

# 基于多通道实时动态反馈的 LED 智能照明系统

陈恩果<sup>1,2</sup>, 周心禹<sup>1</sup>, 郭太良<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350002;

<sup>2</sup>福州大学电子科学与技术博士后科研流动站, 福建 福州 350002

**摘要** 与传统照明相比,采用发光二极管(LED)作为光源的智能照明更高效、舒适和环保,对环境数据的实时采集与动态反馈是研究 LED 智能照明系统的重点。基于模块化设计思路,提出了一种集成化 LED 智能照明系统,从理论上建立了环境参数、人体舒适度指数及照明光源输出参数三者之间的映射关系。利用多通道集成模块实时监测环境参数变化,自动调节光源的光学性能以满足人体舒适度的要求。搭建的系统能够同步采集并反馈空间环境中的声音、温度、湿度、照度,通过实时分析光源的光通量、色温、光谱和显色指数变化,验证了所搭建系统的有效性。该系统达到了自动控制与绿色照明的协同融合,是一种易于推广、低成本的人性化照明控制系统,在照明和显示领域具有广阔的应用前景。

**关键词** 光学器件; 光电子技术; 智能照明; 绿色照明; 发光二极管; 动态反馈

**中图分类号** TN29      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.012301

## LED Intelligent Lighting System Based on Multi-Channel Real-Time Dynamic Feedback

Chen Enguo<sup>1,2</sup>, Zhou Xinyu<sup>1</sup>, Guo Tailiang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

<sup>2</sup> Post Doctoral Research Station of Electronic Science and Technology,  
Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China

**Abstract** Compared with the traditional lighting, intelligent lighting systems which use light emitting diode (LED) as the light source are efficient, comfortable and environmentally friendly. Real-time acquisition and dynamic feedback for environmental data are the research focus for LED intelligent lighting systems. Based on the modular design mentality, an integrated LED intelligent lighting system is proposed, and the mapping relationship among environmental parameters, human comfort index and output parameters of light source is established. The multi-channel integrated module is used to monitor the change of environmental parameters in real time, and the optical properties of the light source can be adjusted automatically to satisfy the requirement of human comfort. The established system can synchronously collect and feed back the sound, temperature, humidity and illumination in the space environment. By analyzing the changes of luminous flux, color temperature, spectrum and color rendering index in real time, we demonstrate the validity of the established system. The proposed system achieves the synergy fusion of automatic control and green lighting, and it is a kind of generalized, low-cost and humanized lighting control system. The system will have a broad application prospect in the field of lighting and display.

**Key words** optical devices; optoelectronic technology; intelligent lighting; green lighting; light emitting diode; dynamic feedback

**OCIS codes** 230.3670; 120.1880; 120.3150

**收稿日期:** 2016-08-22; **收到修改稿日期:** 2016-09-08; **网络出版日期:** 2016-12-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(61405037)、福建省科技计划(2015H4014)、福州大学高等教育教学改革工程项目(52001078)、福州大学本科专业核心课程建设项目(52000735)

**作者简介:** 陈恩果(1984—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光电系统设计方面的研究。E-mail: ceg@fzu.edu.cn

## 1 引言

目前,全球的照明能耗大约占整个电力资源消耗的五分之一,照明在生活、生产等各方面具有重要作用,为社会发展做出了巨大贡献。传统照明的主要缺点为光源光效低下、控制方法单一,这使其在节能环保的绿色照明社会中很难得到进一步的扩展应用。如今,发光二极管(LED)光源的各项性能指标得到稳步提升,应用领域日趋广泛,逐步替代了传统照明中的钨丝灯(黑体辐射光源)、荧光灯(气体放电灯光源)等,尤其是在全球能源危机再度升温的环境下,LED备受关注与青睐。据相关数据预测,2020年全球照明市场的规模将突破1500亿美元,其中LED照明市场的规模将超过425亿美元。在2015~2020年期间,LED照明市场的复合年增长率将高达13%<sup>[1-2]</sup>。现有的LED光源照明系统大多存在3方面的问题:1)配备简易开关的照明系统不能根据环境变化控制光源,开关灯时亮度骤然变化,不符合人眼明适应和暗适应的生理特征,并且灯丝温度的骤冷骤热会影响灯泡的使用寿命;2)光源在任何时候都保持额定亮度,造成能源浪费,并且容易导致人眼疲劳;3)控制系统无法调节光源的输出光学参数,导致用户体验较差。结合LED光源和节能环保的控制方案,研究者们提出了智能照明的概念。利用智能化信息处理技术及节能型电器可构成智能照明控制系统。2011年,Tsuei等<sup>[3]</sup>提出了通过调整三基色LED的室内照明强度来模拟日光色温,目的是在室内环境中模拟类似阳光的照明。为进一步对光源色温进行自动控制,Chen等<sup>[4]</sup>提出了一种非线性控制发光强度的方法,用于实现白色LED双色温系统。2015年,湛江波等<sup>[5]</sup>通过控制模块将指令发送到脉宽调制驱动电路中,分别调节各个LED的驱动电流占空比,进而控制4种LED的光通量及其配比方法,实现了一种光通量和显色性可控、色温可调(2700~6400 K)的系统。同年,牛犇等<sup>[6]</sup>研究了基于ATmega 2560的智能LED控制器,利用红外遥感实现了感应开关和控制光源光照强度、色温的功能。2016年,Chewa等<sup>[7]</sup>引入智能优化算法来处理反馈信号,从而可以改变基于脉宽调制的灯具亮度。分析以上文献不难发现,LED智能照明系统的功能常通过微控制器来实现,量化采集参数与反馈参数间的理论关系以及实现更准确地实时、自动反馈调制照明输出成为研究LED智能照明的重点。

本文根据量化的温湿度来定义人体舒适度指数,提出了一种实时反馈、自动优化控制光源输出参数的智能照明系统,该系统包括数据采集模块、传感器模块、微控制器、中央控制系统及智能转换模块,可实现实时监测室内照明环境变化、多功能集成以及智能照明与绿色照明的有效融合。

## 2 LED智能照明系统设计概述

所提出的LED智能照明系统的总体设计为:建立环境参数、人体舒适度指数及照明光源输出参数三者之间的映射关系;基于三基色LED光源,设计了多通道智能照明系统;进行各功能模块的集成。建立温湿度与人体舒适度指数、人体舒适度指数与LED输出色温、外界光照强度与LED输出光通量之间的映射关系,以此作为系统进行实时反馈调节的理论依据。

系统的总体设计原理图如图1所示,图1给出了智能照明系统的主要输入与输出模块之间的关系。外界环境的光照强度、声音以及人体舒适度指数是影响系统性能的重要参数,系统将这三种参数分别作为非耦合输入参数,利用独立通道和模块采集各个输入信号;通过智能照明系统中中央处理器(CPU)的处理,各个输入信号可分别转化为可控制的光源输出光通量、自启动触发信号和输出色温。在该系统中,人体舒适度指数主要包括温度和湿度两个参数,风速和气压也是影响人体舒适度指数的重要因素,由于在室内环境中这两个参数的变化不明显,可视为常量,因此在该系统中不予考虑。

