

JJF

中华人民共和国民用航空部门计量技术规范

JJF(民航) 0087—2020

代替 JJF(民航) 0087—2006

直读式钢索张力表

Cable Tensiometer of Direct Reading Type

2020-07-20 发布

2020-10-01 实施

中国民用航空局 发布

直读式钢索张力表

校准规范

Calibration Specification for
Cable Tensiometer of Direct Reading Type

JJF(民航) 0087—2020

代替 JJF(民航) 0087—2006

本规范经中国民用航空局2020年07月20日批准，并自2020年10月01日起
施行。

归口单位：中国民用航空局航空器适航审定司

起草单位：北京飞机维修工程有限公司

本规范技术条文由起草单位负责解释。

本规范起草人：

王 辉（北京飞机维修工程有限公司）

李甦时（北京飞机维修工程有限公司）

韩立忠（北京飞机维修工程有限公司）

王海亮（北京飞机维修工程有限公司）

李 达（北京飞机维修工程有限公司）

目 录

引言	(I)
1 范围.....	(1)
2 概述.....	(1)
3 计量特性.....	(4)
4 校准条件.....	(5)
5 校准项目.....	(5)
6 校准方法.....	(6)
7 校准结果.....	(11)
8 复校时间间隔.....	(12)
附录 A 钢索直径的要求.....	(13)
附录 B 校准记录格式	(14)
附录 C 校准证书内容	(16)
附录 D 示值误差测量结果不确定度评定——力传感器方式加载.....	(17)
附录 E 示值误差测量结果不确定度评定——砝码方式加载.....	(20)

引 言

本规范参考 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编制,其主要内容依据美国 SIGMATION 公司操作说明《TYPE C8 AND C9 CABLE TENSIMETER OPERATION INSTRUCTIONS》,美国 OPTI 公司操作与维护手册《OPERATION AND SERVICE MANUAL FOR CABLE TENSIMETER T60 SERIES》Rev. Q 2015 年版,美国 TENSITRON 公司操作说明《OPERATION INSTRUCTIONS ACX-SERIES DIGITAL AIRCRAFT CABLE TENSION METER》,美国 KENT-MOORE 公司附加说明《ADDITIONAL INSTRUCTIONS FOR BT-33-75D CABLE GAUGE》,美军标 MIL-DTL-83420M 2005 年 4 月《WIRE ROPE, FLEXIBLE, FOR AIRCRAFT CONTROL》编写。

本规范代替 JJG(民航) 0087—2006《T60 系列钢索张力表检定规程》。除编辑性修改外主要技术变化如下:

- 直读式钢索张力表,除 T60 系列张力表以外,增加 ACX 系列、TYPE C-8/ C-9 型、BT-33-75D 型三种类型的张力表及各自的结构示意图(见 2.2);
- 增加 ACX 系列、TYPE C-8/ C-9 型、BT-33-75D 型三种类型张力表的测量范围及对应的钢索规格(见 3.1);
- 修改对 T60 系列钢索张力表最大允许误差的要求,增加对 ACX 系列、TYPE C-8/ C-9 型、BT-33-75D 型三种类型张力表最大允许误差的要求,同时删除对准确度级别和重复性的要求(见 3.2);
- 增加校准所用用钢索的外观要求(见 4.2.2);
- 增加 BT-33-75D 型张力表外观检查要求(见 6.1.3);
- 增加 ACX 系列、TYPE C-8/ C-9 型、BT-33-75D 型三种类型张力表钢索及校准点的选择要求(见 6.3.1);
- 增加 T60 系列张力表指针初始位置设置的操作方法描述及示意图、增加 BT-33-75D 型张力表读数方法及读数位置示意图(见 6.3.3);
- 增加 TYPE C-8/ C-9 型张力表校对片放置方式示意图,删除对于校对片的误差要求(见 6.4);

