

# 土木工程结构试验量测技术研究进展与现状

赵宪忠<sup>1,2</sup>, 李秋云<sup>1</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 理论分析、试验研究和数值模拟是土木工程研究的三种基本手段, 其中试验研究是第一性的。目前, 结构试验在作用方式上, 已从传统的静态、准静态试验逐步发展到拟动力、动力试验; 在空间尺度上, 也从常规尺度试验向微细观材性试验和足尺结构试验拓展, 从而对试验的量测技术提出了更高的要求。由于受到测量原理和硬件设备的限制, 传统量测技术已无法完全满足现代结构试验的量测需求, 需要传统的结构试验量测技术结合各种新兴技术进行不断完善和创新。本文总结了传统结构试验量测技术的发展现状, 评述其在现代结构试验中的适用情况, 并介绍了数字图像相关技术和近景摄影测量技术等新兴结构试验量测手段。其中, 数字图像相关技术广泛应用于材料力学行为的测试与分析, 概述其在结构试验中的应用并重点分析影响其测量精度的相关因素; 近景摄影测量技术属非接触测量范畴, 动态采集频率高, 测量范围广, 在高频动态结构试验的位移和应变测量方面有巨大潜力。

**关键词:** 结构试验; 量测技术; 位移; 应变; 数字图像相关; 近景摄影测量

中图分类号: TB879

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)01-0048-08

## A review on measurement technology for structural testing in civil engineering

ZHAO Xianzhong<sup>1,2</sup>, LI Qiuyun<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In the field of civil engineering, theoretical analysis, experimental research and numerical simulation are the three basic methods for investigation, and the experimental research is in the primacy. Nowadays, particularly in the aspect of structural testing, the static and quasi-static tests have extended to pseudo-dynamic and dynamic tests. Moreover, mesoscopic and microscopic material tests and full scale structural tests also developed significantly. A higher request is thus set on the testing measurement system. Due to the limitation of measuring principles and the equipments, traditional techniques for structural testing are unable to completely meet the measurement demands of modern structural tests, and new ideas should be improved and brought forth in combination with a variety of emerging measurement technology. This paper gives an overall review on the development and application of traditional structural testing measurement technology and also introduces new measurement instruments for digital image correlation technique and close-range photogrammetry technology. Digital image correlation technique is widely used in testing and analysis of material behavior. Its applications in structural tests and related factors affecting the measurement accuracy are summarized. Close-range photogrammetry technology is a non-contact measurement method, which has high dynamic acquisition frequency and wide measuring range. It has great potential for displacement and strain measurement of high-frequency dynamic structural tests.

**Key words:** structural testing; measurement technology; displacement; strain; digital image correlation; close-range photogrammetry

结构试验作为整个结构工程学科三级构成中的一级, 是第一性的<sup>[1]</sup>。结构试验的主要任务是将荷载或其他因素(地震、温度等)作用在结构物或试验对象上, 通过量测与结构和试件工作性能相关的各种参数来判断其实际工作性能, 估计结构

的承载能力, 确定结构对使用要求的符合程度, 为工程设计过程中结构优化、使用安全性和可靠性评估提供依据, 并用以检验和发展结构的计算理论<sup>[2]</sup>。由结构试验的任务可知, 试验数据的量测是结构试验的关键环节之一, 只有量测获得可靠

的试验数据, 才能通过数据处理得到正确的试验结果, 达到结构试验的预期目的。

随着高层建筑、大跨度桥梁、空间网架和网壳等各种结构的发展, 结构工程学科对结构整体工作性能和结构非线性性能等问题的研究需求日益突出<sup>[3]</sup>。以目前受到国际土木工程界广泛关注的结构连续性倒塌 (Progressive Collapse) 的研究为例, 在进行结构连续性倒塌的试验研究时, 结构的动力响应由试验模型自身构件的初始失效触发, 结构在试验中产生高频振动和巨大变形, 所需量测的动态位移和动态应变远远超出了传统位移和应变量测技术的应用范围<sup>[4]</sup>。

目前, 结构试验在作用方式上, 已从传统的静态、准静态试验逐步发展到拟动力、动力试验; 在空间尺度上, 也从常规尺度试验向微细观材料试验和足尺度结构试验拓展。由于受到量测原理或硬件设备的限制, 传统的结构试验量测技术在测点布置数量和布置位置、测量量程、测量维度以及测量频率等方面无法完全满足现代结构试验的要求, 为了适应结构试验的发展需求, 传统的结构试验量测技术需结合各种新兴技术进行不断地完善和创新。因此, 本文在对结构试验传统量测技术发展现状进行总结和评述的基础上, 分析了目前结构试验对于量测系统的新需求, 并阐述了数字图像相关技术 (Digital Image Correlation, DIC) 和近景摄影测量技术等新兴结构试验量测手段的量测原理及其在结构试验中的应用情况。

## 1 结构试验传统位移和应变测量技术

### 1.1 传统位移量测技术

结构试验中, 传统的位移量测方法可分为接触式测量和非接触式测量两类。接触式测量主要利用千分表或经典位移传感器实现, 非接触式测量则包括使用非接触式位移传感器和基于光学原理进行位移量测的各种方法。

