

# 基于 PLC 控制技术的桥门式起重机挠度自动化检测

王安强

(河南省特种设备检验技术研究院 濮阳分院, 河南 濮阳 457005)

**摘要:**对桥门式起重机的挠度载荷值进行计算时,存在额定条件下检测精度过低的问题,故研究基于 PLC 控制技术的桥门式起重机挠度自动化检测方法。对应桥门式起重机运行结构,按照主梁的自身质量和小车驱动情况,获取均布载荷值和集中受力值;基于 PLC 技术构建自动化检测模型,选择 Q/E 闭环监测模式,计算电机控制过程中的变频容量,对桥门式起重机的挠度进行自动化检测。实验结果表明:在跨内挠度检测过程中本方法最大误差值为 0.10 mm;以 P4 测试点为起重机主梁中点,进行跨中挠度检测,本方法挠度检测误差可控制在 0.12 mm 范围内,说明本方法的检测精度更高。

**关键词:**桥门式起重机;自动化检测;PLC 控制技术;起重机挠度

**中图分类号:**TH213.5 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)02-0135-04

## Automatic Deflection Detection of Bridge Gantry Crane Based on PLC Control Technology

WANG Anqiang

(Puyang Branch, Henan Special Equipment Inspection Technology Research Institute, Puyang 457005, China)

**Abstract:** With regards to the low detection accuracy under the rated condition in calculating the deflection load value of bridge gantry crane, study on the automatic detection method of bridge gantry crane deflection based on PLC control technology is proposed. According to the dead weight of the main beam and the driving condition of the trolley, the uniform load value and the concentrated force value of the bridge gantry crane are obtained. Based on PLC technology, the automatic detection model is built, Q/E closed-loop monitoring mode is selected, the frequency conversion capacity in the motor control process is calculated, and the deflection of the bridge gantry crane is automatically detected. The experimental results show that the maximum error of the proposed method is 0.10 mm in the process of intra-transverse deflection detection. Test point P4 taken as the midpoint of the main girder of the crane, mid-span deflection detection is performed, with the error being controlled within 0.12 mm, which indicates that the proposed method has higher detection accuracy.

**Keywords:** bridge gantry crane; automatic detection; PLC control technology; crane deflection

## 0 引言

起重机是用来搬运重物或在短距离内水平起重的设备,其中桥式起重机的机载质量较小,适用范围较广<sup>[1]</sup>。桥式起重机运行中挠度为主要检测指标,将其作为检测标准,能够在一定程度上分析起重机的位移状况并及时调整起重机工作状态。而起重机每天要进行上千次的操作,其内在的绕线式电机主要依靠控制元件来完成电机转子的串联和切换,因此产生的故障频次较高<sup>[2]</sup>。

随着起重机技术的不断发展,传统的控制技术已经不能满足起重机的生产效率,需要利用现代控制技术对传统方式进行改造。张俊中等<sup>[3]</sup>以全站仪为基础研究桥梁挠度检测方法。应用全站仪和精密水准仪在相同条件下对桥梁挠度进行测量,该方法在坡度及跨度较大时有较好的应用效果,但该方法仍难以满足挠度检测的精度要求。

董明晓等<sup>[4]</sup>以 ANSYS 为基础研究平头塔式起重机起重臂挠度分析方法,应用 ANSYS 软件建立有限元模型并对整机结构进行分析,得到起重臂挠度与整机结构应力分布规律,并将分析数据与实验数据对比。该方法在挠度数值上与实验结果基本保持一致,但精度方面仍有提升空间。

本文基于 PLC 控制技术研究桥门式起重机的挠度自动检测方法,为其协调控制提供理论支持。

## 1 载荷分布情况对应桥门式起重机挠度

起重机主梁的主要参数包含主梁高度和腹板高度以及主梁长度,以集中力结构对主梁结构进行简化,对其挠度进行计算。主梁自身质量会引起挠度变化,桥式起重机主梁为钢结构,因此自身质量会以均布载荷分布在梁的上端面<sup>[5]</sup>。分析载荷分布情况如图 1 所示。

