

疲劳耐久性评价技术研究综述*

韩萌¹ 王悦廉² 李禄源¹ 边增远¹ 庄晔²

(1. 吉林省产品质量监督检验院, 长春 130000; 2. 吉林大学汽车底盘集成与仿生全国重点实验室, 长春 130022)

【欢迎引用】韩萌, 王悦廉, 李禄源, 等. 耐久性评价技术进展综述[J]. 汽车文摘, 2024(10): 23-32.

【Cite this paper】HAN M, WANG Y L, LI L Y, et al. A Review of Research on Fatigue Durability Evaluation Technologies[J]. Automotive Digest (Chinese), 2024(10): 23-32.

【摘要】疲劳载荷谱处理是疲劳耐久分析的关键环节。在载荷谱的获取方面, 综述并分析了虚拟路面法和载荷迭代法的优势和劣势。在载荷谱的处理方面, 综述了增大幅值法、峰谷抽取法、增加频率法、时域关联编辑法等7种载荷谱处理方法, 分析结果表明基于时域、频域或者将两者结合对载荷谱特征及信息进行提取, 基于疲劳寿命损伤理论对载荷谱进行简化, 能进一步加快疲劳分析的流程、缩短研究时长。在疲劳分析方法方面, 分析了不同疲劳分析方法的优势和劣势, 结果表明在疲劳分析过程的不同阶段选择合适的疲劳分析方法可以获得精度更高的疲劳预测结果, 能更高效地获得车辆目标零部件的疲劳寿命。在疲劳耐久台架试验验证方面, 针对台架试验的迭代过程存在迭代收敛较慢的问题, 提出未来可以尝试通过神经网络的方式来对传递函数进行学习, 以期获得更好的迭代效果, 获得更为准确的驱动信号, 提高疲劳分析的效率。

关键词: 耐久性评价技术; 道路模拟试验; 载荷谱编制

中图分类号: U462.3+6; U467.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20230303

A Review of Research on Fatigue Durability Evaluation Technologies

Han Meng¹, Wang Yuelian², Li Luyuan¹, Bian Zengyuan¹, Zhuang Ye²

(1. Jilin Province Product Quality Supervision Test Institute, Changchun 130000; 2. National Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Jilin University, Changchun 130022)

【Abstract】 Fatigue load spectrum processing is a key part of fatigue durability analysis. In terms of the acquisition of load spectrum, the advantages and disadvantages of the virtual pavement method and the load iterative method are reviewed and analyzed. In terms of load spectrum processing, 7 load spectrum processing methods, including the increased magnitude method, the peak-to-valley extraction method, the increased frequency method, and the time-domain correlation editing method, are reviewed. The analysis results show that the load spectrum features and information are extracted based on the time domain, frequency domain or a combination of the two, and the load spectrum is simplified based on the fatigue life damage theory, which can further speed up the fatigue analysis process and shorten the research time. In terms of fatigue analysis methods, the advantages and disadvantages of different fatigue analysis methods are analyzed, and the results show that the fatigue prediction results with higher accuracy can be obtained by selecting appropriate fatigue analysis methods at different stages of the fatigue analysis process, and the fatigue life of vehicle target parts can be obtained more efficiently. In terms of fatigue durability bench test verification, in view of the problem of slow iterative convergence in the iterative process of bench test, it is proposed that the transfer function can be learned by neural network in the future, in order to obtain better iterative effect, more accurate driving signal, and improve the efficiency of fatigue analysis.

Key words: Durability evaluation technology, Road simulation testing, Load spectrum compilation

0 引言

耐久性衡量汽车性能、品质的重要指标, 是汽车性能开发的重要内容。传统的汽车耐久性开发是

在样车阶段进行可靠性试验验证, 存在时间滞后、开发周期长、资金投入大等问题^[1]。为了更好地满足汽车企业以及零部件生产企业的研发生产需求, 利用载荷谱进行疲劳试验可以有效缩短产品开发周期、

*基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目, 新能源汽车悬架系统可靠性测试及评价方法研究(2022MK022)。

降低开发成本、提高汽车产品耐久性。孙伟等^[2]以某商用车排气系统波纹管为研究对象,通过样车道路试验对其多维耦合随机载荷激励进行测试,采用时域损伤编辑法对波纹管加速寿命载荷谱编辑方法进行了研究,将加速载荷谱缩短至原始谱的17.86%;金红杰等^[3]构建了集力、加速度、位移等多种参数的载荷谱采集系统,为载荷谱编辑提供有效、精简的数据,利用实测数据形成完整的载荷谱数据预处理、编辑、编制流程,采用统计计数、工况合成以及外推等编制方法有效编辑载荷谱;徐保容等^[4]针对履带车辆载荷谱编制中任务关联样本量不足的问题,以载荷谱块和训练科目为基础,利用路径规划、行动规划算法预测车辆行动与操纵动作,提出基于操纵动作预测的履带车辆载荷谱编制方法,分析结果表明在疲劳分析的过程中如何获得高质量的载荷谱是关键。

汽车零部件的材料、结构、受载情况等因素对于疲劳寿命的分析有很大的影响,因此根据实际情况需要选择合适的疲劳寿命理论,才能保证疲劳寿命预测的准确性。许立敬^[5]基于Manson-Coffin理论,考虑气动载荷、温度载荷以及离心载荷三者平均应力对疲劳寿命的影响,并对Manson-Coffin理论进行修正,建立了高压涡轮叶片疲劳寿命预测模型并计算其疲劳寿命;Baek等^[6]采用雨流循环计数法、 $P-S-N$ 曲线和修正Miner法对比疲劳寿命预测值与实际疲劳寿命的差异。研究表明,选择合适的疲劳寿命计算模型,有助于获得更为准确的疲劳计算结果。

传统耐久性试验周期长、费用高,随着产品的开发甚至会重复多次试验,为了解决以上问题,杜建等^[7]简化了冗余的转向节耐久规范,通过悬架运动学及柔顺性试验和虚拟迭代法,从静态、动态角度验证了整车多体动力学模型的准确性,搭建转向节多轴虚拟台架,应用模态应力恢复法,讨论分析转向节虚拟台架下的原始谱、台架随机谱、台架程序谱对其疲劳损伤的影响;徐东等^[8]搭建了转向节多轴虚拟台架,应用模态应力恢复法,讨论分析转向节虚拟台架下的原始谱、台架随机谱、台架程序谱对其疲劳损伤的影响,介绍了从路谱数据采集到数据处理分析的全过程,并利用远程参数控制(Remote Procedure Call, RPC)迭代技术,将试验场采集到的路谱载荷信号通过迭代计算转化为供台架试验使用的驱动信号,进行电瓶箱系统耐久强度的快速试验验证。优化台架试验方法可以更好地还原实际路面下的载荷谱,台架迭代试验可以缩短了耐久性试验周期,提高产品开发效率。

