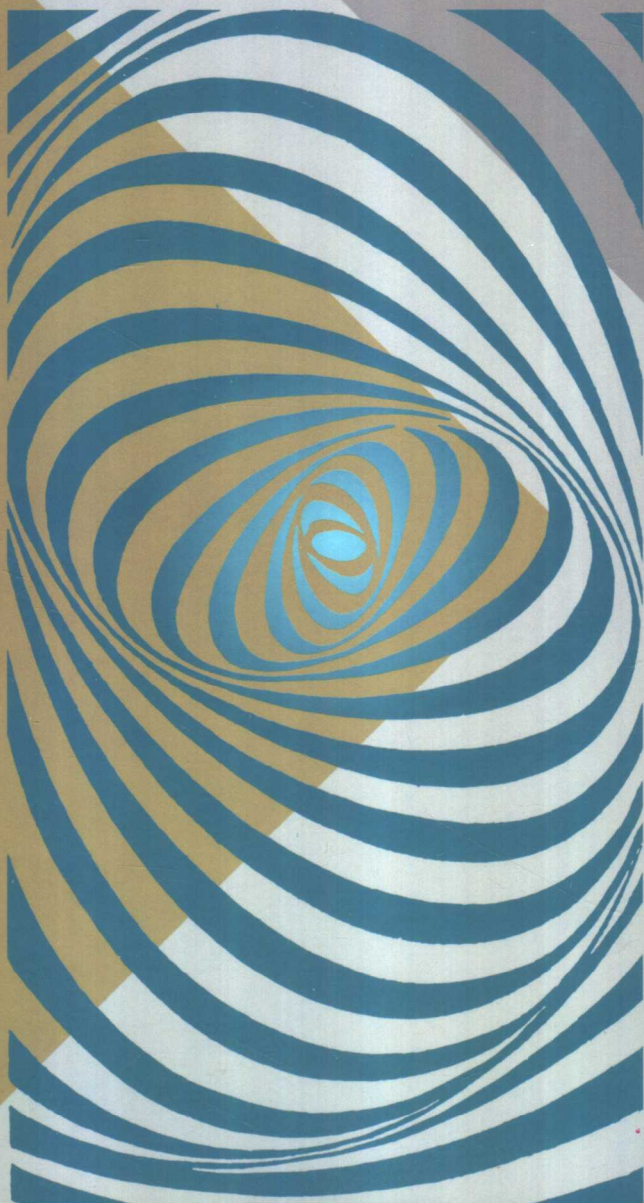


力值、扭矩和硬度 测量不确定度评定导则

李庆忠 李宇红 编著



中国计量出版社



力值、扭矩和硬度 测量不确定度评定导则

李庆忠 李宇红 编著

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

力值、扭矩和硬度测量不确定度评定导则/李庆忠, 李宇红编著. —北京: 中国计量出版社, 2003. 7

ISBN 7-5026-1758-2

I. 力... II. ①李... ②李... III. ①力学测量②扭矩—测量③硬度—测量
IV. TB93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 028577 号

内 容 提 要

本书是测量不确定度评定方面的一部循序渐进的指导书籍, 在内容上注重理论与实际相结合, 从测量不确定度的基本概念入手, 结合我国溯源等级图, 逐项论述了力值、扭矩和硬度测量不确定度的评定方法, 并给出了评定示例, 介绍了解决实际评定各类计量器具测量不确定度的有效措施。

全书共四章, 内容包括: 测量不确定度评定的相关概念、评定步骤、评定要点; 力值、扭矩和硬度计量基标准机及工作计量器具的具体评定程序和方法等。

本书可供从事力值、扭矩和硬度计量、标准、质量认证和实验人员使用, 也可供院校相关专业的师生参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

E-mail jlfxb@263.net.cn

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm×1092 mm 16 开本 印张 4.5 字数 74 千字

2003 年 6 月第 1 版 2003 年 6 月第 1 次印刷

*

印数 1—3 000 定价: 12.00 元

前 言

随着科学技术的不断发展,测量的重要性越来越突出,已成为科学技术、生产、贸易和生活等各个领域不可缺少的一项工作。测量的目的在于确定被测量的值,而测量结果的完整表述中应包含测量不确定度,以确定测量结果的可信程度。因此,测量不确定度的评定已在各个领域得到了广泛的应用。例如:ISO17025《校准和检测实验室的通用要求》和2000版的ISO9000族标准均对测量结果的不确定度提出了明确的要求。

