

DOI: 10.7511/jslx20230807001

基于动力响应峰值的结构碰撞荷载峰值识别

朱亚飞¹, 任伟新^{*2}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 深圳大学 土木与交通工程学院, 深圳 518060)

摘要: 船舶或车辆等与桥梁结构的碰撞是一个复杂的动态过程, 结构发生碰撞的冲击荷载模式一般呈现半正弦分布。鉴于长期健康监测系统在重大结构中的广泛应用, 如何仅利用结构的动力响应来识别突发碰撞荷载成为一个亟需解决的问题, 其关键在于找到动力响应与碰撞荷载之间的关系。本文以梁受半正弦碰撞冲击作用为力学模型, 基于模态叠加法和杜哈姆积分求解梁的动力响应, 构造结构动力响应峰值和碰撞荷载峰值之间的相关关系。结果表明响应峰值与碰撞荷载峰值之间存在线性关系, 且该线性关系不受碰撞持续时间和结构响应位置的影响, 梁在不同碰撞冲击力试验进一步验证了该线性关系。因此, 如果知道结构两个或以上不同位置动力响应峰值, 利用响应峰值与碰撞荷载峰值之间的线性关系, 便可确定冲击荷载峰值的大小。该方法不涉及动力学逆问题复杂的理论计算, 依据此线性关系便可由结构的动力响应峰值估算碰撞荷载的峰值, 实现结构意外碰撞时碰撞荷载峰值的识别。

关键词: 结构碰撞; 结构响应; 碰撞荷载; 荷载识别; 峰值

中图分类号: TU311; O327

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2025)01-0044-09

1 引言

船舶或车辆等与桥梁结构的碰撞是一种外部冲击作用, 其作用时间短, 瞬间会释放较大能量, 严重影响结构的安全运营。如何由结构发生意外碰撞时的动力响应识别出碰撞荷载大小, 是碰撞后结构损伤评估和防撞性能提升的基础。结构碰撞产生的冲击作用是一个复杂的动态过程, 碰撞冲击荷载与碰撞物体的速度、质量、撞击角度以及被碰撞结构的质量和刚度等诸多因素有关^[1-3]。鉴于结构碰撞事故发生的偶然性, 多数情况下很难直接确定碰撞荷载的大小。

目前结构碰撞荷载的求解方法一般采用理论分析、数值计算、模型试验验证以及在此基础上的简化经验公式方法。Consolazio 等^[4]根据驳船质量和速度特征, 在考虑桥梁上部结构和碰撞动力效应的条件下, 提出了桥梁结构耦合驳船的碰撞荷载简化算法, 并利用全尺寸驳船撞击试验结果进行了验证。王君杰等^[5]利用 5 艘不同载重船舶的有限

元模型进行研究, 提出了最大峰值、局部平均和全局平均 3 种等效静力船撞力的计算公式。Sha 等^[6]通过数值模拟研究了船舶甲板室和桥梁之间的碰撞过程, 基于模拟的甲板室变形提出了一种用于预测冲击荷载的简化分析方法。Fan 等^[7]基于船首的力-变形关系和考虑结构刚度的分析模型, 建立了一种确定船舶碰撞载荷的简化方法。张爱锋等^[8]利用船舶碰撞有限元模型, 计算了多种工况下的碰撞荷载, 考虑船舶质量、速度和碰撞角度的情况下, 采用神经网络对碰撞荷载峰值进行了预测。Wang^[9,10]采用有限元计算, 提出了多艘不同尺寸驳船撞击力时间历程的简化模型。Wang 等^[11]提出了考虑梁柱构件轴向、弯曲和剪切变形相互作用的简化冲击模型, 并将该模型用于船舶碰撞荷载的求解。Chen 等^[12]在考虑驳船和桥梁的应变率、桩土相互作用和上部结构的惯性效应等的条件下, 通过对 54 个驳船冲击案例进行数值模拟, 提出了两个碰撞荷载模型, 并利用该模型评估了驳船对桥墩的碰撞荷载。

收稿日期: 2023-08-07; 修改稿收到日期: 2023-10-13.

基金项目: 深圳市科创委项目 (JSGG20210802093207022; KQTD20180412181337494; ZDSYS20201020162400001) 资助.

作者简介: 任伟新* (1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师 (Email: renwx@szu.edu.cn).

引用本文: 朱亚飞, 任伟新. 基于动力响应峰值的结构碰撞荷载峰值识别 [J]. 计算力学学报, 2025, 42(1): 44-52.

ZHU Ya-fei, REN Wei-xin. Structural impact load identification based on peak dynamic response [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2025, 42(1): 44-52.

可以看出,结构碰撞荷载的求解方法是结构碰撞研究的热点问题之一,一般需要预先知道撞击物体和被撞物体的物理参数信息(如质量、刚度、撞击速度等),以及水深、撞击方向等。针对突发的结构碰撞事故,这些参数很难准确获知。如何估算意外发生的碰撞事故时碰撞荷载的大小,是结构碰撞(如船撞桥事故)发生后结构安全评估的基础。

大量研究表明,结构发生碰撞的冲击荷载模式一般呈现半正弦分布^[13,14],这种模式采用荷载峰值和持续时间两个参数定义碰撞荷载,在满足船舶与桥梁碰撞后的碰撞力物理规律的前提下,进一步简化碰撞力计算,以便于工程应用,国内外设计规范^[15-17]均采用这种方法定义碰撞荷载。即便如此,针对具体的结构意外碰撞事故,碰撞荷载的峰值也很难确定。另一方面,结构长期健康监测系统已经广泛应用于重大工程结构,突然发生的结构碰撞事故,由结构健康监测系统,可以记录碰撞过程结构的动力冲击响应。在这种情况下,如何仅利用碰撞时的结构动力响应来识别碰撞荷载成为一个亟需解决的问题,而要解决此类问题,关键在于找到动力响应与碰撞荷载之间的关系。

