

〔苏〕A.B.巴甫洛夫 著

光电装置

〈 理论与计算基础 〉

国防工业出版社

光 电 装 置

(理论与计算基础)

A. B. 巴甫洛夫 著
赖叔昌 杨文库 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是一本现代光电装置的理论 and 物理基础书。书中叙述了辐射和辐射源的特性；研究了装置的光学系统、辐射接收器及分析和扫描系统；介绍了计算辐射源和辐射接收器特性、大气透过率、作用距离及计入大气辐射衰减和背景影响的光电装置参量的方法。

本书可供从事光电装置研究和设计的工程技术人员参考，也适于作高等院校有关专业的教学参考书。

Оптико-электронные приборы (Основы теории и расчета)

А. В. Павлов

«Энергия» 1974.

*

光 电 装 置

(理论与计算基础)

А. В. Барулов 著

赖叔昌 杨文库 译

*

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

*

850×1168¹/₃₂ 印张12⁵/₈ 318千字

1981年1月第一版 1981年1月第一次印刷 印数：0,001—4,200册

统一书号：15034·2093 定价：1.55元

前 言

光电装置是现代科学技术的一个重要组成部分。它已成为工农业生产、科学研究和军事中的十分有效的工具。

光电测量装置、自动制导装置、拍摄地球表面热象的装置，以及最近发展起来的光电遥感装置等都属于光电装置。利用各种光电装置，已能按物质的吸收光谱进行化学分析，遥测各种物体的温度，观察黑暗环境中的目标，测量弹道和轨道，实现卫星的自动跟踪，宇宙飞行器的制导，飞行器对地球和其他天体的定位，气象观测和预报，以及进行军事侦察、预警和资源勘测等等。

原书比较系统地叙述了用作跟踪、测角和观测的自动光电装置的原理及工程计算的通用方法。全书由两部分组成：

第一部分叙述光电装置的结构原理和理论基础。研究辐射及其传输的基本理论，并结合装置的结构研究光学系统、辐射接收器及分析和扫描系统的原理和结构。

第二部分介绍光电装置的计算方法。作者在叙述计算方法的同时，还给出了具体装置，以便完成与各种光电装置设计有关的工程计算。介绍了计算辐射和辐射接收器特性、作用距离、装置灵敏阈及大气和宇宙空间透过率的方法，以及激光光电装置的计算特点。

对原书中的错误，在译校过程中我们尽力作了更正或注明，对于一些明显的错误，改正后就不再一一在文中注明了。由于译者水平所限，译文一定还会有不妥之处，欢迎读者批评指正。

译 者

原 序

种类繁多的光电装置，就其所完成任务来划分，可以归并为几个专用类，这些类别有：

获得所观察的空间图象的装置；

各种用途的测量装置，其中包括光谱测量装置；

用于飞行器，其中包括宇宙飞行器的飞行控制、定向和稳定的导航装置；

制导、瞄准和自动导引装置；

用于机构控制的各种装置。

每一大类还可细分为一系列小类。

尽管光电装置的种类很多，但是它们提取信息的原理，即包含在光辐射中的原始信息的变换原理都是共同的。

光电装置由于具有这种共同点，所以实际上大都采用使提取信息的各通路元协同动作的综合系统。在任何情况下，不论光电装置用来完成何种任务，在其通路系统中都必须有下列几个组成部分：

