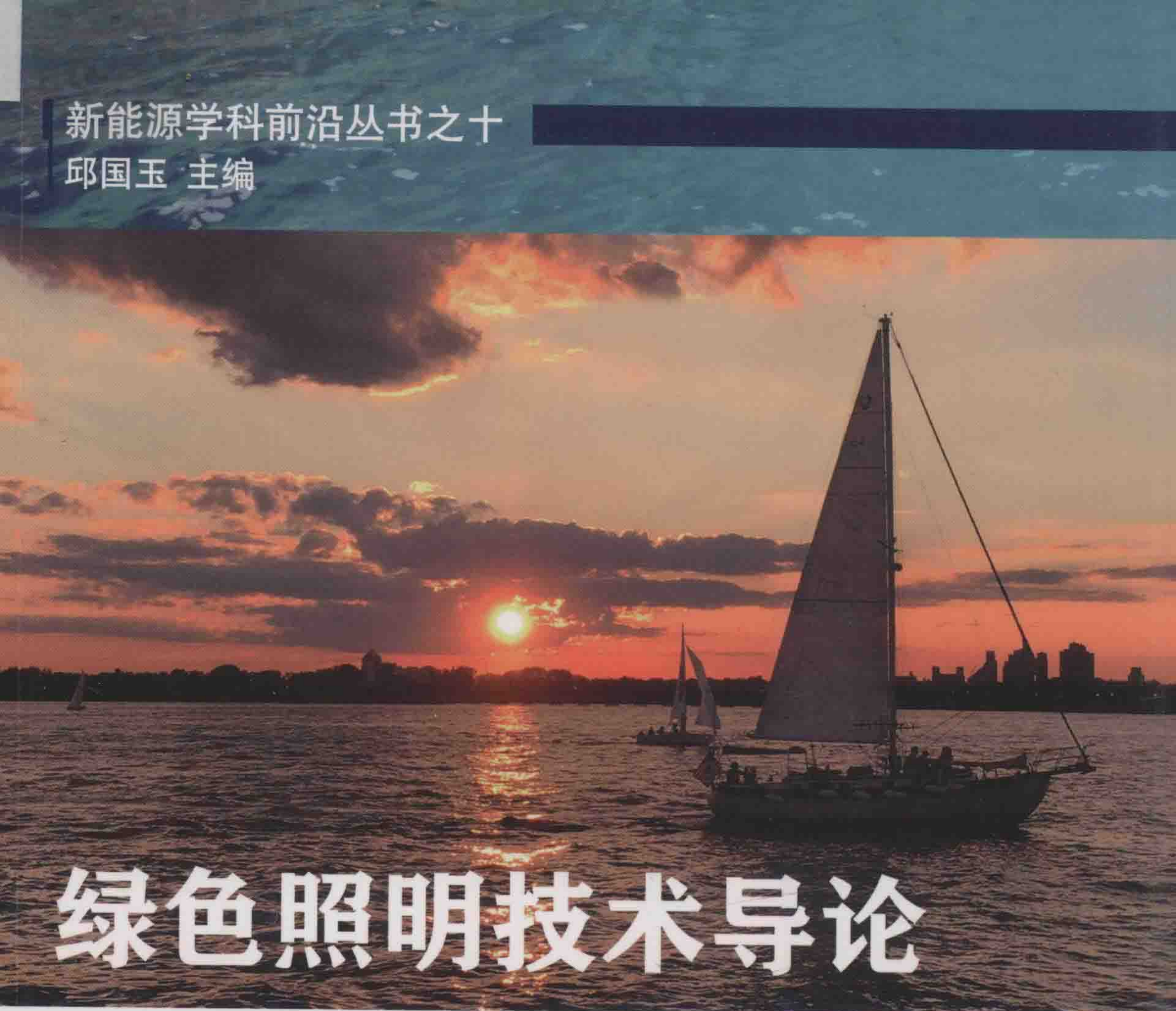


新能源学科前沿丛书之十
邱国玉 主编



绿色照明技术导论

金 鹏 著

Introduction to Green Lighting Technologies



科学出版社

新

邱国玉 主编

绿色照明技术导论

Introduction to Green Lighting Technologies

金 鹏 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

在 LED 固态照明和现代电子技术的推动下,照明技术得到了迅猛的发展。本书从节能、环保、智能和人性化等方面全面地阐述了照明技术的前沿领域和发展趋势。书中的章节涉及照明灯具基础知识、能效标准、色度学、LED 固态照明、智能照明技术和照明产品的生命周期分析。本书注重理论和应用相结合,部分章节有较强的理论性,但也包含了大量新技术简介和低碳照明的工程案例。

