



基于Green函数的轮胎冲击载荷特性反演方法

师桂杰 李强 王德禹

Study of inversion method of tire impact load characteristics based on Green function

SHI Guijie, LI Qiang, WANG Deyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03667>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

载重轮胎的轮印载荷分布特性试验研究

Experimental study on wheel load distribution characteristics of truck tires

中国舰船研究. 2021, 16(6): 140-150 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02121>

车辆甲板次要构件多轮印载荷等效与简化方法

Equivalence and simplification of multi-wheel loading on secondary member of vehicle deck

中国舰船研究. 2024, 19(5): 166-171 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03499>

轴向循环载荷下加筋板极限承载性能分析

Analysis of ultimate load-bearing behavior of stiffened plate under axial cyclic loading

中国舰船研究. 2022, 17(4): 204-211 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02400>

基于输入状态联合估计的漂浮式风机塔架结构载荷反演及状态分析

Structural load inversion and state analysis of floating wind turbine tower based on joint input-state estimation

中国舰船研究. 2024, 19(4): 167-175 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03885>

典型舱内爆炸载荷对加筋板的毁伤特性

Damage characteristics of stiffened plates in typical cabin explosion load

中国舰船研究. 2021, 16(2): 108-115, 124 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01841>

面内循环载荷下基于弹性安定临界状态的船体加筋板极限强度预测公式

Hull stiffened plate ultimate strength prediction formula based on elastic shakedown limit state under in-plane cyclic loading

中国舰船研究. 2024, 19(5): 114-121 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03380>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

引用格式: 师桂杰, 李强, 王德禹. 基于 Green 函数的轮胎冲击载荷特性反演方法 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(X): 1-9.

SHI G J, LI Q, WANG D Y. Study of inversion method of tire impact load characteristics based on Green function[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(X): 1-9 (in Chinese).

基于 Green 函数的轮胎冲击载荷 特性反演方法



扫码阅读全文

师桂杰^{1,2}, 李强³, 王德禹^{*1,2}

1 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240

2 上海交通大学 海洋装备研究院, 上海 200240

3 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093

摘要: [目的] 旨在通过结构响应间接识别轮胎冲击载荷及其分布特性, 为甲板设计与安全评估提供依据, 提出一种基于 Green 函数的载荷反演方法。[方法] 以某船甲板加筋板为研究对象, 利用 Green 函数将冲击载荷表示为单位脉冲载荷的叠加, 通过有限元仿真得到 Green 核函数矩阵, 并结合广义交叉验证准则的 Tikhonov 正则化方法, 建立载荷反演模型。针对单个轮胎及多个轮胎冲击工况, 分析多源载荷对反演精度的影响; 对于凸型、马鞍型和凹型 3 种典型轮印载荷分布形式, 通过等效划分受力区域并施加单位脉冲载荷, 完成载荷分布特性的反演。[结果] 结果表明, 所提方法能有效识别轮胎冲击载荷的时间历程和分布特性, 反演相对误差均小于 5%。其中, 基于应变和位移响应的反演精度较高, 误差低于 2%; 即使在 5% 噪声干扰下, 反演结果仍与实际载荷基本一致。[结论] 所提方法解决了冲击载荷作用时间短、结构响应范围有限以及多源载荷联合作用带来的反演难题, 为实船轮印载荷识别提供了新思路, 具有重要的工程应用价值。

关键词: 甲板设计; 结构响应; 加筋板; 承载能力; 冲击载荷; 轮印载荷分布; Green 函数; 载荷反演; 数值仿真

中图分类号: U663.6; U661.43

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03667

0 引言

轮印载荷具有局部集中及作用位置不固定的特点^[1], 其分布形式对船舶甲板变形和应力分布有着显著影响。在飞行甲板的舰载机冲击、车辆甲板积发生货物跌落冲击等情况下, 轮胎与船舶甲板的接触载荷情况尤为复杂, 极端情况下甚至会威胁船舶甲板结构安全性。然而, 由于技术条件的限制, 直接测量轮胎接触区域的冲击载荷较为困难。相比之下, 测量甲板冲击响应相对容易。因此, 有必要通过结构响应来实现冲击载荷时间历程的有效反演, 从而为甲板设计与安全评估提供可靠的依据。船舶甲板作为一种典型的加筋板结构^[2], 其在受到轮胎冲击时的载荷特性研究具有重要意义。本文将通过反演方法, 对轮胎

冲击下载荷时间历程及其分布特性的识别进行研究。

在轮印载荷分布的研究方面, 已有诸多学者开展了相关工作。刘聪等^[3]采用橡胶块加压的方式模拟轮印载荷, 并测量加筋板与橡胶块之间的接触应力, 从而探究了轮印载荷的分布特性规律。Wesołowski 等^[4]研究了轮胎压力以及车轮与机场路面之间的压力对接触表面面积的影响, 进一步分析了轮印载荷形状和应力分布方式。Zhu 等^[5]借助实验和数值方法, 针对轮胎准静态加载下加筋板的非线性弹塑性响应展开研究, 并提出了基于侧向荷载与加筋板永久变形关系的简单公式。此外, Zhu 等^[6]还研究了压头对甲板冲击载荷下的动态响应, 并建立了预测在不同初始冲击能量作用下板变形的计算程序。Omidali 等^[7]以受卡车车轮影响的船舶加筋板结构为研究对象,

收稿日期: 2023-11-29 修回日期: 2024-01-04 网络首发时间: 20xx-xx-xx xx:xx

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2241266, 51809168, 51979163, 52175239) 海洋装备前瞻基金资助项目 (ZCJDQZ202304B02)

