

“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

现代大气光学

饶瑞中 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

现代大气光学

饶瑞中 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面阐述现代人气光学的研究内容和方法, 主要包括大气的光学性质、大气折射、分子吸收和散射、气溶胶粒子光散射、光在混浊大气中的传播、光在湍流大气中的传播、大气中的成像, 以及大气性质的光学探测方法和技术。本书为大气辐射和天文观测等基础研究以及激光大气传输、光学遥感技术、环境光学监测技术、自适应光学技术、自由空间光通信等先进光电工程应用提供基础数据、应用模式和基本工具。本书反映了大气光学研究的重要进展, 可以作为大气光学及相关研究的教材和有益参考书。

本书的读者对象包括: 物理、光学类的研究生、高年级本科生、高等院校教师, 光学、遥感、大气物理、天文等相关研究领域科研人员, 光电工程类科技工作者、技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

现代大气光学/饶瑞中著, —北京: 科学出版社, 2012

(光学与光子学丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-032958-5

I. ①现… II. ①饶… III. ①大气光学 IV. ①P427.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011) 第 252388 号

责任编辑: 刘凤娟 / 责任校对: 李 影

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 1 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2012 年 1 月第一次印刷 印张: 39

字数: 388 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛 书 序

长期以来,我一直想组织同行出一套适合于光学、光学工程工作者和研究人员需求的光学与光子学的丛书。如今,在科学出版社同志们的努力推进和工作在光学与光子学科研、教学一线的广大专家们的大力支持下,这样一个愿望终于得以实现,这使我感到由衷的欣慰和喜悦,我深信这样一套丛书的出版必将有效地促进我国光学、光电子以及光学工程技术的创新发展。

当今世界科学技术发展日新月异,科技创新能力已成为一个地区、一个国家,尤其是一个大国经济和社会发展的核心竞争力。在众多纷繁的科技领域中,光学与光子学的发展直接影响到其他诸多学科领域的发展及其可能取得的成就。不但物理学、化学、生命科学、天文学等基础科学的发展离不开光学与光子学,对现代人类社会和人类生活影响甚大的一些技术科学,如照明、通信、洁净能源、遥感、显示、环境监测、国防和空间开发、医疗与诊断、先进制造等,都需要光学与光子学的知识。光学与光子学是渗透到各个学科领域内的前沿科学,光学与光子学涉及几乎所有技术前沿的核心技术。中华民族要真正走向繁荣昌盛离不开对光的驾驭。

编委会把丛书的名称定为《光学与光子学丛书》,是想以此既包含经典光学(classical optics)的精华,也容纳现代光学(modern optics)即光子学(photonics)的最新研究进展。我和所有编委们一同期待着这套丛书能够在涉及光科学和光学技术知识的深度和广度上都达到一个崭新的高度。积跬步至千里,汇小溪成江河。改革开放三十年的成就使得我国的光学事业处在了一个新的起点上。让我们大家共同努力,以此套高质量、高水准的《光学与光子学丛书》作为对中国光学事业大发展的鼎力贡献。

母国光

2011年1月

目 录

引言	1
0.1 古老而又年轻的学科	1
0.2 大气对光学的影响举例	1
0.3 现代大气光学概念	2
0.4 大气分子吸收及其应用	3
0.5 气溶胶粒子光学特性、混浊介质光传播和大气探测	4
0.6 大气湍流光学性质及其应用	4
0.7 激光大气传输	5
0.8 大气光学模式和应用软件	6
0.9 本书的撰写动机	6
第 1 章 光学基本参量和基本规律	8
1.0 引言	8
1.1 光波基本参量与基本类型	9
1.1.1 基本光学量	9
1.1.2 偏振及 Stokes 参量	10
1.1.3 光场的相位及其奇性	12
1.1.4 光波的基本类型	14
1.2 光学辐射及其基本定律	17
1.2.1 光辐射及谱线特征	17
1.2.2 黑体辐射定律	22
1.2.3 电偶极辐射	23
1.3 光波基本传播规律	24
1.3.1 波动方程	24
1.3.2 光的直线传播: 几何光学近似	25
1.3.3 Huygens-Fresnel 原理与衍射	26
1.3.4 孔径衍射	28
1.3.5 粒子的光散射	30
1.3.6 辐射传输方程	35
1.4 光学系统的像差与光学质量	37
1.4.1 相位的 Zernike 多项式表达与像差	37