#### 1.1.1 百分表法

百分表是长度测量的通用量具, 通过机械齿轮机构将长度放大指示到刻度盘上, 是结构试验最原始的位移量测方法。利用百分表进行位移量测不能实现数据的自动记录, 必须要近距离工人读数和记录, 只适用于一些小尺寸试件的静载试验, 目前在结构试验中已较少使用。

#### 1.1.2 传感器法

位移传感器的发展经历了经典位移传感器和半导体位移传感器两个阶段。20 世纪 80 年代以前, 包括电阻式、电感式和电容式在内的经典位

移传感器均基于电磁学原理工作<sup>[5]</sup>。20 世纪 80 年代以后, 磁致伸缩技术、光纤技术、超声波技术、基于 OEM 的 LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 技术<sup>[6]</sup>、时栅技术<sup>[7]</sup>等被运用到位移传感器中, 使得位移传感器性能大幅度提升。

目前, 结构试验中常用的位移传感器为电阻应变式、电容式和电感式等经典位移传感器。电阻应变式位移传感器线性度较好, 分辨率高, 结构简单使用方便, 但其位移测量范围仅为  $0.1 \mu\text{m} \sim 0.1 \text{ mm}$ <sup>[7]</sup>, 不能满足振动台和连续性倒塌等试验的大位移量测需要。电容式位移传感器功率小、阻抗高、动态特性好, 可进行非接触式测量, 但同样存在量程小等缺点。电感式位移传感器将被测的位移量转换为线圈的自感变化, 灵敏度和精度均较高, 测量范围宽, 但由于传感器本身频率响应低, 不能用于高频动态位移测量。

不同种类的位移传感器, 除受到本身工作原理的局限外, 传感器的单点单方向测量方式也成为其在空间结构试验中应用的最大限制因素, 对于要求三维空间大位移量测的结构试验 (如空间网壳结构的动力试验) 而言, 不仅测点数量众多, 而且每个测点都具有三个自由度, 需要布置大量传感器, 现场安装和后期数据处理均存在较大困难。

#### 1.1.3 传统光学测量法

运用光学原理测量位移的方法有多种, 微小的位移、应变和振动可以用全息干涉法<sup>[8]</sup>和散斑干涉法<sup>[9]</sup>, 目前已经有大量研究人员对此类测量方法进行了深入的研究, 其他成熟的光学方法<sup>[10-11]</sup>也逐步涌现并得到广泛的应用, 但此类光学量测方法仅能对微小位移进行准确测量, 而且对测量环境要求严格, 振动引起光路有  $1/4$  的波长扰动就会导致测量结果失效。云纹干涉法<sup>[12]</sup>的测量范围较全息干涉和散斑干涉范围大, 但它属于接触测量的范畴。

另一类非接触式的光学测量方法是利用激光测距技术。激光测距技术是指利用射向目标的激光脉冲或连续光束测量目标距离的量测技术<sup>[13]</sup>。不同的激光测距方法其测距原理、测距系统组成和使用范围各不相同, 目前常用的激光测距方法有脉冲法、相位法、三角测距法和激光干涉法。脉冲法测距适合于天体测量等远距离测距, 虽然在不断改进后目前也可利用脉冲法测量 10 m 范围内的距离, 但对发出脉冲的激光器要求较高。相位法测距也比较适合中远距离的测量, 当采用合作目标反射器时可实现高精度测距; 无合作目标的相位测距依靠调制波在待测目标表面的漫反

射,不同类型的漫反射目标反射率差别较大,即使同一测程对不同辐射特性的待测目标可能得到不同的测量结果,这是相位法测距一个待解决的难题。激光三角测距法比较适合于中近距离的测量,广泛应用于物体表面轮廓、宽度、厚度、位移及振动的实时动态测量。激光干涉法通常用于物体微小距离的测量,虽然可以采用光学倍增法实现较大距离的测量,但测量结果误差较大,不是应用于动态大位移测量的理想技术。

#### 1.1.4 全站仪法

全站仪的工作原理是在测控范围内建立空间坐标系,将测量结果转换到统一的坐标系中完成测量控制。与传统单一的测量方法相比,全站仪可实时自动跟踪目标,接收并处理数据,既可远距离遥控也可在机载应用程序控制下使用。在变形观测、动态定位及在一些对人体有害的环境中应用,具有显著的优越性。目前精度最高的全站仪测角精度可达 $\pm 0.5''$ ,测距精度可达 $\pm (0\text{ mm} + 1\text{ ppm} \cdot D)$ 。虽然全站仪有以上优点,但传统的全站仪在测量过程中需要对观测点进行人工瞄准,难以进行结构动态数据的采集。目前已经开发出自动识别目标的智能跟踪全站仪——大地测量机器人,但其响应速度不能满足振动台试验和结构倒塌试验数据采集频率的要求,而且全站仪是精密光学电子仪器,在爆破触发等恶劣的试验环境下难以应用。

