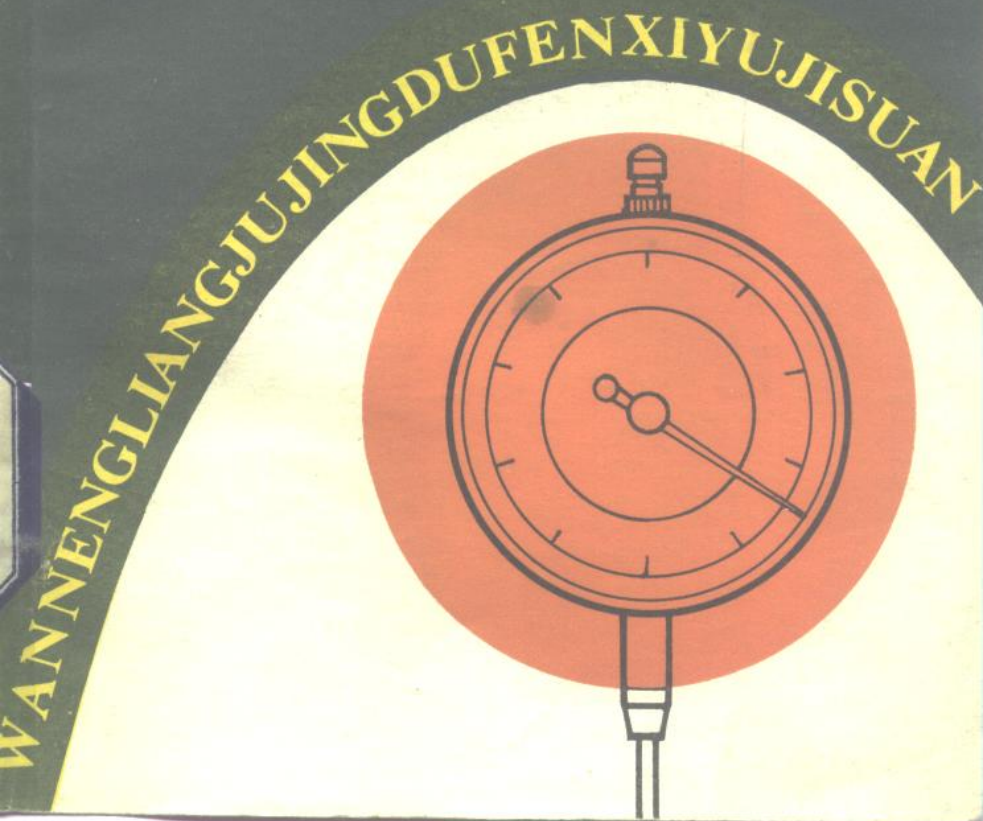


# 万能量具精度分析与计算

关天顾 编著



# 万能量具精度分析与计算

关天顾 编著



机械工业出版社

本书以理论和实践的结合，对万能量具的精度进行了分析与计算。书的前半部叙述精度分析与计算中的一般性和共同性问题；后半部具体叙述游标卡尺、千分尺、百分表等几种典型万能量具的精度分析与计算。本书所引用的数据和例子，大多来源于国内工厂生产实际。书中引用了最新国内、外有关技术标准。

本书的读者对象是从事万能量具设计、制造、检定和修理工作的工程技术人员以及有关院校的师生。

## 万能量具精度分析与计算

关 编著

\*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

外文印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{32}$  · 印张 7 · 字数 152 千字

1982 年 12 月北京第一版 · 1982 年 12 月北京第一次印刷

印数 00,001—11,700 · 定价 0.74 元

\*

统一书号：15033 · 5323

## 前 言

随着生产和科学技术的快速发展，对机器制造业及仪器制造业的产品质量提出了愈来愈高的要求。为了保证产品零件达到预期的质量要求，在生产过程中采用适当的测量器具和完善的测量方法，是不可缺少的重要环节。

