DOI: 10.3901/JME.2020.22.237

高速列车转向架构架损伤、等效应力及寿命分布特性研究^{*}

陈道云¹ 王斌杰² 肖乾¹ 李强² 孙守光²

(1. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室 南昌 330013;
2. 北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要: 为分析高速列车转向架构架损伤、等效应力及寿命分布特性,对构架疲劳关键测点进行动应力线路实测并对测点实测时域数据波形进行解析;基于实测应力时间历程及雨流计数法编制二维应力谱,利用 Goodman 等寿命方程将二维应力谱等效转换为一维应力谱;阐述线性累积损伤及非线性累积损伤模型的建立方法并对实测数据的线性累积损伤及非线性累积损伤进行了计算及对比分析;分别基于线性累积损伤理论及非线性累积损伤理论推导出各理论下的等效应力,基于实测数据对两种等效应力进行了计算及对比分析;通过结合非线性累积损伤及线性累积损伤理论计算的等效应力及不同可靠度下的材料 S-N 曲线计算并对比分析构架结构的疲劳寿命。研究表明,与非线性疲劳分析理论相比,线性疲劳分析理论对高速列车转向架构架的疲劳特性评估偏于保守。

关键词: 车辆工程; 应力谱; 线性累积损伤; 非线性累积损伤; 等效应力; 疲劳寿命

中图分类号: U270

Study on Damage, Equivalent Stress and Life Distribution Characteristics of Bogie Frame of High-speed Train

CHEN Daoyun¹ WANG Binjie² XIAO Qian¹ LI Qiang² SUN Shouguang²

(1. Key Laboratory of Conveyance and Equipment (Ministry of Education),
East China Jiaotong University, Nanchang 330013;
2. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: In order to analyze the damage, equivalent stress and life distribution characteristics of bogie frame of high-speed train, the dynamic stress railway line measurement of the key fatigue points of frame is carried out and the time-domain data waveforms of the measured points are analyzed. Based on the measured stress time history and rain flow counting method, the two-dimensional stress spectrum is compiled, and the two-dimensional stress spectrum is transformed into one-dimensional stress spectrum by using the Goodman equal life equation. The establishment methods of linear cumulative damage model and nonlinear cumulative damage model are described. The linear cumulative damage and nonlinear cumulative damage of measured data are calculated and compared. Based on the linear cumulative damage theory and the nonlinear cumulative damage theory, the equivalent stresses under each theory are deduced, and the two equivalent stresses are calculated and compared based on the measured data. The fatigue life of frame structure is compared and analyzed by combining the equivalent stress calculated by nonlinear cumulative damage theory and linear cumulative damage theory, and by calculating and comparing the fatigue life of the frame structure under different reliability. Compared with the nonlinear fatigue analysis theory, the linear fatigue analysis theory is conservative in evaluating the fatigue characteristics of high-speed train bogie frame.

Key words: vehicle engineering; stress spectrum; linear cumulative damage; nonlinear cumulative damage; equivalent stress; fatigue life

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51565013, 51975210)。20191206 收到初稿, 20200320 收到修改稿

0 前言

疲劳破坏是结构的重要失效形式^[1-4],结构的疲劳破坏通常采用断裂力学及损伤力学的方法进行研究^[5-7]。现行的高速列车转向架构架疲劳分析大多基于 Miner 理论,该理论是疲劳累积损伤理论中形式最简单的,在工程结构的可靠性分析中得到了广泛的应用,然而 Miner 理论计算的疲劳损伤是线性的,无法准确反映实际的结构非线性疲劳累积损伤过程,将该理论应用于以疲劳评估为目标的分析计算时与实际的非线性累积损伤过程有较大偏差^[8]。为研究结构实际的疲劳累积损伤过程,黄洪钟等^[9]提出了剩余强度衰减退化的非线性疲劳累积损伤准则,LI 等^[10-12]提出了针对桥梁结构的疲劳非线性疲劳累积损伤模型,陈志为等^[13]针对结构非线性疲劳累积损伤过程中的大量不确定性,基于连续损伤模型对多种载荷联合作用下的结构疲劳可靠性评估提出了一种新方法,王会利等^[14]针对桥梁结构建立了非线性疲劳累积损伤模型并分析了模型主要参数对桥梁疲劳寿命的影响,基于桥梁非线性疲劳累积损伤模型和 Miner 线性累积损伤模型分析了某大桥的疲劳性能,王虎等^[15]给出了一种基于非线性疲劳累积损伤的随机振动疲劳寿命分析方法,该方法将频域疲劳寿命的预估结果平分为若干段,考虑顺序效应对每一段结果进行修正并叠加,得到修正的振动疲劳寿命结果并通过试样试验验证了该方法的准确性。薛齐文等^[16]构建了一种基于非线性疲劳损伤理论的焊接疲劳设计模式,该模式不仅考虑了多级疲劳载荷的加载次序效应,也考虑了载荷间的相互影响,数值计算结果表明,基于非线性疲劳累积损伤理论所建立的焊接疲劳设计模式可对焊接接头的疲劳特性进行有效的设计分析,具有较高的精度和可信度。

