

利用竖向加速度的水泥路面错台估算方法

英红^{1,2}, 朱庆铨³, 谈至明¹, 韦建颖³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 200092 上海; 2. 桂林电子科技大学 建筑与交通工程学院, 541004 广西 桂林; 3. 广西交通投资集团有限公司, 530028 南宁)

摘要: 针对目前人工错台检测方法效率、可靠性及安全性差的现状, 提出了一种利用竖向加速度的错台估算方法. 首先, 对采集后的加速度信号, 利用5层 Daubechies 小波实现降噪处理, 将加速度序列映射为灰度图像, 利用接缝的周期性, 实现接缝定位; 其次, 由加速度-灰度映射图得到每块板上最大加速度值 g_m 的位置分布、板块相同位置处加速度累加平均值 g_e 和绝对值累加平均值 g_a , 用以分析加速度在接缝附近的变化特征, 从而构建表征错台的加速度特征量. 实验表明: g_m 位置在板块上近似随机分布, 错台与加速度的峰值并无相关性; g_e 和 g_a 曲线在接缝附近的波峰位置、幅值与错台的相关性较弱; g_a 曲线在接缝附近的增量与错台相关性较好, 由此构建的特征参数 a_f 值, 与错台具有良好相关性, 可以实现快速、客观地错台估算.

关键词: 水泥混凝土路面; 错台; 竖向加速度; 小波去噪

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)02-0096-05

Faulting estimation method based on vertical acceleration of cement concrete pavement

YING Hong^{1,2}, ZHU Qingcheng³, TAN Zhiming¹, WEI Jianying³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, 200092 Shanghai, China; 2. College of Construction and Traffic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, 541004 Guilin, Guangxi, China; 3. Guangxi Communications Investment Group Co. Ltd., 530028 Nanning, China)

Abstract: The traditional faulting distress detection method is a manual detection method, which is inefficient, less reliable and dangerous to use. To overcome these shortcomings, a new automatic detection method based on statistics values of vertical acceleration was proposed. Firstly, noise reduction was applied to acceleration signals by 5 layers Daubechies wavelet, acceleration sequence was put forward from the acceleration-gray map and a new joint location method based on the joint periodicity in the acceleration sequence was obtained. Secondly, three statistic parameters were adopted to analyze the acceleration variation near the joint, which included the position distribution of peak acceleration values (g_m) as well as the accumulative mean of acceleration values (g_e) and the accumulative absolute mean of acceleration values (g_a) at the same position on each slab from the acceleration-gray map. Test results show that the position distribution of peak acceleration values (g_m) on slabs is similar to random distribution, peak acceleration values have no relation with faulting distress. The position of peak values and the amplitude near each joint on curves of g_e and g_a have weak relation with faulting distress. The increment near each joint on the curve of g_a has fair relation with faulting distress. Based on the analysis, a new acceleration statistic parameter (a_f) was put forward to estimate the faulting value, which had good relation with faulting distress.

Key words: cement concrete pavement; faulting; vertical acceleration; wavelet denoise

收稿日期: 2012-07-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208130);
交通部西部交通建设科技项目(200731822301-9).

作者简介: 英红(1978—), 男, 博士;
谈至明(1960—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 谈至明, tanjk@online.sh.cn.

错台是水泥路面主要病害, 它降低了行车舒适性, 增加了用户成本; 也是导致结构性破坏的诱因. 由于车辆荷载在错台处产生很大冲击力, 造成

接缝失效,诱发唧泥、脱空,从而致使面板断裂,使结构丧失承载力.目前在水泥路面使用状况评价体系中,多从道路使用者的角度以 IRI 指标建立预测模型^[1-2],IRI 指标涵盖了错台、裂缝、拱起、不均匀沉降、刻槽等路面不平整度信息,未能将错台单独分离出来,对道路管理者而言,往往更关注路面结构要素的衰变情况,错台发生、发展伴随着整个道路使用周期,可以作为水泥路面结构衰变的信号,建立基于错台的路面结构衰变模型^[3-4],用以指导路网的管理养护工作.但长期以来,我国依靠人工测量错台,这种方法工作量大、效率低、准确度差,对检测人员安全不利,比如在广西地区接近 700 km 的高速公路水泥路面,双向四车道,近百万条接缝,每年动员大量人力物力,使用人工检测方法调查路面错台情况,但从收集的历年错台调查资料看,数据质量难以保证.综上,急需建立一种快速、客观的错台检测方法.

