

基于光谱分析的明视觉照度传感器设计研究

杨超普^{1,2,3}, 方文卿^{2,4*}, 阳帆^{2,4}, 赫蕊蕊^{1,3}, 祝飞^{1,3}

¹商洛学院化学工程与现代材料学院, 陕西 商洛 726000;

²南昌大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330031;

³商洛学院陕西省尾矿资源综合利用重点实验室, 陕西 商洛 726000;

⁴南昌大学国家硅基 LED 工程技术研究中心, 江西 南昌 330047

摘要 基于光谱分析,给出了非镀膜明视觉照度传感器的设计流程,通过计算传感器理论相对光谱响应与明视觉光谱光效率函数的中心波长、半峰全宽和在 380~780 nm 波段的积分面积的相对偏差,评估传感器匹配误差。利用蓝色玻璃 QB21、黄色玻璃 LB9 和 LB16 与 LX44MQ 硅光电池组合自主设计非镀膜明视觉照度传感器,与明视觉光谱光效率函数相比,该照度传感器理论相对光谱响应中心波长、半峰全宽和在 380~780 nm 波段的积分面积的相对偏差分别为 0.36%、5.00%和 14.15%。以 TES 1330A 照度计作为标准参考,0~2000 lx 内 10 组测量值的平均绝对误差及平均相对误差分别为 7.82 lx 和 1.77%。研究结果证明了该明视觉照度传感器设计方法可行,可为相关照度传感器的设计开发提供参考。

关键词 探测器;照度;视觉;传感器;光学设计;光谱分析

中图分类号 TH741;O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.090401

Design and Investigation on Illumination Sensors of Photopic Vision Based on Spectral Analysis

Yang Chaopu^{1,2,3}, Fang Wenqing^{2,4*}, Yang Fan^{2,4}, He Ruirui^{1,3}, Zhu Fei^{1,3}

¹ College of Chemical Engineering and Modern Materials, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China;

² School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

³ Shaanxi Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Tailings Resources, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China;

⁴ National Engineering Technology Research Center for LED on Silicon Substrate, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China

Abstract Spectral analysis is used to present the design flow of a non-coated photopic visual illumination sensor. The sensor matching error is evaluated by calculating the relative deviation of central wavelength, full width at half maxima, and the integral area in 380–780 nm band between theoretical relative spectral response and apparent photopic visual spectral efficiency function. Using the combination of blue glass QB21, yellow glass LB9, LB16, and LX44MQ silicon photocell, the theoretical relative spectral response of the illumination sensor is compared with the spectral efficiency function of the photopic illumination spectrum. The relative deviations of the central wavelength, full width at half maxima, and the integral area in 380–780 nm band are 0.36%, 5.00%, and 14.15%, respectively. With TES 1330A illuminometer as the standard reference, the average absolute error and relative error of 10 groups measured in the range of 0–2000 lx are 7.82 lx and 1.77%, respectively. Results show that the proposed method is feasible and can be used as a reference for the design and development of related illumination sensors.

收稿日期: 2019-07-16; 修回日期: 2019-08-18; 录用日期: 2019-09-12

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0403700)、国家自然科学基金(61864008)、商洛学院服务地方专项(18SKY-FWDF002)

* E-mail: fwq@ncu.edu.cn

Key words detectors; illumination; vision; sensors; optical design; spectral analysis

OCIS codes 040.5160; 120.4640; 330.5310

1 引言

照度计又称为勒克斯计,是一种在光学领域用来测量光通量面密度的仪器。照度计的核心元件为照度传感器,一般由光电池与修正滤光片构成,可将光信号按照人眼响应函数转化为电信号^[1]。根据人眼响应函数的不同,当前常见的照度传感器主要包括明视觉照度传感器(如日本滨松光子学株式会社的 S7686)和暗视觉照度传感器(如美国 Solar light 公司的 PMA 2131)。人眼视网膜上有三种感光细胞:锥状细胞、杆状细胞和特化感光神经节细胞(ipRGC)^[2-5]。利用光电器件模拟人眼不同感光细胞的光谱响应即可制备相应照度传感器。国际照明委员会(CIE)在 1924 年给出了明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ (其中 λ 为波长),表征位于视网膜中心能够分辨颜色的锥状细胞的光谱响应,使得明视觉照度传感器的设计逐渐标准化。