### 1.2 传统应变测量技术

结构试验中,传统的应变测量可分为机测法、电测法和光测法三种。机测法是最早的应变测量方法,包括双杠杆应变仪、接触式千分表应变仪和手持式应变仪等,此类机械式应变测量仪器需要人工读数,量测精度较低,在结构试验中已很少使用<sup>[14]</sup>。电测法即利用应变电测和传感器技术进行应变测量,是目前应用最广泛且最有效的应变测量技术。光测法以定性分析为主,较多应用于节点或构件的局部应力分析<sup>[2]</sup>。

#### 1.2.1 电测法

结构应变电测法包括电阻应变计法、电容应变计法、电感式应变传感器法和弦式应变传感器法等,其中电阻应变计是应用范围最为广泛的应变电测法<sup>[14]</sup>。电阻应变计的工作原理是将结构试件的应变转换为电阻变化,一般情况下试件的应变较小,引起的微小电阻变化难以直接测量,通常采用惠斯登电桥将电阻变化转化为电压或电流的变化,使信号得以放大,并解决温度补偿等

问题<sup>[2]</sup>。

利用电阻应变计进行应变测量,主要优点可总结为以下几点:(1)测量范围大,可测量 $0 \sim 2 \times 10^4\text{ }\mu\epsilon$ ;(2)测量精度高,误差一般小于1%;(3)分辨率高,可实现 $1\mu\epsilon$ 的测量;(4)易实现测量过程的自动化和测量结果的数字化。由于应变计电测技术具备以上无可比拟的优点,自20世纪30年代诞生至今,始终是结构试验应变分析的主要手段之一<sup>[15]</sup>。与此同时,应变计电测技术也存在一些不容忽视的缺陷。首先,应变计属于接触式测量,不仅贴片过程繁琐,测量精度对贴片质量敏感,而且一般只能进行试件表面的应变测量;其次,应变计测出的应变结果是应变计敏感栅长度范围内的平均应变值,与真实值存在差异,并且当测量环境变化较大时测量精度也会随之降低;最后,应变计只能得到贴片点处的局部应变,无法测得整个结构或试件的应变情况,对于体型复杂的结构而言,预先确定的测点中可能会遗漏一些预计之外的关键数据。

#### 1.2.2 光测法

结构应变光测法的种类较多,包括光弹法、焦散线法、全息干涉法、散斑干涉法、云纹干涉法和光纤传感器法等。其中光弹法和焦散线法均为将光学与力学相结合进行应力应变分析的试验技术,虽然能够进行非接触全场应变测量,但一般只对结构或试件进行定性分析,很少用于定量计算,而且两种方法的测量光路复杂,需要在隔振平台上进行,所以实际应用时受到诸多限制<sup>[13]</sup>。全息干涉法、散斑干涉法和云纹干涉法在传统位移光学测量法中已经进行较详细介绍,此处不再赘述。

光纤传感器的关键技术是光调制技术,将待测的物理量调制为传输光的某一参数,通过检测调制后的光信号从而获得待测物理量<sup>[16]</sup>。1989年,美国布朗大学的 Mender 等人提出将光纤传感器用于混凝土结构进行安全监测后,世界各国学者开始致力于将这一技术应用于土木工程的研究<sup>[17]</sup>。与传统的电测传感器相比,光纤传感器具备结构简单、重量轻、体积小,耐腐蚀、耐久性好,信号可多路传输易于与计算机连接实现分布式测量,灵敏度与精度高等一系列优点。但由于该传感器数据处理复杂,对测量环境要求高,光源的波动、光电器件和电路的漂移、光纤自身的弯曲损耗等均会影响测量灵敏度和精度,因此目前光纤传感器主要应用于结构的健康监测,在结

构试验中不常使用。

## 2 数字图像相关技术

### 2.1 数字图像相关技术量测原理

数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC) 测量技术本质上是一种基于数字图像处理和数值分析的光测方法, 它通过分析比较材料或结构表面在变形前后形成的具有一定灰度分布的数字图像 (散斑图), 运用相关算法获得变形过程的位移场和应变场。

相比于传统的电测法和光测法, 数字图像相关方法具有特殊的优势, 如: (1) 试验设备简单: 试验中所需的硬件设备仅为被测表面变形前后的图像采集设备, 对于表面纹理分布不明显的试件可使用喷漆在其表面制造随机分布的散斑; (2) 环境适应性好: 对测量环境要求低, 不需进行隔震, 而且也可用白光或自然光照代替激光, 可适用于室外进行的测量; (3) 测量范围和分辨率可灵活调整: 根据不同的试验需要可采用相适应的各种高分辨率数字化图像采集设备, 如利用数字图像相关分析光学显微镜<sup>[18]</sup>、激光扫描共聚焦显微镜<sup>[19]</sup> (Confocal laser scanning microscope, CLSM)、扫描电子显微镜<sup>[20]</sup> (Scanning Electron Microscope, SEM)、原子力显微镜<sup>[21]</sup> (Atomic Force Microscope, AFM) 和扫描隧道显微镜<sup>[22]</sup> (Scanning Tunneling Microscope, STM) 等进行微纳米尺度下的变形量测, 或与高速动态摄影设备相结合, 实现结构的高速瞬态变形量测<sup>[23]</sup>。