本书可以作为大学高年级学生、研究生的辅助教材,也能对能效工程和照明领域的从业人员提供有益的指导。

图书在版编目(CIP)数据

绿色照明技术导论 / 金鹏著. —北京: 科学出版社, 2017. 3

(新能源前沿丛书/邱国玉主编)

ISBN 978-7-03-051804-0

I. 绿… II. ①金… III. ①照明技术—无污染技术—教材 IV. TU113.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 030532 号

责任编辑: 刘 超 李 敏 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张: 10 1/4

字数: 200 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

致 谢

本书在实验、资料收集、数据解析、案例研究和出版等方面得到深圳市发展和改革委员会新能源学科建设扶持计划“能源高效利用与清洁能源工程”项目的资助，深表谢意。

作者简介

金鹏 北京大学绿色照明系统实验室主任、副教授

1992 年获南开大学现代光学研究所物理学学士，师从吴仲康教授；2000 年获美国休斯敦大学德州超导中心物理学博士学位，师从朱经武教授。2001 ~ 2006 年先后在美国康宁公司、赛强半导体公司和 CML 创新科技公司任高级工程师、技术总监等职位，科研和管理经历全面。

2006 年归国，任职于北京大学深圳研究生院，开设“化合物半导体器件”和“微系统封装”等研究生课程，2010 年参与组建“北京大学-加利福尼亚州大学绿色照明系统实验室”，主讲“节能技术与可持续设计”和“低碳科技”。曾任深圳市半导体行业协会秘书长，深圳新能源汽车促进会理事。现兼任《现代显示》编委，深圳节能专家联合会专家、国家标准化管理委员会半导体照明设备和材料标准工作组和国际半导体照明联盟（ISA）技术委员会成员。参与撰写了多个深圳市 LED 和半导体产业发展规划和 LED 产品标准，也数次代表中国参与国际 LED 及半导体行业标准制定和多边谈判。作为课题负责人承担了国家 02 科技重大专项、深圳市杰出青年计划等科研项目。近年发表学术论文 20 余篇，中国发明专利 10 余项，国际专利 2 项，专著 1 本。

| 总 序 |

至今，世界上出现了三次大的技术革命浪潮（图 1）。第一次浪潮是 IT 革命，从 20 世纪 50 年代开始，最初源于国防工业，后来经历了“集成电路—个人电脑—因特网—互联网”阶段，至今方兴未艾。第二次浪潮是生物技术革命，源于 70 年代的 DNA 的发现，后来推动了遗传学的巨大发展，目前，以此为基础上的“个人医药（Personalized medicine）”领域蒸蒸日上。第三次浪潮是能源革命，源于 80 年代的能源有效利用，现在已经进入“能源效率和清洁能源”阶段，是未来发展潜力极其巨大的领域。

