

# 考虑疲劳本构随机性的结构应力 疲劳可靠性分析方法\*

赵永翔 彭佳纯 杨冰 张卫华

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

**摘要:** 提出考虑疲劳本构关系随机性的结构应力疲劳可靠性分析方法。视循环本构模型的材料常数为相关随机变量, 考虑存活概率和置信度 2 个概率测度, 与疲劳试验有机结合, 应用极大似然原理建立随机疲劳本构的概率模型。随机疲劳强度即概率  $S-N$  关系也用 2 个概率测度下表征, 并考虑从中短到长寿命阶段的可能工程实践范围。基于载荷史服从疲劳本构关系产生随机应力载荷、给定寿命时概率  $S-N$  关系揭示结构强度分布的观点, 建立随机应力载荷—强度干涉可靠性分析模型, 可实现任意概率水平的可靠性寿命预测和可靠度评定。中国铁路货车 RD<sub>2</sub> 型车轴的可靠性寿命预测和可靠性评定, 说明了方法的有效性。

**关键词:** 疲劳 随机本构关系 应力分析 可靠性评定 寿命预测

**中图分类号:** O346.2 TB114.3 U270

## 0 前言

材料疲劳本构是计算疲劳循环应力的基础。在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢焊缝金属疲劳试验中, ZHAO 等<sup>[1-2]</sup>揭示了相同循环应变幅载荷条件下材料疲劳本构即循环应力—应变( $\sigma-\epsilon$ )响应滞回环不重合的现象(图 1), 并通过对该材料的微观结构短裂纹和物理短裂纹行为的研究观察揭示了材料循环  $\sigma-\epsilon$  关系、裂纹扩展率和  $\sigma-N/\epsilon-N$  关系是 3 个关联随机关系<sup>[3-5]</sup>; 同时在 LZ50 碳钢疲劳试验中, 也揭示了这一随机性现象<sup>[6]</sup>。

这里所讲随机性与现有结构随机振动分析中常见的随机运动微分方程所表达的随机滞回响应不同<sup>[10-11]</sup>, 结构材料滞回响应自身是确定的, 结构随机滞回响应由外部的随机激振条件产生; 而本研究中结构内在的材料滞回响应是随机的, 当出现这一情况时, 无论外部的随机激振条件是确定的还是随机的, 结构的滞回响应都是随机的。

然而现有有限寿命应力疲劳可靠性分析中未见有考虑这一随机性的工作。在探索考虑这一随机性的应变疲劳可靠性分析方法时, 文献[7]已说明了不考虑这一随机性的疲劳可靠性分析结果偏危险, 对开展考虑这一随机性的可靠性方法也提出了紧迫的要求。本研究探索考虑这一随机性的应力疲劳可

靠性分析方法, 在探索中要考虑从材料性能到结构性能的修正, 并将分析范围由常规中短寿命( $\leq 10^7$  cycles)阶段拓展到长寿命( $> 10^7$  cycles)阶段。

## 1 疲劳本构随机性的表征

如图 1 所示, 疲劳本构关系的随机性是指相同应变幅水平下材料稳定滞回环具有分散性<sup>[7]</sup>。产生这一随机性的原因是<sup>[3-5]</sup>: 一组完全相同试样在相同应变载荷下, 各试样有效短裂纹萌生与扩展裂尖附近的微观组织结构条件存在差异性, 材料抵抗外力变形的能力也存在差异性, 宏观上则表现为疲劳本构关系的随机性; 同时这种局部微观组织结构条件的差异性, 在导致材料抵抗外力变形能力差异的同时, 也导致疲劳裂纹扩展率的差异性。在基本相同的临界失效裂纹尺度下, 疲劳寿命自然也存在差异性。因此, 循环  $\sigma-\epsilon$  关系、裂纹扩展率和  $\sigma-N/\epsilon-N$  关系是 3 个关联随机关系。

综合文献[2, 7-8]工作, 基于修正 Ramberg-Osgood 方程<sup>[9]</sup>, 视循环本构模型的材料常数为相关随机变量, 考虑存活概率( $P$ )和置信度( $C$ )2 个概率测度, 与疲劳试验有机结合, 应用极大似然原理建立的单轴随机疲劳本构模型可表示为

