

# 红外手册

第一分册

(辐射理论与大气传输)

红外与激光技术编辑组

# 红 外 手 册

\*

编辑： 红外与激光技术编辑组  
出版： 天津市（15）215 信箱  
印刷： 天津新华印刷厂

\*

第一分册（全套共有四个分册）

1972

测 62

## 出版说明

一九七五年，红外情报与分析中心根据现代红外技术发展的需要，组织和筹备《红外手册》(The Infrared Handbook)的编辑出版工作。红外情报与分析中心主任George Zissis，与亚利桑那大学光学教授W.L.Wolfe、即一九六五年出版的《军事红外技术手册》(Handbook of Military Infrared)的编辑，作为《红外手册》的编辑，共同合作，经过广泛、深入的调查研究，多方征求意见，在《军事红外技术手册》(该手册国内尚无中译本)的基础上，作了较大的修改，充实了大量数据，增加了新的内容，编成了这本《红外手册》。这本手册于一九七八年在美国出版，去冬引入我国，是目前红外学科领域中最最新的一本参考书和必备的工具书。

为了及时地把这本手册推荐给我国从事红外工程技术设计、科教人员，我们全文翻译了这本手册，内部出版；考虑到使用方便，在译本中，根据全书的自然章节，拟分四分册出版：

- 第一分册： 辐射理论与大气传输  
(即原手册的1-6章)
- 第二分册： 光学材料与元件  
(即原手册的7-10章)
- 第三分册： 红外探测器  
(即原手册的11-15章)
- 第四分册： 红外系统  
(即原手册的16-25章)

参加第一分册翻译、校对的有陆荣铿、周金利、龚琰民、张秀媚、唐大经、芦丽卿、金侗乐、王建城、陈水泉等同志。整个分册由何启予、陈光余和孙再龙同志审订。

红外技术涉及的专业面很广，参加译、校和审订者的专业、外文水平有限，在译本中难免有谬误之处，敬请广大读者批评指正。

《红外与激光技术》编辑组

一九八〇年五月

## 序 言

红外情报与分析中心(IRIA)筹备出版这本《红外手册》来替补1965年出版的《军事红外技术手册(*Handbook of Military Infrared Technology*)》。那本老手册在提供数据、技术性能和计算公式方面,起到了参考作用,是一本必备的工具书,倍受红外技术界人士欢迎,但自它出版到现在,已过去了十多年,作为资料显得有点过时。从1965年以来,已经研制成了许多新的探测器,发现了许多新材料,许多测试手段得到很大改进。此外,那本老手册也有其不足之处,例如,对红外系统注意得很少,而过多地着重于(在别处已有许多文献论述的)控制理论方面。

1975年,《红外手册》两位编辑中,有一位编辑,即红外情报与分析中心主任 George Zissis与华盛顿特区海军研究部(ONR)的物理学者 William Condell作了充分的讨论,最后确认原先那本手册已经不合时宜了;经过反复协商,决定出版本手册。后来,亚利桑那大学光学教授,即原先那本手册的编辑 William Wolfe,同IRIA达成协议,与George Zissis一起,共同编辑这本《红外手册》。

首先,我们对红外技术界有代表性的人物作调查,力求确定1965年出版的那本手册中哪几部分最有用,哪几部分很少用,以及收集一些增补和删节的意见。调查结果归纳如下:有关辐射、探测器、光学设计、光学材料和背景等几章用得很多,而控制系统、热控制和调制盘几章用得甚少;对红外系统的论述也不充分。调查结果与我们对那本手册的优缺点的估计是一致的。于是,我们就与先前编写过辐射理论及辐射源、探测器、光学材料、光学系统和背景各章的作者取得联系,进行订正和增补;删去用得很少的一些章节,并将不太令人满意的系统设计那一章分四章编写,着重于有选择的主要红外系统设计方面。我们还加进了显示一章,因为它是系统总体设计和性能中一个关键的要素。热释电敏感元件的出现,使人们对设计和制作完全类似于标准电视摄像管的那种红外摄像管有了新的希望,所以增加了红外摄像管一章,但着重于摄像管和热释电材料方面。半导体电子学中的主要技术进展是电荷耦合器件(CCD),它使得二维阵列探测器有成为现实的希望。虽然红外CCD仍处于研制阶段,其本身实际还没有成熟到可作为手册内容,但我们决意把理论探讨和现有几种实验性模型的数据放在手册中;读者也在期望红外CCD结构能迅速成为现实。有源系统在红外工艺设备中也开始占有它的位置。而在这方面,本手册也包括了在通讯、定向搜索和测距系统中用的激光信号的直接探测及相干探测方面的一些探讨和数据。

编辑好一本手册,其中有一部分准备工作是确定统一的名称、一套始终一致的符号和统一的单位。统一单位这部分,原是想象得很容易,但实际并不易。我们直接采用国际单位制(SI)(基本上是米制)作为本手册的单位制;除了气动力效应和致冷器这两章外,对其他全部章节这似乎是很自然的。在这里,几乎全是由采用英制的工程技术人员来完成这一工作的,因而参考数据都是用英制。做到名称统一是有困难的。首要的规则,当然是要确定所用的术语。最麻烦的术语是“intensity”这个词。大多数天文学家用“intensity”或“specific intensity”作为与面积和立体角有关的辐射通量(或辐射功率)密度分布的术语,而

