

文章编号 1004-924X(2012)05-0942-07

输电塔架承载变形的三维光学测量

刘建伟^{1,2*}, 蒋志强¹, 刘元朋¹, 文振华¹, 梁晋²

(1. 郑州航空工业管理学院, 河南 郑州 450015;

2. 西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 考虑输电塔架结构复杂, 需要做承载变形真型实验来检测塔架实际承载能力的问题, 本文提出了一种三维全场变形光学测量方法来解决塔架真型试验中存在的大尺寸、大变形、多测点、三维变形、塔架承载形态保持时间短等测量难点。该方法基于工业近景摄影测量技术重建单个状态下塔架测点的三维结构, 利用具有身份信息的人工标志点来实现不同状态测量结果的对齐。通过跟踪固定在塔架上的变形点, 计算相应部位的位移来获取真型塔架在不同负载下的整体变形。精度评估实验表明, 提出的方法测量精度优于 0.1 mm/4 m; 真型实验显示, 测量结果能够为塔架结构力学性能分析和改进塔架设计提供有价值的参考数据。该方法具有现场工作量小、不干扰测量对象、量程弹性大等优点, 能够满足各型塔架三维变形测量对效率和精度的要求。

关键词: 输电塔架; 三维变形测量; 近景摄影测量; 光束平差; 坐标对齐

中图分类号: TB92; TB879 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122005.0942

Measurement on structural deformation of load-bearing power transmission tower based on 3D optical method

LIU Jian-wei^{1,2*}, JIANG Zhi-qiang,¹ LIU Yuan-peng¹, WEN Zhen-hua¹, LIANG Jin²

(1. Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

* Corresponding author, E-mail: cnhnljljw@163.com

Abstract: The actual load-bearing capacities of Power Transmission Towers (PTTs) should be estimated by a real-scale model experiment due to their complex structures, therefore an optical full-field 3D deformation measurement method is proposed to overcome the difficulties of large-scale, large-displacement, 3D deformation, rapid multi-point measurement in PTT real-scale model experiments. Based on close-range photogrammetry technology, this method utilizes specialized markers as measured targets to reconstruct the 3D coordinates of those pre-pasted artificial targets through analyzing the captured photo-set in each epoch, then it conducts the coordinate system global registration according to un-movable targets. By tracking and comparing the 3D coordinates of the deformable targets between different epoches, the 3D load-deformation diagram of the PPT structure is obtained. Ac-

收稿日期: 2011-10-11; 修订日期: 2011-12-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51105344); 河南省科技攻关项目 (No. 112400450389)

ceptance experiment results indicate that the accuracy of this method could reach about 0.1 mm/4 m and real-scale model experiments show the proposed method could meet accuracy and efficiency requirements of PPT load-deformation measurement. Comparing with traditional deformation sensors, the proposed method can satisfy measuring requirements of non-contact(non-interfere), on-spot, high precision, rapid speed, strong anti-jamming and stabilization.

Key words: power transmission tower; 3D deformation measurement; close-range photogrammetry; bundle adjustment; coordinate registration

1 引言

随着高压输电网电压等级的不断升级,对输电塔架高度和承载能力的要求也在逐步提高。2008年我国南方雪灾曾造成大批输电塔架在不断累积的冰雪负载下倒塌,给国民经济造成了重大损失。现实对新建输电塔架的设计和制造提出了更高的要求,因而准确获取其承载能力和屈服极限显得尤为重要。输电塔架是一种高次超静定空间结构,被公认为是最难以分析的一种杆系结构,一般由单角钢用螺栓偏心连接构成。由于单角钢为单轴对称截面的薄壁构件,加之输电塔架结构形式及构造的多样性,承受的荷载工况多而复杂,要对其受力性能进行精确分析比较困难。英国电力研究所(EPRI)做了大量的输电塔架真型试验后得出结论^[1]:荷载工况复杂时计算结果和试验数据符合得不好。因此,在计算塔架的承载能力时,单纯使用数值模拟的方法难以获取准确的结果,需要直接测量真型试验中的负载变形,并观测塔架在不同负载情况下的变形场及承载极限。

