

遥
感
手
册
第
二
分
册



遥感手册

第二分册



国防工业出版社

7.9073
559

87.9073
659

遥 感 手 册

第 二 分 册

〔美〕 菲 利 普 N. 斯 莱 特 等 著

陈 宁 锵 等 译

刘 益 悟 等 校



國防工業出版社

1109931

内 容 简 介

本书较全面系统地介绍了遥感技术的各个方面，共分十二个分册出版。全书内容丰富，具有一定的深度。

第二分册包括第六、第七和第八章。第六章讨论摄影过程的理论，航空胶片的物理性质、光学设计和象质评定等，以及各种类型的遥感用照相机。第七章介绍探测器的分类，换能器的工作原理，以及摄像管的类型和特性。第八章讲述成象和非成象传感器、光机扫描仪和辐射定标。

本书可供从事这方面工作的科研、工程技术人员及大专院校有关专业的教师和研究参考。

0036/08

Manual of Remote Sensing
Philip N. Slater et al.
American Society of Photogrammetry 1975
遥 感 手 册
第 二 分 册
〔美〕 菲 利 普 N. 斯 莱 特 等 著
陈 宁 彬 等 译
刘 益 悟 等 校

国防工业出版社 出版
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 $1/16$ 印张13 $1/2$ 插页1 313千字
1982年2月第一版 1982年2月第一次印刷 印数：0,001—4,300册
统一书号：15034·2271 定价：1.45元

译者的话

美国摄影测量学会集中了数以百计的有关科学家和工程技术人员,从1969年开始,花了近六年时间,编辑并于1975年出版了这本遥感手册。遥感技术作为一门新兴学科,随着空间科学技术的发展,近十多年来进展很大,获得了多方面的应用,对促进国民经济发展和国防建设都有很大作用。因此,当前世界各国都对它给予了必要的重视。在遥感领域中,本手册是迄今较为全面而在技术上又有一定深度的书。为配合我国遥感技术的发展,我们请各方面的同志共同翻译并出版这本手册,以供有关科研、教学和工程技术人员参考。由于遥感技术本身是一门新学科,应用范围又特别广,加之我国在这方面的发展起步不久,有些定名和理解可能还须商榷。

原书分上、下两卷出版,计二十六章加一个遥感小辞典。我们考虑到编辑出版的方便,分十二个分册出版:

- 第一分册 遥感基础 (第一至第五章);
 - 第二分册 光学和电-光遥感器 (第六至第八章);
 - 第三分册 微波遥感器 (第九章);
 - 第四分册 遥感器的运载工具、数据传输及遥感地面研究(第十、第十一和第十三章);
 - 第五分册 遥感数据的处理与管理 (第十二章);
 - 第六分册 图象判读和制图 (第十四和第十五章);
 - 第七分册 遥感应用:地质勘测 (第十六章);
 - 第八分册 遥感应用:森林与草原 (第十七和第十八章);
 - 第九分册 遥感应用:水文学与海洋学 (第十九和第二十章);
 - 第十分册 遥感应用:气象学及作物与土壤 (第二十一和第二十二章);
 - 第十一分册 遥感应用:城市环境与区域工程规划 (第二十三和第二十四章);
 - 第十二分册 遥感应用:区域分析与社会科学 (第二十五和第二十六章)。
- 本书封面特约张博智同志设计。

目 录

第六章 摄影遥感系统

1. 引言	1
2. 基本概念	1
2.1 照相机分光辐射度学	1
2.2 航空相机光学	10
2.3 大气效应	20
2.4 光谱特征	29
3. 航空摄影胶片	34
3.1 黑白航空胶片	34
3.2 彩色航空胶片	44
4. 遥感用的照相机	57
4.1 普通航空照相机	57
4.2 多谱段照相机	92
5. 滤光片	112
5.1 防晕映滤光片	112
5.2 光谱滤光片	113
5.3 偏振滤光片	117
参考文献	118

第七章 电-光遥感器与摄象管

1. 基本概念	121
1.1 探测器的分类	121
1.2 品质因数	127
1.3 噪声	128
1.4 换能器的工作机理	131
1.5 探测器阵列	135
1.6 灵敏度和噪声输入	137
1.7 低温问题	138

1.8 光学遥感器中辐射功率传输的 性能参数	139
---------------------------------	-----

2. 摄象管和器件	142
2.1 摄象管的类型	142
2.2 摄象管的特性	144
2.3 可用的摄象管	148
2.4 电视摄象机和遥感器	157
2.5 可用的成象器件	164
参考文献	172

第八章 成象和非成象遥感器

1. 引言	173
2. 遥感器原理	173
2.1 类别	173
2.2 组件及其相互关系	173
3. 非成象遥感器	174
3.1 通用仪器	174
3.2 辐射计和分光计应用实例	177
4. 光机扫描仪	182
4.1 光机扫描仪特性	183
4.2 扫描仪种类	188
5. 辐射定标	200
5.1 定标参数	201
5.2 定标分类	202
5.3 定标技术	203
5.4 飞行定标源的实验室定标	208
5.5 定标转换技术和现有的标准	208
参考文献	211

9520011

第六章 摄影遥感系统

作者 菲利普·N·斯莱特等

1. 引言

与摄影测量和航空侦察这些领域不同,有关摄影遥感方面的参考书很少。有鉴于此,本章将通过基本概念和技术、照相机系统的考虑以及照相机系统本身的讨论,来着重说明摄影遥感的基本原理。由于篇幅的限制,有关照相机分系统的工程技术和测试方法以及摄影光学和物理光学方面的许多问题就不作赘述了。照相机稳定支架、快门、取景器、定时器、速高比传感器、象移补偿装置和数据注记器等内容也都略去;所以本章只讨论摄影过程的理论、航空胶片的物理性质、光学设计和象质评定等。

本章将要叙述照相机分光辐射度学方面的内容。其基本概念在一般光学教科书中可以找到,但这些教科书没有说明本文所涉及的高高空摄影的复杂情况。直到最近,这方面的术语、符号和单位在国际上还没有统一。详细介绍上述内容的主要理由有二:首先,摄影遥感的主要内容及若干有关方面的问题尚未获得完整的了解或正确的理解;其次,本文介绍的许多数学方程可以用来解释从遥感数据推得的地面场景辐射率或光谱特征的信息。光谱特征的确定为进一步发展象片判读的识别和测量技巧以及供编制地形图用的摄影测量技术增添了新内容。

