

# 建筑电气照明系统的节能设计与照度优化

张通

中核华伟工程设计研究有限公司, 河北 石家庄 050000

**[摘要]**建筑电气照明系统是建筑能耗的重要组成部分,其节能设计与照度优化对实现建筑碳中和目标具有重要意义。文章系统分析了各类光源的技术特性与适用场景,根据利用系数法照度计算的基本公式,建立了照明功率密度与照度设计之间的数学关系模型,重点探讨了灯具配光曲线的合理选择、灯具布置位置与高度的优化方法、照明控制系统的设计策略,以及灯具防护等级选择、线路损耗控制等辅助节能措施。研究表明,通过科学的光源选型、合理的灯具布置、精细化的照明控制以及全系统的节能考量,照明系统可实现10%-20%的节能潜力,同时保障良好的光环境质量。本文为建筑电气照明系统的节能设计与照度优化提供了理论依据与实践参考。

**[关键词]**建筑电气;照明系统;节能设计;光源特性;配光曲线;照明控制;防护等级;线路损耗

DOI: 10.33142/ect.v4i2.19202

中图分类号: TU113.6

文献标识码: A

## Energy-saving Design and Illumination Optimization of Building Electrical Lighting System

ZHANG Tong

CNNC Huawei Engineering Design and Research Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** Building electrical lighting system is an important component of building energy consumption, and its energy-saving design and illumination optimization are of great significance for achieving the goal of building carbon neutrality. The article systematically analyzes the technical characteristics and applicable scenarios of various types of light sources. Based on the basic formula for calculating illuminance using the coefficient method, a mathematical relationship model between lighting power density and illuminance design is established. The article focuses on the reasonable selection of lighting distribution curves, optimization methods for lighting arrangement positions and heights, design strategies for lighting control systems, as well as auxiliary energy-saving measures such as selecting lighting protection levels and controlling line losses. Research has shown that through scientific selection of light sources, reasonable arrangement of lighting fixtures, refined lighting control, and energy-saving considerations throughout the entire system, lighting systems can achieve 10% -20% energy-saving potential while ensuring good light environment quality. This article provides theoretical basis and practical reference for energy-saving design and illumination optimization of building electrical lighting systems.

**Keywords:** building electrical; lighting system; energy-saving design; light source characteristics; light distribution curve; lighting control; protection level; line loss

### 1 概述

#### 1.1 研究背景与意义

随着我国“双碳”目标的深入推进,建筑节能已成为实现全社会节能减排的关键领域。照明系统是建筑中电能消耗的主要来源之一,在我国建筑运行阶段的碳排放量中,照明能耗在公共建筑电耗中占比约15%~25%。因此,照明系统的节能设计对降低建筑运行碳排放具有重要意义。

照明节能设计并非简单地降低照度水平或减少灯具数量,而是在保障良好光环境质量的前提下,通过科学的光源选型、合理的灯具布置、精细化的照明控制以及全系统的节能考量,实现能源消耗的最小化。这需要设计人员深入了解各类光源的技术特性,掌握照度计算的基本方法,并能够根据建筑空间特点和使用需求进行系统化的节能设计。

#### 1.2 研究目的与内容

本文旨在系统探讨建筑电气照明系统的节能设计与

照度优化方法,主要研究内容包括:(1)梳理各类光源的技术特性与适用场景,建立光源选型的比较框架;(2)根据照度计算的核心公式,建立照明功率密度与设计参数的数学关系;(3)探讨灯具配光曲线的选择原则与灯具布置位置的优化方法;(4)分析照明控制系统的设计策略与控制方式选择;(5)补充灯具防护等级选择、线路损耗控制等辅助节能措施。研究结果可为建筑电气工程设计及绿色建筑评价提供参考。

### 2 常用光源技术特性对比

#### 2.1 光源分类与发光原理

照明光源按照发光形式可分为热辐射光源、气体放电光源和电致发光光源三大类。热辐射光源利用电流通过灯丝产生热量使其白炽发光,如白炽灯;气体放电光源利用电流通过气体或金属蒸气产生放电而发光,如荧光灯、高压钠灯、金属卤化物灯;电致发光光源在电场作用下使固

