基于路面不平度和车速的试验场耐久性试验关联方法*

蒋青松[1,2,3] 邱慕逵[1,2,3] 覃星福[1,2,3] 何厚来[1,2,3] 廖艳辉[1,2,3]

（1.上汽通用五菱汽车股份有限公司，柳州 545007；2.广西新能源汽车实验室，柳州 545616；3.广西汽车新四化重点实验室，柳州 545616）

【摘要】针对传统可靠性耐久性试验规范相对滞后、传统用户调研方法难以准确反映用户需求的问题，融合用户大数据与公共道路数据，以路面不平度与行驶速度为核心锚点，构建了一种用户使用工况与试验场耐久性试验的关联方法。先建立公共道路路面不平度地图，通过经纬度关联耦合用户行驶网联数据，对各用户行驶数据进行离散化处理，构建包含车速、路面不平度、载质量及行驶里程的四维特征矩阵；再基于采集的典型道路载荷谱片段，精准重构各用户的载荷谱以获取用户目标载荷；最后依托损伤等效原理制定试验场耐久试验规范。研究建立了柳州市公共道路路面不平度地图，以16条典型道路不同车速下累计超1 000 km的载荷谱为基础，构建了2 000名用户近7×10^6 km载荷谱，并据此完成了对应试验场耐久试验规范的制定。

主题词：路面不平度 车速 载荷谱 用户关联

中图分类号：U467.1 **文献标志码：**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20250807

Correlation Method for Proving Ground Durability Test Based on Road Unevenness and Vehicle Speed

Jiang Qingsong[1,2,3], Qiu Mukui[1,2,3], Qin Xingfu[1,2,3], He Houlai[1,2,3], Liao Yanhui[1,2,3]

（1. SAIC-GM-Wuling Automobile Co., Ltd., Liuzhou 545007; 2. Guangxi New Energy Vehicle Laboratory, Liuzhou 545616; 3. Guangxi Key Laboratory of Automotive New Four Modernizations, Liuzhou 545616）

【Abstract】In light of traditional reliability and durability testing standards have lagged behind, and where conventional user survey methods struggle to accurately reflect user needs, this paper integrates user big data with public road big data. Taking road surface roughness and driving speed as core reference points, it establishes a method for correlating user behaviour with durability testing conducted at test tracks. Specifically, this method first establishes a road surface roughness map of public roads. By linking and coupling users' connected vehicle driving data via latitude and longitude coordinates, the driving data for each user is discretised to construct a four-dimensional feature matrix comprising vehicle speed, road surface roughness, load mass and mileage. Subsequently, based on collected segments of typical road load spectra, the load spectra for each user are precisely reconstructed to obtain the target loads for each user; Finally, test track durability test specifications are formulated based on the damage equivalence principle. The study established a road surface roughness map of public roads in Liuzhou City. Based on load spectra from 16 typical roads covering a cumulative distance of over 1 000 km at various speeds, load spectra for 2 000 users totalling nearly 7×10^6 km were constructed, and the corresponding test track durability test specifications were formulated accordingly.

Key words: Road unevenness, Vehicle speed, Load spectrum, User correlation

【引用格式】蒋青松，邱慕逵，覃星福，等. 基于路面不平度和车速的试验场耐久性试验关联方法[J]. 汽车技术，2026(9)：45-52.

JIANG Q S, QIU M K, QIN X F, et al. Correlation Method for Proving Ground Durability Test Based on Road Unevenness and Vehicle Speed[J]. Automobile Technology, 2026(9): 45-52.

*基金项目：广西重大专项计划（桂科AA23062060）；广西重大专项计划（桂科AA23062084）。

通信作者：邱慕逵（1987—），男，高级工程师，研究方向为整车道路试验开发验证，378979104@qq.com。

1 前言

当前，我国汽车产业已由增量扩张阶段全面迈入存量博弈阶段，汽车企业普遍面临“提升产品可靠性”与“控制研发制造成本”之间的双重约束。同时，公路网络密度不断提升，等外公路占比显著下降，车辆的实际使用强度逐年递减。然而，传统用户调研方法在数据采集过程中存在主观性强、样本变异性不足等固有局限，难以准确表征极端用户真实使用场景下的车辆载荷特征与失效模式。因此，构建用户真实使用数据驱动的耐久性试验体系，实现试验场验证工况与用户实际使用需求之间的精准映射与有效对接，已成为汽车企业优化产品开发流程、提升产品市场竞争力的重要方向。

李文亮等[1]提出了考虑路面不平度和速度分布的用户目标载荷谱构建方法，该方法首次将路面不平度与行驶速度纳入载荷谱构建核心参数，为后续研究奠定了理论基础。然而，该方法存在关键性技术缺陷：

a. 未能建立用户个体数据与载荷谱的关联机制，无法区分不同用户群体的载荷特征差异；

b. 未形成从用户数据到试验场规范的完整技术链条，构建的目标载荷谱难以直接应用于试验验证环节，导致其工程实用性受限。

针对现有研究的不足，本文构建一套覆盖“用户大数据分析-载荷谱采集-用户载荷谱构建-目标载荷计算-试验场规范等效”的全流程技术体系，并引入多维度参数离散化处理、用户-路面数据精准关联、多S-N曲线雨流矩阵匹配等核心技术。

