

光的构筑：建筑照明设计

Architectural Lighting Design: The Construction of Light

"建筑是光的容器，光是建筑的灵魂。没有光，空间不过是黑暗的虚空；有了光，材料开始呼吸，体量开始说话，人的情感开始流动。"

—— 勒·柯布西耶 (Le Corbusier)

绪论

建筑照明设计，是科学与艺术的交叉点，是技术理性与感性美学的融合体。它不仅仅是"让空间亮起来"的工程行为，更是一种通过光来塑造空间、引导行为、营造氛围、表达意义的创造性活动。

从拉斯科洞窟中摇曳的火光，到古罗马万神殿穹顶倾泻而下的那道光柱；从哥特教堂彩色玻璃窗上斑斓的光影，到安藤忠雄光之教堂中那束穿透十字缝隙的白光——人类对建筑中光的追求从未停歇。进入电气时代后，从爱迪生发明白炽灯，到如今LED与智能控制系统的全面普及，照明技术的进步为建筑师和设计师提供了前所未有的创作自由。

本教材旨在系统阐述建筑照明设计的基础理论、设计方法、技术设备和前沿实践，为建筑学、环境艺术设计、室内设计等相关专业的学生及从业者提供一本兼具理论深度与实践指导意义的参考读物。

全书分为五大部分，共二十五章：

- **第一部分：光的基础理论**——从物理学和视觉科学的角度，建立对光的系统认知；
- **第二部分：照明设计原理**——阐述各类建筑空间的照明设计方法与计算体系；
- **第三部分：照明技术与设备**——全面介绍光源、灯具与控制系统的技术知识；
- **第四部分：建筑照明设计实践**——聚焦建筑内外照明设计的具体手法与实践策略；
- **第五部分：专题与前沿**——探讨健康照明、可持续设计、智能技术与发展趋势。

第一部分：光的基础理论

第1章 光的物理本质

1.1 电磁波谱

光是一种电磁辐射。在物理学中，电磁波按照波长（或频率）的不同，排列形成一个连续的谱系，称为电磁波谱（Electromagnetic Spectrum）。电磁波谱涵盖了从极短波长的伽马射线到极长波长的无线电波，其完整谱段包括：

波段名称	波长范围	特征描述
伽马射线	< 0.01 nm	核反应产生，穿透力极强
X射线	0.01 nm ~ 10 nm	医学成像基础
紫外线（UV）	10 nm ~ 380 nm	化学效应显著，可杀菌消毒
可见光	380 nm ~ 780 nm	人眼可见的唯一波段
红外线（IR）	780 nm ~ 1 mm	热辐射的主要形式
微波	1 mm ~ 1 m	通信与加热应用
无线电波	> 1 m	通信广播基础

建筑照明设计关注的核心波段即为可见光（380~780 nm），但紫外线和红外线的存在对光源选择、材料老化和人体健康均有重要影响，不可忽略。

1.2 可见光的波长与颜色

可见光波段内，不同波长对应不同的颜色感知：

波长范围	对应颜色	典型光源
380 ~ 430 nm	紫色	紫外LED荧光转换
430 ~ 470 nm	蓝色	蓝光LED芯片
470 ~ 500 nm	青蓝色	金属卤化物灯
500 ~ 560 nm	绿色	绿色LED、荧光灯
560 ~ 590 nm	黄色	低压钠灯、荧光粉
590 ~ 620 nm	橙色	琥珀色LED
620 ~ 780 nm	红色	红光LED、白炽灯

值得注意的是，颜色并非光本身的"固有属性"，而是人脑对不同波长电磁辐射的主观解读。同一波长的光在不同观察条件下可能产生不同的色彩感知，这为照明设计中色彩管理的重要性奠定了理论基础。

1.3 光的波粒二象性

光的本质具有波粒二象性（Wave-Particle Duality）。在某些实验中，光表现为波动特性（如干涉、衍射、偏振）；在另一些实验中，光则表现为粒子特性（如光电效应、康普顿散射）。

波动模型：光作为电磁波，其传播速度在真空中为 $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。波长 λ 、频率 ν 和波速 c 的关系为：

$$c = \lambda \cdot \nu$$

粒子模型：光由不可再分的基本能量量子——光子（Photon）组成。每个光子的能量 E 与其频率成正比：

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

其中 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 为普朗克常数。

在照明设计中，波动模型有助于理解光的传播、干涉和衍射现象（如灯具光学系统中的光束控制），粒子模型则有助于理解光电转换过程（如LED和太阳能电池的工作原理）。

1.4 光在介质中的传播行为

光在不同介质中的传播行为是照明设计的物理基础：

反射（Reflection）：光到达两种介质的交界面时改变方向返回原介质的现象。反射分为：

- **镜面反射：**光滑表面上的反射，入射角等于反射角，如镜面、抛光金属。
- **漫反射：**粗糙表面上的反射，光向各方向散射，如白色墙面、石膏天花板。
- **混合反射：**既有镜面分量又有漫反射分量，如半光泽涂料表面。

折射（Refraction）：光从一种介质进入另一种介质时传播方向发生改变的现象，遵循斯涅尔定律（Snell's Law）：

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

吸收（Absorption）：光在介质中传播时部分能量被介质吸收转化为热能的现象。材料的吸收率取决于其分子结构和光的波长。

透射（Transmission）：光穿过介质的现象。根据透射光的散射程度，分为：

- **规则透射：**透明材料（如玻璃），透射光保持原方向。

· **漫透射**：半透明材料（如磨砂玻璃、亚克力），透射光被散射。

散射（Scattering）：光在不均匀介质中向各方向分散传播的现象。瑞利散射（Rayleigh Scattering）解释了天空为何呈蓝色——短波长的蓝光比长波长的红光更容易被大气分子散射。

1.5 光的叠加与混色

照明设计中经常需要将不同光源混合以获取目标光色。混色分为两种基本类型：

加色混色（Additive Color Mixing）：不同色光叠加时，混合光的亮度等于各分量的亮度之和。红（R）、绿（G）、蓝（B）为加色法的三原色。白光 = 红光 + 绿光 + 蓝光。

减色混色（Subtractive Color Mixing）：颜料或滤光片叠加时，每经过一层便减去一部分波长的光。青（C）、品红（M）、黄（Y）为减色法的三原色。

在LED照明中，白光LED的实现通常采用蓝色LED芯片激发黄色荧光粉的"加色混色"方案，也有采用RGB三色LED混合的方案，后者可实现全彩动态调光。

第2章 光度学基本量

2.1 光度学概述

光度学（Photometry）是研究光的度量的学科，与辐射度学（Radiometry）的区别在于：光度学的所有物理量都经过人眼视觉灵敏度的加权，反映的是人眼对光的主观感知，而非纯粹的物理能量。

2.2 光通量（Luminous Flux）

定义：光源在单位时间内发出的、被人眼感知到的光能量总量。

符号：Φ

单位：流明（Lumen, lm）

光通量是衡量光源"总发光量"的核心指标。一个光源的总光通量越大，它看起来就越"亮"（在相同条件下）。

常见光源的光通量参考值：

光源类型	功率	光通量
白炽灯	60W	约 800 lm
荧光灯管	36W（T8）	约 3,250 lm

光源类型	功率	光通量
LED灯泡	9W	约 800 lm
LED灯管	18W	约 2,000 lm
金属卤化物灯	150W	约 13,000 lm
高压钠灯	250W	约 28,000 lm

2.3 发光强度 (Luminous Intensity)

定义：光源在给定方向上的单位立体角内发出的光通量。

符号：I

单位：坎德拉 (Candela, cd)

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

其中 Ω 为立体角 (Steradian, sr) 。

发光强度描述的是光源在不同方向上的"光的集中程度"。一个各向同性 (均匀发光) 的点光源，其总光通量与发光强度的关系为：

$$\Phi = 4\pi \cdot I$$

即 1 cd 的各向同性点光源，总光通量为 $4\pi \approx 12.57$ lm。

2.4 照度 (Illuminance)

定义：被照面上单位面积接收到的光通量。

符号：E

单位：勒克斯 (Lux, lx) , 1 lx = 1 lm/m²

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

照度是照明设计中最基本、最常用的指标——它直接反映了"工作面被照亮的程度"。

点光源的照度计算 (距离平方反比定律)：

$$E = \frac{I \cdot \cos\theta}{r^2}$$

其中 r 为光源到被照点的距离，θ 为光线入射角。

常见场景的照度参考值：

场景	照度范围
满月夜晚的室外	0.1 ~ 0.3 lx
普通街道照明	10 ~ 30 lx
住宅客厅	100 ~ 300 lx
办公室工作面	300 ~ 500 lx
精密机械车间	750 ~ 1,500 lx
手术室	10,000 ~ 100,000 lx
直射阳光下	50,000 ~ 100,000 lx

2.5 亮度 (Luminance)

定义：光源或被照面在给定方向上的单位投影面积上的发光强度。

符号：L

单位：坎德拉每平方米 (cd/m²) ， 也称"尼特" (nit)

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos\theta}$$

亮度是唯一直接与"人眼感觉到的明亮程度"对应的光度学量。当我们说"这个屏幕太亮了"或"那面墙看起来很刺眼"，描述的正是亮度。

常见亮度参考值：

对象	亮度
晴朗蓝天	约 8,000 cd/m ²
白炽灯灯丝	约 10,000,000 cd/m ²
普通LCD显示屏	200 ~ 400 cd/m ²
月光下的路面	约 0.01 cd/m ²

2.6 色温 (Color Temperature)

定义：当某一光源所发射的光的颜色与黑体 (Planckian radiator) 在某一温度下辐射的光的颜色相同时，该黑体的绝对温度即为该光源的色温。

符号：Tc 或 CCT (Correlated Color Temperature, 相关色温)

单位：开尔文 (K)

色温的心理感知分类：

色温范围	感知描述	典型光源	适用场景
2,000 ~ 2,700 K	暖黄光，温馨放松	白炽灯、烛光	卧室、餐厅、酒店
3,000 ~ 3,500 K	暖白光，舒适自然	暖白LED	住宅客厅、商业空间
4,000 ~ 4,500 K	中性白光，清爽明亮	中性白LED、荧光灯	办公室、教室、医院
5,000 ~ 6,500 K	冷白光，清醒警觉	日光色LED	工业厂房、手术室
> 6,500 K	偏蓝光，冷峻严肃	高压汞灯	特殊工业应用

在建筑照明设计中，色温的选择直接影响空间氛围和使用者的心理感受。低色温营造温暖、放松的氛围，适合休息和社交空间；高色温营造清爽、专注的氛围，适合工作和学习空间。

2.7 显色指数 (Color Rendering Index, CRI)

定义：光源对物体颜色的还原能力的评价指标，以标准光源（同色温的黑体辐射或日光）为基准，将被测光源下的物体颜色与标准光源下的物体颜色进行比较。

符号：Ra (一般显色指数)，取前8种标准色样的平均值

数值范围：0 ~ 100

显色指数	等级	适用场景
$Ra \geq 90$	优秀	博物馆、美术馆、医疗、高端商业
$80 \leq Ra < 90$	良好	办公室、学校、住宅、一般商业
$60 \leq Ra < 80$	一般	工业照明、仓库、停车场
$Ra < 60$	较差	道路照明、室外泛光

特殊显色指数：除了一般显色指数 Ra，CIE 还定义了 R1~R15 共 15 种特殊显色指数，其中：

- R9 (饱和红色) 对评估光源的红色还原能力至关重要，尤其在商业照明和医疗照明中
- R12 (饱和蓝色) 对评估蓝色还原有重要意义

· R13（肤色）对评估人物照明效果有参考价值

需要特别注意的是，仅凭 Ra 值无法全面评价光源的显色性能。两个 Ra 值相同的光源，对特定颜色的还原效果可能截然不同。因此，CIE 近年来推荐使用色域指数（Gamut Index, Rg）和色保真度指数（Rf）等更完善的评价体系（IES TM-30 标准）。

2.8 其他重要光度学量

光效（Luminous Efficacy）：光源发出的总光通量与其消耗的电功率之比，单位为流明每瓦（lm/W）。是衡量光源能效的核心指标。

光源类型	典型光效
白炽灯	10 ~ 17 lm/W
卤素灯	15 ~ 25 lm/W
T8 荧光灯	80 ~ 100 lm/W
T5 荧光灯	90 ~ 110 lm/W
LED灯（商用）	100 ~ 200 lm/W
低压钠灯	150 ~ 200 lm/W