### 2.2 数字图像相关技术在结构试验中的应用

我国将数字图像相关方法用于材料力学行为的研究始于 1989 年, 高建新<sup>[24]</sup>对数字散斑相关方法的基本原理进行系统分析, 并提出该方法在宏观和细观力学测量中的应用, 奠定了我国数字图像相关方法发展的基础。近年来, 随着数字图像相关技术的算法进步和精度提高, 越来越多的研究者利用该方法进行金属材料的力学行为研究, 主要集中于试验过程中材料颈缩阶段的变形、裂纹的发展以及裂纹尖端应变场和张开位移等<sup>[23, 25-34]</sup>参数的测量。除此之外, Anwender 等<sup>[35]</sup>在前人的研究基础上, 开发出一种基于激光散斑的数字图像相关高温应变测量系统, 可用于温度高达 1 200 °C 环境下拉伸试验的应变测量。徐飞鸿等<sup>[36]</sup>提出基于加权光强系数的塑性变形识别方法, 利用数字图像相关方法引入光强相关系数的计算来判别被测点是否进入塑性变形阶段, 通过完整试件和

带缺口试件的试验证明该方法能够直观地识别出塑性变形区域。陈思颖等<sup>[37]</sup>利用数字图像相关理论和自主设计的高分辨率光学观测系统, 捕捉了试件在冲击荷载作用下绝热剪切带的动态实时演化过程。戴宜全等<sup>[38]</sup>针对混凝土构件的特性, 优化数字图像相关方法算法, 并将其应用于低周往复荷载作用下混凝土构件转角的测量, 与数值模拟结果对比, 验证了该方法对于研究容许变形量较小的结构的弯矩转角特性以及位移应变分析是十分有效的。

### 2.3 影响数字图像相关方法测量精度的因素

数字图像相关方法的量测精度是研究者一直关注的问题, 在实际试验中引入误差影响最终量测精度的因素众多, 根据其来源主要可分为两类: 一类是试验过程中与试验环境、设备条件和试样准备等相关的因素; 另一类因素则来源于图像处理过程中相关算法和函数的选择。后一类因素不属于结构试验过程的控制范畴, 因此下文主要针对前一类因素进行分析。

利用数字图像相关方法进行位移或应变测量, 从试件准备到试验进行过程中, 影响量测精度的主要因素包括数字散斑质量、相机与被测平面的夹角、试件受荷变形后产生的离面位移、图像失真和噪声等。

#### 2.3.1 数字散斑图像质量

目前, 获得随机散斑图像的常用方法有三种, 分别为利用试件表面的自然纹理、在试件表面随机喷涂黑白漆和通过激光照射试件表面形成激光散斑。潘兵<sup>[39]</sup>在其论文中建立了二维数字图像相关方法位移测量精度的理论模型, 为散斑图像质量的评价奠定了理论基础。Zhou 和 Goodson<sup>[40]</sup>研究了散斑颗粒大小对数字图像相关方法量测精度的影响, 得到当散斑大小为 2~5 个像素时测量精度最理想的结论, 并且提出一种新的数字散斑图像生成算法, 为数字图像相关算法的比较、验证和定量评价提供了依据。王志勇等<sup>[41]</sup>建立了数字图像相关方法总测量误差的数学模型, 并在该数学模型的基础上, 通过理论分析和数值模拟证明对于一定的测量参数存在散斑尺寸的最优区间, 在最优区间内散斑数量越多位移测量精度越高。

#### 2.3.2 相机与被测平面的夹角及试件变形产生的离面位移

理论上, 在采集试验图像时试件的被测表面应与相机的光轴保持 90° 夹角, 但在实际测量过程中, 由于试件受荷变形产生离面位移, 使被测表

面与相机光轴很难保持严格垂直。孟利波等<sup>[42]</sup>结合理论分析和数值模拟对由于相机与被测面不平行引起的误差进行了详细的研究分析,结果表明当相机光轴与被测面的不垂直时,每 $1^\circ$ 引起的位移偏差为0.01像素,当不垂直度小于 $5^\circ$ 时可忽略该误差对测量结果的影响。

### 2.3.3 图像失真

图像失真一般是由于相机的镜头畸变导致,由于受到光学镜头制作工艺的限制,质量再高的镜头也无法避免图像边缘产生的变形和失真,对扫描电镜获取的图像还要考虑空间的漂移失真现象。不少研究者<sup>[43-44]</sup>均致力于消除相机畸变的研究,一定程度上提高了数字图像相关方法的测量精度。

### 2.3.4 噪声

目前较常用的数字图像去噪方法是小波变换。继 Dai 等<sup>[45]</sup>采用小波方法对数字图像相关计算进行降噪处理后,姚学锋、金观昌等<sup>[46-47]</sup>对运用小波变换方法降噪开展进一步研究,在去除噪声方面取得较好效果,但会丢失部分图像的细节。李新忠等<sup>[48]</sup>提出了一种基于多尺度的小波降噪方法,针对存在三种不同噪声的散斑图像采用不同的降噪策略进行处理,计算结果显示该种多尺度小波降噪方法相比传统方法测量精度大大提高,并且相对误差也可得到较好的控制,需注意的是实际环境噪声和机器噪声常常是多种噪声的组合,在采用该小波方法降噪时要根据具体的噪声成分选用合适的降噪策略。胡斌<sup>[49]</sup>在其学位论文中对小波阈值去噪进行了深入研究,提出了一种可克服伪吉布斯现象和恒定偏差的新阈值函数,并通过实验验证了新阈值函数在不同噪声情况下的可行性和优越性。

