

动态称重数据驱动的桥梁疲劳车辆模型优化

孙 琼¹, 魏明光^{2,3}, 杨东辉⁴

[1. 上海市道路运输事业发展中心, 上海市 200023; 2. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092;

3. 上海市预制技术开发有限公司, 上海市 200092; 4. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024]

摘 要: 为提升区域交通差异下桥梁疲劳损伤评估的准确性, 提出一种基于动态称重数据(WIM)的疲劳车辆模型优化方法。针对现行规范中固定参数模型在区域适应性不足的问题, 引入疲劳损伤比作为核心指标, 以跨中截面为关键分析位置, 建立以疲劳损伤比趋近于 1 为目标的优化函数, 并通过遗传算法协同标定车辆轴数构型、轴重比和轴距等参数, 构建 3 轴/4 轴区域适应性模型。以上海市某高架桥半年 WIM 数据为案例的分析表明: 规范模型Ⅲ的疲劳损伤比普遍高于 2.0, 显著高估了实际损伤; 优化后的 4 轴模型将疲劳损伤比稳定在 1.0~1.2 区间内。由此证实所提方法可有效降低模型误差, 为区域差异化交通荷载下的桥梁疲劳寿命评估提供精准理论支撑。

关键词: 动态称重数据; 疲劳损伤比; 疲劳损伤等效; 车辆荷载模型; 遗传算法

中图分类号: U441⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)10-0068-06

Weigh-in-Motion Data-driven Optimization of Bridge Fatigue Vehicle Models

SUN Qiong¹, WEI Mingguang^{2,3}, YANG Donghui⁴

[1. Shanghai Municipal Road Transportation Development Center, Shanghai 200023, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design

Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Municipal Prefabrication Technology Development Co., Ltd.,

Shanghai 200092, China; 4. Dalian University of Technology, Liaoning 116024, China]

Abstract: To enhance the accuracy of fatigue damage assessment for bridges under regional traffic differences, an optimization method for fatigue vehicle models based on weigh-in-motion (WIM) data is proposed. In response to the insufficient regional adaptability of the fixed parameter model in current standards, the fatigue damage ratio is introduced as the core indicator. With the mid-span section as the key analysis position, an optimization function is established with the goal of the fatigue damage ratio approaching 1. And through genetic algorithms, the parameters such as the number of vehicle axles configuration, axle load ratio and wheelbase are collaboratively calibrated to construct a 3-axle / 4-axle regional adaptability model. Taking the half-year WIM data of a certain elevated bridge in Shanghai as a case, the analysis shows that the fatigue damage ratio of the standard model Ⅲ is generally higher than 2.0, significantly overestimating the actual damage. After optimization, the four-axle model stabilizes the fatigue damage ratio within the range of 1.0 to 1.2. The conclusion confirms that this method can effectively reduce the model errors and provide the precise theoretical support for the fatigue life assessment of bridges under regional differentiated traffic loads.

Keywords: weigh-in-motion (WIM) data; fatigue damage ratio; fatigue damage equivalence; vehicle load model; genetic algorithm

0 引 言

中国中小跨径桥梁中, 钢桥和钢混组合梁桥因施工便捷、经济性突出等优势, 在在役桥梁中占比很

高。然而, 这类桥梁在其整个服役期内, 持续承受着由过往车辆产生的动态交通荷载作用, 疲劳损伤问题尤为突出^[1], 如何评估这类桥梁在交通荷载下的疲劳损伤一直以来都是一个难题。桥梁设计规范中一般采用标准疲劳车来评估这类桥梁的累积疲劳损伤^[2]。然而, 不同区域交通荷载差异性较大, 这会导致使用具有固定参数设置的单一模型进行疲劳损伤分析时会产生较大的误差, 尤其在重交通路段, 可能会严重低估实际损伤^[3-4]。

收稿日期: 2025-07-07

基金项目: 上海市交通科研项目(JT2024-KY-001)