装置为之工作的原始目标（原始辐射源）；

目标的背景；

天然辐射源和人造辐射源，它们可以有是有用的辐射体，也可能是背景；

信息源与接收器之间的介质；

处理接收到的光学信号，提取信息并将需要的电信号从中检出及整形的装置。

在具体装置的系统中，其中某些部分可以没有，但总的结构原理不变。

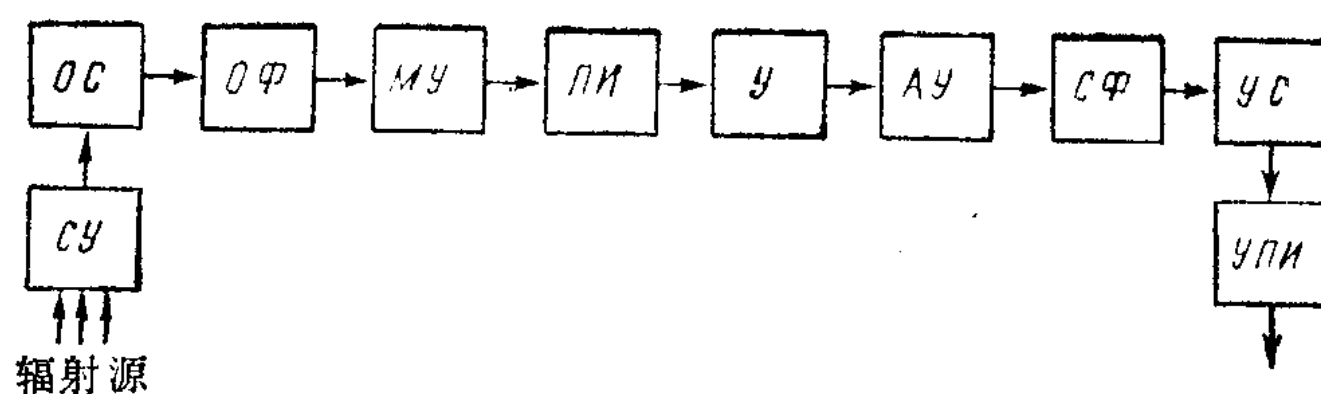


图 1 光电装置的综合系统方框图

OC—光学系统；CY—扫描器；OΦ—光学滤光片；MY—调制器；
ΠΠ—辐射接收器；У—放大器；AY—分析器和处理系统；CΦ—
输出信号的整形系统；YC—存储比较机构；УΠΠ—信息传输机构。

接收光学信号和处理信息的装置，其组成一般包括如方框图 1 示出的基本部分。其中必须具备的组元有：带扫描器或不带扫描器的光学系统；带滤光片的辐射接收器；调制器和分析器；前置放大器、放大器和信号处理系统；输出信号的整形系统，以及比较、存储和信息传输等系统。

本书主要研究有关光学辐射的发生、传输和接收，光电变换及光电装置的基本特性计算等方面的问题。

目 录

第一部分 光电装置的理论基础

第一章 辐射的基本特性和定律	1
1-1 辐射的基本特性及其测量单位	1
1-2 辐射的基本定律	8
1-3 简化的辐射方程	12
1-4 非黑体辐射	18
1-5 光照特性及其与能量特性的关系	21
1-6 辐射源的空间频率特性	28
第二章 辐射源	34
2-1 辐射源的分类	34
2-2 简单几何形状辐射源的辐射特性	35
2-3 标准辐射源或测量辐射源	37
2-4 地球表面及周围大气层的辐射特性	41
2-5 天体的辐射特性	51
2-6 太阳的辐射特性	62
2-7 极光的辐射	68
2-8 激光的辐射特性	71
2-9 简单形式的恒定亮度辐射体的空间频谱	78
第三章 辐射通量与介质的相互作用 辐射在大气和 宇宙中的传输	84
3-1 辐射通量与介质的相互作用	84
3-2 辐射通量的反射	85
3-3 辐射在均匀介质中的衰减	87
3-4 关于大气和近宇宙的简要知识	90
3-5 辐射在大气和宇宙中的传输	95
第四章 光电装置的光学系统	101