2 用户大数据分析

2.1 用户工况的离散算法

车辆在行驶过程中承受的动态载荷是导致结构疲劳损伤的根本原因，其载荷特性受车辆固有参数与外部行驶条件的双重影响。基于图1所示的二自由度四分之一车辆动力学模型[2]和运动方程，可清晰识别影响车辆垂向载荷的关键因素。该模型将车辆简化为簧上质量与簧下质量2个自由度系统，能够精准描述路面激励向车身的传递过程。如图1所示，车辆固有参数包括悬架阻尼（C_s）、悬架刚度（K_s）、轮胎刚度（K_t）、簧上质量（m_s）与簧下质量（m_t），这些参数在车辆设计阶段已基本确定；而外部行驶条件中的路面不平度（z_0）、行驶速度（v）与载质量（m_s）则是随用户使用场景动态变化的关键变量，直接决定了车辆实际承受的载荷水平。

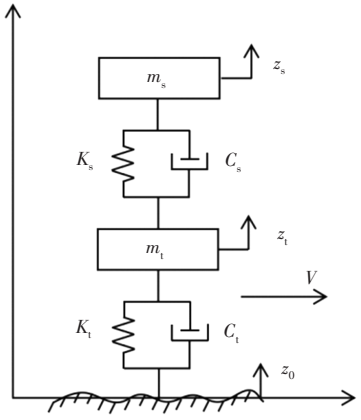


图1 二自由度四分之一车辆模型

图1中，z_s为簧上质量垂向位移，z_t为簧下质量垂向位移，K_s为悬架刚度，K_t为轮胎刚度，C_t为轮胎阻尼。二自由度四分之一车辆模型的运动方程可表示为：

$$m_t\ddot{z}_t = K_t(z_0 - z_t) - K_s(z_t - z_s) - C_s(\dot{z}_t - \dot{z}_s) - C_t(\dot{z}_t - \dot{z}_0) \quad (1)$$

$$m_s\ddot{z}_s = -K_s(z_s - z_t) - C_s(\dot{z}_s - \dot{z}_t) \quad (2)$$

为实现用户载荷谱的精准构建，本文提出“三维参数离散化”技术方案，从路面不平度、车速、载质量3个维度对用户行驶里程进行系统性离散处理。该方案的核心价值在于将无限维的用户行驶数据空间映射到有限维的统计矩阵中，大幅降低数据处理复杂度，同时保留用户行驶特征的关键信息，为后续精准建模奠定基础。

在路面不平度离散方面，遵循GB/T 7031—2025《机械振动 道路路面谱 测量数据报告》[3]标准，将路面不平度按功率谱密度（Power Spectral Density，PSD）划分为A~F等级（对应1~6级），其中A级为最平整路面（如新建高速公路），F级为最崎岖路面（如未铺装乡村土路）。通过该离散方式，可将复杂多变的自然路况转化为标准化的路面等级标签，为不同路况下的载荷特征分析提供统一基准。

在车速离散方面，考虑到用户车速分布的连续性与统计分析的便利性，采用10 km/h为间隔进行区间划分。该划分方式既能够有效区分城市拥堵路况（低速区间）、城市主干道路况（中速区间）与高速公路路况（高速区间）的车速特征差异，又避免了区间过细导致的数据稀疏问题，确保统计结果的可靠性。

在载质量离散方面，结合汽车行业常规分类标准与用户实际使用场景，将载质量划分为半载与满载2个区间。其中，半载定义为车辆整备质量加上1~2名乘员（约75~150 kg），满载定义为车辆最大允许总质量（含额定乘员与额定载质量）。该离散方式能够覆盖用户日常

通勤、家庭出游等典型使用场景，同时简化后续载荷计算复杂度。

通过上述三维离散处理，可构建用户行驶里程的初始统计框架，为后续融合用户网联数据构建四维矩阵奠定基础。该框架实现了多维度参数的协同离散，而非单一参数的独立划分，能够更全面地反映用户行驶场景的复杂性与多样性。

2.2 用户路面不平度分析

用户通过智能网联系统上传的云端数据（如GPS轨迹、车速、车辆加速度等）虽包含丰富的行驶信息，但无法直接获取路面不平度这一关键载荷影响因素。因此，需构建精准的路面不平度地图并实现与用户行驶轨迹的关联，以突破用户载荷谱构建瓶颈。

为解决路面不平度精准测量问题，本研究设计了一套“激光位移传感器+GPS惯性导航系统”的组合测量装置。该装置可通过多传感器数据融合实现测量误差的主动修正：激光位移传感器安装于车身底部，实时采集车身与路面的相对距离数据，采样频率达1 kHz，确保数据的高时间分辨率，以保证车辆高速行驶时的空间分辨率；同时，在车厢内安装高精度GPS惯性导航系统（定位精度≤1 m，加速度测量精度≤0.01g），实时采集车身垂向振动加速度数据。通过将GPS惯性导航系统测得的车身振动位移与激光位移传感器测得的相对距离进行叠加修正，可有效消除车身振动对路面不平度测量的干扰，显著提升测量精度（修正后误差≤5%）。