测量不确定度既然已被社会的各个领域所采用,若要正确评定测量不确定度,并使评定的结果可以进行相互比较,必须有一套统一的评定方法和理论体系。为了解决这一问题,经过二十余年国际相关专家的不懈努力,1993年国际计量局(BIPM)、国际电工委员会(IEC)、国际临床化学联合会(IFCC)、国际标准化组织(ISO)、国际理论化学与应用化学联合会(IUPAC)、国际理论物理与应用物理联合会(IUPAP)和国际法制计量组织(OIML)联合发布了《测量不确定度表示指南》(以下简称GUM),1995年又对该指南进行了修订。自此以来,国际上有了进行测量不确定度评定和表示的约定一致的方法和理论体系。各国纷纷采纳该指南进行测量不确定度的评定和表示,我国亦于1999年依据该指南起草颁布了JJF1059—1999《测量不确定度评定与表示》。

GUM和JJF1059规定的是测量中评定和表示不确定度的一种通用规则,针对每一领域不同准确度等级的测量,如何给出其测量结果的不确定度是我们面临的又一问题。各国计量部门结合本国情况,已经或正在对量大面广的不同量值的测量不确定度评定方法进行具体化。欧共体试验室认可委员会(EAL)在力学方面正在进行有关力值、扭矩、硬度、质量、容量、密度等量值的测量不确定度评定研究工作。

我们根据GUM和JJF1059的要求,结合力值、硬度及扭矩计量专业的具体问题,对其测量不确定度评定方法进行了研究,同时对测量不确定度评定的基本要点进行了系统分析,其中包括基本概念、基本计算公式、计量传递链、评定过程、评定要点等。本书的目的在于为力值、硬度及扭矩国家计量基标准的建立,测量设备的检定和校准,检定规程、检定系统、测量方法和校准规范的起草等工作提供测量不确定度评定的参考。

由于时间仓促,书中可能存在缺点和不足,恳请业界的专家、学者和读者批评指正。

作者

2003年4月

目 录

第一章 测量不确定度评定基础知识	(1)
第一节 引言	(1)
第二节 基础知识	(1)
一、基本概念	(1)
二、基本计算公式	(2)
三、自由度	(4)
四、计量传递链	(6)
五、评定过程	(6)
六、不确定度评定的要点	(7)
第二章 力值计量	(8)
第一节 力基(标)准机的力值不确定度	(8)
一、静重式力基(标)准机(DWM)	(8)
二、杠杆式力标准机(LM)	(12)
三、液压式力标准机(HM)	(14)
第二节 标准测力仪的力值测量不确定度	(17)
一、高精度测力仪	(17)
二、普通标准测力仪	(18)
三、力值连续使用的测力仪	(18)
第三节 负荷传感器的力值测量不确定度	(19)
第四节 叠加式力标准机的力值不确定度	(20)
第五节 力校准机的力值不确定度	(21)
一、力校准机的不确定度(标准测力仪只进行一次定度时)	(21)
二、力校准机的不确定度(标准测力仪进行两次定度时)	(22)
三、力校准机的力值相对偏差的合成不确定度(已知标准测力仪输出温度 修正系数时)	(22)
第六节 拉压材料试验机的力值不确定度	(22)
第三章 硬度计量	(24)
第一节 硬度测量不确定度概述	(24)
一、简介	(24)
二、影响压入硬度测量不确定度的参量	(25)
第二节 洛氏硬度测量不确定度	(29)

