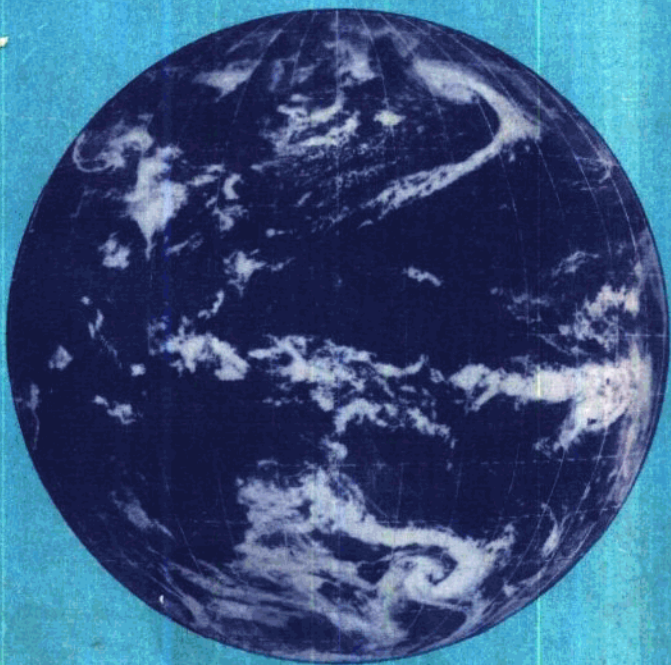


# 大气辐射学

刘长盛 刘文保 编著



南京大学出版社

## 前 言

大气辐射学是大气物理学中一门古老的分支学科，主要研究大气中辐射传输的基本规律和物理过程，以及地球大气系统的辐射能量收支问题。随着科学技术的发展，它在大气科学各学科领域中的渗透与影响日益扩大。辐射是大气与太阳、地球进行能量交换的主要形式，在行星气候的形成中起着关键作用。但由于辐射过程的复杂性，过去在地球气候问题讨论中只能用极其简单的、高度参数化的方法或者藉助于辐射图解来解决某些问题。随着大气辐射传输理论研究的深入以及计算机技术的发展，我们可以用比较精确的算法来处理辐射问题。辐射因子不仅在气候问题中必须考虑，而且在五天以上的中长期天气预报中也必须要考虑在非绝热加热项中辐射因子的影响。在过去几十年中对于晴空大气辐射传输研究得比较透彻，但仍有一些问题，如水汽连续带的吸收、非洛伦兹线型等，还没有很好地解决，影响着计算精度的进一步提高。此外，云在辐射传输中有举足轻重的影响。近20年来关于云中辐射传输的研究有所进展，已有一些较实用的算法，但仍然是初步的。近代卫星和地面遥感技术的发展又反过来促进了辐射传输理论的研究，利用卫星遥感资料反演大气温度廓线时，要求精确测量大气吸收谱和计算高分辨率大气透过率，并进行反演方法的研究，成为辐射传输理论新的应用方面。

本书从辐射的一些基本过程出发，论及辐射在大气、云与气溶胶中的传输问题，介绍一些较好的实用解法以及如何在大气的环流和气候模式中处理和计算辐射问题，讨论了辐射的气候效应以及如何利用卫星的辐射观测资料来研究有关的气候问题。使读者能够了解辐射过程的物理基础，在大气中传输的特点，在各种气象条件下计算大气中辐射传输的有效和实用方法，以及计算中的问题和今后发展趋向。

本书是作者多年来在南京大学对本科生和研究生讲授大气遥感、大气辐射传输课程的基础上，将教材整理编写而成，其中第一、二、四章及附录由刘文保编写，第三、五、六、七章由刘长盛编写，全书由刘长盛校阅。本书插图由石宗祥绘制。由于我们水平有限，书中错误在所难免，恳请读者批评指正。