作者简介: 孙琼(1976—), 女, 本科, 高级工程师, 从事桥梁前期管理工作。

通信作者: 杨东辉(1985—), 男, 博士, 教授, 从事桥梁监测与评估工作。电子信箱: dhyang@dlut.edu.cn

目前国内外学者已经开展了大量基于动态称重数据(WIM)的疲劳车辆模型研究。童乐为等^[5]通过上海市内环线中的交通数据,得到了由6类模型车辆组成的荷载频值谱,为相似城市道路桥梁的疲劳损伤验算提供了参考。周泳涛等^[6]通过实地调查高速公路运营的车辆荷载,推导了符合我国国情的公路钢桥疲劳标准荷载。朱劲松等^[7]基于车桥耦合效应分析,采用多种模型对疲劳车辆荷载作用下的疲劳损伤度和疲劳寿命进行了评估。Han等^[8]结合车辆轴重增长参数,分析了车辆荷载对疲劳可靠性的影响。Deng等^[9]提出了基于钢-混组合梁桥疲劳损伤分析的车辆限重确定方法。Laman等^[10]构建了差异化疲劳车辆模型分析体系,以适配多轴系复杂交通场景下的桥梁抗疲劳设计需求。Deng等^[11]采用分类优化方法,构建了轻、重交通对应的3轴、4轴疲劳车辆模型。

然而,上述既有研究在针对配筋混凝土梁桥的承载能力进行评定时,所选用的评估车辆荷载模型是基于规范设计阶段假定的数学分布构建的,由于地区差异性和交通水平的不断增长,规范中的评估车辆荷载模型在不同地区的适用性较差。

本文提出了一种基于动态称重数据的精细化桥梁疲劳评估模型构建方法,通过定义评估模型与实际交通车流所致疲劳损伤的比值为疲劳损伤比,引入遗传算法,建立以标准跨径桥梁疲劳损伤比趋近于1为收敛条件的目标函数,进而生成具有区域交通适应性的疲劳车辆模型。

1 工程概况

上海市某高架桥呈东西走向,由186孔简支混凝土梁桥与简支钢混组合梁桥组成,桥面总宽为17 m,空心板数量为每孔16片主梁。该桥对于完善国道主干线、市高速公路网、拓展都市区发展空间具有重要意义。

2 桥梁疲劳荷载分析理论

2.1 累积损伤准则及应力幅等效

在车辆荷载循环作用下,桥梁构件的渐进性损伤累积遵循线性累积损伤准则^[12]。其假设:构件在第*i*级应力幅为 $\Delta\sigma_i$,作用下的疲劳寿命为 N_i ;实际承受 n_i 次循环时,产生的疲劳损伤分量为 $D_i = \frac{n_i}{N_i}$;总疲劳损伤度*D*为各应力级损伤的线性叠加:

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

当 $D \geq 1$ 时判定为结构失效。该准则有3个关键假设:损伤独立性、顺序无关和阈值限制。为简化变幅疲劳分析,工程界提出了等效应力幅 $\Delta\sigma_{eq}$ 概念,将多级应力循环等效为单一应力幅的常幅循环。定义等效条件为疲劳损伤等效原则,即原变幅荷载与等效常幅荷载的总损伤相等,其表达式为:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{N_{eq}} \quad (2)$$

综合*S-N*曲线方程,可推导得到等效应力幅 $\Delta\sigma_{eq}$ 的表达式:

$$\Delta\sigma_{eq} = \left(\frac{\sum_{i=1}^k n_i (\Delta\sigma_i)^m}{\sum_{i=1}^k n_i} \right)^{1/m} \quad (3)$$

