传感器测量运动状态，然后通过不同位置变形速度反演得出测点弯沉值。

该文采用丹麦 Greenwood 公司研发的高速激光弯沉仪 TSD，其检测速度可达 90 km/h，测量精度0.001 mm，数据输出间隔 1～10 m。

2 结构内部状态评价指标

结构内部状态评价包含结构完整性评价和结构强度评价，其中结构完整性评价由探地雷达判定，结构强度评价由激光动态弯沉判定。

2.1 结构完整性评价

路面结构内部病害分为不密实、层间不良、松散三大类，其中松散可细分为层间局部松散和结构层松散。不同隐性病害的雷达灰度图具有显著差异：

（1）完好处。如图 2(a)所示，路面结构内部并未出现明显振幅加强的信号，且信号较均匀，层间同相轴由材料介电常数的差异造成，属于正常反射信号，判断该处路面内部完好。

（2）不密实。如图 2(b)所示，上基层底部点状反射信号加强，判断上基层孔隙较多，不密实。

（3）层间不良。如图 2(c)所示，基层与基层之间有明显的信号加强，判断基层与基层分离。

（4）松散。如图 2(d)所示，下基层内部反射信号较强烈，且同相轴较杂乱，判断下基层内部出现松散。

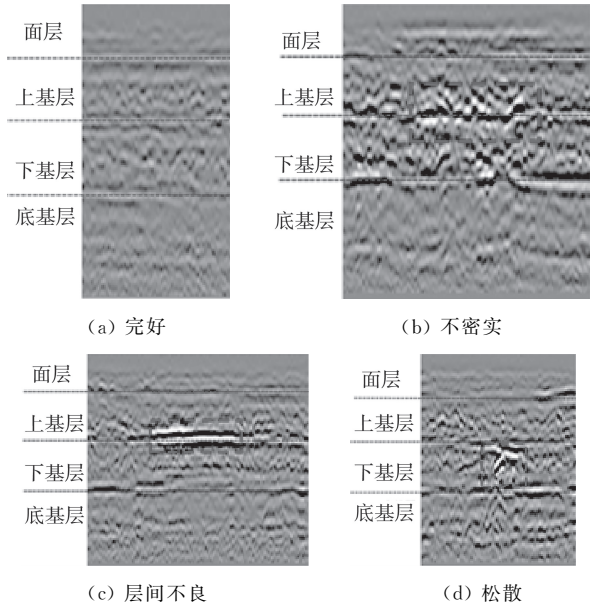

图 2 不同结构完整状态下的雷达图像

高速公路沥青路面结构完整性能指标可借鉴路面状况指数 *PCI* 评价方法，采用路面内部破损状况指数 *IPCI* 进行评价。考虑到 *IPCI* 评价多个层位，而 *PCI* 仅评价路表单一层位，将评价模型参数适当降低，调整后的计算公式如下：

$$IPCI=100-13\times IDR^{0.352} \tag{1}$$

$$IDR=100\times\frac{\sum_{i=1}^{i0}W_iA_i}{A} \tag{2}$$

式中：*IDR* 为路面内部破损率，为各种路面内部损坏面积之和与路面调查面积之比（%）；W_i 为第 i 类路面结构内部病害的权重；A_i 为第 i 类路面内部病害的长度（m）；A 为调查的路面长度（m）。

不同类型隐性病害对结构强度的影响存在较大差异，其中不密实类隐性病害对结构强度的影响较小，而松散病害对结构强度的影响较大。根据这种影响关系，结合现场工程经验，确定各类隐性病害的权重，不密实、层间不良、层间局部松散、结构层松散的权重分别为 0.01、0.3、0.8、1。

2.2 结构强度评价

根据 JT/T 1170－2017《激光式高速弯沉测定仪》对高速激光弯沉仪进行标定，结果表明，高速激光弯沉值与贝克曼梁弯沉值具有显著的线性相关性，高速激光弯沉值可转化为贝克曼梁值。

巩建等选择 6 段不同弯沉水平的试验路段进行贝克曼梁弯沉与激光动态单点弯沉检测，通过回归分析得到二者的转换关系式[见式(3)]，相关系数 $R=0.929\ 4$。

$$l_B=1.43\,l_J-0.53 \tag{3}$$

式中：l_B 为贝克曼梁单点弯沉值（0.01 mm）；l_J 为激光动态单点弯沉值（0.01 mm）。

根据 JTG H20－2007《公路技术状况评定标准》，高速公路沥青路面承载能力采用路面结构强度指数 *PSSI* 评价。根据 JTJ 073.2－2001《公路沥青路面养护技术规范》，高速公路沥青路面强度采用强度指数 *PSSI* 评价。

3 结构内部状态评价标准

根据 *PSSI* 和 *IPCI* 评价结果，可将路况分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ四级，图 3 为路况分级决策树。考虑到养护处治措施应偏于安全，取结构完整性 *IPCI* 和结构强度 *PSSI* 评分中较小者作为判别依据。

