

沙尘媒质中电磁波 的传播与散射

Electromagnetic Wave Propagation and
Scattering in Sand-Dust Medium

董群锋 著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

沙尘媒质中电磁波的传播与散射

董群锋 著



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书共分7章,主要包括沙尘暴的物理特性、沙尘暴中电磁波的传播特性、带电沙尘对微波传播的影响、球形粒子对脉冲波的散射、各向同性及各向异性带电球形粒子的散射特性等。

本书可作为从事电磁波散射、电磁波传播、气溶胶遥感、雷达系统和隐身技术等研究的技术人员、研究生及相关专业科研工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

沙尘媒质中电磁波的传播与散射/董群锋著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-5606-4987-0

I. ① 沙… II. ① 董… III. ① 沙尘暴—媒质—电磁波传播—研究 ② 沙尘暴—媒质—电磁波散射—研究 IV. ① P425.5 ② O451 ③ O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 161658 号

策划编辑 戚文艳

责任编辑 曹 锦 阎 彬

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 北京虎彩文化传播有限公司

版 次 2018年8月第1版 2018年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 7.75

字 数 176千字

印 数 1~1000册

定 价 22.00元

ISBN 978-7-5606-4987-0/P

XDUP 5289001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前言

本书系统地介绍了沙尘媒质中电磁波的传播与散射特性，主要对沙尘、带电沙尘媒质中的电磁波传输特性以及各向同性、各向异性球形粒子散射进行了分析与研究。

第1章 绪论。介绍本书研究的背景和意义，概述电磁波在沙尘媒质中的传播特性及各向同性、各向异性球散射特性的研究进展概况。

第2章 沙尘暴的物理特性。介绍沙尘暴的概况，包括中国沙尘暴的空间分布和时间分布、沙尘暴的含义、沙尘暴的物理特性，如粒径分布、浓度、形态分布和介电特性等。

第3章 沙尘暴中电磁波的传播特性。基于介质球散射理论，研究沙尘尺寸分布对电磁波传播特性的影响；应用空气单位体积中沙尘粒子的相对总体积与能见度的关系，简化沙尘粒子随机分布的复杂性对微波传播的影响，推导出沙尘媒质中微波传播特性的一般模型；应用傅里叶时域积分近似解的方法研究毫米脉冲波在沙尘媒质中的传输效应；研究沙尘媒质中毫米波雷达后向散射特性，推导出沙尘媒质雷达信号衰减公式和反射率因子解析式，建立适用于各种尺寸分布的回波功率和等效目标散射截面模型；应用 Mie 理论研究红外波段沙尘粒子的散射、消光和吸收特性。

第4章 带电沙尘对微波传播的影响。基于带电沙粒子的 Rayleigh 散射，提出沙尘粒子指数分布、对数正态分布时微波在带电沙尘中的衰减模型，并进行了仿真计算。针对沙尘粒子的不同尺寸分布，提出适用于各种尺寸分布模型的微波传播特性统一模型，该模型预测结果与实验测量结果一致，并用数值仿真了沙尘尺寸分布对微波传播的影响。结合地空路径的经验模型，推导出地空路径上电磁波衰减和相移的等效模型，并利用典型数据做了相应的计算和分析。应用带电球形粒子的 Mie 散射理论，研究频率、能见度等因素对微波衰减的影响。

第5章 球形粒子对脉冲波的散射。根据水的介电特性，讨论了带电水滴对电磁波的散射特性，分析带电水滴归一化的散射截面和吸收截面以及散射截面和吸收截面随粒子尺寸参数、频率的变化关系，并与不带电水滴的情况进行了比较。重点依据 Lorentz - Mie 理论研究球形粒子对脉冲波的散射特性，得到了粒径、脉冲宽度对球形沙尘粒子以及水滴粒子对脉冲波的衰减系数、散射吸收、后向散射和散射相函数的影响规律。

第6章 各向同性带电球形粒子的散射特性。结合沿轴向入射电磁波的球形粒子 Rayleigh 散射理论，对电磁波沿任意方向入射时的球形粒子、带电球形粒子的散射特性进行研究，推导出各向同性球形粒子、局部均匀带电球形粒子和局部非均匀带电球形粒子的内/外电势、电场的解析式。利用随机介质中的波传播理论，给出其散射振幅、微分散射截面的表达式，利用数值计算并分析了介电常数、入射角和观察角对微分散射截面的影响。

第7章 各向异性带电球形粒子的 Rayleigh 散射特性。结合介质球的 Rayleigh 散射理论，对电磁波沿任意方向入射时的各向异性带电球形粒子的散射特性进行研究，推导出各向异性局部均匀带电球形粒子和局部非均匀带电球形粒子的内/外电势、电场的解析式。

利用随机介质中的波传播理论，给出其散射振幅、微分散射截面的表达式，利用数值计算并分析了微分散射截面随介电张量和观察角的变化关系。

本书是作者在完成国家自然科学基金项目(61102018)的过程中写成的，得到了国家自然科学基金的资助。书中物理概念清楚，理论公式推导严谨、详细。在本书的编写过程中，得到了许家栋教授、李应乐教授、张辉教授、弓树宏副教授的帮助与指导，在此表示感谢。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，希望读者批评指正。

