

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.014

基于伪损伤理论的重型车辆强化系数评估方法

范慧¹, 卢卫建¹, 王泽涛², 王玺¹, 刘黎¹, 王修业²

(1. 北京航天发射技术研究所, 北京 100076; 2. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:采用 Dirlik 模型开展车辆在路面谱激励条件下的振动载荷分布特性研究, 基于行驶强度路面谱数据提出一种重型车辆的疲劳伪损伤计算方法, 据此给出其强化系数。该方法从车辆振动疲劳载荷概率密度函数出发, 根据 Miner 线性疲劳损伤累积准则, 结合车辆疲劳性能数据进行相对疲劳损伤和路面强化系数评估。对比比利时路等 7 种常见路面谱, 进行了强化系数分析。结果表明: 该方法能实现重型车辆疲劳耐久性评估, 为其行驶路面规划等提供理论指导。

关键词:疲劳强化系数; 路面谱; 幅值概率密度函数; 疲劳伪损伤; Dirlik 模型

中图分类号:U461.7 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)02-0070-06

Evaluation Method of Reinforcement Coefficient for Heavy Vehicle Based on Pseudo Damage Theory

FAN Hui¹, LU Weijian¹, WANG Zetao², WANG Xi¹, LIU Li¹, WANG Xiuye²

(1. Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, China;

2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The research on distribution characteristics of vehicle vibration loading under road spectrum excitement are carried out by Dirlik's model, and the fatigue pseudo damage analysis method for the heavy vehicles is proposed based on the spectrum data of driving road, thus its strengthening coefficient value being derived. With the initiation of the probability density function of the vehicle vibration fatigue loading, the proposed method is applied to evaluate the relative fatigue damage and the road strengthening coefficient based on the vehicle fatigue property data in accordance with Miner's linear fatigue damage accumulation rule. The fatigue strengthening coefficient analysis are conducted on seven types of common road spectrum including Belgian road, which indicates that the proposed method can evaluate the fatigue endurance property of heavy vehicles and provide theoretical guidance for driving road planning.

Keywords: fatigue strengthening coefficient; road spectrum; probability density function of load amplitude; fatigue pseudo damage; Dirlik's model

0 引言

随着对车辆机动性能需求的提升, 重型车辆的疲劳耐久性问题越来越受到广泛重视, 其可靠性和安全性评估问题亟待解决。可靠性试验技术在不断发展, 并演化出了多种形式^[1-2]。目前车辆强化系数的确定耗时长花费高, 需要发展一种快速便捷的疲劳强化系数的分析方法, 用于试验指导。

车辆疲劳强化系数的计算方法主要可以分为两种: 测定计数法和故障统计法。测定计数法又可以细分为载荷谱法和功率谱法。在载荷幅值域分析计算强化系数方面, 田文春^[3]在强化系数模型基础上, 提出了当量频次的概念, 便于不同道路之间比较。方华^[4]运用频率因子统计量和损伤因

子统计量的概念, 对国内部分道路进行了强化系数的计算, 为汽车试验场提供了指导。程文平^[5]、包铁成等^[6]详细介绍了强化系数的计算模型, 进一步提出了一种整车强化系数的计算方法。部分学者将仿真技术引入了强化系数的分析中。刘东俭等^[7]通过试验, 完成了车速对强化系数影响的分析。李文亮等^[8]通过仿真得到了不同变量对强化系数的影响规律, 提出了强化区间的概念。ZHOU 等^[9]定性了车速对强化系数的影响。从功率谱密度的角度出发, 虞明等^[10]结合 Rayleigh 模型, 完成了相关的强化系数模型, 并分析了不同因素对车辆强化系数的影响。也有部分学者从数据出发, 如陈沛等^[11]、陈传钦等^[12]采用用户关联的数据进行分析计算, 这更符合用户端的情况。

从载荷幅值域分析计算强化系数, 其计算结

第一作者简介: 范慧 (1997—), 女, 安徽亳州人, 工程师, 硕士, 研究方向为系统可靠性设计、车辆耐久性评估, 2926285841@qq.com。

果的准确性高,但此方法需要详细的数据,大量的试验或详细准确的建模,耗时长花费高;通过功率谱密度分析计算强化系数,较为便捷,但存在误差,可通过合适的模型降低。

车辆在行驶过程中,最直接的激励即为行驶路面,路面谱表征了其力学特性,本文通过对路面谱分析,采用符合疲劳损伤破坏机制的雨流幅值概率密度函数模型进行重型车辆振动疲劳载荷分布特性表征,基于疲劳伪损伤概念建立了车辆强化系数的计算分析方法。

