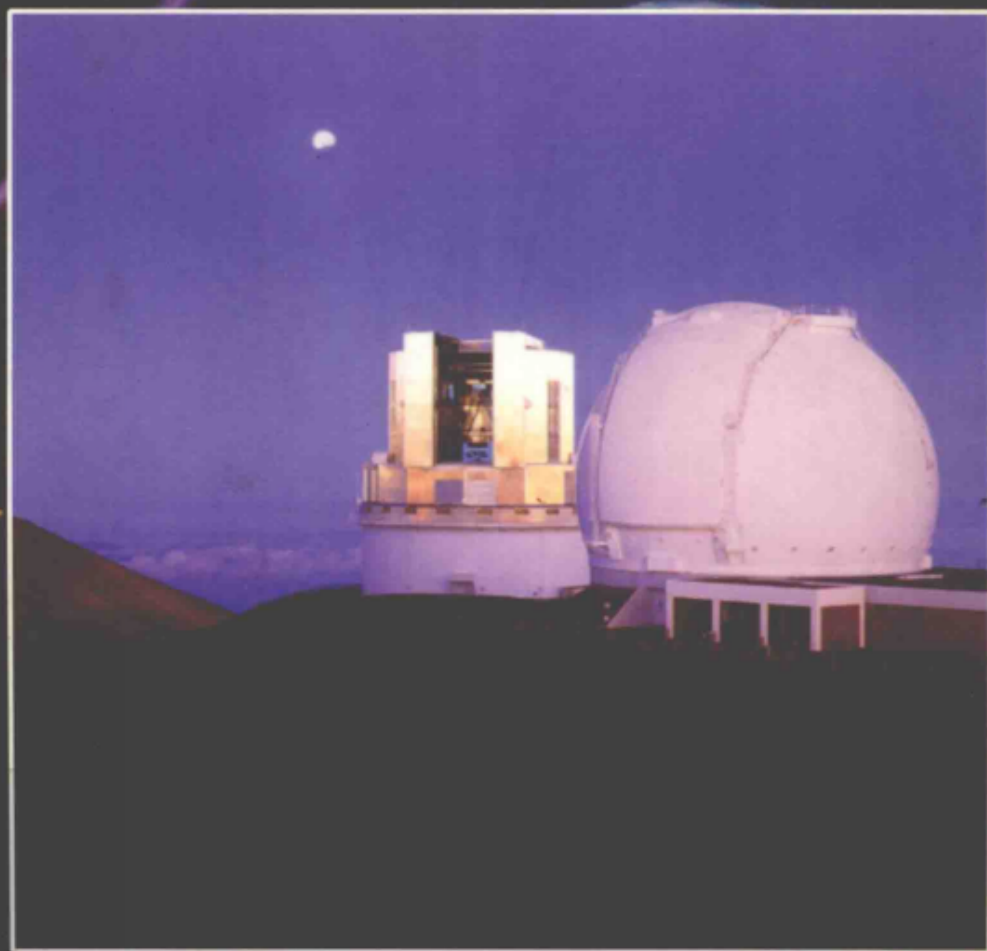