由于万能量具具有结构简单、使用方便等优点，因此在生产实践中得到广泛应用。

为了有助于改进万能量具的结构和性能，提高万能量具的制造质量和检修质量，本书对万能量具精度进行了分析。书中除对万能量具精度分析中的一般性问题进行了叙述外，并对游标卡尺、高度游标卡尺、外径千分尺、百分表、杠杆百分表等万能量具的精度进行了详细的分析和计算。

书中述及的测量器具，从用途和结构原理方面应分属于量具和机械式量仪。考虑到目前工厂生产中的习惯，本书仍称为万能量具。但为了确切表达述及的内容，书中部分章节要涉及到量仪方面的问题。

本书可供万能量具设计、制造、检定、修理部门的工程技术人员以及高等院校和中等专业学校有关专业师生参考。

由于作者水平所限，书中不当和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

本书得到王慈明、范增仁、江敦金等同志审阅并提出宝贵意见，在此表示衷心感谢。

# 目 录

第一章 概论 .....	1
一、测量器具的基本度量指标和精度指标 .....	1
1. 测量器具的基本度量指标 .....	1
2. 测量器具的精度指标 .....	3
二、测量器具精度分析概述 .....	7
1. 精度分析的意义 .....	7
2. 精度分析的过程 .....	7
第二章 误差原理及精度评定方法 .....	9
一、误差的基本概念 .....	9
二、概率论简介及随机误差的综合 .....	11
1. 概率论与概率 .....	11
2. 随机误差的基本特性 .....	12
3. 随机误差的综合 .....	14
三、函数误差的综合 .....	17
1. 定函数误差的综合 .....	17
2. 不定函数误差的综合 .....	18
3. 周期函数误差的综合 .....	19
四、精度评定方法 .....	22
1. 极大极小法 .....	22
2. 均方误差算法 .....	23
3. 综合算法 .....	26
第三章 测量器具误差的来源 .....	28
一、影响测量器具精度的主要因素 .....	28
二、原理误差 .....	28
1. 不符合阿贝原理的原理误差 .....	29
2. 杠杆传动机构的原理误差 .....	32

三、原始误差 .....	40
1. 制造误差 .....	41
2. 使用误差 .....	41
第四章 机构精度分析与计算方法 .....	51
一、局部误差的概念 .....	51
二、微分法 .....	53
三、几何法 .....	57
四、作用线与瞬时臂法 .....	58
1. 作用线与瞬时臂法的基本观点 .....	59
2. 原始误差沿作用线传递的基本公式 .....	59
3. 作用误差向示值误差的传递 .....	63
第五章 游标卡尺精度分析 .....	65
一、概述 .....	65
二、影响游标卡尺精度的主要因素分析 .....	66
1. 主尺刻度误差的影响 .....	66
2. 游标刻度误差的影响 .....	66
3. 刻线宽度误差的影响 .....	67
4. 刻线对主尺基准面垂直度误差的影响 .....	70
5. 视差的影响 .....	70
6. 主尺基准面平面度误差的影响 .....	71
7. 测量面平面度误差的影响 .....	71
8. 测量面平行度误差的影响 .....	71
9. 测量面对主尺基准面垂直度误差的影响 .....	72
10. 主尺刻度面弯曲的影响 .....	72
11. 测量力引起卡尺弯曲变形的影响 .....	74
12. 温度偏差的影响 .....	79
13. 零位调整不正确的影响 .....	79
14. 内径测量误差 .....	80
15. 刀口形量爪测量管壁厚的测量误差 .....	83