由于电力塔架具有尺寸大、变形大、测点多和三维变形等特点,传统的位移传感器和应变片等无法满足其三维变形测量的需要。单只传感器只能测单点的一维变形且量程有限,大量安装它们需要布置大量引线,采集分析繁琐,成本高且常常受到空间的限制,很难测量整体变形场。Moon从电力塔架中取出两个单元,采用线性可变差动变压器(LVDT)位移计对其在静载和风载下的应变进行测量,但LVDT为单点测量,无法反映塔架结构的整体变形情况^[2]。针对大目标的三维变形测量问题,近年来越来越多的研究者开始引入视觉测量方法。Fraser对钢梁从1100℃高温到

室温的降温过程中的变形进行了视觉测量,将特殊材料制作的耐高温人工标志贴于钢梁表面,测量钢梁表面变形点的变形时空图^[3]。Jiang对大桥水泥梁的负载变形情况进行了测量,提出了一种新型的网络控制方案,减少了测量现场控制点的布置和测量的工作量^[4]。徐芳等利用视觉方法对钢结构挠度的变形进行了监测^[5]。余永生等采用摄影测量法对一个高空悬臂梁钢结构的风致振动进行了现场测量,解决了难接近目标的动态位移测量问题^[6]。Jiang在回顾了视觉测量技术在桥梁特别是钢结构桥梁领域的应用案例后指出,大多应用采用了固定位置的多个传感器针对静态对象设计交会的方案,缺乏通用性和灵活性,测量精度也参差不齐^[7]。

本文针对输电塔架承载变形真型试验测量需求,提出并实现了一种光学三维变形快速测量方法,并在某型塔架组件上进行了三维变形测量实验。该方法基于近景摄影测量和计算机视觉技术,通过跟踪固定在塔架表面的众多变形标志点,计算标志点在负载下的位移,以获取塔架在不同负载下的整体变形场。其测量结果不仅为塔架力学性能分析提供了数据支持,检验数值模拟中模型和结果的可信性,也为设计塔架时提高承载能力和使用寿命提供了定量参考。

2 大尺寸三维光学变形测量系统设计

2.1 测量系统硬件构成

三维光学变形测量系统XJTUSD基于近景摄影测量和立体视觉技术,以数码相机拍摄到的测量对象多角度照片组作为原始数据。XJTUSD硬件由单反数码相机CANON400D、环形闪光

灯、磁性环形编码标志点、十字方向尺、比例尺和非编码点(作为测量目标的普通圆形标志点)组成。单反数码相机 CMOS 芯片尺寸为 23.6 mm × 15.8 mm,像素大小为 6.09 μm × 6.09 μm,分辨率为 3 872 × 2 592;光学镜头采用尼康 20 mm 定焦镜头,如图 1 所示。

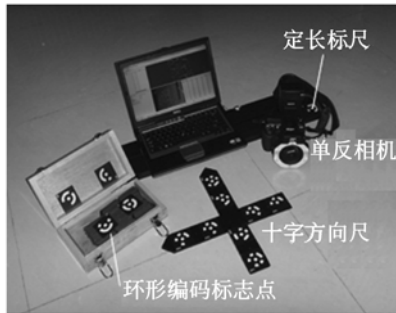


图 1 三维光学变形测量系统组成

Fig. 1 Components of 3D optical measurement system

2.2 XJTUSD 测量软件界面及处理流程

XJTUSD 测量软件在 VC++ 6.0 下开发,运行环境为 WindowsXP 系统,软件界面如图 2 所示。

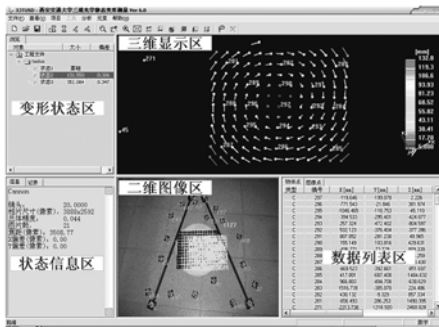


图 2 XJTUSD 测量软件界面

Fig. 2 Interface of XJTUSD software

获取每个状态的原始数据输入 XJTUSD 测量软件中进行全自动测量。在测量软件中,先对拍摄的照片组进行图像处理,检测出本组图像中所有标志点的二维图像坐标,根据图像中的编码点完成定向,利用外极线几何关系实现非编码点的匹配^[8],采用含相对控制的光束平差解法计算出所有标志点的三维空间坐标,最后将各状态的坐标系对齐后计算两个状态之间的变形场。软件处理流程如图 3 所示。

