

# T/SLDA

团 体 标 准

T/SLDA 026—2025

## 全光谱白光 LED 光谱质量评价与分级规范

Evaluation and grading specification for full-spectrum white LED  
spectral quality

2025-12-31 发布

2026-01-31 实施



## 目 次

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 前言 .....                | II  |
| 引言 .....                | III |
| 1 范围 .....              | 1   |
| 2 规范性引用文件 .....         | 1   |
| 3 术语和定义 .....           | 1   |
| 4 评价原则 .....            | 3   |
| 5 评价主体 .....            | 3   |
| 6 评价要求 .....            | 3   |
| 6.1 通则 .....            | 3   |
| 6.2 评价内容及等级划分 .....     | 3   |
| 7 评价指标要求 .....          | 4   |
| 7.1 基础指标 .....          | 4   |
| 7.2 评分项（共 100 分） .....  | 5   |
| 7.3 附加项 .....           | 5   |
| 8 测量方法 .....            | 5   |
| 8.2 评价指标测量 .....        | 6   |
| 8.3 数据分析 .....          | 6   |
| 附录 A（资料性）平均光谱差异 .....   | 7   |
| 附录 B（资料性）光谱近似度 .....    | 11  |
| 附录 C（资料性）平均寿命测试方法 ..... | 12  |
| 参 考 文 献 .....           | 13  |

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由普瑞光电(厦门)股份有限公司和深圳市照明与显示工程行业协会共同提出。

本文件由深圳市照明与显示工程行业协会归口。

本文件起草单位：普瑞光电(厦门)股份有限公司、深圳市照明与显示工程行业协会、深圳市明见怡然创新科技有限公司、深圳市极光光电有限公司、厦门市产品质量监督检验院、厦门大学、深圳爱图仕创新科技股份有限公司、深圳市顺铭启科技有限公司。

本文件主要起草人：张景琼、陈亚勇、景发俊、黄国林、王海英、陈静、刘科亮、郭伟杰、谢奕、葛莉茹、葛行艳、伍春平、郭奕棋。

# 引 言

研究全光谱（类太阳光谱）的目的是让人们在舒适健康的照明环境中工作和生活，应用于健康照明的全光谱（类太阳光谱）照明光源、灯具是人们获得舒适健康体验的直接载体。故，立足于市场的产品情况，制订全光谱（类太阳光谱）照明灯具的标准是行业应关注的重点之一，利于推动产品技术创新、质量水平提升及评价工作。

深圳市照明与显示工程行业协会规划了全光谱LED照明系列标准，原则上是以市场上各厂家关注的LED光源及封装、重点灯具、新型技术下的灯具、典型灯具和特殊用途灯具为基准。截止本标准正在制订之时，全光谱照明灯具系列标准包括：

- 全光谱落地灯技术规范；
- 全光谱吸顶灯技术规范；
- 全光谱一体式儿童学习桌灯技术规范；
- 全光谱白光LED光谱质量评价与分级规范；
- 其他全光谱照明灯具技术规范。

全光谱白光LED是一种高品质光，全光谱白光LED封装及其照明应用产品越来越受到市场青睐，市场规模逐年递增。在全光谱（类太阳光谱）LED封装一般显示指数普遍达到95及以上，以及光谱拟合度系数（GFC）在0.95及以上的情况下，进一步细化光谱质量提升评价方法，构建及完善全光谱（类太阳光谱）白光LED光谱质量评价体系。即通过制定《全光谱白光LED光谱质量评价分级规范》标准，提出相应的技术指标要求和测试评价方法，推动LED照明朝着健康、智能、高光效方向发展，更好服务消费者和市场，引导产业高质量发展。

本文件构建的全光谱白光LED光谱质量评价体系，核心为基于被测照明体（LED封装）的相关色温（CCT），选择相同色温的参照照明体（LED封装），计算参照照明体（LED封装）的相对光谱功率分布（SPD），作为基准光谱；将拟合度系数（GFC）、全光谱显色指数、颜色保真指数、色域指数、平均寿命等作为基础评价技术指标，采用ASD（平均光谱差异）作为全光谱白光LED光谱与黑体辐射光谱（普朗克曲线）BBC/CIE标准照明体匹配程度的定量评价指标，再结合光效、光谱稳定性对全光谱白光LED光谱质量进行分级评价，保证质量评价体系更加完善。

特别说明：行业中涉及的“全光谱”与“类太阳光谱”术语从本文件的实际应用意义上来看，并无区别，本系列标准取“全光谱”主因为“市场存在”，即“全光谱”为此类产品、技术的代名词。

从本义上看，全光谱（full spectrum）指覆盖太阳光全部可见光谱范围的光源技术，区别于普通LED的窄光谱。注意与“宽光谱”（wide-spectrum）的区分，后者可能不包含完整光谱连续性。类太阳光谱（solar-like spectrum）特指人工光源对太阳光谱的模拟程度，技术术语中也可用“sun-mimicking spectrum”（更强调仿生特性）或“daylight spectrum”（侧重色温表现）。



# 全光谱白光 LED 光谱质量评价与分级规范

## 1 范围

本文件规定了全光谱白光LED封装的光谱质量评价分级的评价原则、评价主体、评价要求、评价指标要求和测量方法。

本文件适用于各类全光谱白光LED封装的设计、生产、检验及应用。LED模块、LED灯及LED灯具等可参照执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2900.65 电工术语 照明

GB/T 5702 光源显色性评价方法

GB/T 24826 普通照明用LED产品和相关设备术语和定义

GB/T 39394 LED灯、LED灯具和LED模块的测试方法

QB/T 5208—2017 白光光源显色性评价方法

IES TM-30-20 IES光源显色性的评估方法 (IES method for evaluating light source color rendition)