由结构的动力响应来识别碰撞荷载,本质上属于结构动力学中的逆问题,实现过程较为复杂。本文旨在建立一种利用碰撞后桥梁结构产生的响应峰值来估算碰撞力峰值的方法,不涉及复杂的理论计算,方便实际工程应用。

本文采用结构碰撞荷载半正弦荷载模式,以梁在此模式冲击作用为力学模型,基于模态叠加法和杜哈姆积分求解梁的动力响应,构造结构动力响应峰值和碰撞荷载峰值之间的关系方程,发现碰撞荷载峰值与结构响应峰值之间存在线性关系。数值算例和实验室试验验证了该线性关系,且该线性关系不受碰撞持续时间和结构响应位置的影响。依据此线性关系便可由结构的动力响应峰值估算出碰撞荷载的峰值,从而确定碰撞荷载的模式,可用于结构意外碰撞时已知结构动力响应时碰撞荷载的计算。

2 结构碰撞荷载模式

为了求解碰撞冲击振动过程中结构的振动响应,需要设定碰撞荷载模式。假设有一质量为 m 的船舶与桥梁发生了碰撞,如图 1 所示。

碰撞发生前,船舶的速度为 v_0 ,碰撞后速度为 v_t ,碰撞持续时间设为 t_0 ,期间桥梁和船舶受到的碰撞荷载分别为 $F(t)$ 和 $F_s(t)$,由牛顿第三定律

知 $F(t) = F_s(t)$ 。

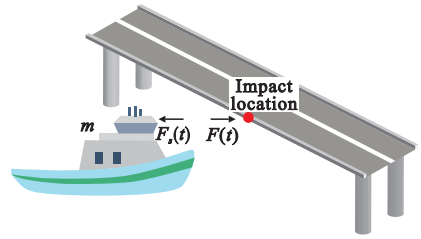


图1 碰撞过程受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of force during collision

以碰撞物船舶为研究对象,由动量守恒定律得

$$\int_0^{t_0} F_s(t) dt = m(v_t - v_0) \quad (1)$$

为了求解式(1),可设 $F_s(t)$ 的近似表达式为

$$F_s(t) = m(v_t - v_0) \bar{F}(t) \quad (2)$$

其中 $\bar{F}(t)$ 为归一化碰撞力,且需满足

$$\int_0^{t_0} \bar{F}(t) dt = 1 \quad (3)$$

由于船舶、车辆等具有一定的刚度,且惯性较大,造成这些物体与桥梁碰撞产生的碰撞力模式不同于爆炸^[18]或冰撞击^[19]等类型的冲击荷载。大量的试验^[20,21]和数值模拟^[22-24]表明船舶或车辆在低速碰撞结构时,碰撞荷载时程曲线呈先逐渐上升然后再下降的趋势,呈现半正弦曲线的分布特征。典型的船-桥和车-桥撞碰荷载时程曲线如图2和图3所示。

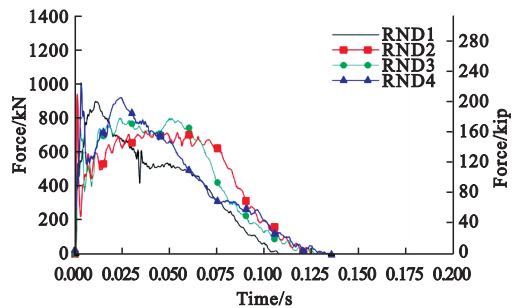


图2 船-桥碰撞荷载时程曲线^[23]

Fig. 2 Ship-bridge collision load time curve

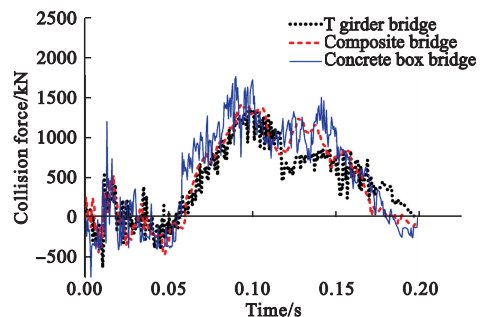


图3 车-桥碰撞荷载时程曲线^[24]

Fig. 3 Vehicle-bridge collision load time curve

实际结构碰撞的荷载模式异常复杂,为进一步

规范和简化结构碰撞力计算,方便工程实际应用,将船-桥碰撞荷载简化为半正弦函数的形式,并列入各国结构碰撞设计规范。该荷载模式形式简洁,为实际工程应用普遍采用。

因此,结构归一化碰撞力时程曲线可以近似表示为如式(4)所示的半正弦函数形式,且满足了公式的要求。

$$\bar{F}(t) = \begin{cases} \frac{\pi}{2t_0} \sin\left(\frac{\pi}{t_0} t\right) & (0 < t \leq t_0) \\ 0 & (t > t_0) \end{cases} \quad (4)$$

式中 t_0 是碰撞作用持续时间。把式(4)代入式(2)

并令 $P_0 = \frac{\pi m}{2t_0}(v_i - v_0)$, $\omega_0 = \frac{\pi}{t_0}$, 则船-桥碰撞荷载模式最终可表示为式(5), 将该公式绘制成曲线如图4所示。

$$F_s(t) = \begin{cases} P_0 \sin(\omega_0 t) & (0 < t \leq t_0) \\ 0 & (t > t_0) \end{cases} \quad (5)$$

可以看出,船-桥碰撞荷载由碰撞荷载峰值 P_0 和碰撞持续时间 t_0 确定。碰撞持续时间考虑冲击的特性一般较短,碰撞荷载主要由碰撞荷载峰值 P_0 确定。我国《公路桥梁抗撞设计规范》^[17] 考虑了碰撞物体质量、速度、碰撞角度等参数,对该荷载模式的峰值系数进行了修正。

