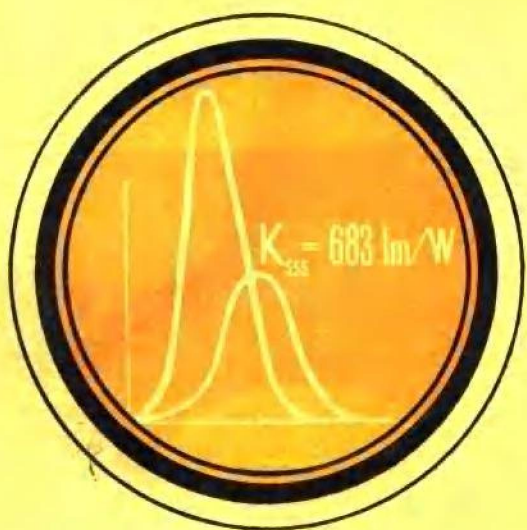




光辐射测量 原理和方法

光辐射测量原理和方法

薛君敖 李在清 编著
朴大植 孟昭仟

计 量 出 版 社

1980

内 容 提 要

本书是根据国际照明学会(CIE)和一些主要计量研究单位(如NBS—美, NPL—英, PTB—西德, ETL—日本, NRC—加拿大)的技术报告以及作者多年实际工作经验编写成的.内容共五章.各章分别阐述光度测量和辐射测量中的基本概念和基础理论,介绍近年来国际上推荐的典型测量方法,探讨光辐射测量中存在的问题以及解决问题的途径.使读者对光辐射测量有一个正确概括的了解,以便改进和提高光辐射测量技术.

本书适用于科研单位、工矿企业等从事光学计量、测试的技术人员,以及高等院校理工科与光学有关的专业师生.

光 辐 射 测 量 原 理 和 方 法

薛君敖 李在清
朴大植 孟昭仟 编著

—

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—

开本 787×1092 1/32 印张 13 1/4

字数 300 千字 印数 1—5,000

1981年3月第一版 1981年3月第一次印刷

统一书号 15210·6

定价 1.80 元

科技新书目: 178—101

前 言

太阳、空气和水是生命存在的三个必要条件。人类和一切生物都生活在光的世界里，没有光，生命活动就会终止。自然界的生命发展过程是与光密切相关的，德国诗人哥德说过：“眼睛的存在应当归功于光”。人类在利用自然光源和发明人造光源的实践中，无时无刻不在进行着光的相对比较，但是对于光的定量测量，那还是近二百年的事情。

直到 18 世纪，人类对光的研究几乎全部局限于几何光学，没有人定量地测量光辐射。1727 年法国人鲍吉尔 (Bouguer) 首次提出了光度和有关的概念。1760 年朗伯 (Lambert) 创立了光度学体制，确立了不同概念之间的数学关系。当时广泛使用人造火焰作为光源，例如蜡烛、菜油灯、戊烷气灯，并且选用特制的火焰灯作为光的基准。1879 年爱迪生 (Edison) 发明白炽灯，实现了有效的人工照明。白炽灯和气体灯的竞相发展，有力地推动了光度学的发展。就在爱迪生做出第一支炭丝灯那年，维奥列 (Violle) 建议用凝固温度下的铂表面作为光强度基准，这就是铂点黑体的原型。1920 年以前的光度学，把光强度看作为待测光源最容易比较的特性。正如瓦锡 (Walsh) 所描述的，光度学是应用物理学的一个分支，它主要研究光源的定量比较，并用某些约定的“标准”评价光源的发光量。在这一时期广泛应用本生光度计这类仪器，通过目视法比较火焰光源发出的光强度。

从 1920 年到 1962 年这 40 多年的时间里，是光度学从目视法转向光电法的过渡时期。在本世纪初期，照明工程师关心光源发出的总光通量，胜过关心光强度，在测量对象上，

