

940335

高等学校教材

仪器精度设计

郑文学 王金波 编著

TH702
8709



兵器工业出版社

仪器精度设计

郑文学 王金波编著

兵器工业出版社

(京)新登字049号

内 容 简 介

本教材系统地阐述了仪器设计中的精度和可靠性问题,详细地论述了仪器精度的基本概念、仪器精度设计和评定方法、仪器可靠性设计,并对精密运动机构、传动与变换机构、精密伺服系统、光电系统进行了精度分析。最后,讨论了仪器总体精度设计与分析方法。

本教材理论与实践相结合。理论阐述简明扼要、通俗易懂,精度分析前后内容呼应,逻辑性强。

本书可作为大专院校精密机械专业、光学仪器专业、电子机械专业、检测技术及仪器专业教材,也可供从事精密机械和测试仪器设计的工程技术人员参考。

仪器精度设计

郑文学 王金波编著

兵器工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

北京市顺义县后沙峪印刷厂印装

开本: 787×1092 1/16 印张: 12.125 字数: 294.84千字

1992年4月第1版 1992年4月第1次印刷

印数: 1—1200 定价: 3.18元

ISBN7-80038-360-1/TH·21(课)

前 言

本教材是根据1989年10月在北京召开的“高等工业学校光学技术专业教学指导委员会全体会议”审定通过的《仪器精度设计》初稿编写的。1985年以来，《仪器精度设计》教材初稿已先后六次为我院本科生和研究生讲授。这本教材可供高等工业院校机械类和仪器仪表类专业三、四年级学生及研究生使用。学生在学习本课程以前，应该学习过本专业的专业技术基础课，并开始涉及本专业的专业课内容。

随着科学技术的发展和生产自动化程度的不断提高，要求测试的参数愈来愈复杂，对测试的速度、精度、可靠性的要求也愈来愈高。为了适应现代科学技术迅速发展的需要，按照新的教材大纲和学生培养目标的要求，本教材在编写过程中注意理论与实践相结合，把仪器精度与可靠性有机地联系起来，把静态精度、被动检测与动态精度、主动及在线测量有机地联系起来，把单纯的机构精度与机光电一体化精度设计有机地联系起来，并通过总体精度的分析与综合，使之成为一门系统、完整的独立课程。

本教材共分八章。第一、二章是仪器精度设计的基本理论和基本方法，系统地论述了仪器的形状特性、运动特性、外部干扰特性以及仪器精度设计的基本原则和静、动态精度分析与计算方法。第三章讨论了仪器的可靠性问题，重点讲述了仪器的冗余设计、可靠性设计及可靠性预测。第四、五、六、七章是机光电系统精度的综合分析，重点讲述了精密运动机构、传动与变换机构、伺服跟踪系统及光电系统精度。第八章进行了仪器总体精度分析与综合，使学生进一步了解仪器精度与测量精度的关系，了解仪器精度对分选测量、主动检测的影响以及提高仪器测量精度的方法。

本教材由长春光机学院郑文学副教授担任主编。第一、二、三、四、五、七、八章由郑文学副教授编写，第六章由王金波讲师编写，全部图稿由张辉工程师绘制。本教材在撰写过程中得到了许多单位和个人的大力支持和热情帮助。吉林工业大学甘永立教授对本书的编写工作给予了热情的帮助和支持，并担任本书的主审，对本书的初稿提出了许多宝贵意见。长春光机学院杨大任副教授担任本书的责任编辑工作，对本书的初稿也提出了许多宝贵意见。作者在此表示衷心感谢。

鉴于笔者水平有限，书中难免有这样或那样缺点和错误，恳请读者批评指正。

作者

1990.6.26

2011/07

目 录

第一章 仪器精度的基本概念	(1)
§ 1.1 仪器的参数和特性.....	(1)
1.1.1 示值与示值范围.....	(1)
1.1.2 刻度与分度值.....	(1)
1.1.3 测量范围.....	(1)
1.1.4 稳定度.....	(1)
1.1.5 灵敏度与鉴别阈.....	(1)
§ 1.2 仪器精度的基本概念.....	(2)
1.2.1 正确度.....	(2)
1.2.2 精密度.....	(3)
1.2.3 准确度.....	(4)
1.2.4 回程误差.....	(6)
1.2.5 迟钝度.....	(8)
§ 1.3 影响仪器精度的主要因素.....	(11)
1.3.1 仪器原理误差.....	(12)
1.3.2 形状特性.....	(12)
1.3.3 外部干扰特性.....	(12)
1.3.4 运动特性.....	(15)
§ 1.4 精度设计的基本原则.....	(17)
1.4.1 阿贝原则.....	(17)
1.4.2 最小变形原则.....	(18)
1.4.3 基准面选择原则.....	(20)
1.4.4 测量链最短原则.....	(21)
第二章 仪器精度特性	(22)
§ 2.1 仪器的精度与误差.....	(22)
2.1.1 测量与检验的种类.....	(22)
2.1.2 测量结果的误差.....	(22)
2.1.3 随机误差与系统误差.....	(24)
2.1.4 测量仪器误差.....	(24)
§ 2.2 仪器精度的评定方法.....	(25)
2.2.1 仪器的精度特性.....	(25)
2.2.2 仪器精度评定方法.....	(26)
§ 2.3 测量仪器动态精度.....	(33)
2.3.1 测量仪器动态精度的基本概念.....	(33)
2.3.2 传递函数.....	(34)