本文在前述的研究基础上,进行了高速列车转向架构架的损伤、等效应力与寿命分布特性分析。首先进行了构架动应力线路实测,对实测数据进行处理并得到了二维应力谱及一维应力谱,然后分别进行了构架的线性及非线性疲劳累积损伤分析、线性及非线性等效应力分析、线性及非线性疲劳寿命分析,最后对研究结果进行了总结。

1 动应力线路实测试验

掌握测点的动应力实测数据是进行高速列车转向架构架疲劳特性分析的重要基础,为此,对高速列车转向架构架的数十处动应力测点进行了线路试

验。图 1 为测试结果中应力响应较大的几处测点位置示意图。表 1 所示为测点号、测点区域及线号之间的对应关系。测试所用的电阻应变片阻值为 $120\ \Omega$,灵敏度为 2.22%,选用 HBM 公司的 eDAQ 数据采集器(图 2)进行动应力数据采集,该设备是针对复杂恶劣环境设计的一种密封独立数据采集系统,可实现试验数据的全程连续采集,本次试验的数据采样频率为 500 Hz,能够保证完整采集到有效的动应力数据,该设备安装位置如图 3 所示,图 4 为测试线路的卫星图,始于原平西站,终于忻州西站,线路中包含了道岔、隧道及不同半径的曲线等工况。

图 1 构架动应力测点分布图

表 1 动应力测点位置说明

序号	测点号	测点区域	线号
1	1-C1	齿轮箱吊座	45-25
2	1-D6	电机吊座	47-55
3	1-HC10	横侧梁连接部	47-56
4	1-HZ8	横纵梁连接部	45-65
5	1-Z1	制动吊座	47-29
6	1-X1	定位转臂座	47-51
7	1-J1	横向减振器座	45-12
8	1-Q1	牵引拉杆与横梁连接部	47-46
9	RS4	抗蛇行减振器座	45-24

图 2 动态数据信号采集设备

图 3 测试转向架位置

图 4 实测线路图

图 5 所示为测点实测时域数据波形图, 可见, 在全程测试过程中各测点的应力波形产生了不同的趋势变化, 表明不同工况对转向架构架各测点处产生的应力趋势变化是不同的, 其中: 测点 1-Z1(制动吊座测点)在测试的结尾处有非常明显的数据波形波动, 这是列车减速停车时制动夹钳产生制动力反作用于制动吊座引起的; 测点 1-X1(定位转臂测点)的应力幅值明显大于其他测点, 但是应力趋势无明显波动; 测点 1-C1(齿轮箱吊座测点)在测试开始阶段有几处明显的数据波形波动, 这是由于列车启动阶段的齿轮箱转速变化导致了齿轮箱吊座力产生变化。

(a) 测点 1-HC10

(b) 测点 1-D6

(c) 测点 1-X1

(d) 测点 1-Q1

(e) 测点 1-Z1

(f) 测点 1-HZ8

(g) 测点 1-C1

图5 测点实测时域数据波形

2 实测数据的应力谱编制

实测的应力时间历程经雨流计数处理后输出的数据为整个时间历程中各个应力循环周期的幅值和均值对,数据量繁多且为随机变量,为顺利进行后续的疲劳特性分析,须将这些雨流计数^[17]统计后的数据进行整理,编制出相应的应力谱。非线性累积损伤理论需要得到二维应力谱数据,二维应力谱的编制需要将雨流计数得到的应力幅值和均值数据按照式(1)进行分组处理

$$\begin{cases} G_a = \frac{\sigma_{a,\max} - \sigma_{a,\min}}{N_g} \\ G_m = \frac{\sigma_{m,\max} - \sigma_{m,\min}}{N_g} \end{cases} \quad (1)$$

式中, G_a 为应力幅值的分组间距; G_m 为应力均值的分组间距; $\sigma_{a,\max}$ 为应力幅值的最大值; $\sigma_{a,\min}$ 为应力幅值的最小值; $\sigma_{m,\max}$ 为应力均值的最大值; $\sigma_{m,\min}$ 为应力均值的最小值; N_g 为分组级数,一般可取 8 级。

