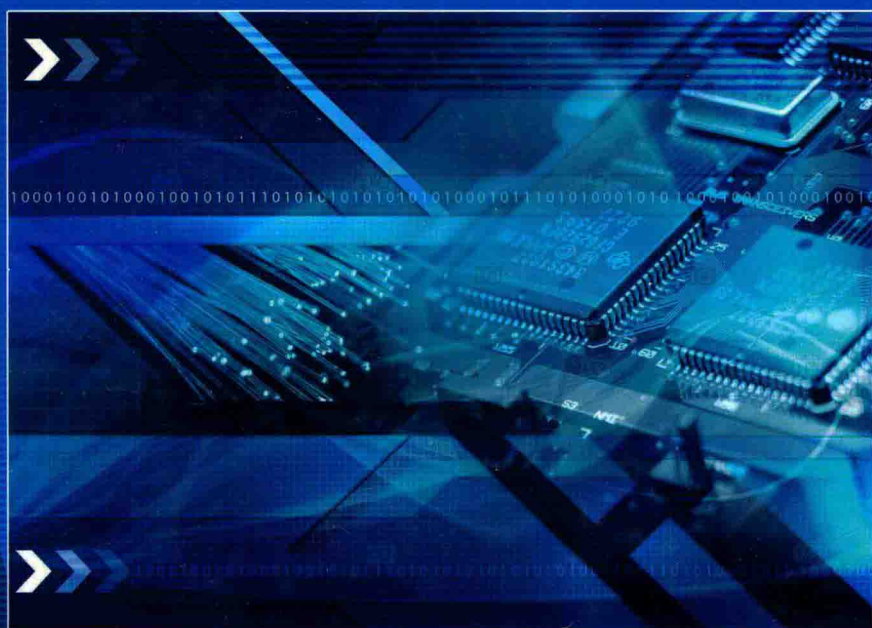


Handbook of Optical and Laser Scanning,  
S  
ion

# 光学和激光扫描技术手册

(原书第2版)



[美] 杰拉尔德·马歇尔 (Gerald F. Marshall) 主编  
格伦·斯图兹 (Glenn E. Stutz) 主译  
周海宪 程云芳 主译  
周华君 程林 校

 CRC Press  
Taylor & Francis Group



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 光学和激光扫描技术手册 (原书第2版)

[美] 杰拉尔德·马歇尔 (Gerald F. Marshall) 主编  
格伦·斯图兹 (Glenn E. Stutz)

周海宪 程云芳 主译

周华君 程林 校



机械工业出版社

本书具有以下显著特点：第一，内容丰富，不仅有详尽的光学和激光扫描技术理论，而且给出许多实际的扫描实例；第二，覆盖面广，既介绍了常规的扫描技术（如单反射镜、转鼓），又阐述了一些利用如微纳米光学（微光机电系统）和全息光学的先进技术研发的光学和激光扫描装置；第三，为使本书能够充分反映光学和激光扫描技术领域的国际先进水平，汇集了该领域美国、英国、日本等国的26位专家的研究成果，具有一定代表性。

本书可供光电子学、空间传感器及系统、遥感、热成像、军事成像、光通信领域中从事光学和激光扫描器设计和制造、光电子仪器总体设计、光学系统和光机结构设计的设计师、工程师阅读，也可作为大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。

Handbook of Optical and Laser Scanning, Second Edition/by Gerald F. Marshall/ISBN: 9781439808795  
Copyright © 2012 by Taylor and Francis Group LLC.

Authorized translation from English language edition published by Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下，CRC 出版公司出版，并经其授权翻译出版。版权所有，侵权必究。

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the **Chinese (Simplified Characters)** language edition. This edition is authorized for sale throughout **Mainland of China**. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2013-3812 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

光学和激光扫描技术手册：原书第2版/(美)杰拉尔德·马歇尔 (Gerald F. Marshall), (美)格伦·斯图兹 (Glenn E. Stutz) 主编; 周海宪, 程云芳主译. —北京: 机械工业出版社, 2018. 6

书名原文: Handbook of Optical and Laser Scanning (Second Edition)  
ISBN 978-7-111-59494-9

I. ①光… II. ①杰… ②格… ③周… ④程… III. ①激光扫描—技术手册 IV. ①TN27-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 088303 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王欢 责任编辑: 王欢

责任校对: 樊钟英 封面设计: 陈沛

责任印制: 张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 36.25 印张 · 2 插页 · 889 千字