## 3 术语和定义

GB/T 2900.65、GB/T 24826中界定的及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**全光谱白光 LED full-spectrum white LED**

指光谱范围覆盖可见光波段（380nm~780nm）且光谱连续性接近自然光的LED光源或LED封装。

注1：白光光谱范围为可见光波段380nm至780nm。

注2：白光LED能够发出连续、平滑且完整的光谱成分，光谱成分包括构成白光所必需的蓝、绿、红波段，还特别注重填充普通LED所缺失的青色和深红色区域，从而在光谱形态上无限逼近太阳光。

注3：以LED作为发光体通过光谱组合技术，在可见光区域模拟地表太阳光光谱。

注4：LED光源或LED封装对应GB/T 24826中3.16、3.20的定义。

### 3.2

**光谱功率分布 Spectral Power Distribution**

**SPD**

表征在可见光范围（380~780nm）各个波长上辐射功率（或辐射通量密度）的相对或绝对分布。

### 3.3

**拟合度系数 goodness-of-fit coefficient**

**e(GFC)**

被测光源在一定的波长范围内，根据相应的数学公式与目标光谱进行拟合所得到的数值，用来评估被测光源和目标光谱的相似程度。

拟合度系数e(GFC)按照公式（1）计算。

$$e(GFC) = \frac{\left| \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{LED} S_{Target} d\lambda \right|}{\left[ \left( \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{LED}^2 d\lambda \right)^{1/2} \left( \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{Target}^2 d\lambda \right)^{1/2} \right]} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$S_{LED}$  —— 被测LED器件的相对光谱功率分布；

$S_{Target}$ ——目标光源的相对光谱功率分布。光谱功率对560nm的强度值进行归一化；拟合波长范围：430nm~687nm；目标光谱的选择参考CIE 015—2018；

$\lambda_1$ ——选取基准光谱 $S_{Target}$ 范围的起始波长；

$\lambda_2$ ——选取基准光谱 $S_{Target}$ 范围的截止波长。

### 3.4

**平均光谱差异 average spectrum difference**

**ASD**

表征LED光源或其应用产品的光谱与标准光源的目标光谱间的平均差异值，见附录A。

### 3.5

**全光谱近似度 full-spectrum similarity**

**M**

表征相关色温下的光谱接近自然光谱的相似度M，见附录B。

注：确定为全光谱的基本条件是当光源与目标光谱的拟合度系数（GFC）大于0.95且颜色保真度指数（ $R_f$ ）大于95时。

### 3.6

**显色指数 color rendering index**

**CRI**

**$R$**

被测照明体照射物体所呈现的心理物理色与由参照照明体照射同一物体所呈现的心理物理色一致程度的度量，其中已考虑了适当的色适应状态。

注1：另见 CIE 13。

注2：本条目在 IEC 60050-845:1987 中编号为 845-02-61。

[来源：GB/T 2900.65—2023，845-22-109]

### 3.7

**特殊显色指数 CIE1974 special colour rendering index**

**$R_i$**

被测照明体照射 CIE 试样所呈现的心理物理色与由参照照明体照射同一试样所呈现的心理物理色一致程度的度量，其中已考虑了适当的色适应状态。

注 1：另见 CIE 13。

注 2：本条目在 IEC 60050-845:1987 中编号为 845-02-62。

[来源：GB/T 2900.65—2023，845-22-110]

### 3.8

**一般显色指数 CIE1974 general colour rendering index**

**$R_a$**

对于规定的一组8种试验色样的CIE 1974特殊显色指数的平均值。

注 1：另见 CIE 13。

注 2：本条目在 IEC 60050-845:1987 中编号为 845-02-63。

[来源：GB/T 2900.65—2023，845-22-111]

### 3.9

**相关色温 correlated colour temperature, CCT**

**$T_{cp}$**

在修正的1976 UCS图上，普朗克轨迹与测试色刺激的坐标用 $u'$ ， $2/3v'$ 表示，当普朗克辐射体与给定光谱分布的色品最为接近时的温度，单位为开尔文（K）。

[来源：GB/T 2900.65—2023，845-23-068]

### 3.10

**光效 luminous efficiency**

发出的光通量与所消耗功率之比，单位为流明每瓦（lm/W）。

[来源：GB/T 2900.65—2023，845-21-089]

### 3.11

颜色保真指数 color fidelity index

$R_f$

对于规定的一组99种试验色样的特殊颜色保真指数 $R_{f, \text{ces}, f}$ 的平均值。

注：数值从0~100，数值越高色彩真实度越佳。

[来源：QB/T 5208—2017，3.2]

### 3.12

色域指数 gamut index

$R_g$

表征被测照明体照射下颜色饱和度的参数，由99种试验色样分别在被测照明体和参考照明体条件下构建的色域多边形面积比计算得到。

注：附录A给出了99种试验色样的光谱反射因子。

[来源：QB/T 5208—2017，3.4]

