

张玉文 陈照聚 编著

几何量仪 检定/校准技术

JIHE LIANGYI JIANDING

JIAOZHUN JISHU



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

几何量仪检定/校准技术

张玉文 陈照聚 编著

中国计量出版社

图书在版编目(CIP)数据

几何量仪检定/校准技术/张玉文,陈照聚编著. —北京:中国计量出版社,2004.1

ISBN 7-5026-1904-6

I. 几… II. ①张…②陈… III. ①几何量—计量仪器—检定②几何量—计量仪器—校正
IV. TB92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 118164 号

内 容 提 要

本书全面、系统地介绍了各种常用几何量计量仪器的检定和校准的方法,内容包括形状、位置误差及示值误差的检定与校准以及不确定度评定等。

本书的特点是将同一类仪器归纳其共性加以叙述,给读者一个检定与校准的综合概念,叙述时以现行有效的检定规程和校准规范为依据,同时也提供了保证准确度的其他校准方法,供仪器校准时参考。

本书可供几何量仪的使用、维修、检定和校准人员阅读和参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话(010)64275360

E-mail jifxb@263.net.cn

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787mm×1092mm 16 开本 印张 12.25 字数 277 千字

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷

*

印数 1—3000 定价:25.00 元

前 言

几何量计量仪器的检定与校准在几何量计量中是一个很重要的技术,是确保量值统一和量值溯源性的重要手段。其对象是长度计量的标准装置或测量装置,因为它涉及到长度、角度、线纹、粗糙度、齿轮、平面度、圆度等计量仪器。这些仪器的检定和校准要求专业基础知识和技术水平比较高,涉及到几十个检定规程和规范,其检定和校准的方法和数据处理也不相同。但从几何量仪器的基本共性来看,其内容有两大部分:几何量仪器部件形状和位置误差(包括直线度、垂直度、平行度、平面度以及轴系和顶针附件)、示值误差(读数测微器和瞄准装置)。

该书旨在为从事几何量计量仪器检定和校准人员提供一本全面了解和掌握仪器检定和校准方法、数据处理、正确使用计量标准器具的综合实用技术书,既起到检定规程、规范宣贯也起到检定与校准技术交流的作用。

该书在编写时特别注意到:

- 1.全面系统地介绍仪器检定与校准的方法;
- 2.将同一类仪器归纳其共性加以叙述,在叙述仪器检定和校准方法时着重反映共性的同时也注意了个性的特点,给读者一个检定与校准的综合的概念;
- 3.检定与校准方法的叙述是以现行有效的检定规程和校准规范为依据,同时也提供了保证准确度的其他校准方法,供仪器校准时参考;
- 4.尝试对典型仪器示值误差检定或校准的测量不确定度的评定,以供参考。

该书在编写时参考了国内外相关的标准、规程、文献和著作,同时得到周自力、周维虎、薛佳等同志的帮助,在此表示感谢。由于编著者的水平及经验有限,差错或不当之处在所难免,敬请读者和专家批评指正。

作 者
2003年5月

目 录

第一章 概 述	(1)
第一节 量仪分类	(1)
一、机械量仪	(1)
二、光学量仪	(1)
三、气动量仪	(1)
四、电动量仪	(1)
第二节 量仪的基本结构	(2)
第三节 量仪的光学系统	(4)
一、显微系统	(4)
二、望远系统	(5)
三、投影系统	(6)
四、干涉系统	(6)
第四节 量仪基本度量技术指标	(7)
一、通用技术指标	(7)
二、准确度指标	(8)
第五节 几何量仪器特性评定的依据和形式	(9)
一、几何量仪器特性评定的依据	(9)
二、几何量仪器特性评定的形式	(10)
第二章 量仪几何形状和位置误差检定、校准	(12)
第一节 量仪几何形状与位置误差评定的基本准则	(12)
一、形状误差的评定准则	(12)
二、位置误差评定准则	(13)
第二节 典型仪器导轨直线度的检定、校准	(15)
一、自准直法	(15)
二、截距法	(16)
三、测微表法	(19)
四、扭摆误差校准	(19)
五、直线度检定方法误差分析	(20)
第三节 导轨运动的相互垂直度检定、校准	(21)
一、影像法	(21)
二、多齿分度台法	(22)
三、立柱对工作台面的垂直度	(22)
四、立式光学计类仪器测量轴线与仪器工作面垂直度	(23)
五、立式测长仪工作面与测量轴线垂直度	(23)

