

气动光学效应校正

——原理、方法与应用

Aero-Optical Effect Correction: Principles,
Methods and Applications



张天序
洪汉玉 著
张新宇

中国科学技术大学出版社

当代科学技术基础理论与前沿问题研究

中国科学技术大学
校友文库

气动光学效应校正

——原理、方法与应用

Aero-Optical Effect Correction: Principles,
Methods and Applications

张天序

洪汉玉 著

张新宇

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书以高速飞行器导航、制导和遥感探测中面临的气动光学效应问题为应用背景,总结了张天序教授及其领导的课题组十余年来在气动光学效应校正方向的研究成果。该书聚焦交叉学科的核心问题,在全面介绍气动光学效应基本原理的基础上,深入分析研究了成像谱段优选、热辐射校正、单帧图像和序列图像校正恢复、相位校正恢复、模型和知识约束的智能校正恢复以及数字/光电混合校正等方面的新方法、新技术。该专著不仅具有好的理论深度,而且具有重要的应用价值。

本书适合从事光学、空气动力学、光电子学、精确制导与控制、计算机和信号信息处理等领域研究的科技人员阅读,也可作为高等院校师生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

气动光学效应校正:原理、方法与应用/张天序,洪汉玉,张新宇著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2014

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书;中国科学技术大学校友文库)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-312-05331-5

I. 气… II. ①张… ②洪… ③张… III. 气动力效应—光学效应—校正
IV. ①O354 ②O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 309440 号

出版 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026

<http://press.ustc.edu.cn>

印刷 合肥市宏基印刷有限公司

发行 中国科学技术大学出版社

经销 全国新华书店

开本 710 mm×1000 mm 1/16

印张 28.5

字数 509 千

版次 2014 年 1 月第 1 版

印次 2014 年 1 月第 1 次印刷

定价 99.00 元

编 委 会

顾 问 吴文俊 王志珍 谷超豪 朱清时

主 编 侯建国

编 委 (按姓氏笔画为序)

王 水	史济怀	叶向东	朱长飞
伍小平	刘 兢	刘有成	何多慧
吴 奇	张家铝	张裕恒	李曙光
杜善义	杨培东	辛厚文	陈 颢
陈 霖	陈初升	陈国良	陈晓剑
郑永飞	周又元	林 间	范维澄
侯建国	俞书勤	俞昌旋	姚 新
施蕴渝	胡友秋	骆利群	徐克尊
徐冠水	徐善驾	翁征宇	郭光灿
钱逸泰	龚惠兴	童秉纲	舒其望
韩肇元	窦贤康	潘建伟	

总 序

大学最重要的功能是向社会输送人才,培养高质量人才是高等教育发展的核心任务。大学对于一个国家、民族乃至世界的重要性和贡献度,很大程度上是通过毕业生在社会各领域所取得的成就来体现的。

中国科学技术大学建校只有短短的五十余年,之所以迅速成为享有较高国际声誉的著名大学,主要就是因为她培养出了一大批德才兼备的优秀毕业生。他们志向高远、基础扎实、综合素质高、创新能力强,在国内外科科技、经济、教育等领域做出了杰出的贡献,为中国科大赢得了“科技英才的摇篮”的美誉。

2008年9月,胡锦涛总书记为中国科大建校五十周年发来贺信,对我校办学成绩赞誉有加,明确指出:半个世纪以来,中国科学技术大学依托中国科学院,按照全院办校、所系结合的方针,弘扬红专并进、理实交融的校风,努力推进教学和科研工作的改革创新,为党和国家培养了一大批科技人才,取得了一系列具有世界先进水平的原创性科技成果,为推动我国科教事业发展和社会主义现代化建设做出了重要贡献。

为反映中国科大五十年来的人才培养成果,展示我校毕业生在科技前沿的研究中所取得的最新进展,学校在建校五十周年之际,决定编辑出版《中国科学技术大学校友文库》50种。选题及书稿经过多轮严格的评审和论证,入选书稿学术水平高,被列入“十一五”国家重点图书出版规划。

入选作者中,有北京初创时期的第一代学生,也有意气风发的少年班毕业生;有“两院”院士,也有中组部“千人计划”引进人才;有海内外科研院所、大专院校的教授,也有金融、IT行业的英才;有默默奉献、矢志报国的科技将军,也有在国际前沿奋力拼搏的科研将才;有“文革”后留美学者中第一位担任美国大学系主任的青年教授,也有首批获得新中国博士学位的中年学

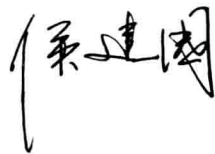
者……在母校五十周年华诞之际,他们通过著书立说的独特方式,向母校献礼,其深情厚谊,令人感佩!

