

汽车道路谱伪损伤等效的结构损伤识别方法研究

曾泽江，李衡，何洋，苏振兴
东风汽车公司技术中心

【摘要】本文以某越野车的整车耐久试验问题为研究对象，通过道路谱采取 Lalanne 方法进行伪损伤等效的方式完成载荷谱编辑和汽车结构损伤的识别，后续以幅值方式修正载荷谱，最后完成振动台架验证，并对结构损伤识别的时长进行研究。基于伪损伤等效的汽车结构损伤识别方法能够有效进行零部件级台架试验验证，可准确复现出整车道路耐久试验中出现的结构破坏，并且台架验证时间大幅缩短，有效缩短开发周期。通过载荷谱幅值修正，可更加有效地验证结构破坏问题，为汽车产品疲劳耐久性能的分析和验证提供了思路和研究方法。

【关键词】 疲劳试验，伪损伤，结构损伤识别，台架载荷谱

Research on Structural Damage Identification Method Based on Pseudo Damage Equivalent of Automotive Road Spectra

Zeng Zejiang, Li Heng, He Yang, Su Zhenxing

Dongfeng Motor Corporation Technical Center

Abstract: This article takes the durability test of a certain off-road vehicle as the research object. The load spectrum is edited and the identification of vehicle structural damage is completed by using the Lalanne method for pseudo damage equivalence through road spectrum. Subsequently, the load spectrum is corrected by amplitude, and finally, vibration bench verification is completed. The duration of structural damage identification is also studied. The method of identifying automotive structural damage based on pseudo damage equivalence can effectively perform component level bench test verification, accurately reproduce the structural damage that occurred in the road durability test of the entire vehicle, and the bench verification time is significantly shortened, effectively reducing the development cycle. By modifying the amplitude of the load spectrum, the problem of structural failure can be more effectively verified, providing ideas and research methods for the analysis and verification of fatigue durability performance of automotive products.

Key words: fatigue test, pseudo damage, structural damage identification, platform load spectrum

引言

随着汽车工业的发展，汽车产品的疲劳耐久性能越来越受大众关注。汽车疲劳性测试是在试车场内完成全生命周期的整车道路耐久试验。进行整车道路耐久试验可以发现设计阶段的缺陷，这也需要很长的试验周期和高昂的试验成本^[1]。对于发现问题后如何快速识别问题和验证改善方案的有效性对汽车产品设计来说至关重要。相比于整车道路耐久试验的缺点，进行零部件级疲劳耐久的室内台架试验可以有效的降低试验成本和提高验证效率。

如何确保台架试验的准确和有效，是目前疲劳耐久研究的主要方向之一。王文龙对汽车道路载荷谱进行分析和编辑，通过对试验载荷谱编辑缩短试验时长，提高验证效率^[2]。高博等对疲劳损伤谱的时、频域两种算法进行阐述，并在 MATLAB 中编写程序，对典型的载荷谱进行计算，发现两种算法得到的谱线一致性较好，具有等效性^[3]。

本文以试车场道路谱为基础，通过伪损伤等效理论进行载荷谱编辑分析以完成汽车结构损伤的识别，并进行台架验证。台架验证相较于整车道路耐久试验，在时间上大幅缩短，有效缩短开发周期。利用幅值修正的方式进行载荷谱修正，更加有效地验证试验问题，为汽车疲劳耐久试验分析提供了思路。

1 伪损伤理论

目前提出的疲劳损伤累积理论，有不同的假设，比较典型的是：线性损伤累积理论、非线性损伤累积理论和双线性损伤累积理论^[4]。对金属构件而言，在承受随机载荷时，其（结构损伤的）疲劳破坏是在循环作用下的多损伤不断累积的过程，其中，线性损伤累积理论因其计算简单有效被普遍应用。Miner 线性损伤累积表达式^[5]为

$$D = \sum_{i=1}^i \frac{n_i}{N_i} = a \quad (1)$$

式中， a 为常数，一般取值为 1，考虑工程经验常小于 1，确保寿命估算的安全。

在使用汽车道路载荷谱数据时，因采集的道路工况数量和通道需求众多，通常能有几十甚至上百 GB 数据。道路载荷谱和台架载荷谱之间（大小）关系需要进行比较和联系，通过疲劳损伤理论来确定载荷谱中不同工况、不同材料及不同构件加速度信号之间的疲劳损伤情况，以假定的 S-N 曲线去评估损伤大小的，即伪损伤。以伪损伤值大小确定台架振动耐久与整车道路耐久的关联是目前预测耐久性能准确度的有效手段。

