

“十二五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术出版基金资助项目
世界光电经典译丛
丛书主编 叶朝辉

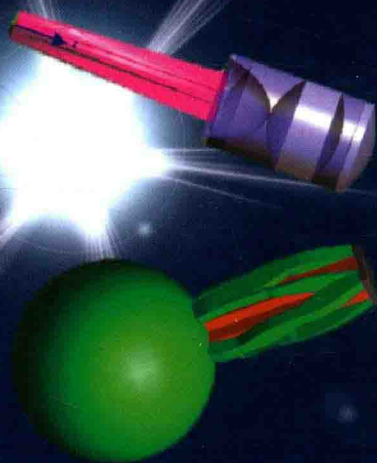
照明工程

非成像光学设计

ILLUMINATION ENGINEERING: DESIGN WITH NONIMAGING OPTICS

R. John Koshel 编著

葛鹏 赵茗 刘祥彪 译



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



“十二五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术出版基金资助项目
世界光电经典译丛
丛书主编 叶朝辉

照明工程

非成像光学设计

R. John Koschel 编著

葛鹏 赵茗 刘祥彪 译



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

Copyright © 2013 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers. All rights reserved.
Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
Published simultaneously in Canada.

This translation published under license. Authorized translation from the English language edition. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

湖北省版权局著作权合同登记 图字:17-2015-351 号

图书在版编目(CIP)数据

照明工程:非成像光学设计/(美)科谢尔(Koshel,R.J.)编著;葛鹏,赵茗,刘祥彪译.—武汉:华中科技大学出版社,2015.12
(世界光电经典译丛)
ISBN 978-7-5680-1480-9