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_{a,P-C}}{E'_{P-C}} + \left( \frac{\sigma_{a,P-C} - \sigma_{o,P-C}}{K'_{P-C}} \right)^{\frac{1}{n_{P-C}}} \quad (1)$$

式中  $\epsilon_a$  ——循环应变幅

$\sigma_{a,P-C}$  —— $P-C$  水平下循环应力幅

$E'_{P-C}$  —— $P-C$  水平下循环弹性模量

\* 国家自然科学基金(50375130, 50323003, 50575189)、全国百篇优秀博士学位论文作者专项资金(FANEDD200234)、新世纪人才支持计划(NCET040890)和教育部创新群体团队支持计划(PCsIRT0452)资助项目。20051212 收到初稿, 20060525 收到修改稿

$K'_{P-C}$ —— $P-C$  水平下疲劳强度系数

$n'_{P-C}$ —— $P-C$  水平下疲劳塑性指数

$\sigma_{0,P-C}$ —— $P-C$  水平下临界塑性变形点

这一模型把循环  $\sigma-\varepsilon$  关系中的材料常数合理地视为完全相关的随机变量，其中  $E'_{P-C}$  由公式弹性部分拟合解耦弹性应力幅—应变幅 ( $\sigma_{ai} - \varepsilon_{cai}$ ) 数据获得

$$E'_{P-C} = E'_{av} - [\phi^{-1}(P) + t_{1-C}(n-1)]E'_{rms} \quad (2)$$

式中  $E'_{av}$ ——循环弹性模量均值

$E'_{rms}$ ——循环弹性模量方均差

$\phi^{-1}(P)$ —— $P$  时标准正态分布百分位点

$t_{1-C}(n-1)$ —— $C$ 、自由度  $n-1$  时  $t$  分布函数

而参数  $E'_{P-C}$ 、 $K'_{P-C}$ 、 $n'_{P-C}$  和  $\sigma_{0,P-C}$  则由公式的塑性部分拟合解耦的塑性应力幅—应变幅 ( $\varepsilon_{pa} - \sigma_a$ ) 试验数据得到，详情参见文献[2, 7-8]。

