

大气辐射导论

[美] Kuo - Nan Liou



气象出版社

大气辐射导论

(美)廖国男 著

周诗健 阮忠家 陶丽君 朱文琴 译

周秀骥 审校

气象出版社

内 容 简 介

本书系统地、全面地介绍了大气辐射领域的内容。主要有大气辐射的基础知识、辐射定律、辐射传输方程以及太阳和地气系统的辐射特征；米氏散射和多次散射，包括辐射传输方程的各种解法；基本辐射传输理论对大气遥感的应用和卫星探测所取得的最新辐射资料。每章后附有推荐参考书目和一定数量的习题。

本书特别适合于学习大气科学的大学生和研究生，以及从事大气辐射的研究工作者阅读；对于从事行星探测、电磁散射、光学、地球物理学等学科的研究工作者也有一定的参考价值。

Kuo-Nan Liou

AN INTRODUCTION TO ATMOSPHERIC RADIATION

Academic Press, New York 1980

大气辐射导论

〔美〕 廖国勇

周诗健 等译

周秀骥 审校

责任编辑：顾仁俭

气象出版社出版

（北京西郊白石桥路46号）

北京通县科技印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

开本：787×1092 1/32 印张：13.75 字数：308千字

1985年3月第一版 1985年3月第一次印刷

印数：1—3,000

统一书号：13194·0193 定价：3.50元

审校者前言

大气辐射学作为主要研究辐射在地球大气系统内传输和转换过程的学科,是大气物理学中发展较早的一个分支领域,又是现代大气科学中非常活跃的研究课题。首先,大气辐射是当代大气遥感探测的理论基础。同时,由于电子计算机技术、计算数学方法与大气动力学的迅速进展,在中长期数值天气预报模式、大气环流与气候变化的数值模拟试验中已经完全可以定量考虑复杂的大气辐射过程,从而迫切要求建立具有物理基础的参数化的实际大气辐射模式。特别是,由于现代工业化的结果,人们愈来愈关心生产活动对天气气候变化的冲击,其中的核心问题又是由于大气成分变化所引起的新的地气系统的辐射收支与平衡问题。

国外关于大气辐射方面的论著已有不少,最近新出版的由美国犹他大学气象系廖国男教授所编著的“大气辐射导论”一书却具有新的特色。作者根据多年从事这方面研究和教学的经验,用简洁的篇幅、清晰的概念,把大气辐射的基本物理过程和大气遥感与气候变化等有机地结合起来,作了全面而系统地论述;既着重阐述了吸收与散射等基本过程的物理内容,又介绍了诸如考虑多次散射在内的辐射传输方程解的一些新的数学物理方法,却没有使读者坠入繁琐的数学推导;大气辐射在大气遥感中的应用以及辐射气候等新的研究进展也得到应有的反映。这些都是以往有关著作中所缺乏的。

根据教学要求不同取舍,本书可作为研究生或大气物理专业高年级学生的教材。同时,对开始从事大气辐射与大

气遥感研究的科技工作者来说，也是一本有益的好书。本书每章后均有习题，书末还有附录，这些对学习和研究都会带来方便。我相信，本书将会受到读者们的欢迎。

周秀骥

1982年4月14日

作者序言

近年来,了解和预测气候和气候变迁的有关问题已成为科学家和公众之间越来越感兴趣的课题。这股热潮起源于人类认识到自身的种种努力往往经不起气候变化不定的袭击,以及认识到人类活动也可能引起气候变迁。太阳和红外辐射的传输代表着驱动大气环流和洋流的主要物理过程。显然,了解气候和气候变迁的机制,必须从详细了解辐射过程以及地球和大气的辐射平衡问题开始。

