

基于格拉斯曼光学模型的PWM调光应用研究

李宗骞 石艳 廖映华 罗一

Application of PWM dimming based on Grassmann optical model

LI Zongqian, SHI Yan, LIAO Yinghua, LUO Yi

引用本文:

李宗骞, 石艳, 廖映华, 等. 基于格拉斯曼光学模型的PWM调光应用研究[J]. 应用光学, 2022, 43(5): 973–979. DOI: 10.5768/JAO202243.0505001

LI Zongqian, SHI Yan, LIAO Yinghua, et al. Application of PWM dimming based on Grassmann optical model[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(5): 973–979. DOI: 10.5768/JAO202243.0505001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0505001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于联合编码调制的调光控制方案实现

Implementation of dimming control scheme based on joint coding and modulation

应用光学. 2018, 39(4): 470–475 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0401005>

基于三组元可调光焦度器件的变焦光学系统设计

Zoom optical system based on three-element variable focal power devices

应用光学. 2021, 42(6): 1127–1132 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0605004>

基于WS₂可饱和吸收体的脉冲激光器研究

Pulse lasers based on WS₂ saturable absorber

应用光学. 2018, 39(2): 279–283 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0207003>

基于湍流模型的自适应光学系统响应矩阵测量方法

Measurement method of response matrix for adaptive optics systems based on turbulence model

应用光学. 2017, 38(6): 963–967 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0603004>

基于最小二乘法多项式拟合三角测量模型研究

Laser triangulation measurement model based on least square polynomial fitting method

应用光学. 2019, 40(5): 853–858 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0503003>

FBG传感器在空腔爆炸压力测量中的应用研究

Application research of FBG sensors used in cavity explosion for pressure measurement

应用光学. 2019, 40(2): 300–305 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0203004>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2022) 05-0973-07

基于格拉斯曼光学模型的 PWM 调光应用研究

李宗骞, 石 艳, 廖映华, 罗 一

(四川轻化工大学 机械工程学院, 四川 宜宾 644000)

摘 要: 针对发光二极管 (light-emitting diode, LED) 光源颜色和光通量精准调控难度高, 在生产应用中, 调控操作需在电脑等设备上进行的问题, 基于格拉斯曼颜色混合定律, 结合脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 调控 LED 的特性, 建立表示 PWM 与 LED 照度关系的数学模型, 以 STM 32 微控制器为核心设计了三基色 LED 调光调色系统。对系统分别进行单色、双色和 3 色的混光照度实验, 数字照度计的测量值与光照数学模型的理论值对比结果表明, 该系统在 0~370 lx 区间内系统的光源照度误差 $\leq 4\%$, 合成光色共 16 777 216 种, 且对光源颜色和光通量的调控操作可直接在系统上完成, 无需接入其他设备, 减少了操作流程, 满足工业视觉检测、农作物补光照明和文化旅游对光源颜色和照度的需求。

关键词: 格拉斯曼光学模型; PWM 调光; 照度; WS2812B

中图分类号: TN202

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202243.0505001

Application of PWM dimming based on Grassmann optical model

LI Zongqian, SHI Yan, LIAO Yinghua, LUO Yi

(School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin 644000, China)

Abstract: For the difficulty to accurately regulate the color and luminous flux of light-emitting diode (LED) light source, and the regulation operation needs to be carried out in computers and other equipment in the production and application, a mathematical model representing the relationship between pulse width modulation (PWM) and LED illumination based on the Grassmann color law and the characteristics of PWM in regulating LEDs was proposed. The RGB LED dimming and color matching system was designed with STM32 microcontroller as the core. The monochrome, double-color, and trichrome mixed illumination experiments were performed on the system. The comparison between the measured value of the digital illuminometer and the theoretical value of the illumination mathematical model proves that the illumination error of the system in the range of 0~370 lx is less than or equal to 4%, and a total of 16 777 216 kinds of light colors can be synthesized. The control of the color and luminous flux of the light source can be accomplished directly on the system without connecting to other equipment, which can reduce the operation process and meet the color and illuminance requirements for industrial visual detection, crop fill lighting and cultural tourism.