从单一的光源测量扩展到任意辐射场和探测器的测量。光效较高的卤素灯和放电灯已经普遍应用于照明。物理探测器技术的进展和国际照明委员会推荐的光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 和 $V'(\lambda)$ 得到了国际公认, 促使测量方法由单纯的目视法逐渐转到物理(客观)光度法, 并且更多地使用硒光电池和真空管制成光电光度计。光谱光度法既为异色目视法提供辅助手段, 也为异色光电法提供色修正因子。1933年, 国际计量委员会成立了电学和光度学咨询委员会, 负责光度基准的定义工作。随之确定铂点黑体为光度基准, 把真空和充气钨丝灯作为光度传递标准, 相继进行了多次国际比对。象曝光表、照度计、球形光度计等已在工业实验室里得到广泛应用。在工业发达国家里还建成了 500—1000 K 的黑体辐射标准。

1963年以后是全面使用物理光度法的时期。在光度基准的选择上, 经过多年酝酿摆脱了温度测量的影响, 在光单位流明和辐射单位瓦特之间建立了准确的数学关系, 即 $K_{655} = 683 \text{ [lm} \cdot \text{w}^{-1}\text{]}$, 从而废除了铂点黑体作为光度基准。1963年普雷斯顿(Preston)首次用绝对辐射计测定了 K_m 值, 布列文(Blevin)等人于1974年提出了重新定义光单位的建议。这一时期的特点是材料的光辐射测量成为研究工作者的一个主要课题, 光谱辐射法已逐渐受到重视, 并把常规波长范围从可见区向紫端延伸到 0.2μ , 向红端延伸到 20μ 。在节约电能提高光效和改善光色的竞争中, 照明光源得到迅速发展。从19世纪80年代的炭丝灯发展到现代的金属卤化物灯和陶瓷灯, 光效从5流明/瓦提高到100流明/瓦以上, 在科学仪器和交通照明方面广泛应用发光二极管和各种规格的闪光管, 在研究地球外和地球表面上太阳辐射方面涉及的波长从真空紫外一直伸展到 30μ 的红外。为了提高人造光源

和自然光源测量的精度，发展了硅光二极管带运算放大器的数字式物理光度计，响应时间达到纳秒数量级，在光度动态范围 8 个数量级内，线性可达 0.05%，测量精度可达 0.01%，用这种仪器可以方便地测量光强度、光照度和光亮度等量。自动测量光源总光通量的变角光度计和测量辐射源光谱功率分布的光谱辐射计，采用微型计算机控制仪器动作，并快速处理数据，最高精度可达 0.3% 左右。测量瞬变光源的积分光度计已在工业测试中应用。作为辐射单位的基准，有三种途径，一是以普朗克理论为基础的黑体辐射器，精度可达 1%；二是电替代辐射计，公认的精度为 0.3%，一种精心设计的低温量热计估计可达万分之几；三是基于内量子效率测量的自校准硅光二极管，精度可达 0.04%。（辐射测量要普遍获得 0.1% 的不确定度还需解决不少困难。）PIN 硅光二极管的成功应用辅之以其它光探测器，既可使光辐射测量稳定可靠，又可进行宽量程的测量。阵列二极管的使用将会简化光谱辐射计的结构，提高了测量速度。

材料的光辐射测量已成为科学研究、工业生产中的一个重要方面。在测量月球——地球距离中使用的溯源反射材料已在交通照明器中广泛使用，纺织品的色度、粉末制品和纸张的白度、塑料制品的朦胧度、化学试剂和医药用品的吸光度、玻璃材料的透明度、太阳灶和红外加热器涂料的辐射度特性等，对于质量管理有着普遍的直接意义。这种材料特性的测量，本质上是光的反射、吸收、透射和发射的测量问题。用于材料测量的光谱光度计（分光光度计）、白度计、光学密度计、色差计已成为监视产品质量的重要工具。微处理机在光谱仪器中的应用使测量简便，速度加快。目前光谱透射比的最高准确度为 $\pm 0.04\%$ ，光谱反射比为 $\pm 0.2\%$ 。这方面的仪器在向标准化、多功能的方向发展。光谱透射标准材料

