

小粒子电磁散射 与沙尘暴微波遥感

Electromagnetic Scattering of Small Particles
and Dust Storm Microwave Remote Sensing

李兴财 王敏仲 张北斗 明虎◎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>

小粒子电磁散射与沙尘暴微波遥感

李兴财 王敏仲 张北斗 明虎 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

颗粒物电磁散射性质的求解是大气科学、无线电物理、医学、生物学等学科关注的基本问题。本书系统介绍了不同结构、表面带电的球体及椭球体颗粒电磁散射性质求解的基本方法,并讨论了沙尘暴对电磁波传播过程的影响,详细给出了不同结构小粒子电磁散射性质求解的等效介质理论推导过程及结果,并讨论了微波段雷达(以风廓线雷达为例)在沙尘暴遥感中的应用。

本书理论公式推导严谨、详细,可作为从事电磁散射、电磁波传播、气溶胶遥感、功能材料设计、隐身技术、大气辐射学等研究的技术人员、研究生及其他各类科研工作者的参考书。

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

小粒子电磁散射与沙尘暴微波遥感 / 李兴财等著. —北京:电子工业出版社, 2017.4
ISBN 978-7-121-30754-6

I. ①小… II. ①李… III. ①沙尘暴—大气遥感—微波遥感—研究 IV. ①P425.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 320172 号

策划编辑: 李 敏

责任编辑: 李 敏

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: 720×1 000 1/16 印张: 13.5 字数: 312 千字 彩插: 2

版 次: 2017 年 4 月第 1 版

印 次: 2017 年 4 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 zltz@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: limin@phei.com.cn 或 (010) 88254753。

