

力值参数校准方法及校准不确定度评定

贾莹莹 叶仁根

襄阳达安汽车检测中心有限公司, 湖北 襄阳 441004

[摘要] 力值参数使用非常广泛, 是设备的一个基本参数, 对其校准方法也有许多种, 但很多都不符合我们的实际使用需求, 文中的基本内容是根据我们日常所使用的校准方法对力值参数进行校准, 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] 力值; 校准方法; 不确定度评定

DOI: 10.33142/ec.v7i4.11670

中图分类号: TM935.3

文献标识码: A

Calibration Method of Force Parameters and Evaluation of Calibration Uncertainty

JIA Yingying, YE Rengen

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

Abstract: The value parameter is widely used and is a basic parameter of equipment. There are also many calibration methods for it, but many of them do not meet our actual usage needs. The basic content of this article is to calibrate the force parameter based on the calibration methods we use in daily life, and evaluate its calibration uncertainty in detail to meet the needs of quantity traceability.

Keywords: force value; calibration method; uncertainty evaluation

现今试验室现有许多非标试验设备, 这些设备国家、地方、行业都没有校准规范和检定规程, 所以没有统一的校准依据文件和校准方法。力值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, 详细阐述力值参数的校准方法, 并对其校准不确定度进行评定, 此即可满足其量值溯源的需求, 达到计量校准的目的。

1 力值参数校准方法

示值误差和重复性误差校准

1.1 砝码校准法 (在被校设备力值量程不大于 1000N 时采用)

将被校设备力传感拆下, 在被校设备力传感器上, 逐级加载砝码至力值上限。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, 记录设备示值。

按公式 (1.1.1) 计算加载力值 F :

$$F = m \cdot g \quad (1.1.1)$$

式中: m —加载砝码的质量, kg;

g —当地的重力加速度, m/s^2 。

每个校准点的力值示值误差 W_F 和示值重复性误差 R_F 分别按公式 (1.1.2) 和公式 (1.1.3) 计算:

$$W_F = \frac{\bar{F}_i - F}{F} \times 100\% \quad (1.1.2)$$

$$R_F = \frac{F_{max} - F_{min}}{F} \times 100\% \quad (1.1.3)$$

1.2 标准测力仪校准法 (在被校设备力值量程大于 1000N 时采用)

将被校力传感拆下, 和标准测力仪串联安装在反力架上进行加载。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, 记录设备示值。

每个校准点的力值示值误差 W_F 和示值重复性误差 R_F 分别按公式 (1.2.1) 和公式 (1.2.2) 计算:

$$W_F = \frac{\bar{F}_i - F}{F} \times 100\% \quad (1.2.1)$$

$$R_F = \frac{F_{max} - F_{min}}{F} \times 100\% \quad (1.2.2)$$

式中: \bar{F}_i —3 次力值示值的算术平均值, N;

F —加载的标准力值, N

F_{max}/F_{min} —3 次力值示值的最大值/最小值, N;

2 力值示值误差测量不确定度评定

2.1 力值示值误差测量不确定度的评定

力值范围: $F > 1000N$, 标准器为标准测力仪。

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

$$W_F = \frac{\bar{F}_i - F}{F} \times 100\% \quad (2.1.1)$$

式中: W_F ——力值示值误差, %;

F_i —3 次力值示值的算术平均值, N;
 F —加载的标准力值, N

2.1.2.1 方差

因为各输入量彼此独立, 依不确定度传播定律:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (2.1.2)$$

由 (2.1.1) 式得方差:

$$u_c^2(W_F) = c_1^2 u^2(\bar{F}_i) + c_2^2 u^2(F) \quad (2.1.3)$$

式中: $u(\bar{F}_i)$ —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;

2.1.2.2 灵敏系数:

$$c_1 = \frac{\partial(W_F)}{\partial(\bar{F}_i)} = \frac{1}{F} \quad (2.1.4)$$

$$c_2 = \frac{\partial(W_F)}{\partial(F)} = \frac{-\bar{F}_i}{F^2} \quad (2.1.5)$$

根据 (2.1.4), (2.1.5) 式得标准不确定度:

$$u_c^2(W_F) = \frac{F^2 u^2(\bar{F}_i) + \bar{F}_i^2 \cdot u^2(F)}{F^4} \quad (2.1.6)$$