Key words: Grassmann optical model; pulse width modulation dimming; illumination; WS2812B

引言

光源是影响视觉系统信息输入的重要因素^[1], 不同环境下人们对光源的光通量、颜色要求不同。心理方面, 2002 年美国 Berson 发现了一种影

响人体生物钟的感光细胞, 表明光照会对人的情绪、睡眠产生影响^[2]。农业生产方面, 适宜的光照条件对实现农作物优质高产及可持续发展至关重要^[3]。工业检测方面, 光源要尽可能突出目标的特

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-03-31

基金项目: 四川省经信厅省级工业发展专项资金 (川财建 [2021]106 号); 四川省科技厅科技计划项目 (2020YFSY0036); 宜宾市科技计划项目 (2021GY011)

作者简介: 李宗骞 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事嵌入式系统研究。E-mail: lzscqhg@163.com

通信作者: 石艳 (1971—), 女, 教授, 主要从事过程装备优化设计等研究。E-mail: sy71Email@163.com

征,在物体需要检测的部分与非检测部分之间产生明显的区别^[4]。

目前主流人造光源有白炽灯、日光灯和 LED 等。LED 凭借其体积小、寿命长、绿色节能^[5]等优点脱颖而出,在道路照明和室内照明方面的应用、研究越来越广^[6-7],具有良好的发展前景。

对 LED 光源的调光调色,学者们进行了深入研究。宋鹏程等^[8]基于照明参数,建立了 3 通道 PWM 调光调色的数学模型,模拟不同色温的太阳光,但在调控中需另外接入信号发生器,硬件缺少完善的人机交互设计;Chih-Hsuan^[9]等在实验室内模拟了日光照明;夏振平等^[10]采用线性调光避免 LED 闪烁,优化算法减少色度漂移,但仅适用于冷、暖白光混光;骆伟岸^[11]等基于 PWM 数字化调控光源,实现了一定范围内照度可调,但调控操作无法由现场人员独立完成。基于上述研究成果及其不足,本文根据格拉斯曼颜色混合定律^[8,12],推导出了应用于 LED 调光调色的光学模型,结合软、硬件设计,构建调光调色系统,系统光源颜色有 16 777 216 种,光照强度在 0~370 lx 可实现精准调控,并且对光源颜色和照度的调控无需通过信号发生器或电脑等设备,可直接在系统硬件上进行,减少了工作流程,提高了光源调控的工作效率。

1 系统设计原理

1.1 格拉斯曼亮度相加律与三基色 LED 调光

调光的实质是调控光通量的大小,可通过改变输出到 LED 的 PWM 占空比,调节输出电流,实现调光^[13]。PWM 占空比改变时,LED 光源的色品坐标不变,而光通量呈线性变化^[14],在系统中认为光通量和 PWM 占空比呈正比关系。系统选择的三基色 LED 型号为 WS2812B,内有红、绿、蓝 3 色灯珠和驱动芯片,WS2812B 可根据 STM32 写入驱动芯片的 3 个光通量等级,分别改变红、绿、蓝灯珠的 PWM 占空比,调节光通量,光通量等级为 0~255。

根据 WS2812B 单色光源的发光强度,可计算其光通量,三基色 LED 的发光强度如表 1 所示。

表 1 WS2812B 发光强度

Table 1 Luminous intensity of WS2812B

光源颜色	发光强度 I/mcd
红色	390~420
绿色	660~720
蓝色	180~200

光通量与发光强度的关系为

$$\begin{cases} \phi_r = 2\pi I_r \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) \\ \phi_g = 2\pi I_g \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) \\ \phi_b = 2\pi I_b \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϕ_r 、 ϕ_g 、 ϕ_b 为红、绿、蓝灯珠最大光通量; I_r 、 I_g 、 I_b 为最大发光强度; α 为发散角。在系统中,以三基色最大光通量为基础进行混光调亮,根据格拉斯曼亮度相加定律,任取一被照射点 P , 计算总光通量:

$$\begin{cases} p_r = \frac{D_r}{D_{\max}} \\ p_g = \frac{D_g}{D_{\max}} \\ p_b = \frac{D_b}{D_{\max}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\phi_p = k (p_r \phi_r + p_g \phi_g + p_b \phi_b) \quad (3)$$