2.3.3 测量系统的动态精度	(38)
§ 2.4 仪器精度设计与计算	(39)
2.4.1 仪器精度分配	(39)
2.4.2 仪器精度计算	(40)
第三章 仪器可靠性设计	(44)
§ 3.1 可靠性的基本概念	(44)
3.1.1 可靠度函数	(44)
3.1.2 失效率	(45)
§ 3.2 可靠性计算	(47)
3.2.1 串联系统可靠性计算	(47)
3.2.2 并联系统可靠性计算	(48)
3.2.3 混联元件系统的可靠性计算	(49)
3.2.4 期望寿命	(50)
§ 3.3 冗余设计	(52)
3.3.1 冗余的基本概念及分类	(52)
3.3.2 冗余设计	(53)
3.3.3 冗余选择注意的问题	(53)
§ 3.4 可靠性预测	(54)
3.4.1 可靠性预测的目的	(54)
3.4.2 可靠性预测方法的分类	(54)
3.4.3 系统运行参数对系统可靠性的影响	(54)
3.4.4 故障率累积预测法	(55)
3.4.5 参数漂移分析	(57)
§ 3.5 可靠性设计	(58)
3.5.1 可靠性设计基本思想	(58)
3.5.2 可靠性分配原则	(58)
3.5.3 可靠性分配方法	(59)
第四章 精密运动机构精度	(62)
§ 4.1 轴系精度	(62)
4.1.1 轴系精度的基本概念	(62)
4.1.2 主轴回转误差	(63)
§ 4.2 影响轴系精度的因素	(65)
4.2.1 轴系零件形状特性的影响	(65)
4.2.2 运动特性的影响	(67)
4.2.3 外部干扰特性的影响	(67)
§ 4.3 轴系精度分析	(68)
4.3.1 V形轴系精度分析	(68)
4.3.2 半运动式圆柱形轴系精度	(70)
§ 4.4 导轨副的导向精度及其对仪器测量精度的影响	(71)

4.4.1	导向精度	(71)
4.4.2	导向误差对仪器测量精度的影响	(72)
§ 4.5	影响导轨副精度的因素	(73)
4.5.1	形状特性	(73)
4.5.2	运动特性	(73)
4.5.3	外部干扰特性	(74)
§ 4.6	滚动导轨副精度	(76)
4.6.1	导轨副的原始误差	(76)
4.6.2	误差传递方程	(76)
§ 4.7	气体轴承稳定性	(79)
4.7.1	气体轴承类型和特点	(79)
4.7.2	气体轴承的稳定性	(80)
4.7.3	影响空气轴承性能的主要参数	(81)
第五章	传动与变换机构精度	(83)
§ 5.1	螺纹参数误差及其对旋合性的影响	(83)
5.1.1	螺纹参数误差	(83)
5.1.2	螺距误差对螺旋副旋合性的影响	(83)
5.1.3	牙型半角误差对螺旋副旋合性的影响	(84)
§ 5.2	螺旋副传动螺纹啮合特点	(85)
5.2.1	螺旋副传动特点	(85)
5.2.2	导圈和闭圈	(86)
5.2.3	螺旋副啮合螺纹位置的确定	(86)
5.2.4	导圈的位移及位移误差	(88)
§ 5.3	螺旋副传动精度	(89)
5.3.1	螺旋副螺母位置误差	(89)
5.3.2	中径误差、螺距误差、半角误差对螺母位置误差的影响	(90)
5.3.3	螺旋副的空回	(92)
5.3.4	螺旋副传动精度计算实例	(92)
§ 5.4	精密滚珠螺旋副精度	(94)
5.4.1	精密滚珠螺旋副结构及特点	(94)
5.4.2	滚珠螺旋副传动精度	(95)
5.4.3	滚珠螺旋副传动精度计算	(96)
§ 5.5	提高螺旋副传动精度措施	(98)
5.5.1	滑动螺旋副	(98)
5.5.2	滚珠螺旋副	(101)
§ 5.6	齿轮机构的传动精度	(102)
5.6.1	齿轮机构传动误差主要来源	(102)
5.6.2	齿轮机构传动误差统计计算	(105)
§ 5.7	齿轮机构空回	(107)

