文章编号:1006-1355(2022)01-0206-08

# 车桥耦合振动下中承式拱桥吊杆汽车冲击效应

贺煊博，郭增伟，徐 华

（重庆交通大学 土木工程学院，重庆 400074）

**摘 要**:针对中承式拱桥短吊杆在实际工程中易疲劳断裂的问题,采用接触约束法实现车桥耦合振动响应的求解,以某中承式拱桥为背景研究不同类型车辆过桥时不同长度吊杆轴力的时变特性和动力冲击效应,对比分析出、入桥侧短吊杆冲击效应的差异和不同部位吊杆的疲劳损伤分布规律。研究发现:车辆过桥时吊杆最大的力学响应出现在车辆通过该吊杆时刻,但吊杆轴向应力会出现波动,且应力波动的高频分量多发生于车辆经过吊杆后的余振阶段;车桥耦合振动所导致的吊杆轴向应力波动频率和幅值随吊杆长度的减小而逐渐增强,相同条件下算例最短吊杆的疲劳损伤度为最长吊杆的3倍;出桥侧主梁因受车辆荷载激励“方向性”的影响,导致出桥侧短吊杆的轴向应力冲击系数达到入桥侧短吊杆的2倍,且出桥侧吊杆的疲劳损伤度和疲劳动力放大系数均表现出大于等长度入桥侧吊杆的趋势;吊杆的疲劳损伤度随着车重的增加而增加,46 t车辆作用下短吊杆疲劳损伤度可达到2 t车辆的40 000倍以上。

**关键词**:振动与波;中承式拱桥;短吊杆;车致振动;冲击效应;疲劳损伤

**中图分类号**:U441.3 **文献标志码**:A **DOI编码**:10.3969/j.issn.1006-1355.2022.01.034

# Vehicle Impact Effect of Suspender in Half-through Arch Bridge Considering Vehicle-bridge Coupled Vibration

*HE Xuanbo*, *GUO Zengwei*, *XU Hua*

（School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China）

**Abstract**: The problem of fatigue fracture of short suspenders of half-through arch bridge is studied. Taking a half-through arch bridge as the research background, the vehicle-bridge coupled vibration response of the bridge is solved using the contact constraint method. The time-varying characteristics and dynamic impact effect of suspenders with different lengths and different types of vehicles passing through the bridge are studied. The difference of the impact effects on the short suspenders at the bridge exit side and entrance side and the distribution of fatigue damage of suspenders in different positions are analyzed. It is found that the maximum mechanical response of the suspender occurs when the vehicle passes through the suspender, but the axial stress of the suspender fluctuates, and the high frequency component of the stress fluctuation occurs in the residual vibration stage after the vehicle passes through the suspender. The frequency and amplitude of the axial stress fluctuation of the suspender induced by the vehicle-bridge coupled vibration increase gradually with the decrease of the suspender's length. Under the same conditions, the fatigue damage degree of the shortest suspender is triple of that of the longest suspender. Due to the influence of direction effect of vehicle load excitation on the main beam on exit side of the bridge, the axial stress impact coefficient of the short suspender on the bridge exit side is twice of that of the short suspender on the bridge entrance side. And the fatigue damage degree and fatigue dynamic amplification coefficient of the suspender on the bridge exit side are greater than those of the suspender on the bridge entrance side with the same length. The fatigue damage degree of suspender increases with the increase of vehicle weight. The fatigue damage degree of the short suspender under the action of 46 t vehicle can be up to above 40 000 times of 2 t vehicle.

**Key words**: vibration and wave; half-through arch bridge; short suspender; car-induced vibration; impact effect; fatigue damage

**收稿日期**:2021－06－08

**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(51878106);重庆市自然科学基金面上资助项目(cstc2019jcyj-msxmX0818);重庆市研究生联合培养基地建设资助项目(JDLHPYJD2020023);桥梁工程结构动力学国家重点实验室开放基金联合资助项目(编号:201501)

**作者简介**:贺煊博(1996－),男,四川省广元市人,硕士研究生,主要研究方向为桥梁的长期性能。
E-mail: hexuanbo9696@163.com

**通信作者**:郭增伟(1985－),男,河南省林州市人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为桥梁的振动控制与长期性能。
E-mail: zengweiguo@cqjtu.edu.cn

中承式拱桥能在满足桥下净空的前提下最大限度地降低桥面标高，并以其优美的结构外形广泛应用于市政桥梁中。吊杆作为中承式拱桥的重要组成部分，其损坏势必会危及桥梁结构的运营安全。过去发生的多起中承式拱桥坍塌事故，例如宜宾南门大桥、新疆库尔勒孔雀河大桥和福建武夷山公馆大桥等[1]均是由短吊杆断裂引起的。短吊杆的刚度大、自身固有频率高、受力变形卸载能力差，反复的交变荷载将导致吊杆内索体更容易发生疲劳破坏。

桥梁工作者已对中、下承式拱桥吊杆的力学特性进行一定的研究。顾安邦等[2]认为车辆通过拱桥时，吊杆始终处于高频振动状态，车辆对短吊杆的动力影响要远大于长吊杆，导致其抗疲劳性能更差。Malm等[3]通过分析一座下承式拱桥吊杆的应力监测数据，发现列车过桥时吊杆截面应力不均匀分布较为明显，吊杆较大的变幅循环应力源自车桥振动。朱劲松等[4]以同一悬挂系统车辆为基础，在对吊杆的冲击系数不均匀性研究中发现，车重、车速、桥面不平整度对吊杆的冲击系数均有影响，且短吊杆对外部激励的改变最为敏感。Huang[5]研究了桥面、拱肋及立柱的边界条件对钢管混凝土拱桥冲击系数的影响。Shao等[6]研究了吊杆应力冲击系数随桥面等级及行车时速的变化规律。杨建荣[7]研究认为短吊杆与跨中的长吊杆相比，短吊杆位于拱脚与桥面结合部附近，该位置的受力非常复杂,大多数桥梁的短吊杆过短，自由长度不足，桥面反复纵向位移时，短吊杆不能自由摆动，且频频交替出现较大的附加应力，大大降低了短吊杆的抗疲劳能力。目前对不同车辆作用下车桥动力响应导致的短吊杆疲劳损伤规律研究较少，本文以此为重点，基于车桥耦合接触约束法研究车辆作用下短吊杆的冲击效应及疲劳性能。在三类车辆悬挂系统的基础上，所得结论更具可靠性，可为实际工程中中承式拱桥吊杆的长期性能分析提供参考。