此外,由于本世纪六十年代中气象卫星的相继发射,辐射传输原理的应用显得极其富有成效。利用卫星收集的资料和辐射传输原理,我们现在已能推求出温度和各种光学活跃气体的廓线,例如大气中的水汽和臭氧。这些廓线资料又大大地增强了我们对地球天气和气候的认识。随着我们对云和气溶胶与太阳和红外辐射的物理相互作用的逐步深入了解,定量推求全球分布的云系以及气溶胶的成分和结构似乎已成为可能。显然,对地球大气所发展的种种探测方法,也能直接用于其它行星大气。

虽然在大气辐射领域内已写了不少重要的参考书,但其中还没有一本适用于作为大气科学的教科书。这主要是因为,有的书的目的在于文献调研,有的书则缺乏关于行星大气中散射和吸收过程的一个或几个方面的内容介绍。再就是,迄今已出版的书,还没有一本介绍光散射和辐射传输原理对遥感和辐射气候学的应用。值此卫星遥感、激光应用以及辐射传输在行星大气的天气和气候研究中变得日益重要之际,

的确迫切需要写出有关行星大气辐射过程问题的连贯而有条理的教材。本书的目的就在于描述和统一所有与大气辐射基础有关的专题内容。本书讲解的水平适合于在大气科学领域内学习的高年级学生和研究生，以及刚开始进行大气辐射研究的人，他们能够消化和吸收书中的数学推演过程以及那些控制行星大气辐射场的基本物理定律。

本书共分八章。第一章介绍有关辐射传输的概念、定义、各种基本辐射定律以及基本方程。第二章叙述在地球大气顶的太阳辐射的特性。第三章讨论太阳辐射在分子大气中的吸收和散射过程，同时讨论了涉及紫外辐射和臭氧的光化学过程，并叙述了偏振的概念和大气分子对阳光的瑞利散射。第四章研究地气系统中的红外辐射传输，红外传输的基本理论也包括在内，并讨论了吸收带模式和辐射图的原理。第五章描述有关大气中气溶胶和云粒子的单次散射过程。首先介绍麦克斯韦方程组，然后推导矢量波动方程的解，从而导出米氏散射理论。还概述了对球形水滴和六角形冰晶光散射的几何射线光学近似方法。第六章中介绍了在平面平行大气中多次散射的原理，这一章包括建立基本方程、辐射传输问题的一些近似方法、不变性原理以及解基本传输方程的各种方法。第七章中给出基本辐射传输理论对大气遥感的应用。对根据卫星红外探测通道确定温度和气体廓线过程中所用的反演原理进行了讨论，也介绍了各种反演方法。对微波探测器的用途以及反射和透射太阳光作为遥感手段的问题作了进一步讨论，并且叙述了雷达和激光雷达后向散射法探测云和降水的基本原理。最后一章中叙述了与辐射气候学有关的专题。这一章介绍了由卫星取得的宽带辐射观测资料，并报导了由卫星探测确定的各纬度和全球的辐射收支量，进而还叙述了辐

射收支的理论研究结果以及根据辐射平衡建立的简单气候模式。在每一章中还给出了一组具有不同困难程度的习题。

在写本书时,我认为读者在物理和数学方面已具有一定的预备知识。虽然本书主要是为大气科学领域内的大学生和研究者而写的,但其它学科,包括行星探测、电磁散射、光学、以及地球物理学等学科的大学生和研究者,也能在本书中找到他们感兴趣的内容和应用。我曾用第一至第四章的材料给高年级大学生和一年级研究生去讲名为“大气辐射: 物理气象 I”的专业课;我也曾用第五至第六章以及第七至第八章的材料给高年级研究生讲课,分别称为“大气辐射”和“卫星遥感”。书中的某些材料还是首次引用,没有在别处发表过。

