

## 扭矩参数校准方法及校准不确定度评定

叶仁根 贾莹莹

襄阳达安汽车检测中心有限公司, 湖北 襄阳 441004

**[摘要]** 扭矩参数是试验室较多设备的一个重要参数, 所以对其进行计量校准, 满足其量值溯源的需求就很有必要, 文中的基本内容是根据我们日常所使用的校准方法对扭矩参数进行校准, 并详细评定其校准不确定度, 以满足其量值溯源的需求。

**[关键词]** 扭矩; 校准方法; 不确定度评定

DOI: 10.33142/ect.v2i1.10687

中图分类号: U66

文献标识码: A

### Torque Parameter Calibration Method and Evaluation of Calibration Uncertainty

YE Rengen, JIA Yingying

Xiangyang Da'an Automobile Test Center Co., Ltd., Xiangyang, Hubei, 441004, China

**Abstract:** The torque parameter is an important parameter for many equipment in the laboratory, so it is necessary to calibrate it to meet the demand for traceability of its values. The basic content of this article is to calibrate the torque parameter based on the calibration methods we use in daily life, and evaluate its calibration uncertainty in detail to meet the demand for traceability of its values.

**Keywords:** torque; calibration method; uncertainty assessment

试验室现有很多非标试验设备, 这些设备较多都没有校准规范和校准方法, 因此需制定相应的校准方法。扭矩参数是一项非常重要的参数, 对其校准的方法也没有非常统一的校准方法, 现特著此文, 详细阐述扭矩参数的校准方法, 并对其校准不确定度进行评定, 即可满足其量值溯源的需求, 对试验设备校准的准确可靠有重要意义。

#### 1 扭矩参数校准方法

1.1 砝码校准法 (在被校设备扭矩量程不大于 2000N·m 时采用)

安装好专用加载力臂, 调整好平衡及水平后, 在力臂托盘上加砝码, 逐级加载砝码至扭矩上限, 再逐级卸除砝码至零点。从零点至最大测量范围, 至少应选择 5 个校准点, 其中应包括约 10%FS、50%FS 和 100%FS。如果是承载器尺寸的原因, 无法对测量范围上限 (或接近测量范围上限) 的测量点进行校准时, 可以校准至实际使用的最大测量点。此过程重复测量三次, 记录设备进程和回程示值。

按下列公式计算加载力矩  $M$ :

$$M = m \times g \times L \times \cos \theta \quad (1)$$

式中:  $m$ —加载砝码的质量, kg;

$g$ —当地的重力加速度,  $m/s^2$ ;

$L$ —校准专用杠杆的长度, m;

$\theta$ —校准专用杠杆与水平面的夹角,  $^\circ$ 。

每个校准点的扭矩示值误差  $W_F$ , 示值重复性误差  $R_F$  和示值回程误差  $H_F$  按下列公式计算:

$$W_F = \frac{\bar{T}_1 - M}{T_u} \times 100\%FS \quad (2)$$

$$R_F = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_u} \times 100\%FS \quad (3)$$

$$H_F = \frac{\bar{T}_2 - \bar{T}_1}{T_u} \times 100\%FS \quad (4)$$

式中:  $\bar{T}_1$ —进程中 3 次扭矩示值的算术平均值, N.m;

$M$ —加载的标准扭矩值, N.m;

$\bar{T}_2$ —回程中 3 次扭矩示值的算术平均值, N.m;

$T_{max}/T_{min}$ —进程中 3 次扭矩示值的最大值/最小值, N.m;

$T_u$ —被校设备扭矩测量范围上限值, N.m。

1.2 标准测力仪校准法 (在被校设备扭矩量程大于 2000N·m 时采用)

安装好专用加载力臂, 调整好平衡及水平后, 用标准测力仪加载, 逐级加载至扭矩上限, 再逐级卸载至零点。从零点至最大测量范围, 至少应选择 5 个校准点, 其中应包括约 10%FS、50%FS 和 100%FS。如果是承载器尺寸的原因, 无法对测量范围上限 (或接近测量范围上限) 的测量点进行校准时, 可以校准至实际使用的最大测量点。此过程重复测量三次, 记录设备进程和回程示值。

按下列公式计算加载力矩  $M$ :

$$M = F \times L \times \cos \theta \quad (5)$$

式中:  $F$ —标准测力仪加载力值, N;

$L$ —校准专用杠杆的长度, m;