# 1　工程背景及有限元模型

## 1.1　中承式拱桥模型

以某特大跨中承式拱桥为背景考察短吊杆的汽车冲击效应，并分析汽车冲击对不同长度吊杆疲劳性能的影响。该桥为主跨221 m的钢管混凝土拱桥，主桥全宽28.5 m，矢跨比$f$=1/4，两片拱肋分别由4根等外径变厚度截面直径为$\phi$1 000×20～$\phi$1 000×25 mm的钢管组成，两片拱肋间跨中及拱脚部位采用“一”型风撑，其余部位均采用“K”型风撑，共设置9道风撑；全桥共设置21对平行钢绞线吊杆，每对吊杆横桥向间距为27.3 m，同侧吊杆纵桥向间距为8.5 m；吊杆最长为39.1 m，最短为8.3 m，两端采用球形锚固装置进行锚固，吊杆抗拉强度设计值$f_{pk}$=1 860 MPa，弹性模量$E$=1.95×10$^5$ MPa，松弛等级为II级；桥道系采用半漂浮体系，主梁为钢混结合梁，整桥布置如图1所示。在进行有限元模拟时，拱肋及立柱的钢管混凝土构件采用双单元法并使用ANSYS中的BEAM188单元模拟；桥道梁采用鱼骨梁模型并使用BEAM44单元模拟，纵梁刚度按照组合截面刚度等效原则进行换算处理，横梁则使用其真实截面刚度，桥道梁两端按滑动铰接处理；吊杆系统采用LINK180单元进行模拟。

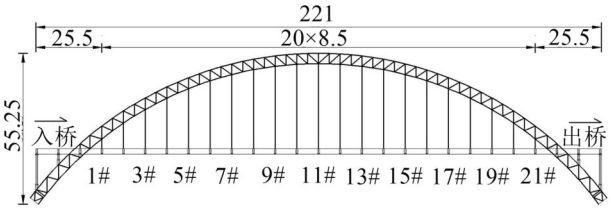
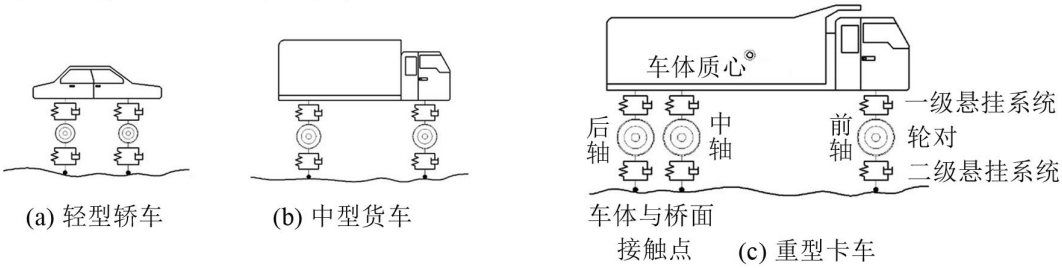



图1　桥梁整体立面布置及吊杆编号（单位：m）

## 1.2　汽车车辆模型

根据文献[8–10]中的车辆基本参数建立车桥耦合分析中的车辆模型，同时考虑车体的俯仰、沉浮以及车辆各轴悬挂系统的随机振动。为讨论不同轴载车辆对桥梁吊杆的冲击效应，使用如图2所示的3类代表性车辆：双轴2 t车辆（轻型轿车）、双轴24 t车辆（中型货车）、三轴46 t车辆（重型卡车）。其中，一级悬挂系统表示车体与车轮间相互作用，二级悬挂系统表示车轮与桥面间相互作用。

车辆模型中关键参数包括：车辆总质量为$M$；车体质量为$m_1$，车体绕质心的转动惯量为$J$；前、中、后轴轮对系统质量为$m_2$、$m_3$、$m_4$；前、中、后轴所对应一




(a) 轻型轿车　(b) 中型货车　(c) 重型卡车

图2　三类车辆简化模型

级悬挂系统的刚度系数和阻尼系数分别为$k_{d1}$、$k_{d2}$、$k_{d3}$、$c_{d1}$、$c_{d2}$、$c_{d3}$；前、中、后轴所对应二级悬挂系统的刚度系数和阻尼系数分别为$k_{u1}$、$k_{u2}$、$k_{u3}$、$c_{u1}$、$c_{u2}$、$c_{u3}$；车辆轴距为$L$，各轴车轮至车体质心的距离为$l_1$、$l_2$、$l_3$。三类车辆具体构造关键参数如表1所示。

