

第2版

# 一级注册计量师 基础知识及专业实务

YIJI ZHUCE JILIANGSHI  
JICHU ZHISHI JI ZHUANYE SHIWU

中国计量测试学会 组编

下 册



 中国质检出版社

第2版

# 一级注册计量师 基础知识及专业实务

YIJI ZHUCE JILIANGSHI  
JICHU ZHISHI JI ZHUANYE SHIWU

中国计量测试学会 组编

下 册

中国质检出版社  
北 京

## 图书在版编目(CIP)数据

一级注册计量师基础知识及专业实务:全2册/中国计量测试学会组编.—2版.—北京:中国质检出版社,2011

ISBN 978-7-5026-3511-4

I. ①—… II. ①中… III. ①计量—资格考试—自学参考资料 IV. ①TB9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 205971 号

## 内 容 提 要

《一级注册计量师基础知识及专业实务》分上、下两册,内容包括上、下两篇,上篇是计量法律法规及综合知识,下篇是测量数据处理与计量专业实务。本书依据现行有效的计量法律法规和各项规定,针对一级注册计量师应该熟悉和掌握的计量基础知识及应具备的计量业务能力而编写的。上篇内容主要包括:计量的法律和法规、计量的监督管理、量和单位、测量仪器及其特性、测量标准、计量技术机构质量管理体系的建立和运行、计量安全防护及职业道德教育等。下篇内容主要包括:测量误差的处理,测量不确定度的评定与表示,计量检定、校准和检测的实施,计量标准的建立、考核及使用,计量检定规程和校准规范的使用和编制,比对和测量审核的实施,期间核查的实施,型式评价的实施等。每节都提供了一些案例、思考题和选择题,以便于读者自我检查学习的效果。

本书可供准备参加一级注册计量师考试的人员以及已经获得注册计量师资格的计量技术人员使用,也可供计量管理人员以及需要了解计量业务的其他有关人员作为参考。

中国质检出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲2号(100013)

北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 [www.spc.net.cn](http://www.spc.net.cn)

总编室:64275323 发行中心:51780235

读者服务部:68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

\*

开本 880×1230 1/16 印张 16.25 字数 421 千字

2011 年 11 月第 2 版 2011 年 11 月第 4 次印刷

\*

定价:88.00 元(上、下册)

本书封面压纹隐现中国质检出版社社名、社标

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107

下 篇



# 测量数据处理与计量专业实务

# 目 录

## 上 册

### 上篇 计量法律 法规及综合知识

|                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| 第一章 计量法律、法规及计量组织机构.....            | ( 3 )  |
| 第一节 计量法律、法规及计量监督管理.....            | ( 3 )  |
| 一、计量立法的宗旨和调整范围 .....               | ( 3 )  |
| 二、我国计量法规体系的组成 .....                | ( 4 )  |
| 三、计量监督管理的体制 .....                  | ( 5 )  |
| 四、法定计量检定机构的监督管理 .....              | ( 8 )  |
| 五、计量基准、计量标准的建立和法制管理 .....          | ( 10 ) |
| 六、计量检定的法制管理 .....                  | ( 12 ) |
| 七、计量器具产品的法制管理 .....                | ( 22 ) |
| 八、商品量的计量监督管理和检验 .....              | ( 27 ) |
| 九、产品质量检验机构计量认证 .....               | ( 31 ) |
| 十、计量法律责任 .....                     | ( 31 ) |
| 习题及参考答案 .....                      | ( 32 ) |
| 第二节 计量技术法规及国际计量技术文件 .....          | ( 35 ) |
| 一、计量技术法规的范围及其分类 .....              | ( 35 ) |
| 二、计量检定规程、国家计量检定系统表、计量技术规范的应用 ..... | ( 38 ) |
| 三、国际计量组织机构及国际计量技术规范 .....          | ( 40 ) |
| 四、OIML 证书制度 .....                  | ( 47 ) |
| 五、“互认协议”(MRA) .....                | ( 48 ) |
| 习题及参考答案 .....                      | ( 50 ) |
| 第二章 计量综合知识 .....                   | ( 52 ) |
| 第一节 量和单位 .....                     | ( 52 ) |
| 一、量和量值 .....                       | ( 52 ) |
| 二、量制、量纲和无量纲量 .....                 | ( 54 ) |
| 三、计量单位和单位制 .....                   | ( 55 ) |
| 习题及参考答案 .....                      | ( 80 ) |
| 第二节 测量、计量.....                     | ( 82 ) |
| 一、测量 .....                         | ( 82 ) |
| 二、计量 .....                         | ( 85 ) |
| 三、计量学 .....                        | ( 91 ) |