1 疲劳强化系数的伪损伤评估方法

本文的重型车辆为8轴牵引车,悬挂系统采用油气悬架系统,研究对象为车辆的摆臂,其零部件材料为42CrMo,车辆载质量达几十吨,可在非常规路面行驶。为便于强化系数的快速计算,将该零件进行简化,仅考虑材料本身的疲劳性能,忽略其他参数的影响。本文将路面谱等效看作应力谱输入,研究路面谱对零件疲劳寿命的影响,通过不同路面谱的输入,结合Dirlik模型初步评价不同路面损伤能力的强弱。

1.1 强化系数的评估方法

汽车进行强化试验时所选的道路为强化试验道路。为了比较车辆在特殊道路行驶与普通道路行驶时自身零件受到的损伤,引入了强化系数。强化系数,即为零件达到相同破坏情况下,普通路面行驶的里程与强化道路行驶里程之比。

基于疲劳寿命指标的强化数学模型主要理论依据为Miner线性疲劳累积损伤,本文基于伪损伤计算强化系数运用了Miner线性疲劳累积理论。根据疲劳特性曲线的Basquin关系式,可以得到下式:

$$N_i \cdot \sigma_i^m = N_0 \cdot \sigma_{-1}^m = C \quad (1)$$

式中: N_i 为S-N曲线上对应某级应力 σ_i 的疲劳寿命(循环数); σ_i 为任意一级应力幅值; m 为疲劳指数; N_0 为材料的疲劳极限 σ_{-1} 对应的疲劳寿命(循环数); σ_{-1} 为材料的疲劳极限; C 为材料常数。

根据Miner疲劳累积理论,该零部件的累积疲劳损伤量 D :

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

式中 n_i 为零件受不同应力 σ_i 作用,各级应力对应的循环数。

由式(1)和式(2),可以得到零部件的累积疲劳

损伤量 D 为

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_i} \right)^m} \quad (3)$$

对于程序载荷谱,有

$$n_i = n_L \cdot \theta_i = n_L \cdot \left(\frac{\alpha_i}{10^6} \right) \quad (4)$$

式中: n_L 为各级载荷作用的总循环次数,即疲劳寿命; θ_i 为第 i 级应力幅值所对应的频次率,即程序载荷谱中各级频次相对于总频次的比例; α_i 为程序载荷谱中对应于第 i 级等效应力幅值的循环数。

将式(3)和式(4)整合后可得:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_L \cdot \alpha_i \cdot \sigma_i^m}{10^6 \cdot N_0 \cdot \sigma_{-1}^m} \quad (5)$$

当 $D=1$ 时,零部件发生疲劳。同时,零部件的理论寿命里程数和实测里程数应存在关系: $L/L_0 = n_L/n_0$ 其中, L 为理论寿命里程数; $L_0 = v_0 \cdot t_0$ 为载荷谱的测定里程, v_0 和 t_0 分别为实测里程下所对应的车速和测定时间; n_0 为测定里程内的载荷谱雨流计数法计数后的应力循环数,即实测载荷均幅值总频次。整合可得:

$$L = \frac{v_0 \cdot t_0}{n_0} \cdot \frac{10^6 \cdot N_0 \cdot \sigma_{-1}^m}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \sigma_i^m} \quad (6)$$

设汽车在某一强化道路到达疲劳破坏时行驶的里程为 L_1 ;在普通路面到达疲劳破坏时行驶的里程为 L_2 ,则由式(6)可以得到疲劳寿命指标下的强化系数数学模型:

$$K = \frac{L_2}{L_1} = \frac{[n_{01}/(v_{01} \cdot t_{01})] \cdot \left[\sum_{i=1}^n \alpha_{i1} \cdot \sigma_{i1}^m \right]}{[n_{02}/(v_{02} \cdot t_{02})] \cdot \left[\sum_{i=1}^n \alpha_{i2} \cdot \sigma_{i2}^m \right]} \quad (7)$$

