

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.08.018

# 基于路况识别及素材谱的汽车用户路线 疲劳损伤获取研究\*

苏亮, 吴道俊, 陈泉泉

(厦门金龙联合汽车工业有限公司, 福建省安全与节能技术企业重点实验室, 厦门 361023)

**[摘要]** 为识别和获取用户路线的汽车结构疲劳损伤, 提出了“素材谱”和“探测车”的概念, 进而提出了一种基于路况识别、划分并与素材谱相结合的用户路线的汽车结构疲劳损伤的便捷获取方法。首先, 构建了IRI(国际平整度指数)识别路面等级的数学模型, 建立了通过探测车的简配传感器方案识别用户路面等级的方法, 并研究了车速与IRI的关联性和独立性。接着, 提出了基于IRI和车速二维变量对用户路线的探测车道路况细化分级及里程分布确定的方法。然后, 结合全通道样车在本地采集的素材谱及单位里程损伤, 最终高效地计算、获得用户路线及区域的汽车结构疲劳损伤。从而创建和形成了“素材谱+探测车”识别用户路线总损伤的解决方案。验证结果良好, 表明所研究技术方法具有良好的可操作性、精确性和有效性。

**关键词:** 损伤; 用户; 路面; IRI; 素材谱; 探测车

## Study on Calculation of Customer Vehicle Fatigue Damage Based on Road Condition Identification and Element Spectrum

Su Liang, Wu Daojun &amp; Chen Quanquan

*Xiamen King Long United Automotive Industry Co., Ltd., Key Laboratory of Bus Safety and  
Power-saving Technology Enterprises of Fujian Province, Xiamen 361023*

**[Abstract]** In order to identify and obtain the automotive structure fatigue damage of user route, the concepts of ‘element spectrum’ and ‘survey vehicle’ are proposed, and a convenient method for obtaining fatigue damage of automotive structure of user route based on road condition identification, classification and element spectrum is proposed. Firstly, the mathematical model of IRI (International Roughness Index) is established to identify the road grade and the method of identifying the user’s road surface grade through the simple sensor scheme is established. And the correlation and independence between vehicle speed and IRI are studied. Subsequently, the method for determining the road classification and mileage distribution of the survey vehicle for user route based on IRI and vehicle speed is proposed. Then, combined with the element spectrum and unit mileage damage collected locally by the full-channel vehicle, the fatigue damage of the vehicle structure on the user’s route is finally calculated efficiently. Thereby, the solution of ‘element spectrum + survey vehicle’ to identify the total damage of user route is created. The verification results are good, indicating that the technology and method studied is operable, exact and effective.

**Keywords:** damage; user; road surface; IRI; element spectrum; survey vehicle

\* 国家重点研发计划“新能源汽车”重点专项项目(2021YFB2500704)资助。

原稿收到日期为2024年02月26日, 修改稿收到日期为2024年04月10日。

通信作者: 吴道俊, 博士、高级工程师, E-mail: wudaojun217@126.com。

## 前言

结构耐久可靠性是汽车最重要的性能之一。获取和识别用户的路况及汽车结构疲劳损伤,是汽车产品研发中重要的工作环节,是评价用户工况对结构影响的重要数据,是研究用户关联和可靠性试验强化系数的前提,是评价零部件可靠性、制定设计目标和实现轻量化的重要条件。

汽车用户路况复杂,为获取用户目标路况及结构疲劳损伤信息,目前国外和国内的学者及工程技术人员开展了一定的探索和研究。已有的方法主要有两类:一类是基于问卷或市场调查的方法,另一类是基于全通道整车采集的方法。其中,基于问卷或市场调查的方法,即通过研究和实践问卷设计、用户调查和数据统计,获取城市道路、高速公路、省道和乡村路等类型的比例,然后在典型路段上进行载荷谱采集,完成总体的计算和预测。Mattetti等<sup>[1]</sup>通过2 000份问卷对欧美重要市场进行产品用户用途分类和比例的调研,并统计获取用户目标信息。吴橙<sup>[2]</sup>开展了汽车可靠性问卷设计,并研究问卷的评价方法。凌龙<sup>[3]</sup>通过对用户群体、车辆市场定位分析,研究用户的路面类型及比例等信息。陈传钦等<sup>[4]</sup>、武振等<sup>[5]</sup>通过问卷调查车辆用户的实际使用情况,统计路面类型及里程比例等用户信息,为用户损伤获取提供条件。另外,基于全通道整车采集的方法,即采用整车及大量传感器进行道路载荷谱采集,完成大里程数的全通道的用户现场路况数据获取。Passos等<sup>[6]</sup>在样车上装载了载荷、力矩、位移、加速度等众多传感器及采集通道。并在用户典型区域社会道路开展大量的载荷谱测试和疲劳损伤计算。王世英<sup>[7]</sup>、张佳云<sup>[8]</sup>在研究用户关联及用户损伤中,对样车关键部位布置各类传感器,然后发到典型市场、主销地区进行用户道路载荷谱数据采集。熊飞<sup>[9]</sup>开展了全国用户典型道路谱采集及损伤计算,测试涵盖了加速度、位移、应变、力等多个传感器类型和数据通道。黄云毅等<sup>[10]</sup>、郑国峰<sup>[11]</sup>、张禄<sup>[12]</sup>研究了载荷谱全方位采集方案,包括零部件测点以及传感器通道配置方案。