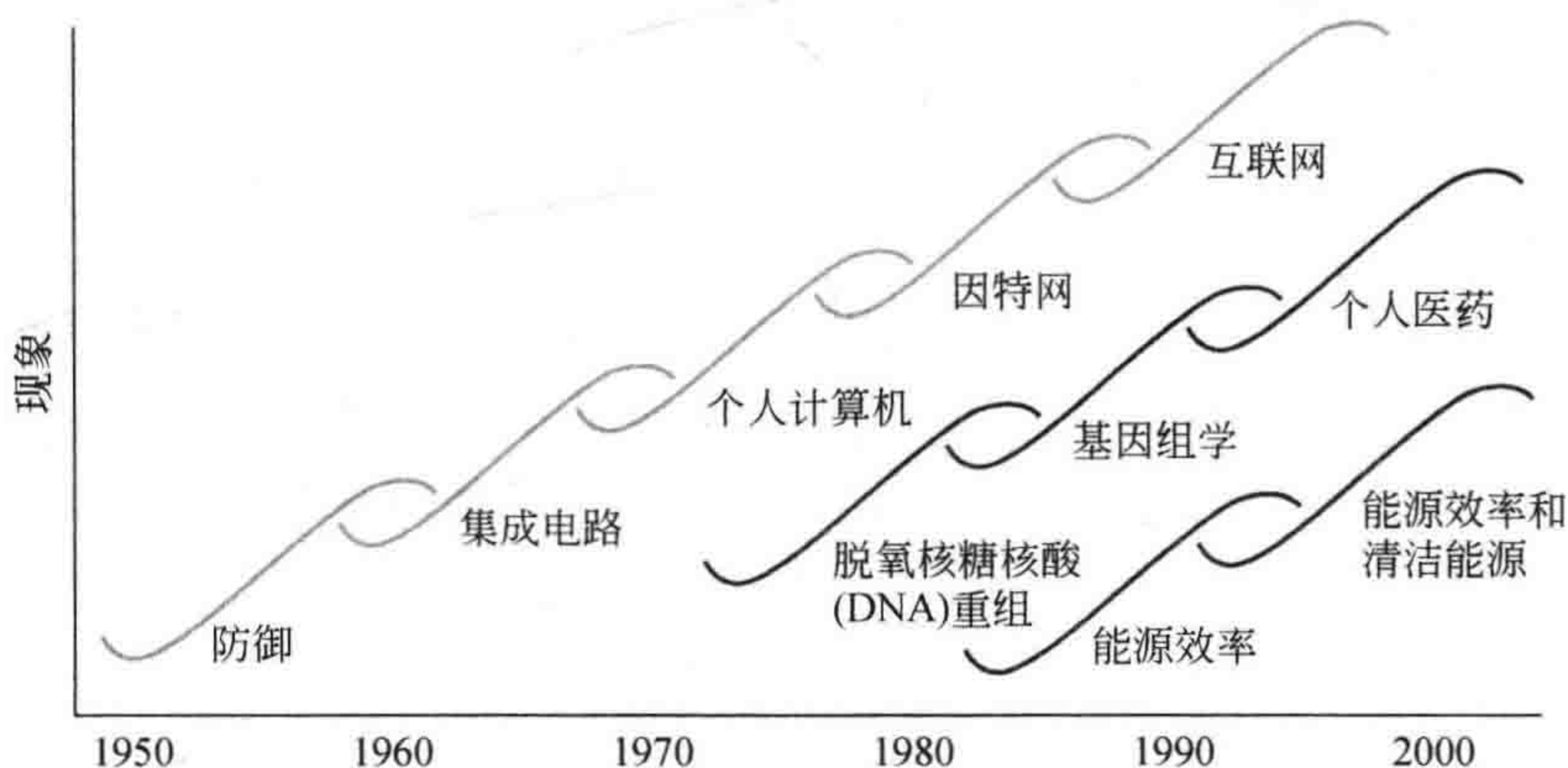


图 1 世界技术革命的三次浪潮

资料来源：<http://tipstrategies.com/bolg/trends/innovation/>

在能源革命的大背景下，北京大学于 2009 年建立了全国第一个“环境与能源学院（School of Environment and Energy）”，以培养高素质应用型专业技术人才为办学目标，围绕环境保护、能源开发利用、城市建设与社会经济发展中的热点问题，培养环境与能源学科领域具有明显竞争优势的领导人才。“能源高效利用与清洁能源工程”学科是北大环境与能源学院的重要学科建设内容，也是国家未来发展的重要支撑学科。“能源高效利用与清洁能源工程”包括新能源工程、节能工程、能效政策和能源信息工程 4 个研究方向。教材建设是学科建设的基础，为此，我们组织了国内外专家和学者，编写了这套新能源前沿丛书。该丛书包括

13 本专著，涵盖了新能源政策、法律、技术等领域，具体名录如下：

基础类丛书

- 《水与能：蒸散发、热环境与能量收支》
- 《水环境污染和能源利用化学》
- 《城市水资源环境与碳排放》
- 《环境与能源微生物学》
- 《Environmental Research Methodology and Modeling》

技术类丛书

- 《Biomass Energy Conversion Technology》
- 《Green and Energy Conservation Buildings》
- 《城市生活垃圾管理与资源化技术》
- 《能源技术开发环境影响及其评价》
- 《绿色照明技术导论》

政策管理类丛书

- 《环境与能源法学》
- 《碳排放与碳金融》
- 《能源审计与能效政策》

众所周知，新学科建设不是一蹴而就的短期行为，需要长期不谢的努力。优秀的专业书籍是新学科建设必不可少的基础。希望这套新能源前沿丛书的出版，能推动我国在“新能源与能源效率”等学科的学科基础建设和专业人才培养，为人类绿色和可持续发展社会的建设贡献力量。

