

精密仪器

精度理论

张善钟 编著

机械工业出版社

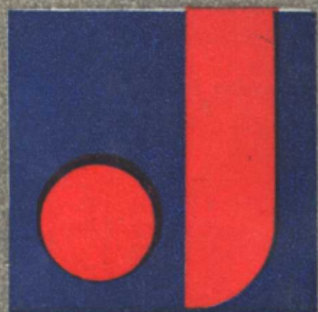
JINGMI YIQI JINGDULILUN JINGMI YIQI JINGD



ISBN 7-111-03543-7/TH·413

TH701

7.12A



定 价： 9.50 元

精密仪器精度理论

张善锺 编著



机械工业出版社

(京) 新登字054号

本书对精密仪器精度理论领域的各个基本问题,包括仪器的精度指标,准确度等级,仪器误差的来源,仪器各种误差的研究分析方法和计算方法,以及提高仪器精度减小仪器误差的各种手段、途径和方法等各个方面,作了全面系统深入的论述,书中汇集了目前精密仪器精度理论方面的有关资料 and 科研成果,反映了这一领域当前的发展水平。

本书可作高校精密仪器及机械类专业本科生、研究生及教师的教学用书,亦可供从事精密仪器设计、制造和精密测试工作的科技人员学习之用。

精密仪器精度理论

张善锺 编著

责任编辑: 贡克勤 版式设计: 冉晓华

封面设计: 肖 曈 责任校对: 熊天荣

责任印制: 路琳

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码: 100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市丰台区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $7^{1/2}$ · 字数163千字

1993年7月北京第1版·1993年7月北京第1次印刷

印数 0 001—2 050 · 定价: 9.50元

ISBN 7-111-03543-7/TH·413

前 言

仪器的基本功能是实现对被测量量值的测定。对仪器的精度要求，是对一切仪器众多要求中的最基本的要求。因此，有关仪器精度的研究，一直是仪器发展进程中一个主要的基础研究课题，并且始终受到从事精密仪器事业的广大科技人员和高等院校有关专业师生的极大重视和关注。特别是随着机械加工精度的提高，高精密大型机电光一体化测量设备的出现，以及微小尺寸测量和微位移技术的发展，仪器精度更是成为仪器向前发展的关键问题之一。然而，目前对仪器精度问题的讨论，比较分散，尚未综合发展成一个较完整的体系。作者本人长期在哈尔滨工业大学精密仪器专业从事“量仪设计”和“精密仪器精度理论”课程的授课工作，根据多年的教学心得和科研工作的体会，并又汇集了当前仪器精度领域有关的资料和科研成果，编著了本书。作为一个尝试，意在有关仪器精度理论及其研究方法的论述，建立一个较完整的体系，使读者通过对本书的学习，能够对仪器精度问题有个比较全面系统深入的了解，能够掌握正确的仪器精度设计方法，从而为做好仪器设计，提高仪器设计水平和进一步促进仪器事业发展奠定基础。

目前，仪器精度的研究是：一方面，努力使仪器各种误差的研究方法和分析计算方法不断完善和充实，特别是随着新技术在测量中的应用，在新测量机理的误差因素的分析 and 计算工作方面，有许多需要开展研究；另一方面，努力于研究减小仪器误差的方法，仪器误差的补偿技术得到了飞速的发展，这一技术目前在仪器领域的各个方面得到了广泛的应

AAS 08/03

用。

本书侧重于从测量技术角度，从仪器误差总体方面讨论了仪器精度的有关问题。全书共分五章：第一章总论，讨论了仪器的精度指标，准确度等级，仪器误差的来源、性质和合成；然后，以原理误差、工艺误差、受力变形误差和温度误差等仪器误差的几个主要来源，分设四章进行讨论。各章中，对该项误差的特点，研究分析方法和计算方法，以及对减小该项误差的手段、途径和方法等各个方面，进行了比较系统、全面、深入地论述。讨论中注意理论分析和实际例子剖析两方面的结合，选材上注意了实用性、先进性和科学性，素材基本上反映了仪器精度领域当前的发展水平。