经调研对比发现,基于问卷或市场调查的方法,具有可操作性、直接性,耗费成本也较低;但是,受调查人存在较强的主观性,其中按道路大类分类的方法也较为粗糙,例如城市道路并非都是良好路面,其中也存在较恶劣的路线或损坏失修的局部路段;所

以,采用问卷及统计调查用户使用路况的结果精度存在局限性。基于全通道整车采集的方法,能够获取用户场景下结构所有关注点的损伤信息;但是,这种直接采用全通道样车在用户现场采集和获取用户路况及疲劳损伤的方法,须将全通道样车和大量仪器设备发往外地,而样车上须贴装大量的应变片、应变花、位移传感器、加速度传感器等,以及配套布置大量通道数据传输线,这些容易失效,而用户现场往往维修条件差、操作存在难度、排查维修时间长,花费人工工时较多,影响工作效率。

因此,研究客观数据化、精细化、便捷化的汽车用户路况及结构疲劳损伤获取方法,显得非常必要和迫切。

本文提出基于“素材谱+探测车”的技术方法;首先,研究国际平整度指数(IRI)<sup>[13-16]</sup>数学模型及其对路况的表征和路面不平度的等级识别,并研究路面等级与车速的二维区间划分;然后,通过简配通道方案的探测车采集用户载荷谱数据,获取用户路况信息在二维区间的里程分布;之后,利用全通道的目标车,无须发往用户现场(可规避外地现场条件不足等问题),仅须在主机厂所在地采集素材谱并计算单位里程损伤;两者结合,最终计算和获取用户路线或区域的汽车结构疲劳损伤。通过与实际目标数据对比,验证方法的有效性。

## 1 基于IRI的路面等级识别方法研究

### 1.1 IRI的计算方法

汽车在行驶过程中,承受着路面不平度引起的激励,对汽车零部件结构产生动态载荷,从而容易产生疲劳损伤和疲劳破坏。路面等级是影响汽车结构耐久可靠性的重要因素。

为了度量路面不平度水平及其等级,以国际平整度指数(IRI)作为评价指标,它采用1/4汽车模型,如图1所示,计算行驶距离内悬架系统的簧载质量 $m_2$ 与非簧载质量 $m_1$ 的动态响应累积统计量,从而得到与行驶距离的比值,其单位为 $\text{m/km}$ <sup>[17-18]</sup>。IRI的计算表达式如式(1)所示。由于IRI可将路面等级通过数字来表达<sup>[19]</sup>,大大提高了计算和对比的精确性和便捷性。

$$IRI = \frac{1}{L} \int |v_1 - v_2| dt \quad (1)$$

式中:IRI为路面不平度指标, $\text{m/km}$ ;  $v_1$ 、 $v_2$ 分别为簧上和簧上的速度 $\dot{z}_1$ 、 $\dot{z}_2$ ;  $L$ 为路段里程,km。

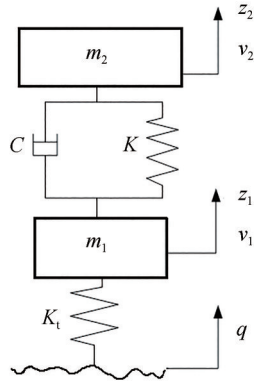


图1 汽车1/4振动数学模型

### 1.2 路面等级识别的数学模型及限值建立

结合以往的研究<sup>[18,20]</sup>,可以确定国际平整度指数 IRI 与路面不平度指数  $G_q(n_0)$  存在如式(2)的关系:

$$IRI = k \sqrt{G_q(n_0)} \quad (2)$$

式中: $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数; $k$ 为系数。

基于汽车1/4汽车数学模型,通过在道路模拟试验台生成等级路面  $G_q(n_0)$  的激励,获取车辆响应并计算 IRI,从而可以获得多组数据,以确定  $k$  值。其中,等级路面激励<sup>[21]</sup>信号可由式(3)表达:

$$G_q(f) = G_q(n_0) \times n_0^2 \times \frac{u}{f^2} \quad (3)$$

式中: $G_q(f)$ 为路面激励时间频率功率谱密度(PSD),  $m^2/Hz$ ;  $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数,对应路面不平度等级;  $n_0$ 为参考空间频率,  $0.1m^{-1}$ ;  $u$ 为车速,  $m/s$ ;  $f$ 为时间频率,  $Hz$ 。其中,路面不平度系数如表1所示。