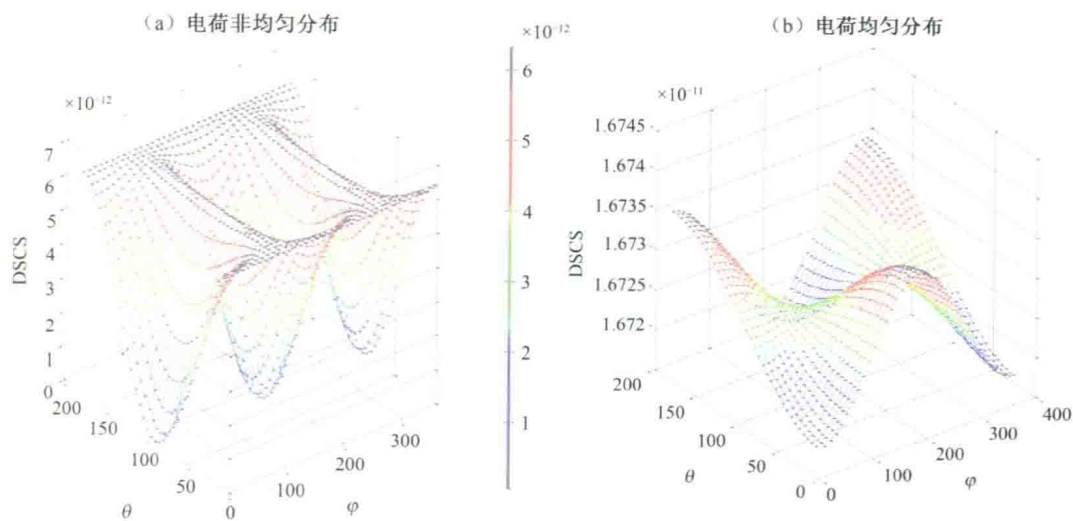


图 4.9 局部带电沙粒微分散射截面的分布规律

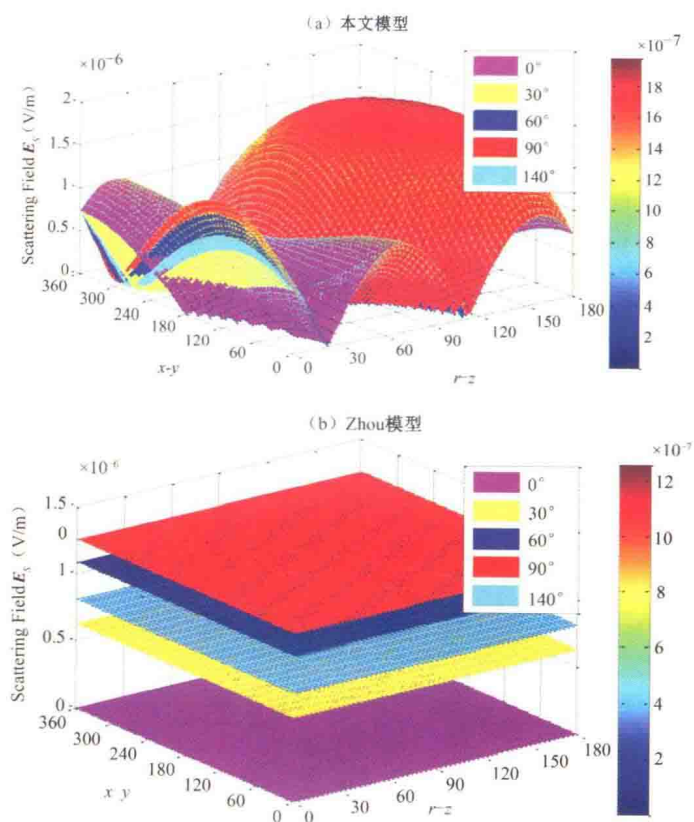


图 4.14 电荷分布角对局部带电沙粒的散射场强的影响

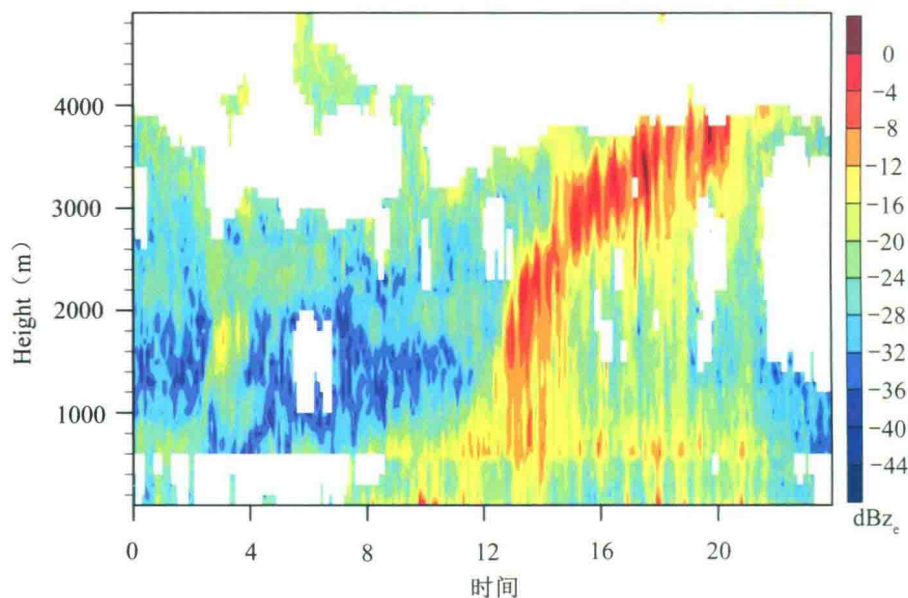