$\theta$ —校准专用杠杆与水平面的夹角,  $^\circ$ 。

每个校准点的扭矩示值误差  $W_F$ , 示值重复性误差  $R_F$  和示值回程误差  $H_F$  按下列公式计算:

$$W_F = \frac{\bar{T}_1 - M}{T_u} \times 100\%FS \quad (6)$$

$$R_F = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_u} \times 100\%FS \quad (7)$$

$$H_F = \frac{\bar{T}_2 - \bar{T}_1}{T_u} \times 100\%FS \quad (8)$$

式中： $\bar{T}_1$ —进程中3次扭矩示值的算术平均值，N.m；  
 $M$ —加载的标准扭矩值，N.m；  
 $\bar{T}_2$ —回程中3次扭矩示值的算术平均值，N.m；  
 $T_{max}/T_{min}$ —进程中3次扭矩示值的最大值/最小值，N.m；  
 $T_u$ —被校设备扭矩测量范围上限值，N.m。

## 2 扭矩示值误差测量不确定度评定

### 2.1 扭矩示值误差测量不确定度的评定

扭矩范围：T>2000N.m 标准器为标准测力仪时。

#### 2.1.1 测量方法

用上述规定的测量方法所述。

#### 2.1.2 校准模型

$$\delta_F = \bar{T}_1 - F \cdot L \cdot \cos \theta \quad (9)$$

式中： $\delta_F$ ——扭矩示值误差，%FS；  
 $\bar{T}_1$ ——进程中3次扭矩示值的算术平均值，N.m；  
 $F$ ——加载标准力值，N；  
 $L$ ——校准专用力臂的长度，m。  
 $\theta$ ——力臂与水平面的夹角，°；

#### 2.1.3 方差

因为各输入量彼此独立，依不确定度传播定律：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (10)$$

方差：

$$u_c^2(\delta_F) = c_1^2 u^2(\bar{T}_1) + c_2^2 u^2(F) + c_3^2 u^2(L) + c_4^2 u^2(\theta) \quad (11)$$

式中： $u(\bar{T}_1)$ —被校设备的不确定度分量；  
 $u(F)$ —标准测力仪误差的不确定度分量；  
 $u(L)$ —校准力臂长度误差引入的不确定度分量；  
 $u(\theta)$ —校准力臂与水平线夹角引入的不确定度分量。

灵敏系数：

$$c_1 = 1; \quad c_2 = -L \cos \theta; \quad c_3 = -F \cos \theta; \quad c_4 = FL \sin \theta \quad (12)$$

标准不确定度：

$$u_c^2(\delta_F) = u^2(\bar{T}_1) + (L \cos \theta)^2 \cdot u^2(F) + (F \cos \theta)^2 \cdot u^2(L) + (FL \sin \theta)^2 \cdot u^2(\theta) \quad (13)$$

#### 2.1.4 测量不确定度来源

扭矩示值误差测量不确定度的来源主要包括：

(1) 被校设备扭矩测量重复性引入的不确定度分量  $u_1$ ，采用 A 类方法评定；

(2) 被校设备扭矩数显量化误差引入的标准不确定度  $u_2$ ，采用 B 类方法评定；

(3) 标准测力仪误差引入的标准不确定度  $u(F)$ ，采用 B 类方法评定；

(4) 校准力臂长度误差引入的标准不确定度  $u(L)$ ，采用 B 类方法评定；

(5) 校准力臂与水平线夹角引入的标准不确定度  $u(\theta)$ ，采用 B 类方法评定。

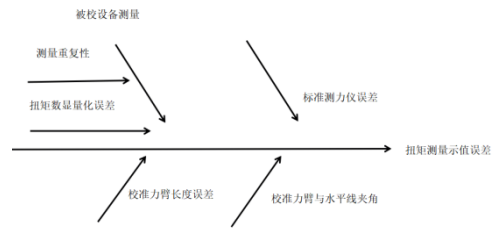


图1 扭矩示值误差测量不确定度的来源

#### 2.1.5 标准不确定度评定

由被校设备测量引入的标准不确定度  $u(\bar{T}_1)$ 。

由被校设备扭矩测量重复性引入的标准不确定度分量  $u_1$ 。

以扭矩上限值为 5000N.m，扭矩比为 1: 1 为例，选择加载标准测力仪为 5000N，杠杠长度为 1m，即扭矩为 5000N.m 输入，进行 10 次独立、等精度测量，测量结果如表 1 所示。

表 1 被校设备测量数据 (单位: N.m)

5002	5004	5003	5005	5001	5002	5003	5002	5003	5004
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