我们则用“radiance”代表这个词；电磁理论方面的研究人员当单独提到面积上的辐射通量密度分布时，就经常使用“intensity”，而我们就用“irradiance”或“exitance”代表这个词。我们用intensity只是指对于立体角的辐射通量密度分布。信噪比的概念含糊，我们力求以定义来解决。首先，除非另有说明，否则都是指均方根(rms)信号与均方根噪声之比的意思，当表示为峰-峰信号与均方根噪声之比时，那就得加说明，如无差别，就不作说明。

其次，考虑到与红外技术有关的许多频率中可能有的混淆现象，在本手册中，我们用 $\nu$ 代表很大的光学辐射频率（例如， $\nu \sim 10^{12} \sim 10^{14}$  赫）。调制频率（可能备有斩波盘）是与一种调制或用 $f$ 表示的时间频率相关联的。最后，辐射图型往往有空间分布，与此有关的还有空间频率。这些我们用 $f_x$ 或 $f_y$ 或 $f_z$ 表示，也许是最为适宜的。

在正文中，我们以黑体字表示矢量，而在图中就要用上面划一箭头的正规符号，如 $\vec{x}$ 。此外，在正文中，有些符号用斜体印刷，但在图中就不能这样表示。

毕竟英语字母和希腊字母很少，不足以在符号和物理量之间做到一一对应。我们利用国际单位制的一套符号为各原子恒量和有关辐射度术语的符号。全书开头所列的符号是通用符号，不独为本手册所采用。例如，光在真空中的速度常常写成 $c$ ，而 $c$ 有时也表示其他常数。每一章都有其自己的一套符号、名称和单位，都列成表格，放在每一章的开头。我们相信统一是可能的，但希望不要出现混淆。

我们力求把文章按逻辑顺序编排，以方便读者查找一个具体题目。按惯例，一般都是辐射源、大气、光学、探测器、电子学、显示和系统这样排列的。第一章着重于黑体辐射体的一般计算方法。我们决意为各种分布及积分提供出几种有代表性的小型计算器程序，使读者在原子恒量的最新数值的基础上很快能得到一种数值。第二章和第三章提供有大多数实验室和野外源的资料数据。因为不可能对全部自然源列出一览表，所以只是提供一些模型，以便能从相当少的数据中构筑自然景象。第四章、第五章和第六章提供受大气影响的散射、吸收及湍流效应的模型，并给愿意深究的读者提供参考文献。第七章、第八章、第九章和第十章，可以使读者选择一种材料，并在一项光学设计中找到“好门路”(first-cut)。如能应用和参考几种光线追迹和光学设计程序中某一种程序，设计还可以作得更精致一些，如能与出售人取得联系，并对实物作具体的测定，可对光学材料和光学设计作最后的选择。第十一章，第十二章、第十三章和第十四章，能使读者挑选一种有用的探测器：元件、阵列、CCD、摄像管或感光胶片，经过更详尽的分析之后，还可作具体的选择。第十五章和第十六章提供有关探测器致冷和从探测器提取信号的资料。第十七章和第十八章叙述信息处理和显示的各种方法；在第十七章中，详细叙述二维傅里叶分析以及在红外系统设计和分析中尚未广泛采用的技术。第十九章到第二十四章涉及系统、成象、辐射测量、跟踪、报警、通讯、测距以及模拟，所提供的方程式及数据，都是具体到某一个系统的设计，无需作具体举例就可以应用。最后，第二十五章介绍的许多常数，与1965年那本手册及其他出版物中刊载的常数有所不同（或改进），是得到国际科联理事会(ICSU)下属科学技术数据委员会(CODATA)的业务组在1973年制定的国际物理常数的现行公认的数值。在这里，利用第一和第二辐射常数的给定值计算出的测量数值与过去那种不那么精确的数值之间有显著的差异。

许多人对本手册的出版，都作了不同的贡献，在此向他们表示感谢！最值得提到的是Gary Gatien，他是我们的同事，也是主编和组织者。在整个出版规划中，他审阅和删改

手稿、订正内容，以及协助两位编辑的校正工作； Corliss Hugg对本手册的出版，也给予许多帮助，在图形大小和订正中，任劳任怨完成工作，IRIA的 Marie Nichols和Rose Coleman承担了大量的打字工作； William Condell, John Ivory (是芝加哥, ONR) 和 Joseph L. Blue (国防后勤代理) 三位一体，对本手册如期顺利出版做出了贡献。

由 James Cooper, Robert DiGiovanni, Macella Dunton, Alice Otto, Judith Steeh和 Watter Ellis组成的ERIM出版公司及其技术部门全体成员作了至关重要的贡献。IRIA的经理 Mildred Denecke对出版计划给予帮助， Ruth Chatton负责准备索引，Janice McKimmy作了清样校对工作； ERIM新技术编辑部的三位成员，即Anthony J.La-Rocca, 已故的 Leo Larsen, 和 Joseph Mudar, 负责几章的技术编辑工作，其他人员在具体章节中做了有益的审校工作。

特别要提到的是Eastman Kodak公司的小 John Berezansky和 Kenneth T. Lassiter, 以及休斯飞机公司的 Michael N. Ernstoff和 Gerald K.Slocum, 他们牺牲了休息时间，为第七章、第十四章和第十八章对照出版物与他们公司的产品作数据校正；我们还感谢