（1）路况为Ⅰ级时，路面整体结构内部状态良

好，不需进行处理。

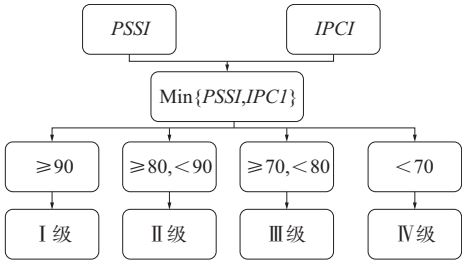

图 3　路况分级决策树

（2）路况为Ⅱ级时，路面结构内部状态出现一定程度衰减，需重点关注。

（3）路况为Ⅲ级时，路面结构内部状态存在一定缺陷，需进行养护维修处理，甚至是结构补强。

（4）路况为Ⅳ级时，路面结构内部状态已有明显缺陷，需针对薄弱位置进行补强处理，提高路面的整体结构性能，延长路面使用寿命。

4　实例分析

在江苏选取 A、B、C 3 条高速公路进行分析，其中 A 采取了较多预防性养护措施，C 已通车 15 年。分别进行探地雷达和高速激光弯沉仪检测，计算各评价单元的结构完整性 *IPCI* 和结构强度 *PSSI*，确定各评价单元的路况等级，其中评价单元长度取为 1 km。各高速公路的不同路况占比见图 4。

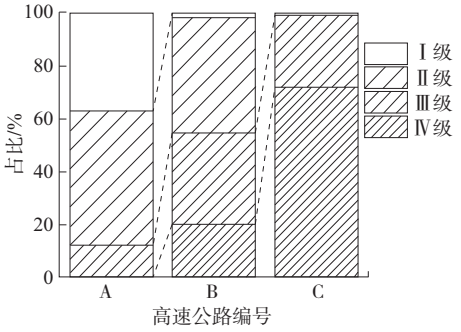

图 4　各高速公路的不同路况占比

从图 4 可看出：A 高速公路大部分路段为Ⅰ、Ⅱ级，没有Ⅳ级路段；C 高速公路大部分路段为Ⅲ、Ⅳ级路段，没有Ⅰ级路段。路况为Ⅲ、Ⅳ级时，路面结构内部状态较差，应采取必要的维修措施。对于 A、B、C 高速公路，需维修路段占比分别为 11.5%、54.7%和 99.2%。

5　结论

该文建立路面结构内部状态评价方法，包含结构完整性和结构强度两方面，分别采用探地雷达和高速激光弯沉仪进行检测，实现路面结构内部状态的快速、连续、无损评价。主要结论如下：

（1）在结构完整性方面，探地雷达实测表明，路面存在不密实、层间接触不良、松散等 3 种隐性病害时，借鉴路面状况指数 *PCI* 评价方法，可采用路面内部破损状况指数 *IPCI* 进行评价。

（2）在结构强度方面，高速激光弯沉仪检测结果可线性转化为贝克曼梁值，采用结构强度指数 *PSSI* 进行评价。

（3）基于 *IPCI* 和 *PSSI* 联合评价结构内部状态，可将路面内部状态分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ四级。若路面养护及时，路面结构内部状态较好，则需维修的路段较少。

参考文献：

[1]　JTG H20－2007，公路技术状况评定标准[S].

[2]　白日华，许士丽，崔坤荣，等.TSD 和 GPR 在路面养护中的联合应用[A].中国公路学会养护与管理分会第六届学术年会论文集(上卷)[C].2016.

[3]　张海如，王国富，张法全.基于探地雷达信号频带介电谱特征的公路早期病害检测[J].科学技术与工程，2018，18(4).

[4]　JT/T 1170－2017，激光式高速弯沉测定仪[S].

[5]　巩建，常成利，张智勇，等.高速激光弯沉仪标定方法[J].北京工业大学学报，2015，41(8).

[6]　武韬，付宏渊，刘建华，等.沥青路面激光动态弯沉测试试验研究[J].湖南交通科技，2016，42(2).

[7]　巩建，邢燕颖，张智勇，等.高速激光弯沉仪研究综述[A].中国公路学会道路工程分会 2014 年学术年会暨第八届沥青路面养护技术论坛论文集[C].2014.

[8]　巩建，常成利，程珊珊，等.基于弯沉的沥青路面使用性能评价模型[J].公路交通科技，2016，33(7).

[9]　王涛，成钢，郭晶.基于探地雷达的砼道面脱空识别研究[J].公路与汽运，2013(5).

[10]　王楹.高速公路路基路面使用性能检测评定与养护规划[J].公路与汽运，2016(3).

[11]　俞先江，汪春桃，顾章川.综合评价体系在探地雷达检测路面结构内部质量中的应用[J].中外公路，2014，34(2).

[12]　高哲.基于落锤式弯沉仪(FWD)的半刚性基层沥青路面结构性能评价[D].济南：山东建筑大学，2016.

[13]　熊春龙.基于无损检测技术的沥青路面结构性健康状况评估方法研究[D].广州：华南理工大学，2017.

收稿日期：2019－09－23