

红 外 辐 射

第 1 卷

红外与光电系统手册

翻译出版序言

本书以 1978 年出版的“红外手册”为基础，并对它作了大量的修订、更新和补充，而且进行了重新整理和编排，于 1993 年再版。因此，无论在内容上和形式上都以崭新的面貌出现。

全书共分八卷四十五章。几乎涉及到目前活跃于军事、航空航天和民用光电技术的大部分学科。有些内容是由先进的军事技术派生而来，在公开发表的文献中很少有如此大量的报道。在编排上也较好地考虑了可使用性因素。每章自成一体，避免了相互间繁琐的查阅，陈述格式由简明导言、实用公式汇编、有关数据、公式和数据使用方法实例四部分组成，非常明了、实用。

本书内容广泛充实，有较丰富的数据和参考文献，反映了美国 80 年代后至 90 年代初在此学科领域内的工程研究水平，具有先进性和借鉴性，是目前红外与光电系统学科领域中最新的一本参考书和非常有用的工具书。

为及时地把这本手册推荐给我国从事红外和光电系统设计的工程技术人员，我们决定翻译出版本手册。

红外和光电系统技术属于跨学科应用工程技术，所涉及的专业知识面极广。由于参加翻译、校对和审订者的专业水平和外语水平有限，在译文中难免有错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

本手册由中国科学院成都分院林祥棣院长推荐并引进，值此翻译出版之际对他表示谢忱。

孙再龙

2001 年 9 月

《红外与光电系统手册》

翻译出版委员会

顾 问：姚绍福 黄瑞松 承 文 于世元
委员会主任：姜殿元 谷满仓
副 主 任：孙再龙 杨树谦
主 编：孙再龙
责 任 编 辑：赵雪燕 何淑珍 丰金凤 李 瑾
翟远征

《红 外 辐 射》

翻 译：陈光余
校 对：陆玲华

《红外与光电系统手册》总目次

第1卷 红外辐射

- 第1章 辐射理论
- 第2章 人工辐射源
- 第3章 自然辐射源
- 第4章 辐射测量术

第2卷 辐射的大气传输

- 第1章 大气透射
- 第2章 通过大气湍流的传输
- 第3章 空气动力学效应
- 第4章 非线性传输:热晕

第3卷 光电元器件

- 第1章 光学材料
- 第2章 光学设计
- 第3章 光机扫描应用、技术和器件
- 第4章 探测器
- 第5章 红外传感器的读出电路
- 第6章 低温制冷系统的热学与机械设计
- 第7章 图像显示技术以及在机载条件下的特殊问题
- 第8章 摄影胶卷
- 第9章 调制盘
- 第10章 激光器

第4卷 光电系统设计、分析和测试

- 第1章 光电成像系统的基础分析
- 第2章 光电成像系统性能预测
- 第3章 光学机械系统设计
- 第4章 红外成像系统的测试
- 第5章 跟踪和控制系统
- 第6章 信标预测和建模