——增加力传感器方式加载和垂吊砝码方式加载的测量结果不确定度评定（见附录 D 和附录 E）。

JJF（民航）0087 历次版本发布情况：JJG（民航）0087—2006。

直读式钢索张力表校准规范

1 范围

本规范适用于民用航空系统飞机维修过程中使用的直读式钢索张力表（以下简称张力表）的校准，除本规范涉及的张力表类型以外的其他直读式张力表的校准，可参照执行。

2 概述

2.1 用途

张力表是用于测量飞机操纵系统钢索工作状态下两端拉力的仪表。

2.2 组成

张力表分为数显式和机械式两种。ACX 系列张力表为数显式；T60 系列、TYPE C-8/ C-9 型、BT-33-75D 型张力表为机械式。

2.2.1 ACX 系列张力表如图 1 所示，主要由数字指示器、功能键、操纵手柄、把握手柄、钢索定位装置、传动装置及升降块等部件组成。

2.2.2 T60 系列和 TYPE C-8/ C-9 型张力表分别如图 2 和图 3 所示，主要由指示表、操纵手柄、传动装置、钢索尺寸指示器、指针止动装置、手柄锁、升降块、钢索定位装置及校对片等部件组成。

2.2.3 BT-33-75D 型张力表如图 4 所示，主要由刻度盘、读数刻线、读数圆点、把握手柄、操纵手柄、传动装置、升降块和钢索定位装置等部件组成。

2.3 工作原理

张力表的工作原理是利用钢索在不同被拉紧状态下所具有的不同抗弯曲能力的力学特性，在一定长度的两个支点间利用弹性元件向钢索施加作用力，使元件感应到的反作用力。机械式张力表通过传动机构带动指示表读数；数显式张力表是由数字显示器直接显示出张力值。

