



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

精密刻划 与超精密 特种加工技术

马宏 董连和 白素平 王劲松 编著

JINGMI
KEHUA
YUCHAO
JINGMI
TEZHONG
JIAGONG
JISHU



兵器工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

精密刻划与超精密特种 加工技术

马 宏 董连和 白素平 王劲松 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本教材介绍了国内外 20 世纪 90 年代以来在精密刻划技术和超精密加工技术方面的新工艺、新技术以及相关的理论,同时也编入了一些国内外最新的科研成果。本教材共 7 章,其中第 1 章针对精密刻划技术与超精密加工技术进行了较全面的阐述;第 2~5 章分别介绍了刻划设备、机械刻划工艺、照相制作分划零件、光刻技术;第 6 章介绍了分划零件的检验;第 7 章介绍了超精密特种加工技术。

本教材可作为光学工程专业本科生的专业课教材,也可供从事精密刻划技术和超精密加工技术研究的科技人员作为参考书使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

精密刻划与超精密特种加工技术/马宏等编著. —北京:
兵器工业出版社, 2008. 8
ISBN 978-7-80248-054-4

I. 精… II. 马… III. ①精密刻划—高等学校—教材
②特种加工—高等学校—教材 IV. TG63 TG66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 089435 号

出版发行: 兵器工业出版社
发行电话: 010-68962596, 68962591
邮 编: 100089
社 址: 北京市海淀区车道沟 10 号
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京市登峰印刷厂
版 次: 2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷
印 数: 1—2000

责任编辑: 张小洁
封面设计: 李 晖
责任校对: 郭 芳
责任印制: 赵春云
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 16.75
字 数: 415 千字
定 价: 30.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

本教材是根据《精密刻划与超精密加工技术》教材编写大纲，以长春理工大学马宏主编的《精密刻划工艺》为基础，重新编著而成的。

在教材编著过程中，作者根据教学大纲要求，本着教育面向现代化、面向世界、面向未来，教育要为国家现代化需求培养人才的指导方针，对原教材内容作了大幅度的改动，删去了金属分划零件的制作工艺等章节，增补了国内 20 世纪 90 年代以来在精密刻划技术和超精密加工技术方面的新工艺、新技术及相关的理论，同时也编入了一些国内外最新的科研成果。

本教材共 7 章，其中第 1 章针对精密刻划技术与超精密加工技术进行了较全面的阐述；第 2~5 章分别介绍了刻划设备、机械刻划工艺、照相制作分划零件、光刻技术；第 6 章介绍了分划零件的检验；第 7 章介绍了超精密特种加工技术。全书配有大量的图例，注重实用性和新颖性。本教材可作为光学工程专业本科生的专业课教材，也可供从事精密刻划技术和超精密加工技术研究的科技人员作为参考书使用。

本教材内容涉及知识面较宽，除光学与精密机械的有关专业知识外，还用到照相化学、电子技术、激光技术和计算机方面的有关知识，故应先修机械制造基础、互换性与技术测量、应用光学、物理光学、激光原理、光电检测技术、微机原理及应用等技术基础课和光学零件加工技术、光学测量、干涉测试技术等专业课，然后再讲授此教材。

本教材第 1、2、6 章由马宏编写，第 3、4、5 章由董连和编写，第 7 章由白素平编写，王劲松参与第 2、4 章的部分内容编写。全书由马宏统稿，由白素平校改图稿，孙彦军对第 2~5 章文稿进行了整理。

在本教材编写过程中，光电学院的车英、闫钰锋和教材科耿丽华等同志给予热情支持和指导，还得到冯立、郭锐、张婕、周贺等同志的热情帮助，在此表示衷心感谢。

在本教材的编写中，作者参考了国内外专家学者的最新研究成果和资料，在此向这些专家、学者表示诚挚的谢意。

精密刻划和超精密加工技术涉及内容广泛，新技术发展迅猛，由于编者水平有限，教材中错误或不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者
2008 年 8 月

目 录

| | |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 精密刻划技术与超精密加工技术 | 1 |
| 1.1 精密刻划技术 | 1 |
| 1.1.1 精密刻划技术 | 1 |
| 1.1.2 精密刻划技术的任务 | 1 |
| 1.2 分划零件的类型与用途 | 1 |
| 1.2.1 分划元件 | 2 |
| 1.2.2 分划元件的类型与用途 | 2 |
| 1.3 分划元件的设计 | 4 |
| 1.3.1 分划设计中的长度单位和角度单位 | 4 |
| 1.3.2 分划板的设计 | 5 |
| 1.3.3 分划元件毛坯材料的选择与加工分划技术条件的确定 | 6 |
| 1.4 分划的制作方法 | 9 |
| 1.4.1 以机械法为主结合化学或物理的方法制取分划 | 10 |
| 1.4.2 以照相法为主结合化学或物理的方法制取分划 | 11 |
| 1.4.3 机械照相法(光刻法)制取分划 | 12 |
| 1.5 超精密加工技术概述 | 13 |
| 1.5.1 超精密加工的范畴 | 13 |
| 1.5.2 超精密加工方法 | 13 |
| 1.5.3 超精密加工技术的作用 | 16 |
| 1.5.4 超精密加工技术的发展状况与趋势 | 19 |
| 第 2 章 刻划设备 | 27 |
| 2.1 缩仿刻线机 | 27 |
| 2.1.1 缩仿刻线机的工作原理 | 27 |
| 2.1.2 多轴缩仿刻线机 | 29 |
| 2.1.3 单轴缩仿刻线机 | 30 |
| 2.2 长刻线机 | 31 |
| 2.2.1 机械定位长刻线机 | 32 |
| 2.2.2 激光定位光栅刻划机 | 36 |
| 2.3 圆刻线机 | 39 |
| 2.3.1 普通圆刻线机 | 40 |

