

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416653

起重机主梁智能化激光测量系统设计*

郭大慷 贾云飞 肖凯文

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘要: 为了提高特种设备检测工作者对起重机主梁下挠值进行测量的工作效率,保证测量精度以及实现测量数据的智能化处理,提出了一种基于水平激光与光电传感器的测量方法,并设计了测量系统的原理样机。测量系统将起重机主梁拱度值转化为水平激光照射在光电传感器阵列上的高度差进行测量,通过纵向双排交错感光单元排布的方法提高了测量分辨率;利用双轴承重力悬吊结构保证了激光水平照射;通过点光源聚焦水平扫描代替一字线水平激光解决了激光远距离照射时衰减导致亮度不足的问题;借助 LoRa 和 5G 无线通信技术实现了测量数据实时上传云端的功能。在某起重机主梁检测现场,将本文设计的系统样机与传统经纬仪法进行对比测量实验,结果表明本文所提出的测量方法以及设计的系统样机相比传统经纬仪法,各点的测量误差在本次实验中均小于 0.6 mm,且总测量用时减少了 70% 左右,保证了测量精度与可靠性,显著提高了测量效率,实现了将测量数据实时上传云端,提高了检测工作的智能化程度。

关键词: 下挠检测;激光测量;光电传感器阵列;智能化云平台

中图分类号: TH215;TH822;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Design of intelligent laser measurement system for crane girder

Guo Dakang Jia Yunfei Xiao Kaiwen

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the working efficiency of special equipment testing workers to measure the flexible value under the main beam of the crane, ensure the measurement accuracy and realize the intelligent processing of measurement data, a measurement method based on horizontal laser and photoelectric sensor is proposed, and the principle prototype of the measuring system is designed. The measuring system transforms the arch value of the crane into the height difference of horizontal laser irradiation on the photoelectric sensor array and improves the measurement resolution by the arrangement of the horizontal beam; ensures the horizontal illumination by the focus instead of the horizontal laser in the result with the function of LoRa and 5G wireless communication technology. In the field of a crane girder detection, the system prototype designed in this paper and the traditional theodolite method contrast measurement experiment, the results show that the measurement method and this paper designed the system prototype compared with the traditional theodolite method, the measurement error of each point are less than 0.6 mm, in the experiment, and the total measurement time reduced by about 70%, ensure the measurement accuracy and reliability, significantly improve the measurement efficiency, implements the measurement data real-time upload to the cloud, improve the intelligent degree of the detection work.

Keywords: downward deflection detection; laser measurement; optoelectronic sensor arrays; intelligent cloud platforms

0 引言

起重机形式多样且应用广泛,其主梁是主要承载结构,工作一定时间后,由于主梁长期受载荷作用,不可避免会产生一定程度的材料损伤,体现为载重后主梁的下挠值增大,

达到一定程度后就容易断裂,造成安全事故^[1]。起重机主梁额定载重时的下挠值可以表征其垂直刚度,是衡量其性能,评估其承载能力和剩余寿命的重要参数指标。根据国标相关要求,手动小车(或手动葫芦)位于桥架主梁跨中位置时,由额定起升载荷及手动小车(或手动葫芦)自重载荷

收稿日期:2024-08-12

* 基金项目:江苏省特种设备安全监督检验研究院立项项目(KJ(Y)2023036)资助

在该处产生的垂直静挠度 f 与起重机跨度 S 的关系,推荐为: $f < \frac{1}{400}S$; 自行式小车(或电动葫芦)位于桥架主梁跨中位置时,由额定起升载荷及自行式小车(或电动葫芦)自重载荷在该处产生的垂直静挠度 f 与起重机跨度 S 的关系,推荐为低定位精度要求的起重机: $f < \frac{1}{500}S$; 中等定位精度特性的起重机: $f < \frac{1}{750}S$; 高定位精度特性的起重机: $f < \frac{1}{1000}S$; 当铸造起重机小车起吊额定载荷位于跨中,与载荷试验时的原始下挠值(或设计计算下挠值)相比,主梁下挠值增加量达到或超过跨度的 $0.15/1000$ 时,应报废^[2]。

