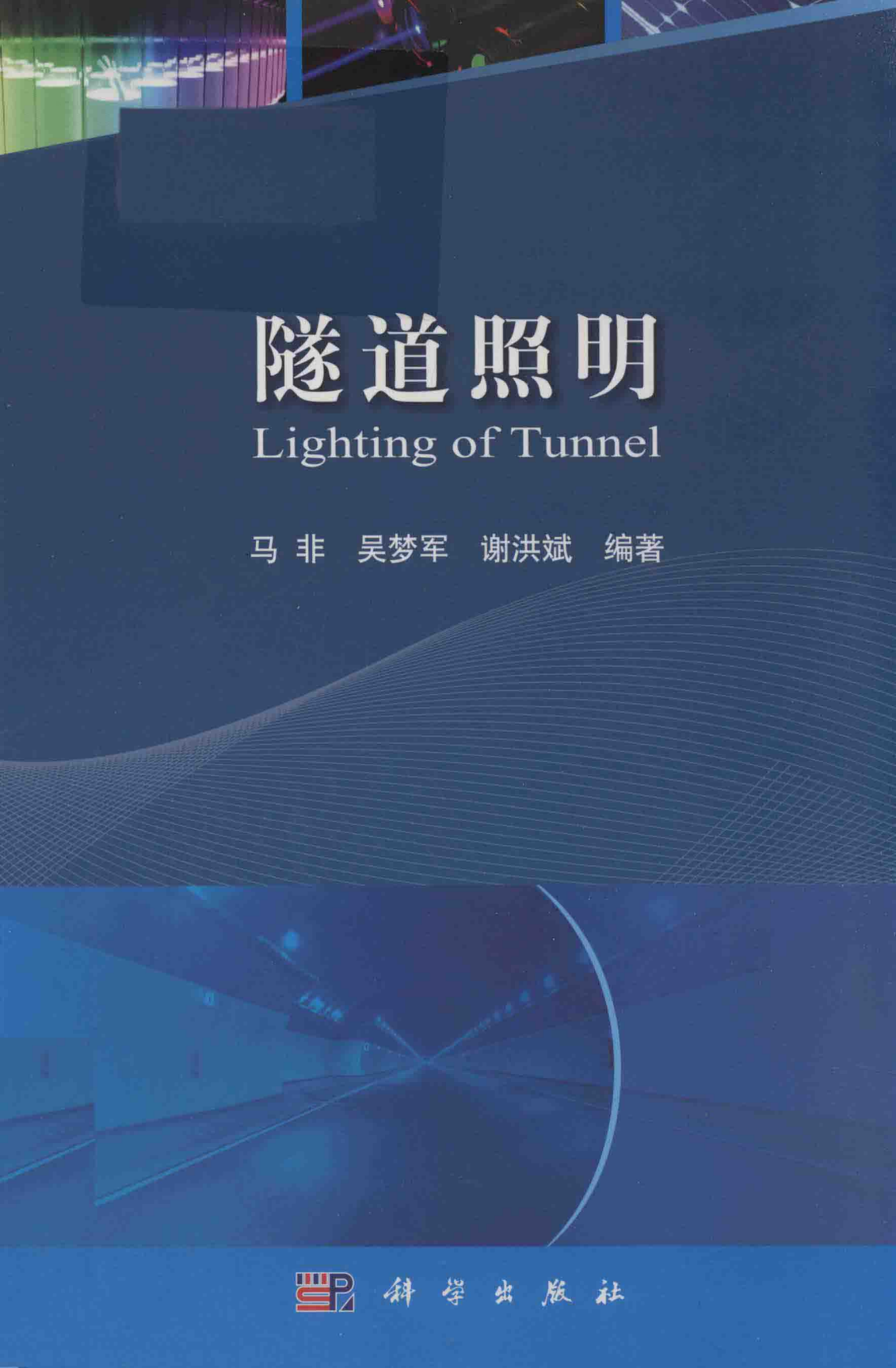




隧道照明

Lighting of Tunnel

马非 吴梦军 谢洪斌 编著



科学出版社

隧 道 照 明

马 非 吴梦军 谢洪斌 编著



科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了隧道照明的基本概念、基础理论和研究历程,对影响隧道照明的光学、材料学、电子学、生理学和心理学等因素进行了详细分析,阐述了不同隧道照明灯具的光学及电气特性、隧道入口加强照明计算方法、隧道中间段灯具配置参数对路面亮度均匀度的影响、计算机技术在隧道照明计算中的应用以及隧道照明的测量方法等,提出了提高隧道照明质量的相关理念和措施。

本书可供交通运输管理部门、隧道建设和隧道运营单位以及灯具制造企业的相关工程技术人员参考,也可作为高等学校隧道工程、建筑等相关专业的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

隧道照明/马非,吴梦军,谢洪斌编著. —北京:科学出版社,2018.8

ISBN 978-7-03-058383-3

I. ①隧… II. ①马… ②吴… ③谢… III. ①隧道-照明
IV. ①U453.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 168662 号

责任编辑:朱英彪 赵晓廷/责任校对:张小霞

责任印制:张 伟/封面设计:蓝正设计

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年8月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年8月第一次印刷 印张:9 3/8 彩插:2

字数:185 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

截至 2017 年底,中国的公路隧道总量达 16229 座,总里程为 15285.1km,中国已经成为世界上拥有公路隧道数量最多、里程最长的国家。隧道照明系统对行车的安全性和舒适性有重要的影响,良好的隧道照明环境能够大大降低隧道内发生交通事故的概率,使驾驶者能充满信心地接近、进入和通过隧道。在节能减排的时代背景下,研究如何通过设备和管理手段来发挥隧道照明系统的效能,已经成为当前面临的重要课题。

隧道照明是一门综合性较强的学科,它涉及光学、材料学、电子学、视觉神经生理学和心理学等学科;同时,隧道照明也是一门实践性很强的学科,纵观隧道照明研究的历程,诸多结论在实践中得到了修正。本书总结和吸收了国内外近年来隧道照明研究、设计及运营等方面的最新成果与实践经验,在此基础上加入了作者的研究成果与见解。全书共 8 章,第 1 章阐述光的相关特性以及与隧道照明相关的指标和术语;第 2 章介绍人的视觉特性;第 3 章在总结分析隧道照明视觉任务的基础上回顾隧道照明的研究历程,介绍与隧道照明相关的规范和报告;第 4 章对灯具的特性进行阐述,对不同类型的灯具在光通量、光谱、寿命和色温等方面的特性进行比较分析;第 5 章和第 6 章分别就隧道加强照明和中间段基本照明的需求、亮度确定方法进行阐述;第 7 章和第 8 章分别对隧道照明的计算和测量进行阐述。

本书由招商局重庆交通科研设计院有限公司马非博士、吴梦军博士以及重庆市城市建设发展有限公司谢洪斌高级工程师编著,其中第 1、3、5、6、7 章由马非编写,第 2、4 章由吴梦军编写,第 8 章由谢洪斌、马非编写。

在本书编写过程中,丁浩、张琦、李科、陈建忠、刘鹏、赵清碧、赵卫斌、金海诚、王乾等给予了大力帮助和支持,在此表示感谢。书中借鉴和引用了国内外大量与隧道照明相关的研究成果,在此一并向作者致以诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请读者批评指正。

作 者

2018 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 光及光学指标	1
1.1 光	1
1.2 光度学参数	2
1.2.1 辐射通量	2
1.2.2 光通量	2
1.2.3 辐照度	3
1.2.4 光强	3
1.2.5 光谱功率分布	4
1.2.6 S/P 值	5
1.2.7 色温	5
1.2.8 显色性	6
1.3 道路照明质量参数	7
1.3.1 照度	7
1.3.2 亮度	7
1.3.3 对比度	8
1.3.4 可见度	11
1.3.5 光幕亮度	11
1.3.6 小目标可见度	11
1.3.7 眩光	12
1.3.8 频闪	14
1.4 灯具及光源参数	15
1.4.1 光效	15
1.4.2 灯具光输出比	16
1.5 光在物体表面的反射特性	17
1.5.1 镜面反射和漫反射	17
1.5.2 路面反射特性	19
参考文献	21
第 2 章 人的视觉特性	23
2.1 人眼的生理结构	23

2.2 人眼的视觉特性	25
2.2.1 视觉适应特性及视觉状态	25
2.2.2 人眼的光谱灵敏度	26
2.2.3 人眼的亮度阈值差	27
2.2.4 人眼的视力	29
参考文献	30
第3章 隧道照明的理论基础	31
3.1 隧道照明的视觉任务	31
3.2 隧道照明的研究历程	32
3.2.1 视觉适应理论主导阶段	33
3.2.2 视觉适应理论向等效光幕理论过渡阶段	35
3.2.3 等效光幕理论主导阶段	37
3.3 隧道照明相关规范及报告	39
参考文献	40
第4章 隧道照明灯具	41
4.1 光强分布	41
4.2 光强表及配光曲线	43
4.3 隧道照明类型	47
4.4 灯具类型	48
4.4.1 高压汞灯	49
4.4.2 高压钠灯	50
4.4.3 金卤灯	51
4.4.4 荧光灯	53
4.4.5 电磁感应灯	54
4.4.6 LED 灯具	55
4.4.7 灯具特性综合比较	57
参考文献	58
第5章 隧道加强照明	60
5.1 隧道照明区段划分	60
5.1.1 接近段	60
5.1.2 入口段	61
5.1.3 过渡段	61
5.1.4 中间段	61
5.1.5 出口段	62
5.2 L_{20} 方法确定入口段亮度	62

5.2.1	L_{20} 方法简述	62
5.2.2	计算查表法	63
5.2.3	环境简图法	63
5.3	觉察对比度法确定入口加强照明	65
5.3.1	觉察对比度法概述	65
5.3.2	相关参数确定	66
5.3.3	觉察对比度法算例	68
5.4	SRN 法确定入口段亮度	77
5.5	洞外减光棚洞	78
5.6	亮度控制	80
5.7	过渡段照明	81
5.7.1	过渡段亮度	81
5.7.2	过渡段长度	82
5.8	出口段照明与加强照明	82
	参考文献	83
第 6 章	隧道中间段照明	85
6.1	概述	85
6.2	中间段亮度等级与布置形式	86
6.2.1	中间段亮度等级	86
6.2.2	灯具布置形式	86
6.3	两侧布灯形式照明特征	87
6.3.1	分析模型	87
6.3.2	照明质量指标	89
6.3.3	亮度空间分布	92
6.3.4	纵向间距影响	98
6.4	拱顶布灯的照明特征	100
6.4.1	分析模型	100
6.4.2	照明质量指标	101
6.4.3	亮度空间分布	103
6.4.4	灯具安装高度影响	104
6.5	内表面材料的影响	107
6.6	隧道夜间照明	110
6.7	照明类型对照明质量的影响	112
6.7.1	分析模型	113

6.7.2	不同照明类型下的照明指标分析	115
6.7.3	光通量对照明指标的影响分析	119
6.8	应急照明	122
6.9	眩光控制	122
	参考文献	122
第 7 章	隧道照明计算	124
7.1	隧道照明计算的特征	124
7.2	隧道照明计算的指标	124
7.2.1	计算指标	124
7.2.2	基础数据需求	125
7.3	直接光线计算	125
7.3.1	几何模型	125
7.3.2	道路亮度计算	126
7.3.3	道路亮度计算区域与计算点	126
7.3.4	道路水平照度计算	127
7.3.5	道路垂直照度计算	128
7.3.6	道路照度计算区域与计算点	128
7.3.7	墙壁亮度和照度计算	129
7.4	间接反射光线计算	129
7.5	常用的照明计算软件	130
7.5.1	计算模型	130
7.5.2	照明软件	132
	参考文献	133
第 8 章	隧道照明系统测量	134
8.1	照明测量的必要性及影响因素	134
8.1.1	照明测量的必要性	134
8.1.2	照明测量精度的影响因素	134
8.1.3	测量段落及时间选择	135
8.2	测量仪器	135
8.2.1	点式亮度计	135
8.2.2	成像式亮度计	136
8.2.3	照度计	137
8.3	隧道亮度测量	137
8.3.1	亮度计位置和测量区域	137
8.3.2	测点布置	138

8.4 隧道照度测量	138
8.4.1 照度测量的必要性	138
8.4.2 测点布置	139
参考文献	139

彩图

第 1 章 光及光学指标

1.1 光

光是能量的一种形式,其本质上是电磁波,任何一个光源都属于电磁波辐射源。电磁波按频率可分为长波、无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、伽马射线和宇宙射线,电磁波谱及可见光谱如图 1.1 所示。

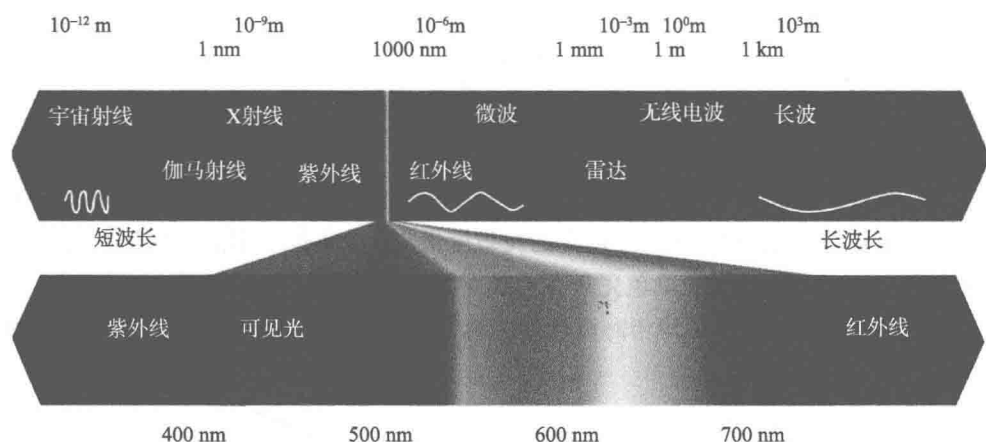


图 1.1 电磁波谱及可见光谱

能对人的视觉产生刺激并能被人眼所感受的电磁波称为可见光,波长范围在 380~780nm,不同波长的可见光具有不同的颜色,在光谱上从右到左的颜色依次为红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫。

光具有波粒二象性,在传播过程中主要表现为波动性,在与其他物质相互作用时主要表现为粒子性。

光在同一介质中是沿直线传播的,在真空中的传播速度 $c = 299792458\text{m/s}$,近似为 $3.0 \times 10^8\text{km/s}$,光在空气中的传播速度略小于真空中的传播速度。光在其他介质中的传播速度均小于真空中的传播速度,其在水中的传播速度约是真空中传播速度的 $3/4$ 。

1.2 光度学参数

道路照明和隧道照明涉及辐射度学的内容。辐射度学主要研究电磁波辐射的测试、计量和计算,其在可见光范围内称为光度学。光度学指标是道路照明和隧道照明的基础性指标。

1.2.1 辐射通量

以电磁波形式发射、传输和接收的能量统称为辐射能,用 Q_e 表示;单位时间内通过某特定区域或某立体角的辐射能称为辐射通量,用 Φ_e 表示。辐射能与辐射通量的关系为

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1.1)$$

1.2.2 光通量

研究表明,在明视觉状态下,当辐射通量相同时,人眼对不同波长可见光的灵敏度不同,对波长为 555nm 的单色光的灵敏度最高,也就是说当辐射的能量相同时,人眼感觉波长为 555nm 的单色光最亮,其对人眼的刺激程度最大。

人眼对各种波长的平均相对灵敏度,称为光谱光效函数或视见函数 $V(\lambda)$,如图 1.2 所示。

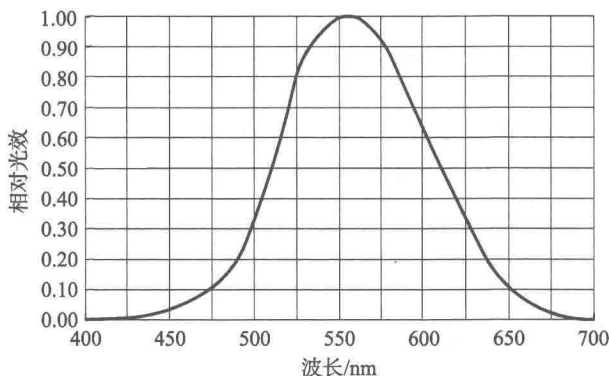


图 1.2 人眼在明视觉状态下的光谱相对光效

光通量是用“标准人眼”来度量的辐射通量,即人眼主观感受到的客观物理量。它等于辐射通量与光谱光效函数 $V(\lambda)$ 的乘积,单位为流明(lm)。当波长为 λ 时,对

于波长范围为 $d\lambda$ 的单色光, 其光通量 $d\Phi$ 为

$$d\Phi = V(\lambda)d\Phi_e(\lambda)d\lambda \quad (1.2)$$

对可见光范围 380~780nm 的波长区间进行积分, 得到光源(灯具)的总光通量为

$$\Phi = K \int_{380}^{780} \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} V(\lambda)d\lambda \quad (1.3)$$

式中, K 为光视效能, 即人眼对不同波长光的感知能力, 在明视觉状态下, 波长为 555nm 时的光敏度最高, 达到 683.002lm/W, 在暗视觉状态下, 波长为 505nm 时的光敏度最高, 达到 1700lm/W; λ 为可见光的波长。

需要注意的是, 光源的光通量大小与灯具的光通量大小是不同的, 光源的光通量只是光源本身的光通量, 而灯具的光通量是光源及壳体组成灯具后测得的。由于灯具反射器或者透镜的反射损失, 光源的光通量一般大于灯具的光通量。例如, 一盏额定功率为 100W 的高压钠灯输出的光通量约为 7000lm, 高压钠灯光源本身的光通量约为 11000lm。

1.2.3 辐照度

辐照度表示受照面单位面积上接受的辐射通量, 用 E_e 表示, 表达式为

$$E_e = \frac{\Phi_e}{dA} \quad (1.4)$$

式中, dA 表示面元。

1.2.4 光强

光源在三维空间内发出的光通量具有不均匀性。因此, 采用参数光强 I 来表示光源在不同方向上光通量的分布特征, 它表示点光源或面光源上面元 dA 在单位立体角 $d\Omega$ 内所辐射的光通量 $d\Phi$, 如图 1.3 所示。

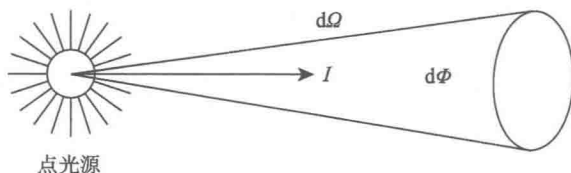


图 1.3 光强

光强 I 的表达式为

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1.5)$$

当光强在所有方向的光通量均匀分布时, 光强与光通量的关系如下:

$$\Phi = \int I d\Omega = 4\pi I \quad (1.6)$$

1.2.5 光谱功率分布

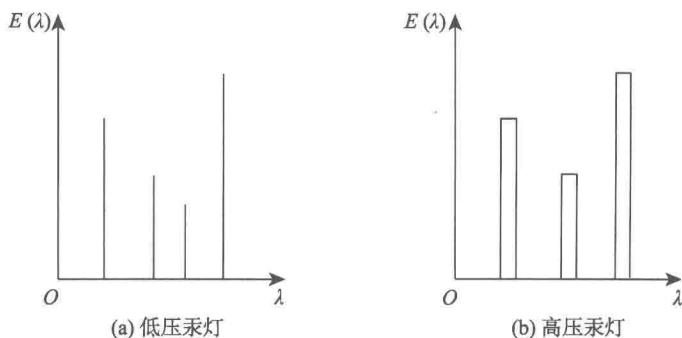
人眼视网膜上的锥状感光细胞能将颜色信号传递至大脑, 当光的波长为 380~480nm 时, 大脑会感知光是蓝色的, 随着波长的增加, 颜色变化的顺序依次为绿—黄—橙—红。

一般光源发出的光是由不同波长的单色光复合而成的, 因此需要量化光源发出光的颜色特性, 先要获得光源的光谱或者波长组成, 即光谱功率分布, 光谱功率分布描述了在可见光范围内每个特定波长或者频率的辐射功率。采用直角坐标系, 以波长或者频率为横坐标, 以辐射功率为纵坐标绘制曲线, 就可以得到光源的光谱功率分布。光谱功率分布是衡量光源发出光的颜色与能量分布的重要指标, 也是计算光的色温和显色性的基础指标。

光谱功率分布在形式上可以表达为绝对光谱功率分布和相对光谱功率分布两种类型。绝对光谱功率分布取辐射功率的绝对值绘制分布曲线, 仅针对某一特定的光源而言, 通常用 $E(\lambda)$ 表示, 如一盏高压钠灯的发光能量的分布情况。相对光谱功率分布是以最大辐射功率值为参考, 通过归一化处理后得到分布曲线, 表示某一类光源的光谱功率分布特征, 通常用 $S(\lambda)$ 表示, 它并不局限于某一特定的光源。

在分布形式上, 光源的光谱功率分布通常有以下四种典型的情况。

- (1) 线状光谱, 如低压汞灯的光谱分布, 如图 1.4(a) 所示。
- (2) 带状光谱, 如高压汞灯的光谱分布, 如图 1.4(b) 所示。
- (3) 连续光谱, 如白炽灯的光谱分布, 如图 1.4(c) 所示。
- (4) 混合光谱, 如荧光灯的光谱分布, 如图 1.4(d) 所示。



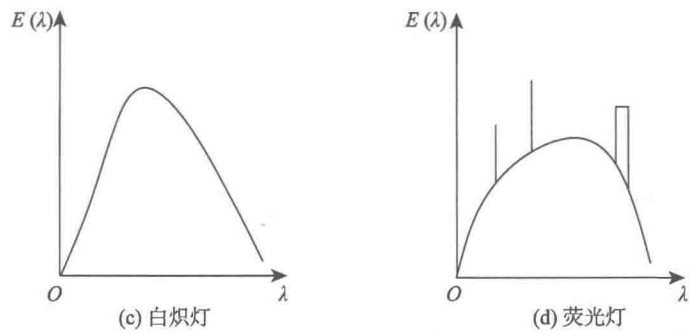


图 1.4 典型光源光谱分布形式

1.2.6 S/P 值

如前所述，在不同的视觉状态下，人眼对光的敏感度是不同的，S/P 值表示采用人眼暗视觉状态下的光谱光效函数 $V'(\lambda)$ 计算的光源光通量与采用人眼明视觉状态下的光谱光效函数 $V(\lambda)$ 计算的光源光通量的比值。作为光源的特性参数，光源的 S/P 值越高，光源在中间视觉和暗视觉中的光效就越高，对暗环境下的照明越有利。传统高压钠灯的 S/P 值较低，一般小于 1；LED 灯具、荧光灯等类型光源的 S/P 值较高，一般情况下等于或者大于 1；蓝光成分较多的 LED 灯具的 S/P 值能达到 2。光源的 S/P 值的计算公式为

$$S/P = \frac{1700 \int_0^\infty \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} \bar{v}'(\lambda) d\lambda}{683 \int_0^\infty \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda} \tag{1.7}$$

在隧道的中间段，人眼的视觉处于中间视觉范畴，采用 S/P 值较高的 LED 灯具，在消耗同样电能的条件下，驾驶者能够感知到亮度等级较高的照明，有利于行车安全和节能。

1.2.7 色温

假定某一纯黑物体能够将落在其上的所有热量吸收而没有反射出去，同时又能将热量转换为光，全部以“光”的形式释放出来，当其发射的光的颜色与某个光源所发射的光的颜色相同时，这个黑体加热的温度称为该光源的颜色温度，简称色温，通常用热力学温度(K)表示。色温是表示光源光谱质量最通用的指标。

白炽灯的辐射光谱与黑体比较接近，色品坐标点基本处于黑体轨迹上；而白炽灯以外的其他光源，如 LED 灯具等，其光谱分布与黑体相差较远，相对光谱功率分布所决定的色品坐标不一定准确地落在色品图的黑体温度轨迹上，只能用光源与黑体轨迹最近的颜色来确定该光源的色温，称为相关色温(correlated color

temperature, CCT)。计算相关色温的方法有内插法、三角垂足插值法、黑体轨迹法、模拟黑体轨迹弧线法和近似公式法等。

色温对人的主观感受有很大影响,在色温较低的光环境下人有“温暖”的感觉,心理上很放松,注意力不高;在色温较高的光环境下人有“冷”的感觉,注意力较高,能够使人保持清醒、镇定。

1.2.8 显色性

由于光源的光谱分布存在差异,在照射物体后,物体呈现的颜色会有所差异,这种差异在色度学上称为显色性差异,通过显色指数(color rendering index)量化这种差异,表示物体在人造光源照射下的显色状态和该物体在日光照射下的显色状态之间的接近程度。

1965年国际照明委员会(英语为 International Commission on Illumination, 法语为 Commission Internationale de L'Eclairage, 采用法语缩写为 CIE)发布了评价光源显色性的方法体系,并在 1974 年进行了修订,目前广泛使用的版本为 CIE 13.3—1995。当光源的色温不同时,光源显色性评价参照的标准光源是不一样的,在 CIE 13.3—1995 标准中定义了两种连续光谱的标准照明体作为参考光源,即普朗克辐射体和标准照明 D(组合日光),分别用于小于 5000K 的低色温测试光源和大于 5000K 的高色温测试光源。

显色指数通常用 R 表示,其中 R_i 表示特殊显色指数, R_a 表示一般显色指数。计算两个指数前要选择相应的检验色样,图 1.5 所示为 15 种标准色样。

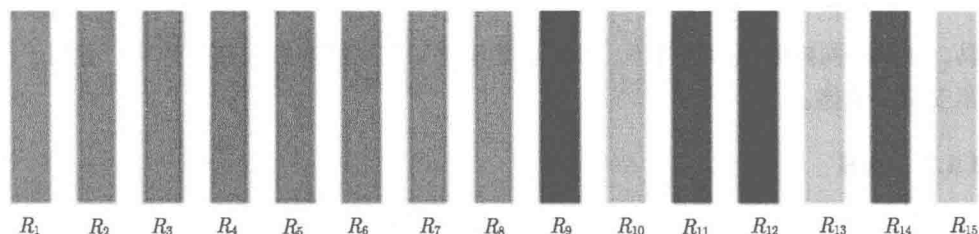


图 1.5 15 种标准色样

特殊显色指数 $R_i(i=1, 2, 3, \dots)$ 的计算公式如下:

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \quad (1.8)$$

式中, ΔE_i 为在待测光源和参考光源照射下第 i 个检验色样的色差。

一般显色指数 R_a 由 8 个特殊显示指数取算术平均值取得,其计算公式如下:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 R_j \quad (1.9)$$

1.3 道路照明质量参数

1.3.1 照度

照度表示光源投射到物体表面单位面积上的光通量，单位为勒克斯(lx)，其表达式为

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1.10)$$

当入射角度不垂直于入射面时，照度的大小遵循朗伯余弦定律，即物体表面的照度大小等于光通量除以面积和入射角余弦的乘积，如图 1.6 所示。

照度因所在平面或者曲面不同分为水平照度、垂直照度、柱面照度和半柱面照度。照度是客观、可精确测量的物理量，与观察者的观察方向和位置无关，通常作为道路照明质量评价标准之一。

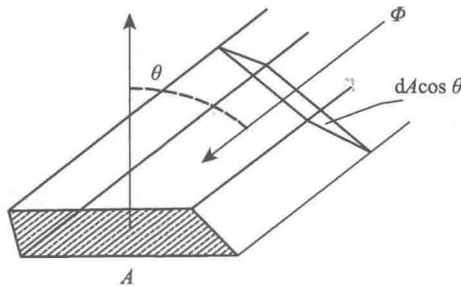


图 1.6 朗伯余弦定律

1.3.2 亮度

亮度是表示人眼感受物体表面反射光强弱的物理量，也表示从物体表面反射出的在特定方向上单位立体角内的光通量，单位为坎德拉/平方米(cd/m²)。物体表面的亮度主要与以下三个因素相关。

- (1) 投射在物体表面的光通量。
- (2) 物体表面的反射率。
- (3) 观察方向或者角度。

图 1.7 为亮度定义示意图。在物体表面 S 上取一个面积足够小的面元 dA ，观察

者的观察方向与物体表面 S 法线 n 的夹角为 θ , $d\Omega$ 为观察方向上的单位立体角, dI 为面元 dA 接收到的入射光光强, 则物体亮度可表达为

$$L = \frac{dI}{\cos \theta dA} = \frac{d^2 \Phi}{dA d\Omega \cos \theta} \quad (1.11)$$

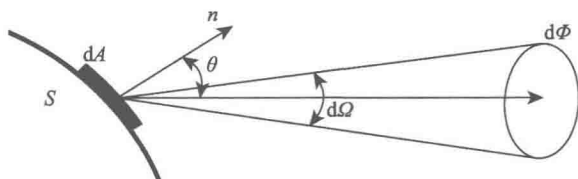


图 1.7 亮度定义示意图

亮度和照度都可以作为隧道照明质量的评价指标, 但是亮度和照度有本质的不同。亮度与照度的关系如图 1.8 所示, 路面上 A 点和 B 点的照度相同, 当路面的镜面反射特性较强时, B 点的亮度要低于 A 点的亮度。照度与观察者的位置、观察方向无关, 一般用于室内观察者的位置和观察角度经常变化的场所的照明质量评价, 如办公区、体育场和生产车间等。亮度大小与灯具的光强分布、观察面的反射率、观察者的位置和方向相关。在道路驾驶中, 驾驶者的视线夹角与前方路面的角度基本固定, 一般为 $0.5^\circ \sim 2^\circ$, 路面亮度的高低取决于经路面反射后的光线进入驾驶者眼睛的多少, 因此亮度指标更适合用于隧道照明质量的评价。

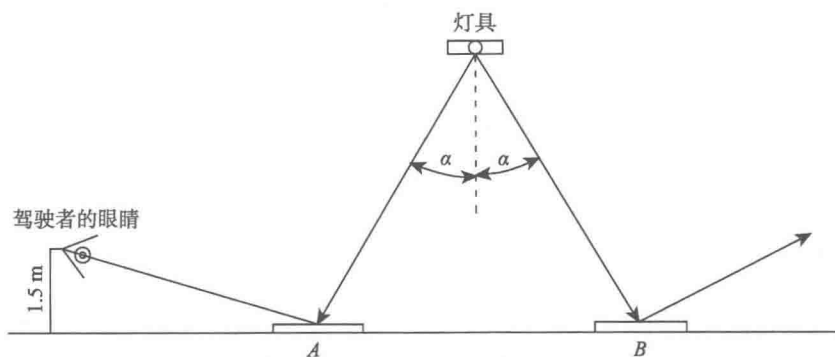


图 1.8 亮度与照度的关系

1.3.3 对比度

目标物能否被看见或者是否看得清晰、明确, 不仅与观察者的视力条件相关, 还与目标物本身的物理条件和环境相关。目标物与背景之间必须在亮度和颜色上与所在的背景有一定的差别, 物体才能被人眼觉察到, 即物体与背景之间必须有一定的对比度。在亮度上对比度的表达式为