

物理气象学

J. C. 强 生 著

科学出版社

物理气象学

J. C. 強生 著

王 鵬 飞 譯

科 学 出 版 社

1 9 6 0

【中国科学院图书馆藏】

JOHN C. JOHNSON
PHYSICAL METEOROLOGY
THE TECHNOLOGY PRESS OF THE M. I. T.
New York
1954

2P62/11

內 容 簡 介

物理气象学是气象学科中一个新的分支,其中有許多研究項目过去是、甚至現在有的也还是由天文学和物理学工作者以及航空工程师們所进行研究的。本书收集了各方面的資料,包括上述这些研究工作者所进行的有关以大气为主的研究工作編写而成。书中从敘述大气折射、散射、能见度开始,討論了天气中辐射过程、地球的热量收支、大气光学、电学、云的物理学、人工降水、飞机积冰、雷达气象学以及高层大气物理学等部分。

本书对于气象研究工作者和天文、物理、航空工作者均有参考价值,同时本书亦可供大学有关专业师生在教学上参考。

物 理 气 象 学

J. C. 强 生 著
王 鵬 飞 譯

科学出版社出版 (北京朝阳門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

1960 年 2 月第 一 版

1960 年 2 月第一次印刷

(京)0001—4,500

书号: 2077 字数: 325,000

开本: 850×1168 1/32

印张: 17 1/2 插頁: 1

定价: 1.90 元

序

物理气象学是一门边缘科学。它是研究那些不直接涉及大气环流的气象现象的科学。它将气象学与某些其他科学联系起来。就这一点看来，它正象物理化学处于化学与物理学两者之间的地位一样。大家知道，在 19 世纪，物理学与化学还被认为是两门截然无关的科学。

在物理气象学范围内，大多数原始研究项目，过去是而且现在还是由天文学家、无线电物理学家、化学家及航空工程师所担任的。本书已将他们研究工作中凡以大气为主要的部分收集进去。

本书所介绍的材料，其深度是假定读者已学过普通物理学及微积分的基本课程。虽然本书主要是作为物理系毕业后训练成为专业气象学家的学生的初步教材，但也可作为物理系未毕业学生三、四年级的选修课程。物理教师在这样一门课程中，可以对一些看上去是简单的物理上的问题的复杂性加以阐明，并指出如何设法去解决这些问题。大气界是一个任何人都接触到的阐明这些问题的实验室。然而我们都知道大气现象以单纯的形式出现的机会是很少的，与一般实验室中实验工作的精确度来比较，测量自然界中大气现象所得的许多资料似乎仅是一个设计不好、执行得又很粗糙的实验。然而许多大气过程的理论解释已有很大的进展，而且这些理论也已为可靠的实验所证实。

由于这是一本作为许多不同的应用科学之间的桥梁的教科书，因此在选择符号时有时会遇到困难。例如有时在某一科目的文献中习惯采用的符号常与本书中想统一采用符号的意念相矛盾。在少数情况下，特别是在第九章，以同一符号 V 代表体积和代表电势出现在同一个方程式中。这种不调和的现象既非由于粗心大意也非由于弄错。仔细观察一下这个方程式就可发现正楷体是

用以代表电学量,而斜体字是用以表示非电学量的。其他类似的偏差也是在企图合理地选择符号以避免在字面领会会上发生混淆而造成的。

本书每章末的参考文献主要是为研究者而不是为初学者选录的。由于我们大多数习惯先从教科书次从参考书,最后从原始编著找寻自己不熟悉的知識,因此在每章末又列出了一些十分有价值的参考书。这些参考书,对于該章中涉及的問題,列有很多的参考文献,而本书所列的参考文选,或系十分有价值的論文,或系概述性的論文,或系自所附参考书出版时间直到1953年为止这一段时间內新出版的論文。

