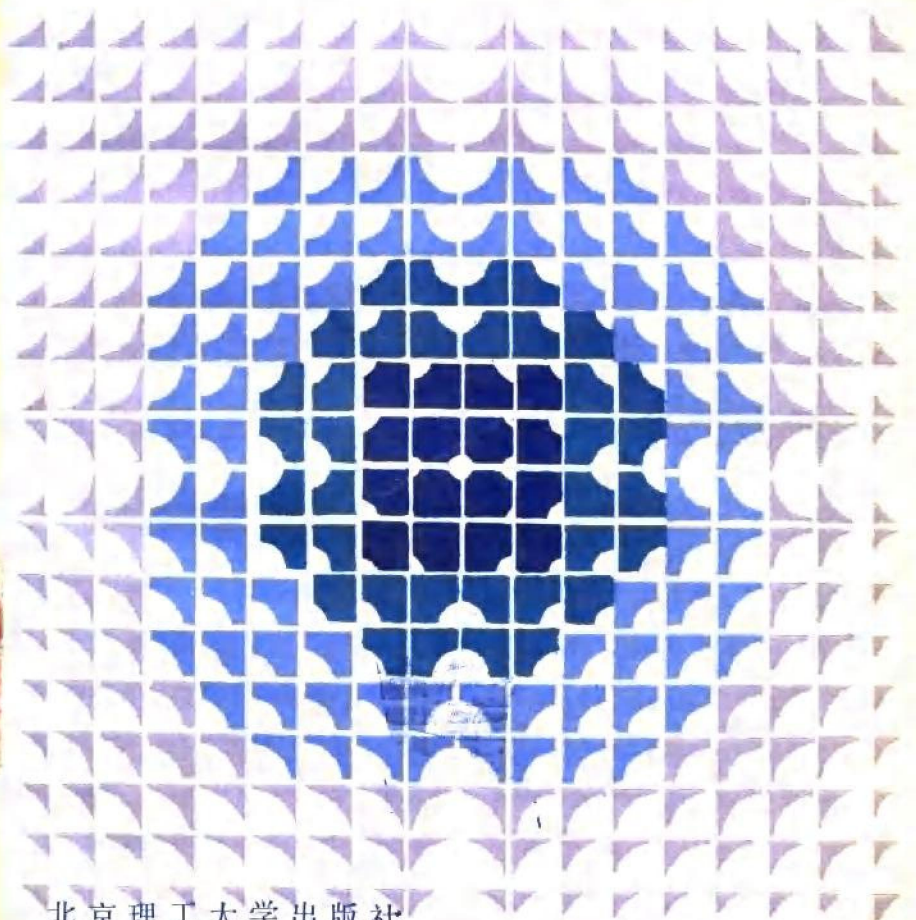


辐射度和光度学

● 车念曾 闫达远 编



北京理工大学出版社

辐射度学和光度学

车念曾 阎达远 编

北京理工大学出版社

前 言

辐射度学和光度学是应用物理学的一个重要分支。尤其在近几十年来，它们得到了非常迅速的发展。现在，它除了在古老的照明工程、色度学中得到了广泛的应用外，还在天体物理、医学、激光、微波、材料科学、大气和气象科学、军事、遥感、光化学、摄影、辐射热传递、太阳能、电视、目视信息显示、视觉研究等部门占有相当重要的地位。因此可以说，辐射度学和光度学是每个物理工作者和辐射能使用工作者的必备知识。

全书共分九章。前三章是关于辐射度学和光度学的基本知识，包括基本概念、光辐射能的传输、光源和光探测器等；中间五章是关于辐射度量和光度量的测量，包括测量设备、仪器的特性和标定、测量方法以及材料辐射度特性的测量。最后一章通过三个例子来阐述辐射度学的某些应用。全书由车念曾编写第一到第五章以及第七到第九章，阎达远编写第六章。

辐射度学和光度学所包括的内容是极其广泛而丰富的，本书只着重介绍经典辐射度学中的一些基本内容。有许多重要方面，例如，紫外光谱、大气辐射、激光、萤光光度、光导纤维、辐射能传输、摄影感光、色度等，都没有或只有少量地涉及到。目前辐射度学和光度学的专著、论文、报告等正日见增多，有兴趣的读者可以参考它们，就所研究的专题进行更深入的探讨。