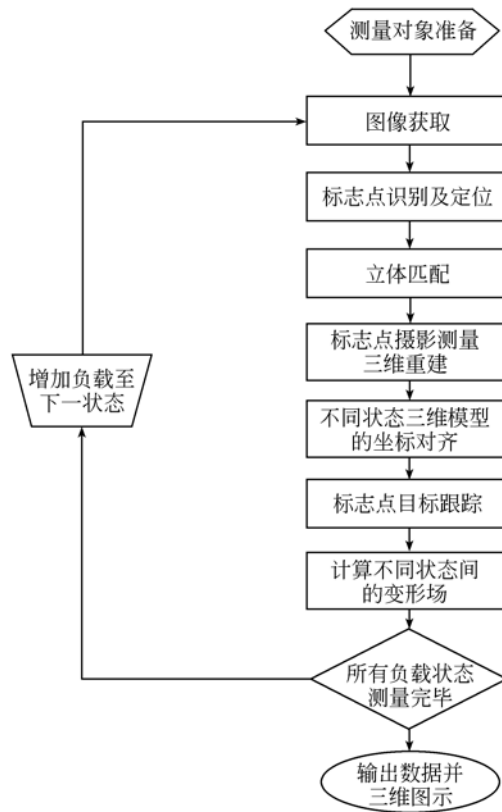


图 3 XJTUSD 系统处理流程图

Fig. 3 Flowchart of XJTUSD measurement system

3 关键技术

3.1 图像标志点检测与匹配

本文在对比分析现有图像特征提取方法的基础上,采用了文献[9]中的组合式人工标志点快速检测算法。图像标志点检测出来后,各图像中非编码点极为相似,传统的立体视觉系统中常采用核线约束来进行匹配,但在标志点分布密集,某些核线附近的标志点不唯一时,就会出现误匹配。本文系统在摄站网型设计中采用了大交会角多次覆盖的方案,在匹配算法中采用了文献[9]中的多核线立体匹配策略,实验中得到了 99% 以上的匹配率。

3.2 空间标志点的三维坐标解算

图像标志点匹配成功后,利用两张图像的内、外参数以及对应的像点二维坐标,通过空间前方交会就可以重建得到空间点的三维坐标。本文的网型设计中使绝大多数标志点出现在 3 张以上的图像中,这就为三维坐标的重建精度和重建成功

率提供了足够的冗余。采用自由网光束平差算法^[10],并考虑数字相机成像系统可能存在的 4 种系统误差,包括对称径向畸变、偏心畸变(含切向畸变和非对称径向畸变)、像平面畸变和内方位元素误差,采用无绝对控制点的整体解算算法,将所有标志点作为待测点解算其空间三维坐标,所以光束平差前不需要知道控制点的三维坐标,只需要一个已知的空间长度作为约束条件,对所有待解参数进行同步最优求解。本文的网型设计保证了每个标志点至少三次成像在相关图像上,并形成了对整个塔架各部分的多次覆盖,使得空间标志点的测量精度在 3 个坐标方向上大体相仿,解算出标志点的三维坐标精度在整个模型空间分布均匀。

