

基于实测不平度的路面等级分析与评价

曲啸天, 赵强*, 赵吉业, 岳永恒, 赵月焕

(东北林业大学 交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 通过经改良的平整度仪的实际测量得到了路面不平度数据, 将所测得的频域信号转化为位移信号后, 采用经验模态分解去均势项和小波硬阈值去噪等方法对数据进行了预处理。再对预处理后的数据进行傅里叶变换得到功率谱密度曲线, 并用倍频程的平滑滤波法得到了平均功率谱密度曲线。然后运用谐波叠加法重构了 A 级路面谱并将其与实测路谱进行对比, 最后用特征参数提取法评价所测路段的路面等级, 并在分析和处理所有测量路段后, 基于统计结果对整个林场的路面状况进行了评价。结果表明试验方法可行, 所测区域路面整体水平较好, 大部分集中在 A 级和 B 级, 整体路面不平度在 B 级以上。

关键词: 路面不平度; 模态分解; 小波滤波; 功率谱密度; 特征参数提取

路面平整度是影响车辆垂向振动激励的主要因素, 对车辆的平顺性、轮胎寿命乃至车辆操控稳定性、油耗、货物运输完整性都有重要影响。其衡量指标——路面不平度是指路面相对基准平面高度沿道路走向长度的变化, 用来描述路面的起伏程度。大量研究表明: 路面不平度可视为平稳随机过程, 可用功率谱密度 PSD 描述。车辆领域常用路面功率谱密度来描述路面不平度的统计特性, 不仅能够很好地刻画出路面波的结构, 还能反映总体特征, 是国标规定的路面不平度评价指标。段虎明等提出利用特征参数提取方法采用功率谱密度曲线对路面质量进行评价, 该方法可通过若干参数来对测量路段路面不平度整体水平进行定量评价, 包括比例参数和拟合直线参数。

该文仅从车辆工程的角度出发来分析纵向路面不平度。首先对路面数据进行采集, 接着运用经验模态分解去均势项和小波去噪等方法进行预处理。然后对处理后的实测数据通过傅里叶变换求取路面功率谱密度曲线, 并利用多倍频程法得到平滑滤波后的平均功率谱密度曲线, 再基于特征参数提取的方法对平均功率谱密度曲线进行分析, 对实测路段的路面等级进行评价, 最后选取几段有代表性的测量路段进行同样的处理, 在统计各路段所属等级后, 对整个区域的路面状况进行推断。

1 路面不平度采集试验

试验所选用的采集设备为 LXBP-3 型平整度测量仪, 为了获得更好的试验效果, 对原有的测量系统进行了改良。原有的位移传感器采集的数据是位移信号, 采集的时域高程数据带有干扰误差(如噪声信号误差特别是低频信号误差)难以消除。因此为了更好地减小采集误差, 试验选用采集频率信号的接触式位移传感器。在频域范围内采集频率信号可有效地减少低频噪声等干扰误差。传感器安装在测量仪中部, 测头直接与地面接触的测量轮保持相对垂直接触的状态。传感器与采集卡相连用来记录所测路面不平度数据, 上位机改为车载电脑来进行试验操控。改进后的测量系统具有数据存储量大、操作便捷、精度高等优点。

试验选取某林场作为研究路段, 该路段路面整体为混凝土铺装路面且定期维护, 相比于砂石路面和未铺装路面的山区林场, 整体路面水平较好。国际标准协会根据功率密度值的上下限将路面分为 A~H 共 8 级。基于功率谱密度为表征参数的不同类型路面的级别分类如表 1 所示, A~H 级划分的功率谱密度 $G_d(n_0)$ 标准数值如表 2 所示。

收稿日期: 2018-03-29

基金项目: 黑龙江省留学归国人员科学基金资助项目(编号: LC2015019)