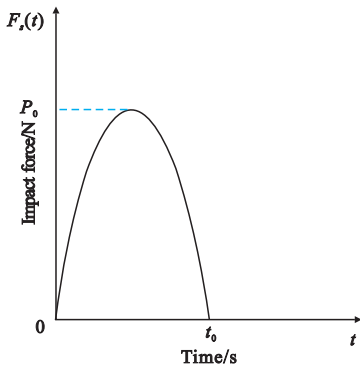


图4 碰撞荷载模式
Fig. 4 Collision load pattern

3 结构碰撞冲击作用下响应峰值与碰撞荷载峰值的关系

结构碰撞往往是意外突发事故,即便结构安装有健康监测系统,也只能得到结构碰撞时的响应,实际碰撞的荷载大小往往很难确定。根据船-桥碰撞荷载模式(5),如果建立碰撞响应峰值与碰撞荷载峰值之间的关系,那么就可以由碰撞时的结构响应峰值确定碰撞荷载。以峰值为 P_0 的半正弦碰撞荷载 $P_0 \sin(\omega_0 t)$ 作用下的简支梁为例,如图5所示,来探究荷载峰值与响应峰值之间的关

系,梁跨度为 l ,碰撞荷载距离左支座为 x_0 。

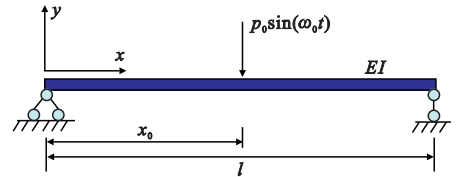


图5 碰撞冲击作用下的梁
Fig. 5 A beam under collision loading

梁的振动微分方程为

$$EI \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = P_0 \sin(\omega_0 t) \quad (6)$$

其中 EI 为梁的抗弯刚度, \bar{m} 为单位梁长的质量, c 为粘性阻尼系数。根据分离变量法和模态叠加原理求梁的竖向位移 $u(x,t)$ 表示为

$$u(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j(t) Y_j(x) \quad (7)$$

式中 $\varphi_j(t)$ 为相应的模态坐标,表示 t 时刻第 j 阶振型振动的幅值; $Y_j(x)$ 为第 j 阶的振型函数,相应的固有圆频率为 ω_j 。针对简支梁,振型函数可以取为

$$Y_j(x) = \sin\left(\frac{j\pi x}{l}\right) \quad (j=1,2,3,\dots,n) \quad (8)$$

$$\omega_j = j^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{\bar{m} l^4}} \quad (j=1,2,\dots) \quad (9)$$

通过一系列化简,最终该简支梁振动微分方程可分解为单自由度的形式,即

$$\ddot{\varphi}_j(t) + 2\zeta_j \omega_j \dot{\varphi}_j(t) + \omega_j^2 \varphi_j(t) = \frac{2P_0 \sin(\omega_0 t)}{\bar{m} l} \sin\left(\frac{j\pi x_0}{l}\right) \quad (j=1,2,\dots,\infty) \quad (10)$$

式中 $\xi_j = \frac{c}{2\bar{m}\omega_j}$ 为第 j 阶模态的阻尼比

利用 Duhamel 积分求解可得

$$\varphi_j(t) = \frac{2P_0}{\bar{m} l \omega_{dj}} \sin \frac{j\pi x_0}{l} \int_0^t \sin(\omega_0 \tau) e^{-\xi_j \omega_j (t-\tau)} \sin \omega_{dj} (t-\tau) d\tau \quad (11)$$

其中 $\omega_{dj} = \omega_j \sqrt{1-\xi_j^2}$ 为考虑阻尼时第 j 阶的自振频率。考虑小阻尼的情况,即取 $\omega_{dj} \approx \omega_j$, 对方程(11)进行化简整理可得

$$\varphi_j(t) = \frac{2l^3 P_0}{j^4 EI \pi^4} \frac{\omega_j^2 \sin(\omega_0 t) - \bar{\omega}_j \sin(\omega_j t)}{\sqrt{(1-\bar{\omega}_j^2)^2 + (2\zeta_j \bar{\omega}_j)^2}} \cdot \sin \frac{j\pi x_0}{l} \quad (12)$$

其中 $\bar{\omega}_j = \frac{\omega_j}{\omega_0}$ 为频率比。

假设初始位移 $u(x,0)=0$ 和初始速度 $\dot{u}(x,0)=0$, 把式(12)代入式(7), 即可求出半正弦

碰撞荷载作用下梁的位移、速度和加速度。

$$u(x,t) = \frac{2l^3 P_0}{\pi^4 EI} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^4} \frac{\bar{\omega}_j^2 \sin(\omega_0 t) - \bar{\omega}_j \sin(\omega_j t)}{\sqrt{(1 - \bar{\omega}_j^2)^2 + (2\zeta_j \bar{\omega}_j)^2}} \sin\left(\frac{j\pi x_0}{l}\right) \sin\left(\frac{j\pi x}{l}\right) \quad (13)$$

$$\dot{u}(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \frac{2l^3 P_0}{\pi^4 EI} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\omega_j}{j^4} \frac{\bar{\omega}_j \cos(\omega_0 t) - \bar{\omega}_j \cos(\omega_j t)}{\sqrt{(1 - \bar{\omega}_j^2)^2 + (2\zeta_j \bar{\omega}_j)^2}} \sin\left(\frac{j\pi x_0}{l}\right) \sin\left(\frac{j\pi x}{l}\right) \quad (14)$$

$$\ddot{u}(x,t) = \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = \frac{2l^3 P_0}{\pi^4 EI} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\omega_j^2}{j^4} \frac{\bar{\omega}_j \sin(\omega_j t) - \sin(\omega_0 t)}{\sqrt{(1 - \bar{\omega}_j^2)^2 + (2\zeta_j \bar{\omega}_j)^2}} \sin\left(\frac{j\pi x_0}{l}\right) \sin\left(\frac{j\pi x}{l}\right) \quad (15)$$

