

文章编号: 1005-0523(2024)05-0001-09



考虑不同损伤模型的转向架构架疲劳寿命研究

肖乾^{1,2}, 符远航^{1,2}, 陈道云^{1,2}

- (1. 华东交通大学机车车辆智能运维铁路行业重点实验室, 江西 南昌 330013;
2. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要:【目的】为了更好地分析动车组转向架构架的疲劳寿命。【方法】对某型转向架构架的疲劳关注测点进行了动应力实测, 并对其数据进行后处理, 通过雨流计数法和波动中心法进行了一维应力谱的编制; 通过 Miner 线性累积损伤模型、一种考虑载荷相互作用及其固有属性损伤的非线性累积损伤模型和 Cotern-Dolan 非线性累积损伤模型分别对其进行分析计算, 推断其疲劳寿命并进行三方对比。【结果】考虑固有损伤的非线性模型分析结果与线性模型计算结果差别微小。【结论】固有属性损伤的非线性属性不明显, Cotern-Dolan 非线性累积损伤模型的寿命分析结果与前两种相比整体偏小, 但趋势相同, 表明其用于疲劳寿命评估更偏保守。

关键词: 疲劳寿命; 应力谱; 线性累积损伤; 非线性累积损伤; 转向架构架

中图分类号: U270

文献标志码: A

本文引用格式: 肖乾, 符远航, 陈道云. 考虑不同损伤模型的转向架构架疲劳寿命研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(5): 1-9.

Study on Fatigue Life of Bogie Frames Considering Different Damage Models

Xiao Qian^{1,2}, Fu Yuanhang^{1,2}, Chen Daoyun^{1,2}

- (1. Railway Industry Key Laboratory of Intelligent Operation and Maintenance of Rolling Stock, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Key Laboratory of Conveyance and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: 【Objective】In order to better analyze the fatigue life of the high-speed train bogie frame. 【Method】dynamic stress measurements are conducted on the fatigue concern measuring points of a certain type of bogie frame, and the data is post-processed. A one-dimensional stress spectrum is compiled using the rain-flow counting method and the fluctuation center method. By analyzing and calculating the Miner linear cumulative damage model, a nonlinear cumulative damage model considering load interaction and inherent attribute damage, and the Cotern-Dolan nonlinear cumulative damage model, their fatigue life is inferred and compared in three aspects. 【Result】The results show that the difference between the analysis results of the nonlinear model considering inherent damage and the calculation results of the linear model is small, indicating that its nonlinear attribute is not obvious. 【Conclusion】The life analysis results of the Cotern-Dolan nonlinear cumulative damage model are overall smaller than other kinds, but the trend is the same, indicating that it is more conservative for fatigue life

收稿日期: 2024-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(52202468); 江西省自然科学基金项目(20232BAB204104)

assessment.

Key words: fatigue life; stress spectrum; linear cumulative damage; nonlinear cumulative damage; bogie frame

Citation format: XIAO Q, FU Y H, CHEN D Y. Study on fatigue life of bogie frames considering different damage models[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(5): 1-9.

【研究意义】本研究深入探讨了高速列车结构在长期承受随机载荷情况下的疲劳损伤累积机理和疲劳破坏模式,有助于丰富和发展高速列车疲劳可靠性理论,为高速列车结构疲劳寿命预测、健康监测等提供理论基础和分析方法。

【研究进展】结构的疲劳破坏通常是采用损伤力学和断裂力学的方法来进行研究^[1-3]。Miner线性累积损伤理论^[4]是现今最主要的分析方法,大多数的疲劳分析方法都是基于它延伸,但是由于Miner理论计算的是线性的分析,然而材料中某一点在受到载荷作用时受到的损伤不是独立的,它同时也会影响到周围领域,它对本轮疲劳是无影响的,但它对下一轮疲劳的影响却是一定存在且不可忽略的,因此非线性疲劳损伤的分析同样重要。孙钰^[5]研究了基于雨流计数法和 Cotern-Dolan 准则的轴承疲劳寿命预测,屈少鹏^[6]研究了 Manson-Halford 疲劳损伤模型并提出了改进模型。Ye 等^[7]从材料韧性衰减的角度研究了金属材料的疲劳损伤,并采用损伤等效准则建立了非线性累积损伤模型。冯胜等^[8]探讨了负载顺序、局部潜在缺陷及损伤非线性如何作用于材料疲劳寿命,并据此构建了一个非线性疲劳累积损伤的模型与相应的计算表达式。高会英等^[9]研究了考虑 S-N(应力-寿命)曲线不确定性的概率疲劳寿命预测方法并提出了改进 Manson-Halford 模型与改进 Cotern-Dolan 模型。李威^[10]研究了考虑强度退化的 Cotern-Dolan 累积损伤模型并证明了其比传统 Cotern-Dolan 模型的预测精度更高。刘其鹏等^[11]研究了基于载荷相互作用效应的 Cotern-Dolan 改进模型并证明该模型能够在载荷加载次序及幅值变化未知的情况下依旧能够较为准确预测疲劳寿命。王鹤轩等^[12]研究了一种考虑载荷相互作用及固有属性损伤的累积损伤模型。