作者简介: 曲啸天, 男, 硕士, E-mail: 1471991@163.com

* 通信作者: 赵强, 男, 博士, 教授, E-mail: zhaoqiangmvp@163.com

表 1 不同类型路面的路面等级分类

路面等级	路面类型
A	铺装路面,包括高速国道等,道路平坦,少弯
B	铺装路面,盘山路,弯多,过弯少坡平坦,少许碎石
C	土路,碎石,连续盘山路,坡度 10°,20 cm 以下硬底涉水及冰雪覆盖的 2 级路面
D	冰雪覆盖 3 级路面及较多 10 cm 的凸凹,石块,10 cm 深长距离泥路,坡度 18°以下的非铺装路,软性砂地
E	20 cm 积雪路面及长距离泥路,坡度 23°以下碎石路面
F	窄路,30 cm 高的石块,需要查看才能通过的泥潭,坡度 25°以下碎石路面障碍
G	道路极窄,常有 30 cm 凹凸及泥潭并且上坡,70 cm 的硬底涉水,有一定风险,车辆通过需适当改造
H	难度高于以上级别,车辆需高可靠性的改装和携带辅助装置才有可能通过,风险比较大

表 2 路面不平度分类标准

路面等级	$G_d(n_0)/(\times 10^{-6} \cdot \text{m}^{-3})$		
	上限	几何平均值	下限
A	8	16	32
B	32	64	128
C	128	256	512
D	512	1 024	2 048
E	2 048	4 096	8 192
F	8 192	16 384	32 768

由表 1 可初步判断所测路面整体应处于 B 级以上。该次试验共采集了 9 段路面的高程数据,在分析时以所测的第 2 段道路数据为例,其余路段作类似处理,最后汇总整段路的分级和评价结果。所测林区道路连续直线区域较短,故该林区直线行驶运载车辆的设计速度为 25 km/h 左右,而实际车速根据要求要控制在设计车速之内。又由于采用的测量传感器为接触式位移传感器,低速行驶具有更高的测量精度。故将速度设计标准及测量精度的影响考虑在内,将试验速度选取为 20 km/h。该路段长 1 000 m,采样频率 500 Hz,共采集 90 508 个样点。图 1 为林场内测量的第 2 段路线的卫星地图。

2 实测路面数据预处理

路面数据的分析建立在各态历经平稳随机过程的

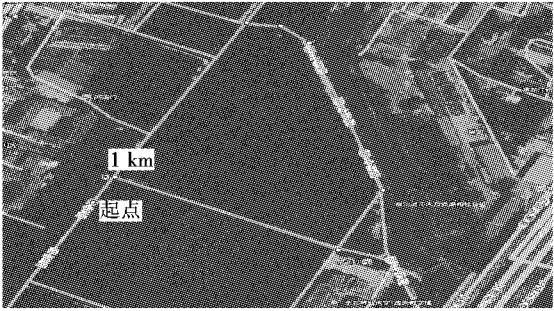


图 1 林场内所测路段的卫星地图

基础之上。实际路面不平度的数据并不都是各态历经的,一般都不满足各态历经平稳性要求,因此用预处理的方法来使样本数据平稳化十分必要。

2.1 时域信号的转换

将试验测得的频率信号转换为时域信号,此处取小段数据进行处理。由于采集数据量较大,所使用采集卡记录的数据值有限。需要将采集卡所采集的几段数据拼接在一起,拼接后的信号图如图 2 所示。

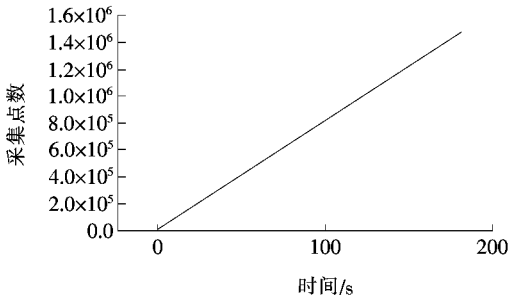


图 2 实测频率信号图

再根据已测量点的频率的对应关系进行函数拟合,根据对应频率和传感器伸缩量的对应函数转换为路面高程数据。图 2 中的频率信号转换为位移信号后得到图 3,并对其余数据进行同样处理。