董群锋
2018 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 沙尘暴中电磁波传输特性的研究现状	2
1.2.2 球形粒子对电磁波散射的研究现状	4
1.2.3 带电球形粒子散射的研究现状	5
1.2.4 各向异性球对电磁波散射特性的研究现状	5
1.3 本书主要内容	6
第 2 章 沙尘暴的物理特性	8
2.1 沙尘暴的含义	8
2.2 中国沙尘暴天气的空间分布和时间分布	8
2.2.1 沙尘暴天气的空间分布	8
2.2.2 沙尘暴天气的时间分布	9
2.3 沙尘暴的尺寸分布模型	11
2.3.1 沙尘暴的浓度	11
2.3.2 沙尘暴中沙尘的粒子尺寸分布	11
2.3.3 沙尘暴中粒子的形态	13
2.4 沙尘粒子的介电特性	13
2.4.1 沙尘粒子的介电常数	13
2.4.2 沙尘粒子的等效介电常数	16
本章小结	18
第 3 章 沙尘暴中电磁波的传播特性	19
3.1 引言	19
3.2 介质球散射理论	19
3.3 水平路径上毫米波在沙尘暴中传播的衰减和相移	21
3.4 地空路径上毫米波在沙尘暴中的传播特性	22
3.4.1 不同沙尘尺寸分布下 I_3/I_2	23
3.4.2 水平路径及地空路径上计算结果和分析	24
3.5 沙尘媒质中的衰减和去极化效应模型	25
3.5.1 传播常数	26
3.5.2 沙尘的微波衰减模型	26
3.5.3 去极化效应	27
3.5.4 计算结果和分析	28

3.6 毫米波段脉冲波在沙尘媒质中的传输特性	34
3.6.1 脉冲波在媒质中的传输理论	34
3.6.2 脉冲畸变的数值计算	35
3.7 沙尘媒质中的雷达后向散射特性	36
3.7.1 雷达接收功率	37
3.7.2 沙尘对雷达信号的影响	37
3.7.3 雷达的反射率因子	38
3.7.4 雷达回波功率和等效目标散射截面	38
3.7.5 计算结果和分析	39
3.8 沙尘的红外传输衰减	41
3.8.1 沙尘粒子的红外散射、吸收和消光特性	41
3.8.2 沙尘红外衰减特性	43
本章小结	45
第 4 章 带电沙尘对微波传播的影响	47
4.1 引言	47
4.2 单个带电球形粒子的 Rayleigh 散射	47
4.2.1 带电球形粒子模型	47
4.2.2 带电球形粒子的散射振幅	48
4.3 水平路径上微波在带电沙尘中的传输特性	50
4.3.1 指数分布下沙尘的衰减	50
4.3.2 对数正态分布下沙尘的衰减	51
4.3.3 沙尘不同尺寸分布对微波传输的影响	54
4.4 地空路径上微波在带电沙尘中的传输特性	58
4.4.1 带电沙尘引起的衰减和相移	59
4.4.2 地空路径上带电沙尘引起的衰减和相移	59
4.5 带电球形粒子的 Mie 散射	63
4.5.1 带电球形粒子的 Mie 散射系数	63
4.5.2 带电沙尘粒子的散射特性	64
4.5.3 沙粒衰减与能见度关系的计算	65
本章小结	66
第 5 章 球形粒子对脉冲波的散射	67
5.1 引言	67
5.2 带电水滴的介电特性	67
5.2.1 水滴的介电常数	67
5.2.2 带电水滴的介电常数	68
5.3 带电水滴对平面波的散射特性	69
5.3.1 Rayleigh 散射	69
5.3.2 带电水滴的散射特性数值计算	70
5.4 球形粒子对脉冲波的散射特性	72

5.4.1 球形粒子对脉冲波的散射 72

5.4.2 脉冲波的散射系数 73

5.4.3 水滴对脉冲的散射计算 74

5.4.4 沙尘粒子对脉冲的散射计算 75

本章小结 77

第 6 章 各向同性带电球形粒子的散射特性 78

6.1 引言 78

6.2 各向同性介质球对任意入射平面电磁波的 Rayleigh 散射 78

6.2.1 球内/外电势及电场 78

6.2.2 散射振幅和散射截面 81

6.2.3 数值计算与结果讨论 82

6.3 各向同性带电球形粒子对任意入射平面电磁波的 Rayleigh 散射 83

6.3.1 局部均匀带电球形粒子内/外电势及电场 84

6.3.2 局部均匀带电球形粒子的散射特性 86

6.3.3 局部非均匀带电球形粒子内/外电势及电场 87

6.3.4 局部非均匀带电球形粒子的散射特性 89

6.3.5 数值计算与结果讨论 89

本章小结 91

第 7 章 各向异性带电球形粒子的 Rayleigh 散射特性 92

7.1 引言 92

7.2 介质球的各向异性 Rayleigh 散射 93

7.2.1 介电张量 93

7.2.2 球内/外电势及电场 93

7.2.3 散射振幅和散射截面 96

7.2.4 数值计算与结果讨论 97

7.3 各向异性带电球形粒子 Rayleigh 散射 98

7.3.1 局部均匀带电球形粒子内/外电势及电场 99

7.3.2 局部均匀带电球形粒子的散射特性 101

7.3.3 局部非均匀带电球形粒子内/外电势及电场 102

7.3.4 局部非均匀带电球形粒子的散射特性 103

7.3.5 数值计算与结果讨论 104

本章小结 105

参考文献 106

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

人类步入信息社会,无线电作为信息传输和获取的重要手段得到了广泛的开发和应用。无线电技术已普遍应用于人类生活的各个领域,并在各种电磁产品、无线电通信、卫星通信及遥感技术方面得到广泛应用。然而,电磁波在传播的过程中,会遇到自然界的许多随机粒子如雨滴、沙尘暴、冰晶、云雾、气溶胶粒子等大气悬浮粒子,这些粒子对电波的衰减和散射是影响微波、毫米波和红外光学系统工作性能的重要因素。尤其近年来沙尘暴频繁发生,迫切要求在更深入的层次上,对沙尘暴的电磁信息进行定量的研究。