该公式量化了复杂荷载作用下关注位置复杂荷载谱的等效损伤效应,如今已成为疲劳荷载效应评估的核心工具。

2.2 现有疲劳车辆模型的简化形式

目前应用较为广泛的公路桥梁疲劳荷载有车辆荷载频值谱、标准疲劳车模型、标准活载中的某辆重车这3种简化形式^[13]。

2.2.1 车辆荷载频值谱

该形式是基于某地大量交通调查数据分析获得的,通常以该地区典型车辆类别及其各自的发生概率来表征。获取流程为:基础数据获取→车辆特征分类→频值谱建模→等效参数转化。

(1)基础数据获取。通过桥梁动态称重系统(WIM)采集目标桥梁的汽车荷载特征参数,核心数据包括:车型配置信息、车轴轴重信息、车轴距距信息以及车流量信息等。

(2)车辆特征分类。依据轴数(一般为2~6轴)、轴距配置等特征参数,将车流离散化为5类典型车辆荷载模式。

(3)频值谱建模。针对每类车型,需分别获取其轴重和轴距的取值及其对应的分布频率。

(4)等效参数转化。依据*S-N*曲线理论、Miner准则和疲劳损伤等效原则,计算每种典型车型的等效轴重 Q_{eq} 和等效轴距 L_{eq} 。

等效轴重 Q_{eq} 的计算式为:

$$Q_{eq} = \left(\frac{\sum n_i Q_i^m}{N} \right)^{1/m} \quad (4)$$

式中: Q_{eq} 为等效轴重; m 为材料*S-N*曲线斜率参数;

n_i 为实测轴重频次; Q_i 为实测轴重; N 为设计基准期内轴载作用次数。

等效轴距 L_{ej} 计算式为:

$$L_{ej} = \sum f_{ij} L_{ij} \quad (5)$$

式中: L_{ej} 为该类典型车的第 j 个轴距; f_{ij} 为第 i 辆车中第 j 个轴距为 L_{ij} 的频率; L_{ij} 为第 i 辆车中第 j 个轴距。

2.2.2 标准疲劳车模型

该模型依据损伤等效原理,将实际监测获得的车辆荷载频值谱数据或服役期内的真实交通荷载,经当量化处理后,转化为具有等效损伤效应的标准单车荷载模式。

2.2.3 标准活载中的某辆重车

该形式常用于桥梁结构的静力强度设计。原理是标准疲劳车模型与在静力设计时所采用的基准重型车辆荷载,在等效替代实际交通荷载对桥梁结构的效应层面具有一致性。

2.3 现行规范中的疲劳荷载计算模型

我国现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)(简称《规范》)针对桥梁构件疲劳设计需求,建立了疲劳荷载计算模型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ这3种模型^[14]。

2.3.1 疲劳荷载计算模型Ⅰ

该模型为等效车道荷载模式,其安全系数较高,主要对应无限寿命设计准则,形式如图1所示,其中 P_k 和 q_k 取值参考《规范》相关规定。

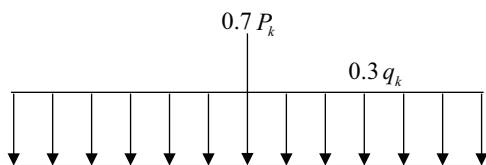


图1 疲劳荷载计算模型Ⅰ

2.3.2 疲劳荷载计算模型Ⅱ

该模型为双车协同作用模式。2车各个参数设置均相同,加载时车辆间距不小于40 m,车型为6轴车,形式如图2所示。《规范》规定,当构件和连接没有满足模型Ⅰ的验算要求时,应按模型Ⅱ进行验算。