工程上描述 S-N 曲线的线性部分的经验公式有两个，分别为

- 1) 指数函数公式：

$$Ne^{\alpha} = C \rightarrow \lg N = a + bS \quad (2)$$

2) 幂函数公式:

$$\sigma^m N = C \rightarrow m \lg \sigma + \lg N = \lg C \quad (3)$$

式中, m 和 c 均为材料常数; 其他参数参照零部件材料特性参数。

Lalanne^[6]给出了基于 PSD 计算疲劳损伤谱 (FDS) 的过程, 将时域加速度信号计算得到的功率谱 PSD。伪损伤法的重点不在于预测零部件的疲劳寿命, 而是利用直观的数值反映出道路载荷谱对于汽车产品产生的疲劳耐久特性。以假设的 S-N 曲线进行损伤计算能够让试车场载荷与试验室台架载荷的当量等效。

2 道路载荷谱采集

2.1 道路载荷谱采集工况

由于汽车在实际使用的过程中, 受到来自道路的随机载荷是无法用某一公式来进行描述的。即便能够在相同环境等条件下, 也无法获取一致的数据, 故获取准确可代表全用户的道路特征的载荷数据是难以实现的。因此, 确保台架试验所用数据的有效性, 道路试验采集的载荷谱数据需具有表征性, 需选择能够表征该越野车大部分用户实际使用时的典型工况作为采集的样本。

经调查和研究分析, 试验挑选了能够代表用户使用的试车场典型道路进行了数据采集。本文开展试验的越野车对应的用户使用道路类型主要包括强化路、越野路和山区等。采集工况见表 1, 越野路 0.5 万 km, 山区 1 万 km, 强化路各不同, 总里程 3.9 万 km。

表 1 越野车结构耐久性试验工况

路况	工况名称	车速	特征长度/m
强化路	石块路 (比利石)	20-25	2867
	带角度搓板路	50WOT	200
	直搓板路 (错位)	60 滑行	200
	凸块路 (乙)	25	90
	短波路	15	200
	大卵石	15	10
越野路	越野路	10~30	2200
山区	标准坡		10980

注: 部分采集路。

2.2 测点选择

本文研究的是道路载荷谱的加速编辑方法, 因此本次试验设计规划了需要进行的测点数据, 目的是为了与振动台架试验对应。道路谱采集试验布置传感器的测点数量共计 8 个, 测点位置包含机罩锁扣位置、机罩锁、铰链位置、气撑杆、电池两支脚位置、金属前保左右固定点位置。机罩锁扣位置加速度布置见图 1, 测试通道共计 24 个。在整车路试耐久规范进行载荷谱采集的过程中, 减少驾驶操作差异带来的影响, 每台车同一驾驶人并且保证每个工况完成 3 个样本。



a) 道路谱采集 b) 振动台架

图 1 加速度布置位置

2.3 数据预处理

获取的数据由于外界的干扰和系统的原因往往会造成某些载荷信号出现异常现象, 一般由试验直接得到的道路原始载荷谱数据在分析和使用之前都需要进行数据的预处理 (见图 2)。根据试车场各种路况上对应的不同车速选择一圈比较好的数据用来分析处理, 去除与路况不相符的异常数据。