就卫星通信而言,其具有覆盖区域广、不受地理限制、通信频带宽等特点,近二十年来卫星通信已经在极其广泛的领域得到应用。但是,由于通信业务的不断增加,C频段和Ku频段的通信卫星越来越多,现有轨道显得越来越拥挤,因此为了适应军事和民用通信的需求,扩展卫星通信的容量,提高系统的灵活性、抗毁性、抗干扰性及保密性,国际上从20世纪70年代开始进行了Ka频段卫星通信系统的研究和实验工作。日本在1977年发射了一颗34 GHz的传播实验卫星,1991年意大利和1993年美国各发射了一颗Ka频段ITALSAT及ACTS通信卫星,通过实验证实了Ka频段卫星通信系统的可用性。目前,Ka频段卫星通信系统的有关技术已日趋成熟。继ACTS发射后美、日、德又相继发射了十几颗Ka频段卫星,现已投入正式运营。我国在Ka频段卫星通信系统方面的研制必须加强,以赶上世界先进水平。

在卫星通信中采用Ka频段,能够得到较宽的工作频段、增加通信容量等。而卫星通信的质量与接收信号的强度有关,接收信号的强度取决于发射机的功率以及天线的增益和方向性,也要取决于传播距离及电波传播过程中的介质状况等。由于Ka频段频率较高,因此该频段的电磁波在通过恶劣气象环境如暴雨、沙尘暴、冰雪、浓雾等时,水凝物粒子及沙尘粒子对电波产生严重衰减、去极化、多径效应等,以及在地球站附近覆盖的这些粒子沉落在收/发天线上产生沉积效应。以上这些效应将会在不同程度上影响卫星通信的信道特性,它们会使系统的信噪比降低,不同极化通道的隔离度变坏,通信信道的电磁干扰增加,信号产生时延与衰落,传输速率减小,误码率与误比特率上升,甚至造成信号传输中断,全面影响了卫星通信系统工作的有效性与可靠性。另外,宽带无线通信技术是无线通信中的新技术,它使用的发射机波形为脉冲波形。对于宽带信号而言,不同的频率分量经不同的路径时形成多径效应;Ka频段主要由于降雨、沙尘等造成信号衰落,这将影响通信的质量。为了保证通信系统的正常工作,必须深入研究恶劣环境下电波的传播特性,尤其是脉冲波在雨、沙尘、雾等介质中的传输效应,采取相应的措施来克服其所产生的不良影响。

在 20 世纪末美国国家宇航局制定的火星登陆计划中,为了保证探测仪器设备避免遭受静电干扰,考虑了火星地表风沙流中沙尘的电效应及影响。在实际的环境中,存在的很多粒子都是带电的,如海洋浪花中形成的水滴,雷暴中形成的冰晶和星际尘埃等,已有研究证明,带电冰晶、带电雨滴对电磁波信号的传播有影响。国外学者从 20 世纪初就已注意到沙尘暴起电现象,国内外学者已通过实际的实验测试,其中主要关注沙尘粒子带电量问题。而进一步开展沙尘粒子带电对电磁信号传播与散射特性的理论分析与建模研究,将为卫星通信、雷达的目标识别和遥感探测等技术的发展提供必要的理论依据和实用模型。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 沙尘暴中电磁波传输特性的研究现状

美、英、日、意等国早在 20 世纪 70 年代就开始结合本国气候特点,对 Ka 频段大气环境效应做了大量的实验和理论研究。测试方法有辐射计法、雷达法、卫星信标法等。自 20 世纪 70 年代以来欧盟科技合作署主持了一系列大规模合作研究,例如 COST25/4 至 COST235 等。美国发射的气象卫星及陆地、海洋卫星中如云雨一号、海洋一号、SSM/I、NUAA 等上面均载有多通道的微波和毫米波辐射计,并进行了大规模传播实验,累积了大量实验数据。在理论研究方面,主要是建立 Ka 频段电磁波通过雨、沙尘、雪、雾等时的衰减、去极化等效应的预报模型,有的已形成 ITU 文件。但现有模型不能满足系统设计要求,不能很好地用于不同地区的预报工作。由于沙尘暴发生的随机性较大以及受环境的影响,实地测量困难重重,因此进一步开展有关沙尘暴媒质中电磁传播与散射的理论实验研究,对于卫星通信、雷达目标识别和遥感探测等具有重要的意义。

对于沙尘暴,最初人们并没有普遍关注它对无线电波传播的影响,认为沙尘粒子尺寸太小,对正在工作的微波系统不会产生明显的影响。另外,由于沙尘暴发生的随机性较大,实地测量很困难,因此沙尘的特性数据(即大小、尺寸、形状和折射指数)通常没有降雨和降雪的特性数据丰富。最近几年,许多学者已注意到沙尘暴对无线电波的影响。

