

# 并列式公铁两用钢桁梁桥疲劳损伤及寿命研究\*

储胡照<sup>1</sup>, 吉军立<sup>1</sup>, 董婷婷<sup>2</sup>, 王佐才<sup>2,3</sup>, 孙晓彤<sup>2</sup>, 丁福凡<sup>2</sup>

(1. 中铁上海设计院集团合肥有限公司 合肥, 230011)

(2. 合肥工业大学土木与水利工程学院 合肥, 230009)

(3. 安徽省基础设施安全检测与监测工程实验室 合肥, 230009)

**摘要** 为研究某并列式公铁两用钢桁梁桥车桥耦合振动引起的钢桁梁桥节点构件的疲劳损伤,建立了局部节点精细化的全桥有限元模型和车辆多刚体模型,采用Craig-Bampton法求解了车桥耦合振动系统方程。首先,利用动态称重系统采集同线路全年公路交通流数据,统计分析车辆的车型、车速、车重及车间距等参数分布特征;其次,结合列车荷载模型,基于S-N曲线及Miner线性累计损伤理论,计算获得钢桁梁节点由列车和汽车通行导致的节点疲劳损伤,并基于雨流计数法对其疲劳寿命进行了预测;最后,探讨了列车速度、载重、不平整度及腐蚀对钢桁梁节点的累积疲劳损伤及疲劳寿命的影响。结果表明:节点疲劳损伤随着速度增大不呈现单一变化,随着载重增大和不平整度变差迅速增大,疲劳寿命降低明显;考虑腐蚀造成的节点刚度折减时,节点累积疲劳损伤曲线的发展是非线性的,疲劳寿命降低显著。

**关键词** 公铁两用桥梁;疲劳损伤;疲劳寿命;钢桁梁节点;车桥耦合

**中图分类号** U448.12;U24

## 引言

钢桁梁桥凭借着自重轻、刚度大、跨越能力强等特点,在我国的公铁两用桥梁中获得了广泛应用。钢桁梁节点是公铁两用钢桁梁桥的重要构件,其受力复杂并具有明显的空间效应,在车辆反复加载和卸载过程中容易产生疲劳损伤<sup>[1-2]</sup>。同时,腐蚀作用会进一步加剧节点的疲劳损伤,严重时甚至导致钢桁梁节点发生疲劳破坏而失效<sup>[3-4]</sup>。因此,开展车桥耦合振动作用下公铁两用钢桁梁桥的疲劳研究,具有重要的工程应用价值。目前,针对钢桁梁节点疲劳损伤的研究一般通过对节点构件开展疲劳试验<sup>[5-6]</sup>或采用数值方法建立节点的有限元模型进行构件的疲劳分析<sup>[7-8]</sup>。在采用数值方法时,通常仅考虑列车或汽车单独作用产生的动力效应<sup>[9-10]</sup>。

为了探究运营条件下的钢结构桥梁疲劳性能问题,国内外学者进行了相关研究。Imam等<sup>[11]</sup>通过雨流计数法统计了一座铆接铁路板梁桥纵横梁连接节点加载下的应力幅,以铆接节点的疲劳S-N曲线为参考,根据Palmgren-Miner累积损伤理论计算了全桥纵横梁节点的疲劳损伤量。Alencar等<sup>[12]</sup>在考虑车辆行驶速度变化和路面不平整度退化的情况下,

建立了钢-混组合梁桥焊接接头的实体有限元模型,采用热点应力法对变形诱导疲劳作用下焊接接头进行了寿命预测,并讨论了交通量年增长对桥梁焊接接头疲劳寿命的影响。朱志辉等<sup>[13]</sup>针对移动列车引起的铁路钢桁梁桥局部应力问题,提出了基于Ansys-Matlab联合仿真的列车-桥梁耦合动力响应分析方法,基于该方法分析了不同编组列车和不同车速条件下列车动力荷载对钢桁梁桥节点板的局部应力影响。

对于并列式公铁两用钢桁梁桥,需要关注列车、汽车在桥梁横向上非对称偏载布置的特点以及节点受力的空间特性,对节点疲劳损伤进行研究<sup>[14-16]</sup>。笔者以某并列式公铁两用钢桁梁桥为研究对象,采用有限元方法和多体动力学方法建立桥梁柔性体子系统 and 列车、汽车多刚体子系统,通过大型通用多体动力学仿真软件Universal Mechanism,采用基于Craig-Bampton法求解车桥耦合系统方程。根据实测的同线路全年公路交通流数据和列车车辆荷载模型,获得了列车、汽车作用对钢桁梁节点造成的疲劳损伤和全年车辆总通行量下的节点疲劳寿命,同时研究了列车车速、载重及不平整度对节点疲劳损伤

\* 国家自然科学基金优秀青年科学基金资助项目(51922036)

