文章编号:1001-5078(2019)03-0282-09

·激光应用技术·

激光基准桥梁挠度成像检测系统

赵宏伟¹,宋云峰¹,王会峰^{2,3},何娜娜²,黄 鹤^{2,3},关丽敏^{2,3},穆柯楠^{2,3} (1. 渭南市交通工程质量监督站,陕西渭南 714000;2. 长安大学电子与控制工程学院,陕西西安 710064; 3. 陕西省道路交通智能检测与装备工程技术研究中心,陕西西安 710064)

摘 要:针对桥梁结构健康安全运行自动化实时检测的需求,提出了利用激光基准的嵌入式桥 梁挠度图像式检测方案,设计了基于透射式靶标的测量数据视觉读数方法和硬件系统。该方 案在分析桥梁跨中下挠成因的基础上,提出了检测系统的原理和组成,给出了检测系统的硬件 原理框图,设计了透射式光斑转换智能靶标的结构图。给出了人机交互和远程传输模块的原 理和系统上位机监测和分析终端软件,该方法应用于桥梁挠度参数的测量中解决了高精度和 实时性的矛盾,保证了系统测量精度和效率。经实验室平台实测发现:利用该方法的测量误差 小于 300 μm,数据更新率小于40 ms,满足了高精度实时性的要求。

关键词:仪器仪表技术;光斑图像;透射靶标;椭圆拟合

中图分类号:TH741.1⁺;TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2019.03.004

Measurement of bridge deflection on laser datum and vision imaging

ZHAO Hong-wei¹ , Song Yun-feng¹ , WANG Hui-Feng^{2,3} ,

HE Na-na², HUANG He^{2,3}, GUAN Li-min^{2,3}, MU Ke-nan^{2,3}

 $(1.\ Wei-Nan\ Traffic\ Engineering\ Quality\ Supervision\ Station\ , Wei'nan\ 714000\ , China\ ;$

2. School of Electronic & Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

3. Road Traffic Intelligent Inspection and Equipment Engineering Technology Research Center, Xi'an 710064, China)

Abstract: Aiming at the requirement of automatic real-time detection for safe operation of bridge structure, an embedded image type bridge deflection detection scheme using laser datum is proposed, a visual measurement data reading method and hardware system based on transmission target are designed. On the basis of analyzing, the cause of bridge span down deflection, the principle and constitutes of the laser datum bridge deflection detection system, the hardware block diagram of system are presented, the structure diagrams of transmissivity intelligent target which can automatic convert light spot is designed, and the principle of human-interactive and remote transmission module, computer monitoring system and analysis software are also presented. The method solves the contradiction between high precision and real-time in measuring the bridge deflection, ensure the precision and efficiency of the measurement system. It is found by the laboratory platform that the measurement error of this method is less than 300 μ m, and the data update rate is less than 40 ms, which meets the requirements of high precision and real-time.

Key words: technology of instrument and meter; spots image; ransmission-type target; ellipse fitting

1 引 言

桥梁是交通设施中的重要组成部分,在交通系

统中起着至关重要的作用。桥梁的挠度是测量桥梁 运行状况的常用度量参数,可以对桥梁的承载能力

作者简介:赵宏伟(1966 -),男,硕士,高级工程师,主要从事道路桥梁质量检测方面的研究。E-mail:hfwang@chd.edu.cn 收稿日期:2018-07-24;修订日期:2018-09-11

进行评估,指导桥梁的维护和维修工作,并且在桥梁的健康监测、温度效应、应力损失上也得到了极为广泛的应用^[1]。激光准直技术是精确测量大跨径桥梁挠度变化的一种有效方法,其广泛应用在直线度、同轴度、平面度、平行度等形位误差的测量方面^[2-3]。因此,有必要利用激光准直技术对桥梁挠度进行长期监测,确保桥梁结构服役可靠性实时可控,提升其安全保障能力^[4]。