有中灰玻璃和荧石，光谱反射标准材料有硫酸钡和海龙（聚氟树脂）等。

探测器的特性测量已经是光辐射测量不可分割的部分。在光度、色度和辐射测量的各类仪器中都需要标定探测器的相对灵敏度、绝对光谱灵敏度；在评定探测器质量时还需要检查它的量子效率和响应度的线性、响应的角分布、稳定性、温度效应、偏振效应、磁效应等。热电和光电探测器已经复盖了整个光谱范围。探测器的相对灵敏度测量的精度可达 1×10^{-3} ，直线性检查的精度可达 1×10^{-4} 。

用五个参数全面描述辐射源、材料和辐射探测器的特性是比较合理的。1、辐射源输出的功率水平，材料的反射、吸收和透射辐射的能力（总称调制辐射的能力），探测器的响应度或灵敏程度；2、辐射源辐射功率的空间分布，材料调制的辐射功率的空间分布，探测器响应的空间分布，即灵敏度的空间分布；3、辐射源发射功率和材料调制辐射功率的光谱分布，探测器灵敏度随波长的变化；4、辐射源发射辐射和材料调制辐射的瞬时特性以及探测器的瞬时响应；5、辐射源、材料和探测器的偏振特性。光辐射测量的首要任务是设计和制造各类测量仪器以适应不断增长的需要，并通过标准参考材料的发行使各个国家内部以至世界范围内的光辐射测量得以统一；其次是探寻新的物理效应和新的测量方法用以提高常规波段辐射标准的准确性，或者将波长范围向两端延伸（例如等离子体、电子同步加速器使光辐射测量向紫外扩展）。此外，由于对辐射功率需要加上人眼视觉特性（光谱光效率）这个“权”，而使光度学成为一门心理物理学，所以必须研究物理测量结果与目视评判结果一致性的问题。

在科学技术迅猛发展的今天，光辐射测量不仅已经成为计量科学的一个重要分支，而且广泛地深入到社会生产、生

活各个方面。不论是在灯、探测器（包括显象管）、光学材料（轻工业和宇航技术中必须解决的关键问题）、仪器设备（包括摄影器材）的研制和机场、高速公路的照明（与能源消耗密切相关，美国照明用电约占电力消耗的 $1/4$ ）中，还是在有关人类身体健康的生物学工程、紫外光的大气透射（极大的曝辐量可以引起皮肤癌，而受控的曝辐量则可以治疗它）、污染检测（与人类健康直接密切相关的空气和水质）、光疗法（美国在临床化学分析中每天要用光谱光度计完成分析一百万次，这个数字每年约增加 15%）和植物生长的光合作用（这是生物物理学中的重大课题）中，甚至在犯罪预防中都少不了光辐射测量（美国利用光辐射测量技术改进了街道照明，使犯罪率下降 30%~40%）。目前日益受到重视的遥感技术（它是地球资源勘探、气象、灾害防治、地质地理科学研究中的最经济最有效的手段）迫切需要宽波长范围的光谱辐亮度标准、反射率标准及其空间分布的数据，而这些都离不开光辐射测量。

目前国外有关光辐射测量的资料，大多是论述可见光测量的书籍，有关辐射测量的资料大都是会议的专题报告和文件，一般读者（具有中专水平或大学低年级学生）阅读起来比较困难，而国内又无这方面的专著。因此，编者根据自己的实际工作经验，将国际上推荐的散见于各种书刊中的技术文件、专题报告编写成比较有体系的一本书——《光辐射测量原理和方法》，为具有一般物理基础知识的读者阅读光辐射测量专题文献搭个“桥”，为我国四个现代化贡献一份力量。