I. ①照… II. ①科… ②葛… ③赵… ④刘… III. ①照明设计 IV. ①TU113.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 292398 号

照明工程:非成像光学设计

Zhaoming Gongcheng:Feichengxiang Guangxue Sheji

R. John Koshel 编著

葛 鹏 赵 茗 刘祥彪 译

策划编辑:徐晓琦

责任编辑:余 涛

封面设计:原色设计

责任校对:张 琳

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉正风天下文化发展有限公司

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:19.75

字 数:326千字

版 次:2016年1月第1版第1次印刷

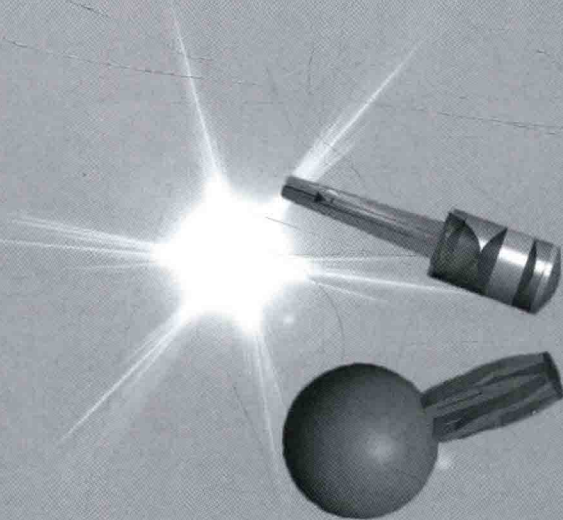
定 价:158.00元

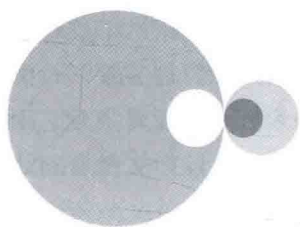


本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



**ILLUMINATION ENGINEERING
DESIGN WITH NONIMAGING OPTICS**





序

很久以前我就开始编写本书。起初我想写一本照明工程领域的入门书籍,但是现在已经扩展了很多内容。原书名为“高级非成像/照明光学”,但由于该书名未能涵盖本书的所有内容而放弃。尽管如此,我认为在最终的书名中还是应同时含有“非成像”和“照明”这两个术语。照明光学,将会在第1章讨论,指的是观察者采用或探测到的光源的光场分布。“非成像光学”则指的是不需要满足成像约束条件,重点讨论从光源到目标的辐射的有效传输问题。“照明光学”和“非成像光学”之间的不同之处很细微,但简而言之,照明是要求有一个观察者,而非成像光学则主要考虑获得所需的分布和/或效率。因此,我想尽力找到更符合的标题。直到提交书稿之前,我才决定采用“照明工程:非成像光学设计”。当然,并不是所有的照明系统都使用非光学设计原理(例如,一些投影系统使用基于成像原理的柯勒照明)。此外,也并不是所有的照明系统必须有一个“观察者”,但至少有一个观察目标(例如,太阳能发电以使用光伏电池为目标)。因此,术语“照明”和“非成像”在本书中涵盖的范围是比较宽泛的。用这样一个宽泛的表述是合适的,正如本书所述,大部分的非成像光学设计原理基于成像光学设计,如边缘光线的设计。同时,对“照明”的意义则是考虑光源“照明”的目标而不是考虑给观察者提供“照明”。因此,这本书的重点是非成像光学在照明系统的使用。

照明领域是古老的,但直到最近几十年学者们才开始对非成像光学的应用进行研究以期获得所需的辐射分布和高的传输效率。我们的社会面临越来越多的环境和能源利用的问题,因此设计优良的照明/非成像光学系统越来越

有吸引力。例如,太阳能光伏系统采用大量的非成像光学设计方法来获得用以照明的电能以及我们日常生活中使用的电能。非成像光学领域将与科技领域同步发展。一些观点认为目前的照明领域可类比于20世纪早期的镜头设计领域,因此未来有很大的发展空间。

本书涉及面较宽,涵盖了设计方法、光源、应用及加工制造。在本书出版的前十年,相关主题的文献都还很少,仅有一本书涉及了非成像光学这个主题,照明领域的文献资料则相对较多。然而,照明领域的文献资料主要讨论灯光的应用,内容局限于设计方法和建议,并未从理论的角度讨论设计原理。而随着固态照明和太阳能光伏发电系统的迅速发展,现在原理性的文献资料也在逐渐增多。本书所介绍的主题围绕基础理论进行拓展,而其他文献资料通常不会过多讨论。本书第1章主要介绍了单位、设计方法、设计类型和照明历史概要;第2章集中讨论了光学扩展量的守恒及其衍生出的斜不变量。光学扩展量是光学问题可行性的限制。因此,有必要让读者理解这个术语和其含义。第2章中涵盖的理论很多,包括一些证明,读者还可通过本章给出的例子加深理解。理论证明的过程从辐射度学、热力学、光线追迹等多角度给出,便于不同物理学背景的读者进行理解。第3章由Pablo Benítez, Juan Carlos Miñano和José Blen编写,他们对光学扩展量进行处理将其压缩至所求的相空间。第4章中, Juan Carlos Miñano, Pablo Benítez, Aleksandra Cvetkovic和Rubén Mohedano继续通过这种方法开发出高传输效率且满足所求分布的自由曲面光学系统,并紧接着给出了两个应用领域:太阳能聚光器(见第5章,由Julio Chaves和Maikel Hernández编写);导光管(见第6章,由William J. Cassarly编写)。第5章研究了为太阳能光伏电池系统提供高传输效率和高均匀性的非成像光学系统,且降低了光线追迹时的公差要求。第6章讨论了我们生活中常见的导光管与光导。导光管和光导通常用于汽车仪表盘的指示灯显示、笔记本电脑显示和各种电子产品的显示灯等。最后一章,本书用一定篇幅讨论了采样的要求(即空间分布的像素化)、光线追迹的需求(即光线和分布的抽样)、优化方法和公差。读者可能会注意到不同的章节中有重复的地方,如光学扩展量的概念在所有的章节都反复提到,自由曲面光学的内容则涵盖了第4章和第5章。我不想限制这几章作者的发挥,所以从某种意义上说,每一章都是独立的。不过,正如以上所提,光学扩展量是基础。本书尚不完善,有许多内容还未涉及,如光源模拟、投影系统、颜色、制造加工和测量等。因此,期待新版本可以弥补这些遗憾。当然可以通过查找这方面的文献来了