传统的桥梁挠度测量方法主要有以下几种:1) 全站仪法[5-7],其测量原理为三角高程测量法,通过 测量两点间的竖直角和水平距离求得两点间的高差 得出桥梁挠度的方法。2)百分表法^[8-10],百分表法 利用齿轮转动机构对所检测位置的位移放大,并将 检测的直线往返运动转换成指针的回转运动,用来 指示位移数值。3)水准仪法[11-13],水准仪法是利 用精密水准仪测量桥面上两点间的高度差,在桥面 两点之间放置水准仪,通过观测两点之上的水准标 尺的读数,推算两点间高度差。4)倾角仪法^[14-16], 通过测量被测桥梁在变形时几个截面的倾角,然后 根据倾斜角拟合出倾角曲线,进而得到挠度曲线,通 过计算求得桥梁在任一点的挠度值;5)连通管 法^[17-19],该测量法是每隔一定的距离在被测桥梁上 铺设连通管,管内装有液体,根据连通管内液面位置 的变化量来获得桥梁挠度的值:6)光电成像测量 法^[20-22],光电测量靶固定在待测部位,数字像机则 固定在桥墩上,数字像机记录发光靶标成像在光敏 面上,当加载后靶标图像在摄像机上移动的位移测 量桥梁挠度。

本文将高精度激光基准和光电图像处理技术相结合,提出了一种实时、全天候网络化监测方案,该 方案可随时反应桥梁所承受的负载力对桥梁挠变位 移的影响,及时判断桥体是否危险,也可应用在新建 桥梁的验收上。该方法可实时检测,不仅精度高、且 可便捷评估桥梁安全,对于梁体的结构健康具有重 大意义。

2 梁体跨中下挠成因及挠度特征

荷载、环境温度、梁体构件收缩等因素都会引起 桥梁挠变,当桥梁的挠变量过大时,会导致梁体产生 裂缝和损坏,影响桥梁的安全和正常使用。桥梁挠 度^[23]是指梁体结构在荷载受力过程中会产生形变, 桥梁弯曲变形时横截面在其轴线法平面内相对于原 来所在位置的位移量。如图1为一个简易的单跨度 梁桥模型,理想情况下,桥梁在外力 P 的作用下产 生变形,梁体沿 y 轴方向弯曲成一条曲线,这条曲线 称为桥梁的挠度曲线, y_b 表示梁体的最大形变量即 挠度的最大值^[24]。



Fig. 1 The simple beam bridge model

桥梁在没有承受任何外力的情况下,桥梁只承 受自身重量的作用力并且均匀分布于梁身,如图 2 所示。桥梁在自身重量的作用下梁体上任意一点 *x* 处的挠度方程可以表示为:

$$y = -\frac{qx}{24EI}(L^3 - 2Lx^2 + x^3)$$
(1)

其中, L 表示梁体总长; q 为桥梁密度; EI 是一个常量 为弹性模量和惯性矩的乘积, 表示桥梁的抗弯刚度。



Fig. 2 Self-gravity bridge model

假设随机荷载产生的作用力为 P,当仅承受外 力 P 的作用下梁体发生变形,如图 3 所示。桥梁承 受随机荷载时梁体上任意一点 x 处的挠度方程表示 如下:

$$\begin{cases} y = -\frac{Pbx}{6LEI}(L^2 - x^2 - b^2) & 0 \le x \le a \\ y = -\frac{Pb}{6LEI} \left[(L^2 - b^2)x - x^3 + \frac{L}{b} (x - a)^3 \right] & a < x \le b \end{cases}$$
(2)





在梁体的线弹性范围内,其上任意一点 x 处的 挠变量可以看作是桥梁自身重量和随机荷载产生的 外力作用相叠加而产生的,所以挠度方程可以由叠 加法计算,如下式:

$$\begin{cases} y = -\frac{Pbx}{6LEI}(L^2 - x^2 - b^2) - \frac{qx}{24EI}(L^3 - 2Lx^2 + x^3) & 0 \le x \le a \\ y = -\frac{Pb}{6LEI} \Big[(L^2 - b^2)x - x^3 + \frac{L}{b} (x - a)^3 \Big] - \frac{qx}{24EI}(L^3 - 2Lx^2 + x^3) & a < x \le b \end{cases}$$
(3)

公式(3)中梁体长度 L,待测点位置 x 和 a、b 参数值已知,通过测量加载后梁体上 3 个不同位置 的挠度值 y,将三组测量值分别代入公式(3) 联立 求解即可求得公式中的未知参数 P、q、EI的值,从 而得到梁体承受固定荷载 P 的挠度方程。

公式(3)表示在理想情况下桥梁荷载的挠度曲 线方程,在实际使用过程中情况比较复杂,除了外荷 载,还会受到梁体结构、温度、收缩等因素的影响,则 桥梁的实际挠度公式表示如下:

 $f_s = f_p + f_q + f_r + f_e + \delta_e$ (4) 其中, f_s 表示实际挠变量; f_p 表示承受外界荷载作用 力 P 产生的挠变量; f_q 表示梁体自身重量 q 产生的 挠变量; f_r 表示受环境温度影响产生的挠变量; f_e 表 示梁体材料特性影响产生的挠变量; δ_e 为系统 误差。

3 激光基准桥梁挠度检测系统原理和构成

3.1 激光基准桥梁挠度参数检测原理

如图4所示,激光基准桥梁挠度图像式检测仪 是利用激光的直线传输原理,将激光束作为测量基 准,利用透射式的成像靶标将桥梁的挠变量转化为 光斑在标靶面上的位移量,再根据成像和图像处理 技术解算出被测点的光斑中心位移量便得到该点的 挠度值。检测时在桥梁梁体上部指定几个待测点, 一般选取跨中 L/2 和 2 个 L/4 点,将测量靶标安放 在待测位置处,同时将基准激光发生器安放在桥墩 某固定部位,此时激光束在测量标靶上打出一个激 光光斑,调整出瞳焦距将激光光斑调整到合适大小。 在桥梁未加载前先对待测点进行测量得到激光光斑 在标靶上的初始位置坐标(x₀,y₀),桥梁加载之后 再次对待测点进行测量得到激光光斑的位置坐标 (x_1, y_1) ,则桥梁的待测点两次测量的光斑位置沿 x 方向和 y 方向的距离之差分别为: $\Delta x = x_1 - x_0$ 和 $\Delta y = y_1 - y_0$,由此可以得到待测点的挠度值(不含 桥梁的徐变自重挠度),将这三处测得的挠度值代 入公式(3),就可得到该跨的挠度曲线,若只检测跨 中最大挠度,则只需要安装 L/2 一个靶标即可。当 检测该跨的挠度曲线时,需在梁体 L/2 和 2 个 L/4 点分别安装靶标系统,在桥墩相对应位置须安装 3 个基准激光发生器。其中 3 个靶标系统须安装在沿 桥梁通行方向的同一直线上,并且 3 个靶标系统需 高度错开,防止遮挡其他激光路线以免影响各个靶 标的正常工作,具体安装模型如图 4 所示。



图 4 激光基准桥梁挠度检测原理 Fig. 4 Theory diagram of system

3.2 检测系统硬件构成

桥梁挠度视觉成像检测系统主要由激光基准发 射装置、发射瞄准装置、成像靶标、CCD像机、滤光 片、成像镜头、DSP图像信号处理器和无线发射装置 等部分组成,其功能框图如图5所示。安装在桥梁 桥堆部位的准直激光器发出的激光光束作为基准, 在悬挂于跨中位置的透射式智能靶标成像,位于靶 标后方的CCD像机拍摄基准靶标的光斑图像,将光 图信息转换为数字图像信息,图像信号处理板,采集 CCD像机的图像信号,并对光斑图像信息进行解 算,获取激光光斑的相对偏移尺寸,即可得到桥梁的 挠度测量值。





为了提高检测系统的实时处理能力,将靶标图像的处理与检测结果传输分开进行,以 DM642 芯片为核心的处理系统专门负责靶标图像的实时处理; 以 STC12C5A60S2 为核心处理器的数据传输子系统 完成桥梁挠度检测结果的数据传输任务。同时为了 实现桥梁挠度检测的远程无线控制与实时在线监 测,在远程电脑终端设计上位机软件用于显示和存 储测量数据,如图 6 所示。



4 视觉读数智能靶标系统设计

4.1 智能靶标系统的原理及构成

智能靶标设计采用透射式光学图像转换靶标方 式,标靶平面的尺寸为 m × n。光学标靶靶面由漫 射滤光材料构成,以便滤除背景杂波图像从而提高 系统的信噪比,改善成像平面上的光图质量。靶面 后置 CCD 成像装置,镜头前安装滤光片,成像镜头 到光学标靶的距离为 d,通过成像镜头使光学标靶 在图像传感器(CCD)上成像,获得对称性好、能量 均匀的激光光斑图像。靶标内部安装实时图像处理 电路和数据传输电路完成靶标图像实时处理和数据 传输,其原理如图 7 所示。





Fig. 7 Block diagram of measuring system function

漫射板具有较好的漫射效果,直射的激光光源 经过漫反射板后可以变成漫射的光源,使用透射式 漫反射板作为激光接收转换装置,可以获得均匀而 稳定的漫反射光照射区,从而使标靶靶面上的激光 光斑均匀而稳定。