4-1	光学系统的分类、功用和特性	101
4-2	光学系统图及其元件	103
4-3	光学系统的基本特性	105
1)	光学系统的外形尺寸特性	105
2)	光学系统的能量特性	106
3)	光学系统的象差	108
4)	光学系统的空间频率特性	112
4-4	光学系统的基本元件	119
4-5	光学系统的类型	121
1)	透镜光学系统	121
2)	反射镜及反射镜-透镜光学系统	126
3)	激光光电装置的光学系统	131
4)	应用纤维光学元件的光学系统	133
第五章 辐射接收器		137
5-1	接收器的功用和分类	137
5-2	接收器的基本特性	138
5-3	光电管和光电倍增管	152
1)	光电管的工作原理和结构	152
2)	光电管的基本特性	156
3)	光电管的噪声和灵敏阈	156
4)	光电倍增管的工作原理和结构	160
5)	光电倍增管的噪声和灵敏阈	163
5-4	光电析象管的工作原理和基本特性	169
5-5	光敏电阻	173
1)	光敏电阻的作用原理和结构	173
2)	光敏电阻的基本特性	175
3)	光敏电阻的噪声和灵敏阈	177
4)	光敏电阻灵敏面的致冷装置	184
5-6	光电二极管、光电三极管和具有纵向光电效应的光电器件	186
1)	光电二极管的工作原理及基本参数	186
2)	光电二极管的噪声和灵敏阈	187
3)	光电二极管的基本特性	189
4)	光电三极管	193
5)	具有纵向光电效应的光电器件(反转光电二极管)	194
6)	具有纵向光电效应的光电器件的基本特性	197
5-7	热辐射接收器	199
1)	热辐射接收器的分类	199
2)	热敏器件	199

3) 测辐射热器	201
4) 测辐射热器的噪声和灵敏阈	205
5) 热电辐射接收器	209
6) 热电辐射接收器的特性和结构	212
第六章 光电装置中的分析器和扫描器	218
6-1 分析器和扫描器的功用及分类	218
6-2 相位分析器	220
6-3 极性分析器	229
6-4 扫描和搜索系统的功用、分类和特性	233
6-5 应用纤维光学的扫描和搜索系统	246
6-6 利用压电元件的光偏转器	249
1) 压电模量、弹性和弹性常数模量的相互关系	255
2) 压电元件的物理模型	256
6-7 扫描器的空间频率传输特性	261

第二部分 光电装置的计算基础

第七章 辐射源辐射特性的计算方法	263
7-1 从地面及云层反射后被装置接收到的太阳辐射值的计算方法	263
7-2 由人造目标反射并被装置接收到的太阳辐射值的计算	268
7-3 由球形目标反射时能量光强度的计算方法	273
7-4 由角反射器反射时能量光强度的计算	278
7-5 确定非均匀受热物体辐射特性的方法	281
7-6 根据已知光谱特性和光谱分布确定选择性辐射体和 灰色辐射体的光谱密度函数	289
7-7 根据已知的光谱密度函数值计算辐射源的辐射特性	294
第八章 大气透过率特性的计算	298
8-1 确定大气对单色辐射和连续辐射的透过率的方法	298
8-2 水平、倾斜和垂直路程中的水汽数量的计算	301
8-3 在水平、倾斜和垂直路程上的空气和二氧化碳质量的 计算方法	304
第九章 辐射接收器的基本特性的计算, 最佳辐射接收器的 选择方法	306
9-1 用于实际辐射体的辐射接收器特性的计算	306

9-2	光电倍增管的单色通量阈、光谱灵敏度、单色量子效率和量子灵敏阈的计算方法	309
9-3	按辐射源的积分辐射计算量子效率	321
9-4	光电管和光电倍增管在杂散光背景下的灵敏阈的计算方法	325
9-5	光敏电阻基本特性的计算	330
9-6	在有背景杂散光情况下的光敏电阻基本特性的计算	334
9-7	光电管和光电倍增管的辐射利用系数及其计算方法	338
9-8	辐射接收器的评价标准及选择方法	343
第十章 光电装置的能量计算		351
10-1	能量计算的任务	351
10-2	在无背景情况下光电装置的作用距离和灵敏阈的计算方法	352
10-3	在均匀辐射背景上观察目标时的作用距离和灵敏阈的计算	357
10-4	在有不均匀辐射背景的情况下装置的灵敏阈和作用距离的计算	363
10-5	对面辐射体工作的装置灵敏阈的计算	370
第十一章 激光光电装置的计算特点		374
11-1	在无背景辐射情况下激光光电装置作用距离的计算特点	374
11-2	在利用角反射器（反射镜）时激光光电装置作用距离的计算	380
11-3	在有辐射背景的情况下计算作用距离的特点	382
参考文献		388