式中: D_r 、 D_g 、 D_b 为红、绿、蓝灯珠的实际光通量等级; D_{\max} 为最大光通量等级 255; p_r 、 p_g 、 p_b 为光通量等级百分比; ϕ_p 为总光通量; k 为调光系数,整体调控光通量大小。实际应用中,直接测量 LED 光通量过程复杂,误差较大,通常以照度为检测量。照度与光通量的关系为

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad (4)$$

式中 S 为光照面积。结合(3)式和(4)式,可得:

$$E_p = k (p_r E_r + p_g E_g + p_b E_b) \quad (5)$$

式中: E_r 、 E_g 、 E_b 为红、绿、蓝灯珠的最大照度,可由照度仪测得; E_p 为总照度。根据(5)式,通过调光系数 k 可整体调控照度,该调节方式不改变三基色光通量混合比例,以保证光源颜色不因 LED 整体光通量大小的变化而变化。

1.2 格拉斯曼间色律与三基色 LED 调色

在 CIE x - y 色品分析图中, R 、 G 、 B 3 点分别代表红、绿、蓝光源坐标,根据色度学原理,两种颜色混合产生的第 3 种颜色总在前两种颜色的连线上,如图 1 所示^[8],代表红、蓝混合光源的点 M 在线段 BR 上。根据格拉斯曼间色律,第 3 种颜色由前两种颜色的混合比例决定,所以点 M 的具体坐标由红、蓝 2 色的混合比例得到。点 M 坐标确定后,进行红、蓝混合光源和绿色光源的混光,同理,可以得到代表目标色的点 P 坐标。所以,理论上三角

形 RGB 范围内任意一点都可以由不同比例的红、绿、蓝 3 色混合得到。换言之, 所需目标颜色确定后, 可以根据 CIE x - y 色品分析图确定其红光、绿光、蓝光所占比例。

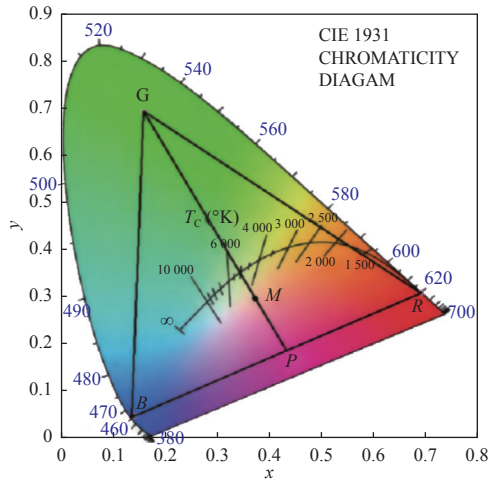


图 1 CIE x - y 色品分析图

Fig. 1 Diagram of chromaticity analysis of CIE x - y

色品坐标表示光源中三基色所占比例, 可由 3 刺激值 X 、 Y 、 Z 推导得到。以图 1 中 P 点为例, 有:

$$\begin{cases} x_p = \frac{X_p}{X_p + Y_p + Z_p} \\ y_p = \frac{Y_p}{X_p + Y_p + Z_p} \\ z_p = \frac{Z_p}{X_p + Y_p + Z_p} \end{cases} \quad (6)$$

式中: x_p 、 y_p 、 z_p 为色品坐标。通过测量、计算 3 刺激值, 得出光源色品坐标, 这种方式对测量设备的要求很高, 系统使用三基色光通量混合比例表示光源颜色。根据光通量等级计算可得:

$$\begin{cases} x'_p = \frac{D_r}{D_r + D_g + D_b} \\ y'_p = \frac{D_g}{D_r + D_g + D_b} \\ z'_p = \frac{D_b}{D_r + D_g + D_b} \end{cases} \quad (7)$$

式中: x'_p 、 y'_p 、 z'_p 为红、绿、蓝 3 色所占比例。通过对光通量等级的控制, 可满足三基色 LED 调色精准控制要求。

2 系统硬件设计

为实现三基色 LED 独立、快速、精准的调光调色, 系统具有以下 3 个功能:

1) 对 LED 的调控操作不需接入上位机进行, 系统能够脱离上位机的限制, 使工作人员能够直接与之交互; 2) 对红、绿、蓝 3 色的混光比例控制准确, 数字化显示比值, 满足混光对颜色的精度要求; 3) 调光调色过程便捷、迅速, 使用滚轮调控, 摆脱按键在大数值调控中的不便。