六、三坐标测量机坐标轴相互垂直度	(24)
第四节 仪器轴系检定、校准	(25)
一、分度头主轴径向圆跳动	(25)
二、分度头主轴轴向圆跳动	(26)
三、分度头主轴正反转 360°回原位误差和回程误差	(26)
四、主轴锁紧时引起的示值误差变化	(26)
五、圆度仪主轴径向误差	(26)
六、圆度仪多次测量时的重复性	(28)
七、圆度仪轴向误差	(28)
八、高精度测角仪主轴径向圆跳动	(28)
九、光学经纬仪三轴间垂直度	(29)
第五节 工作台的平行度及平面度检定、校准	(30)
一、多齿分度台任意位置啮合时工作台面与底平面的平行度	(31)
二、工具显微镜金属工作台与纵横滑板移动方向的平行度	(31)
三、筋形工作台的平面度及中央筋的平面度、高出度	(31)
四、三坐标测量机 X, Y 导轨运动平面与工作台表面的平行度	(32)
第六节 顶尖、顶尖杆的检定、校准	(32)
一、顶尖跳动	(32)
二、两顶尖轴线的平行度检定	(33)
三、工具显微镜两顶尖的重合性	(34)
四、上下两顶尖的同轴度	(35)
五、渐开线检查仪上下两顶尖联线对测量滑架运动的垂直度	(35)
六、万能工具显微镜顶尖轴心线与测量面间距离	(36)
七、工具显微镜顶尖中心连续与立柱回转中心重合性	(36)
第七节 仪器光学系统视轴线的正确性检定	(38)
一、自准直仪	(38)
二、经纬仪、水准仪调焦运行误差	(38)
第三章 几何量仪器示值误差检定、校准	(40)
第一节 示值误差评定的方法和表示形式	(40)
一、量仪示值误差的评定方法	(40)
二、仪器示值误差的表示形式	(40)
三、测量重复性的表示方法	(41)
四、稳定性	(41)
第二节 标准线纹尺比较法	(42)
一、万能工具显微镜	(42)
二、工具显微镜	(44)
三、像点比较仪	(44)
第三节 标准量块(激光干涉仪)比较法	(47)
一、测长机	(47)

二、坐标测量机校准	(49)
三、数控装置位置误差检测	(60)
第四节 标准量块组合法	(62)
一、0.2 μm 光学计	(62)
二、接触式干涉仪	(65)
三、数显电感比较仪	(69)
第五节 多面棱体比较法与排列互比法	(70)
一、光学分度头(光学分度台)	(70)
二、多齿分度台	(73)
三、光学测角仪	(75)
四、测微器示值误差检定	(81)
第六节 标准小角度比较法	(84)
一、自准直仪	(84)
二、电子水平仪	(89)
第七节 标准样板法	(90)
一、光切显微镜与干涉显微镜	(90)
二、触针式表面粗糙度测量仪器	(93)
三、圆度、圆柱度仪	(97)
四、渐开线检查仪	(99)
五、平面等倾干涉仪	(102)
六、球径仪	(103)
第八节 标准装置法	(104)
一、光学经纬仪	(104)
二、水准仪	(112)
三、测微准直望远镜	(116)
第九节 仪器测量重复性和示值变动性检定、校准	(118)
一、测量重复性检定或校准	(118)
二、统计法	(120)
三、示值变动性	(121)
第四章 示值误差检定、校准的不确定度评定	(123)
第一节 概述	(123)
一、标准不确定度的 A 类评定	(123)
二、标准不确定度 B 类评定	(123)
三、合成标准不确定度的评定及灵敏系数	(124)
第二节 万能工具显微镜	(124)
一、概述	(124)
二、测量原理与数学模型	(124)
三、标准不确定度评定	(124)
四、合成标准不确定度	(125)

