

目 录

出版说明

前言

第一章 天文望远镜史话	1
一、以管窥天	2
二、奇妙的发现	3
三、后起之秀	6
四、射电波段的战斗	9
五、空间天文望远镜	12
六、我国的成就	21
第二章 反射望远镜的原理	24
一、望远镜的种类	24
二、几何光学成象	33
三、天文望远镜的元件	38
四、近轴光学基本公式	44
五、象差	78
六、非球面反射镜	90
七、反射望远镜系统成象	98
第三章 反射望远镜的设计	111
一、天文望远镜的光学性能	111
二、卡式望远镜的设计	119
三、其他类型设计	130
第四章 反射望远镜的制作	134

• v •

一、选料及工具	134
二、磨制方法	153
三、卡式主、副镜的磨制	196
四、目镜与寻星镜的磨制	222
五、镜面镀银	231
第五章 望远镜的安装和校准	245
一、望远镜的安装	245
二、望远镜的校准	278
第六章 转仪钟	284
一、重力转仪钟	285
二、电动转仪钟	286
第七章 小型天文台的设计	290
一、圆顶式	290
二、方顶式	295

第一章 天文望远镜史话

夕阳西下，夜色降临，晴朗的夜空，繁星点点，吸引着千千万万的天文爱好者。天文台的圆顶室打开了天窗，短而粗的望远镜，或细而长的望远镜，敏捷地寻找目标，细致地观测各种各样的天体。

晴朗的夜空，在天文工作者和天文爱好者看来，不仅使现代人迷恋，而且，自古以来吸引着许许多多的人。在望远镜发明之前，人们经历着多少不眠之夜，就用双眼观看闪烁的星光，搜索天空上出现的奇异现象，精确地记录着它们的变化。战国时代，我国古代天文学家甘德、石申，便用肉眼观测，编制了 120 颗恒星的位置表，这是世界上最古老的星表，可惜失传了。

随着科学的发展，单凭肉眼观测天空，所见的天体太有限了。事隔一千八百多年后，人类用自己的智慧发明了望远镜，用望远镜观测天空，极大地拓宽了人类的眼界。宇宙间的妙趣，更加激发人们的探索热情。天文望远镜的发明，是天文学划时代的标志，从而迎来了天文学上的一次飞跃。经过了三个世纪的漫长年代，天文学取得丰硕的成果，在人们向宇宙更进一步探索的时候，天文望远镜不断地得到改进，它成为天文工作者的重要手段。

在天文学发展中,观测手段的不断改进和创造,对天文学均有着重要意义。回顾十七世纪以前,人们只能用肉眼观测,看到的星星不过是六、七千颗。十七世纪以来人们用越来越大的口径制成的望远镜,使人类的视野从我们周围的太阳系,从太阳系所在的、由数以千计的恒星和星云组成的银河系,扩大到银河系以外广袤无垠的空间。而在近三、四十年来,从应用光学、无线电电子学以及空间技术,汲取养料,创造出独特的观测手段。射电望远镜和空间望远镜相继诞生了。它使天文观测手段不但具有空前的探测能力和精度,而且使天文观测的领域,扩大到整个电磁波段,这就是说,除了用肉眼观测可见光波以外,针对天体的紫外、红外、无线电、X射线、 γ 射线的波段,均产生了相应的望远镜。

如今追溯望远镜发展的历史,会对我们有着很大的启发。

一、以管窥天

天空无限奥妙,人们凭眼睛观星,总是不够深远的。为能够看得更多、更清楚的天体,创制了各种各样古代观测仪器,我国西汉时的古书《淮南子》,曾有“以管窥天”的记载。这是一个用细而长的空圆管观看的工具。被称作窥管或望筒。实际上是没有镜片的望远镜。宋代科学家沈括在《梦溪笔谈》中写着:“熙宁中,予受招典领历官,杂考星历,以玑衡求极星。初夜在窥管中,少时复出,以此知窥管小,不能容极星游转,乃稍稍展窥管俟之,凡历三月,极星方游于窥管之内,常见不隐。

然后知天极不动处，远极星犹三度有余。每极星入窥管，别画一图。图为一圆规，乃画极星于规中，具初夜、中夜、后夜所见各图之。凡为二百余图，极星方常循圆规之内，夜夜不差。予于《熙宁历奏议》中叙之甚详。”

这段论述的意思就是说：“熙宁年间(公元 1072 年)，我奉皇帝的命令掌管历法，研究星象，我用窥管观测真正的北极。第一夜观看北极，发现窥管所能看到的星，不一会就移出筒外。因此，我感到窥管太小了，不能让极星在管里游转，于是我逐步增大窥管进行观看，经过三个月的实验，结果极星只在窥管视野内移动，常见不消失。采用这个办法，我发现极星离真正的天极三度余。把每次的观看画出视野图。图为一圆形，并把极星划入图中，绘出入夜后、午夜和黎明前的位置。共有 200 多幅，图中表明极星均在圆规内夜夜不差，‘极星’确实是一颗拱极星。”

通过这段生动的记录，足见窥管在天文学史上，曾有过不小的贡献。

二、奇妙的发现

1608 年，荷兰的米德堡，有位不出名的眼镜制造商，名叫汉斯·李波尔赛。有一天，店门口有两个孩子，看见李波尔赛没在店内，拿了几片透镜玩耍，他们通过前后两块透镜，观看远处教堂上的风标，好象发现了什么似的，分外惊喜。李波尔赛回来后，看到他们欣喜若狂的神情，也拿起两片透镜，叠

在一起观看,出现在他眼前的风标放大了,这使李波尔赛大为兴奋,立刻把两片透镜装在一个筒子里,制成望远镜。这个奇妙的发现,使第一个望远镜诞生了。窥管便很快被淘汰了。

这意外的发现,象长着翅膀似的,很快地传到意大利。1609年5月意大利天文学家伽利略,在威尼斯得到了这方面的消息,他深知这一发明的重要性,迅速赶回住地——帕多瓦城,

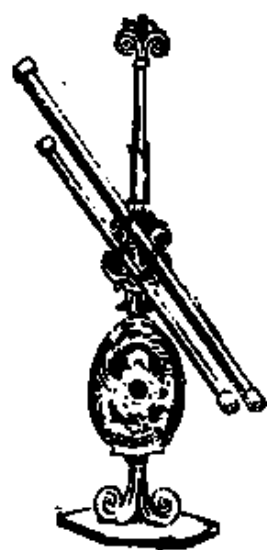


图 1.1 伽利略望远镜

他曾写道:“知道了这件事,我就开始思索这个问题,我在回来的第一天夜里就把问题解决了,第二天把仪器做成功了。”伽利略制作的望远镜是用一个纸制的镜筒,长约1.2米,物镜口径为4.2厘米的平凸透镜,目镜用双凹透镜。开始只放大3.5倍,后来经过不断地改进,把放大倍数提高到三十倍左右。图1.1是伽利略制作的第一架望远镜照片,图1.2是望远镜的原理图。

伽利略用自己制造的望远镜观测星空,在短短的两年多时间内,他发现了月亮上的环形山、山谷和“海”;他先后发现木星四个最大的卫星,从而有力地说明了运动中的木星,又是

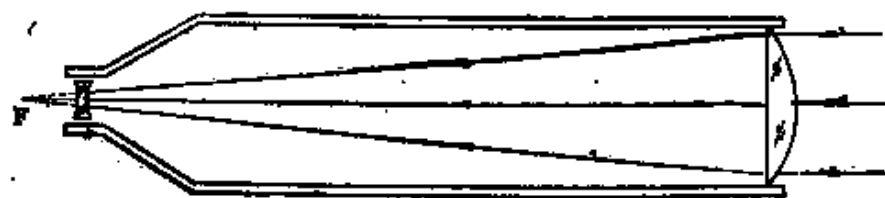


图 1.2 望远镜的原理图

另外一些较小天体运动的中心；接着他用望远镜观测金星，看到金星也有位相，表明金星是在地球轨道之内绕太阳运动的一般行星。这些不寻常的发现，雄辩地验证和保卫了哥白尼的“日心说”。在望远镜的视野内，茫茫的银河系被分解成颗颗恒星，原来白色云雾般的银河系是由无数颗恒星组成庞大的天体系统，这就大大扩展了人类眼界。观测太阳表面，发现太阳有黑子，并且还有运动，由此测出太阳自转的规律。凡此种种，在当时无不使全世界的学者大吃一惊，给那些守旧顽固分子当头一棒。天文望远镜的发明，在天文学发展史上是个重要的里程碑，有着划时代的意义。它成为保卫真理的犀利武器，同时在自然科学中完成一次伟大的革命，开创了天文学的新时代——望远镜天文学时代。

1611 年德国的天文学家开普勒，又把望远镜改进了，他选用两片双凸透镜，组成折光系统，使放大倍数有了很大提高，视野宽阔，人们称它为开普勒望远镜。如图 1.3 所示。

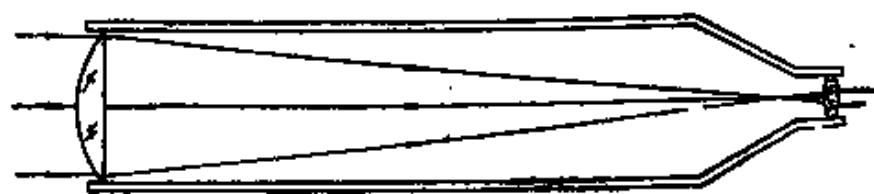


图 1.3 开普勒望远镜原理图

后来人们制作一些口径比较大的望远镜，用它观看天体时，镜头四周总是出现五颜六色的花斑(叫色差)，严重影响成象质量，这曾长时间使天文学家苦恼。为了克服它，只有拉长

望远镜的镜筒，有的索性架在空中观测，即所谓架空望远镜，当时曾有人使用 75 米长的望远镜，测定金星的直径。由于折射镜这个缺欠的存在，使折射望远镜长时间停滞不前，直到 1758 年，英国光学家杜隆特，用两块不同玻璃合理组合，制成消色差透镜，减掉讨厌的色差，大大提高观察天体的清晰度和测量精度。这样大大促进折光系统望远镜又向前迈进了一大步。可是要制作大口径的折射镜，困难仍是很大的，直到现在为止，世界上最大的折射望远镜是在美国叶凯士天文台，口径为 102 厘米，透镜装在 19.2 米长的镜筒前端。除此之外，超过 70 厘米口径的折射望远镜，仅仅有五台(见表 1.1)。

表 1-1 世界上最大的折射望远镜

天文台	所在地	口径(厘米)
美国叶凯士天文台	美国威斯康星州威廉斯湾	102
美国利克天文台	美国加利福尼亚州哈密尔顿山	91
法国巴黎默东天文台	法国塞纳-瓦兹省	83
德意志民主共和国天体物理台	德意志民主共和国波茨坦	80
美国阿勒格尼天文台	美国宾夕法尼亚州匹兹堡大学	76
苏联普尔科沃天文台	苏联列宁格勒	76

三、后起之秀

作为折射望远镜的亲兄弟，反射望远镜很快问世了。如今后来居上，成为现代天文学日用工具了。1668 年英国的科学家牛顿，他经过实验，认为反射镜可以代替折射镜，能够很好地克服折射系统产生的色差。于是他自己亲自动手，选用

2.5 厘米直径的金属,磨制成一块凹面反射镜。当平行光线照在镜面上时,不必穿过玻璃内部,而从表面反射回来聚成一点,再配上目镜也能观测天体。

反射望远镜比折射望远镜有着许多优点,它消除色差,并能在广泛的可见光波段内,聚集天体发出的辐射能。反射望远镜容易制作,即使玻璃内部有些气泡和条纹,也可以使用。制成的望远镜镜筒较短。有了这些优点,反射望远镜一出现,便很快得到发展,各类繁多的反射望远镜接连出现,成为观测天空的主要手段。关于反射望远镜的种类我们将在下一章详细讨论。开始制作的反射望远镜口径不算大,后来,选用玻璃作镜面,又解决了在玻璃表面镀银或镀铝的新工艺,大口径的反射望远镜相继而出。目前世界上口径在 2 米以上的反射望远镜有十四台之多。其中美国帕洛马山,口径 508 厘米的反射望远镜和近年来制成的苏联高加索山,口径 600 厘米的反射望远镜,是这些反射望远镜的佼佼者(见表 1-2)。

望远镜口径越大制作起来越困难。如美国 5 米望远镜,从设计到制成,中间花费 20 年之久,镜面重 20 吨,研磨和抛光用了 11 年时间,磨掉的玻璃超过 4.5 吨,可见制作之难可以想像。

为了能够克服大口径单镜的加工困难,美国设计并制造一种新型望远镜。这种望远镜由许多单块小口径的镜面组合而成,即所谓“多镜面望远镜”,它的出现被认为是第二代光学望远镜。美国曾于 1979 年用六台口径 1.8 米的反射镜组合成第一台相当口径 4.5 米的反射望远镜。望远镜采用地平式

表 1-2 世界上最大的反射望远镜

天文台	所在地	口径(厘米)
苏联专门天体物理台	苏联高加索泽丘克斯卡亚	600
美国海耳天文台	美国加利福尼亚州帕洛马山	508
美国美洲际天文台	智利托洛洛山	400
美国国立天文台	美国亚利桑那州基特峰	400
英、澳赛丁斯普林天文台	澳大利亚新南威尔士	390
英、法、美莫纳克亚天文台	美国夏威夷莫纳克亚	380、370、310
西欧六国欧洲南天天文台	智利拉西亚	360
美国利克天文台	美国加利福尼亚州哈密尔顿山	300
美国麦克唐纳天文台	美国得克萨斯州洛克山	270
苏联克里米亚天体物理台	苏联克里米亚	260
苏联比尤拉坎天体物理台	苏联亚美尼亚比尤拉坎	260
美国海耳天文台(南天天文站)	智利坎帕纳岛	260
美国海耳天文台	美国加利福尼亚州威尔逊山	254
美国史密森天文台	美国霍普金斯山	450(6台1.8米 多镜面组合)

电子计算机自动控制。目前,美国在“多镜面望远镜”成功的鼓舞下,正进行着口径 25 米望远镜的研究。打算用十八个 6 米镜面组合,或用一百多个 2.4 米镜面组合一个庞大的望远镜阵列。新望远镜的集光能力将比美国目前最大的 5 米望远镜大 25 倍,分辨力也大 5 倍。在实际观测中,所有主镜用激光敏感,并通过一台计算机系统,不断地校正各个主镜位置,使它们相互合作,精确地成象在同一焦点上,即所谓自适应望远镜。可以预见这台望远镜的建成,天文学家将可以用它观测到诸如恒星的行星;木星和土星上的风云和天气变化;其他银河系中恒星的表面细节、运动和构造等。

四、射电波段的战斗

大气层对可见光开辟的窗口太狭小了,为了扩大窗口,开辟新领域,射电望远镜及时诞生了。在 1932 年美国贝尔实验室无线电工程师,为专门搜索和鉴别电话的干扰信号,在一个农场架起一具奇妙的装置。这个装置长 30.5 米高 3.66 米,外表看上去象飞机的翅膀骨架,下面安上了四个轮子,装置上安上马达,可以旋转,人们给它起个绰号叫“旋转木马”。这实际是现在射电望远镜的天线系统。另外为这个装置配上灵敏度很高的接收机。当央斯基把这架接收 14.6 米波长的射电望远镜,对向天空检测电讯干扰信号时,偶然发现有种微弱的“沙沙”信号声,而且这种信号有着 23 小时 56 分 04 秒的周期性变化。这个变化恰巧就是地球相对于恒星自转周期,经过仔细分析,发觉这正是银河扫经天线主瓣的时候。他在 1932 年发表文章断言:这是来自银心——人马座方向,一种射电辐射。由此央斯基开创了用射电波研究天体的新纪元。

然而在当时这一重大发现未被天文学家重视。可是被一名美国杰出的无线电工程师格罗特·雷伯所重视,他决心制作一架射电望远镜。经过几年的努力直到 1937 年,雷伯终于制成世界上第一台射电望远镜。它的天线是由一块金属板拼成直径约 9.6 米的抛物面,在抛物面焦点处放置一对锥状的小接收天线,可以接收 1.87 米的波长。这个庞大仪器就安放在他家的后院里。他在 1939 年 4 月接收到来自银河中心的

表 1-3 世界上最大的施密特望远镜

天文台	所在地	口径(厘米)	
		改正镜	主 镜
德国科学院天文台	德意志民主共和国图林根, 陶登堡	134	203
美国海耳天文台	美国加利福尼亚州帕洛马山	122	186
英、澳赛丁斯普林天文台	澳大利亚新南威尔士	122	183
西欧六国欧洲南天天文台	智利拉西亚	100	162
委内瑞拉天文研究所	委内瑞拉梅里达	100	150
日本东京天文台木曾观测所	日本木曾	105	150
法国地球动力学与天文研究 探测中心	法国格拉斯	90	150
瑞典乌普萨拉大学天文台	瑞典布鲁	102	137
苏联综合技术学院天文台	苏联拉脱维亚里加	80	190
德意志联邦共和国汉堡天文 台	德意志联邦共和国贝格多夫	81	122
比利时皇家天文台	比利时于克勒	84	117
南非波伊登天文台	南非布隆方丹	81	90

射电波,此外又在天鹅座、仙后座、大犬座也发现有射电源。但是当时正值第二次世界大战期间,雷伯的工作,仍然没有引起天文学家的重视。

1942年正当第二次世界大战时,英国的雷达兵在巡天寻找德国的飞机时,总发现有一种神秘的“干扰”周期性地出现,当他们进一步研究时,发现雷达对准太阳时,受“干扰”最大,证明是来自太阳的射电干扰。当时没有时间进行更深入的研究,待第二次世界大战结束后,随着一些军用雷达和有关专家转向射电天文观测,射电望远镜才有了显著的发展。1946年英国曼彻斯特大学首先建造直径为66.5米的固定抛

物面射电望远镜。1955 年建成当时世界上最大的 76 米直径的可转抛物面射电望远镜。进入六十年代美国建成世界上最大的射电望远镜。它的抛物面口径达 305 米, 装在波多黎各阿雷西博镇附近的天然盆地, 用 7.7 公顷带孔铝板制成。这座巨大的射电望远镜抛物面天线是顺着山谷固定在地表面, 不能转动。但它的灵敏度很高, 它用一定波长以空前的精确度与深远度描绘出部分射电天空图象。更有意思的是在 1974 年 11 月 16 日, 用这架射电望远镜, 向居住在武仙座 M13 球状星团方向的宇宙人, 发出长达 3 分钟的电报, 向宇宙人表示问候。进入七十年代西德在波恩附近, 建造 100 米直径世界上最大的全向转动的抛物面反射天线。这也是一个庞然大物, 它可在一条环形轨道上转动, 跟踪精度很高。现在世界上

表 1-4 重要的射电望远镜

天文台	所在地	口径
美国阿雷西博天文台	波多黎各	305米固定式抛物面镜
德意志联邦共和国马克斯·普朗克射电天文研究所	德意志联邦共和国埃费尔斯贝格	100米全动式抛物面镜
美国国立射电天文台	美国西弗吉尼亚州格林班克	91米抛物面镜
英国焦德雷尔班克	英国曼彻斯特	76米抛物面镜
印度塔塔基础科学研究所	印度乌塔卡蒙德	530×30米赤道式
法国巴黎天文台南锡射电观测站	法国南锡	300×35米子午式
苏联专门天体物理台	苏联高加索泽连丘斯克卡亚	600米环形反射面
荷兰韦斯特博克射电天文台	荷兰格罗宁根	1.62公里综合孔径 25米×12米
英国穆拉德射电天文台	英国剑桥	5公里综合孔径 12.8米×8米
澳大利亚悉尼大学射电天文中心	澳大利亚霍斯金斯敦	1.6公里十字形天线

许多国家也制造了各种各样的射电望远镜(见表 1-4)。

射电望远镜作为一个新的观测手段,正不断地向前发展,它不管阴天或下雨均可以照常工作。它的最显眼的部分是巨大的天线,或者叫能量收集器。天线主要是抛物面天线,分为反射天线和偶极天线阵两种。抛物面反射天线可以认为是光学反射望远镜的主镜,用以聚集射电能,即把波长在 1 毫米到 30 米左右波段内的无线电波接收到,这些波称为射电波。这些波不受大气阻拦可以顺利地到达地面,被射电望远镜天线收集。接收到的射电波又被天线反射到位于焦点处集中,在焦点处有一具小天线,可把集中的射电波再输入到接收器上进行放大。然后再经电子计算机剔除干扰,最后由一能记录器将之录成曲线图。

射电望远镜的产生,为射电天文学的发展起着关键的作用。六十年代著名的四大发现:即是类星体、脉冲星、星际分子和微波背景辐射,都是使用射电望远镜的重大发现。

五、空间天文望远镜

在地面上观测天体,因为大气的干扰使观测存在一定困难。五十年代以来,随着航天技术的发展,也带来了空间天文学的兴起。空间天文学可以使用电磁波的各个波段。即可对天体进行 γ 射线、X 射线、远紫外线和远红外线、以及短波到甚长波的射电波的探测。

空间天文观测使用的望远镜,有的用传统的光学系统和

射电望远镜，有的要用特制的望远镜。不过即使是使用地面上的望远镜进行观测，在大气外进行也比在地面上有着特殊的优越性。例如同样口径的光学望远镜，放在空间观测，其极限星等可暗到 1—5 等。空间望远镜在结构上，传动和跟踪等系统都与地面上的望远镜差别很大。同时重量轻得多。在使用时，因为是在地面上控制，所以每台望远镜均有完善的自动化遥控、遥测装置。

红外望远镜：宇宙射来的红外线大部分被大气层所阻，只有少部分能穿过大气层射到地面。最早进行红外线观测是英国著名天文学家赫歇尔。他在观测太阳时，用普通温度计首次发现红外辐射。1869 年罗斯在 90 厘米反射望远镜上用热电偶测量了月球红外辐射。对行星和一些恒星进行红外观测是二十世纪二十年代进行的。以后一直发展缓慢，直到第二次大战后，红外技术才得到发展，在 1965 年美国加利福尼亚理工学院，首先制成口径为 1.5 米的简易红外望远镜，并发现了红外星，从此揭开了现代红外天文学的新篇章。

红外天文望远镜的结构形式与光学望远镜基本相同，只不过精度较低，目前世界上许多国家对地面大口径望远镜进行改装，使其在黑夜作一般光学望远镜使用，在月夜或白天可以进行红外观测。如美国夏威夷岛集中使用三架口径大于 3 米红外望远镜便是如此。目前美国加利福尼亚理工学院已建成 10 米口径铝镜面的红外望远镜。六十年代以后又把红外望远镜用高空飞机、火箭等手段送入高空进行巡天观测。利用低温致冷光电导探测器和优良的红外滤光器，在整个红外

波段进行天文观测。红外天文学，打开了认识宇宙的一个新境界。

紫外望远镜：通常把波长在 100 埃—4000 埃之间的电磁波称为紫外波段。由于大气层的吸收作用，在地面上无法用紫外望远镜进行观测，只有到大气层之外，紫外望远镜才能进行正常工作，紫外望远镜是用光学望远镜，配上终端设备组成的，不过所用设备材料不同于可见光。常用的望远镜分为观测太阳和恒星的庞大部分。

观测太阳的紫外望远镜是探测太阳紫外线光学装置。在紫外望远镜中多采用反射系统，通常用铝作为镀制紫外反射膜的膜料。为防止铝膜氧化降低反射率，便在铝膜上再喷镀一层极薄的氟化镁层，作为保护膜。在使用时根据光线入射情况不同又有正入射太阳紫外分光计。它是把太阳光经过入射窗，射到成像镜 M 处，再由成像 M 将太阳像成在入射狭缝上，通过光栅进行色散。从地面发出遥控指令能够在一定波长得到太阳单色象。这种望远镜最早使用，是安装在美国发射的轨道太阳观测台 4 号(英文缩写 OSO-4)的太阳分光光度计。后来在 1973 年发射的天空实验室上又得到进一步改进。它由口径 18 厘米、焦比 12.5 的偏轴抛物面镜收集太阳光，正入射到一个凹面光栅上，在分光计的焦平面上有七个探测器，可同时记录下 300—1400 埃范围内各个波段单色太阳像。

另一种利用紫外线在非常倾斜的掠射角下将产生全反射的原理制成太阳远紫外掠射望远镜。在天空实验室内，使用这种望远镜，它用焦距为 1 米抛物面镜收集太阳紫外辐射，使

其聚焦成像。集光面积为 12 平方厘米,用三块极薄的薄铝作滤光片,只让紫外线 170—630 埃波段辐射通过。用远紫外像转换器将远紫外像转换成可见光像。然后再借助于摄像管把像送到地面上,地面可以接收到清晰的太阳紫外单色像。

恒星紫外望远镜: 由于恒星的紫外辐射通常比太阳弱得多,因而要求恒星紫外望远镜口径一般要大于 25 厘米,同样采用反射光学系统望远镜。不过为减少背景辐射,望远镜的视场一般较小。根据观测紫外波长不同,恒星紫外望远镜同太阳紫外望远镜一样,也有两种类型。只是为提高望远镜的灵敏度,在结构上采用多层结构。即把数套同轴共焦圆锥曲面套迭在一起。几种典型的紫外望远镜介绍如下表。

表 1-5 几种紫外望远镜性能表

安装地点	望 远 镜 性 能				附属仪器	工作波段 (埃)	完成 时间
	主镜口径 (厘米)	副镜口径 厘米	焦比	视 场 (角分)			
轨道天文台 2 号	30	15	$f/2.1$	144	无	1100—2000	1968
轨道天文台 3 号	92	30	$f/1.6$	1	扫描 分光计	1000—4000	1970
国际紫外探险者	45		$f/15$	10	阶梯光栅 摄谱仪	1190—3020 1150—3260	1978
探空火箭	38	20	$f/4.2$	60	无	100—1000	1977
探空火箭	38	5	$f/10$	10	远紫外 分光计	100—500	1977

X 射线望远镜: X 射线望远镜起始于二十世纪四十年代,但是成为一门学科,则是六十年代人造卫星上天以后的

表 1-6 天文观测卫星系列表

系列或卫星名称	发射的国家或组织	已发射数目	发射时间	简 注
太阳辐射监测卫星 (SOLRAD)	美国	11	1960.6~1976.3	监测太阳紫外线和 X 射线辐射
轨道太阳观测台 (OSO)	美国	8	1962.3~1975.6	观测太阳紫外和 X 射线 γ 射线辐射, 研究太阳结构、动力学、化学成分以及太阳活动的长期变化和快速变化
行星际监测站 (IMP)	美国	10	1963.11~1973.10	由十颗探险者卫星组成
国际辐射研究卫星 (IRIS)	欧洲空间局	2	1967.5, 1968.5	研究太阳和辐射
宇宙号 (Kosmos)	苏联	宇宙 166、208、215、230、336 等		宇宙 166、230 号为太阳观测卫星; 宇宙 208 号观测恒星 X 射线; 宇宙 215 号为紫外线和 X 射线观测卫星; 宇宙 336 号有射电天文观测实验
国际宇宙 (Intercosmos)	苏联/东欧	17	1969.10~1977.9	其中国际宇宙 1、4、7、9、11、16 号观测研究太阳紫外线、X 射线及其对地球的影响
预报号 (Прогноз)	苏联	6	1972.4~1977.9	用以监测太阳活动和研究日地关系, 并考察行星际物质
太阳卫星 (たこよう)	日本	1	1975.2	观测太阳辐射和电离层的卫星
国际日地关系探险者 (ISEE)	美国 欧洲空间局	2	1977.10	ISEE-1 由美国宇航局, ISEE-2 由欧洲空间局同日发射
天空实验室 (Skylab)	美国	4	1973	实验性的载人轨道空间站, 站上阿波罗望远镜装置是一组观测太阳的仪器

续 表

系列或卫星名称	发射的国家或组织	已发射数目	发射时间	简 注
轨道天文台(OAO)	美国	3	1966.4~1972.8	以紫外线和X射线观测恒星、星系和其他天体以及星际气体。OAO-3被命名为哥白尼卫星
射电天文探险者(RAE)	美国	2	1968.7 1973.6	即探险者38、49号,进行射电天文研究,特别是有关宇宙射电源的辐射频率、强度和方向观测
小型天文卫星(SAS)	美国	3	1970.12~1975.5	SAS-A、B、C分别为探险者42、48、53号。SAS-A又名“乌呼鲁”,是X射线天文探测器;SAS-B为 γ 射线天文探测器,SAS-C观测天体X射线
特德-1A(TD-1A)	欧洲空间局	1	1972.3	用于观测太阳 γ 射线,以及宇宙中各天体,银河系和银河系外的辐射
荷兰天文卫星(ANS)	荷兰/美国	1	1974.8	观测天体紫外线和X射线的荷兰第一颗天文卫星
羚羊5号(Ariel-5)	美国/英国	1	1974.10	用以测量非太阳X射线源光谱偏振和脉冲特性
宇宙线观测卫星-B(COS-B)	欧洲空间局	1	1975.8	携带一架大型 γ 射线望远镜
王冠-2B(D-2B)	法国	1	1975.9	研究太阳和星体的紫外辐射
信使-3(Signe-3)	法国/苏联	1	1977.6	进行 γ 射线、X射线和太阳紫外线观测
高能天文台(HEAO)	美国	3	1977.8 1978.11 1979.9	研究脉冲星、黑洞、类星体等各种宇宙天体辐射源的X射线、 γ 射线和宇宙线。其中HEAO-3又称为爱因斯坦卫星

事。早期主要对太阳的 X 射线进行观测。自从 1962 年 6 月美国麻省理工学院研究小组第一次发现来自天蝎座方向的强大 X 射线源后,非太阳 X 射线天文学进入一个新的发展阶段。七十年代以来,发射一系列专门研究 X 射线的天文卫星(如小型天文卫星系列)(见表 1-6),观测到许多先前不知道的宇宙 X 射线源,使 X 射线源的数目从十几个猛增到一千多个。

X 射线望远镜不同于光学望远镜,所以使用的仪器及方法有所不同。探测软 X 射线用薄窗正比计数器,常用铍做窗材料。铍窗的密封性能好,能保证仪器工作稳定,但铍窗的厚度仍然限制着计数器对更低能量 X 射线的灵敏度。探测软 X 射线一般采用有机薄膜窗的计数器,但有机薄膜窗的气体密封性不好。近年来在空间探测中,发展了一种自动调节的流气技术,保证计数器管内维持一定气压,使仪器处于稳定可靠状态。不过它的制造工艺和使用条件都较为复杂。

在非太阳 X 射线源的探测方面,为提高灵敏度,常常采用大面积薄窗正比计数器,如美国小型天文卫星“自由号”曾使用面积达 840 厘米²,厚仅 50 微米的铍窗正比计数器。在高能天文台 1 号使用面积达 8,800 平方厘米铍窗正比计数器。随着 X 射线能量的提高,探测 60 千电子伏以上高能量探测,则须用闪烁计数器。

正比计数器和闪烁计数器本身均有个缺点,它没有任何成像和定向功能。为证认 X 射线源和精确定出它们在空中的方位,一般在计数器前部加上准直器。目前是用板条式准直器和调制准直器定方位。前者是用铝片做成栅格筒状物,置

于计数器窗口前，以限制探测器视场。调制准直器它是在计数器前精密地、有规则地排列数层终栅，通过对X射线源扫描所得到的流量变化的信息，而定出源的位置和大小。

实验X射线天文学突出一个成就，制造一种使天体X辐射聚焦成像的X射线望远镜。利用X射线在非常倾斜的掠射角下将产生全反射的原理，制成掠射X射线望远镜。按照制作工艺来划分，X射线望远镜的研制已经历三代。第一代是铝制的镜面，效率较低，仅为1%；1965年制成第二代镜面是在光学抛光的不锈钢模上电铸镍，效率提高20%；第三代镜面一个是利用石英作镜面材料，另一个是由两套同轴共焦系统进行套迭组成。镜面由铝制作，表面镀镍磷合金，它效率高、分辨率好。在天空实验室的望远镜装置上使用。不过制作X射线望远镜，尤其需要制作口径大，质量高的望远镜。

对于X射线视亮度比较强的太阳，还有的使用X射线针孔成像方法测量。这种方法不适合宇宙X射线的探测。

γ 射线望远镜：这种望远镜也是和X射线望远镜一样利用闪烁计数器探测低能 γ 射线，鉴于 γ 射线源背景辐射较强，利用空间探测的闪烁计数器，都需采取主动和被动式屏蔽和准直器等措施，并借此取得定出 γ 射线源的位置。

另一种广泛使用的探测器是半导体探测器。它主要优点是能量分辨率高，可用于 γ 谱线的测量。如果能量高于10兆电子伏的 γ 射线探测，则使用火花室。火花室是利用气体火花放电的粒子探测器。它由若干金属板组成，室内充满一个大气压的氦氖混合气体。当一个带电粒子入射后，火花室内

气体被电离。同时火花室与计数器望远镜联系在一起，再配上照相装置或摄影装置，组成 γ 射线望远镜。

最早在 50 年代末期开始对太阳的 γ 射线的探测，到 1962 年月球轨道卫星“徘徊者”3 号和 5 号实验表明，存在宇宙 γ 射线背景辐射，以后经过轨道太阳观测台 3 号(OSO-3)，“阿波罗”15 号，小型天文卫星等均探测到 γ 射线辐射的存在。1969 年第一个探测到的地外 γ 射线谱线是由银心方向发射出的。对太阳的探测的重大成果是在 1972 年 8 月，太阳观测台 7 号卫星，以非常高的能量记录下完整的 γ 射线谱。

地球轨道天文望远镜也是光学望远镜。为了克服大气影响，人们利用航天技术，把地面用的光学望远镜，搬到大气层之外进行观测，被称为空间望远镜。六十年代开始人们便把望远镜安放在卫星、天空实验室等进行观测，随着航天飞机的出现，美国正研制新的地球轨道天文望远镜，称为宇宙望远镜，它的口径是 2.4 米反射镜，背面呈蜂窝状，在镜表面已成功地镀上铝膜和氟化镁保护层，两层厚度不到一根头发丝直径的千分之一。制成望远镜的镜长为 13 米，直径 4.7 米，总重达十二吨。1985 年将用航天飞机带出大气层，送入地球轨道，在距离地球 500 公里的高空绕地球运行。它的两侧装有象机翼一样长方形嵌板，嵌板里的数千个太阳能电池，把阳光转换成电能，供各种仪器使用。观测工作由地球无线电遥控进行。图片和资料用无线电信号发回地面。地面设有接收站，利用电子计算机再把无线电信号还原成图片和资料。

这种望远镜，能观测到最亮天体的亮度，比地面上最大的

望远镜所能观测到最暗的星，还暗五十倍，它能使人类可观测到的宇宙距离增加七倍。相当距地球 140 亿光年远的天体。使天文学家的宇宙视野扩大 350 倍，辨别天体细节的能力提高 10 倍。可以预见，天文学家将会发现更多的宇宙奥秘。

六、我国的成就

中国是世界上天文学发展最早的国家之一，几千年来积累了大量的宝贵天文资料，其中天文仪器在二十四史也有专门记载，如浑仪、简仪、仰仪等均有详细说明，特别是简仪，它的设计和制造水平在世界领先三百多年。以元代的《授时历》为标志，中国古代天文学发展到最高峰。明代停滞不前，西方天文学的传入，又有了进展，但当时的中国已沦为半封建半殖民地社会，现代化的天文台和观测手段，都没有建立和创制。1934 年在南京建立紫金山天文台，可是在解放前，我国的天文学得不到重视，更没有先进的仪器。中华人民共和国成立以后，仪器设备、台站建设，得到较大的发展。首先中国科学院接管了原有的各天文机构：将佘山观象台和徐家汇天文台先划归紫金山天文台领导，后合为独立的上海天文台；将昆明凤凰山观测站划归紫金山天文台领导。1958 年开始，在北京建立以天体物理研究为主的综合性天文台——北京天文台。1966 年起，建立了以时间频率及其应用研究为主的陕西天文台。1975 年起，把昆明凤凰山观测站扩建成大型综合性的云南天文台。在 1979 年安装了我国口径最大的 1 米反射望远镜，用

于恒星物理观测。

在 1958 年，在南京建立了南京天文仪器厂，成为我国制作天文仪器唯一的重要基地。我国许多台站均有我国自制的天文仪器。建厂以来，南京天文仪器厂研制成功和即将投入天文观测的天文仪器主要有：（1）人造天体观测仪器，包括有 1964 年安装紫金山天文台的 43/60/80 厘米折反射望远镜（图 1.4），各人造卫星观测站使用的光学打印经纬仪、大型人卫跟踪摄影机。（2）高精度测时、测纬仪器。有各项技术性能指标已达到世界先进水平的 I 型和 II 型光电等高仪，和安装于天津纬度站的照相天顶筒。（3）太阳观测仪器。如多波段太阳光谱仪，色球望远镜等。（4）恒星物理实测用的反光望远镜。口径 60 厘米反射望远镜。（5）反射镜材料上，选用



图 1.4 紫金山天文台 40/60 厘米特望远镜

陶瓷代替玻璃，1976 年研究成功口径 60 厘米陶瓷镜面。它的成本低、脆性小强度大，是制作科普小望远镜的好材料。目前正在制造 2.16 米的反射望远镜，使用的是线膨胀系数极小的微晶玻璃，不久的将来制成安装在北京天文台兴隆观测站。

我国的天文学具有悠久的历史 and 光荣的传统。为在本世纪末实现四个现代化，广大的天文工作者正日以继夜战斗，为在不远将来努力赶上和超过世界水平而努力。

第二章 反射望远镜的原理

一、望远镜的种类

反射望远镜以不可争议的优越性占据了后来居上的宝座，一直发展到现在种类繁多，各有千秋。望远镜的分类一般以创造发明者姓氏来命名的。现在分别介绍各种反射类型望远镜的简单原理。

(一) 牛顿式反射望远镜

这种望远镜由两块反射镜组成。一块是较大口径的凹面反射镜，叫做主镜。一块较小的平面镜，叫做副镜。再配目镜则可以进行观测。牛顿式望远镜光路结构如图 2.1-1 所示。来自天体的平行光束，投射到物镜上，经过反射后会聚到焦点 F 处。在 F 处可以看到天体的象。此焦点又称主焦点。一般大口径望远镜可以在主焦点观测。如美国帕洛马山 5 米望远镜，便在主焦点处进行观测。可是一般小口径望远镜，如果在主焦点处观看，由于人与物方向一致，不可避免地遮挡了光线，影响了效果。为避免这种情况，在主焦点前安放一个小平面镜，使它与主镜光轴之间夹角为 45° ，把光线转向 90°

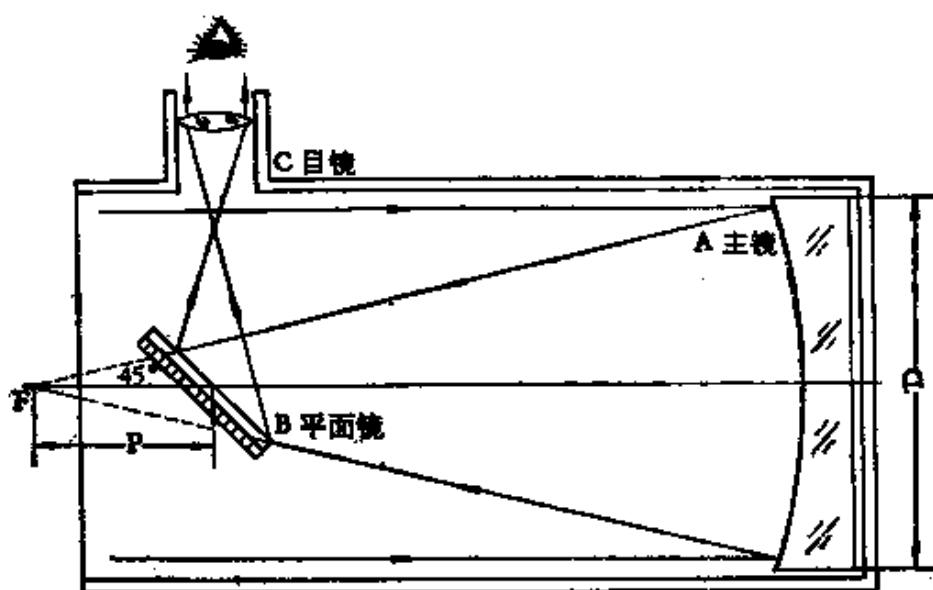


图 2.1-1 牛顿式反射望远镜

角，然后在镜筒一侧聚焦成象。同时在镜筒壁上开个孔安装目镜，通过目镜进行观测。它的焦点称为牛顿焦点。

这种望远镜不仅观测方便，而且终端设备不在入射光路中，不会挡光，可以安置较大的终端设备。另外这种望远镜结构简单，制造容易，视场较大，但它的镜筒较长，使用一个平面反射镜，因而光的损失稍多。天文台站目前使用较少，业余爱好者使用较多。

(二) 赫歇尔式反射望远镜

赫歇尔是世界上制作反射望远镜的大师，他一生中制作望远镜达数百架之多。他早年为音乐师，爱好天文。1773 年开始磨制望远镜，1781 年 3 月用自制望远镜发现了天王星。

他曾于 1787 年制成一架焦距 6 米的反射望远镜。1789 年又制成一架焦距 12 米、口径 122 厘米大型望远镜，镜面是用合金铸成的。在当时是世界上“大得骇人的望远镜”。

赫歇尔制的望远镜，是把物镜斜放在镜筒之中，当平行光线经镜面反射后，会聚在镜筒的一侧，以主焦点处聚焦成象。然后再用目镜进行观测。如图 2.1-2 所示。

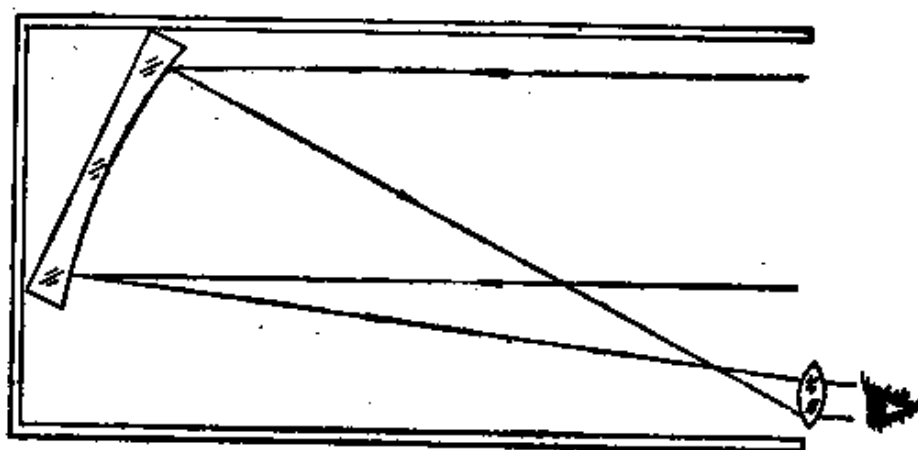


图 2.1-2 赫歇尔式反射望远镜

(三) 卡塞格林式反射望远镜

这是一种常见的反射望远镜，1672 年为卡塞格林所发明。又简称卡式反射望远镜。它是由两块反射镜组成的一种反射镜。反射镜中大的称为主镜，小的称为副镜。通常在主镜中央开孔，成象于主镜后面，它的焦点称为卡塞格林焦点。有时也在主镜前，即在卡塞格林焦点前，加上一个与光轴成 45° 角的斜平面镜，使象成在侧面，这种卡塞格林望远镜，又称为

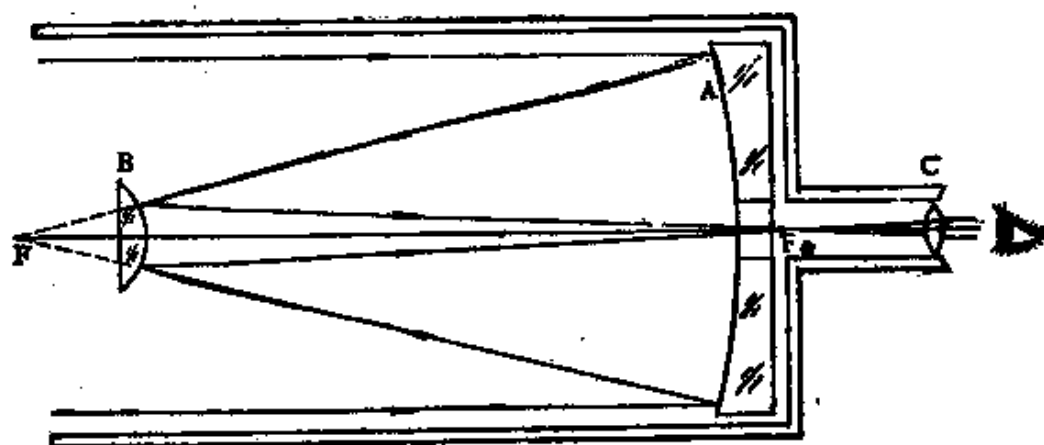


图 2.1-3 卡塞格林式反射望远镜

耐司姆斯望远镜。

图 2.1-3 是卡塞格林式反射望远镜的光路图。当来自天体平行主轴的光束，投射到主镜，再经主镜的反射，在镜前 F 处聚焦，但在光束尚未聚焦时，又受到在主焦点前的副镜再反射，使欲聚合的光束，再受到一定的发散，使光束重新在镜后 F' 处会聚，为使光线能够通过主镜，在主镜中心处开适当圆孔，让光束穿孔在镜后不远处聚焦成像。人们可以在主镜背后，对着星光方向观看，如同折射系统一样，观看时更方便。在卡塞格林焦点处也可以安置较大的终端设备，并不挡光，且观测操作均较方便。

卡塞格林式望远镜中，副镜不仅将象由 F 移至 F' ，而且将它放大，副镜的放大率通常为 2.5—5 倍，由于主镜的相对口径一般为 $1/2.5$ — $1/5$ 变卡塞格林望远镜后，相对口径常为 $1/7$ — $1/1.5$ 。（相对口径为口径与焦距之比。）

卡塞格林式望远镜的主、副镜面，可以有几种不同的形

式,光学性能也随之不同。经典的卡塞格林望远镜,主镜是抛物面镜,副镜为双曲面镜。这种望远镜象差较小,但制作困难。如果主镜和副镜接近双曲面镜,它可以使平行于光轴的光线经过镜面反射后消除一些象差,即近似地消除三级球差和彗差。因为是由克列基昂提出的、里奇制成的,按他们两人姓氏的第一个字母命名为 R-C 望远镜。另外还有如果主镜形状是球面的,为了消球差,副镜近似为扁球面。或者副镜是球面的,为了消球差,主镜近似椭球面。这些望远镜系统的优点是容易制造,调整简单,但象差较大。

总的来看卡塞格林式望远镜的优点较多:(a) 焦距长而镜筒短,得到倍率大,星象也增大。(b) 在拍照天体时,由于焦距长照片的比例尺度较大,所以星象清晰。(c) 望远镜相对口径小,因而彗差较小适合用于测量微小的角距离。(d) 用途广泛,望远镜既有卡塞格林焦点,可研究小视场内的天体,又有牛顿焦点,可拍照大面积的天体。在使用时二者取长补短可使望远镜开展多项工作。

(四) 格雷果里式反射望远镜

这种型式望远镜也是由两块反射镜组成的一种反射望远镜,1663 年为英国物理学家和天文学家格雷果里所发明。基本组成与卡塞格林式反射望远镜相似,如图 2.1-4 所示。它的大反射镜称为主镜,小的反射镜为副镜。一般主镜制成抛物面,副镜则制成椭球面,而把副镜的位置安放在主镜焦点 F

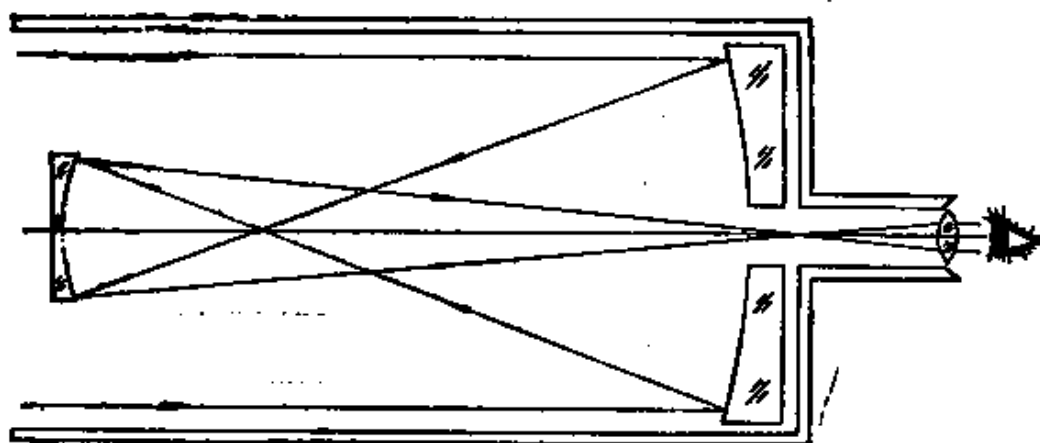


图 2.1-4 格雷果里反射望远镜

之外，并使光线经过副镜反射后，在主镜的镜后聚焦 F' 处成像。同样主镜的中心处，要开适当的圆孔，使光线穿过。 F' 焦点称为格雷果里焦点。

这种望远镜存在一定的象差。又由于望远镜中的主、副镜之间的距离较大，镜筒制作时较长，而光学性能与相应的卡塞格林式望远镜相比则差不多，所以，一般反射望远镜很少采用这种光学系统。但现代有些太阳望远镜也采用这种系统，因为可在主焦点处安置倾斜光栏，把大部分光线反射到镜筒之外，减少太阳辐射对成像质量的影响。

（五）折轴反射望远镜

折轴反射望远镜是使光线聚焦时，沿轴射出镜筒外部。很象卡塞格林式望远镜，不同的是它加入了一个平面反射镜使光偏折侧射。此镜可以移动以补偿望远镜运动改变光的方

向,使光束保持固定位置,以便观看。这种望远镜的焦点称为折轴焦点。在焦点处也可以安置各种仪器,如摄谱仪、光度计等。

(六) 折反射望远镜

1. 施密特式奇怪的镜片

1931 年一位失去右手的德国光学家 B. V. 施密特,发明别具一格的折反射望远镜。这种望远镜的主镜是一个凹球面反射镜,另一块是接近平行平板的非球面薄透镜。又称改正透镜。透镜的一面为平面,对向光线,另一面磨成奇特的形状,使中心区与边缘区的曲率不同,安放时放在主镜的曲率中心处,即球心的位置。利用改正镜与球面反射镜巧妙的配合,可以消除主镜造成的球差,同时也较好地消除轴外象差。如图 2.1-5 所示。

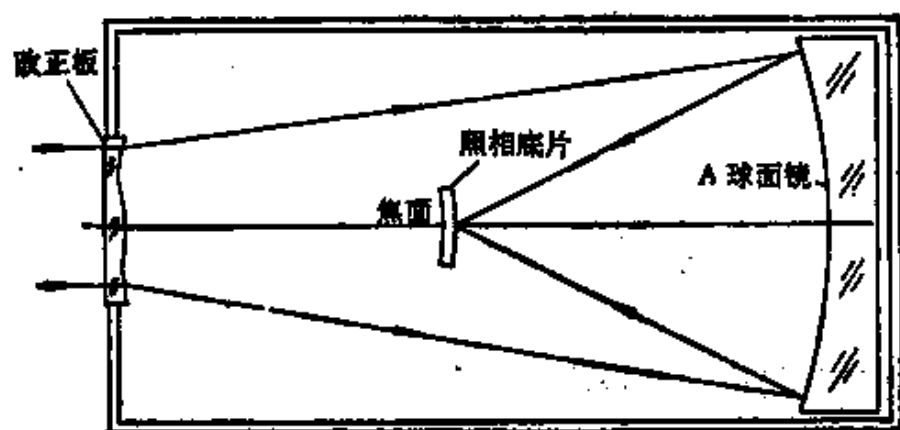


图 2.1-5 施密特折反射望远镜

施密特望远镜的优点是：光能损失少，改正透镜比折射望远镜薄，制作材料容易解决。口径可以做得较大。在口径和焦距相同的情况下，施密特望远镜比其他望远镜有更大的清晰视场，适于拍摄大面积的天区照片，尤其对暗弱星云的拍照，更为突出，被人们誉为“巡天警察”。不过它改正镜的非球面形状比较特殊，加工比较困难。拍照天体时，把底片放在焦点M处，但它焦面是弯曲的，所以底片必须弯成和焦面相符合，这样克服了场曲，可得到良好的天空照片，但对使用玻璃底片带来不便。再有望远镜的镜筒长度比主镜焦距相同的反射镜长，约为焦距的两倍。增加造价。

施密特制作的第一台望远镜，口径为 36 厘米，能在 16 平方度范围内成象。现在世界上最大的施密特望远镜在德国陶登堡天文台，是 1960 年制造的，改正透镜口径为 1.34 米，主镜口径为 2 米，焦距为 4 米，视场为 $3^{\circ}4' \times 3^{\circ}4'$ 。世界上主镜口径大于 90 厘米以上有十几台(详见表 1.3)。

2. 马克苏托夫镜片巧妙组合

1940 年初苏联光学家马克苏托夫发明一种新型折反射望远镜。马克苏托夫望远镜和施密特望远镜类似，这种望远镜的主镜也是一个凹球面反射镜，副镜是由一个特殊的月牙状透镜，又称弯月形改正透镜。改正透镜是球面的，它的两个表面的曲率半径相差不大，但有相当大的曲率和厚度。适当选择透镜两面的曲率半径和厚度，可以使弯月镜产生足以补偿凹球面镜的球差，同时又满足消色差的目的。在整个系统

中适当调节弯月透镜与球面镜之间的距离，就能够对彗差进行校正。

如图 2.1-6a 所示为马克苏托夫式折反射望远镜的光路图。弯月形透镜安放在主镜焦点之内。当平行主轴光线射到

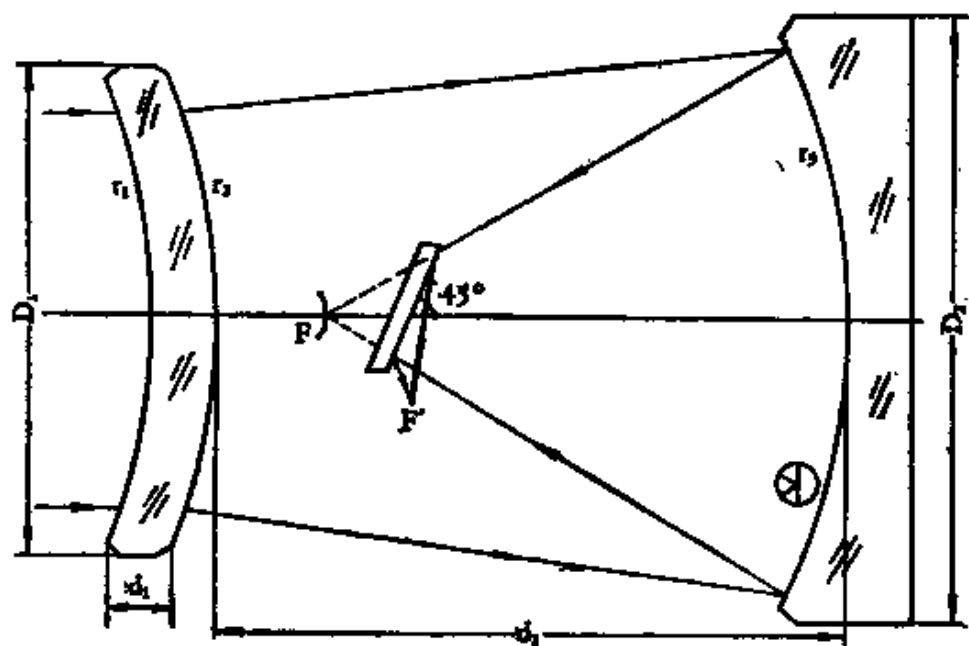


图 2.1-6a 马克苏托夫式望远镜

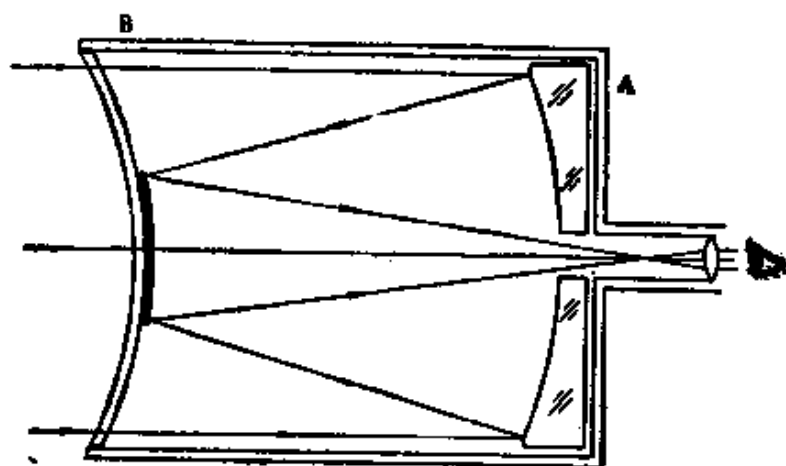


图 2.1-6b 马卡式折反射望远镜

弯月形镜时,光线穿镜而过并发生折射,但光线折射的数值恰好等于主镜产生的球差数值,二者巧妙组合,消除了象差。但因场曲较大,拍照时的底片也必须采用和焦面相符的曲面底片。

有时为观看方便,在弯月形镜后,安放直角棱镜或倾斜平面镜,把天体的象转向到筒壁一侧,在筒壁上开孔观看。有时在应用中,把弯月形镜第二面的中央部分磨成曲率半径更长的球面,或者单独胶合一块反射镜面,再者将弯月形镜中央部分镀铝作为反射面,再把主镜中央区域钻个适当圆孔,则构成马克苏托夫——卡塞格林式望远镜,简称马卡式望远镜(如图 2.1-6b)。

马克苏托夫望远镜主要优点:(a)系统中的所有表面是球面的,容易制造;(b)在同样的口径和焦距情况下、镜筒较短。缺点是:(a)和相同的施密特望远镜比较,视场稍小;(b)弯月形透镜的厚度较大,一般为口径的 $1/10$,对使用的光学玻璃要求较高,因此,限制了口径的增大。目前世界上最大的马克苏托夫望远镜在苏联阿巴斯图马尼天文台,弯月形镜为 70 厘米的口径,球面镜为 98 厘米的口径,焦距 210 厘米。

二、几何光学成象

(一) 光的传播

白天看到光芒四射的太阳,夜晚看到满天的繁星。你想

到没有，它们离我们之间多么的遥远啊！千山万水已远远无法形容我们和它们之间的距离。只能用浩瀚无边的宇宙空间来描述了。人们已经知道地球离太阳的距离是 1.5×10^{11} 米。而最近的恒星大约还要远三十万倍。我们能在如此遥远的地方相识他们，要感谢“飞驰而来”的光束，传来丰富的宇宙信息。由此可见，光确实能够通过巨大的距离，也确实能在广阔的空间自由传播。

地面上许许多多望远镜，收集着“飞驰而来”的宇宙之客，殷切地向着这些来客，探询着宇宙的奥秘。这些光束怎样通过这广阔的空间到我们的故乡来呢！这首先要认识光的传播规律。

光的传播规律，归纳起来，有如下几种情况：

(1) 光在同一介质中，沿直线传播。

(2) 光在非均匀介质中，一般不沿直线传播。

(3) 光若从一种介质进入另一种介质时，在两个介质的分界面上，被分为两部分；第一部分光被反回原介质中，这种现象叫光的反射。第二部分光由第一种介质，进入第二种介质，光不沿直线传播，而发生偏折。这种现象叫光的折射。

为了便于在几何光学中，作定量分析，引入“光线”这一几何概念。用“光线”表示的几何线，代表光向空间传播的路径和方向。一个点光源能向四周的任何方向传播出去无限条光线。（如图 2.2-1a）。若许多“光线”集合在一起便称为光束。例如从点光源 O 射出，且在张角为 α 角空间内的光线，构成锥形光束（如图 2.2-1b）。如果光源在无穷远，例如星体发射

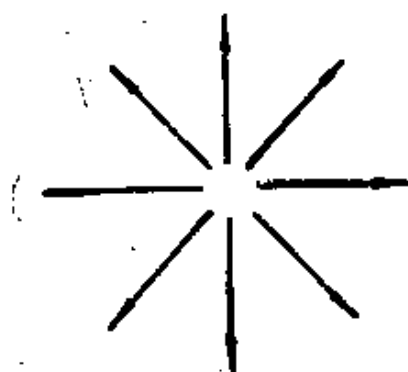


图 2.2-1a 点光源的传播

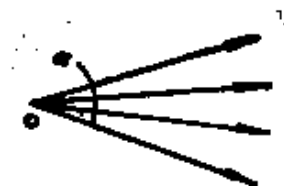


图 2.2-1b 光束的结构

光，或者利用其他方法，使光线彼此平行，那么这些光线就构成了平行光束。

(二) 两个定律

图 2.2-2 表示出光线从一种介质进入另一种介质时的情形。

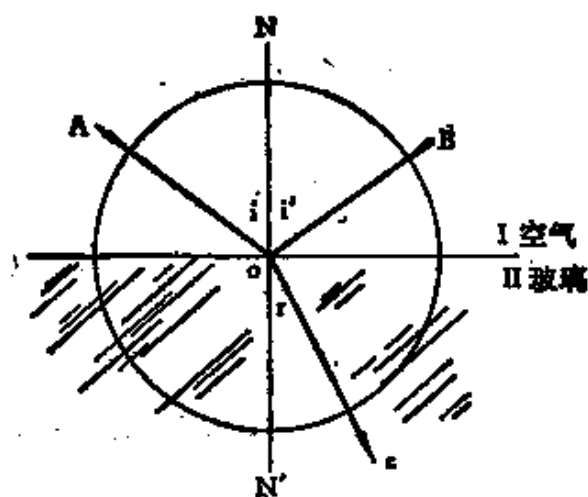


图 2.2-2 光线通过两种介质

图中入射光线 AO ，由空气入射到分界面的 O 点上，它被分为两条光线，一条 OB ，它从分界面被反回原介质的空气中，这条光线即为反射光线。另一条 OC ，通过分界面，由第 I 种介质空气，而进入第 II 种介质玻璃中。它的方向发生偏折，这条光线称为折射光线。

为表达方便，人们规定：入射光线和界面的交点 O 叫做入射点。通过入射点，垂直于界面的直线 NON' 叫法线。入射光线跟法线的夹角 $\angle AON(i)$ 叫做入射角。反射光线与法线之间的夹角 $\angle BON(i')$ 叫做反射角。折射光线与法线的夹角 $\angle CON'(r)$ 叫做折射角。

通过实验，研究出反射光和折射光的规律：反射定律和折射定律。

1. 反 射 定 律

(1) 反射光线跟入射光线和法线在同一平面内；反射光线与入射光线分别位于法线的两侧。

(2) 反射角等于入射角。即 $i = r$ 。

2. 折 射 定 律

(1) 折射光线跟入射光线和法线在同一平面内；折射光线和入射光线分别位于法线的两侧。

(2) 入射角的正弦跟折射角的正弦之比，对于一定的两种介质来说，总是一个常数 n 。

用公式表示

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1} \quad (2.2-1)$$

式中 n 称为折射率。

如果某种介质对于真空的折射率，称为绝对折射率，简称折射率。如果光线由第一种介质进入第二种介质时，这个常数叫做第二种介质对第一种介质的折射率。又称相对折射率。记作 $n_{2,1}$ 。

从实验知道，某种介质的绝对折射率 (n) 等于光在真空中的速度 (C) 跟光在那种介质中的速度 (V) 之比。即：

$$n = \frac{C}{V} \quad (2.2-2)$$

可是光在真空中传播的速度和在空气中传播的速度相差很小，认为二者相等，因此公式可写作：

$$n_{\text{空气}} = \frac{C}{V_{\text{空气}}} = 1$$

通常认为空气折射率为 1。

光在玻璃中传播速度较慢，它相当于在真空中传播速度的 $\frac{1}{1.5} C$ 。所以，一般玻璃折射率为 1.5。由于介质不同，折射

表 2-1 几种介质的折射率

介 质	折 射 率	介 质	折 射 率
空 气	1.0003	冕牌玻璃	1.52
水	1.333	重火石玻璃	1.67
酒 精	1.362	硫化锌光学薄膜	2.35
二硫化碳	1.632	冰晶石光学薄膜	1.35
熔凝石英	1.46	氟化镁	1.38

率也不同(参看表 2-1)。

三、天文望远镜的元件

天文望远镜的光学系统,无论是古代或现代;无论是小型或巨型,都是用反射镜或透镜等光学元件组成,不同种类的望远镜,可以看作是不同光学元件的有机组合。

(一) 球 面 镜

反射望远镜多借助于球面镜的反射光而成象。

反射镜的反射面,如果是球面的一部分,这样的反射镜叫做球面反射镜。如果使用球的内表面作为反射面的叫做凹面镜,简称凹镜,如果使用球的外表面作为反射面的叫做凸面镜,简称凸镜(如图 2.3-1a, b)。

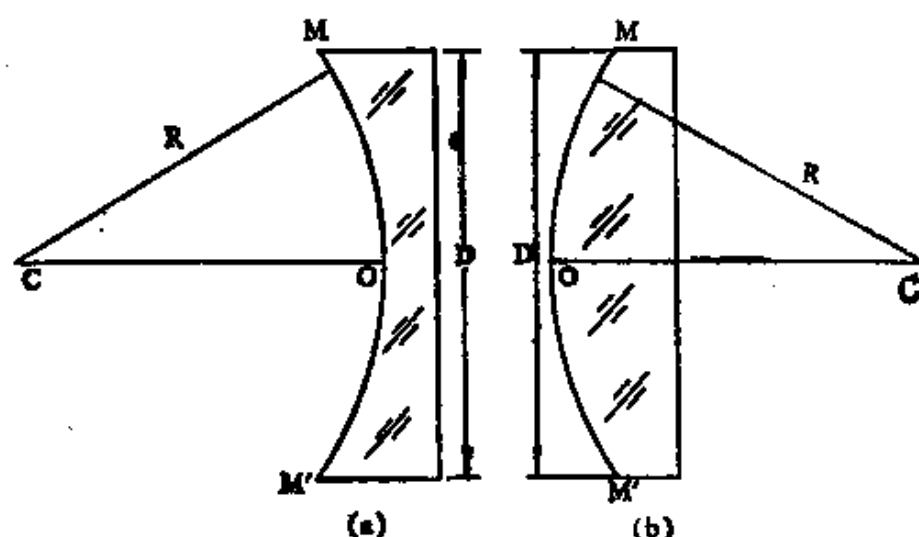


图 2.3-1 凹凸球面反射镜

每种镜面有其自己独特功能。

1. 凹面镜的会聚

让我们先做一个简单的实验：取一块凹面镜，把镜面对着太阳，再拿一张白纸作屏，在镜前来回移动，耐心地寻找小亮点，当发现白纸上出现最小亮点时，表明太阳光已被会聚。此时把纸固定一段时间，纸便很快地由亮点开始，冒烟而燃烧。这说明凹面镜有会聚光的本领。

进一步研究凹面镜的聚光情况，可知当逐渐改变点光源与凹面镜的距离时，观看到不同情况。如图 2.3-2 所示。

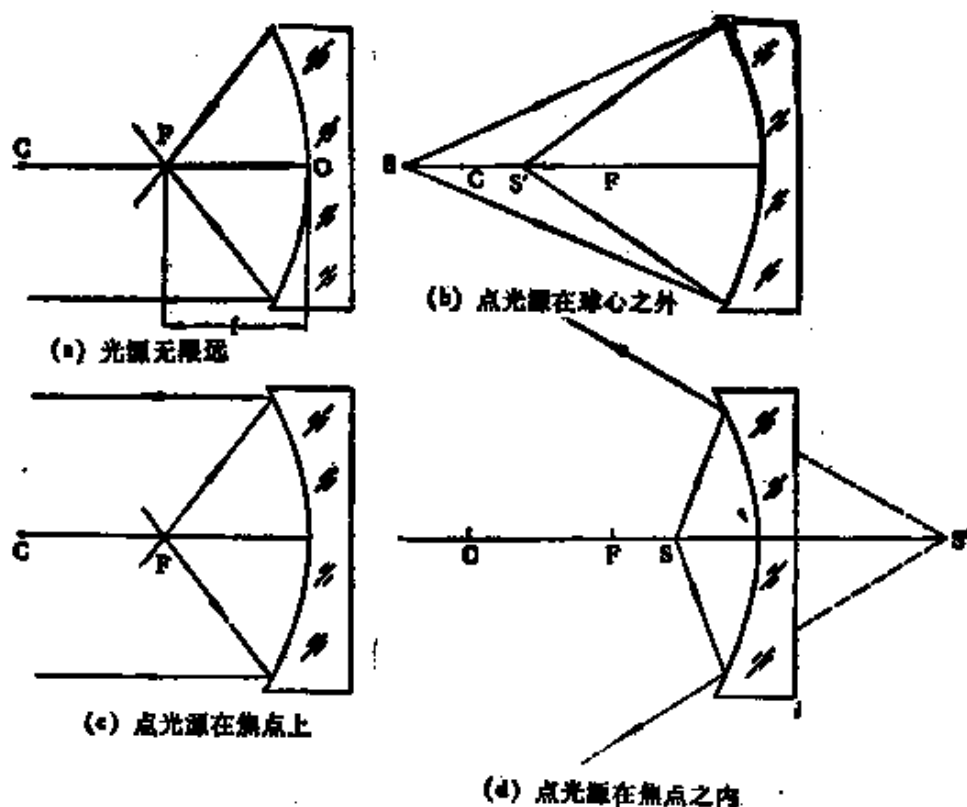


图 2.3-2 凹镜聚光

从(a)(b)来看,光线经过凹面镜反射后,均有不同程度的会聚,特别是(a)中,平行光束(即无限远的星光)经凹面镜反射后,会聚到一“点”F处。这点F称为焦点。因为,光线是真正的会聚,又称为实焦点。由焦点F到镜顶O之间距离称为焦距。用 f 表示。凹面镜只有一个实焦点和一个焦距。

从(c)来看,光源在焦点上,经凹面镜反射后,光线平行于主轴。这个现象被广泛地利用。用这个方法可以人为地制造平行光,并且这种平行光不受损失,它对紫外光,可见光,红外光均适用。

2. 凸面镜的发散

如果取一个凸面镜,让平行光线射到凸镜上,光线经凸镜反射后,不仅找不到会聚点,相反却光斑加大,反射后成为发散光束(如图 2.3-3a)。精心研究这些发散的光线,发现这些反射光线反向延长,则在镜后近似地相交F点。从镜面看去,光线好象是从F点发出的,这点F称为凸镜焦点。由于光线并没有穿镜而过,真正在F处聚焦,这样的焦点称为虚焦点。凸镜只有一个虚焦点。从镜顶O点到F之间的距离称为凸面镜焦距 f 。

图 2.3-3b 中,当入射光线不平行光轴,而角度较大地远离光轴时,经过凸镜反射后,光线有所会聚。这也是凸面镜的特性。在实践中应用较广。

凹镜能聚光,凸镜能发散,这两个似乎矛盾的特性,在光学系统中,却被很好地利用。取其长补其短,相互配合成为有

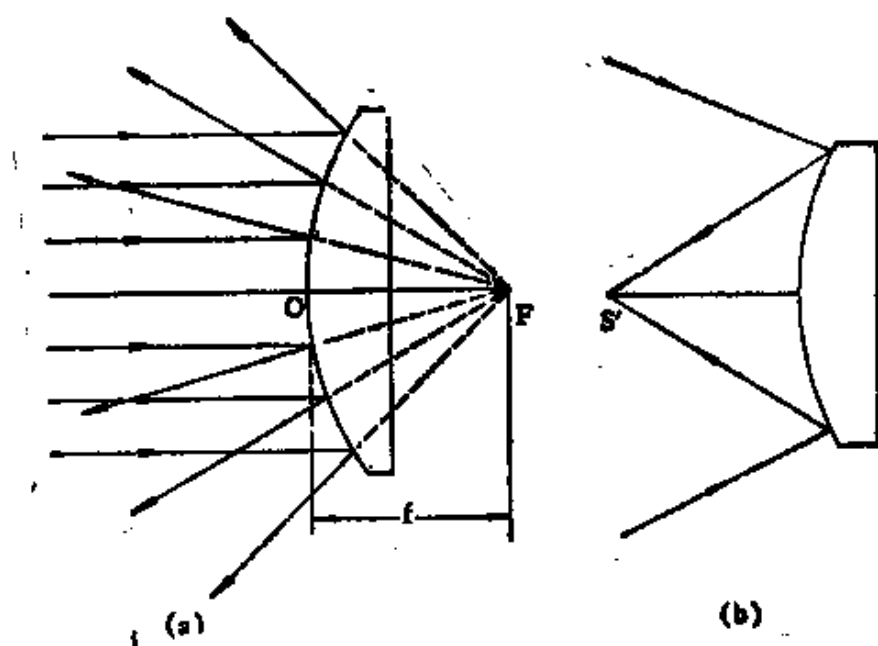


图 2.3-3 凸镜的焦点

机整体。图 2.3-4 中，即平行光线经凹面镜反射后，应在 F 处聚焦；但未聚焦前放置一个凸面镜，则使本来要会聚的光线，经凸面镜的发射作用，使光线又返回来，经过一段距离后，又重新会聚，从而延长了凹面镜的焦距。在这个过程中，凹

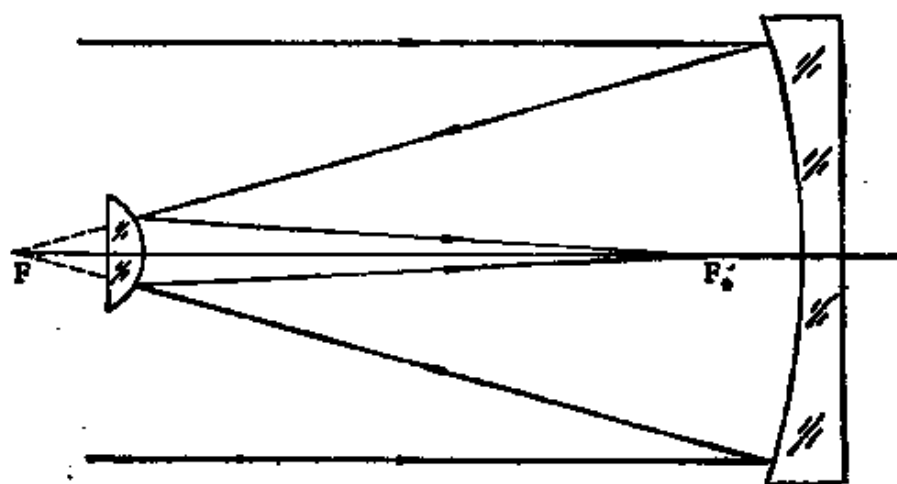


图 2.3-4 凹凸镜的组合

面镜的聚光作用起主导作用,凸面镜的发散作用起辅助作用。
二个镜子相辅相成形成完整光学系统。

(二) 透 镜

具有一定几何形状,能使光线直接通过的透明体叫透镜。
透镜的两个侧面都是球面,或者其中一个侧面是平面。若中
央厚而边缘薄的透镜叫做凸透镜;中央薄而边缘厚的透镜叫
凹透镜。如图 2.3-5 所示。

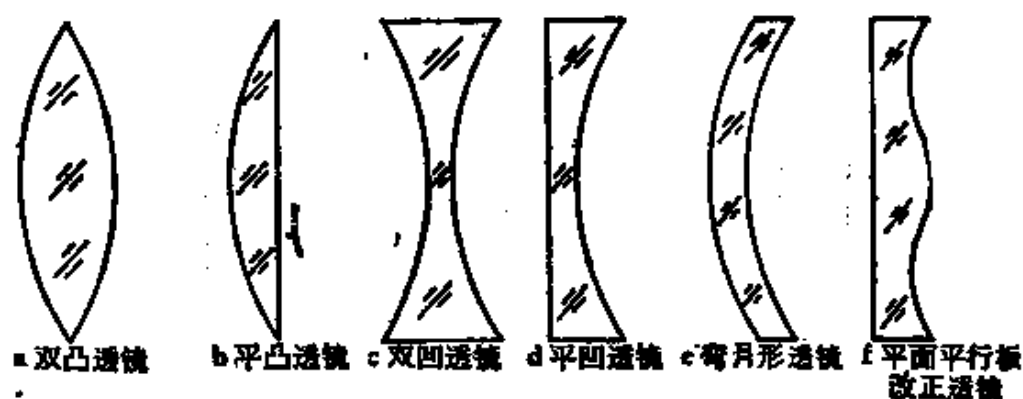


图 2.3-5 六种透镜

1. 凸透镜的聚光作用

凸透镜同样也有聚光的本领。

当一束平行于光轴的光线射到透镜上(如图 2.3-6a),光线通过透镜,而在镜后会聚在主光轴一点 F_1 处。这点叫做凸透镜的焦点。光心到焦点的距离 OF_1 叫做焦距。当“点”光源位在图 2.3-6b 时,光线经过透镜后,变成平行光,这个位置

也称焦点。为了区别起见,图 a 时的焦点称为“第一焦点”,与此相应的焦距称为“第一焦距”。图 2.3-6b 的焦点称为“第二焦点”,它相应的焦距称为“第二焦距”。这两个焦点,都是光线真正的会聚,所以均为实焦点。并且: $f_1 = f_2$, 也就是这两个焦点在透镜的两边的位置是对称的。

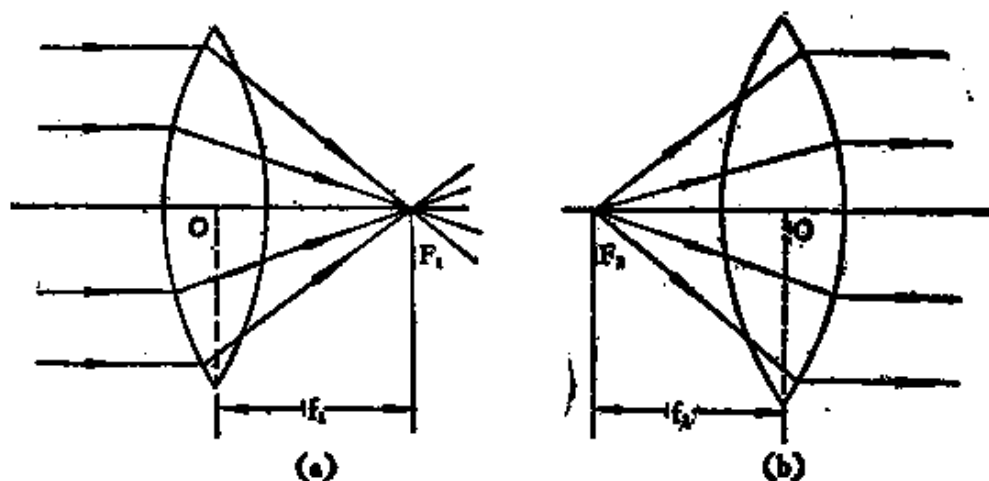


图 2.3-6 两个焦点和焦距

2. 凹透镜的发散

凹透镜与凸面镜特性一样,都有把光发散作用,如图 2.3-7 所示。

图中的发散光线,反向延长交于光轴上一点 F_1 , 此点称为凹透镜的焦点。由于凹透镜的焦点不是实际光线的真正交汇,因此叫做虚焦点。凹透镜也有两个焦点,图 2.3-7 中, F_1 为“第一焦点”,相应焦距 (F_1O) 为“第一焦距”,用 f_1 表示。 F_2 为“第二焦点”,相应焦距 (F_2O) 为“第二焦距”。用 f_2 表示。

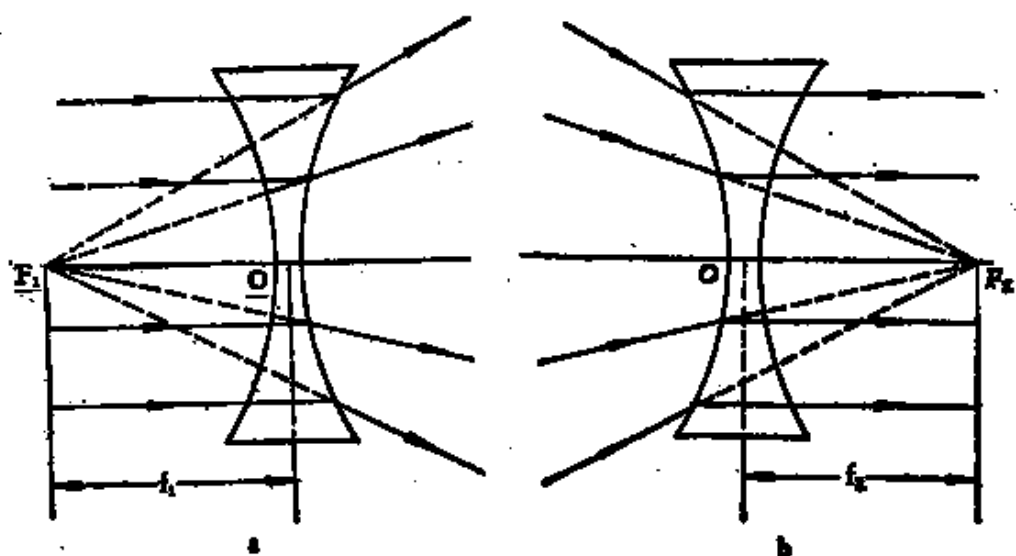


图 2.3-7 凹透镜的焦点和焦距

在天文望远镜中,凸透镜是折射望远镜的主要光学元件。凹透镜一般起辅助作用。而在反射望远镜系统中,折光系统起辅助作用。

四、近轴光学基本公式

(一) 来自天体的象

这里有两张图,你能看出它们有什么区别吗?

