

# 钢丝绳张力测量仪的校准及不确定度评定

蒋帆<sup>1,2</sup>, 康张宜<sup>1</sup>, 刘一<sup>1</sup>, 王文昌<sup>2</sup>, 李矛<sup>1</sup>, 郭彪<sup>1</sup>

(1. 上海市计量测试技术研究院, 上海 201203; 2. 上海大学, 上海 201203)

**摘要:** 钢丝绳在使用中产生的疲劳和磨损会导致其承载能力降低或丧失, 检测机构目前主要采用张力测量仪对钢丝绳的张力进行测量和监控。通过分析钢丝绳张力测量仪的基本结构和工作原理, 对张力测量仪的校准方法和计量特性进行了研究; 利用测力杠杆式试验机作为标准装置, 通过配套砝码改变标准力值, 实现了钢丝绳张力测量仪的实验室校准; 通过对钢丝绳张力测量仪示值误差的不确定度进行评定, 得到其扩展不确定度为 0.17%FS。

**关键词:** 钢丝绳; 张力测量仪; 测力杠杆式试验机; 校准; 不确定度

**中图分类号:** TB93      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-4012(2020)07-0026-04

## Calibration and Uncertainty Evaluation of Steel Wire Rope Tension Meter

JIANG Fan<sup>1,2</sup>, KANG Zhangyi<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>, WANG Wenchang<sup>2</sup>, LI Mao<sup>1</sup>, GUO Biao<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China;

2. Shanghai University, Shanghai 201203, China)

**Abstract:** The fatigue and wear of the steel wire rope led to the reduction or loss of its bearing capacity, at present, the tension of the steel wire rope was measured and monitored by testing organization through tension meter. The basic structure and working principle of the tension meter for steel wire rope were analyzed to study the calibration method and measurement characteristic of the tension meter. The lever-type force testing machine was used as the standard device, the laboratory calibration of the steel wire rope tension meter was realized by changing the standard force value with matching weights. The uncertainty of indication error of wire rope tension meter was evaluated, and the expanded uncertainty was 0.17%FS.

**Keywords:** steel wire rope; tension meter; lever-type force testing machine; calibration; uncertainty

钢丝绳是工程结构中用于承受拉力的重要构件<sup>[1]</sup>, 由于其质量轻并且具有较高的抗拉强度和韧性, 被广泛用于电梯、起重运输设备和桥梁索道结构中。工作过程中钢丝绳所受的张力是影响设备安全运行的重要因素, 一旦由于疲劳和磨损造成钢丝绳张力变化, 进而导致其承载能力降低, 将直接关系到生命和财产安全<sup>[2]</sup>。

随着检测技术的迅速发展, 钢丝绳的张力检测已由定性检测发展到定量检测, 具体可分为非接触式和接触式两种检测方式。起初, 有些学者通过使用冲击力打击钢丝绳而产生振动波估算钢丝绳的张力<sup>[3-4]</sup>, 但振动产生的主次波峰很难分辨, 影响测量

精度。另外有些特殊工程通过磁通检测元件实时监测磁通量的变化来反映钢丝绳的张力<sup>[2]</sup>, 但是此方法需预先得到或假设钢丝绳的常数, 进而推导出钢丝绳张力的变化。目前, 实际工程检测中主要采用的是接触式应变测力方法<sup>[5]</sup>, 即采用张力测量仪直接接触钢丝绳测量其张力值。为了满足工业发展的需求, 确保钢丝绳张力测量仪的量值可靠, 笔者分析了钢丝绳张力测量仪的基本结构和工作原理, 研究了设备的实验室校准和示值误差的不确定度。

### 1 钢丝绳张力测量仪的结构及原理

#### 1.1 钢丝绳张力测量仪的基本结构

钢丝绳张力测量仪的结构如图 1 所示, 设备的固定装置和钢丝绳夹与钢丝绳直接接触, 允许钢丝绳上负载测量; 夹紧手柄一般可以调节钢丝绳夹的

收稿日期: 2020-03-13

作者简介: 蒋帆 (1991—), 男, 硕士, 主要从事金属材料的力学性能检测工作, jiangfan682@163.com

张开角度,从而确保对不同型号的钢丝绳施加适合的夹紧力<sup>[5]</sup>,保证在加载过程中钢丝绳夹和钢丝绳之间不产生相对位移;固定装置内部包含一个或多个传感器,可以将微小变形转换成电信号的形式输出,用于测量钢丝绳夹顶端位置受到的支撑力。