在国外,Tsai 等^[5]利用扫描激光雷达检测错台,这种雷达价格昂贵,在国内目前尚未见此装备的报道.我国近年来路面检测装备发展较快,具备了以路面图像实施接缝定位,以激光断面仪实施高程测量的条件,但图像检测与激光断面仪在数据同步、融合方面仍存在大量技术难题还未解决;英红等提出了基于双目视觉^[6]、结构光^[7]的错台检测方法,由于硬件结构复杂,尚未投入应用.竖向加速度已在道路平整度^[8]、局部平整度^[9]检测中得到应用,它与乘客舒适感密切相关,而错台也是造成乘客舒适感降低的重要因素,因此本文根据车辆经过错台处、由加速度传感器采集振动信号增强原理,探索了一种利用竖向加速度的错台估算方法,在当前无法准确检测每处错台的情况下,使用加速度估算错台量具有工程实用价值.

1 加速度信号采集

为方便与纵断面高程曲线对比,采用激光断面仪内置的加速度传感器,如图 1 为广西柳南路 K1459+462—K1459+482 上行线左轮迹处的纵断面曲线和同步采集的竖向加速度曲线,采样点间隔为 0.007 m,图中点 A~D 标记了纵断面曲线上错台的位置:点 A、C 处错台较轻,B、D 处错台明显;曲线上的毛刺由刻槽引起;从纵断面曲线中还可观测板块沉降、拱起情况;由于传感器安装在检测车的前端横梁上,并未安装在轮轴处,因此,监测到的振动信号滞后于与纵断面曲线,滞后的距离大致为前轮接地中心与激光测距仪激光投影点中心的间距.振动信号在错台位置附近出现

增强现象,据此可建立接缝附近加速度的统计特征值与错台量的回归关系,实现错台的估算.

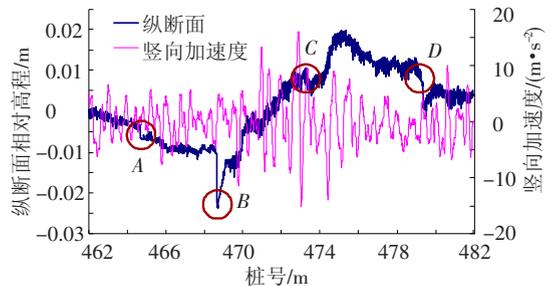


图1 纵断面相对高程和竖向加速度曲线

2 加速度信号预处理

2.1 小波去噪

加速度信号中的随机噪声、刻槽引起的高频振动噪声,对建立错台与加速度的数量关系带来较大误差,须对加速度信号作降噪处理,通常利用低通滤波器对噪声这种高频分量进行滤波处理.小波变换是一种常用的去噪方法,它的思路就是抑制小波分解后的子序列中高频部分,由低频序列重建原信号.使用 Daubechies 小波^[10]将图 1 中的加速度信号分别进行 3~6 层分解,高频分量置零后重建原信号,噪声剔除后的波形与原始信号的对比情况绘于图 2.图 2(a)中去噪后的信号与原始信号几乎重合,滤波效果不明显;图 2(d)去噪后损失了部分波峰,造成过度滤波;图 2(b)、2(c)去噪效果较好,两者比较,图 2(c)中使用 5 层小波去噪效果最好,既保留了原始信号的大部分特征,又消除了波形中的毛刺,因此,建议用 5 层 Daubechies 小波进行降噪处理.

2.2 加速度序列的接缝定位

使用加速度序列分析接缝附近振动增强的特征量,须首先找到序列中接缝的位置,加速度序列在错台、横向裂缝处均呈现振动增强现象,且板块尺寸并不完全保持一致,在一维的加速度序列中难以实现接缝定位,考虑到接缝位置在序列中存在较明显的周期性,本文提出一种简易的二维加速度图谱接缝定位法,具体实现步骤如下.