根据图1所示的系统总体设计原理,该集成智能照明系统主要包括4个反馈功能:基于环境声音,实现对自启动的控制;基于外界环境光照强度,并利用CPU控制输出光通量;根据温度、湿度,计算人体舒适度指数,并将其实时反馈给LED照明系统;基于人体舒适度指数,并利用CPU控制LED输出色温。系统主要利用光强传感器模块(BH1750FVI)获取外界环境的光照强度,利用温湿度采集模块(DHT11)采集外界环境温湿度,并利用声控传感器实现系统LED的声控开关功能。

图2为各个模块与主控制器的交互关系。系统中通过J-Link连接各个模块。选型确定后,各个模块将满足如下运行过程:在光强传感器模块中,微控制器(STM32)通过串行总线(I<sup>2</sup>C)控制BH1750FVI的信号

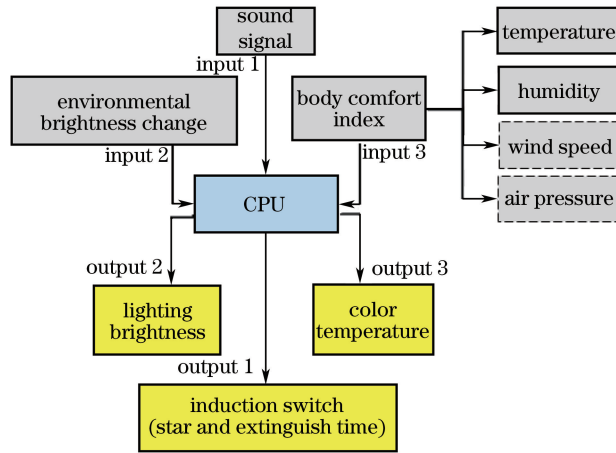


图 1 系统的总体设计原理图

Fig. 1 Schematic of system overall design

读写,并将读到的外界光照强度值在薄膜晶体管液晶显示器(IL19341 LCD screen)上显示;在温湿度传感器模块中,STM32 通过输入/输出端口控制 DHT11 的信号读写,根据读取的温湿度值计算人体的舒适度指数,并将其在 TFT-LCD 上显示;在 STM32 控制下,TFT-LCD 显示模块可实现对外界光照强度、温度、湿度、人体舒适度指数、光照强度阈值等信息的实时显示。

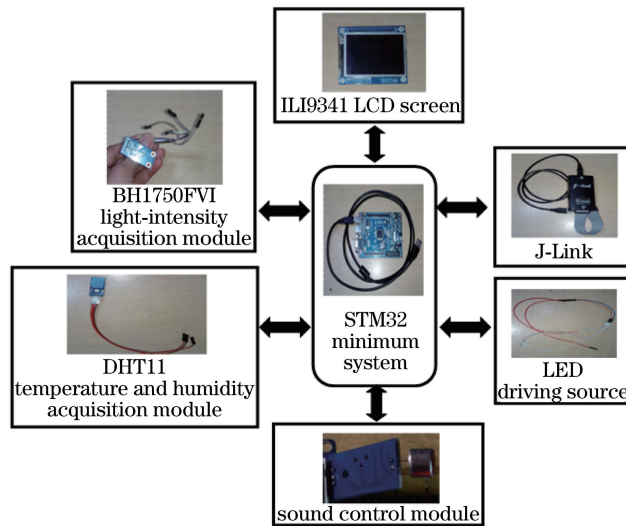


图 2 智能照明系统中各个模块与主控制器的交互关系

Fig. 2 Interaction relationship between each module and main controller in intelligent lighting system

### 3 功能模块设计原理

#### 3.1 实时反馈调节 LED 输出光通量

利用 BH1750FVI 可实时采集外界光照强度信息并将其转换为可读数值。系统通过光强采集模块实时采集外界环境的光照强度,并将其转化为电信号后传输至 CPU;经过微控制器对信号的处理,输出信号反馈到 LED 光源,从而实现对 LED 光源的调光。所设计的照明系统主要用于室内居住照明,因此可将外界光照强度定义为室内采集到的自然光的光照强度。LED 的输出光强度可用 LED 的输出光通量来表示,输出光通量可表示为

$$L_{\text{out}} = \begin{cases} B_{\text{CMPMAX}} > I_{\text{Lit}} > B_{\text{CMPMIN}}, & 10^4 - I_{\text{Lit}} g_{\text{Grade}} / B_{\text{CMPMAX}} \\ I_{\text{Lit}} \geq B_{\text{CMPMAX}}, & 0 \\ \text{else,} & 2000 \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $B_{\text{CMPMIN}}$  为系统设定的光照强度的最小边界,取值为 1000;  $B_{\text{CMPMAX}}$  为系统设定的光照强度的最大边界,取值为  $10^4$ ;  $I_{\text{Lit}}$  为实时光照强度值;  $g_{\text{Grade}}$  为一个定值,此处设定为  $10^4$ 。由(1)式可知,当外界环境光照强度介于  $1001 \sim 10^4$  lx 之间,LED 的输出光通量随外界环境光照强度的减小而增加,即当外界光照强度减小至 1001 lx 时,LED 输出光通量达到最大;当外界光照强度低于 1001 lx 时,为避免光源刺激人眼,将 LED 设定为柔和光输出;当外界光照强度高于  $10^4$  lx 时,LED 自动熄灭。

为了验证外界光照强度和 LED 输出光通量的关系,当外界环境光照强度介于  $1001 \sim 10^4$  lx 之间时,LED 的输出光通量  $\Phi$  可表示为

$$\Phi = k_1 l + b_1, \quad (2)$$

式中  $l$  为外界光照强度,  $k_1$ 、 $b_1$  分别为待确定的比例系数和常数项。

### 3.2 实时反馈调节 LED 输出色温

实时环境因素的采集主要依赖 DHT11 模块,该模块可灵敏地检测周围环境温湿度的变化,迅速读取并传输数据值。人体所感知的人体舒适度主要依赖于环境温度和湿度的变化,因此人体舒适度  $C_{\text{SSD}}$  的量化也可以根据温度和湿度之间的关系来计算,即<sup>[8]</sup>

$$C_{\text{SSD}} = (1.818T + 18.18)(0.88 + 0.002h_{\text{RH}}) + \frac{T - 32}{45 - T} - 3.2v + 18.2, \quad (3)$$

式中  $T$  为平均气温,  $h_{\text{RH}}$  为相对湿度,  $v$  为风速。该系统忽略风速对人体舒适度指数的影响,因此(3)式可转化为

$$C_{\text{SSD}} = (1.818T + 18.18)(0.88 + 0.002h_{\text{RH}}) + \frac{T - 32}{45 - T}. \quad (4)$$

根据(4)式,可以得到  $C_{\text{SSD}}$  与  $T$ 、 $h_{\text{RH}}$  的关系图,如图 3 所示。图 3 分析了  $T = 25$  °C 时相对湿度对人体舒适度指数的影响以及当相对湿度分别为 30%、70% 时,  $T$  对人体舒适度指数的影响。由图 3 可知,  $T$  一定时 (25 °C),  $h_{\text{RH}}$  的改变对人体舒适度指数的影响较小,随着  $h_{\text{RH}}$  的增大,人体舒适度指数随之增大,然而增幅并不明显,基本稳定在一个常数附近,且人体舒适度指数与  $h_{\text{RH}}$  近似呈线性关系;  $h_{\text{RH}}$  一定时,  $T$  对人体舒适度指数的影响较大,  $T$  升高,人体舒适度指数增大,且变化幅度较大。因此,影响人体舒适度指数的主要因素为  $T$ ,  $T$  越大,人体舒适度指数越大,反之越小;影响体感差异最为明显的因素即为  $T$ ,  $T$  的变化导致体感差异明显,从而影响人体舒适度。