据有关文献报道,国外学者曾开展了有关沙尘暴对微波、毫米波传播影响的理论研究和实际测量工作。这方面最早的工作是 1941 年 J. W. Ryde 开展的沙尘暴对微波散射方面的研究。J. W. Ryde 仅考虑了尘暴对雷达的反射率,发现频率 $f \leq 30$ GHz 且浓度比较低的沙尘暴对雷达信号不产生影响。苏丹曾记录了十多年来沙尘暴发生的统计数据,并实地测量了微波在沙尘暴中产生的衰减。Al-Hafid 在伊拉克巴格达附近的纳西里亚至达尔吉之间的 45 km、11 GHz 的微波电路上进行了沙尘暴直接影响的研究,观察时采用一种开口谐振器记录下 6 月 1 日至 8 月 15 日间伊拉克经常发生沙尘暴的约三个月的接收信号强度,分析和计算了电磁波通过不同沙尘粒子浓度时的衰减,发现短期(几十分钟)的沙尘暴会衰减微波接收信号 10~15 dB,观察到一次 10 dB 的衰落持续了 150 min,另一次 26 dB 的衰落持续了 40 min;在某些严重的沙尘暴情况下,信号衰减会导致一连几个小时的完全衰落。对高于 10 GHz 的微波信号来说,沙粒浓度越大则信号衰减越大,当波长接近沙粒大小时,信号衰减达到最大值。美国军方曾进行了爆炸形成的尘土对 35 GHz、94 GHz 和

140 GHz 的雷达毫米波信号传播影响的试验。国外学者近年来所作的主要工作归纳起来有: Ahmed、Goldhirsh、Chu、Ghobial、Sharief、Albader 和 Hadad 等人分别用标准谐振腔法、短路波导法和开口谐振腔法测量了 $f=10$ GHz 频率附近的沙尘土的介电常数; Chu、Ghobial Ansari 和 Evans 等人在理论上计算了 $f=10$ GHz 时微波在沙尘暴中传播时的衰减; Bashir 和 Ghobial 分别计算了 $f=10$ GHz 时微波在沙尘暴中传播时的差分衰减和差分相移, 并由此计算出极化隔离度 XPI 和串话 XT; Kumar、Bashir 和 Mcervan 做了 $f=3$ GHz 与 $f=7$ GHz 时由于沙尘土在微波反射器天线上的沉积而产生的交叉去极化和信号增益衰减的测量。Ahmed 和 Ali 等人研究了粒子尺寸具有一定分布的沙尘暴对微波传播的影响, Ahmed 等人通过地域沙尘的尺寸分布测量数据, 建立微波衰减和相移模型; Julius Goldhirsh 基于 Rayleigh 散射, 建立沙尘暴二维衰减与后向散射模型。同时, 许多学者也开展了对沙尘粒子介电特性的研究和沙尘暴衰减的预测。

电磁波在沙尘中的传播, 从 20 世纪 80 年代起, 国内才有学者开展这方面的研究, 主要侧重于沙尘暴对陆地通信线路和地空路径上的衰减及交叉极化效应的研究, 给出了相应的预报模型。

2000 年以来, 兰州大学黄宁等通过实验测量表明: 风沙流中的沙粒是带有电荷的, 且带电沙粒与由此形成的风沙电场对沙粒的跃移运动有明显影响。2003 年, 中科院寒区旱区环境与工程研究所利用大型风洞对沙尘暴起电现象进行了实验测量, 揭示了沙尘暴的空间电结构和起电机理, 考虑了沙尘含水量对沙尘带电的影响, 计算得到负电荷最大荷质比为 $304 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2008 年, Herrmann 教授在《Nature》的“News & Views”专栏对沙粒带电研究给予积极评价。兰州大学何琴淑、周又和等人考虑带电沙粒为各向同性局部均匀带电球形粒子, 基于 Rayleigh 散射近似, 给出了带电沙尘粒子的散射场。另外, 董群锋等人在不同尺寸分布下, 给出了微波在带电沙粒中的传输特性模型。

自麦克斯韦方程组建立一百多年来, 对电磁现象的应用如通信、广播、电视、雷达等一般都局限在单频或较窄的频率范围内, 相应的时谐电磁场理论和实验技术得到了十分广泛和深入的发展。然而, 由于理论和实验技术方面的困难, 对于脉冲电磁场的研究开始得很晚, 直到 20 世纪 70 年代, 在目标探测识别和核电磁脉冲防护等实际应用的促使下, 脉冲电磁场的研究才开始较为迅速地发展起来, 而这一时期的短脉冲技术的发展又为脉冲电磁场的发展提供了技术基础。

近几十年来, 随着脉冲技术在微波与毫米波通信、雷达、遥感等领域的广泛应用, 与脉冲有关的电磁场(又称时域电磁场)的研究正引起人们极大的兴趣和重视。研究脉冲电磁场的分析方法主要有三类: ① 以傅里叶(Fourier)变换为基础的频域法; ② 直接在时域内求解的时域法(主要有时域积分法和时域有限差分法); ③ 以拉普拉斯变换为基础的复频域法(即奇点展开法)。频域法是将脉冲波表示为各种不同频率的时谐波的叠加, 利用现有分析频域问题的各种方法求得解析解或数值解后再经 Fourier 逆变换得到时域解。时域法的优点是可以适用于色散介质, 可借助多种成熟的频域方法获得时谐解; 而傅里叶逆变换可以借助快速傅里叶变换(FFT)有效地完成, 概念简单明了。