## 4 评价原则

4.1 科学性：以光谱功率分布（SPD）客观数据为核心依据。

4.2 可操作性：评价方法应具有明确的测量标准和可重复性。

4.3 分级评价与管理：按综合得分分为AAAA、AAA、AA、A和B(不达标，差)五级，根据评价结果对产品进行质量分级，引导行业技术进步。

## 5 评价主体

5.1 制造商或产品提供商：负责产品自检，提供完整的光谱及性能参数，依据本标准进行自评，结果应标注“自评”。

5.2 第三方检测机构：经认证的光电检测实验室负责客观参数检测与验证，实施评价。

5.3 行业组织：制定评价标准，组织专家评审和认证工作。

## 6 评价要求

### 6.1 通则

6.1.1 客观性：以实验室实测光谱功率分布（SPD）数据及相应光电参数为唯一依据。

6.1.2 全面性：覆盖7.1基础指标、7.2评分项、7.3附加项全部要求。

6.1.3 一致性：相同型号样品取3个批次，结果取算术平均值。

### 6.2 评价内容及等级划分

#### 6.2.1 评价内容

6.2.1.1 评价指标体系包括以下指标：

a) 基础性指标：全光谱显色指数、颜色保真指数、色域指数、拟合度系数 $e(\text{GFC})$ 和平均寿命等；

b) 评分项指标：ASD、光效和光谱稳定性等；

c) 附加项（可选）指标：全光谱近似度（M）。

6.2.1.2 基础性指标评定结果应为达标或不达标，应在基础性指标全部达标时对评分项指标进行评价；评分项评定结果应为分值；附加项的评价见6.2.2中g)条要求。

6.2.1.3 各类评分项指标总分均应为100分。

#### 6.2.2 综合评分法

符合以下要求：

- a) 为 ASD、光效、光谱稳定性等指标赋予不同的权重 ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ );
- b) 综合得分按公式 (2) 计算权重分配;

$$S = \omega_1 \times S_{ASD} + \omega_2 \times S_{光效} + \omega_3 \times S_{光谱稳定性} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

S —— 总得分;  
 $S_{ASD}$ 、 $S_{光效}$ 、 $S_{光谱稳定性}$  —— 分别指 ASD、光效、光谱稳定性和等几类指标的得分;  
 $\omega_1 \sim \omega_5$  —— 评分项权重, 根据表 1 取值。

表 1 评分项权重

|                 |                |                   |
|-----------------|----------------|-------------------|
| ASD的 $\omega_1$ | 光效的 $\omega_2$ | 光谱稳定性的 $\omega_3$ |
| 0.50            | 0.30           | 0.20              |

- c) 评价等级应按总得分 S 确定;
- d) 根据综合得分按照表 2 评价光谱质量;

表 2 光谱质量等级划分规则

| 等级          | 分值范围                | 标识颜色 (宜) |
|-------------|---------------------|----------|
| AAAA        | $S \geq 95$         | 红色       |
| AAA         | $85 \leq S < 95$    | 黄色       |
| AA          | $75 \leq S < 85$    | 蓝色       |
| A           | $60 \leq S < 75$    | 绿色       |
| B (不达标 (差)) | $S < 60$ 或任一基础指标未达标 | 不予分级     |

注1: 可视化标识用颜色区分等级, 便于消费者识别。  
 注2: 绿色代表合格, 蓝色代表良好, 黄色代表优秀, 红色代表领先。

- e) 光谱质量等级从高到低分为 AAAA、AAA、AA、A 和 B(不达标, 差)五级, 应符合表 2 的规定;
- f) 光谱质量首先应满足基础性指标要求, 且每类评分项指标得分不应低于该类型满分值的 60%。当光谱质量评价总得分 S 分别不低于 60 分、75 分、85 分和 95 分时, 光谱质量等级应分别为 A、AA、AAA、AAAA;
- g) 质量评价总得分 S 高低确定等级高低, 采用附加项 (全光谱近似度 (M)) 参与质量评价时, 符合以下要求:
  - 1) 产品之间对比质量评价的 S 得分一致时, 可通过附加项指标水平高低进行等级高低评比;
  - 2) 当有技术或质量需求时, 可进行附加项质量评价。

## 7 评价指标要求

### 7.1 基础指标

#### 7.1.1 全光谱显色指数

全光谱显色指数符合以下要求:

- a) 全光谱一般显色指数  $R_{1-8}$  不应低于 95;
- b)  $R_9$ 、 $R_{12}$  不应低于 90;
- c) 其他  $R_i$  不应低于 95。

注: 显色指数 (CRI) Ra 值, 反映光源还原物体真实颜色的能力, R9 值反映红色还原能力, R12 值反映饱和和蓝还原能力。

### 7.1.2 颜色保真指数 ( $R_f$ )

颜色保真指数 $R_f$ 应大于或等于95。

### 7.1.3 色域指数 ( $R_g$ )

色域指数 $R_g$ 应大于或等于95。

### 7.1.4 拟合度系数 $e$ (GFC)

光谱功率分布的拟合度系数 $e$ (GFC)应大于或等于0.95。

### 7.1.5 平均寿命

当LED在 $T_c$ 点温度恒定维持在105℃的严苛条件下进行测试,其光通量衰减到初始值70%的时间不低于36000 h。

## 7.2 评分项 (共 100 分)

全光谱白光LED光谱质量评分见表3。

表 3 全光谱白光 LED 光谱质量评分表

| 编号 | 评分项                                                   |                                 | 评分                                                                  |                            |                              |
|----|-------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------|
|    |                                                       |                                 | 100分                                                                | 80分                        | 60分                          |
| 1  | ASD<br>(100分)                                         | ASD <sub>1</sub><br>(425-690nm) | ≤12%                                                                | ≤15%                       | ≤20%                         |
|    |                                                       | ASD <sub>2</sub><br>(425-474nm) | ≤20%                                                                | ≤25%                       | ≤35%                         |
|    | 注: ASD的评分取ASD1和ASD2的评分较小值, ASD的计算光谱以热态为准, 更接近实际灯具的使用。 |                                 |                                                                     |                            |                              |
| 2  | 光效<br>(100分)                                          |                                 | ≥140 lm/W                                                           | ≥130 lm/W                  | ≥120 lm/W                    |
|    |                                                       |                                 | 注: 0.2W 4000K光效 (lm/W), 反映光源的能效。                                    |                            |                              |
| 4  | 光谱稳定性<br>(100分)                                       |                                 | ASD1 变化量≤0.6%,<br>ASD2 变化量≤2%                                       | ASD1 变化量≤1%,<br>ASD2变化量≤3% | ASD1 变化量≤1.5%,<br>ASD2变化量≤4% |
|    |                                                       |                                 | 注: 光谱稳定性采用ASD变化量进行比较, 将0 H与老化1000H的光谱计算ASD进行差值对比; ASD变化量取绝对值, 都为正数。 |                            |                              |

