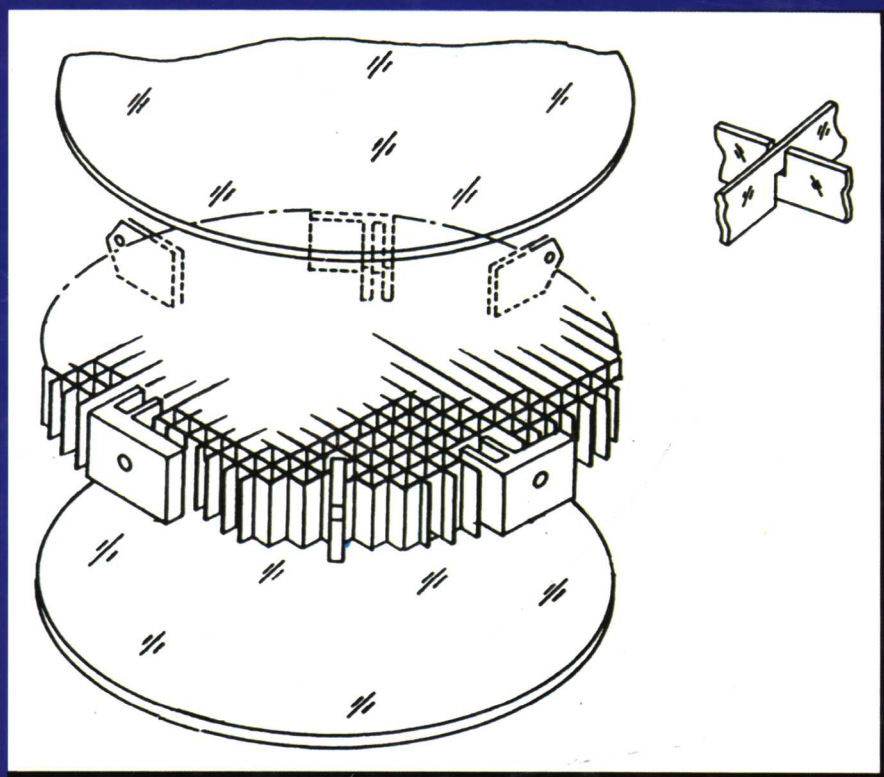


Opto-Mechanical  
Systems Design

# 光机系统设计

(原书第3版)



(美) Paul R. Yoder, Jr. 著

周海宪 程云芳 译  
周华君 程 林 校

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



TB133/10

2008

# 光机系统设计

(原书第3版)

(美) Paul R. Yoder, Jr. 著

周海宪 程云芳 译

周华君 程 林 校

机械工业出版社

本书共分为4个部分15章：第一部分阐述光机系统总的设计概念，包括第1章光机设计过程，第2章环境影响和第3章材料的光机特性；第二部分是透射式光机系统的设计，包括第4章单透镜的安装，第5章多透镜的安装，第6章光窗和滤光片的安装和第7章棱镜的设计和安装；第三部分是反射式光机系统的设计，包括第8章小型非金属反射镜、光栅和胶片的设计和安装，第9章轻质非金属反射镜的设计，第10章光轴水平放置的大孔径反射镜的安装，第11章光轴垂直放置的大孔径反射镜的安装，第12章大孔径、变方位反射镜的安装技术和第13章金属反射镜的设计和安装；第四部分是光机系统的整体分析，包括第14章光学仪器的结构设计和第15章光机系统设计分析。本书提供的材料和例子能够对军事、航空航天和民用光学仪器应用中的设计概念、具体设计、开发、评价和使用提供有用的指导。

本书可供在光电子领域中从事光学仪器设计、光学设计和光机结构设计的研究设计师、光机制造工艺研究的工程师、光机材料工程师阅读，也可以作为大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。

Opto-mechanical System Design, 3<sup>rd</sup> edition/by Paul R. Yoder, Jr.

© 2006 by Taylor & Francis Group, LLC

CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group

All Rights Reserved.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC.

© 2008 by China Machine Press

本书中文简体字版由 Taylor & Francis 集团 CRC 出版公司授权机械工业出版社独家翻译出版。

版权所有，违者必究。

本书著作权登记号：图字01-2007-3013号

## 图书在版编目(CIP)数据

光机系统设计：原书第3版 / (美) 约德 (Yoder, P. R.) 著  
周海宪, 程云芳译. —北京：机械工业出版社, 2008. 1  
ISBN 978 - 7 - 111 - 23073 - 1

I. 光… II. ①约…②周…③程… III. 光学系统 - 系统设计 IV. 043

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 194963 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：牛新国 责任校对：吴美英

封面设计：王奕文 责任印制：李妍

北京蓝海印刷有限公司印刷

2008 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm × 260mm · 49.75 印张 · 2 插页 · 1175 千字

0001—4000 册

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 23073 - 1

定价：98.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换  
销售服务热线电话：(010) 68326294  
购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643  
编辑热线电话：(010) 88379768  
封面无防伪标均为盗版

## 译 者 序

光学是一门古典和传统的学科，又是一门非常活跃的学科。最近几十年来，随着近代光学和光电子技术的迅速发展，光电子仪器及其元件都发生了深刻和巨大的变化，在继承传统光学的基础上创新了许多新的成像技术、新的加工方法和新的光学元件，形成了一些新的光学分支。

光学成像技术的变化主要表现在以下几个方面：

- 光学成像元件和系统的光谱范围已经由可见光光谱几乎扩展到全光谱范围，包括远红外、中红外、近红外、可见光和紫外光谱区；

- 光学成像元件不只是简单的透镜、棱镜和反射镜，已经设计和制造出诸如全息透镜，衍射透镜和微透镜阵列等新型光学元件；

- 光学系统的成像不只是遵守折射定律和反射定律，衍射理论已经成为衍射光学元件的基本成像理论；

- 光学元件的加工方法不只是传统的粗磨、精磨和抛光工艺，已经创立了全息干涉法、蚀刻法以及微透镜加工法；

- 光学元件的外形尺寸在向两个极端方向发展，一些光电子仪器中要求每毫米基板上能制造出千百个透镜（微透镜阵列），而另一些光学仪器则要求主反射镜的通光孔径大到 8.1m（Gemini 望远镜），全息光栅和薄膜透镜的应用使透镜的厚（薄）度到了极限；

