

中国科学院国家天文台
天体物理技术与方法丛书

天文望远镜设计

胡企千 姚正秋◎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与方法丛书

天文望远镜设计

胡企千 姚正秋 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

天文望远镜设计/胡企千, 姚正秋编著. —北京: 中国科学技术出版社, 2012. 3

(中国科学院国家天文台天体物理与方法丛书)

ISBN 978 - 7 - 5046 - 5987 - 3

I. ①天… II. ①胡… ②姚… III. ①天文望远镜—设计
IV. ①TH751.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 016462 号

选题策划 赵 晖
责任编辑 赵 晖 夏凤金
封面设计 杜 宇
责任校对 赵丽英
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 - 62173865
传 真	010 - 62179148
投稿电话	010 - 62103182
网 址	http://www.cspbooks.com.cn

开 本	787mm × 1092mm 1/16
字 数	850 千字
印 张	42.5
版 次	2013 年 7 月第 1 版
印 次	2013 年 7 月第 1 次印刷
印 刷	北京金信诺印刷有限公司

书 号	ISBN 978 - 7 - 5046 - 5987 - 3/TH · 58
定 价	130.00 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 叶彬浚

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，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，也取得了一批重大成果。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

目 录

上篇 基础理论和基本结构

上篇前言	(3)
主要符号说明	(5)
第一章 波动光学原理及其在天文观测中的应用	(9)
第一部分 波动光学原理	(9)
1.1 波动光学的基本概念	(10)
1.1.1 概述	(10)
1.1.2 术语及其含义	(11)
1.1.3 基本公式和物理量	(13)
1.1.4 光波空间状态的数学表示	(27)
1.2 衍射理论	(34)
1.2.1 光的传播, 惠更斯-菲涅耳原理	(34)
1.2.2 衍射成像的近似计算公式, 菲涅耳近似和夫琅禾费 近似	(35)
1.2.3 几点讨论	(38)
1.2.4 菲涅耳-基尔霍夫公式的扼要推导	(42)
1.3 “空光学系统”衍射成像原理	(47)
1.3.1 波动光学的“物像”关系	(47)
1.3.2 点光源的“像”, 点扩展函数 PSF	(48)
1.3.3 衍射光线的空间频率	(54)
1.3.4 点扩展函数的空间频率	(56)
1.3.5 几点讨论	(62)

1.3.6	面源物体的衍射像	(66)
1.4	实际光学系统的衍射成像	(67)
1.4.1	理想成像光路的透过率	(67)
1.4.2	理想抛物面反射望远镜的衍射场计算	(68)
1.4.3	波像差影响	(70)
1.5	基于空间频率特性的物像关系	(70)
1.5.1	物像与点扩展函数的关系	(70)
1.5.2	相干传递函数	(73)
1.5.3	波动光学物像关系小结	(75)
1.5.4	光学传递函数 (OTF)	(78)
1.5.5	光学传递函数的其他表示形式	(81)
1.5.6	关于光学传递函数的几点讨论	(89)
1.5.7	成像关系及函数关系公式汇总	(91)
第二部分	波动光学在天文观测中的应用	(95)
1.6	理想望远镜系统的点扩展函数和理论分辨率	(95)
1.6.1	理想望远镜系统无中心挡光时的点扩展函数	(95)
1.6.2	理论分辨率	(96)
1.6.3	组合光瞳的衍射像	(98)
1.6.4	望远镜观测面源目标星的情况	(100)
1.7	望远镜的光学像质评价	(102)
1.7.1	斯特尔比 (Strehl ratio) 及其近似计算	(102)
1.7.2	波面误差及其泽尼克 (Zernike) 多项式拟合	(104)
1.7.3	完善光路、准完善光路及其判断准则	(106)
1.7.4	光学像质评价方法	(106)
1.8	天文光干涉	(108)
1.8.1	光干涉与夫琅禾费衍射的关系	(108)
1.8.2	单镜双孔干涉	(109)
1.8.3	一维排列的多光瞳干涉	(115)
1.8.4	空间频率采样	(119)
1.8.5	现代恒星干涉仪	(121)
1.8.6	在光瞳面上的采样	(128)
1.9	光辐射传播方程和波前相位复原	(133)

1.9.1	近轴光辐射传播方程	(134)
1.9.2	波前相位复原	(138)
第二章 天球坐标系及其转换		(141)
2.1	天球坐标系	(141)
2.1.1	天球坐标系的意义	(141)
2.1.2	两个基本几何要素	(142)
2.1.3	地平坐标系	(143)
2.1.4	赤道坐标系	(144)
2.1.5	水平坐标系	(145)
2.2	三种坐标系的转换关系公式的推导	(146)
2.2.1	具有一条公共轴的直角坐标转换公式	(146)
2.2.2	地平坐标系和赤道坐标系	(147)
2.2.3	地平坐标系和水平坐标系	(149)
2.2.4	赤道坐标系和水平坐标系	(151)
2.3	从赤道坐标到地平坐标转换公式的深化	(153)
2.3.1	角速度和角加速度的转换公式的推导	(153)
2.3.2	望远镜视场中星位角 P 的变化	(156)
2.4	用直接投影法推导公式	(159)
2.5	不同赤纬的星的运行规律	(161)
2.5.1	南北方位和地平上下的判断	(161)
2.5.2	方位角 A 的修正计算	(163)
2.6	地平式望远镜的速度盲区	(164)
2.6.1	盲区的确定	(164)
2.6.2	盲区附近方位速度和方位加速度等高线	(166)
第三章 两轴望远镜指向误差分析		(167)
3.1	用直角坐标系表示望远镜轴系	(168)
3.1.1	望远镜的轴系和绝对(天文)坐标系的关系	(168)
3.1.2	由望远镜轴系误差引起的指向误差	(168)
3.1.3	望远镜的轴系误差	(169)
3.2	直角坐标转换法则	(169)

第四章 望远镜机架形式	(184)
4.1 两轴望远镜机架	(184)
4.1.1 机架形式分类	(184)
4.1.2 各机架类型的特点	(185)
4.1.3 第二轴抬高的改进设计	(188)
4.1.4 机械设计问题	(188)
4.2 望远镜轴系转动对像场的影响	(190)
4.2.1 像场的方向和位置	(190)
4.2.2 一般分析	(191)
4.2.3 北天极方向相对于仪器北的转动	(193)
4.2.4 光学元件相对转动对仪器北方向的影响	(193)
4.2.5 两因素综合后的像场旋转	(196)
4.2.6 像场旋转中心与光学视场中心一致性的调整	(196)
4.3 定日镜和定天镜	(198)
4.3.1 定日镜	(199)
4.3.2 定天镜	(200)
4.4 特殊的望远镜机架形式	(207)
4.4.1 单轴望远镜	(207)
4.4.2 球体望远镜	(207)
4.4.3 平行轴望远镜	(208)

4.4.4 倾斜第二轴的采用	(209)
4.5 重力变形固定不变的二镜系统	(209)
4.5.1 结构原理	(209)
4.5.2 实现对目标跟踪的可能性	(211)
第五章 结构力学和有限元原理	(214)
5.1 常用构件的静力变形公式摘要	(214)
5.1.1 简单构件受力变形和应力	(214)
5.1.2 圆形薄板弯曲	(215)
5.1.3 矩形薄板弯曲	(218)
5.1.4 接触变形和应力	(219)
5.1.5 压杆保持稳定的临界压力	(221)
5.1.6 简单弹性系统的自振频率	(221)
5.2 结构力学的一些基本方法和基本问题	(223)
5.2.1 求简单杆系变形的的方法	(223)
5.2.2 零件设计中的一些力学问题	(223)
5.2.3 片簧设计参数计算	(225)
5.2.4 对称结构的刚度合成	(226)
5.3 有限元法原理及其在结构变形分析中的应用	(231)
5.3.1 有限元法概述	(231)
5.3.2 有限元法的基本思路和步骤	(232)
5.3.3 杆系结构的有限元分析	(233)
5.3.4 连续弹性体的有限元法	(254)
5.4 结构动力学	(269)
5.4.1 拉普拉斯变换及有关公式	(269)
5.4.2 单自由度系统的动力学分析	(270)
5.4.3 激振力的传递和隔振原理	(279)
5.4.4 单自由度模型的地震响应	(281)
5.4.5 积分变换的讨论和单自由度系统公式汇总	(284)
5.4.6 用有限元法求结构自振频率和振型	(287)
5.4.7 用有限元法和振型组合法进行结构动力学分析	(294)

5.4.8 随机振动问题	(299)
5.5 有限元法在结构的温度场和热变形问题中的应用	(303)
5.5.1 望远镜结构的温度场和热变形问题	(303)
5.5.2 有限元法用于结构温度场问题	(303)
5.5.3 有限元法用于结构热变形分析	(308)
5.6 有限元建模中的一些问题	(312)
5.6.1 刚体自由度和选择约束的关系	(312)
5.6.2 对称和反对称的利用	(314)
5.6.3 避免刚度矩阵的主对角线元素为零的问题	(315)
5.6.4 特殊单元的运用	(316)
5.7 结构变形与望远镜成像的关系	(317)
5.7.1 结构变形对望远镜成像的影响	(317)
5.7.2 结构变形引起光轴方向变化的归算	(318)
第六章 桁架式镜筒及其结构分析	(320)
6.1 概述	(320)
6.2 桁架式镜筒的设计要求	(320)
6.3 平移桁架原理	(321)
6.3.1 反对称力学模型	(321)
6.3.2 纵向位移为 0 的非对称结构	(321)
6.3.3 平移结构	(322)
6.4 塞勒里尔 (Serrurier) 桁架	(322)
6.4.1 简介	(322)
6.4.2 结构分析	(322)
6.4.3 典型望远镜的塞勒里尔桁架镜筒	(328)
6.4.4 有关塞勒里尔桁架设计的几个问题	(329)
6.5 多层桁架镜筒	(334)
6.5.1 单层桁架在大型望远镜应用的局限性	(334)
6.5.2 典型大望远镜所采用的多层桁架	(334)
6.5.3 规律多层桁架镜筒	(335)

第七章 主镜结构及支承	(338)
7.1 主镜面形允差	(338)
7.1.1 决定允差的依据	(338)
7.1.2 主镜面形允差	(339)
7.1.3 面形质量评价函数	(339)
7.2 主镜结构及其支承设计的一些原则问题	(343)
7.2.1 主镜结构及其支承设计的任务	(343)
7.2.2 主镜结构设计的一些原则问题	(343)
7.2.3 主镜支承设计的一些原则问题	(343)
7.3 传统圆柱盘主镜的支承	(348)
7.3.1 由圆板理论估算主镜变形	(348)
7.3.2 传统主镜支承结构	(352)
7.4 主镜支承技术的发展	(356)
7.4.1 望远镜技术发展对主镜结构提出的要求	(356)
7.4.2 镜坯结构的发展	(356)
7.4.3 轻量化主镜	(357)
第八章 蜂窝镜结构	(363)
8.1 筋板排列基本形式	(363)
8.2 筋板密度	(364)
8.3 夹心板的等效弯曲刚度分析	(365)
8.3.1 假设条件	(365)
8.3.2 分析思路	(366)
8.3.3 弹性薄板弯矩和应力的关系	(366)
8.3.4 只有 x 方向筋板的夹心板	(367)
8.3.5 正方形单元夹心板	(368)
8.3.6 正三角形单元夹心板	(368)
8.3.7 正六边形单元夹心板	(369)
8.3.8 蜂窝夹心板等效厚度公式汇总	(370)
8.4 轻量化程度	(371)
8.5 面板最优厚度 t_0	(374)
8.6 筋间面板变形	(375)

8.7 蜂窝镜结构参数的优化步骤	(376)
8.8 制作工艺	(376)
第九章 结构优化	(378)
9.1 结构优化概述	(378)
9.1.1 望远镜结构优化的内容	(378)
9.1.2 结构优化方法	(378)
9.1.3 结构优化与有限元法	(379)
9.1.4 结构优化与通用结构分析软件	(379)
9.1.5 计算机优化与人工干预	(379)
9.1.6 优化问题的构成要素及优化问题形式	(379)
9.1.7 主要符号的意义	(380)
9.2 参数影响矩阵	(381)
9.2.1 公式推导	(381)
9.2.2 刚度敏感度和载荷敏感度	(382)
9.3 用数学规划法进行抛物面射电天线结构优化的若干方法	(383)
9.3.1 最佳吻合抛物面	(383)
9.3.2 以变形平方和为目标函数, 以体积不变为约束的优化问题	(389)
9.3.3 以“保形”为约束条件, 以设计变量变化最小为目标函数的天线结构优化 (冯·霍尔纳方法) ...	(391)
9.4 准则法	(394)
9.4.1 参数影响矩阵	(394)
9.4.2 以表面点轴向位移平方和为目标函数, 以重量 (体积) 不变为约束的天线结构优化 (王生洪方法)	(398)
9.5 某些直接解位移方程的结构优化方法	(399)
9.5.1 非线性函数降阶近似	(400)
9.5.2 直接解位移方程求目标函数对设计变量的差分	(400)
9.5.3 一阶近似后转化为线性规划问题	(401)
9.5.4 最速下降法	(402)