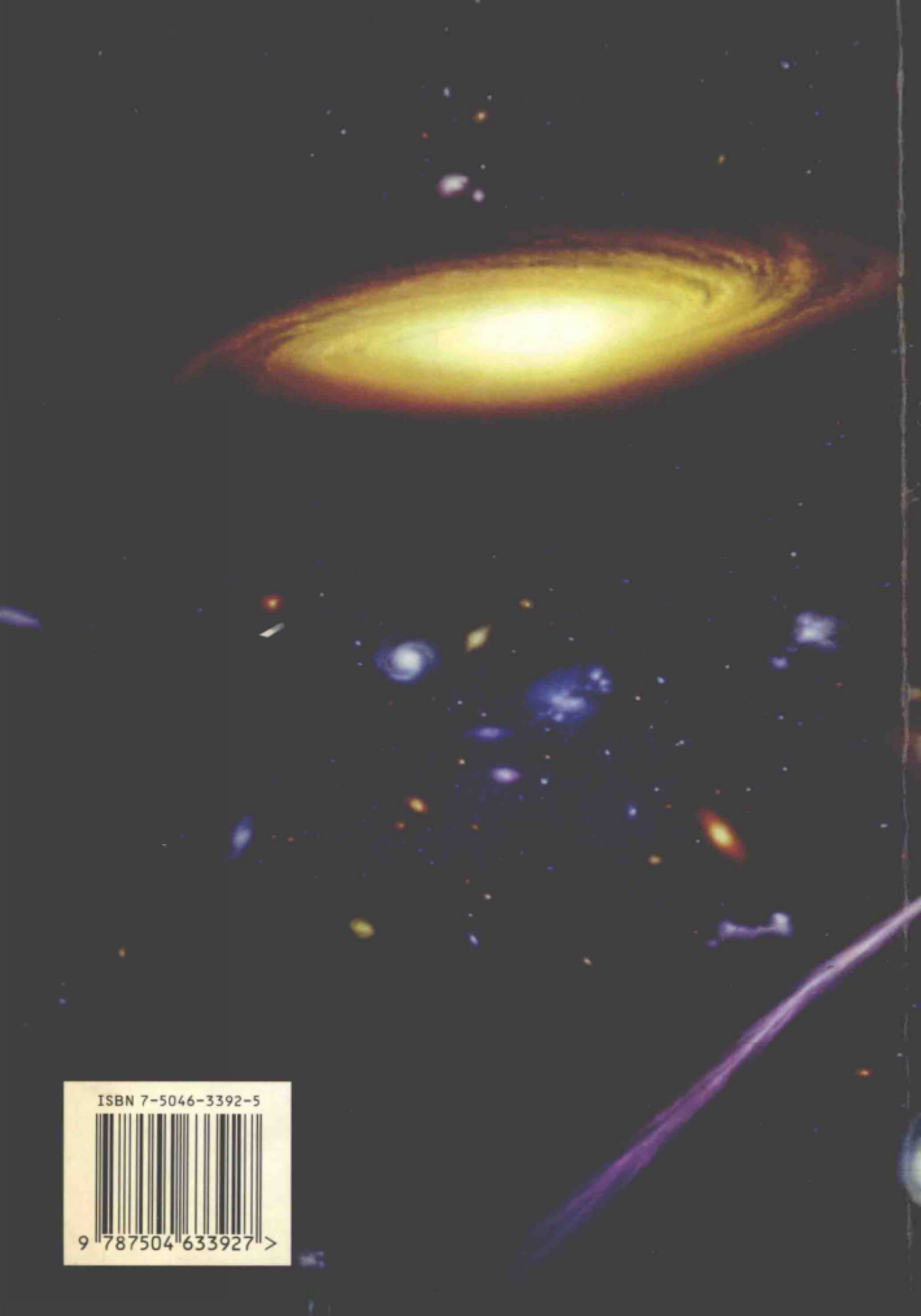