1.2 伪损伤和真实损伤

通过1.1节中式(2)计算得到的是基于应力应变数据零部件的累积疲劳损伤量 D ,为真实损伤,其由不同级的损伤量 D_i 相加得来,可以真实反应该零部件在行驶过程中受到的损伤,直接用来描述零件的状况。

$$D = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (8)$$

将输入条件改为非应力应变功率谱,按上述流程计算,得到的损伤值 D' 为伪损伤。伪损伤为非应力应变数据计算出的损伤值,不可以直接反

应出车辆零部件在行驶过程中受到的损伤,不能直接描述零件的状况,但可用于同类数据比较。

$$D' = \sum_{i=1}^n D'_i = \sum_{i=1}^n \frac{n'_i}{N_i} \quad (9)$$

目前获取应力应变信号的方法有两种^[13],一是通过贴应变片采集,二是通过虚拟仿真获得。运用第一种方法耗时且费力,而运用第二种方法即虚拟仿真技术对有限元模型要求很高,较难获得。非应力应变功率谱的获取则比较简单。在许多工程应用中,研究人员并不需要获得零部件的准确损伤值^[14],而是需要评价不同路段的强化能力,控制其经济成本,加快试验的进行。据此进行伪损伤计算相较于真实损伤则比较简便易获取、经济性好。

疲劳伪损伤采用路面谱作为输入,结合材料力学性能进行计算,得到该段路面对该零件造成损伤的能力大小。不同路面在此方法计算后,其比较结果即对应零件的强化系数。

1.3 振动疲劳载荷的雨流幅值概率密度函数模型

结合 1.2 节的伪损伤概念,并采用 Dirlik 模型在频率域下计算得到式(9)中的疲劳应力循环数 n'_i 。设车辆零部件对应的应力谱 $s(t)$,其功率谱密度为 $G(f)$ 。由穿越分析可得对应谱单位时间内零值正穿越次数的期望为

$$\nu_0^+ = \frac{\sqrt{\int_0^\infty f^2 G(f) df}}{\sqrt{\int_0^\infty G(f) df}} \quad (10)$$

设 D 为疲劳损伤值,将 Miner 的线性累积损伤公式写成连续积分形式

$$D = \int_0^\infty \frac{n(s)}{N(s)} ds \quad (11)$$

式中: $n(s)$ 为幅值为 s 的应力循环在单位时间内的实际循环数; $N(s)$ 为零部件在幅值 s 的应力作用下的疲劳寿命(循环数)。

又设 N_T 为单位时间内作用在零部件上的随机应力循环的平均次数,该数值可以用单位时间内零值正穿越次数的期望(零均值正穿越期望率) ν_0^+ 近似表达,故 $N_T = \nu_0^+$, $p(s)$ 为幅值为 s 的应力循环的概率密度函数,因此有

$$n(s) = p(s) \cdot N_T = p(s) \cdot \nu_0^+ \quad (12)$$

功率谱密度函数的各阶谱矩为

$$m_k = \int_0^\infty f^k G(f) df \quad k = 1, 2, \dots \quad (13)$$

Dirlik 模型的数学表达式为

$$p(s) = \frac{\frac{D_1}{Q} \exp\left(\frac{-Z}{Q}\right) + \frac{D_2 Z}{R^2} \exp\left(\frac{-Z^2}{2R^2}\right) + D_3 Z \exp\left(\frac{-Z^2}{2}\right)}{2\sqrt{m_0}} \quad (14)$$

$$\text{式中: } Z = \frac{s}{2\sqrt{m_0}}; \gamma = \frac{m_2}{\sqrt{m_0 m_4}}; D_1 = \frac{2(x_m - \gamma^2)}{1 + \gamma^2}; \\ D_2 = \frac{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}{1 - R}; D_3 = 1 - D_1 - D_2; Q = \frac{1.25(\gamma - D_2 - D_2 R)}{D_1}; R = \frac{\gamma - x_m - D_1^2}{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}; x_m = \frac{m_1}{m_0} \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}。$$

将式(14)代入式(12)中,即可得到从伪损伤角度出发的汽车行驶过程中零部件受到的应力幅值为 s 的应力循环在单位时间、车速相等下的循环次数,进一步代入式(11)中,可得到汽车零部件对应的应力级在这一路面的损伤值 D 。

$$D = \int_0^\infty \frac{p(s) \cdot \nu_0^+}{N_0 \cdot S_{-1} \cdot s^{-m}} ds = \frac{1}{N_0 \cdot S_{-1}} \cdot \nu_0^+ \cdot \int_0^\infty p(s) \cdot s^m ds \quad (15)$$

