



Springer 航天技术译丛

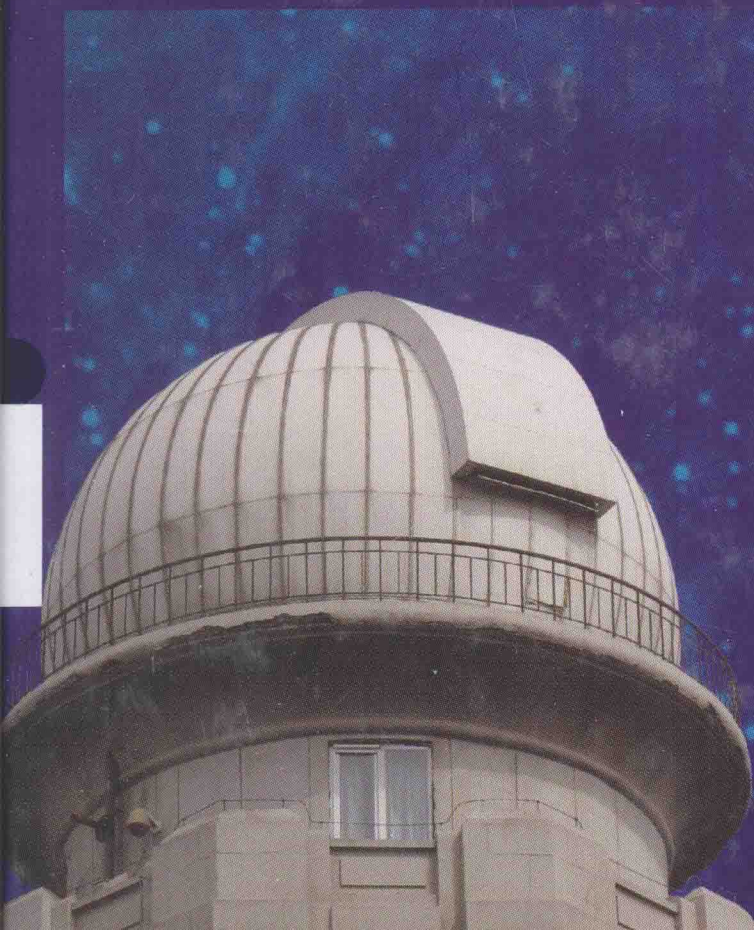
# 大型光学望远镜的设计与建造

[美] Pierre Y. Bely 主编

北京跟踪与通信技术研究所

高昕 王建立 唐嘉 译

于前洋 审校



清华大学出版社

Spr

---

# 大型光学望远镜的设计与建造

[美] Pierre Y. Bely 主编

高昕 王建立 唐嘉 译

清华大学出版社  
北京

**Translation from the English language edition:**

*The Design and Construction of Large Optical Telescopes*, 1<sup>st</sup> Edition by Pierre Y. Bely  
ISBN 978-0-387-95512-4

**Copyright © Springer 2003**

**Springer is a part of Springer Science + Business Media**

**All Rights Reserved.**

本书中文简体字翻译版由德国施普林格公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2013-7718

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

大型光学望远镜的设计与建造/(美)贝里(Bely, P. Y.)主编;高昕,王建立,唐嘉译.--北京:清华大学出版社,2015

(Springer 航天技术译丛)

书名原文: *The Design and Construction of Large Optical Telescopes*

ISBN 978-7-302-41269-4

I. ①大… II. ①贝… ②高… ③王… ④唐… III. ①天文望远镜—光学望远镜  
IV. ①TH751

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 186452 号

责任编辑:石磊 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:三河市市中晨雅豪印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153mm×235mm 印 张:28.5 字 数:495 千字