各级应力幅值与应力均值分组后的上、下限值可按式(2)计算得到:

$$\begin{cases} G_{a,i_up} = \sigma_{a,\min} + i \times G_a \\ G_{a,i_down} = \sigma_{a,\min} + (i-1) \times G_a \\ G_{m,i_up} = \sigma_{m,\min} + i \times G_m \\ G_{m,i_down} = \sigma_{m,\min} + (i-1) \times G_m \end{cases} \quad i=1,2,\dots,N \quad (2)$$

式中, i 为分组序号; G_{a,i_up} 为第 i 级应力幅值分组上限值; G_{a,i_down} 为第 i 级应力幅值分组下限值; G_{m,i_up} 为第 i 级应力均值分组上限值; G_{m,i_down} 为第 i 级应力均值分组下限值。

应力幅值与应力均值经过分组之后,假设 N^2 个统计“幅值-均值”应力对的频数变量为 C_{jk} ,其中:均值级数 $j=1,2,\dots,N$;幅值级数 $k=1,2,\dots,N$ 。将 C_{jk} 的初值赋为零,依次按顺序读取原循环周期统计结果数据文件,对比判断读取的“幅值-均值”应力对属于 N^2 个二维区间的哪一个,若所读取的“幅值-均值”应力对在某级区间的应力范围内,则对该区间对应的频数 C_{jk} 进行加 1 处理,以此方法循环往复直至所有的数据读取计算完毕为止。

为了计数及描述清晰,本文采用组中值定义各级载荷幅值与均值组,组中值按式(3)计算

$$\begin{cases} \sigma_{a,i} = \frac{G_{a,i_up} + G_{a,i_down}}{2} \\ \sigma_{m,i} = \frac{G_{m,i_up} + G_{m,i_down}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\sigma_{a,i}$ 为第 i 级应力幅值的组中值; $\sigma_{m,i}$ 为第 i 级应力均值的组中值。

表 2 所示为 8 级二维应力谱的组成结构示意图。

表 2 8 级二维应力谱组成结构示意图

均值	幅值							
	$\sigma_{a,1}$	$\sigma_{a,2}$	$\sigma_{a,3}$	$\sigma_{a,4}$	$\sigma_{a,5}$	$\sigma_{a,6}$	$\sigma_{a,7}$	$\sigma_{a,8}$
$\sigma_{m,1}$	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}
$\sigma_{m,2}$	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}	C_{26}	C_{27}	C_{28}
$\sigma_{m,3}$	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}	C_{35}	C_{36}	C_{37}	C_{38}
$\sigma_{m,4}$	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	C_{45}	C_{46}	C_{47}	C_{48}
$\sigma_{m,5}$	C_{51}	C_{52}	C_{53}	C_{54}	C_{55}	C_{56}	C_{57}	C_{58}
$\sigma_{m,6}$	C_{61}	C_{62}	C_{63}	C_{64}	C_{65}	C_{66}	C_{67}	C_{68}
$\sigma_{m,7}$	C_{71}	C_{72}	C_{73}	C_{74}	C_{75}	C_{76}	C_{77}	C_{78}
$\sigma_{m,8}$	C_{81}	C_{82}	C_{83}	C_{84}	C_{85}	C_{86}	C_{87}	C_{88}

由于线性累积损伤理论需要得到一维应力谱数据,因此需要利用一定的等效方法将二维应力谱转换为一维应力谱,本文选取 Goodman 等寿命方法^[18]实现二维应力谱向一维应力谱的转换,等效后的一维应力谱均值为 0,等效方程为

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{eq}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_b} = 1 \quad (4)$$

式中, σ_a 为应力幅值; σ_b 为应力极限, 通过求解超越概率 10^{-6} 所对应的应力值而得到^[16]; σ_m 为应力均值; σ_{eq} 为等效应力幅值。