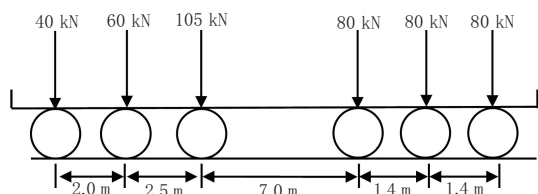


图2 疲劳荷载计算模型Ⅱ

2.3.3 疲劳荷载计算模型Ⅲ

该模型为单车加载模式。这是基于单车道作用

原理进行的疲劳效应评估,形式如图3所示。

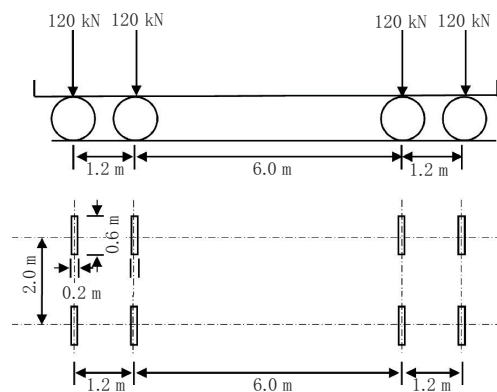


图3 疲劳荷载计算模型Ⅲ

3 基于疲劳损伤等效的疲劳车辆模型优化

3.1 疲劳损伤比

为评估《规范》中规定的标准疲劳车辆模型(Fatigue Load Model Ⅲ)及其优化后的疲劳车辆模型在桥梁疲劳损伤分析中的可靠性,本研究基于Miner线性累积损伤准则,构建了疲劳损伤比指标 D_{Li} ,用于定量表征模型计算疲劳损伤结果与实际交通荷载作用下疲劳损伤之间的差异。针对中小跨径简支梁桥,选取跨中截面作为关键分析截面,其依据在于线弹性条件下截面弯矩与应力呈线性关系,且跨中位置通常为中小跨径简支梁桥最不利受力部位,应当格外重视其疲劳损伤评估。疲劳损伤比指标 D_{Li} 计算式为:

$$D_{Li} = \frac{D_{\text{model}}}{D_{\text{flow}}} = \frac{N_{\text{total}} N_{\text{eff}} S_{\text{np},m}^m}{\sum_{i=1}^{N_{\text{total}}} f_i S_{\text{np},i}^m} = \frac{N_{\text{eff}} M_{\text{rp},m}^m}{\sum_{i=1}^{N_{\text{total}}} f_i N_{e,i} M_{\text{np},m}^m} \quad (6)$$

式中: D_{flow} 为桥梁关注位置在实际汽车交通荷载工况下所积累的疲劳损伤; D_{model} 为通过疲劳车辆模型模拟计算所得的等效损伤数值; N_{total} 为统计分析周期内桥梁承受的总车辆数量; N_{eff} 为疲劳车辆模型作用下的等效循环次数,需要基于最大应力幅值 $S_{\text{np},m}$ 或最大弯矩幅值 $M_{\text{rp},m}$ 计算得到; f_i 为实际交通状况下第 i 类车型的占比; $S_{\text{np},m}$ 为疲劳车辆模型作用下的最大应力幅值; $S_{\text{np},i}$ 为实际交通状况下第 i 类车型过桥时引起的最大应力幅值; $M_{\text{rp},m}$ 为实际交通状况下第 i 类车型过桥时引起的最大弯矩幅值。

在使用疲劳损伤比 D_{Li} 定量分析车辆模型与实际车流过桥时导致的疲劳损伤这两者之间的差异时,若出现 $D_{Li} > 1$,则表明使用疲劳车辆模型分析疲劳损伤会高估桥梁的实际损伤情况,评估结果会趋

向于保守;若 $D_{L1} < 1$, 则表明使用疲劳车辆模型分析疲劳损伤会低估桥梁的实际损伤情况, 评估结果会趋向于危险。

3.2 疲劳车辆模型优化方法

疲劳车辆模型的理想设计目标是使其计算的损伤比 D_{L1} 等于 1, 此时使用疲劳车辆模型能很好地反映桥梁在实际车流作用下的疲劳损伤。本文以提高疲劳车辆模型与实际交通引起的疲劳损伤等效性为目标, 提出基于数学优化的多参数协同标定方法, 通过对模型轴数、轴重和轴间距进行动态调整以适应不同地区的交通特征。