表1 路面等级与  $G_q(n_0)$  取值

路面等级	$G_q(n_0)/(10^{-6}m^3)$
A	16
B	64
C	256
D	1 024
...	...

以B级为例,在车速30 km/h下,有: $G_q(f) = 64 \times 10^{-6} \times (0.1)^2 \times \frac{30/3.6}{f^2} = (5.33 \times 10^{-6}) \times f^{-2}$ ,即可得到30 km/h下B级路面激励的时间PSD曲线。

在道路模拟试验台,经过频域时域信号转换,播放各等级路面各车速下的激励信号,基于同步采集的簧上簧下之间的位移响应,计算速度并得到相应的IRI,数据汇总如表2所示。

表2 IRI与 $\sqrt{G_q(n_0)}$ 数据汇总

序号 $n$	车速/( $km \cdot h^{-1}$ )	等级	$\sqrt{G_q(n_0)}$	IRI/( $m \cdot km^{-1}$ )
1	25	A	4	1.99
2		B	8	3.83
3		C	16	8.40
4	30	A	4	1.75
5		B	8	3.50
6		C	16	7.34
7	40	A	4	1.54
8		B	8	3.11
9		C	16	6.51
10	50	A	4	1.34
11		B	8	2.77
12		C	16	5.75
13	60	A	4	1.23
14		B	8	2.59
15		C	16	5.41
16	70	A	4	1.22
17		B	8	2.46
18		C	16	5.24

采用最小二乘法对表2系列数据点( $\sqrt{G_q(n_0)}$ , IRI)进行统计和拟合<sup>[22]</sup>,从而获得如式(4)所示的拟合关系式。计算拟合优度的关键指标——判定系数<sup>[22]</sup>结果为0.9,接近于1,表明拟合程度高、效果良好。

$$IRI = 0.4 \times \sqrt{G_q(n_0)} \quad (4)$$

参照文献[21]中各个路面等级的关系和方法,确定各路面等级上限,如式(5)所示。

$$IRI^+ = \sqrt{2} \times 0.4 \times \sqrt{G_q(n_0)} \quad (5)$$

结合表1和式(4)、式(5),得到各等级的IRI及其上限值,如表3所示。两个相邻的上限值构成相应等级的区间,例如B级的IRI值在2.26~4.52之间。

表3 路面等级IRI值及其上限值

等级标准值	IRI/( $m \cdot km^{-1}$ )	等级上限	等级限值IRI <sup>+</sup> /( $m \cdot km^{-1}$ )
A	1.6	A+	2.26
B	3.2	B+	4.52
C	6.4	C+	9.05
...	...	...	...

### 1.3 IRI评定路面等级方法的试验验证

为评价IRI识别路面等级方法的有效性,选取多个用户路段载荷谱。参照汽车1/4振动数学模型,已知用户载荷谱的响应信号,可通过道路模拟试验台

反求获得车轮激励 PSD,评判相应路段的等级。从而用于验证 IRI 计算和识别的路面等级结果的正确性。

以表 4 中的路段 2 为例,通过响应信号计算 IRI 而识别的路面等级为 B 级。响应信号通过道路模拟反求的路面垂向位移的 PSD 曲线,如图 2 所示;图中的虚线为按式(6)绘制的等级限值<sup>[21]</sup>,相邻的限值构成等级 B 的区域;由图可见道路模拟的位移 PSD 曲线很好地落在 B 级区域范围。两者都为 B 级,表明 IRI 识别该路段等级的精度良好。

**表 4 基于道路模拟 PSD 验证的 IRI 识别等级结果评价**

序号	车速/ (km·h <sup>-1</sup> )	IRI/ (m·km <sup>-1</sup> )	IRI 识别的 等级	道路模拟 PSD 验证识别等级
路段 1	32.0	2.0	A	A
路段 2	30.0	3.9	B	B
路段 3	28.4	6.0	C	C
路段 4	35.0	1.2	A	A
路段 5	33.1	3.1	B	B