2.1.3 测量不确定度来源

力值示值误差测量不确定度的来源主要包括:

- (1) 被校设备力值测量重复性引入的不确定度分量 u_1 , 采用 A 类方法评估;
- (2) 被校设备力值数显量化误差引入的标准不确定度 u_2 , 采用 B 类方法评估;
- (3) 标准测力仪误差引入的标准不确定度 $u(F)$, 采用 B 类方法评估;

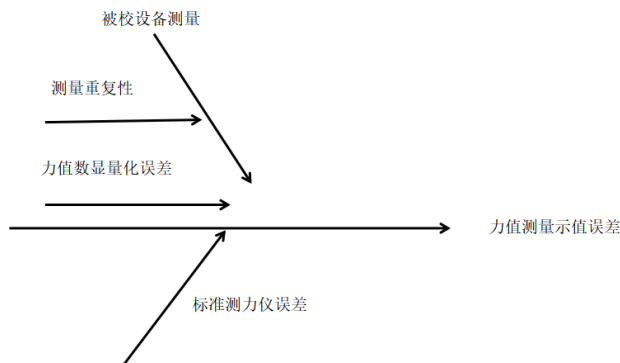


图 1 测量不确定度来源图 (1)

2.1.4 标准不确定度评定

(1) 由被校设备测量引入的标准不确定度 $u(\bar{F}_i)$

①由被校设备力值测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1 。

以力值上限值为 10000N, 选择加载标准测力仪为 5000N, 进行 10 次独立、等精度测量, 测量结果如表 1 所示。

表 1 设备力值测量数据 (单位: N)

5004	5004	5015	5008	5005	5009	5013	5008	5003	5005
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

得单次测量的实验标准差:

$$S(F_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (F_i - \bar{F}_i)^2}{9}} = 4.03\text{N} \quad (\text{其中 } n=10) \quad (2.1.7)$$

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:

$$u_1 = \frac{S(F_i)}{\sqrt{3}} = 2.33 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2.1.8)$$

②由被校设备力值数显量化误差引入的标准不确定度分量 u_2 。

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

$$u_2 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ N} \quad (2.1.9)$$

(2) 标准装置引入的标准不确定度分量

①查标准测力仪证书, 其最大允许误差为 $\pm 0.1\%$ 。服从均匀分布, 由此引入的标准不确定度分量:

$$u(F) = 5000 \times 0.1\% / \sqrt{3} = 2.89\text{N} \quad (2.1.10)$$

以上各项均不相关, 列出力值示值误差测量不确定度汇总表

表 2 力值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	被校设备力值测量						
1.1	测量重复性	A	正态	1	u_1	0.0002N^{-1}	2.33N
1.2	力值数显量化误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_2	0.0002N^{-1}	0.29N
2	标准装置引入						
2.1	标准测力仪误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u(F)$	0.0005N^{-1}	2.89N

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, 因此可以不考虑力值数显量化误差引入的不确定度。

由被校设备力值测量引入的标准不确定度为:

$$u(\bar{F}_i) = u_1 = 1.31\text{N} \quad (2.1.11)$$

2.1.5 合成标准不确定度

$$u_{\text{crel}}(W_F) = \sqrt{\frac{F^2 u^2(\bar{F}_i) + \bar{F}_i^2 \cdot u^2(F)}{F^4}} = 0.074\% \quad (2.1.12)$$

2.1.6 扩展不确定度评定:

按置信因子 $k=2$, 则扩展不确定度为: $U_{\text{rel}}=2 \times 0.074\%=0.15\%$ 。

结论: 上述分析及计算得到力值示值误差测量结果的

扩展不确定度为： $U_{rel}=0.15\%$ ， $(k=2)$ 。

2.2 力值示值误差测量不确定度的评定

力值范围： $1000N \geq F > 100N$ ，标准器为标准砝码。

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

$$W_F = \frac{\bar{F}_i - F}{F} \times 100\% \quad (2.2.1)$$

其中，对于使用砝码加载时：

$$F = m \bullet g \quad (2.2.2)$$

即：

$$W_F = \frac{\bar{F}_i - m \bullet g}{m \bullet g} \times 100\% \quad (2.2.3)$$

式中： W_F ——力值示值误差，%；

\bar{F}_i ——3次力值示值的算术平均值，N；

F ——加载的标准力值，N

m ——加载砝码的质量，kg；

g ——当地的重力加速度， m/s^2 。

(1) 方差

因为各输入量彼此独立，依不确定度传播定律：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (2.2.4)$$