《文库》于2008年9月纪念建校五十周年之际陆续出版,现已出书53部,在学术界产生了很好的反响。其中,《北京谱仪II:正负电子物理》获得中国出版政府奖;中国物理学会每年面向海内外遴选10部“值得推荐的物理学新书”,2009年和2010年,《文库》先后有3部专著入选;新闻出版总署总结“‘十一五’国家重点图书出版规划”科技类出版成果时,重点表彰了《文库》的2部著作;新华书店总店《新华书目报》也以一本书一个整版的篇幅,多期访谈《文库》作者。此外,尚有十数种图书分别获得中国大学出版社协会、安徽省人民政府、华东地区大学出版社研究会等政府和行业协会的奖励。

这套发端于五十周年校庆之际的文库,能在两年的时间内形成现在的规模,并取得这样的成绩,凝聚了广大校友的智慧和母校的感情。学校决定,将《中国科学技术大学校友文库》作为广大校友集中发表创新成果的平台,长期出版。此外,国家新闻出版总署已将该选题继续列为“十二五”国家重点图书出版规划,希望出版社认真做好编辑出版工作,打造我国高水平科技著作的品牌。

成绩属于过去,辉煌仍待新创。中国科大的创办与发展,首要目标就是围绕国家战略需求,培养造就世界一流科学家和科技领军人才。五十年来,我们一直遵循这一目标定位,积极探索科教紧密结合、培养创新拔尖人才的成功之路,取得了令人瞩目的成就,也受到社会各界的肯定。在未来的发展中,我们依然要牢牢把握“育人是大学第一要务”的宗旨,在坚守优良传统的基础上,不断改革创新,进一步提高教育教学质量,努力践行严济慈老校长提出的“创寰宇学府,育天下英才”的使命。

是为序。



中国科学技术大学校长
中国科学院院士
第三世界科学院院士

2010年12月

序

在光学遥感、探测、导航与制导中需采用高超声速飞行,为了使飞行器能沿着设定轨道飞行,必须考虑气动光学的影响。气动光学的发展方向是气动光学效应校正及其目标检测识别问题。气动光学的研究包括气动光学效应机理、气动光学效应控制、气动光学效应校正和气动光学试验验证等重要研究领域。

气动光学效应校正技术的发展涉及光学、空气动力学、光电子学、计算机和信号信息处理等多个学科,学科之间相互渗透,极大地丰富了该领域的学术、技术内涵。因此,该方向的研究不仅具有基础研究的意义,而且具有高科技的特点。

张天序教授及其所领导的团队过去十余年在该方向进行了一系列的研究,最近写出了此专著。该专著聚焦交叉学科的核心问题,在全面介绍气动光学效应基本原理的基础上,深入分析和论述了成像谱段优选、热辐射校正、单帧图像和序列图像校正恢复、相位校正恢复、模型和知识约束的智能校正恢复以及数字/光电混合校正等方面的新方法、新技术。

专著不仅具有好的理论深度,而且具有重要的应用价值。该书的出版将有力地推动我国新型高超声速飞行器发展中有关机载探测、导航与制导新技术的探索与应用。

我衷心祝福此专著的出版!

金国盾

中国工程院院士
清华大学教授
2013年3月7日于清华园

前 言

随着大气层内外高速飞行器的发展,气动光学的研究和应用日益受到科技与工业界的重视。为了实现高速飞行条件下对场景的探测,自身导航、制导和通信的需要,高速飞行器一般都携带有主动/被动光学系统,如激光投射装置或光学成像探测装置。在大气层内飞行时,高速来流与飞行平台及所载成像装置之间相互作用,形成复杂流场,对平台携带的成像探测和导航、制导系统产生光学传输干扰和热辐射影响,导致投射光束或场景图像的模糊、抖动、偏移、光强减弱或饱和,这种效应称为气动光学效应(Aero-Optic Effects)。它包括流场光学传输效应,流场与投射/探测窗口、光学头罩相互作用所产生的气动热辐射效应等。在大气层外飞行,探测大气层内场景和目标时,远场大气层内复杂流场的气动光学传输效应影响也不能忽视。

