

# 斜拉桥气弹模型拉索振动数字摄影测量技术

陈艾荣, 涂 熙, 马如进

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

**摘要:** 利用数字摄影测量的方法, 在斜拉桥全桥气弹模型风洞试验中对拉索结构实现振动位移的动态测量. 介绍了该方法的基本原理, 并通过某斜拉桥进行了实测研究, 获得了该桥气动失稳状态时的拉索振动形态, 为桥梁颤振发散机理的研究提供了直接依据. 讨论了拉索位移测量方法的误差, 并提出改进测量精度的对策.

**关键词:** 气弹模型试验; 拉索; 振动响应测量; 图像识别

**中图分类号:** TU 317.1

**文献标识码:** A

## Vibration Measurement Technique for Cables of Full Aeroelastic Model for Cable-Stayed Bridge Based on Digital Photogrammetry

CHEN Airong, TU Xi, MA Rujin

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** This paper presents the application of digital photogrammetry in obtaining the vibration response of cables for full aeroelastic cable-stayed bridge model in wind tunnel test. In the wind tunnel test, aeroelastic model for a cable stayed bridge with the span of 1 088 m was adopted and the vibration modes for cables during aerodynamic instable status were acquired by image capture and analysis, which clearly revealed the relationship between cable and girder of cable stayed bridge and provided essential data for future research on the mechanism of the flutter of cable stayed bridge with long span. Moreover, the measurement error was discussed and the countermeasures for improving precision were proposed.

**Key words:** full aeroelastic model test; stay cable; vibration measurement; image recognition

气弹模型风洞试验是现阶段研究桥梁抗风的主要方法, 是了解结构抗风性能、验证结构抗风安全度的重要途径<sup>[1]</sup>. 针对缆索承重体系桥梁, 目前气弹模型风洞试验主要观测主梁、桥塔的振动响应, 而斜拉索、主缆等构件却不在风洞试验研究范围之列, 其原因在于此类构件重量轻、外形小, 不适用于目前的振动、位移测量设备. 因此, 使用数字摄影测量是较好的解决方案.

美国摄影测量与遥感协会(ASPRS)对摄影测量的定义为: 通过对拍摄图像的记录、测量和解译过程来获取有关物理对象可靠信息的科学与技术<sup>[2]</sup>. 数字摄影测量技术是摄影测量和数字图像识别相结合的产物. 其核心内容包括获取图像坐标, 图像坐标的物理坐标还原, 以及借助计算机对数字图像进行位移数据处理等. 数字图像识别技术从上世纪 80 年代中期到 90 年代取得了突飞猛进的发展<sup>[3]</sup>, 数字摄影测量的精度大幅提高. 该技术所需设备简单, 操作空间要求少, 亦改善传统测量仪器的量程限制, 且测量点数量可以任意设置, 节省试验经费. 随着数字摄像设备成本下降和性能大幅提高, 越来越多的土木结构试验和检测开始应用数字摄像与识别技术<sup>[4]</sup>, 对结构物的位移、变形、混凝土裂缝等进行识别和测量. 本文针对这种技术在桥梁风洞试验中的应用进行分析及讨论.

## 1 识别原理与试验方案

风洞试验中使用图像识别的原理是通过数字摄影机拍摄运动中的测量目标, 在拍摄的每一帧图像中通过一定算法捕捉测量目标, 并通过图像中目标运动状态与参照物之间的比较得到目标的实际运动状态, 最终获得目标的位移测量值. 构成图像识别系

收稿日期: 2010-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(50708073); “十一五”国家科技支撑计划(2009BAG15B01)

第一作者: 陈艾荣(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构设计理论. E-mail: a.chen@tongji.edu.cn

通讯作者: 马如进(1978—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构设计理论. E-mail: rjma@tongji.edu.cn

统的要素包括摄影机、拍摄画面范围、目标、参考长度、目标运动轨迹等(图 1)。

本文以某超大跨径斜拉桥气弹模型试验为对象(图 2)。该桥设计跨径为 1 088 m, 最长拉索长为 577 m。在风洞试验桥梁失稳状态过程中, 拉索产生较大摆动振幅<sup>[5]</sup>。本文利用数字摄影机对拉索振动进行测量, 以期为深入研究该桥气动失稳形态以及气动失稳过程中拉索发挥的作用提供必要的数据支撑。

从前期试验现象的观测来看, 该斜拉桥在较高试验风速下发生了整体结构气动失稳现象。发生该现象时, 主梁发生较大位移的周期性竖向位移和侧向位移; 拉索发生较大幅度侧向变形; 由于中跨和边跨的拉索索力不平衡, 桥塔亦发生较大幅度的纵向