图 6 所示为各测点的二维应力谱分布图, 可见, 各测点处的二维应力谱幅值以低幅值为主, 相比之下高应力幅值频数极少, 属于紫色条带的显示范围, 因而在图 6 所示的二维应力谱分布图中无法明显显示出其具体位置。制动吊座测点的二维应力谱均值分布均为负值, 表明了制动吊座测点处受力方向的单一性, 这种受力方向的单一性正是由于制动夹钳载荷反作用于制动吊座过程的单一性造成的。除制动吊座测点外, 其他测点处的二维应力谱均值分布涵盖了正值和负值范围, 表明了趋势载荷对测点受力状态的影响是围绕零线附近上下波动的。牵引拉杆与横梁连接部测点的二维应力谱均值及幅值分布范围最广, 最低应力均值约为 -17 MPa, 最高应力均值约为 25 MPa, 最低应力幅值约为 2.5 MPa, 最高应力幅值约为 44 MPa, 这是由于列车起动加速时的牵引力迅速增加, 作用于牵引拉杆处的牵引力使得牵引拉杆与横梁连接部测点处的动应力均值及幅值迅速增大, 产生大的正应力均值及幅值; 当列车制动时, 惯性力的存在使得牵引拉杆受到压缩, 从而导致产生大的负应力均值及幅值。横向减振器座测点的二维应力谱总累积频次明显高于其他测点, 表明横向减振器振动频率明显高于其他测点。

(a) 齿道箱吊座测点

(b) 电机吊座测点

(c) 横侧梁连接部测点

(d) 横纵梁连接部测点

(e) 横向减振器座测点

(f) 牵引拉杆与横梁连接部测点

(g) 定位转臂座测点

图 6 二维应力谱分布

表 3 所示为二维应力谱经 Goodman 等寿命方程转换得到的一维应力谱, 由表 3 可见, 各测点处的应力频次以低应力幅值为主, 等效后的定位转臂座测点 1-X1 一维应力谱应力幅值的最大值明显高于其他测点, 达到了 45 MPa, 横向减振器座测点 1-J1 的一维应力谱应力幅值的最大值是所有测点中最大应力幅值中最小的, 仅为 4.6 MPa。

表 3 测点一维应力谱

1-C1		1-D6		1-HC10	
幅值	频次	幅值	频次	幅值	频次
1.1	271 500	1.1	205 800	0.6	228 200
3.4	2 469	3.2	7 518	1.8	13 350
5.7	169	5.3	509	3.1	1 605
8.0	36	7.4	128	4.3	195
10.3	1	9.6	55	5.5	35
12.5	0	11.7	11	6.7	11
14.8	1	13.8	5	7.9	1
17.1	1	15.9	3	9.2	1
1-HZ8		1-Z1		1-X1	
幅值	频次	幅值	频次	幅值	频次
0.8	214 000	1.4	233 700	3.0	177 800
2.3	8 645	4.3	5 227	9.0	5 190
3.8	826	7.2	303	15.0	374
5.3	140	10.1	54	21.0	67
6.8	48	13.0	8	27.0	11
8.3	20	15.9	1	33.0	4
9.9	6	18.7	0	39.0	0
11.4	1	21.6	1	45.0	1
1-J1		1-Q1		RS4	
幅值	频次	幅值	频次	幅值	频次
0.3	286 900	1.0	186 800	1.0	301 100
0.9	10 260	3.1	9 159	3.0	2 363
1.5	785	5.1	585	4.9	971
2.1	130	7.2	127	6.9	295
2.8	41	9.3	37	8.9	71
3.4	14	11.3	19	10.9	10
4.0	2	13.4	3	12.8	2
4.6	2	15.4	3	14.8	1

3 累积损伤分析

损伤是表征结构疲劳特性的重要参数之一, 通常认为结构在承受疲劳载荷的情况下损伤是逐渐累积的。当前对结构的损伤分析主要可分为线性累积损伤分析和非线性累积损伤分析, 以下分别阐述线性累积损伤模型和非线性累积损伤模型的建立原理, 在实测应力数据的基础上对高速列车转向架构架测点的累积损伤进行分析研究。

3.1 线性累积损伤模型

线性累积损伤^[19]的基本思想如下: 在任何应力循环作用下结构都会产生疲劳损伤, 疲劳损伤程度与应力幅作用的频次有关, 各级应力幅之间相互独立且都不相关。每级应力幅所产生的损伤可线性叠加, 当总累积损伤达到临界值 1 时就会产生疲劳破坏, 损伤的表达式为

$$D_L = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (5)$$

式中, k 为级数; N_i 为第 i 级应力水平下对应的疲劳寿命; n_i 为第 i 级应力水平对应的循环次数。

结合材料 $S-N$ 曲线和 Miner 线性累积损伤法则

$$D_L = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (\sigma_i)^m}{C} \quad (6)$$

式中, m 、 C 为材料 $S-N$ 曲线参数; σ_i 为第 i 级应力水平下对应的应力幅。

3.2 非线性累积损伤模型

Lemaitre 基于连续介质热力学和耗散能理论^[20], 建立了高周疲劳损伤演化方程

$$\dot{D}_{NL} = \begin{cases} \frac{R_v \sigma_{eq}^2 |\sigma_{eq} - \bar{\sigma}_{eq}|^\beta}{B(1 - D_{NL})^\alpha} \left\langle \dot{\sigma}_{eq} \right\rangle & \sigma^* \geq \sigma_f \\ 0 & \sigma^* < \sigma_f \end{cases} \quad (7)$$