式(15)中有一部分为材料固有属性,对强化系数的计算无影响。

将路面谱的数据处理后代入式(10)进行计算,沿上述计算的流程,得到车辆零部件在该路面上受到的单位疲劳伪损伤。设汽车零部件在两种不同道路上受到的单位损伤分别为 D_{01} 和 D_{02} ,车辆行驶的时间分别为 T_1 和 T_2 ,行驶距离相等,其强化系数为

$$K = \frac{D_{01} \cdot T_1}{D_{02} \cdot T_2} = \frac{\nu_2}{\nu_1} \cdot \frac{\nu_{01}^+ \cdot \int_0^\infty p(s_{01}) \cdot s_{01}^m ds}{\nu_{02}^+ \cdot \int_0^\infty p(s_{02}) \cdot s_{02}^m ds} \quad (16)$$

由式(16)可以看出,强化系数与功率谱密度和材料的疲劳指数以及速度有关,当不同道路上的速度相等,则强化系数与功率谱密度和材料的疲劳指数有关。

2 算例分析

2.1 路面谱数据及分级

汽车试验场有多种强化道路,如搓板路、扭曲路、比利时路、砂石路、卵石路等,这些是进行汽车强化试验的重要基础。图1为汽车试验场中部分强化路面的路面谱汇总,来自原有的文献[15],将其作为伪损伤计算的输入条件。

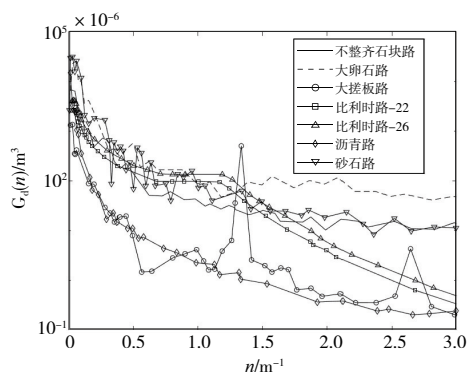


图1 常见强化路面的路面谱

国际标准基于道路不平度 $G_d(n_0)$ 值,将路面划分成了8种不同的对应等级,从低到高分别A~F级。根据这一原则,有 $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$ 时的数据,砂石路和大卵石路可以归为F级路面;比利时路-22、比利时路-26、不整齐石块路属于E级路面;沥青路和大搓板路对应C级路面。据此,将所得的损伤值按其划分为3种类型,第1类路面为砂石路和大卵石路,该类路面以砂石路为基准;第2类路面为比利时路-22、比利时路-26和不整齐石块路,该类路面以比利时路-22为基准;第3类路面为沥青路和大搓板,该类路面以沥青路为基准。

在上述的计算过程中,由于式(10)的输入需为时间域的数据,所以需要进行转化,时间频率功率谱密度与空间频率功率谱密度之间存在以下关系

$$G_d(f) = \frac{1}{v} G_d(n) \quad (17)$$

同时,频率 f 和空间频率 n 存在以下关系

$$f = n \cdot v \quad (18)$$

设车辆行驶速度分别为 30 km/h (8.33 m/s)、50 km/h (13.89 m/s)、80 km/h (22.22 m/s),将这3个速度下的不整齐石块路的功率谱密度转化到频率域,如图2所示。

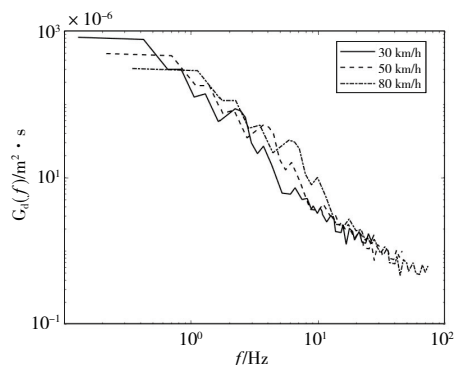


图2 不同速度下的不整齐石块路的时间域功率谱密度

2.2 车辆材料 S-N 曲线

42CrMo 钢是一种广泛使用的优质合金结构钢,具有较高的强度,是重型车辆中最常用的材料之一。本文选用 42CrMo 钢作为重型车辆汽车零部件的材料进行疲劳损伤评估和强化系数分析。42CrMo 钢在室温下的弹性模量 $E = 2.12 \times 10^5 \text{ MPa}$ [16]。