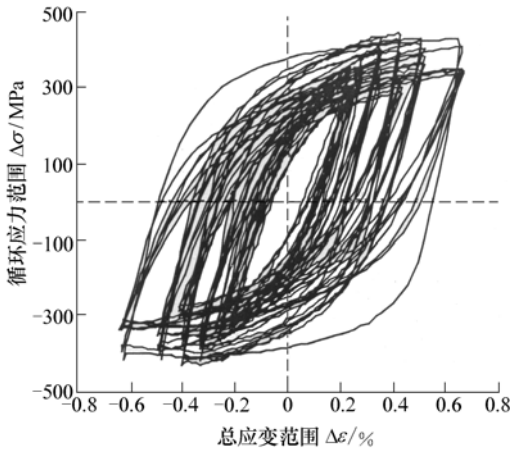


图 1 6 组 1Cr18Ni9Ti 管道焊缝金属试样的饱和滞回线

## 2 疲劳随机 $S-N$ 关系的表征

### 2.1 材料的随机 $S-N$ 关系

考虑存活概率和置信度 2 个概率测度，从中短到长寿命阶段的可能工程实践范围，概率疲劳  $S-N$  关系宜用下属模型来表征<sup>[12-14]</sup>

(1) 当疲劳寿命  $< N_T$  ( $N_T < 10^7$  周期)，属于常规中短疲劳寿命阶段，概率疲劳  $S-N$  关系可表示为

$$(\lg N)_{P-C} = A_{P-C} + B_{P-C} \lg(s_a)$$

或

$$s_a^{m_{P-C}} N = D_{P-C} \quad (N < N_T; s_a < s_T) \quad (3)$$

$$D_{P-C} = 10^{A_{P-C}} \quad m_{P-C} = -B_{P-C} \quad (4)$$

式中  $s_a$ ——试样循环应力幅或材料疲劳强度幅

$(\lg N)_{P-C}$ —— $P-C$  水平对数疲劳寿命

$A_{P-C}$ 、 $B_{P-C}$ —— $P-C$  水平材料常数，由 BASQUIN<sup>[15]</sup>

拟合试验  $S-N$  数据获得

(2) 当疲劳寿命  $> N_T$ ，属于长疲劳寿命范围，其概率  $S-N$  关系可表征为<sup>[16]</sup>

$$(\lg N)_{P-C} = E_{P-C} + F_{P-C} \lg(s_a)$$

或

$$s_a^{w_{P-C}} N = G_{P-C} \quad (N \geq N_T; s_a \geq s_T) \quad (5)$$

$$G_{P-C} = 10^{E_{P-C}} \quad w_{P-C} = -F_{P-C} \quad (6)$$

式中  $N_T$ ——从中短疲劳寿命范围到长寿命范围转折点

$E_{P-C}$ 、 $F_{P-C}$ ——长寿命范围  $P-C$  水平材料常数，由

Basquin 方程拟合长寿命范围试验

$S-N$  数据或合适外推方法得到

测定参数时，应注意相同概率水平中短与长寿命范围  $S-N$  关系的光滑连接，详情见文献[16]。

### 2.2 结构的随机 $S-N$ 关系

在生产中，由于结构几何形状、尺寸、表面加工质量、服役环境及载荷模式与实验室试样存在差异，因此结构概率  $S-N$  关系必须考虑这一差异性，才能对真实生产情况作出合理预测。通常有综合修正与单因素修正两种方法，分别介绍如下。

(1) 综合修正。一般通过完成真实或相似结构在真实或模拟载荷与环境下的疲劳试验来实现。以铁道车辆车轴的概率  $S-N$  关系测定为例<sup>[17]</sup>：考虑费用，这一修正在给定寿命  $N=10^7$  cycle 时的疲劳极限层面进行。综合修正系数  $K_S$  定义为

$$K_S = \frac{S_{-1}}{s_{-1}} \quad (7)$$

式中  $s_{-1}$ ——材料试样疲劳极限强度

$S_{-1}$ ——结构试样疲劳极限强度

考虑非线性修正，同时完成不同尺度材料试样的疲劳试验，形成尺度相关的修正系数函数

$$K_S = K_S \left( \frac{g}{g_0} \right) \quad (8)$$

式中  $g_0$ ——材料试样特征尺寸

$g$ ——结构试样特征尺寸

假设这一修正可以拓展到全寿命范围，则结构的概率  $S-N$  关系模型可表示为

$$P(S_a) = \iint f(K_S) f(s_a) dK_S ds_a \quad (9)$$

式中  $f(K_S)$ ——修正系数函数的概率密度函数

$f(s_a)$ ——材料疲劳强度的概率密度函数

当  $K_S$  为确定性参数时，结构的概率  $S-N$  关系模型可表示为

$$(s_a/K_S)^{m_{P-C}} N = D_{P-C} \quad (N < N_T; s_a < s_T) \quad (10)$$

$$(s_a/K_S)^{w_{P-C}} N = G_{P-C} \quad (N \geq N_T; s_a \geq s_T) \quad (11)$$

(2) 单因素修正，即几何形状、尺寸、表面加

工质量、服役腐蚀环境和载荷模式单独试验,各自形成修正系数。考虑前 4 项的综合影响系数由式(12)估计

$$K_{S1} = \frac{K_f}{\varepsilon\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} - 1 \quad (12)$$

式中  $K_f$ ——疲劳应力/应变集中修正系数

$\varepsilon$ ——尺寸修正系数

$\beta_1$ ——表面加工质量修正系数

$\beta_2$ ——服役腐蚀环境修正系数

4 个参数分别定义为

$$\begin{aligned} K_f &= \frac{S_{-1f}}{s_{-1}} & \varepsilon &= \frac{S_{-1\varepsilon}}{s_{-1}} \\ \beta_1 &= \frac{S_{-1\beta_1}}{s_{-1}} & \beta_2 &= \frac{S_{-1\beta_2}}{s_{-1}} \end{aligned} \quad (13)$$