3.3 多状态测量坐标系对齐

单状态下测量出来的塔架标志点三维模型处于自由坐标系下,因此要进行不同状态之间的变形矢量计算,必须先将每个状态的三维模型转换到统一坐标系下。在编码点中选取一部分作为全局点,在塔架的外侧及内侧立体放置,这些点要求不跟随塔架发生位移和变形,见图 4 中砖块上的点。本文定义空载状态为变形量计算的基准坐标系,空载状态测量完成后,得到了基准坐标系下全局点的三维坐标;每个负载状态测量完成后,得到了本状态下全局点的三维坐标。根据全局点在不同状态下的三维坐标求取坐标转换矩阵,就可以将本状态下所有标志点的三维坐标对齐到基准坐标系下。为了求取变形状态 i 下坐标系相对于基准坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R}_i 和平移矩阵 \mathbf{T}_i ,本文采用重心法。设基准坐标系下(空载状态)所选的 m 个全局点的坐标矩阵为:

$$\mathbf{Global}^{\text{base}} = \begin{bmatrix} x_1^{\text{base}} & x_2^{\text{base}} & \vdots & x_m^{\text{base}} \\ y_1^{\text{base}} & y_2^{\text{base}} & \vdots & y_m^{\text{base}} \\ z_1^{\text{base}} & z_2^{\text{base}} & \vdots & z_m^{\text{base}} \end{bmatrix}, \text{第 } i \text{ 个变形}$$

状态下同名全局点坐标矩阵为:

$$\mathbf{Global}^i = \begin{bmatrix} x_1^i & x_2^i & \vdots & x_m^i \\ y_1^i & y_2^i & \vdots & y_m^i \\ z_1^i & z_2^i & \vdots & z_m^i \end{bmatrix}, \text{则变形状态 } i \text{ 相对}$$

于基础状态的坐标系关系可以用矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_i & \mathbf{T}_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Global}^i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Global}^{\text{base}} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$\mathbf{Global}^{\text{base}}$ 和 \mathbf{Global}^i 分别为全局点在两个状态下的三维坐标矩阵,用公式(2)求取全局点在基准坐

标系下的重心 \mathbf{M}^{base} ,同样可得第 i 个状态的全局点重心 \mathbf{M}^i 。

$$\mathbf{M}^{\text{base}} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{t=1}^m x_t^{\text{base}}}{m} & \frac{\sum_{t=1}^m y_t^{\text{base}}}{m} & \frac{\sum_{t=1}^m z_t^{\text{base}}}{m} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} M_x^{\text{base}} \\ M_y^{\text{base}} \\ M_z^{\text{base}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$\mathbf{Global}^{\text{base}}$ 相对于其重心的坐标矩阵 $\mathbf{Global}_M^{\text{base}}$ 可由公式(3)求得,同理可求得 \mathbf{Global}^i 相对于其重心的坐标矩阵 \mathbf{Global}_M^i 。

$$\mathbf{Global}_M^{\text{base}} = \begin{bmatrix} x_1^{\text{base}} - M_x^{\text{base}} & x_2^{\text{base}} - M_x^{\text{base}} & \dots & x_m^{\text{base}} - M_x^{\text{base}} \\ y_1^{\text{base}} - M_y^{\text{base}} & y_2^{\text{base}} - M_y^{\text{base}} & \dots & y_m^{\text{base}} - M_y^{\text{base}} \\ z_1^{\text{base}} - M_z^{\text{base}} & z_2^{\text{base}} - M_z^{\text{base}} & \dots & z_m^{\text{base}} - M_z^{\text{base}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1M}^{\text{base}} & x_{2M}^{\text{base}} & \dots & x_{mM}^{\text{base}} \\ y_{1M}^{\text{base}} & y_{2M}^{\text{base}} & \dots & y_{mM}^{\text{base}} \\ z_{1M}^{\text{base}} & z_{2M}^{\text{base}} & \dots & z_{mM}^{\text{base}} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由旋转变换公式:

$$\mathbf{R}_i \mathbf{Global}_M^i = \mathbf{Global}_M^{\text{base}}, \quad (4)$$

两边同时乘 $(\mathbf{Global}_M^i)^T [(\mathbf{Global}_M^i)^T (\mathbf{Global}_M^i)^T]^{-1}$ 得:

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{Global}_M^{\text{base}} (\mathbf{Global}_M^i)^T [(\mathbf{Global}_M^i)^T (\mathbf{Global}_M^i)^T]^{-1}, \quad (5)$$