由(2.2.3)式得方差：

$$u_c^2(W_F) = c_1^2 u^2(\bar{F}_i) + c_2^2 u^2(m) + c_3^2 u^2(g) \quad (2.2.5)$$

式中： $u(\bar{F}_i)$ ——被设备测量的不确定度分量；

$u(m)$ ——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。

(2) 灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial(W_F)}{\partial(\bar{F}_i)} = \frac{1}{m \bullet g} \quad (2.2.6)$$

$$c_2 = \frac{\partial(W_F)}{\partial(m)} = -\frac{\bar{F}_i}{m^2 \bullet g} \quad (2.2.7)$$

$$c_3 = \frac{\partial(W_F)}{\partial(g)} = -\frac{\bar{F}_i}{m \bullet g^2} \quad (2.2.8)$$

根据(2.2.6)，(2.2.7)，(2.2.8)式得标准不确定度：

$$u_c^2(W_F) = \frac{1}{m^2 \bullet g^2} u^2(\bar{F}_i) + \frac{\bar{F}_i^2}{m^4 \bullet g^2} u^2(m) + \frac{\bar{F}_i^2}{m^2 \bullet g^4} u^2(g) \quad (2.2.9)$$

2.2.3 测量不确定度来源

力值示值误差测量不确定度的来源主要包括：

被校设备力值测量重复性引入的不确定度分量 u_1 ，

采用 A 类方法评估；

力值数显量化误差引入的标准不确定度 u_2 ，采用 B

类方法评估；

标准砝码质量误差引入的标准不确定度 $u(m)$ ，采用

B 类方法评估；

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

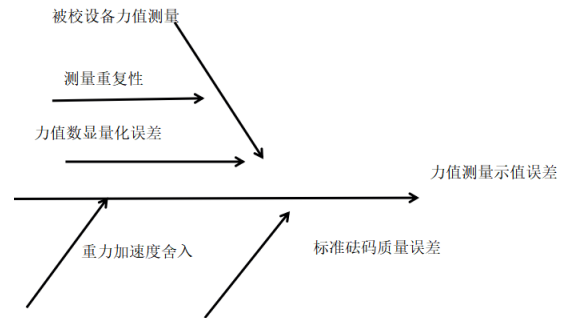


图2 测量不确定度来源图(2)

2.2.4 标准不确定度评定

(1) 由被校设备力值测量引入的标准不确定度 $u(\bar{F}_i)$ 。

① 由被校设备力值测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1 。

以力值上限值为 1000N，选择加载标准砝码为 50kg 输入，进行 10 次独立、等精度测量，测量结果如表 3 所示。

表3 校设备测量数据(单位：N)

491	493	492	492	493	494	492	493	495	491
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

得单次测量的实验标准差：

$$S(F_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (F_i - \bar{F}_i)^2}{9}} = 1.26N \quad (\text{其中 } n=10) \quad (2.2.10)$$

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：

$$u_1 = \frac{S(F_i)}{\sqrt{3}} = 0.73 \quad N \quad (2.2.11)$$

② 由力值数显量化误差引入的标准不确定度分量 u_2 。

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

$$u_2 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29 \quad N \quad (2.2.12)$$

(2) 标准装置引入的标准不确定度分量

① 标准测力仪误差引入的标准不确定度 $u(m)$ 。

根据 M1 等级砝码证书结果，50kg 标准砝码最大允许误差为 $\pm 2.5g$ ，服从均匀分布，由此引入的标准不确定度分量：

$$u(m) = 2.5g / \sqrt{3} = 1.44 \times 10^{-3} kg \quad (2.2.13)$$

② 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：

$$u(g) = 0.005m / s^2 \times 10 / \sqrt{3} = 2.89 \times 10^{-3} m / s^2 \quad (2.2.14)$$

