

中国科学院国家天文台
天体物理技术与方法丛书

天文望远镜光学系统

王亚男◎编著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

中国科学院国家天文台天体物理技术

天文望远镜光学系统

王亚男 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

天文望远镜光学系统 / 王亚男编著. —北京: 中国科学技术出版社, 2011. 4

(中国科学院国家天文台天体物理技术与方法丛书)

ISBN 978-7-5046-5782-4

I. ①天… II. ①王… III. ①天文望远镜—光学系统
IV. ①TH751

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 035935 号

选题策划 赵 晖
责任编辑 赵 晖 夏凤金
封面设计 蒲亨军
责任校对 何士如
责任印制 张建农

出 版 中国科学技术出版社
发 行 科学普及出版社发行部
地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号
邮 编 100081
发行电话 010-62103130
传 真 010-62179148
投稿电话 010-62103182
网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 720mm×1000mm 1/16
字 数 345 千字
印 张 21.75
版 次 2016 年 7 月第 1 版
印 次 2016 年 7 月第 1 次印刷
印 刷 北京玥实印刷有限公司印刷

书 号 978-7-5046-5782-4/TH·53
定 价 78.00 元

如有缺页、倒页、脱页, 请联系本社发行部调换

中国科学院国家天文台天体物理技术与方法丛书

编委会

主 编：苏定强

副主编：崔向群

编 委（按姓氏笔画排序）：

王兰娟 甘为群 叶彬浔

南仁东 阎保平

《天体物理技术与方法丛书》序

除了太阳系内的天体，过去和现在人类都无法到达那里，对它们的研究是通过望远镜的观测进行的，望远镜的使用开创了现代天文学，为了纪念1609年伽利略开始用望远镜观测天体400年，2009年被定为国际天文年。望远镜口径越大收集的光越多，衍射限制的分辨率也越高。400年来不仅望远镜的口径越做越大，而且在技术和方法方面有一系列重大的进展：从单纯观测天体的像，发展到观测天体的光谱（多色测光相当于低分辨光谱），它可以使我们了解天体的化学成分、物理状态、视向速度，这是天体物理学研究最重要的手段。以光谱观测为主，发展了多种的终端仪器。对天体辐射的接收由肉眼发展到底片，近三十多年又发展到CCD，它的量子效率比底片高得多。上世纪80年代发展的主动光学，使光学红外望远镜的口径突破了5~6米，增大到上世纪90年代的8~10米，现正在向30~40米迈进。还发展了自适应光学、斑点干涉和光干涉等高分辨技术。1931年央斯基发现了来自天体的无线电波，第二次世界大战后射电望远镜包括综合孔径、甚长基线干涉仪（VLBI）、接收机技术，以至整个射电天文学蓬勃发展起来了。1957年苏联成功发射了第一颗人造卫星，此后望远镜又从地面发展到空间，波段又从可见光、一些红外窗口和射电发展到整个电磁波段，特别是X、 γ 波段对高能天体物理学的研究有重要意义。除电磁波外，对来自天体的宇宙线（多种粒子）的探测和研究也是天体物理学的重要内容。还应当指出，利用气球和火箭的观测也取得了一些重大成果。对以上各种观测得到的数据要做许多处理，为此发展了相应的方法和软件。各波段巡天和其他观测所得到的数据量是极大的，将它们处理、归档放到网上，就相当于在网上建立了一个天文台，这就是虚拟天文台。天文望远镜和技术、方法是天体物理学研究的基础。

上世纪50年代以来，中国研制了多个望远镜和仪器，对多种天文技术和方法作了研究，这些工作是在十分困难的条件下进行的，改革开放前，绝大多数科技人员没有读研究生和出国学习的机会，当然改革开

放后情况是完全变了，不过经费仍然是很少的，只是到了近十年才有了较大的增加，我国的科技人员和工人就是凭着为了科学和民族的振兴在这些领域取得了多项成果，并有不少创新。这里仅举一个近的例子：2008年建成的大天区面积多目标光纤光谱望远镜（LAMOST），就是我国创新的、世界上口径最大的大视场望远镜，配有4000根光纤和16台光谱仪，这样大规模的有缝光谱巡天是空前的，当前世界上好几个项目也正在计划沿着这个方向去做。通过LAMOST的研制，我国掌握并发展了大望远镜的关键技术——主动光学，基本上具备了研制30米级光学红外望远镜的能力。

