

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107074

# 基于 STM32 的拉力测量方法及误差补偿方法研究 \*

张晓琳 曾志强 党长营 贾立功

(中北大学 机械工程学院 太原 030051)

**摘要:** 架空电缆安装施工过程中,塔架物品提升使用的钢丝绳的拉力监测对施工安全性有着重要意义。由此设计了一种基于三点弯曲法原理的拉力检测装置。该装置内单片机系统将压力传感器获得的信号放大接入计算机,转化为电信号输出,以实现监测。但该方法必然存在非线性因素的干扰,通过实验标定与误差补偿,该装置误差可控制到2%以内;实际使用中环境温度引起的测量误差不可忽略,为此通过温度标定试验进行温度补偿。实际工程数据结果表明,其测量误差能够满足工程需求。

**关键词:** 单片机;拉力监测;标定;误差补偿;温度误差

**中图分类号:** TP23    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 460.4030

## Tensile measurement method and error compensation method based on STM32

Zhang Xiaolin Zeng Zhiqiang Dang Changying Jia Ligong

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In the process of overhead cable installation and construction, the tension monitoring of steel wire rope used for tower lifting is of great significance to construction safety. Therefore, a tension detection device based on the principle of three-point bending method is designed. The single chip microcomputer system in the device amplifies the signal obtained by the pressure sensor into the computer and converts it into electrical signal output to realize monitoring. However, there must be the interference of nonlinear factors in this method. Through experimental calibration and error compensation, the error of the device can be controlled within 2%. In practice, it is found that the measurement error caused by ambient temperature can not be ignored. Therefore, temperature compensation is carried out through temperature calibration test. The results of practical engineering data show that the measurement error can meet the engineering needs.

**Keywords:** single chip microcomputer; tension monitoring; calibration; error compensation; temperature error

### 0 引言

在输电线安装施工过程中,铁塔物品的吊装通常采用钢丝绳进行提升拽引,具有较高的抗拉强度和弯曲灵活性<sup>[1]</sup>,经济费用低,便于布置施工现场,极大地减小了劳动强度<sup>[2]</sup>。从对架设高压输电线的安全可靠性的重视程度来看,拉力在线实时监测系统研究十分必要。凭借经验监测存在极大的安全隐患。处理钢丝绳张力动态检测的问题,常用的方法有基于阻尼传感器的检测方法、基于声学滤波传感器的检测方法等。文献[3]提出采用粒子阻尼传感器可有效消除钢丝绳振动对张力测量的影响,达到精确的测量效果,但该方法成本极高。文献[4]提出采用内部设有油

腔和穿孔板结构的声学滤波传感器进行测量,该方法输出信号平稳,但运行一段时间后会因平衡油缸某根活塞杆伸出或缩回至极限位置的情形,测量数据与实际拉力之间会出现较大偏差。本文设计的实时监测系统采用压力传感器进行测量,成本低,且调整方便,有效避免了因钢丝绳疲劳断裂造成的安全隐患,也解决了成本方面的问题,节省了大量人力物力,在工程安全健康方面具有重要意义。

基于企业使用的实际需求,本文设计研发了一套钢丝绳拉力实时监测系统,并采用控制变量法进行实验验证,最后误差补偿保证了系统的精确度。该系统依据三点弯曲法设计三滑轮机械结构,测量时装置夹持在钢丝绳上,将拉力转化为压力传感器的压力,进而转化为电信号输出,可以实

收稿日期:2021-06-25

\* 基金项目:中北大学先进制造技术山西省重点实验室开放基金项目(XJZZ201904)资助

时检测钢丝绳拉力值,当拉力值超过安全阈值时,系统会进行声光报警。设计完成后对该系统进行实验室标定与误差补偿,保证其测量精度。并在实际工作环境下做验证实验,补偿环境温度带来的误差,最终可满足实际工程需求。

## 1 检测系统设计

### 1.1 检测方法选择

对钢丝绳拉力检测系统进行设计时,装置需要满足的技术指标如下。

- 1) 具备调节机构,能够适应不同的拉力范围,有较高灵敏度。
- 2) 具备牵引线安装和拆除装置结构,方便现场操作。
- 3) 装置可控制,对牵引机构不造成太大的影响,对牵引绳不造成损伤。