## 7.3 附加项

### 7.3.1 全光谱近似度 (M)

相关色温为4000 K时,全光谱被测照明体总的光谱近似度 (M) 应大于或等于60%,光谱近似度 (M) 计算方法见附录B。

当满足本条要求时,根据M值确定质量水平高低;不满足本条要求时,评价为不达标。

## 8 测量方法

### 8.1.1 测量准备

按照以下要求准备:

- 样品: 选择符合要求的全光谱白光 LED 样品, 确保样品在测试前处于稳定状态;
- 仪器: 使用符合国家标准的测量设备, 进行光谱质量的测量, 如分光辐射度计 (波长范围 380~780 nm, 带宽≤5nm)、色温计、光通量计等;
- 温度条件: 25℃±1℃, 稳定工作 30 min 后测量;
- 采样间隔: ≤1 nm。

### 8.1.2 测量报告

应内容完整, 数据准确、结论清晰; 应包括以下内容:

- a) 工程项目名称、地点和委托单位；
- b) 测量日期、时间和环境条件；
- c) 测量依据；
- d) 测量设备；
- e) 测量项目；
- f) 测点布置图和装置布置图；
- g) 测量数据；
- h) 测量结论。

## 8.2 评价指标测量

8.2.1 相关色温 (CCT)：根据 GB/T 5702 中规定的方法测量光源相关色温值 (报告实测值)。

8.2.2 全光谱显色指数：照 GB/T 39394 中的相应试验方法进行测量，通过标准色样进行显色指数测试，记录测量结果。

8.2.3 颜色保真指数 ( $R_f$ ) 和色域指数 ( $R_g$ )：依据 QB/T 5208—2017 的第 4 章分别计算颜色保真指数和色域指数，或依据 IES TM-30-20 中规定的方法测量。

8.2.4 拟合度系数 (GFC)：按照 3.4 中规定的计算方法进行测量计算，宜按照以下步骤进行目标光谱的相似性计算。

- a) 首先确定实验光谱的相关色温 (CCT)；
- b) 根据实验光谱的色温按照建议的规则选择目标光谱；

注：目标光谱选择：为统一计算基准，建议相关色温在 4000K 以下时，采用黑体辐射光谱 (普朗克曲线) 作为目标；相关色温在 4000K 至 25000K 时，采用 CIE (国际照明委员会) 定义的昼光光谱 (D 系列) 作为目标。

- c) 对实验光谱按照 560 nm 的强度值进行归一化处理；
- d) 针对相应的目标光谱，通过 CIE 昼光公式进行计算；
- e) 按照公式 (1) 计算拟合度系数 (GFC)。

8.2.5 平均光谱差异系数 (ASD)：按照附录 A 给出的计算方法进行测量计算。

8.2.6 全光谱近似度 (M)：按照附录 B 给出的计算方法进行测量计算。

8.2.7 光效：按照 GB/T 39394 中的相应试验方法进行试验，使用光通量计测量样品的的光通量，确保在标准测试条件下进行。

8.2.8 平均寿命：测量及推算方法如下。

使用有 ANSI/IES LM-80-20 测试报告的 LED 封装 (器件) 时，按照 GB/T 7000.1—2023 中 12.4.1 的方法测试 LED 封装 (器件) 焊点的最高温度 ( $T_c=105^\circ\text{C}$ )、按照 GB/T 31897.201 或 ANSI/IES LM-79-19 测得 LED 封装 (器件) 的最大正向电流，将实测值与 ANSI/IES LM-80-20 测试报告验证符合后，依据 GB/T 41423 推算产品的寿命，可将测试报告中 LED 封装 (器件) 的 3000h 和 6000h 光通维持率作为灯具 3000h 和 6000h 的光通维持率。具体方法见附录 C。

8.2.9 光谱稳定性

采用平均光谱差异系数 (ASD) 的变化量进行评估，具体方法为：比较同一 LED 光源在老化 0 小时与老化 1000 小时后的光谱，分别计算其在 425-690nm ( $ASD_1$ ) 和 425-474nm ( $ASD_2$ ) 两个波段的 ASD 值，并以该值的变化量 (取绝对值) 作为稳定性评分依据。

## 8.3 数据分析

对测量数据进行分析，计算各项指标，判断样品是否符合标准要求，并进行分级。按以下步骤数据采集与预处理：

- a) 选择符合要求的全光谱白光 LED 样品；

注：可覆盖不同 CCT，如 2700K-6500K；不同 CRI 等级；不同技术类型，如蓝光芯片+YAG 荧光粉、蓝光芯片+红绿荧光粉、紫光芯片+RGB 荧光粉、全光谱等。

- b) 在标准条件下 (积分球、恒流驱动、热稳定后) 精确测量每个样品的 SPD 数据 (波长范围通常 380~780nm，间隔 1~5nm)；
- c) 对 SPD 数据进行必要的预处理，比如暗电流校正、波长校准、杂散光校正、归一化等；
- d) 光谱质量等级划分的确定：根据第 6、7 章的要求，将上述 (8.2) 测量和计算的结果，确定光谱质量等级。