【创新特色】本文在线性疲劳累积损伤模型与非线性累积损伤模型对比分析的基础上,引进了一种新的考虑载荷相互作用及固有属性损伤的累积

损伤模型来进行三方对比,对高速列车转向架构架的损伤和剩余寿命进行了分析,使实验更具有严谨性。**【关键问题】**研究在长期随机载荷作用下,高速列车关键结构的疲劳损伤如何起始、扩展和累积,以及导致疲劳失效的内在机理。

1 实验数据采集

本文选择了 13 不同位置的高速列车转向架构架结构,并对其进行了应变测量,各个测量点位置见图 1。试验中使用的电阻应变片的阻值为 $120\ \Omega$,灵敏度为 2.22%,应变数据是通过 HBM 公司的电子 eDAQ 数据采集器来采集的,该仪器旨在为苛刻的环境条件量身定制,它是一种密闭的自主数据收集系统,能够不间断地记录整个实验过程中的数据。在此次实验中,设备的数据采样率设定为 500 Hz,这一频率足以确保所有动态应力数据的完整性与有效性。该动车组的行驶区间是由原平西站到忻州西站,在整个线路中包含了很多种类型的工况,包括道岔、隧道及不同半径的曲线等。

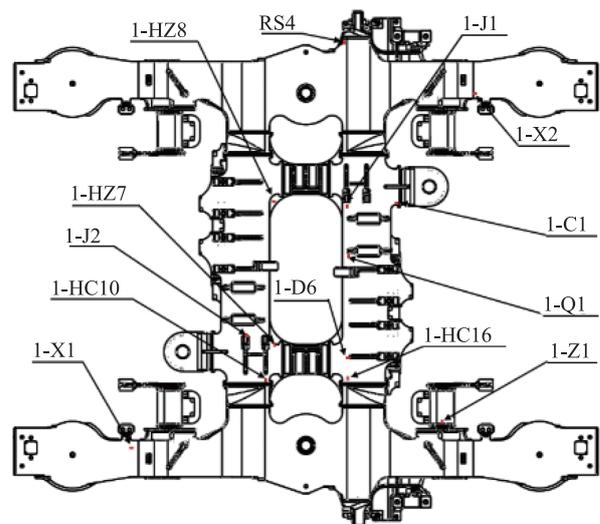


图 1 测点位置示意图

Fig. 1 Diagram of measuring points location

2 实验数据分析及处理

实测之后得到的数据通过 nCode 软件对其进行处理,根据材料力学中的胡克定律,当材料所承受的应力未超过其弹性极限,且材料只受到单轴应力作用的情况下,应力 σ 与应变 ε 之间存在线性关系。这意味着

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

式中: E 为材料的弹性模量。

将各测点的原始数据进行滤波、去毛刺等各项处理之后得到的各测点时域数据,然后将应变转换为应力,最终得到部分主要测点的动应力与速度的双y轴图如图2所示。从图2中可以看出所有应力测点的应力均随着速度的提高而呈增大趋势,随速度降低呈减小趋势。在接近试验测试的结束的时候,

各个应力测点都有比较显著的数据起伏,其中 1-C1 和 1-Z1 尤为显著,这是因为在列车减速停车的时候制动夹钳会对制动吊座产生一个反作用的制动力,而齿轮箱吊座受该制动力的影响较大。应力测点 1-X2 处的应力幅值明显比其他应力测点要大,而应力测点 1-J1 处的应力幅值明显比其他应力测点要小。应力测点 1-C1、1-Q1 和 1-D6 处的数据波形波动较为明显,而其他测点处的数据波形波动相对来说要小很多。