版 次:2015 年 7 月第 1 版 印 次:2015 年 7 月第 1 次印刷

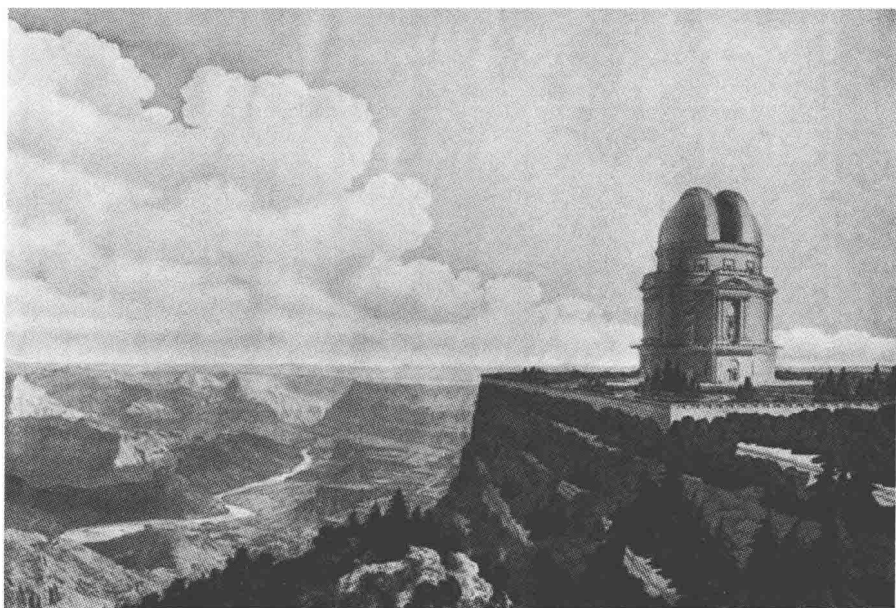
定 价:98.00 元

---

产品编号:053329-01

## 致梦想者

——过去、现在和未来



乔治·W.里奇 1929 年提议在大峡谷修建 8m 望远镜。

(法国天文学会提供)

Springer 航天技术译丛

## 编译委员会

主 任 钱卫平

委 员 董光亮 朱天林 吴正容

孙 威 李海涛

# 译者序

本书译自 2002 年由皮埃尔·Y. 贝里主编的 *The Design and Construction of Large Optical Telescopes*。本书将大型望远镜设计与建造的基础理念与技术以及相关的基本天文和工程原理首次融汇到一起,涵盖了大型望远镜设计与建造的所有重要领域,从天文观测基础,到光学设计、机械结构、控制系统以及站址选择和项目管理等专门课题。本书吸取了众多活跃在这些领域的科学家和工程师的研究成果,对大型望远镜设计、研制及相关领域的研究人员和从业人员具有很好的帮助和指导作用。

本书由北京跟踪与通信技术研究所组织编译。第 1~5 章由高昕研究员翻译,第 6、8、9、11、12 章由王建立研究员(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)翻译,第 7、10 章由唐嘉工程师翻译,全书由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所于前洋研究员审校。

翻译中译者力求忠实于原著,但由于译者水平有限,书中难免存在疏漏和不当之处,恳请广大读者和专家批评指正。

译者

2015 年 6 月

论述望远镜光学的书籍,市面算不上缺乏。谈到设计与建造大型望远镜,光学当然是其关键元素。当然,这不意味着,只需要一种关键元素就可包打天下。时至今日,望远镜体积越来越大,成本越来越高,精密结构、指向系统、波面控制、附属设备和项目管理等诸多方面,都变得十分重要,缺一不可。

当然,这些领域的很多基础理论与技术知识,都可以在各类专业书籍、期刊文献和技术报告中找到,似乎不用再拨冗写什么望远镜方面的书了。然作者及其朋友们,由于多年在此山之操劳与兴志所在,总觉意犹未尽、不吐不快,总想做点什么,觉得有事可做。本书就尝试将大型望远镜设计与建造的基础理念与技术,以及相关的基本天文知识和工程原理,首次融汇到一起。目标是涵盖所有大型望远镜设计与建造的重要领域,从天文观测基础,到光学、控制、结构、机械与热工程以及站址选择和项目管理等专门课题。