收稿日期:2022-07-04;修回日期:2022-10-16

的影响。考虑了腐蚀作用的影响,探讨了随着钢桁梁节点构件刚度退化累积疲劳损伤曲线增长的模式,并对钢桁梁节点的使用寿命进行预测。

### 1 车桥耦合振动模型

#### 1.1 钢桁梁节点精细化模型

本研究的平列式公铁两用钢桁梁桥主跨为128 m,其单线铁路和双线公路在同一水平面非对称布置,主桁断面如图1所示。桥梁主桁桁高为16 m,上、下弦杆分别采用1.45 m和1.6 m高的箱形截面,桥面系采用板厚为16 mm的正交异性板,设有U肋、板肋和倒T肋纵梁进行加劲,桥面系每间距3 200 mm设一道横隔板。

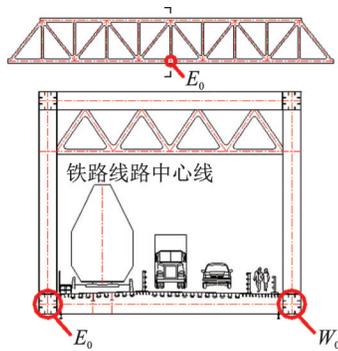


图1 主桁断面图

Fig.1 The cross section of the main truss

为了获得车辆通过时钢桁梁节点疲劳细节精确的应力时程曲线,建立钢桁梁桥及节点精细化模型如图2所示。为了考虑跨中节点的复杂应力状态,对节点局部进行更精细的网格划分。桥面板、横隔板以及加劲肋采用壳单元模拟,上、下弦杆、腹杆及纵横联结系采用梁单元模拟。桥梁钢材的弹性模量为 $2.06 \times 10^{11}$  Pa,泊松比设定为0.3。杆件单元之间以及杆件与桥面板均采用刚性连接,并在节点连接位置设置刚性区。全桥精细化有限元模型共离散为81 053个节点和83 135个单元。

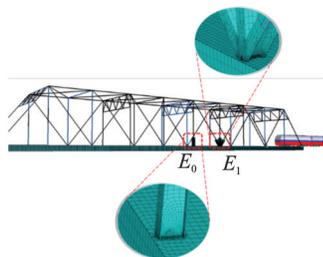


图2 钢桁梁桥及节点精细化模型

Fig.2 The refined models of the steel truss joints

#### 1.2 车辆模型

车辆视为由多个刚体组成,每个刚体有绕x,y,z轴3个平动自由度和3个转动自由度。结合实际选取列车及汽车二系悬挂系统刚度和阻尼参数,通过不同自由度铰和力元连接各个刚体,建立车辆多刚体模型并作为车桥系统中的子系统。

由于桥梁实际运营中的荷载形式往往是车流,需要关注车流对结构的作用效应<sup>[17-19]</sup>。为获得桥梁运营期内交通状况,利用动态称重系统对同线路公路交通流数据进行采集,该系统通过安装在主梁上的应变传感器,测定车辆过桥时的动态响应,并通过内部算法识别车辆的车速、轴重及车间距等信息<sup>[20]</sup>。通过统计分析一定时间内过往车辆的车型、车速、车重及车间距等参数分布特征,将汽车车辆划分为6种车型,如表1所示。实测的车型分布如图3所示。根据车流量统计信息,本研究进一步利用Matlab软件对交通流数据进行概率密度函数拟合,

表1 公路车型划分

Tab.1 Classification of highway vehicles

车型编号	车辆类别	图示
V <sub>1</sub>	2轴轿车	
V <sub>2</sub>	2轴货车	
V <sub>3</sub>	3轴货车	
V <sub>4</sub>	4轴货车	
V <sub>5</sub>	5轴货车	
V <sub>6</sub>	6轴货车	

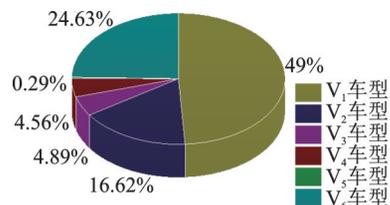


图3 实测的车型分布图

Fig.3 The distribution of highway vehicles of different types

生成各类型车辆的车速、车重及车间距概率密度曲线。其中:实测的  $V_1$  和  $V_2$  车型的车速分布分别如图 4,5 所示;实测的  $V_1$  和  $V_2$  车型的车重分布分别如图 6,7 所示;实测的车辆间距分布如图 8 所示。根据不同车型各参数的概率分布,采用 Monte-Carlo 法生成桥梁服役期内汽车车流模型,作为本研究公铁

两用桥的公路荷载模型,获得的实测车型与模拟车型对比如图 9 所示。列车荷载选择 2 节货运机车 + 8 节敞车的列车编组形式建立列车模型,作为铁路荷载形式,其中机车车体和空载敞车车体的单节质量分别为 81 t 和 23 t。图 10 为建立的列车和汽车的多刚体模型示意图。