北京大学教授 邱国玉
2013 年 10 月

| 前 言 |

本书是新能源学科前沿丛书中的一部。新能源领域的范畴很广，涉及可再生能源，如太阳能，风能和潮汐能等。节能和能效也是新能源学科的重要组成部分。书中的内容部分取材于北京大学深圳研究生院开设的“节能技术与可持续设计”和“低碳科技”这两门研究生课程。本书围绕着绿色照明的4个主旋律：节能照明（energy efficient lighting）、智能照明（smart lighting）、生态照明（eco lighting）和人性化照明（ergo lighting）展开章节。其中第1章简述了照明技术发展史；第2章介绍了照明与能效和能效标准；第3章深入地讲述了光源评价体系和人性化照明；第4章简述了高速发展的固态照明技术的应用；第5章以案例分析了太阳能结合LED照明、智能照明和日光采集技术；第6章以全生命周期的视角分析了照明技术对环境的影响，全生命周期分析是生态照明的核心评价标准。

本书涉及光电子技术、色度学、生命周期分析和标准等多个学科，可以作为大学高年级学生、研究生的辅助教材，也能对能效工程和照明领域的从业人员提供有益的指导。

书稿的编辑得到了北京大学魏烨艳和张军斌的大力支持。书稿的写作也得到了其他人员的帮助，其中周奇峰参与了第1章和第2章的撰写。蒋丽婷执笔了第3章的部分内容。王绍芳提供了第4章的部分图表和文字。张军斌、陈彪、雷鹏和赖君渊参与了第5章和第6章的撰写。另外参加本书资料收集和整理的还有陈炜霞、曹润泽、邹北冰等同学，封面的精美照片由袁朗提供，作者在此向他们表示由衷的感谢。作者要特别感谢耿旭教授和 Michael Siminovitch 教授在本书写作过程中的鼓励和支持。由于作者水平有限，加上成稿仓促，疏漏和不当之处，恳请读者批评指正。

金 鹏

2016年8月

于北京大学南国燕园

| 目 录 |

总序	
前言	
第1章 照明基础	1
1.1 引言	1
1.2 电光源与灯具	5
1.2.1 热辐射发光光源与灯具	6
1.2.2 气体放电发光光源与灯具	7
1.2.3 场效应电致发光光源与灯具	10
1.3 灯具应用技术与照明设计	12
思考题	14
参考文献	14
第2章 照明与能效	16
2.1 照明能耗的现状分析	16
2.1.1 照明能效	16
2.1.2 照明能效的基本要素	18
2.2 研究照明与人、环境、社会的关系	19
2.2.1 照明与人	19
2.2.2 照明对于环境的影响	20
2.2.3 照明的可持续性研究	22
2.2.4 绿色照明	22
2.3 能效工程与建筑能效	23
2.3.1 美国建筑能效标准 (ASHRAE90.1-2010)	24
2.3.2 中国《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015)	25
2.3.3 LEED 认证	25
2.4 LED 照明能效标准	25
2.4.1 中国 LED 能效标准	26
2.4.2 欧盟能效标准	27

2.4.3	美国能源部能源之星	28
2.4.4	美国加利福尼亚州 DLC	29
2.4.5	美国加利福尼亚州 Title24	30
思考题		31
参考文献		31
第3章 照明与视觉		32
3.1	视觉系统	32
3.1.1	人眼结构	32
3.1.2	视见函数	33
3.1.3	CIE 色度空间坐标	34
3.1.4	麦克亚当椭圆	37
3.1.5	均匀空间	37
3.1.6	色彩视觉	40
3.2	照明光源	42
3.2.1	照明光源光学性能	42
3.2.2	照明光源其他特性	45
3.3	光源光色性能评价模型	46
3.3.1	显色指数	46
3.3.2	色品质数	49
3.3.3	色域指数	51
3.3.4	色分辨指数	52
3.3.5	锥细胞灵敏度差异指数	53
3.4	人性化照明	54
思考题		55
参考文献		56
第4章 LED 与固态照明		57
4.1	LED 封装与光效历程	57
4.2	LED 在显示领域应用	58
4.2.1	LED 指示光源	58
4.2.2	LED 显示屏	59
4.2.3	LED 背光源	62
4.3	LED 通用照明	63
4.3.1	LED 照明产品色温	64
4.3.2	LED 照明产品显色性 (CRI)	66