|                              |         |
|------------------------------|---------|
| 四、计量在国民经济和社会生活中的地位和作用 .....  | ( 93 )  |
| 习题及参考答案 .....                | ( 98 )  |
| 第三节 测量结果 .....               | ( 99 )  |
| 一、被测量及影响量 .....              | ( 99 )  |
| 二、量的真值和约定真值 .....            | ( 100 ) |
| 三、测量结果 .....                 | ( 100 ) |
| 四、描述测量结果的术语 .....            | ( 101 ) |
| 习题及参考答案 .....                | ( 106 ) |
| 第四节 测量仪器及其特性 .....           | ( 108 ) |
| 一、测量仪器(计量器具) .....           | ( 108 ) |
| 二、测量仪器的特性 .....              | ( 118 ) |
| 习题及参考答案 .....                | ( 132 ) |
| 第五节 测量标准 .....               | ( 135 ) |
| 一、测量标准概述 .....               | ( 135 ) |
| 二、量值传递与量值溯源 .....            | ( 138 ) |
| 三、计量基准 .....                 | ( 140 ) |
| 四、计量标准 .....                 | ( 141 ) |
| 五、标准物质 .....                 | ( 144 ) |
| 习题及参考答案 .....                | ( 146 ) |
| 第六节 计量技术机构质量管理体系的建立和运行 ..... | ( 149 ) |
| 一、计量技术机构的基本要求 .....          | ( 149 ) |
| 二、检定、校准、检测工作公正性的要求 .....     | ( 149 ) |
| 三、质量管理体系文件的建立和有效运行 .....     | ( 150 ) |
| 四、资源的配备和管理 .....             | ( 151 ) |
| 五、计量标准、测量设备量值溯源的实施 .....     | ( 154 ) |
| 六、与顾客有关的过程 .....             | ( 155 ) |
| 七、检定、校准、检测方法的选择和确认 .....     | ( 156 ) |
| 八、检定、校准、检测物品的处置 .....        | ( 158 ) |
| 九、检定、校准、检测中抽样的控制 .....       | ( 158 ) |
| 十、检定、校准、检测的质量保证 .....        | ( 159 ) |
| 十一、原始记录和数据处理 .....           | ( 160 ) |
| 十二、检定、校准、检测结果的报告 .....       | ( 160 ) |
| 十三、不合格的控制 .....              | ( 162 ) |
| 十四、内部审核和管理评审的实施 .....        | ( 162 ) |
| 十五、纠正措施和预防措施的控制和实施 .....     | ( 163 ) |
| 十六、管理体系的持续改进 .....           | ( 164 ) |
| 习题及参考答案 .....                | ( 164 ) |
| 第七节 计量安全防护 .....             | ( 166 ) |
| 一、计量安全防护的定义 .....            | ( 166 ) |
| 二、计量安全防护的基本方法和要点 .....       | ( 167 ) |

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 三、影响计量人员或仪器设备安全的危险源分析及防护措施 .....    | (168) |
| 四、开展现场检定、校准、检测时有关安全的注意事项 .....      | (173) |
| 五、计量实验室的安全防护制度 .....                | (173) |
| 六、事故的预防及应急处理 .....                  | (174) |
| 习题及参考答案 .....                       | (175) |
| 第八节 职业道德教育 .....                    | (177) |
| 一、道德和职业道德 .....                     | (177) |
| 二、注册计量师的职业道德 .....                  | (179) |
| 习题及参考答案 .....                       | (182) |
| 附录 .....                            | (184) |
| 附录 1 相关计量法律法规、规章、规范及标准目录 .....      | (184) |
| 附录 2 中华人民共和国计量法 .....               | (186) |
| 附录 3 中华人民共和国计量法实施细则 .....           | (189) |
| 附录 4 国务院关于在我国统一实行法定计量单位的命令 .....    | (196) |
| 附录 5 全面推行我国法定计量单位的意见 .....          | (197) |
| 附录 6 中华人民共和国强制检定的工作计量器具检定管理办法 ..... | (199) |
| 参考文献 .....                          | (201) |

## 下 册

### 下篇 测量数据处理与计量专业实务

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 第三章 测量数据处理 .....             | (205) |
| 第一节 测量误差的处理 .....            | (205) |
| 一、系统误差的发现和减小系统误差的方法 .....    | (205) |
| 二、实验标准偏差的估计方法 .....          | (209) |
| 三、算术平均值及其实验标准差的计算 .....      | (212) |
| 四、异常值的判别和剔除 .....            | (213) |
| 五、测量重复性和测量复现性的评定 .....       | (216) |
| 六、加权算术平均值及其实验标准偏差的计算方法 ..... | (218) |
| 七、计量器具误差的表示与评定 .....         | (219) |
| 八、计量器具其他一些计量特性的评定 .....      | (224) |
| 习题及参考答案 .....                | (227) |
| 第二节 测量不确定度的评定与表示 .....       | (230) |
| 一、统计技术应用 .....               | (230) |
| 二、评定不确定度的一般步骤 .....          | (237) |
| 三、测量不确定度的评定方法 .....          | (237) |
| 四、表示不确定度的符号 .....            | (257) |