第5卷 被动光电系统

- 第1章 红外行扫描系统
- 第2章 前视红外系统
- 第3章 凝视传感器系统
- 第4章 红外搜索/跟踪系统

第 6 卷 主动光电系统

第 1 章 激光雷达

第 2 章 激光测距仪

第 3 章 毫米波雷达

第 4 章 光纤系统

第 7 卷 光电对抗系统

第 1 章 报(预)警系统

第 2 章 伪装、抑制及屏障系统

第 3 章 主动红外对抗

第 4 章 消耗性诱饵

第 5 章 光学和传感器的保护

第 6 章 遮挡对抗

第 8 卷 新系统和技术

第 1 章 非常规成像系统

第 2 章 自适应光学

第 3 章 传感器与数据融合

第 4 章 自动目标识别系统

第 5 章 定向能量系统

第 6 章 全息学

第 7 章 视觉耦合系统的设计考虑

引 言

本卷内容来源于原红外手册的第 1、2、3 和 20 章。第一卷旨在为系统和应用后续的各卷中涉及辐射源提供分析的基础。

第 1 章、第 2 章及第 4 章写于 1991 年,审定于 1992 年。它们都被适时地修订以反映当今高效的新的计算方法和计算能力。

第 1 章给出并讨论了黑体辐射源的通用计算程序,但分析已推广到包括线谱和带谱辐射源基础的研究。

第 3 章讨论了自然源的辐射测量数据,是由 Kryskowski 和 Suits 1992 年写成的。他们着重引入了有关模型和建模方面的最新进展。

1992 年新的空基辐射测量仪器有了惊人的表现。精密辐射测量方面的进展在第 4 章中有简要的评述和介绍。

George J. Zissis

Ann Arbor

于密执安州 1993 年 1 月

目 次

第 1 章 辐射理论

1.1 引言	(1)
1.1.1 辐射测量的符号和名称	(1)
1.1.2 下标的使用	(3)
1.1.3 荧光计测量	(4)
1.1.4 Nicodemus 体系	(4)
1.1.5 中餐馆菜式命名法	(4)
1.1.6 光度学术语	(4)
1.2 黑体(普朗克)函数	(5)
1.2.1 谱辐射出射度和亮度	(5)
1.2.2 换算为光子形式	(6)
1.2.3 谱标度的换算	(6)
1.2.4 换算为其他辐射量	(7)
1.2.5 通用曲线和方程式	(7)
1.2.6 对比度	(7)
1.2.7 最大值	(8)
1.2.8 总积分	(9)
1.2.9 计算机程序	(9)
1.3 辐射体的性质	(14)
1.3.1 名称	(14)
1.3.2 发射、发射度和发射率	(14)
1.3.3 吸收、吸收系数和吸收率	(15)
1.3.4 反射、反射系数和反射率	(16)
1.3.5 透射	(17)
1.3.6 基尔霍夫定律	(17)
1.3.7 相互关系	(17)
1.4 辐射几何	(18)
1.4.1 变换公式	(18)
1.4.2 各向同性辐射体	(18)
1.4.3 各向异性辐射体	(19)
1.4.4 各向同性圆盘	(19)
1.4.5 方向图系数	(19)
1.4.6 通常的几何传输	(20)

1.5 辐射测量温度·····	(20)
1.5.1 辐射温度·····	(20)
1.5.2 辐亮度温度·····	(20)
1.5.3 分布温度·····	(21)
1.5.4 色温·····	(21)
1.6 辐射过程·····	(21)
1.6.1 原子的波谱·····	(22)
1.6.2 气体的分子光谱·····	(24)
1.6.3 固体的光谱·····	(25)
1.6.4 线状光谱·····	(25)
计算黑体函数的 BASIC 程序·····	(27)
参考文献·····	(42)

第2章 人工辐射源

2.1 引言·····	(43)
2.2 标准实验室辐射源·····	(44)
2.2.1 黑体腔原理·····	(44)
2.2.2 光的基本标准·····	(48)
2.2.3 辐射的基本标准·····	(48)
2.2.4 辐射的工作标准·····	(48)
2.3 市售的实验室辐射源·····	(52)
2.3.1 黑体·····	(52)
2.3.2 非气体白炽光源·····	(58)
2.3.3 碳弧·····	(61)
2.3.4 封闭式弧光灯和放电光源(高压)·····	(65)
2.3.5 封闭式弧光灯和放电光源(低压)·····	(70)
2.3.6 聚心弧光灯·····	(78)
2.3.7 辉光调制放电管·····	(78)
2.3.8 氢弧和氙弧灯·····	(79)
2.3.9 其他市售光源·····	(80)
2.4 外场辐射源(人造靶标)·····	(81)
2.4.1 地面和水面的运载工具·····	(81)
2.4.2 飞机·····	(81)
2.4.3 火炮闪光·····	(87)
2.4.4 目标辐射体的其他样品·····	(88)
2.5 红外仿真和建模概述·····	(91)
2.5.1 原理阐述·····	(91)
2.5.2 仿真过程概述·····	(91)

2.5.3 以 SIRIM 为实例的红外图像仿真梗概	(92)
参考文献	(95)

第3章 自然辐射源

3.1 引言	(97)
3.1.1 理想化的源	(97)
3.1.2 其他的源分类法	(97)
3.2 辐射传输模型	(98)
3.2.1 平面混合模型	(98)
3.2.2 平面堆集反射率模型	(98)
3.2.3 面反射率和体反射率的概念	(100)
3.2.4 湿-干平面堆集模型	(101)
3.2.5 植被模型	(101)
3.2.6 热模型	(102)
3.3 太阳	(107)
3.3.1 外大气层的太阳辐射	(107)
3.3.2 地面上的太阳辐射	(107)
3.4 月亮	(112)
3.5 天体背景	(112)
3.5.1 天球上的坐标	(112)
3.5.2 宇宙的微波背景	(117)
3.5.3 可见光区的天体背景	(117)
3.5.4 2.0~100.0 μ m 光谱范围内的天体背景	(126)
3.6 天空	(142)
3.6.1 散射的太阳辐射	(142)
3.6.2 热辐射	(145)
3.6.3 粒子统计学	(145)
3.6.4 极光	(146)
3.6.5 夜间气辉	(148)
3.6.6 流星体的辐射	(153)
3.7 地球	(153)
3.7.1 从高空和外空观察	(154)
3.7.2 星体反照率	(155)
3.7.3 地表面的发射	(157)
3.7.4 云的气象学	(158)
3.8 天然物质的性质	(166)
3.8.1 土壤、岩石和矿物质	(166)
3.8.2 建筑材料	(170)