Bulova Watch公司的 Robert Ansell为第十章做了同样的工作；感谢信息显示学会(STD)及其负责出版的理事 Thomas V. Curran同意让我们从 STD出版物中复制第十八章的资料，和感谢休斯飞机公司的 Lawrence C. Caplan, John M. Fitts, Jack M. Sacks,

Reo Yoshitani和 Albert Zalon为第廿二章花了颇多的精力；还有GTE Sylvania公司的 A.R. Kraemer, P.J.Titterton和 S.C. Morford, 为第廿三章做了类似的贡献。本手册的出版承蒙各方协助，特致谢忱。

最后，各位作者在工作中一丝不苟，认真校正，和埋头苦干的精神，应受到赞扬。虽以菲礼，亦难酬其所付之辛劳！

编辑： George J. Zissis  
William L. Wolfe

# 红 外 手 册

## (总 目 录)

- 第 一 章 辐射理论
- 第 二 章 人工源
- 第 三 章 自然源
- 第 四 章 大气散射
- 第 五 章 大气吸收
- 第 六 章 通过大气湍流的传输
- 第 七 章 光学材料
- 第 八 章 光学设计
- 第 九 章 光学元件——透镜和反射镜
- 第 十 章 光—机扫描技术和装置
- 第 十 一 章 探测器
- 第 十 二 章 电荷耦合器件 (CCD)
- 第 十 三 章 显象管
- 第 十 四 章 感光胶片
- 第 十 五 章 致冷系统
- 第 十 六 章 与探测器连接的有关电子学
- 第 十 七 章 调制盘和图象分析
- 第 十 八 章 显示
- 第 十 九 章 成象系统
- 第 二 十 章 辐射测量术
- 第 二 十 一 章 报警系统
- 第 二 十 二 章 跟踪系统
- 第 二 十 三 章 测距、通讯和模拟系统
- 第 二 十 四 章 气动力对红外系统设计的影响
- 第 二 十 五 章 物理常数和换算因子

# 红 外 手 册

## 第 一 分 册

### 目 录

第 一 章	辐射理论·····	( 1 )
第 二 章	人工源·····	( 32 )
第 三 章	自然源·····	( 99 )
第 四 章	大气散射·····	(202)
第 五 章	大气吸收·····	(259)
第 六 章	通过大气湍流的传输·····	(355)



# 第一章 辐射理论

## 目 录

1.1 引 言 .....	(2)
1.1.1 符号、名称和单位 .....	(2)
1.1.2 荧光计测和建议中的几种分类法 .....	(2)
1.1.3 中国餐馆菜式命名法 .....	(2)
1.2 黑体(普朗克)函数 .....	(2)
1.2.1 辐射度量及其换算 .....	(4)
1.2.2 辐射度量(光谱标度换算) .....	(6)
1.2.3 广义普朗克函数 .....	(6)
1.2.4 普朗克函数的近似值 .....	(10)
1.2.5 普朗克函数的消长值 .....	(10)
1.2.6 普朗克曲线 .....	(10)
1.2.7 袖珍计算器程序 .....	(12)
1.2.8 辐射计算尺 .....	(12)
1.3 有关的辐射定律 .....	(23)
1.3.1 发射率 .....	(23)
1.3.2 总功率定律 .....	(24)
1.3.3 基尔霍夫定律 .....	(24)
1.3.4. 反射率和双向反射分布函数(BRDF) .....	(25)
1.4 辐射几何学 .....	(26)
1.4.1 传输方程 .....	(26)
1.4.2 朗伯面 .....	(26)
1.4.3 余弦辐射分布面 .....	(27)
1.4.4 朗伯圆盘 .....	(27)
1.4.5 计算的捷径 .....	(27)
1.5 参考资料文献目录 .....	(31)
1.5.1 参考资料 .....	(31)
1.5.2 文献目录 .....	(31)

# 第一章 辐射理论

## 1.1 引言

1.1.1 符号、名称和单位 这里所用的各个量和符号基本上是以国际单位制为基础的。表1-1列出本章用的各个量的符号、名称和单位（辐射度各量的除外）。表1-2列出辐射度各量的符号、单位和公式。

光度各个量是以视觉响应为基础的，因而

$$\int K(\lambda)S(\lambda)d\lambda = K_m S \int V(\lambda)s(\lambda)d\lambda \quad (1-1)$$

式中  $K_m$  = 最大的发光能力，683流明/瓦

$S$  = 最大的源输出，瓦

$V(\lambda)$  = 国际照明委员会(CIE)标准光度观测仪的相对光谱发光效率

$s(\lambda)$  = 源的相对光谱输出

基本单位是新烛光，或国际标准烛光，确定为在铂的凝结温度下，一个黑体的1/60厘米<sup>2</sup>面积的发光强度（见第二章）。表1-3给出多数光度量的单位、量纲和定义，表1-4是光度单位间的相互换算。

1.1.2 荧光计测和建议中的几种分类法 Jones[1-1]指出，辐射度量学中多数概念只讲到一种辐射通量的几何学，例如辐射通量几何图形或“荧光计测”（Jones建议接头词用“phlu-”）。在本节中， $Q$ 这个量的通量是很有意义的。在表1-5中列出了Jones采用的名称和Nicodemus采用的某些别称。