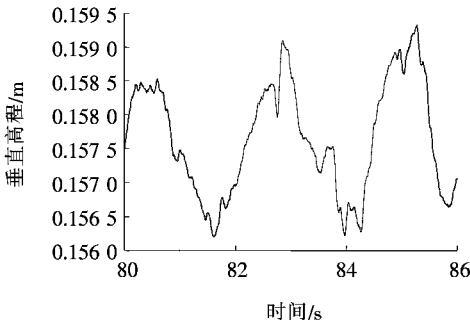


图 3 位移信号的时域高程图

2.2 去趋势项处理

趋势项指的是信号中周期大于采样长度的频率成分,在实际测量过程中,由于测量系统自身误差及外界

环境因素影响,往往在测量过程中会产生趋势项。路面不平度时域信号的 trend 项一般表现为较低频的部分。基于经验模态分解 EMD 的非平稳信号 trend 项剔除具有自适应性和简洁性。该文选用经验模态分解 EMD 的方式来提取 trend 项。计算公式如下:

$$\begin{cases} U_{1,1}(t) = x(t) - m_1(t) \\ I_1(t) = U_{1,k}(t) \\ r_1(t) = x(t) - I_1(t) \end{cases} \quad (1)$$

基本原理为将试验所测的时域信号序列 $x(t)$ 减去包络线均值 $m_1(t)$ 后得到新序列 $U_{1,1}(t)$ 。然后判断 $U_{1,1}(t)$ 是否满足 IMF 条件,不满足则继续分解,直至 k 次后满足条件为止,此时得到序列 $U_{1,k}(t)$ 。 $U_{1,k}(t)$ 即为 $x(t)$ 中的高频分量 $I_1(t)$ 。原始序列 $x(t)$ 与 $I_1(t)$ 之差得到剩余分量 $r_1(t)$ 。根据上述处理方法可得到 $I_2(t)$ 。 $r_1(t)$ 与 $I_2(t)$ 的差即为剩余分量 $r_2(t)$ 。以此类推,按照此方法继续分解,得到最后一个无法再继续分解的分量 $r_n(t)$ 为止。此时, $x(t)$ 可表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n I_i(t) + r_n(t) \quad (2)$$

在原始信号 $x(t)$ 中, $r_n(t)$ 的频率成分最低,而且根据分解原则可知, $r_n(t)$ 必为单调且是周期大于采样长度的频率成分,故可视为 trend 项。其余部分中的低频部分也存在一些 trend 项成分,但由于相对 $r_n(t)$ 较小,此处不予考虑。根据处理需要,利用 Matlab 软件编写模态分解法去 trend 项的程序。去 trend 项的前后对比图如图 4 所示。

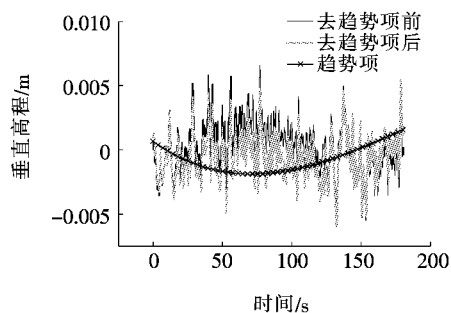


图 4 去趋势项前后对比图

一般路面空间频率段分布范围为 $0.011 \sim 2.83 \text{ m}^{-1}$ 。图 4 中的 trend 项基本不在该范围内,因此可以作为无用分量提取出来,并不会对汽车主要振动的频率段造成影响。

2.3 去噪处理

选用小波去噪的方法对所采集数据进行去噪处理。小波变换是一种具有多分辨率特点的时频分析方

法,更易于从强噪声中提取信号。试验测得的频率信号已有效去除了低频噪声干扰,因此针对高频信号进行去噪会得到更好的去噪效果。鉴于硬阈值函数处理噪声有着更好的高频去噪效果,而且经测试得知几个阈值确定准则下的去噪效果相近,该文选择基于固定门限准则 (Sqrtwolog) 的硬阈值小波去噪方法对采集数据进行去噪处理。小波基选用 Sym8,分解层数选为 3 层。去噪后的路面不平度时域图如图 5 所示,数据分布更为清晰。