本丛书的作者都是这三五十年来在我国天文望远镜和技术、方法领域中做了很多工作的专家，丛书最大的特点是大多数作者在书中包括了很多本人和合作者的研究和工作成果，并有许多实例。不过，本丛书各本的情况也是有区别的，有的包括了作者参与的直到当前最前沿的工作，也有的由于作者年龄较高，参与的工作较早，国内外的最新进展包含得较少，另外，本丛书未能包括以上提到的天文望远镜、技术和方法的所有方面，这些是不足的地方。

最后，要感谢各位作者将自己的知识和心得无保留地奉献给了读者，感谢崔向群副主编实际上对本丛书做的大量的组织工作，也向做了很多具体工作的林素女士表示感谢。

苏定强

2012年6月

前 言

崔向群院士作为这套系列丛书的常务副主编建议本人撰写此书，本人从自己的水平、能力考虑，确实不敢当此重任。但鉴于多年来一直从事这方面的工作，对此建议在所难辞。于是拟借此机会把中国科学院南京天文仪器厂（简称天仪厂）后更名为中国科学院南京天文仪器研制中心，直到现在的中国科学院南京天文光学技术研究所（简称天光所）几十年来，以苏定强院士为首，从事天文光学系统设计工作的同事们所做的工作整理、汇总一下，以便于后来的人参考。苏定强是我国天文望远镜光学系统理论研究的奠基人，我们的工作基本上都是以他所推导的公式为依据的。书中把所用到的他的公式归纳在有关的章节中，以便于读者应用。该书也是回顾了在他带领下，我国天文望远镜光学系统研究设计发展的历程。所以本书最大的特点是大部分内容都是我们自己做的，不是国外文献或书本上的。而且有很多是创新性的做法，这些创新点都是苏定强提出来的。另外，书中也介绍了一些近年来国际上天文光学望远镜技术的新发展和未来极大望远镜的建设计划。

本书第一章是关于天文光学望远镜的一般介绍。第二章介绍三级像差计算公式和对像质的评价方法。第三至六章分别为天文光学系统设计理论和方法、天文望远镜光学系统的基本类型、像场改正器和大视场望远镜。第七章介绍了 VLT 和 Keck 两个新技术望远镜和国内外所提出的几个极大望远镜方案。由于本书在 2010 年初即已完稿，书中所说的关于 VLT、KECK 望远镜以及国际上正在研制的极大望远镜计划的情况已经与现在的实际情况不同了，请读者谅解。第八章是关于双折射滤光器的介绍。其中第二章中的一部分和第三至六章中的大部分是从天仪厂到天光所多年来所作的光学系统研究设计工作为基础（其中有的内容是苏定强更早的工作）的，从事这些工作的主要有苏定强院士、羿美良研

究员、王兰娟研究员（王兰娟是上海天文台的研究员，曾与我们长期密切合作）、周必方研究员、崔向群院士和笔者等。第七章里介绍的我国极大望远镜方案的研究工作主要由苏定强院士、王绶琯院士、崔向群院士和笔者等一起进行的。

有关参考文献列在各章的最后面。与我们以前的工作有关的内容，参考文献中只列出我们所发表的文章，所涉及的其他人的工作见我们所发表的文章中引用的参考文献，这里未再列出。

本书中除特别注明者外所有的例子都是用 ZEMAX 程序重新算的，目的是为了得到比较漂亮的点图（我们以前的点图都是用手工在方格纸上画的），与论文中三四十年前用我们的程序算的比较一下就会发现像质几乎是一样的，原因是现在世界上所有的光学优化程序都用了和我们 40 年前（1972 年）一样的评价函数，这也表明了我们 40 年前的光学系统优化工作是非常先进的。

由于本人水平、能力所限，错误和不当之处在所难免，请各位同仁和读者批评指正。

本书完稿后，苏定强院士进行了仔细地修改，并做了很多补充，王兰娟研究员提出了很多修改意见，在编写过程中得到崔向群院士、范一新研究员、羿美良研究员和袁祥岩研究员等的帮助、支持和鼓励。周文革先生在资料方面给予了很多帮助，在此向各位表示感谢！

目 录

第一章 概论	(1)
1.1 天文光学望远镜基本介绍	(1)
1.2 天文望远镜的发展	(3)
参考文献	(6)
第二章 像差简介及像质评价	(7)
2.1 像差简介	(7)
2.1.1 像差的定义	(7)
2.1.2 几何像差计算公式	(8)
2.1.3 三级像差系数的计算和所代表的意义	(10)
2.2 非球面的像差	(17)
2.2.1 由波像差导出几何像差	(17)
2.2.2 非球面的三级像差公式	(19)
2.2.3 球面加 $\xi=k_2(Y^2+Z^2)^2$ 形式的非球面光学系统的 三级像差公式	(21)
2.2.4 非球面的高次项引起的像差	(22)
2.2.5 非球面形状的计算方法	(24)
2.3 像质评价	(25)
2.3.1 波像差	(25)
2.3.2 几何像差	(27)
2.3.3 点图	(30)
2.3.4 光学传递函数	(31)