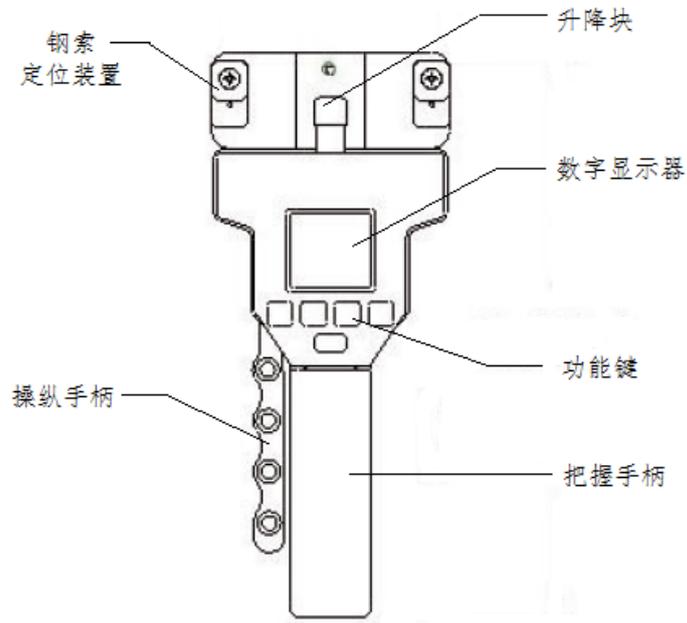


图 1 ACX 系列张力表结构示意图

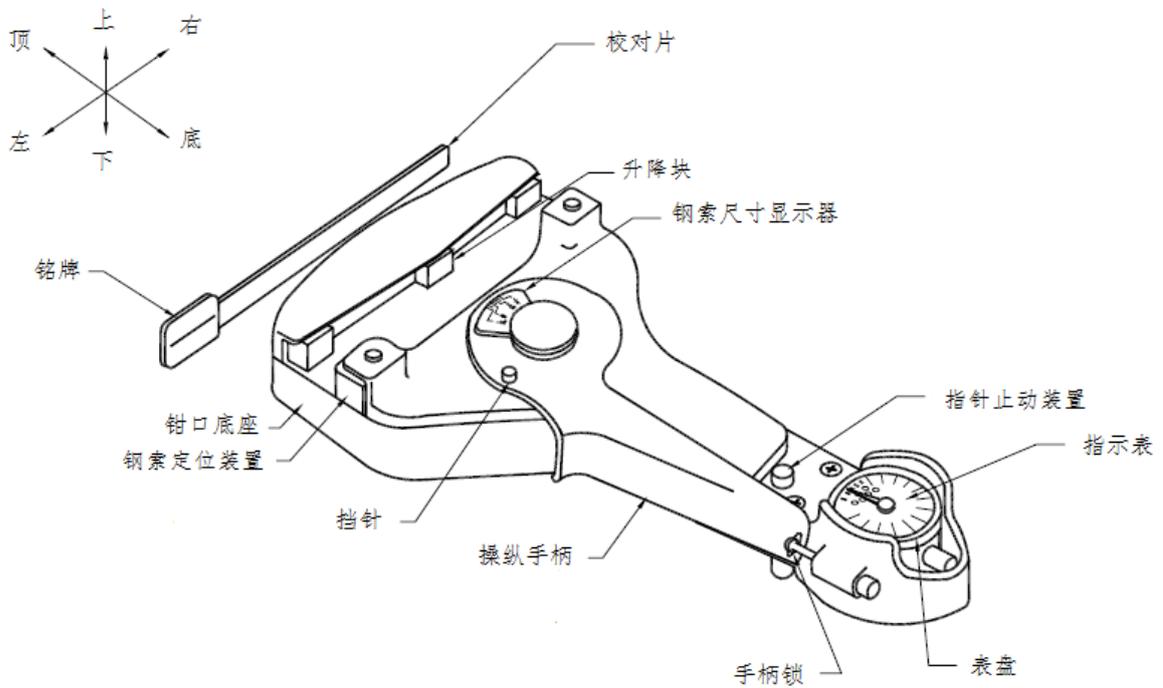


图 2 T60 型张力表结构示意图

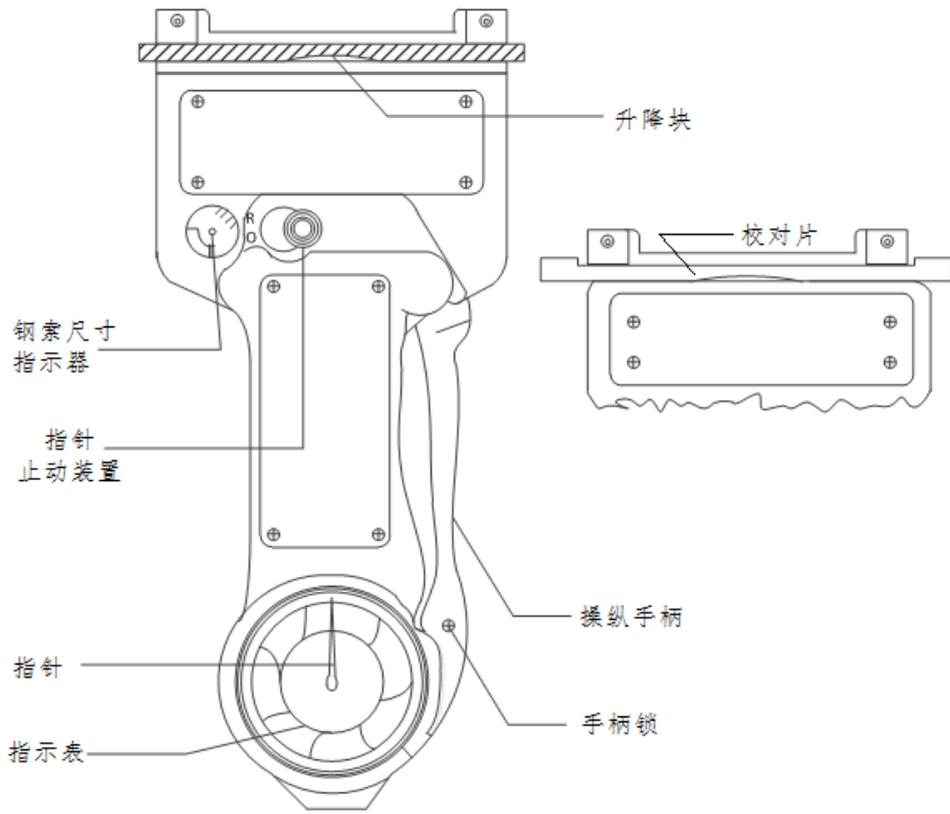


图 3 TYPE C-8/C-9 型张力表结构示意图

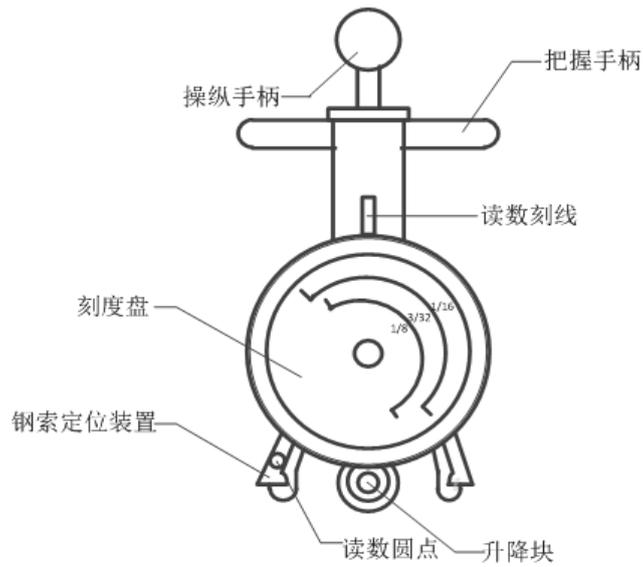


图 4 BT-33-75D 型张力表结构示意图

3 计量特性

3.1 测量范围

各种型号张力表测量范围及对应的钢索规格见表 1。

表 1 各种型号张力表测量范围及对应的钢索规格

型号	测量范围 N (lbf)	对应钢索规格
ACX-100	22.24~444.82 (5~100)	1/16, 3/32, 1/8, 5/32
ACX-250	88.96~1 111.06 (20~250)	1/16, 3/32, 1/8, 5/32, 3/16
ACX-500	177.93~2 224.11 (40~500)	3/32, 1/8, 5/32, 3/16
T60-1001-C8-1A TYPE C-8	44.48~889.64 (10~200)	1/16, 3/32, 1/8
	133.45~889.64 (30~200)	5/32, 3/16
	355.86~889.64 (80~200)	7/32, 1/4
T60-1001-C9-1A TYPE C-9	667.23~2 001.70 (150~450)	1/8, 5/32, 3/16, 7/32, 1/4
BT-33-75D	44.48~311.38 (10~70)	1/16
	66.72~311.38 (15~70)	3/32, 1/8

3.2 最大允许误差要求

张力表最大允许误差要求见表 2。

表 2 张力表最大允许误差要求

型号	最大允许误差
ACX-100 ACX-250 ACX-500	校准点的±2%

表 2(续)

型号	最大允许误差
TYPE C-8 TYPE C-9	校准点的 $\pm 10\%$
BT-33-75D	校准点的 $\pm 10\%$
T60-1001-C8-1A T60-1001-C9-1A	校准点的 $\pm 5\%$ 与最小分度值，取大值

4 校准条件

4.1 环境条件

环境温度： $(20 \pm 10) ^\circ\text{C}$