以图 5 所示的梁为例,梁矩形截面长、宽、高分别为 3 m,0.125 m,0.025 m,碰撞荷载作用位置 x_0 为 1 m。荷载峰值 P_0 分别取 5 N,10 N,15 N,20 N。任取梁上的两个响应点记为 point A 和 point B,本文所取响应点分别距离碰撞位置分别为 0.5 m 和 1.2 m,碰撞持续时间 t_0 分别取 0.2 s,0.4 s,0.6 s,0.8 s 和 1.0 s 五种工况。利用方程 (13~15) 可以计算出 point A 和 point B 的位移、速度和加速度的响应时程,进而可以获取位移最大峰值 u_{\max} ,速度最大峰值 \dot{u}_{\max} ,加速度最大峰值 \ddot{u}_{\max} 。以其中一个加速度时程响应为例并获取其峰值,如图 6 所示。

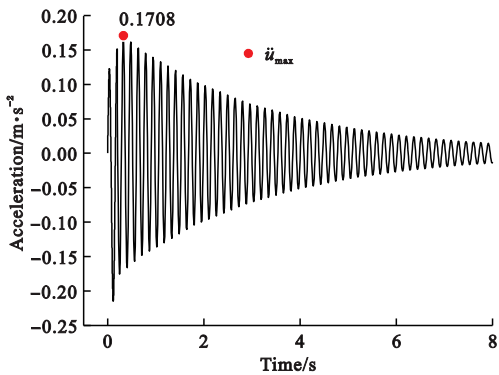


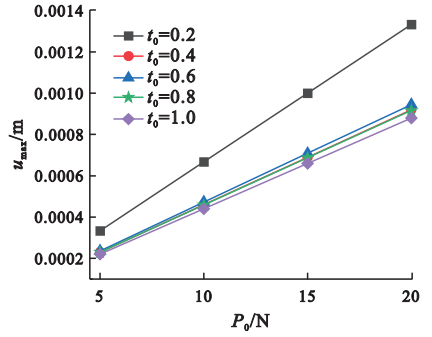
图 6 加速度响应与相应的峰值

Fig. 6 Acceleration response and corresponding peak value

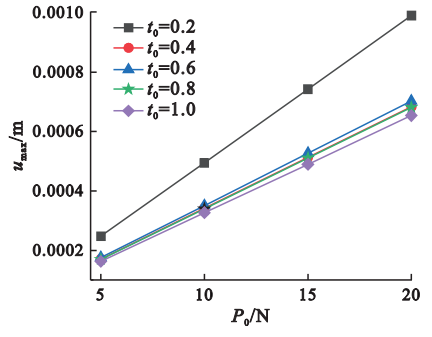
针对不同碰撞荷载持续时间,其位移响应、速度响应和加速度响应峰值与碰撞荷载峰值之间的关系分别如图 7~图 9 所示。

结果表明,结构响应峰值随碰撞荷载的增大而增大,位移、速度和加速度响应峰值与碰撞荷载峰值之间均为线性关系,且这种线性关系不受碰撞荷载作用时间 t_0 的影响。利用该线性关系

的性质,在已知结构碰撞响应峰值的情况下,不需要繁琐的计算便可对碰撞荷载峰值进行估算与识别。



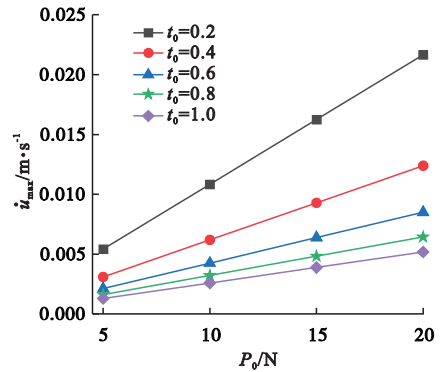
(a) Point A



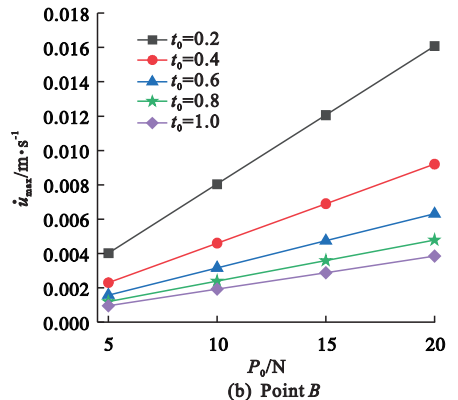
(b) Point B

图 7 碰撞荷载峰值与位移响应峰值的关系

Fig. 7 Relationship between impact load peak and displacement response peak



(a) Point A



(b) Point B

图 8 碰撞荷载峰值与速度响应峰值的关系

Fig. 8 Relationship between impact load peak and velocity response peak

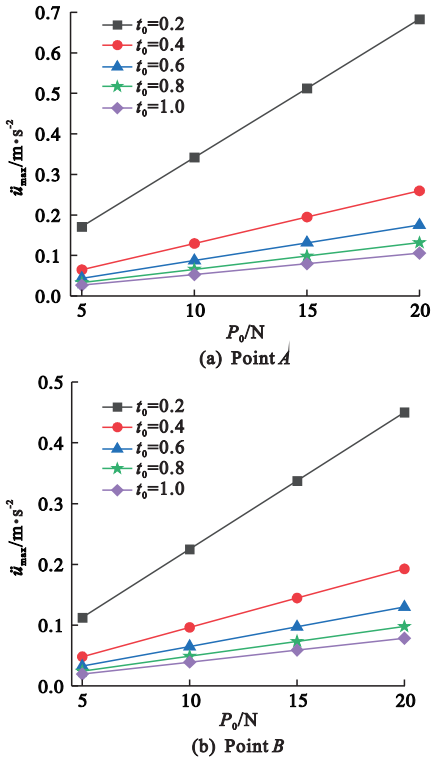


图9 碰撞荷载峰值与加速度响应最大峰值的关系
Fig. 9 Relationship between impact load peak and acceleration response peak