近年来,随着光电器件、微控制器和集成电路等快速发展,照度计发展已相当成熟。明视觉照度计已是光学相关专业学生及研究人员的必用测量工具,然而当前照度计越来越趋向于微型化和模块化。明视觉照度计传感器也多采用光电池与镀膜滤光片集成封装,且价格较为昂贵,例如网上 S7686 的单个售价约为 150 元。为便于初学者深刻理解明视觉照度传感器的设计原理,方便且以较低成本制备明视觉照度传感器,有必要给出一种基于光谱分析,通过常见滤光片组合及光电池制备高精度明视觉照度传感器方案。

2 原理与方法

2.1 设计原理

位于人眼视网膜中心区域的锥状感光细胞能够分辨颜色,对应明视觉,CIE 在 1924 年给出了明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$,表征锥状细胞光谱响应^[6]。明视觉照度传感器的设计原理是:利用滤光片尽可能将光电探测器光谱响应曲线修正得与明视觉光谱光效率函数曲线重合^[7]。图 1 实线为 S7686 明视觉照度传感器相对光谱响应曲线,阴影为明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 曲线,由图可见二者重合度较高。图 2 为明视觉照度传感器结构示意图,光电探测器常用硅光电池,修正滤光片由多个滤光片组

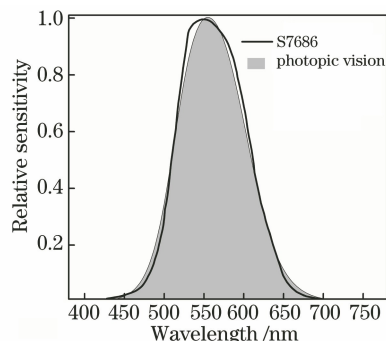


图 1 明视觉照度传感器设计原理图

Fig. 1 Design principle diagram of photopic visual illumination sensor

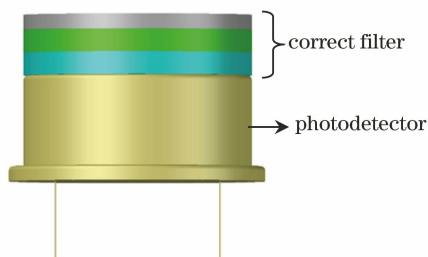


图 2 明视觉照度传感器结构示意图

Fig. 2 Schematic of photopic visual illumination sensor structure

合而成,如 $V(\lambda)$ 人眼视觉函数修正滤光片组和余弦修正片等。

为了便于计算分析,根据 CIE 给出的明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 的原始数据,利用 OriginPro 软件中 Asym2Sig 函数(y_0 、 A 、 x_c 、 w_1 、 w_2 、 w_3 为待定系数),即

$$y = y_0 + A \left\{ \frac{1}{1 + \exp[-(x - x_c + w_1/2)w_2]} \right\} \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \exp[-(x - x_c - w_1/2)/w_3]} \right\}, \quad (1)$$

拟合明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 表达式^[8-9],即

$$V(\lambda) = 3.659 \times 10^{-4} + \frac{1.182}{1 + \exp(32.651 - \lambda/15.731)} \left[1 - \frac{1}{1 + \exp(24.558 - \lambda/20.915)} \right], \quad (2)$$

拟合结果的相关系数平方 $R^2 = 0.99903$,说明拟合质量较高,可保证计算分析精度。

由于明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 为 Gaussian 型峰值函数,实验提出利用设计传感器光谱响应曲线的中心波长、半峰全宽和 380~780 nm 波段的积分面积与明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 的偏差表征

二者的重合度,进而评估传感器误差。根据(1)式计算分析中心波长、半峰全宽和 380~780 nm 波段的积分面积,结果见表 1。

表 1 明视觉光谱光效率函数分析计算结果

Table 1 Analysis and calculation results of the spectral luminous efficiency function of photopic vision

Center wavelength /nm	Full width at half maximum /nm	Integral area of 380-780 nm band
555	100	106