一、直接校准法的校准不确定度	(29)
二、间接校准方法的校准不确定度	(33)
第三节 布氏与维氏硬度测量不确定度	(38)
一、布氏与维氏硬度间接校准的硬度不确定度	(38)
二、布氏与维氏硬度的测量不确定度影响量	(38)
三、布氏硬度的测量不确定度	(39)
四、维氏硬度的测量不确定度	(45)
第四章 扭矩计量	(52)
第一节 计量传递链(传递系统)	(52)
第二节 标准扭矩仪的等级化分	(52)
第三节 校准方法	(54)
第四节 扭矩基(标)准机的不确定度评估	(57)
一、静重式扭矩基(标)准机(DTM)	(57)
二、杠杆式扭矩标准机(LTM)	(59)
三、力传感器式扭矩标准机	(59)
第五节 扭矩传感器的扭矩校准不确定度	(60)
第六节 扭矩校准机的扭矩不确定度	(61)
一、标准扭矩仪只进行一次校准	(62)
二、标准扭矩仪进行两次校准	(62)
三、已知标准扭矩仪输出温度修正系数	(63)
第七节 扭矩比较机(TC)的扭矩不确定度	(63)
参考文献	(65)

第一章 测量不确定度评定基础知识

第一节 引言

自 1993 年国际标准化组织 (ISO)、国际计量局 (BIPM)、国际法制计量组织 (OIML) 等七个与计量测试相关的国际组织发表了“测量不确定度表达导则”(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) 之后, 各国计量部门结合本国情况, 已经或正在对量大面广的不同量值的测量不确定度评定方法进行具体化。欧共体试验室认可委员会 (EAL) 在力学方面正在进行有关力值、扭矩、硬度、质量、容量、密度等量值的计量不确定度评估研究工作。

我国国家质量技术监督局和中国计量科学研究院亦采用上述 ISO 导则, 编制了相应技术文件。

目前的主要任务是, 如何根据 ISO 不确定度导则, 研究不同专业的量值不确定度评定方法。

我们根据 ISO 导则的精神, 结合力值、硬度及扭矩计量专业的具体问题, 对其测量不确定度评估方法进行了研究以供相应计量工作者在评估上述范畴的测量不确定度时参考。与此同时, 对计量不确定度评定的基本要点进行了系统分析, 其中包括基本概念、基本计算公式、计量传递链、评定过程、评定要点等。

由于测量的不确定度评定本身并无定论, 是个不完全确定的问题。随着量值测量手段的不断改进, 测量准确度的提高, 对物理问题认识的加深, 数学分析的严密, 计算手段的现代化, 力值、硬度及扭矩计量不确定度评定方法将会不断深入和改进。

第二节 基础知识

一、基本概念

在测量不确定度评估中涉及的主要概念有: 测量不确定度、标准不确定度、不确定度的 A 类评定、不确定度的 B 类评定、合成标准不确定度、扩展不确定度、包含因子、自由度和置信概率等。现将其定义^[1]汇集如下。

(1) 测量不确定度：表征合理地赋予被测量之值的分散性，与测量结果相联系的参数。

(2) 标准不确定度：以标准差表示的测量不确定度。

(3) 不确定度的 A 类评定：用对观测列进行统计分析的方法，来评定标准不确定度。

(4) 不确定度的 B 类评定：用不同于对观测列进行统计分析的方法，来评定标准不确定度。

(5) 合成标准不确定度：当测量结果是由若干个其他量的值求得时，按其他各量的方差或（和）协方差算得的标准不确定度。

(6) 扩展不确定度：确定测量结果区间的量，合理赋予被测量之值分布的大部分可望含于此区间。

(7) 包含因子：为求得扩展不确定度，对合成标准不确定度所乘之数字因子。

(8) 自由度：在方差的计算中，和的项数减去对和的限制数。

(9) 置信概率：与置信区间或统计包含区间有关的概率值。

二、基本计算公式

1. 标准不确定度的 A 类评定

(1) 贝塞尔法

对一个量 X 在等精密度下独立测量得到 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，则 X 的最佳值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-1)$$

单次测量的标准不确定度

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-2)$$

平均值 $\bar{x}$ 的标准不确定度

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-3)$$

(2) 极差法

在计量检定与校准的实施中，为了节省时间、提高效率，常常对同一测量点仅做有限的几次测试，如 3 次、4 次、5 次，甚至 2 次，以此计算极差、确定重复性。因此，如何根据极差确定标准不确定度成为人们关心的问题。

单次测量的标准不确定度

$$s(x_i) = \frac{1}{d_n}(x_{\max} - x_{\min}) \quad (1-4)$$

式中： d_n ——极差系数，其值与测量次数 n 有关，见表 1—1。

表 1—1 极差系数 d_n 及自由度 ν

n	2	3	4	5	6	7	8	9
d_n	1.13	1.64	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97
ν	0.9	1.8	2.7	3.6	4.5	5.3	6.0	6.8