在写作过程中,我找到了大量的大气辐射领域内的文献,这是由于气象学、天体物理学、行星学、电子工程学以及应用物理学都与大气辐射有关所造成的。通常,我尽量避免引用有关课文中讨论专题的原始参考书目,希望进一步学习专题材料的有兴趣的读者可以由推荐参考书目中找到有关的文献,推荐参考书目或是已出版的书,或是评述文章。另一方面,我尽量引用那些有重要贡献的参考书目,它们阐述了大气辐射和遥感领域内的近代进展和主要发现。我从事了一项几乎不可能完成的工作:统一在散射、吸收和发射、辐射传输,以及卫星遥感领域中所用的混乱的符号。遗憾的是,我发现为了保持各领域内的特点,一些符号的重复使用将是不可避免的。最后,许多在正文中没有叙述的材料,通过在每章末的习题而予以补充。

我对花时间阅读了原稿中不同章节并提出许多有益改进建议的下列友人和同事表示衷心的感谢: P. Barber, K. L. Coulson, A. Fymat, J. F. King, C. B. Leovy, J. North, 以及

T. Sasamori。在写作过程中，我的研究计划继续得到国家自然科学基金会大气研究组和空军地球物理实验室的支持，他们的支持使书中所述的许多工作有可能完成。我还衷心地感谢犹他大学授予我 D. P. Gardner 会员奖，这使我能够在 1978 至 1979 的科学年度的冬季内从教学工作中解脱出来，在此期间完成了相当多的写作任务。最后，我还要感谢 R. Coleman 和 K. Hutchison，他们独立地设计了大多数的习题并协助我校对手稿，以及感谢 D. Plumbhof 夫人打印各式各样的手稿。

廖国男

目 录

审校者前言

作者序言

第一章 辐射的基本知识.....	1
1.1 概念、定义和单位	1
1.2 黑体辐射	10
1.3 吸收(发射)线的形成和谱线形状	14
1.4 辐射传输的一些基本性质	21
习题.....	27
推荐参考书目.....	29
第二章 大气顶的太阳辐射.....	30
2.1 作为能源的太阳	30
2.2 地球绕太阳的轨道	37
2.3 太阳光谱和太阳常数	40
2.4 太阳常数的确定	43
2.5 大气外界日射的分布	48
习题.....	51
推荐参考书目.....	52
第三章 太阳辐射在大气中的吸收和散射.....	53
3.1 地球大气的成分和结构	53
3.2 紫外吸收	55
3.3 光化学过程与臭氧层的形成	59
3.4 在可见光区和红外区的吸收	63
3.5 太阳增温率的计算	68
3.6 偏振光的表征方法和斯托克斯参数	71

7	瑞利 (Rayleigh) 散射	79
	习题	89
	推荐参考书目	92
第四章	大气中的红外辐射传输	94
4.1	热红外光谱和大气效应	94
4.2	大气气体红外吸收光谱的一般性质	96
4.3	在平面平行大气中的红外传输理论	100
4.4	透射函数(透射比)的概念	102
4.5	透射函数(透射比)的谱带模式	105
4.6	对非均匀大气的柯蒂斯-戈德森 (Curtis-Godson) 近似	114
4.7	红外冷却率的计算	116
4.8	按斯蒂芬-玻尔兹曼定律计算的红外通量和辐射图	119
4.9	二氧化碳和气候	128
	习题	130
	推荐参考书目	132
第五章	大气中粒子的光散射	133
5.1	麦克斯韦方程组	133
5.2	电磁波方程及其解	135
5.3	形式散射解	141
5.4	远场解和消光参数	146
5.5	散射相矩阵	153
5.6	射线光学 (ray optics)	159
5.7	非球形冰晶对光的散射	181
	习题	190
	推荐参考书目	192
第六章	平面平行大气中的多次散射原理	194
6.1	阳光在平面平行大气中散射的公式	195
6.2	辐射传输的近似处理方法	201
6.3	辐射传输的离散纵标法	213