本文结合大量参考文献,综述载荷谱获取方法、载荷谱处理方法、针对不同载荷情况的疲劳分析方法,并对疲劳耐久台架试验进行探讨,旨在更准确、有效地获得目标部件的寿命情况,缩短研发周期,提高研发生产效率。

1 载荷谱的获取方法

根据载荷输入位置的差异性,获得目标部件载荷谱的仿真方法包括路面载荷输入法和轮心载荷输入法。路面载荷输入法将路谱信息用于模型胎面,轮心载荷输入法则将路谱信息作用于轮心处,目标都是获得轮心处的载荷谱。

1.1 路面载荷输入法

路面载荷输入法主要使用虚拟试验场(Virtual Proving Ground, VPG)技术^[9]对载荷谱进行提取,与传统的采集方法相比,可减少研发设计时间,大量节约成本和人力、物力。

为了保证获得数据的精确度和准确性,虚拟试验场需要获得试验场标准路面的完整扫描数据,同时获得轮胎的动态性能^[10],测定各个部件的刚度等力学曲线,提高动力学模型建模的准确性,对标仿真和试验数据,不断提高动力学模型的准确性,以确保最终获得的载荷谱的精度。

根据目标车辆的寿命目标以及实际的使用工况,一般采用强化路面^[11]缩短试验过程,典型强化路面生成的虚拟试验场路面以及对应的实际路面如图1所示^[9]。进行不同路面的循环配比,获得需要的耐久试验标准,通过动力学模拟路面的仿真获得轮心处的载荷谱。

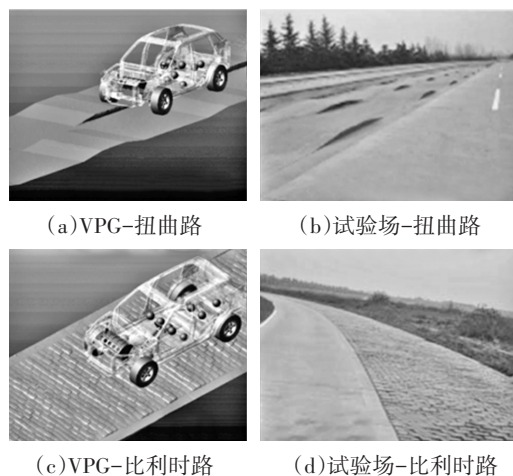


图1 虚拟试验场典型路面和实际路面^[9]

1.2 轮心载荷输入法

轮心载荷输入法可分为自由位移加载法、自由载荷加载法、约束载荷加载法、位移反求加载法。

(1)自由位移加载法是指模型不需要施加任何约束,直接将轮心垂向位移作用于轮毂,但由于轮心垂向位移不易测量,通常对轮心垂向加速度进行计算得到轮心垂向位移^[12]。自由载荷加载法是指模型不施加任何约束,直接将实测轮心六分力作用于轮毂,但整车多体模型与试验车之间存在差异,模型无约束情况下施加实测轮心六分力将会导致仿真不稳定,模型发生翻转、倾覆,最终导致仿真失败^[13]。

(2)约束载荷加载法是在自由载荷加载法的基础上将车身固定约束,这样仿真时模型就不会出现不稳定现象,但车身固定后,无法考虑簧上质量的影响,导致与实际情况不相符,仿真与试验存在误差^[14]。

(3)位移反求加载法是在自由位移加载法和自由载荷加载法的基础上衍生出来的新方法。模型不施加任何约束,应用虚拟迭代原理反求轮心垂向位移,替换轮心垂直载荷,联合其他轮心载荷作用于轮毂,这样不会出现仿真不稳定现象,仿真与实际情况相符,能够保证高仿真精度。

基于 FEMFAT LAB 和 ADAMS 软件求解载荷谱的虚拟迭代^[15]技术,可以更为高效地获得载荷谱。通

过调用 ADAMS 建立的动力学模型,得到路面激励下的响应情况,根据多体动力学模型响应与原始信号之间的差异,反复迭代进行修正。

由六分力载荷谱得到轮心位移信号的虚拟迭代的具体过程如图 2 所示,以强化道路试验过程中六分力仪测得的轮心处的载荷谱作为外部激励输入^[16],将随机白噪声作为垂向位移激励输入动力学模型后得到响应力信号,通过响应力信号与白噪声信号求得传递函数后,求取反函数^[17],再将原始垂向力信号代入反函数,求得位移信号,再次输入动力学模型得到响应力信号,以垂向力信号为目标进行验证,如果损伤值稳定在可以接受的范围(0.5~1.5),则迭代结束,如果不在可以接受的范围内,将对位移信号进行修正,重新输入动力学模型反复迭代,直到损伤值在可以接受的范围内,则迭代收敛,认为获得了轮心处的位移信号。