测量起重机主梁的下挠值是对其进行安全性检测的最直接有效的方法^[3]。目前行业内常用的起重机主梁的下挠值测量方法主要有全站仪法和经纬仪法,其本质上都是转换为直接测量其空载和额定载重时的拱度值,再通过计算差值间接测量下挠值^[4]。这两种测量方法,经纬仪法需要两人配合测量,且需要测量人员长时间在起重机主梁上进行高空作业,不仅危险性高,还受到较大的主观性影响;全站仪法受到主梁测量点的颜色和环境光线影响,有时无法测得数据,精度也受到影响,且两种方法都需要进行人工记录大量的测量数据,容易出现差错或者数据丢失^[5]。

最近几年随着物联网技术的迅猛发展,国内外出现了将物联网技术引入特种设备检测行业应用的案例,例如江苏省特检院的周超等^[6],将起重机的吊重、限位状态、偏斜量等参数通过传感器与 LoRa、5G 等通讯技术进行实时监控与上传。为了改善现有方法测量起重机主梁下挠值的不足,本文借鉴此种思想,提出一种利用水平激光进行测量的方法,设计了一套光电测量系统,该系统可以在较少的人工工作量下对起重机主梁的下挠值进行测量,并将测量数据通过 LoRa 和 5G 无线通信技术实时上传到云端,不仅解决了测量主观性影响大、精度低的问题,还实现了测量数据实时上传云端数据中心储存,比现有方法更加高效与智能。

1 水平激光测量方案设计

1.1 测量原理

起重机主梁在制造出厂时留有一定预拱的目的是使其将来载重时有更多的下挠值裕量,以抵消将来在起吊作业中梁自重、起重物产生的下挠,从而提高载重能力、使用寿命等力学性能^[7]。一些大型门式起重机的跨度一般在 $80 \sim 100$ m 左右,从该起重机下方观察和在主梁上方观察时均可见微小的拱度,如图 1 所示。

经纬仪法的测量原理是主梁上部分别架设经纬仪和标尺,起吊重物前观测一次经纬仪十字线位于标尺的位置,起吊并保持重物悬空再次观测十字线的位置,取两次的差值为下挠值,其测量原理如图 2 所示^[8]。



图 1 起重机主梁及其拱度

Fig. 1 Crane main beam and its arch degree

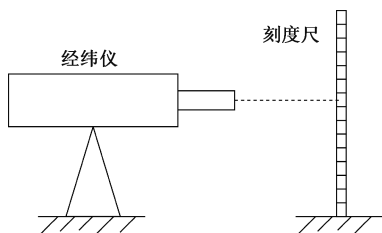


图 2 经纬仪法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the theodolite method

仿照经纬仪法测量的原理,设计一种基于水平激光与光电传感器的测量方法,通过水平激光代替经纬仪的观测视线,光电传感阵列代替标尺,对起重机主梁进行两次拱度测量。将大功率激光器通过两组高精轴承和悬吊式机械结构,使其发射出的激光束在晃动稳定时保持水平,并可以在减速电机的带动下缓慢旋转,使得激光束可以覆盖同一高度的整个水平面^[9]。将上述部分安装在工业遥控小车上,并遥控其行驶到起重机主梁上的各个待测点,记录水平激光束照射在光电传感器阵列上的光斑位置高度变化从而测量起重机主梁待测点的拱度,测量时的工作示意图如图 3 所示。