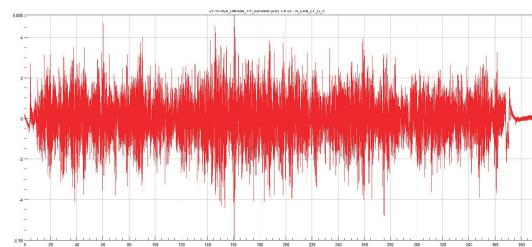


图 2 越野路加速度时域信号

处理工作主要包括低通滤波、去毛刺及解决温漂等数据信号异常情况。

(1) 滤波 对采集的原始道路谱数据进行滤波处理, 本文采取保留部分高频信息, 确保留下 0~200Hz 频率的数据。

(2) 去毛刺 由于测量等存在外界干扰或人为因素的过程导致数据毛刺的出现, 往往这些数据的异常点对分析结果而言却是影响严重的。通过设定寻查值和手动分析的方法去探测并依据实际情况考虑将其去除。

(3) 去除温漂 部分采集点布置在发动机舱内, 温度过高将导致传感器数据出现偏离基线的情况, 即温漂现象, 偏离的数据修正后才能使用。

3 伪损伤等效的载荷谱编制

振动试验台架是以功率谱密度 (PSD) 作为输入。PSD 的表达式为^[7]

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

式中, $R(\tau)$ 为平稳随机振动的自相关, τ 为周期。

本文对于整车道路耐久试验得到的加速度信号采用基于伪损伤等效法进行编辑处理, 可缩短试验时间, 达到加速试验的目的。通过对采集到的道路载荷谱加速度信号进行分析, 道路载荷谱分析和编辑分析流程见图 3。

道路载荷谱中小幅值载荷对整体载荷谱的贡献很小可以去除, 利用伪损伤等效需要保留 90% 以上损伤, 才能代替

4 结构损伤识别的台架试验结果

4.1 台架试验结果分析

机罩锁扣和金属前保分别进行 X、Y、Z 方向试验，经过试验验证后，从两项试验结果来看，振动台架试验与整车试验失效位置、失效模式一致，结构损伤识别载荷谱完成了问题复现验证，结果见表 2。从失效时比结果来看，故障出现时间滞后于道路耐久试验。对于故障问题的验证，因考虑产品的稳健生命周期可靠性 QRD (quality reliability degradation) 在不保留幅值情况下建议以 1.5 倍寿命（振动时长）去完成验证。

表 2 道路耐久与台架试验结果对比

试验项目		失效位置	失效模式	失效时比
机罩	道路耐久	锁扣根部	断裂	62%
	台架试验	锁扣根部	断裂	85%
金属前保	道路耐久	连接点、安装点	断裂、开裂	71%
	台架试验 1	连接点、安装点	断裂、开裂	102%
	台架试验 2	连接点、安装点	断裂、开裂	77%

注：失效时比指发生失效时间占整个试验周期的比例。

4.2 损伤等效的幅值修正

考虑台架试验 1 存在的失效时比与整车道路耐久的差异，以道路谱载荷为分析对象，通过数据分析，找出结构损伤位置的载荷特性，识别出关键频率下的损伤响应。保证损伤基本等效且不超过原损伤的 5% 的情况下，进行台架载荷谱修正。

$$105\% D_{si} \geq P_{pi} \quad (10)$$

式中， D_{si} 为结构损伤位置的道路谱损伤大小； P_{pi} 为幅值修正后的载荷谱损伤大小。

将修正问题转变为多测点的最优解问题，以求解多测点的载荷谱目标，确定修正系数 x_i ：

$$\max(P_p) = (x_1 D_1 + \dots + x_i D_i + \dots + x_n D_n) / n \quad (11)$$

金属前保台架试验 2 采取道路谱幅值修正方式得到的载荷谱，幅值雨流见图 5。可以有效补足台架振动试验 1 中失效时比的缺点，结构损伤的情况复现时长晚于道路小于 10%。