通常迭代的过程在 10~20 次后迭代逐渐收敛到合理范围,如果收敛效果不理想或者无法收敛,则动力学模型的搭建可能存在问题,需要对动力学模型进行调整。

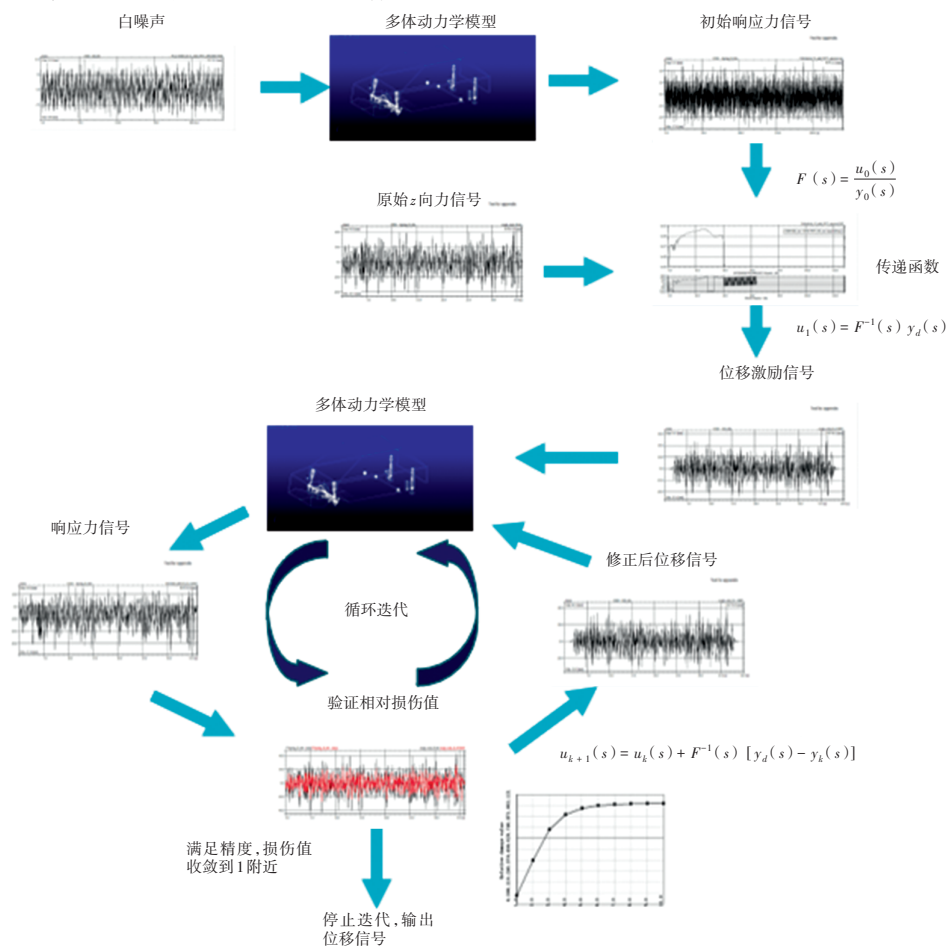


图 2 虚拟迭代流程原理

通过虚拟迭代获得了轮心处的垂向位移信号后,接下来通常会与其他五分力一起驱动动力学模型,获得各部件连接处的载荷谱,用于接下来的疲劳寿命分析。

2 载荷谱的处理方法

2.1 增大幅值法

增大幅值法^[18]对载荷的幅值级别按照恒定值进行缩放,因此通过编辑后的载荷谱计算出的疲劳寿命比原始数据得到的疲劳寿命更短,在疲劳寿命的预测设计上依然有意义。

通过公式(1)可以确定幅值增加的系数 A 。

$$A = \frac{S_1}{S_0} = \left(\frac{N_0}{N_1} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (1)$$

式中: S_0 为原始载荷幅值, S_1 为增大后的载荷幅值, N_0 为原始试验时间, N_1 为加速后试验时间, b 为与材料、应力比、加载方式等有关的系数。其中, S 和 N 来自于沃勒公式 $C = N \cdot S^b$, N 为应力幅值 S 下对应的疲劳寿命, C 和 b 直观反映了沃勒曲线的截距和斜率。

这种方法保留了载荷谱的频率、相位和加载顺序的信息,所以适用于进行单轴或者多轴的疲劳加载预测,此方法的关键在于确定幅值增大的系数。

2.2 峰谷抽取法

峰谷抽取法通过删除波峰和波谷外的点,对载荷谱进行简化,如图3所示。通过峰谷抽取法对载荷谱进行处理,可以缩短信号长度,同时考虑对小于某一阈值的应力循环进行进一步删减,缩短载荷谱压缩信号,此阈值一般通过疲劳分析进行选取。

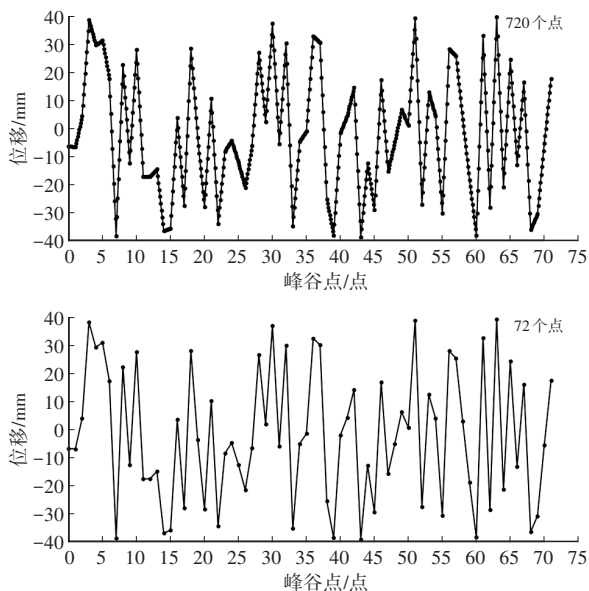


图3 峰谷抽取法示意^[19]

峰谷抽取法^[19]的优势在于该方法能简单高效地对载荷谱进行处理,迅速获取载荷谱历程中的关键信息,其缺点是对于一些复杂工况下的载荷谱处理效果有限,不能获取足够的载荷谱信息。

2.3 增加频率法

增加频率法^[20]通过增加循环荷载的频率从而实现疲劳测试的加速,对于简单的部件,可以在实际工作载荷下正常频率范围内对部件疲劳强度没有影响或影响最小的基础上改变加载频率。

该方法要求零部件的响应是准静态的,并且还要保证频率的增加不会造成动态响应的放大。应用这种方法之前必须掌握零部件的固有频率,一般加速试验的最大频率不会超过一阶固有频率的1/3,所以在尝试这种方法之前必须对零部件进行模态分析,而且还需考虑试验设备加载能力的限制。

针对于复杂的结构或者测试工况,输入会激发谐振,谐振会导致研究的结构内的应力分布与实际使用过程中监测到的应力分布有所不同,所以频率的选择存在困难。

2.4 时域关联编辑法

在采用时域关联编辑法^[21]对载荷谱进行处理时,对于计算结果为无损伤或者小损伤的载荷谱段进行删除,在保证整体载荷损伤值不受影响或影响较小的前提下对载荷谱实现编辑加速。在载荷谱进行分段时,需要选择合适的时间长度,对载荷谱进行等长多段划分,删除无损伤或先损伤区段后将各段载荷谱进行平滑连接,得到想要的载荷谱。