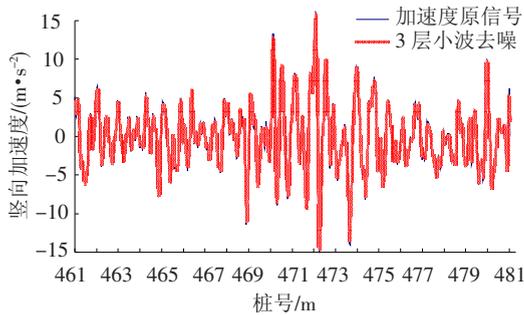
首先,将采集的加速度值经小波降噪处理后,映射为灰度图像(灰度值为 0~255 的整数),加速度序列映射为灰度图像的公式为

$$f(i, j) = 128 + 255 \frac{g_k}{g_{\max} - g_{\min}},$$

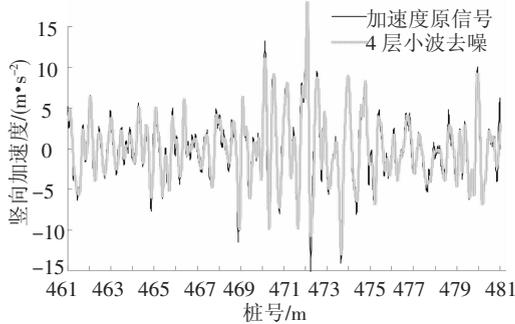
$$i = k/W, \quad j = k \% W.$$

式中: $f(i, j)$ 为灰度图像第 i 行、第 j 列的像素灰度值; g_k 为加速度序列中第 k 个测量值; g_{\max} 为最大加速度测量值; g_{\min} 为最小加速度测量值; W 为映

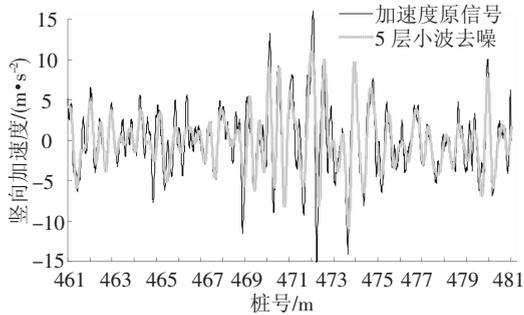
射图像的宽度,取值略大于单块水泥板上采样点数目,如采样点间隔为 0.007 m, W 可取 700; % 为余数运算符.



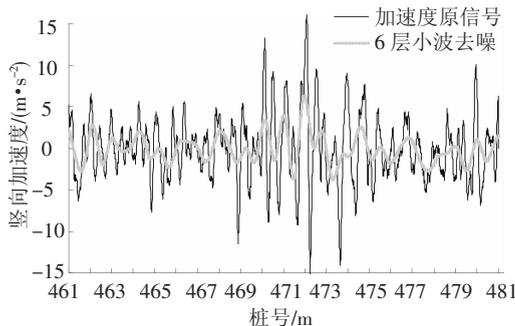
(a) 3层 Daubechies 小波去噪效果



(b) 4层 Daubechies 小波去噪效果



(c) 5层 Daubechies 小波去噪效果



(d) 6层 Daubechies 小波去噪效果

图2 加速度信号的小波去噪

然后,检测车前轮经过错台时的加速度,由于受到错台激励,变化较大,映射图像在此处的灰度变化剧烈,如图3中椭圆圈中图像,灰度变化剧烈的地方呈现为较明显的斜直线特征,这是接缝位置在加速度序列中存在周期性的体现,且与 W 的取值有关,如果 W 正好为水泥板长,则两段椭圆圈中的斜直线变为一条竖直线,因此在映射图

像中可找到接缝位置.

最后,由加速度序列和映射图的位置对应关系,找到序列中的接缝位置.

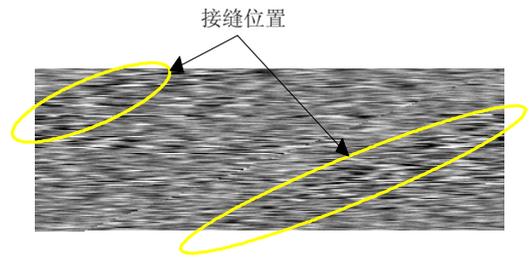


图3 由加速度-灰度映射图实现接缝定位

3 加速度在接缝附近的变化特征

3.1 调查路段概况

为研究加速度在接缝附近的变化特征,选取广西南柳高速、南宁环城高速和水南高速作为调查路段,调查路段的概况列于表1. 竖向加速度采用激光断面仪内置的加速度计得到,检测车速分别为 30、50、70 km/h,采样间隔为 0.007 m;错台通过塞尺检测.