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 习题及参考答案 .....                   | (258) |
| 第三节 测量结果的处理和报告 .....            | (260) |
| 一、最终报告时测量不确定度的有效位数及数字修约规则 ..... | (260) |
| 二、报告测量结果的最佳估计值的有效位数的确定 .....    | (261) |
| 三、测量结果的表示和报告 .....              | (262) |
| 习题及参考答案 .....                   | (264) |
| 第四章 计量专业实务 .....                | (266) |
| 第一节 计量检定、校准和检测的实施 .....         | (266) |
| 一、检定、校准和检测概述 .....              | (266) |
| 二、检定、校准、检测过程 .....              | (270) |
| 三、校准测量能力的评定 .....               | (278) |
| 四、检定周期和校准间隔的确定 .....            | (279) |
| 五、周期检定(校准)计划的编制 .....           | (279) |
| 六、计量标准器具和配套的测量仪器的管理 .....       | (280) |
| 七、仲裁检定的实施 .....                 | (282) |
| 八、检定和校准实务举例 .....               | (282) |
| 习题及参考答案 .....                   | (304) |
| 第二节 检定证书、校准证书和检测报告 .....        | (308) |
| 一、证书、报告的分类 .....                | (308) |
| 二、校准证书中测量不确定度的表述要求 .....        | (309) |
| 三、证书、报告的审核和批准 .....             | (310) |
| 四、证书、报告的修改和变更 .....             | (310) |
| 五、证书、报告的质量保证 .....              | (311) |
| 六、证书、报告的管理 .....                | (312) |
| 七、计量检定印、证 .....                 | (313) |
| 八、检定证书和原始记录举例 .....             | (314) |
| 习题及参考答案 .....                   | (341) |
| 第三节 计量标准的建立、考核及使用 .....         | (343) |
| 一、建立计量标准的依据和条件 .....            | (343) |
| 二、计量标准的命名规则 .....               | (344) |
| 三、计量标准考核的原则和内容 .....            | (345) |
| 四、计量标准的考核要求 .....               | (346) |
| 五、计量标准考核中有关技术问题 .....           | (351) |
| 六、建立计量标准的准备工作 .....             | (357) |
| 七、计量标准考核(复查)申请资料的填写方法 .....     | (359) |
| 八、计量标准考核的程序和考评方法 .....          | (365) |
| 九、计量标准考核的后续监管 .....             | (372) |
| 十、计量标准的保存、维护和使用 .....           | (373) |
| 习题及参考答案 .....                   | (374) |
| 第四节 计量检定规程和校准规范的编写和使用 .....     | (377) |
| 一、计量检定规程的编写 .....               | (377) |

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 二、计量校准规范的编写 .....             | (388) |
| 三、计量检定规程、校准规范的使用 .....        | (393) |
| 习题及参考答案 .....                 | (395) |
| 第五节 比对和测量审核的实施 .....          | (396) |
| 一、比对和测量审核的定义和作用 .....         | (396) |
| 二、比对的类型和组织 .....              | (397) |
| 三、比对技术方案的制定 .....             | (399) |
| 四、比对结果的评价 .....               | (404) |
| 五、比对过程举例 .....                | (404) |
| 六、比对总结报告及相关事项 .....           | (405) |
| 七、测量审核相关要求 .....              | (408) |
| 习题及参考答案 .....                 | (409) |
| 第六节 期间核查的实施 .....             | (411) |
| 一、期间核查 .....                  | (411) |
| 二、期间核查的策划 .....               | (413) |
| 三、期间核查的实施 .....               | (416) |
| 四、核查记录的内容及记录的形式和保存 .....      | (418) |
| 五、核查标准的保存 .....               | (420) |
| 习题及参考答案 .....                 | (420) |
| 第七节 型式评价的实施 .....             | (421) |
| 一、计量器具的型式 .....               | (421) |
| 二、计量器具型式评价的目的和要求 .....        | (421) |
| 三、计量器具型式评价的范围和实施机构 .....      | (421) |
| 四、型式评价的程序 .....               | (422) |
| 五、型式评价大纲的要求 .....             | (423) |
| 六、型式评价的实施 .....               | (427) |
| 七、型式评价结果的判定 .....             | (428) |
| 八、计量器具型式批准标志和编号的使用 .....      | (428) |
| 习题及参考答案 .....                 | (428) |
| 第八节 计量科学研究 .....              | (429) |
| 一、计量科学研究概述 .....              | (429) |
| 二、计量科学研究方法 .....              | (432) |
| 三、计量科学研究的程序 .....             | (437) |
| 四、我国重要科技计划简介 .....            | (447) |
| 习题及参考答案 .....                 | (449) |
| 附录 .....                      | (451) |
| 附录1 综合案例题举例 .....             | (451) |
| 附录2 相关计量法律法规、规章、规范及标准目录 ..... | (454) |