表1 三类车辆构造参数

| 构造参数 | 车辆类型 | | |
|---|---|---|---|
| | 轻型轿车 | 中型货车 | 重型卡车 |
| $M$/kg | 2 000 | 24 000 | 46 000 |
| $m_1$/kg | 1 828.2 | 21 600 | 37 340 |
| $J$（kg·m²） | $2.444\times10^3$ | $1.47\times10^6$ | $2.446\times10^6$ |
| $m_2$/kg | 81 | 1 200 | 4 330 |
| $m_3$/kg | | | 2 165 |
| $m_4$/kg | 90.8 | 1 200 | 2 165 |
| $L$/m | 2.76 | 4 | 8 |
| $l_1$/m | 1.25 | 2.75 | 4 |
| $l_2$/m | | | 3 |
| $l_3$/m | 1.51 | 1.25 | 4 |
| $k_{d1}$/(N·m⁻¹) | $3.4\times10^4$ | $1.53\times10^6$ | $2.535\times10^6$ |
| $k_{d2}$/(N·m⁻¹) | | | $1.267\ 5\times10^6$ |
| $k_{d3}$/(N·m⁻¹) | $4.4\times10^4$ | $1.53\times10^6$ | $1.267\ 5\times10^6$ |
| $k_{u1}$/(N·m⁻¹) | $3.84\times10^5$ | $2.28\times10^6$ | $4.28\times10^6$ |
| $k_{u2}$/(N·m⁻¹) | | | $2.14\times10^6$ |
| $k_{u3}$/(N·m⁻¹) | $3.84\times10^5$ | $2.28\times10^6$ | $2.14\times10^6$ |
| $c_{d1}$/(N·m⁻¹·s⁻¹) | $3.0\times10^3$ | $1.96\times10^5$ | $1.96\times10^5$ |
| $c_{d2}$/(N·m⁻¹·s⁻¹) | | | $9.8\times10^4$ |
| $c_{d3}$/((N·m⁻¹·s⁻¹) | $3.0\times10^3$ | $1.96\times10^5$ | $9.8\times10^4$ |
| $c_{u1}$/(N·m⁻¹·s⁻¹) | 0 | $9.8\times10^4$ | $9.8\times10^4$ |
| $c_{u2}$/(N·m⁻¹·s⁻¹) | | | $4.9\times10^4$ |
| $c_{u3}$/(N·m⁻¹·s⁻¹) | 0 | $9.8\times10^4$ | $4.9\times10^4$ |

模拟车辆荷载时，车辆悬挂系统均采用COMBIN14单元进行模拟；车体与悬架的连接采用MPC184单元进行模拟；各质量系统均采用MASS21单元进行模拟；车轮与桥面间的接触对采用CONTA175单元以及Targe169单元进行创建，采用CE命令建立车轮节点与对应桥面间的接触耦合方程。

### 1.3 桥面不平整度

车桥耦合计算时桥面不平整度是引起车桥相互振动的主要外部激励，桥面不平整度会增强车桥相互振动的随机性及激烈程度，其不平整度序列可用零均值服从稳态Gauss分布的随机过程[11]来进行描述。根据《车辆振动输入路面平整度表示方法》（GB7031－1986）[12]路面功率谱密度拟合函数，桥面不平整度样本以经傅里叶变换后的函数进行模拟，如式（1）所示。

$$R(x)=\sum_{k=1}^{N}\sqrt{2G_d(n_k)\Delta n}\cos(2\pi n_k x+\varphi_k) \quad (1)$$

式中：$R(x)$为桥面沿顺桥向的不平整度样本；$N$为不平整度采样点数；$G_d(n_k)$为桥面功率谱密度拟合函数；$\Delta n$为空间频率间隔的带宽；$n_k$为功率谱密度拟合函数离散的空间频率；$x$为顺桥向坐标；$\varphi_k$为随机相位角，分布于[0，2π]。

使用谐波合成法[13]得到的一组各级桥面不平整度序列片段如图3所示。

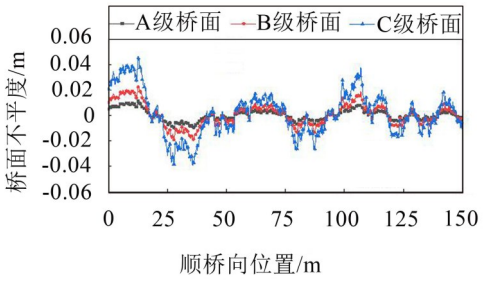



图3 桥面不平整度序列

根据文献[14]中的研究，整桥的阻尼比及参考频率的选取具有盲目性，建议尽量选取较小的阻尼比进行桥梁的动力计算。文献[4]和文献[15]指出整桥阻尼比与吊杆冲击效应的关系尚不明确且其对冲击效应影响较小。偏于安全地，本文暂不考虑桥梁阻尼比对吊杆车致振动带来的影响。

## 2 吊杆车致振动特性

### 2.1 汽车冲击效应

车辆轴载的增加会增加吊杆的疲劳应力幅，加重吊杆的疲劳破坏。根据桥梁实际服役状况及相关规定，控制车辆以70 km/h的速度匀速行驶，桥面为随机B级不平整度，对1#短吊杆进行动力响应分析。加载车辆分别为2 t、24 t、46 t车辆。三类车辆加载下1#吊杆的应力-时间历程如图4所示。需要特别说明的是，在进行车桥耦合振动分析时，车辆沿主梁中心线行驶，由1#吊杆入桥侧驶入，由21#吊杆出桥侧驶出。

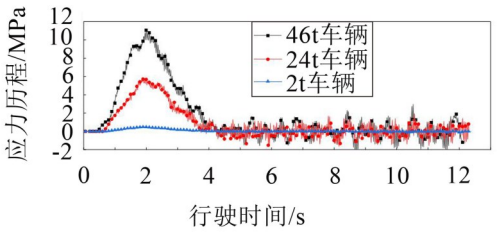



图4 1#吊杆应力-时间历程曲线

从图4不难发现：2 t、24 t、46 t车辆的动力效应将分别导致1#吊杆出现0.5 MPa、5.9 MPa、11.1 MPa的应力变化，车辆轴载越重，车桥耦合振动的动力效