附录 A  
(资料性)  
平均光谱差异

### A.1 平均光谱差异

ASD 用来评估被测照明体 (LED 封装) 和标准照明体的光谱相似程度。将 LED 测试照明体和标准照明体 (参考光源) 在每个波长单位的光谱辐射功率能量差, 并用百分比来表示偏差。在一定的波长范围内, 每个区间 1nm, 对该区间的 n 个值的绝对值进行平均以产生单个值, 其辐射光谱功率分布 SPD 按照 TM30 的归一方式, 将三刺激值 Y=100 轴归一化, 再按照公式 (A.1) 计算平均光谱差异 ASD。

$$ASD = \frac{\sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} \left| \frac{\Phi_{ref} - \Phi}{\Phi_{ref}} \right|}{\lambda_2 - \lambda_1 + 1} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$\Phi_{ref}$  ——参考光源按照 Y=100 进行归一的光谱功率分布;

$\Phi$  ——被测 LED 器件按照 Y=100 进行归一的光谱功率分布;

$\lambda_1/\lambda_2$  ——计算平均光谱差异的波段范围,  $\lambda_1$  为 425nm,  $\lambda_2$  分别为 474nm 和 690nm。

### A.2 计算基准光谱

基于被测照明体的相关色温 (CCT), 选择相同色温的参照照明体, 计算参照照明体的相对光谱功率分布 (SPD)  $S(\lambda)$ , 作为基准光谱。参考照明体光谱的选择可参考 CIE 015—2018。

- a) 当参照照明体相关色温  $CCT \geq 4000K$  时, 选取等色温的 CIED 系列日光照明体光谱功率分布作为基准光谱。

在 1931 ( $x, y$ ) 色度坐标中, 日光 (D) 照明体按照计算公式 (A.2) 定义相关关系。

$$y_D = -3.0x_D^2 + 2.870x_D - 0.275 \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$x_D$ ——在 0.250 和 0.380 之间, 日光 (D) 的相关色温  $T_{CP}$  与  $x_D$  的关系由基于 CIE 1960 均匀色度图的普朗克轨迹法向的下列等式 (A.3)、(A.4) 确定。

当参照照明体相关色温为  $4\ 000\ K \leq CCT \leq 7\ 000\ K$  时,  $x_D$  的计算公式为 (A.3)。

$$x_D = \frac{-4.6070 \times 10^9}{T_{CP}^3} + \frac{2.9678 \times 10^6}{T_{CP}^2} + \frac{0.09911 \times 10^3}{T_{CP}} + 0.244063 \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

当参照照明体相关色温为  $7000\ K < CCT \leq 25000\ K$  时,  $x_D$  的计算公式为 (A.4)。

$$x_D = \frac{-2.0064 \times 10^9}{T_{CP}^3} + \frac{1.9018 \times 10^6}{T_{CP}^2} + \frac{0.24748 \times 10^3}{T_{CP}} + 0.237040 \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

$T_{CP}$  ——以 K 为单位的相对色温。

参考照明体 (光源) 相对光谱功率分布按照公式 (A.5)。

$$S_D(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

式中:

$S_0(\lambda)$ ,  $S_1(\lambda)$ ,  $S_2(\lambda)$  ——波长  $\lambda$  的函数, 参见 CIE 015—2018 中表格 6。

其中,  $M_1$  和  $M_2$  分别由计算公式 (A.6)、(A.7) 给出。

$$M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703x_D + 5.9114y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D} \dots\dots\dots (A.6)$$

$$M_2 = \frac{0.0300 - 31.4424x_D + 30.0717y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D} \dots\dots\dots (A.7)$$

b) 相关色温在 4000K 以下照明体（光源）采用黑体辐射谱功率分布，不同色温和黑体辐射光谱按照公式 (A.8) 确定。

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1} \dots\dots\dots (A.8)$$

式中：

- T——色温；
- h——普朗克常数；
- c——光速  $2.998 \times 10^8 \text{m/s}$ ；
- K——玻尔兹曼常数；
- $T_B$ ——黑体绝对温度；
- $\lambda$ ——辐射波长。

### A. 3 典型示例评测

#### A. 3. 1 基于人眼视觉敏感区，科学定义评测范围

ASD 的计算波长范围 425nm~690nm 与人眼明视觉函数  $V(\lambda)$  的高响应区高度一致，覆盖其曲线下总面积的 99.9%。在此基础上，进一步细化对 425nm~474nm 蓝光波段的评测。见图 A. 1。

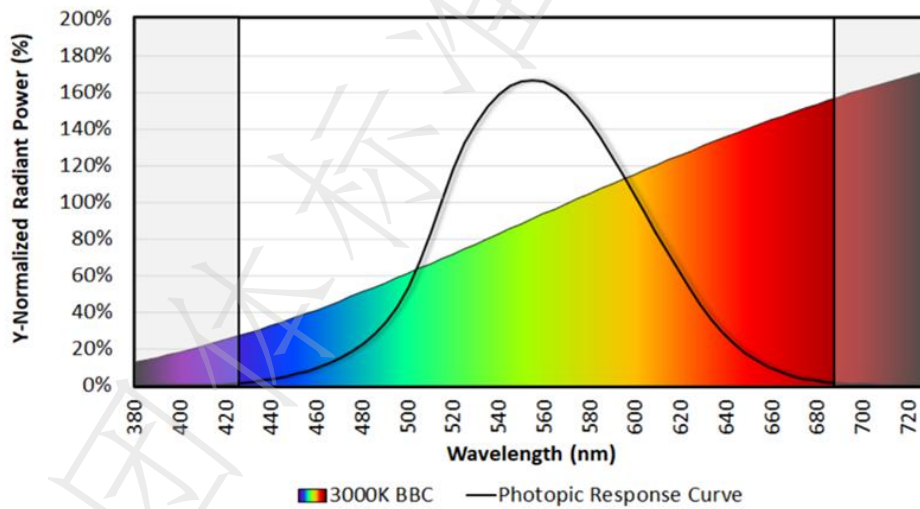


图 A. 1 明视觉反应曲线

#### A. 3. 2 与自然参考光谱直接比对

与自然参考光谱直接比对，ASD 揭示传统指标未能反映的差异。以 3000K 色温为例，自然光（黑体辐射曲线）ASD 为 0%，典型示例 LED CRI 98 的 ASD 为 9%；CRI 98 的传统 LED 光源 ASD 高达 18%。