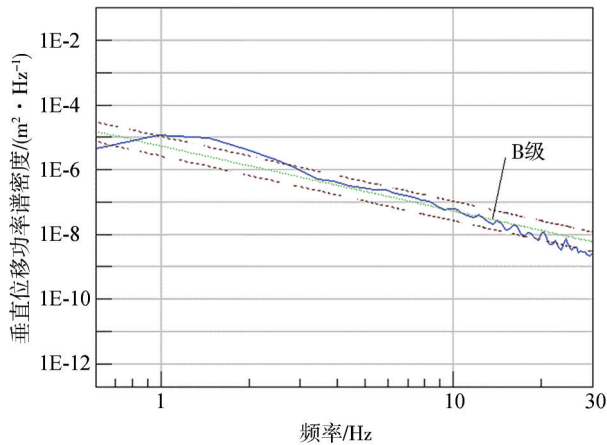


图 2 IRI 识别 B 级路段对应道路模拟激励 PSD

$$G_q(f) = 2 \times G_q(n_0) \times n_0^2 \times \frac{u}{f^2} \quad (6)$$

汇总抽取的用户路段的识别结果和验证结果(如表 4 所示),从而说明了基于 IRI 识别路面等级方法及其限值的有效性。

## 2 车速对 IRI 的影响研究

IRI 是从样车行驶过程的响应数据获得,车速作为样车行驶中的重要参数,有必要研究其对 IRI 的影响。采集 3 条典型路段,获取在不同车速下的 IRI 结

果,如表 5 所示,描绘相应的曲线如图 3~图 5 所示。

**表 5 同路段不同车速的 IRI 计算结果**

路段	目标车速/ (km·h <sup>-1</sup> )	IRI/ (m·km <sup>-1</sup> )	IRI 均值/ (m·km <sup>-1</sup> )	IRI 与均 值的比值	IRI 标准差	变异 系数/%
物流园 公路	10	3.96	3.79	1.05	0.26	6.8
	25	3.44		0.91		
	30	3.42		0.90		
	40	3.91		1.03		
	50	3.86		1.02		
	60	3.95		1.04		
开发区 大道	10	3.41	3.41	1.00	0.16	4.6
	25	3.26		0.96		
	30	3.36		0.99		
	40	3.68		1.08		
	50	3.49		1.02		
	60	3.27		0.96		
城市 干线	10	1.66	1.61	1.03	0.11	6.8
	25	1.78		1.11		
	30	1.50		0.93		
	40	1.68		1.04		
	50	1.51		0.94		
	60	1.54		0.96		

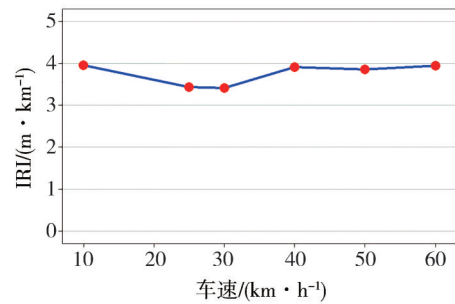


图 3 IRI 散点连线图—物流园公路

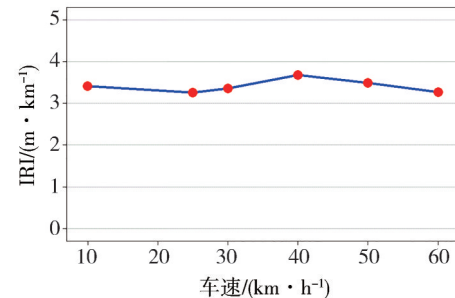


图 4 IRI 散点连线图—开发区大道

综合以上多个路段数据分析,结果表明,同一路段在车速变化时,IRI 没有明显变化,较为随机,且 IRI 稳定在均值附近,通过标准差除以均值,得到的

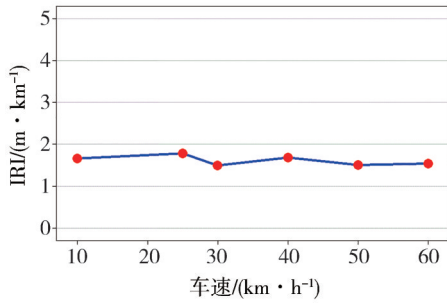


图5 IRI散点连线图—城市干线

变异系数<sup>[23]</sup>均在8%以内,数值分布集中。可见,IRI受车速的影响小,IRI与车速两者具有独立性;路面等级识别可通过IRI独立完成。

### 3 基于“素材谱”与“探测车”的用户路线疲劳总损伤便捷获取

为了获取用户路线的结构疲劳总损伤,提出一种基于“素材谱”与“探测车”的便捷获取方法。首先,综合考虑路面等级与车速的二维区间划分,基于探测车(仅须简配传感器通道)采集载荷谱确定各个区间的里程分布;另外,利用全通道样车(目标车)只须就近采集素材谱损伤;两者结合,最终计算用户路线的汽车结构疲劳总损伤,其技术路线如图6所示。其中,探测车的简配通道只须包括车速、簧上簧下加速度、悬架相对位移。