针对不同车辆荷载轴型导致的分析差异, 国际主流的研究文献和《规范》通常采用 3 轴或 4 轴构型作为标准疲劳车辆模型。既有研究表明: 3 轴模型适用于轻载车辆占据主导地位的交通荷载工况; 4 轴模型在重载车辆主导的交通荷载情况下具有更好的适用性。

依据损伤等效原则, 通过计算得到当地车辆荷载的等效总重 W_{eq} , 并将疲劳车辆物理模型转化为具有轴重比 (ω) 和轴距 (L) 关键变量参数的数学模型, 如图 4 所示。等效总重的表达式为:

$$W_{eq} = \left[\sum (f_i W_i^3) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

式中: f_i 为第 i 类车型在当地出现的频率; W_i 为第 i 类车型的总重。

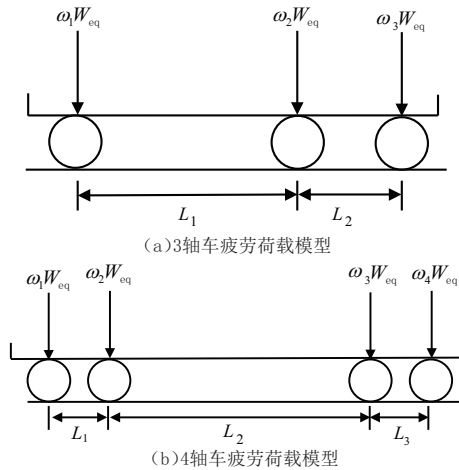


图4 疲劳荷载模型

计算得到上述模型具体参数后, 可以通过计算得到的 W_{eq} 和各轴轴重比 ω , 计算得到优化后疲劳车辆模型的每个实际轴重。

由于轴重比和轴间距对不同跨径桥梁疲劳损伤的影响具有显著的不规则性和不确定性, 既有的传统分析方法通常难以精确刻画其中的复杂关联。

为此, 本研究采用 MATLAB 内置的遗传算法求解最优疲劳车辆模型。目标函数设计为联合优化目标函数, 综合考虑不同桥梁跨径及交通荷载工况下, 目标疲劳车辆模型与实际交通荷载引起的桥梁构件疲劳损伤比的误差平方和及其方差。通过联合优化, 旨在提升模型对不同跨径桥梁的普适性和适应性。

3 轴车具体目标函数设置为:

$$\begin{aligned} f_1 &= \sum (D_{L1} - k)^2 = \sum (g(w_1, w_2, w_3, l_1, l_2) - k)^2 \\ f_2 &= \text{Var}(D_{L1} - k) = \text{Var}(g(w_1, w_2, w_3, l_1, l_2) - k) \\ f &= \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 \end{aligned} \quad (8)$$

4 轴车具体目标函数设置为:

$$\begin{aligned} f_1 &= \sum (D_{L1} - k)^2 = \sum (g(w_1, w_2, w_3, w_4, l_1, l_2, l_3) - k)^2 \\ f_2 &= \text{Var}(D_{L1} - k) = \text{Var}(g(w_1, w_2, w_3, w_4, l_1, l_2, l_3) - k) \\ f &= \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: k 为目标疲劳损伤比, 取值为 1.0。

