

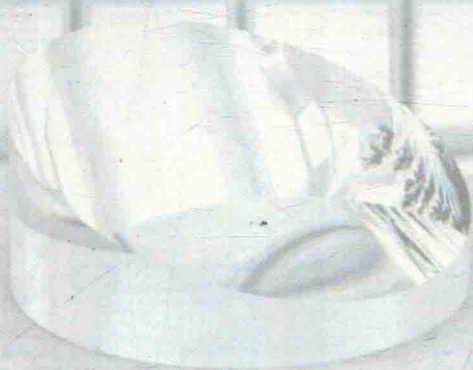


国防科技图书出版基金

© 李安虎 著

双棱镜多模式扫描 理论与技术

Double-prism Multi-mode Scanning
Theory and Technology



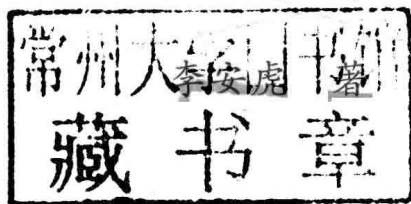
国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

Double-prism Multi-mode Scanning
Theory and Technology

双棱镜多模式扫描 理论与技术



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

双棱镜多模式扫描理论与技术/李安虎著. —北京:
国防工业出版社, 2016. 12
ISBN 978 - 7 - 118 - 11259 - 7

I. ①双… II. ①李… III. ①棱镜 - 研究 IV.
①TH74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 076384 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17 字数 302 千字
2016 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 86.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部**国防科技图书出版基金**资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 许西安 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

序 言

随着现代工业技术的快速发展,高精度光束扫描技术日益受到重视。大范围、高精度、多模式、强适应性的光束扫描系统的研制已经成为光电领域的前沿问题,由此必须拓展新型光束扫描的概念性、原理性及实现方法的研究,为关键技术的突破提供基础性支撑。

双棱镜扫描技术是一种颇具潜力的光电扫描新技术,因为其独特的技术优势而受到重视,具有广阔的应用前景。李安虎教授多年来致力于该技术的研究,尤其在双棱镜多模式扫描的基础理论和技术开发方面,已经有了较为系统的、完善的研究成果。作者将多年来的研究成果经过精心的整理后,形成了这本介绍双棱镜多模式扫描理论与技术的专著。

我非常欣喜地看到这本专著的出版,这对于弥补双棱镜多模式扫描理论研究的缺失有着重要的作用。该书在双棱镜多模式扫描理论及实现方法方面做了大量开拓性研究工作,书中揭示了双棱镜扫描的基本规律和机制,梳理了双棱镜多模式扫描的基本原理,构建了多种扫描模式的理论模型和实现方法,阐述了多模式扫描的关键技术,并对双棱镜扫描性能进行了实验研究。

本书具有较强的原创性和学术性。相对于现有的光学扫描著作,本书选题前沿、特色明显、应用目标明确,突出了基础性、创新性和前瞻性研究成果。本书建立的扫描理论和实现方法在航空航天、军事装备、工业生产诸多领域中具有广阔的应用前景。

全书结构清晰,内容翔实,案例丰富。书中内容无论是深度还是广度都达到了较高的水平,体现了作者在该领域扎实的理论基础和丰富的研究积累。

本书可以为双棱镜多模式扫描的应用和装置研发提供有益的参考,对广大读者也将是一笔宝贵的财富。

最后,在本书即将付梓之际,谨向李安虎教授致以衷心的祝贺。



前 言

随着现代光电技术的快速发展,光学扫描技术在空间光通信、激光雷达、卫星遥感、定向能应用及医疗探测等领域得到了广泛的应用。双棱镜光束扫描系统相较于其他机械式光束扫描系统,如反射式和万向架式扫描系统,具有结构紧凑、转动惯量小、动态性能好、工作可靠性高、扫描精度高等特点,是一种颇具潜力的扫描技术,在激光通信、机载激光雷达、微结构加工、生物医学、军事武器等领域具有广阔的应用前景,已经成为光学扫描领域的重要分支。

