



Study on Singular Optics
in Atmospheric Turbulence

大气湍流中 奇点光学的研究

李晋红◎著

中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

大气湍流中奇点光学的研究

Study on Singular Optics in Atmospheric Turbulence

李晋红 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

奇点光学诱人的应用前景和大气湍流随机复杂的多样性,使大气湍流中奇点光学的研究成为现代光学的重要研究方向。本书是在国家自然科学基金等项目的研究成果基础上完成的,较为系统和深入地论述了大气湍流中奇点光学的主要理论和方法,主要内容包括奇点光学与激光传输的基本理论,奇点光束在大气湍流中的传输特性,相干涡旋在大气湍流中的动态演化,刃型位错的动态演化,涡旋光束在大气湍流中的光束质量。

本书可作为高等院校光学、光学工程、物理电子学及通信工程等专业的教学参考书,可供从事空间光通信、奇点光学等领域的科技工作者、教师、研究生或高年级大学生阅读和参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大气湍流中奇点光学的研究 / 李晋红著. —北京: 电子工业出版社, 2016.12

ISBN 978-7-121-30652-5

I. ①大… II. ①李… III. ①大气湍流—奇点—光学—研究 IV. ①P421.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 308378 号

策划编辑: 徐蔷薇

责任编辑: 李蕊

印刷: 北京季蜂印刷有限公司

装订: 北京季蜂印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开本: 720×1000 1/16 印张: 14 字数: 274.4 千字

版次: 2016 年 12 月第 1 版

印次: 2016 年 12 月第 1 次印刷

定价: 59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: xuqw@phei.com.cn

前 言



奇点光学以其本身固有的奇异特性和在信息传递、微粒操控等领域的重要应用,引起了学术界的高度关注。近年来,因广义惠更斯-菲涅耳原理的应用,用半解析或解析方法研究奇点光束在大气湍流中的传输特性取得了进展。相关学者在大气湍流中奇点光学的研究方面做了大量的科研工作,得到了许多有价值的理论模型和实验方法,促进和推动了相关技术和学科快速发展。开展大气湍流中奇点光学研究,对自由空间光通信、量子保密通信、激光武器、天体物理等领域有着重要意义。

本书内容主要建立在著者及所在科研团队从事的激光大气传输与奇点光学研究、近年内承担的相关科研项目和研究生教学基础上,对大气湍流中奇点光学的研究成果进行归纳、分析和总结。

全书共分6章。第1章为绪论,主要阐述大气湍流中奇点光学研究背景、意义和国内外研究进展,使读者对大气湍流中奇点光学研究有一个大致了解;第2章为奇点光学与激光传输的基本理论,分别从奇点光学的基本概念、奇点光束的产生方法、激光传输的常用方法、部分相干光的基本理论四个方面进行介绍;第3章重点分析了奇点光束在大气湍流中的传输特性,首先叙述了大气湍流的基本知识,然后基于广义惠更斯-菲涅耳原理,从光强演化、角扩展、束宽扩展和斯托克斯参量方面对涡旋光束和线刀型位错光束在水平大气湍流、斜程大气湍流中的传输变换进行分析;第4章为相干涡旋在大气湍流中的动态演化,内容包括相干涡旋的动态演化、相干涡旋产生分类与拓扑荷守恒距离、高阶涡旋的动态演化和传输轨迹、相干涡旋偶极子在大气湍流中的演化;第5章为刀型位错的动态演

化, 分别研究线刃型位错在大气湍流中的转化、圆刃型位错在自由空间中的演化和在大气湍流中的转化; 第6章为涡旋光束在大气湍流中的光束质量, 首先介绍了聚焦光斑尺寸、远场发散角、斯特列尔比、陡峭度参数、桶中功率和光束传输因子等光束质量的评价参数, 然后从不同角度分析了涡旋光束在大气湍流中的光束质量及拓扑荷对涡旋光束质量的影响。

本书中涉及的理论及理论模型的描述, 都节选自国内外本领域专家、学者公开发表的论文和研究成果, 在写作中不可避免地对参考资料在形式和内容上进行了不同程度的取舍或修改, 文中尽可能对引用的参考文献加以著录, 由于种种原因的限制, 很难保证没有遗漏或错误, 欢迎各位读者批评指正。