光通量维持率：光源在规定条件下燃点一定时间后，其光通量与初始光通量之比。LED 灯具通常以 L70（光通量降至初始值 70% 的时间）来标定寿命。

年光通量输出（Lumen Depreciation）：综合考虑光源光衰、灯具积尘和环境因素后的光通量衰减，在照明设计中通常引入维护系数（Maintenance Factor, MF）来修正。

第3章 人眼视觉特性

3.1 人眼的结构

人眼是一个高度精密的光学系统。光线依次经过角膜、房水、瞳孔、晶状体和玻璃体，最终在视网膜上成像。

角膜（Cornea）：透明的穹顶形结构，是光线进入眼内的第一道界面，承担约 2/3 的屈光力。

瞳孔 (Pupil) : 虹膜中央的圆形开口, 通过虹膜肌肉的收缩和舒张调节直径 (约 2~8 mm), 控制进入眼内的光量。瞳孔在暗环境中扩大 (散瞳), 在明亮环境中缩小 (缩瞳), 这类似于照相机的光圈机制。

晶状体 (Lens) : 透明的双凸透镜, 通过睫状肌调节曲率, 实现对远近物体的聚焦 (调节功能)。随年龄增长, 晶状体逐渐变硬变黄, 调节能力下降 (老视), 对蓝紫光的透过率也随之降低。

视网膜 (Retina) : 眼球壁的最内层, 含有约 1.2 亿个视杆细胞 (Rod cells) 和 600~700 万个视锥细胞 (Cone cells)。视杆细胞负责暗视觉 (对亮度敏感, 不分辨颜色), 视锥细胞负责明视觉和色觉 (需要较高亮度, 能分辨红、绿、蓝三原色)。

3.2 明视觉与暗视觉

人眼根据环境亮度水平, 在两种视觉模式之间切换:

明视觉 (Photopic Vision) :

- 适应亮度: $> 3 \text{ cd/m}^2$
- 主要感光细胞: 视锥细胞
- 光谱光视效率函数: $V(\lambda)$
- 峰值敏感波长: 555 nm (黄绿色)
- 特征: 色彩分辨能力强, 空间分辨能力高

暗视觉 (Scotopic Vision) :

- 适应亮度: $< 0.001 \text{ cd/m}^2$
- 主要感光细胞: 视杆细胞
- 光谱光视效率函数: $V'(\lambda)$
- 峰值敏感波长: 507 nm (蓝绿色)
- 特征: 无法分辨颜色, 空间分辨能力低, 对运动物体敏感

中间视觉 (Mesopic Vision) :

- 适应亮度: $0.001 \sim 3 \text{ cd/m}^2$
- 视杆细胞和视锥细胞同时参与
- 光谱灵敏度介于明视觉和暗视觉之间
- 是大多数室外夜间照明 (如道路照明、停车场照明) 所处的视觉状态

中间视觉的重要性在照明设计中日益受到关注。在中间视觉条件下, 人眼对短波长 (蓝绿光) 的敏感度高于明视觉条件下的预期, 这意味着在低照度环境下使用含蓝光成分较多的光源, 可能比传统计算预测

的更为有效。CIE 于 2010 年发布了中间视觉光度学系统（CIE 198:2010），为这一领域提供了标准化的评价框架。

3.3 眩光

眩光（Glare）是照明设计中最需要控制的不利视觉效应之一。眩光是由于视野中的亮度分布或亮度范围不适宜，或在空间或时间上存在极端的对比，从而引起不舒适感或视觉作业能力降低的视觉条件。

不舒适眩光（Discomfort Glare）：引起视觉不适但不一定降低视觉作业能力的眩光。典型场景：裸露的高亮度灯管在视线上方。

失能眩光（Disability Glare）：由眼内散射引起，降低目标物与背景之间的对比度，从而降低视觉作业能力。典型场景：对面车辆远光灯。

眩光评价指标：

统一眩光值（UGR, Unified Glare Rating）：CIE 推荐的室内眩光评价指标：

$$UGR = 8 \log_{10} \left\{ \frac{0.25}{L_b} \sum_{n=1}^N \frac{L_s^2 \cdot \omega}{p^2} \right\}$$

其中 L_b 为背景亮度， L_s 为每个灯具在观察者眼睛方向的亮度， ω 为每个灯具对观察者所张的立体角， p 为 Guth 位置指数。

UGR 数值越小，眩光控制越好：

UGR 值	眩光等级	适用场景
≤ 16	不可察觉	精密绘图、手术室
≤ 19	可察觉但不干扰	办公室、教室
≤ 22	可察觉但可接受	走廊、楼梯间
≤ 25	明显但可容忍	工业车间
≤ 28	严重	不允许

眩光控制措施：

- 控制灯具亮度：使用漫射罩、格栅等降低灯具表面亮度
- 增大遮光角：使灯具在正常视线方向上不可见
- 合理布置灯具位置：避免灯具位于工作面的反射眩光区
- 增加背景亮度：减少灯具与环境的亮度对比
- 采用间接照明：将光线投射到天花板或墙面上，利用漫反射光线照明

3.4 对比敏感度与视觉作业

视觉作业（Visual Task）是指人眼需要辨识的目标物及其细节。照明设计的核心目标之一就是为不同视觉作业提供适当的光环境。

对比敏感度：人眼能够分辨的最小亮度差异与背景亮度之比。对比敏感度受以下因素影响：

- 目标物的大小
- 目标物与背景的亮度对比
- 观察时间
- 环境照度
- 观察者的年龄和视觉能力

视觉作业分级（根据 GB 50034）：

视觉作业等级	作业示例	推荐照度
特别精密	微电子装配、精密制图	1,500 ~ 3,000 lx
很精密	精密机械装配、质量检验	750 ~ 1,500 lx
精密	普通机械加工、阅读书写	500 ~ 750 lx
中等	一般办公、会议室	300 ~ 500 lx
粗糙	仓库、走廊	100 ~ 200 lx

3.5 适应与视觉功效

明适应与暗适应：人眼从暗环境进入亮环境时迅速适应（约数秒），从亮环境进入暗环境时缓慢适应（约 20~30 分钟完全适应）。这意味着在照明设计中，应避免频繁出现极端的亮度变化——例如从极亮的室外直接进入昏暗的室内，会导致数分钟的视觉适应期，影响安全和舒适。

视觉功效曲线：在一定的照度范围内，视觉作业绩效随照度的增加而提高。但当照度超过一定阈值后，绩效的提升趋于平缓。这意味着盲目增加照度并非最佳策略，而应综合考虑照度均匀度、眩光控制和色温选择。

第4章 色彩与光

4.1 光谱功率分布（SPD）

光谱功率分布（Spectral Power Distribution, SPD）描述了光源在各个波长上辐射功率的相对大小，是光源颜色的"指纹"。不同光源的 SPD 形态各异：

白炽灯：近似黑体辐射的连续光谱，长波长（红、黄）成分丰富，短波长（蓝、紫）成分稀少。因此白炽灯光色偏暖，显色性优秀（ $R_a \approx 100$ ），但光效低。

荧光灯：以低压汞蒸气的线状光谱（主要为 254 nm 紫外线）为基础，通过荧光粉将紫外线转换为可见光。不同配方的荧光粉产生不同的 SPD 形态，从而实现不同的色温和显色性。

LED：典型的白光 LED 由蓝光芯片（峰值约 450 nm）激发黄色荧光粉（宽波段发射，峰值约 560 nm）组成。SPD 上呈现明显的蓝色尖峰和黄色宽峰。

日光：自然日光的 SPD 是连续且相对平坦的，色温随太阳高度角和大气条件变化（从日出日落的约 2,000 K 到正午的约 5,500~6,500 K）。

SPD 的重要性在于：两个色温相同的光源，SPD 可能截然不同，这意味着它们对物体颜色的呈现效果、对人眼舒适度的影响、以及对人体生理节律的调节效果都可能不同。

4.2 CIE 色度系统与色品坐标

CIE 1931 标准色度系统使用 X、Y、Z 三个三刺激值来描述任何颜色。将三刺激值归一化后，得到色品坐标 x 、 y 、 z （ $x + y + z = 1$ ），可以绘制在 CIE 1931 色品图上。

黑体轨迹（Planckian Locus）：不同温度的黑体辐射在色品图上的轨迹。光源的色品坐标越接近黑体轨迹，其光色看起来越"自然"。

色温与相关色温：

- 色温：光源的色品坐标恰好落在黑体轨迹上时
- 相关色温（CCT）：光源的色品坐标不在黑体轨迹上时，用黑体轨迹上距离最近的点所对应的温度表示

色容差（SDCM, Standard Deviation of Color Matching）：描述光源实际色品与目标色品之间的偏差程度。1 SDCM 为人眼不可察觉的极限偏差，通常商业照明产品要求 ≤ 5 SDCM，高端项目要求 ≤ 3 SDCM。

4.3 显色性的深层理解

显色性（Color Rendering）是光源质量评价中仅次于色温的重要指标。它描述的是光源对物体"真实颜色"的还原能力。

显色性评价的两个维度：

1. **色保真度 (Fidelity, R_f)**：被测光源下物体颜色与参考光源下颜色的接近程度。类似于"照片是否逼真"。
2. **色域指数 (Gamut, R_g)**：被测光源下物体颜色的鲜艳程度相对于参考光源的变化。类似于"色彩是否饱和"。

传统 CRI (R_a) 只关注色保真度，不反映色域变化。一个 R_g 较高的光源 (> 100) 会使物体颜色看起来更鲜艳，虽然严格来说"不够忠实"，但在商业照明中往往更受青睐——超市的水果、服装店的衣物在略微提高饱和度的光源下看起来更吸引人。

TM-30-20 色向量图：IES 发布的 TM-30 标准使用 99 个色样 (远多于 CRI 的 8 个一般色样和 6 个特殊色样)，生成色向量图 (Color Vector Graphic)，直观展示光源在各个色相方向上的色保真度和色域变化。

4.4 色温对心理与行为的影响

大量研究表明，光源色温对人的心理状态和行为模式有显著影响：

暖色温 (2,700 ~ 3,000 K)：

- 心理感受：温馨、放松、亲密、安全
- 行为倾向：社交互动、休闲放松、食欲增加
- 适用场景：卧室、餐厅、酒店大堂、休闲会所

中性色温 (3,500 ~ 4,500 K)：

- 心理感受：中性、舒适、自然
- 行为倾向：适度的警觉性和放松感的平衡
- 适用场景：普通办公室、教室、零售店

冷色温 (5,000 ~ 6,500 K)：

- 心理感受：清爽、专注、警觉
- 行为倾向：注意力集中、工作效率提高
- 适用场景：精密工作间、手术室、工业车间

Kruithof 曲线：1941 年 Kruithof 提出的"愉悦光色"图，描述了照度与色温之间的"匹配"关系——在低照度环境下，人们更偏好暖色温；在高照度环境下，人们更偏好冷色温。当照度与色温不匹配时 (如高照度 + 暖色温，或低照度 + 冷色温)，空间会被感知为"不自然"或"不舒适"。

这一规律在照明设计中具有重要的实践指导意义：住宅卧室应采用低照度 + 暖色温的组合，而办公空间则适合高照度 + 中性色温的组合。

第5章 自然光特性

5.1 太阳高度角与方位角

太阳在天空中的位置由两个角度决定：

太阳高度角 (Solar Altitude Angle, α)：太阳光线与地平面的夹角。

- 日出日落时： $\alpha = 0^\circ$
- 正午时：达到最大值
- 计算公式： $\sin \alpha = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega$
- 其中 ϕ 为当地纬度， δ 为太阳赤纬（随日期变化）， ω 为时角（随时间变化）

太阳方位角 (Solar Azimuth Angle, γ)：太阳光线在地平面上的投影与正南方向的夹角（南半球为正北）。

太阳高度角和方位角的变化直接影响建筑的日照条件和自然采光效果。在照明设计中，需要结合建筑所在纬度和朝向，分析不同季节、不同时刻的自然光入射情况，以设计合理的遮阳和采光方案。