42CrMo 钢光滑试样的 S-N 曲线表达式为

$$9.842 \cdot 4 \cdot \lg s + \lg N = 32.637 \quad (19)$$

2.3 疲劳损伤率和强化系数评估

1) 疲劳损伤率

由路面的功率谱密度计算得到的方均根值如表1所示。

表1 路面谱方均根值 单位:mm

道路种类	方均根值
砂石路	52.01
大卵石路	49.03
不整齐石块路	26.74
比利时路-22	20.08
比利时路-26	24.35
大搓板	10.71
沥青路	16.96

由式(15)计算的不同路面不同速度下的疲劳损伤值如表2所示。

表2 疲劳损伤值计算结果(Dirlik 模型)

道路种类	疲劳损伤率		
	30 km/h	50 km/h	80 km/h
砂石路	1.543×10^{-10}	2.573×10^{-10}	4.117×10^{-10}
大卵石路	2.036×10^{-10}	3.396×10^{-10}	5.432×10^{-10}
不整齐石块路	5.219×10^{-13}	8.702×10^{-13}	1.392×10^{-12}
比利时路-22	8.132×10^{-14}	1.356×10^{-13}	2.169×10^{-13}
比利时路-26	5.539×10^{-13}	9.236×10^{-13}	1.478×10^{-12}
大搓板	1.982×10^{-16}	3.305×10^{-16}	3.286×10^{-16}
沥青路	6.159×10^{-16}	1.027×10^{-15}	1.643×10^{-15}

2) 强化系数

强化系数通常大于1,由于当基准路选取不同时,强化系数的范围可达到几十或几百[17-18]。本文由路面谱计算的强化系数主要用于不同路面造成损伤能力的初步判断。强化系数计算结果如表3所示。

表3 道路强化系数计算结果

类型	道路种类	强化系数		
		30 km/h	50 km/h	80 km/h
类型一	砂石路(基准路)	1.00	1.00	1.00
	大卵石路	1.32	1.32	1.32
类型二	比利时路-22(基准路)	1.00	1.00	1.00
	比利时路-26	6.81	6.81	6.81
类型三	不整齐石块路	6.42	6.42	6.42
	大搓板(基准路)	1.00	1.00	1.00
类型三	沥青路	3.11	3.11	3.11

通过计算可以发现不同路面的损伤结果其大小顺序基本与时域功率谱密度的方均根值的大小保持一致,不同速度下各路面间的相对强化系数相等。

3) 应力幅值概率密度函数

根据砂石路的路面谱计算得到的应力幅值概率密度函数曲线如图3所示。

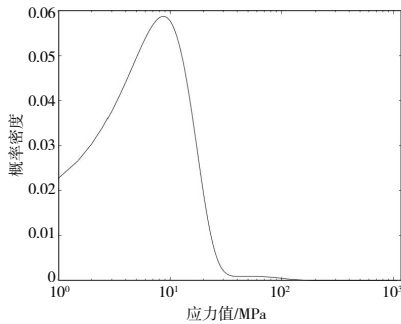


图3 砂石路应力幅值分布的概率密度函数
($v=30\text{ km/h}$ 、 50 km/h 、 80 km/h)

由图3可知,不同速度对应同一种路面下的应力幅值分布的概率密度函数相同,由此对应应力幅值分布的概率密度函数进行进一步分析。

已知路面谱与时间频域功率谱密度的关系为式(17)和式(18),其中路面谱、速度为已知量,速度设为 v_0 ,常数。通过Dirlik模型求解概率密度函数 $p(s)$,有个重要参数谱矩,即式(13)。

代入已有参数,求功率谱密度的 k 阶谱矩

$$m_k = \int_0^{+\infty} f^k G_d(f) df = \int_0^{+\infty} (nv_0)^k \cdot \frac{1}{v_0} \cdot G_d(n) d(nv_0) = v_0^k \cdot \int_0^{+\infty} n^k G_d(n) dn \quad (20)$$