脉冲电磁波的传播和散射一直是人们感兴趣的研究课题。近些年来, 在雷达、高频数字通信及遥感等领域有广泛的应用。有关脉冲信号在连续介质(湍流、电离层等)和离散随机介质(雨、雾、云、雪等水凝物)中传播的理论研究已受到极大关注。Minter 利用波恩

(Born)近似研究了声脉冲在海洋中的传播;Liu 等人在多重散射效应下,利用抛物近似得到的双频互相干函数,分析了脉冲波在电离媒质中的传播;Ishimaru 等人通过研究脉冲波在随机介质中的传播,发现脉冲波的传播特性可以用双频互相干函数来描述,它既反映了两个位置、不同频率的波在同一时间和位置的相关性(相干带宽),又能反映波在同一位置、不同时间的相关性(相干性时间)。Ishimaru 于 20 世纪 70 年代提出基于双频互相干函数的脉冲波传播理论,研究了脉冲波在随机介质中的传播特性,在前向散射近似下计算了由信号的非相干分量产生的脉冲畸变。

另一种研究脉冲波传播的方法是 Forrer 在 1958 年首次提出的,Forrer 用该方法来研究脉冲波在波导中的传输问题。该方法假定要用一个截断频率的多项式近似信道传输函数(当传递函数随频率的变化不太明显时,这种近似很有效),在前向散射近似下,脉冲信号在介质中传播时,由于信号的相干分量产生不同的衰减和相移,从而导致脉冲畸变的出现。该方法被 Teria 应用于高频波段脉冲波在电离层中的传播;此后,Mederios Filho 用该方法研究了载频为 55 GHz 的脉冲波在大气中的视距传输特性;Gibbins 又用该方法解决了毫米波段脉冲波在大气中的传输特性问题。A.Maitra 和 Maria Dan 用该方法研究了光波段脉冲波通过雾媒质的传播特性,给出了脉冲畸变与频率、脉冲宽度及传播距离的关系。另外,同样基于媒质中电磁波复传播常数泰勒展开法,求取衰减和相移系数的二阶导数的方法,Yosef Pinhasi 和 Georgiadou 等人利用该方法研究了脉冲在大气、雨媒质中的传输特性。这些研究成果的出现,为宽带通信、光通信、雷达遥感等技术的飞速发展奠定了理论基础。

Kusiel S. Shifrin 等利用 Lorentz-Mie 理论研究了球形粒子(如水滴)对光脉冲波的散射特性,同时也表明:随机介质中球形粒子对平面波的散射系数和相函数与粒子对脉冲波的散射系数和相函数是不同的。从 20 世纪 90 年代起,中国电波研究所、西安电子科技大学等对电磁脉冲信号在湍流、电离层等介质中的传播特性进行了研究。其主要侧重于利用双频互相干函数研究脉冲波在介质中的时间展宽、双频互相关函数的振幅和相位等。

然而,针对沙尘媒质中脉冲波的传输特性及沙尘粒子对脉冲波散射特性的研究,目前国内外公开报道的文献比较少。

1.2.2 球形粒子对电磁波散射的研究现状

早在 19 世纪末 20 世纪初,Lorentz 和 Mie 分别利用麦克斯韦(Maxwell)方程给出了均匀介质球对平面电磁波散射的解析表达式,这就是后来被广泛应用于研究均匀球散射的 Lorentz-Mie 理论,该理论在许多专著中都有描述。随后,Debye 考虑空间微粒上的辐射压力,利用德拜势研究了球形粒子的散射。Van de Hulst 给出了由吸收物质和非吸收物质构成的球状、柱状和盘状粒子散射特性的计算。尽管已有许多学者开始关注粒子的电磁散射这一问题,但由于当时计算方法的限制,因此粒子对电磁波的散射研究进展缓慢。直到上世纪五六十年代,随着计算机的出现,各种数值算法随之而出,解析方法也有了相应的数值结果。例如,1949 年 Brillouin 讨论了电磁波对球粒子的散射截面,解释了 Stratton 理论中对于大尺寸球粒子的散射截面为粒子实际截面 2 倍的原因。1950 至 1960 年间,Aden 和 Scharfman 等人分别讨论了同心球壳对平面波的散射特性,理论、实验和数值结果都有了一定的结论,并分析了球壳参数和介电常数对散射截面的影响。Albini、Stein 分别采用

Born 近似和 Rayleigh - Gan 近似数值研究了非均匀球的光散射, 分析了雷达散射截面 (RCS) 的变化。1960 至 1990 年间, 很多专家学者采用各种数值和解析方法, 如物理光学近似 (PO)、几何光学近似 (GO)、射线理论等对该问题做了进一步的研究, 给出了一些有意义的结论。吴振森等人采用 Born 近似研究了双层介质球的散射, 并提出了计算多层同心球平面波电磁散射的收敛与迭代改进算法, 提高了数值计算效率。孙文波等人采用时域有限差分法 (FDTD) 和解析法研究了吸收环境中涂层球的光散射。与解析 Mie 理论比较, Debye 级数可以将散射系数的每一项表达为另一个无限级数, 这对分析粒子的彩虹现象具有重要的作用。Edward 等人采用 Debye 级数, 分析了介质球的 Mie 散射中复杂射线远场的贡献。