## 3 近景摄影测量技术

### 3.1 近景摄影测量技术量测原理

近景摄影测量是在不接触被测物的情况下,运用影像传感器获取物体的影像信息(模拟信号或数字信号),独立客观地对被测物进行静态或动态测量,以获得被测物体形状大小、空间位置和运动状态等信息<sup>[50]</sup>。

较之其他三维测量技术,近景摄影测量具备其自身独特的优势,如:(1)可利用图像或影像作为信息载体,适用于被测点众多的目标;(2)非接触测量,不干涉被测物的自然状态,可完成恶劣环境下的测量;(3)既可测量静态目标的三维空间

坐标,亦可测量动态目标的运动轨迹及变化规律。但摄影测量发展到今天,依旧没有完全实现实时性和自动化,将其应用于结构试验时,图像的获取和处理是分开进行的,当发现处理的图像不能满足要求时需要重新补测数据,对于振动台和连续性倒塌等高频动态结构试验而言往往是难以实现的。随着信息技术和电子技术的飞速发展,近景摄影测量图像的获取和处理设备性能在不断提升,如果将来能将摄影测量理论、图像处理技术和自动化技术结合起来,完全实现自动化的实时测量,则近景摄影测量可成为大体量高频动态结构试验位移和应变测量的重要手段。

### 3.2 近景摄影测量技术在结构试验中的应用

近景摄影测量技术凭借测量精度好、动态采集频率高、测量范围广等优点在土木工程、工业制造、航天航空等领域已有广泛的应用。在土木工程领域,近景摄影测量主要有三方面的应用<sup>[51]</sup>。第一,结构的变形监测以及损伤的定位和识别<sup>[52-56]</sup>;第二,结合光测力学和材料力学,对具有特殊形态或特殊材质材料进行不同荷载作用的材性试验,利用数字图像相关技术对摄像机捕获的试验图像进行分析,获得试件的位移和变形信息<sup>[57-60]</sup>;第三,用于建筑结构的静力或动力测试,获取结构物在试验过程中的变形参数和位移、速度、加速度等动力学参数<sup>[61-66]</sup>。其中,文献[62]基于数字图像处理技术研究了振动台试验中动态位移的非接触式测量方法;文献[63-66]针对连续性倒塌实验的特点开发出测量结构失效过程竖向和水平位移的摄影测量系统。

## 4 结语

(1)目前,结构试验在作用方式上,已从传统的静态、准静态试验逐步发展到拟动力、动力试验,如振动台试验和连续性倒塌试验;在空间尺度上,也从常规尺度试验向微细观材性试验和足尺度结构试验拓展。结构试验技术的日益进步对量测系统的测量量程、测量维度、测量频率和测量精度提出了更高的要求。

(2)传统的结构试验量测技术目前仍为常规结构试验的主要测量手段,但由于受到测量原理或硬件设备的限制,已经无法完全满足现代结构试验的测量需求。为适应结构试验的发展,传统量测技术需结合各种新兴测量技术进行不断完善和创新。

(3)数字图像相关方法以其自身独特的优势,

广泛应用于材料力学行为的测试与分析. 随着数字图像相关技术的不断发展,该方法在金属材料性试验中测量试件的颈缩变形、裂纹的发展以及裂纹尖端应变场和张开位移等方面有巨大潜力.

(4) 近景摄影测量技术属非接触测量范畴,动态采集频率高,测量范围广,已在土木工程监测领域有较好的应用. 但摄影测量发展至今,未能完全实现实时性和自动化. 如果未来能将摄影测量理论、图像处理技术和自动化技术相结合,在完善测量精度的基础上,实现自动化地实时测量,则近景摄影测量可成为大体量高频动态结构试验位移和应变测量的重要手段.

