

基于雨流模型下的车辆疲劳损伤计算方法研究

董炳健,赵斐然

(武汉路特斯科技有限公司,湖北 武汉 430090)

摘要:在车辆的耐久及可靠性测试中,由于不同道路对车辆的损伤程度无法量化,故产生试验结论与用户实际评价差距较大的问题。需研究车辆的循环载荷与应力、应变关系,以得到外应力与疲劳寿命曲线特性。在道路载荷数据基础上,设计一种基于雨流模型下的车辆道路损伤计算方法,对已测量的两条道路载荷及车辆损伤值进行对比,并将评价模型与实际道路疲劳损伤进行验证。结果表明:两种评价方法的误差在相同车辆及环境下吻合率达到 90% 以上,实际损伤分析和预测的基本一致。

关键词:雨流模型;道路试验;车辆疲劳损伤

中图分类号:U463.83 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)04-0075-03

Research on Calculation of Vehicle Fatigue Damage Based on Stress of Rain Flow Model

DONG Bingjian, ZHAO Feiran

(Wuhan Lotus Technical Co.,Ltd., Wuhan 430090, China)

Abstract: To address the big gap between the test results and actual users' evaluation due to non quantifiable damage degree of vehicles by different roads in vehicle durability and reliability test, the relationship between cyclic load and stress-strain is analyzed to obtain the curve features of external stress and fatigue life. With the road load data, an algorithm of vehicle road damage based on rain flow model is designed, two measured road loads and their vehicle damage values are compared, and the evaluation model is verified with the actual road fatigue damage. The results show that the coincidence rate between the two evaluation methods is more than 90% under the same vehicle and environment, and the actual damage analysis is consistent with the anticipated evaluation.

Keywords: rain flow model; road test; vehicle fatigue damage

0 引言

车辆的载荷谱分析是研究整车及零部件耐久实验的重要依据之一。因为车辆工作载荷的随机性,定性分析随机载荷最有效的方法就是统计分析法。计数法^[1]和功率谱法是目前最常用的统计分析法。在耐久可靠性试验过程中车辆产生疲劳损伤的主要因素为循环次数和载荷幅值,因此采用计数法来计算载荷更为合适;而目前最为常用的方法是雨流模型计数法。

通过对车辆试验阶段的路谱收集,计算不同道路对车辆的损伤值及对应关系已逐步被各主机厂及整车试验场所采用^[2]。对车辆道路损伤探测,一般采用单车循环采集路谱的形式,但它存在车辆更换及采集道路不同导致结果稳定性差及多车辆共同采集成本过高的问题。因此针对不同道路对车辆损伤值进行采集并对比分析^[3],获得稳定且精确的分析数据拥有很高的实用价值。

本文给出了一种基于雨流模型下的道路损伤计算方案。首先阐述雨流模型的基本原理^[4],利用 NCODE 软件的雨流模型,采用六分力试验仪采集载荷,通过软件模型转换,并循环计数,最后通过特定公式计算道路损伤值,再将特定道路损伤值进行对比,得出不同道路载荷的比值关

系。经过实地可靠性车辆验证,此种方法测量的不同道路损伤值与实际损伤比值基本相同,说明该研究成果为车辆道路损伤值的测量提供了新的方法,对整车及零部件在不同道路的耐久及可靠性分析具有很高的实用价值。

1 理论依据

从微观层面上分析,整车及零部件的疲劳裂纹产生都与塑性变形直接相关;从宏观角度看,当循环应力处于高值,起到主导作用的是弹性应变,此时有较长的疲劳寿命,零件处于高周疲劳区。当循环应力处于低值,起到主导作用的是塑型应变,相应疲劳寿命较短,即部件处于低周疲劳区^[5](图 1)。