李德熊教授细致地审阅了本书，并提出了许多宝贵的意见及建议，特致以诚挚的谢意。

作 者

1988年6月于北京

目 录

绪 论

第一章 辐射度学和光度学的基础知识及辐射能在空间的传输	(5)
§ 1.1 辐射度学和光度学的基础知识	(5)
§ 1.2 光辐射能在空间的传输	(23)
§ 1.3 光辐射能在传输路径上的反射、散射和吸收	(39)
第二章 黑体辐射及光源	
§ 2.1 黑体辐射的基本定律	(56)
§ 2.2 发射体的温度	(67)
§ 2.3 自然光源	(79)
§ 2.4 人工光源	(90)
§ 2.5 标准照明体和标准光源	(113)
§ 2.6 色温变换及光谱能量分布特性的改变	(120)
第三章 光辐射探测器	
§ 3.1 光辐射探测器的性能参数	(131)
§ 3.2 光电探测器	(142)
§ 3.3 热探测器	(161)
第四章 光辐射测量的基本设备	
§ 4.1 光度导轨	(173)
§ 4.2 单色仪	(178)
§ 4.3 分光光度计和光谱辐射计	(195)
§ 4.3.1 傅里叶变换光谱仪	(199)
§ 4.5 积分球	(207)

第五章 光辐射测量系统的工作性能及其测量

- § 5.1 测量系统的响应度..... (216)
- § 5.2 测量系统的光谱响应..... (226)
- § 5.3 测量系统的视场响应..... (236)
- § 5.4 测量系统的线性响应..... (245)
- § 5.5 测量系统的偏振响应..... (254)

第六章 光度量的测量

- § 6.1 人眼的构造及视觉特性..... (263)
- § 6.2 发光强度的测量..... (281)
- § 6.3 光通量的测量..... (295)
- § 6.4 照度的测量..... (310)
- § 6.5 亮度的测量..... (320)

第七章 辐射度量的测量

- § 7.1 标准辐射源和标准探测器..... (335)
- § 7.2 绝对辐射计和自校准硅光电二极管..... (339)
- § 7.3 光谱辐射度量的测量..... (345)
- § 7.4 总辐射度量的测量..... (360)
- § 7.5 辐射温度的测量..... (367)
- § 7.6 探测器特性的测量..... (376)

第八章 材料辐射度特性的测量

- § 8.1 反射特性的测量..... (388)
- § 8.2 透射比的测量..... (402)
- § 8.3 发射率和吸收比的测量..... (412)

第九章 辐射度学的应用

- § 9.1 光学系统中杂散光的分析和计算..... (421)
- § 9.2 辐射测温仪..... (436)
- § 9.3 卫星多光谱扫描系统..... (449)

绪 论

辐射度学是一门研究电磁辐射能测量的科学。在电磁辐射测量中，辐射度学的基本概念和定律都是适用的，但是对于电磁辐射的不同频段，针对它们的特殊性质，又往往有不同的测量手段和方法。本书主要限于阐述电磁辐射频谱内光学谱段的辐射能的测量。

光学谱段一般是指包括从波长为10nm左右的远紫外到波长约0.1cm的极远红外的范围（图0-1）。波长小于10nm的是伽玛射线、x射线，而波长大于0.1cm的则属于微波和无线电波。在光学谱段内，又可以按照波长分为远紫外、近