作者简介: 师桂杰, 男, 1984 年生, 博士, 高级工程师。研究方向: 结构非线性力学性能。E-mail: sgi2004@sjtu.edu.cn

李强, 男, 1995 年生, 硕士。研究方向: 冲击载荷识别。E-mail: liqiang199724@163.com

王德禹, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师。研究方向: 船舶与海洋工程结构力学。E-mail: dywang@sjtu.edu.cn

*通信作者: 王德禹

针对不同的轴载荷分布函数,计算了失效概率和可靠性指数。Polasik 等^[8]研究了轮胎压力和负载变化对轮胎与道路接触表面积的影响,并提出了轮印面积的测量方法。在反演研究方面,何帅康等^[9]提出了一种基于动力效应的冰载荷反演方法,通过船体受到的应变响应对冰载荷进行反演识别。孔帅等^[10]对比船体上冲击载荷信号和测量的应变信号之间的相关性,确定了最佳的传感器布置方案。

综上,以上研究基本上针对准静态载荷工况,而对车辆在船上跌落或舰载机着舰等轮胎冲击载荷的反演研究相对较少。因此,本文拟通过反演的方式识别甲板上轮胎冲击载荷。具体而言,将冲击载荷在时域内表示为一系列 Green 单位脉冲核函数的叠加,系统响应是单位脉冲载荷引起响应与冲击载荷的卷积积分。通过测出轮胎冲击下的系统响应,进而反演出不同分布特性下轮胎冲击载荷分布情况。

1 基于 Green 函数冲击载荷反演方法

1.1 基于 Green 函数建立正问题

对于单源载荷反演,根据线性系统、时不变系统的叠加原理可得,输入载荷 $p(\tau)$ 引起的响应 $y(t)$ 可以由一系列单位脉冲载荷下的响应 $g(t)$ 线性组合进行表示^[11],即

$$y(t) = \int_0^t p(\tau)g(t-\tau)d\tau \quad (1)$$

式中, τ 表示时移因子且 $t \geq \tau$ 。

由于实际测量的响应是一些离散数据,需要对式(1)进行离散处理,将式(1)所示的卷积积分离散为线性方程组:

$$\begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 & & & \\ g_2 & g_1 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ g_m & g_{m-1} & \cdots & g_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_m \end{Bmatrix} \Delta t \quad (2)$$

式中: y_i, g_i, p_i 分别表示在 $t = i\Delta t$ 时刻的测点响应、系统由载荷作用点至响应测点的 Green 函数值、作用在系统上的载荷。

进一步地,式(2)表述为第一类算子方程的矩阵形式:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{p} \quad (3)$$

载荷识别问题可转化为,已知响应 \mathbf{y} 和核函数矩阵 \mathbf{G} ,进而反求载荷 \mathbf{p} 。但是载荷反演具有反问题的不稳定性,不能直接通过求逆得到载

荷,故需要通过 1.2 节介绍的正则化方法来提高解的稳定性。

当受到多个载荷作用时,系统的总响应可由各载荷引起响应的线性叠加表示,其中单个载荷产生的响应依然可通过该载荷与相应脉冲响应函数,进行卷积得到。因此,多源载荷问题可以表示为矩阵-矢量的形式:

$$\begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1N} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{M1} & G_{M2} & \cdots & G_{MN} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_N \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中, M 为响应点的数目; N 为载荷作用点数目; G_{MN} 表示响应 y_M 和载荷 p_N 之间的核函数矩阵。在多源载荷反演中需要使响应点数目大于等于载荷作用点数目,这样才能保证方程(4)处于适定或超定状态下求解。

1.2 载荷反演正则化方法

Tikhonov 正则化技术^[12]是由变分原理导出的,通过引入稳定的泛函数来实现。其原理是通过在残差范数 $\|\mathbf{G}\mathbf{p} - \mathbf{y}\|_2$ 和解范数 $\|\mathbf{p}\|_2$ 之间寻找一个合适的正则化参数 λ ,对奇异值进行修正,以提高解的稳定性。其目标函数可以写为

$$\arg \min_p \|\mathbf{G}\mathbf{p} - \mathbf{y}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{p}\|_2^2 \quad (5)$$

对目标函数式(5)关于 p 求导后整理,可得

$$\mathbf{p} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{y} \quad (6)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{y} 测量的响应; \mathbf{p} 为载荷。

通过寻找合适的正则化参数 λ ,可反演出载荷 \mathbf{p} 。目前使用比较多的正则化选取准则有 L 曲线准则以及广义交叉验证准则(GCV)^[13],本文选择适应性较强的 GCV 准则。

2 轮胎冲击载荷反演方法研究

2.1 研究对象

为研究轮胎冲击下载荷反演,本文设计了如图 1 所示的加筋板模型。该模型来源于实船甲板的某块加筋板,模型结构尺寸如表 1 所示。材料使用 Q235 钢,密度为 $7.85 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$,弹性模量 $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比 0.3,阻尼假设为比例阻尼。网格为 20 mm 的壳单元网格,加筋板四边固支。轮胎可看作规则的回转体。首先,对二维横剖面进行网格划分,图 2 所示;然后,再以二维横剖面网格为基准,绕轮胎中心进行三维扫描,即可得

到轮胎三维模型。该轮胎型号为 275/60R17, 即轮胎宽度为 275 mm, 扁平率为 60%。轮胎各材料参数如表 2 所示。假定轮胎以 1m/s 的速度冲击加筋板。