- 光学元件和系统的应用环境已经由实验室和地球表面延伸到了宇宙的其他空间，环境条件对元件和系统的要求越来越高，也越来越苛刻。

光学技术的创新进一步促进了光机系统的发展，为光机零件、组件和系统的设计、制造、装配、检验和测量提出了许多新的研究课题。

Jacobs 首次提出将光学设计、机械结构设计和光机系统的设计作为整体设计考虑，多种杂志和出版物发表了许多有关光机系统设计课题的文章，一些专业协会 [例如美国光学协会 (OSA) 和国际光学工程协会 (SPIE)] 已经认识到了这个课题的重要性，将光机设计和光机系统工程问题列为专题讨论，因此，光学设计和结构设计已经成为一个紧密结合的专业，互相沟通和互相配合是必不可少的。在不同的研制阶段，光学设计和结构设计的主要角色和重要性在不断转换，正如 Donald H. Jacobs 所论述的：“在设计任何光学仪器时，不能完全把光学设计和机械设计作为不同的个体分割开来考虑，它们不过是一个问题的两个阶段”。

《光机系统设计》一书的作者 Paul R. Yoder, Jr. 先生是国际光学工程领域中著名的光机系统设计专家，1947 年在 Juniata 学院获得理学学士学位，1950 年在宾西法尼亚州立大学获得硕士学位。将近 60 年来，一直从事光学仪器光机系统工程的研发和管理工作，设计和分析过许多光学仪器，在美国法兰克福 (Frankford) 军工厂、Perkin-Elmer 公司及 Taunton 技术有限公司担任过各种技术和工程管理职务。Yoder 先生是美国光学协会

(OSA)、国际光学工程协会 (SPIE) 及 Sigma Xi 协会会员, 是 SPIE 光机/仪器工作委员会的创始成员。Yoder 先生担任过光学工程 (Optical Engineering) 杂志的评论编辑、应用光学 (Applied Optics) 杂志的专题编辑, 是国际标准化组织 (ISO), 红外空间观测站委员会技术委员会 (T172 类)、光学和光学仪器美国咨询委员会的成员, 是国际光学委员会 (ICO) 美国委员会的成员。为 SPIE、工业界和美国政府部门承办过许多有关光学工程和光机设计的短期培训班, 为康涅狄格 (Connecticut) 大学讲授研究生课程, 为全美技术 (网络) 大学讲授两门课程。

Paul R. Yoder, Jr. 先生参加过《光学手册》(Handbook of Optics) 第 2 版第一卷 (McGraw-Hill, 1995) 和《光机工程手册》(Handbook of Optomechanical Engineering) (CRC Press, 1997) 一些章节的撰写; 出版了《光学仪器中透镜的安装技术》(SPIE Press, 1995)、《光学仪器中棱镜和小反射镜的设计和安装》(SPIE Press, 1998) 和《光学仪器中光学件的安装技术》(SPIE Press, 2002) 等著作。在许多国际会议和杂志上发表过 65 篇光学工程方面的技术论文。

1986 年,《光机系统设计》一书首次出版, 概括和总结了光机系统总的设计过程, 从讨论概念设计开始, 到评价成品的各项性能, 最后形成设计文件, 使读者首先懂得一个成功的设计所必须采取的主要步骤。接着介绍环境的影响、光机零件材料、各种典型光学元件的安装技术, 包括单透镜、反射镜和棱镜; 折射组件和折反射组件; 轻质反射镜; 光轴水平放置、垂直放置以及可变向运动反射镜的安装; 金属反射镜的设计、制造和安装。此后, 光机系统设计的多学科研究受到越来越高的重视, 陆续发表了大量相关课题新的研究资料, 评价机械结构和光学件—镜座安装界面的解析技术也越来越成熟, 新材料和性能得到改进后的材料越来越多地进入实用阶段, 所以, 在 1992 年, 出版了本书的修订版 (第 2 版), 扩充了尽可能多的新技术, 增添了大约 300 篇新的参考文献, 给出了许多使用新方法设计出的例子, 总结了光学件在不利环境条件下的评价技术, 拓宽了安装应力对光学零件影响的讨论, 在所有的例子中都同时给出了 SI 单位制和英制单位制。此后的 14 年内, 光机专业以未曾有过的速度继续发展, 国际光学工程师协会又举办过多次 (至少 33 次) 与光机技术有关的学术会议, 这些会议文章极详细地阐述和讨论了当今所产生的光学新技术、新的设计工具、新的产品和测试设备, 以及诸如宇航望远镜和空间科学仪器等主要系统的性能, 提供了更多和更重要的光机系统方面的技术信息。因此, 在前两版成功出版的基础上, 再次修订后的《光机系统设计》原书第 3 版在 2006 年正式出版。

本书 (原书第 3 版) 共分 4 个部分 15 章: 第一部分阐述光机系统总的设计概念, 包括第 1 章光机设计过程, 第 2 章环境影响和第 3 章材料的光机特性; 第二部分是透射式光机系统的设计, 包括第 4 章单透镜的安装, 第 5 章多透镜的安装, 第 6 章光窗和滤光片的安装和第 7 章棱镜的设计和安装; 第三部分是反射式光机系统的设计, 包括第 8 章小型非金属反射镜、光栅和胶片的设计和安装, 第 9 章轻质非金属反射镜的设计, 第 10 章光轴水平放置的大孔径反射镜的安装, 第 11 章光轴垂直放置的大孔径反射镜的安装, 第 12 章大孔径、变方位反射镜的安装技术和第 13 章金属反射镜的设计和安装; 第四部分是光机系统的整体分析, 包括第 14 章光学仪器的结构设计和第 15 章光机系统设计分析。