式中  $S_{-1f}$ ——几何形状试样疲劳极限强度

$S_{-1\varepsilon}$ ——尺寸试样疲劳极限强度

$S_{-1\beta_1}$ ——表面加工质量试样疲劳极限强度

$S_{-1\beta_2}$ ——服役腐蚀环境试样疲劳极限强度

通常采用正态分布来考虑这些系数的随机性,其均值  $K_{S1,av}$  和标准差  $K_{S1,rms}$  由式(14)计算

$$K_{S1,av} = \frac{K_{f,av}}{\varepsilon_{av}\beta_{1,av}} + \frac{1}{\beta_{2,av}} - 1 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} K_{S1,rms} &= \left[ \left( \frac{K_{f,rms}}{\varepsilon_{av}\beta_{1,av}} \right)^2 + \left( \frac{\varepsilon_{rms}}{\varepsilon_{av}^2\beta_{1,av}} \right)^2 + \left( \frac{\beta_{1,rms}}{\varepsilon_{av}\beta_{1,av}^2} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. \left( \frac{\beta_{2,rms}}{\beta_{2,av}^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (15)$$

式中,  $K_{f,av}$ ,  $\varepsilon_{av}$ ,  $\beta_{1,av}$  和  $\beta_{2,av}$  分别是  $K_f$ ,  $\varepsilon$ ,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  的均值;  $K_{f,rms}$ ,  $\varepsilon_{rms}$ ,  $\beta_{1,rms}$  和  $\beta_{2,rms}$  分别是  $K_f$ ,  $\varepsilon$ ,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  的标准差。进一步考虑载荷模式修正系数  $K_L$ , 定义为

$$K_L = \frac{S_{-1L}}{S_{-1}} \quad (16)$$

式中  $S_{-1L}$ ——特定载荷模式试样疲劳极限强度

复合修正系数  $K_S$  可表示为

$$K_S = K_{S1}K_L \quad (17)$$

获得  $K_S$  后可根据式(8)~(10)获得结构随机  $S-N$  关系。

当采用局部应力史或使用检测方式或有限元法获取结构循环应力史时,不应考虑  $K_f$  修正。

### 3 可靠性分析

#### 3.1 疲劳应力史

使用检测方式获取时,通常获得结构的局部非

对称循环应变史( $\varepsilon_{ai}$ ,  $\varepsilon_{avi}$ ,  $n_i$ ),  $i=1, 2, \dots, n_L$ 。这一循环应变史一般认为仅有均值意义。进一步根据随机循环本构关系,可获得非对称均值循环应力史( $\sigma_{ai}$ ,  $\sigma_{avi}$ ,  $n_i$ ),  $i=1, 2, \dots, n_L$ ; 采用有限元法获取时,一般也将循环外载史视为均值意义。通过均值随机循环本构关系,可获得结构局部非对称循环应力史( $\sigma_{ai}$ ,  $\sigma_{avi}$ ,  $n_i$ ),  $i=1, 2, \dots, n_L$ ; 采用名义计算方式获取时,考虑  $K_f$  修正,根据循环外载史和材料循环本构关系,可获得局部非对称循环名义应力史( $\sigma_{ai}$ ,  $\sigma_{avi}$ ,  $n_i$ ),  $i=1, 2, \dots, n_L$ 。

#### 3.2 疲劳当量应力幅及概率分布函数

载荷史下结构的循环应力、应变响应服从疲劳本构关系,自然将产生随机疲劳应力。考虑 Goodman 平均应力修正,式(18)可将非对称均值循环应力史对称化( $\sigma_{-1ai}$ ,  $n_i$ ),  $i=1, 2, \dots, n_L$

$$\sigma_{-1a} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_{av}}{\sigma_b}} \quad (18)$$

式中  $\sigma_b$ ——材料试样强度极限

根据均值  $S-N$  关系中长寿与中短疲劳寿命的分界点  $s_T$ , 将均值循环应力史分为( $\sigma_{-1aj}$ ,  $n_j$ ),  $j=1, 2, \dots, n_{L1}$  和( $\sigma_{-1ak}$ ,  $n_k$ ),  $k=1, 2, \dots, n_{L2}$  两部分。结合结构均值  $S-N$  关系和 Miner 线性损伤准则,可由式(19)获得应力史产生的均值损伤

$$D_B = \sum_{j=1}^{n_{L1}} \frac{n_j}{D_{av}/\sigma_{-1aj}^{m_{av}}} + \sum_{k=1}^{n_{L2}} \frac{n_k}{G_{av}/\sigma_{-1ak}^{w_{av}}} \quad (19)$$