五、检定的扩展不确定度	(125)
第三节 测长机	(126)
一、概述	(126)
二、测量原理和数学模型	(126)
三、标准不确定度评定	(126)
四、合成标准不确定度	(127)
五、扩展不确定度	(127)
第四节 0.2 μm 光学计	(128)
一、概述	(128)
二、测量原理和数学模型	(128)
三、标准不确定度分量	(129)
四、合成标准不确定度	(129)
五、扩展不确定度	(129)
第五节 圆分度仪器	(129)
一、概述	(129)
二、测量原理和数学模型	(130)
三、标准不确定度评定	(130)
四、合成标准不确定度	(131)
五、扩展不确定度	(131)
六、排列互比法不确定度评定	(131)
第六节 坐标测量机	(133)
一、概述	(133)
二、测量原理和数学模型	(133)
三、标准不确定度评定	(133)
四、合成标准不确定度	(135)
五、扩展不确定度	(135)
第七节 圆度仪器	(136)
一、概述	(136)
二、测量原理和数学模型	(136)
三、标准不确定度评定	(136)
第八节 自准直仪	(137)
一、概述	(137)
二、测量原理和数学模型	(137)
三、标准不确定度评定	(137)
第九节 渐开线检查仪	(138)
一、概述	(138)
二、测量原理和数学模型	(138)
三、标准不确定度分量计算	(139)
第十节 干涉显微镜	(140)

一、概述	(140)
二、测量原理和数学模型	(140)
三、标准不确定度分量	(140)
第十一节 经纬仪	(141)
一、概述	(141)
二、测量原理及数学模型	(141)
三、方差和灵敏系数	(142)
四、检定—测回水平方向标准偏差标准不确定度评定	(142)
第十二节 水准仪	(144)
一、概述	(144)
二、测量原理及数学模型	(144)
三、标准不确定度评定	(144)
四、合成标准不确定度	(145)
五、扩展不确定度	(145)
第五章 定型鉴定和样机试验	(146)
第一节 定型鉴定和样机试验的定义	(146)
一、定型鉴定	(146)
二、型式批准	(146)
三、样机实验	(146)
第二节 计量器具型式评价大纲的制订	(147)
一、型式评价大纲的构成	(147)
二、计量器具型式评价样机试验大纲编制	(147)
第六章 瞄准系统及测微目镜检定、校准	(155)
第一节 瞄准系统及瞄准误差	(155)
第二节 光学瞄准系统	(155)
第三节 物镜系统	(156)
一、物镜分辨率	(156)
二、物镜的场曲	(157)
第四节 测微目镜	(158)
第七章 检定仪器标准器组	(162)
第一节 检定仪器标准器组的设计	(162)
第二节 检定仪器标准器组种类及应用	(163)
第三节 检定仪器标准器检定、校准	(165)
一、检定直尺	(165)
二、刀口直角尺	(167)
三、十字线校对杆	(168)
四、方块角尺	(168)
五、锥体心轴	(170)
六、标准心轴	(170)

七、玻璃比例尺	(170)
八、专用标准玻璃线纹尺	(171)
九、刻线样板	(172)
第四节 标准装置检定	(173)
一、经纬仪标准装置	(173)
二、水准仪标准装置	(177)
附录 1 量块标称长度测量不确定度与长度变动量	(182)
附录 2 有关量仪的检定规程和校准规范目录	(183)
参考文献	(185)