由于真空紫外区和远红外区的测量方法有其特殊性，且应用也较窄，所以本书是在常规波段（ $0.20-20\mu$ ）范围内讨论光辐射测量问题，而且只涉及非相干辐射。第一章讲述光辐射测量的基本概念、基础理论，系统地介绍其中的物理

量、单位和符号（本书的物理量单位及其符号采用我国国家计量总局试行的国家标准和国际照明委员会的推荐以及国际计量大会的规定）。第二、三章讨论辐射源（光源）的测量技术，重点讨论源的测量方法和辐射计（光度计）的基本问题，系统地介绍辐射标准和光度标准。第四章讨论材料的光度和辐射度特性及各种测量方法，并较详细地讨论了光谱光度计的杂散光问题。第五章讨论光探测器的特性及其测量技术，重点讨论探测器的光谱灵敏度和直线性问题。各章都附录了光辐射测量中常用的数据和图表。限于我们的知识水平和时间的急促，错误和不妥之处还望读者指正。

国家建委建筑研究院物理所副所长肖辉乾同志和该所李亚璋同志审阅了本书手稿全文，计量出版社陈艳春、刘宝兰、邓惠君、席秀莲、李锦兰、孙丽英、李裕山等同志在本书的编写和出版过程中给了很多帮助，在此一并致谢。

编 者

一九八〇年十月

于中国计量科学研究院

目 录

第一章 基本概念和基础理论.....	(1)
§ 1—1 引言.....	(1)
§ 1—2 基本概念.....	(3)
能量和通量(3) 光谱量和非光谱量(3) 辐射度量和光度量(3) 辐亮度(6) 光谱辐亮度(12) 辐射度量(光度量)之间的几何关系(15)	
§ 1—3 辐射度量和光度量的名称、符号和单位.....	(19)
光照度单位换算(23) 光亮度单位换算(24)	
§ 1—4 黑体辐射.....	(25)
普朗克定律(25) 维恩位移定律(27) 维恩近似和瑞利-琼斯近似(28) 斯忒藩-玻尔兹曼定律(29) 归一化光谱分布函数 $f(\lambda T)$ (30) 归一化累积光谱分布函数 $F(\lambda T)$ (30) 光量子辐射理论(32)	
§ 1—5 可见区黑体辐射.....	(34)
黑体光亮度(34) 黑体辐射的光效能(34) 实际温度(36) 辐射温度(36) 分布温度(36) 相关色温(37) 色品图(38)	
第二章 辐射测量.....	(41)
§ 2—1 引言.....	(41)
§ 2—2 辐射测量的基本要点.....	(44)
测量的基本考虑(44) 辐射源的测量(48) 源的调制(52) 源-背景衬比(53)	
§ 2—3 线光谱辐射的测定方法.....	(55)
逐点法(56) 通带半宽度法(57) 光谱辐射法(60) 扫描积分法(61)	

§ 2—4	标准辐射源.....	(65)
	黑体辐射器(65)辐亮度标准(钨带灯,碳弧其它标准源)(68)	
	辐照度标准(75)	
§ 2—5	标准辐射计.....	(76)
	Wonda辐射热测量计(77) 盘形绝对辐射计(79) 热释电辐射计(80)	
§ 2—6	自校准硅光二极管.....	(87)
§ 2—7	辐射测量的标定.....	(93)
	辐射源的标定(94) 辐射计的标定(95)	
§ 2—8	模拟太阳辐射标准和晴朗天空光亮度分布标准	(99)
	地球外太阳辐射的积分辐照度(100) 地球外太阳辐射的光谱分布(100) 模拟太阳辐射光谱分布的一致性要求(104) 模拟总辐射的积分辐照度(107) 自然总辐射的光谱分布(109) 模拟总辐射光谱分布的一致性要求(111) 晴朗天空的相对光亮度分布(114)	
第三章	光度原理与测量.....	(133)
§ 3—1	引言.....	(133)
	光度学的发展(133) CIE 与 CIPM 的关系(134) 光度测量的有效范围(134)	
§ 3—2	CIE 标准光度观察者.....	(135)
	人眼相对光谱灵敏度(135) 明视觉标准光度观察者(136) CIE 1964 补充色度观察者(144) 暗视觉标准光度观察者(144)	
§ 3—3	基准与光单位.....	(147)
	早期的火焰基准(147) 白炽体基准与“小数”基准(148) 临时“国际烛光”(149) 黑体基准和“新烛光”(149) 新烛光变成坎德拉(150) 坎德拉的新定义(151)	
§ 3—4	测光基本定律.....	(154)
	平方反比定律(154) 余弦定律(156) 组合定律(157) 塔尔伯特定律(157) 无限长发光线和无限大发光面光照度的计算(158) 星球的望远光度学(159) 光学密度(159)	