2.2 设计方法

图 3 给出明视觉照度传感器的设计流程,主要步骤包括:拟合明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 表达式;根据目标函数及光电探测器响应值选择合适滤光片或其组合;计算光电探测器响应值与滤光片透射率的乘积,并进行归一化;计算照度传感器的相对光谱响应函数及明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 的中心波长、半峰全宽和 380~780 nm 波段的积分面积,比较误差大小;将滤光片组与光电探测器组装成传感器。

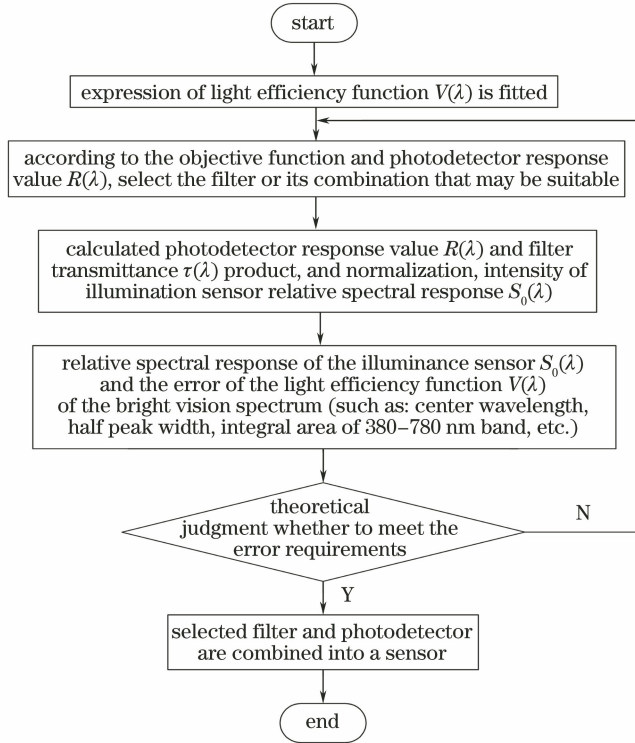


图 3 明视觉照度传感器的设计流程图

Fig. 3 Design flow chart of photopic visual illumination sensor

3 设计与分析

3.1 光电探测器选择

光电探测器可将光信号转换成电信号,是照度传感器的核心元件,主要包括硒光电池和硅光电池。硒光电池的光谱响应峰值约为 560 nm,接近明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 的最大峰值(555 nm),经滤光片校准后与 $V(\lambda)$ 函数重合度非常高,曾广泛应用于照度传感器。然而,硒光电池光老化寿命短,在照度为 1000 lx 的阳光连续照射 1000 h 后,其光电转换效率将降低 1/3。硅光电池具有寿命长、灵敏度高和体积小等优势,迅速替代硒光电池,成为当前照度传感器中常用光电探测器。实验选用深圳龙信达科技有限公司型号为 LXD44MQ 的硅光电池,该光

电探测器在 250~900 nm 波段的相对光谱响应如图 4 所示。

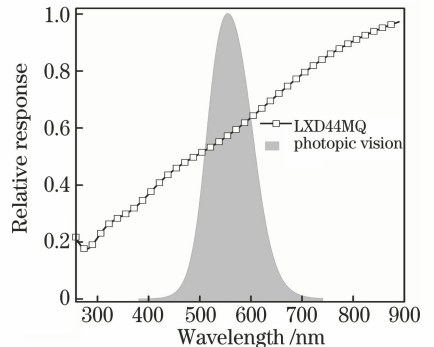


图 4 LXD44MQ 光电探测器的相对光谱响应

Fig. 4 Relative spectral response of LXD44MQ photodetector

表 2 给出 LXD44MQ 光电探测器的主要参数。为了便于比较,图 4 同时给出明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 。由图 4 可见,LXD44MQ 硅光电池在

380~780 nm 可见光波段均有响应,但光谱响应波形与目标明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 波形的差异较大,需要进行复杂修正。

表 2 LXD44MQ 光电探测器的主要参数

Table 2 Main parameters of LXD44MQ photodetector

Size / (mm×mm)	Wavelength range /nm	Reverse voltage /V	Open circuit voltage /V	Short circuit current / μ A	Dark current /nA	Peak wavelength /nm
4×4	200-1100	5	0.3	15	2	940