1.1.3 中国餐馆菜式命名法[1-2] 用这种方法，人们挑选一个量和几个修饰量，就象选用中餐的不同菜肴一样。这种方法是具体而明确的，而且有文字说明。例如，起初从表1-6的A、B、C和D列中每列选一个字，而到后来也许用缩写字了。

## 1.2 黑体（普朗克）函数

一个黑体可以定义为一个理想的辐射体，即单位时间内从特定光谱区间的单位面积向半球发射出最大的光子数，也是在同样温度下热力学平衡中任一物体能够发射出的最大光子数，其能量处于 $hck$ 和 $hc(k+dk)$ 之间的这样一个黑体，每单位体积的光子数 $n_k$ 为

$$n_k dk = \pi^{-2} k^2 (e^x - 1)^{-1} dk \quad (1-2)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$

表1-1 符号、名称和单位

符 号	名 称	单 位
$A$	面积	米 <sup>2</sup>
$C$	光速	米·秒 <sup>-1</sup>
$c_1$	第一辐射常数	瓦米 <sup>2</sup>
$c_2$	第二辐射常数	米K
$D$	状态密度函数	变量
$E_q$	光子辐射照度	秒 <sup>-1</sup> 米 <sup>-2</sup>
$h$	普朗克常数	焦·秒
$\hbar$	$h/2\pi$	焦·秒
$K_m$	最大光谱发光效率	683流明瓦 <sup>-1</sup>
$k$	角波数或弧度波数, $2\pi/\lambda$	弧度米 <sup>-1</sup>
$k_B$	波尔兹曼常数	焦K <sup>-1</sup>
$M_q$	光子出射度 (通量密度)	秒 <sup>-1</sup> 米 <sup>-2</sup>
$N$	数	—
$\dot{N}$	数率	秒 <sup>-1</sup>
$n$	数密度; 也是整数	米 <sup>-3</sup>
$R$	一般辐射度量	变量
RD	相对差	—
RE	相对误差	—
$T$	温度	K
$V(\lambda)$	国际照明委员会(CIE)标准光度计观测仪的相对光谱 发光效率	—
$x$	归一化的辐射变量, $x = h\nu/k_B T$	—
$\alpha, \beta$	角	弧度
$\beta$	$1/k_B T$	焦耳 <sup>-1</sup>
$\gamma$	相干因素	—
$\zeta(\ )$	$\zeta$ 函数	—
$\theta$	视线与法线的夹角	弧度
$\lambda$	波长	米, 微米, 毫微米
$\nu$	频率	赫
$\tilde{\nu}$	波数, $1/\lambda$	米 <sup>-1</sup> , 厘米 <sup>-1</sup>
$\sigma$	斯蒂芬—玻耳兹曼常数	瓦米 <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup>
$\Omega, \omega$	立体角	球面度
$\Omega'$	投影立体角, $\Omega' = \omega \cos\theta = \Omega \cos\theta$	球面度
下 标		
$e$	辐射度各个量	—
$q$	光子数	—
$v$	视觉光度量	—
$\lambda, \nu, k$	相对于指定光谱变量的分布	—

$\lambda =$  波长

$$x = c_2/\lambda T = h\nu/k_B T = \hbar ck/k_B T$$

这是状态密度 (这时为 $\pi^{-2}k^2$ ) 和一个给定模平均占据率  $(e^x - 1)^{-1}$  的乘积。状态密度看其是否以 $k$ 、 $\omega$ 、 $\nu$ 、 $\lambda$ 、 $\tilde{\nu}$ 表示或以某种其他变量表示而写成不同的形式; 这种表示式也与状态是

表1-2 辐射度量、符号和单位〔1-3〕

量	符 号	规 定 方 程	单 位
能量	$Q_e$	—	焦耳
能量密度 (体积密度)	$w_e$	$\frac{\partial Q_e}{\partial V}$	焦耳米 <sup>-3</sup>
通量 (功率)	$\phi_e$	$\frac{\partial Q_e}{\partial t}$	瓦
通量密度 (面积密度)	—	$\frac{\partial \phi_e}{\partial A}$	瓦米 <sup>-2</sup>
辐射出射度	$M_e$	$\frac{\partial \phi_e}{\partial A}$	瓦米 <sup>-2</sup>
辐射照度	$E_e$	$\frac{\partial \phi_e}{\partial A}$	瓦米 <sup>-2</sup>
辐射亮度	$L_e$	$\frac{\partial^2 \phi_e}{\partial A \cos \theta \partial \Omega}$	瓦米 <sup>-2</sup> 球面度 <sup>-1</sup>