0001—2600 册

标准书号: ISBN 978-7-111-59494-9

定价: 179.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

## 译者序

激光原理早在1916年就被著名的物理学家爱因斯坦发现。受激辐射原理提出后，陆续有科学家进行了研究。1916~1930年，拉登堡等人进行了氖的色散研究，并于1933年绘制出色散系数与放电电流密度的函数曲线。1940年，法布里发现了负吸收现象。1947年，兰姆和雷瑟夫提出“粒子数反转实现受激辐射”理论；1952年，帕塞尔等人实现了粒子数反转，观察到了负吸收现象。1953年，韦伯发明了受激辐射诱发原子或分子从而放大电磁波的方法，并提出微波辐射器的原理，查尔斯·汤斯实现了微波受激发射放大——微波激光器(maser)；1957年，斯科威尔实现了固体顺磁微波激光器。既然微波可以激发受激辐射，那么红外乃至可见光应该也可以。在此思想启发下，戈登·古尔德博士创造了“laser(受激辐射的光放大)”这个单词，中文简称为激光。1958年，汤斯和肖洛发表了著名的论文“红外与光学激光器”。1959年，汤斯提出了建造红宝石激光器的建议。1960年，美国休斯(Hughes)公司莱曼博士发明了第一台实用激光器。

激光是20世纪60年代产生的新光源，是继原子能、计算机、半导体之后，人类的又一重大发明。它具有方向性好、亮度高、单色性好和能量密度高等特点。激光器的问世和发展不仅使古老的光学科学和光学技术获得新生，而且形成一个新兴的产业。

激光使人们有效地利用前所未有的先进方法和手段，获得空前的效益和成果，从而促进了生产力的发展，以激光器为基础的激光应用在全球迅猛发展。

首先是军事应用，包括激光武器、激光制导、激光测距、激光雷达、激光陀螺、激光侦察对抗、激光告警和大气激光通信等。

激光的民用范围更广泛，几乎涉及所有领域。典型的代表是，1969年阿姆斯特朗登月安放了激光反射器，然后由地面站发射至月球的激光脉冲反射回地面站，从而确定了地球与月亮之间的精确距离。具有代表性的应用还包括，激光电视；激光光谱分析；激光加工(切割、焊接、打孔、表面处理、快速成型)；激光通信；激光生物学应用；激光生命科学研究；激光医学应用；激光农业和畜牧业方面的应用；激光水下传输应用；激光全息无损检验；激光大气监测；CD、VCD、DVD、BD光盘；激光打印机、复印机、扫描仪，以及激光照排机；商品防伪标签和条形码识别码；激光能源领域的应用……

光学和激光扫描技术(包括可见光和不可见光)，是控制光束偏转的技术。对于大多数以激光应用为基础的仪器和设备，它是一种很重要的技术，也是覆盖非常广泛的研究课题。其重点包括，控制光束偏转的机理，根据该机理实现扫描功能的光学系统，以及影响扫描系统图像真实性(保真度)的因素。扫描系统可以是一个输入扫描器、输出扫描器或者两种功能兼而有之的扫描器。输入系统能够获得二维或三维图像，以固定波长或者在宽光谱范围内工作，通过聚集镜面反射光或散射光，以及通过使图像发荧光和获得荧光而形成新的光源。

光学和激光扫描技术是一门综合学科，涉及面广泛，如微光机电技术、焦距自调整技术、位增强与色彩增强技术、移动平台扫描技术、色彩校正技术和光学新技术。它不仅涉及

光学和控制光束偏转的机械学，而且影响输出数据（显示在屏幕上或者以书面形式记录）成像保真度的其他学科，如电子学、磁学、流体动力学、材料科学、声学、图像分析学、固件<sup>①</sup>软件等。

为了完整而充分地反映光学和激光扫描技术的现状和最新进展，2004年，杰拉尔德·马歇尔（Gerald F. Marshall）和格伦·斯图兹（Glenn E. Stutz）先生作为主编，汇集了该领域英国、日本和美国等国的27位国际专家，在1985年出版的《激光束扫描技术（Laser Beam Scanning）》和1991年出版的《光学扫描技术（Optical Scanning）》两本书基础上，出版了原书第1版——《光学和激光扫描技术手册（Handbook of Optical and Laser Scanning）》。