本章的后面几节将讨论影响透过大气的地面场景辐射率测量的若干因素。对于用户来说,当然还要考虑诸如摄影光学、摄影胶片 and 摄影遥感系统等方面的重要内容,不过重点仍放在地面场景辐射率的定量测量上。

2. 基本概念

2.1 照相机分光辐射度学

在遥感技术中,照相机是用于侦察、地图绘制和光谱特征测定的重要工具。在测定光谱特征时,只是应用照相机分光辐射度学的若干性质。而对侦察和制图来说,则要考虑使象面上获得正确的曝光量和均匀光谱辐照度。

本章中叙述的一些基本概念,在第三、第十和第十一章里也会出现。各章中出现重复叙述为的是使读者能按各章的主题更好地掌握这些重要概念。

在下述的讨论中[●],将用辐射度学和几何光学的基本概念来讨论航空照相机的分光辐射度学的性质。这里所用的国际上接受的辐射度学和光度学术语及符号就是第三章中所引

● 某些章节可能会出现某些混淆,辐射度学的物理量是分别以 e 和 v 作为下标的光度学量来微分的。下标 λ 表示波长间隔(微米)。括号中的符号 λ 代表波长的函数。下标 r 和 i 分别表示反射和入射的量。在没有特别说明的情况下,下标 O 表示目标, I 表示象。每当包含上述定义中的各种依赖关系时,辐射度量的微分记号,如 $d^2\Phi$ 和 $d\Phi$ 等将在以下的正文中普遍使用。

用的和《美国标准 RP-16》⁽⁹⁸⁾中所介绍的。有关摄影学中遇到的辐射度学的若干物理定义列于表 6-1 中。

表6-1 辐射度学量的定义

辐射度量	符 号	定 义	单 位	单位符号
辐 射 能	Q		焦耳 (尔格)	J
辐射通量	Φ	$\frac{dQ}{dt}$	瓦 (尔格/秒)	$W(\text{erg} \cdot \text{sec}^{-1})$
辐 照 度	E	$\frac{d\Phi}{dA}$	瓦/米 ²	$W \cdot m^{-2}$
辐射强度	I	$\frac{d\Phi}{d\omega}$	瓦/立体弧度	$W \cdot sr^{-1}$
辐 射 率	L	$\frac{d^2\Phi}{d\omega dA \cos\theta}$ 或 $\frac{dI}{dA \cdot \cos\theta}$	瓦/立体弧度/米 ²	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$
反 射 比	ρ	$\frac{\Phi_r}{\Phi_i}$		

2.1.1 分光辐射度学理论

遥感技术所涉及的许多物理量可以通过对被测表面的某一给定区域所发出的辐射通量 Φ 的测量来确定；对于点辐射源，需要测量的只有单位立体角的辐射通量。有关立体角测量的概念曾在第三章中与球面度的定义一起作过介绍。让我们回顾一下，假如点辐射源位于球心 S 处，则球面的辐照度将随球半径 r 的平方而减小，这就是熟知的平方反比定律。一般说来，摄影遥感系统中，用户所涉及的将是延展的表面（面辐射波）。下面就要指出，在这种情况下，平方反比律就不再适用了。此时，图象的辐照度将正比于孔径和照相机物镜焦距比值的平方。

在摄影学这一特定情况下，即对于波长大约小于 1 微米的情形，出射通量将等于表面上接受的太阳直射辐射及大气散射辐射的辐射通量与表面反射比 ρ 的乘积，如图 6-1 所示。正如第三章所讨论和图 6-2 所表示的那样，设入射辐射的反射而引起的 P 处的辐射率

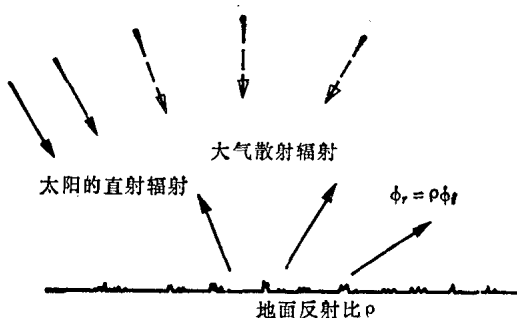


图6-1 地面上的反射，其中 Φ_i 为入射到地面上的太阳直射辐射和大气散射辐射之和

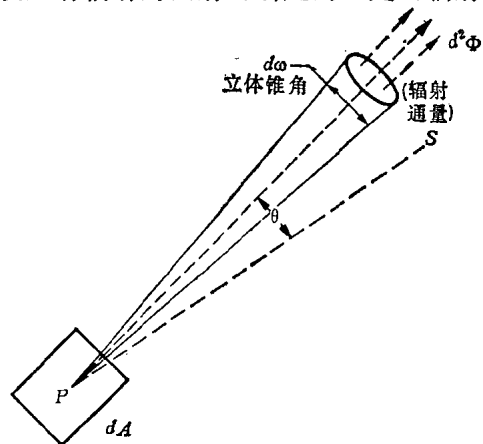


图6-2 确定从单元表面 dA 上发射的辐射通量的几何图形，其中 PS 垂直于 dA

为 L (瓦·立体弧度⁻¹·米⁻²), 则 P 处出射的辐射通量 $d^2\Phi$ 可表示为辐射率 L 、垂直于摄影方向的面元的投影 $dA \cdot \cos \theta$ 以及 P 处所张的立体锥角 $d\omega$ 的乘积

$$d^2\Phi = L \cos \theta dA d\omega \quad (6-1)$$

方程 (6-1) 是表 6-1 中所示的辐射率 L 的一种表示方式。

在将方程 (6-1) 应用于航空摄影之前, 必须确定出太阳和天空引起的地面辐射率与表面辐照度之间的关系。

首先须要叙述的是表面反射比的性质。与某一给定波长对应的表面反射比的测量值将取决于辐射源、表面和探测器位置的几何关系, 以及辐照度的偏振程度和表面辐照度的光谱分布。现在忽略这些因素, 假设表面辐照度是不偏振的, 而且测量时将采用单色或窄谱段的辐射。另外还将进一步假设所考虑的表面是理想的漫反射表面, 即类似于积雪或云层、表面粗糙的玻璃等。