| | | |
|------------|-----------------|-----------|
| 2.3.2 | 光电圆刻线机 | 44 |
| 2.4 | 衍射光栅刻划机 | 46 |
| 2.4.1 | 普通平面刻划机 | 47 |
| 2.4.2 | 光电干涉控制平面刻划机 | 49 |
| 第3章 | 机械刻划工艺 | 51 |
| 3.1 | 刻划保护层 | 51 |
| 3.1.1 | 对刻划保护层的性能要求 | 51 |
| 3.1.2 | 刻划保护层的分类及成分 | 52 |
| 3.2 | 机械化学法 | 57 |
| 3.2.1 | 清洗玻璃零件 | 58 |
| 3.2.2 | 涂布刻划保护层 | 59 |
| 3.2.3 | 浮刻 | 60 |
| 3.2.4 | 腐蚀刻线 | 61 |
| 3.2.5 | 填充着色 | 67 |
| 3.3 | 机械物理法 | 70 |
| 3.3.1 | 涂布刻划保护层 | 70 |
| 3.3.2 | 浮刻与修饰 | 70 |
| 3.3.3 | 真空镀金属膜 | 71 |
| 3.4 | 镀金属层刻划 | 71 |
| 3.4.1 | 对金属镀层的要求 | 71 |
| 3.4.2 | 常用的金属镀层 | 72 |
| 3.4.3 | 刻划腐蚀法制造透明分划 | 72 |
| 3.5 | 各类分划零件的机械刻划 | 73 |
| 3.5.1 | 分划板的刻划 | 73 |
| 3.5.2 | 光学度盘的刻划 | 80 |
| 3.5.3 | 光学刻尺的刻划 | 82 |
| 3.5.4 | 螺旋线分划板的刻划 | 83 |
| 3.5.5 | 球面分划板的刻划 | 85 |
| 3.5.6 | 多圈法刻划圆光栅 | 87 |
| 3.6 | 物理光栅的刻划与复制 | 89 |
| 3.6.1 | 物理光栅的刻划 | 89 |
| 3.6.2 | 衍射光栅的复制 | 91 |
| 第4章 | 照相制作分划零件 | 94 |
| 4.1 | 照相制作分划零件的基本知识 | 94 |
| 4.1.1 | 感光材料 | 94 |
| 4.1.2 | 照相常用术语 | 96 |
| 4.1.3 | 卤化银显影液与定影液 | 98 |

| | | |
|------------|---------------------------|------------|
| 4.2 | 卤化银照相制版 | 102 |
| 4.2.1 | 分划底图的制作 | 102 |
| 4.2.2 | 制版照相机原理与结构 | 104 |
| 4.2.3 | 火棉胶湿版照相 | 106 |
| 4.2.4 | 火棉胶干版照相 | 114 |
| 4.2.5 | 超微粒干版照相 | 118 |
| 4.3 | 照相复制 | 123 |
| 4.3.1 | 铬盐感光胶照相复制 | 123 |
| 4.3.2 | 光刻胶照相复制 | 130 |
| 第5章 | 光刻技术 | 138 |
| 5.1 | 概述 | 138 |
| 5.2 | 计量光栅的光刻 | 139 |
| 5.2.1 | 长光栅的刻制 | 139 |
| 5.2.2 | 圆光栅的刻制 | 141 |
| 5.3 | 光学码盘的光刻 | 145 |
| 5.3.1 | 光学码盘 | 145 |
| 5.3.2 | 码盘的光刻工艺 | 149 |
| 5.4 | 感应同步器模版的光刻 | 153 |
| 5.5 | 全息光栅的制作 | 154 |
| 5.6 | 激光直写技术 | 155 |
| 5.6.1 | 直角坐标激光直写系统 | 156 |
| 5.6.2 | 极坐标激光直写系统 | 156 |
| 5.6.3 | 直角坐标与极坐标组合的激光直写系统 | 157 |
| 5.6.4 | 激光直写制作掩模版和元件 | 158 |
| 5.7 | 光刻制作微光学元件 | 159 |
| 5.7.1 | 二元光学元件的制作 | 159 |
| 5.7.2 | 光刻热熔法制作折射微透镜阵列 | 160 |
| 第6章 | 分划零件的检验 | 163 |
| 6.1 | 分划的技术要求 | 163 |
| 6.1.1 | 普通分划板的技术要求 | 163 |
| 6.1.2 | 分辨率分划板的技术要求 | 167 |
| 6.1.3 | 可见光方块栅栏形分辨率分划板的技术要求 | 167 |
| 6.2 | 长分划零件的检验 | 170 |
| 6.2.1 | 一般精度长分划零件的检验 | 170 |
| 6.2.2 | 高精度长分划零件的检验 | 173 |
| 6.3 | 圆分划零件的检验 | 176 |
| 6.3.1 | 评价圆分划零件精度的参数 | 176 |