图 2.4-1a 是人们目视看到的北斗星,而图 b 却是用望远镜拍摄的北斗星。二者相比,同物不同景,细看又发现是异曲同工,景色一样,只不过上下颠倒,左右对调而已。所以这两张图,告诉我们天文望远镜,可以作为观测天体的仪器。因为它能把遥远的天体目标,通过望远镜而成象。尽管望远镜

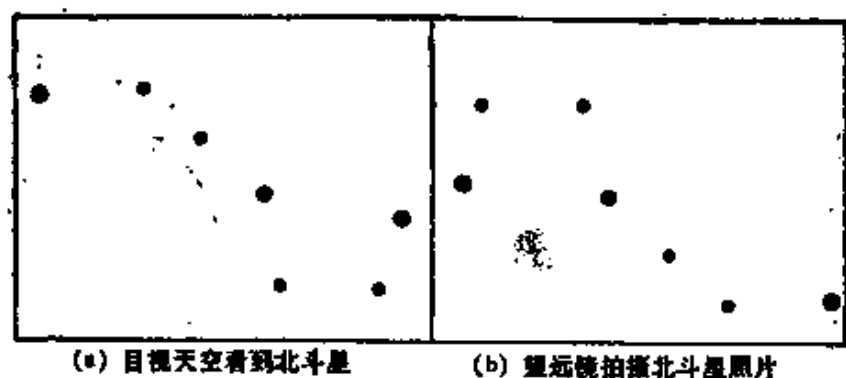


图 2.4-1 目视和望远镜拍摄的北斗星

种类很多,但不管那种望远镜,都是用物镜使天体成象的。这些象均成在焦点上或焦平面上。如果照相的话,把底片放在焦点上,就可以拍出逼真的天体象。如果用目视观测,望远镜物镜把天体照射在它上面的光线,集中到达人眼的视网膜上,看起来天体就变得亮多了。物镜愈大收集的光越多,看到星象就越亮。

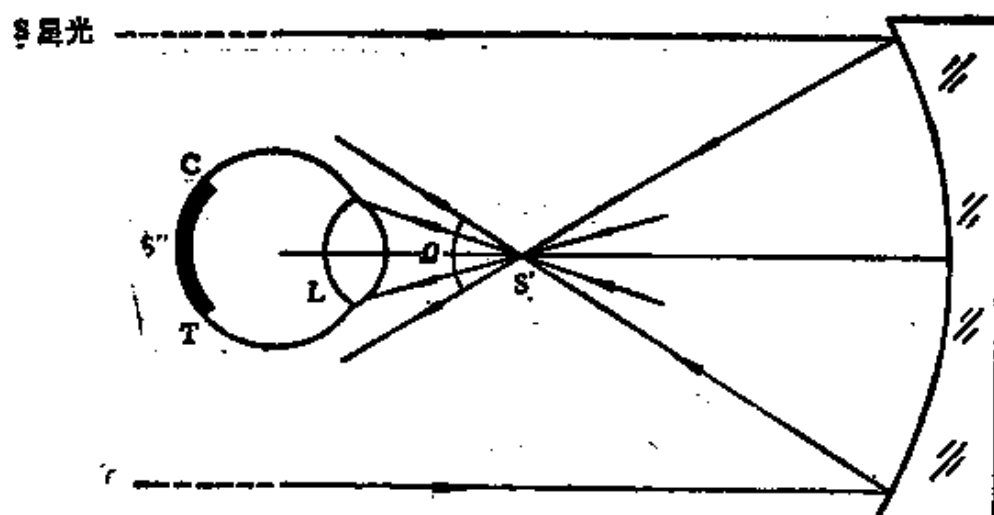


图 2.4-2 目视天体示意图

CT 视网膜 L 晶状体

图中 S 是代表遥远天体发出的光束。经过漫长的路途，被望远镜会聚在一起，即在焦点上会聚为 S' 。那么， S' 是 S 点的象。如果在 S' 处放一张白纸作屏，能清楚看到星光象，由于这个象是实在光线会聚，所以称为实象。用眼睛看去，人眼的水晶体，相当凸透镜的作用，结果使 S' 的光再次会聚，使其在视网膜上成象为 S'' 。这样我们看到， S'' 是 S' 的象，而 S' 即成为 S'' 的物了。但 S' 是 S 的象点，所以 S'' 也就是 S 的象点，只不过位在人眼视网膜上。这一系列成象均是光线的真正会聚，所以 S'' 的象也就是实象。我们之所以通过望远镜能看到象，原因也正在这里。不过这里的象与光源同认为是一个物，但它又有所不同，点光源可从任何位置看到，而象点 S' 被眼中瞳孔所限只能在有限的立体角 Ω 的可见区内看到。

下面进一步讨论望远镜成象原理。图 2.4-3 中，表示一个恒星发射至反射镜上的光。现在假设平行光束不沿着镜轴，而是与镜轴成一个角度 α 。根据反射定律：入射角等于反射角，作出几条光线，我们就可知道成象情况了。如图 2.4-3 所示，这些反射光线都通过一个恰好位于主焦点下方的小区域，即焦平面上。它和恒星分别位于轴的两侧。

虽然这些入射光线不是通过一个单一的点，通过精确作图，表明所有反射光线，甚至包括不在图面上的那些光线，确实都在这一点附近通过，因此 S' 点即是恒星的象点。

这样每个恒星经过望远镜物镜，均可在相应的位置上成象。这样我们从镜心看到几颗恒星的象，所构成的图样和这几颗恒星本身在天空所构成的图样是相同的。不同的是方向

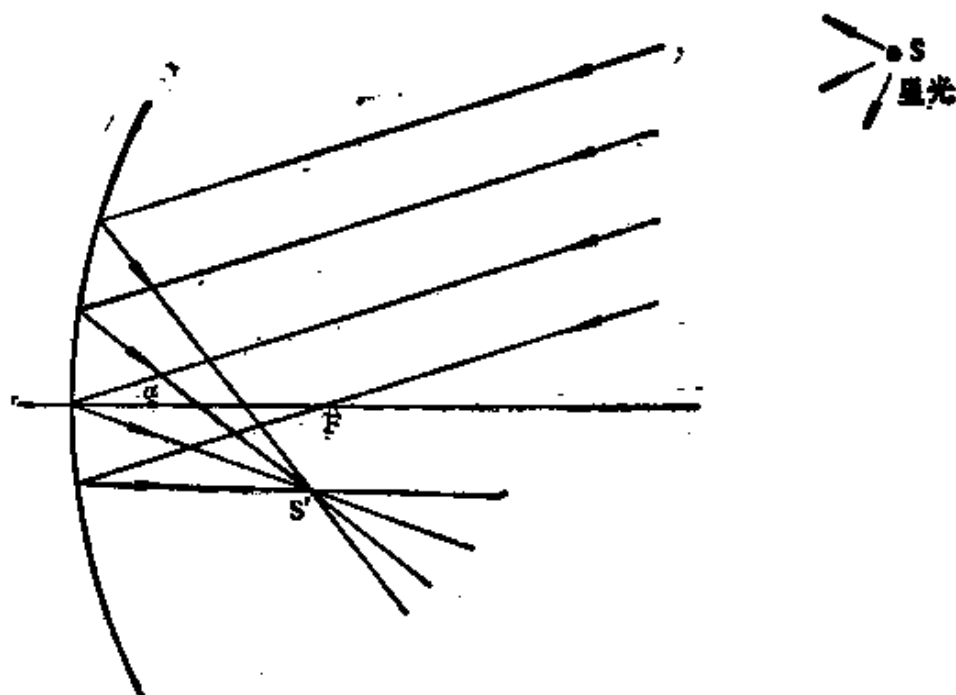


图 2.4-3 反射镜成像

相反。

(二) 凸镜状的眼睛

用眼睛看到物体是因为眼睛有着特殊机能。这要从眼睛构造谈起。

人的眼睛近似球状,它的平均直径是 2.5 厘米;外围有三层膜。如图 2.4-4。最外层是巩膜,它是坚硬而结实的膜。起到保护眼睛内部免受机械的损伤。在眼睛前部的一层巩膜,由于它是透明的,叫角膜。巩膜的其余部分是不透明的,一般是白色的,通常叫眼白。巩膜里面紧接着脉络膜,由

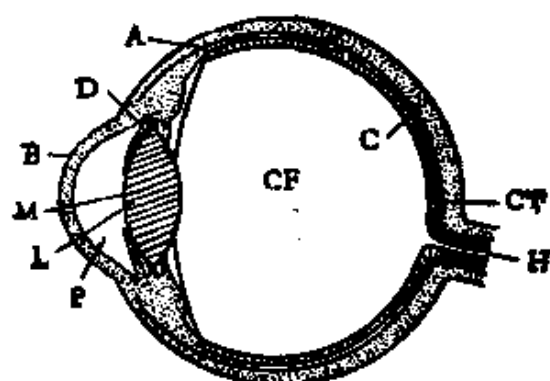


图 2.4-4 人眼的剖面图

A. 巩膜 B. 角膜 C. 脉络膜 D. 虹膜 M. 瞳孔 L. 晶状体 CT. 视网膜 P. 前房 H. 神经 CF. 玻璃体

供给眼睛营养的许多复杂血管组成。第二层膜在眼睛的前面部分叫虹膜。虹膜中间有一个圆孔叫做瞳孔。虹膜能够变形，从而改变瞳孔的直径。它能随着外界光亮的强弱自动调节瞳孔，控制进光多少。一般人眼在光亮照明下，瞳孔的直径缩小至 2 毫米。在微弱的照明下，瞳孔的直径可以扩大到 8 毫米。为此，古代天文学家，有的在观星前。在黑漆漆屋里，独自闭目静坐数小时，这样做目的是使瞳孔放大到最大程度，然后，观看星象时便可以看到更多更暗的星。

在脉络膜内表面上，有层网状膜或视网膜。视网膜布满整个眼底，不过它的前面部分除外。在这膜的后面，有连接眼和大脑的视神经进入眼中。视网膜基本上是视神经纤维的分支和尾部组成的，因而形成了眼睛的感光面。

在角膜和虹膜之间叫做前房，前房充满了水状体（前房液）。在眼睛里面紧接瞳孔之后的晶状体眼球，它是一种透明的弹性体，形如双凸透镜。

晶状体表面的曲率,由于四面紧贴着它的肌肉的作用,可以改变晶状体的曲率,就可以把不同距离上的物体的象,恰好引到视网膜上,这一过程叫做调节。晶状体后面的整个眼腔内,都充满了透明的凝胶状液体,形成了玻璃体。

从眼睛本身构造来讲,正是一个光具组。和照相机相似。晶状体和前房的折光媒质,以及玻璃体共同起了物镜的作用。使象成在视网膜的感光面上。象的清晰度是由眼的调节来校准的。例如,遥远的星体,由望远镜所成象 S' , 经过眼睛的调节,晶状体把光再次聚合,使其在视网膜上成了象。

(三) 物与象的转化的秘密

物与象是相对而言的,即某个光学系统所成的象,可以作另一个光学系统的物。利用物与象这一特点能制作各种光学仪器。

除实象之外,还有一种象称为虚象。所谓虚即是光线没有真正会聚成象。例如,凸面镜、平面镜、凹透镜等所成的象均为虚象。如图 2.4-5 所示。

从图上看,无论是平面镜还是凸面镜,用眼迎着反射光看去,似乎感觉反射光是从镜后 S' 点发来的,其实这是错觉,实际上光线并没有透过镜子射来,而是反射光线反向延长的结果,我们把这样的象叫虚象。即 S' 是 S 的虚象。一个光学系统的虚象,可以作为另一个光学系统的“物”。无论是“实象”或“虚象”,都可以相互转化。

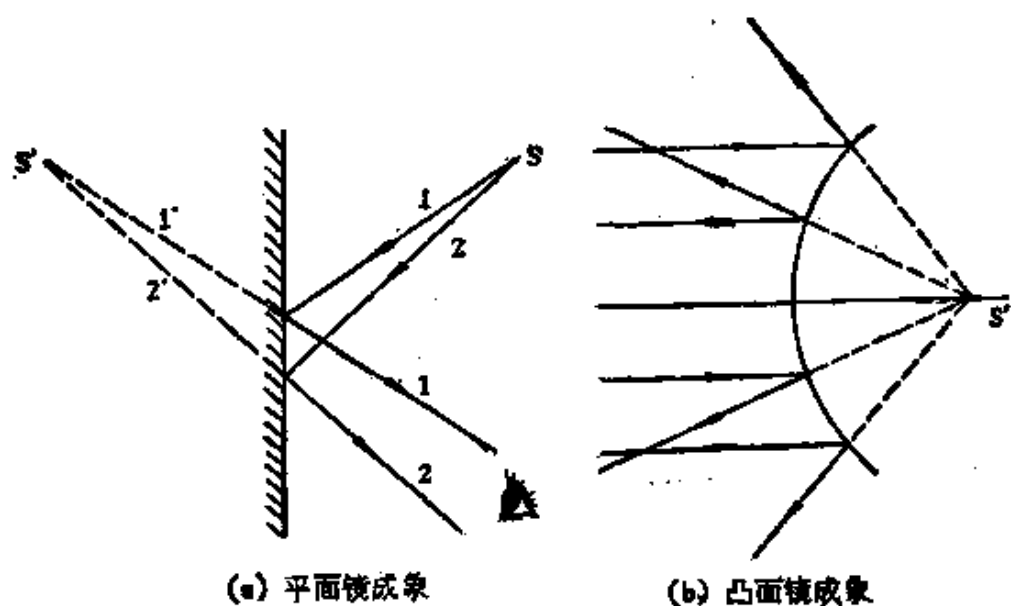


图 2.4-5 虚象

“物点”和“象点”都是抽象的概念。任何物体总是要有一定大小。任何物体都可以认为是由无数个排列在一起的“点”组成的。如果从每一点发出的光,通过受到光学系统作用以后,所有光线都会聚在象点上;而且组成全部象的诸象点排列,均与其相应的诸物点排列几何形状完全相同。这样的光学系统所成“物”与“象”关系称为理想光学系统。

(四) 近轴光学基本公式的运用

深入研究凹面镜成象情况,我们发现真正的理想光学系统是没有的。从物点发出的光,经球面反射后,光线并不真正交于一点。靠近光轴的光线,反射后与光轴的交点较接近焦点,远离光轴的光线,反射后与光轴的交点远离焦点。这样我

们可以找到入射光线的张角，这张角越小所得的象越集中在一点。因而把这种光线叫做近轴光线。就近似地认为，所有诸光线交于一点，即达到理想光线。如果光学系统满足这种条件的区域，称为近轴区域。我们在以后的讨论中，主要限于近轴区域问题。

1. 光路图及正负号的规定

光路图是用来表示“光线”经过的路程图。为了能画好图，有必要在画图时事先把线段和角度规定一套正负符号。现在介绍如下：

(1) 线段的正负

(a) 物点或象点的位置，以球面为顶点或其他指定点为起点，到光线和光轴的交点(即物点或象点)，向右为正，向左为负。

(b) 曲率半径，以球面的顶点为起点到球心，向右为正、向左为负。

(2) 角度的正负

(a) 光线与光轴的交角，从光轴起转向光线，顺时针为正；逆时针为负。

(b) 光线与法线的夹角，从法线起转向光线，顺时针为正；逆时针为负。

(c) 曲率半径与光轴的交角，从光轴起转向曲率半径，顺时针为正；逆时针为负。

例如：图 2.4-6 表示。

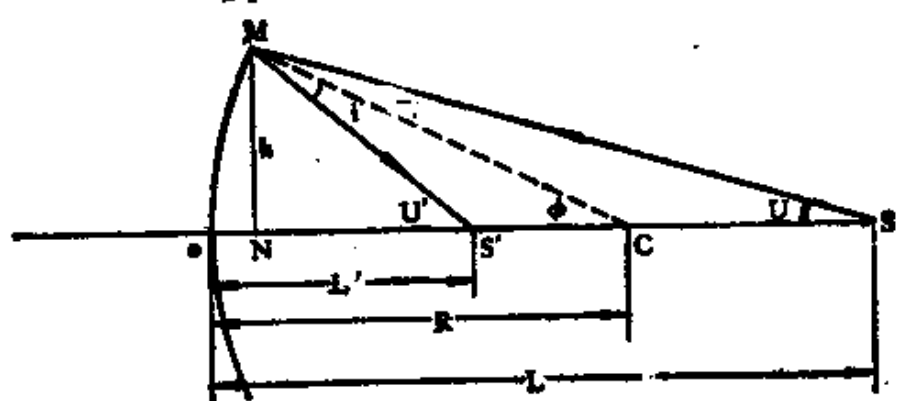


图 2.4-6a 反射系统符号标记

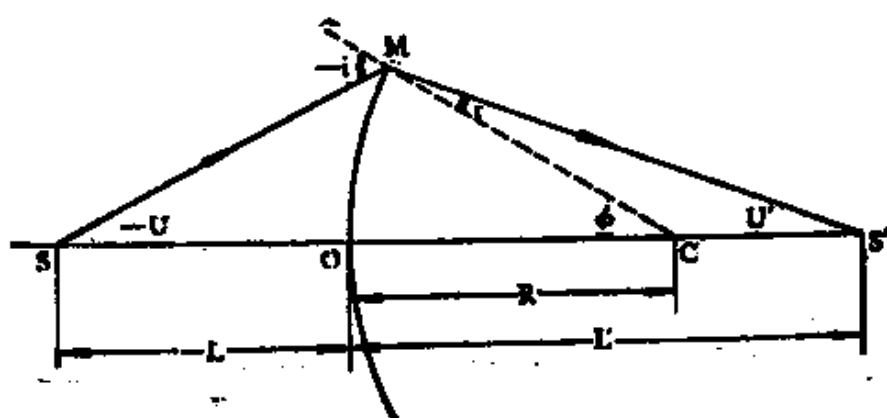


图 2.4-6b 折射系统符号标记

2. 反射镜成像作图法

反射镜成像用光路图表示，便能直观地看出物与象的关系。

如作出光源在 P 点的象最简单的方法，只要画出两条光线就够了。由两条光线的交点决定象的位置。

这两条光线从下面选定

- (1) 通过球心的光线 PC ，反射后，仍由原方向返回。
- (2) 平行于主轴的光线 PM ，反射后通过焦点 F 。

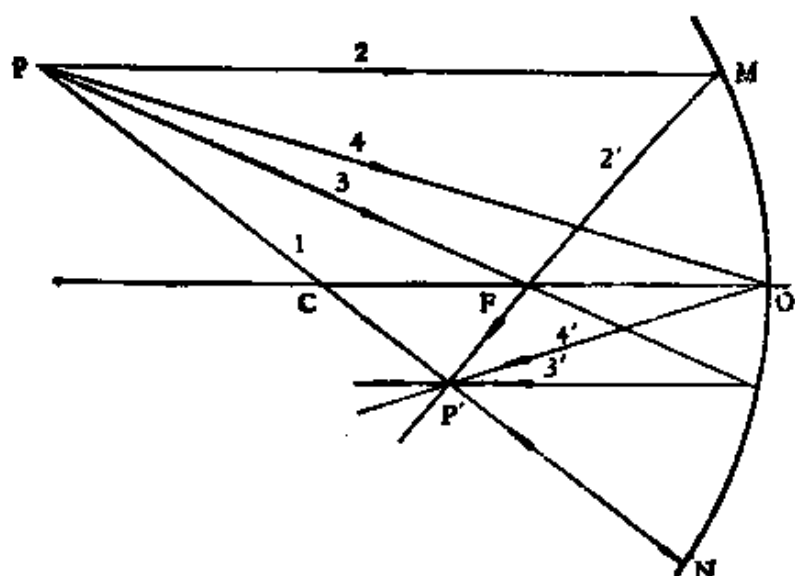


图 2.4-7 凹面镜成像示意图

(3) 通过焦点的光线 PN , 反射后跟主轴平行。

(4) 投射到镜顶的光线 PO , 反射后以主轴为准, 对称地反回。

对于凸面镜成像方法与凹面镜的方法相似, 但它不能成为实象, 只能成为虚象, 如图 2.4-8 中, P' 是个虚象。

透镜是经过光线折射后成像。透镜成像的作图法也和球

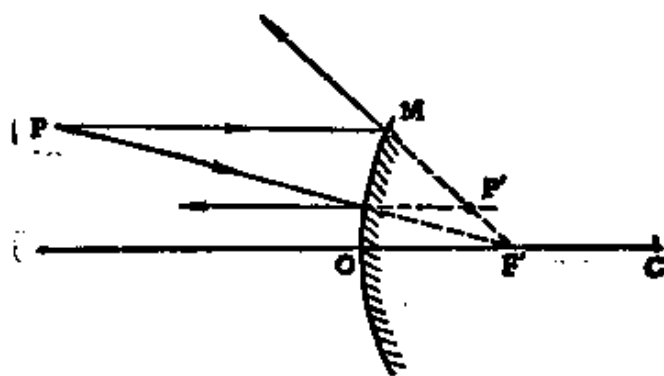


图 2.4-8 凸面镜成像示意图

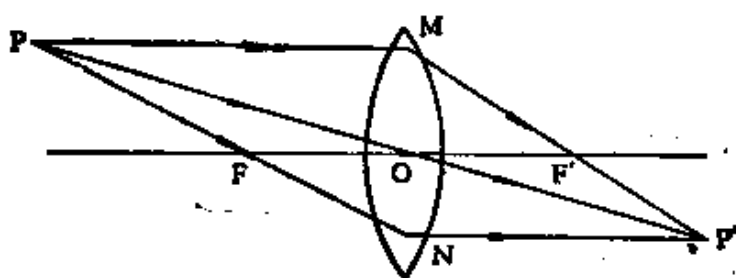


图 2.4-9 凸透镜成象示意图

面镜的作法一样,只要求选出从 P 点出发的三条光线,(1)跟主轴平行的光线,经凸透镜折射后通过焦点 F ; (2)通过光心的光线 PO 经过透镜不发生折射; (3)通过焦点光线 PF ,折射后与主轴平行。如图 2.4-9 所示。在实际应用中,只要任选上面其中二条光线,即可以把图作出来。

3. 球面光学系统四个基本公式

科学是由实践中来的,又要经得起客观的检验。凹面镜成象可以用作图法精确画出,能否用理论推理计算出来呢?事实证明完全可以。但是航行到大洋彼岸需要船舶,打开知识的宝库需要智慧的金钥匙,计算成象规律,必须掌握好近轴光路计算公式。

下面让我们以讨论反射镜成象公式为例,用来揭示成象规律的计算秘密。

前面的图 2.4-7 是这样画的:画一个曲率半径为 R 的凹面镜, C 点为光心。取一个点光源 S 放在光轴上,它离镜顶为 L 的距离。设有一个细光束 SM 射到反射镜面上,这条光

线与光轴的夹角为 U ，且认为这个角很小，它投射到镜面交于 M 点，离光轴为 h 高。反射后光线和光轴相交在 S' 点上，它距离镜顶为 L' 。反射后光线和轴所成角度为 U' ，这个角也很小。通过测量确定出 L 、 R 、 U 的数值，并把它们作已知条件，然后用三角追踪法，确定出理想象点 i 、 i' 、 U' 、 L' 的大小位置。

(1) 求光线 SM 在球面上入射角 I

在 $\triangle SMC$ 中，根据正弦定理。（边长和它的对角正弦成比例）

得出：

$$\frac{L-R}{\sin(-I)} = \frac{R}{\sin U}$$

整理

$$\sin(-I) = \frac{L-R}{R} \cdot \sin U$$

由于

$$\sin(-I) = -\sin I$$

则：

$$\sin I = \frac{R-L}{R} \cdot \sin U \quad (2.4-1)$$

(2) 求光线在球面上的反射角 I'

根据反射定律

$$I = -I'$$

即

$$\sin I = -\sin I' \quad (2.4-2)$$

(3) 求反射光线在光轴的交角 U'

由图 2.4-6b 中,应用外角定理

$$\phi = U + (-I)$$

则:

$$U' = U - I + I'$$

又:

$$U' = U + 2I' \quad (2.4-3a)$$

$$U + U' = 2\phi \quad (2.4-3b)$$

式中角 U 为已知,前两步已求出 I 和 I' ,代入式中即可得 U' 的数值。

(4) 反射光线在轴上距离 L'

对 $\triangle S'MC$ 应用正弦定理

$$\frac{R - L'}{\sin I'} = \frac{R}{\sin(\pi - U')}$$

整理:

$$L' = R - \frac{R \cdot \sin I'}{\sin U'} \quad (2.4-4)$$

式中右侧的数值都已知道,代入即得 L' 值。

以上四个公式 (2.4-1)~(2.4-4) 是球面光学系统的基本计算公式。

如果光学系统是由多个球面组成的,而且这些球面都共有同一光轴,称为共轴球面系统。在计算这类光路时,我们可以利用上述公式,逐步计算第一个反射面的反射光线 I' 、 U' 。然后再把第一个反射面的反射光线,当作第二个反射面的入射光线,展转计算。由图 (2.4-10) 可以得到如下的关系式:

$$U_2 = U'_1 \quad L_2 = L'_1 - d \quad (2.4-5)$$

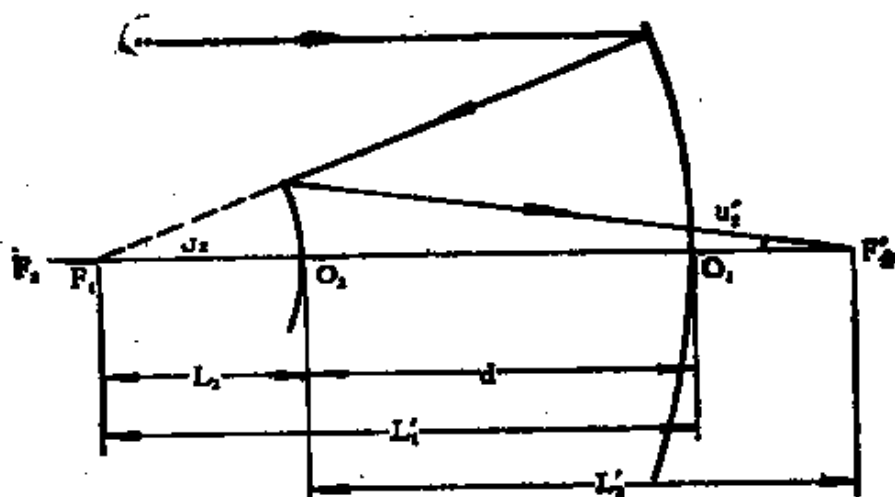


图 2.4-10 转面公式关系图

以上公式称为转面公式。式中 d 为反射镜面的镜顶 O_1 到第二个反射面的镜顶 O_2 之间距离。

由于靠近主轴的近轴光线，对于角 I 、 I' 、 U 、 U' 都很小的情况下，可用角度本身代替角的正弦。

即 $\sin I \doteq I$ ， $\sin I' \doteq I'$ ， $\sin U \doteq U$ ， $\sin U' \doteq U'$ 为了区别起见，以下将代表字母改为小写：令 (2.4-1)~(2.4-5) 公式中的 $\sin U = u$ ， $\sin U' = u'$ ， $\sin I = i$ ， $\sin I' = i'$ ，得到以下的新的公式组：

$$i = \frac{r-l}{r} \cdot u \quad (2.4-6)$$

$$i' = -\frac{r-l}{r} \cdot u \quad (2.4-7)$$

$$u' = u - i + i' \quad (2.4-8)$$

$$l' = r - \frac{r \cdot i'}{u'} \quad (2.4-9)$$

转面公式

$$u_2 = u'_1, \quad l_2 = l'_1 - d \quad (2.4-10)$$

若观看星体时,投入镜面为平行光,此时 $L = \infty, u = 0$, 略去 NO 长度。

则公式简化

$$i - \phi = \frac{h}{R}.$$

$$2h = \frac{D}{2}$$

代入

$$i = \frac{D}{2R} \quad (2.4-11)$$

其他类推。

(五) 单个球面反射镜成像公式

上节讨论的光路追踪公式,在设计光学系统时,使用比较方便。它把理想象点,通过光路中公式组的计算,使光线经过每个面的路程,看得一清二楚。但是,要设计光学元件的话,上述公式比较繁杂,又有欠缺。因而这一节,要从单个反射球面入手,讨论它物、象及焦距的关系。

1. 共轭点关系式

在光学成像中,物与象是对应的。即镜前的物点,反射后对应地有个象点。而且只有一个象点,这样,称这两个点为共

轭点。同样,物方有一直线,象方相对应也有一直线,也只有一条直线的象。这两个直线称为共轭线。

共轭点有它独特关系式

在图 2.4-6b 中,利用正弦定义

得:

$$\left. \begin{aligned} u &= \sin u \approx \frac{h}{L} \\ u' &= \sin u' \approx \frac{h}{L'} \\ \phi &= \sin \phi \approx \frac{h}{R} \end{aligned} \right\} \quad (2.4-12)$$

把所得等式,代入公式 (2.4-3b) 中,约去公因数 h ,得

$$\frac{1}{L} + \frac{1}{L'} = \frac{2}{R} \quad (2.4-13)$$

从公式中来看,高度 h 和角 u 一样,均不包含在最后结果内,这说明任何由 S 点出发的光线,在反射后都通过 S' 点。 S' 离开镜顶的距离是 L' 。由此可见, S' 点是 S 点的象,它们形成共轭关系,故公式称共轭点关系式。

2. 焦距公式

天文望远系统中,星光无限远,即 $L = \infty$ 则 $\frac{1}{L} = 0$, 它们通过凹面镜成象在焦点上,在这种情形下, $L' = f'$ 。

代入公式 (2.4-13) 中: 得

$$f' = \frac{R}{2} \quad (2.4-14)$$

这个结果很重要,说明球面焦距,等于曲率半径的一半。

把公式(2.4-13)和公式(2.4-14)结合起来,得到球面成像焦距公式

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{L} + \frac{1}{L'} \quad (2.4-15)$$

说明球面镜焦距的倒数等于物距的倒数与象距的倒数之和。

以上两个公式是球面反射镜成像基本公式,如果是单个透镜成像情况,公式中要考虑折射率。即

共轭点关系式

$$\frac{n'}{L'} - \frac{n}{L} = \frac{n' - n}{R} \quad (2.4-16)$$

焦距公式

$$L' = \frac{n'}{n' - n} \cdot R \quad \text{或} \quad f' = \frac{n'}{n' - n} R. \quad (2.4-17)$$

3. 高 斯 公 式

为了研究问题方便,公式(2.4-15)可变为另一种表现形式,利用反射面的焦距值,表示物象公式,由公式(2.4-15)中移项,得:

$$f \left(\frac{1}{L'} + \frac{1}{L} \right) = 1$$

或对透镜

$$\frac{f'}{L'} + \frac{f}{L} = 1 \quad (2.4-18)$$

公式说明只要知道 f' 和 L 值,就很容易确定物象关系。

4. 牛 顿 公 式

以上介绍公式，物点和象点的位置是以球面顶点为坐标原点的。为了计算方便，物点和象点的位置也可以用反射镜的焦点作原点。由图 2.4-11 所示。线段符号是从焦点为起点，向右为正，向左为负。图中的 x 表示物点在焦点的右侧，其值为正。 $-x'$ 表示象点在焦点的左侧，其值为负。由图可知：

$$L = f + x$$

$$L' = f - (-x')$$

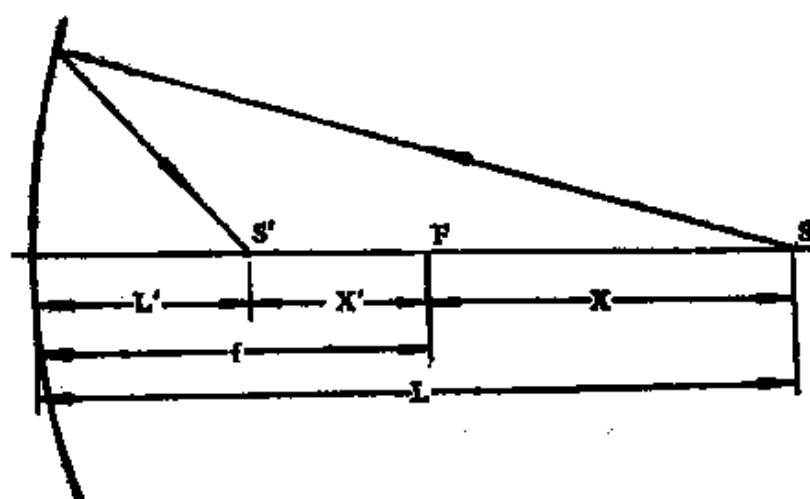


图 2.4-11 牛顿公式关系图

代入高斯公式则得

$$\frac{f}{f+x} + \frac{f}{f+x'} = 1$$

简化后

$$xx' = f^2 \quad (2.4-19)$$

不难推出,有两个焦点的透镜,牛顿公式形式应是:

$$x \cdot x' = f \cdot f'$$

在实际应用中,应注意公式(2.4-13)、(2.4-18)和(2.4-19)的物理意义都一样,均是球面反射的物象关系式。它们的不同形式,是为了比较方便地解决不同特点的问题。

5. 放 大 率

无限远的物体,经过反射镜反射后成象,那么象可认为是物的“对象”了。它们是依靠光线率连在一起的。我们说“物”与“象”,“千里姻缘一线牵”是不过分的。那么它们怎样连在一起的,这要从放大率谈起。

(1) 线放大率

图 2.4-12, 表示有个物体 AB , 高度为 h , 位在镜心之前。它的象 $A'B'$ 可以用作图法毫不费力地画出。象的高度

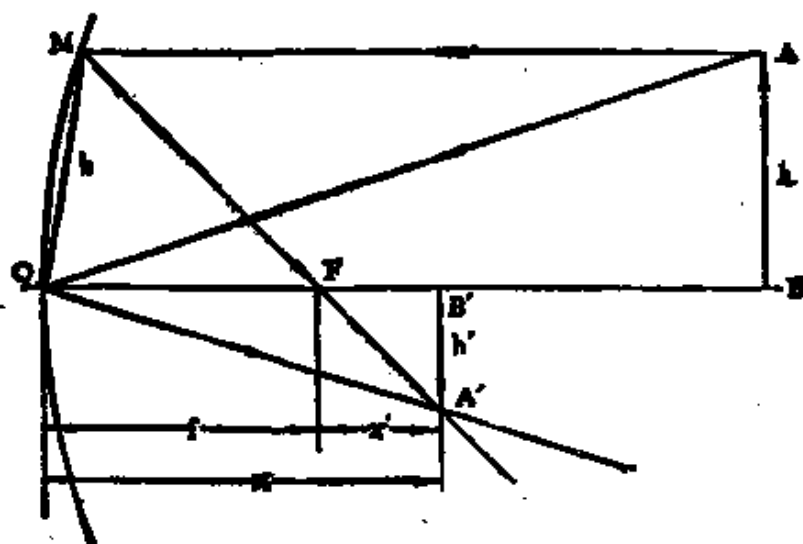


图 2.4-12 线放大率

为 h' 。

图中 $\triangle A'OB' \sim \triangle AOB$ 则

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OB'}{OB}$$

即

$$\beta = \frac{h'}{h} = \frac{L'}{L} \quad (2.4-20)$$

$$\triangle A'B'F \sim \triangle MOF$$

则

$$\frac{h'}{h} = \frac{x'}{f}$$

即

$$\beta = \frac{x'}{f} = \frac{h'}{h} \quad (2.4-21)$$

我们把象的长度 h' 与物的长度 h 的比值,叫做线放大率。用 β 表示。

通过公式,可以看到线放大率对于垂直于光轴的任何两个共轭面都是常数。也就是说,线放大率与物点在光轴上的位置无关。这是望远镜物镜的重要性质。

(2) 角放大率

现在我们研究反射光线与光轴的交角及入射光线与光轴的交角规律。

图 2.4-13 中 SM 为入射光线它与光轴交角为 u 。 $S'M$ 为反射光线它与光轴交角为 u' 。过 M 点作垂直光轴线 MN , N 点在光轴上。由图可知,在 $\triangle S'MN$ 和 $\triangle SMN$ 中

$$\operatorname{tg} u' = \frac{MN}{NS'}$$

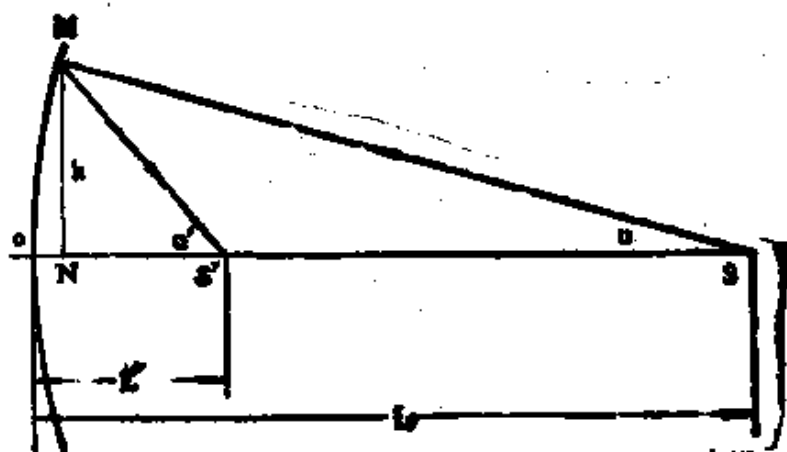


图 2.4-13 角放大率

$$\because NS' = L', MN = h$$

$$\therefore \operatorname{tg} u' = \frac{h}{L'} \dots\dots ①$$

同理

$$\operatorname{tg} u = \frac{h}{L} \dots\dots ②$$

把①与②二式相除:

则:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = \frac{u'}{u} = \frac{L}{L'} \quad (2.4-22)$$

我们把象的会聚角与物的会聚角的正切之比,叫做角放大率。用 γ 表示。

(3) 角放大率和线放大率关系:

由公式 (2.4-20) 和 (2.4-22) 中,可知

$$\gamma = \frac{1}{\beta} \quad \text{或} \quad \beta = \frac{1}{\gamma} \quad (2.4-23)$$

概括来讲,角放大率与线放大率互为倒数。也就是线放

大率越大角放大率越小，形成的象大而光束窄。反之角放大率越大线放大率越小，形成的象小而光束宽。

（六）两个共轴球面的反射镜的组合

单个镜固然能成象，终究本领有限，两个反射镜组合，则妙处繁多。百闻不如一见，让我们先作个实验来看看。

取一个凹面镜，最好中心有孔。事先对准远处一个目标，这时从镜后看上去，丝毫没有象形成。再取一个凸面镜，这个口径比凹面镜小一些。凸面镜的反射面正对着凹面镜的反射面，使两个光轴重合在一起，如图 2.4-14 所示。

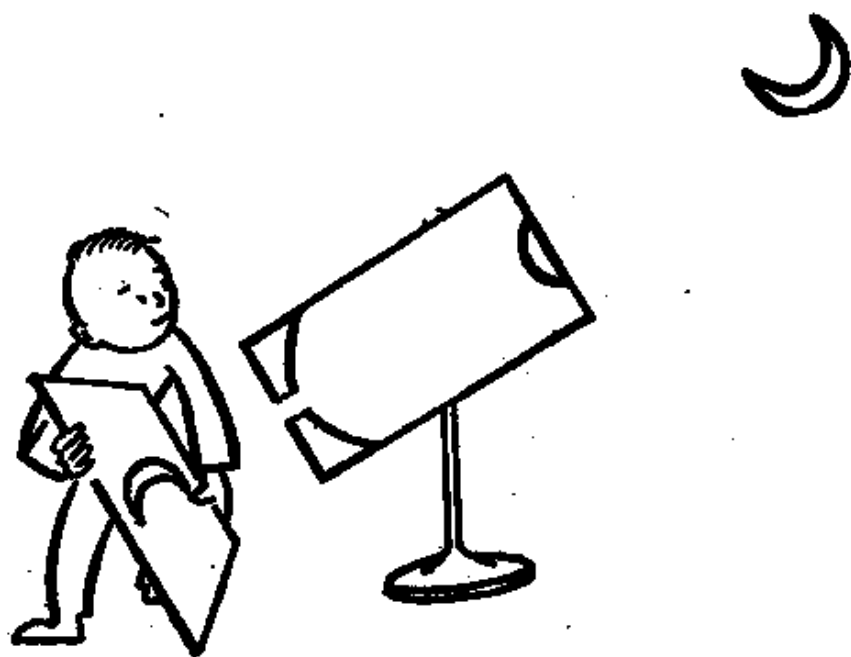


图 2.4-14 共轴系统成象

当把凸镜移到某个位置时，这时在镜后用眼观去，令人惊

奇的是远处物体非但没有受到大镜片的遮拦，反而使远处物体移近在眼前。如果用白纸作屏，很容易找到光线的集中处，形成倒立缩小的实象。然后你再移动凸镜的位置这时发现原来的白纸上所成之象，变得模糊不清了，移动一下白纸屏，又可找到清晰的象。而这个象比原来的象，不是变大就是变小。凸镜往前象小了，凸镜往后象变大了，这个象如同魔术师的戏法一样的变换，使人感到惊奇。那么这里的秘密在哪呢？

一个凸反射镜，一个凹反射镜，二者组合成共轴球面反射系统。即成一个光具组。这个光具组对平行光也有会聚作用，它和凹面镜情形可谓异曲同工。在这样的光学系统中，每一个光学元件均有其自己的焦点和焦距，要问合成焦距怎样？如果要直接回答，这就困难了，因为不知道从那点算起。为解决这个问题，我们介绍主平面和主点的表示方法。

1. 主平面与主点

单个凹面反射镜能把平行光会聚在焦点上，如图 2.4-15。如果经镜顶 O 处作一个与球面相切的垂面 $M'O$ ，把平行光线 SM 延长交至平面 M' 点，反射后光线仍认为通过焦点 F 。同样许多平行光线射到 $M'O$ 平面上，它们仍会聚在 F 点，所以 F 点也可认为是 $M'O$ 平面的焦点。 $M'O$ 平面便具有反射镜的特性，这样不管光线如何经过镜面，用 $M'O$ 平面就可以代替反射镜的镜面形状。我们把 $M'O$ 平面叫做反射镜的主平面。 O 点称为主点。

对于复杂的光具组，可以看作不只是一个主平面，而是两

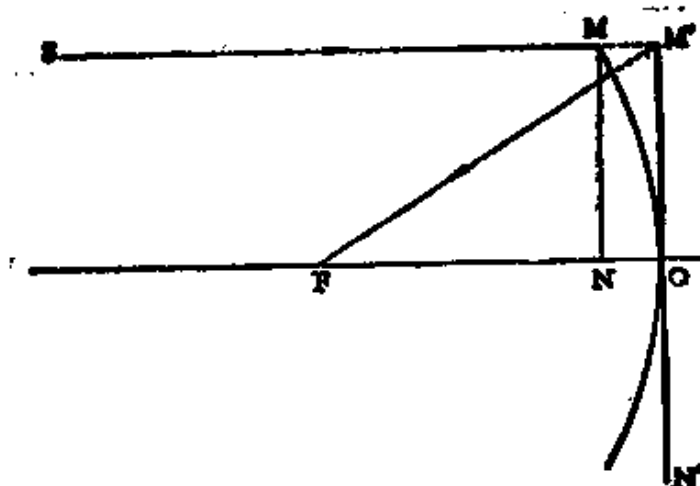


图 2.4-15 主平面与主点

个垂直光具组的光轴,而且和它相交于两个主点 H 和 H' 的主平面组合。

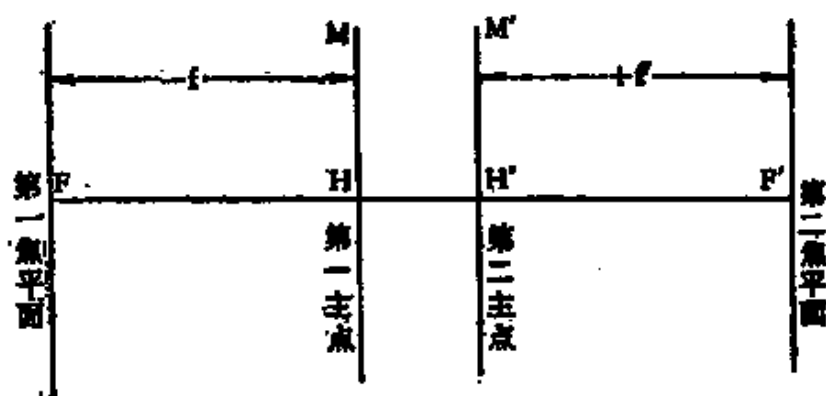


图 2.4-16 光具组的特征图

从图 2.4-16 可以看到反射镜在特殊情况下,它的两个主面和两个主点相重合。

一个光具组的性质,完全决定于主点及主平面的位置和焦距的数值。我们在研究光具组成象时,完全可以把许多共轴球面的组合当作一个整体来看,不管多么复杂的共轴系统,

均可找到共同主平面和主点，以此确定整个光学系统的合成焦距和焦点。从而较容易地确定物与象的关系。达到化繁为简的目的。对于不同结构的光具组，主平面和主点的位置不同，有的在光具组里面，有的在光具组外面，也有的对光具组的几个界面完全不对称，甚至偏在一边。尽管如此，均不影响用主平面的方法，研究光具组成象情况。

2. 卡式望远镜的主平面和主点

前面作实验的一组光具组，实际上就是卡式望远镜——主镜和副镜组合的共轴系统。图 2.4-17a 表示它成像光路图。

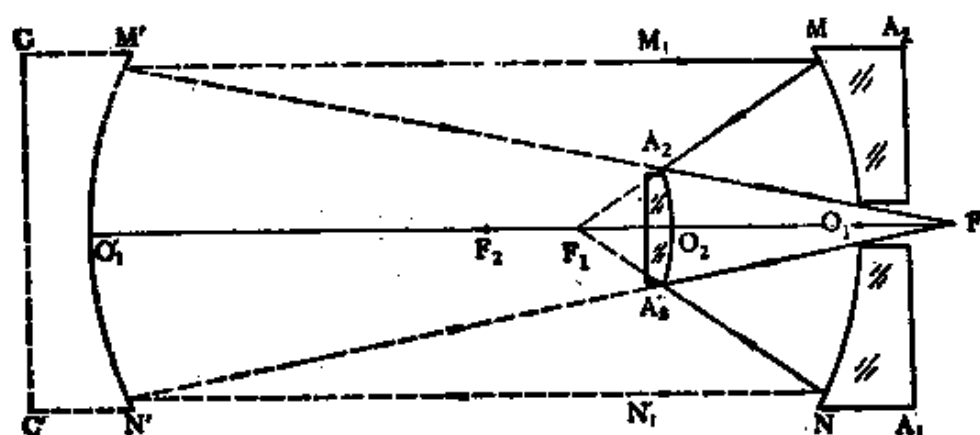


图 2.4-17a 光具组合成焦距

图中反射镜 CC' 的焦点及焦距，等于主镜和副镜组成光路组的合成焦点和合成焦距。这样 CC' 反射镜成象情况，完全可以取代主镜和副镜组成光具组的情况。反射镜 CC' 实质可看作主镜向前移动，并反向使其焦距加长的结果。

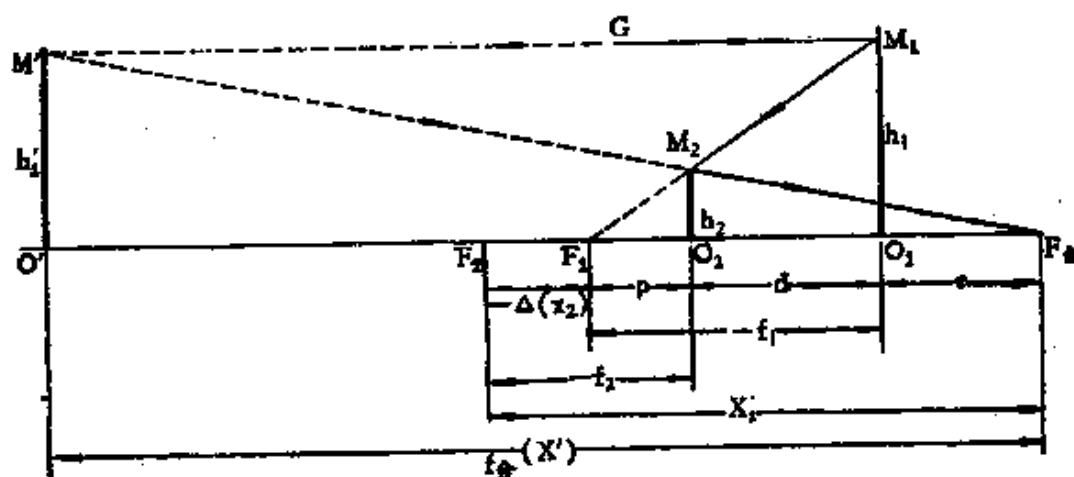


图 2.4-17b 卡式主平面和主点

根据主平面定义，画出卡式光路图 2.4-17b。按照焦点的性质，平行于主轴的入射光线 GM_1 ，通过主镜主平面 M_1O_1 后，必然要会聚到主镜焦点 F_1 ，但光线没有到 F_1 会聚前，由副镜主面 M_2O_2 反射而继续前进。当它通过主镜主面之后，其出射光线与光轴交于 F_* 处。此点即为组合系统焦点。出射光线与入射光线的交点 M' ，是主平面上的一个点，过 M' 垂直于光轴的平面 $M'O'$ ，就是光具组的主平面。由于 O' 点在光轴上，所以又是反射镜主点，又是镜顶。所以 F_* 即为主焦点，而 f_* 即为合成焦距。

在图中，主镜主点（即镜顶）和副镜主点之间的距离用 d 表示。主镜焦点 F_1 到副镜主点 O_2 距离为 p 。主镜主点 O_1 到系统合成焦点 F_* 之间的距离用 e 表示。又主镜焦点 F_1 和副镜焦点 F_2 之间的距离称为光学间隔，用 Δ 表示。

3. 合成焦距公式

合成焦点 F_* ，通过精确作图完全可以确定它的具体位置，也同样可以通过公式计算出来。

物与象是相对而言，我们从图 2.4-17b 中也能清楚看到。 F_1 点是主镜对无限远物体所形成的象，对副镜 M_2O_2 来讲， F_1 点象被当作物， F_* 处的象即为 F_1 物的反映，所以 F_1 和 F_* 形成了共轭关系。如果选用副镜焦点 F_2 为原点，由 F_2 到 F_1 的距离是物点坐标 X_2 。由 F_2 起到 F_* 的距离是象点坐标 X'_2 。应用牛顿公式

$$X_2 X'_2 = f_2^2 \quad (2.4-24)$$

这里的 X_2 是自左到右的，而系统光学间隔 Δ 是从 F_1 起到 F_2 ，是从右到左的。所以它们的符号相反：即

$$F_2 F_1 = X_2 = -\Delta。$$

代入公式 (2.4-24) 中：得

$$-\Delta \cdot X'_2 = f_2^2$$

移项

$$X'_2 = -\frac{f_2^2}{\Delta} \quad (2.4-25)$$

由于 F_2 的位置已确定，由此可以从公式 (2.4-25) 确定组合后光学系统的焦点 F_* 位置。

下面求出组合系统的主平面位置。根据主平面的定义，主平面与合成焦点的距离是合成焦距。合成焦距的大小确定后，主平面的位置也就能够确定了。

先求合成焦距公式：

在图 2.4-17b 中: 由于 $\Delta M'O'F_{\star} \sim \Delta M_2O_2F_{\star}$

则

$$\frac{f_{\star}}{X'_2 - (-f_2)} = \frac{h'_1}{h_2}$$

$$2\Delta M_1O_1F_1 \sim \Delta M_2O_2F_1$$

则

$$\frac{-f_1}{-f_2 + \Delta} = \frac{h_1}{h_2}$$

由于 $h'_1 = h_1$ 所以 $\frac{h'_1}{h_2} = \frac{h_1}{h_2}$

则

$$\frac{f_{\star}}{X'_2 + f_2} = \frac{-f_1}{\Delta - f_2}$$

把公式 (2.4-25) 代入上式:

则

$$\frac{f_{\star}}{-\frac{f_2}{\Delta} + f_2} = \frac{-f_1}{\Delta - f_2}$$

整理:

$$\frac{f_{\star}}{f_2\left(1 - \frac{f_2}{\Delta}\right)} = \frac{-f_1}{\Delta\left(1 - \frac{f_2}{\Delta}\right)}$$

等式两边同除 $\left(1 - \frac{f_2}{\Delta}\right)$, 得:

$$\frac{f_{\star}}{f_2} = -\frac{f_1}{\Delta}$$

因此

$$f_{\star} = -\frac{f_1 f_2}{\Delta} \quad (2.4-26)$$

此公式说明: 组合系统的合成焦距与两个镜面的焦距乘

积成正比,与它们的光学间隔成反比。

这里光学系统主镜焦距 f_1 和副镜焦距 f_2 , 以及两个系统的光学间隔 Δ 都是已知量, 所以由 (2.4-26) 公式可求得合成系统的焦距。从而确定出主平面 $M'O'$ 的位置。

$$\text{又知} \quad \Delta = f_1 + f_2 - d$$

则

$$f_s = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d}$$

整理标准化

$$\frac{1}{f_s} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad (2.4-27)$$

公式说明, 系统的合成焦距的倒数, 等于两个镜组焦距的倒数之和, 减去两组镜顶距与两个焦距乘积之商。

4. 共轴系统的放大率

(1) 线性放大率

共轴球面反射镜组, 可以认为是两个镜组合二而一, 组成一个新单一物镜仅仅是焦距增长, 那么, 单个反射镜面的所有放大率规律, 也适用于组合后的球面反射系统。

$$\text{则} \quad \beta = \frac{X'}{f_s}$$

$$\text{又因为} \quad \beta_1 = \frac{h_2}{h_1}$$

$$\beta_2 = \frac{h_3}{h_2}$$

$$\text{则} \quad \beta = \beta_1 \cdot \beta_2$$

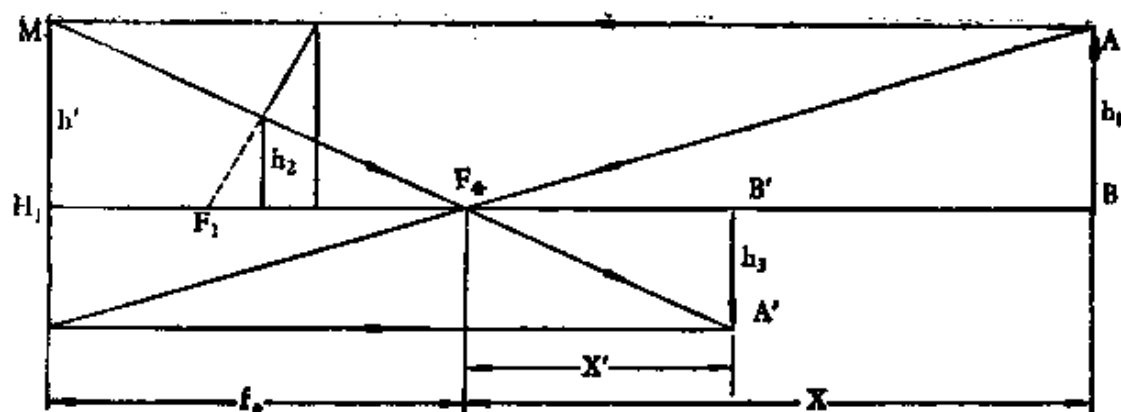


图 2.4-18 光具组线放大率

镜组的放大率等于主镜放大率和副镜放大率的乘积。

(2) 角放大率

图 2.4-19 中，入射光线与光轴的夹角 u' ；出射光线与光轴的夹角 u 。根据角放大率定义，

$$\gamma = \frac{\lg u'}{\lg u}$$

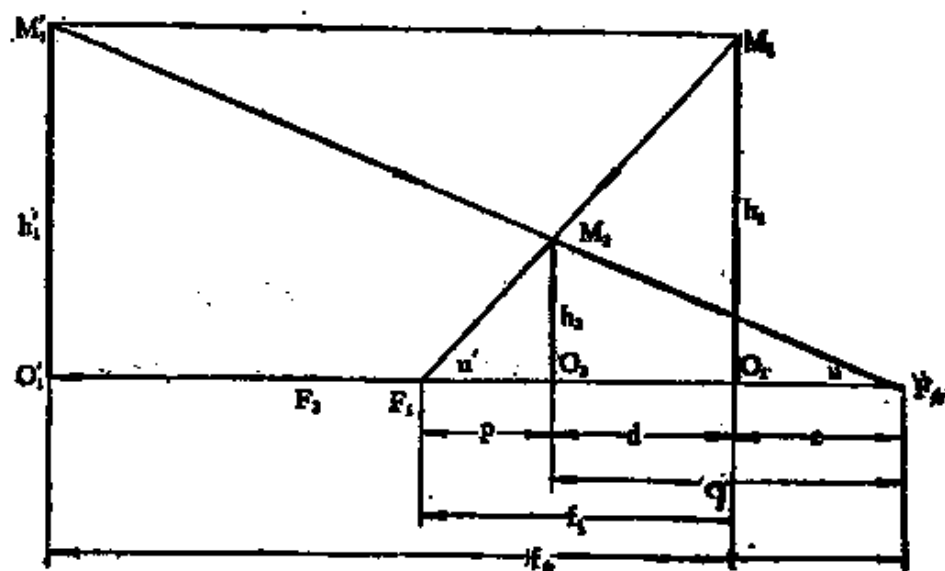


图 2.4-19 角放大率

在 $\Delta M_2O_2F_1$ 和 $\Delta M_2O_2F_\star$ 中及 $\Delta M_1O_1F_1$ 和 $\Delta M'_1O'_1F_\star$ 中:

$$\operatorname{tg} u' = \frac{h_2}{P} = \frac{h_1}{f_1}$$

$$\operatorname{tg} u = \frac{h_2}{q} = \frac{h'_1}{f_\star}$$

则

$$\gamma = \frac{q}{P} = \frac{f_\star}{f_1} \quad (2.4-28)$$

角放大率又等于副镜的顶点到合成焦点距离 q , 与副镜顶点到主镜焦点之间的距离 P 之比。或者等于合成焦距与主镜焦距之比。

所以

$$f_\star = \gamma f_1 \quad (2.4-29)$$

由此可见, 共轴球面系统的合成焦距又等于角放大率和主镜焦距的乘积。这样, 共轴光学系统的主镜焦距确定后, 选择一定的角放大率, 共轴系统的合成焦距也就确定了。

同样角放大率与线放大率二者成倒数关系。即

$$\beta = \frac{1}{\gamma} \quad \text{或} \quad \gamma = \frac{1}{\beta}。$$

要想增大线放大率, 角放大率必然小, 光具组为考虑各种用途, 必须注意选择适当的角放大率。一般望远系统角放大率选用 3—6 之间较为合适。

5. 望远镜光束限制

经过光具组光束的大小, 不仅影响造象的亮度, 而且也决

定着光具组所产生的象差。轴上物点的球差，就是与入射光束的大小有着密切关系。因此下面研究有关光束限制问题。

如果仅是一个反射镜，在镜前并没有遮挡光线的东西，那么反射镜边缘 AB ，就起着限制从物点射出的光束作用。造成象的光线当然只是 ACB 范围内的光束。如图 2.4—20 所示。

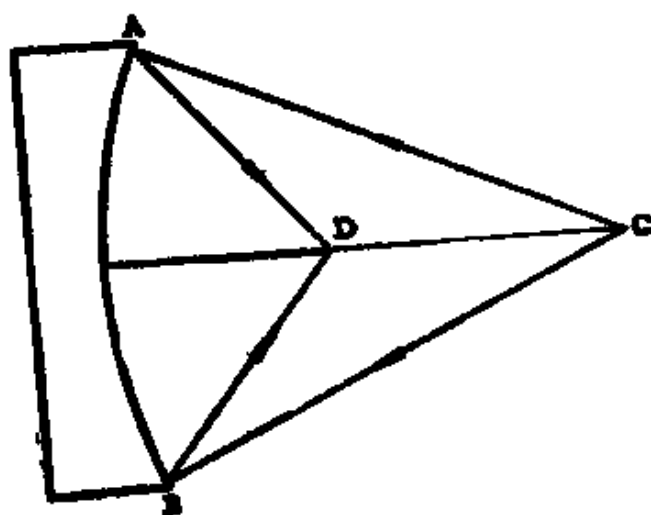


图 2.4-20 光束造象

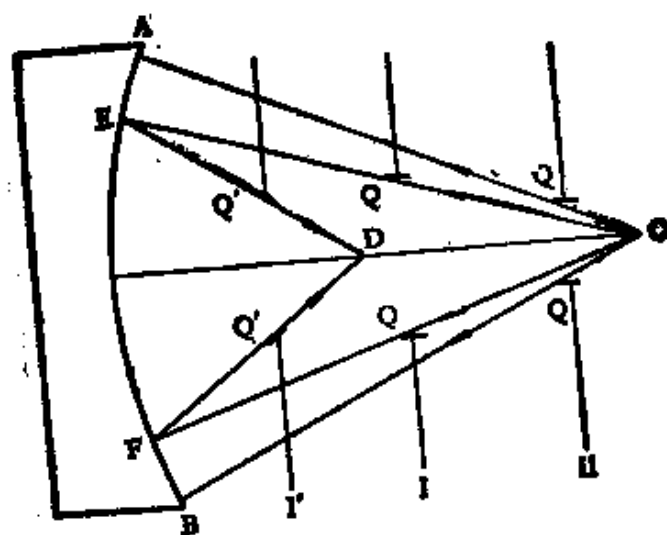


图 2.4-21 遮光片的位置

现在，如果在反射镜前 I 的位置上放一个只有通孔的遮光片，从图 2.4-21 中，显然看到， AC 、 BC 都给挡住了。经过反射镜只是 ECF 范围内的光束，这种在镜前的挡光薄片，叫做光栏。同时应该注意到，光栏的作用，不仅与孔径大小有关，而且和它的位置也有密切关系。如果把 QQ 向右逐渐移动，它对光束的限制，就逐渐减少，当抵达 II 位置后，那就完全失去了光栏的作用。限制光束的大小的，仍然是反射镜的口径 AB 。

如果把光栏 QQ 作为放置在反射镜前的物体，反射镜就一定可以把它造成共轭象 $Q'Q'$ 。经过 QQ 的光线，必须经过 $Q'Q'$ 。我们把限制物方的人射光线，称为入射光瞳。 $Q'Q'$ 是限制象方的出射光线，称为出射光瞳。入射光瞳和出射光瞳是共轭的物和象。如果 $Q'Q'$ 是实际放置的光栏，那末， $Q'Q'$ 本身仍是出射光瞳，这时候它的共轭象 QQ 就成了入射光瞳了。在光学望远系统中，入射光瞳的位置和大小都是十分重要的。

望远系统中，又常常以物镜或者镜筒口径作为入射光栏，它可以保证平行光完全被镜面反射，而斜光束只能与光轴夹角很小时，才能进入，对于杂散光完全被限制进入。

两个以上光具组的望远系统，除了有不同口径反射镜（或透镜）以外，也有不同作用的光栏，例如图 2.4-22a 中，主镜 AB ，它的口径边缘是无限远物体投射来的光线窗口——成为入射光栏 I 。它造成象的光束是 AF_1B 。如果离镜面焦点 F_1 处，相距 P 远放置一个光栏 II ，此光栏是主镜的出射光栏。在 II 处放置与光栏直径同样大小的凸反射镜，光线经反射后在

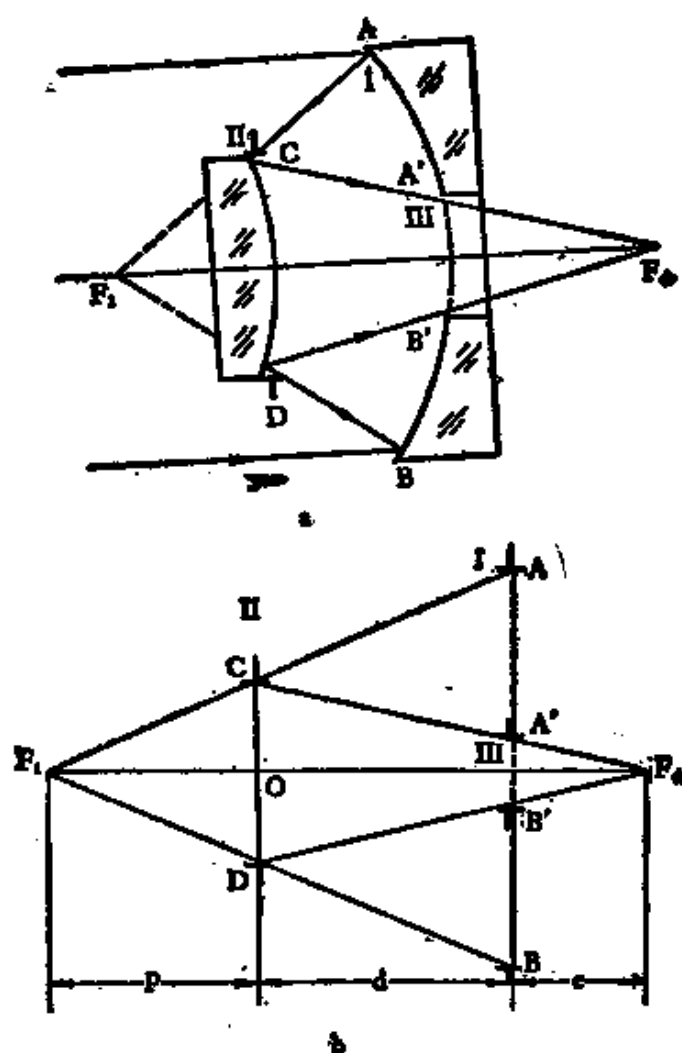


图 2.4-22 光栏位置

F_3 汇合，此点距离主镜镜顶 o 的距离。我们可以看到，对镜 CD 来讲，光束 CF_1D 是入射光束，II 则为人射光栏，光束 CF_3D 是出射光束，此光束穿过主镜的孔洞 $A'B'$ 。那么 $A'B'$ 又是出射光栏。把图简化为 (2.4-22b)，通过有关相似三角形的计算，分别求出光栏 II 和 III 的孔径大小。

$$\text{令 } AB = D_1 \quad CD = D_2 \quad A'B' = D_3$$

$$\text{在 } \triangle AF_1B \sim \triangle CF_1D$$

$$\begin{aligned} \text{则} \quad \frac{D_1}{D_2} &= \frac{f_1}{P} \\ D_2 &= \frac{P}{f_1} \cdot D_1 \end{aligned} \quad (2.4-30)$$

又 $\triangle CF_{\star}D \sim \triangle A'F_{\star}B'$

$$\begin{aligned} \text{则:} \quad \frac{D_2}{D_3} &= \frac{d+e}{e} \\ D_3 &= \frac{D_2 \cdot e}{d+e} \end{aligned}$$

令 $d+e=q$

$$D_3 = \frac{e}{q} D_2 \quad (2.4-31)$$

把公式 (2.4-30) 代入

$$\text{则} \quad D_3 = \frac{e}{q} \cdot \frac{P}{f_1} \cdot D_1$$

由公式 (2.4-28) 导出 $\frac{1}{f_{\star}} = \frac{P}{q \cdot f_1}$ 代入

$$\text{则} \quad D_3 = \frac{e}{f_{\star}} D_1. \quad (2.4-32)$$

从上述分析, 在设计卡式望远镜的副镜及主镜中心孔洞的最小直径, 可依据公式 (2.4-30) 和公式 (2.4-32), 并代入有关参数, 加以确定。关于设计的有关问题将在第三章加以介绍。

五、象 差

一个胖胖的小朋友, 偶尔拿着镜子照自己的脸, 本来圆圆

的脸变长了,或者清晰的线条变模糊了,人都变了个样。这是怎么回事呢?其实毛病出现在镜子上,这个镜子所照的象与原物产生了差异,我们把这种现象叫象差。这一节将对产生象差的原因作一定的讨论。

人们制作望远镜,总希望得到一个理想的象。什么样是理想象呢?有如下两条标准来衡量:(1)从每个物点射出的同源光线,准确地重新聚焦成象点,即完全象点。(2)同平面的物点与物点之间的相互位置,其所对应的象点,均保持准确的比例而无变形。

这两条标准看起来很简单,然而在光学成象上是很难找到的。人们只能选用近轴光路这个概念作近似地研究。首先假定:象由细光束形成的。并且这些光束与光轴的夹角是在很小情形下,射到光具组上的。尽管如此,真正作到也是不易的。特别是望远镜,因为要观看遥远的天体,必然要扩大主镜直径来增加亮度,结果所成之象,更满足不了上述要求。

我们把实际光学系统与理想光学系统成象的差别,叫做象差。

由于造成象差的原因不同。有的在轴上物点形成,有的在轴外物点形成,象差分为色差、球差、彗差、象散、场曲和畸变。

下面讨论主要象差及消除它的方法。

(一) 色 差

当人们用折射望远镜观看星体时,发现星体都有五颜六

色的表面,漂亮的外表遮住星体的真貌,这种现象星体本来是没有的。它是通过折射系统给加上的,这种现象叫做色差。

造成色差原因是因为我们平常见到的白光并不是单一的,而是多种颜色的复色光的组合,实践证明,每一种颜色光均有一定的波长,当它们一齐通过透镜时,不同颜色有不同的折射率。使得通过折射镜后的角度不同,结果在光轴上不能汇集一点,而形成一条彩色带(如图 2.5-1)。