## VI

三、游标卡尺的示值总误差 .....	85
第六章 高度游标卡尺精度分析 .....	88
一、影响高度游标卡尺精度的主要因素分析 .....	88
1. 主尺刻度误差的影响 .....	88
2. 游标刻度误差的影响 .....	88
3. 刻线宽度误差的影响 .....	89
4. 视差的影响 .....	89
5. 主尺基准面平面度误差的影响 .....	89
6. 测量面及底座底面平面度误差的影响 .....	89
7. 测量面与底座底面平行度误差的影响 .....	89
8. 主尺基准面与底座底面垂直度误差的影响 .....	89
9. 测量力产生的变形的影响 .....	90
10. 零位调整不正确的影响 .....	92
二、高度游标卡尺的示值总误差 .....	93
第七章 外径千分尺精度分析 .....	95
一、影响外径千分尺精度的主要因素分析 .....	95
1. 测微螺杆螺距误差的影响 .....	95
2. 螺旋副无效行程的影响 .....	96
3. 微分筒分度误差的影响 .....	97
4. 微分筒刻线与固定套管轴向刻线宽度差的影响 .....	97
5. 固定套管轴向刻线与轴线平行度误差的影响 .....	97
6. 视差的影响 .....	97
7. 测量面平面度误差的影响 .....	98
8. 测量面平行度误差的影响 .....	98
9. 测量力变化的影响 .....	98
10. 千分尺自重的影响 .....	100
11. 温度偏差的影响 .....	101
12. 尘埃等引起的误差的影响 .....	103
13. 校对量杆误差的影响 .....	103

14. 零点变化的影响 .....	107
二、外径千分尺的示值总误差 .....	109
第八章 百分表精度分析 .....	112
一、概述 .....	112
1. 齿条齿轮式百分表传动机构工作原理 .....	112
2. 齿条齿轮式百分表传动机构特点 .....	114
二、全国统一设计百分表介绍 .....	115
1. 全国统一设计百分表主要特点 .....	115
2. 全国统一设计百分表主要结构介绍 .....	117
3. 全国统一设计百分表的齿轮参数 .....	119
三、影响百分表精度的主要因素分析 .....	130
1. “齿条 $P$ -轴齿轮 1” 环节误差的影响 .....	133
2. “片齿轮 2-中心齿轮 3” 环节误差的影响 .....	138
3. “指针 $C$ -刻度盘 $B$ ” 环节误差的影响 .....	140
4. 测头与工件接触产生变形的影响 .....	142
5. 温度偏差的影响 .....	142
6. 回程误差 .....	143
四、百分表的示值总误差 .....	153
1. 回程误差与示值误差的关系 .....	153
2. 百分表示值总误差的计算 .....	155
第九章 杠杆百分表精度分析 .....	160
一、概述 .....	160
二、影响杠杆百分表精度的主要因素分析 .....	162
1. 原理误差的影响 .....	162
2. 测头长度误差及齿杆长度误差的影响 .....	163
3. 枢轴与配合孔间隙的影响 .....	165
4. 端面齿轮周节累积误差的影响 .....	165
5. 端面齿轮安装偏心误差的影响 .....	166
6. 轴齿轮切合综合误差的影响 .....	166



## Ⅵ

7. 刻度误差的影响 .....	166
8. 刻度盘偏心误差的影响 .....	167
9. 回程误差的影响 .....	167
三、杠杆百分表的示值总误差 .....	167
附录 .....	172
表 1 各国游标卡尺标准主要技术指标 .....	172
表 2 各国千分尺标准主要技术指标 .....	184
表 3 各国百分表标准主要技术指标 .....	200
表 4 各国杠杆百分表标准主要技术指标 .....	210
参考文献 .....	214

# 第一章 概 论

目前工厂生产中常用的测量器具主要有以下三类：

(1) 游标量具 用游标来提高刻线读数精度的测量器具。属于游标量具的有游标卡尺、高度游标卡尺、深度游标卡尺、游标量角器、齿厚游标卡尺等。

(2) 测微量具 应用螺旋传动原理进行测量的测量器具。属于测微量具的有外径千分尺、内径千分尺、深度千分尺等。

(3) 机械量仪 应用机械结构将被测量进行放大并通过读数装置指示出来的测量仪器。通常用机械杠杆、齿轮系或弹簧等构成传动放大机构。属于机械量仪的有杠杆齿轮比较仪、百分表、千分表、内径百分表及扭簧比较仪等。