| | | |
|------------|------------------------|------------|
| 6.3.2 | 圆分划零件精度检验的方法 | 178 |
| 6.3.3 | 多面体比较法检定度盘直径误差 | 179 |
| 6.3.4 | 单常角法检定度盘直径误差 | 182 |
| 6.3.5 | 光电常角比相法检测圆光栅 | 192 |
| 6.3.6 | 六十进制光电圆分度检验仪 | 198 |
| 6.4 | 特殊分划零件的检验 | 199 |
| 6.4.1 | 菱形分划零件的检验 | 199 |
| 6.4.2 | 螺旋分划板的检验 | 200 |
| 6.4.3 | 球面分划板的检验 | 202 |
| 第7章 | 超精密特种加工技术 | 205 |
| 7.1 | 概述 | 205 |
| 7.1.1 | 超精密特种加工技术的特点 | 205 |
| 7.1.2 | 超精密特种加工的适用范围 | 205 |
| 7.1.3 | 超精密特种加工技术的内容 | 205 |
| 7.2 | 激光加工 | 206 |
| 7.2.1 | 激光加工原理 | 206 |
| 7.2.2 | 激光加工的特点 | 207 |
| 7.2.3 | 激光加工设备的组成 | 207 |
| 7.2.4 | 激光微细加工技术与应用实例 | 209 |
| 7.3 | 电子束微细加工 | 217 |
| 7.3.1 | 电子束加工原理 | 217 |
| 7.3.2 | 电子束加工的特点与应用范围 | 218 |
| 7.3.3 | 电子束加工装置的组成 | 219 |
| 7.3.4 | 电子束微细加工应用技术 | 220 |
| 7.4 | 离子束微细加工 | 224 |
| 7.4.1 | 离子束微细加工原理 | 224 |
| 7.4.2 | 离子束微细加工的特点 | 224 |
| 7.4.3 | 离子束微细加工设备 | 224 |
| 7.4.4 | 离子束加工的应用 | 225 |
| 7.5 | 微细电火花加工 | 228 |
| 7.5.1 | 概述 | 228 |
| 7.5.2 | 微细电火花加工的特点 | 228 |
| 7.5.3 | 微细电火花加工的工艺和设备技术 | 228 |
| 7.5.4 | 微细电火花加工的应用 | 233 |
| 7.6 | 超声波微细加工 | 234 |
| 7.6.1 | 超声加工原理 | 234 |
| 7.6.2 | 超声微细加工的特点 | 234 |
| 7.6.3 | 超声波加工机床组成 | 234 |

| | |
|------------------------------|------------|
| 7.6.4 超声微细复合加工 | 236 |
| 7.7 电化学加工 | 240 |
| 7.7.1 电解抛光 | 241 |
| 7.7.2 电化学机械复合加工 | 245 |
| 7.8 磁力研磨加工和磁力电解研磨加工 | 248 |
| 7.8.1 磁力研磨加工 | 248 |
| 7.8.2 磁力电解研磨加工 | 252 |
| 7.9 等离子体加工 | 252 |
| 7.9.1 等离子体 | 253 |
| 7.9.2 等离子弧加工 | 253 |
| 7.9.3 等离子体辅助抛光 | 254 |
| 7.10 基于微机器人的超精密加工技术 | 255 |
| 7.10.1 概述 | 255 |
| 7.10.2 微机器人超精密加工的类型及应用 | 255 |
| 参考文献 | 258 |

第 1 章 精密刻划技术与超精密加工技术

精密刻划技术与超精密加工技术是适应现代高新技术需要而发展起来的两种制造技术，它们综合应用了机械技术发展的新成果及现代电子、传感技术、光学和计算机等高新技术，是高科技领域中的基础技术，在国防科学技术现代化和国民经济建设中发挥着至关重要的作用。作为现代高科技的基础技术和重要组成部分，这两种加工技术的发展促进了半导体技术、光电技术、材料科学技术等多门技术的发展进步。从某种意义上说精密刻划与超精密加工技术负担着支持最新科学技术进步的重要使命。它们也是衡量一个国家科学技术水平的重要标志。

本章主要介绍精密刻划技术与超精密加工技术的任务、分类、特点与发展趋势。

1.1 精密刻划技术

1.1.1 精密刻划技术

精密刻划技术是自 19 世纪初应精密光学观察仪器、测量仪器、计量仪器、测绘仪器、军用观瞄仪器等精密仪器的发展需要而出现的一种新型技术。有关精密分划元件的设计、制造、检验的技术统称为精密刻划技术。精密刻划技术涉及各种分划元件的设计理论，加工设备与制作工艺、工装，分划零件的质量指标、质量检验原理、方法与设备等方面的专业知识。近年来由于科学技术的发展，新材料、新器件、新技术、新工艺、新仪器设备的出现，带动精密刻划技术也有了飞跃发展。例如纳米材料和纳米技术的出现，使紫外光刻技术的加工分辨率达到 $0.5 \sim 1 \text{ nm}$ ，加工的进刀量可达到 1 nm 。