5.2 天空亮度分布

天空并非均匀发光的穹顶，其亮度分布受到太阳位置、大气条件、云层覆盖等因素的影响：

CIE 标准全阴天空：亮度从天顶到地平线逐渐增加，天顶亮度约为地平线附近亮度的 1/3。这种天空模型是采光设计的标准参考条件。

CIE 标准晴天天空：亮度分布复杂，太阳周围区域亮度最高（太阳晕），与太阳相对的天顶区域亮度较低。亮度比可达 100:1 以上。

实际天空：介于全阴和全晴之间的各种状态，受云量、大气透明度、空气污染等影响。

天空亮度分布对建筑采光设计的影响主要体现在：

- 天窗采光更适合利用天顶区域的稳定亮度
- 侧窗采光受太阳高度角和天空亮度梯度的影响
- 遮阳设计需要考虑太阳直射光和天空漫射光的综合效应

5.3 采光系数（Daylight Factor）

定义：室内某一点由天空漫射光产生的照度与同一时刻室外无遮挡水平面上由天空漫射光产生的照度之比。

符号：DF

计算公式： $DF = (E_{in} / E_{out}) \times 100\%$

采光系数的组成：

- 1. 天空分量（Sky Component, SC）：直接从窗户看到的天空对室内照度的贡献
- 2. 外部反射分量（Externally Reflected Component, ERC）：室外建筑物、地面等反射光对室内照度的贡献
- 3. 内部反射分量（Internally Reflected Component, IRC）：光线进入室内后经墙面、天花板、地面等表面多次反射的累积贡献

采光标准值：

空间类型	推荐最低 DF
办公室	2%
教室	2%
住宅起居室	1%
医院病房	1.5%
走廊、楼梯	0.5%

5.4 日照分析

日照分析是评估建筑内外接受太阳直射光情况的计算过程，对建筑照明设计中的自然光利用和遮阳设计至关重要。

日照时数：某一地点在一定时间段内接受太阳直射光的时间总量。是建筑日照标准的核心指标。

日照标准（GB 50180）：

- 住宅建筑：大寒日（最冷日）日照不少于 2 小时（严寒地区）或冬至日日照不少于 1 小时（其他地区）
- 老年人住宅、残疾人住宅：应满足冬至日日照不少于 2 小时

日照分析工具：现代建筑设计中，日照分析通常借助专业软件完成，如 Ecotect、Daysim、Radiance 等。这些工具基于建筑模型和地理信息，精确计算全年各时刻的日照情况。

5.5 自然光在照明设计中的综合利用

自然光是照明设计中最节能、最舒适的光源。在照明设计中应充分利用自然光，并与人工照明有机结合：

自然光利用策略：

1. **侧窗采光**：最常见的采光方式，适合进深不大的空间
2. **天窗采光**：适合大进深空间和中庭，采光均匀性好
3. **导光管系统**：利用反射管道将室外自然光导入室内深处
4. **光架系统 (Light Shelf)**：在窗户上部设置水平反射板，将光线反射到天花板深处

自然光与人工照明的联动：

- 照度传感器实时监测室内照度，自动调节人工照明亮度
- 日光 harvesting 策略：靠窗区域灯具自动降低亮度，深处区域适当补充
- 全年能耗模拟：评估不同采光策略的节能效果

第二部分：照明设计原理

第6章 照明设计基本原则

6.1 功能性原则

照明设计的首要原则是满足空间的功能需求。不同的空间承担不同的使用功能，对应不同的视觉任务，需要不同的光环境支持。

功能性照明的核心要求：

- **足够的照度**：满足不同视觉作业的照度需求
- **良好的均匀度**：避免工作面出现过大的照度差异
- **适当的显色性**：确保颜色辨识的准确性
- **有效的眩光控制**：保证视觉舒适度
- **安全的照明**：确保夜间行动的安全性和导向性

6.2 舒适性原则

舒适性照明关注使用者的主观感受，包括视觉舒适和心理舒适两个层面：

视觉舒适：

- 避免直射眩光和反射眩光
- 控制亮度对比度（工作区与周围环境亮度比不宜超过 3:1）
- 提供适当的环境照明，避免"黑洞效应"

心理舒适：

- 选择与空间功能匹配的色温
- 营造适宜的空间氛围
- 提供使用者可调光的灵活性
- 避免频闪和光源噪声

6.3 节能性原则

照明节能是全球节能减排的重要组成部分。据统计，全球约 15~19% 的电力消耗用于照明。在建筑运行能耗中，照明占比通常为 20~35%。

照明节能的设计策略：

1. **选用高光效光源**：优先选择 LED 等高效光源
2. **合理确定照度标准**：不盲目追求高照度
3. **优化灯具布局**：使光线有效到达工作面
4. **充分利用自然光**：减少白天人工照明的使用时间
5. **采用智能控制系统**：按需照明、分时控制
6. **降低照明功率密度（LPD）**：满足标准要求的前提下尽量减少装机功率

6.4 艺术性原则

照明设计不仅满足功能需求，还应提升空间的审美价值。光的艺术性体现在：

- **明暗的韵律**：通过光与影的交替创造节奏感
- **层次的构建**：用光的不同亮度层级塑造空间深度
- **焦点的引导**：通过重点照明引导视线，突出空间主题
- **情绪的渲染**：利用色温和色彩的变化营造不同的情感氛围
- **空间的定义**：用光来划分和界定不同的功能区域

6.5 四大原则的平衡

在实际设计中，四大原则往往存在矛盾和张力。例如，高照度的功能需求可能与节能原则冲突；强烈的艺术效果可能影响视觉舒适度。优秀的照明设计师需要在这些原则之间找到最佳的平衡点，根据不同项目的优先级做出合理的取舍。

第7章 照明方式分类

7.1 一般照明 (General Lighting)

定义：为整个空间提供均匀照明的方式，不考虑局部特殊需求。

特点：

- 照度均匀，无明显方向性
- 通常由均匀分布的灯具实现
- 适合需要全面照明的空间

典型应用：办公室、教室、开放式工作空间

设计要点：

- 灯具间距与安装高度的比值应满足灯具的最大允许距离比 (SHR)
- 保证照度均匀度 (最小照度/平均照度 ≥ 0.7)
- 注意控制 UGR 值

7.2 局部照明 (Local Lighting)

定义：为特定视觉作业区域提供额外照明的方式。

特点：

- 针对性强，照度可高于一般照明
- 灯具靠近工作面
- 允许使用者个人调节

典型应用：台灯、阅读灯、工作台灯、梳妆镜灯

设计要点：

- 亮度不宜与周围环境差异过大 (建议不超过 3:1)

- 避免产生眩光和阴影干扰
- 应配合一般照明使用，不宜单独使用（避免视觉适应疲劳）

7.3 混合照明（Mixed Lighting）

定义：一般照明与局部照明相结合的照明方式。

特点：

- 工作面由局部照明提供高照度
- 周围环境由一般照明提供基础照度
- 节能效果好

典型应用：开放式办公室（工位台灯 + 环境照明）、工厂车间（一般照明 + 工位局部照明）

设计要点：

- 一般照明照度不宜低于总照度的 10~15%
- 局部照明与一般照明的色温宜保持一致
- 避免两种照明之间产生干扰性阴影或眩光

7.4 重点照明（Accent Lighting）

定义：为突出特定目标物或区域而设置的定向照明。

特点：

- 方向性强，光束集中
- 目标物亮度显著高于周围环境（通常为目标物：背景 = 3:1 ~ 10:1）
- 具有引导视线和创造戏剧效果的能力

典型应用：博物馆展品照明、商业空间商品照明、建筑空间焦点照明

设计要点：

- 光束角应与目标物大小匹配
- 灯具安装位置和角度应避免对观察者产生眩光
- 注意被照物的光热敏感性（紫外线和红外线辐射）
- 重点照明与一般照明的亮度比应根据空间氛围需求确定

7.5 装饰照明（Decorative Lighting）

定义：以美化环境、营造氛围为主要目的的照明方式。

特点：

- 灯具本身即为装饰元素
- 光线效果服务于氛围营造
- 对功能和效率的要求相对较低

典型应用：吊灯、壁灯、彩色灯饰、艺术灯具

设计要点：

- 灯具造型应与室内设计风格协调
- 光线效果应服务于整体空间氛围
- 不宜产生过高的亮度干扰
- 在满足装饰效果的前提下尽量选择高效光源

第8章 室内照明设计方法

8.1 住宅照明

住宅照明设计需要根据不同空间的功能特征和使用者的生活习惯，提供差异化的照明方案。

8.1.1 客厅

客厅是家庭的核心公共空间，承担休闲、会客、娱乐等多种功能，需要灵活的照明方案：

照度标准：

- 一般活动：100 ~ 150 lx
- 会客模式：150 ~ 300 lx
- 阅读区域：300 ~ 500 lx（局部照明补充）

色温选择：2,700 ~ 3,000 K（暖白光），营造温馨舒适的家庭氛围

布灯方案：

- 基础层：嵌入式筒灯或暗槽灯带提供环境照明
- 功能层：落地灯或台灯提供阅读照明
- 装饰层：吊灯或壁灯作为空间视觉焦点

- 氛围层：洗墙灯或间接照明营造空间层次感

场景模式：

- 日常模式：基础照明 150 lx，暖白光
- 会客模式：环境照明 + 装饰照明 200~300 lx
- 观影模式：仅保留微弱间接照明，30~50 lx
- 阅读模式：阅读灯局部照明 500 lx

8.1.2 卧室

卧室以休息和睡眠为主要功能，照明设计应以低亮度、暖色调为主：

照度标准：

- 一般照明：50 ~ 100 lx
- 床头阅读：200 ~ 300 lx（局部照明）
- 衣柜区域：150 ~ 200 lx

色温选择：2,400 ~ 2,700 K（暖黄光），促进褪黑素分泌，利于睡眠

布灯方案：

- 避免床头正上方设置灯具（躺下时产生直射眩光）
- 床头阅读灯应可独立控制，互不干扰
- 衣柜内设置感应照明
- 地面设置低位感应夜灯（方便夜间起夜）

8.1.3 厨房

厨房是功能性极强的工作空间，对照度、显色性和安全性有较高要求：

照度标准：

- 一般照明：200 ~ 300 lx
- 操作台面：300 ~ 500 lx（局部照明补充）
- 灶台区域：200 ~ 300 lx

色温选择：3,000 ~ 4,000 K，兼顾清晰辨识和舒适感受

显色性要求： $Ra \geq 80$ ，确保食材颜色的准确辨识

布灯方案：

- 天花板嵌入式筒灯提供一般照明
- 橱柜下方灯带照亮操作台面（消除身体遮挡造成的阴影）
- 抽油烟机自带灶台照明
- 注意灯具的防潮防油性能（IP 等级 $\geq$ IP44）

8.1.4 卫生间

照度标准：

- 一般照明：100 ~ 200 lx
- 镜前区域：300 ~ 500 lx

色温选择：3,000 ~ 4,000 K

布灯方案：

- 镜前照明应双侧设置（避免单侧照明造成的面部阴影）
- 淋浴区和浴缸区采用防水灯具（IP $\geq$ IP65）
- 马桶区域设置阅读照明
- 夜灯功能（低位感应灯）

8.1.5 书房/家庭办公室

照度标准：

- 一般照明：200 ~ 300 lx
- 桌面工作面：500 lx

色温选择：3,500 ~ 4,500 K，有助于保持专注力

布灯方案：

- 桌面台灯位于非书写手一侧（避免阴影干扰）
- 屏幕后方设置环境照明，减少屏幕与背景的亮度对比
- 书架内设置展示照明

8.2 办公照明

办公照明设计的目标是创造高效、舒适、健康的视觉环境，直接影响工作效率和员工满意度。

照度标准（GB 50034）：

办公空间类型	推荐照度	UGR 限值
普通办公区	300 ~ 500 lx	≤ 19
会议室	300 ~ 500 lx	≤ 22
前台接待	200 ~ 300 lx	≤ 25
绘图室	500 ~ 750 lx	≤ 19
档案室/库房	100 ~ 200 lx	≤ 25

办公照明的核心设计要点：

- 1. 均匀照度：工作面上照度均匀度不低于 0.7，避免局部过亮或过暗
- 2. 防眩光控制：UGR ≤ 19，选用带微棱镜防眩罩的灯具
- 3. 视觉作业分级：根据不同工作岗位的视觉需求确定照度标准
- 4. 色温选择：4,000 K 左右的中性白光，有利于保持专注和警觉
- 5. 显色性：Ra ≥ 80
- 6. 垂直照度：现代办公大量使用电脑，垂直面的照度和亮度也很重要
- 7. 与日光联动：靠窗区域灯具根据自然光自动调节

