

# 面向用户的汽车道路谱重构方法

刘永臣<sup>1,2</sup> 王国林<sup>1</sup> 孙丽<sup>2</sup> 邵长征<sup>1</sup>

1. 江苏大学, 镇江, 212013      2. 淮阴工学院, 淮安, 223003

**摘要:**为准确确定汽车道路耦合动力学的路面激励,提出一种基于实际用户使用的道路谱获取方法。使用多功能激光路面检测仪进行道路谱数据采集,根据汽车用户需求,选择实际使用的路面数据,通过对路面高程数据去除毛刺、平滑连接、多倍频程滤波等预处理,进行功率谱密度分析计算,获得用户典型道路谱的等级功率谱;应用开发的 Caroad 软件系统重构出用户需要的道路时域谱,并生成可用于 ADAMS、VPG、Carsim 动力学软件的仿真路面,通过相关系数分析了道路谱的重构精度。通过实例分析,获得了符合用户需要的典型虚拟三维路面谱,道路谱重构精度较高。

**关键词:**用户需要;实测道路谱;功率谱密度分析;虚拟重构

中图分类号:U461.7

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.15.024

## Reconstruction Methods of Vehicle Road Spectrum Faced Users

Liu Yongchen<sup>1,2</sup> Wang Guolin<sup>1</sup> Sun Li<sup>2</sup> Shao Changzheng<sup>1</sup>

1. Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu, 212013

2. Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu, 223003

**Abstract:** In order to determine the road motivation accurately for the vehicle and road coupling dynamics, a road spectrum acquisition method was presented based on the actual users. Roads spectrum data was acquired by using multifunction laser pavement detector according to the needs of car users, and the road elevation data was preprocessed by removing the singular value, the smooth connection, multi-octave filter. The user typical road spectrum and grade power spectrum were acquired by the power spectral density analysis and calculation. A road domain spectrum of user need was reconstructed by application Caroad software system, and simulation road spectrum were generated, which could be used in ADAMS, the VPG, of Carsim software and road spectrum reconstruction precision were analyzed with the correlation coefficient method. By instance analysis, three-dimensional road spectrum was obtained that meets user's requirements, and the road spectrum reconstruction precision is better.

**Key words:** user need; measured road spectrum; power spectral density analysis; virtual reconstruction

## 0 引言

路面不平度是汽车行驶最主要的激励,对汽车舒适性、可靠耐久性等有直接影响,是汽车底盘部件磨损、疲劳失效的主要外因。目前,室内道路模拟试验受到各汽车厂家的重视,它不但能大大缩短试验周期和节约资金,而且试验可控性好,试验结果重复性强、精度高。而如何准确构造出符合设计需要的虚拟路面进行试验,是室内道路模拟试验的关键,也是汽车道路耦合动力学仿真研究、耐久试验研究的重要基础。文献[1-5]提出了汽车虚拟路面的数值重构方法,文献[6-8]提出了路面不平度时域序列的构建方法,文献[9]提出了路面不平度的测量方法。

在工程实际中,重构路面的准确性是关键,结合实测路面数据进行路面重构能保证这一点。根据实测路面高程数据进行满足用户要求的路面重构方法的研究尚未见文献报道,本文力求结合用户需要,通过实测高程数据处理及功率谱分析计算,利用开发的重构软件系统,等效重构出满足不同设计需要的道路谱。对于不同的汽车企业用户而言,在开发面向不同地区、客户群的各种车型,进行整车与零部件耐久性研究时,需要的道路谱特征是不同的,故此需要针对不同汽车企业用户提出一种道路谱重构的科学方法,为仿真分析、虚拟试验、台架试验等提供准确的虚拟路面。

## 1 道路谱采集试验

### 1.1 高程数据采集

路面不平度高程数据的采集设备是由激光传感器和垂直加速度传感器组合成的惯性参照道路纵断面剖面检测系统,其结构如图 1 所示,主要完成对道路不平度高程的采集处理和计算。在采集

收稿日期:2013-03-05

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA110116-04);江苏省自然科学基金资助项目(BK2011405);江苏省高校自然科学基金资助项目(13KJB580001);江苏省“青蓝工程”项目;淮阴工学院基金资助面上项目(HGB1105)