3 应力谱编制

3.1 一维应力谱的编制

由于采集的数据都依照雨流计数法处理了,此获得的是整个时间历程中的各个应力周期的均值

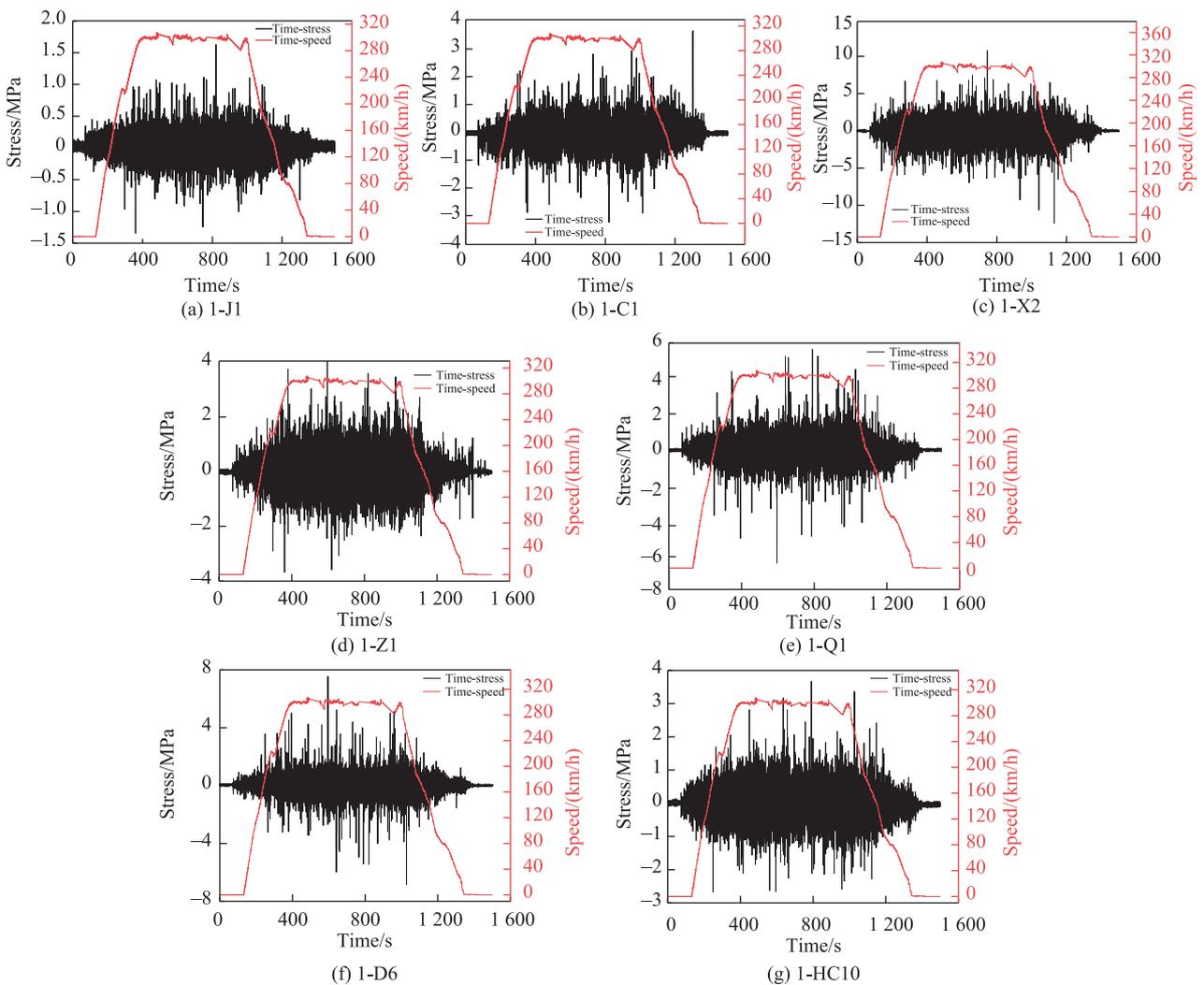


图2 部分主要测点动应力与速度双y轴图

Fig. 2 Double y-axis diagram of dynamic stress and velocity at measuring point

和幅值,它的量非常的庞大,并且还包含了许多的随机变量,因此必须对这些数据进行处理和统计,从而编制可靠的应力谱,这样才能够更好完成累计损伤与寿命预测分析。由于一维应力谱是线性疲劳累积损伤理论所必需的,因此本文将首先进行一维8级应力谱的编制。

利用波动中心法,编制一维应力谱。本文所提出的这种方法,只考虑一种单一的随机变量,也就是应力幅值,而忽略其平均应力。以波动中心取代了应力周期的静态应力分量,并将其作为一个固定的参量,以振幅替代应力周期中的动态应力成分,并将振幅与振幅相结合叠加于中心上。

第一步,求出应力谱各级之间的组间距

$$M = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{k} \quad (2)$$

式中: M 为各层之间的间距; σ_{\max} 为应力谱的最大值; σ_{\min} 为最小值; k 为应力幅值的级数,本文选取 k 为8,即8级应力谱。

然后通过下列式子来进行各组的上下限

$$\begin{cases} M_{i\uparrow} = \sigma_{\min} + i \times M \\ M_{i\downarrow} = \sigma_{\min} + (i-1) \times M \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i=1, 2, 3, \dots, l$; l 为应力峰值的个数范围; $M_{i\uparrow}$ 和 $M_{i\downarrow}$ 分别为第 i 级的组上下限值。

设置 τ 个变量 $A_i (i=1, 2, \dots, \tau)$,为记录各组内应力峰值的出现次数,初始频次设置为零。如果 $M_{i\downarrow} \leq \sigma \leq M_{i\uparrow}$,相应的 A_i 就增加1;这一过程一直进行,直至所有的数据输入完成。为了表示的方便,各个级别的应力幅值都用组中值来表示,其组中值的计算方法如下

$$\sigma_i = \frac{M_{i\uparrow} + M_{i\downarrow}}{2} \quad (4)$$

式中: σ_i 为第 i 级的应力组中值。

进一步,将每组应力峰值的出现次数称为频次,将总循环数除以频次得到频率,并将各频率从低到高累加,以此计算超值累积频率。通过雨流计数法对每个应力测试点的数据进行统计,并采用波动中心法整理,最终获得该测试点的应力谱。

