

基于分段法照度测量系统研究*

谭家杰, 邹常青

(衡阳师范学院 物理与电子信息科学系, 湖南 衡阳 421002)

摘要: 为了测量 LED 的照度, 在分析光电池工作原理的基础上, 设计了以单片机为基础的光照度测量系统。系统由光电池、A/D 转换器件、集成运放、温度传感器和单片机组成。为了克服光电池的温度非线性影响, 采用了分段法进行最小二乘标定, 即根据标定数据分别采用线性和非线性标定, 测量时对温度曲线查表线性内插。测量系统具有原理清晰、结构简单、读数容易、系统线性等优点。经实验测试, 表明测量系统性能良好, 实验结果可靠。

关键词: 光照度; 测量; 硅光电池; 单片机; 分段法标定

中图分类号: TN364+.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)10-0077-04

Research on illumination measurement system by segmented calibration based on MCU

Tan Jiajie, Zou Changqing

(Department of Physics and Electronic Information Science, Hengyang Normal University, Hengyang 421002, China)

Abstract: In order to measure the illumination of LED lamps for indoor, after analyzing the principle of silicon photocell, and we design an illumination measuring system that consists of a silicon photocell, an A/D converter, operational amplifiers, a temperature sensor and a microcontroller. In order to overcome the nonlinear effects caused by the temperature of the silicon photocell, we use the segmented calibration with the least squares method to calibrate, which are the linear and the non-linear calibration according to the data. When measuring, the microcontroller looks up table according to the surrounding temperature by linear interpolation. The system has advantage of explicit principle, simple structure, easy reading. The experiments show that the system has better performance and more reliable experimental results.

Key words: illumination; measurement; silicon photocell; microcontroller; segmented calibration

大功率 LED 广泛应用于室内照明, 无论采用发光阵列法还是采用二次配光法, 既要保证光照度大小满足规范要求, 又要保证室内照明的均匀性^[1-2]。传统测量仪器如 TES1330A 是以数字仪表 ICL7135 四位双积分 A/D 转换芯片为核心器件, 用 CD4511 译码器驱动液晶显示测量值。目前对照度测量的方法有: 利用 ATmega16L 单片机自带的 A/D 转换测量曝光成形的视图平面照度^[3]; 采用数字照度传感器 BH1750 实现多功能照度计^[4]; 用 PIN 光亮传感器 LX1970 和单片机 AT89C51 测量光照度, 并控制室内照度^[5]; 用 PIN 管和高精度集成运放对 UV 灯的辐照度进行测量以保证 UV 灯具的质量^[6]。为了精

确测量 LED 的照度及分布, 本文设计了以单片机为主的测量系统。系统以硅光电池为主要器件, 用集成运放将光电流转换成电压, 然后进行 A/D 采样电压值, 用分段最小二乘法标定从而间接测量光照度。将该系统用于实地测量, 系统具有快速、稳定、准确等特性。

1 系统设计

1.1 系统总体组成

本测量系统的结构如图 1 所示。系统主要由单片机、光电池、电流转换电压放大、A/D 转换、温度测量、键盘输入、LCD 显示及 RS232 通信模块组成。单片机采用普芯达公司的 8 位 CW89F52 型单片机, 它内含 8 KB Flash

* 基金项目: 湖南省光学重点学科建设项目资助; 湖南省普通高校光电课程组教学团队支助; 衡阳师范学院科研启动项目(12B38); 衡阳师范学院产学研用项目(12CXY05)