表1 调查路段概况

| 路段 | 通车日期 | 板块数目 | 接缝情况 | 平均错台/mm |
|------------|---------|------|------------------------|---------|
| 柳南高速 K1459 | 1999-01 | 250 | 部分严重错台经过打磨,个别板块维修后设传力杆 | 2.2 |
| 南宁环城高速 K49 | 2003-12 | 220 | 未设传力杆 | 0.8 |
| 水南高速 K75 | 2004-12 | 234 | 未设传力杆 | 1.3 |

3.2 调查路段加速度分布特征

通过加速度 - 灰度映射图,以及每块板上最大加速度 g_m 的位置分布、板块相同位置处加速度累加平均值 g_e 和绝对值累加平均值 g_a 描述加速度在接缝附近的变化特征. 定义第 j 块板上最大加速度为 g_m^j 、每块板上采样点 i 处的加速度累计平均值为 g_e^i 及每块板上采样点 i 处的加速度绝对值累计平均值为 g_a^i , 则

$$g_m^j = \max\{g_{i,j}\}, g_e^i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (g_{i,j} - g_0),$$

$$g_a^i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |g_{i,j} - g_0|.$$

式中: n 为板块数目; $g_{i,j}$ 为第 j 块板、第 i 个采样点处的加速度测量值; g_0 为路段的平均加速度,用以消除路段长波起伏的影响.

图4为调查路段的加速度 - 灰度映射图,根据 g_m 、 g_e 和 g_a 的定义,它们均可由加速度 - 灰度映射图计算,将 g_m 的位置分布标记于图5中,将 g_e 绘于

图6中,将 g_a 绘于图7中;在绘制图4、6、7时,为了方便对比车辆前轮经过接缝时加速度的变化情况,将每块板上的加速度序列右移0.85 m,考虑到水泥板块长度存在差异,统一取接缝前0.85 m和接缝后3.5 m段的加速度序列进行绘图。

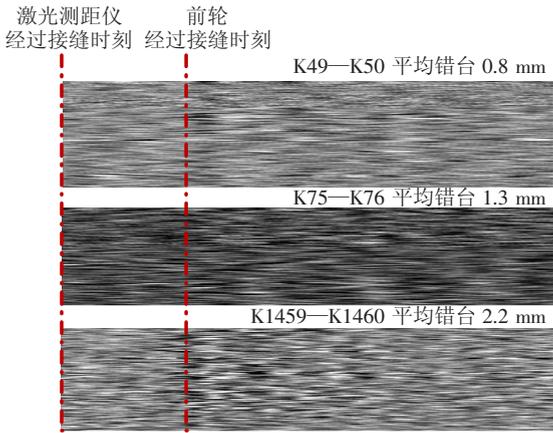


图4 灰度映射图

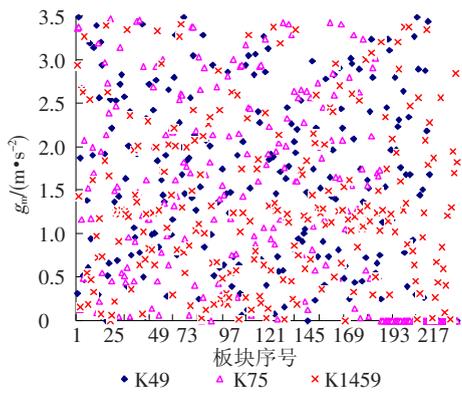


图5 g_m 的位置分布

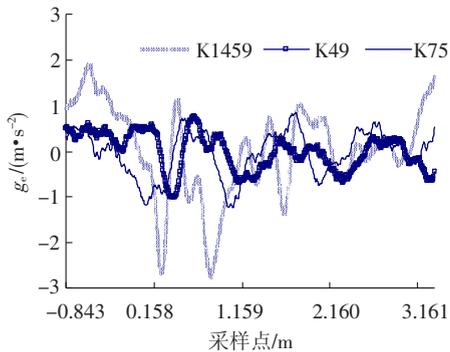


图6 g_e 曲线

对灰度映射图、 g_m 的位置分布以及 g_e 、 g_a 曲线描述的接缝附近加速度变化特征分析如下。

灰度映射图. 由加速度转换为灰度的映射公式可知,映射图中颜色越黑表示加速度趋向负向最大,越白表示加速度趋向正向最大. 从图4可以看出,接缝附近色彩变化剧烈,平均错台量最大的K1459段最为明显,说明检测车前轮经过错台时,随着错台的增加,加速度变化的剧烈程度相应增加. 对于K75段,颜色整体偏黑,这是由于此段处于