表1-3 光度量、符号和单位〔1-4〕

量	符 号	公 式 或 值	单 位 名 称	单 位 符 号
发光能量 (光量)	$Q_v$	$\int_{380}^{760} K(\lambda) Q_{e,\lambda} d\lambda$	流明小时 流明秒	lm h lm sec
发光 (能量) 密度	$w_v$	$\partial Q_v / \partial V$	每立方米流明秒 (塔博脱/米 <sup>3</sup> )	lm sec m <sup>-3</sup>
发光通量 (光功率)	$\phi_v$	$\partial Q_v / \partial t$	流明 (塔博脱/秒)	lm
发光通量密度	$\phi_v / A$	$\partial \phi_v / \partial A$	每平方米流明 (米烛光)	lm m <sup>-2</sup> (lx)
发光出射率	$M_v$	$\partial \phi_v / \partial A$	每平方厘米流明 (厘米烛光)	lm cm <sup>-2</sup> (ph)
照度	$E_v$	$\partial \phi_v / \partial A$	每平方英尺流明 (英尺烛光)	lm ft <sup>-2</sup> (ft c)
发光强度	$I_v$	$\partial \phi_v / \partial \Omega$	单位立体角的流明数 (新烛光)	lm sr <sup>-1</sup> (cd)
亮度 (光亮度)	$L_v$	$\frac{\partial^2 \phi_v}{\partial A \partial \Omega \cos \theta}$	每球面度每平方米 流明 (尼特) 每平方米新烛光 每平方厘米新烛光 (照提) *英尺朗伯 *朗伯 *阿照提	lm sr <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (nt) cd m <sup>-2</sup> cd cm <sup>-2</sup> (Sb) ft L(π <sup>-1</sup> cdft <sup>-2</sup> ) L(π <sup>-2</sup> cdcm <sup>-2</sup> ) asb (π <sup>-1</sup> cdm <sup>-2</sup> )

\* 有系数π<sup>-1</sup>的各个单位一般只能用于散射材料。

否以 $dk$ 、 $d\omega$ 、 $dv$ 、 $d\lambda$ 、 $d\tilde{\nu}$ 等区间表示有密切关系。

1.2.1 辐射度量及其换算 每单位体积单位 $h$ 区间光子数的普朗克函数是 (上方方程 (1-2))

$$n_h = k^2 \pi^{-2} (e^x - 1)^{-1} \quad (1-3)$$

同一光谱区内每单位体积能量是

$$w_h = h\nu n_h = \hbar c k n_h \quad (1-4)$$

表1-4 光度换算表[1-5]

	尼 特 新烛光/米 <sup>2</sup>	熙 提	每公顷 烛 光	阿熙提	毫阿熙提	微 阿 熙 提
1 尼特(nt) =	1	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>4</sup>	3.14	3.14 × 10 <sup>3</sup>	3.14 × 10 <sup>6</sup>
1 熙提(sb) =	10 <sup>4</sup>	1	10 <sup>8</sup>	3.14 × 10 <sup>4</sup>	3.14 × 10 <sup>7</sup>	3.14 × 10 <sup>10</sup>
每公顷一烛光 =	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-8</sup>	1	3.14 × 10 <sup>-4</sup>	3.14 × 10 <sup>-1</sup>	3.14 × 10 <sup>-2</sup>
1 阿熙提(asb) =	3.183 × 10 <sup>-1</sup>	3.183 × 10 <sup>-5</sup>	3.183 × 10 <sup>3</sup>	1	10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>
1 毫阿熙提(masb) =	3.183 × 10 <sup>-4</sup>	3.183 × 10 <sup>-8</sup>	3.183	10 <sup>-3</sup>	1	10 <sup>3</sup>
1 微阿熙提(μasb) =	3.183 × 10 <sup>-7</sup>	3.183 × 10 <sup>-11</sup>	3.183 × 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-3</sup>	1
1 朗伯(L) =	3.183 × 10 <sup>3</sup>	3.183 × 10	3.183 × 10	10 <sup>4</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>10</sup>
1 毫朗伯(mL) =	3.183	3.183 × 10 <sup>-4</sup>	3.183 × 10 <sup>4</sup>	10	10 <sup>4</sup>	10 <sup>7</sup>
1 微朗伯(μmL) =	3.183 × 10 <sup>-3</sup>	3.183 × 10 <sup>-7</sup>	3.183 × 10	10 <sup>-2</sup>	10	10 <sup>4</sup>
1 英尺朗伯(ftL) =	3.426	3.426 × 10 <sup>-4</sup>	3.426 × 10 <sup>4</sup>	10,764	1.0764 × 10 <sup>4</sup>	1.0764 × 10 <sup>7</sup>
1 烛光/平方英尺 =	1.0764 × 10	1.0764 × 10 <sup>-3</sup>	1.0764 × 10 <sup>5</sup>	3.382 × 10	3.382 × 10 <sup>4</sup>	3.382 × 10 <sup>7</sup>
1 烛光/平方英寸 =	1.55 × 10 <sup>3</sup>	1.55 × 10 <sup>-1</sup>	1.55 × 10 <sup>-5</sup>	4.869 × 10 <sup>3</sup>	4.869 × 10 <sup>6</sup>	4.869 × 10 <sup>9</sup>

  