1.4.2 光学质量评价方法	41
1.5 自然光源	45
1.5.1 天球坐标系和太阳与地球间的几何关系	45
1.5.2 太阳辐射及月球的反射	49
1.5.3 恒星辐射	52
1.6 地表的反射与辐射特性	56
1.6.1 非均匀界面的反射特性及双向反射分布函数 BRDF	56
1.6.2 典型地表的反射特性	60
1.6.3 典型地表的辐射特性	64
1.7 小结	64
参考文献	64
第 2 章 大气的基本物理特性	68
2.0 引言	68
2.1 大气成分与结构	69
2.1.1 大气成分	69
2.1.2 大气结构	76
2.2 云、雾粒子和雨滴	80
2.3 大气气溶胶粒子	87
2.4 大气中的风结构	94
2.5 大气湍流及大气边界层	98
2.6 大气特性的随机性及其定量描述	104
参考文献	110
第 3 章 大气的光学特性及其应用模式	113
3.0 引言	113
3.1 标准大气及应用模式	113
3.1.1 美国标准大气及模式大气	113
3.1.2 大气折射率及高度廓线	123
3.2 大气气体分子的吸收光谱特性	126
3.2.1 大气主要吸收气体分子的结构	126
3.2.2 紫外大气分子吸收特征	130
3.2.3 可见和近红外大气分子吸收特征	132
3.2.4 红外大气分子吸收特征	135
3.2.5 大气分子吸收光谱参数数据库 HITRAN	140
3.3 大气气溶胶粒子光学特性及其应用模式	145
3.4 云、雾粒子和雨滴的光学特性及其应用模式	152

3.5 大气湍流的光学特性及其应用模式	155
参考文献	163
第 4 章 大气分子对光的折射、散射和吸收	166
4.0 引言	166
4.1 球面平行大气中的折射	166
4.1.1 大气中的光线轨迹	166
4.1.2 天文折射	171
4.1.3 空气质量	173
4.1.4 大气延迟	176
4.1.5 落日形变 (曙暮光)	176
4.2 地面非均匀大气中的折射	177
4.2.1 海市蜃楼	178
4.2.2 大地测量	180
4.3 大气分子的 Rayleigh 散射	181
4.3.1 Rayleigh 散射	181
4.3.2 退偏振修正	183
4.3.3 模式大气的 Rayleigh 散射特性	185
4.4 大气分子的吸收	190
4.4.1 单谱线吸收	190
4.4.2 分立谱线吸收的逐线积分方法	194
4.4.3 大气分子吸收的谱带模式	195
4.4.4 大气分子吸收计算的光谱映射方法	211
4.5 非均匀路径的大气分子吸收	213
4.5.1 等效谱带模式	213
4.5.2 相关 k 分布方法	215
4.5.3 MODTRAN 方案	215
参考文献	216
第 5 章 大气云雾和气溶胶粒子的光散射	219
5.0 引言	219
5.1 球体粒子的光散射 ——Mie 理论	219
5.1.1 入射光和散射光的球谐函数展开	220
5.1.2 散射光的分布和散射参量	223
5.1.3 Mie 散射的数值计算方法	229
5.1.4 双层球体粒子的光散射特性	231
5.1.5 水云、雾和雨滴的光散射特性	232

