

文章编号: 1007-7294(2024)10-1599-12

船舶板架结构变形场测量技术研究

李生鹏^{1,2}, 韦朋余^{1,2}, 刘豪¹, 戴泽宇¹, 张若楠¹, 宋培龙¹

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 2. 船舶结构安全全国重点实验室, 江苏 无锡 214082)

摘要: 船舶结构强度试验过程中, 传统的离散点变形测量技术难以获得结构的全场变形数据, 因而无法有效揭示结构的渐进破坏过程。本文基于数字图像相关和三维激光扫描原理, 提出适用于船舶板架结构变形测量的位移形函数与子区相关性准则, 发展定量可控的数字散斑场制作方法, 形成船舶板架结构几何形貌测量方法, 建立船舶板架结构变形场测量技术; 在此基础上, 开展船舶板架结构模型变形场演化过程测量试验, 获得模型在纵向压缩载荷所用下的结构变形场, 尤其是模型结构临界状态前后的失效演化行为, 揭示船舶板架结构变形场的时空演化规律, 可为实船结构的失效模式识别提供基础测量技术手段。

关键词: 船舶板架结构; 数字图像相关; 三维激光扫描; 变形场测量

中图分类号: U661.4 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.10.012

Deformation field measuring technique of ship grillage structure

LI Sheng-peng^{1,2}, WEI Peng-yu^{1,2}, LIU Hao¹, DAI Ze-yu¹, ZHANG Ruo-nan¹, SONG Pei-long¹

(1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China; 2. National Key Laboratory of Ship Structural Safety, Wuxi 214082, China)

Abstract: In the course of ship structural strength experiment, it is difficult to obtain the full field deformation data of a structure by the traditional discrete point deformation measuring technique. Therefore, the progressive destruction process of a structure cannot be effectively revealed on the base of the method. In this paper, the deformation field measuring technique of a ship grillage structure was established based on the principle of digital image correlation and 3D laser scanning. The displacement shape function and correlation criterion of subset were proposed for deformation measurement of the ship grillage structure. Moreover, a digital speckle making tool was developed in order to obtain a quantitative and controllable digital speckle field. Based on a portable 3D laser scanning system, a method for measuring the geometry of ship grillage structure was presented. An experiment was carried out to verify the deformation field measuring technique of ship grillage structure. The structural deformation field of the model under longitudinal compression load was obtained by the experiment, and the failure evolution behavior was found before and after the critical state of the model structure. Through the above experiment, the space-time evolution law of deformation field for the ship grillage structure was revealed. A basic measuring technique for failure mode recognition of real ship structures was provided in this paper.

Key words: ship grillage structure; digital image correlation; 3D laser scanning; deformation field measuring

收稿日期: 2024-04-22

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20230181); 科技部重点研发计划项目(2022YFB3404800)

作者简介: 李生鹏(1989-), 男, 高级工程师, E-mail: lspssrc@163.com; 韦朋余(1982-), 男, 研究员。

0 引 言

船舶结构的变形测量技术是研究其结构力学特性、揭示其结构失效力学机理的直接手段。变形测量技术主要分为接触式测量和非接触式测量两大类,如图 1 所示。接触式测量技术具有精度高,灵敏性好及抗干扰能力强等优点,但该类方法只能进行离散点测量,以获得结构在固定方向上的位移或变形,无法获得结构的全场变形,而且个别技术存在测量效率低、测量范围小等缺点^[1]。近年来,非接触的全场光测法在结构变形测量领域得到了越来越广泛的应用。魏斌等^[2]针对大型上单翼飞机在飞行过程中机翼大挠度变形检测难题,提出了大倾角相机视场下机翼的非接触三维全场变形测量方法;李英杰等^[3]建立了基于 CT 扫描和数字体相关法的页岩各向异性三维变形场测量技术,揭示了各向异性页岩的裂隙演化规律及应变变化特征;余镇江^[4]针对航空发动机在工作条件下的叶片表面三维变形测量问题,提出一种基于双目视觉和数字图像相关法的三维变形测量方法,实现了 6000 r/min 条件下叶片表面位移场以及主应变场的测量;赵南等^[5-6]开展了若干船舶与海洋结构物极限强度的试验研究,试验过程中均采用离散测点的位移变化来表征结构的失效过程,类似的方法广泛应用于船舶结构性能试验中^[7-8]。

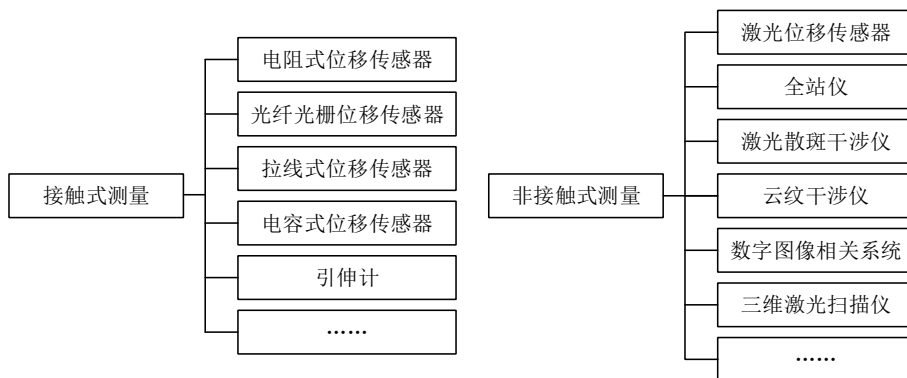


图 1 结构变形测量方法

Fig.1 Measuring method of structural deformation

船舶板架结构模型是一种能够直观、真实和定量地反映实船在极端服役条件下渐进失效破坏过程的特殊结构。在船舶板架结构强度试验过程中,传统的变形测量方法首先通过非线性有限元计算获得模型结构的大变形位置,而后采用离散点测量手段(电阻位移传感器、激光位移传感器等)对能够反映模型主要变形特征的部位进行测量,或在模型表面制作网格线来观察结构模型的变形过程,这种方法只能获取少数离散点的结构变形数据,无法得到结构整体的变形场演化信息。船舶板架结构模型强度试验进入非线性阶段以后,模型处于失效临界状态,较小的载荷扰动就能够引起模型结构形态的急剧转换,传统的测量技术难以捕捉非线性阶段结构变形模式演化及其相互影响,无法有效揭示结构渐进破坏过程的失效机理。为此,本文基于数字图像相关和三维激光扫描原理,建立船舶板架结构变形场演化过程测量技术,开展验证试验,获得模型在纵向压缩载荷所用下的结构变形场,揭示船舶板架结构变形场的时空演化规律,为实船结构的失效模式识别提供了基础测量技术手段。