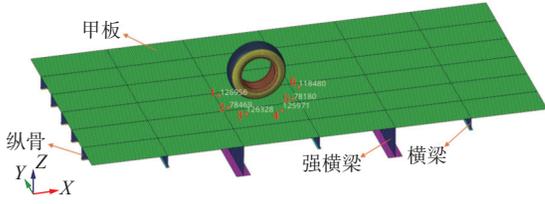


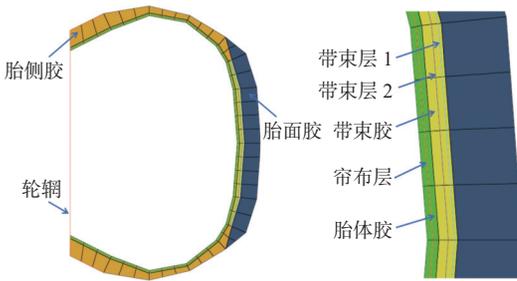
图 1 轮胎冲击加筋板结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tire impact on stiffened plate structure

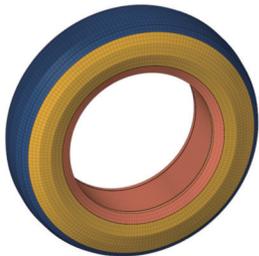
表 1 加筋板结构尺寸

Table 1 Structural dimensions of stiffened plate

参数	数值
总长/m	7.2
总宽/m	3.6
板厚/m	0.016
纵板厚/m	0.6
横梁间距/m	1.2
纵骨(长×宽×厚)/m	7.2*0.2*0.01
横梁(长×宽×厚)/m	3.6*0.2*0.01
强横梁(长×宽×厚)/m	3.6*0.5*0.01



(a) 二维横剖面



(b) 三维轮胎模型

图 2 轮胎有限元模型

Fig. 2 Finite element model of tire

2.2 单个轮胎冲击加筋板

研究中, 让轮胎在同一高度分别对不同网格单元尺寸 of 加筋板中心处进行冲击。不同网格尺寸下的最大应变值如图 3 所示。经计算, 20 mm

表 2 轮胎各材料参数

Table 2 Material parameters of tire components

材料名称	Yeoh 模型材料参数			杨氏模量 /MPa	泊松比	密度 /($t \cdot mm^{-3}$)
	C ₁₀	C ₂₀	C ₃₀			
胎面胶	0.658 165	-0.095 07	0.026 315	-	-	1.13×10^{-9}
胎侧胶	0.378 013	-0.064 52	0.012 688	-	-	1.09×10^{-9}
带束层胶	1.079 26	-0.078 21	0.033 738	-	-	1.18×10^{-9}
胎体胶	1.092 19	-0.127 03	0.049 518	-	-	1.18×10^{-9}
帘布层	-	-	-	9870	0.3	1.5×10^{-9}
带束层	-	-	-	172200	0.3	5.9×10^{-9}
轮辋	-	-	-	210000	0.3	7.85×10^{-9}

网格与 40 mm 网格的应变值误差小于 1%, 满足要求, 故本文研究选择了 20 mm 网格。

$$(1.497 \times 10^{-4} - 1.49 \times 10^{-4}) \div 1.497 \times 10^{-4} \approx 0.0047 < 1\%$$

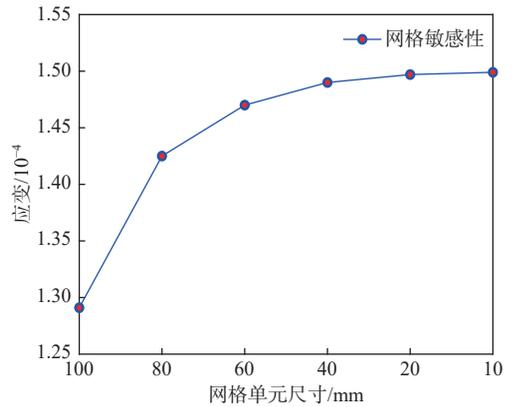


图 3 网格敏感性

Fig. 3 Grid sensitivity

在时域内一般将任意的动态载荷表示为单位脉冲载荷之和的形式, 这种离散的动态载荷与实际载荷的近似程度取决于单位脉冲载荷的脉宽, 即采样间隔 Δt , Δt 越小, 近似程度则越高。然而, 随着 Δt 减小, 载荷反演中形成的 Green 核函数矩阵的规模将会增大, 显著增加计算成本。本文在对比图 4 所示不同采样时间间隔的相对误差发现, 在 $\Delta t = 0.0005$ s 时, 反演相对误差已趋于稳定, 因此选择了采样周期为 0.0005 s。

首先, 在轮胎和加筋板接触的中心点位置施加一个采样周期为 $\Delta t = 0.0005$ s、幅值为 1N 的单位脉冲载荷, 经过有限元求解, 得到在点 1 处的单位脉冲核函数响应, 如图 5(a) 所示。然后, 按照式(2)将其组装成一个 Green 核函数矩阵。其后, 结合图 5(b) 所示轮胎冲击载荷在点 1 处测到的 Y 方向应变响应, 再通过 Tikhonov 正则化方法对该冲击载荷进行载荷反演。最后, 通过引入整体相对误差(RE), 对实际载荷与反演载荷的接近情况进行评价, 其公式如下:

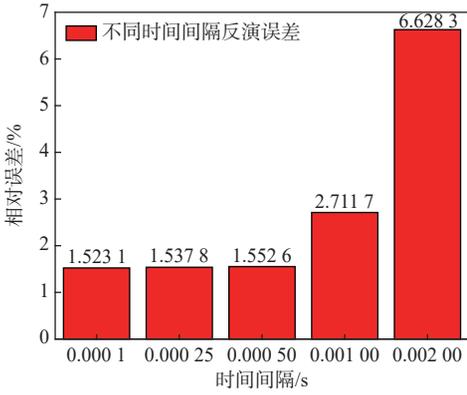
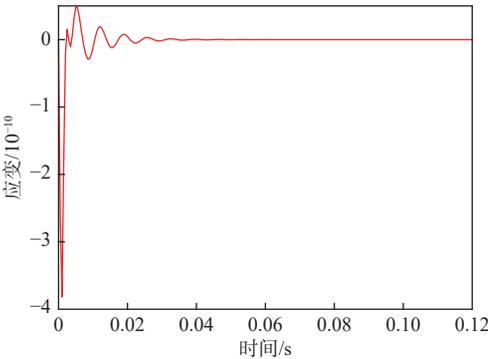


图4 不同采样周期反演误差

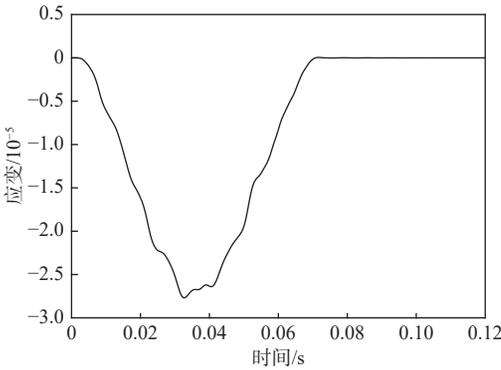
Fig. 4 Inversion error at different sampling periods

$$e_{RE} = \frac{\|P - F\|}{\|F\|} \times 100\% \quad (7)$$

式中, F 为实际载荷; P 为反演载荷。



(a) 单位脉冲核函数应变响应



(b) 轮胎冲击应变响应

图5 应变响应图

Fig. 5 Strain response diagram

图6所示为使用GCV准则(广义交叉验证准则)确定的最佳正则化参数。将最佳的正则化参数为 1.5753×10^{-10} 代入式(6)中, 得到如图7所示轮胎冲击载荷的反演结果。从图7中可看出, 反演的载荷随时间有变化历程与实际载荷基本一致。

由于实际的结构响应测量数据会含有一定的噪声信号, 因此在仿真计算得到的响应中加入一定水平的白噪声来模拟实际测量的响应, 并对比不同水平白噪声下的反演结果, 如图8所示。含有噪声的响应表达如下:

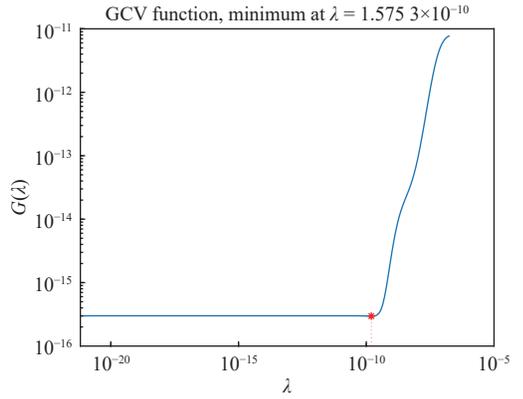


图6 正则化参数最优选择

Fig. 6 Optimal selection of regularization parameters

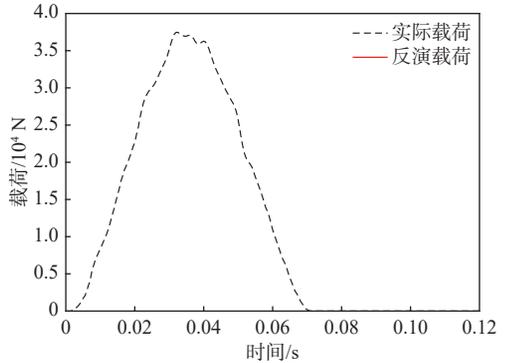


图7 载荷识别结果

Fig. 7 Load identification results

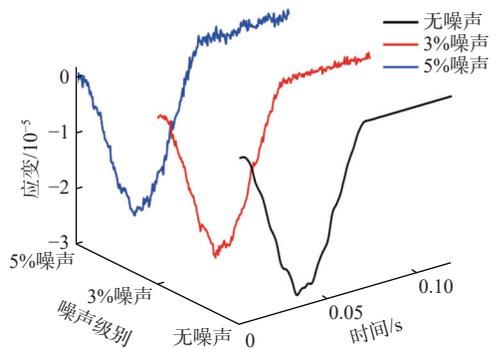


图8 不同噪声水平下的应变响应

Fig. 8 Strain response at different noise levels

$$y^\delta = y^c + l^\delta \cdot \text{std}(y^c) \cdot \text{randn} \quad (8)$$

式中, y^c 是仿真计算得到的应变响应; $\text{std}(y^c)$ 是响应的标准差; l^δ 是代表噪声水平的百分数; randn 是均值为0、方差为1的随机数。其中, 无噪声、含有3%噪声、5%噪声水平下的载荷反演相对误差分别为1.60%、2.1%、2.73%, 从数据结果以及图9所示的载荷曲线可见, 即使在5%噪声干扰情况下, 反演的载荷曲线和实际载荷曲线趋势依然基本一致。