式中, B 、 α 、 β 是材料常数; σ_{eq} 为 Von Mises 等效应力; σ_f 为疲劳应力极限; D_{NL} 为非线性累积损伤; $\dot{D}_{NL}$ 为非线性累积损伤变化率; $\dot{\sigma}_{eq}$ 为等效应力变化率; $\langle \cdot \rangle$ 是 McCauley 括号, 表示当 $x > 0$ 时, $\langle x \rangle = x$; 当 $x < 0$ 时, $\langle x \rangle = 0$; σ^* 为损伤等效应力, 在塑性阶段就是 Von Mises 等效应力; R_v 是三轴应力函数。

在单轴应力状态下, 式(7)可以简化为

$$\dot{D}_{NL} = \begin{cases} \frac{\sigma^2 |\sigma - \sigma_m|^\beta}{B(1 - D_{NL})^\alpha} \left\langle \dot{\sigma} \right\rangle & \sigma^* \geq \sigma_f \\ 0 & \sigma^* < \sigma_f \end{cases} \quad (8)$$

式中, σ 为轴向应力; σ_m 为平均应力。

为便于分析, 此处先忽略平均应力的影响并不计 $(1-D_{NL})^\alpha$ 的变化, 对式(8)在一个应力循环块中积分可得

$$\int_{D_{NL}}^{D_{NL}+\frac{\delta D_{NL}}{\delta N_{bl}}} dD_{NL} = \sum_{i=1}^{m_{th}} \int_0^{\sigma_{\max, ri}} \frac{\sigma^{\beta+2}}{B(1-D_{NL})^{\alpha_i}} d\sigma \quad (9)$$

式中, m_{th} 为循环块中最大应力下的循环数的上限; N_{bi} 为当前循环块的循环数; $\sigma_{\max, ri}$ 为第 i 次循环的最大应力, 且 $\sigma_{\max, ri} > \sigma_i$; 当 $\sigma_m=0$ 时, 应力幅 $\sigma_{ar}=\sigma_{\max, r}$ 。

由式(9)可得

$$\frac{\delta D_{NL}}{\delta N_{bl}} = \sum_{i=1}^{m_{th}} \frac{\sigma_{ari}^{\beta+3}}{B(\beta+3)(1-D_{NL})^{\alpha_i}} \quad (10)$$

式中, N_{bl} 为循环块数量。

对式(10)积分可得

$$N_{bl} = \sum_{i=1}^{m_{th}} \frac{B(\beta+3)}{(\alpha+1)} \left[1 - (1-D_{NL})^{\alpha+1} \right] \sigma_{ari}^{-(\beta+3)} \quad (11)$$

经整理可得

$$D_{NL} = 1 - \left[1 - \frac{(\alpha+1)N_{bl}}{B(\beta+3)} \sum_{i=1}^{m_{th}} \sigma_{ari}^{\beta+3} \right]^{\frac{1}{\alpha+1}} \quad (12)$$

考虑平均应力的影响并结合 SWT 方程, 有

$$\begin{cases} \sigma_{ar} = (\sigma_{\max} \sigma_a)^{\frac{1}{2}} \\ \sigma_{\max} = \sigma_a + \sigma_m \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12), 得到非线性累积损伤模型为

$$D_{NL} = 1 - \left\{ 1 - \frac{(\alpha+1)N_{bl}}{B(\beta+3)} \sum_{i=1}^{m_{th}} \left[(\sigma_{ai} + 2\sigma_{mi}) \sigma_{ai} \right]^{\frac{\beta+3}{2}} \right\}^{\frac{1}{\alpha+1}} \quad (14)$$

3.3 实测数据累积损伤分析

图 7 所示为高速列车转向架构架各测点实测数据的非线性累积损伤和线性累积损伤对比雷达图, 为便于清晰观察对比, 图中的损伤坐标轴已转换为对数坐标。由图 7 可见, 各测点处的非线性累积损伤值均小于线性累积损伤值, 表明利用线性累积损伤评价结构的疲劳偏于保守。牵引拉杆与横梁连接部测点 1-Q1 和定位转臂座测点 1-X1 处的非线性累积损伤和线性累积损伤值较大, 横向减振器座测点 1-J1 处的非线性累积损伤和线性累积损伤值较小。此外, 两种损伤累积模型计算得到的各测点处的损伤大小趋势几乎保持一致。