在中文版《光机系统设计》的出版过程中, 得到了 Paul R. Yoder, Jr. 先生的大力支

持，对原版英文书中的有关问题进行了及时和充分的沟通讨论，对书中一些有重要变动的内容增加了“译者注”。为了使读者更准确地理解和利用本书，保留了英文参考文献。

周海宪翻译了第1~第14章，程云芳翻译了第15章。在美国工作的周华君和程林先生对全书进行了认真的校对，程云芳和范斌高级工程师对该书做了专业校对和最终审核。

清华大学教授、中国工程院院士金国藩先生、美国的 Paul R. Yoder, Jr. 先生和北京理工大学王涌天教授对本书的出版给予了极大的关注，对有关问题给出了诚恳的建议；与祖成奎博士和黄存新博士在光学材料方面进行了非常有益的讨论；特别是刘永祥、仇志刚、郭世勇、潘新宇等高级工程师都对本书的出版给予了很大支持，在此表示衷心的感谢。同时，也感谢我的同事吴建伟、邢妙娟、朱彬、李延蕊、杨耀山和翟文军高级工程师的真诚帮助。

机械工业出版社电工电子分社的牛新国社长对本书的出版给予了非常大的鼓励和支持，在此特别致以谢意！

本书可供在光电子领域中从事光学仪器设计、光学设计和光机结构设计的研发设计师、光机制造工艺研究的工程师、光机材料工程师阅读，也可以作为大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。希望本书提供的材料和例子能够对军事、航空航天和民用光学仪器应用中的设计概念、具体设计、开发、评价和使用提供有用的指导。

译者

2007年10月

## 第3版前言

在前两版成功出版的基础上,《光机系统设计》第3版对光机设计中使用的技术又进行了更新,强调了许多重要的新老成熟技术的发展,对其中的大部分进行了更为深入的讨论,对另外一些仅进行了简单叙述,便于那些对某些特定主题感兴趣的读者更详细地研究原始文件。全书共15章,每一章都相当详细地阐述该章的主题内容,因此,读者可以直接应用这些技术解决实际工作中的问题。所给出的例子进一步解释和说明此处提供的数学方程式和理论应用。列出了许多新的参考文献,直至2005年前半年发表的文章,因此展示了过去10年光机设计领域中许多关键性的进展。

光机专业似乎以未曾有过的速度在继续发展,该领域的科技人员非常乐意与全社会共享其获得的成果。这种良好的发展势头很大程度上可以归功于SPIE的成功,归功于国际光学工程师协会以及在其举办的会议、短期课程和出版的各种期刊、书籍、CD-ROM、视频和其它出版物中的参加者,尤其是一些关键技术论文的作者。至今,SPIE的专题研讨会仍然代表着当今最重要的信息来源,包括光学新技术、新的设计工具和设计技术、新的产品和测试设备,以及诸如宇航望远镜和空间科学仪器等主要系统的性能。自本著作第2版于1992年出版之后,又举办过多次(至少33次)与光机技术有关的SPIE会议,这些会议文章极详细地阐述了当今产生的新技术。

《光机系统设计》一书的整个内容已被重新修订,力求将某些技术细节写得更透彻,并纠正了前面版本中存在的一些错误。该版本中的新内容包括:

1. 对第1章中的内容进行修订和扩展,涵盖了国际标准化组织(ISO)和美国光学和电子—光学委员会(OEOSC)的最新研究成果,增加了一些图表用来描述光学仪器研制过程中在概念设计、初步设计、最终设计、加工制造以及验证阶段的活动流程,同时也注意到了计算机和互联网产生的影响。

2. 在第2章中,增加了空间环境特性、敏感设备的振动标准、将污染减少到最小的方法以及激光对光学件的损伤。

3. 第3章则采用了最新的光学玻璃表,并列出了光学机械性能。该表反映了光学设计工作者近期认同的“比较喜欢”的玻璃类型,同时还更新了一些其它材料的表格,增加了一个热离焦系数表和各種光学材料的热光系数。

4. 在第3章中还增加了下面的内容:光机材料的特殊镀膜和光机零件的加工技术,这些技术包括保护性抛光、光学镀黑、提高金属反射镜表面平滑度的电镀以及制造(包括复合材料)光机零件的方法。

5. 第4章增加了下列内容:利用压圈、法兰盘(压片)以及挠性装置固定透镜;过严公差对透镜成本的影响;计算透镜重量和重心位置的方法及单透镜与其镜座之间的对准。

6. 扩展了第5章中对折反系统的讨论,补充了透镜元件的液体胶合和多透镜与其镜

座的对准技术。

7. 第6章以新的思路阐述光窗的设计,并增加了整流罩和共形光窗的设计举例。

8. 第7章补充的内容包括26种棱镜和棱镜组件的设计方案,更深入地讨论了棱镜的半运动学安装方式及将棱镜与镜座的连接。

9. 新增加了第8章,其内容是设计和固定小反射镜、光栅和薄胶片。该章的内容还包括单个反射镜的设计、反射镜系统的设计、反射镜第二面形成的鬼像,并给出了大量典型零件安装设计的例子。

10. 第9章补充阐述轻质非金属反射镜,主要讨论由模块组装起来的基板的构造,旋转铸造大型(8m)反射镜基板的技术及不同背部结构形式的实体反射镜重量的估算方法。

11. 从第10~第12章,补充讨论大型反射镜的设计技术以及该类反射镜的光轴位于固定的水平轴上、固定的垂直轴上和变方位光轴应用中的安装技术。该部分所讨论的最现代化的例子包括:直径2.49m(98in)哈勃空间望远镜的主镜、2.7m(106in)SOFIA望远镜的主镜、8.1m(319in)Gemini望远镜的主镜以及Chandra X射线望远镜的非球面斜入射柱面反射镜,直径从0.68m(27in)到1.2m(47in)。

12. 将原版章节中关于设计和安装金属反射镜的内容合并到第13章,着重描述反射镜的金属基质材料、蜂窝泡沫芯材结构、镀膜、单刃金刚石车削(SPDT)技术和挠性安装方式。