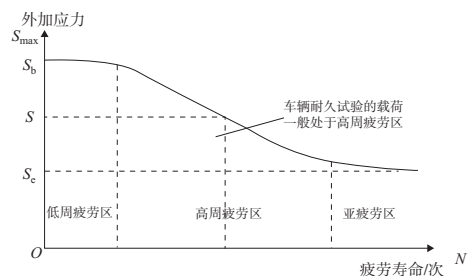


图 1 循环载荷与应力-应变特性

第一作者简介:董炳健(1986—),男,浙江杭州人,工程师,学士,研究方向为汽车工程。

1.1 Miner 理论

根据线性疲劳累积损伤理论:处于循环载荷中的零件,其各个应力之间互不关联,相互独立,但疲劳损伤是可以进行累积的。当累积的损伤到达其临界值,零件将发生疲劳损坏。线性疲劳下的累积理论为 Palmgren-Miner 理论,一般称为 Miner 理论^[6]。

1) 每个循环载荷构成的损伤定义为 $D = 1/N$, 其中 N 为载荷 S 对应的疲劳损伤。

2) 等幅值载荷下, n 个循环构成的累积疲劳损伤为 $D = n/N$;

可变幅值载荷下, n 个循环构成的累积疲劳损伤为

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i} \quad [7]$$

3) 临界疲劳损伤 D_{cr} : 循环载荷的累积疲劳损伤值 $D = D_{cr} = 1$ 时, 此时发生疲劳损坏。

1.2 S-N 曲线

一种表述外加应力 S 与疲劳寿命 N 之间关系的曲线叫做 S-N 曲线。

经验方程:

1) 指数函数: $N \cdot e^{\alpha S} = C$ 。

2) 幂函数公式: $S^\alpha \cdot N = C$ 。

其中 α, C 为材料常数^[8]。

通过 Miner 理论, 将特定模式下的应力循环数进行累计, 则可评价该模式对车辆的损伤情况。通过 S-N 曲线, 即可得到应力循环对车辆的伪损伤值大小^[9]。

2 道路载荷的数据采集

采用六分力测试仪采集目标道路入力, 同一辆车、相同负荷下, 采集比利时路模式与某综合测试路模式的 F_z 入力数据, 时域数值如图 2、图 3 所示。

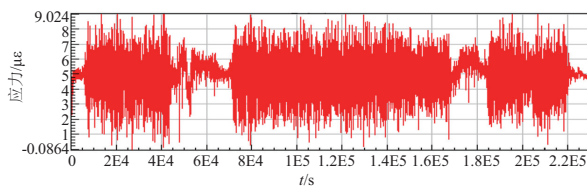


图 2 不同时间内 F_z 入力图谱(比利时路)

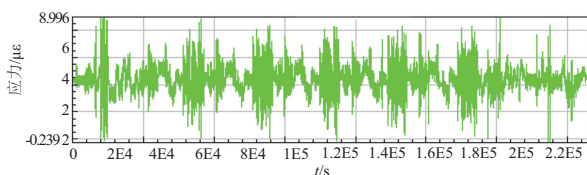


图 3 不同时间内 F_z 入力图谱(某综合测试路)

将 F_z 读取的数值进行数学模型处理, 目的是将收集到的随机应力通过雨流分析法转化为封闭的应力循环, 并按照应力幅值大小及对应的循环进行统计分析。雨流计

算结果如图 4 所示。

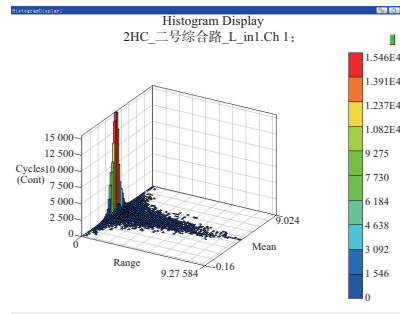


图 4 雨流计算结果

3 伪损伤值计算

1) 计算应力 S 对应的 N 值, 并生成 S-N 曲线。

参考相关文献^[10]可知, $S^\alpha \times N = C$, 即 $N = C/S^\alpha$, 令 $A^\alpha = C$, 则 $N = C/S^\alpha = A^\alpha/S^\alpha = (A/S)^\alpha$, α 为材料常数^[10]。按 S 的取值范围 0~10, 分别计算各个应力下的 N 值。