最终的部分测点的一维应力谱如表1所示。从表中可以看出,各个测点的应力谱幅值主要是低幅值,高应力幅值出现的频率很低;其中在定位转座臂测点处的应力幅值最大,其最大的应力幅值约为24.6 MPa;横向减震器座测点处的应力幅值最小,其最大的应力幅值仅3.2 MPa,说明定位转臂座是

表1 部分测点一维应力谱
Tab.1 One dimensional stress spectrum of measuring points

1-J1	1-J1	1-D6	1-D6	1-C1	1-C1
Amplitude	Frequency	Amplitude	Frequency	Amplitude	Frequency
0.22	7.12×10^4	1.01	7.65×10^4	0.54	7.68×10^4
0.66	1.25×10^4	3.03	7 284	1.61	1.51×10^4
1.10	1 734	5.05	549	2.69	1 562
1.53	331	7.08	128	3.77	266
1.97	80	9.10	52	4.84	83
2.40	32	11.12	19	5.92	27
2.84	15	13.14	2	6.99	9
3.28	4	15.16	3	8.07	4
1-Q1	1-Q1	1-X2	1-X2	1-Z1	1-Z1
Amplitude	Frequency	Amplitude	Frequency	Amplitude	Frequency
0.91	7.52×10^4	1.64	8.81×10^4	0.61	6.23×10^4
2.72	9 234	4.92	1.33×10^4	1.84	1.73×10^4
4.54	729	8.21	2 014	3.06	4 719
6.36	158	11.49	412	4.29	797
8.17	46	14.77	100	5.52	175
9.98	24	18.05	23	6.74	63
11.80	11	21.33	5	7.97	18
13.62	1	24.61	2	9.19	4

转向架构架中较为危险的部位,而横向减震器座较为安全,且二者的累积频次都要高于其他测点,说明这两处地方的振动频率要更高。

3.2 应力谱的推断与扩展

为了能够发挥出材料的疲劳性能,对于每个应力测点的应力谱进行扩展。曲线外推技术被用来执行扩展。将观测到的样本累积频次分布转换为一个标准化的累积分布函数,该函数形式定义为

$$H = H_0^{1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right)^b} \quad (5)$$

式中: σ_m 为最大应力; H 为相应于应力 σ 的累积频数; H_0 为最大累积频数; b 为载荷谱的级数。

扩展因子法的原理如图3所示。曲线平移的扩展因子 γ ,其值为

$$\gamma = \frac{H_{02}}{H_{01}} \quad (6)$$

式中: H_{01} 与 H_{02} 分别为曲线1与曲线2对应的最大累积频数。在将曲线1平移到曲线2的位置之后,确定曲线3的形状与位置,要使得曲线2与曲线3能够平滑过渡。假设曲线3为

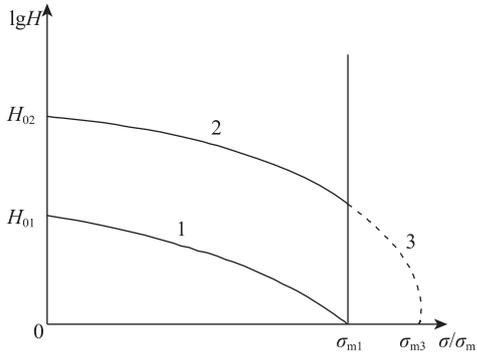


图3 扩展因子法原理图

Fig. 3 Schematic diagram of extended factor method

$$H_3 = H_{02} \exp \left[-a \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{m3}} \right)^b \right] \quad (7)$$

式中: a 为待定系数; σ_{m3} 为曲线3对应的最大应力; H_3 为曲线3对应的最大累积频数的假想值, H_{03} 为实际值。

将上式两边取对数

$$\log H_3 = \log H_{02} - a \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{m3}} \right)^b \quad (8)$$

当 $\log H_3 = \log(H_{02}/H_{01})$ 时, $\sigma_3 = \sigma_{m1}$ 。因此

$$a = \frac{\log H_{01}}{\left(\frac{\sigma_{m1}}{\sigma_{m3}} \right)^b} \quad (9)$$

所以

$$\log H_3 = \log H_{02} - \log H_{01} \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{m1}} \right)^b \quad (10)$$

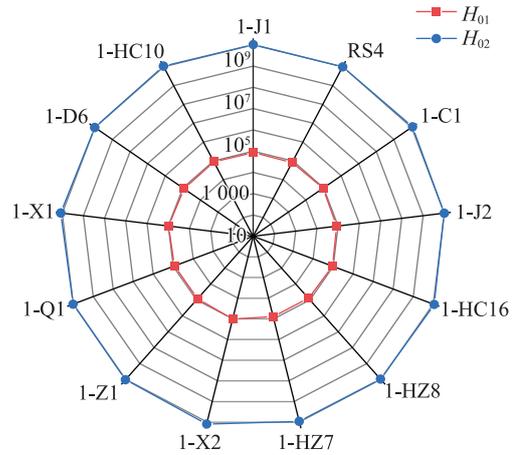
求得

$$\sigma_3 = \sigma_{m1} \left[\frac{\log H_{02} - \log H_{01}}{\log H_{01}} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (11)$$