第一章 概 述

第一节 量 仪 分 类

量仪是将被测量值转换成可直接观察的示值或等效信息的计量器具,几何量仪器(以下简称量仪)是利用机械、光学、电学、气动或其它原理将被测几何量转换为可直接观测的指示值或等效信息的器具。

量仪可根据其结构特点、用途、自动化程度、测量范围等指标进行分类。

根据量仪的作用原理可分为:

一、机械量仪

机械量仪是将被测量的微小位移,通过机械传动比加以放大,然后显示出来。如万能测齿仪、锥度检查仪、直角尺检查仪等。

二、光学量仪

光学量仪是用光学方法,实现对被测量微小线位移或角位移的转换放大。根据仪器中光学系统的不同,光学量仪又可分为:

(1)望远系统式光学量仪,如光学比较仪、自准直仪等;

(2)显微系统式光学量仪,如工具显微镜、测长机、光学分度头等;

(3)投影系统式光学量仪,如各种光学投影仪等;

(4)光波干涉系统式光学量仪,如复现长度基准的激光干涉仪、立式接触式干涉仪、干涉显微镜等。

三、气动量仪

气动量仪以压缩空气为介质,用气动系统状态的变化(流量或压力的变化)来实现对微小尺寸的测量。气动量仪按工作原理的不同可分为压力式和流量式两类。

四、电动量仪

电动量仪是将被测量的微小位移转换成电压、电感、电容等电信号,然后进行放大、运算处理和显示的量仪。如电感测微仪、粗糙度轮廓仪、圆度仪等。

随着科学技术的不断进步,新技术在量仪设计中得到了普遍的应用,例如光电技术、激光技术、光栅技术、数显及计算机技术等,给计量仪器提供了广泛的发展前途。如现代的三坐标测量机,激光量块干涉仪等仪器都综合地应用了光、机、电和计算机技术。

根据量仪的用途又分为:长度、角度、粗糙度、平直度、齿轮、螺纹、孔径、圆度仪器等。

第二节 量仪的基本结构

为了说明量仪的基本结构和作用,首先观察几个典型测量实例:

图 1-1 是比较法测量的例子,其中 1 为工件;2 为测头,是感受部件,它的作用是拾取信号;3 为表头,它将拾取的信号转换成可使测量者能直接接受的指示值或其它信息;4 为定位件,它的作用是保证测头 2 感受的量是被测参数的自身。在这个例子中,对被测量和标准量的感受、转换和放大是由一套部件来完成的。

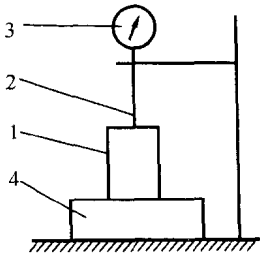


图 1-1 比较测量

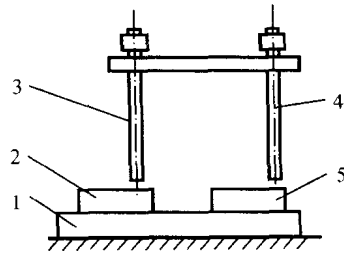


图 1-2 绝对测量

图 1-2 是比长仪上作绝对法测量的例子。其中 4 为瞄准显微镜,它的作用是通过非接触的光学方法来感受被测工件 5 的原始信号,并进行转换放大实现对零;2 是线纹尺,作基准部件用;3 是读数显微镜,它通过非接触式的光学方法感受线纹尺的信号,并进行转换放大和读数;1 是定位件。在这个例子中,对被测量和标准的感受、转换和放大是由两套不同部件完成的。