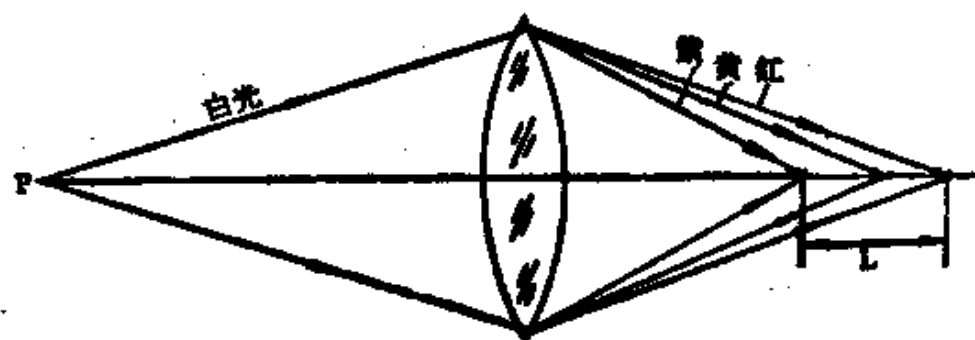


图 2.5-1 色差

很早人们为色差的存在而苦恼,奋战近一个半世纪之后,才使人们找到克服它的办法。这个方法是采用消色差物镜。

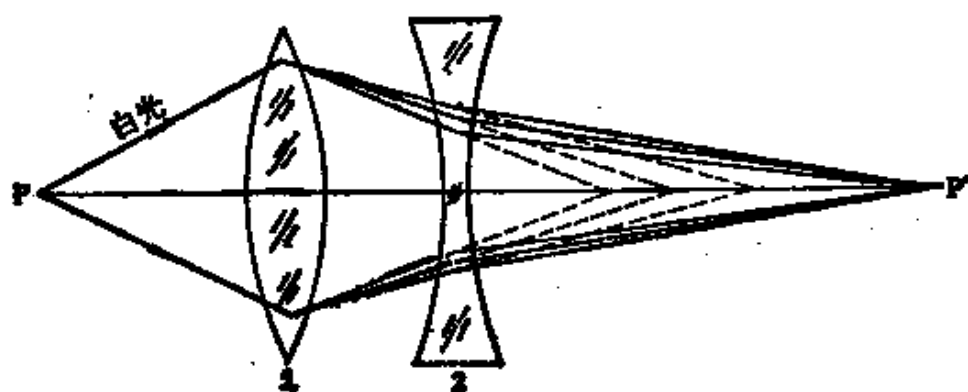


图 2.5-2 消色差物镜

1.冕牌玻璃 2.重火石玻璃

物镜制作时选用不同种类的玻璃,制作不同形状的正负透镜,适当的配合,或把它们胶合在一起,或分开一定距离,利用各自对光的会聚和发散的不同特点,取长补短,相合协作而组成消色差物镜。如图 2.5-2 所示。

(二) 球 差

球面象差的产生是球面形状固有的象差。这可用简单实验作出证明。取一个凹面镜,在镜前光轴上放置点燃的蜡烛。在蜡烛与镜间,放置一个硬纸作的光屏,在光屏中心扎一个小针孔,光线只能通过针孔射到镜面,其余全部被遮住。这时再取一小块毛玻璃作屏,把它放在镜前寻找象点,这时你会发现,不管怎样移动,在屏上的亮点总不是纯粹的一个点。而是略有模糊的光斑。如果把中心孔剪大,光线通过此中心孔成为宽光束投射到镜面上。这时再用毛玻璃寻找象点,发现比以前更模糊了。

现在我们另作一个实验,选用图 2.5-3a 沿反射镜直径方向钻有几个小孔的硬纸板。在镜前空气中稍微放些烟尘,当光线穿孔而射到镜面时的行程,可以清楚看到。我们可以发现,从离开反射镜中心的距离不同的小孔里,通过的光线交于不同的点。越靠近镜面边缘反射回来的光线与光轴的交点离着镜面越近。反之,越靠近中心反射光线与光轴的交点离镜面越远。如图 2.5-3b 所示。

由实验说明,离反射镜光轴距离不同的各个区域的光线,

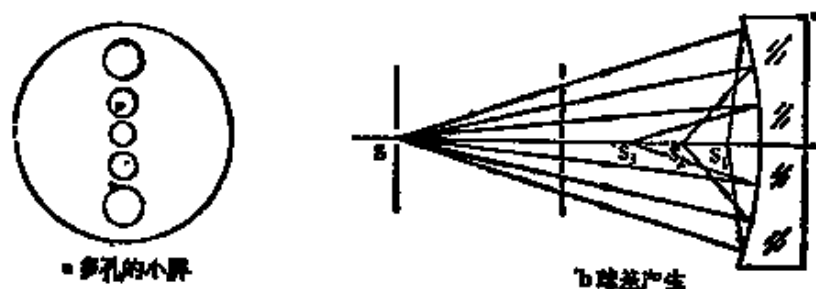


图 2.5-3 球差实验

在离反射镜的距离不同的地方形成光源的象。在焦距相同的情况下,直径大的反射镜所造成点光源的象更模糊不清。

球面反射镜对于平行光的反射也是如此。如图 2.5-4 表示平行光束 1、2、3 投射到反射镜面上, 这些光束经过球面反射后, 并不完全聚焦在焦点上。离光轴较远的光线 1-1' 会聚在镜前 I 处, 光线 2-2' 和 3-3' 分别汇集在光轴的 II III 处。同样, 离光轴越远的平行光束, 交点越离镜面顶点近。它们所形成的象, 也是不清晰的模糊光斑。

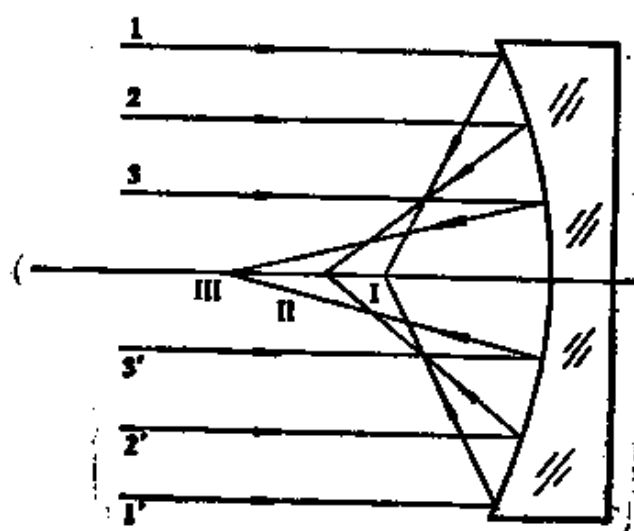


图 2.5-4 球差

从上面分析,这种象差的存在,完全是球面形状固有的缺陷所造成的,所以这种象差称为球面象差,简称象差。

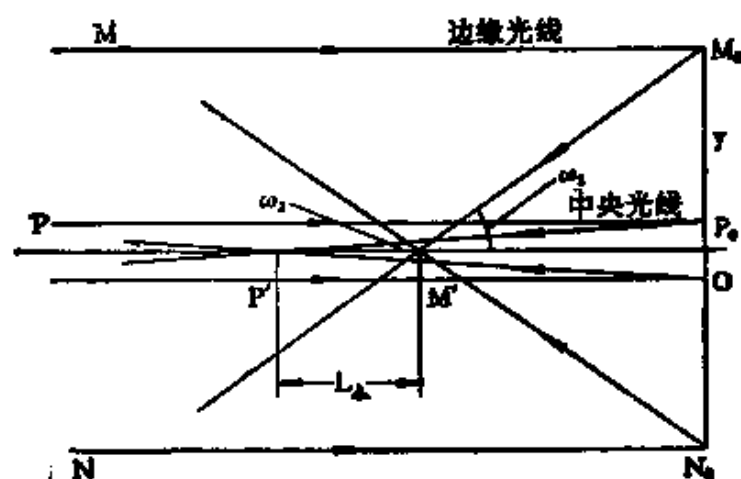


图 2.5-5 球差公式示意图

球差的大小可以用下图 2.5-5 加以说明。用 M_0N_0 代替反射镜。两条平行主轴光线 MM_0 是边缘光线, PP_0 为中央光线, 这两条光线经过反射镜反射后, 分别交于光轴 M' , 及 P' 。它们与光轴的交角分别为 ω_1 、 ω_2 。从图上明显看到, 两条光线经反射后, 在轴上相差的球差为:

$$M'P' = OP' - OM'。$$

如果 M_0O 为镜面最大口径的一半, 即 $Y = \frac{D}{2}$ 。

主轴上球差, 有下列形状: 令 L_A 代表球差

$$\Delta L_A = AF\omega^3$$

式内 $\omega = Y/F$, 代表某一光线的圆锥的半顶角, 系数 A 和 L_A/F 及 ω 是常量, 由光学玻璃特性而决定。

则: $\Delta L_A = AF(Y/F)^2 = A \frac{Y^2}{F}$

把 $Y = \frac{1}{2} D$ 代入上式, 则象差最大值为:

$$\Delta L_A = A \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{F} = AD^2/4F \quad (2.5-1)$$

根据光力定义, 则 $m = \frac{F}{D}$, $F = mD$

又: $\Delta L_A = AF/4m^2 \quad (2.5-2)$

由公式可以看到, 球差大小与镜面口径平方成正比, 与焦距成反比。

在设计球面的反射镜, 考虑球差大小时, 可以根据上式, 进行初步计算。式中 A 参数的大小, 在凹反射镜系统中, 可取 $A = 0.125$ 。对于抛物面取 $A = 0$ 。

球差对于透镜和反射镜, 都是普遍存在的。尤其是口径越大的反射镜, 球差更为突出, 为了克服球差, 折射系统采用正负透镜合理组合, 除大部分色差得到校正外, 还消去了球差。对于反射系统, 有的是用抛物面镜代替球面镜, 还有的是在光学系统上加入非球面副镜进行校正。

(三) 彗 差

在光轴以外的一个点光源, 发出宽光束并倾斜入射到镜面上。这时所成的象, 并不是一个点, 而成为彗星形状的光

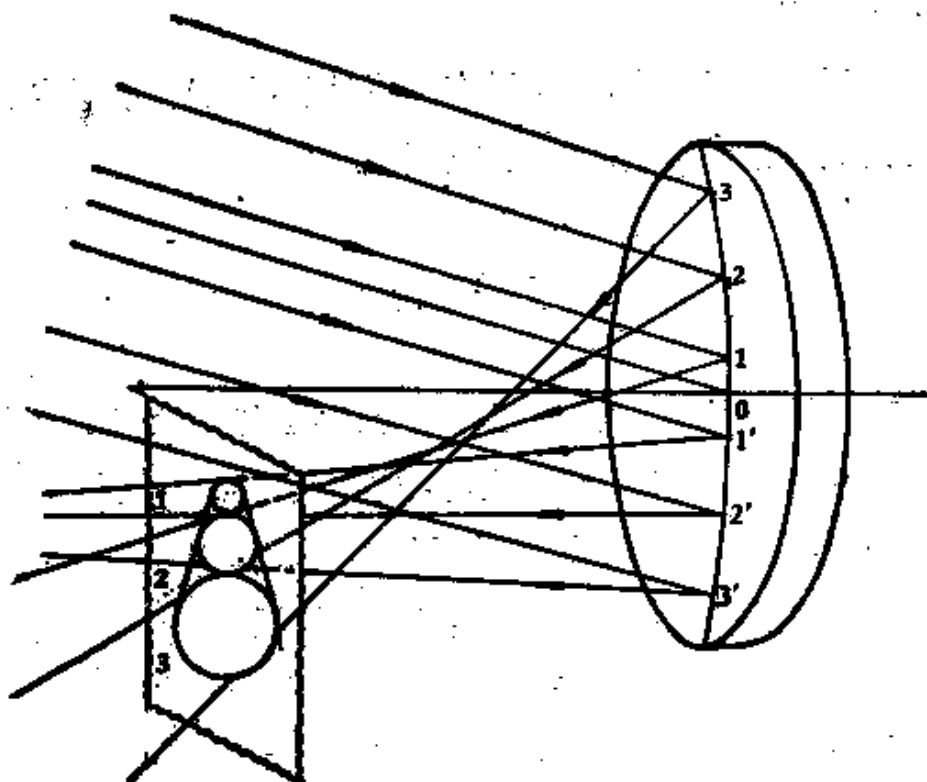


图 2.5-6 彗差示意图

斑。这种象差叫作彗差。如图 2.5-6 所示。

这种象差与球差类似，但它是由轴外倾斜光线入射经镜面反射后形成的，因此它与光轴是不对称的。现以 O 为中心，把球面分为不同的球带 $11'$ 、 $22'$ 、 $33'$ 等。球带 $11'$ 在屏上产生圆周斑点 1；环带 $22'$ 在屏上产生圆周斑点 2，环带 $33'$ 产生圆周斑点 3，……，这些圆周斑点由小到大。它们合在一起形成一个彗形光斑。

彗形象差根据 $f_0 A$ 一段距离而测定，其公式为：

$$f_0 A = 3B \left(\frac{D}{2} \right)^2 \vartheta$$

式内系数 B 是个常量， ϑ 是主轴和副轴的夹角。即倾斜

光束的角度。

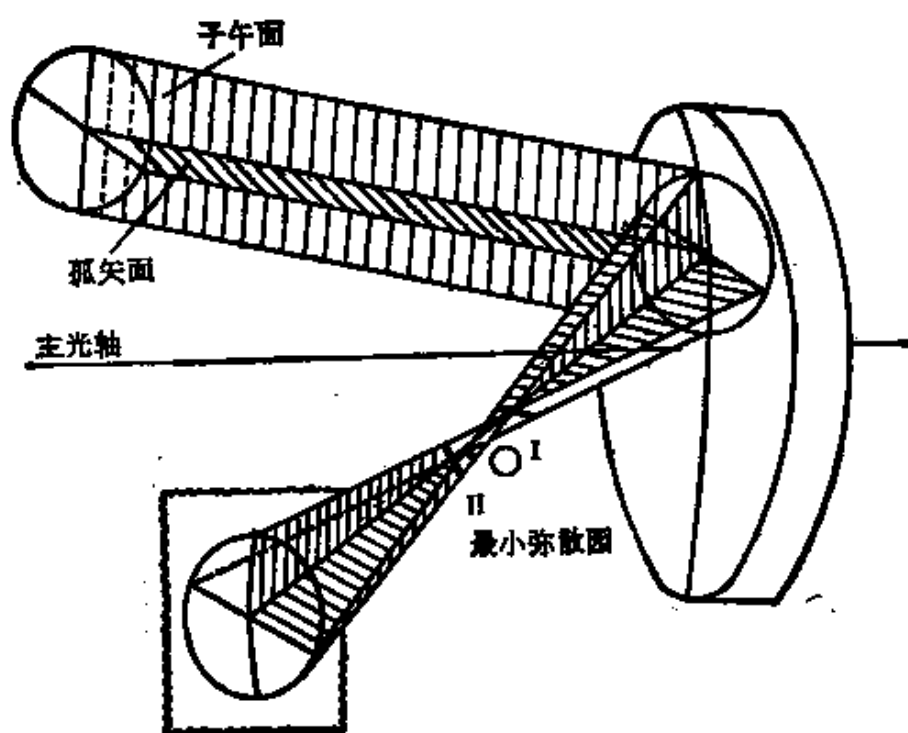
在天文望远镜中,如果没有消除彗差,只能在视场中心区域得到良好象点。越靠近边缘彗差越大。

(四) 象散及场曲

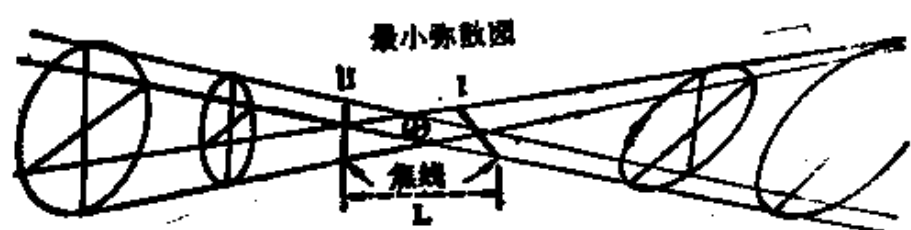
离光轴较远的物点,发出细窄光束,当与光轴有很大的倾斜角的斜光束,入射到镜面上时,这些反射光线,同样不能汇聚为一点,有时形成直线,这种现象叫象散。

观察象散现象,可用一块具有小孔的纸板遮住反射镜,分出细光束。这时光源放在一条和主轴成 30° — 45° 角的副轴上。用屏寻找点光源象时,发现象变得非常模糊,而且形状不正确。如果我们开始使屏对着反射镜,慢慢移动,那末在屏上有两个位置(如图 2.5-7a) I 和 II 处,使象足够清楚。不过这和光源在轴上的象不同这个 I 和 II 上的象不是一个点,而是个线段。二者互相垂直。除此之外,屏在其他位置上的象均是模糊的。有时呈椭圆形,有时为圆形,在屏上找到最小圆斑,称为“最小弥散圆”(图 2.5-9b)。I 处形成水平“线”状象,称为“子午焦象”。II 处竖直“线”状象,称为“弧矢焦象”。两个焦线之间的距离 L ,叫做象散长度。

如果光学系统完全消除了象散,则最小弥散圆变成“点”象。如图 2.5-8a 所示。但由此组合的线不是一条直线而成一条曲线,这种现象叫场曲。对于具有“场曲”的光学系统,它的“焦平面”和“象平面”,将不是一个平面,而是一个曲面,如



(a)



(b)

图 2.5-7 象差示意图

图 2.5-8b 所示。

对于一个没有消除场曲的天文望远镜，如果用一个平面的照相底片，去拍照天体的象，那就不能在整个相面上得到清晰的象。为了得到清晰的图片，必须把底片作相应的弯曲。如施密特望远镜，在拍照天体时，就是这样做的。拍照效果

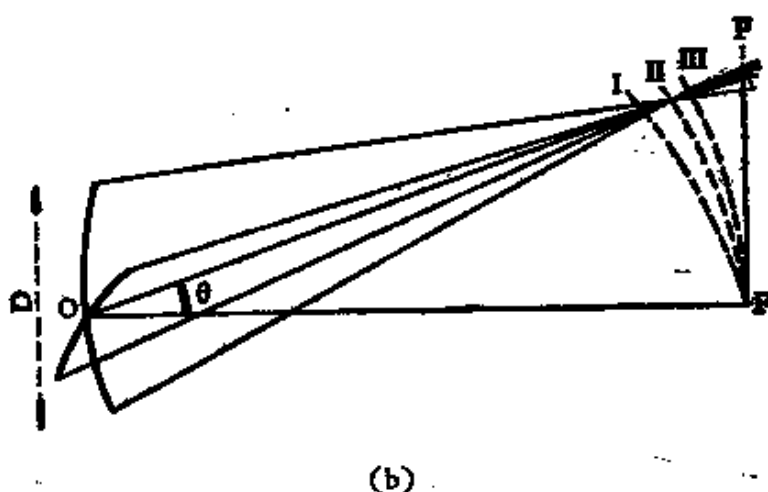
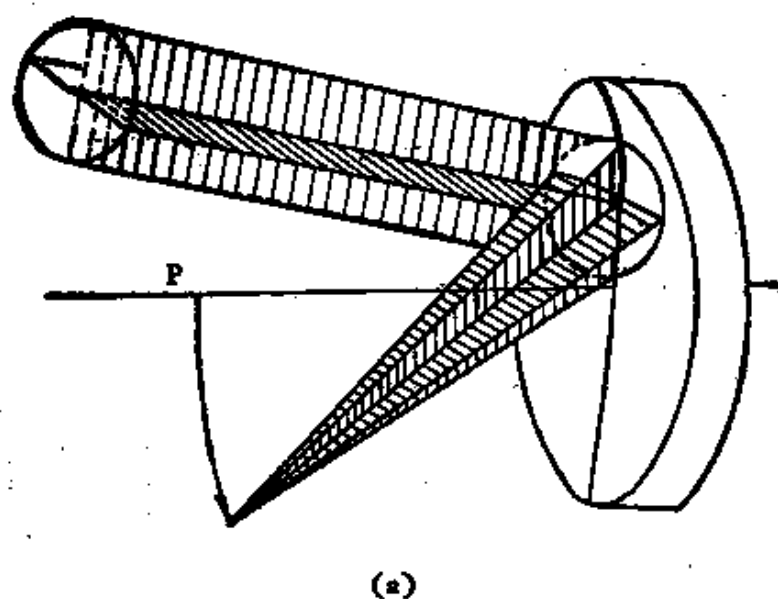


图 2.5-8 场曲示意图

很好。

(五) 畸 变

如果物体对光学系统所张的角度范围很大,也就是说,物体边缘部分离光轴较远,则所成的象和实物不相似。这种现

象叫畸变。

为什么发生畸变，原因是光学系统对物体离光轴较远的部分和离光轴较近的部分，放大率不同，即边缘光线比中央光线会聚得更厉害，因而使象的边缘部分发生形变。见图 2.5-9。

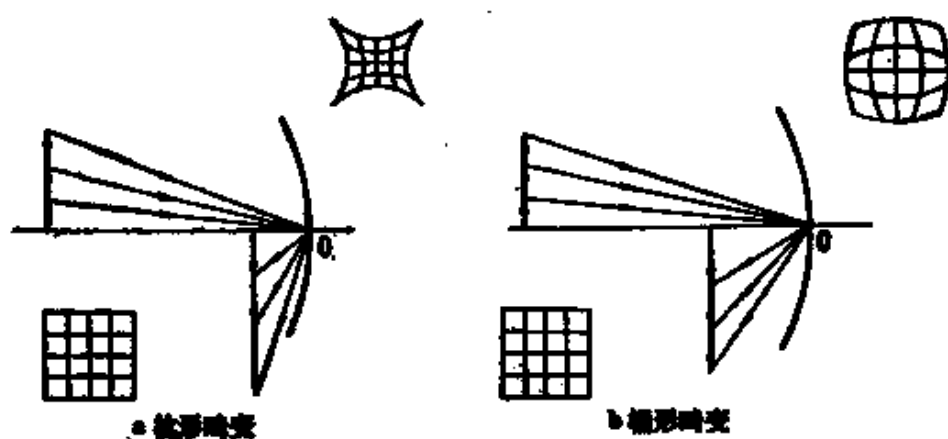


图 2.5-9 畸变示意图

由于形变不影响成象的清晰程度，而只改变象的几何形状，所以它与其他象差不同，对某些望远光学系统来说，只要畸变不大于 5%—10% 就不影响使用效果。

最后应当指出，象差的存在，并不是光学系统本身的缺欠，它反映光线经球面反射（或折射）的情况。由于望远镜种类不同，消除象差要求也不一样。象差一般经过计算（这些计算比较复杂，请参考《光学设计手册》（上册）有关介绍），采取一定措施可以减小或消除。

六、非球面反射镜

(一) 非球面镜成像特性

由于球面镜的球差存在，使象的效果较差，为了提高象质，人们采用抛物面镜达到消除球差的目的。

抛物面能够使平行于光轴的平行光束，完善地会聚在一点，从而达到消除球差的目的，如图 2.6-1b 所示。

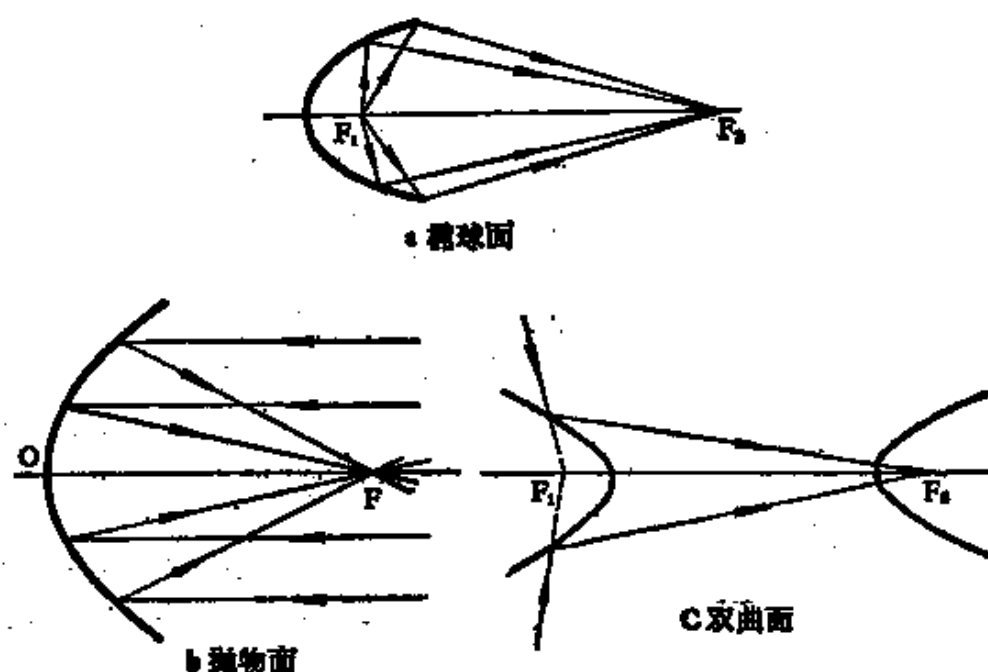


图 2.6-1 二次曲面焦点示意图

除了抛物面镜以外，双曲面镜、椭球面镜，均能够达到消除球差的目的。如图 2.6-1a、c 所示。它们又均称二次曲面。即抛物面是抛物线绕一个固定对称轴，旋转而扫过的几

何面形。同样,双曲面是双曲线绕轴旋转而成,椭球面是椭圆线绕长轴旋转而成的面形。每一种面形均可能为凸面镜或凹面镜。

(二) 圆锥曲线及曲线方程

圆、椭圆、抛物线、双曲线,均可以从一个平面截割正圆锥得到,如图 2.6-2 所示,所以又称为圆锥曲线。

从图上看,如果平面与圆锥的轴构成的角 $\varphi = 90^\circ$ 时,则得到的截线是圆;当 $\alpha < \varphi < 90^\circ$ 时(α 角为圆锥的轴与其母线组成的夹角),则得到的截线是椭圆。当 $\varphi = \alpha$ 时,得到的截线是抛物线;当 $\varphi < \alpha$, 则得到的截线是双曲线。

二次曲面的组成,均由圆锥曲线的形状所决定。它们可用如下的公共方程式表示之:

$$Y^2 = 2R_o X - (1 - e^2)X^2 \quad (2.6-1)$$

式中 R_o : 曲线在坐标原点(曲线顶点)相切的圆的曲率半径

e : 偏心率

O_o : 曲线顶点曲率中心

在图 2.6-3 表示圆锥曲线一部分,以曲线顶点 B 为坐标原点。 F 为焦距 $\left(\frac{R_o}{2} \cdot O\right)$, 且 $F = \frac{R_o}{2}$ 。

在曲线上任取 A 点,坐标为 (x, y) , 由 A 点作法线 AO_y 交于横坐标 O_y 处,则 BO_y 称截距,用 R_y 表示。 R_y 不是曲线

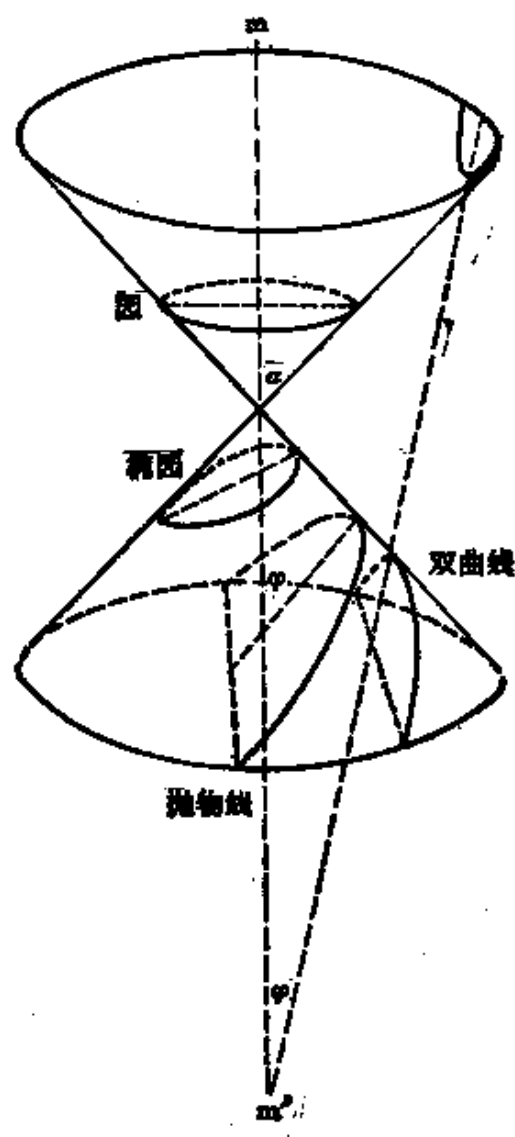


图 2.6-2 圆锥曲线示意图

在点 A 的曲率半径,而是曲线上 A 点的法线与 x 轴的交点的横坐标,所以:

$$\Delta R_y = R_y - R_0 = X e^2$$

其中 e 为偏心率。

对于球面: $e^2 = 0$ 则 $\Delta R_y = 0$

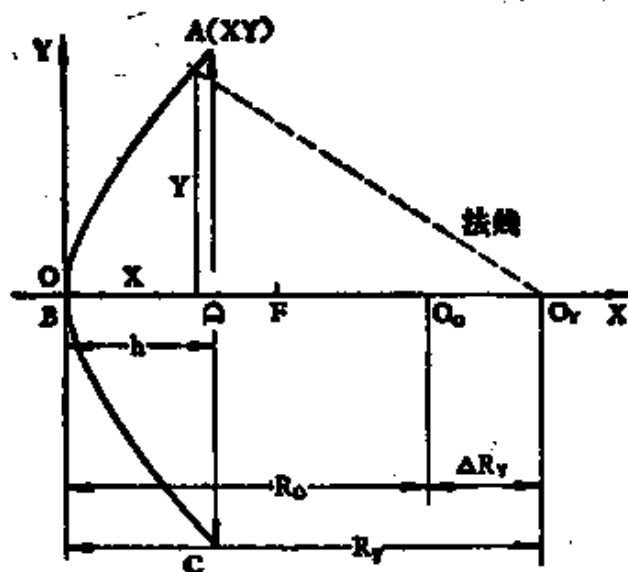


图 2.6-3 二次曲线坐标图

抛物面 $e^2 = 1$ $\Delta R_r = X$

椭球面 $0 < e^2 < 1$ $\Delta R_r < X$

双曲面 $e^2 > 1$ $\Delta R_r > X$

图中 h 代表镜面深度，即曲线上各点的 X 的最大值又称
为矢高。 Y 则为镜面口径的一半。

由上而知，如果知道各面形的基本条件，或顶点曲率半径
 R_0 及偏心率 e 便可根据公式 (2.6-1) 计算出各点对应方程。
各个曲线再用描点法即可画出。这对于制造检验非曲面样
板，业余条件下，精度要求不高时还是可以用的。

(三) 球面与抛物面

在制作抛物面时，一般先要制作标准球面，然后再改成抛
物面，为什么能这样呢？既然曲线中，圆抛物线等是“同胞兄

弟”，尽管他们各有其貌，然而貌有似处。从图 2.6-4 中，可

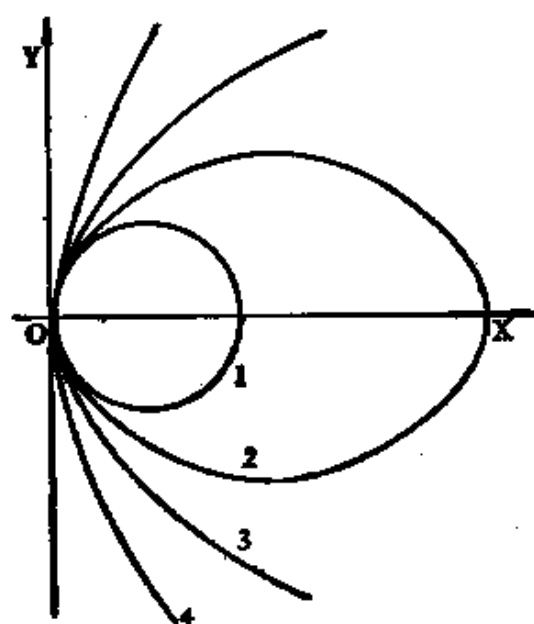


图 2.6-4 几种曲线轨迹

1. 圆 2. 椭圆 3. 抛物线 4. 双曲线

以看出，如果口径很小的情况下，焦距又很长，球面与其他非球面是比较接近的。在这种情况下，我们可以用球面镜代替抛物面镜。

根据象差理论和规定可知，当主镜满足于

$$\frac{D}{2048m^3} \leq \frac{\lambda}{4} \text{ 时}$$

主镜便可做成球面镜。式中 D 为主镜口径， m 为相

对焦距。即 $m = \frac{f}{D}$ ， λ 代表波长，一般取黄光波长的数值，即

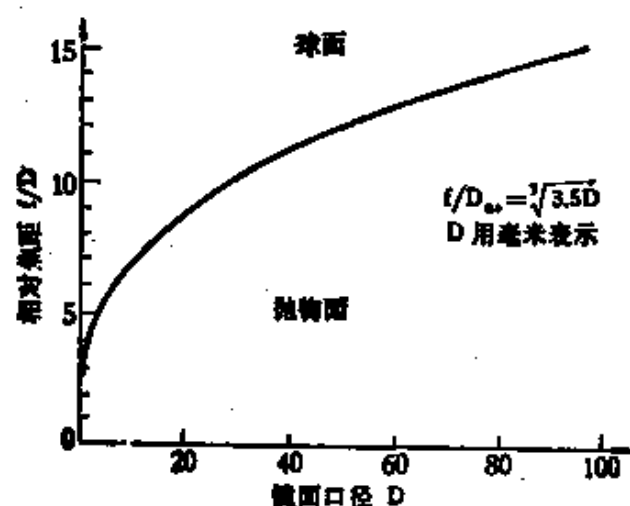


图 2.6-5 球面与抛物面关系图

$$\lambda = 5550 \text{ \AA} (\text{埃}) (0.55 \mu)$$

根据上面所述,图 2.6-5 可画出计算结果——曲线。

从图中看出以曲线为界,如果制作望远镜的口径及它的光力坐标在曲线上方,则它的表面形状,球面即可满足条件。如果在曲线下方,则它的表面形状必须是抛物面;如果在曲线上,则表示表面形状抛物面也行,球面也行。

假如一个口径为 10 厘米,相对焦距为 10 时,镜面可以磨制成球面就行了。如果一个口径为 20 厘米相对焦距为 8 时,那一定要磨制成抛物面;但口径 15 厘米,相对焦距为 8 的镜面,磨制成球面或抛物面均可以。

再深入研究球面与抛物面,找到一个最接近的比较球面。如图 2.6-6 所示。

图中有一个口径 P_1P_2 的抛物面 I,同时,通过 P_1P_2 两点又有一个球面 II,此球面顶点与抛物面顶点重合,这个球面称为最接近比较球面。这个球面的半径 R 大小可用公式求出:

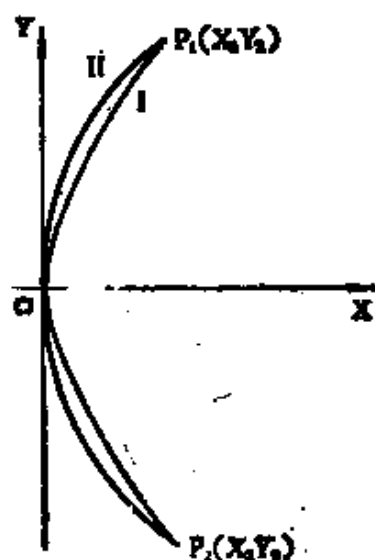


图 2.6-6 抛物面曲线与球面曲线比较图

$$R = R_0 + \frac{DA}{32} \quad (2.6-2)$$

式中 R_0 : 抛物线顶点曲率半径

D : 最大口径

A : 相对口径。

例 $D = 100$ 毫米, $A = \frac{1}{6}$, $R_0 = 1000$ 毫米, 代入上述方程式中得:

$$R = 1000.526 \text{ 毫米,}$$

又从图 2.6-7 中看到, 球面曲线 II 和抛物面曲线 I 之间为最大间距, 这个间距叫做最大非球面度。用 δ_{\max} 表示。对于二次曲面, 计算最大非球面度可用下式。

$$\delta_{\max} = x' - x \approx \frac{D^2 e^2}{512 R_0^3} \quad (2.6-3)$$

式中: D ——非球面口径。

e ——偏心率, 可从给定曲面方程得到。

R_0 ——非球面顶点曲率半径。可从给定曲面方程得到。

通过计算可以知道, 最大非球面度 δ_{\max} 是在 $0.7Y$ 处 (参看图 2.6-7)。了解这一点很重要, 如果把球面镜

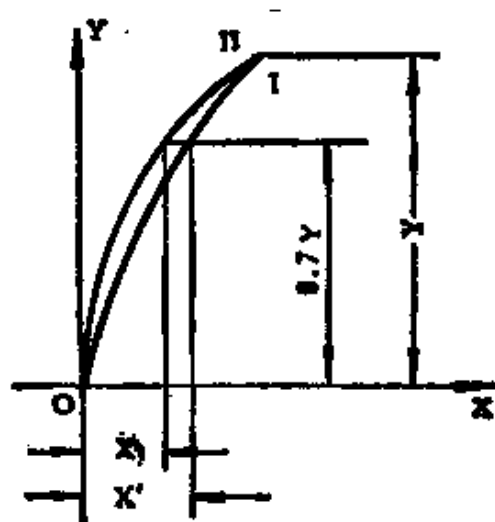


图 2.6-7 抛物面曲线与球面曲线的坐标系

改成抛物面镜时, 可作到心中有数。一般球面镜改为凹抛物面镜时, 在球面的 $0.7Y$ 处磨得最少, 中间和边缘磨得最多。

(四) 球面与双曲面

在圆锥曲线中，双曲面也是经常磨制的面形。如卡式望远镜副镜。一般要磨制双曲面时，也是把它先磨制成标准球面，然后再改成双曲面。从图 2.6-8 中，也可看到一个与双曲面最接近的比较球面。这个圆的半径同样可用公式(2.6-1)和(2.6-2)计算确定。

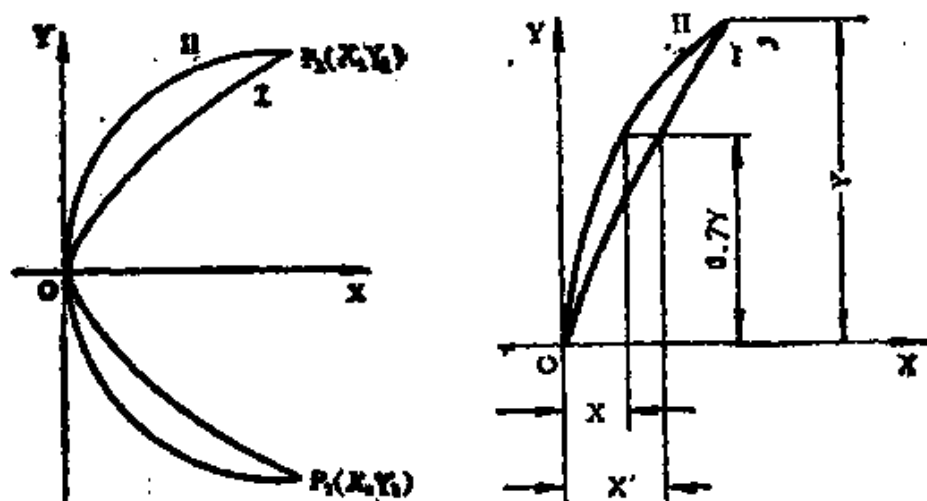


图 2.6-8 双曲线与球面曲线比较图 图 2.6-9 双曲线与球面曲线坐标系

图 2.6-9 中，双曲面与球面间也有最大间距，即最大非球面度 δ_{\max} 。最大非球面度可用公式(2.6-3)计算。这里的 $e > 1$ 。可根据所需镜面形状确定。

对于凸双曲面，它的最大非球面度也是在 $0.7Y$ 处。所以在最接近比较球面的 0.7 带处磨得最多，中间边缘磨得最少。一般最大非球面度愈大，加工愈困难。

七、反射望远镜系统成象

(一) 合 二 为 一

一架反射望远镜包括目视系统和物镜系统，每个系统各有各的作用。物镜系统是反射系统，目视系统是折射系统。作为每个系统均有自己的主点和主平面。但两个系统又成为一个整体，密切合作成为一个共轴系统。那么它们的主点和主平面又是怎样呢？

为了研究问题方便，我们先讨论一般两个共轴光学系统普通成象情况。方法仍然是把两个共轴光学系统合二为一看作一个整体。找出这个整体的主点和主平面的位置，以及合成焦距的大小。

图 2.7-1a 中，I 代表物镜反射系统。它的主点为 H_1 ，主平面为 M_1H_1 ， F_1 为焦点。II 代表目镜系统，它的主点为 H_2 、 H'_2 ，主平面为 M_2H_2 、 $M'_2H'_2$ ， F_2 为第一焦点，在镜左方； F'_2 为第二焦点在镜右方。两个光学系统间隔 F_1F_2 用 Δ 表示，且 $\Delta \approx 0$ ，其它代表符号均在图中标明清楚。

整个系统的第二焦点 F'_s 的确定：按照焦点的性质，平行于主光轴的人射光线 GM_1 ，经过系统 I 的反射，必然通过系统 I 的焦点 F_1 。然后继续前进，直到系统 II。经 II 的折射，其出射光线和光轴的交点 F'_s 。这个 F'_s 就是组合系统的第二焦点。继续延伸光线，使其与人射光线交于 M' 点。根据

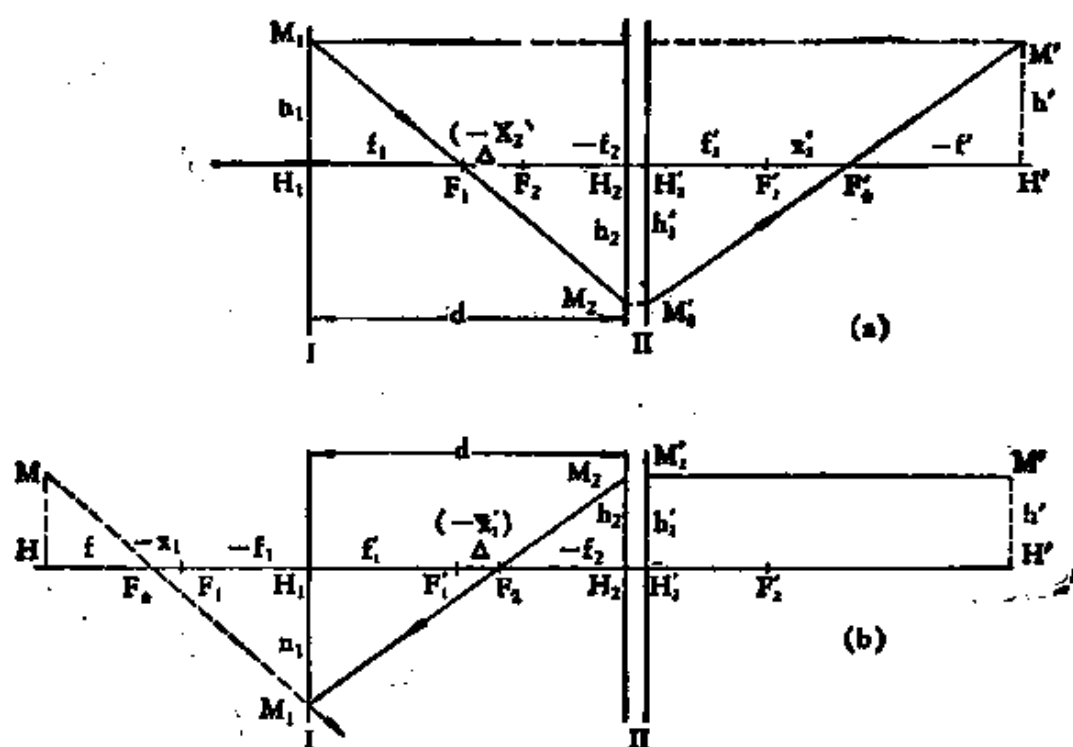


图 2.7-1 光具组主平面的合并

主平面定义， M' 点是主平面上一个点，所以过 M' 作垂直于光轴的平面 $M'H'$ ，就是整个系统的第二主平面。到此为止，我们是找到了第二焦点及第二主平面的位置，但是如果要问它的数值如何？还是不知的。下面我们再找第二焦距的数值。

从图中可以看到，如果以 Π 系统为准， F_1 和 F'_2 是物与象的两个共轭点，应用牛顿公式，则：

$$x_2 x'_2 = f_2 \cdot f'_2$$

这里 x_2 是从 F_2 到 F_1 ，方向自右向左则为负。而系统的光学间隔 Δ 是从 F_1 到 F_2 ，方向自左向右则为正，所以：

$$-x_2 = \Delta$$

代入上式,得

$$x_2' = -\frac{f_2 \cdot f_2'}{\Delta} \quad (2.7-1)$$

式中 F_2' 的位置是已知的, 由此式可确定合成光学系统的第二焦点 F_2' 。

知一求二以确定第二主平面的位置。根据主平面定义, 第二主平面与第二焦点的距离便是第二焦距 f_2' 。它的大小如下求出。

由图 2.7-1a 中, $\Delta M_1'F_2'H_1' \sim \Delta M_2'F_2'H_2'$

则:
$$\frac{-f_2'}{f_2' + x_2'} = \frac{h_1'}{h_2'}$$

又 $\Delta M_1F_1H_1 \sim \Delta M_2F_1H_2$

则:
$$\frac{f_1}{\Delta + (-f_2)} = \frac{h_1}{h_2}$$

$$\because h_2 = h_2' \quad h_1 = h_1'$$

因此
$$\frac{-f_2'}{f_2' + x_2'} = \frac{f_1}{\Delta - f_2}$$

将 $x_2' = -\frac{f_2 f_2'}{\Delta}$ 代入, 得:

$$\frac{-f_2'}{f_2' - \frac{f_2 f_2'}{\Delta}} = \frac{f_1}{\Delta - f_2}$$

整理:

$$\frac{-f_2'}{f_2' \left(1 - \frac{f_2}{\Delta}\right)} = \frac{f_1}{\Delta \left(1 - \frac{f_2}{\Delta}\right)}$$

等式两边同除 $\left(1 - \frac{f_1}{\Delta}\right)$

则：
$$f'_s = - \frac{f_1 \cdot f'_2}{\Delta} \quad (2.7-2)$$

由公式来看，两个共轴光学系统的合成焦距大小，与它们两个系统的焦距乘积成正比，与它们之间的光学间隔成反比。

式中 f_1 、 f'_2 及 Δ 都是已知量，那么，合成系统的第二焦距 f'_s 的大小便能求出数值。因此第二主平面 $M'H'$ 的位置也就确定了。

为了求得合成系统的第一焦点和第一主平面的位置，根据光的可逆原理，如图 2.7-1b 所示。令一条光线从 M' 点反方向射出，并使它平行于光轴入射到系统 II 的左侧。与前面的道理相同，最后光线由系统 I 反射，此反射光线与光轴交点为 F_s ，此 F_s 是整个光学系统的第一合成焦点。出射光线与入射光线延长线的交点 M 是主平面上一点，过 M 作垂线交光轴与 H，则 MH 平面即是合成系统的第一主平面。根据推导第二合成焦点与第二主平面的方法，可求出：

$$f_s = \frac{f_1 \cdot f_2}{\Delta} \quad (2.7-3)$$

以上确定了合成系统的两个焦点和两个主点，下面可以运用“高斯公式”或“牛顿公式”，对有关的物象关系进行计算。

(二) 望远光学系统的关键

公式 (2.7-2) 和 (2.7-3)，要改变共轴光学系统的合成焦

距长短，有两种办法，一则增加物镜系统或目镜系统的焦距，再则减少光学间隔 Δ 的距离。但增加物镜及目镜系统也会引起新困难，在前者确定之后，减少光学间隔使合成焦距能明显增加。特别当 $\Delta = 0$ 时，即 F_1 与 F_2 两点重合，那么光具组第一合成焦距 $f_{\text{合}}$ 及第二合成焦距 $f'_{\text{合}}$ 均变为无穷大。这样的光具组就是望远系统的光具组。所以使其光学间隔为零时，是望远系统的关键。也是反射系统的关键。如图 2.7-2 所示。

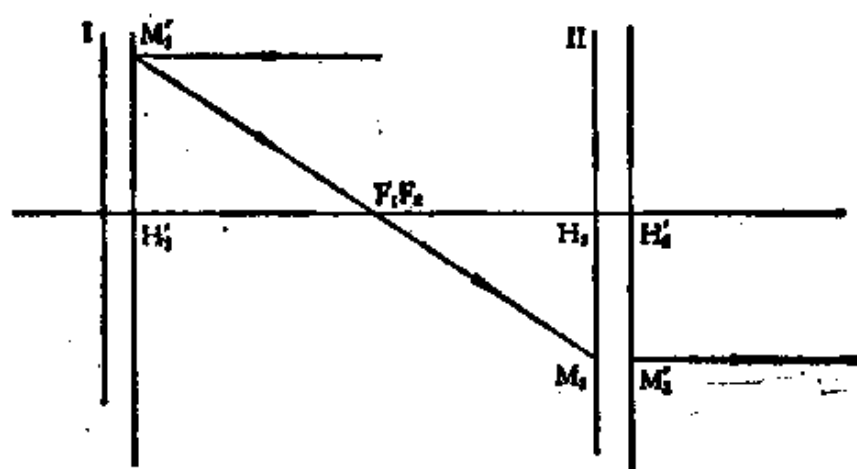


图 2.7-2 反射望远镜系统

图 2.7-2 是适用任何反射望远系统光路图。I 代表反射系统， $M_1'H_1'$ 是它的主平面， H_1' 为主点。II 代表目视折射系统， $M_2'H_2'$ 、 $M_1'H_1'$ 是它的两个主平面， H_2' 与 H_1' 分别是两个主点。从图中来看，无限远的平行光，经第 I 系统反射后，通过 I 系统的焦点 F_1 ，同时也是 II 系统的第一焦点 F_2 。因而光线射到目视折射系统 II 后，再经折射形成平行主轴的光线。

(三) 近在眼前

使用天文望远镜观看天体,就能把遥远的天体移到眼前,让人看清它的“庐山真面目”。这也就是放大作用。光具组的放大作用已作过介绍,现在让我们讨论组合系统的放大率。

1. 线 放 大 率

图 2.7-3 是望远系统成像光路简图。图中对反射系统 I 来讲, $AB(h)$ 为物高。 L_1 为物距, 光线经 I 反射后成像是 $A_1B_1(h_1)$, 距离镜面 L'_1 远。从放大率定义可知:

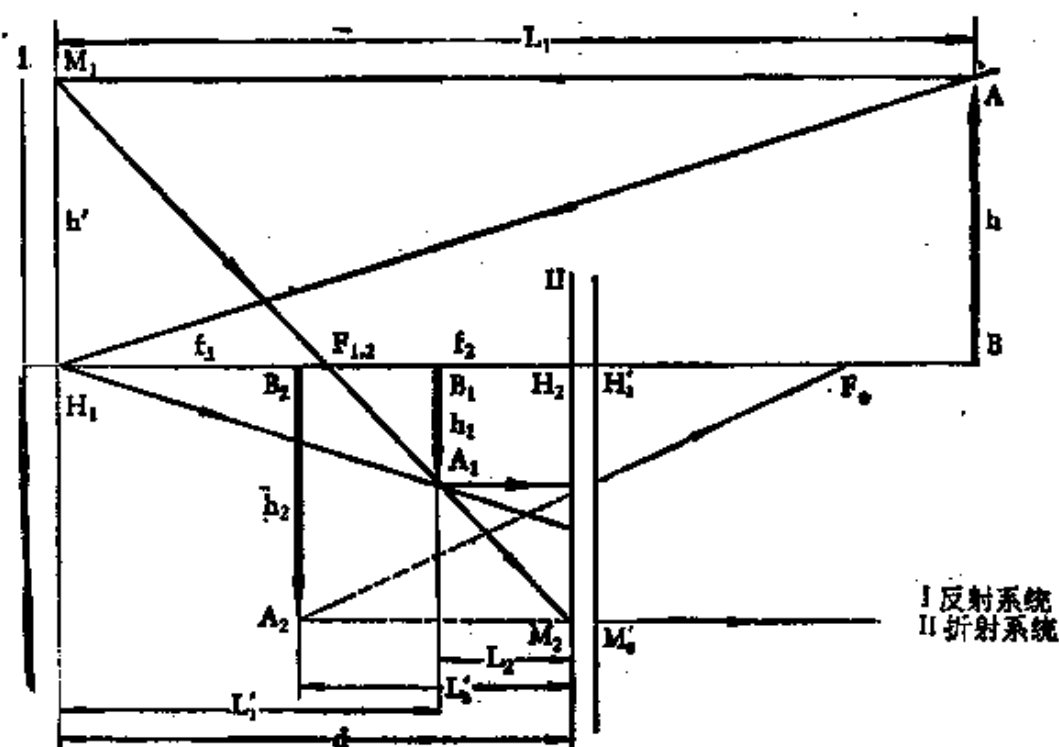


图 2.7-3 望远镜系统放大率

$$\beta_1 = \frac{h_1}{h} = \frac{L'_1}{L} \dots\dots (2.7-4)$$

对于目镜系统 II 来讲, 此时 $A_1B_1(h_1)$ 为物高, 距镜 II 为 L_1 远, $A_2B_2(h_2)$ 为象高, 此象是虚象。它距离镜面 II 的距离为 L'_2 远。从放大率定义则:

$$\beta_2 = \frac{h_2}{h_1} = \frac{L'_2}{L_1} \dots\dots (2.7-5)$$

由(2.7-4)和(2.7-5)可知: $h_1 = \beta_1 \cdot h = \frac{h_2}{\beta_2}$

又据定义则组合系统放大率 $\beta_{\Sigma} = \frac{h_2}{h}$

$$\text{则: } \beta_{\Sigma} = \beta_1 \cdot \beta_2 \quad (2.7-6)$$

由上得知: 望远系统的总放大率 β_{Σ} , 等于物镜系统放大率 β_1 与目镜系统放大率 β_2 的乘积。

2. 角 放 大 率

如图 2.7-4 所示, u 为入射光线与光轴的夹角; u' 为出射光线与光轴的夹角。

根据角放大率定义, 则

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = \frac{u'}{u}。$$

又在 $\triangle ABH_2$ 中和 $\triangle ABH_1$ 中

$$\operatorname{tg} u' = \frac{AB}{f_{\text{目}}}$$

$$\operatorname{tg} u = \frac{AB}{f_{\text{物}}}$$

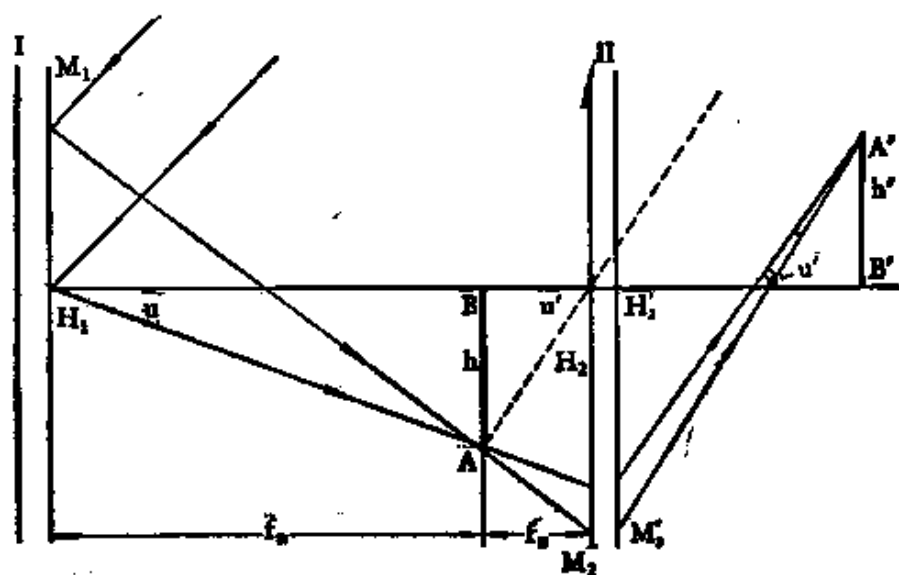


图 2.7-4 角放大率

代入上式则

$$\gamma = \frac{f_1}{f_2} \quad (2.7-7)$$

望远系统的角放大率等于会聚角与入射角之比，又等于物镜焦距与目镜焦距之比。

一般讲望远镜的放大率，多系指角放大率而言。这在实际设计中是个重要参数。表示望远系统光学性能。

线放大率和角放大率的关系

$$\beta = \frac{1}{\gamma} \quad \text{或} \quad \gamma = \frac{1}{\beta}$$

其中 $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$, $\gamma = \gamma_1 \cdot \gamma_2$

望远系统的线放大率与角放大率互为倒数关系。即望远镜线性放大率放大 50 倍，可以把象缩小为原来的 $\frac{1}{50}$ 。而角放大率却使原物体移近 50 倍的地方观看。

从公式中看到，望远镜光具组的线放大率 β 和角放大率 γ 是组合焦距的函数，并不依物体和象点的位置有所变更，这和其他光具组是有显著区别的。

3. 放大率实质

有人常问望远镜把物体放大多少呀！这似乎真的把原物体放大了，可是实际用望远镜观看原物不仅没放大反而缩小了，但用眼看去，又把原物看得清清楚楚，这又为什么呢？原来用望远镜观看物体，是人的眼睛被仪器武装了，它增强人的观察物体的本领。图 2.7-5a 表示用眼睛直接观看物体在视

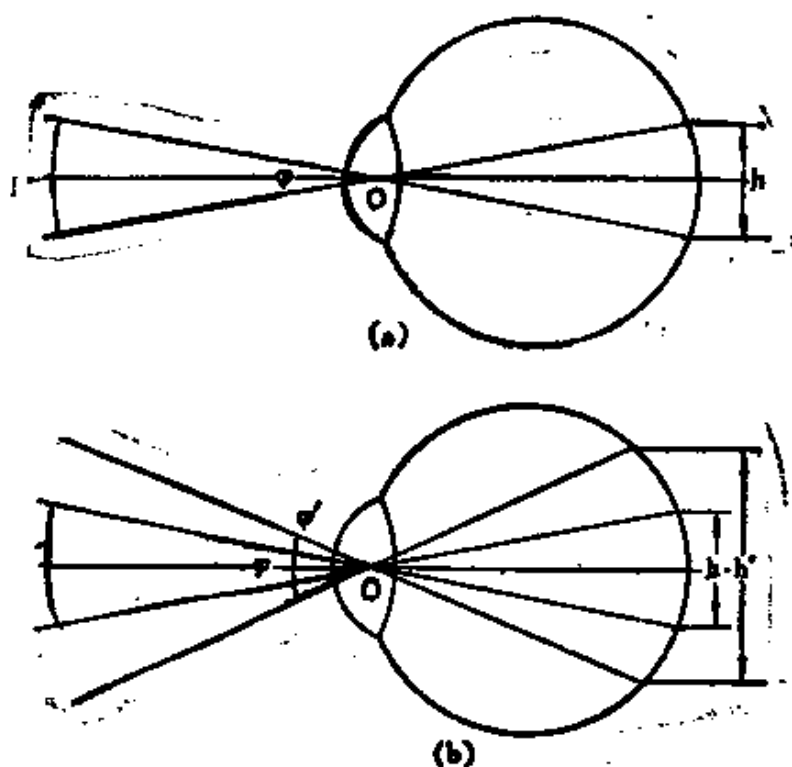


图 2.7-5 人眼观察物体原理图

(a) 人眼直观物体原理 (b) 通过望远镜观察原理

网膜上成象情形。图 2.7-5b 是眼睛通过望远镜观看物体，在视网膜上成象情况。二者比较来看，显然用望远镜观看物体，在视网膜上的象增加，这是视角加大的结果。因而辨别细微部分本领明显增加。从上面线放大率和角放大率的关系中，也说明放大率的不同作用。那么要问放大率实质是什么？我们可以用一句话总结，望远镜的放大作用是使远处的物体被缩小了，而使物体向眼前移近了，平常人们讲近在眼前，便是这个道理。例如用人眼观看火星，火星离我们很远，用眼看去的视角只有 $25''$ （角秒），只能见一个小光点。而用望远镜看去则不然，如一个放大率为 75 倍的望远镜看火星；它的视角增加为 $31'$ （角分），这好象我们直接用眼睛观看太阳一样。

（四）目 镜

目镜是目视天体望远镜不可缺少的附件。它的作用是把望远镜在焦平面上的象，经目镜后使视角加大，把象放大。目镜特点是焦距短，一般为 10—40 毫米。当物镜焦距一定时，焦距越短，得到角放大倍率越大。同时它的视场大，视角在 30° — 70° 之间，这样保证在较大放大倍率下，可以观看范围较大天区。特别对暗弱天体，能有较好的清晰象。

这里应该指出，目镜收集到的光线，投射到眼睛上，眼睛是接收器。如果由物镜所成之象在目镜里看作是出射光瞳。那么，凡是投射到物镜上的光线都通过这个光瞳，瞳孔愈接近光瞳时，眼睛所接受的光线越多，如果光瞳的直径大于瞳孔的

直径时,便会失掉一部分物镜所接收到的光线,所以,为了避免这种情况,制作目镜时,应该使光瞳直径 d 等于眼睛的瞳孔直径 δ (称等瞳倍率 g) 即 $d = \delta$

因为
$$d = D \frac{f_n}{f_o}$$

D 为物镜口径用厘米表示,

f_o 为物镜焦距, f_n 为目镜焦距。

则
$$f_n = \delta \frac{f_o}{D} = \delta m$$

由前面分析,由于人眼的调节观看亮暗物体时,瞳孔直径不一样,如果以人瞳孔增加较大的情况下,取 $\delta = 6$ 毫米。根据以上 f 的关系式,便可得出目镜的焦距最大值。

为便于望远镜上通用,目镜的镜筒都采用统一尺寸为 24.5 毫米。

目镜很少用单独透镜制成,因它光学性能不好,尤其短焦距的目镜象差更大了。所以一般目镜均采用复合目镜,这样消去不少象差,保证在较大视场内,成象良好。

天文爱好者最常用的目镜有以下两种:

1. 冉斯登目镜

这种目镜是由两块均为一样的平凸透镜组成的,如图 2.7-6 所示。这两块透镜参数完全一样。按装时凸面向里,平面向外。为消除象差,把它们之间的镜间距相离 $\frac{2}{3}f$ 处。焦

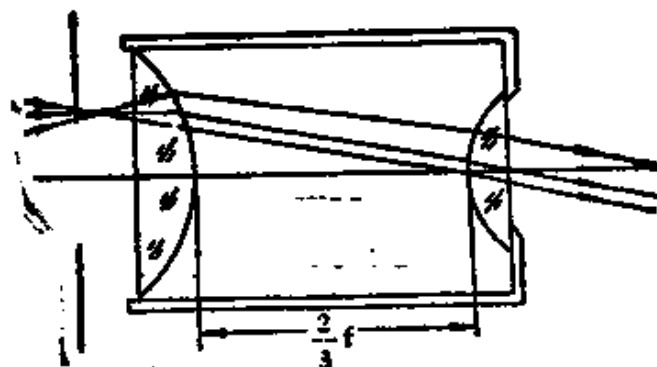


图 2.7-6 冉斯登目镜

点 F' 到镜片距离为 $\frac{1}{4} f'$ 。通过计算确定合成焦距 $f_s = \frac{3}{4} f'$ ，
 每个单片薄透镜其焦距近似等于 $f \approx \frac{R}{n-1}$ 。取 $n \approx 1.5$ ，则
 $f = \frac{R}{\frac{1}{2}} = 2R$ 。视场为 40° 左右。此种目镜磨制容易。目
 镜又有实焦点，可在镜前按放十字丝用以定位。

2. 惠更斯目镜

惠更斯目镜的结构是由两块焦距不等的平凸透镜组成，

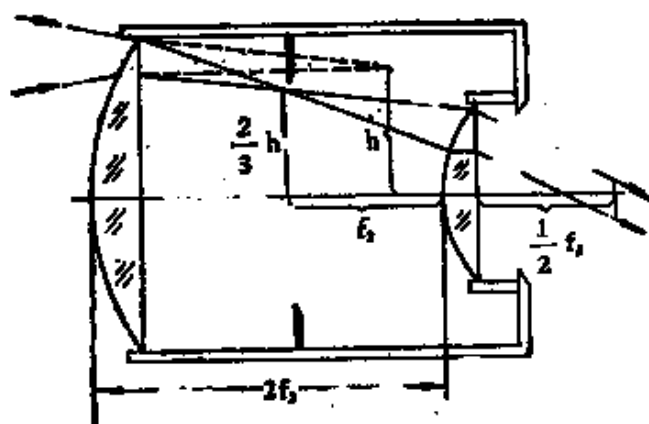


图 2.7-7 惠更斯目镜

如图 2.7-7 所示。前面一块透镜焦距是后面一块透镜焦距的 3 倍, $f_1 = 3f_2$ 两个镜子的镜间距为后一个目镜焦距的 2 倍。 $d = 2f_2$ 根据计算, 目镜焦距值为

$$f_2 = \frac{3}{2} f_1$$

这种目镜第一个透镜成会聚光线作用, 它使视场几何面积缩小, 然后由第二个目镜观测, 所以视场较大, 约为 45° 。能使望远镜长度缩短, 它也是象差较小的一种目镜, 目前应用较广泛。效果较好。

第三章 反射望远镜的设计

天文爱好者观看星象,迫切地需要有一架天文望远镜,但是目前国内能买到天文望远镜还是有困难的,为解燃眉之急最好是自己动手制作一架望远镜,这也是一件有意义的事情。

制作什么样的天文望远镜合适呢?制作者总想有一架质量好,用途广的望远镜,为了能达到这样的目的,首先要了解望远镜的有关光学性能,然后可以“量体裁衣”选择合适的设计方案。

一、天文望远镜的光学性能

(一) 口径与分辨角

世界上的天文台,均努力用最大口径望远镜观看天体,特别是探索暗弱天体的秘密,更是如此。望远镜的口径大小是个尺度,用它可以衡量天文台的工作能力。

每架望远镜的观察的可能限度,取决于镜口的直径,它表示集光能力的不同。口径越大集光能力越强,观测暗弱星体本领越强。这种集光本领与物镜的口径平方成正比。例如,用物镜的直径 60 厘米的望远镜进行观察时,假定眼睛瞳孔的

直径等于6毫米，我们对于所看见星球的亮度所得到的放大率是10,000倍。

随着望远镜的建成，我们所能观察宇宙部分的范围也扩大，看到天体便更加真切。例如，口径为10厘米的望远镜，在理想条件下，使人能发现月球上宽约40米的裂缝和火星上5公里宽的“渠道”；而世界上5米的大望远镜，确能发现月亮上不到1米的裂缝和火星上100米宽的渠道（实际上，由于空气流所带来的畸变和望远镜在光学上的缺点，望远镜分辨本领要小些）。

所以人类顽强地努力克服一切困难制作大望远镜。目前正在研制第二代望远镜的口径可以达到45米。

天上的星星有亮的也有暗的。自古以来，人们用肉眼观看，按照看到的光度强弱而分为等级即为星等(m)。现代天文学把星等作了严格的规定。此规定为凡是二颗星，它们在光度上相差为2.512倍，规定差一个星等。所以一等星比六等星亮为 $(2.512)^5$ 倍，即差100倍。我们把望远镜所能观测到最弱的星等，叫做望远镜“极限星等”。对同一颗星，用人眼看和用望远镜看，二者有差别。根据定义二者相差的星等 Δm ，有如下关系式：

$$\Delta m = -2.5 \log \sigma_{\text{望远镜}} / \sigma_{\text{人眼}}$$

式中 σ 与 δ 用毫米表示。若人眼的瞳孔最大值取 $\delta = 6$ 毫米，将口径 D 用厘米表示，则上式又改写为：

$$\Delta m = -5 \log D / \delta = -1.1 - 5 \log D$$

人眼直接观看的极限星等是6.5等，考虑大气的透射系

数影响,取值为 -0.5 ,综合上述情况,望远镜最终能看到的极限星等是:

$$m_e = 7.6 - 0.5 + 5 \log D$$

取近似值

$$m_e = 7.1 + 5 \log D \quad (3.1-1)$$

(D 以厘米为单位)

用上述公式,可以计算出不同口径的望远镜所能看到的最暗星等。见表 3.1-1。

公式计算出的星等是纯理想的结果,在观测中往往达不到,原因是光线在传播过程中,有各种损失;另外在城里观看,受夜晚灯光的干扰,会使计算的极限星等下降 1—2 个星等。

望远镜还有另外一个本领。有时人们用眼睛观看恒星见到一颗星,当用望远镜观看却能看到两颗或多颗星,这也许使你惊奇,其实是望远镜能分辨物体的细微部分的本领的表现。我们把望远镜所能分辨的本领用分辨角来表示,又称鉴别率。

经验证明:最小分辨角(α)对一定口径的望远镜,可用下面公式表示:

$$\alpha = \frac{12''}{D} \text{ (角秒)} \quad (3.1-2)$$

式中 D 以厘米为单位,求出 α 角单位为角秒。从公式 (3.1-2) 中看到,口径越大,分辨角越小,观看细微部分越清楚。

按照公式不同口径分辨角不同,现列表如下:

表 3-1 口径与极限星等,最小分辨角

性能 \ 物镜口径 (D)cm	10	15	20	25	30
极限星等(m_e)	12 ^m	13 ^m 0	13 ^m 6	14 ^m 1	14 ^m 5
分辨角(α)	1"2	0"8	0"6	0"48	0"4

从上面讨论中可以看到,望远镜的口径大小,是一个重要的光学性能。在制作望远镜时,首先考虑的是口径。从道理上讲口径越大越好,但是大口径望远镜磨制技术难度大,镜架庞大,如美国 5 米望远镜总重量有 530 吨。物镜重 14.5 吨,磨制 11 年完成,制成的镜筒重 150 吨按放在圆顶直径为 45 米的天文台里,整台仪器搞了十多年时间,花费人力、物力是相当可观的。所以至今世界上制造大口径望远镜还是不多的。业余制作受条件限制,磨制大口径的望远镜困难更多。为了能迅速取得成功,建议初磨者磨制 10 厘米—30 厘米之间较为合适。

(二) 焦距与光力

望远镜的焦距是指物镜的焦距。如牛顿式是单片凹面镜的焦距值;卡式是主镜和副镜的合成焦距。不管哪种望远镜,制成后它的焦距总是一个定值。一般焦距越大一定张角的天区在望远镜上的象越大,测量恒星的位置越能准确;观看有视面的星体,表面细微部分越清楚。比如,60 米以上焦距的望

远镜，观看木星的象的直径达 15 毫米 (47'')，而用 2 米焦距观看，只能看到 0.5 毫米直径的斑点。这样看来望远镜的焦距越长越好。

但是，当望远镜口径一定时，如果焦距无限增加，观看星象效果反而事与愿违。这时看到恒星表面光度变暗，影响效果。也就是说光力减弱。

光力是指口径与焦距的比值。用 A 表示：

$$\text{即} \quad A = \frac{D}{f} \quad (3.1-3)$$

光力又叫相对口径，或简称焦比。从公式中来看，焦距越长光力越弱，观看有视面天体细微部分效果变差，观看更暗弱星体则无能为力。因为观看星象最后要用眼睛，而人眼观看星象的亮暗程度，与光力的平方 $\left(\frac{D}{f}\right)^2$ 成比例，而望远镜制作时，总是焦距大于口径，实际效果使亮度减弱。所以在制作望远镜时，要看望远镜所能担负的任务，选择合适的光力。

在实际应用上，把光力比值的倒数叫做相对焦距 $V = \frac{F}{D}$ ，如 f_8 表示焦距是口径的 8 倍，即口径为 10 厘米时，焦距为 80 厘米；口径为 20 厘米时，焦距为 160 厘米。一般观看月亮、行星的细部，望远镜光力可选择 $\frac{1}{6} - \frac{1}{8}$ 之间。观看大范围的星云和星团光力可选择 $\frac{1}{4} - \frac{1}{6}$ 之间。

(三) 放大率与视场

放大率是望远镜观看物体本领的一种光学性能。一般人认为,放大率越大看星象越清楚。从理论上讲,放大率等于物镜焦距和目镜焦距之比。(见前“角放大率”一节)所以增大物镜的焦距同时减少目镜焦距,能得到无限的放大率。然而事物总是一分为二的,如果放大率无限增大,可是物镜口径不增加,结果导致光力越来越弱,用这样弱光力望远镜观看星象,不仅不能增加观看细节的效果,反而难辨真目。与此同时用大倍率望远镜观看星象,星象是被放大了,而使星象抖动的大气,也随之放大,这样星象仿佛蒙上一层跳荡的面纱,又难以看清楚了。综上所述,无限增大放大率,反而是费力不讨好,得不偿失。一般物镜直径每一厘米最大有效的放大倍率等于50—60倍。可是绝少使用最大极限的放大倍率。

在讨论放大率时,还要讨论“分辨放大率”。我们看天体清楚与否,最终由眼睛分辨出细微部分来决定。什么情况就能分辨开呢?根据公式(3.1-2),口径决定望远镜光学系统的最小分辨角 α'' ,但是最小分辨角能否被人眼真正分开,还要看所取的目镜放大率。因为人眼本身只能分辨开大于 $60''$ 的角距离,也就是将物镜的最小分辨角要放大到 $60''$ 角秒上,这样人眼才能分辨开,那么它所对应的放大率称为“分辨放大率”,用 G_r 表示。即为最小放大率。用公式表示:

$$G_r = \frac{60''}{\alpha(\text{厘米})} \quad (3.1-4)$$

根据公式 (3.1-2)

$$\alpha = \frac{12''}{D \text{ 厘米}}$$

代入上式:

$$\text{则: } G_r = \frac{60}{\frac{12}{D \text{ 厘米}}} = 5D \text{ 厘米}$$

业余制作放大倍率最好选 50—300 倍之间为宜。

表示望远镜性能的还有视场。所谓视场是指望远镜中看到的一定范围的天空(如图 3.1-1)。

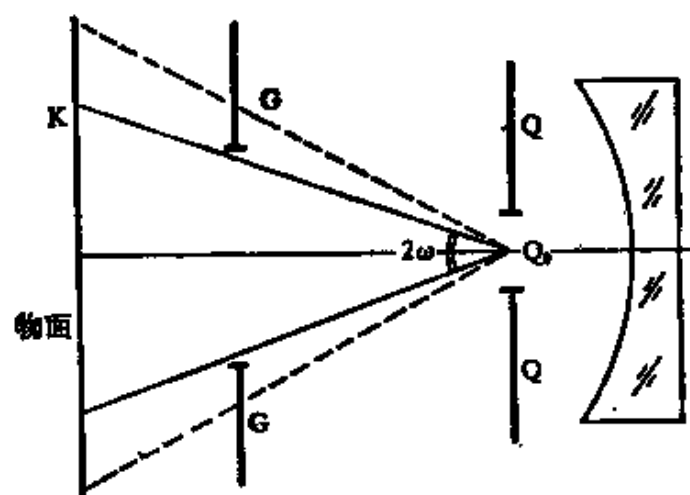


图 3.1-1 视角

设图中反射镜前有个光栏 QQ 为入射光瞳，可以通过物象关系找出以光栏 QQ 为物 GG 为象的位置和大小，当 GG 确定后，光线通过 GG 之后，到光栏的中心点 Q_0 处所成角度 2ω 为最小角。则 GG 称为场栏。这时 2ω 就是最大视角。在 2ω 范围以外，显然从天体范围射出的主要光线，就给 GG 挡