3.8.3 水	(177)
3.8.4 雪和冰	(184)
3.8.5 生物体	(188)
3.9 红外背景的统计测量	(195)
3.9.1 概率统计的描述	(195)
3.9.2 相关函数表示	(201)
3.9.3 功率谱表示法	(203)
3.9.4 各向异性的相关函数	(206)
3.9.5 各种地面背景的统计	(206)
参考文献	(212)

第4章 辐射测量术

4.1 引言	(218)
4.2 辐射计	(219)
4.2.1 辐射计的响应度	(219)
4.2.2 归一化	(222)
4.2.3 参考辐射水平	(223)
4.2.4 辐射计的校准	(224)
4.2.5 红外辐射测量术	(227)
4.3 光谱辐射计	(229)
4.3.1 棱镜	(229)
4.3.2 光栅	(230)
4.3.3 棱镜和光栅的配置和仪器	(231)
4.4 干涉仪	(235)
4.4.1 双光束干涉仪	(236)
4.4.2 多光束干涉仪	(240)
4.5 其他的光谱仪器和技术	(245)
参考文献	(246)

第一章 辐射理论

1.1 引言

本章讨论各种形式的黑体辐射,因为这是所有稳定辐射体的基本辐射过程。除此以外还讨论了材料的辐射测量特性、辐射测量温度以及某些存在于气体、液体和固体中的各种辐射过程。但是,这里涉及的不可能是完整的或包罗万象的。

首先,给出了名称和符号的说明,读者会再次注意到,这也并没包括一切,某些命名体系可能把这里给出的同一个字赋予不同的涵义,不同的字表示同一个含义。人们造字是为了用它们准确表达人们的含义。

黑体是热力学的基本辐射体,在第 1.2 节中进行了比较完整的描述。给出了用于计算各种黑体参量,如波长分布、总积分、最大值、对比度、功率和光子等表达式。描述了这些参量随温度的变化,并用 BASIC 和 Spreadsheet 程序在有限波带内进行计算。

实际材料以其固有的特殊方式进行传输、反射、发射、吸收和散射。实际辐射体的特性以及描述不同光谱和几何分布的方法在第 1.3 节中给出。第 1.4 节叙述了各种几何结构的辐射传输。

温度是最普通的概念,这里用了各种辐射测量温度。因此,用各种不同方式进行辐射测量的量度和描述,其中的一些方式,以及关于这些辐射测量温度同实际的热力学温度有何不同在第 1.5 节中说明。

红外谱中最重要的气体和固体的原子和分子的辐射过程在第 1.6 节中给出。很多书从经典和量子理论的角度撰写了这些过程。因而,本节对此仅做简短的评述。

本节末尾的参考文献是有代表性的,并尝试为感兴趣的读者提供各种来源的参考。

1.1.1 辐射测量的符号和名称

有多种命名方案可用于表征辐射测量的符号。这里所描述的命名体系不是唯一的,对于类似的甚至是相同的概念,其他的学科可能选用别的字和符号。这里提出了两点建议:第一是在文体上,读者采用本书所描述的每个概念的单位以确认辐射测量的概念和量值都有明确的定义并且是一致的。第二个是,读者同作者一样,在他(或她)写每一篇文章的开始就必须小心地定义适当的术语。

表 1.1 给出了辐射测量量的符号、名称和单位。最基本的辐射测量量是辐射能量,通常用符号 Q 或 U 表示,而辐射能的(体)密度则用 q 或 u 表示。通量是能量随时间的变化率,即功率,用符号 P 或 Φ 表示。因为 P 打字方便且代表功率,一些人喜欢用 P ,而另一些人认为用 Φ 作为通量的符号(flux→ Φ lux)更好。后者是国际标准化组织推荐的^[1]。通量密度一般用于表示单位面积的通量,即面密度。似乎对通量密度的量没有推荐的符号,而只有入射通量和出射通量的值,它们分别被称为辐射入射度或辐照度以及辐射出射度或发射密度。本章后面的篇幅中将采用辐照度和出射度,其他的称谓注在随后的括号内。单位立体角的通量称为强度。