许多天然地域可近似地认为是漫反射体 (表 6-5); 但水面和某些人造目标则不能当作漫反射体, 与它们相应的反射辐射通量的分布将介于图 6-3(b) 和图 6-3(c) 之间。当入射线与反射线处于同一平面上并且入射角等于反射角时, 在这些漫反射体的反射分布上将出现峰值, 与该峰值对应的反射分量又称镜面反射分量。朗伯定义了一种理想的漫反射表面, 在该表面上绕法线的任一反射角 θ 的辐射率都保持不变, 这种表面以后通称为朗伯表面。于是, 方程 (6-1) 所给出的就是面积为 dA 、辐射率为 L 的朗伯表面的辐射通量 $d^2\Phi$ (瓦); 沿表面法线方向将得最大值 $LdAd\omega$ 。 $d^2\Phi$ 的轨迹是直径为 $LdAd\omega$ 的圆周, 当 $\theta = 90^\circ$ 时, $d^2\Phi = 0$ 。在通常的三维情况下, 表面辐射通量的分布是球对称的。

现在假设图 6-4 中的朗伯表面元 dA 受到辐射率为 E (瓦·米⁻²) 的辐照, 则面元 dA 在与表面法线的夹角为 θ 的方向所出射的辐射通量可由方程 (6-1) 导出。因为面元 dA 上球面环带所对的单元立体角 $d\omega$ (图 6-4) 可表示为

$$d\omega = \frac{2\pi r \sin \theta (r d\theta)}{r^2} \quad (6-2)$$

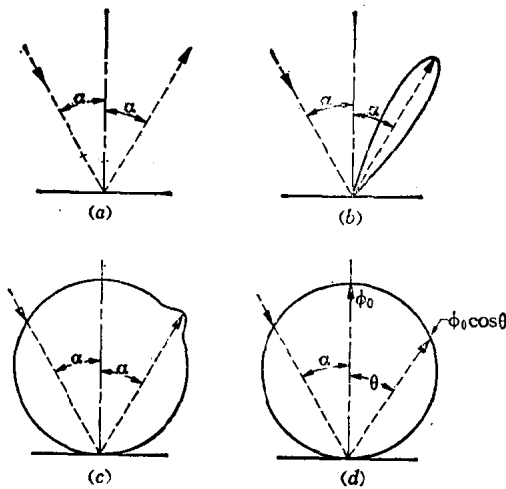


图 6-3 来自不同类型的反射表面的反射辐射通量的分布
(a) 理想的镜面反射体; (b) 接近理想的镜面反射体;
(c) 接近理想的漫反射体; (d) 理想的漫反射体。

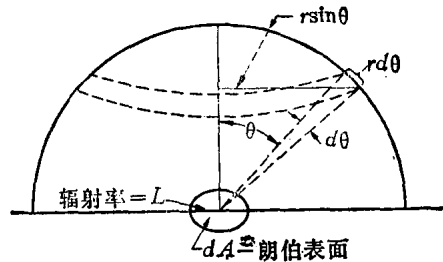


图 6-4 辐射率为 L 的朗伯表面 dA 所发射的辐射通量的半球截面图

则出射到半球面上的总辐射通量(瓦)可由下式给出:

$$d\Phi_h = 2\pi \int_0^{\pi/2} L dA \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta = \pi L dA \quad (6-3)$$

式中下标 h 代表整个半球。

总反射辐射通量与表面上入射通量 $d\Phi_i = E dA$ 之比定义为表面的漫反射比, 即

$$d\Phi_h/d\Phi_i = \rho = \pi L/E \quad (6-4)$$

表面出射和入射的辐射通量的光谱分析, 在上面推导中并未考虑。这些量的比值正比于表面的光谱反射比 $\rho(\lambda)$ 。它与波长的数学关系式为

$$\rho(\lambda) = \pi L_\lambda/E_\lambda \quad (6-5)$$

于是表面辐射率的光谱分布 L_λ (瓦·米⁻²·立体弧度⁻¹·微米⁻¹) 既依赖于表面的光谱反射比 $\rho(\lambda)$, 也依赖于入射辐照的光谱分布 E_λ (瓦·米⁻²·微米⁻¹)。

正如第四章中所指出的, 光谱反射比及其有关的若干物理量在遥感中广泛地用于描述地面的特性。例如, 当使用多谱段照相机时, 可以在 4 个谱段 (每个谱段的带宽为 0.1 微米) 对同一地域表面进行拍照。此时借助于摄影学中的感光度学和显微密度测定技术可以给出这 4 个谱段中每个谱段入射到底片上的地域表面图象辐照度的一系列数值。

这些光谱辐照度值在进行照相机的分光辐射度学校正以及大气效应的校正时, 对应于地面特征的光谱辐射率值, 它们通称为地表的光谱特征。应该注意到, 有时候给出的一组光谱特征并不是正确的。在任何场合都务必强调: 对于一给定的地面特征, 光谱特征并不是恒定不变的。它既与地面特征上入射通量的大小和光谱分布有关, 还与相对地面的太阳高度角和照相机视角之间的几何关系有关。诸如地面特征的偏振性质之类的因素还会进一步增加光谱特征的可变性。本章下面将会指出, 采用所谓比例调制技术往往可以减小上述因素所引起的变化。

(1) 在航空摄影中的应用

现在考虑航空摄影的一般情况。对于航空摄影来说, 照相机的光轴相对于地面法线的倾斜角为 β (图 6-5)。设地面为平面, 从直径为 D 、焦距为 f 的镜头到面积为 dA_0 (下标 0 表示目标, 下标 I 表示图象) 的地表的距离为 R , 视场角为 α , 目标处的垂线与视场角为 α 的镜头入射光线之间的夹角为 θ 。