13. 第14章增补了几种新的光学仪器,进一步阐述良好的结构设计原理,解释了模块设计技术,用较长的篇幅讨论了消热设计技术,并给出了许多新的设计实例。

14. 第15章是新增加的一章,讨论的主要内容是:表面损伤对光学零件强度的影响,评价光学元件寿命的静态方法,对以普通光学玻璃、一些光学晶体和非金属反射镜材料制造的元件的张应力给出了一个经验公差。以前对光学件(包括透镜、棱镜和小型反射镜)—镜座的应力分析技术是分散讨论的,现在统一放在该章中,着重讨论了胶合面和焊接点处温度梯度和温度变化造成的膨胀/收缩等类关键因素的影响,对轴向预载随温度的变化率(参数K3)重新进行了分析和核实,并扩展到可以对任何温度条件下的预载进行更为有把握地评估。增补了使用轴向和径向挠性支撑结构补偿余热膨胀错配的内容,同时给出了几种有代表性的设计实例。

15. 增加了附录D,为本书中使用的术语和符号提供了一个汇编表。

再次感谢分布在世界各地的个人、公司和政府部门的支持,他们为本书提供了许多技术信息。特别需要感谢Daniel Vukobratovich, Alson E. Hatheway, Roger A. Paquin, David Crompton, Victor L. Genberg, Keith B. Doyle, and William A. Goodman的大力支持,他们给出了有益的指导,审查了书稿的图表部分,标明附加技术信息的来源,帮助作者理解一些复杂的设计焦点问题,对本书中的新理论和公式进行了校对。作者相信,这些信息已经被精确地接受,可信度非常高。当然,对书中存在的任何错误、技术上的不确切描述和遗漏,作者都会负完全的责任,并深表歉意。最后,希望本书能够有助于读者理解光机械学,并且将会证明本书非常适合于工厂使用以及未来光学仪器和其它设备的设计开发。



# 目 录

译者序

第3版前言

第1章 光机设计过程 ..... 1

- 1.1 概述 ..... 1
- 1.2 概念设计 ..... 2
- 1.3 技术性能要求和设计约束 ..... 5
- 1.4 初步设计 ..... 12
- 1.5 设计分析和计算机建模 ..... 15
- 1.6 误差预估和公差 ..... 21
- 1.7 试验建模 ..... 27
- 1.8 最终设计 ..... 30
- 1.9 设计审查 ..... 31
- 1.10 仪器的制造 ..... 32
- 1.11 最终产品的评估 ..... 33
- 1.12 编制设计文件 ..... 34
- 参考文献 ..... 34

第2章 环境影响 ..... 37

- 2.1 概述 ..... 37
- 2.2 影响产品性能的因素 ..... 38
  - 2.2.1 温度 ..... 39
  - 2.2.2 压力 ..... 43
  - 2.2.3 静态变形和应力 ..... 45
  - 2.2.4 振动 ..... 46
  - 2.2.5 冲击 ..... 52
  - 2.2.6 湿度 ..... 53
  - 2.2.7 腐蚀 ..... 54
  - 2.2.8 环境污染 ..... 55
  - 2.2.9 霉菌 ..... 58
  - 2.2.10 磨损和侵蚀 ..... 59
  - 2.2.11 高能辐射和微小陨石 ..... 62
  - 2.2.12 激光对光学元件的损伤 ..... 65
    - 2.2.12.1 基本机理 ..... 66
    - 2.2.12.2 表面和反射镜 ..... 66
    - 2.2.12.3 材料和测量 ..... 67

2.2.12.4 薄膜 ..... 67

2.3 光学件的环境测试 ..... 69

参考文献 ..... 70

第3章 材料的光机特性 ..... 75

- 3.1 概述 ..... 75
- 3.2 折射光学材料 ..... 75
  - 3.2.1 基本要求 ..... 75
  - 3.2.2 光学玻璃 ..... 77
  - 3.2.3 光学塑料 ..... 91
  - 3.2.4 光学晶体 ..... 94
    - 3.2.4.1 碱和碱土金属卤化物 ..... 95
    - 3.2.4.2 玻璃及其它氧化物 ..... 97
    - 3.2.4.3 半导体 ..... 99
    - 3.2.4.4 硫属化物 ..... 100
    - 3.2.4.5 与光学材料热特性有关的系数 ..... 101
- 3.3 反射光学元件的材料 ..... 103
  - 3.3.1 平滑度 ..... 106
  - 3.3.2 稳定性 ..... 107
  - 3.3.3 硬度 ..... 107
- 3.4 机械零件材料 ..... 110
  - 3.4.1 铝 ..... 112
    - 3.4.1.1 铝合金 1100 ..... 113
    - 3.4.1.2 铝合金 2024 ..... 113
    - 3.4.1.3 铝合金 6061 ..... 113
    - 3.4.1.4 铝合金 7075 ..... 113
    - 3.4.1.5 铝合金 356 ..... 113
  - 3.4.2 钛 ..... 113
  - 3.4.3 铜 ..... 114
    - 3.4.3.1 铜合金 C10100 ..... 114
    - 3.4.3.2 铜合金 C17200 ..... 114
    - 3.4.3.3 铜合金 C360 ..... 114
    - 3.4.3.4 铜合金 C260 ..... 114
    - 3.4.3.5 格立德 (Glidcop™) 铜合金 ..... 114