图 7.8 2010 年 8 月 3 日塔克拉玛干沙漠腹地晴空等效反射率因子时间—高度图

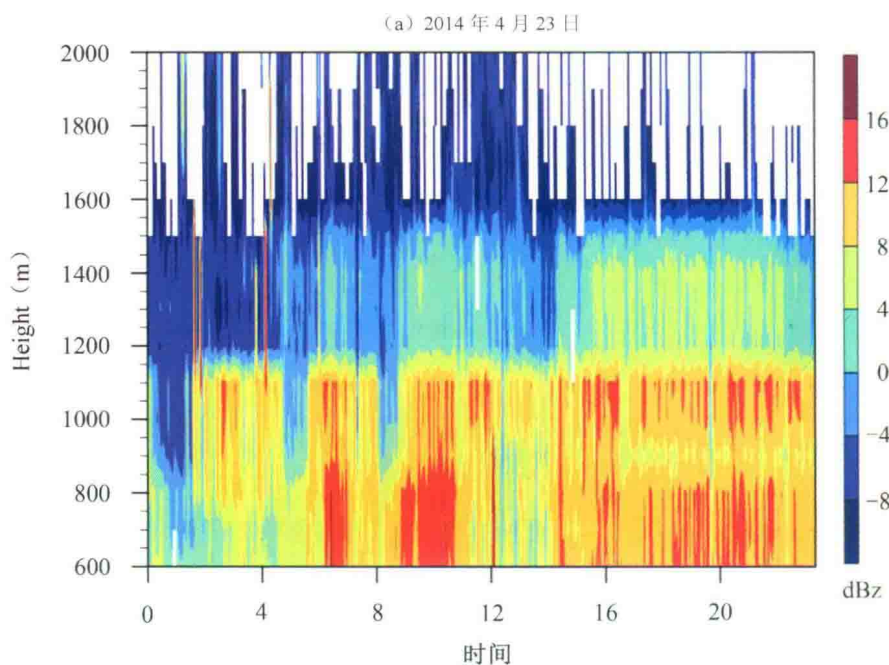


图 7.9 沙尘暴过程雷达反射率因子时间—高度图

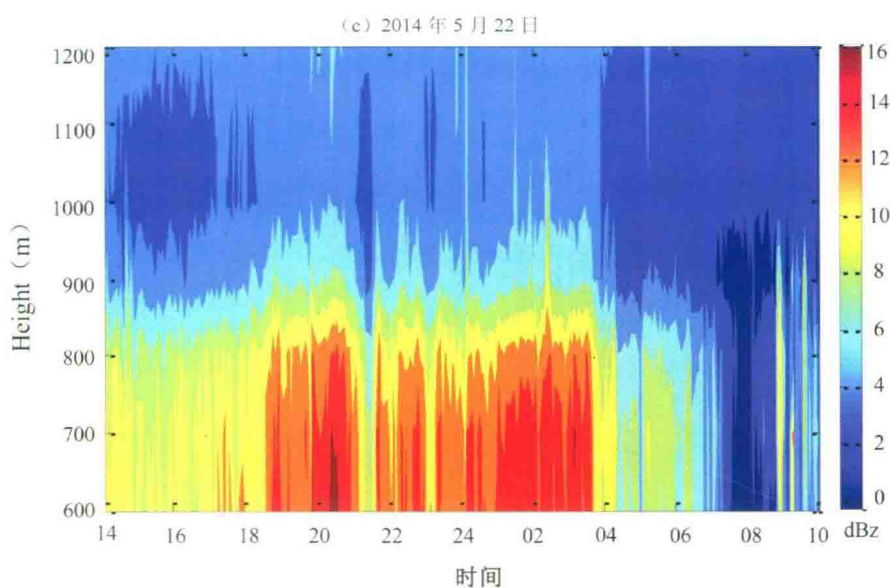
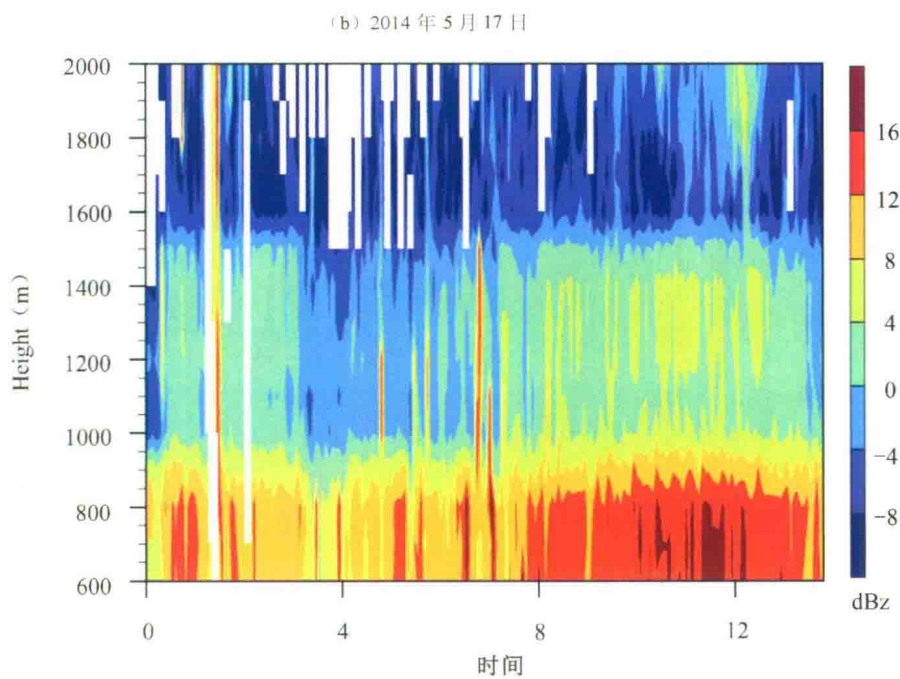