1 船舶板架结构变形场测量技术

1.1 船舶板架结构模型设计与变形特性分析

根据典型的船舶板架结构形式,被设计的板架结构试验模型(Grillage Structure Experiment Model, GSEM)如图 2 所示,其中板架结构的加强筋类型有 T 型材和扁钢两种型式,试验模型的主尺度参数及结构尺寸见表 1,试验模型的建造材料均为 Q235B,材料的实测屈服强度取为 246 MPa。

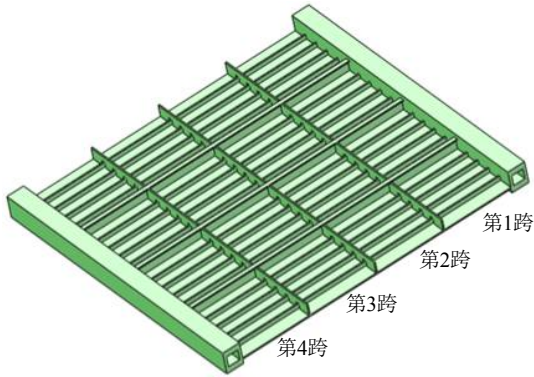


图2 船舶板架结构试验模型

Fig.2 Grillage structure experiment model

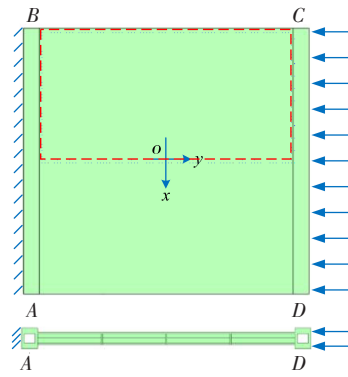


图3 试验加载及约束边界示意图

Fig.3 Schematic diagram of experiment loading and constraint conditions

表1 船舶板架结构试验模型主尺度

Tab.1 Parameters of GSEM

总长 L /mm	总宽 B /mm	板格长度 a /mm	板格宽度 b /mm
2400	2500	600	125

本文旨在研究船舶板架结构的变形场测量技术。为使模型在试验过程中产生较大变形,试验时的加载及约束边界如图3所示,其中板架模型的 AB 边固支, CD 边施加轴向载荷, BC 边及 AD 边自由。船舶板架结构试验模型垂向变形分布的有限元计算结果如图4所示,模型的载荷-位移曲线如图5所示,模型的极限载荷为9558 kN。如图3中所示,在模型上建立坐标系 $o-xyz$, oz 轴垂直于 xoy (板架结构平面)平面,约定 ox 为横向, oy 为纵向, oz 为垂向。分析船舶板架结构模型在纵向压缩载荷作用下的有限元计算结果,可以发现其变形特性主要表现为:(1)变形发生于 $2.4\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ 范围内,垂向变形的量级明显大于其他两个方向;(2)最大垂向变形量级在 100 mm 以上,由于模型4跨的结构相似,受焊接变形、试验边界条件等的影响,实际试验过程中,最大变形可能发生在 BC 和 AD 两条自由边的任意部位;(3)模型破坏后,结构在纵向上呈现出“半波”失效形态,横向上呈现出“波浪”形态,如图6和图7所示;(4)变形场是从两条自由边向中间区域扩散,最终汇聚为一体,极限强度前后模型的垂向变形发生剧烈的变化。

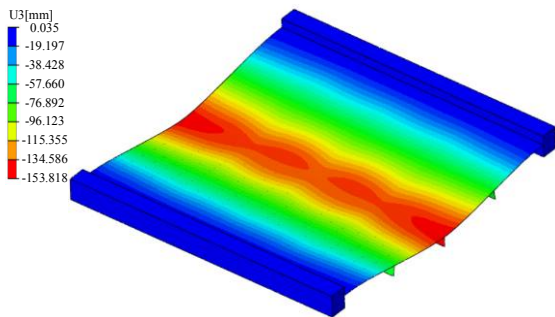


图4 船舶板架结构模型垂向变形云图(有限元计算)

Fig.4 Vertical deformation contour of GSEM (FEM)

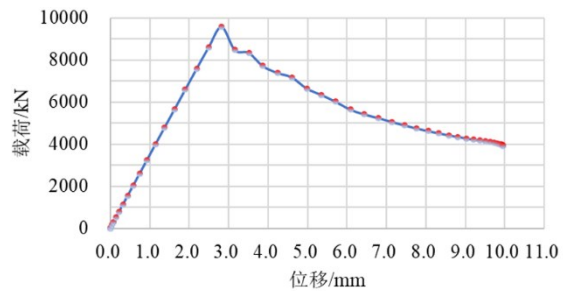


图5 板架模型载荷-位移曲线(有限元计算)

Fig.5 Load-displacement curve of GSEM (FEM)

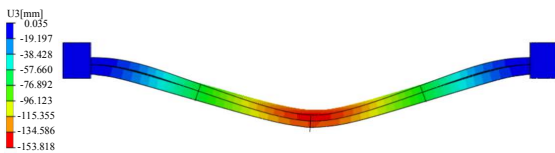


图6 模型“半波”形态(纵向)

Fig.6 Deformed shape of GSEM in half-wave

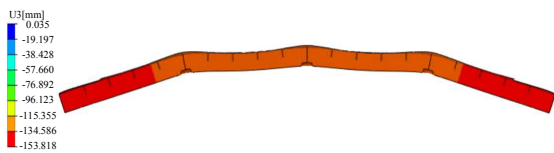


图7 模型“波浪”形态(横向)

Fig.7 Deformed “wave” shape of GSEM

显然,上述船舶板架结构的变形特性难以用传统的离散点测量手段获得,因而,探索建立结构变形场测量技术,是解决上述难题的必由之路。为此,本文基于数字图像相关和三维激光扫描原理,提出适用于船舶板架结构变形测量的位移形函数与子区相关性准则,发展定量可控的数字散斑场制作方法,形成船舶板架结构几何形貌测量方法,从而建立船舶板架结构变形场测量技术,以期实现对船舶板架结构演化过程的精细化测量。

1.2 数字图像相关测量技术

数字图像相关测量(DIC)是基于双目立体视觉原理的非接触测量技术,通过给被测模型表面制作散斑场,采集散斑场在试验全过程中的数字图像序列,利用数字图像相关算法获得被测模型在三维空间的全场形貌、变形场及应变场等^[9]。DIC 数字散斑图像匹配原理如图 8 所示,左侧一列散斑图像为左相机采集获得,右侧一列散斑图像为右相机采集获得,在同一时刻 t ,左右相机散斑图像以子区为单元进行立体匹配,一般以左相机采集的 t_0 时刻散斑图像作为参考图像;时序上, t_n 时刻的散斑图像均与各相机 t_0 时刻的散斑图像进行匹配^[10]。