2. 标准不确定度的 B 类评定

获得 B 类不确定度的信息来源有以下几个方面：以前的观测数据；对有关技术资料和测量仪器特性的了解和经验；生产部门提供的技术说明文件；校准证书，检定证书，或其他文件提供的数据、准确度的级别，包括目前暂在使用的极限误差等；手册或某些资料给出的参考数据及其不确定度；规定试验方法的国家标准或类似技术文件中给出的重复性限或复现性限。

根据 B 类不确定度评定的实践，分以下几种情况加以说明：

(1) 影响量的估计值 x 来源于正式的符合要求的校准证书时，应在给出测量平均值 $\bar{x}$ 的同时，给出扩展不确定度 U 及相应的包含因子 k ，则 $\bar{x}$ 的标准不确定度 $u(\bar{x}) = U/k$ 。

(2) 当已知估计值 x 的极限误差 $\pm \Delta x = \pm a$ ，即认为 x 的分散区间为 a ，且 x 落在 $-a$ 到 $+a$ 区间的概率 $p = 100\%$ ，即全部落在此区间内。通过对其分布的估计，得到 x 的标准不确定度 $u(x) = a/k$ 。 k 值取决于所估计的分布(见表 1—2)。

表 1—2 常用分布与 k ， $u(x_i)$ 的关系

分布类型	$p(\%)$	k	$u(x_i)$
正态	99.73	3	$a/3$
三角	100	$\sqrt{6}$	$a/\sqrt{6}$
梯形 ($\beta=0.71$)	100	2	$a/2$
矩形 (均匀)	100	$\sqrt{3}$	$a/\sqrt{3}$
投影	100	10/3	$3a/10$
反正弦	100	$\sqrt{2}$	$a/\sqrt{2}$
两点	100	1	a

备注： β 为梯形的上底与下底之比。对于梯形分布 $k = \sqrt{6/(1+\beta^2)}$ ，当 $\beta=1$ 时梯形分布变成矩形分布；当 $\beta=0$ 时梯形分布变成三角形分布。

(3) 在缺乏任何其他信息时,一般估计为均匀(矩形)分布。

(4) 对于数字显示测量仪器,分辨力 δx 带来的标准不确定度 $u(x)=0.29\delta x$ 。

3. 合成标准不确定度

设被测量(又称输出量)为 Y , 其估计值为 y , 影响量为 X_i ($i=1, \dots, N$) (又称输入量), 其估计值为 x_i , 二者之间的函数模型为

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1-5)$$

当全部影响量的估计值 x_i 彼此独立或不相关时, 合成标准不确定度 $u_c(y)$ 由下式得到:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (1-6)$$

式中: $u(x_i)$ ——影响量的估计值 x_i 的标准不确定度, 即可按 A 类也可按 B 类进行评估;

$u_c(y)$ ——估计值 y 的标准偏差;

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$ ——在 $X_i=x_i$ 时的偏导数, 称为灵敏系数, 符号为 c_i 。灵敏系数描述

输出量估计值 y 如何随输入量估计值 $x_1, x_2, \dots, x_N$ 的变化而变化。

式(1-6)称为“不确定度传播定律”, 还可写成

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (1-7)$$

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (1-8)$$

灵敏系数 c_i 的确定方法为:

①当模型函数 f 已知时, 取模型函数 f 的偏导数;

②当模型函数 f 不明确, 尚无合适的解析式选用, 则通过试验方法确定增量比 $\Delta f_i / \Delta x_i$, 以此代替其偏导数。即通过变化第 i 个 x_i , 而保持其他输入量不变, 测量 Y 的变化量。

③输出量 Y 与一些影响量有明显函数关系, 与另一些影响量的函数关系不明确, 则前者通过取偏导数方法确定, 后者通过试验方法确定增量比。

④在一些情况下, 认为影响量的变化或其本身的数量不经放大和缩小直接反映在被测量的合成标准不确定度中, 即认为对这些影响量的灵敏系数 $c_i = \pm 1$ 。

三、自由度

根据 JJF1059—1999《测量不确定度评定与表示》的规定, 在评定扩展不确

定度时,有两种方法:

①在合成标准不确定度 $u_c(y)$ 确定之后, 乘以一个包含因子 k , 即得扩展不确定度 $U = k u_c(y)$, 一般 k 取 2。

②将 $u_c(y)$ 乘以给定概率 p 的包含因子 k_p , 得到扩展不确定度 U_p , 而 k_p 与 y 的分布有关。

这就是说, 只有用方法② 评定扩展不确定度时, 需要评定各分量的自由度 ν_i 及合成标准不确定度的有效自由度 ν_{eff} , 从而得到与给定概率 p 相对应的包含因子 k_p 。一般情况下, 用方法①评定扩展不确定度时不需要估算自由度。

自由度估算方法简述。

1. A 类估算

对一个量 X 在等精度下独立测量 n 次, 用贝塞尔公式计算其单次测量值的不确定度和平均值的不确定度时, 对应的自由度为 $n-1$ 。实际上, 对一个量 X 在非等精度下独立测量 n 次, 对应的自由度也为 $n-1$ 。

按极差法计算时, 对应的自由度 ν 与 n 的关系见表 1—1。

2. B 类估算

当能估算出影响量的相对标准偏差时, 按下述公式计算与其标准不确定度对应的自由度:

$$\nu = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma(u)}{u} \right)^{-2} \quad (1-9)$$

表 1—3 给出一些计算结果。

表 1—3 自由度与相对标准偏差对应关系

ν	$\sigma(u)/u$	ν	$\sigma(u)/u$	ν	$\sigma(u)/u$
1	0.71	6	0.29	15	0.18
2	0.50	7	0.27	20	0.16
3	0.41	8	0.25	50	0.10
4	0.35	9	0.24	100	0.07
5	0.32	10	0.22		

3. 合成标准不确定度的有效自由度

$$\nu_{\text{eff}} = u_c^4 / \left(\sum \frac{u_i^4}{\nu_i} \right) \quad (1-10)$$

式中： u_c ——合成标准不确定度；

u_i ——分量标准不确定度；

ν_i ——与分量标准不确定度对应的自由度。

并且有 $\nu_{\min} < \nu_{\text{eff}} \leq \sum \nu_i$ 。

四、计量传递链

在进行不确定度估算时，首先应明确评定对象，知道其相应的计量传递链以及它在传递链的位置。从而确定评定对象的上下、左右关系。这样才可能对拟评定的被测量进行准确而全面的评定。计量传递链的一般形式见图 1—1。与此同时，还应清楚所采用的检定或校准方法。