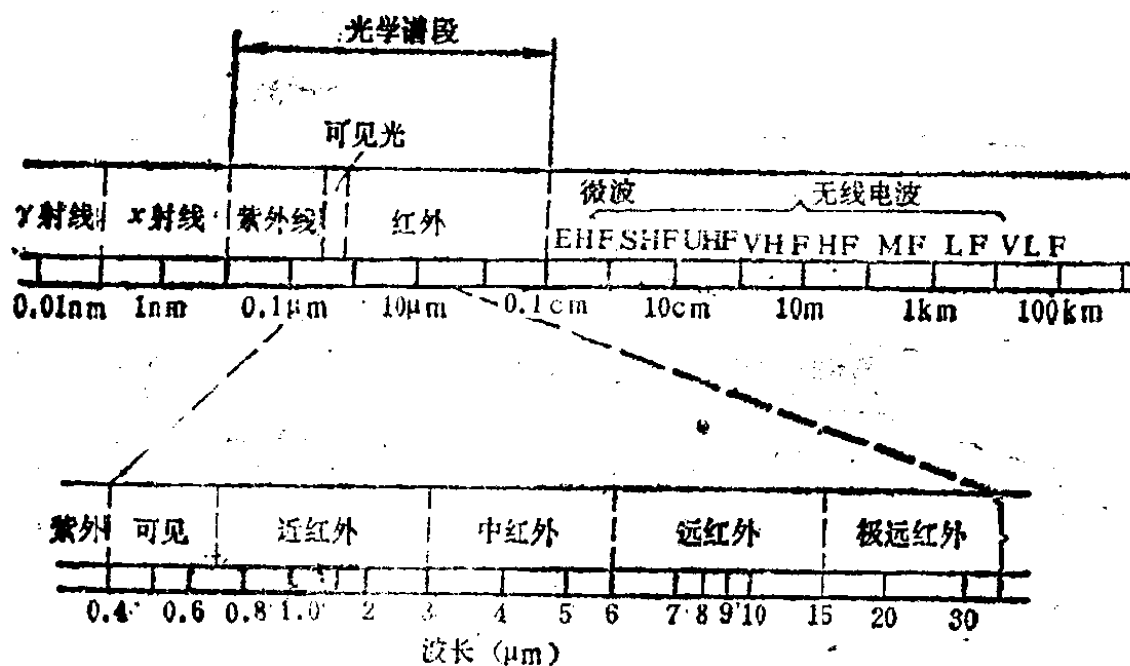


图0-1 电磁频谱

紫外、可见光、近红外、中红外、远红外和极远红外。可见光谱段，即辐射能对人眼能产生目视刺激而形成光亮感的谱段，一般是指波长从 $0.38\sim 0.76\mu\text{m}$ 。

使人眼产生总的目视刺激的度量，则是光度学的研究范畴，这样光度学除了包括光辐射能客观物理量的度量外，还应考虑人眼视觉机理的生理和感觉印象等心理因素。就光度量作为物理量度量来说，可以认为光度量是用具有“标准人眼”视觉响应的探测器对辐射能的度量。但仅仅把光度测量局限在“物理量的度量”这一点是不够的，人眼的生理、心理因素常常对光度测量有着很大的影响。

辐射度学和光度学作为一门科学来进行研究，可以认为是从18世纪中期研究光辐射的目视效应开始的。法国的鲍吉尔(Bouguer)在1727年提出了光度学的概念，并为光度学的实践奠定了基础。1760年朗伯(Lambert)提出了光度学的基本定律，如照明的可加性定律，照度的平方反比定律，余弦定律等。光度学的发展是和当时主要用作照明的光源的进步密切相关的。光源由蜡烛、戊烷气灯到1879年爱迪生(Edison)发明的白炽灯，进一步推动了光度学的发展。光度基准也由火焰灯发展到维奥列(Violle)提出的用凝固温度时的铂作为光强度的基准，并为1889年国际电工会议所采纳。

在这期间，赫谢尔(Herschel)在1800年测量太阳光通过棱镜色散在不同光谱位置上目视和液体温升的效应而发现了红外辐射，次年李特(Ritter)发现了紫外辐射。这样，辐射度学的研究领域也逐步扩大了。19世纪上半叶制造出第一个热电偶，并用于测量辐射热。比丘里(Becquerel)

发现了光伏效应。19世纪中叶，基尔霍夫 (Kirchhoff) 和斯蒂瓦特 (Stewart) 提出了黑体的概念。直到1900年，在大量实验和理论分析的基础上，才由普朗克 (Planck) 导出了描述黑体辐射能量和光谱分布的物理定律。此后，随着温度测量精度的提高，普朗克常数和玻尔兹曼 (Boltzmann) 常数已可准确地求到仅有1%的误差了。

除了普朗克定律和量子理论这两个辐射度学对物理学最基本的贡献外，在19世纪的后20年，兰利 (Langley) 研制了辐射热计，并开始研究大气辐射。当时热电偶的响应度也大大地提高了。安格斯特鲁 (Angstrom) 于1893年做出了第一台标准探测计——电标定辐射热计。许多科学家用它来测量黑体总辐射能和温度的关系。