其详细的时域关联编辑流程如图4所示,通过已有材料的相关疲劳参数,计算测点的损伤时间分布图,得到不同区段载荷谱对应的损伤值,考虑到存在多个通道的载荷谱,可以选择当所有通道损伤值均满足小损伤标准时,才会对该时间区段的信号进行删除,计算好伪损伤后,对载荷谱用合适的窗口长度进行划分,设定损伤保留度,得到与载荷时间历程相对应的损伤情况,对不满足设定损伤保留度的区段进行标记并删除,并对信号进行连接从而得到加速后的载荷谱。

该方法在处理过程中保留了原始载荷谱有效区段内的加载顺序、频率和相位信息,能比较好地体现原有载荷谱的损伤疲劳特性。

2.5 非平稳工况合成算法

非平稳性任务合成算法(Mildly Nonstationary Mission Synthesis, MNMS)^[22]使用离散傅立叶变换、正交小波变换12阶Daubechies小波^[23]、小波分组程序、

凸点计数程序用于试验或数值测试。峰值使用波峰因数控制进行校正以浓缩试验测量的振动数据并将其分为短测试序列。获得的任务信号以功率谱密度 (Power Spectral Density, PSD) 函数记录原始数据、峰顶因子和峰值, 以获得保证质量的数据信号。

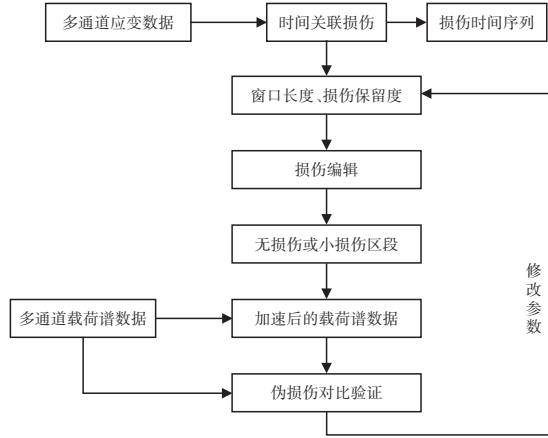


图4 时域关联编辑流程

其主要分析工作流程如图5所示,在第一阶段,采用传统的傅立叶分析该数据,确定总体功率谱密度函数。确定所获得的PSD中的每条频率线特征的关键在于振幅,计算公式如下:

$$A_k = \sqrt{2\Delta f S(k\Delta f)} \quad (2)$$

式中: $S(f)$ 为高斯信号的基本功率谱密度, $k\Delta f$ 为所讨论谐波的频率。振幅 A_k 用于生成短的人工信号,该信号用作构造振动任务信号的基础。短人工基信号的时间历程是通过具有大量 N 个谐波的傅立叶展开计算得来,可以表示为:

$$y(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(2\pi k\Delta f t + \varphi_k) \quad (3)$$

按照平稳高斯行为的传统假设,以随机方式选择相位角 φ_k 。利用傅立叶技术构造短汇总信号是传统上用于振动台和类似测试台的数字随机控制器的基本过程,该方法保证短测试信号精确地再现规定的道路数据的PSD。

第二个阶段主要执行道路数据的正交小波变换 (Orthogonal Wavelet Transform, OWT)。如果首先通过 OWT 分解原始振动时程,将大幅度提高信号分析和合成效率。小波是数学函数 $\Psi(t)$,用于将信号 $x(t)$ 分解为缩放的小波系数 $W_\varphi(a,b)$,连续小波变换是一种时间尺度的方法,可以表示为:

$$W_\varphi(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

式中: $\Psi_{a,b}(t)$ 为尺度小波, Ψ^* 为 Ψ 的复共轭。基小波

$\Psi(t)$ 可以是满足一组容许条件的许多函数中的任何一个,连续分析的自然扩展是时间 b 和尺度 a 根据 $A = a_0^m, b = na_0^n b_0$ 的离散化,其中 m 和 n 为整数, $b_0 \neq 0$ 为平移步骤。

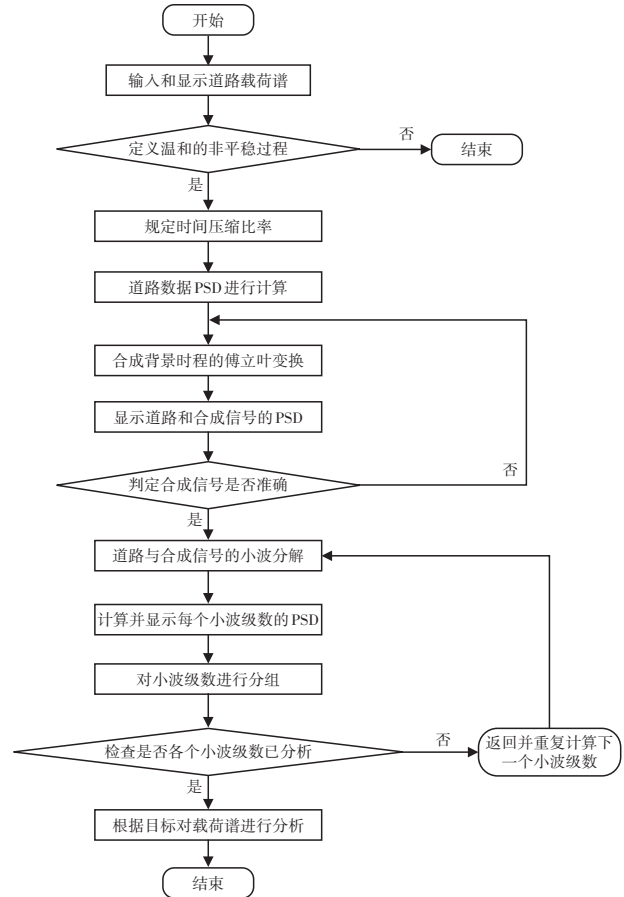


图5 非平稳随机工况研究工程

在第三个阶段中,分析道路数据的每个小波组。在MNMS中,道路数据和合成傅立叶数据中对每个小波组进行比较,以确定傅立叶数据是原始数据,并对数据进行分析处理。

2.6 最小样本量计算模型

高置信度最少采集样本量计算模型^[24]首先需要对已采集的载荷谱进行小波分解,得到累积载荷谱密度,将累积功率谱密度信号等距离加窗(窗口长度为 L),计算每个窗口内累积功率谱密度的和,获取累积功率谱密度特征参数样本。利用极大似然法对服从威布尔分布的特征参数样本进行参数估计,获取威布尔分布的形状参数和尺度参数。根据载荷谱采集样本的尺度参数与载荷谱总体的估计尺度参数,并以其之间的相对偏差期望值的绝对值作为精度指标,构建满足精度指标所需要的载荷谱采集最小子样容量计算模型。指定精度指标和置信水平,并将累积功率谱密度特征参数样本及其威布尔分布^[25]参数估计结果