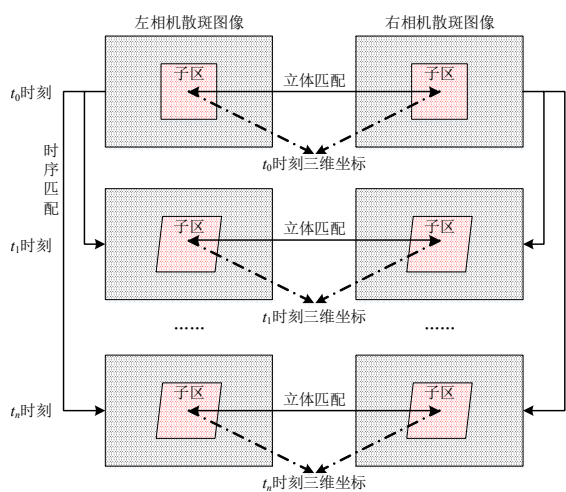


图 8 数字散斑图像匹配原理示意图

Fig.8 Schematic diagram of matching principle of DIC speckle images

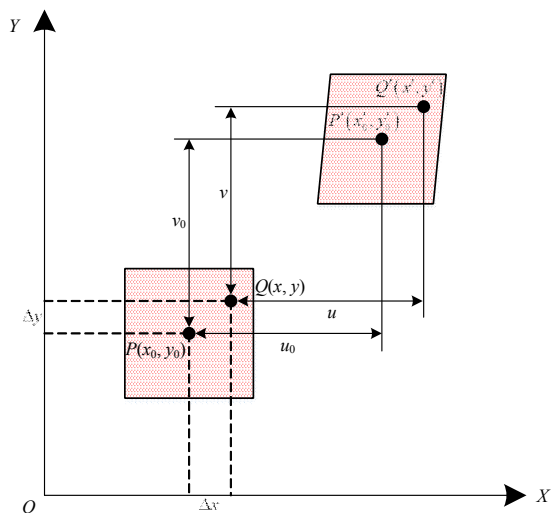


图 9 位移形函数数学模型

Fig.9 Mathematical model of displacement shape function

1.2.1 位移形函数与子区相关性准则选取

由于结构模型变形前后其子区形状在目标图像中会发生变形,故引入形函数来描述结构模型变形前后散斑图像子区的形状改变。如图 9 所示,设点 $P(x_0, y_0)$ 为参考图像中一个子区的中心点,点 $P'(x'_0, y'_0)$ 为相关图像中与参考图像中点 $P(x_0, y_0)$ 相对应的点,且在 X 和 Y 轴方向的位移分别记为 u_0 和 v_0 , $Q(x, y)$ 为参考子区内任意点,其在目标子区中对应点为 $Q'(x', y')$,点 Q 相对于点 P 的距离记为 Δx 和 Δy 。数字图像相关计算的一阶形函数如公式(1),对应的变形模式分别是刚体平行位移、拉伸和剪切变形。

$$\begin{cases} x' = x + u_0 + \frac{\partial u_0}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u_0}{\partial y} \Delta y \\ y' = y + v_0 + \frac{\partial v_0}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v_0}{\partial y} \Delta y \end{cases} \quad (1)$$

当结构发生较为复杂的变形时,如非均匀变形、梯形变形等,采用一阶形函数便不能精确计算结构的变形,就需要采用包含更多参数的二阶形函数来模拟子区变形。针对船舶板架结构的复杂变形

特性,本文选取二阶位移形函数来表征图像子区的变形,如公式(2)所示:

$$\begin{cases} x' = x + u_0 + \frac{\partial u_0}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u_0}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{\partial^2 u_0}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_0}{\partial y^2} \Delta y^2 \\ y' = y + v_0 + \frac{\partial v_0}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v_0}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v_0}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} \Delta y^2 \end{cases} \quad (2)$$

用相关函数 S 表示目标子区与参考子区的相关性,常见的相关函数主要有最小二乘相关函数、归一化差值平方和函数、零均值归一化差值平方和函数等。由于船舶板架结构模型极限强度试验需持续数小时,为了提高测量精度以及避免试验过程中光照等条件的变化对测量结果造成影响,本文采用抗干扰性较好的零均值归一化差值平方和函数作为相关函数:

$$S_{Z_{NSSD}} = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left[\frac{f(x,y) - f_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - f_m]^2}} - \frac{g(x',y') - g_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y') - g_m]^2}} \right]^2 \quad (3)$$

式中, $f(x,y)$ 为图像子区灰度值, $g(x',y')$ 为待匹配图中子区灰度值, $2M+1$ 为子区大小, f_m, g_m 分别为参考图像、目标图像子区灰度值的平均值。相关函数 $S_{Z_{NSSD}}$ 的值越大,表示目标子区与参考子区之间的相关性越大,相关函数 $S_{Z_{NSSD}}$ 取得最大值的点即为所求的目标点。

1.2.2 定量可控数字散斑场制作方法

散斑场作为船舶板架结构模型变形信息的载体,其质量直接与变形测量的精度、相关性计算的效率和不同批次试验测试结果的一致性相关。实际工程中,常用的散斑场是以哑光白色作为底漆,哑光黑色作为散斑点,传统的散斑场制作方法主要有:(1)手工自喷漆制作斑点;(2)喷枪喷碳粉制作斑点;(3)记号笔手工制作斑点等,上述方法存在着散斑场一致性差、制作效率低、噪声较大及随机性不可控等问题,难以适用于船舶板架结构模型变形场的高精度测量。散斑场质量与散斑点的大小、密度及随机度等特征紧密相关。相关研究^[11,12]表明,在其他测量条件不变的前提下,数字散斑场的占空比 ρ (散斑点所占的面积与数字散斑图像总面积的比值)为 50%,散斑点直径 d 为 3~5 个像素,随机度 ω 为 0.3 时, DIC 的测量精度最高。基于此,本文建立了定量数字散斑场的数学模型,研制了便捷的数字散斑制作工具,形成了定量可控的数字散斑制作方法,突破了传统人工散斑的大小、密度及随机度难以控制、不可重复的局限性。定量数字散斑场的数学模型由公式(4)~(6)和图 10、图 11 描述。