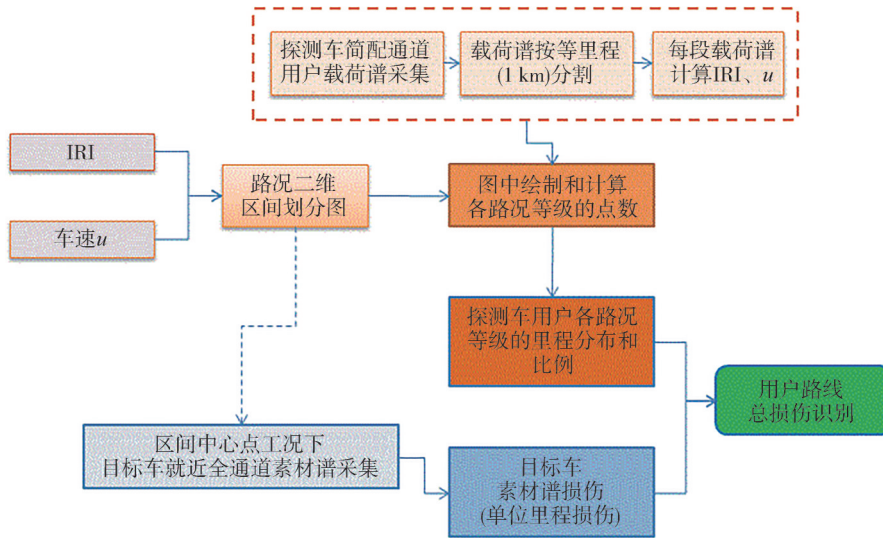


图6 基于“素材谱”与“探测车”的损伤获取技术路线

#### 3.1 路面等级与车速二维区间划分

由于汽车上结构件其疲劳损伤既受到路面不平度等级的影响,同时还与车速存在联系。所以,为了更加全面和细致地研究行驶路况,提出一种路面不平度等级及车速联合划分区间的方法。

基于IRI(单位:m/km)将路面划分等级:A级对应 $IRI < 2.26$ , B级对应 $2.26 \leq IRI < 4.52$ , C级对应 $4.52 \leq IRI < 9.05$ ,...。对车速 $u$ (单位:km/h)的划分区间: $(0, 5)$ 、 $[5, 15)$ 、 $[15, 25)$ 、 $[25, 35)$ 、 $[35, 45)$ 、 $[45, 55)$ 、 $[55, 65)$ ...

从而组成一系列的二维区间,例如,B级车速5~15 km/h的区间标记为B10,以此类推,具体如表6所示。对应的区间划分图,如图7中粗实线所划分结果。通过这种更全面和细致的划分,以获得更精确

的路况分布和路线疲劳损伤计算结果。

表6 二维的区间标记罗列

...	...	...	...	...	...	...
B10	B20	B30	B40	B50	B60	...
A10	A20	A30	A40	A50	A60	...

#### 3.2 素材谱及其损伤获取

素材谱获取,只须在主机厂所在城市或周边,利用目标车进行全通道采集多段样本,筛选IRI为3.19、1.6 m/km...等相关路段,以不同车速(10、20、30 km/h... )通过,从而获取目标车的全通道素材谱。实测采集现场情况,如图8所示。其中,车身骨架结构应变测点情况,如图9的箭头位置,结合CAE分析的热点位置,同时考虑在骨架的前、中、后段及左右