## 第三章

# 测量数据处理

本章重点介绍测量误差的处理、测量不确定度的评定与表示以及测量结果的处理和报告。内容主要包括：减小系统误差的方法，实验标准偏差的计算，异常值的判别和剔除，测量重复性和测量复现性的评定，计量器具计量特性的评定，统计技术的应用，评定测量不确定度的步骤和方法，数据的有效位数和修约规则。

## 第一节 测量误差的处理

### 一、系统误差的发现和减小系统误差的方法

#### （一）系统误差的发现

（1）在规定的测量条件下多次测量同一个被测量，从所得测量结果与计量标准所复现的量值之差可以发现并得到恒定的系统误差的估计值。

（2）在测量条件改变时，例如随时间、温度、频率等条件改变时，测量结果按某一确定的规律变化，可能是线性地或非线性地增长或减小，就可以发现测量结果中存在可变的系统误差。

#### （二）减小系统误差的方法

通常，消除或减小系统误差有以下几种方法：

##### 1. 采用修正的方法

对系统误差的已知部分，用对测量结果进行修正的方法来减小系统误差。例如：测量结果为  $30^{\circ}\text{C}$ ，用计量标准测得的结果是  $30.1^{\circ}\text{C}$ ，则已知系统误差的估计值为  $-0.1^{\circ}\text{C}$ 。也就是修正值为  $+0.1^{\circ}\text{C}$ ，已修正测量结果等于未修正测量结果加修正值，即已修正测量结果为  $30^{\circ}\text{C} + 0.1^{\circ}\text{C} = 30.1^{\circ}\text{C}$ 。

## 2. 在实验过程中尽可能减少或消除一切产生系统误差的因素

例如在仪器使用时,如果应该对中的未能对中,应该调整到水平、垂直或平行理想状态的未能调好,都会带来测量的系统误差,操作者应仔细调整,以便减小误差。又如在模拟式仪表读数时,由于测量人员每个人的习惯不同会导致读数误差,采用了数字显示仪器后就消除了人为读数误差。

## 3. 选择适当的测量方法,使系统误差抵消而不致带入测量结果中

这里举例说明常用的几种方法:

### (1) 恒定系统误差消除法

#### ① 异号法

改变测量中的某些条件,例如测量方向、电压极性等,使两种条件下的测量结果中的误差符号相反,取其平均值以消除系统误差。

**【案例】** 带有螺杆式读数装置的测量仪存在空行程,即螺旋旋转时,刻度变化而量杆不动,引起测量的系统误差。为消除这一系统误差,可从两个方向对线,第一次顺时针旋转对准刻度读数为  $d$ ,设不含系统误差的值为  $a$ ,空行程引起的恒定系统误差为  $\epsilon$ ,则  $d = a + \epsilon$ ;第二次逆时针旋转对准刻度读数为  $d'$ ,此时空行程引起的恒定系统误差为  $-\epsilon$ ,即  $d' = a - \epsilon$ 。于是取平均值就可以得到消除了系统误差的测量结果:  $a = (d + d')/2$ 。

#### ② 交换法

将测量中的某些条件适当交换,例如被测物的位置相互交换,设法使两次测量中的误差源对测量结果的作用相反,从而抵消了系统误差。例如:用等臂天平称重,第一次在右边秤盘中放置被测物  $X$ ,在左边秤盘中放置砝码  $P$ ,使天平平衡,这时被测物的质量为  $X = Pl_1/l_2$ ,当两臂相等( $l_1 = l_2$ )时  $X = P$ ,如果两臂存在微小的差异( $l_1 \neq l_2$ ),而仍以  $X = P$  为测量结果,就会使测量结果中存在系统误差。为了抵消这一系统误差,可以将被测物与砝码互换位置,此时天平不会平衡,改变砝码质量到  $P'$  时天平平衡,则这时被测物的质量为  $X = P'l_2/l_1$ 。所以可以用位置交换前后的两次测得值的几何平均值得到消除了系统误差的测量结果

$$X = \sqrt{PP'}$$

#### ③ 替代法

保持测量条件不变,用某一已知量值的标准器替代被测件再作测量,使指示仪器的指示不变或指零,这时被测量等于已知的标准量,达到消除系统误差的目的。

**【案例 1】** 用精密电桥测量某个电阻器时,先将被测电阻器接入电桥的一臂,使电桥平衡;然后用一个标准电阻箱代替被测电阻器接入,调节电阻箱的电阻,使电桥再次平衡。则此时标准电阻箱的电阻值就是被测电阻器的电阻值。可以消除电桥其他三个臂的不理想等因素引入的系统误差。