图 7 实测数据累积损伤对比雷达图

4 等效应力分析

等效应力是将随机应力时间历程转化为等幅应力时间历程的重要手段, 对结构实测数据进行等效应力分析可清晰对比结构各测点间的疲劳强度强弱, 从而为后续的结构优化及抗疲劳设计等提供重要的参考数据, 以下分别基于线性累积损伤和非线性累积损伤对高速列车转向架构架测点的等效应力进行分析。

4.1 基于线性累积损伤的等效应力

根据 Miner 线性累积损伤法则和材料的 $S-N$ 曲线可计算得到一个应力谱块的损伤^[21], 假设等效应力 σ_{eqv} 作用 N_0 次, 则结构损伤为

$$D_L = \frac{N_0 \sigma_{eqv}^m}{C} \quad (15)$$

令列车运行里程为 L_1 时的实测应力谱损伤为 D_1 , 在恒幅载荷作用下运行里程 L (结构全寿命里程) 产生的损伤为 D_L , 则

$$\frac{D_L}{L} = \frac{D_1}{L_1} \quad (16)$$

联立式(15)、(16)可得等效应力表达式

$$\sigma_{L,eqv} = \left[\frac{L}{L_1 N_0} \sum_{i=1}^k n_i \sigma_i^m \right]^{\frac{1}{m}} \quad (17)$$

4.2 基于非线性累积损伤的等效应力

由式(10)和 SWT 方程可得

$$\frac{\delta D_{NL}}{\delta N_{bl}} = \sum_{i=1}^{N_t} \frac{\left[(\sigma_{ai} + 2\sigma_{mi}) \sigma_{ai} \right]^{\frac{\beta+3}{2}}}{B(\beta+3)(1-D_{NL})^{\alpha_i}} \quad (18)$$

式中, N_t 为总循环量。

用等效应力表示的上述方程特殊形式为

$$\frac{\delta D_{NL}}{\delta N_{bl}} = \frac{N_t \sigma_{NL,eqv}^{\beta+3}}{B(\beta+3)(1-D_{NL})^{\alpha_i}} \quad (19)$$

由损伤等效原则可得基于连续损伤力学的等效应力幅为

$$\sigma_{NL,eqv} = \left\{ \sum_i \frac{n_i}{N_t} \left[(\sigma_{ai} + 2\sigma_{mi}) \sigma_{ai} \right]^{\frac{\beta+3}{2}} \right\}^{\frac{1}{\beta+3}} \quad (20)$$

式中, n_i 为应力幅等于 σ_a 的循环数。

4.3 实测数据等效应力分析

图 8 所示为高速列车转向架构架各测点实测数据的非线性累积损伤等效应力和线性累积损伤等效应力对比雷达图, 图中的等效应力坐标轴单位为 MPa。由图 8 可见, 各测点处的非线性累积损伤等效应力值均小于线性累积损伤等效应力值, 表明利用线性累积损伤等效应力评价结构的疲劳偏于保守。定位转臂座测点 1-X1 处的非线性累积损伤等效应力和线性累积损伤等效应力值较大, 横向减振器座测点 1-J1 处的非线性累积损伤等效应力和线性累积损伤等效应力值较小。此外, 两种方法计算得到的各测点处的等效应力大小趋势几乎保持一致。

图 8 实测数据等效应力对比雷达图

5 疲劳寿命分析

高速列车转向架构架的疲劳寿命评估可基于测点等效应力及构架材料的 $S-N$ 曲线计算实现, 由于疲劳寿命的分散性, 用常规方法作出的 $S-N$ 曲线是存活率 $p=50\%$ 的中值 $S-N$ 曲线, 其置信度也为 50%。它只能代表中值疲劳寿命与应力水平之间的关系。如果仅仅以这种曲线作为产品设计和疲劳寿命估算的依据, 则往往偏于危险。因为, 中值寿命意味着有一半的产品在达到预期的寿命前已经失效。如果用高存活率、高置信度的 $p-S-N$ 曲线进行设计和寿

命估算, 其结果将更有利于安全。 $p-S-N$ 曲线是指在给定存活率 p 下的 $S-N$ 曲线, 同时也要保证达到给定的置信度 γ 。这里存活率 p 表示在一定的应力水平 S 下, 经一定的循环次数 N 后试验的破坏概率, 而置信度则反映了这一事件本身的可信程度。