6.4	不变性原理	221
6.5	考虑表面反射	238
6.6	多次散射的累加法	242
6.7	考虑偏振的多次散射	246
6.8	一定取向非球形粒子的多次散射方程	250
6.9	三维空间中多次散射的方程	254
	习题	258
	推荐参考书目	260
第七章	辐射传输对大气遥感的应用	262
7.1	引言	262
7.2	用于遥感的散射太阳光	264
7.3	卫星红外遥感	276
7.4	卫星微波遥感	309
7.5	激光雷达(或雷达)的后向散射	320
	习题	326
	推荐参考书目	327
第八章	辐射气候学	329
8.1	地球-大气辐射收支研究综述	329
8.2	宽带辐射的卫星观测资料	332
8.3	卫星观测资料的辐射收支研究	338
8.4	辐射收支的理论研究	348
8.5	简单的辐射和气候模式	371
	习题	386
	推荐参考书目	387
附录 A	基本符号	389
附录 B	一些常用常数	396
附录 C	普朗克函数的推导	398
附录 D	复折射指数、光的色散以及洛伦兹-洛伦茨公式	400

附录 E	勒让德多项式的性质	404
附录 F	散射的几何关系	406
附录 G	勒让德多项式的加法定理	408
附录 H	美国气象卫星系列	410
附录 I	部分习题的答案	414
参考书目	419
译后记	428

第一章 辐射的基本知识

1.1 概念、定义和单位

1.1.1 电磁波频谱

担负大气中能量传输的最重要过程是电磁辐射。电磁辐射以波的形式传播,所有的电磁波均以同一速度,即光速,进行传播。真空中的光速为 2.99793×10^8 米/秒,大气中的光速也非常接近这一速度值。可见光加上伽玛射线、爱克斯射线、紫外线、红外辐射、微波、电视信号以及无线电波,共同形成了电磁波频谱。

人眼视网膜所敏感的电磁波频率在 4.3×10^{14} 赫(即每秒振动1周,亦可写为周/秒)到 7.5×10^{14} 赫之间。因此,这一频带称为电磁波频谱的可见光区。然而,眼睛并不能反应高于 7.5×10^{14} 赫的电磁波频率。位于频谱中紫光边缘之外的这种波称为紫外线。另一方面,如果波的频率低于 4.3×10^{14} 赫,眼睛同样不能反应。这种波动的频率比频谱红端的最低可见光频率还要低,但又高于 3×10^{12} 赫左右,这种波称为红外线或红外辐射。紧接频谱红外部分的是微波,它的频率范围在 $3 \times 10^{10} - 3 \times 10^{12}$ 赫。与行星大气中辐射能量传输有关的最重要谱区位于紫外线与微波之间。

电磁波频谱的爱克斯射线区由频率约为 3×10^{16} 到 5×10^{18} 赫之间的波动构成,并且紧接频谱中的紫外线区。频谱中频率最高的是伽玛射线区,频率由 3×10^{19} 赫向上延伸。在频谱的另一端,微波区之外是电视和调频区,频率从 3×10^8 赫左右

谱区名称	波长 (厘米)	频率 (赫)
伽玛射线	10^{-9}	3×10^{19}
X射线	10^{-6}	3×10^{16}
紫外	3×10^{-5}	10^{15}
可见		
红外	10^{-4}	3×10^{11}
微波	10^{-1}	3×10^{10}
宇航	1	3×10^8
电视及调频	10^2	3×10^7
短波	10^3	3×10^6
调幅	10^4	3×10^5
无线电波	10^5	3×10^4

紫
蓝
绿
黄
橙
红

图 1.1 电磁波频谱

延伸到 3×10^5 赫。无线电波在频谱中具有最低的频率，由 3×10^5 赫左右向下延伸。

电磁波通常按它们的波长而不是按它们的频率来描述。联系频率 $\bar{\nu}$ 和波长 λ 的普遍公式为

$$\lambda = c/\bar{\nu} \quad (1.1)$$

式中 c 代表真空中的光速。这一公式对任何类型的波动都适用，不一定限于电磁波。习惯上常用波数 ν 来描述红外辐射的特征，它的定义为

$$\nu = \bar{\nu}/c = 1/\lambda \quad (1.2)$$

因此，10 微米(1 微米 = 10^{-4} 厘米，简称为 μm) 波长等于 1000 厘米⁻¹ 的波数。然而，在微波区通常使用千兆赫(GHz) 为频率单位，1 千兆赫等于 10^9 赫，因此，1 厘米相当于 30 千兆赫。