$$\begin{cases} x_i = l \times [\text{mod}(i/\sqrt{n})] + 0.5 \times f(\omega) \times l \\ y_i = l \times [\text{int}(i/\sqrt{n})] + 0.5 \times f(\omega) \times l \end{cases} \quad i = 1, \dots, n; \quad \omega \in (0, 1] \quad (4)$$

$$l = \sqrt{\pi/\rho} \times d/2 \quad (5)$$

$$n = \rho \times p/(0.25 \times \pi \times d^2) \quad (6)$$

式中, (x_i, y_i) 为随机散斑场第 i 个散斑点的中心坐标, l 为规则分布散斑点的中心距离, $\text{mod}(i/\sqrt{n})$ 为 i 除以 \sqrt{n} 的余数, $\text{int}(i/\sqrt{n})$ 为 i 除以 \sqrt{n} 的整数, $f(\omega)$ 是区间为 $(-\omega, \omega)$ 的伪随机函数, ω 为区间 $(0, 1]$ 的随机度因子, ρ 为占空比, d 为散斑点直径, n 为散斑场中散斑点的个数, p 为数字散斑图像的分辨率,由 DIC 测量系统的工业相机决定。基于定量数字散斑场数学模型,编制程序,即可生成如图 12 所示的散斑场。针对具体的试验对象尺寸,确定散斑点大小,再将散斑场加工成如图 13 所示的滚轮式散斑制作工具,蘸取哑光黑色油漆,在模型表面滚动,即可获得相对理想的数字散斑场。本方法具有成本低、效率高、散斑点质量可控等优点,实践证明散斑制作时间可节省 80% 以上。

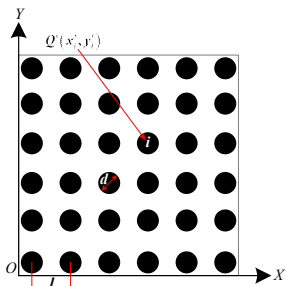


图10 规则分布的散斑点

Fig.10 Regularly distributed speckles

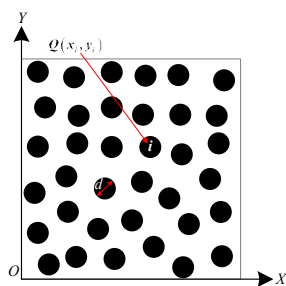


图11 随机分布的散斑点

Fig.11 Randomly distributed speckles

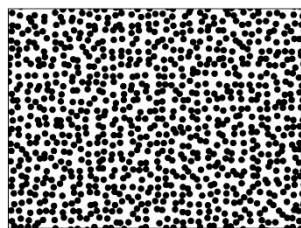


图12 程序生成的散斑场

Fig.12 Speckle field generated by computer program

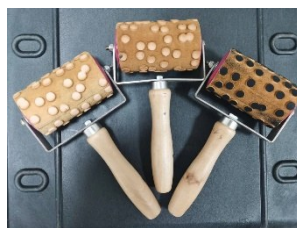


图13 数字散斑制作工具

Fig.13 Making tool of digital speckle field

1.3 三维激光扫描测量技术

三维激光扫描测量技术就是利用激光测距原理高密度地采集被测物体表面的三维坐标信息,形成点云数据之后再对点云数据进行压缩、过滤和拟合等处理,从而获得被测物体的三维几何形貌。如图14所示的三维激光仪内部的激光发射器向被测物体发射激光脉冲,通过对每束激光脉冲所经历的时间或相位的精确测量来实现对距离的测算;同时,由系统内的编码器对激光脉冲的发射角度进行测量,可计算得到被测物体在既定坐标系内的空间三维坐标^[13]。如图15所示,以激光发射源作为坐标原点O,激光束发射方向作为Y轴,Z轴与仪器的旋转轴重合且竖直向上,X轴与YOZ平面垂直,方向由右手螺旋法则确定,按下式(7)计算扫描点的三维空间坐标。



图14 三维激光扫描仪

Fig.14 3D laser scanner

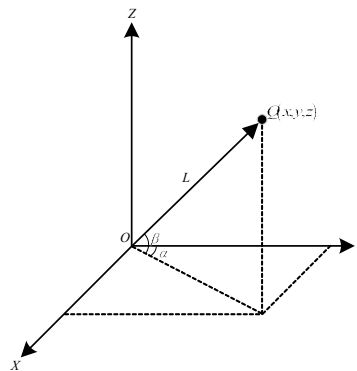


图15 三维激光扫描点云数据坐标系

Fig.15 Coordinate system for 3D laser scanning

$$\begin{cases} x = L\cos\beta\sin\alpha \\ y = L\cos\beta\cos\alpha \\ z = L\sin\beta \end{cases} \quad (7)$$

针对船舶板架这种结构整体与局部特征间尺度差异较大的测试对象,基于三维激光扫描测量的技术特性,利用便携式三维激光扫描测量系统,在试验前和试验后分别对船舶板架结构模型的整体几

何形貌和局部结构细节进行高精度扫描,通过对点云数据精细化处理,获得模型的精细三维图像,对比试验前后模型几何形貌的差异,即可获得船舶板架所有结构特征的变形量,基于三维激光扫描的船舶板架结构几何形貌测量方法如图16所示。

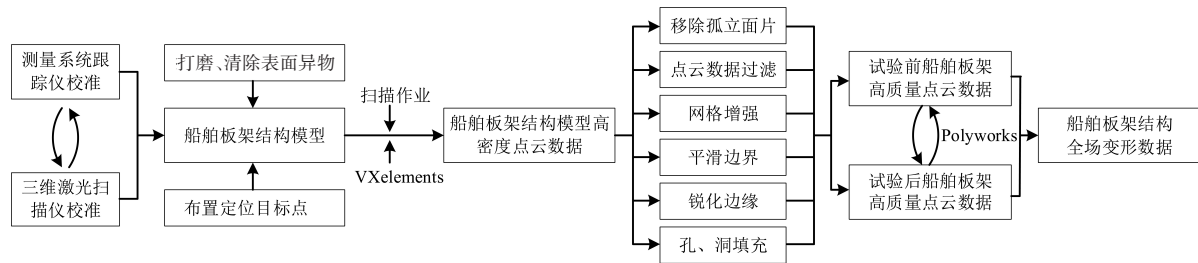


图16 基于三维激光扫描的船舶板架结构几何形貌测量方法

Fig.16 A method for measuring the geometry of GSEM based on 3D laser scanning

2 船舶板架结构变形场演化过程测量试验

基于大型结构试验平台设计搭建的船舶板架结构变形场演化过程测量试验系统如图17所示。正式试验前,先进行3次预加载,上限载荷为3000 kN,以尽可能消除板架结构中的焊接残余应力,并调试载荷加载系统和结构响应测量系统。在正式试验过程中,弹性阶段采用载荷控制模式进行载荷加载,注意时刻观察载荷-位移曲线斜率的变化情况,斜率越来越小则表明模型结构刚度已显著减小,此时将加载方式调整为位移控制模式。

