

辐射度量、光度量和色度量及关联性

李远达 李伟 楼云亭

从 17 世纪牛顿通过三棱镜将光谱分解为七色光开始,人们逐渐对光有所了解。此后,很多科学家致力于对光线及其成因进行研究,从而发现了光波、无线电波、微波、宇宙射线等多种辐射线。在此同时,部分科学家对光线照射在物体上呈现的颜色进行研究,逐渐揭示了物体呈现颜色的原因。科学家在不断发现的基础上,逐渐形成了辐射度量学、光度学、色度学等多个度量学。这些度量学的建立,为量化分析提供了条件,为深层次的研究本领域内的内容打下了坚实的基础。随着研究内容的增多,领域之间联系更加复杂。本文将对三个度量的基本概念、范围及领域内的相关概念进行介绍,并对三者进行对比分析,以期达到明晰概念的目的。

一、辐射度量简介

辐射度量是一门专门研究电磁辐射能测量的科学。辐射度量是用能量单位描述辐射能的客观物理量。电磁辐射主要依赖于电磁波,电磁波即在空间传播着的交变电磁场。特定波长 λ 的电磁波,在真空中频率 ν 和光速 c 有如下关系: $c=\lambda\nu$ (c 是光速,等于 $3\times 10^8\text{m/s}$)。宇宙空间中充斥着电磁波,电磁波包括了从波长为 10^{-14}m 的宇宙射线到 10^9m (千兆米)的无线电波,其包括范围很广。为了便于对电磁波进行研究,人们按照波长或频率的顺序把各种电磁波排列起来,这就是电磁波谱。图 1 即为按波长排列的电磁波谱分布图。

电磁波有多种分类方式,按波长来分有无线电波($10^9\sim 0.3\text{m}$)、微波($0.3\sim 10^{-3}\text{m}$)、红外线($10^{-3}\sim$

$7.8\times 10^{-7}\text{m}$)、可见光($7.8\times 10^{-7}\sim 3\times 10^{-7}\text{m}$)、紫外线($3\times 10^{-7}\sim 6\times 10^{-10}\text{m}$)、X 射线($2\times 10^{-9}\sim 6\times 10^{-12}\text{m}$)和 γ 射线($10^{-10}\sim 10^{-14}\text{m}$)。

需要指出的是 X 射线(又称伦琴射线),随着技术的发展,它的波长范围也不断朝两个方向扩展。目前在长波段已与紫外线有所重叠,短波段已进入 γ 射线领域。无线电波段按波长可分为长波、中波、短波,按频率可分为 14 频带,这 14 个频带分别为至低频 1(TLF)、至低频 0(TLF)、极低频(ELF)、超低频(SLF)、特低频(ULF)、甚低频(VLF)、低频(LF)、中频(MF)、高频(HF)、甚高频(VHF)、特高频(UHF)、超高频(SHF)、极高频(EHF)、至高频(THF)。具体各波段频率范围及波长范围见文献。微波是频率为 $1\text{G}\sim 300\text{GHz}$ (对应波长 $0.3\sim 10^{-3}\text{m}$)的电磁波,是无线电波的一个有限频带。在实际应用中,对应的微波频段代号分别表为 L、S、C、X、Ku、K、Ka 和 V,各频段标称频段名为 1.5GHz 频段、2.5GHz 频段、4/6GHz 频段、11/14GHz(12/14GHz)频段、20GHz 频段、30GHz 频段、40GHz 频段。

通过对电磁波的划分,可以很清晰地知道日常生活中对电磁波的应用到底是使用的电磁波哪一频段。比如刚刚发射的嫦娥二号探月卫星和已经发射的嫦娥一号,其与地球通信就是通过微波,其频段为 S 频段。嫦娥二号卫星还将测试 X 频段的通信效果。S 频段频谱区域为 $2\sim 4\text{GHz}$,这一频段相对较低,带宽有限。而 X 频段频谱区域为 $8\sim 12\text{GHz}$,



图 1 电磁波谱分布图

比 S 频段频带更宽。X 频段更有利于星载测控设备小型化,降低设备功耗,传输更高码率信号。因此,对 X 频段通信效果的测试意义重大。另外,同步轨道卫星使用 C 频段通信,对深空探测通信则采用 X 频段和 Ka 频段。Ka 频段目前在国际上主要用于数据的接收。日常生活中应用的微波炉主要使用 2.45GHz 的微波,全球移动通信系统(简称全球通或 GSM)使用 900M~1.8GHz 的电磁波,电视使用四个频段的电磁波分别隶属两个波段,米波段和分米波段。米波段包括是 48.5M~72.5MHz (76M~92MHz)、167M~223MHz,分米波段包括 470M ~ 566MHz、606 M~958MHz。

辐射度量是面向整个电磁波谱的度量。辐射度量的基本概念和定律适用整个电磁波段的辐射测量。辐射度量发展关系生活中的方方面面,准确地对电磁波进行测量与控制具有重大的意义。