钢丝绳拉力检测方法包括非接触式检测方法、接触式检测方法。非接触式检测方法利用电磁检测原理,依据钢丝绳具有捻制股波的特点<sup>[5]</sup>,对钢丝绳进行磁化,在距钢丝绳表面一定距离的两处分别安装相同的磁通检测元件<sup>[6]</sup>。但检测元件不易安装拆除且不易移动,不便测多个位置的拉力。接触式检测方法包括传感器串接方法和三点弯曲法。传感器串接方法是将测力传感器与钢丝绳直接串接,通过测力传感器及与之相匹配的二次仪表来测量拉力。该方法对传感器的强度要求较高(据《煤矿安全规程》规定,不应低于钢丝绳最大静张力的13倍),故传感器灵敏度较低。

三点弯曲法是将整个检测装置夹持在拉紧的钢丝绳上,借助横向力使被夹持钢丝绳产生一微小挠度,类似于三点弯曲的局部变形,压力传感器将测量得的压力转换为电信号,再通过信号变换和单片机系统将拉力显示出来,以此来测量拉力<sup>[7]</sup>,依据方法设计的检测装置可以移动,测量任何位置的拉力,且对传感器的强度要求较低<sup>[8]</sup>。通过比较以上测量方法,选择“三点弯曲法”作为钢丝绳拉力检测方法。

### 1.2 检测系统结构设计与实现

三点弯曲法测拉力原理如图1所示,测量过程中,将检测装置夹持在钢丝绳上,在A轮相对于B、C两轮压紧的过程中,产生位移信号 $\delta$ 及压紧力信号 $P$ ,实验及理论研究表明,钢丝绳所受拉力 $T$ 与产生位移信号 $\delta$ 及压紧力信号 $P$ 之间存在一定关系<sup>[9]</sup>,如式(1)所示。

$$T = f(P, \delta) \quad (1)$$

其中, $P$ 为钢丝绳对活动滚轮的反作用力,该力由检测装置所用的压力传感器测出。

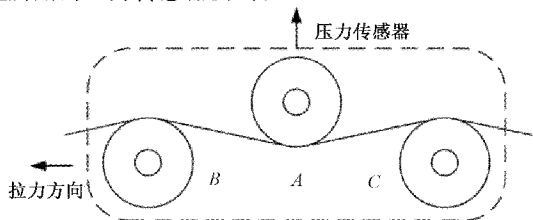


图1 三点弯曲法测拉力原理

检测装置结构由3部分构成:压力传感器、滚轮和位置调节。压力传感器具有灵敏、效率高的优点,位于端挡和活动滚轮支撑轴之间,检测二者之间的压力,传感器接收到压力信号后,输出电压信号。压力传感器通过连接套固定,其作用是将钢丝绳拉力转化为压力传感器所受压力,输出电压信号;位置调节部分由调节螺钉、活动轴、直线轴承等组成,该部分能实现活动滚轮的轴向调节和高度调节。该部分的直线轴承,既能实现活动滚轮的轴向位置调节,也能削弱作业过程中产生的扭矩,降低扭矩对装置的破坏力;滚轮部分由1个活动滚轮和2个滚动滚轮组成,固定滚轮通过固定轴与底座连接固定,用于钢丝绳的定位与支撑。利用该原理设计钢丝绳检测装置,其三维结构如图2所示。

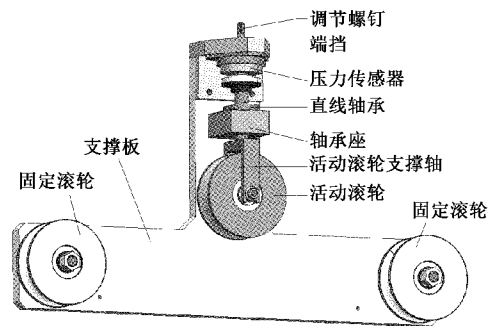


图2 钢丝绳拉力检测装置结构

2个固定滚轮和1个活动滚轮与钢丝绳被测表面接触,钢丝绳受横向力产生类似于三点弯曲的局部变形,在活动轮相对于2个固定轮压紧的过程中,产生位移信号及压紧力信号,钢丝绳拉力与产生位移信号及压紧力信号之间存在如式(1)所示的关系,利用该关系便能建立钢丝绳所受拉力数学模型,根据所建立的数学模型可以计算钢丝绳所受拉力。

### 1.3 硬件设计

单片机具有体积小、功耗低、控制功能强、扩展灵活、微型化和使用方便等优点,因此广泛应用于仪器仪表中<sup>[10]</sup>。以单片机为核心,处理检测到的拉力状况。压力传感器获得的信号通过放大,由数模转换接入计算机。单片机的型号有51单片机和STM32单片机,但51单片机不具有自编程能力,且ROM和RAM分别为2K~64K和128B~1K;外设仅有3个定时器和1个串口<sup>[11]</sup>。故选择STM32单片机,速度更快,功能更强大,外设接口众多,ROM为20K~1MB, RAM有8K~256K,满足实际工作要求<sup>[12]</sup>。通信接口选择RS485,通讯距离可达1200m,传输方式为差分信号传输,抗干扰的能力强。