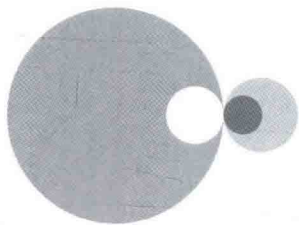
解这些信息,但还是希望本书的新版本把这些文献的内容都扩充进来。在此欢迎读者对补充内容提供好的建议。

本书的编写得到了大家的帮助,在此表示感谢。首先感谢的是我曾经工作过的公司。我在 Lambda Research 公司时候就开始写这本书,完稿的时候在 Photon Engineering 公司。这两家公司的 LLC. Ed Friere 和 Rich Pfisterer 都鼓励我写这本书。如果没有这两家公司的光学设计分析程序,这本书是不可能完成的。我同样也得到了 University of Arizona 的光学科学学院的很多人的鼓励和反馈。院长 Jim Wyant 和 José Sasián 教授对书稿给了一些反馈意见并鼓励我。另外,我需要感谢 Wiley/IEEE 出版社和 Toppan Bestset Premedia 有限公司的编辑,Taisuke Soda, Mary Hatcher, Christine Punzo 和 Stephanie Sakson,坚持等我缓慢地写完,所有的鼓励激励着我尽快完成此书。我的最大资源来自于我在光学科学学院教授照明工程课程的学生,该课程是本科生和研究生共选课程。学生们在初稿的查错和打字排版方面给了我不少帮助,让书中的观点表述更好。该门课程还只是研讨课时已有 70 多名学生选修,成为学分课后尚有 50 多名学生选修。学生们发现,问我问题的时候,95%的情况下,答案是使光学扩展量守恒。我告诉我的学生,我至今仍在学习如何应用光学扩展量。我相信光学扩展量的内涵在不断变化,完全掌握需终身不断学习。对光学扩展量的一些的细微变化我也不见得完全理解,但这本书的确也让我受益,我相信读者也会逐渐领会。本书若要再版,则将补充对光学扩展量的一些应用。最后,我要谢谢我的家庭。我把这本书奉献给你们。

R. John Koschel

封面

本书封面给出的是 2006 年国际光学设计会议 (IODC) 上的第一个照明设计竞赛问题的两个设计。目标是使得从一个正方形辐射的光线以可能的高传输效率进入一个十字图形分布。Bill Cassarly (见第 6 章) 开发了一种基于成像原理的方法,而 Julio Chaves 则开发了一个采用旋转对称变换的纯粹非成像方法,即外部区域是非对称导光管阵列,中间区域是一个大的导光管。2010 年的 IODC 会议提出了第二个照明设计竞赛问题,2014 年举办了第三次竞赛。我鼓励读者查阅文献来了解更多关于这些设计的挑战。



译者序

近年来,我国的照明事业不断发展,照明的需求也不断提高。传统的成像光学设计在很多照明应用领域已不适用,非成像光学设计则应运而生。正如本书作者提到的,多数有关照明系统的书籍资料都重在实际的工程应用,而很少涉及理论。某些研究人员虽也针对照明系统的非成像光学设计进行过相关专题的研究,但至今没有完整的理论体系,而本书的出版则恰逢其时,在某种程度上弥补了这一空白。

本书内容丰富,实用性强,全书分为7章,几乎涵盖了照明光学的所有专题,既有理论,也有应用。本书作者先后在多家著名光学软件公司(包括高级光学分析软件 ASAP 的开发公司)工作,后来又至大学任教,实践经验丰富,其书中所选案例具有很强的代表性和可操作性。