按照等损伤原则,应力史的当量均值应力幅  $\sigma_{-1av,eq}$

$$\sigma_{-1av,eq} = \sqrt[m_{av}]{\frac{D_B D_{av}}{\sum_{i=1}^n n_i}}$$

或

$$\sigma_{-1av,eq} = \sqrt[w_{av}]{\frac{D_B G_{av}}{\sum_{i=1}^n n_i}} \quad (20)$$

与材料常数有效范围一致的  $\sigma_{-1av,eq}$  即为所求值。

进一步与材料循环本构关系结合,可得  $\sigma_{-1eq,eq}$  所对应当量应力幅  $\sigma_{-1eq}$  的概率分布函数,其概率密度函数(pdf)用  $f(\sigma_{-1eq})$  来表示。如果  $\sigma_{-1eq}$  服从正态分布,其标准差为  $\sigma_{-1rms,eq}$ ,  $C$  时应力幅误差参量为  $\delta_C$ , 分布函数可表示为

$$F = \phi \left( \frac{\sigma_{-1,eq} - \sigma_{-1av,eq} - \delta_C}{\sigma_{-1rms,eq}} \right) \quad (21)$$

式中  $F$ ——失效概率

$\phi(\cdot)$ ——标准正态分布函数

#### 3.3 可靠度评价

给定寿命  $N$  时,概率  $S-N$  关系揭示着结构的随机强度,其 pdf 函数用  $f(S_{-1}|N)$  来表示。当  $S_{-1}$  服从正态分布时,其均值、标准差和  $C$  时的强度幅误差

参量分别  $S_{-lav}$ 、 $S_{-lrms}$  和  $\theta_C$ ，则分布函数可表示为

$$F = \phi \left( \frac{S_{-1} - S_{-lav} - \theta_C}{S_{-lrms}} \right) \quad (22)$$

结合结构局部所承受的随机当量应力幅， $P$  可由如下应力强度干涉模型求解

$$P = \int_0^{+\infty} f(S_{-1}|N) \int_0^{S_{-1}} f(\sigma_{-1,eq}) d\sigma_{-1,eq} dS_{-1} \quad (23)$$

当  $S_{-1}$  和  $\sigma_{-1eq}$  都服从正态分布时， $P$  可由式(24)计算

$$P = \left( \frac{S_{-lav} - \theta_C - \sigma_{-lav,eq} + \delta_C}{\sqrt{S_{-lrms}^2 + \sigma_{-lrms,eq}^2}} \right) \quad (24)$$

### 3.4 可靠性寿命预测

可靠性寿命预测就是根据  $P-C$  要求估计疲劳应力史作用下结构的疲劳寿命。首先确定  $C$ ，然后假定  $N$  求得寿命相关的结构强度 pdf  $f(S_{-1}|N)$ ，结合当量随机疲劳应力 pdf  $f(\sigma_{-1eq})$ ，可根据式(23)估计  $P$ ，当  $P$  与要求值间的误差在可接受范围内时，假定的  $N$  就是所要预测的疲劳可靠性寿命。当  $S_{-1}$  和  $\sigma_{-1eq}$  都服从正态分布时， $P$  由式(24)计算。

## 4 应用

为了分析曾多次引起列车脱轨重大事故的铁路货车  $RD_2$  型车轴的疲劳可靠性，作者等完成了 LZ50 车轴钢的概率力学性能测定<sup>[18]</sup>、随机本构关系测定<sup>[6]</sup>、中短寿命范围概率疲劳  $S-N$  曲线模型测定<sup>[19]</sup>、疲劳极限测定<sup>[20]</sup>、长寿命范围概率疲劳  $S-N$  曲线确定<sup>[16]</sup>和基于实物车轴试验的结构概率疲劳  $S-N$  曲线修正<sup>[17]</sup>等相关试验研究工作。

以大连—沈阳为典型线路，通过随机动力学模拟获得了我国主型货车  $C_{64A}$  和  $C_{64K}$  分别以 60、70、80、90 km/h 和 90、100、110、120 km/h 运行的轮轨接触力史，结合轮轨接触力线路检测数据，如图 2 所示，确定了  $C_{64A}$  和  $C_{64K}$  主型货车的代表性载荷谱。