将求得的旋转矩阵 \mathbf{R}_i 代入公式(1)中,可得平移矩阵

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{M}^{\text{base}} - \mathbf{R}_i \mathbf{M}^i. \quad (6)$$

求出旋转矩阵 \mathbf{R}_i 和平移矩阵 \mathbf{T}_i 后,便可将变形状态 i 中所有标志点的三维坐标,利用公式(7)转换到基准坐标系下^[11]。

$$\begin{bmatrix} x_1^i \\ y_1^i \\ z_1^i \end{bmatrix}^{\text{base}} = \mathbf{R}_i \begin{bmatrix} x_1^i \\ y_1^i \\ z_1^i \end{bmatrix} - \mathbf{T}_i. \quad (7)$$

3.4 多状态同名变形点匹配及变形量计算

同名点匹配就是给不同状态下三维标志点模型中的同一标志点分配相同的编号,以解决不同状态标志点的对应问题,也称目标跟踪^[12-13]。本文的变形点有两种,非编码标志点和未用作全局点的编码标志点。对于编码点,变形前后状态中可以根据自身身份信息(ID号)实现自动匹配;对于非编码点,本文采用在相邻两个重建出三维点云模型中进行邻域搜索的算法完成匹配。三维空间的邻域搜索算法描述如下:

假设状态 i 中存在一点 \mathbf{P}^i ,其在状态 $i+1$ 中

的相同标志点搜索方法为:

(1)在状态 $i+1$ 三维点云中,判断是否存在唯一一个点 P^{i+1} 与搜索起始点 P^i 的距离小于邻域搜索阈值,不存在则搜索失败;

(2)以点 P^{i+1} 为搜索中心,在状态 i 中搜索与其点间距小于搜索邻域阈值的点,如果没有点,或者不仅为点 P^i ,则搜索失败;

(3)搜索成功后,将点 P^{i+1} 的 ID 编号重置为点 P^i 的 ID 编号。

两个状态下的变形点匹配完成后,得到的是塔架上同一点在两个不同状态下的空间坐标。将空间中任一点 i 在变形前后三维坐标的对应分量相减,即可计算出塔架相应位置的三维位移或变形值。本文系统可任意选择两个状态进行变形计算,并用三维图形显示其大小和方向。

4 实验验证

为检验 XJTUSD 系统对大型结构件三维变形测量的适用性,本文针对经过加强设计的某型塔架构件(见图 4)在不同负载下的变形进行测量实验。



图 4 真型塔架构件

Fig. 4 Part of scale power transmission tower

4.1 输电塔架真型承载变形测量实验

2008 年中国南方雪灾中失效的输电塔架,主要承受的是堆积在塔架梁杆上冰雪的重力负载,为模拟垂直压力,将塔架水平放置于地面上,两端使用水压机加压,从侧面进行观测。塔架真型试验变形测量示意图见图 5。

在塔架上及周围放置编码点、非编码点,并使其空间分布。其中非编码点粘贴于关键变形部

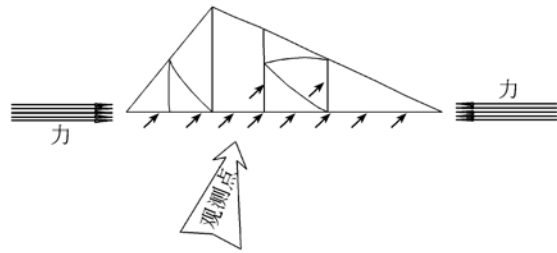


图 5 钢结构梁承载变形测量实验示意图

Fig. 5 Sketch diagram of steel structure load-bearing deformation measurement

位,作为测量的变形点。从空载开始,以 30 t 左右的间隔增加负载。空载时作为初始状态,采用 XJTUSD 系统测量出待测标志点的空间三维坐标,此时的变形量为 0;每次增加负载变形结束后为一个变形状态,采用 XJTUSD 系统再次测量被测点的三维坐标,与初始坐标相减得到此状态下被测标志点的三维位移。重复上述操作直至塔架失效。部分变形点在不同负载下的三维变形测量结果变化曲线见图 6,选取的 10 个点均为三维位移量较大的点。负载加至 340 t 时,塔架屈服。