4.3.3	LED 照明额定光通量和系统光效	66
4.3.4	LED 照明产品的寿命及综合可靠性	67
4.3.5	LED 通用照明产品	68
思考题		76
参考文献		76
第 5 章 低碳照明实践		77
5.1	日光照明技术	77
5.1.1	窗户	78
5.1.2	天井	79
5.1.3	高窗	80
5.1.4	天窗	82
5.1.5	镜面反射系统	84
5.1.6	导光管	85
5.1.7	锯齿形屋顶	85
5.1.8	定日镜	86
5.1.9	智能调光玻璃	87
5.1.10	光纤混凝土墙壁	88
5.1.11	混合太阳能照明	88
5.2	智能照明	88
5.2.1	传感器	89
5.2.2	通信技术	96
5.2.3	调光技术	110
5.3	太阳能离网照明	115
5.3.1	太阳能	115
5.3.2	太阳能发电原理	117
5.3.3	太阳能照明系统	118
5.3.4	太阳能离网照明设计方案	122
5.3.5	工程实例	126
思考题		127
参考文献		127
第 6 章 照明产品生命周期分析		130
6.1	产品生命周期分析	130
6.2	照明产品生命周期的能耗分析	135
6.2.1	对比参量的选择	137

6.2.2 生产环节能耗分析	138
6.2.3 运输环节能耗分析	139
6.2.4 使用环节能耗分析	140
6.2.5 整个生命周期中的能耗总结	141
6.3 照明产品生命周期对环境的影响	142
思考题	149
参考文献	149

| 第 1 章 | 照 明 基 础

1.1 引 言

亲爱的读者，在您即将阅读本书的章节内容之际，笔者期望您能短暂闭上眼睛，感受并思索呈现在您眼前的黑暗以及所获得的光明与色彩。我们感知到了光的存在，诸如自然界中的太阳光、星光、绚丽的北极光，黑夜中流光溢彩的街灯、车水马龙的车灯、霓虹闪烁的巨幅广告牌及温馨而浪漫的万家灯火等。光无处不在，它是我们生活中不可或缺的资源，更标志着人类的文明进度。

人们对于光的本质的探寻由来已久，早在公元前 6 世纪 ~ 公元前 5 世纪的古印度，对光的理论研究就在数论派与胜论派的学者中形成雏形；同时期的古希腊理论同样开始兴起与繁荣，公元前 5 世纪，光的原子论假设被提出；公元前 300 年左右，欧几里得开始提出了几何光学理论。直至近代，人们开始真正从物理学的角度来探究光的本质。1637 年，笛卡尔发表了有关“光的折射理论”的文章，将光类比为声波，不同于当时“光的形态说”理论或“光的种说”理论，而是揭示了光的波动机械属性，这被视为是现代物理光学的起点。

光的微粒说与光的波动说理论开始被越来越多的科学家研究，并提出质疑。在前人的研究基础上，牛顿的《光学》著作以及其本人的权威使得“光的微粒说”理论在 18 世纪甚嚣尘上；同一时期，光的波动理论发展也同样飞速，一大批科学家如胡克、克里斯蒂安·惠更斯、欧拉等提出或支持了光的波动理论。1800 年，托马斯·杨用实验的方法展示了光的波动特征之干涉现象以及光的偏振性；奥古斯丁·菲涅尔用数学方法证明了光的偏振性，1850 年莱昂·傅科的实验同样证实了光的波动理论。法拉第、麦克斯韦、赫兹等科学家提出理论并用实验的方式证实了光是一种电磁波。直至 1905 年，科学家爱因斯坦通过对光电效应的理论解释，最终揭示了光具有波粒二象性这种本质特征（Born and Wolf, 1999）。

光是一种电磁辐射波，可以理解为是一种能量的传播形式，并有别于声波、水波这样的机械波，它是以光子为载体，由大量光子（光量子）的统计行为所体现出的波动性。光与无线电波等并无本质的不同，区别仅在于波长（或频率）

的不同。由量子电动力学的理论可知，光量子携带的能量为 $h\nu$ ， h 为普朗克常量 ($h=6.626\times10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$)， ν 为光的频率 ($\nu=c/\lambda$ ， c 为真空中光的传播速度) (赵凯华和钟锡华，1982)。这也很好地解释了光的波粒二象性。

光的电磁波谱范围涵盖了从红外至紫外 (约 $1\text{mm}\sim10\text{nm}$) 一个相当宽的波长区间，而能被人类所感知的波谱范围仅为 $380\sim780\text{nm}$ 的一个较窄的波长区间，这一部分能被人眼感知形成视觉效应的光谱区间被称为可见光。

在电磁辐射波谱图中，通过用波长 (或频率) 的特性将光从中分离出来，能较好地诠释光的特性。图 1-1 揭示了常见类型的电磁辐射波与其波长所覆盖的大致范围，以及可见光在整个电磁辐射波谱中随波长的位置分布示意图。