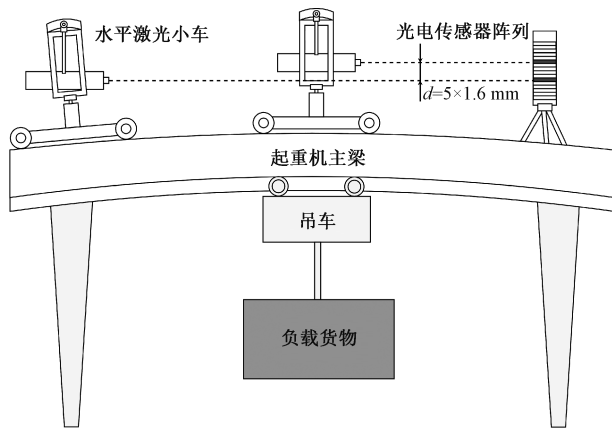


图 3 水平激光测量法原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the principle of the horizontal laser measurement method

1.2 测量方法及流程

在进行测量时,激光器在减速电机的旋转带动下发出的光束缓慢扫过一个水平面,光斑在光电传感器阵列上扫过。激光源距离传感器阵列较远时,例如 80 m 时,有效

的光斑覆盖面近似一个直径为 2 cm 左右的圆形,在扫过传感器阵列时会覆盖相邻的几个感光单元,如图 4 所示。

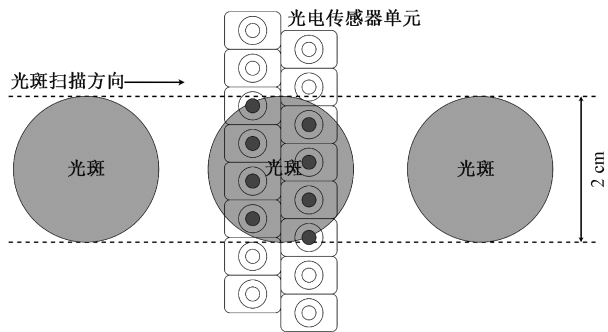


图 4 光斑扫描过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the light spot scanning process

激光器距离光电传感器阵列较近时,例如 10 m 时,光斑直径会缩小至 0.5 cm 左右,因此无论是激光器距离光电传感器阵列较远处还是较近处,都取被光斑覆盖到而触发的感光单元的中间位置作为激光束的理想点位置,实现方法是记录下光斑在一次扫过光电传感器阵列过程中触发过的最高点与最低点的感光单元,再取两点的中间点为理想点,在硬件电路上的实现流程如图 5 所示。