## 参考文献 References

- [1] 刘西拉. 我国结构工程学科应优先发展的领域[J]. 土木工程学报, 1993, 26(4): 21-28.  
LIU Xila. Priority research topics of structural engineering in China[J]. China Civil Engineering Journal, 1993, 26(4): 21-28.
- [2] 姚振刚, 刘祖华. 建筑结构试验[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.  
YAO Zhengang, LIU Zuhua. Architectural structure experimentation [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996.
- [3] 华燕, 王际芝, 黄勇. 大型结构试验和结构监测中的数据采集系统[J]. 工程力学, 2003, 20(1): 166-170.  
HUA Yan, WANG Jizhi, HUANG Yong. Data acquisition system for large-scale structural experiments and monitoring[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(1): 166-170.
- [4] 赵宪忠, 闫仲, 陈以一. 大跨度空间结构连续性倒塌研究方法现状[J]. 建筑结构学报, 2013, (4): 1-14.  
ZHAO Xianzhong, YAN Shen, CHEN Yiyi. A review on progressive collapse study for large-span space structures[J]. Journal of Building Structures, 2013, (4): 1-14.
- [5] 昌学年, 姚毅, 闫玲, 等. 位移传感器的发展及研究[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(9): 42-44.  
CHANG Xuenian, YAO Yi, YAN Ling, et al. The development and investigation of displacement sensor [J]. Measurement and Testing Technology, 2009, 36(9): 42-44.
- [6] ZHOU J, OUYANG M, SHEN Y, et al. Study of a displacement sensor based on transmission varied-line-space phase grating [J]. Optoelectronics Letters, 2008, 4(3): 217-222.
- [7] 彭东林, 刘小康, 张兴红, 等. 高精度时栅位移传感器研究[J]. 机械工程学报, 2006, 41(12): 126-129.  
PENG Donglin, LIU Xiaokang, ZHANG Xinghong, et al. Research on high-precision time-grating displacement sensor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 41(12): 126-129.
- [8] WATT D W, GOULET R U, GROSS T S. In-situ measurements of three-dimensional displacement fields in shear crack growth using phase-shifted speckle interferometry[C]// SPIE's 1995 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 1995: 122-132.
- [9] 赵德信, 宋伟. 用散斑法测位移进行结构分析[J]. 应用激光, 1992, 12(4): 148-149.  
ZHAO Dexin, SONG Wei. Structural analyze by measuring displacement with speckles method[J]. Applied Laser, 1992, 12(4): 148-149.
- [10] LYAVSHUK I A, LYALIKOY A M. High-sensitivity holographic interferometry method for studying transparent objects with small transverse size [J]. Technical Physics, 2008, 53(11): 1458-1462.
- [11] TAY C J, QUAN C, CHEN W. Dynamic measurement by digital holographic interferometry based on complex phasor method[J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41(2): 172-180.
- [12] 卿新林. 云纹干涉法的理论与应用研究评述[J]. 力学与实践, 1997, 19(6): 14-21.  
QING Xinlin. A review on theory and application of moire interferometry [J]. Mechanics in Engineering, 1997, 19(6): 14-21.
- [13] 王丽, 许安涛, 王瑛. 激光器的发展及激光测距的方法[J]. 焦作大学学报, 2007, 21(4): 55-56.  
WANG Li, XU Antao, WANG Ying. The development of laser and the method of laser ranging [J]. Journal of Jiaozuo University, 2007, 21(4): 55-56.
- [14] 吴太广. 数字图像相关方法及其应用研究[D]. 湖南: 长沙理工大学, 2010.  
WU Taiguang. Digital image correlation method and its application [D]. Hunan: Changsha University of Science & Technology, 2010.
- [15] 尹福炎. 电阻应变计技术六十年(4) 结构应变测量用各种电阻应变计[J]. 传感器世界, 1999(1): 15-25.  
YIN Fuyan. Sixty years of electric resistance strain gauges technique(4) [J]. Sensor World, 1999(1): 15-25.
- [16] TENNYSON R C, COROY T, DUCK G, et al. Fibre optic sensors in civil engineering structures[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27(5): 880-889.
- [17] MERZBACHER C I, KERSEY A D, FRIEBELE E J. Fiber optic sensors in concrete structures: a review [J]. Smart materials and structures, 1996, 5(2): 196.
- [18] ZHANG D, LUO M, AROLA D D. Displacement/strain measurements using an optical microscope and digital image correlation [J]. Optical Engineering, 2006, 45(3): 535-545.
- [19] FRANCK C, HONG S, MASKARINEC S A, et al. Three-dimensional full-field measurements of large deformations in soft materials using confocal microscopy and digital volume correlation[J]. Experimental Mechanics, 2007, 47(3): 427-438.
- [20] KANG J, JAIN M, WILKINSON D S, et al. Microscopic strain mapping using scanning electron microscopy topography image correlation at large strain[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2005, 40(6): 559-570.
- [21] LI X, XU W, SUTTON M A, et al. Nanoscale deformation and cracking studies of advanced metal evaporated magnetic tapes using atomic force microscopy and digital image correlation techniques[J]. Materials science and technology, 2006, 22(7): 835-844.
- [22] VENDUROUX G, SCHMIDT N, KNAUSS W G.