$N = (A/S)^\alpha$, 两边取对数, 得到 $\lg N = \alpha + \lg(A/S)$ 。因此在采用对数刻度的形式下生成 S-N 曲线为一条直线, 如图 5 所示。

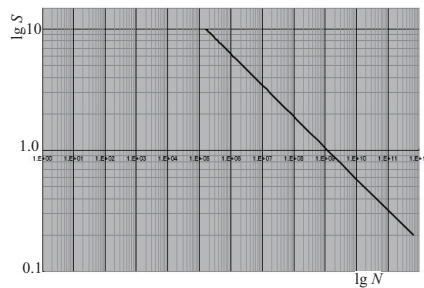


图 5 对数刻度下的 S-N 曲线图

2) 道路损伤计算

载荷 S_1 达到临界疲劳损伤值 D_{cr} 的循环数为 N_1 , 则 n_1 个 S_1 循环载荷的损伤值 $D_1 = n_1/N_1$, 所有的载荷 S_1 ,

S_2, S_3, \dots, S_n 的损伤之和 $D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i}$ ^[11]。

由以上公式计算, 即可求得不同道路对车辆的伪损伤值, 进而得到不同道路载荷的大小(图 6)。对比结果表明: 当材料常数取 $\alpha = 3.883$, $C = 218.3$ 时, 同样 5 000 km 测试路线, 比利时路面的损伤值约为 1.41, 而综合耐久路面损伤值约为 1; 比利时路的道路损伤为综合路的 1.4 倍。

4 结语

1) 本文研究了不同道路载荷下的车辆损伤机理, 确定了循环载荷、外应力、疲劳寿命等影响车辆损伤的特性指标;

2) 雨流计数模型具有很强的统计和发散能力, 可用于分析复杂的道路载荷数据, 使分析结果准确、稳定;

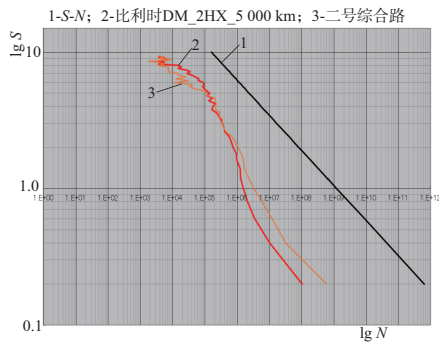


图6 比利时路5 000 km与综合路5 000 km的道路损伤情况

3)基于雨流模型构建的循环数统计原理,提出了一种道路损伤的计算方法,实现了不同道路损伤值的对比分析;为车辆耐久及可靠性试验不同路谱下损伤分析提供了一种新的方法。所提供的模型分析方法同样可应用到其他耐久及疲劳强度分析中,具有广泛的适用性及实用价值。

依据上述结论,制定了针对该车型的试验场测试规范,其总里程为5 000 km,实际测试时间为目标规范的60%。试验结果表明:新规范下的汽车测试能够有效缩短项目开发周期,提高可靠性试验准确性,增强产品竞争力。

参考文献:

- [1] 孙丽,刘永臣. 雨流计数法及在车辆疲劳损伤分析中的应用综述[J]. 装备制造技术,2012(12):75-77.

- [2] 蔡桃庭. 襄樊汽车试验场轻型汽车耐久性试验的研究[M]. 上海:上海交通大学,2005:13-19.
- [3] 王玮,周肖飞,陈文斐,等. 一种基于损伤等效原理的PSD路谱生成方法[J]. 机械制造与自动化,2021,50(4):193-196.
- [4] BAEK S H, CHO S S, JOO W S. Fatigue life prediction based on the rainflow cycle counting method for the end beam of a freight car bogie[J]. International Journal of Automotive Technology, 2008,9(1):95-101.
- [5] LANGLAIS T E, VOGEL J H. Overcoming limitations of the conventional strain-life fatigue damage model[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1996,118(1):103-108.
- [6] 王宏伟,邢波,骆红云. 雨流计数法及其在疲劳寿命估算中的应用[J]. 矿山机械,2006,34(3):95-97.
- [7] 郭虎,陈文华,樊晓燕,等. 汽车试验场可靠性试验强化系数的研究[J]. 机械工程学报,2004,40(10):73-76,81.
- [8] HEULER P, KLÄTSCHE H. Generation and use of standardised load spectra and load-time histories[J]. International Journal of Fatigue, 2005,27(8):974-990.
- [9] 胡宗武,孙丰奎. 按疲劳等损伤原则计算汽车强化试验的强化系数[J]. 机械强度,1991,13(1):36-39.
- [10] 田军,李强. 改进的雨流法实时计数模型[J]. 北京交通大学学报,2009,33(1):28-31.
- [11] TROSHCHENKO V T, KOVAL' Y I, TSYBANEV G V. Study of the connection between metal fatigue endurance and the level of cyclic inelastic strain[J]. Strength of Materials, 1977,9(11):1291-1295.