为了探究不同响应对载荷反演精度的影响, 本文对比了应变、位移、速度、加速度4种响应下的载荷反演情况。响应位置取图1中的1~6

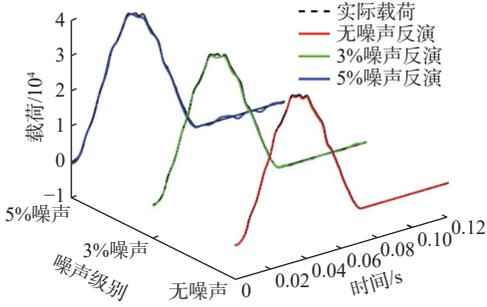


图9 不同噪声水平下的反演结果

Fig. 9 Inversion results at different noise levels

个点。反演结果如表 3 和图 10 所示。

从表 3 和图 10 所示不同响应点的相对误差对比可以看出, 应变和位移响应反演精度较高, 相对误差都低于 2%。加速度响应的反演精度明显比其他响应低很多, 主要是因为施加的单位脉冲载荷时间极短, 使得加速度发生急剧的变化, 从而导致了加速度响应的反演精度变低。

表 3 不同响应的相对误差(%)

Table 3 Relative errors of different responses(%)

	响应点1	响应点2	响应点3	响应点4	响应点5	响应点6
应变	1.49	1.51	1.58	1.56	1.64	1.45
位移	1.57	1.53	1.57	1.54	1.61	1.52
速度	1.82	1.66	2.63	1.72	1.87	1.73
加速度	10.25	10.72	11.64	9.62	12.21	10.92

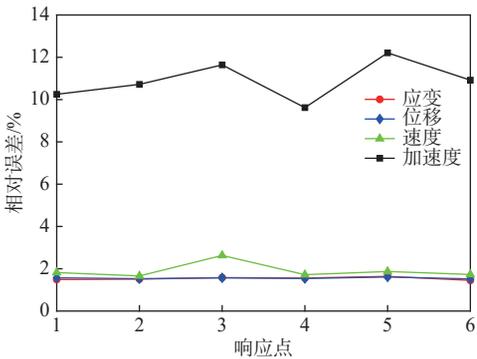


图 10 不同响应相对误差对比

Fig. 10 Comparison of relative errors of different responses

2.3 多个轮胎冲击加筋板

车辆通常具有多个轮胎, 在冲击加筋板时, 不同轮胎引发结构响应会相互混合, 这必然会对载荷反演的准确性造成一定的影响。为了探究这一问题, 本文构建了整车冲击甲板的仿真模型, 并基于该模型开展载荷反演的相关研究。研究的车辆重 1.550 3 t, 车身总长 3.951 m, 总宽 1.726 m, 高度 1.771 m。模拟中, 车辆冲击甲板, 其中后轮先接触甲板, 前轮再接触甲板, 如图 11 所示。冲击

速度沿 Z 方向为 1 m/s。

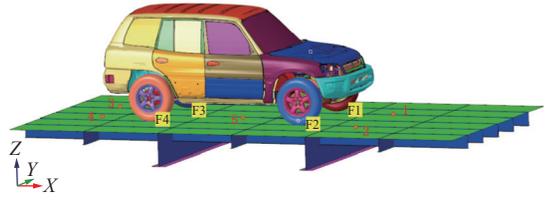


图 11 整车冲击加筋板模型

Fig. 11 Vehicle impact on stiffened plate model

在进行多个载荷反演时, 依据系统总响应可表示为各载荷引起响应的线性叠加这一原理展开研究。为确保方程(4)具备可解性, 所选取的响应点数量需超过载荷作用点的数量。在此情境下, 以每个轮胎的冲击合力作为反演的对象, 相应地, 在加筋板上选定 5 个响应点。借助仿真模型, 计算出这些响应点的应变响应, 并求解出从各载荷作用点到各响应点的 Green 脉冲核函数, 随后将这些数据代入方程(4)实施反演操作, 结果如图 12 所示。图中, F1~F4 为 4 个轮胎的实际载荷, 分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮; P1~P4 为对应的反演载荷。

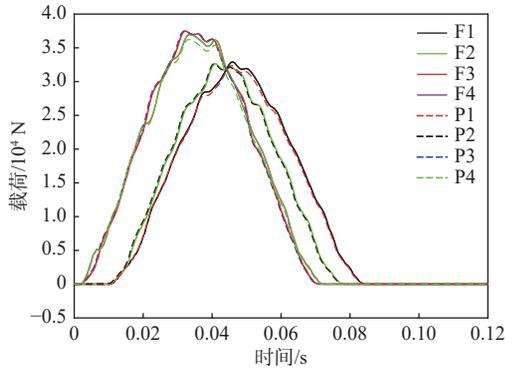


图 12 四轮冲击载荷反演

Fig. 12 Inversion of four-wheel impact loads

实际载荷随时间变化的历程与反演得到的载荷曲线较为吻合, 对于 4 个轮胎的载荷反演同, 相对误差分别为 1.84%, 1.77%, 1.51% 和 2.41%。相较于单个轮胎冲击载荷反演结果相比, 这些误差略显增大, 但仍然处于可接受的范围之内。这表明, 本文所提方法能够有效地对多个轮胎冲击加筋板时的载荷随时间变化趋势进行反演。

3 轮胎冲击载荷分布特性反演研究

3.1 轮印载荷分布形式

前文的研究通常将轮胎冲击力作为一个合力进行分析。为了更深入地探究轮胎与接触面之间的载荷分布特性, 本文进一步开展了轮胎接触面

载荷的反演研究。综合现有的国内外相关文献[1, 14-16]及仿真研究结果,可以发现,轮印形状基本上呈现为矩形。具体地,对于载重轮胎而言,当胎压较高或者载重较轻时,轮胎接触区域的压力在纵向或横向均表现为单峰值分布,这种分布形式简称为凸型分布。随着载重的逐渐增加,轮胎压力的分布逐渐转变为马鞍型分布,即在轮胎纵向或横向为双峰值现象。进一步地,当胎压较低或者载重较大时,轮胎接触区域的压力在纵向和横向均呈现出双峰值分布,这种分布形式则被称为凹型分布。