表 A. 1 3000K 色温下典型示例 LED 的 ASD、TM-30 ( $R_f/R_g$ ) 和 CRI 值对比表

| 评估指标  |                | 自然光 | 典型示例 LED | 80 CRI | 90 CRI | 98 CRI |
|-------|----------------|-----|----------|--------|--------|--------|
| ASD   |                | 0%  | 9%       | 28%    | 20%    | 18%    |
| CRI   | R <sub>a</sub> | 100 | 98       | 83     | 92     | 98     |
|       | R <sub>f</sub> | 100 | 98       | 84     | 91     | 94     |
| TM-30 | R <sub>g</sub> | 100 | 101      | 93     | 97     | 102    |

以上说明高 CRI 并不等同于光谱的高自然度。ASD 清晰地揭示，即便 CRI 相同，不同光源的光

谱形态仍可能与自然光存在显著差异。

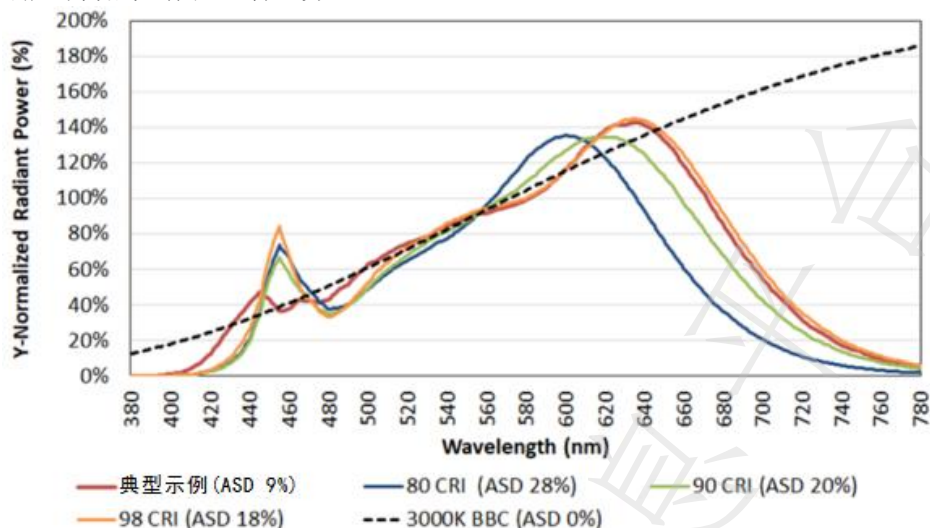


图 A.2 典型示例 LED 的 ASD、TM-30 ( $R_f/R_g$ ) 和 CRI 值对比示例图

### A.3.3 典型示例产品的光谱表现

典型示例产品 LED 封装技术，在 2700K~6500K 全色温的白光 LED 产品上实现接近自然光光谱。不同色温的 TM-30 ( $R_f/R_g$ )、CRI 值尽管一样，而 ASD 能够更加敏感地揭示出不同色温光源间光谱质量的细微差异，见表 A.2。

表 A.2 不同色温下 ASD、TM-30 ( $R_f/R_g$ ) 和 CRI 值

| CCT   | ASD | TM-30 |       | 典型 CRI 和 CRIR 值 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     |
|-------|-----|-------|-------|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|       |     | $R_f$ | $R_g$ | $R_a$           | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 | R10 | R11 | R12 | R13 | R14 | R15 |
| 2700K | 10% | 97    | 100   | 98              | 98 | 99 | 95 | 94 | 97 | 99 | 98 | 98 | 93 | 97  | 92  | 92  | 99  | 96  | 98  |
| 3000K | 9%  | 98    | 101   | 98              | 98 | 99 | 95 | 93 | 97 | 99 | 96 | 97 | 97 | 98  | 92  | 93  | 98  | 96  | 97  |
| 3500K | 8%  | 97    | 100   | 98              | 98 | 98 | 97 | 98 | 98 | 98 | 98 | 97 | 93 | 97  | 97  | 95  | 98  | 97  | 98  |
| 4000K | 8%  | 96    | 99    | 98              | 99 | 98 | 96 | 98 | 99 | 98 | 98 | 98 | 95 | 95  | 97  | 94  | 99  | 97  | 99  |
| 5000K | 9%  | 96    | 99    | 98              | 99 | 98 | 96 | 97 | 98 | 96 | 97 | 97 | 92 | 94  | 97  | 92  | 98  | 98  | 99  |
| 5700K | 9%  | 96    | 99    | 98              | 98 | 98 | 97 | 95 | 98 | 97 | 96 | 95 | 92 | 97  | 96  | 96  | 98  | 98  | 97  |
| 6500K | 8%  | 96    | 99    | 98              | 98 | 98 | 98 | 98 | 97 | 96 | 99 | 99 | 96 | 98  | 98  | 91  | 98  | 99  | 97  |