系统硬件包括电源、主控、彩灯、显示、按键、滚轮 6 个模块, 如图 2 所示。电源模块为整个系统提供能量; 按键模块和滚轮模块为输入部分, 通过按键向主控模块传递指令; 滚轮模块的实质是滑动变阻器, 通过 AD 转换将其电压数值传递给主控模块处理、使用; 主控模块的核心是 STM32 微控制器, 由 CPU(中央处理器)和片上外设组成, 参与到系统的片上外设 FSMC、DMA、ADC 等, 主控模块获取按键指令, 执行切换状态、读取滚轮电压值、处理数据、赋值等操作; 彩灯模块根据 STM32 写入的数据, 调控光源颜色、光通量; 显示模块将调试的数字化信息以及所处状态显示在屏幕上, 系统脱离上位机限制后, 满足独立、快速、准确调控的要求。

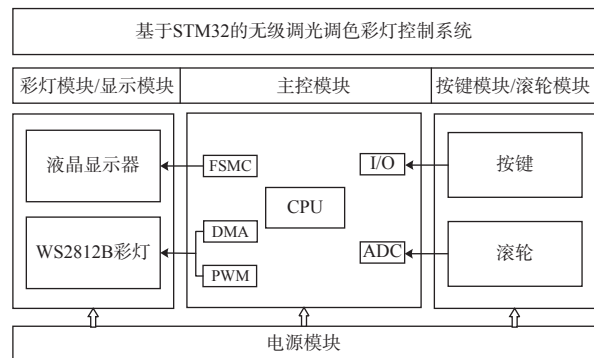


图 2 系统硬件总体设计

Fig. 2 Diagram of overall design of system hardware

系统选用的微控制器型号为 STM32F103ZET6 (简称 STM32), 该微控制器由意法半导体有限公司基于 ARM 32 位的 Cortex-M3 CPU 设计生产^[15], 由 CPU 和片上外设 DMA、ADC、FSMC 等组成, 是整个系统的控制核心。

主控模块电路如图 3 所示, 由 RTC 时钟、系统时钟、复位、启动等电路组成。为获得良好的工作性能, STM32 系统时钟晶振频率选为 8 MHz, 锁相环倍频设置为 9, 则工作频率为 72 MHz, WS2812B 彩灯数据接受速度为 800 kbps, 定时器自动装载值设为 89, 满足 WS2812B 的驱动条件。

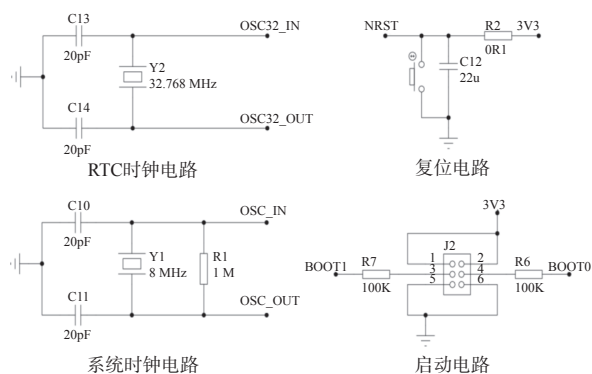


图3 主控模块电路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of main control module circuit

根据 WS2812B 时序要求, STM32 可以通过 I/O 接口翻转或 PWM 与 DMA 结合的方式驱动 LED。I/O 接口翻转占用主程序, 消耗大量 CPU 资源, 所以系统选用了 PWM 与 DMA 结合的驱动方式, 如图 4 所示。系统把数据存入 DMA, 设置模式和内存偏移后, DMA 通过 PWM 传输数据到 LED 驱动芯片, 这种驱动方式可节省 CPU 资源用于其他操作。

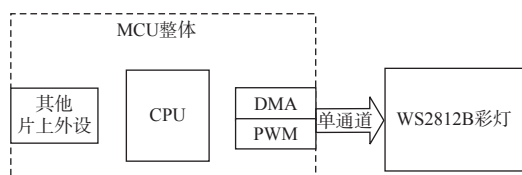


图4 彩灯模块关系示意图

Fig. 4 Schematic of coloured lantern module relationship

3 系统软件设计

3.1 系统软件总体设计

系统软件由默认、颜色调控、光通量调控 3 个模块组成。以 status 为状态标志位, status 是 0 时, 系统初始化, 为默认模块; status 是 1~3 时, 系统进行红、绿、蓝 3 色光通量混合比例调控, 为颜色调控模块; status 是 4 时, 系统进行光通量整体调控, 为光通量调控模块。