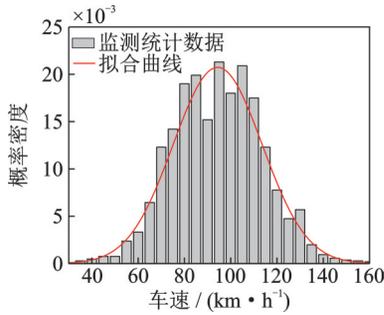


图 4  $V_1$  车型速度分布

Fig.4 The speed distribution of  $V_1$

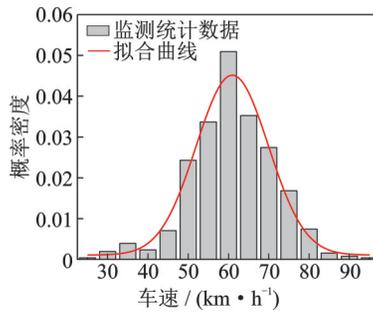


图 5  $V_2$  车型速度分布

Fig.5 The speed distribution of  $V_2$

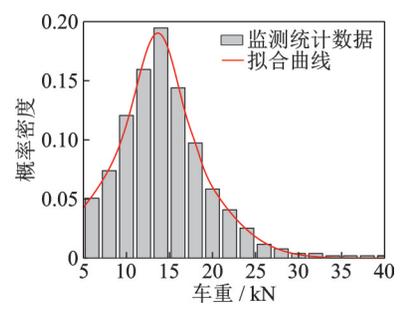


图 6  $V_1$  车型车重分布

Fig.6 The weight distribution of  $V_1$

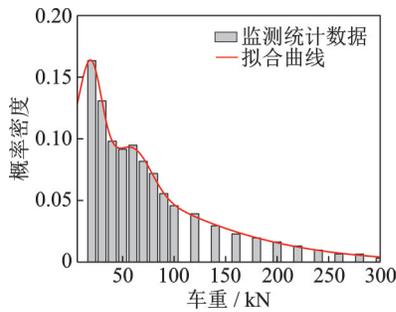


图 7  $V_2$  车型车重分布

Fig.7 The weight distribution of  $V_2$

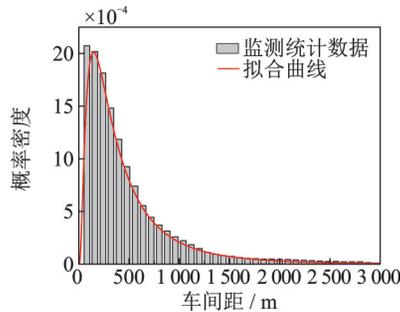
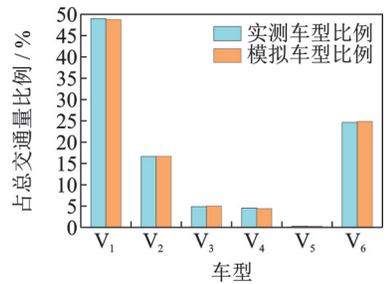


图 8 车辆间距分布

Fig.8 The distribution of the distance between vehicles



9 实测车型与模拟车型对比

Fig.9 The comparison between the measured and the simulated vehicle type

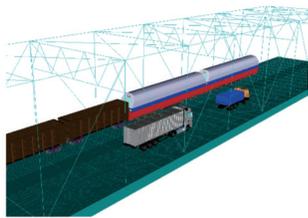


图 10 车辆多刚体模型

Fig.10 The multi-body model of the freight train and vehicles

## 2 基于 Craig-Bampton 法的车桥耦合振动方程求解

Craig-Bampton 法<sup>[21]</sup>为固定界面模态综合法的一种,该方法可组合桥梁有限元柔性体子系统和车辆多刚体子系统进行车桥耦合运动方程的建立。首先,生成车桥系统中各个子系统的刚度矩阵  $K^i$  和质量矩阵  $M^i$ ,分别为

$$K^i = \begin{bmatrix} K_{II} & K_{IJ} \\ K_{JI} & K_{JJ} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M^i = \begin{bmatrix} M_{II} & M_{IJ} \\ M_{JI} & M_{JJ} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:上标  $i$  表示第  $i$  个子系统; $K_{II}, K_{IJ}, K_{JI}, K_{JJ}$  和  $M_{II}, M_{IJ}, M_{JI}, M_{JJ}$  分别为第  $i$  个子系统刚度矩阵和质量矩阵的分块;分块矩阵的下标  $I, J$  表示行列数。

假设车桥系统包括  $\alpha$  和  $\beta$  两个子系统,可分别组合  $\alpha$  和  $\beta$  子系统的子刚度矩阵和质量矩阵,形成车桥系统整体刚度矩阵和整体质量矩阵,系统整体刚度矩阵  $\bar{K}$ 、质量矩阵  $\bar{M}$  分别为

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K^\alpha & 0 \\ 0 & K^\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} M^\alpha & 0 \\ 0 & M^\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $K^\alpha, M^\alpha, K^\beta, M^\beta$  分别为子系统  $\alpha$  和  $\beta$  的刚度和

