

# 大型结构高精度三维动态变形测量应用进展

邵新星\*, 员方, 魏康, 何小元\*\*

东南大学土木工程学院工程力学系, 江苏 南京 210096

**摘要** 大型结构全周高精度三维动态变形测量对大型或超大型结构的力学性能研究有着重大意义。三维数字图像相关作为一种结构简单、非接触、精度高的全场变形测量技术,可以为大型结构变形测量提供有效的测量手段。首先介绍三维数字图像相关测量的基本原理。在大型结构多相机全周变形测量方法中,将介绍大尺度散斑制作、大视场三维标定、多相机系统坐标统一、相机外参实时标定等关键技术的研究工作。最后,针对土木工程领域与航空航天领域的实际需求,介绍大型结构高精度三维动态变形测量的应用,包括盒式结构地震模拟振动台试验测量、悬索穹顶结构连续坍塌试验全周高速变形测量、运载火箭舱段荷载试验全周变形测量。大型结构全周高精度三维动态变形测量将为大型建筑结构抗震性能分析、大型结构力学建模和破坏机理研究提供可靠的实验分析手段。

**关键词** 大型结构; 三维动态变形测量; 多相机测量; 数字图像相关

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230675

## Advances in High-Accuracy Three-Dimensional Dynamic Deformation Measurement and its Applications for Large Structures

Shao Xinxing\*, Yuan Fang, Wei Kang, He Xiaoyuan\*\*

Department of Engineering Mechanics, School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China

**Abstract** High-accuracy panoramic three-dimensional (3D) dynamic deformation measurements are of considerable significance for studying the mechanical properties of large or ultra-large structures. As a simple, non-contact, and high-precision full-field deformation measurement technology, three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) can provide an effective measurement method for large-scale structural deformation measurement. This paper introduces the basic principles of 3D-DIC measurement and presents key technical advancements in the panoramic deformation measurement of large structures with multiple cameras. These advancements include large-scale speckle fabrication, 3D calibration of large field-of-view, coordinate unification of multi-camera systems, and real-time calibration of camera extrinsic parameters. Furthermore, this paper presents practical applications of high-accuracy 3D dynamic deformation measurements for large structures in civil engineering and aerospace engineering fields, such as the assessment of the cassette structure in seismic shaking table tests, panoramic high-speed deformation measurement of suspension cable dome structures in progressive collapse tests, and panoramic deformation measurement of cabin structures of launch vehicles in load tests. Using high-accuracy 3D dynamic deformation measurements for large structures provides a reliable experimental method for seismic performance analysis, mechanical modeling of large structures, and in-depth study of failure mechanisms.

**Key words** large structure; three-dimensional dynamic deformation measurement; multi-camera measurement; digital image correlation

## 1 引言

大型结构全周高精度三维动态变形测量对大型或超大型结构的力学性能研究有着重大意义<sup>[1-2]</sup>。传统

的位移计与应变片测量技术具有较高的应变测量精度,但是无法满足大型结构大范围、全场的变形测量需求。目前,基于双目视觉原理<sup>[3]</sup>的三维数字图像相关(DIC)技术因大范围、全场、非接触等特殊优势,广泛

收稿日期: 2023-02-21; 修回日期: 2023-03-04; 录用日期: 2023-03-16; 网络首发日期: 2023-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(11827801, 11902074, 12272093)、国家重点研发计划(2020YFC1511900)

通信作者: \*xinxing.shao@seu.edu.cn; \*\*mmhxy@seu.edu.cn

应用于科研和工程领域的结构变形测量方面<sup>[4]</sup>。三维数字图像相关技术不仅可以测量结构表面应变场,还可以测量结构表面三维位移场,获得丰富的变形数据。

三维数字图像相关测量技术将在被测物表面覆盖灰度随机分布的散斑场作为光学标志,可以实现全场三维位移和表面应变的测量。目前三维数字图像相关测量技术已经比较成熟,但是对大尺度、全周变形的测量仍然存在很大的挑战。单一测区受到视角和分辨率的限制,无法满足大尺度、全周变形测量的需求。尽管增加相机数量可以扩大测区范围,若不对测量系统进行坐标统一,则无法实现对整体变形的分析。同时,对于大型结构全周高精度三维动态变形测量,单套系统的测量视场也比常规系统的测量视场大得多,如何实现高精度的三维标定和测量,也是需要解决和突破的问题。对于大型地震模拟振动台等特殊试验环境,多相机系统中的相机姿态还会因环境扰动发生变化,这将给高精度变形测量带来极大的挑战。

本文针对土木工程领域与航空航天领域的实际需求,将介绍大型结构高精度三维动态变形测量应用方

面的研究进展,包括盒式结构地震模拟振动台试验测量、悬索穹顶结构连续坍塌试验全周高速变形测量、运载火箭舱段荷载试验全周变形测量。在介绍应用之前,将简要介绍三维数字图像相关测量技术的基本原理和大型结构全周高精度三维动态变形测量中的关键技术,关键技术包括大尺度散斑制作技术、大尺度三维系统标定技术、多相机坐标系统一技术和相机外参实时标定技术。

## 2 基本原理

三维数字图像相关测量技术采用双目立体视觉原理和数字图像相关原理<sup>[5]</sup>,通过拍摄被测物体变形前后的表面信息,跟踪物体表面的灰度特征,经数字图像相关运算和三维坐标重构,实现物体变形过程中非接触式三维形貌、三维位移和表面应变的全场测量。

如图 1 所示,空间点  $P$  的左右图像点分别为  $P_1$  和  $P_2$ ,  $P_1$  和  $P_2$  移除畸变后的图像坐标分别为  $(u_1, v_1)$  和  $(u_2, v_2)$ 。将世界坐标系建立在左相机坐标系上,那么重构出的空间点  $P$  的三维坐标为

$$\begin{bmatrix} f_{x1} & f_{s1} & c_{x1} - x_1 \\ 0 & f_{y1} & c_{y1} - y_1 \\ R_{11}f_{x2} + R_{21}f_{s2} + R_{31}(c_{x2} - u_2) & R_{12}f_{x2} + R_{22}f_{s2} + R_{32}(c_{x2} - u_2) & R_{13}f_{x2} + R_{23}f_{s2} + R_{33}(c_{x2} - u_2) \\ R_{21}f_{y2} + R_{31}(c_{y2} - v_2) & R_{22}f_{y2} + R_{32}(c_{y2} - v_2) & R_{23}f_{y2} + R_{33}(c_{y2} - v_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -t_x f_{x2} - t_y f_{s2} - t_z(c_{x2} - x_2) \\ -t_y f_{y2} - t_z(c_{y2} - v_2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

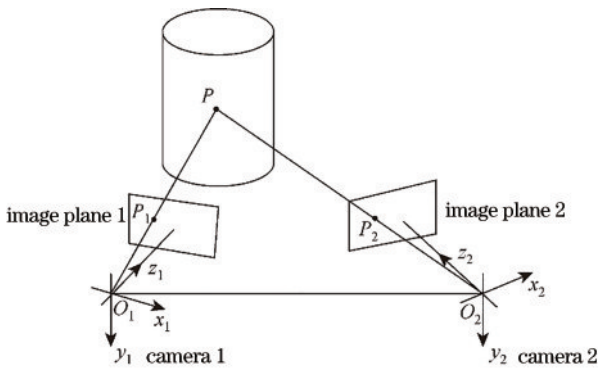


图 1 双目视觉测量原理

Fig. 1 Schematic of binocular vision measurement

考虑到镜头畸变的影响,在三维重构前需要对左右图像匹配点坐标系进行去畸变处理。对匹配点坐标进行畸变校正后,使用式(1)就可以完成空间点三维坐标的获取。在参考图阶段,通过三维重构,可以获得空间点在变形前的空间坐标  $(X_0, Y_0, Z_0)$ 。对于每一个变形阶段  $i$ ,通过三维重构,可以获得空间点在每一个