为了更简洁清晰地描述轮印载荷分布的情况,本文采用二次多项式的形式进行模拟,具体形式如式(9)所示。

$$F = ax^2 + by^2 + c \quad (9)$$

式中: F 为轮印载荷; x 表示为轮胎宽度方向; y 表示为轮胎前进方向; a, b, c 为系数。当 a, b 都为负值时,表现为凸型分布; $ab < 0$ 时,为马鞍型分布; a, b 都为正数时,为凹型分布。

通过轮胎冲击仿真分析发现,当胎压为0.3 MPa、冲击载荷为14 640 N时,轮印载荷为凸型分布;当胎压为0.25 MPa、冲击载荷为21 616 N时,轮印载荷为马鞍型分布;当胎压为0.2 MPa、冲击载荷为30 815 N时,轮印载荷为凹型分布。本文通过对表4所示3种工况轮胎冲击作用下的加筋板载荷分布形式进行反演分析。分析中,轮胎宽度方向和加筋板横梁方向一致。

表4 工况表

Table 4 Working conditions

工况1_凸型分布		工况2_马鞍型分布		工况3_凹型分布	
胎压/MPa	载荷/N	胎压/MPa	载荷/N	胎压/MPa	载荷/N
0.3	14 640	0.25	21 616	0.2	30 815

3.2 凸型分布冲击载荷反演方法研究

通过仿真分析,获得了凸型轮印载荷幅值的分布情况,并经过曲面拟合得到了二次多项式来描述该分布,如图13所示。具体表达式为

$$F = -2128x^2 - 5017y^2 + 186.6$$

进一步地,将轮印载荷受力区域等效划分为9个较小区域,并选取每个较小区域中心点作为等效受力点,如图14所示。图中,圆形点处为轮印载荷等效受力点位置,矩形点为应变响应测量位置。

首先,在加筋板9个载荷作用点上,依次施加

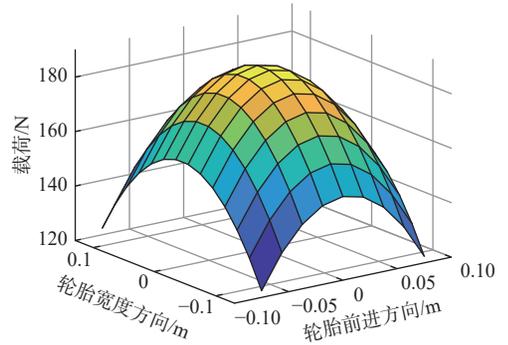


图13 凸型载荷分布曲面

Fig. 13 Convex load distribution surface

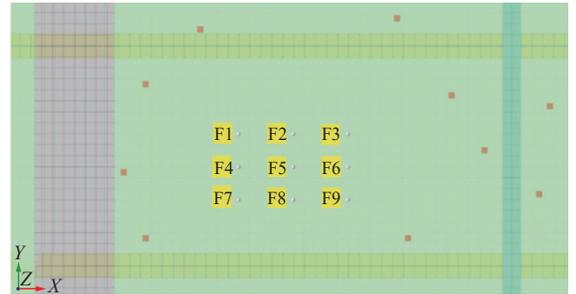


图14 轮印载荷等效划分位置图

Fig. 14 Equivalent division positions of wheel print load

采样周期为 $\Delta t = 0.0005$ s、幅值为1 N的单位脉冲载荷。通过有限元求解,可以得到每个载荷作用点应的Green脉冲核函数响应。然后,按照式(4),将这些响应组装成一个Green核函数矩阵。结合轮印载荷下的结构响应数值,利用Tikhonov正则化方法进行载荷识别。图15所示即为凸型载荷分布下的识别结果。图中, F 为实际载荷曲线, P 为反演载荷曲线。

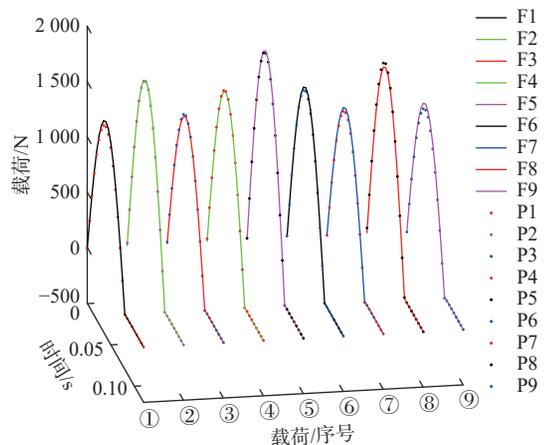


图15 凸型轮印载荷反演

Fig. 15 Convex wheel print load inversion

通过式(7)对载荷识别结果进行评价,得到如表5所示识别结果的相对误差。从图15以及表5中可以看出,反演结果比较理想,最大误差出现在载荷峰值附近,相对误差在5%以内。这表明,通过GCV并结合Tikhonov的方法,能够较好地

表 5 凸型轮印反演载荷相对误差

Table 5 Relative errors of convex wheel print load inversion

载荷作用点	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
相对误差/%	3.44	1.15	1.57	1.16	1.39	2.10	2.67	2.35	3.81