基于上述测量装置，开展了大范围区域的路面不平度测量工作。具体流程如下：

a. 选择覆盖高速公路、城市主干道、城市次干道、县乡公路、乡村土路等典型道路类型的测量路线，总里程超过10 000 km；

b. 按2 m间隔对测量路线进行采样，计算每个采样点的路面不平度功率谱密度，并根据标准GB/T 7031—2025确定其路面等级，如图2所示；最后，将每个采样点的路面等级与对应的经纬度坐标进行关联，构建如图3所示覆盖大范围区域的高精度路面不平度地图，能够为用户路面不平度关联提供精准的基础数据支撑。

在用户与路面不平度地图的关联环节，提出了基于“最短距离匹配”的关联算法。该算法的核心逻辑是：对于用户行驶轨迹中的每个GPS定位点（时间间隔1 s，定位精度10 m左右），计算其与路面不平度地图中所有采样点的空间距离，选取距离最近的采样点对应的路面等级作为该用户定位点的路面不平度等级。为进一步提升关联精度，引入“轨迹平滑处理”技术：对用户连续10个定位点的关联结果进行滑动平均滤波，消除单点定位误差导致的路面等级跳变问题。通过该算法，可实现用户行驶轨迹与路面不平度地图的精准关联，关联准确率达92%以上。

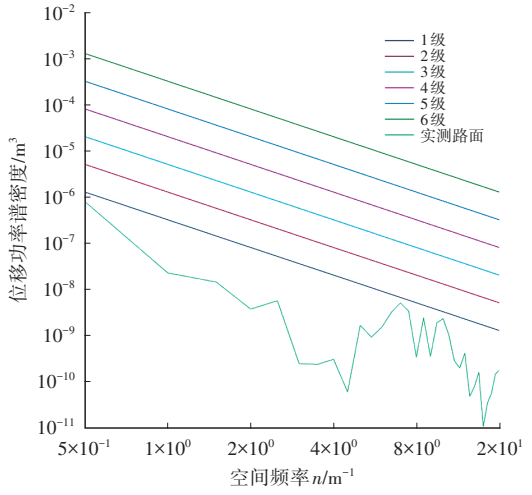


图2 路面不平度量化

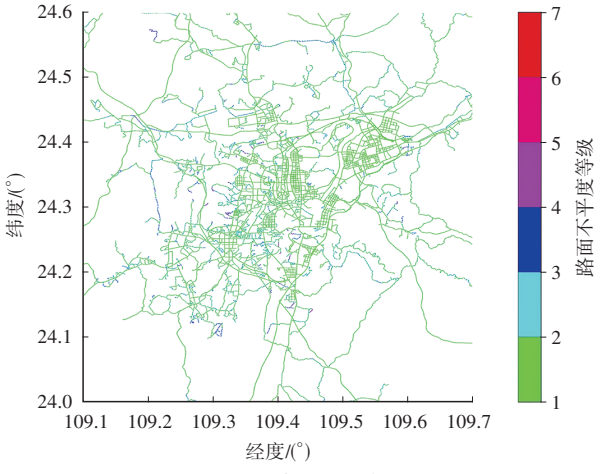


图3 路面不平度

2.3 用户车速分析

目前，主流智能网联汽车已实现车速数据的实时采集与云端上传，采样频率达1 Hz（部分高端车型达10 Hz），数据精度≤1 km/h，为用户车速特征分析提供了高质量的数据基础。

用户车速分析方法主要包括数据预处理、里程统计2个核心步骤。在数据预处理阶段，首先对原始车速数据进行异常值剔除（如因传感器故障导致的0值或超量程值），然后采用四舍五入修约规则将车速数据修约至最近的10 km/h整数倍（如36 km/h修约为40 km/h），使其与前文设定的车速离散区间相对应。该修约处理不仅能够简化后续统计计算，还能有效消除车速测量中的微小误差（如±1 km/h）对统计结果的影响。

在里程统计阶段，基于修约后的车速数据与采样时间间隔，计算用户在每个车速区间的行驶里程。具体计

算公式为：

$$L_i = \sum_{j=1}^{n_i} v_j \times \Delta t \quad (3)$$

式中：L_i为第i个车速区间的累计行驶里程，v_j为第j个采样点的实际车速，Δt为采样时间间隔，n_i为第i个车速区间的采样点数量。

通过对用户连续上传的所有采样点进行逐点计算与区间累加，可得到该用户在各个车速区间的累计行驶里程及占比。该统计方法的创新性在于实现了车速数据与行驶里程的精准映射，能够量化反映用户在不同车速区间的行驶特征，为后续构建四维矩阵提供了车速-里程数据支撑。

2.4 用户承载质量分析

载质量作为影响车辆载荷的关键参数，其精准估算一直是汽车工程领域的研究热点。褚文博等[4]提出的基于高频信息提取的整车质量估计方法，通过提取驱动电机电流中的高频成分实现质量估算，精度可达95%；廖银生等提出的基于纵-横向动力学耦合的质量估计模型[5]通过融合纵向加速度与横向加速度数据，提升了复杂工况下的估算鲁棒性。然而，上述方法多适用于特定工况（如匀速行驶、直线行驶），在复杂城市路况下的适用性受限。