1.1.2 精密刻划技术的任务

研究精密刻划技术主要解决以下 5 个问题：

- ①掌握精密刻划技术所涉及的基本理论；
- ②掌握各种分划元件的分类与用途；
- ③熟悉各类分划元件的设计理论与方法；
- ④掌握分划元件的制作原理与工艺；
- ⑤了解分划元件的质量要求，掌握典型分划元件精度的检验方法。

1.2 分划零件的类型与用途

在光学仪器中为了满足瞄准、测量及其他要求，都装置了分划元件。伴随近代科学技术

的发展,各种光学仪器也得到迅速发展,于是推动了分划元件制作工艺(简称刻划工艺)逐步地由简单到复杂,从低精度向高精度发展。早期的分划元件制作工艺很简单,十字线是用蜘蛛丝粘成的;度盘和刻尺的精度也很低,毛坯都是用金属做的。现今的分划元件绝大多数是用玻璃或塑料做毛坯,图案也复杂得多。以分划元件的刻划精度来讲,国内在圆分划方面已达到中误差 $\pm 0.2''$ 的世界先进水平;在长分划方面,200 mm 范围内,最高精度可达零点几微米。

1.2.1 分划元件

在平面或曲面光学零件表面上刻制出由直线、曲线、数字、指标或其他图案所构成的图形组就形成了分划元件,常见的分划元件有精密刻尺、度盘和分划板等,如图 1-1 所示。分划元件上的这些图形组称之为分划。分划元件上刻有图形组的表面称为分划面。

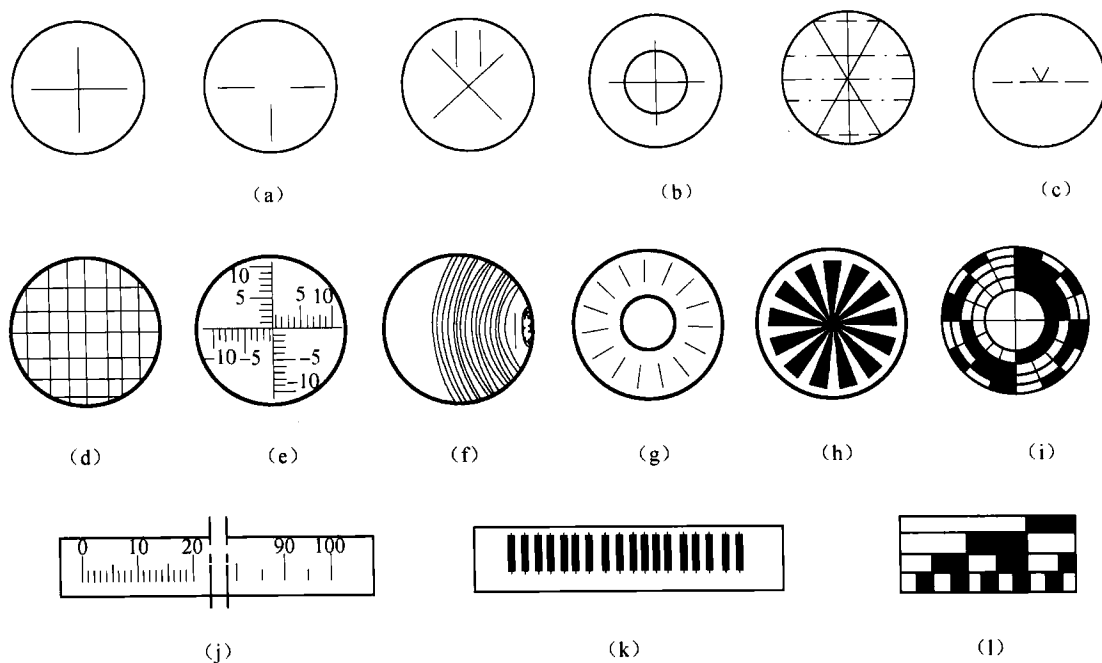


图 1-1 常见的分划元件

分划元件的外形最常见的是圆形平板状的,少数做成平凸或平凹透镜状。有些用于线值测量仪器上的分划元件则做成条形平板状。分划面一般是平面,特殊需要时也可将分划图形组刻制在曲面上。各种分划元件上分划图案的具体形状取决于分划元件的用途。供仪器瞄准物体用的分划元件,其图案均比较简单,而供测量仪器使用的分划元件,其分划图案要复杂些,往往是由许多线条按某种规律排列而成。为了便于读数,在刻线顶端还标有各种数字,例如图 1-1 中的度盘(g)和标尺(e)、(j)。而图 1-1 中(a)、(b)、(c)3种分划板则是供仪器瞄准用的分划元件,其分划分别为十字线、箭头和圆圈等。