**【案例 2】** 采用高频替代法校准微波衰减器,其测量原理图如图 3-1 所示。

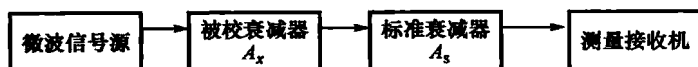


图 3-1 高频替代法校准微波衰减器测量原理图

当被校衰减器衰减刻度从  $A_1$  改变到  $A_2$  时,调节标准衰减器从  $A_{s1}$  到  $A_{s2}$ ,使接收机指示保

持不变,则被校衰减器的衰减变化量  $A_1 - A_2 = A_x$  等于标准衰减器的衰减变化量  $A_s = A_{s2} - A_{s1}$ , 可以使微波信号源和测量接收机在校准中不引入系统误差。

## (2) 可变系统误差消除法

合理地设计测量顺序可以消除测量系统的线性漂移或周期性变化引入的系统误差。

### ① 用对称测量法消除线性系统误差

**【案例 1】** 用电压表作指示,测量被检电压源与标准电压源的输出电压之差,由于电压表的零位存在线性漂移(如图 3-2 所示),会使测量引入可变的系统误差。可以采用下列测量步骤来消除这种系统误差:顺序测量 4 次,在  $t_1$  时刻从电压表上读得标准电压源的电压测量值  $a$ ,在  $t_2$  时刻从电压表上读得被检电压源的电压测量值  $x$ ,在  $t_3$  时刻从电压表上再读得被检电压源的电压测量值  $x'$ ,在  $t_4$  时刻再读得标准电压源的电压测量值  $a'$ 。

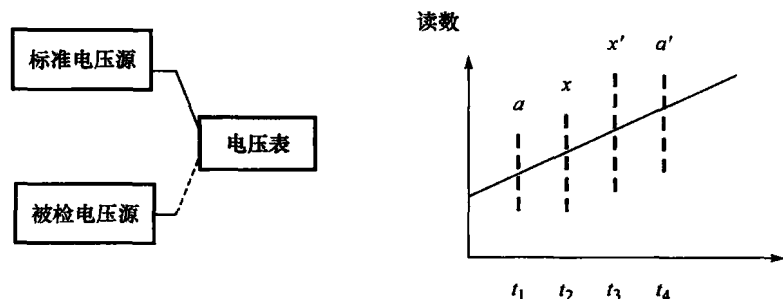


图 3-2 对称测量法

设标准电压源和被检电压源的电压分别为  $V_s$  和  $V_x$ , 系统误差用  $\epsilon$  表示, 则

$$t_1 \text{ 时: } a = V_s + \epsilon_1$$

$$t_2 \text{ 时: } x = V_x + \epsilon_2$$

$$t_3 \text{ 时: } x' = V_x + \epsilon_3$$

$$t_4 \text{ 时: } a' = V_s + \epsilon_4$$

测量时只要满足  $t_2 - t_1 = t_4 - t_3$ , 当线性漂移条件满足时, 则有  $\epsilon_2 - \epsilon_1 = \epsilon_4 - \epsilon_3$ , 于是有

$$V_x - V_s = \frac{x + x'}{2} - \frac{a + a'}{2}$$

由上式得到的被检电压源与标准电压源的输出电压之差测量结果中消除了由于电压表线性漂移引入的系统误差。

**【案例 2】** 用质量比较仪作指示仪表, 用  $F_2$  级标准砝码替代被校砝码的方法校准标称值为 10kg 的  $M_1$  级砝码, 为消除由质量比较仪漂移引入的可变系统误差, 砝码的替代方案采用按“标准-被校-被校-标准”顺序进行, 测量数据如下: 第一次加标准砝码时读数为  $m_{s1} = +0.010\text{g}$ , 接着加被校砝码, 读数为  $m_{x1} = +0.020\text{g}$ , 再第二次加被校砝码, 读数为  $m_{x2} = +0.025\text{g}$ , 再第二次加标准砝码, 读数为  $m_{s2} = +0.015\text{g}$ 。则被校砝码与标准砝码的质量差  $\Delta m$  由下式计算得到:  $\Delta m = (m_{x1} + m_{x2})/2 - (m_{s1} + m_{s2})/2 = (0.045\text{g} - 0.025\text{g})/2 = +0.01\text{g}$ , 由此获得被校砝码的修正值为  $-0.01\text{g}$ 。