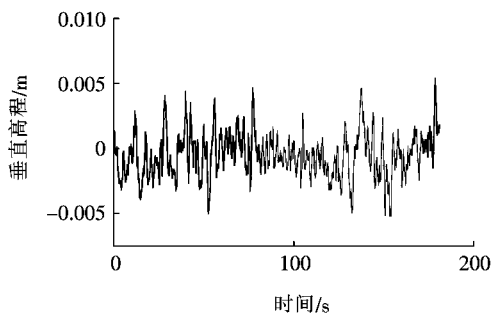


图 5 去噪后的时域路面图

将去噪前后的信号均进行傅里叶变换,将得到的功率谱密度曲线进行对比,结果表明去噪后的功率谱密度曲线整体下移,去噪效果明显。且在经过小波去噪后的功率谱曲线误差明显降低,较去噪前的曲线更为光滑。

3 基于功率谱密度的实测路面分析

3.1 路面等级的划分方法及与 A 级路面对比

实际测量路面不平度时域数据时经常使用快速傅里叶变换 FFT 来处理。将实测路面高程数据进行傅里叶变换后使用双对数坐标图来绘制功率谱密度曲线,再运用谐波叠加法模拟生成 A 级路面不平度的时域信号,相关参数值的选取与实际试验数据保持一致。速度取 20 km/h ,模拟路长 1000 m ,频率 50 Hz 。

模拟的时域信号与实际试验数据处理后得到的时域信号对比如图 6 所示。由图 6 可知:所测路面的高程波动程度与模拟生成的 A 级路面的波动程度整体较为相似。测量轮的垂直位移波动较小,由此可初步判断所测路面不平度整体情况较好,大体满足 A 级路面要求。

3.2 计算及平滑处理功率谱密度曲线

将测量的路面时域数据进行快速傅里叶变换 (FFT),空间频率 $0.11 \leq n_0 \leq 2.83 \text{ m}^{-1}$,采样频率为 500 Hz 。在进行傅里叶变换后采用双对数坐标图绘

制曲线。横轴为空间频率,纵轴为位移功率谱密度,如图 7 所示。图中由下到上的 8 条斜线即为路面等级 A~H 级的划分线,路面功率谱密度曲线越靠下则说明路面等级越高,路面平整度越好。从图 7 可知:所测路段的路面不平度曲线大致分布在 A、B 级与 C 级区域之中,整体在 D 级以下。可初步判断该路段的整体水平较好。

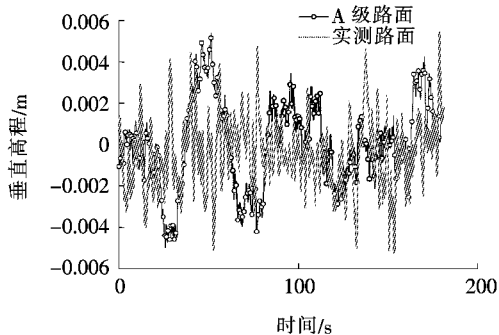


图 6 实测路面高程与 A 级路面对比图

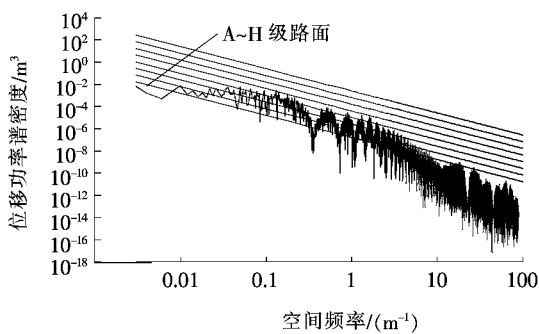


图 7 实测数据功率谱密度曲线图

由于试验测量数据量较大,傅里叶变换后的频谱分布较为密集,该文是利用定带宽的方法来计算功率谱密度的,在对数坐标图的高频区域就会出现丰富的频率变量,这是由于过分强调所谓真实功率谱分布引起的,易给人产生错觉,因此功率谱密度需以更为平滑的方式来描述。该文使用多倍频程的方法对曲线进行平滑处理。

根据 GB/T 7031—2005 报告中所提出的方法,把频带主要分为 3 部分进行曲线平滑:

(1) 倍频程分析:从最低计算频率(0 除外)到中心频率为 $0.031\ 2\ \text{m}^{-1}$ 的频率带宽。

(2) 1/3 倍频程分析:从中心频率为 $0.049\ 6\ \text{m}^{-1}$ 到 $0.25\ \text{m}^{-1}$ 的频率带宽。

(3) 1/12 倍频程分析:从中心频率为 $0.280\ 6\ \text{m}^{-1}$ 直到最高计算频率。

倍频程分析平滑部分的频率数据参见表 3,其余

两部分具体频率参数见文献[11]。其中 n_l 、 n_h 为上、下截止频率, n_c 为中心频率。

表 3 上、下截止频率及中心频率

EXP	$n_l/(\text{m}^{-1})$	$n_c/(\text{m}^{-1})$	$n_h/(\text{m}^{-1})$
-9	0.001 4	0.002 0	0.002 8
-8	0.002 8	0.003 9	0.005 5
-7	0.005 5	0.007 8	0.011 0
-6	0.011 0	0.015 6	0.022 1
-5	0.022 1	0.031 2	0.044 2

注:EXP 为以 e 为底的指数函数,表中第 1 列数值对应指数的取值。

在所给定的频率带宽 i 内,平均功率谱密度根据式(3)进行计算:

$$G_s(i) = \frac{[(n_l + 0.5) \cdot B_e - n_l(i)]G(n_l)}{n_h(i) - n_l(i)} + \frac{\sum_{j=n_l+1}^{n_h-1} G(j) \cdot B_e}{n_h(i) - n_l(i)} + \frac{[n_h(i) - (n_h - 0.5)] \cdot G(n_h)}{n_h(i) - n_l(i)} \quad (3)$$

$$n_h = \text{INT} \left[\frac{n_h(i)}{B_e} + 0.5 \right] \quad (4)$$

$$n_l = \text{INT} \left[\frac{n_l(i)}{B_e} + 0.5 \right] \quad (5)$$

式中: $G_s(i)$ 为平均带宽 i 上的平均功率谱密度; B_e 为频率分辨率; $G(j)$ 、 $G(n_l)$ 为功率谱密度;INT 为取整。

用上述公式对原功率谱曲线进行平滑处理,得功率谱密度曲线。表 4 为平滑所测路段功率谱曲线的中心频率、均方根值及功率谱密度值。图 8 为倍频程法平滑滤波后的曲线。平滑滤波后的平均功率谱曲线更为简洁,常用它来分析评价路面特性。

表 4 平均功率谱曲线相关参数

中心频率/ (m^{-1})	均方根/m	功率谱密度/ $(\times 10^{-6}\ \text{m}^3)$
0.007 8	0.259 0	0.168 5
0.001 5	0.215 3	0.918 7
0.031 2	0.439 7	3.730 6
0.062 5	0.213 0	1.807 1
0.125	0.119 8	1.016 4
0.25	0.106 0	0.899 6
0.5	0.045 7	0.387 5
1	0.030 1	0.000 2
2	0.001 7	0.000 1

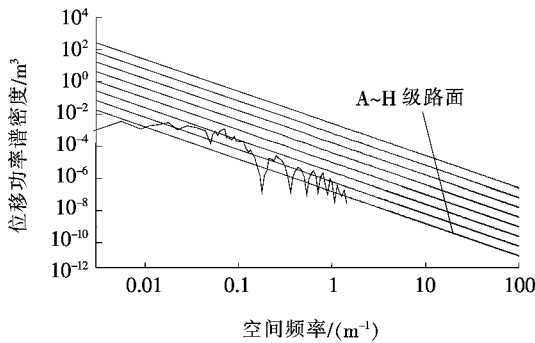


图 8 平滑后的平均功率谱密度曲线

3.3 基于特征参数提取法的路面评价

由图 8 得知平均功率谱密度整体位于 A~C 级路面之间,路面整体水平较好。为了能够更好地对路面质量进行定量分析,需要提取平均功率谱密度曲线的特征参数来进一步评价,包括等级百分比参数和拟合直线相关参数。