变形阶段的空间坐标  $(X_i, Y_i, Z_i)$ 。根据变形前后的空间坐标,即可计算某点的三维位移,表示为

$$\begin{cases} U_{i1} = X_i - X_0 \\ V_{i1} = Y_i - Y_0 \\ W_{i1} = Z_i - Z_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $U_{i1}$ 、 $V_{i1}$  和  $W_{i1}$  分别为该点在变形阶段  $i$  的三个位移分量。一旦确定了试样表面的三维形貌信息和三维位移信息,就可以通过几何关系计算表面应变。由于被测物表面可能是曲面的,因此不能直接用二维数字图像相关中的位移场数据进行差分运算。为了计算曲面待计算点的应变信息,需要先建立待计算点处的局部坐标系,再将三维位移场数据转到局部坐标系下,最后对局部坐标系下的面内位移场数据进行差分得到该计算点的表面应变信息。

为了实现大型结构全周高精度三维动态变形测量,单套三维数字图像相关测量系统是无法满足需求的,如图 2 所示,需要使用多相机系统对测量区域

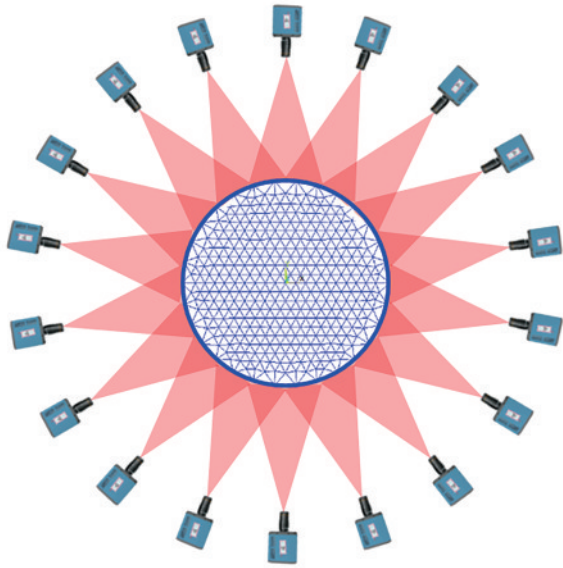


图 2 多相机全周变形测量示意图

Fig. 2 Schematic of multi-camera panoramic deformation measurement

进行拆分,每套系统测量其中的一部分区域,通过坐标系统与数据融合实现大范围、全场、高精度变形测量。

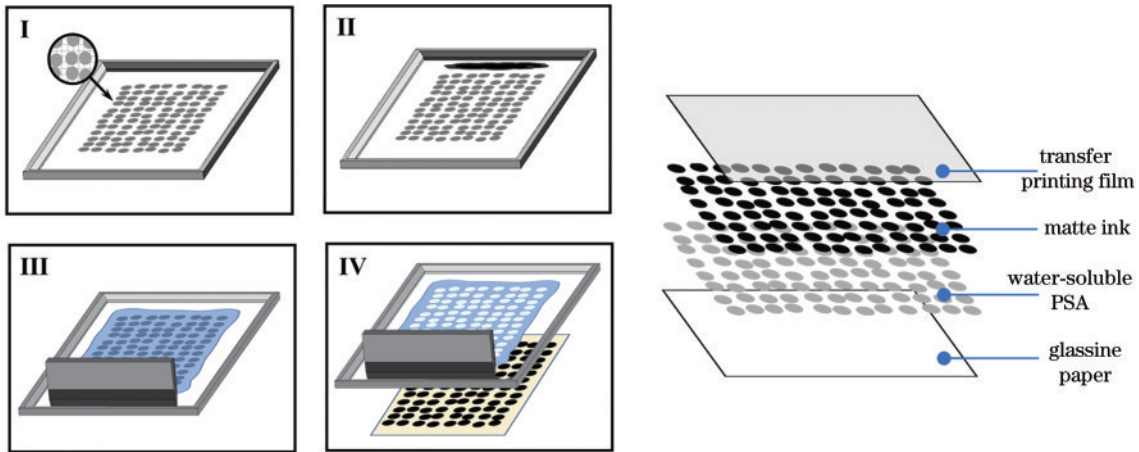


图 3 大尺度数字散斑的制作方法

Fig. 3 Large-scale digital speckle fabrication method

### 3.2 大视场双目标定

相机的标定可以分为内参标定和外参标定,内参标定主要用于标定每台相机的主点坐标、像距和畸变等参数,外参标定则需要标定两台相机光心坐标系之间的相对位姿关系。大视场标定与常规视场标定的最大不同在于视场,因为标定板需要占据一定的视场才能很好地标定出镜头畸变等参数,使用大标定板存在加工成本高且在现场标定不便于操作等问题。相机的内参可以使用平面标定法在实验室进行提前标定得到<sup>[7]</sup>,实际标定时可以在近距离更小视场下用相位标定物进行标定<sup>[8]</sup>。相机内参标定后,将调节像距的部分固定,在运输过程中可以近似认为内参不发生变化。

## 3 关键技术

### 3.1 大尺度散斑制作

为了保证散斑匹配的准确性和测量结果的一致性,在测量中需要使用高质量的优化散斑场。传统的散斑制作方法通常在现场采用喷漆或喷枪的方式绘制纹理图案,每次制作的散斑场图案不一致,制作精度难以保证。热转印、镂空模板喷涂、光敏印章等方法虽然能实现高精度的散斑场转印,但并不适用于大面积、大尺度散斑场的现场制作。

常规水转印技术<sup>[6]</sup>虽然可以制作高精度的散斑图案,但其载体薄膜容易反光,在漫反射光源条件下有较好效果,但在光源直射情况下反光现象非常严重。为了实现大尺度哑光散斑的制作,采用了丝网印刷技术。首先利用光敏胶晒制数字散斑模板,调制哑光油墨,将其印刷在转印膜上;然后使用模板在油墨上刷一层压敏胶,底部使用离型纸进行保护。具体制作流程和方法如图 3 所示。使用时只需撕掉离型纸,将有压敏胶的一面贴在试件表面,再用刮板刮过转印膜,即可将散斑转印至待测试件表面。这种哑光数字散斑方法制作工艺简单,其哑光的特性非常适用于各种测量环境。

如果测量系统需要在现场调节像距等参数,则无法提前标定相机内参,需要在现场标定相机内外参数。

#### 3.2.1 基于共面约束的相机外参标定方法

对于相机内参提前标定的双目测量系统,在实验现场,只需要标定相机间的相对外参。为实现对单套测量系统中相机外部参数的高精度标定,采用基于散斑匹配和共面方程的大视场标定方法<sup>[9]</sup>。如图 1 所示,点  $O_1$ 、点  $O_2$  和点  $P$  是共面的。在右相机坐标系,根据共面方程,有

$$\overrightarrow{O_1O_2} \cdot (\overrightarrow{O_1P_1} \times \overrightarrow{O_2P_2}) = 0, \quad (3)$$

$$\overrightarrow{O_1O_2} = -\mathbf{T}, \quad (4)$$

$$\overrightarrow{O_1 P_1} = [x_1 \ y_1 \ f_1]^T = [X_1 \ Y_1 \ Z_1]^T, \quad (5)$$

$$\overrightarrow{O_2 P_2} = \mathbf{R} [x_2 \ y_2 \ f_2]^T = [X_2 \ Y_2 \ Z_2]^T, \quad (6)$$