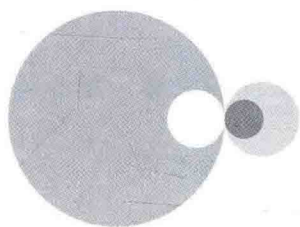
本书可作为高等学校光电信息科学与工程、光信息科学与技术、电子科学与技术、仪器仪表类和其他相近专业的教材,也可作为物理和测控技术及仪器专业的选修课教材或者参考书,以及作为从事光学设计工程技术人员的参考书。

华中科技大学赵茗副教授翻译了第1章、第2章、第4章、第7章,华南理工大学葛鹏老师翻译第5章、第6章,武汉墨光科技有限公司的刘祥彪翻译了第3章并对整本书进行了校对。在美国工作的张洁仪博士对全书进行了认真的校对,并提出了宝贵修改意见,其中多个名词均由张洁仪博士确定。此外,

感谢华南理工大学陈赞吉、时爽、王翔、贺威同学的文字工作。

华中科技大学出版社的徐晓琦编辑对本书的出版给予了极大的鼓励和支持,在此特别致以感谢。

由于译者水平有限,衷心希望广大读者对书中的不足之处给予批评指正。



目录

第 1 章 概述与术语 /1

- 1.1 什么是照明 /1
- 1.2 照明光学简史 /2
- 1.3 单位 /4
- 1.4 强度 /9
- 1.5 光照度和辐照度 /10
- 1.6 发光亮度和辐射亮度 /11
- 1.7 照明设计的重要因素 /14
- 1.8 用于照明工程的标准光学系统 /16
- 1.9 照明系统设计过程 /24
- 1.10 照明设计工程难吗 /26
- 1.11 后续章节的安排 /27

第 2 章 光学扩展量 /30

- 2.1 光学扩展量 /31
- 2.2 光学扩展量守恒 /32

- 2.3 光学扩展量的其他表达式 /39
- 2.4 使用光学扩展量设计举例 /43
- 2.5 会聚比 /58
- 2.6 旋转斜率不变 /59
- 2.7 光学扩展量讨论 /65

第3章 光学扩展量压缩 /69

- 3.1 简介 /69
- 3.2 光学扩展量压缩和光学扩展量旋转 /69
- 3.3 光学扩展量压缩器实例介绍 /76
- 3.4 典型的无焦透镜阵列系统 /79
- 3.5 两个自由反射面聚光器的应用 /85
- 3.6 光学扩展量压缩在光导管中的应用 /92
- 3.7 总结 /93

第4章 同步多表面3D设计方法 /98

- 4.1 引言 /98
- 4.2 自由曲面光学设计方法的发展状况 /98
- 4.3 SMS 3D 光学设计方法 /100
- 4.4 SMS 链 /101
- 4.5 SMS 表面 /103
- 4.6 设计实例 /107
- 4.7 结论 /139

第5章 太阳能聚光器 /146

- 5.1 聚集的太阳能辐射 /146
- 5.2 接收角 /147

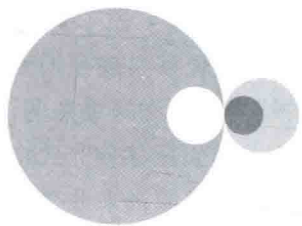
- 5.3 成像和非成像聚光器 /155
- 5.4 无穷小光学扩展量的极限实例:齐明光学系统 /163
- 5.5 应用于高太阳能会聚比的三维 Minano-Benitez 设计方法 /171
- 5.6 一个方向的科勒积分 /180
- 5.7 两个方向的 Köhler 积分 /194

第 6 章 导光管的设计 /210

- 6.1 背景及术语 /210
- 6.2 导光管的系统 /212
- 6.3 导光管光线追迹 /213
- 6.4 图表 /215
- 6.5 弯曲导光管 /215
- 6.6 混光棒 /220
- 6.7 背光 /234
- 6.8 非均匀背光源形状 /245
- 6.9 条形光源 /246