- Submicron deformation field measurements: Part 3. Demonstration of deformation determinations[J]. *Experimental Mechanics*, 1998, 38(3): 154-160.
- [23] KIRUGULIGE M S, TIPPUR H V, DENNEY T S. Measurement of transient deformations using digital image correlation method and high-speed photography: application to dynamic fracture[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(22): 5083-5096.
- [24] 高建新. 数字散斑相关方法及其在力学测量中的应用[D]. 北京: 清华大学, 1989.  
GAO Jianxin. Digital speckle correlation method and its application in experimental mechanics[D]. Beijing: Tsinghua University, 1989.
- [25] HAN G, SUTTON M A, CHAO Y J, et al. A study of stable crack growth in thin SEC specimens of 304 stainless steel by computer vision[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1995, 52(3): 525-555.
- [26] CINTRON R. Strain measurements with the digital image correlation system Vic-2D[D]. Mayaguez: University of Puerto Rico, 2008.
- [27] ROSSI M, BROGGIATO G B, PAPALINI S. Application of digital image correlation to the study of planar anisotropy of sheet metals at large strains[J]. *Meccanica*, 2008, 43(2): 185-199.
- [28] TARIGOPULA V, HOPPERSTAD O S, LANGSETH M, et al. A study of localisation in dual-phase high-strength steels under dynamic loading using digital image correlation and FE analysis[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45(2): 601-619.
- [29] SAVIC V, HECTOR Jr L G, FEKETE J R. Digital image correlation study of plastic deformation and fracture in fully martensitic steels[J]. *Experimental Mechanics*, 2010, 50(1): 99-110.
- [30] BESNARD G, HILD F, LAGRANGE J M, et al. Analysis of necking in high speed experiments by stereo correlation[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 49: 179-191.
- [31] 刘宝琛, 李勇. 韧性金属裂纹尖端损伤区内应变场测量: 数字散斑相关法应用[J]. *实验力学*, 1993(1): 11-17.  
LIU Baochen, LI Yong. Measurement of strain field in damage zone around crack-tip-application of digital speckle correlation technique[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1993(1): 11-17.
- [32] 孙伟, 何小元, 胥明, 等. 数字图像相关方法在膜材拉伸试验中的应用[J]. *工程力学*, 2007, 24(2): 34-38.  
SUN Wei, HE Xiaoyuan, XU Ming, et al. Study on the tension test of membrane materials using digital image correlation method[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(2): 34-38.
- [33] 桂良进, 高付海, 范子杰. 双相钢板料的单向拉伸断裂失效研究(I): 数字图像相关技术试验[J]. *应用力学学报*, 2010(2): 380-383.  
GUI Liangjin, GAO Fuhai, FAN Zijie. Fracture of dual phase steel sheets under uniaxial tension (I): Experimental study with dic techniques[J]. *Chinese Journal of Application Mechanics*, 2010(2): 380-383.
- [34] 高付海, 桂良进, 范子杰. 双相钢板料的单向拉伸断裂失效研究(II): 弧长法非线性有限元分析[J]. *应用力学学报*, 2010(3): 570-573.  
GAO Fuhai, GUI Liangjin, FAN Zijie. Fracture of dual phase sheets under uniaxial tension (II): Nonlinear finite element analysis[J]. *Chinese Journal of Application Mechanics*, 2010(3): 570-573.
- [35] ANWANDER M, ZAGAR B G, WEISS B, et al. Noncontacting strain measurements at high temperatures by the digital laser speckle technique[J]. *Experimental mechanics*, 2000, 40(1): 98-105.
- [36] 徐飞鸿, 吴太广, 孙丽娟. 基于数字图像相关的塑性变形识别方法[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 6(3): 78-82.  
XU Feihong, WU Taiguang, SUN Lijuan. Determination of plastic deformation based on digital image correlation[J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2009, 6(3): 78-82.
- [37] 陈思颖, 黄晨光, 孔卫国等. 结构钢中绝热剪切带形成与扩展的光学观测与数值模拟[J]. *高压物理学报*, 2010(1): 31-36.  
CHEN Siying, HUANG Chenguang, KONG Weiguo, et al. Optical observation and numerical simulation on the evolution of adiabatic shear band in structural steel[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2010(1): 31-36.
- [38] 戴宜全, 何小元, 孙泽阳. 改进数字图像相关法测量混凝土柱弯转角[J]. *工程抗震与加固改造*, 2010, 32(5): 69-74.  
DAI Yiquan, HE Xiaoyuan, ZHANG Manyang. Bending test of concrete pole by improved digital image correlation[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2010, 32(5): 69-74.
- [39] 潘兵. 数字图像相关方法及其在实验力学中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2007.  
PAN Bing. Digital image correlation method and its application in experimental mechanics[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [40] ZHOU P, GOODSON K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC)[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1613-1620.
- [41] 王志勇, 王磊, 郭伟, 等. 数字图像相关方法最优散斑尺寸[J]. *天津大学学报*, 2010, 43(8): 674-678.  
WANG Zhiyong, WANG Lei, GUO Wei, et al. Optimal size of speckle spot in digital image correlation method[J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, 43(8): 674-678.
- [42] 孟利波, 金观昌, 姚学锋. DSCM 中摄像机光轴与物面不垂直引起的误差分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 46(11): 1930-1932.  
MENG Libo, JIN Guanchang, YAO Xuefeng. Errors caused by misalignment of the optical camera axis and the object surface in the DSCM[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2007, 46(11): 1930-1932.
- [43] YONEYAMA S, KIKUTA H, KITAGAWA A, et al. Lens distortion correction for digital image correlation by measuring rigid body displacement[J]. *Optical engineering*, 2006, 45(2): 409-411.
- [44] SUTTON M A, LI N, GARCIA D, et al. Metrology in a scanning electron microscope: theoretical developments and experimental validation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(10): 2613.