下坡路段,加速度均值为负值. 通过灰度映射图的初步分析,加速度在错台附近会出现较剧烈的变化。

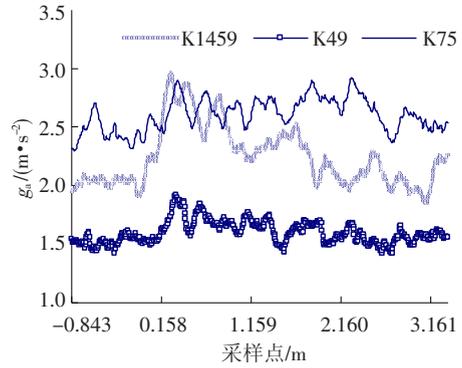


图7 g_a 曲线

g_m 的位置分布. 图5中 g_m 的位置几乎均匀地分布在水泥板上,并未与接缝位置发生关联,这是由于车辆前后轮振动、路面纵坡、裂缝、板块尺寸变化、行车速度和随机噪声等因素叠加在一起,致使加速度的振幅、相位的变化非常复杂,因此 g_m 值与错台量的相关性不明显。

g_e 曲线. 图6中接缝附近 g_e 变化剧烈,尤其是平均错台量最大的K1459段,K49与K75的振动幅度相当;三段路的 g_e 曲线峰值位置相差较大,且波形起伏各异,这是由于接缝处的加速度相位不同造成的,因而难以用 g_e 构建参数表征接缝附近的加速度变化情况. 从 g_e 曲线的定义看, g_e 曲线实质为灰度映射图在纵向上的投影,虽然在灰度映射图中,接缝附近的加速度变化剧烈,但 g_e 曲线没有将这种变化很好表达出来,原因在于加速度相位的差异,在投影过程中某些加速度变化被抵消。

g_a 曲线. 在 g_a 曲线计算的过程中,由于采用绝对值累加,相位的因素可被消除. 图7中 g_a 曲线在接缝附近幅值均有增大的趋势,K1459增加幅度最大,K75段次之,K49段增加最少,与各自平均错台量呈正相关;K75段的 g_a 曲线位置最高,这是因为该段路处于下坡路段,说明计算 g_a 时,通过扣除平均加速度并不能完全消除路段长波起伏的影响。

4 错台估算方法

通过上述分析,加速度 - 灰度映射图可直观地反映出接缝附近加速度变化情况,由此图计算得到的 g_m 位置分布、 g_e 曲线和 g_a 曲线描述了的检测车经过接缝附近时加速度变化特征,其中只有 g_a 曲线在接缝附近的增量与错台量的相关性较大,且三段路的 g_a 曲线总体变化趋势是一致的. 首先前轮未到达接缝时,曲线变化较平坦,幅值较低;当前轮经过接缝时, g_a 值增大,直到出现最大峰值后 g_a 值回落;峰值过后,曲线趋于平坦. 但 g_a

曲线并未消除长波路段起伏对加速度的影响,可由接缝处 g_a 增量构建新的参数 a_f 表征接缝附近的加速度变化情况, a_f 表达式为

$$a_f = \frac{1}{N_s} \sum_{i=p_{\text{joint}}}^{p_{\text{joint}}+N_s} |g_{a,i}| - \frac{1}{N_s} \sum_{i=p_{\text{joint}}-N_s}^{p_{\text{joint}}-1} |g_{a,i}|$$

式中: p_{joint} 为 g_a 曲线中接缝处的采样点序号; N_s 为单位长度(1 m)采样点个数, $N_s = L/\Delta d_i$, Δd_i 为采样点间距, L 为用于计算 g_a 增量的取样长度, 考虑到检测速度为 30 ~ 70 km/h, 加速度序列在每块板上出现 5 ~ 8 个波峰, 计算 a_f 时, 应至少包含一个完整的波形, 同时避免将后轮经过错台时的 g_a 增量计入, 推荐 L 取 1 m.