对于其中的游标卡尺、千分尺和百分表，习惯称为万能量具。

## 一、测量器具的基本度量指标和精度指标

测量器具的基本度量指标和精度指标，具体地、全面地表明了测量器具的性能，不但是设计、制造、选择和使用测量器具，研究和判断测量方法正确性的依据，而且也是对测量器具进行精度分析时遇到的基本概念。在这里，仅将与精度分析有关的几个指标叙述如下。

### 1. 测量器具的基本度量指标

(1) 刻线间隔 测量器具刻线尺上相邻两刻线中心的

距离。当标线或指针位于两刻度中间时，为了便于目力估计能达到足够的精度，最适宜的间距为  $0.75 \sim 2.5\text{mm}$ 。此时用眼观察可以估出其间距的  $1/10$ 。

(2) 刻度值 (分度值) 测量器具的最小细分刻线尺上每一个刻线间隔所代表的被测量的数值。在测量器具中，一般皆为均匀刻度。考虑到习惯上读数的方便，刻度值应取为 1、2 或 5 的倍数。常用的刻度值有： $0.0001$ 、 $0.0002$ 、 $0.0005$ 、 $0.001$ 、 $0.002$ 、 $0.005$ 、 $0.01$ 、 $0.02$ 、 $0.05$  及  $0.1\text{mm}$  等。

(3) 示值范围 测量器具主要刻线尺全部刻度所表示的被测量的范围。例如：千分尺的示值范围一般为  $25\text{mm}$ 。百分表的示值范围有 3、5 或  $10\text{mm}$  等几种。

(4) 测量范围 用测量器具所能测量出来的最大及最小被测量的范围。

有调节范围的测量器具，其测量范围等于示值范围加上调节范围。例如，固定在可调节支架上的百分表，其测量范围等于百分表的示值范围加上固定百分表的支架沿立柱高低方向调节的范围。

(5) 放大比 (传动比) 测量器具的标线或指针相对刻线尺的直线或角度位移量与引起该位移量的被测量的变动量之比。一般情况下，示值  $W$  可以表示为被测量  $u$  的函数，即  $W = f(u)$ ，则传动比  $K$  为：

$$K = \frac{dW}{du} = f'(u)$$

$W = f(u)$  在理论上常为线性的关系，则  $K = \frac{dW}{du} = \text{常数}$ ，这时传动比  $K$  也就等于其刻度间隔  $C$  与刻度值  $i$  之比，

即：

$$K = \frac{dW}{du} = \frac{C}{i}$$

(6) 测量力 在测量过程中，测量器具测量面和被测件表面接触时产生的机械压力。

测量力大小的选择，对测量精度有很大的影响。太小的测量力，不能实现很好的接触，将不会获得正确的测量结果，还会降低灵敏限。通常测量力不应小于 50gf。测量力将引起被测件和测量装置的弹性变形，因此，测量力也不宜过大，并应尽可能地稳定，以免影响测量结果。此外，测量力过大，还增加了测量装置的惯性，降低了对于微小交变位移的灵敏性。

上述测量力，系指静测量力。在考虑测量力时，不仅要看到静测量力，而且还要注意到动测量力。所谓动测量力，即测杆落于工件上时的冲击力。动测量力远远大于静测量力，能达到很大的数值。R. Lehmann、A. Wiemer 1959 年试验得出各种测量器具的静测量力与动测量力，其中百分表的静测量力为 70~130gf，而动测量力却达到了 200~7400gf [6]。