5.2	无限长圆柱粒子的光散射	235
5.3	旋转对称粒子的光散射	241
5.3.1	T 矩阵与扩展边界条件法	241
5.3.2	T 矩阵在旋转对称粒子散射问题中的应用	246
5.4	旋转对称椭球粒子的散射特性	247
5.5	规则冰晶大粒子的光散射特性	254
5.6	任意形状粒子的光散射	260
5.7	非均匀粒子光散射的等效性	265
5.7.1	非均匀粒子光散射等效性的分析方法	265
5.7.2	外混合球形粒子光散射的等效性	267
5.7.3	内混合球形粒子光散射的等效性	271
5.8	小结	272
	参考文献	274
第 6 章	大气辐射传输理论与算法	277
6.0	引言	277
6.1	大气中的辐射传输方程及其形式解	277
6.1.1	平行平面大气中的辐射传输方程	277
6.1.2	平行平面大气中的辐射传输的边界条件	279
6.1.3	大气辐射传输方程的形式解	280
6.1.4	单次散射近似解	280
6.2	散射相函数及辐射传输方程的离散化	281
6.2.1	散射相函数的 Legendre 多项式展开	281
6.2.2	辐射传输方程的离散化	282
6.3	辐射传输方程的二流近似及相关近似解	285
6.3.1	二流近似解的基本形式	285
6.3.2	Eddington 近似解	287
6.3.3	相函数 δ 函数化后的近似解	289
6.3.4	广义二流近似解的通用形式	290
6.4	辐射传输的离散坐标 (DISORT) 算法	291
6.4.1	单一均匀介质的 DISORT 算法	291
6.4.2	分层均匀介质的 DISORT 算法	296
6.5	光谱辐射亮度的精确求解	298
6.5.1	散射相函数的 δ -M 处理方法	298
6.5.2	光谱辐射亮度的修正方法	300
6.6	常用算法软件和标准谱辐射传输问题	302

6.6.1 常用算法软件	302
6.6.2 DISORT	303
6.6.3 标准辐射传输问题	307
6.6.4 LOWTRAN/MODTAN/FASCODE	308
6.7 小结	308
参考文献	309
第 7 章 混浊大气中的辐射传输问题	312
7.0 引言	312
7.1 激光的大气透过率	313
7.2 红外大气透过率和辐射量修正	322
7.3 天空背景辐射亮度	326
7.3.1 可见光天空背景辐射亮度	326
7.3.2 可见光天空背景辐射亮度光谱特征	330
7.3.3 长波天空背景辐射亮度	333
7.3.4 强吸收波段的地球大气背景辐射亮度	334
7.3.5 地球大气背景辐射的偏振特性	335
7.4 大气中的视觉和大气能见度	343
7.4.1 均匀大气中的视觉问题	344
7.4.2 气象视距和大气能见度	346
7.4.3 非均匀大气中的能见度问题	349
7.5 大气中的辐射收支平衡	353
7.6 小结	365
参考文献	365
第 8 章 湍流大气中光传播的分析方法	368
8.0 引言	368
8.1 湍流大气光传播的定性分析	369
8.1.1 大气湍流对光传播影响的重要性	369
8.1.2 相位和到达角起伏的启发式分析	370
8.1.3 空间相干性的启发式分析	373
8.1.4 光强起伏的启发式分析	374
8.2 抛物型方程和光传播的数值模拟	379
8.2.1 抛物型方程	379
8.2.2 多层相位屏数值模拟	380
8.2.3 湍流相位屏的构造	382
8.2.4 光传播模拟的数值问题	384