得单次测量的实验标准差：

$$S(T_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (T_i - \bar{T}_1)^2}{9}} = 1.197 \text{ N.m (其中 } n=10) \quad (14)$$

在实际测量中，在重复条件下测量 3 次，以 3 次测量结果的算术平均值为测量结果，其标准不确定度分量为：

$$\mu_1 = \frac{S(T_i)}{\sqrt{3}} = 0.69 \text{ N.m} \quad (15)$$

由被校设备扭矩数显量化误差引入的标准不确定度分量  $u_2$ 。

扭矩显示仪表的分辨力为：1N.m，其量化误差以等概率分布在半宽为 0.5N.m 的区间内，取包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，其引入的标准不确定度为：

$$u_2 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ N.m} \quad (16)$$

标准装置引入的标准不确定度分量。

标准测力仪误差引入的标准不确定度  $u(F)$ 。

标准测力仪最大允许误差为  $\pm 0.1\%$ 。

施加力由标准测力仪经校准专用力臂转换为扭矩。因设备的误差采用相对满量程的引用误差，最大不确定度发生在扭矩值最大的情况下。以下以加载 5000N 力值的极端

情况来分析:

F 的最大允差服从均匀分布, 由此引入的标准不确定度分量:

$$u(F) = 5000 \times 0.1\% / \sqrt{3} = 2.89\text{N} \quad (17)$$

校准力臂长度误差引入的标准不确定度  $u(L)$

校准力臂长度误差引入的不确定度: 校准力臂最大允许误差为  $\pm 0.1\%$ 。

L 服从均匀分布:

$$u(\theta)_{u(L)} = 0.1\% \times 1.0 / \sqrt{3} = 5.89 \times 10^{-4}\text{m} \quad (18)$$

校准力臂与水平线夹角引入的标准不确定度

校准时, 测力力臂上放置水平仪以确保水平。水平仪分度为  $\pm 0.1^\circ$ , 服从均匀分布, 即:

$$u(\theta) = 0.1 / \sqrt{3} = 0.058 = 1.01 \times 10^{-3} \quad (19)$$

以上各项均不相关, 列出扭矩示值误差测量不确定度汇总表:

**表 2 扭矩示值误差测量不确定度汇总表**

序号	来源	类型	分布	包含因子	符号	灵敏系数	标准不确定度
1	被校设备测量						
1.1	测量重复性	A	正态	1	$u_1$	1	0.69N.m
1.2	被校设备扭矩扭矩数显量化误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u_2$	1	0.29N.m
2	标准装置引入						
2.1	标准测力仪误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u(F)$	1m	2.89N
2.2	校准力臂长度误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u(L)$	5000N	$5.89 \times 10^{-4}\text{m}$
2.3	校准力臂与水平线夹角	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u(\theta)$	0	$1.01 \times 10^{-3}$

由重复性引入的不确定度分量大于由分辨力引入的不确定度分量, 因此可以不考虑扭矩数显量化误差引入的不确定度。由被校设备扭矩测量引入的标准不确定度为:

$$u(\bar{T}_1) = u_1 = 0.69\text{N.m} \quad (20)$$

2.1.6 合成标准不确定度:

$$u_c(\delta_F) = \sqrt{u^2(\bar{T}_1) + (L \cos \theta)^2 \cdot u^2(F) + (F \cos \theta)^2 \cdot u^2(L) + (FL \sin \theta)^2 \cdot u^2(\theta)} = 4.0\text{N.m} \quad (21)$$

2.1.7 扩展不确定度评定:

按置信因子  $k=2$ , 则扩展不确定度为:

$$U = 2 \times 4.0 = 8.0\text{N.m}$$

测功机满量程为 5000N.m,  $U_{rel} = 0.16\%$ FS

结论: 上述分析及计算得到扭矩示值误差测量结果的扩展不确定度为:  $U_{rel} = 0.16\%$ FS, ( $k=2$ )。

2.2 扭矩示值误差测量不确定度的评定

扭矩范围:  $T \leq 2000\text{N.m}$  标准器为标准砝码时。

2.2.1 测量方法

用上述规定的测量方法所述。

2.2.2 校准模型

$$\delta_F = \bar{T}_1 - m \cdot g \cdot L \cdot \cos \theta \quad (22)$$

式中:  $\delta_F$  —— 扭矩示值误差, %FS;

$\bar{T}_1$  —— 进程中 3 次扭矩示值的算术平均值, N.m;

$m$  —— 加载标准质量, kg;

$g$  —— 当地的重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;

$L$  —— 校准专用力臂的长度, m;