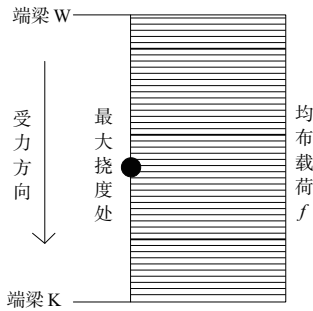


图1 均布载荷挠度

图1中主梁受到的均布载荷为 $f$ ,主梁两端的位置点分别为W和K,主梁长度为 $l$ ,在中间段会产生最大挠度值。其中主梁上任一点的挠度值计算方法如式(1)所示。

$$a_1 = -\frac{fd}{24Eg}(g^3 - 2gd^2 + d^3) \quad (1)$$

式中: $d$ 为起重机主梁中任意一点到端梁W的距离; $g$ 为主梁在中心轴的惯性矩; $E$ 为起重机主梁材料的弹性模量。

均布载荷时 $d = \frac{1}{2}l$ ,此时起重机主梁的挠度最大,则其最大值可表示为式(2)。

$$a_{1\max} = -\frac{5fl^4}{348Eg} \quad (2)$$

式中 $a_{1\max}$ 为起重机主梁的挠度最大值。

小车质量包含车轮质量和驱动以及减速器质量,当其无法被忽视掉时,或起重机搬动不同物体时,通过载荷引起的主梁挠度,需要按照集中力的作用方式进行计算<sup>[6]</sup>,如图2所示。

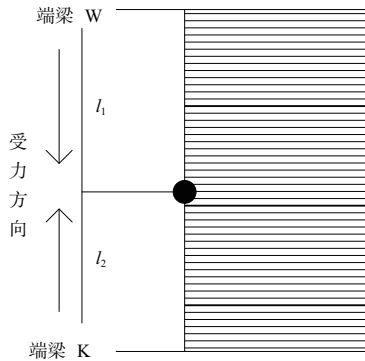


图2 集中力载荷挠度

图2中,集中力点到W点的距离为 $l_1$ ,到K点的距离为 $l_2$ ,集中力的位置与 $l_2$ 有关,则集中力载荷挠度方程如式(3)所示。

$$a_2 = -\frac{j l_2 d}{6Egl}(g^2 - d^2 - l_2^2) \quad (3)$$

式中 $j$ 为主梁受到的集中力,包含了小车质量和载荷质量,其中 $0 \leq l_2 \leq l_1$ 。

当 $d = \sqrt{\frac{l^2 - l_2^2}{3}}$ 时,集中力载荷的挠度值最大,计算公式如式(4)所示。

$$a_{2\max} = -\frac{j l_2 (l^2 - l_2^2)^{\frac{3}{2}}}{9\sqrt{3}Egl} \quad (4)$$

式中 $a_{2\max}$ 为此时产生的挠度最大值。

对主梁中点挠度的累积值进行计算,即当 $d = \frac{1}{2}l$ 时,主梁中点挠度累积值的计算公式为式(5)、式(6):

$$a = a_{1\max} + a_{2\max} \quad (5)$$

$$a = -\frac{5fl^4}{348Eg} - \frac{j l_2 (3l^2 - 4l_2^2)}{48Eg} \quad (6)$$

式中 $a$ 为主梁中点挠度累积值。

以此对主梁挠度和集中力进行关系求解,如式(7)所示。

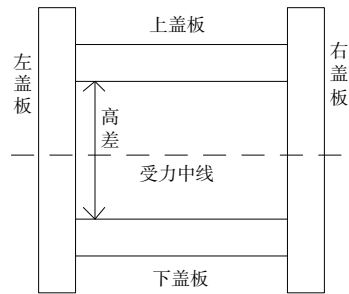
$$j = -\frac{48Eg(a + \frac{5fl^4}{348Eg})}{l_2(3l^2 - 4l_2^2)} \quad (7)$$