考虑到仪器的动态精度和静态精度有不同的研究方法，为使讨论问题集中，本书只讨论仪器静态精度，动态精度是另一个专门问题，本书没有涉及。对于目前一些教材和参考图书中讨论较多的问题，本书只是出于全书体系上的考虑，仅作了必要的简要叙述。本书列举的某些实例，除了说明与仪器精度有关问题外，其它的一般不作过多的解释及说明，以紧缩全书篇幅。

本书由哈尔滨工业大学强锡富教授审稿，他对本书内容提出了不少宝贵意见，在此谨表深切谢意！本书在编写过程中，许多单位和学者提供了不少资料并给予了热情的帮助，在此一并表示衷心感谢！

总的说来，目前关于仪器精度问题的研究，跟不上仪器发展的需要，还有不少不尽如人意的地方，加之作者水平和精力所限，本书在体系及内容上肯定会有不少缺点和错误，恳请读者指正。

张善钟

1992.5于哈尔滨

目 录

前言

第一章 总论	1
第一节 精密仪器精度理论研究的内容	1
第二节 仪器精度	2
第三节 仪器的准确度等级	4
一、以最大绝对误差方式表示的测量器具的准确度及其等级系列	5
二、以最大引用误差方式表示的测量器具的准确度及其等级系列	6
三、以最大相对误差方式表示的测量器具的准确度及其等级系列	7
第四节 仪器误差的组成	8
第五节 仪器误差的性质	10
第六节 仪器误差的合成	15
第七节 提高仪器精度的途径和方法	19
第二章 仪器原理误差	20
第一节 仪器的原理误差及其计算方法	20
一、测量原理测量方法上的原理误差	20
二、非线性刻度特性线性化的原理误差	25
三、结构参数取值近似带来的原理误差	32
四、近似数据处理带来的原理误差	32
五、简化机构带来的原理误差	33
第二节 避免和减小原理误差的方法	34
一、掌握正确的设计方法避免原理误差的产生	34

二、原理误差实时修正	38
三、非线性刻度特性线性化原理误差的补偿	38
四、利用微机计算技术减小原理误差	44
五、正确的数据处理方法	45
第三章 仪器工艺误差	55
第一节 仪器工艺误差的计算方法	55
一、微分法	57
二、作用线法	61
三、矢量代数法	68
四、坐标变换法	75
五、几何法	86
第二节 减小仪器工艺误差的途径和方法	91
一、工艺的方法	92
二、结构设计的方法	94
三、误差补偿的方法	99
四、误差分离的方法	122
五、遵守相应的设计原则及设计原理	143
第四章 仪器力变形误差	157
第一节 求力变形误差的方法	158
一、局部弹性变形误差的计算	158
二、局部弹性变形量的试验测定	162
三、弯曲变形误差的计算	163
四、弯曲变形的实验验证	179
五、材料弹性模量的实验测定	182
第二节 减小力变形误差的方法	187
一、减小局部弹性变形误差的方法	187
二、减小弯曲变形误差的方法	189
三、减小内应力影响的措施	203
第五章 仪器温度误差	205

第一节 仪器的温度效应	205
一、环境平均温度偏离 20°C 的效应	205
二、环境平均温度波动的效应	207
三、温度梯度效应	214
第二节 减小温度误差的方法	214
一、温度的控制	214
二、线膨胀系数控制	218
三、选择结构参数	221
四、温度补偿的误差	223
参考文献	228

第一章 总 论

第一节 精密仪器精度理论研究的内容

在科学和技术的各个领域，有许多物理参量需要确定。这一技术工作，人们是利用各种测量仪器，通过各种测量方法来实现的。关于测量仪器的基本功能，我们可以从名词“测量仪器”的定义中得到回答。国际上对“测量仪器”的定义表述为：“单独地或连同其它设备一起用来进行测量的装置”〔1〕。定义中的“测量”是指“以确定量值为目的的一组操作”。上述定义表明，一切测量仪器的共同功能是实现对被测量量值的测定。测定量值时，总存在一个是否准确的问题。因此，虽然事实上对各种测量仪器提出了各种各样的要求，但其中对仪器的精度要求，即准确测定被测量量值的要求，是一切仪器共有的基本的要求，也是仪器设计者和仪器制造者在其设计和制造仪器过程中始终关心的基本问题。因此，围绕有关仪器精度领域的问题，进行比较全面、系统、深入地讨论和研究是完全必要的。

