



# 辐射度、光度与色度学综合实验

## Comprehensive Experiment on Radiometry, Photometry and Colorimetry

### ——实验测试数据报告及分析

---

实验课程：光度学与色度学基础

小组成员：陈勃嫣 林承阳 周智辉 祝庆

指导教师：顾晓娟 鲁梦河

完成日期：2026年4月16日

# 目 录

<b>1 实验原理简述</b>	<b>1</b>
1.1 辐射度量与光度量的物理转换机制	1
1.2 照度空间分布的叠加性与距离衰减律	1
1.3 基于积分球原理的电光转换效率测量	1
1.4 CIE 1931 标准色度系统特征参量提取	2
<b>2 实验结果与数据记录</b>	<b>3</b>
2.1 光度学与辐射度学的测量响应比较	3
2.2 光度学基本空间定律验证数据	3
2.3 固态光源电光转换效率测定	3
2.4 多色发光二极管色度学参数提取	4
<b>3 结果讨论与误差分析</b>	<b>5</b>
3.1 记错数据反而验证了“人眼看不见红外线”	5
3.2 没关严灯导致红光被“稀释”	5
3.3 距离太近导致灯泡不能算作“点”	5
3.4 电压不够导致二极管“发热不发光”	5
<b>4 团队协作与分工</b>	<b>7</b>

# 1 实验原理简述

本综合实验旨在通过定标、测试与定量分析，系统建立辐射度学、光度学及色度学的理论体系与实践量测方法。实验主要涵盖四个核心模块：量值溯源与光度学对比、光度学基础空间定律验证、光源电光效率测定以及基于 CIE 标准系统的色度学表征。

## 1.1 辐射度量与光度量的物理转换机制

辐射度学是对全电磁波段辐射能量的客观物理计量，而光度学则是建立在人眼视觉生理特性基础上的心理物理量。两者的桥梁为国际照明委员会（CIE）所确定的光谱光视效率函数  $V(\lambda)$ 。其能量到光视效应的转换方程为：

$$\Phi_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中， $K_m = 683 \text{ lm/W}$  为最大光谱光视效能，表征在明视觉最敏感波长（555 nm）处每瓦绝对物理辐射功率所激发的视觉光通量（流明）。

## 1.2 照度空间分布的叠加性与距离衰减律

光照度  $E$  被定义为入射至给定面元上的光通量表面密度。在多光源独立作用的线性光学系统中，满足照度叠加定律：即靶面总照度等于各点光源单独存在时所激发的照度量之和， $E = \sum_i E_i$ 。

对于各项同性的理想点光源，其在法向接收面上建立的光照度服从距离平方反比定律。若光源在指定方向的发光强度为  $I$ ，传播距离为  $l$ ，则接收面上的照度遵循下式：

$$E = \frac{I}{l^2} \quad (2)$$

## 1.3 基于积分球原理的电光转换效率测量

电光转换效率  $\eta$  是评价半导体固态光源（如 LED）能量利用率的核心指标，定义为输出光通量  $\Phi$  与输入电功率  $P$  之比（ $\eta = \Phi / (U \cdot I)$ ）。受限于发光面的几何复杂性，本实验采用辐射式积分球进行全空间光通量的相对测量。根据朗伯漫反射定律与积分球多次反射理论，球壁探测窗口的稳定照度  $E_M$  与置入球内的光源总光通量成严格正比。通过引入已知光通量  $\Phi_s$  的标准卤钨灯进行系统定标（ $E_s$ ），即可依据替代法方程解算待测光

源光通量  $\Phi_c$ :

$$\Phi_c = \frac{E_c}{E_s} \cdot \Phi_s \quad (3)$$

#### 1.4 CIE 1931 标准色度系统特征参量提取

光源的颜色特征可通过其相对光谱功率分布  $S(\lambda)$  与 CIE 1931 标准色匹配函数  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  的卷积积分, 获取颜色三刺激值  $X, Y, Z$ 。在此基础上进行归一化处理, 投影至二维色品图以获得色品坐标  $(x, y)$ 。进一步结合参照白点坐标, 可推导表征光源色调特征的主波长、表征单色光饱和程度的色纯度, 以及相关色温和一般显色指数。

## 2 实验结果与数据记录

### 2.1 光度学与辐射度学的测量响应比较

Table 1: 红外 LED 与白光 LED 辐射功率与测量响应对比表

光源类型	全谱辐射功率 $P_e$ (mW)	测量记录值 $E_v$
红外 LED (850 nm)	52.8	0.001
白光 LED	32.5	0.009

### 2.2 光度学基本空间定律验证数据

Table 2: 多光源照度叠加定律验证记录

测量基准距离	20cm	10cm	30cm	40cm	60cm
标准白光独立响应 $E_S$ (lx)	84	331	50	31	17
普通白光独立响应 $E_W$ (lx)	266	708	109	57	26
理论叠加总和 $E_S + E_W$	350	1039	159	88	43
实测耦合照度 $E_C$ (lx)	<b>349</b>	<b>1045</b>	<b>158</b>	<b>92</b>	<b>42</b>