相对湿度：不大于 85%

周围无影响进行正常工作的振动。

张力表在上述环境条件下至少静置 2 h 后方可校准。

4.2 测量标准及其他设备

4.3 标准装置

加载方式分为砝码加载方式和力传感器加载方式。

测量范围：应覆盖被校张力表的测量范围。

最大允许误差：小于或等于被校张力表最大允许误差的 1/4。

校准用钢索直径的要求见附录 A，钢索外观应无磨损、绞缠、弯曲、破损及断丝等现象。

5 校准项目

校准项目如下：

- 外观及各部分相互作用检查；
- 钢索尺寸指示器的检查；
- 示值误差的校准；
- 校对片的标定。

6 校准方法

6.1 外观及各部分相互作用检查

6.1.1 张力表的铭牌应标明张力表的名称、制造厂家或商标、件号、序号。

6.1.2 张力表及所配校对片的序号应一致，且不应有影响正常使用的机械损伤。指示表的表蒙应清晰、透明。张力表钢索尺寸指示器的刻线应清晰。配有钢索直径检查标准规时（仅 ACX 系列张力表配有），两工作面不应有目力可见的缺陷和破损，刻线和钢索规格的标注应清晰。

6.1.3 BT-33-75D 型张力表刻度盘上的刻线应清晰，红、黑、蓝三种颜色应醒目。各规格的钢索读数位置应有清晰标识。

6.1.4 张力表操纵手柄的移动应自如平稳，无卡滞。各部件连接应牢固、可靠，带有手柄锁的张力表，其手柄锁应有效。

6.1.5 带有指针止动装置的张力表其指针止动装置应有效。在张力表上表面凸起时，止动装置为打开状态，指示表指针指示正常；当止动装置被按下，止动装置从张力表下表面伸出时，止动装置为锁紧状态，指示表指针将不能指示。

6.1.6 张力表工作时，指示表指针应移动平稳，无卡滞、冲击现象。

6.1.7 张力表刻度盘的调整应平稳顺畅，定位后应稳定。

6.1.8 数显式张力表的各功能键应有效，数显示屏显示正常。

6.2 钢索尺寸指示器的检查

ACX 系列张力表带有钢索直径校准规，目视检查其刻线是否清晰，测量钢索直径部位不应有凹坑、碰伤等缺陷。

T60 系列张力表按照以下方式检查钢索尺寸指示器，可在适用规格的钢索中

任选一根进行检查。在张力表操纵手柄锁紧状态下,对于 T60 系列张力表应将钢索尺寸指示器逆时针旋转与挡针接触;对于 TYPE C-8/C-9 型张力表应将钢索尺寸指示器逆时针旋转到不能动为止。然后缓慢释放操纵手柄,使张力表夹紧在已知尺寸的钢索上,检查标识刻度线是否对准钢索尺寸指示器上相应的钢索规格刻线,并将检查结果填入附录 B 中。