2.3.5 斯特列尔比 (Strehl Ratio)	(36)
参考文献	(36)
第三章 天文光学系统设计	(38)
3.1 传统设计	(39)
3.2 现代光学设计	(39)
3.2.1 评价函数	(41)
3.2.2 优化计算方法	(53)
3.3 光学系统设计步骤	(56)
3.3.1 望远镜总体方案设计	(56)
3.3.2 光学系统总体设计	(56)
3.3.3 具体设计	(57)
参考文献	(58)
第四章 反射望远镜光学系统	(59)
4.1 单镜面系统	(59)
4.2 双反射镜 (两镜面) 系统	(61)
4.2.1 几何尺寸的计算	(62)
4.2.2 三级像差计算公式	(62)
4.2.3 双反射镜系统的主要类型	(64)
4.3 三镜面系统	(69)
4.3.1 几何尺寸计算	(70)
4.3.2 三级像差公式及面形参数计算	(71)
4.3.3 三镜系统参数分析与计算实例	(75)
4.4 多镜面望远镜系统	(83)
4.4.1 用多个反射镜实现折轴系统	(83)
4.4.2 一个亚毫米波望远镜方案	(83)
4.4.3 40m 球面主镜大望远镜光学系统	(86)
4.5 一个反射望远镜实例——中国 2.16m 望远镜的 光学系统	(88)
4.5.1 主焦点系统	(90)
4.5.2 卡塞格林系统	(92)

4.5.3 折轴系统	(94)
参考文献	(98)
第五章 像场改正器	(99)
5.1 主焦点改正器	(100)
5.1.1 透镜改正器	(100)
5.1.2 非球面板改正器	(109)
5.2 卡塞格林焦点改正器	(118)
5.2.1 透镜改正器	(118)
5.2.2 非球面板改正器	(130)
5.3 含有透棱镜的像场改正器 (同时具有校正大气色散功能的 像场改正器, 简称 ADC)	(141)
参考文献	(158)
第六章 大视场望远镜	(160)
6.1 马克苏托夫望远镜	(161)
6.1.1 马克苏托夫望远镜的设计原理	(162)
6.1.2 马克苏托夫-卡塞格林系统	(166)
6.2 施密特望远镜	(169)
6.2.1 施密特望远镜的设计原理及性能分析	(169)
6.2.2 一个施密特望远镜的例子	(176)
6.2.3 施密特望远镜与马克苏托夫望远镜性能比较	(177)
6.2.4 从施密特望远镜发展出的其他类型望远镜	(178)
6.3 大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜 (LAMOST) 光学系统	(180)
6.3.1 LAMOST 光学系统的特点	(184)
6.3.2 成像质量的计算	(191)
6.4 阵列改正器望远镜系统	(194)
6.4.1 视场的分割	(195)
6.4.2 阵列改正器望远镜光学系统设计	(195)
6.4.3 设计实例	(196)
参考文献	(203)

第七章 新技术望远镜和未来大望远镜	(204)
7.1 望远镜新技术	(204)
7.1.1 主动光学	(204)
7.1.2 自适应光学	(221)
7.1.3 天文光干涉	(224)
7.1.4 斑点干涉	(225)
7.2 新技术望远镜	(225)
7.2.1 欧洲南方天文台的甚大望远镜 (VLT)	(225)
7.2.2 美国凯克天文台的凯克望远镜	(232)
7.3 国际上正在计划建造的极大望远镜	(242)
7.3.1 30m 望远镜 (Thirty Meter Telescope, TMT)	(242)
7.3.2 巨型麦哲伦望远镜 (Giant Magellan Telescope, GMT)	(245)
7.3.3 欧洲极大型望远镜 (European Extremely Large Telescope, E-ELT)	(250)
7.4 我国提出的极大望远镜方案	(254)
7.4.1 一些有关公式	(255)
7.4.2 未来极大望远镜方案之一	(259)
7.4.3 未来极大望远镜方案之二	(261)
7.4.4 未来极大望远镜方案之三	(267)
7.4.5 对以上我国提出的极大望远镜方案作两点 重要的改动	(273)
参考文献	(274)
第八章 双折射滤光器 (干涉偏振滤光器)	(277)
8.1 双折射滤光器原理	(278)
8.1.1 基本原理	(278)
8.1.2 滤光器透过带能量	(281)
8.1.3 滤光器的轴外效应	(285)
8.2 滤光器的类型	(286)
8.2.1 简单滤光器	(286)