	朗 伯	毫朗伯	微朗伯	英尺朗伯	烛光/平 方英尺	烛光/平 方英寸
1 尼特(nt) =	3.14 × 10 <sup>-4</sup>	3.14 × 10 <sup>-1</sup>	3.14 × 10 <sup>2</sup>	2.919 × 10 <sup>-1</sup>	9.29 × 10 <sup>-2</sup>	6.452 × 10
1 熙提(sb) =	3.14	3.14 × 10 <sup>3</sup>	3.14 × 10 <sup>6</sup>	2.919 × 10 <sup>3</sup>	9.29 × 10 <sup>2</sup>	6.452
每公顷一烛光 =	3.14 × 10 <sup>-8</sup>	3.14 × 10 <sup>-5</sup>	3.14 × 10 <sup>-2</sup>	2.919 × 10 <sup>-5</sup>	9.29 × 10 <sup>-6</sup>	6.452 × 10 <sup>8</sup>
1 阿熙提(asb) =	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>2</sup>	9.29 × 10 <sup>-2</sup>	2.957 × 10 <sup>-2</sup>	2.054 × 10 <sup>4</sup>
1 毫阿熙提(masb) =	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	9.29 × 10 <sup>-5</sup>	2.957 × 10 <sup>-5</sup>	2.054 × 10
1 微阿熙提(μasb) =	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-4</sup>	9.29 × 10 <sup>-8</sup>	2.957 × 10 <sup>-8</sup>	2.054 × 10 <sup>10</sup>
1 朗伯(L) =	1	10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>	9.29 × 10 <sup>2</sup>	2.957 × 10 <sup>2</sup>	2.054
1 毫朗伯(mL) =	10 <sup>-3</sup>	1	10 <sup>3</sup>	9.29 × 10 <sup>-1</sup>	2.957 × 10 <sup>-1</sup>	2.054 × 10 <sup>-3</sup>
1 微朗伯(μmL) =	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-3</sup>	1	9.29 × 10 <sup>-4</sup>	2.957 × 10 <sup>-4</sup>	2.054 × 10 <sup>-6</sup>
1 英尺朗伯(ftL) =	1.0764 × 10 <sup>-3</sup>	1.0764	1.0764 × 10 <sup>3</sup>	1	0.3183	2.14 × 10 <sup>-3</sup>
1 烛光/平方英尺 =	3.382 × 10 <sup>-3</sup>	3.382	3.382 × 10 <sup>3</sup>	314	1	6.944 × 10 <sup>-3</sup>
1 烛光/平方英寸 =	4.869 × 10 <sup>-1</sup>	4.869 × 10 <sup>2</sup>	4.869 × 10 <sup>5</sup>	4.524 × 10 <sup>2</sup>	1.44 × 10 <sup>2</sup>	1

表1-5 荧光计测法的量[1-6]

名 称	符 号	定 义	方 程	别 称
量	Q	—	—	—
辐射通量	φ	时间速率	$\frac{\partial Q}{\partial t}$	—
辐射通量密度	—	垂直于流动方向的单位面积时间速率	$\frac{\partial Q}{\partial t} \frac{\partial A \cos \theta}{\partial A}$	面率
出射度	M	发射出的通量密度	—	面率
入射率	E	接收到的通量密度	—	面率
辐射强度	I	小辐射源辐射的单位立体角通量	$\frac{\partial Q}{\partial t \partial \Omega}$	点率
出射率	L	单位面积单位立体角通量密度	—	出射率
出射率	—	单位路程长度辐射率的变化	—	出射率
光流量	—	—	—	光流量
辐照量	—	在半球范围内, 由投影立体角积分得到的辐射通量密度	—	辐照量

表1-6 中国餐馆菜式命名法

A	B	C	D
入射的 散射的 反射的 吸收的 透射的 发射的	总的 光谱的 加权的 适光的 微光的 赤红的	能 量 熵 功 率 光 子 光子速率 冲量	通过表面 辐射亮度 辐射照度 辐射强度 单位长度的辐射率 —

就单色光而言，能量总是光子数乘以每光子能量。

一个黑体在单位面积、单位时间辐射到半球内的光子数给定为

$$M_q = \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial A} = \frac{c}{4} n \quad (1-5)$$

用能量表示，其关系式为：

$$M_h = \frac{\partial^3 Q_e}{\partial k \partial t \partial A} = \frac{c}{4} w_h \quad (1-6)$$

一个黑体在单位面积、单位时间、单位立体角辐射出的光子数为：

$$L_q = \frac{\partial^3 N}{\partial t \partial A \cos \theta \partial \Omega} = \frac{c}{4\pi} n \quad (1-7)$$

同样以能量表示，关系式为

$$L_h = \frac{\partial^4 Q_e}{\partial k \partial t \partial A \cos \theta \partial \Omega} = \frac{c}{4\pi} w_h \quad (1-8)$$

这几种不同的形式都综列于表1-7中。

1.2.2 辐射度量 (光谱标度换算) 表1-8中给出不同光谱标度下、不同辐射度函数的表示式。自变量有 $k$ 、 $\nu$ 、 $\tilde{\nu}$ 、 $x$ 、 $\lambda$ 和 $\omega$ ，一般全用变量 $y$ 标明。

1.2.3 广义普朗克函数 辐射出射度的一个有用的公式为：

$$M_x = 2\pi c^2 h \left( \frac{k_B T}{ch} \right)^4 x^3 (e^x - 1)^{-1} \quad (1-9)$$

这是一种表示式

$$R(x, T) = CT^1 x^n (e^x - 1)^{-1} \quad (1-10)$$

通用的辐射度函数 $R$ 是温度 $T$ 和与频率或波长成比例的光谱变量的函数：

$$\begin{aligned} R &= R(p\nu, T) \\ R &= R(l\lambda, T) \end{aligned} \quad (1-11)$$

式中 $p$ 和 $l$ 是比例常数， $R$ 可随光谱变量或温度而变化，或随二者的变化而变化。

$$dR = \frac{\partial R}{\partial(p\nu)} d(p\nu) + \frac{\partial R}{\partial T} dT \quad (1-12)$$

$$dR = \frac{\partial R}{\partial(l\lambda)} d(l\lambda) + \frac{\partial R}{\partial T} dT \quad (1-13)$$