首先提取路面等级百分比参数,在平均功率谱密度曲线中找到曲线与标准路面分级线的交点,以各交点为分界点,分别统计落在各个路面等级区间内的曲线点数并计算各区间点数与总体的比例,由比例参数来描述路段整体情况。所测路段的比例参数为:A 级占 30.56%,B 级占 45.92%,C 级占 22.22%,D 级占 1.30%。

通过比例参数可以判定路段整体分布在 A~D 级之间且只有很小部分处于 C 级分界线之外,由此可以准确判定该路段平整度较高,大部分路面集中在 A 和 B 级,整体满足 B 级水平。

再通过拟合直线的参数进行评价。提取的评价参数包括拟合直线的截距和斜率。根据式(6)采用最小二乘法将曲线进行拟合。

$$G_q(n)=G_q(n_0)\left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w} \tag{6}$$

式中: $G_q(n)$ 为路面功率谱密度; n_0 为参考空间频率

($n_0=0.1\text{ m}^{-1}$); $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数; w 为频率指数,表示双对数坐标下的斜率。路面不平度 8 级划分是 w 值取 2,然后根据式(6)计算得到的。平均功率谱密度曲线拟合后的直线如图 9 所示。

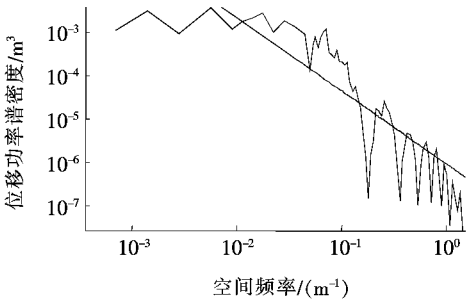


图 9 平均功率谱密度曲线的直线拟合

拟合直线的 n_0 与 8 级分级路段取值相同均为 0.1 m^{-1} 。这样拟合直线截距值的大小就可以反映路面等级,斜率的大小能够反映所测路面不平度的一致性程度,其值与 8 级分级路面的斜率值($w=2$)越接近,则一致性越好,越偏离则一致性越差(所拟合直线跨越的路面分级段越多)。所拟合直线的截距为 $7.3\times 10^{-6}\text{ m}^3$,斜率值为 -1.687 。因为 A 级与 B 级路面的分界线的截距为 $32\times 10^{-6}\text{ m}^3$,由此可断定所测路段很大一部分路面等级处于 A 级。斜率值为 -1.687 与 -2 有一定偏差但不大,则说明一致性不是很差。拟合直线少量跨越分级线,整体在 A~C 级的分级区间,极少部分跨至 D 级,由此判定所测路面大体符合 A 级与 B 级的标准。

3.4 测量路段所属区域的路面等级评价

从林场测量的 9 段路面数据中,选取最具有代表性的 4 段主道路的路面信息进行上述处理,并运用参数提取法分别进行评价。所测的 4 段道路有少许重复部分,但由于重复区域较小且为多次测量处理的结果,所以对评价不会造成影响,评价结果如表 5 所示。

表 5 选取的 4 段测量路段的特征参数

路段 编号	长度/ m	车速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	A 级/ %	B 级/ %	C 级/ %	D 级/ %	E 级/ %	F 级/ %	G 级/ %	截距/ ($\times 10^{-6}\text{ m}^3$)	斜率
1	1 000	20	30.56	45.92	22.22	1.30	0	0	0	7.3	-1.687
2	1 000	20	31.94	51.39	11.07	5.60	0	0	0	2.9	-1.170
3	1 000	20	44.44	40.28	12.50	2.78	0	0	0	4.6	-1.182
4	1 000	20	54.17	36.11	9.72	0	0	0	0	3.7	-1.019

由表 5 可知:所测量的 4 段道路均主要分布在 A 级与 B 级之中,少量路段属于 C 级路面,路段 2 所占 D

级的比例最多,也仅占 5.6%,可判断只有极少路段区域属于 D 级路面。且由拟合直线的斜率值可知一致

性有一定偏差,所拟合直线会跨越多个分级区间,最远可能少量部分跨至 D 级区域。因此可知所测得的 4 个路段的路面不平度整体较好且并没有路面质量偏差较大的路段。

因为所测的 4 个路段测量车速相同,故可将 4 个路段进行汇总。用汇总路段对林场主车道的整体路面不平度水平进行评价。汇总参数见表 6。其中截距和斜率取 4 个路段的平均值。