8.2.2	宽视场滤光器	(287)
8.2.3	分裂元素滤光器	(290)
8.2.4	波长可调的滤光器	(293)
8.2.5	可在几个波长工作的双折射滤光器	(298)
8.2.6	Sole 滤光器	(301)
8.3	研制我国第一台双折射滤光器中解决的关键技术	(303)
8.3.1	水晶	(303)
8.3.2	冰洲石	(310)
8.4	我国研制的第一台双折射滤光器的具体结构	(314)
8.4.1	滤光器研制中的基本考虑	(314)
8.4.2	滤光器结构的确定	(315)
8.4.3	滤光器的理论计算和结果分析	(316)
8.4.4	机械结构	(323)
8.5	一个太阳望远镜实例	(330)
	参考文献	(332)

第一章 概 论

1.1 天文光学望远镜基本介绍

人用眼睛观看天上的星时，因为眼睛的瞳孔最大只有 8mm，能被瞳孔收集进入眼睛的光很少，只有很亮的星才能看到。另外，眼睛的分辨角约为 $1'$ ，即只有角距离对眼睛的张角大于 $1'$ 的点才能被眼睛区分开来。所以用眼睛观测天体时，只能看到亮星，而且看不清其细节。发明了望远镜以后，人可以通过望远镜观测天体。目视望远镜由物镜和目镜组成，它们的焦点重合在一起。物镜收集到的光线聚焦在焦点处，通过目镜后，又变成平行光，进入观测者的眼睛。望远镜的物镜比人眼的瞳孔大，可以收集较多的光，适当选取物镜和目镜的比例（放大率），使从目镜出来的光线都能进入眼睛的瞳孔，就可以看到比较暗一些的星。同时从目镜出来进入眼睛的光束张角也比进入物镜之前放大了，这样就可以分辨比 $1'$ 更小的细节。随着科学技术的发展，在大部分天文工作中望远镜用的不是目镜，而是其他接收器。例如，将照相底片（现在用 CCD）直接放在物镜的焦面上，拍摄天体的像，然后对天体的像进行测量、分析。还可以使物镜的焦面与光谱仪的狭缝重合（或用别的方法将焦面上的星像引到光谱仪的狭缝上），通过光谱仪进行光谱观测等。望远镜是天文学研究必需的仪器，天文学的发展全靠望远镜的不断发展。

由上述可知，天文望远镜的功能是将遥远的天体清楚地成像在焦面上，用不同的接收器接收，供分析研究使用。天文学研究中希望能观测到尽可能暗的天体，离地球尽可能远的天体，同时希望在焦面上能分辨尽可能小的细节，因此，对望远镜的主要要求是具有尽量大的集光能力和尽可能高的分辨率。

表示天文光学望远镜性能的参数有：

◆ 口径

口径是望远镜光学系统中决定其收集光能量多少的光学元件的直

径,多数情况是光学系统的第1个镜面,通常以 D 或 ϕ 表示。望远镜收集光能量的能力和分辨率都与其口径有关。收集光能量的能力与 D^2 成正比。望远镜的理论分辨角为:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (1.1)$$

式中, θ 以弧度为单位; λ 是波长,与口径 D 用相同的单位。可见望远镜的口径越大越好。

◆ 焦距(焦比)

焦距是主平面到焦面的距离,以 f 表示。焦距与口径之比称为焦比,以 F 表示,其倒数称为相对口径。焦距决定焦面的线直径,见(1.2)式。对有视面的天体,焦比越大,像越暗。

◆ 视场

望远镜的视场是成像质量符合要求的天空区域的角直径,通常用 w 表示视场半径。入射光束与光轴之间的夹角称为视场角。视场角为 w 的光束在焦面上的像到焦面中心的距离 l 用下式表示:

$$l = f \tan w \quad (1.2)$$

◆ 焦面比例尺、放大率

焦面比例尺是焦面上单位长度对应的天空中的角距离,可用(1.2)式得到。目视望远镜放大率的定义是通过望远镜后看到的天体张角和没有望远镜时看到的张角之比(角度应取小量),它等于物镜焦距与目镜焦距之比,也等于入射光瞳(通常是物镜)与出射光瞳直径之比。

$$m = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{w_2}{w_1} \quad (1.3)$$