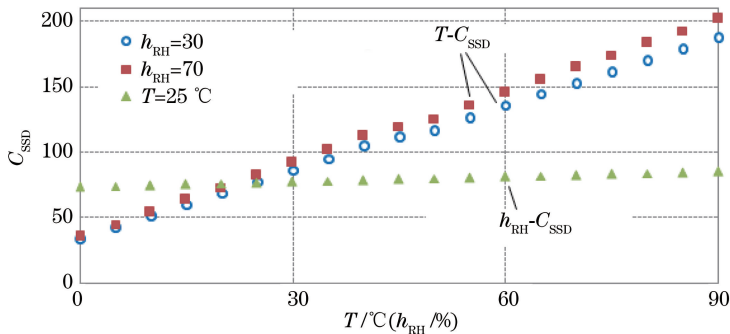


图 3 人体舒适度指数与温度、相对湿度的关系

Fig. 3 Relationship among  $C_{\text{SSD}}$ ,  $T$  and  $h_{\text{RH}}$

根据 LED 智能照明系统的实际应用,将人体舒适度指数划分为不同的等级,其中每一等级分别对应人体不同的感知情况,虽然人体舒适度为主观指标,但可以通过人体舒适度指数量化不同光照情况下的人体体感。这里推导了人体舒适度指数的计算公式,计算了外界环境的主要因素与体感的关系,计算所得的结果可反映实际外界环境因素的改变对体感的影响,如表 1 所示。按照不同的色温带来的不同体感,将色温分为低、中、高 3 个区段<sup>[9]</sup>。低色温指色温在 3000 K 以下,此时输出光偏红,给人以温暖的感觉;中色温指色温在 3000~6000 K 之间,此时不会给人带来特别明显的视觉和心理效果;高色温指色温超过 6000 K,此时输出光偏蓝,给人以清冷的感觉<sup>[10]</sup>。

表 1 人体舒适度指数的等级

Table 1 Classification of  $C_{SSD}$ 

$C_{SSD}$	Classification	Human body feeling
86-88	4	most unadaptable
80-85	3	hot and very uncomfortable
76-79	2	hot and uncomfortable
71-75	1	warm and comfortable
59-70	0	most comfortable and most adaptable
51-58	-1	slightly cooler and more comfortable
39-50	-2	cold (cool) and uncomfortable
26-38	-3	very cold and very comfortable
<25	-4	cold and unadaptable

为了整合人体舒适度指数与  $T$  的关系,突出温度对体感差异的影响,基于表 1,对 LED 照明做如下设定:人体舒适度指数超过 76 时,假定人体感觉偏热,系统将实时反馈并自动调节到高温,通过调节 LED 色温,给人以清冷的感觉;当人体舒适度指数低于 50 时,假定人体感觉偏凉,系统将实时反馈并自动调节到低色温,通过调节 LED 色温的变化,给人以暖和的感觉。调节程度视 LED 光源而定,此过程可视为正反馈调节。根据系统设计,假定色温值用  $C_T$  表示,则系统调节后 LED 的输出色温与人体舒适度指数的关系可表示为

$$C_T = k_2 C_{SSD} + b_2, \quad (5)$$

式中比例系数  $k_2$  为实验设定的参数,常数项  $b_2$  将在后续实验中根据模块参数进一步确定。因此,人体舒适度指数范围为 50~76,LED 光源自动反馈发出中等色温的光;当人体舒适度指数小于 50 时,LED 光源反馈输出色温值较低的光;当人体舒适度指数大于 76 时,LED 光源反馈输出色温值较高的光。因此,系统可通过实时反馈和自动调节色温来适应人体感知。

### 3.3 声控智能感应开关

在所提出的多通道智能照明系统中,声控模块是一个独立的功能模块,它通过探测外界声音的扰动来实现自启动功能,并通过用户自主设定来实现照明系统的延时熄灭功能,该模块是智能控制系统的重要组成部分。一方面,声控自启动通过人声信号来启动照明系统的某些功能,当系统接收到人声信号且此信号强度大于系统设定的阈值时,系统将自动启动光源,该阈值取决于声传感器的灵敏度和用户的设定,设定的阈值越小,系统自启动需要的人声信号强度越小,即系统灵敏度越高;相反,设定的阈值越大,系统自启动需要的人声信号强度越大,即系统灵敏度越低。另一方面,延时熄灭时间是用户设定的光源自动延时熄灭的时间,自定义延时熄灭的时间范围为 0~12 h,当设定时间倒计时为 0 时,系统光源将关闭。声控模块的功能可以通过系统设定的按键关闭,即自启动与延时熄灭功能都可以通过按键被动关闭。图 4 为当外界声音信号足够强时声控采集模块工作流程图。声控采集模块的感受器将声信号转变为电信号,电信号经电子线路传输,感受器配合执行机构和反馈线路以实现智能感应开关,最终实现声控智能感应开关及延时功能。

该智能照明系统应用于阅读照明时,可通过按键关闭声控功能,系统将不会自启动和关闭,从而避免影

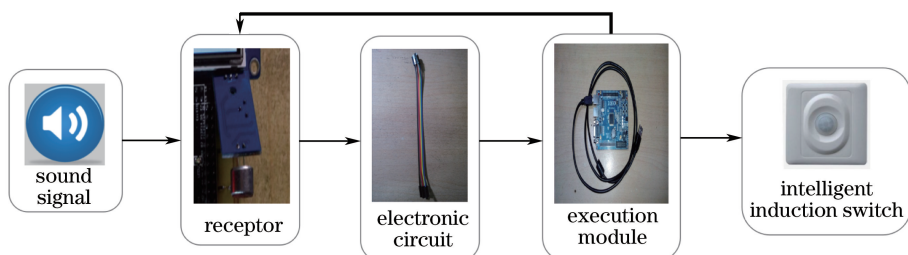


图 4 声控采集模块工作流程图

Fig. 4 Working flowchart of sound control acquisition module

响阅读体验;应用于居室照明时,正常居住环境的噪声以小于 60 dB 为佳,所以通常将系统阈值设定为 80 dB,除了如拍手动作产生的高分贝噪声外,系统将不会自启动,从而避免频繁启动。

### 3.4 系统功能集成与输出

系统根据外界环境的光照强度、温度、湿度及声音实时动态地调节光源的输出色温、输出光通量及开闭状态,这些输入环境信息和输出光源信息将以数据形式显示在一个液晶屏幕上,供使用者直观地观察。考虑到该 LED 智能照明系统的普适性,设定 3 种系统输出模式。

1) 全自动模式:系统多通道同步工作,通过实时、自动采集外界信号并由微控制器处理和反馈信号,可实现光源自动调光。由于各模块相互独立,当多个信号同时输入时,各个传感器将同步采集信号并独立进行存储,再根据系统编写的代码顺序处理。由于各个传感器之间的程序延时处理时间差在毫秒级别,可认为是同步处理。