目标既然选得如此宽阔宏大,过深论述显然不现实。我们力图为望远镜设计与建造提供一个基本而综合性的介绍。本书不能代替专业科学技术书籍,但对于想对望远镜制造有基本理解的天文学家、管理者们和系统工程师,本书一定会有帮助,这些天文学家、管理者和系统工程师可能希望了解望远镜的制造原理;对有志于帮助自己的同事在职业训练中了解这方面基本知识的专家,本书更会有所斩获。

我们慎重选择从常规视角入手,去研究地面望远镜和空间望远镜。研究机构和工业企业在这方面曾有很好的分工与合作,因此,地面望远镜和空间望远镜的设计和制造大多数都是由具有不同文化背景的科学家、工程师和企业家们合作完成的。事实上,很多问题都是相似的,我们觉得,不同文化背景在解决同样的问题上发挥的作用可能是一大优势。

因为我们的目标比较宽泛,所以本书是许多科学家、工程师和管理者共同编写完成的。本书没有采用传统的一人一章的编写格式,而是采用从引言到解决办法的统一的叙事格式。最后,为保证客观性与完整性,再由其他专家评述与扩展。总之,本书实际上是现今大量活跃在各领域的重要人物

的共同作品。名单附后。

作为编辑,我要感谢空间望远镜科学研究所、欧洲南方天文台的支持,特别感谢空间望远镜科学研究所的 Ann Feild 提供的图。还必须感谢 Springer-Verlag 资深编辑 Louise Farkas 在书稿编写过程中提供的宝贵帮助。对所有为本书提供帮助的研究所和工业界同仁诚恳致谢。最后,感谢我妻子 Sally 在本书出版上的大力协助。

巴尔的摩,马里兰州 皮埃尔·Y. 贝里

2002 年 10 月

# 作者与评论者

本书是团队努力的成果,众多活跃在这些领域的科学家和工程师,都为此贡献了宝贵丰富的学识与经验。以下列出其姓名及工作团队,并列出参加的主题讨论。标注\*者为主要贡献人。