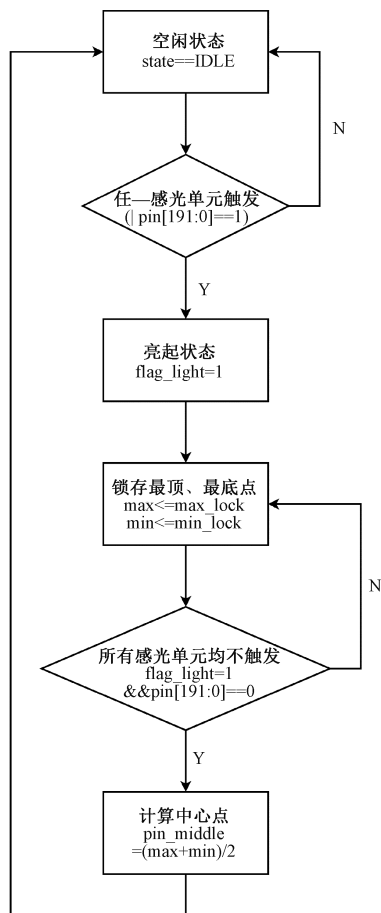


图 5 测量计算流程图

Fig. 5 Flow chart of measurement calculation

1.3 水平激光器设计

水平激光器整体由 3 部分组成,分别是激光发射器、悬吊结构以及减速电机。选择 500 mW 大功率激光器作为激光光源,通过透镜组将点状光斑进行聚焦,使得光斑尽可能小,从而使光斑亮度尽可能高,调整至 80 m 处的光斑直径在 2 cm 左右时,可以使得在白天自然光环境下,光斑亮度仍然远高于自然光照射的亮度,将触发输出的亮度阈值设置在自然光亮度与光斑亮度之间,尽可能避免自然光照射导致的误触发。激光器通过悬吊结构保持水平,悬吊结构是由垂直的两根轴与相应轴承组成的,通过调整激光器与悬吊结构的中心固定位置,使激光器发射出的激光束在晃动稳定后保持水平^[10]。减速电机的转速为固定的 2 r/min,其带动激光器缓慢旋转,使点状光斑可以在水平面内扫描,达到和一字线光斑类似的效果,这样可以保证点状光斑一定可以扫过光电传感器阵列,并且避免了一字线光斑亮度太低,能量密度不够触发感光单元的问题,其 3D 设计模型如图 6 所示。



图 6 水平激光器 3D 图

Fig. 6 Horizontal laser 3D diagram

2 系统硬件设计

2.1 硬件总体构成

系统硬件电路主要分为 4 个部分,分别是传感器电路、调理电路、FPGA 核心电路以及传输电路。传感器电路主要由 192 个 PT3528 封装的光电传感器组成,其作用是感光并输出电压;调理电路主要由 48 个四输入输出的电压比较器组成,其作用是比较感光电压与阈值大小并输出逻辑电平^[11];FPGA 核心电路由 Altera 的 EP4CE55F23I7 芯片通过六层 PCB 布局布线实现,其作用是接收逻辑电平信号并计算处理;传输电路主要由 LoRa 模块组成,其作用是将 FPGA 处理后的数据通过 LoRa 无线点对点传输到 5G 路由器的串口输入^[12];4 部分分别通过锂电池和线性稳压器提供相应的工作电压,设计框图如图 7 所示。

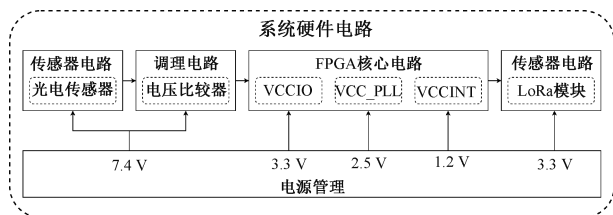


图 7 系统硬件框图

Fig. 7 System hardware block diagram

2.2 光电传感器阵列设计

光电传感器阵列主要由传感器电路以及特殊的带狭缝的外壳组成。传感器电路通过将 192 个宽度为 3.2 mm 的光传感器单元以两列交错间隔排列的方式在纵向上形成最小分辨率为 1.6 mm 的感光阵列,当光电传感器单元感光时,输出电压与感光的光强正相关,通过 48 个 4 输入比较器 LM339,将 192 路输出电压与设置好的阈值进行比较,即感光强度超过阈值时比较器输出逻辑电平 1,并将此电平输入 FPGA 的 I/O 口进行后续处理,此部分的电路原理只画出了起始的两路和最后一路,中间省略了相似的 189 路,如图 8 所示。

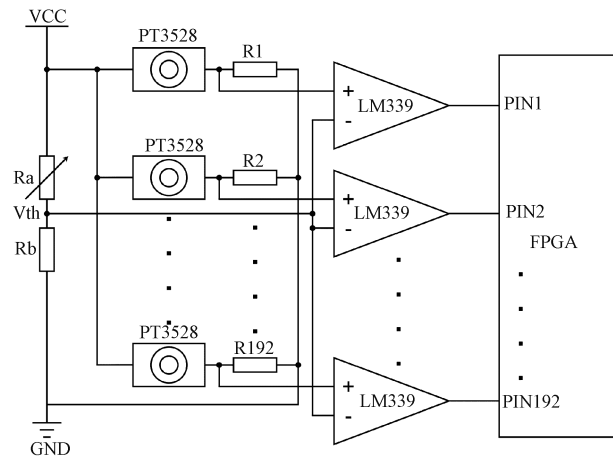


图 8 光电传感器阵列电路原理图

Fig. 8 Schematic diagram of the photoelectric sensor array circuit

为了避免环境中的自然光对光电传感器影响造成误触发,将外壳设计为不透明且带狭缝的形状,并且在狭缝处用红光 650 nm 带通滤光片进一步过滤环境中的杂光进入,使得测量系统所使用的激光器发射的 650 nm 红激光成为感光的目标光谱波段,外壳的 3D 模型以及其内部部分电路板 PCB 模型如图 9 所示。