式中:  $(x_1, y_1, f_1)$  和  $(x_2, y_2, f_2)$  为  $P_1$  和  $P_2$  在左和右相机光心坐标系下的三维坐标, 可以由去畸变后的匹配像素坐标、主点坐标、等效焦距和像元尺寸计算得到。为了得到匹配像素坐标, 可以直接对采集到的左右散斑图像进行模板匹配。联立式(3)~(6), 得点  $P$  的共面方程为

$$t_x(Y_1 Z_2 - Y_2 Z_1) + t_y(X_2 Z_1 - X_1 Z_2) + t_z(X_1 Y_2 - X_2 Y_1) = F(n_x, n_y, n_z, t_x, t_y, t_z) = 0. \quad (7)$$

对于  $N$  对匹配点, 最终的参数优化方程为

$$(n_x, n_y, n_z, t_x, t_y, t_z)_{\text{opt}} = \arg \min \sum_{n=1}^N F_n^2. \quad (8)$$

若相机水平布置, 可以对平移向量分量对  $t_x$  进行归一化; 若为垂直布置, 则可以对平移向量分量对  $t_y$  进行归一化。因此, 在式(8)中共有 5 个参数需要求解, 也就是说至少需要左右图像中的 5 对匹配点来进行计算。对于三维数字图像相关中的数万对散斑匹配点, 使用非线性最小二乘法优化求解出相机间的旋转向量和平移向量, 外参优化的初值可以由本质矩阵分解得到。最后, 使用一个固定的标尺对平移向量的尺度信息进行校正。

### 3.2.2 基于摄影测量的相机内外参数标定方法

对于现场需要标定相机内参和外参的双目测量系统, 可以使用基于摄像测量的相机参数标定方法<sup>[10]</sup>。如图 4 所示, 利用不同姿态和测量位置拍摄的图像, 在

摄影测量的基础上, 同时求解左右相机的内参和编码点的三维空间坐标。每台相机的内参标定可归纳为 3 个步骤。

1) 编码点检测。在采集不同标定位置和测量位置的图像后, 需要检测所有图像中编码的目标, 并保存编码点的编码号和中心的图像坐标。

2) 相对外部参数估计和匹配编码目标的三维重建。根据具有相同编码号的编码点图像坐标与依据相机出厂参数推导的相机内参初值, 使用共面约束计算出不同拍摄姿态之间的相对外参。利用计算得到的相对外参和内参初值, 可以完成匹配编码点的三维重建。

3) 光束平差优化。为了获得更加精确的相机内参和编码点三维空间坐标, 可以采用光束平差方法进一步优化相机内参、不同拍摄姿态下的相机外参和编码点三维空间坐标。

重构的  $M$  个编码点三维空间坐标可用于确定双目相机之间的外部参数, 且无需进行非线性迭代优化, 公式为

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \sum_{m=1}^M \left\| \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix}_m - \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}_m - \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \right\|^2 \\ \mathbf{R}^T \mathbf{R} - \mathbf{I} = \mathbf{0} \end{array} \right., \quad (9)$$

在求解外部参数之前, 需要使用固定的标尺对左右相机坐标下的三维重构坐标进行尺度校正。

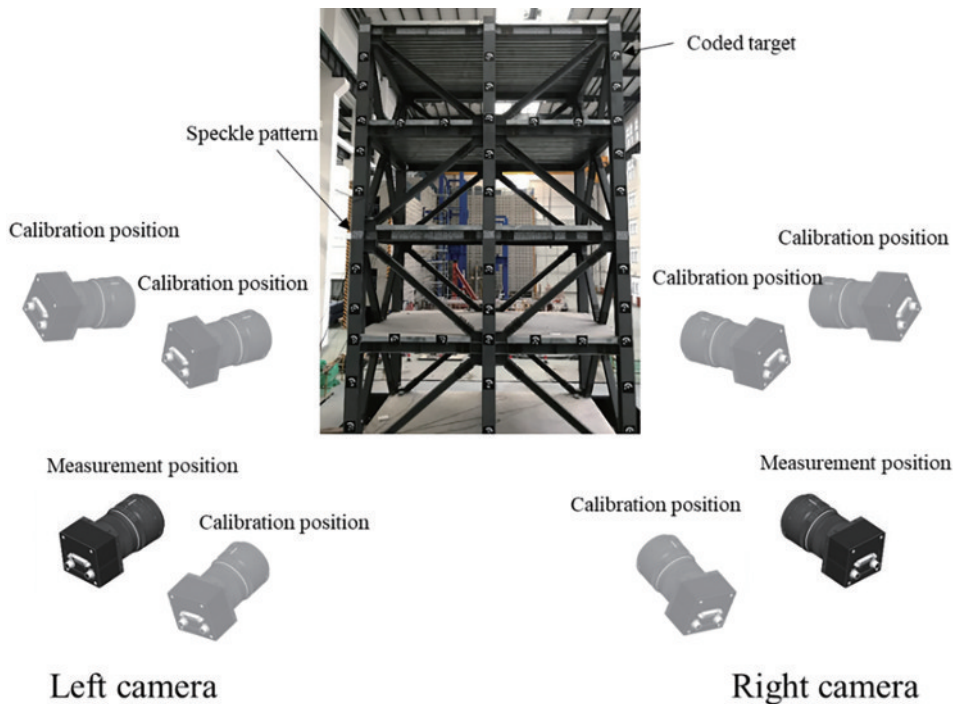


图 4 基于摄影测量的相机内外参数标定<sup>[10]</sup>

Fig. 4 Calibration of camera intrinsic and extrinsic parameters based on photogrammetry<sup>[10]</sup>

### 3.3 多相机坐标系统一

多套三维数字图像相关测量系统的测量结果是在各自左相机光心坐标系下得到的, 将多套系统的测量结果转换到一个全局坐标系下才可以得到整体变形。局部坐标系到全局坐标系的变换需要计算两个坐标系之间的旋转和平移矩阵, 其中  $j$  为三维数字图像相关系统的编号。

如图 5 所示, 为了实现全局坐标系统一, 加载前使用摄影测量方法重构被测物体上的编码点的三维空间坐标<sup>[11]</sup>。同样地, 使用每套双目三维数字图像相关系统重构各自看到的编码点的三维空间坐标。利用编码

值相同的对应关系, 可计算不同坐标系的刚性转置信息, 实现相机坐标系到全局坐标系的测量数据坐标系统一。其中, 在每套双目三维数字图像相关系统中重构的空间坐标为  $p_{jt}$ , 其对应摄影测量中重构的空间坐标为  $q_{jt}$ , 其中  $t$  为该点在视场中编码的序号。该过程实质为一个最小乘, 可描述为

$$(R_{L_i-W}, T_{L_i-W}) = \arg \min \sum_{t=1}^T (R_{L_i-W} p_{jt} + T_{L_i-W} - q_{jt})^2, \quad (10)$$