表8 用户某路线等里程分割后的IRI和车速

分割路段 序号	时间/s	里程/km	平均车速/ (km·h <sup>-1</sup> )	IRI/ (m·km <sup>-1</sup> )
1	419	1.0	8.6	2.38
2	201	1.0	17.9	1.44
3	92	1.0	39.1	1.8
4	215	1.0	16.9	2.3
5	92	1.0	38.9	1.81
6	167	1.0	21.6	1.25
7	124	1.0	28.9	1.71
8	177	1.0	20.3	2.07
9	179	1.0	20.3	2.25
10	113	1.0	31.7	2.47
11	104	1.0	34.6	1.95
12	147	1.0	24.6	1.65
13	80	1.0	44.8	1.61
14	78	1.0	46.3	2.28
15	73	1.0	49.4	1.82
16	85	1.0	42.1	2.39
17	80	1.0	45.3	1.12
18	68	1.0	52.9	0.72
19	69	1.0	51.8	0.95
20	92	1.0	39.6	2.20
21	69	1.0	51.9	1.14
22	76	1.0	47.2	1.47
23	188	1.0	19.1	2.04
24	120	1.0	30.0	2.04
25	314	1.0	11.5	2.28
26	93	1.0	39.0	1.55
27	83	1.0	43.1	1.92
28	159	1.0	22.7	1.66
29	222	1.0	16.2	2.31
30	343	1.0	10.4	2.77
31	148	1.0	24.5	2.96
32	184	1.0	19.5	3.11
33	84	1.0	42.8	2.90
34	174	1.0	20.8	3.63

表9 各划分区间的状态点数分布

区间	B10	B20	B30	B40	B50	B60
状态点数	3	5	1	2	1	0
里程数/km	3	5	1	2	1	0
区间	A10	A20	A30	A40	A50	A60
状态点数	0	7	3	6	6	0
里程数/km	0	7	3	6	6	0

素材谱疲劳损伤(单位里程损伤),得到该区间对应的损伤,如表10所示;将表10中各个区间的损伤相加,最终得到该应变测点在整条用户路线的总损伤(探测得到的总损伤),最终结果如表11所示。

$$D = \sum_i \sum_j D_{ij} \cdot \lambda_{ij} \tag{7}$$

式中: $D_{ij}$ 为划分的区间素材谱损伤; $\lambda_{ij}$ 为对应划分区间内的点数(即相应的里程数); $D$ 为路线总损伤; $i$ 代表路面等级,取A级、B级、C级...; $j$ 代表车速等级,取值10、20、30 km/h...

基于以上方法与流程,对某城市区域的干线场景的公交路线的路况(共203 km)划分与计算结果,如表12所示;探测获得的该城市区域相应的结构疲劳损伤结果及精度数据,如表13所示。

基于素材谱+探测车的方法,获得用户具体路线、场景区域的探测损伤,如表11和表13所示。与路线实际损伤验证数据相比,结果表明,两者比值都控制在[0.8, 1.2]之间,很好地达到国际共识的[0.5, 2.0]的精度要求<sup>[25]</sup>;且各个比值的平均值达到0.97,即探测损伤十分接近实际目标损伤数据;证明了所研究方法的精确性和有效性。此外,可根据工程实际需要,按照本文研究方法类推,进一步细化IRI和车速的划分,从而还可以获得更高的精度,也说明该方法具有拓展性。

## 4 结论

为解决用户路线汽车结构疲劳损伤识别和获取困难的问题,本文提出了“素材谱”、“探测车”的概念,创建了一整套便捷获取用户路线或区域汽车结构疲劳损伤的解决方案和技术方法。首先,通过构建IRI识别路面等级的数学模型及限值,建立了路面等级与车速二维变量的细分区间;然后,基于探测车采集简配通道载荷谱,实现路面路况的细致划分;结合在本市或就近采集的目标车全通道载荷谱(注:采集地点可不受限制)作为素材谱,从而快速地计算和获取用户路线的疲劳总损伤。