第 7 章 采样、优化和公差分析 /254

- 7.1 介绍 /254
- 7.2 设计技巧 /256
- 7.3 光线抽样原理 /268
- 7.4 优化 /273
- 7.5 公差 /289



第 1 章

概述与术语

本章主要介绍照明光学领域的一些常见物理量和基本概念。首先给出了一些基本物理量的定义。因为非成像光学和照明光学的基础均基于这些基本物理量,所以读者需熟悉这些基本度量并学会使用它们去进行设计、分析和测量。然后概述了照明系统领域的发展,并给出了描述照明系统性能的重要参数。

1.1 什么是照明

一直以来,光学设计都被认为仅仅是镜头设计或成像系统设计。但从近 10 年的发展来看,光学设计已包括了照明设计这个子领域。照明设计主要关注的是光源到目标之间的可见光或辐射的传输问题。^①

可见光的有效传输在成像系统中是必需的,但是这些系统均受到成像要求的限制。为高效传输光线,照明系统可以忽略“成像约束”。因此,“非成像光学”一词经常出现在照明系统中。按以上所述,光学系统设计大致可分成以下四类。

- 成像系统设计。这类设计通常有一定的成像要求,如焦平面相机设计。
- 可见光成像系统设计。主要考虑某些集成观察系统的整体成像要求,

^① 光源辐射一般针对可见光,广义包括紫外和红外,用电磁辐射表达更贴切。

如望远镜、照相机取景器和显微镜等,这些均是需要人眼来直接面对成像对象的光学系统。

- 可见光照明系统设计。可见光照明系统即有一定成像要求并充当光源的光学系统,如显示器、照明设备以及复印机的照明光源等。

- 不可见光照明系统设计。该类系统无成像要求,如太阳能集束器、激光泵浦腔以及其他光学传感器应用领域。

上述后面两个系统即属于照明工程领域。成像系统虽也可实现照明要求,但在某些特殊应用情形下,如制版行业中需用到的临界照明和柯勒照明,本书给出了许多基于非成像光学原理的替代方法。本书将重点阐述使光线在源与目标之间进行有效传输的非成像技术,偶尔也会采用成像原理来改善传输效果。此外,我们对观察者未设置任何要求,但读者也将发现,大多数照明光学实际上是默认了观察者是人眼或一个光电成像系统(如相机)。如果忽视必要的可视化和视觉特点将会影响照明系统的性能。从这一点来看,照明设计也有一些主观的因素。虽然该因素目前不是本书的重点,但在此处讨论它是为了促进某些系统的改善。

本章接下来将围绕以下内容进行阐述:

- 照明领域的发展简史;
- 照明设计分析的单位 and 术语;
- 照明设计的重要因素;
- 标准照明光学;
- 设计一个照明系统的步骤;
- 照明设计的难点讨论;
- 章节安排。

值得注意的是,虽然本书存在交替使用“照明”和“非成像”这两个术语的情形,但严格讲,照明的广义概念包含了非成像和成像两种方法。

1.2 照明光学简史

照明和非成像光学领域的历史悠久,但一直以来主要都是采用实验和误差计算的方法来完成。图 1.1 给出了照明领域所使用的光源和光学设计发展里程。宽泛地讲,照明光学领域开始于地球上普遍应用的光源——太阳。虽然把太阳包含进来显得有些不合逻辑,但太阳的确在照明和非成像光学领域正变得越来越重要,如日光系统、太阳能热效应以及太阳能发电等领域。光源

的使用、建模和制造目前已是照明设计领域的重点之一。目前因为 LED 光源具有光效高、光色可选、寿命长、结构紧凑等特点,已逐渐取代传统光源。过去 60 年,非成像光学方法得到了一定发展,目前在照明行业中,光学设计和光源开发发展迅速,预计在未来几十年里潜力无限。