代入,可以获取载荷谱最小子样容量。将最小子样容量 n 乘以窗口的长度 L ,即可得到具有高置信度载荷谱最少采集里程。

2.7 短时傅立叶变换法

短时傅立叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)^[26]是一种常用的信号处理技术,尤其在疲劳载荷谱处理中具有广泛的应用,滑动数据窗口用于获得时间局部化频谱,这些频谱共同构成了数据的时间-频率表示,在时域和频域上对信号进行分析。在疲劳载荷谱处理中,这对于捕捉载荷信号的瞬态变化以及频率成分的变化至关重要。通过时频图,可以观察到信号在不同时间和频率上的演变。从疲劳载荷谱中提取关键的特征,如频率成分、信号的能量分布等。通过去除原始信号中包含的低振幅周期来实现载荷谱的缩减,这些特征对于了解载荷谱的性质以及对结构产生的影响非常重要。关于窗函数的选择,原则上可以使用任何窗口函数,但窗口大小和形状决定了时间-频率分辨率以及频谱泄漏,合适的窗函数可以帮助准确地捕捉信号的瞬态变化,在疲劳载荷谱处理中,需要根据具体情况选择适当的窗函数以获得准确的分析结果。

STFT通过将信号划分成小的顺序或重叠的数据帧来执行。然后,将快速傅立叶变换(FFT)应用于每个数据帧。连续STFT的输出可以提供信号的时间-频率表示,为了实现这一点,通过将信号乘以一个窗口,将信号截断为短数据帧,使得修改后的信号在数据帧外为零。为了分析整体信号,然后将窗口转换为整个时间长度重新应用于信号。STFT由主要功能分段,通过固定形状的平移窗口。主时间轴上所有点的局部光谱构成STFT。一般表达式为:

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) w(t - \tau) \exp(-2\pi i f \tau) d\tau \quad (5)$$

式中: h 为主函数, τ 为时间, f 为频率。平移窗口 w 的位置由 t 确定, t 的单位与 τ 相同。

STFT的优势在于可以有效抑制载荷信号中的噪声。通过在时域上对信号进行局部分析,有助于从噪声中提取有价值的信息,提高信号的清晰度和准确性。

3 疲劳寿命分析

3.1 疲劳分析方法

3.1.1 名义应力法

名义应力法通过将载荷循环等效为静态载荷,简化了疲劳分析的复杂性。名义应力法假定:只要应力

集中系数和载荷谱相同,由同种材料制成的任意构件的寿命就相同^[27]。这个等效化过程旨在找到一个与实际载荷循环相对应的静态载荷,其引起的疲劳破坏与实际情况相当。基于材料的S-N曲线,考虑到影响零部件疲劳寿命的各种因素,计算出零件的S-N曲线,对目标零部件在不同工作载荷下的疲劳寿命进行预测。

在传统的频域寿命估算方法中,首先进行目标零部件的动力学响应分析,以获得目标零部件在各个位置的应力幅值的概率密度函数^[28]。接着,运用Miner累积损伤理论,结合材料的S-N曲线,对随机振动下的疲劳寿命进行估算。这一方法综合考虑了振动对结构寿命的影响,提供了一种更为深入和全面的手段,以更精确地评估目标零部件在疲劳加载条件下的寿命:

$$T = \frac{1}{v \int_0^{\infty} \frac{P(S)}{N(S)} dS} \quad (6)$$

式中: $P(S)$ 为应力幅值概率密度函数, $N(S)$ 为材料S-N曲线中材料的寿命, v 为单位时间内的应力循环次数。

3.1.2 应力场强度法

应力场强度法认为,在裂缝的根部存在可能导致疲劳破坏的区域,通过定义缺口附近的应力场强度来反映缺口件受载的严重程度,假定当缺口根部的应力场强度大于等于光滑件应力场强时发生破坏。这种方法着重考虑材料性能,并引入应力场强度 σ_{FI} 的控制参数。该参数综合考虑了多个因素,包括裂缝根部的最大应力、裂缝周围的应力梯度以及整体应力状态等。总体而言,应力场强度是一个综合考虑材料性能和结构受力状况的参数,有助于全面评估零件的受力严重程度。

$$\sigma_{FI} = \frac{1}{V} \int_{\Omega} f(\sigma_{ij}) \varphi(\vec{r}) dv \quad (7)$$

式中: Ω 为局部损伤区,场强法认为它对于某种材料而言是一个常数,它的大小和形状与破坏机理有关; v 为 Ω 的体积; $f(\sigma_{ij})$ 为破坏函数反映材料和应力分布对缺口强度的影响,对不同的材料其表达式也不相同; $\varphi(\vec{r})$ 为权函数,表示在 Ω 内某点处的应力对 σ_{FI} 的贡献程度,在物理上表征局部损伤区内各点对材料损伤的贡献,贡献程度依据各点距应力峰值点的距离、基于应力峰值点的方向角、各点应力梯度的不同而不同^[29]。

3.1.3 临界距离法

临界距离法使用缺口附近特定点、线、面或体的应力特征值作为材料失效的依据,认为当该区域的平均应力超过疲劳强度时就会发生疲劳失效,将缺口附近最大主应力场内某一临界尺寸内的平均应力作为控制疲劳损伤的特征应力,将该特征应力与材料的S-N曲线对比获得构件危险部位的疲劳寿命。当某一临界尺度下的平均应力 σ_{av} 超过材料的疲劳强度时,该材料构件被认定为疲劳失效。通过分析这个特定点的应力 σ_{av} 与材料疲劳强度Wöhler曲线之间的关系,可以预测缺口根部的危险点的疲劳寿命。临界距离法不同判定条件下对于特征应力的计算方式为:

点法^[30]:

$$\sigma_{av} = \sigma_1 \left(l = \frac{L_0}{2}, \vartheta = 0 \right) \quad (8)$$