2) 半自动模式:预先设定好不同输出光对应的场景模式,用户通过最小系统上的按键或者遥控器选择场景,系统根据人工选择的场景控制光源以实现特定的光输出。

3) 手动模式:用户自行设定系统感受环境参数产生变化的分界点,根据是否触发设定的分界点对光源输出进行反馈控制。

## 4 功能模块集成化

### 4.1 功能传感器设计

#### 4.1.1 温湿度传感器选型及实现

如前文所述,选用 DHT11 作为数字温湿度传感器<sup>[11-12]</sup>,该传感器包括一个电阻式感湿元件和一个具有负温度系数的热敏电阻元件,传感器与一个高性能 8 bit 单片机相连接,采用单总线进行通信,通过 I/O 端口将传感器内部的湿度、温度数据(所占空间为 40 bit)一次性传给单片机,采用校验和方式对数据进行校验。该传感器实时采集某时刻的温湿度将采集的数据进行数字化处理,从而可用于显示输出。该传感器的通信过程如图 5 所示,STM32 的 PB6,(通用输入/输出 B 端口的 6 引脚)通道口作为 DHT11 的数据采集口,系统每刷新一次,DHT11 便更新一次数据,将更新数据传输给单片机用于显示和计算。系统模块中结合了数字采集模块和温湿度传感技术,兼容性较好,保证了 LED 智能照明系统具有较高的可靠性和稳定性。图中 VCC 为电源电压,GND 为电线接地端。

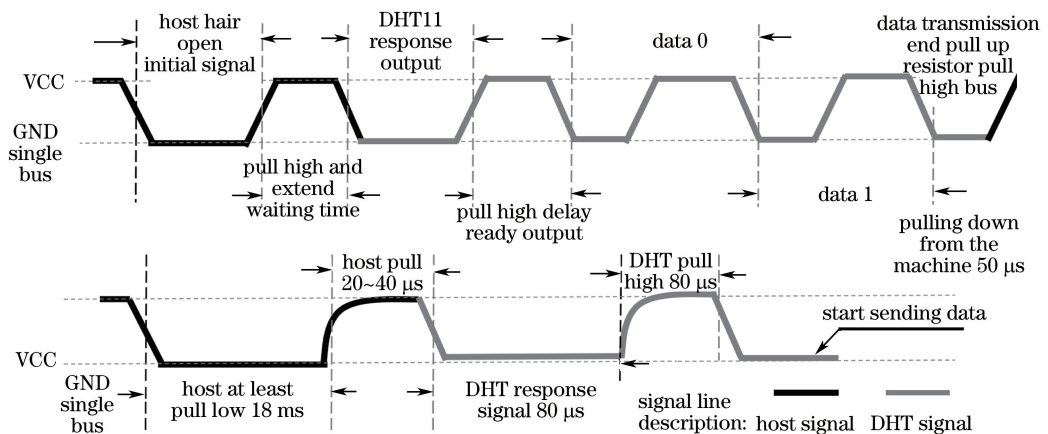


图 5 温湿度传感器的信号传输图

Fig. 5 Signal transmission diagram of temperature and humidity sensor

#### 4.1.2 光强传感器的选型及实现

光强采集模块探测光照强度的范围为  $1 \sim 6.5535 \times 10^4$  lx,支持连续和单次 2 种读取模式。BH1750FVI 光强传感器可直接输出数字信号,并且支持 I<sup>2</sup>C 通信协议,应用于本系统将简化驱动器的程序设计。系统采用 STM32 单片机从传感器中读取输出数字信号并处理反馈信号,通过修改程序实现输出信号占空比的调

整,从而使 LED 光源实现自动调光。

图 6 为光强采集模块 BH1750FVI 的印制电路板(PCB)原理图。系统中 BH1750FVI 模块利用单片机的硬件 I<sup>2</sup>C 读写数据,STM32 中 PB11 的开设用于读取 BH1750FVI 的地址线(ADDR)端口(I<sup>2</sup>C 通信时设备地址的选择端口)信号,PB10 的开设用于读取 BH1750FVI 的时钟线(SCL)端口信号,双向数据线(SDA)端口置为低电平。如图 6 所示,在 I<sup>2</sup>C 总线上传送数据,先传送最高位,由主机发出启动信号,SDA 在 SCL 高电平期间由高电平跳变为低电平,然后由主机发送一个字节的的数据。数据传送完毕后,由主机发出停止信号,SDA 在 SCL 高电平期间由低电平跳变为高电平。图中 DVI 端口为数字视频端口,C1~C4 为具有不同电容的电容,R1~R3 为阻值为 1 k $\Omega$  的电阻;U1 和 U2 分别为芯片 1 和芯片 2;J1 和 J2 分别为器件 1 和器件 2;CON1 和 CON2 分别为排针 1 和排针 2。

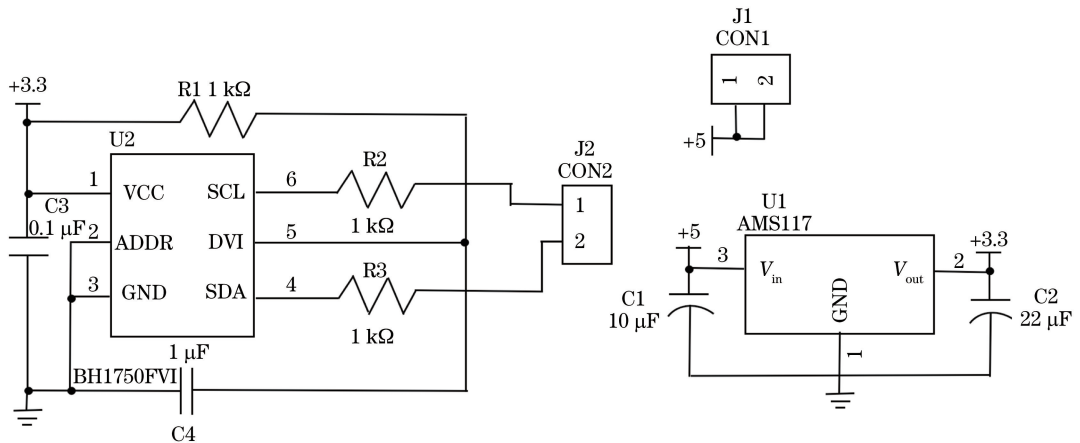


图 6 光强采集模块的 PCB 原理图

Fig. 6 PCB schematic of light intensity acquisition module

#### 4.1.3 声传感器的选型及实现

声控采集模块原理图如图 7 所示,该模块可探测周围环境的声强,当环境声音强度未达到设定阈值时,数据输出(DO)端口输出高电平;当环境声音强度超过设定阈值时,DO 端口输出低电平。DO 端口可以与单片机直接相连,通过单片机来检测高低电平,从而实现环境声音强度的检测。系统在声控模块中加入了可以调节灵敏度的旋钮,灵敏度越大,能辨别的干扰噪声越小,从而更容易识别外界干扰声音。系统通过设置按键来调节光源熄灭时间,超时后声控模块启动工作,当接收到可分辨声音时,声信号将启动系统,使光源正常工作。图 7 中 S9014 为 NPN 晶体管,用来赋予 LH393 负端正极性或负极性。