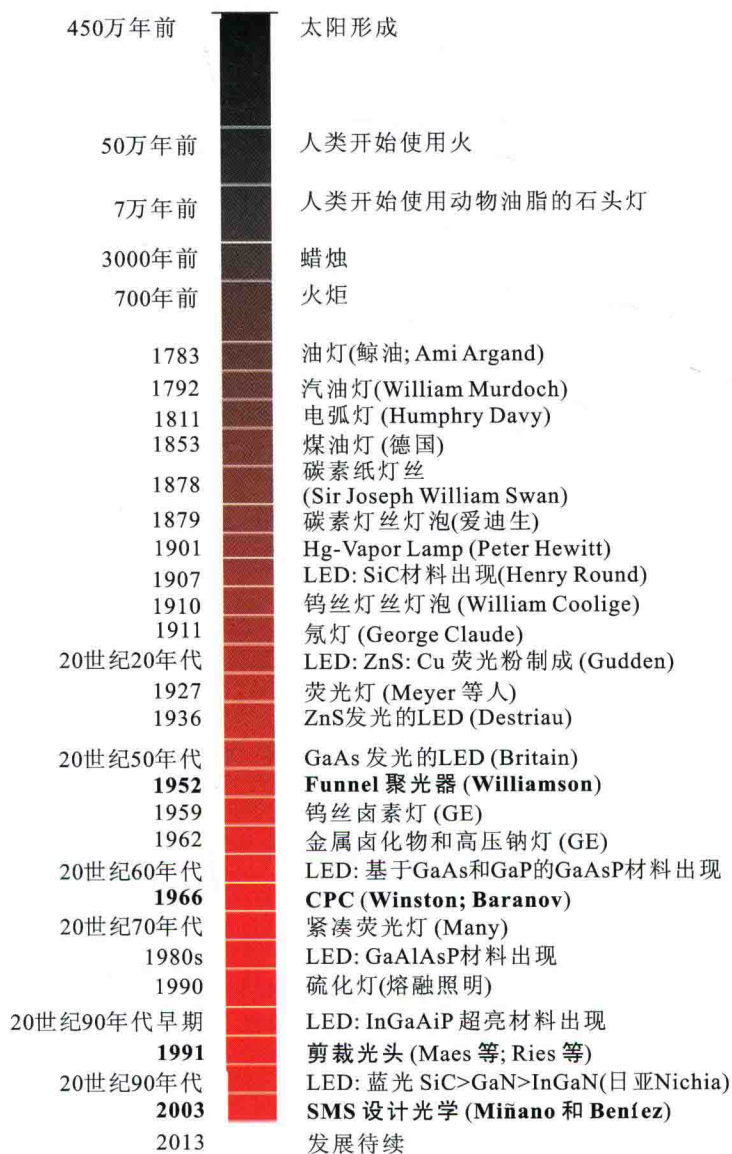


图 1.1 照明和非成像光学发展里程碑。左列是日期,右列是对应的事件。黑体标注的为照明光学设计概念,以 LED 开头的是新型固态光源,其余为各种类型的光源

1.3 单位

正如其他任何工程类或科学类学科,照明系统的设计和建模中也需要用到一些基本物理量。为便于比较,单位标准化尤其重要。在照明领域,主要关注两种类型的物理量。

- 辐射度量。对光的物理特性的客观描述度量,常用于不可见光系统。
- 光度量。基于人眼视觉的度量,这类度量常用于可见光系统。

辐射度量和光度量可通过人眼视觉相互关联,国际照明委员会(Commission Internationale de L'Eclairage, CIE)^{[2][3]}已给出相应的标准化人眼视觉函数。这两类度量原则上可以基于任何单位制,公制和英制均可。但1971年的第十四届国际度量衡大会规定了公制单位国际标准单位^[4]:长度单位为米(m),质量单位为千克(kg),时间单位为秒(s),即MKS系统。使用厘米、克和秒时则表示为CGS。本书对辐射度量使用MKS标准单位,但有时也会采用非MKS单位,譬如长度采用毫米。接下来的两小节将详细给出两类度量的定义,并在光度量部分指出了两类度量之间的联系。