20世纪初，辐射度学和光度学在许多科学研究和应用领域，如分子物理、光谱化学分析、视觉、照明等，得到了广泛的应用，使它们已明显地从物理学中分支出来。当时气体放电灯、充气白炽灯等相继问世，白炽灯在1914年也已用作辐照度标准光源。1920年在光度学中已使用具有一定色温的标准灯。此后，人眼明视觉光谱光视效率和色度系统都有了国际标准。20世纪中期，光电探测器已开始应用到光辐射探测中。光辐射在吸收、散射介质中的传输也有人开始研究了。辐射度学在大气物理，红外、紫外分光光度测量，色度的质量检查中都有了广泛的应用。

近二三十年来，辐射度学和光度学发展特别迅速。光源的种类日新月异地发展着，它们的光效与光色都得到了改善。光辐射探测器品种大大地增加了，性能提高十分显著。这些使辐射度量学和光度学物理测量的精确度大为提高。例如，基

于电功率标定的辐射计和基于内量子效率测量的自校准硅光电二极管，使辐射度量的测量精度可达到0.1%。材料辐射度特性的测量也得到广泛的应用。

空间技术、军事、激光技术等的发展，给辐射度学和光度学提出了新的课题，也大大促进了这一学科的研究以及在测量技术、设备、方法上的进步。

辐射度学和光度学应用领域的迅速扩大，也带来了一些问题，就是曾经在相当长的一段历史时期内，各应用学科提出和采用一套适应自行需要的有关辐射度量和光度量的术语定义和单位，从而造成辐射度学和光度学在这些方面长期不能统一。它的逐步解决也只是近20年来的事。

我国的光辐射计量也取得了显著的成绩。国家计量部门能复现国际光度基本量——坎德拉，并建立起光通量、光强度、照度、亮度等一系列标准。光谱辐照度、光谱辐亮度的标准以及色度标准、材料反射比标准等都已建立起来。为了适应激光功率的测量需要，也建立起一套从纳瓦级到万瓦级的功率测量系统。其中不少基准、标准和测量手段已达到或接近国际水平。我国的计量标准还定期与国际上主要光辐射计量部门进行比对。所有这一切，对推动我国光辐射计量的标准化，提高计量的精确性以及计量对科学研究、生产的监督等都起到越来越大的作用。

第一章 辐射度学和光度学的基础知识及辐射能在空间的传输

§1.1 辐射度学和光度学的基础知识

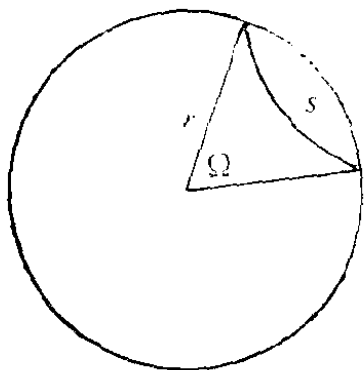
在光辐射能的定量描述中，采用了各种辐射度量。简单地说，辐射度量是用能量单位描述光辐射能的客观物理量。与辐射度量对应的还有光度量。光度量是光辐射能为平均人眼接受所引起的视觉刺激大小的度量。这就是说，光度量是具有平均人眼视觉响应特性的人眼所接收到的辐射量的度量。不难看出，辐射度量和光度量都是用来定量地描述辐射能强度的。然而辐射度量是辐射能本身的客观度量，是纯粹的物理量；而光度量则还包括了生理学、心理学等的概念在内。

在讨论辐射度量和光度量时，一个十分重要的概念是立体角。

1. 立体角

立体角是用来描述辐射能向空间发射、传输或被某一表面接收时的发散或会聚的角度。

锥体的立体角 Ω 定义为：以锥体的顶点为球心作一球表面，该锥体在球表面上所截取部分的表面积和球半径平方之比。单位是球面度（sr）。



由图1-1可以写出

$$\Omega = \frac{s}{r^2} \quad (1-1)$$

图1-1 立体角的概念

式中， s 是立体角为 Ω 的锥体在球面上所截部分的表面积， r 是球的半径。

在平面图形上，常用角度来描述两条或一束射线的发散和会聚的程度，而辐射能是以电磁波的形式向它所在的空间传输，这样就要用立体角来描述辐射能在传输中发散和会聚的空间角度。

由于半径为 r 的球，其表面面积等于 $4\pi r^2$ ，所以一个光源向整个空间发出辐射能，或者一个物体从它所在的整个空间接收辐射能时，它们对应的立体角就是 4π 球面度。而半球空间所张的立体角即 2π 球面度。

在球坐标中（图1-2），由天顶角 θ 和方位角 φ 的增量 $d\theta d\varphi$ 所围成的立体角为

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{r^2 \sin\theta d\theta d\varphi}{r^2} = \sin\theta d\theta d\varphi \quad (1-2)$$