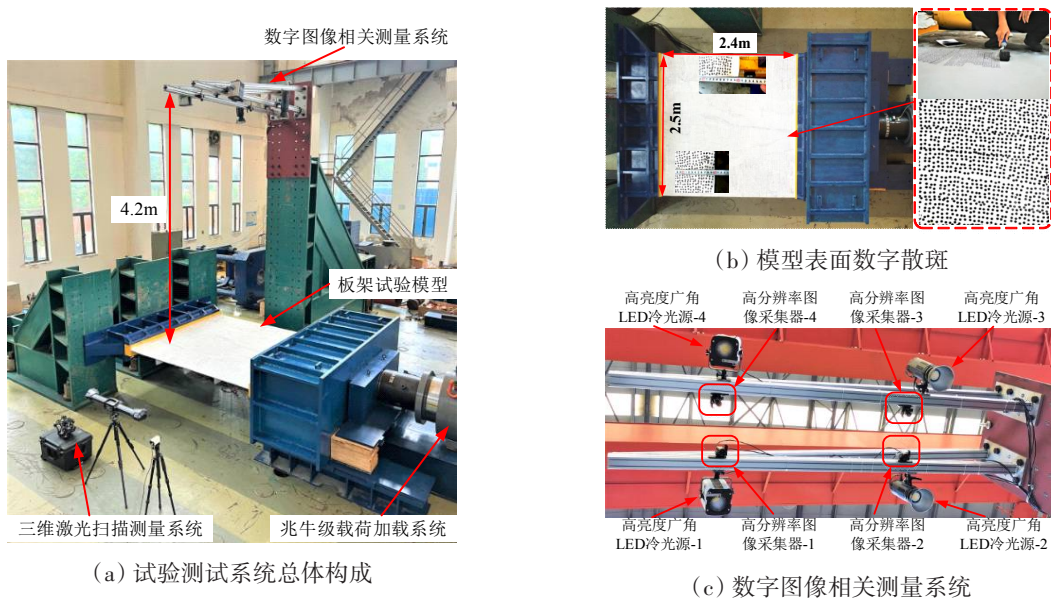


图17 船舶板架结构变形场演化过程测量试验

Fig.17 Experiment of deformation field evolution for the GSEM

试验准备阶段,在模型上表面2.4 m×2.5 m范围内均匀地喷涂一层哑光白色底漆,运用散斑制作工具制备散斑场,如图17(b)所示。应用4504(V)×4504(H)像素的高分辨率工业相机,配合16 mm的广角镜头采集模型在试验全过程中的的数字散斑图像,如图17(c)所示,相机间的立体夹角约为30°,相机基线至模型表面的距离约为4.2 m,确保板架模型占整个工业相机采视场的90%以上;采用4个高亮度广角LED冷光源,以确保模型表面光照达到数字图像高对比度的要求。试验过程中,每个载荷增量或每0.1 mm位移增量拍摄1组照片(每组10张),获得船舶板架结构模型在弹性阶段、非线性阶段、

极限状态及后极限状态的数字散斑图像。采用三维激光扫描测量系统在试验前测量船舶板架结构的初始形貌,试验后获取板架模型失效后的最终形貌,分析获得模型的最终失效形态。如图 18 所示,在试验模型的下表面,布置经计量认证的 12 个激光位移传感器,获得典型测点的垂向变形数据,同时和船舶板架结构变形场测量技术测得的垂向变形数据做对比,验证本文所建立测量技术的测量精度。

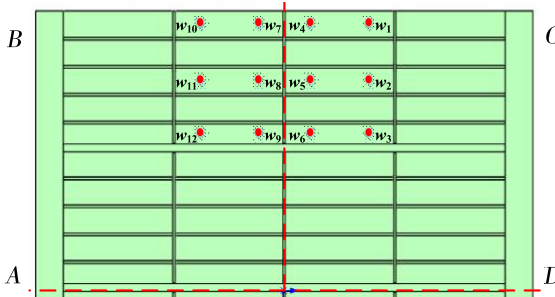


图 18 激光位移传感器布置

Fig.18 Layout of laser displacement sensors

3 试验结果与变形场演化过程分析

3.1 试验测试结果

船舶板架结构模型的理论极限强度为 9558 kN,试验得到其极限强度为 8952 kN,试验结果相较于仿真结果小 6.34%。分析图 19 可以发现:在 6000 kN 以前,试验载荷-位移曲线呈现出良好的线性状态;7000 kN 以后,载荷-位移曲线表现出明显的非线性特征,说明模型进入非线性阶段,直至 8952 kN 时达到模型的极限状态;之后,模型的承载能力急剧下降,较小的位移载荷步,使得其载荷响应快速下降,模型发生垂向大变形,完全失去承载能力,失效后的船舶板架结构模型如图 25 所示。

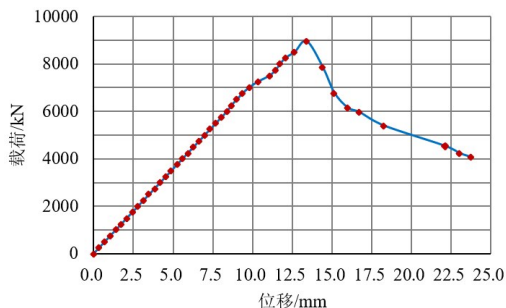


图 19 船舶板架载荷-位移曲线(试验)

Fig.19 Load-displacement curve of GSEM (experiment)

图 20 为 DIC 测量系统采集得到的第一张数字散斑图像,建立平面坐标系 $o-xy$,约定 oy 方向为纵向, ox 方向为横向,垂直于 xoy 平面的方向为垂向。在板架模型的上表面选定典型测点 $W_1 \sim W_{12}$,位置分别与图 18 中的 $w_1 \sim w_{12}$ 对应。以激光位移传感器测得的变形为基准,对比研究本文所建立的变形场测量技术的测量误差,记作 $\Delta_n (\Delta_n = W_n - w_n, n=1, 2, \dots, 12)$ 。图 21 所示为 4 个典型测点在不同载荷下的测量误差分布图,由图可知测量误差位于 $-0.070 \sim 0.080$ mm 之间,说明本文所建立的变形场测量技术具备较高的测量精度。