杰拉尔德·马歇尔先生获得了英国伦敦大学工科学士学位，在光学设计和工程领域，尤其对光学扫描技术和显示系统具有丰富的工作经验，曾在下列公司担任高级职位（现已退休）：美国凯撒电子（Kaiser Electronics）公司、能量转换装置（Energy Conversion Device）公司、Axsys科技（Axsys technologies）有限公司、医用激光器公司、衍射有限公司、英国BAE系统公司机载导航显示系统部等。杰拉尔德·马歇尔先生发表过许多文章，获得多项专利，是以下三本国际知名专业图书的主编兼作者：1985年，《激光束扫描技术》；1991年，《光学扫描技术》；2004年，《光学和激光扫描技术手册》。他曾在美国威斯康星大学麦迪逊分校（the University of Wisconsin-Madison）和国际光学工程学会（Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, SPIE）短训班授课，也是美国物理学会（Institute Of Physics, IOP）、美国光学学会（Optical Society of America, OSA）和国际光学工程学会会员，并担任过重要职务。

格伦·斯图兹先生获得美国罗彻斯特大学（Rochester University）光学专业学士学位和亚利桑那大学（University of Arizona）光学科学硕士学位，以及亚利桑那州立大学工商管理学硕士学位。他是美国林肯（Lincoln）激光技术公司的首席运营总监和首席技术总监。格伦·斯图兹先生从事激光扫描技术研究近三十年，致力于下列领域中激光扫描系统设计和制造工艺转换：视网膜扫描、农产品检验、胶片印制、大尺寸测量、激光投影、显微术和印制电路板检验。他曾与美国天合（TRW）集团（又译为汤普森-拉莫-伍尔德里奇集团，英文名称为Thompson-Ramo-Wooldridge Group）合作，进行高能激光器的研究。

原书第1版出版后，得到业内好评，对光学和激光扫描技术的发展起到很好的推动作用。但随着科学技术持续快速发展，又出现了许多新的扫描技术和扫描装置，为了涵盖十年来的新变化，作者对第1版进行了修订。

《光学和激光扫描技术手册（原书第2版）》具有以下明显特点：第一，内容丰富，不仅有详尽的光学和激光扫描技术理论，而且给出许多实际的扫描实例；第二，覆盖面广，既介绍了常规的扫描技术（如单反射镜、转鼓），又阐述了一些利用诸如微纳米光学（微光机电系统）和全息光学的先进技术研发的光学和激光扫描装置；第三，为使本书能够充分反映光学和激光扫描技术领域的国际先进水平，汇集了该领域美国、英国、日本等国的26位专家的研究成果，具有一定代表性。

本书共16章，包括489幅图和55张表。各章如下：

① 固化在硬件中的软件。——译者注

- 第1章 激光束特性： $M^2$  模型
- 第2章 激光扫描光学系统
- 第3章 数字扫描成像系统的像质
- 第4章 多面体反射镜扫描器：组件、性能和设计
- 第5章 高性能多面体反射镜扫描器的电动机和控制器（驱动器）
- 第6章 旋转扫描器的轴承系统
- 第7章 物镜前多面体反射镜扫描技术
- 第8章 振镜扫描器（检流计）和共振振镜扫描器
- 第9章 振荡扫描器的挠性枢轴
- 第10章 全息条形码扫描器：应用、性能和设计
- 第11章 声光扫描器和调制器
- 第12章 电光扫描器
- 第13章 压电扫描器
- 第14章 光盘扫描技术
- 第15章 计算机直接制版扫描系统
- 第16章 水下成像同步激光线扫描器

在本书的翻译过程中，与作者杰拉尔德·马歇尔先生和格伦·斯图兹先生进行了充分的讨论和沟通，对书中印刷错误进行了修订，增加了“译者注”。为使读者更准确地理解和使用本书，保留了英文参考文献。

周海宪主要翻译了第1~15章，程云芳主要翻译了第16章。在美国工作的周华君和程林先生对全书的中英文进行了认真审校，高级工程师张良、曾威、赖宏辉和程云芳对全书做了专业校对和最终审核。参与翻译工作的还有刘永祥、郭世勇、郭华鹏、邢妙娟、仇志刚、朱彬、李艳、刘凤玉、安世甫、负亚军、吴建伟、李延蕊、孙红晓、鲁保启、李志强、马俊岭、李沛、周华伟、张庆华、金朝翰、杨建国、武晓军等同志。