在 θ, φ 角度范围内的立体角

$$\Omega = \int_0 \int_{\varphi} \sin\theta d\theta d\varphi \quad (1-3)$$

求空间一任意表面 s 对空间某一点 o 所张的立体角时，可以由 o 点向该空间表面 s 的外边缘作一系列射线（图1-3）。这

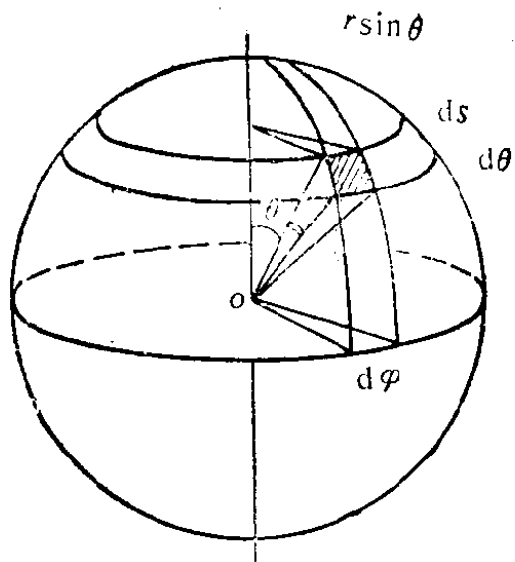


图1-2 角度增量对应的立体角

些射线束所围成的空间角的度量即为表面 s 对 o 点所张的立体角。因而不管空间表面的凸凹如何，只要它们对同一 o 点所作射线束围成的空间角是相同的，那末它们就有相同的立体角，例如图1-3中对于 o 点表面 s' 和 s 所张的立体角相同。

为了计算该立体角，可以过 o 点作半径为任意值 r 的球面，计算该球面被射线束所截部分的表面积，再除以 r^2 ，即得该射线束所构成的立体角大小。

在光学系统能量计算时，常常遇到求一个圆对称表面对某点 o 所张的立体角。如果该表面距 o 点较远，则常常可以先将该表面投影到 o 点与圆对称中心连线方向垂直的平面上（圆心位置不变），然后用该投影圆面积除以它到 o 点的距离平方来近似计算（图1-4）。

由图可写出

$$\Omega = \frac{s'}{r^2} = \frac{s \cos \theta}{r^2} \quad (1-4)$$

这样近似计算求得的立体角，比实际对应的立体角小，其误差如表1-1所示。

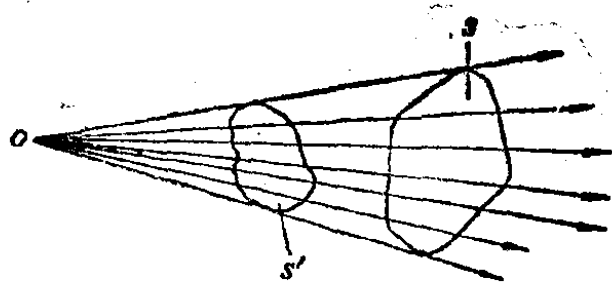


图1-3 射线束围成的立体角

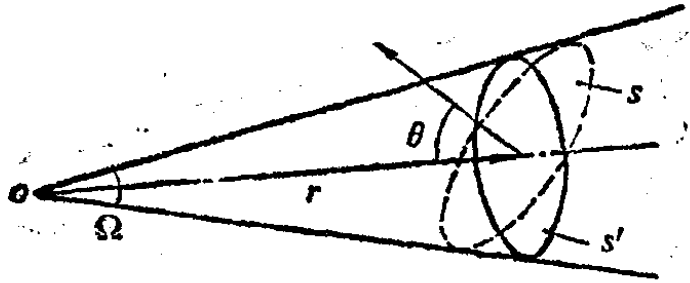


图1-4 与射线束成一定角度的平面的立体角

表1-1 用近似公式(1-4)计算立体角的误差

Ω	5°	10°	15°	20°	30°	40°	50°	60°
误差百分比	0.04	0.19	0.43	0.76	1.73	3.11	4.91	7.18

2. 辐射度量 and 光度量的名称、定义、符号及单位(GB 3102.6—82)