收稿日期:2021-08-11

(上接第64页)

参考文献:

- [1] 韩清凯,云向河,李宁,等. 大型滚动轴承故障诊断及寿命评估技术进展[J]. 轴承,2021(9):1-13.
- [2] 李苗苗,杨阳,王宇,等. 考虑温度影响的角接触球轴承疲劳寿命仿真研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(2):113-116.
- [3] WANG T Y, 赵嘉芳,杜杰,等. 基于振动信号的轴承寿命预测[J]. 国外铁道车辆,2021,58(1):35-40.
- [4] 郑小霞,蒋海生,刘静,等. 基于变分模态分解与灰狼算法优化极限学习机的滚动轴承故障诊断[J]. 轴承,2021(9):48-53.
- [5] 徐继亚,王艳,严大虎,等. 融合KPCA与信息粒化的滚动轴承性能退化SVM预测[J]. 系统仿真学报,2018,30(6):2345-2354.
- [6] 马海龙. 基于主元特征融合和SVM的轴承剩余寿命预测[J]. 工矿自动化,2019,45(8):74-78.
- [7] 者娜,杨剑锋,刘文彬,等. KPCA和改进SVM在滚动轴承剩余寿命预测中的应用研究[J]. 机械设计与制造,2019(11):1-4,8.
- [8] WANG W B, HUSSIN B, JEFFERIS T. A case study of condition based maintenance modelling based upon the oil analysis data of marine diesel engines using stochastic filtering[J]. International Journal of Production Economics, 2012,136(1):84-92.
- [9] 胡小曼,王艳,纪志成. 模糊信息粒化与改进RVM的滚动轴

承寿命预测[J/OL]. 系统仿真学报:1-12 [2021-09-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3092.V.20210818.1012.005.html>.

- [10] 张金豹. 基于全寿命数据的滚动轴承运行状态评估和剩余寿命预测[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [11] MESHREF M N A, AZIZI S M M, DASTYAR W, et al. Low-temperature thermal hydrolysis of sludge prior to anaerobic digestion; principal component analysis (PCA) of experimental data[J]. Data in Brief, 2021,38:107323.
- [12] SUTRISNO E, OH H, VASAN A S S, et al. Estimation of remaining useful life of ball bearings using data driven methodologies[C]//2012 IEEE Conference on Prognostics and Health Management. Denver, CO, USA: IEEE, 2012:1-7.
- [13] 刘永明,赵帅帅,赵转哲,等. 具有指数衰减振荡型概率密度变化规律的产品寿命分布模型[J]. 南京航空航天大学学报,2021,53(3):449-454.
- [14] 卢永,章文,王威,等. 油液及振动监测在机泵群轴承早期故障预警中的应用[J]. 润滑与密封,2020,45(10):136-140.
- [15] 赵彦玲,侯新新,向敬忠. 油液中轴承钢球表面展开运动分析[J]. 轴承,2019(8):46-50,54.
- [16] 徐笑莹,马思群,陶然,等. 动车组轮对轴温监测虚拟培训系统开发[J]. 现代机械,2021(4):63-67.
- [17] 尚川,高军伟. 基于ZigBee和云端的列车轴温监测系统设计与[J]. 传感器与微系统,2021,40(8):110-112,120.

收稿日期:2021-10-22