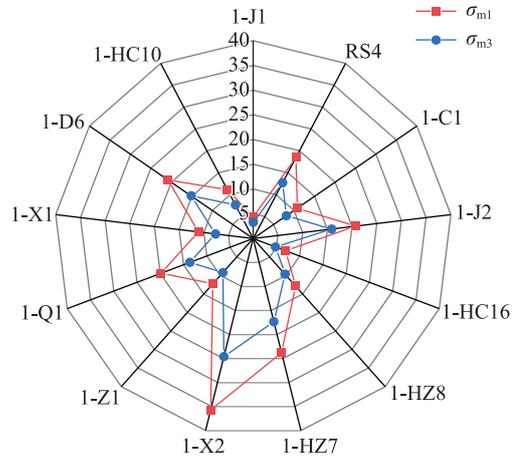
当 $\log H_3 = 0$ 时, $\sigma_{m3} = \sigma_3$,最终可得

$$\sigma_{m3} = \sigma_{m1} \left[\frac{\log H_{02}}{\log H_{01}} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (12)$$

式中: σ_{m1} 为外推前累积频次谱中的最大应力水平; σ_{m3} 为外推后累积频次谱中的最大应力水平。通过这种方法,可以从原始数据中得出外推后的应力水平和频数,进而对材料在更高应力水平下的行为进行预测和分析。 H_{01} 与 H_{02} , σ_{m1} 与 σ_{m3} 的对比图如图4所示。由图4可知各应力测点外推后的最大应力均略大于外推前的最大应力且趋势相同,各应力测点外推后的最大累积穿越频数均大于外推前,且外推后与外推前之间的比例基本相同。



(a) H_{01} and H_{02} (Unit: times)



(b) σ_{m1} and σ_{m3} (Unit: MPa)

图4 外推前后最大应力及最大累积穿越频数对比图
Fig. 4 Comparison of maximum stress and maximum cumulative crossing frequency before and after extrapolation

通过实验证明,经过雨流计数后的累积频数与运行里程近似呈线性关系

$$\frac{L_{\max}}{L} = \frac{N_{\max}}{N} \quad (13)$$

式中: L_{\max} 为全寿命周期的里程, L 为实际测量的里程; N_{\max} 和 N 分别为全寿命周期的累积循环次数和实际测量期间的累积循环次数。

应力数据通常服从对数正态分布或威布尔分布,本文选取了对数正态分布进行分布拟合,分布函数表达式为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\theta\sigma} \exp \left(-\frac{(\log_e \sigma - \mu)^2}{2\theta^2} \right) \quad (14)$$

式中: μ 和 θ 分别为变量对数的平均值和标准差。

基于最大应力值和分布函数,计算各个载荷级

别的发生概率。本研究中,载荷级数定为8级。通过将计算得出的每个载荷级别的概率乘以总累积频次,可以估算出在全寿命周期中各级载荷的出现次数。据此,可以推导出在全寿命期间各级载荷的频次分布,部分测点的全寿命周期应力谱如图5所示。由图5可知,所有应力测点的应力数据都是基本符合对数正态分布的。其中,应力测点1-X1与1-X2处的累积循环次数要比其它应比其他累积循环次数明显偏高,可见定位转臂座的振动频率要高于其他应力测点。同时,应力测点1-X2处的应力幅值大小也明显高于其他应力测点,该应力测点不仅振动频率高,而且应力幅值大,说明该应力测点相对来说比较危险。应力测点1-J1、1-HZ7和1-HZ8处的累积循环次数要比其他应力测点偏小,说明横纵梁连接部与横向减震器座处的振动频率较低,较为稳定。而应力测点1-J1处的应力幅值是所有应力测点中最小的,同时该应力测点处的振动频率低,说明该应力测点处较为安全。

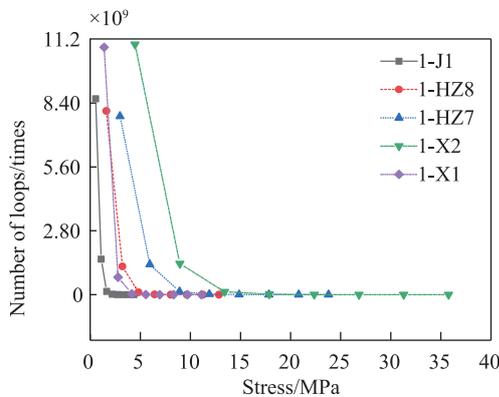


图5 部分测点全应力周期应力谱图

Fig. 5 Total stress periodic stress spectrum of each measuring point

4 疲劳寿命分析

疲劳损伤是表征结构疲劳特性的重要参数之一,同时疲劳损伤的计算也是计算疲劳寿命所需要的关键步骤。普遍地认为损伤是在不断地加载中逐渐积累形成的。影响疲劳损伤累积的因素包括载荷大小、载荷顺序、载荷历史(动作次数)和载荷路径。疲劳损伤的累积效应直接决定了机械零件的寿命和可靠性。