4 连续梁数值算例

为了说明针对上述简支梁解析推导出的结构响应峰值与碰撞荷载峰值之间成线性的关系适用于超静定结构碰撞问题,以图 10 所示的等跨连续梁例进行数值计算验证。梁总长度为 $2l$,每跨长度 l 为 30 m,碰撞荷载作用于右跨跨中,取梁上 A, B 为响应测点。

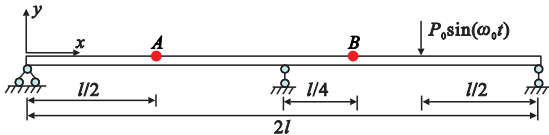


图 10 碰撞冲击作用下的连续梁
Fig. 10 Continuous beam under collision loading

碰撞荷载峰值 P_0 分别取为 10 kN, 15 kN, 20 kN, 25 kN; 碰撞持续时间 t_0 分别为 0.2 s, 0.4 s, 0.6 s, 0.8 s, 数值计算梁上 A, B 两点碰撞时的位移响应峰值 u_{\max} 、速度响应峰值 \dot{u}_{\max} 和加速度响应峰值 \ddot{u}_{\max} 。则可获得连续梁上点 A 和点 B 响应峰值与碰撞荷载峰值之间的关系,如图 11~图 13 所示。

计算结果表明,连续梁发生碰撞时,结构响应峰值随碰撞荷载的增大而增大,位移、速度和加速度响应峰值与碰撞荷载峰值之间均为线性关系,且

这种线性关系的成立不受碰撞持续时间的影响。

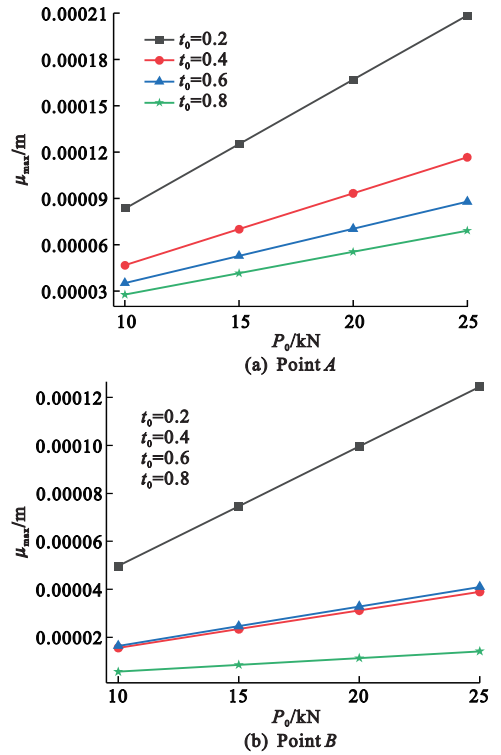


图 11 连续梁碰撞荷载峰值与位移响应峰值的关系
Fig. 11 Relationship between impact load peak and displacement response peak of continuous beam

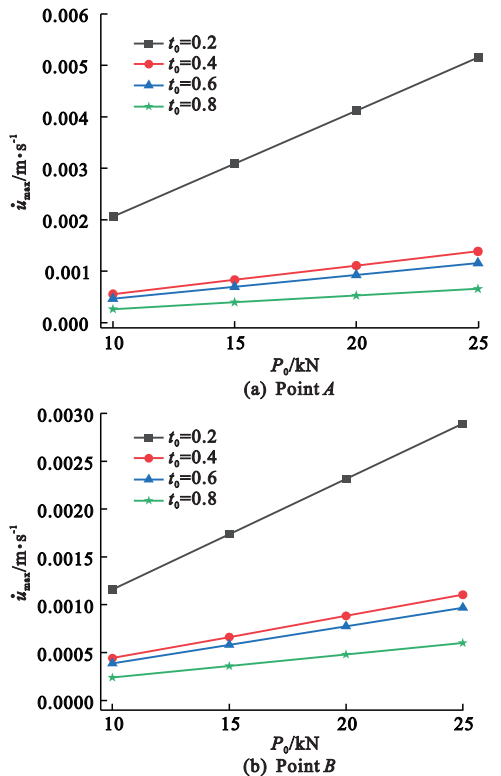


图 12 连续梁碰撞荷载峰值与速度响应峰值的关系
Fig. 12 Relationship between impact load peak and velocity response peak of continuous beam

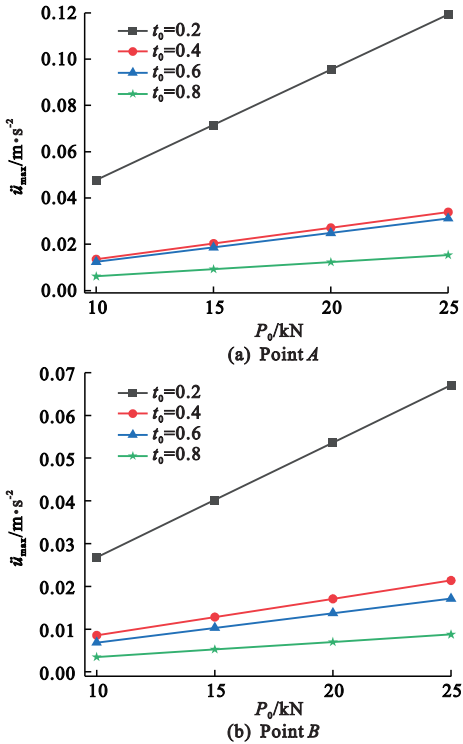


图 13 连续梁碰撞荷载峰值与加速度响应峰值的关系
Fig. 13 Relationship between impact load peak and acceleration response peak of continuous beam

