

# 基于数字滤波的桥式起重机钢丝绳张力测量研究

李胜永, 张智华, 胡怀毅

(南通航运职业技术学院 交通工程系, 江苏 南通 226010)

**摘要:** 桥式起重机工作在大载荷, 大冲击场合, 钢丝绳张力传感器测量吊重载荷瞬时冲击效应明显, 吊重载荷测量波动大, 给控制系统、故障诊断、安全作业提示带来了过多干扰数据。通过分析当前旁压式传感器的测量原理, 将其应用到容积卡尔曼数字滤波中, 实现了过滤冲击效应带来的瞬时波峰, 提升了桥式起重机控制系统的安全性。

**关键词:** 桥式起重机; 钢丝绳; 传感器; 数字滤波

中图分类号: TH215

文献标识码: A

文章编号: 1671-9891(2018)01-0046-04

## 0 引言

桥式起重机起升载荷是起重机控制系统、驱动系统和安全系统运行的关键参数。为了充分发挥起重机的吊重能力, 同时防止超过允许载荷而产生的机械损伤甚至断裂等严重后果, 就必须实时监测起重机载荷情况。当前, 起重机载荷监测传感器类型主要有三种: 端拉式、轴压式和旁压式。<sup>[1-2]</sup> 桥式起重机工作在大载荷、大冲击的现场, 端压式和轴压式传感器由于和钢丝绳固定端直接接触, 瞬时冲击效应明显, 吊重载荷测量波动很大, 出现“冲击超载”现象比较频繁。<sup>[3]</sup> 旁压式传感器采用钢丝绳折线夹角的形式测量轴向压力分量间接测量, 而且可以对单股钢丝绳直接测量, 拓展了应用范围, 因此得到了广泛的应用。但是在控制系统中需要将钢丝绳的测量数值按照钢丝绳缠绕方式还原载荷重量, 所谓的“冲击超载”现象在还原数据倍增的情况下更加明显。目前, 对于这种“冲击超载”现象的处理方式是在控制系统 PLC 程序中将所有检测超载的数据进行记录, 并对每个超载数据进行中断计时检测, 对比当前脉冲和前后脉冲的幅度及持续时间关系, 进而来区分“冲击超载”和实际超载。

上述处理问题的方法可以在现实使用过程中防止因“冲击超载”带来的起重机停机现象, 保证了工作的持续性。其缺点主要包括三个方面。第一, 作为操作员司机看到的是实时载荷重量数据, 经常性的“冲击超载”使得操作员司机“见怪不怪”, 降低了人为过滤重大故障的概率。第二, 每次超载数据进行中断记录, 以供对起重机进行安全评估分析, 此记录过程中包含了众多的“冲击超载”, 降低了起重机安全评估的质量, 埋下安全隐患。第三, 由于在判断两种超载的过程中需要进行持续时间关系比较, 因此占用了 PLC 宝贵的扫描周期和中断资源, 降低了系统的稳定性。

## 1 旁压式传感器测力分析

桥式起重机钢丝绳张力传感器的结构原理如图 1 所示。测量方法是根据“三点弯曲法”测力原理, 钢丝绳手里分析如图 2 所示。<sup>[4]</sup>

根据材料力学理论, 钢丝绳弯曲时挠曲线方程如式(1)所示。<sup>[5]</sup>

$$4(\sqrt{T})^3\delta - Pl\sqrt{T} + 3P\sqrt{E_s l_s} = 0 \quad (1)$$

式中:  $T$  为钢丝绳的张力,  $\delta$  为受压位移, 即挠度,  $l$  为支点标距,  $P$  为旁侧压力,  $E_s l_s$  为钢丝绳抗弯刚度。

收稿日期: 2017-11-24

基金项目: 2017 年大学生实践创新项目(201712703009Y); 2016 年南通航运职业技术学院科技课题(HYKJ/2016QN03); 2016 年江苏省高校自然科学基金面上项目(16KJD580002)。

作者简介: 李胜永(1981—), 男, 河南濮阳人, 南通航运职业技术学院交通工程系副教授, 硕士。

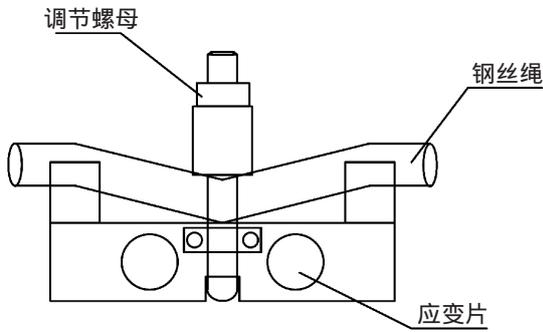


图 1 张力传感器结构原理图

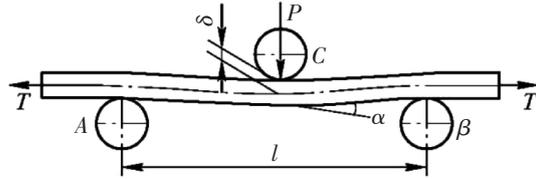


图 2 钢丝绳受力分析

根据文献[4]静张力分析,可以计算得到钢丝绳吊重载荷静止不动时的静张力,如式(2)所示。

$$T = \frac{P_1 P_2 l}{4(P_2 - P_1)\delta} \tag{2}$$

式中  $l$  为支点标距,  $P_1$ 、 $P_2$  分别为标距为  $2l$  和  $l$  时测得的钢丝绳旁侧压力,  $\delta$  为受压位移,即挠度。

同时,同一台张力传感器对同一位置进行静态测量获得静态测量值假定为  $P_0$ 、 $\delta_0$ 、 $T_0$ ,然后在载荷移动过程中测得的钢丝绳的张力为动态测量,设动态信号为  $P$ 、 $\delta$ 、 $T$ ,通过人工调整可使得  $\delta = \delta_0$ ,对式(1)和式(2)微分可得钢丝绳动张力,如式(3)所示。

$$T = T_0 + \frac{8\delta_0 T_0^2 \Delta P}{12P_0 \delta_0 T_0 - P_0^2 l} \tag{3}$$

式中  $T$ 、 $T_0$  为钢丝绳动、静张力,  $P$ 、 $P_0$  为动态、静态测量压力,  $\Delta P = P - P_0$  为压力信号增量。

在桥式起重机人机界面显示系统中显示的是吊重的质量,在控制系统程序中也是用质量作为运算单位,拉力和质量之间的关系如图 3 所示。

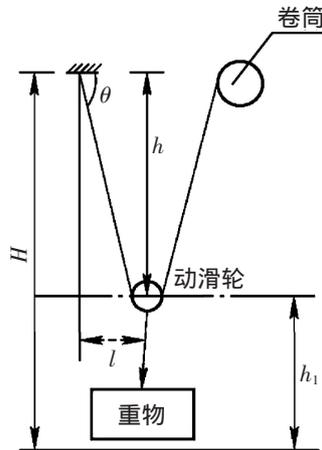


图 3 动滑轮的吊钩起升几何关系图

设动滑轮直径为  $r$ ,则由图 3 几何关系可得  $\sin\theta$ ,如式(4)所示。

$$\sin\theta = \frac{h}{\sqrt{h^2 + (1-r)^2}} = \frac{H-h_1}{\sqrt{(H-h)^2 + (1-r)^2}} \tag{4}$$

由于起重机应用中两侧钢丝绳的张力作用于动滑轮,可以认为两侧钢丝绳张力相同,假设在起升加速或减速过程中,获得的加速度为  $a$ ,其关系式如式(5)所示。

$$2T\sin\theta - G = ma \tag{5}$$

带入  $\sin\theta$  后得到式(6)。

$$T = \frac{m(g+a)}{2\sin\theta} = \frac{m(g+a)\sqrt{(H-h)^2 + (1-r)^2}}{2(H-h_1)} \tag{6}$$

桥式起重机中最为普遍的是采用八绳吊重系统,如图 4 所示即为多动滑轮提升示意图。根据几何关系和上述分析可得式(7)。

$$m = \frac{2NT(H-h_1)}{(g+a)\sqrt{(H-h)^2+(1-r)^2}} \quad (7)$$

式中  $N$  为动滑轮个数。由此可以得到吊重质量,从式(7)可知,关键参数是动张力和提升加速度  $a$ 。

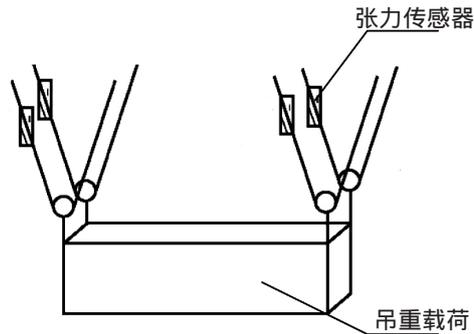


图 4 多动滑轮提升示意图

## 2 容积卡尔曼数字滤波算法对动态张力的处理方法

研究对象是钢丝绳张力,目的是引入容积卡尔曼数字滤波算法和自动区别钢丝绳冲击载荷和真实载荷。先假定系统处于稳定和恒速状态,此时钢丝绳张力是吊重载荷,把冲击载荷的偏差看成高斯白噪音,这些偏差跟前后时间是没有关系的而且符合高斯分配。<sup>[6-7]</sup>钢丝绳张力传感器和加速度传感器分别时刻测量钢丝绳动态张力和瞬时加速度。考虑一个没有加速度和干扰量情况下的钢丝绳张力,在前面分析过程中当  $a=0$ ,是张力传感器测得的  $T_0$ 。系统受到冲击作用,每隔  $\Delta t$  采集一次张力传感器动态张力数值,由此作为初始状态推导出卡尔曼滤波器。

张力传感器最初状态可以用张力和加速度线性空间描述,如式(8)所示。

$$x_k = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中  $x$  表示张力,  $\dot{x}$  表示张力对质量的微分,即加速度。