5.7.1	空回产生的原因	(107)
5.7.2	齿轮机构空回的统计计算	(113)
§ 5.8	消减齿轮机构空回和传动误差的措施	(114)
5.8.1	消减齿轮机构空回方法	(114)
5.8.2	消减齿轮机构传动误差的方法	(116)
第六章	精密伺服系统精度分析	(117)
§ 6.1	伺服系统的原理及典型精密伺服机构	(117)
6.1.1	伺服系统控制原理	(117)
6.1.2	典型精密伺服机构	(118)
§ 6.2	伺服系统的方框图和传递函数	(119)
6.2.1	系统的传递函数	(119)
6.2.2	系统的方框图	(120)
§ 6.3	伺服系统的稳定性	(122)
6.3.1	稳定性的基本概念	(122)
6.3.2	判定系统稳定性的基本方法	(123)
§ 6.4	伺服系统的稳态误差	(128)
6.4.1	稳态误差基本概念及计算方法	(128)
6.4.2	降低稳态误差的方法	(132)
§ 6.5	伺服系统的瞬态响应	(133)
6.5.1	伺服系统瞬态响应性能指标	(133)
6.5.2	二阶系统瞬态响应性能指标的分析计算	(134)
§ 6.6	精密伺服系统精度分析方法	(138)
6.6.1	伺服系统的精度与误差	(138)
6.6.2	伺服系统参数与精度之间的关系	(140)
§ 6.7	精密伺服系统精度分析实例	(141)
6.7.1	伺服系统精度分析步骤	(141)
6.7.2	电视跟踪系统的精度分析	(141)
第七章	光学电气测量系统精度	(147)
§ 7.1	测量仪器光学系统对准精度	(147)
7.1.1	光学系统对准精度	(147)
7.1.2	物镜放大倍数误差及物镜畸变	(148)
§ 7.2	测量仪器光学系统元件误差对仪器精度的影响	(148)
7.2.1	透镜误差	(148)
7.2.2	平行玻璃板及分划板误差	(151)
7.2.3	反射棱镜制造误差	(152)
§ 7.3	测量仪器电气测量系统精度	(152)
7.3.1	开环式测量系统	(152)
7.3.2	平衡测量系统	(152)
7.3.3	比例式测量系统	(153)

§ 7.4	电气测量系统误差分析及提高精度措施	(154)
7.4.1	信号处理电路误差分析	(154)
7.4.2	线性电路的动态误差	(155)
7.4.3	提高电气测量系统精度的措施	(155)
第八章	仪器总体精度分析	(157)
§ 8.1	仪器总体精度分析的意义	(157)
8.1.1	仪器总体精度设计的目的	(157)
8.1.2	总体精度分析方法	(157)
§ 8.2	测量仪器精度对测量结果的影响	(159)
8.2.1	零件制造公差与验收公差	(159)
8.2.2	仪器测量误差对分选测量结果的影响	(160)
8.2.3	仪器测量误差对主动检测结果的影响	(162)
§ 8.3	测量系统线性化及最佳参数的确定	(163)
8.3.1	线性化的意义及方法	(163)
8.3.2	函数最佳近似理论	(163)
8.3.3	应用实例	(164)
§ 8.4	仪器刻度尺被检点数的选择	(165)
8.4.1	刻度尺被检点数选择的意义	(165)
8.4.2	刻度尺被检点数选择的方法	(166)
§ 8.5	仪器精度的谐波分析	(168)
8.5.1	付氏级数	(168)
8.5.2	12纵坐标计算系统	(169)
8.5.3	应用实例	(173)
§ 8.6	仪器精度和测量精度	(178)
8.6.1	仪器精度	(178)
8.6.2	仪器精度和测量精度的关系	(178)
§ 8.7	提高仪器总体精度的方法	(180)
8.7.1	将随机误差转化为系统误差	(180)
8.7.2	系统误差随机化	(180)
8.7.3	产品设计时消除误差	(181)
8.7.4	产品装配调整中消除误差	(181)
8.7.5	微机误差补偿	(181)
8.7.6	降低环境条件影响	(183)

第一章 仪器精度的基本概念

§ 1.1 仪器的参数和特性

仪器的基本参数和特性是设计、制造、选择和使用仪器的正确依据。设计一台仪器，总是根据仪器的使用要求，把所给仪器的基本参数作为设计的依据，最后又用这些基本参数来验证是否满足使用要求。因此，这些基本参数既是仪器设计的原始资料，又是仪器设计的目标。

1.1.1 示值与示值范围

仪器指示的被测量值称为示值。由仪器所显示或指示的最小值到最大值的范围称为示值范围。如果仪器读数装置中采用分划元件（刻尺或度盘），示值范围就是仪器的分划范围。例如，千分尺的示值范围一般为25mm。在数字显示仪器中，所显示的最大数字代表了示值范围。

示值范围即所谓仪器量程，量程大则仪器使用性能好。一般来说，量程大必然影响分度值。所以，实现大量程小分度值的信号转换原理具有现实意义。目前，激光及光栅在测试技术中的广泛应用，实现了这一目的。

1.1.2 刻度与分度值

所谓刻度是指仪器上指示不同量值的刻线标记的组合。相邻两刻线所代表的量值之差称为分度值。例如，千分表的分度值为0.001mm。对于数字式仪器，分度值一般被称为分辨率。所谓分辨率是指仪器显示的最末一位数字间隔所代表的被测量值。例如，某光学分度头的分辨率为1"。