灯具布局：

- 采用与窗户平行的灯具排列方式
- 灯具间距与安装高度比不超过灯具的 SHR 值
- 工位正上方避免设置高亮度灯具
- 推荐采用"间接照明 + 直接照明"组合型灯具

8.3 商业照明

商业照明的核心目标是引导消费行为、突出商品价值、营造购物氛围。

商业照明的层次：

- 1. 环境照明（Ambient Lighting）：
 - 提供空间的基础亮度
 - 照度通常为 100 ~ 300 lx
 - 色温与品牌定位匹配

2. 重点照明（ Accent Lighting ）：

- 突出展示商品
- 照度比为基础照明的 3 ~ 10 倍
- 使用窄光束射灯（ 光束角 10° ~ 25° ）

3. 装饰照明（ Decorative Lighting ）：

- 增强空间美感和品牌识别
- 灯具本身作为空间装饰元素

4. 导向照明（ Way-finding Lighting ）：

- 引导顾客动线
- 标识和出入口的照明强化

不同商业业态的照明特点：

业态	照度水平	色温	显色性	特殊要求
奢侈品店	200~500 lx	2,700~3,000 K	Ra≥90	重点照明比高（ 10:1以上 ）
快时尚	300~750 lx	3,000~4,000 K	Ra≥80	均匀明亮，活力感
超市	300~500 lx	4,000~5,000 K	Ra≥80	高照度，整洁感
生鲜区	300~500 lx	根据商品选择	R9≥50	生鲜色优化
珠宝店	200~500 lx	4,500~6,000 K	Ra≥95	极高重点照明比

8.4 博物馆照明

博物馆照明设计需要在展品保护和视觉效果之间取得精细的平衡。

展品保护要求：

不同材质的展品对光的敏感程度不同：

展品类别	最大照度	年曝光量
极度敏感（ 纸质、纺织品、水彩 ）	50 lx	50,000 lux · h/年
	150 ~ 200 lx	150,000 lux · h/年

展品类别	最大照度	年曝光量
中度敏感（油画、皮革、象牙）		
不敏感（金属、石材、陶瓷、玻璃）	300 lx	无限制

博物馆照明的设计要点：

- 1. **紫外线控制：**所有光源的紫外线含量不超过 75 $\mu\text{W}/\text{lm}$ ，敏感展品应使用零紫外线光源
- 2. **红外线控制：**避免光源产生的热辐射对展品的损害
- 3. **显色性：** $R_a \geq 95$ ， $R_9 \geq 90$ ，确保展品颜色的准确呈现
- 4. **角度控制：**精确控制光束角和投射方向，避免光线溢出
- 5. **眩光控制：**灯具位置和角度避免对观众产生直射眩光
- 6. **反射控制：**考虑展品表面（尤其是画框玻璃）的反射光影响

照明方式：

- 展品照明：轨道射灯，可调节角度和光束
- 展柜照明：内嵌 LED 灯条或光纤照明
- 建筑照明：洗墙灯、间接照明勾勒空间轮廓
- 重点照明与一般照明的亮度比通常为 3:1 ~ 10:1

8.5 酒店照明

酒店照明需要营造从公共空间到私密空间的层次化照明体验。

8.5.1 大堂

大堂是酒店的"门面"，照明设计需要传达品牌调性：

- **照度：**150 ~ 300 lx（大堂整体），前台区域 300 ~ 500 lx
- **色温：**2,700 ~ 3,000 K，营造高端温馨感
- **照明层次：**大型装饰吊灯（焦点）+ 间接灯带（氛围）+ 台灯/壁灯（细节）
- **设计策略：**创造"到达感"——从室外明亮环境进入时，通过适度过渡让客人感受到空间的温暖

8.5.2 客房

客房照明应像住宅卧室一样舒适，但更注重品质和易用性：

- 一般照明：75 ~ 150 lx，色温 2,700 K
- 床头阅读：300 lx 局部照明
- 衣柜：150 lx，感应开关
- 浴室：200 ~ 300 lx，镜前双侧照明
- 控制方式：床头总控开关、场景一键切换

8.5.3 餐厅

- 一般照明：100 ~ 200 lx
- 桌面照明：150 ~ 300 lx（重点照明餐桌区域）
- 色温：2,400 ~ 2,700 K
- 关键策略：餐桌上方的重点照明使食物看起来更有食欲，同时保持周围环境相对幽暗，营造私密就餐氛围

8.5.4 走廊/电梯厅

- 照度：100 ~ 150 lx
- 设计策略：通过间隔布灯创造光影节奏感，避免单调的"隧道效应"
- 夜灯模式：深夜时段自动降至 30~50 lx

第9章 照明计算

9.1 利用系数法（Utilization Factor Method）

利用系数法是最常用的平均照度计算方法，适用于一般照明的初步设计和校验。

基本公式：

$$E_{av} = \frac{N \cdot \Phi \cdot UF \cdot MF}{A}$$

其中：

- E_{av} 为工作面的平均照度（lx）
- N 为灯具数量
- Φ 为每个灯具内光源的总光通量（lm）
- UF 为利用系数（Utilization Factor）

- MF 为维护系数 (Maintenance Factor)
- A 为工作面面积 (m²)

利用系数 UF：表示从灯具发出的光通量中最终到达工作面的比例。UF 取决于：

- 房间尺寸 (室形指数 RI)
- 天花板、墙面、地面的反射率
- 灯具的配光类型

室形指数 (Room Index)：

$$RI = \frac{L \cdot W}{H_m \cdot (L + W)}$$

其中 L、W 分别为房间长度和宽度，H_m 为灯具安装高度与工作面高度之差。

维护系数 MF：综合考虑光源光衰和灯具积尘等因素：

$$MF = LLD \cdot LDD \cdot RSF$$

其中 LLD 为光源光通量维持系数，LDD 为灯具积尘衰减系数，RSF 为房间表面脏污系数。通常 MF 取 0.7 ~ 0.8。

设计步骤：

1. 确定照度标准值 E
2. 计算室形指数 RI
3. 查表或计算利用系数 UF
4. 确定维护系数 MF
5. 计算所需灯具数量 $N = (E \times A) / (\Phi \times UF \times MF)$
6. 根据灯具布置方案确定灯具位置
7. 校验照度均匀度

9.2 逐点算法 (Point-by-Point Method)

逐点算法用于计算工作面上特定点的照度，适用于重点照明设计和照度均匀度校验。

点光源的照度计算：

对于点光源 (当光源尺寸远小于光源到计算点距离时)，被照面的照度为：

$$E = \frac{I_{\theta} \cdot \cos\theta}{r^2}$$

其中 I_θ 为灯具在 θ 方向上的发光强度，r 为光源到计算点的距离，θ 为光线入射角。

等照度曲线：根据灯具的配光数据，可以绘制出被照面上的等照度曲线图，直观展示照度的空间分布。

线光源的照度计算：对于荧光灯管、LED 灯带等线形光源，需要使用线光源的照度计算公式：

$$E = \frac{I_L}{h^2} \cdot (\alpha + \sin\alpha \cdot \cos\alpha) \cdot \cos^2\theta$$

其中 I_L 为单位长度的发光强度， h 为灯具到工作面的垂直距离。

面光源的照度计算：对于发光天花板、发光墙面等面光源，需要使用面光源的照度计算公式或借助数值积分方法。

9.3 DIALux 软件应用

DIALux 是国际最广泛使用的照明设计软件，由德国 DIAL GmbH 公司开发。

DIALux 的主要功能：

1. **三维建模：**支持导入 DWG、3DS、SKP 等格式的建筑模型
2. **照明计算：**基于精确的光度学数据（IES/LDT 文件）进行照度计算
3. **可视化渲染：**生成逼真的光环境效果图
4. **报告生成：**自动生成包含计算结果、等照度图、伪彩色图的计算书
5. **节能分析：**评估不同方案的能耗差异

DIALux 设计流程：

1. 创建或导入建筑空间模型
2. 定义空间用途和照度标准
3. 设置表面反射率
4. 选择灯具并布置
5. 运行计算并查看结果
6. 调整方案直到满足要求
7. 生成设计报告

DIALux evo 的新特性：

- 支持自然光模拟（与 Radiance 引擎集成）
- 日光因子计算
- 年能耗评估
- 与 BIM 系统的互操作性
- 多人协作功能

第10章 照明节能设计

10.1 照明能效标准

照明节能是全球建筑节能的重要组成部分。各国和地区都制定了照明能效标准和法规。

中国标准：

GB 50034《建筑照明设计标准》规定了各类建筑空间的照明功率密度（LPD, Lighting Power Density）限值：

建筑类型	现行值（W/m ² ）	目标值（W/m ² ）
办公空间	≤ 9	≤ 7
商业空间	≤ 12	≤ 9
酒店客房	≤ 15	≤ 12
医院	≤ 6	≤ 5
学校	≤ 9	≤ 7
住宅	≤ 6	≤ 5

LPD 的计算：

$$LPD = \frac{P_{total}}{A} = \frac{\sum P_i}{A}$$

其中 Ptotal 为所有灯具的总安装功率（W），A 为建筑面积（m²）。

美国标准：ASHRAE 90.1 和 IECC 规定了类似的 LPD 限值。加利福尼亚州 Title 24 标准更为严格。

欧盟标准：EN 15193 规定了照明能耗指标（LENi, Lighting Energy Numeric indicator）。

10.2 照明节能设计策略

10.2.1 高效光源选择

- 全面采用 LED 光源替代传统光源
- 选择高光效产品（≥ 120 lm/W）
- 关注系统光效（含灯具效率和驱动损耗），而非仅关注光源光效

10.2.2 智能控制系统

- 时间表控制：按使用时间表自动开关照明
- 照度感应控制：根据自然光水平自动调节人工照明
- 人体感应控制：人走灯灭、人来灯亮
- 场景控制：根据不同使用场景一键切换照明模式
- 分组控制：根据功能区域灵活分组，避免全开全关

10.2.3 自然光利用

- 合理的建筑朝向和窗地比
- 导光管和光架系统
- 日光 harvesting 控制策略
- 全年能耗模拟优化

10.2.4 维护管理

- 制定定期清洁和维护计划
- 光源到寿时及时更换
- 建立照明能耗监测系统

10.3 照明节能的经济分析

照明节能投资的回收期分析：

简单回收期：

$$T = \frac{C_{\text{invest}}}{S_{\text{annual}}}$$

其中 C_{invest} 为节能改造投资， S_{annual} 为年节省费用。

全生命周期成本（LCC）：

$$LCC = C_{\text{invest}} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{\text{annual}}}{(1+r)^t}$$

其中 C_{annual} 为年运行和维护费用， r 为折现率， n 为使用寿命。

LED 照明的全生命周期成本通常远低于传统光源，尽管初始投资较高。

第三部分：照明技术与设备

第11章 光源技术演变

11.1 白炽灯时代（1879~）

1879年，爱迪生成功发明了碳丝白炽灯，开启了电气照明时代。白炽灯的原理是通过电流加热灯丝至白炽状态而发光。

工作原理：钨丝在约 2,700°C 的温度下发出连续光谱的光，类似于黑体辐射。

优点：

- 显色性极佳（ $Ra \approx 100$ ）
- 色温暖黄（约 2,700 K）
- 无需镇流器，可直接调光
- 即开即亮

缺点：

- 光效极低（10~17 lm/W）
- 95%以上的能量转化为热能
- 寿命短（约 1,000 小时）

历史地位：白炽灯统治了人类照明近一个世纪，但由于能效问题，全球多数国家已逐步淘汰白炽灯。

11.2 荧光灯时代（1938~）

1938年，通用电气公司推出了第一支商用荧光灯。荧光灯通过低压汞蒸气放电产生紫外线，再由荧光粉将紫外线转换为可见光。

工作原理：

1. 灯管两端的电极发射电子
2. 电子与管内的汞蒸气碰撞，产生 254 nm 紫外线
3. 管壁荧光粉吸收紫外线，发出可见光

分类：

- **T12**（直径 38 mm）：最早的标准荧光灯管
- **T8**（直径 26 mm）：目前最广泛使用的灯管规格
- **T5**（直径 16 mm）：高光效细管径灯管