Marblehead, Massachusetts

1953年12月9日

J. C. 強 生

符 号 表

a	球的直径
A	面积、視反照率、稜鏡角
$\mathcal{A}$	吸收率
B	亮度、雷利散射系数
$B^*(\lambda)$	固有亮度(随波长而变)
$B(z)$	由于分子导热率而造成的通量密度(随高度而变)
B_r	絕热体积弹性模量
c	真空中电磁辐射速率
c_p	空气的定压比热、
c_v	空气的定容比热
C	容电器的电容量
C	一个常数、亮度对比、浓度
C_D	曳力系数
D	平均日地距离、水的密度、偏向角
D'	冰的密度
e	水汽压
e	电子上的电荷
e_s	饱和水汽压
E	通量密度
E_0	太阳常数、原始通量密度
$E(z)$	太阳能量的通量密度(指短波、随高度而变)
E	电場向量的数值、併合效率
f	力
F	通量
g	重力加速度
G	雷达接收器的接收能
h	普朗克常数、厚度坐标

H	均质大气的高度、辐射函数、增热速率、标高
i	电流
i	入射角、整数的指示符号、 $\sqrt{-1}$
i'	折射率渐渐变化时介质中的折射角
I	强度、每立方厘米中每秒形成的离子偶的数目
$I_{\perp}$	垂直于偏振面的偏振辐射的强度
$I_{\parallel}$	平行于偏振面的偏振辐射的强度
j	电流密度
$J_i()$	序次为 i 的贝塞尔函数
k_{ij}	臭氧、氧及分子氧的复合因子
k	波尔兹曼常数
k_a	单位长度的吸收系数
k_s	单位长度的散射系数
κ	每单位波长的电磁波吸收系数
K	水汽在空气中的扩散率、曲率
K_s	散射面积系数
K'_s	后向散射系数
l	脉冲长度
$\bar{l}$	平均自由路程
L	潜热
$L(z)$	涡动扩散造成的通量密度
m	折射率、单位体积的质量
M	各种质点的质量、克分子浓度
n	单位体积中不同质点数, 一个整数
N	质点总数、单位时间通过单位面积的质点数
p	压力、气压
P	偶极矩
q	单位体积的电荷量
q	比湿、单位时间射到单位体积上的量子数
Q	电荷
Q	辐射函数、单位时间为单位体积所吸收的量子数、单位体积形成电子的时间速率、热量

r	徑向坐标、半径、折射角
R	地球半径
R_G	干空气单位质量的气体常数
R_W	水汽单位质量的气体常数
Re	雷諾数
R	电阻
$\mathcal{R}$	反射率
$\mathcal{R}_\lambda$	单位波长的反射率
$R(z)$	柱状电阻
s	曲綫坐标
S	接收器面积
$S(z)$	地球輻射的通量密度(指长波輻射,随高度而变)
t	時間
T	絕對温度
u	光学路程、微粒在軌跡上的速度、羣速度
U	空气速度
v	相对速度、相速度、比容
v_T	相对末速
$\varnothing$	加速度
V	体积
V	电势及电势差
V_m	視程
w	可能降水量、空气中单位体积內液态水质量
w_s	飽和比湿
$W(z)$	水分輸送的通量密度(随高度而变)
x	坐标距离
y	坐标距离
z	高度
z'	視高度、虛高度
Z	核荷数
α	$\pi a/\lambda$ 、高度角、偏振輻射的散射角、 α 質点
α'	視高度角
α_i	光子吸收成数

β	高度角、雷利散射系数
β'	視高度角
γ	环境直減率
γ_A	自动对流直減率
Γ	偏振度、电子復合系数
δ	偏振差、相角、非选择性散射系数
ϵ	电容常数、亮度对比閾、天空散射增益、橢圓偏心率、輻射能率閾
ζ	天頂角
η	变量、运动学粘滯率
θ	天頂角
θ'	視天頂角
Θ	位溫
κ	空气热扩散率(传导)、离子的迁移率
κ_E	空气的涡动扩散率
κ_H	热輸送系数(传导)
κ_s	土壤热扩散率
λ	波长
λ	比导率
Λ	传导率、併合效率之无量綱参数
μ	微米、粘滯率
ν	頻率、分子碰撞頻率
ρ	空气密度
ρ_w	水汽密度
σ	单位长度的衰減系数、碰撞截面、表面张力、单位面积的电荷
Σ	总和号
τ	透射率、時間坐标
Ξ	无量綱的速度坐标
ϕ	前向散射角
χ	无量綱的坐标距离
ψ	无量綱的坐标距离、坐标角
ψ_λ	視見度(色度学定义)
Ψ	天文折射
ω	立体角