体物质直接发光，如发光二极管（LED）。

不同发光原理决定了光源的光效、显色性、寿命等技术特性的根本差异。表 1 汇总了常用照明光源的主要技术参数对比。

### 2.2 光源选型原则

光源选型应综合考虑以下因素：（1）光效与节能要求：在满足照明质量的前提下优先选用高光效光源；（2）显色性要求：对色彩分辨要求高的场所应选用  $Ra \geq 80$  的光源；（3）使用寿命：长寿命光源可降低更换维护成本，减少全生命周期资源消耗；（4）启动特性：需频繁开关或瞬时启动的场所应选用瞬时启动光源；（5）光色品质：根据空间氛围需求选择适宜的色温。

## 3 照度计算的数学模型与标准选择

### 3.1 利用系数法基本公式

利用系数法是工程中最常用的平均照度计算方法，适用于灯具均匀布置、墙和天棚反射系数较高、空间无大型设备遮挡的室内一般照明。其基本公式为：

$$E_{av} = \frac{N \times \Phi \times U \times K}{A} \quad (1)$$

式中： $E_{av}$ ——工作面平均照度（lx）； $N$ ——灯具数量； $\Phi$ ——单个光源的光通量（lm）； $U$ ——利用系数； $K$ ——维护系数； $A$ ——房间面积（ $m^2$ ）。

由上式可反推出所需灯具数量：

$$N = \frac{E_{av} \times A}{\Phi \times U \times K} \quad (2)$$

进而可计算照明功率密度（LPD）：

$$LPD = \frac{N \times P}{A} = \frac{E_{av} \times P}{\Phi \times U \times K} = \frac{E_{av}}{\eta \times U \times K} \quad (3)$$

式中： $P$ ——单个灯具的总功率（W）； $\eta = \Phi/P$ ——光源系统光效（lm/W）。该式表明，LPD 与设计照度  $E_{av}$  成正比，与光源光效  $\eta$ 、利用系数  $U$ 、维护系数  $K$  成反比。

需要强调的是，照度标准值的合理选择是节能设计的基础：设计时应根据国家标准《建筑节能与可再生能源利用通用规范》（GB 55015—2021）、《建筑照明设计标准》（GB/T 50034—2024）规定的照度标准值，结合空间实际使用功能，避免盲目追求过高照度造成能源浪费。同时，在满足 LPD 限值的前提下，计算照度值可适当高于标准值，以补偿维护系数和光衰的影响，确保长期使用中照度仍能满足要求，但需注意照度裕量不宜过大，一般不超过标准值的 20%。

### 3.2 室空间比与利用系数的确定

利用系数  $U$  的选取除与灯具的光强分布有关外，还与

房间形状、室内装修标准密切相关。房间几何特征通常用室空间比（Room Cavity Ratio, RCR）量化：

$$RCR = \frac{5 \times h_{RC} \times (l+b)}{l \times b} \quad (4)$$

式中： $h_{RC}$ ——室空间高度，即灯具安装平面至工作面的垂直距离（m）； $l$ ——房间长度（m）； $b$ ——房间宽度（m）。

RCR 值反映了房间的几何特征：矮而宽的房间 RCR 值较低，多数直射光落在工作面上，利用系数较高；高而窄的房间 RCR 值较高，利用系数较低。根据 RCR 值可初步选择灯具配光类型，如表 2 所示。

表 2 室空间比与灯具配光选择

RCR 范围	距高比 $\lambda$	配光种类
1~3	1.5~2.5	宽配光
3~6	0.8~1.5	中配光
6~10	0.5~1.0	窄配光

## 4 灯具配光特性与布置优化

### 4.1 配光曲线的合理选择

配光曲线的选择应综合考虑房间几何特征、照明质量要求和节能目标。基本原则是：宽而矮的房间应选用宽配光灯具，使光线均匀覆盖工作面；高而窄的房间应选用窄配光灯具，将光线有效投射到下方区域。

选择正确的配光曲线对视觉舒适度、照明均匀度和能源效率均有重要影响。适当的光型可最大限度减少眩光，营造舒适的视觉环境；均匀的光型可确保一致的亮度，提高安全性和视觉敏锐度；精确控光可将光线引导到需要的地方，减少能源消耗和光污染。