本书是在国家自然科学基金项目(Nos. 61405136、61178067、11247278 和 11547211)、山西省基础研究项目(Nos.2012021016 和 2013021010-4)和太原科技大学博士科研启动基金(No.20102016)等研究成果的基础上撰写的, 在此对国家自然科学基金委员会、山西省科技厅和太原科技大学等部门和单位表示衷心的感谢。在作者的学术生涯和本书的写作过程中, 得到了许多前辈和老师的热情支持和鼓励, 也得到了许多同事、朋友和学生的大力支持和帮助, 如(排名不分先后)吕百达教授、邝小渝教授、张天才教授、王云才教授、冯国英教授、张彬教授、蒲继雄教授、季小玲教授、陶向阳教授、潘留占教授、袁孝教授、王磊教授、康小平教授、赵志国教授、赵光普教授、高曾辉教授、邹其徽教授、蔡阳健教授、沈波教授、陈志刚教授、魏计林教授、刘淑平教授、赖云忠教授、罗亚梅研究员、马建毅研究员、聂娅博士、杨元杰博士、王飞博士、赵承良博士、王涛博士、张永涛博士、丁攀峰博士、张恩涛博士、程科博士、熊玲玲博士、刘永欣博士、丁超亮博士、闫红卫博士、刘海岗博士、杨爱林博士、王伟伟博士生、曾军博士生、索强波博士生等, 在此恕不一一列出了, 谨致以衷心的感谢! 感谢电子工业出版社的徐蔷薇等编辑在本书出版中所付出的辛勤劳动。本书在写作过程中借鉴和参考了国内外同行的研究成果, 引用了大量的参考文献, 谨在此表示衷心的感谢。

由于著者学识水平有限, 加之大气湍流中奇点光学的研究涉及面太宽, 书中难免有许多不妥和错误之处, 欢迎广大读者批评指正, 谢谢。

著 者

2016年6月

目 录



第 1 章 绪论	1
1.1 大气湍流中奇点光学研究背景	1
1.2 大气湍流中奇点光学研究进展	3
参考文献	8
第 2 章 奇点光学与激光传输的基本理论	20
2.1 奇点光学的基本概念	20
2.1.1 螺旋型位相奇点	21
2.1.2 刃型位相奇点	22
2.1.3 混合型位相奇点	23
2.1.4 拓扑荷	24
2.1.5 偏振奇点	24
2.1.6 相干涡旋	25
2.2 奇点光束的产生方法	25
2.2.1 几何模式转换法	26
2.2.2 螺旋位相板法	27
2.2.3 计算全息法	29
2.2.4 空间光调制器法	30
2.2.5 角向光栅耦合法	31
2.3 激光传输的常用方法	33

2.3.1 几何光学方法	34
2.3.2 矩阵光学方法	34
2.3.3 波动方程	37
2.3.4 衍射积分方法	40
2.3.5 傅里叶光学方法	45
2.4 部分相干光的基本理论	47
2.4.1 互相干函数和互强度函数	47
2.4.2 交叉谱密度函数和复空间相干度	48
2.4.3 维格纳分布函数	49
参考文献	50
第3章 奇点光束在大气湍流中的传输特性	57
3.1 大气湍流的基本知识	57
3.1.1 大气基本描述	57
3.1.2 大气光学特性	60
3.1.3 大气湍流的形成	68
3.1.4 大气湍流结构常数	69
3.1.5 大气折射率起伏功率谱模型	70
3.2 涡旋光束在水平大气湍流中的传输变换	72
3.2.1 交叉谱密度函数	72
3.2.2 光强演化	74
3.2.3 束宽扩展	78
3.3 涡旋光束在斜程大气湍流中的传输变换	80
3.3.1 斜程传输与水平传输的比较研究	80
3.3.2 斜程中上行与下行路径的比较研究	83
3.4 线刃型位错光束在斜程大气湍流中的传输变换	86
3.4.1 光强演化	86
3.4.2 角扩展	89
3.5 涡旋光束在大气湍流传输中斯托克斯参量的变化	92
3.5.1 理论模型	92
3.5.2 数值计算和分析	97
参考文献	108