作者

1989年8月于南京大学

# 目 录

第一章 辐射物理基础.....	1
1.1 电磁辐射.....	1
1.1.1 电磁波谱.....	1
1.1.2 电磁波波动方程.....	3
1.1.3 电磁辐射的能量与辐射度量.....	7
1.1.4 电磁辐射的偏振特性及数学表征.....	11
1.2 热辐射.....	17
1.2.1 黑体辐射.....	18
1.2.2 实际物体的辐射.....	25
1.3 原子和分子辐射.....	25
1.3.1 原子辐射.....	26
1.3.2 分子光谱.....	27
1.3.3 二氧化碳和水汽分子的红外吸收谱.....	30
1.3.4 谱线位置.....	34
1.3.5 谱线强度.....	35
1.3.6 谱线线型函数.....	38
1.3.7 谱线的增宽效应.....	39
第二章 大气中辐射传输特性.....	53
2.1 辐射传输的基本特性.....	53
2.1.1 基本的辐射传输方程.....	53
2.1.2 辐射传输有关物理量的定义.....	56
2.2 大气的吸收作用.....	57

2.2.1	大气模式	57
2.2.2	实际大气吸收谱	71
2.2.3	大气透过率的逐线计算方法	82
2.2.4	大气透过率的带模式计算方法	84
2.2.5	大气透过率的 $k$ 分布计算方法	102
2.2.6	大气透过率的经验模式计算方法	108
2.3	大气的散射作用	110
2.3.1	Rayleigh 散射	111
2.3.2	Rayleigh 散射各特征量的计算	113
2.3.3	Mie 散射	120
2.3.4	Mie 散射特征量的计算	123
2.3.5	散射相矩阵	131
2.3.6	非球形粒子的散射	137
第三章	无云大气中短波辐射的传输	142
3.1	太阳常数和太阳辐射谱	142
3.1.1	太阳常数	142
3.1.2	大气外界太阳辐射谱	144
3.1.3	太阳辐射的变化	147
3.2	大气分子与气溶胶粒子的散射减弱作用	148
3.2.1	大气分子的减弱作用	148
3.2.2	气溶胶的减弱作用	151
3.3	大气臭氧对太阳辐射的吸收及增热作用	156
3.3.1	臭氧的吸收率	156
3.3.2	臭氧含量的铅直分布	160
3.3.3	辐射传输路程中臭氧含量的计算	162
3.3.4	臭氧层吸收的太阳辐射及增热	164
3.4	水汽对于太阳辐射的吸收	167
3.5	地表的反射	170

第四章 无云大气中长波辐射的传输.....	174
4.1 辐射传输方程 RTE .....	174
4.2 辐射传输方程解的计算.....	178
4.2.1 对高度积分.....	178
4.2.2 对角度积分.....	182
4.2.3 对波数积分.....	189
4.3 长波辐射通量密度的实用算法.....	207
4.3.1 Rodgers和Waishaw 的特模式方法.....	207
4.3.2 LOWTRAN 方法.....	215
4.4 非热动平衡状态下的辐射传输.....	221
4.4.1 热动平衡与非热动平衡条件.....	221
4.4.2 非热动平衡状态下的源函数.....	223
第五章 云和气溶胶中辐射的传输(一维问题).....	229
5.1 云模式及其单次散射参量.....	229
5.2 气溶胶模式及其单次散射参数.....	239
5.3 散射相函数的解析表示.....	246
5.3.1 用参数化方程近似表示.....	246
5.3.2 相函数的球函数展开.....	247
5.3.3 引入 $\delta$ 函数的展开.....	248
5.4 传输方程及其解法.....	251
5.4.1 传输方程.....	251
5.4.2 Gauss-Seidel 迭代方法.....	254
5.4.3 二流近似.....	257
5.4.4 离散纵标法.....	269
5.4.5 不变原理.....	276
5.4.6 加倍法.....	291
5.4.7 矩阵算法.....	295
5.4.8 Monte-Carlo 方法.....	301

5.5	与方位有关时传输方程的一般解法	303
第六章	云中辐射传输(三维问题)	305
6.1	三维辐射传输方程	305
6.2	三维辐射传输方程的解	307
6.2.1	Monte-Carlo 方法	307
6.2.2	$\delta$ -Eddington 近似	310
6.2.3	多模传输方程	325
6.3	非连续云层辐射计算的参数化	327
第七章	辐射的气候效应	331
7.1	大气环流模式与气候模式中的辐射计算	331
7.1.1	晴空大气辐射的计算	331
7.1.2	有云或气溶胶大气的辐射计算	335
7.2	气溶胶与云的辐射气候效应	343
7.2.1	气溶胶的辐射气候效应	343
7.2.2	云的辐射气候效应	345
7.3	吸收气体对于大气温度分布的影响	353
7.4	辐射的卫星观测	357
7.4.1	辐射与云	357
7.4.2	地球辐射收支	360
7.4.3	灵敏度因子	365
附录		370
I	基本常数	370
II	日地平均距离处的太阳辐射谱	372
III	气溶胶物质的折射率	378
IV	模式云的单次散射特性	385
参考书目		433
参考文献		435