动测量力的大小与测量器具内部运动部件的质量、转动惯量及运动速度有关。为了减少动测量力，应当尽量减小运动部件的质量以及降低运动件的速度（如加阻尼器等）。

## 2. 测量器具的精度指标

测量器具的精度是指读数或指示数值（测得值）与被测量的实际值的近似程度，以及多次重复测量同一被测量时，所得的一组指示数值的符合程度。

测量器具的精度高低用以下几个指标来衡量。

(1) 示值误差 测量器具的读数或指示数值与被测量

的实际值之差，即：

$$\text{示值误差} = \text{测得值} - \text{实际值}$$

测量器具的示值误差表示其本身的误差，它包括原理误差，刻度尺、传动机构的制造和装调误差等，是测量器具精度的主要指标。

在测量器具的测量范围内，各点的示值误差均不相同，并有正负之分。最大的正误差称为示值误差的上限值；最大的负误差称为示值误差的下限值。示值误差的上限和下限值的绝对值之和称为示值总误差。

在精密测量时，应根据检定后得出的示值误差校正值，对测量结果加以校正。校正值通常与示值误差的绝对值相等而符号相反。

(2) 示值稳定性 在外界条件不变时对同一被测量多次重复测量，所得指示数值的最大变化范围为示值稳定性。

示值稳定性是无法加以校正的，它表征了测量器具的随机误差的大小。为了确定示值稳定性，重复测量次数一般为 10 至 15 次。示值稳定性以均方误差的极限误差表示。如图 1-1 所示，示值稳定性以  $2f_c$  表示，则：

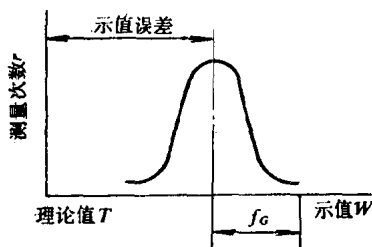


图 1-1

$$f_c = 3\sigma_c$$

式中  $\sigma_c$  为随机误差的均方差值。它主要由测量器具零件之间的间隙、摩擦、形变、配合不良等引起。一般示值稳定性为 0.1~0.3 倍刻度值。示值误差很大时，不见得示值稳定

性就不好，这是两个不同的概念。

(3) 回程误差 回程误差是指对同一基准量进行正、反向测量，两次测量的最大差值。回程误差产生的原因是由于零件间有摩擦，有间隙。当传动机构正反向运行时，摩擦力方向改变，因此使零件的相对位置发生变化而引起回程误差。回程误差是一个不定的系统误差。

(4) 灵敏限 灵敏限是指能使指针，或刻度尺发生微小变化(视觉刚刚能观察到)的被测量的最小变动量。它表示仪器感受微量的可能性。如令  $u$  为被测量，仪器示值  $W$  与被测量函数关系为：

$$f(u) = W$$

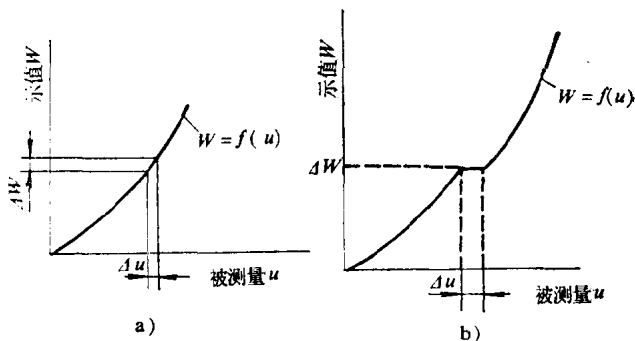


图 1-2

如图 1-2a 所示，被测量  $u$  有一增量  $\Delta u$ ，对应有一示值增量  $\Delta W$ ，这是理想情况。但实际上由于机构中不可避免地要存在着间隙和摩擦，因此实际上每次测量中都不可能得到一条如图 1-2a 所示的光滑曲线，而是在某些地方出现如图 1-2b 所示的那种折线段。当被测量  $u$  增加  $\Delta u$  时， $\Delta W$  不变

(或者变动极小, 难以察觉), 出现  $\Delta W$  呈水平线状态。我们称出现这种状态时的  $\Delta u$  最大值为灵敏限。它与灵敏度是两个概念。灵敏度大并不表示可以测出微小的量值, 这取决于灵敏限的大小。灵敏度表示了结构系统原理, 而灵敏限表示了结构的质量。对测量微小量变化的量仪, 灵敏限要求应较高。