8.2.5 平面波、球面波、Gauss 光束和非理想波型的模拟	387
8.2.6 数值模拟典型结果	390
8.3 几何光学近似、Rytov 近似和谱分析方法	391
8.3.1 几何光学近似及谱分解法	392
8.3.2 Rytov 微扰近似及谱分解法	394
8.4 Markov 近似和场的统计矩方程	398
8.5 Huygens-Fresnel 相位近似法	401
8.6 球面波和 Gauss 光束的情况	404
8.7 小结	407
参考文献	408
附录 A 随机函数的谱分解	411
第 9 章 湍流大气中的光传播效应	415
9.0 引言	415
9.1 空间相干性退化和相位起伏	416
9.1.1 空间相干性退化	416
9.1.2 相位起伏	419
9.2 到达角起伏	421
9.2.1 干涉仪中的到达角起伏	421
9.2.2 孔径上的相位起伏和到达角起伏	423
9.3 相位校正与自适应光学技术	428
9.3.1 湍流大气光传播的相位校正原理	428
9.3.2 湍流大气光传播的相位校正技术	429
9.4 光强起伏 (闪烁效应)	433
9.4.1 弱起伏条件下的闪烁效应	433
9.4.2 强起伏条件下的闪烁效应	435
9.4.3 闪烁强度的普适模型	438
9.4.4 有限面积上的光强起伏及孔径平均	442
9.5 光波起伏的概率分布与分形特征	446
9.5.1 光波起伏的概率分布特征	446
9.5.2 光强起伏的间歇性特征	451
9.6 光波起伏的时间频谱特征	454
9.6.1 光波起伏的时间频谱	454
9.6.2 光波起伏频谱的高频幂律的拟合方法	457
9.6.3 湍流谱形状的影响	459
9.6.4 Gauss 光束的光波起伏频谱特征	460

9.6.5 有限孔径和饱和情况下的光波起伏频谱	462
9.7 激光束传播效应	463
9.7.1 激光束的漂移	464
9.7.2 激光束的扩展	467
9.7.3 光强图像的光学质量与特征尺度	469
9.7.4 光斑的分形结构与相位奇点	473
9.7.5 聚焦光束的焦移	474
参考文献	475
第 10 章 高能激光大气传输的热晕及综合效应	481
10.0 引言	481
10.1 热晕效应的物理图像	482
10.2 热晕的流体力学模型	485
10.3 简单情况下的热晕解析解	488
10.3.1 瞬变热晕时的密度时间演化特征	488
10.3.2 柱坐标系下求解密度变化	490
10.3.3 热晕时的相位变化	491
10.3.4 热晕光斑的基本特征	492
10.4 热晕的数值模拟方法	494
10.4.1 瞬变热晕的数值模拟方法	494
10.4.2 稳态热晕的数值模拟方法	496
10.4.3 热晕模拟的数值问题	498
10.5 热晕效应的定标规律	499
10.5.1 纯热晕效应的经验公式	500
10.5.2 热晕和湍流的相互作用	502
10.5.3 热晕效应的相位校正	505
10.6 高能激光大气传输的综合效果	505
参考文献	511
第 11 章 混浊和湍流大气中的光学成像	514
11.0 引言	514
11.1 大气介质与成像系统的调制传递函数	515
11.1.1 光场相干函数与成像系统的调制传递函数	515
11.1.2 背景光下大气介质中的成像	518
11.2 大气湍流介质的光学传递函数与图像分辨率	519
11.2.1 大气湍流介质的光学传递函数	519
11.2.2 湍流大气中望远镜的分辨本领	520

11.3 大气混沌介质的调制传递函数	522
11.3.1 大气混沌介质调制传递函数的近似解析结果	523
11.3.2 大气混沌介质调制传递函数的数值计算结果	526
11.3.3 大气混沌介质调制传递函数的实测结果	528
11.3.4 混沌介质调制传递函数的一般形式	532
11.4 图像大气影响的修正方法和技术	538
11.4.1 自适应光学实时校正技术	539
11.4.2 图像处理方法	541
11.4.3 基于成像过程的大气影响修正技术	541
11.5 小结	543
参考文献	544
第 12 章 大气探测的光学方法与技术	547
12.0 引言	547
12.1 光学遥感技术中的反演方法	547
12.1.1 反演问题的数学模型	548
12.1.2 线性约束反演方法	549
12.2 大气吸收光谱和透过率测量技术	552
12.2.1 长程高分辨率大气吸收光谱测量技术	552
12.2.2 高分辨率大气吸收光谱测量方法	555
12.2.3 实际大气透过率和吸收光谱测量技术	561
12.2.4 利用太阳辐射测量整层大气光学厚度	563
12.3 大气气溶胶粒子光散射技术	565
12.3.1 大气气溶胶粒子尺度散射测量技术: 光学粒子计数器	565
12.3.2 大气介质散射特性测量技术: 能见度仪、积分和极角浊度计	569
12.3.3 从散射相函数反演大气气溶胶粒子谱分布	574
12.4 大气后向散射技术: 激光雷达	577
12.4.1 激光雷达工作原理	577
12.4.2 激光雷达方程求解方法	580
12.4.3 差分激光雷达探测大气吸收气体成分	583
12.4.4 通过硬件技术求解激光雷达方程	585
12.4.5 Doppler 测风激光雷达技术	588
12.5 大气湍流特性测量技术	589
12.5.1 局域湍流强度测量技术: 温度脉动法和折射率脉动法	590
12.5.2 路径平均的湍流强度测量技术: 闪烁法和到达角起伏法	592
12.5.3 湍流功率谱和特征尺度的测量技术	594