式中:  $L_i$  为第  $i$  套双目系统所在的局部坐标系;  $W$  为世界坐标系。

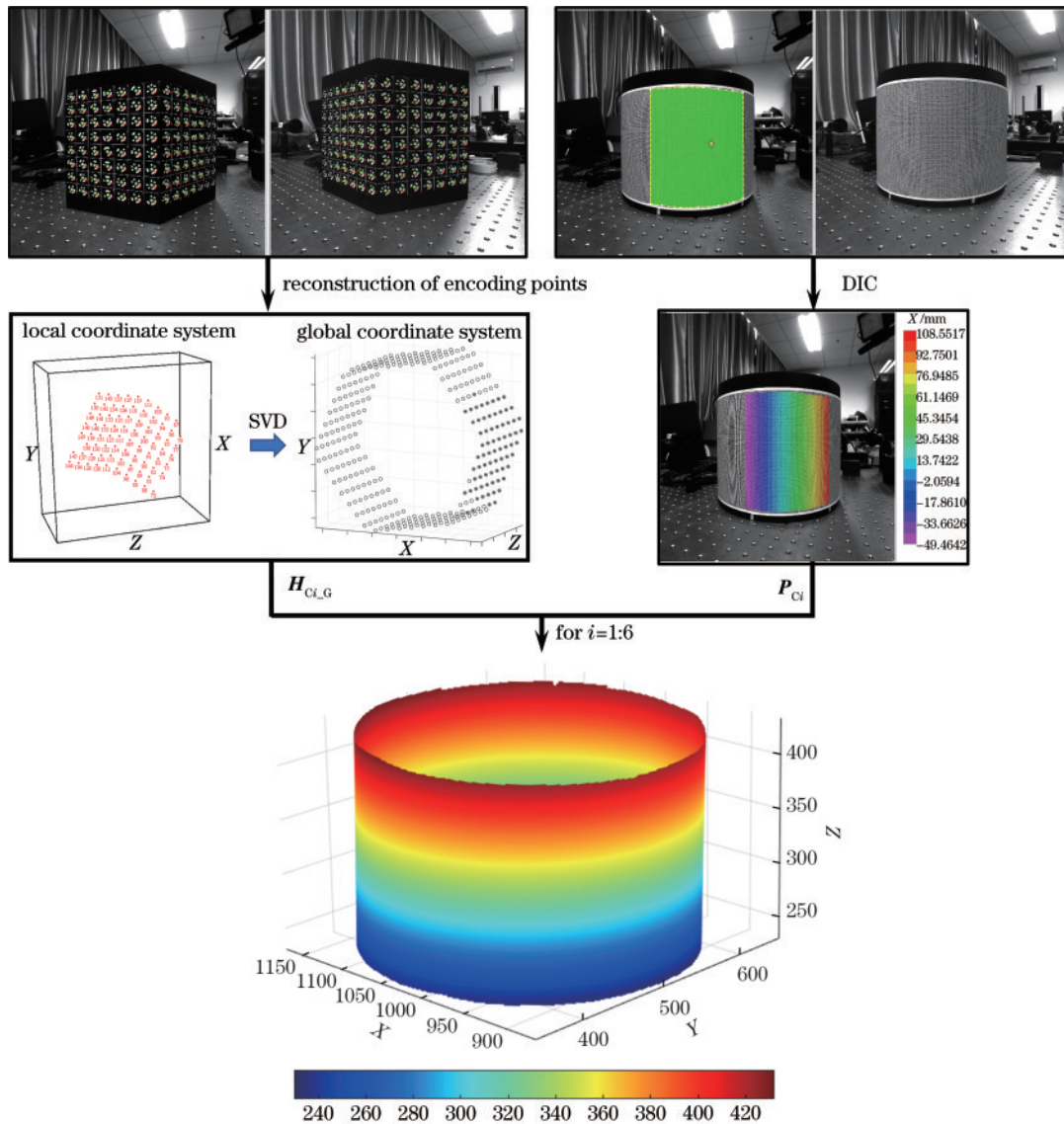


图 5 多相机坐标系统一示意图

Fig. 5 Schematic of multi-camera coordinate system unification

实际操作中, 需要先在被测物体上均匀布置编码点, 再使用单反相机从不同角度对编码点进行拍摄, 最终使用摄影测量方法重构编码点的三维空间坐标系。对于每套双目系统, 同样需要记录编码点照片, 并根据双目视觉原理重构编码点三维空间坐标系。得到坐标

变换关系后, 即可取下编码点, 避免编码点在测量过程中遮挡散斑区域的现象。

### 3.4 相机外参实时标定

对于室内实验室环境下的大型结构变形测量, 气流、光照、环境温度等因素相对稳定。此时, 三维数字

图像相关方法主要的误差来源有相机内参的变化和相机外参的变化。相机内参的变化主要来自相机自热造成的像距变化,测量前让相机开机自热,达到热平衡后再进行标定和测量<sup>[12]</sup>。

在双目视觉测量中,相机外参变化可以分为相对外参变化和绝对外参变化,绝对外参变化可以等效为一次坐标变换,相对外参变化则会进一步影响三维重构<sup>[13]</sup>。对于高精度形貌和应变测量,校正相对外参变化即可。若要实现高精度三维位移测量,则需要同时校正相对外参变化和绝对外参变化。3.2.1 节中的外参标定方法利用左右单帧图像可以标定出相机外参,可以直接用于相机相对外参的实时标定<sup>[13]</sup>。标定出的相机外参可以作为新的外参用于三维重构,从而实现相对外参实时校正。同时,基于散斑匹配和共面方程的外参求解算法可以提供更高的求解精度<sup>[13]</sup>。对于绝对外参的实时校正,则需要依赖参照物或不动点,从而实现坐标系变换参数的实时求解<sup>[14]</sup>。

## 4 实际应用

### 4.1 盒式结构地震模拟振动台试验

#### 4.1.1 工程背景

地震模拟振动台作用下的结构变形测量是结构动

力学领域的一个重要研究方向,主要用于分析和评估结构在不同地震荷载作用下的变形状态和抗震力学性能。通过对结构在振动台作用下的变形进行测量和分析,可以了解结构的固有特性、动态响应和破坏形式等。

由于测量尺度大、现场试验受振动影响等原因,目前国内外针对振动台作用下的多相机全场变形测量的研究鲜有报道。测量方案多为使用十字或圆形标记点的单点测量。虽然单相机二维数字图像相关或双相机三维数字图像相关可以实现全场测量,但二维数字图像相关无法用于存在离面方向运动的三轴振动台试验,而三维数字图像相关在用于大尺度工程结构测量时,存在难以兼顾视场范围和测量精度的问题。

#### 4.1.2 测量方案

盒式框架结构的尺寸约  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 7\text{ m}$ , 竖向共有 15 层。为了实现对该结构变形的高精度测量,沿竖向布置了 2 套三维测量系统<sup>[15]</sup>,如图 6 所示。2 套三维数字图像相关系统分别布置在实验楼的二层和三层(振动台北侧),从而减小环境振动对三维测量系统的影响。通过在相机测量视场内设置固定的人工标记点,通过参考坐标系坐标变换,可以对环境振动引起的