# 第一章 辐射物理基础

太阳辐射和地球大气辐射虽具有不同的特性，其本质是相同的，它们均为电磁辐射。电磁辐射是以波动和微粒形式表现出的一种能量传送形式。其波动性表现在电磁辐射以波动方式在大气中传播，并发生反射、折射、干涉、衍射、偏振等效应。其微粒性表现在电磁辐射过程、吸收过程发生的气体辐射谱线和吸收谱线、光电效应等。这种双重特性实际正是电磁辐射本质在不同方面的表现，二者同时存在，共同出现于电磁辐射过程中，如波动的频率 $\tilde{\nu}$ 、波长 $\lambda$ 与微粒的能量 $E$ 、动量 $p$ 之间存在着一定关系： $E = h\nu$ ， $p = h/\lambda$ ，说明了波粒二种特性既不相同而又互相联系。

本章简要阐述与大气中辐射过程有关的一些电磁辐射的基本性质。

## 1.1 电磁辐射

### 1.1.1 电磁波谱

电磁辐射的发生是由于电磁振荡、分子热运动、分子或原子内的电子能级跃迁、原子和分子的振动和转动、内层电子跃迁等作用引起的，这些作用产生不同波长的电磁辐射，约从 $10^{-13}\text{cm}$ — $10^{11}\text{cm}$ ，包括了 $\gamma$ 射线、 $x$ 射线、紫外线、可见光波、红外辐射、微波、无线电波等，它们构成整个电磁波



谱, 如图1.1所示。电磁辐射以横波形式在空间传播, 并在真空中具有相同的传播速度。根据波动理论, 有

$$c = \tilde{\nu} \lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1.1)$$

式中  $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$  为真空中波速,  $\lambda$  为波长,  $\tilde{\nu}$  为频率,  $\nu$  为波数, 波数定义为

$$\nu = \frac{1}{\lambda} \quad (1.2)$$

$\nu$  以  $\text{cm}^{-1}$  为单位, 其意义表示 1 cm 空间距离内波的数目, 是光谱学中常用的单位。在红外波段习惯上用波数单位。

根据量子理论, 一个量子的能量为

$$E = h \tilde{\nu} = hc \nu \quad (1.3)$$

式中  $h = 6.6262 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$ , 为 Planck 常数, 因此与一个波数相当的能量值为  $1.9865 \times 10^{-23} \text{ J}$ 。又 1 电子伏特  $= 1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ , 则  $1 \text{ cm}^{-1} = 1.24 \times 10^{-4} \text{ eV}$ 。

频率  $\tilde{\nu}$  的单位为 Hz, 即  $\text{s}^{-1}$ , 在微波区常采用 GHz ( $10^9 \text{ Hz}$ ) 为单位, 30 GHz 微波辐射的波长为 1 cm。

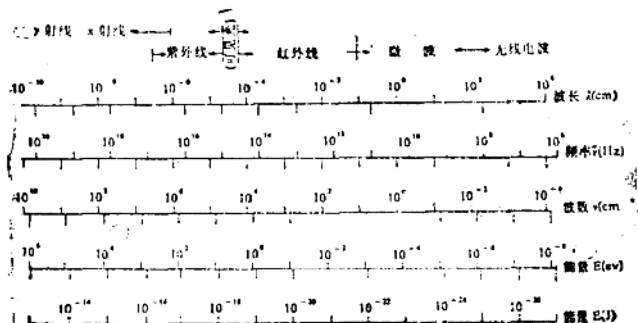


图1.1 电磁波谱

### 1.1.2 电磁波波动方程

Maxwell方程组描述了电磁场的基本规律，由该方程组可解释电磁辐射传播的波动性质及其他特性。

在MKSA有理制中，Maxwell方程组可写为

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon} \\ \nabla \cdot \mathbf{H} &= 0 \\ \nabla \wedge \mathbf{E} &= -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \wedge \mathbf{H} &= \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}\end{aligned}\quad (1.4)$$