1.2.3 带电球形粒子散射的研究现状

在前面的分析中可知, 所讨论的沙尘、水滴等均是不带电的粒子, 但自然界中实际存在的粒子却有很多是带电的, 如海洋浪花中形成的水滴、雷暴中形成的冰晶、尘埃等都能带电。因此研究带电粒子的散射具有实际意义, 如可以修正作用于非常小的纳米尺寸的带电宇宙尘埃粒子 (在太阳系中会出现) 上的电磁力, 分析地球大气中带电水滴和冰晶的微波 (毫米波) 吸收和散射系数。Bohren 最先采用分离变量法分析了单个带电球形粒子的散射。何琴淑研究了带电沙尘粒子 Rayleigh 散射和 Mie 散射的解; 同时通过求解给定边界条件下的 Maxwell 方程, 研究带电长椭球粒子对正入射于介质上的电磁波散射, 讨论了散射强度与粒子参数和面电导率之间的关系。李海英等人研究了单个带电球形粒子 (Carbon 粒子和冰晶粒子) 和尘埃对电磁波的散射传输特性。2007 年, J. Klacka 和 M. Kocifaj 研究各向同性带电球形粒子的散射特性, 给出散射系数的解析式; 2010 年, A. Heifetz 等人应用 Rayleigh 散射研究了各向同性带电雨滴对毫米波的散射特性。然而, 这些研究仅考虑了各向同性带电球形粒子的散射, 其主要结论是关于对入射波沿球形粒子的一个轴传播时的散射特性, 并未考虑对入射波沿任意方向入射到球上的散射问题。

可见粒子带电会对其电磁波散射产生重要影响, 而目前存在的结论主要是关于各向同性带电粒子的散射研究。

1.2.4 各向异性球对电磁波散射特性的研究现状

随着各向异性材料在集成光学、微波工程、毫米波技术、复合材料、遥感和装甲技术等领域中越来越多的应用, 电磁波与各向异性材料之间的相互作用也逐渐引起了专家学者的关注。目前主要考虑的各向异性材料是铁氧体、单轴各向异性材料、钛氧化物和等离子体等。

近十年来, 各向异性介质目标的电磁散射特性以及与电磁波的相互作用这些难题受到国内外专家学者的高度关注。Norris、Achenbach 等学者直接基于 Radon 变换, 研究了无界均匀各向异性弹性媒质的时谐并矢格林函数在球坐标系下的表达式; Wei Ren 等人给出了各向异性媒质中波函数的展开式。就研究方法来讲, 对于各向异性目标散射特性的研究方法可以分为解析方法与数值方法, 而且各种数值方法均以解析方法为理论基础。

研究各向异性目标的散射特性中常用的数值方法有 FDTD 法、离散偶极子 (DDA) 法、

矩量法、快速多极子技术、积分/微分方程法等。1987年, Richmond 分别采用波函数理论、PO、GO 方法研究了有耗均匀铁氧体涂层球的散射, 并讨论了后向散射截面随尺寸参数的变化, 但该文将铁氧体材料视为各向同性材料具有一定的局限。意大利的 Graglia 从频域的角度, 采用体积分/微分方程法研究了任意有形、三维、有耗、均匀的各向异性散射体的散射, 采用矩量法和点匹配得到了耦合积分方程的数值结果。1989年, Varadan 等人采用耦合偶极子近似方法计算了三维均匀、无耗、各向异性结构, 并给出了单轴球的数值结果。1998年, Malyuskin 等人采用积分/微分方程法研究了处于各向异性媒质环境中的各向异性椭球的平面波电磁散射, 该文与其他文献的不同之处在于考虑了环境和目标均为各向异性。目前, 采用 FDTD 方法研究各向异性目标(包括球和柱等)的散射是该领域比较常用的数值方法, 国内外很多学者对此进行了讨论, 其中张明和洪伟采用多极子技术(GMT)研究了单轴双各向异性媒质柱面的电磁散射。

由于各向异性材料介电常数和磁导率的特殊性, 使得它与电磁波的相互作用变得比较复杂。从解析的角度研究各向异性材料目标散射的结论主要有: 1992年, 台湾学者 Wong 采用标势研究了介质和吸收的单轴异性球对平面波的电磁散射。吴信宝和任伟等人分别采用波函数和本征函数方法, 讨论了圆柱对平面波的散射。耿友林等人采用傅里叶变换和矢量球函数, 给出了单轴各向异性球以及铁氧体球对平面波散射的解析解。四川大学张大跃等人从数值的角度采用两点边值问题方法, 研究了平面电磁波入射等离子球和圆柱的散射特性。耿友林等人采用电磁场傅里叶变换, 从解析的角度研究了等离子体异性球、球壳、多层等离子体球对平面波的电磁散射。对于各向异性球形粒子的散射特性, 黄际英、李应乐提出了电磁场的多尺度变换理论, 将各向异性目标重建为各向同性目标, 从而利用各向同性目标电磁散射的有关理论与算法研究各向异性目标的散射问题。李应乐等人给出了各向异性介质球的散射场, 对电磁各向异性球的散射特性进行了研究。然而, 对于各向异性带电球形粒子的散射特性研究, 还未见国内外文献报道, 因此, 开展各向异性带电球粒子的散射研究, 是对各向异性介质球形目标散射特性的进一步深入探索。

1.3 本书主要内容

本书介绍了沙尘、带电沙尘媒质中电磁波的传输特性及其各向同性、异性带电球形粒子的散射特性, 主要内容如下:

(1) 针对沙尘媒质对微波通信线路的影响问题, 依据介质球散射理论, 得出地空路径上毫米波通过沙尘媒质的衰减和相移与粒子尺寸分布的函数关系, 用数值计算了沙尘尺寸分布对沙尘衰减和相移的影响, 其结果表明, 指数分布和对数正态分布对电磁波的影响最大, 瑞利分布和正态分布的预测结果较为接近且影响最小。应用空气中单位沙尘粒子的相对总体积与能见度关系, 简化了沙尘粒子随机分布的复杂性对微波传播的影响, 首次提出了沙尘媒质中的微波传播特性的理论模型, 克服了粒子尺寸分布的多样性对微波传播的影响。进一步将傅里叶时域积分近似解的方法应用于研究毫米脉冲波在沙尘媒质中的传输效应, 数值仿真结果表明, 脉冲畸变随脉冲宽度和传播距离的增大而增大。推导出了沙尘媒质雷达信号衰减公式和反射率因子解析式, 建立了适用于各种尺寸分布的回波功率和等效目标散射截面模型。研究了沙尘红外传输衰减特性。该部分的研究工作, 对于提高恶劣气

象环境下的电波传播特性、遥感技术奠定了理论基础。

(2) 基于带电沙粒 Rayleigh 散射, 结合粒子的指数分布、对数正态分布模型, 提出了带电沙尘的微波衰减模型, 在不考虑沙尘粒子带电时, 该模型与有关文献完全吻合。由于沙尘尺寸分布的多样性, 使得在给定粒子尺寸分布下的衰减模型呈现局限性, 因此提出沙尘不同尺寸分布下, 电磁波在带电沙尘中传输特性的统一(计算)模型, 该计算模型简便, 适用于工程应用; 利用地空路径的经验模型, 给出了计算地空路径上电磁波衰减和相移的等效模型。应用带电球形粒子的 Mie 理论, 研究了带电沙尘媒质中的微波衰减特性。仿真结果表明, 对于同一频率和能见度, 带电沙尘的微波衰减要比不带电沙尘的微波衰减大, 并且衰减随能见度的增大而减小。

(3) 依据带电水滴的等效介电常数, 基于毫米波段不带电水滴 Rayleigh 散射理论研究了带电水滴的散射特性, 分析了带电水滴归一化的散射截面和吸收截面、散射截面和吸收截面随粒子尺寸参数、频率的变化关系。重点依据 Lorentz - Mie 理论研究了球形沙尘粒子对脉冲波的散射特性, 用数值计算并分析了粒径、脉冲宽度对脉冲波的消光系数、散射吸收和散射相函数的影响。其结果表明, 脉冲散射因子和平面波散射因子不同; 脉冲散射、消光因子随沙尘粒径的增加先达到一个峰值后振荡; 脉冲的相函数 S_{11} 总是比载波的小, 而且随着散射角的增大, 不同脉冲的 S_{11} 变化明显。

(4) 对电磁波沿任意方向入射到各向同性的介质球、带电球形粒子 Rayleigh 散射特性进行了研究。推导出各向同性球形粒子、局部均匀带电球形粒子和局部非均匀带电球形粒子的内/外电势、电场的解析式; 利用随机介质中的波传播理论, 给出其散射振幅、微分散射截面的表达式, 用数值计算并分析了入射方位角和观察角对散射截面的影响。据本书作者调研, 在研究球形目标体系的电磁散射特性中, 平面电磁波常被认为是沿轴方向极化、轴方向传播的, 将该部分的研究推广到解决沿任意方向入射、任意方向极化的平面电磁波入射到球上的散射问题, 对于雷达目标识别、目标隐身技术等具有重要的参考价值。

(5) 对电磁波沿任意方向入射到各向异性带电球形粒子的散射特性进行研究, 推导出了各向异性局部均匀带电球形粒子和局部非均匀带电球形粒子的内/外电势、电场的解析式。利用随机介质中的波传播理论, 推导出其散射振幅、微分散射截面的表达式, 用数值计算并分析了介电张量和观察角对微分散射截面的影响。据本书作者了解, 目前对于各向异性带电球形粒子散射特性的研究并不多, 该部分的研究工作为各向异性目标检测、各向异性目标光散射及等离子体隐身技术等奠定了理论基础。

第2章 沙尘暴的物理特性

2.1 沙尘暴的含义

在气象学中,由大风刮起的能见度在 1000 m 以下弥散在空中浓密的沙尘,叫做沙尘暴。沙尘暴可以分为沙暴和尘暴两类。沙暴是指强风将地面沙尘吹起使空气浑浊,水平能见度小于 1000 m 的天气现象;尘暴是由粒子半径小于 $60\text{ }\mu\text{m}$ 的黏土和沙粉组成的,它无明显的上界,高度可达几千米甚至数十千米。

沙尘暴的强度可以分为沙尘暴(能见度小于 1 km)、强沙尘暴(风速大于等于 20 m/s ,能见度小于等于 200 m)和特强沙尘暴(风速大于等于 25 m/s ,能见度小于 50 m)。

沙尘暴是一种风与沙相互作用的灾害性天气现象,它的形成与地球温室效应、厄尔尼诺现象、森林锐减、植被破坏、物种灭绝、气候异常等因素有着密不可分的关系,且受到多种因素的制约,如大气(风力、湍流、大气密度、黏度、水分)、地面(粗糙度、障碍物、温度)、土壤(土壤结构、水分含量)等。当大风经过沙(尘)质地表产生扬沙(尘),并有部分沙(尘)渗入气流中时,粒径小于 0.2 mm 的沙尘随着气流升空→运移→沉降,形成了沙尘暴。在沙尘暴发生时,沙粒运动的主要形式是跃移,其运动速度比气流的小 3~5 倍,而其加速度比重力加速度大几个量级。尘土粒子的主要运动形式是悬移,它随气流的跟随性比沙粒强得多。初步测量,细沙或尘土粒子的速度谱为偏正态分布,因此沙尘暴是一种非均匀的三相流运动。