气动光学效应引起主动光学系统投射距离的缩短,远场投射光束强度的扩散和定位误差;被动光学成像探测系统成像品质劣化,探测距离缩短及导航、制导误差扩大;严重时,成像探测系统、导航制导系统甚至丧失应有的功能。所以必须研究控制气动光学效应和校正气动光学效应的理论、方法和技术。

气动光学研究的主要内容包括高速流场对光波传输和光学成像的影响机理以及从源头上如何控制或抑制,以减轻气动光学效应不利影响等问题,重点关注可压缩流场的密度分布与光波传输特性之间的相互关系及其可抑制性。特别是对被动光学系统而言,气动光学效应校正应在气动光学效应产生和控制机理指导下,建立校正畸变、恢复失真场景信息的理论、方法和技术。这是本书要讨论的课题。

本书是作者及所领导的课题组过去十余年以来在该领域学习、研究和实践工作的总结。本书力求理论联系实际,奉献该书于读者的目的,是推动

国内气动光学效应校正及其应用研究的发展,满足从事相关学科研究、教学和应用的科技工作者和研究生的参考需要。

本书所涉及的研究工作得到了国家自然科学基金重点项目(编号:60736010)和国家重大基础研究项目(编号:51323020202,51323020302-4)的资助和支持,本书的出版得到了中国科学技术大学校友文库出版基金的资助,在此一并表示感谢。

作者在开展相关研究工作和撰写本书的过程中,有幸得到清华大学金国藩院士,北京理工大学周立伟院士,航天科工集团殷兴良研究员、费锦东研究员、袁健全研究员、张丽琴研究员、郭勤研究员和朱南机教授等许多专家和领导的指导、支持、建议和帮助,在此表示衷心的感谢。

作者感谢在本书文稿准备过程中诸多同事和学生的贡献,包括富有启发性的讨论和建议,编程,计算,调试,准备、整理、补充、编辑和打印有关材料。他们是:钟胜、颜露新、陈建冲、关静、王泽、刘立、陈浩、左芝勇、张坤、张必银、翁凯剑、武道龙、何成剑、涂娇娇、余国亮、王宁宇、卢晓芬、符俊杰、王进、陈荣华、余铮、宋治、孙向华、郭畅、唐飞、王皎、郑伟、陈胜斌、李纪赛、瞿勇、李辉、康胜武、郭远飞、张泽彬、彭凡、王正、何力等。

全书由张天序策划,其中第1、2、3、6、7章由张天序主笔,第4章由洪汉玉主笔,第5章由张天序、洪汉玉主笔,第8章由张新宇、张天序主笔,全书由张天序统稿。

限于作者水平,书中难免有疏漏和不当之处,恳请读者批评指正。

著 者

“十一五”国家重点图书

中国科学技术大学校友文库

第一辑书目

- ◎ *Topological Theory on Graphs* (英文) 刘彦佩
- ◎ *Advances in Mathematics and Its Applications* (英文) 李岩岩、舒其望、沙际平、左康
- ◎ *Spectral Theory of Large Dimensional Random Matrices and Its Applications to Wireless Communications and Finance Statistics* (英文) 白志东、方兆本、梁应昶
- ◎ *Frontiers of Biostatistics and Bioinformatics* (英文) 马双鸽、王跃东
- ◎ *Spectroscopic Properties of Rare Earth Complex Doped in Various Artificial Polymer Structure* (英文) 张其锦
- ◎ *Functional Nanomaterials: A Chemistry and Engineering Perspective* (英文) 陈少伟、林文斌
- ◎ *One-Dimensional Nanostructures: Concepts, Applications and Perspectives* (英文) 周勇
- ◎ *Colloids, Drops and Cells* (英文) 成正东
- ◎ *Computational Intelligence and Its Applications* (英文) 姚新、李学龙、陶大程
- ◎ *Video Technology* (英文) 李卫平、李世鹏、王纯
- ◎ *Advances in Control Systems Theory and Applications* (英文) 陶钢、孙静
- ◎ *Artificial Kidney: Fundamentals, Research Approaches and Advances* (英文) 高大勇、黄忠平
- ◎ *Micro-Scale Plasticity Mechanics* (英文) 陈少华、王自强
- ◎ *Vision Science* (英文) 吕忠林、周逸峰、何生、何子江
- ◎ 非同余数和秩零椭圆曲线 冯克勤
- ◎ 代数无关性引论 朱尧辰
- ◎ 非传统区域 Fourier 变换与正交多项式 孙家昶
- ◎ 消息认证码 裴定一
- ◎ 完全映射及其密码学应用 吕述望、范修斌、王昭顺、徐结绿、张剑
- ◎ 摄动马尔可夫决策与哈密尔顿圈 刘克