1.2.2 分划元件的类型与用途

根据各种分划元件在光学仪器中的用途可以把分划元件分为下述 4 种类型:

(1) 瞄准用分划元件

这类分划元件主要用在光学仪器的瞄准系统中。图 1-1 (a) 中的十字线分划板就是一种经常作为瞄准用的分划元件。将这种分划板装置在普通望远镜物镜的后焦平面上, 且使分画十字中心与物镜后焦点重合 (图 1-2), 则由分划元件的十字线中心和望远镜光学系统的光轴所确立的直线构成仪器的瞄准轴, 利用这个瞄准轴, 望远镜可以随意瞄准某一被观测的目标。此时, 通过这个望远镜不但可以观察物体, 而且可以瞄准物体的某一部分。所以各种枪用瞄准具 (单筒望远镜)、水准仪和经纬仪的望远镜里所装有的瞄准用分划板, 就组成了仪器的瞄准系统 (又称作瞄准镜), 这样的枪支和仪器随时都可用来瞄准所需要的目标。

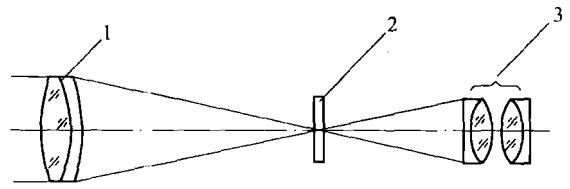


图 1-2 望远镜的光学系统
1—物镜; 2—分划板; 3—目镜

(2) 测量用分划元件

这类分划元件一般是作为传递线值或角值的标准器件, 装置在各种光学测量 (或计量) 仪器里, 构成仪器的测量系统。如果是用于线值测量的光学仪器, 则所装置的分划元件通常是具有线位移类分划图案: 除了图 1-1 (j) 所示的精密标尺外, 还有十字刻度尺、光栅尺、码尺、网格板、米字形板、齿形板等。如果是用作角值测量的光学仪器, 则所配置的分划元件一般是带有圆分度的分划图案, 例如图 1-1 (g)、(h)、(i) 所示的度盘、圆光栅和编码盘。

在图 1-2 所示的望远镜的光学系统中, 如果用图 1-1 (e) 所示的十字刻度标尺取代十字线分划板, 则这个望远镜不但具有观察和瞄准目标的功能, 而且还可以用它来测量目标到观察者之间的距离, 其原理将在 1.3 中叙述。

(3) 光栏和取像用分划元件

1) 光栏

在某些光学仪器或光刻工艺中, 为了限制光束的作用范围, 需要用图 1-3 所示的单线狭缝把从光源来的粗光束变成狭窄的成像光带, 投射在像面上 (或感光胶面上), 这种带有单线狭缝的分划元件就称为光栏。

2) 取像用分划元件

在经纬仪的读数系统里, 须把水平度盘 (或竖直度盘) 的粗读数 (度) 和测微器分划盘的细微读数 (分或秒) 同时成像在一个视场里 (见图 1-4) 来读取, 把视场中这个同时显示度盘局部像和测微器分划盘局部像的两个框子式分划元件叫做取像用分划元件或读数窗。显然, 这类取像用分划元件在光学仪器的读数系统中起到了限制像面大小的作用。在许多光学测量仪器里都有这种读数窗。

(4) 附有照明的分划元件

在某些仪器特别是军用光学仪器里, 为了便于观察分划, 在分划元件上附加有照明光源, 成为附有照明的分划元件, 如图 1-5 所示。这种分划元件上的分划多用白色填料或荧光粉, 可用于夜间观察。

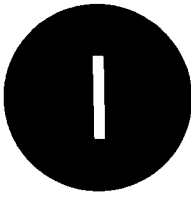


图 1-3 光栏

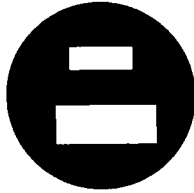


图 1-4 读数窗

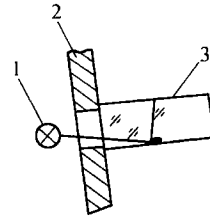


图 1-5 附有照明的分划元件
1—照明灯；2—光栏；3—分划元件

1.3 分划元件的设计

分划元件的设计内容有 3 项：第 1 项是确定分划元件的外形尺寸；第 2 项是确定分划图案、分划线宽与分划间隔等；第 3 项是选择分划元件的毛坯材料及加工分划的技术条件。由于分划板是应用得最广泛的一种典型分划元件，其设计内容基本上可以反映其他各种分划元件的设计构思，所以这里以分划板的设计来说明分划元件设计的第 1 项、第 2 项内容；然后再单独介绍分划元件毛坯材料的选择与加工分划技术条件的确定原则。在讨论分划板的设计内容之前，首先介绍分划设计中应用的部分长度单位和角度单位以及相应的换算关系式。

1.3.1 分划设计中的长度单位和角度单位

分划设计中所应用到的长度单位制有公制和英制两种；角度单位制则有弧度制、六十进制、百进制和密位制 4 种。为了便于分划设计，现将设计中所涉及的各种长度和角度单位制的换算关系分述如下：