本文采用Chi等[6]提出的基于卡尔曼滤波-递归最小二乘法（Kalman Filter-Recursive Least Squares，KF-RLS）的车辆质量参数分层估计算法，该算法的核心优势在于通过分层估计策略实现了载质量的实时、精准估算，且对复杂工况具有较强的鲁棒性。其工作原理如下：首先，基于车辆纵向动力学模型建立载质量估算的状态方程与观测方程；然后，采用卡尔曼滤波（KF）算法对车辆行驶阻力等干扰项进行实时估计与补偿；最后，采用递归最小二乘法（RLS）对载质量进行动态更新，估算精度可达96%以上，能够满足用户载质量分析的实时性与准确性要求。

基于上述估算算法，结合前文设定的载质量离散区间（半载、满载），对每个用户的行驶数据进行逐点分析，判断每个采样点对应的载质量区间。然后，将载质量区间与路面不平度等级、车速区间、行驶里程进行关联，构建用户行驶里程的四维矩阵（路面不平度等级×车速区间×载质量区间×行驶里程），如表1所示。该矩阵的创新性在于实现了多维度用户行驶参数的有机融合，而非单一参数的独立统计，能够全面、系统地反映用户在不同行驶场景下的里程分布特征，为后续载荷谱关联与目标载荷计算提供了完整、精准的数据基础。通过构建上述四维矩阵，可实现对用户行驶特征的精准刻画，为汽车企业针对不同用户群体开发定制化的耐久性试验方案提供了数据支撑，体现了本方法的工程实用价值。

3 载荷谱采集

载荷谱采集是连接用户大数据与试验场验证的关键桥梁，其核心目标是获取不同行驶场景下车辆关键部件的载荷时间历程数据，为后续用户载荷谱构建与试验场规范等效提供基础数据支撑。本文采用的载荷谱采集方案具有“场景代表性强、数据质量高、与用户数据协同性好”的特点，主要包括采集路段选择、采集参数设定、数据处理3个核心环节。

在采集路段选择方面，基于前文构建的路面不平度地图，采用“分层抽样”策略选取典型采集路段。具体而言，首先按路面等级（1~6级）进行分层，确保每个路面等级至少选取2~3条代表性路段；然后，在每个路面等级内，结合道路类型（高速公路、城市道路、乡村道路）选择合适的采集车速。最终确定的采集路段总里程不低于1 000 km，覆盖所有路面等级、主要道路类型和车速，能够反映不同路况、不同车速的载荷特征，确保采集数据的场景代表性。

在采集参数设定方面，严格遵循用户四维矩阵的参数特征，确保采集工况与用户实际行驶工况高度一致。具体而言，在每个采集路段，根据用户四维矩阵中该路

表1 用户满载的车速、路面不平度、载质量和行驶里程的四维矩阵

路面不平度等级	满载行驶里程/km									
	10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h	90 km/h	100 km/h
1	46	147	249	309	347	248	125	45	8	1
2	23	62	65	34	17	7	3	1	0	0
3	5	17	12	5	2	1	0	0	0	0
4	2	3	2	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

面等级下的车速分布比例，设定对应的采集车速（如某路面等级下用户在30~40 km/h区间的行驶里程占比最高，则将该区间作为主要采集车速区间）；同时，根据用户载质量分布特征，分别在半载与满载条件下采集。通过该设定方式，可确保采集的载荷谱数据与用户实际载荷特征具有高度一致性，避免传统采集方法中“工况理想化”导致的偏差。

在数据采集硬件配置方面，采用高精度数据采集系统，主要包括传感器、数据采集仪、GPS定位模块3部分。其中，传感器包括车轮六分力传感器（测量精度≤0.5% FS）、轮心三向加速度传感器（测量范围±50 g，精度≤0.1% FS）、减振器位移传感器（测量范围0~300 mm，精度≤0.5 mm），能够全面采集车辆关键部件的载荷、加速度、位移数据；数据采集仪的采样频率达1 kHz，确保数据的高时间分辨率与完整性；GPS定位模块的定位精度≤1 m，用于记录采集轨迹，便于与路面不平度地图关联。同时，参考T/CSAE 173—2021《基于道路载荷谱的汽车用户使用与试验场试验相关性分析评价规程》[7]，对传感器的安装位置、校准方法进行严格规范，确保采集数据的准确性与可比性。

在数据处理方面，本研究提出了“等距离截取”的数据处理方法：将采集的连续载荷谱数据按100 m距离进行分段截取，每段对应一个独立的载荷谱片段。对于每个片段，计算其对应的路面不平度等级、车速区间、载质量区间，并统计该片段的行驶里程，构建载荷谱路面的四维矩阵（与用户四维矩阵结构一致），如表2所示。该处理方法的创新性在于实现了载荷谱数据与用户数据在矩阵结构上的完全匹配，为后续采用整数线性规划方法进行精准关联奠定了基础；同时，100 m的截取长度能够在保留载荷特征完整性的前提下，提高数据处理效率，避免片段过短导致的数据冗余。