- ◎近代微分几何：谱理论与等谱问题、曲率与拓扑不变量 徐森林、薛春华、胡自胜、金亚东
- ◎回旋加速器理论与设计 唐靖宇、魏宝文
- ◎北京谱仪Ⅱ·正负电子物理 郑志鹏、李卫国
- ◎从核弹到核电——核能中国 王喜元
- ◎核动力学导论 何汉新
- ◎基于半导体量子点的量子计算与量子信息 王取泉、程木田、刘绍鼎、王霞、周慧君
- ◎高功率光纤激光器及应用 楼祺洪
- ◎二维状态下的聚合——单分子膜和LB膜的聚合 何平笙
- ◎现代科学中的化学键能及其广泛应用 罗渝然、郭庆祥、俞书勤、张先满
- ◎稀疏金属 翟秀静、周亚光
- ◎SOI——纳米技术时代的高端硅基材料 林成鲁
- ◎稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放 蔡祖聪、徐华、马静
- ◎松属树脂特征与化学分类 宋湛谦
- ◎计算电磁学要论 盛新庆
- ◎认知科学 史忠植
- ◎笔式用户界面 戴国忠、田丰
- ◎机器学习理论及应用 李凡长、钱旭培、谢琳、何书萍
- ◎自然语言处理的形式模型 冯志伟
- ◎计算机仿真 何江华
- ◎中国铅同位素考古 金正耀
- ◎辛数学·精细积分·随机振动及应用 林家浩、钟万勰
- ◎工程爆破安全 顾毅成、史雅语、金骥良
- ◎金属材料寿命的演变过程 吴犀甲
- ◎计算结构动力学 邱吉宝、向树红、张正平
- ◎太阳能热利用 何梓年
- ◎静力水准系统的最新发展及应用 何晓业
- ◎电子自旋共振技术在生物和医学中的应用 赵保路
- ◎地球电磁现象物理学 徐文耀
- ◎岩石物理学 陈颢、黄庭芳、刘恩儒
- ◎岩石断裂力学导论 李世愚、和泰名、尹祥础
- ◎大气科学若干前沿研究 李崇银、高登义、陈月娟、方宗义、陈嘉滨、雷孝恩

目 录

总序	(i)
序	(iii)
前言	(v)
第 1 章 导论	(1)
1.1 问题的起源	(1)
1.2 多学科交叉的领域	(7)
1.3 历史、现状与发展趋势	(8)
参考文献	(11)
第 2 章 气动光学效应	(15)
2.1 气动流场的基本性质	(19)
2.2 非均匀介质中光的传输	(28)
2.3 气动热辐射效应	(31)
2.4 气动光学效应测量、控制与可视化	(34)
2.5 气动光学效应对成像探测的影响	(47)
2.6 气动光学效应校正研究方法	(68)
参考文献	(76)
第 3 章 成像谱段优选与热辐射校正	(81)
3.1 成像谱段优选方法	(81)
3.2 谱段优选实例与分析	(93)
3.3 热辐射的空间—时间指纹建模	(102)