由式(20)可得不同阶谱矩的表达式为

$$m_0 = \int_0^{+\infty} G_d(n) dn; m_1 = v_0 \cdot \int_0^{+\infty} n \cdot G_d(n) dn; m_2 =$$

$$v_0^2 \cdot \int_0^{+\infty} n^2 \cdot G_d(n) dn; m_4 = v_0^4 \cdot \int_0^{+\infty} n^4 \cdot G_d(n) dn$$

由此可得0阶谱矩不随速度发生变化。

对上述谱矩进行处理,令

$$a(n)^{(k)} = \int_0^{+\infty} n^k G_d(n) dn \quad (21)$$

可将 m_1 、 m_2 、 m_4 简化。

由上文可知Dirlik数学模型的表达式,通过观察分析可以发现, D_1 、 D_2 、 D_3 、 Q 、 R 受到 Z 、 γ 、 x_m 的影响,由于 m_0 不变,将简化后的相关参数代入后,可得

$$\gamma = \frac{m_2}{\sqrt{m_0 m_4}} = \frac{v_0^2 \cdot a(n)^{(2)}}{\sqrt{m_0 \cdot v_0^4 \cdot a(n)^{(4)}}} = \frac{a(n)^{(2)}}{\sqrt{m_0 \cdot a(n)^{(4)}}} \quad (22)$$

$$x_m = \frac{m_1}{m_0 \sqrt{m_4}} = \frac{v_0 \cdot a(n)^{(1)}}{m_0} \cdot \sqrt{\frac{v_0^2 \cdot a(n)^{(2)}}{v_0^4 \cdot a(n)^{(4)}}} = \frac{a(n)^{(1)}}{m_0} \cdot \sqrt{\frac{a(n)^{(2)}}{a(n)^{(4)}}} \quad (23)$$

故 Z 、 γ 、 x_m 不受速度的影响,进而 D_1 、 D_2 、 D_3 、 Q 、 R 不受速度 v 变化的影响,速度的变化不影响应力幅值的分布概率密度函数。

当行驶速度发生变化时,单位时间内的零值正穿越次数的期望随之发生变化。

$$v_0^+ = \frac{\sqrt{m_2}}{\sqrt{m}} = v_0 \cdot \frac{\sqrt{\int_0^{+\infty} n^2 G_d(n) dn}}{\sqrt{\int_0^{+\infty} G_d(n) dn}} \quad (24)$$

进而造成损伤值的变化,同种路面在不同速度下损伤值变化的大小为速度比。

3 结语

1) 本文从路面谱密度数据出发,基于疲劳伪损伤理论提出了重型车辆强化系数的分析模型和评估方法,对重型车辆的疲劳耐久性评估和行驶规范的制定提供了理论方法。

2) 基于路面谱特征将常见行驶路面分为3类,采用上述方法分析比较了重型车辆在不同行驶路面工况下的疲劳伪损伤率,并分别求得对应的强化系数;路面谱量级越高,重型车辆的疲劳伪损伤率也越高,对应的强化系数也越大;为判断同级别不同路面类型的强化路面损伤能力提供了判断方法。

3) 通过Dirlik模型,从路面谱计算强化系数时,同一道路在不同速度下的应力幅值分布的概率密度函数相同;当车辆在强化路面和基准路面

的行驶速度一样时,计算出的强化系数不随速度发生改变。

参考文献:

- [1] 魏朗,周文财,田顺,等. 强化试验技术在车辆可靠性试验中的应用[J]. 机械设计,2020,37(1):1-9.
- [2] LEE D,SHIH J,LIN R. The application of ED-HALT,6 DoF, vibration system in ESS [C]//2017 12th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT). Taipei: IEEE,2017:172-174.
- [3] 田文春. 汽车试验场可靠性试验强化系数的研究[J]. 汽车技术,1997(2):22-24.
- [4] 方华. 可靠性强化试验道路强化系数应用研究[D]. 南京:东南大学,2003.
- [5] 程文平. 摩托车试验场特殊路面强化系数的理论模型[J]. 小型内燃机与摩托车,2008,37(6):42-44.
- [6] 包铁成,程文平,杜青,等. 摩托车试验场道路可靠性试验强化系数[J]. 天津大学学报,2009,42(7):591-596.
- [7] 刘东俭,朱淮烽,施磊,等. 基于车速影响的比利时路强化系数研究[J]. 机电工程技术,2023,52(10):89-94.
- [8] 李文亮,高利. 汽车试验场中度标准搓板路的强化系数[J]. 振动·测试与诊断,2015,35(6):1110-1115,1202.
- [9] ZHOU Wei,LI Wenliang,GUO Zhiping,et al. Study on enhancement coefficient of washboard road of automobile proving ground [J]. Journal of Highway and

Transportation Research and Development, 2008, 25 (11):140-144.