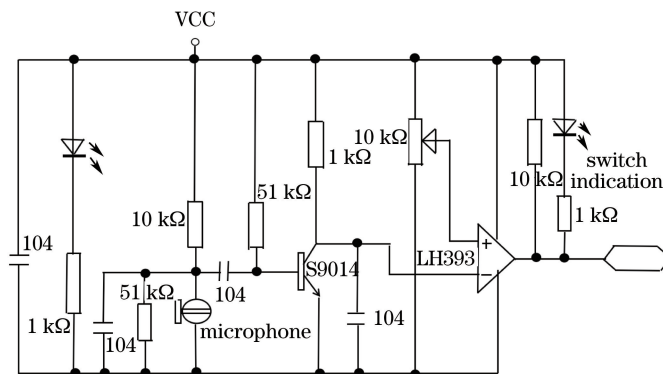


图 7 声控采集模块原理图

Fig. 7 Diagram of sound control acquisition module

## 4.2 主体控制核心的实现

控制器为该系统的核心,为满足处理速度和通信的要求,采用内核 STM32(ARM Cortex-M3,ST 公司)作为控制核心<sup>[13]</sup>。如图 8 所示,该芯片具有内存为 128 kB 的 Flash、内存为 20 kB 的静态随机存取存储器

(SRAM)、2个串行外设接口、3个串口、1个通用串行总线(USB)、1个控制局域网总线、2个分辨率为12 bit的模拟数字转换器(ADC)、实时时钟(RTC)和51个I/O端口。可见,外设和I/O端口选择较多,适用于本系统的多通道反馈控制。CH1~CH7为系统通道,DAM为直接内存存取控制器,AHB为先进高性能总线,APB1、APB2为先进外围总线,ADC1~ADC3为数模转换端口,TIM2~TIM6为定时器,FLITF为闪存存储器接口,GPIOA为通用输入/输出A端口,GPIOB为通用输入/输出B端口,ICode为指令代码,DCode为数据代码,Cortex-M3为一个32 bit的核。在传统的单片机领域,存在一些不同于通用32位处理器应用的要求。控制领域都要求中断速度快,Cortex-M3基于硬件进行中断处理,最多可减少12个时钟周期数,在实际应用中可减少70%的中断,适于本系统的应用。此外,基于Cortex-M3的单线调试技术,将一个引脚专门用作调试,实现了系统在低成本环境中的开发。Cortex-M3还集成了大部分存储器、控制器,可直接在微控制单元(MCU)外连接Flash,降低了系统的设计难度,减少了该系统的应用障碍。

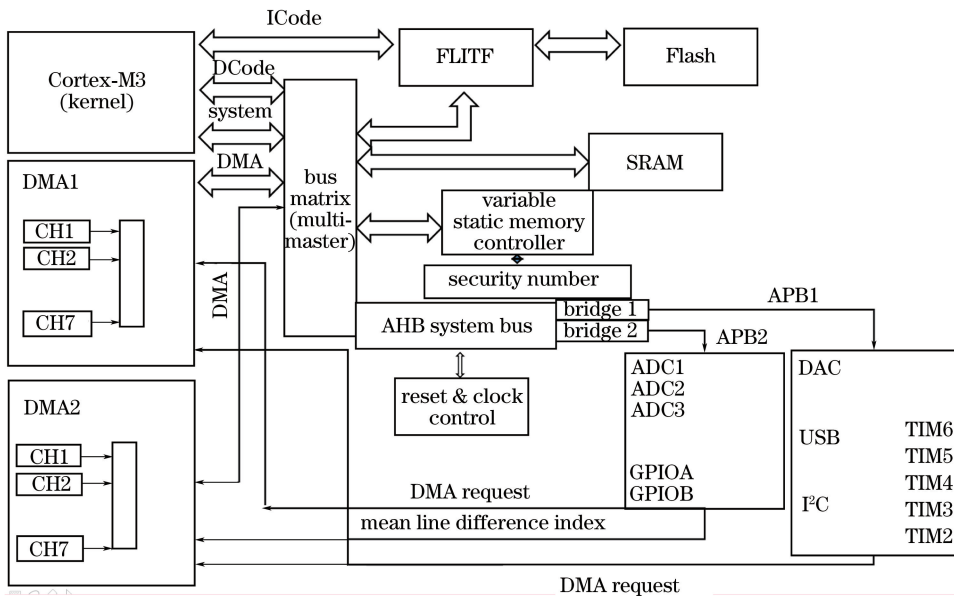


图8 STM32控制多模块原理图

Fig. 8 Diagram of STM32 control multi-module

### 4.3 LED驱动模块

智能照明系统中的光源是输出终端,能够在控制参数发生变化时自动反馈调控结果<sup>[14]</sup>,这里以普通的LED光源作为输出设备对系统进行原理性验证。LED光源的开关速度可以高达微秒以上,满足实时反馈调节的需求。图9中控制端口STM32接收外界环境因素的反馈,通过STM32中的脉冲宽度调制(PWM)<sup>[15]</sup>的3个通道口,分别控制白、红、蓝LED照明光源,以改变输出光参数。STM32的I/O端口PB0、PC8(通用输入/输出C端口的8引脚)、PB5分别作为红、白、蓝LED的输出端口。因此,需把电源转换为脉冲恒流源,采用改变脉冲宽度的方法改变参数输出。假设脉冲周期为 $T_{PWM}$ ,脉冲宽度为 $W_{ton}$ ,则占空比

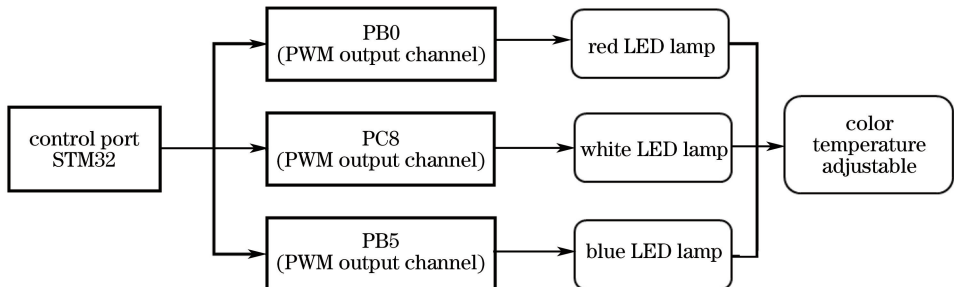


图9 LED与STM32的连接示意图

Fig. 9 Connection diagram of LED and STM32



$D = W_{\text{ton}} / T_{\text{PWM}}$ , 占空比越大, 意味着脉冲高电平在一个周期内维持的时间越长。人眼无法在一个周期内分辨出 LED 亮灭的变化, 只能根据一个周期内的平均电压来决定, 占空比越大, 平均电压越大, LED 越亮, 因此通过改变恒流源脉冲的占空比便可改变 LED 的亮度。

通常情况下, 室内 LED 照明都采用单颗或多颗白光光源, 色温的可调节范围受到极大限制。为了获得更大的色温调节范围, 对三基色 LED 照明系统进行改进, 将三基色 LED 光源改为包含白色、红色和蓝色的集成光源, 且各灯珠的输入功率均为 3 W, 工作电流均为 350 mA, 从而保证了驱动电路具有较好的兼容性。改进的三基色 LED 光源既可用于单颗光源, 也可用于多光源集成。