精密仪器精度理论要研究和讨论的内容有：

- ① 仪器的精度指标，划分仪器精度等级的原则和方法。
- ② 仪器误差的来源、性质和特点，仪器误差合成的原则和方法。
- ③ 根据不同的误差来源，研究仪器中各种误差的计算原理和方法。

④ 根据不同的误差来源，研究减小仪器误差提高仪器精度的原理和方法。

⑤ 测定仪器精度的实验方法。

需要说明，目前计量学名词术语有关文件^[1,2]对测量仪器、计量器具、计量仪器、量具等名词已有定义；对另一些名词，如仪器、精密仪器、测量器具等则未定义。但我们在使用上述名词时，如无特别的说明，都是把它们视为实现测量目的的一种装置，而并不特别注意这些名词是否定义，或已定义的名词在定义的内涵或表述上的某些区别。

第二节 仪器精度

仪器精度在我国是从50年代初起，并且至今仍然普遍使用的一个概念上泛指术语。它是误差的反义词。国内外的计量技术法规和文件，对仪器精度一词目前尚无定义。但根据我国几十年来的习惯，仪器精度是笼统表述仪器显示示值真实程度和一致程度的一个泛指的概念。名词仪器精度本身不是仪器的一项技术指标。仪器精度是用一组名词术语及技术指标来综合反映的。属于仪器精度概念范畴的名词术语及技术指标有以下一些，现将它们的定义分述于下

1) 仪器的准确度 测量仪器给出接近于被测量真值的示值的能力。

2) 仪器的示值误差 仪器的示值和被测的量的真值之间的差值。例如，电流表的示值为40mA，若电流的真值为41mA，则电流表的示值误差为 $\Delta = 40\text{mA} - 41\text{mA} = -1\text{mA}$ 。

3) 仪器的示值变动性 在测量条件不作任何改变的情况下，对同一被测的量进行多次重复测量读数，其示值的最大差异。在考核这项技术指标时，一般不改变安装位置及输

入量。如对用作几何量测量的测微仪，可拨动拨叉移动测杆5~10次，其示值的最大差异即为示值变动性的值。

4) 仪器的重复性误差 在实际相同的测量条件下(如同一方法、同一观测者、用同一测量仪器、在同一实验室内、于很短时间间隔内)，对同一被测的量进行连续多次测量时，其示值间的最大差异。重复性误差与示值变动性的区别在于：重复性误差是多次输入同一被测量，而示值变动性为输入量不变，仅多次移动测杆。

5) 仪器的稳定度 在规定的工作条件内，测量仪器某些性能随时间保持不变的能力。如年稳定度，即用间隔一年前后两次检定结果之差来表示。仪器的稳定度亦称仪器的复现精度。

6) 回程误差 在相同条件下，仪器正反行程对同一被测量仪器示值之差的绝对值。

7) 滞后误差 满量程内，正反行程输出的最大差值，以百分数表示。如图1-1所示，滞后误差 δ 为

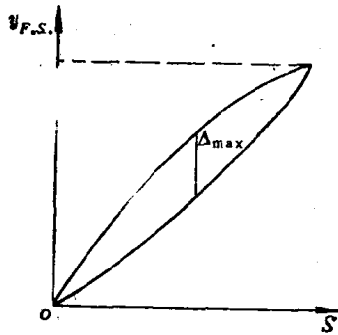


图1-1 滞后误差

$$\delta = \frac{\Delta_{max}}{y_{F.S}}$$

式中， $y_{F.S.}$ 为满量程输出； Δ_{max} 为输出值在正反行程间的最大差值。

8) 灵敏阈(鉴别力阈) 引起仪器示值可察觉变化的被测的量的最小变化值。例如，使天平指针产生可见位移的最

小负载变化为90mg, 则天平的灵敏阈是90mg。

9) 线性度(非线性误差) 输入输出之间的标定曲线与其拟合直线之间的最大偏差。

上面列举的名词术语及技术指标都是属于仪器精度这一概念范畴的。如果某一台仪器的上述各项指标(或其中几项主要指标)比较好时, 则我们就可以极其简要地用这台仪器的精度好一词来概括; 反之则称这台仪器的精度差。我们在以下行文中的仪器精度用语, 一般情况下, 都是指这一泛指概念。当需要说明某台仪器在仪器精度某方面的具体性能时, 则另用上面列举的有关指标来具体说明。

需要说明, 根据仪器测量状态的不同, 仪器精度有静态精度和动态精度之分。上面列举的指标一般讲属于静态精度的范围。评价仪器的动态精度, 另有一些相应的指标。仪器的静态精度和动态精度在研究方法上有不同的特点, 我们在本书中只限于讨论仪器的静态精度问题。仪器的动态精度属于另一个专门的问题, 本书将不涉及。

第三节 仪器的准确度等级

在实际工作中, 有必要以一定的表示方式来表示仪器在精度性能方面的不同, 并将仪器划分为不同的等级。如果各个国家和各个仪器生产厂家各自采用不同的技术指标或不同的表示方法来表示仪器的精度性能并划分仪器的精度等级, 则势必因指标上的不一致而造成仪器精度表示方式及等级划分上的混乱, 影响了相互间的交往。为此, 国际法制计量组织(OIML)提出了国际建议 No.34, 名为“测量器具的准确度等级”〔4〕。在该建议中, 叙述了按照测量仪器准确度来表示仪器的精度性能并划分其等级的各项原则。我国于1985年

4月25日起也是OIML的成员国之—，根据公约规定，各成员国尽可能采用国际建议的道义义务。为此，下面简要介绍该项建议的主要内容，以供我国有关方面在制定仪器精度等级时参考。

该建议规定：根据测量器具的作用原理、结构设计、用途及其工作条件的不同，仪器的准确度主要地分别由表示仪器基本误差的3种方式中某一种方式的最大误差来表示。这里，表示仪器基本误差的3种方式是：绝对误差、引用误差和相对误差。而仪器的准确度等级系列即以3种方式中某种方式表示的最大误差的不同数值来排列。

一、以最大绝对误差方式表示的测量器具的准确度及其等级系列

仪器的绝对误差是仪器的示值减去被测量的真值。根据不同的仪器，测量器具的最大误差以绝对误差表示时，有以下3种方式：

① 测量器具最大绝对误差不随所测之量的大小而改变，则其最大绝对误差规定如下式

$$\Delta = \pm a \quad (1-1)$$

式中， Δ 为最大绝对误差； a 为以被测量的单位表示的一个常数值。

这里式(1-1)是以绝对误差表示的表明仪器准确度的一种表示式，并以数值 a 的大小不同，划分测量器具的准确度等级系列。

② 测量器具最大绝对误差与所测量的值成线性关系，则其最大绝对误差规定如下式

$$\Delta = \pm (a + bx) \quad (1-2)$$

式中， Δ 为最大绝对误差； a 为以被测量的单位表示的一个常数； x 为被测量的值； b 为正无量数。

这里式(1-2)是以绝对误差表示的表明仪器准确度的另一种表示式，并以数值 a 、 b 取值的大小不同，划分测量器具的准确度等级。

③ 当测量器具最大绝对误差与被测量的值之间存在更加复杂关系时，则其最大绝对误差以近似于该关系的函数形式或以图表的形式规定。

二、以最大引用误差方式表示的测量器具的准确度及其等级系列

仪器的引用误差是仪器的绝对误差与测量范围上限值(或量程)之比值，以百分数表示。例如，测量范围为0~150V的电压表，当示值为100.0V时，其电压的真值为99.4

V，则电压表的引用误差为 $\frac{100 - 99.4}{150} \times 100\% = 0.4\%$

测量器具的最大引用误差规定如下式

$$\gamma = \pm \frac{100|\Delta|}{x_N} \% = \pm p \% \quad (1-3)$$

式中， γ 为以一个约定值 x_N (例如为测量范围上限值或量程)的百分数表示的最大引用误差； $|\Delta|$ 为用与约定值 x_N 相同单位表示的最大绝对误差，不论正负号； p 为正无量数。

这里式(1-3)是以引用误差表示的表明仪器准确度的表示式，其准确度等级系列以式(1-3)中的 $p\%$ 的不同取值来确定。而 $p\%$ 的数值取自下列系列： 1×10^n ， 1.5×10^n ， 1.6×10^n ， 2×10^n ， 2.5×10^n ， 3×10^n ， 4×10^n ， 5×10^n ， 6×10^n ，其中的 $n = 1, 0, -1, -2$ ，等等。

三、以最大相对误差方式表示的测量器具的准确度及其等级系列

仪器的相对误差是仪器的绝对误差与被测量的真值之比。

根据不同的仪器，分两种情况

① 测量器具的最大相对误差不因所测量的大小而改变，则其最大相对误差规定如下式

$$\delta = \pm \frac{100 | \Delta |}{x} \% = \pm c \% \quad (1-4)$$

式中， δ 为以量值 x 的百分数表示的最大相对误差； x 为被测量的值； $|\Delta|$ 为最大绝对误差，不论正负号； c 为正无量数。

这里式 (1-4) 是以相对误差表示的表明仪器准确度的一种表示式，准确度等级的系列以式 (1-4) 中的 $c\%$ 的不同数值而定，而数 $c\%$ 也取自公式 (1-3) 下所列的数字系列。

② 测量器具的最大相对误差随所测量的大小而改变，则其最大相对误差规定如下式

$$\begin{aligned} \delta &= \pm \frac{100 | \Delta |}{x} \% \\ &= \pm \left[c + d \left(\frac{x_m}{x} - 1 \right) \right] \% \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中， δ 为以量值 x 的百分数表示的最大相对误差； x 为被测量的值； $|\Delta|$ 为绝对误差极限，不论正负号； x_m 为该器具测量范围的上限； c 和 d 为正无量数。

这里式 (1-5) 是以相对误差表示的表明仪器准确度的另一种表示式，其准确度等级的系列以式 (1-5) 中的 c 和 d 两个数的不同取值而定，而 c 和 d 两个数也取自公式 (1-3)

下所列的数字系列，例如 $\delta = \pm \left[0.02 + 0.01 \left(\frac{x_m}{x} - 1 \right) \right]$ 。 c

和 d 两个数的比率对于不同的仪器可以有不同的规定，但要遵守 c 大于 d 的条件。

国际建议 No.34 还规定，除了以仪器基本误差的 3 种表示方式中某一种方式的最大误差的值作为确定准确度等级系列的参数外，根据不同的仪器，还规定了其它一些技术参数应达到的数值或其确切的误差允许值。当仪器为某一准确度等级时，这些参数也必须达到规定的数值，或它们的误差允许值应在规定的范围之内。

至于国际建议 No.34 更详细的内容，读者可参阅文献〔4〕。

用法规的形式来规定测量器具的准确度等级是一项十分严格、细致、繁杂而又涉及面广的工作。我国目前还没有关于仪器准确度等级的统一法规，但此项工作的意义及其重要性是十分明显的。因此，有必要根据实际情况，经过仔细的调查研究，在充分的理论分析和实验验证的基础上，制定出统一的法规。

第四节 仪器误差的组成

仪器误差由哪些部分组成，可以从不同的角度进行归纳。我们按产生仪器误差的根源把仪器误差归纳为以下几项：

- ① 仪器的原理误差。
- ② 仪器的工艺误差。
- ③ 仪器受力作用引起的误差。
- ④ 仪器受温度影响引起的误差。
- ⑤ 仪器元部件特性随时间不稳定而引起的误差。