### ② 半周期偶数测量法消除周期性系统误差

周期性系统误差通常可以表示为

$$\epsilon = a \sin \frac{2\pi t}{T}$$

式中:  $T$ ——误差变化的周期;

$l$ ——决定周期性系统误差的自变量(如时间、角度等)。

因为相隔  $T/2$  半周期的两个测量结果中的误差是大小相等符号相反的。所以凡相隔半周期的一对测量值的均值中不再含有此项系统误差。这种方法广泛用于测角仪上。

### (三) 修正系统误差的方法

#### 1. 在测量结果上加修正值

修正值的大小等于系统误差估计值的大小,但符号相反。当测量结果与相应的标准值比较时,测量结果与标准值的差值为测量结果系统误差估计值

$$\Delta = \bar{x} - x_s \quad (3-1)$$

式中: $\Delta$ ——测量结果的系统误差估计值;

$\bar{x}$ ——未修正的测量结果;

$x_s$ ——标准值。

注意:当对测量仪器的示值进行修正时, $\Delta$  为仪器的示值误差

$$\Delta = x - x_s$$

式中: $x$ ——被评定的仪器的示值或标称值;

$x_s$ ——标准装置给出的标准值。

则修正值  $C$  为

$$C = -\Delta \quad (3-2)$$

已修正的测量结果  $X_c$  为

$$X_c = \bar{x} + C \quad (3-3)$$

**【案例】** 用电阻标准装置校准一个标称值为  $1\Omega$  的标准电阻时,标准装置的读数为  $1.0003\Omega$ 。问:该被校标准电阻的系统误差估计值、修正值、已修正的校准结果分别为多少?

**【案例分析】** 系统误差估计值 = 示值误差 =  $1\Omega - 1.0003\Omega = -0.0003\Omega$

示值的修正值 =  $+0.0003\Omega$

已修正的校准结果 =  $1\Omega + 0.0003\Omega = 1.0003\Omega$

#### 2. 对测量结果乘修正因子

修正因子  $C_r$  等于标准值与未修正测量结果之比

$$C_r = \frac{x_s}{\bar{x}} \quad (3-4)$$

已修正的测量结果  $X_c$  为

$$X_c = C_r \bar{x} \quad (3-5)$$

#### 3. 画修正曲线

当测量结果的修正值随某个影响量的变化而变化,这种影响量例如温度、频率、时间、长度等,那么应该将在影响量取不同值时的修正值画出修正曲线,以便在使用时可以查曲线得到所需的修正值。例如电阻的温度修正曲线的示意图如图 3-3 所示。实际画图时,通常要采用最

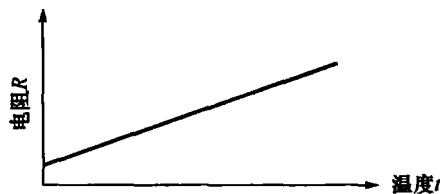


图 3-3 电阻温度修正曲线

小二乘法将各数据点拟合成最佳曲线或直线。

4. 制定修正值表

当测量结果同时随几个影响量的变化而变化时,或者当修正数据非常多且函数关系不清楚等情况下,最方便的方法是将修正值制成表格,以便在使用时可以查表得到所需的修正值。表格形式举例如表 3-1 所示。

表 3-1 电阻的频率和温度修正值表

$\Omega$

| 温度/℃<br>频率/Hz | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|---------------|----|----|----|----|----|----|
| 10            |    |    |    |    |    |    |
| 200           |    |    |    |    |    |    |

注意:

- (1) 修正值或修正因子的获得,最常用的方法是将测量结果与计量标准的标准值比较得到,也就是通过校准得到。修正曲线往往还需要采用实验方法获得。
- (2) 修正值和修正因子都是有不确定度的。在获得修正值或修正因子时,需要评定这些值的不确定度。
- (3) 使用已修正测量结果时,该测量结果的不确定度中应该考虑由于修正不完善引入的不确定度分量。

二、实验标准偏差的估计方法

随机误差是指“测量结果与在重复性条件下,对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差”。它是在重复测量中按不可预见的方式变化的测量误差的分量。由于实际工作中不可能测量无穷多次,因此不能得到随机误差的值。随机误差的大小程度反映了测量值的分散性,即测量的重复性。