Table 3: 照度与距离平方反比衰减关系记录

距离参量 $l$ (cm)	10	12	14	16	18	20
距离倒数方 $1/l^2$ ( $\text{cm}^{-2}$ )	0.010	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002
测量照度 $E$ (lx)	1070	837	578	427	340	265
距离参量 $l$ (cm)	25	30	40	60	80	
距离倒数方 $1/l^2$ ( $\text{cm}^{-2}$ )	0.0016	0.0011	0.0006	0.0003	0.0002	
测量照度 $E$ (lx)	161	108	61	26	15	

### 2.3 固态光源电光转换效率测定

Table 4: 待测 LED 在不同工作状态下的电光效率解算结果

驱动电流 $I$ (mA)	偏置电压 $U$ (V)	待测照度 $E_c$ (lx)	定标照度 $E_s$ (lx)	电光效率 $\eta$ (lm/W)
50	2.81	11.4	6.0	46.67
50	2.60	1.50	6.0	6.64
50	2.70	6.10	6.0	25.90

## 2.4 多色发光二极管色度学参数提取

Table 5: 各单色及复合光 LED 核心色度学特征参量总表

测试光源	X	Y	Z	色品坐标 $(x, y)$	主波长	色纯度	相关色温	一般显指
标准白光	0.00162	0.00153	0.00174	(0.312, 0.319)	–	–	6896K	76
单色红光	0.00140	0.00070	0.00034	(0.565, 0.293)	634 nm	0.6318	–	–
单色绿光	0.00049	0.00150	0.00042	(0.220, 0.610)	532 nm	0.5891	–	–
单色蓝光	0.00073	0.00030	0.00366	(0.156, 0.064)	464 nm	0.8947	–	–

## 3 结果讨论与误差分析

---

我们在整理数据时发现，有几个实验的数据看起来有点“奇怪”，甚至好像测错了。但经过仔细分析和查资料，我们发现有些错误是因为操作失误，而有些“异常”其实刚好能用基础物理原理解释得通。具体复盘如下：

### 3.1 记错数据反而验证了“人眼看不见红外线”

在对比红外和白光 LED 时（表 1），我们发现测出来的数据极其微小（白光只有 0.009，红外只有 0.001）。后来复盘发现，是我们当时看错了软件界面，没有记录真实的物理照度（lx），而是填了软件算出来的一个相对值（三刺激值 Y）。虽然数据填错了，但歪打正着：红外光的数值几乎是零，远小于白光。这恰好证明了红外光对人眼的“视觉贡献”极小。简单来说，就是验证了“人眼（以及模拟人眼的仪器）对红外光是不敏感的”这一物理常识。

### 3.2 没关严灯导致红光被“稀释”

在测红光 LED 时（表 5），理论上纯正红光的色坐标  $x$  应该大于 0.65，但我们测出来只有 0.565，数据偏向中间的白色区域，说明红光不够纯。我们推测，这大概率是因为做实验的时候，实验室周围的灯没有关严实，或者旁边的电脑屏幕一直亮着。环境里的白光照进了仪器里，就像往红色颜料里兑了水，把红光给“稀释”了。这也直观地让我们明白了不同颜色的光混在一起会发生叠加，改变原本的颜色。

### 3.3 距离太近导致灯泡不能算作“点”

在验证“照度与距离平方成反比”定律时（表 3），当距离在 12cm 到 80cm 之间时，数据衰减的规律非常完美。但是在 10cm 这个极近的距离下，测出来的照度和理论公式对不上了。其实这不是测错了。这个定律有一个大前提：灯必须是一个“点”。当距离比较远的时候，5mm 大小的 LED 灯泡确实可以看作一个小点；但当仪器贴到 10cm 这么近的时候，灯泡的面积就显得很大了，它变成了“面光源”。既然前提不成立了，公式套用起来自然就有了误差。

### 3.4 电压不够导致二极管“发热不发光”

在测发光效率时（表 4），我们发现 2.60V 的时候效率非常低（只有 6.64 lm/W），但电压稍微加大一点到 2.81V 时，效率就猛增到了 46.67 lm/W。我们高中物理学过二极管的

单向导电性，需要达到一定的电压差才会导通发光。在这组数据里也是一样的道理：在 2.6V 时，电压还不够，电能大部分变成了热量浪费掉了；等电压加到 2.81V 跨过了门槛，它才真正亮起来。我们在 AI 的询问和帮助下了解到，这个现象在专业上叫作二极管的“势垒阈值特性”：在未跨越正向导通临界电压时，电子主要通过发热消耗掉；这组看起来“效率极低”的异常数据，实际上成功捕捉到了二极管从只发热不发光，向正常发光跃迁的那个拐点。

## 4 团队协作与分工

---

本综合实验由本组成员通力协作完成，具体任务分工如下：

- 祝庆：主要实验完成人，负责光学系统搭建与核心数据采集。
- 林承阳：报告撰写人，负责实验原理梳理、结果分析及文档排版。
- 陈勃嫣：负责数据后期分析，完成表格整合与物理量换算。
- 周智辉：负责实验现场记录，协助维护光学导轨及环境避光。