2.3 数据传输系统设计

系统整体的数据传输过程是:先通过 LoRa 进行较短距离的点对点无线透传,将数据从光电传感器阵列传输到 5G 工业路由器的 RS485 串口,再通过 5G 工业路由器上传到云端服务器,此数据传输过程采用了 modbusRTU 协议,协议中的 CRC-16 校验可以确保数据传输的正确性^[13]。系统的通信数据链路示意如图 10 所示。



图 9 光电传感器阵列 3D 图

Fig. 9 3D diagram of the photoelectric sensor array

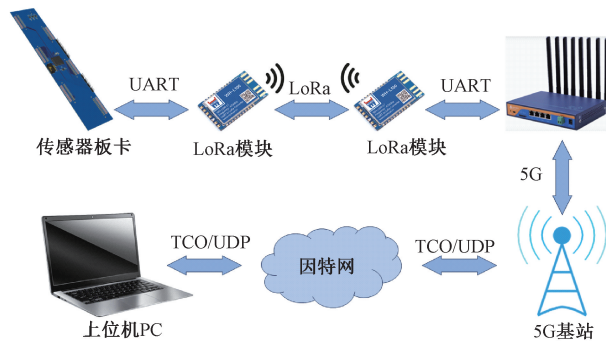


图 10 数据传输链路示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the data transmission link

3 实验及应用

3.1 水平激光校准实验

目前测量行业中,常使用准直激光来进行机械定位测量,本文所设计的水平激光源所发射出激光束的水平度直接影响测量精度,因此对悬吊结构下的大功率激光器进行校准是必要步骤^[14]。建筑行业中使用的高精度激光水平仪,其水平角精度可以达到小数点后 3 位的度数,即 80 m 处高度仅偏差毫米量级^[15],因此可使用其作为基准对本文所设计的激光器水平度进行校准。将激光水平仪和本文所设计测量系统的水平激光器同时照射在一面距离较近处(0.1 m 左右)的背景墙上,并调整水平激光器的重心固定位置使其光斑(红色点状)与激光水平仪的光斑(绿色十字)处于同一高度,如图 11 所示。

再将两者的光斑照射到较远处(80 m 左右)的背景墙上,再次观察光斑高度是否一致,若不一致则通过微调水平激光器的重心固定位置,直到较远处的光斑高度也一致,即可保证至少 80 m 范围内激光器所发出的光束是水平的,如图 12 所示。

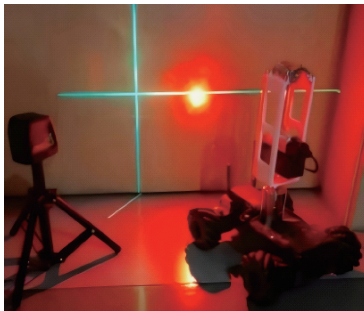


图 11 近点光源高度校准

Fig. 11 High calibration of the near-point light source

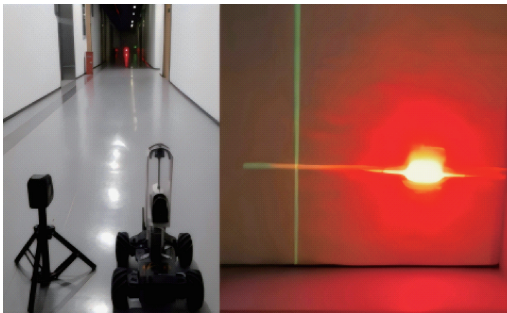


图 12 远点光束水平校准

Fig. 12 Remote beam horizontal calibration

3.2 光电传感阵列环境光影响测试

由于实际情况部分大型门式起重机的场所处于室外,起重机进行定期安全检测的工作一般也在白天进行,而本文所设计的测量系统是基于对激光器发射的强光进行感光作为测量的手段,因此必须要考虑检测现场的环境光是否会对测量产生影响^[16]。