在主梁材料结构确定的基础上,此时主梁中的长度、弹性模量、惯性矩和均布载荷均为确定值,可知主梁挠度和主梁集中力大小有关,还和集中力位置有关。

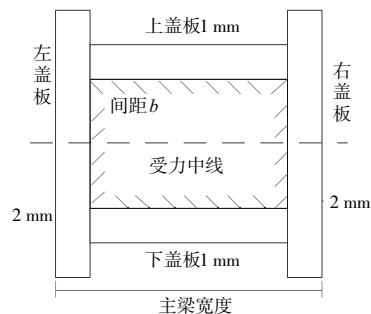
## 2 基于 PLC 技术构建自动化检测模型

起重机不同结构中的负载均属于恒转矩负载,以此将 PLC 控制技术应用在变频器内,构建自动化检测模型。分别通过 Q/E 开环监测、Q/E 闭环监测、开环矢量监测、闭环矢量监测 4 种方式,建立自动化检测模块。

根据上文对应的起重机主梁结构,分析在 PLC 控制技术下,电机的变频容量变化形式,将其按照有加强主筋和无加强主筋进行截面示意<sup>[7]</sup>,具体如图3所示。



(a) 无加强主筋主梁结构



(b) 加强主筋主梁结构

图3 主梁截面示意图

由图3,主梁在有加强筋时,产生的间距为 $b$ mm。上

下盖板的厚度为 1 mm,左右盖板的厚度为 2 mm。

将 PLC 技术控制分为两个阶段,当其负载相对较小时,可以产生阻力性的负载<sup>[8]</sup>。因此选择 Q/E 闭环监测进行控制,能够将 PLC 控制技术同时应用在多个电机中,进行电动机驱动的机构控制,其变频容量计算公式如式(8)所示。

$$\begin{cases} z_{xc} \geq \frac{v_1 v_2 z_b}{\alpha \cos \phi} \\ m_{xc} \geq v_1 v_c m_c \end{cases} \quad (8)$$

式中: $z_{xc}$ 为模型中额定容量,kVA; $z_b$ 为负载要求下单台电动机的输出功率,kW; $m_{xc}$ 为额定电流,A<sup>[9]</sup>; $m_c$ 为电动机的电流,A; $\cos \phi$ 为功率因数; $\alpha$ 为电机效率,通常设定为 0.85; $n_c$ 为额定电压,V; $v_1$ 为电流的波形修正系数; $v_2$ 为容量补偿系数。

以变频容量为基础,设计 PLC 控制技术的工作原理,将对起重机的挠度数据采集过程进行分裂,按照输入和整合以及输出的阶段进行分类,如图 4 所示。

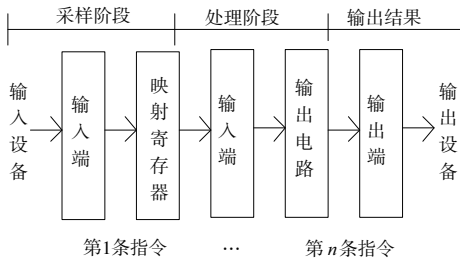


图 4 基于 PLC 控制技术的工作原理

图 4 中当 PLC 进行工作时,会对起重机一直重复描述,分为 3 个阶段,形成一个循环周期。当全部的挠度数据输出后,能够进行数据分析,为后续自动化监测提供理论基础。

而当桥门式起重机的大小车机构,在较大惯量负载情况下,计算容量公式如式(9)所示<sup>[10]</sup>。

$$\begin{cases} z_{xc} \geq \frac{vcz_b}{\alpha \cos \phi} \\ m_{xc} \geq cm_c \end{cases} \quad (9)$$

式中:此时电动机的效率  $\alpha$  仍为 0.85; $v$  为电流波形修正系数,取值为 1.05~1.10; $z_b$  为输出功率; $c$  为同时工作的电机数量。当起重机进行工作时,必须满足式(7)、式(8)的要求。

将全部监测到的负载数据,封存在电路中进行起重机状态刷新,以此对输出电路的外部设备进行控制,自动检测起重机挠度变化情况。至此完成基于 PLC 控制技术的检测方法设计。

### 3 实验测试分析

本文在对应起重机结构基础上,引入 PLC 控制技术,设计了挠度自动化检测方法。为验证其有效性,采用对比

测试法进行论证。选择文献[3]中的基于全站仪的桥梁挠度检测方法、文献[4]中的基于 ANSYS 的平头塔式起重机起重臂挠度分析方法进行对照,比较不同检测方法下起重机的挠度值测试精准度。