线法^[31]:

$$\sigma_{av} = \frac{1}{2L_0} \int_0^{2L_0} \sigma_1(l, \vartheta = 0) dl \quad (9)$$

面法:

$$\sigma_{av} = \frac{2}{1.1\pi L_0^2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{L_0} \sigma_1(l, \vartheta = 0) l dl d\vartheta \quad (10)$$

体法:

$$\sigma_{av} = \frac{3}{2\pi(1.54L_0)^3} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{1.54L_0} \sigma_1(l, \vartheta, \phi) \cdot l^2 \sin \vartheta dl d\vartheta d\phi \quad (11)$$

式中:以缺口根部危险点为原点O建立局部坐标系Oxyz,以试件轴线方向为y轴,缺口二分线方向为x轴, σ_1 为缺口根部弹性应力场中极坐标 (l, ϑ, ϕ) 处的最大主应力, ϑ 为弹性应力场中任意方向和x轴的夹角, ϕ 为该方向在Oyz平面的投影与y轴夹角, L_0 称为临界距离,表达式为:

$$L_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma_0} \right)^2 \quad (12)$$

式中: $\Delta \sigma_0$ 和 ΔK_{th} 分别是材料光滑件疲劳极限变程和疲劳裂纹扩展门槛值变程。

3.1.4 局部应力应变法

在低周疲劳问题中,设计的应力或应变水平相对较高,以充分发挥材料的性能,这样可能会使构件中某些高应力处(尤其是缺口根部)进入塑性屈服,因此考虑以应变为疲劳分析的参量将更好地进行疲劳预测。

局部应力应变法认为,若缺口件危险部位受到的

局部应力应变历程与作用在相同材料光滑件上的应力应变历程相同,则它们的疲劳寿命相同。局部应力应变法的关键是确定疲劳缺口处的应力应变历程。疲劳寿命取决于应力集中处的最大局部应力 $\Delta \sigma$ 和应变 $\Delta \varepsilon$,所计算的疲劳寿命是缺口根部应力集中附近一小部分面积材料的疲劳破坏寿命,通常指缺口部位出现可见裂纹的寿命,即裂纹形成寿命。故局部应力应变法是与实际情况相符的,具有较高的寿命精度。

将局部应力应变与名义应力联系起来^[32],考虑应变幅为应变幅的弹性分量和塑性分量之和,循环应力应变曲线拟合式为:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (13)$$

以幅度的形式表示为:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (14)$$

式中: ε_a 为总应变; ε_e 为应变幅的弹性分量; ε_p 为应变幅的塑性分量; σ_a 为总应力; $\Delta \varepsilon$ 为应变幅度,即 $2\varepsilon_a$; $\Delta \sigma$ 为应力幅; E 为弹性模量; K' 为循环强度因数; n' 为循环应变硬化指数。

根据Basquin公式,可得:

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (15)$$

根据Manson-Coffin公式^[33],可得:

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (16)$$

式中: σ'_f 为疲劳应力, ε'_f 为疲劳应变率, N_f 为寿命; b, c 为疲劳循环常数。

将式(13)、式(14)代入式(12),可得:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f (2N_f)^b}{E} + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (17)$$

高周疲劳主要是弹性应变,低周疲劳主要是塑性E-N应变,局部应力应变法更适用于低周疲劳寿命估算,用于高周疲劳误差较大,原因是该方法未考虑应力梯度、尺寸和表面状况的影响。

3.2 疲劳分析流程

根据目标构件的使用工况,选择相应的疲劳分析方法,完成疲劳寿命预测分析,一般采用nCode软件进行疲劳分析,nCode中进行应变疲劳寿命分析的流程如图6所示。

根据分析流程图可知,为完成疲劳寿命分析所需的数据包括:疲劳载荷谱、有限元分析结果文件、材料E-N曲线。

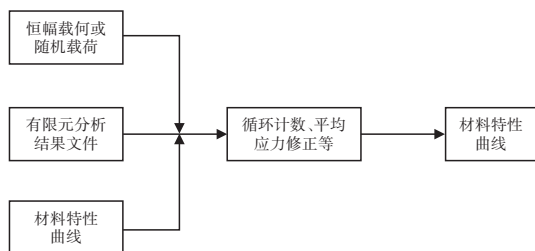


图6 nCode疲劳寿命分析流程

疲劳载荷谱是来自于目标构件受到的真实激励载荷谱,在nCode软件中可以以恒定幅值载荷、时间序列载荷和随机载荷等几种不同的形式进行加载。需要进行有限元分析^[34]是疲劳分析的载体文件,为了获得构件各连接点处在不同方向载荷作用下的应力分布,一般构件在分析得出其主要受力部位后,在受力部位施加载荷进行静力分析作为疲劳分析结果文件输入。

而关于材料的 $E-N$ 曲线,理想状况下是获得目标构件材料的 $E-N$ 曲线,以获得更为精准的疲劳预测数据,但是对于不同结构、不同加工方式的各种构件材料都进行试验测量相应的疲劳寿命曲线,试验周期长且成本大幅增加,而一般在疲劳分析软件中根据材料的强度极限、屈服极限、弹性模量、泊松比等参数,经Goodman法^[35]或Gerber法修正后得到的疲劳寿命曲线也能保证最终的分析结果精度。

4 疲劳耐久台架试验验证

在整车试验场中如果只考虑单个或某几个目标零部件的话,整个试验周期将被延长,成本大幅提高且重复性较差,室内台架试验由于重复性好、试验周期短等优点^[36],是目前汽车零部件试验验证的重要手段。因此,建立一种与试验场路试关联性较好,又能快速复现失效模式和验证改进方案的零部件级基于路谱的多通道室内台架试验尤为重要。

采用远程参数控制技术对路谱进行迭代,迭代过程中要对实际道路行驶中采集得到的各种响应输出信号与试验台加载设备上的响应输出信号进行不断的比较,反复回馈迭代进行修正完成载荷的迭代。在振动疲劳试验中,一般不会采用采集到的原始数据,在信号采集的过程中存在各种干扰因素,会影响信号的质量,而使信号出现各种异常,需要先进行滤波、重采样等,同时考虑到载荷谱中存在大量对零部件疲劳计算贡献较小的载荷谱,会延长后续迭代和台架试验等步骤的时间,降低试验的效率,一般考虑使用前文提及的载荷谱编辑方法,对载荷谱进行处理^[37],得到疲劳损伤贡献相近的加速载荷谱。