9.5.5 梯度投影法	(404)
9.5.6 牛顿法	(406)
9.6 普查法	(407)
第十章 六杆机构	(408)
10.1 六杆机构的优越性	(408)
10.2 六杆机构理论分析概述	(409)
10.2.1 六杆机构的构形	(409)
10.2.2 六杆机构的驱动方式	(410)
10.2.3 位移分析, 动平台结点位置与刚体位移的关系	(410)
10.2.4 动平台结点位移的近似表达式	(414)
10.2.5 速度分析	(415)
10.2.6 力学分析	(416)
10.3 六结点杆长控制六杆机构	(417)
10.3.1 机构特点	(417)
10.3.2 位移关系分析	(418)
10.4 轴向移动控制六杆机构	(422)
10.4.1 结构原理	(422)
10.4.2 位移关系	(422)
10.3.3 小位移条件下的近似位移关系	(423)
10.5 横向移动控制六杆机构	(426)
10.5.1 构形和特点	(426)
10.5.2 垂向支承设计及其位移关系分析	(427)
10.5.3 关于一般设计的几点讨论	(429)
10.6 六杆机构优化设计的任务及初始结构考虑	(430)
10.6.1 六杆机构优化设计的任务	(430)
10.6.2 支承三角形概念的应用	(431)
10.7 用实测法求雅可比矩阵	(437)
10.8 小位移三结点平台的技术实施	(438)
10.8.1 公共铰链结构方案	(438)
10.8.2 六结点动平台按三结点动平台设计	(438)

第十一章 自动导星方法	(439)
11.1 望远镜的自动导星	(439)
11.2 点源目标像的位置探测	(439)
11.2.1 机械调制方法	(440)
11.2.2 四棱体反射镜	(440)
11.2.3 四象限光电管	(440)
11.3 干涉测光导星 (波前倾斜探测)	(441)
11.4 摄像器件星像位置探测	(441)
11.5 太阳望远镜的太阳像 (面源目标) 的位置探测	(442)
11.5.1 全日面像导星	(442)
11.5.2 相关跟踪 (导星)	(444)
第十二章 主动光学基本原理	(447)
12.1 概述	(447)
12.2 薄镜面主动光学	(448)
12.2.1 波前检测	(448)
12.2.2 镜面校正力的计算	(451)
12.2.3 用直测法建立刚度矩阵	(455)
12.2.4 薄镜面主动光学校正能力的限度	(456)
12.3 拼镜面主动光学	(456)
12.3.1 由位移传感器的读数求促动器的位移量	(456)
12.3.2 共焦检测和调整	(457)
12.3.3 拼镜主动光学的共面检测方法	(460)
上篇参考文献	(468)

下篇 结构设计和新一代望远镜

下篇前言	(473)
第十三章 天文观测与天文望远镜	(474)
13.1 天文观测	(474)
13.2 天文望远镜的发展历史	(475)
13.3 天文学对光学天文望远镜的基本要求	(479)
13.3.1 天文望远镜的分辨率	(479)
13.3.2 天文望远镜的有效视场和综合效率	(481)
13.3.3 天文光学望远镜观测星等	(482)
13.3.4 大气窗口和台址的选择	(485)
第十四章 天文望远镜的设计方法	(487)
14.1 现代天文仪器设计过程	(487)
14.1.1 科学目标	(487)
14.1.2 功能的抽象化	(487)
14.1.3 明确设计技术要求和约束条件 (Specifications, Constraints)	(487)
14.1.4 设计任务书内容	(488)
14.1.5 技术条件依据	(488)
14.1.6 调研工作	(489)
14.1.7 初步设计阶段 (Preliminary Design)	(489)
14.1.8 可行性研究阶段 (Feasibility Study)	(491)
14.1.9 详细设计或最终设计阶段 (Detailed Design or Finalizing Design)	(492)
14.1.10 鉴定和文件归档 (Evaluating and Documenting the Design)	(493)
14.2 天文仪器设计过程阶段和工作框图	(493)
14.3 设计采用黑箱法	(494)
14.4 设计前应明确的各方面	(495)