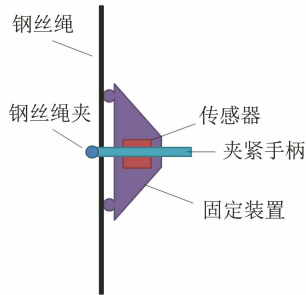


图1 钢丝绳张力测量仪结构示意图

Fig.1 Structure diagram of steel wire rope tension meter

### 1.2 传感器的工作原理

传感器一般采用应变式电阻传感器,它是利用应变效应测量微小变形的理想传感器。考虑设备所需要实现的功能与生产成本,传感器可以简化为直流电桥,工作原理如图2所示。电桥电路由电阻和电源组成,输出电压 $\Delta U$ 为<sup>[6]</sup>

$$\Delta U = U_{ab} - U_{cd} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \quad (1)$$

式中: $R_1, R_2, R_3, R_4$ 为4个电阻值; $U$ 为电源电压。

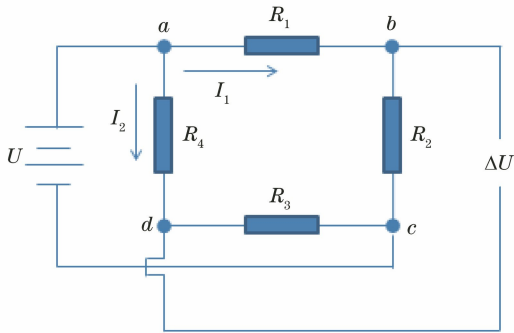


图2 传感器工作原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of sensor working principle

当 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 时,输出电压 $\Delta U = 0$ ,即电桥处于平衡状态。各电阻值相等(均为 $R$ )形成等臂电桥时,假设在 $R_1$ 的电阻桥臂上接入一个应变信号 $\Delta R$ ,则输出电压为

$$\Delta U = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} U \quad (2)$$

因为 $\Delta R \ll R$ ,所以输出电压和电阻变化率近似成线性关系,在此传感器工作原理的基础上,根据不同的精度需求,选择采用半桥或全桥结构,将电信号提供给放大电路放大后进行测量,以提高测量的灵

敏度,实现物理信号向电信号的转换。

### 1.3 张力的计算方法

弯曲法是根据钢丝绳纵横弯曲原理,将张力测量仪夹持在张紧的钢丝绳上,迫使钢丝绳局部产生类似于三点弯曲的变形<sup>[1]</sup>,如图3所示,图中 $T$ 为钢丝绳的张力, $P$ 为传感器上的横向压紧力, $l$ 为传感器的测定标距, $\alpha$ 为钢丝绳夹的张开角, $\delta$ 为传感器上的位移。

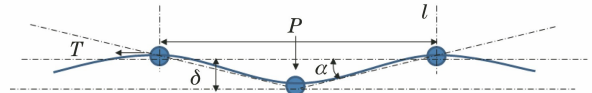


图3 钢丝绳张力测量示意图

Fig.3 Tension measurement diagram of steel wire rope

将整段钢丝绳视为受横向压紧力和轴向拉力共同作用的三跨连续梁,传感器上的钢丝绳夹与被测钢丝绳表面接触,而后向下压紧强迫钢丝绳局部产生位移信号和压紧力信号。根据材料力学理论,假设张开角 $\alpha$ 很小,可以得到钢丝绳张力的近似表达式<sup>[7]</sup>

$$T \approx \frac{Pl}{4\delta} \quad (3)$$

在实际工程中为了提高工作效率并且方便计算张力,生产厂家根据工况设计不同的夹紧手柄结构,根据传感器的性能匹配不同的钢丝绳夹张开角 $\alpha$ <sup>[8]</sup>,通过大量的试验使传感器的信号强度、力值的线性和重复性以及滑轮与钢丝绳的使用寿命等均达到最佳状态。

## 2 钢丝绳张力测量仪的校准

### 2.1 校准器的选择

为方便调整和固定校准区域的位置,保证测量数据的有效性,采用测力杠杆式试验机作为标准装置<sup>[9]</sup>,其结构如图4所示。

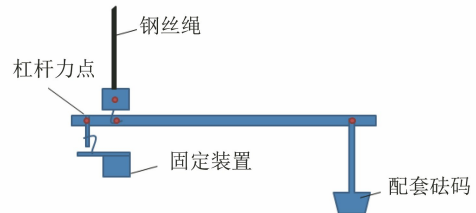


图4 测力杠杆式试验机结构示意图

Fig.4 Structure diagram of lever-type force testing machine

在标准装置上夹持钢丝绳,通过加减可溯源的配套砝码调节杠杆得到张力标准值,在该张力条件下,将被检张力测量仪加到钢丝绳上测量张力,可以

得到这一校准点处张力测量仪的测量结果,经一系列校准点的测量,经过数据处理可以得到被检张力测量仪的示值、示值误差、直线度和重复性等性能参数,实现钢丝绳张力测量仪的实验室校准。