RS485是隶属于OSI模型物理层的电气特性规定为2线,半双工,多点通信的标准。表示传递信号用电缆两端的电压差值,RS485仅规定了接受端和发送端的电气特性,并未规定或推荐任何数据协议<sup>[13]</sup>。

针对自动检测、自动报警、自动显示、大容量存储的功

能要求,设计了系统的硬件配置,系统的硬件配置如图3所示。

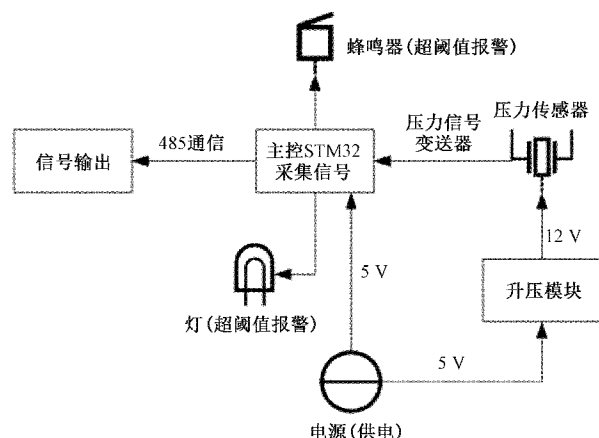


图3 系统硬件配置

## 2 标定与误差补偿

### 2.1 标定

该系统的机械结构因采取三点弯曲法原理设计,因而必然存在一定的非线性问题;且系统工作时不可避免的存在摩擦,为了保证系统的测量精度,检测装置在制造、装配完成后,需对其进行标定。通过试验建立检测装置的输出电压信号与输入拉力信号之间的关系,得到表征两者对应关系的标定曲线。并且可以消除掉非线性问题和摩擦引起的误差<sup>[14]</sup>。

试验使用的拉力机为0~40 T专用液压拉力机,钢丝绳直径为15 mm。钢丝绳与测量装置的温度大致相同且都是20℃的时候,是测量的最佳温度<sup>[15]</sup>。标定试验共完成3组试验:加载(100~5 000 kg)→卸载(5 000~0 kg)→加载(100~5 000 kg)→卸载(5 000~0 kg)→加载(100~5 000 kg)→卸载(5 000~0 kg),拉力加载过程称为正行程,卸载过程称为反行程。根据压力传感器的测量范围,测量间距大约为100 kg,正行程时拉力机拉力值由小到大增加,待显示值稳定后,记录与拉力机显示值对应的电压输出值。反行程亦然。其正反行程拉力—电压分布点线图如图4和5所示。

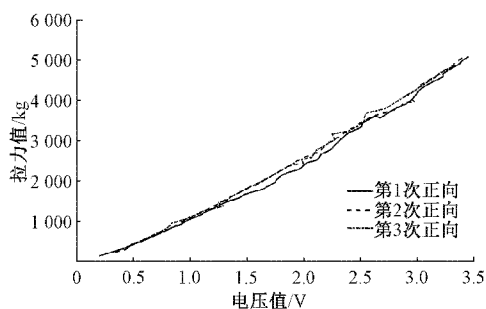


图4 正行程拉力—电压点线图

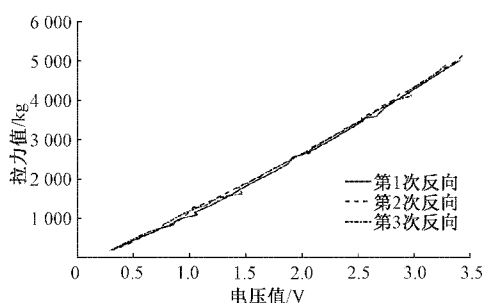


图5 反行程拉力—电压点线图

图4和5表明,正行程和反行程时,拉力都是随着电压增大而增大的,且数据接近程度高,所以可进行综合拟合。针对所有6条曲线分别拟合直线和拟合曲线,选取5条曲线进行拟合(如图4所示的第1次正向结果误差太大,故舍弃),测量数据的拟合结果如图6所示,得到拟合直线与曲线的函数表达式分别如式(2)和(3)所示。