§ 3—5	测光标准灯	(164)
	白炽标准灯(164) 气体放电标准灯(166)	
§ 3—6	物理测光法	(167)
	宽带滤光器法(167) 光谱光度法(170) 绝对辐射测量法(172)	
	物理光度计的常用线路(172) 光度计响应的角分布特性(184)	
§ 3—7	目视测光法	(186)
	明视觉测光要素(186) 介视觉与暗视觉测光要素(188) 目视光度计(188) 同色光度法(192) 异色光度法(192)	
§ 3—8	光源的测量方法	(194)
	光照度(195) 光强度(196) 光通量变角测量法(197) 光亮度(201) 低光亮度(202) 照相光度法(203)	
§ 3—9	放电灯的光通量测量	(204)
	测量设备(204) 测量程序(214) 测量结果修正(215) 标定工作标准(218) 性能检查(219)	
第四章	材料的辐射度和光度特性及其测量	(226)
§ 4—1	引言	(226)
	光谱特征量(228) 一般特征量(228) 辐射度特征量(228) 光度特征量(228) 影响特征量的参数(229)	
§ 4—2	基本特性及其特征量的描述	(232)
	折射(232) 漫射(232) 反射(234) 透射(240) 吸收(241) 发射(244)	
§ 4—3	特征量之间的相互关系	(245)
	辐射度和光度特征量之间的关系(245) 光学材料各过程的相互关系(246) 光谱特征量与非散射体之间的相互关系(247)	
§ 4—4	各种材料的特征量	(248)
	Kubelka—Munk常数(248) 纸浆、纸和纸板(249) 塑料(250) 涂料、增塑剂、溶剂和胶合剂(252) 具有宏观结构的材料(252)	
§ 4—5	一般测量方法	(253)
	反射(254) 透射(262) 透明材料光谱特征量的确定(263) 规则透射因数和规则反射因数(265)	

§ 4—6	绝对反射测量方法·····	(266)
	变角光度法(266) 使用半球辐射体的方法(270) 基于Kubelka-Munk理论的方法(271) 基于积分球理论的双球法(272)	
§ 4—7	紫外-可见-近红外光谱光度计·····	(275)
	几个常用术语的定义(275) 结构与工作原理(278) 噪声与分辨率之间的关系(282) 仪器的最佳工作条件(283) 获得最佳仪器参数的步骤(290)	
§ 4—8	傅里叶变换红外光谱光度计·····	(291)
	傅里叶干涉分光计原理(291) 傅里叶变换红外光谱光度计的功能(293)	
§ 4—9	几种新型测量仪器·····	(298)
	逆反射计(298) 朦胧计(300) 光泽计(301) 镜面反射率测量仪(302)	
§ 4—10	估计杂散辐射能量的常规方法·····	(304)
	杂散辐射的一般概念(306) 光学系统设计对杂散辐射能量的影响(310) 杂散辐射能量随缝宽和缝高的变化(312) 滤光器材料和衰减器(314) 检验步骤与方法(318)	
第五章	光辐射探测器·····	(329)
§ 5—1	引言·····	(329)
	热敏探测器(329) 光电探测器(329)	
§ 5—2	各种探测器的原理和性能·····	(330)
	测辐射热器(330) 热偶堆(332) 高莱池(333) 热释电型探测器(333) 光电发射器件(334) 光导型探测器(336) 光伏型探测器(337)	
§ 5—3	探测器的特性参数·····	(339)
	响应度(339) 光谱响应曲线(339) 响应时间(339) 噪声电压(流)噪声等效功率(NEP)(340) 热噪声(341) 产生-复合噪声(341) 散粒噪声(342) 光子噪声(342) 探测率(343) 量子效率(344)	
§ 5—4	光电探测器的参数测定·····	(345)