将方程 (6-1) 改写后, 可以给出从光谱辐射率为 L_λ 的地表出射而又被镜头所接收的光谱辐射通量 $d\Phi_\lambda$ 。于是, 参照图 6-5, 并采用第三章所介绍的立体角近似公式 (本章都使用这近似公式), 则有

$$d\Phi_\lambda = L_\lambda (dA_0 \cos \theta) \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{\cos \alpha}{R^2} \text{ (瓦·米}^{-2}\text{·立体弧度}^{-1}\text{·微米}^{-1}\text{)} \quad (6-6)$$

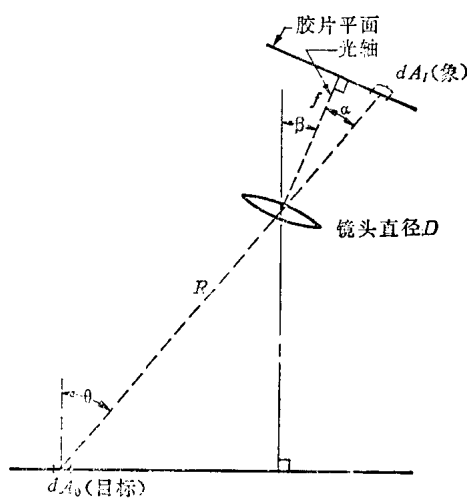


图 6-5 用倾斜照相机对离轴地面景物进行航空摄影的图解表示

现在, 若假设镜头无辐射损失, 则上述接收的通量将全部入射到象元 dA_I 上。于是方程 (6-1) 对目标和象都适用, 此时, 目标投影面积和镜头在目标上所张的立体角的乘积等于象的投影面积和镜头在象上所张的立体角的乘积, 即

$$dA_I \frac{\cos^3 \alpha}{f^2} = dA_0 \frac{\cos \theta}{R^2} \quad (6-7)$$

因此, 入射到象元上的光谱辐射通量为

$$d\Phi_\lambda = \frac{\pi}{4} L_\lambda dA_I \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cos^4 \alpha \quad (6-8)$$

象元上光谱辐射通量的另一来源为天空光谱辐射率 $L_{\lambda s}$ 。在把 $L_{\lambda s}$ 的作用包括进去时, 方程 (6-8) 就变为

$$d\Phi_\lambda = \frac{\pi}{4} dA_I \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cos^4 \alpha (L_\lambda + L_{\lambda s}) \quad (6-9)$$

现在, 对朗伯表面来说, 光谱辐射率 L_λ 和光谱辐照度 E_λ (包括太阳辐射和天空辐射的作用) 之间的关系可根据方程 (6-5) 写成

$$L_\lambda = \rho(\lambda) \frac{E_\lambda}{\pi} \quad (6-5)$$

式中 $\rho(\lambda)$ ——地表的光谱漫反射比。

此外, 大气的光谱透射比 $\tau_a(\lambda)$ 和镜头-滤光片组合的光谱透射比 $\tau_o(\lambda)$ 也可以加到方程 (6-9) 中去, 于是得

$$d\Phi_\lambda = \frac{dA_I \cos^4 \alpha [E_\lambda \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) + \pi L_{\lambda s}] \tau_o(\lambda)}{4N^2} \quad (6-10)$$

式中 $N = f/D$, 称为镜头的相对孔径。

f/D 的数值就是镜头的 f 数。因此, 若镜头的有效焦距为有效孔径的两倍, 则相对孔径可写成 $f/2$, 即 f 数为 2。

假如考虑某一特定的谱段 $\Delta\lambda$ (从 λ_1 到 λ_2), 则如同处理方程 (3-33) 那样, 可以由方程 (6-10) 对与波长有关的各个因子的影响进行累加。于是, 在所考虑的谱段内, 入射到象元上的总光谱辐射通量可写成

$$d\Phi_{\Delta\lambda} = \frac{(dA_I \cos^4 \alpha)}{4N^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [E_{\lambda s} \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) + \pi L_{\lambda s}] \tau_o(\lambda) d\lambda \quad (6-11)$$

而象元的光谱辐照度 E_I 可由下式获得:

$$E_{I\Delta\lambda} = \frac{\cos^4 \alpha}{4N^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [E_{\lambda s} \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) + \pi L_{\lambda s}] \tau_o(\lambda) d\lambda \quad (6-12)$$

这是一个基本表达式, 在这一节的后面还会提到它。

有关这一问题的另一种表述方法, 读者可参看第四章。

(2) 更详细的考虑

由于方程 (6-12) 中包含因子 $\cos^4 \alpha$ 、 $\tau_o(\lambda)$ 和 N^2 , 人们可能会误解那些影响 $E_{I\Delta\lambda}$ 值的与照相机有关的一切因素都已经考虑到了。实际上, 杂散光的影响、渐晕影响以及对 $\cos^4 \alpha$ 的偏离都可能是很显著的。因此, 下面将讨论象平面光谱辐照度的更一般的表示式。

方程 (6-12) 表明, 象平面上的光谱辐照度正比于照相机的光谱透射比和入射到照相机上光谱辐射通量的乘积。实际上, 辐射通量的一部分将被镜头元件吸收, 而不透视过去,

另外还有一部分将被反射到照相机的外部。更为重要的是光学表面的缺陷（诸如表面上的灰尘、划痕和透镜材料的微观不均匀性，等等）引起的光散射而导致的光谱透射比的损失。此外，还有透镜表面、照相机胶片、框架、光阑、快门的表面和边缘等表面反射和多次反射。这些杂散光源或光斑将在象平面上产生附加的光谱辐照度 $E_{\lambda f}$ ，它会降低象的对比度，这就是平常所讲的模糊光。除了上述杂散光的影响以外， $E_{\lambda f}$ 还受镜头的设计、光学加工和镀膜、 f 数、视场光阑位置和谱段的影响。

例如，设 $E_{\lambda f}$ 为 5%，这是典型的杂散光数值；就是说，在理想黑体上叠加 5% 的照度。于是，与 100:1^① 的目标反差，对应的照相机杂散光系数（其定义为目标反差与构象反差之比）的值为 6，而与 2:1 的目标反差对应的值为 1:1。大气散射的辐射率 L_s 所引起的地面景物反差通常为 2:1 或更小些，所以航空照相机的杂散光系数往往接近 1。然而附加光谱辐照度即使只有象平面辐照度的百分之几，对精确的分光辐射测量来说仍是必须加以考虑的。