式中  $\mathbf{E}$  为电场强度矢量， $\mathbf{H}$  为磁场强度矢量， $\rho$  为电荷密度， $\sigma$  为电导率， $\epsilon$  为介质的介电常数， $\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}' \cdot \bar{\epsilon}_0$ ， $\bar{\epsilon}'$  为相对介电常数， $\bar{\epsilon}_0$  为真空中的介电常数。 $\mu$  为介质的磁导率， $\bar{\mu} = \mu' \mu_0$ ， $\mu'$  为相对磁导率， $\mu_0$  为真空中的磁导率。

由方程组(1.4)可推得电磁波波动方程为

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \bar{\epsilon} \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \nabla \frac{\rho}{\bar{\epsilon}} \quad (1.5)$$

对于平面电磁波，设电矢量  $\mathbf{E}$  在  $x$  方向并在  $xz$  平面沿  $z$  方向传播，如图1.2所示，则有

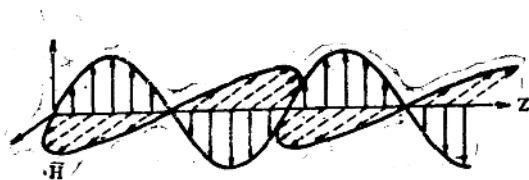


图1.2 平面电磁波

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \sigma\mu \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho}{\epsilon} \right) \quad (1.6)$$

讨论下面三种情况:

(1) 在真空中,  $\epsilon' = 1$ ,  $\mu' = 1$ , 且无自由电荷  $\rho = 0$ ,  $\sigma = 0$ 。则平面电磁波波动方程为:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1.7)$$

所以, 电磁辐射在真空中的传播速度为

$$c \equiv \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.9979 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

(1.7) 式的解为

$$E = E_0 \cos \omega \left( t - \frac{z}{c} \right) \quad (1.8)$$

或写成指数形式

$$E = E_0 e^{i\omega \left( t - \frac{z}{c} \right)} \quad (1.9)$$

式中  $E_0$  为电场振幅,  $\omega$  为振动的圆频率, 它和振动周期  $T$ 、频率  $\tilde{\nu}$  有关系式

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \tilde{\nu} \quad (1.10)$$

(2) 在均匀各向同性介质中,  $\rho = 0$ ,  $\sigma = 0$ ,  $\epsilon = \text{常数}$ ,  $\mu = \text{常数}$ 。则平面电磁波波动方程为

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \bar{\epsilon}\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1.11)$$

所以电磁辐射在介质中传播速度为

$$v \equiv \frac{1}{\sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon'\epsilon_0\mu'\mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'\mu'}} \quad (1.12)$$

因为  $\epsilon' \geq 1$ ,  $\mu' \geq 1$ , 故  $v < c$ , 此时介质的折射率为

$$n \equiv \frac{c}{v} = c\sqrt{\epsilon\mu} = \sqrt{\epsilon'\mu'} \quad (1.13)$$

一般情况下, 在非磁性介质中  $\mu' \simeq 1$ , 则有

$$n = \sqrt{\epsilon'} \quad (1.14)$$

(1.11) 式的解为

$$E = E_0 e^{i(\omega t - \frac{\omega}{v}z)} \quad (1.15)$$

又可写为

$$E = E_0 e^{i(\omega t - kz)} \quad (1.16)$$

式中  $k = \frac{\omega n}{c} = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  为介质中波长。

(3) 在导体中,  $\rho = 0$ ,  $\sigma \neq 0$ 。则在导体中传播的电磁辐射的特性不仅与  $\epsilon$ 、 $\mu$  有关, 尚且与  $\sigma$  有关。此时平面电磁波波动方程为

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \sigma\mu \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.17)$$

将(1.16)式代入上式, 得

$$-k^2 + \omega^2 \epsilon\mu - i\omega\mu\sigma = 0 \quad (1.18)$$

可见在导体中传播的平面电磁波的波矢量  $k$  将为复数形式, 以  $\hat{k}$  表之, 有

$$\hat{k} = \omega^2 \mu \left( \epsilon - i \frac{\sigma}{\omega} \right) = \omega^2 \mu \hat{\epsilon} \quad (1.19)$$