表 6 汇总路段特征参数信息

路面等级	所占比例/%	路面等级	所占比例/%
A 级	40.24	F 级	0
B 级	43.43	G 级	0
C 级	13.88	H 级	0
D 级	2.41		
E 级	0		

注:汇总路段共 3 600 m;截距 $4.625 \times 10^{-6} \text{ m}^3$,斜率 1.265。

由表 6 可知:测量的 4 段道路绝大部分属于 A 级和 B 级路面(40.28%和 43.43%),极少部分划至 D 级(仅占 2.41%)。由提取的拟合直线的斜率值与截距值也得到相似的结论。由斜率值可知测量路面大部分处于 A 级。由截距值一致性相对较好,拟合直线跨越的路面分级线较少,可推断出林场车道整体路面不平度水平较高,路面质量较好,绝大部分路面在 B 级以上,不存在质量过差的路段,路面不平度最差延伸至 D 级但其区域较小。

4 结论

利用改进的不平度测量仪对某林场实际的路面不平度进行了采集并基于实测的路面高程数据进行了处理和评价。最后基于汇总路段的特征参数,对整个林场的路面水平和等级进行了合理推断。

(1) 路面不平度试验。选定了试验参数进行路面不平度采集。改良后的测量仪使用测量频域信号为接触式位移传感器,它有效消除了外界信号干扰,提高了试验数据精度。

(2) 对试验数据预处理。将测量的频域信号转换

成位移信号,并用经验模态分解的方法消除了趋势项,用基于固定门限准则的硬阈值小波去噪方法去除了高频噪声。预处理效果明显,处理后数据更为清晰,曲线更加平滑。

(3) 将实测路面高程与模拟生成的 A 级路相对比。运用多倍频程法得到平均功率谱密度曲线后,运用路面等级百分比提取法提取了比例系数参数,再用直线拟合相关参数压缩了大量统计量并对测量路面评级,得到了该路面主要集中在 A 级和 B 级且一致性相对较好的结论。

(4) 将测量的主干线路段汇总,对汇总路段,采用特征参数提取法进行评价,并对整个林场的路面不平度水平进行了推断。结果表明:该林场整体路面水平较好,路面大部分处于 B 级以上、但一致性稍有偏差。

参考文献:

[1] 赵济海,王哲人,关朝雳.路面不平度的测量分析与应用[M].北京:北京理工大学出版社,2000.

[2] 周晓青,颜利,孙立军.国际平整度指数与路面功率谱密度相关关系研究及验证[J].土木工程学报,2007(1).

[3] 段虎明,石峰,马颖,等.基于功率谱密度的路面评价与特征参数提取[J].振动与冲击,2013(4).

[4] 段虎明,谢飞,张开斌,等.海量道路测量数据的若干预处理方法研究[J].振动与冲击,2011(8).

[5] 李振兴.结合经验模态分解的振动信号趋势项提取方法[J].飞行器测控学报,2011(1).

[6] 王绍杰.基于小波分析的振动信号去噪研究[D].燕山大学硕士学位论文,2015.

[7] 王国林,胡蛟,钱金戈,等.路面对汽车非平稳激励的时域仿真及小波分析[J].振动与冲击,2010(7).

[8] 刘永臣,王国林,杨彦鹏,等.基于实测道路谱的路面等效重构[J].农业工程学报,2012(19).

[9] 过学迅,刘汉斌,汪斌,等.路面不平度测量与重构[J].车辆与动力技术,2010(4).

[10] 汪斌,过学迅,杨波,等.路面不平度再现方法研究[J].汽车科技,2008(5).

[11] GB/T 7031—2005 机械振动——道路路面谱测量数据报告[S].

[12] 段虎明,石峰,谢飞,等.道路谱测量系统的误差与精度分析[J].汽车工程,2010(9).