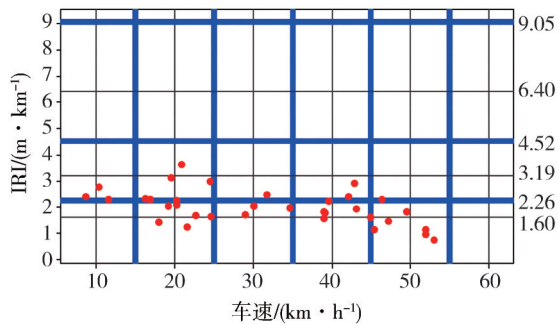


图10 各个划分区间的用样本点分布

表 10 各应变测点在各划分区间的素材谱损伤

区间	应变测点 1	应变测点 2	应变测点 3	应变测点 4	应变测点 5	应变测点 6
B60	0	0	0	0	0	0
B50	5.54E-07	1.60E-05	3.92E-06	1.29E-06	2.54E-08	9.55E-07
B40	5.96E-07	2.15E-05	5.73E-06	2.85E-06	5.69E-08	1.91E-06
B30	9.72E-08	3.41E-06	4.29E-07	4.29E-07	9.42E-09	1.87E-07
B20	4.71E-07	1.30E-05	1.72E-06	2.22E-06	3.88E-08	8.90E-07
B10	6.59E-08	3.56E-06	1.97E-07	3.63E-07	7.16E-09	1.68E-07
A50	3.77E-07	1.06E-05	1.63E-06	9.52E-07	1.77E-08	1.71E-06
A40	4.60E-07	2.45E-05	2.32E-06	2.37E-06	5.96E-08	4.85E-06
A30	2.38E-07	7.83E-06	7.99E-07	2.27E-06	7.27E-08	5.38E-07
A20	1.37E-07	5.64E-06	3.48E-07	8.87E-07	1.58E-08	4.98E-07
A10	0	0	0	0	0	0

表 11 用户某路线探测损伤与实际损伤对比

损伤类别	应变测点 1	应变测点 2	应变测点 3	应变测点 4	应变测点 5	应变测点 6
路线探测损伤	3.00E-06	1.06E-04	1.71E-05	1.36E-05	3.03E-07	1.17E-05
路线实际损伤	2.81E-06	9.82E-05	1.44E-05	1.62E-05	3.70E-07	1.22E-05
比值	1.07	1.08	1.19	0.84	0.82	0.96

表 12 某城市区域干线场景公交线路路况分布

区间	B10	B20	B30	B40	B50	B60
里程数/km	4	4	10	7	2	1
区间	A10	A20	A30	A40	A50	A60
里程数/km	7	33	39	43	47	6

结果显示,所研究的探测获取的损伤与实际目标损伤比值在[0.8, 1.2]之间,达到且优于国际认可的[0.5, 2.0]范围要求;说明该技术方法在用户路线或区域的汽车结构疲劳总损伤的识别上具备良好的精度。

表 13 某城市区域干线场景公交线路探测损伤与实际损伤对比

损伤类别	应变测点 1	应变测点 2	应变测点 3	应变测点 4	应变测点 5	应变测点 6
城市干线探测损伤	1.52E-05	5.56E-04	8.06E-05	7.85E-05	1.98E-06	6.95E-05
城市干线实际损伤	1.70E-05	4.79E-04	7.47E-05	9.02E-05	2.18E-06	7.48E-05
比值	0.89	1.16	1.08	0.87	0.91	0.93

在该方法研究中,所提出的基于“素材谱”+“探测车”获取用户路况分布及汽车疲劳损伤的技术方案,只须探测车简配传感器方案便可识别用户路况信息,避免了全通道的目标车发往用户区域进行载荷谱采集;便捷性强,出问题概率大大降低,维护方便,降低人工工时和设备成本;且可与目标车两地并行开展工作,减少开发周期,提高工作效率。同时,改变以往通过问卷获得路面分类的人为主观描述,真正实现用户路况信息的数据化、客观化。

此外,在探测车载荷谱数据的处理中,应用了路线载荷谱的等里程分割的方法,实现载荷谱分段数与里程数直接建立对应关系,计数样本点数即获得里程数,为里程分布结果的获取提供了便捷手段。

## 参考文献

- [1] MATTETTI M, MOLARI G, SEDONI E. Methodology for the realisation of accelerated structural tests on tractors [J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 113(3): 266-271.
- [2] 吴澄. 汽车可靠性问卷评价新方法 [J]. *农业装备与车辆工程*, 2018, 56(10): 37-41.  
WU C. New method for evaluating the automobile reliability questionnaire [J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2018, 56(10): 37-41.
- [3] 凌龙. 基于实际载荷谱的驱动桥台架疲劳试验等效方法研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.  
LING L. Research on equivalent method of fatigue test of drive axle platform based on actual load spectrum [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2022.
- [4] 陈传钦, 陈春燕, 钟志宏, 等. 基于用户道路载荷谱采集的试验场关联研究 [J]. *工程与试验*, 2020, 60(2): 31-33.