### 2.2 钢丝绳的选择

不同批次钢丝绳间存在一定的直径偏差,这对张力测量以及校准有较大的影响。当对张力测量仪进行校准时,需选用与工程中各项性能指标一致的钢丝绳,或截取一段实际使用的钢丝绳,以减少钢丝绳结构差异对张力测量结果的影响。

钢丝绳具有一定的柔韧性,但位置固定后,越接近两端受力点的钢丝绳柔韧性越差,即中间段和两端受力点的张力不同,会导致张力测量仪受力状态发生变化。为了保证测量结果的准确性和稳定性,测量仪需与钢丝绳的两端保持一定距离,选择钢丝绳中部且表面无损伤的部位进行测量。

### 2.3 校准方法

钢丝绳张力测量仪按照 JJG 455-2000《工作测力仪检定规程》的技术要求进行校准,在测量标准装置上固定对应的标准钢丝绳,选择合适的位置安装钢丝绳张力测量仪。初始阶段张力测量仪示值指示装置应调至零点。由于钢丝绳为多股钢丝编织,不同角度钢丝绳截面的直径有细微差别<sup>[10]</sup>,如图 5 所示,因此在测量范围内至少需检测 5 个点,每一点施加的标准力值用  $F$  表示,各点大致均匀分布,5 个点施加的标准力值一般为测量范围  $F_{\max}$  的 20%, 40%, 60%, 80% 和 100%, 逐步递增标准力值,至各点保持稳定后记录相应的测量值。调整测量仪的角度,每个点重复进行 3 次测量,每次测量前指示装置均应调至零点,3 次示值的算术平均数作为测量结果  $\bar{F}$ , 张力测量仪的示值误差  $\delta$  为 (%FS 表示计算结果是以测量上限确定的示值误差)

$$\delta(\%FS) = \frac{\bar{F} - F}{F_{\max}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $\bar{F}$  为张力测量仪的算术平均值;  $F$  为每一点施加的标准力值;  $F_{\max}$  为张力测量仪的测量上限。

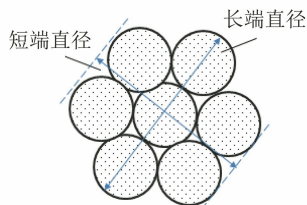


图 5 钢丝绳截面示意图

Fig.5 Section diagram of steel wire rope

## 3 钢丝绳张力测量仪示值误差的不确定度评定实例

根据钢丝绳张力测量仪的计量特性,为了简化计算过程,可以首先计算示值的不确定度<sup>[11]</sup>,然后通过量程示值误差的不确定度,得到钢丝绳张力测量仪示值误差的不确定度。

### 3.1 数学模型

不确定度的数学模型为

$$\Delta F = \bar{F} - F \quad (5)$$

式中:  $\Delta F$  为钢丝绳张力测量仪的示值误差。

### 3.2 标准不确定度的评定

标准不确定度来源主要为测力杠杆式试验机的不确定度  $u_1$  以及重复测量引起的不确定度  $u_2$  两个部分。

测力杠杆式试验机的准确度等级为 0.1 级<sup>[9]</sup>, 使用 B 类方法,服从均匀分布,可得不确定度为

$$u_1 = \frac{5\,000 \times 0.1\%}{\sqrt{3}} = 2.9 \text{ N} \quad (6)$$

示值重复性引起的不确定度  $u_2$  的测量结果的算术平均值和试验标准差如表 1 所示。

表 1 不确定度  $u_2$  测量结果的平均值和试验标准差

Tab.1 Average value and experiment standard deviation of measurement results of uncertainty  $u_2$  N

测量次数	各标准力值下的测量力值				
	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000
1	1 018	2 021	3 035	4 038	5 053
2	1 013	2 024	3 039	4 043	5 054
3	1 021	2 014	3 042	4 042	5 046
4	1 015	2 020	3 030	4 045	5 061
5	1 011	2 021	3 035	4 053	5 042
6	1 010	2 029	3 033	4 041	5 058
7	1 008	2 011	3 025	4 047	5 053
8	1 012	2 018	3 031	4 052	5 052
9	1 004	2 022	3 032	4 044	5 049
10	1 011	2 024	3 032	4 046	5 053
算术平均值	1 012	2 020	3 033	4 045	5 052
试验标准差	4.85	4.88	4.50	4.44	5.19
算术平均值的标准偏差	2.8	2.8	2.6	2.6	3.0