12.5.4 大气湍流强度廓线的测量	598
12.6 小结	603
参考文献	603

引 言

0.1 古老而又年轻的学科

光的传播是人类最早观察研究的自然现象之一,从直线传播到波动特性再到波粒二象性,人们对光的特性已有本质的理解。光在确定性均匀介质中的传播规律已基本被人们掌握,但光在随机非均匀介质(如地球大气)中的传播规律至今仍是一个令人十分困惑的问题。经过自牛顿时代起(特别是20世纪中期以来半个多世纪)的努力,人们已取得了长足的进步,解决了一些基本问题,研究结果得到了较为广泛的应用,但仍存在着一些关键问题悬而未决,促使人们进行深入的研究。

大气光学是一门十分古老而又十分年轻的学科。古老的大气光学主要是对大气光象(霓、虹、晕、落日、海市蜃楼和星光闪烁等)的研究和认识。这些知识对气象科学的发展起到了重要作用。我们在晴朗的夜空中总能看到星星在眨眼睛,这是最为常见的星光闪烁现象。由于闪烁,我们不可或缺的空气成了天文观测的麻烦制造者。牛顿对星光闪烁现象及其观测进行了认真、细致的分析,在其著名的《光学》一书中,他写到:

“即使能按照理论制造出实用化的理想望远镜,但它的有效应用依然受到一定的界限的约束。高塔的投影在晃动,天上的星星在闪烁,从这些现象可以推测:我们仰望群星所途经的空气在永恒地颤动着。……用长望远镜观测比用短望远镜观测时,物体看起来更亮一些、更大一些,但却不能消除大气颤动引起的光线的混乱。唯一的救药是非常宁静的空气,这在云端之上的高山之巅可能存在。”

天文观测仅仅是大气光学涉及的一个传统学科。随着现代光电科学技术的迅速发展,大气的影晌体现在许多方面。例如,空间通信、气象与大气探测、卫星和航空遥感、光学侦察、大气污染监测、空间目标探测、自适应光学、激光大气传输等,从而赋予了大气光学全新的内容,形成了现代大气光学。

0.2 大气对光学的影响举例

自由空间光通信和天文观测可以很好地反映大气的影晌。

激光的出现使光学以及整个现代科学的面貌焕然一新,激光以其突出的高度相

干性、高亮度、特别好的方向性、特别小的发散性等优异特点在各个领域得到了广泛应用。自然地,激光出现不久,人们就研究利用激光在自由大气空间中的传播进行测距、定位和通信等。那时,人们尚未意识到大气对激光的传播会带来多大的影响。当时,光纤通信和自由大气激光通信的概念都被提了出来。二者相比,光纤通信不被看好,因为光纤本身的制造尚是一件技术难度较大的工作,当时几米、几十米的光纤的研制成功都是一个个明显的进展。反之,自由大气光通信不需要人为的传播介质,相应的技术就简单得多。可光通信的实际进程是:光纤通信蓬勃发展、日新月异,目前已成为当代通信的主要手段之一,并有可能全面替代其他手段;而自由大气光通信的研究在红火了一阵后很快就销声匿迹,虽然目前在某些特殊场合又被重新提了出来,但其规模和前景却无法望光纤通信之项背。