疲劳车辆模型优化流程见图 5。

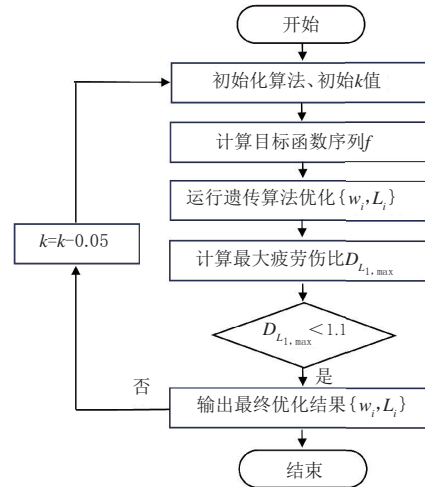


图5 疲劳车辆模型优化流程

该方法不仅能够有效降低模型误差, 还能增强其对区域性交通荷载特征的适应性, 为桥梁疲劳损伤评估提供更为精确的理论依据。

需要注意的是, 经过优化的疲劳车辆模型, 其计算损伤比应稳定在 1.00 左右, 以吻合实际交通荷载产生的疲劳效应, 并以 1.10 为临界阈值, 当损伤比突破该阈值时, 需及时对参数进行动态修正, 并且实施模型再校准策略, 以保证满足损伤等效性的约束条件, 从而保障优化后的疲劳车辆模型对实际荷载特征具有较高的表征精度和工程适用性。

4 实测数据案例分析

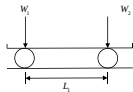
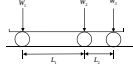
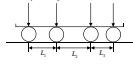
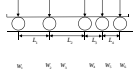
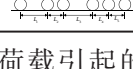
4.1 实测车辆荷载频值谱获取及分析

依托上海市某实际桥梁附近动态称重系统半年的实测随机车载数据,以中小跨径简支梁桥跨中位置为研究对象^[15-16],获取了反映当地交通状况的车辆荷载频值谱,并分别获取了实际交通作用下和规范疲劳荷载模型作用下桥梁的疲劳损伤情况;分析

了《规范》疲劳荷载模型在当地的适用性,并依据实测随机车载数据优化得到了新的疲劳荷载计算模型。

由于该动态称重系统所在位置工业和物流繁忙,因此该公路桥梁承受的车辆中多轴重载车辆占比非常大。使用2.2.1节介绍的车辆荷载频值谱获取方法,可以获取该地区具体的等效模型车辆参数,如表1所示。

表1 实测车辆荷载频值谱

车辆类型	车辆图示	轴重/kN						轴距/m					频率
		W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	
2轴车		22.9	51.8					4					0.54
3轴车		40.7	45.2	87.7				4.2	1.3				0.07
4轴车		48.2	56.1	72.1	75.4			3	4.4	1.3			0.11
5轴车		47.3	76.2	47.6	45.6	49.7		4	5	1.3	1.3		0.11
6轴车		47.1	55.9	57.8	58.9	54.8	58.5	4	1.4	6	1.4	1.4	0.17

车辆荷载引起的桥梁疲劳损伤可由计算得到,实际车流中各车型引起的疲劳损伤占比如图6所示,各种车型引起的疲劳损伤占比之和为1。由图6可见,2轴车和6轴载重车辆在中小跨径桥梁疲劳损伤中占据主导性地位,其单类车型贡献率均达30%左右,累计占比超总损伤的60%。

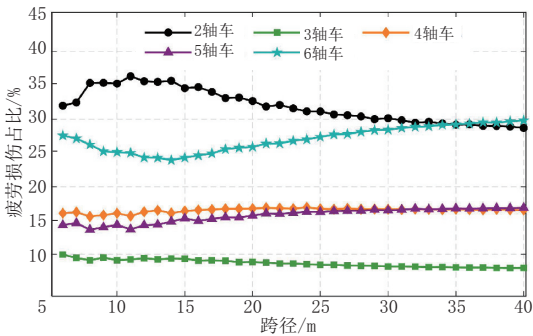


图6 各车型疲劳损伤占比

4.2 疲劳车辆模型优化

使用疲劳损伤比分析《规范》中规定的疲劳荷载计算模型Ⅲ在当地的适用性,结果如图7所示。

由图7可知,《规范》中规定的疲劳荷载计算模型Ⅲ对于不同跨径桥梁计算的疲劳损伤比差异性很大,而且在所有桥梁标准跨径上的疲劳损伤比均大于2.0,甚至部分跨径的疲劳损伤比接近3.5,这意味着在当地直接使用疲劳荷载计算模型Ⅲ可能会显著