应导致吊杆内出现更大的疲劳应力幅，46 t车行驶过程中1#吊杆应力峰值约为2 t车辆的22倍。46 t车辆通过1#吊杆后，该吊杆余振阶段最大应力幅值为2.63 MPa，其任一振幅都远大于2 t车辆作用下的应力峰值。为更好地评价车桥耦合振动对吊杆受力的影响，根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)[16]，冲击系数的定义如式(2)所示。

$$\mu = \frac{Y_{d\max} - Y_{j\max}}{Y_{j\max}} \tag{2}$$

式中：$\mu$为冲击系数；$Y_{d\max}$为吊杆最大动力响应值；$Y_{j\max}$为同荷载水平下吊杆最大静力响应值。

### 2.2 振动时频特性

当车辆经过桥梁时，车辆自身重量及其动力效应将导致主梁下挠，进而导致吊杆下锚固端产生竖向位移，使得吊杆产生交替轴向变形。短吊杆的刚度大，自振频率高，且处于桥梁特殊构造部位，车致振动对短吊杆具有更加明显的冲击效应。采用24 t车辆进行加载，控制行车速度为70 km/h，桥面为随机B级不平整度，选取各部位具有代表性的不等长1#、5#、11#、21#吊杆，考察其在车辆通过时轴向应力的变化时程，其结果如图5所示。

通过对比可以发现，随着吊杆长度的减小，吊杆轴向应力的波动幅度和频率均有明显增大趋势，尤其是在车辆通过吊杆后的余振阶段，短吊杆的振动会更加剧烈，这一力学特性势必会加重工程中短吊杆的疲劳破坏。

进一步地，对各吊杆动力响应下的整体应力时程进行短时傅里叶变换[17]。同样，以1#、5#、11#、21#吊杆为例，得到其车致振动下轴向应力的时频关系，如图6所示。由时频分析结果可以看出：