识别出轮印载荷的分布情况。

3.3 马鞍型分布冲击载荷反演方法研究

通过仿真分析, 获得马鞍型轮印载荷幅值的分布情况, 并经过曲面拟合得到二次多项式来描述该分布, 如图 16 所示。具体表达式为

$$F = 2\ 136x^2 - 3\ 345y^2 + 201.4,$$

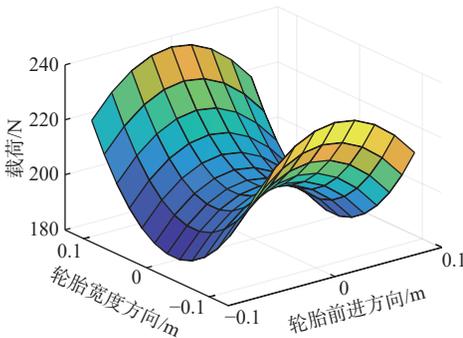


图 16 马鞍型载荷分布曲面

Fig. 16 Saddle-shaped load distribution surface

进一步地, 将轮印载荷等效划分为 9 个较小区域, 选取每个较小区域的中心点作为等效受力点, 然后对载荷其进行载荷反演, 结果如图 17 所示。表 6 为识别结果的相对误差。从图 17 和表 6 可以看出, 反演的载荷随时间变化的历程与实际载荷基本一致, 相对误差控制在 5% 以内。

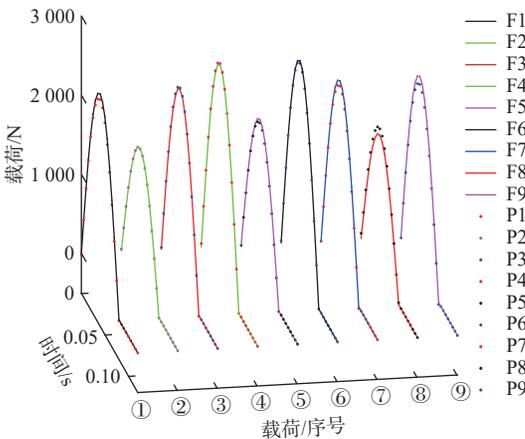


图 17 马鞍型轮印载荷反演

Fig. 17 Saddle wheel print load inversion

表 6 马鞍型轮印反演载荷相对误差

Table 6 Relative errors of saddle wheel print load inversion

载荷作用点	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
相对误差/%	2.23	3.61	3.08	1.58	2.25	3.77	1.81	3.09	3.57

3.4 凹型分布冲击载荷反演方法研究

通过仿真分析, 获得马鞍型轮印载荷幅值的分布情况, 并经过曲面拟合得到二次多项式来描述该分布, 如图 18 所示。具体表达式为

$$F = 2\ 554x^2 + 3\ 326y^2 + 233.3.$$

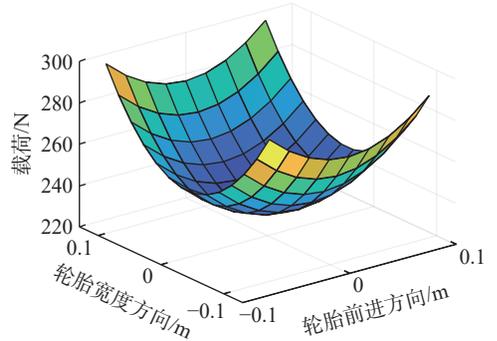


图 18 凹型载荷分布曲面

Fig. 18 Concave load distribution surface

按照图 18 所示轮印载荷幅值分布形式进行载荷反演分析, 结果如图 19 所示, 相对误差如表 7 所示。通过反演结果图表的对比, 最高相对误差为 3.14%, 低于 5%, 在可接受范围之内, 反演的载荷随时间变化的历程与实际载荷基本一致。

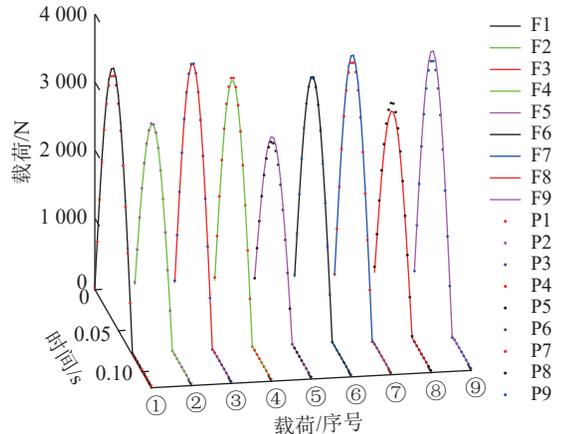


图 19 凹型轮印载荷反演

Fig. 19 Concave wheel print load inversion

表 7 凹型轮印反演载荷相对误差

Table 7 Relative errors of concave wheel print load inversion

载荷作用点	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
相对误差/%	2.97	1.17	1.04	1.13	1.82	1.78	2.39	2.65	3.14

通过对以上 3 种不同工况下轮印载荷分布的反演分析, 结果表明, 所提方法能够有效地对冲击载荷作用下的轮印载荷进行间接测量, 从而为轮印载荷的测量提供了一种新的技术手段。

4 结论

针对甲板上轮胎冲击载荷难以直接测量的问

题,本文建立了基于 Green 函数的冲击载荷反演方法,并完成单个轮胎冲击载荷、4个轮胎联合冲击载荷以及3种不同载荷分布形式的载荷反演研究。主要结论如下:

1)本文基于 Green 函数与 GCV 准则,提出了轮胎冲击加筋板载荷的正则化反演方法。该方法成功完成了单个轮胎冲击载荷与4个轮胎冲击载荷反演,反演载荷与实际载荷的时间历程基本一致,相对误差小于3%。

2)通过对比分析不同结构响应对冲击载荷反演精度的影响,发现基于位移响应和应变响应的载荷反演精度较高,相对误差均在2%以内。而基于加速度响应的载荷反演精度较低,相对误差超过了10%,这主要是因为单位脉冲载荷引起的结构加速度时间历程曲线变化非常剧烈。