图 1.1 绘出整个电磁波频谱，并标出频率和波长，也标出了频谱各个不同部分的名称。

1.1.2 立体角

分析辐射场常常需要考虑单位立体角内的辐射能量。立体角定义为锥体所拦截的球面积 σ 与半径 r 的平方之比，如图 1.2 所示，它可写为

$$\Omega = \sigma/r^2 \quad (1.3)$$

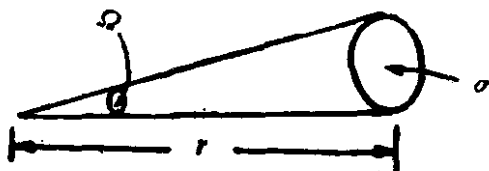


图 1.2 立体角的定义

立体角的单位用球面度(sr)表示,对面积为 $4\pi r^2$ 的球,它的立体角为 4π 球面度。

为了得到微分立体角元,我们画出中心在 O 的球。假设通过 O 点的直线在空中移动并与离 O 点 r 距离处的任意球面相交,则由图 1.3 显然看出,极坐标中的微分面元为

$$d\sigma = (r d\theta)(r \sin\theta d\phi) \quad (1.4)$$

因此,微分立体角元为

$$d\Omega = d\sigma / r^2 = \sin\theta d\theta d\phi \quad (1.5)$$

式中 θ 和 ϕ 分别表示极坐标中的天顶角和方位角。

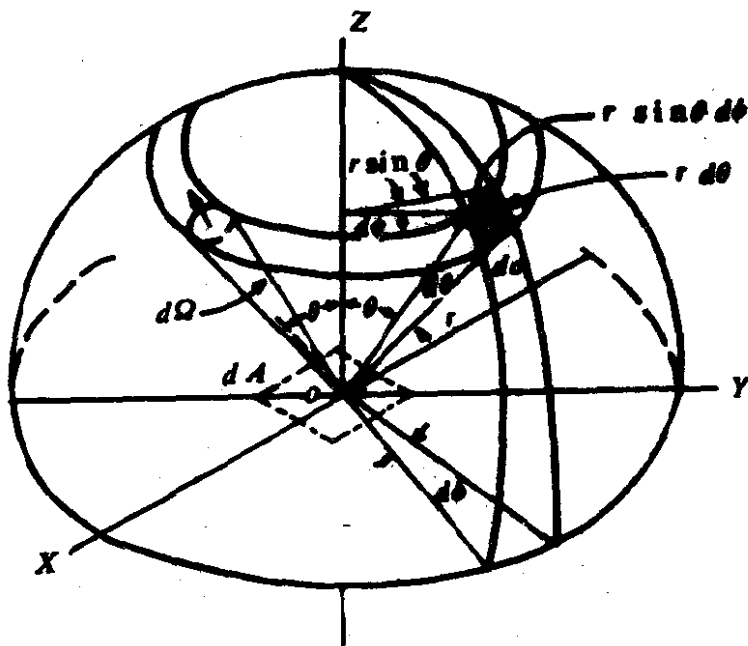


图 1.3 立体角及其在极坐标中的表示方法。也图示出限制在立体角元 $d\Omega$ 方向中的通过面元 dA 的一束辐射

1.1.3 基本辐射量

今考虑在时间间隔 dt 和给定波长间隔 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 之间的,通过图 1.3 所绘面元 dA , 并限制在与 dA 法向成 θ 角方向的微分立体角内的微分辐射能量 dE_λ 。这一能量按谱强度