进一步根据 LZ50 钢的均值本构关系，如图 3 所示，完成了主型货车  $RD_2$  车轴卸荷槽等危险截面的非对称疲劳循环应力史计算。

考虑 Goodman 平均应力效应修正，利用本方法考虑疲劳本构关系的随机性，结合 Miner 准则完成当量应力计算，根据实物车轴试验完成车轴疲劳性能修正，然后完成了  $RD_2$  型车轴的疲劳可靠性寿命预测和可靠性评价。表 1、2 分别给出了一组典型结果。

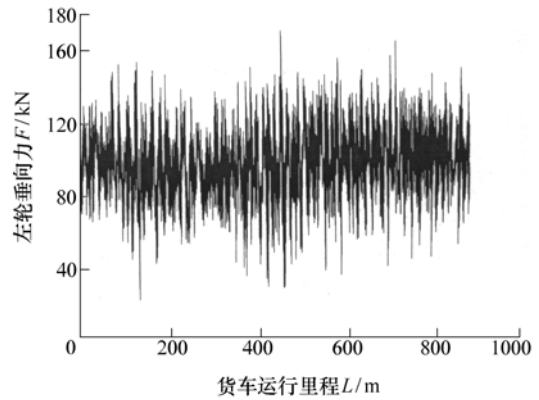


图 2 典型货车载荷谱示意图

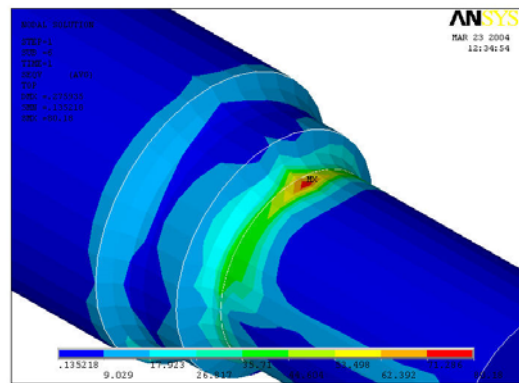
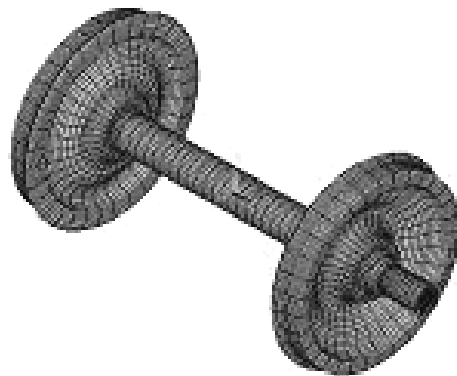


图 3 车轴疲劳应力史的典型有限元计算

表 1  $P=0.99$ 、 $C=99\%$ 时  $C_{64A}$  与  $C_{64K}$  货车  $RD_2$  型车轴的可靠性寿命

$C_{64A}$		$C_{64K}$	
车速 $v/(km \cdot h^{-1})$	寿命 $N/km$	车速 $v/(km \cdot h^{-1})$	寿命 $N/km$
60	$1.033 \times 10^{13}$	90	$1.203 \times 10^{11}$
70	$2.602 \times 10^{10}$	100	$9.136 \times 10^9$
80	$6.961 \times 10^8$	110	$4.920 \times 10^8$
90	$2.139 \times 10^7$	120	$3.568 \times 10^7$

表 2  $C=99\%$ 、500 万公里寿命时  $C_{64A}$  与  $C_{64K}$  货车  $RD_2$  车轴的可靠度

$C_{64A}$		$C_{64K}$	
车速 $v/(km \cdot h^{-1})$	存活概率 $P$	车速 $v/(km \cdot h^{-1})$	存活概率 $P$
60	0.999 920	90	0.999 901
70	0.999 594	100	0.999 759
80	0.998 194	110	0.999 013
90	0.979 147	120	0.982 554