目 录

序	i
符 号 表	v
第 一 章 大气折射	1
第 二 章 大气中的散射	33
第 三 章 大气能见度的理论	65
第 四 章 地球大气中的辐射过程	103
第 五 章 辐射研究和地球的热量收支	148
第 六 章 大气悬浮物的折射和衍射。大气光学	176
第 七 章 云滴形成的物理条件	205
第 八 章 天然及人工降水、飞机积冰和雷达气象学	238
第 九 章 大气电学	278
第 十 章 电离层和臭氧层	322
第十一章 高层大气的温、湿、压及密度	360
附 录 常用常数的简表	386
分子量	386
水汽的饱和汽压	387
NACA 标准大气(低层)	387
附 图 埃尔色塞大气辐射图	书末插页

第一章 大气折射

§ 1. 导 言

过去人们习惯于将物理学分为力学、热学、电磁学、光学、声学及近代物理学几个方面,但从 1930 年起,在物理教学上渐渐地愈来愈有这样的倾向,那就是对于这门学科的完整性以及与别的学科的联系方面更有所注意了,物理气象学也是这样,目前它包括了大气物理学的许多部分,并且还包括了某些原属于化学领域内的问题,因此将这一门学科整体化,也已有了可能。运用这种处理方法的例子,如首先考虑支配电磁能通过大气时的传播、衰减、偏振及色散等普遍原理。对于这些普遍性的原理有了概念后,就很容易进入可见光、红外线、微波、超高频无线电波的领域,并对它们作专门性的研究。

大气折射就是可以按照上述研究方法进行研究的一个特殊科目。一般说来,折射是指辐射从一个介质进入另一个介质速度的改变(包括辐射路程的方向改变和辐射传播的速率改变)。在大气光学中以及在通过大气的微波及超高频无线电波传播的领域中,大气折射现象的知识是十分重要的。在上述领域中,某些基本概念是共通的。但有些细节在研究某一项目(例如大气光学)时可以忽略不考虑,而在研究另一项目(例如无线电频率)时,却不能忽略掉。这些不同点在以后各节中还要谈到。

首先,我们概括地叙述一个能产生电磁能、发射电磁能、接收并检出电磁能的收发系统。电磁能从发射机到达接收机,要通过数量级常达几千米或几百千米的大气距离。上述收发系统的外貌可能有很大的不同。例如将太阳可看作发射机、日射强度表可看作接收机,则太阳和日射强度表就组成一个收发系统。这和将一架

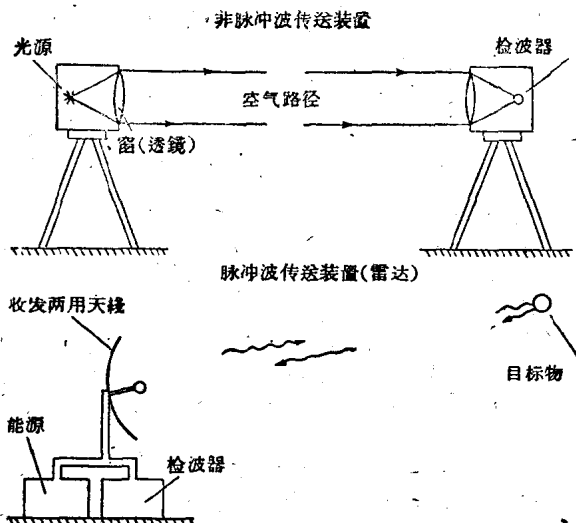


图 1.1 两种电磁波收发系统的草图。在非脉冲波传送装置组中，能源和检波器是分开的。但在雷达中，情况就不同了，同一天线既用于发射辐射能，又用于接收辐射能。由于采用了脉冲波，所以一个天线作两种用途就成为可能。在两次发射辐射能的脉冲之间，正是天线接收自目标物反射回来的辐射能的时间。