掉了。这样视场角以内的星体却同样明亮。视场角以外的星体则看不到。所以视场大小表示望远镜观看天空区域的大小,当然,区域大的,观看星象多。

视场大小与望远镜的种类有关,也与目镜的结构有关。不管什么样的望远镜一般视场都较小,所以不同任务的望远镜,要求视场不同,如拍照大天区的望远镜最好是旋密特望远镜。另外同类型的望远镜,因放大率不同,视场也不同。一般用下面公式表示。

$$\omega = \frac{30^\circ}{\beta}$$

从公式中看,当目镜视场一定时,放大率越大,视场越小,放大率越小,视场越大。视场与放大率成反比。

表 3-2 物镜口径 20 厘米的放大倍率与视场

放 大 率 \ 项 目	视 角	观 看 现 象	恒星穿过视场的时间
30 倍—40 倍	1°—0.75°	找寻目标,观察彗星,星云、星团和变星、太阳黑子及人造卫星	4 分
50 倍—80 倍	0.6°—0.37°	观察彗星,特别彗头部分金星盈亏,月亮上环形山及表面一般观察,土星四大卫星、火星极冠,太阳黑子的米粒组织	2.1 分—9 秒
100 倍—150 倍	0.3°—0.2°	观看火星、木星、土星、月亮表面细部,太阳米粒组织,观看双星	7.2 秒—4.8 秒
200 倍	0.15°	观察行星和月亮表面,近距双星等	3.6 秒

注:穿过视场的时间是在赤道上,穿过视场的时间,如果不在赤道上,随着恒星赤纬不同而不同,一般用 $t = T / \cos \delta$ 公式计算出来。

望远镜的使用中,为观看不同天体现象,则要求选用不同放大率的望远镜。可是望远镜制成时,物镜的焦距总是一定的,为了得到多种倍率,便采用配备不同焦距的目镜。那么,望远镜的视场也要变化(参看表 3-2)。

二、卡式望远镜的设计

(一) 设计前的考虑

高楼大厦的建设必须有蓝图,同样要制作望远镜也必须事先有个打算,这个打算便是平常所说的设计工作。本章着重介绍卡式望远镜在业余条件下的简单设计方法。由于是业余制作,因而不得不根据实际情况作出合适的设计的方案,作为加工的标准,但是不能作为绝对的标准。

另外光学系统的设计是相当费时的工作,我们只介绍一些简单的计算步骤,以便在磨制时尽量达到良好效果。

设计的具体步骤包括三个方面:

(1) 根据使用要求,确定光学性能。即选择望远镜的主要规格。因为同样类型的光学仪器,可以有不同的具体结构。比如选择50倍率的望远镜,物镜的焦距多长,取决于目镜的焦距,目镜焦距太短会引起很多难予修正的象差。为了设计和制作方便起见,我们希望目镜的焦距尽量放长些,这无疑使望远镜的长度和重量增加。除了物镜和目镜焦距长短之外,尚决定物镜的口径比率,口径大小不仅有关象的亮度,更

重要的是决定望远镜的分辨力。因此设计时,必须按照使用要求和已有条件,确定望远镜的各项光学性能。

(2) 进行外形尺寸计算。确定光学系统成象及确定光学性能后,光学零件外形尺寸应如何要求,加工时应制作的尺寸如何,要先作到心中有数。

(3) 绘制光路(草)图及光学零件加工图。把计算的结果,按比例绘图,并算出加工零件有关技术要求,标明主要外形尺寸,使得在制作时一目了然。在制作时当做标准,尽量达到设计的要求,制成后并按要求组装成完整光学系统。

(二) 设计要求及举例

1. 对光学性能要求

望远镜的光学性能,重要的关键在于主镜的口径。因为口径大小对于望远镜是举足轻重的条件。一旦口径得以确定,其他相关的光学性能便随即确定。再则事先确定望远镜所要担负的任务,也就是使用目的,而适当地确定光力及视场。现将制作卡式望远镜的有关选择光学性能介绍如下。

口径: $D = 200$ 毫米

考虑望远镜以观看月亮及行星为主、并能具有多种用途,所以相对口径适中,视场稍大。

即: 相对口径: $A = \frac{1}{6}$

视 场 $2\omega = 30'$

放大率分四级 γ : 50, 80, 100, 150。

副镜顶点到主镜焦点距离: $P = 270$ 毫米

主镜顶点到系统合成焦点距离: $e = 150$ 毫米

2. 物镜的尺寸

(1) 主镜的外形

由已确定出相对口径的大小, 从公式 $A = \frac{D}{f}$ 中, 得出主镜焦距为:

$$f_{\pm} = 1,200 \text{ 毫米}$$

由图 2.6-5 可知磨制这样主镜面形, 必须要选择抛物面镜, 但磨制抛物面镜前, 先要磨制

球面镜, 所以根据公式 $f = \frac{R}{2}$, 确定出此球面的曲率半径为:

$$\begin{aligned} R_{\pm} &= 2f_{\pm} = 2 \times 1200 \text{ 毫米} \\ &= 2400 \text{ 毫米} \end{aligned}$$

计算矢高如图 3.2-1 所示一般计算矢高方法, 采用开方方法。

公式为:

$$h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (3.1-1)$$

则主镜矢高为

$$h = 2400 - \sqrt{(2400)^2 - \left(\frac{200}{2}\right)^2} \text{ 毫米}$$

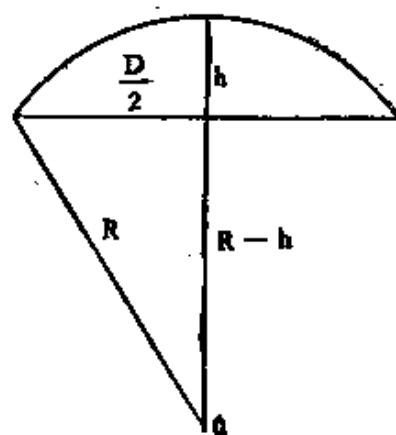


图 3.2-1 矢高

$$h = 2 \text{ 毫米}$$

知道矢高可在磨制时,作为检验的参考。

在磨制和使用望远镜时,为防止损坏需要镜面有一定厚度,再者防止外界温变引起镜面变形也需要一定厚度。但这种厚度又没有严格界限,一般小型望远镜玻璃厚度选择它的口径为 $\frac{1}{6} - \frac{1}{10}$ 之间就可以了。

$$\text{即} \quad d = K \cdot D \quad (K \text{ 为厚度系数})$$

如果把主镜厚度系数 $K = \frac{1}{8}$ 时,则主镜厚度:

$$d_{\pm} = 25 \text{ 毫米}$$

(2) 副镜的外形

要设计副镜有关尺寸,首先确定副镜与主镜合成焦距的数值。它计算由公式 $f_{\pm} = \frac{q}{P} f_1$ 求出。式中 q 是副镜顶点到合成焦点之间距离,由图 (2.4-17b) 可知。

$$q = f_1 - P + e。 \text{代入公式}$$

$$\text{则:} \quad f_{\pm} = \frac{f_1 - P + e}{P} \cdot f_1$$

代入数值

$$f_{\pm} = 4800 \text{ 毫米}$$

由公式 (2.4-27) 可导出副镜焦距公式:

$$f_2 = \frac{f_{\pm}(f_1 - d)}{f_1 - f_{\pm}} \quad \text{又} \quad P = f_1 - d$$

$$\text{则} \quad f_2 = \frac{f_{\pm} \cdot P}{f_1 - f_{\pm}}$$

分别把 f_1 、 f_e 、 P 值代入公式

得:
$$f_2 = \frac{4800 \times 270}{1200 - 4800} (\text{毫米}) = -360 (\text{毫米})$$

负号说明副镜面形与主镜面形方向相反,为凸面反射镜。

副镜曲率半径:

$$R_{\text{副}} = -720 (\text{毫米})$$

在望远镜光束限制中,我们已讨论了卡式副镜的直径与主镜出射光栏有关,同时与视场直径也有关。所以副镜直径可由如下公式确定:

$$D_2 = \frac{P(D - b_1)}{f_1} + b$$

式中 b 为主镜视场直径。因卡式望远镜视场小于 1° , 计算时可粗略地取 5—10 毫米。

现取 $b = 6$ 毫米代入则

$$\begin{aligned} D_2 &= \frac{270 \times (200 - 6)}{1200} + 6 \\ &= 43.625 + 6 \\ &= 49.625 (\text{毫米}) \end{aligned}$$

考虑到磨制及按装时的误差,副镜实际口径 $D'_2 = KD_2$ (K 取 1.15 值)

则 $D'_2 \doteq 55$ 毫米。

副镜的厚度: $d_2 = \frac{1}{6} D'_2 \doteq 9.12$ 毫米

取标准化 $d'_2 = 10$ 毫米

矢高计算

$$h_m = R_m - \sqrt{R_m^2 - \left(\frac{D_2}{2}\right)^2}$$

$$= 5.3 \text{ 毫米}$$

为了能使光线在主镜后聚焦，主镜中心处开孔直径由下式计算。

$$D_3 = \frac{e(D-b)}{f_a} + b$$

代入数值：则

$$D_3 = \frac{150 \times (200 - 6)}{4800} + 6$$

$$= 5.39 + 6$$

$$= 11.94 \text{ (毫米)}$$

考虑整个望远镜视场及斜光束影响，取 $D'_3 = 2.5D_3$ ，则：

$$D'_3 = 29.85 \text{ 毫米}$$

取标准化 $D'_3 = 30 \text{ 毫米}$ 。

上述是把卡式主副镜的外形尺寸及有关参数作个初步计算。为提高象质减少象差，主镜须改制成抛物面镜，副镜须改制成双曲面镜，改制方法待磨制时加以评述。为增加反光能力，主副镜表面需要镀上银膜或者铝膜。

(3) 目镜的选择

(a) 冉斯登目镜设计：

在目镜一节已经把爱好者常用的类型目镜作了简要介绍。在这里仅就以放大率为 50 倍为例，说明目镜设计有关方法。

冉斯登目镜是由两个参数相同的镜片组成的，计算时可以运用在目镜一节介绍有关公式求出其镜面参数，

$$\text{合成焦距: } f_{\text{目}} = \frac{\delta_{\text{全}}}{\gamma} = \frac{4800}{50} (\text{毫米}) = 96 \text{ 毫米}$$

$$\text{每个镜片焦距 } f_1 = \frac{4}{3} f_{\text{目}} = 128 \text{ 毫米}$$

$$\text{每个镜面曲率半径 } r = (n - 1)f_1 = 64 \text{ 毫米}$$

$$\text{每个镜片口径: } D_{\text{目}} = A f_1, \text{ 取 } A = \frac{1}{8}$$

$$\text{则: } D_{\text{目}} = 16 \text{ 毫米 标准化取 } D = 20 \text{ 毫米}$$

$$\text{镜片中心厚度: } \Delta = 0.18D = 3.6 \text{ 毫米}$$

$$\text{镜片矢高 } h = 0.78 \text{ 毫米}$$

边缘厚度取 1 毫米。

$$\text{二片平面间距离: } d = \frac{2}{3} f = 64 (\text{毫米})$$

$$\text{焦点至平面距离: } s = \frac{1}{4} f = 24 (\text{毫米})$$

这些计算是近似的计算，有了这些数据则可以着手磨制目镜。

(b) 惠更斯目镜

惠更斯目镜设计方法与冉斯登方法基本相似，现以放大率为 100 倍为例说明方法。

$$\text{合成焦距: } f_{\text{目}} = \frac{4800}{100} = 48 (\text{毫米})$$

$$\text{后镜焦距, } f_1 = \frac{2}{3} f_{\text{目}} = 32 (\text{毫米})$$

曲率半径 $r_1 = (n - 1)f_1 = 16$ 毫米

口径 $D_1 = \frac{1}{4} f_1 = 8$ 毫米, 现取 10 毫米

镜片中心厚: $\Delta_1 = 0.5D_1 = 5$ 毫米

矢高 $h_1 = 0.83$ 毫米

边缘厚度 取 1 毫米

前镜焦距 $f_2 = 3f_1 = 96$ 毫米

曲率半径 $r_2 = (n - 1)f_2 = 48$ 毫米

口径 $D_2 = \frac{1}{5} f_1 = 19.2$ 毫米, 取 20 毫米

镜片中心厚 $\Delta_2 = 0.2D = 4$ 毫米

矢高 $h = 1.06$ 毫米

边缘厚度 取 1 毫米

镜顶之间距离 $d = 2f_1 = 64$ 毫米

惠更斯镜光栏位在两个镜片之间, 距离后镜为 f_2 焦距远, 所以 $s = f_2 = 32$ 毫米。

上面我们讨论了冉斯登和惠更斯两种目镜的简单设计。这些计算是按照理论上的计算, 在磨制时和按装时均与计算结果略有出入, 一般讲这种变化范围不十分大, 不影响使用效果。

望远镜往往要配上不同焦距的目镜, 以得到不同的放大倍率。每种目镜的设计方法, 均可参照上述方法去自行设计。为了供读者制作方便, 现把主镜直径为 200 毫米, 系统合成焦距为 4,800 毫米, 使用不同倍率目镜尺寸列表 3.1-2 如下, 供制作时参考。

表 3-3 两种目镜数据表

物镜 $D = 200\text{mm}$, 合成焦距 $F_A = 4800\text{mm}$

单位: 毫米

项 目 种 类	放大率 (γ)	系统合 成焦距 f_A	单片焦距		镜片曲率		镜片口径		镜间距 d
			f_1	f_2	r_1	r_2	D_1	D_2	
冉 斯 登	50	96	128	128	64	64	20	20	85.33
	80	60	80	80	40	40	10	10	53.3
	100	48	64	64	32	32	10	10	42.67
	150	32	42.67	42.67	21.33	21.33	10	10	28.45
	200	24	32	32	16	16	5	5	21.33
惠 更 斯	80	60	40	120	20	60	15	20	80
	100	48	32	96	16	48	10	20	64
	150	32	21.3	63.9	10.65	31.95	5	15	42.6
	200	24	16	48	8	24	5	15	32
	300	16	10.7	32.1	5.35	16.05	5	10	21.4

4. 光路图及主要光学零件图

计算了望远系统的外形尺寸之后,为了能更清楚表示光学元件性能,同时加工时一目了然,还要对所设计的光学系统及外形尺寸进行认真地画图。图包括光路图及零件图等。

图 3.2-2 是设计望远系统光路图。它的作用是标明组成这些光学系统中每个光学零件的相对位置及尺寸。标明主要光学元件的外形尺寸及光学系统的光学性能。在安装时光路图是重要的参考依据。

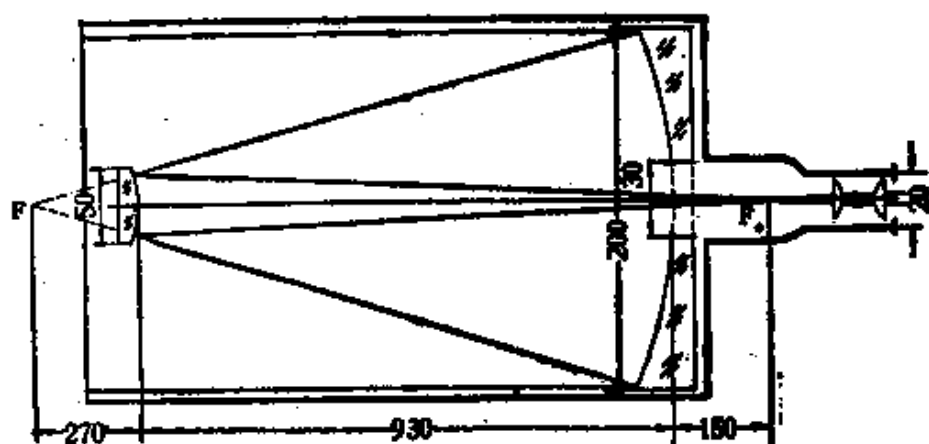


图 3.2-2 卡式望远镜光学系统图

图 3.2-3 及图 3.2-4 分别是主镜和副镜的单个外形尺寸图。这种图又称光学零件图,它具体对光学性能加以说明,标明加工时的要求,可作为磨制及检验的标准。

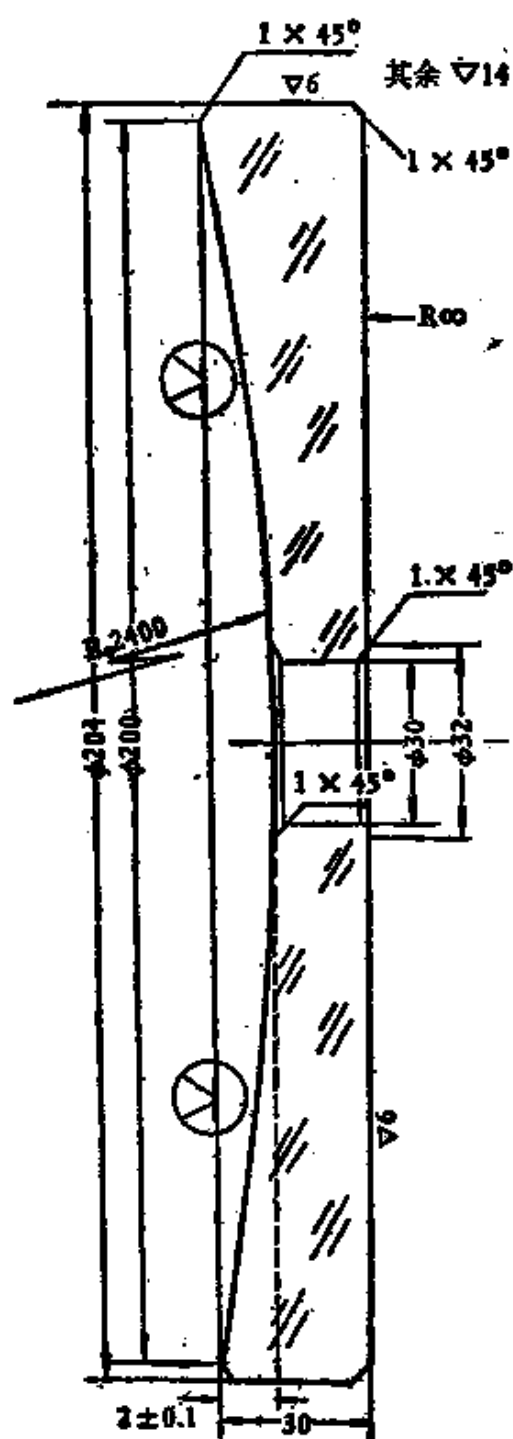


图 3.2-3 主镜

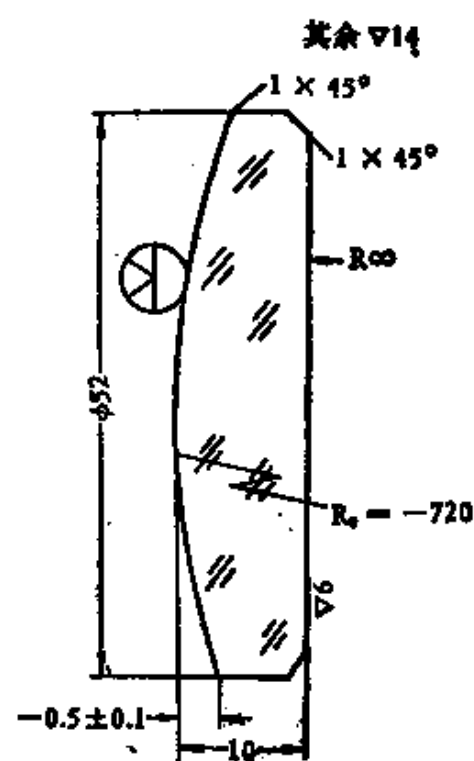


图 3.2-4 副镜

三、其他类型设计

前面介绍的是卡式望远镜制作的简易设计过程。如果想制作其他类型望远镜，也是可以的。下面再介绍牛顿式望远镜和马克苏托夫式望远镜的简易设计方法。

1. 牛顿式望远镜的简易设计

牛顿式反射望远镜(图 2.1-1)与卡式的主镜均一样是个凹球面反射镜，它的设计方法请参照前面介绍，这里不再叙述。它的副镜是用一个平面镜(又叫对角镜)作为转象系统。由于光线经主镜反射后形成光锥，其截圆直径愈来愈小，它与平面镜相交成椭圆形，因此平面镜最好是椭圆形。这样它的主镜上投影就呈圆形，遮挡光线少。可是椭圆镜磨起来麻烦，有时把它磨成八角形或长方形。如图 3.3-1。

平面镜大小根据如下公式计算。

$$b = \frac{D}{f} \cdot P + 2(f - P) \lg \frac{\omega}{2}$$

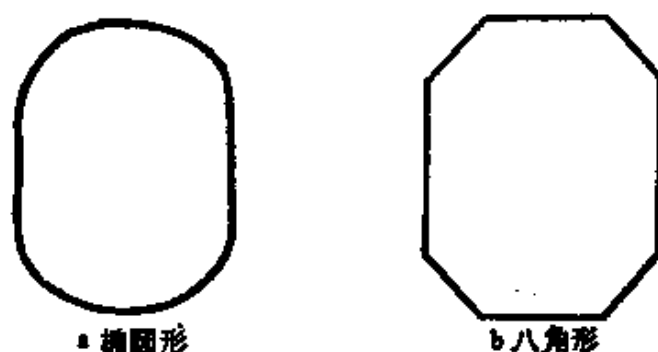


图 3.3-1 平面镜

式中 D : 口径

f : 主镜焦距。

P : 平面镜中心离焦点间距离。

ω : 视场角(一般选为 1° 以下)

b : 椭圆短边长度。

例: $P = 100$ 毫米, $D_1 = 200$ 毫米, $F = 1200$ 毫米。
 $\omega = 45'$ 。(月亮的角直径为 $30'$, 取 $45'$ 看满月视野开阔)。

代入公式

$$b = \frac{200}{1200} \times 100 + 2(1200 - 100) \times \operatorname{tg} \frac{45'}{2} \\ = 30.75 \text{ 毫米}$$

取标准化 $b = 32$ 毫米。

由于平面镜长边 a 的长度与短边 b 的长度之比为 $\sqrt{2}:1$ 。

则: $a = \sqrt{2}b$ 。

求出 a 值: $a = 45.248$ 。

取标准化: $a = 46$ 毫米

平面镜的厚度 d 取 $\left(\frac{1}{5} - \frac{1}{8}\right)a$, 不要超过 $\frac{1}{4}a$ 。

则: $d = \frac{1}{7}a = 6.87$ 毫米 取 $d = 8$ 毫米

为了能制作容易和有较好的效果, 我们介绍用球面镜代替抛物面镜的一些数据, 见表 3-4。表中所列数据是根据图 2.6-5 得出, 用这种相对焦距时, 球面镜与抛物面镜相差很少, 所以可视为抛物面镜。

表 3-4 球面镜代替抛物镜的数据

(单位: 毫米)

主镜口径(D)	50	100	200	400
焦 距	280	700	1780	4486
相对焦距	5.6	7.0	8.9	11.2

2. 马克苏托夫式望远镜的简易设计

马克苏托夫式望远镜应用是比较广泛的,它的镜筒短,象差小,视场大,加工容易,有一定磨制卡式镜经验的人,可以试磨马克苏托夫式。它的光路图见前(图2.1-6a)。但这种望远镜适合照相,观测不便,如果配上个导星镜或加转向镜也就可以进行观测。

设计马式望远镜,有如下经验公式,通过这些公式能较容易地计算出各个镜面的主要参数。制作时尽量达到标准,否则影响效果。

$$r_1/D = -0.612A^{-0.66}$$

$$r_2/D = -0.612A^{-0.66} - 0.0565 - 0.007A$$

$$r_3/D = -2.107A^{-0.983}$$

$$d_2/D = 1.11A^{-1.14}$$

$$d_1/D = 0.1$$

其中 r_1 ——弯月形镜第一面半径

r_2 ——弯月形镜第二面半径

r_1 ——主镜球面半径

D ——主镜口径

A ——相对口径 $\left(\frac{D}{F}\right)$

d_1 ——弯月形镜厚度

d_2 ——弯月形镜到反射镜的顶点间隔。

(公式摘自光学设计仪器手册上册 208 页)

弯月形镜所用玻璃相当于 K, 光学玻璃; 其他玻璃不好用。

当 $r_1 = r_2$ 时是无色差的。当 $r_1 \neq r_2$ 时, 虽有色差, 但由于弯月形镜很薄, r_1 与 r_2 的曲率半径又相差很小, 所以色差小, 影响成象不明显。为使读者能制作, 下面介绍一组数据, 供制作时参考, 见表 3-5。

表 3-5 马式镜组数据

(单位: 毫米)

项 目 种 类	口 径 (D)	曲 率 半 径 r	厚度及间隔	材 料	备 注
弯月形镜	100	$r_1: 177.04$	10 695.26	一定用 K,	
		$r_2: -182.83$			
主 镜	110	$r_3: -1025.08$		K, 或其他	表面镀银 或镀铝

第四章 反射望远镜的制作

望远镜光学系统设计完成后,就要开始磨制镜面了。制一架望远镜要磨制许多镜片。除此之外还要制作稳固灵活的镜架。在这一章里要对这些作个介绍。不过要说明的是书中介绍的制作方法,尽量从爱好者实际出发,做到既简单可作而且效果又好。这样不免又显得“土”些。可是“土”并没什么,实际能用就好,况且不断实践可以“由土而洋”呢!功夫不负有心人,从实践中总会不断提高。

一、选料及工具

(一) 玻璃的选择

望远镜中的光学元件是由玻璃磨制而成的,镜面玻璃多采用光学玻璃,这种玻璃是把特殊的化学元素掺入玻璃内制成的,它的光学性能好磨制也较容易。光学玻璃品种较多,主要分为冕玻璃和火石玻璃两大类,根据要求不同,选用不同光学玻璃。一般业余磨制镜面,选用K₉较好。如果没有光学玻璃,作反射镜面也可以用普通硬质玻璃代替。只要玻璃表面光洁度较好,即使内部有小气泡和小纹道的存在也不影响使

用。但玻璃的内应力大时,加工后会使镜面变形,甚至炸裂。所以不宜使用作为透镜的目镜玻璃,最好选用 K₉ 光学玻璃,这种玻璃要求严格内部不能有小条纹,气泡和杂质等。

研磨镜面采用手工对磨法磨制,也就是每当磨制一个镜面时,均选用两块玻璃,一个作镜面,一个作偶板(即工具)。现将磨制 20 厘米卡式望远镜所需毛坯料,列表如下:

表 4-1 毛坯料的数据

(单位:毫米)

名 称	项 目	材 料	直 径	厚 度	数 量	焦 距	曲率半径
1	主 镜	光学玻璃K ₉ 或 普通玻璃	210	25	1	1200	2400
	偶 板		210	10~15	1		
2	副 镜	同 上	50	15	1	-360	-720
	偶 板		50	10	1		
3	目 镜	K ₉	20	5	8	128	64
4	寻星物镜	K ₉	40	10	1	200	100
	偶 板		40	10	1		

(二) 磨料及自制

磨料是研磨镜面用的各种砂料。按成分来分,有金刚砂(SiC)、刚玉(Al₂O₃)等。

金刚砂: 主要由黑色或暗绿色的碳化硅组成。这种砂硬度较大,是莫氏硬度 9.15 级,韧性小,研磨玻璃时磨制较快,

但磨得玻璃表面粗糙，一般用于粗磨较多。

刚玉：又称氧化铝 (Al_2O_3)，它具有较大韧性，硬度为 9 级左右。刚玉颜色较多，有粉红色、棕褐色、黑色等。

磨料的颗粒直径大小各有不同，按其颗粒大小而分为粗砂和细砂。每一种又分为许多级，每级定有许多标号。粗砂的标号采用筛号来命名。就是用一定大小的网眼筛子，所筛出的砂子，与筛子的网眼的大小近似，所以用筛号命名砂号。较小颗粒的分级而选用沉淀法。即根据颗粒大小不同的磨料，在水中沉降的速度不同，颗粒大沉降时间短，颗粒细沉降时间长。然后按颗粒直径大小而命名，一般砂号可分为 200 号，现举例如下：12、16、24、36、40、50、60、70、80、90、100、120、160、180、200、240、M302、M302 $\frac{1}{2}$ 、M303、M304、M305、M306。号码越大粒径越小。

在磨制玻璃镜面时，只选用几种就够了，例如粗砂为 60—100 号。细砂种类为 120—150 号，240—280 号，M302、M303、M303 $\frac{1}{2}$ 或 M304 号。现将磨制卡式望远镜所用砂量列表如下 (表 4-2)。

表 4-2 砂的用量表

名 称	砂 号	成 分	用 量	备 注
I 粗 砂	60—100	SiC	1.5 斤	粗 磨
II. 细 砂	120—150	SiC	0.5 斤	粗 磨
	240—280	SiC	0.5 斤	细 磨
	M302	Al_2O_3	4 两	细 磨
	M303	Al_2O_3	3 两	细 磨
	M303 $\frac{1}{2}$ 或 M304	Al_2O_3	2 两	细 磨

砂号如果缺少几种没多大关系，用漂洗法可以自制。制作方法如下：

把使用过的粗砂，集中放入具有一定高度和容量的容器中，例如水桶等。把桶中放入水，然后用木棍充分搅拌，待搅拌均匀后，使其平静地沉降一段时间，粗粒下沉，细粒悬浮；另取一个胶皮管（或塑料管），把其一端插入容器中，另一端放在下面一个容器中，如图 4.1-1 所示。

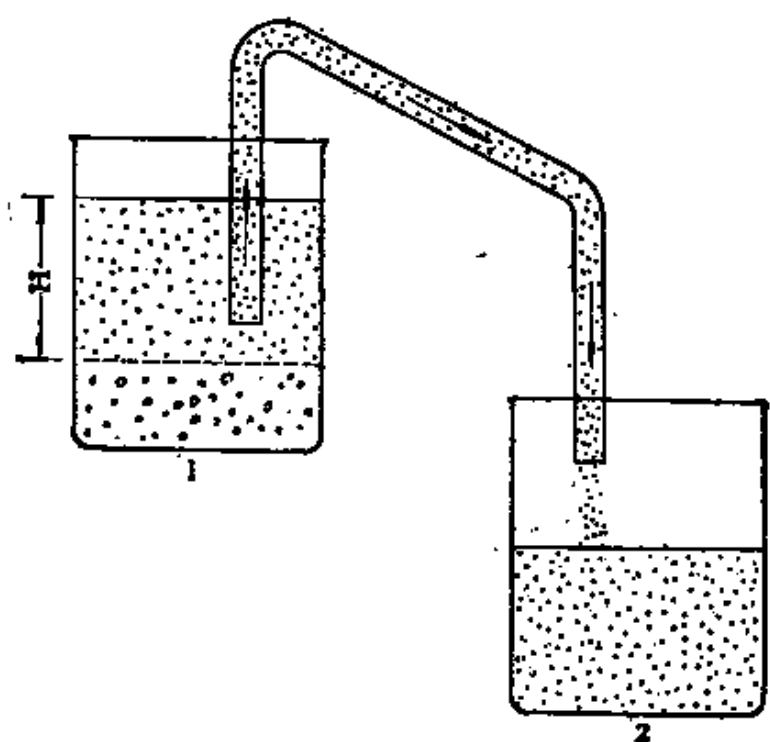


图 4.1-1 虹吸法

利用虹吸法吸出液面为 H 的混合液（一般 H 取容器中水的三分之二）放在第二个容器中，此时，第一个容器中沉淀的粗砂。因为砂粒太杂了不宜使用，往往把它倒掉。倒掉后的

容器要用水刷干净,千万不能残留粗砂粒,再把它接到第二个容器的下面。第二个容器中再放入一定的水,也用木棍充分搅匀,然后沉淀一定时刻,再用虹吸法把悬浮液吸到第一个容器中。那么第二个容器中沉淀某时间的砂,我们便定为此砂号为某时间砂,如30秒砂、1分砂等。把这些洗过的砂装在小瓶(或罐中),作好标记留待磨制时使用。我们可以用上述方法重复多次,并把每次沉淀的不同时间记下而且装好,这样可以得到不同型号的砂粒。

建议砂粒可选如下几个时间的砂。粗砂用2秒砂、5秒砂、10秒砂;细砂用30秒砂、1分砂、3分砂等。漂洗时千万注意,绝对不能在细砂中混杂有粗砂。那怕是很少的粗砂,也将是危险的祸害,以致在磨制过程中,造成很多麻烦。

如果没有磨料,也可以采用工厂使用过报废的砂轮,把它砸碎成末,然后用漂洗法选出可用的粗砂和细砂。

(三) 红粉和沥青的选用

1. 红 粉

镜面经细磨后,需要进行抛光。抛光的材料是抛光粉和沥青。目前普遍采用的抛光粉有两种,一种是氧化铁(Fe_2O_3),俗称红粉;另一种是氧化铈(CeO_2)。氧化铈抛光效率高,效果好,但它比较贵。一般条件下,多采用红粉。

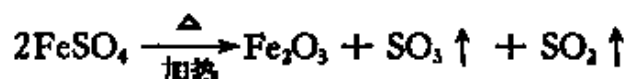
红粉是极细的暗红色粉末,平均直径约为1微米左右,硬度为4—7之间,它的成分是氧化铁(Fe_2O_3)。到商店购买时

必须买光学红粉,其它红粉(例如涂木器红粉)质地粗糙是不适用的。

上等红粉买不到可以自制,自制方法有三种。

第一种方法是把硫酸亚铁($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), (又称绿矾)在高温下焙烧而成的氧化铁。

方法是: 选取一定的硫酸亚铁放入器皿中, 加热 100°C 左右, 把结晶水慢慢蒸发掉, 加热时要不停地搅拌, 待绿色的结晶变成白色粉末后, 说明完成了硫酸亚铁净化和再结晶的任务。继续加热, 加热约为 800°C 左右, 在通风条件下, 保温数小时, 这样白色粉末变成了红色粉末。化学反应过程如下:

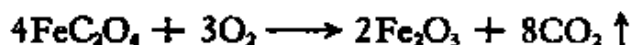


这时的氧化铁呈硬块状, 待自然冷却后, 放入研钵中研碎, 同时用约 70°C 左右的热热水冲洗数次。这样制成了红粉。但这样的红粉还不是十分纯净, 再用静水沉淀法, 把红粉进行漂洗, 一般可分半分钟左右, 两分钟以上的两个时间红粉的沉淀, 前者开始抛光时用, 后者待最后修改时使用。

第二种方法是采用硫酸亚铁与草酸($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 反应, 生成草酸亚铁, 然后再焙烧成氧化铁。草酸亚铁制取反应按下式进行。



制成草酸亚铁, 再加热制成红粉, 反应如下:



制造方法: 把一定量的硫酸亚铁溶入水中, 再加入草酸,

此时溶液中,产生黄色的草酸亚铁的沉淀,如果作用太慢可加微热。以后把反应物用清水冲洗数次,直到加入氯化钡时,不显硫酸钡沉淀为止。吸去草酸亚铁上层的水,然后在剩下沉淀物内加水搅匀,待重新沉淀后,再将上层水倒净,重复多次,则把沉积物。装入盒内,进行加热(110°C 左右)烘干,研碎后再装入盒内,加热至 750°C 左右。注意加热同时要慢慢搅拌使温度均匀增加。开始时发现黄色的草酸亚铁表面上出现一些黑色的斑点,以后黑斑逐渐增大,这时更要勤搅拌,使下层草酸亚铁能充分接触氧气,得以完全氧化,以后略微加热,待黄色草酸亚铁全部变成黑色氧化铁后,停止加热,撤火冷却,过些时刻黑色氧化铁就逐渐变成红色的了。把制成的红粉放入清水洗涤,然后用沉淀法进行分级,留待使用。

第三种办法是采用硫酸亚铁与碳酸钠(Na_2CO_3)反应,制成碳酸亚铁(FeCO_3),再焙烧制成氧化铁。制法与第二种相似,可按照上述介绍方法去制作。

2. 沥青的选择

抛光时要用沥青作盘。沥青俗称柏油,它由许多有机物混合而成。具有一定流动性和可塑性。因为它不是晶体,所以没有熔点只有软化点,而且温度不高就能软化。抛光是利用沥青的上述特点制成抛光盘的。抛光盘随季节不同要选取不同硬度的沥青。沥青要求含杂质少,软而有韧性,断面有光泽。如果是质量较差沥青,也没关系,那要用过滤法把沥青纯净。纯净方法如下,用一个小铁桶或小锅放入沥青,让它在炉

上加热，待沥青达到软化点时，把它倒在纱布上过滤。纱布是事先用2—3层纱布叠加在一起，用铁丝作框把它绷紧，沥青倒入后，经过纱布流进另外一个小桶（如图4.1-2）。经过过滤后的沥青变得比较纯净。如果沥青硬度不合适也可以进行调节。在溶化的沥青中加入一些松香则沥青变硬，加些松节油沥青变软。加入蜂蜡可以减少流动性。

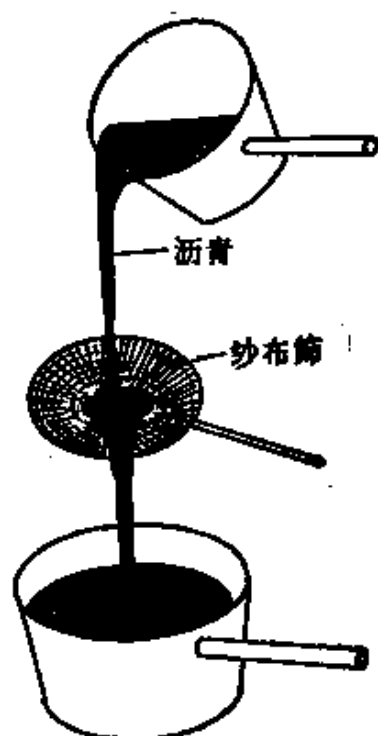


图 4.1-2 过滤沥青

（四）自制检验工具

不磨镜子则罢，只要一开磨，心里总想知道磨得行不行，一会儿用眼看，一会儿用手摸，然而总是无法判断的。要想得到结果，只有用仪器测量，最常用的仪器有球径仪和刀口仪，可是业余制作者受条件所限，可望而不可及。那末只有自己动手先制作些简单可用的“土”仪器，这些仪器制作时也很容易，现将制法介绍如下。

1. 球 径 仪

球径仪是测量镜面曲率半径的仪器。图4.1-3是个简单球径仪。仪器有个铁托盘，在托盘的中心处装有测量螺丝，在边缘相距中心的半径有三个测量钉，彼此相距 120° 。考虑

到多种用途,在圆托盘上开出三个沟槽,使测量钉能够自由地沿沟槽移动,可测不同口径镜面曲率。在测量螺丝上固定有指针,圆盘上有刻度,刻度化分为 360° 。使用起来比较方便。

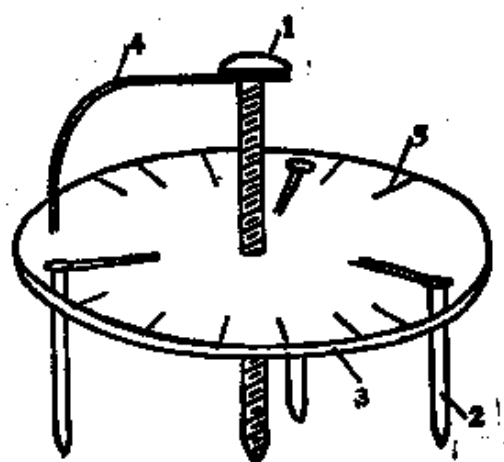


图 4.1-3 简易球径仪

1. 测量螺丝 2. 测量钉 3. 托盘
4. 指针 5. 刻度盘

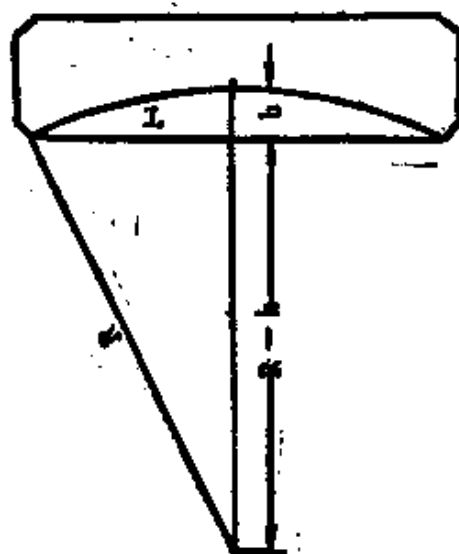


图 4.1-4 曲率半径计算原理
 h : 矢高 R : 半径 L : 口径一半

球径仪主要测量出镜面的矢高,再由矢高导出曲率半径 R 的数值,如图 4.1-4。它的关系式如下:

$$R^2 = L^2 + (R - h)^2$$

将上式展开并化简,得:

$$R = \frac{L^2}{2h} + \frac{h}{2} \quad (4.1-1)$$

因为 h 很小,则 $\frac{h}{2}$ 更小故忽略不计,得

$$R = \frac{L^2}{2h} \quad (4.1-2)$$

式中 L 为中心点到测量钉之间的距离, h 为矢高。

在球径仪中, 如果测量螺丝的螺距为 a 毫米, 则指针每转一度 α , 螺距应升的高度 h 为:

$$h_0/\alpha = a \text{ 毫米} \div 360^\circ = a/360^\circ。$$

如果指针转过 ΔP 度, 则 $h = \Delta P \cdot a/360^\circ$

代入 (4.1-2) 式中

$$R = \frac{L^2}{2 \times \Delta P \cdot a/360^\circ} \quad (4.1-3)$$

根据 $F = \frac{R}{2}$, 则求出镜面焦距的数值。

$$F = \frac{L^2}{4 \cdot \Delta P \cdot a/360^\circ} \quad (4.1-4)$$

现将球径仪制作尺寸介绍如下, 供制作时参考。见图 4.1-5 所示。

球径仪的零件制作好坏, 直接影响测量精度, 零件制作一定要精确。制作时注意圆铁盘一定要平; 所刻度盘要误差小, 测量螺丝和测量钉务必使其尖端位在轴线上。按装时, 先把测量螺丝和测量钉固定在铁盘上, 把指针放在测量螺丝上。此时把球径仪放在一个平面上, 让四个尖端同时接触在平面上, 旋转指针使它对准刻度盘的零点, 对好后用烙铁把它焊牢。这样球径仪可以使用。

2. 刀 口 仪

球径仪对镜面形状的质量测量是比较粗糙的, 如果要对镜面质量进行更精确地测量, 就要使用刀口仪。刀口仪是检

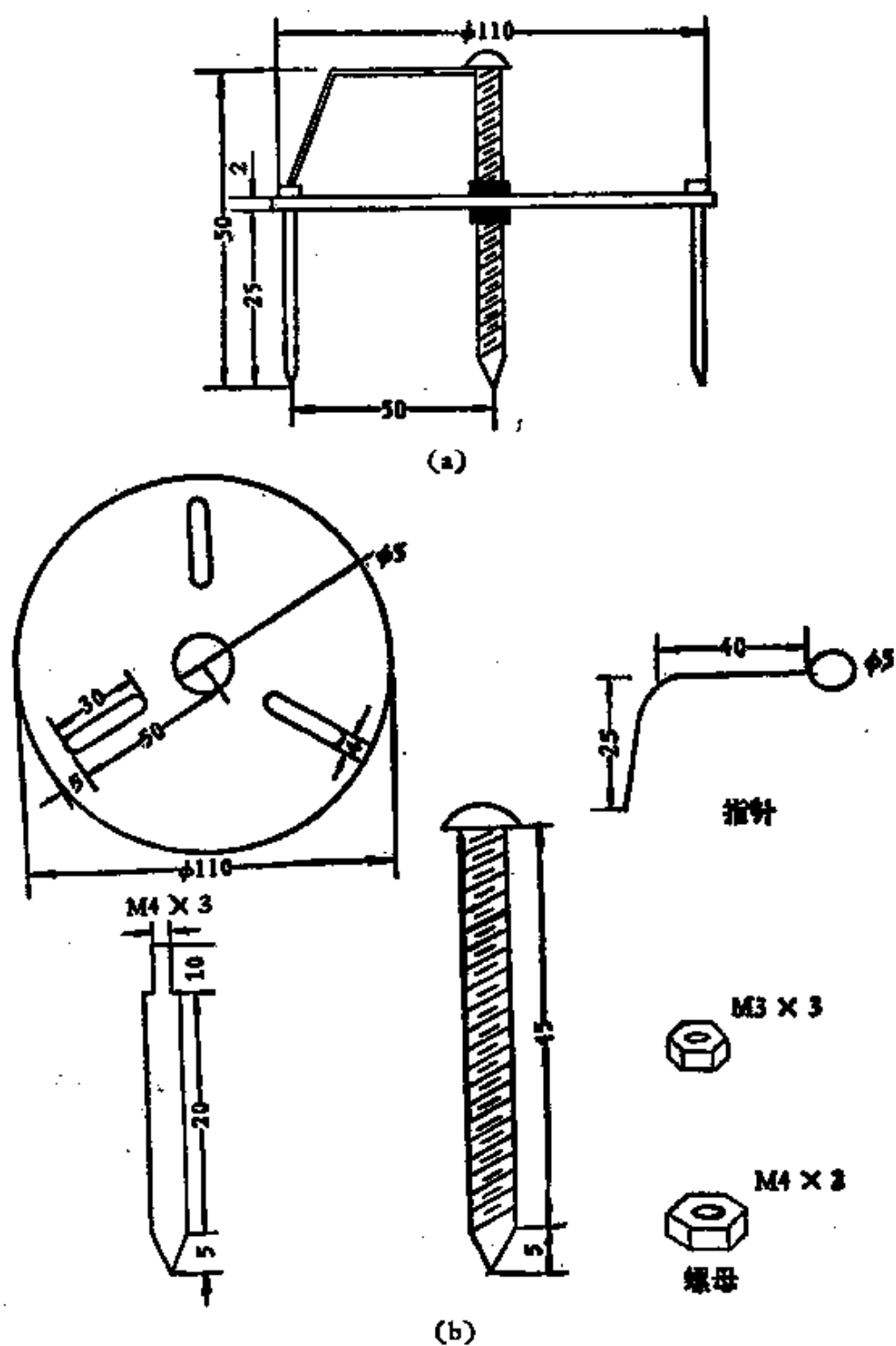


图 4.1-5 球径仪的制作

验抛光后的球面镜、非球面镜、平面镜等镜面质量较好的仪器。

仪器组成见图 4.1-6 所示。主要由镜筒、光源，立柱和底座等几部分组成。镜筒上有刀片和它相近 3—5 毫米的小圆针孔。小针孔直径很小，约为 0.1 毫米。在刀口仪前端留有较窄的狭缝，约为 0.2 毫米。它们使光源能较集中照到所测镜面上。

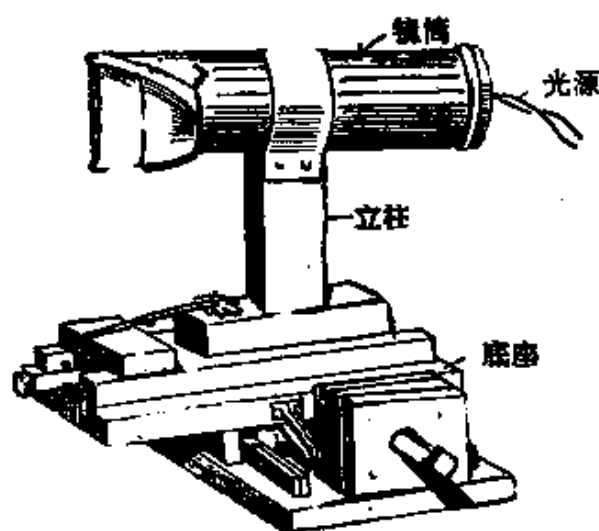


图 4.1-6 刀口仪

光源采用 6—8V 的小灯泡，小灯泡在镜筒内可以来回移动进行调整。在刀口仪立柱上有紧固螺丝，松开螺母立柱可以上下移动。底座利用螺丝的顶力和弹簧的拉力，使镜筒可作纵向和横向的移动。在两个方向上按装标尺，使镜筒运动的距离大小，由标尺上直接读出。

仪器中的光学系统如图 4.1-7 所示。在镜筒后端的灯泡发出光线经聚光镜会聚后，投射到刀片后面的小平面镜上，经

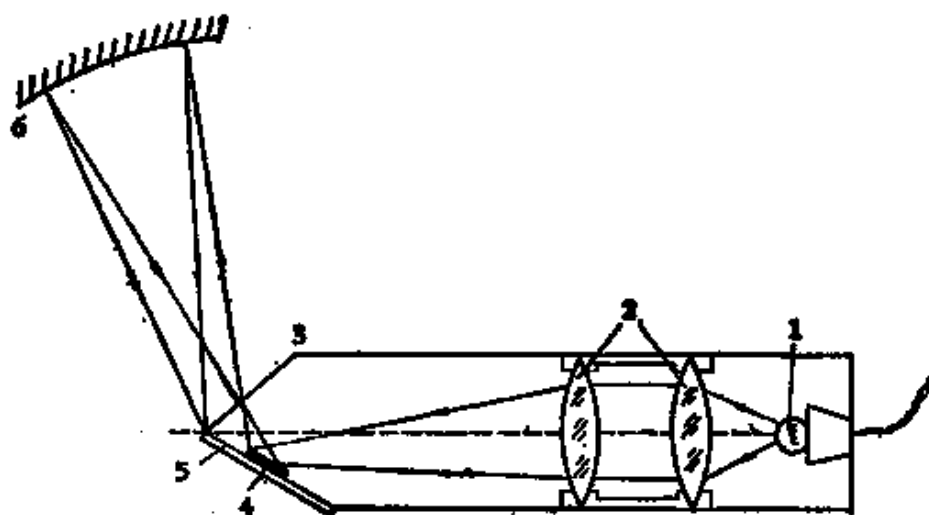


图 4.1-7 刀口仪光路图

1.灯泡 2.凸透镜 3.光阑针孔 4.平面镜 5.刀片 6.镜面

过平面镜的反射光束从小孔或狭缝射出，这些光束射向被测凹球面上，倾斜调节球面和纵向移动刀口仪，使从球面镜反射回来的星点象，在刀口处形成。横向移动刀口仪去切割星点象，检测镜面质量。（具体方法见本书：刀口仪检验原理一节）

用这种刀口仪检测镜面，可得到较高的精度。一般面形误差精度 < 0.001 毫米。

刀口仪的制作方法简介如下：

（1）镜筒制作，选取长 150 毫米，直径为 40 毫米的塑料筒。从顶端到 50 毫米处，用锯锯开一个斜面，斜面与主轴线交于 45° 角，另一侧从顶端到 20 毫米处，再锯斜面与主轴线交为 30° 角。在两斜侧面贴上硬纸壳，在 45° 一侧的硬纸壳里面按上小平面镜，在外面顶部贴好刀片，并使刀口略突出顶端。 30° 角一侧，离顶点 5 毫米中心处，用细针轻扎一个小孔，

孔径越小精度越高。一般直径为 0.1 毫米左右。

为了使小孔中能发出较强光线,在镜筒中安放透镜,它的作用是使微弱灯光聚焦,使在小孔处亮度增强,镜片选用两块均为 35 毫米左右,焦距为 20—40 毫米的平凸透镜。两个镜放在镜筒的后面,镜筒末端使用一个 40 毫米的小铁盖作后盖。在后盖中心处钻一个 5 毫米的孔,在孔内插入 5 毫米的塑料管,再把 6V—8V 小灯座固定在上面,灯座可用一个暖水瓶上的软木塞改装而成(详见图 4.1-8)。

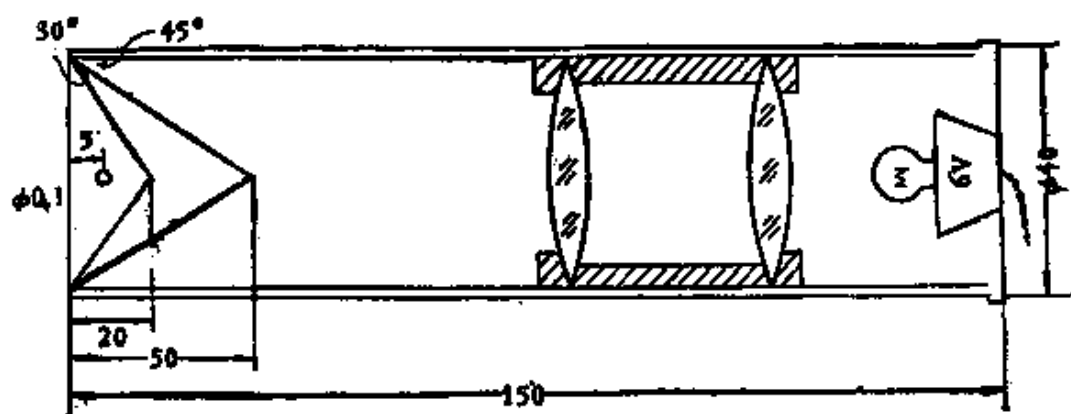


图 4.1-8 镜筒

(2) 刀口仪支架制作,立柱是支撑镜筒并要站稳支架上,同时使镜筒能够上下移动。它的制作是选用两块长方形木块,每块尺寸是 $50 \times 15 \times 80$ 毫米,再把长方木钉牢在滑动木块上,滑动木块尺寸为 $80 \times 50 \times 30$ 毫米,在滑动木块两边钉上小钉,准备安放小弹簧再用。另外在木块 A 离底高 50 毫米处安放 $\phi 6$ 的长螺丝一个。再取 B 块,把 B 木块上端用木锉锉与镜筒相同的半圆弧,用薄铁皮把镜筒安放在半圆弧中。为

使镜筒能上下移动,在B木块中心线处,开一个6毫米,长为50毫米的沟槽。A与B木块准备完后,把两块合在一起,让A块 $\phi 6$ 的螺丝穿入B块槽中,用蝶形罗母把它拧紧。如果

松开罗母,B块则可以上下移动,使镜筒也随之上下移动。如图4.1-9a所示。

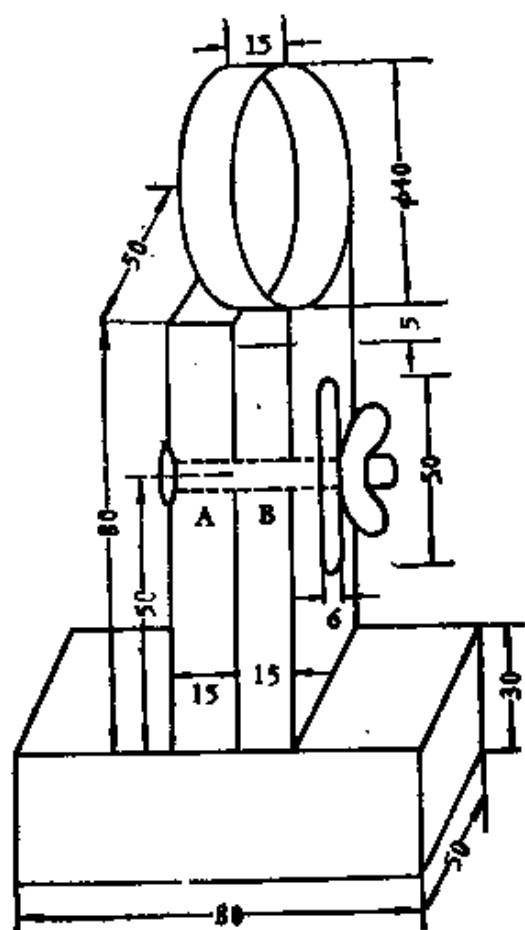


图4.1-9a 立柱

刀口仪的支架在测量时,要能使刀口在水平方向和垂直方向移动一段距离,使刀口仪架横能移,纵能动。并且每移动一段距离均能在尺上较准确地读出数值。这个装置与车床的车刀架相似,如果要有车刀架稍加改制就可以使用。自制也不难,自制方法如下:图4.1-9b所示是一个水平横动装置,它

是选用一块长150毫米,宽80毫米,高10毫米的木板。在木板上方两侧各钉上一条 $150 \times 15 \times 15$ 毫米的长木条,另外在前端木板离顶20毫米处,挖一个 $\phi 6$ 螺母的小槽,再取一块小盖板($80 \times 20 \times 10$ 厘米)。把螺母卡紧并将盖板钉在长条木上。在盖板上方安一个弯钩,弯钩上安放小弹簧。取一

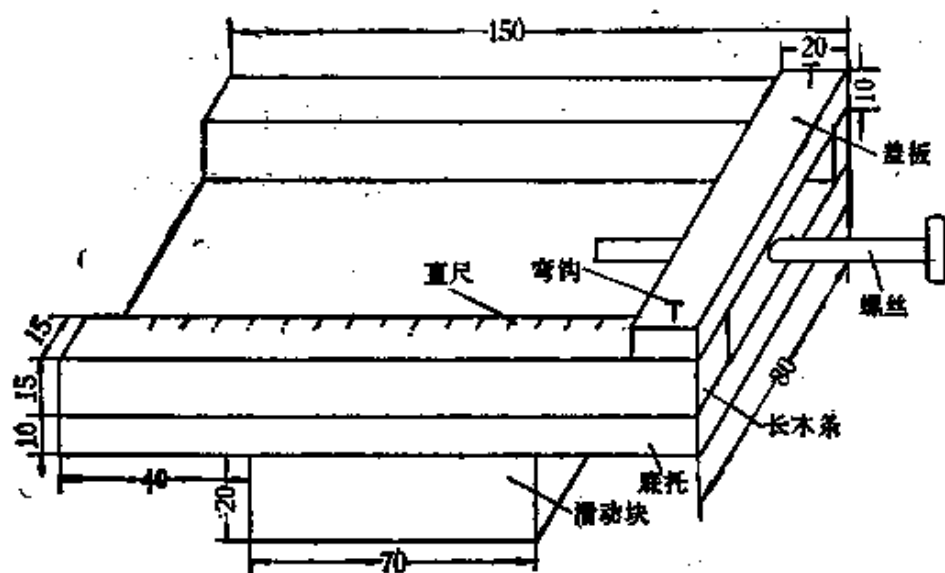


图 4.1-9b 水平横动装置

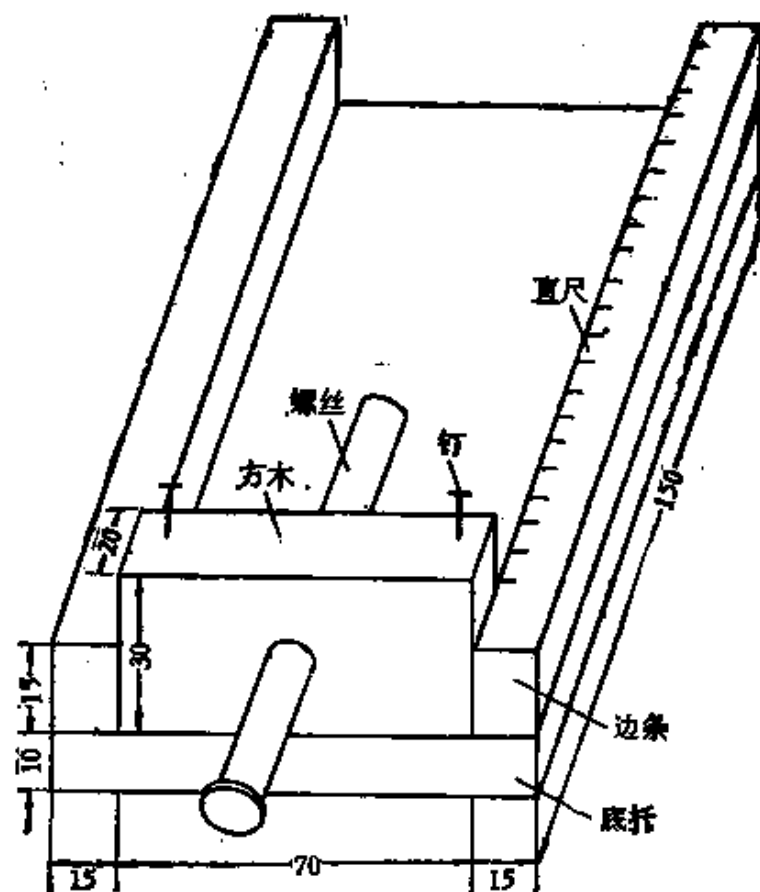


图 4.1-9c 垂直纵向装置

木直尺钉在长条木的一侧。直尺选用木工使用的一段折尺或学生使用木尺都可以。最后在木板下面再钉上一块小木块(80 × 70 × 20厘米)作顶板,将来安装时放在垂直纵向移动装置上。

垂直纵向移动装置是选用一块木板(150 × 100 × 10厘米)在木板两侧钉上长木条(150 × 15 × 15厘米),在前端再钉上安螺母的小方木(70 × 20 × 30厘米),方木中心处钻 $\phi 6$ 的孔并安好螺母。然后把两个小钉分别钉在小方木两侧,也是准备安装弹簧(或皮筋)之用。再取一个木尺在长木条的右上面钉好。

这样刀口仪架各部分基本作完,需要放在一起安装成整体。

首先把水平横向装置安放在垂直纵向装置的槽内,安上小弹簧,把小方木和顶板联在一起,再把长80毫米 $\phi 6$ 螺丝旋在螺母里,并使螺丝顶端顶在顶板上,不断旋动螺丝,使水平横向板能够不断地随着螺丝的移动而平稳地作前后纵向移动。待调到弹簧和螺丝一推一拉达到稳定而灵活移动为止。然后对好刻度尺,在顶板一侧选择合适位置用红笔作个三角(Δ)记号,表示指针。

把安好镜筒的立柱放在水平横向移动板的槽内,用小弹簧把方木与盖板连在一起,同时把80毫米 $\phi 6$ 毫米的螺丝旋在螺母里,使其顶在小方木上,旋转螺丝顶着小方木带动镜筒移动,当调整到推拉镜筒能够稳定灵活地移动时,不再调了,调好后再把刻度尺对好,在方木一侧中心合适位置画上红色

三角(Δ)表示指针。

经过上述工作,一架既经济又实用的简易刀口仪就已制成,待以后镜面抛完光后,作为检测镜面质量之用。

3. 检测型板

你要知道磨制球面的曲率将是怎样的?作个镜面型板就解决了。这样型板可以随时检测磨制镜面是否达到初步要求。型板选用化学板或是硬纸板制成。制作方法如图 4.1-10 所

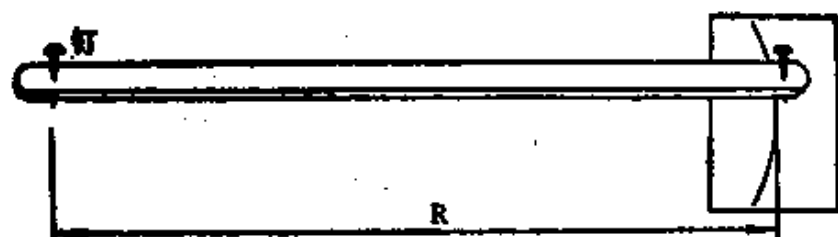


图 4.1-10 球面检测型板

示。选取一块略大镜面口径的化学板,放在平地上。用一根竹杆或木条,长度稍比曲率半径长一些,把一端固定一个尖针(如细铁钉或唱机针头),另一端把等于曲率半径的之长处固定好,以此为圆心,让尖针在化学板上画弧线,在画之前先试画一下,看看位置是否合适。如果合适了就用力使尖针迅速而连续地在化学板上画弧线,这时化学板便被尖针给分割成两部分。上面的呈凹面形,留作检测偶板用。下面呈凸面形作为检测凹球面镜的型板。这样的型板磨制卡式镜时须要 4 个,具体尺寸见表 4.1-1 所列。

4. 工作台及其他

磨制镜片的工作地点，要选择环境干净，离水源较近的地方。磨制时是在工作台上进行。工作台要满足三个条件。

(1) 台面稳定，保证磨制时不晃动，(2) 台面不宜太大，圆、方不限，只要磨制时能使人围绕其旋转即可。(3) 台面高度略高于工作者腹部，这样工作时可以减少劳累。

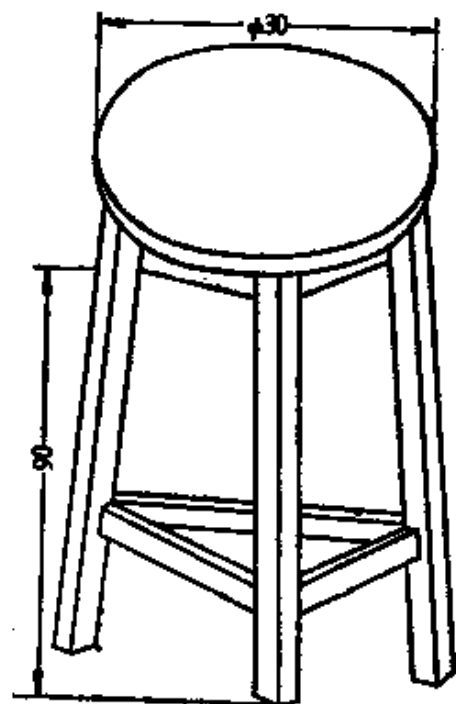


图 4.1-11 工作台

一般常用的是木制圆形三脚小圆台。如图 4.1-11 所示。

其他

磨制镜面还需准备洗镜面用的水桶或盆。擦镜面的擦布。

擦布在粗磨时要求不高，在细磨和抛光时要求柔软洁净、吸水性强的脱脂纱布。简单的脱脂方法是将纱布用肥皂洗净后，放入清水中加入少量碱(约 3%)煮沸半小时左右，再用清水漂洗干净。这样的擦布需准备两块，一条湿一些的作擦镜面上的细纱和红粉。另一条稍干一些的用来最后擦干镜面用。

还要准备擦抛光面用的高级汽油，(用量不多。)准备煮化

柏油的小锅及小刀、直尺等。

二、磨制方法

磨制望远镜的主要工作是制作良好的光学镜面，要想得到一个完好的镜面，要经过粗磨、细磨、抛光和修改等过程。最后镜面上还需镀银或镀铝。初学者看起来似乎很难，这也是可理解的，但是经过不断实践，耐心领会操作要领，不怕困难总会变难为易，比较满意的镜面总会磨制出来。

(一) 压力及磨法

用对磨法磨制镜面可以看作是这样进行的，选用镜面玻璃放在上面，偶板玻璃放在下面，中间夹杂着磨料——金刚砂和水。一般磨料的硬度比玻璃的硬度大，当两块玻璃相互磨碰时，特别在外界压力作用下，磨料象尖刀对上下玻璃同时刺

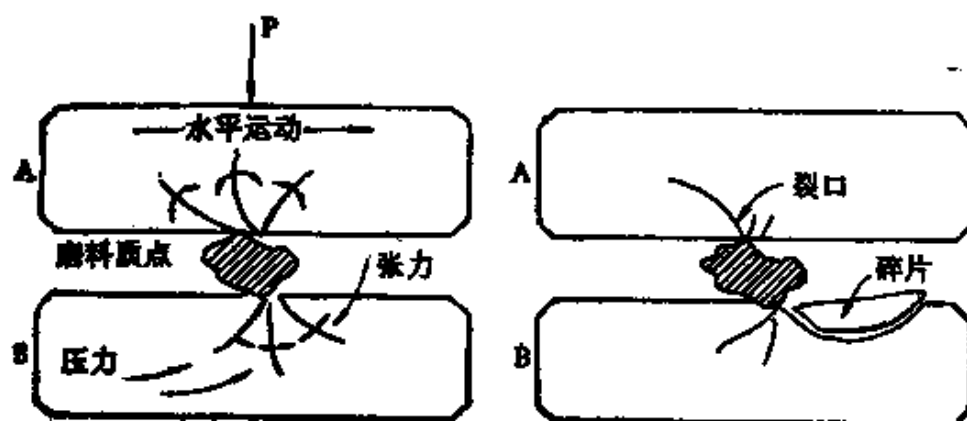


图 4.2-1 压力

A: 镜面玻璃 B: 偶板玻璃

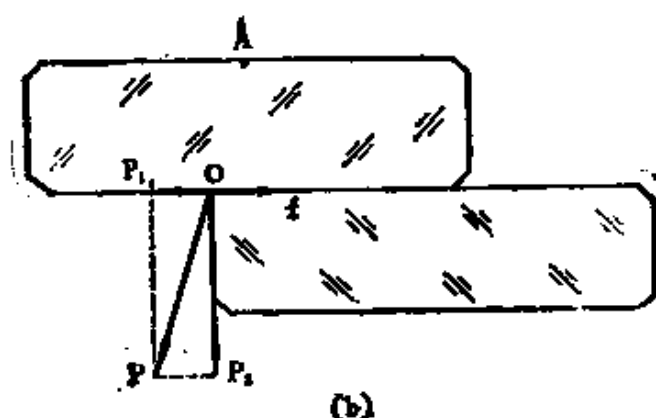


图 4.2-2b 磨镜方法图

当镜面与偶板磨出一定曲率时（如图 4.2-3），磨制镜面垂直向下的压力 P 被分解或径向作用力 P_2 和切向作用力 P_1 。又 $P_2 = P \cos \beta$ ，式中 β 角是偶板的球心到顶点与镜面球心到圆心点之间的圆心角。镜面中心越往边缘移动， β 角就增大， $\cos \beta$ 就越小。由此磨削镜面的力 P_2 就越小。这说明镜面在偶板中心处磨削力大。在磨制镜面过程中，镜面中心始终在偶板上被研磨，而边缘断续被研磨，久磨下去镜面必然成为凹形了。

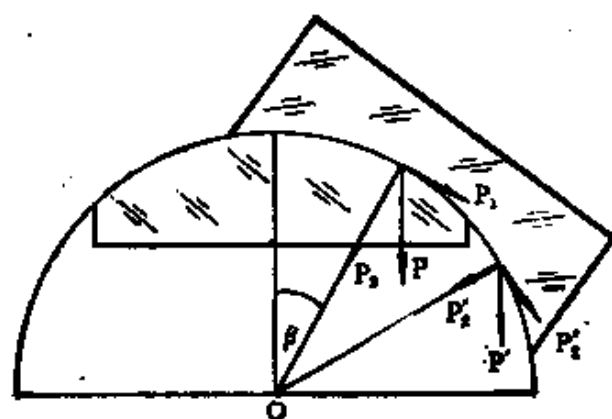


图 4.2-3 镜面与偶板图

研磨镜面只作平推移动,单调动作造成镜面形成柱形。为消除柱形,则必须使镜面与偶板相互旋转。

首先偶板不动镜面在上面旋转,速度为 ω_1 (如图 4.2-4a)。因离中心越远线速度越大,镜边就增大磨削形成图 4.2-4b 形状。

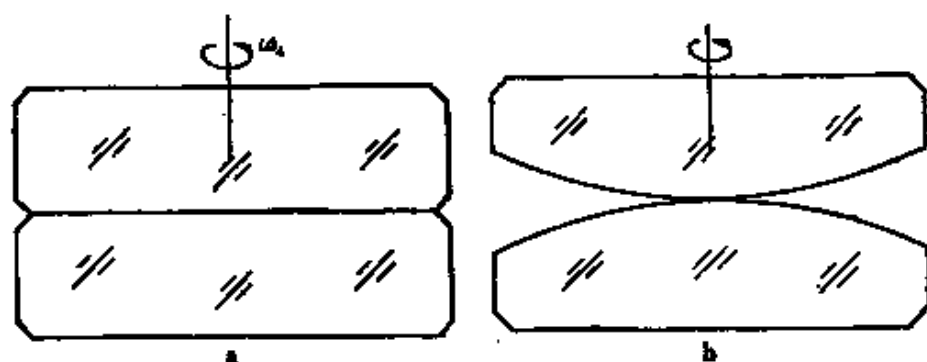


图 4.2-4 磨后的镜片

镜面中心移到偶板边缘处旋转,同样边缘线速度较大,镜面边缘比中心磨削大 (见图 4.2-5)。但单一的旋转动作又会使镜面产生环带。为了克服柱形和环带的产生,给镜面适当压力的同时,不仅要作径向移动,而且还要使镜面作自身旋转和绕偶板旋转。

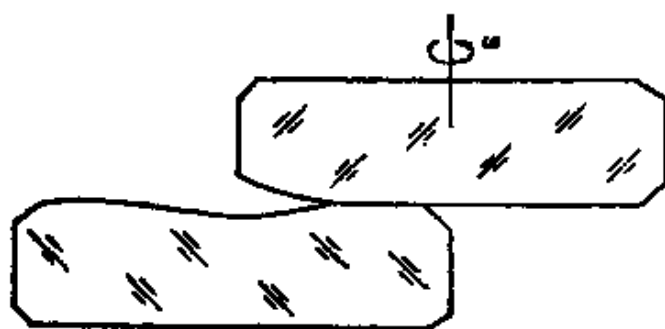


图 4.2-5 经过磨制的镜片

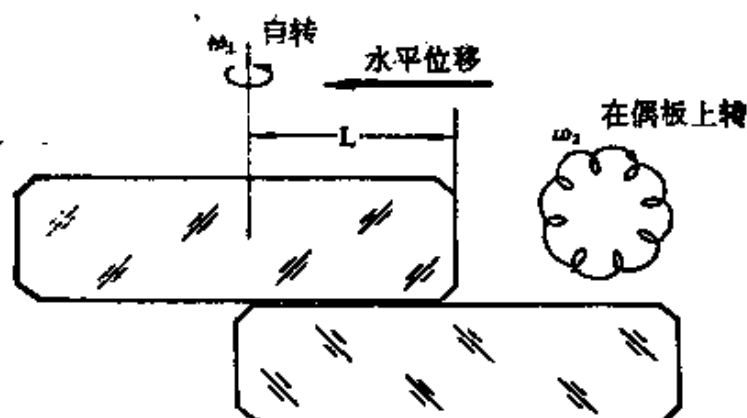


图 4.2-6 磨镜的基本方法

图 4.2-6 表示研磨镜面的基本方法。图中箭头代表作径向运动， ω_1 是用五指按住镜面，依靠大姆指的推动，不断围绕自身旋转的速度 ω_2 是磨制者围绕偶板旋转的速度。现将磨法分别介绍如下：

(a) 径动。镜面沿偶板直径方向前后推拉如图 4.2—7a 叫做径动。

(b) 弦动。镜面边缘沿偶板边缘推拉，叫做弦动如图 4.2-7b。

(c) 椭圆动：镜面中心绕偶板中心，作椭圆运动，叫做椭圆动如图 4.2-7c。

一般粗磨时多用弦动，因为弦动磨下的快，不管那种办法，只要前后推拉得长，中央就会磨下得快些。如果在弦动时，偏心多而拉得又长，那就更快。但在磨制时均不采用单一手法而是取各自所长三者同时使用，又称综合动。图 4.2-8 则是综合动分解图。