第一部分 光电装置的理论基础

第一章 辐射的基本特性和定律

1-1 辐射的基本特性及其测量单位

辐射是一种能的形式。它有电磁本质，又具有量子-波动性质。在光的发射和吸收，以及发生辐射和物质——量子 and 电子相互作用的基本过程的光电效应现象中，都能表现出辐射的量子特性。在光的衍射、干涉和偏振现象中表现出辐射的波动特性。电磁辐射所占的光谱区由 10^{-11} (短波电磁振荡) 到 3×10^{-5} 厘米(无线电波)。

在光电子学中利用光谱区由 0.1 微米 (短波紫外辐射) 到几百微米 (长波红外辐射) 的光辐射。其中也包括人眼能够感觉到的可见光。可见光的光谱范围比较窄, 在 0.38 微米到 $0.76 \sim 0.77$ 微米。在眼睛适应的条件下, 在 $0.35 \sim 0.90$ 微米光谱范围, 以至 $0.30 \sim 0.95$ 微米范围内的辐射都能引起光感。

波长在 ($\Delta\lambda \rightarrow 0$) 的狭窄范围内的辐射称为单色辐射。用来表征单色辐射的有: 波长 λ 或振荡频率 ν , 以及量子能量 $h\nu$, 量子质量 $m = h\nu/c^2$ 或它的动量 $p = h\nu/c$; 其中 $c \approx 2.98 \times 10^8$ 米/秒——真空中的光速, $h = 6.625 \cdot 10^{-34}$ 焦耳·秒——普朗克常数。

这里应指出, 通过不同介质的单色辐射的波长的变化, 按如下方程与介质的折射率有关:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n},$$

式中 λ 和 λ_0 ——折射率为 n 的介质中及真空中的辐射波长。同时振荡频率不变。

光辐射伴随着辐射能的转移。辐射能及其引起的特性以能量或有效的物理量来测量。其中最通用的一种有效物理量是光照特性。

如果在整个光谱区估算辐射，则可利用能量特性：在可见光区（适用于眼睛）用光照特性；在任意光谱区（适用于任何辐射接收器）则用对该接收器有效的那些特性。由于历史上首先引用了光照特性，所以它在评价辐射及其对许多接收器的作用方面得到了广泛应用。然而评定辐射性质的最通用和最方便的是能量特性：辐射能、辐射通量、能量亮度、能量发光度及光源所建立的能量照度。

辐射能，象其他任何形式的能一样，可用焦耳、卡、电子伏等单位测量。用这种特性来评价辐射体的性质是比较少见的。由于激光器的出现，近几年来才开始普遍应用。

在单位时间内发射的辐射能是光辐射强度的量度，或称之为辐射通量。辐射通量与辐射能之间的关系用如下关系式描述：

$$\Phi = \frac{dW}{dt}, \quad (1-1)$$

式中 dW ——在 dt 时间内转移的单元能量。在能量随时间等量转移的情况下，关系式 (1-1) 可取如下形式：

$$\Phi = \frac{W}{t}. \quad (1-1 a)$$

辐射通量的测量单位为瓦。

在某一方向上，辐射通量的强度（辐射通量的空间密度或角密度）用能量光强度 I （辐射强度）表示：

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}, \quad (1-2)$$

式中 $d\Phi$ ——在空间角 $d\omega$ 范围内传播的元辐射通量。假设通量 Φ 在空间角 ω 范围内均匀地分布，则

● 空间（立体）角定义为该角顶点画出的球面上所截的面积与球的半径平方之比。立体角在球面上截取的面积等于边长为球的半径的正方形面积时，把该立体角取为立体角的单位。——原书注

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (1-2 a)$$

辐射的能量光强度的单位为瓦/球面度。立体角（图 1-1）由下式确定：

$$\omega = \frac{A}{L^2}, \quad (1-3)$$

并以下面的关系式使与锥顶的平面角 2α 联系起来：

$$\omega = 2\pi(1 - \cos \alpha) \quad (1-4)$$

当 α 角值小时（不超过 $15^\circ \sim 20^\circ$ ），平面角与空间角之间的关系可以用下式给出：

$$\omega = \frac{\pi}{4} (2\alpha)^2, \quad (1-5)$$

式中角 α 以弧度为测量单位。

当 $2\alpha \leq 20^\circ$ 时，角的计算误差不超过 1%。例如，对于角 $2\alpha = 20^\circ$ ，公式 (1-5) 给出立体角值 $\omega = 0.0961$ 球面度，而按公式 (1-4) 计算的该角的真值为 $\omega = 0.0954$ 球面度。