程景全 著

天文望远镜 原理和设计

射电、红外、光学、X射线和 γ 射线望远镜





ISBN 7-5046-3392-5



9 787504 633927 >

天文望远镜原理和设计

—— 射电、红外、光学、X射线和 γ 射线望远镜

程景全 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

天文望远镜原理和设计:射电、红外、光学、X射线和 γ 射线望远镜/程景全著. —北京:
中国科学技术出版社, 2002. 10

ISBN 7-5046-3392-5

I. 天... II. 程... III. ①天文望远镜—理论②天文望远镜—设计 IV. TH751

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第082007号

责任编辑:赵晖

责任印制:安利平

封面设计:刘一明

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街16号 邮政编码:100081

电话:62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京印刷学院实习工厂印刷

*

开本:787毫米×1092毫米 1/16 印张:21.5 字数:550千字

2003年2月第1版 2003年2月第1次印刷

内 容 提 要

您想知道隐形飞机的秘密吗？您想知道侦察卫星是如何分辨出报纸上的大字标题的吗？您希望测出相距 100 m 的距离而使误差不超过两根头发丝的直径吗？您想把一个圆周均匀地等分成 16777216 个极小的角度吗？您想知道如何将一个 100 m 直径的表面调整精确到误差仅有 $70\text{ }\mu\text{m}$ 吗？您想知道如何制造磨擦力最小的空气轴承吗？您想知道摆动结构中的一部分而不使结构的其他部分产生振动的方法吗？您想知道高效的大型通讯天线的设计吗？您想知道现代光学理论和它所产生的影响吗？您想知道空间的环境吗？您想知道风和地震对结构的影响吗？您想知道如何防雷击吗？您想知道地基的强度吗？……所有这些您均可以在这本书中找到答案。这是一本专著，又是一本工程师设计的参考书。现代天文望远镜的发展使工艺和技术发展到了极点，您通过这本书可以学到您需要的高新技术。特别是光学、空间、通信、大型天线、精密机械、结构设计、碳纤维合成材料、精密测量、传感器、振动控制、主动控制、自适应控制、结构分析、计算机模拟等众多领域中的高新技术成果。

本书对于有关专业的研究人员、学者、学生、研究生以及各个领域的工程技术人员有很大的参考价值。

前 言

这是一本全面介绍各类天文望远镜原理和设计的专著。众所周知,作为人类探索宏观世界最主要的工具,天文望远镜是一个复杂的系统工程。纵观其演变过程,它的发展事实上反映了所在时代工程科学可能达到的最高设计水平。为了反映当代最新科学技术成就的利用与影响,本书在系统阐述各个波段天文望远镜的原理和设计的同时,并着重介绍了与之相关的最新技术。这些技术中既有专门用于天文、通讯、航天、遥感、军事、高能物理和大气科学前沿领域的,也有可广泛用于其他工业领域的。其中,专门用于天文、通讯、航天、军事等领域的最新技术有主动光学技术(4.1.3, 4.1.4)、自适应光学技术(4.1.6)、人造激光星技术(4.1.7)、斑点干涉技术(4.2.1)、振幅干涉技术(4.2.4)、全息面形检测技术(8.4.1)、红外调制技术(9.1.3)、光学桁架技术(5.2.3)、广谱平面天线技术(8.4.4)、隐形技术(7.1.6)等等。而广泛用于其他工业领域的高新技术有光学镜面的加工技术(2.3.2)、镜面的支承技术(2.1.2)、空气和静压轴承的技术(3.2.4)、六杆式万向平台的技术(3.1.3)、精密编码器技术(3.3.3)、结构的动态模拟技术(3.4.2)、结构振动控制技术(3.4.4)、结构保型设计技术(7.1.3)、激光测距技术(7.2.4)、激光横向定位技术(7.2.4)、大视场后向反射器技术(7.2.4)、碳纤维合成材料技术(8.3.1)、倾斜仪、加速度仪的技术(8.2.4)、精密面形加工技术(8.2.1)、X 射线成像技术(9.2.2)、雷电保护技术(8.2.6)、三维面形干涉测量技术(8.2.1)等等。此外,本书还对风、温度、地震对结构的影响进行了详细的讨论,对大型精密结构的基础设计也作了一定的介绍。

本书的写作过程前后近 15 年,作者几易其稿,尽最大可能采用最好的论证和最通俗的语言来解释较深的电磁波理论。本书包括了作者的所有的经验和实践,本书除可供天文、通讯、航天、遥感、光学、结构、军事、高能物理和大气科学科研、工程技术人员和大专院校师生使用外,亦可供普通的机械、测量和相关工业部门科技人员参考。

在本书的写作过程中,作者曾多次得益于和多位学者、同仁和朋友的交流。谨借此机会由衷感谢杨戟、蒋世仰、叶彬浚、王绶琯、艾国祥、崔向群、赵刚、蔡贤德、程景云、范章云、黄克谅、程海蓉、孙艳、徐火旺、谢晓云、梁明、陈磊等的帮助和鼓励。本书初稿和送审稿均经国家天文台资深研究员蒋世仰认真审阅校核。作者感谢众多的学术机构和出版社允许作者复制大量插图。本书的出版获得了中国科学院国家天文台资助,在此表示感谢。