BT-33-75D 型张力表不带有钢索尺寸指示器或类似装置。

6.3 示值误差的校准

6.3.1 钢索及校准点的选择

钢索规格及校准点的选择至少应满足表 3 的要求。

表 3 钢索规格及校准点

张力表型号	钢索规格	校准点 N (lbf)
ACX-100	1/16, 3/32, 1/8, 5/32	22.24 (5), 222.41 (50), 444.82 (100)
ACX-250	3/32, 1/8 5/32, 3/16	88.96 (20), 667.23 (150), 1 112.06 (250)
ACX-500	1/8, 5/32, 3/16	177.93 (40), 1 334.47 (300), 2 224.11 (500)
T60-1001-C8-1A	1/16, 1/8	44.48 (10), 444.82 (100), 889.64 (200)
TYPE C-8	7/32	355.86 (80), 444.82 (100), 889.64 (200)
T60-1001-C9-1A	1/8, 7/32	667.23 (150), 1334.47 (300), 2 001.70 (450)
TYPE C-9		
BT-33-75D	1/16	44.48 (10), 177.93 (40), 311.38 (70)
	3/32, 1/8	66.72 (15), 177.93 (40), 311.38 (70)

6.3.2 钢索测量段

钢索测量段至少应距两端各 300 mm，校准张力表的位置应选择在钢索中点附近的测量段内，测量段的钢索长度应不小于 200 mm。

6.3.3 张力表初始位置的设置

校准前，数显式张力表应在选择钢索规格后置零。机械式张力表指针位置应设置为所选钢索规格对应的初始位置。

对于 T60-1001-C8-1A 型张力表，当选用规格为 7/32 或 1/4 的钢索校准张力表的张力值时，应先调节张力表的指示表盘，使指针对准标有所选钢索规格的位置。当所校张力表的示值大于 555.62 N (125 lbf) 时，指针应对准标有“125+”上部方格的左边拐角位置；当所校张力表的示值小于 555.62 N (125 lbf) 时，指针应对准标有“125-”下部方格的左边拐角位置。选用其他规格钢索校准时，指针应放置在标有钢索规格方格的中间位置。T60-1001-C8-1A 型张力表指针位置设置示意图见图 5。

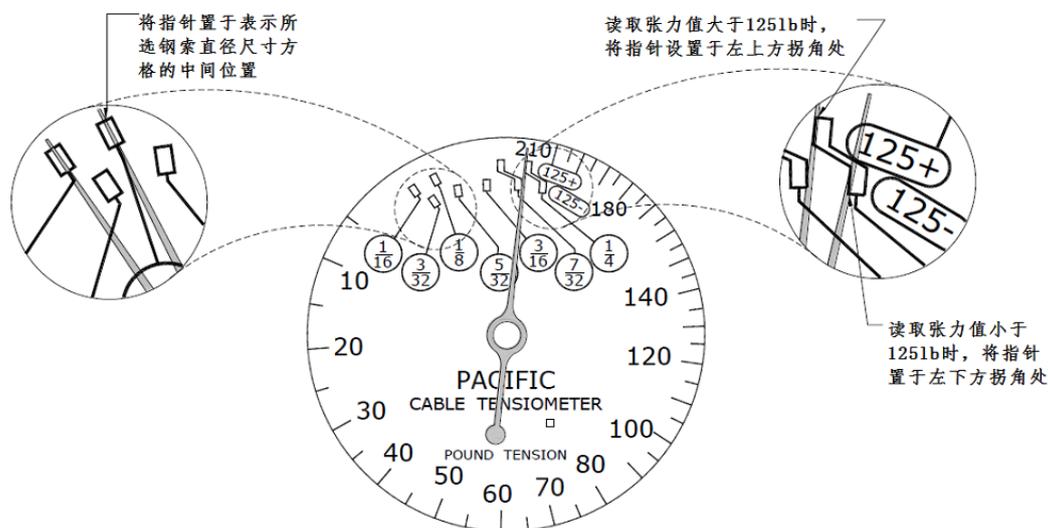


图 5 T60-1001-C8-1A 型张力表指针位置设置示意图

对于 BT-33-75D 型张力表，校准时所选钢索规格对应校准点张力值的读数区域以颜色进行区分。即选用 1/16 钢索时对应红色刻度标识；选用 3/32 钢索时对应黑色刻度标识；选用 1/8 钢索时对应蓝色刻度标识。此型号张力表的表盘不能

被调整，张力值可直接读取，但需根据所选钢索选择读数位置：在操作手柄正下方中间处的读数刻线位置读取 3/32 和 1/8 两种钢索规格对应的张力值，见图 6；在“DOT”小圆点处读取 1/16 钢索规格对应的张力值，见图 7。