如果立体角具有矩形角锥体的形式，且各边之间的夹角分别为 2α 和 2β ，则其值可按式求得：

$$\omega = 4\alpha\beta \quad (1-6)$$

由辐射表面定向发射的辐射通量强度用能量亮度 B 表示，该能量亮度决定于单位面积的辐射表面所发射的通量的空间分布。

在与辐射表面 dA 的法线成 β 角的方向上，能量亮度 B_β 等于该方向上的辐射强度 dI_β 与辐射表面在该方向垂直面上的投影面积之比，即

$$B_\beta = \frac{dI_\beta}{dA \cos \beta} \quad (1-7)$$

对于有限尺寸的辐射表面，在沿表面均匀辐射的情况下，式

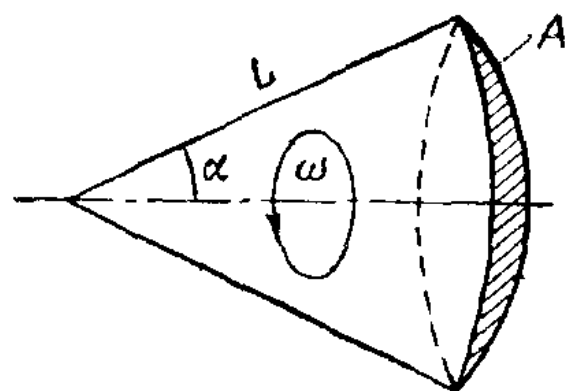


图1-1 立体角的确定

(1-7) 可写成:

$$B_{\beta} = \frac{I}{A \cos \beta} \quad (1-7 a)$$

把无限小的, 在所有点上都是一样的辐射表面上的能量亮度, 即从 1 平方米的这个辐射表面沿法线方向具有的能量光强度为 1 瓦/球面度取作为单位, 称该单位为瓦/米²·球面度。

许多辐射源的能量亮度与辐射方向无关。这种辐射源为等亮度辐射源, 且服从朗伯定律。在这种情况下, 能量光强度 I 与法线和所观察方向之间夹角的余弦成正比。因为

$$B_{\beta} = \frac{dI_{\beta}}{dA \cos \beta} \quad \text{或} \quad B = \frac{I_{\beta}}{A \cos \beta},$$

所以

$$dI_{\beta} = B dA \cos \beta \quad \text{或} \quad I_{\beta} = B A \cos \beta. \quad (1-8)$$

最适用的特性是能量发光度 (辐射本领)

$$R = \frac{d\Phi}{dA}, \quad (1-9)$$

这个特性可以确定单位辐射面积在所有方向上发射的辐射通量值。

对于沿表面面积均匀辐射的有限尺寸的表面, 式 (1-9) 可取如下形式:

$$R = \frac{\Phi}{A}. \quad (1-9 a)$$

根据朗伯定律可以得到某些特性间的简单得多的关系。让我们来研究一下辐射表面 A (图 1-2)。为了确定该表面发出的全部辐射通量, 我们标出受顶角 β 和 $\beta + d\beta$ 的两个圆锥面限制的立体角 $d\omega$ 。如果由辐射面的中心 O 描绘出半径为 L 的球面, 则角 $d\omega$ 将与面积为

$$dA = 2\pi L^2 \sin \beta d\beta$$

的窄元球带有关, 式中 $Ld\beta$ 为球带宽。根据式 (1-3)

$$d\omega = \frac{dA}{L^2} = 2\pi \sin \beta d\beta。$$

在角 $d\omega$ 范围内传播的辐射通量为:

$$d\Phi = I_\beta d\omega,$$

对变量 β 积分, 由下式则可求得全部辐射通量

$$\Phi = \int_{\beta} I_\beta 2\pi \sin \beta d\beta。$$

(1-10)