作者 2002 年 12 月于美国

作者介绍

程景全 1946 年生于江苏泰州，1968 年毕业于南京理工大学光学仪器系，1984 年获英国威尔士大学结构工程博士学位。程景全先后就职和访问过中国科学院南京天文光学研究所，英国格林尼治天文台，爱丁堡天文台，卢瑟福实验室，欧洲南方天文台，美国空间望远镜科学研究所，波士顿大学天文系，阿根廷射电天文研究所和英国福克斯公司。程景全现任美国国立射电天文台资深工程师，中国国家天文台客座研究员和紫金山天文台研究生指导导师。程景全曾参加和主持过英国 4.2m 光学望远镜，英国 3.8m 红外望远镜，15m 英荷毫米波望远镜，中国 1.05m 光学望远镜，中国 13.7m 毫米波望远镜，1.7m 美国南极亚毫米波望远镜，12m 欧美日大毫米波阵天线的设计、调整和安装工作。其中 13.7m 毫米波望远镜工程中，程景全担任工程指挥部副总指挥，该工程获国家科技进步一等奖。程景全先后发表专业论文 29 篇，科普文章 6 篇和很多的技术报告。程景全曾任中国科学院第一届天文委员会委员，中国天文学会理事。

感谢中国国家天文台的支持

感谢下列机构和出版社允许作者复制插图：

Academic Press, Inc.

Acoustical Publications, Inc.

AIAA, Inc.

American Institute of Physics

Artech House, Inc.

American Society of Civil Engineers

AURA

Cambridge University Press

Elsevier Science Publishers BV

IEEE press

Kluwer Academic Publishers, Inc.

National Academy of Sciences, US

McGraw Hill Inc.

Optical Society of American

Oxford University Press

Plenum Publisher Co.

SPIE press

Space Telescope Institute

Taylor & Francis Ltd.

Veritas Project

Praxis Publishing Ltd.

JC Company Inc.

PRINCIPLES OF ASTRONOMICAL TELESCOPE DESIGN

—FROM RADIO, INFRARED, OPTICAL, X-RAY TO GAMMA RAY TELESCOPES

Jingquan Cheng

China Science & Technology Press

· Bei Jing ·

目 录

第一章 光学天文望远镜基础	(1)
1.1 光学天文望远镜的发展历史	(1)
1.2 天文学对光学天文望远镜的基本要求	(3)
1.2.1 空间分辨率和大气扰动	(3)
1.2.2 聚光本领和极限星等	(8)
1.2.3 视场和综合效率	(16)
1.2.4 大气窗口和台址的选择	(18)
1.3 天文光学基础	(21)
1.3.1 现代光学天文望远镜的基本光路	(21)
1.3.2 主要像差和基本计算公式	(25)
1.3.3 望远镜系统的主要像差公式	(29)
1.3.4 像场改正器的设计	(34)
1.3.5 光线追踪、点图和评价函数	(38)
1.4 现代光学理论	(42)
1.4.1 光学传递函数	(42)
1.4.2 波像差和调制传递函数	(48)
1.4.3 斯特尔比	(51)
1.4.4 望远镜像的空间频谱	(52)
第二章 光学望远镜的镜面设计	(59)
2.1 光学镜面的设计要求和局限	(59)
2.1.1 对镜面面形的基本要求	(59)
2.1.2 镜面支承系统和镜面精度的关系	(61)
2.1.3 镜面变形曲线的贴合和表面误差的斜率表示	(68)
2.2 减轻镜面重量的意义和途径	(69)
2.2.1 减轻镜面重量的必要性	(69)
2.2.2 薄型镜面	(70)
2.2.3 蜂窝镜面的应用	(72)
2.2.4 多镜面望远镜的结构	(73)
2.2.5 拼合镜面望远镜 (SMT) 的结构	(74)
2.2.6 金属镜面、碳纤维合成镜面及其他途径	(78)
2.3 光学镜面的加工和支承	(80)
2.3.1 光学镜面的材料特性	(80)