$p-S-N$ 曲线^[22]在双对数坐标上为一直线, 一般采用以下表达式

$$\lg N_p = a_p + b_p \lg \sigma \quad (21)$$

式中, a_p 、 b_p 为 $p-S-N$ 曲线系数; N_p 为对应于存活率 p 的疲劳寿命。

$$a_p = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l \lg N_j - \frac{b_p}{l} \sum_{j=1}^l \lg \sigma_j \quad (22)$$

$$b_p = \frac{\sum_{j=1}^l \lg \sigma_j \lg N_j - \frac{1}{l} \left(\sum_{j=1}^l \lg \sigma_j \right) \left(\sum_{j=1}^l \lg N_j \right)}{\sum_{j=1}^l (\lg \sigma_j)^2 - \frac{1}{l} \left(\sum_{j=1}^l \lg \sigma_j \right)^2} \quad (23)$$

式中, l 为应力水平数; $\lg N_j$ 为第 j 级应力水平的对数安全寿命; $\lg \sigma_j$ 为第 j 级应力水平的对数值。

本文在测定 $p-S-N$ 曲线时, 采用成组法与升降法相结合的方式。曲线的低应力水平点由升降法确定, 其他 3~4 级较高应力水平下的数据点用成组法确定。选取 20 根试样进行测试, 对最终的测试结果进行分析计算并将相关参数的计算结果列于表 4 中。

表 4 $p-S-N$ 曲线参数测定结果

	γ_1	p_1	γ_2	p_2	γ_3	p_3
	90%	90%	90%	95%	90%	99%
a_p	15.702		15.301		14.105	
b_p	-5.305		-5.155		-4.752	

高速列车转向架构架的疲劳寿命取决于最薄弱测点(即等效应力最大的测点)处的疲劳寿命, 将构架最薄弱测点处的非线性累积损伤等效应力及线性累积损伤等效应力代入式(21)中, 计算得到不同置信度及存活率下的高速列车转向架构架疲劳寿命, 图 9 所示为疲劳寿命计算结果对比。

由图 9 可见, 非线性及线性寿命均随着可靠度增加而逐渐降低, 在三种可靠度下的非线性疲劳寿命均大于 10^8 , 与转向架构架设计时保证的足够疲劳寿命安全裕量基本相符。此外, 在相同可靠度下, 非线性寿命大于线性寿命且当可靠度达到 99% 时的线性疲劳寿命小于 10^8 , 表明与非线性疲劳寿命评估方法相比, 线性疲劳寿命评估方法偏保守。

图9 疲劳寿命对比

6 结论

(1) 构架各测点处的非线性累积损伤值均小于线性累积损伤值, 表明利用线性累积损伤评价结构的疲劳偏于保守。牵引拉杆与横梁连接部测点 1-Q1 和定位转臂座测点 1-X1 处的非线性累积损伤和线性累积损伤值较大, 横向减振器座测点 1-J1 处的非线性累积损伤和线性累积损伤值较小。此外, 两种损伤累积模型计算得到的各测点处的损伤大小趋势几乎保持一致。

(2) 构架各测点处的非线性累积损伤等效应力值均小于线性累积损伤等效应力值, 表明利用线性累积损伤等效应力评价结构的疲劳偏于保守。定位转臂座测点 1-X1 处的非线性累积损伤等效应力和线性累积损伤等效应力值较大, 横向减振器座测点 1-J1 处的非线性累积损伤等效应力和线性累积损伤等效应力值较小。此外, 两种方法计算得到的各测点处的等效应力大小趋势几乎保持一致。

(3) 非线性及线性寿命均随着可靠度增加而逐渐降低, 在三种可靠度下的非线性疲劳寿命均大于 10^8 , 与转向架构架设计时保证的足够疲劳寿命安全裕量基本相符。在相同可靠度下, 非线性寿命大于线性寿命, 表明在线性累积损伤理论建立起来的构架疲劳寿命评估方法偏保守。

参 考 文 献

[1] PASTORCIC D, VUKELIC G, BOZIC Z. Coil spring failure and fatigue analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 99: 310-318.

[2] ZHANG X, ZHAO W, XIE Y. Fatigue failure analysis of semi-open impeller with mistuning considered[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 95: 127-139.

[3] 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.

[4] WEIBRING M, GONDECKI L, TENBERGE P. Simulation of fatigue failure on tooth flanks in consideration of pitting initiation and growth[J]. Tribology International, 2019, 131: 299-307.

[5] NAIRN J A. Direct comparison of anisotropic damage mechanics to fracture mechanics of explicit cracks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 203: 197-207.

[6] STEIMBREGER C, CHAPETTI M D. Fracture mechanics based prediction of undercut tolerances in industry[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 211: 32-46.

[7] PIPPAN R, WURSTER S, KIENER D. Fracture mechanics of micro samples: Fundamental considerations[J]. Materials & Design, 2018, 159: 252-267.

[8] SUN Q, DUI H N, FAN X L. A statistically consistent fatigue damage model based on Miner's rule[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 69: 16-21.

[9] 黄洪钟, 朱顺鹏, 汪忠来, 等. 基于剩余强度衰减退化的非线性累积损伤准则及其可靠性定寿[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(2): 323-334.

HUANG Hongzhong, ZHU Shunpeng, WANG Zhonglai, et al. Nonlinear fatigue damage cumulative rule based on strength degradation and its application to fatigue life reliability analysis[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(2): 323-334.

[10] LI Z X, CHAN T H T, KO J M. Fatigue damage model for bridge under traffic loading: Application made to Tsing Ma Bridge[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2001, 35(1): 81-91.

[11] LI Z X, CHAN T H T, KO J M. Fatigue analysis and life prediction of bridges with structural health monitoring data-Part I: Methodology and strategy[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(1): 45-53.

[12] CHAN T H T, LI Z X, KO J M. Fatigue analysis and life prediction of bridges with structural health monitoring data-Part II: Application[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(1): 55-64.

[13] 陈志为, 徐幼麟. 考虑非线性累积损伤的大跨多荷载桥梁的疲劳可靠度评估[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(2): 213-219.

- CHEN Zhiwei, XU Youlin. Fatigue reliability analysis of multi-loading suspension bridges considering nonlinear accumulative damage[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(2): 213-219.
- [14] 王会利, 秦泗凤, 谭岩斌. 考虑非线性累积损伤的桥梁疲劳寿命分析[J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(4): 362-366.
- WANG Huili, QIN Sifeng, TAN Yanbin. Bridge fatigue life analysis considering nonlinear accumulative damage[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2016, 56(4): 362-366.
- [15] 王虎, 王轲, 赵丽茹. 基于非线性累积损伤的随机振动疲劳寿命分析[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(5): 991-996, 1083.
- WANG Hu, WANG Ke, ZHAO Liru. Random vibration fatigue life analysis based on nonlinear cumulative damage[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(5): 991-996, 1083.
- [16] 薛齐文, 杜秀云. 基于非线性损伤理论的焊接疲劳设计[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 32-38.
- XUE Qiwen, DU Xiuyun. Fatigue design of welded structure based on the non-linear cumulative damage theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 32-38.
- [17] 宾洋, 于静美, 朱英凯, 等. 实时雨流计数法及其在钴酸锂电池健康状态建模中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3627-3635.
- BIN Yang, YU Jingmei, ZHU Yingkai, et al. A real-time rain flow algorithm and its application to state of health modeling for LiCoO₂ Lithium-ion batteries[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3627-3635.
- [18] 李煜佳. 钛合金 Ti-6Al-4V 的疲劳行为及疲劳设计曲线研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- LI Yujia. Investigation of fatigue properties and fatigue design diagram of Titanium Alloy Ti-6Al-4V[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.
- [19] FISSOLO A, GOURDIN C, CHEN Y Q, et al. Investigations into the cumulative fatigue life of an AISI 304L austenitic stainless steel used for pressure water reactors: Application of a double linear damage rule[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 77: 199-215.
- [20] 孙艳娜, 李立寒, 汪于凯. 沥青疲劳性能评价指标[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(6): 1102-1107.
- SUN Yanna, LI Lihan, WANG Yukai. Evaluation parameter research of Asphalt binder fatigue[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(6): 1102-1107.
- [21] 陈道云, 孙守光, 李强, 等. 基于分段函数的结构动应力谱分布估计方法[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(4): 89-94.
- CHEN Daoyun, SUN Shouguang, LI Qiang, et al. Estimation method for dynamic stress spectrum distribution of structure based on piecewise function[J]. China Railway Science, 2016, 37(4): 89-94.
- [22] 刘文飞, 刘志明, 薛海, 等. 基于样本信息重构的小子样 P-S-N 曲线拟合方法[J]. 铁道学报, 2018, 40(7): 47-53.
- LIU Wenfei, LIU Zhiming, XUE Hai, et al. Method of P-S-N curve fitting for small sample based on sample information reconstruction[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(7): 47-53.

作者简介: 陈道云, 男, 1988 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为结构疲劳可靠性。

E-mail: chendaoyun@ecjtu.edu.cn

王斌杰(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为结构疲劳可靠性。

E-mail: bjwang2@bjtu.edu.cn