### 4.2 灯具布置位置与高度优化

#### （1）灯具间距的确定

为实现良好的照度均匀度，灯具布置间距应满足距高比要求。灯具的最大允许间距可由下式估算：

$$L_{max} = \lambda \times h \quad (5)$$

式中： $L_{max}$ ——灯具最大允许间距（m）； $\lambda$ ——距高比，由灯具配光决定（见表 2）； $h$ ——灯具安装高度（m）。

#### （2）安装高度的确定与优化

灯具安装高度应根据空间高度、工作面高度和配光特性综合确定。一般照明灯具的安装高度可按式估算：

$$h = h_{room} - h_{work} - h_{susp} \quad (6)$$

表 1 常用照明光源主要技术特性对比

光源类型	光效范围 (lm/W)	平均寿命 (h)	显色指数 Ra	色温范围 (K)	启动时间	主要特点与应用
白炽灯	6.5-25	1000~2000	95~99	2400~2900	瞬时	显色性好，光效极低，寿命短，逐步淘汰
三基色荧光灯	60-90	8000~15000	80~90	2500~6500	1~4s	光效高，显色性好，适用于办公、学校等
高压钠灯	65-120	12000~24000	20~60	1900~2800	4~8min	光效高，显色性差，适用于道路照明
金属卤化物灯	50-120	3000~10000	65~90	3000~6500	4~8min	光效高，显色性较好，适用于体育馆、商场
LED 灯	80-120	50000~100000	70~95	多种可选	瞬时	光效高，寿命长，可控性好，主流选择

式中： $h_{\text{room}}$ ——房间净高（m）； $h_{\text{work}}$ ——工作面高度（m），通常取 0.75m； $h_{\text{susp}}$ ——灯具吊装高度（m），吸顶安装时为 0。

在满足使用需求的基础上，适当降低灯具安装高度可提高利用系数，因为光线传播距离缩短，光通损失减少。但安装高度过低可能导致眩光和照度不均匀，需结合配光曲线综合考虑。对于高大空间，可在主要工作区域上方采用局部照明或分区一般照明，通过降低局部灯具高度来提升能效。

### （3）局部照明的应用

对于视觉作业要求高的区域（如绘图桌、精密操作台），宜在一般照明的基础上增加局部照明。局部照明可将光线精准投放到工作面，避免为满足局部高照度而提升整个空间的照明功率密度，从而实现节能。设计时应确保局部照明与一般照明的照度比例协调，避免产生过大的亮度对比。

### （4）布置位置的优化策略

**区域照明：**采用分区一般照明方式，针对走道、工作区等重点区域补光，而非整间空间均匀铺灯。

**墙面洗光：**将灯具稍靠墙配置，让光线沿墙面扩散，可放大空间感并降低刺眼度。

**避免眩光：**选择防眩设计灯具（深藏灯杯、蜂巢罩等），避免视线直接看到光源。

## 5 照明控制系统设计

### 5.1 主要照明控制方式

根据《建筑照明设计标准》（GB/T 50034—2024），照明控制方式可分为以下几类：

#### （1）分区/分组控制

按使用条件和天然采光状况，将照明系统划分为若干独立控制区域。公共建筑中的门厅、大堂、电梯厅等场所，宜采用夜间定时降低照度的自动控制装置。大空间、多功能场所的照明，应采取集中控制或智能控制系统。