非綫性 (345) 相对光谱响应度 (345) 空間响应度分布 (346)
疲劳 (347) 偏振誤差 (347) 局部响应度分布 (348) 光照度計
的允許誤差 (349)

§ 5—5 探测器光谱灵敏度的测量方法…………… (349)

参考热偶堆法 (350) 串接单色仪透射比测量法 (358) 串接单色
仪法与参考热偶堆法测定探测器光谱灵敏度結果的比較 (364)
探测器绝对光谱灵敏度的测量 (367)

§ 5—6 测量探测器非线性的各种方法…………… (370)

迭加法 (371) Bouguer 定律法 (384) Beer 定律法 (386) 迭加
法与 Bouguer 定律的結合法 (386) 平方反比律法 (387) 使用液
体和气体标准吸收滤光器法 (388) 使用标准反射材料法 (388)
使用转动扇形盘法 (388) 諧頻振幅或拍頻振幅測量法 (389)
輻通量測量法 (393) 示零法 (394) 用綫性探测器标定被测探
测器法 (394)

§ 5—7 减小非线性和提高准确度的方法…………… (395)

光电倍增管的选用 (396) 扇形盘的使用 (397) 将稳定通量加
于两个被斬輻射束中的弱通量 (Jung 法) (397)

第一章 基本概念和基础理论

§ 1—1 引言

以电磁波形式或粒子（光子）形式传播的能量，可用平面镜、透镜或棱镜之类的光学元件反射、成像或色散，这种能量传播过程称为光辐射。在电磁波谱中（如图 1-1 所示），光辐射位于 X 射线和微波之间，在约 1 纳米与约 1 毫米之间。最熟悉的部分是可见光，位于约 380 纳米和 780 纳米之间，即人眼明视响应的近似极限。这个极限两端的界限不是很分明的，图中的波长范围只有近似的边界。

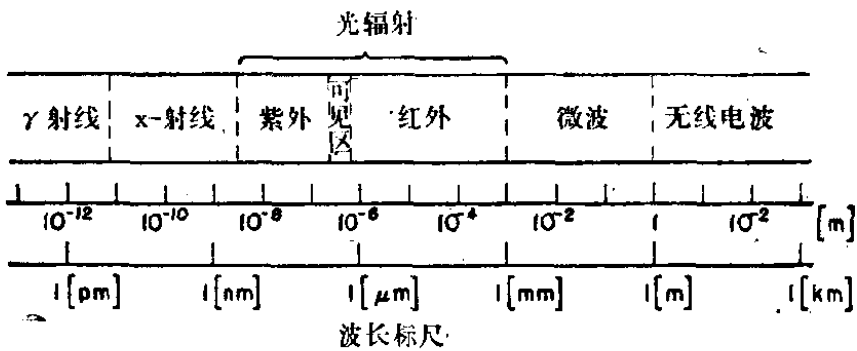


图 1-1 电磁波谱

研究光学现象有三种方法，每种方法的有效性都有其一定范围。它们是：几何光学（射线光学）、物理光学（波动光学）和量子光学（粒子光学）。

处理光学问题的最简单方法是几何光学。这种方法能很好地说明最普通的光源，诸如白炽灯、荧光灯、碳弧灯、放电灯、发光二极管（LED）和实验室黑体这类光源的光辐射。但是几何光学却不能解释某些阴影边缘处发生的衍射条纹，