道路谱数据的过程中,需注明采集路段的位置信息以及车辆行驶的车道信息,以确保数据的准确性。系统中横断面有 9 个激光传感器,用于测出车道的横断面,也可测得路面车辙深度,分辨率为 0.01 mm,测量范围不小于 200 mm,精度(偏差)为 0.1%,采样频率(轮迹处)为 16 kHz。试验获得了各级典型路段的路面信息,已采集了东北、华东、华北等地区的路面数据,本文主要以华东地区的路面数据为例。

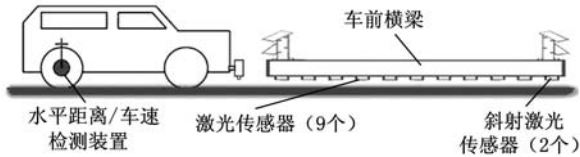


图 1 多功能激光路面检测仪结构示意图

## 1.2 试验数据预处理

根据汽车用户目标,选出测试路面数据库中用户关注的道路路段集合,按某地区路面类型或道路等级(如高速公路、一级公路、二级公路等)的比例选取样本,进行分段处理。路面不平度曲线以 2 km 为分段长度,不够 2 km 长度的数据舍弃,对分段处理后的道路数据进行统计和整理,作为典型道路谱提取的基础,进而确定道路实测数据分析样本。本文根据某汽车企业用户需要,选择了江苏某地区路段的道路试验数据作为分析对象,对数据进行预处理分析,即提取路面不平度曲线的趋势项、去除所有数据中的毛刺、进行分段路面数据间的平滑过渡连接、将等时间间隔采样数据转换为等距离间隔数据,进一步去除路面数据中车速异常的路段数据,得到有效的路面不平度曲线,图 2 所示为预处理后的省道 S245 某段五路时域数据曲线,横轴为等距离间隔,最小间隔为 1 mm。

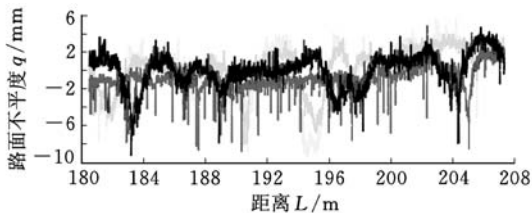


图 2 某段路面的五路路面不平度数据

## 2 典型道路谱提取

### 2.1 道路谱的功率谱密度分析计算

功率谱密度(power spectral density, PSD)分析是信号频谱分析的一种最常见方法。常用一条 PSD 值-频率值的关系曲线来表示结构在随机动态载荷激励下响应的统计结果,曲线下方面积为方差,即响应标准偏差的平方值。PSD 是一种概

率统计方法。本文路面不平度数据为稳态时域信号,可利用快速傅里叶变换(FFT)求取幅值频谱。

考虑后续研究需要的频率范围,确定道路路面波长的分析范围为 0.01~100 m,即分析的空间频率范围为 0.011~1001  $m^{-1}$ ,因此在计算过程中,路面不平度数据分析片段的长度取为 2 km。道路分析长度取 2 km 的主要原因是:最大分析波长为 100 m,如果分析路段太短则会影

响分析精度,导致丢失低频信息,若分段太长又将影响计算速度。为此将所有的路面不平度曲线数据分割为 2 km 长的数据段,然后分别计算其 PSD,进行分析。

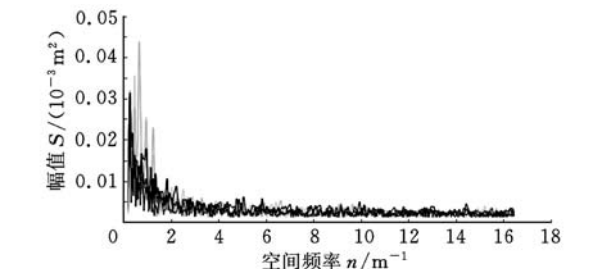


图 3 某段路面不平度幅值频谱曲线

表 1 功率谱分析参数

计算长度(距离)(m)	2000
分析频率范围( $m^{-1}$ )	0.01~100
抽样频率( $m^{-1}$ )	263
频率分辨率( $m^{-1}$ )	0.0005
FFT 分段点数	524 288( $2^{19}$ )
数据总点数	526 000
FFT 分段数	1
重叠比例	0
窗函数类型	Hanning
窗函数修正参数	1.633
计算前是否去均值	是