表2　某片段30 km/h车速路面不平度矩阵

路面不平度等级	1	2	3	4	5	6
里程/m	88	8	2	2	0	0

4　用户载荷谱构建

用户载荷谱构建是实现“用户数据-载荷特征”转化的核心环节，其目标是为每个用户构建专属的载荷谱，精准反映该用户实际使用过程中车辆关键部件的载荷特征。采用基于整数线性规划的用户载荷谱构建方法，具体流程如下。

首先，明确用户载荷谱构建的数学模型。设用户四维矩阵为$\boldsymbol{A}$（维度：载质量区间数×车速区间数×路面不平度等级数×行驶里程L），其中元素$A(m,v,r,i)$表示第m个载质量区间、第v个车速区间、第r个路面不平度等级下的用户累计行驶里程i；设载荷谱路面四维矩阵为$\boldsymbol{B}$（维度：载质量区间数×车速区间数×路面不平度等级数×载荷谱片段里程），其中元素$B(m,v,r,i)$表示第m个载质量区间、第v个车速区间、第r个路面不平度等级下的行驶里程i；设决策变量矩阵为$\boldsymbol{X}$（维度：载质量区间数×车速区间数×路面不平度等级数×载荷谱片段数），其中元素$X(n)$为表示第$B(m,v,r,i)$的匹配次数n。

用户载荷谱构建的核心目标是找到最优的$\boldsymbol{X}$矩阵，使得通过$\boldsymbol{X}$矩阵选择的载荷谱片段的累计里程与用户四维矩阵$\boldsymbol{A}$的里程尽可能一致，数学表达式为：

$$\min \sum_{m=1}^{2}\sum_{v=1}^{12}\sum_{r=1}^{6}\sum_{i=1}^{100} B(m,v,r,i)\times X(n)\approx A(m,v,r,i) \tag{4}$$

上述模型为整数线性规划问题，其求解难度随变量数量增加呈指数增长。为提高求解效率，采用“分层求解”策略：首先按载质量区间分层，将原问题分解为半载、满载两个子问题；然后在每个载质量区间内，按车速区间进一步分解，将子问题分解为12个车速子问题；最后在每个车速子问题内，求解路面不平度等级与载荷谱片段的匹配问题。通过该分层策略，可将原问题的变量数量从$m\times v\times r\times i\times n$减少至$r\times n$（每个子问题），大幅降低求解复杂度，确保在合理时间内得到最优解。

在求解算法选择方面，采用分支定界法（Branch and Bound）进行整数线性规划求解。该算法通过构建搜索树，不断将可行域划分为更小的子域（分支），并计算每个子域的目标函数下界（定界），剪枝掉不可能包含最优解的子域，从而高效找到最优解。

通过求解上述整数线性规划问题，可得到每个用户的最优载荷谱片段组合，将这些片段按用户行驶时间顺序拼接，即可构建该用户的专属载荷谱。以某用户为例，其半载、[35~45) km/h车速区间、路面等级2下的行驶里程为62 km，通过求解得到该区间需选择片段$B(1,4,r,100)\times X(n)$，累计里程62 km，与用户里程完全匹配。该匹配结果验证了本方法的精准性，能够实现用户行驶里程与载荷谱片段的对应。

用户载荷谱构建的完成标志着从用户数据到载荷特征的关键转化，其核心价值在于：

a. 实现了用户个体与载荷谱的精准关联，能够区分不同用户群体的载荷特征差异，为汽车企业开发定制化产品提供依据；

b. 构建的载荷谱直接反映用户实际使用场景，避免传统载荷谱“理想化”导致的试验偏差，提高试验验证的准确性；

c. 形成了从用户大数据到载荷谱的标准化技术流程，为后续目标载荷计算与试验场规范等效提供了统一的技术基础。

5 用户目标载荷计算

用户目标载荷是汽车企业进行产品耐久性设计与试验验证的核心依据，其定义为能够代表目标用户群体典型使用场景的载荷水平。采用基于“第90百分位伪损伤”的用户目标载荷计算方法，该方法的创新性在于综合考虑了用户群体的载荷差异，既能够覆盖绝大多数用户的实际使用需求，又能够对产品质量提出合理要求，避免过度设计或设计不足，具体流程如下。

首先，进行用户群体伪损伤统计分析。计算了2 000名目标用户的载荷谱数据，计算得到2 000个用户伪损伤值（$D_1, D_2, \ldots, D_{2\,000}$）。对这些伪损伤值进行统计分析，发现对数正态分布进行数据拟合（如图4所示），拟合优度R^2达0.92，表明用户伪损伤分布符合对数正态分布特征，为后续分位值计算提供了统计依据。