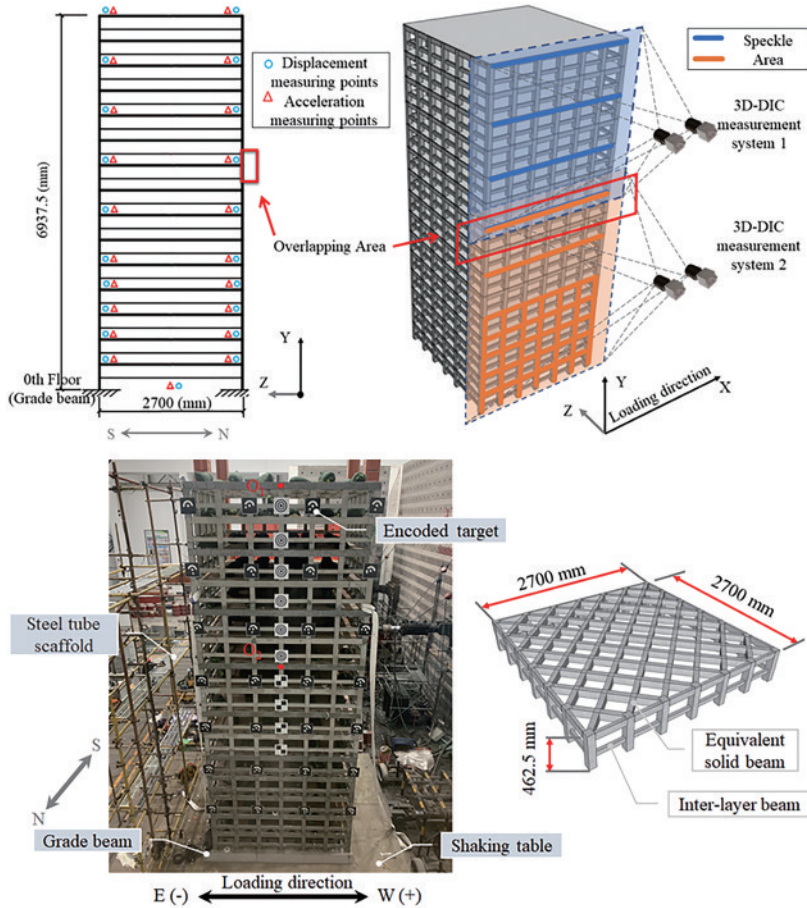


图 6 高层盒式结构变形测量示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 6 Schematic of deformation measurement for high-rise cassette structure<sup>[15]</sup>

绝对外参变化进行实时校正。标记点需要粘贴在稳定的地方,如地面或反力墙。对于测量系统的相对外参变化,采用 3.4 节介绍的相机外参实时标定方法进行实时校正。

4.1.3 实验结果

如图 7 所示,实验测得的位移结果与激光位移计的结果对应良好,多个工况下位移峰值差异为 0.34 mm;对于地震波峰值加速度(PGA)高达 1.0g 的工况,两种测量方法的位移差异亦小于 0.7%。图 8 为多相机三维数字图像相关与拾震器的加速度的对比结果,无论是幅值还是频率均保持一致。对 4 条输入地

震波相同但 PGA 不同的加速度结果进行快速傅里叶变换(FFT)分析,随着工况的加载,明显能发现结构自振频率变小,结构在此过程发生了明显的损伤。

进一步地,提取位移变形最大时的全场测量结果。图 9(a)为正方向最大位移,图 9(b)为负方向最大位移,可以发现结构第 7 层和第 9 层的位移数值与方向都有明显的差异,说明该区域发生了严重的结构破坏。以上结果表明,该多相机三维数字图像相关测量系统具备亚毫米的位移测量精度,并能实现对加速度结果的精准测量,因全场位移测量的能力,便于直观分析结构变形和研究结构破坏形式。

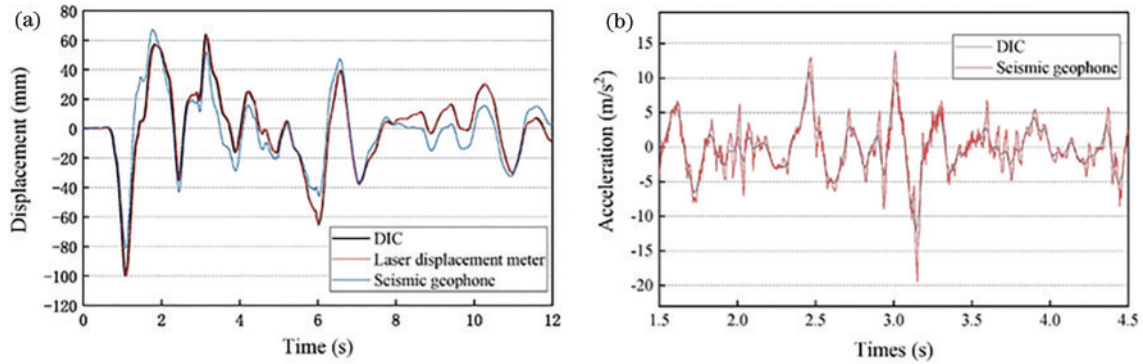


图 7 Imperial Valley 地震波下测量结果的对比<sup>[15]</sup>。(a)位移;(b)加速度

Fig. 7 Comparison of measured results under Imperial Valley wave<sup>[15]</sup>. (a) Displacement; (b) acceleration

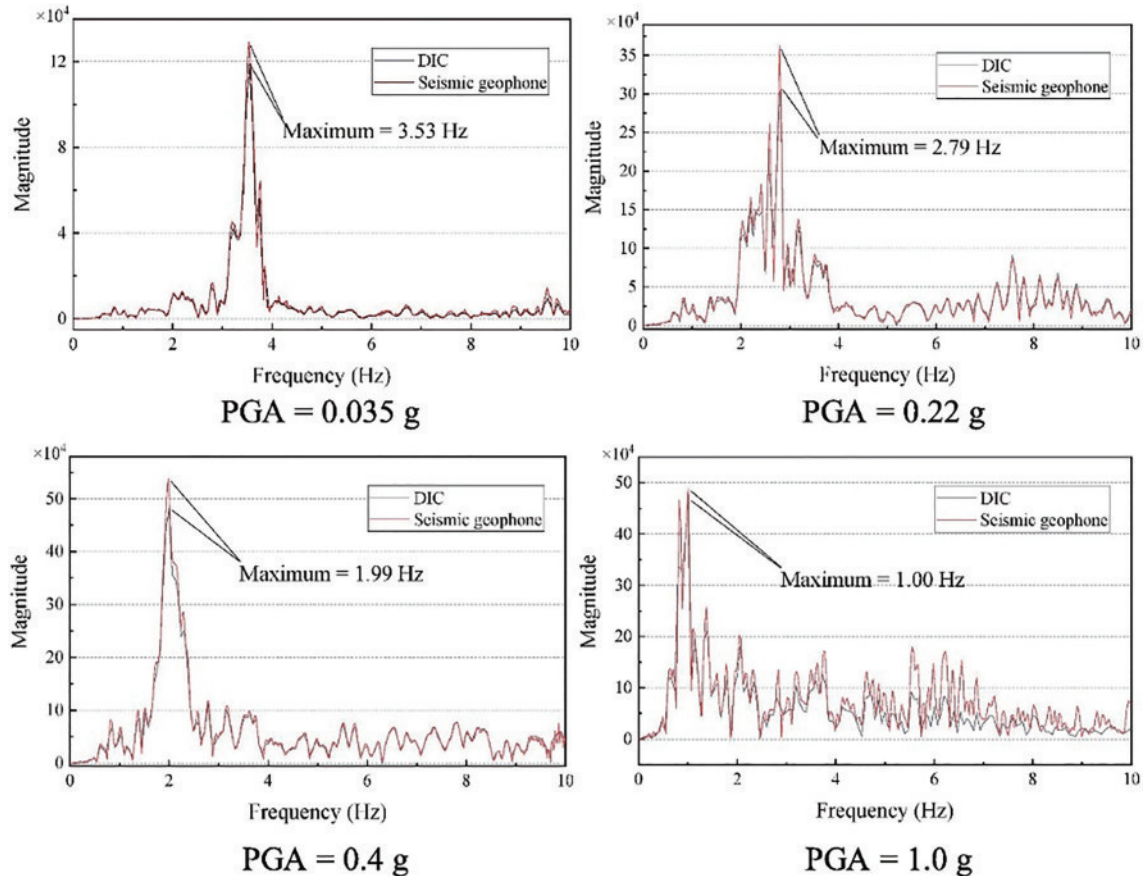


图 8 不同 PGA 工况下顶层位移的 FFT 结果<sup>[15]</sup>

Fig. 8 FFT results of the roof displacement under different PGA conditions<sup>[15]</sup>