位移。由以上现象可知, 就拉索上任意一点来看, 其位移应为复杂的空间运动。从对该气动失稳现象的研究意义来看, 测量的主要对象为此时结构风致振动的频率以及拉索的振型。因此, 受限于试验条件, 本次数字摄影测量采用了拉索目标测量点位移在横截面上的 1 维投影图像。

在测量过程中, 以最长拉索的中点作为试验点, 考虑到桥梁横断面上下游 1 对拉索的影响, 在研究过程中考察了 1 组最长拉索, 即迎风侧和背风侧 2 根拉索。斜拉索测试点标记在斜拉索所需测点处(图 3)。标记本身选择轻质材料, 且要求其自身反光性能较好, 同时在外形上不能显著改变斜拉索的气动性能。

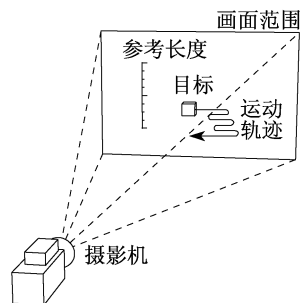


图 1 摄影测量原理示意

Fig.1 Diagram of the theory for photogrammetry



图 2 某超大跨径斜拉桥全桥气弹模型

Fig.2 Full aero-elastic model of long-span cable stayed bridge

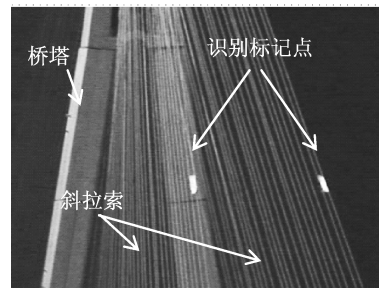


图 3 标记点位置

Fig.3 Location of markers

测量系统的空间关系是本文测量方法的关键。图 4 为测量系统平面布置图。同时摄影机与测点位于同一水平面。摄影机采集的 1 组动态图像如图 5 所示。

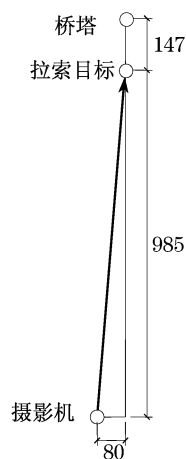


图 4 测量系统平面布置图(单位:cm)

Fig.4 Layout of measuring systems (unit:cm)

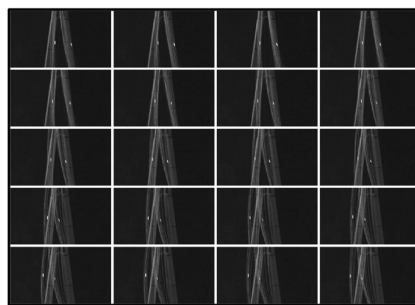


图 5 测量图像序列

Fig.5 Measured picture sequences

## 2 图像识别算法

通过摄影机导入的 24 bit 图像由红、绿、蓝 3 个通道组成, 每个波段的灰度分级为 256 级。在图像处理中仅选取了动态范围较高的红色通道, 对像素灰度进行处理和分析。通过 Matlab 程序将每张图片文件的信息转换成包含每个像素信息的矩阵, 利用数学处理找到目标点所在单幅图像中的位置。程序识

别的大致步骤包括:图像预处理、搜索独立块区域以及计算目标区域中心点.

本试验中拉索上的识别对象为较背景明显的标记点,不能在标记点上加入更多的识别信息.本文的标记点识别方法为:对处理后的目标区域形成非零区域的像素取型心位置.这一过程中,由于识别区域已完成二值化过程,边缘识别简化为以发现非零像素为依据,而没有采用常规的边缘检测算子,因此亦不考虑目标边缘亚像素问题.

2.1 图像预处理

图像预处理是指通过一定算法对原始图像优化以便进行识别分析操作<sup>[6]</sup>.本文图像预处理的目的在于提高图像的动态范围以及筛选必要的识别图像,便于后期识别算法的应用.图像预处理将清除低于某个灰度阈值的像素,实现对图像的二值化.其具体步骤为:① 调整图像的特性,如亮度、对比度等;② 分析得到图像的灰度柱状图;③ 统计各灰度值包含的像素量;④ 自最高灰度值累计像素量,直致累计计数达到总数的某个比例,如 1%;⑤ 根据上一步停止的亮度值,清除所有低于该灰度值的像素.