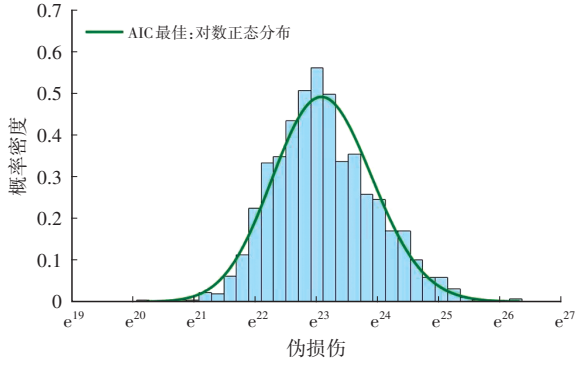


图4 用户伪损伤拟合

其次，基于上述拟合结果，选取第90百分位对应的伪损伤作为用户目标载荷的核心指标，如图5所示。第90百分位的选择依据如下：

a. 能够覆盖90%的用户实际使用场景，确保产品在绝大多数用户的使用过程中具有足够的耐久性；

b. 排除了10%极端用户（如频繁越野、重载使用的用户）的影响，避免因过度设计导致的成本增加。

用户目标载荷计算的完成标志着从用户个体载荷特征到群体共性特征的关键提炼，其核心价值在于：

a. 为汽车企业提供了明确的耐久性设计目标，避免设计过程中的主观随意性；

b. 实现了用户需求与设计目标的精准对接，确保产品设计能够满足目标用户群体的实际使用需求；

c. 为后续试验场规范等效提供了量化的目标基准，使试验验证能够围绕用户需求展开，提高试验的针对性与有效性。

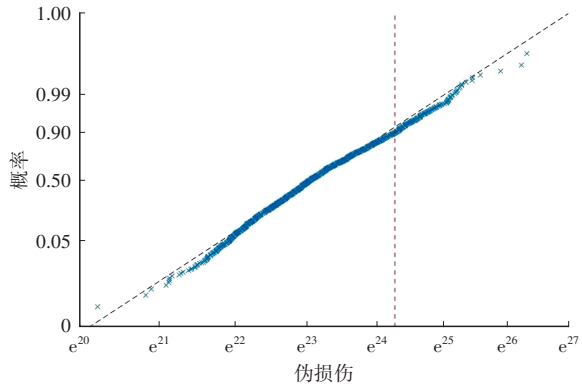


图5 第90百分位用户伪损伤

6 试验场规范等效

试验场规范等效可连接用户目标载荷与试验验证，其目标是将用户目标载荷转化为试验场可执行的试验规范，确保试验场试验能够精准模拟用户实际使用过程中的载荷损伤效应。本文采用了基于“多S-N曲线雨流矩阵匹配”的试验场规范等效方法，该方法的创新性在于突破了传统单一S-N曲线匹配的局限性，实现了载荷谱损伤特征的全面等效，具体流程如下：

a. 明确试验场规范等效的基本原理。试验场规范由多个试验子规范组成，每个试验子规范对应特定的路面类型（如比利时路、鹅卵石路、搓板路等）。试验场规范的核心是确定每个试验子规范的行驶次数和车速，使得所有子规范的累计损伤等于用户目标载荷的损伤。采集了11种路面，不同车速下的载荷谱及行驶里程数据。

b. 计算每个试验子规范的伪损伤。对每个试验子规范的载荷谱进行分析：采用雨流计数法对载荷谱进行循环计数，得到雨流矩阵；基于选定的S-N曲线，计算该子规范的伪损伤d_k（k为子规范编号）。

设用户目标载荷的总伪损伤为D_{target}，第k个试验子规范的行驶次数为n_k，里程为L_k（L_k=n_k×L_{k0}，其中L_{k0}为该子规范的单圈里程），则试验场规范等效的基本方程为：

$$\sum_{k=1}^{n} d_k \times L_k \approx D_{\text{target}} \tag{5}$$

然而，传统等效方法仅基于单一S-N曲线（如m=3）进行伪损伤匹配，存在显著局限性：不同汽车结构件采用不同材料（如高强度钢、铝合金、复合材料），其S-N曲线斜率m差异较大（T/CSAE 173—2021推荐m范围为3~7），仅匹配单一m值下的伪损伤，无法确保其他m值下的损伤等效，导致试验规范无法准确模拟不同材

料部件的用户损伤。

为解决这一问题，提出了“多S-N曲线雨流矩阵匹配”方法，其核心思想是通过调整试验子规范的行驶次数，使基于多条S-N曲线（斜率m分别等于3、4、5、6、7）计算的试验规范伪损伤与用户目标载荷伪损伤同时相等，从而实现雨流矩阵的全面匹配。该方法的数学模型为：

$$\sum_{m=3}^{7}\sum_{k=1}^{n} d_{k,m} \times L_k \approx D_{\text{target},m} \tag{6}$$

式中：$d_{k,m}$为第k个试验子规范基于斜率m的S-N曲线计算的单位里程伪损伤，$D_{\text{target},m}$为用户目标载荷基于斜率m的S-N曲线计算的总伪损伤。

要求车辆关键测量点在试验场工况下的伪损伤与用户目标损伤的比值在0.5~2范围内，且总体算术平均之接近1.0，其他非关键测量点试验场工况下的伪损伤与用户目标损伤的比值在0.1~10范围内[8]。