2.2 中国沙尘暴天气的空间分布和时间分布

2.2.1 沙尘暴天气的空间分布

沙尘暴易发区大多属中纬度干旱和半干旱地区,这些地区受荒漠化的影响和危害比较严重,地表多为沙地和旱地,植被稀少,大风过境,容易形成沙尘暴天气。

中国是世界上沙漠及沙漠化土地最多的国家之一,沙漠及沙漠化土地的面积约占国土面积的 16%,达到约 153.3 万平方千米。它主要分布在北纬 35 度至 50 度、东经 75 度至 125 度之间的大陆盆地和高原,形成了一条西起塔里木盆地西端,东迄松嫩平原西部,横贯西北、华北、东北地区,长约 4500 千米、南北宽约 600 千米的断续弧形沙漠地带。

沙尘暴天气的沙源区主要分布在我国西北地区的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、塔克拉玛干沙漠、乌兰布和沙漠、黄河河套的毛乌素沙地等。尤其是塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠是我国沙尘暴的主要沙尘源区。图 2-1 所示为中国

八大沙漠分布图。

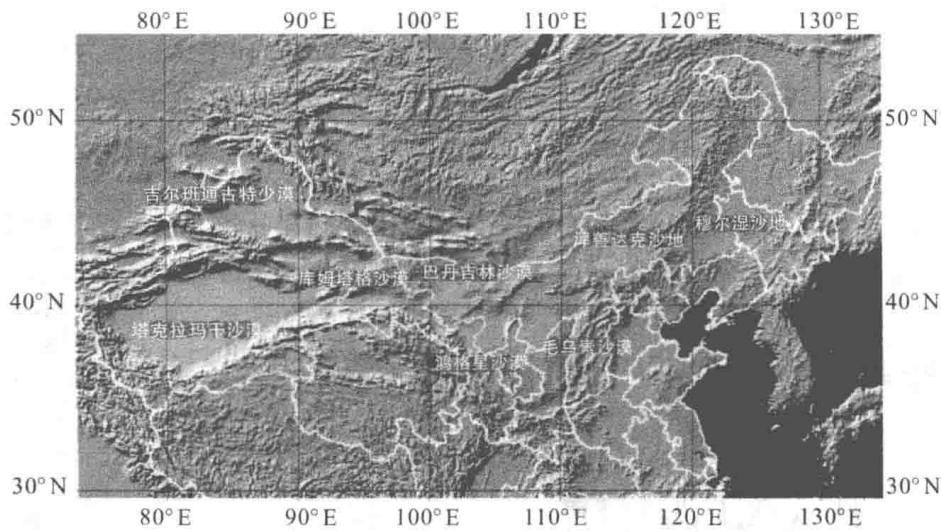


图 2-1 中国八大沙漠分布图

中国沙尘暴天气的空间分布情况：我国西北地区、华北大部地区、青藏高原和东北平原地区沙尘暴年平均日数普遍大于 1 天，是沙尘暴的主要影响区，其中东经 110 度以西、天山以南大部分地区沙尘暴年平均日数大于 10 天，是沙尘暴的多发区；塔里木盆地及其周围地区、阿拉善和河西走廊东北部地区是沙尘暴的高频区，沙尘暴年平均日数达 20 天以上，局部地区接近或超过 30 天，如新疆维吾尔自治区民丰县 36 天、柯坪县 31 天，甘肃省民勤县 30 天等。图 2-2 所示为全国沙尘暴年总日数的分布(1956—2000 年)。

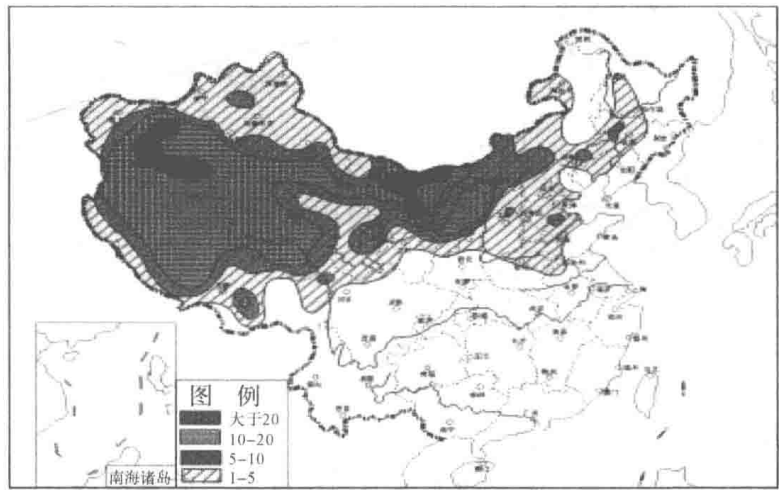


图 2-2 全国沙尘暴年总日数的分布(1956—2000 年)

2.2.2 沙尘暴天气的时间分布

沙尘天气的季节变化大致可划分为三种类型：

(1) 春季最多型。以北京市、内蒙古自治区朱日和等华北地区台站为代表，例如北京市 3~5 月沙尘暴与扬沙日数分别占全年总出现日数的 52.6%和 67.2%。