- **紧凑型荧光灯 (CFL)**：即"节能灯"，将灯管弯曲压缩

优点：

- 光效大幅提升 (80~110 lm/W)
- 寿命较长 (8,000~20,000 小时)
- 色温和显色性可调节

缺点：

- 含汞，存在环境污染风险
- 频繁开关影响寿命
- 低温环境下性能下降
- 部分产品存在频闪问题

11.3 LED 时代 (2000s~)

LED (Light Emitting Diode, 发光二极管) 是照明技术的第三次革命。LED 通过半导体 PN 结的电致发光效应直接将电能转化为光能。

发展历程：

- 1907年：首次观察到半导体电致发光现象
- 1962年：第一支可见光 (红色) LED 由 Nick Holonyak Jr. 发明
- 1990年代：中村修二发明高亮度蓝色 InGaN LED，获 2014 年诺贝尔物理学奖
- 2000年代：白光 LED 开始商用化
- 2010年代至今：LED 光效和品质持续提升，成本快速下降

白光 LED 的实现方式：

1. **荧光粉转换法 (主流)**：蓝光芯片 + 黄色荧光粉 (YAG:Ce)。成本低、光效高，但蓝色尖峰导致显色性有待优化。
2. **RGB 混合法**：红、绿、蓝三色 LED 芯片混合。可实现全彩动态调光，但成本高、色差控制复杂。
3. **紫外芯片 + 多色荧光粉**：类似荧光灯原理，显色性好但光效较低。
4. **量子点 LED**：利用量子点的窄带发射特性实现高显色性，是前沿技术方向。

11.4 OLED 与未来光源

OLED (有机发光二极管)：

- 面光源特性，光线柔和均匀

- 超薄、柔性、透明
- 目前光效和寿命尚不及 LED
- 适用于装饰照明和高端氛围照明

激光照明：

- 激光激发荧光粉产生白光
- 极高的亮度和方向性
- 适用于探照灯、汽车远光灯等特殊场景

人因照明光源：

- 可调光谱 LED，动态调节 SPD 以匹配人体节律需求
- 是健康照明的技术基础

第12章 LED 照明技术详解

12.1 LED 封装技术

LED 封装是将 LED 芯片与外部电路连接，并提供散热、光学和机械保护的过程。

常见封装形式：

封装类型	特点	应用
SMD (Surface Mount Device)	表面贴装，小型化	灯带、筒灯、面板灯
COB (Chip on Board)	多芯片直接贴装在基板上，面光源效果	射灯、筒灯、轨道灯
MCOB (Multi COB)	多组 COB 阵列	大功率灯具
CSP (Chip Scale Package)	芯片级封装，无需打线	紧凑型灯具
灯丝 LED (Filament LED)	模仿白炽灯灯丝造型	装饰灯泡

封装材料：

- 基板：陶瓷基板（ Al_2O_3 、 AlN ）导热性好；FR-4 基板成本低
- 荧光粉：YAG:Ce（黄色）、氮化物（红色）、硅酸盐（绿色）等
- 封装胶：硅胶（耐高温、抗紫外）或环氧树脂（成本低）

12.2 LED 驱动电源

LED 驱动电源将市电（AC）转换为 LED 所需的低压直流电（DC），是 LED 灯具的核心部件之一。

驱动方式：

恒流驱动（Constant Current, CC）：

- 输出恒定电流，电压随 LED 正向压降自动调节
- 是 LED 驱动的主流方式
- 确保 LED 亮度稳定，延长使用寿命

恒压驱动（Constant Voltage, CV）：

- 输出恒定电压（如 12V、24V）
- 通常用于 LED 灯带（每段内置限流电阻）
- 灵活性好，但效率略低

驱动电源的关键参数：

- 效率：通常 85%~95%，高效驱动减少热损耗
- 功率因数（PF）：> 0.9（商用要求），> 0.7（家用）
- 总谐波失真（THD）：< 20%
- 调光兼容性：支持 TRIAC、0-10V、DALI、PWM 等调光协议
- 纹波电流：影响 LED 的频闪表现

12.3 LED 散热设计

LED 的结温（Junction Temperature）是影响光效、色温漂移和寿命的关键因素。

散热的重要性：

- 结温每升高 10° C，LED 光效下降约 5%
- 结温每升高 20° C，LED 寿命减半
- 结温不均匀导致色温不一致

散热路径：LED 芯片 → 封装基板 → 热界面材料 → 散热器 → 环境空气

散热方式：

1. 自然对流散热：利用铝型材散热器的自然对流和辐射散热。适用于中小功率灯具。
2. 强制风冷散热：使用风扇强制对流。适用于大功率灯具（如 200W 以上路灯）。

3. **热管散热**：利用热管的高效导热特性。适用于空间受限的高功率灯具。

散热设计原则：

- 散热器表面积尽可能大
- 散热路径尽可能短
- 保证空气流通通道
- 考虑安装方向对散热的影响

12.4 LED 光效与寿命

系统光效：

- 光源光效：LED 芯片的光效，可达 200+ lm/W
- 灯具光效：考虑灯具效率、驱动损耗后的系统光效，通常 100~170 lm/W
- 系统光效是评估 LED 灯具能效的正确指标

LED 寿命：

- LED 不像传统光源那样突然"烧毁"，而是逐渐光衰
- 通常以 L70 表示：光通量降至初始值 70% 的时间
- 商用 LED 灯具的典型 L70 寿命为 30,000 ~ 50,000 小时
- 寿命受结温、驱动电流、环境温度的影响

影响 LED 寿命的因素：

1. 结温过高（散热不良）
2. 驱动电流过大
3. 频繁开关和浪涌冲击
4. 高温高湿环境
5. 紫外线 exposure（对封装材料的影响）

第13章 灯具分类与选型

13.1 吊灯（Pendant Luminaire）

特点：从天花板悬垂而下，既是照明设备也是空间装饰元素。

分类：

- 单头吊灯：适合餐桌上方、阅读区域
- 多头吊灯：适合客厅、大堂等大空间
- 线性吊灯：长条形，适合长餐桌、会议室
- 装饰吊灯：水晶灯、艺术造型灯等

选型要点：

- 安装高度：一般距地面 2.1~2.4 m 以上（避免碰头）
- 餐桌上方：距桌面 60~80 cm
- 根据空间大小选择适当尺寸
- 注意灯具重量和安装固定方式

13.2 吸顶灯（Ceiling Luminaire）

特点：紧贴天花板安装，适合层高较低的空间。

选型要点：

- 适合层高 2.4~2.8 m 的住宅空间
- 选择带漫射罩的款式，避免直射眩光
- LED 吸顶灯可选调光调色功能
- 注意防尘防虫设计

13.3 筒灯（Downlight）

特点：嵌入天花板安装，光线向下投射，是现代室内照明最基础的灯具类型。

分类：

- 固定式筒灯：光束方向固定
- 可调式筒灯：灯头可调节角度（通常 $\pm 15^\circ \sim 30^\circ$ ）
- 深藏防眩筒灯：光源深藏在灯筒内，从正常视角看不到光源

选型参数：

- 开孔尺寸： $\phi 75$ 、 $\phi 100$ 、 $\phi 125$ 、 $\phi 150$ 等
- 光束角：窄光束（ $15^\circ \sim 25^\circ$ ）、中光束（ $30^\circ \sim 45^\circ$ ）、宽光束（ $50^\circ \sim 70^\circ$ ）
- 色温：2,700K / 3,000K / 4,000K
- 显色指数： $Ra \geq 80$ （一般）， $Ra \geq 90$ （高品质）

- 防眩等级：UGR $\leq$ 19

13.4 射灯 (Spotlight)

特点：光束集中、方向性强，用于重点照明和装饰照明。

分类：

- **嵌入式射灯：**嵌入天花板或墙面
- **轨道射灯：**安装在轨道上，可灵活调整位置和方向
- **明装射灯：**直接安装在天花板或墙面上

选型要点：

- 光束角：6° 15°（极窄，用于小件展品）、15° 25°（窄，用于商品展示）、25° ~40°（中等，用于墙面洗光）
- 中心光强高，适合远距离投射
- 注意眩光控制

13.5 灯带 (LED Strip Light)

特点：柔性可弯曲的线性 LED 光源，广泛用于间接照明和装饰照明。

分类：

- **低压灯带 (12V/24V DC)：**安全性好，可裁剪，需配驱动器
- **高压灯带 (220V AC)：**安装简便，但有安全顾虑
- **COB 灯带：**无点状光斑，光线均匀连续

选型参数：

- 每米功率：4~20 W/m
- 每米光通量：300~1,800 lm/m
- IP 等级：IP20（室内干燥区）、IP65（防潮）、IP67/IP68（水下）
- 色温一致性：同一项目应选用同一批次

安装注意事项：

- 需要配铝合金灯槽散热，延长寿命
- 安装面应平整、干燥
- 长距离安装注意电压降（建议单段不超过 5~10 m）

- 配合调光器使用可实现氛围调节

13.6 壁灯 (Wall Luminaire)

特点：安装在墙面上，提供装饰性和辅助照明。

选型要点：

- 安装高度：一般距地面 1.5~1.8 m
- 上下出光的壁灯可洗亮墙面，增加空间高度感
- 单侧出光的壁灯适合阅读照明
- 注意与室内装饰风格的协调

13.7 地灯/埋地灯 (In-ground Luminaire)

特点：嵌入地面安装，用于引导照明和景观照明。

选型要点：

- IP 等级 $\geq$ IP67 (防雨水浸泡)
- 承重能力满足行人或车辆通行要求
- 安装深度和基础处理需规范
- 注意避免对行人产生直射眩光

13.8 水下灯 (Underwater Luminaire)

特点：安装于水池、喷泉、游泳池等水下环境。

选型要点：

- IP 等级 $\geq$ IP68
- 使用安全低电压 (12V 或 24V AC/DC)
- 材质应耐水腐蚀 (316L 不锈钢)
- 安装和维护需考虑排水需求

第14章 灯具光学参数

14.1 配光曲线 (Light Distribution Curve)

配光曲线是描述灯具在各个方向上发光强度分布的图形，是灯具最重要的光学参数之一。

配光曲线的表示方式：

- **极坐标图**：最常见，以灯具为中心，用曲线表示各方向的发光强度
- **直角坐标图**：适合窄光束灯具
- **等光强图**：用等高线形式表示光强分布（适用于非对称配光）

配光类型：

配光类型	光束特征	典型应用
窄光束（Narrow）	光束角 < 20°	重点照明、展品照明
中光束（Medium）	光束角 20° ~40°	一般筒灯、射灯
宽光束（Wide）	光束角 40° ~80°	泛光照明、洗墙
超宽光束（Extra Wide）	光束角 > 80°	天花板洗光、间接照明
非对称配光	不同方向光束角不同	道路照明、墙面洗光

配光曲线的应用：

- 根据空间需求选择适当配光类型的灯具
- 计算特定点的照度
- 评估照度均匀性
- 在 DIALux 等软件中导入配光文件进行模拟

14.2 光束角（Beam Angle）

定义：光束中心轴上光强最大点两侧，光强下降到最大值 50% 时所夹的角度。

光束角的选择原则：

- 目标物越大，所需光束角越宽
- 安装距离越远，需要越窄的光束角以维持足够的照度
- 一般规则：照射直径 = 安装距离 × tan(光束角/2) × 2

常用光束角对照射效果的影响：

光束角	照射效果	适用场景
6° ~10°	极窄光斑，高集中度	小件珠宝、装饰品
15° ~20°	窄光束，戏剧性强	商品展示、重点照明
30° ~40°	中等光束，效果自然	一般重点照明
50° ~60°	宽光束，柔和扩散	墙面洗光、空间照明
90° ~120°	超宽光束，泛光效果	天花板洗光、室外泛光

14.3 遮光角（Shielding Angle）

定义：灯具出光口边缘到光源可见边缘的连线与水平线之间的夹角。遮光角越大，从正常视角越难看到光源，眩光控制越好。

遮光角的选择：

- 一般室内照明：遮光角 $\geq 15^\circ$
- 办公室等防眩要求高的空间：遮光角 $\geq 20^\circ$
- 室外照明：根据安装高度和观察距离确定