（1）各吊杆低频区间的能量峰值主要集中在车辆通过该吊杆的时刻，而高频区间的能量则更为均匀地分布于车辆经过吊杆后的余振阶段；

（2）短吊杆能量的频带分布更广，且20 Hz～30 Hz频带范围的高频能量更大；

（3）吊杆长度越短，车桥耦合振动所导致的短

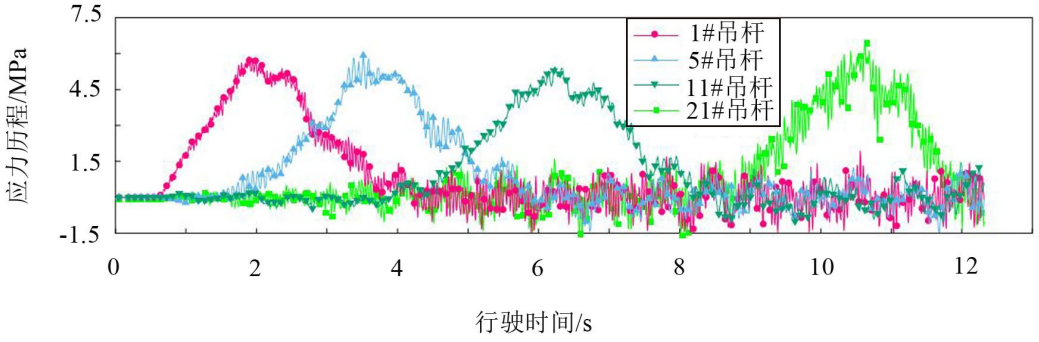



图5 各吊杆应力-时间历程曲线

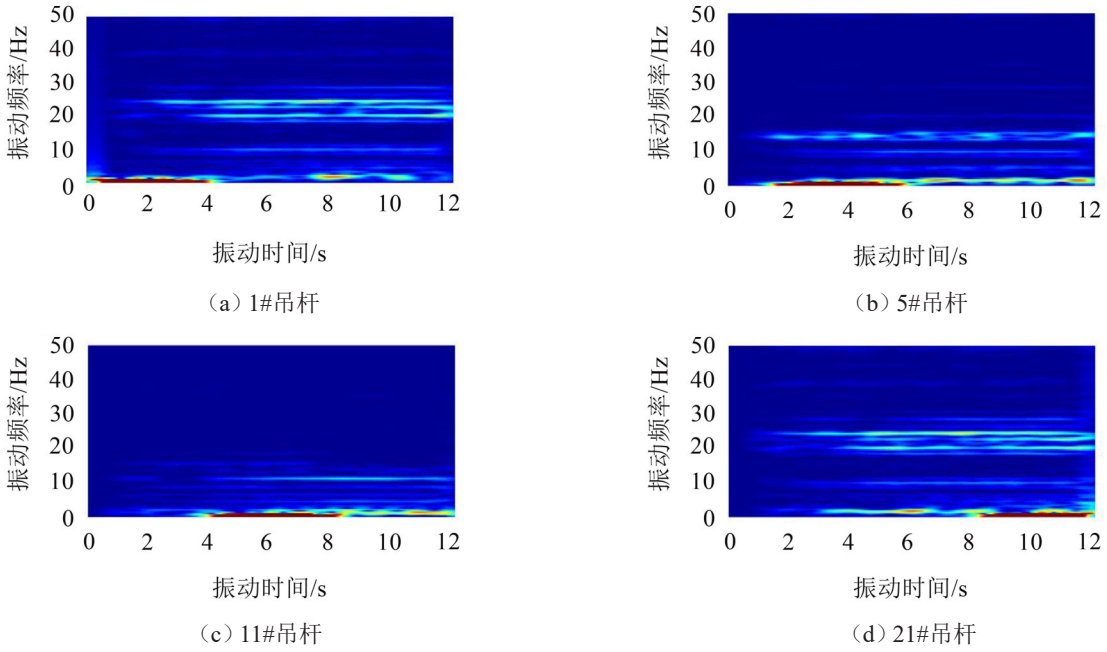



图6 各吊杆振动时间-频率关系

吊杆轴向应力波动中高频分量更大、持续时间更长，这意味着车辆单次过桥时，短吊杆所经历的应力交变次数将显著大于长吊杆，这也是短吊杆易疲劳破坏的主要原因之一；

（4）对比1#吊杆和21#吊杆轴向应力时频图，不难发现位于出桥侧的21#吊杆在0～10 Hz范围内的能量略大于1#吊杆，这表明出桥侧的短吊杆受车桥耦合振动的影响更为显著。

### 2.3 疲劳动力放大效应

在工程设计中，疲劳动力放大效应越显著则越难掌控和评估构件的疲劳性能。为了考察汽车动力作用下冲击效应对不同部位吊杆疲劳损伤的影响，特将吊杆的疲劳动力放大系数[18]定义为式（3）。

$$d_f = \frac{D_{d\max} - D_{j\max}}{D_{j\max}} \tag{3}$$

式中：$d_f$为疲劳动力放大系数，$D_{d\max}$为考虑车桥耦合振动下吊杆的疲劳损伤度，$D_{j\max}$为同荷载水平静力响应下吊杆的疲劳损伤度。

## 3 吊杆冲击系数及疲劳分析

### 3.1 短吊杆冲击系数

设定车辆行驶速度为70 km/h，桥面等级为随机B级不平整度，对2 t、24 t、46 t三类车辆作用下入桥侧1#吊杆和出桥侧所对应21#吊杆的冲击系数进行分析。

通过式（2）计算可得，2 t、24 t、46 t车辆作用下入桥侧1#吊杆的轴向应力冲击系数分别为0.118 9、0.102 3、0.114 5，出桥侧21#吊杆的轴向应力冲击系数分别为0.205 9、0.221 2、0.209 4，由于桥面不平整度的随机性以及三类车辆的静力效应、悬挂系统、轴距、轮载等设计参数不尽相同，三类车辆所导致的吊杆轴力冲击系数并无明显的规律。显然，不论是何种类型的车辆，出桥侧短吊杆的轴向应力冲击系数均比入桥侧短吊杆大，三类车辆作用下出桥侧21#吊杆轴向应力冲击系数均高于0.20且达到了入桥侧1#吊杆的2倍左右。

为了解释这一现象，特作以下分析：入桥侧梁端与1#吊杆距离较近，车辆由入桥侧立柱与主梁连接段迅速行驶至1#吊杆前，车致振动传递至1#吊杆的时间短，当车辆行驶通过1#吊杆时，该吊杆以微小的初始振动状态承受车辆荷载的冲击作用。对于出桥侧21#吊杆，从车辆进入桥梁直至车辆行驶至该吊杆前，行驶时间相对较长，车辆与桥梁有充足的动力响应时间，随着车辆的行驶，该振动持续传递至21#吊杆位置处主梁区域，进而导致21#吊杆振动愈加明显。当车辆行驶通过21#吊杆时，该吊杆以较为剧烈的初始振动状态承受车辆荷载的冲击作用。对于车辆行驶通过桥梁的整体时段而言，1#吊杆处于一个越来越远离的车桥耦合激励峰值的过程，而21#吊杆处于一个越来越临近的车桥耦合激励峰值的过程，两者振动的初始条件差异显著，且21#吊杆索力达到峰值响应之前车致桥面振动的传递效应更加明显，正是这两种差异使得出桥侧21#吊杆比入桥侧1#吊杆的汽车冲击效应表现得更为显著。

对于上述分析，提取24 t车辆作用下入桥侧1#吊杆及出桥侧21#吊杆对应处横梁中心及上、下锚固端位移-时间历程，如图7所示。

从图7可以看出：车辆行驶通过吊杆时，21#吊杆上、下锚固端挠度的波动比1#吊杆更大，表明出桥侧短吊杆受车桥耦合振动影响更为显著，1#吊杆及21#吊杆上锚固端位移冲击系数分别为0.088 5、0.238 1，下锚固端位移冲击系数分别为0.075 7、0.302 0。由于横梁受到车辆荷载的直接作用，横梁中心的动力挠度幅值大于短吊杆上、下锚固端，1#吊杆及21#吊杆位置处横梁中心的位移冲击系数分别为0.025 2、0.042 6。结合车辆作用下短吊杆的轴向应力冲击系数计算结果，出桥侧21#吊杆对应各部位的位移冲击系数均大于入桥侧1#吊杆，这一规律与

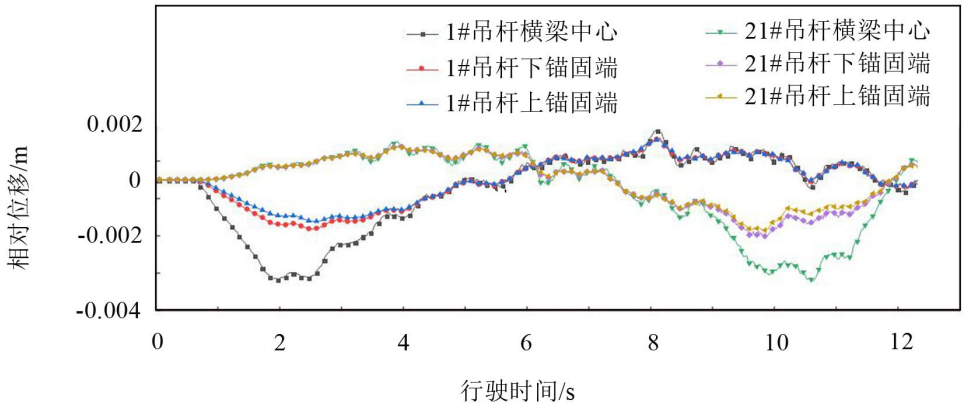



图7 短吊杆对应部位位移-时间历程曲线

其轴向应力冲击系数完全一致，这说明车致振动由主梁传递至短吊杆使其出现轴向应力波动，出桥侧主梁因与入桥侧主梁具有车桥耦合振动“方向性”的差异，而产生更大的车致振幅，最终导致出桥侧短吊杆内部产生更大的轴向应力冲击系数。