系统软件控制流程如图 5 所示。系统启动后完成初始化, status 赋值为 0, 执行主程序。1) 系统识别 status 为 0, 进入默认模块, LED 为白光, 光通量最大; 2) 调节光源颜色时, 点击按键, 系统进入颜色调控模块, 依次进行红、绿、蓝混合比例调控, 对应 status 为 1、2、3 值, 使用按键切换, 对某一具体颜色的光通量等级调控可使用滚轮完成; 3) 调控光源整体光通量时, 点击按键, status 为 4, 系统

进入光通量调控模块。3 色混合比例不变, 光源颜色基本不变, 根据 (5) 式, 通过滚轮调节 k 值, 在不改变光源颜色混合比例的前提下, 整体调控光通量。

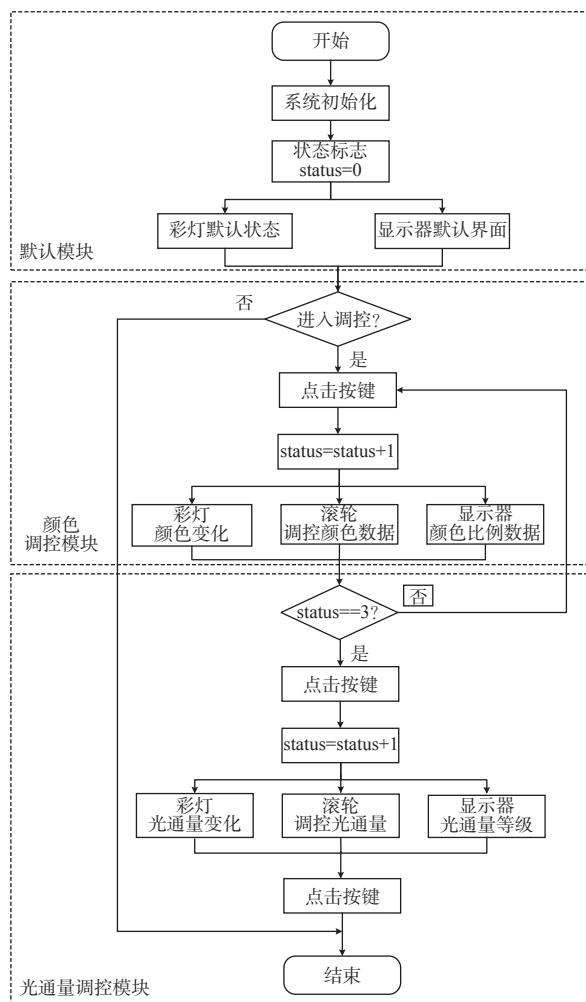


图5 系统软件控制流程图

Fig. 5 Flow chart of system software control

在上述 3 种模块调控过程中, 可以看到 LED 颜色和光通量的变化, 液晶显示器实时数字化显示 3 色光通量等级比、系统所处模块和 k 值大小, 实现光源颜色和光通量的精准调控。

3.2 软件调控流程设计

系统软件的核心是颜色调控和光通量调控, 二者调控原理、流程基本相同。以颜色调控为例, 软件调控设计流程图如图 6 所示。系统进入调控模块后, ADC 启动, 获取滚轮电压模拟量并转换为数字量, 该值范围是 0~4 096。系统将数字量电压限制到与 LED 光通量等级同等范围 0~255 内, 关闭 ADC。处理值一方面以 DMA 与 PWM 结合的方式写入 LED 的驱动芯片, 另一方面经过 FSMC 与液