#### 3.1 获取起重机位移挠度值

选择某林场使用的桥门式起重机,其内置电阻型号分为 WEY-50 和 WEY-100 的两种类型。按照起重机的运行轨迹,在重物升降过程中设置 7 组测试点。采用应变式位移传感器测量不同点位的挠度值,其分辨能力可达到 0.03 mm,实测数据如表 1 所示。

表 1 主梁各点实测挠度值 单位:mm

测试点	载荷力逐级增加变化值/t				
	6	12	18	24	30
P1	0	0	0	0	0
P2	0.45	1.50	2.50	4.50	6.00
P3	0.80	3.00	5.00	6.50	10.50
P4	1.20	5.50	8.00	12.00	16.20
P5	0.75	3.50	4.00	6.00	10.00
P6	0.30	1.50	2.50	4.00	8.50
P7	0	0	0	0	0

表 1 中测试点 P1 和 P7 为起重机运行的起点和终点,因此在不同荷载力变化情况下,其挠度值均为 0。而在起点和终点之间的测试点位中,随着运行轨迹的变化和载荷的增加,起重机的挠度值会逐渐增大。

结合起重机挠度检验的测量值计算理论,其本质为主梁在受到载荷时,对处于载荷处的位移量在挠度值测试数据统计中,均取其绝对值。将上述数据导入 MATLAB 测试平台中,分别对主梁的跨内挠度值和跨中挠度值进行检测。

#### 3.2 比较主梁跨内挠度检测结果

此次选择的起重机挠度值实测数据,是在载荷力逐渐加载的基础上,获取不同点位的位移变化情况,将其作为各测试点的挠度值。分别将 3 组检测方法连接到测试平台中,按照载荷力为 12t 和 18t 以及 24t 的情况进行检查,结果见图 5。

由图 5 可知,在不同载荷力变化状态下,起重机的挠度值会逐渐增大,不同检测方法获取的数据结果也产生差异。本文方法应用过程中,基本与实测的挠度值保持一致,测量曲线变化与实际挠度变化在同一范围内,最大误差为 0.10 mm。两组方法对比下,仅在载荷力为 12t 时的挠度检测值能够与实际样本数据相接近。但随着载荷力的逐渐增加,测量精度越来越低,难以和实际挠度变化保持在同一范围内,最大误差值均超过了 1.00 mm。综上所述表明本文方法在起重机的整体运行过程中,能够精准地检测到各点的挠度值,提高了检测精度,具有应用效果。