其二阶导数为：

$$\frac{\partial^2 R}{\partial T^2}, \frac{\partial^2 R}{\partial (l\lambda)^2}, \frac{\partial^2 R}{\partial (p\nu)^2}, \frac{\partial^2 R}{\partial T \partial (l\lambda)}, \frac{\partial^2 R}{\partial T \partial (p\nu)} \quad (1-14)$$

前三项中的任何一项的符号都决定着回折点的性质，而使第三项或第四项等于零，将决定光谱变量，在这个光谱变量下，随温度变化是一个极值。

通常 $R(l\lambda, T)$ 项（对于光通量密度、能通量密度、能容积密度或光子容积密度等等）可以写成下式

$$R = \text{常数} y^{\pm m} (e^x - 1)^{-1} \quad (1-15)$$

于是

$$\frac{dR}{R} = \left[ \pm m \frac{dy}{y} + \frac{x e^x}{(e^x - 1)} \left( \frac{dT}{T} \mp \frac{dy}{y} \right) \right] \quad (1-16)$$

式中  $y = l\lambda$  相当于上边符号（即加号和减号）

$y = p\nu$  相当于下边符号（即减号和加号）（见参考资料[1-7, 1-8]）这就给出维恩（Wien）分布律的广义表示式。表1-9给出各种分布的最大值。

表1-7 普朗克函数中的状态密度函数D

函数	$y =$	$k$	$\tilde{\nu}$	$\nu$	$x = h\nu/kT$	$\lambda$	$\omega$
$n_y = N_y/\nu$		$k^2/\pi^2$	$8\pi\tilde{\nu}^2$	$8\pi\nu^2/c^3$	$8\pi \left(\frac{kT}{ch}\right)^3 x^2$	$8\pi\lambda^{-4}$	$\omega^2/(c^3\pi^2)$
$u_y = h\nu n_y$		$chk^3/2\pi^3$	$8\pi ch\nu^3$	$8\pi h\nu^3/c^3$	$8\pi ch \left(\frac{kT}{ch}\right)^4 x^3$	$8\pi ch\lambda^{-5}$	$h\omega^3/(2\pi^3 c^3)$
$M_{qy} = nc/4$		$ck^2/4\pi^2$	$2\pi c\tilde{\nu}^2$	$2\pi\nu^2/c^2$	$2\pi c \left(\frac{kT}{ch}\right)^3 x^2$	$2\pi c\lambda^{-4}$	$\omega^2/(4\pi^2 c^2)$
$M_y = u_y c/4$		$c^2 hk^3/8\pi^3$	$2\pi c^2 h\nu^3$	$2\pi h\nu^3/c^2$	$2\pi c^2 h \left(\frac{kT}{ch}\right)^4 x^3$	$2\pi c^2 h\lambda^{-5} = c_1\lambda^{-5}$	$h\omega^3/(8\pi^3 c^2)$
$L_{qy} = M_{qy}/\pi$		$ck^2/4\pi^3$	$2c\tilde{\nu}^2$	$2\nu^2/c^2$	$2c \left(\frac{kT}{ch}\right)^3 x^2$	$2c\lambda^{-4}$	$\omega^2/(4\pi^3 c^2)$
$L_y = M_y/\pi$		$c^2 hk^3/8\pi^4$	$2c^2 h\tilde{\nu}^3$	$2h\nu^3/c^2$	$2c^2 h \left(\frac{kT}{ch}\right)^4 x^3$	$2c^2 h\lambda^{-5}$	$h\omega^3/(8\pi^4 c^2)$

自变量用 $y$ 表示。表中的函数有：数密度 $n_y$ ，能量密度 $\omega_y$ ，光子出射度 $M_{qy}$ ，辐射出射度 $M_y$ ，光子辐射亮度、辐射亮度，每项都是 $D$ ，即普朗克表示式中 $(e^x - 1)^{-1}$ 的乘数。

表1-8 光谱变量间的关系

$$\nu = c\tilde{\nu} = (2\pi)^{-1}\omega = (c/2\pi)k = (kT/h)x = c\lambda^{-1}$$

$$\lambda = c\nu^{-1} = \tilde{\nu}^{-1} = (2\pi c)\omega^{-1} = 2\pi k^{-1} = (hc/kT)x$$

$$d\nu = c d\tilde{\nu} = (2\pi)^{-1}d\omega = (c/2\pi)dk = (kT/h)dx = -c\lambda^{-2}d\lambda$$

$$d\lambda = -\frac{d\tilde{\nu}}{\tilde{\nu}^2} = -2\pi c \frac{d\omega}{\omega^2} = -2\pi \frac{dk}{k^2} = -c \frac{dv}{v^2}$$

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = -\frac{d\tilde{\nu}}{\tilde{\nu}} = -\frac{d\omega}{\omega} = -\frac{dk}{k} = -\frac{dx}{x} = -\frac{dv}{v}$$