根据以上的幅值频谱计算,可以得到 5 个通道的 PSD 曲线,图 4 为线性坐标系统下的 PSD 曲线。

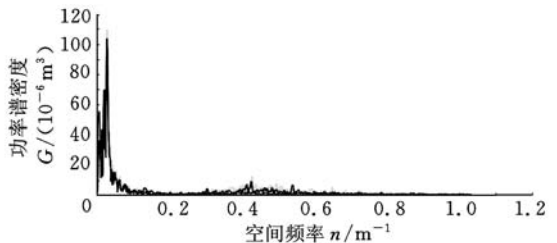


图 4 某段路面的 PSD 曲线

由于道路路面的 PSD 曲线的低频段内容比较丰富,而且幅值跨度较大,所以可用双对数坐标系进行分析,如图 5 所示。

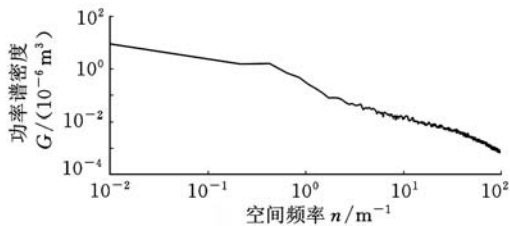


图 5 双对数坐标下某段路面的 PSD 曲线

### 2.2 道路谱多倍频程滤波

按照 GB/T7031-2005 中描述的多倍频程滤波方法,使用倍频程、1/3 倍频程和 1/12 倍频程组合滤波,对每一条 PSD 曲线进行滤波处理,去除掉高频段的冗余信息,在双对数坐标下形成一条光滑的 PSD 曲线(简称 SPSD 曲线),如图 6 所示。由图 6 可以看出,使用定带宽分析的方法计算道路路面的 PSD,在对数坐标图的高频区域出现了丰富的频率分量,容易给人产生错觉,这是由于过分强调真实功率谱分布或者是统计噪声引起了 PSD 曲线的起伏变化,因此该 PSD 应该使用平滑形式来描述。提取所有道路的总体典型道路谱:将所有 SPSD 曲线绘制在一个双对数坐标下,统计落在每一个频程中的数据点均值,连接所有频程中的均值点形成一条光滑曲线,该曲线即为总体典型道路谱。

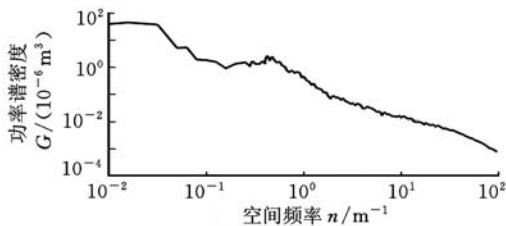


图 6 多倍频程滤波的 PSD 曲线

### 2.3 路面等级分析

GB/T7031-2005 明确规定了根据路面不平度分类的道路路面 8 级标准,即 A~H 级,并建议使用下式对路面不平度进行拟合计算:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w} \quad (1)$$

其中,  $n$  为空间频率( $m^{-1}$ ),它是波长  $\lambda$  的倒数,表示每米长度中波长的个数; $n_0$  为参考空间频率,  $n_0 = 0.1 m^{-1}$ ;  $G_q(n_0)$  为参考空间频率  $n_0$  下的路面 PSD 值,称为路面不平度系数,单位为  $m^2/m^{-1} = m^3$ ;  $w$  为频率指数,为双对数坐标上斜线的斜率,它决定路面功率谱密度的频率结构。

表 2 列出了各级路面不平度系数  $G_q(n_0)$  的几何平均值,同时也列出了路面不平度在  $0.011 m^{-1} < n < 2.83 m^{-1}$  范围内的均方根值  $\sigma_q$  的几何平均值。