### 3.2 疲劳损伤度

现以1-21#吊杆中单数编号吊杆为研究对象进行出、入桥侧不同长度吊杆的疲劳损伤分析。运用MATLAB编制雨流计数程序，对车辆单次通过桥梁时各吊杆的应力-时间历程进行处理，同时考虑不同部位吊杆的恒载效应，提取各吊杆的有效循环应力历程及应力水平。作为示例，图8给出了三类车辆作用下21#吊杆的应力循环雨流矩阵。

从图8可以看出，2 t、24 t、46 t车辆作用下21#吊杆的有效应力历程中的高频循环分别多分布于0～0.15 MPa、0～2 MPa、0～3.5 MPa范围内，三者对应的应力均值分别多分布于289.6 MPa～290.1 MPa、289 MPa～295 MPa、288 MPa～300 MPa，这表明车辆轴载越大，吊杆的疲劳应力幅范围越大，吊杆所处的平均应力水平越高，越容易致使其产生疲劳损伤。

考虑到吊杆在实际工程中的服役状况，采用Palmgren-Miner线性累计损伤理论对短吊杆的疲劳损伤度进行定量计算。为了能够更加直观地反映导致吊杆疲劳的应力循环幅值，同样为了更加合理地分析吊杆的疲劳损伤，将吊杆的各变幅荷载统一为等效荷载，其原理是等效荷载对某一吊杆的疲劳损伤度贡献与各变幅荷载所做的贡献相等，如式(4)所示。

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n}{N_{eq}} \tag{4}$$

式中：$D$为吊杆疲劳损伤度；$n_i$为某一应力幅的循环次数；$N_i$为同级应力幅作用下吊杆疲劳破坏所需循环次数；$n$为吊杆应力谱中变幅荷载循环总次数；$N_{eq}$为等效应力幅下吊杆疲劳破坏所需循环次数。

其中，等效应力幅可以看作是常幅循环荷载，吊杆内部钢绞线疲劳寿命规律满足应力-寿命曲线，采用马林等[19]测量的国产低松弛1 860钢绞线S-N曲线，如式(5)所示。

$$\log N_{eq} = \log C - m \log \Delta\sigma_{eq} \tag{5}$$

式中：$N_{eq}$为等效应力幅下吊杆疲劳破坏所需循环次数；$\Delta\sigma_{eq}$为吊杆的等效应力幅；参数$m$取3.5，$\log C$取13.84。

根据文献[20–21]中的研究，小于疲劳极限的荷载幅仍会对钢构件带来损伤，因此为安全起见，将对全部有效循环荷载进行考虑。联立式(4)与式(5)，并考虑不同部位吊杆循环应力幅的平均应力水平对疲劳强度的影响，采用Goodman方程对等效应力幅进行修正，得到修正后等效应力幅计算式(6)：

$$\Delta\sigma_{eq} = \left[ \frac{\sum n_i \left( \frac{\sigma_b \sigma_{ai}}{\sigma_b - \sigma_{ci}} \right)^m}{n} \right]^{\frac{1}{m}} \tag{6}$$

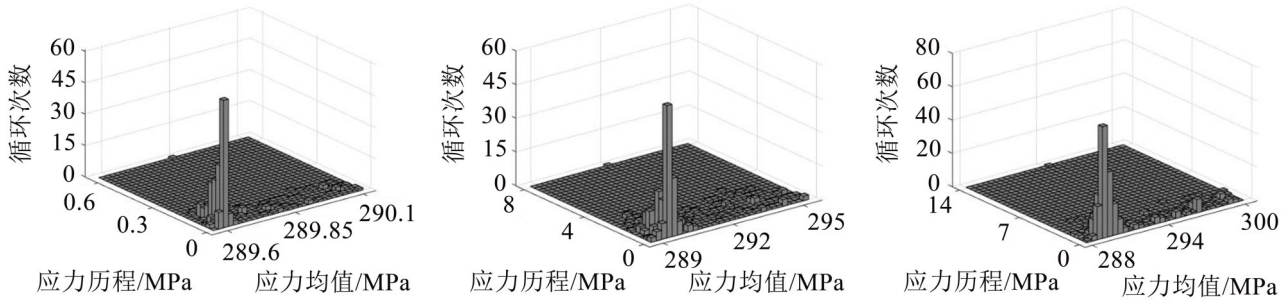
式中：$\sigma_{eq}$为考虑平均应力水平下的等效应力幅；$\sigma_b$为吊杆内部钢绞线强度极限；$\sigma_{ai}$为雨流矩阵中某一级应力幅；$\sigma_{ci}$为同级应力幅所对应的平均应力水平。