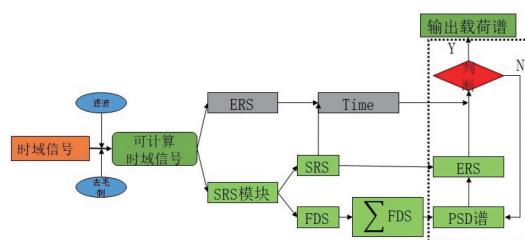


图 3 道路谱的结构损伤识别流程

原始谱的损伤当量进行试验，保留原则是低于最大载荷的 10%。将保留的信号以正弦曲线形式顺滑连接，得到新的道路载荷谱。

新的道路载荷谱为可计算时域信号，经过 SDOF 系统传递函数的过滤后，可以得到最大响应加速度，对最大响应速度值做包络线，即为 SRS^[8]，在冲击激励函数的作用下通过雨流计数法计算得到的疲劳损伤随一系列固有频率而生成的疲劳损伤谱，即 FDS。

FDS 计算公式如下：

$$FDS(f_n) = f_n T \frac{K^b}{C} \left[\frac{Q Y_{APSD}(f_n)}{2(2\pi f)} \right]^{b/2} \Gamma\left(1 + \frac{b}{2}\right) \quad (5)$$

$$k = \frac{1 + \sqrt{1 - (1 - a^2 V_R^2)(1 - a^2 V_E^2)}}{(1 - a^2 V_R^2)} \quad (6)$$

其中， a 为存活率； V_R 为强度变化率； V_E 为载荷变化率，其可用下式获得：

$$V_R = \sigma_R / R \quad (7)$$

$$V_E = \sigma_E / E \quad (8)$$

式中， σ_R 和 σ_E 分别为材料疲劳强度和载荷的标准差。

通过得到的各路况 FDS 计算总损伤 FDS，即目标 FDS，依据疲劳损伤等效原则合成振动台架试验驱动的 PSD 谱和确定振动试验时长。

通常采用傅立叶变换对随机过程的周期信号进行描述，通过对随机过程的时域周期信号进行傅里叶变换可以将其转换成正弦波信号。将周期为时间 T 的信号 $x(t)$ 进行傅里叶变换得到公式^[9]：

$$G_{synth}(f_n) = \frac{2(2\pi f)^3}{Q} \left[\frac{K \sum FDS(f_n C)}{K^b T_{eq} \Gamma(1 + b/2)} \right] \quad (9)$$