图 7.9 沙尘暴过程雷达反射率因子时间—高度图 (续)

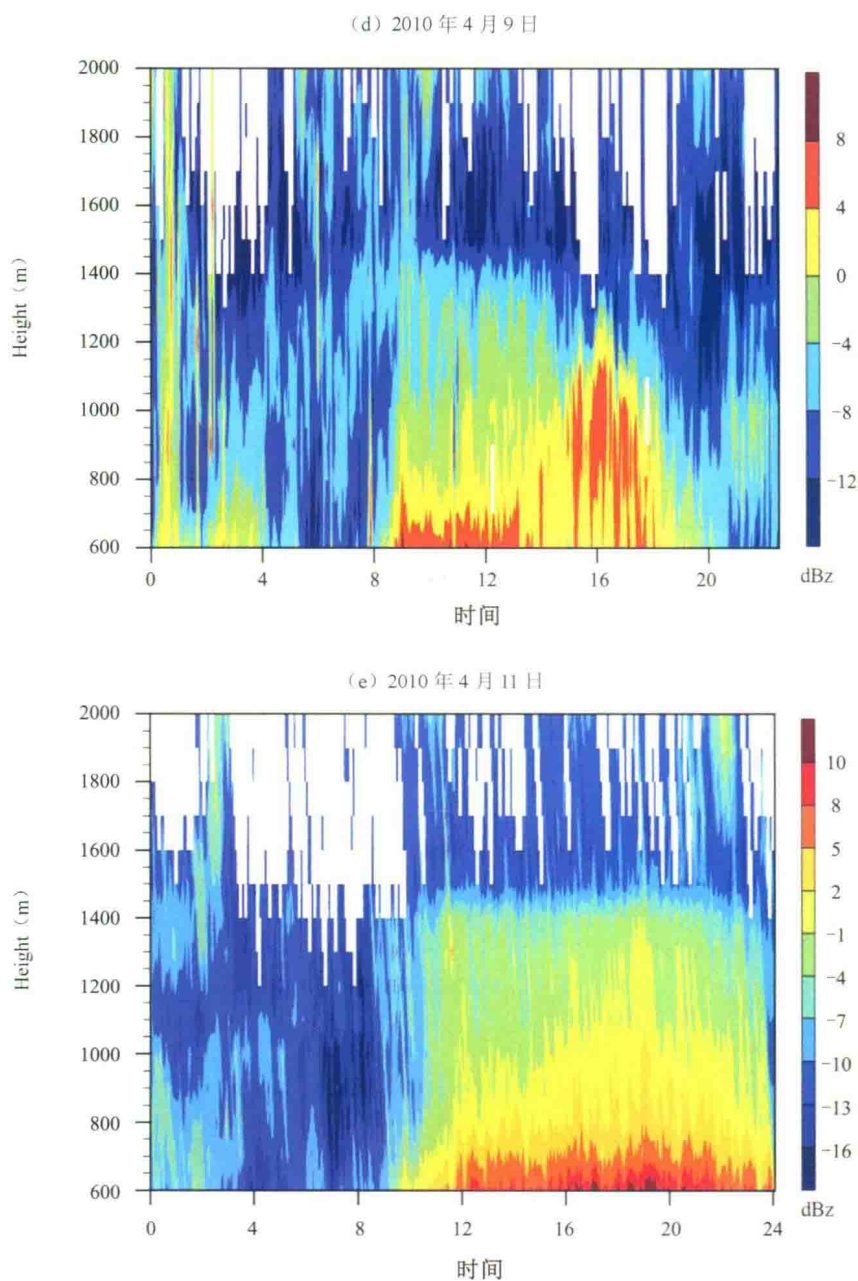


图 7.9 沙尘暴过程雷达反射率因子时间—高度图 (续)

前 言



近几十年来, 遥感技术因其特殊的优势在大气遥感、地球资源勘查、环境监测、国土军事安全等领域得到了长足的发展。在这些应用中, 一个最基本的科学问题就是, 对电磁波在介质中的传播特性进行准确的预测和仿真, 而针对不同结构的球体和椭球体颗粒物电磁散射性质的准确求解, 是更为基础的科学问题。