(1) 长度单位及换算

公制长度单位： $1\text{ m} = 10^2\text{ cm} = 10^3\text{ mm} = 10^6\text{ }\mu\text{m}$

英制长度单位： $1\text{ ft} = 12\text{ in}$

公制与英制长度单位换算： $1\text{ in} = 25.4\text{ mm}$

(2) 角度单位及换算

弧度制：圆周 $= 2\pi\text{rad}$

六十进制：圆周 $= 360^\circ = 21600' = 1296000''$ ($1^\circ = 60'$, $1' = 60''$)

百进制：圆周 $= 400\text{ g} = 40000\text{ c} = 4 \times 10^6\text{ cc}$ ($1\text{ g} = 100\text{ c}$, $1\text{ c} = 100\text{ cc}$)

密位制：圆周 $= 6000\text{ 密位}$ (或圆周 $= 6400\text{ 密位}$)

密位的表示法和读法有特殊的规定，如表 1-1 所示。

表 1-1 密位的表示法和读法

| 密位数 | 表示法 | 读法 |
|------|-------|---------|
| 2478 | 24—78 | 二十四、七十八 |
| 130 | 1—30 | 一、三十 |
| 5 | 0—05 | 零、零五 |

各种角度单位的换算关系：

$$2\pi\text{rad} = 360^\circ = 400\text{g} = 6000\text{密位} \text{ (或 } 6400\text{密位)}$$

1.3.2 分划板的设计

(1) 确定分划板的外形尺寸

分划板作为光学测量仪器内光学系统的重要组成部分之一，并和其他元件一起构成仪器的瞄准系统与测量系统。以望远镜为例，其分划板应装置在物镜的后焦平面内，使其分划面与物像重合。因此分划板直径 D 应根据光学系统中物镜的视场 2ω 和焦距 f'_w 来确定，如图 1-6 所示。

$$D = 2f'_w \tan\omega \text{ (mm)} \quad (1-1)$$

式中： f'_w ——物镜的后焦距，mm；

ω ——物镜的半视场角。

分划板厚度 B 一般取为

$$B = \left(\frac{1}{8} \sim \frac{1}{10} \right) D \text{ (mm)}$$

(2) 确定分划板图案、分划线宽 b 和分划间隔 t

1) 分划板图案

分划板图案当然是根据需要来决定，但不要有多余的线条，整个图案应简明、实用和易制作。因为物镜视场中心的像质比边缘好，所以图案应尽量布置在分划板的中部；整个图案应安排得匀称、大方，使人看起来顺眼。

2) 分划线宽 b

分划线宽 b 不能太细，否则虽经目镜放大但仍不能被人眼看清，影响使用。因为人眼在明视距离（250 mm）能看清的最细线条为 $250 \times \tan 1' = 0.075 \text{ mm}$ ，所以刻线宽 b 经目镜放大后应大于 0.075 mm，即

$$\begin{aligned} b \times \frac{250}{f'_m} &> 0.075 \\ b &> \frac{0.075}{250} f'_m \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中： f'_m ——目镜的焦距，mm。

分划线宽 b 也不能太粗，否则会过多地遮挡目标，从而降低望远镜的瞄准精度和测量精度。实践证明，刻线对物镜中心所形成的角度应小于 $30''$ ，即

$$b < f'_w \tan 30'' = 0.00014 f'_w \quad (1-3)$$

分划线宽 b 的理想数值应该是在同时满足式（1-2）和式（1-3）情况下的凑整值。但对于某些军用光学瞄准仪器，为了快速捕捉目标，往往使分划线宽 b 适当地超出式（1-3）的限制。总之在具体设计时须根据实际情况灵活地掌握。

3) 分划间隔 t 的确定

对于望远系统的分划板来说，其设计的关键在于如何将角度量表示成分划板上的长度

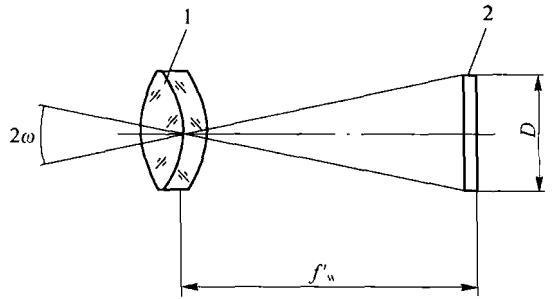


图 1-6 分划板直径的确定

1—物镜；2—分划板

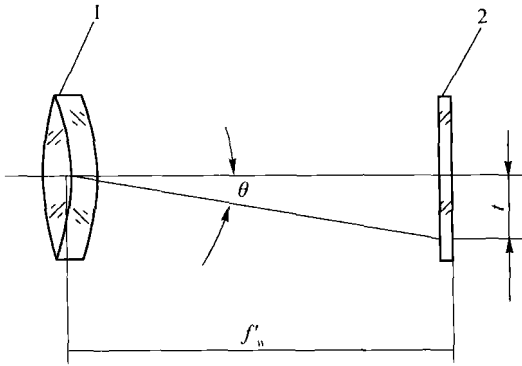


图 1-7 确定分划间隔
1—物镜；2—分划板

量。由图 1-7 可知，分划间隔 t 对物镜中心 O 的张角 θ 与焦距 f'_w 有如下关系

$$t = f'_w \tan \theta \quad (1-4)$$

式中 θ 为角度。在军用光学仪器里 θ 多采用密位制。不同的张角 θ ，对应不同的分划间隔 t 。如果事先按式 (1-4) 计算好分划板上每两条刻线（其中一条是中心刻线或零位刻线）所对应的角度值，那么在实际观测时，当目标像落在某一条刻线与中心刻线中间时，就可以立即读出目标像与望远系统光轴的夹角 θ 是多少密位，然后再根据式 (1-5) 计算出观察者与目标间的距离 s 。