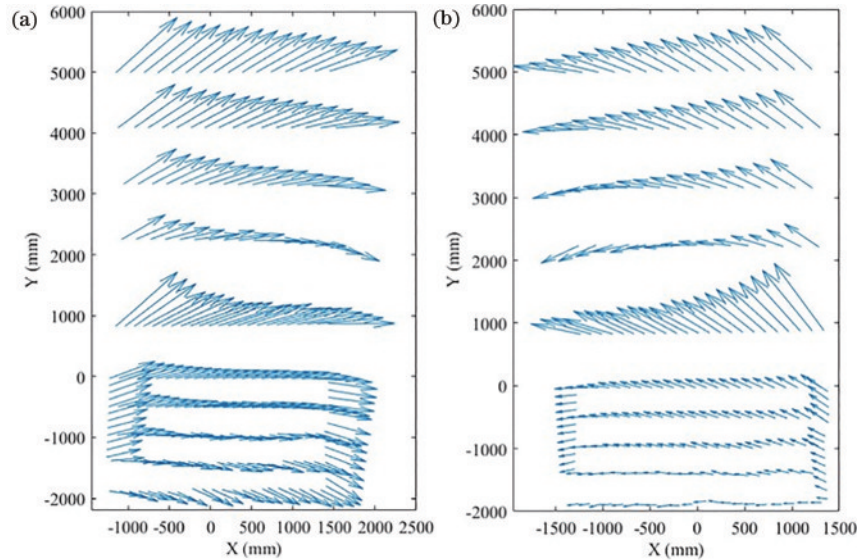


图 9 位移变形最大时的全场结果<sup>[15]</sup>。(a)正方向最大位移;(b)负方向最大位移

Fig. 9 Full-field results at the maximum displacement deformation<sup>[15]</sup>. (a) Maximum displacement in positive direction; (b) maximum displacement in negative direction

## 4.2 悬索穹顶结构连续坍塌试验

### 4.2.1 工程背景

弦支穹顶结构是一种新型的大跨度空间结构,当它们受到设计缺陷、不当施工或极端事件的影响时,可能会导致结构某些关键部分的初始失效,损伤的扩展甚至会引发结构的连续倒塌。为避免类似事故的发生,抗连续倒塌能力已成为空间结构设计的基本要求。

目前大跨度空间结构连续倒塌的研究主要记录为倒塌过程中的节点位移、杆件应力和索力。对于节点位移的测量,通常使用线性可变差动变压器等位移传感器,然而,结构的连续倒塌是一个空间位移,单方向的位移结果不足以分析结构的破坏形式。其次,一般弦支穹顶的关键节点分布于结构全周,如图 10 所示,常规的双目视觉测量系统无法实现空间构型的全周变形动态测量。网壳结构直径约 6 m,中间节点呈小弧度拱状,地面相机难以观测到,给现场测量带来了一定的挑战<sup>[16]</sup>。

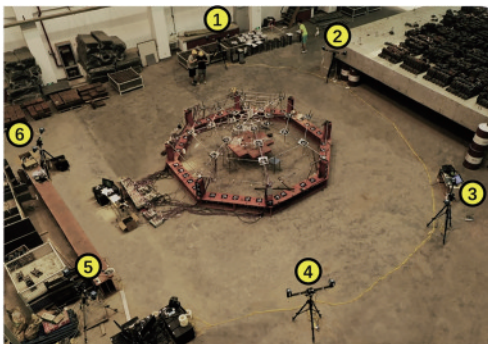


图 10 弦支穹顶结构及测量系统布置的现场图<sup>[16]</sup>

Fig. 10 On-site photo of cable-supported dome structure and measurement system layout<sup>[16]</sup>

### 4.2.2 测量方案

现场实验主要分为两部分,其一是对拉索进行静态的张拉实验,其次是对结构进行动态垮塌实验,均需要测量关键节点的位移变化。测量系统分为无人机辅助测量系统和多相机测量系统两个部分,基于无人机实现标志点三维重构用于静态张拉实验的节点测量,由 12 台相机构成的多相机测量系统则负责对结构全周的动态垮塌进行监测。利用结构表面大量布置的圆形编码标志点,实现所有无人机结果和多相机结果的坐标统一。

实验的操作步骤为:

1)在拉索张拉前后阶段,无人机使用优化后的飞行路径对节点处进行不断拍摄,如图 11(a)所示,利用近景摄影测量方法对多张图片进行计算,可以得到节点变形的高精度三维坐标;

2)如图 11(b)所示,使用单反相机对地梁和边柱处的编码标志点进行拍摄,边柱上的编码标志点可以作为不动点,其摄影测量重构结果可用于坐标系的统一,图 11(c)为拉索张拉前后的变形结果均转至单反相机摄影测量坐标系的结果;

3)在网壳结构的连续倒塌实验中,12 台相机可两两组成一套双目系统,多个相机通过硬触发同步,拍摄倒塌实验节点位移的全过程。

### 4.2.3 实验结果

图 12 显示了张拉前后配重结点的位移,通过无人机拍摄结合摄影测量方法,可以有效地测量张拉实验的结点静态位移。在连续倒塌阶段,为模拟结构外环拉索突然失效的工况,使用通断装置瞬间释放外环索力,拉索从触发到索力完全释放的整个过程约为 0.04 s,从拉索断开至子结构触地,整个过程为 3 s 左



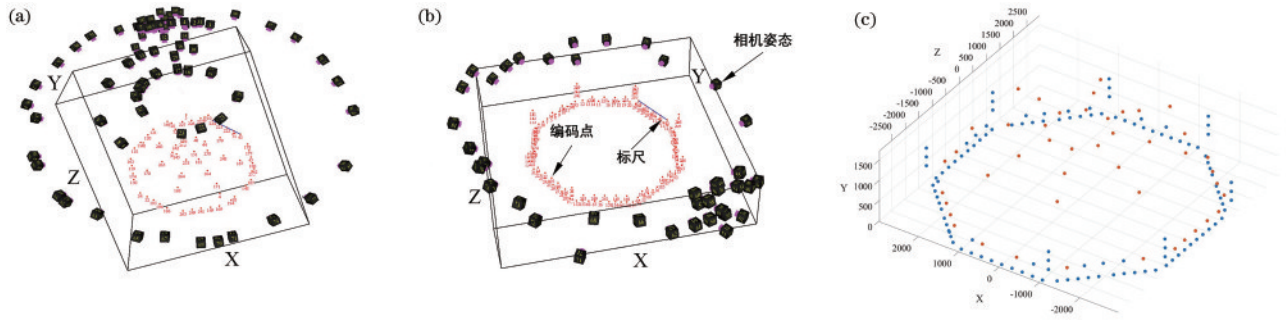


图 11 编码标志点的三维重构结果<sup>[16]</sup>。(a) 无人机拍摄的图像的重构结果；(b) 单反相机拍摄的图像的重构结果；(c) 两套重构数据在坐标系统一后的结果