桥梁挠度检测系统中光学标靶靶面尺寸为: $m \times n = 170 \text{ mm} \times 120 \text{ mm},$ 检测系统中选择 Watec 公司的 WAT902H2 超低照度的 PAL 制式摄像机, CCD 尺寸 1/2'',像面尺寸为 6.4 mm × 4.8 mm,视频 输出 1 Vpp -75Ω ,有效像素 $752(H) \times 582(V)$,信 噪比 50 dB,当拍摄较暗的场景时噪声对图像质量 的干扰较小。标靶成像系统的工作距离约为 100 mm,因此利用公式求得镜头的放大倍数为:

PMAG = 6. 4/170 ≈ 0. 03764 (5) 则镜头的焦距为:

$$f = 0.03764 \times 100/(1 + 0.03764) \approx 3.627 \text{ mm}$$
(6)

通常情况下可选择的镜头焦距有 4 mm,8 mm, 12.5 mm,16 mm 等标准规格,所以标靶成像系统选 择最接近于计算值的焦距为 4 mm 的镜头。再根据 镜头焦距计算标靶平面到镜头之间的距离:

 $d = WD = (1 + 0.3.764) \times 4/0.03764 =$ 110.27 mm (7)

以靶标成像系统参数的理论计算结果为参考, WAT902H2 的最低照度为0.0003 Lx@F1.4,相当于 无月光照射夜晚天光在地面产生的照度,因此无论 白天还是夜晚摄像机都可以正常工作,采集到激光 标靶图像信息,从而保证无论昼夜都能够可靠地完 成桥梁挠度的检测。

4.2 智能靶标摄像机的标定

智能靶标系统是单目二维测量系统,其摄像机 安装垂直于靶标工作平面,摄像机的位置和内外参 数固定,以摄像机的光轴为中心,并以从摄像机到靶 面的方向为正方向建立坐标系,如图 8 所示,靶面坐 标系原点 O_w 可选择光轴中心现与靶面平面的交点, Z_w 方向与 Z_c 方向相同。于是有摄像机的外参矩阵 为R = I, $p = [0,0,d]^T$, d 为光轴中心点 O_c 到靶 面的距离。在工作平面上,靶面坐标可表示为(x_w , y_w ,0),可得靶面点在摄像机下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ d \\ 1 \end{bmatrix}$$
(8)





不考虑畸变,则内参数采用四参数摄像机模型, 对于工作平面上的两点 $P_1 = [x_{w1}, y_{w1}, 0], P_2 = [x_{w2}, y_{w2}, 0], 利用式(8)可得:$

$$\begin{cases} u_2 - u_1 = \frac{k_x}{d} (x_{w2} - x_{w1}) \\ v_2 - v_1 = \frac{k_y}{d} (y_{w2} - y_{w2}) \end{cases}$$
(9)

$$\begin{cases} k_{xd} = \frac{u_2 - u_1}{x_{w2} - x_{w1}} \\ k_{yd} = \frac{v_2 - v_1}{y_{w2} - y_{w1}} \end{cases}$$
(10)

式中, (u_1, v_1) 是 P_1 点图像坐标; (u_2, v_2) 是 P_2 点 的图像坐标, $k_{xd} = k_x/d$, $k_{yd} = k_y/d$, 是标定的摄像 机的参数。

4.3 基于 DM642 的激光光斑图像的获取与处理

准直激光器发出的激光束投射到激光光斑成像 靶上,CCD 摄像机对目标靶面的激光光斑进行成 像,DSP 图像信号处理器是视觉读数单元的核心部 件,它可采集 CCD 摄像机的实时图像信号,并对靶 面的激光光斑的中心位移(水平和竖直方向)进行 精确坐标解算,并传输给单片机,单片机把所得到的 数据通过无线通讯模块发送到远程上位机终端,上 位机终端将对多个测点测得的挠变数据进行拟合, 最终数据进行存储、打印,并通过评估数据库软件算 法对桥梁梁体的运营安全进行分析。在视觉读数 时,可以初始的平面坐标和图像坐标的点作为参考 点,则可以用任意点的图像坐标的位移解算出激光 光斑中心相对于参考点的位移:

$$\begin{cases} x_{wi} = x_{w0} + (u_2 - u_1)/k_{xd} \\ y_{wi} = y_{u0} + (v_2 - v_1)/k_{yd} \end{cases}$$
(11)