5 试验验证

上述简支梁和连续梁数值算例结果表明,碰撞荷载峰值与响应峰值之间的线性关系不受边界条件的影响。为进一步验证碰撞荷载峰值与响应峰值之间的线性关系,以一简支梁为模型,进行碰撞冲击试验。冲击荷载采用力锤施加,响应信号为加速度。试验方案和数据采集如图 14 所示,在距离梁端部 100 cm 处设置力锤作用点,加速度响应测点 Point 1 和 Point 2 分别距离锤击点为 50 cm 和 120 cm,数据采集系统同时记录力锤碰撞冲击荷载和两测点加速度数据响应。在试验过程中利用力锤多次碰撞冲击简支梁的冲击点,以改变碰撞荷载

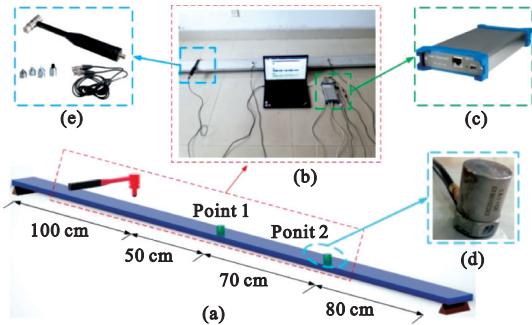


图 14 简支梁碰撞试验:(a)传感器布置;(b)数据采集;(c)数据采集模块;(d)加速度传感器;(e)力锤
Fig. 14 Beam impact test setup (a) sensor arrangement; (b) data acquisition; (c) data acquisition module; (d) acceleration sensor; (e) hammer

大小。两次碰撞冲击试验之间间隔一定的时间,以使梁的响应彻底衰减。

试验中采样频率均为 500 Hz,采集时长 567.05 s,每个通道共采集 283528 个数据。图 15 为某一次冲击试验时碰撞力时程和两个测点的加速度响应时程,并分别标注了碰撞荷载峰值 P_0 和加速度响应峰值 \ddot{u}_{max} 。

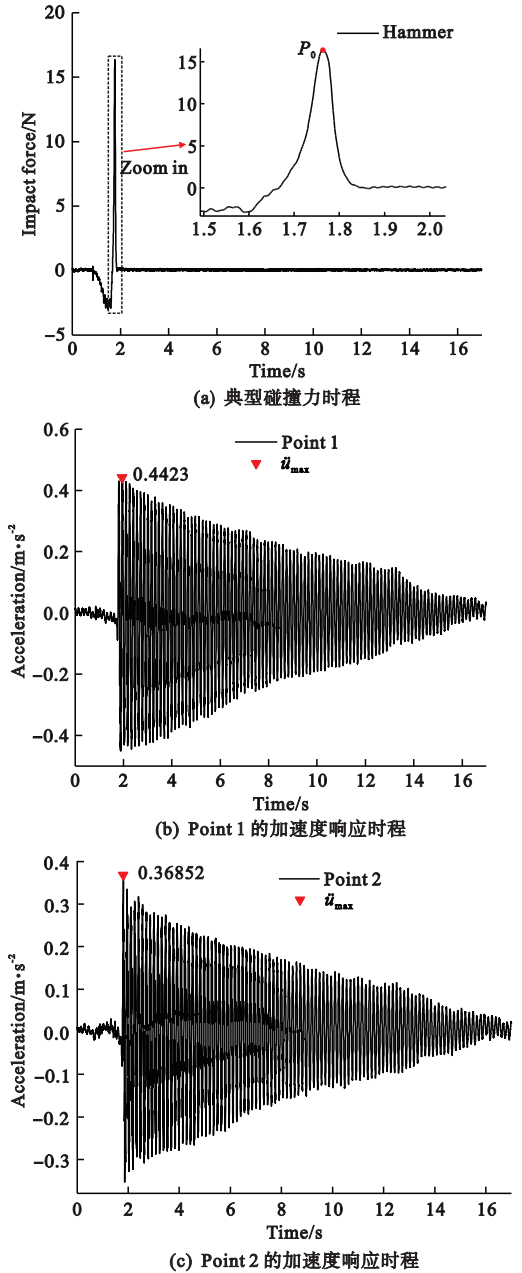


图 15 碰撞力和加速度响应试验数据
Fig. 15 Test data of impact force and acceleration

图 16 为多次冲击试验获得的力锤碰撞荷载和加速度时程曲线,其中冲击荷载峰值 P_0 的范围为 4.38 N~16.35 N;冲击持续时间变化范围为 0.166 s~0.236 s,均值为 0.201 s。可以看出,每个冲击荷载峰值均对应一个加速度响应峰值,荷载峰值越大,则加速度响应峰值越大。

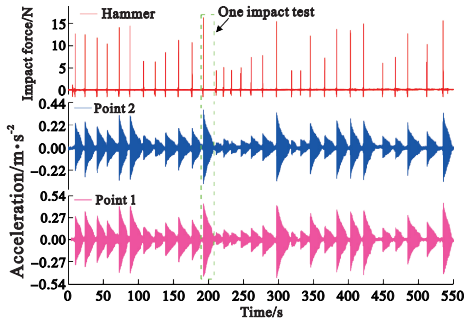


图 16 试验实测冲击荷载与加速度响应数据

Fig. 16 Measured impact load and acceleration response data

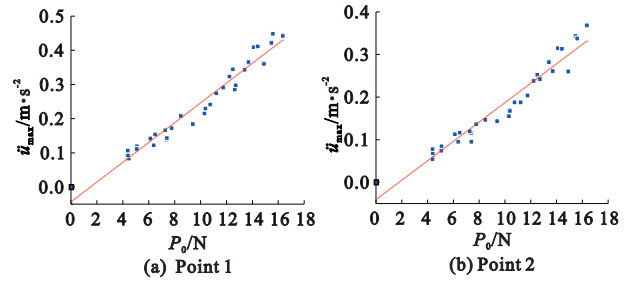


图 17 碰撞荷载峰值与加速度最大峰值关系

Fig. 17 Relationship between peak impact load and maximum peak acceleration

表 1 碰撞荷载峰值实测值与识别值比较

Tab. 1 Comparison of impact load peak values between measurement and identification