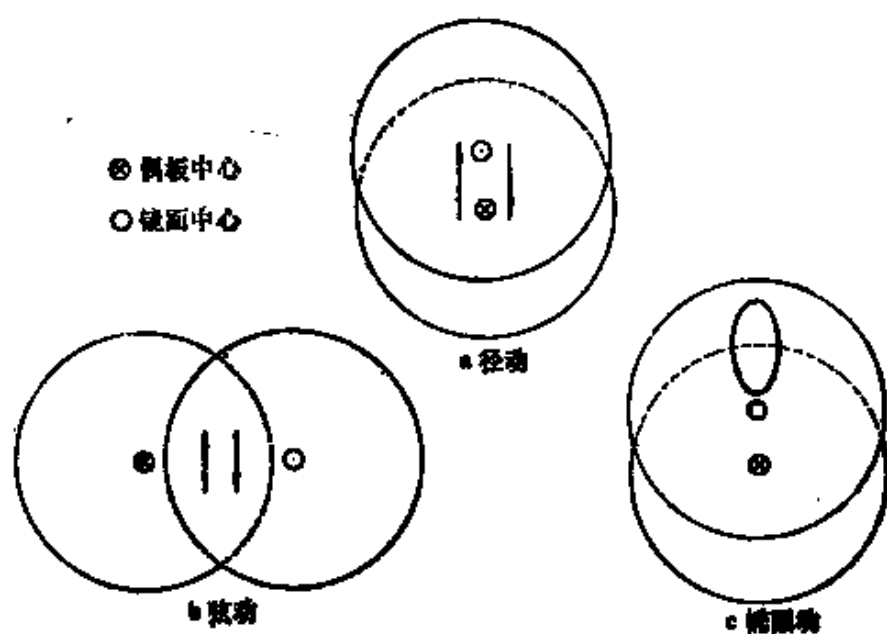


图 4.2-7 魔法

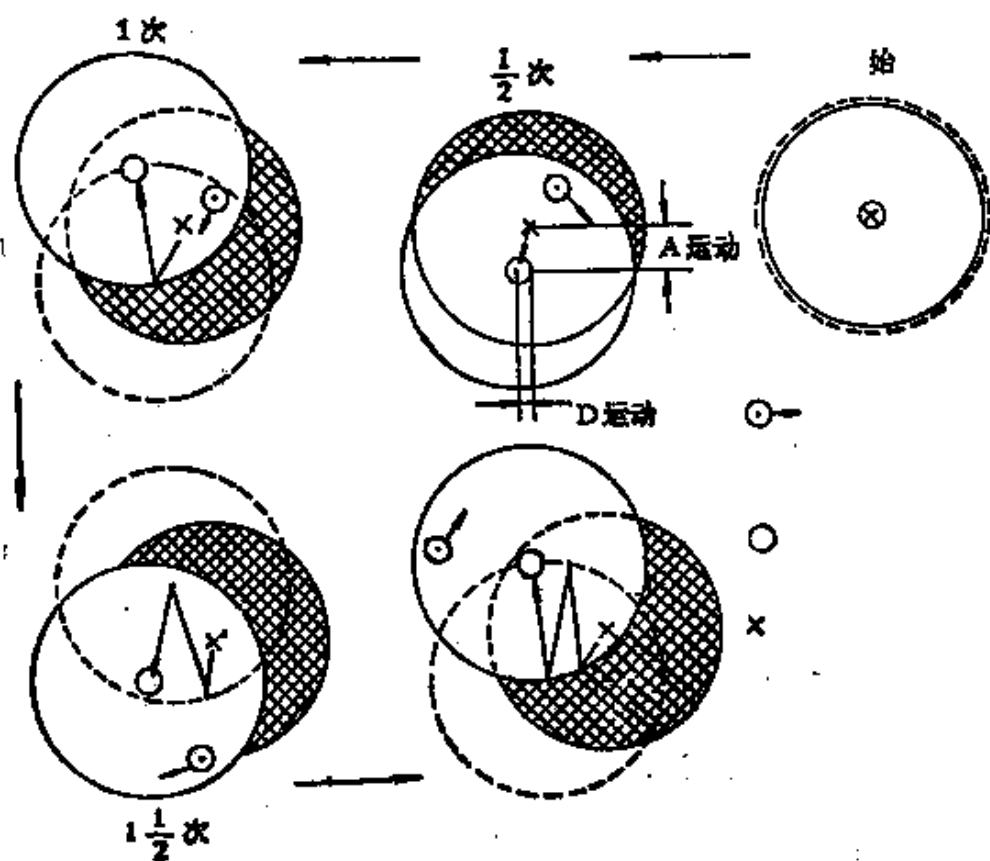


图 4.2-8 综合动分解图

径向推拉次数,在粗磨时可用 60 次/分左右,细磨中减慢 20—30 次/分左右,镜面自转 10—15 次/分人绕工作台旋转 4—8 次/分。

在磨时还要考虑磨程范围,又叫动程,它是表示镜面与偶板磨制时所通过的距离如图 4.2-9, 如果镜面往前方向运动,镜面前沿与偶板前沿之间的距离叫做前动程。如果镜面向反方向运动,它的后沿与偶板后沿之间的距离,又叫后动程,那么总动程等于前动程和后动程之和。

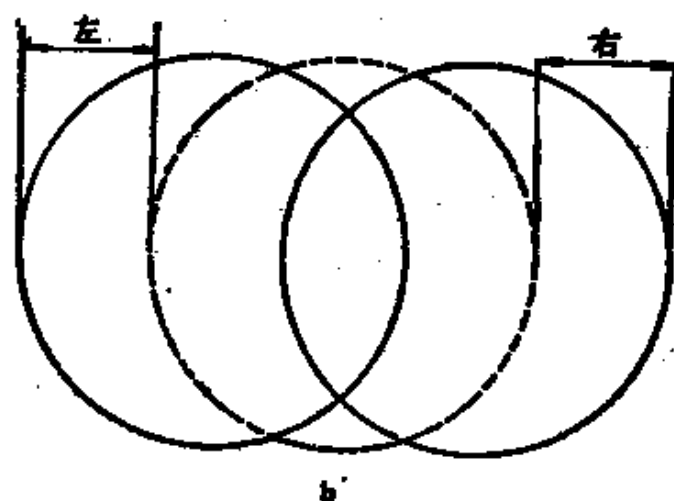
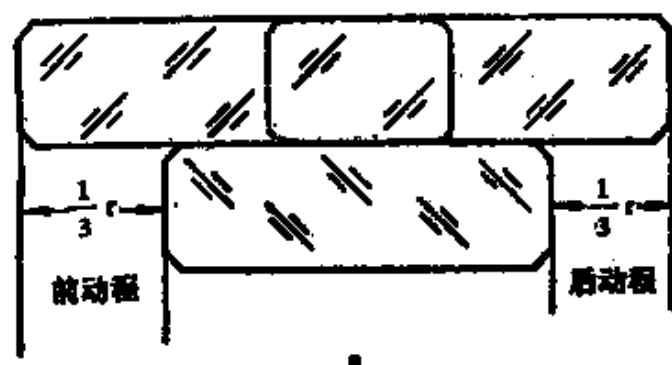


图 4.2-9 动程

为使中心很快凹下,可加大动程,一般保持 $\frac{1}{2}-\frac{1}{3}$ 之间,尤其 $\frac{1}{3}$ 动程磨球面效果好,人们常称为正常动程。在磨制时的动程既要求控制在一定范围左右,又不能死板固定,这样会使镜面形状不均匀现象,所以动程采用又固定又不固定的方法,这请初磨者在实践中细心体会。

(二) 滚 圆

镜面一般要磨成圆形。有时选的玻璃不是圆形,就先要加工玻璃成圆形,我们把玻璃外形粗磨成圆形的过程叫做滚圆。

滚圆最简单的方法是用切角变圆法进行。如选择两块方形玻璃,一块准备做镜面,一块用来作偶板。首先将两块玻璃用石蜡粘在一起使其同时滚圆。粘结方法是先将两块方玻璃给以微火加热,待稍热后取来石蜡涂在一块玻璃表面上,这时把另一块玻璃放在已涂蜡的玻璃面上,用力紧压待冷却后两块玻璃就粘在一起。

滚圆需要一块较平的厚铁板作工具。把厚铁板放在工作台上固定好,取粘好的玻璃放在上面加粗砂进行研磨。研磨方法是先将玻璃成为正方形,再从四角研磨,磨去四角变八边形,再磨去八角变十六边形如图 4.2-10 ……以此类推最后把玻璃磨圆。在磨时不断用卡尺测量直径。玻璃滚圆之后,再把玻璃微火加热使石蜡化开,化开后把玻璃取下,选择好的

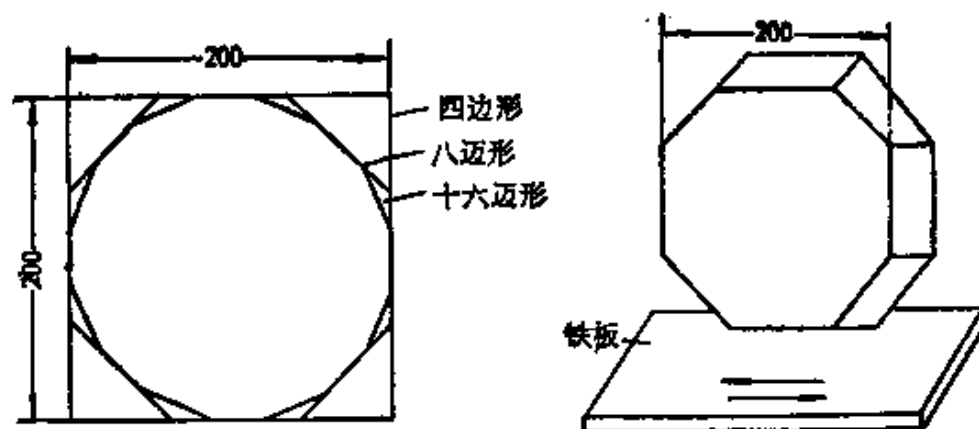


图 4.2-10 滚圆

一块较好作主镜,另一块作偶板。

上述滚圆方法比较简单易行,但费时间,效果差。如果有钻床可以用钻孔法下料,使玻璃成为圆形。具体请详见钻孔一节的介绍。

(三) 粗 磨

生活经验告诉我们烧砖要先制坯,烧瓷器要先塑形。同样磨成镜面,也要先制坯,那就是把平面玻璃通过初步加工,形成镜面的粗糙球面形状和厚度等。这个加工过程叫做粗磨。粗磨后镜面上允许有 10—20 微米的小麻点及不平程度。

粗磨最关键的是使玻璃面形基本上磨成球面形状,不然的话,细磨中很难把镜面磨成标准球面。为了把镜面磨好,下面讨论影响粗磨的因素。

影响粗磨的因素很多,要想又快又好地把镜面磨成球面,

首先要选好磨料的种类，其次选好第一道砂的砂号。在正常条件下，玻璃的磨削量随着磨料种类的不同又有不同。图 4.2-11a, b, 中表明普通的天然石英砂与人造碳化硅对玻璃的磨削量相差很大，表面粗细程度也是相差很大。

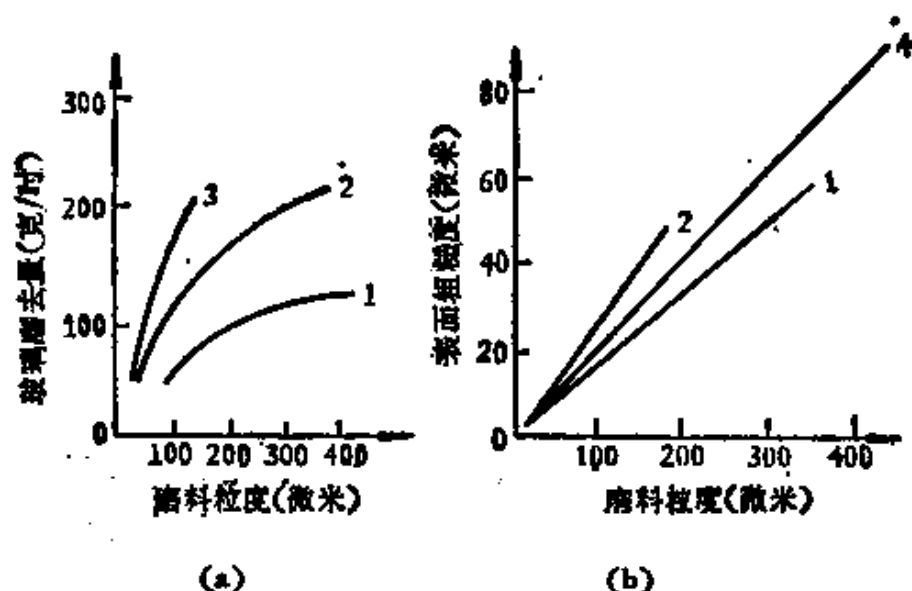


图 4.2-11 几种磨砂

1. 石英砂 2. 刚玉 3. 碳化硅 4. 石榴石

当磨料种类选定后，第一道砂的粒度的选择要参考加工镜面的矢高而定。如果矢高大于 1 毫米选用砂号 180[#]，如果矢高在 0.4—1 毫米之间选用 200[#]—180[#]，矢高在 2—1.5 毫米之间选用 60[#]—80[#]。余下砂号选择可以隔开几种砂号，再选用一些就行了。原则上是加工余量大的可选择粗些砂粒。镜面比规定形状差不多时，选取较细砂粒，并且砂号隔开少些。如口径为 15 厘米相对焦距 $f10$ 的镜面，或口径为 20 厘米相对焦距 $f6$ 的镜面，均可以从 80[#] 砂开始粗磨。余下的砂号见表 4.1-2 所列。

玻璃的磨削量与砂粒和水的混合重量比例也是密切相关的。如图 4.2-12 所示。当水的供给量不足时(曲线起始部分),磨削玻璃的量较低。为什么呢?那是因为研磨下来的玻璃碎屑和磨碎的磨料等不能被及时清除,从而占居了一定空间,影响着新磨料的补充。当水的供给量过量时(曲线右方),则促使参加工作的磨料粒度数量减少,同样降低了研磨效率。当水和砂的重量比为 2:1 时,产生的磨削量最大。

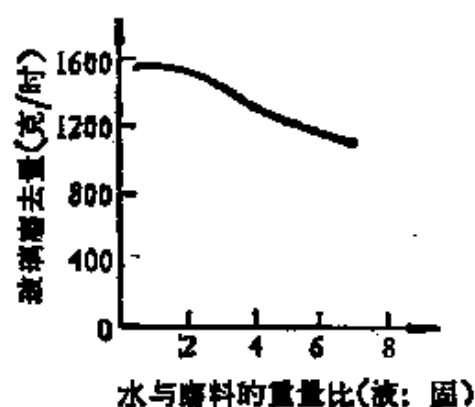


图 4.2-12 水与石料重量比

除此之外,用手工对镜面磨制时的压力,及磨制方法均有影响。一般 80# 砂,每分钟约为 60—70 来回,适当给予压力,工作半小时后,可以磨去 0.8 毫米左右的玻璃。

研磨时加砂的方法也要注意,加砂合适与否,对于提高磨制效率影响也很大。加砂可采用两种方法:

(1) 把砂放在盆中,放入合适比例的水,拌成糊状,用勺加在偶板上,使砂水铺满一层,然后把镜面放在上面进行研磨。

(2) 把干砂撒在偶板上,再加些水,加水时不让砂子从边上滚落下来或流下来,然后把镜面放在上面进行研磨。

以上两种方法均可以使用,效果相同。待加砂后,开始研磨时,用手的感觉来控制压力大小,用耳听磨削情况,判断砂

粒磨削时的情形。一般开始研磨时，由于砂粒较粗，磨削较快。可听到清脆的砂粒磨削声。待砂粒磨细听到有声音变弱的沙沙声，即可将沙换掉再进行研磨。直到把镜面磨成一定要求形状为止。

球面的控制及检验，研磨镜面时，不要心急，也不能一口气地磨完，开始可磨得时间长些，约半小时测定一下凹度。测试的方法选用球面弧形样板进行。首先把镜面上的砂用水冲净，擦干放平，把事先制作的弧形型板放在镜面上测定。测时有三种情形(如图 4.2-13)。观看型板与镜面吻合情况判断镜面磨制的结果。

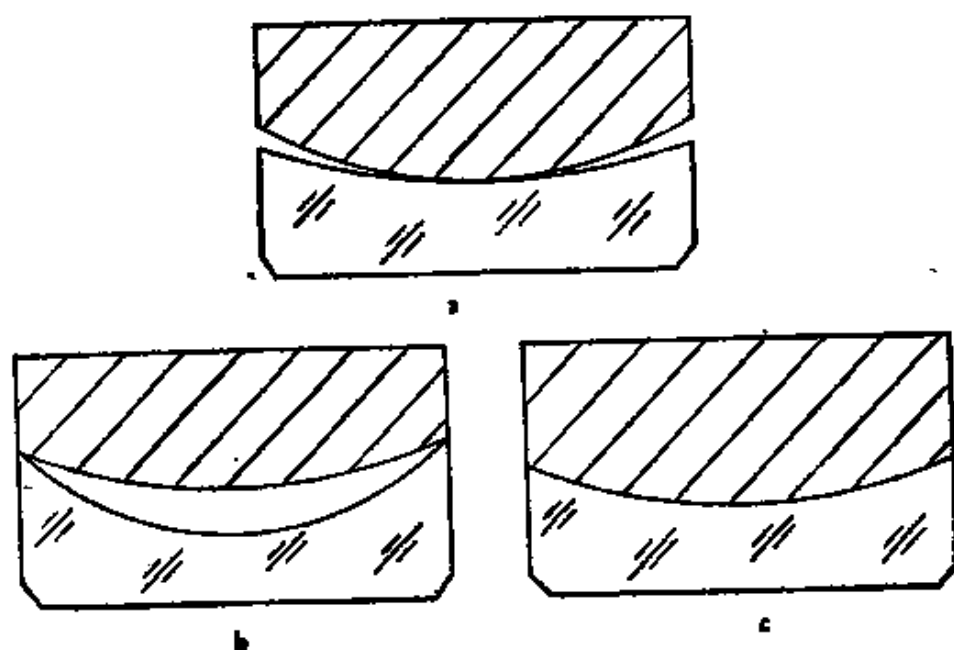


图 4.2-13 弧形型板检验

图中的(a)凹度太浅，焦距太长。需继续粗磨。(b)凹度太深，焦距太短，需采取反磨法。即把镜面和偶板对调，用偶

板放在镜面上进行研磨。研磨方法与以前一样，磨一段时间就会使下面的镜面焦距加长。(c)型板与镜面吻合，深度合适，说明曲率和焦距均达到要求。再观看镜面上的光洁程度，如果镜面上无明显的砂痕，就可以停止粗磨。

在粗磨时要严格控制球面，特别接近完成时更要注意。控制方法由磨程的长短和变换磨法进行。开始为了加速磨成球面，动程可略大于半径的 $\frac{1}{2}$ ，后来逐渐控制在半径的 $\frac{1}{3} - \frac{1}{8}$ 之间，同时适当减少压力，换砂时间略长些。

(四) 细 磨

在粗磨的基础上，将镜面的粗砂痕除去，使表面光洁度小于 6.3 微米的研磨称细研磨，简称细磨。细磨的目的使镜面获得接近完工的几何形状和改善表面光洁度，为抛光打下良好的基础。因此，细磨的好坏对于抛光工作是十分重要的一环。

和粗磨一样，影响细磨的因素，主要是磨料的粗细、用量多少，压力大小及动程控制等。

细磨的磨料是越磨越细，一般选用 4—5 个砂号，例如：280[#]、M302、M303、M303¹。这些标号的砂粒是越来越细，按顺序研磨下去，镜面上的光洁度越来越高。这里谈到磨料时，还要附带谈一谈，为保证镜面质量，不要在细磨中混有粗砂，那怕是小小一粒粗砂，也能使镜面划出一道深深的砂痕，这

些讨厌的砂痕出现,使得我们不得被迫返工浪费许多时间。因而细磨中突出一个问题是清洁工作问题。

工厂中粗磨和细磨是分开在两个车间进行,而业余磨制条件有限,多在一起进行,这就更要作好清洁工作,认真清除掉粗砂的磨影。建议在细磨前务必把环境卫生打扫干净,同时个人卫生也要清理,不可麻痹大意。如头发洗洗剪剪指甲,换换衣服,这很必要。又如工具旁的粗砂,水盆中粗砂,均要铁面无私,一律清除,对这些多余之“客”没有什么可挽留的。每当换新砂时都要小心用手摸摸,检验确无粗砂后方可再用。加砂细磨开始时也要轻推几下,用耳侧听有无异常声响判断有无粗砂的存在,如果有则必须停止研磨立即除去。也许有人说:“这样未免太过分了吧!”其实不然,这是教训的总结,千万不要疏忽。

磨料的用量和加砂方法在 302[#] 砂以前与粗磨相同,在 303[#] 砂以后则采用砂与水先混合成合适的浓度再用。另外 303[#] 砂颗粒很细,在出厂时有时颗粒大小不均,事先要洗一洗,洗过砂为糊状。使用时先把砂浆和水弄匀,再用吸管从瓶中吸出滴到偶板上。并让其均匀地铺落。然后再把镜面放上去,看不出有明显的砂层,砂也不溢流,推磨时也不费劲。如磨时觉得推拉费劲,或者看到镜边出现缺浆或干涸现象,就另换新砂。换砂时同样注意清洁工作,最好用毛刷把镜面和工具刷洗干净。然后再加砂进行研磨。

细磨的特点是加砂越细,用砂越少,研磨时间越长。如 M303,每加一次可磨 5—10 分钟。为了提高质量,有时在细

磨快完毕时，不再加砂而是加几次清水。这样虽然磨制效率略有降低，但毛面将磨得更细，对以后抛光工作有明显的影
响。但注意掌握好添水的时间长短。防止时间太长出现划
痕，一般在添水后大约磨到玻璃呈青灰色为止。为避免划痕
可先试试再作。

有时在磨制时，砂水干枯使偶板与镜面贴在一起了，根本
推不动，遇到这种情况不必着急，更不能硬撬，因为镜面与偶
板接触时，密合不够，使中间有空隙造成局部真空，由于大气
压强作怪，造成内外压力差，促使镜面与偶板粘牢。这时把它
完全浸在水中，过一段时间不撬自开。另一个办法是在玻璃
缝中加几滴酒精，过一会也会开。

球面控制，细磨对球面的控制要求更高了。球面的控制
要用磨程和适当压力来进行。动程要采用正常动程（即半径
的 $1/3$ ），并且前后推拉差不多。再者压力要匀，特别换最后
几道砂时，不要加更大的压力。前后动程速度，40 次/分—60
次/分。镜子约每推拉 10 次转动一周。与此同时勤检测，不
断地更正纠偏，以期达到要求。

检查球面准确与否的方法。

（1）推拉阻力均匀与否判断：加了适当的砂后用正常动
程磨过一段时间在水不太多也不太干时，用手慢慢前后左右
各方向轻推镜面，如感觉各方向各位置阻力都均匀，表示球面
准确。如感觉有一方有些疙瘩，表示球面不准。这种方法初
学者要多练几次，力求熟悉此方法。

（2）根据气泡形状来判断：加适当的砂水，用正常动程

磨一段时间后，把镜面和偶板重合，然后用力轻压一下镜面，可以发现有一些气泡出现。根据气泡形状判断出镜面情况。如图 4.2-14 所示。

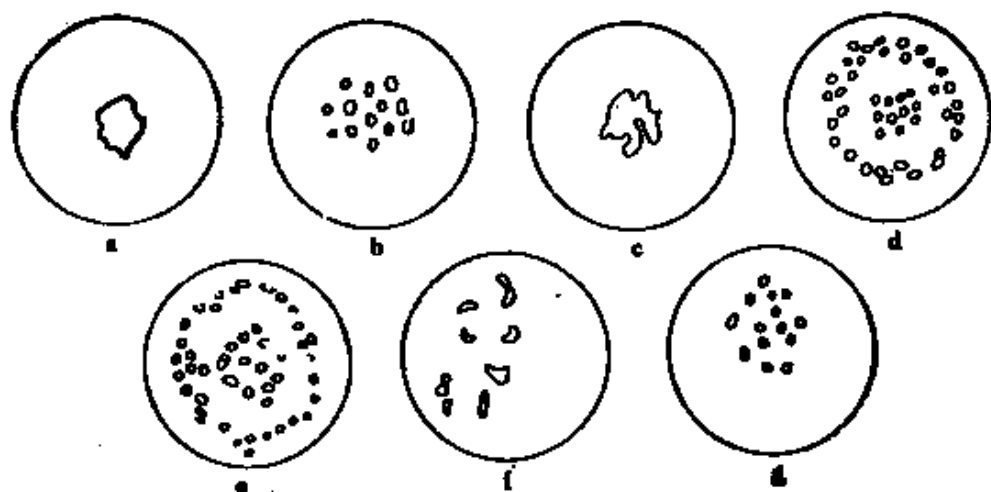


图 4.2-14 气泡图

图中 (a) 和 (b) 是镜面中央低的表现，而 (a) 比 (b) 低得深一些。(d)、(e) 是镜面波浪起伏的标志，而 (d) 周围较严重。(e) 中央部分较严重。(f) 和 (g) 是球面较准确；(c) 是一种过渡型。使用这种方法检验很方便，但必须在实践中不断摸索取得经验。

(3) 染色法判断：把两块镜面洗干净擦干，在偶板上用软铅笔沿直径画条线，然后把镜板与偶板对磨一段时间，观看铅笔线条情况。如果铅笔线条模糊而没印记，说明球面准确。如果铅笔线断断续续，或有的地方没磨掉，说明球面不准。

焦距的检验方法，细磨时不断地检验镜面，还要经常检查镜面的焦距及光洁度。

(1) 用弧形型板法测曲率 (详见粗磨时测量方法介绍)。通过测镜面曲率情况得知焦距的长短及球面的面形初步情况。

(2) 用球径仪测焦距。图 4.2-15 所示用球径仪测量矢高, 通过公式 (4.1-1) 计算出焦距 f 的数值。(详见球径仪使用一节)。测三次求平均值。

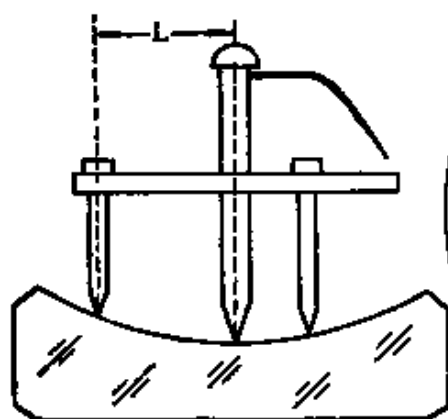


图 4.2-15 球径仪测高图

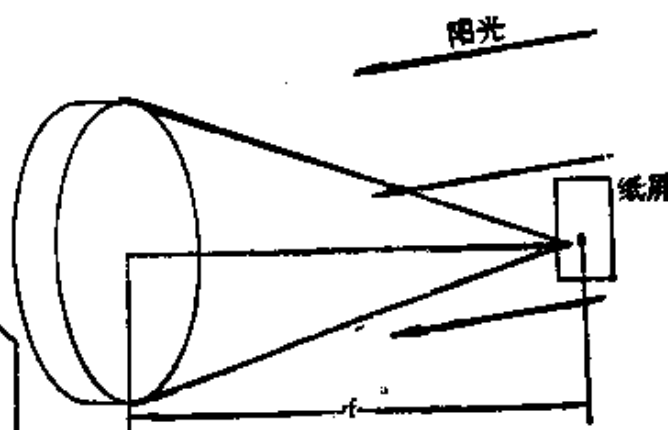


图 4.2-16 镜面的焦距图

(3) 用太阳光测焦距。把镜面上的砂用水清洗, 清洗后镜面上附一层水, 把它对着阳光让镜面反光, 然后在镜前适当位置放个白纸作屏, 移动到合适位置找到反射太阳的象点, 取一个钢尺测量镜顶到象点的距离, 这一段距离是镜面的焦距数值(如图4.2-16)。

(4) 灯光测距法。此法是利用凹面反射镜成像规律; 在球心处物体成象在球心, 距离镜面顶点为二倍焦距即 $R = 2f$ 。

具体作法是: 把镜面清洗干净, 在上面洒些清水, 取一个手电筒去掉玻璃罩, 让小灯泡亮点照在凹面镜上, 然后用白纸

作屏找其小灯泡的象—灯丝。如果象与物不在一条直线上，就要耐心地移动灯泡和屏的位置，直到象与物在同一直线上如图 4.2-17 此时取一直尺测量一下象或灯与凹面镜顶的距离。测量出的长度便是此凹面镜焦距的 2 倍，测量三次取平均值，这样可以粗略地确定镜面的焦距。这个方法测出的结果，比实际数值要大一些，不过这样的误差不影响质量。

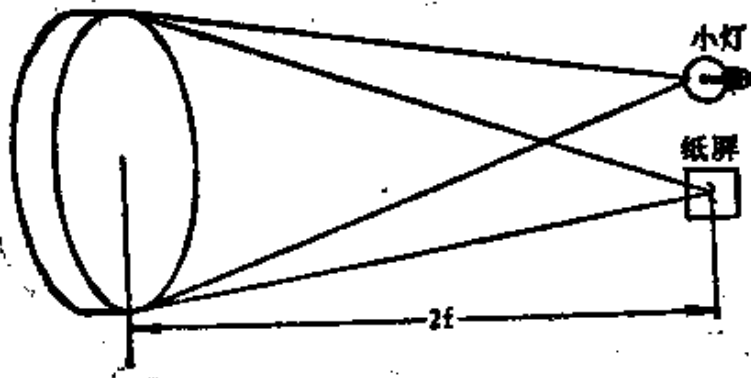


图 4.2-17 灯光测焦

光洁度的检验，在某一号砂磨过一定时间后，都要进行光洁度的检验。首先把镜面的砂除掉，水擦干。仔细看其表面有无划痕。特别最后几道砂，稍不注意就会产生划痕。如果砂痕不深砂道子不多，经过几道砂能磨掉的暂且不管可继续研磨。如果砂痕太深，或本道砂根本磨不掉，那么干脆返工重磨，一般估计那道砂能磨掉它就返回到那道砂。对这一点初学者总是舍不得，怕费时间，但实践证明，很深的砂痕用本道砂去磨不仅花费时间更多，反而容易使镜面质量不好，遇到这种情况一定要当机立断，重新返工还能争取时间。如果无砂痕，再把镜面放在灯下，看其表面，特别边缘部分看看是否把

上道砂的砂眼磨掉,如果已磨掉,看镜面的灰色颜色是否均匀一致,有无上道砂的小砂眼,如果颜色一致、均匀,又无砂眼可换下道砂进行研磨。如果磨过 M303 砂之后,用肉眼直接观看便困难了,这时要把擦干净的镜面放在灯下,通过高倍率的放大镜细看,有无砂痕及前道砂的砂眼。当磨过 M303 和 M304 氧化铝后,镜面呈半透明状,这时要从镜背观看灯丝的亮度,观看灯光各处是否均匀,如果各处均匀说明光洁度很好。

最后擦干镜面,让灯泡的光线与镜面在 30° — 40° 的夹角下射入,这时观看灯泡反射象,如图

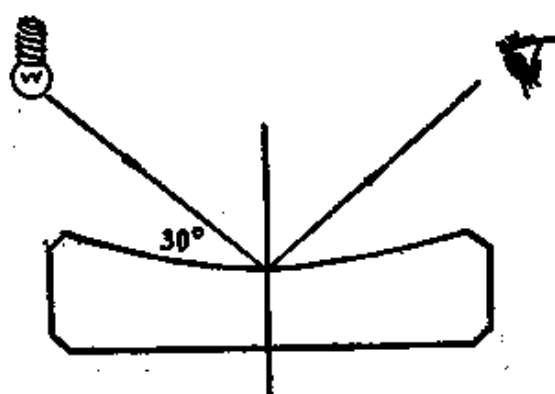


图 4.2-18 灯泡反射图

4.2-18 所示,如果能看见呈红色的灯丝象,说明光洁度较好。

通过上述测出焦距数字与设计要求的相差不多,光洁度又达到要求,那么可以停止细磨,便可进行抛光工作。

(五) 抛光与检验

细磨完工后要进行抛光,抛光的目的是把镜面上尚存的细微高低起伏的毛面,连同小裂痕一扫而光(如图 4.2-19)。增加玻璃对光线的反光能力,成为更平滑的球面。

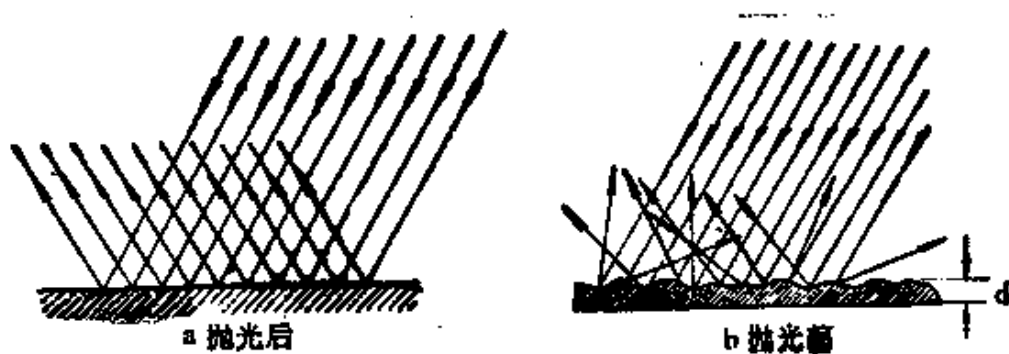


图 4.2-19 抛光的镜面

1. 抛光前的准备

抛光要求清洁工作更严格了,有必要对工作间、磨具作一个大扫除,工作者仍要作好个人卫生工作,最好洗个澡换换衣服。清洁保效果,如果抛光时尚存一粒小砂子,那怕是人眼看不见它,照样成为抛光的捣乱“分子”。某种意义上讲,清洁工作好坏,关系到抛光的成败。清洁的环境还不能只保持一时,连续抛光几天均要如此。

抛光时要用的必要物品,主要是沥青和红粉。其次直尺、小刀、松香、肥皂水及蜡纸等,都要准备齐全,作到用时方便。

2. 抛光盘的制作

抛光工作不是把镜面直接在偶板上研磨了,而是以偶板表面形状为胎,把沥青浇到上面制成抛光盘。

抛光盘上的沥青又称抛光胶。抛光胶的软硬是否合适,直接影响抛光工作。如沥青硬度大,镜面与抛光胶不易压得吻合,抛光时会使镜面产生带区误差或平边现象。沥青太软

抛光时抛光盘变形严重,效率较低,镜面易变形质量差。

怎样算合适呢?把沥青放在锅中,用炉上加热,不等沥青沸腾,用木棍把沥青撩起放在玻璃上,待稍冷却后,用手指在沥青上轻按一下。如果有深指印,说明太软了。如果用力去按还没有指印,则说明又太硬了。只有当用手按去有浅浅的指印,则说明软硬合适。

如沥青软硬不合适,也没关系。我们可以在沥青中加松香,使软变硬,加蜂蜡使硬变软。一般来说,平常使用的沥青较软,所以加松香来调节,比较合适的比例 7:3。加松香时不能在沥青沸腾加入,因为松香沸腾时易挥发,经过沸腾的沥青里,松香会全挥发掉了,等于沥青中根本没有加松香。为防止挥发,可事先把松香加入,待沥青加热时稍软就能用。

浇制抛光盘前,把准备好的偶板洗净烘干选择合适位置放平。用蜡纸条把偶板围上,在半厘米处划一记号,作为浇制时厚度的记号。再把镜面洗干净,表面涂上一层肥皂水,防止压制镜面与沥青工具粘在一起。

沥青调好熔化、经过过滤后,浇在偶板上,如图 4.2-20a 所示。开始从偶板中央浇起,让它自然地慢慢流向四周并布满表面(如图 4.2-20b)。当边缘厚度达到半厘米以后,中心处再浇一点。这是因为偶板上的沥青容易向边缘流动,而边缘部分沥青又易被刮掉,这样抛光盘不能形成等厚体,却形成中心薄两边厚的现象。为此现象产生,中间要略厚于边缘。

另外,注意沥青温度不能太高,否则偶板炸裂!待沥青稍冷后,把纸条撕掉,再把涂好肥皂水的镜面压在沥青盘上。如

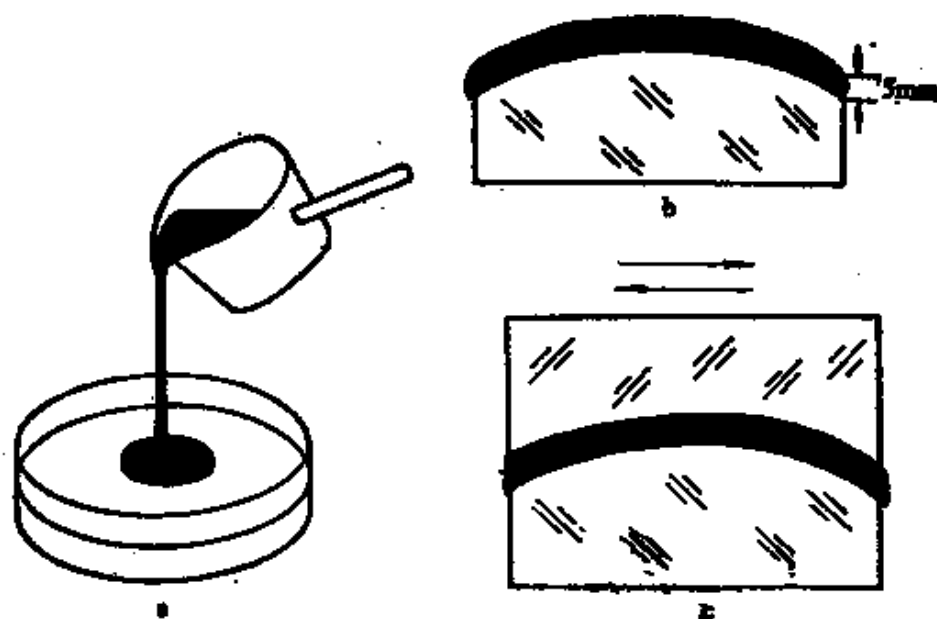


图 4.2-20 浇沥青盘

图 4.2-20c 所示。压上后转动镜面，适当地前后推拉，令沥青与镜面完全吻合为止。如果因沥青太硬，压不吻合。可用 70°C 水浸烫，片刻拿出来，使沥青变软再用力紧压。吻合后流向偶板边缘的沥青，用小刀把它切掉。

刻槽，为了使抛光膜表面能输送和贮藏红粉，也使沥青能较快地变形以适应镜面形状。要在抛光盘上用小刀开一些小槽，叫做刻槽。在抛光盘上先用湿尺画出若干小方格，这些小方格与中心线不能对称，要纵横交错地分布着。对于 $\phi 200$ 毫米左右的工具方格大小可用 25×25 (毫米) 左右，槽宽为 2—3 毫米分布。如图 4.2-21a。在画好的盘上用小刀沿每条方格线对称地刻出 V 字形的小槽，槽内壁倾斜为 45° 角，槽距为 3 毫米，深度为 1.5—2.5 毫米，刻时不能刻透沥青而露出偶板。如图 4.2-21b 所示。

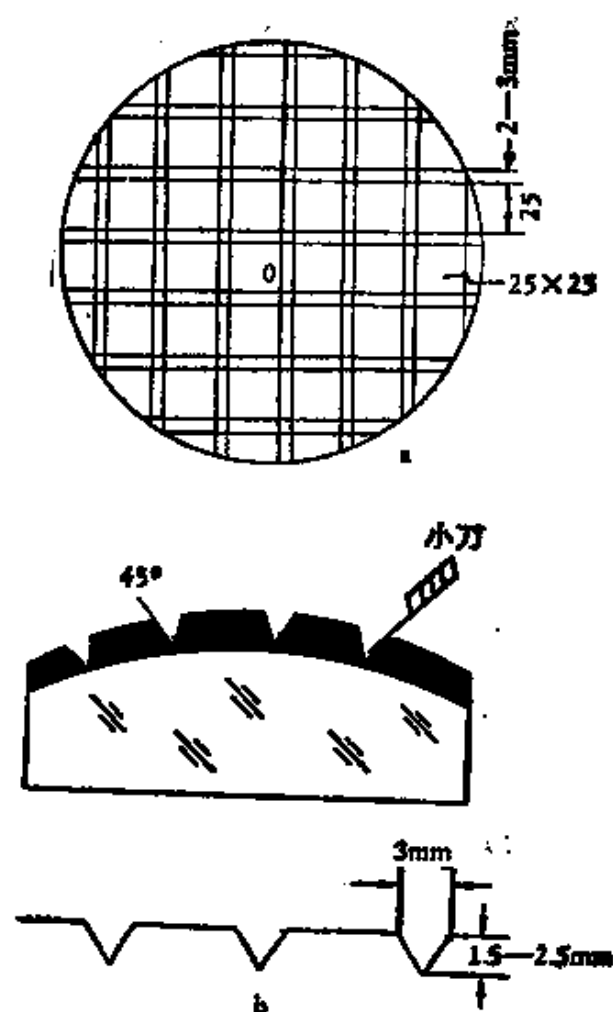


图 4.2-21 刻槽

刻槽要一点点刻，不要一下子刻完。刻时动作要干脆利落、迅速准确。刻完槽如沥青没完全变硬，可以把镜面放上去加压推磨，使镜面与沥青更加吻合。从镜背看去镜面全部呈均匀黑色，刻槽处界线明显表明吻合较好。相反，各处黑色不均深浅不一，表明没有完全吻合。再须加压推磨使它吻合。有时不好辨认，可以加些红粉水研磨几下，再透过镜背观看。特别黑的地方说明沥青高，特别浅的地方说明沥青低了。在

高低交界处用力压。如果沥青硬了可用热水再浸烫使沥青变软再压。压好后加红粉研磨一段时间，磨一段时间可以完全吻合，当镜面抛亮程度基本均匀了，说明抛光盘制成了。

3. 影响抛光的因素

制作者总想心急手快把抛光完成，可是实践总是教训人们不能这样，对于抛光来讲欲速则不达。因为进行抛光影响的因素更多了。如红粉浓度、抛光时用量、抛光的压力、磨程、手温……等等均影响抛光，如果有一个方面处理不当就会使你前功尽弃。那么影响抛光的因素有哪些呢？

(1) 红粉的浓度应合适。加在镜面上用量应适当。从图 4.2-22 中，看出红粉的浓度与抛光效率的相应关系，当液体与固体重量为 7:1 时，抛光效果最好。即使在同一比例情况，抛光时红粉浓度也要合适，这里浓度太高，水分少，红粉颗粒不能正常工作，也就是抛光过程中，碎屑物质不能迅速排除。浓度太低水分多，红粉颗粒减少抛光工作慢，同时给玻璃降温

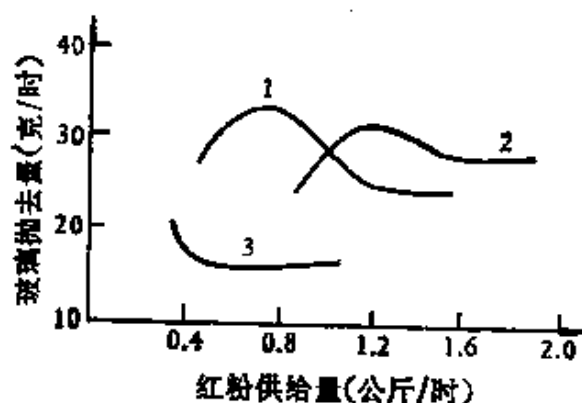


图 4.2-22 红粉浓度与抛光率图

1. 液:固=7 2. 液:固=5 3. 液:固=9

造成抛光效率降低。

从图 4.2-23 中可以看到, 同样供给一定合适比例的红粉水, 抛光效果也不同, 红粉太少参与抛光颗粒少, 曲线偏低, 红粉太多参与抛光颗粒重叠相互磨磋也使玻璃磨去量减少。这里有个最好的量 0.7 公斤/小时是磨削玻璃最多的量。

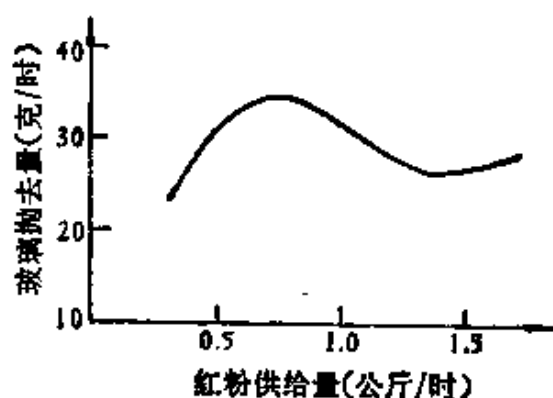


图 4.2-23 红粉适量图

(2) 压力适当加大, 动程控制正常量。红粉浓度及供给量都合适时, 随着压力的增加, 抛光效果也随着增加。从图

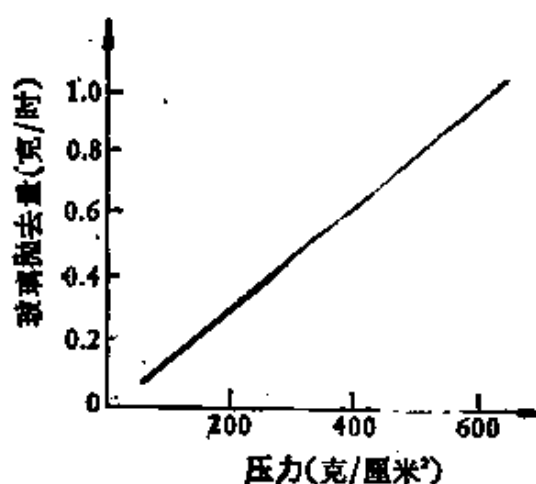


图 4.2-24 压力与抛光图

4.2-24 中压力与抛光量成正比。抛光时可以适当增加对镜面的压力。在抛光加压时容易又使镜面受力不均, 使球面不准。这需控制动程在 1/3 左右的正常动程范围内。还要采用多种手法。慢起慢止以保证质量。

(3) 控制温变, 力求精确。从图 4.2-25 中所示, 温度越高, 抛光的越快, 这是抛光过程中, 摩擦力经长时间磨制后, 使玻璃表面温度升高。可是玻璃散热不同, 往往中心处温度高,

所以中心先抛亮，边缘后亮，当用手磨时，手按着镜面，使镜面温度也同时升高，同样影响抛光效果，为了避免上述现象发生，抛光时不要长时间进行，一般抛光 10—20 分钟就停一停，手要随时改换接触镜面位置，甚至有必要经常放在冷水中浸一下，或带上橡皮手套。

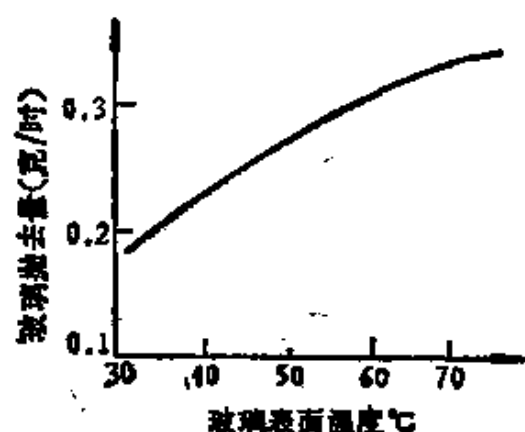


图 4.2-25 研磨与温度

一个镜面全部抛亮大约须要有二十多个小时，甚至更长，检查镜面的光洁度，只要在高倍率放大镜观看下，没有毛点和研磨的麻点痕迹，就算抛光合格了。有时镜面上有极微的小划道，一般为红粉道，根据反射强光衍射光时能看到。这些小划道不影响成象。为了能熟练地掌握研磨的特点，特编写出《磨镜歌》。

磨 镜 歌

镜偶相对平放台，手握镜面推拉开；
砂水磨磋显神威，上者变凹下凸来。

正常动程三一摆，压力均匀莫偏爱；
径动弦动椭圆动，镜自转来悠悠哉。

镜面制坯粗磨来，球面速成粗砂快；
细磨横扫砂眼群，道道细砂见光采。

偶板刻盘沥青材， 镜偶必合勤修改；
边抛边检红粉干， 合格镜面心花开。

4. 检验与修改

俗语说“功到自然成”，对磨制镜面是如此，特别是抛光更是如此。欲想得到质量好的球面，必须伴随着许多艰苦细致的检验和修改的工作。所以抛光过程也就是镜面检验与修改过程。抛光完毕也就是检验修改完毕。

过去人们磨制镜面，不知如何修改，只凭经验去判断，直到 1856 年莱翁·佛科发明了刀口仪，人们才找到检测镜面质量的钥匙，这是个比较直观、简单、灵敏度高的检测方法，人们称为阴影法。

刀口仪是利用阴影法测量凹球面的面形，而且它可精确地测定凹球面的曲率半径和焦点。现在我们就拿这个刀口仪进行检测镜面。

刀口仪的检验重要的是，理想球面的检验。所谓理想球面，就是位于球心的点光源发出的光，经过该球面反射后，仍在球心处交于一点而没有象差，如图 4.2-26a。在球心处放一个点光源，则从 S 点发出的光束，经球面 AB 反射回来在 S' 处聚焦成象。用眼睛靠近 O 点处观看情况。

为了表示清楚，在图中不把入射光线画出，只绘出反射光线会聚情况(如图 4.2-26b)。此时 SS' 重合为曲率中心 O。在曲率半径 O 点前后 N_1 、 N_2 、 N_3 处用刀口仪切割光线，再用眼观看刀口移动方向与镜面阴影方向的变化情况。

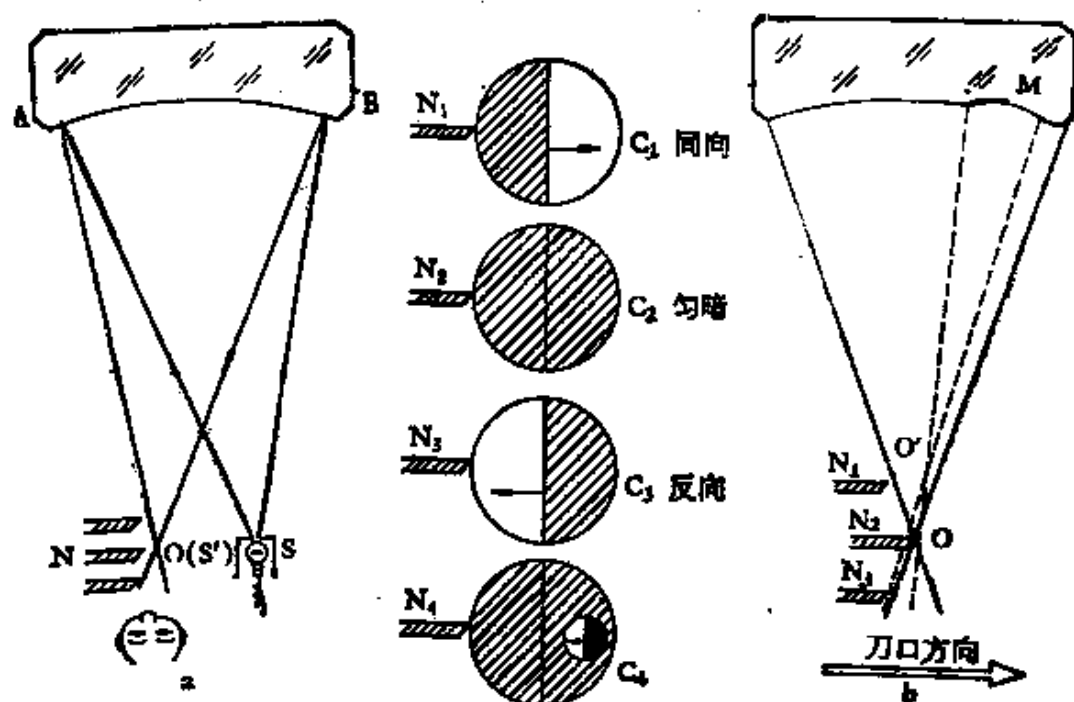


图 4.2-26 刀口切割镜面阴影

刀口在 N_1 处，即在曲率中心前，如果刀口没有切割光线前，用眼望去均匀的亮盘呈现。当刀口对光束由左向右切去，亮盘则由左向右逐渐均匀变暗(如图 4.2-26c₁)。

刀口在 N_2 处，即在曲率中心处。当刀口刚一切割光束时，亮盘上顿时黑影突降，不过看不见黑影移动的迹象。可是严格地讲，由于 O 点不是纯粹的点，它有一定面积，刀口移动 ΔS 的距离之后，镜面才逐渐变暗的。如图 4.2-26c₂。

刀口在 N_3 处：即在曲率中心 O 点之后，如果刀口自左向右切割光束，而黑影却由右向左反向逐渐变暗。如图 4.2-26c₃。

归纳上述情况，理想凹球面刀口切割光线时有三个特点；曲率中心切、亮突暗；曲率中心前切阴影与刀口同向行。曲率

中心后切阴影与刀口反方向行。

在检验镜面时,根据这些特点来判断镜面的不规则程度。如图 4.2-26b 中,虚线所画的部分表示凹球面中间某一个部位有局部凹面,我们用刀口仪要把它检验出来凹下情况。

把刀口放在 N_2 处,仍由左向右切割光束,这时阴影图除了 M 处以外,均成为较匀的黑影,在 M 处刀口 N_2 是在 M 处所对应的曲率中心 O' 的后面切割,这时所看到的黑影是从右向左移动。如图 4.2-26c₄ 所示。阴影图上有清晰的黑白分明处,在黑白交界处是镜面相应位置上面存在有高带或低带的顶点,它们形成等高环。一般当刀口从左向右移,阴影图上黑白阴影如果是左明右暗,说明交界处凹陷;如果是左暗右明说明交界处凸起。然后根据阴影图的位置和大小,初步估计镜面上对应区域变形位置和范围。

阴影图上与刀口垂直的直径灵敏度高,与刀口平行的直径精度为零,在此直径上阴影图亮度是一致的。阴影图亮暗左右对称的分布在这条直径的二侧。阴影法是检验镜面形状比较灵敏的方法,至今被广泛应用。为使初学者能迅速掌握又便于记忆,编《检验歌》如下:

检 验 歌

刀峰切光为检验,	*	球面起伏波浪翻,
阴影变换眼诊断;		明暗交界是关键;
光聚成锥三点切,	*	由左向右进刀来,
理想球面必这般。		刀歌影舞蹈浪欢。

一切球心亮突暗，	*	左明右暗进凹陷，
影匀不动镜中满；		左暗右明见凸点；
二切焦前影同向，	*	凹谷过罢凸峰起，
刀影相随齐向前；		翻峰入谷众波连；
三切焦后影异常，	*	凸凹相对细分明，
亲切相迎对面赶。		实践谱写攻关篇。

另有一些常见的球面毛病，它的检验方法、产生的原因和修改的办法分别介绍如下。

关于中央凸起，如图 4.2-27a 所示。在球面 A_1B_1 中心处有一个小凸起 A_2B_2 ，由于 A_1B_1 曲率大，光线反射后交于 O_1 点； A_2B_2 曲率小，光线反射后交于 O_2 点，而且焦点到镜顶的距离， $O_2O > O_1O$ 。对于这样的球面，首要的是设法能找到 O_1 、 O_2 交点的粗略位置，然后用刀口仪在 N_2 处的位置进行切割，观察其阴影的图形判断镜面的情况。

刀口仪开始不一定准确地找到 N_2 位置进行切割，找不到时必定是在 N_1 或 N_3 处切割，然后通过 N_1 或 N_3 再找到 N_2 的位置。

当刀口在 N_1 处切割光线，因为它在 O_1 和 O_2 点之前，所以阴影方向与刀口同向，这时把刀口向后移动再选择 N_2 位置。

如果刀口在 N_3 处切割，即在 O_1 和 O_2 点之外。阴影方向与刀口切割方向相反，阴影逐渐增加，说明刀口不在 N_2 处切割需要把刀口向前移动。

刀口在 N_2 处切割，它介于 O_1 和 O_2 点之间，对 O_1 来

讲,刀口在焦点后切割,则阴影移动方向和刀口运动方向相反。对 O_2 来讲刀口在焦点前切割,则阴影移动方向和刀口移动方向相同(如图 4.2-27b)。

在 N_2 处切割,阴影图上并存相反方向的两个阴影,此时阴影越黑,说明高差越大。再前后推动刀口仪,使其在 O_1 与 O_2 之间移动,可看到阴影区域不变。如果出现同方向的区域减少,反方向阴影增大,可以确定是均匀凸起。

把这些变化范围要细心多检验几次,要记下刀口仪进尺距离确定误差范围。校正好位置后用红粉画在镜背相应位置。

检验完镜面情况,需要分析产生原因,找出其中主要影响因素采取有效措施把毛病改正。造成上述原因,主要有三点:(a)抛光的沥青工具中部低。(b)动程太短,中心磨削小。(c)中部与边缘压力不均,加工时间不够。

针对产生误差原因,采取如下措施进行修改。(a)采用偏

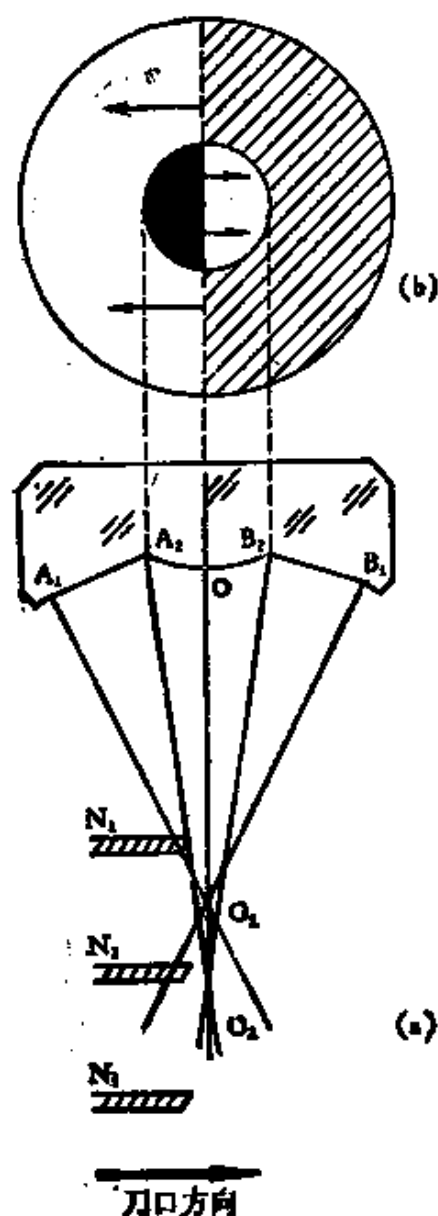


图 4.2-27 中央凸起

心抛光适当加大动程。见图 4.2-28a。(b) 用小沥青工具辅助抛光能迅速地把凸面消除,抛时注意每次时间不易太长,约 4—5 分之后检验一次。见图 4.2-28b。(c) 加宽沥青工具边缘沟槽的距离为 1—2 毫米,加强中心的抛光作用。见图 4.2-28c。

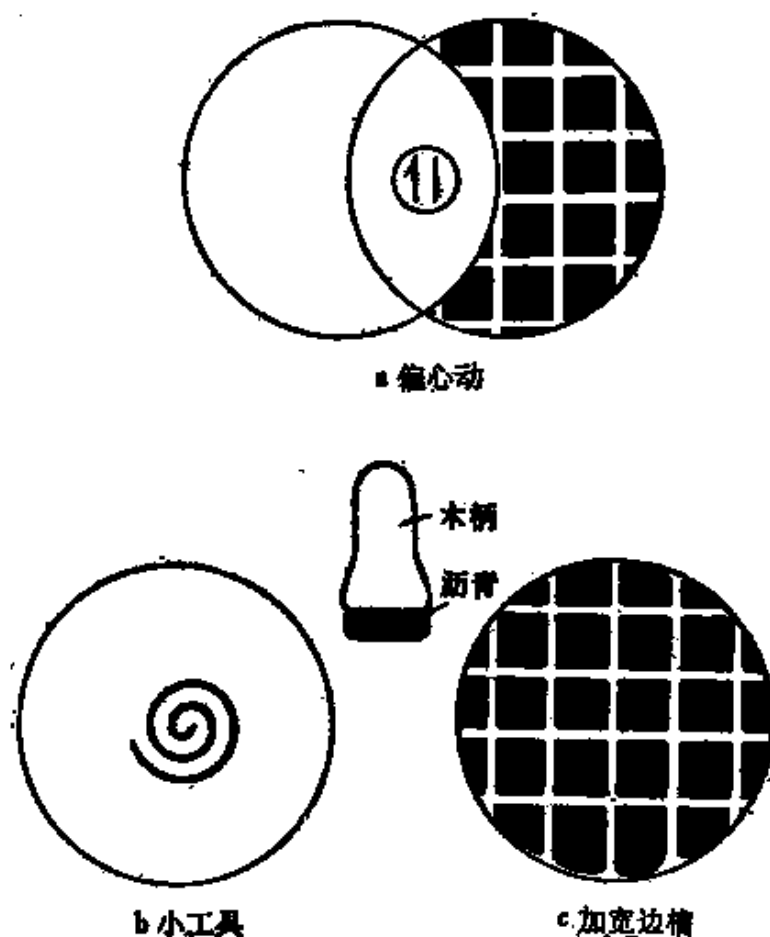


图 4.2-28 中央高的修改方法

修改是保证镜面质量的重要环节,在修改中还要不断地进行检验,一般抛几分钟便检验一下,找出毛病再修改,一定要耐心细致地工作,千万不能操之过急。刚抛完的镜面在检

验时需要放置 10—15 分钟冷却一段时间。因为抛光后镜面局部温度较高,造成表面形状有暂时变化,待冷却后镜面保持实际的镜面情况,这时再检验能查明真实效果。

关于中央低下。中央低下的毛病也是经常出现的。如图 4.2-29a 中,镜面中心 A_2B_2 较低。说明 A_1B_1 的曲率比 A_2B_2 的曲率小。两个曲率的焦点 O_1 比 O_2 远离镜面中心。检验这样镜面与检查中央凸起镜面方法相似。首先要确定出 N_2 的刀口位置,观察 N_2 处刀口移动时,阴影变化情况,确定出镜面毛病所在。

刀口位在 N_1 处切割光线,因它均在 O_1 点和 O_2 点之前,阴影变化与刀口运动同向。刀口在 N_2 处切割光线,它又在 O_1 点和 O_2 点之后,阴影变化与刀口运动方向相反。通过检验最后找到 N_2 的位置。

当刀口在 N_2 处切割光线,即它在 O_1 和 O_2 点之间,对

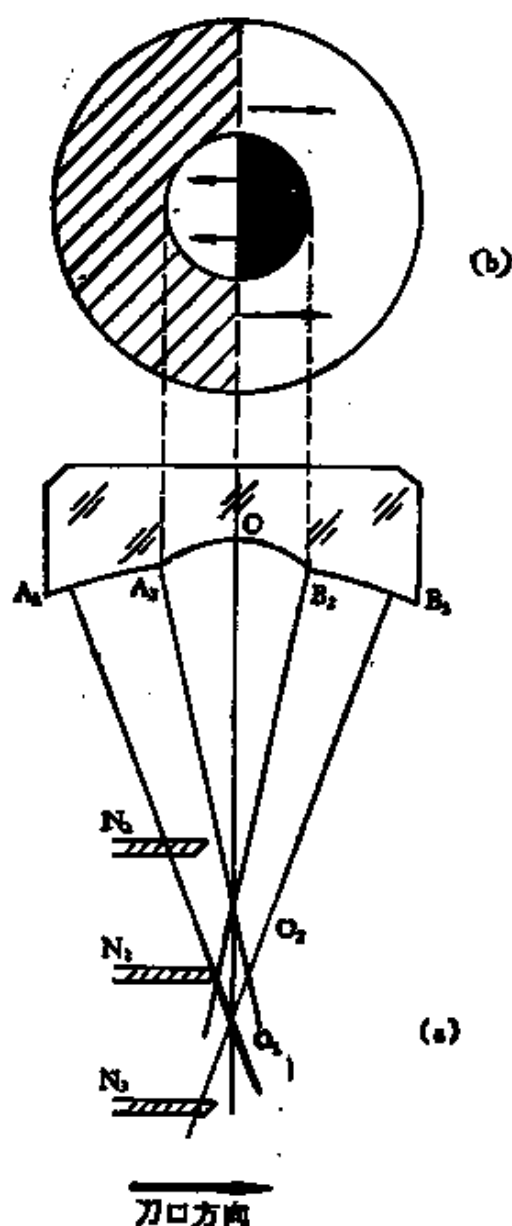


图 4.2-29 中央凹陷

O_1 点来讲,刀口位在焦点之后,观察到阴影移动方向与刀口移动方向相反。对于 O_1 点来讲,刀口位在焦点之前,则阴影移动方向与刀口移动方向相同(如图 4.2-29b)。在测量时,当刀口由左向右方向切割,由于先切割 A_1O_1 光线,则阴影由左向右变暗。继续向右移动刀口,刀口切割了 B_1O_1 光线,看到中心处的阴影反而由右向左移动。观看标尺记下这个交界处的刀口移动距离。继续移动刀口,当刀口切割光线 A_2O_1 时,看到阴影图又恢复开始移动方向。再看一下标尺,记录下这个交界处的刀口移动距离。这样不断移动刀口,直到刀口从光线 B_1O_1 处移开为止。切割光线移动速度要慢而均匀,把变化情况认真记录,根据记录计算出镜面上的位置。并用红粉在镜面上画出范围。最好做三遍后确定其范围,这样能更准确些以备修改时心中有数。

另外使刀口纵向移动,黑暗区域不变,如果刀口从 O_1 点到 O_2 点移动,如果反方向阴影减少,同方向阴影增大,说明镜面中央是均匀凹下。

检查中看到这种镜面上,边缘阴影与刀口移动同向,而中央阴影与刀口移动反向。即同时存在两个方向相反的阴影。

中央低下原因有(a)抛光盘中心高。(b)使用动程太长,中央抛去太多。(c)抛光速度太快。改正的方法;如果中央低下轻微,可在对应的抛光盘处轻刮一下,使抛光盘中央略低一些。如果低下较多,可把抛光盘中心对应部分挖去几块或挖成多角形等,但注意挖时不要对称进行。如图 4.2-30 所示。目的为减少中央处抛光,减少动程,减缓抛光速度。

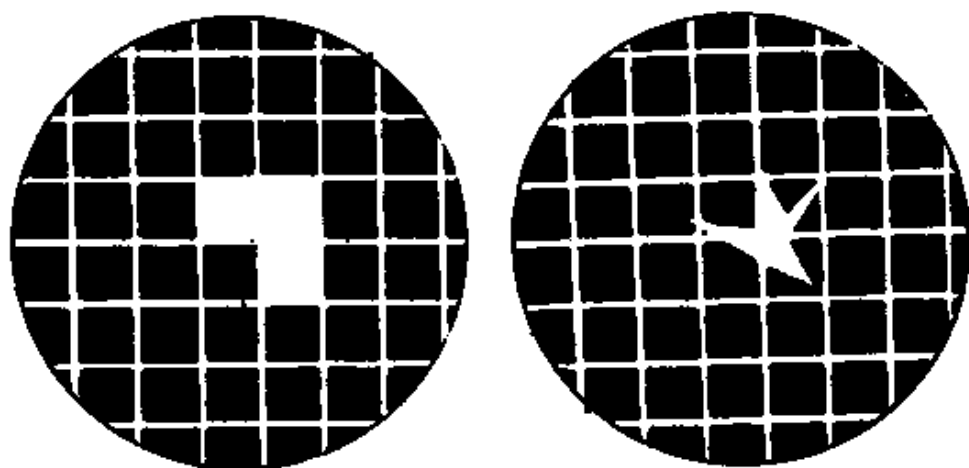


图 4.2-30 中央低下抛光盘的修改

关于中部环带。镜面上有与中心对称的圆叫做环带。环带分两种、高出镜面的狭窄圆环叫高环带；低于镜面窄圆环叫低环带。

高环带特点是在中部区域形成不同的几个曲率，它们的中心点 O_1 、 O_2 、 O_3 也不同(如图 4.2-31a)。

用刀口仪在 N_1 处切割，由于是在三个焦点之前，所以总看到与刀口同向的阴影。刀口在 N_2 处切割或在 N_3 处切割，在所对应的切带区域总有两个很黑的环，它们刀口切割同方向黑环在外，反方向黑环在内，这两环的黑度较其他部分要深(如图 4.2-31c)

低环带的特点也是在中心区域形成几个曲率，它们的中

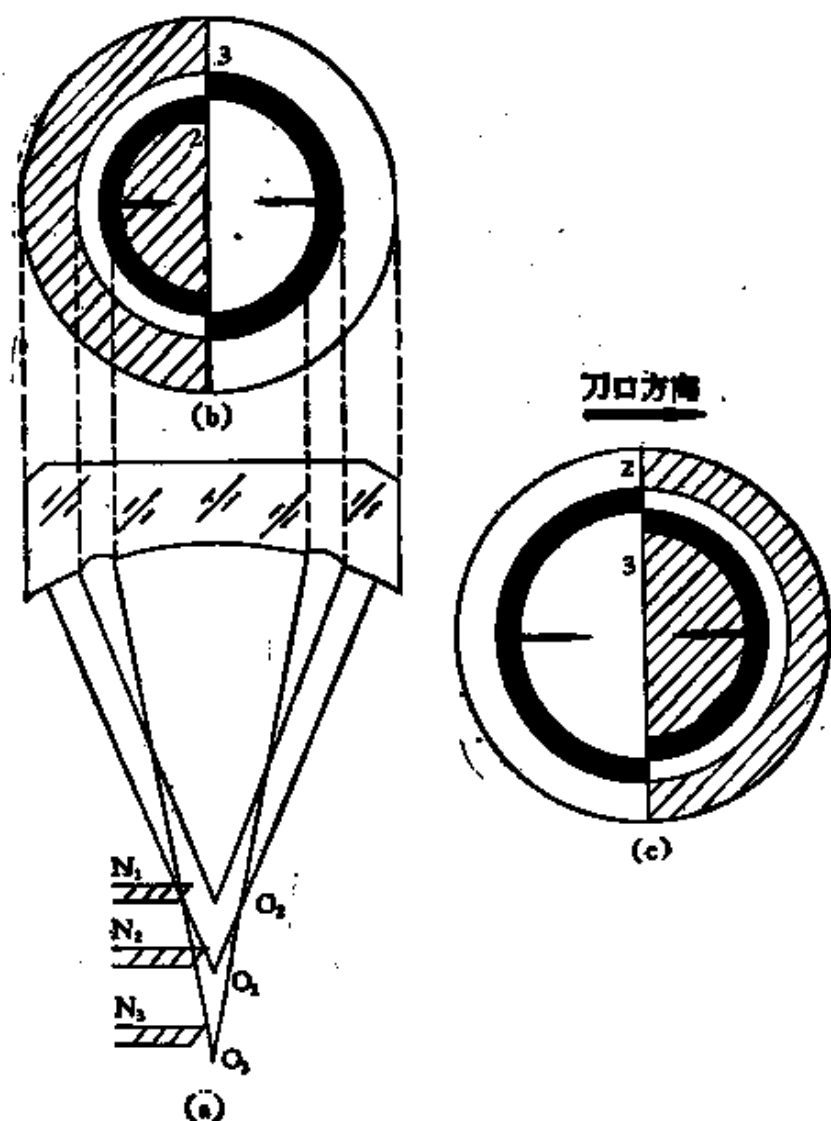


图 4.2-31 高环带

心点 O_1 、 O_2 、 O_3 也不同(如图 4.2-32a)。同上述相似方法分析,在 N_3 处切割,在对应的切带区域也有两个很黑的环,但方向与高环带完全相反。即与刀口切割同方向环在外,反方向环在内(如图 4.2-32c)

波浪形; 在球面 A_1OB_1 的面形内,有些环带不十分明

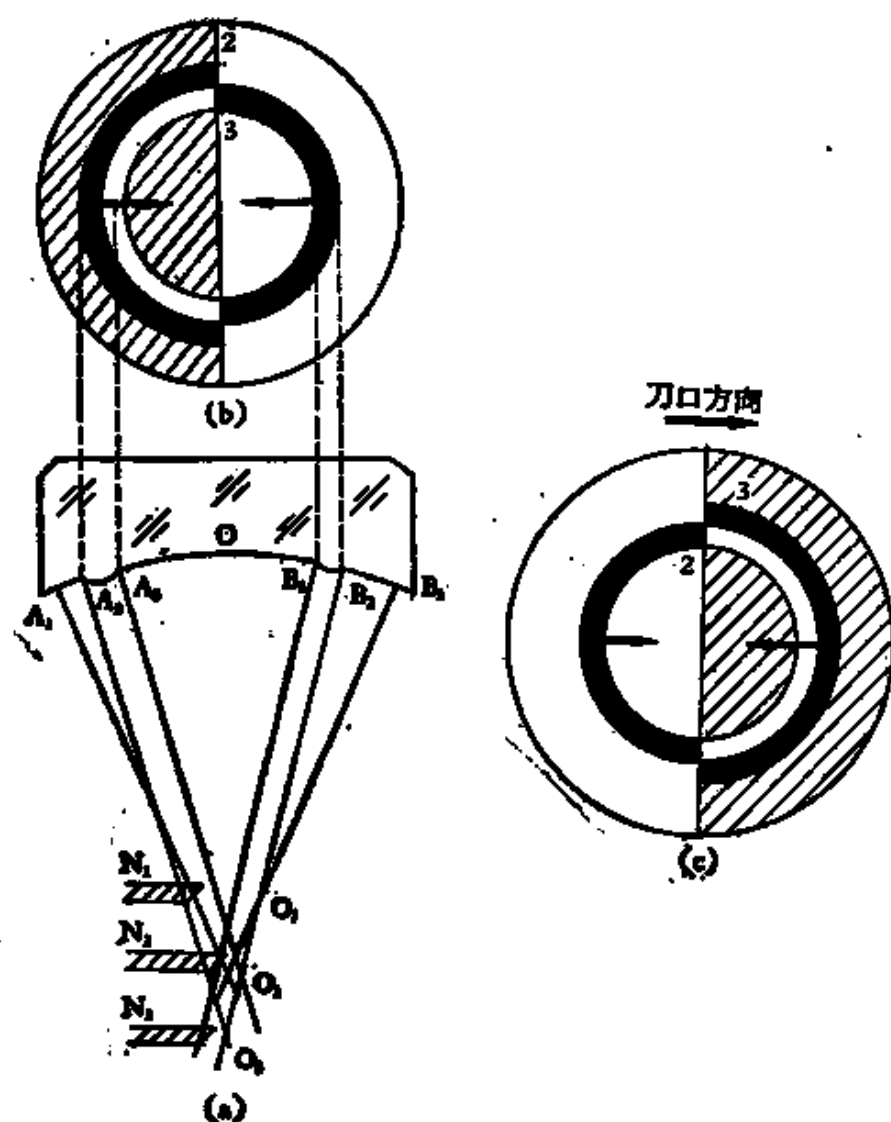


图 4.2-32 低环带

显,但高低起伏呈波浪形。检验这样的镜面,把它分成几个曲率不同的最小球面来分析。从图 4.2-33a 中来看,它们反射的光线分别交于 O_1 、 O_2 、 O_3 三个点。它们距离不同,如果在 N 处切割,形成几个环带的阴影图 (4.2-33b)。但阴影不象上面所说的那样黑,一般区域切带也较宽。