3.2 滤光片选择

选择合适的滤光片才能将 LXD44MQ 光电探测器相对光谱响应曲线修正得与人眼光谱响应函数 $V(\lambda)$ 曲线重合。因此,滤光片的选择至关重要。高精度照度传感器滤光片多采用真空镀膜技术,该技术成本较高,适合大规模量产。为了降低成本,选择青蓝色玻璃 QB21、黄色玻璃 LB9 和 LB16 三种玻璃叠加组合为明视觉照度传感器修正滤光片。利用上海复享光学股份

有限公司的 FX2000 高速微型光纤光谱仪及 HL2000 卤素光源测量三种玻璃在 350~900 nm 波段的透射率,结果如图 5 所示,主要参数如表 3 所示,其中 A[2856 K]与 D65 分别代表 2856 K 及 D65 标准光源透过玻璃片的 CIE 1931 x_yY 坐标, N_D 表示以钠元素的特性谱线 D-589.3 nm 测定的滤光片折射率,Bubble(气泡)、Stripe(条纹)和 Stress(应力)的级别参考中华人民共和国国家标准无色光学玻璃 GB903-65。

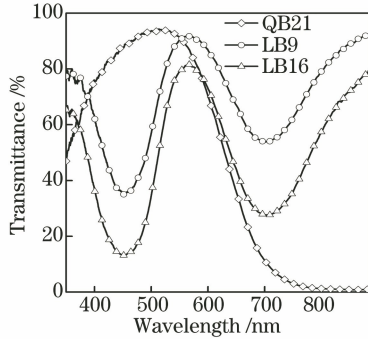


图 5 修正滤光片透射率

Fig. 5 Correction filters transmittance

表 3 修正滤光片主要参数

Table 3 Main parameters of correction filters

Type	Thickness /mm	A[2856 K]			D65			N_D	Bubble	Stripe	Stress
		x	y	Y	x	y	Y				
QB21	2	0.345	0.439	62.1	0.244	0.326	68.8	1.535	C	3C	4
LB9	2	0.462	0.452	86.7	0.353	0.429	85.2	1.547	C-B	3C	3
LB16	2	0.484	0.476	74.0	0.405	0.483	70.2	1.535	D-C	3C	4

3.3 计算分析

利用 3.2 节 LXD44MQ 光电探测器的相对光谱响应曲线,及蓝色玻璃 QB21、黄色玻璃 LB9 和 LB16 透射率数据,计算四组数据的乘积,并进行归一化处理,得到自主设计的明视觉照度传感器在 350~900 nm 波段的理论相对光谱响应曲线,结果如图 6 所示。为了便于比较分析,图 6 阴影为明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 曲线。另外,图 6 中还给出某款国产 BPW28 型镀膜明视觉照度传感器的相对光谱响应曲线。

由图 6 可直观比较自主设计的明视觉照度传感器及 BPW28 型镀膜明视觉照度传感器的相对光谱

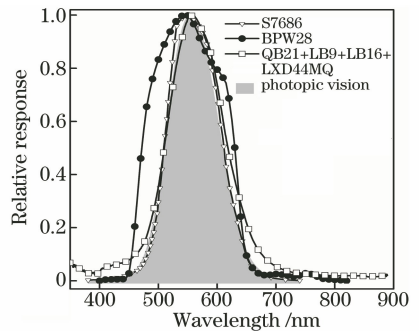


图 6 视觉照度传感器的相对光谱响应比较

Fig. 6 Comparison of relative spectral response of photopic vision illumination sensors

响应曲线,与目标函数明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 曲线的重合程度。采用 QB21 + LB9 + LB16 + LXD44MQ 设计的明视觉照度传感器的相对光谱响应曲线与明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 曲线重合度较高,明显优于 BPW28 型镀膜明视觉照度传感器。为了更加精确地定量分析比较自主设计的明视觉照