晶显示器通信,在液晶面板上实时显示 LED 光通量等级的变化。

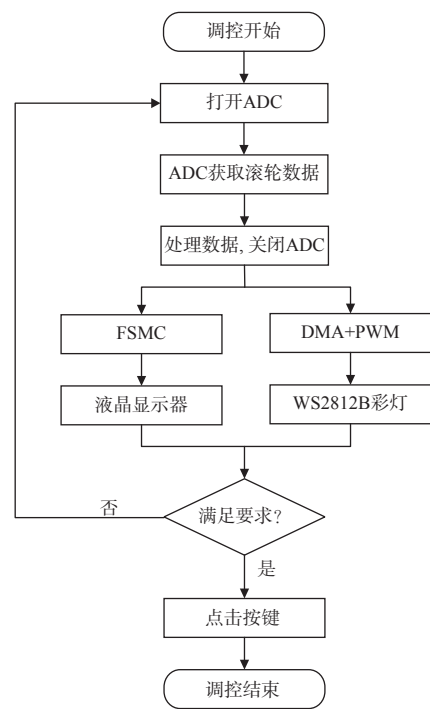


图6 软件调控设计流程图

Fig. 6 Flow chart of software control design

4 实验测试与分析

4.1 实验测试

为验证上文数学模型在实际应用中是否成立,以及系统调光调色的效果,设计了 LED 光源照度检测实验。光源选用硬质灯环,灯环直径 27 mm,内嵌 8 个 LED 灯珠。测量仪器选择 UT383 数字照度计,精度为±4%,固定于距灯环 210 mm 处,检测面正对灯环中心。为避免其他光源影响,实验在照度为 0 的条件下进行,同一值进行 10 次测量,取平均数为实验数据。照度检测实验位置摆放与实物如图 7 所示。



(a) 调光调色系统与数字照度计实物图

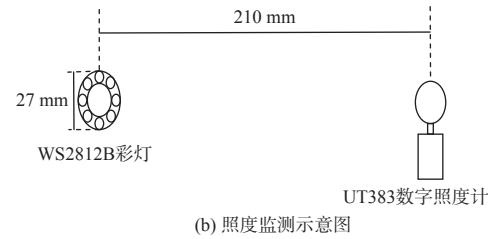


图7 彩灯照度检测实验图

Fig. 7 Schematic diagram of illumination detection experiment of colored lamp

首先测量红、绿、蓝 3 色光的最大照度,作为后续实验依据,测量数据见表 2 所示。

表 2 单色光最大照度测量数据

Table 2 Maximum illuminance measurement data of monochromatic light

光源颜色	符号	光通量等级	光通量等级百分比%/	照度测量值/lx
红色	E_r	255	100	122.71
绿色	E_g	255	100	215.86
蓝色	E_b	255	100	262.14

对单色、双色、3 色分别进行照度测量,根据(5)式计算理论值,与实际值对照,以确定数学模型是否成立和系统调色调亮效果。取调光系数 k 为 1,光通量等级百分比分别为 20%、40%、60%、80%、100% 进行测试。

单色光照度实验以蓝色光源为实验对象,理论值由(5)式推导计算可得:

$$E_p = kp_b E_b \tag{8}$$

测量数据如表 3 所示。由表 3 可看出,测量值与理论值存在少许偏差,但差值在照度计精度允许范围内,可认为测量数据与数学模型符合良好。

表 3 蓝色光照度测量数据

Table 3 Illuminance measurement data of blue light

光源颜色	光通量等级	光通量等级百分比%	照度测量值/lx	照度理论值/lx	差值百分比/% (精度范围±4%)
蓝色	255	100	261.50	262.14	-0.24
蓝色	204	80	212.00	209.71	-1.09
蓝色	153	60	158.67	157.28	-0.88
蓝色	102	40	104.33	104.86	+0.51
蓝色	51	20	51.92	52.43	+0.97
蓝色	0	0	0.00	0.00	0.00

双色混光照度实验以蓝色和红色光源为实验对象,以光通量等级比 1:1 混光,理论值由式(5)推导计算可得:

$$E_p = k(p_r E_r + p_b E_b) \quad (9)$$

红、蓝混光照度情况如图 8 所示,测量数据如表 4 所示。由表 4 知,虽然误差仍在精度范围内,但随着测量值增大,照度测量值与理论值的差值变大,照度测量值低于照度理论值的趋势越明显。