## 5 结论

(1) 考虑疲劳本构的随机性, 建立了结构应力疲劳可靠性分析的新方法。

(2) 方法考虑了实物结构与材料疲劳性能的差异, 提出了修正方法。

(3) 方法将分析范围自常规的中短寿命阶段拓展到寿命长寿命阶段。

(4) 应用本方法可实现结构疲劳可靠性寿命预测和失效分布规律评价。

## 参 考 文 献

- ZHAO Y X, WANG J N, GAO Q. Random cyclic stress-strain responses of a stainless steel pipe-weld metal I—a statistical investigation [J]. Nucl. Eng. Des., 2000, 199(3): 303-314.
- ZHAO Y X, GAO Q, WANG J N. Random cyclic stress-strain responses of a stainless steel pipe-weld metal II—a modeling [J]. Nucl. Eng. Des., 2000, 199(3): 315-326.
- ZHAO Y X, WANG J N, GAO Q. Statistical evolution of small fatigue crack in 1Cr18Ni9Ti weld metal [J]. Theor. Appl. Fract. Mech., 1999, 32(1): 55-64.
- ZHAO Y X, GAO Q, WANG J N. Interaction and evolution of short fatigue cracks [J]. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 1999, 22(6): 459-468.
- ZHAO Y X, GAO Q, WANG J N. Microstructural effects on the short crack behaviour of a stainless steel-weld metal during low-cycle fatigue [J]. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 1999, 22(6): 469-480.
- 赵永翔, 杨冰, 孙亚芳, 等. LZ50 车轴钢的概率循环本构模型[J]. 机械工程学报, 2004, 40(9): 48-53.
- ZHAO Y X. A methodology for strain-based fatigue reliability analysis [J]. Reliab. Eng. Sys. Saf., 2000, 70(2): 205-213.
- 赵永翔, 杨冰, 李朋州. 0Cr18Ni10Ti 管道钢的随机循环本构模型[J]. 核动力工程, 2004, 25(1): 45-49.
- EISENBERG M A. Plastic flow theory with application to cyclic hardening and softening phenomena [J]. J. Engng Mater. Tech. ASME, 1976, 98(3): 221-228.
- WEN Y K. Equivalent linearization for hysteretic systems under random excitation [J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(1): 150-154.
- 张义民, 付立英, 闻邦椿. 单自由度随机滞回系统的振动响应分析[J]. 振动工程学报, 2004, 17(1): 11-15.
- 赵永翔, 王金诺, 高庆.  $P-S-N$  曲线及其置信限参数估计的统一常规方法[J]. 机械强度, 2000, 22(3): 217-221.
- 赵永翔, 王金诺, 高庆. 估计三种常用疲劳应力-寿命模型  $P-S-N$  曲线的统一经典极大似然法[J]. 应用力学学报, 2001, 18(1): 83-90.
- 赵永翔, 高庆, 王金诺. 估计三种常用应力-寿命模型概率设计  $S-N$  曲线的统一方法[J]. 核动力工程, 2001, 22(1): 42-52.
- BASQUIN O H. The exponential law of endurance tests[J]. Proceedings of ASTM, 1919, 10(3): 625-630.
- 赵永翔, 杨冰, 何朝明, 等. 确定 LZ50 车轴钢外推概率疲劳  $S-N$  曲线的新方法[J]. 铁道学报, 2004, 26(3): 20-25.
- 赵永翔, 杨冰, 梁红琴, 等. LZ50 钢材料试样与车辆实轴的概率疲劳极限[J]. 铁道学报, 2005, 27(3): 40-44.
- 赵永翔, 黄郁仲, 高庆. 铁道车辆 LZ50 车轴钢的概率机械性能[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(2): 11-17.
- 何朝明, 赵永翔, 杨冰, 等. LZ50 车轴钢随机  $S-N$  关系的概率模型[J]. 工程力学, 2005, 22(2): 200-205.
- 赵永翔, 何朝明, 杨冰. 改进的概率疲劳极限测定方法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(5): 53-57.

## STRUCTURAL STRESS-BASED FATIGUE RELIABILITY ANALYSIS CONSIDERING THE RANDOM CYCLIC CONSTITUTIONS

ZHAO Yongxiang PENG Jiachun

YANG Bing ZHANG Weihua

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

**Abstract:** A structural fatigue reliability analysis method is presented to consider random cyclic constitutions. A characterization for the random constitutions is established by using two probabilistic measurements of survival probability and confidence. The entire material constants in the constitutive

equation are reasonably taken as dependent random variables. The probabilistic  $S-N$  relations covering from mid-short life regime to long life regime, representing structural fatigue strength, are also given on the two probabilistic measurements. Considering that the random constitutions derive random stresses of structures under cyclic loading and the probabilistic  $S-N$  relations introduce random strengths of structures anti-fatigued cycling, reliability assessment is then constructed by considering interference of the random cyclic stress and strength. The method can be applied to realize fatigue reliability life prediction and reliability assessment at arbitrary probability

level. Availability of the present method has been indicated by the reliability life prediction and reliability assessment of RD2 type axle of Chinese railway freight cars.