分别在室外阴天、室外晴天以及太阳光照射方向不同的情况下进行环境光误触发实验,如图 13 所示。



图 13 环境光影响测试

Fig. 13 Environmental light impact test

实验结果表明除了晴天太阳光直射在光电传感器阵列狭缝上的情况下会导致误触发外,其余情况都不会导致误触发,这说明本文所设计地测量系统样机能够对处于室内的起重机全时间段进行测量;对处于室外的起重机在阴天时也能够可靠地进行测量;如果特殊情况下需要在晴天对室外的起重机开展检测工作时,可以人为进行简单的遮光

处理(例如在光电传感器阵列上方放置遮阳板)即可避免环境光影响正常进行测量,如图 14 所示。



图 14 向光时使用遮阳板示意

Fig. 14 Illustrates the use of a sun visor to the light

3.3 起重机主梁测量实验与对比

起重机主梁智能化激光测量系统最终的实物样机分为四部分,分别是水平激光遥控小车、光电传感阵列接受发射器、工业 5G 路由器以及 PC 上位机,如图 15 所示。

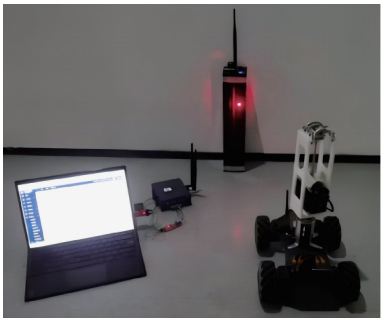


图 15 系统样机实物

Fig. 15 System prototype material object

将整套样机设备于某大型门式起重机主梁上进行测量实验,所测得的数据在云端服务器平台上可以直接进行数据查看和可视化,空载时得到的 9 个测量点的感光单元序号数据以及数据可视化后的曲线如图 16 所示。

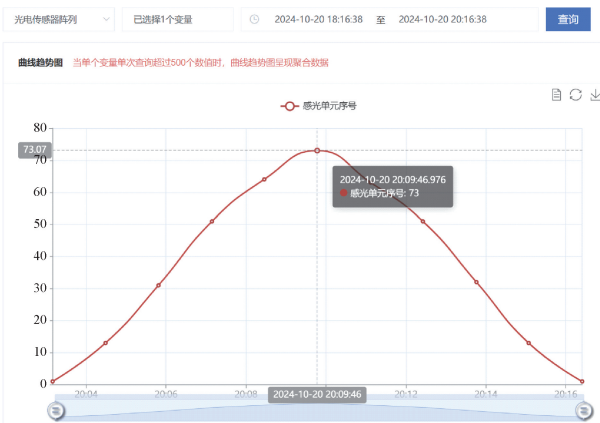


图 16 空载测量数据可视化

Fig. 16 Visualization of the no-load measurement data

载重时以同样流程进行第 2 次测量,将两次测量分别得到的 9 个测量点的感光单元序号对应相减,再乘以每个感光单元的宽度 1.6 mm 即可算出各点的下挠值,如表 1 所示,由此可以根据相应国标要求判断所检测的起重机主梁是否达标。

表 1 水平激光法测量结果

Table 1 Results of the horizontal laser measurement method

检测 点位	空载时感光 单元序号	载重时感光 单元序号	下挠值/ mm
1	22	21	1.6
2	40	38	3.2
3	55	51	6.4
4	64	54	16.0
5	72	59	20.8
6	63	52	17.6
7	55	47	12.8
8	41	39	3.2
9	20	19	1.6