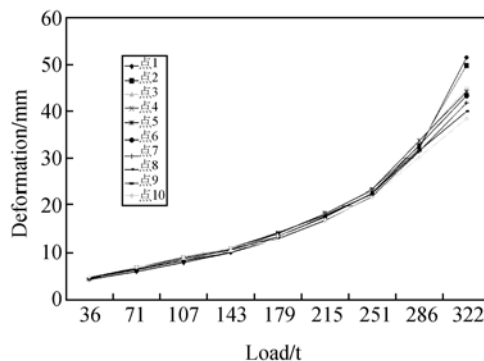


图 6 部分变形点在不同负载下的三维位移量

Fig. 6 3D displacements of some deforming points under different loads

全部测点的整体变形情况可以在 XJTUSD 测量软件的 3D 窗口中进行观察,图 7 中列出了各测量点在部分状态下的三维变形场。在 XJTUSD 测量软件中,也可以选择任意两个状态进行变形场计算及显示。

从各点的变形矢量看,两端变形小,方向向外发散,中间受力位置变形大,方向向内集中,符合塔架的受力变形特性,与有限元模型模拟结果一致。

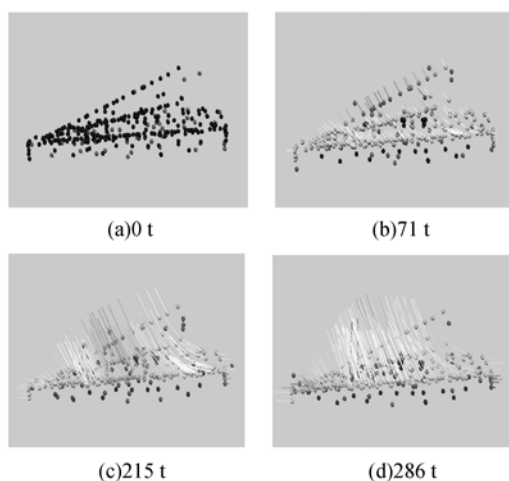


图7 塔架部分负载状态下的3D整体变形场

Fig. 7 Progress of full-field 3D deformation of steel structure under different loads

4.2 三维变形测量系统 XJTUSD 的精度评估实验

现有各种测量技术中难以找到能完成同样任务的测量手段对塔架进行同步测量(短时间内测量众多变形点),因此很难通过塔架实验来评估本文系统的精度。为了验证本系统中标志点空间重建的精度(变形测量精度的主要影响因素),参照 VDI-2634 光学设备三维精度测试标准及测试框架^[9],并取框架上不同方向的7个空间长度(以商用系统 TRITOP 6.0 的测值为基准)作为标准长度,用本文系统对这些空间长度进行16次测量,结果如表1所示,得到本文系统三维测量结果与基准的偏差小于0.1 mm/4 m(RMS, 1σ),完全能够满足塔架变形测量对精度的要求。

参考文献:

- [1] 赵滇生. 输电塔架结构的理论分析与受力性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
ZHAO S S. *The Theoretical Analysis and Study of Mechanical Behaviour for Transmission Tower* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese)
- [2] MOON B W, PARK J H, LEE S K, *et al.*. Performance evaluation of a transmission tower by sub-structure test[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 6(5): 1-11.

表1 空间长度测量结果

Tab. 1 Measurement results of spatial length

(mm)			
框架上的空间长度	空间长度标准值	XJTUSD测量值	误差
长度1	826.197	826.140	-0.057
长度2	1 276.896	1 276.849	-0.047
长度3	1 582.228	1 582.234	0.006
长度4	2 265.346	2 265.416	0.070
长度5	1 935.599	1 935.582	-0.017
长度6	2300.053	2 300.097	0.044
长度7	2 165.965	2 166.049	0.084