单位投射面积和单位立体角内的通量则称为亮度或立体角密度,这两个可替换的字也按上述同样的方式处理;即写成亮度〔立体角密度〕。

表 1.1 符号、名称和单位

符 号	说 明	单 位	符 号	说 明	单 位
B	循环常数	cm^{-1}	U	能量	J
C	常数	—	u	能量密度	J m^{-3}
c	真空中光速	m s^{-1}	x	无量纲频率, $=c_2/\lambda T$	—
c_1	第一辐射常数	W cm^2	y	通用谱变量	可变的
c_2	第二辐射常数	cm K	α	吸收率	—
E	入射度(辐照度)	W m^{-2}	$\alpha(\)$	吸收系数	cm^{-1}
h	普朗克常数	J s	$\Delta\lambda, \Delta\nu$	带宽	$\mu\text{m}, \text{cm}^{-1}$
I	辐射强度	W sr^{-1}	ϵ	发射率	—
I_0	惯性矩	g cm^2	ζ	积分变量	—
i	循环(顺序)指数 1,2,3...	—	$\Theta(\)$	方位波函数	—
K, L, M, N	原子壳层代号	—	θ	平面角	red, deg
k	玻耳兹曼常数	J K^{-1}	λ	波长	μm
k	力常数	J m^{-2}	ν	频率	Hz
k	辐射波数	m^{-1}	ν	波数	cm^{-1}
L	亮度〔立体角密度〕	$\text{W m}^{-2}\text{sr}^{-1}$	π	3.14159...	—
l	轨道量子数	—	ρ	反射率	—
M	辐射出射度〔发射密度〕	W m^{-2}	σ	斯蒂芬-玻耳兹曼常数	$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-4}$
m	整数 1,2,3...	—	τ	透射率	—
m	磁量子数	—	$\Phi(\)$	角波函数	—
m	折合质量	g	ϕ	平面角	red, deg
n	主量子数	—	Ω	立体角	sr
P	压强	Pa	Ω'	投射立体角	sr
P, Φ	通量	$\text{J s}^{-1}, \text{W}$	上标 BB	黑体	
$P(\)$	勒让德多项式	—	下标		
Q	量,参量	可变的	b	双向的	
q	量的体密度	可变的, m^{-3}	h	半球的	
R	距离	m	q	光子的	
R	通用辐射测量变量	可变的	s	谱的	
R_H	氢的里德伯常数	cm^{-1}	u	能量的	
$R(\)$	径向波函数	—	v	可见的	
r	轴向距离	m	λ	波长	
S	线强度	—	∞	表示具有无限数的特性	
T	温度	K			

上面提供了一个完备描述辐射传输的符号集,但是,对从一个表面上反射和发射出的单位面积和单位立体角的辐射通量提出了一个专用的名称,即总辐射密度(radiosity)。很多作者采用亮度表示这个概念,而且当需要明确时,注明发射或反射亮度。在发射或散射的介质中,亮度随路径长度变化,并用专用的路径亮度来表征,量纲为单位路径长度亮度,即 $\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{cm}^{-1}$ 。这个物理量被称为路径亮度或立体传送度。

表 1.2 列出了国际照明委员会(CIE)推荐并由美国国家标准化协会在美国颁布的各种通用辐射测量术语及其定义和优选符号^[2],也在括号内给出了在很多文献中使用过,由 Jones^[3]和 Nicodemus^[4]先后提出的早先的符号。