No.	Test of P_0 / N	Test of $\ddot{u}_{\max} / m \cdot s^{-2}$		Identification of P_0 / N			
		Point 1	Point 2	Point 1	Error/%	Point 2	Error/%
1	12.63	0.286	0.240	11.37	9.97	12.33	2.37
2	12.49	0.345	0.253	13.4	-7.28	12.90	-3.30
3	11.73	0.291	0.204	11.55	1.54	10.75	8.35
4	10.37	0.230	0.168	9.43	9.05	9.17	11.58
5	14.09	0.409	0.315	15.63	-10.93	15.62	-10.89
6	14.41	0.412	0.314	15.72	-9.08	15.58	-8.13
7	6.48	0.154	0.117	6.81	-5.16	6.93	-6.93
8	6.38	0.123	0.095	5.73	10.24	5.96	6.53
9	8.47	0.208	0.147	8.69	-2.57	8.25	2.63
10	11.20	0.275	0.188	10.98	1.98	10.05	10.29
11	10.73	0.242	0.188	9.85	8.24	10.05	6.36
12	16.35	0.442	0.369	16.77	-2.59	18.00	-10.07
13	4.38	0.084	0.055	4.38	-0.04	4.21	3.96
14	5.08	0.120	0.085	5.63	-10.8	5.52	-8.74
15	4.46	0.084	0.065	4.38	1.71	4.65	-4.16
16	5.06	0.111	0.074	5.34	-5.57	5.04	0.38
17	7.37	0.139	0.116	6.3	14.5	6.89	6.58
18	7.76	0.173	0.136	7.46	3.9	7.76	-0.05
19	15.46	0.422	0.343	16.07	-3.93	16.85	-9.02
20	4.39	0.093	0.069	4.7	-7.03	4.82	-9.82
21	4.38	0.107	0.078	5.18	-18.26	5.22	-19.10
22	12.22	0.323	0.238	12.67	-3.67	12.24	-0.19
23	7.26	0.167	0.120	7.25	0.14	7.06	2.74
24	13.70	0.366	0.261	14.14	-3.21	13.25	3.26
25	13.40	0.343	0.282	13.35	0.35	14.18	-5.79
26	14.89	0.361	0.260	13.95	6.31	13.21	11.29
27	6.11	0.142	0.113	6.4	-4.83	6.75	-10.53
28	7.39	0.144	0.095	6.45	12.7	5.96	19.31
29	12.70	0.298	0.243	11.79	7.2	12.46	1.87
30	10.30	0.215	0.155	8.93	13.26	8.60	16.52
31	15.59	0.448	0.338	16.98	-8.92	16.64	-6.70
32	9.39	0.184	0.144	7.87	16.22	8.12	13.58

提取多次试验的碰撞荷载峰值及其对应的 Point 1 和 Point 2 处的加速度响应峰值,并以荷载峰值为横坐标,加速度响应峰值为纵坐标绘制如图 17 所示的散点图。然后利用最小二乘法进行线性拟合,分别得到 Point 1 和 Point 2 处碰撞荷载与加速度峰值之间的方程(16)和方程(17),且相关系数均在 0.95 以上,表明碰撞荷载峰值与响应峰值之间为线性关系。

$$\ddot{u}_{\max} = 0.02895P_0 - 0.04328 \quad (16)$$

$$\ddot{u}_{\max} = 0.02277P_0 - 0.04078 \quad (17)$$

根据点 Point 1 和 Point 2 的加速度实测峰值 \ddot{u}_{\max} ,分别由方程(16,17)来识别碰撞荷载峰值 P_0 ,列入表 1。可以看出,无论采用点 Point 1 还是采用点 Point 2 处碰撞响应峰值,均可估算出碰撞荷载峰值。需要指出的是,表 1 在所有试验计算结果中,有 2 次计算的误差较大,分别为 19.10% 和 19.31%,这种误差可能是由于试验过程测量误差导致的,除此之外,大部分情况下均能满足工程实际要求。

6 结 论

在大型重要结构普遍安装长期健康监测系统的情况下,针对突然发生的结构碰撞事故,仅可以得到碰撞过程结构的动力响应,但碰撞荷载的大小往往难以确定。本文从理论上探讨结构在半正弦碰撞荷载作用下动力响应峰值和碰撞荷载峰值之间的关系,发现结构响应峰值与碰撞荷载峰值之间存在线性关系,并采用试验验证了这种线性关系,建立了仅知道结构响应峰值估算碰撞冲击荷载峰值的方法。论文的主要结论如下。

(1)大型结构物之间的碰撞荷载一般为半正弦模式,考虑到碰撞持续的时间较短,其荷载峰值是控制碰撞荷载的关键参数。以梁在半正弦冲击荷载作用下的动力响应解析解为例,表明动力响应峰值与碰撞荷载峰值之间存在线性关系,且该线性关系不受碰撞持续时间和结构响应位置的影响。

(2)连续梁数值模拟算例结果表明,结构响应峰值与碰撞荷载峰值之间的线性关系同样适用于超静定结构。

(3)简支梁碰撞冲击试验验证了加速度响应峰值与冲击荷载峰值之间的线性关系,线性相关系数均在 0.95 以上。结果表明,采用不同测点冲击响应峰值,利用结构响应峰值与冲击荷载峰值之间的线性关系,可以较好地估算出碰撞冲击荷载的峰值。

(4)建立的仅基于结构动力响应峰值估算碰撞荷载峰值的方法,不涉及复杂的结构动力学逆问题理论计算,方便工程实际应用,可用于结构(桥梁)意外碰撞事故(船撞)时碰撞荷载的识别。

参考文献(References):