本书的翻译得到了清华大学教授、中国工程院院士金国藩先生，美国杰拉尔德·马歇尔和格伦·斯图兹先生，北京理工大学王涌天教授，南京理工大学常本康教授及中航电光设备研究所孙隆和研究员的极大支持；与祖成奎、孙维国和黄存新研究员、翟文军高级工程师进行了有益讨论，在此表示衷心感谢。

机械工业出版社王欢编辑对本书的出版给予了极大鼓励和支持，在此特别致以谢意！

本书可供光电子学领域、空间传感器及系统、遥感、热成像、军事成像、光通信领域从事光学和激光扫描器设计和制造、光电子仪器总体设计、光学系统和光机结构设计的设计师阅读，也可用作大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。希望本书能够对军事、航空、航天和民用光学仪器的设计和制造提供有益指导。

译者

2018年5月

## 原书第2版前言

光学和激光扫描技术是控制光束偏转的技术，包括可见光和不可见光。编写第2版的目的是为科学家、工程师、维修管理技师及在校学生深入理解光学扫描技术提供参考。第2版涵盖了之前出版的三本书的内容：《激光束扫描技术》《光学扫描技术》和《光学和激光扫描技术手册（原书第1版）》。这三本著作出版后，光学扫描技术出现了许多新的进展，需要对之前介绍的材料进行更新，同时增加新的内容。第2版增加了扫描技术新的应用方面的章节，以进一步阐述扫描技术的实际应用。

光学和激光扫描技术是一个内容非常广泛的研究课题。其重点包括，控制光束偏转的机理，根据该机理实现扫描功能的光学系统，以及影响扫描系统图像真实性（保真度）的因素。本书将对每个重点课题进行全面阐述。

扫描系统可以是输入系统、输出系统或者两者的组合。输入系统可以获得二维或者三维图像，能够以固定波长工作或者在宽光谱范围内工作，通过聚集镜面反射光或者散射光，也可以通过荧光图像并收集荧光而重新获得原光源。输出系统使光束形成应用所需要的图像，如标识、可视投影和“硬拷贝”<sup>⊙</sup>输出；激光雷达和许多探测系统采用相同的光路照射物体并获取图像。一个扫描系统不但涉及光学，还包括其他学科，如机械学、电子学、磁学、流体动力学、材料科学、声学、图像分析学、固件、软件等。而本书汇集了英国、日本和美国等国的26位作者的学识和经验。

出版文字书籍，总是落后于科学技术突飞猛进的发展。本书是作者竭尽全力完成的光学和扫描技术方面的书籍，写出所属特定领域的权威内容，是对该领域技术的介绍。本书可以作为从事光学和激光扫描技术人员的参考书。

第1~3章包括三个（扫描系统中）研究课题：高斯（Gaussian）激光束特性、激光扫描器的光学系统及其成像质量。第4~7章介绍了单面（单面反射镜）和多面扫描系统的设计，包括轴承。第8、9章讨论了振镜和谐振扫描系统，包括挠性铰链（枢轴）。第10~12章阐述全息、声光和电光扫描系统。第13、14章介绍压电扫描器及光盘扫描。第15、16章讨论两种应用，即计算机直接制版（Computer To Plate, CTP）法的光学扫描技术和水下扫描技术。本书讨论的这些内容将说明扫描技术在当今社会的重要意义。

杰拉尔德·马歇尔  
格伦·斯图兹

⊙ hard copy，一般指打印到纸上。——译者注

# 原书第 1 版前言

光学和激光束扫描技术是控制光束偏转方向的技术，包括可见光和不可见光。编写本书的目的是为应用工程师、科学家、维修管理技师及在校学生深入理解光学扫描技术提供参考。本书源自之前出版的两本书：《激光束扫描技术》和《光学扫描技术》。上述著作出版后，扫描技术有了许多新的进展，必须予以更新，还要包括十多年来发生的新变化。本书内容汇集了英国、日本和美国等国的 27 位国际专家的学识和经验。

光学和激光扫描技术是一个内容非常广泛的研究课题，其重点不仅包括控制光束偏转的机理，而且还涉及影响输出数据（记录在纸或者胶片上，显示在监视器或者投影在屏幕上）图像保真度的各种因素。扫描系统可以是输入扫描器、输出扫描器或者两者的组合。系统图像保真度最初取决于输入信息的精确读入和存储——存储信息的处理，以及最后是输出数据的读出。光学扫描技术与许多学科密切相关：光学、材料学、磁学、声学、机械学、电子学和图像分析学等。