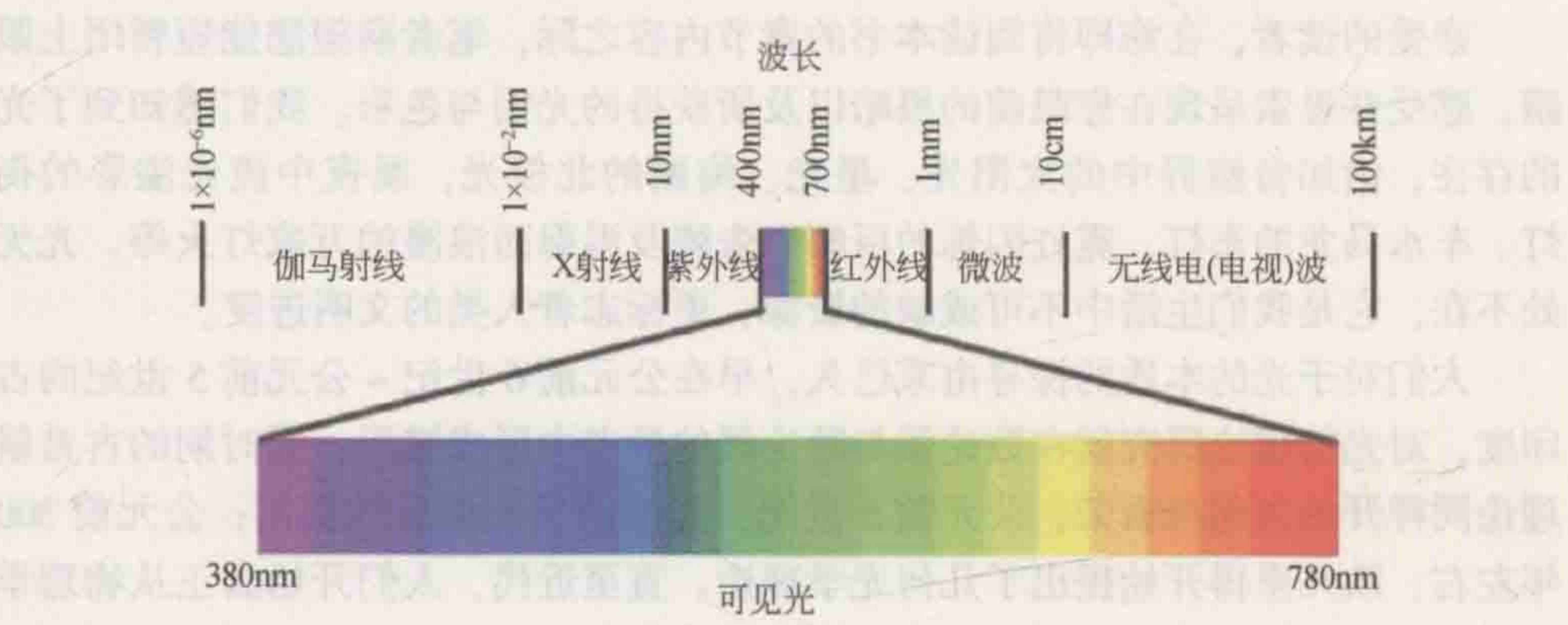


图 1-1 可见光在电磁波谱图中的位置示意图

人眼受不同波长的单色可见光刺激，形成不同的视觉颜色，单色可见光刺激人眼依次形成紫、蓝、青、绿、黄、橙、红不同的颜色。紫外光与红外光，不能被人眼所感知 (人眼看不见)，我们将其称为不可见光。紫外光，是指涵盖波长范围为 $10\sim400\text{nm}$ 的电磁辐射，在自然界中主要来源于太阳光辐射。

1801 年，德国物理学家里特通过棱镜分离日光，在紫外端使溴化银底片感光变黑的实验，发现并证实了紫外光的存在。根据生物效应不同，紫外线可以按照波长细分为四种波段：UV-A ($320\sim400\text{nm}$)、UV-B ($280\sim320\text{nm}$)、UV-C ($100\sim280\text{nm}$)、UV-D ($<100\text{nm}$)。UV-A (长波黑斑效应紫外线)，具备较强的穿透力，而且一年四季、无论阴晴都存在，绝大部分可以到达地球表面，穿透人体皮肤表层，抵达人体皮肤真皮深层，使我们晒黑。360 nm 波长的 UV-A 紫外线符合昆虫类的趋光性反应曲线，可制作诱虫灯；365 nm 的近紫外光可用于矿石鉴定、验钞等领域。UV-B (中波红斑效应紫外线)，具备中等穿透能力，大部分被大气层中的臭氧层和云层所吸收，被人体表层皮肤吸收，适量辐射能促进体内矿物质代谢和维生素 D 的合成，过量辐射会使得皮肤肿胀、脱皮，使得皮肤被