**Greg Andersen**, 洛克希德-马丁公司: 空间系统指向控制

**Roger Angel**, Steward 天文台: 反射镜制造, 望远镜总体概念

**Charles Atkinson**, TRW 公司: 光学设计与制造

**Janet Barth\***, NASA, 哥达德飞行控制中心: 空间环境

**Christopher Benn\***, Isaac Newton 公司: 望远镜性能指标

**Pierre Bely\***, 空间望远镜科学研究所(退休): 全部主题及统编

**Daniel Blanco\***, EOS 科技公司: 机械设计

**Allen Bronowicki\***, TRW 空间及电子技术团队: 空间系统动力学、隔离与姿态控制

**Richard Burg\***, NASA, 哥达德太空飞行中心: 天文观测, 综述

**James Burge**, 亚利桑那大学光学科学中心: 主镜制造, 光学车间检验

**Robert Burke**, TRW 空间及防御中心: 项目管理

**Christopher Burrows**, 顾问(曾任空间望远镜科学研究所): 成像质量

**Marvin (Tim) Campbell\***, Vertex RSI: 控制系统

**Stefano Casertano**, 空间望远镜科学研究所: 天文观测

**Marc Cayrel\***, 法国 REOSC 公司: 反射镜材料与制造

**Gary Chanan**, 加利福尼亚大学, 欧文分校: 拼接式系统的共相程景全, 国家射电天文台: 通用望远镜设计

**Martin Cullum\***, 欧洲南方天文台: 地基望远镜热控制

**Larry Daggert**, NOAO, Gemini 天文台: 系统工程与项目管理

**Phillipe Dierickx\***, 欧洲南方天文台: 光学系统设计、反射镜制造

**Rodger Doxsey**, 空间望远镜科学研究所: 项目管理

**Scott Ellington**, 威斯康星大学空间科学及工程中心: 控制系统

**Toomas Erm**, 欧洲南方天文台: 控制系统

**Fred Forbes**, NOAO (退休): 大气视宁度及视宁度控制

**George Frederick**, URS Radian 气象系统: 声波探测

**Paul Gillett**, NOAO, Gemini 天文台: 圆顶

**Paul Giordano**, 欧洲南方天文台: 反射镜清洗和镀膜

**Gary Golnik**, Schafer 公司: 系统工程和项目管理

**Peter Gray**, 欧洲南方天文台: 装配和集成

**Hashima Hasan**, NASA 总部: 图像质量

**Thomas Hawarden**, 英国皇家天文台, 天文技术中心: 天文观测, 热问题, 红外望远镜

**John Hill**<sup>\*</sup>, Steward 天文台, 大型双筒望远镜项目(LBT): 望远镜概念, 反射镜制造

**James Janesick**, Sarnoff 公司先进探测器团队: 固态探测器

**Helmuth Jenkner**, 空间望远镜科学研究所: 天文观测, 导星星库

**Debora Katz**, 美国海军学院: 天文观测

**Philip Kelton**, 德克萨斯大学 HET 望远镜: 望远镜设计

**Michael Krim**, 雷神(退休): 空间结构, 反射镜制造和支撑

**John Krist**, 空间望远镜科学研究所: 成像建模

**Mark Lake**, JPL 实验室: 微观动力学

**Marie Levine**, JPL 实验室: 微观动力学, 阻尼

**Richard Lyon**, 马里兰大学: 衍射极限光学

**Barney Magrath**, 加拿大-法国夏威夷望远镜(CFHT)天文台: 镜面清洗和镀膜

**Jean-Pierre Maillard**, 法国天文物理学院: 天文观测, 仪器终端

**Terry Mast**<sup>\*</sup>, 加利福尼亚大学, 圣克鲁兹分校: 拼接镜, 光学制造与检测, 主动光学

**Rebecca Masterson**, TRW 空间与电子集团: 干扰与隔离

**John Mather**, 下一代天文望远镜项目(NGST)科学家, 戈达德太空飞行中心: 综述

**Craig McCreight**, NASA, 埃姆斯研究中心: 探测器, 仪器终端

**Stefan Medwadowski**, 咨询结构工程师: 望远镜结构设计, 圆顶与建筑设计

**Aden Meinel**<sup>\*</sup>, 亚利桑那大学光学科学中心(退休): 光学设计, 望远镜概念

**Marjorie Meinel**<sup>\*</sup>, 亚利桑那大学光学科学中心(退休): 光学设计, 望

## 远镜概念

**Mike Menzel**, 洛克希德-马丁公司: 项目管理, 系统工程

**Luciano Miglietta**, 意大利 Arcetri 天文台: 机械系统

**Gary Mosier**<sup>\*</sup>, NASA, 戈达德太空飞行中心: 空间望远镜指向系统

**Jerry Nelson**<sup>\*</sup>, 凯克天文台: 反射镜设计与制造, 望远镜系统, 观测

## 概念

**Lothar Noethe**<sup>\*</sup>, 欧洲南方天文台: 反射镜支撑系统, 风载

**James Oschmann**, NOAO, GEMMINI 天文台: 项目管理

**Mette Owner-Petersen**<sup>\*</sup>, 瑞典 Lundt 天文台: 光学设计

**Roger Paquin**, 先进材料顾问: 材料特性与制造

**Thomas Parsonage**, Brush Wellmann 公司: 铍材料和制造

**Earl Pearson**, 基特峰(Kitt Peak)国家天文台: 机械设计

**Charles