表 1.2 辐射测量的术语*

名 称	符 号	定 义	表 达 式	单 位	别 称
基本量 Quantity	Q, U	辐射能量		焦耳[J]	
通量 Flux	Φ, P	量的时间率	$\frac{\partial Q}{\partial t}$	瓦[W]	
通量密度 Flux density		单位法向面积的通量	$\frac{\partial \Phi}{\partial A}$	W m^{-2}	
出射度 Exitance	$M[\text{W}]$	出射通量密度	$\frac{\partial \Phi}{\partial A}$	W m^{-2}	面辐射发射密度 Areance Radiant emittance
入射度 Incidence	$E[H]$	入射通量密度	$\frac{\partial \Phi}{\partial A}$	W m^{-2}	面辐照度 Areance Irradiance
强度 Intensity	$I[J]$	单位立体角通量	$\frac{\partial \Phi}{\partial \Omega}$	W sr^{-1}	点强度 Pointance
立体角密度 Sterance	$L[N]$	单位立体角通量密度	$\frac{\partial^2 \Phi}{\cos \theta \partial A \partial \Omega}$	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$	亮度 Radiance
立体传送密度 Steriscent		单位路径长度的立体角密度	$\frac{\partial^3 P}{\cos \theta \partial A \partial \Omega \partial l}$	$\text{W m}^{-3} \text{sr}^{-1}$	路径亮度 Path radiance
能流曝光量 Fluence exposure		入射照度乘以时间	$\frac{\partial Q}{\partial A}$	J m^{-2}	
总辐射密度 Radiosity		发射和反射的亮度	$\frac{\partial^2 P}{\cos \theta \partial A \partial \Omega}$	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$	亮度, 立体角密度 Radiance, Sterance

* 为了便于读者对照使用,本表中保留部分英文名称——译者。

1.1.2 下标的使用

每个辐射测量术语都有其确定的谱特性。亮度可能是以逐个波长为基础给出的,在这种情况下称为谱亮度;也可以是整个谱区内的,称为总亮度;或是某个特定波段的,称为加权或波段亮度,加权亮度也可能是可见光区亮度(光亮度)。若辐射测量的量是光谱的,并且上下文没有说明,则必须附上一个指定波长或说明频率的下标;若是对某个特定波段的,则必须注上相应波段。通常,对于光子(量子)通量的量,必须用一个下标 q 来标明。假如是关于发光度的量,则采用下标 ν 。通常上下文有明确说明的,可以省略下标。对红外波段,若是以能量为基

本量,则下标可以省略;若是光子的量,则采用下标 q。下标 λ (或任何其他谱变量)有时是表示微分或量的分布,例如:

$$L_{\lambda} = \frac{\partial L}{\partial \lambda} \tag{1.1}$$

但是任何加权的量,如可见的或红外的都可表示为:

$$L_v = \int_0^{\infty} W(\lambda) L_{\lambda}(\lambda) d\lambda \tag{1.2}$$

式中 W ——谱的加权函数。

1.1.3 荧光计测量

Jones^[3]在 1963 年引入了荧光计测量的概念,并把能量和功率传输的概念普遍化。他指出:各种几何量都是独立(存在)的,无论其基本量是能量、光子,还是这些量的变种、电子或其他。因此,把通量描述为该量的时间变化率,不管其基本量是什么量。通量密度是通量的面密度,然后他造了两个词,用出射度(exitance)命名发射出的通量密度,用入射度(incidence)表示接收到的通量密度。单位立体角通量称为辐射强度,而把单位面积、单位立体角通量统称为亮度,把其出射率(sterance)称为综合物理量,把路径亮度称为立体传送密度(sterisent)。这虽然有点深奥,但却是很有用的。形容词可修饰每一个量,例如,有辐射的出射率、可见光的出射率、电子出射率、光子出射率等。同样的命名体系也可用于出射度、入射度和立体传送密度。

1.1.4 Nicodemus 体系

作为 Jones 荧光计测量体系的应用和推广,Nicodemus 提出了一些修改^[4],他建议用点强度(pointance)代替强度,用面密度(areance)代替通量密度。虽然这些修改也被人采用过,但尚未被普遍接受。

1.1.5 中餐馆菜式命名法

为了更清楚地全面描述辐射测量术语,Geist 和 Zalewski^[5]提出了一个带有很多修饰词的命名体系,并建议对每个量采用四项,因而就构成了一个四列表。头一列表示量的谱特性,第二列描述源,第三列是几何,而第四列是通量或量的类型。这就类似于进入中餐馆时对各类不同菜肴的选择,因此而得名。表 1.3 列出了某些项。例如,开始可以从每一列中选

表 1.3 中餐馆菜式命名法

源	谱域	量	几何
入射的	光谱的	能量的	亮度
散射的	光子的	熵的	入射度
发射的	加权的	光子	通量密度

1.1.6 光度学术语

用于光度学的术语是一个历史悠久的体系,而且非常复杂并有点深奥。为了简化读写语言,已想出了很多术语,以便对那些较长的术语进行简化,以早期作者的名字命名某些物理量表示出了对他们的尊敬。光度学的基本量是流明或光瓦特。现在定义^[6]每瓦 680 lm 乘以由人眼光谱响应加权的光谱通量积分为发光效率,并可表示为:

$$L_v = \int_0^{\infty} L_{\lambda}(\lambda) K(\lambda) d\lambda \quad (1.3)$$

式中 $K(\lambda)$ ——人眼的光谱响应,并给定为:

$$K(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda,v}(\lambda)}{\Phi_{\lambda,e}(\lambda)} = V(\lambda) K_{\max} \quad (1.4)$$