图像预处理能够有效改善区域识别的命中率.图 6 为采集到的某张图像柱状图.调整图像的亮度过滤比例值将明显改变识别画面的构成,从而改变识别命中率.图 7 为不同过滤阈值对应的图像预处理结果.

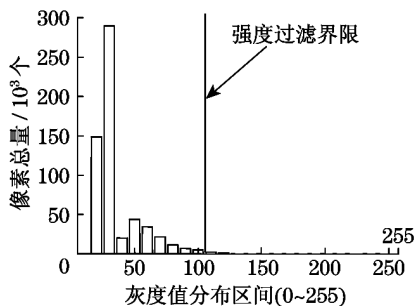


图 6 某张图像中各亮度区段单元格数量分布  
Fig.6 Cell quantitative distribution in different brightness areas

从以上调试可见,信号筛选阈值太低会生成过多的干扰区域,这不利于正确区域的选择.而信号筛选阈值太高则会删除原本需要的区域.正确选择图像调整的策略能够有效改善图像信息的识别.

2.2 搜索独立块区域

搜索独立块区域能够将预处理后图像中的独立块区域搜索出来,其中必然包含所需目标点形成的区域.搜索步骤示意图如图 8 所示,具体表述如下:

① 为每个像素编号;②从图像左上角开始扫描像素,如果发现灰度非零像素,则为该像素创建区域存储区,把该像素的序列号存储其中;③扫描该灰度非零像素周围的像素,如再发现灰度非零像素,则也将其序列号存储到由上一个灰度非零像素创建的存储区,为了提高扫描效率,扫描像素按顺序仅限初始位置的右、右下、下以及左下 4 个位置,如图 9 所示;④扫描之后非零像素的序列号并将其存储在邻近的区域存储空间内,若其序列号已在其中,则跳过存储操作.

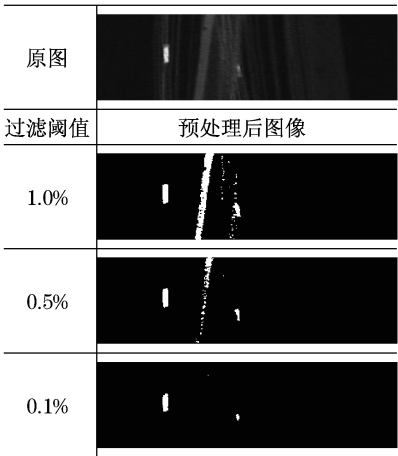


图 7 不同过滤阈值对某张图像过滤的影响

Fig.7 Effects of different filtering thresholds

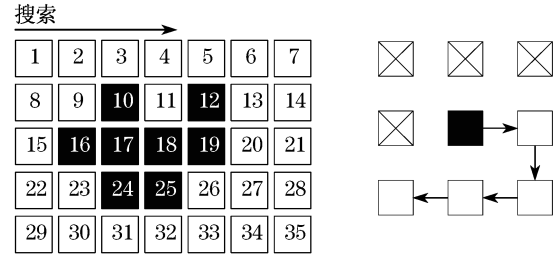


图 8 非零区域搜索示意图 图 9 相邻单元格扫描示意图  
Fig.8 Diagram of searching non-zero areas Fig.9 Diagram of scanning for neighboring cells

2.3 选择目标区域

搜索图像中非零像素独立区域,找到目标区域.本试验中因设置背景反差较大,目标区域能够被较好表现,即包含像素量最大的 2 个独立区域,为拉索运动图像中的 2 个测试点.找到目标区域后可通过物理坐标均值获得该目标区域的中心点.

3 数据识别与分析

3.1 识别结果

根据测量系统平面布置尺寸转换识别结果.依照

图4的坐标信息,摄影机视轴与全桥模型轴线夹角为 $4.64^\circ$ ,标记点的横向位移乘以1.0033的放大因数.通过参考长度计算可得到转换比例为每像素0.694 mm.部分识别结果数据见图10.其中,图10a和b为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 试验风速下的斜拉索响应时程;图10c和d为 $8.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 试验风速下的斜拉索响应时程,此风速下斜拉桥气弹模型整体发生气动失稳.