第 4 章 相干涡旋在大气湍流中的动态演化	113
4.1 相干涡旋的动态演化	114
4.1.1 单光束产生的相干涡旋演化	114
4.1.2 双光束产生的合成相干涡旋演化	118
4.1.3 多光束产生的合成相干涡旋演化	126
4.2 相干涡旋产生分类与拓扑荷守恒距离	137
4.2.1 相干涡旋的产生分类	137
4.2.2 拓扑荷的守恒距离	144
4.3 高阶涡旋的动态演化和传输轨迹	147
4.3.1 高阶相干涡旋的动态演化和传输轨迹	147
4.3.2 高阶光涡旋的动态演化和传输轨迹	152
4.4 相干涡旋偶极子在大气湍流中的演化	154
4.4.1 理论模型	154
4.4.2 数值计算与分析	156
参考文献	163
第 5 章 刃型位错的动态演化	166
5.1 线刃型位错在大气湍流中的转化	167
5.1.1 理论模型	167
5.1.2 数值计算与分析	170
5.2 圆刃型位错的动态演化	177
5.2.1 圆刃型位错光束的交叉谱密度函数	177
5.2.2 圆刃型位错在自由空间中的演化	179
5.2.3 圆刃型位错在大气湍流中的转化	181
参考文献	187
第 6 章 涡旋光束在大气湍流中的光束质量	189
6.1 激光光束质量的评价参数	189
6.1.1 聚焦光斑尺寸和远场发散角	189
6.1.2 斯特列尔比和陡峭度参数	190
6.1.3 桶中功率	191
6.1.4 光束传输因子	192
6.2 涡旋光束在大气湍流中光束质量的分析	193

6.2.1	光束传输因子分析	193
6.2.2	斯特列尔比分析	197
6.2.3	陡峭度参数分析	200
6.2.4	角扩展分析	203
6.2.5	维格纳分布函数分析	207
6.3	拓扑荷对涡旋光束质量的影响	210
6.3.1	拓扑荷对涡旋光束传输因子的影响	210
6.3.2	拓扑荷对涡旋光束角扩展的影响	213
	参考文献	214

第1章 绪 论

大气湍流中奇点光学的研究,属于光学信息获取与处理、高速保密光通信技术、高密度信息存储、大气光学等交叉学科中的现代光学问题。近年来,奇点光学在大气湍流中的相关问题受到研究者的重视。由于奇点光束含有光涡旋和拓扑荷(又称轨道角动量),研究大气湍流中奇点光束、光涡旋、相干涡旋和拓扑荷的传输行为和动态演化,对实现自由空间量子光通信系统的设计具有重要意义。

1.1 大气湍流中奇点光学研究背景

近年来,以奇点光束、光涡旋、相干涡旋和拓扑荷为核心内容的奇点光学,已在光镊^[1, 2]、激光通信^[3-5]、微粒操控与捕获^[6-10]、光数据存储^[11]、量子信息及量子纠缠^[12-17]、天体物理及天文学^[18, 19]和新型超分辨光学显微镜^[20, 21]等方面展示出诱人的应用前景,它研究的是光波场在位相奇点附近出现的光涡旋、相干涡旋、波前位错和波前拓扑结构等精细而又复杂的光波场结构及其相关问题^[10, 13, 22]。实验中通过模式转换法^[23, 24]、计算全息法^[4, 25, 26]、螺旋位相板法^[27-31]、空间光调制器法^[32, 33]、异双折射光学元件^[34]、亚波长光栅^[35]、光学楔子^[36, 37]与光学镜子^[38, 39]、多级涡旋镜^[40]、反射或中空波导法^[41, 42]等多种方法已获得有位相奇异的奇点光束。近年来,参与奇点光学的人员越来越多,产生奇点光束的方法越来越多,奇点光束的应用领域越来越广。

另一方面,激光大气传输与控制在激光通信、光学雷达、卫星遥感、远距测量、激光武器等领域中有十分重要的应用意义,是目前自由空间光通信方面最为活跃的研究热点之一^[43-47]。由于激光本身具有的高强度、高方向性、高空间分辨率、高相干性和高单色性等特性,从而有容量更大、速度更快、波束更窄、增益更高、抗干扰性更强和保密性更好等优点,因此激光成为空间数据传输的最佳载