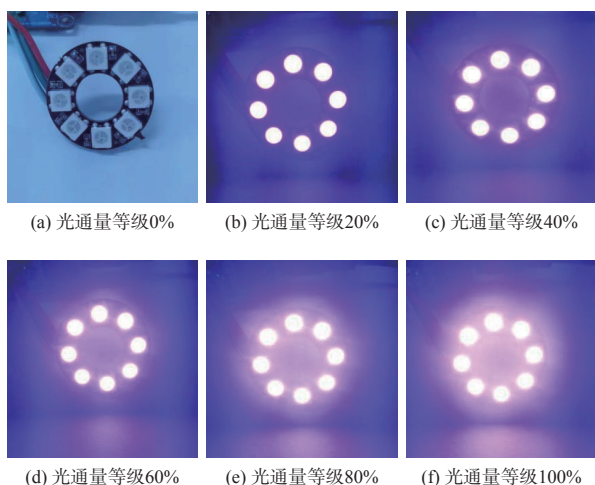


图 8 红、蓝混光照度实验图

Fig. 8 Experimental diagram of illuminance with mixed red and blue light

表 4 红、蓝混光照度测量数据

Table 4 Red and blue mixed illuminance measurement data

光源颜色	光通量等级	光通量等级百分比/%	照度测量值/lx	照度理论值/lx	差值百分比/(精度范围±4%)
蓝色 红色	255	100	372.00	384.85	+3.34
蓝色 红色	204	80	300.5	307.88	+2.40
蓝色 红色	153	60	228.66	230.91	+0.97
蓝色 红色	102	40	155.50	153.94	-1.01
蓝色 红色	51	20	77.50	76.97	-0.69
蓝色 红色	0	0	0	0.00	0.00

3 色混光照度实验以红、绿、蓝 3 色光源为实验对象,光通量等级比 1:1:1 混光,理论值由式(5)推导计算可得:

$$E_p = k(p_r E_r + p_g E_g + p_b E_b) \quad (10)$$

测量数据如表 5 所示。由表 5 可看出,随着照度测量值的增大,照度测量值与照度理论值的差值越来越大,甚至超过了精度允许范围。

表 5 红、绿、蓝混光照度测量数据

Table 5 Illuminance measurement data of mixed red, green and blue light

光源颜色	光通量等级	光通量等级百分比/%	照度测量值/lx	照度理论值/lx	差值百分比/(精度范围±4%)
蓝色 红色 绿色	255	100	542.17	600.71	+9.75%
蓝色 红色 绿色	204	80	438.00	480.57	+8.86%
蓝色 红色 绿色	153	60	346.83	360.43	+3.77%
蓝色 红色 绿色	102	40	236.00	240.28	+1.78%
蓝色 红色 绿色	51	20	117.86	120.14	+1.90%
蓝色 红色 绿色	0	0	0	0.00	0.00

4.2 实验分析

从上述实验数据可以看出,在照度测量值较低(低于约 370 lx)时,测量值与理论值之间的误差较小,差值在数字照度计精度允许范围(±4%)内。根据规范,如居住建筑起居室内一般活动照明要求为 100 lx,书写阅读照明要求最大为 300 lx^[16-17],且可以通过增加灯罩、灯珠等方式提高光通量,因此,在该照度范围内实验数据与数学模型符合较好,系统调控效果达到要求。

当照度测量值较大(约大于 370 lx)时,照度测量值与照度理论值之间的差值随着照度测量值的增加而增加,且照度测量值低于照度理论值。结合照度测量值较低时的实验数据及相关资料,分析误差产生的原因可知,LED 受结温的影响较大,随着照度提高,温度升高,测量值与理论值的差值会增大^[8,17]。

5 结论

本文根据格拉斯曼颜色混合定律,结合 PWM 调控 LED 特性构建光学模型,应用于 STM32 微控制器的调光调色系统中,调控操作可直接在系统上进行,无需接入电脑等设备。实验结果表明,0~370 lx 照度区间范围内,系统的数字化调光调色精度较高,可用于农业补光,提高作物所受光照强度,在光照方面最大限度促进作物生长,增加产量;系统用于机器视觉检测,可针对正常工件与瑕疵工件的视觉差别,调节光源颜色,明显区分正常工件与瑕疵工件,提高工作效率;系统用于家禽养殖,调节照度大小,可缩短家禽的生长周期。

参考文献:

[1] 孟然. 基于机器视觉的工件特征识别与分类方法研

- 究[D]. 天津: 天津科技大学, 2006.
- MENG Ran, Research on feature recognition and classification method for workpiece based on machine vision[D]. Tianjing: Tianjin University of Science and Technology, 2006.
- [2] 周太明. 光的生物功能与动感照明[J]. 中国照明电器, 2005(10): 7-8.
- ZHOU Taiming. Biological function and dynamic lighting of light[J]. China Light & Lighting, 2005(10): 7-8.
- [3] 董超. 基于LED可调光植物生长人工环境监控系统应用研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.
- DONG Chao, Application research on monitoring system of plant growth artificial environment based on the adjustable LED light [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2017.
- [4] 宋国庆, 吴育民, 冯云鹏, 等. 机器视觉在光学加工检测中的应用[J]. 影像科学与光化学, 2016, 34(1): 30-35.
- SONG Guoqing, WU Yumin, FENG Yunpeng, et al. Application of machine vision in optical manufacturing and testing[J]. Imaging Science and Photochemistry, 2016, 34(1): 30-35.
- [5] 胡阳. 基于PWM调光的高显色性白光LED混光优化方法研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- HU Yang. Research on the optimization method of high color rendering white LED based on PWM dimming [D]. Tianjin: Tiangong University, 2019.
- [6] TAGUCHI T. Developing white LED lighting systems and its technological roadmap in Japan[J]. Journal of Light and Visual Environment, 2006, 30: 177-182.
- [7] TSUEI C H, PEN J W, SUN W S. Simulating the illuminance and the efficiency of the LED and fluorescent lights used in indoor lighting design[J]. Optics Express, 2008, 16: 18692-18701.
- [8] 宋鹏程, 文尚胜, 尚俊, 等. 基于PWM的三基色LED的调光调色方法[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 293-300.
- SONG Pengcheng, WEN Shangsheng, SHANG Jun, et al. A dimming method for RGB LED based on three channels'PWM[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 293-300.
- [9] TSUEI C H, SUN W S. Momentary adjustment means for simulating the sunlight color temperature, hues and brightness with RGB LEDs in indoor lighting[C]. Holland: Physics Procedia, 2011: 239-243.
- [10] 夏振平, 付保川, 程成. 基于冷暖白光LED的线性调光混合照明[J]. 发光学报, 2018, 39(5): 730-736.
- XIA Zhenping, FU Baochuan, CHENG Cheng, Mixed lighting based on linear dimming of cold and warm white LEDs [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(5): 730-736.
- [11] 骆伟岸, 王晗, 陈新度, 等. 三通道PWM的数控调光调色方法[J]. 发光学报, 2018, 39(3): 414-421.
- LUO Weian, WANG Han, CHEN Xindu, et al. A digital dimming color and intensity method of three-channel LED[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(3): 414-421.
- [12] 柳建新, 田会娟, 洪振, 等. 高显色指数白光LED光源的研究[J]. 应用光学, 2017, 38(4): 599-605.
- LIU Jianxin, TIAN Huijuan, HONG Zhen, et al. Research on high color rendering index white LED light source[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(4): 599-605.
- [13] 高兴华, 李建永, 全继花, 等. 基于PT4115驱动的高精度数字LED星等模拟器[J]. 应用光学, 2016, 37(2): 276-280.
- GAO Xinghua, LI Jianyong, QUAN Jihua, et al. High-precision digital LED star magnitude simulator based on PT4115 drive[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(2): 276-280.
- [14] 朱丹红. LED类日光光源色度学的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2014.
- ZHU Danhong. Studies on the chrominance of LED based light source with daylight spectrum [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2014.
- [15] 刘火良, 杨森. STM32库开发实战指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 693-694.
- LIU Huoliang, YANG Sen. STM32 guide for library development in the field [M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 693-694.
- [16] 陈家斌, 陈蕾. 电气照明实用技术[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2008: 27-28.
- CHEN Jiabin, CHEN Lei, Electric lighting practical technology [M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 2008: 27-28.
- [17] 殷录桥, 杨卫桥, 李抒智, 等. 基于三基色的动态色温白光发光二极管照明光源[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 230-236.
- YIN Luqiao, YANG Weiqiao, LI Shuzhi, et al. Dynamic color temperature white lighting source based on red green and blue light emitting diode[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 230-236.