重复性是用实验标准偏差表征的。用有限次测量的数据得到的标准偏差的估计值称为实验标准偏差,用符号  $s$  表示。实验标准偏差是表征测量值分散性的量。

当用多次测量的算术平均值作为测量结果时,测量结果的实验标准偏差是测量值实验标准偏差的  $1/\sqrt{n}$  倍( $n$  为测量次数)。因此可以说,当重复性较差时可以增加测量次数取算术平均值作为测量结果,来减小测量的随机误差。

(一) 几种常用的实验标准偏差的估计方法

在相同条件下,对同一被测量  $X$  作  $n$  次重复测量,每次测得值为  $x_i$ ,测量次数为  $n$ ,则实验标准偏差可按以下几种方法估计:

1. 贝塞尔公式法

从有限次独立重复测量的一系列测量值代入式(3-6)得到估计的标准偏差

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

(3-6)

式中:  $\bar{x}$ —— $n$ 次测量的算术平均值,  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ;

$x_i$ ——第 $i$ 次测量的测得值;

$v_i = x_i - \bar{x}$ ——残差;

$\nu = n - 1$ ——自由度;

$s(x)$ ——(测量值 $x$ 的)实验标准偏差。

**【案例】** 对某被测件的长度重复测量10次,测量数据如下:10.0006m,10.0004m,10.0008m,10.0002m,10.0003m,10.0005m,10.0005m,10.0007m,10.0004m,10.0006m。用实验标准偏差表征测量的重复性,请计算实验标准偏差。

**【案例分析】**

$n=10$ ,计算步骤如下:

(1) 计算算术平均值

$$\begin{aligned}\bar{x} &= 10\text{m} + (0.0006 + 0.0004 + 0.0008 + 0.0002 + 0.0003 + 0.0005 + 0.0005 \\ &\quad + 0.0007 + 0.0004 + 0.0006)\text{m}/10 = 10.0005\text{m}\end{aligned}$$

(2) 计算10个残差  $v_i = x_i - \bar{x}$

$$+0.0001, -0.0001, +0.0003, -0.0003, -0.0002, +0.0000, +0.0000, +0.0002, -0.0001, +0.0001$$

(3) 计算残差平方和

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0.0001^2 \times (1+1+9+9+4+0+0+4+1+1)\text{m}^2 = 30 \times 0.0001^2\text{m}^2$$

(4) 计算实验标准偏差

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{30 \times 0.0001^2}{10-1}}\text{m} = 1.8 \times 0.0001\text{m} = 0.00018\text{m}$$

所以实验标准偏差  $s(x) = 0.00018\text{m} = 0.0002\text{m}$  (自由度为  $n-1=9$ )。

## 2. 最大残差法

从有限次独立重复测量的一系列测量值中找出最大残差  $v_{\max}$ , 并根据测量次数  $n$  查表3-2得到  $c_n$  值, 代入式(3-7)得到估计的标准偏差

$$s(x) = c_n |v_{\max}| \quad (3-7)$$

式中:  $c_n$ ——残差系数。

最大残差法的  $c_n$  值列于表3-2。

表3-2 最大残差法的  $c_n$  值表

| $n$   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 15   | 20   |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $c_n$ | 1.77 | 1.02 | 0.83 | 0.74 | 0.68 | 0.64 | 0.61 | 0.59 | 0.57 | 0.51 | 0.48 |

**【案例】** 对于上一个案例,用最大残差法估算实验标准偏差。

**【案例分析】**

计算步骤如下:

(1) 计算算术平均值:  $\bar{x} = 10.0005\text{m}$ ;

- (2) 计算 10 个残差  $v_i = x_i - \bar{x}$ ;  
 $+0.0001, -0.0001, +0.0003, -0.0003, -0.0002, +0.0000, +0.0000, +0.0002,$   
 $-0.0001, +0.0001$ ;
- (3) 找出最大残差的绝对值为  $0.0003\text{m}$ ;
- (4) 根据  $n=10$ , 查表 3-2 得到  $c_n=0.57$ ;
- (5) 计算实验标准偏差:  $s(x) = c_n |v_{\max}| = 0.57 \times 0.0003\text{m} = 0.00017\text{m}$ 。

### 3. 极差法

从有限次独立重复测量的一系列测量值中找出最大值  $x_{\max}$  和最小值  $x_{\min}$ , 得到极差  $R = x_{\max} - x_{\min}$ ; 根据测量次数  $n$  查表 3-3 得到  $C$  值, 代入式 (3-8) 得到估计的标准偏差

$$s(x) = (x_{\max} - x_{\min}) / C \quad (3-8)$$

式中:  $C$ ——极差系数。

极差法的  $C$  值列于表 3-3。

表 3-3 极差法的  $C$  值表

| $n$ | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 15   | 20   |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $C$ | 1.13 | 1.69 | 2.06 | 2.33 | 2.53 | 2.70 | 2.85 | 2.97 | 3.08 | 3.47 | 3.74 |