2.3.2 光学镜面的加工	(82)
2.3.3 光学镜面的镀膜	(84)
2.3.4 光学镜面的支承结构	(84)
第三章 光学天文望远镜结构和自动控制	(89)
3.1 望远镜机架结构的基本形式	(89)
3.1.1 赤道式天文望远镜	(89)
3.1.2 地平式天文望远镜	(90)
3.1.3 六杆万向平台式天文望远镜	(96)
3.2 望远镜的镜筒和其他结构设计	(102)
3.2.1 望远镜镜筒的误差要求	(102)
3.2.2 望远镜的镜筒设计	(103)
3.2.3 望远镜副镜的四翼梁设计	(104)
3.2.4 望远镜轴承的设计	(104)
3.2.5 望远镜的静态结构分析	(107)
3.3 望远镜的驱动和自动控制	(110)
3.3.1 望远镜的基本运动方式及要求	(110)
3.3.2 传动机构设计的基本动向	(111)
3.3.3 望远镜的轴角位置指示	(112)
3.3.4 望远镜的指向误差的校正	(118)
3.3.5 望远镜的伺服控制和智能分布	(120)
3.3.6 光电导星和电视监视	(123)
3.4 望远镜的动态结构分析	(125)
3.4.1 风和地震波的能量谱	(125)
3.4.2 望远镜的动态模拟	(130)
3.4.3 望远镜的结构控制模拟	(135)
3.4.4 望远镜的振动控制	(136)
3.4.5 望远镜的基础设计	(141)
第四章 光学天文望远镜的新技术	(145)
4.1 主动光学和自适应光学	(145)
4.1.1 主动光学和自适应光学的基本原理	(145)
4.1.2 波阵面误差的检测	(147)
4.1.3 主动镜面的执行机构	(150)
4.1.4 主动光学的控制过程	(152)
4.1.5 主动光学中的波阵面曲率补偿	(155)
4.1.6 自适应光学对大气扰动的补偿	(157)
4.1.7 人造激光星和自适应光学	(159)
4.2 光学望远镜的干涉技术	(161)

4.2.1 斑点干涉技术	(161)
4.2.2 迈克尔逊干涉仪	(163)
4.2.3 强度干涉仪	(165)
4.2.4 振幅干涉仪	(170)
第五章 空间光学望远镜及其发展	(174)
5.1 轨道空间的环境及轨道的选择	(174)
5.1.1 空间轨道简介	(174)
5.1.2 轨道空间的温度环境	(176)
5.1.3 轨道空间的其他环境	(179)
5.2 空间光学望远镜工程	(181)
5.2.1 空间望远镜	(181)
5.2.2 下一代空间望远镜	(184)
5.2.3 空间光学干涉仪	(187)
第六章 射电天文望远镜基础	(190)
6.1 射电望远镜的发展历史	(190)
6.2 天文学对射电望远镜的要求	(191)
6.3 大气射电窗口和台址选择	(194)
6.4 射电望远镜的基本参量	(197)
6.4.1 天线方向图	(197)
6.4.2 增益	(198)
6.4.3 天线的噪声温度	(199)
6.4.4 天线效率	(200)
6.4.5 天线的极化特性	(202)
6.4.6 射电望远镜基本参数的优化选择	(203)
6.4.7 偏轴射电望远镜的特性	(210)
第七章 射电天文望远镜的设计	(215)
7.1 天线的误差理论和保形设计	(215)
7.1.1 电磁波的透射损耗	(215)
7.1.2 天线的误差理论	(216)
7.1.3 天线的保型设计	(220)
7.1.4 天线表面的最佳抛物面贴合	(222)
7.1.5 射电望远镜的镜面和接收器位置允差	(225)
7.1.6 副镜支承的口径遮挡和天线噪声	(230)
7.2 射电望远镜的结构设计	(234)
7.2.1 射电望远镜的基本结构形式	(234)
7.2.2 抛物面射电望远镜的设计	(240)
7.2.3 风对射电望远镜的影响	(243)