以上两个例子可用图 1-3 表示测量的全过程。

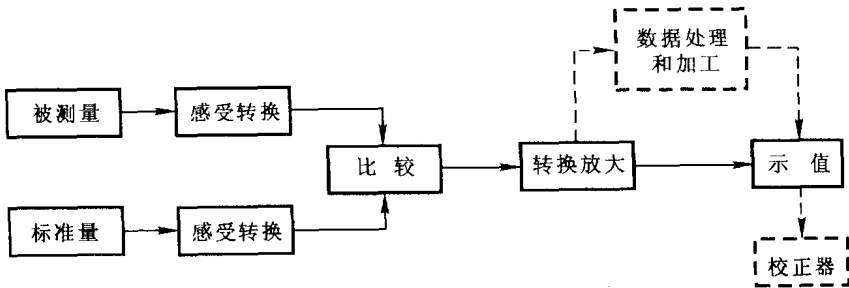


图 1-3 测量过程框图

图 1-4 是测量圆度的例子。其中 4 为工件;5 为定位部件;3 为主轴,主轴的回转起到提供基准圆运动的作用;2 为表头,指示出工件相对于基准圆的圆度误差大小。这个测量系统可用图 1-5 表示测量的全过程。

从上述三个测量例子可以看出,作为一台仪器,不论其结构怎样复杂,测量原理如何不同,其基本结构可分为:

1. 测量标准部件

标准部件是量仪的重要组成部分,是决定量仪准确度的主要环节。基准部件的形式很多,如量块、精密丝杠、线纹尺、度盘、多面棱体、光栅尺、感应同步器及光波等等。有的仪器以标准样板或标准的圆运动、渐开线运动、齿轮啮合运动等作为基准部件。

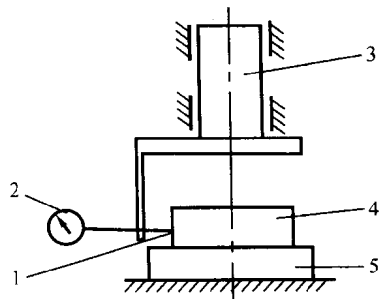


图 1-4 圆度测量

2. 感受转换部件

感受转换部件的作用是感受被测量,拾取信号,有些场合感受转换部件仅起感受原始信号的作用,但在有些场合下在感受原始信号的同时,也起信号一次转换作用。例如电感测微仪测头在感受微小位移变化的同时,将位移量又转换为电感变化。

感受转换部件分为接触式和非接触式两大类。接触式的如机械测头等,非接触式的如气动非接触式测头,显微镜投射光束等。

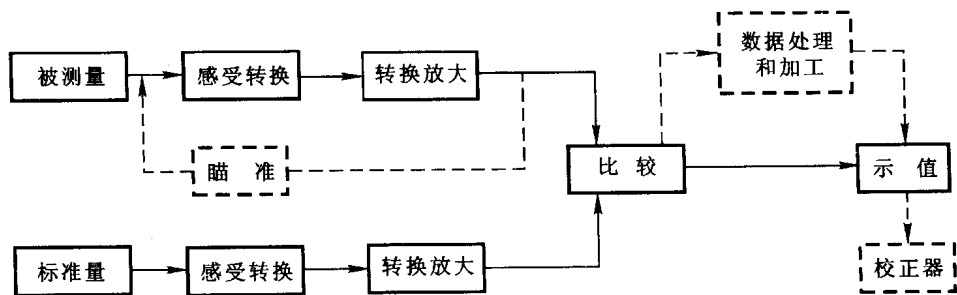


图 1-5 圆度测量过程框图

3. 转换放大部件

转换放大部件的作用是将感受来的微小信号,通过各种原理(光、机、电、气)进一步转换放大,成为观测者能直接接收的信息。

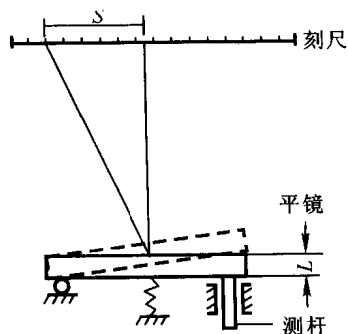


图 1-6 光学杠杆原理

根据仪器结构和测量原理的不同,转换放大部件采用转换放大的方式也不同,如机械放大、光学放大、电器放大等。

图 1-6 是光学杠杆放大原理,由测头感受的微小尺寸位移量 L , 经过光学杠杆放大之后显示为 S 。

图 1-7 是显微镜放大原理图。

由光束感受的微小位移量 η 经过物镜成像后放大为 η' , 其放大率为

$$\beta = \frac{\eta'}{\eta} = \frac{l'}{l} = \frac{u'}{u} \quad (1-1)$$

式中: β —— 线性放大率;