表 2 路面不平度 8 级分类标准

路面等级	几何平均值	
	$G_q(n_0) (10^{-6} m^3)$ ( $n_0 = 0.1 m^{-1}$ )	$\sigma_q (10^{-3} m^3)$ ( $0.011 m^{-1} < n < 2.83 m^{-1}$ )
A	16	3.81
B	64	7.61
C	256	15.23
D	1024	30.45
E	4096	60.90
F	16 384	121.80
G	65 536	243.61
H	262 144	487.22

将所有滤波后的 PSD 曲线绘制于路面 8 级分级图中,得到路面总体概况,并根据不同的路面类型分类进行统计分析,得到不同的分布范围。从 PSD 曲线上看,一条道路并不一定只属于一个等级,它有可能跨越几个等级,如图 7 所示。图 7 中曲线是一条道路的经过平滑滤波的 PSD 曲线,可以看出它跨越了 A、B、C 三个等级,在汽车工程中,目前主要通过该曲线图来评定和分析道路的平整度情况以及研究路面空间频率的分布范围等。

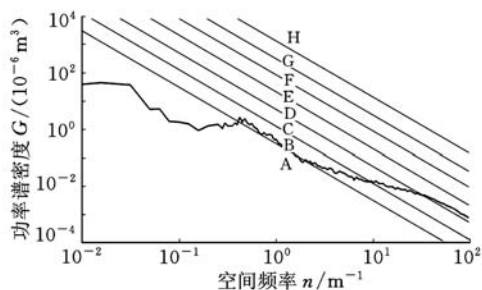


图 7 曲线穿越路面分级界限图

### 3 虚拟道路重构

在得到所有 PSD 曲线后,在不同的空间频率点上进行平均计算,得到不同分类的均值 PSD 曲线,即得到具有代表性的典型道路谱(均值 PSD 曲线)。在实际高程数据基础上,通过 AR 模型法、分型法等方法以及傅里叶逆变换,即可得到不同长度的时域序列,进而可以生成虚拟路面,以提供给不同用户进行各种台架试验和计算机虚拟仿真分析。

#### 3.1 道路重构的软件实现

本文在混合编程中使用 MCC 编译器,由 VC++调用 MATLAB,开发出 Caroad 道路重构软件,进行虚拟路面重构<sup>[10]</sup>。Caroad 道路重构软件可根据用户需要定义路形,并依据 AR 模型理论、分型理论重构路面,可方便、快捷地生成动力学分析所需的虚拟路面文件。用户可根据前期处

理的数据,选择 AR 模型、分型理论模型进行路面重构,同时可根据需要,虚拟生成 Carsim、VPG、ADAMS 格式的虚拟路面,供后续仿真分析使用。

### 3.2 重构精度分析

可以通过相关系数法分析重构出的路面不平度功率谱与原始谱之间的拟合精度,进而确定重构路面的准确性。相关系数计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中, $x_i$  为原始路面不平度数据样本; $y_i$  为重构路面不平度数据样本; $m$  为正整数。

## 4 实例分析

为说明以上典型道路谱提取算法的有效性,选择了华东地区的采样路段进行虚拟重构。

### 4.1 计算用户典型道路谱

某汽车企业用户关注华东地区道路状况,故选择华东地区路面数据,公路总里程为 1740 km,按照 2 km 分段计算,共计 870 段。针对每一个分段,运用前述的方法进行计算,得出 SPSD 曲线,然后对所有分段 SPSD 曲线上的 PSD 值进行平均,最终得到华东地区典型道路的 PSD 曲线,即华东地区的典型道路谱,如图 8 所示。可以看出,典型道路主要分布于 A 等级,只是在  $10 \sim 100 \text{ m}^{-1}$  的频段上跨越到了 B、C 等级,极微量的高频部分进入了 D 等级,没有 E~H 等级。