以上各项均不相关,列出力值示值误差测量不确定度汇总表。

表4 力值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	被校设备力值测量引入						
1.1	测量重复性	A	正态	1	u_1	$0.00204N^{-1}$	$0.73N$
1.2	力值数显量化误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_2	$0.00204N^{-1}$	$0.29N$
2	标准装置引入						
2.1	标准砝码质量误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u(m)$	$0.02kg^{-1}$	$0.00144kg$
2.2	重力加速度舍入误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u(g)$	$0.102(m/s^2)^{-1}$	$0.00289m/s^2$

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,因此可以不考虑力值数显量化误差引入的不确定度。

由被校设备测量引入的标准不确定度为:

$$u(\bar{F}_i) = u_1 = 0.73 \text{ N} \quad (2.2.15)$$

2.2.5 合成标准不确定度

$$u_{\text{cref}}(W_F) = \sqrt{\frac{1}{m^2 \bullet g^2} u^2(\bar{F}_i) + \frac{\bar{F}_i^2}{m^4 \bullet g^2} u^2(m) + \frac{\bar{F}_i^2}{m^2 \bullet g^4} u^2(g)} = 0.152\% \quad (2.2.16)$$

2.2.6 扩展不确定度评定

按置信因子 $k=2$, 则扩展不确定度为: $U_{\text{rel}} = 2 \times 0.152\% = 0.31\%$ 。

结论:上述分析及计算得到力值示值误差测量结果的扩展不确定度为: $U_{\text{rel}} = 0.31\%$ ($k=2$)。

2.3 力值示值误差测量不确定度的评定

力值范围: $F \leq 100N$ 标准器为标准砝码时。

2.3.1 测量方法

用上述规定的测量方法所述。

2.3.2 校准模型

$$W_F = \frac{\bar{F}_i - F}{F} \times 100\% \quad (2.3.1)$$

其中,对于使用砝码加载时:

$$F = m \bullet g \quad (2.3.2)$$

即:

$$W_F = \frac{\bar{F}_i - m \bullet g}{m \bullet g} \times 100\% \quad (2.3.3)$$

式中: W_F ——力值示值误差, %;

\bar{F}_i ——3次力值示值的算术平均值, N;

F ——加载的标准力值, N

m ——加载砝码的质量, kg;

g ——当地的重力加速度, m/s^2 。

(1) 方差

因为各输入量彼此独立,依不确定度传播定律:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (2.3.4)$$

由(2.3.3)式得方差:

$$u_c^2(W_F) = c_1^2 u^2(\bar{F}_i) + c_2^2 u^2(m) + c_3^2 u^2(g) \quad (2.3.5)$$

式中: $u(\bar{F}_i)$ ——被设备测量的不确定度分量;

$u(m)$ ——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。

(2) 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial(W_F)}{\partial(\bar{F}_i)} = \frac{1}{m \bullet g} \quad (2.3.6)$$

$$c_2 = \frac{\partial(W_F)}{\partial(m)} = -\frac{\bar{F}_i}{m^2 \bullet g} \quad (2.3.7)$$

$$c_3 = \frac{\partial(W_F)}{\partial(g)} = -\frac{\bar{F}_i}{m \bullet g^2} \quad (2.3.8)$$

根据(2.3.6), (2.3.7), (2.3.8)式得标准不确定度:

$$u_c^2(W_F) = \frac{1}{m^2 \bullet g^2} u^2(\bar{F}_i) + \frac{\bar{F}_i^2}{m^4 \bullet g^2} u^2(m) + \frac{\bar{F}_i^2}{m^2 \bullet g^4} u^2(g) \quad (2.3.9)$$

2.3.3 测量不确定度来源

力值示值误差测量不确定度的来源主要包括:

(1) 被校设备力值测量重复性引入的不确定度分量 u_1 , 采用A类方法评估;

(2) 力值数显量化误差引入的标准不确定度 u_2 , 采用B类方法评估;

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

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

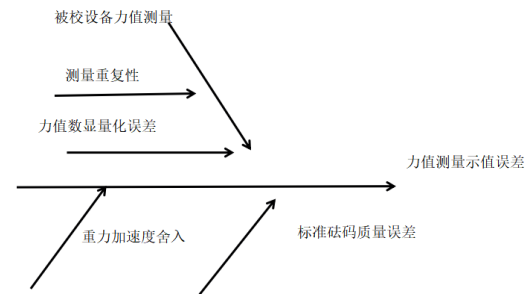


图3 测量不确定度来源图(3)