分别以 70、50、30 km/h 的行驶速度进行检测, 将 28 个路段的平均错台与 a_f 值的关系绘于图 8, 两者的相关性较明显: 1) 路段的平均错台与 a_f 值正相关, 且呈幂指数形式. 2) 同一路段, 速度较高时, 错台对车辆振动增量的影响较低速时大, 这与日常生活经验是相符的. 3) 行驶速度分别为 70、50 km/h 时, 两条曲线接近重合, 而速度为 30 km/h 的曲线与前两条曲线较远, 中、高速时, 错台与 a_f 值的关系较稳定, 且相关系数与低速时相差不大; 在实际检测中, 不中断交通的情况下, 检测车辆需经常变速, 因此在中高速时检测, 即使车速发生变化, 对最终检测结果影响不大.

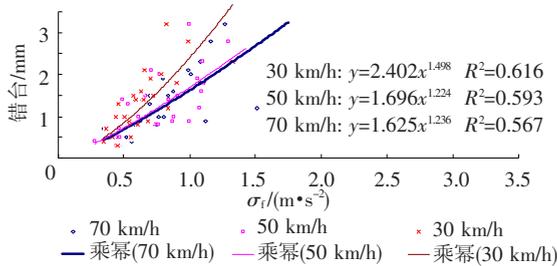


图 8 不同速度下错台与 a_f 值的关系

使用车速为 70 km/h 时, 建立 a_f 值与错台 F 的回归关系, 估算模型为

$$F = 1.625a_f^{1.236}$$

以此模型可计算其他相似路段平均错台量, 在实际应用中, 应对上述模型系数进行标定, 标定路段应涵盖不同路龄、破损及维修情况, 以增强该方法的适用性.

5 结 论

1) 提出了一种利用竖向加速度的错台估算方法, 它是由试验路段的竖向加速度统计量 a_f 值与该路段实测错台建立相关关系, 以此来估算路网的错台量, 可实现快速、客观地错台检测, 具有工程实用价值.

2) g_m 位置在板块上近似随机分布, 错台与加速度的峰值并无相关性; g_e 曲线在接缝附近的波峰位置、幅值与错台的相关性较弱; g_a 曲线在接缝附近的增量与错台相关性较好, 在此基础上, 提出了加速度统计值 a_f , 它与路段的平均错台有较好的回归关系, 可用于错台估算.

3) 在对加速度信号预处理中, 利用 5 层 Daubechies 小波对加速度信号进行降噪处理, 消除了曲线中刻槽引起的毛刺及其他随机噪声; 使用加速度 - 灰度映射图, 将一维的加速度序列转换为二维图谱, 利用接缝的周期性, 实现了加速度曲线的接缝定位.

参考文献

- [1] SIMPSON A L, RAUHUT J B, JORDAN L P R, et al. Early analysis of LTPP general pavement studies data; sensitivity analyses for selected pavement distresses [R]. Washington DC: Strategic Highway Research Program, 1994.
- [2] HOERNER T E, DARTER M I, KHAZANOVIC H L, et al. Improved prediction model for PCC pavement performance-related specifications: final report [R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2000.
- [3] US Department of Transportation. LTPP 2004 year in review [R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2005.
- [4] 陈富强, 谈至明. 水泥混凝土路面横向接缝错台模型与应用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(1): 74 - 79.
- [5] TSAI Yichang, WU Yiching, AI Chengbo. Feasibility study of measuring concrete joint faulting using 3D continuous pavement profile data [R]. Washington DC: 90th Transportation Research Board, 2011.
- [6] 英红, 谈至明. 基于双目视觉的水泥混凝土路面错台检测方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 247 - 253.
- [7] 谈至明, 英红, 周玉民. 基于结构光视觉的水泥混凝土路面错台检测方法: 中国, 201010143937 [P]. 2010 - 04 - 09.
- [8] 查旭东, 程景, 朱广峰. 基于垂直加速度的平整度检测指标[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2010, 7(1): 18 - 22.
- [9] MARK M, ZHANG Zhongjie. A new approach to indexing localized roughness of pavement [C]//TRB 2010 Annual Meeting. Washinton DC: TRB, 2010: 2100 - 2124.
- [10] 刘万国, 李景森, 杨功流. 基于小波变换的重力变化信号处理技术研究[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(2): 5 - 13.

(编辑 魏希柱)