以 6500K 高色温为例，典型示例 LED 的 ASD 为 8%；示例 2（市面某产品）LED 的 ASD 高达 27%，LED 通过对蓝光峰值的有效抑制、红光增强以及光谱平滑化处理，显著降低了与自然光的光谱差异，见图 A.3。

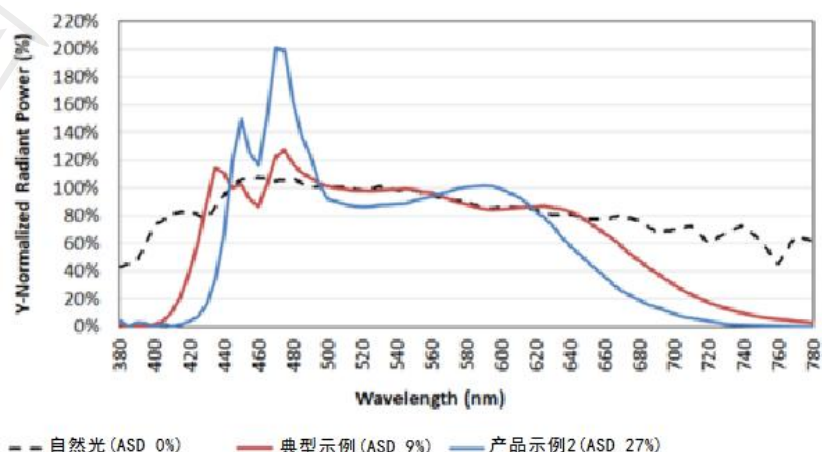


图 A.3 典型示例 LED 与示例 2（市面某产品）LED 的 ASD 对比图

#### A.3.4 典型示例产品满足照明视觉效应的色彩指标

当 TM-30 颜色保真度  $R_f \geq 92$  时，人眼难以察觉该颜色样本在测试光源与自然光下的差异。典型示例在 3000K 时的 99 个颜色样本中 97 个  $R_f \geq 92$ ，示例 2（市面某产品）仅有 69 个达标。这从视觉感知层面验证了低 ASD 值的实际意义，即在典型示例 LED 光源照射下，人眼几乎觉察不到其与自然光源照射下的色彩差异。见图 A.4。

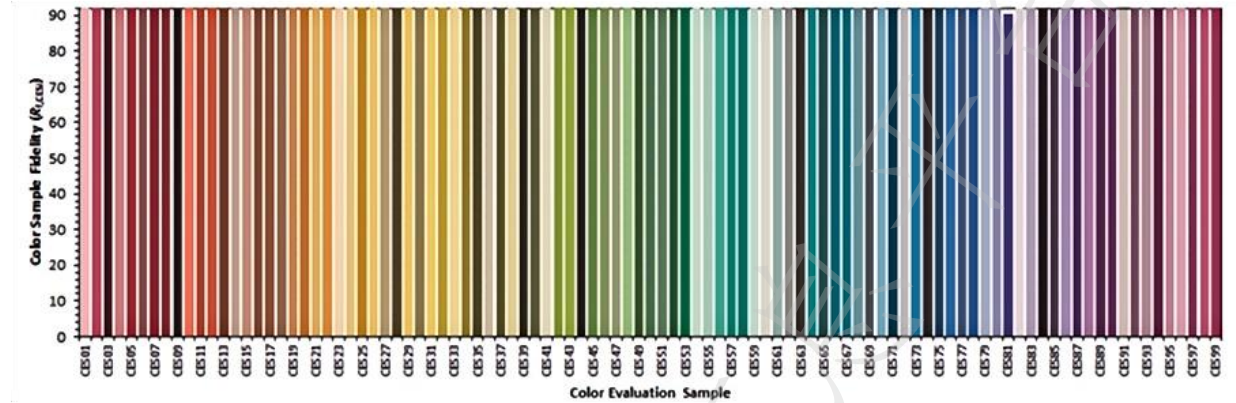


图 A.4 典型示例产品满足照明视觉效应的色彩指标

#### A.3.5 典型示例产品契合照明非视觉效应和节律指标

典型示例 LED 在黑视素比率（Melanopic Ratio, MR）、节律作用因子（Circadian Action Factor, CAF）、节律刺激值（Circadian Stimulus, CS）等非视觉效应和节律指标上也与自然光差异极小，普遍低于  $\pm 4\%$ ，表明典型示例 LED 能够协同支持人体自然的生理节律，见表 A.3。

表 A.3 典型示例 LED 非视觉效应和节律指标与自然光的差异

| CCT   | 黑视素比率(MR) |       |       | 节律作用因子(CAF) |       |       | 节律刺激值(CS)<br>300 lux 眼部照明(Eye illuminance) |       |       |
|-------|-----------|-------|-------|-------------|-------|-------|--------------------------------------------|-------|-------|
|       | 典型示例      | 自然光   | 差异    | 典型示例        | 自然光   | 差异    | 典型示例                                       | 自然光   | 差异    |
| 2700K | 0.515     | 0.522 | -1.3% | 0.337       | 0.353 | -4.5% | 0.297                                      | 0.302 | -1.7% |
| 3000K | 0.598     | 0.603 | -0.8% | 0.419       | 0.28  | -2.1% | 0.328                                      | 0.331 | -0.9% |
| 3500K | 0.669     | 0.679 | -1.5% | 0.486       | 0.501 | -3.0% | 0.358                                      | 0.360 | -0.6% |
| 4000K | 0.739     | 0.734 | 0.7%  | 0.536       | 0.557 | -3.8% | 0.249                                      | 0.256 | -2.7% |
| 5000K | 0.945     | 0.934 | 1.2%  | 0.744       | 0.759 | -2.0% | 0.341                                      | 0.337 | -1.2% |
| 5700K | 1.024     | 1.016 | 0.8%  | 0.828       | 0.840 | -1.4% | 0.361                                      | 0.366 | -1.4% |
| 6500K | 1.093     | 1.079 | 1.3%  | 0.898       | 0.912 | -1.5% | 0.385                                      | 0.391 | -1.5% |