度传感器的优劣,分别计算 S7686 镀膜明视觉照度传感器、BPW28 型镀膜明视觉照度传感器和自主设计非镀膜明视觉照度传感器的相对光谱响应,与明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 的中心波长、半峰全宽和 380~780 nm 波段的积分面积的绝对偏差及相对偏差,结果如表 4 所示。

表 4 三种明视觉照度传感器偏差计算结果

Table 4 Deviation calculation results of three kinds of photopic visual illumination sensors

Sensor	Center wavelength		Full width at half maximum		Integral area of 380~780 nm band	
	Absolute	Relative	Absolute	Relative	Absolute	Relative
	deviation /nm	deviation /%	deviation /nm	deviation /%	deviation /nm	deviation /%
S7686	-5	0.90	+1.58	1.58	+1.18	1.11
BPW28	-5	-1.80	+58.00	58.00	+41.00	38.70
Self-made	-2	0.36	+5.00	5.00	+15.00	14.15

由表 4 可见,自主设计非镀膜明视觉照度传感器的中心波长偏差优于其他两种传感器;半峰全宽与 380~780 nm 波段的积分面积偏差远优于 BPW28 传感器,分别为 BPW28 值的 0.086,0.366。由表 4 综合分析得,自主设计传感器的性能优于 BPW28,逊于 S7686。

中华人民共和国国家计量检定规程(JJG 245-2005)给出了照度传感器光谱响应与明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 的匹配误差计算方法^[10],即

$$F = \frac{\int_{380}^{780} |S(\lambda) - V(\lambda)| d\lambda}{\int_{380}^{780} V(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

式中: F 为匹配误差, F 值越小,代表传感器响应曲线越接近明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 曲线; $S(\lambda)$ 为传感器标准相对光谱响应,计算公式为

$$S(\lambda) = \frac{S_0(\lambda) \int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda) S_0(\lambda) d\lambda}, \quad (4)$$

式中: $P(\lambda)$ 为 2856 K 标准光源相对光谱分布; $S_0(\lambda)$ 为传感器相对光谱响应。利用(3)式和(4)式计算得到自主设计非镀膜明视觉照度传感器的匹配误差 $F=16.28$ 。

4 结果与讨论

为了进一步验证采用 QB21 + LB9 + LB16 + LXD44MQ 自主设计非镀膜明视觉照度传感器的可行性,并直接给出测量误差。以美国 Microchip 公司 PIC 16F1787 单片机为核心制备印刷电路板,采用 H28-12864TFT 彩色液晶显示模块显示照度数值,制作使用传感器的照度计。以台湾泰仕数字式

照度计 TES 1330A 为标准参考,分析该照度传感器的测量误差,原理如图 7 所示。



图 7 明视觉照度传感器测量误差分析原理图

Fig. 7 Schematic of measurement error analysis of photopic visual illumination sensor

利用直流可调光强 LED 球泡灯为光源,恒流源供电,LED 球泡灯固定在高度可大范围调节的铁架台上。通过电流及高度调节,在 0~2000 lx 内调节 10 组照度值,每次测量前让光源稳定 5 min,并保证自制照度计与 TES 1330A 参考照度计的感光口在同一平面、同一位置测量,测量误差如表 5 所示。

由表 5 可知,10 组测量值的平均绝对误差为 7.82 lx,平均相对误差为 1.77%,最大绝对误差在 1500 lx 时偏差为 -25 lx,最大相对误差在 100.4 lx 时偏差为 4.98%。已知 TES 1330A 照度计准确度为 $\pm 3\% \text{ rdg} \pm 0.5\% \text{ f.s.}$ ($< 10^4 \text{ lx}$) (rdg 为 reading 缩写,即读数,f.s.为 full scale 缩写,即满量程),故自制明视觉照度传感器有较高精度,也说明采用 QB21 + LB9 + LB16 + LXD44MQ 自主设计非镀膜明视觉照度传感器的可行性,四种原件价格合计不足 30 元。

表5 自制明视觉照度传感器测量误差

Table 5 Measurement error of self-made photopic visual illumination sensor

No.	Standard illumination value /lx	Measured value /lx	Absolute error /lx	Relative error /%
1	0	0	0	0
2	50.8	52.0	+1.2	2.36
3	100.4	95.4	-5.0	4.98
4	150.0	147.0	-3.0	2.00
5	200.0	203.0	+3.0	1.50
6	500.0	505.0	+5.0	1.00
7	800.0	792.0	-8.0	1.00
8	1000.0	1003.0	+3.0	0.30
9	1500.0	1475.0	-25.0	1.67
10	2000.0	2022.0	+22.0	1.10