渐晕现象（定义见本节的后面）与视场角及 f 数有关。这里将用符号 $K_N(\alpha)$ 来表示渐晕参量。于是后面要讨论的 $\cos^4\alpha$ 关系可以进行修正；为了获得更普遍的应用，将以 $\cos^n\alpha$ 来代替， n 值通常介于 2.5 和 4 之间。于是以 $\cos^n\alpha$ 代入方程 (6-12)，使得象平面光谱辐照度的更普遍的表达式

$$E_{e\lambda\Delta\lambda} = \frac{K_N(\alpha)\cos^n\alpha}{4N^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [E_{e\lambda\rho}(\lambda)\tau_A(\lambda) + \pi L_{e\lambda s}\tau_0(\lambda)]d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e\lambda f}d\lambda \quad (6-13)$$

这一普遍表达式是为了防止照相机分光辐射度计算过于简化而提出来的。但在本章的其余部分，为方便起见仍常用方程 (6-12)。在实际使用时，方程 (6-12) 应扩展成包含尽可能多的象方程 (6-13) 中那样的，在所考虑的情况下是十分重要的附加因子。

2.1.2 光度学参数的使用

发光辐射这一特定情况应引起注意，在这种场合，可以使用光度学的术语和单位，于是方程 (6-11) 可写成

$$d\Phi_v = \frac{dA_i \cos^4\alpha}{4N^2} (E_v \rho \tau_A + \pi L_v) \tau_0 \quad (6-14)$$

式中 Φ_v ——光通量，流明 (lm)；

E_v ——光照度，流明/单位面积；

L_v ——发光率，烛光^② (cd)/透镜接收的天空光的单位面积；

ρ ——地面目标反射比。

τ_0 和 τ_A 分别为光学系统透射比和大气透射比。

同样，

$$E_{vI} = \frac{\cos^4\alpha}{4N^2} (E_v \rho \tau_A + \pi L_v) \tau_0 \quad (6-15)$$

① 在这种情况下，目标不是理想黑体，因为它还包含着 1% 的外界辐射率。如果象包含着 5% 的附加辐照度，则目标与构象反差之比等于 6。因为外界的面积比目标的面积大得多，所以来自大面积外界的辐射损失被认为是可以忽略的。对 2:1 的情况可以作同样的论证。

② 发光率的国际单位制 (SI) 单位是烛光 (cd)，即铂在 2046K 凝固时，黑体辐射体每平方厘米的发光强度规定为 60 烛光（更严格的关系是，一个老国际烛光等于 58.9 烛光）。

式中 E_v ——象平面的光照度, 流明/单位面积。

方程 (6-15) 还可写成

$$E_v t = \frac{t \cos^4 \alpha}{4N^2} (E_v \rho \tau_d + \pi L_v) \tau_0 \quad (6-16)$$

式中 E_v 的单位为勒克司;

t 为曝光时间 (秒);

L_v 的单位^② 为烛光/米²。

在辐射测量方面, 有两种不同的测量概念, 基于这两种不同的概念, 有两组不同的术语和单位, 其一为瓦特 (辐射度学), 另一为流明 (光度学)。由于一些科学家固执地使用英尺-磅-秒单位制, 致使许多结果变得相当混乱。为了使测试结果标准化, 用米制单位表示辐射度学参数的努力, 至今仍然只取得了部分的成功。由于许多制造商仍采用光度学术语表示光电探测器和摄影胶片的灵敏度, 所以许多重要数据在很大范围内仍以其它方式来表示。利用适当的变换因子, 方程 (6-16) 也可以重新写成

$$E_v t = \frac{2.7 t \cos^4 \alpha}{N^2} (E_v \rho \tau_d + L_v) \tau_0 \quad (6-17)$$

在这种情况下, 单位是混杂的, 式中 $E_v t$ 为勒克司·秒, E_v 为英尺·烛光, L_v 为英尺·朗伯。

由于 E_v 和 L_v 经常采用上述单位, 而胶片制造商又经常以勒克司·秒的倒数来表示胶片的感光速度, 所以这种公式形式都包含了。

(1) 辐射度学与光度学单位的变换

可以从光度学单位变换到辐射度学单位, 或者从辐射度学单位变换到光度学单位, 这一点是十分重要的。为了进行这种变换, 就须要选用对人眼有响应的相对发光度值。图6-6给出了适应于人眼的相应的铃形曲线, 它的峰值波长为 0.555 微米。国际照明委员会 (CIE) 曾规定了与标准眼睛响应对应的一系列数值 (表 6-2)。当波长为 0.555 微米时, 1 瓦 = 680 流明, 于是

$$E_v = 680 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) E_{e,\lambda} d\lambda \quad (6-18)$$

式中 E_v ——光照度 (流明/单位面积);

$V(\lambda)$ ——视觉光谱发光效率;

λ_1 到 λ_2 ——所考虑的波长范围;

$E_{e,\lambda}$ ——已知的光谱辐照度分布 (瓦·米⁻²)。

下述的例子可以说明这种变换方法。在 0.59~0.72 微米谱段内, 针对表 6-2 所列的辐照度值确定瓦特和流明这两种单位之间的关系。在多谱段摄影工作中, 这类换算是经常发生的。

利用梯形面积定律, 可得图 6-6 中光谱太阳辐照度曲线 (基于表 6-2 的数据) 以下与标明的波长范围对应的面积为 147 瓦·米⁻²。于是, 正如方程 (6-18) 所指出的, 必须进一步