$$s = \frac{H}{\theta} \times \left(\frac{6000}{2\pi} \right) \approx 954 \frac{H}{\theta} \text{ (m)} \quad (1-5)$$

作近似估算时，则取

$$s = 1000 \frac{H}{\theta} \text{ (m)}$$

式中： H ——被观测目标的高度，m；

θ ——目标像与望远镜光轴的夹角，密位。

例如，在某望远镜目镜视场里读得敌人的像在分划板上的角度 $\theta = 10$ 密位（见图 1-8），敌人高度以平均值 1.7 m 计算，即 $H = 1.7$ m，应用式 (1-5) 即可算得敌人至观察者的距离 s 约为

$$s = 1000 \frac{H}{\theta} = 1000 \times \frac{1.7}{10} = 170 \text{ (m)}$$

了解了分划板的使用情况，再来设计分划板上的分划间隔 t 就很容易了。例如，某望远镜的焦距 $f'_w = 120$ mm，要计算 $\theta_1 = 5$ 密位， $\theta_2 = 10$ 密位， $\theta_3 = 15$ 密位所对应的分划间隔 t_1 、 t_2 、 t_3 值，可以利用式 (1-4)，最后得到

$$t_1 = f'_w \tan \theta_1 = 120 \times \tan 5 \times \frac{2\pi}{6000} = 0.628 \text{ (mm)}$$

$$t_2 = 1.256 \text{ (mm)}$$

$$t_3 = 1.884 \text{ (mm)}$$

(3) 确定刻线垂直度公差

分划元件中相互垂直的刻线间的垂直度公差按实际需要确定，需要多大就定多大。

1.3.3 分划元件毛坯材料的选择与加工分划技术条件的确定

(1) 分划元件毛坯材料的选择

制作分划元件毛坯的材料与制作分划的工艺密切相关，它直接影响分划元件的质量，故

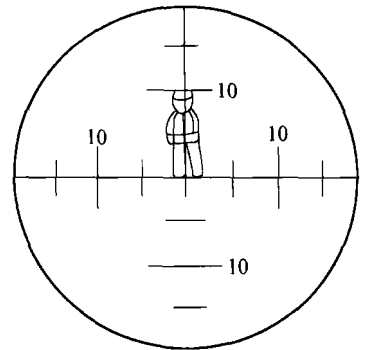


图 1-8 望远镜分划板的应用

选择合适的分划元件的毛坯材料十分重要。分划元件的毛坯是经过抛光后的光学玻璃零件，所以又称作光坯，光坯常用的玻璃牌号如表 1-2 所示。

表 1-2 光坯常用的玻璃牌号

| 成分与性能 | | 牌号 | BaK7 | BaK2 | BaF1 | F6 | K9 | 窗玻璃 |
|-----------------------------------|-------------------------------|--|----------------------------------|-----------------------|-----------|--|--|-----|
| 研磨相对硬度 | | | 0.7 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 1 | |
| 膨胀系数 $\alpha (\times 10^{-7})$ | -60 ~ +20°C | | 65 | 74 | 71 | 95 | 72 | |
| | +20 ~ 120°C | | 74 | 84 | 84 | 101 | 76 | |
| 化学 稳定性 | 对潮湿大气 | | A | A | A | C | A | |
| | 对弱酸溶液 | | B | A | A | A | A | |
| 可供应的 气泡度 | 0~1类的 最大毛坯 质量/g | | 100 | 50 | 100 | 200 | 200 | |
| 主要化学 成分 | SiO ₂ | | 49.8 | 59.4 | 58.1 | 42.8 | 69.1 | |
| | K ₂ O | | 7.1 | 9.9 | 11.1 | 10.4 | 6.3 | |
| | Na ₂ O | | 1.3 | 3.0 | | 1.5 | 10.1 | |
| | BaO | | 21.9 | 19.3 | 11.7 | | 3.1 | |
| | PbO | | 2.2 | 10.9 | 10.9 | | | |
| | B ₂ O ₃ | | 5.0 | 3.1 | 3.7 | | 10.8 | |
| | ZnO | | 12.5 | 1.9 | 1.3 | | | |
| 适用范围 | | 适用于酸蚀法制造分划元件，蚀出的线条边缘光滑，沟槽深，是最常用的材料。当分划元件直径大于 30 mm 时，因气泡多，浪费较大 | 适用于酸蚀法制造分划元件，也是常用的分划板材料，仅次于 BaK7 | 多用于酸蚀法制造度盘的材料，也用于计量光栅 | 多用于制造光学刻尺 | 常用于镀金属层刻划的基体，作透明分划和真空着色分划。也用于粗线条的腐蚀，酸蚀出的线条沟槽边缘常呈圆弧形，较难填充着色 | 多用于在反射观察条件下，用真空着色方法制造度盘的材料。也用作一般光学刻尺的材料。目前工业用铬线计量光栅大多数用此材料 | |