η —— 物高;

- η' ——像高;
- l' ——像距;
- l ——物距;
- u ——物方孔径角;
- u' ——像方孔径角。

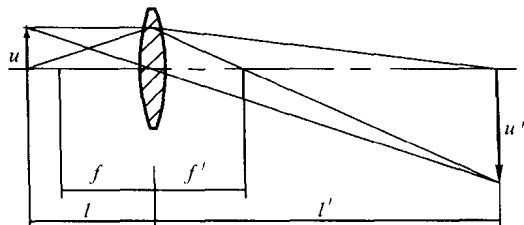


图 1-7 显微镜放大原理

4. 瞄准及测量部件

瞄准及测量部件是量仪重要组成部分,是仪器的眼睛。瞄准部件的功能在于确定被测量对应基准量的位置,以便进行测量。而测微部件主要获得被测量的偏差部分。瞄准部件主要是为了提高分辨力,便于精确瞄准,对放大比无严格要求;而测微部件则多是些位移小,灵敏度高的测微传感器,要求转换放大比精确,而且要求线性好,测量范围大。

5. 机械结构部件

主要指基坐、支架、工作台、轴系及微调、锁紧、限位和保护机械等等。它们的作用是执行测量任务,完成测量中所需要各种运动;同时也起改善测量条件、保证机械运行良好安全、稳定和可靠。

6. 计算部件

它包括数据加工、处理和校正环节等。

7. 显示部件

它的作用是显示测量结果,如指针表盘、记录器、数字显示器、打印机、荧光屏图像显示等等。

第三节 量仪的光学系统

由于测量原理和结构不同,量仪的光学系统分为显微系统、望远系统、投影系统和干涉系统。

一、显微系统

显微镜是由两组透镜组成,一组为物镜,另一组为目镜。在光学系统中,透镜的配制特点是物镜的像方焦点与目镜的物方焦点相隔一段光学间隔 Δ ,该距离称为光学筒长。观察时将物体 AB 置于物镜的物方焦点稍外处,则物体 AB 被物镜成一放大倒立的实像 A'B',这个实像在目镜方焦点略后一点,再由目镜放大,在明视距离处可以看到经过二次放大的虚像 A''B'',如图 1-8 所示。