文字书籍的出版，总是落后于科学技术突飞猛进的发展的。本书作者竭尽全力完成这本光学和扫描技术方面的书籍，并撰写出所在特定领域的权威内容。本书可以视为该领域技术的导论，并可作为光学和激光扫描技术领域工作人员的重要参考书。

为了方便国际间科技工程类读者阅读，只要合适，本书都将以两种单位制表示测量量，第二种单位置于括号中。除非有特别意义，否则优先采用米制。关于术语、命名法和符号，本书尽量保持一致。然而，由于 27 位作者来自很多国家，具有不同的风格，相比之下，我更关注他们做出的独特贡献而非形式。

本书按照逻辑顺序编排章节，从激光光源开始而以术语表结束。第 1~3 章包括三个基本的（扫描系统中）研究课题：高斯（Gaussian）激光束特性、激光扫描器的光学系统及其成像质量。第 4~7 章介绍了单面（单面反射镜）和多面扫描系统的设计，包括轴承。第 8、9 章讨论了振镜和谐振扫描系统，包括挠性铰链（枢轴）。第 10~14 章阐述了全息、光盘、声光、电光扫描系统及热打印头技术。最后，本书列出了非常有用的扫描技术术语表。

杰拉尔德·马歇尔



## 致 谢

---

首先，感谢美国林肯（Lincoln）激光技术公司的首席运营总监（COO）和首席技术总监（CTO）、合作主编格伦·斯图兹先生。他做了大量的基础性工作，汇总所有作者的手稿。非常感谢林肯激光公司工程部斯蒂芬·斯图尔特（Steven Stewart）先生，他准备和绘制了封面详细插图。还要感谢所有的参编人员，没有他们的杰出贡献，就不会有本书第2版。最后，感谢美国 Taylor & Francis 出版集团工作人员的支持。

杰拉尔德·马歇尔

# 目 录

译者序	
原书第 2 版前言	
原书第 1 版前言	
致谢	
第 1 章 激光束特性： $M^2$ 模型	1
1.1 概述	1
1.2 激光束特性（理论）发展史	1
1.3 本章内容的组织结构	2
1.4 混模激光束的 $M^2$ 模型	3
1.4.1 基横模：厄米特-高斯和拉盖尔-高斯函数	3
1.4.2 混模：纯模的非相干叠加	5
1.4.3 与光束直径相关的基模特性	6
1.4.4 基模光束的传播特性	8
1.4.5 混模激光束的传播特性：嵌入式高斯分布和 $M^2$ 模型	9
1.5 利用透镜对基模和混合模进行光束变换	12
1.5.1 利用光束-透镜转换技术测量激光束发散角	14
1.5.2 光束-透镜转换的应用：深聚焦的局限性	14
1.5.3 逆变换常数	15
1.6 基模和混模光束直径的定义	15
1.6.1 由辐照度分布确定光束直径	16
1.6.2 获取实用光束分布图的具体思考	18
1.6.2.1 市售扫描轮廓仪的工作原理	20
1.6.3 五种定义和测量光束直径（常用）方法的比较	21
1.6.3.1 $D_{\text{pin}}$ （针孔分布 $1/e^2$ 限幅点的间隔）	21
1.6.3.2 $D_{\text{slit}}$ （狭缝分布 $1/e^2$ 限幅点的间隔）	21
1.6.3.3 $D_{\text{ke}}$ （刀口扫描限幅点 15.9% 和 84.1% 的两倍间隔）	22
1.6.3.4 $D_{86}$ （通过总能量 86.5% 的同心圆孔直径）	22
1.6.3.5 $D_{4\sigma}$ （针孔辐照度分布标准偏差的 4 倍）	22
1.6.3.6 $D_{4\sigma}$ （对辐照度分布信噪比的灵敏度）	23
1.6.3.7 ISO 选择 $D_{4\sigma}$ 作为标准直径的理由	24
1.6.3.8 直径定义的总结	25
1.6.4 直径定义之间的转换	25
1.6.4.1 $M^2$ 是唯一的吗？	26
1.6.4.2 转换规则的经验基础	26