- CHEN C Q, CHEN C Y, ZHONG Z H, et al. Study on proving ground correlation based on public road load data acquisition[J]. *Engineering & Test*, 2020, 60(2): 31-33.
- [5] 武振, 郭瑞玲, 梁东, 等. 用户关联技术在整车可靠性试验中的应用[J]. *北京汽车*, 2020(5): 16-20.
- WU Z, GUO R L, LIANG D, et al. Application of user related technology in vehicle reliability testing [J]. *Beijing Automotive Engineering*, 2020(5): 16-20.
- [6] PASSOS F, MADURO F, COURA I. Customer profile identification and correlation between the customer damage and durability tests[C]. *SAE Paper 2019-36-0189*.
- [7] 王世英. 基于车辆损伤贡献分析的试验场耐久性试验方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- WANG S Y. The study of PG durability test method based on vehicle damage contribution analysis[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [8] 张佳云. 自卸车耐久性试验载荷谱编辑与外推[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- ZHANG J Y. Editing and extrapolation of durability load spectrum of dump truck[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [9] 熊飞. 基于实车道路谱的车身疲劳寿命预测[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- XIONG F. The fatigue life prediction of car body structure based on real road spectrum[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [10] 黄元毅, 董国红, 钟明, 等. 基于实测动态道路载荷谱的车辆疲劳性能设计[J]. *汽车工程*, 2017, 39(11): 1282-1285, 1293.
- HUANG Y Y, DONG G H, ZHONG M, et al. Vehicle fatigue performance design based on dynamic road load spectra measured [J]. *Automotive Engineering*, 2017, 39(11): 1282-1285, 1293.
- [11] 郑国峰. 典型汽车部件载荷谱及加速耐久性编辑与实验方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- ZHENG G F. Studies on load spectrum and accelerated durability test methods to typical automotive parts [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [12] 张禄. 大型营运客车用户关联试验场可靠性理论分析及试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- ZHANG L. Reliability theory analysis and test on proving ground correlated with customers usage of big operation vehicle[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [13] AWARA P R, MATHEWB A T, SARAFC M R. IRI (international roughness index): an indicator of vehicle response[C]. *International Conference on Materials Manufacturing and Modelling*, 2017.
- [14] QIN Y C, WANG Z F, XIANG C L. Speed independent road classification strategy based on vehicle response: theory and experimental validation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 117: 653-666.
- [15] 齐麟, 怀永成, 潘慧. 考虑非一致不平整激励的机场跑道平整度评价方法研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(15): 325-330.
- QI L, HUAI Y C, PAN H. Evaluation method for airport runway roughness considering non-uniform uneven excitation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(15): 325-330.
- [16] 曹源文, 王杰, 姚国宁, 等. 水泥混凝土路面振动平整特性试验研究[J]. *中国工程机械学报*, 2023, 21(5): 465-470.
- CAO Y W, WANG J, YAO G N, et al. Experimental research on vibration leveling characteristics of cement concrete [J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2023, 21(5): 465-470.
- [17] ZANG K Y, SHEN J, HUANG H S, et al. Assessing and mapping of road surface roughness based on GPS and accelerometer sensors on bicycle-mounted smartphones[J]. *Sensors*, 2018, 18: 1-17.
- [18] 杨文臣, 胡澄宇, 田毕江, 等. 国际平整度指数建模与影响因素综合分析[J]. *公路交通科技*, 2017, 34(12): 23-29.
- YANG W C, HU C Y, TIAN B J, et al. Modelling of international roughness index and comprehensive analysis on its influencing factors [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34(12): 23-29.
- [19] 凌建明, 刘诗福, 袁捷, 等. 采用IRI评价机场道面平整度的适用性[J]. *交通运输工程学报*, 2017, 17(1): 20-27.
- LING J M, LIU S F, YUAN J, et al. Applicability of IRI based evaluation of airport pavement roughness [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(1): 20-27.
- [20] 吴庆雄, 陈宝春, 奚灵智. 路面平整度PSD和IRI评价方法比较[J]. *交通运输工程学报*, 2008, 8(1): 36-41.
- WU Q X, CHEN B C, XI L Z. Comparison of PSD method and IRI method for road roughness evaluation [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2008, 8(1): 36-41.
- [21] 余志生. 汽车理论[M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- YU Z S. *Automobile theory* [M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [22] 胡春春. 统计学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017.
- HU C C. *Statistics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2017.
- [23] 方国松, 何海燕. 统计学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2017.
- FANG G S, HE H Y. *Statistics* [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2017.
- [24] 吴获非, 刘成龙, 覃伯豪, 等. 基于车辆参数估计的振动式路面平整度检测标定方法[J/OL]. *中国公路学报*. <https://link.cnki.net/urlid/61.1313.U.20240116.1024.006>.
- WU D F, LIU C L, QIN B H, et al. Calibration method for vibration-based road roughness detection based on vehicle dynamic parameters estimation [J/OL]. *China Journal of Highway and Transport*. <https://link.cnki.net/urlid/61.1313.U.20240116.1024.006>.
- [25] AWATE C, PANSE S, DODDS C. Validation of an accelerated test on a 4-post road simulator[C]. *SAE Paper 2007-26-070*.