5 结 论

基于光谱测量与分析,给出明视觉照度传感器的设计流程,提出了利用蓝色玻璃 QB21、黄色玻璃 LB9 和 LB16 与 LXD44MQ 硅光电池组合自主设计非镀膜明视觉照度传感器。通过滤光片透射率及硅光电池响应曲线计算明视觉照度传感器理论相对光谱响应,比较理论相对光谱响应与明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 的中心波长、半峰全宽和在 380~780 nm 的积分面积的差异,判断照度传感器设计优劣;以台湾泰仕数字式照度计 TES 1330A 为标准参考,分析该照度传感器的测量误差。研究结果表明,采用 QB21+LB9+LB16+LXD44MQ 自主设计非镀膜明视觉照度传感器方案可行。与明视觉光谱光效率函数相比,该照度传感器理论相对光谱响应的中心波长、半峰全宽和 380~780 nm 的积分面积的相对偏差分别为 0.36%、5.00% 和 14.15%。以 TES 1330A 照度计作为标准参考,0~2000 lx 内 10 组测量值的平均绝对误差及平均相对误差分别为 7.82 lx 和 1.77%。该设计方案可为初学者深刻理解明视觉照度传感器的设计原理,方便且以较低成本制备明视觉照度传感器提供参考。

参 考 文 献

- [1] Wu P F. Design of digital display illuminometer based on single chip microcomputer [D]. Harbin: Helongjiang University, 2015.
吴鹏飞. 基于单片机数显照度计的设计 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2015.
- [2] Yang C P, Fang W Q, Liu M B, et al. Blue light hazard and non-visual biological effect of LED backlight displayer at different color temperatures [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017,

54(10): 101701.

杨超普, 方文卿, 刘明宝, 等. 不同色温 LED 背光屏的蓝光危害和非视觉生物效应 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 101701.

- [3] Yang C P, Fang W Q, Wang Z, et al. Comparison on blue light hazard and circadian effect of different displays [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 121701.
杨超普, 方文卿, 王昭, 等. 不同显示器的蓝光危害及节律效应比较 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 121701.
- [4] Huang Y, Yang C Y. The simulative experimental analysis of the effect of light color on photopic visual performance [J]. Light & Lighting, 2015, 39(3): 1-4, 10.
黄彦, 杨春宇. 光源光色对明视觉功效影响的模拟实验研究 [J]. 灯与照明, 2015, 39(3): 1-4, 10.
- [5] Berson D M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock [J]. Science, 2002, 295(5557): 1070-1073.
- [6] Baczynska K, Price L. Efficacy and ocular safety of bright light therapy lamps [J]. Lighting Research & Technology, 2013, 45(1): 40-51.
- [7] Li W, Liu Z T, Lü J W, et al. Design and implementation of a simple digital light illuminanometer [J]. Physics Experimentation, 2016, 36(6): 19-21.
李伟, 刘昭廷, 吕靖薇, 等. 简易数字照度计的设计与实现 [J]. 物理实验, 2016, 36(6): 19-21.
- [8] Yang C P, Fang W Q, Liu M B, et al. A visualization evaluation method for blue light hazard and circadian effect of light source [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(11): 3476-3482.
杨超普, 方文卿, 刘明宝, 等. 一种光源的蓝光危害与节律效应可视化评估方法 [J]. 光谱学与光谱分

- 析, 2018, 38(11): 3476-3482.
- [9] Yang C P, Fang W Q, Han C W, et al. Variation of non-visual biological effect of LED lighting with color temperature[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 243301.
- 杨超普, 方文卿, 韩昌万, 等. LED照明的非视觉生物效应随色温变化研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 243301.
- [10] State general administration of quality supervision, inspection and quarantine. Illuminance meter: JJG 245-2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- 国家质量监督检验检疫总局. 光照度计: JJG 245-2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.