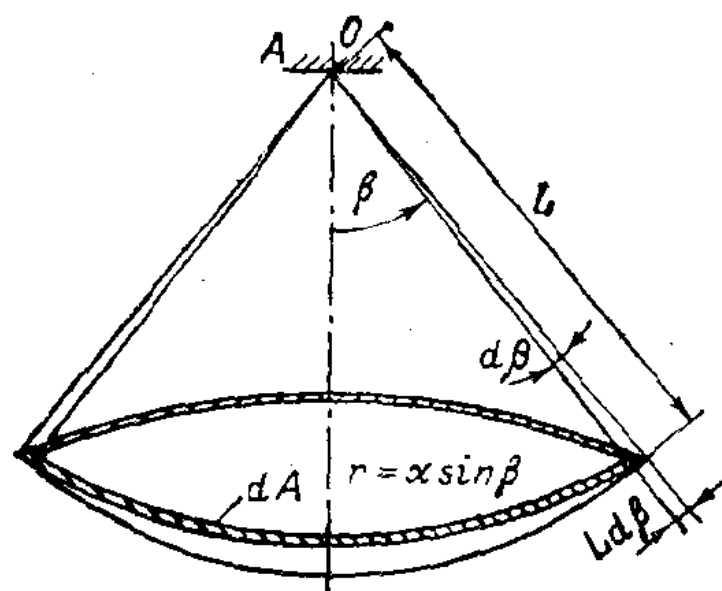


图1-2 服从朗伯定律的平面辐射体的辐射通量值的确定

对于服从朗伯定律的辐射体, 考虑到关系式 (1-8), 公式 (1-10) 可改写为:

$$\Phi = 2\pi \int_0^{\pi/2} \bullet BA \sin \beta \cos \beta d\beta。 \quad (1-11)$$

积分的结果为:

$$\Phi = \pi BA。 \quad (1-12)$$

因为根据式 (1-9 a) $\Phi/A = R$, 所以

$$R = \pi B \text{ 或 } B = \frac{R}{\pi}。 \quad (1-13)$$

为了评定辐射体对装置的作用, 一般利用表征表面入射通量密度的能量照度

$$E = \frac{d\Phi}{dA}。 \quad (1-14)$$

对于有限尺寸的表面, 入射通量沿表面积均匀分布时,

$$E = \frac{\Phi}{A}。 \quad (1-14 a)$$

取 1 瓦/米^2 (即相当于在面积为 1 米^2 的表面上均匀分布 1 瓦 的辐射通量) 做为能量照度的单位。

如果辐射源是点辐射源, 那么当它位于以辐照面 dA 为基面

● 原文误为 $\int_0^{2\pi}$ 。——译者

的立体角 $d\omega$ 的顶点 C 时 (图 1-3), 考虑到公式 (1-2), 由式 (1-14)● 可得:

$$E = \frac{I d\omega}{dA}, \quad (1-15)$$

式中

$$d\omega = \frac{dA}{L^2} \cos \beta;$$

式中 $dA \cos \beta$ —— dA 面在垂直于辐射源方向的平面上的投影;

L —— 由辐射体到 dA 面中心的距离。

将 $d\omega$ 值代入公式 (1-15), 则有:

$$E = \frac{I}{L^2} \cos \beta. \quad (1-16)$$

所得的关系式表达了距离平方定律。

无论在确定能量光强度, 还是在研究能量照度时, 都是假定辐射源为点辐射源。“点”的概念与辐射源的尺寸无关, 而与辐射源的尺寸和研究它的作用距离的比例有关。因此, 这一