分度值是仪器的一项重要参数。分度值是与仪器的精度相适应的。分度值小则仪器的精度高。

1.1.3 测量范围

所谓测量范围是指在允许误差范围内仪器的被测量值的范围。测量范围的最大、最小值被称为测量范围的“上限值”、“下限值”。

测量范围和示值范围不能混淆。在有调节范围的仪器中，测量范围等于示值范围加调节范围。例如，光学比较仪示值范围为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，由于悬臂可沿立柱调节，故测量范围为180mm。

1.1.4 稳定度

稳定度是在规定的工作条件内，仪器某些性能随时间保持不变的能力，即在外界条件不变情况下，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。重复测量次数一般为10~15次；变动范围一般允许为分度值的 $1/3\sim 1/10$ 。

1.1.5 灵敏度与鉴别阈

所谓灵敏度即仪器对被测量变化的反应能力。对于给定的被测量值，仪器的灵敏度 S 用

被观测变量的增量与其相应的被测量的增量之商表示，即

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta x}$$

式中 ΔL ——被观测变量的增量；

Δx ——被测量的增量。

对于具有刻度的测量仪器，灵敏度可用沿刻度增值方向的位移与引起它的被测量的增量之商来表示。刻度间隔与分度值之比即为灵敏度。例如，机械式杠杆比较仪，分度值为0.001mm，刻度间隔为1mm，则灵敏度为1000。此时，灵敏度即等于比较仪的传动比或传递函数。在设计仪器时，需要考虑到灵敏度。

鉴别阈也称灵敏限，定义为引起测量仪器示值可察觉变化的被测量的最小变化值。例如，0.008g载荷不能引起天平指针的任何位移，0.009g载荷才能引起天平指针的位移，则其鉴别误差为0.008g，而鉴别阈为0.009g。

§ 1.2 仪器精度的基本概念

随着科学技术不断发展，在工业生产和科学研究中广泛地应用高精度的测量仪器。在一定的测量条件下，不管测量仪器多么精密，总是存在一定测量误差。仪器精度的高低是用误差来衡量的，误差大精度低，误差小精度高。仪器精度是客观存在的，它表现在误差之中。误差有不同的分类方法。按其性质可分为系统误差、随机误差；按被测参数的时间特性可分为静态参数误差、动态参数误差。因此，精度也要相应地加以区分。

1.2.1 正确度

仪器正确度是指仪器实际测量对理想测量的符合程度。它是仪器测量范围内位置误差的函数，表示了仪器系统误差大小的程度。图1-1所示为仪器的实际测量曲线与理想测量曲线。

在任意位置 x_1 处，理想测量曲线与实际测量曲线之间的位置误差定义为机构在 x_1 位置的正确度 a_1 ，即

$$a_1 = y_2(x_1) - y_1(x_1) \quad (1-1)$$

同样，机构在 x_2 位置的正确度为

$$a_2 = y_2(x_2) - y_1(x_2)$$

我们把机构在位置 x_1 和 x_2 的正确度之差称为位移正确度，即

$$\Delta a = a_2 - a_1$$

机构在运动范围内的全部正确度可定义为

$$\begin{aligned} A &= \int |a| dx \\ &= \int [y_2(x) - y_1(x)] dx \end{aligned} \quad (1-2)$$

正确度是评定仪器精度的最基本参数，其它几个参数是仪器精度的进一步表达。

在仪器正确度的计算中，实际上用机构的位置误差来评定仪器的正确度，用位移误差来评定仪器的位移正确度。所谓机构的位置误差可定义为：当实际机构与理想机构的主动件处在相同的位置时，两机构从动件位置的误差称为机构的位置误差；机构的位移误差可定义

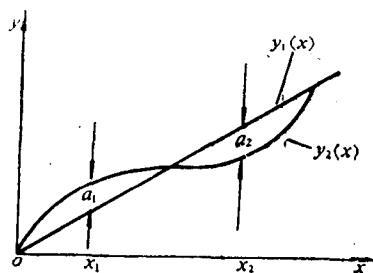


图1-1 仪器的实际测量曲线与理想测量曲线
 $y_1(x)$ —理想测量曲线； $y_2(x)$ —实际测量曲线

为：当实际机构与理想机构的主动件位移相同时，其从动件的位移误差称为机构的位移误差，即机构的位移正确度。

如图1-2所示的曲柄连杆机构， OAB 为理想机构， $OA'B'$ 为实际机构。当理想机构 OAB 的主动件 OA 与实际机构 $OA'B'$ 的主动件 OA' 处于相同位置时，其从动件 B 和 B' 的位置误差称为曲柄连杆机构的位置误差。