$\theta$  —— 力臂与水平面的夹角,  $^\circ$ 。

2.2.3 方差

因为各输入量彼此独立, 依不确定度传播定律:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (23)$$

得方差:

$$u_c^2(\delta_F) = c_1^2 u^2(\bar{T}_1) + c_2^2 u^2(m) + c_3^2 u^2(g) + c_4^2 u^2(L) + c_5^2 u^2(\theta) \quad (24)$$

式中:  $u(\bar{T}_1)$  —— 被校设备的不确定度分量;

$u(m)$  —— 标准砝码质量误差的不确定度分量;

$u(g)$  —— 重力加速度舍入的不确定度分量;

$u(L)$  —— 校准力臂长度误差引入的不确定度分量;

$u(\theta)$  —— 校准力臂与水平线夹角引入的不确定度分量。

灵敏系数:

$$c_1 = 1; \quad c_2 = -gL \cos \theta; \quad c_3 = -mL \cos \theta; \quad c_4 = -mg \cos \theta; \quad c_5 = mgL \sin \theta \quad (25)$$

标准不确定度:

$$u_c^2(\delta_F) = u^2(\bar{T}_1) + (gL \cos \theta)^2 \cdot u^2(m) + (mL \cos \theta)^2 \cdot u^2(g) + (mg \cos \theta)^2 \cdot u^2(L) + (mgL \sin \theta)^2 \cdot u^2(\theta)$$

2.2.4 测量不确定度来源

扭矩示值误差测量不确定度的来源主要包括:

(1) 被校设备扭矩测量重复性引入的不确定度分量  $u_1$ , 采用 A 类方法评定;

(2) 被校设备扭矩数显量化误差引入的标准不确定度  $u_2$ , 采用 B 类方法评定;

(3) 标准砝码质量误差引入的标准不确定度  $u(m)$ , 采用 B 类方法评定;

(4) 重力加速度舍入误差引入的标准不确定度  $u(g)$ , 采用 B 类方法评定;

(5) 校准力臂长度误差引入的标准不确定度  $u(L)$ , 采用 B 类方法评定;

(6) 校准力臂与水平线夹角引入的标准不确定度  $u(\theta)$ , 采用 B 类方法评定。

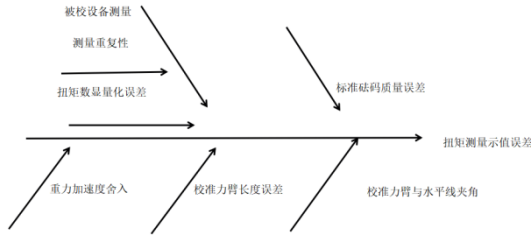


图2 扭矩示值误差测量不确定度的来源

### 2.2.5 标准不确定度评定

由被校设备测量引入的标准不确定度  $u(\bar{T}_i)$ 。

由被校设备扭矩测量重复性引入的标准不确定度分量  $u_1$ 。

以扭矩上限值为 2000N.m，扭矩比为 1:1 为例，选择加载标准砝码为 200kg，杠杠长度为 1.02m，即扭矩为 2000N.m 输入，进行 10 次独立、等精度测量，测量结果如表 3 所示。

表3 被校设备测量数据 (单位: N.m)

2001	2002	2001	2000	2002	2001	2002	2001	2003	2002
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

得单次测量的实验标准差:

$$S(T_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (T_i - \bar{T}_i)^2}{9}} = 0.850 \text{ N.m (其中 } n=10) \quad (26)$$

在实际测量中，在重复条件下测量 3 次，以 3 次测量结果的算术平均值为测量结果，其标准不确定度分量为:

$$u_1 = \frac{S(T_i)}{\sqrt{3}} = 0.49 \text{ N.m} \quad (27)$$

由被校设备扭矩数显量化误差引入的标准不确定度分量  $u_2$

扭矩显示仪表的分辨力为: 1N.m，其量化误差以等概率分布在半宽为 0.5N.m 的区间内，取包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，其引入的标准不确定度为:

$$u_2 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ N.m} \quad (28)$$

标准装置引入的标准不确定度分量。

标准砝码质量误差引入的标准不确定度  $u(m)$ 。

根据 20kg 砝码 M1 等级结果提供的质量允差为  $\pm 1g$ ，

施加扭矩由标准砝码经校准专用力臂转换为扭矩。因设备的误差采用相对满量程的引用误差，最大不确定度发生在扭矩值最大的情况下。以下以加载 200kg 标准砝码 (10 个) 的极端情况分析:

$m$  的最大允差服从均匀分布，由此引入的标准不确定度分量:

$$u(m) = 1g \times 10 / \sqrt{3} = 5.89 \times 10^{-3} \text{ kg} \quad (29)$$

重力加速度舍入误差引入的标准不确定度  $u(g)$ 。

$g$  的舍入误差服从均匀分布，由此引入的标准不确定度分量:

$$u(g) = 0.005 \text{ m/s}^2 \times 10 / \sqrt{3} = 2.89 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2 \quad (30)$$

校准力臂长度误差引入的标准不确定度  $u(L)$ 。

校准力臂长度误差引入的不确定度: 校准力臂最大允许误差为  $\pm 0.1\%$ 。

$L$  服从均匀分布:

$$u(L) = 0.1\% \times 1.02 / \sqrt{3} = 5.89 \times 10^{-4} \text{ m} \quad (31)$$

校准力臂长度误差引入的标准不确定度  $u(L)$ 。

校准时，测力力臂上放置水平仪以确保水平。水平仪分度为  $\pm 0.1^\circ$ ，服从均匀分布，即:

$$u(\theta) = 0.1 / \sqrt{3} = 0.058^\circ = 1.01 \times 10^{-3} \quad (32)$$

以上各项均不相关，列出扭矩示值误差测量不确定度汇总表。

表4 扭矩示值误差测量不确定度汇总表

序号	来源	类型	分布	包含因子	符号	灵敏系数	标准不确定度
1	被校设备测量引入						
1.1	测量重复性	A	正态	1	$u_1$	1	0.49N.m
1.2	被校设备扭矩数显量化误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u_2$	1	0.29N.m
2	标准装置引入						
2.1	标准砝码质量误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u(m)$	$10 \text{ m}^2/\text{s}^2$	0.00589kg
2.2	重力加速度舍入误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u(g)$	$204 \text{ kg.m}$	$0.00289 \text{ m/s}^2$
2.3	校准力臂长度误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u(L)$	$1960 \text{ kg.m/s}^2$	0.000589m
2.4	校准力臂与水平线夹角	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u(\theta)$	0	$1.01 \times 10^{-3}$

由重复性引入的不确定度分量大于由分辨力引入的不确定度分量，因此可以不考虑扭矩数显量化误差引入的不确定度。

由被校设备扭矩测量引入的标准不确定度为:

$$u(T_1) = u_1 = 0.49 \text{ N.m} \quad (33)$$

### 2.2.6 合成标准不确定度:

$$u_c(\delta_F) = \sqrt{u^2(\bar{T}_i) + (gL \cos \theta)^2 \cdot u^2(m) + (mL \cos \theta)^2 \cdot u^2(g) + (mg \cos \theta)^2 \cdot u^2(L) + (mgL \sin \theta)^2 \cdot u^2(\theta)} = 1.3 \text{ N.m} \quad (34)$$

### 2.2.7 扩展不确定度评定

按置信因子  $k=2$ ，则扩展不确定度为:

$$U = 2 \times 1.3 = 2.6 \text{ N.m} \quad (35)$$

测功机满量程为 2000N.m， $U_{\text{rel}} = 0.13\% \text{ FS}$

结论: 上述分析及计算得到扭矩示值误差测量结果的扩展不确定度为:  $U_{\text{rel}} = 0.13\% \text{ FS}$ ，( $k=2$ )。

## 3 结束语

对扭矩参数进行校准方法的制定并进行不确定度评定，对设备的扭矩校准有着非常重要的意义，满足了其量

值溯源的需求。

#### [参考文献]

- [1] 李先友, 王晓明, 祝夏雨. 扭矩校准技术现状与发展趋势[J]. 计量与测试技术, 2013(8): 56.
- [2] 王广俊, 张中杰, 孟峰, 等. 电动、气动扭矩扳子校准规范: JJF 1610-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-2.
- [3] 陈红, 陈伟昕. 国家计量检定规程编写规则: JJF1002-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 3-4.
- [4] 叶德培, 赵峰, 施昌彦, 等. 《测量不确定度评定与表示》中华人民共和国国家计量技术规范: JJF1059-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 2-3.

作者简介: 叶仁根 (1986.9—), 男, 江苏大学, 测控技术与仪器, 襄阳达安汽车检测中心有限公司, 主管工程师, 高级工程师; 贾莹莹 (1977.10—), 女, 湖北汽车工业学院, 工厂企业电气自动化, 襄阳达安汽车检测中心有限公司, 主管工程师, 高级工程师。