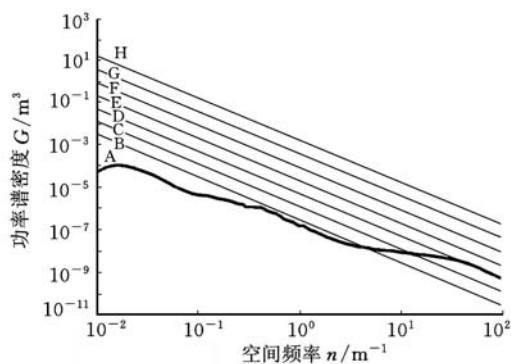


图 8 华东地区典型道路谱曲线图

### 4.2 路面重构及分析

将以上典型道路谱曲线通过 Caroad 路面重构系统中的 AR 模型法进行路面重构,得到不同长度的时域序列,如图 9、图 10 所示,进而生成具有代表性的路面曲线和虚拟仿真路面,如图 11 所示,其三维路面数据可保存为 \*.rdf 格式、\*.par 格式、\*.dyn 格式文件,可分别供给 ADAMS、Carsim、VPG 动力学软件仿真使用。

随机选取图 10 中沿路面长度方向某一系列不

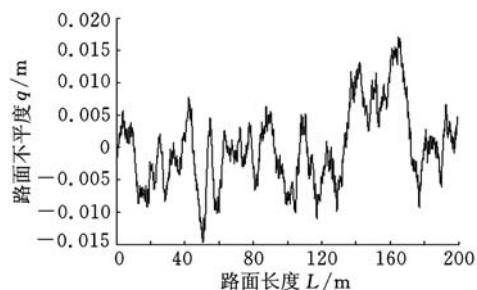


图 9 重构路面一维时域序列

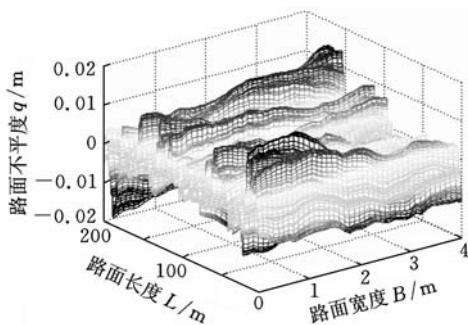


图 10 重构路面二维序列

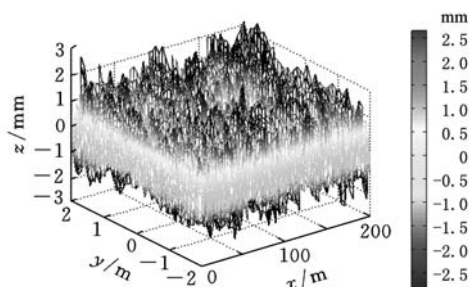


图 11 三维重构虚拟路面

平度数据来估计路面的功率谱,并与原始路面典型功率谱进行比较,如图 12 所示。通过计算图 11 中沿路面长度方向的每一列的功率谱与原始谱之间的相关系数  $r$  (图 13) 可以看出,相关系数的最小值为 0.914,可见,重构出的路面不平度功率谱与原始典型道路谱之间的拟合精度较高,重构方法可行、结果可信。

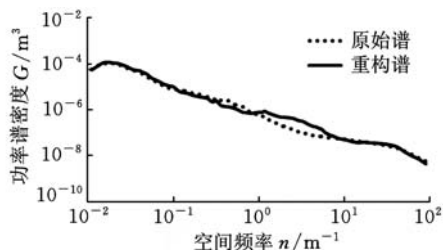


图 12 重构路面与原始路面的功率谱比较

## 5 结论

(1) 汽车企业用户在开发车辆产品过程中,需要准确的路面激励,以进行道路虚拟仿真实验、汽车耐久性实验等,为此本文提出了一种符合汽车

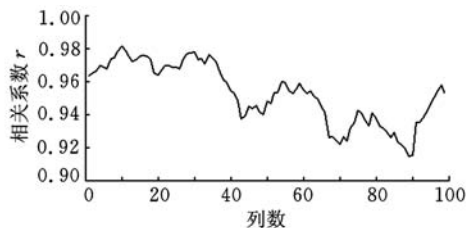


图 13 重构谱与原始谱的相关系数

运行实际的汽车道路谱重构方法。

(2)将路面不平度高程测试数据样本长度确定为 2 km,有利于提高数据运行速度和处理精度以及进行多倍频程滤波等预处理,在双对数坐标下形成一条光滑 SPSD 曲线,作为典型道路谱提取的基础。