靶标图像采集和处理子系统如图9所示,其功 能是采集 CCD 传感器的光斑靶标信号并将其转化 为数字信号,然后经去噪、分割等处理过程获得测量 靶标的光斑中心位移的像素坐标值,再根据标定因 子解算出光斑中心的二维坐标信息,最后经过 RS232 接口电路将其发送出去。



Fig. 9 Target image processing subsystem

系统以TMS320DM642(简称DM642)芯片为核 心处理器,完成标靶图像核心处理算法,实现标靶图 像上光斑中心的精准定位。DM642 片上具有丰富 的视频硬件资源,包含三个可软件配置的视频端口 VP0、VP1、VP2。DM642 芯片运算速度快并且存储 扩展能力非常强,由于标靶图像的采集和处理过程 中需占用大量的存储空间,所以芯片外部扩展大容 量存储器件 SDRAM,以满足图像数据的存储要求。 DM642 处理系统的视频端口外设在视频捕获模式 下支持 YCbCr4:2:2 的格式下输入8 位或10 位分辨 率的数字视频信号,输出 YCbCr4:2:2 格式的数字 视频信号。

5 检测系统误差分析

基于激光基准的桥梁挠度测量,影响系统测量 的误差由系统误差和随机误差组成,下面对影响系 统测量精度的部分主要因素进行分析。

5.1 镜头畸变引起的误差

理想情况下 CCD 像机的成像原理可用线性透 视模型表示^[25],实际成像系统并不完全符合线性透 视模型,由于成像透镜物理特性,成像画面会发生畸 变^[26]。通常情况下的畸变主要考虑径向畸变,径向 畸变从镜头的光轴中心开始,沿着径向产生并且逐 渐增大,距离光轴中心越远畸变越明显^[27]。摄像机 镜头沿着 *x* 和 *y* 方向上的畸变量表示如下:

$$\begin{cases} \delta_x(x_d, y_d) = x_d(k_1q^2 + k_2q^4 + k_3q^6 + \cdots) \\ \delta_y(x_d, y_d) = y_d(k_1q^2 + k_2q^4 + k_3q^6 + \cdots) \end{cases}$$

其中, $q^2=x_d^2+y_d^2$, (x_d,y_d) 表示畸变后像点在

像平面上的位置坐标, $k_1 \ \langle k_2 \ \langle k_3 \ \rangle$ 为径向畸变系数, $\delta_x(x_d, y_d)$ 和 $\delta_x(x_d, y_d)$ 分别表示像点在像平面上沿 着 x和y方向径向畸变量。摄像机的镜头径向畸变 属于系统误差,可以通过畸变模型进行校正^[28],本 文不再敖述。

5.2 靶面不垂直引起的误差

理想状况下靶标平面在安装过程中应该垂直于 基准光束,但实际上由于安装原因总会存在一定的 误差。如图 10 所示,假设靶标平面在安装过程中存 在一定的倾斜角 θ ,这样当跨中下挠时假设在竖直 位置上的挠度量为h的位移时,由于靶标与基准光 束不垂直,智能靶标测得的实际位移值将是h',由 图示的集合关系可得:





图 10 靶面安装倾斜引起的误差

Fig. 10 The error caused by target tilt installation

可得相对误差 δ_h 为:

$$\delta_h = \frac{h' - h}{h} \times 100\% = (1 - \cos\theta) \times 100\%$$
(14)

由式(14)可知,此项误差也属于系统误差,安 装倾斜角度误差 θ 越小,相对误差越小,所以在安装 过程中要尽量保证靶标平面和跨中截面垂直,以减 小此项误差。以理想靶标位置为参考坐标平面,实 际靶标平面有绕 x 轴方向和 y 轴方向两种情况的倾 斜角。当靶标平面绕 x 轴方向倾斜角度范围在 0° ~30°时,桥梁挠变量为 10 mm 时产生的误差范围 为0~1.32 mm。当靶标平面绕 y 轴方向倾斜角度 范围在 0°~30°时,桥梁挠变量为 10 mm 时产生的 误差范围为 0~0.93 mm。

5.3 基准位置漂移引起的误差

特大桥梁的单孔跨径一般都超过了 100 m,因 此安装在跨中靶标和激光基准源的距离也较长,设 其距离为 l,如图 11 示,假设激光基准源在测量中 由于外界的影响产生了偏角 α 和移位 δ_d ,则由于基 准激光束漂移在靶面上产生的实际位移为:





 $\delta_p = \delta_d \pm l \times tan\alpha \leq |\delta_d| + l \times tan\alpha
 (15)
 (15)可知当 α 和 l 增大时,该项误差增加。根据误差传播规律在 l 较大时,α 变化很小的量也会引起 <math>\delta_p$ 产生一个较大的变化,因此,后一项误差对误差的影响至关重要。在设计中我们在激光器本体上安装了高精度的二维倾角测量装置,由于 l 在特定的桥梁中为已知,因此可以通过设定参数消除该项误差的影响。分别对安装环境和实验测试数据进行分析,当激光发射器到测试点距离为 100 m 时,基准位置漂移引起的误差范围为 0 ~ 25.6 mm。根据从高精度二维倾角测量装置获取的数据,并定期进行相应的参数设定,以消除该项误差。

5.4 大气湍流引起的误差

大气湍流是指大气层各点的温度、折射率、压力 等随机变化引起空气的密度发生无规则起伏的现 象^[29],大气湍流现象会干扰光束在空气中的传输, 特别是激光器与接收标靶之间的距离较远时影响会 比较明显,导致激光光斑在标靶上成像时出现光斑 抖动、强度闪烁、光束扩展等现象,如图 12 所示。当 湍流尺寸 *L* 远大于激光光束直径 *D* 时,会导致激光 在传播过程中产生偏移,使标靶上的激光光斑位置 出现漂移的现象;假设激光在大气中传播时传播路 径均匀,根据 Kolmogrov 谱湍流,引起的激光光束抖 动可表示为^[30]:

 $\delta_p^2 = 2.03C_n^2 \times (2 \times R)^{-1/3} \times d^3$ (16) 其中, C_n^2 为大气折射结构常数,单位是 m^{-2/3}; R 为 初始为发射半径; d 为传输距离。光束漂移的程度 可以用光斑重心的平方差表示。检测系统使用大功 率激光发射器,当传输较远距离时会很大程度地减 弱大气湍流带来的误差,分析实验数据可得,当传输 距离为100 m 左右时,在不同的外界环境条件下,大 气湍流引起的误差范围为0~5.6 mm。



图 12 大气湍流对激光光束的影响

Fig. 12 The Influence of atmosphere turbulence on laser beam

6 实验结果

利用所设计的原理实验样机,采用高精度的二 维光学平台(北京中天光电数显平台精度为 0.01 mm),在室内进行测试,实验平台安装的是 4.1 节所 选用的像机,镜头配中联科创(ZLKC)4 mm 百万像 素级无畸变高清工业镜头,实验原理样机如图 13 所示。



(a) 激光发射实验装置
 (b) 智能靶标实验装置
 图 13 桥梁挠度检测仪原理实验样机
 Fig. 13 Experimental prototype of bridge deflection tester principle

6.1 智能靶标定实验

样机在实验室内在高精度二维光学平台上对智能靶进行标定,标定时将激光器放置在智能靶标前固定,调整出瞳焦距,使得光斑尺寸大约3 mm,将样机置于二位数显移动平台上,如图14 所示,分别沿着竖直和水平方向移动靶标,平台每次移动2 mm,利用重心法计算光斑中心坐标,部分数据如表1 所示。

表1 像素位移值

Tab. 1 Pixel d	isplacement value
----------------	-------------------

实际位移 /mm	像平面光斑中心坐标		与初始位置之差	
	u	v	Δu	Δv
0	125	301	0	0
10	145	299	20	-2
30	193	299	68	-2
50	237	298	112	- 3
70	284	297	159	-4
100	353	296	228	- 5

沿着一个方向每移动 2 mm,测量 CCD 上移动的像素数,取其中的 5 组如表 1 所示,利用其中的数据进行平均,并且利用公式(9)和(10)可求得 $k_{xd} = 2.499$; $k_{yd} = 2.304$ 。



图 14 系统标定 Fig. 14 System calibration

6.2 倾斜角度模拟实验

样机在室内状态下在测量靶标倾斜 0°~45°偏转角度所引起的标定系数 k_{xd}, k_{yd} 之间的误差如图 15 所示。



6.3 模拟测量实验

样机在室外状态下在靶标距离光源 70 m 左右 处进行模拟测量实验,如图 16 所示,发现系统在天 气晴朗的条件下,系统的显示测量误差小于 0.3 mm,满足系统测量的要求。