$$y_{直} = 1\,551.25x - 390.1 \quad (2)$$

$$y_{曲} = 107.10x^2 + 1\,078.29x - 192.52 \quad (3)$$

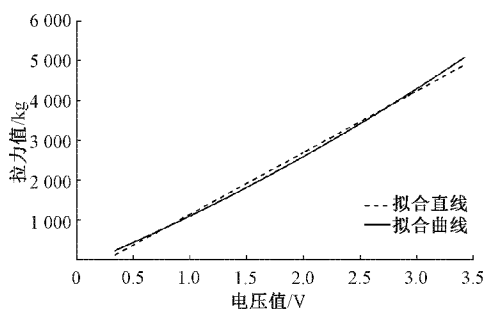


图6 测量数据拟合图

通过对拟合结果进行求解及对比,曲线拟合的精度优于直线拟合,因此采用曲线拟合的方式进行输出。将式(3)写进程序,检测装置显示值为拟合曲线的计算结果。进行一次测量实验,来验证标定后测量系统的精确度是否满足要求,实验条件与标定时保持一致。记拉力机显示值为真实值,检测装置显示的值为测量值,实验结果如图7所示,结果表明,检测装置的测量误差小于2%。

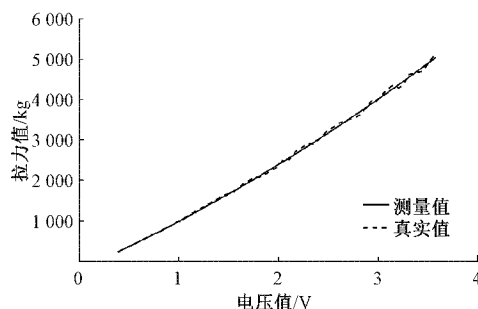


图7 实验验证测量结果

### 2.2 补偿温度变化引起的误差

由于该检测装置的使用地区为中国北方地区,为温带/

暖温带大陆性气候,施工温度一般在-20℃~35℃之间变化;使用环境为野外作业,系统热胀冷缩不可避免,特别是在温度变化剧烈的情况下,涨缩导致的误差尤为明显<sup>[16]</sup>。因此需要对该因素引起的误差进行补偿,得到不同环境温度下电压信号与拉力信号之间的函数关系。在检测装置上安装温度传感器,读取环境温度  $T$ ,采用插值法计算输出温度  $T$  下的拉力测量值。温度误差补偿流程如图 8 所示。

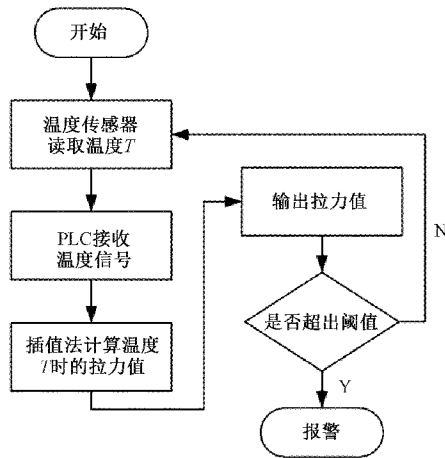


图 8 温度误差补偿流程

保持其他实验条件不变,测量时温度变化不得超过 0.5℃,将室内温度测量同现场测量结合起来,从根本上控制室内温度。每次测量前都进行恒温工作,保证钢丝绳、检测装置与室温相同。划分实验温度的间隔为 10℃。分别在如图 9 所示的 6 个环境温度下进行测量,拟合出其多项式曲线,拟合出的曲线函数公式如表 1 所示。

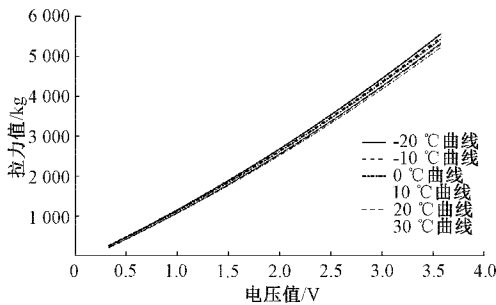


图 9 6 个温度下拟合曲线

表 1 修正后拟合曲线

温度	拟合曲线
30℃	$y_1 = 103.41x^2 + 1138.12x - 178.23$
20℃	$y_2 = 107.10x^2 + 1149.29x - 191.52$
10℃	$y_3 = 109.08x^2 + 1147.93x - 182.78$
0℃	$y_4 = 112.67x^2 + 1153.02x - 147.50$
-10℃	$y_5 = 114.13x^2 + 1165.17x - 158.80$
-20℃	$y_6 = 115.21x^2 + 1182.33x - 149.85$