体,也是自由空间光通信最理想的载体^[45,46]。从国防军事角度来说对激光大气传输的研究也十分必要。未来战争的主战场将是太空、临近空间、航空、地面、海洋等立体空间,越来越多的国家认识到掌握空间对于打赢未来战争的重要性。目前的航空、航天等侦察平台正向高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率和多传感器复合侦察等方向发展,迫切需要将海量原始数据以无损压缩方式从侦察平台直接传输或中继传输至指控终端,满足现代军事的实时性要求。另外,未来局部战争需要激光武器具备抗电子干扰能力、安全保密能力、机动通信能力和快速反应能力等。大气激光通信和射频通信进行复合模式工作,已成为未来军事通信的趋势。大气激光通信可在特殊时段、区域和天气条件进行通信,与射频通信共同构成高速、无缝、保密的军用激光通信链路。但自由空间光通信系统和激光武器系统都在复杂的大气环境中工作,大气湍流效应、大气中的气体分子、气溶胶等微粒的散射与吸收对激光信息传输、接收和利用有着不可忽视的影响,从而使自由空间光通信传输的信号质量明显下降、激光武器的高精度跟踪瞄准系统的技术性能显著降低。为了提高空间光通信的能力和激光武器的精度,必须对激光大气传输理论与技术进行深入分析。

随着新世纪信息时代的深入发展,整个社会对信息的需求越加膨胀,尤其是近几年,互联网和数据流量一直处于急剧爆发式的增长。文件传输、音乐下载、视频浏览等业务已经成为人们日常生活中必不可少的一部分,数据流量的需求正在以指数级的程度增长。拥有光子轨道角动量(拓扑荷)的奇点光束进入通信学者的视野,将轨道角动量这一全新的电磁波容量资源应用于光通信领域的复用传输技术可大幅度提高频谱效率和信道容量。奇点光束是一种具有相位奇点和螺旋波前的特殊光场,在光束传输过程中波前会呈现螺旋状分布,相位分布函数为 $\exp(im\theta)$, m 为奇点光束所具有的轨道角动量(拓扑荷数),它代表一个光学波长内相位旋转的周期数,此类特殊光场中的每个光子都具有特定的轨道角动量 $m\hbar$ 。理论上奇点光束具有无限多个轨道角动量本征态,且其相互正交,可以作为新的光通信复用维度,也可以直接进行编码或者作为载波携带信息,这就极大地提高了信道容量^[48,49]。

由于奇点光束具有轨道角动量这一全新的电磁维度,理论上拥有无数个正交的轨道角动量态,这为实现轨道角动量复用的自由空间光通信提供了理论基础。与此同时,自由空间光通信系统以大气为传输信道,一旦奇点光束携带的信息遭到截取或破坏,奇点光束的波前相位就会发生相应改变,从而造成解码时信息的不对称,这在一定程度上实现了量子领域的保密通信。将奇点光束与自由空间光通信结合具有以下四个主要特点:①全新的光自由度。轨道角动量是一个全新的

光自由度,可作为第五种复用的维度(常用的四种信息复用维度包括空分复用、时分复用、频分复用、码分复用),提供了灵活的网络和信息操控功能^[50]。②固有的安全性。利用奇点光束的轨道角动量复用技术可以极大地提高信息传输的安全性,因为对于基于轨道角动量进行传输的信息在解调端需要有与调制端匹配的轨道角动量装置,而直接进行探测窃取信息难度是非常高的。③频谱效率高。信息传输的主要载体为电磁波,它是非常重要的资源。理论上光束轨道角动量的数目是无穷多的,利用本征值不同的光轨道角动量的相互正交特性,可以实现在同一波长上传输多路信号,提高了系统的频谱利用率^[51]。④系统兼容性与扩展性好。在发送端,经过传统方式复用的信号在发送之前,可以再经过轨道角动量复用进行系统扩容;在接收端,首先将信号进行轨道角动量解复用(轨道角动量移除操作),之后每路信号就可以独立地利用现有接收机进行处理。也就是说,轨道角动量复用/解复用设置在最接近信道的部位,这种复用/解复用实现方案不影响已有光发射机和接收机设计,系统兼容性好^[52]。系统扩容时只需要增加一个含有新拓扑荷数的奇点光束,将其耦合至轨道角动量复用信道即可,易于实现系统扩容^[48]。