晒红。紫外保健灯、植物生长灯发出的 UV-B 就是使用峰值在 300 nm 附近的荧光粉制成。UV-C（短波灭菌紫外线），只有很弱的穿透能力，可完全被大气层中的臭氧层所吸收。紫外线杀菌灯发出的就是该短波紫外线。

红外光，是指涵盖波长范围为 780 nm ~ 1 mm 的电磁辐射，介于可见光与微波之间。1800 年由德国科学家霍胥尔通过三棱镜分解日光，在红光外端的温度实验发现其存在。表 1-1 揭示了不同类型的光所对应的波长范围值。

表 1-1 不同类型的光所应对波长的范围区间

不同类型光的名称		波长范围
紫外光	UV-D	10 ~ 100nm
	UV-C	200 ~ 280nm
	UV-B	280 ~ 320nm
	UV-A	320 ~ 380nm
可见光	紫 violet	380 ~ 455nm
	蓝 blue	455 ~ 490nm
	青 cyan	490 ~ 515nm
	绿 green	515 ~ 570nm
	黄 yellow	570 ~ 600nm
	橙 orange	600 ~ 625nm
	红 red	625 ~ 780nm
红外光	近红外 NIR	780 ~ 2. 5μm
	中红外 MIR	2. 5 ~ 25μm
	远红外 FIR	25 ~ 1. 0mm

照明，就其过程而言，是可见光刺激人眼获得视觉的过程。进入人眼的光，可能是光源直射的光，或者是光源照射物体反射的光，进入并辐射刺激人眼，在大脑中感知形成对光或者被照射物体的视觉过程，它包括人脑将进入眼睛的光刺激转化为整体经验的过程，如觉察某些物体的存在，鉴别、确定其在空间中的位置，阐明它与其他事物的关系，辨认它的运动、颜色、明亮程度或形状等。在形成照明获得视觉的过程中，对光源的认识与应用、对光的主动应用技术、人眼对可见光辐射刺激所对应的视觉响应，是研究照明的关键性因素。

发光的物体都可以称为光源，太阳是最为重要的自然光源。千百万年以来，为了适应太阳光，人眼进化成能够感知和利用太阳光发射频谱中一部分特殊的辐射能，该部分辐射能在水中的透过率最高，形成视觉以获知出现在眼中的物体的颜色、形状、明暗等最为本真的基本属性。

在人造光源发现以前，史前人类的活动行为基本上是日出而作，日落而息。然而人类的趋光本能，以及对于黑暗的恐惧与光明的渴望，促使人类不断地尝试与创新。火的熟练运用以及各型人造光源的出现，让人类突破了黑夜的束缚，赢得更多的时间与自由。人类对于光源的追求与发展，可以看成是一部人类文明的进步史，人工照明的发展状态，也折射出人类文明的发展程度，当人类从宇宙中观察地球在黑夜中的状态，会发现类似如繁星点点、璀璨夺目的一片片区域，正是人工照明塑造了地球在宇宙中的奇迹；明与暗，同时也折射出文明与落后、贫穷与富足。

灯具，为光源提供机械支撑和外形，满足光源散热，提供电连接，通过透镜和反射机构等结构改变出光方式或分布，以实现众多的照明功能。广义的灯具包括光源的全部照明器具。

人类对电光源的发明与利用，灯具的发展，系统性与功能性的照明设计理念，其终极目标乃是要符合人类在形成视觉获得照明这一过程中，同时获得最佳的照明视觉效果（如当基本功能性照明需求被满足的前提条件下，需同时兼顾合适的亮度、色温、光照显色性、眩光等级控制、均匀度依据辐射与光生物安全等相关要求）。尽量减少对于能源的损耗，最大限度地避免对于环境、生物与人的影响，充分兼容人类在迈向智能化时代对于智能控制以及功能性模块的消费需求，同时考虑产品在量产化消费时代的经济成本与产品生命周期的竞争优势。在这一过程中，进入人眼的光（物理层面）与人眼对于光的特征响应（生物层面）的综合作用，影响决定这些目标是否能得以实现。