#### 4.4 系统软件功能实现

系统软件设计的主要控制流程图如图 10 所示, 软件包含头文件和库文件, 开始时对函数进行声明, 设定 I/O 端口, 定义全局变量, 再对各个子函数进行声明; 进入主函数, 声明局部变量, 配置定时器, 进行相关模块的初始化, 如液晶屏幕的初始化、DHT11 初始化、BH1750FVI 初始化等, 再进行液晶开窗及液晶上固定文字和动态数据显示位置的设定; 采集和读取 DHT11 的 I/O 端口电平信号, 将其转换为温湿度并显示在液晶上, 通过  $I^2C$  的实时采集, 同样将采集到的电信号转换为可显示的光照强度数据并显示在液晶屏上。对于声控模块, 通过按键来调节 LED 自动关闭的时间, 当外界干扰声音大于声控模块的灵敏度时, LED 再次开始工作; 将温度、湿度代入公式进行计算, 获得人体舒适度指数, 再进行实时反馈判断, 从而决定红、蓝灯的亮灭, 最终达到调节色温的目的。上述流程为一轮反馈调节的过程, 该系统根据此流程来实现预期目的, 在主体函数中, 模块化数据的采集始终处于刷新状态, 不间断获取新数据以达到对周围环境因素进行实时监测的目的。

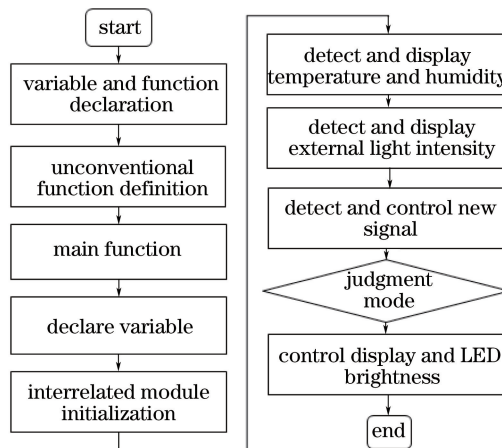


图 10 控制程序流程图

Fig. 10 Flow chart of control program

## 5 实验及测试结果

### 5.1 系统模块集成

图 11 为智能照明系统的功能模块示意图, 包括温湿度采集模块、光强采集模块、LED 光源模块、声控模块、液晶屏 (LIL9341LCD) 等外设, 系统采用的主板为 STM32 开发板, 硬件外设通过杜邦线与主板的通信口连接, ILI9341 通过 STM32 的集成 I/O 端口输出显示, STM32 的 PB6 通道 I/O 端口作为 DHT11 的数据采集口, BH1750FVI 通过 STM32 的  $I^2C$  进行数据刷新采集, 利用 PB10 和 PB11 通道采集光照强度信号。在实际运用中, 采集模块的各个传感器均间隔放置, LED 光源独立封装, 光源及各个传感器与主控模块的信息传输通过硬件电路连接来实现, 且各部分之间互不影响。

### 5.2 实时反馈调节光通量的测试结果及分析

当 LED 智能照明系统正常工作时, 在外界温度、湿度、人体舒适度指数取值一致的情况下, 通过改变外界环境的光照强度来实现自动反馈测试得到的实验结果, 由精密快速光谱辐射计 (HAAS-1200, 远方光电)

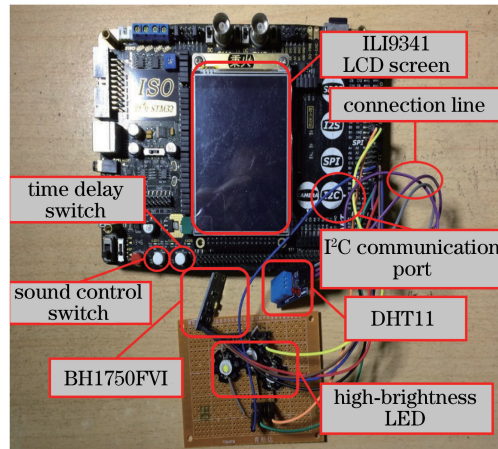


图 11 智能照明系统的功能模块示意图

Fig. 11 Diagram of function modules of intelligent lighting system

测试光通量,图 12 为相应的实验结果图。各组实验条件中,相对湿度、温度、人体舒适度指数分别设定为 65%、20 °C、73,外界光照强度为系统的唯一变量,实验测试分为 5 组。对比图 12(a)~(e)可以发现,在其他因素(温湿度)都相同的情况下,外界光照强度范围为 1001~10<sup>4</sup> lx 时,白色 LED 光源的输出光通量随外界光照强度的增加而减小。当外界光照强度为 1513 lx 时,白色 LED 光源输出光通量实测为 6.90 lm;当外界光照强度增大为 5241 lx 时,LED 光源输出光通量减小为 4.04 lm;当外界光照强度增加至 7874 lx 时,LED 光源输出光通量进一步减小为 1.84 lm。当外界光照强度达到 2.6321×10<sup>4</sup> lx 时,此时已超过 10<sup>4</sup> lx 的系统响应阈值,环境照度相当于室外白天环境照度,此时 LED 光源实时自动熄灭,进入节能状态,如图 12(d)所示。当外界光照强度的实测值为 70 lx 时,相当于外界环境较暗的情况,为了不刺激人眼,LED 输出光也自动调节为较柔和的亮度,输出光通量为 0.18 lm,在提供照明的前提下节约了用电量,如图 12(e)所示。由图 12 可较为直观地看出受外界光照强度反馈的 LED 光通量输出的变化,同时,液晶屏幕实时监控着各项数据,验证了多通道数据采集的有效性。

表 2 根据环境光照强度实时反馈调整照明输出光通量的实验结果

Table 2 Experimental results of output luminous flux adjustment by real-time feedback according to environmental light intensity

	Relative humidity /%	Temperature /°C	External illumination /lx	C <sub>SSD</sub>	Mixing color	Luminous flux /lm
Test result 1 Fig. 12(a)	65	20	1513	73	White	6.90
Test result 2 Fig. 12(b)	65	20	5241	73	White	4.04
Test result 3 Fig. 12(c)	65	20	7874	73	White	1.84
Test result 4 Fig. 12(d)	65	20	26321	73	White	0
Test result 5 Fig. 12(e)	65	20	70	73	White	0.18

在满足表 2 测试条件的情况下,将多次改变外界光照强度值后测得的 LED 光通量结果绘制在图 13 中,可以得到 LED 智能照明系统输出光通量与外界光照强度之间的变化关系。由图 13 可知,当外界光照强度小于 1000 lx 时,LED 反馈输出的光通量均为一个较低值(0.18 lm),并保持不变。当外界光照强度达到 1001 lx 时,LED 反馈输出的光通量达到最大值,此后 LED 输出光通量与外界光照强度呈线性关系,计算得到(2)式的系数  $k_1 = -0.000777$ ,  $b_1 = 5.72$ 。当外界光照强度超过 10<sup>4</sup> lx 时,光源熄灭,此时光通量为 0 lm。

在满足表 2 的实验条件下,外界光照强度分别取  $L_1 = 5241$  lx、 $L_2 = 7874$  lx、 $L_3 = 70$  lx,利用 HAAS-