### 2.3 工程实例

为了保证温度补偿后测量系统的精确度,记录了该监测系统在实际工程中的测量数据。工程环境温度为 23℃,其余条件与补偿温度误差时保持一致,记录检测装置显示的插值计算结果值与拉力机显示的真实值,结果如图 10 所示,测量系统的精度在实际使用中能满足要求。

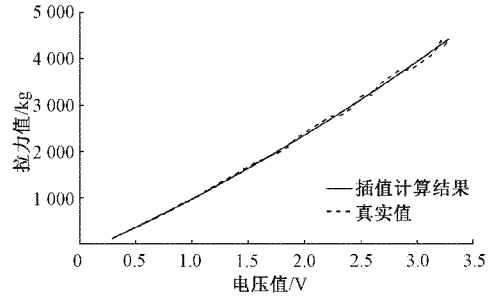


图 10 23℃下验证实验测量结果

### 3 结 论

本文针对电网施工过程中钢丝绳所受拉力过大可能导致断裂的问题,依据三点弯曲法,设计了一种钢丝绳拉力检测装置,该装置具有自动检测、自动报警、自动显示和大容量存储的功能;并对检测装置进行了标定,解决了非线性因素产生误差的问题。针对环境温度变化引起涨缩产生误差的问题,采用的多项式曲线拟合的方法,进行了补偿,能够在-20℃~30℃的温度范围内保证测量精度,测量结果更加稳定、精确。该检测装置较大程度上减少了人为因素的干扰,直接测量获得架空送电工程中塔架物品的吊装所用钢丝绳的拉力大小,测量精度较高;适用性强,结果表明,测量结果误差达到 2% 以内,满足工程实际的要求。

### 参考文献

- [1] 欧阳玉平,王天玉,孙晗,等.山地轨道运载机牵引钢丝绳空间结构分析与几何建模[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(1):184-192.
- [2] 卫建华,徐薇,刘文玥,等.低电压网监测系统设计与实现[J].国外电子测量技术,2020,39(1):118-122.
- [3] LEI G Y, XU G Y, ZHANG X G, et al. Study on dynamic monitoring of wire rope tension based on the particle damping sensor[J]. Sensors,2019,19(2):388.
- [4] 宋振越.多绳提升机钢丝绳张力动态监测方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [5] ZHANG P, DUAN M L, MA J M, et al. A precise mathematical model for geometric modeling of wire rope strands structure [J]. Applied Mathematical Modelling, 2019,76:151-171.
- [6] 常琳.基于电磁法的无损检测技术在矿用钢丝绳检测中的应用[J].煤矿机械,2020,41(1):154-156.
- [7] KULARATHNA N D, PERERA S. Design of a

- vibration sensor based train arrival detection system to prevent elephant-train accidents in sri lanka [J]. Instrumentation, 2020, 7(4): 40-47.
- [8] 陈建勋, 崔大光, 林晓明, 等. 电梯曳引钢丝绳三点弯曲法张力偏差测试精度的研究[J]. 中国特种设备安全, 2018, 34(4): 26-30, 34.
- [9] 刘雷, 张新, 郑余胜, 等. 矿井提升钢丝绳张力在线监测系统的设计[J]. 煤矿机械, 2019, 40(7): 179-181.
- [10] 杨卫东, 邓冠群, 张国平, 等. 基于STM32单片机的库房安全远程控制系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 94-98.
- [11] 魏丽君. 基于STM32的智能调速跟踪风扇设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(15): 177-181.
- [12] HUANG X N, XIE Y W, MA C J, et al. Design and application of insulator detection robot system for UHVDC transmission line[J]. International Journal of Mechanical Engineering and Applications, 2019, 7(4): 106-110.
- [13] 江贤志, 刘华章, 张教育, 等. 基于C8051F020单片机的RS485串行通信设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(3): 121-124.
- [14] 闫文吉, 陈红亮, 陈洪敏, 等. 硅压阻式压力传感器测量误差在线补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 59-65.
- [15] 臧洪涛. 温度误差对长度测量的影响分析[J]. 中国新技术新产品, 2015(13): 54.
- [16] 蔡友发, 傅星, 李飞. 数字图像相关方法的桥梁挠度仪的温度补偿[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7): 88-92.

#### 作者简介

**张晓琳**, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉与视觉机器。

E-mail: 2696939509@qq.com

**曾志强**(通信作者), 工学博士, 副教授, 主要研究方向为机器视觉与材料表面强化。

E-mail: zzhqzhy@nuc.edu.cn

**党长营**, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为无损检测、机器视觉。

E-mail: 524944732@qq.com

**贾立功**, 硕士, 主要研究方向为机器视觉与视觉机器。

E-mail: 2218995939@qq.com