取算术平均值的标准偏差中最大值作为  $u_2$ , 则有不不确定度为

$$u_2 = 3.0 \text{ N} \quad (7)$$

### 3.3 合成标准不确定度的评定

$u_1$  和  $u_2$  相互独立不相关<sup>[12]</sup>, 根据不确定度的传播定律, 得到测量结果的合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{2.9^2 + 3.0^2} = 4.2 \text{ N} \quad (8)$$

示值误差的相对合成标准不确定度  $u_{c,rel}$  为

$$u_{c,rel} = \frac{u_c}{F_{max}} \times 100\% = 0.084\%FS \quad (9)$$

### 3.4 扩展不确定度的评定

取包含因子  $k=2$ , 钢丝绳张力测量仪测量结果的扩展不确定度  $U_{rel}$  为

$$U_{rel} = k \cdot u_{c,rel} = 2 \times 0.084\%FS \approx 0.17\%FS \quad (10)$$

### 3.5 评定结果

根据以上计算结果可以得到标准装置引入不确定度  $u_1$  为 2.9 N, 重复测量引入不确定度  $u_2$  为 3.0 N, 合成标准不确定度  $u_c$  为 4.2 N, 扩展不确定度  $U_{rel}(k=2)$  为 0.17%FS。由于标准装置、辅助设备 & 环境条件等所引入的测量扩展不确定度一般应小于被检设备最大允许误差的 1/3, 确定此校准方法适用于准确度等级高于 0.5 级的钢丝绳张力测量仪的实验室校准。

## 4 结论

通过对钢丝绳张力测量仪基本结构和工作原理的分析, 结合设备的使用工况选择测力杠杆式试验机作为标准装置, 并使用可溯源的配套砝码提供标准力值, 得到钢丝绳张力测量仪的实验室测量结果, 实现了张力测量仪的实验室校准。通过对钢丝绳张力测量仪的示值误差进行不确定度评定, 确定当被测量的钢丝绳张力测量仪准确度等级高于 0.5 级时, 使用该校准方法可以确保钢丝绳张力测量仪测量结果准确可靠, 其扩展不确定度为 0.17%FS。

### 参考文献:

[1] 姚文斌, 何天淳, 文宏光. 一种高精度接触式钢索张

力测定传感器的研制[J]. 仪表技术与传感器, 2001(2):9-10.

- [2] 杨玉杰, 谭继文. 钢丝绳张力检测磁弹性传感器仿真优化设计[J]. 煤矿机械, 2018, 39(11):109-112.
- [3] 刘志军, 党志杰, 罗元文, 等. 振动法测定缆索张力的研究[J]. 桥梁建设, 2002, 2(2):26-29.
- [4] 陈国栋, 王平, 陈启东, 等. 基于动测法测量钢丝绳张力的研究与分析[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(3):226-228.
- [5] 张庆丰, 赵德栋, 张铖宏, 等. 一种便捷式电梯钢丝绳张力计的设计[J]. 起重运输机械, 2019, 6(5):105-111.
- [6] 康红明, 贾春风, 李伟, 等. 基于 GSM 和单片机的矿井提升机钢丝绳张力检测系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2015, 3(5):30-32.
- [7] 缪建成, 陈关龙, 金隼. 小直径柔性钢索预紧张力的测量与计算[J]. 力学与实践, 2006, 28(2):29-32.
- [8] 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, 8(3):16-18.
- [9] 毛勤卫. 测力杠杆校准拉力试验机测量误差分析[J]. 计量与测试技术, 2015, 42(4):31-32.
- [10] 刘广大, 方欲晓, 雷力. 影响飞机钢索张力测量准确性的几个因素[J]. 计测技术, 2016, 36(z1):187.
- [11] 王承忠. 测量不确定度基本原理和评定方法及在材料检测中的评定实例 第五讲 测量不确定度的评定方法(扩展不确定度的评定、报告及表示)[J]. 理化检验(物理分册), 2014, 50(1):52-56.
- [12] 冉学臣. 疲劳试验结果测量不确定度评定[J]. 理化检验(物理分册), 2017, 53(10):717-719.

欢迎订阅 欢迎赐稿 欢迎刊登广告和信息