3.4.4 钢和超钢	115	4.2 共轴光学	145
3.4.5 镁	115	4.3 制造公差对成本的影响	154
3.4.6 碳钢	116	4.4 透镜的重量和重心	161
3.4.7 不锈钢	116	4.4.1 透镜的重量估算	161
3.4.8 钛钢	116	4.4.2 透镜的重心	165
3.4.9 碳化硅	117	4.5 单个低精度透镜的安装	166
3.4.10 复合材料	117	4.5.1 弹簧固定	166
3.5 粘合剂	120	4.5.2 滚边镜座安装	167
3.5.1 光学胶	120	4.5.3 卡环安装	169
3.5.1.1 失液胶	121	4.6 曲面边缘的透镜安装	170
3.5.1.2 热塑胶	121	4.7 球形表面的安装界面	171
3.5.1.3 热凝胶	121	4.7.1 基本要求	171
3.5.1.4 光凝胶	121	4.7.2 螺纹压圈的安装方法	175
3.5.2 物理特性	122	4.7.3 连续法兰盘的安装方法	179
3.5.3 透过特性	123	4.7.4 多悬臂弹性卡环安装方法	181
3.5.4 光学表面的胶合	124	4.7.5 光机界面的类型	185
3.5.5 结构粘合剂	125	4.7.5.1 尖角界面	185
3.5.5.1 环氧树脂	126	4.7.5.2 相切界面	185
3.5.5.2 聚氨酯橡胶粘合剂	126	4.7.5.3 超环面界面	185
3.5.5.3 氰基丙烯酸盐粘合剂	126	4.7.5.4 球形界面	187
3.6 密封剂	129	4.7.5.5 倾斜界面	187
3.7 光机材料的专用膜层	131	4.8 透镜的弹性安装	189
3.7.1 保护膜	131	4.9 透镜的挠性安装	191
3.7.1.1 油漆	131	4.10 单透镜的对准	196
3.7.1.2 电镀和阳极镀	131	4.11 塑料透镜的安装	207
3.7.1.3 专利镀膜	132	参考文献	211
3.7.2 光学发黑处理	132		
3.7.3 改进表面平滑度的镀膜	133	<b>第5章 多透镜的安装</b>	<b>213</b>
3.7.3.1 镀镍	133	5.1 概述	213
3.7.3.2 镀铝	134	5.2 多元件间隔的分析	213
3.8 光机零件的加工技术	134	5.3 透镜组件中不含有运动零件的 安装实例	220
3.8.1 光学零件的加工	134	5.3.1 军用望远镜目镜	220
3.8.2 机械零件的加工	136	5.3.2 军用望远镜物镜	221
3.8.2.1 机械加工方法	137	5.3.3 定焦转像物镜	221
3.8.2.2 铸造方法	137	5.3.4 航空摄影物镜	223
3.8.2.3 锻造和压延法	138	5.3.5 低畸变投影物镜	224
3.8.2.4 复合材料的加工和固化	138	5.3.6 电影放映物镜	224
3.8.3 对加工过程的综合评估	139	5.3.7 为高冲击负载设计的准直 系统	225
参考文献	140	5.3.8 大型天体照相物镜	227
<b>第4章 单透镜的安装</b>	<b>145</b>	5.3.9 红外传感器物镜	229
4.1 概述	145		

5.4 包含有运动零件的物镜组件·····	229	7.3.7 阿贝正像系统·····	320
5.4.1 中红外物镜·····	229	7.3.8 菱形棱镜·····	321
5.4.2 内调焦照相物镜·····	231	7.3.9 道威棱镜·····	322
5.4.3 双目望远镜调焦机构·····	232	7.3.10 双道威棱镜·····	323
5.4.4 变焦物镜·····	235	7.3.11 五角棱镜·····	324
5.5 车床装配技术·····	243	7.3.12 五角屋脊棱镜·····	324
5.6 显微物镜·····	248	7.3.13 阿米西/五角和直角/五角屋脊正像系统·····	326
5.7 塑料零件的装配·····	251	7.3.14 FA-0°复合棱镜、阿贝 A 型和 B 型棱镜·····	327
5.8 透镜的液力胶合·····	253	7.3.15 δ 棱镜·····	330
5.9 折反射组件·····	255	7.3.16 别汉棱镜·····	331
5.10 多透镜组件的对准·····	265	7.3.17 施密特棱镜·····	331
5.11 反射式望远系统的对准·····	279	7.3.18 B II -45°半五角棱镜·····	334
参考文献·····	279	7.3.19 法兰克福(军工厂)的 1* 和 2* 棱镜·····	334
<b>第 6 章 光窗和滤光片的安装</b> ·····	<b>281</b>	7.3.20 列曼棱镜·····	334
6.1 概述·····	281	7.3.21 内反射圆锥形棱镜·····	334
6.2 普通光窗的安装·····	282	7.3.22 立方锥形棱镜·····	337
6.3 特殊光窗的安装·····	284	7.3.23 合像式测距机的接目棱镜·····	338
6.4 保护罩和整流罩的安装·····	289	7.3.24 一种双目单筒镜的棱镜系统·····	340
6.5 保角光窗的安装·····	294	7.3.25 色散棱镜·····	340
6.6 滤光片的安装·····	299	7.3.26 薄楔形棱镜系统·····	342
6.7 承受一定压力差的光窗安装·····	302	7.3.26.1 薄楔形镜·····	342
6.7.1 光窗的强度·····	302	7.3.26.2 累斯莱楔形系统·····	342
6.7.2 光学性能的下降·····	306	7.3.26.3 纵向平动光楔·····	344
参考文献·····	307	7.3.26.4 调焦光楔系统·····	344
<b>第 7 章 棱镜的设计和安装</b> ·····	<b>309</b>	7.3.27 变形棱镜系统·····	346
7.1 概述·····	309	7.4 棱镜安装的运动学和半运动学原理·····	347
7.2 几何关系·····	309	7.5 使用机械压紧方式安装棱镜·····	349
7.2.1 棱镜表面的折射和反射·····	309	7.5.1 棱镜安装:半运动学方法·····	349
7.2.2 棱镜和平板产生的像差·····	310	7.5.2 棱镜安装:非运动学方法·····	357
7.2.3 棱镜和平板造成光束的位移·····	310	7.6 使用粘结技术安装棱镜·····	360
7.2.4 光线的隧道传播图·····	311	7.7 棱镜的挠性安装·····	369
7.2.5 全内反射·····	313	参考文献·····	372
7.3 典型棱镜的设计·····	315	<b>第 8 章 小型非金属反射镜、光栅和胶片的设计和安装</b> ·····	<b>374</b>
7.3.1 直角棱镜·····	315	8.1 概述·····	374
7.3.2 分束(或合束)立方棱镜·····	317		
7.3.3 阿米西棱镜·····	317		
7.3.4 泊罗棱镜·····	318		
7.3.5 阿贝型泊罗棱镜·····	320		
7.3.6 泊罗正像系统·····	320		