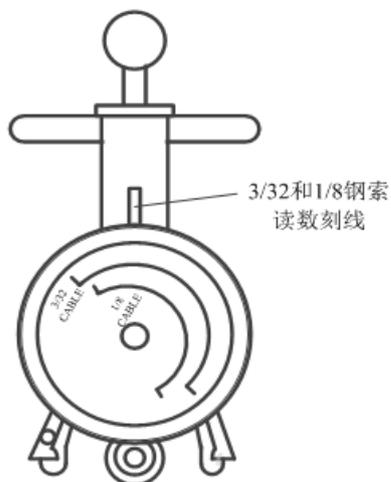


图 6 读数刻线位置示意图

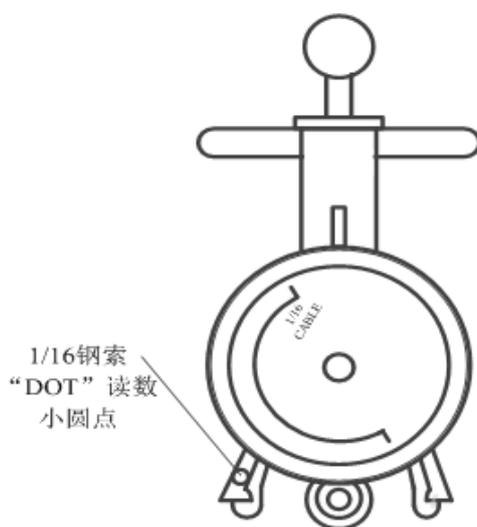


图 7 “DOT” 读数小圆点位置示意

6.3.4 钢索的加载

按表 3 的要求将所选规格的钢索分别安装在标准装置上。对于每根钢索各校准点的力值应逐步由大到小进行加载。

6.3.5 校准张力值

在校准过程中,应尽可能地避免张力表自重对钢索产生的影响。在用张力表夹持钢索时应缓慢地释放操纵手柄,使张力表的作用部件平稳地接触钢索,使钢索能被紧紧地夹住,不应产生冲击现象。

使用砝码加载时,应平稳地在钢索悬挂端增、减砝码,保持钢索及砝码的相对稳定,避免发生摆动现象。使用力值传感器加载时,调节标准装置的力值,当张力表夹紧钢索后,标准器指示的力值应在校准点的 $\pm 2.22\text{ N}(\pm 0.5\text{ lbf})$ 范围内。测量时,应在钢索测量段内尽可能选择同一位置,每一校准点至少测量三次。

6.3.6 数据处理方法

6.3.6.1 使用砝码加载

以加载砝码的力值作为标准力值 F , 张力表示值作为 f_i 。对于 T60 系列张力表,按公式(1)和公式(2)分别计算张力表示值绝对误差和相对误差,测量结果按照示值误差要求中的形式表示,并将测量结果填入附录 B 的表 B.1 中。对于其他型号张力表,仅按公式(2)计算示值相对误差,并将测量结果填入附录 B 的表 B.1 中。

$$\Delta = \bar{f} - F \quad (1)$$

$$e = \frac{\bar{f} - F}{F} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Δ ——示值绝对误差 N (lbf);

e ——示值相对误差;

\bar{f} ——每一校准点示值的算术平均值 N (lbf);

F ——每一校准点的标准力值 N (lbf);

6.3.6.2 使用力值传感器加载

将标准装置的力值作为参考标准值 F_i' , 被检张力表的示值作为 f_i' , 按公式

(3) 计算张力表的修正示值 f_i ，将张力表示值、参考标准值和修正示值填入附录 B 的表 B.2 中。根据各校准点的修正示值计算出算术平均值，再根据张力表的型号，按公式 (1) 及公式 (2) 计算出其示值误差。将修正后示值、算术平均值和测量结果填入附录 B 的表 B.1 中。

$$f_i = f'_i \times \frac{F}{F'_i} \quad (3)$$

式中： f'_i ——每一校准点第 i 次张力表示值 N (lbf)；

F'_i ——每一校准点第 i 次标准装置的参考标准值 N (lbf)；

F ——每一校准点的标准力值 N (lbf)。

6.4 校对片的标定

使用已校准的且与校对片配套的张力表进行标定。对于 T60 系列张力表的校对片，标有数值的一面应面向操作者；对于 TYPE C-8/C-9 型张力表校对片放置方式见图 8。调节张力表的指示表表针至最细的钢索规格位置，缓慢地释放操纵手柄，使张力表作用部分紧紧地夹住校对片，读取张力表的示值。按上述方法操作三次并计算出算术平均值，计算结果保留至整数位，并将结果作为标定值标记在不影响校对片使用的位置处。将三次的示值、算术平均值和标定值填入附录 B 的表 B.3 中。ACX 系列张力表、BT-33-75D 型张力表无校对片。