为何自由大气光通信败下阵来?原因就出在大气身上!当激光在湍流大气中传播时,大气湍流造成的折射率的起伏引起光线的随机漂移、一定接收面积上光强起伏等,给光通信的接收带来了困难,并引进了噪声。这些问题在传播距离长和湍流强度大的情况下极为严重,从而制约了自由大气光通信的发展。

牛顿的思想依然是现代天文观测站址选择的指导思想。在高山之巅、在人迹罕至之地寻找宁静的空气,是在地面进行天文观测力图摆脱空气干扰的无可奈何的办法,但想彻底摆脱空气是不可能的,除非在大气之外观测。令人十分欣慰的是,随着航天技术的飞速发展,哈勃太空望远镜的发射终于使人类的眼睛摆脱了空气的干扰,梦想终于成了现实。

哈勃太空望远镜(主镜口径为 2.4m,次镜 0.3m, $f/24$)观测到的星空图像比地面相仿口径的天文望远镜观测到的要清晰得多,所能观测的太空距离要远得多,发现了许多地面未见的太空奇景,这一方面说明人类航天本领的神奇,另一方面也说明地球大气给我们观测星空所带来的影响有多么大。

0.3 现代大气光学概念

现代大气光学主要包括大气光学性质、光波大气传输、大气光学探测及其在相关学科的应用。作为光波传播介质的大气的光学性质是影响在大气中工作的光电系统性能的最本质因素,而光波在大气中的传播规律则是了解和解决这些影响的物理基础。利用这些规律则可以发展各种有效的技术手段进行大气光学性质的研究和探测。

大气可以划分为由微粒组成的离散混浊大气介质和由热运动分子构成的“连续”湍流大气介质。大气气体分子对短波长光波有明显的散射作用,即 Rayleigh 散射,这是蔚蓝色天空的成因。大气分子最重要的光学性质就是光谱吸收特性,不同的气体成分有不同的吸收特征。尘埃粒子一般称为气溶胶粒子,根据其起源的不同

光学性质有明显的差异。作为流体的大气,由于温度等要素的微弱起伏,导致空气密度(折射率)的微弱起伏,从而形成了光学湍流,对光传播产生了重要影响。

上述两种类型的大气介质对光传播的影响不同,混浊大气介质对光传播的影响主要体现在微粒的散射作用上,光在任意方向上偏离直线传播。灰蒙蒙的天空、日晕等是较常见的现象,日益严重的沙尘暴天气是一个极端的例子。大气湍流介质对光传播的影响主要集中在直线传播的近轴范围内,烈日下柏油路面上像波浪一样起伏的空气、晴朗夜空的星光的闪烁是很容易观察到的现象。

对两种影响的处理方法也有差异:混浊介质中的光传播主要以光强为研究对象,其主题是辐射传输方程的求解;湍流介质中的光传播主要以光场为研究对象,其主题是波传播方程的求解。湍流介质中光传播研究的困难之处表现在三个方面,首先是随机介质中波传播理论本身的复杂性:非微扰起伏问题;其次是湍流介质随机特性的复杂性:湍流的非局地均匀各向同性和间歇性;第三个方面在于实验条件的不可控制性:传播路径上湍流均匀性的假设、气象要素均匀性的假设、Taylor 冻结湍流的假设等在多大程度上成立总是很难确定的,因此将实验结果与理论结果作严格的比较是不可能的。