3)针对不同轮胎引起的凸型、马鞍型与凹型轮印载荷分布,本文利用反演方法有效地识别了加筋板上的轮印载荷分布,总体相对误差小于5%。通过与比仿真计算结果的对比,进一步证实了轮印分布载荷反演方法的有效性。

参考文献:

- [1] 何市伟,刘晖,张梗林,等.载重轮胎的轮印载荷分布特性试验研究[J].*中国舰船研究*,2021,16(6):140-150.
HE S W, LIU H, ZHANG G L, et al. Experimental study on wheel load distribution characteristics of truck tires[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(6): 140-150 (in Chinese).
- [2] 何市伟,刘晖,张梗林,等.轮印载荷作用下加筋板极限承载力试验研究[J].*舰船科学技术*,2021,43(21):63-67.
HE S W, LIU H, ZHANG G L, et al. Experimental study on the ultimate bearing capacity of stiffened plates with wheel load[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(21): 63-67 (in Chinese).
- [3] 刘聪,程远胜,张攀,等.加筋板轮印载荷分布特性的试验与数值分析[J].*海洋工程*,2017,35(4):84-93.
LIU C, CHENG Y S, ZHANG P, et al. Experiment and numerical analyses on wheel load distribution on stiffened plate[J]. *The Ocean Engineering*, 2017, 35(4): 84-93 (in Chinese).
- [4] WESOŁOWSKI M, BLACHA K, PIETRUSZEWSKI P, et al. Analysis of the actual contact surface of selected aircraft tires with the airport pavement as a function of pressure and vertical load[J]. *Coatings*, 2020, 10(6): 591.
- [5] ZHU L, CAI W, FRIEZE P A, et al. Design method for steel deck plates under quasi-static patch loads with allowable plastic deformations[J]. *Marine Structures*, 2020, 71: 102702.
- [6] ZHU L, GAO J Y, LI Y G. Numerical analysis on the response of deck plates laterally impacted by a rectangular indenter[C]//Proceedings of the 37th ASME International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Madrid, Spain: ASME, 2018.
- [7] OMIDALI M, KHEDMATI M R. Reliability-based design of stiffened plates in ship structures subject to wheel patch loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 127: 416-424.
- [8] POLASIK J, WALUŚ K J, WARGUŁA Ł. Experimental studies of the size contact area of a summer tire as a function of pressure and the load[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 177: 347-351.
- [9] 何帅康,陈晓东,孔帅,等.基于动力效应的船体远场冰载荷测量与识别[J].*中国舰船研究*,2021,16(5):54-63.
HE S K, CHEN X D, KONG S, et al. Measurement and identification of ice loads on hull structures in far field based on dynamic effects[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(5): 54-63 (in Chinese).
- [10] 孔帅,崔洪宇,季顺迎.船体结构冰载荷反演方法及试验验证[J].*中国机械工程*,2020,31(3):281-288.
KONG S, CUI H Y, JI S Y. Ice load identification method of ship structures and experimental verification[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(3): 281-288 (in Chinese).
- [11] 邹谋炎.反卷积和信号复原[M].北京:国防工业出版社,2001.
ZOU M Y. Deconvolution and Signal Recovery[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001 (in Chinese).
- [12] TIHONOV A N. Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method[J]. *Soviet Math Dokl*, 1963, 5: 1035-1038.
- [13] GOLUB G H, HEATH M, WAHBA G. Generalized cross-validation as a method for choosing a good ridge parameter[J]. *Technometrics*, 1979, 21(2): 215-223.
- [14] SEBASTIAN W M, WEBSTER T, KENNEDY C, et al. Profiled metal plate-Cork mat loading systems on cellular FRP bridge decks to reproduce tyre-to-deck contact pressure distributions[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 49: 1064-1082.
- [15] REYNAUD P, NASR S B, ALLOU F, et al. 3D modelling of tyre-pavement contact pressure[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2017, 21(6): 712-729.
- [16] 柳帅蒙.载重轮胎接地压力模型研究[D].西安:长安大学,2015.
LIU S M. Study on the truck tire contact pressure model[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015 (in Chinese).

Study of inversion method of tire impact load characteristics based on Green function

SHI Guijie^{1,2}, LI Qiang³, WANG Deyu^{*1,2}

1 State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2 Institute of Marine Equipment, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

3 School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: [**Objectives**] This study aims to indirectly identify tire impact loads and their distribution characteristics through structural responses, providing a basis for deck design and safety assessment. A load inversion method based on Green's function is proposed. [**Methods**] The study focuses on a ship deck stiffened plate. The impact load is represented as a superposition of unit impulse loads using Green's function. The Green kernel function matrix is obtained through finite element simulations. An inversion model is established by combining the Tikhonov regularization method with the generalized cross-validation criterion. For single and multiple tire impact scenarios, the influence of multi-source loads on inversion accuracy is analyzed. For three typical wheel print load distribution forms—convex, saddle, and concave—the load distribution characteristics are inverted by equivalently dividing the force application area and applying unit impulse loads. [**Results**] The proposed method can effectively identify the time history and distribution characteristics of tire impact loads, with a relative error of less than 5%. Specifically, the inversion based on strain and displacement responses achieves higher accuracy, with errors below 2%. Even under a 5% noise interference, the inversion results remain consistent with the actual loads. [**Conclusions**] The proposed method addresses the challenges of short impact load duration, limited structural response range, and the joint action of multi-source impact loads. It provides a new approach for identifying wheel loads on real ships and holds significant engineering application value.

Key words: deck design; structural response; stiffened plate; bearing capacity; impact load; wheel load distribution; Green's function; load inversion; numerical simulation