7.2.4 射电望远镜的主动控制	(245)
7.3 射电天文干涉仪	(251)
7.3.1 射电干涉仪的基本原理	(251)
7.3.2 十字天线	(254)
7.3.3 综合孔径望远镜	(255)
7.3.4 甚大天线阵	(256)
7.3.5 甚长基线干涉仪	(256)
7.3.6 空间射电干涉仪	(257)
第八章 毫米波和亚毫米波望远镜	(260)
8.1 温度对毫米波和亚毫米波望远镜的影响	(260)
8.1.1 毫米波和亚毫米波望远镜的特点	(260)
8.1.2 天线的温度环境	(262)
8.1.3 热量的传递公式	(262)
8.1.4 面板的温度考虑	(266)
8.1.5 背架的温度考虑	(268)
8.2 毫米波和亚毫米望远镜的结构设计	(271)
8.2.1 面板的要求和加工	(271)
8.2.2 背架和其他结构	(274)
8.2.3 摆动副镜的设计	(276)
8.2.4 温度传感器、倾斜仪、加速度仪和光学指向望远镜	(278)
8.2.5 毫米波望远镜中主动光学的应用	(280)
8.2.6 望远镜防雷电的保护措施	(281)
8.3 低膨胀碳纤维合成材料	(282)
8.3.1 碳纤维合成材料的性质	(282)
8.3.2 异形三明治结构的温度变形	(286)
8.4 全息检测和准光学理论	(289)
8.4.1 全息面形检测	(289)
8.4.2 天线的面板调整	(295)
8.4.3 准光学理论	(296)
8.4.4 广谱平面天线的应用	(297)
第九章 红外、紫外、X 射线和 γ 射线望远镜	(300)
9.1 红外望远镜	(300)
9.1.1 红外望远镜的基本要求	(300)
9.1.2 红外望远镜的结构特点	(302)
9.1.3 红外调制技术	(305)
9.1.4 空间红外望远镜	(305)
9.2 X 射线和紫外线望远镜	(308)

9.2.1 X 射线的基本特性	(308)
9.2.2 X 射线成像望远镜	(311)
9.2.3 X 射线观察卫星	(315)
9.2.4 紫外天文卫星	(317)
9.3 γ 射线望远镜	(319)
9.3.1 γ 射线空间望远镜	(319)
9.3.2 切伦科夫 γ 射线望远镜	(320)
第十章 天文望远镜综述	(325)
10.1 电磁波和地球大气层	(325)
10.2 地面天文望远镜	(326)
10.3 空间天文望远镜	(329)

第一章 光学天文望远镜基础

1.1 光学天文望远镜的发展历史

可见光是人类直接能够感受的电磁波辐射。它的波长大约从 $3900\text{\AA}$ 一直延伸到 $7500\text{\AA}$ 。人的眼睛是可见光辐射能的收集器和探测器相结合的复杂器官。人的眼睛十分灵敏，如果在 100ms 内，对人的眼睛连续发射 100 个波长约为 $5000\text{\AA}$ 的光子，则人的眼睛就可以产生视觉。然而人的眼睛的聚光能力却十分有限。人的瞳孔的最大直径仅仅是 8mm 左右，因此它只能收集到任一发光辐射中极小的一个立体角内辐射的能量。为了检测或探测极其微弱的可见光辐射能，人类只有借助于各种形式的光学望远镜，特别是光学天文望远镜。

光学天文望远镜的诞生是由一次极偶然的机遇促成的。1608 年 10 月一个名叫利普希 (Lippeshey) 的荷兰眼镜商的学徒，将一块正透镜放置在另一块凹透镜的前方的一定距离上，他突然发现，利用这种镜片的组合，远处教堂顶上的十字架变得十分清晰，从而世界上第一架光学望远镜诞生了。1609 年 7 月伽利略研制成功了用于天文研究的光学天文望远镜。伽利略早期借助该望远镜取得了突出的成绩，因此这个望远镜就被称为伽利略望远镜[图 1.1(a)]。1611 年开普勒发明了另一种形式的折射望远镜。它被称为开普勒望远镜[图 1.1(b)]。早期的望远镜由玻璃透镜所构成，因此它的像受到色差的严重影响。为了减少色