双棱镜扫描理论研究的难点在于双棱镜运动特性与光束指向之间的非线性关系,可以分为正向问题和逆向问题两个方面。虽然目前国内外学者对正向和逆向问题均有一些研究,但是不够全面、系统,尤其是逆向理论的研究不够深入,无法满足实际的应用需求。本书围绕双棱镜多模式光束扫描问题,构建了双棱镜粗扫描和精扫描的正逆向理论模型和方法,提出了双棱镜实现优于微弧度量级的精扫描理论,尤其在逆向解算法方面进行了深入研究,形成了系统的逆向解理论。本书丰富了双棱镜多模式扫描的理论体系,为大范围和高精度扫描提供了新的途径,可以为相关应用提供基础性支撑。

在双棱镜的扫描技术和应用方面,目前国内外的研究工作主要集中于旋转双棱镜用于光束指向和视轴调整等具体应用,如美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)支持喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)发展的空间激光通信终端检测和验证平台(Lasercom Test and Evaluation Station, LTES)、加拿大国防技术研究与发展中心采用旋转双棱镜构建的步进-凝视成像系统、欧普特拉公司(Optra Inc.)开发的基于旋转双棱镜系统的红外对抗装置等,但缺少双棱镜扫描技术的系统性论述。本书在总结旋转双棱镜扫描理论的基础上,发展了双棱镜多模式光束扫描技术,尤其在双棱镜多模式扫描方案、扫描系统设计、光束多模式扫描性能测试等方面进行了大量创新性研究,对双棱镜光学扫描的规律、性质、特点等进行了大量计算、测试和分析,拓展了双棱镜扫描技术的应用领域。本书还给出了多套旋转双棱镜扫描装置、偏摆双棱镜扫描装置、双棱镜复合运动扫描装置的设计案例,并对各套装置的扫描性能及关键技术进行了研究。

本书作者多年来致力于激光跟踪和扫描技术研究,尤其在双棱镜多模式扫描方面已经有了较为系统的、完善的研究成果。作者在吸收国内外相关理论研究成果和应用实例的基础上,将自身多年来的研究成果进行系统的整理,形成了这本国内外首部系统介绍双棱镜多模式扫描理论与技术的专著,展示了作者在双棱镜扫描系统方面取得的新成果。本书的主要创新工作包括:建立了双棱镜多模式光束扫描理论,阐述了旋转双棱镜扫描域和高精度径向扫描问题;提出了偏摆双棱镜实现优于微弧度级高精度扫描的理论模型,用一般的机械结构实现了高精度的光束偏转;提出了旋转双棱镜系统逆向解迭代法算法,解决了双棱镜被动跟踪的关键问题;建立了偏摆双棱镜逆向解模型,丰富了用于特定目标轨迹扫描的精扫描理论;提出了多种双棱镜扫描运动实现方法,采用特定的机构设计解决了双棱镜扫描的非线性控制问题;发展了双棱镜系统的性能验证和精度测试技术;发展了大口径动态棱镜运动仿真和镜面动载变形分析技术;等等。本书内容全面,层次清晰,并辅以大量案例分析,澄清了一些长期困扰相关研究的关键问题。本书的宗旨是将双棱镜多模式扫描的最新研究成果介绍给广大读者,使读者对双棱镜扫描系统能有系统、清晰、全面、深刻的认识,以期对从事相关项目和技术研究的人员有所助益和启发。