对已经得到并处理过的载荷谱进行识别和分析处理,得到试验所需要的期望响应信号,以白噪声信号作为输入,得到测试对象系统的响应情况,据此对台架系统的频率响应函数进行计算,再对频率响应函数的逆函数进行求取,根据逆函数和期望的信号生成初始的驱动信号,以期望得到的信号为目标通过反复地迭代修正,得到台架试验需要的驱动信号^[38]。这个迭代的过程与虚拟迭代类似,但是其获取响应的方式有所差异,虚拟迭代用数值计算的方法不断修正逆传递函数得到驱动信号,通过Adams搭建的动力学模型求解响应信号,本研究方法通过数值计算对驱动信号修正后,直接传给作动器,驱动试验台架获得响应信号^[39],其终止迭代的判据同样为与目标信号在时域上和功率谱密度上的吻合度,以及相对损伤值的偏差也要足够小,标准要求试验的迭代目标为最大和最小统计偏差要求均为 $100\% \pm 5\%$,均方根偏差小于 5% ,相对损伤值要求为 $100\% \pm 5\%$ 。

得到需要的驱动信号后,开始完整台架的搭建,对于目标部件的约束情况应与实车情况一致,开始试验直至目标部件出现疲劳损坏。根据到达损坏时经过的时间是否满足设计要求,以及疲劳损坏的位置情况,来对目标部件的设计研究给出参考意见。

5 结束语

疲劳载荷谱处理是在工程结构疲劳分析中关键的一步,可从实际测量或模拟的载荷数据中提取出有助于疲劳寿命评估的关键信息。处理疲劳载荷谱的目标是准确捕捉结构在实际工作条件下所受到的变化载荷,并将其转化为适用于疲劳寿命分析的形式。

本文对疲劳分析的各个流程进行了介绍,针对于载荷谱的获取主要介绍了虚拟路面法和载荷迭代法,虚拟路面的优势在于建立虚拟路面数据后,可以根据不同车型的预期使用工况进行组合仿真测试^[40],但是对建模的精度要求较高,高精度虚拟路面的建立需要大量的试验数据,同时模型的反复验证也是复杂漫长的过程,同时高精度的虚拟路面模拟需要大量的计算资源,尤其是在需要考虑大量细节和非线性效应的情况下,这可能导致仿真的计算成本较高。对于复杂路面的模拟依然存在困难。而虚拟迭代技术非常依赖于动力学模型的建立^[41],过于简化或者过于复杂都会导致虚拟迭代过程不能很好收敛,虚拟迭代计算过程较为漫长并且占用较多计算资源^[35,42],这些问题也有

待解决,对于目标部件载荷谱的快速有效获取依然有进步的空间。

对于已获得载荷谱的处理,基于时域、频域或者将两者结合起来对载荷谱特征及信息进行提取,基于疲劳寿命损伤理论,对载荷谱进行简化,进一步加快疲劳分析的流程。已有的技术在工程实践中可以在保证分析结果准确性的同时,减少试验成本,缩短研发周期。

而对于台架试验的迭代过程同样存在迭代收敛较慢的问题,求取传递函数以及求取反函数的过程,与虚拟迭代的思路类似,都是尝试用线性函数来表达非线性系统的特性,其准确性和稳定性都不够好,未来可以尝试通过神经网络的方式来对传递函数进行学习,以期获得更好的迭代效果,获得更为准确的驱动信号,对于不同的输入有更好地泛化能力,提高疲劳分析的效率。

参 考 文 献

- [1] 毛显红,肖攀,陈建华,等.基于道路谱的汽车车身疲劳分析[J].计算机辅助工程,2011,20(2):75-77.
- [2] 孙伟,卢剑伟,过慧敏.车载耦合工况下波纹管加速寿命载荷谱编制[J].农业装备与车辆工程,2024,62(3):40-44.
- [3] 金红杰,臧利国,李瑶薇.车辆底盘试验载荷谱编制技术研究与应用[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2022,36(12):58-70.
- [4] 徐保荣,王涛,梁梓.基于操纵动作预测的履带车辆载荷谱编制方法与流程[J].兵工学报,2022,43(2):252-259.
- [5] 许立敬.民航发动机高压涡轮叶片寿命预测研究[D].天津:中国民航大学,2023.
- [6] BAEK S H, CHO S S, JOO W S.基于雨流循环计数法的货车转向架端梁疲劳寿命预测[J].国外铁道车辆,2021,58(3):39-44.
- [7] 杜建,黄丽美,魏敏先,等.转向节多轴虚拟试验台架载荷谱应用研究[J].机械强度,2023,45(1):198-208.
- [8] 徐东,孙清雨,李相标,等.商用车后置电瓶箱室内道路模拟台架试验分析[J].汽车与新动力,2023,6(4):70-76.
- [9] 郑轩,廖慧红,张俊,等.基于虚拟载荷谱的车身疲劳预测研究[J].机械研究与应用,2022,35(6):62-65.
- [10] 路军凯,张朝军,王香云,等.基于虚拟试验场(VPG)整车强度耐久开发技术[J].内燃机与配件,2021(16):7-8.
- [11] 姚波,冯赞,叶磊,等.试验场强化路面载荷谱特征研究[J].重型汽车,2022(1):35-36.
- [12] BÄCKER M, MÖLLER R, KIENERT M, et al. Load Identification for CAE Based Fatigue Life Prediction of a New Bus Type[J/OL]. SAE Technical Paper, (2007-10-30) [2024-07-18]. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2007-01-4281/>.
- [13] 苗冬梅.基于车辆系统动力学建模仿真的整车疲劳载荷分析研究[D].长春:吉林大学,2017.
- [14] 黄民锋,江迎春.基于有限元法的汽车构件疲劳寿命分析[J].机械研究与应用,2008,21(2):57-61.
- [15] 张鸣凤,徐达,谷亚蒙.基于虚拟迭代的越野车零部件载荷谱求解技术简介[J].小型内燃机与车辆技术,2023,52(1):87-89.
- [16] 刘亚军.基于车轮六分力测量的某商用车车架疲劳寿命分析研究[D].合肥:合肥工业大学,2023.
- [17] 孟科委,王启栋,胡金芳,等.基于虚拟迭代的某重型商用车驾驶室疲劳分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(2):158-163.
- [18] 金锋.加速疲劳试验的疲劳编辑技术探讨[J].上海汽车,1999(2):17-21.
- [19] 花菲菲,郑松林,冯金芝,等.基于时域损伤编辑法的整车道路模拟试验谱编制[J].机械强度,2015,37(5):964-971.
- [20] PRATUMNOPHARAT P. Novel Methods for Fatigue Data Editing for Horizontal Axis Wind Turbine Blades[EB/OL]. 2012[2024-07-18]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Novel-methods-for-fatigue-data-editing-for-axis-Pratumnopharat/d3d3f20f94869c7291809acf9450d68ed4b81396>.
- [21] 王举金.多轴随机振动疲劳预测与加速疲劳试验研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- [22] GIACOMIN J, STEINWOLF A, STASZEWSKI W J. An Algorithm for Mildly Nonstationary Mission Synthesis (MNMS) [J/OL]. Clustering, 2000[2024-08-17]. <https://www.semanticscholar.org/paper/An-algorithm-for-mildly-nonstationary-mission-Giacomin-Steinwolf/8a510481455634625df4f734ad98e946902ff6ef>.
- [23] PRATUMNOPHARAT P, LEUNG P S, COURT R S. Wavelet Transform-Based Stress-Time History Editing of Horizontal Axis Wind Turbine Blades[J]. Renewable Energy, 2014, 63(3): 558-575.
- [24] 郑国峰,万银青,隗寒冰,等.非道路特种车辆耐久性载荷谱的高置信度最少采集样本量研究[J/OL].兵工学报,2023[2024-08-14]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2176.TJ.20231028.1413.002>.
- [25] 杨静,赵可沦,李慧.基于部分故障的威布尔分布寿命数据分析[J].环境技术,2023,41(9):80-84.
- [26] ABDULLAH S, NIZWAN C K E, NUAWI M Z, et al. The Applicability of the Short-Time Fourier Transform (STFT) for Fatigue Data Editing[C]// MACMESE'07: Proceedings