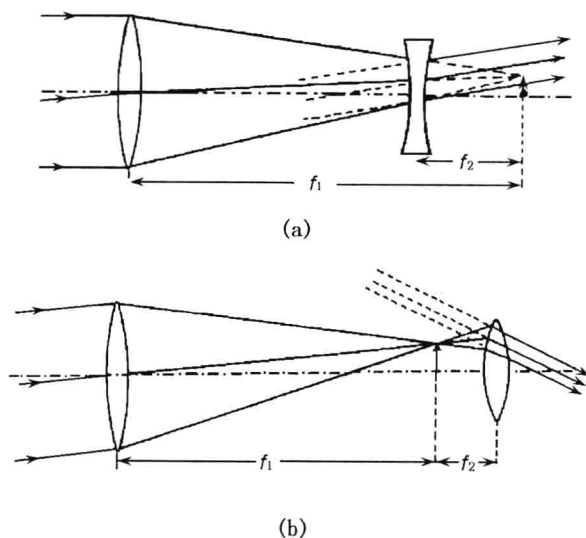


图 1.1 伽利略望远镜(a)与开普勒望远镜(b)的光学系统

差,赫维列西(J.Herelius)和惠更斯(Huygens)提出了应用曲率很小的透镜的方法。这一提议使得新的折射望远镜的镜筒越来越长。1664 年格利高里(J.Gregory)提出了制造反射式望远镜的设计方案,称为反射式望远镜中的格利高里系统。然而这一系统中的椭球凹面镜在当时无法加工,所以该系统并没有得到应用。1670 年 1 月牛顿选择了较为简单的牛顿式系统,发明了第一台可以实际应用的反射式望远镜。反射式望远镜排除了色差的影响,大大缩短了镜筒的长度。但是反射式望远镜对镜面的加工要求更为苛刻,镜面材料要有足够的硬度。从这个意义上讲,反射式望远镜的制造比折射望远镜更为困难。

1672 年,牛顿在评价折射望远镜时曾经说过:“进一步改善折射望远镜的性能是决不可能的。”然而仅仅 86 年之后多拉德(J.Dollond)就于 1758 年制造出消色差的透镜。1761 年消色差透镜第一次应用于天文望远镜中。消色差透镜的应用极大地改善了折射望远镜的性能,折射望远镜的长度一下缩小了 10 倍,从而使折射望远镜又重新恢复了生机。1897 年叶凯士天文台建成了当时世界上最大的 1m 折射光学望远镜。在折射望远镜的发展过程中,建成大型反射式望远镜的努力也并没有中止。19 世纪 40 年代罗斯(Rosse)完成了口径为 1.8m 的大型金属镜面望远镜。1856 年第一台玻璃镀银镜面的望远镜试验成功。进入 20 世纪以来反射望远镜的口径不断增大。1934 年新的真空镀铝方法诞生。1948 年美国建成了口径达到 5m 的大型光学望远镜。

20 世纪初期光学天文望远镜分出了两个专门分枝:它们是天体测量仪器和太阳仪器。天体测量仪器要求精确的定位性能,太阳仪器则希望避免温度变形对望远镜的影响。现在的天体测量仪器有融入一般望远镜的趋势,而太阳望远镜则已经自成体系。另外在反射望远镜中也产生了新的增大视场的系统。