质量矩阵。

该方法首先通过式(5)求解得到固定界面低阶主模态

$$K_{ii}^i \phi_{ii}^i = \omega^2 M_{ii}^i \phi_{ii}^i \quad (5)$$

其中： $\phi_{ii}^i$ 为第*i*个子系统的固定界面主模态； $K_{ii}^i$ ， $M_{ii}^i$ 分别为其刚度、质量矩阵的分块矩阵，下标表示行列； $\omega$ 为对应的圆频率。

由式(6)可得子系统全部界面坐标的约束模态

$$K^i \psi_c^i = R^i \quad (6)$$

其中： $\psi_c^i$ 为第*i*个子系统全部界面坐标的约束模态，包括刚体模态； $K^i$ ， $R^i$ 分别为子系统刚度和约束矩阵。

根据固定界面主模态和约束模态矩阵可组合形成子系统 $\alpha, \beta$ 的变换矩阵 $\Phi_{CB}^\alpha$ 和 $\Phi_{CB}^\beta$ ，进一步得到系统整体的变换矩阵 $\Phi_{CB}$ ，即

$$\Phi_{CB} = \begin{bmatrix} \Phi_{CB}^\alpha & 0 \\ 0 & \Phi_{CB}^\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

对系统整体刚度、质量矩阵进行第1次坐标变换，变换后的模态刚度矩阵 $\tilde{K}$ 、模态质量矩阵 $\tilde{M}$ 分别为

$$\tilde{K} = \Phi_{CB}^T \bar{K} \Phi_{CB} = \begin{bmatrix} \tilde{K}^\alpha & 0 \\ 0 & \tilde{K}^\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\tilde{M} = \Phi_{CB}^T \bar{M} \Phi_{CB} = \begin{bmatrix} \tilde{M}^\alpha & 0 \\ 0 & \tilde{M}^\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据界面位移连续性条件连接各个子系统，通过式(10)、式(11)进行独立坐标变换，可得到经Craig-Bampton法缩减后的整体刚度矩阵 $\tilde{K}_{CB}$ 和质量矩阵 $\tilde{M}_{CB}$

$$\tilde{K}_{CB} = T^T \tilde{K} T \quad (10)$$

$$\tilde{M}_{CB} = T^T \tilde{M} T \quad (11)$$

其中： $T$ 为考虑几何协调条件的坐标变换矩阵。

将 $\tilde{K}_{CB}$ ， $\tilde{M}_{CB}$ 代入式(12)得到结构的独立广义坐标 $q$ ，进一步由式(13)求得物理坐标下系统整体的振型 $\tilde{u}$

$$(\tilde{K}_{CB} - \omega_{CB}^2 \tilde{M}_{CB})q = 0 \quad (12)$$

$$\tilde{u} = \Phi_{CB} T q \quad (13)$$

其中： $\omega_{CB}$ 为系统整体广义坐标对应的圆频率。

基于车辆与桥梁的相互作用原理，考虑轨道作用，可建立桥梁有限元模型和车辆多刚体模型，将其作为车桥系统中的多个子系统，组合各个子系统的模态形成系统整体模态，进行车桥耦合方程求解。

基于有限元理论，根据系统整体振型 $\tilde{u}$ 可获取单元应力 $\sigma_i^e$

$$\sigma_i^e = D_i^e B_i^e(x_i^e) u_i^e \quad (14)$$

其中： $D_i^e, B_i^e$ 分别为单元刚度和几何矩阵； $x_i^e$ 为单元节点坐标； $u_i^e$ 为单元节点位移。

### 3 节点疲劳损伤分析及寿命预测

#### 3.1 S-N曲线和Miner线性累计损伤理论

S-N曲线是衡量材料或构件抗疲劳能力的依据，其中： $S$ 为疲劳强度，可由应力、应变或加载力的形式表示； $N$ 为循环次数，两者的关系为

$$N(\Delta\sigma)^m = C \quad (15)$$

其中： $N$ 为材料或构件疲劳破坏时对应的加载次数； $\Delta\sigma$ 为加载于疲劳细节的应力幅； $C$ 为疲劳细节常数； $m$ 为S-N曲线的斜率负倒数，其取值与材料特性相关。

桥梁构件在车桥耦合振动作用下实际承受的是随机荷载谱，根据Miner疲劳损伤理论，假定应力谱中各个应力幅循环均会导致结构产生疲劳损伤，且疲劳损伤可在数值上叠加，即

$$FD = \sum_1^k FD_i = \sum_1^k \frac{n_i}{N_i} \quad (16)$$

其中： $FD_i$ 为应力谱中第*i*个应力幅 $\Delta\sigma_i$ 循环导致的疲劳损伤； $n_i$ 为该应力幅实际循环次数； $N_i$ 为S-N曲线中该应力幅对应的循环次数；疲劳应力谱中应力幅共*k*个，则*i*=1, 2, ..., *k*。

变幅应力产生的总疲劳损伤用FD表示，当FD=1时，认为材料或构件发生疲劳破坏，结合年度损伤量即可进行节点的使用寿命预测。钢桁梁节点疲劳损伤与疲劳寿命预测流程如图11所示。