图 16 模拟测量实验 Fig. 16 Analog measurement experiment

7 结 论

通过对桥梁跨中挠度的结构特点的研究,提出 了一种基于激光基准的和视觉读数靶的跨中挠度测 量方案,给出系统的硬件设计方案,设计了智能靶标 的结构原理,对智能靶标的各组成部分进行的选型 设计,最后分析了影响系统测量误差的主要因素,并 通过实测验证了系统测量的精度。该系统巧妙地将 激光和图像靶结合起来,准确而方便地获取了系统 的测量值,对同类系统乃至其他系统有重要的参考 价值和应用前景,后续可继续研究开发满足各种工 况的网络化智能产品。

参考文献:

- [1] XIE Jun, WANG Guoliang, ZHENG Xiaohua. State of arts of long-term deflection for long span prestressed concrete box-girder[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, (1):47 – 50.
- [2] KANG Weiwei. Research on ranging technology in total station laser alignment system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
 康玮玮. 全站式激光准直系统中的测距技术研究

[D].天津:天津大学,2007.

- [3] ZHANG Benniu, SHI Lingli, ZHOU Zhixiang, et al. Laser projection deflection monitoring system for collimating point of Wujiang bridge in Tu Kan[J]. Architecture Science, 2011, 27(3):30-32. (in Chinese)
 张奔牛, 石玲莉, 周志祥, 张开洪. 土坎乌江大桥准直 点激光投射式挠度监测系统[J]. 建筑科学, 2011, 27 (3):30-32.
- [4] Karim Helmi, Todd Taylor, Ali Zarafshan, et al. Reference free method for real time monitoring of bridge deflections
 [J]. Engineering Structures, 2015, (103):116-124.
- [5] Panos A, Psimoulis, Stathis C Stiros. Measurement of deflections and of oscillation frequencies of engineering structures using Robotic Theodolites(RTS)[J]. Engineering Structures, 2007, 12(29):3312 - 3324.
- [6] Panos A Psimoulis, Stathis C. Stiros. A supervised learning computer-based algorithm to derive the amplitude of oscillations of structures using noisy GPS and Robotic Theodolites(RTS) records[J]. Computers & Structures, 2012,2(92-93):337-348.
- ZENG Xiaoming, ZHANG Wenji. Research on bridge deflection detection technology based on total station [J].
 Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2003, 17

(1):39-41. (in Chinese)

曾小明.张文基.基于全站仪的桥梁挠度检测技术研究[J].黑龙江工程学院学报,2003,17(1):39-41.

[8] HU Xiao. Research on bridge high frequency deflection detection technology based on laser ranging principle[J]. Architectural knowledge,2016,(3):267 - 290. (in Chinese)

胡晓.一种基于激光测距原理的桥梁高频挠度检测技术的研究[J].建筑知识,2016,(3):267-290.

- [9] LI Guiliang. Research on the method of measuring bridge deflection based on wireless inclination sensor[D]. Tianjing: Hebei University of Technology, 2013. (in Chinese) 李桂良. 基于无线倾角传感器测量桥梁挠度的方法研 究[D]. 天津:河北工业大学, 2013.
- [10] XIANG Yiqiang, LI Chunhui, BAI Hua. A new non-contact detection method for bridge deflection and deformation[J]. China Municipal Engineering, 2010, (5):66 68. (in Chinese)
 项贻强,李春辉, 白桦. 新型非接触式桥梁挠度和变形的检测方法[J]. 中国市政工程, 2010, (5):66 68.
- [11] LU Ying. Application research of bridge detection technology based on 3D laser scanning[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
 卢颖. 基于三维激光扫描的桥梁检测技术应用研究
 [D]. 长春:吉林大学, 2017.
- [12] SUN Jiping. Uncertainty analysis of bridge deflection measurement using leveling instrument[J]. Scientific and Technological Information, 2010, (13):134 - 135. (in Chinese)
 孙冀平.采用水准仪测量桥梁挠度测量不确定度分析 [J]. 科技资讯,2010,(13):134 - 135.
- [13] ZHAO Lizhen, HE Xianlong. Testing static deflection of railway bridges based on inclinometer [J]. China Test, 2012,38(1):136-138. (in Chinese) 赵立珍,何先龙. 基于倾角仪测试铁路桥梁静态挠度 [J]. 中国测试,2012,38(1):136-138.
- [14] ZHANG W, Sun L M, Sun S W. Bridge-deflection estimation through inclinometer data considering structural damages [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 22 (2):04016117.
- [15] CHEN Zhongxiao, WANG Jun, HAN Jinbo, et al. Bridge deflection detection based on connected pipe principle
 [J]. Machinery and Electronics, 2016, 34(3):50 53. (in Chinese)

陈忠孝,王军,韩锦波,等.基于连通管原理的桥梁挠

度检测[J]. 机械与电子,2016,34(3):50-53.