- [45] DAI X, CHAN Y C, SO A C K. Digital speckle correlation method based on wavelet-packet noise-reduction processing [J]. *Applied Optics*, 1999, 38 (16): 3474-3482.
- [46] 姚学锋, 吴震, 金观昌. 数字散斑相关法中的小波减噪分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2001(5): 108-111.  
YAO Xuefeng, WU Zhen, JIN Guanchang. Wavelet denoising using the digital speckle correlation method [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2001(5): 108-111.
- [47] 林碧森, 金观昌, 等. 正交小波变换在散斑图像相关计算中的应用[J]. *光子学报*, 2002:235-240.  
LIN Bisen, JIN Guanchang, YAO Xuefeng. The application of orthogonal wavelet transform on digital speckle correlation method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002:235-240.
- [48] 李新忠, 岱钦, 王希军, 等. 多尺度小波降噪的数字散斑相关搜索[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1): 57-62.  
LI Xinzhong, DAI Qin, WANG Xijun, et al. Digital speckle correlation method of multi-scale wavelet noise reduction[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(1): 57-62.
- [49] 胡斌. 小波阈值去噪及其在数字图像相关中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
HU Bin. Wavelet threshold denoising and its application study on digital image correlation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [50] SLAMA C C, THEURER C, HENRIKSEN S W. Manual of photogrammetry[M]. American Society of photogrammetry, 1980.
- [51] 梅华丰. 基于数字图像相关方法的视频摄影测量技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.  
MEI Huafeng. Research on video photogrammetry technology based on digital image correlation method [M]. Shanghai, Tongji University, 2014.
- [52] PATSIAS S, STASZEWSKI W J. Damage detection using optical measurements and wavelets[J]. *Structural Health Monitoring*, 2002, 1(1): 5-22.
- [53] POUDEL U P, FU G, YE J. Structural damage detection using digital video imaging technique and wavelet transformation[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 286(4): 869-895.
- [54] LIN S Y, MILLS J P, GOSLING P D. Videogrammetric monitoring of as-built membrane roof structures [J]. *The Photogrammetric Record*, 2008, 23(122): 128-147.
- [55] CAETANO E, SILVA S, BATEIRA J. A vision system for vibration monitoring of civil engineering structures[J]. *Experimental Techniques*, 2011, 35(4): 74-82.
- [56] 罗洪斌, 赵文光, 文银平, 等. CCD 图像监测系统应用于桥梁结构检测[J]. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2006 (S1): 91-93.  
LUO Hongbin, ZHAO Wenguang, WEN Yinping. Application of CCD image monitoring system in detecting bridge structure[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)*, 2006 (S1): 91-93.
- [57] FRASER C S, RIEDEL B. Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 55(4): 268-276.
- [58] MAAS H G, HAMPEL U. Photogrammetric techniques in civil engineering material testing and structure monitoring[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2006, 72(1): 39-45.
- [59] 姚学锋, 林碧森, 简龙晖, 等. 立体摄影术与数字散斑相关方法相结合用于研究三维变形场[J]. *光学技术*, 2003, 29(4): 473-476.  
YAO Xuefeng, LIN Bisen, JIAN Longhui, et al. Three-dimensions deformation field measurement combining digital speckle correlation technology with stereo photography[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(4): 473-476.
- [60] 吴加权, 马琨, 李燕. 数字散斑相关方法用于 PMMA 弹性模量的测量[J]. *力学与实践*, 2007, 29(5): 35-37.  
WU Jiaquan, MA Kun, LI Yan. Measurement of elastic modulus of PMMA digital speckle correlation method [J]. *Mechanics in Engineering*, 2007, 29(5): 35-37.
- [61] LEE J J, FUKUDA Y, SHINOZUKA M. Dynamic displacement measurement of bridges using vision-based system [C] // *Smart Structures and Materials 2006: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. 2006, 6174: 1015-1023.
- [62] 田国伟, 韩晓健, 徐秀丽, 等. 基于视频图像处理技术的振动台试验动态位移测量方法[J]. *世界地震工程*, 2011, 27(3): 174-179.  
TIAN Yuanwei, HAN Xiaojian, XU Xiuli, et al. Measuring method of dynamic displacement in shaking table test based on the technology of video processing [J]. *World Earthquake Engineering*, 2011, 27(3): 174-179.
- [63] 王磊, 陈以一, 李玲, 等. 引入初始破坏的桁梁结构倒塌试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(5): 644-649.  
WANG Lei, CHEN Yiyi, LI Ling, et al. Experimental study on beam truss model by introducing incipient failure in collapse [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(5): 644-649.
- [64] 李玲. 反映构件失效效应的结构模型试验: 模型设计与动位移测量程序开发[D]. 上海: 同济大学, 2008.  
LI Ling. Structural model tests reflecting effects on members' failure: model design and development of measuring program for dynamic displacement [M]. Shanghai, Tongji University, 2008.
- [65] 李秋云. 结构模型试验的量测系统研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.  
LI Qiuyun. Structural model tests measurement system research[M]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [66] 谢甫哲, 舒赣平. 空间钢框架连续倒塌拟静力试验[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*:2013 (2): 195-201.  
XIE Fuzhe, SHU Ganping. Quasi-static experimental research on progressive collapse of space steel frames [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*:2013 (2): 195-201.

(编辑 桂智刚)