附录 B  
(资料性)  
光谱近似度

相关色温下的光谱接近自然光谱用相似度进行表征。根据被测照明体的相对光谱功率分布 (SPD)  $A(\lambda)$  和参照照明体的相对光谱功率分布 (SPD)  $S(\lambda)$  (基准光谱计算见A.2), 计算得出被测照明体的光谱近似度M。

光谱相似度典型值 (人眼明视觉函数 $V(\lambda)$ 和430~650 nm波段范围的光谱相似度典型值、400~470 nm和650~680 nm范围的相似度典型值)与太阳光谱对比的光谱相似度M按照公式(B.1)进行计算。

$$M=1-\frac{\left| \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} A(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) d\lambda \right|}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) d\lambda} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

- M ——为光谱相似度;
- $\lambda_1$  ——对应波段的起始波长;
- $\lambda_2$  ——对应波段的截止波长;
- $S(\lambda)$  ——基准光谱的SPD;
- $A(\lambda)$  ——被测照明体的SPD。

示例:

相关色温为4000 K时, 全光谱的光谱特性近似度应符合表4要求, 其总的光谱近似度M应 $\geq 60\%$ 。

表 5 全光谱光谱近似度

| 光色 | 波长/nm   | 近似度       |
|----|---------|-----------|
| 红  | 700~780 | $\geq 20$ |
| 红  | 680~700 | $\geq 45$ |
| 红  | 650~680 | $\geq 75$ |
| 红  | 622~640 | $\geq 80$ |
| 橙  | 597~622 | $\geq 85$ |
| 黄  | 577~597 | $\geq 85$ |
| 绿  | 492~577 | $\geq 85$ |
| 青  | 475~492 | $\geq 85$ |
| 蓝  | 450~475 | $\geq 80$ |
| 紫  | 380~450 | $\geq 40$ |

附录 C  
(资料性)  
平均寿命测试方法

### C.1 测试标准

数据采集遵循 IES LM-80-20。

寿命推算遵循 IES TM-21-19，国内依据 GB/T 41423—2022。

### C.2 样品与条件

按照以下要求准备样品机测试条件：

- a) 测试条件：测试温度( $T_s$ )包含 LED 封装体（或灯珠）壳体的温度点  $T_c=105^\circ\text{C}$ 。设置另外 1~2 个温度点（如  $85^\circ\text{C}$ 、 $125^\circ\text{C}$ ）以进行模型校准；
- b) 控制对象：通过热电偶精确测量并控制样品焊盘或指定点的温度稳定在  $105^\circ\text{C}$ （明确控制的是 LED 的壳温 ( $T_c$ )，而非环境温度)；
- c) 驱动电流：在额定电流下进行。

### C.3 测试流程

测试步骤如下：

- a) 初始光通量(0 h)测量：作为基准值；
- b) 长期持续点亮：在恒定的  $105^\circ\text{C}$  壳温和额定电流下，样品需连续或周期性（如 12 h 开/12 h 关）工作；
- c) 定期测量：按标准要求的时间间隔（如每 500 h、1000 h）将样品取出，冷却到标准温度后，在积分球系统中测量其光通量；
- d) 最低测试时长：至少 6000 h，这是 TM-21 模型进行可靠推算的基本数据要求

### C.4 数据处理与推算

按照以下方法进行数据处理与推算：

- a) 计算各时间点的光通维持率（当前光通量/初始光通量）；
- b) 使用 TM-21 方法对  $105^\circ\text{C}$  下的光衰数据进行指数曲线拟合，建立数学模型；
- c) 利用该模型将测试曲线外推，计算出光通维持率下降至 70% 时对应的 L70 寿命预测值。

### C.5 寿命报告

最终报告应给出在  $T_c=105^\circ\text{C}$  的测试条件下，依据 GB/T 41423 或 IES TM-21-19 推算出的 L70 预测寿命。

## 参 考 文 献

- [1] GB/T 2893.1 图形符号 安全色和安全标志 第1部分：安全标志与安全标记的设计原则
  - [2] GB/T 7921 均匀色空间和色差公式
  - [3] T/SCA/TR 008—2019 类太阳光LED术语定义及相关问题研究
  - [4] CIE 015: 2018 Colorimetry, 4th Edition (色度学第四版)
  - [5] CIE 13 Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources(光源显色性的测量方法和规定)
  - [6] CIE 1931 色度系统
  - [7] CIE 1976 ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) 色空间
  - [8] CIE 224:2017 Color Fidelity Index for accurate scientific use
  - [9] CIE S 026/E:2018 光生物安全标准
  - [10] IEC 60050-845 International electrotechnical vocabulary (IEV)-Part 845: Lighting(国际电工词汇 (IEC) -第845部分：照明)
  - [11] IEC 62471 灯和灯系统的光生物安全 (Photobiological safety of lamps and lamp systems)
  - [12] IEC/TR 62778 IEC62471在光源和照明产品蓝光危害评价方面的应用 (Application of IEC 62471 for the assessment of blue light hazard to light sources and luminaires)
  - [13] IES TM-30-18 光源显色性评估方法 (IES method for evaluation light source color rendition)
  - [14] CIE 13 光源显色性测量与确定方法 (Method of Measuring and specifying colour rendering properties of light sources)
-