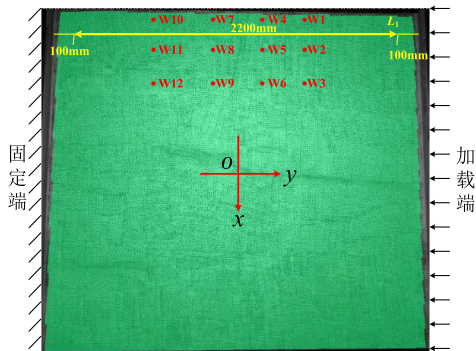


图 20 DIC 测量的典型测点分布示意图

Fig.20 Location diagram of typical measuring points of DIC measurement

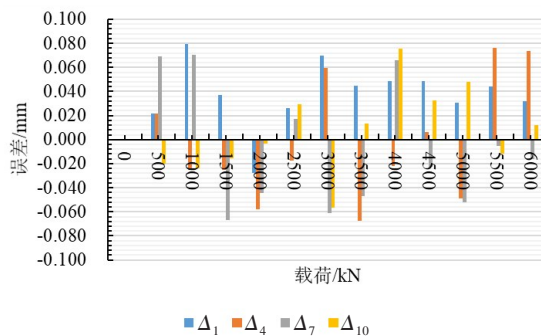


图 21 DIC 与激光位移传感器之间的测量误差 (W_1, W_4, W_7, W_{10})

Fig.21 Measurement deviation between results of DIC and laser displacement sensors (W_1, W_4, W_7, W_{10})

图 22 为试验前后船舶板架结构初始形貌与失效后的最终形貌,对比能够发现,试验后船舶板架结构的中间部位发生了明显的垂向变形,最大变形量为 140 mm 左右。

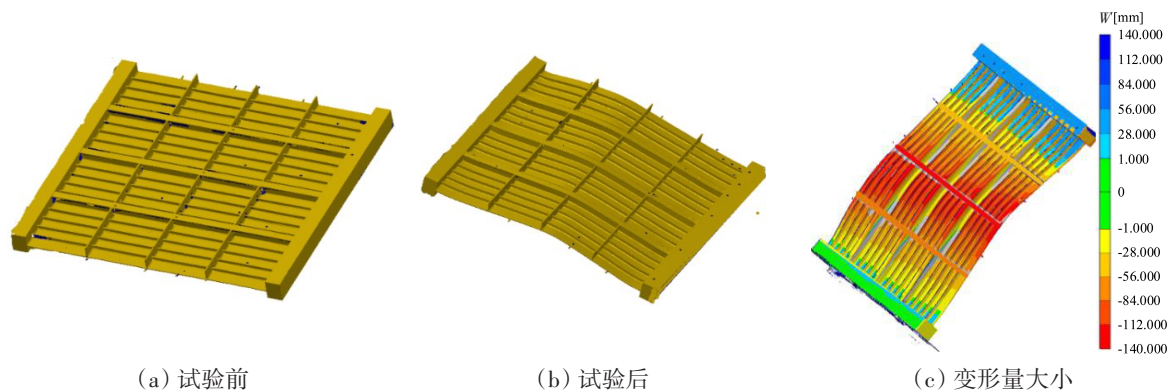
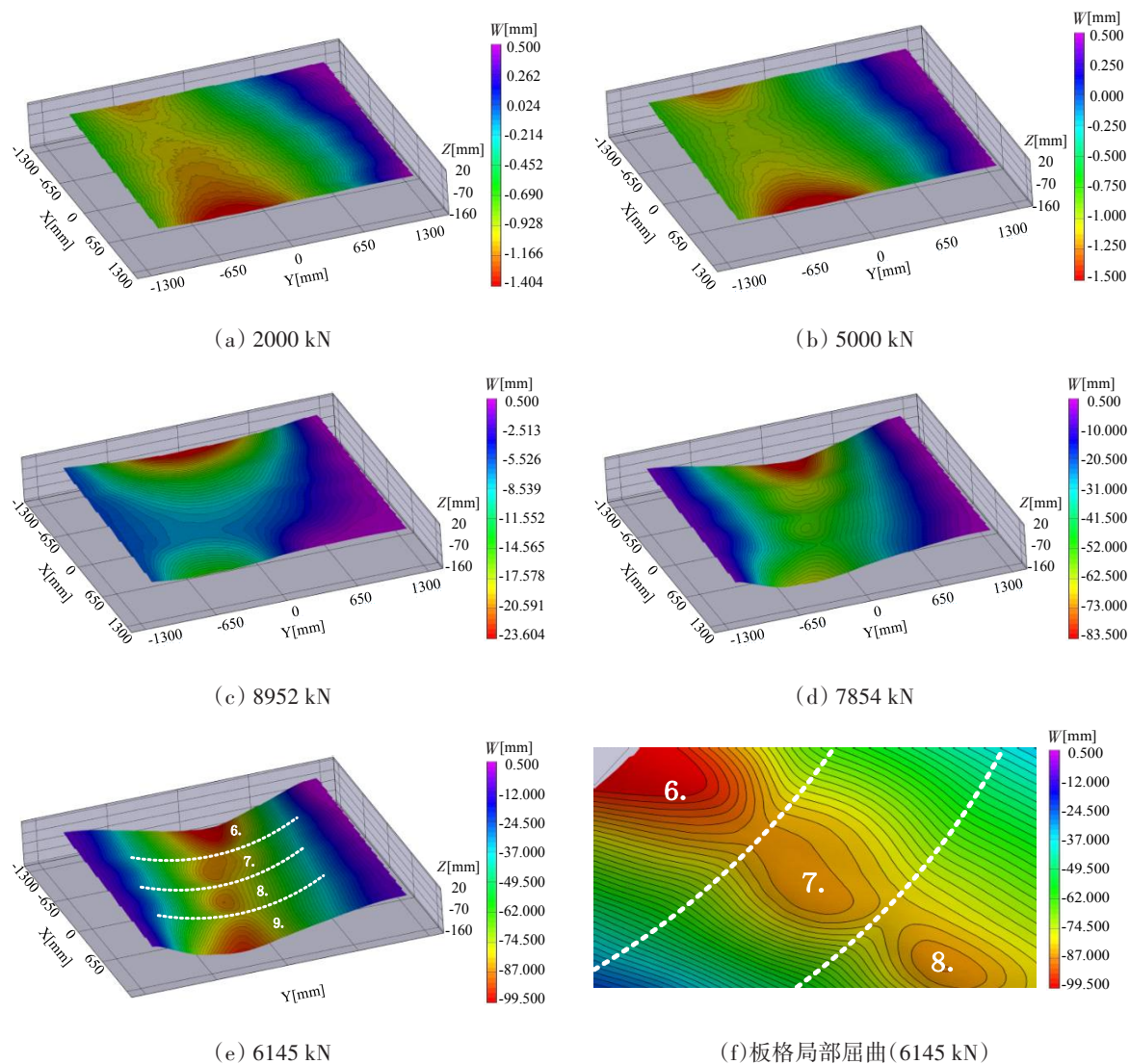