在疲劳累积损伤研究领域,众多专家学者开展

了深入的研究工作,提出了各种疲劳累积损伤理论和计算模型。这些理论和模型主要可以分为三类:线性累积损伤模型、双线性累积损伤模型以及非线性累积损伤模型。这些模型根据不同的材料特性和应力响应机制,提供了评估材料在反复载荷作用下损伤累积和寿命预测的有效方法。本文在对其进行分析时使用常用的Miner线性累积损伤准则、一种考虑载荷相互作用及固有属性损伤的累积损伤准则以及Cotern-Dolan非线性累积损伤准则分别计算转向架构架的疲劳寿命,然后进行三方对比。各应力测点的S-N曲线参数C如表2所示。

表2 各应力测点的S-N曲线参数
Tab.2 Parameters of S-N curve for each stress measurement point

Measuring point number	C
1-J1	6.80×10^{14}
RS4	6.80×10^{14}
1-C1	6.80×10^{14}
1-J2	6.85×10^{15}
1-HC16	6.80×10^{14}
1-HZ8	6.80×10^{14}
1-HZ7	6.85×10^{15}
1-X2	6.85×10^{15}
1-Z1	6.80×10^{14}
1-Q1	6.80×10^{14}
1-X1	6.80×10^{14}
1-D6	6.80×10^{14}
1-HC10	6.80×10^{14}

4.1 Miner线性累积损伤模型

Miner理论是最被广泛使用的线性损伤理论。它对于疲劳损伤D的定义是在承受一定应力情况下,循环次数n与被测物在该情况下的疲劳寿命 N_i 之比

$$D = \frac{n}{N_i} \quad (15)$$

Miner线性累积损伤理论指出,在多个层次的应力作用下,会发生疲劳失效

$$\sum \frac{n_i}{N_{fi}} = 1 \quad (16)$$

式中: n_i 为第i次应力水平下的循环次数; N_{fi} 为第i次应力下的疲劳寿命。

Miner与材料的S-N曲线结合最终可得

$$D = \sum \frac{n_i}{N_{fi}} = \sum \frac{n_i(\sigma_i)^m}{C} \quad (17)$$

式中:m为S-N曲线中的幂常数。

将得到的损伤值通过一定的转化关系可以得到对应的疲劳寿命,其转化关系如下

$$N = \frac{\sum_i n_i}{D} \quad (18)$$

4.2 考虑载荷相互作用及固有属性损伤的累积损伤模型

同时考虑非线性损伤与固有属性损伤的累计损伤累积则如式

$$\begin{cases} D = \sum_{i=1}^y \frac{n_{Gi}}{N_{Gi}} + \sum_{j=1}^z \frac{n_{Qj}}{N_{Qj}} \\ N_{Qj} = \frac{C}{(S_{Qj})^m} \\ N_{Gi} = \frac{C(1-D_{i-1})}{(S_{Gi})^m} \end{cases} \quad (19)$$

式中: N_{Gi} 为第 i 个等级的高周载荷的疲劳寿命; n_{Gi} 为第 i 个等级的高周载荷的实际循环数; S_{Gi} 表示第 i 个等级的高周载荷的实际应力; N_{Qj} 为第 j 个等级的低周载荷的疲劳寿命; n_{Qj} 为第 j 个等级的低周载荷的实际循环数; S_{Qj} 为第 j 个等级的低周载荷的实际应力; $C(1-D_{i-1})$ 为每次计算高周载荷产生损伤时累积损伤影响后 C 的逆行计算。

疲劳寿命可由损伤值通过转化得到,其转化关系如下

$$N = \frac{\sum_i n_i}{D} \quad (20)$$

此外,该理论还考虑了疲劳损伤对高周载荷下 C 的影响。

1) 疲劳损伤的影响:在材料承受重复应力时,其疲劳损伤会对 C 产生影响。随着损伤的累积,材料的耐久性降低,这在 S-N 曲线上表现为 C 值的变化。

2) 高周损伤的加剧:在 Miner 理论的框架内,认为高周损伤对材料的影响是加剧的,其强度增加到原来的 $1/(D-1)$ 倍。这意味着随着损伤 D 的增加,材料对相同循环次数的耐受能力降低。

4.3 Cotern-Dolan 模型

Cotern 与 Dolan 提出了一种非线性累积损伤法则,被命名为 Cotern-Dolan 模型^[9]。该模型认为每次循环产生的损伤与循环次数呈现指数关系

$$D = wrn^\beta \quad (21)$$

式中: w 为由于应力作用产生的损伤核数目; r 为损伤系数; n 为循环次数; β 为与应力水平有关的常

数。在 Cotern-Dolan 模型中,损伤的临界值为

$$D_c = w_{\max} r_{\max} n^{\beta_{\max}} \quad (22)$$

式中: D_c 为材料的临界损伤值; N 为最大应力载荷作用下的疲劳寿命; w_{\max} , r_{\max} , β_{\max} 分别为与最大应力相对应的损伤核数量,损伤系数和常数。