本书的工作得到了国家自然科学基金项目(编号 61675155、51375347 和 50805107)、中国科学院空间激光通信及检验技术重点实验室开放课题、上海市军民结合专项、上海市自然科学基金项目等支持。作者衷心感谢中国科学院上海光学精密机械研究所刘立人老师的悉心指导,感谢孙建锋研究员、沈潜德高工、王利娟高工等的帮助。感谢中国工程院院士李同保老师的关心和帮助。感谢中国科学院西安光学精密机械研究所郜鹏博士的帮助。本书的工作得到了同济大学石来德教授、卞永明教授、刘广军副教授、刘钊教授、钟计东博士等的热心支持。在本书的撰写过程中,易万力、孙万松、左其友、高心健、刘兴盛、张洋等同学付出了辛勤劳动,感谢李志忠、兰强强、钟圣泽、黄清清、王耀锋、黄承磊、王舰、张瑀、施志祥等同学的工作。本书摘引了作者团队近年来公开发表的研究论文,部分章节摘引了作者指导的几位硕士研究生姜旭春、丁烨、王伟、高心健等的学位论文,在此一并致以感谢。感谢国防工业出版社孙严冰总编、尤力编辑等同仁的大力支持以及国防科技图书出版基金的资助。

本书共 7 章,第 1 章介绍了双棱镜扫描技术的国内外研究现状,第 2 章研究了双棱镜多模式扫描理论模型,第 3 章研究了双棱镜多模式扫描逆问题,第 4 章介绍了双棱镜多模式扫描光束性质,第 5 章介绍了典型双棱镜多模式扫描系统的设计技术,第 6 章介绍了双棱镜多模式扫描性能测试,第 7 章介绍了大口径棱

镜的支撑设计技术。

本书可以为光电跟踪、光学扫描和工业动态测量等领域的技术人员和科研工作者提供参考,也可供高校相关专业师生和光学机械或精密仪器爱好者参阅。

由于作者学识有限,书中难免有错误与不足之处,殷切期盼广大读者批评指正。

作者

2016年10月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 光束扫描技术概述	1
1.2 常见的光束扫描方法	2
1.2.1 非机械式	2
1.2.2 微光机电式	3
1.2.3 机械式	4
1.3 双棱镜多模式扫描系统国内外研究现状	9
1.3.1 双棱镜多模式扫描系统理论研究	9
1.3.2 双棱镜多模式扫描系统实现技术	14
1.3.3 双棱镜多模式扫描系统的应用	16
1.4 双棱镜多模式扫描系统研究中存在的问题	26
1.5 本书主要工作	29
参考文献	30
第2章 双棱镜多模式扫描理论	35
2.1 概述	35
2.2 双棱镜多模式扫描基本原理	35
2.2.1 旋转扫描模型近似解	35
2.2.2 偏摆扫描模型基本解	37
2.3 双棱镜多模式扫描理论模型	39
2.3.1 旋转扫描模式理论模型	40
2.3.2 偏摆扫描模式理论模型	44
2.4 双棱镜多模式扫描范围和精度	47
2.4.1 旋转扫描模式的扫描范围和精度	47
2.4.2 偏摆扫描模式的扫描范围和精度	51
2.5 出射光扫描点坐标推导	54
2.5.1 旋转扫描模型出射光扫描点	54
2.5.2 偏摆扫描模型出射光扫描点	56

2.6	双棱镜间距讨论	58
2.6.1	旋转扫描模型棱镜间距	59
2.6.2	偏摆扫描模型棱镜间距	60
2.7	双棱镜多模式扫描分析	62
2.7.1	旋转扫描模型扫描盲区问题	62
2.7.2	旋转扫描模型多模式扫描轨迹	65
2.7.3	偏摆扫描模型的扫描域	68
2.7.4	偏摆扫描模型多模式扫描轨迹	70
2.8	多棱镜组合扫描模型	72
2.8.1	多棱镜组合扫描理论模型	72
2.8.2	多棱镜组合扫描模型出射光扫描点	73
2.8.3	旋转三棱镜扫描域分析	74
2.8.4	旋转三棱镜多模式扫描轨迹	75
2.9	本章小结	79
	参考文献	79
第3章	双棱镜多模式扫描逆问题	81
3.1	旋转扫描模式逆问题	81
3.1.1	两步法求解逆问题	81
3.1.2	查表法求解逆问题	88
3.1.3	迭代法求解逆问题	105
3.2	偏摆扫描模式逆问题	117
3.2.1	解析法求解逆问题	117
3.2.2	查表法求解逆问题	119
3.3	本章小结	126
	参考文献	126
第4章	双棱镜多模式扫描光束性质	127
4.1	非线性问题	127
4.2	奇点问题	131
4.3	光束变形问题	133
4.3.1	旋转扫描模式光束变形	133
4.3.2	偏摆扫描模式光束变形	140
4.4	双棱镜多模式扫描误差建模	143
4.4.1	棱镜位置倾斜引起的指向误差	144
4.4.2	轴承位置倾斜引起的指向误差	148
4.5	本章小结	152