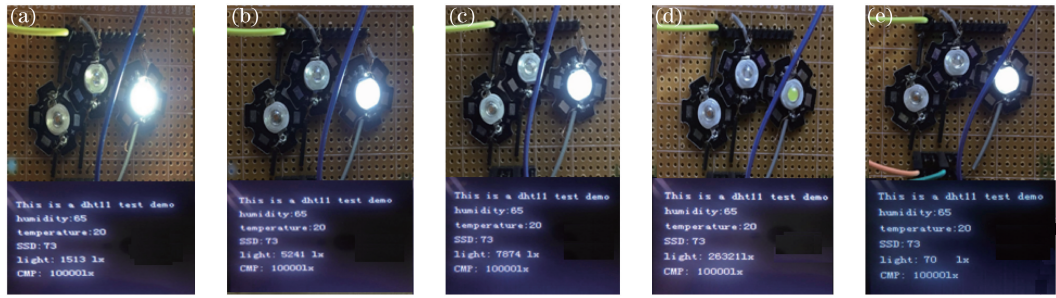


图 12 根据外界环境不同的光照强度实时反馈调整照明输出光通量。

(a) 1513 lx; (b) 5241 lx; (c) 7874 lx; (d)  $2.6321 \times 10^4$  lx; (e) 70 lx

Fig. 12 Output luminous flux adjustment by real-time feedback according to different environmental light intensities.

(a) 1513 lx; (b) 5241 lx; (c) 7874 lx; (d)  $2.6321 \times 10^4$  lx; (e) 70 lx

1200 测得输出光谱能量分布如图 14 所示,光谱的横坐标为输出光波长,纵坐标为对应的归一化光能量值。比较图中各条曲线不难发现,白光 LED 是由蓝光激发 YAG 荧光粉实现的,在外界环境光照强度变化的条件下,各条曲线的趋势基本相近,峰值波长的峰位均一致(位于 448 nm),对应的峰值越来越低;在 500~600 nm 波段中,输出光谱能量也随  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  的值依次减小,验证了当外界光照强度变化时 LED 智能照明系统可实现实时反馈输出光通量的结论。

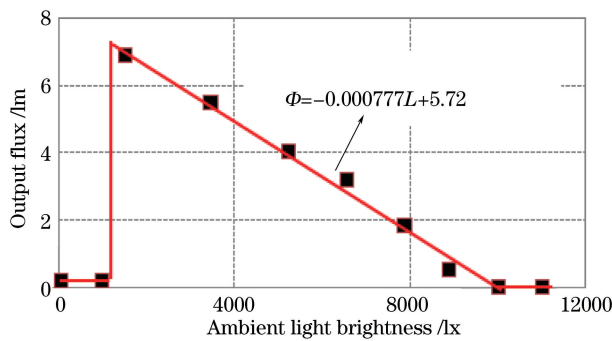


图 13 LED 输出光通量与外界光照强度的关系

Fig. 13 Relationship between LED output luminous flux and ambient light brightness

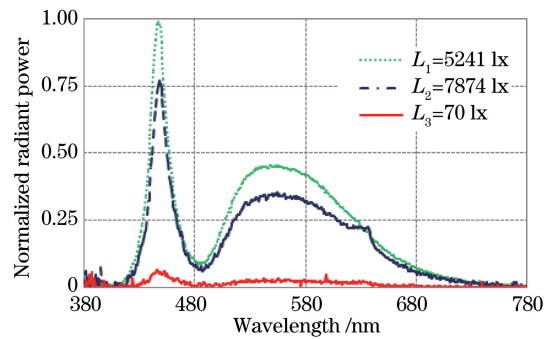


图 14 不同外界光照强度对应的的光谱图

Fig. 14 Spectra corresponding to different ambient light intensities

### 5.3 实时反馈调节输出光色温的测试结果及分析

表 3 为根据人体舒适度指数实时反馈调整照明输出色温的实验结果,相应效果图如图 15。对比图 15 (a)~(c)可知,由温湿度计算得到的人体舒适度指数分别为 60,80,40 时,输出光分别实时自动调节为白光、白蓝混合光和白红混合光,从而验证了系统的设计原理。如图 15(a)所示,当人体舒适度指数为 60 时,介于 50~76 之间,人体感觉较为舒适,因此 LED 光源色温无需额外调节,发出白光,测试得到此时的光源色温为

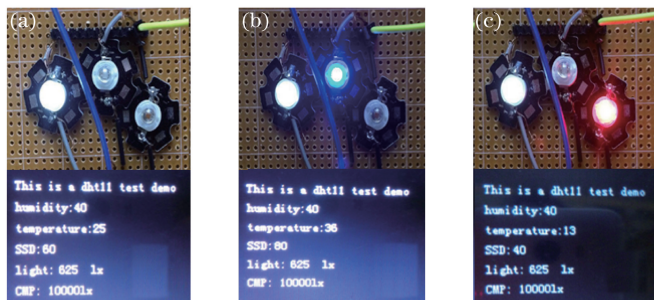


图 15 根据人体舒适度指数实时反馈调整照明输出色温。(a)  $C_{SSD} = 60$ ; (b)  $C_{SSD} = 80$ ; (c)  $C_{SSD} = 40$

Fig. 15 Output color temperature adjustment by real-time feedback according to human comfort index.

(a)  $C_{SSD} = 60$ ; (b)  $C_{SSD} = 80$ ; (c)  $C_{SSD} = 40$

6090 K,属于中等色温;如图 15(b)所示,当人体舒适度指数为 80 时,大于 76,人体感觉偏热,系统自动调高色温,因此 LED 光源输出白蓝混合光,测试得到此时的光源色温为 9659 K;如图 15(c)所示,当人体舒适度指数为 40 时,小于 50,人体感觉偏凉,系统自动反馈调低光源色温,因此 LED 光源输出白红混合光,测试得到此时的光源色温为 1823 K。

基于表 3 的实验结果,在同一实验条件下,改变人体舒适度指数,可以测得 LED 光源的输出色温变化趋势,如图 16 所示。不同的人体舒适度指数与系统调节后的 LED 色温基本符合线性关系,该结果验证了(5)式,同时确定了参数  $k_2 = 195.5$ ,  $b_2 = -5040$ 。

表 3 中  $N_{RA}$  表示显色指数(RA)值。从表中可以看出,当照明系统的输出光色温分别为 6090,9659,1823 K 时,光源的显色指数分别为 73.3,67.5,68.1。由数据分析可知,该照明系统在色温调节过程中显色指数的变化并不明显,总体变化值在 8% 以内,证明了该系统具有较稳定的显色性,且采用显色指数较高的 LED 光源可以进一步提升系统显色性。

表 3 根据人体舒适度指数实时反馈调整照明输出色温的实验结果

Table 3 Experimental results of output color temperature adjustment by real-time feedback according to human comfort index

	Relative humidity / %	Temperature / °C	External illumination / lx	$C_{SSD}$	Mixing color	Color temperature / K	$N_{RA}$
Test result 6 Fig. 15(a)	40	25	625	60	White	6090	73.3
Test result 7 Fig.15(b)	40	36	625	80	White and blue	9659	67.5
Test result 8 Fig.15(c)	40	13	625	40	White and red	1823	68.1