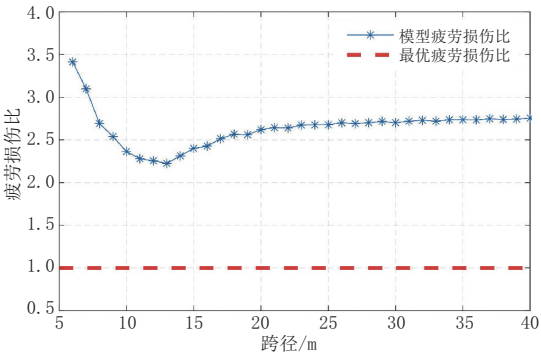


图7 疲劳荷载计算模型Ⅲ的疲劳损伤比

高估车辆引起的疲劳损伤,造成不必要的浪费。因此需要提出一种新的疲劳车模型,以提高当地中小跨径桥梁疲劳损伤评估的准确性。

基于表1所示的实测车辆荷载频值谱,通过车辆荷载等效总重公式,计算可得当地车辆荷载等效总重为220.15 kN。由于重载货车(6轴车)在实际车流中所占比例较大,且其造成的疲劳损伤在所有车型造成的疲劳损伤之间占比较大,需要使用多轴车才能更好地表征其特性,因此后续的疲劳车辆模型选择4轴构型进行分析。

为了找到一个能适用于当地所有中小跨径桥梁的疲劳车辆模型,使用图5所示的基于遗传算法的疲劳车辆模型优化流程。根据已有相关研究,中国

主要车辆类型的轴距范围主要集中在 1.35~7.21 m 之间,因此,在优化过程中轴距的约束范围设置在 1.35~7.21 m 之间。约束过程中具体约束条件为:

$$\begin{cases} 0 < w_i < 1 \\ \sum w_i = 1 \\ 1.35 < l_i < 7.21 \end{cases} \quad (10)$$

由于每次优化过程的初始种群是随机的,因此将优化程序独立运行并重复多次,将优化结果中的目标函数最小值对应的特征参数选为疲劳车辆模型优化的最终结果。通过多次遗传算法优化后,4 轴疲劳车辆模型的轴重比 ω 和轴距 L 为:

$$\begin{aligned} \omega &= \{0.262, 0.123, 0.169, 0.446\} \\ L &= \{5.17, 5.77, 5.65\} \end{aligned} \quad (11)$$

优化疲劳车辆模型见图 8。此时对应的各跨径疲劳损伤比见图 9。

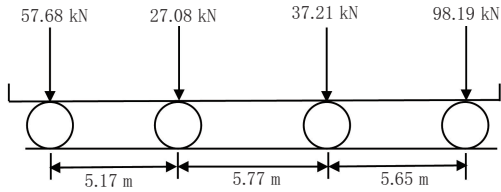


图 8 优化疲劳车辆模型

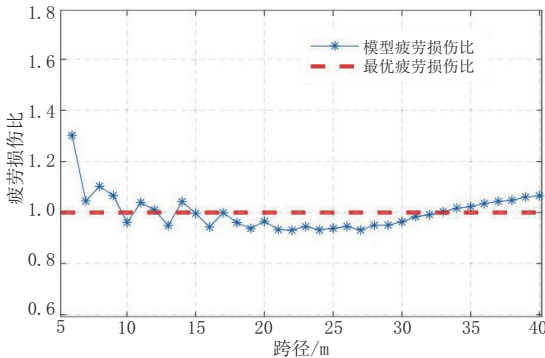


图 9 优化疲劳车辆模型的疲劳损伤比

由图 9 可知,采用优化后的疲劳车辆模型得到的疲劳损伤比已经接近 1.0,能够很好地代替当地实际车流来分析桥梁的疲劳损伤。

5 结 语

(1)不同区域的车辆荷载谱与等效总重呈现显著的差异性,需基于当地实测的车辆荷载频值谱特征对车型频次和损伤贡献进行单独分析。研究表明,区域车辆荷载频值谱中低频高轴重车辆可能成为疲劳损伤主导因素,或由多种车型共同主导桥梁疲劳损伤,因此需要针对每个地区进行单独分析。