- of the 9th WSEAS International Conference on Mathematical and Computational Methods in Science and Engineering, 2007: 318-323.
- [27] 张成成, 姚卫星. 典型缺口件疲劳寿命分析方法[J]. 航空动力学报, 2013(6): 1223-1230.
- [28] 崔泗鹏, 姚卫星, 夏天翔. 连接件振动疲劳寿命分析的名义应力法[J]. 中国机械工程, 2014, 25(18): 4.
- [29] 李玉春, 姚卫星, 温卫东. 应力场强法在多轴疲劳寿命估算中的应用[J]. 机械强度, 2002(2): 258-261.
- [30] 辛朋朋, 胡绪腾, 宋迎东. 基于临界距离理论的TC4合金缺口试样低循环疲劳寿命预测[J]. 航空动力学报, 2012, 27(5): 1105-1112.
- [31] 陈卓异, 杨宇, 李传习, 等. 基于临界距离理论的弧形切口疲劳寿命研究[J]. 钢结构(中英文), 2021(10): 1-6.
- [32] 周炜, 周铓, 冯展辉. 应用局部应力-应变法估算机械疲劳寿命[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(8): 928-931.
- [33] 刘琥珀, 黄昌文, 吴玉国, 等. 基于局部应力应变法的转向节预锻下模热机械疲劳分析[J]. 机械设计, 2021(10): 59-65.
- [34] 张宇, 李昌, 韩兴, 等. 基于nCode汽车后桥疲劳失效灵敏度评估方法[J]. 机械强度, 2021(4): 936-944.
- [35] 商搏世, 石光林, 梁潇帝, 等. 工程钢圈弯曲疲劳裂纹萌生寿命研究[J]. 热加工工艺, 2022(16): 20-31.
- [36] 田佳伟. 基于有限元与多体动力学的商用车驾驶室疲劳耐久性研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2023.
- [37] 胡秋洋. 电驱总成多轴振动疲劳载荷谱及其模拟方法研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
- [38] 吴云飞. 基于路谱载荷的某前副车架多通道试验的开发以及设计优化研究[J]. 上海汽车, 2022(8): 56-62.
- [39] 暴文师, 徐刚, 蔡正. 基于实测载荷谱的半挂车虚拟台架试验研究[J]. 宝钢技术, 2023(2): 54-59.
- [40] 廖晖, 刘明卓. 虚拟试验场技术在整车结构耐久性性能测试中的应用[J]. 北京汽车, 2023(4): 39-43.
- [41] 龙岩, 蒋凌山, 刘雪强, 等. 车身疲劳载荷识别与应用[J]. 西安交通大学学报, 54(7): 34-42+93.
- [42] 张邦基, 周守玉, 谢庆喜, 等. 基于Tikhonov正则化与模型减缩技术的虚拟迭代载荷反求[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2017, 44(2): 53-59.

(责任编辑 明慧)

《汽车技术》征稿启事

《汽车技术》杂志是中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊,为我国高质量科技期刊分级目录入选期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊(A)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)收录期刊、日本科学技术振兴机构数据库入选期刊、EBSCO学术数据库收录期刊、欧洲学术出版中心(EuroPub)数据库收录期刊。

《汽车技术》杂志以报道汽车整车及其零部件设计、研究、试验等方面的前瞻与应用技术为主,并兼有理论研究内容,是中国汽车行业核心学术和知识传播与共享的平台。

《汽车技术》将在国家提出的“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念的指引下,把握《节能与新能源汽车技术路线图》和“低碳化、信息化、智能化”的汽车技术主流发展趋势,努力在传统内燃机汽车高效动力系统、轻量化、低阻力领域,新能源汽车和互联智能汽车技术领域,大力吸收优质稿源,为广大科研和工程技术人员服务,为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

《汽车技术》欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员及相关人员不吝赐稿,反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将被优先选择刊登。

投稿要求:

1. 文章字数最好控制在6 000~8 000字范围之内;
2. 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数控制在180字左右;
3. 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献,且在文中应标注文献引用处;
4. 文章主要作者应提供其简介,包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等;
5. 来稿的保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;
6. 请勿一稿多投;
7. 本刊使用网站投稿,请先登录网站注册成功后投稿,详细投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏的“作者指南”,

网址: <http://qcjs.cbpt.cnki.net>。

《汽车技术》编辑部