② 勒克司是光照度的国际单位, 其值等于 1 流明/米²。以前曾称为“米烛光”。烛光/米²是发光率的国际制单位, 也曾称为“尼特”。

找出 λ_1 至 λ_2 谱段内函数 $V(\lambda)$ 和 E_e 的乘积。再利用梯形面积定律，在指定的谱段内，

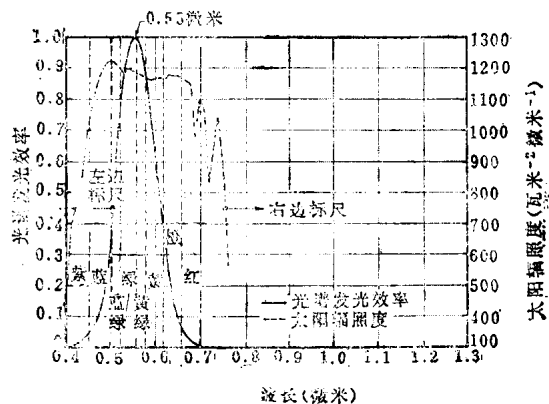


图6-6 在海平面处，在垂直于太阳（太阳天顶角为 60° ）
辐射的面积上，眼睛光谱发光效率和太阳辐照度

根据上述乘积对波长作图，得到曲线下的面积为 $30 \text{ 瓦} \cdot \text{米}^{-2}$ 。这些 $\text{瓦} \cdot \text{米}^{-2}$ 的值是有效值，并注意到眼睛在光谱红区灵敏度的减小将使变换到 $\text{瓦} \cdot \text{米}^{-2}$ 有效值的实际值减少 $4/5$ 。由于 $30 \text{ 瓦} \cdot \text{米}^{-2} \times 680 \text{ 流明} \cdot \text{瓦}^{-1}$ 等于 $20400 \text{ 流明} \cdot \text{米}^{-2}$ ，所以在指定的辐照度条件下，在 0.59 至 0.72 微米谱段内， 1 瓦 大约等于 140 流明 。

表6-2 眼睛的光谱发光效率（在 0.555 微米时相对为 1 ）和海平面^①
处垂直于太阳的面积上的太阳辐照度（ $\text{瓦} \cdot \text{米}^{-2} \cdot \text{微米}^{-1}$ ， $E_0 = 1322 \text{ 瓦} \cdot \text{米}^{-2}$ ）

波长（微米）	效 率	$\text{瓦} \cdot \text{米}^{-1} \cdot \text{微米}^{-1}$	波长（微米）	效 率	$\text{瓦} \cdot \text{米}^{-1} \cdot \text{微米}^{-1}$
0.40	0.0004	470	0.60	0.631	1.137
0.41	0.0012	672	0.61	0.503	1.163
0.42	0.0016	733	0.62	0.381	1.165
0.43	0.0116	787	0.63	0.265	1.176
0.44	0.023	911	0.64	0.175	1.175
0.45	0.033	1.006	0.65	0.107	1.173
0.46	0.060	1.089	0.66	0.061	1.166
0.47	0.091	1.138	0.67	0.032	1.160
0.48	0.139	1.183	0.68	0.017	1.149
0.49	0.203	1.210	0.69	0.0082	978
0.50	0.323	1.215	0.70	0.0041	1.108
0.51	0.503	1.206	0.71	0.0021	1.070
0.52	0.710	1.199	0.72	0.00105	832
0.53	0.862	1.188	0.73	0.00052	965
0.54	0.954	1.198	0.74	0.00025	1.041
0.55	0.995	1.190	0.75	0.00012	867
0.56	0.995	1.182	0.76	0.00006	566
0.57	0.952	1.178			
0.58	0.870	1.168			
0.59	0.757	1.161			

① 对于2气团，即太阳天顶角 $=60^\circ$ ；

对于0气团，参看文献[93]所介绍的数据（这些太阳辐照度的值和其他有用的数据可在文献[100]中找到）。

2.1.3 有关象平面光谱辐照度基本方程的说明

对于方程(6-12), 须作几点重要的说明。方程(6-12)是把象平面光谱辐照度与照相机辐射度学参数、地表辐照度和反射比以及大气辐射率和大气透射比联系起来的基本方程。

第一, 该方程指出: 象平面的辐照度反比于相对孔径的平方。就是说, 为了将象平面的辐照度减少一半, 必须将 f 数乘以 $(2)^{1/2}$ 。为此, 镜头的光阑标记和光阑孔径要以比例因子为 $(2)^{1/2}$ 的几何级数来标记 (此时最低的 f 数与标准级数不一致, 它经常分别取 1.9, 2.0, 2.8, 4.0 等)。光阑标记的准确度通常为 f 级数的 $\pm(2)^{1/6}$, 即光阑的 $1/3$, 或 f 数的 $\pm 12\%$ 。所以透过没有光损失的镜头后的光通量可能与光阑标记对应的值相差 $\pm 24\%$ 。由许多空气-玻璃界面组成的复合镜头或吸收大量被记录辐射的零件的情况下, f 数就不是镜头的聚光本领或聚光速率的准确度量。因而, 经常使用 T 数, 对于圆孔径, T 数的表示式为

$$T \text{ 数} = \frac{f \text{ 数}}{\sqrt{\tau_0}} \quad (6-19)$$

式中 τ_0 ——光学系统的透射比。

镜头的 T 光阑标记的误差不应超过光阑的 $1/10$, 或轴向象平面辐照度的 $\pm 7\%$ 。因为在一般情况下, τ_0 是波长的函数, 所以在方程(6-12)中采用 N 而不是 T 数。在镜头焦深的计算中还要进一步使用 N , 在本章的下一节中将讨论这一计算。

第二, 从方程(6-12)可以看出, 如果不考虑大气效应的影响, 象平面光谱辐照度与照相机镜头至地面目标的距离无关。因为透镜聚集的地面目标辐射率随高度的平方而减小, 所以也随镜头对目标所成的象的面积而减小。因此镜头聚集的辐射率和象的面积之比与高度无关, 只要是均匀延展的目标所成的象, 则象的辐照度是不变的。

第三点要说明的是这样的一个事实, 根据方程(6-12), 忽略大气效应, 则象的辐照度随着 $\cos^4 \alpha$ 而减小, α 为视场角。这种关系适用于简单透镜和不发生渐晕的透镜。而一些多元件大角度镜头则按辐照度的衰减近似地遵守 $\cos^3 \alpha$ 关系来设计。通过在透镜的入射光瞳中引入彗形象差[●], 使视场角增大时入射光瞳的面积也随之增大, 这样可以完成上述的设计。这种改进显然是很有价值的, 因为对具有 $\cos^4 \alpha$ 衰减率的 90° 镜头的标准测图相机(mapping camera)来说, 画幅边缘上的辐照度比画幅中心的辐照度几乎要小四分之三, 或者说比光阑的一档大。即使具有 $\cos^3 \alpha$ 的衰减率, 辐照度的改变仍大于彩色反转胶片的宽容度, 因为这种胶片的宽容度约为半挡光阑。为了克服这一问题, 可以在镜头前放置一块防晕映滤光片。