参考文献	153
第5章 双棱镜多模式扫描系统设计	154
5.1 双棱镜多模式扫描系统组合形式	154
5.2 双棱镜多模式扫描系统运动机构	156
5.2.1 旋转双棱镜运动机构	156
5.2.2 偏摆双棱镜运动机构	159
5.3 旋转双棱镜扫描装置设计	162
5.3.1 设计要求	162
5.3.2 机械结构设计	163
5.3.3 控制系统设计	165
5.3.4 装配误差分析	168
5.3.5 光束扫描性质及检测方法	172
5.4 偏摆双棱镜扫描装置设计	173
5.4.1 设计要求	173
5.4.2 棱镜运动规律	173
5.4.3 凸轮摆动机构	173
5.4.4 装置结构设计	176
5.4.5 运动仿真分析	178
5.4.6 扫描误差分析	179
5.4.7 扫描速度对扫描轨迹的影响	180
5.5 双棱镜复合运动扫描装置设计	182
5.5.1 设计要求	182
5.5.2 系统布置方案	182
5.5.3 重心分析	184
5.5.4 驱动机构设计	185
5.5.5 运动仿真分析	187
5.5.6 扫描误差分析	191
5.6 本章小结	195
参考文献	195
第6章 双棱镜多模式扫描性能测试	197
6.1 概述	197
6.2 旋转双棱镜多模式扫描性能测试	197
6.2.1 测试平台硬件组成	197
6.2.2 测试平台软件系统	199
6.2.3 光束多模式扫描性能测试	202

6.2.4	查表法逆向解测试	207
6.3	偏摆双棱镜扫描性能测试	212
6.3.1	偏摆准确度、减速比和光束偏转范围测试	212
6.3.2	光束偏转精度测试	215
6.4	本章小结	218
	参考文献	218
第7章	大口径棱镜支撑设计技术	219
7.1	棱镜多段面支撑设计与分析	219
7.1.1	径向多段面支撑	219
7.1.2	三段面支撑分析	221
7.1.3	多段面支撑分析	228
7.1.4	多段面支撑方法的推广	230
7.2	棱镜动态支撑性能研究	232
7.2.1	动态分析方法	232
7.2.2	转动棱镜动力学仿真与分析	233
7.3	棱镜面形拟合	239
7.3.1	Zernike 拟合基本理论	240
7.3.2	棱镜镜面拟合	244
7.4	本章小结	252
	参考文献	252

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Beam scanning technology	1
1.2 Beam scanning method	2
1.2.1 Non-mechanical method	2
1.2.2 Micro-opto-electro-mechanical method	3
1.2.3 Mechanical method	4
1.3 Research status on double-prism multi-mode scanning system	9
1.3.1 Theoretical research	9
1.3.2 Implementation method	14
1.3.3 Application	16
1.4 Problems of double-prism multi-mode scanning system	26
1.5 Main work of the book	29
References	30
Chapter 2 Double-prism multi-mode scanning theory	35
2.1 Introduction	35
2.2 Basic principle of double-prism multi-mode scanning	35
2.2.1 Approximate solution for rotating scan model	35
2.2.2 Basic solution for tilting scan model	37
2.3 Theoretical model of double-prism multi-mode scanning system	39
2.3.1 Rotating scan model	40
2.3.2 Tilting scan mode	44
2.4 Scan region and precision of double-prism multi-mode scanning	47
2.4.1 Rotating scan mode	47
2.4.2 Tilting scan mode	51
2.5 Coordinate expressions of scan points	54
2.5.1 Rotating scan mode	54