#### （2）天然光联动控制

利用天然采光的场所，应随天然光照度变化自动调节人工照明照度。采光区域的照明控制应独立于其他区域的照明控制。主要功能房间采光区域的人工照明应独立控制。

#### （3）感应控制

**人体感应控制：**办公室、教室、会议室等场所，可按使用需求自动开关灯或调光。

**动静感应控制：**走廊、楼梯间、门厅等公共场所，宜采用集中控制并按使用条件采取分区、分组控制。

#### （4）定时控制

对于有固定使用时间表的场所，可按预设时间表自动开关灯。门厅、大堂、电梯厅等场所，宜采用夜间定时降低照度的自动控制装置。

#### （5）智能集中控制

对于设置照明控制系统的大型公共建筑，宜根据项目

实际情况采用智能照明控制系统，具备可编程控制、远程监控、能耗监测等功能。

## 5.2 不同场所的控制策略

**办公建筑：**个人办公室就地控制，开放式办公室采用人员传感器+照度传感器控制，会议室采用场景控制。

**教育建筑：**教室按采光条件分区控制，阶梯教室采用场景控制（讲课、投影、自习等模式）。

**地下车库：**采用感应控制，车辆或人员进入时自动开启或调亮，无人时段维持低照度节能模式。

## 6 辅助节能措施

### 6.1 灯具防护等级与环境适应性

根据安装环境选择合适的防护等级（IP 等级）是保障灯具长期稳定运行、延长使用寿命的关键。灯具寿命的延长意味着更少的更换频率和资源消耗，本身就是一种重要的节能方式。

**IP 防护等级：**由两位数字组成，第一位数字表示防固体异物进入等级（0~6），第二位数字表示防水等级（0~8）。常见要求为：普通室内场所 IP20 以上，潮湿场所（浴室、厨房）IP44 以上，室外场所 IP65 以上。

#### 环境适应性选择：

**干燥洁净室内（办公室、住宅）：**选用 IP20-IP40 灯具，重点考虑防尘即可

**潮湿场所（卫生间、厨房操作区）：**选用 IP44-IP55 灯具，具备防溅水能力

**多尘场所（仓库、车间）：**选用 IP5X 以上灯具，防止粉尘侵入影响散热

**室外场所（道路、广场）：**选用 IP65 以上灯具，完全防尘且防喷水

**腐蚀性环境（化工厂、海边）：**选用 IP66 以上且具备防腐涂层的灯具

**抗冲击等级（IK 等级）：**对于可能遭受机械撞击的场所（地下车库、厂房），应选择 IK 等级合适的灯具。IK 等级范围为 IK01-IK10，数字越大抗冲击能力越强。

正确选择防护等级可避免因环境因素导致的灯具早期损坏，延长使用寿命 2~3 倍。灯具使用寿命的延长减少了生产、运输、安装过程中的资源消耗和碳排放，是“延长即节能”理念的具体体现。

### 6.2 配电线路损耗控制

照明配电线路的能耗损失虽占比较小，但通过合理设计可进一步挖掘节能潜力。线路损耗主要取决于线路电阻和电流大小，其有功功率损耗计算公式为：

$$\Delta P = I^2 \times R = I^2 \times \rho \times \frac{L}{S} \quad (7)$$

式中： $\Delta P$ ——线路有功功率损耗（W）； $I$ ——线路计算电流（A）； $R$ ——线路电阻（ $\Omega$ ）； $\rho$ ——导体电阻率（铜芯取  $0.0172 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ）； $L$ ——线路长度（m）； $S$ ——导体截面积（ $\text{mm}^2$ ）。

由上式可知,线路损耗与电流平方成正比,与导体截面积成反比。降低线路损耗的主要措施包括:

#### (1) 合理选择线缆规格

根据计算电流选择导体截面积,对于长距离配电回路(如大型厂房、道路照明),应进行电压损失校验,确保末端电压满足灯具要求,三相平衡负荷线路计算公式为:

$$\Delta U = I \times l \times \Delta u_i \times 100\% \quad (8)$$

单相平衡负荷线路计算公式为:

$$\Delta U \approx 2 \times I \times l \times \Delta u_i \times 100\% \quad (9)$$

式中: $\Delta U$ ——电压损失百分数(%); $I$ ——线路负荷电流(A); $l$ ——线路长度(m); $\Delta u_i$ ——三相线路单位电流长度的电压降百分数, %/(A km)。

#### (2) 优化敷设方式

缩短配电半径:合理设置配电箱位置,使配电箱尽可能靠近负荷中心,减少干线长度。

采用放射式配电:对大功率照明回路采用放射式供电,避免多个回路共用长距离干线。

平衡三相负荷:将单相照明负荷均匀分配至三相,减少中性线电流和线路损耗。

#### (3) 提高功率因数

照明系统的功率因数对照明配电线路的损耗有显著影响。对于气体放电灯(荧光灯、高压钠灯、金属卤化物灯),应配套功率因数校正装置,使功率因数不低于0.9。功率因数提高后,线路电流相应减小,损耗按电流平方比例下降。