式中， ΣFDS 为总疲劳损伤谱； K 为安全系统； T_{eq} 为加速试验时间。

以金属前保的结构损伤识别结果为例，得到的功率谱密度 PSD 见图 4。

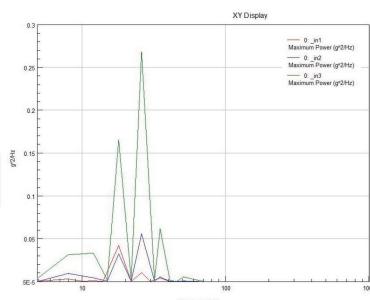


图 4 结构损伤识别载荷谱

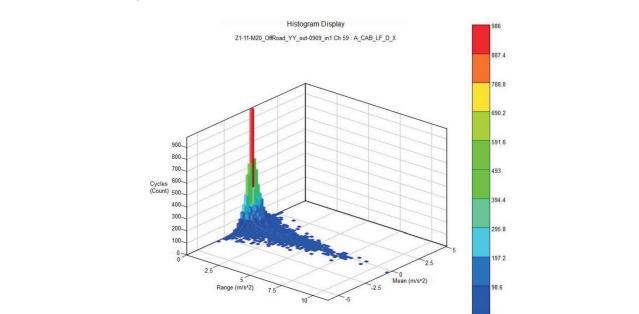


图 5 幅值雨流计数结果

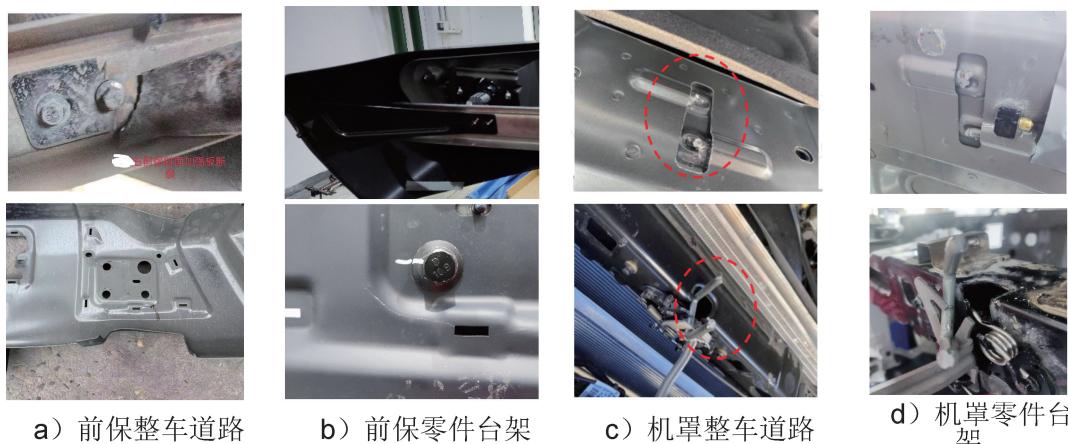


图 6 整车道路耐久试验与台架振动试验结果对比

5 结论

本文为提高产品疲劳耐久性能，提高试验效率、缩短试验周期以及减少试验样车节省成本为基本点，进行伪损伤等效的台架载荷 PSD 谱编制，得到的载荷谱应用于振动台架试验。

通过对整车耐久和零部件台架试验结果，可以得出，基于整车道路载荷谱转化台架振动载荷 PSD 谱，得到的载荷谱用于台架试验，能够有效进行零部件级试验的结构损伤识别，可以复现整车道路耐久试验故障问题，并且台架验证相较于整车道路耐久验证，在时间上大幅缩短，能有效缩短开发周期。

主要结论如下：

- 1) 基于伪损伤等效对所有通道进行了原始载荷谱的编辑，得到了各典型用户道路下所有通道的台架载荷谱，并经台架试验验证，结构破坏的形式和位置与整车道路耐久试验一致，方法有效。
- 2) 基于伪损伤等效的结构损伤识别获得的载荷谱用于零部件台架试验，失效时比的结果表明，考虑产品的稳健生命周期和可靠性建议以 1.5 倍寿命（振动时长）去完成验证。
- 3) 单轴振动试验采取保留道路谱幅值方式修正台架载荷谱与伪损伤等效相结合能够更加接近整车道路耐久试验时间复现试验问题。

参 考 文 献

- [1] 郑松林, 等. 基于载荷频率的用户道路与试验场车辆部件损伤关联模型研究 [J]. 机械强度, 2018, 40 (5): 1177-1182.
- [2] 王文龙, 等. 基于试验场真实载荷谱的悬架疲劳试验研究 [J]. 汽车零部件, 2016 (9): 32-35.
- [3] 高博, 等. 疲劳损伤谱时域、频域计算方法及其等效性验证 [J]. 装备环境工程, 2021, 18 (10), 52-57.
- [4] 李照广. 铁路桥粱减震樁和樁形防落梁装置的低周疲劳研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [5] MINER M A. Cumulative damage in fatigue [J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12 (31): 59-164.
- [6] REGE K PAVLOU G D. A one-parameter nonlinear fatigue damage accumulation model [J]. Int J Fatigue, 2017, 98 (5): 234-246.
- [7] 龚苏生, 等. 汽车空调管路系统随机振动疲劳分析优化研究 [J]. 汽车技术, 2020 (10): 14-18.
- [8] 崔京宝, 等. 基于 PSD 谱的 SCR box 频域加速耐久试验 [J]. 车用发动机, 2011 (5): 84-88.
- [9] REGE K, PAVLOU G D. A one-parameter nonlinear fatigue damage accumulation model [J]. Int J Fatigue, 2017, 98 (5): 234-246.