2.5.2	Tilting scan mode	56
2.6	Discussion on distance between two prisms	58
2.6.1	Rotating scan mode	59
2.6.2	Tilting scan mode	60
2.7	Double-prism multi-mode scanning analysis	62
2.7.1	Blind region of rotating scan model	62
2.7.2	Multi-mode scan trajectories of rotating scan model	65
2.7.3	Scan region of tilting scan model	68
2.7.4	Multi-mode scan trajectories of tilting scan model	70
2.8	Multi prism scan model	72
2.8.1	Theoretical model	72
2.8.2	Coordinate expressions of scanning points	73
2.8.3	Scan region of rotating triple prisms	74
2.8.4	Multi-mode scan trajectories of rotating triple prisms	75
2.9	Summary	79
	References	79

Chapter 3 Inverse problem of double-prism multi-mode scanning

	scanning	81
3.1	Inverse solution for rotating double prisms	81
3.1.1	Two-step method	81
3.1.2	Lookup-table method	88
3.1.3	Iterative method	105
3.2	Inverse solution for tilting double prisms	117
3.2.1	Analytical method	117
3.2.2	Lookup-table method	119
3.3	Summary	126
	References	126

Chapter 4 Beam scanning performance of double-prism multi-mode scanning

	multi-mode scanning	127
4.1	Nonlinearity issue	127
4.2	Singularity issue	131
4.3	Beam distortion	133
4.3.1	Rotating scan mode	133
4.3.2	Tilting scan mode	140

4.4	Error modeling for double-prism multi-mode scanning	143
4.4.1	Pointing error caused by prism assembly	144
4.4.2	Pointing error caused by bearing assembly	148
4.5	Summary	152
	References	153

Chapter 5 Design of double-prism multi-mode scanning

	system	154
5.1	Configuration	154
5.2	Motion mechanism	156
5.2.1	Rotating double prisms	156
5.2.2	Tilting double prisms	159
5.3	Scanning device design of rotating double prisms	162
5.3.1	Design requirement	162
5.3.2	Mechanical structure design	163
5.3.3	Control system design	165
5.3.4	Assembly error analysis	168
5.3.5	Beam scanning property and test	172
5.4	Scanning device design of tilting double prisms	173
5.4.1	Design requirement	173
5.4.2	Motion law of two prisms	173
5.4.3	Cam oscillating mechanism	173
5.4.4	Mechanical structure design	176
5.4.5	Kinematics simulation analysis	178
5.4.6	Scanning error analysis	179
5.4.7	Influence of scan speed on scan trajectory	180
5.5	Scanning device design of combined motion double prisms	182
5.5.1	Design requirement	182
5.5.2	Layout scheme of the system	182
5.5.3	Analysis on the center of gravity	184
5.5.4	Driving mechanism design	185
5.5.5	Kinematics simulation analysis	187
5.5.6	Scanning error analysis	191
5.6	Summary	195
	References	195

Chapter 6	Performance test on double-prism multi-mode scanning system	197
6.1	Introduction	197
6.2	Performance test on rotating double prisms	197
6.2.1	Hardware of the test platform	197
6.2.2	Software of the test platform	199
6.2.3	Multi-mode scanning performance test	202
6.2.4	Lookup-table method validation	207
6.3	Performance test on tilting double prisms	212
6.3.1	Test on tilt accuracy, reduction ratio and beam deflection range	212
6.3.2	Test on beam deflection accuracy	215
6.4	Summary	218
	References	218
Chapter 7	Support design technology of large-aperture prism	219
7.1	Design and analysis of multi-segment support	219
7.1.1	Radial multi-segment support	219
7.1.2	Three-segment support analysis	221
7.1.3	Multi-segment support analysis	228
7.1.4	Extension of multi-segment support	230
7.2	Dynamic performance analysis	232
7.2.1	Dynamic analysis method	232
7.2.2	Dynamic simulation and analysis of rotating prism	233
7.3	Deformation fitting of prism surface	239
7.3.1	Zernike fitting theory	240
7.3.2	Surface fitting	244
7.4	Summary	252
	References	252