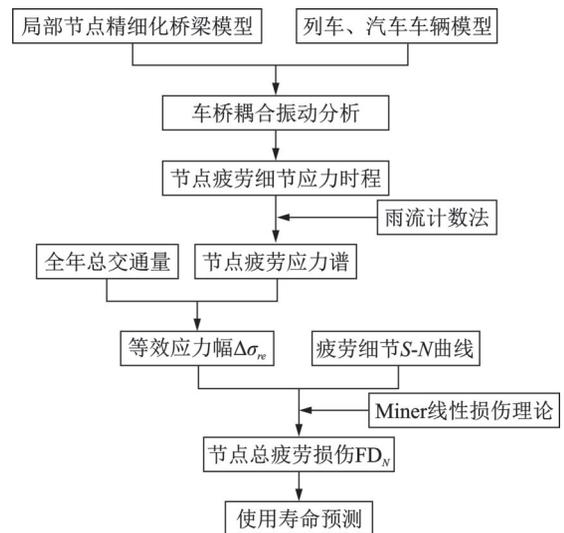


图11 钢桁梁节点疲劳损伤与疲劳寿命预测流程图  
Fig.11 Flowchart for calculation of fatigue damage and service life of the steel truss joints

### 3.2 节点疲劳损伤及疲劳寿命预测

车辆过桥时钢桁梁跨中及附近节点的动力响应较大,由于平列式钢桁梁桥线路非对称布置的特点,位于跨中腹杆与桥面板交接处双侧两节点  $E_0$  和  $W_0$  (见图 1)因列车上桥引起的动挠度差值为 2.45 mm,约占单侧节点的 11.84%,铁路侧节点的下挠程度明显高于公路侧,因此笔者将重点开展跨中铁路侧节点  $E_0$  的疲劳性能研究。以 C64 型敞车车厢的列车和 6 种车型典型汽车为例,列车运行速度设置为 70 km/h,敞车载重为 60 t,汽车按随机车流加载。另外,轨道不平顺度设置为 6 级,道路路面平整度设置为非常好。经计算,由各车辆通过引起节点  $E_0$  和  $E_1$  的单趟疲劳损伤如表 2 所示。由表 2 可知,列车导致的两种类型疲劳损伤显著高于汽车,且  $V_5$  和  $V_6$  车型的货车相较其他车型汽车引起的单趟疲劳损伤较大。

表 2 节点  $E_0$  和  $E_1$  单趟疲劳损伤

Tab.2 The fatigue damage of joints  $E_0$  and  $E_1$

研究对象	车辆类型	节点 $E_0$	节点 $E_1$
列车	机车+C64 敞车	$5.86 \times 10^{-8}$	$5.98 \times 10^{-8}$
汽车	$V_1$	$2.43 \times 10^{-10}$	$2.34 \times 10^{-10}$
	$V_2$	$6.29 \times 10^{-10}$	$6.12 \times 10^{-10}$
	$V_3$	$9.13 \times 10^{-10}$	$8.30 \times 10^{-10}$
	$V_4$	$4.84 \times 10^{-10}$	$4.51 \times 10^{-10}$
	$V_5$	$1.85 \times 10^{-9}$	$1.63 \times 10^{-9}$
	$V_6$	$1.26 \times 10^{-9}$	$1.28 \times 10^{-9}$

根据该钢桁梁桥铁路货运专用线年运输量可确定该线路货运专列的通行次数,同时结合同一线路公路交通荷载调查数据,可得到公铁两用桥的公路类型汽车的年总通行量,进一步可得到钢桁梁节点的年疲劳损伤量。通过计算得到节点  $E_0$  的疲劳寿命为 180 年,节点  $E_1$  的疲劳寿命为 177 年。

## 4 疲劳损伤及寿命影响因素分析

### 4.1 列车速度

为研究列车运行速度对钢桁梁节点疲劳损伤及寿命的影响,假设列车分别以 50~100 km/h 共 6 组车速行驶,不同车速下节点的疲劳损伤如图 12 所示。由图 12 可知,随着列车速度的变化,车辆引起的钢桁梁节点疲劳细节的单趟疲劳损伤并未呈现单调变化,在所研究的车速范围内,疲劳损伤计算量在

速度为 60 和 90 km/h 时相对较大。不同车速下节点疲劳寿命预测如表 3 所示,可以看出,车速对疲劳寿命的影响不显著。

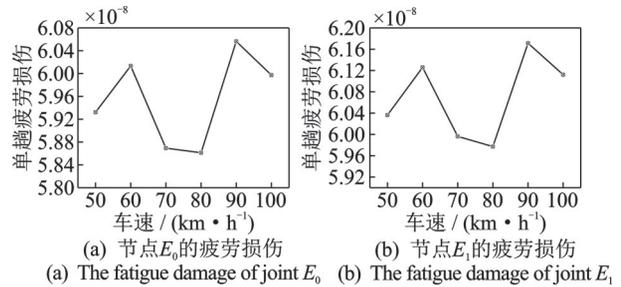


图 12 不同车速下节点的疲劳损伤

Fig.12 The fatigue damage of the joints with various speeds

表 3 不同车速下节点疲劳寿命预测

Tab.3 The fatigue life of the joints with various speeds

车速/(km·h <sup>-1</sup> )	疲劳寿命/年	
	节点 $E_0$	节点 $E_1$
50	178	175
60	176	173
70	180	177
80	180	177
90	175	172
100	176	174

### 4.2 车厢载重

为研究列车车重对钢桁梁节点疲劳损伤及寿命的影响,假设列车车厢载重以 50~90 t 依次增加,同载重下节点的疲劳损伤如图 13 所示。由图 13 可知,随着列车车厢载重增大,车辆过桥导致钢桁梁节点产生的疲劳损伤量迅速增加。

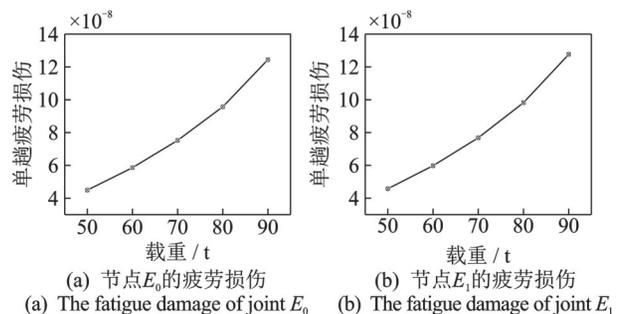


图 13 不同载重下节点的疲劳损伤

Fig.13 The fatigue damage of the joints with various weights

不同载重下节点疲劳寿命预测如表 4 所示,可以看出,随着载重的增加,节点疲劳寿命降低明显,当载重为 90 t 时,节点  $E_0$  和  $E_1$  的疲劳寿命分别降至 90 年和 88 年。

表4 不同载重下节点疲劳寿命预测

**Tab.4 The fatigue life of the joints with various weight**

载重/t	疲劳寿命/年	
	节点 $E_0$	节点 $E_1$
50	227	224
60	180	177
70	144	141
80	115	112
90	90	88

4.3 不平整度影响

采用美国标准轨道谱(American association of railroads, 简称 ARR)和我国《车辆振动输入路面平度表示方法》(GB/T 7031—1986)建议的功率谱密度函数,组合铁路轨道不平顺度与公路路面不平顺度,将桥面总路况划为5个等级,依次为“非常好”、“好”、“一般”、“差”和“非常差”,路况组合形式如表5所示。不同路况下节点的疲劳损伤如图14所示,由图14可知,不同类型节点疲劳损伤均随平整度变差迅速增大。不同平整度等级条件下的节点疲劳寿命预测如表6所示,可以看出,当路况平整度等级为“非常差”时,钢桁梁节点 $E_0$ 和 $E_1$ 的计算寿命分别降低至52年和45年,远低于该桥梁设计的基准期。

表5 路况组合形式

**Tab.5 Unevenness combination of the railway and the highway**

总路况等级	组合形式	
	铁路路况等级	公路路况等级
非常好	6级	非常好
好	5级	好
一般	3级	一般
差	2级	差
非常差	1级	非常差

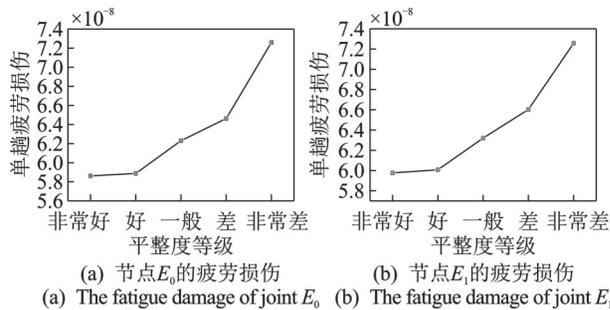


图14 不同路况下节点的疲劳损伤

Fig.14 The fatigue damage of the joints with various unevenness levels

表6 不同平整度等级条件下的节点疲劳寿命预测

**Tab.6 The fatigue life of the joints with various unevenness levels**

平整度等级	疲劳寿命/年	
	节点 $E_0$	节点 $E_1$
非常好	180	177
好	170	167
一般	150	149
差	118	112
非常差	52	45

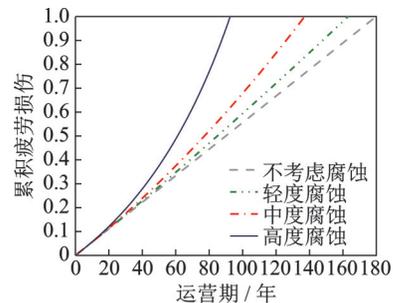
4.4 腐蚀影响

桥梁在实际运营期内受腐蚀环境影响,钢节点构件刚度会随时间产生一定折减,导致节点承载力减弱<sup>[22]</sup>。定义节点的刚度损伤系数 $\lambda_t$ 为

$$\lambda_t = 1 - K_t/K_0 \quad (17)$$

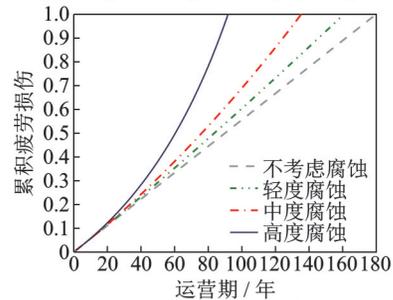
其中: $K_t, K_0$ 分别为使用时间 $t$ 对应的构件损伤后的刚度和构件的原始刚度。

将腐蚀分为轻度、中度、高度腐蚀3个等级,并考虑钢材保护层的损耗时间,研究钢桁梁节点累积疲劳损伤量的发展情况,不同腐蚀等级下节点的累积损伤发展如图15所示。由图15可知,当考虑腐蚀引起的节点刚度折减时,节点疲劳累计损伤曲线以非线性的行驶发展,腐蚀等级越强,曲线发展的速率



(a) 节点 $E_0$ 的累积损伤发展

(a) Fatigue damage development of joint  $E_0$



(b) 节点 $E_1$ 的累积损伤发展

(b) Fatigue damage development of joint  $E_1$

图15 不同腐蚀等级下节点的累积损伤发展

Fig.15 Fatigue damage development of the joints at different corrosion levels

越快。考虑腐蚀影响的节点疲劳寿命预测如表7所示,对比不考虑腐蚀的情况,节点使用寿命显著缩小。当腐蚀程度分别为低度腐蚀、中度腐蚀和高度腐蚀时,节点使用寿命分别缩短了约9%,23%和48%,尤其对于高度腐蚀,构件疲劳寿命显著降低,此时的节点预测寿命要低于桥梁设计使用期限。

表7 考虑腐蚀影响的节点疲劳寿命预测

Tab.7 The fatigue life of the joints when considering corrosion

腐蚀等级	疲劳寿命/年	
	节点 $E_0$	节点 $E_1$
轻度	164	161
中度	138	136
高度	93	92

## 5 结 论

1) 车辆过桥时钢桁梁跨中及附近节点的动力响应较大,且铁路侧节点的动挠度大于公路侧的节点动挠度。相对于汽车,列车单次过桥引起的钢桁梁节点疲劳损伤也更大。

2) 钢桁梁节点疲劳损伤随列车车速的增加不呈单一变化趋势,列车车速对钢桁梁节点的疲劳损伤和疲劳寿命影响较小。

3) 随着列车载重的增加,节点疲劳损伤增大,节点疲劳寿命降低。当载重为90 t时,节点 $E_0$ 和 $E_1$ 的疲劳寿命分别降至90年和88年。

4) 考虑轨道不平顺度和公路不平整度的同时影响时,路况等级越差,钢桁梁节点疲劳细节的损伤累积发展速度越快,疲劳寿命显著降低。当路况平整度等级为“非常差”时,钢桁梁节点 $E_0$ 和 $E_1$ 的计算寿命分别降低至52年和45年,远低于该桥梁设计基准期。

5) 考虑腐蚀引起的刚度折减时,钢桁梁节点累积疲劳损伤曲线的发展是非线性的,腐蚀程度越高,累积损伤曲线发展越迅速。考虑腐蚀作用时钢桁梁节点使用寿命显著降低,当为高度腐蚀时,疲劳寿命降低48%。

## 参 考 文 献

[1] 孙建鹏,周鹏,刘银涛,等.中国公铁两用桥主桥结构体系分析与展望[J].土木与环境工程学报,2020,42(2):80-94.  
SUN Jianpeng, ZHOU Peng, LIU Yintao, et al. De-

velopment trend and analysis of main bridge about the rail-road bridge in China[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(2): 80-94. (in Chinese)

- [2] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述:2021[J].中国公路学报,2021,34(2):1-97.  
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 1-97. (in Chinese)
- [3] LI H L, WU G. Fatigue evaluation of steel bridge details integrating multi-scale dynamic analysis of coupled train-track-bridge system and fracture mechanics [J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 3261.
- [4] PUERTO-TCHEMODANOVA S, MASHAYEKHI M, SANAYEI M, et al. Multiaxial fatigue assessment of complex steel connections: a case study of a vertical-lift gussetless truss bridge [J]. Engineering Structures, 2021, 235: 111996.
- [5] CUI C, ZHANG Q H, BAO Y, et al. Fatigue performance and evaluation of welded joints in steel truss bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 148: 450-456.
- [6] 肖林,刘丽芳,李小珍,等.钢桁梁焊接构造细节的疲劳性能及基于XFEM的疲劳寿命评估[J].铁道学报,2018,40(4):113-119.  
XIAO Lin, LIU Lifang, LI Xiaozhen, et al. Fatigue performance of weld detail of steel truss girder and fatigue life estimation based on XFEM[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(4): 113-119. (in Chinese)
- [7] 卫星,李俊,强士中.钢桁梁整体节点典型构造细节的抗疲劳性能分析[J].公路交通科技,2009,26(7):85-89.  
WEI Xing, LI Jun, QIANG Shizhong. Fatigue performance of typical structure detail of monolithic joints in steel trusses[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(7): 85-89. (in Chinese)
- [8] MASHAYEKHI M, SANTINI-BELL E. Fatigue assessment of a complex welded steel bridge connection utilizing a three-dimensional multi-scale finite element model and hotspot stress method[J]. Engineering Structures, 2020, 214: 110624.
- [9] CHENG Z N, ZHANG N, SUN Q K, et al. Research on simplified calculation method of coupled vibration of vehicle-bridge system[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 9929470.