造成切带和波浪形的主要原因有三点；

(a) 抛光盘制作和压制时，表面有高有低的现象，或刻槽

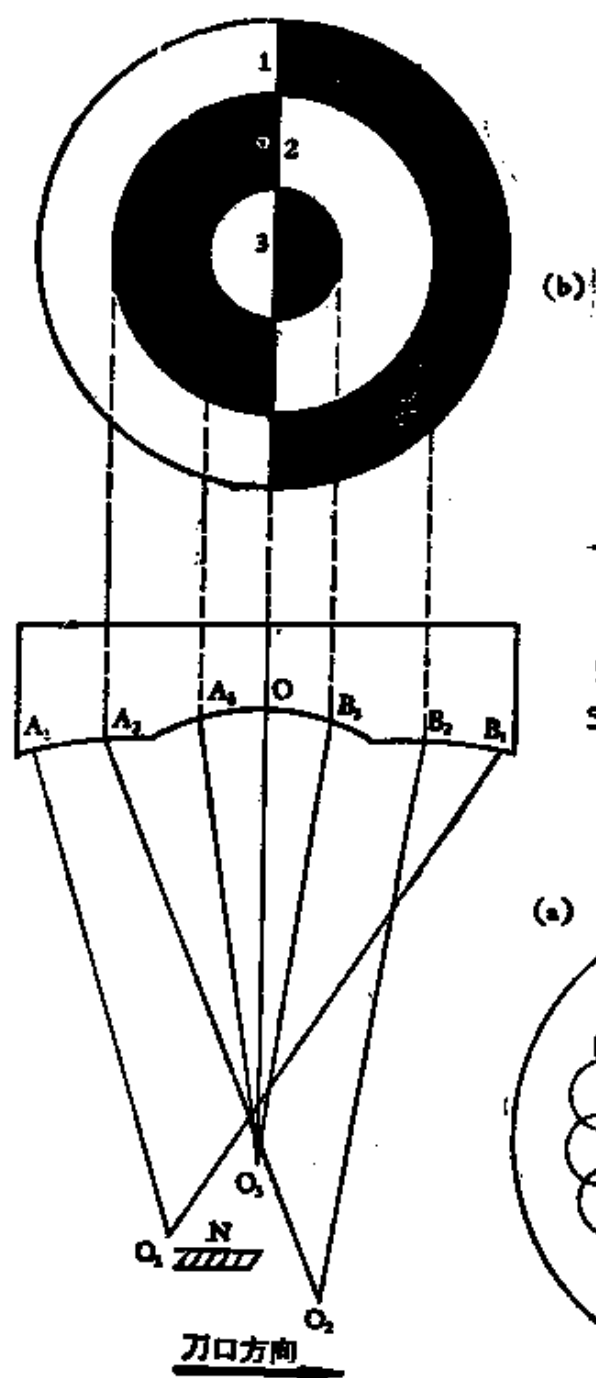
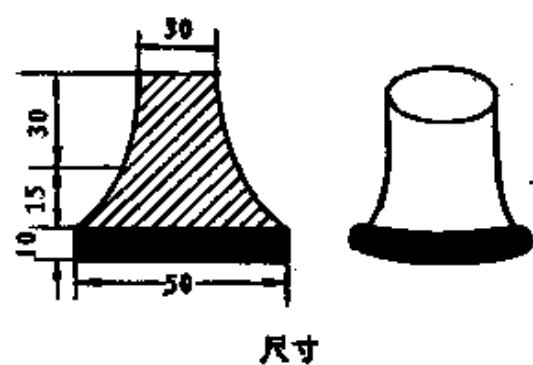


图 4.2-33 波浪形

(b)



(a)

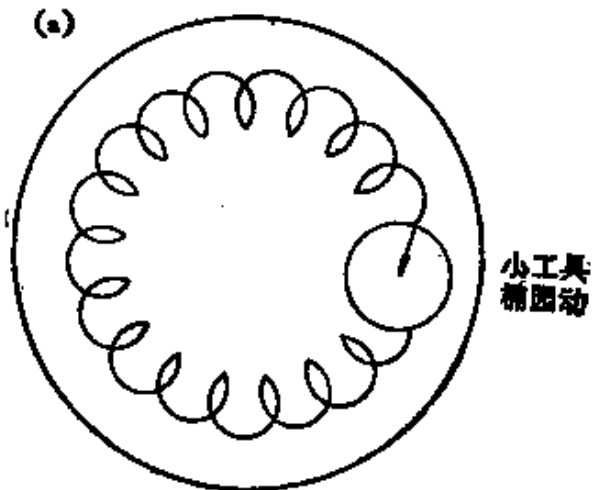


图 4.2-34 小工具修改

对称结果。

(b) 磨制时各处压力不均。

(c) 磨制动程呆板单一,不熟练。

克服办法:对切带不深可以用椭圆动的磨法逐渐消除。磨时注意控制动程磨一会便可消除。对切带比较严重的镜面,需要修改一下抛光盘,低切带处需要把抛光盘对应部分轻刮一部分。再用短动程抛光。对高切带测定其位置后用小工具抛一段时间,再用抛光盘抛光,如图 4.2-34。这就要每分钟检验一次。对波浪形采用以椭圆动为主再配合多种手法及动程逐渐可以消除环带。也可以用小工具,对镜面进行修改把毛病逐步消除掉。

(4) 倒边与翘边。倒边是指在镜面边缘磨损较多,使其低于镜面。翘边则与上述相反,边缘高出镜面。倒边现象在作刀口切割时,在边缘处总有一个同方向的黑环与刀口移动。如图 4.2-35 所示。翘边与倒边恰恰相反,作刀口切割时,在边缘处总有一个反方向的黑环与刀口移动。如图 4.2-36 所示。

造成这两种现象的原因:(a)工具边缘有高或有低。如果边缘高形成倒边;边缘低形成翘边。(b)磨制动程太大而又快容易出现倒边;相反,动程太小、速度慢容易出现翘边。(c)细磨时加砂过多。

修改办法:对倒边处将工具刮低些,刻稀边缘处的槽沟;另外,可以把镜面放在下面,小工具在上采用短动程抛光,待抛段时间后,再用足型工具抛光。倒边现象完全消除比较困

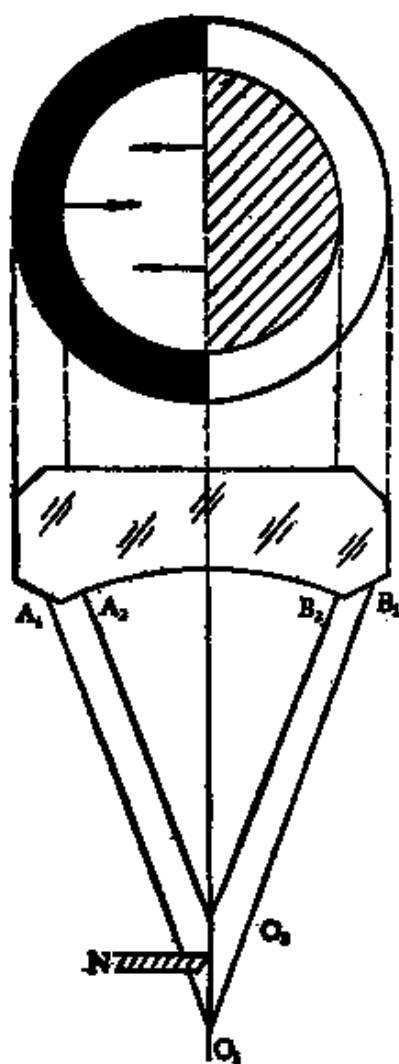


图 4.2-35 倒边

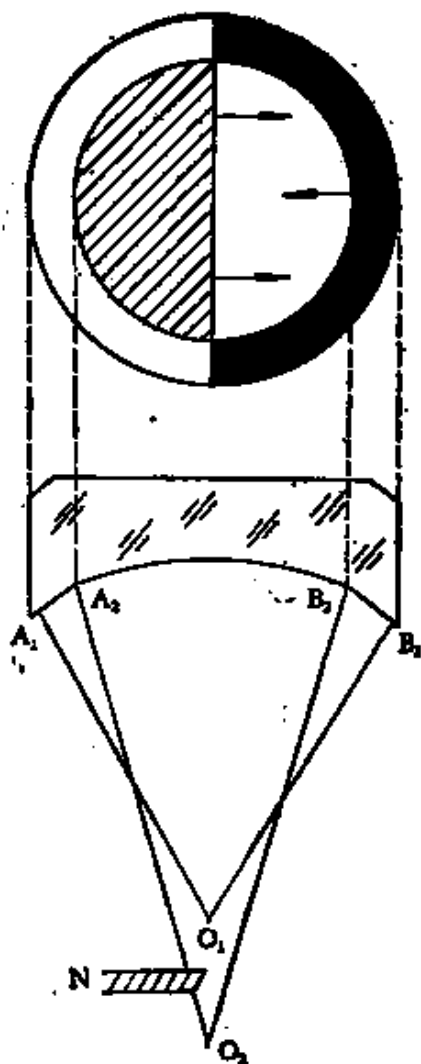


图 4.2-36 翘边

难的,在实际上,只要倒边不超过 3—4 毫米,对观测没有多大影响。

对于翘边可以采用长动程推拉或翻转镜面倒过来抛光。

(5) 象散的检验与修改。当观察到的阴影图明暗交线不与刀口平行,也就是在检查时,有时开始从右上角先暗,有时从左下角先暗,这说明有象散存在。为了检查有无象散存在

时，一般把刀口相对方向倾斜 45° 角，当刀口在球心附近沿光束方向移动时，可以看到刀影图中的亮暗分界线作旋转如图 4.2-37 所示。

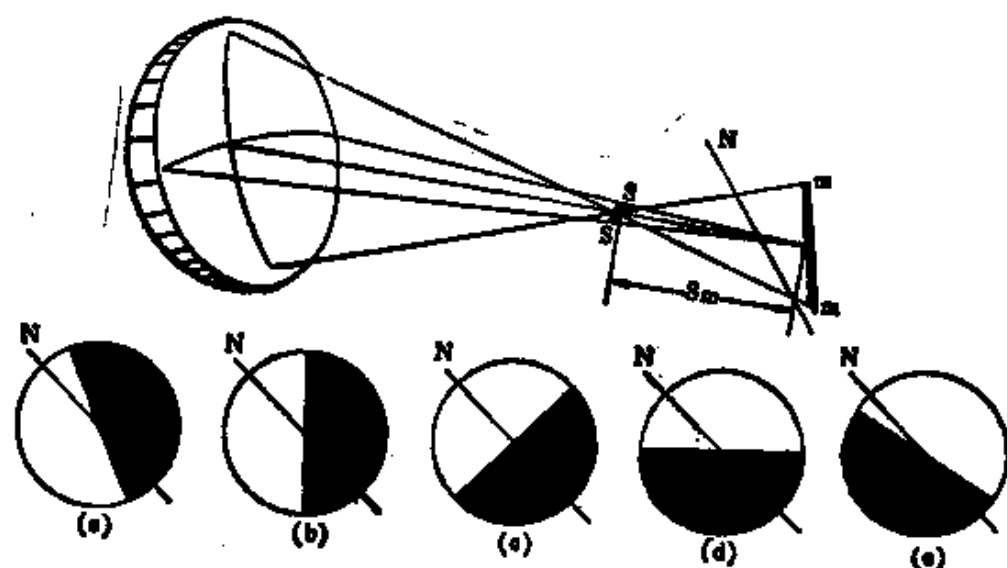


图 4.2-37 象散

当刀口与 SS 或 mm 平行时，则象散不容易发现。只有使刀口与 SS 或 mm 平面交叉，并与 SS 或 mm 成 45° 角时才能发现。当刀口与弧矢焦线 SS 所在平面交叉并与 SS 成 45° 角去切割光束时，如果刀口在 SS 焦线前，则看到的阴影图和刀口的相对位置如图 4.2-37a 所示；当刀口移到 SS 焦线上时，阴影图和刀口的相对位置如图 4.2-37b 所示；刀口移到 SS 焦线与 mm 焦线之间时，阴影图和刀口的相对位置如图 4.2-37c 所示；刀口移到 mm 焦线上时，阴影图和刀口的相对位置如图 4.2-37d 所示；刀口移到 mm 焦线后时，阴影图和刀口的相对位置如图 4.2-37e 所示。

从图上 4.2-37 为弧矢焦线 SS 在子午焦线 mm 的前面，刀

口从弧矢焦线前后移动时，在各个不同位置切割光束所看到的阴暗交线按顺时针方向旋转的变化情况。如果弧矢焦线在子午焦线后面，则刀口从子午焦线前向后移动时，看到的明暗交线按逆时针方向旋转。与图 4.2-37 所示情况正好相反。

为了减少其他象差对阴影图的影响，有时用减少光束口径办法来测量象散。移动刀口当看到亮暗分界线由垂直方向变到水平方向（或由水平方向变化到垂直方向）时，记录下刀口移动距离 S_m 表示象散值。

上述方法检验象散是比较准确的，但检验方法是比较难的。用目镜检验象散方法可以较容易进行。

用刀口检验仪的光源照射在镜面上，用一个高倍率目镜在刀口处附近看针孔的象，如果镜面是好的，看到的象和针孔一样的圆。在焦点内外只有大小变化。如果存在象散的

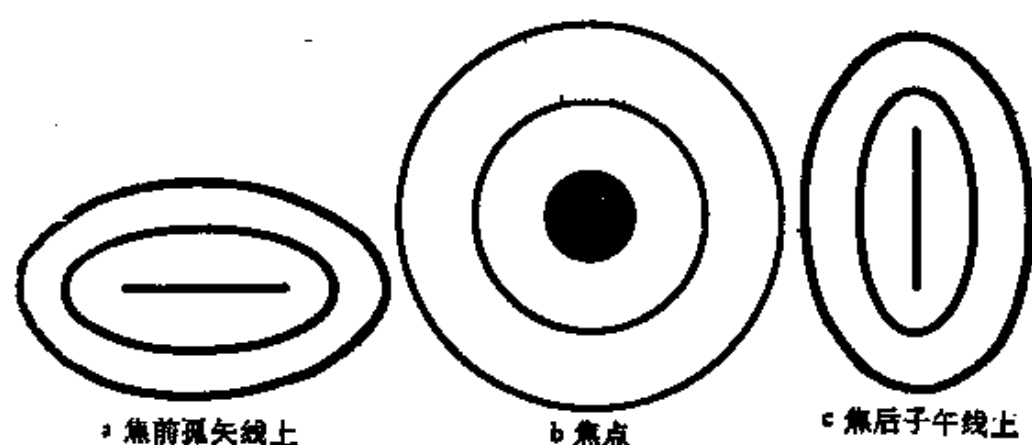


图 4.2-38 刀口检验镜面

话，那么，象就不规则，不是长的就是扁的，并且曲率中心前与后象的伸长方向恰好相互垂直。如果在曲率中心前较远处形成的象是水平方向伸长的话，如图 4.2-38 所示，那么可以断

定这个镜面，弧矢方面的焦距比子午线上的焦距要大。为了便于修改，测得后在镜侧用红粉笔作个记号。

造成象散的原因很多，其中主要是抛光时的动程太死板，转动镜面不够，使某个方向磨的时间多，相对另一方向磨的时间少，造成两个方向的曲率半径不一样。另外磨制时受力不均也是造成原因之一。

对于镜面上的象散，如果在镜面还没有抛光以前，可以暂时不理。但抛光将结束时，仍然存在，则要认真进行修改。主要方法是在焦点后的象长的方向，稍垫高一些。并在这个方向上加长动程，磨一会当镜面曲率变小，使两个方向的曲率差不多时就可结束。磨时注意时间不宜太长，磨上半分钟到三分钟以后，就停下来检验。为消除温度影响，检验在15分钟后进行较好。

(6) 刀口仪测焦距。抛光完后的镜面曲率半径总与设计时有差别，有必要对镜面的曲率半径重新测定。刀口仪测量镜面焦距是它另一个用途，这比用球径仪要精确得多。

测定时把刀口仪放在球心处，使小孔射出的光，由反射镜反射在刀口处会聚。用直尺测量镜面到刀口之间的距离（如图4.2-39）。球面半径可按下式计算：

$$R \approx L + \frac{D\Delta}{4L} \quad (4.2-1)$$

式中：L——镜面到刀口的距离；

D——镜面口径

Δ——刀口与小孔之间的距离。

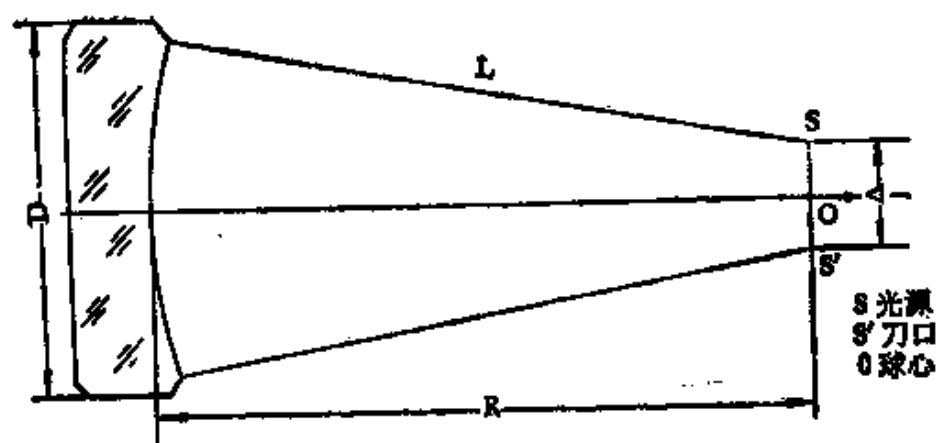


图 4.2-39 测定曲率半径

测定时的半径误差 ΔR 一般不超过下式值

$$\Delta R = 0.2 \frac{R^2}{D^2} + \Delta L \text{ (微米)}$$

式中 ΔL ——测量 L 时的误差

镜面焦距根据公式: $f = \frac{R}{2}$ 求出。

三、卡式主、副镜的磨制

卡式望远镜的光学系统是由主镜和副镜组成。每种镜面根据光学性能和要求不同,磨制时方法也不同,下面分别加以介绍。

(一) 主镜加工

主镜的镜面及偶板选取材料以后,首先要经过滚圆(方法

见滚圆一节),把它们磨制成圆形以便采用对磨法进行磨制。

在进行镜面磨制之前,因卡式主镜中心处有个圆孔,需要先进行钻孔。

1. 钻 孔

钻孔是用特制的空心钻,在普通钻床上进行。空心钻外径等于主镜的内径,壁厚为1—2毫米。材料选用铜管和铁管均可。如图4.3-1 也可以用下边是锯齿状的铁盒上面焊接一个铁棍制成。如图4.3-2。为使金钢砂进入镜面在管壁上需要开成四个槽。

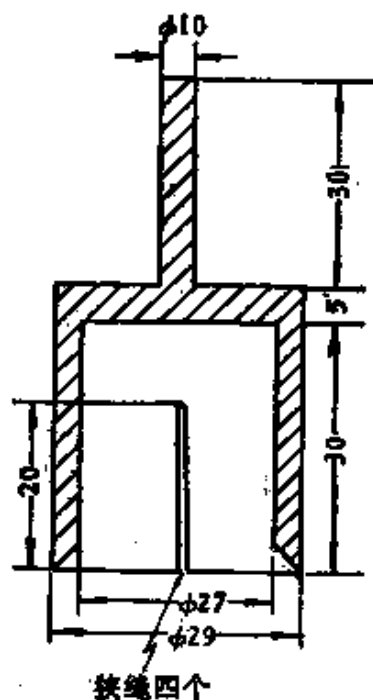


图 4.3-1 空心钻

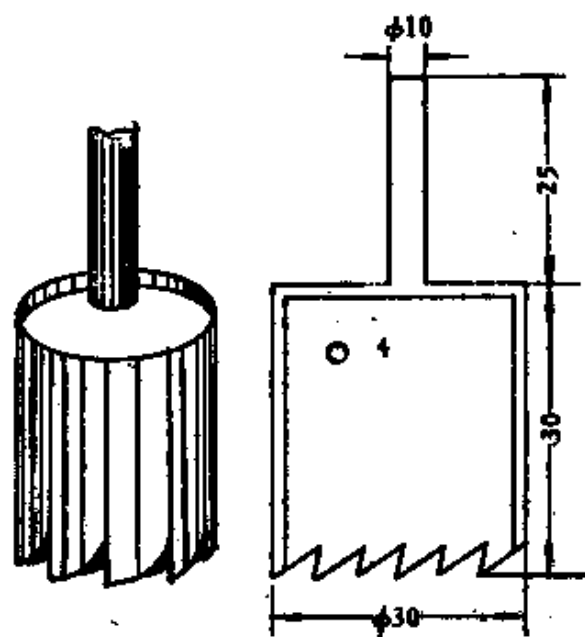


图 4.3-2 铁皮钻

如主镜孔洞为30毫米,则取外径为30毫米,内径为28毫米,管长30毫米的铜管(或铁管),顶端车成50毫米 $\phi 60$ 的

圆棍。

钻孔时要先把镜面固定好。选用一块木板，把镜面平放在上面，四周用小木块或钉子给卡牢，要钻孔的位置用红粉画出它的位置和大小。钻孔是用磨料的磨削作用进行的。磨料不能太粗一般选用 240 号金刚砂。用量不多，用时是把这些磨料放在一个小水杯中，加入少量水使其成为悬浮液。

钻孔过程是这样的。把空心钻卡紧在钻床上，已固定好的镜面放在工作台上，试对空心钻与镜面中心孔是否对齐，对齐后左手取 240 号砂浆均匀涂在开孔处，右手开动机器控制钻床手柄，轻轻给以压力。同时左手要不断地把金刚砂推送刀口处，让砂从孔中不停地由管壁流到刀口处。钻孔时手要边往下压又不时提起，让新磨料源源不断地流入环形槽中，加速磨削玻璃。钻时玻璃局部温度升高，防止过热而炸裂，注意用冷水不断降温。

为避免钻透时造成镜背出现大崩裂，事先可在镜背钻孔地方，贴一块大于孔径的玻璃片，厚约 2—4 毫米。如果不小心出现崩裂也没太大关系，可以增大倒角把它消除。约莫 30 分钟左右可以把 20 毫米厚度的玻璃钻透。要是没有钻床，可以用木工使用的手摇钻固定后进行钻孔。

2. 磨凹球面

主镜钻孔完毕后，把钻下来的玻璃仍放回原孔中，用石蜡把它粘牢。这样做的目的是防止磨制时，中心区域产生严重的塌边现象。

把偶板放在工作台上固定好,再把主镜放在偶板上面,开始对镜面进行研磨。研磨同样经过粗磨、细磨和抛光三个工序,先使主镜成为标准球面。磨法请参照书中有关介绍。

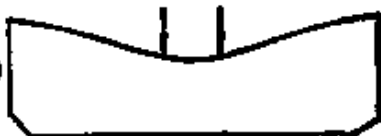
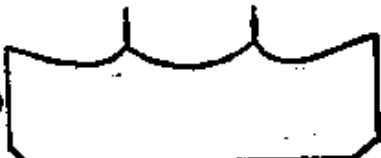
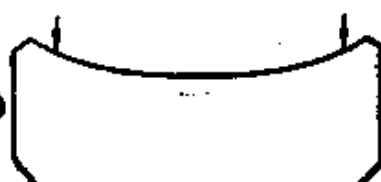




为使初步开始磨制的人有个参考,现将磨制过的 20 厘米,相对焦距为 6 的镜面,在用砂多少和所需时间的记录介绍如表 4-3:

表 4-3 砂 量 表

(镜面口径 $D=200$ 、矢高 $h=2$ 毫米、曲率半径 $R=2000$ 毫米。)

工序	砂量	砂量 (毫升)	球径仪 读数	时间 (时)	动程及检验
粗磨	80	160	1.82	7	以径动为主 长动程 弧型板测量合适
	150	30	1.89	2.5	以径动为主的综合动 正常动程
细磨	240	20	1.98	3.5	磨法同上 灯光检验 中间曾返工一次
	M302	5	1.99	1.5	椭圆动为主 短动程 灯光检验
	M303	5	2.00	1.2	同 上 太阳光测焦合格
	M303 $\frac{1}{2}$	2	2.00	1	检验光洁度合适焦距 基本相符
共计 16.7 时					

表 4-4 抛 光 记 录

次	镜面检验情况	修改方法	时间	备注
1	1) 	工具中心刮低, 动程用 $\frac{1}{5}$ 径动	5时	
2	2) 	足型工具 径动与弦动 动程为半径的 $\frac{3}{5}$	3.5时	
3	3) 	足型工具 弦动动程 $\frac{1}{5}$	50分	
4	4) 	镜面倒置抛光 加长焦距 正常动程	2时	
5	5) 	用直径为 50 毫米小型工具 椭圆动磨法	30分	
6	6) 	足型工具 弦动动程 $\frac{1}{2} - \frac{1}{3}$	30分	
7	7) 	去掉中心玻璃, 中央有小塌边而结束	30分	
	图 4.3-3	共 计	13时左右	

3. 球面改抛物面

在第二章球面与抛物面关系一节中说即使是理想球面，仍然有象差存在。这对观测天体不利，为了消除这些象差，就要把球面改成抛物面，提高成象质量。

从讨论中知道，当二次球面偏心率接近或趋于零时，则非球面趋于球面。也就是说抛物面总有一个最接近的比较球面。我们已经磨制了理想球面，作为要改成抛物面的最接近比较球面。如图 4.3-4 所示。

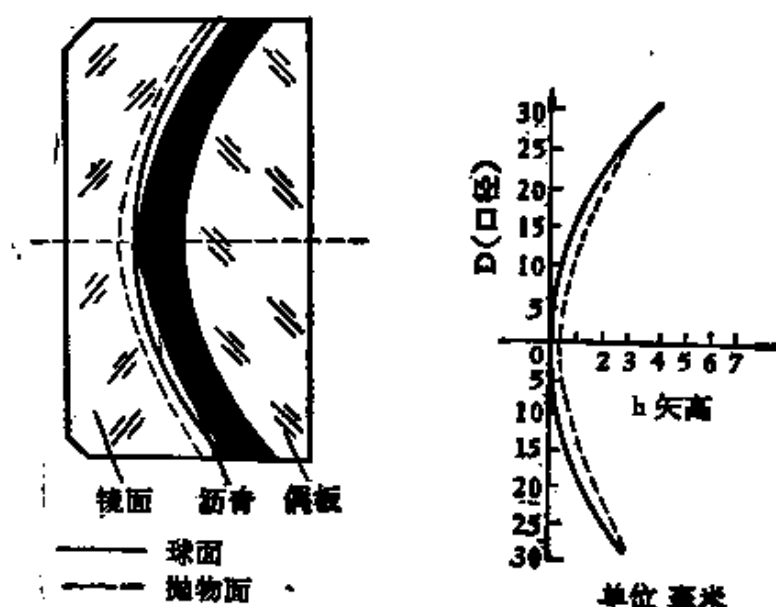


图 4.3-4 球面改抛物面

球面改成抛物面时，最大非球面度通过公式(2.6-3)可以计算出来。如我们所磨制的主镜：当 $R = 2400$ 毫米、 $D = 200$ 毫米、 $e = 1$ 时，最大非球面度 $\delta_{\max} = 0.000226$ 毫米，即 0.2 微米，最大非球面度是在球面口径的 0.7Y 处。即在 70

毫米带处,因而修改抛光盘时,注意以此带为界,中心和边缘磨削量不同。

球面修改抛物面的方法如下:

(1) 修改抛光盘。由于把球面改成抛物面时,各个带区有不同的修磨量,基于抛光盘表面相对于抛物面不同带区有不同面积,使抛物面在不同带区,在相同时间内在抛光盘上走过不同的路程,产生对镜面表面的不均匀磨损,达到修改成抛物面的目的。根据如此把抛光盘修改成图 4.3-5 的形状。修改时一定要小心修改,一次修削抛光盘可以小些逐渐达到修好的目的。在抛光镜面时要磨一段时间(约 2—3 分),就需要细心检验一次,如果修改的抛光盘较好,检验也适当,能够制造出高精度的抛物面镜。但它效率低需要耐心细致地进行。同时还要借助小工具辅助。

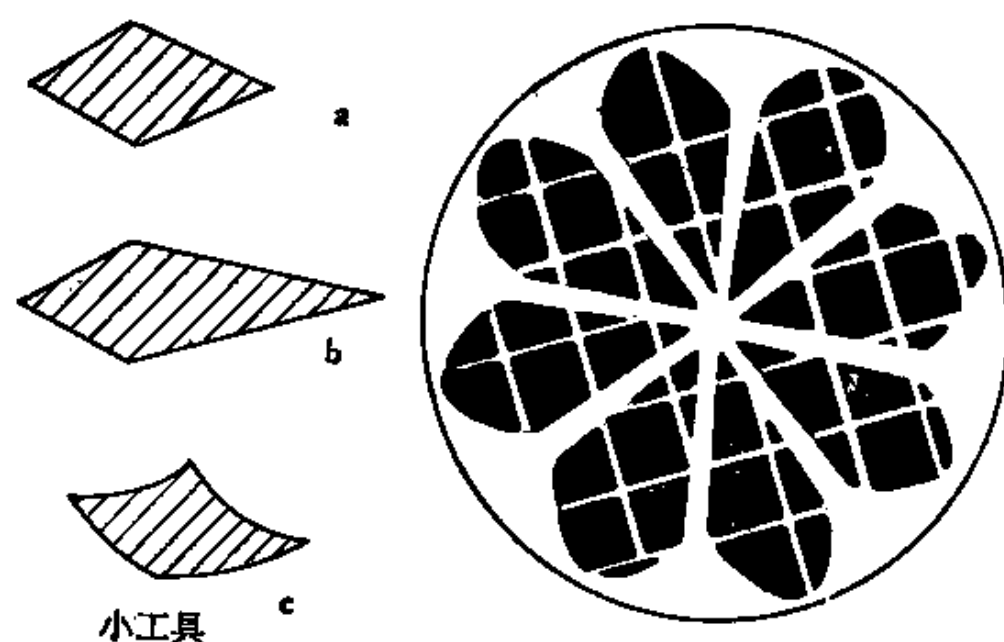


图 4.3-5 抛光盘的修改

(2) 小工具加工。图 4.3-5 中所示小工具是在修改一块抛物面镜的带区误差的, a 是在修改 0.7 带区以外时用; b 是在修改 0.7 带区以内时用, 锐角指向工件中心; c 是修改焦距和局部小带区用。小工具通常相当镜面口径 $1/3$ 左右小抛光盘, 要刻制好, 修改时把镜面平放在工作台上, 用小工具(a)在镜中央处进行抛光, 采用椭圆动手法。抛一段时间后, 镜面中央变低, 这时再把镜面放到原抛光盘进行修改。这个方法奏效快, 但对初学者有困难, 需要多练习才能掌握好。

(3) 动程的变化。由前面介绍磨法时已知道, 长动程可使中央很快磨低, 弦动也对边缘很快磨削, 因而把球面改成抛物面时, 采用改变动程的方法来修改镜面。磨时注意慢起慢止, 并且注意镜中心与抛光盘中心要经常改变其位置, 防止中心对称抛光。在改变偏心距时一定要抛整数周防止偏心。此方法简单但困难大, 初学者一定要多练习, 注意掌握要领。

4. 抛物面的检验

把球面镜改成抛物面的修改过程, 同时是不断地进行检验过程。检验方法介绍如下:

(1) 刀口仪测距法。用阴影法也能检验抛物面的形状, 但是检验方法与检验球面镜方法有些差别。抛物面可看作是由许多半径不同的球面组成的, 越靠近顶点半径越小。所以把抛物面分成几个带区(如图 4.3-6a)。对各个带区分别加以检查, 把检查后的各带区的焦距之差与事先计算好的数据如果基本相符, 说明镜面越接近抛物面的程度。如果相差很大, 说

明镜面的抛物面不够准确。

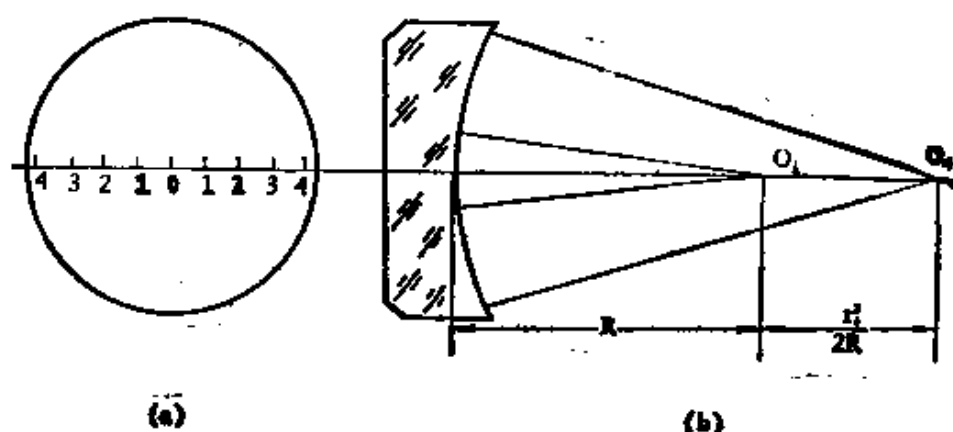


图 4.3-6 刀口测距法

在图中,设抛物面镜的中心曲率为 R ,则: 在刀口检验时镜面中央部分焦点是在 O_1 , 而离开中央 r 处的截点位置,要增加长度 $\frac{r^2}{2R}$ 。

如果把 200 毫米口径的镜面分成四个带区: $r_1 = 25$ 毫米、 $r_2 = 50$ 毫米、 $r_3 = 75$ 毫米、 $r_4 = 100$ 毫米先测出 r_1 的焦点至镜顶点距离 R 的数值,再测 r_2 、 r_3 、 r_4 的截距数值。如果测得的数值与计算出来的数值相差不多,而镜面的起伏又是平滑的,那么镜面修改便算完结,如果有的相差大,则说明镜面上有毛病需要修改。哪部分数值不准就用小工具修改哪部分,直到合适为止。

(2) 月光验镜。大自然是天然实验室,月亮可以帮助人们测验镜面。在月光如水的夜晚,用抛物镜观看月亮,由于射入镜面的平行光,经镜面反射后在焦点处成象。用目镜直接观看月亮的象,如果看月面模糊一片,分不出表面细节,说

明镜面不好,如果影象清晰逼真,则说明可用。但此法直观、简便,遗憾的是无法断定如何不好。如图 4.3-7 所示。

为了精确地测定镜面的毛病,可以在会聚光的焦点处,用刀口仪进行检验,为防止检验时遮挡光线,利用一块小平面镜,使它与光轴成为 45° 角,把会聚光线转 90° 的方向,在 F' 处聚焦(如图 4.3-8)。

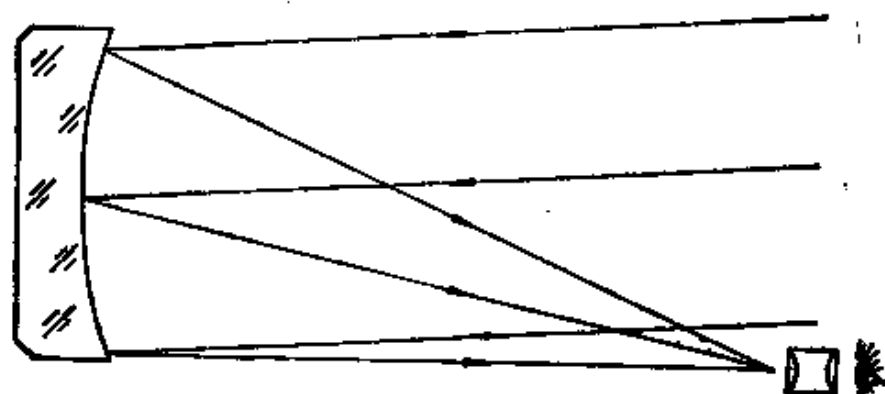


图 4.3-7 月光检验

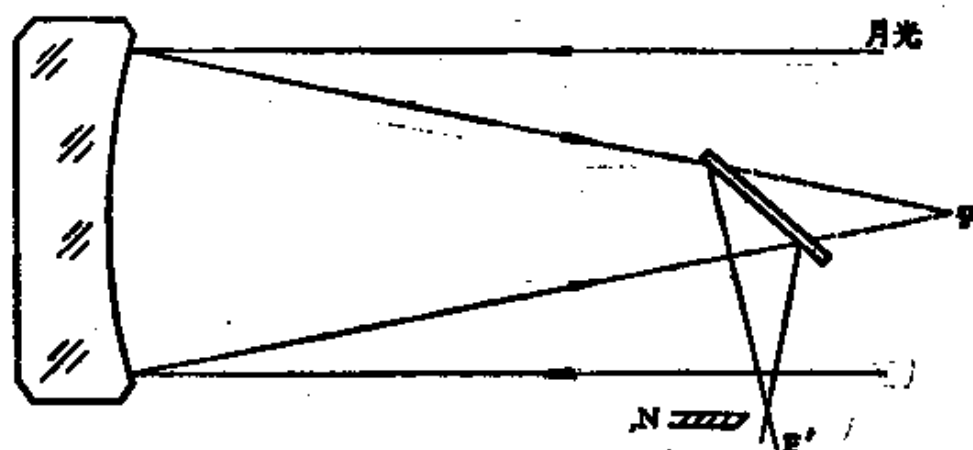


图 4.3-8 刀口切割

用刀口仪在 N 处切割,如果是理想抛物面镜,则刀口切割时的阴影变化与理想球面镜的情况一样。如果镜面有带区

误差,阴影图与球面镜也相同。所以这里不再作详细介绍,请参照前面检验球面的情况进行判断。

采用月光检验镜面,使用刀口仪是比较麻烦,因为地球自转使刀口仪跟踪转动困难且月象是圆面,再加上有大气的扰动对刀口检验更不利,所以把后一步工作又搬回实验室内进行,光源采用人造平行光。平行光照射镜面,反射后在焦点处成象,然后再用刀口仪对镜面进行检验。

(3) 平面反射镜辅助检验。为使点光源变成平行光射入抛物面镜,应用刀口仪进行检验。则选用一块中间开孔的标准平面镜作辅助镜,其原理是利用离抛物面顶点为 $\frac{R}{2}$ 处的焦点 F_1 发出的光线,经抛物面反射后变成平行光束,平行光束射到平面镜后,按原路返回射到抛物面镜上,抛物面镜把光会聚,通过标准平面中心开孔,在 F_1 处又重新聚焦(图 4.3-9)这时用刀口仪切割反射光束,通过阴影的变化来断定镜面情况。出现异常则采取相应措施对镜面进行修改。

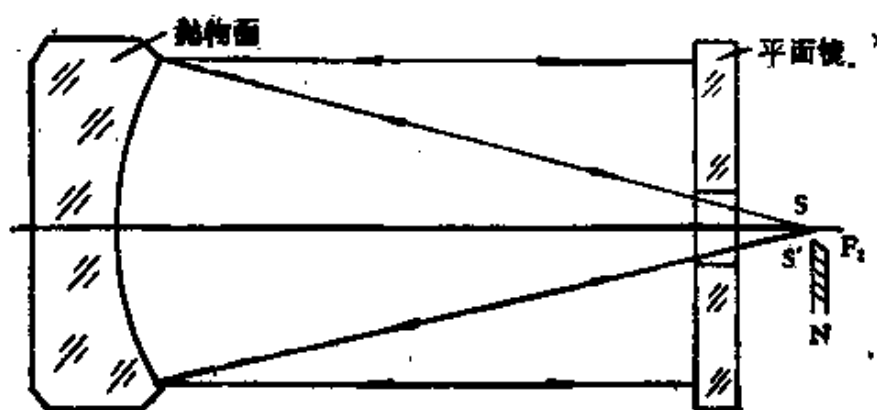


图 4.3-9 抛物面检验

抛物面检验方法与球面检验方法相似,这里举几例说明。

(1) 中央凸起(或凹下)。图 4.3-10a 表示镜面中央凸起。图中只表示反射光线会聚情况。反射后的光线都应会聚在 F 处,但因中部高,则它的曲率中心会聚在 F_1 处,如果在 N 处进行刀口切割,开始时刀口由左向右移动,首先看到镜面中心处有黑影与刀口同向运动,随着刀口继续切割,不久镜面四周全变黑色,仅中央另一侧仍有光亮,这说明中心偏高。

改正办法,用小工具小心地作椭圆运动,磨制 1—2 分钟,

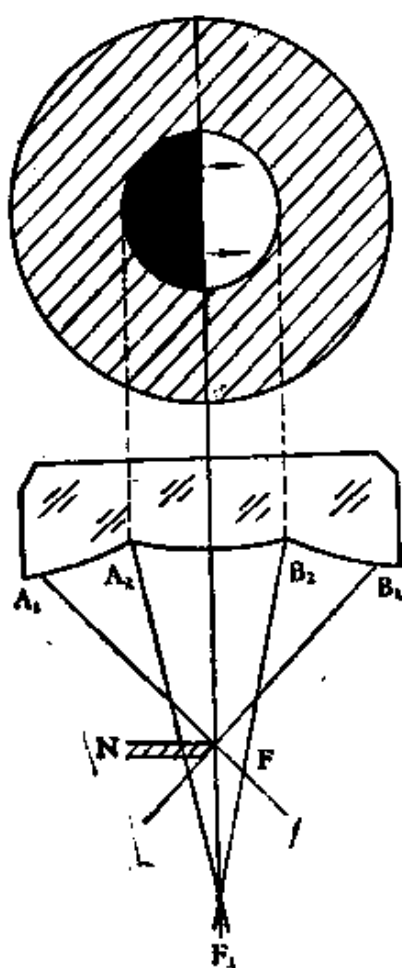


图 4.3-10(a) 中央凸起

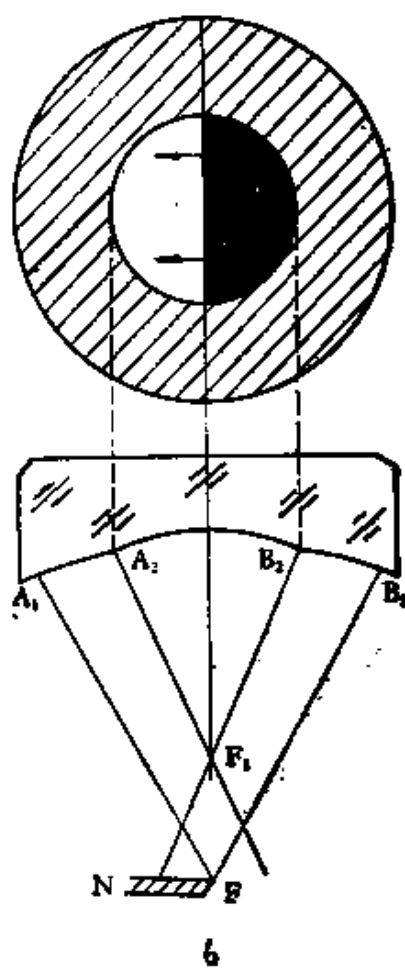


图 4.3-10(b) 中央凹下

再检验一次,直到刀口在 F 处切割,镜面完全呈暗色为止。要想达到理想程度比较困难,如果误差不大也就算合格了。

图 4.3-10b 表示中央凹下镜面,检验方法与上面一样,仅阴影变化与上面相反。

(2) 边缘塌边及翘起。当刀口放在焦点 F 处,由左向右切割,此时阴影不是马上变暗,而在左侧边缘先有一个与刀口同向的半暗环,随着刀口继续切割,中心处突然变暗,而边上另一侧半环还仍亮如图 4.3-11a 所示,这说明边缘塌下。这要

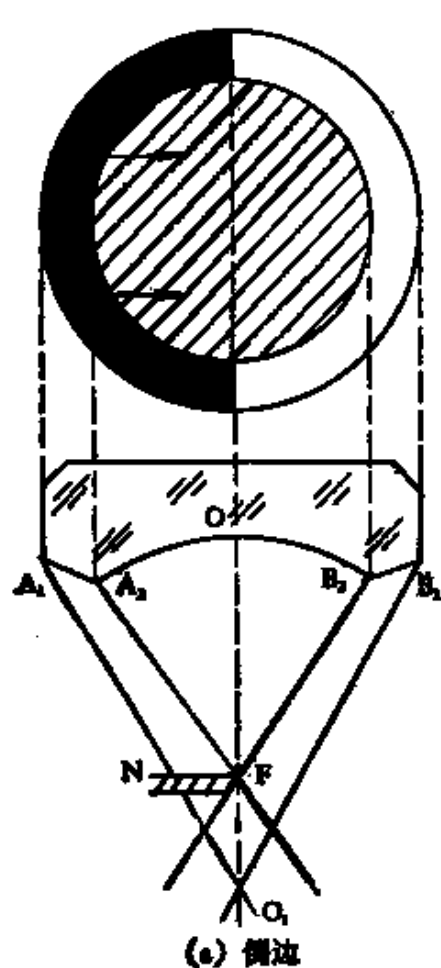


图 4.3-11(a) 倒边

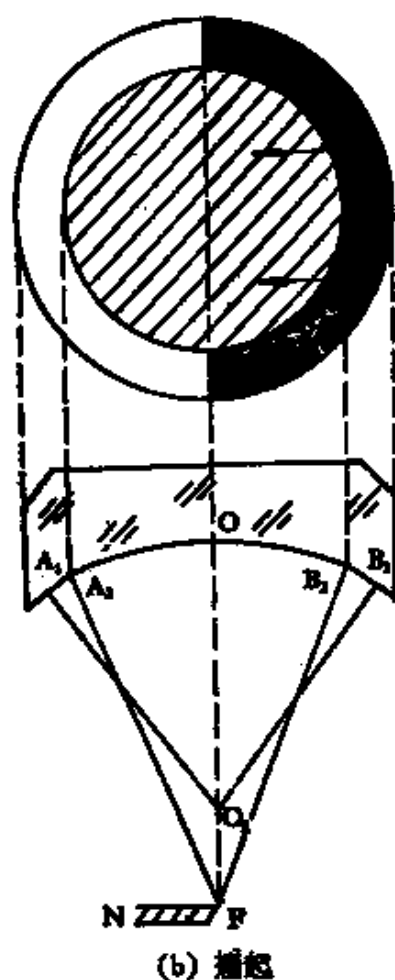


图 4.3-11(b) 翘起

采用小动程的弦动把边缘修好。直到刀口在N处切割,镜面全变暗为止。图4.3-11b是边缘翘起,检验情况与上者相反。其他如环带及波浪形检验情况,请参看检验球面情况加以判断。

经过检验的抛物面镜,如果误差不大则可结束抛光。抛完后把镜面略微加热,使中心孔处的石蜡熔化,取出中心玻璃,用汽油或酒精把镜面洗净,准备镀银(或镀铝)如果不马上镀银,可在镜面上涂一层漆片保护镜面。

(二) 副 镜 加 工

1. 研磨凸球面

为保证成象质量,卡式副镜要磨成凸双曲面镜。要磨出双曲面必先磨出球面。

磨制凸球面镜的方法,仍采用对磨法。首先选用两块口径相同的玻璃(见表4.1-1)。如果玻璃不是圆形,用滚圆办法制成圆形,再把玻璃两面在平板上研磨。初步加工平面。随后把边缘部分磨去,进行倒角。

上述完工后,选其中气泡少作副镜,把它固定在工作台上,另一块作偶板放在上面进行研磨。研磨方法与前面介绍的粗磨、细磨均相同。一般从80号砂开始使它磨成凸球面,再经过120号,240号,M302,M303、M303⁺等几道砂的细磨去掉砂痕,使凸球面的曲率和光洁度均达到要求为止,这里不再作详述。只谈谈磨制时应注意的几点。

(1) 加砂适量、压力要匀。磨制副镜是把镜片放在下面，偶板放在上面研磨的。镜面面形质量好坏，完全靠手对偶板的控制来决定。这要求磨制时加砂量适当，一般砂粗量多，砂细量少；压力要均使镜面各处受力一致，特别最后几道砂，经常用手轻推轻拉，保证球面的均匀磨制。

(2) 多样手法、合理动程。磨法以径动为主的综合手法，切不要单一手法进行。这样保证镜面球面准确。同时动程保持正常动程，决不能超过半径的 $1/3$ 。

(3) 勤检验、勤测定。凸面镜磨到一定程度就要测定一下焦距和曲率。保证达到设计要求为止。测量方法如下：

(a) 弧形型板法检测面形。图 4.3-12 表示测量的情况。图中 a 表示镜面凸起，焦距变短，这就需要继续对磨；图 b 表示镜面凹下，焦距变长，这就需要把镜面和偶板倒置过来

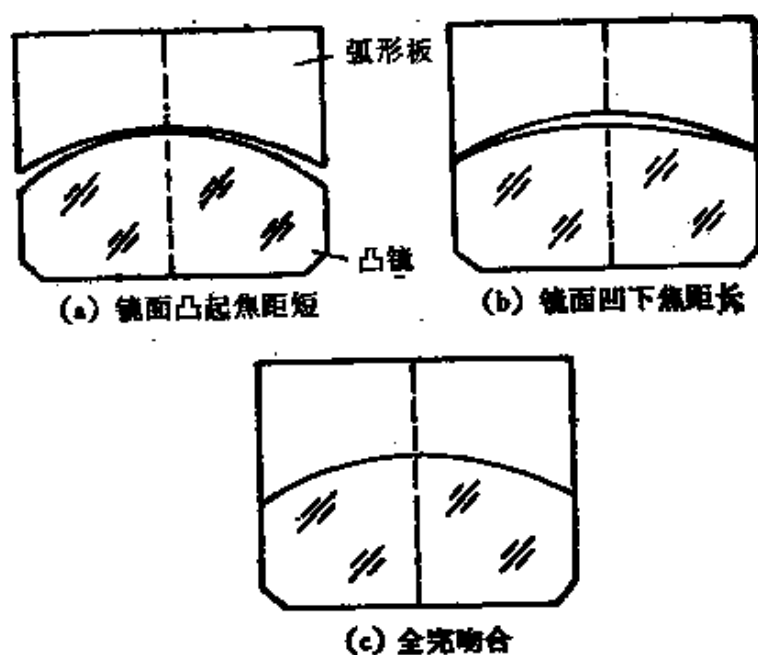


图 4.3-12 弧形型板测量

进行研磨;图c表示镜面磨制合格,可以停止细磨了。

(b) 球径仪测曲率。一般在细磨时,弧形样型满足不了
一定精度的要求。这可用简易求径仪进行测量提高精度。

测量的方法是把球径仪轻放在凸球面上(或偶板上也可以。)慢慢旋转中心螺丝,使其四个尖端均与镜面接触好,记好
指针在度盘上的位置,测其矢高的数值。量好铁钉与中心距
离的数值,把二者代入公式(4.1-1)中,可以计算出 R 的大小,
从而判断镜面磨制情况。

用同样办法更换三次口径,分别测出矢高的数值,计算出
曲率半径,求其平均值,这样更能判断镜面的确切情况。

2. 凸 镜 抛 光

细磨完后要进行抛光,抛光方法与凹面镜的方法基本相
同,不同处是制作的抛光盘要在凹球面上。由于凹球面中心
向下,制抛光盘时,不必围纸条,将软硬合适的抛光胶溶化后,
倒在偶板上,为防止中心多边缘少,倒抛光胶时,要从边上开
始逐渐向中心螺旋式进行。如

图 4.3-13 所示。使边缘厚
度达到为 1 厘米左右,中心厚
0.9 厘米左右。待沥青还未完
全硬化前,在沥青表面涂一层
肥皂水,把镜面放在上面。开
始无动程地在沥青上转动。用
均匀力使镜面与沥青吻合。稍

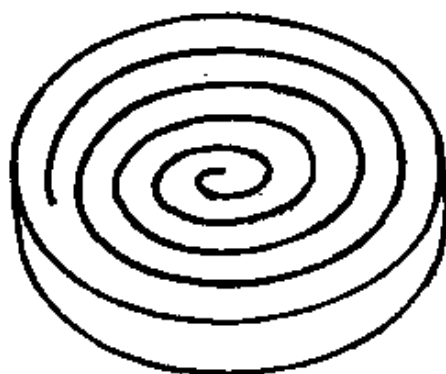


图 4.3-13 浇制抛光盘

加压之后再适当地前后推拉,当镜面与沥青完全吻合,则停止加压。

在压时一定要压力均匀,而决不能一边力大,另一边力小形成偏边现象(见图 4.3-14)这样抛光时会造成镜面上产生很大象差。

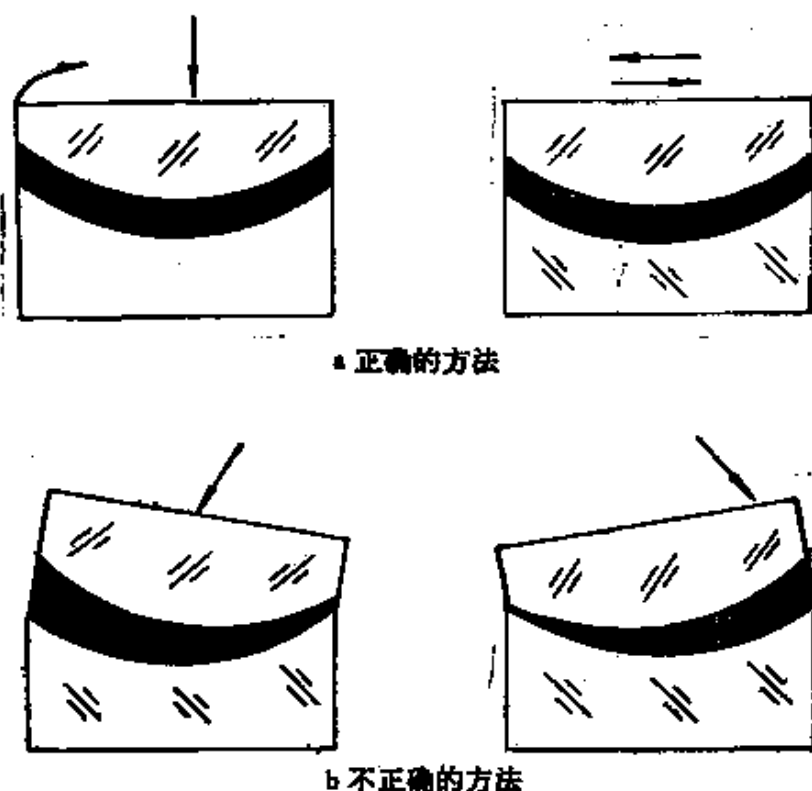


图 4.3-14 抛光盘的压制

压好后的抛光盘要进行刻槽。方法仍用一个湿尺,在沥青表面印出约 1 厘米大小的方格,这些小方格与中心不对称。画好后用小刀在沥青盘上刻槽,槽宽 0.2—0.3 毫米,槽深 0.3—0.5 毫米。如图 4.3—15 所示。

有时沥青盘不采用刻槽方法,而是在沥青未硬化之前,用

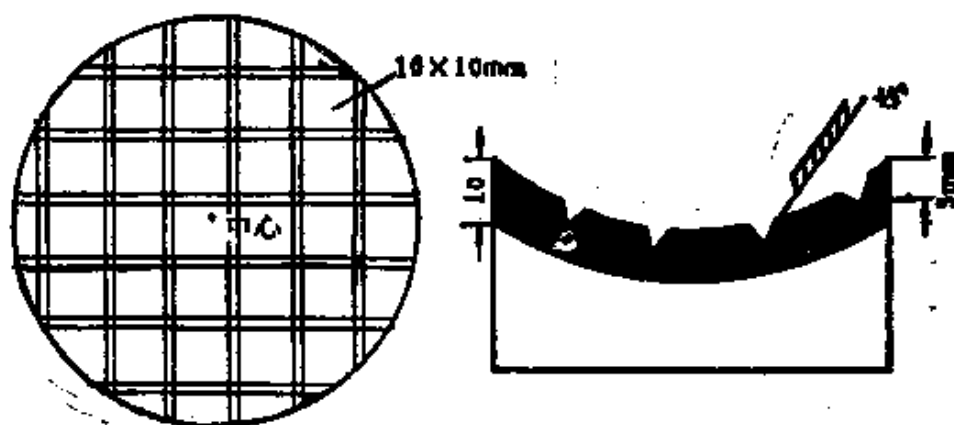


图 4.3-15 抛光盘方格刻槽

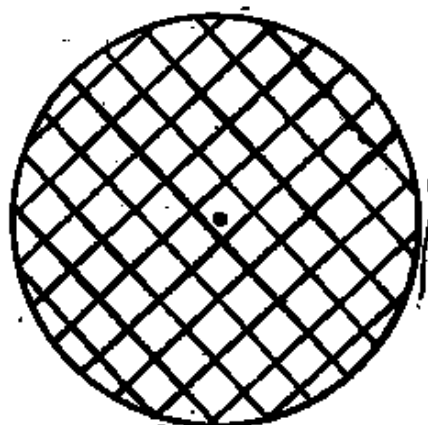


图 4.3-16 抛光盘螺旋刻槽

细而密的塑料网，压在沥青表面，使其表面形成细而密的方格，如图 4.3-16。在中心处挖一个小孔。这种方法既简单效果又好。

刻完槽后，把镜面再放在上面压制吻合。这时可加些红粉试抛一段时间，观看红粉在沥青表面是否均匀，如果分布均匀说明镜面与沥青完全吻合，如果不均匀要对抛光盘适当地修改，使其完全吻合。

凸镜的抛光方法与凹镜方法基本相同。但凸镜的检验比凹镜困难得多。业余条件下，我们只能采取预防为主。尽量把镜面抛得合格一些。

如在抛光过程中，镜面常出现有中间凹而边缘塌的现象和山字形情况(如图 4.3-17)。

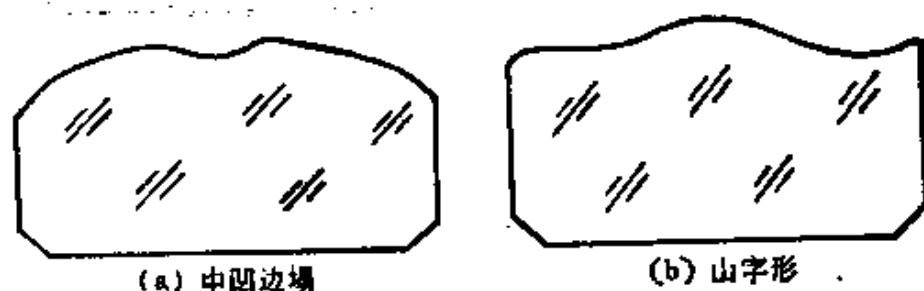


图 4.3-17 凸镜镜面图

中凹边塌是因为镜边与抛光盘之间的摩擦力的合力点和手压着力点之间有一定距离。由于力矩的作用，使抛光胶容易向中心流动，结果造成中心凸起，使镜面中间磨成一个凹穴。镜边的塌边是当抛光胶被推到镜边时抛光胶表面与镜面边缘部分，因受压力产生较大变形。但露出镜盘的部分没有变形，并高于变形部分，当抛光盘又推到中心时，镜面边缘碰到未变形的凸出部分造成多磨，结果形成塌边。为克服中凹边塌的现象，在抛光盘的中心处挖个小孔，边缘部分沟槽开得稍宽些。动程保持正常动程左右。速度要稍慢些，压力要均匀，这样便基本克服中凹边塌的现象发生。

山字形情况是指中心和边缘突起，中腰凹下去。造成这样现象的原因，主要是抛光盘与镜面吻合不好，抛光时又转动

不够。这也是中腰压力大而中心小，特别抛光盘推到边缘太多又受力不均的结果。解决办法主要把抛光盘制好，一定要作到与镜面完全吻合。动程和压力要合适。

凸镜的焦距测定。当凸镜抛亮后要测一下焦距。测凸镜焦距的方法，除用球径仪测量外，还可用视差法。

视差法是指由于人的眼睛，观看在一条直线上的两个物体，产生视差的结果。

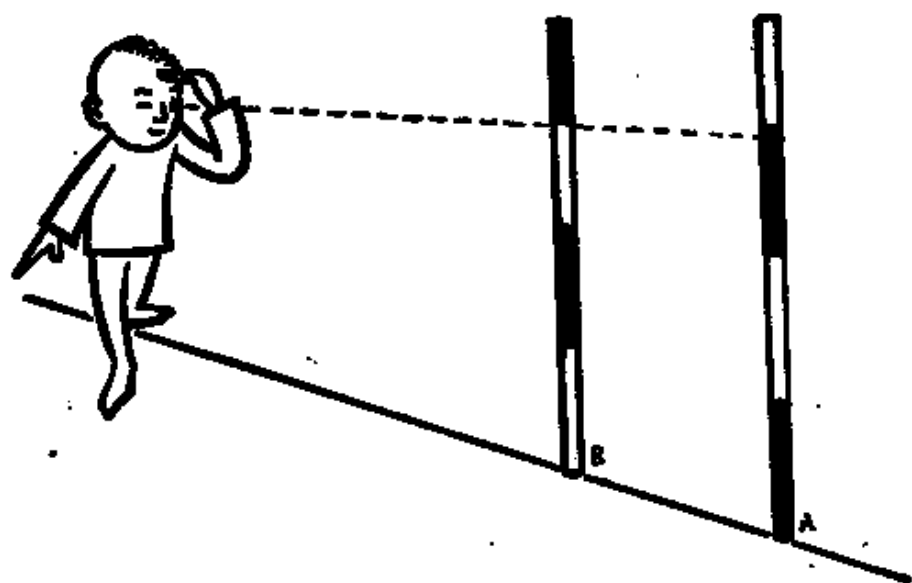


图 4.3-18 视差法

图 4.3-18 表示远处有两根长标杆 (A 与 B)，人站在与两根长标杆一条直线上观看，这时只能看到一根长标杆 (B)。当人的眼睛略向左向右移动，这时仿佛后面的长标杆 A 也随着向左或向右移动，与眼同向，这可判定 A 在 B 后。如果以 A 不动，前面长标杆 B 则由右向左与人眼反向移动，这说明与眼反向移动的物体在前。用这种视差法可以判断哪个物体在

前,哪个物体在后。

把这个方法应用到测凸镜焦距,还是比较容易掌握的方法。

把已抛亮的镜子表面洒上一层水,并把它竖起在一块木板上(如图 4.3-19)在离镜前的一段距离 S 处插一根大头针 (AB),取一个长针 ($A'B'$) 在镜后找到大头针的象,用眼观镜,把它插在大头针象的位置上。这时,从镜边望去长针、大

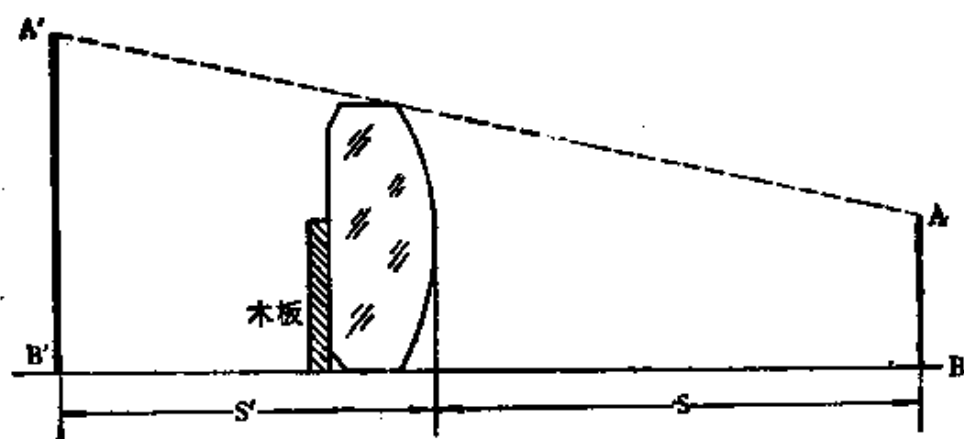


图 4.3-19 测量凸镜焦距

头针 (AB) 和大长针 ($A'B'$) 的象在一条直线上。放好后检查长针与大头针的象是否重合,采用视差法。即略使眼睛先左后右移动,通过镜子观看长针运动情况,如果长针与眼睛移动方向同向,则说明长针在象的后头,如果长针与眼睛移动方向相反,说明长针在象前面,这样把长针向前或向后移动一下,直到眼睛的移动,看不到长针与象的移动现象为止。这表示大头针的象就在大长针的位置上。然后用尺量一下它到镜顶的距离作为象距 (S')。由已知物距 S 和象距 S' 的数值,代人

公式

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S} + \frac{1}{S'}$$

求出 f 。式中取 $f < 0$ 为负、 $S > 0$ 为正、 $S' < 0$ 为负。

这种方法存在一定误差,为了准确起见,用此方法连测三次,求其平均值。如果焦距基本上达到要求便进行把球面改成双曲面的工作。

3. 球面改双曲面

为提高光学系统成象的质量,卡式副镜要求为双曲面镜。也就是把已磨成的凸球面改成凸双曲面。修改方法与修改抛物面近似。可以把已经磨成的球面看作是要修改凸双曲面的最接近比较球面。根据要求通过公式 (2.6-3) 计算出最大非球面度 δ_{\max} 的数值。

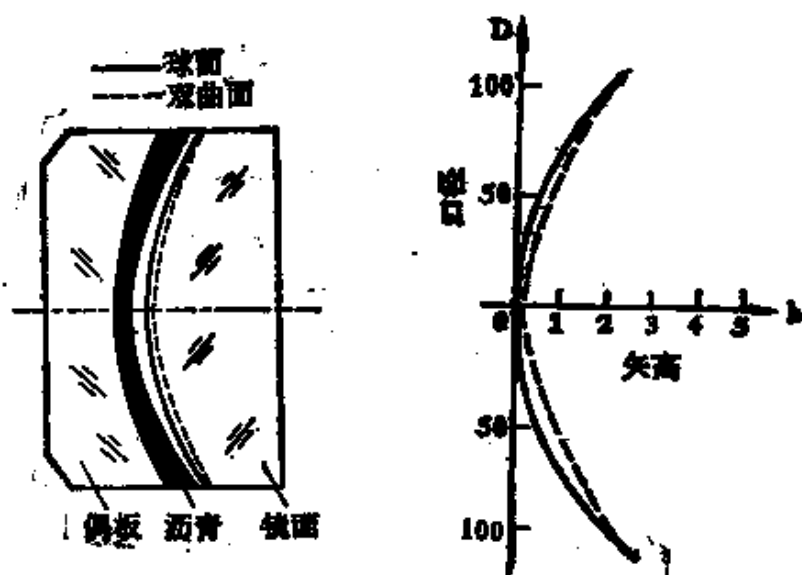


图 4.3-20 球面改双曲面

这个最大非球面度是位在凸面镜的 $0.7Y$ 处即 17.5 毫米环带处。由此带为界向中心,向边缘镜面磨去量逐渐减少。如图 4.3-20 所示。

修改方法如下:

(1) 修削抛光盘。以 17.5 毫米环带为中心,向中央,向边缘加宽沟槽,中央部分更宽些目的是为减少中央的磨削作用。这样在抛光时,各个带区的磨削量不同,产生对镜面不均匀磨损。修抛光盘不要一次修完要由少到多逐渐修完,见图 4.3-21,防止一次修削过度,造成无可挽回的效果。

边抛光要边检验,凸双曲面的检验难度较大,业余制作者条件限制,也不能作更精确地检验,一般根据修削抛光盘后,再抛 30—60 分钟,便算完工了。

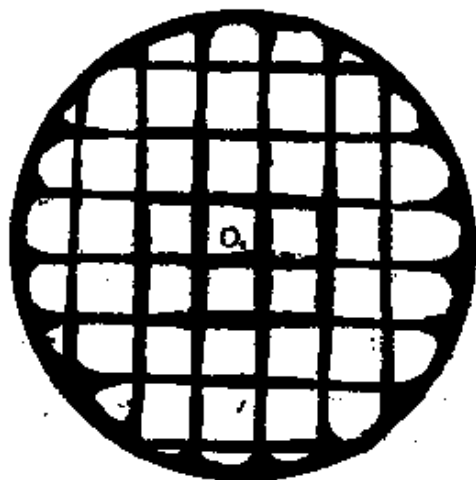


图 4.3-21 修改抛光盘

(2) 动程与磨法的变换。短动程和弦动可以加速对环带处的磨削,改双曲面时可以用弦动为主,椭圆动相配合,采用

$\frac{1}{5}$ 动程,抛光时要慢起慢止,并要转整数圈,抛过 30 分钟左右即可基本达到为双曲面形。

双曲面镜的检验方法有两种:

图 4.3-22 是用标准球面镜检验凸双曲面镜;图 4.3-23 是用标准平面和抛物面镜检验凸双曲面镜。这两种方法难度较大。

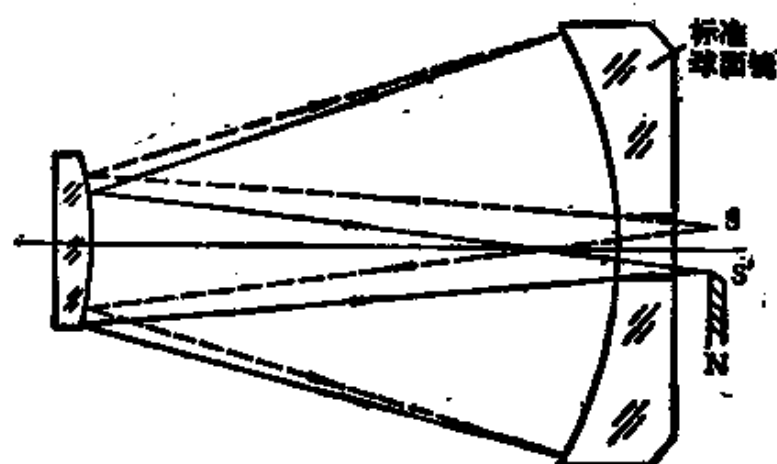


图 4.3-22 标准球面镜检验凸双曲面镜

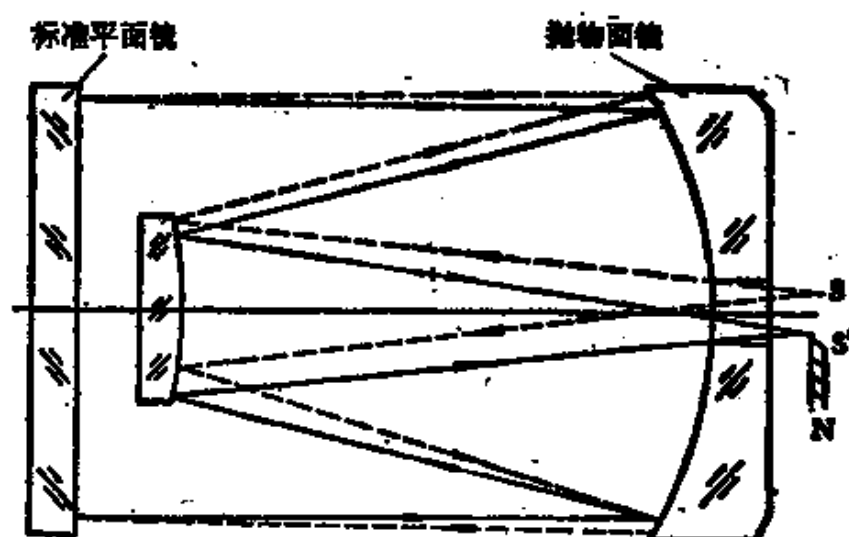


图 4.3-23 标准平面和抛物面镜检验凸双曲面镜

在图 4.3-22 中选用一块中心钻孔的标准球面镜，把待测的凸双曲面镜放在此镜前面的一定位置上，让它们同在一个光轴上，然后把刀口仪放在 S 处，由于针孔的点光源发出的光束(虚线表示)，射到凸双曲面镜上，经过凸面镜的发散作用，使光束反射到球面镜上。此时球面镜对反射过来的光线，又再反射到凸双曲面镜上(实线表示)这凸双曲面镜又迅速地把它反回球面镜上；使光束从球面镜中心穿过，在 S' 处重新会聚。 S' 点恰好是刀口的所在位置。

有时 S' 点不在刀口上，这要移动一下副镜的位置，直到找到为止。

在 S' 处让刀口切割光束，观察阴影图检查凸双曲面形情况。观察到的阴影图是球面镜和双曲面镜合起来的情况，但是使用的标准球面，认为面形无误差，如果发现阴影图有差异，即认为是凸双曲面镜上的毛病。阴影图与观看球面镜情况相同。发现毛病便在双曲面镜上作个记号待检验完后去修改。

副镜改成双曲面镜还可以用图 4.3-23 的方法进行刀口检验。这种方法不仅要选用一块标准抛物面镜，而且还需要一块标准平面镜作辅助检验。它的光路原理是由 S 点发出光线，经双曲面反射后又经抛物面镜，平面镜的几次反射，光线又通过抛物面镜中心，在 S' 处会聚，用刀口在 S' 切割观察阴影图的变化，检验双曲面镜的镜面情况，找出毛病，采取相应措施进行修改。

检验完镜面后，如果基本上达到要求便结束抛光和修改

工作,准备镀银。在镀银之前,仍在镜面上涂一层漆片保护镜面。

到此为止,卡式望远镜的主镜和副镜的磨制和抛光及修改基本完毕,总结起来有以下几点应注意的事项。

1. 慢 中 求 快

研磨、修改整个过程均要耐心细致地进行,切不可“一口吃个胖子”,心急手快造成不可弥补的损失。如修改抛光盘想一次修好,但因不慎没能修好,反而使抛光盘报废,不得不重新再制抛光盘,结果欲速则不达。不如慢慢修改抛光盘,让每修一次,取得一些好结果,脚踏实地一步一步进行,看来慢些,实际快了,所以在磨制和抛光中注意慢中求快。

慢中包含着细心,例如磨制过程中的清洁问题,砂量多少,动程变化等问题均要细心对待不可大意。特别是检验工作,无论是用曲线型板或刀口仪均要细心观看,作到准确为止。

2. 勤 检 勤 修

把球面改成抛物面,改成双曲面,这些工作难度是较大的,对于初学者来讲,确乎是在登山,然而并非高不可攀,只要在实践中,认真领会操作要点,勤检验勤修改,“功夫不负有心人”,总会达到预想结果。

如果对镜面进行抛物面的检验,总是反复检验,努力判断镜面结果,善于判断毛病的所在。发现毛病,要认真修改,有

时遇到难修的情况,或多次修改不好,切不要灰心,要充满信心,注意在实践中不断提高水平。

3. 边干边记

在磨制和抛光时,为了提高水平就要不断地总结,要边干边作记录,把成功记下,把失败写明,工作中思考问题,实践中掌握变化规律,善于解决问题。记录很重要,要认真作好。记录的内容包括如下几个方面:什么时间开始研磨,什么时间结束,用什么样工具,动程如何,镜面情况怎样,改进意见以及改进效果如何等等,可供以后磨制工作参考。

四、目镜与寻星镜的磨制

(一) 目 镜 磨 制

目镜的磨制比主镜要容易得多了,但它磨制的数量较多。一架望远镜要得到不同倍率,必须配上许多不同焦距的目镜。所以必须磨多种镜片。

目镜所需原料见表 4-1 所列。它的玻璃最好选用光学玻璃,并且要求玻璃内部没有气泡及纹道、透光性能好。现以制作冉斯登目镜的方法为例,介绍磨制方法。

1. 手摇式磨镜机

目镜的镜片口径较小,为了磨得快一点,最好自制一个筒

易磨镜机,最简单的是用木工用的手摇钻,把它垂直向上固定在台钳上就可以使用。在轴上方安装一个木棒,把镜片用沥青粘在木棒顶,用手摇动摇把时它能随着主轴的旋转而旋转。这需要转动平稳不晃动才能使用。