假设在时间间隔  $k-1$  和  $k$  之间,小车收到一个恒定的冲击  $a_k$ ,  $\mu_k$  服从方差为固定卡尔曼间隔  $\delta$  的正态分布。根据容积卡尔曼动力学方程可得式(9)。

$$x_k = Fx_{k-1} + Ga_k \quad (9)$$

在每一时刻,获取到真实测量张力值,假设噪音干扰测量,并服从值为 0,标准差为  $\delta$  的正态分布,得到观测方程。

将上述初始条件和观测方程考虑在内获取滤波增益方程,如式(10)所示。可以此滤波增益方程作为系统变量的区分方程。

$$H(t+\Delta t) = \hat{P}(t+\Delta t/t)C^T(t+\Delta t) \left[ C(t+\Delta t)\hat{P}(t+\Delta t/t)C^T(t+\Delta t) + \frac{R(t)}{\Delta t} \right]^{-1} \quad (10)$$

## 3 试验结果及分析

试验中,将容积卡尔曼算法进行 C 语言编程,用单片机 STC12C5A60S2 进行处理,并利用串口将张力传感器数据传输到上位机,并记录在 excel 文件中。上位机采样频率为 500 Hz,状态变量  $x_i$  初值为  $(0, 0)^T$ ,误差协方差矩阵的初值为  $100I_{100 \times 100}$ ,差分区间为 1。试验模型的初值阶段为静止启动悬浮阶段。在同等条件下分别得到容积卡尔曼数字滤波曲线和直接传感器测量曲线。

数字滤波器试验输出结果如图 5 所示。吊重重 6 t,在不同的加速度下给予干扰,从图 5 可以看出,数字滤波输出数字对比传感器实时值输出得到了很大改善。

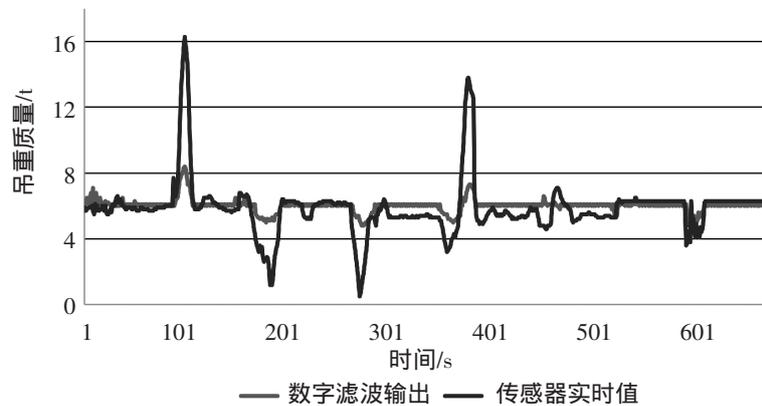


图 5 数字滤波器试验输出结果

#### 4 结束语

结合目前大规模使用的旁压式传感器结构,利用容积卡尔曼数字滤波算法对测量数据进行处理,主动分辨“冲击超载”和实际超载的数据,节约控制系统资源,并将这种运算设备及算法集成在钢丝绳旁压传感器中,使得输出信号过滤冲击超载数据,在保证传感器的使用范围同时提升数据准确度。

#### 参考文献:

- [1]谈兵,高红兵.港口起重机钢丝绳状态监测仪的研制[J].华中理工大学学报,1994,(7):28-31.
- [2]陈先中,魏任之.多绳摩擦提升机钢丝绳张力在线监测传感器[J].工程科学学报,1998,(5):434-437.
- [3]姚文斌,刘北辰.起重机提升钢丝绳张力测力传感器的研究[J].工业仪表与自动化装置,2001,(3):16-18.
- [4]贾尚雨,谢小鹏,梁广焯.起重机钢丝绳的动力学建模与仿真[J].煤矿机械,2010,(4):58-61.
- [5]李向东,原徐成.基于旁侧压力测量的起重机械称重方法研究[J].起重运输机械,2013,(10):10-13.
- [6]李胜永,季本山,张智华,等.用容积卡尔曼滤波算法进行集装箱吊具姿态估计[J].上海海事大学学报,2015,(1):56-60.
- [7]李胜永,张智华,徐勇.船舶港口监控中的多通道时延数据融合技术研究[J].舰船科学技术,2017,(20):138-140.

(责任编辑:顾力豪)

## Research on Cable Tension Measurement of Bridge Crane Based on Digital Filter

LI Sheng-yong, ZHANG Zhi-hua, HU Huai-yi

(Dept. of Transport Engineering, Nantong Vocational & Technical Shipping College, Nantong 226010, China)

**Abstract:** On the occasion of bridge crane bearing heavy workload and shock, the steel wire tension sensor indicates an obvious effect of instantaneous shock of lifting load. The fluctuation of lifting load measurement brings about overmuch interference data to the control system, fault diagnosis and safe operation tips. By analyzing the measurement principle of current bypass pressure sensor, applied to the volumetric Kalman Digital Filter, instantaneous wave crest caused by filter shock effect is realized, which improves the safety of bridge crane control system.

**Key words:** Bridge crane; Wire rope; Sensor; Digital filter