因此,进行大气湍流中奇点光束的深入研究,对民用方面的激光通信、雷达、测距、遥感和监测等,以及军事方面的激光制导、跟踪和各种激光武器的应用都具有重要的现实意义。

1.2 大气湍流中奇点光学的研究进展

有关位相奇点的研究,最早可追溯到19世纪30年代。1833年Whewell在研究潮汐问题时,将重心放在对同潮线(等位相线)和潮汐峰演变过程的观察上,研究发现,当多列同潮线相遇时会交汇于同一点,潮汐峰随之消失,且此处潮水位为零,该点就是存在于潮汐漩涡中的位相奇点,这是对位相奇点现象有科学记载的最早生活观察实例。环绕位相奇点的旋流被称为涡旋,涡旋现象普遍存在于大自然中,如光波场中的光学涡旋,水涡旋中的漩涡,大气涡旋中的龙卷风等。1972年,Nye和Berry在测量影响南极冰盖厚度变化因素的过程中无意间发现了海水声波存在位相奇点的现象^[53],在该发现的基础上他们发表了一篇题目为《波列中的位错(Dislocations in wave trains)》的经典论文^[54],文中类比晶体中的缺陷,将“波前错位”的概念引入波动理论中,用来解释波中位相缺陷现象。研究发现,在粗糙表面反射的光脉冲,具有螺旋型波前位错(screw wavefront dislocations)、刃型(edge)波前位错和混合型(screw-edge)波前位错等缺陷。这一工作对人们认识波场中位相奇点有着关键作用。Baranova及其合作者通过理论研究和实验证

实了光学领域中波前位错的密度,并在散斑场中发现了波前位错^[55, 56]。在 1989 年, Couillet、Gil 和 Rocca 发现具有较大菲涅耳数的激光腔内存在强度为零的奇点,该奇点在高于阈值电压的不稳定场中长时间存在,并且围绕此奇点的位相是变化的,环绕该奇点一周位相改变量为 2π 。他们将这种类似超流体涡旋状态称为“光涡旋”,然后证明了涡旋解的确存在^[57]。

近年来,奇点光学的研究对象已从完全相干光扩展到部分相干光,从光涡旋扩展到携带相反拓扑荷的双涡旋,即光涡旋偶极子甚至合成光涡旋,研究范围也从自由空间扩展到光纤、光学系统、大气湍流等介质。对部分相干光而言,一般不存在光强为零的光涡旋,但却存在光谱相干度或互相干函数为零的相干涡旋^[58, 59],又称为相关涡旋^[60, 61]。目前,用来研究部分相干场中相干涡旋的方法主要有两种。一种方法是相干模拟理论^[62],就是将部分相干光认为是相干模式的非相干叠加。Ponomarenk 在 2001 年研究了一类含光涡旋的部分相干光的传输特性,该部分相干光具有可分离的位相,可表示为由角向指数相同的 LG 模非相干叠加^[63]。Bogatryyova 及其合作者也利用相干 LG 模的非相干叠加构造出具有可分离位相的部分相干光,对相干涡旋的研究发现,相干涡旋属于横平面上的圆形位错,并实验证实了理论预测^[64]。2007 年刘普生和吕百达研究了 LG 模叠加形成的部分相干光的相干涡旋,指出权重因子和模指数及参考点的选择都会改变圆刃型位错出现的位置^[65]。另一种研究部分相干光中的相干涡旋特性的方法是分析光谱相干度或交叉谱密度函数或互相干函数。Gbur 和 Visser 理论上预言了部分相干光的光谱相干度具有孤立的奇点,该点为相干涡旋^[58]。Palacios 及其合作者指出数值计算和实验技术能够预测和验证空间相干函数的相关涡旋的存在^[60]。Maleev 等用四维互相干函数数值分析了部分相干光在近场和远场区域有相关涡旋的存在^[61]。Schouten 等用部分相干光做了杨氏双缝实验,研究了的光谱相干度奇异行为,证实了在一定的位存在有相干涡旋^[66]。Swartzlander 及其合作者通过 Fizeau 干涉仪研究了相关涡旋的构成,证实了相关涡旋具有拓扑荷散射现象^[67]。

在过去半个多世纪里,关于大气湍流中光波传输方面的著作已出版了许多,其中,国外的有: Tatarskii 的 *Wave Propagation in a Turbulent Medium*^[43]、Strohbehn 等人合编的 *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*^[68]、Ishimaru 的 *Wave Propagation and Scattering in Random Media*^[69], 以及 Andrews 和 Phillips 合著的 *Laser Beam Propagation through Random Media*^[70]等;国内的有:宋正方的《应用大气光学基础》^[71]、张逸新和迟泽英的《光波在大气中的传输与成像》^[72]、吴健等编的《大气中的光传输理论》^[45]、姜会林等编的《空间激光通信技术与系统》^[73], 以及饶瑞中的《光在湍流大气中的传播》^[74]和《现代大气光学》^[75]等。这些著作