- [16] Yang J C, Chen W M. Connected pipe opto-electronic deflection measurement system and the application in Dafoshi Yangtze River Bridge [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2006, 17(3):343-346.
- [17] Liu Y, Deng Y, Cai C S. Deflection monitoring and assessment for a suspension bridge using a connected pipe system: a case study in China [J]. Structural Control & Health Monitoring, 2015, 22(12):1408-1425.
- [18] WANG Haiyan, YANG Tingwu, AN Yuying. Acta photonica sinica, 2003, 32(1):9-13. (in Chinese)
 王海晏,杨廷梧,安毓英.激光水下偏振特性用于目标
 图像探测[J]. 光子学报, 2003, 32(1):9-13.
- [19] DEGN Suai. Study on dimming method of photoelectric theodolite[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
 邓帅.光电经纬仪调光方法研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [20] Yoneyama S, Kitagawa A, Iwata S, et al. Bridge deflection measurement using digital image correlation [J]. Experimental Techniques, 2007, 31(1):34-40.
- [21] Basu A K, Matthews L K. Assessment of the current condition of structures using nondestructive, modeling, and parameter estimation techniques[C]. Smart Structures & Materials. International Society for Optics and Photonics, 1995:242-257.
- [22] YE Huawen, WANGa Liwu, QU Haobo. Long term deflection analysis of Prestressed Continuous Box Girder in Palau[J/OL]. Chinese and foreign highway, 2017, (5): 81-87. (2017-10-24). (in Chinese)
 叶华文, 王力武, 曲浩博. 帕劳国预应力连续箱梁长期下挠分析[J/OL]. 中外公路, 2017, (5): 81-87. (2017-10-24).
- [23] YE Feng, WANG Min, CHEN Jiandong. Correction of camera nonlinear distortion based on coplanar points[J].
 Optical precision engineering, 2015, 23 (10): 2962 – 2970. (in Chinese)

叶峰,王敏,陈剑东.共面点的摄像机非线性畸变校正[J].光学 精密工程,2015,23(10):2962-2970.

[24] REN Xiaokui, JIN Lin, JIAO Wenbin. Camera lens distortion correction on IACPSO algorithm [J]. Application Research of Computers. 2015, 32(6):1865 - 1868. (in Chinese)

任晓奎,靳琳,缴文斌.基于 IACPSO 算法的摄像机镜头畸 变校正[J].计算机应用研究,2015,32(6):1865-1868.

- [25] ZHANG Jing, ZHU Dayong, ZHANG Zhiyong. A non metric correction method for camera lens distortion[J]. Journal of Optics, 2008, (8):1552 - 1557. (in Chinese) 张靖,朱大勇,张志勇. 摄像机镜头畸变的一种非量测 校正方法[J]. 光学学报, 2008, (8):1552 - 1557.
- [26] XU Fang. Research on image distortion correction technology of airborne CCD camera based on FPGA[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese) 徐芳. 基于 FPGA 的航空 CCD 相机图像畸变校正技术

研究[D].北京:中国科学院大学,2013.

[27] WANG Guiping, WANG Huifeng, LIU Panzi. Field correction of imaging distortion with characteristic parallel lines [J]. Journal of Photons, 2014, 43(1):93 - 97. (in Chinese)

汪贵平,王会峰,刘盼芝.特征平行直线的成像畸变现 场校正[J].光子学报,2014,43(1):93-97.

- [28] ZHANG Wentao, ZHU Baohua. Influence of atmospheric turbulence on laser signal transmission[J]. Journal of University of Electronic Science and technology of China, 2007,36(4):784-787. (in Chinese) 张文涛,朱保华. 大气湍流对激光信号传输影响的研 究[J]. 电子科技大学学报,2007,36(4):784-787.
- [29] Ebrahim Mohammadi Razi, Saifollah Rasouli. Investigation of inhomogeneity and anisotropy in near ground layers of atmospheric air turbulence using image motion monitoring method[J]. Optics Communications, 2016.
- [30] QIANG Xiwen, ZHANG Hui. The attenuation effect of lidar signal [J]. Applied Optics, 2000, 21:88 - 89.