人眼对于光的特征响应，呈现出以下特点：对于不同波段的可见光谱响应程度不同；在不同照明环境条件下对光的响应曲线也不相同（将在第2章相关内容中详细介绍）。

在照明形成的过程中，追溯进入人眼的光，是由光源、灯具到照明应用系统三个层面所决定的。

1) 光源（如电光源），其各自发光原理不同，这意味着能耗效率存在差异；不同光源有着独有的特征光谱（光谱功率分布），这决定着人眼所获得的视觉效果（如色温、显色指数）以及灯具获得的初始光通量。

2) 灯具，利用独特的导光结构将光源发出的光导出并改善出光方式与分布，这影响着光的利用效率、能源消耗，以及人眼在特定区域所获得的照明视觉效果。

3) 照明应用系统，结合特定的照明场所，从照明应用的层面来合理选择光源与灯具、优化布局、设计控制、兼容模块，实现功能性照明需求，这决定着最终的照明视觉效果，以及能源消耗水平等。

1.2 电光源与灯具

光源在人类历史上的发展历程，最早是从史前人类对于火的控制与运用开始，篝火、油灯、蜡烛、煤油灯、燃气灯等通过燃烧来进行照明的光源相继出现 (Bowers, 1998)，历经了最早时代直到工业革命并且延续到今天，这种照明技术的进展缓慢而曲折，从巴比伦时代直到 18 世纪晚期的煤气发展，这段时期几乎没有新的设备和改进（图 1-2，在今天繁华时尚的大都市香港，仍能够看到 20 世纪曾经被广泛应用的燃气灯的身影）。



图 1-2 燃气灯街景照片
注：拍摄于香港 都爹利街

进入 19 世纪，白炽灯、气体放电灯相继问世，照明技术进入了一个跨越式的发展黄金时代；到现在，电器照明已经发展到了以 LED（light emitting diode，发光二极管）等半导体固态照明为代表的第四代绿色照明光源与灯具应用时代，形式各异的照明光源以及千差万别的照明技术应用，已经被渗透到人类的任何活动领域。图 1-3 为照明光源的发展历史。

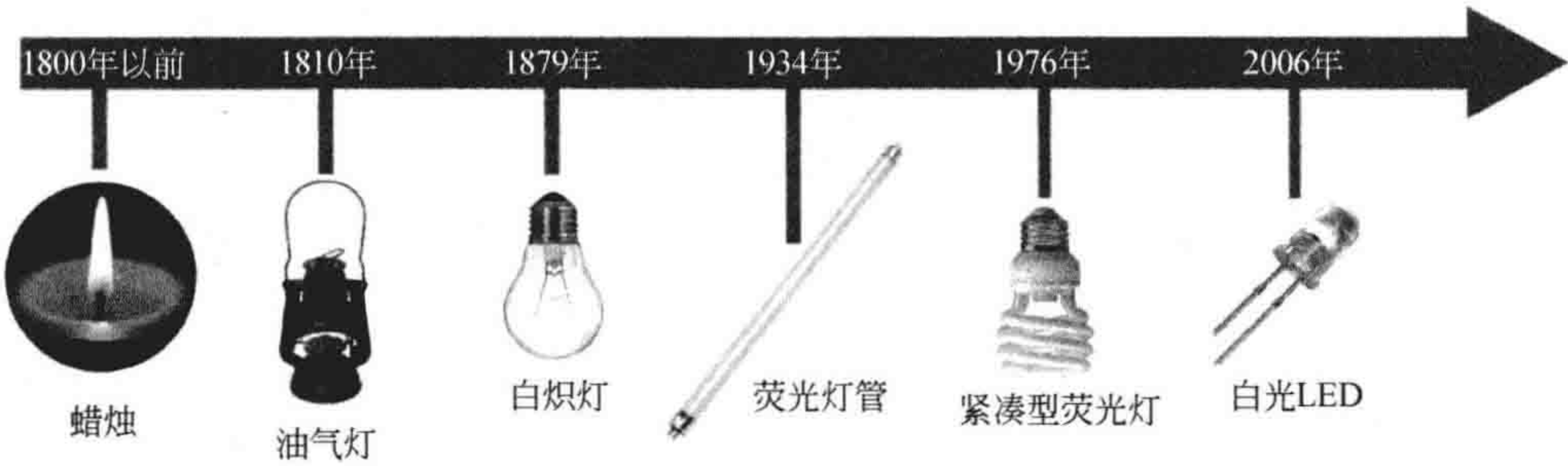


图 1-3 照明光源的发展历史