3.4 热辐射校正方法	(116)
参考文献	(126)
第4章 单帧图像的数字校正恢复	(127)
4.1 改进的 IBD 校正算法	(127)
4.2 递归逆滤波反卷积校正算法	(140)
4.3 贝叶斯校正算法	(156)
4.4 自适应总变分最小化校正算法	(169)
4.5 双重正则化极大似然估计恢复校正算法	(185)
4.6 基于过渡区提取的图像恢复	(204)
参考文献	(214)
第5章 序列图像的数字校正恢复	(218)
5.1 两帧图像校正恢复方法(相邻帧方法)	(218)
5.2 各向异性和非线性正则化的校正算法	(243)
5.3 多帧图像恢复的极大似然估计算法	(259)
5.4 极大似然估计恢复算法的正则化问题	(273)
5.5 EM 复原校正算法的并行实现	(285)
参考文献	(304)
第6章 畸变图像校正的相位恢复方法	(308)
6.1 迭代傅里叶变换法	(309)
6.2 修改的梯度法	(312)
6.3 组合算法	(314)
6.4 基于相位估计的细节保持快速校正	(316)
参考文献	(325)
第7章 模型和知识约束的智能校正恢复	(328)
7.1 噪声/目标空间—频谱特性约束的校正恢复	(328)
7.2 Hu 矩约束的最大似然估计算法	(350)
7.3 多阶段多算法组合的图像校正	(369)
7.4 校正检测跟踪一体化的方法	(373)
7.5 模型指导的抖动偏移校正	(380)
7.6 模糊图像的空变校正恢复	(390)

参考文献	(392)
第 8 章 数字与光电校正系统	(394)
8.1 数字校正系统	(394)
8.2 光电校正方法与系统	(404)
8.3 数字与光电混合校正	(421)
参考文献	(433)

CONTENTS

Preface to the USTC Alumni's Series	(i)
Preface	(iii)
Foreword	(v)
Chapter 1 Introduction	(1)
1.1 The Origin of the Problems	(1)
1.2 Interdisciplinary Fields	(7)
1.3 History, Status and Prospect	(8)
References	(11)
Chapter 2 Aero-Optical Effects	(15)
2.1 Basic Characters of Aero Flow Field	(19)
2.2 Light Transmission in Inhomogeneous Media	(28)
2.3 Aero Heat Radiation Effects	(31)
2.4 Aero-Optics Effect Measurement, Control and Visualization	(34)
2.5 Aero-Optical Effects on Imaging Detection	(47)
2.6 Aero-Optical Effect Correction Research Approach	(68)
References	(76)
Chapter 3 Imaging Spectra Selection Optimization and Thermal Radiation Correction	(81)
3.1 Methods of Imaging Spectra Selection Optimization	(81)

3.2	Examples and Analysis	(93)
3.3	Modeling of Spatial and Temporal Fingerprints of Thermal Radiation	(102)
3.4	Thermal Radiation Correction Methods	(116)
	References	(126)
Chapter 4	Single Frame Image Digital Correction and Restoration	(127)
4.1	Improved IBD Algorithm	(127)
4.2	Recursive Inverse Filtering Deconvolution Algorithm	(140)
4.3	Bayesian Algorithm	(156)
4.4	Adaptive Total Variation Minimization Algorithm	(169)
4.5	Double Regularization of Maximum Likelihood Estimation ...	(185)
4.6	Image Restoration Method Based on Transition Region Extraction	(204)
	References	(214)
Chapter 5	Image Sequences Digital Correction and Restoration	(218)
5.1	Algebraic Method Using Two-Frame Images	(218)
5.2	Anisotropic and Nonlinear Regularization Algorithm	(243)
5.3	Multi-Frame Maximum Likelihood Estimation Algorithm	(259)
5.4	Regularization for Maximum Likelihood Estimation Algorithm	(273)
5.5	Parallel Implementation of Expectation-Maximization Algorithm	(285)
	References	(304)
Chapter 6	Phase Recovery Method of Distorted Image Correction	(308)
6.1	Iterative Fourier Transform Method	(309)
6.2	Modified Gradient Method	(312)
6.3	Jointed Algorithms	(314)
6.4	Phase Estimation Based Fast Correction with Detail-Preserving	(316)
	References	(325)

Chapter 7 Model and Knowledge Constrained Intelligent

Correction Restoration (328)

 7.1 Noise / Target Spatial - Spectral Characteristics Constrained
 Correction (328)

 7.2 First-Order Hu Moment Restricted Maximum
 Likelihood Estimation (350)

 7.3 Image Correction with Multi-Stage and
 Multi-Algorithm Jointed (369)

 7.4 Correction, Detecting and Tracking Integrated Approach ... (373)

 7.5 Dither and Deviation Correction with Model Guided (380)

 7.6 Spatially Variable Correction and Restoration for
 Blurry Images (390)

 References (392)

Chapter 8 Digital and Optoelectronic Correction System (394)

 8.1 Digital Correction System (394)

 8.2 Optoelectronic Correction Method and System (404)

 8.3 Digital and Optoelectronic Integrated Correction (421)

 References (433)