为了验证本文所设计测量系统的性能,再分别采用传统的经纬仪法和进行测量并对比数据,所测得相应测试点的数据对比如表 2 所示。

表 2 测量结果对比

Table 2 Comparison of the measurement results mm

检测 点位	水平激光法测得 下挠值	经纬仪法测得 下挠值	误差
1	1.6	1.3	0.3
2	3.2	2.8	0.4
3	6.4	5.9	0.5
4	16.0	16.3	0.3
5	20.8	21.4	0.6
6	17.6	18.0	0.4
7	12.8	12.3	0.5
8	3.2	3.5	0.3
9	1.6	1.5	0.1

测量的实验结果表明,所测的 9 个测量点使用本文所设计的起重机主梁下挠值智能化激光测量系统和使用传统的经纬仪法相比误差在本次实验中均小于 0.6 mm,完全可以满足测量精度要求,而相比测量用时,在同一专业检测人员操作下,本文所设计的测量系统完成整个测量用时 10 min 左右,经纬仪法由于需要每个测量点架设经纬仪和人工读数、记录等操作,总用时 30 min 左右,比传统的经纬仪法用时减少 70%左右,且本文所设计的测量系统所测得的数据直接上传至云端数据中心,方便进行后续的处理、保

存等。另外对比例如江苏省特检院的周超等所设计的起重机实时监控系統,本文所设计的测量系统无需对特种设备本体添加安装任何器件,避免了对待检测特种设备预先安装例如应变传感器等的工作,真正实现了对任意待测设备随时抽查的效果。

4 结 论

本文总结对比了现有的起重机主梁拱度测量方法,指出了现有方法的不足,提出了利用水平激光束进行测量的智能化起重机主梁拱度测量方法并设计了测量系统,并进行了现场对比实验,测量精度与正确性经过与现有的经纬仪测量法进行对比,可认为测量结果可靠,且用时显著低于经纬仪测量法。本文所提出的测量方法和所设计的系统以其测量结果的可靠性、操作流程的高效性以及高智能化程度,显著提升了特种设备检测领域中起重机主梁检测的能力和效率,同时也为其他检测领域例如桥梁、道路、楼房等检测等提供了新的技术手段。

参考文献

[1] 李仕华,周继红,牛雪梅,等.改进模糊 PID 控制算法的起重机吊重消摆及行车定位控制系统[J].国外电子测量技术,2023,42(5):180-186.
LI SH H, ZHOU J H, NIU X M, et al. Improve the positioning control system of fuzzy PID control algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023,42(5): 180-186.

[2] 陈加军.冶金起重机主梁结构疲劳失效模式与维修加固研究[D].南京:东南大学,2021.
CHEN J J. Study on the fatigue failure mode and maintenance and reinforcement of the main beam structure of metallurgical crane [D]. Nanjing: Southeastern University, 2021.

[3] 潘明,陈钦鸿,苏和镨,等.20 t 桥式起重机桥架设计及静态刚性试验[J].机械研究与应用,2020,33(1):139-141.
PAN M, CHEN Q H, SU H K, et al. Bridge design and static rigidity test of 20 t bridge crane [J]. Mechanical Research and Applications, 2020, 33(1): 139-141.

[4] 于广超,郭昕航,李治军.桥式起重机检验中的问题探究[J].设备管理与维修,2021(20):28-29.
YU G CH, GUO X H, LI ZH J. Exploration on problems in bridge crane inspection[J]. Equipment Management and Maintenance, 2021(20): 28-29.

[5] 袁健伟,田小丹,尹浩,等.基于数字散斑技术的静刚度测量仪[J].光学与光电技术,2021,19(2):70-78.
YUAN J W, TIAN X D, YIN H, et al. Static stiffness meter based on digital speckle technology[J].