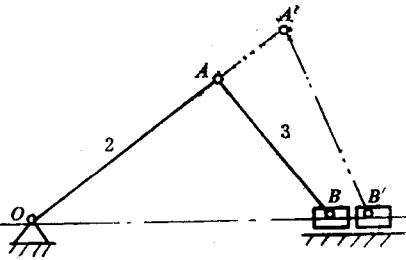


图1-2 曲柄连杆机构

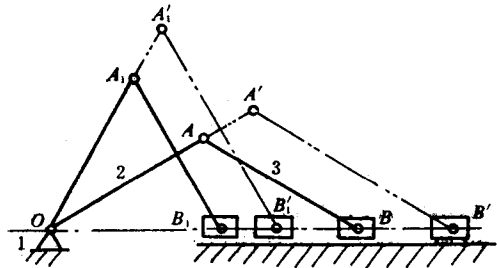


图1-3 曲柄连杆机构位移误差

图1-3所示为曲柄连杆机构位移误差。图中 $BB_1 - B'B'_1$ 为机构位移误差。

机构正确度，即机构的位置误差，取决于机构理论误差及机构构件的制造误差。因此，提高机构构件的制造精度、改进设计、加入补偿和校正装置都可以提高机构的正确度。

确切地说，以全部正确度来评定机构的优劣是比较合理的，但在实用中是以机构正确度的最大值来评定机构的正确度。设在 x_0 处机构的位置误差最大，则机构的正确度表示为

$$a_{\max} = y_2(x_0) - y_1(x_0)$$

正确度既然反映了仪器的系统误差，在误差合成中可以采用代数相加的方法，即

$$a = a_1 + a_2 + \dots + a_n \quad (1-3)$$

1.2.2 精密度

精密度表示测量结果中随机误差分散的程度，即在一定的条件下进行多次测量时，所得测量结果彼此之间的符合程度。

对于给定仪器来说，精密度表示仪器多次重复测量结果的符合程度，即仪器测量的可靠程度。它表示仪器在正常工作条件下的随机误差，表示仪器重复测量对其平均测量的分散程度。

造成仪器重复测量对平均测量分散的原因是很复杂的。它包括仪器在任何瞬时都在变化的因素，是许多因素综合作用的结果，例如，仪器零件的配合间隙、作用力的变化、摩擦、弹性变形等因素。因此，精密度与正确度是不同的。对于具体仪器来说，正确度反映了仪器的系统误差，精密度则反映了给定仪器的随机误差。可以通过试验的方法测得给定仪器测量曲线对平均值的分散程度。正确度可以靠调整、更换零件的方法使之得到改善，而同一类型仪器的精密度基本上是不变的，不能通过调整或更换零件的方法使之改善。

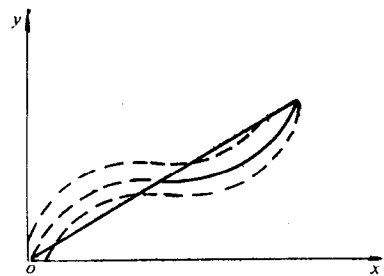


图1-4 仪器精密度变化曲线

图1-4所示为仪器精密度的变化曲线。在仪器的全部测量过程中，精密度是变化的。通常，用位置精密度变化的最大值来表示仪器的精密度。由于精密度反映仪器的随机误差，可用几何相加的方法进行

误差合成，即

$$\varepsilon^2 = \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_n^2 \quad (1-4)$$

正确度和精密度是仪器两个不同的精度指标，其概念的含义必须加以区别。正确度表示仪器的实际测量曲线偏离理想测量曲线的程度，反映了仪器的系统误差；精密度则表示仪器实际测量曲线对其平均值的分散程度，即工作的可靠程度，反映了仪器的随机误差。正确度和精密度的综合称为仪器的准确度。任何仪器必须有足够的精密度，以保证仪器工作可靠；而仪器正确度不一定要求很高，因为仪器可以通过调整或加入修正量来改善其正确度。

当然，对于某些具体仪器而言，正确度高不能说明精密度也高；精密度高同样也不能说明正确度高。图1-5表明了正确度与精密度的关系。图1-5(a)表示正确度和精密度都高；图1-5(b)则表示仪器精密度高；图1-5(c)表示仪器正确度高但不精密；图1-5(d)表示正确度和精密度都低。因此，正确度和精密度的综合才能表征仪器的精度特征。

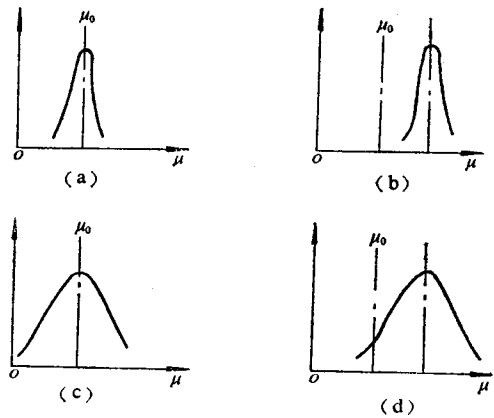


图1-5 正确度与精密度关系曲线

1.2.3 准确度

准确度是测量结果中系统误差与随机误差的综合，表示测量结果与被测量的真值的接近程度。苏联ГОСТ8.011—72中制定了测量结果准确度指标，即

- 测量误差按给定概率所处的区间；
- 测量误差的系统分量按给定概率所处的区间；
- 测量误差系统分量的数字特征；
- 测量误差随机分量的数字特征；
- 测量误差各分量的分布函数。

以表格、图形或解析公式给出的具体分布函数含有随机分量的完整信息。已知分布函数，可以求出随机量的数字特征及其量的界线。因此，以分布函数表示测量准确度能反映测量误差的特性。