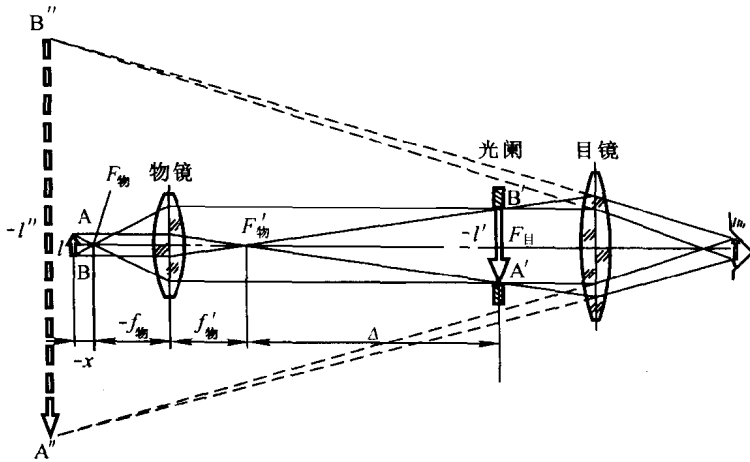


图 1-8 显微系统光路图

显微镜的放大倍数是根据物镜的放大倍数 β 和目镜放大倍数 γ 的乘积求得。物镜的放大倍数：

$$\beta = \frac{\Delta}{f_1}$$

式中： f_1 ——物镜的焦距。

目镜放大倍数：

$$\gamma = \frac{s}{f_2}$$

式中： f_2 ——目镜的焦距；

s ——明视距离(250mm)。

所以显微镜的放大倍数：

$$k = \beta\gamma = \frac{\Delta}{f_1} \frac{s}{f_2} \quad (1-2)$$

二、望远系统

望远系统在几何量仪器中被广泛应用,例如平行光管、自准直仪、测微准直望远镜、光学经纬仪、光学水准仪等。

简单的望远镜系统见图 1-9,物镜将很远的物体(几乎平行光入射)成像在物镜的后焦点上,而此位置又与目镜的焦面重合,为眼睛所接受。用“仪器+眼睛”观察物体时的视角的正切与直接用眼睛观察时构成的视角的正切之比就是望远镜的放大率。

望远镜系统主要作用是增大对远处物体的视角,因而比用眼睛直接观察,物体似乎近了一些。

$$\text{眼睛直接观察物体时的视角为} \quad \omega_{\text{眼}} \approx \frac{l}{-s} = \frac{-l'}{f_{\text{物}}} \quad (1-3)$$

$$\text{通过仪器观看视角为} \quad \omega_{\text{仪+眼}} \approx -\frac{-l'}{-f_{\text{目}}} = \frac{l'}{f'_{\text{目}}} \quad (1-4)$$

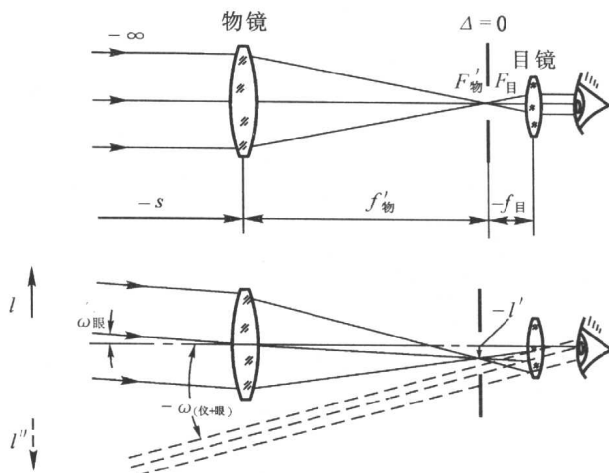


图 1-9 望远系统光路图

望远镜的放大率(负号表示成的像为倒像):

$$\Gamma_{望} = \frac{\omega_{眼+仪}}{\omega_{仪}} = \frac{l' / f'_{目}}{-l' / f'_{物}} = -\frac{f'_{物}}{f'_{目}}$$

望远镜和显微镜的区别,从光学结构上看望远镜的物镜的后焦点与目镜前焦点重合,它的光学间隔 $\Delta = 0$,这样就构成了“放大”特性不同;显微镜是将微小的物体经过物镜放大后,再由目镜作视角放大,使原来眼睛看不见的微小物体被“放大”了,然而望远镜却是把很远的物体成像到分划板上,是一个比实物小得多的像,再经过目镜作视角放大。它的效果是使远处的物体看上去更近了,但并没有把物体“放大”。

三、投影系统

投影系统和上面的两光学系统不同,投影物镜成的是实像,可以用屏幕把它显示出来,供人们观察或测量。投影光学系统见图 1-10。照明光源安置在聚光镜的焦点上,聚光镜发出的平行光线将被测件的轮廓照亮,并通过物镜放大后在投影屏上得到放大的清晰的倒实像。由于物体遮挡一部分光线,故在屏幕上呈现出清晰的被测物体的轮廓影像。