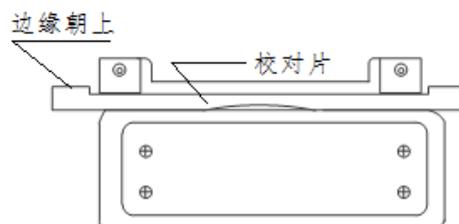


图 8 TYPE C-8/C-9 型张力表校对片放置方式

7 校准结果

经校准的张力表出具校准证书，使用钢索直径的要求见附录 A，校准记录格式见附录 B，校准证书内容见附录 C，示值误差测量结果的不确定度评定方法见附录 D 及附录 E。

8 复校时间间隔

张力表的复校时间间隔不超过 6 个月，必要时可随时校准。

附录 A

钢索直径的要求

钢索规格	钢索组成	直径尺寸 mm (inch)	直径允许变化范围 mm (inch)
1/16	7×7	1.574 8 (0.062)	1.574 8~1.828 8 (0.062~0.072)
3/32	7×19	2.362 2 (0.093)	2.362 2~2.667 0 (0.093~0.105)
1/8	7×19	3.175 0 (0.125)	3.175 0~3.530 6 (0.125~0.139)
5/32		3.962 4 (0.156)	3.962 4~4.368 8 (0.156~0.172)
3/16		4.749 8 (0.187)	4.749 8~5.207 0 (0.187~0.205)
7/32		5.537 2 (0.218)	5.537 2~5.994 4 (0.218~0.236)
1/4		6.350 0 (0.250)	6.350 0~6.807 2 (0.250~0.268)

表 B.2 张力表的修正后示值（仅适用于使用传感器加载的标准装置）

钢索规格	校准点 F	第一次测量			第二次测量			第三次测量		
		F'_1	f'_1	f_1	F'_2	f'_2	f_2	F'_3	f'_3	f_3

钢索尺寸指示器检查： _____

表 B.3 校对片的标定

示值 1	示值 2	示值 3	平均值	标定值

附录 C

校准证书内容

校准证书的内容应排列有序、清晰，一般应包括下列内容：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），页码及总页的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称和代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

附录 D

示值误差测量结果的不确定度评定——力传感器方式加载

D.1 测量方法

张力表的示值误差是用符合本校准规范要求的标准装置和标准钢索，使用力传感器加载方式进行校准的。

现对 T60-1001-C8-1A 型钢索张力表使用 7/32 规格钢索在 200 lbf 点的示值误差测量结果不确定进行评定。

D.2 数学模型

张力表示值误差计算见公式(D.1):

$$\Delta = \bar{f} - F \quad (\text{D.1})$$

式中: \bar{f} —— 钢索张力表在校准点修正后示值的算术平均值;

F —— 校准点的标准力值。

D.3 灵敏系数与方差

灵敏系数计算公式见公式 (D.2) 和(D.3):

$$c_1 = \frac{\partial e}{\partial f} \quad (\text{D.2})$$

$$c_2 = \frac{\partial e}{\partial F} \quad (\text{D.3})$$

方差计算公式见公式(D.4):

$$u^2(e) = c_1^2(u_1^2 + u_{\text{修}}^2) + c_2^2 u_2^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_{\text{修}}^2 \quad (\text{D.4})$$

D.4 输入量标准不确定度的评定

D. 4. 1 重复性引入的不确定度分量 u_1

使用力传感器方式加载校准钢索张力表同一点，重复测量 10 次得到观察列，如下所示：

$$x_1 = 191.0 \text{ lbf} \quad x_2 = 191.0 \text{ lbf} \quad x_3 = 191.0 \text{ lbf} \quad x_4 = 191.0 \text{ lbf} \quad x_5 = 192.0 \text{ lbf}$$

$$x_6 = 191.0 \text{ lbf} \quad x_7 = 192.0 \text{ lbf} \quad x_8 = 192.0 \text{ lbf} \quad x_9 = 191.0 \text{ lbf} \quad x_{10} = 192.0 \text{ lbf}$$

求得其标准偏差 $s = 0.52$ ， 则 $u_1 = \frac{s}{\sqrt{3} \times 200} \times 100\% = 0.15\%$ 。

D. 4. 2 标准器引入的不确定度分量 u_2

使用力传感器加载方式时，标准装置的相对误差带来的影响为 $\pm 0.75\%$ ，按均匀分布估计， $u_2 = \frac{0.75\%}{\sqrt{3}} = 0.43\%$

D. 4. 3 数据修约引入的不确定度分量 $u_{修}$

将张力表示值平均值进行数据修约至小数点后一位(读数为整数位)，按均匀分布进行估计，置信因子 k 为 $\sqrt{3}$ ，区间半宽为 0.5lbf， $u_{修} = \frac{0.5}{\sqrt{3} \times 200} \times 100\% = 0.14\%$