2. 拉弓式磨镜机

如果没有手摇钻,则可以自造土的磨镜设备。如图 4.4-1。目镜玻璃粘在木棒顶端,拉动弓弦,木棒随着迅速转动。

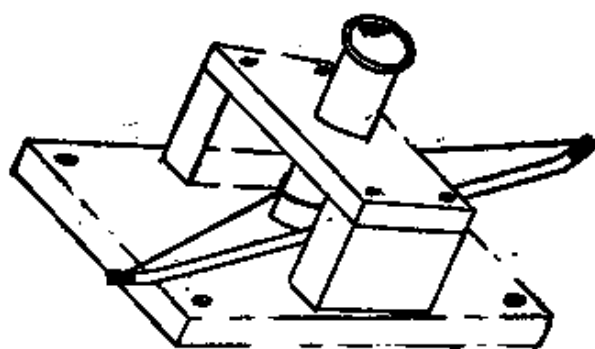


图 4.4-1 拉弓式磨镜机

3. 磨 平 面

冉斯登目镜是平凸透镜,磨制目镜要磨两面,如果选用目镜玻璃有一面已是平面而且比较光亮,那么可以不再磨平面了。如果不是这样,在磨凸球面之前先磨平面。

磨平面是选用一块比较平的金属板(如铁板、铝板)作标准平面,在磨时先把平盘固定在磨镜机的主轴上,把需磨的平面,可以从细磨开始研磨,随后经过抛光。磨镜方法与前面介

绍相同。抛光要作平抛光盘，沥青要软硬合适。抛光时即使有一些曲率也没关系。待抛亮以后便开始在另一面研磨球面。图 4.4-2

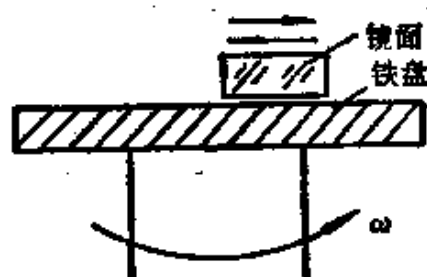


图 4.4-2 磨目镜的平面图

4. 磨 凸 面

磨凸面的方法有两种，一种是对磨法，另一种是球模法。下面分别介绍二种磨制方法：

(1) 对磨法。选用两个长约 3—5 厘米的木棒，直径略小于所磨镜片的直径，然后用沥青(加入少量松香)，分别将两块对磨的玻璃粘在木棒的顶端。选作镜片的木棒夹牢磨镜机上，另外一块作偶板，事先在两块玻璃之间加些砂水悬浮液，一手摇钻，另一手抓住工具玻璃的木棒，并不断左右摇晃摆动作径动磨，同时使其木棒不断地转动，轴动方向与主轴转动方向相反。经过粗磨后，下面镜面变凸。用制得目镜弧形型板测量如果曲率差不多合乎设计要求，则进行细磨。又经细磨把砂痕除掉，再用球径仪测得曲率比较合格，便结束细磨而准备抛光。见图 4.4-3 所示。这个方法与磨主镜和副镜的均相同，具体参照上面介绍。

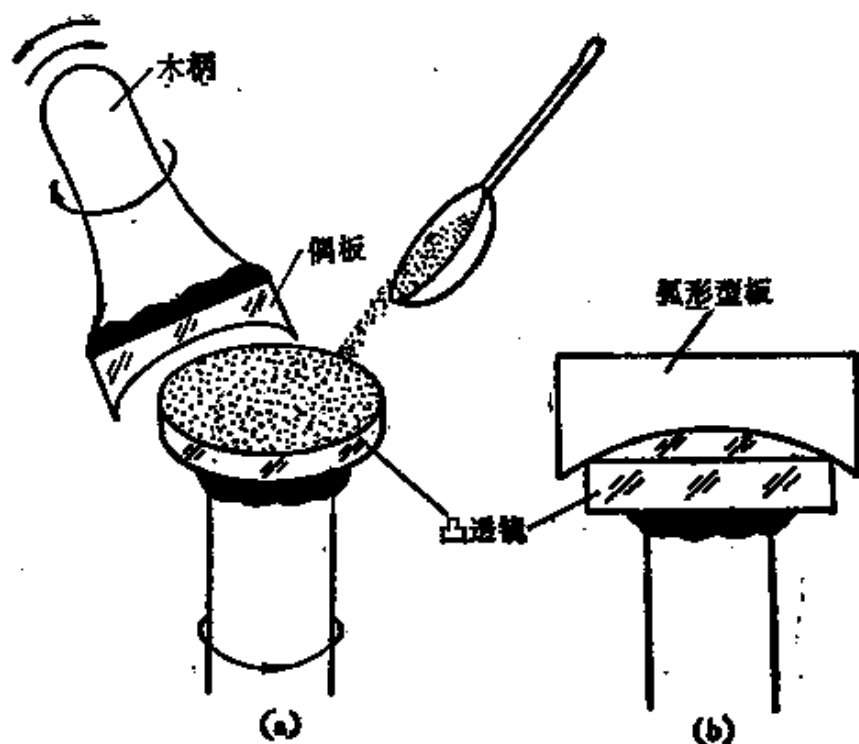


图 4.4-3 目镜细磨最后阶段

(2) 球模法。这是指事先用金属材料制成一定曲率的凹模。凹模的曲率与所磨制镜面曲率相同。用它代替磨镜的偶板。球凹模的制作最好用生铁在车床上车出，它可以得到标准的球面。如果没有车床则可用土法自制。制作方法是选取一块 $\phi 40$ 厚 1 毫米左右的薄铁皮。在它下面垫个空心的垫圈，如螺丝帽等。取一钢球，其直径最好等于要加工球面曲率半径的二倍，即等于 f 。把它放在铁皮上，用铁锤敲击钢球，使铁皮成为凹球形，如图 4.4-4 所示。

球凹模也可以这样制作，事先剪好所要磨制镜面的弧形型板。取一圆头小锤，用圆头轻敲已垫好的铁皮中心，一直把

铁皮敲击成凹形与设计相符为止。如果用弧形型板检测合适就可以使用。打制好的球模,用沥青粘在磨镜机的主轴上,如图 4.4-5 所示。

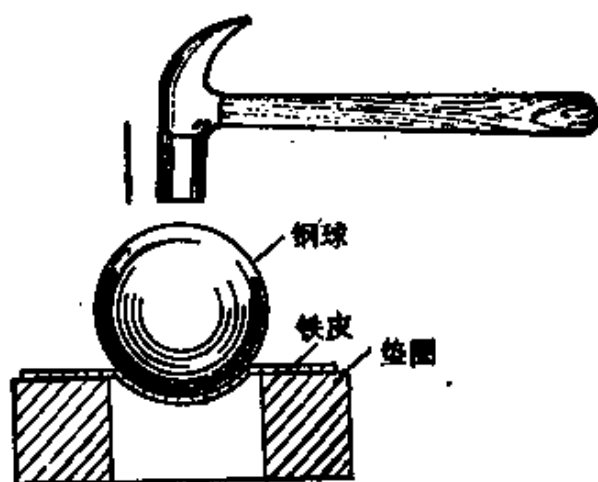


图 4-4.4 球凹模磨镜机

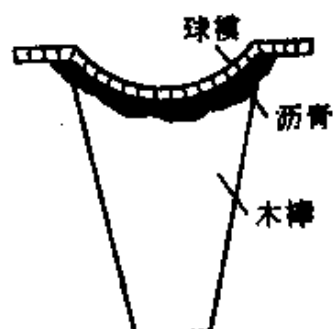


图 4.4-5 固定球模机

凹模固定好后,开始研磨球面工作,

把粗砂水放入凹模内,一手摇动手柄使凹模按逆时针方向旋转,速度为 ω_1 , 另一手按住镜片(或用木棒粘上)。沿磨

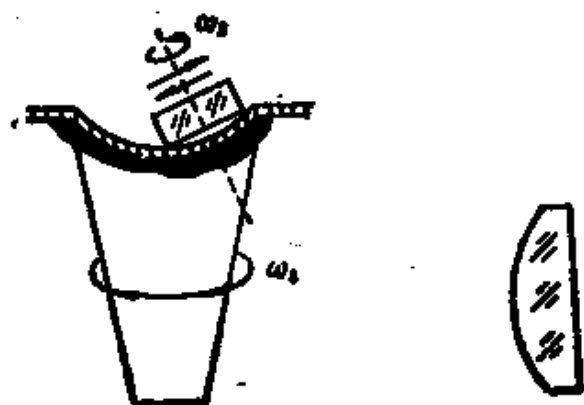


图 4.4-6 磨凸面

盘表面上下移动（如图 4.4-6）。移动幅度往中心使镜片边缘超过镜盘中心，往边缘使镜边超出凹模边，使镜盘表面到处被磨到。镜面在推拉同时，还要依靠大姆指的推动，不断地围绕自身轴线旋转（ ω_2 ），以防止较大偏心。

由于镜面矢高不大，直接用 120 号砂开始研磨，开始磨时总是外圈先磨到变成球环，里面没磨到仍为平面，当磨的时间增加逐渐磨成球形，磨时注意球环的对称性以免磨偏，这可以从磨制过程中，观看中央部分平面缩小时是否位于透镜中心来判断。磨时经常注意镜面厚度，可用千分尺量测边缘厚度加以控制，当磨完最后一道砂 M303¹ 之后，边缘厚度达到规定数值，凸球面曲率合格，砂眼均匀光洁度好，则结束研磨进行抛光。换砂时要清洁干净。也可以同时细磨好几块然后再抛光。

这里要强调一点，磨凸镜重要一点要经常控制中心和边缘厚度，防止磨制过程中出现如图 4.4-7 中所示的劈形现象。造成这些现象原因大多是转动摇摆用力不均，或者玻璃与木棒粘结不正。磨制时要及时发现，让它经过最粗的几道砂矫正过来。否则观测中带来色差。

矫正方法是停止转动，透镜较厚的一边增加研磨时间。最后使镜片各处的厚薄一致。为防止镜片安装时碰碎，边缘厚度最少保持 1—2 毫米（如图 4.4-7b）。

4. 抛 光

抛光盘要在凹模中制作，作法同磨凸镜一样。将溶化的

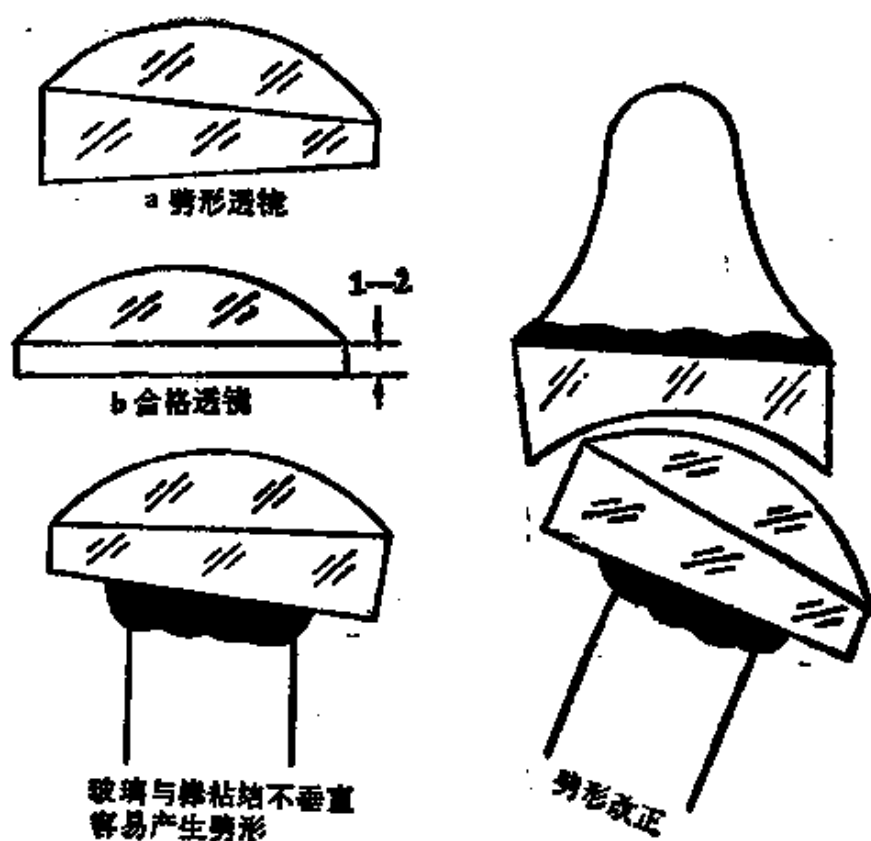


图 4.4-7 镜片劈形

沥青倒在凹模内,沥青可以稍硬些,但不要太厚,待稍冷后在其表面涂上肥皂水,把凸镜压在沥青盘上。此时不要有动程,

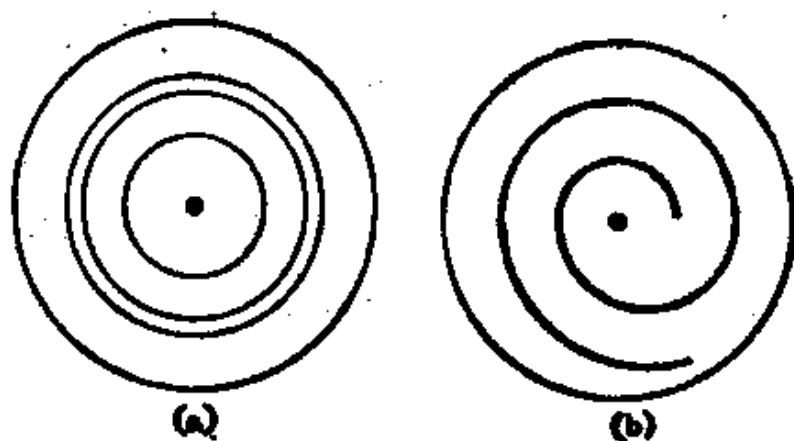


图 4.4-8 抛光盘

要用力压制吻合。此沥青盘较小不必刻槽，为了使红粉和水容易流动，只需用刀尖在沥青工具边缘轻划几道，中心处挖出一块小穴(如图 4.4-8)即可。

修完抛光盘后，再把镜面压在上面采用磨程和手法与研磨时相同。经过约 30 分钟后，光洁度较均匀就可以结束抛光。用汽油或酒精洗去粘住镜面的沥青，擦干后测量焦距，方法参照细磨一节进行。

(二) 寻星镜的磨制

由于望远镜视场很小，寻找天体困难，例如 50 倍的望远镜视场仅与月亮视直径差不多。为便于寻星瞄准目标，在天文望远镜上总要有折射镜的小兄弟与它形影不离，帮助寻找目标。寻星镜口径虽小可是视场大，目镜一般安装十字丝，把天体调到寻星镜视场中心十字丝交点上，这时望远镜主镜视场中心也就出现了该天体。这是因为寻星镜光轴与主镜光轴平行结果。

寻星镜一般是采用二片不同玻璃胶合而成，用冕牌光学玻璃作正透镜，用火石玻璃作负透镜，然后用冷杉树脂胶胶合在一起。由于它制作困难，爱好者则可以使用单片作物镜，如图 4.4-9 所示。

寻星镜需要与物镜及目镜的研磨方法一样，只是口径和焦距不同。现在介绍磨制口径 50 毫米，焦距 240 毫米，放大 8 倍、12 倍的寻星镜光学数据见表 4-5。

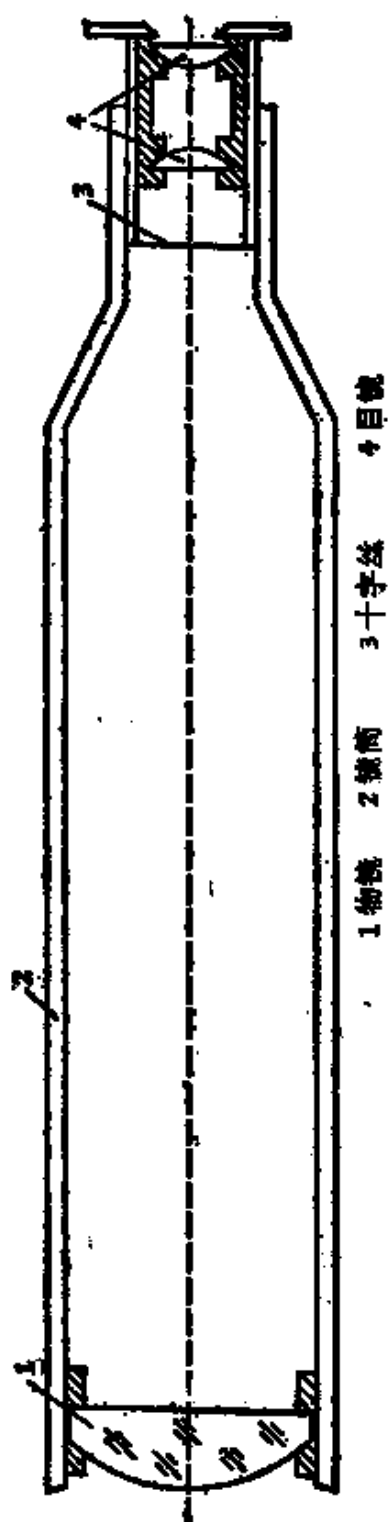


图 4.4-9 望远镜安装图

表 4-5 磨制寻星镜数据表 (单位: 毫米)

		倍数	口径		合成 焦距	单片焦距		曲率半径		镜间距
						f_1	f_2	R_1	R_2	
物镜			50		240					260
目 镜	冉斯登	8	20		30	40	40	60	60	26.7
		12	15		20	26.7	26.7	40	40	17.8
	惠更斯	8	15	20	30	20	60	30	90	40
		12	10	15	20	13.3	49	20	60	26.6

五、镜面镀银

检验合格的主镜和副镜,不能直接使用,必须要在其表面镀上一层银或铝。因为即使抛得很亮的镜面,仅能有 4% 的反光本领,要是在镜面上镀上一层银或铝,情况大不相同了。由于银或铝大显神通,反射光线明显增加达 80%—90% 之多。

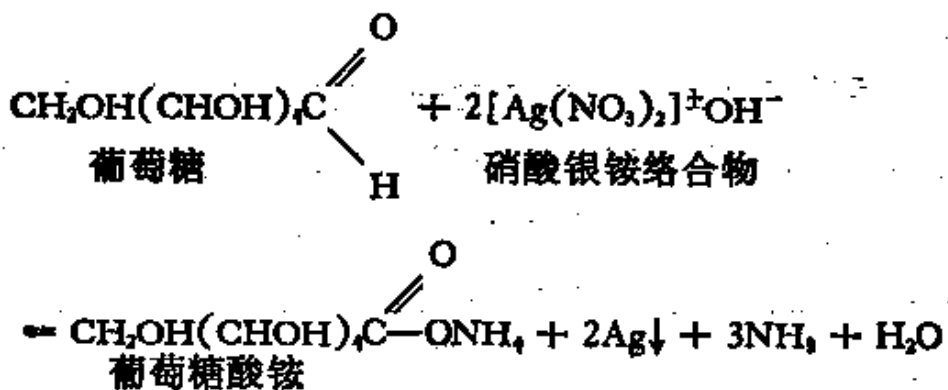
目前工业上常用的方法之一是真空蒸发镀铝。但这种工艺较难,必须具备真空镀膜机的设备才行。业余条件是望尘莫及的。如果请有关单位大力协助,那可就是锦上添花了。此外,还可用古老的化学方法,自行在镜面上镀银。它的方法如下:

(一) 镀银原理

十九世纪的磨镜能手赫歇尔只能用铜作反射镜面，当时反射光线较差，直到 1835 年利毕赫发现某种醛基的化合物，能从银盐溶液中把银还原成金属层的性能。1856 年傅科用这种方法在镜面上镀银成功，使得望远镜的反光能力大为提高。

镀银的过程是利用化学中氧化——还原反应进行的。这里需要配制含有银化合物的镀银液及能使银还原出来的还原液。在镀银液中,含有硝酸银氨络合物,里面含有大量的氧化银成分,在还原液中,葡萄糖含有醛基,它能使氧化银失去氧原子而把纯净的银析出,沉淀在平滑的镜面上。使镜面上布满一层洁净光亮的银层。

这个氧化——还原反应，在化学上又称为银镜反应。反应主要方程式如下：



(二) 镀银的药品及用具

1. 镀银液药品

硝酸银 (AgNO_3): 是无色透明片状结晶, 能溶于水中, 有毒性, 有腐蚀性。操作时要小心不要接触到皮肤或衣服上。

硝酸银是镜面镀银主要化学药品, 要求纯净。用量适当。根据经验如下关系式可估计用量:

$$\frac{\text{镜面面积 (cm}^2\text{)}}{27} = \text{所需硝酸银量(克)}$$

所以镀一个 20 厘米的镜面, 需要硝酸银 12 克。

氢氧化钾(KOH): 白色条状或粒状, 易溶解, 有吸水性。腐蚀性很强。但是氢氧化钠 (NaOH) 能代替氢氧化钾, 它用量少些, 相当于氢氧化钾用量的七分之五。

氨水溶液 NH_4OH 有刺鼻的臭气味, 腐蚀性强, 使用时要求纯净浓度达 25% 左右。

2. 还原液药品

浓硝酸 (HNO_3) 是无色而有挥发性的液体, 烟气刺鼻。具有强烈的腐蚀性, 使用时应注意安全。一般市售浓度为 68% 亦可用。

酒精: 一般医用的则可, 但不要带色的, 主要用于洗镜面和还原液中防腐用。

砂糖(或冰糖): 选用洁净的砂糖, 它是用来转化有机物葡萄糖的主要原料。可以用纯净的葡萄糖直接使用。效果

好,用量少。

蒸馏水:用于配制溶液和洗镜面之用。使用时不能用自来水代替,因为自来水中含有杂质,对镀银起破坏作用。

3. 其他用具

烧杯(或玻璃杯)4个、量筒1个、滴管2个、瓶子2个、玻璃棒1根、天平、漏斗、蜡纸、药棉、胶布、橡皮手套、防护镜、麂皮、细红粉等。

(三) 影响镀银的因素

影响镜面镀银的因素很多,其中主要有如下几个方面。

1. 镜面的清洁度

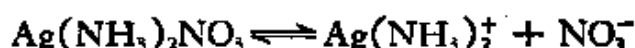
小小银粒能否久居在镜面上,这要取决于镜面对银粒接待条件怎样。如果镜面洁净,光洁度好,银粒是喜于久居,附着力大,相反镜面光洁度不好,又不清洁,镜面上有灰尘和手印油斑等。银粒在镜面上则不稳定,一擦即脱,更有甚者,银粒还要给个颜色,造成镜面上斑纹四起,反光能力大为减弱。所以镀银前一定要把镜面表面弄得非常干净。这也是成败关键。

2. 镀银液的浓度

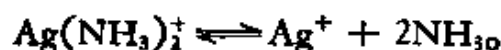
一般镜面银层的产生是由于硝酸银铵络合物分解而成银

离子。

(1) 银铵络盐分解:



(2) 络盐离子反应分解成银离子:



由此可见镀银液的浓度大小影响银离子的产生有着密切关系。硝酸银的浓度又不宜太高和太低,经过实验表明,硝酸银的浓度,效果最好是 0.03 克分子/升。

在镀银液中的氨液浓度的增大,反而使银沉淀的初速下降,因为多余的氨存在确不能使银离子大量析出。反而使已产生的氧化银沉淀转成硝酸银铵络合物。影响镀银质量。

当镀银液中的碱浓度的变化,随着碱浓度增大,镜面银含量增长,还原过程也加快,银层厚度也增加。碱浓度低银几乎不进行还原。但碱浓度过大,达到 4 克分子/升时,得到镜面的银质量不好。

3. 还原液的浓度

还原液主要是产生大量葡萄糖,如果葡萄糖多则氧化银就多,镜面上银粒增加,但达到一定限度后,镜面上的银粒的数量反而降低(见图 4.5-1)

根据实验得知,一分子葡萄糖能还原 10 分子的硝酸银。即要还原 6 克硝酸银仅要 0.635 克葡萄糖或 1.27 克转化糖。如果溶液在还原过程中,随着碱浓度的提高用一分子葡萄糖还原出硝酸银的数量也就增加。

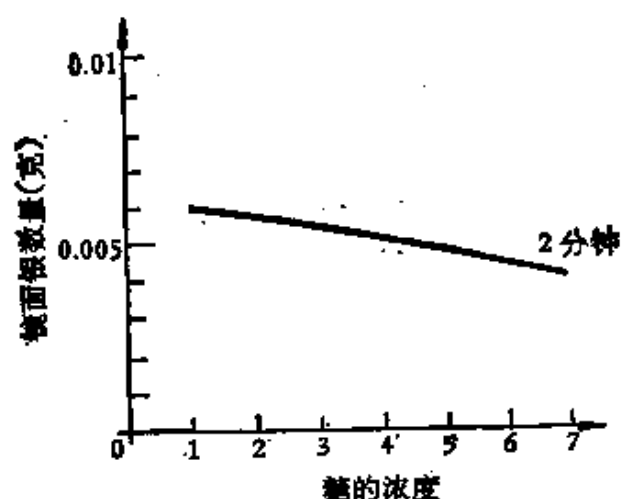


图 4.5-1 镜面银粒在硝酸银为 0.03 克分子/升时

4. 温度影响

镀银时外界温度影响较大。如果温度高于 30°C 以上,镜面上银层形成的速度快,但厚度小,而温度低形成镜面上的银层速度慢,但最终厚度增加。一般镀银温度为 18°C — 25°C 较适宜。

另外还要说明一点,当温度太低,溶液密度大时,或者温度太高,尽管溶液密度低时,均会使镀银液中产生的雷酸银 (AgONC) 自行爆炸带来危险。故夏天最好早上进行,冬天最好在中午进行(切忌在炉旁进行)。

5. 溶液的纯度

溶液要求纯度比较高。如果溶液中含有杂质会使银层质量不佳。如溶液中氢氧化铁和有机杂质的存在会使镜面产生有褐色的斑点和星点小疵病。严重时会使镜面镀银报废,造

成不必要的浪费。储存溶液的瓶子及配制溶液的所有器皿均要十分干净,并用蒸馏水冲洗过。

(四) 镀银的方法

镀银之前要配好还原液和镀银液。

1. 还原液的配制

还原液要在镀银前半个月或一个月配好。因为还原液中含有醛基的葡萄糖,需要长时间进行化学反应,为保证质量时间越长越好,并且它可以多年不坏。

还原液需要用料见表 4-6。

表 4-6 还原液用料表 (1cc = 1cm³)

药 品	用	量
	1	2
冰 糖	90克	22.5克
蒸馏水	1000厘米 ³	250厘米 ³
	c c	c c
浓硝酸	4 c c	1 c c
酒 精	175 c c	44 c c

如果用不了这么多剂量,可以按比例减少。注意配制量要比实用量增加三分之一左右。防止用时不够。不够用时,也可以马上配制。在开始配制时,不加酒精。其他药品配完后装进一个烧杯搅拌好,然后另取一个大烧杯,里面放入水,

把烧杯放在盛水的大烧杯中,准备好后放在酒精灯加热(如图4.5-2)同时不断用玻璃棒充分搅拌,加热至水沸腾,即在沸点温度下保持十分钟左右。然后停止加热,冷却一段时间再加入酒精。加热的目的是改变反应条件,促使硝酸和糖在短时间内充分反应使砂糖迅速转化成葡萄糖。

如果不用砂糖而直接用葡萄糖作原料,那更好了,不再用

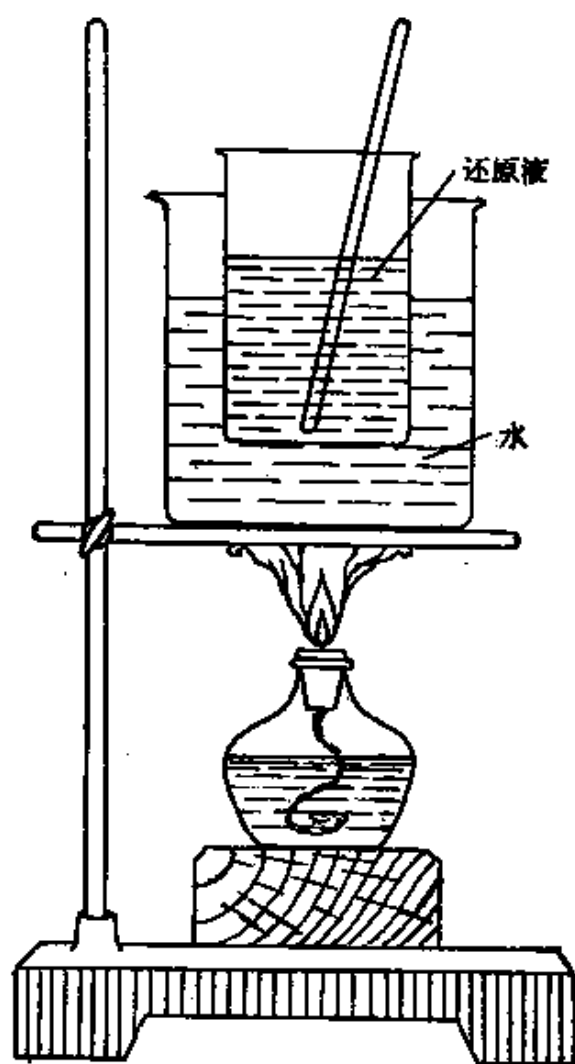


图 4.5-2 煮沸还原液

硝酸和酒精的作用，也不必加热或停放一段时间了。作法是把葡萄糖直接溶于蒸馏水中即制成还原液。

2. 镀银液的配制

镀银液要在镀银时才配制，不能预先配制。下面以镀膜

表 4 7 镀银液配方

口径 药品	5cm	10cm	15cm	20cm
硝酸银	1g	3g	7g	12g
氢氧化钾	0.7g	1.5g	3.5g	6g
氨水	0.3cc	0.6cc	1.4cc	2.4cc
蒸馏水	80cc	125cc	350cc	600cc

面为 20 厘米口径的需用量，说明配制方法。

(1) 先取 200cc 的蒸馏水放入烧杯中，再取 12g 硝酸银溶在水中，用玻璃棒不断搅和使它成为均匀溶液。另外再取一个烧杯，倒出溶液 30cc，放在一旁留以备用。

(2) 拿一个滴管吸取氨水，把它渐渐滴入溶液中，每加一滴均要充分搅动，这时溶液由无色逐渐变成棕黑色，这说明溶液中产生了氧化银沉淀。反应方程式如下：

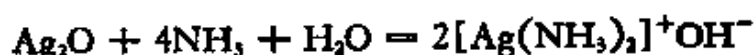


氢氧化银自动分解生成氧化银



继续滴入氨水，此时看到溶液颜色逐渐变淡，并出现许多

小粒灰色沉淀物又使溶液变成灰色。在这变化时滴氨水的速度减慢,同时更要不断搅动;随着颜色越来越淡时,滴液速度也要越来越慢,搅动的时间也要越来越长,直到溶液重新完全澄清为止。氨水千万不要加得过量,在这段过程中,原先沉淀的氧化银沉淀,与氨水作用转化成可溶性硝酸银氨络合物。即:



为防止溶液中氨水过多,用另一支滴管吸取硝酸银把它滴在溶液中,使溶液又重新变成淡棕色,宁肯使硝酸银过量,不要氨水过量,因为在溶液中存在多余硝酸银不影响镀银的质量,而溶液中有多余的氨水则使银沉淀的速度减慢,影响镀银的质量。

另外加入氨水不能用杯倒,一定要用滴管滴入,目的是控制氨水量。因为氨水中氨的成分容易变化,事先无法判断所需精确量,而要从实际效果中观察来确定。

(3) 取第三个烧杯,在杯中倒入蒸馏水 400cc, 又取氢氧化钾 6g 放至杯中成为氢氧化钾溶液。配好后放在一旁待用。

(4) 把配好后的氢氧化钾溶液慢慢倒入已滴定过的硝酸银溶液。(注意不要将硝酸银溶液倒入钾碱溶液)。同时用力搅动,这时溶液又变成棕黑色了。这时,再滴入氨水,直到溶液又变清为止。为防止溶液中存在过量的氨,便可把烧杯中存放的后备硝酸银,取一些滴入溶液中,不断搅拌使之变成淡茶色,如果溶液中存在多余的铵时,过数分钟溶液变成灰白色,遇到这种情况,再滴入微量硝酸银,用力搅动直到淡茶色

不退为止。到此镀银液便已配完。

在配制镀银液时要小心,操作时一定要慢慢进行,特别把氢氧化钾溶液倒入硝酸银溶液中更要慢,如果急匆匆地把钾碱溶液倒入,则使硝酸银铵溶液中,短时间内产生大量的雷酸银(AgONC)而产生爆炸,为安全起见在操作时可以带上防护眼镜。

3. 镜 面 镀 银

在没配好镀银液之前,一定要把镜面清洗干净。首先用肥皂水洗净镜面上的红粉,擦掉油点,最后用酒精和蒸馏水冲洗。冲洗完后不再用手摸,等它干后在边缘围一圈蜡纸。蜡纸从镜面厚度一半开始,经上直到露出镜面约为5厘米左右。蜡纸不能用刻钢板的那种,因为太薄。一般选用牛皮纸。在用时要把它浸过白蜡。围纸时大部只到镜面厚度的一半,待纸合拢后,用胶布沿着交界处粘起来。蜡纸接头处也用胶布粘上。粘时注意不要将蜡沾在镜面上。如图4.5-3所示。

镜面围好后要用浓硝酸清洗镜面。清洗前准备一个小木棒,把一端扎好棉球,用这样棉球沾上浓硝酸用力擦洗镜面,特别边缘部分要擦净。仔细擦过5—6次后,用蒸馏水冲洗镜面,冲掉硝酸。在冲洗最后

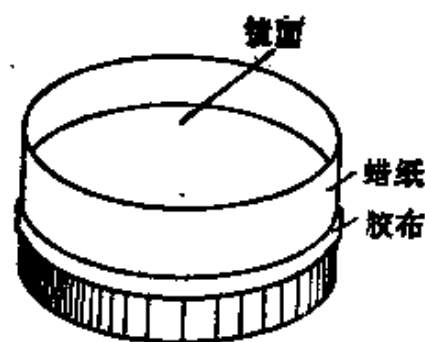


图 4.5-3 在镜片上围蜡纸

一次时;不要把水都倒掉,要留一部分,水深约0.5厘米左右,用

来保护镜面防止弄脏。这部分直到开始镀银的时候再把它倒掉。

清洗完毕镜面后开始进行镀银。取事先配好的还原液 100cc 倒入烧杯,让它和镀银液同时倒在镜面上。并且轻轻晃动镜面。过不久只见溶液又开始变黑,这是还原液的葡萄糖和氧化银的氧发生氧化作用,在镜面上开始有纯银析出而沉淀。随着溶液的颜色由浓茶色转变成深棕色,过后又变成淡棕色。沉淀一段时间,镜面上出现一层洁白闪光的银膜。与

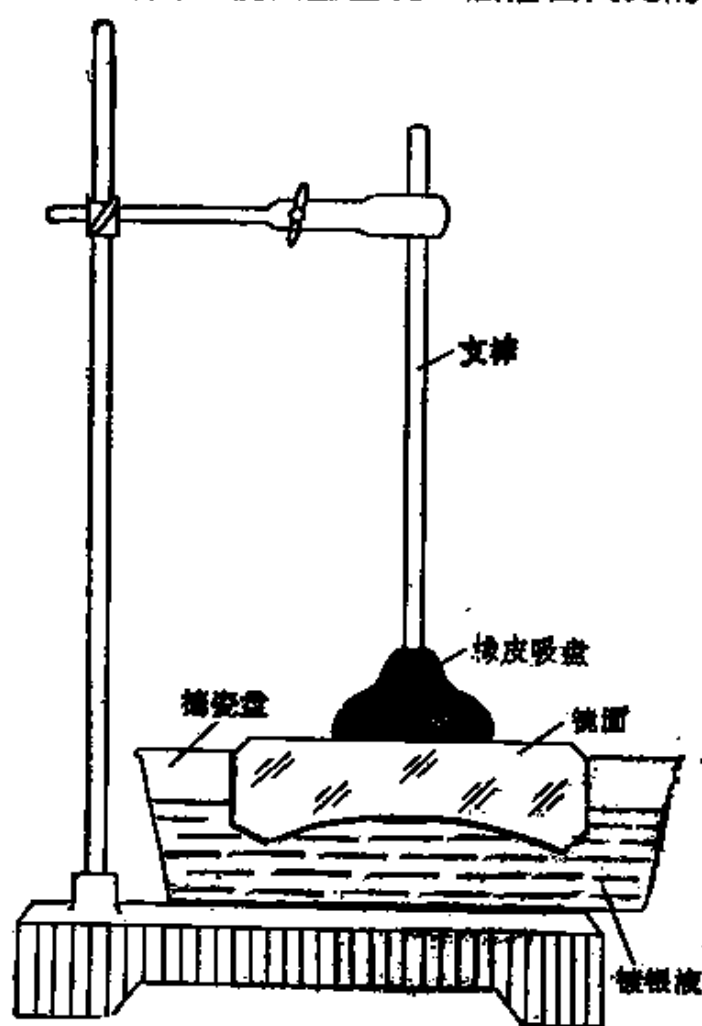


图 4.5-4 吊镀法

此同时银膜上又分布着星星点点的小黑点。这些小黑点是有害的氧化物,开始暂不必理它,当银粒镀到一定厚度时,再用扎着棉花球的木棒,轻擦镜面把小黑点除去。此时溶液逐渐由半透明变成透明液体了。这表明还原作用已基本结束。当镜面出现比较粗的银粒——银霜时,立即把溶液倒掉。溶液倒掉后再用清水冲洗镜面。拆除胶布及蜡纸,最后用蒸馏水冲洗一次,把镜面竖直晾干。

镀好后的镜面,透过玻璃应看不见背面,用灯光照明时,最多只能看到灯的亮光,并且呈紫色。如果一看即明,说明银层太薄还须重新镀第二次。方法同上只不过时间缩短些。

除了把镜面围起来镀银方法之外,还可以采用吊镀法,如图 4.5-4 所示。把镜背面用橡皮吸盘吸住,用个实验架把它悬在空中,让盛好镀银液的搪瓷盘放在下面,让镜面慢慢接触溶液液面进行镀银。这样镀出来的镜面质量比较好。

4. 镜 面 抛 光

镀好的镜面上面银膜总有些银霜,使镜面灰暗不亮。这在斜射光照在镜面时显得很清楚。附在镜面上的银粒也松散不紧,为使银层发亮和牢固地附在镜面上,对镜面进行抛光。

取一块事先清洗过的麂皮,包在一团棉花上,上面不要有油脂和水分,抛光时先在镜



图 4.5-5 镜面抛光

面上作螺旋状擦动（如图 4.5-5）。擦一遍后，再沾些较细红粉，用同样的动作轻擦银膜，用力要匀压力要小，切勿擦伤银膜。待擦好后银膜耀眼发亮。至此镀银工作全部结束。

把镀好的镜面放于盒中或用洁纸包好，置放在干燥清洁的地方保存好。一定不要用手再直接接触镜面，如果上面有灰尘时，只能用气吹去，或用极干净的镜头软毛刷轻轻拂去。不用时要放在盒中保护好。

第五章 望远镜的安装和校准

一、望远镜的安装

望远镜的安装包括镜身和镜架两大部分，如图 5.1-1 所

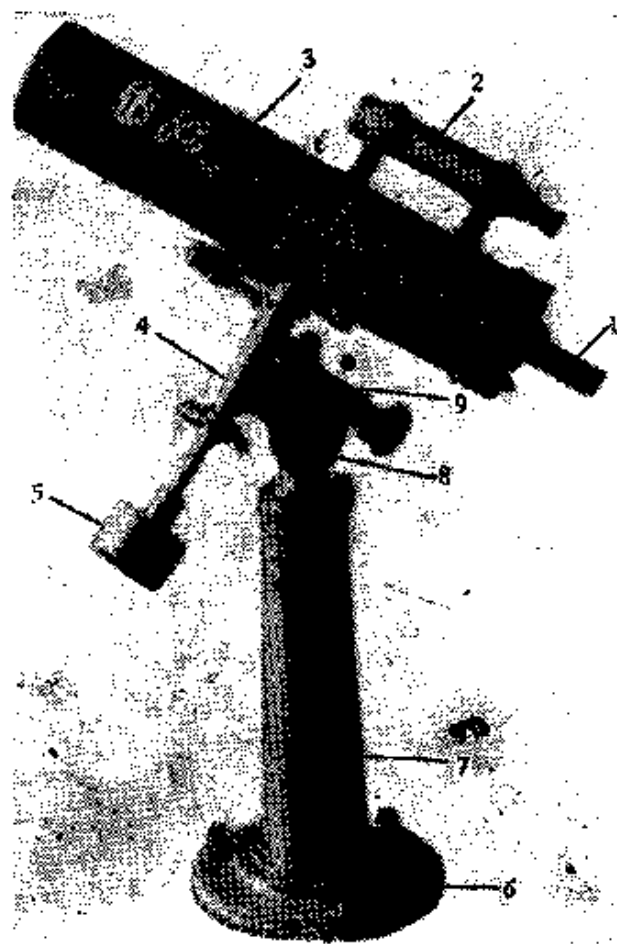


图 5.1-1 望远镜的构造

1. 目镜 2. 寻星镜 3. 镜筒 4. 赤纬轴 5. 平衡锤
6. 底托 7. 镜架立柱 8. 极轴调节器 9. 极轴

示。

镜身是把已经磨成的主镜、副镜和目镜等光学元件,使它们有机联系在一起,成为观看天体的光学系统。

镜架要把镜身支持起来,同时观看天空时能够灵活地自由旋转,使其准确地指向天空中任何位置。

下面分别介绍镜身和镜架的简易制作方法。

(一) 镜身的制作

镜身在望远镜中的重要性显而易见,很大程度影响组合成光学系统的效果,所以制作时要求还是较高的。镜身的部分要包括镜筒、主镜、副镜的安装及目镜和寻星镜的安装。

镜身的大小尺寸及材料的选择,要考虑光学系统的性能及使用条件、制作时的可能等决定。现将磨制成功的卡式望

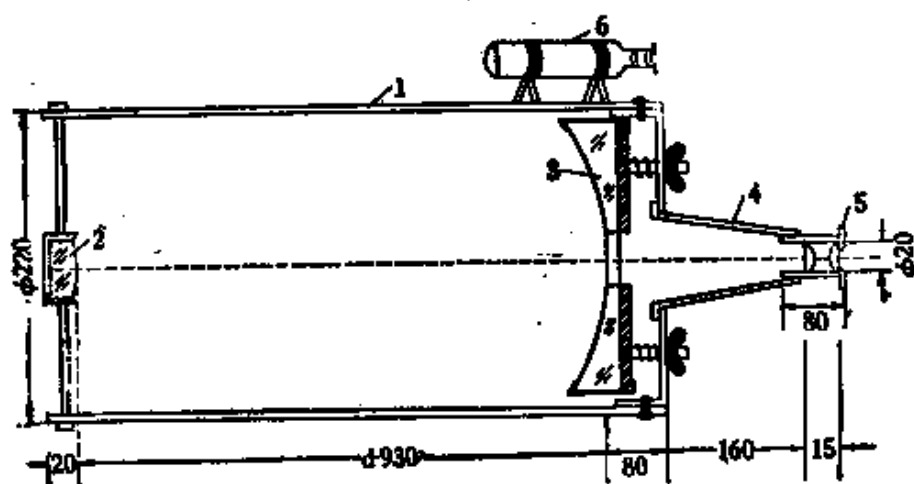


图 5.1-2 镜身安装

1. 镜筒 2. 副镜 3. 主镜 4. 目镜接筒 5. 目镜 6. 寻星镜

远镜的光学元件，组成镜身，确定如下方案。如图 5.1-2 所示。

1. 主镜怎样安装

图 5.1-3 所示，把主镜通过卡片固定在中间有孔的铁底板上，为了防止铁底板直接接触镜面。在它们中间垫上一块三合板和棉花层。铁底板的背面，焊接三根长螺杆，它使镜后

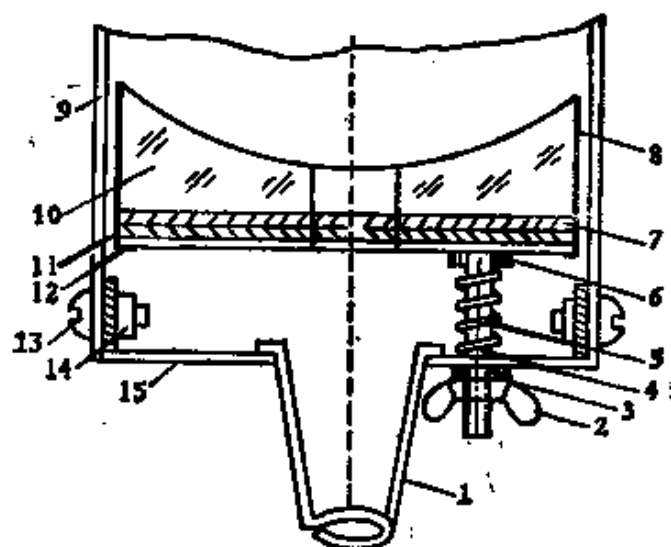


图 5.1-3 主镜安装

1. 目镜接筒 2. 蝶形螺母 3. 6. 垫圈 4. 长螺杆(M5×80) 5. 弹簧
7. 棉花层 8. 铜卡片 9. 镜筒 10. 主镜 11. 三合板 12. 铁底板
13. 短螺丝 14. 螺母 15. 后盖

盖和底板连在一起。每根长螺丝上，均配上一个弹性较强的弹簧(5)，利用蝶形螺母紧压在后盖和底板之间。把后盖壁用短螺丝与镜筒固定住。

在安装时，拧动蝶形螺母，能使主镜微微移动。以便观测时能调节光轴，很好地观测。

(1) 底板制作。底板的尺寸大小如图 5.1-4 所示。

主镜要固定在底板上，它的材料要求稍厚一点，一般选用 3—5 毫米厚的铁板为宜。铁板要求比较平整。现取一块直径为 200 毫米的圆盘，按照图 5.1-4a 所示尺寸加工，中心孔

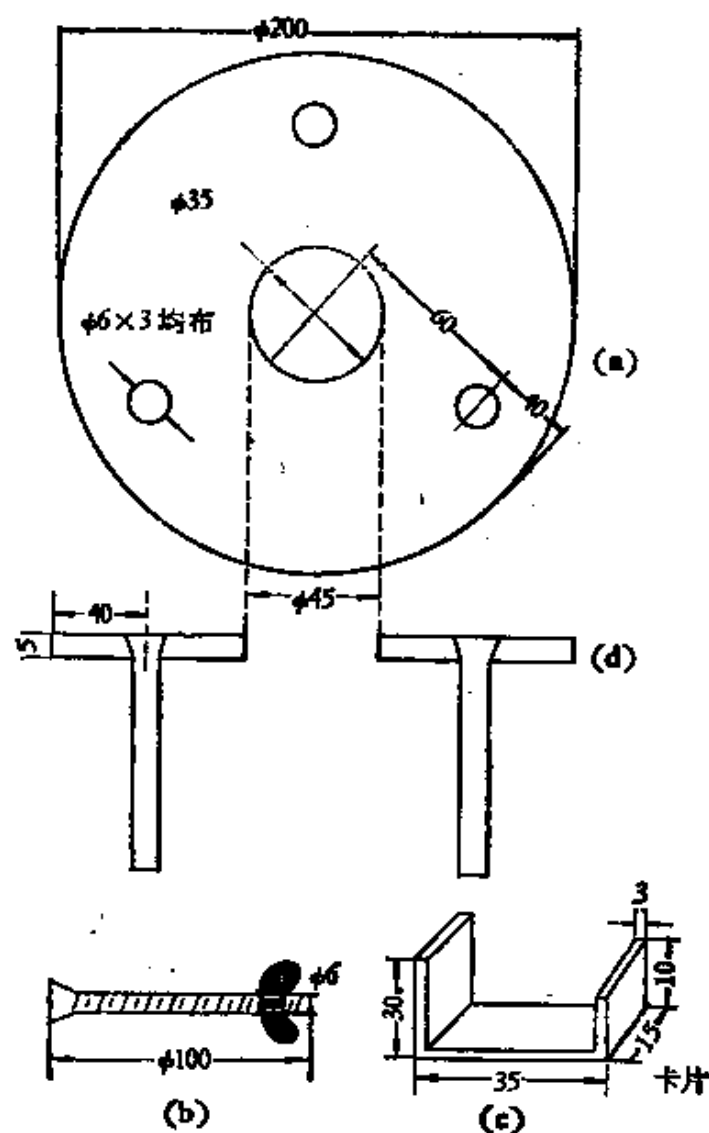


图 5.1-4 底板制作

a. 底板 b. 平机长螺杆蝶形螺母 c. 卡片 d. 长螺杆

径比主镜中心孔略大是为了防止遮挡光线。在底板上钻出 6 毫米的小孔，这些小孔间要成等边三角形。在每个圆孔上穿过一个长螺杆如图 5.1-4d，穿过圆孔的螺钉帽恰好座在铁板孔中的槽，然后用锡把它焊牢，如果不平用锉刀把它锉平。

主镜固定铁底板是用四个铜片把它勾住(如图 5.1-4c)。制作铜卡片时，先将其一端弯成直角另一端画好尺寸暂不弯，待安上主镜之后再把它弯过来。把弯好的一端用锡焊在铁底板上，此时把事先制好的一块与底板同样大，中心有孔的三合板，垫好棉花(注意要平)，把主镜放在棉花上并用黑胶布把镜边与三合板一块缠好，再使它们一块放在铁底板上。用小钳把铜卡片弯好卡住主镜，使主镜不松也不紧最好。

(2) 后盖。后盖是镜筒尾部的盖子，它用来防尘和保护镜子。同时通过它把目镜和主镜、副镜光学系统联成为整体。

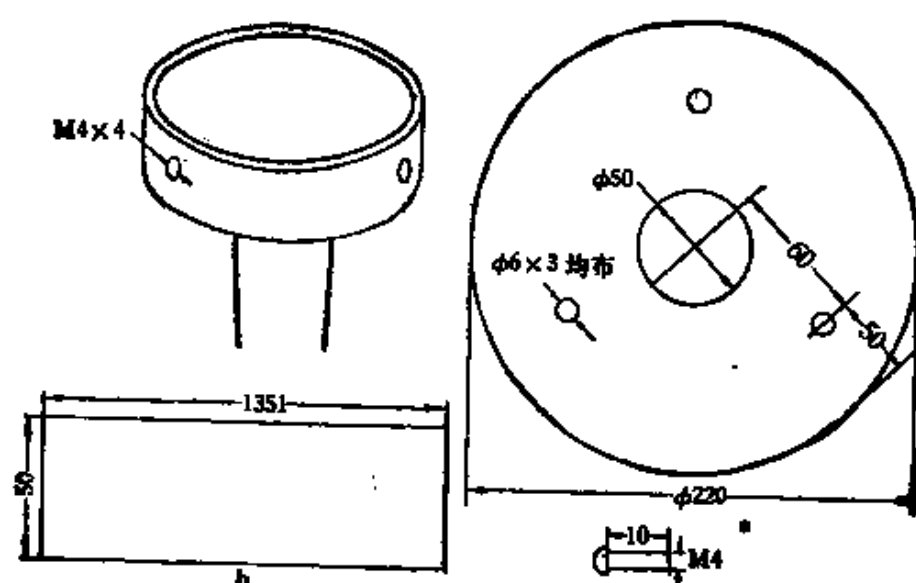


图 5.1-5 后盖尺寸图

a. 后盖 b. 后盖图

制作后盖要选择较厚的铁板,选 3—5 毫米即可。这样保证拧紧蝶形螺母时,后盖不变形,不影响效果。按照图 5.1-5 所示。取 3 毫米厚,220 毫米直径铁板一块,在中心处钻 50 毫米圆孔。在边缘处钻三个 6 毫米的圆孔。这三个孔在后盖上成为等边三角形,并与底板上三个长螺钉相对应。

后盖侧壁四周要围上一个圆圈,用它与镜筒固定。镜筒如果采用薄铁皮而后盖圈选用厚铁皮,这样也可以加强筒壁的强度减少变形。如图 5.1-5b 所示后盖圈加工尺寸。制成的后盖圈要焊在后盖上,焊好后在圆圈上钻四个 4 毫米的圆孔,套丝 M4 的螺纹。如果后盖圈是选用薄铁皮制作的,不能在上面直接套丝,则可在钻孔的内侧焊上一个螺母代替螺纹。

(3) 弹簧。在三个长螺丝上均套有弹性较好的弹簧,弹簧没有特殊要求,只要拧紧蝶形螺母,能使镜面产生移动变化就行了。

弹簧也可以自制,如图 5.1-6 所示。用台钳夹住两块厚

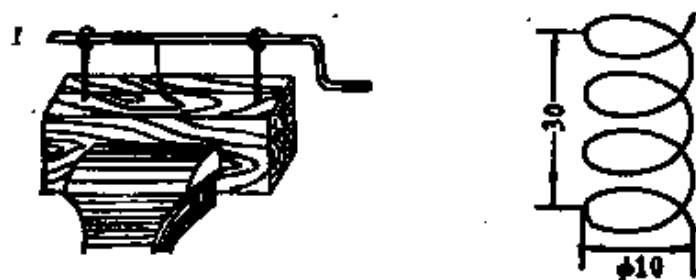


图 5.1-6 弹簧及制作

木板,在厚木板上钉两个环,把绕弹簧用的铁棒穿在这两个环里。在铁棒上钻一个小孔。把钢丝夹在两块木板间,一端插入到铁棒小孔里固定。转动铁棒,钢丝在铁棒上就成了螺旋

弹簧。绕好后的弹簧要在炉火中烧红,再放入冷水中淬火,以提高弹性。

(4) 目镜接筒。后盖中心孔处要伸长一个目镜接筒,使目镜安在上面进行观看。这个目镜接筒制作成圆锥台形比较好。

图 5.1-7, 是圆锥台的展开图。它是用 2 毫米厚薄铁皮

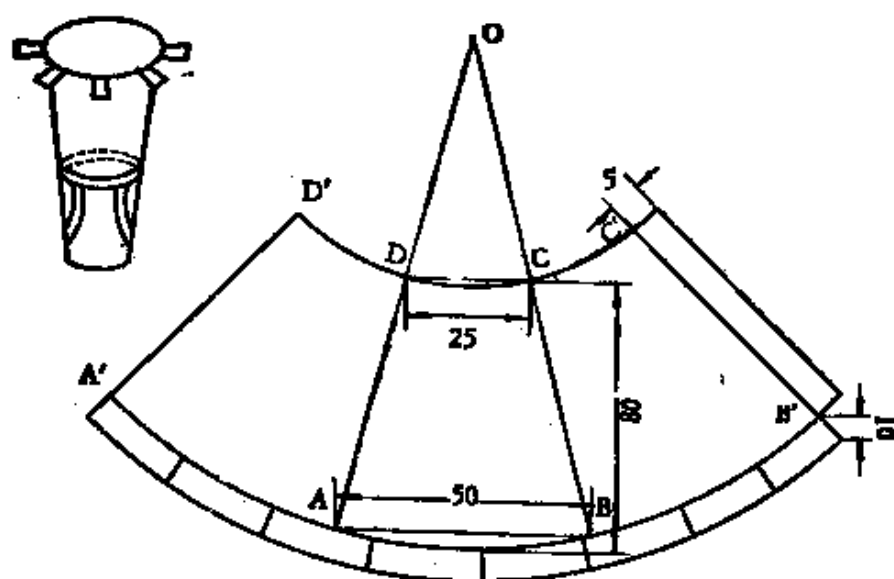


图 5.1-7 锥台接筒

制成的(用纸也行)。圆锥台的画法如下: 先画一个等腰梯形 ABCD。它的下底等于后盖孔直径为 50 毫米, 上底等于目镜筒直径为 25 毫米, 梯形高为 80 毫米。延长两腰使其交于 O 点; 以 O 点为圆形分别截 OA、OC 之长为半径, 作两个圆弧; 截取 $\widehat{AA'} = \widehat{BB'} = \widehat{AB}$ 及 $\widehat{CC'} = \widehat{DD'} = \widehat{CD}$ 。A'B'C'D' 即为圆锥台的展开图。在 $\widehat{A'B'}$ 上截 10 毫米, 把它剪成几个缺口。在 B'C' 边留 5 毫米作焊口。

下好料后把它用木棒敲成锥台，焊口处用锉刀斜锉出新磋口，便于接口处焊平。缺口处再弯成直角。

目镜放在接筒有时较松，为卡紧目镜，在接筒中安装一个目镜卡：如图 5.1-8 所示。目镜卡的材料要选有弹性的磷青

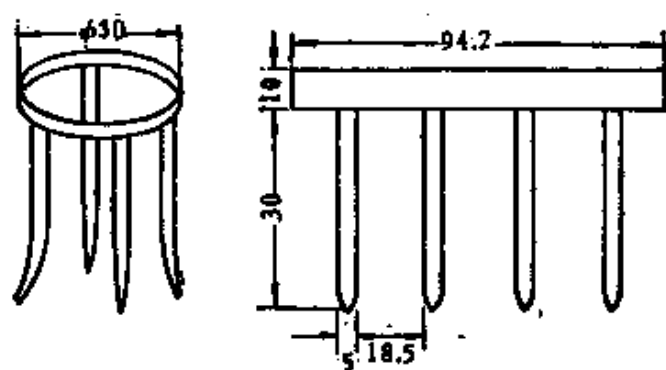


图 5.1-8 目镜卡

铜片。把制成的目镜卡四脚略弯成弧形，然后焊在接筒内。

2. 副镜巧配合

主镜的前端放置一块副镜，副镜的光轴要和主镜光轴重合。即副镜悬在镜筒中心。图 5.1-9a 是安装的示意图。制作方法如下：取一个直径 55 毫米的铁管，壁厚 5 毫米，用锯截 20 毫米。铁管壁上分为四等分，每隔 90° 处钻孔套 M6 螺纹（如果没有铁管可用直径 55 毫米小油盒代替，但在钻孔处焊上 M6 螺母）。

取薄铁皮作一个铁衬圈，放在镜筒内侧，加强镜筒强度保证前端成圆形（具体尺寸参考后盖圈的制法）。铁衬圈放在镜筒内同钻，也钻成四个孔，每个孔均于副镜环上的孔相对

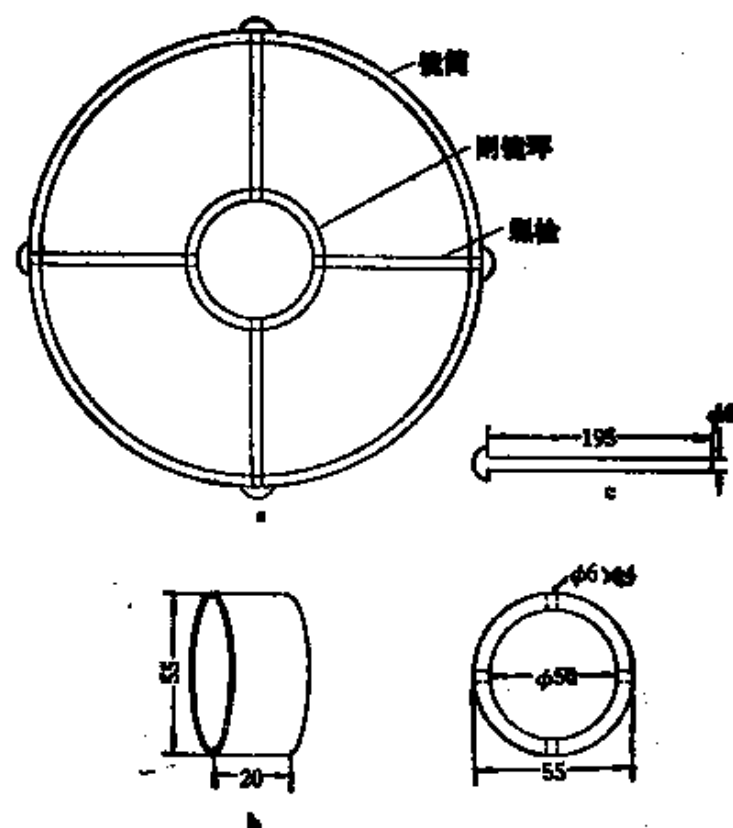


图 5.1-9 副镜安装示意图

应。钻孔外套螺纹。安装时用四个长螺丝让它把镜筒、衬圈、副镜环三者紧紧相连。

上述零件制好后，把副镜四周用黑胶布缠好，放在铁环内。放时注意保护镜面。而且镜面垂直铁环。

3. 目镜精又巧

人的眼睛通过目镜才能看到天体。所以目镜的制作好坏，影响很大，制作时要多多细心。由于目镜的种类不同制作情况也有不同，这里以制作放大 80 倍冉斯登目镜为例，说明

制作方法。

选取两块直径 20 毫米,焦距为 80 毫米的平凸透镜,作为目镜片。按照设计要求,把两个镜片放在目镜筒里面。目镜筒可以选用塑料管、薄铁皮或厚纸等制成。取外径 25 毫米,内径 15 毫米左右的塑料管,截取长度为 80 毫米,如图 5.1-10a 所示,在内壁上下两端用车床车出浅台,两浅台之间相隔 53.3 毫米,把两个镜片凸面相对放在其中,用两根细钢丝卡紧镜片上下两端。目镜上盖选用塑料板,如图 5.1-10b 所示,把目镜筒和上盖用胶粘在一起。胶可选用万能胶或 502 胶皆可。

目镜制成后首先检查镜片安装是否合适,然后实测一下焦距,测定方法同单片一样。如果焦距达到设计要求,便在镜片前端粘上十字丝。

十字丝的材料可选用人的头发及蛛丝等,制作时选两根长约 5—10 厘米的头发,截一小段牙膏皮系在头发丝一端作重锤,用镊子夹住牙膏皮,把头发丝放在 50°C — 70°C 热水中,浸泡 2—3 分钟,去掉油脂。安放十字丝需要把目镜筒前端与头发接触处点上清漆(或松香),等漆干后头发丝便被固定在筒壁上。让铅皮自然下垂拉紧发丝,用清漆与筒壁粘上。漆干后用刀片将多余的头发丝切去。用同样办法,把另一根头发丝也粘在目镜壁上。粘时注意两根头发丝一定要崩紧并且相互垂直。

为了更好地观测天体,天文望远镜往往要配上几个不同焦距的目镜,从而能得到不同的放大倍率。目镜需要制几个

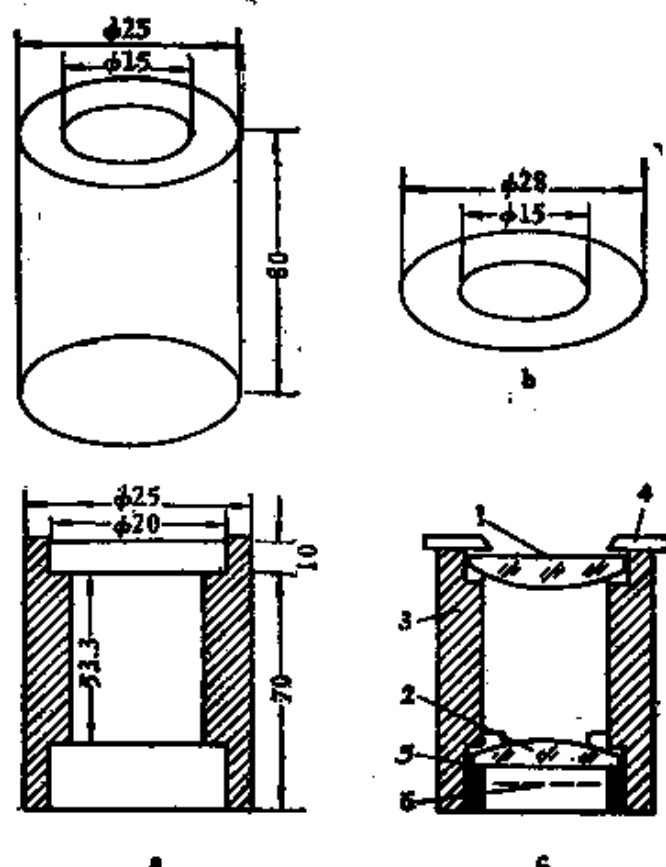


图 5.1-10 目镜制作

1.2. 镜片 3. 镜筒 4. 上盖 5. 挡圈 6. 十字丝

不同焦距的镜片。

惠更斯目镜的制作与冉斯登的方法基本相同。制作时注意两点：(a)两个镜片大小不同，在镜片中间加个垫圈，垫圈可用纸卷做成。(b)光栏位在两镜之间，十字丝安在光栏上。

4. 镜筒的制作

镜筒可看作是主镜和副镜的安身处，同时也是保护者。不仅如此，还作为纽带把主、副镜光学系统和目镜光学系统形成

统一整体。它的顶端口又起到光栏作用限制杂散光束干扰正常工作。

制作镜筒时，要考虑满足光学系统的要求，要有刚度。

图 5.1-11 表示制作卡式镜的镜筒的尺寸。制作方法是这样

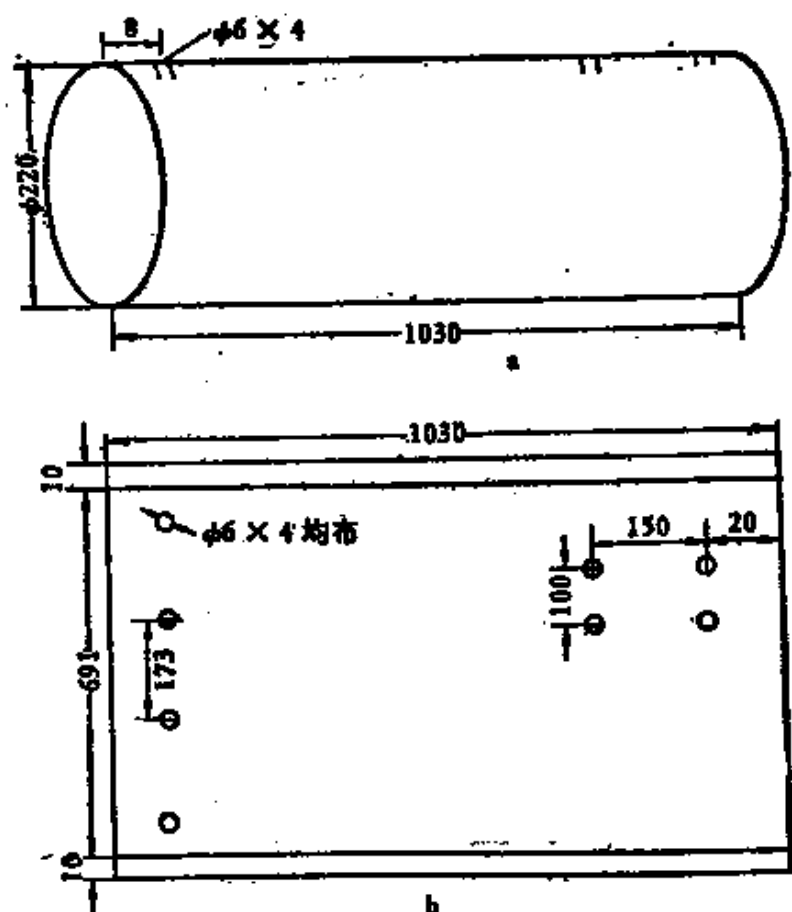


图 5.1-11 镜筒

的。取一薄铁皮 (2 毫米)，按照图 5.1-11b 要求尺寸裁剪成长方形。在铁板两端用尖针画出各 5 毫米宽的界线。然后把它放在事先架好的三角铁上，取厚方木沿着画线把两边各拍击成 60° 角等宽的边沿，二者方向相反能够咬合在一起。再取一根长铁棍，用架子支起来，把上面拍成角度的铁板继续拍

击成圆形,拍时注意保持铁皮长方向与圆柱母线平行,直径一致,如图 5.1-12 所示。拍击到两边咬合后为止。镜筒不一定非圆形不可,方镜筒不影响使用。

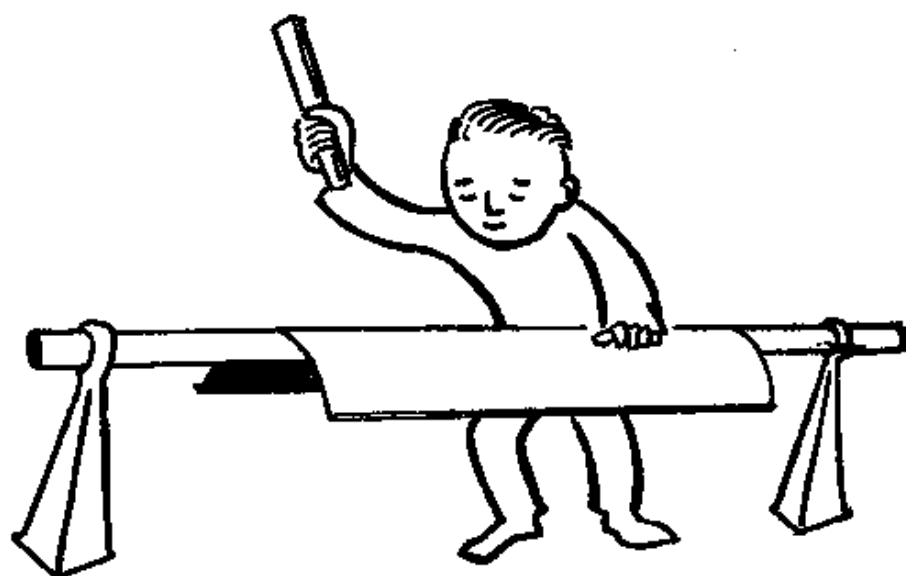


图 5.1-12 拍镜筒

圆筒制成后,根据图上所标尺寸划线钻孔,等安好主镜和副镜之后,可以进行光路校准。最后为保护镜面及防止灰尘落在镜面上,要制作一个镜盖。如图 5.1-13 所示。材料可以选用薄铁皮或铝板。也可以用硬纸板制作。

5. 寻星镜安装

配在望远镜上的寻星镜,要制作轻巧耐用,固定在镜筒上既稳定,又能调节光轴使之经常与望远镜光轴保持平行。首先依据磨制好的物镜和目镜,按照一定光路把它作个设计方案(如图 5.1-14)。物镜焦距 240 毫米,口径 50 毫米。

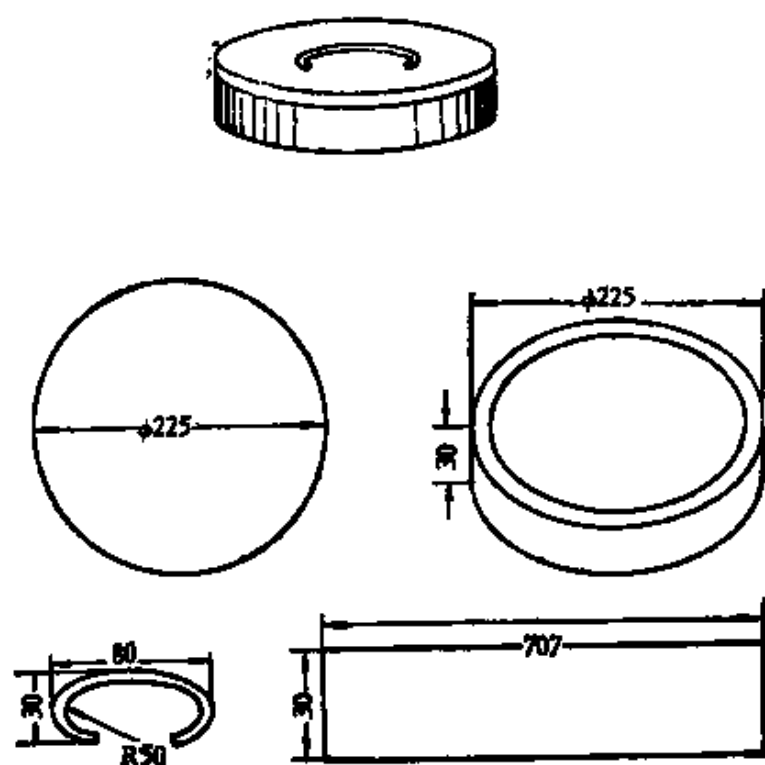


图 5.1-13 镜盖

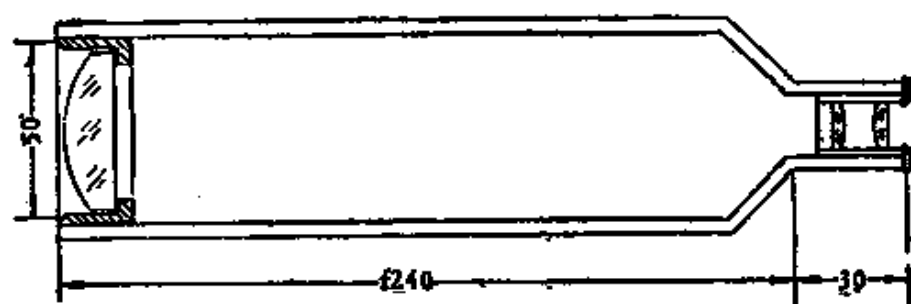


图 5.1-14 寻星镜光路图

制作方法如下:

(1) 物镜安装。寻星镜的物镜是放在镜头圈内。镜头圈是选用 45 毫米的内径,壁厚 5 毫米的铁管,截取 20 毫米长,把内

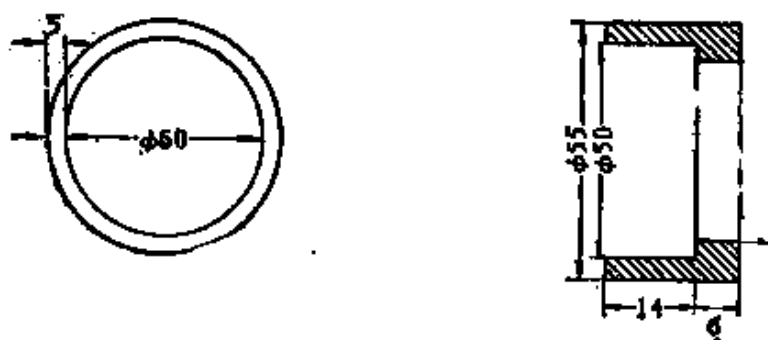


图 5.1-15 物镜圈

圆用车床车去一部分,使物镜正好能放进去(如图 5.1-15)。背后的平台要求较平,安放镜面后一定与镜圈垂直。物镜用钢丝卡紧。

(2) 镜筒制作。这比主镜筒要容易多了。制作时根据图 5.1-16 所示尺寸下料,并参照制作主镜筒的方法制作。

(3) 支架。寻星镜支架是把寻星镜固定在主镜筒上,同时利用支架上调节螺丝,使其光轴与主镜光轴保持平行,观测时能指向同一目标。

支架的制作如下:如图 5.1-17 所示,选取二个直径 58 毫米铁管,20 毫米长,壁厚约 1.5 毫米左右。在每个圆环上套丝 M4 螺纹三个,这三个孔要求均布,形成等边三角形,彼此相隔 120° 。三个孔要求准确,调节光轴时比较容易。

圆铁管下面安放一对支脚,以固定在主镜筒上。支脚的尺寸如图 5.1-17c 所示。它是利用厚铁条制成的,制成支脚后把它与圆铁管焊在一起。支脚底弯成 120° 角。在底部 $\phi 4$ 钻孔,准备安在镜筒时紧固螺丝用。