在检验一批产品时，如果测量误差（仪器精度高）与产品公差相比较可以忽略时，则检测结果可分为合格品、废品⁺、废品⁻。设零件尺寸分布为 $f(Q)$ ，图1-6所示的 Q 量分布图给出了公差范围界限 a 和 b ，则合格品数量为

$$W_r = \int_a^b f_o(Q) dQ$$

相应的废品数量为

$$W_b = \int_{-\infty}^a f_o(Q) dQ + \int_b^{+\infty} f_o(Q) dQ$$

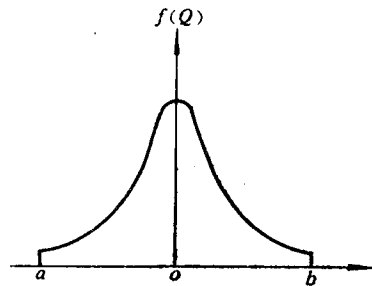


图1-6 Q 量分布图

实际上，计量测试仪器总是有误差的。在这种情况下，根据测量结果确定的被检验的质量参数分布曲线及其数字特征，可能与实际情况不同。

因此，研究根据测量结果确定的被检验质量参数分布曲线与其数字特征与实际值之间的关系，从而分析测量的准确度具有重要意义。

用具有误差的仪器测量产品时，在被认为是合格的产品中将有一定数量的实际上是废品，在废品中会有一定数量的合格品。这是评定测量结果准确度的重要标志。

设测量结果 x 是实际参数 Q 和测量误差 δx 的函数。若 Q 和 δx 是独立的，则

$$x = Q + \delta x$$

随机量 x 的分布律和数字特征为

$$\varphi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(Q) f_2(x - Q) dQ$$

或
$$\varphi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(\delta x) f_1(x - \delta x) d(\delta x)$$

$$\bar{x} = Q + \bar{\delta x}$$

$$\sigma_x^2 = \sigma_Q^2 + \sigma_{\delta x}^2$$

式中 $\bar{\delta x}$ —— 测量误差的平均值。

假设，根据检验结果把产品分为在公差范围内的合格品、超出公差下限的废品、超出公差上限的废品。在这种情况下，由于检验仪器的不准确，往往把合格产品当废品，把废品当合格产品。从产品分类准确度观点来研究检验结果，如图1-7所示为产品分类曲线图及在公差范围界限上的分布。

根据检验结果，合格产品的条件为

$$a \leq x \leq b$$

$$\text{或 } a \leq Q + \delta x \leq b$$

合格品为

$$W_1 = \int_a^b \varphi(x) dx \quad (1-5)$$

根据检验结果，废品条件为

$$-\infty < x < a$$

$$b < x < +\infty$$

废品为

$$W_2 = \int_{-\infty}^a \varphi(x) dx + \int_b^{+\infty} \varphi(x) dx \quad (1-6)$$

由于检验仪器不准确，在合格产品中含有废品，在废品中又往往含有合格品。根据检验结果，实际合格品为

$$W_3 = \int_a^b f_1(Q) \left[\int_{a-Q}^{b-Q} f_2(\delta x) d(\delta x) \right] dQ \quad (1-7)$$

其中 $(a - Q) \leq \delta x \leq (b - Q)$

在整批产品中，被误认为合格品的废品部分为

$$W_4 = \int_{-\infty}^a f_1(Q) \left[\int_{a-Q}^{b-Q} f_2(\delta x) d(\delta x) \right] dQ + \int_b^{+\infty} f_1(Q) \left[\int_{a-Q}^{b-Q} f_2(\delta x) d(\delta x) \right] dQ \quad (1-8)$$

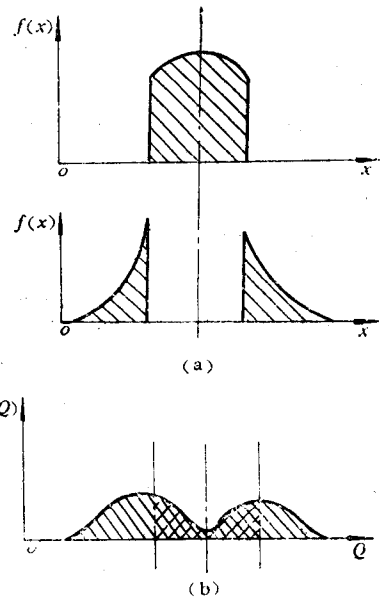


图1-7 产品分类曲线图

在整批产品中，被误认为是废品而实际上是合格品部分为

$$W_5 = \int_a^b f_1(Q) \left[\int_{-\infty}^{a-Q} f_2(\delta x) d(\delta x) + \int_{b-Q}^{+\infty} f_2(\delta x) d(\delta x) \right] dQ \quad (1-9)$$

实际废品根据检验结果为废品的部分为

$$W_6 = \int_{-\infty}^a f_1(Q) \left[\int_{-\infty}^{a-Q} f_2(\delta x) d(\delta x) + \int_{b-Q}^{+\infty} f_2(x) d(\delta x) \right] dQ \\ + \int_b^{+\infty} f_1(Q) \left[\int_{-\infty}^{a-Q} f_2(\delta x) d(\delta x) + \int_{b-Q}^{+\infty} f_2(\delta x) + d(\delta x) \right] dQ \quad (1-10)$$