很长时间以来，国际上所采用的辐射度量和光度量的名称、单位、符号等很不统一。国际照明委员会(CIE)在1970年推荐采用的辐射度量和光度量单位基本上和国际单位制(SI)一致，并在后来为越来越多的国家(包括我国)所采纳。

表1-2和表1-3分别列出了基本的辐射度量和光度量的名称、符号、定义方程及单位、单位符号。

表1-2 基本辐射度量的名称、符号和定义方程

名称	符号	定义方程	单位	单位符号
辐(射)能	Q, W		焦(耳)	J
辐(射)能密度	w	$w = dQ/dv$	焦(耳)每立方米	Jm^{-3}
辐(射)能通量, 辐(射)功率	Φ, P	$\Phi = dQ/dt$	瓦(特)	W
辐(射)强度	I	$I = d\Phi/d\Omega$	瓦(特)每球面度	Wsr^{-1}
辐(射)亮度, 辐射度	L	$L = d^2\Phi/d\Omega dA \cos\theta$ $= dI/dA \cos\theta$	瓦(特)每球面度平方米	$Wm^{-2}sr^{-1}$
辐(射)出(射)度	M	$M = d\Phi/dA$	瓦(特)每平方米	Wm^{-2}
辐(射)照度	E	$E = d\Phi/dA$	瓦(特)每平方米	Wm^{-2}
发射率	e	$e = M/M_{b, \lambda}$ ①	—	—
吸收比	α	$\alpha = \Phi_a/\Phi_i$ ②	—	—
反射比	ρ	$\rho = \Phi_r/\Phi_i$ ③	—	—
透射比	τ	$\tau = \Phi_t/\Phi_i$ ④	—	—

① $M_{b, \lambda}$ 是黑体的辐出度。

② Φ_a 是吸收的辐通量, Φ_i 是入射辐通量。

③ Φ_r 是反射辐通量。

④ Φ_t 是透射辐通量。

表1-3 基本光度量的名称、符号和定义方程

名称	符号	定义方程	单位	单位符号
光量	Q		流(明)秒	lms
			流(明)小时	lmh
光通量	Φ	$\Phi = dQ/dt$	流(明)	lm
发光强度	I	$I = dQ/d\Omega$	坎(德拉)	cd
(光)亮度	L	$L = d^2\Phi/d\Omega dA \cos\theta$ $= dI/dA \cos\theta$	坎(德拉) 每平方米	cdm^{-2}
光出射度	M	$M = d\Phi/dA$	流(明)每平方米	lm m^{-2}
(光)照度	E	$E = d\Phi/dA$	勒(克斯)(流明每平方米)	$\text{lx}(\text{lm m}^{-2})$
光视效能	K	$K = \Phi_V/\Phi_e$	流(明)每瓦(特)	lm W^{-1}
光视效率	V	$V = K/K_m$ K_m 为最大光谱光视效能	—	—

⊖ Φ_e 是光通量, Φ_e 是辐通量。

(1) 辐射度量

① 辐射能。简称辐能 (Q) ,用来描述以辐射的形式发射、传输或接收的能量。单位是焦耳 (J) 。

当描述辐射能量在一段时间内的积累时,就用辐能来表示,例如:地球吸收太阳的辐射能,又向宇宙空间发射辐射

能，使地球在宇宙中具有一定的平均温度，就用辐能来描述地球辐射能量的收支平衡情况。

为了进一步描述辐能随时间、空间、方向等分布的特性，分别用以下不同的辐射度量来表示。

② 辐能密度 (w)。定义为体积元内的辐能除以该元的体积。即

$$w = \frac{dQ}{dV}$$

③ 辐通量 (Φ)。是以辐射的形式发射、传输或接收的功率，用以描述辐能的时间特性。许多光源，它的发射特性往往不是用它在一段时间内发射的辐能，而是用它们的辐射功率来描述的；许多辐射接收器，它们的响应值不取决于辐能的时间积累值，而取决于辐通量的大小。所以辐通量是一个十分重要的辐射度量。

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

④ 辐强度 (I)。定义为在某给定传输方向上的立体角元内光源发出的辐通量除以该立体角元，即

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

辐强度是把光源作为一个整体来描述其辐射功率的方向特性的，其中描述点光源 \ominus （或辐射面元）的辐强度具有更重要的意义。

\ominus 点光源即光源发光部分的尺寸比起它的实际辐射传输距离小得多时，把它近似认为是一个点源，在辐射传输计算、测量上不会引起明显的误差。