(2)在《公路桥涵设计通用规范》中,疲劳荷载计算模型Ⅲ的准确性与特定场地的交通状况组成、桥梁跨度长度有关。采用疲劳荷载计算模型Ⅲ计算疲

劳损伤时,在某些区域、某些跨径可能会出现非常大的误差,使用该模型进行疲劳损伤分析时可能会导致严重高估疲劳损伤,造成不必要的浪费

(3)疲劳车辆模型的轴重比和轴距对疲劳损伤计算的准确性具有很强的影响。在本文的研究中,通过数学优化的多参数协同标定方法获得了适用于上海的疲劳车辆模型,发现优化后的疲劳车辆模型相较于疲劳荷载计算模型Ⅲ具有更高的准确性。

(4)本文提出的动态称重数据(WIM)驱动的疲劳车辆模型优化方法,可适用推广于不同地区的工程场景:以当地区域的 WIM 为核心输入,以疲劳车辆模型的轴重比和轴距作为优化参数,通过遗传算法即可求解出最优疲劳车辆模型,从而为不同区域疲劳损伤评估提供了更为精确的理论依据。

参考文献:

- [1] 邓露,王维,何旭辉.基于美国规范的桥梁疲劳设计优化及应用[J].中国公路学报,2017,30(3):40-48.
- [2] 吕志林,姜旭,强旭红,等.钢箱梁斜拉桥等效疲劳车辆荷载模型分析[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(6):2197-2208.
- [3] 孙守旺,孙利民.基于实测的公路桥梁车辆荷载统计模型[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(2):198-204.
- [4] QIN S Q, GAO Z Y. Developments and prospects of long-span high-speed railway bridge technologies in China[J]. Engineering, 2017, 3(6): 787-794.
- [5] 童乐为,沈祖炎,陈忠延.城市道路桥梁的疲劳荷载谱[J].土木工程学报,1997(5):20-27.
- [6] 周泳涛,鲍卫刚,翟辉,等.公路钢桥疲劳设计荷载标准研究[J].土木工程学报,2010,43(11):79-85.
- [7] 朱劲松,香超,祁海东.考虑车桥耦合效应的大跨悬索桥钢-混组合梁疲劳损伤评估[J].振动与冲击,2021,40(5):218-229.
- [8] HAN Y., LI K., CAI C., et al. Fatigue reliability assessment of long-span steel-truss suspension bridges under the combined action of random traffic and wind loads[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(3): 04020003.
- [9] DENG L, YAN W. Vehicle weight limits and overload permit checking considering the cumulative fatigue damage of bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(7): 04018045.
- [10] LAMAN J. A., NOWAK A. S. Fatigue-load models for girder bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(7): 726-733.
- [11] DENG L, NIE L, ZHONG W, et al. Developing fatigue vehicle models for bridge fatigue assessment under different traffic conditions [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(2): 04020122.
- [12] 王瑞敏,宋玉普,赵国藩.混凝土疲劳累积损伤准则[J].水利学报,1992(5):72-76.
- [13] 张劲泉,宋紫薇,韩冰,等.车辆荷载作用下公路混凝土桥梁疲劳问题研究进展[J].土木工程学报,2022,55(12):65-79.
- [14] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [15] 颜全哲,卓卫东,王志坚,等.利用动态称重技术的福建省重载交通公路车辆荷载模型[J].福州大学学报(自然科学版),2021,49(3):421-427.
- [16] 狄谨,王杰,朋茜,等.港口公路桥梁疲劳荷载谱研究与应用[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(4):48-55.