一般在测量次数较小时采用该法。

**【案例】** 对某被测件进行了 4 次测量, 测量数据为:  $0.02\text{g}, 0.05\text{g}, 0.04\text{g}, 0.06\text{g}$ 。请用极差法估算实验标准偏差。

#### 【案例分析】

计算步骤如下:

- (1) 计算极差:  $R = x_{\max} - x_{\min} = 0.06\text{g} - 0.02\text{g} = 0.04\text{g}$ ;
- (2) 查表 3-3 得  $C$  值:  $n=4, C=2.06$ ;
- (3) 计算实验标准偏差  $s(x) = (x_{\max} - x_{\min}) / C = 0.04\text{g} / 2.06 = 0.02\text{g}$ 。

### 4. 较差法

从有限次独立重复测量的一系列测量值中, 将每次测量值与后一次测量值比较得到差值, 代入式 (3-9) 得到估计的标准偏差

$$s(x) = \sqrt{\frac{(x_2 - x_1)^2 + (x_3 - x_2)^2 + \cdots + (x_n - x_{n-1})^2}{2(n-1)}} \quad (3-9)$$

## (二) 各种估计方法的比较

贝塞尔公式法是一种基本的方法, 但  $n$  很小时其估计的不确定度较大, 例如  $n=9$  时, 由这种方法获得的标准偏差估计值的标准不确定度为  $25\%$ , 而  $n=3$  时标准偏差估计值的标准不确定度达  $50\%$ , 因此它适合于测量次数较多的情况。

极差法和最大残差法使用起来比较简便, 但当数据的概率分布偏离正态分布较大时, 应当以贝塞尔公式法的结果为准。在测量次数较少时常采用极差法。

较差法更适用于随机过程的方差分析, 如适用于频率稳定度测量或天文观测等领域。

### 三、算术平均值及其实验标准差的计算

#### (一) 算术平均值的计算

在相同条件下对被测量  $X$  进行有限次重复测量, 得到一系列测量值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3-10)$$

#### (二) 算术平均值实验标准差的计算

若测量值的实验标准偏差为  $s(x)$ , 则算术平均值的实验标准偏差  $s(\bar{x})$  为

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (3-11)$$

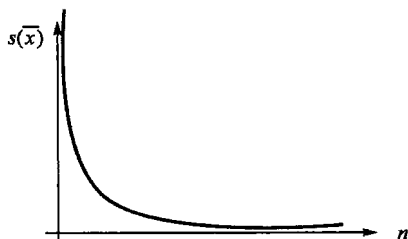


图 3-4 算术平均值的实验标准偏差与测量次数  $n$  的关系

有限次测量的算术平均值的实验标准偏差与  $\sqrt{n}$  成反比。从图 3-4 可见, 测量次数增加,  $s(\bar{x})$  减小, 即算术平均值的分散性减小。增加测量次数, 用多次测量的算术平均值作为测量结果, 可以减小随机误差, 或者说, 减小由于各种随机影响引入的不确定度。但随测量次数的进一步增加, 算术平均值的实验标准偏差减小的程度减弱, 相反会增加人力、时间和仪器磨损等问题, 所以一般取  $n=3 \sim 20$ 。

**【案例】** 某计量人员在建立计量标准时, 对计量标准进行过重复性评定, 对被测件重复测量 10 次, 按贝塞尔公式计算出实验标准偏差  $s(x)=0.08\text{V}$ 。现在, 在相同条件下对同一被测件测量 4 次, 取 4 次测量的算术平均值作为测量结果的最佳估计值, 他认为算术平均值的实验标准偏差为  $s(x)$  的  $1/4$ , 即  $s(\bar{x})=0.08\text{V}/4=0.02\text{V}$ 。

**【案例分析】** 计量人员应搞清楚算术平均值的实验标准偏差与测量值的实验标准偏差有什么关系? 依据 JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》, 案例中的计算是错误的。按贝塞尔公式计算出实验标准偏差  $s(x)=0.08\text{V}$  是测量值的实验标准偏差, 它表明测量值的分散性。多次测量取平均可以减小分散性, 算术平均值的实验标准偏差是测量值的实验标准偏差的  $1/\sqrt{n}$ 。所以算术平均值的实验标准偏差应该为

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \frac{0.08\text{V}}{\sqrt{4}} = 0.04\text{V}$$

#### (三) 算术平均值的应用

由于算术平均值是数学期望的最佳估计值, 所以通常用算术平均值作为测量结果。当用算术平均值作为被测量的估计值时, 算术平均值的实验标准偏差就是测量结果的 A 类标准不确定度。