Fig.11 Three-dimensional reconstruction results of encoded markers<sup>[16]</sup>. (a) Reconstructed result of image captured by UAV; (b) reconstructed result of image captured by SLR camera; (c) results of two sets of reconstructed data after the coordinate system unification

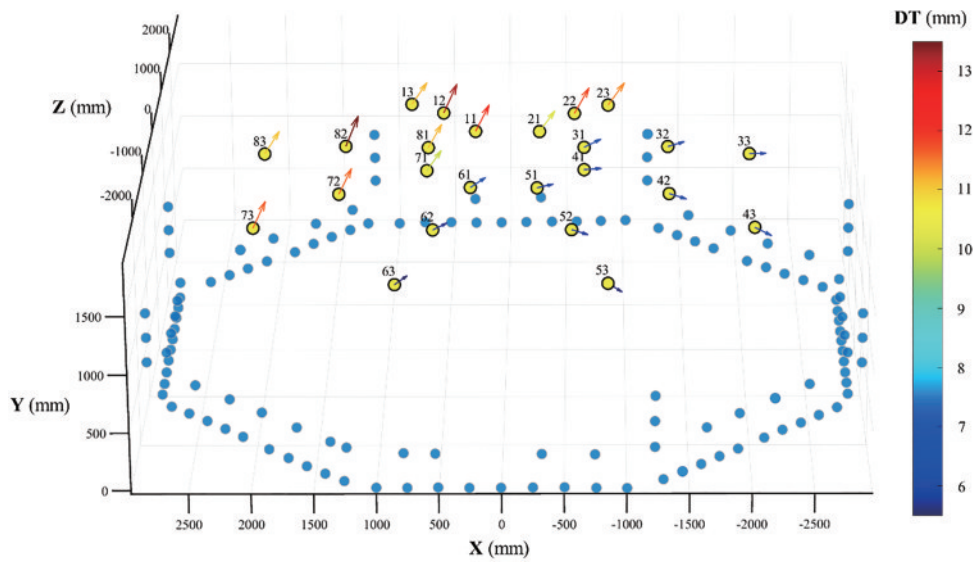


图 12 张拉前后配重结点位移<sup>[16]</sup>

Fig. 12 Displacement of counterweight nodes before and after tension<sup>[16]</sup>

右。多相机系统完整地记录了倒塌过程中结点的瞬时位移变化,为结构的破坏模式分析和数值模拟提供了

可靠的数据支持。

每个结点的垂直位移如图 13 所示,根据结点划

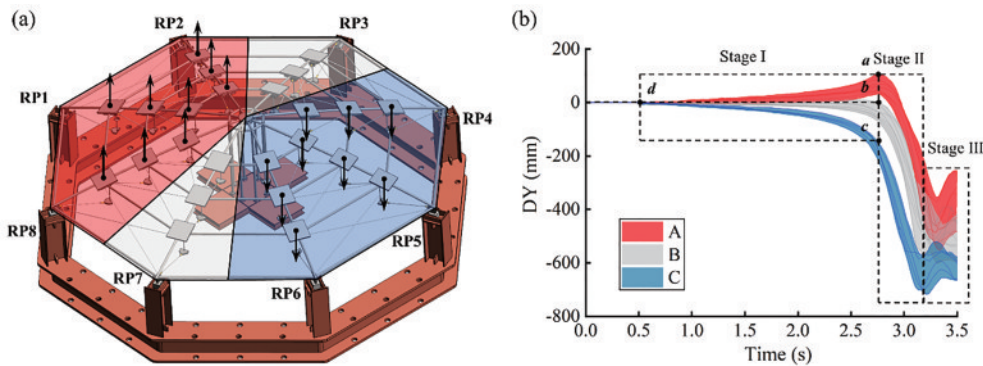


图 13 连续坍塌过程中结点的运动方向和竖向位移<sup>[16]</sup>。(a) 断索后配重结点运动方向的区域划分；(b) 结点的竖向位移和结构坍塌阶段

Fig.13 Movement direction and vertical displacement of nodes during progressive collapse<sup>[16]</sup>. (a) Area division of the movement direction of the counterweight nodes after the cable cutting; (b) vertical displacement of nodes and structural collapse stage

分,将位移时间曲线绘制成三个颜色波段。d点是电缆被切断的时刻,a、b、c点是三个区域的位移拐点,这也是进入第二阶段的标志。两段位移-时间曲线的斜率明显增大,这表明下降速度突然增加。子结构接触地面的时刻被认为是两个阶段的结束。在第三阶段,子结构完全倒塌,大部分径向构件屈曲,整个结构倒塌。

### 4.3 运载火箭舱段荷载试验

#### 4.3.1 工程背景

舱段结构是运载火箭的重要组成部分,地面荷载试验则是分析舱段承载能力的重要环节。在荷载试验中,需要测量每一级荷载作用下的舱段结构变形信息,以分析结构变形状态和力学性能。传统的应变片测量技术具有较高的应变测量精度,但是无法满足火箭舱段大范围、全场的应变测量需求<sup>[17]</sup>。

#### 4.3.2 测量方案

如图 14 所示,将相机固定在六棱柱形状的安装平台上,通过可伸出式的支杆确保相机置于合适的成像距离上。每根支杆上安装 2 台相机,共有 24 台相机,组

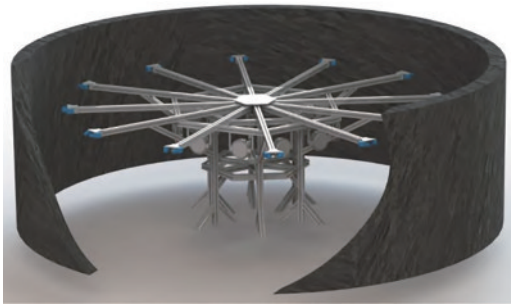


图 14 多相机全周变形测量系统示意图<sup>[17]</sup>

Fig. 14 Schematic of the multi-camera panoramic deformation measurement system<sup>[17]</sup>

成了 12 套双目测量单元。图 15 为实验设备布置的现场图,24 台相机通过硬触发线实现同步触发采集图像,相机分辨率为 2048×2048 像素,像元尺寸为 5.5 μm。在物距为 2.6 m 的情况下选用焦距为 8 mm 的镜头,对应相机视场约为 3.6 m×3.6 m。根据视场尺寸,使用电脑生成直径为 7.2 mm(约 4 个像素直径)的优化数字散斑,并将其制作成转印贴纸附在舱段内表面,从而实现高精度散斑场的制作。

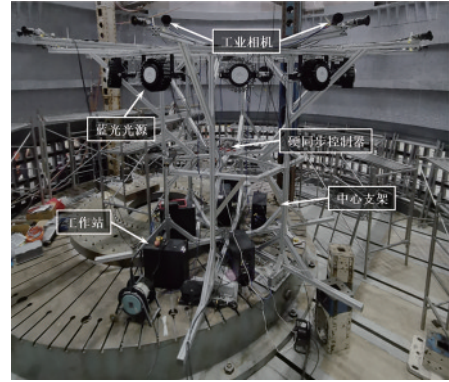


图 15 多相机全周变形测量系统现场图<sup>[17]</sup>

Fig. 15 Site view of multi-camera panoramic deformation measurement system<sup>[17]</sup>