- [10] 虞明,赵济海,邬惠乐. 随机不平路面上的汽车强化试验研究[J]. 汽车工程,1993,15(1):42-53.
- [11] 陈沛,周驰. 关联用户汽车试验场可靠性强化系数计算[J]. 农业装备与车辆工程,2022,60(1):126-129.
- [12] 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):31-33,82.
- [13] 郑松林,周亚捷,冯金芝,等. 一种新的考虑伪损伤保留的道路载荷模拟试验加速方法[J]. 机械强度,2017,39(2):410-416.
- [14] 于佳伟,郑松林,冯金芝,等. 某轿车前副车架服役载荷模拟试验加速方法研究[J]. 机械工程学报,2016,52(22):112-120.
- [15] 周金宝,汪铸,王可. 汽车试验场总论[M]. 北京:中国科学技术出版社,2013:119-136.
- [16] 《机械工程材料性能数据手册》编委会编. 机械工程材料性能数据手册[M]. 北京:机械工业出版社,1995:232-236.
- [17] 吴道俊. 车身焊接结构室内可靠性试验强化系数计算研究[J]. 客车技术,2020(1):59-61,64.
- [18] 栾振,卢剑伟,赵方洲,等. 汽车变速器齿轮疲劳寿命试验强化系数计算分析[J]. 农业装备与车辆工程,2019,57(2):9-13.

收稿日期:2024-01-17

(上接第25页)

- [7] 吴艺娟,田小江,黄烈,等. 一种结构简单的径向畸变发生器设计[J]. 燃气涡轮试验与研究,2023,36(6):55-60.
- [8] 崔佳航,李江红,李晓宇,等. 一种新型进气畸变设计体系研究[J]. 西北工业大学学报,2023,41(2):363-369.
- [9] EDDY G L JR. Study of steady - state wake characteristics of variable angle wedges: [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University,2001.
- [10] SAVAGE K,FLANDRO G,MAJDALANI J. Modeling and simulation of dynamic inlet flow distortion generation[C]//40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Fort Lauderdale, Florida. Reston, Virginia: AIAA,2004:3933.
- [11] BEALE D,DAVIS M,SIRBAUGH J. Requirements and advances in simulating aircraft inlet total pressure distortion in turbine engine ground tests[C]//Volume 2: Aircraft Engine; Ceramics; Coal, Biomass and Alternative Fuels; Controls, Diagnostics and Instrumentation; Environmental and Regulatory Affairs. Barcelona, Spain: ASMEDC,2006:42371
- [12] HASSANI M,BAZAZZADEH M,MANSHADI M D.

Effects of splitting airfoil's aspect ratio on the control of separation and loss distribution in a distortion generator [J]. International Journal of Aerospace Engineering,2022,2022(1):1177112.

- [13] 赵文燕. 锯齿边缘的铰链式畸变单元的气动特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2023.
- [14] 赵文燕,胡骏,李传鹏. 带锯齿边缘的铰链式畸变单元气动特性研究[J]. 南京航空航天大学学报,2023,55(5):808-818.
- [15] 王铭祖,王志强. 合页式可调总压畸变发生器效果预测及调节方法研究[J]. 航空动力学报,2024,39(11):201-212.
- [16] 王铭祖. 基于人工神经网络的合页式可调畸变发生器调节规律研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2021.
- [17] 袁新渊. 铰链式总压畸变发生器设计技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2023.
- [18] 袁新渊,王英锋. 一种多孔铰链式压力畸变发生器设计方法:CN114091367A[P]. 2022-02-25.
- [19] 张韬,蔡文祥,赵伟,等. 进气畸变模拟器动态总压畸变指数神经网络预测[J]. 航空动力学报,2025,40(9):383-390.

收稿日期:2024-01-11