式中  $\hat{\epsilon}$  表示复数形式的介电常数,

$$\hat{\epsilon} = \epsilon - i \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.20)$$

由此折射率亦将表示为复数形式  $\hat{n}$ ,

$$\hat{n}^2 = \hat{\epsilon} \mu c^2 \quad (1.21)$$

若以  $n_r$ ,  $n_i$  分别表示  $\hat{n}$  的实部与虚部, 则

$$(n_r - in_i)^2 = \left( \hat{\epsilon} - i \frac{\sigma}{\omega} \right) \mu c^2 \quad (1.22)$$

故

$$\begin{cases} n_r^2 - n_i^2 = \epsilon \mu c^2 \\ n_r n_i = \frac{\sigma \mu c^2}{2 \omega} \end{cases} \quad (1.23)$$

得

$$n_r^2 = \frac{\mu c^2}{2} \left[ \epsilon + \sqrt{\epsilon^2 - \frac{\sigma^2}{\omega^2}} \right] \quad (1.24)$$

$$n_i = \frac{\sigma^2 c^2}{2 \omega^2} \frac{1}{\left[ \epsilon + \sqrt{\epsilon^2 - \frac{\sigma^2}{\omega^2}} \right]} \quad (1.25)$$

则方程式(1.17)的解为

$$\begin{aligned} E &= E_0 e^{i\omega \left( t - \frac{\hat{n}}{c} z \right)} \\ &= E_0 e^{-\frac{\sigma n_i}{c} z} e^{-i\omega \left( t - \frac{n_r}{c} z \right)} \end{aligned} \quad (1.26)$$

式中  $e^{-\frac{\sigma n_i}{c} z}$  表示振幅衰减项, 即随着传播距离  $z$  的增大,

电磁波振幅按指数衰减，电磁波传播过程中能量按  $e^{-\frac{2\omega n_i}{c}z}$  衰减。其中  $\frac{2\omega}{c}n_i = \frac{4\pi}{\lambda_0}n_i = A$  称为吸收系数， $\lambda_0$  为真空中波长。所以，折射指数虚部  $n_i$  可表示吸收系数的大小。

### 1.1.3 电磁辐射的能量与辐射度量

#### (1) 电磁辐射能量

电磁波的传播即电磁辐射能量的传递过程，通常以能流密度表示电磁辐射能量流的强弱。在单位时间内通过与辐射传播方向垂直的单位截面积的能量称为能流密度，在电磁学中称为 Poynting 矢量，常以  $S$  表示。在 MKSA 有理制下

$$S = E \wedge H \quad (1.27)$$

$S$  的方向表示电磁辐射能量传递的方向，其数值表示电磁辐射能流密度的大小，单位为焦耳·秒<sup>-1</sup>·米<sup>-2</sup>(J·s<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>)或瓦·米<sup>-2</sup>(W·m<sup>-2</sup>)。

由(1.27)式可得

$$S = E_0 H_0 \cos^2(\omega t - kz) \quad (1.28)$$

上式表示电磁辐射的瞬时能流密度。在电磁辐射传播的一个周期中，其平均值为

$$\begin{aligned} \bar{S} &= \frac{1}{T} \int_0^T S dt \\ &= \frac{E_0 H_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2(\omega t - kz) dt \\ &= \frac{1}{2} E_0 H_0 \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_0^2 \end{aligned} \quad (1.29)$$

可见电磁辐射能流密度与电场振幅平方成正比关系。

## (2) 辐射度量

在描述辐射场能量时常用的辐射度量和单位列于表 1.1 中。

表 1.1 辐射度量及其单位

辐射度量	符合及定义	单 位	量 纲
辐射能量	$U$	焦耳(J)	$ML^2T^{-2}$
辐射通量	$\phi = \frac{dU}{dt}$	瓦(W)	$ML^2T^{-3}$
辐射通量密度	$F = \frac{d\phi}{d\sigma}$	瓦·米 <sup>-2</sup> (W·m <sup>-2</sup> )	$MT^{-3}$
角辐射强度	$I_{\Omega} = \frac{d\phi}{d\Omega}$	瓦·球面度 <sup>-1</sup> (W·sr <sup>-1</sup> )	$ML^2T^{-3}$
面辐射强度	$I = \frac{d^2\phi}{\cos\theta d\sigma d\Omega}$	瓦·米 <sup>-2</sup> ·球面度 <sup>-1</sup> (W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup> )	$MT^{-3}$