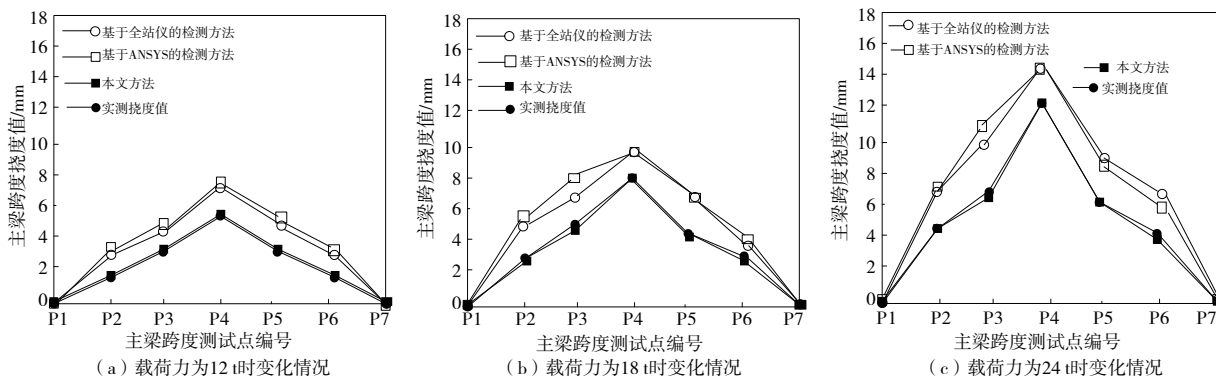


图 5 跨内挠度检测结果

### 3.3 对比主梁跨中挠度检测结果

为进一步确定检测方法的精度,以布置的测试点 P4 为主梁跨度中点,在不同载荷力下检测其挠度变化值,描述具体结果如图 6 所示。

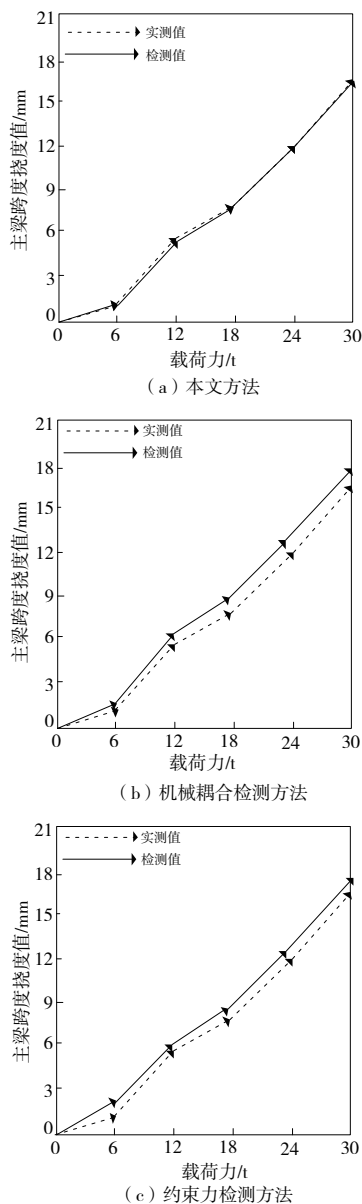


图 6 跨中挠度检测结果

由图 6 可知,本文方法检测结果与实际值基本一致,并没有因为直接对某一点检测而发生偏差。当载荷逐渐增加时,初始状态存在少许误差,可控制在 0.12 mm 以内。而对比方法在直接选择单一点检测时,其误差值变化幅度有所增加,以载荷力为 30t 时的检测值为例,对测试点 P4 的挠度检测误差,分别达到了 1.22 mm 和 1.46 mm,说明本文方法的检测效果更好。

## 4 结语

本文为提升起重机挠度检测精度问题,采用 PLC 控制技术,实现桥门式起重机挠度自动化检测方法的设计。经过实验测试可知,PLC 控制技术能够可靠且精准地完成挠度检测。此次仅以桥门式起重机类型进行研究,并未推广到其他类型起重机的检测,尚有一定不足。后续会进一步探索不同产品类型的起重机,对多种性能和材质的起重机进行挠度检测方法设计,为自动判别起重机挠度提供理论支持。

### 参考文献:

- [1] 赵小霞,李虹飞. 基于 PLC 控制技术的韭菜收割机调速系统的研究[J]. 农机化研究,2021,43(9):88-92.
- [2] 陆萍蓝,邵力行,张火明,等. 基于慧鱼技术和 PLC 控制的餐盘分拣系统设计[J]. 包装工程,2020,41(13):210-215.
- [3] 张俊中,朱义朝,刘乾,等. 基于全站仪在桥梁挠度检测中的应用和研究[J]. 测绘与空间地理信息,2019,42(1):41-44.
- [4] 董明晓,梁立为,冯润辉,等. 基于 ANSYS 的平头塔式起重机起重臂挠度与静应力分析[J]. 中国工程机械学报,2020,18(6):471-474.
- [5] 刘岩松,王宗彦,石瑞敏,等. 基于高斯伪谱法的双摆桥式起重机消摆策略分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(1):189-195.
- [6] 刘昊,周成,于存贵. 随车起重机伸缩臂截面多目标优化[J]. 机械设计与研究,2020,36(1):173-176.
- [7] 杜大喜,胡庆斌,王军. 超高温气体调节阀热流固耦合数值分析[J]. 流体机械,2021,49(11):62-68.
- [8] 路永婕,张俊宁,李皓玉,等. 基于非均匀接触的轮胎-道路系统耦合动力学研究[J]. 机械工程学报,2021,57(12):87-98.
- [9] 杨佳云,么一诺,于鲲,等. 目标检测中语义约束检查算法的研究与实现[J]. 计算机工程与应用,2022,58(7):237-242.
- [10] 唐建林,雷呈喜. 基于 COPRA 的高强度管材弯曲成形误差自动化检测系统[J]. 电子设计工程,2022,30(1):66-70.

收稿日期:2022-06-23