二、光度量及与辐射度量的关系

光度量是度量使人眼产生视觉效果的辐射的量。光度量的对象也是电磁波,因此,光度量和辐射度量之间存在密切的关系。在电磁波谱中,仅仅是波长为 380~780nm 的电磁波可以引起视觉,这部分电磁波被称作可见光。光度量度量的是能引起人眼视觉的电磁波(即可见光波段),因此,能否引起人眼视觉是评定是否是光度量的首要标准。由于光度量度量的也是电磁波,所以光度量同辐射度量的基本量定义和定义方程一一对应,光度量可以通过辐射度量导出。但是,光度量不仅包括光波(电磁波)量的度量,还包括人眼视觉对光(电磁波)响应程度的度量。因此,光度量又不等同于辐射度量。

两者的关系可以通过光通量 Φ_v 和辐射通量 Φ_e 两个对应量的转换公式清晰地表现出来。为避免光度量和辐射度量在符号上混淆,所以,光度量符号上加下标“v”,而在辐射度量符号上加下标“e”。两者的关系式为

$$\Phi_v(\lambda) = K_m V(\lambda) \Phi_e(\lambda)$$

$$\text{或 } \Phi_v = k_m \int_0^\infty V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \dots \dots \quad (1)$$

由于光度量表征人眼视觉对电磁波的响应,因此引入人眼光谱光视效率 $V(\lambda)$ (或称视见函数)来表征。 $V(\lambda)$ 是国际发光明委员会(CIE)推荐的平均人眼光谱光视效率。引入光谱光视效率的原因是由于人眼个体的差异,使得同样的光波刺激人眼所产生的效果不同。光谱光视效率是通过大量的实验数据得到的平均值,这已经得到国际计量委员会批准。人眼光谱光效率函数如图 2 所示。

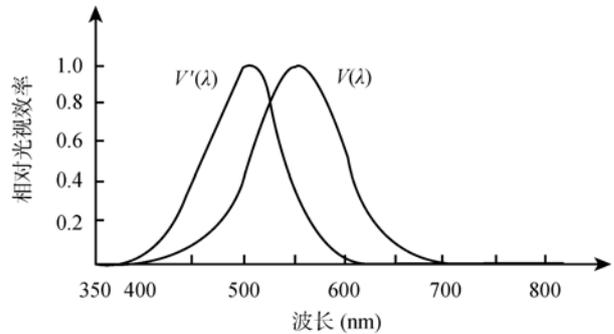


图 2 光谱光视效率图

在图 2 中有两条曲线,分别是明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 和暗视觉光谱光效率函数 $V'(\lambda)$ 。明视觉和暗视觉的形成是由于人眼在不同的亮度下,对各波段光谱刺激的反应程度不同。 K_m 是最大光谱光视效能(常数),对于波长为 555nm 的明视觉, $K_m=683 \text{ lm/W}$ 。对于波长为 507nm 的暗视觉, $K'_m=1725 \text{ lm/W}$ 。光视效能 K 与最大光谱光视效能 K_m 和光谱光效率函数 V 的关系为 $V=K/K_m$ 。

光度量包括基本量有光量 Q_v 、光通量 Φ_v 、发光强度 I_v 、(光)亮度 L_v 、光出射度 M_v 、(光)照度 E_v 、光视效能 K 、光视效率 V 等。辐射度量包括基本量有辐(射)能 Q_e 、辐(射)能密度 ω 、辐射通量 Φ_e 、辐射强度 I_e 、辐(射)亮度/辐射度 L_e 、辐射出射度 M_e 、辐(射)照度 E_e 等。光度量与辐射度量两者物理量的定义方程和对应如表 1 所示。

表 1 光度量与辐射度量物理量对应关系

辐射度量				光度量			
名称	符号	定义方程	单位符号	名称	符号	定义方程	单位符号
辐射能	Q_e		J	光量	Q_v		lm·S
辐射通量	Φ_e	$\Phi_e = dQ_e/dt$	W	光通量	Φ_v	$\Phi_v = dQ_v/dt$	lm
辐射强度	I_e	$I_e = d\Phi_e/d\Omega$	W/sr	发光强度	I_v	$I_v = d\Phi_v/d\Omega$	cd
辐射亮度	L_e	$L_e = d^2\Phi_e / d\Omega dA \cos\theta$	W/(sr·m ²)	光亮度	L_v	$L_v = d^2\Phi_v / d\Omega dA \cos\theta$	cd/m ²
辐射出射度	M_e	$M_e = d\Phi_e/dA$	W/m ²	光出射度	M_v	$M_v = d\Phi_v/dA$	lm/m ²
辐射照度	E_e	$E_e = d\Phi_e/dA$	W/m ²	光照度	E_v	$E_v = d\Phi_v/dA$	lx(lm/m ²)