通过合理的线路设计,配电回路损耗可控制在总照明用电量的1%~2%以内,较粗放设计可降低损耗5%~10%。

### 6.3 维护管理对节能的贡献

照明系统的长期节能运行离不开科学的维护管理。主要维护措施包括:

定期清洁灯具:积灰可使灯具光输出下降20%~30%,定期清洁可维持设计照度,避免为补偿光衰而增加照明时间。

及时更换老化光源:光源光衰超过30%时应及时更换,避免为维持照度而延长点亮时间。

检查控制系统:定期检查传感器、控制器工作状态,确保自动控制功能正常发挥节能作用。

## 7 结论

本文对建筑电气照明系统的节能设计与照度优化进行了系统研究,得出以下主要结论:

(1) 各类光源技术特性差异显著,应根据具体应用场景合理选型:白炽灯显色性极佳但光效最低,已逐步淘汰;三基色荧光灯光效和显色性均衡;高压钠灯光效最高但显色性差,适用于道路照明;金属卤化物灯兼顾光效与显色性;LED光源综合性能最优,已成为主流选择。

(2) 利用系数法照度计算公式  $E_{av} = \frac{N \times \Phi \times U \times K}{A}$  为精确计算灯具数量和照明功率密度提供了理论依据。照度标准

值应合理选择,避免过度照明;在满足LPD限值的前提下,计算照度值可适当提高以补偿维护系数和光衰的影响。

(3) 灯具配光曲线的选择应基于室空间比和场所特点:宽而矮的房间选用宽配光灯具,高而窄的房间选用窄配光灯具。灯具间距应满足距高比要求,安装高度在满足使用需求的基础上可适当降低以提高利用系数;对于高照度要求的局部区域,宜采用局部照明而非整体提升照度。

(4) 照明控制是实现精细化节能的核心手段。主要控制方式包括分区/分组控制、天然光联动控制、感应控制、定时控制和智能集中控制。不同场所应根据功能特点设计适宜的控制策略。

(5) 辅助节能措施不容忽视:根据环境正确选择灯具防护等级可延长使用寿命2~3倍;合理计算线缆规格、优化敷设方式可将线路损耗控制在1%~2%以内;科学的维护管理可维持照明系统长期高效运行。

(6) 照明节能设计应遵循“高效光源+科学布置+精细控制+系统优化”的综合技术路径,在保障照度质量的前提下实现能源消耗的最小化。综合应用多种节能策略,照明系统可实现10%~20%的节能潜力。

建筑电气照明系统的节能设计与照度优化是一个综合性课题,需要工程设计人员深入理解光源特性、掌握照度计算方法、合理选择配光曲线、优化布置方案,并根据使用需求设计适宜的照明控制系统,同时关注防护等级选择、线路损耗控制等细节,共同构建绿色、高效、舒适的建筑光环境。

### [参考文献]

- [1]中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑照明设计标准:GB/T50034-2024[Z].北京:中国建筑工业出版社,2024.
  - [2]中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑节能与可再生能源利用通用规范:GB55015-2021[Z].北京:中国建筑工业出版社,2022.
  - [3]北京照明学会照明设计专业委员会.照明设计手册(第三版)[Z].中国电力出版社,2016-12.
  - [4]中国航空规划设计研究总院有限公司组编.工业与民用供电设计手册(第四版)[Z].中国电力出版社,2016-12.
  - [5]韩浩学、王进林、谢斌、韩伟伟.照明节能技术在建筑电气工程中的应用[J].电子元器件与信息技术,2025(4):257-259.
  - [6]施云琼.节能照明设计及灯具的选型[EB/OL].中国照明网,2009-06-30.
  - [7]魏征.民用建筑电气照明节电技术的探讨[J].电气技术,2021(7):21-23.
  - [8]刘凤勇,徐国伟,肖凯强.建筑电气照明系统节能优化设计技术要点分析[J].光源与照明,2024(2):207-209.
- 作者简介:张通(1994.2—),毕业院校:河北工业大学城市学院,所学专业:电气工程及其自动化,当前就职单位:中核华伟工程设计研究有限公司,职称级别:工程师。