也可以用一般方法计算各函数的总积分：

$$I_m = \int_0^\infty CT^l x^m (e^x - 1)^{-1} dx \quad (1-17)$$

若 $T$ 为常数, 则

表1-9 不同的等温普朗克光谱分布的应变量和自变量的最大值

函 数		$m$	$x_{max}$	$R_{max}$
应 变 量	自 变 量			
光 子	$\tilde{\nu}$	2	1.593624260	0.6476
功 率	$\nu$	3	2.821439372	1.4214
光 子	$\lambda$	4	3.920690395	4.7796
功 率	$\lambda$	5	4.96511423	21.2036
功率对比度	$\lambda$	6	5.96940917	115.9359

表1-10  $\zeta(m+1)$ 和 $m!\zeta(m+1)$ 的值

$m$	1	2	3	4	5
$\zeta(m+1)$	$\pi^2/6$	1.2021	$\pi^4/90$	1.0369	$\pi^6/945$
$m!\zeta(m+1)$	$\pi^2/6$	2.4041	$\pi^4/15$	24.9863	$8\pi^6/63$

$$I_m = CT^1 \int_0^\infty x^m (e^x - 1)^{-1} dx \quad (1-18)$$

用 $\zeta$ 函数表示这种定积分是可以恒等的。

$$\int_0^\infty x^m (e^x - 1)^{-1} dx = m!\zeta(m+1) \quad (1-19)$$

表1-10给出 $m$ 从1到5时 $\zeta(m+1)$ 和 $m!\zeta(m+1)$ 的值。表1-11给出这些值与合理分布的各种常数相乘的数式。总积分与光谱标度无关, 因此, 总光子体容积密度也与光谱标度无关。能量密度与光谱标度无关, 但与光子密度有别。光子出射度为密度的 $c/4$ 倍, 光子辐射亮度为出射度的 $\pi^{-1}$ 倍。结果综列于表1-11。

表1-11 几种普朗克函数的总积分值

分 布	变 量	方 程	值
光子密度	$n$	$\int_0^\infty n_\nu dy$	$\frac{4}{c} M_q$
能量密度	$w$	$\int_0^\infty w_\nu dy$	$\frac{4}{c} M$
光子出射度	$M_q$	$\int_0^\infty M_{q\nu} dy$	$\frac{2\pi k_B^3 T^3}{c^2 h^3} (2.4041) = 1.5202 \times 10^{11} T^3 \approx \frac{\sigma T^3}{2.75 kT}$
辐射出射度	$M$	$\int_0^\infty M_\nu dy$	$\frac{\pi^5 k_B^4}{45 c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4$
光子出射率	$L_q$	$\int_0^\infty L_{q\nu} dy$	$\pi^{-1} M_q$
辐射亮度	$L$	$\int_0^\infty L_\nu dy$	$\pi^{-1} M$
对比度	$\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} dT$	$\frac{dT}{T} \int_0^\infty \frac{x e^x}{e^x - 1} dx = 11\zeta(2) \frac{dT}{T} = \frac{\pi^2}{6} \frac{dT}{T}$	



表1-12  $x^l e^{-mx}$  积分的解

$l$	$I_l$	公 式
0	$I_0$	$-\frac{e^{-mx}}{m}$
1	$I_1$	$-\frac{e^{-mx}}{m^2} = -\frac{xe^{-mx}}{m} + \frac{1}{m}I_0$
2	$I_2$	$-\frac{xe^{-mx}}{m} - \frac{2}{m} \frac{xe^{-mx}}{m} + \frac{2}{m} \frac{e^{-mx}}{m} = -\frac{xe^{-mx}}{m} + \frac{2}{m}I_0$
3	$I_3$	$-\frac{xe^{-mx}}{m} + \frac{3}{m}I_2$
4	$I_4$	$-\frac{xe^{-mx}}{m} + \frac{4}{m}I_3$

虽然不定积分很复杂，但却很重要。在恒温时，这个函数可写成：

$$R^m = Cx^m (e^x - 1)^{-1} = Cx^m \sum_{n=1}^{\infty} e^{-nx} \quad (1-20)$$

部分积分，得

$$I_m = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-nx} x^m \sum_{l=1}^n [(mx)^l (n-1)!]^{-1} \quad (1-21)$$

表1-2给出不同函数的适宜形式。根据迭代式可将函数展开

$$I_l = -\frac{x^l e^{-mx}}{m} + \frac{l}{m} I_{l-1} \quad (1-22)$$

任一等温光谱标度的最大值可给定为

$$\frac{xe^x}{e^x - 1} = m \quad (1-23)$$

这是维恩(Wien)定律的广义表示式。等谱曲线的斜率给定为  $(R/T)xe^x(e^x - 1)^{-1}$ 。

同样，可以看出全部混合导数有一个由下式确定的最大值：

$$\frac{xe^x}{e^x - 1} = \frac{x + m + 1}{2} \quad (1-24)$$

良好的近似式为

$$\frac{xe^x}{e^x - 1} = m + 1 \quad (1-25)$$

表1-13 对比度最大值函数

函 数		$m+1$	$x_{md}$	$x_{md}/x_{max}$
应 变 量	自 变 量			
$\frac{\partial M_{qv}}{\partial T}$	$\nu$	3	2.575678910	1.50
$\frac{\partial M_v}{\partial T}$	$\nu$	4	3.830016096	1.33
$\frac{\partial M_{q\lambda}}{\partial T}$	$\lambda$	5	4.928119359	1.25
$\frac{\partial M}{\partial T}$	$\lambda$	6	5.969409172	1.20