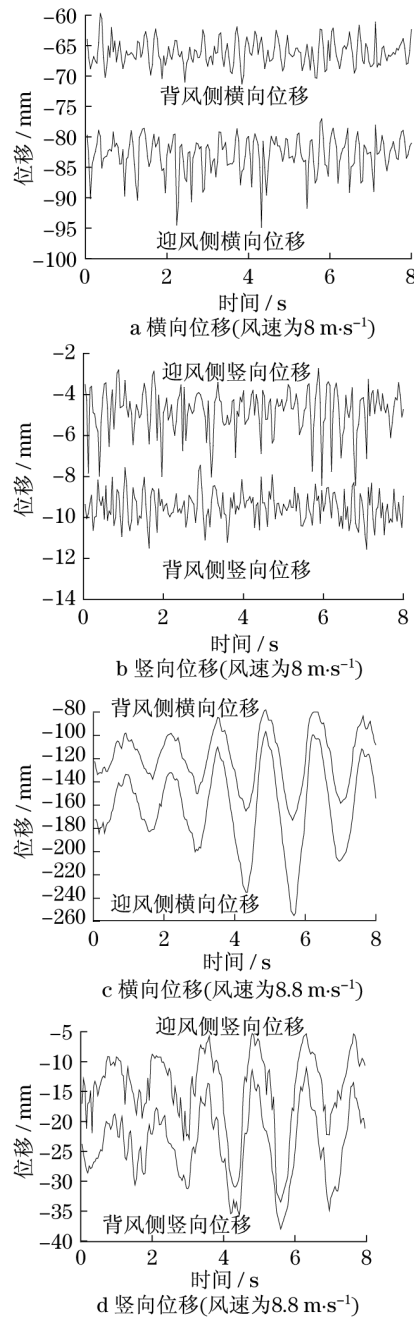


图10 标记点风振位移曲线

Fig.10 Wind-induced vibration of markers

### 3.2 数据分析

针对图像识别的数据进行分析,可以得到各个标记点不同风速下位移均值,如图11所示.表1给出了

2个不同风速下各测点位移响应根方差.拉索的平均风响应除了包含自身受到风荷载作用下的响应之外,还受到了主梁变位引起的拉索附加位移.由图11所示的拉索中点位移平均值变化趋势大体服从2次抛物线的变化规律.此外,受尾流效应的影响,背风侧拉索的横桥向位移小于迎风侧拉索.受拉索倾斜方向的影响,背风侧拉索测点的竖向位移大于迎风侧.

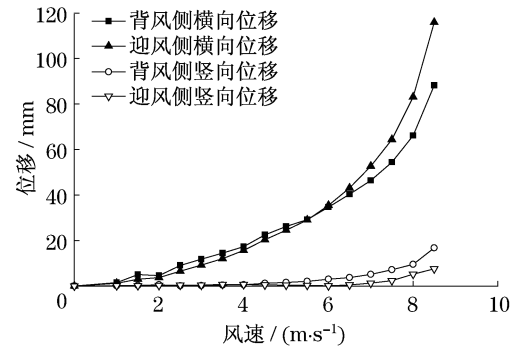


图11 标记点各个风速下位移均值

Fig.11 Mean displacements of markers and wind speeds

表1 不同风速下各测点位移响应根方差

Tab.1 RMS Displacement of Markers mm

拉索位置	风速为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$		风速为 $8.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	
	横向	竖向	横向	竖向
背风侧	2.120	0.792	23.018	5.783
迎风侧	3.524	1.972	33.759	5.552

为了考察拉索振动响应与主梁响应的关系,图12给出了全桥气弹模型气动失稳状态时拉索测点与

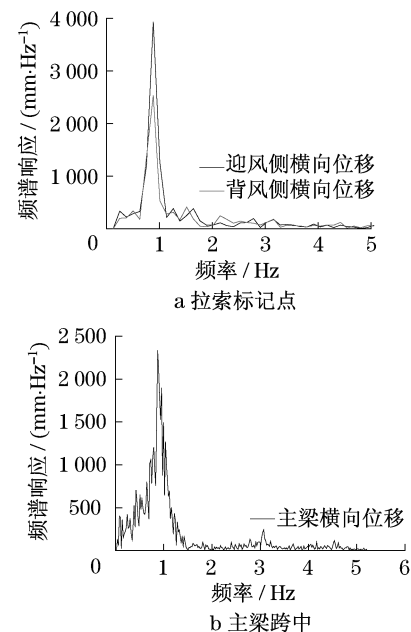


图12 横桥向振动频域信号(风速为  $8.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig.12 Frequency signals of lateral displacements ( $U = 8.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

主梁跨中横向振动响应的功率谱图. 数据表明, 拉索侧向振动的主要频率为  $0.883\ 8\ \text{Hz}$ . 主梁振动的主要频率为  $0.874\ 8\ \text{Hz}$ . 可以发现结构气动失稳发生时, 拉索振动与主梁一致.