式中, m 是放大率; f_1 、 ϕ_1 和 w_1 分别为物镜的焦距、入射光瞳直径和入射视角; f_2 、 ϕ_2 和 w_2 分别为目镜的焦距、出射光瞳直径和出射视角,上式中 w_1 和 w_2 应取小量。

◆ 工作波段

工作波段即望远镜能正常工作的波段。光学玻璃的折射率与波长有关,不同波长的光线经透镜折射后,焦面位置会有不同,焦距也不同,

这种现象影响焦面上像的清晰度，称为色差。折射望远镜只能在一定的波长范围内有好的像质。另外，玻璃的透过率和玻璃表面镀的膜层的透过率或反射率都与波长有关。因此，反射望远镜的性能也有波段的限制。望远镜必须在规定的波段上有符合要求的像质。

◆ 成像质量

由于望远镜有像差，焦面上的像会变模糊。望远镜必须有符合要求的像质，成像质量是望远镜的重要指标。

1.2 天文望远镜的发展

由于天文望远镜是观测天体的重要手段，望远镜性能的每一步提高，都带来了天文学的进一步发展。1608年，荷兰的一位眼镜商利伯希（Lippershey）偶然发现通过两片透镜可以清楚地看到远处的景物，他做出了第一架望远镜。图 1.1 和图 1.2 是利伯希和他所做的望远镜。意大利科学家伽利略（Galileo）听到这个消息后，也开始制造望远镜，到 1609 年年底，他制造出放大率分别为 3 倍、8 倍、20 倍和 30 倍的 4 架望远镜，最大的口径 4.2cm，长约 1.2m，并首先用望远镜观测天空。他发现了月亮表面凹凸不平、木星有 4 颗卫星、太阳黑子在日面移动等天文现象。图 1.3 和图 1.4 是伽利略和他所做的望远镜。伽利略的望远



图 1.1 望远镜发明人利伯希



图 1.2 利伯希和第 1 架望远镜

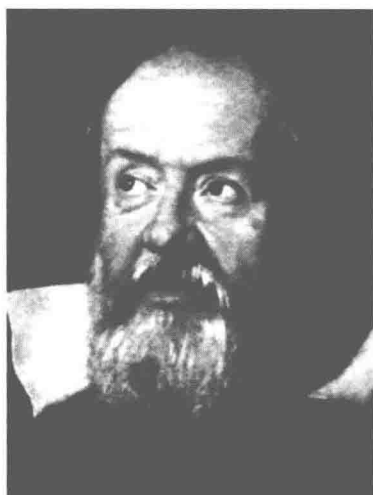


图 1.3 伽利略



图 1.4 伽利略的望远镜

镜是用一片凸透镜和一片凹透镜做成的，凸透镜作物镜，凹透镜作目镜，目镜在物镜的焦点前面。这种形式的望远镜称为伽利略望远镜。1611年，开普勒（Kepler）提出用两片凸透镜作望远镜，物镜和目镜都是凸透镜，目镜在物镜焦点的后面，称为开普勒望远镜。这些望远镜的光学元件都是折射元件，故称为折射望远镜。两种形式的折射望远镜在天文工作中都被使用。折射望远镜的缺点是，由于色差的影响，不能得到很清晰的像。人们发现，望远镜的物镜口径相同时，焦距越长，色差的影响越小。为了得到清晰的像，便把焦距加长。由于镜筒不能太长，折射望远镜也就不能做得很大。在折射望远镜发展的同时，人们已经有了用反射镜面代替透镜的想法，并开始制造反射望远镜。但球面镜像质太差，非球面镜又没有很好的方法加工，一直没能成功。直到1668年牛顿（Newton）制成了第一架反射望远镜，物镜口径2.5cm，焦距16cm，放大率31倍，图1.5和图1.6所示的是牛顿和他的望远镜。1733年，由于消色差物镜的发明，折射望远镜又开始复苏，从此，折射望远镜和反射望远镜平行地发展着。由于光学玻璃熔炼技术及透光性能等的限制，折射望远镜最大只能做到100cm左右。1886年建成了口径91cm的里克望远镜。1897年建成的口径102cm的叶凯士望远镜是世界上最大的折射望远镜。随着反射望远镜用的玻璃制造技术的不断发展，反射望远镜可以制造的口径越来越大。1918年美国建成了2.54m