图 22 试验前后船舶板架形貌对比及变形量

Fig.22 Appearance of GSEM before and after test and deformation value

典型载荷步下船舶板架模型垂向变形场如图 23 所示,所选取的载荷步涵盖了试验全过程的弹性段、非线性段、极限状态以及后极限状态。



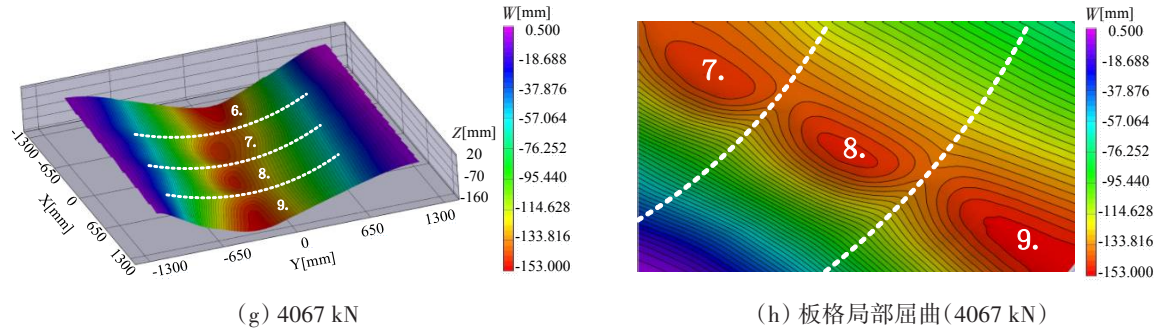


图23 船舶板架模型垂向变形场演变过程

Fig.23 Evolution process of vertical deformation field of the GSEM

选取图3中船舶板架结构模型的虚线区域,对比分析典型载荷步下的变形场测量结果与数值仿真结果,如图24所示。比较可以发现,本文所建立的测量技术所获得的变形场在分布规律和数值量级上均与数值仿真结果保持了较好的一致性,这从另一个角度验证了其有效性。

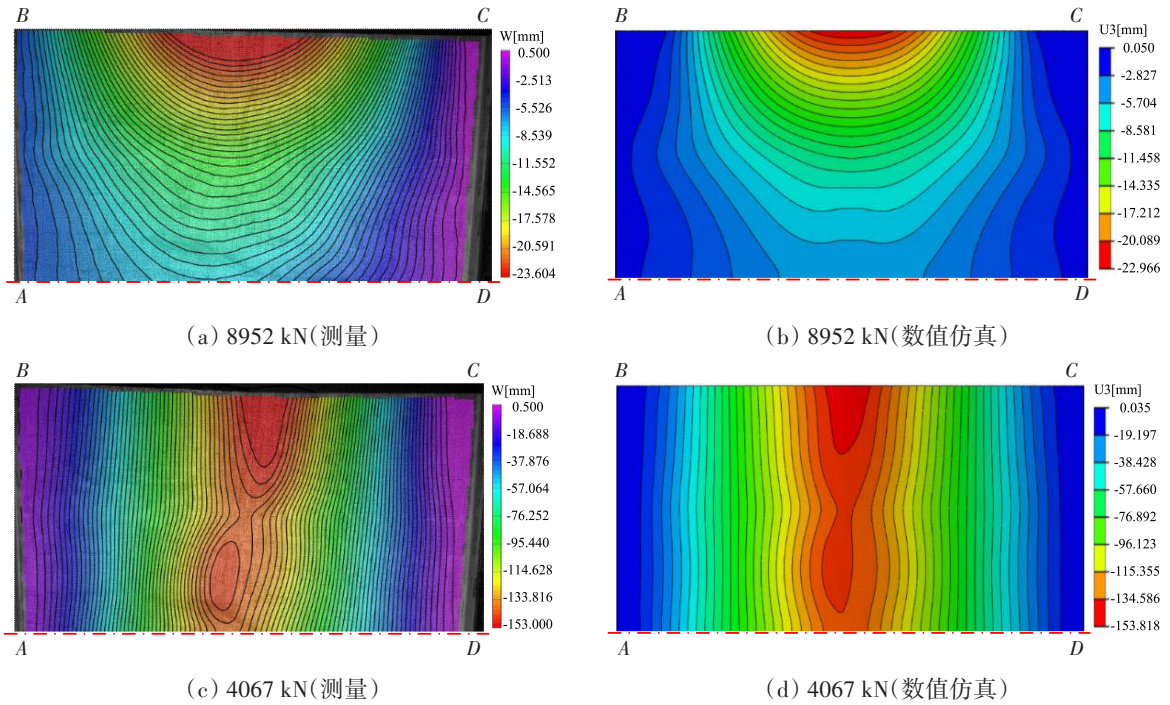


图24 垂向变形场测量结果与数值仿真结果对比

Fig.24 Comparison between experimental and FEM results of vertical deformation field



图25 船舶板架最终失效形态

Fig.25 Final status of GSEM failure

3.2 板架结构变形场演化过程分析

如图 23 所示,板架结构的大变形起始于固定端两条自由边区域,随着载荷的增加,大变形区域沿着纵向自由边往加载方向移动,同时也在横向扩散;极限状态后,大变形区域在横向整体上汇聚为一体,此后模型在纵向剖面上呈“半波”形态;然而,由于纵向 T 型材的强力支撑作用,与其相连带板的变形量明显小于板格中心的变形量,模型在横向剖面上呈“波浪”形态,如图 23(d)、(e)和(g)所示。假想在距板架模型 BC 边 100 mm 处,放置一条纵向长度为 2200 mm 的“虚拟”直线 L_1 (如图 20 中所示),提取 L_1 处的变形数据,用以定量研究不同载荷下板架模型的垂向变形演变规律,结果如图 26 所示。分析发现,极限状态时模型的最大变形量为 -20.994 mm,发生在距模型中心位置约 -69 mm 处;极限状态后,最大变形量的位置趋于固定,发生在距模型中心位置约 163 mm 处,试验过程中模型的最大变形量为 -152.201 mm,变形分布规律符合上文所述的“半波”形态。对比分析试验前后船舶板架结构的表面形态,发现最终模型的最大变形量仅为 140.000 mm,说明模型在完全卸载后发生了一定程度的“回弹”。