同时, 沙尘暴、雾霾等灾害性天气事件给人类生活、区域气候、海洋生态带来了许多直接和间接的影响。这类灾害性天气现象的监测和预警, 对颗粒物电磁散射特性的求解这一科研领域带来了更多新的科学问题。例如, 气溶胶颗粒运动过程的带电现象是否会影响其电磁散射性质? 由带电气溶胶诱发的强度高达数百千伏每米的静电场是否会对颗粒电磁散射性质产生影响? 气溶胶颗粒的带电现象是否会对自身的物理化学性质产生影响? 气溶胶颗粒在运动过程中与大气环境的化学反应和物理性改变对其光学性质有何影响? 这些影响对气溶胶环境下的目标物遥感测量结果又有何影响? 这些基本问题的回答, 有助于促进气溶胶环境下遥感反演、图像恢复等科技领域的发展, 从而对人类社会的发展、遥感监测、复杂环境下的目标识别和无线通信系统设计产生重要而又积极的作用。

本书主要总结了作者们近年来从事颗粒物电磁散射性质求解建模与仿真、基于风廓线雷达的沙尘暴遥感监测等方面的主要研究成果, 并引入了部分文献中的相关内容。书中重点介绍了 Mie 理论、Rayleigh 近似、T 矩阵法在颗粒物电磁散射性质求解中的应用, 并首次详细介绍了复杂结构颗粒的等效介质理论, 以及环境电场对颗粒物电磁散射性质影响的求解方法。通过对以上内容的学习, 读者能了解这一领域相关研究的基本理论、方法

及其进展。当然, 这些内容还有大量工作亟待完善, 这也是我们今后共同努力的方向, 也期望本书能起到抛砖引玉的作用。

本书内容安排如下。

第1章概述了沙尘暴对电磁波的衰减作用、环境电场对介质光学性质的影响、等效介质理论等内容, 以期读者对相关研究现状有所了解。

第2章汇总了基本电磁理论方程和不同介质中的电磁波方程, 是本书相关理论和方法的基础知识。

第3章给出了 Mie 理论和 T 矩阵法在求解各向同性均质圆球和分层圆球颗粒电磁散射性质中的应用, 以及不同结构、局部带电、球体颗粒电磁散射性质的求解方法和仿真结果; 同时也讨论了颗粒系统中多次散射过程的求解方法, 重点介绍了带电颗粒的 T 矩阵建立过程, 并基于此讨论了带电颗粒系统对入射电磁波多次散射过程的求解。

第4章介绍了 Rayleigh 近似在求解不同结构、带电和不带电小球体粒子电磁散射过程的基本应用, 并基于 Rayleigh 近似讨论了环境电场对颗粒光学性质的影响。本章重点介绍了各向同性、各向异性球体带电颗粒电磁散射性质的求解, 并讨论了表面电荷非均匀分布时颗粒物电磁散射特性的变化。

第5章讨论了非均质圆球颗粒等效介质理论的建立过程, 及其在颗粒电磁散射性质求解中的应用, 同时也给出了静电场近似下椭球颗粒等效球体理论的建立过程。

第6章探讨了沙尘暴对微波雷达的影响, 主要讨论沙尘暴对微波的散射和吸收作用、沙尘暴中微波的传输距离等内容, 并给出了基于微波雷达反射率反演沙尘暴过程中风沙静电场强度的基本方法。

第7章概述了基于风廓线雷达反演沙尘暴结构参数的基本方法和基本结果。

通过以上内容的学习, 我们希望读者可以扎实掌握现有颗粒物电磁散射特性建模的基本理论和方法, 以及复杂介质等效介质理论的建立方法, 以尽快进入这一领域开展自己的特色研究, 为祖国科技的发展与进步贡献自己的力量。

作者

2016年9月

致 谢



本书涉及的部分研究成果是在国家自然科学基金项目（10872082、11302111、11562017、41305035、41305027、41575008、61463043）、教育部科学技术研究重大项目（308022）、国家重点基础研究计划（2009CB421304）、国家科技部国际合作项目（2011DFA11780）、兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室开放课题、中国沙漠气象科学基金课题（Sqj2014003）、半干旱气候变化教育部重点实验室开放课题、上海交通大学先进光通信系统和网络国家重点实验室开放课题（2013GZKF031306）、宁夏自然科学基金（NZ12117）、宁夏科技支撑计划项目、宁夏科协青年科技人才托举工程专项经费的资助下完成的，对此表示真诚感谢。