**Key words:** Fatigue

Random constitutions

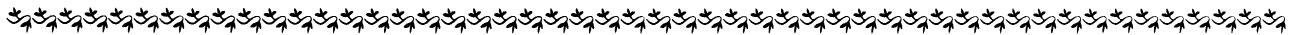
Stress analysis

Reliability assessment

Life prediction

作者简介: 赵永翔, 男, 1963年出生, 教授, 博士生导师。主要研究方向为疲劳断裂、可靠性、安全性和寿命周期工程。

E-mail: yxzhao@home.swjtu.edu.cn



## 《机械工程学报》英文版投稿须知

### (一) 简介

《机械工程学报》英文版(以下简称《学报》英文版)创刊于1988年,在十几年的办刊实践中,始终坚持严谨、严肃、求真、唯实、理论联系实际学风与文风,及时报道机械工程领域在基础理论、工程技术应用方面所取得的重大科研成果,着重报道具有综合性、基础性、开发性和边缘性的科技成果和先进经验,紧密地随着中国和世界机械科学技术的发展而发展,赢得了国内外机械行业专家的赞誉,成为中国机械工程领域最具权威性的学术期刊之一。《学报》英文版面向国内外发行,并与20多个国家及我国香港、台湾地区的多家单位建立了交换关系。

《学报》英文版建立了由世界各国机械工程领域知名专家、学者组成的国际编委会,有越来越多的国际机械工程领域专家、学者关注刊物的发展。《学报》英文版得到我国高等院校、国家重点实验室及科研院所的大力资助,获得中国科协择优支持基础性和高科技学术期刊专项资助经费的资助,获得国家自然科学基金委员会的资助。《学报》英文版被EI、CA、SA、CSA及AJ等多家国际检索系统收录,从1998年起至今发表的论文全部被EI收录。《学报》英文版刊登的论文属于国家和省部级基金项目资助的约占80%,不少论文在理论和技术上取得了突破性进展,已转化为先进生产力,产生了较好经济效益和社会效益。《学报》英文版已成为评定博士点、评估国家重点实验室、申请国家自然科学基金、申报科研成果和晋升职称等的重要依据,得到了国内外机械行业专家的好评,在历年各级期刊评比中获得了好名次。

### (二) 特别指出

由于《学报》中文版的英文译名正好与《学报》英文版同名,使得一些作者误以为它们是同一种期刊以不同的文种形式出版。因此这里特别指出:《学报》英文版与《学报》中文版是两种不同的期刊,《学报》英文版从2007年第1期起为双月刊,160页/期;《学报》中文版为月刊,240页/期,其内容是完全不重复的。

为进一步发挥《学报》英文版在世界范围内的“高水平学术阵地”和“重要窗口作用”,扩大我国机械工程领域的优秀科研成果在世界范围内的影响,加强科研工作者与国外同行的交流,欢迎广大国内外学者积极踊跃地将优秀科研论文投到《学报》英文版。大家共同努力将《学报》英文版办成具有国际品牌的大刊、名刊,使其成为中国机械工程界走向世界的桥梁!

### (三) 投稿要求

1. 投稿应遵循本刊《作者须知》、《投稿式样》和《投稿要求》(可从《机械工程学报》网站<http://www.cjme.com.cn>下载)。
2. 论文字数不受限制,一般为4页以上(正文字号小5号, A4纸),其中摘要300~500字左右。
3. 来稿请用A4纸打印,两份英文稿,两份中文译稿(中文译稿应与英文稿的内容一致),需同时提供论文的电子文档(\*.doc文件)。
4. 编辑部对来稿有修改权,重大删改时会与作者协商,排版后的清样将邮给作者进行核对。
5. 稿件文责自负,勿一稿多投。未被采用的稿件,编辑部将给作者发退稿通知,但原稿恕不退还。
6. 作者可随时到编辑部的网站查询稿件的处理情况。

### (四) 联系方式

通信地址: 北京市百万庄大街22号《机械工程学报》编辑部, 100037

电话: 010-88379907; 传真: 010-68994557

E-mail: cjme@mail.machineinfo.gov.cn