示值误差、示值稳定性、回程误差、灵敏限可以用四条曲线表示如图 1-3 所示。

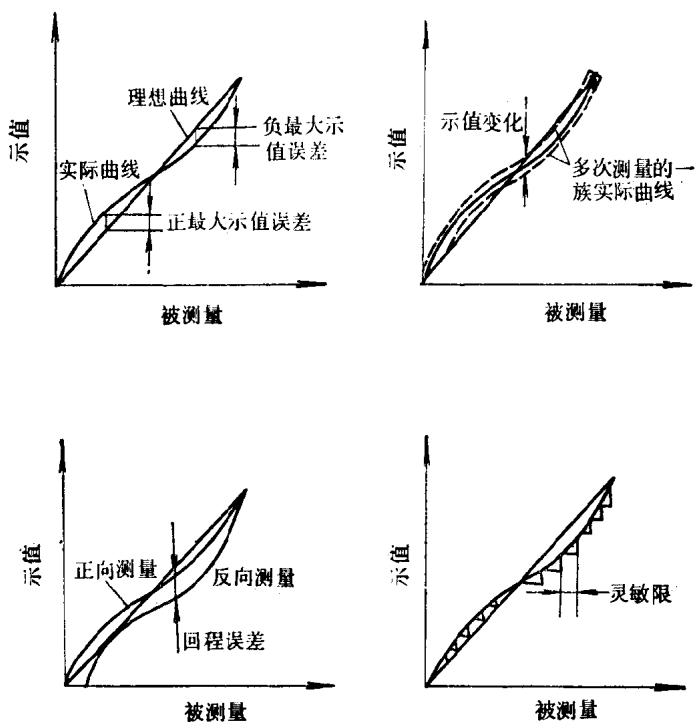


图 1-3

## 二、测量器具精度分析概述

### 1. 精度分析的意义

精度是评价测量器具的性能和质量的基本指标之一，它是测量器具设计、制造和使用的核心问题。精度分析的意义就在于找出影响精度的各种误差因素，研究其特征和规律，从而提出获得高精度的方法和途径。

精度与误差这两个概念，是同一本质的两种提法。精度高是用误差数值大小来表示的，误差大精度低，误差小精度高。

测量器具的精度，主要决定于结构原理和加工装配的质量及作用品质的优劣。由于零件制造不可避免地有误差，零件装配后也一定有误差，设计和制造测量器具时应该使误差限制在精度要求之内。在测量器具设计中，除按已定的测量方法确定工作原理、结构参数和结构形式外，也要考虑测量器具的工作精度。因此，测量器具的精度分析，在产品设计过程中是个必要的步骤，同时对测量器具零件的制造加工、总装调试以及检定修理等，都是十分必要的。

### 2. 精度分析的过程

测量器具的精度分析，就是从结构原理和制造质量，以及测量器具本身所产生的随机误差出发，根据误差原理来分析和计算机构的各项误差，并研究这些误差对测量器具精度的影响。

测量器具的精度分析，根据目的不同，一般按以下两个过程进行。

(1) 当用来合理地设计新测量器具时，从测量器具总体的精度和给定的技术要求出发，确定测量器具结构的参数



和机构尺寸，拟定合理的工作方法和零、组件的精度要求，合理地选择配合精度和公差大小。

(2) 当用来正确评定现有测量器具的质量时，根据结构并参考其它相似测量器具的零、组件的精度，以及根据加工制造条件（包括加工设备、工艺水平、操作技能等），从理论上确定出零、组件的误差影响所造成的测量器具的总体误差。

精度分析过程实际上是理性判断过程。测量器具的使用精度到底能否达到要求，最终还是要通过试制经过鉴定才能确定。而精度分析不可能是很准确的，因为影响精度大小的因素比较复杂，所以测量器具精度分析只能是初步的估算。

关于精度分析，目前还没有一个普遍的方法，只能根据具体的结构特点做具体分析。