上述分析方法，对确定检验仪器准确度的选择、分析零件检验准确度和零件分类准确度具有现实意义。

1.2.4 回程误差

回程误差表示由机构本身缺陷造成的测量结果的变化程度，即在相同条件下，仪器正行程在同一点示值的被测量值之差的绝对值，也称为“滞后误差”或“变差”。

如图1-8所示，仪器正向和反向测量曲线不重合，所包含的区域即为仪器的全部变差，区域愈大，则仪器变差愈大。

在图1-8中， $\int \varphi_1(x) dx$ (即图中面积 ABE) 正比于将此仪器反向测量所作的功， $\int \varphi_2(x) dx$ (即图中面积 OBE) 正比于仪器正向测量所作的功， $\int [\varphi_1(x) - \varphi_2(x)] dx$ 则表示仪器正向和反向测量中消耗于仪器内部的能量。此能量主要是补偿仪器机构中的空隙、摩擦力方向改变及弹塑性变形的能量消耗。因此，仪器的全部变动度等于 $\int [\varphi_1(x) - \varphi_2(x)] dx$ 。仪器作正向和反向测量后零位不再重合，就说明此仪器具有空回。

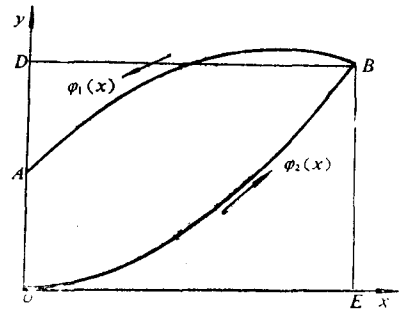


图1-8 仪器的变动度

影响空回的主要因素是仪器机构中的空隙、摩擦和弹性变形。当仪器测量方向改变时，仪器机构中的空隙需要补偿，摩擦力方向也随着改变，接触表面间又需要重新经过静摩擦至动摩擦，造成表面间的挤压和薄弱零件的弹性变形；此外，测量方向改变后，原先受挤压或弹性变形的零件回弹时，由于弹性的不完全恢复和弹性滞后等都会造成测量变异。

众所周知，摩擦力和弹性变形本身是不稳定的，它和许多因素有关。图1-9表示一个具有摩擦及弹性变形的系统。在正反向运动时，所造成的从动件运动位置的差异，即回程误差 Δ ，可用下式给出，即

$$\Delta = y_0 + \frac{2F}{C} = y_0 + \frac{2fN}{C} \quad (1-11)$$

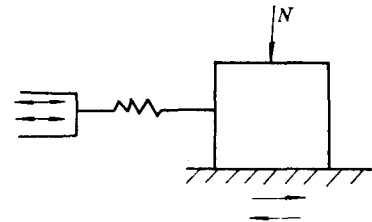


图1-9 摩擦及弹性变形系统

式中 y_0 ——仪器各部件的空回，包括制造误差引起的空隙和由于摩擦而产生的所谓“摩擦死程”（如轴在孔中的爬行现象）等所折合的从动件位置误差；

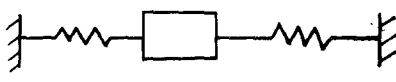
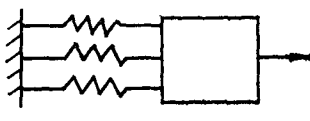
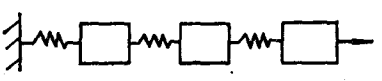
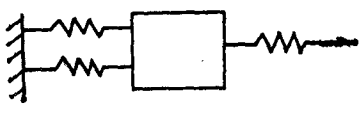
F ——摩擦力；

f ——摩擦系数；

N ——正压力；

C ——各构件刚度。若构件由几个零件组成，则刚度以表1-1的等效刚度代替。

表1-1 等效刚度

并联		$C = C_1 + C_2$
并联		$C = C_1 + C_2 + C_3$
串联		$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$
混联		$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1 + C_2} + \frac{1}{C_3}$

对于一般滑动摩擦取 $f=0.2$ ，当不计算空回影响时，回程误差约等于以正压力直接作用于仪器机构上时变形量的 $2/5$ 左右。在仪器回程误差的实际计算中，如果仪器机构刚性很好，有时只计算仪器的空回，此时回程误差由空回来决定。