14.4 灯具效率（Luminaire Efficiency）

定义：灯具发出的总光通量与灯具内光源发出的总光通量之比。

$$\eta = \frac{\Phi_{\text{luminaire}}}{\Phi_{\text{lamp}}}$$

影响灯具效率的因素：

- 反射器的吸收和散射损失
- 透镜或扩散罩的透射损失
- 灯具内部结构对光线的遮挡
- 光源位置和方向

典型灯具效率：

- 带格栅的嵌入式荧光灯灯具：60%~75%
- 带扩散罩的 LED 筒灯：75%~90%
- 裸灯泡/灯丝的装饰灯具：95%~100%

第15章 照明控制系统

15.1 调光技术

照明调光是通过改变光源的输入功率或有效发光面积来调节光输出的技术。

主要调光方式：

TRIAC 调光（前沿切相调光）：

- 通过可控硅截断交流电的前沿部分来调节功率
- 兼容传统白炽灯调光器
- 适用于电阻性负载和部分 LED 驱动
- 缺点：低亮度时可能闪烁、有噪声

MOSFET/IGBT 调光（后沿切相调光）：

- 截断交流电的后沿部分
- 更适合 LED 和电子变压器
- 调光平滑、无噪声

0-10V 模拟调光：

- 通过 0~10V 的模拟电压信号控制调光
- 0V 对应最低亮度（或关闭），10V 对应最大亮度
- 简单可靠，但只能单向通信

1-10V 模拟调光：

- 1V 对应最低亮度，10V 对应最大亮度
- 1V 以下自动关闭
- 比 0-10V 更安全（不存在 0V 短路的误判）

PWM 调光（脉冲宽度调制）：

- 以高频率（通常 $> 1\text{ kHz}$ ）开关 LED，通过改变占空比调节平均亮度
- 调光范围宽，不影响 LED 色温
- 适用于 LED 灯带和灯具
- 频率过低可能产生可感知的频闪

DALI 数字调光：

- 详见下文 DALI 系统介绍

15.2 场景控制

场景控制是将照明系统预设多种"场景模式"，用户通过一键操作即可切换到预设的照明状态。

住宅典型场景：

- **回家模式：**玄关灯亮、客厅灯开启、窗帘打开
- **会客模式：**全开、明亮
- **影院模式：**仅保留微弱间接照明
- **阅读模式：**阅读灯亮、环境灯半亮
- **睡眠模式：**全部关闭
- **起夜模式：**低位夜灯微亮

办公典型场景：

- **工作模式：**全亮度工作照明
- **会议模式：**降低直射照明，增强间接照明
- **演示模式：**仅保留屏幕后方照明
- **加班模式：**仅开启局部工位照明

15.3 人体感应控制

感应技术类型：

红外感应（PIR, Passive Infrared）：

- 检测人体发出的红外线变化
- 优点：成本低、功耗低
- 缺点：需要人体运动才能触发，静止人体可能检测不到
- 适用于走廊、楼梯间、卫生间

微波感应：

- 发射微波并检测回波的变化
- 优点：灵敏度极高，可穿透非金属障碍物
- 缺点：可能误触发（如宠物、窗帘摆动）
- 适用于大空间、停车场

超声波感应：

- 发射超声波并检测回波
- 可检测微小运动
- 适用于需要高灵敏度的场所

摄像感应（AI 视觉）：

- 基于摄像头的智能检测
- 可识别人数、位置和活动类型
- 是智能照明的前沿方向

15.4 日光联动控制

日光联动控制系统通过光照度传感器实时监测室内自然光水平，自动调节人工照明的输出，实现"恒照度"控制。

系统组成：

1. **光照度传感器**：安装在代表性工作面上或天花板上
2. **控制器**：接收传感器信号，计算所需补光量
3. **可调光驱动器**：执行调光指令

控制策略：

- **开关控制**：日光充足时关闭人工照明（节能但可能有频繁开关问题）
- **连续调光**：根据日光水平连续调节人工照明亮度（舒适性好，设备要求高）
- **分区控制**：靠窗区域和深处区域分别控制

节能效果：日光联动控制可节省 20%~60% 的照明能耗，具体取决于建筑的采光条件和气候特征。

15.5 智能照明系统

15.5.1 DALI 系统

DALI (Digital Addressable Lighting Interface) 是国际标准的数字照明控制协议 (IEC 62386)。

特点：

- 每个灯具（或镇流器/驱动器）有独立地址
- 支持分组、场景和渐变控制
- 双向通信：控制器可查询灯具状态

- 最多支持 64 个设备（地址）、16 个分组、16 个场景
- 使用 4 芯线缆（2 芯信号线 + 2 芯电源线）

DALI-2:

- 最新标准版本，增强了互操作性和认证体系
- 增加了颜色控制（DT8）功能
- 支持更复杂的系统集成

15.5.2 KNX 系统

KNX 是国际标准的楼宇自动化协议（ISO/IEC 14543），照明控制是其核心功能之一。

特点:

- 开放标准，多厂商兼容
- 支持照明、暖通、遮阳、安防等全屋/全楼集成
- 总线拓扑，布线灵活
- 强大的逻辑控制和定时功能

15.5.3 Zigbee 与无线系统

Zigbee 是低功耗无线通信协议，适用于智能家居照明控制。

特点:

- 无需额外布线
- 低功耗，支持电池供电设备
- 网状网络（Mesh），设备间可中继信号
- 代表产品：Philips Hue、IKEA TRÅDFRI

其他无线协议:

- **蓝牙 Mesh**: 适合小范围照明控制
- **Wi-Fi**: 直接连接互联网，功耗较高
- **Thread/Matter**: 新兴的统一智能家居标准

15.5.4 智能照明的发展趋势

1. **IoT 集成**: 照明系统接入物联网，成为智慧建筑的感知节点
2. **Li-Fi**: 利用 LED 光波传输数据，实现照明与通信的融合

3. **AI 调光**：基于人工智能的自适应照明，根据人员活动和偏好自动优化
4. **数字孪生**：建立照明系统的数字孪生模型，实现精确模拟和预测性维护

第四部分：建筑照明设计实践

第16章 建筑外立面照明

16.1 泛光照明（Flood Lighting）

原理：使用投光灯从一定距离外照射建筑表面，使建筑体量和细节在夜间得以呈现。

设计要点：

- 投光灯的安装位置和角度需精确计算，避免对周围环境和交通产生眩光干扰
- 根据建筑材质选择适当的照度水平——浅色表面反射率高，所需照度较低
- 使用非对称配光的投光灯减少光溢出
- 考虑夜间不同时段的分时段控制（如 22:00 后降低亮度或关闭）

典型应用：

- 历史建筑的立面照明（如教堂、城堡）
- 现代建筑的光影雕塑效果
- 城市标志性建筑的夜景照明

16.2 轮廓照明（Contour Lighting）

原理：使用线性灯具勾勒建筑的轮廓线条。

设计要点：

- 灯具应尽可能隐蔽，做到“见光不见灯”
- LED 灯带和线性洗墙灯是实现轮廓照明的主要手段
- 避免过度使用导致“光污染”
- 色彩变化应与建筑性质匹配

典型应用：

- 高层建筑的天际线照明

- 桥梁的结构线条勾勒
- 建筑檐口和腰线的强调

16.3 内透光照明 (Internal Transmittance Lighting)

原理：利用建筑内部的光线透过玻璃幕墙或窗户向外透出，形成建筑的整体发光效果。

设计要点：

- 利用室内照明即可实现，无需额外安装室外灯具
- 节能效果好，不产生眩光
- 需要协调室内照明设计，保证夜间有适当的灯光透出
- 可配合窗帘控制实现图案化效果

典型应用：

- 玻璃幕墙办公楼的夜景效果
- 商业建筑的橱窗照明延伸
- 酒店建筑的氛围营造

16.4 媒体立面 (Media Facade)

原理：将建筑立面作为显示介质，通过 LED 点阵或投影技术呈现动态影像。

设计要点：

- 像素间距决定画面的清晰度和最佳观赏距离
- 亮度和对比度需适应环境光条件
- 内容设计应考虑建筑比例和周边环境
- 控制夜间播放时间和亮度，避免光污染和扰民

典型应用：

- 大型商业建筑的广告和内容展示
- 城市公共空间的节庆和活动照明
- 文化建筑的创意表达

第17章 景观照明设计

17.1 庭院灯照明

庭院灯是景观照明中最常见的灯具类型，高度通常为 2.5~4 m，提供路径引导和空间氛围。

设计要点：

- 庭院灯的间距通常为灯具高度的 3~5 倍
- 光色以暖白（2,700~3,000 K）为主
- 灯具造型应与景观风格统一
- 注意避免对住宅产生光线干扰

17.2 地埋灯

地埋灯嵌入地面安装，用于路径引导、树木照明和建筑基座照明。

设计要点：

- 选用可承受踩踏/碾压的结构（行人区域 IP67，车行区域承重 ≥ 2 吨）
- 安装时应做好排水处理
- 注意避免对行人产生直射眩光（选择带有防眩格栅或磨砂玻璃罩的款式）

17.3 树木照明

树木照明是景观照明中最具艺术性的部分。

照明方式：

- **上照照明（Uplighting）**：在树根部设置投光灯向上照射，展现树冠形态
- **下照照明（Downlighting）**：在高处设置灯具向下照射，模拟月光效果
- **包围照明（Moonlighting）**：将灯具安装在树冠内，光线透过树叶洒落
- **轮廓照明**：使用灯带勾勒树的轮廓

设计注意事项：

- 不应将灯具直接固定在树干上（损伤树木）
- 灯具应随树木生长调整位置
- 考虑光对树木生长的影响（光周期影响落叶和开花）
- 选择对植物光周期影响较小的光源（减少蓝光成分）

17.4 水景照明

水景照明是景观照明中最复杂、也最具视觉冲击力的部分。

照明方式：

- **水面照明**：照亮水面的倒影和波纹效果
- **水下照明**：照亮水下的喷头、池底和游鱼
- **瀑布照明**：从上方或侧方照亮落水面
- **喷泉照明**：与喷泉水柱配合的彩色照明

技术要求：

- 水下灯具必须使用安全低电压（12V AC 或更低）
- IP 等级 $\geq$ IP68
- 不锈钢 316L 材质
- 灯具安装应在水位线以下，避免"空烧"

17.5 道路照明

道路照明的核心目标是保障夜间交通安全。

关键指标：

- **平均亮度**：根据道路等级确定（快速路 1.5~2.0 cd/m²，主干路 1.0~1.5 cd/m²）
- **亮度均匀度**：总均匀度 $\geq$ 0.4，纵向均匀度 $\geq$ 0.7
- **眩光控制**：阈值增量 TI $\leq$ 10%（快速路）
- **环境比**：道路周边环境的照明水平

照明方式：

- **单侧布置**：适合宽度 $\leq$ 12 m 的道路
- **双侧对称布置**：适合宽度 $>$ 12 m 的道路
- **双侧交错布置**：适合宽度中等的道路
- **中心对称布置**：在道路中央隔离带设置灯杆

第18章 间接照明与氛围营造

18.1 灯槽照明

灯槽（Cove Lighting）是通过建筑凹槽或吊顶暗藏灯带，将光线投射到天花板或墙面上的间接照明方式。

设计要点：

- 灯槽深度应使光源不可见（通常 $\geq 100\text{ mm}$ ）
- 灯槽宽度根据灯具尺寸确定
- 天花板表面应平整光滑，反射率高（建议使用白色或浅色涂料，反射率 ≥ 0.7 ）
- 灯带应均匀排列，避免出现明暗交替的"斑马纹"

灯槽形式：

- **上照灯槽：**光线投射到天花板上，增加空间高度感
- **下照灯槽：**光线投射到地面上，适合吊顶边缘
- **双面灯槽：**上下同时出光

18.2 洗墙照明

洗墙照明（Wall Washing）是将光线均匀地投射到墙面上的照明方式，目的是"用光刷墙"。

与擦墙照明的区别：

- **洗墙照明：**灯具距墙面较远（通常为墙面高度的 $1/3$ ），光线均匀覆盖整个墙面
- **擦墙照明（Wall Grazing）：**灯具紧贴墙面或距墙面很近，突出墙面纹理和质感

设计要点：

- 使用非对称配光的洗墙灯具，确保光线均匀
- 灯具间距应与安装高度匹配，避免墙面出现"花瓣状"光斑
- 被照墙面的颜色和材质直接影响光效
- 注意灯具的隐蔽性

18.3 背光照明

背光照明（Backlighting）是将被照物后方的光线透过半透明材料射出的照明方式。

典型应用：

- **透光石墙面：**将 LED 灯设置在石材背面，光线透过石材纹理
- **磨砂玻璃隔断：**灯光从一侧透过磨砂玻璃
- **灯箱广告：**光源从背后照亮透光画面