当外界光照强度一定时,不同人体舒适度指数对应的的光谱能量分布如图 17 所示。3 条曲线分别为人体舒适度指数为 60,40,80 时对应的的光谱图。当人体舒适度指数为 60 时,输出的光谱图与图 14 相似,光源输出光为白光,根据测试数据分析,光谱图中的峰值波长为 448 nm;当人体舒适度指数为 40 时,从输出的光谱图中可以看出,在波长为 622~760 nm 的红光波长范围内出现了一个较强的谱峰,此时光源输出为白光、红光 LED 的混合光,在光谱图中峰值波长红移至 632 nm,此时光源色温偏暖;当人体舒适度指数为 80 时,对应的的光谱图显示峰值波长移至 462 nm,仍然位于蓝光区域内,而红绿光波段的强度值相对较弱,此时 LED 输出光为白光、蓝光的混合光,峰值波长相对于 448 nm 发生红移,但仍然位于蓝光波长范围内,实现了冷光源高色温的输出。由以上光谱可知,该系统较好地实现了根据人体舒适度指数要求自动反馈调节色温的功能。

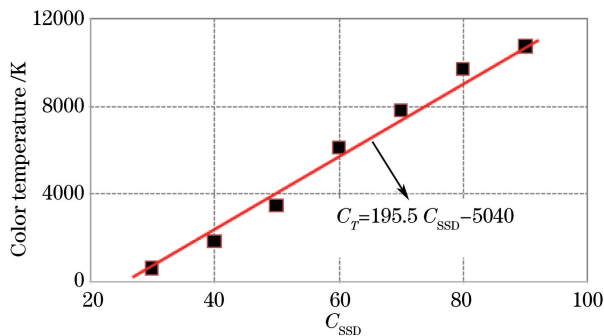


图 16 人体舒适度指数与系统调节后 LED 色温的关系图  
Fig. 16 Relationship between human comfort index and adjusted LED color temperature of system

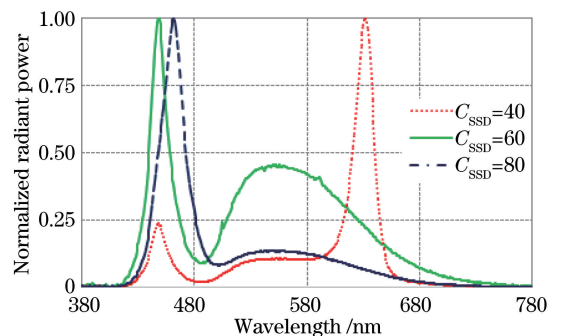


图 17 不同人体舒适度指数对应的的光谱图  
Fig. 17 Spectra corresponding to different human comfort indexes

## 6 结 论

提出了一种实现多通道实时动态反馈的 LED 智能照明系统,该系统主要包括 3 个具有独立通道的功能

模块,实现了系统的集成化设计。该系统根据外界光照强度的变化,实时反馈调节照明光源的输出光通量;根据周围环境的温湿度动态计算人体舒适度指数,查找对应色温并实现实时自动调节;通过声控模块实现声控自启动功能与延时熄灭功能。与传统照明相比,该系统在保证实用性和便捷性的前提下,提供了一种易于推广、低成本智能照明解决方案,未来可将该系统与互联网融合,利用无线互联网技术控制照明系统,并将其有效融入智能家居管理系统中;将该照明系统应用于液晶显示器的背光模组中,可以实现液晶显示器背光源的实时动态调光。

### 参 考 文 献

- [1] Le Liqin, He Suxia. LED lighting market outbreak in the technical bottleneck analysis[J]. *Electronic Components and Materials*, 2014, 33(3): 85-86.  
乐丽琴, 贺素霞. LED照明市场爆发中的技术瓶颈分析[J]. *电子元件与材料*, 2014, 33(3): 85-86.
- [2] In 2020 the global LED lighting market will be increased to 42 billion 500 million[J]. *Magnetic Components and Power Supply*, 2016(3): 74.  
2020年全球LED照明市场将增至425亿[J]. *磁性元件与电源*, 2016(3): 74.
- [3] Tsuei C H, Sun W S. Momentary adjustment means for simulating the sunlight color temperature, hues and brightness with RGB LEDs in indoor lighting[J]. *Physics Procedia*, 2011, 19: 239-243.
- [4] Chen H T, Tan S C, Hui S Y R. Nonlinear dimming and correlated color temperature control of bicolor white LED systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(12): 6934-6947.
- [5] Chen Jiangbo, Yu Jianhua, Gao Yafei, *et al.* Ultra high color rendering index and color temperature adjustable white LED lighting light source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1023002.  
湛江波, 余建华, 高亚飞, 等. 超高显色指数和色温可调的LED白光照明光源研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1023002.
- [6] Niu Ben, Zhu Wenzhang, Shen Hanxin, *et al.* The infrared remote intelligent LED controller with multi-sensor design based on ATmega 2560[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2015, 26(5): 37-41.  
牛 犇, 朱文章, 沈汉鑫, 等. 基于ATmega2560的多传感器红外遥控智能LED控制器[J]. *照明工程学报*, 2015, 26(5): 37-41.
- [7] Chewa I, Kalavallya V, Ooa N W, *et al.* Design of an energy-saving controller for an intelligent LED lighting system [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 120: 1-9.
- [8] Yang Chengfang. REOF analysis of human comfort in Shandong province[J]. *Meteorological Science*, 2006, 26(1): 103-109.  
杨成芳. 山东省人体舒适度的REOF分析[J]. *气象科学*, 2006, 26(1): 103-109.
- [9] Yin Luqiao, Yang Weiqiao, Li Shuzhi, *et al.* Based on three primary colors of the dynamic color temperature white luminous diode illuminating light source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0523004.  
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): 0523004.
- [10] Shi Lu. Effects of lighting source color temperature on the central nervous system of the human body physiological function[J]. *Chinese Journal of Ergonomics*, 2006, 12(2): 59-61.  
石 路. 照明光源色温对人体中枢神经生理功能的影响[J]. *人类工效学*, 2006, 12(2): 59-61.
- [11] Zhou Tao, Liu Qiao, Zhang Ruimin, *et al.* The design of the greenhouse environment temperature and humidity sensor node based on the internet of things architecture[J]. *Internet of Things Technology*, 2015, 5(3): 26-27.  
周 涛, 刘 巧, 张锐敏, 等. 基于物联网架构的温室环境温湿度传感器节点设计[J]. *物联网技术*, 2015, 5(3): 26-27.
- [12] He Jintian. Design guidelines for sensor principle and application[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2009: 1.  
何金田. 传感器原理与应用课程设计指南[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2009: 1.
- [13] Zhao Lihui, Guo Dong, Jin Feng. System of classroom lighting and image remote monitoring based on STM32[J]. *Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 33(5): 286-289.

赵立辉, 郭 栋, 金 凤. 基于 STM32 的教室照明与图像远程监视系统[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2013, 33(5): 286-289.

[14] Chiu H J, Lo Y K, Lin Y L, *et al.* A cost-effective PWM dimming method for LED lighting applications [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2015, 43(3): 307-317.

[15] Chen Peiteng, Wang Weidong, Li Guanhua. Design of a PWM control circuit in LED driver with high refresh rate[J]. Electronic Devices, 2016, 39 (1): 16-20.

陈培腾, 王卫东, 黎官华. 高刷新率 LED 驱动芯片中 PWM 控制电路的设计[J]. 电子器件, 2016, 39(1): 16-20.