投影系统的放大率是用线性放大率 β 来衡量:

$$\beta = \frac{A_1 B_1}{AB} = \frac{l'}{l} = \frac{x'}{f'} \quad (1-5)$$

四、干涉系统

几何量仪中应用平板干涉原理和迈克尔逊干涉系统的仪器很多,例如平面等厚干涉仪、接触式干涉仪、表面粗糙度干涉仪等。

下面主要介绍迈克尔逊干涉系统,干涉系统原理如图 1-11。

入射光线 L 在半镀银平板 M 上分为两束光线,一束射向平面镜 S_1 ,另一束射向平面镜 S_2 ,两块平面镜与光线垂直,因此经过平面镜反射后光线由原路返回,在平板 M 上两束光线重合,向 L' 方向自干涉仪射出。从光学原理可知,在光学系统中满足下列条件就会产生干涉:频率

相同的两光波在相遇点有相同的振动方向和固定的相位差;两光波在相遇点上所产生的振动的振幅(强度)相差不悬殊;两光波在相遇点的光程差不能太大;当光程差大于所用实际光波的相干长度则无干涉现象。迈克尔逊干涉系统满足上述条件。在迈克尔逊干涉系统中由同一光源分为两束光线,其干涉仪的两臂长不可能完全相等,便产生光程差。当平面镜 S_2 发生微小倾斜时,通过平板 M (分光镜)在平面镜 S_1 处形成虚平板 R ,在 S_1 和 R 之间产生等厚干涉,出现干涉条纹。利用这些干涉条纹的位移和图形的变化进行测量。

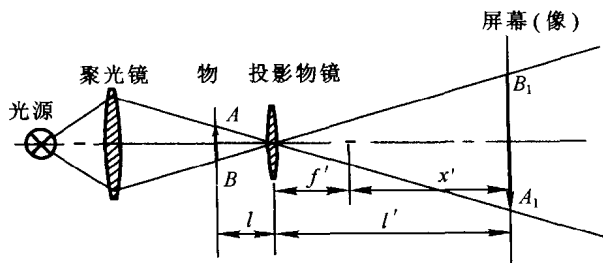


图 1-10 投影系统光路图

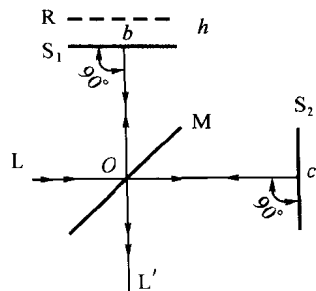


图 1-11 干涉系统原理图

第四节 量仪基本度量技术指标

量仪基本度量技术指标分为通用技术指标和准确度指标。

一、通用技术指标

1. 分度值 i

相邻两刻线所代表的量值之差。例如光学计的分度值为 0.001mm ;光学分度头的分辨力是 1 角秒,而圆度仪、轮廓仪的分度值是通过换挡来实现的。

分度值是量仪的一项重要指标,应把分度值设计得与量仪准确度相适应。一般来说分度值小,仪器准确度相应也高,反之亦然。准确度很低的量仪而把分度值设计很小是没有意义的。例如有的光学分度头的分度值为 $0.2''$,而仪器示值误差为 $18''$,这就不相称。

2. 刻度间隔 d

相邻两刻线的实际距离。刻线间隔一般选择在 $0.75\text{mm} \sim 2.5\text{mm}$ 之间,这时能用眼睛估计刻度间隔的 $1/10$ 。当刻度间隔很小时,可以采用光学放大,此时刻度间隔 d 即等于实际间隔乘上光学放大倍数。

3. 标尺范围

在给定的标尺上,标尺两端标记之间标尺值的范围。

标尺范围以标尺上的单位表示,它与被测量的单位无关,标尺范围的上下限分别可称为终点值、起点值。

4. 标称范围

对于每个标尺范围而言,当计量器具的操作器件调到特定位置时,计量器具给出处在此标