D. 5 不确定度分量一览表

如下表所示：

标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度分量来源	标准不确定度分量 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$ c_i \times u(x_i)$
u_1	重复性	0.15%	1	0.15%
u_2	标准装置相对误差	0.43%	-1	0.43%
$u_{修}$	数据修约	0.14%	1	0.14%

D. 6 合成标准不确定度 u_c

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_{\text{修}}^2} = \sqrt{0.15\%^2 + 0.43\%^2 + 0.14\%^2} = 0.48\%$$

D.7 相对扩展标准不确定度 U_{ref}

$$U_{ref} = k \cdot u_c = 2 \times 0.48\% \approx 1.0\%, \quad k = 2$$

附录 E

示值误差测量结果的不确定度评定——砝码方式加载

E.1 测量方法

直读式钢索张力表的示值误差是用符合本规范要求的标准装置和标准钢索，使用垂吊砝码方式加载进行校准的。

现对 T60-1001-C8-1A 型钢索张力表使用 7/32 规格钢索在 200 lbf 点的示值误差测量结果不确定进行评定。

E.2 数学模型

钢索张表示值误差计算见公式(E.1):

$$e = \bar{f} - (F_a + F_b) \dots\dots\dots (E.1)$$

式中: e ——示值误差 N(lbf);

\bar{f} ——钢索张力表在校准点示值的平均值 N(lbf);

F_a ——砝码产生的标准力值 N(lbf);

F_b ——钢索自重产生的力值 N(lbf)。

E.3 灵敏系数与方差

由公式(D.2)、(D.3)和(D.4)得到:

$$c_1 = \frac{\partial e}{\partial f} = 1 \qquad c_2 = \frac{\partial e}{\partial F_a} = -1 \qquad c_3 = \frac{\partial e}{\partial F_b} = -1$$

$$u^2(e) = c_1^2(u_1^2 + u_{修}^2) + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_3^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_{修}^2$$

E.4 输入量标准不确定度的评定

E.4.1 重复性引入的不确定度分量 u_1

使用垂吊砝码加载方式校准钢索张力表同一点，重复测量 10 次得到观察列：

$$\begin{aligned}
 x_1 = 193 \text{ lbf} & & x_2 = 194 \text{ lbf} & & x_3 = 193 \text{ lbf} & & x_4 = 193 \text{ lbf} & & x_5 = 193 \text{ lbf} \\
 x_6 = 193 \text{ lbf} & & x_7 = 193 \text{ lbf} & & x_8 = 193 \text{ lbf} & & x_9 = 194 \text{ lbf} & & x_{10} = 193 \text{ lbf}
 \end{aligned}$$

求得其标准偏差 $s = 0.42$ ，则 $u_1 = \frac{s}{\sqrt{3} \times 200} \times 100\% = 0.12\%$

E. 4. 2 标准器引入的不确定度分量 u_2

使用砝码加载方式时，M2 级砝码质量的相对误差为 $\pm 0.015\%$ ，按反正弦分布估计，

$$u_2 = \frac{0.015\%}{\sqrt{2}} = 0.01\%$$

E. 4. 3 钢索自重引入的不确定度分量 u_3

使用垂吊砝码加载方式时，由于 7/32 钢索规格的钢索自重对钢索中段产生的张力影响为 0.2%，按反正弦分布估计， $u_3 = \frac{0.2\%}{\sqrt{2}} = 0.14\%$

E. 4. 4 数据修约引入的不确定度分量 $u_{修}$

将张力表示值平均值进行数据修约至小数点后一位(读数为整数位)，按均匀分布进行估计，置信因子 k 为 $\sqrt{3}$ ，区间半宽为 0.5 lbf， $u_{修} = \frac{0.5}{\sqrt{3} \times 200} \times 100\% = 0.14\%$

E. 5 不确定度分量一览表

如下表所示：

标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度分量来源	标准不确定度分量 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$ c_i \times u(x_i)$

u_1	重复性	0.12%	1	0.12%
u_2	标准装置相对误差	0.01%	-1	0.01%
u_3	钢索自重的影响	0.08%	-1	0.14%
$u_{修}$	数据修约	0.14%	1	0.14%

E.6 合成标准不确定度 u_c

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_{修}^2} = \sqrt{0.12\%^2 + 0.01\%^2 + 0.14\%^2 + 0.14\%^2} = 0.23\%$$

E.7 相对扩展标准不确定度 U_{ref}

$$U_{ref} = k \cdot u_c = 2 \times 0.23\% = 0.46\%, \quad k = 2$$