Perrygo**<sup>\*</sup>, Swales Associates 公司: 机械和结构设计

**Gary Peterson**<sup>\*</sup>, Breault 工程公司: 杂光

**Larry Petro**, 空间望远镜科学研究所: 天文观测

**Joe Pitman**<sup>\*</sup>, 洛克希德-马丁公司: 天基系统结构

**Marco Quattri**<sup>\*</sup>, 欧洲南方天文台: 望远镜圆顶和内部结构

**Bernard Rauscher**<sup>\*</sup>, 空间望远镜科学研究所: 天基望远镜科学院: 探

## 测器

**Martin Ravensbergen**<sup>\*</sup>, AMSL, 荷兰, 早先在欧洲南方天文台: 控制

## 系统

**David Redding**, JPL 实验室: 主动光学, 相位复原技术

**Francois Rigault**, Gemini 天文台: 自适应光学

**Massimo Robberto**<sup>\*</sup>, 空间望远镜科学研究所: 红外望远镜和仪器终端

**Francois Roddier**<sup>\*</sup>, 夏威夷大学天文学院(退休): 大气湍流, 成像质量, 光学测试, 自适应光学

**Joseph Rothenberg**, NASA 总部(退休): 大空间项目管理

**Marc Sarazin**<sup>\*</sup>, 欧洲南方天文台: 站址选择, 视宁度

**Daniel Schroeder**<sup>\*</sup>, 伯洛伊特(Beloit)学院(退休): 光学设计

**Bernard Seery**, 戈达德太空飞行中心: 系统问题, 项目管理

**Michael Schneermann**, 欧洲南方天文台: 望远镜力学, 圆顶

**David Shuckstes**, TRW 空间和防御部: 项目管理

**Walter Siegmund**<sup>\*</sup>, 华盛顿大学: 望远镜结构与力学, 圆顶设计

**Mark Sirota**, 康宁公司: 指向控制系统

**Alessandro Spagna**, 意大利都灵天文观测站: 导星数

**Philip Stahl**, NASA, 马绍尔太空飞行中心: 光学制造和测试

**Larry Stepp**<sup>\*</sup>, NOAO, Gemini 天文台: 光学设计和制造

**Mark Stier**, Goodrich 公司: 空间望远镜, 光学制造

**Conrad Sturch**, 空间望远镜科学研究所: 天文观测

**Marco Venturini**, 意大利 Phase 运动控制公司: 直接驱动, 控制系统

**Merle Walker**, 加利福尼亚大学, Lick 天文台(退休): 站址测试

**Mark Warner**, 国家太阳天文台: 望远镜结构与力学

**Robert Williams**, 空间望远镜科学研究所: 项目管理, 科学测量

**Krister Wirenstrand**, 欧洲南方天文台: 天文台控制软件

**Eve Woolridge**, NASA, 戈达德太空飞行中心: 空间光学污染

**James Wyant**, 亚利桑那大学光学科学中心: 光学测试

**Lorenzo Zago**<sup>\*</sup>, 瑞士联邦技术学院, 之前在欧洲南方天文台: 大气湍流, 圆顶和镜面视宁度



## 表版权说明

感谢下列出版商允许使用书内的图表材料,有些按文本内容作了修改与重画。

学术出版社:图 4.10(b),来自 Schroeder, D. J., *Astronomical Optics*, 图 10.5.

德芙出版社:图 12.13,来自 Bate, R. B., Mueller, D. D., and White, J. E., *Fundamentals of Astrodynamics*, 1971, p. 157.

International Society for Optical Engineering (SPIE): 图 3.12, 图 4.52, 图 5.10, 图 7.37, 图 8.24, 图 9.2, 图 11.6, 图 11.8, 图 11.16. (图内说明了引证出处)

John Wiley & Sons, Inc. and Praxis Publishing Ltd.: 图 2.9, 来自 McLean, I. S., *Electronic Imaging in Astronomy: Detectors and Instrumentation*, 1997, Figure 6.3.

Nature: 图 3.16, 来自 Leverington, D., "Star-gazing funds should come down to Earth," *Nature*, Vol. 387, p. 12, Figure 1, 1997.

Publications of the Astronomical Society of the Pacific: 图 4.12, 来自 Hasan, H. and Burrows, C. J., "Telescope image modeling (TIM)," *PASP*, Vol. 107, p. 291, 1995, Figure 1.

Scientific American, Inc.: 图 2.8, 来自 Kristian, J. and Blourke, M., "Charge-coupled devices in astronomy," *Scientific American*, Vol. 247, No. 4, second figure on p. 70, 1982.

我们还要感谢下列公司和学院,允许使用其图表和数据,有些按文本内容作了修改与重画。

Canada-France-Hawaii Telescope Corporation: 图 6.20, 图 6.35(a), 图 6.49 和图 6.51(a), 图 9.7 和表 3.5.

Draper Laboratory: 图 8.13.