上述模型为线性方程组，方程组可能无解或存在无穷多解。与此同时，为保证效率，需要得到最优解下的最小行驶里程。该目标函数的意义在于在满足损伤等效的前提下，最小化总试验里程，从而降低试验成本、提高试验效率。为进一步提升用户载荷谱构建的精准性与工程适用性，采用非支配排序遗传算法Ⅱ（NSGA-Ⅱ），建立以“里程匹配残差最小化”和“计算复杂度最小化”为核心的双目标优化模型，实现关联精度与计算效率的协同优化。

以某车型四轮F_z（垂向力）通道为例，其基于不同S-N曲线斜率的损伤比如图6所示。从图中可以看出，采用多S-N曲线匹配方法后，所有斜率下的损伤比均控制在0.5~2范围内，满足验证标准。而传统单一S-N曲线匹配方法（m=3）的损伤比在m=3时达0.5~2，但m=7时，伪损伤比可能会超过2倍，验证了本方法的优越性除损伤比验证外，还对试验规范的雨流计数曲线与穿级计数幅值进行匹配性检查（如图7、图8所示）。在雨流计数曲线匹配方面，要求试验规范雨流曲线在低幅值时低于用户目标载荷雨流曲线，中幅值时高于用户目标载荷雨流曲线，高幅值时与用户目标载荷雨流曲线接近。在穿级计数幅值匹配方面，要求试验规范穿级计数与用户目标载荷穿级计数在最大幅值时接近。通过上述多维度验证，可确保试验场规范与用户目标载荷在损伤特征、载荷分布、极端值特征等方面的全面等效，为试验验证的准确性提供坚实保障。

试验场规范等效的完成标志着从用户目标载荷到试验验证的最终转化，其核心价值在于：

a. 实现了用户实际使用场景与试验场试验的精准对接，确保试验结果能够真实反映产品在用户使用过程中的耐久性表现；

b. 形成了标准化的试验规范等效流程，为汽车企业提供了统一的技术方法，避免因方法差异导致的试验结果不可比；

c. 通过多S-N曲线匹配与多维度验证，大幅提高了试验规范的准确性与可靠性。

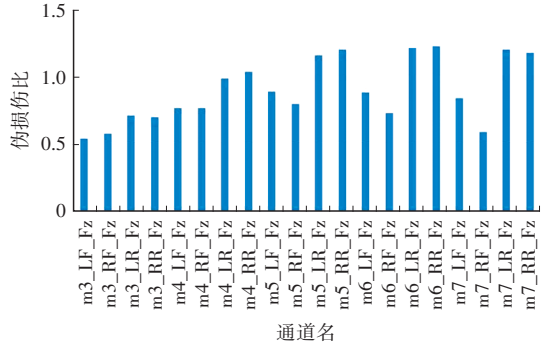


图6　四轮F_z通道在不同S-N曲线斜率下的损伤比

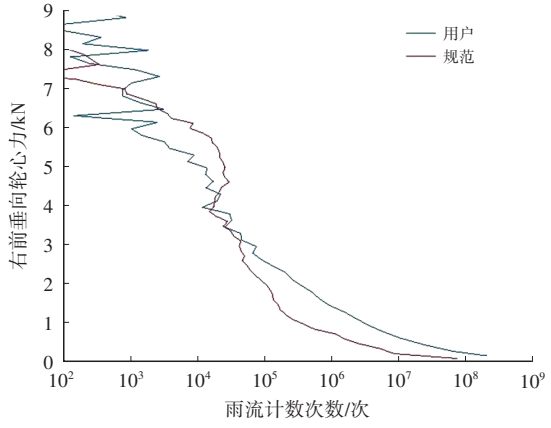


图7　右前轮心力雨流计数

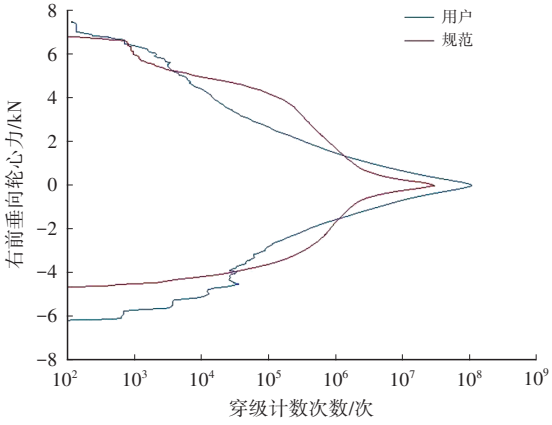


图8　右前轮心力穿级计数

7　结束语

研究依托汽车大数据平台，提出了一种基于大数据的用户关联耐久试验规范开发方法，该方法覆盖“用户大数据分析-载荷谱采集-用户载荷谱构建-用户目标载荷计算-试验场规范等效”的全流程，主要步骤如下：

a. 基于经纬度的用户-路面关联：设计“激光位移传感器+GPS惯性导航系统”的组合测量装置，实现路面不平度的高精度测量（误差≤5%）；基于2 m间隔采样构建大范围区域路面不平度地图，采用“最短距离匹配+轨迹平滑”关联算法，实现用户行驶轨迹与路面不平度的精准关联（准确率≥92%），解决了用户数据中路面不平度缺失的问题。