减少回程误差的方法有以下几种：

①采用可调中心距、弹簧加载齿轮、辅助传动链等方法，降低或消除齿轮传动链系统的回程误差。

②减小机构中的摩擦力。例如，选用适当的材料、选用合适的润滑剂、采用滚动摩擦、采用强迫高频振动、减小正压力等。

③增加机构的刚度。例如，增强零件的刚度，减少传动链环节。

综上所述，回程误差是用来评定仪器性能的重要质量指标之一。它取决于仪器的设计结构。它反映了仪器设计本身的缺陷和可能达到的精密可靠程度。回程误差是比较各种仪器优劣的一个重要指标。回程误差与正确度的含义是不相同的。正确度表示同一类型仪器之间的差异；回程误差则表示不同类型仪器之间的差别。同一类仪器的回程误差基本上是相同的，因此不能用更换零件的方法来改善回程误差指标。回程误差与精密度的含义也不同。精密度表示连续重复单方向（正向或反向）测量时对平均测量结果的分散程度；回程误差则反映了仪器正反向测量时测量曲线的变异。从误差性质来说，精密度表示了仪器的随机误差，回程误差则表示仪器的系统误差。后者表示的是仪器正反向测量变异的范围，为一不带符号的数值。回程误差有一定的规律，但比较复杂，在一定程度上是可以控制的；精密度仅有统计规律，很难控制，也无法使仪器完全免除它的影响。

比较图1-1和图1-6可以看出，回程误差实际上就是变动的正确度。图1-6中 $\varphi_2(x)$ 和 $\varphi_1(x)$ 曲线为仪器正反方向测量的正确度曲线，而回程误差为正反方向测量时正确度变异的范

围。仪器的全部回程误差定义为

$$\Delta = \int |\varphi_1(x) - \varphi_2(x)| dx$$

在实用中，不用全部变异来表示仪器的回程误差，而是用其中的最大变异 Δ_{max} 来表示仪器的回程误差。

回程误差既然是表示仪器正确度变异的范围，它为一不带符号的数值，其合成方法取代数和，即

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n \quad (1-12)$$

下面例举几个仪器回程误差的实例。

光栅光谱仪上的狭缝原为滑动摩擦，测定的最大回程误差达0.0002mm，如图1-10所示。

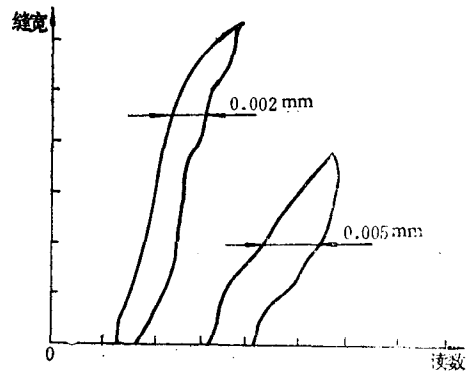


图1-10 光栅光谱仪狭缝回程误差

图1-11为两个利用测微螺丝读数的测量显微镜回程误差实验结果。此两台仪器用途虽然相同，但结构不同。一台仪器用一般燕尾槽导轨止推轴承和开槽的螺母，图1-11(a)所示为其回程误差实验曲线；另一台仪器则采用所谓“运动学设计方法”的结构，回程误差实验曲线如图1-11(b)所示。显然前者的回程误差远较后者大。

同样的例子也可见于光机所设计制造的测量显微镜回程误差实验结果的比较中，如图1-12所示。

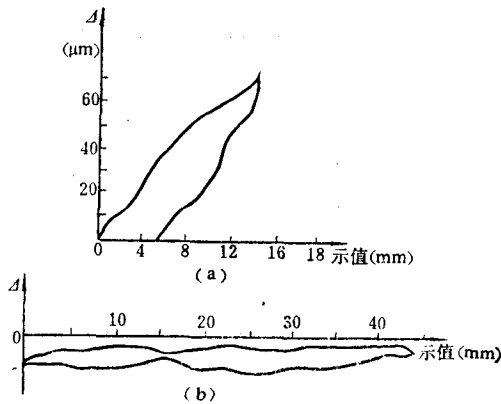


图1-11 测量显微镜回程误差实验曲线

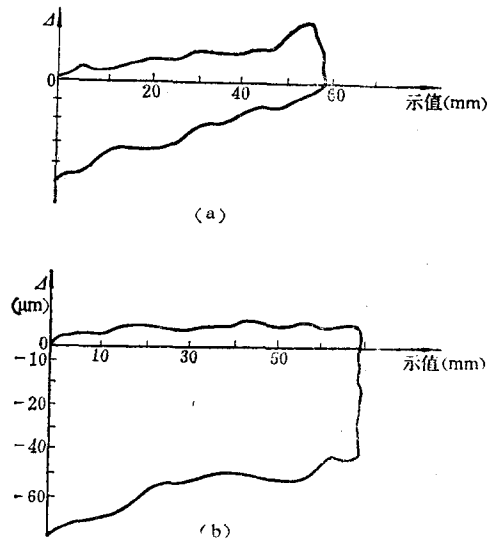


图1-12 不同结构测量显微镜回程误差实验曲线

由于两种测量显微镜的结构不同，回程误差也有很大差异。从图中可以看出，光机所1954年制造的测量显微镜与英国海尔格的测量显微镜，均为滑动摩擦式、开槽式螺母，机构间隙未能消除，因此回程误差较大；光机所后来改进设计的测量显微镜和德国蔡司的测量显微镜均采用滚动摩擦、机动式螺母，消除了机构中的空回，回程误差很小。

1.2.5 迟钝度

迟钝度为仪器机构对微量运动的敏感程度，即为仪器机构的灵敏阈，可定义为能引起机