- [1] Pedersen P T, Chen J, Zhu L. Design of bridges against ship collisions[J]. *Marine Structures*, 2020, **74**:102810.
- [2] Luperi F J, Pinto F. Structural behavior of barges in high-energy collisions against bridge piers[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, **21**(2):04015049.
- [3] 曹明,张南,沈强,等.船桥撞击力影响因素有限元仿真模拟分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, **41**(3):603-611. (CAO Ming, ZHANG Nan, SHEN Qiang, et al. Finite element simulation of influencing factors of ship-bridge impact force[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, **41**(3):603-611. (in Chinese))
- [4] Consolazio G R, Davidson M T. Simplified dynamic analysis of barge collision for bridge design[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2008, **2050**(1):13-25.
- [5] 王君杰,陈诚,汪宏,等.基于碰撞数值模拟的桥梁等效静力船撞力—基本公式[J]. *公路交通技术*, 2009, **25**(2):66-70. (WANG Jun-jie, CHEN Cheng, WANG Hong, et al. Equivalent static force of ship impact to bridge based on impact numeric simulation—fundamental formula[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2009, **25**(2):66-70. (in Chinese))
- [6] Sha Y Y, Amdahl J. A simplified analytical method for predictions of ship deckhouse collision loads on steel bridge girders[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2019, **14**(s1):121-134.
- [7] Fan W, Liu Y Z, Liu B, et al. Dynamic ship-impact load on bridge structures emphasizing shock spectrum approximation[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, **21**(10):04016057.
- [8] 张爱锋,刘少康,苏琳芳.多因素影响下的船桥碰撞力神经网络预测方法研究[J]. *船舶力学*, 2020, **24**(11):1470-1478. (ZHANG Ai-feng, LIU Shao-kang, SU Lin-fang. Research on neural network prediction method of ship-bridge collision force under the influences of multi-factors[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, **24**(11):1470-1478. (in Chinese))
- [9] Wang J J, Song Y C, Yu Z R. Impact factor method for design of bridge foundations under ship collisions[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2017, **20**(4):534-548.
- [10] Song Y C, Wang J J, Han Q. A simplified model of impact force time-history for bridge pier-barge collision[J]. *Ocean Engineering*, 2022, **264**:112464.
- [11] Wang W, Zhou F, Zhong J. An efficient axial-flexure-shear fiber beam model for dynamic analyses of beam-column framed structural systems under im-

- pact loading [J]. *Ocean Engineering*, 2022, **245**: 110349.
- [12] Chen T L, Wu H, Fang Q. Impact force models for bridge under barge collisions [J]. *Ocean Engineering*, 2022, **259**: 111856.
- [13] Gholpour G, Zhang C W, Mousavi A A. Analysis of girder bridge pier subjected to barge collision considering the superstructure interactions: The case study of a multiple-pier bridge system [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2019, **15**(3): 392-412.
- [14] Oppong K, Saini D, Shafei B. Characterization of impact-induced forces and damage to bridge superstructures due to over-height collision [J]. *Engineering Structures*, 2021, **236**: 112014.
- [15] Aashto . Guide Specifications and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges [R]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Official, 1991.
- [16] JTG D60-2015. 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (JTG D60-2015. General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [17] JTG/T 3360-02-2020. 公路桥梁抗撞设计规范[S]. 行业标准, 2020. (JTG/T 3360-02-2020. Specifications for Collision Design of Highway Bridges[S]. Industry Standard, 2020. (in Chinese))
- [18] Hashemi S K, Bradford M A, Valipour H R. Dynamic response of cable-stayed bridge under blast load [J]. *Engineering Structures*, 2016, **127**: 719-736.
- [19] Sun J Q, Huang Y. Investigations on the ship-ice impact: Part 2. Spatial and temporal variations of ice load [J]. *Ocean Engineering*, 2021, **240**: 109686.
- [20] Brackin M S, Abu-oden A, Buth C E, et al. Impact forces from heavy-vehicle collisions with bridge piers [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2012, **2313**(1): 42-51.
- [21] Cowan D R, Consolazio G R, Davidson M T. Response-spectrum analysis for barge impacts on bridge structures [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, **20**(12): 04015017.
- [22] Sun W B, Fan W, Yang C C, et al. Lessons learned from vehicle collision accident of Dongguofenli Bridge: FE modeling and analysis [J]. *Engineering Structures*, 2021, **244**: 112813.
- [23] Kantrales G C, Consolazio G R, Wagner D, et al. Experimental and analytical study of high-level barge deformation for barge-bridge collision design [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, **21**(2): 04015039.
- [24] Xu L J, Lu X Z, Guan H, et al. Finite-element and simplified models for collision simulation between overheight trucks and bridge superstructures [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, **18**(11): 1140-1151.

Structural impact load identification based on peak dynamic response

ZHU Ya-fei¹, REN Wei-xin^{*2}

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The collision between a ship or a vehicle and a bridge structure is a complex dynamic process, and the impact load pattern of collision generally is a semi-sinusoidal distribution. Given the extensive application of long-term health monitoring systems in major structures, it is an urgent problem to identify the impact load using only the dynamic response of structures, the key to which is to find the relationship between the impact load and the dynamic response. Taking a beam subjected to half-sine impact as a mechanical model, the dynamic response of the beam is obtained based on the modal superposition method and Duhamel's integral, and the correlation between the peak dynamic response of the structure and the peak impact load is constructed. The results show that there is a linear relationship between the peak response and the peak impact load, and that this linear relationship is independent of the impact duration and the location of structural response, which is further verified by the beam tested at different impact forces. Therefore, if the peak dynamic response of a structure is known at two or more different locations, the peak impact load can be determined using the linear relationship between the peak response and the peak impact load. The method does not involve complicated theoretical calculations of dynamic inverse dynamic problems and enables the identification of impact loads in the event of accidental impact of a structure.

Key words: structural impact; structural response; Impact load; Load identification; peak value