也不能说明干涉仪中的衍射或干涉图样。此时需要用物理光学来处理。在研究光与物质相互作用的微观结构时，必需考虑到其中能量交换时的不连续性。此时需要把光辐射看作是分立“波包”或光子的传播，大量分布的光子才在与光学波对应的时空中产生平均能量分布。就本书讲述的内容而言，用几何光学就足以处理“经典的”光辐射测量，只是偶尔将波动光学或量子光学现象看作为射线光学的微扰。

几何光学和物理光学都基于光的波动理论，可用微粒理论使它们一致。它们之间的主要区别是相干现象。

电磁波是由相互联系的周期性变化电磁场构成，这些变化在沿传播方向的空间和在沿光路上任一时刻都是周期性的。电磁波的发射可认为是由辐射源材料的分子或原子中各个荷电粒子的振动引起的。如果这些振动是无规则的，如同物质受热激发时产生的无规则运动，那么产生的波的位相同样也是无规则的。这样的振动组合起来以非相干的辐射传播。非相干辐射遵守几何光学定律，从不同方向通过同一点的各个波似乎是彼此完全无关，互不干扰。

可是，如果粒子由于某种原因而一起振动，彼此“同步”，则合成的波将是相干的。这些波具有一致的相位关系，在许多振动周期期间它们将彼此加强或相消，产生的干涉图样偏离几何光学定律。基于几何光学的关系式，在许多情况下不适用于激光器产生的强相干辐射。但如前所述，在前面列出的普通光源的测量中几乎完全可用几何光学处理，而把波动光学和量子光学现象当作偶然的干扰。

本书主要论述约从 200 纳米到 20 微米的非相干光辐射，不讨论激射和真空紫外及远红外光谱区。我们称这样“缩小的”非相干辐射区为“光辐射”。

凡是光辐射测量都包含光源产生的一束辐射，沿一光路

传播到辐射测量仪器这样的过程。这个光源可以是一个发射辐射的源，也可以是个被照射的物体，通过反射或散射把另一光源的辐射投在测量仪器上。辐射传播的路径可以是真空，也可是穿过一些不同的媒质，并且包含有与物质的种种作用诸如反射、折射、散射、吸收甚至是发射（由荧光产生的）等相互作用。辐射测量仪器有各种形式，从单个光电管到高级光谱辐射计。在光辐射中，辐射功率（辐射能流）的分布或非相干光辐射通量可用五个辐射参量：位置、方向、波长、时间和偏振来完整地描述或说明。光辐射的测量是个多维问题，它总是包括这五个参量以及可能有的其它参量。辐射强度在空间的不同点，在任何一点的不同方向，对于不同的波长和不同的偏振态都是不相同的，并随时间迅速变化。此外，辐射与物质的相互作用——吸收、发射、散射或反射和折射也都与这五个辐射参量有关。仪器参量 and 环境参量（例如温度、湿度、磁场）也可影响测量。因此，我们虽然不能方便而周密地表示这些因素，但还是要提供在各种情况下辨认和处理所有这些重要因素的系统方法。

§ 1—2 基 本 概 念

辐射测量是测量与辐射能有关的量，光度测量是测量与光能有关的量。因此，在辐射测量与光度测量中，能量与通量（即能量流）是最基本的物理量。下面首先讲述这两个量，然后通过它们来描述光辐射测量中其它重要的概念。

1. 能量和通量 光谱量和非光谱量 辐射度量和光度量

辐射能 Q 是以电磁波形式发射、传输或接收的能量。辐通量 $\Phi \equiv \partial Q / \partial t$ 是辐射能随时间的变化率，即以辐射形式发射、传输或接收的功率。光能 Q_v 是视觉可见的辐射能。光通量 $\Phi_v \equiv \partial Q_v / \partial t$ 是光能随时间的变化率，是可见的辐通量。