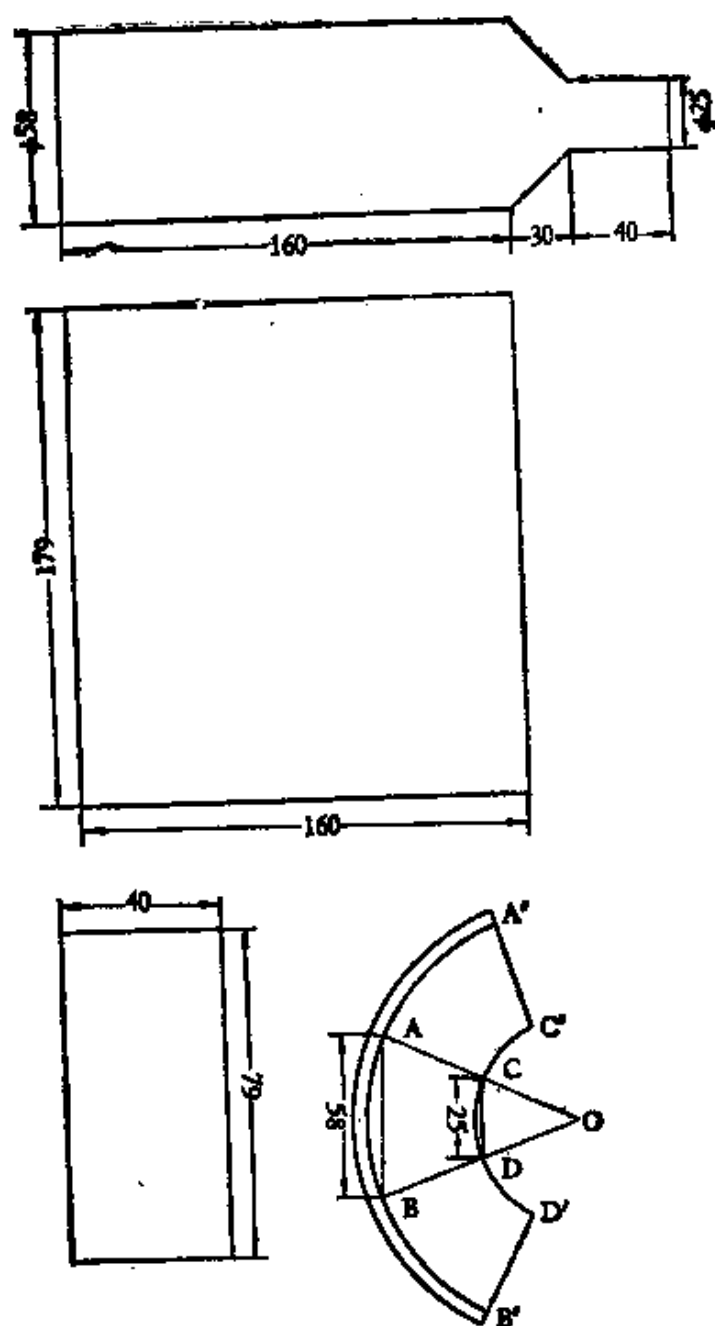
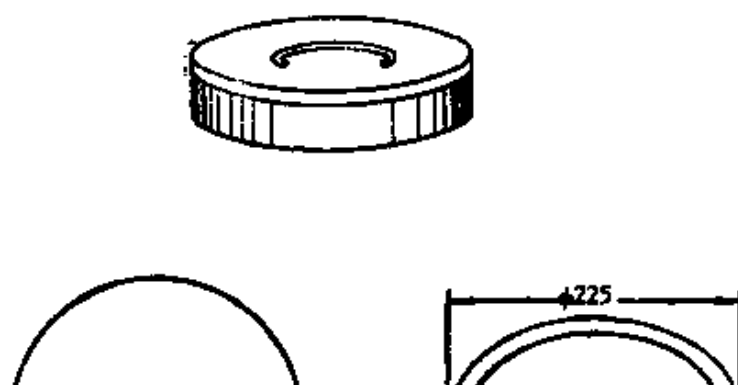


图 5.1-16 导星镜筒的制作



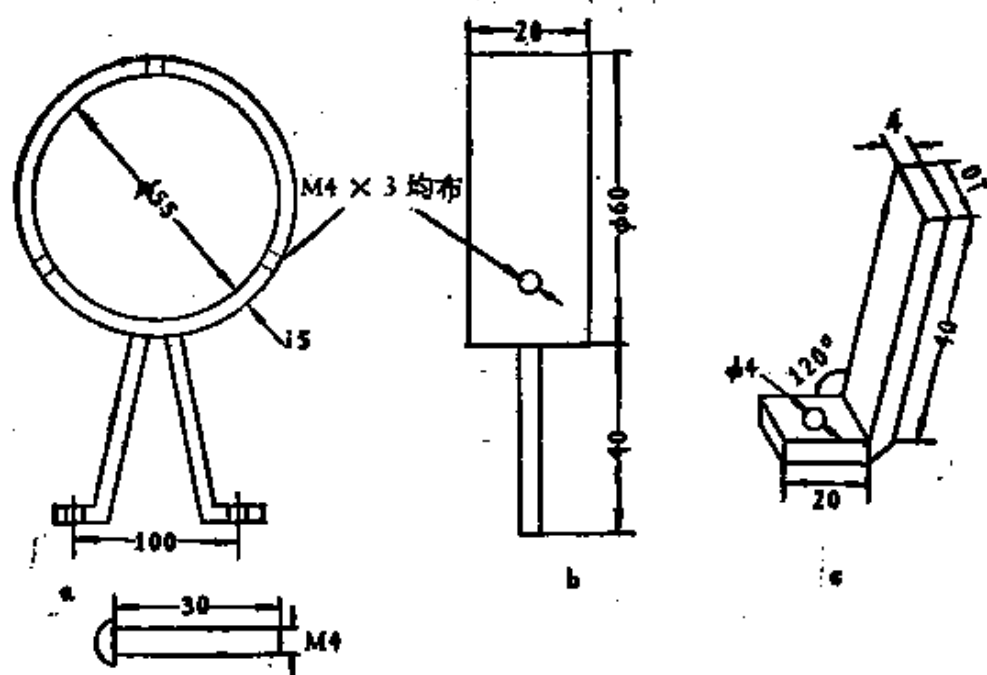


图 5.1-17 寻星镜支架

6. 镜箱及涂漆

镜箱是为了平时保护镜面，并存放有关零件及附件而作的。木箱的尺寸可根据不同情况进行加工制作。

零件制成后，要给镜筒内侧，目镜内侧等涂上黑漆。这起到吸光作用和保护铁板防止生锈。黑漆使用黑调和漆或清漆加黑颜色。一般涂两层，第一层为底漆，防锈漆也可作底漆，用清漆掺红土粉调和成，待干后，再涂层黑漆。阴干后方可组装及校准。

(二) 镜 架

工欲善其事，必先利其器。望远镜要达到理想观测效果，必须制作好些镜架。特别是进行天文摄影时尤其如此。镜架要求结构简单、稳固灵活。稳固是很必要的。一般望远镜视场小，如果不稳天体很容易因为颤动而从视场中消失，同时目镜放大作用使小颤动也放大了，无疑增加观测困难。

望远镜的镜架是建立在两根互相垂直的转动轴结构，它可以支撑镜筒，可以适当转动跟踪天体。望远镜的镜架分为两大类，一类为地平式，一类为赤道式。

1. 地 平 式

这是简单的双轴装置，它以大地为基准面绕大地转动，如图 5.1-18 所示。一个轴与地平线平行，称为方位轴；一个轴

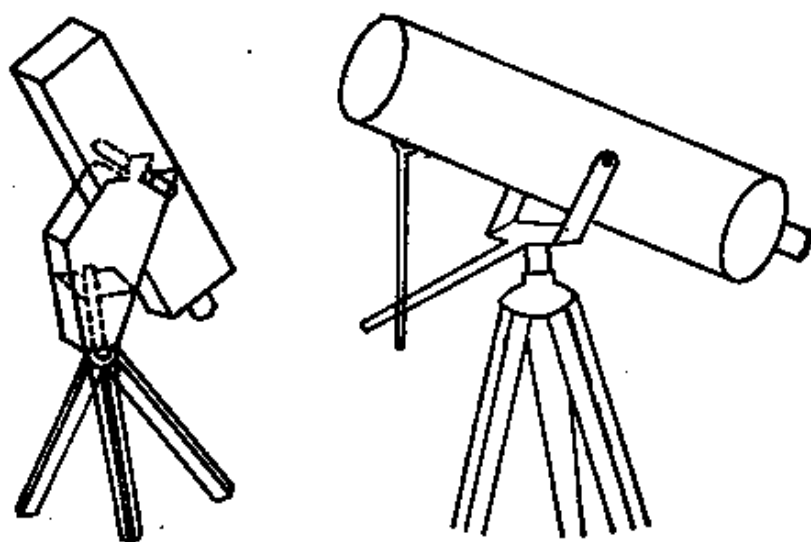


图 5.1-18 地平式

与地平垂直,称为高度轴。它的优点是比较稳固、制作容易。观测时先转方位轴,差不多时再转高度轴,一下子不能马上调准,反复调几次直到要观测的天体进入视场,到达中心为止。随着地球的自转看一会天体便从视场中消失,这样须再调节两个轴,把天体捕捉到视场中。这种装置使用不便而且它不能观看天顶的星象,即为天顶盲区。

2. 赤道装置

望远镜能够准确地跟踪天体是赤道式装置。它有两个轴,一个轴与地球的旋转轴平行,称为赤经轴(或极轴),另一个轴与它垂直,称为赤纬轴。图 5.1-19 表示望远镜放在地

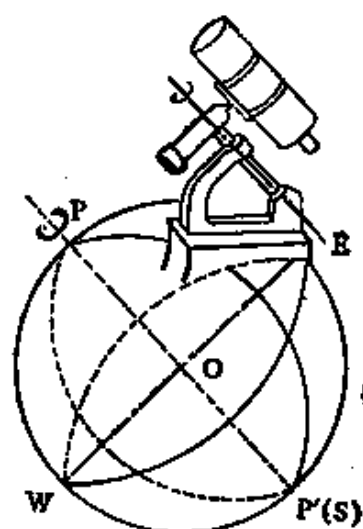


图 5.1-19 极轴平行天轴镜筒与赤经平行

球上观察时两个轴的情形。这种装置的优点是：(1) 只需旋转一根赤经轴便能跟踪天体。大家知道地球是有自转的，它以 30 公里/秒的速度自西向东转。我们观看的恒星认为是不动的，这样望远镜在地面上跟着地球自转使恒星便慢慢地从视场中消失。为保持恒星在视场中不消失，需要旋转望远镜的赤经轴，使它速率与地球速率相等且方向相反便能准确跟踪了。(2) 没有视场旋转。(3) 没有天顶的盲区，而这里大气折射最小，宁静度好。赤道仪种类很多，常用有如下几种。

(1) 德国式。这种装置是把镜筒按放在极轴的一侧，是非对称式赤道装置。它转动平稳，转动时依靠平衡锤的重量，保持与镜筒平衡。极轴受力小不产生很大的扭力。它运动灵活，回转半径大能指向天空中任何位置。特别指向天顶区域是它具有的独特专长。目前比较普遍地使用，制作也较容易。

(2) 英国式。英国式装置又称叉式，是一种对称式赤道装置。它主要省去外加的平衡锤用叉形装置代替。但它的缺点是赤纬轴离极轴的轴承处太远，受到镜筒对它的扭力较大，因而要求极轴必须坚固。同时它的稳定性较差。

(3) 美国式。美国式又称摇篮式，这种也是对称式赤道

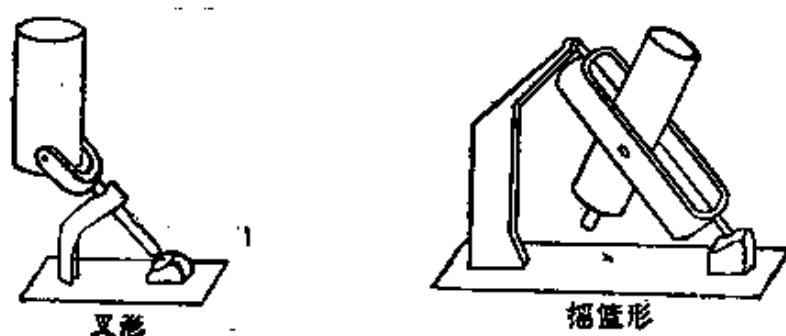


图 5.1-20 赤道装置的类型

装置。它克服了英国式的缺点，采用将赤纬轴置于二个轴承当中，但它的缺点是不能够把望远镜指向北极。

以上三种装置各有其特点，制作赤道仪时，要根据望远镜的用途及性能，还有制作具备的材料等加以选择。现在介绍一种简单的德国式装置。

3. 赤道仪的制作

图 5.1-21 是用一些废旧材料，经过简单的加工就能制作。制作的具体尺寸如下。

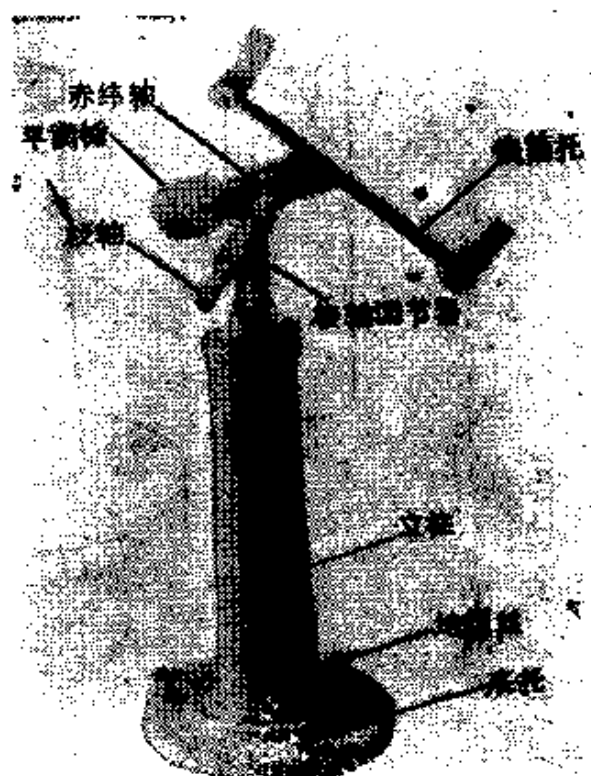


图 5.1-21 自制赤道仪

(1) 稳固的底托。望远镜观看时，需要底托稳固，不能晃动，这样人可长时间尽情观看。如果底托不稳则使镜筒易颤

动,那么观看者费很大气力而找到的天体,由于颤抖不能长久观察,弄得人心烦不快。

要使底托稳定主要有两个办法,一是增大接触面积,二是增加底托重量,目的是在于降低重心。如采用三脚架式和重底托均是为达到这个目的。

图 5.1-22 是底托的结构图。下托盘选用 300 毫米的大

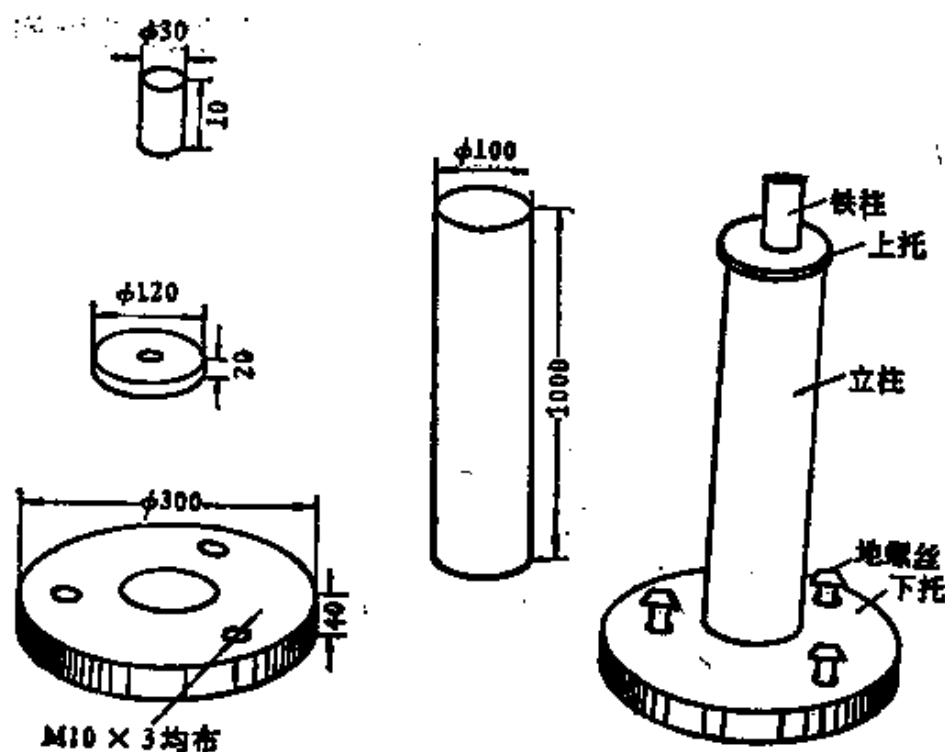


图 5.1-22 底托及尺寸

皮带轮,上托盘选用 120 毫米的皮带轮。立柱把二者联在一起,立柱选用 100 毫米左右的粗管截成 1 米高。在上托盘的上面焊上一个 30 毫米的生铁柱,用来与极轴架相联接。这几部分可以制成可折式也可以完全焊在一起。

这种底托由于底面沉,又因接触面积大,重心较低所以比较稳。为了调节水平下托盘还配上地脚螺丝。

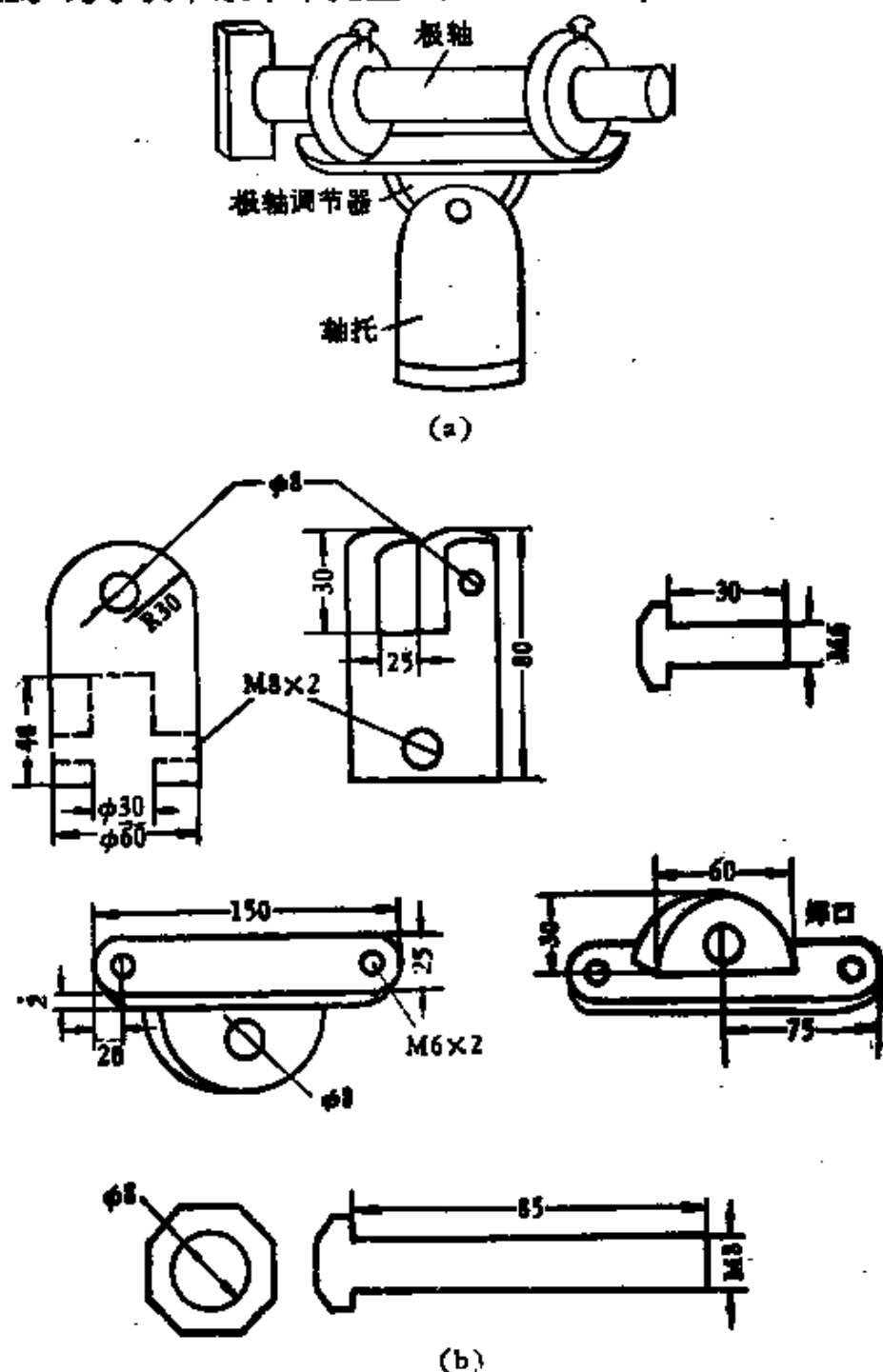


图 5.1-23 极轴组成

(2) 极轴。这是赤道仪的中枢，克服地球自转的影响主要靠极轴的反转。所以要求极轴转动灵活，并且在相同时间内所转的角度相同。转动时不能晃动，要保证望远镜转动平稳。制作精度要求高。但是业余制作者不能制成高精度极轴，只好制个“土极轴”。图 5.1-23 是简易极轴的外形。

轴托：它联接底托和极轴，上面安装极轴调节器，目的调节极轴与地平线的夹角。即等于观测地点的当地纬度。保证极轴与天轴平行。调节越准望远镜跟踪越准。

图 5.1-23b 是轴托的简单装置。它选用直径 60 毫米、长 80 毫米的生铁棒，中间车出孔 30 毫米、深 40 毫米，使其恰好放在生铁柱上。

在铁棒另一端，距离顶端 30 毫米处，锯个中心为 25 毫米的槽。把它锉成半圆形。在两侧钻 8 毫米圆孔。在底端两侧套丝 M8。并配好螺丝。

调节器。在轴托上有个极轴调节器，它是选取长 150 毫米，宽为 25 毫米的厚铁条。在其中心焊上一块半圆形铁板，此铁板恰好能放在轴托的凹槽中。制好后放在凹槽中与轴托同钻，配好螺丝控制极轴调节器的转动。

极轴制作，极轴要安放在调节器的铁板上。极轴选用 3 厘米的直径自来水管，取长 25 厘米。管子一定要直，如果有弯处要用小锤轻敲取直。有时还要在车床上走一刀保证轴直。

极轴放在轴套内，轴套是用生铁制成的。尺寸如图 5.1-23c 所示。一共要制两件。轴套中心安放极轴。轴套中心孔用车床车成，能把极轴放进并能转动便可以了。有时不够吻

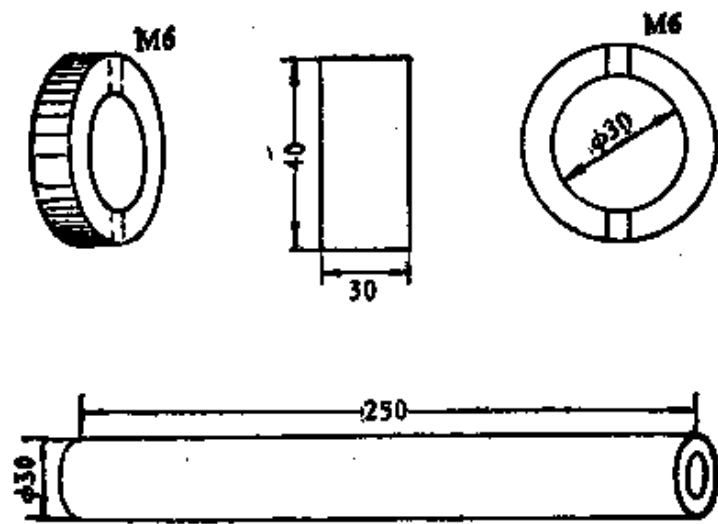


图 5.1-23(c) 极轴尺寸

合可用刮刀修削吻合为止。最后在轴套上方各攻一个 M6 螺纹，配上螺丝作控制极轴用。下方各攻丝 M6 把它安装在调节器铁极上。

(3) 赤纬轴的制作。赤纬轴的轴托比较简单，它选用三角铁直接加工。主要尺寸参照图 5.1—24 所示。为什么选用三角铁？主要原因是三角铁支撑力较大又不易变形。望远镜的镜筒及平衡锤诸力均加在赤纬轴上，为保证赤纬轴不发生弯曲，三角铁承受着主要力矩。另外三角铁也比较容易选择。三角铁最好选厚一些，并且两边的垂直度要精确，要用直角尺测量一下，如果垂直度不够一定要采取措施改正。否则影响精度。

轴套和赤纬轴的制作方法方法与极轴的轴套和极轴制作方法相同，一般按照图上所标尺寸制作即可。

赤纬轴与极轴的连接是把极轴的顶端焊在赤纬轴的轴托

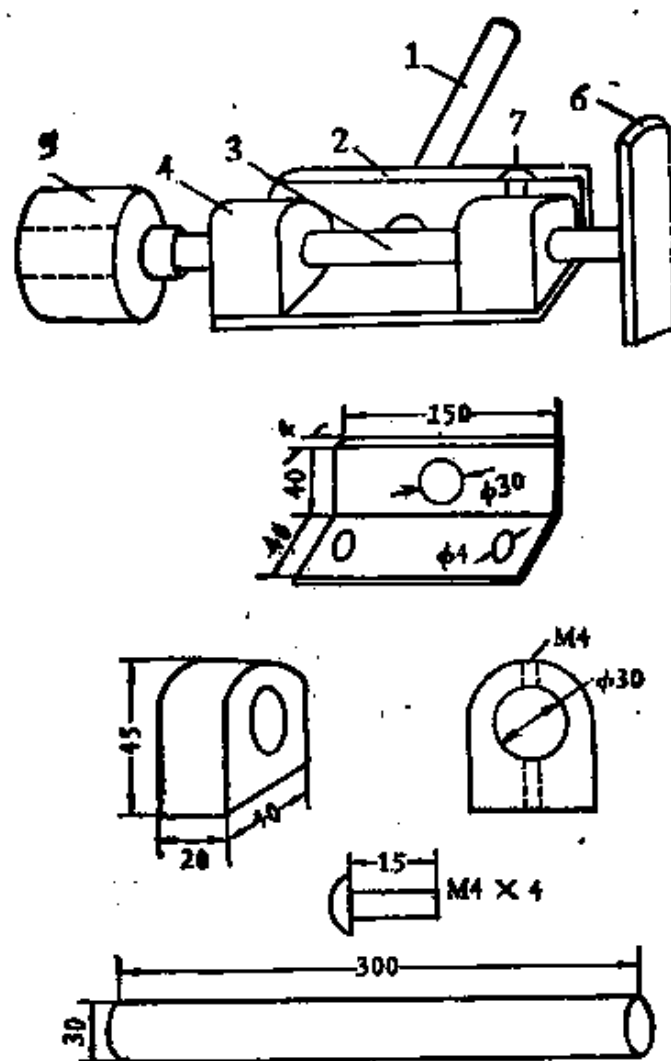


图 5.1-24 赤纬轴组成及尺寸

1. 极轴 2. 赤经轴托 3. 赤纬轴 4. 轴套 5. 平衡锤
6. 镜托 7. 紧固螺丝

上,焊时要注意二者一定要保持垂直。

(4) 平衡锤的制作。德国式的赤道仪突出的装置是有一个沉甸甸的平衡锤,以赤纬轴为中心,以它自重时刻与镜筒等保持平衡,而且不管望远镜旋转到任何位置均是如此。

它们的平衡是以极轴为中心,平衡锤产生的力矩与望远

镜产生力矩，二者恰好相等而方向相反，如图 5.1—27。用公式表示

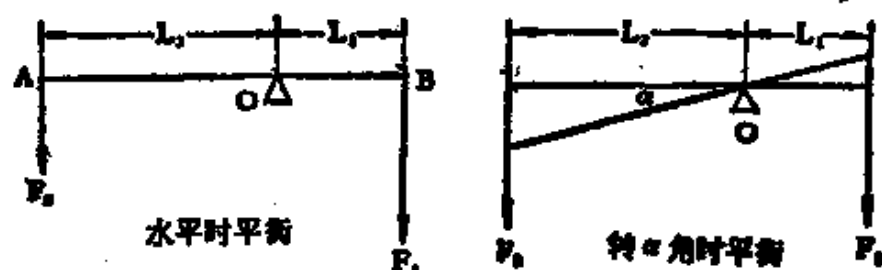


图 5.1—25 平衡原理

F_1 : 望远镜重量 F_2 : 平衡锤重量 L_1 : 望远镜力臂
 L_2 : 平衡锤力臂 α : 转动角度

即

$$M_1 = -M_2$$

$$F_1 L_1 = -F_2 \cdot L_2$$

式中 F_1 : 望远镜重量

F_2 : 平衡锤重量

L_1 : 望远镜到极轴间距离

L_2 : 平衡锤到极轴间的距离

望远镜制成后，望远镜的重量 F_1 可以称量出来，它距极轴的距离是固定的用尺可以测出数值，如果选择合适的 L_2 ，则平衡锤的重量便可由公式中求出。如 $F_1 = 15$ 公斤， $L_1 = 10$ 厘米， $L_2 = 15$ 厘米，则

$$F_2 = \frac{F_1 \cdot L_1}{L_2} = \frac{10 \text{ 厘米} \times 15 \text{ 公斤}}{15 \text{ 厘米}} = 10 \text{ 公斤。}$$

计算后平衡锤的重量是不计赤纬轴的重量的，严格来讲这是不准确的，有时为了观测的需要，望远镜需要加一些辅助

装置,这样因望远镜重量的变化,影响了平衡,为了克服这样的额外变化,一般采用调整平衡锤在赤纬轴上的位置,使它不断地保持与望远镜的平衡。

平衡锤一般制成圆柱形,在中心处穿孔把它插入赤纬轴上,如图 5.1-26。为了调整平衡锤的位置,最简单的办法在

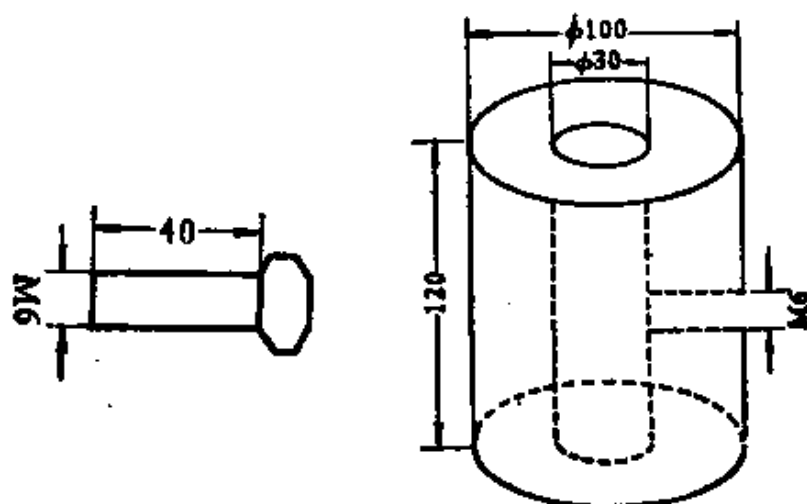


图 5.1-26 平衡锤

平衡锤的中部钻孔套丝 M6 的螺纹。配上螺丝,待调定合适位置后,把螺丝拧紧即可。

(5) 镜托。望远镜的镜筒要固定在赤纬轴顶端,镜托位于赤纬轴的顶端,并且与它垂直能托住望远镜,使望远镜与赤道仪形成统一整体,由于赤道仪的转动,望远镜可以任意指向一定天区。

镜托选用长 20 厘米,宽为 3 厘米,厚度为 4 毫米的铁板。在它的两端各焊上扣环。如图 5.1-27 所示。

为了使用时方便,望远镜筒拆卸方便,扣环可制成合页式

(如图 5.1-27b)。

制作方法如下：把两个铁片按照图 5.1-27c 所示尺寸，在顶端剪去缺口，再选一个大铁钉，把剪得的部分，用铁钉卷成小圆柱，把圆柱串在一起形成合页扣环。另一端各弯成直角，钻 6 毫米孔，配好螺丝，直角锉成圆弧形。制成的扣环分别焊在铁板两端，则镜托即已完成。

底托、极轴、赤纬轴、平衡锤及望远镜等制成后，把它初步组装起来，检查一下是否合适，然后进行改正直到合适为止。

(三) 时角盘、赤纬盘的制作

寻星镜只能找到目视观测到的恒星，而对那些暗弱星体，特别是星云，那将是无能为力的。即使是找到了恒星，它在天球哪个位置也无法确切知道，所以天文望远镜一般要借助于时角盘和赤纬盘。时角盘是固定在极轴上的；赤纬盘是固定在赤纬轴上的，在它上面均有一定刻度表示天球中的赤经和赤纬。寻找一颗星，先要把它的赤经换算成时角，然后在时角盘上表示。同时还要把它的赤纬在赤纬盘上表示。也就是恒星在天球上的位置表示出来了。这样在望远镜的视场中便能观看它了。这种方法是常用的科学方法。

赤纬盘和时角盘分为平面式和轮缘式。如图 5.1-28 所示。

每个刻度盘上分为不同刻度。赤纬盘分为 360° ，最小单位为 1° 。在盘上的标度可以按照象限标明： $0^\circ-90^\circ, 90^\circ-$

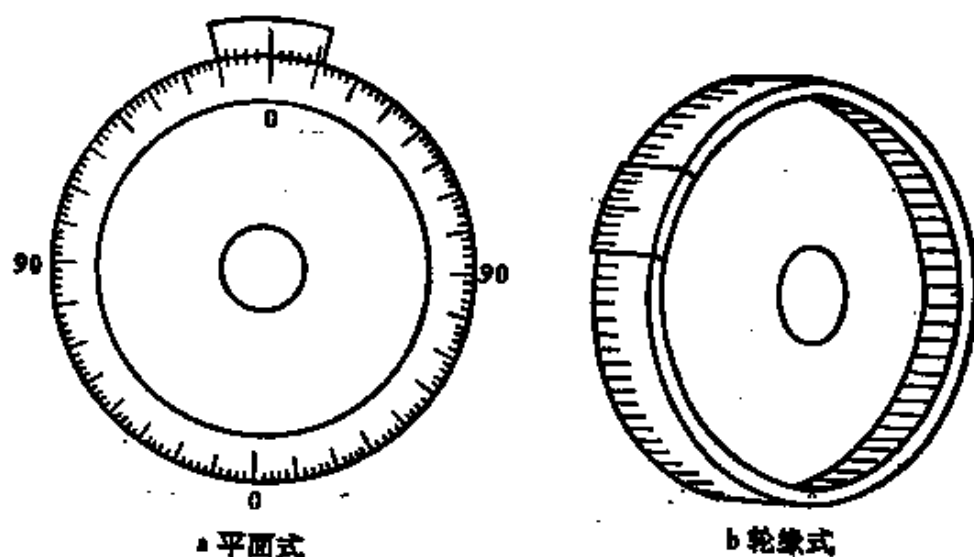


图 5.1-28 赤纬盘和时角盘

0° ; $0^\circ-90^\circ$, $90^\circ-0^\circ$ 。对准赤道面上的恒星时度盘为零度, 即 $\delta = 0$ 。这种方法使用很方便。为了提高刻度的精度, 往往还配上副盘游标尺。它的刻度是取主盘 11° 的长度, 把它分为 12 个格, 每一格定为 $11/12$ 度。即主盘上 1° 与副盘上一格的角度相差为 $1/12$ 度, 近似 $10'$ 。如图 5.1-29a 所示。如果某个恒星赤纬为 δ_x , 在赤纬盘上标出 δ 多一些。即

$$\delta_x = \delta + \Delta\delta$$

$\Delta\delta$ 则读数为游标尺上的刻线与主盘上刻线相对齐时, 游标尺上的数值。图 5.1-29a 指示出的 δ 为 $56^\circ 10'$ 。

时角盘的刻度为 24 小时, 从子午面上的星时开始, 刻度为零, 向东为负(-)向西为正(+), 盘上刻度由 $+6^h$ 到 -6^h 。每一小时为 15° , 再分成六格每一小格为 2.5° 。即为 10 分钟。共刻 244 个格。为了提高精度也要配上副盘游标尺。它的刻度是这样划分的。即游标尺上 10 个格等于主盘上刻度

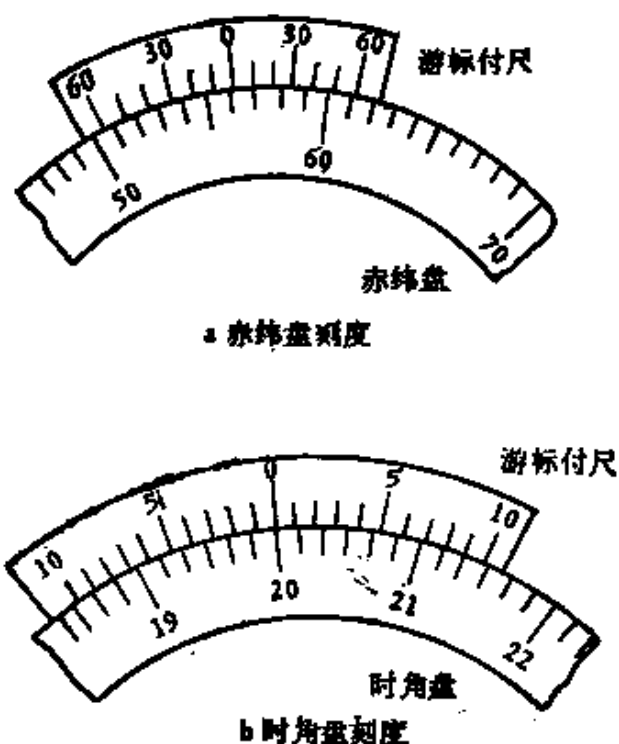


图 5.1-29 刻度

90 分的长度。每一格为 9 分如图 5.1-29b 所示。如果知道某恒星的赤经 α ，首先换算成极轴度盘上时角 t 的数值。由公式：

$$t = s - \alpha$$

式中 s ：观测时的恒星时。

t ：时角。

式中可看到只有知道 s 后才能求出 t 值。测 s 的数值方法是这样的。在未观测前先找一颗容易辨认比较亮的恒星，在它即将过子午面时，我们从天文年历上或其他资料查找它的 α 、 δ 值，用未上发条的钟或表拨到该星的 α 值。转动望远镜赤纬轴至该星 δ 。极轴转到子午面即 0^h 时，恒星快到子午

面用目镜监示。当星在视场中过中心的一瞬间使钟表走动,这时钟表指示的就是恒星时了。它在短时间内应用是可以的,但是到了第二天就与正确的恒星时差了约 3 分 56 秒,要加上这一改正量才能应用。当我们欲观测的天体其 $\alpha > s$ 时, t 值为负即该天体在子午线以东,如果 $\alpha < s$ 时, t 值为正,天体在子午线以西。用这一方法我们就可以很快的用度盘在望远镜中找到要观测的对象了。时角的读数,也是游标尺上的刻线与主盘上刻线相对齐时,在游标尺上的读数。

赤纬盘的制作:

(1) 水平式。选取厚 5 毫米,直径 120 毫米的有机玻璃或塑料板。找好圆心,再取一个量角器及直尺,然后把量角器的圆心及直尺一端与有机玻璃的圆心固定在一起。如图 5.1-30 所示。再取一个尖针,细心准确地把度数画在有机玻璃盘上。副盘游尺选择有机玻璃比主盘直径略为大一些,它不必

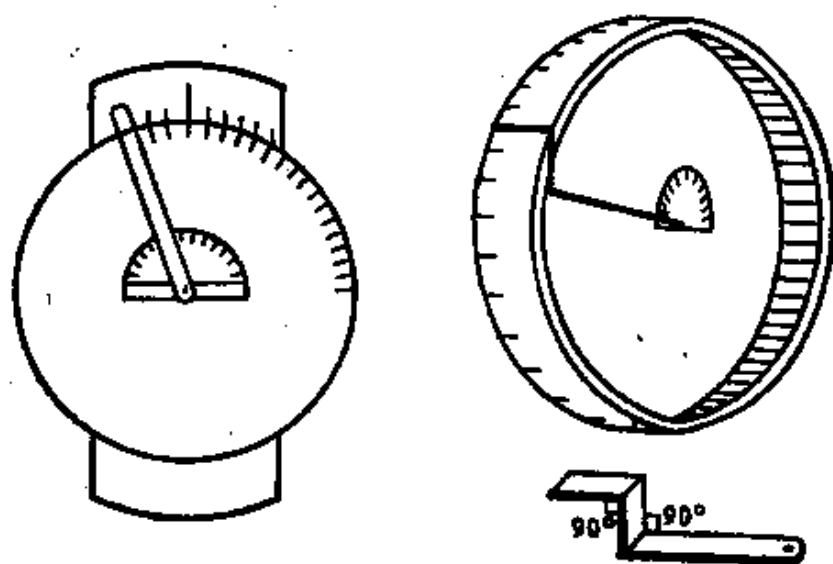


图 5.1-30 刻度盘的制作

用圆盘，只需要一个长条即可。在游尺上标出刻度。这些刻度必须事先细心地把主盘上 11° 化分为 12 分，然后刻在游尺上。

(2) 轮缘式。选取与水平式相同直径的主盘，在主盘四周要围一圈有机玻璃条(长 377 毫米、宽 10 毫米、厚 5 毫米)。有机玻璃条用酒精灯慢慢加热弯成圆形，恰好绕主盘边缘而合在一起，再用 502 等粘合剂把它粘牢。刻度方法与水平式一样，先在主盘上标出 360° ，再用自制直角弯尺把刻度转刻在轮缘边上(如图 5.2-30b)。

时角盘的制作：首先选取直径 10 厘米的有机玻璃，制作方法与赤纬盘相同。只不过度盘不用度数表示，而用时角表示。我们可以把量角器上的角度换算成时角。把每 15° 定为 1 小时，所以 360° 共分 24 小时。每小时内再分六格：即 2.5° 为 10 分钟。刻线的方法与制赤纬盘方法一样。

制成后的赤纬盘和时角盘分别固定在赤纬轴和极轴上。而每个副盘游标尺均固定在它们各自轴套上。

二、望远镜的校准

按照要求把零件制作出来，并且组装完毕之后，并不能马上使用，需要经过耐心细致地校准。校准工作包括两部分，一部分是校准光路；另一部分是校准赤道仪，即把每个部件校准在正确位置上。这个工作要经常进行，特别是容易变动的零件，每次观测时均要作一次校准。

(一) 主、副镜光轴一条线

先把副镜安在镜筒上，主镜和目镜暂不安装。从镜后用眼观看副镜是否垂直。眼睛看时一般不准，我们可以取一个灯，把它放在镜筒后端的中部去照射副镜，这时用眼观看灯在副镜象的位置，不断地调节副镜使灯缩小的象位在副镜中心为止。这说明副镜位置基本准确了，把副镜固定好再调主镜。

把主镜安装在镜筒后端，这时通过目镜接筒观看副镜，并不断地调整蝶形罗母，使主镜和副镜的反射象同心。图 5.2-1c 说明望远镜的物镜光轴基本上校准了。

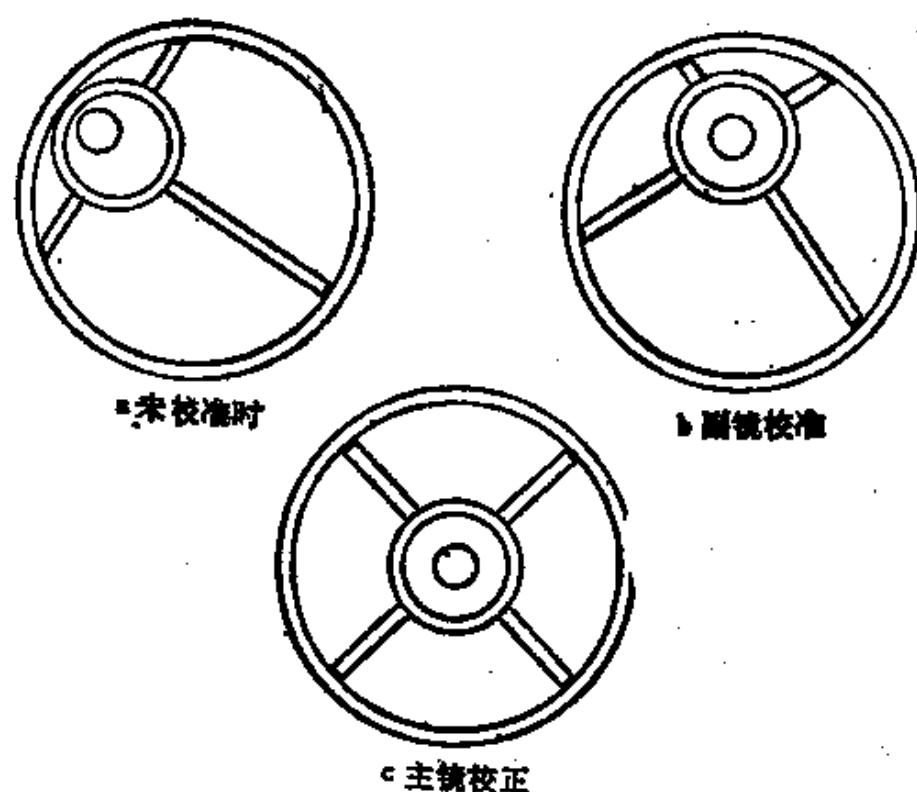


图 5.2-1 校准主副镜

望远镜主、副镜的光轴一定要细心调准。否则光学系统不能成象。调准光轴可以在晚上，直接观看天体来进行。例如对准月亮进行调准。如果从目镜接筒直接用眼睛观看，望远镜中看不到月亮象，这说明光轴和镜面均没调好，需要调节主镜和副镜的垂直度及镜间距，一直调到看到清晰的月亮象，说明光轴已调好。这时移开眼睛，拿一张白纸作屏，在镜后寻找月亮的象，如果在镜后不远处能找到缩小倒立象，说明光路完全调好。如果纸屏看到月亮象离主镜框太远，则要使副镜平移远离主镜，如果纸屏象离主镜框太近，甚至就在主、副镜间，也要平移副镜靠近主镜，即减少间距。如果副镜不能平移可以改变主镜上的三个弹簧而达到调整的目的。最后调准为止。这种校准要经常进行。特别每次搬动均会影响光路，更要经常校准。

(二) 寻星镜校平行

寻星镜作为主镜的亲密伙伴，它是协助主镜寻找目标的，如果寻星镜的光轴不与主镜光轴平行，那是无法起作用的。因而必须把两个光轴校准成平行。

把调好光轴的物镜系统，安上目镜观测远远的固定目标。观看时最好选用高倍率附有十字丝的目镜，让目标恰好位于十字丝中央。白天目标可对准高楼上的旗杆，晚上可对准街灯。对准后固定好望远镜，松开寻星镜螺丝，用寻星镜同样寻找望远镜中的目标，使它也位于寻星镜中央，这时紧固螺丝固

定住寻星镜,再转动一个方向,用寻星镜寻找一个目标,再看望远镜中目标是否在视场中,如果视场中有目标,说明望远镜的光轴与寻星镜的光轴相互平行。调整光路便基本结束。注意所选目标愈远,校正光轴平行性精度愈高。

(三) 赤道仪的调准

赤道仪装置需要认真调准才能充分发挥它的作用。对于经常搬动的望远镜,只作短时间观测,调准要求不十分严格,它的调整方法是把望远镜固定在一个位置上,先把极轴调节器的角度粗调等于观测地点纬度(例如北京 $N40^\circ$)。把望远镜转到和极轴平行,转动机座使极轴指向北极星,这时用望远镜观看,如果北极星恰在视场内,说明极轴与地轴平行。看不见就说明二者不平行,则需要细心地转动极轴的调节器,直到看到为止。

作长时间观看时,或拍照弱星体,望远镜必须作精确调准。先将望远镜的极轴大致放在子午面内,并让极轴近似地对准北极星,将望远镜任意对准一颗星,使用有十字丝强倍率的目镜观看恒星,对准后转动极轴,这时这颗星就会在视场中经过一个轨迹,然后转动目镜使十字丝其中的一条与星的轨迹相重合。以后我们把望远镜对准子午线附近的任何一颗星,使它位于视场中央,固定住望远镜,经过一段时间,星体就会慢慢移动,细心观看恒星在视场内移动情况。

图 5.2-2a 中看到恒星总是沿着一个十字丝移动,而不

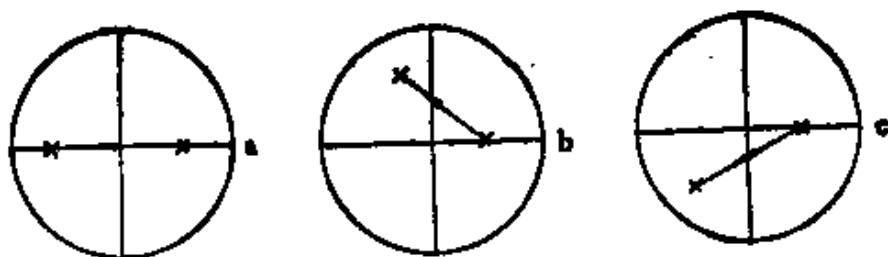


图 5.2-2 校准

离开它,方向从右到左,因为望远镜呈倒象,实际上是从左向右移动,这说明极轴位于子午面上已经校准了。

图 5.2-2b 中恒星移动的路线和水平丝成一个向上的交角,说明极轴不在子午面上,极轴方向略偏向东,这需把极轴北端向西移,即反时针方向转动镜架。

图 5.2-2c 中表明恒星移动方向和水平丝有向下的交角。极轴偏西,则使极轴顺时针方向把极端的北端向东移动。

这样工作进行三次均能达到图 5.2-2a 的情况,说明极轴已调准在子午面上。但是极轴对地的倾角,不一定等于当地纬度,即极轴不一定平行于地轴,需要再调准极轴的倾角。

我们选取东西比较近地平之星,先让它位于目镜视场中心,再观看恒星移动情况。(1)恒星沿着一条十字丝走动,说明仪器调好。(2)恒星在视场中的移动路线和十字丝成向上的交角,说明极轴偏低,此时调节极轴的北端,使它略为抬高,增大和地平线的倾角。(3)恒星在视场中的移动路线和十字丝成向下的交角,说明极端偏高,再调节极端北端,使它略为降低,减少与地平线的倾角。

用上面的方法,重复几次,极轴的位置慢慢地调到正确的位置。以后在观看恒星时,只要使极轴一定旋转,视场中的恒

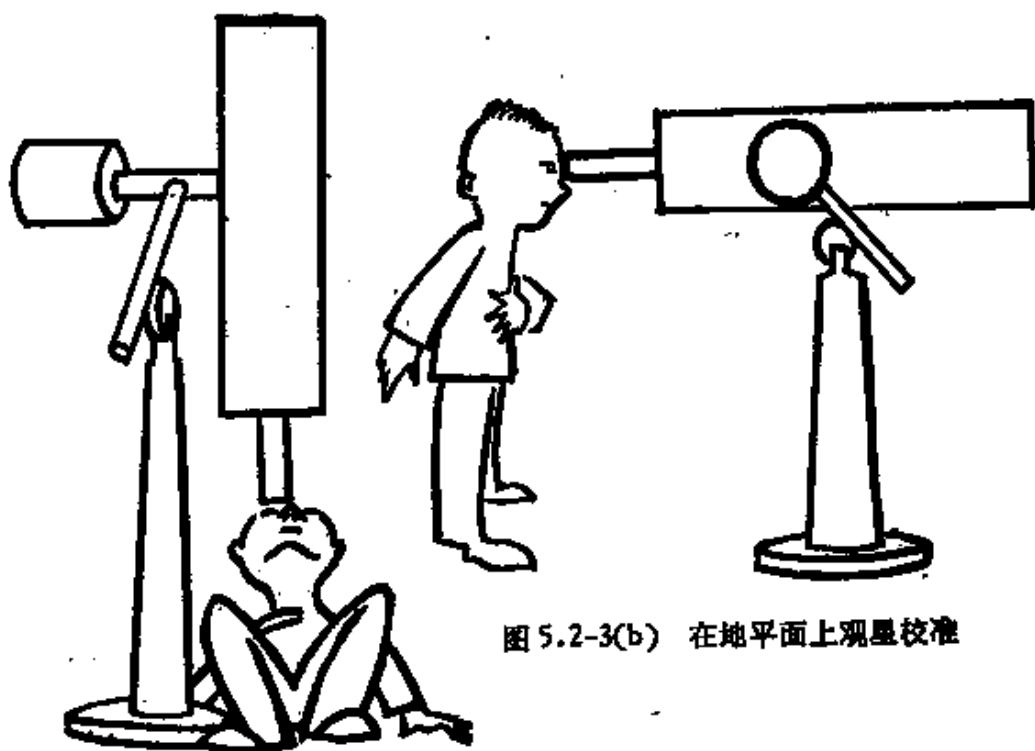


图 5.2-3(b) 在地平面上观星校准

图 5.2-3(a) 在子午面上观星校准

星就始终不断地被跟踪了。

赤道仪调好后，把时角盘和赤纬盘的 0° 对好后并固定住。以后望远镜不宜经常搬动，如果搬动了，使用前均要认真调准。

第六章 转 仪 钟

为了准确地自动跟踪天体,在赤道仪上安装一个转仪钟,它控制着极轴与地球自转的速度相等,并且方向相反。我们知道地球自转速度为 23 时 56 分 4 秒(即 86164 秒)转一周,那么,转仪钟要保持上述速度,使望远镜约 24 小时转一周 360° ,而且要求转动均匀、平滑,始终一致。这样望远镜必须配备较复杂的转仪钟。这对爱好者来讲困难较多。从另一个角度来讲,转仪钟作的再好,也不可能跟踪特别准。原因有两个,一个是我们眼中所见的恒星是通过浓密的大气层,由于空气对光的折射作用,总使看到的恒星与它真实方位产生差别。这种由大气造成的差别叫做大气差。另一个是空气的密度各处不同,在地平处密度大,天顶密度小,因而对光的折射程度不同。光线入射角为 90° ,即从天顶方向而来则无折射现象,入射角为 0° ,即由地平射来光线折射现象最大。平均达 $35'$,这种原因造成星体的不均匀性。使人误为它经过子午线时最快,在地平时的速度最慢。如图 6.1-1。所以不管多么精密的设备,也必须人工与转仪钟相互配合,需要经常用低倍率的寻星镜瞄准星体,并不断地调整跟踪速度。

由于转仪钟推动力的不同,又分为重力转仪钟和电动转仪钟。

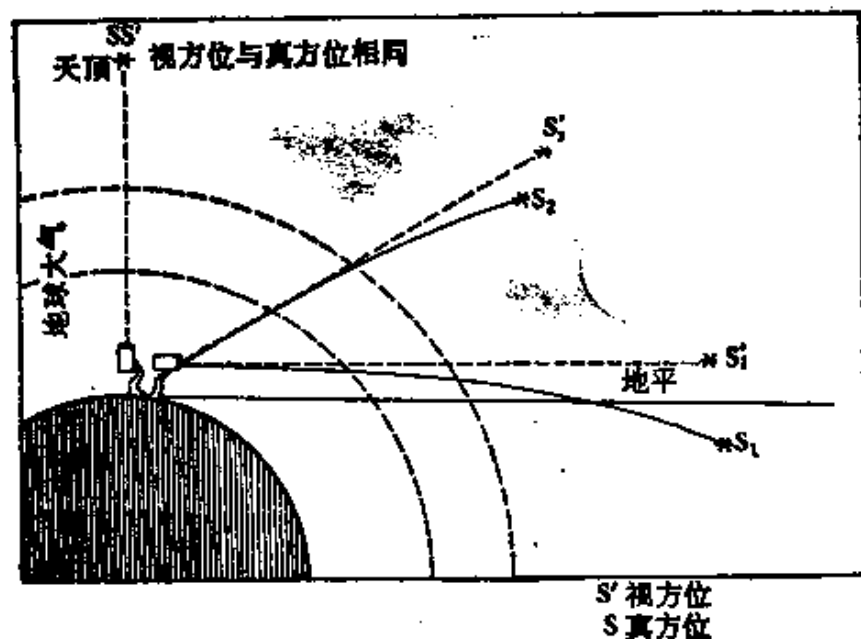


图 6.1-1 大气差

一、重力转仪钟

时钟哒哒响,重锤徐徐降;极轴缓步行,星笑在中央。这是说利用重锤向下的重力作拉力,用时钟的机件作变速控制极轴转动的速度,这样的装置叫做重力转仪钟。

图 6.1-2 所示它的基本原理图。在极轴的前端安装一个直径较大的皮带轮(或涡轮),皮带轮的顶点安个螺丝,在 A 点向下有一条钢片使它固定在皮带轮上。钢片下端与三角杠连接,三角杠通过支点均固定在立柱上端,在三角杠的下端连接一个长齿条,最下端连接一个重锤。要使极轴旋转就把钢片与皮带轮固定好,重锤下降的速度受时钟控制达 15'/分。它利用发条与齿条相互咬合传动。

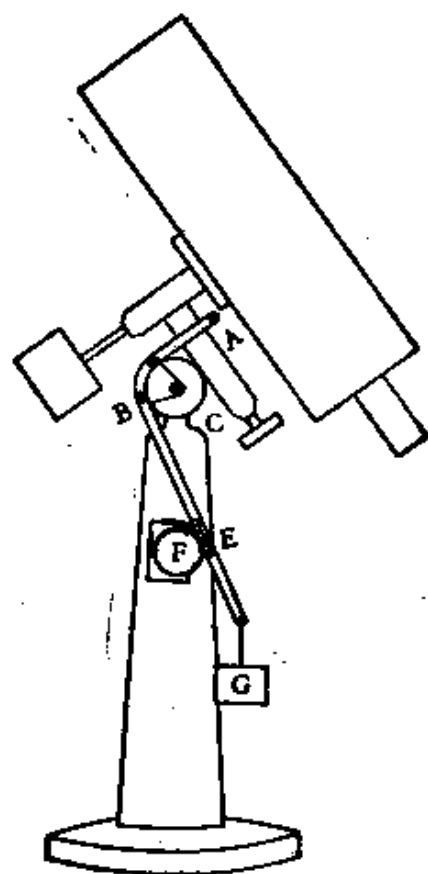


图 6.1-2 重力转仪钟

A. 钢带 B. 三角杠 C. 支点 D. 齿条
F. 时钟发条 G. 重锤

制作时皮带轮的直径以及时钟转动比速与重锤的重量根据一定条件去设计。齿轨可根据时钟传动的齿轮参数自行锉制。一般业余条件能跟踪半个小时也就可以了。

二、电动转仪钟

为了能长时间的跟踪天体，极轴的旋转动力改用电动机来带动。但是一般电机的转速均较快，而极轴转速又很慢。如

电机转速 $n = 3000$ 转/分, 用角秒表示 $n = 64800000'$ /分。地球自转速度 $n_{\text{地}} = 0.25^\circ/\text{分} = 15'/\text{分}$ 。由上看到, 它们的转速相差多么悬殊呀! 所以必须用齿轮传动系统, 逐级将速度减慢, 以达到与地球转速相同如图 4.1-3 所示。它的原理是根据齿转传动速比公式

即

$$n_n = \frac{Z_1 \cdot Z_3 \cdot Z_5 \cdots Z_{n-1}}{Z_2 \cdot Z_4 \cdot Z_6 \cdots Z_n} \cdot n_1$$

式中 n : 转速

Z : 齿轮齿数

公式说明, 最后一个齿轮的转速, 等于第一个齿轮的转速乘以各主动轮齿数的乘积, 除以各被动轮齿数的乘积。如采用五级传动用 10 个齿轮 (见表 6.1-1) 变速, 最后一级的转数应为:

$$n_n = \frac{1 \times 1 \times 27 \times 72 \times 1}{72 \times 50 \times 80 \times 81 \times 360} \times 64800000'/\text{分} \\ = 15'/\text{分}$$

级	主动轮齿数 Z	被动轮 ₁ 齿数 Z	备 注
I	$Z_1=1$	$Z_2=72$	蜗杆齿数为 1 对应齿 轮为蜗轮 Z_1 固定在电机转轴 Z_{10} 固定在极轴
II	$Z_3=1$	$Z_4=50$	
III	$Z_5=27$	$Z_6=80$	
IV	$Z_7=72$	$Z_8=81$	
V	$Z_9=1$	$Z_{10}=360$	

用此套齿轮传动, 基本上与地球自转速度相等, 用图 (6.1-3) 的装置, 使它与地球反向转动就能长时间跟踪天体运

动。

设计电动转仪钟，首先选择适当的电机。这包括电机种类，功率及转速等。小型望远镜转动时消耗功率不大，一般选择 25W—50W 的。转数原则上越慢越好，转速慢的电机变速时较容易。如选用 1400 转/分的电机，经过四级变速就可以达到跟踪的目的。电机的种类选择一般选用交流同步电机。

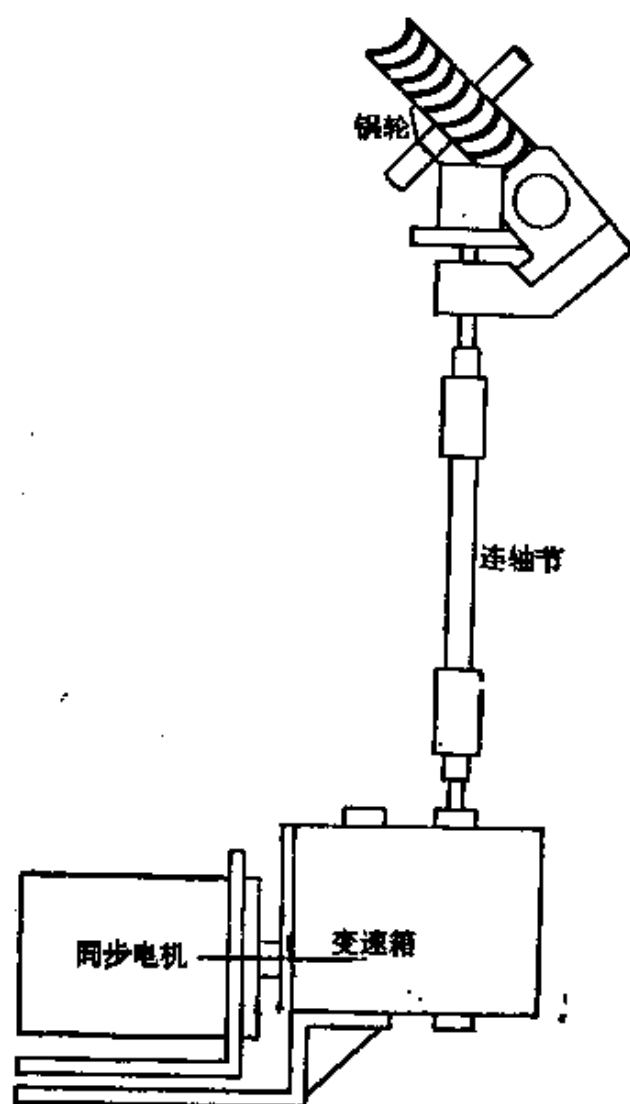


图 6.1-3 电动转仪钟

它的特点是转速均匀,长时间跟踪比较准确,产生误差小,但它初级转速较快,变速过程制作复杂。近来有的望远镜选择力矩马达,它是通过一定控制系统使电机速度发生变化,用以取代复杂的机械传动装置,使用方便,准确性高。但是,它的控制系统复杂造价高。对业余天文爱好者来说,制作或选择异步电机比较容易,成本低。但是,它在工作时转速不均匀,长时间跟踪误差较大,需要用人工经常调整。

第七章 小型天文台的设计

望远镜校准后进行观测,最好固定在一个地方观看,经常搬动影响观测效果。这就需要建立一个小型天文台。小型天文台建立不仅有固定观测地点,还可以保护望远镜。同时也避免在外面观测时,镜筒周围引起的空气湍流现象,这种湍流现象直接影响观测。

天文台的建立要选择合适的地方。由于爱好者选择台址的条件有限,只有在可能条件下选择合适的地方。在城里台址选择越高地方越好,一般有平台的楼顶比较理想。它登高远望视野开阔、繁星纵览,干扰不多。其次平房顶也可以,但注意周围房屋要低些,周围开阔,树少灯光弱。附近有大工厂,最好离远些,防止机器震动及灰尘影响观测。

天文台的台顶种类很多,常用的有圆顶式和方顶式。

一、圆顶式

圆顶室是各天文台站观测主要结构,圆顶是天文台的象征。它有许多优点:圆顶结构占地面积少,观测方便,圆顶能够用电动或手动使其旋转运动。圆顶上天窗可以随时开启或关闭,使望远镜能指向任意天区,活动范围广。但是制作一个

现代化大直径的圆顶室投资大,技术复杂工艺难,要求较高。可是爱好者使用的望远镜均比较小,制作一个直径较小,结构简单还是可以的,同时因陋就简方便实用的圆顶室成本也不高。图 7.1-1a 是一种简易圆顶室的结构。

(一) 圆 顶 结 构

天文台的圆顶要放在四周用砖砌成的圆形围墙上。围墙上铺放着用工字钢制成的圆形轨道。圆顶是采用木制结构为主,下面利用小轮可以沿着轨道进行旋转。上面天窗观测时可以打开,观测结束时可以关闭。圆顶的直径大小主要依据望远镜在其内转动的区域以及观测者在顶内活动的范围来决定。如图 7.1-1b 所示。

(二) 顶 架 制 作

顶架是圆顶的骨骼,它支撑圆顶上的顶面形成一个整体。为了使圆顶能经久耐用,减轻重量,顶架采用大板条和扁钢等材料制成。图 7.1-2 表示一种简易顶架示意图。

圆顶底采用扁钢,制作时可先选择一块平坦的地面,画出底部图形,计算好尺寸截好料,用冷加工的办法把它慢慢加工成圆形。接口处用电焊焊牢。为了使它能在底托上旋转,在底圈上还需要焊接四个小轮或安装四个轴承。各支架用长木条制成。这些木条长短根据设计尺寸及形状要事先画好,再

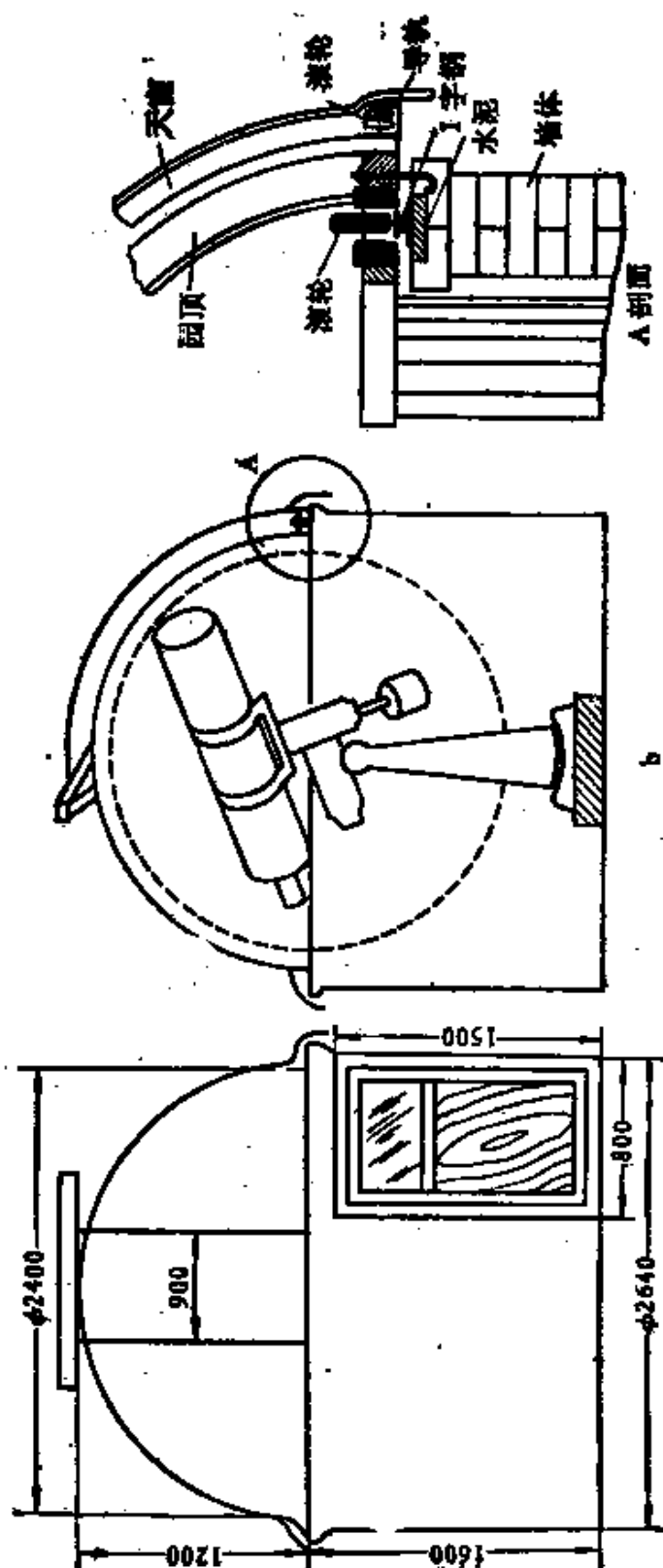


图 7.1-1 圆顶

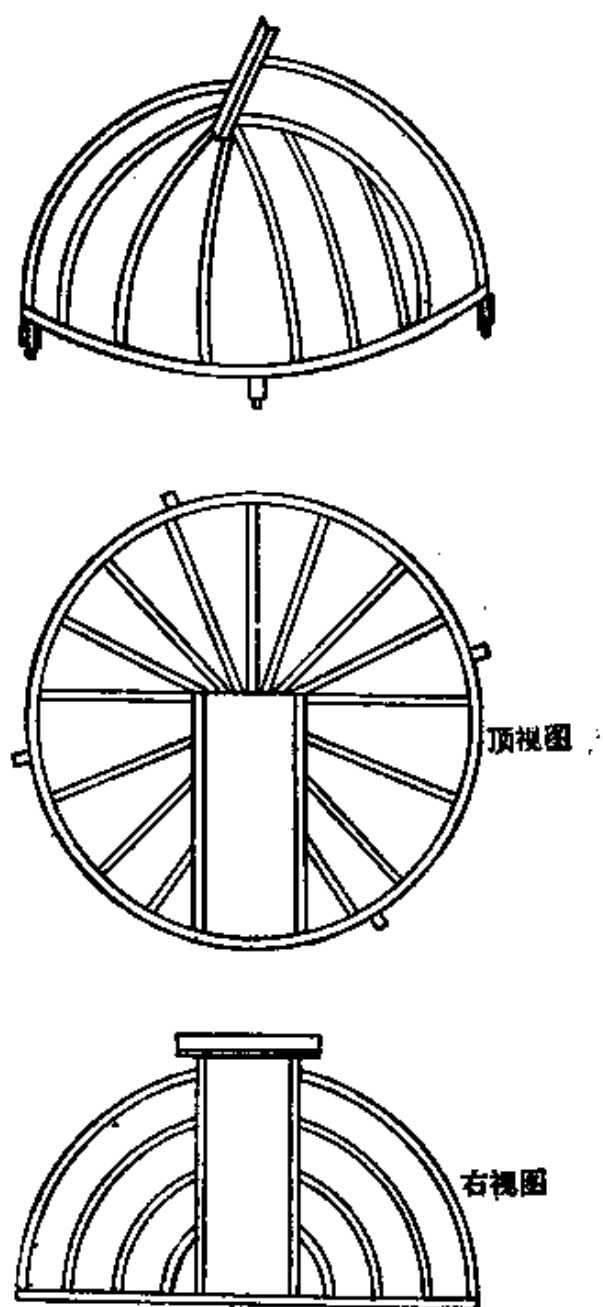


图 7.1-2 圆顶骨架

用锯把它锯好，锯好后的长木条把它组合在一起成为顶架。

(三) 转动灵活、表面光滑

圆顶转动是靠顶架上四个小轮，沿着围墙上圆轨道自由旋转。窗门是用薄三角铁焊接，焊接的形状与窗口形状吻合，使它启动灵活，推拉不费力。安装时注意防止漏雨。

圆顶面上要铺放三合板和铁皮。它们是被紧固在骨架

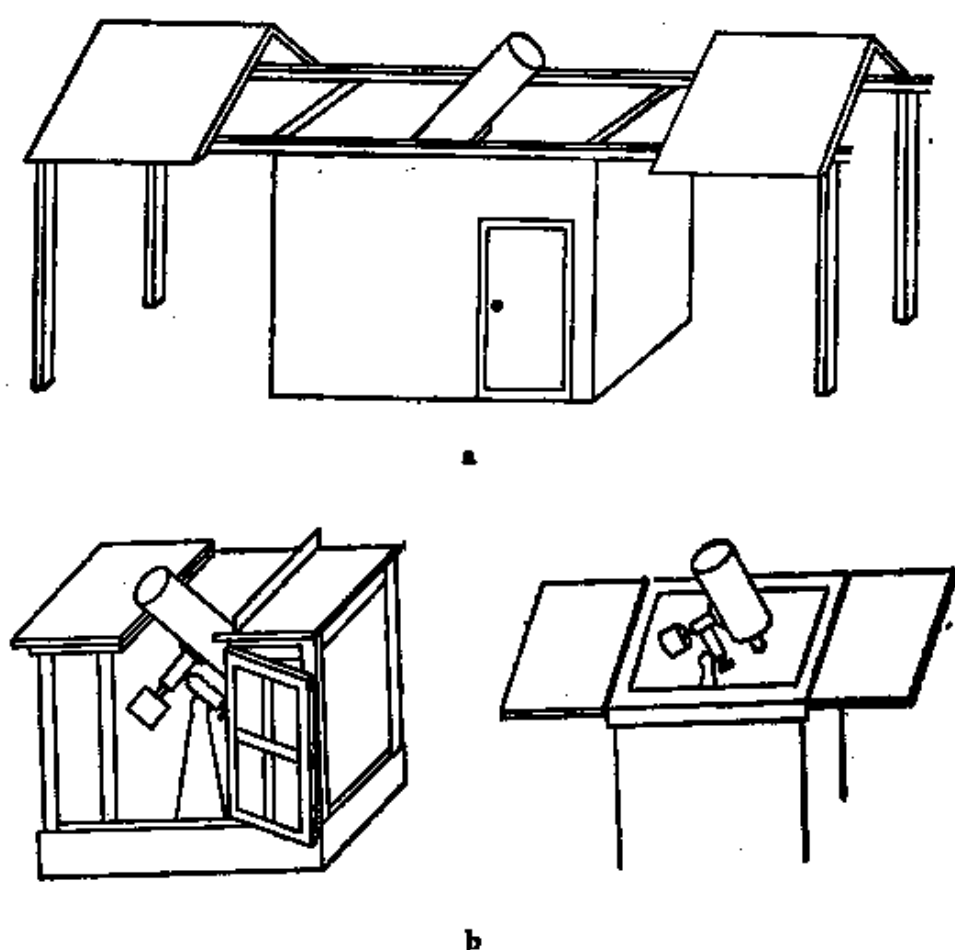


图 7.1-3 二段拉顶式与天窗式
(a) 二段拉顶式 (b) 天窗式

上。制成的圆顶表面要尽量平滑美观。为防雨水和减少太阳辐射,在其表面涂上银粉。

圆顶室内中心处,砌上一个水泥平台,以便平稳地安放望远镜。

二、方 顶 式

方顶式从外表看就是有脊的普通房顶,但这个房顶可以移动,使里面的望远镜可以观看天空。这种方顶制作容易,成本低在天文台站中也广泛应用。房顶移动有的是整体平移,有的是从中间分两段分别向相反方向移动,我们称为二段式。这些移动是在底座上的导轨上面移动,因此它只能大开大关,所以占地面积大,房顶大则移动笨重。方顶结构简单易行,造价低廉又是爱好者最容易制作的一种结构参看图 7.1-3。