本书作者李兴财博士想在此特别感谢研究生阶段的导师——中国科学院院士、西安电子科技大学校长郑晓静院士和兰州大学谢莉教授一直以来的帮助和指导，是她们带领他进入科学的大门；感谢百年名校兰州大学的培养；感谢年迈仍在农村辛苦劳作的父亲李建仓、母亲张淑霞的养育之恩，也感谢妻子王娟女士一直以来的陪伴、鼓励和支持。

作者

2016年9月

目 录



第 1 章 绪论	1
1.1 沙尘暴对电磁波的衰减影响	3
1.2 外加强电场对介质光学性质的影响	6
1.3 等效介质理论	7
1.4 本书主要内容	8
参考文献	9
第 2 章 不同媒质中的电磁场和电磁波方程	17
2.1 均匀各向同性媒质中的电磁场与电磁波	18
2.1.1 Maxwell 方程组及其场的边界条件	18
2.1.2 均匀各向同性线性媒质中的电磁波动方程	20
2.2 均匀、线性各向异性媒质中的电磁波动方程	22
2.3 不同媒质中的静电场方程及其边界条件	23
2.3.1 线性各向同性媒质中的静电场	23
2.3.2 电各向异性介质中的静电场	24
2.3.3 静电学求解中的边界条件	25
2.4 平面分层介质中的电磁波传播	25
2.4.1 基本方程	25
2.4.2 在沙尘暴浓度测量方面的应用	26
参考文献	29

第 3 章 圆球颗粒的 Mie 散射	31
3.1 不带电圆球颗粒的 Mie 散射理论	32
3.1.1 均质各向同性圆球颗粒散射的 Mie 解	32
3.1.2 均质各向同性核壳球体颗粒散射的 Mie 解	38
3.2 带电均质、各向同性圆球颗粒散射的 Mie 解	40
3.3 带电分层各向同性圆球颗粒散射的 Mie 解	45
3.3.1 带电同心核壳颗粒的电磁散射	45
3.3.2 带电同心多层球体颗粒的电磁散射	52
3.3.3 带电偏心多层球体颗粒的电磁散射	60
3.4 各向同性颗粒散射的 T 矩阵解	62
3.5 各向异性球体颗粒散射的 T 矩阵解	67
3.6 颗粒系统的多次散射研究	71
3.6.1 Twersky 理论的多次散射过程	71
3.6.2 基于 T 矩阵的多次散射理论	73
3.6.3 基于辐射传输理论的多次散射过程计算	82
3.7 总结	83
参考文献	84
第 4 章 小粒子电磁散射求解的 Rayleigh 近似	87
4.1 经典小球颗粒散射的 Rayleigh 近似	87
4.2 带电均质、各向同性圆球颗粒的 Rayleigh 近似	89
4.3 带电均质、各向异性圆球颗粒的 Rayleigh 近似	93
4.4 非均匀带电圆球颗粒的电磁散射	105
4.5 带电均质、各向同性弱导体颗粒的电磁散射	108
4.6 外加强电场条件下带电圆球颗粒的电磁散射	108
4.6.1 极化电荷的影响	108
4.6.2 电光效应的影响	122
4.7 总结	124
参考文献	125

第 5 章 非均质粒子的等效介质理论	127
5.1 不带电多层圆球粒子的等效介电常数	128
5.1.1 涂覆球体颗粒	128
5.1.2 多层结构的核壳粒子	131
5.1.3 模型的有效性及其适用范围	133
5.2 各向异性涂层颗粒的等效介电常数	134
5.3 带电多层球体的等效介电常数	138
5.3.1 带电各向同性分层球体	138
5.3.2 局部带电含各向异性涂层颗粒	142
5.4 匀强电场中弱导体颗粒的等效介电常数	143
5.4.1 弱导体球状颗粒	144
5.4.2 界面带电的弱导体球壳颗粒	145
5.5 夹杂颗粒介质层的等效介电常数	146
5.6 椭球等效球体的介电常数张量	147
5.7 分层颗粒的等效磁导率	149
5.8 总结	150
参考文献	151
第 6 章 沙尘暴对电磁波的衰减	153
6.1 沙尘颗粒的成分	153
6.2 湿沙等介质的介电常数	154
6.2.1 纯水的介电常数	154
6.2.2 盐水的介电常数	155
6.2.3 湿沙的介电常数	155
6.3 沙尘暴中沙粒的粒径分布函数	156
6.4 考虑环境电场及沙粒表面带电时沙尘暴对电磁波的衰减	159
6.5 沙尘暴的雷达反射率及其应用	163
6.6 沙尘暴中微波的探测距离	170
参考文献	174