渐晕是指当视场角增大时通过镜头的光束截面逐渐缩小的现象。这种缩小通常是由于透镜框挡光而引起的。因此, 对一给定镜头的渐晕是与 f 数有关的, f 数愈大, 渐晕愈小。与此相反, $\cos^4 \alpha$ 衰减率则与 f 数无关, 所以使用一块防晕映滤光片可以使象面的辐照度均匀, 从而使镜头不致受渐晕的影响。

参考方程(6-13), 将有助于了解针对航空摄影的光谱特征跟基本分光辐射度学条件的依赖关系。必须指出, 对任何类型的照相机来说, 表示式都是相同的, 不管图象是用胶片摄影记录的或是用光电方法记录的。

● 彗形象差就是单色象差, 它使离轴目标点形成彗星状的不对称的模糊斑。

在用此方程作精确的计算前, 必须在实验室里测定照相机的分光辐射度学响应, 再对场景反射比和大气散射相对于假设的朗伯特特性的偏离进行修正, 并且还必须密切注意胶片的感光特性。

最后, 必须考虑照相机中胶片的曝光量。胶片上某一给定面积 dA 曝光时获得的辐射能 Q (尔格) 是曝光时间 t 及象平面的辐照度 E 的函数, 因为

$$Q = E \times t \times dA \quad (6-20)$$

所以, 曝光时间必须准确地知道, 即与额定标记值对应的快门平均有效开放时间必须知道, 同时快门还应该有重复性。

2.2 航空相机光学

有几种高等综合基础教科书介绍了一般的光学概念^[62, 106, 57, 7]。有关航空摄影学也有几本专门的参考书^[8, 4, 9, 10, 11, 50]。本章主要介绍量度或影响照相机成象性能的光学因素, 它们可以由照相机的使用者和象片的判读者确定或使用。几何光学、象差理论和光学设计方法不属于本书的范畴。光学传递函数理论和具体测量方法的详情可参阅上述文献, 这里只作简要的讨论。其它的参考文献可以在第十三章中找到。下面要讨论的题目是: (1) 反差(对比); (2) 分辨本领和面积带权平均分辨率 (AWAR); (3) 调制传递函数和阈调制; (4) 比例尺和分辨率随视场角的变化; (5) 焦深; (6) 畸变和校正焦距。

2.2.1 反差(对比)

目标或构象反差常常定性地说指高反差或低反差, 又指对比度(反差比)或对比差的缩写。遗憾的是, 有好几种表达式都可用来描述反差, 以致在使用中显得很混乱。

图 6-7 将有助于理解和定义这些术语。假设象面辐照度的分布如图 6-7 所示, $E_{\max}$ 和 $E_{\min}$ 分别为象面辐照度的最大值和最小值, 则通常将这些术语定义为

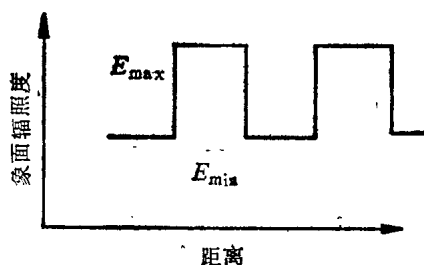


图 6-7 假设的象平面辐照度的分布

$$\text{对比度} = C_R = E_{\max} / E_{\min} \quad (6-21)$$

$$\text{对比差} \ominus = C_D = (E_{\max} - E_{\min}) / E_{\min} \quad (6-22)$$

$$\text{对数反差} = C_L = \log_{10}(E_{\max} / E_{\min}) \quad (6-23)$$

$$\text{调制} = M = (E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}) \quad (6-24)$$

在这几个术语中, 对比度(通常简称为对比)和调制是航空摄影学中使用最广泛的术语, 所以本章中这两个术语的使用将比其它术语要多。

注意: 当 $E_{\min} = 0$ 时, M 为 1, 而 C_R 为无穷大;

当 $E_{\min} = E_{\max}$ 时, M 为零, 而 C_R 为 1 (并不是往往不严谨地说成零)。

上面几个表达式的相互关系如下:

● 也就是一般讲的反差^[29]。

$$C_R = \frac{1+M}{1-M} = C_D + 1 = 10^{C_L} \quad (6-25)$$

$$C_D = \frac{2M}{1-M} = C_R - 1 = 10^{C_L} - 1 \quad (6-26)$$

$$C_L = \log_{10} \frac{1+M}{1-M} = \log_{10}(C_D + 1) = \log_{10} C_D \quad (6-27)$$

$$M = \frac{C_D}{C_D + 2} = \frac{C_R - 1}{C_R + 1} = \frac{10^{C_L} - 1}{10^{C_L} + 1} \quad (6-28)$$

2.2.2 分辨本领和面积带权平均分辨率

(1) 系统的分辨本领

当按照一定的准则, 某一光学系统恰好能区分开试验目标(例如, 天文学中的双星, 显微技术中光栅的线条, 摄影技术中靶板的线条)时, 则说明该光学系统达到分辨率极限。在摄影学中, 达到分辨率极限时, 试验目标的象上各线条中心间距的倒数即为系统的分辨本领。系统或构成它的零部件(如镜头、胶片、或光电器件)的分辨本领通常以每毫米的线条数[●]或每毫米的周数来描述。表征成像系统分辨本领的一种方便的方法是进行角测量, 例如, 毫弧度/周, 据此可以同样方便地确定物方的线/米或象方的线/毫米。分辨本领和分辨率这两个术语经常交替使用, 不过应当搞清楚这两个术语的区别, 分辨本领适用于光学系统或系统的部件, 而分辨率则适用于系统所产生的象。

理想的或无象差的镜头成像的讨论可以在前面提到的几种一般的光学教科书中找到。这里只说明一下理想镜头对点光源所成的象是所谓爱里图样的情况。按图 6-8 所示的诺谟图和公式可以看出, 爱里图样中心斑点的大小(中心斑的辐照度占整个图样辐照度的 84%)与波长数值孔径(或成像锥的 f 数)有关。对于圆孔径的无象差镜头的爱里斑分布图或点扩展函数见第十三章图 13-103。