#### 4.3.3 实验结果

图 16 为第 17 级加载状态下的柱坐标 360°全周变形,其中包括轴向位移场和应变场,以及沿半径方向的屈曲变形和转角应变。通过搭建本套相机网络全周三维变形测量系统,成功实现了火箭舱段内表面柱坐标系下 360°全周变形测量,全周测量结果可以全方位地直观展现火箭舱段在荷载作用下的变形。如图 17 所示,三个方向位移时域静态噪声标准差小于 0.01 mm,

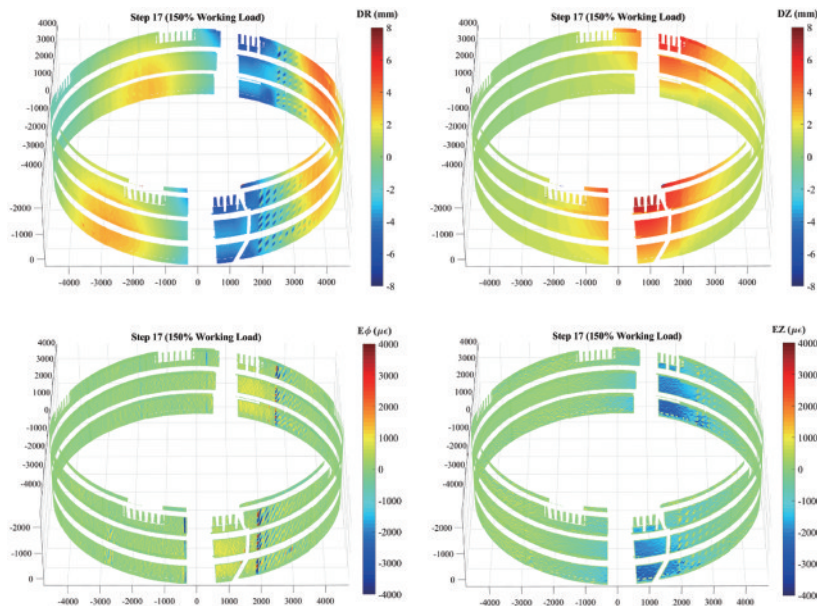


图 16 柱坐标系下的 360°全周变形<sup>[17]</sup>

Fig. 16 360° panoramic deformation in cylindrical coordinate system<sup>[17]</sup>

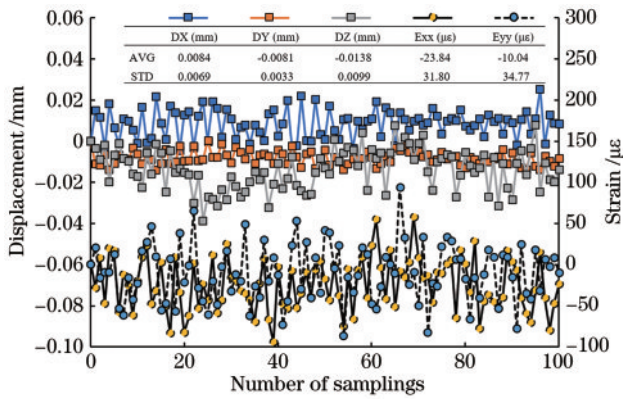


图 17 位移和应变测量静态噪声

Fig. 17 Static noise of displacement and strain measurement

应变时域静态噪声标准差小于  $50 \mu\epsilon$ 。

## 5 结 论

主要介绍了大型结构高精度三维动态变形测量方法与应用。针对实际测量需求,开展了相关研究,并给出了一些测量技术问题的解决方案。对于多相机测量,目前对变形场的拼接精度已经可以满足大部分的测量需求,如何进一步提高形貌拼接精度也将会得到进一步研究。同时,对于十几台乃至上百台相机组成的多相机变形测量系统,需要存储和处理的图像数据量也会大幅度增加,如何高效率地存储和处理图像数据的研究工作也正在进行中。

本文的应用目前主要针对室内实验室环境下的测量,对于室外复杂环境,进一步有相机内外参数同时变化、气流扰动、浑浊介质成像等问题需要解决。大型结构全周高精度三维动态变形测量将为大型建筑结构抗震性能分析、大型结构力学建模和破坏机理深入研究提供可靠的实验分析手段。

## 参 考 文 献

- [1] 于起峰, 尚洋, 伏思华, 等. 大型结构变形及形貌摄像测量技术研究进展[J]. 实验力学, 2011, 26(5): 479-490.  
Yu Q F, Shang Y, Fu S H, et al. Development of videometrics for large-scale structural deformation and topography measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5): 479-490.
- [2] 亢一澜. 追思怀远 继往前行: 写在贾有权教授百年诞辰之际[J]. 实验力学, 2016, 31(5): 573-576.  
Kang Y L. Remembering for the Future and Moving Forward: on the occasion of Professor Jia Youquan's centenary birthday[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(5): 573-576.
- [3] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
Zhang G J. Vision measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [4] Luo P F, Chao Y J, Sutton M A, et al. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision[J].

- Experimental Mechanics, 1993, 33(2): 123-132.
- [5] 潘兵, 谢惠民, 李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法[J]. 实验力学, 2007, 22(6): 556-567.  
Pan B, Xie H M, Li Y J. Three-dimensional digital image correlation method for shape and deformation measurement of an object surface[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(6): 556-567.
- [6] Chen Z N, Quan C G, Zhu F P, et al. A method to transfer speckle patterns for digital image correlation[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(9): 095201.
- [7] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [8] An Y T, Bell T, Li B W, et al. Method for large-range structured light system calibration[J]. Applied Optics, 2016, 55(33): 9563-9572.
- [9] Shao X X, Dai X J, Chen Z N, et al. Calibration of stereo-digital image correlation for deformation measurement of large engineering components[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(12): 125010.
- [10] Shao X, Wei K, He X. Calibration of stereo-digital image correlation for large field of view measurement based on photogrammetry[EB/OL]. [2022-11-09]. <https://ssrn.com/abstract=4334128>.
- [11] Dong S, Shao X X, Kang X, et al. Extrinsic calibration of a non-overlapping camera network based on close-range photogrammetry[J]. Applied Optics, 2016, 55(23): 6363-6370.
- [12] Ma S P, Pang J Z, Ma Q W. The systematic error in digital image correlation induced by self-heating of a digital camera[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(2): 025403.
- [13] Shao X X, He X Y. Camera motion-induced systematic errors in stereo-DIC and speckle-based compensation method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 149: 106809.
- [14] Malesa M, Kujawinska M. Deformation measurements by digital image correlation with automatic merging of data distributed in time[J]. Applied Optics, 2013, 52(19): 4681-4692.
- [15] Wei K, Yuan F, Shao X X, et al. High-speed multi-camera 3D DIC measurement of the deformation of cassette structure with large shaking table[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 177: 109273.
- [16] 员方. 柱表面三维变形高精度测量系统与分析方法[D]. 南京: 东南大学, 2022: 58-65.  
Yuan F. High precision measurement system and analysis method for three-dimensional deformation of cylindrical surface [D]. Nanjing: Southeast University, 2022: 58-65.
- [17] 邵新星, 周江帆, 员方, 等. 基于相机网络的运载火箭舱段全周变形实时测量[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(12): 1849-1858.  
Shao X X, Zhou J F, Yun F, et al. Real-time panoramic-deformation measurement of cabin structure of launch vehicle based on camera network[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2022, 52(12): 1849-1858.