最后利用该方法得到的拉索振动位移响应, 对该桥的气动失稳状态进行再现, 并绘制得出气动失稳状态时(试验风速为  $8.8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )拉索在不同时点( $0 \sim T/2$ ,  $T$  为周期)的等比例振型图(图 13). 根据该失稳形态分时图可以看出, 在气动失稳时, 拉索参与振动所占成分不可忽略, 并且该桥的气动失稳有别于传统斜拉桥的主梁弯扭耦合的气动失稳形态.

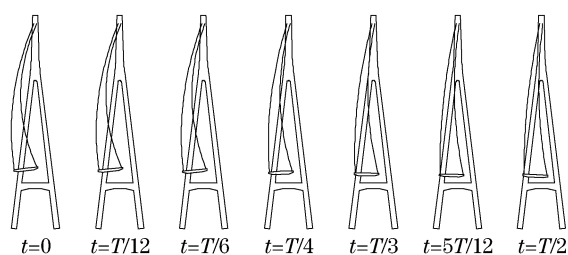


图 13 气动失稳半周期形态图(风速为  $8.8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig.13 Aerodynamic divergence shape in half cycle ( $U=8.8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

从分析结果来看, 标记点的位移被识别出来, 而其在高风速下的运动形态也同结构整体运动形态一致, 表明数字摄影测量能够有效测量拉索构件的位移, 能够准确反映所需的拉索风致振动形态, 具有一定的实用性和准确性.

### 3.3 误差与校正讨论

本识别算法基于测点图像的区域, 而识别区域边缘是以处理后图像的灰度变化为依据, 因此这种算法在边缘识别的精度为像素级, 受到摄影器材解析度的影响, 其精度在  $2\ \text{mm}$  左右. 其次, 该算法是根据处理后图像进行区域搜索. 而受到标记点的形状、拉索的转动以及光照条件的影响, 摄影机拍摄到的测点图像并非保持稳定, 在不同时点上区域识别中心点的波动可达到  $5\ \text{mm}$ . 但由于标记点在横风向尺度较小, 对相对重要的横向位移影响较小.

为了从试验手段上改善图像识别结果的准确性, 试验者尽可能选择分辨率高、拍摄速度高且高感光性能的摄影设备; 同时, 试验者应尽可能增大标记点亮度, 降低背景亮度, 增大测试环境反差; 摄影方向尽可能垂直于标记点运动平面, 并增大测量距离. 此外可通过畸变校正图来修正镜头畸变.

## 4 结语

从试验结果看, 基于数字图像识别的摄影测量方法可认为是一种弥补激光位移计和加速度缺陷的有效方法. 从本次试验的结果看, 使用该方法得到的结果准确地反映出模型的风致振动响应特性, 为研究该结构抗风性能提供了依据.

从试验过程看, 数字摄影测量对试验设备和试验场地的要求较低. 对程序进行简单改进后可对同一画面内多个目标进行分析识别, 在识别目标间干扰较小的情况下可以大大增加测点数. 此外, 使用多台摄影机即可对复杂的空间运动轨迹进行测量. 因此, 该方法能够为风洞试验带来极大的便利.

尽管如此, 该方法的识别速度还比较低, 每个数据点的获取时间比较长. 对于采样时间为  $60\ \text{s}$  或者更长的情况, 该方法还不能够实时或者在短时间内提取测量结果. 因此, 现阶段该方法只能作为激光位移计和加速度计失效情况下的补充手段. 这一点将在进一步工作中通过使用更高效的算法和策略加以改善.

## 参考文献:

- [1] 项海帆. 我国大跨度缆索承重桥梁的空气动力性能研究[J]. 力学季刊, 2000, 21(4): 3.  
XIANG Haifan. Aerodynamic studies of long-span cable-supported bridges in China[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2000, 21(4): 3.
- [2] JI Yunfeng. Videogrammetric technique for structural dynamic applications[D]. Hongkong: Hongkong University of Science and Technology, 2007.
- [3] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing [M]. 2nd ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2002.
- [4] 曲哲, 陆新征, 叶列平, 等. 数字摄影测量在混凝土梁受剪性能研究中的应用[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(增刊): 936.  
QU Zhe, LU Xinzheng, YE Lieping, et al. Applications of the digital photogrammetry in the studies on shear behavior of concrete beams[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27 (Suppl): 936.
- [5] 陈艾荣. 苏通长江公路大桥全桥气弹模型风洞试验研究[R]. 上海: 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 2004.  
CHEN Airong. Full aeroelastic bridge model wind tunnel study of Sutong Bridge [R]. Shanghai: Tongji University. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, 2004.
- [6] Mantas J. Methodologies in pattern recognition and image analysis: a brief survey[J]. Pattern Recognition, 1987, 20(1): 1.