变幅载荷条件下,所有阶段的损伤总和应等于单一应力水平 σ 下产生的疲劳破坏所对应的损伤。基于此原理,多级载荷条件下的疲劳寿命预测模型可以表示为

$$N = \frac{N_{\max}}{\sum_{i=1}^k \alpha_i (\sigma_i / \sigma_{\max})^d} \quad (23)$$

式中: α_i 为第 i 个等级应力水平下的循环次数占总循环次数的比例; d 为材料常数,对于材料常数 d 的具体数值,建议根据材料特性和实验数据进行选择,其中高强度钢的 d 值为 4.8,其他材料的 d 值为 5.8。

4.4 疲劳寿命分析

得到的寿命为各测点的可循环次数,可以通过每秒的采样频率与动车组运行速度之间的关系来将其转化为可运行的里程。经过分析计算,得到了实测应力谱与全寿命周期应力谱通过线性累积损伤模型、考虑载荷相互作用及固有属性损伤的累积损伤模型和 Cotern-Dolan 模型计算出的转向架构架的寿命里程。同时各个应力测点的实测应力谱计算的疲劳寿命与全寿命周期应力谱计算的疲劳寿命之间的雷达对比图如图 6 所示。由图 6 可知,全寿命周期应力谱对应的寿命里程普遍比实测应力谱计算出的寿命里程要偏小一些,因为全寿命周期应力谱的各级应力幅值普遍比实测应力谱偏大,符合逻辑关系,说明扩展的全寿命周期应力谱是可靠的。考虑载荷相互作用及固有属性损伤的累积损伤模型与线性累积损伤模型之间的差别非常小,说明该模型的非线性属性很弱; Cotern-Dolan 模型则能够体现出其非线性属性, Cotern-Dolan 模型考虑到了线性模型无法计算的小载荷对损伤的贡献和载荷间的相互作用效应,所以其得到的损伤值略大于线性模型,致使各测点的寿命均稍小于线性寿命,有些许差别于在合理范围内,且趋势都相同。各应力测点基本满足寿命里程大于 1×10^8 km,基本满足列车运行里程,但损伤值最大的测点 1-X2 处的全寿命周期对应的寿命里程仅满足列车在该工况下行驶 2.4×10^7 km,而转向架构架的设计寿命里

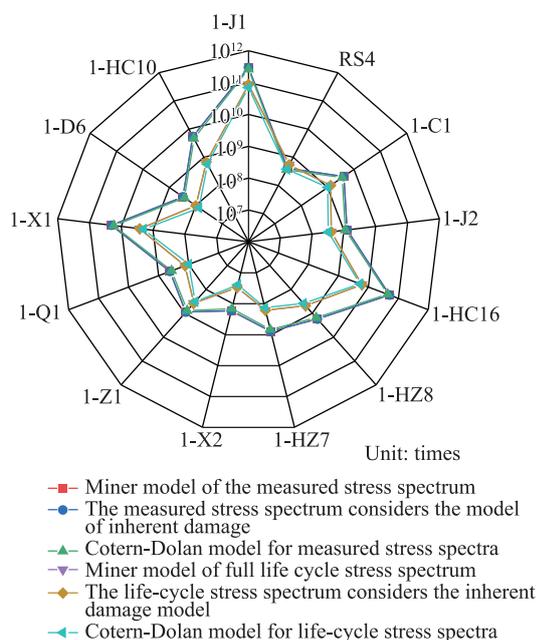


图6 各应力测点疲劳寿命里程对比雷达图

Fig. 6 Comparison radar chart of fatigue life mileage at each measuring point

程为 1.5×10^7 km, 二者较为接近, 可见该测点较为危险, 需要提前监测该测点部位的损伤情况, 防止因构架部位的疲劳失效而产生事故; 对于处在设计中的构架而言, 定位转臂座区域是需要进行抗疲劳特性优化的重点部位, 改善危险节点的受损情况, 能够有效提高转向架构架的安全性。

5 结论

1) 考虑载荷相互作用及固有损伤的累积损伤模型计算出的损伤值和寿命里程均与线性累积损伤模型差别微小, 表明该模型具有非线性属性, 但其非线性属性并不明显。

2) 转向架构架各测点处的非线性累积损伤值均大于线性累积损伤值, 且寿命小于线性模型计算的寿命里程, 表明 Cotern-Dolan 模型很好地考虑到了线性累积损伤模型无法计算的小载荷对损伤的影响和载荷间的相互作用效应。

3) 构架的定位转臂座测点 1-X1 与 1-X2 处的线性累积损伤值与非线性累积损伤值均较大, 且测点 1-X2 处的寿命里程是比较接近转向架构架设计寿命里程的, 因此在需要提前监测定位转臂座区域的损伤情况, 且对于处在设计中的构架而言, 定位转臂座区域是需要进行抗疲劳特性优化的重点部位。

参考文献:

- [1] NAIRN J A. Direct comparison of anisotropic damage mechanics to fracture mechanics of explicit cracks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 203: 197-207.
- [2] STEIMBREGER C, CHAPETTI M D. Fracture mechanics based prediction of undercut tolerances in industry[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 211: 32-46.
- [3] PIPPAN R, WURSTER S, KIENER D. Fracture mechanics of micro samples: fundamental considerations[J]. Materials & Design, 2018, 159: 252-267.
- [4] 冯胜, 程燕平, 赵亚丽, 等. 线性疲劳损伤累积理论的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003(5): 608-610.
FENG S, CHENG Y P, ZHAO Y L, et al. Linear fatigue damage cumulation theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003(5): 608-610.
- [5] 孙钰, 袁强, 温小飞, 等. 基于雨流计数法及 Corten Dolan 准则的轴承疲劳寿命预测[J]. 船舶工程, 2020, 42(1): 68-73.
SUN Y, YUAN Q, WEN X F, et al. Prediction of bearing fatigue life based on rain-flow counting method and Corten Dolan criterion[J]. Ship Engineering 2020, 42(1): 68-73.
- [6] 屈少鹏. Manson-Halford 疲劳损伤模型改进研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2021.
QU S P. Research on improvement of Manson-Halford fatigue damage model[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2021.
- [7] YE D Y, WANG Z L. A new approach to low-cycle fatigue damage based on exhaustion of static toughness and dissipation of cyclic plastic strain energy during fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(8): 679-687.
- [8] 冯胜, 程燕平, 赵亚丽, 等. 非线性疲劳损伤累积理论研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(12): 1507-1509.
FENG S, CHENG Y P, ZHAO Y L, et al. Unlinear fatigue damage cumulative theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(12): 1507-1509.
- [9] 高会英, 张小强, 黄洪钟, 等. 考虑 S-N 曲线不确定性的概率疲劳寿命预测[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48(1): 67-75.
GAO H Y, ZHANG X Q, HUANG H Z, et al. Probabilistic fatigue life prediction considering the uncertainty of S-N curve[J]. Scientia Sinica(Physica, Mechanica & Astronomica), 2018, 48(1): 67-75.
- [10] 李威. 考虑强度退化的非线性累积损伤模型分析[J]. 机械强度, 2020, 42(3): 723-727.
LI W. Analysis of nonlinear cumulative damage model considering strength degradation[J]. Journal of Mechan-

- cal Strength, 2020, 42(3): 723-727.
- [11] 刘其鹏, 高月华, 李永华. 基于载荷相互作用效应的Corten-Dolan改进模型[J]. 铁道学报, 2021, 43(5): 80-86.
LIU Q P, GAO Y H, LI Y H. An improved Corten-Dolan model based on load interaction effects[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(5): 80-86.
- [12] 陈道云, 王斌杰, 肖乾, 等. 高速列车转向架构架损伤、等效应力及寿命分布特性研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 237-246.
CHEN D Y, WANG B J, XIAO Q, et al. Study on damage, equivalent stress and life distribution characteristics of bogie frame of high-speed train[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(22): 237-246.
- [13] 孙璐. 高速列车转向架构架长期服役应力谱及损伤演化规律研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
SUN L. Study on stress spectrum and damage evolution law of the long-term service for high-speed EMU's bogie frame[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [14] 陈道云, 孙守光, 李强. 高速列车载荷谱推断及扩展方法研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(10): 151-155.
CHEN D Y, SUN S G, LI Q. Study on deduction and extend of high-speed train load spectrum[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10): 151-155.
- [15] PASTORCIC D, VUKELIC G, BOZIC Z. Coil spring failure and fatigue analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 99: 310-318.
- [16] SINGH S S K, ABDULLAH S, NIKABDULLAH N. The needs of understanding stochastic fatigue failure for the automobile crankshaft: a review[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 80: 464-471.
- [17] 李家春, 胡彪彪, 罗珊, 等. 基于Corten-Dolan法则的低压训练舱疲劳寿命预测[J]. 机床与液压, 2022, 50(13): 143-148.
LI J C, HU L B, LUO S, et al. Fatigue life prediction of low-pressure training cabin based on Corten-Dolan rule [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(13): 143-148.
- [18] LIU Q, GAO Y, LI Y, et al. Fatigue life prediction based on a novel improved version of the Corten-Dolan model considering load interaction effect[J]. Engineering Structures, 2020, 221: 111036.
- [19] YANG X, LIU X, WANG Y. Random fatigue life prediction of automobile lower arm via modified Corten-Dolan model[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2022, 45(12): 3500-3513.
- [20] XU X, XUE Q, HE Y. A Corten-Dolan model considering material strength degradation[J]. Mechanics of Solids, 2022, 57(1): 149-162.
- [21] CHEN D, XIAO Q, MOU M, et al. Fatigue reliability evaluation of heavy-haul locomotive car body underframe based on measured strain and virtual strain[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 172: 107661.



第一作者:肖乾(1977—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为轨道车辆轮轨关系,轨道车辆运维装备研究与开发。E-mail:jxralph@foxmail.com。



通信作者:陈道云(1988—),男,副教授,硕士生导师,研究方向为结构强度与可靠性。E-mail:chendaoyun@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑:姜红贵)