除表 1-2 所列玻璃牌号外，BaK10、BaK8、BaF3、F4、F3、K8 等也可用作分划元件的材料，但用得很少。

玻璃牌号的鉴别，常用紫外线灯观察，BaK7 呈天蓝色，K9 无色。

选择分划元件光坯材料的原则主要是根据分划元件的用途、使用环境和制作方法。现分述如下：

1) 根据用途选择

用作刻尺的光坯要选用与钢有相近膨胀系数 ($\alpha_{\text{钢}} = 0.0000105$) 的材料，如 F7 ($\alpha_{\text{F7}} = 0.00001019$)，以减少因为玻璃与钢的膨胀系数不同而引起的误差。

2) 根据使用环境选择

一般的分划元件均应有足够的化学稳定性,以防霉雾。对于一些军用光学仪器或在湿度较大条件下工作的光学仪器,对分划元件的化学稳定性则应有更高的要求。

3) 根据制作方法选择

若用机械物理法或照相复制法加工分划元件,则可以用货源充足、性能稳定、较硬的K8和K9玻璃作光坯材料。对于用机械化学法加工的分划元件,为有利于酸蚀与填色,光坯应选择性能较软的材料,例如BaK10、F4等。含氧化钡和氧化铅的玻璃对酸蚀很有利,它们不仅会加速酸蚀,同时与氢氟酸起反应生成钡和铅的氟化物,呈白色粉状,留于刻线内,产生漫反射,便于观察,并对填充着色有利。含二氧化硅较多的玻璃(BaK2、BaK7、BaF1)经稀盐酸处理后,在表面上易于生成二氧化硅薄膜,此膜比较耐腐蚀。在酸蚀刻线的时候,表面层被腐蚀后,就容易向玻璃内部深入腐蚀,使刻线断面成波纹状,便于着色,在必要时可以对光坯进行这样的处理。

(2) 确定加工分划元件的技术条件

1) 对分划元件光坯表面粗糙度的要求

对分划板等分划元件光坯抛光面,不允许存在未完全抛光的痕迹,其表面粗糙度为 $R_a = 0.01 \sim 0.05 \mu\text{m}$ 。

直径大于18 mm和配合不高于4级精度的分划板的圆柱面,其表面粗糙度为 $R_a = 3.2 \mu\text{m}$ 。

直径小于18 mm的4级配合精度和直径大于18 mm的3级配合精度的分划板的圆柱面,其表面粗糙度为 $R_a = 1.6 \mu\text{m}$ 。

直径小于18 mm的3级配合精度的分划板的圆柱面,其表面粗糙度为 $R_a = 0.8 \mu\text{m}$ 。

2) 对分划元件光坯表面疵病的限制

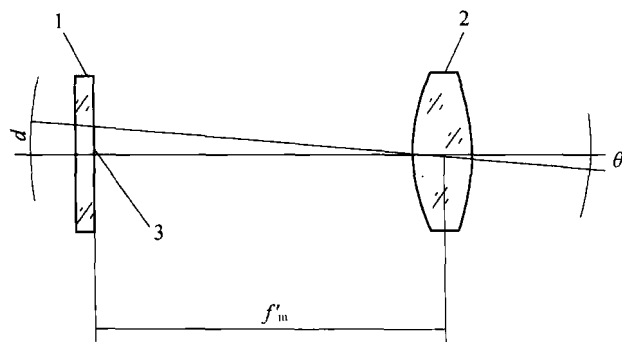


图1-9 分划元件表面疵病的影响

1—分划板; 2—目镜; 3—疵病

分划元件一般都位于光学系统的像面位置上,分划面上的细小疵病经目镜放大后很容易被人眼观察到,这对光学仪器的瞄准和测量都是不利的。由图1-9可见,若分划面上疵病直径 d 对目镜所形成的 θ 角能小于人眼的分辨角 $1'$,则此疵病是允许的,即要求疵病直径 d 满足

$$d < f'_m \tan 1' = 0.00029 f'_m$$

根据这一点,一般对分划元件光坯抛光表面的疵病等级规定0-I-30、

II、III三个级别,其中0-I-30用于要求较高的分划元件,III级则适用于平行光管的分划板。

3) 分划表面的形状误差

用作分划元件的光坯,刻划面可取光圈 $N = 5 \sim 15$,面形局部误差的允许值取 $\Delta N = 0.5 \sim 5$;对于高精度的度盘和光学刻尺,应考虑到面形误差对刻划精度和读数精度的影响,一般要求 $N < 5$, $\Delta N = 0.5$ 。当必须通过背面读取刻线数值时,则背面光圈数应与刻划面