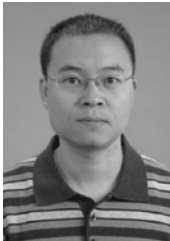
5 结 论

输电塔架结构复杂,理论分析和数值模拟结果与实际实验存在较大误差,在实践中通常辅以真型试验来验证设计的安全性和确定其极限承载力。本文提出了一种非接触式光学全场三维变形测量方法,该方法有着严谨的理论基础,通过跟踪固定在塔架上的标志点的位移来获取真型塔架在不同负载下的整体变形情况和变形趋势。精度实验和真型实验表明,该方法精度高(0.1 mm/4 m),量程具有较大的弹性(0.1~100 m),响应速度快(能在10 min内完成照片采集,此间隔内塔架形态保持不变),其测量结果能够为输电塔架结构力学性能分析和改进设计提供有价值的参考数据。本文系统也为解决其他大型结构件全场三维变形测量难题提供了一种可选方案。

- [3] FRASER C S. Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2000, 55(4): 268-276.
- [4] JIANG R, JAUREGUI D V. A novel network control method for photogrammetric bridge measurement[J]. *Experimental Techniques*, 2007, 5(6): 48-53.
- [5] 徐芳, 于承新, 黄桂兰, 等. 利用数字摄影测量进行钢结构挠度的变形监测[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2001, 26(3): 256-260.
XU F, YU CH X, HUANG G L, *et al.*. The monitor of steel structure bend deformation based on

- digital photogrammetry [J]. *Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(3): 256-260. (in Chinese)
- [6] 余永生. 一种典型工程结构风致振动现场测量[J]. *实验流体力学*, 2006, 20(4): 73-76.
YU Y SH, BI W T, LIANG B. Field measurements of wind-induced vibration of a structure[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2006, 20(4): 73-76. (in Chinese)
- [7] JIANG R, JAUREGUI D V, WHITE K R. Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: literature review[J]. *Measurement*, 2008, 41(8): 823-834.
- [8] CHANG C, JI Y. Flexible videogrammetric technique for three-dimensional structural vibration measurement[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2007, 133: 656-664.
- [9] 刘建伟, 梁晋, 梁新合, 等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 126-134.
LIU J W, LIANG J, LIANG X H, *et al.*. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 126-134. (in Chinese).
- [10] 韩建栋, 吕乃光, 王锋, 等. 采用光学定位跟踪技术的三维数据拼接方法[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 45-51.
HAN J D, LÜ N G, WANG F, *et al.*. 3D data registration method based on optical location tracking technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 45-51. (in Chinese).
- [11] 陈刚, 姚英学. 多视点大空间三维坐标数据归一化方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1309-1314.
CHEN G, YAO Y X. 3D datum mosaic method of multi-view and large scale based on optical coding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1309-1314. (in Chinese).
- [12] SANT Y L, MIGNOSI A, DELEGLISE B. Model deformation measurement (MDM) at onera [C]. *25th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Miami, FL*, 2007: 1-8.
- [13] LICHTI D D, GUMULYA M M, HORSLEY R R. Determination of trajectories of metallic spheres settling in non-newtonian fluids[J]. *The Photogrammetric Record*, 2009, 24(125): 37-50.

作者简介:



刘建伟(1976—),男,河南洛阳人,博士,2006年于广东工业大学获得硕士学位,2011年于西安交通大学获得博士学位,主要从事三维光学测量方面的研究。E-mail: cnhnyljw@163.com



蒋志强(1965—),男,四川安岳人,博士,教授,博士生导师,2001年于河南科技大学获得硕士学位,2006年于西安交通大学获得博士学位,主要从事数字化制造方面的研究。E-mail: new-room@zzia.edu.cn



刘元朋(1976—),男,河南邓州人,博士,副教授,1999年,2002年,2006年于西北工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事精密测量、计算机辅助技术方面的研究。E-mail: lyp5599@126.com



文振华(1976—),男,湖北天门人,博士,2006年、2009年于南京航空航天大学分别获得硕士、博士学位,2009~2010期间在香港城市大学PHM研究中心作访问学者/高级副研究员,主要从事状态监测、故障诊断与系统健康管理方面的研究。E-mail: levinzhwen@126.com



梁晋(1968—),男,河南郑州人,教授,1990年,1993年,2001年于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事机电控制、机器视觉等方面的研究。E-mail: liangjin@mail.xjtu.edu.cn