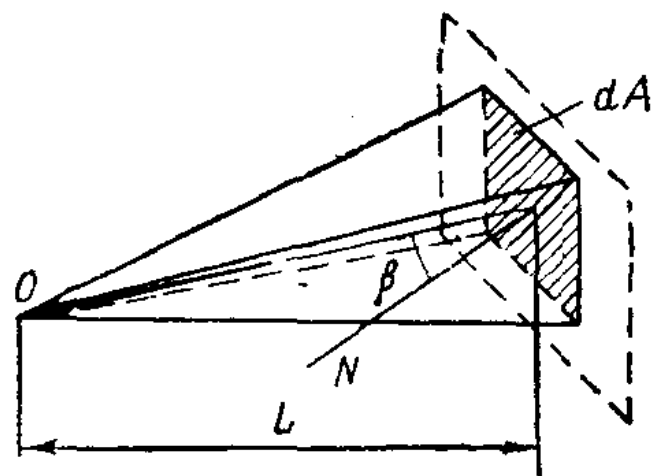


图1-3 点辐射源能量照度的确定

概念适用于线尺寸远小于辐射体与辐照面之间的距离的任何辐射体。因而可以把辐射看作是在某一方向上从一个点发射出去的, 并根据公式 (1-16) 来计算有限尺寸的辐射源所建立的能量照度。计算表明, 在 5 倍于辐射源尺寸的距离上, 按公式 (1-16) 确定的照度误差不会超过实际照度的 1%。该误差随着距离的增加而减小, 在 10 倍于辐射体尺寸的距离上, 按公式 (1-16) 计算的照度几乎与实际照度一样。

对于理想的散射面, 满足条件 $R = E$; 于是由公式 (1-13) 有:

● 原文误为 (1-4) 式。——译者

$$B = \frac{E}{\pi}。 \quad (1-17)$$

为了表征辐射，不仅要知道辐射的总通量和强度，还应知道其光谱组份。光谱有连续光谱、带状光谱和线状光谱。连续光谱是热（温度）辐射的特点。带状光谱是由分子的旋转辐射和振荡辐射引起的。这种光谱是不同宽度的大量紧密排列的谱线汇合。

我们用辐射通量光谱密度 $\Delta\Phi(\lambda)/\Delta\lambda$ 这一概念来表征具有连续光谱辐射的光谱组份。辐射通量光谱密度的单位为瓦/米。

如果在上述关系中光谱间隔的宽度趋于零，则在极限情况下，这一比例关系将趋近于所谓辐射通量光谱密度函数的值 $\phi(\lambda)$ ，亦即

$$\lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi(\lambda)}{\Delta\lambda} = \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} = \phi(\lambda)。 \quad (1-18)$$

在直角坐标系中绘出函数 $\phi(\lambda)$ (图 1-4)。

若按整个光谱积分该函数，则可求得总通量值：

$$\Phi = \int_0^{\infty} \phi(\lambda) d\lambda。 \quad (1-19)$$

由于积分限是由辐射的光谱界线自然建立，所以通常以 0 和 ∞ 作为积分限，在该范围内必定包括任何光谱的分布。

与辐射通量的光谱密度函数 $\phi(\lambda)$ 类似，我们可以写出其他特性的光谱密度函数的表示式：

能量亮度

$$\lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta B(\lambda)}{\Delta\lambda} = \frac{dB(\lambda)}{d\lambda} = b(\lambda)； \quad (1-18 a)$$

能量光强度

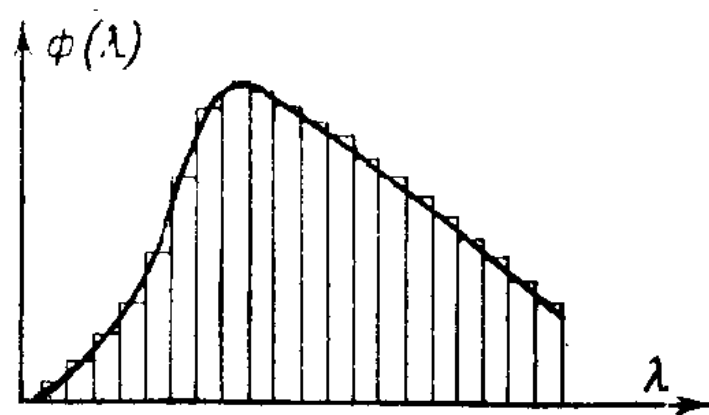


图1-4 具有连续光谱的光源的辐射通量光谱密度函数的形式