如果设计的视场很窄, 则中等 f 数的镜头可以接近理想情况。因此对轴上或近轴工作的显微镜头以及 $f/5$ 、视场角为 10° 的某些全景相机镜头可以设计到几乎没有象差。宽角航空照相机的镜头设计总是存在很大的象差, 所以图 6-8 不适用于这些镜头。

(2) 确定和测量分辨本领的方法

确定系统分辨本领的方法有好多种, 相应的准则也有好多个。为了使所测的分辨本领数值可信, 必须随时注意几何学、辐射度学及图象记录和处理等方面的因素。为了便于叙述确定照相机分辨本领的测量技术和处理方法, 以便与其它照相机作比较, 通常选用一种标准的方法, 在美国, 最常用的标准方法在《军用标准 150 A》⁽⁹⁹⁾中有介绍。这个方法的所有重要方面都与美国国家标准协会⁽²⁾所介绍的方法相同。这些标准规定采用由各种不同宽度的线条组成三线测试靶, 近二十年来在美国已被广泛地采用, 只有国家标准局例外, 它直至最近, 仍经常使用与此不同的测试靶。在其它国家, 还使用了许多种不同的靶型, 例如环形的、双线条的、多线条的以及各种各样的简单几何图形。为了模拟真实的事物, 已经设计出三维的测试靶。

● 为了简便起见, 本章采用条线/毫米, 而不用线对/毫米或光学线对/毫米。注意: 不能把本章中所用的线/毫米与电视技术中的线/毫米等同起来; 2 电视线/毫米等于这里所考虑的 1 线/毫米(这是近似的, 精确的应为 $2\sqrt{2}$ 电视线/毫米, 相当于摄影技术中的 1 线/毫米。——校者); 在摄影技术中都是如此。

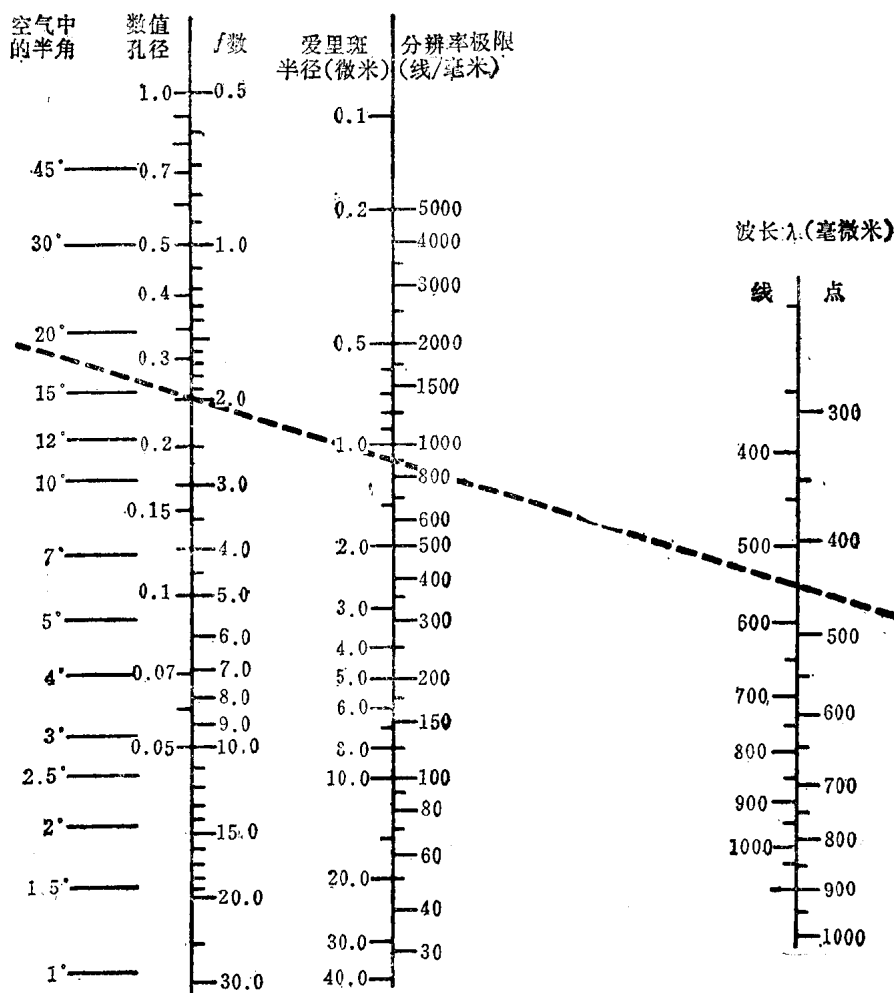


图6-8 理想镜头的爱里斑半径和分辨率的理论极限

$$\text{数值孔径} = \frac{1}{2(f\text{数})} = \sin(\text{半角}); \quad \text{爱里斑半径} = \frac{1.22 \lambda (f\text{数})}{10^3}$$

$$\text{分辨率极限 (周/毫米)} = \frac{10^6}{\lambda (f\text{数})}$$

测试靶

标准测试靶是由一系列图样组成的，这些图样的尺寸按数字2的某些根式（通常为 $(2)^{1/6}$ ）减少。本文要介绍的标准靶如图6-9所示，它是由两组在所示的面积内线条相互垂直的图样组成的。在航空照相机或航空照相机镜头的测试中，常常使用透射式分辨率靶，其中靶线的透射比大于周围空间的透射比。靶线与周围空间的密度差一般选取大于2.0（对大于100:1的高反差比）；等于 0.8 ± 0.05 （对6.3:1的中反差比）；或等于 0.2 ± 0.05 （对1.6:1的低反差比）。

系统分辨本领的测量

照相机或镜头分辨本领的标准测试步骤如下：（1）将标准分辨靶放在校正好的准直仪的焦平面上。（2）将待测的照相机或镜头装在调节面上，以便在象面不变的条件下，可以按不同的视场角要求，转动镜头。（3）带有色补偿滤光片的石英碘光源或钨光源（即温度接近6000K的黑体辐射源）所模拟的晴天辐射照明分辨率靶。（4）在各种视场角的条