五、评定过程

评定过程见图 1—2。在进行测量不确定度评定时，经常用不确定度评定表 1—4 来完成。

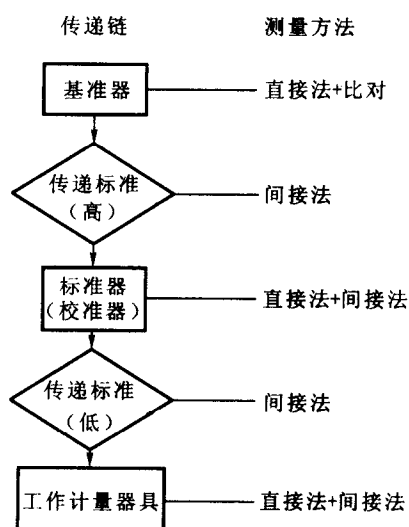


图 1—1 计量传递链

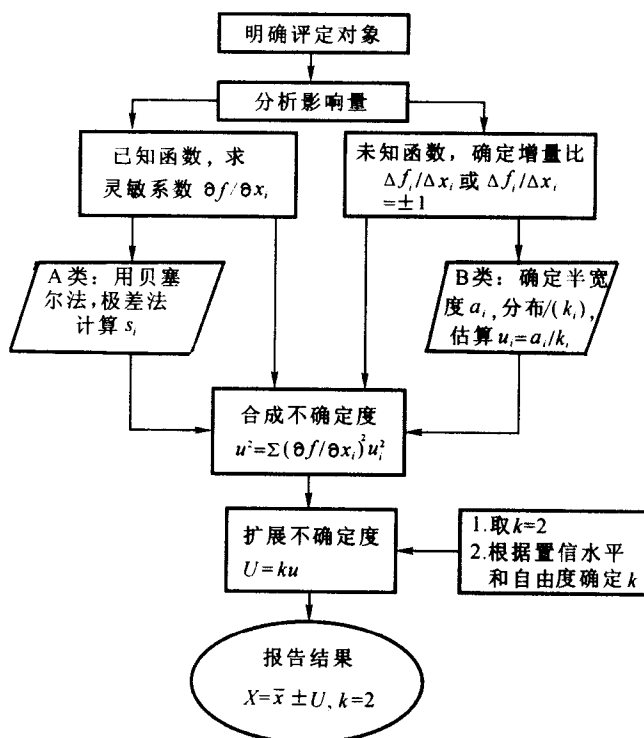


图 1—2 评估过程

表 1—4 测量不确定度评估表

影响量 X_i	估计值 x_i	标准不确定度 $u(x_i)$ 或 s_i	分布	灵敏系数 $c_i = \partial f / \partial x_i$ 或 $\Delta f_i / \Delta x_i$	对合成标准不确定度贡献 $u_i = c_i u(x_i)$ 或 $u_i = c_i \cdot s_i$
X_1	x_1	$u(x_1)$ 或 s_1		c_1	u_1
...	...	...		...	...
X_N	x_N	$u(x_N)$ 或 s_N		c_N	u_N
X					
合成不确定度 u		$= \sqrt{\sum u_i^2}$			
扩展不确定度 $U (k=2)$		$= 2u$			

六、不确定度评定的要点

在任何一个计量领域进行不确定度评定时，需掌握以下 5 个要点：

①具有一定的数学基础，包括分析数学和统计数学，以及 JJF1059—1999 或 ISO《测量不确定度评估导则》等。

②熟悉相关的物理和计量理论与实践。

③掌握相关量值的传递（溯源）链。

④清楚相关仪器的检定或校准方法。

⑤了解检定或校准与使用的情况。

第二章 力值计量

第一节 力基（标）准机的力值不确定度

本节讨论静重式、杠杆式和液压式力基（标）准机的力值不确定度评定方法。从标准力值的计算公式出发，利用函数的误差传递公式，导出标准力值的相对不确定度与各影响量的不确定度的关系，确定力基（标）准机的力值相对不确定度。在进行不确定度评定时，应首先建立被评估量值的溯源系统。图 2—1 给出了力值溯源系统。