技术与方法

Technique and Method

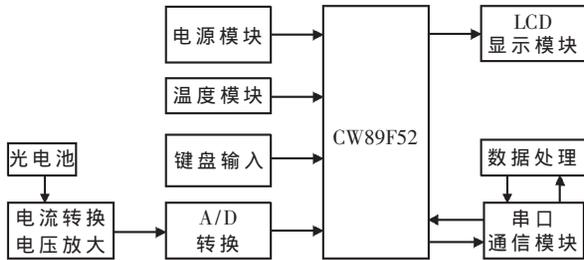


图1 测量系统结构

ROM 和 512 B RAM, 兼容标准 MCS-51 单片机指令和管脚, 主要用于数据采集与数据处理。测量光照度的传感器为硅光电池, 它输出的短路电流与输入光照度成正向比例关系。采用德州仪器的 LM358 将光电流转换成电压并进行放大。为了保证测量具有一定的精度, A/D 转换采用美信公司的 12 位低功耗模数转换器 MAX187。系统工作时并对环境温度进行测量, 温度模块则采用 DHT11 温湿度复合传感器, 主要用来测量环境温度和湿度。显示模块利用 LCD1602 显示照度、温度及湿度。RS232 串口通信模块采用 PL-2303 USB 桥接芯片与单片机串口相连, 一方面用于单片机下载程序, 另一方面用于与上位机通信, 进行数据处理。键盘输入模块主要用于系统的功能选择。

1.2 光电池选择

系统的传感器选用龙信达公司的 LX6×6CV 硅光电池, 其光敏面积为 5.7 mm×5.7 mm, 波长响应范围为 320 nm~1 100 nm, 峰值波长为 760 nm。这种传感器在可见光范围内有良好的灵敏度, 广泛应用于光学领域的光度计、白度计、光功率计等方面。光电池的基本结构是一个 PN 结, 在光照下能产生光电流。在检测时需要使其工作在短路电流方式下, 此时的光电流与输入光照度成比例变化, 这个点即为线性工作的临界点。临界状态时的输出电流接近于短路电流, 它与输入的光照度关系为:

$$I_{sc} = SE \quad (1)$$

其中, I_{sc} 为短路电流, S 为光照灵敏度, E 为输入光照度。如果将短路电流转换成电压, 有:

$$E = \frac{U_{sc}}{SR} \quad (2)$$

根据式(2), 只要测量出 U_{sc} 和标定出光照灵敏度便能得到光照度。

光照度定义为单位面积接受的光通量, 光学量与辐射量之间的关系决定于人的视觉特性^[7]。根据参考文献[4], 传感器的光谱响应应与入眼一致, 光学量与辐射量之间与单色光的绝对光谱效率成比例关系, 否则需要修正。由于硅光电池存在峰值波长及光谱曲线不匹配, 为了正确测量出光照度值, 系统的光电池上加上了蓝色滤光片进行光谱校正。该滤光片的作用是使它的“光谱响应度”或“视见函数”与国际照明委员会明视觉光谱光效函数相匹配^[7]。

1.3 信号处理电路设计

系统的信号处理电路包括电流-电压转换电路、有源滤波电路、电压放大、电压跟随电路, 其结构如图 2 所示。

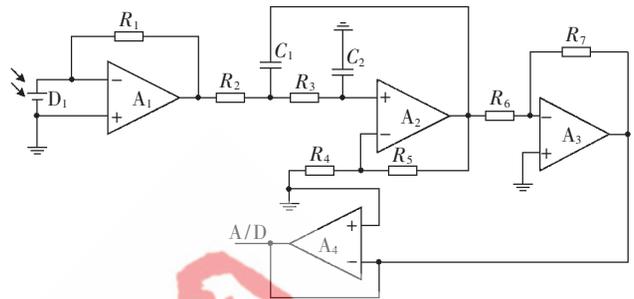


图2 信号处理电路

图 2 中, D_1 、 R_1 、 A_1 组成电流-电压转换电路, 其中 D_1 为硅光电池, 处于短路状态。根据集成运放的虚地特性, 将光电流 I_{sc} 转换成电压, 显然输出电压与输入电流成正比。第一级输出电压为 $I_{sc}R_1$, 其值取决于光电流 I_{sc} 和电阻 R_1 , 即 R_1 决定了电流-电压转换的比例关系。在设计电路时需注意电阻的大小, 电阻过小则输出电压过小, 过大则容易使输出饱和, 导致输出电压与输入照度不易保持线性关系; 另一方面电阻的 R_1 热噪声影响输出结果。实验过程中, 发现电阻值在 500 Ω ~1 000 Ω 之间为最佳, 能使输出电压与输入光照度成正向比例关系。因此, 测量系统选择 $R_1=1$ k Ω 。在选择集成运放方面, 尽量选择零偏电流较小的器件。此时, 测量光照度的原理由直接测量光电流的电流值转为间接测量电压值。