- 发光天花板：整个天花板或局部区域成为均匀的光源面

设计要点：

- 半透明材料的透光率和散射特性决定了最终效果
- 光源到半透明材料的距离影响均匀性
- 注意散热（尤其是封闭空间内的大功率 LED）

18.4 漫反射照明

漫反射照明是利用粗糙或白色表面的漫反射特性，将光线均匀散射到空间中的照明方式。

设计要点：

- 使用高反射率的表面（白色天花、浅色墙面）
- 光源应指向反射面，而非直接射向空间
- 间接照明的光效较低（因反射损失），需要更高功率的光源补偿

第19章 光与空间的关系

19.1 光的方向性

光的方向性是塑造空间感知的基本手段。同一空间，从不同方向照射的光会产生截然不同的空间感受：

顶光（Downlight）：

- 光线从上方向下照射
- 强化空间的垂直尺度感
- 在地面形成明亮区域，营造聚焦感
- 模拟正午自然光效果
- 过度使用可能产生"洞穴感"

侧光（Sidelight）：

- 光线从侧面水平照射
- 强调物体的立体感和表面纹理
- 模拟窗户自然光效果
- 使空间显得更宽敞

底光 (Underlight) :

- 光线从下方照射
- 违反日常视觉经验，产生戏剧性甚至不安的效果
- 适合特殊艺术装置和主题空间
- 在常规空间中应谨慎使用

逆光 (Backlight) :

- 光源位于被照物后方
- 勾勒轮廓，创造剪影效果
- 使透明/半透明材质呈现发光质感

19.2 光的层次感

优秀的照明设计应建立清晰的亮度层次，引导视线在空间中自然流动。

光的三个层次：

1. 环境光 (Ambient Light) :

- 空间的基础亮度
- 提供整体的空间感知
- 通常最暗的层次

2. 任务光 (Task Light) :

- 工作区域的功能性照明
- 亮度高于环境光
- 引导视线到工作面

3. 焦点光 (Accent Light) :

- 重点突出特定对象或区域
- 亮度最高
- 引导视线焦点

亮度层次比：

- 焦点光：环境光 = 3:1 ~ 10:1
- 任务光：环境光 = 1.5:1 ~ 3:1
- 过大的对比度 (>10:1) 可能造成不适

19.3 光的焦点

在空间中设置光的焦点，类似于音乐中的重音——它引导注意力，创造节奏，定义空间的重要元素。

焦点照明策略：

- 入口照明：照亮建筑或空间的入口，引导来访者
- 艺术品照明：用射灯突出画作、雕塑等
- 特征墙面照明：用洗墙灯或装饰照明强调一面特征墙
- 功能焦点照明：照亮壁炉、书架、吧台等功能性元素

19.4 光的节奏

光的节奏是通过光线的重复、交替、渐变等模式创造的空间韵律感。

节奏手法：

- 重复：等间距排列的灯具创造秩序感和韵律感（如走廊中的筒灯排列）
- 交替：明暗交替创造节奏变化（如庭院中的高低灯具交替）
- 渐变：亮度的渐变引导空间的过渡（如从明亮的大堂逐渐过渡到幽暗的走廊）
- 聚焦-发散：在开放空间中先聚焦再发散，创造空间的张弛

第20章 光与材质的关系

20.1 反射

不同材质对光的反射特性差异巨大，直接影响照明设计的效果和灯具选择。

镜面反射材质：

- 代表材质：抛光大理石、镜面不锈钢、玻璃、水面
- 光效特征：产生清晰的映像和高光点
- 照明影响：容易产生眩光，需要注意灯具位置
- 设计应用：创造空间的延伸感和豪华感

漫反射材质：

- 代表材质：石膏、白色涂料、石膏板、未抛光石材
- 光效特征：光线被均匀散射，无清晰映像
- 照明影响：光线柔和，适合间接照明

- 设计应用：作为间接照明的反射面

混合反射材质：

- 代表材质：半光泽涂料、木材、丝绸、皮革
- 光效特征：同时具有漫反射和少量镜面反射
- 照明影响：呈现材质的质感和光泽
- 设计应用：用侧光突出质感

20.2 透射

透射材质允许光线穿过，在照明设计中可以创造独特的光效。

透明材质：

- 代表材质：透明玻璃、水晶、亚克力
- 光效特征：光线基本不变方向地穿过
- 照明应用：吊灯中的水晶棱镜产生折射彩虹

半透明材质：

- 代表材质：磨砂玻璃、玉石、云石、织物、纸张
- 光效特征：光线被散射后穿过，材料本身发光
- 照明应用：灯罩、发光墙面、发光天花板

20.3 吸收

吸收材质将光能转化为热能或其他形式的能量。

高吸收材质：

- 代表材质：深色涂料、黑色织物、深色木材
- 反射率：5%~20%
- 照明影响：需要更高的照度才能达到相同的空间亮度
- 设计注意：深色空间的照明功率需适当增加

20.4 不同材质的光效表现

材质	反射特性	推荐照明方式	光效描述
白色石膏墙	高漫反射	洗墙、间接照明	均匀柔和，空间明亮

材质	反射特性	推荐照明方式	光效描述
深色木材	低漫反射	重点侧光	凸显纹理，沉稳内敛
抛光大理石	镜面+漫反射	避免直射角度	高光闪烁，奢华感
清水混凝土	中等漫反射	擦墙照明	突出质感，朴素有力
玻璃	透明+反射	背光、边缘照明	通透灵动，光影变化
金属（拉丝）	方向性反射	侧光	方向性光泽，工业质感
织物（窗帘）	漫透射	背光	温暖柔和，层次丰富
水	镜面+透射	水下灯、侧光	波光粼粼，动态美感

第五部分：专题与前沿

第21章 健康照明

21.1 人体昼夜节律与光

人体的生理功能遵循约 24 小时的昼夜节律（Circadian Rhythm），而光是调节昼夜节律最主要的"授时因子"（Zeitgeber）。

视网膜上的"第三条感光通路"：

2002 年，Brainard 和 Thapan 各自独立发现了视网膜上除视杆细胞和视锥细胞之外的第三种感光细胞——内在光敏视网膜神经节细胞（ipRGC, intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells）。

ipRGC 含有黑视蛋白（Melanopsin），对约 480 nm 的蓝光最为敏感。ipRGC 不参与视觉成像，而是将光信号传递给视交叉上核（SCN，人体的"生物钟"），调控褪黑素分泌、皮质醇水平、体温、警觉性等多种生理功能。

褪黑素（Melatonin）：

- 由松果体分泌的激素
- 在黑暗环境中分泌增加，促进睡眠
- 光照（尤其是 460~480 nm 的蓝光）会抑制褪黑素分泌

- 夜间暴露于蓝光下（如手机屏幕、冷色温灯光）会延迟入睡

21.2 人因照明（ Human Centric Lighting, HCL ）

人因照明是以人的生理和心理健康为核心目标的照明设计理念，强调光对人的非视觉效应。

人因照明的核心参数：

等效黑视素照度（ Melanopic Equivalent Daylight Illuminance, Melanopic EDI ）：

- CIE 于 2018 年发布了 CIE S 026/E:2018 标准，定义了"等效黑视素照度"
- 衡量光源对 ipRGC 的刺激强度
- 是评价人因照明效果的核心指标

人因照明的设计策略：

1. 时间-光谱策略：

- 早晨：高色温（ 5,000~6,500 K ）、高照度，帮助唤醒和提神
- 上午：中性色温（ 4,000~5,000 K ），维持警觉性
- 下午：逐渐降低色温（ 3,500~4,000 K ）
- 傍晚：暖色温（ 2,700~3,000 K ），低照度，促进放松
- 夜间：极低色温（ < 2,700 K ），极低照度，最小化蓝光成分

2. 空间-光谱策略：根据空间功能和使用者的活动类型选择适当的光谱和亮度

21.3 蓝光管理

蓝光（ 400~500 nm ）在照明健康影响中扮演双重角色：

蓝光的正面作用：

- 白天：提高警觉性、注意力和认知表现
- 调节昼夜节律

蓝光的潜在风险：

- 夜间暴露：抑制褪黑素，干扰睡眠
- 长期高剂量暴露：可能对视网膜造成光化学损伤（蓝光危害）

蓝光危害等级（ IEC 62471 ）：

危害等级	蓝光加权辐亮度	适用场景
豁免级	$< 100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$	所有常规照明
1 类	$100 \sim 10,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$	有条件使用
2 类	$> 10,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$	仅限工业/专业使用

商用照明产品应达到豁免级要求。

21.4 健康照明在各场景的应用

医院/养老院：

- 病房：模拟自然光的日变化，帮助住院患者维持正常节律
- ICU：通过照明调节减少"ICU 综合征"
- 养老院：帮助老年人维持正常的睡眠-觉醒周期

学校：

- 教室：集中注意力时使用高色温高亮度照明
- 休息时间：切换为暖色温低亮度照明
- 研究表明可提高学生注意力和学习成绩

办公：

- 根据工作任务和时间段自动调节光谱
- 减少下午疲劳感
- 改善员工满意度和工作效率

住宅：

- 日间模式：高色温，适合工作和学习
- 傍晚模式：暖色温，放松和社交
- 夜间模式：极低色温和亮度，准备入睡

第22章 可持续照明

22.1 光污染

光污染是指过度的、不适当的或侵扰性的人工室外照明。光污染已成为继空气污染、水污染、噪声污染之后的第四大环境污染问题。

光污染的类型：

1. **天空辉光 (Sky Glow)**：城市上空的亮度增加，使星空不可见
2. **眩光 (Glare)**：过亮的直射光，影响视觉舒适和安全
3. **光侵入 (Light Trespass)**：光线进入不需要的区域（如邻居卧室）
4. **杂乱光 (Clutter)**：过多过杂的光源造成的视觉混乱

光污染的生态影响：

- **鸟类**：夜间灯光干扰候鸟的导航系统，导致"光陷阱"效应
- **海龟**：海滩灯光误导刚孵化的海龟朝内陆爬行（而非朝海面的自然光）
- **昆虫**：路灯大量吸引和杀死夜行昆虫，影响食物链
- **植物**：夜间照明影响植物的光周期，导致异常开花或延迟落叶
- **人类**：夜间光暴露与睡眠障碍、肥胖、抑郁甚至某些癌症的风险增加相关

22.2 暗天空运动 (Dark Sky Movement)

暗天空运动是由国际暗天协会（IDA, International Dark-Sky Association）推动的全球性运动，旨在减少光污染，保护夜空环境。

暗天空照明设计原则：

1. **有用**：所有室外照明应有明确的目的
2. **有目标**：光线应投射到需要的地方
3. **适度**：使用满足需求的最低亮度
4. **可控**：使用定时器和传感器，在非需要时段关闭或降低亮度

暗天空认证灯具要求：

- 灯具不得在水平线以上发出光线（"Full Cutoff"或"Backlight-Uplight-Glare"等级达标）
- 色温不超过 3,000 K（减少蓝光对生态的影响）
- 通过最小化溢出光和眩光

22.3 可持续照明设计策略

1. **选择高效光源**：LED 的高光效直接减少能源消耗和碳排放
2. **合理确定照度**：不盲目追求高照度，"恰到好处"即可

3. 精确控制光线方向：使用精确配光的灯具，减少光溢出
 4. 智能控制：按需照明、分时段控制
 5. 选择适当色温：室外照明优先选择 $\leq 3,000$ K 的暖色温
 6. 定期维护：保持灯具清洁和光源性能
 7. 照明设计结合生态评估：在生态敏感区域进行专项评估
-

第23章 智能照明趋势

23.1 IoT 与照明

照明系统正在成为物联网（IoT）的重要入口和基础设施。

照明 IoT 的核心特征：

- 每个灯具成为一个联网节点
- 灯具集成多种传感器（光照、温度、湿度、人体存在、CO₂）
- 数据上传至云平台进行分析和决策
- 远程控制和管理

典型应用场景：

- 智慧办公楼：每个工位上方的灯具独立控制，根据人员存在和工作状态自动调节
- 智慧零售：根据客流量和时段自动调整照明场景
- 智慧城市：智慧路灯集成照明、监控、WiFi、充电、环境监测等功能
- 智慧家居：全屋照明与安防、空调、窗帘等系统联动