1.6.4.3	不同定义直径间的转换规则	28
1.7	测量光束质量 $M^2$ 的具体问题: 四切法	29
1.7.1	四切法的逻辑性	29
1.7.1.1	利用附加透镜形成可测束腰	31
1.7.1.2	束腰位置精度	32
1.7.2	数据的图形分析	32
1.7.3	对数据进行曲线拟合分析的相关讨论	34
1.7.4	市售测量仪器和软件包	35
1.8	光束不对称性类型	36
1.8.1	光束不对称性的常见类型	36
1.8.2	等效柱形光束的概念	38
1.8.3	其他光束的不对称性: 扭曲光束, 复杂像散	40
1.9	$M^2$ 模型在激光扫描器中的应用	41
1.9.1	立体光刻扫描器	41
1.9.2	转换为统一的刀口法体系	43
1.9.3	为何使用多模激光束?	43
1.9.4	如何解读激光束测试报告?	44
1.9.5	利用等效透镜代替聚焦扩束镜	44
1.9.6	景深和扫描面位置处光斑尺寸的变化	45
1.9.7	限制扫描面上激光光斑圆度的技术要求	46
1.9.7.1	案例 A: 10% 束腰不对称性	46
1.9.7.2	案例 B: 10% 发散度不对称性	46
1.9.7.3	案例 C: 像散造成扫描面上有 12% 的不圆度	47
1.10	总结: $M^2$ 模型综述	48
	致谢	49
	专业术语	49
	参考文献	54
<b>第2章</b>	<b>激光扫描光学系统</b>	<b>56</b>
2.1	概述	56
2.2	激光扫描器结构	56
2.2.1	物镜扫描	56
2.2.2	物镜后置扫描	56
2.2.3	物镜前置扫描	57
2.3	光学设计和优化: 概述	57
2.4	光学不变量	59
2.4.1	衍射受限	60
2.4.2	实际高斯光束	60
2.4.3	切趾率	61

2.5	性能问题	62
2.5.1	图像辐照度	62
2.5.2	像质	63
2.5.3	分辨率和像素数	64
2.5.4	焦深	64
2.5.5	$F-\theta$ 条件	65
2.6	初级像差和三级像差	66
2.6.1	初级色差校正	68
2.6.2	三级像差性质	69
2.6.2.1	球差	69
2.6.2.2	慧差	70
2.6.2.3	像散	70
2.6.2.4	畸变	70
2.6.3	三级像差经验法则	70
2.6.4	匹兹伐 (Pitzval) 半径的重要性	71
2.7	具体设计要求	71
2.7.1	检流计式扫描器	72
2.7.2	多面体反射镜扫描	72
2.7.2.1	扫描线弯曲	72
2.7.2.2	光束位移	72
2.7.2.3	交叉扫描误差	73
2.7.2.4	小结	75
2.7.3	多面体反射镜扫描效率	75
2.7.4	内转鼓式系统	77
2.7.5	全息扫描系统	77
2.8	物镜设计模式	77
2.8.1	简单扫描物镜的设计剖析	79
2.8.2	采用倾斜面的多结构布局	84
2.8.3	多结构布局反射多面体模式	84
2.8.4	单通道多面体反射镜结构设计实例	85
2.8.4.1	CODE V 程序中多结构布局物镜参数填写格式	86
2.8.4.2	物镜设计过程	87
2.8.5	双轴扫描	88
2.9	激光扫描物镜设计实例	88
2.9.1	300DPI 办公打印机物镜 ( $\lambda = 633\text{nm}$ )	89
2.9.2	广角扫描物镜 ( $\lambda = 633\text{nm}$ )	89
2.9.3	中等视场角扫描物镜 ( $\lambda = 633\text{nm}$ )	89
2.9.4	长扫描线中等视场扫描物镜 ( $\lambda = 633\text{nm}$ )	89
2.9.5	适用于发光二极管的扫描物镜 ( $\lambda = 800\text{nm}$ )	90