2.3.4 标准不确定度评定

(1) 由被校设备力值测量引入的标准不确定度 $u(\bar{F}_i)$

①由被校设备力值测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1 。

以力值上限值为 100N，选择加载标准砝码为 5kg 输入，进行 10 次独立、等精度测量，测量结果如表 5 所示。

表 5 被校设备测量数据 (单位: N)

49.1	49.2	49.3	49.4	49.3	49.2	49.3	49.2	49.3	49.4
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

得单次测量的实验标准差:

$$S(F_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (F_i - \bar{F})^2}{9}} = 0.0948 \text{ N (其中 } n=10) \quad (2.3.10)$$

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:

$$u_1 = \frac{S(F_i)}{\sqrt{3}} = 0.73 \text{ N} \quad (2.3.11)$$

②由力值数显量化误差引入的标准不确定度分量 u_2 。

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

$$u_2 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289 \text{ N} \quad (2.3.12)$$

(2) 标准装置引入的标准不确定度分量

①标准测力仪误差引入的标准不确定度 $u(m)$

根据 M1 等级砝码证书结果，5kg 标准砝码最大允许误差为 $\pm 0.8 \text{ g}$ ，服从均匀分布，由此引入的标准不确定度分量为:

$$u(m) = 0.8 \text{ g} / \sqrt{3} = 4.6 \times 10^{-4} \text{ kg} \quad (2.2.13)$$

②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为:

$$u(g) = 0.005 \text{ m/s}^2 \times 10 / \sqrt{3} = 2.89 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2 \quad (2.3.14)$$

以上各项均不相关，列出力值示值误差测量不确定度汇总表

表 6 力值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	被校设备力值测量引入						
1.1	测量重复性	A	正态	1	u_1	0.0204 N^{-1}	0.055 N
1.2	力值数显量化误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_2	0.0204 N^{-1}	0.029 N
2	标准装置引入						
2.1	标准砝码质量误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u(m)$	0.2 kg^{-1}	0.00046 kg
2.2	重力加速度舍入误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u(g)$	$0.102 (\text{m/s}^2)^{-1}$	0.00289 m/s^2

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，因此可以不考虑力值数显量化误差引入的不确定度。

由被校设备测量引入的标准不确定度为:

$$u(\bar{F}_i) = u_1 = 0.055 \text{ N} \quad (2.3.15)$$

2.3.5 合成标准不确定度:

$$u_{\text{cref}}(W_F) = \sqrt{\frac{1}{m^2 \cdot g^2} u^2(\bar{F}_i) + \frac{\bar{F}_i^2}{m^4 \cdot g^2} u^2(m) + \frac{\bar{F}_i^2}{m^2 \cdot g^4} u^2(g)} = 0.116\% \quad (2.3.16)$$

2.3.6 扩展不确定度评定

按置信因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为: $U_{\text{rel}}=2 \times 0.116\%=0.24\%$ 。

结论: 上述分析及计算得到力值示值误差测量结果的扩展不确定度为: $U_{\text{rel}}=0.24\%$ ($k=2$)。

3 结束语

对力值参数进行校准方法的制定并进行不确定度评定，对设备的力值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]朱岩. 付巍力值加载校准系统的不确定度计算方法研究[J]. 探索与观察, 2015(9): 78.
 - [2]高原. 材料试验机力值校准方法研究[J]. 计测技术, 2008(8): 56.
 - [3]陈红, 陈伟昕. (JJF1002-2010)《国家计量检定规程编写规则》[D]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
 - [4]叶德培, 赵峰, 施昌彦, 原遵东, 沙定国, 周桃庚, 陈红. (JJF1059-2012)《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[D]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- 作者简介: 贾莹莹 (1977.10—), 毕业院校: 湖北汽车工业学院, 所学专业: 机械设计制造及其自动化, 当前工作单位: 襄阳达安汽车检测中心有限公司, 职务: 主管工程师, 职称职级: 高级工程师; 叶仁根 (1986.9—), 毕业院校: 江苏大学, 所学专业: 测控技术与仪器, 当前工作单位: 襄阳达安汽车检测中心有限公司, 职务: 主管工程师, 职称职级: 高级工程师。