1.3.1 辐射度量

辐射测量是一个涉及电磁辐射测量的领域。常用的辐射度量^①如表1.1所示^[5]。通常辐射度量前会冠以“辐射”二字以示与光度量的区别,并用下标“e”来表示,但如没有标注时也默认为辐射度量。

表 1.1 辐射度量定义

辐射度量	符号	定义	SI单位
辐射能量	Q_e		J
辐射能量密度 (每单位体积辐射能量)	u_e	$\frac{dQ_e}{dV}$	J/m ³
辐射通量/功率 (单位时间内的辐射能量)	Φ_e 或 P_e	$\frac{dQ_e}{dt}$	J/s 或 W
辐射出射度 (单位面积光源所发出的辐射通量)	M_e	$\frac{d\Phi_e}{dA_{source}}$	W/m ²

① 注意,本书中符号均遵从 R. W. Boyd《Radiometry and the Detection of Optical Radiation》一书中的约定。不同版本中的辐射度量和光度量可能有不同的符号约定,请读者注意不要混淆。

续表

辐射度量	符号	定义	SI 单位
辐射照度 (辐照接收面上单位面积接收的辐射通量)	E_e	$\frac{d\Phi_e}{dA_{\text{target}}}$	W/m^2
辐射强度 (单位立体角内发出的辐射通量)	I_e	$\frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	W/sr
辐射亮度 (单位投影面积上单位立体角内发出的辐射通量)	L_e	$\frac{d^2\Phi_e}{dA_{s,\text{proj}}d\Omega}$	$\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$

辐射度量的定义均基于表 1.1 中第一个物理量——辐射能量(Q_e), 单位为焦耳(J)。辐射能量密度(u_e)是单位体积内的辐射能量, 单位为 J/m^3 。辐射通量/功率(Φ_e 或 P_e)是单位时间内的辐射能量, 单位为 J/s 或 W 。单位面积上的辐射照度有两种表达法——辐射出射度和辐射照度。辐射出射度(M_e)是指在单位面积上光源向外辐射的通量值, 辐射照度(E_e)是单位面积上接收到的通量值。因此, 辐射出射度适用于光源发射和表面散射等情况, 而辐射照度则描述入射到探测器的通量, 单位均为瓦特每平方米(W/m^2)。辐射强度(I_e)定义为单位立体角内发出的辐射功率, 单位为瓦特每立体角(W/sr)。注意, 很多人误将光源的辐射强度用单位面积功率(即辐射照度)来表述, 这是明显错误的^①。不少文献在表达辐射照度的时候错误采用了强度表述, 也有一些严谨的文献注意到了这点, 比如 Hecht^[6]的《Optics》和一些现代照明领域的文献^[7], Palmer^[8]还在其文中对此混淆情况进行了详细的讨论。最后, 辐射亮度(L_e)是单位投影面积上单位立体角内发出的辐射通量, 单位为瓦特每平方米每立体角($\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$)。接下来的 1.4~1.6 节还将进一步详细讨论辐射照度、辐射强度和辐射亮度这三个量。

如果表 1.1 所列的辐射度量是波长的函数, 则称为光谱辐射量。例如, 当强度具有一定的光谱分布时, 则称为光谱辐射强度, 并用下标“ λ ”标注(如 $I_{e,\lambda}$), 或表示为波长的函数(如 $I_e(\lambda)$)。光谱辐射量对应于表 1.1 中的所有物理量, 仅需在单位上加上每波长单位(如 nm 或 μm)。若需计算某波段范围内

^① 如果本应用辐射照度描述而错误采用强度描述, 将会混淆光学或辐射学的内容。某些作者认为“强度”是指单位面积功率, “辐射强度”则是指单位立体角功率; 还有一些作者则从物理光学的观点出发, 定义强度为坡印亭矢量的大小。本书作者认为, 这些定义均不符合国际单位制, 必须纠正。