根据上述各式，即可计算三类车辆单次过桥时车致振动对不同吊杆的疲劳损伤度。

三类车辆单次通过桥梁时各吊杆的疲劳损伤度统计结果如图9所示。

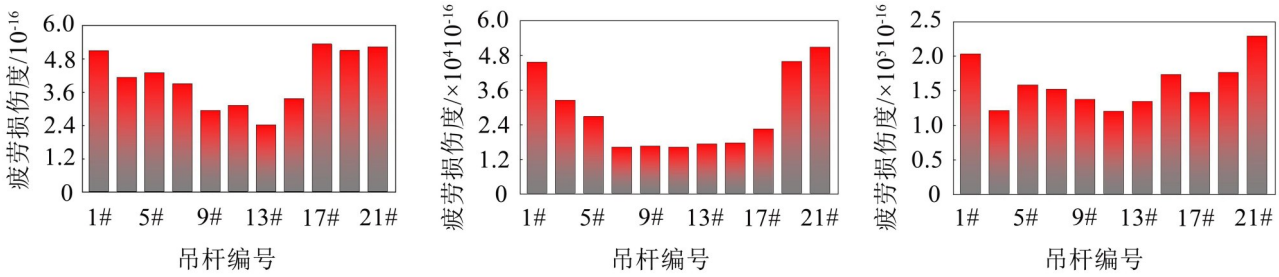
对图9分析可知，对于同一车辆激励作用下的等长度吊杆，出桥侧吊杆的疲劳损伤度表现出大于入桥侧吊杆的趋势。出桥侧21#吊杆和入桥侧1#吊杆在2 t车辆作用下的疲劳损伤度分别为$5.21\times10^{-16}$、$5.08\times10^{-16}$；在24 t车辆作用下的疲劳损伤度分别为$5.08\times10^{-12}$、$4.56\times10^{-12}$；在46 t车辆作用下的疲劳损伤度分别为$2.29\times10^{-11}$、$2.03\times10^{-11}$。显然，21#吊杆不论在何种车辆作用下受损均比1#吊杆严重。随着吊杆长度的增加，出、入桥侧等长度吊杆的疲劳损伤度差异逐渐减小，当吊杆长度达到5#和17#所对应的28.4 m后，此差异不再明显。

对比分析三类车辆作用下等长度吊杆的疲劳损伤度可以发现，各吊杆的疲劳损伤度随着车重的增




(a) 2 t车辆　　(b) 24 t车辆　　(c) 46 t车辆

图8 21#吊杆应力循环雨流矩阵




（a）2 t车辆 （b）24 t车辆 （c）46 t车辆

图 9 各吊杆疲劳损伤度

加而增加。重型汽车对短吊杆的疲劳损伤度远大于轻型汽车，21#吊杆和1#吊杆在46 t车辆作用下的疲劳损伤度分别达到了2 t车辆作用下的44 000和40 000倍。随着吊杆长度的增加，其疲劳损伤度呈减小趋势，特别是24 t车辆行驶通过桥梁时对出桥侧21#吊杆的疲劳损伤度是跨中11#吊杆的3倍，对跨中11#吊杆的疲劳损伤度仅为$1.60\times10^{-12}$。

由此可见，在中承式拱桥实际服役时，重型汽车对吊杆造成的疲劳损伤是巨大的，随着服役年限的增加以及庞大的车流量，短吊杆与长吊杆的疲劳损伤度差距呈几何级数增长，尤其是出桥侧短吊杆将远提前于长吊杆发生疲劳破坏。

### 3.3 疲劳动力放大系数

在疲劳损伤分析的基础上，利用三类车辆的动力响应结果，对各吊杆的疲劳动力放大效应进行分析。为便于描述，以图1中跨中11#吊杆为区分，规定11#吊杆左侧的吊杆统称为入桥侧吊杆，右侧的吊杆统称为出桥侧吊杆。通过式(3)计算可以得到三类车辆作用下各吊杆的疲劳动力放大系数，如图10所示。

由图10可知，三类车辆作用下各吊杆的疲劳动力放大系数随吊杆长度增加呈降低趋势。在24 t车辆作用下，吊杆的疲劳动力放大系数随吊杆长度的变化最为显著，出桥侧最短21#吊杆的疲劳动力放大系数为5.10，而最长的13#吊杆的疲劳动力放大系数仅为1.50，两者差距达到了3.60；同样，入桥侧的最短1#吊杆与最长9#吊杆的疲劳动力放大系数差距也达到了3.15。出桥侧各吊杆的疲劳动力放大系数表现出大于等长度入桥侧吊杆的趋势，这一趋势随吊杆长度的增加而不再明显。

相较于长吊杆，短吊杆的疲劳动力放大系数对车辆类型的改变表现出更强的敏感性，在三类车辆作用下，出桥侧21#吊杆和入桥侧1#吊杆的疲劳动力放大系数最大值与最小值的差距分别为3.13和2.83，随着吊杆长度的增加，这一差距逐渐减小至0.30和0.33且趋于稳定。此外，46 t车辆作用下各吊杆疲劳动力放大系数在三类车辆中始终处于较低的水平，轴载大的车辆并不一定会产生更大的疲劳动力放大效应，这种不均匀性同样与桥面不平整度的随机性及不同车辆的设计参数有关。

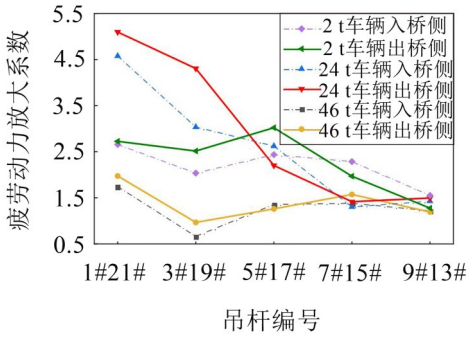



图 10 各吊杆疲劳动力放大系数

## 4 结 语

建立有限元整桥模型，基于接触约束法考虑桥面随机不平整度，实现三类代表性车辆车桥耦合振动下吊杆的动力响应求解，得到车辆冲击作用下不同部位吊杆的振动特性以及疲劳损伤分布规律，具体结论如下：

（1）吊杆动力冲击效应随其长度的减小而增强。吊杆长度越短，车桥耦合振动所导致的吊杆轴向应力波动中，高频分量更大、波动持续时间更长，这表明车辆通过桥梁时短吊杆所经历的应力交变次数将显著大于长吊杆，短吊杆更易发生疲劳破坏，车辆一次过桥对短吊杆造成的疲劳损伤度可达长吊杆的3倍。

（2）出桥侧主梁以较为剧烈的初始振动状态承受车辆荷载的冲击作用，且在达到峰值响应之前车致桥面振动传递更为充分，由此产生的更大索端位移激励导致出桥侧短吊杆的动力冲击效应比入桥侧更为显著。出桥侧短吊杆的疲劳损伤度和疲劳动力放大系数均大于入桥侧对应吊杆，其轴向应力冲击系数可能达到入桥侧对应吊杆的2倍以上。

（3）吊杆的疲劳损伤度随着车重的增加而显著增加，重型汽车对短吊杆的疲劳损伤度远大于轻型

汽车，21#吊杆和1#吊杆在46 t车辆作用下的疲劳损伤度分别达到了2 t车辆的44 000和40 000倍。

**参考文献：**


[1] 陈亚亮，许华聪，余印根. 中下承式吊杆拱桥事故分析及对桥梁检测启示[J]. 福建工程学院学报，2013，11(3)：213-217.

[2] 顾安邦，徐君兰. 中、下承式拱桥短吊杆结构行为分析[J]. 重庆交通学院学报，2002(4)：1-3.

[3] MALM R, ANDERSSON A. Field testing and simulation of dynamic properties of a tied arch railway bridge[J]. Engineering Structures, 2006, 28(1): 143-152.

[4] 朱劲松，邑强. 中下承式拱桥吊杆应力冲击系数不均匀性研究[J]. 振动与冲击，2012，31(13)：5-10.

[5] HUANG DONGZHOU. Vehicle–induced vibration of steel deck arch bridge and analytical methodology[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(2): 241-248.

[6] SHAO YAN, SUN ZONGGUANG, CHEN YIFEI. Analysis of the impact effect of the suspender system in a half-through concrete filled steel tubular arch bridge[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 477: 705-709.

[7] 杨建荣. 车-桥耦合作用下公路桥梁局部振动研究[D]. 上海：同济大学，2008.

[8] 吴君. 移动荷载作用下桥梁冲击系数统计分析[D]. 西安：长安大学，2014.

[9] 蒋培文，贺拴海，宋一凡，等. 大跨径连续梁多工况车桥耦合振动规律分析[J]. 武汉理工大学学报，2011，33(7)：62-67.

[10] 蒋培文. 公路大跨径连续体系桥梁车桥耦合振动研究[D]. 西安：长安大学，2012.

[11] HONDA H, KAJIKAWA Y, KOBORI T. Spectra of road surface roughness on bridges[J]. Journal of Structural Division ASCE, 1982, 108(ST9): 1956-1966.

[12] 中华人民共和国机械工业部. GB7031–1986 车辆振动输入路面平度表示方法[S]. 北京：人民交通出版社，1986.

[13] AU F T K, CHENG Y S, CHEUNG Y K. Effects of random road surface roughness and long-term deflection of prestressed concrete girder and cable-stayed bridges on impact due to moving vehicles[J]. Computers and Structures, 2001, 79(8): 853-872.

[14] 李小珍，雷虎军，朱艳. 车-轨-桥动力系统中Rayleigh阻尼参数分析[J]. 振动与冲击，2013，32(21)：52-57+73.

[15] 杨磊，邵飞，江克斌. 新型索梁结构应急桥车桥耦合振动分析[J]. 工业建筑，2020，50(10)：76-86+93.

[16] 中华人民共和国交通部. JTG D60–2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京：人民交通出版社，2015.

[17] 文鸿雁. 基于小波理论的变形分析模型研究[D]. 武汉：武汉大学，2004.

[18] 李晓章. 拱桥服役吊杆的力学性能退化及其索力识别研究[D]. 杭州：浙江大学，2015.

[19] 马林. 国产1860级低松弛预应力钢绞线疲劳性能研究[J]. 铁道标准设计，2000(5)：21-23.

[20] REVIE R W. Corrosion and corrosion control[M]. John Wiley and Sons, 2008.

[21] ALBRECHT P, FRIEDLAND I M. Fatigue-limit effect on variable-amplitude fatigue of stiffeners[J]. Journal of the Structural Division, 1979, 105(12): 2657-2675.


（上接第181页）

设计验证，车内换挡杆处振动幅值降低了70 %～80 %，主观评价得分提升了2分，换挡杆振动水平得到显著改善，确认了优化方案的有效性，对其他相关性问题具有重要实际参考意义。

**参考文献：**


[1] 李昌炎. 变速器换挡杆抖动解决方案[J]. 汽车技术，2018，4：62-63.

[2] 张朋，相娜，云静，等. SUV车型换挡杆振动的原因分析及控制解决[J]. 价值工程，2015，30：105-107.

[3] 陈浪，方华，杨雪强，等. 某越野车换挡杆NVH问题的试验研究[J]. 汽车技术，2015，5：9-11.

[4] 颜伏伍，刘宗成，李玲，等. 某SUV换挡杆振动问题的识别分析[J]. 重庆理工大学学报，2018，32(11)：40-44.

[5] 郭杨，王涛，冉立. 基于某车型换挡摇臂支架NVH性能优化研究[J]. 时代汽车，2018，2：94-95.