8.2 基本的设计原则	375	10.8 推拉镜座	466
8.2.1 反射镜的应用	375	10.9 动态逐步近似法和有限元分析	
8.2.2 几何外形	375	技术的比较	468
8.2.3 反射后图像的方向	375	参考文献	470
8.2.4 光学表面上的光束投射	378		
8.2.5 反射镜镀膜	381		
8.2.6 后表面反射镜形成的鬼像	385		
8.3 小反射镜的半运动学安装	388		
8.4 使用粘结技术安装反射镜	396		
8.5 反射镜的挠性安装	400		
8.6 多反射镜的安装	404		
8.7 光栅的安装	411		
8.8 胶片反射镜的设计和安装	415		
参考文献	417		
<b>第9章 轻质非金属反射镜的设计</b>	<b>418</b>	<b>第11章 光轴垂直放置的大孔径反射镜的安装</b>	<b>471</b>
9.1 概述	418	11.1 概述	471
9.2 材料的选择	419	11.2 环形支撑	471
9.3 蜂窝芯材结构	420	11.3 气袋(气囊)支撑	474
9.4 铸有加强肋的反射镜	422	11.4 多点支撑	478
9.5 槽孔支柱连接和熔凝连接的单块反射镜	425	11.4.1 三点支撑	478
9.6 玻璃焊成的反射镜	432	11.4.2 Hindle 支撑	480
9.7 低温焊接反射镜	435	11.4.3 平衡安装技术	483
9.8 机械加工出蜂窝芯的反射镜	435	11.4.4 气压/液压镜座	484
9.9 背面具有特定轮廓曲线的实心反射镜	439	11.5 计量安装技术	485
9.10 薄面板反射镜的结构布局	442	11.5.1 36点气压计量镜座	486
9.11 轻质反射镜的比例关系	443	11.5.2 27点液压计量镜座	489
参考文献	447	11.5.3 52点弹簧矩阵式计量镜座	490
		11.5.4 抛光时的横向约束	492
		参考文献	493
<b>第10章 光轴水平放置的大孔径反射镜的安装</b>	<b>449</b>	<b>第12章 大孔径、变方位反射镜的安装技术</b>	<b>495</b>
10.1 概述	449	12.1 概述	495
10.2 重力的影响	449	12.2 机械浮动安装技术	496
10.3 V形安装	450	12.3 液压/气动镜座	505
10.4 多点边缘支撑	458	12.3.1 历史背景	505
10.5 理想的径向安装	459	12.3.2 双子望远镜	507
10.6 水银管径向安装技术	460	12.3.3 新型多反射镜式望远镜	512
10.7 带式 and 滚轮链式安装技术	461	12.4 反射镜的同心安装技术	518
		12.5 双拱反射镜的安装技术	521
		12.6 反射镜的双脚架安装技术	524
		12.7 薄面板反射镜的安装	531
		12.7.1 一般要求	531
		12.7.2 Keck 望远镜	535
		12.7.3 自适应反射镜系统	540
		12.7.3.1 先进的电光望远镜系统	540
		12.7.3.2 多反射镜式望远镜的自适应次镜	542

12.8 大孔径空间反射镜的安装 .....	543	14.3.1 注模成形的塑料模块 .....	638
12.8.1 哈勃空间望远镜 .....	543	14.3.2 一种模块化的军用双目 望远镜 .....	639
12.8.2 Chandra X 射线望远镜 .....	546	14.3.3 应用于空间探索领域中的 模块化光度计 .....	644
参考文献 .....	548	14.3.4 双准直仪模块 .....	647
<b>第 13 章 金属反射镜的设计和     安装</b> .....	552	14.4 适应高冲击负荷的结构设计 .....	648
13.1 概述 .....	552	14.5 消热结构设计 .....	650
13.2 金属反射镜的一般要求 .....	553	14.5.1 同一种金属材料制成的 仪器 .....	651
13.3 铝反射镜 .....	555	14.5.1.1 红外天文卫星望远镜 .....	651
13.3.1 铸铝反射镜 .....	558	14.5.1.2 斯比泽空间望远镜 .....	651
13.3.2 机加成形的铝反射镜 .....	558	14.5.1.3 应用 SPDT 技术加工光学及 元件间界面的望远镜 .....	656
13.3.3 焊接成形的铝反射镜 .....	560	14.5.2 主动控制焦距 .....	656
13.4 铍反射镜 .....	563	14.5.3 使用计量结构进行消热化 的仪器 .....	658
13.5 其它材料的金属反射镜 .....	571	14.5.3.1 在轨运行的天文 观测站 .....	658
13.5.1 铜反射镜 .....	571	14.5.3.2 同步环境实用卫星 .....	660
13.5.2 钼反射镜 .....	572	14.5.3.3 深空成像多目标 光谱仪 .....	663
13.5.3 碳化硅反射镜 .....	573	14.5.3.4 多角度成像分光辐射谱仪的 消热设计 .....	664
13.6 具有泡沫塑料芯和金属蜂窝芯的 反射镜 .....	576	14.5.3.5 哈勃空间望远镜桁架结构的 消热设计 .....	665
13.7 金属反射镜的镀膜 .....	588	14.5.3.6 银河探测器的消热 设计 .....	670
13.8 金属反射镜的单刃金刚石切削 加工 .....	590	14.5.4 折射光学系统的消热技术 .....	673
13.9 金属反射镜的传统安装技术 .....	601	14.6 望远镜镜筒结构的几何形状 .....	676
13.10 金属反射镜的集成式安装技术 .....	602	14.6.1 Serrurier 桁架 .....	676
13.11 大孔径金属反射镜的挠性 安装技术 .....	607	14.6.2 新型多反射镜式望远镜 .....	679
13.12 多个 SPDT 零件的连接、装配和 对准 .....	611	14.6.3 $N$ 层桁架 .....	680
参考文献 .....	616	14.6.4 钱德拉望远镜 .....	682
<b>第 14 章 光学仪器的结构设计</b> .....	622	14.6.5 具有微小重力变形和风载变形的 桁架结构 .....	684
14.1 概述 .....	622	14.6.6 静定的空间框架 .....	685
14.2 刚性框架设计方案 .....	622	参考文献 .....	689
14.2.1 军用双目望远镜 .....	622	<b>第 15 章 光机系统设计分析</b> .....	692
14.2.2 民用双筒望远镜 .....	625	15.1 概述 .....	692
14.2.3 坦克潜望镜 .....	627	15.2 光学件的失效预测 .....	692
14.2.4 空间分光辐射计照相机 .....	629		
14.2.5 大孔径航空照相物镜 .....	631		
14.2.6 一种热稳定光学结构 .....	635		
14.3 模块化设计的原理和实例 .....	637		