第7章 基于风廓线雷达的沙尘暴探测分析与应用	177
7.1 沙尘暴监测方法概述	177
7.2 风廓线雷达探测原理	179
7.2.1 基本探测原理	179
7.2.2 信号处理	180
7.2.3 数据处理	181
7.2.4 风廓线雷达的探测特点	183
7.2.5 风廓线雷达与多普勒天气雷达、激光雷达的区别	183
7.3 风廓线雷达探测沙尘暴外场试验	184
7.3.1 设备及主要技术参数	184
7.3.2 风廓线雷达探测沙尘暴外场试验实例	185
7.4 风廓线雷达探测沙尘暴的基本特征	186
7.4.1 风廓线在沙尘暴天气分析中的应用	187
7.4.2 反射率因子特征	190
7.5 基于风廓线雷达的沙尘暴质量浓度定量反演估算	193
7.5.1 沙尘谱的反演	193
7.5.2 沙尘质量浓度定量估算	197
7.5.3 反射率因子 Z 和沙尘质量浓度 M 的关系	197
7.5.4 实例分析	198
7.6 总结	203
参考文献	203



环境问题是继能源危机、粮食危机之后，人类面临的第三大难题。无论是在大气环境、地下水环境，还是陆地表面环境方面，目前各科技强国都活跃着许多科研团队和专家，他们致力于对相关环境问题的物理建模及解决方案设计等方面的研究。沙漠化是世界干旱、半干旱地区面临的重大环境问题之一。土地荒漠化是目前干旱、半干旱、半湿润地区最主要的环境问题之一。土地荒漠化使得当地居民生活质量急剧下降，并对人类生存安全、气候、大气环境产生许多极为广泛而重要的影响^[1]。由于人们对沙漠化扩展机理、预测和治理等方面的迫切需求，风沙物理学由此诞生。Bagnold 最先借助野外实地测量和风洞模拟实验的方法研究了影响沙粒运动的临界风力、沙粒运动的特征轨迹和输沙率、沙丘形成等问题，并将其归纳整理为专著 *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*^[2]。这本专著的完成和出版，标志着风沙物理学的诞生。自此以后，国内外有许多学者针对沙粒的运动、沙丘的形成和发展，以及沙漠化的扩展和治理等问题，从不同的学科角度进行了大量研究。我国学者也在这方面做出了举世瞩目的贡献。例如，前身为中国科学院治沙科学队的中国科学院兰州沙漠研究所从地理学、生态学角度，针对沙漠化的扩展和治理开展了大量科学研究，并开创了享有国际盛誉的草方格治沙、防护林治沙模式；中国科学院寒区旱区环境与工程研究所王涛研究员团队在沙漠化的科学问题、沙漠化环境背景、沙漠化过程、沙漠化土地动态监测与评估、沙漠化防治战略与途径等方面进行了比较系统的研究，他们的研究成果丰富了我国沙漠和沙漠化研究的理论体系，发展了我国沙漠科学^[3]；兰州大学西部灾

害与环境力学教育部重点实验室郑晓静院士团队采用风洞实验、野外试验和理论建模与计算机仿真相结合的研究方法,开创性地开展了有关风沙静电现象的定量研究^[4-9],相关工作被国际著名学者 Shinbrot 和 Herrmann 在 *Nature* 的文章评价为“迄今非常少有”^[10]。另外,她们从力学角度分析了沙粒的运动、沙波纹和沙丘的形成和发展,以及沙漠化的扩展等过程^[11,12],最先在相关数值仿真模型中计入了风沙静电场及沙粒表面静电荷对沙粒运动过程的影响^[13,14],并建立了对风成地貌的形成、发展过程进行定量化模拟的耦合尺度普适模型^[12,15,16],为荒漠化边缘扩展和草场退化过程的定量模拟、草方格固沙措施有效性评估及新型固沙措施的设计提供了可能。他们的研究成果“将原有风沙物理学理论体系向更为合理和准确的方向大大推进了一步”,为风沙物理学研究做出了巨大贡献(见曾庆存先生为郑晓静院士英文专著 *Mechanics of Wind-Blown Sand Movement* 所作序^[2])。除此以外,中国科学院地理与自然资源科学研究所、西安交通大学、新疆大学等单位都有一批从事风沙物理学、沙漠化研究的学者,他们从不同的专业角度对沙漠化及沙尘暴这一环境问题进行了探索性研究。