2.9.6	双波长高精度扫描物镜 ( $\lambda = 1064$ 和 $950\text{nm}$ )	91
2.9.7	高分辨率远心扫描物镜 ( $\lambda = 408\text{nm}$ )	91
2.10	扫描物镜制造、质量控制和最终检测	91
2.11	全息激光扫描系统	92
2.11.1	利用平面线性光栅扫描	92
2.11.2	扫描线弯曲和扫描线性度	93
2.11.3	扫描盘摆动的影响	93
2.12	全息非接触长度测量	95
2.12.1	速度, 精度和可靠性	96
2.12.2	光学系统结构布局	97
2.12.3	光学性能	99
2.13	全息激光打印系统	100
2.14	总结	102
	致谢	102
	参考文献	102
<b>第 3 章</b>	<b>数字扫描成像系统的像质</b>	<b>104</b>
3.1	概述	104
3.1.1	扫描成像系统的成像理论	104
3.1.1.1	研究范围	104
3.1.1.2	参考文献问题	105
3.1.1.3	扫描器类型	106
3.1.2	扫描像质评价	106
3.2	基本概念和效应	109
3.2.1	数字成像的基本原理	109
3.2.1.1	数字图像结构	110
3.2.1.2	采样定理和空间关系	113
3.2.1.3	灰度等级量化: 一些限制因素	115
3.2.2	基本的系统效应	118
3.2.2.1	模糊	118
3.2.2.2	系统响应	119
3.2.2.3	半色调系统响应	121
3.2.2.4	噪声	124
3.2.2.5	彩色成像	125
3.2.2.5.1	基础知识	125
3.2.2.5.2	色度学和色度图	127
3.3	一些具体问题的考虑	129
3.3.1	扫描频率的影响	129
3.3.2	位置误差或运动缺陷	132



3.3.3 其他不均匀性 .....	135
3.3.3.1 对分色图像中周期非均匀性的认识 .....	136
3.4 产生多级灰度信号的输入扫描器（包括数字相机）特性 .....	136
3.4.1 色调再现和大面积系统响应 .....	137
3.4.2 MTF 和相关的弥散量 .....	142
3.4.2.1 MTF 法 .....	143
3.4.2.2 人眼视觉系统的空间频率响应 .....	148
3.4.2.3 电子增强 MTF 法：提高清晰度 .....	149
3.4.3 噪声度量 .....	149
3.5 二值阈值化扫描成像系统的评价 .....	151
3.5.1 评价二值扫描系统的重要性 .....	151
3.5.1.1 倾斜线和线阵列 .....	151
3.5.2 阈值成像色调再现的一般原理和灰度楔的应用 .....	151
3.5.2.1 基本的特征曲线和噪声 .....	151
3.5.3 二值像质评价：MTF 法和弥散法 .....	152
3.5.3.1 分辨率（辨别细节的一种度量） .....	152
3.5.3.2 线成像的相互影响 .....	154
3.5.4 与噪声特性相关的二值成像系统的度量 .....	154
3.5.4.1 灰度楔噪声 .....	155
3.5.4.2 线条边缘噪声范围的度量 .....	155
3.5.4.3 半色调或网格式数字图像中的噪声 .....	156
3.6 成像性能的综合度量 .....	157
3.6.1 基本信噪比 .....	158
3.6.2 探测量子效率和噪声等效量子 .....	158
3.6.3 特定的应用程序上下文 .....	158
3.6.4 调制要求的测量 .....	159
3.6.5 MTF 曲线下的面积和二次方根积分 .....	159
3.6.6 主观像质的度量 .....	160
3.6.7 信息内容和容量 .....	162
3.7 专业的图像处理技术 .....	166
3.7.1 有损压缩技术 .....	166
3.7.2 数字图像的非线性增强和恢复 .....	168
3.7.3 色彩管理 .....	170
3.8 评价像质的心理测量法 .....	171
3.8.1 心理物理学、客户调查和心理量表之间的关系 .....	171
3.8.2 心理测量法 .....	171
3.8.3 量表技术 .....	173
3.8.3.1 识别法（标称法） .....	173
3.8.3.2 等序法（顺序法） .....	173



3.8.3.3	类型（标称类型、顺序类型、区间类型）	173
3.8.3.4	图形量尺法（区间量表法）	173
3.8.3.5	成对比较（顺序、区间、比例类型）	174
3.8.3.6	配分量表（区间类型）	174
3.8.3.7	量值估算（区间量表、比例量表）	174
3.8.3.8	比例估算（比例量表）	174
3.8.3.9	语义差别法（顺序量表、区间量表）	174
3.8.3.10	利开特（Likert）法（顺序量表）	174
3.8.3.11	混合型量表（顺序型、区间型、比例型）	174
3.8.4	包括统计法在内的试验问题	175
3.9	参考数据和图表	177
	致谢	186
	参考文献	186
<b>第4章</b>	<b>多面体反射镜扫描器：组件、性能和设计</b>	<b>195</b>
4.1	概述	195
4.2	扫描反射镜类型	195
4.2.1	棱柱式多面体扫描反射镜	195
4.2.2	锥体式多面体扫描反射镜	196
4.2.3	单面体扫描反射镜	197
4.2.4	不规则多面体扫描反射镜	197
4.3	材料	197
4.4	多面体反射镜制造技术	198
4.4.1	传统的抛光技术	198
4.4.2	单点金刚石切削技术	199
4.4.3	普通抛光与金刚石切削技术比较	199
4.5	多面体扫描反射镜的技术规范	200
4.5.1	小反射面间夹角的一致性	200
4.5.2	尖塔差	200
4.5.3	小反射面与光轴的一致性	201
4.5.4	小反射面半径	201
4.5.5	小反射面面形精度	201
4.5.6	表面质量与散射	202
4.6	镀膜	203
4.7	电动机和轴承系统	204
4.7.1	气动驱动装置	205
4.7.2	磁滞同步电动机	205
4.7.3	直流无刷电动机	205
4.7.4	轴承类型	206