从表 1 可以看出, 光通量与辐射通量在部分物理量的定义式上形式完全一样, 两者最根本的不同点只能通过式 (1) 表现出来。从这些量可以看出, 光度量是在人眼观察前提下的对辐射光波(电磁波)量的度量。辐射度量是在物理客观领域的, 对辐射电磁波量的度量, 不存在人的主观影响因素。

三、色度量及与光度量的联系

色度量是度量使人眼产生色感刺激的量。色感, 即颜色感觉, 是人眼对某一物体在某一光线照射下的一种心理反应。

颜色形成非常复杂, 但至少包括三个要素: 人眼、光线和被照物体。人是产生颜色感觉的主体, 不同的个体对同一光线照射下的同一物体的颜色感觉也有可能不同。这主要是由于个体之间人眼的差别产生的。为排除个体差异引起的颜色度量误差, 国际发光照明委员会(简称 CIE) 规定了色度量时使用的两个标准, 即 CIE1931 标准色度观察者和 CIE1964 补充标准色度观察者。1931 标准观察者是在视场 $1\sim 3^\circ$ 的前提条件下, 对大量人员进行实验测量后得到的一个平均人眼标准。1964 标准观察者与 1931 标准观察者的不同在于其视场为 $1^\circ\sim 10^\circ$ 。最常用的观察者为 1931 标准观察者, 观察者决定的是光谱光效函数 $V(\lambda)$ 。

影响颜色的第二个要素为光线, 最根本的影响因素为光谱功率分布。每一种光源发射的光谱功率分布都不相同, 为对颜色进行一致的度量, CIE 规定了几种标准照明体, 分别为标准照明体 A、标准照明体 C、标准照明体 D_{65} 、标准照明体 D_{55} 、标准照明体 D_{75} 。以标准照明体 A 为例, 标准规定标准照明体 A 是绝对温度为 2856K 的完全辐射体, 则出射光线的光谱功率分布等同于绝对温度为 2856K 的完全辐射体所辐射光线的光谱功率分布, 通过光谱功率分布可进行进一步的颜色度量。

影响颜色的第三个要素是被照物体, 由于物体表面对各个波段的光线反射率不同, 所以在同一光线照射不同物体时才会产生不同的颜色效果。例如, 纯蓝色光线在照射红色片时呈现黑色, 在照射蓝色片时呈现蓝色。

因此, 在对非发光物体颜色表示中, 在规定的标

准观察者和标准照明体后, 颜色的度量即是对物体对各个光谱波段反射能力的度量, 颜色即是物体对各光谱波段反射能力的综合体现。色度量是反应物体对可见光部分各光谱反射能力的度量。色度量是和光波(电磁波)的光谱分布以及光谱功率分布有关的度量, 它反映物体反射光线光谱的一种能力。

但是, 颜色分为光源色和物体色(又称固有色)。光源色描述发光体发出光的颜色, 物体色描述非发光体的颜色。因发光体发出的光而引起人们视觉的颜色称为光源色, 非发光体(即一般物体)的颜色称为物体色。在光度学中, 对可见光色彩的度量主要有色温、相关色温、色表和显色性几个量。色温描述热辐射光源, 相关色温描述具有线状光谱的辐射光源。概括讲, 光源的颜色有两个含义, 一是光源的色表, 二是光源的显色性。光源的色表是指光源的表观颜色, 它与色温有关。CIE 将电光源色表分为三类, 分别是: I 暖 $< 3300\text{K}$ II 中间 $3300\sim 5300\text{K}$; III 冷 $> 5300\text{K}$ 。光源的显色性是指在光源照射下物体表面显示的颜色与标准光源照射下显示的颜色相符合的程度, 常用显色指数来表征。光源的显色性与光的光谱功率分布有关。

从上述描述中可以看出, 光度量主要是对可见光量的度量, 对可见光色的度量仅涉及色温和显色性。而色度不仅包括对光的色度量而且包括对物体色的度量。且色度量中用 RGB、HSI 等色彩空间, 对颜色进行定量表述, 以方便对色彩的研究。两者有交叉, 但度量范围和方式方法不同, 差别较大。

综上所述, 可以看出, 辐射度量覆盖范围包括整个电磁波波段, 辐射度量的所有基本概念和定律适用于整个电磁波部分。光度量也是对电磁波的度量, 不过光度量仅仅对能够引起人眼视觉的电磁波进行计量。并且引入光谱光视效率, 使度量的电磁波(可见光部分)也受到人眼这一客观条件的限制。光度量对光线有定量的描述, 但是对色的描述有局限性, 主要是光的色表示方面。为对颜色进行定量的描述, 色度量建立起来。色度量不仅能对光源色进行有效地描述, 更可以对物体色进行定量地表述。所以, 三者相互关联, 又不可相互替代。三者的发展必将对社会的方方面面给予极大支持。

(济南市山东建筑大学 200101)