- Optical and Optoelectronic Technology, 2021,19(2): 70-78.
- [6] 周超,甘晶,蒋浩. 基于4G/5G技术的起重机在线监测系统研究[J]. 建筑机械,2024(6):79-82.
ZHOU CH, GAN J, JIANG H. Research on crane online monitoring system based on 4G/5G technology [J]. Construction Machinery, 2024(6): 79-82.
- [7] 李冬明,沈位军,袁爱东,等. 800 t 船坞龙门吊主梁的预拱设计与建造[J]. 造船技术,2021,49(2):33-36.
LI D M, SHEN W J, YUAN AI D, et al. Pre arch design and construction of main girder of 800 t dock[J]. Shipbuilding Technology, 2021,49(2): 33-36.
- [8] 王均,黄海,王炳淳,等. 大跨度钢拱架空中定测量[J]. 居舍,2020(18):89-90.
WANG J, HUANG H, WANG B CH, et al. Air fixed measurement of large-span steel arch frame[J]. Residence, 2020(18): 89-90.
- [9] 吕少炯,唐艳同,周波涛. 基于三维激光扫描的起重机械检测技术研究[J]. 起重运输机械,2024(12):21-26.
LU SH J, TANG Y T, ZHOU B T. Research on the detection technology of lifting machinery based on 3D laser scanning [J]. Lifting and Transportation Machinery, 2024(12): 21-26.
- [10] 向延辉,江世明,米灵勇. 自平衡激光水平仪的设计与实现[J]. 电子世界,2021(20):148-149.
XIANG Y H, JIANG SH M, MI L Y. Design and implementation of the self-balancing laser level instrument[J]. Electronic World, 2021(20): 148-149.
- [11] 吴培鹏,蔡文郁,唐国栋,等. 激光测距动态多阈值误差修正技术研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(7): 170-177.
WU P P, CAI W Y, TANG G D, et al. Research on the dynamic multi-threshold error correction technique for laser ranging [J]. Journal of Electronic Measurement and Instruments, 2021,35(7): 170-177.
- [12] 胡慧慧,练毅,傅鹤朋,等. 港口散货辐射量远程监测系统开发和试验研究[J]. 核电子学与探测技术,2023, 43(4):729-737.
HU H H, LIAN Y, FU H P, et al. Development and experiment of remote monitoring system of bulk radiation in ports [J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2023,43(4): 729-737.
- [13] 田甜. Modbus 通信协议中基于C语言算法的CRC快速校验方法[J]. 信息与电脑(理论版),2020,32(9):57-58.
TIAN T. Modbus CRC rapid calibration method based on C language algorithm in communication protocol [J]. Information and Computer (Theoretical Edition), 2020,32(9): 57-58.
- [14] 邱启帆,程智,高豆豆,等. 基于准直激光的跟踪合作目标小范围二维姿态测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024,45(5):188-196.
QIU Q F, CHENG ZH, GAO D D, et al. Research on small-range two-dimensional attitude measurement method for tracking cooperative targets based on collimating laser [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(5):188-196.
- [15] 杨泉杰. 声学多普勒流速剖面仪现场校准装置设计与校准方法研究[D]. 杭州:中国计量大学,2020.
YANG X J. Study on the design and calibration method of acoustic Doppler flow velocity analyzer[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2020.
- [16] 张明亮,温冠宇,范存波,等. 近红外空间碎片激光测距探测成功概率影响因素的研究[J]. 红外与激光工程, 2024,53(4):128-135.
ZHANG M L, WEN G Y, FAN C B, et al. Research on the factors influencing the successful probability of laser ranging detection in near-infrared space debris[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024,53(4): 128-135.

作者简介

贾云飞(通信作者),博士,副研究员,主要研究方向为嵌入式控制系统、基于嵌入式系统的测试系统。

E-mail:yunfei_jia@163.com

郭大慷,硕士研究生,主要研究方向为测试技术、仪器仪表工程、通信工程。

E-mail:732125158@qq.com

肖凯文,硕士研究生,主要研究方向为电子硬件系统、信号处理、FPGA 接口通信。

E-mail:kevin@njjust.edu.cn