表 1.1 在地球大气中传播电磁能的几种典型收发系统
(这些收发系统并不是对所列的波长范围都一定全部使用的)

范 围	波长范围	能 源	发 射 器	接 收 器	检 波 器
紫 外 线	1200—4000 埃	气体放电	石 英 窗	石 英 窗	摄影底片
可 见 光	400—700 毫微米	灯	放射镜或透镜	反射镜或透镜	光 电 池
红 外 线	1—400 微米	黑 体	NaCl 窗	NaCl 窗	温差电偶
微 波	1 毫米—1 米	磁 控 管	双极天线及反射器	反射器及双极天线	晶体整流器
高频无线电	(高频) 1 米 (很高频) 到 100 米 (超高频)	真空振荡管	双极或负荷天线	双极或负荷天线	晶体双极或三极复合管
无线电广播段	200—600 米	真空振荡管	天 线	天 线	真空管检波器

单位：1米=10² 厘米=10³ 毫米=10⁵ 微米=10⁶ 毫微米=10¹⁰ 埃。

飞机上的很高频率的信号发送器作为发射机、将地面上很高频率的无线电收讯器作为接收机所组成另一个收发系统大不相同，但在所有这样的收发系统中，辐射能总是要通过通常是很长的大气路程的。研究辐射能在通过大气时所遭遇到的变化就属于物理气象学的范围。表 1.1 列举了一些与电磁光谱不同波段有关的收发系统。

§ 2. 折射现象的普遍概念

折射效应之所以产生是因为大气既非等密介质，又非自由空间。电磁波传播的速率随大气密度而变，且与大气中气体分子的内部电结构有很大的关系。在自由空间中辐射传播速率与在介质中(这里指大气)辐射传播速率的比例称为折射系数，用符号 m 表示。令辐射在自由空间中的速率为 c ，它是等于 2.998×10^8 米/秒的普遍常数；又令辐射在大气中的速率为 v ，则我们得

$$m = \frac{c}{v}. \quad (1.1)$$

这个比例式是根据光折射的概念而列出的(光折射的概念，在以后都将引用)。对于无线电频率来说，这个比值是随空气电容常数 ϵ 而变的。

在无线电广播频率段(约 1 兆周)，利用上述符号表示出来的关系式，具有下面的简单形式：

$$m^2 = \epsilon. \quad (1.2)$$

为要表示辐射能的路径曲率，我们将要演绎出一些方程式。可以看出，这种曲率是与能量所通过介质的折射率有关。表示能量路径的几何线条，称为射线或一束射线。用射线表示辐射能路径的方法称为射线迹径法。如将构成射线的尺度限定作适当的假定，则射线迹径法在整个电磁光谱中就能普遍地应用了。

限制射线迹径法应用范围的理论条件有两个。如果辐射能正合乎射线迹径法可应用的范围，则采用了射线迹径法会获得合适并正确的结果。两个限制射线迹径法应用范围的条件均与辐射能

的波长有关。因此波长可以用作尺度限制的标准。

第一个条件是：在等于辐射能一个波长的距离内，折射系数的变化必须很小，这时辐射能的路径才能采取射线迹径法表示出来。在本书中，以“ λ ”代表波长、以 z 代表高度，对大气来说， $m^2 \rightarrow 1$ 。如果采取这些符号，则第一个条件可以下式表示：

$$\frac{\lambda}{2\pi} \left| \frac{\Delta m}{\Delta z} \right| \ll 1.$$

这个式子的意义是：在某一固定折射系数铅直梯度时画出的——条射线，则以波长愈短，这条射线愈接近于真实情况。按照这个道理，相对地说可见光波的射线迹径自然比微波的射线迹径更近于真实情况。但就实用上射线迹径法使用的极限来说，凡波长不超过3米的辐射能，还是可以应用射线迹径法的。只是当辐射能的波长大于9米时，由于受到半导电性的地球和电导性的电离层的影响比较显著，这时如采用射线迹径法，就与真实情况相差很远了。上述限制条件的另外一个说法是：较长的波长对于大气中密度差异的细微结构来说并无影响，但对较大厚度的大气来说则有平均影响。