4.8 扫描器技术规范 .....	206
4.8.1 动态跟踪误差 .....	207
4.8.2 抖动和速度稳定性 .....	208
4.8.3 平衡 .....	208
4.8.4 垂直度 .....	209
4.8.5 时间同步 .....	209
4.9 扫描器的成本因素 .....	209
4.10 系统设计方面的考虑 .....	210
4.11 多面体反射镜的尺寸计算 .....	212
4.12 使扫描系统图像缺陷最小化的措施 .....	214
4.12.1 带状缺陷 .....	214
4.12.2 抖动 .....	215
4.12.3 散射和鬼像 .....	216
4.12.4 光强度变化 .....	216
4.12.5 畸变 .....	216
4.12.6 弓形弯曲 .....	217
4.13 总结 .....	217
致谢 .....	217
参考文献 .....	217
<b>第5章 高性能多面体反射镜扫描器的电动机和控制器（驱动器） .....</b>	<b>218</b>
5.1 概述 .....	218
5.2 多面体反射镜扫描器的基础知识 .....	218
5.2.1 多面体反射镜扫描器结构布局 .....	219
5.2.2 多面体反射镜的旋转与扫描角的关系 .....	221
5.2.3 多面体反射镜旋转速度的考虑 .....	221
5.3 案例研究：胶片记录系统 .....	222
5.3.1 系统性能技术要求 .....	223
5.3.2 转镜系统参数 .....	224
5.3.3 扫描器公差 .....	224
5.3.4 高性能界定 .....	225
5.4 电动机 .....	226
5.4.1 技术要求 .....	226
5.4.2 磁滞同步电动机 .....	226
5.4.3 无刷直流电动机特性 .....	229
5.4.3.1 转矩和绕组特性 .....	230
5.4.3.2 无刷电动机电路模型 .....	231
5.4.3.3 绕组布局 .....	232
5.4.3.4 换相传感器的定时和定位 .....	232





5.4.3.5 转子布局	233
5.5 控制系统设计	234
5.5.1 交流同步电动机控制系统	235
5.5.2 无刷直流电动机控制系统	236
5.6 应用实例	237
5.6.1 军用车辆热成像扫描器	238
5.6.2 便携式热成像扫描仪	239
5.6.3 高速单反射面扫描器	240
5.6.4 多功能单板控制器和驱动器	240
5.7 总结	242
致谢	242
参考文献	243
<b>第 6 章 旋转扫描器的轴承系统</b>	<b>244</b>
6.1 概述	244
6.2 旋转扫描器的轴承类型	244
6.2.1 气体润滑轴承	244
6.2.2 油润滑轴承	244
6.2.3 磁力轴承	245
6.2.4 球轴承	245
6.3 轴承选择原则	245
6.4 气体轴承	246
6.4.1 背景	246
6.4.2 基础知识	247
6.4.2.1 低热量产生	247
6.4.2.2 宽温度范围	248
6.4.2.3 对环境无污染	248
6.4.2.4 平稳度的重复性	248
6.4.2.5 旋转精度	249
6.4.2.6 噪声和振动	249
6.4.3 空气静压轴承	249
6.4.3.1 空气静压圆柱轴承	249
6.4.3.1.1 载荷能力	250
6.4.3.1.2 径向刚性	251
6.4.3.1.3 热量生成	251
6.4.3.1.4 轴承气流	251
6.4.3.2 空气静压止推轴承	252
6.4.3.2.1 载荷能力	253
6.4.3.2.2 轴向刚性	254