虽然处理方法基本已经系统化,得到了一些规律,而且这些规律已在天文观测和大气光通信等领域得到了应用,但时至今日参与研究人员基本上已经有这样的共识——难以找到解决光波在随机介质中传输的各类问题的一个普适性理论,常常需要在一定的简化条件下进行复杂的数值模拟,力求得到与实验上相符的结果^[43, 74, 76]。完全相干光在大气湍流的传输已有大量的报道。近年来,土耳其的 Eyyuboglu 和 Baykal 研究组在这方面开展了许多工作。Eyyuboglu 和 Baykal 利用广义惠更斯-菲涅耳原理,研究了余弦高斯和双曲余弦高斯光束在大气湍流中传输后光强剖面的互易,指出源平面处为余弦高斯分布的场在大气湍流中传输后得到双曲余弦高斯分布,反之亦然^[77]。随后, Eyyuboglu 等经过数值计算模拟研究了离轴高斯光束、高阶环状高斯光束、平顶光束、双曲余弦高斯光束、厄米正弦高斯光束、厄米双曲正弦高斯光束和厄米双曲余弦高斯光束在大气湍流中的平均光强等传输特性,指出普通的光束在大气湍流中传输会经历几个不同阶段的演化,最终得到类高斯的分布^[78-85];他们也研究了高阶贝塞尔光束和修正贝塞尔光束在大气湍流中的传输,指出高阶贝塞尔光束在传输中会转化为修正贝塞尔光束分布,同样,修正贝塞尔光束在传输中会转化为贝塞尔光束分布^[86, 87]。另外,其他研究者对完全相干光束通过大气湍流的传输特性也做了许多研究^[88-91]。

自从 Wolf 和 Carter 在 1975 年提出了准单色的部分相干高斯光源的概念以后^[92],代表部分相干光的高斯-谢尔模型(GSM)光源理论得以发展和完善。从此部分相干光在大气湍流中的研究逐渐增多。吴健和 Boardman 推导出光束通过大气湍流的交叉谱密度函数表达式并做了数值图例计算,首先指出以 GSM 光束为代表的部分相干光比完全相干光受大气湍流的影响要小^[93, 94]。后来 Wolf 研究组对这一工作做了进一步分析^[95-97],2002 年 Gbur 和 Wolf 用均方根束宽定量地研究部分相干光在随机介质中的光束束宽扩展,首次提出“湍流长度”概念,以便更直观、定量地讨论光束受大气湍流的影响^[95]。2003 年 Shirai 及其合作者用模式分析的方法研究了 GSM 光束在大气湍流中的光束扩展,指出高阶模式的光束在大气湍流中的扩展比低阶模式的小,但是在自由空间中各个模式有相同的扩展,对部分相干光比完全相干光受到大气湍流的影响要小给出了解释^[96]。Salem 等建立了两个简单理论模型,指出了用部分相干光通过远距离传输后比完全相干光的一些优点^[97]。Dogariu 和 Amarande 通过检测光束的束宽,定性证实了在大气湍流传输中部分相干光受到的影响比完全相干光要小的结论^[98]。Eyyuboglu 和 Baykal 研究了对部分相干余弦高斯和双曲余弦高斯光束在大气湍流中的透过率^[99]。季小玲等研究了部分相干双曲余弦高斯通过大气湍流的光束扩展^[100]。Shirai、Ji 等对 GSM 光束和部分相干厄米-高斯光束在大气湍流中的方向性进行了报道^[101, 102]。另外,

奇点光束在大气湍流中的传输特性的报道越来越多, Gbur 和 Tyson 利用多位相屏模拟法对拉盖尔-高斯涡旋光束通过大气湍流传输做了分析, 研究指出光涡旋含有的拓扑荷是一个相对稳定的量, 在光通信中拓扑荷有望作为信息传递载体^[103]。Gu 和 Gbur 报道了利用奇点光束测量大气湍流强度的可能方法^[104]。张逸新团队研究了奇点光束在大气湍流中的传输特性^[105]。王立刚课题组研究了具有确定初始相位排列的激光束列阵通过大气湍流的传播特性, 发现在近距离的传输过程中, 列阵光束的光强分布会出现奇点光学行为^[106]。蒲继雄和赵道木通过实验模拟了奇点光束在大气湍流中的闪烁因子^[107]。王海燕和钱仙妹报道了随机电磁奇点光束在大气湍流中的光谱特性^[108]。著者李晋红及其合作者对部分相干厄米正弦类高斯光束、部分相干厄米-高斯光束、部分相干正弦类高斯光束、奇点光束、合成奇点光束、随机电磁奇点光束和刃型位错光束等在大气湍流中的光强演化、束宽扩展、角扩展、方向性、斯托克斯参量、偏振度、方位角、椭圆率和光谱变化等传输特性进行了深入分析^[109-126]。