限制几何光学(即射线迹径法)应用范围的第二个条件是：在等于一个波长的间距内，辐射能射线在空间的部分变化必须很细微。这就是说，在射线很快辐合的地区，射线迹径法能否代表真实情况是可疑的。在射线汇集到一个焦点的地区，射线迹径法的代表性更差了。在焦线(见图1.11)上，射线迹径法也难以代表辐射能真实的传播情况(焦线是指从一点发出的各射线所形成的包迹。这些射线所代表的波似乎就在包迹处受到一个面所反映，因此这个面与包迹是重合的)。在这些点或面附近的某一固定几何距离内，光波的波长愈大，射线就愈与真实情况有出入。大气中，在雷达或其他发射机附近，如发射出的放射线束具有可以测量的角宽度，则在这个区域中要应用射线迹径法就如同在焦点区域一样受到限制。至于在波导壁(walls of wave guides)或大气中类似波导壁的区域[即无线电波导管(redio duct)中]就如同在焦线附近一样，不适于

采用射线迹径法。在本章的后面一节，将对无线电波导管这一名词给予解释。

§ 3. 地球折射的理論

干空气的折射系数，在电磁光谱中很宽的波长范围内（包括可见光及微波段），均可以用下式表示之^[5]：

$$(m - 1) \times 10^6 = \text{常数} \times \rho, \quad (1.3)$$

其中 m 和 ρ 分别为干空气的折射系数和密度。根据气体状态方程式， ρ 可以用气压 p 和绝对温度 T 的比例表示。公式(1.3)有理論上的証明。

如果空气并不干燥，其中包含有水汽，则利用水汽压 e ，就可以将极性水分子对于折射率的影响考虑在内。根据理論，如果考虑了水汽，公式(1.3) 就应改成以下形式^(B2)：

$$(m - 1) \times 10^6 = A \frac{p}{T} \left(1 + \frac{B}{T} \frac{e}{p} \right). \quad (1.4)$$

上式中，如 $e = 0$ （即在干空气的情况下），则整个式子又变成(1.3)式，公式(1.4)中 A 与 B 两个常数可以从理論或实验的方法获得。

对于可见光 ($0.4\mu < \lambda < 0.7\mu$) 来说，常数 A 与 B 应分别为：

$$A = 77.5 \left(1 + \frac{5.15 \times 10^{-3}}{\lambda^2} + \frac{1.07 \times 10^{-4}}{\lambda^4} \right),$$

$$\frac{B^{**}}{T} = -0.120,$$

其中 p 和 e 的单位取毫巴、 T 取绝对温度、波长 λ 取微米。如果色散效应不显著， A 值可以认为等于 $79^\circ\text{K}/\text{毫巴}$ ；这个 A 值是相当于在标准状况下（温度为 273°K 、气压为 1013.2 毫巴）钠的黄线 ($\lambda = 0.589\mu$)。

对光谱波长大于 2 厘米的微波部分来说，常数应分别为：

$$A = 79^\circ\text{K}/\text{毫巴},$$

*) 对于可见光波来说， B/T 值很小，可以当作常数看待。

$$B = 4800.$$

从波长大于 2 厘米的微波直到波长约在 3 米左右（相当于频率为 100 兆周/秒）范围内，这两个常数都是可以适用的，超过 3 米的波长就不适用了，因为这时折射效应不显著。

在波长小于 2 厘米的微波区域及红外线区域，由于吸收效应的参入以及不规则色散现象的出现，使折射系数随频率而有很快的改变，因此公式(1.3)就不再有效了。图 1.2 表示了这些吸收区的位置和强度。