23.2 人因照明算法

基于人因照明的智能调光算法正在从简单的“时间-色温”映射发展为更复杂的个性化算法。

算法输入参数：

- 当前时间和日期
- 当地经纬度和日出日落时间
- 使用者的年龄
- 使用者的睡眠模式（通过可穿戴设备获取）
- 室内自然光水平
- 使用者的活动类型

算法输出：

- 目标色温（CCT）
- 目标照度
- 目标 Melanopic EDI

发展趋势：

- 基于机器学习的个性化模型
- 根据使用者的反馈自动优化
- 与可穿戴健康设备深度集成

23.3 数字孪生在照明中的应用

数字孪生（Digital Twin）是在虚拟空间中创建物理系统的精确数字副本。在照明设计中，数字孪生正在改变设计、安装和运维的全流程。

设计阶段：

- 精确的光环境模拟和可视化
- 全年逐时能耗模拟
- 人因照明效果预览

施工阶段：

- 与 BIM 模型联动，精确指导灯具定位
- 施工进度与照明系统的协调

运维阶段：

- 实时监测照明系统状态
- 预测性维护（根据使用时长预测光源更换时间）
- 能耗优化

23.4 AI 调光与自适应照明

人工智能技术正在为照明设计带来革命性变化：

AI 调光的应用：

1. **需求预测：**根据历史数据预测空间的使用模式和照明需求
2. **自适应控制：**根据实时环境变化（自然光、人员分布、天气）自动调节

- 3. 能耗优化：在满足照明质量标准的前提下最小化能耗
- 4. 视觉舒适度优化：实时评估和调整眩光、亮度对比度等参数
- 5. 异常检测：自动识别灯具故障、光衰等异常状态

第24章 照明设计标准速查

24.1 GB 50034《建筑照明设计标准》

GB 50034 是中国建筑照明设计最核心的国家标准。

主要内容：

章节	内容
第3章	照明数量标准（各类空间照度标准值）
第4章	照明质量要求（UGR、显色指数、均匀度等）
第5章	照明节能（LPD 限值和计算方法）
第6章	照明配电与控制
第7章	照明测量方法

各类空间照度标准（节选）：

空间类型	照度标准值（lx）	UGR 限值	Ra 要求
普通办公室	300~500	19	80
高档办公室	500	19	80
会议室	300~500	22	80
教室/阅览室	300~500	19	80
病房	100~200	19	80
诊室	300	19	80
超市营业厅	300~500	22	80
高档商业	500	22	90

空间类型	照度标准值 (lx)	UGR 限值	Ra 要求
客房	75~150	—	80
餐厅	150~200	22	80
客厅 (住宅)	100~300	—	80
卧室 (住宅)	75~150	—	80
厨房 (住宅)	150~300	—	80

24.2 CIE 相关标准

标准编号	名称	主要内容
CIE S 008	室内工作场所照明	室内照明的综合要求
CIE S 015	室外工作场所照明	室外照明的要求
CIE 115	道路照明	道路照明的设计和评价
CIE 150	室外泛光照明	建筑立面和景观照明
CIE S 026	等效黑视素照度	人因照明的度量体系
CIE 198	中间视觉光度学	中间视觉条件下的照明评价
CIE TN 006	户外照明环境中的光侵入	光侵入的评价和控制

24.3 LEED 照明相关条款

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) 是全球最广泛使用的绿色建筑评价体系。其中与照明直接相关的条款包括：

LEED v4.1 照明条款：

条款	内容	得分
EQ: Interior Lighting	室内照明质量控制 (照度、均匀度、眩光控制、个人控制)	最高 3 分
EQ: Daylight	自然采光 (要求 75%以上面积达到 300~3,000 lx 的日光范围)	最高 3 分

条款	内容	得分
EA: Optimize Energy Performance	包括照明在内的能效优化	最高 18 分
EQ: Visual Light	视野（要求 75%以上常用空间有外部视野）	1 分

** WELL 建筑标准中的照明条款**:

WELL 是专注于人体健康的建筑标准，其中照明章节（Light Concept）涵盖：

- 日光模拟和节律照明设计
- 眩光控制
- 视觉舒适度
- 光对健康的影响

第25章 经典照明设计案例解析

25.1 光之教堂——安藤忠雄

项目概述：位于日本大阪府茨木市，1989年建成。

照明特色：

- 教堂正墙上的十字形开口是整座建筑最核心的"光源"
- 白天，自然光透过十字缝隙投射进黑暗的室内，形成强烈的光影对比
- 室内几乎完全依靠自然采光，人工照明极度克制
- 体现了"少即是多"的照明设计哲学

设计启示：

- 光本身就是最好的装饰材料
- 克制的照明设计反而能创造更强烈的情感体验
- 自然光与人工照明的主从关系

25.2 毕尔巴鄂古根海姆博物馆——Frank Gehry

项目概述：位于西班牙毕尔巴鄂，1997年建成，Frank Gehry 设计。

照明特色：

- 钛金属外皮在不同光照条件下呈现丰富的色彩变化
- 夜景照明采用精确计算的投光方案，突出建筑的不规则曲面
- 室内展厅照明灵活多变，适应不同展览需求

设计启示：

- 建筑外表皮的光反射特性是照明设计的重要考量
- 动态的建筑形态需要动态的照明策略

25.3 路易威登基金会大楼——Frank Gehry

项目概述： 位于巴黎布洛涅森林，2014年建成。

照明特色：

- 玻璃"帆"状结构的内透光照明
- 夜景效果如发光的水晶宫殿
- 室内展厅的精确照明控制
- 水景与照明的完美融合

25.4 上海外滩建筑群照明

项目概述： 外滩沿线数十栋历史建筑的统一夜景照明工程。

照明特色：

- 采用暖色温（约 2,700~3,000 K）统一各建筑的照明基调
- 泛光照明为主，精确控制光束角度避免光溢出
- 黄浦江面的倒影成为照明效果的延伸
- 节日模式与日常模式的分级控制

设计启示：

- 城市级照明设计需要统一的标准和协调
- 历史建筑的照明应尊重建筑的文化内涵
- 水面反射是夜景照明的重要加分项

25.5 Apple Store 照明设计

项目概述： 全球各地 Apple Store 的标准化照明设计。

照明特色：

- 大面积自然采光（标志性玻璃幕墙和天窗）
- 室内采用高均匀度的环境照明
- 产品体验台的精确照明，突出产品质感
- 天花板使用大面积发光面板，创造均匀柔和的光环境
- 色温约 3,500~4,000 K，传达科技感和清洁感

设计启示：

- 零售空间照明应服务于产品展示
- 自然光与人工照明的无缝融合
- 统一的照明语言塑造品牌识别

25.6 东京天空树照明设计

项目概述： 634 米高的电视塔，2012年开业。

照明特色：

- 使用约 1,600 个 LED 灯具实现全塔照明
- "粹"（Iki）和"雅"（Yabi）两种基本照明模式
- 季节性色彩变化
- 照明方案考虑了航空安全和周边居民的舒适

设计启示：

- 超高层建筑的照明需要考虑多重因素
- LED 技术为大型构筑物照明提供了前所未有的灵活性

25.7 杭州西湖音乐喷泉照明

照明特色：

- 水景照明与音乐的精确同步
- RGB LED 实现丰富的色彩变化
- 水下灯具与喷泉水柱的巧妙配合
- 湖面倒影增强视觉效果

25.8 伦敦泰特现代美术馆照明

照明特色：

- 涡轮大厅的自然采光（屋顶天窗）
- 展厅采用轨道射灯的灵活照明方案
- 根据展品类型精确控制照度水平和紫外线含量
- 间接照明勾勒建筑空间

25.9 北京大兴国际机场照明

项目概述：由扎哈·哈迪德建筑事务所设计，2019年投入运营。

照明特色：

- 巨大的天窗系统引入丰富的自然光
- 室内照明模拟自然光的色温和亮度变化
- C形柱的照明设计突出结构美感
- 旅客引导照明与建筑流线一体化设计

设计启示：

- 交通枢纽的照明需兼顾功能性和导向性
- 大型公共空间的自然光利用具有巨大的节能潜力

25.10 苏州博物馆新馆——贝聿铭

项目概述：2006年建成，贝聿铭封山之作。

照明特色：

- 自然光通过几何天窗精确引入室内
- 展览照明与建筑照明的和谐统一
- 水面倒影与建筑照明的互动
- 光与白墙的对话：将光作为“建材”使用
- 色温统一在 3,000~4,000 K，与粉墙黛瓦的建筑语言呼应

设计启示：

- 大师级照明设计是对光与空间关系的深刻理解
- 建筑照明应与建筑语言统一

附录

附录A：常用照明设计公式速查

公式名称	表达式	适用场景
利用系数法	$E = N \cdot \Phi \cdot UF \cdot MF / A$	平均照度计算
距离平方反比	$E = I \cdot \cos \theta / r^2$	点光源照度计算
室形指数	$RI = L \cdot W / [Hm \cdot (L+W)]$	利用系数查表
亮度	$L = I / (A \cdot \cos \theta)$	表面亮度计算
维护系数	$MF = LLD \cdot LDD \cdot RSF$	光通量衰减修正
LPD	$LPD = P / A$	照明功率密度

附录B：常见光源特性对照表

特性	白炽灯	荧光灯	LED	OLED
光效 (lm/W)	10~17	80~110	100~200	30~60
寿命 (h)	1,000	8,000~20,000	30,000~50,000	10,000~30,000
色温 (K)	2,700	2,700~6,500	1,800~10,000	3,000~5,000
显色指数 Ra	100	60~95	70~98	80~95
调光	优秀	一般	优秀	优秀
瞬时启动	是	否 (需预热)	是	是
紫外辐射	极少	有 (需防护)	无	无
含汞	否	是	否	否
成本趋势	淘汰	下降	持续下降	下降中

附录C：照明设计常用参数

参数	推荐值	备注
办公室照度	300~500 lx	GB 50034
办公室 UGR	≤ 19	防眩光
住宅客厅照度	100~300 lx	根据功能区分
住宅色温	2,700~3,000 K	暖白光
商业 Ra	≥ 80 (一般) / ≥ 90 (高端)	显色性
博物馆敏感展品照度	≤ 50 lx	保护展品
道路照明维护系数	0.6~0.7	根据环境
维护系数 (室内)	0.7~0.8	根据清洁度

参考文献

1. 中国建筑标准设计研究院. GB 50034-2024 建筑照明设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
2. CIE. CIE S 008/E:2020 Lighting of Indoor Work Places[S]. Vienna: CIE.
3. CIE. CIE S 026/E:2018 CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light[S]. Vienna: CIE.
4. IES. IES LM-79-19 Optical and Electrical Measurements of LED Light Sources[S]. New York: IES.
5. IES. IES TM-30-20 IES Method for Evaluating Light Source Color Rendering[S]. New York: IES.
6. 郝洛西. 建筑照明设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
7. 李农. 建筑光环境设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
8. Peter Dormer. Lighting Design Basics[M]. London: Wiley.
9. Mark Karlen. Illuminating Design Simplified[M]. New York: Routledge.
10. Christina Spitzbart. LED Lighting Design: A Practical Guide[M]. Basel: Birkhäuser.
11. USGBC. LEED v4.1 Building Design and Construction Guide[S]. Washington DC: USGBC.
12. International Dark-Sky Association. Outdoor Lighting Code Handbook[M]. Tucson: IDA.

后记

建筑照明设计是一门融合物理学、生理学、心理学、工程技术和美学的综合性学科。从光的基础理论到照明设备的技术细节，从空间照明的设计方法到健康照明的前沿探索，本教材力求为读者构建一个完整的知识体系。

照明设计的终极目标，不是让空间“亮起来”，而是让空间“活起来”。一个好的照明设计，应该让使用者在不知不觉中感受到舒适、高效和愉悦——就像最好的光，是让人忘记光的存在。

随着 LED 技术、智能控制和人工智能的快速发展，照明设计正在经历前所未有的变革。从静态到动态，从固定到自适应，从功能到健康，照明的边界正在不断拓展。可以预见，未来的照明将更加注重以人为本，更加融入自然，更加智能高效。

希望本教材能为读者的学习和实践提供有价值的参考，也希望读者在掌握技术知识的同时，始终保持对光之美的敏感和追求。

"建筑是用光写成的诗。"
—— 安藤忠雄

全书完

本内容由 Coze AI 生成，请遵循相关法律法规及《人工智能生成合成内容标识办法》使用与传播。