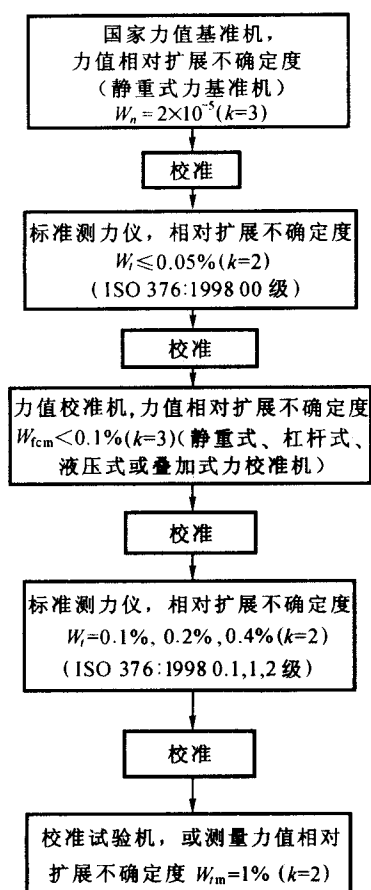


图 2—1 力值溯源系统

一、静重式力基（标）准机（DWM）

静重式力基（标）准机是指以砝码的重力作为标准负荷，通过适当的机构按预定顺序自动平稳地把负荷直接地施加到被检测力仪上的力基（标）准机。

根据万有引力定律，质量为 m (kg) 的砝码在重力加速度为 g (m/s^2) 的真空引力场中产生的重力 F_0 为

$$F_0 = mg$$

如图 2—2 所示，砝码 m 在空气中产生的向下作用力值 F 为

$$F = mg(1 - d_0/d) \quad (2-1)$$

式中： d ， d_0 ——分别为砝码材料密度和砝码所在地点的空气密度， kg/m^3 。

由式 (2—1) 可以求出质量为 m 的物体在有空气的重力场中产生的向下力值 F 。反之，也可以由此式求出在空气中产生向下的力值 F 所需的质量。

当 F 的单位为 N 时

$$m = \frac{F}{g(1 - d_0/d)} \quad (2-2)$$

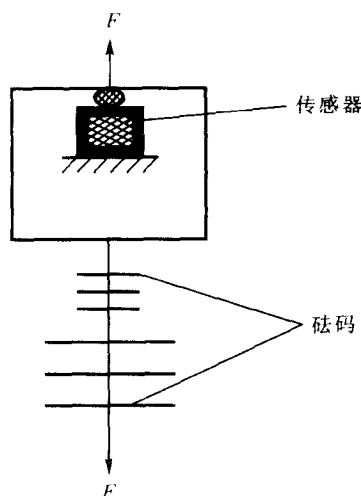


图 2-2 静重机示意图

在静重机中，产生力值不确定度的因素有两方面，其一是由式（2-1）给出的直接决定力值的各物理因素带来的不确定度；其二是与力标准机的安装、调整性能有关的因素带来的不确定度。

1. 物理因素的不确定度分量

由函数误差理论可得到力值的相对不确定度 w_{co} 的表达式

$$w_{co} = \frac{u_f}{f} = \sqrt{\left(\frac{u_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{u_g}{g}\right)^2 + \left(\frac{d_0}{d-d_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{u_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{u_{d0}}{d-d_0}\right)^2} \quad (2-3)$$

式中：

- u_m ——力标准机砝码的质量测量不确定度；
- u_g ——砝码所在地点的重力加速度的测量不确定度；
- u_d ——砝码的材料密度测量不确定度；
- u_{d0} ——砝码所在地点空气密度的变化引起的测量不确定度；