文献[55-67]报道的是单个光涡旋或相关涡旋在自由空间的演化行为。对两束或多束光干涉形成的合成光涡旋或合成相关涡旋在自由空间中的奇异特性做了详细研究, Indebetouw 发现随着传输距离的增加, 携带相反拓扑荷的相干涡旋偶极子会相互吸引并发生碰撞, 最后湮灭; 携带相同拓扑荷的双涡旋光束会按顺时针旋转, 到远场的时候旋转角度达到 90° ^[127]。Freund 则表示携带相反拓扑荷的相干涡旋偶极子在湮灭后又会在远场重新出现^[128]。Roux 报道了相干涡旋偶极子在折射率渐变介质中的演化特性^[129]。Molina-Terriza 及其合作者指出两束含有螺旋波前位错的非同轴叠加光束比单光束更具有丰富的涡旋结构^[130]。Maleev 等人研究了两束非同心的涡旋光束干涉形成的合成光涡旋的特性^[131]。2009 年, Wang 及其合作者提出了一种激光径向列阵模型, 用带不同初始位相的高斯光束组成了径向列阵合成光束, 指出该径向列阵光束在自由空间和透镜光学系统中都可产生合成光涡旋^[132]。Cheng 和 Lv 以部分相干叠加涡旋光束为例, 将合成光涡旋的概念推广到合成相干涡旋^[133]。近年来, 光涡旋或相关涡旋在大气湍流中的动态演化的研究逐渐增多, Dipankar 及其合作者用数值模拟了光涡旋在大气湍流中的传输轨迹^[134]。饶瑞中对平面波在大气湍流中的分形结构和相位奇点做了研究^[135]; 何雪梅等研究了合成相干涡旋在非 Kolmogorov 大气湍流中的演化行为, 得到相干涡旋在非 Kolmogorov 大气湍流中传输时会出现相干涡旋的移动湮灭和新相干涡旋的产生, 广义指数、拓扑荷符号及叠加方式都会影响相干涡旋的演化行为^[136]。2009 年, 著者李晋红等对相干涡旋在大气湍流中的产生、移动、湮灭等演化行为和拓扑荷的守恒情况进行了分析^[115, 137]; 随后对两光束和多光束产生的合成相干

涡旋, 以及合成相干涡旋的位置分布、拓扑荷的大小与符号等进行研究^[113, 138]; 最近从相干涡旋的产生角度将其分为三类, 第一类是涡旋光束本身所固有的相干涡旋, 第二类是涡旋光束在自由空间中自身传输引起产生的相干涡旋, 第三类则是大气湍流诱导涡旋光束产生的相干涡旋^[139-141]。

刃型位错的主要特征是在横平面上有直线或圆形切口, 越过该直线或圆形切口位相发生 π 的突变^[127]。Yan 和 Lv 研究了刃型位错通过自由空间和旁轴 ABCD 光学系统的动力学演化行为, 发现在一定条件下, 新的刃型位错和非正则光涡旋会出现^[142]。He 等发现在一定条件下两个刃型位错通过自由空间传输变得不稳定, 甚至消失; 在两个刃型位错的离轴距离非 0 时产生两个相反拓扑电荷的光涡旋; 而当两个刃型位错相互垂直并且离轴距离是 0 时, 一个刃型位错是稳定不变的^[143]。刘普生等研究了 LG 模叠加形成的部分相干光的相干涡旋, 指出权重因子、模指数及参考点的选择都会改变圆刃型位错出现的位置^[65]。唐碧华等研究了两个刃型位错高斯光束在远场中的位相奇点和能流密度分布, 研究表明, 当两个刃型位错的离轴量为 0 时, 电场分量在远场中出现两个刃型位错; 而当两离轴量不为 0 时, 刃型位错消失, 存在光涡旋^[144]。陈海涛及其合作者对存在倾斜透镜时两个刃型位错的相互作用进行了研究, 发现两个离轴刃型位错在一定条件下由于相互作用会消失, 并产生一个或两个非正则光涡旋, 一个共轴刃型位错和一个离轴刃型位错相互作用时产生一个非正则光涡旋; 当初始场中两个刃型位错相互垂直或者平行时, 出射场中会有一个或者两个刃型位错出现; 改变透镜的倾斜因子不影响出射场中位相奇点的类型和数量, 但位相奇点的横向位置与倾斜因子有线性关系^[145]。Kivshar、Petrov、Yan 等讨论了在非线性介质、线性介质和色散透镜中涡旋-刃型位错的相互作用^[146-149]。著者李晋红和吕百达研究了刃型位错在大气湍流中的转化, 发现在斜程大气湍流中刃型位错消失、转化为非正则相干涡旋, 斜率、离轴量、束腰宽度、相关长度、天顶角和传输距离改变时非正则相干涡旋的位置在移动, 而斜率和束腰宽度对拓扑电荷反转有影响, 大气湍流的强弱只影响非正则相干涡旋位置, 不影响拓扑电荷的反转^[150]。