利用大气光学的研究成果,可以发展各种大气光学探测技术。有用天然光源或辐射源的被动式系统,如卫星、各种辐射计等;也有主动式的激光雷达系统等。

目前,大气光学的成果已经在相关学科及工程应用中发挥了重要作用。主要的学科有自适应光学、天文、遥感、环境监测、通信、激光工程等。

0.4 大气分子吸收及其应用

大气分子吸收的作用体现在各个方面。分子吸收是大气辐射收支平衡的重要因素,水汽和二氧化碳的吸收是产生温室效应的最主要因素。在强激光工程应用中,分子吸收一方面造成激光能量的损失,另一方面则加热大气分子,导致高能激光非线性热晕效应的产生。激光辐射的单色性以及大气分子吸收的高选择性,要求高分辨率大气吸收光谱。选择吸收小的微窗口对激光工程应用极其重要,大气分子吸收光谱特征各不相同,因而是各种大气分子的“指纹”或“身份证”。吸收光谱特征就成为大气污染气体光学探测的依据。

大气分子吸收光谱具有显著的窗口特征,正是根据这种窗口特征,各种红外探测系统工作在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\mu\text{m}$ 波段。而激光波段则都选择在吸收微弱的微窗口,即在较宽的窗口上吸收虽然较强,但在精细结构上存在较弱的吸收。研究精细吸收的系统的关键技术在于长程的吸收池和可调谐激光源。

利用吸收光谱的精细结构,选择吸收强度差别较大的相邻波段进行测量,可以排除其他因素的影响,从而定量测量吸收气体的含量,这就是所谓的差分吸收方法。

利用这种原理发展的测量系统有 DOAS 和差分吸收激光雷达等。

0.5 气溶胶粒子光学特性、混浊介质光传播和大气探测

大气气溶胶粒子的光学性质由它们的浓度、粒子谱分布和组分(折射率)决定。气溶胶粒子对光辐射的散射和吸收效应造成了能量的衰减。对于在大气中传输的图像,这种效应会造成图像的模糊和对比度的降低,相当于光学系统光学传递函数的恶化。大气气溶胶粒子对光辐射的后向散射构成了激光雷达等大气光学探测技术的信息载体。

实际气溶胶粒子的物理化学性质由于种类的不同而差异很大,同时实际气溶胶粒子的形状也很不规则,通常把它们当作球形粒子处理,利用 Mie 散射理论进行光散射分析。随着对一些典型非球形粒子如卷云(冰晶粒子)的传播问题、一般光传播问题精度要求的提高以及对更多信息量(如偏振信息)的利用,对非球形粒子的散射问题的研究正在蓬勃发展,一些有效的算法如 T-Matrix 和 DDA 已经得到了较为广泛的应用。

混浊介质中的光传播的研究以辐射传输方程的求解为中心,问题的本质是小粒子的光散射问题。对于平行平面大气的传输问题已有各种成熟的算法,如离散坐标法(DISORT)等。而对于更接近实际情况的球面平行大气和非均匀地表的传输问题则有待更深入的研究。

混浊介质中的光传播的一个最典型的实际应用是能见度问题,在气象和航空、交通等行业非常重要,因此准确的测量是必要的,目前主要有透过率法和散射法。研究大气气溶胶粒子的光学性质相关研究设备包括:光学粒子计数器、空气动力学粒子计数器、太阳辐射计、太阳光谱和气溶胶粒子谱、浊度计、激光雷达等。

利用气溶胶粒子的后向散射以及其他光学特性,如大气分子的吸收光谱特征、风速(气溶胶粒子运动)造成的后向散射信号的多普勒效应可以进行大气气溶胶粒子、温度、风速和各种吸收或污染气体的探测。基于这种原理发展的各种激光雷达技术在地面、航空和航天平台上的测量已经在气象、环境监测等方面发挥了重要作用。

0.6 大气湍流光学性质及其应用

湍流是物理学最大的难题之一,经过几个世纪的研究依然没有获得真正意义上的解决。湍流引起的大气折射率的起伏导致了光波波前的畸变,破坏光的相干性,造成光学图像的模糊,相当于光学系统光学传递函数的恶化,是造成天文观测困难的主要原因。当激光在大气中传播时,激光的优点被破坏,其主要表现有:光束随