2. 力标准机的安装、调整等有关因素的不确定度分量

这部分因素往往并不直接影响砝码向下作用力的大小，但是它影响力值的正确传递。同时，该影响还与被检测力仪的特性有关，这里给出下述三方面的影响。

(a) 力标准机工作台的不水平会造成施加到测力仪上的轴向力值减少。当工作台的倾角为 α_1 时，力值相对减少量（参见图 2-3）

$$\delta F_1 = 1 - \sqrt{1 + \tan^2 \alpha_1}$$

当 α_1 很小时

$$\delta F_1 = -\frac{\alpha_1^2}{2} \quad (2-4)$$

(b) 力标准机上、下拉头的中心连线不铅垂造成加到测力仪上的轴向力值减少。当中心连线和铅垂线的夹角为 α_2 时，力值相对减少量 δF_2 ：

$$\delta F_2 = -\frac{\alpha_2^2}{2} \quad (2-5)$$

(c) 砝码摆动产生的惯性力。当砝码摆动到最低点时，惯性力达最大值。这时，测力仪所受的向下力为 F_3 。

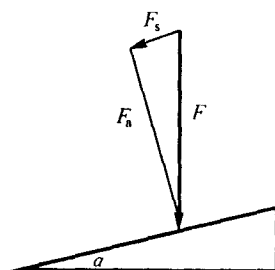


图 2-3 倾斜负荷示意图

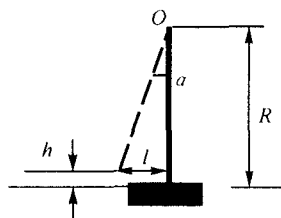


图 2-4 砝码摆动示意图

$$F_s = F + ma$$

式中： a ——砝码摆动时质心的向心加速度。

力值的相对增加量 δF_3 由下式确定：

$$\delta F_3 = (l/R)^2 \quad (2-6)$$

式中： l ——砝码质心摆动的最大水平距离（见图 2-4）；

R ——对应砝码的质心到支承点的距离。

3. 力值合成相对不确定度

在一台静重机建立后，通常会得到与上述 4 个物理因素和 3 个其他因素产生的不确定度相关的误差值，根据实际情况、经验和惯例做如下评估：

①对于力标准机的所有砝码质量，通常由质量室称量，并给出扩展不确定度 Δ_m 。该不确定度用 B 类方法进行评估，正态分布；或给出极限误差。

②重力加速度 g 。有些由中国计量科学研究院或国家测绘总局测出，并给出扩展不确定度，多数是由有关资料中查出。例如，北京地区的重力加速度值为 9.8013 m/s^2 ，考虑到整个地区的重力值随纬度、海拔高度等的变化，其极限变化可取 0.0001 m/s^2 ，相对极限变化为 1×10^{-5} ，用 B 类方法进行评估，均匀分布。如果力标准机安装地点的重力值为直接测出，如中国计量科学研究院， $g = 9.80125 \text{ m/s}^2$ ，其极限变化可取 0.00001 m/s^2 ，相对极限变化为 1×10^{-6} ，用 B 类方法进行评估，均匀分布。

③砝码材料密度。严格地讲，应对砝码材料的样品进行实测，给出其扩展不确定度，看做正态分布，分布因子取 3 或 2。有时，从表中查出砝码材料密度，如钢材取 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，其极限误差为 100 kg/m^3 ，用 B 类方法进行评定，均匀分布。

④空气密度。空气密度随其温度、湿度和大气压力变化。通常只能取其统计平均值 1.2 kg/m^3 ，其极限变化估计为 0.1 kg/m^3 ，用 B 类方法进行评定，均匀分布。

⑤力标准机工作台的不水平造成的加到被校测力仪上的力值减少，其极限值为 δF_1 ，用 B 类方法进行评估，符合投影分布的定义。

⑥力标准机上、下拉头不同心造成的加到被校测力仪上的力值减少，其极限值 δF_2 ，用 B 类方法进行评估，投影分布。

⑦砝码摆动产生的惯性力，使加到被校测力仪上的力增大，其极限增大量为 δF_3 ，用 B 类方法进行评估，看做三角形分布。

将上述分析列成表格，见表 2-1。

表 2—1 静重式力基（标）准机力值不确定度各种分量贡献表

序号	项目	分 量	类别	半宽度 a_i 或 扩展不确定度	分布	分布 因子 k_i	不确定度 u_i 或相对不确定度 w_i
1	砝码质量 m	相对极限误差 δm_1 或相对扩展不确定度 δm_2	B B	δm_1 或 δm_2	均匀 正态	$\sqrt{3}$ 3	$w_m = \delta m_1 / \sqrt{3}$ $w_m = \delta m_2 / 3$
2	重力加速度 g	相对极限误差 δg	B	δg	均匀	$\sqrt{3}$	$w_g = \delta g / \sqrt{3}$
3	砝码材料密度 d	极限误差 Δd_1 或扩展不确定度 Δd_2	B	Δd_1 Δd_2	均匀 正态	$\sqrt{3}$ 3	$u_{d_1} = \Delta d_1 / \sqrt{3}$ $u_{d_2} = \Delta d_2 / 3$
4	空气密度 d_0	极限误差 Δd_0	B	Δd_0	均匀	$\sqrt{3}$	$u_{d_0} = \Delta d_0 / \sqrt{3}$
5	工作台水平	最大偏差 δF_1	B	δF_1	投影	10/3	$w_1 = 3\delta F_1 / 10$
6	上、下拉头不同心	最大偏差 δF_2	B	δF_2	投影	10/3	$w_2 = 3\delta F_2 / 10$
7	砝码摆动	最大偏差 δF_3	B	δF_3	三角	$\sqrt{6}$	$w_3 = \delta F_3 / \sqrt{6}$

力基（标）准机的合成相对不确定度：

$$\text{压向力值} \quad w_{\text{cuc}} = \sqrt{w_{c_0}^2 + w_1^2 + w_3^2} \quad (2-7)$$

$$\text{拉向力值} \quad w_{\text{cut}} = \sqrt{w_{c_0}^2 + w_2^2 + w_3^2} \quad (2-8)$$

将表 2—1 中最后一列数据代入，得到：

$$w_{\text{cuc}} = \left[\left(\frac{\delta m}{3} \right)^2 + \left(\frac{\delta g}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{d_0}{d - d_0} \right)^2 \left(\frac{\Delta d}{\sqrt{3}d} \right)^2 + \left(\frac{1}{d - d_0} \right)^2 \left(\frac{\Delta d_0}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{3\delta F_1}{10} \right)^2 + \left(\frac{\delta F_3}{\sqrt{6}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-9)$$