b. 多维度用户工况离散：基于二自由度车辆动力学模型，识别出路面不平度、车速、载质量为影响用户载荷的核心参数；从三个维度对用户行驶里程进行离散处理（路面不平度按GB/T 7031—2025分为6级，车速按10 km/h分为12个区间，载质量分为2个区间），构建用户行驶里程四维矩阵，为后续建模提供了科学框架。

c. 基于整数线性规划的用户载荷谱构建：将用户四维矩阵与载荷谱路面四维矩阵作为输入输出，构建整数线性规划模型，采用分支定界法求解得到最优载荷谱片段组合，实现用户与载荷谱的的关联；通过分层求解策略，将求解效率提升约30%，满足大规模用户数据处理需求。

d. 第90百分位用户目标伪损伤计算：基于Miner线性累积损伤理论，计算每个用户的伪损伤值；采用对数正态分布拟合用户伪损伤分布（R^2≥0.92），选取第90百分位伪损伤作为核心指标，同时提取雨流矩阵、穿级计数曲线等数据，形成全面的用户目标载荷数据。

e. 多S-N曲线雨流矩阵匹配的试验场规范等效：突破传统的单一S-N曲线匹配的局限性，通过多S-N曲线（斜率m分别等于3、4、5、6、7）下的损伤同时等效，同时引入雨流矩阵和穿级计数曲线匹配性检查等多维度验证标准，确保试验场规范与用户目标载荷的全面等效。

经验证，在本方法基础上，所构建的路面不平度地图具有广泛的车型适配性，仅需选取少量涵盖不同路面不平度特征的典型道路，结合多车速工况开展载荷谱采集工作，即可完成不同车型的试验场耐久性试验规范制定，体现出极高的可复制性。

随着半主动及主动悬架系统的商业化落地，车轮加速度传感器与路面扫描摄像头等车载感知设备有望提供高精度的关键路面数据，直接获取用户全工况下的四维数据矩阵，进而支撑试验场耐久性试验规范编制。

参 考 文 献

[1] 李文亮, 周炜, 张禄, 等. 考虑路面不平度和速度分布的用户目标载荷谱构建方法[J]. 公路交通科技, 2016(12): 154-158.
LI W L, ZHOU W, ZHANG L, et al. A Method for Constructing User Target Load Spectrum Considering Road Unevenness and Speed Distribution[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016(12): 154-158.

[2] 刘永臣. 路面不平度垂向传递机理及其对车辆结构疲劳损伤的影响研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
LIU Y C. Study on Vertical Transmission Mechanism of Road Unevenness and Its Influence on Fatigue Damage of Vehicle Structure[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013.

[3] 全国机械振动、冲击与状态监测标准化技术委员会. 机械振动 道路路面谱 测量数据的报告: GB/T 7031—2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2026: 18-26.
Mechanical Vibration Shock and Condition Monitoring. Mechanical vibration—Road surface profiIes—Reporting of measured data: GB/T 7031—2025[S]. Beijing: China Standard Press, 2026: 18-26.

[4] 褚文博, 罗禹贡, 罗剑, 等. 电驱动车辆的整车质量与路面坡度估计[J]. 清华大学学报（自然科学版）, 2014(6): 724-728.
CHU W B, LUO Y G, LUO J, et al. Estimation of Vehicle Mass and Road Slope for Electrically Driven Vehicles[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014(6): 724-728.

[5] 廖银生, 胡志明, 贾洪波, 等. 基于纵-横向动力学耦合的整车质量与道路坡度估计[J]. 汽车工程师, 2024(10): 1-7.
LIAO Y S, HU Z M, JIA H B, et al. Estimation of Vehicle Mass and Road Slope Based on Longitudinal-Lateral Dynamic Coupling[J]. Automotive Engineer, 2024(10): 1-7.

[6] CHI A, WEI J, WEI T M, et al. Hierarchical Estimation of Vehicle Key Parameters Using KF-RLS Method[J]. 2024 8th International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering (ICEMCE). Xi’an, China: IEEE, 2024: 1025-1029.

[7] 中国汽车工程学会. 基于道路载荷谱的汽车用户使用与试验场 试验相关性分析评价规程: T/CSAE 173—2021[S]. 北京: 中国汽车工程学会, 2021: 4-6.
China Society of Automotive Engineers. Correlation Analysis and Evaluation Method for Vehicle Customer Usage and Proving Ground test Based on the Road Load Spectrum: T/CSAE 173—2021[S]. Beijing: China Society of Automotive Engineers, 2021: 4-6.

[8] 王海宾, 赵云达, 施亦舟, 等. 基于相对损伤谱的试验场耐久性试验关联方法[J]. 汽车工程师, 2023(1): 14-23.
WANG H B, ZHAO Y D, SHI Y Z, et al. A Correlation Method for Proving Ground Durability Tests Based on Relative Damage Spectrum[J]. Automotive Engineer, 2023(1): 14-23.

（责任编辑 天下溪）

修改稿收到日期为2026年9月8日。