(a) 辐射通量( $\phi$ )——指单位时间内在空间方向上传输的辐射能量

$$\phi = \frac{dU}{dt} \quad (1.30)$$

$U$  表示经辐射传输的能量,  $\phi$  表示辐射通量, 其单位为焦耳·秒<sup>-1</sup>(J·S)或瓦(W)。

(b) 辐射通量密度( $F$ )——指单位时间内通过单位面积的辐射能量

$$F = \frac{d\phi}{d\sigma} \quad (1.31)$$

$\sigma$  表示面积,  $F$  表示辐射通量密度, 其单位为瓦·米<sup>-2</sup>(W·m<sup>-2</sup>), 它与 Poynting 矢量具有相同的量纲。

辐射通量密度  $F$  既可表示照射在单位面积上的辐射通

量，亦可表示为单位面积发射或反射的辐射通量。

(c)角辐射强度( $I_o$ )——定义为点源在某一特定方向上单位立体角内发射的辐射通量，它表示点源在一定方向上的辐射强度(图1.3)。

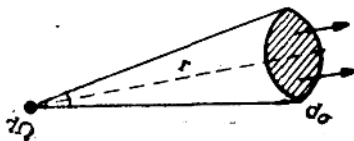


图1.3 点源的辐射

$$I_o = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (1.32)$$

上式中 $\Omega$ 表示立体角，立体角是这样定义的：以源为顶点的锥体在半径为 $r$ 的球面上的截面积为 $d\sigma$ ，则该锥体的立体角为

$$d\Omega = \frac{d\sigma}{r^2} \quad (1.33)$$

立体角的单位为球面度，以符号sr表示，为一无量纲量。球心对全空间所张立体角为 $4\pi$ 球面度。当 $d\sigma = 1\text{m}^2$ ， $r = 1\text{m}$ 时。 $d\Omega$ 就等于一个球面度。

$I_o$ 表示角辐射强度，其单位为瓦·球面度 $^{-1}$ ( $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ )。

(d)面辐射强度( $I$ )——定义为面源在辐射传输 $r$ 方向上单位立体角内发射的通过垂直于 $r$ 方向的单位面积的辐射通量，它表示面源在一定方向上的辐射强度(图1.4)。

$$I = \frac{d^2\phi}{\cos\theta d\sigma d\Omega} = \frac{dF}{\cos\theta d\Omega} \quad (1.34)$$

图(1.4)中 $n$ 为面源面积 $d\sigma$ 的法线方向， $r$ 为辐射传输方向， $\theta$ 为 $n$ 与 $r$ 二个方向之间的夹角。 $I$ 表示面辐射强度，



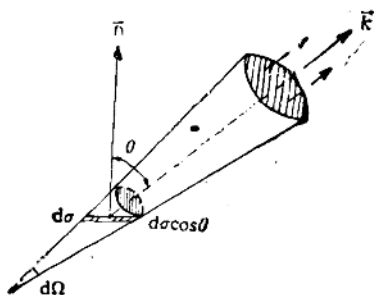


图1.4 面源的辐射

其单位为瓦·米<sup>-2</sup>·球面度<sup>-1</sup>(W·m<sup>-2</sup>·sr<sup>-1</sup>)。

在各向同性辐射情况下，辐射强度大小与方向无关，则  
 可得到由面源  $d\sigma$  上单位面积发射的总辐射功率为

$$F = \int_0^{4\pi} I \cos\theta d\Omega \quad (1.35)$$

在球坐标系  $(r, \theta, \varphi)$ ，面积元  $d\sigma = r^2 \sin\theta d\theta d\varphi$ ，  
 $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ ，则

$$F = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} I \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \quad (1.36)$$

得

$$F = \pi I \quad (1.37)$$

上式说明在各向同性辐射场中，通过表面向半球空间辐射的  
 总辐射通量密度为面辐射强度的  $\pi$  倍，此种与方向无关的辐射  
 源称为 Lambert 源。

此外，若以  $F(\lambda)$  和  $I(\lambda)$  分别表示谱辐射通量密度和谱  
 辐射强度，则总辐射通量密度和总辐射强度将为

$$F = \int_0^{\infty} F(\lambda) d\lambda \quad (1.38)$$