15.2.1 一般考虑 .....	692	15.6.3.1 一般考虑 .....	728
15.2.2 元件强度的测试 .....	694	15.6.3.2 仅考虑整体影响因素的 $K_3$ 近似式 .....	731
15.2.3 威布尔失效预测法 .....	699	15.6.3.3 考虑其它影响因素的 $K_3$ 近似式 .....	735
15.2.4 安全系数 .....	701	15.6.3.4 举例说明 $K_3$ 的评估 .....	737
15.2.5 无故障时间预测 .....	702	15.6.4 各种温度下透镜内接触张 应力的评估 .....	739
15.2.6 应力容许极限的概测法 .....	705	15.6.5 在透镜或反射镜安装中提供可控 轴向一致性的优点 .....	740
15.3 光机界面处应力的形成 .....	707	15.7 温度梯度的影响 .....	750
15.3.1 点接触 .....	707	15.7.1 径向温度梯度 .....	754
15.3.2 短线接触 .....	709	15.7.2 轴向温度梯度 .....	755
15.3.3 环面接触 .....	715	15.8 温度变化造成胶合光学件和粘结 光学件中的应力 .....	756
15.3.3.1 尖角界面 .....	716	15.9 温度变化对使用合成橡胶材料 弹性安装透镜的一些影响 .....	759
15.3.3.2 切向界面 .....	717	参考文献 .....	762
15.3.3.3 超环面界面 .....	718	附录 .....	764
15.3.3.4 球形界面 .....	719	附录 A 单位及其转换 .....	764
15.3.3.5 斜平面界面 .....	719	附录 B 测试不利环境条件下光学零件和 光学仪器的方法总结 .....	765
15.4 圆环接触类界面的参数比较 .....	720	附录 C 材料的硬度 .....	770
15.5 偏心圆环接触界面的弯曲效应 .....	723	参考文献 .....	772
15.5.1 光学零件中的弯曲应力 .....	724	附录 D 术语汇编 .....	772
15.5.2 一个压弯光学件表面弧形的 变化 .....	724		
15.6 温度变化的影响 .....	725		
15.6.1 降温后的径向影响 .....	725		
15.6.1.1 光学件中的径向应力 .....	726		
15.6.1.2 镜座壁内的切向应力 .....	727		
15.6.2 升温后的径向影响 .....	727		
15.6.3 温度造成轴向预载的变化 .....	728		

# 第1章 光机设计过程

## 1.1 概述

光学仪器的光机系统设计是一个将多种学科技术紧密集成在一起的过程。设计初始首先要描述对某项特定设备（或仪器）的具体需求，确定该项设备的使用目的及对该项设备的构型、物理特性和特定应用环境中的性能的严格要求等。设计过程要按照一定的逻辑顺序进行，包括一系列的主要步骤，只有在判定该仪器能够满足所提出的技术要求，以所需要的数量生产时——无论是“单件产品”（例如 Chandra X 射线望远镜）还是大批量产品（例如到处都在使用的“傻瓜”相机的物镜），设计才算结束。

Petroski (1992) 在一本有关工程设计丛书的著作中指出，“设计问题源自于当今某些正在运作的以及所寄以希望的事情，系统和过程的失败，还源自于预先就估计到孕育着失败的情况”。一方面是当前的一些硬件设备已经证明不太完善，或者在不久的将来可能就要失效，另一方面对新技术的应用需求非常之多，新技术的实用性使新的产品设计变得切实可行，因此都更为渴求设计出新的硬件，并且能够比之前的设计更好地完成某项特定的任务。

在本章，将在每个独立的单元论述每一个主要的设计步骤。不可否认，在此叙述的方法是理想化了，因为几乎没有什么设计是平平稳稳地发展和形成的。希望本章能尽力展现这个设计过程应当如何发生，并相信通过对这种产品设计的计划编排、执行、评审和批准将会完全有能力对付和处理不可避免遇到的问题，并将错误的设计过程重新引回到正确的过程中。

推动设计过程中应用这种方法论的驱动力包括计划约束、员工培训的可行性；设备、装备和其它的资源；市场的需求；完成和证明设计成功的固有成本。这些都属于项目管理领域的内容，本书暂且不予讨论。

对光机系统设计过程有较大影响的因素是所应用技术的成熟程度。例如，不久之前，由于种种原因，使用空间飞船将 2.4m (94.5in) 孔径的哈勃空间望远镜 (HST—Hubble Space Telescope) 送入绕地球运行的轨道上实际上是不可能的。一个机械方面的原因就是没有合适的机械材料能够满足高硬度、低密度和超低热膨胀特性的综合要求。在望远镜桁架结构中使用铝、钛或者钢，而代替不熟悉但非常有发展前景的新型石墨环氧树脂 (GrEp) 复合材料（实际上已经在使用）会严重地限制仪器在不稳定热环境中的工作性能<sup>○</sup>。此外，NASA 对望远镜重量的严格限制很难满足。与仅仅使用成熟的材料和技术进行设计相比较，应用新材料成功地实现最新水平的仪器设计就需要更多的理论综合和分

○ 根据 Krim (1990) 提供的资料，如果采用铝、钛或者钢材料结构，哈勃空间望远镜对这些材料的温度稳定性要求分别是  $\pm 0.027^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 0.06^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ 。而设计出来的实际消热化望远镜结构（包括 GrEp 桁架）需要在温度变化范围为  $\pm 13^{\circ}\text{C}$  内仍然能够保持光学性能。

析、试验以及量化测试。应用一种比较高水平的或者全新的技术使一个系统的性能更好，重量更轻或者使用寿命更长，这样就有可能会比使用较低性能普通技术投入更高的成本。Paraphrasing Sarafin (1995a) 从有利于航天事业发展的角度讲过，不应当问“我们能够让系统做……？”，因为答案也许是“是的，能够”。比较恰当问法是“我们可以用什么代价让系统做……，技术失败的风险是什么，如果失败了，要投入多少精力和资金去修复？”。仔细地考虑这些问题有助于平衡考虑被选方案的优缺点。