土地沙漠化会催生沙尘暴过程的频发。沙尘暴是一种突发性很强的灾害性天气现象。沙尘暴爆发时,大量沙尘颗粒通过热对流等方式进入空中,并沿特定方向长距离输运。这种极端天气的出现,一方面,加速了局部地区的沙漠化进程;另一方面,沙粒对太阳辐射及空中游离带电离子的吸收,以及沙尘颗粒的大规模沉降过程会影响局部地区气候,改变了空中悬浮物成分,降低了空气、环境质量,对交通运输、供电线路、卫星通信、人民生活带来了严重影响^[17]。过量的空气悬浮物还会导致呼吸系统疾病的爆发,甚至导致死亡^[18]。因此,对沙尘暴起源和输运过程的监测日益受到人们关注。在风蚀、风沙流、沙尘暴过程的研究中,基于颗粒物对电磁波散射、吸收机理的仪器正越来越多地用于实验测量中,如微波辐射计、激光雷达、气象雷达、风廓线雷达、PDA、PIV 等,因而对沙粒光学性质的准确仿真必然影响到实验测量结果的可靠性^[19]。另外,随着科技的发展,人类对无线通信的需求急剧增加,尤其是对沙尘暴爆发更为频繁、强度和规模都远大于地球的火星、月球等地外星球的探测,促使人们需要更为准确、深刻地认识沙尘暴期间无线电波的传播规律。因此,对沙尘颗粒电磁散射性质的准确认识具有十分广泛而重要的意义。

除此之外,大气环境问题也是影响人类社会生存发展的重要议题之一。特别是,近年来随着工业化的发展,雾霾天气不断增多,而且影响范围极大。这主要

是因为大气气溶胶颗粒浓度过高,空中细颗粒物污染过于严重^[20]。遥感技术作为一种监测范围广、成本低、可实现长期动态监测的新型监测技术,在大气环境的管理和大气污染控制方面有着非常重要的应用。在开展相关研究的过程中,同样面临着对不同种类、不同环境下气溶胶颗粒电磁散射性质的准确仿真等问题。

由此可见,对不同种类、不同结构、不同性质的颗粒物的光学性质的建模和仿真研究,在大气环境、沙漠化及沙尘暴等问题的研究中均有着十分重要的应用。本章中,我们将基于已有文献,针对不同条件下沙粒的光学性质仿真建模等研究进展进行阐述,并引出本书的主要内容。

1.1 沙尘暴对电磁波的衰减影响

当电磁波在含颗粒系统中传播时,根据颗粒性质的不同,可能会发生反射、折射、衍射、荧光等现象。电磁波在沙尘暴或浮尘天气条件下传播时,也会由于颗粒对波的“阻挡”而发生强度衰减。

最早讨论沙粒对电磁波传输强度影响的研究工作是 Ryde 的实验报道,同时,他计算了沙尘暴对雷达波反射率的影响,发现低强度沙尘暴对频率小于 30GHz 的雷达波的影响是可以忽略的^[21]。Rafus 也认为沙粒对电磁波衰减的影响是可以忽略的^[22]。Goldhirsh 发现中等强度沙尘天气中 1~10GHz 频率的雷达波衰减最大值为 4.4dB/km^[23]。E. K. Smith 等人计算了 8.5GHz 和 32GHz 微波在火星尘暴中的衰减情况,认为即使最严重的尘暴对电磁波的衰减也是可以忽略的^[24]。然而,也有许多文献报道,沙尘对电磁波传播过程的影响极为严重。例如,Adel 和 Kevin 通过分析相关的实验数据认为,沙尘天气会对雷达探测性能产生影响^[25~27];Al-Hafid 等发现,在沙尘暴过程中,11GHz 的电磁波衰减达到 10~15dB^[28~30];陈祥占等人发现,沙尘暴中电磁波的衰减率与沙粒浓度成正比,当电磁波波长与颗粒粒径接近时,入射电磁波的衰减最为严重^[31];Mohammed 等认为沙粒粒径和湿度对电磁波在沙尘暴中的衰减程度影响较大^[32];Haddad 利用取自伊拉克一次尘暴期间的沙粒模拟沙尘暴,发现其对频率为 9.4GHz 微波的消光值为 0.034dB/m^[33];塔里木大学陈杰等人测量了沙尘天气下