激光在大气中传输的光束质量问题是国内外激光和光学界十分关注的前沿课题之一, 用光束传输因子 (又称 M^2 因子)、角扩展、陡峭度 K 参数、斯特列尔比等参数评价大气中光束质量的报道越来越多。Xiao 及其合作者利用斯特列尔比、 β 参数和桶中功率, 研究了大气湍流对远场光束质量的影响^[151]。Dan 和 Zhang 利用维格纳分布函数 (Wigner Distribution Function, WDF) 二阶矩得到激光束在大气湍流中 M^2 因子的公式, 并对部分相干平顶光束在大气湍流中的 M^2 因子进行了研究^[152, 153]。Alavinejad 和 Kashani 等研究了部分相干平顶光束在大气湍流中的

M^2 因子和斯特列尔比的变化^[154, 155]。Zhou 等研究了部分相干洛伦兹高斯光束在大气湍流中的 M^2 因子, 指出光束参数、相干参数和大气湍流参数对 M^2 因子有影响^[156]。Zhong 等分析了拉盖尔-高斯光束在大气湍流中的 M^2 因子和角扩展^[157]。Ji 及其合作者利用复高斯展开函数讨论了截断 GSM 光束在自由空间和大气湍流中的 M^2 因子, 指出随截断参数的增加 M^2 因子减小^[158]。Chu 等研究了部分相干双曲余弦高斯光束和超高斯光束在大气湍流中的陡峭度 K 参数变化^[159, 160]。Zhu 等研究了贝塞尔涡旋光束在大气湍流传输中的光束传输因子, 研究指出贝塞尔涡旋光束抗大气湍流能力强于贝塞尔非涡旋光束^[161]。Yuan 等分别分析了径向列阵部分相干平顶光束、多 GSM 光束、拉盖尔 GSM 光束在大气湍流中的 M^2 因子^[162, 163]。王伟伟等研究了非 Kolmogorov 大气湍流对部分相干厄米-高斯光束 M^2 因子的影响^[164]。著者李晋红及其合作者利用 M^2 因子、斯特列尔比、角扩展, 从光束质量角度比较研究了大气湍流对奇点光束和非奇点光束的影响, 研究表明, 与非奇点光束相比奇点光束受大气湍流的影响要小、光束质量要好, 即奇点光束更适合应用于大气激光通信^[165-167]。

总的来说, 对于大气湍流中奇点光学研究, 参与研究的人员越来越多, 研究内容越来越深入、越来越细化, 研究成果将会应用在更多的领域。

参考文献

- [1] N. B. Simpson, K. Dholakia, L. Allen, et al. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner[J]. Optics Letters, 1997, 22(1): 52-54.
- [2] A. T. O'Neil, I. MacVicar, L. Allen, et al. Intrinsic and extrinsic nature of the orbital angular momentum of a light beam[J]. Physical Review Letters, 2002, 88(5): 053601.
- [3] C. Paterson. Atmospheric turbulence and orbital angular momentum of single photons for optical communication[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(15): 153901.
- [4] G. Gibson, J. Courtial, M. J. Padgett, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. Optics Express, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [5] B. Thidé, H. Then, J. Sjöholm, et al. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(8): 087701.
- [6] H. He, M. E. J. Friese, N. R. Heckenberg, et al. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser-beam with a phase singularity[J]. Physical Review Letters, 1995, 75(5): 826-829.
- [7] L. Paterson, M. MacDonald, J. Arlt, et al. Controlled rotation of optically trapped microscopic