式中 $K_{\max}$ ——最大值;

$V(\lambda)$ ——归一化函数,此函数分布在 380~780nm 内,其余波段则为零。

$K_{\max}$ 按前述的定义是 680 lm/W,这一定义取代了早先按黑体在铂的凝固温度下辐射输出的定义^[7]。

能量型的基本量,即发光能量是流明秒,也称塔(尔波特),发光能量密度由每立方米或立方厘米流明表示。每平方米的流明数称为勒克斯,每平方厘米 1 流明称为辐脱,每平方英尺 1 流明称为英尺-坎德拉,这是因为发光强度的单位是坎德拉,而从一个发光强度为 1 坎德拉的源照射到 1 英尺处的光照度为每平方英尺 1 坎德拉。表 1.4 是光度学基本单位一览表。记住:在计算光亮度和一个各向同性辐射体的光照度之间的相互关系时,1 熙提等于 10^4 尼特,或每单位立体角单位平方厘米 1 流明,1 亚熙提等于 1 熙提乘以 π 。同样的理由,1 朗伯等于 1 熙提乘以 $1/\pi$ 。

表 1.4 基本光度学术语

通用量	符号	光度学名称	单位	简略符号
光度量	Q_v	发光能量	塔(尔波特)	
光通量	P_v, Φ_v		lm	lm
光出射度	M_v	发光出射度	$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}, \text{lm cm}^{-2}$	lux, lx phot, ph
光入射度	E_v	光照度	$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}, \text{lm cm}^{-2}$	lux, lx phot, ph
光强度	I_v	发光强度	lm sr^{-1}	candela, cd(坎德拉)
光立体角	L_v	发光亮度	$\text{lm sr}^{-1} \text{cm}^{-2}$	nit(尼特)
光流量		发光流量	塔	
曝光量		曝光量	塔 m^{-2}	

1.2 黑体(普朗克)函数

黑体或普朗克方程的确立是物理学上的一个里程碑^[8],也是很多红外计算极其重要的部分,它可以由不同的形式表示。本节提供了几种形式以及与其相关的常数和系数。用于绘制各种谱辐射测量曲线的一些 BASIC 程序列在第 1.2.9 节中。

1.2.1 谱辐射出射度和亮度

方程的一般形式是把辐射出射度作为波长的函数给出:

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^x - 1)} \quad (1.5)$$

式中

$$x = c_2 / \lambda T \quad (1.6)$$

式中 c_1 ——第一辐射常数; c_2 ——第二辐射常数。它们被给定为^[9](物理常数的值见参考文献[9]):

$$c_1 = 2\pi^2 h = 3.741844 \times 10^4 \quad [\text{W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}] \quad (1.7)$$

$$c_2 = hc/k = 1.438769 \quad [\text{cm K}] \quad (1.8)$$

式中 c ——真空中的光速; h ——普朗克常数; k ——玻耳兹曼常数; T ——绝对温度(K)。黑体的亮度在数值上等于其辐射出射度乘以 $1/\pi$, 因此, 可写成:

$$L_{\lambda} = \frac{2c^2 h}{\lambda^5 (e^x - 1)} \quad (1.9)$$

1.2.2 换算为光子形式

同样, 这些方程可以用光子的形式给出。在这种情况下, 对于单色光, 按光子形式的方程等于按能量形式的方程除以光子的能量(hc/λ),

$$L_{q\lambda} = \frac{2c}{\lambda^4 (e^x - 1)} \quad (1.10)$$

$$M_{q\lambda} = \frac{2\pi c}{\lambda^4 (e^x - 1)} \quad (1.11)$$

1.2.3 谱标度的变换

有时把方程写成谱变量的形式比写成波长的形式更适用。由下列的关系式给出变换, 其中 R 是辐射测量变量, 而 x 和 y 是两个任意谱变量:

$$R_y dy = R_x dx \quad (1.12)$$

$$R_y = R_x \left(\frac{dx}{dy} \right) \quad (1.13)$$

下面用一个例子来说明。把按波长形式给出的谱辐射出射度转换成波数 $\tilde{\nu}$ 的形式, 要进行如下的计算: