

国家机械工业委员会统编

误差与测量

(高级计量鉴定修理工适用)

机械工人技术理论培训教材

JIXIE GONGREN JISHULILUN PEIXUN JIAOCAI



机械工业出版社

机械工人技术理论培训教材

误差与测量

(高级计量鉴定修理工适用)

国家机械工业委员会统编

机械工业出版社

本书共分四章：第一章误差分析与数据处理，介绍不等精度的测量，并以精度分析及多面棱体测试为例，讲解误差知识的应用；第二章特殊齿轮测量，介绍圆锥齿轮、圆弧齿轮、摆线齿轮的基本参数及测量；第三章夹具、模具的检测，介绍六点定位的概念，以及夹具、模具的检测知识；第四章技术管理，介绍量值传递系统、检定规程和测量工艺卡片的编制方法。

本书由沈阳重型机器厂丘峥、吴凤麒、朱晓可、陈阔生编写，沈阳工业大学荆以广、金嘉琪审稿。

误差与测量

(高级计量鉴定修理工适用)

国家机械工业委员会统编

*

责任编辑：杨溥泉

版式设计：张伟行

封面设计：林胜利 方 芬 责任校对：陈 松

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

机械工业出版社发行·新华书店经销

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $4^{1/2}$ · 字数 97 千字

1988年11月北京第一版·1988年11月北京第一次印刷

印数 00,001—17,600 · 定价：1.90 元

*

ISBN 7-111-01180-5/TH · 198

前 言

1981年，原第一机械工业部为贯彻、落实《中共中央、国务院关于加强职工教育工作的决定》，确定对机械工业系统的技术工人按照初、中、高三个阶段进行技术培训。为此，组织制定了30个通用技术工种的《工人初、中级技术理论教学计划、教学大纲（试行）》，编写了相应的教材，有力地推动了“六五”期间机械行业的工人培训工作，初步改变了十年动乱造成的工人队伍文化技术水平低下的状况，取得了比较显著的成绩。

鉴于原机械工业部1985年对《工人技术等级标准（通用部分）》进行了全面修订，原教学计划、教学大纲已不适应新《标准》的要求，而且缺少高级部分；编写的教材，由于时间仓促、经验不足，在内容上存在着偏深、偏多、偏难等脱离实际的问题。为此，原机械工业部根据新《标准》，重新制定了33个通用技术工种的《机械工人技术理论培训计划、培训大纲》（初、中、高级），于1987年3月由国家机械工业委员会颁发，并根据培训计划、大纲的要求，编写了配套教材149种。

这套新教材的编写，体现了《国家教育委员会关于改革和发展成人教育的决定》中对“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的有关精神，坚持了文化课为技术基础课服务，技术基础课为专业课服务，专业课为提高操作技能和分析解决生产实际问题的能力服务的原则。在内容上，力求以

基本概念和原理为主，突出针对性和实用性，着重讲授基本知识，注重能力培养，并从当前机械行业工人队伍素质的实际情况出发，努力做到理论联系实际，通俗易懂，具有工人培训教材的特色，同时注意了初、中、高三级之间合理的衔接，便于在职技术工人学习运用。

这套教材是国家机械工业委员会委托上海、江苏、四川、沈阳等地机械工业管理部门和上海材料研究所、湘潭电机厂、长春第一汽车制造厂、济南第二机床厂等单位，组织了200多个企业、院校和科研单位的近千名从事职工教育的同志、工程技术人员、教师、科技工作者及富有生产经验的老工人，在调查研究和认真汲取“六五”期间工人教材建设工作经验教训的基础上编写的。在新教材行将出版之际，谨向为此付出艰辛劳动的全体编、审人员，各地的组织领导者，以及积极支持教材编审出版并予以通力合作的各有关单位和机械工业出版社致以深切的谢意！

编好、出好这套教材不容易，教好、学好这些课程更需要广大职教工作者和技术工人的奋发努力。新教材仍难免存在某些缺点和错误，我们恳切地希望同志们在教和学的过程中发现问题，及时提出批评和指正，以便再版时修订，使其更完善，更好地发挥为振兴机械工业服务的作用。

国家机械工业委员会
技工培训教材编审组

1987年11月

本教材适用于高级计量 鉴定修理工

本工种应学习下列课程

初级：机械识图、金属材料及热处理基础、误差与测量（初级计量鉴定修理工适用）、量具与仪器（初级计量鉴定修理工适用）

中级：数学、机制工艺基础与夹具（中级冷加工适用）、误差与测量（中级计量鉴定修理工适用）、量具*、计量仪器（中级计量鉴定修理工适用）

高级：误差与测量（高级计量鉴定修理工适用）、计量仪器（高级计量鉴定修理工适用）、微机及应用

为便于企业开展培训，国家机械工业委员会教育局和机械工业出版社还组织编写出版了与机械识图、金属材料及热处理基础、数学、机制工艺基础与夹具、微机及应用等教材配套的习题集，并摄制出版了这几门课的电视教学录像片。

注：带*者未编教材

目 录

前言

第一章 误差分析与数据处理	1
第一节 测量误差分析	1
第二节 误差分析实例	17
复习题	39
第二章 特殊齿轮的测量	40
第一节 圆锥齿轮的测量	40
第二节 圆弧齿轮的测量	54
第三节 摆线轮的测量	75
复习题	78
第三章 夹具、模具的检测	79
第一节 夹具的基本知识	79
第二节 夹具的检测	83
第三节 模具的基本知识	96
第四节 模具的检测	100
复习题	112
第四章 技术管理	113
第一节 编制测量工艺卡片	113
第二节 编制量值传递系统	119
第三节 编制仪器检定规程	125
复习题	136

第一章 误差分析与数据处理

第一节 测量误差分析

任何测量总是不可避免地存在着误差。这些误差可以归纳为五个方面：仪器误差、标准器误差、测量方法误差、测量条件误差和人为误差。它们影响着测量结果的准确性。

一、影响仪器精度的诸因素

1. 仪器的设计原理误差 一些精密仪器在设计原理上本身就存在着一定的近似关系，或者在测量布线上不符合阿贝原理等。例如，将被测量转换成仪器显示的中间环节往往把非线性的函数关系化为线性关系，第二节中介绍的光学计就是这样。它的标尺是按线性关系等距离刻制的，但实际上偏移量与象位移的关系是非线性的，即理论上标尺应当制作成不等距的一系列刻线。又如万能工具显微镜，它的纵向测量轴线与被测轴线没有布置在一条直线上，它的横向测量轴线与被测轴线虽然布置在一条直线上，但当用玻璃工作台时，由于工件有一定厚度，测量轴线与被测轴线又发生了偏离，分布在两条直线上了。这种因不符合阿贝原理而在测量中产生的误差，称为阿贝误差。

2. 标准系统的检定误差 任何精密仪器的标准系统，都是由更高一级的标准来评定的。更高一级标准本身的误差，也直接影响标准系统的精度。

3. 标准系统本身的误差 如标尺的刻度误差、刻度盘

和指针的安装偏心等。

4. 仪器及附件的制造偏差 如仪器导轨直线度、扭摆等因素, 附件的制造偏差等。

5. 仪器零、部件本身因素的影响 由于仪器零、部件配合不稳定, 变形, 表面油膜不均匀及摩擦等因素的影响。

6. 仪器瞄准系统的瞄准和估读误差 瞄准误差的大小因瞄准的对线方式不同而异。估读误差因人而异。

7. 仪器测力变化的影响 接触测量过程中测力不是恒定的, 但其变化范围是一定的。测力的不稳定, 决定了测头与被测件及标准件的压陷程度不同, 因而对测量精度有影响。

8. 仪器校正及检定时温度变化的影响 精密仪器都有一定的使用条件, 其中包括对温度变化范围的要求。当检定温度偏离标准温度 20°C , 如果用量块做为基准对仪器进行调整时, 就会因量块间温度和线膨胀系数的不同, 造成仪器校正及检定不准。

上述误差合成后得到仪器的不确定度。

二、影响测量不确定度的诸因素

1. 仪器的不确定度 该项误差是影响测量精度的主要因素之一。

2. 测量方法的原理误差 由于受到测量条件或其它因素的影响, 测量方法本身就存在一定的原理误差, 或者测量方法是在一定的假设理想状态下成立的, 而实际情况中必然产生某些误差因素。例如, 用三针法测量螺纹中径, 就假设了三针仅仅是一个圆形截面而没有厚度, 但在实际中这是无法实现的, 因此三针将因为螺纹的螺旋角而偏离理想位置, 使测得的中径值偏大。



A00082840

3

3. 函数误差 在间接测量过程中, 测量是通过测量相关的间接量, 然后经一定的函数关系计算求得的。但这绝不是一般的数学计算, 因为间接量的测量误差必然以一定的函数关系反映到被测量中。例如, 用弓高弦长法测量圆的直径 (见图1-1), 其函数关系为:

$$D = h + \frac{s^2}{4h} \quad (1-1)$$

对式 (1-1) 进行全微分, 即可得到由于弓高和弦长的测量误差引起的计算直径的误差:

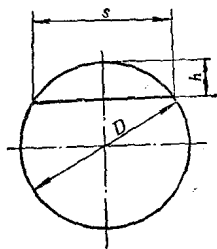


图1-1 弓高弦长法测量直径

$$\Delta D = \frac{s}{2h} \Delta s - \left(\frac{s^2}{4h^2} - 1 \right) \Delta h \quad (1-2)$$

令

$$r_1 = \frac{s}{2h} \quad r_2 = - \left(\frac{s^2}{4h^2} - 1 \right)$$

则式 (1-2) 可改写为

$$\Delta D = r_1 \Delta s + r_2 \Delta h \quad (1-3)$$

式中 s ——弦长;

h ——弓高;

Δs ——弦长的测量误差;

Δh ——弓高的测量误差;

r_1, r_2 ——误差传递系数。

当 $h = 50\text{mm}$, $\Delta h = -0.1\text{mm}$, $s = 500\text{mm}$, $\Delta s = 1\text{mm}$ 时, $\Delta D = 7.4\text{mm}$ 。这是系统误差可以在测量结果中加以消除。

4. 标准件误差 在相对测量过程中, 将被测件与标准件相比较得出被测量相对标准量的偏差, 因而标准件的误差

将直接影响被测量值的精确度。标准件的标称值与实际值的偏差是系统误差，可在测量结果中加以修正，而其检定误差将以随机误差的形式进入测量结果。

另外，当被测量与标准量的几何特性不同时，也可能产生影响。例如在光学计上测量工件直径，以四等量块做为标准件，采用平面测帽，由于测帽与标准件是面接触，而与被测件是线接触，那么量块的平行度和平面度的影响，以及压陷的不同将以一定的量值进入测量结果。

5. 温度误差 在测量时，由于被测件与仪器温度不等，被测件与标准件温度不等，被测件与标准件线膨胀系数不同，都将产生温度误差。

温度误差的计算公式为：

$$\begin{aligned}\Delta L &= L[\alpha_1(t_1 - 20) - \alpha_2(t_2 - 20)] \\ &= L[\alpha_1(t_1 - 20) - \alpha_2(t_2 - 20) \\ &\quad + (t_2 - 20)\alpha - (t_2 - 20)\alpha_1] \\ &= L[\alpha_1(t_1 - t_2) + (t_2 - 20)(\alpha_1 - \alpha_2)]\end{aligned}$$

$$\text{即 } \Delta L = L\alpha_1(t_1 - t_2) + L(t_2 - 20)(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (1-4)$$

式中 L ——被测长度 (mm)；

α_1 和 α_2 ——标准件和被测件的线膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$)；

t_1 和 t_2 ——标准件和被测件的温度 ($^\circ\text{C}$)。

可见当 $t_1 = t_2$ 时， ΔL 的两个组成项之一，

$$L\alpha_1(t_1 - t_2) = 0$$

即温度误差减小，这就是测量时要求等温的实际意义。

上述误差合成后，得到测量的最大不确定度。

三、误差的合成

在对一台仪器进行精度分析或对一测量过程进行误差分析时，上述各项误差并不是每一个都存在，这就需要根据具

体情况进行分析。

上述各误差中有系统误差和随机误差。系统误差又可分为定值系统误差（即误差的数值与符号均已固定不变的系统误差）和变值系统误差（即数值与符号是按规律变化的系统误差）。它们对测量结果的影响是不同的，需要分别进行误差合成。

1. 定值系统误差的合成 按代数和法求出，即

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \cdots + \Delta_m = \sum_{i=1}^m \Delta_i \quad (1-5)$$

式中 Δ ——总的定值系统误差；

Δ_i ——单项定值系统误差。

在实际测量中，一些定值系统误差可在测量过程中消除。例如，对分度盘的测量可采用对径法测量，这样由于偏心引起的系统误差就在测量中抵消了。系统误差合成后，可在测量结果中加以消除。

2. 变值系统误差的合成

(1) 当 s 较大时，常采用方和根法求出，即

$$e = \pm \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + \cdots + e_s^2} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^s e_i^2} \quad (1-6)$$

(2) 当 s 较小时，采用绝对和法求出，即

$$e = \pm (|e_1| + |e_2| + \cdots + |e_s|) = \pm \sum_{i=1}^s |e_i| \quad (1-7)$$

式中 e ——总的变值系统误差；

e_i ——单项变值系统误差。

3. 按正态分布的随机误差的合成 按方和根法求出，

即

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (1-8)$$

式中 δ ——总的随机误差;

δ_i ——单项随机误差。

4. 间接测量误差的合成 间接测量误差也称函数误差。它与直接测量过程中的测量误差计算方法和合成方法是不同的。因为在间接测量中,是通过测量与被测量有一定函数关系的其它分量后,根据一定的函数关系式求得被测量的。因此间接测量误差不仅取决于各分量误差的大小,而且还取决于各分量与被测量之间的函数关系。

1) 间接测量定值系统误差的合成 在此仅讨论常见到的和、差、乘、除、三角函数关系的间接测量定值系统误差的合成。并将其汇总列入表 1-1。

证 1 设被测量 y 与间接测量量 $x_1 \cdots x_n$ 有如下函数关系

$$y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$$

且 $x_1, x_2 \cdots x_n$ 相互独立,其误差分别为 $\Delta x_1, \Delta x_2 \cdots \Delta x_n$,引起函数 y 的误差为 Δy ,则

$$\begin{aligned} y + \Delta y &= (x_1 + \Delta x_1) + (x_2 + \Delta x_2) \\ &+ \dots + (x_n + \Delta x_n) = (x_1 + x_2 \\ &+ \dots + x_n) + (\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n) \\ \Delta y &= \Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n \end{aligned}$$

证 2 设被测量 y 与间接测量量 x_1, x_2 有如下函数系

$$y = x_1 x_2$$

对应于 $\Delta x_1, \Delta x_2$, 有函数 y 的误差 Δy , 则

表1-1 误差的合成汇总表

序号	形式	函数关系	函数的系统误差
1	和	$y = x_1 + x_2 + \cdots + x_m$	$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \cdots + \Delta x_m$
2	差	$y = x_1 - x_2 - \cdots - x_m$	$\Delta y = \Delta x_1 - \Delta x_2 - \cdots - \Delta x_m$
3	积	$y = x_1 x_2 \cdots x_m$	$\Delta y = \frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{\Delta x_2}{x_2} + \cdots + \frac{\Delta x_m}{x_m}$
4	商	$y = \frac{x_1}{x_2}$	$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x_1}{x_1} - \frac{\Delta x_2}{x_2}$
5	正弦	$\sin a = x$	$\Delta a = \operatorname{tg} a \frac{\Delta x}{x}$ 或 $\frac{\Delta \sin a}{\sin a} = \operatorname{ctg} a \Delta a$
6	余弦	$\cos a = x$	$\Delta a = -\operatorname{ctg} a \frac{\Delta x}{x}$ 或 $\frac{\Delta \cos a}{\cos a} = -\operatorname{tg} a \Delta a$
7	正切	$\operatorname{tg} a = x$	$\Delta a = \cos a \sin a \frac{\Delta x}{x}$ 或 $\frac{\Delta \operatorname{tg} a}{\operatorname{tg} a} = \frac{1}{\sin a \cos a} \Delta a$
8	余切	$\operatorname{ctg} a = x$	$\Delta a = -\cos a \sin a \frac{\Delta x}{x}$ 或 $\frac{\Delta \operatorname{ctg} a}{\operatorname{ctg} a} = -\frac{1}{\sin a \cos a} \Delta a$

$$\begin{aligned}
 y + \Delta y &= (x_1 + \Delta x_1)(x_2 + \Delta x_2) \\
 &= x_1 x_2 + (x_2 \Delta x_1 + x_1 \Delta x_2 \\
 &\quad + \Delta x_1 \Delta x_2)
 \end{aligned}$$

$$\Delta y = x_2 \Delta x_1 + x_1 \Delta x_2 + \Delta x_1 \Delta x_2$$

上式两端分别除以 $x_1 x_2$ ，并考虑到 $\Delta x_1 \Delta x_2 \ll x_1 x_2 \frac{\Delta x_1 \Delta x_2}{x_1 x_2}$ ，

可略得

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{\Delta x_2}{x_2}$$

证 3 设被测量 α 与间接测量量 x 间存在函数关系

$$\sin \alpha = x$$

对应于 Δx 有

$$\sin \alpha + \Delta \sin \alpha = x + \Delta x$$

$$\Delta \sin \alpha = \Delta x$$

为得到 $\Delta \alpha$ 与 Δx 的关系式还可写成

$$\sin \alpha + \Delta \sin \alpha = \sin(\alpha + \Delta \alpha)$$

$$\text{则 } \Delta \sin \alpha = \sin(\alpha + \Delta \alpha) - \sin \alpha$$

$$= \sin \alpha \Delta \cos \alpha + \cos \alpha \sin \Delta \alpha - \sin \alpha$$

因 $\Delta \alpha$ 是一很小的量，可认为 $\sin \Delta \alpha \approx \Delta \alpha$ ， $\cos \Delta \alpha \approx 1$ ，则

$$\Delta \sin \alpha = \sin \alpha + \cos \alpha \Delta \alpha - \sin \alpha = \Delta \alpha \cos \alpha$$

即

$$\Delta \sin \alpha = \Delta \alpha \cos \alpha$$

又

$$\Delta \sin \alpha = \Delta x$$

$$\text{所以 } \Delta \alpha = \frac{1}{\cos \alpha} \Delta x = \operatorname{tg} \alpha \frac{\Delta x}{\sin \alpha} = \operatorname{tg} \alpha \frac{\Delta x}{x}$$

$$\Delta \alpha = \operatorname{tg} \alpha \frac{\Delta x}{x}$$

同样可以证明表 1-1 中其它结论，而不必涉及微分知识，这

里不再赘述。

至于误差传递系数，当表 1-1 结论中各式左端仅有被测量的误差项时，且该项因子为 1，此时等式右端各间接分量误差前的系数（因子）即为误差传递系数。

如商形式的函数系统误差为：

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x_1}{x_1} - \frac{\Delta x_2}{x_2} \quad \text{可写为}$$

$$\Delta y = \frac{y}{x_1} \Delta x_1 - \frac{y}{x_2} \Delta x_2$$

式中 $\frac{y}{x_1}$, $\frac{y}{x_2}$ 即为传递系数，可分别设为 $r_1 = \frac{y}{x_1}$, $r_2 = \frac{y}{x_2}$ 。

2) 间接测量变值系统误差的合成 只须将上述各式中定值系统误差换为变值系统误差，然后按绝对和法合成。

3) 间接测量按正态分布的随机误差的合成 将表 1-1 各式中的定值系统误差换为随机误差，然后按方和根法合成，即：

$$\delta = \pm \sqrt{r_1^2 \delta_1^2 + r_2^2 \delta_2^2 + \cdots + r_m^2 \delta_m^2} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^m r_i^2 \delta_i^2} \quad (1-9)$$

式中 r_i ——误差传递系数。

5. 测量结果

$$l = \bar{l} + \Delta \pm (e + \delta) = \bar{l} + \Delta \pm \delta_{\text{lim}} \quad (1-10)$$

式中 l ——测量结果；

$\bar{l}$ ——测量值的平均值；

δ_{lim} ——综合极限误差 $\delta_{\text{lim}} = \pm (e + \delta)$ ，亦称作测量不确定度。

例 1 在万能工具显微镜上用影象法测量一工件。测得

其长度为 60.005mm (该数为平均值), 知该平面工件高 100mm。

(1) 系统误差

1) 阿贝误差

$$e_1 = \pm \frac{HL}{4000} = \pm \frac{100 \times 60.005}{4000} = \pm 1.5 \mu\text{m}$$

2) 玻璃刻度的刻度误差

$$e_2 = \pm \left(1 + \frac{L}{200} \right) = \pm 1.3 \mu\text{m}$$

3) 玻璃刻度尺的检定误差 $e_3 = \pm 0.5 \mu\text{m}$

4) 温度误差

$$e_4 = \pm \frac{7L}{1000} = 0.4 \mu\text{m}$$

式中 L ——被测长度 (mm);

H ——被测工件的测量面高出平台玻璃面之距离 (mm)。

上述四项误差属于变值系统误差, 因其在测量中不具有抵偿性, 其大小和测量次数无关。另外它们给出的数并不是肯定的数值, 而是一个范围, 它们均不超出各自限定范围。

(2) 随机误差

1) 读数装置误差 $\delta_1 = \pm 0.8 \mu\text{m}$

2) 估读误差 $\delta_2 = \pm 1 \mu\text{m}$

3) 瞄准误差 $\delta_3 = \pm 1 \mu\text{m}$ (测量时被两次引入)。

(3) 误差合成

总的变值系统误差用绝对和法合成:

$$\text{即 } e = \pm \sum_{i=1}^4 |e_i| = \pm (1.5 + 1.3 + 0.5 + 0.4)$$