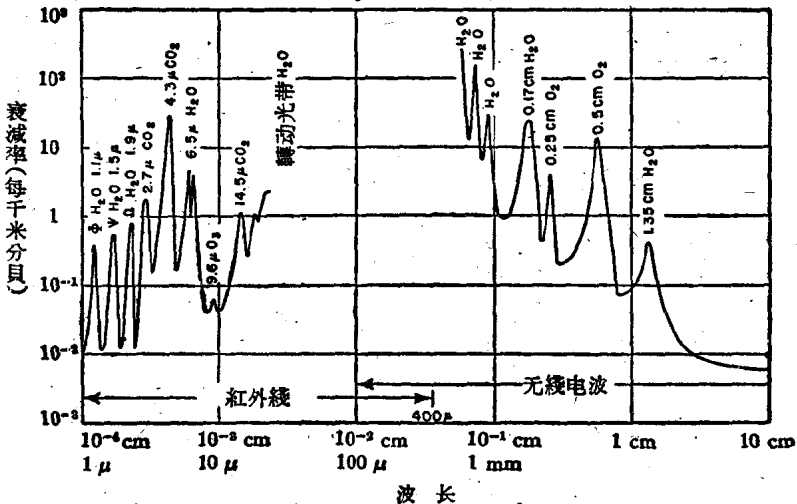


图 1.2 大气中各种气体对于电磁谱中红外线及短波无线电波区的吸收范围。因吸收而产生的辐射能的衰减率以(分贝/千米)为单位。图中的情况是:气温=20℃,气压=1000 毫巴, CO₂ 的体积含量为 0.03%,水汽密度为 7.5 克/立方米。分贝的定义可以用下式表之:

$$1 \text{ 分貝 (Db)} = 10 \log_{10} \frac{E}{E_0},$$

其中 E/E_0 为能量的衰减比例, E_0 为任意选择的一个能量水准.

下面将要談到討論地球折射這一問題的簡單方法。蜃景是气象光学中常用的解釋地球折射的項目。其實蜃景一般虽仅指肉眼看見的一種現象，而在雷達指示器中实际上有时也有同样的大气效应所形成的蜃景存在。

設有一平面波在一个密度随高度而变的干空气中传播。在距离 dz 中空气的密度并不相同,根据公式(1.3),在該距离内的折射系数以及传播速度一定不同,因而射线水平方向的分速必随高度有所改变。这种改变(即 $\frac{dv}{dz}$) 就促使射线的迹线成为弯曲,迹径

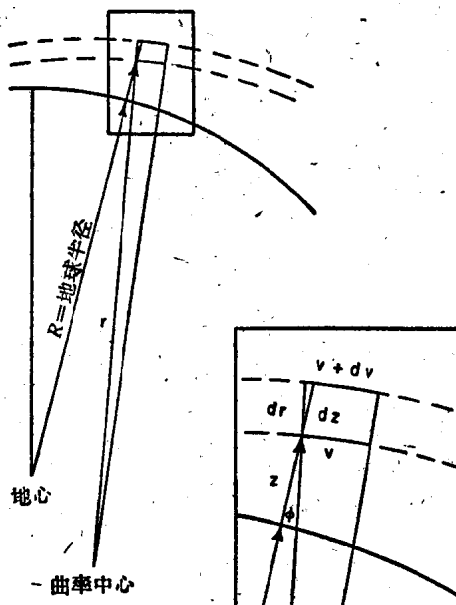


图 1.3 地球折射的几何近似图形。虚线为瞬间射线迹径。这些迹径为半径 r 及 $r+dr$ 的圆弧。在半径为 r 的迹径上,能量速度为 v , 在半径为 $r+dr$ 的迹径上,能量速度为 $v+dv$ 。每一迹径上光线的瞬间角速度是相同的,因而有

$$\text{角速度} = \frac{v}{r} = \frac{v+dv}{r+dr},$$

故得

$$vr + vdr = vr + r dv$$

或

$$\frac{dv}{dr} = \frac{v}{r}.$$

又从图中可得

$$dr = \cos\phi dz.$$

当

$$\phi \rightarrow 0 \text{ 时, } \cos\phi \rightarrow 1,$$

得

$$dr \rightarrow dz.$$

当射线迹径几乎是与地面为同心的时候,这个近似关系是可以采用的。这种特殊情况,即称为地球折射。