光机设计过程中将风险降到最低限度，并且有助于完成设计任务的重要因素就是要使所有参加设计的人员之间的相互交流畅通，非常容易地获取所需要的技术信息。当今，借助于电子手段，例如 E-mail、电信会议、传真以及手机等，前一项要求已经大大地得到了满足，而后一项要求是通过互联网在全世界范围内有权使用世界上各类优秀图书馆的资料和技术数据文件。现在，详细设计本身可以是以计算机为基础，而不再是纸质图样和它的文件。计算机辅助设计和计算机辅助分析 (CAD 和 CAE) 允许通过网络进行信息交换，并且可以控制设计的修改权限。工程设计小组和制造小组之间的交流可以通过电子方式实现，因此缩短了传送时间，提高了数据传送精度。数据直接进入一台加工机床的计算机，即计算机辅助加工 (CAM)，消除了许多人为干预加工的杂事，降低了数据输入期间出现人为误差的可能性，更便于零件的制造。使用计算机控制测试顺序，数据自动存储，恢复和分析也使测试变得比较方便。

复杂的光机系统通常都包括许多子系统：每个子系统都有自己的技术要求和约束条件，因此会伴随有独特的设计问题。子系统常常由几个主要的组件组成，组件又包含子组件、部件和零件。将总的设计问题划分成一系列相关但又可以独立定义的部分，因此，即使最复杂的系统也可以按照该设计过程完成。

在本章不可能只引用一个设计作为例子来解释和说明光机设计过程的所有步骤。所以，为了达到本章的目的，引用相互独立的一些例子，其中包括军用仪器和航天仪器。现实生活中，在某一个步骤中需要付出的努力程度都会有所增减，以适合于具体的设计问题。然而，对于每一个设计步骤和总的设计过程，都应该遵循本书中所介绍的大纲和总体步骤。

## 1.2 概念设计

光机系统设计过程的第一步就是确认所设计的仪器需要实现的功能。通常，仅仅确定一种需求会使有创造性的工程师对满足该需求的仪器形成含糊概念，因为可能有一种或者多种结构形式都能满足该需求。在这一点上，先前的设计已经能够满足类似需求的背景知识在起着重要的作用。从以往的经验里，可以获知该装置如何被认可，还可以获知如何不会被认可。

与系统主要部分有关的功能框图是有价值的交流工具。图 1-1 表示的是一个高性能、长焦距全景照相系统的功能框图，该相机应用在高空飞行的机载下视空中侦察环境中。这个系统包括三个主要组件：一个照相机组件，主要有成像光学系统和景像扫描机构，供片传盒和卷片盒，胶片传送机构，曝光和调焦控制，速度—高度传感器，像移补偿器，温控



装置及相应的结构；一个控制子系统组件提供所需要的操作功能；一个稳定的安装底座。在设计概念化阶段，还不知道组成该系统的单个子系统框的详细布局。

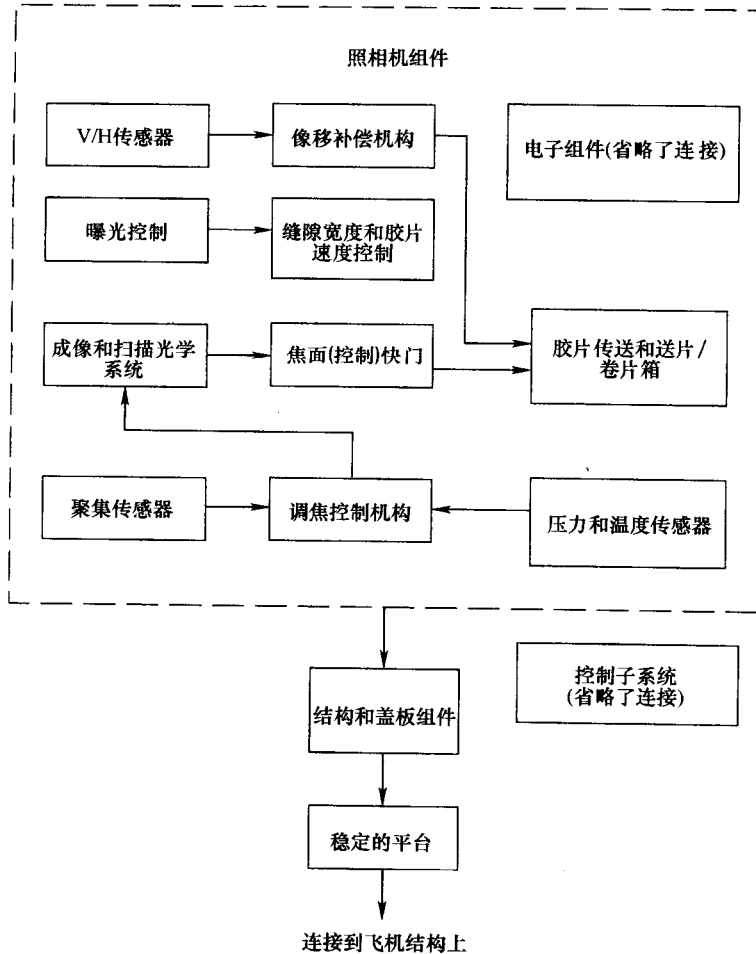


图 1-1 使用胶片作为存储介质的、高性能全景机载侦察照相系统的顶层功能框图。

图 1-1 中成像和扫描光学系统功能框的光机设计概念如图 1-2 所定义。可以看到更详细的框图，表示光学系统从概念上可以包括三个分离的透镜组和两块反射镜，使瞄准线偏转，以及一块扫描棱镜和一块光窗。透镜组和折转反射镜安装在镜座内，该镜座与棱镜以及扫描结构一起固定在支撑结构上。将光窗安装在一个透镜筒内，从而实现光学系统的密封，形成一个锥形透镜组合体，该镜筒依次与相机组件以及通过稳定平台与飞机机舱框架相连接。

如果对牛顿式折反射光学系统应用同样的设计概念，那么，可能会希望采用图 1-3 中所表示的光机设计框图。在此假定主要的成像元件是一块球面主镜，由于成像质量方面的原因，需要两块全孔径校正板和一个场镜组。有一块全孔径折转反射镜用来实现对光路的扫描，在像空间使用一个消旋系统保证胶片上形成一个正像。