- [10] 蔡小杨, 李小珍, 王雷, 等. 大跨度公轨两用钢桁梁斜拉桥车桥耦合效应及影响参数研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 2097-2104.  
CAI Xiaoyang, LI Xiaozhen, WANG Lei, et al. Vehicle-bridge dynamics and its influencing factors for long-span cable-stayed truss bridges carrying both highway and light rail[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(8): 2097-2104.(in Chinese)
- [11] IMAM B M, RIGHINIOTIS T D, CHRYSSANTHOPOULOS M K. Numerical modelling of riveted railway bridge connections for fatigue evaluation[J]. Engineering Structures, 2007, 29(11): 3071-3081.
- [12] ALENCAR G, DE JESUS A M P, CALÇADA R A B, et al. Fatigue life evaluation of a composite steel-concrete roadway bridge through the hot-spot stress method considering progressive pavement deterioration [J]. Engineering Structures, 2018, 166: 46-61.
- [13] 朱志辉, 陈伟, 龚威, 等. 基于联合仿真方法的铁路钢桁梁桥局部应力分析[J]. 铁道学报, 2021, 43(7): 144-152.  
ZHU Zhihui, CHEN Wei, GONG Wei, et al. Local stress analysis of railway steel truss bridge based on co-simulation method[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(7): 144-152.(in Chinese)
- [14] 李小珍, 强士中. 大跨度公铁两用斜拉桥车桥动力分析[J]. 振动与冲击, 2003, 22(1): 6-9, 19, 25.  
LI Xiaozhen, QIANG Shizhong. Vehicle-bridge dynamic analysis for long span highway and railway bi-purpose cable-stayed bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2003, 22(1): 6-9, 19, 25.(in Chinese)
- [15] 刘高, 陈上有, 王昆鹏, 等. 跨海公铁两用桥梁车-桥-风浪流耦合振动研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(4): 72-87.  
LIU Gao, CHEN Shangyou, WANG Kunpeng, et al. Study on coupling vibration of vehicle-bridge-wind-wave-current system of rail-cum-road sea bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(4): 72-87. (in Chinese)
- [16] 张媛, 田子波, 王东起, 等. 汽车和列车荷载共同作用下公铁两用桥的动力响应[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2020, 35(3): 69-74.  
ZHANG Yuan, TIAN Zibo, WANG Dongqi, et al. Dynamic responses of the road-rail bridge under the vehicle and train load[J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2020, 35(3): 69-74.(in Chinese)
- [17] HO H, NISHIO M. Evaluation of dynamic responses of bridges considering traffic flow and surface roughness [J]. Engineering Structures, 2020, 225: 111256.
- [18] 阮欣, 周军勇, 石雪飞. 随机车流作用下多塔斜拉桥总体荷载响应特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 25-30, 108.  
RUAN Xin, ZHOU Junyong, SHI Xuefei. Overall vehicle load response characteristic of multi-span cable-stayed bridge under stochastic traffic flow[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(1): 25-30, 108.(in Chinese)
- [19] 祝志文, 黄炎, 文鹏翔, 等. 随机车流下钢-UHPC组合正交异性桥面疲劳性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 200-209.  
ZHU Zhiwen, HUANG Yan, WEN Pengxiang, et al. Investigation on fatigue performance of orthotropic bridge deck with steel-UHPC composite system under random traffic flows[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 200-209.(in Chinese)
- [20] 邓露, 罗鑫, 凌天洋, 等. 基于卷积神经网络的多车桥梁动态称重算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(1): 33-41.  
DENG Lu, LUO Xin, LING Tianyang, et al. Bridge weigh-in-motion algorithm considering multi-vehicle based on convolutional neural network [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(1): 33-41.(in Chinese)
- [21] CRAIG R R, BAMPTON M C C. Coupling of substructures for dynamic analysis [J]. AIAA Journal, 1968, 6(7): 1313-1319.
- [22] XU J, CHEN W Z. Behavior of wires in parallel wire stayed cable under general corrosion effects[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 85: 40-47.



**第一作者简介:** 储胡照, 男, 1988年2月生, 高级工程师。主要研究方向为道路桥梁工程  
E-mail: 403925672@qq.com

**通信作者简介:** 王佐才, 男, 1982年12月生, 博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桥梁结构健康监测、非线性结构模型修正及车桥耦合振动。

E-mail: wangzuocai@hfut.edu.cn