1930 年斯密特(Schmidt)制成了第一台大视场折反射望远镜,斯密特望远镜的视场可以达到 6 度。从 20 世纪 60 年代至今望远镜的发展又有了很多新的特点。1969 年苏联建成了当时世界上最大的 6m 望远镜。这一望远镜的地平式装置使得新的更大的望远镜成为可能。1979 年一台新型的多镜面望远镜(MMT)在美国建成。1988 年美国在空间轨道上建成了一架 2.4m 的空间望远镜。在空间望远镜中,主镜背面有 24 个力触动器(actuators)可以使主镜面形发生变化以改善其成像质量。1992 年一台新型的拼合镜面的 10 米凯克(Keck)望远镜建成。这台望远镜的主镜由 36 面尺寸为 1.8m 的正六边形的子镜面组成。这台望远镜的建成是现代望远镜制造史上的又一个里程碑。1997 年主镜直径为 10m 的半固定式的拼合球面望远镜(HET)建成。1998 年第二台凯克(Keck II)望远镜建成。1999 年口径为 8.2m 的日本昴星团(Subaru)望远镜和口径为 8m 的双子座(Gemini)北方望远镜建成。同时包括有四台口径为 8m 的欧洲甚大望远镜(VLT)的单元也逐步建成。双子座南方望远镜以及由两块 8.4m 主镜组成的大型双筒望远镜(LBT)也将建成。目前 30m 口径的拼合镜面望远镜的方案正在计划之中。雄心勃勃的 100m 口径的光学望远镜的方案正在形成。

望远镜的发展将为人类捕捉到越来越多的光学信息,同时也将对望远镜的系统、望远镜的结构和设计带来新的、革命性的变革。

1.2 天文学对光学天文望远镜的基本要求

由于天文学研究的特殊性, 光学天文望远镜在很多方面都有着极高的要求。这些要求是: 望远镜的空间分辨率、望远镜的聚光能力、望远镜的有效视场和望远镜的综合效率。下面将就这几个方面分别进行讨论。

1.2.1 空间分辨率和大气扰动

现代天文学的发展要求天文学家可以精确地确定天体的位置。望远镜的高的分辨率是天文学家不断追求的目标。望远镜的空间分辨率是指衡量分开两个相邻天体位置的能力的指标。影响望远镜空间分辨率的主要因素是望远镜的几何像差、望远镜口径的衍射极限和地球的大气扰动。望远镜的几何像差是指望远镜光学系统中的像点弥散以及在实际加工装配后的镜面变形和位移所引起的成像误差。这些成像误差将在后面的 1.3 节中进行讨论。这里主要讨论衍射像斑, 分辨准则和大气扰动。

根据几何光学一个理想的成像系统对轴上遥远的点光源所成的像应该是一锐利的点像。然而可见光并不是严格按照几何光学传播的, 通过光学系统后所成的像斑是一个有一定尺寸的图形。这个像斑的尺寸大小就决定着望远镜系统的分辨极限。如果考虑某一口径场 S 的夫朗和费(Fraunhofer)衍射, 则其中任一面积元 ds 的光辐射将会对空间的某一方向 P 产生一定的影响, 如果 $F(x, y)$ 为口径场中单位面积的辐射, $F(x, y)$ 是 (x, y) 的复数函数, 它包括辐射的振幅和相位。 λ 为光辐射的波长, 则 P 方向上 (l, m, n) 的辐射强度为(Smith, 1971, 见图 1.2):

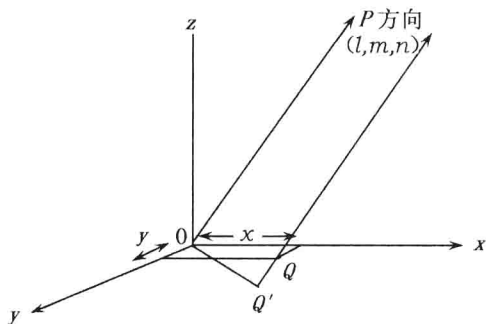


图 1.2 口径场任一面积元 ds 对空间某一方向 P 的贡献

$$A(l, m) = C \iint_{\text{Aperture}} F(x, y) \exp \left[-\frac{2\pi i}{\lambda} (lx + my) \right] \cdot dx dy \quad (1.1)$$

在上列公式中口径场单元在该方向的振幅部分的贡献为 $F(x, y) dx dy$, 而相位部分的贡献