European Southern Observatory: 图 4.18, 图 6.15, 图 6.33(a), 图 6.35(b), 图 6.43(a), 图 7.13, 图 7.27(a), 图 7.28, 图 7.29, 图 8.19,

图 8. 22, 图 11. 5, 图 11. 7 和图 12. 4, 还有表 3. 5 和部分说明.

Gemini Observatory: 图 3. 8, 图 3. 21, 图 3. 22, 图 4. 20, 图 6. 27(b), 图 6. 48(a), 图 9. 11, 图 11. 2 和图 11. 16, 以及表 3. 5 和表 7. 3.

Goodrich Corporation: 图 7. 20(b).

Heidenhain Corporation: 图 7. 22.

W. M. Keck Observatory: 图 4. 40, 图 6. 18, 图 6. 23, 图 6. 24, 图 6. 27(b), 图 6. 33(b), 图 6. 43(b), 图 7. 15, 图 8. 9(b), 图 8. 10, 图 8. 24, 图 8. 25 和表 3. 5.

Jet Propulsion Laboratory: 图 7. 4 和图 7. 41.

McDonald Observatory: 图 6. 39.

Multiple Mirror Telescope Observatory: 图 6. 4(b).

Next Generation Space Telescope Project Office: 图 3. 1, 图 3. 18, 图 4. 17, 图 4. 42(b), 图 5. 17, 图 6. 30, 图 7. 12, 图 7. 25, 图 7. 33, 图 7. 35, 图 8. 18, 图 8. 26, 图 10. 3 和部分说明.

Observatoire Midi-Pyrénées: 图 11. 9(b).

Phase Motion Control, Inc. : 图 7. 16.

REOSC: 图 4. 39, 图 4. 42(a) 和图 4. 20.

SKF USA, Inc. : 图 6. 42.

Société Astronomique de France: 页 V 说明.

Space Telescope Science Institute: 图 1. 1, 图 1. 2, 图 4. 11, 图 4. 24, 图 4. 27(a), 图 5. 7, 图 5. 16, 图 6. 27(a), 图 7. 26, 图 7. 36, 图 7. 37, 图 7. 42 和表 3. 5.

Subaru Telescope National Astronomical Observatory of Japan: 图 6. 45 和表 6. 2. 1.

University of Arizona Mirror Lab: 图 4. 41.

Isaac Newton Group, La Palma: 图 4. 51 和表 3. 5.

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 引言 .....                 | 1  |
| 1 天文观测 .....             | 5  |
| 1.1 天文望远镜的作用 .....       | 5  |
| 1.2 观测源特征 .....          | 5  |
| 1.2.1 强度 .....           | 5  |
| 1.2.2 天空中最关注源的分布 .....   | 7  |
| 1.3 通过大气的观测 .....        | 8  |
| 1.3.1 大气消光 .....         | 8  |
| 1.3.2 大气辐射 .....         | 10 |
| 1.3.3 大气折射 .....         | 11 |
| 1.3.4 大气扰动：基本概念 .....    | 12 |
| 1.3.5 大气扰动：视宁度物理意义 ..... | 16 |
| 1.4 背景源 .....            | 17 |
| 1.4.1 天空背景 .....         | 17 |
| 1.4.2 大气背景 .....         | 20 |
| 1.4.3 杂光和探测器背景 .....     | 20 |
| 1.4.4 应对大气和望远镜的热辐射 ..... | 21 |
| 1.5 信噪比 .....            | 22 |
| 1.6 时间 .....             | 25 |
| 1.6.1 恒星时 .....          | 25 |
| 1.6.2 儒略日 .....          | 25 |
| 1.7 坐标系 .....            | 26 |
| 1.8 指向修正 .....           | 28 |
| 1.8.1 岁差和章动 .....        | 29 |
| 1.8.2 自行 .....           | 29 |
| 1.8.3 视差 .....           | 29 |
| 1.8.4 恒星光行差 .....        | 30 |

|       |                        |           |
|-------|------------------------|-----------|
| 1.8.5 | 大气折射 .....             | 31        |
| 1.9   | 望远镜指向和跟踪过程 .....       | 31        |
| 1.9.1 | 目标截获 .....             | 32        |
| 1.9.2 | 引导 .....               | 33        |
| 1.9.3 | 引导星表 .....             | 33        |
| 1.10  | 望远镜与干涉仪 .....          | 33        |
|       | 参考文献 .....             | 35        |
|       | 书目 .....               | 36        |
| 2     | <b>仪器 .....</b>        | <b>38</b> |
| 2.1   | 仪器的主要类型 .....          | 38        |
| 2.1.1 | 相机 .....               | 38        |
| 2.1.2 | 光度计 .....              | 39        |
| 2.1.3 | 偏振计 .....              | 40        |
| 2.1.4 | 色散型光谱仪 .....           | 41        |
| 2.1.5 | 法布里-珀罗光谱仪 .....        | 43        |
| 2.1.6 | 傅里叶变换光谱仪 .....         | 44        |
| 2.2   | 可见-中红外探测器 .....        | 45        |
| 2.2.1 | 半导体内的光子探测 .....        | 46        |
| 2.2.2 | CCD 探测器 .....          | 48        |
| 2.2.3 | 红外阵列探测器 .....          | 49        |
| 2.2.4 | 专用探测器的特点 .....         | 51        |
| 2.3   | 中继光学 .....             | 54        |
| 2.4   | 制冷系统 .....             | 55        |
|       | 参考文献 .....             | 56        |
|       | 书目 .....               | 56        |
| 3     | <b>设计方法与项目管理 .....</b> | <b>57</b> |
| 3.1   | 项目生命周期 .....           | 58        |
| 3.2   | 系统工程工具 .....           | 60        |
| 3.2.1 | 设计参考程序 .....           | 61        |
| 3.2.2 | 需求逐级“下行” .....         | 63        |
| 3.2.3 | 误差分配 .....             | 65        |
| 3.2.4 | 端对端计算机仿真 .....         | 67        |
| 3.2.5 | 可测性和容错性设计 .....        | 68        |
| 3.2.6 | 缩比法则 .....             | 68        |

|        |                   |     |
|--------|-------------------|-----|
| 3.2.7  | 成本模型 .....        | 70  |
| 3.2.8  | 作为设计变量的成本 .....   | 72  |
| 3.2.9  | 天文观测平台性能评价 .....  | 73  |
| 3.3    | 项目管理 .....        | 78  |
| 3.3.1  | 一般性原则 .....       | 78  |
| 3.3.2  | 项目组织 .....        | 79  |
| 3.3.3  | 项目分解结构 .....      | 79  |
| 3.3.4  | 项目数据库 .....       | 80  |
| 3.3.5  | 采购策略 .....        | 81  |
| 3.3.6  | 技术开发 .....        | 82  |
| 3.3.7  | 可靠性 .....         | 83  |
| 3.3.8  | 质量保证、检验和验证 .....  | 84  |
| 3.3.9  | 接口文档 .....        | 85  |
| 3.3.10 | 结构管理 .....        | 85  |
| 3.4    | 项目进度表 .....       | 85  |
| 3.5    | 风险分析 .....        | 88  |
| 3.6    | 成本估算和预算编制 .....   | 89  |
| 3.6.1  | 成本估算方法 .....      | 89  |
| 3.6.2  | 主要资助机构的财政预算 ..... | 90  |
| 3.6.3  | 成本估算的准确率 .....    | 91  |
| 3.6.4  | 多个单元建造 .....      | 91  |
| 3.6.5  | 拟定预算和资源规划 .....   | 92  |
|        | 参考文献 .....        | 93  |
|        | 书目 .....          | 94  |
| 4      | 望远镜光学系统 .....     | 95  |
| 4.1    | 光学设计基础 .....      | 95  |
| 4.1.1  | 基本原理 .....        | 95  |
| 4.1.2  | 二次曲面公式 .....      | 96  |
| 4.1.3  | 光阑与光瞳 .....       | 97  |
| 4.1.4  | 初级像差 .....        | 98  |
| 4.1.5  | 波像差 .....         | 100 |
| 4.1.6  | 衍射效应 .....        | 102 |
| 4.1.7  | 像的形成 .....        | 103 |