选取图 20 中所示的典型位移测点 W_1 、 W_4 、 W_7 及 W_{10} ,在试验时序上呈现它们的变形演化规律,如图 27 所示,在弹性阶段,典型测点的变形值呈现出良好的线性变化规律,试验全过程中,船舶板架结构发生了 5 次较为明显的结构形态转换后最终失效,典型载荷步下的垂向变形场也佐证了这一结论。

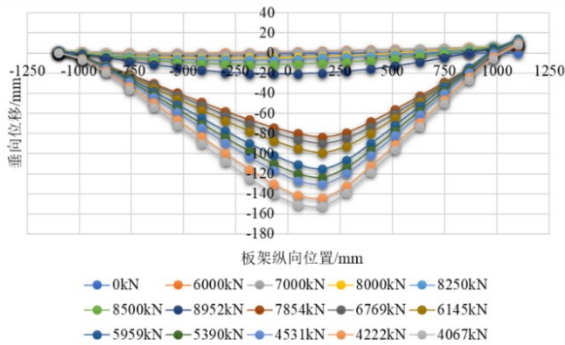


图 26 直线 L_1 的位移变化规律

Fig.26 Deformation along envisioned line L_1 under different loading conditions

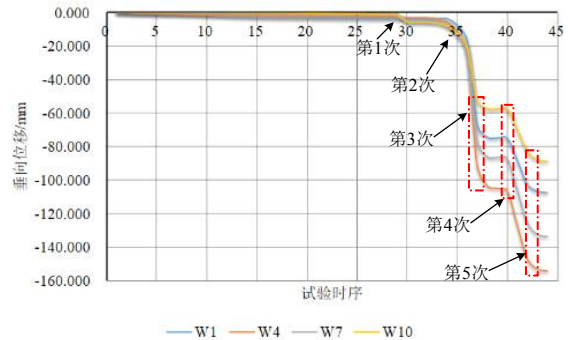


图 27 船舶板架结构模型 5 次结构形态转换示意图

Fig.27 Schematic diagram of structural form transformation of the GSEM

4 结 论

针对离散点变形测量技术难以获得船舶板架结构的全场变形数据而无法有效揭示结构的渐进破坏过程这一难题,本文建立了船舶板架结构变形场演化过程测量技术,开展了验证试验,获得了模型在纵向压缩载荷作用下的结构变形场,揭示了其变形场的时空演化规律,主要获得下述结论:

(1) 基于数字图像相关和三维激光扫描原理,提出了适用于船舶板架结构变形测量的位移函数与子区相关性准则,研制了散斑制作工具并给出了定量可控的数字散斑场制作方法,形成了船舶板架结构几何形貌测量方法,建立了船舶板架结构变形场测量技术,实现了船舶板架结构变形场的全过程测量。

(2) 与经计量认证的激光位移传感器测得的数据相比较,船舶板架结构变形场测量技术的测量偏差位于 -0.070~0.080 mm 之间,故本文所建立的变形场测量技术具有较高的测量精度。

参 考 文 献:

[1] 潘广娟. 基于数字图像处理的复材构件变形测量研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.

- Pan Guangjuan. Research on deformation measurement of composite materials based on digital image processing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [2] 魏 斌, 梁 晋, 李 洁, 等. 大型上单翼飞机机翼三维全场变形测量方案[J]. 航空学报, 2017, 38(7): 172-181.
Wei Bin, Liang Jin, Li Jie, et al. 3D full-field wing deformation measurement method for large high-wing airplanes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(7): 172-181.
- [3] 李英杰, 张 亮, 王炳乾, 等. 基于CT扫描和数字体相关法的页岩各向异性三维变形场特征研究[J]. 岩土力学, 2023(S1): 1-11.
Li Yingjie, Zhang Liang, Wang Bingqian, et al. Study on anisotropic three-dimensional deformation field characteristics of shale based on CT scanning and digital volume correlation method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023(S1): 1-11.
- [4] 余镇江. 基于数字图像相关法的航空发动机叶片三维变形测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
Yu Zhenjiang. Research on 3d-deformation measurement technology of aero engine blade based on digital image correlation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [5] 赵 南, 顾学康, 李政杰, 等. 弯剪载荷作用下超大型浮体撑杆结构极限强度研究[J]. 船舶力学, 2022, 26(9): 1344-1353.
Zhao Nan, Gu Xuekang, Li Zhengjie, et al. Ultimate strength of brace strut structure of VLFS under bending and shear loads [J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(9): 1344-1353.
- [6] 赵 南, 顾学康, 祁恩荣, 等. 复杂载荷作用下连接器基座加强区结构极限强度研究[J]. 船舶力学, 2018, 22(7): 857-864.
Zhao Nan, Gu Xuekang, Qi Enrong, et al. Theoretical and experimental study on the ultimate strength of the VLFS connector foundation support reinforcing area structure under complex loads[J]. Journal of Ship Mechanics, 2018, 22(7): 857-864.
- [7] 熊群飞. 联合载荷作用下加筋板极限强度数值与试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
Xiong Qunfei. Numerical and experimental study on ultimate strength of stiffened plates under combined loads[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [8] 陆 晔, 滕 蓓, 王新宇, 等. 超大型浮体柔性连接器极限强度模型试验研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(11): 1506-1514.
Lu Ye, Teng Bei, Wang Xinyu, et al. Experimental study on ultimate strength of flexible connectors of very large floating structures[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(11): 1506-1514.
- [9] Janeliukstis R, Chen X. Review of digital image correlation application to large-scale composite structure testing[J]. Composite Structures, 2021, 271: 114143.
- [10] Sharma D, Hiremath S S. In-plane and out-plane flexural properties of the bird feather-inspired panels: Experimental, digital image correlation, and finite element study[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 127: 107731.
- [11] 陈振宁. 数字散斑场优化及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
Chen Zhenning. Optimizations and applications of digital speckle patterns[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [12] Xiumei W, Renfen C, Li Y, et al. Improved diagnostic accuracy in detecting anti-dense fine speckle 70 antibodies using fluorescence enzyme immunoassay and line immunoassay by optimising their cut-offs[J]. Pathology, 2022, 54(S1).
- [13] 段志鑫. 三维激光扫描数据精简、表面重构方法及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
Duan Zhixin. Research on 3D laser scanning data simplification, surface reconstruction methods and applications[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.