(3)应用开发的 Caroad 软件生成典型路面的重构时域谱序列,该软件可以根据需要定义路形,三维路面数据可保存为 \*.rdf、\*.par、\*.dyn 格式文件,以供 ADAMS、Carsim、VPG 动力学软件仿真使用。

#### 参考文献:

- [1] 唐光武,成思源. 二维路面不平度的时域模型及计算机仿真[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2000,23(6):31-34.  
Tang Guangwu, Cheng Siyuan. Time Domain Model of 2D Road Roughness and Numerical Simulation [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23(6): 31-34.
- [2] 张永林,钟毅芳. 车辆路面不平度输入的随机激励时域模型[J]. 农业机械学报,2004,35(2):9-12.  
Zhang Yonglin, Zhong Yifang. Time Domain Model of Road Undulation Excitation to Vehicles [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 9-12.
- [3] 唐光武,贺学锋. 路面不平度的数学模型及计算机模拟研究[J]. 中国公路学报,2000,13(1):114-117.  
Tang Guangwu, He Xuefeng. Mathematical Model of Road Roughness in Time Domain and Its Simulation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(1): 114-117.
- [4] 朱茂桃,刘建,王国林. 路面不平度重构的 AR 模型阶数确定方法研究[J]. 公路交通科技,2010,27(7):25-28.  
Zhu Maotao, Liu Jian, Wang Guolin. Research on Method of Determining Order of AR Model for Road Roughness Reconstruction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(7): 25-28.
- [5] 王若平,李成彬,王国林. 分形模型在路面不平度再

现中的应用[J]. 吉林大学学报(工学版),2010,40(4):991-994.

Wang Ruoping, Li Chengbin, Wang Guolin, et al. Application of Fractal Model in Road Surface Roughness Reconstruction [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2010, 40(4): 991-994.

- [6] 王岩松,李章明,何辉. 四轮车辆非平稳路面不平度时域模拟及小波分析[J]. 汽车工程,2004,26(1):42-47.  
Wang Yansong, Li Zhangming, He Hui. Nonstationary Road Roughness Simulation in Time Domain and Wavelet Analysis for Four Wheel Vehicles [J]. Automotive Engineering, 2004, 26(1): 42-47.
- [7] 刘献栋,邓志党,高峰. 基于逆变换的路面不平度仿真研究[J]. 中国公路学报,2005,18(1):122-126.  
Liu Xiandong, Deng Zhidang, Gao Feng. Study of Simulation of Road Roughness Based on Inverse Transform [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 122-126.
- [8] 张永林,易启伟,丁世云,等. 三维随机路面时序建模研究[J]. 武汉理工大学学报,2007,29(8):92-95.  
Zhang Yonglin, Yi Qiwei, Ding Shiyun, et al. Research on Time Series Modeling Method of 3D Stochastic Road [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(8): 92-95.
- [9] 汪斌,过学迅,徐占,等. 路面时域波形室内再现方法研究[J]. 中国机械工程,2010,21(3):363-366.  
Wang Bin, Guo Xuexun, Xu Zhan, et al. Research on Algorithm of Road Surface Time Waveform Reappearanc [J]. China Mechanical Engineering 2010, 21(3): 363-366.
- [10] 刘永臣,王国林,杨彦鹏,等. 基于实测道路谱的路面等效重构研究[J]. 农业工程学报,2012,28(19):26-32.  
Liu Yongchen, Wang Guolin, Yang Yanpeng, et al. Road Surface Equivalent Reconstruction Based on Measured Road Spectrum [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(19): 26-32.

(编辑 苏卫国)

作者简介:刘永臣,男,1974年生。江苏大学汽车与交通学院博士研究生,淮阴工学院交通工程学院副教授。主要研究方向为道路谱与汽车耐久性。王国林,男,1965年生。江苏大学汽车与交通学院教授、博士研究生导师。孙丽,女,1979年生。淮阴工学院交通工程学院讲师。邵长征,男,1984年生。江苏大学汽车与交通学院硕士研究生。