为了减少输入光的波动对测量结果的影响, 在电流-电压转换电路后面设计了第二级信号处理电路, 由 A_2 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 、 C_1 和 C_2 组成。根据图 2 电路可以求得系统的增益为:

$$G = G_0 \frac{\omega_0^2}{s^2 + s\omega_0(3 - G_0) + \omega_0^2} \quad (3)$$

其中, $G_0 = \frac{R_4 + R_5}{R_4}$, $\omega_0 = \frac{1}{R_2 C_1}$, $R_2 = R_3 = 10$ k Ω , $C_1 = C_2 = 1$ μ F,

$R_4 = R_5 = 10$ k Ω 。图 2 中的 A_3 、 R_6 、 R_7 组成反相比电压放大模块, A_4 为电压跟随器, 将电压送至 A/D 转换。

1.4 数模转换和温度模块

设计的模数转换及测温接口电路如图 3 所示。前期实验测量采用 8 位、10 位 A/D, 由于分辨率过小, 测量光照度精度不是很理想。因此采用 MAXIM 公司的 12 位

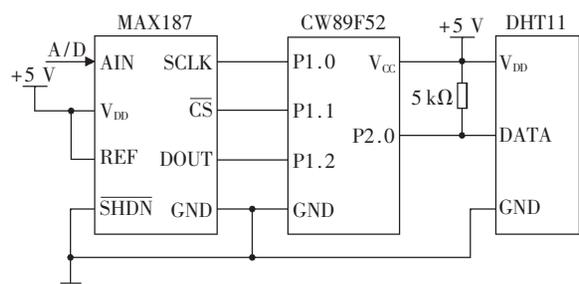


图3 数模及测温接口电路

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 81

技术与方法 Technique and Method

串行 A/D 转换器件。它由单电源 5 V 供电,其串行外设总线接口既简化了接口电路又便于软件编程,只需 3 根线与单片机相连,具体见图 3。单片机通过 P1.0 口与 MAX187 的串行时钟 SCLK 相连接,并为其提供外部工作时钟。MAX187 的片选端口与单片机 P1.1 连接,串行数据输出 DOUT 与单片机 P1.2 连接。注意编程产生的串行时钟不得超过 5 MHz,采用外部参考电压且为 5 V。

为了测量在不同温度下输出电压与输入光照度的关系,设计了 DHT11 测量实时温度和相对湿度模块。DHT11 是已经校准的单总线数字信号输出的温、湿度复合传感器,由一个感湿式电阻元件和一个负温度特性的热敏电阻组成。校准系数存储在传感器内部 ROM,测量的数据通过 DATA 单总线与单片机进行通信,一次通信时间约为 4 ms。完整的数据为 40 位,高位先出,其格式为:8 位湿度整数数据、8 位湿度小数数据、8 位温度整数数据、8 位温度小数数据及 8 位校验和。

1.5 系统余弦修正

传感器的接收表面会将斜向输入传感器表面的光线部分反射,根据照度的定义可知它是投影到单位面积的光通量,系统采用的传感器表面积较大,如果对于斜向输入的光线不做修正则会导致测量值产生误差。所谓余弦修正是入射光线与输入平面的法线组成方向角成余弦比例关系,修正时按照余弦关系进行修正。为了正确测量照度必须进行余弦修正,具体做法是在传感器的表面前加装光照半球或漫散射器件。本系统采用内径 22 mm、高 18 mm 的乳白色塑料半球进行余弦修正。

2 测量实验及数据处理

2.1 照度、电压关系测量实验

为了研究传感器在不同温度下的输入输出特性,设计了传感器特性测量实验,将 LED 灯改成高度可调以达到接收照度变化的目的。设计的单片机程序首先测量环境温度,然后对输出电压进行 A/D 采样,对应一个照度值测量 10 次输出电压并取算术平均送 LCD1602 显示。同时,将照度计放置于与测量系统等照度位置,记录输入的照度值。分别测量了室温在 28 °C、25 °C、23 °C、21 °C、18 °C、16 °C 下的输入照度和输出电压,并用 Matlab7.0 软件得到如图 4 所示光照度-电压关系图。图中的虚线为不同温度下的测量值连线。图 4 表明输入光照度与电路输出电压不完全是线性比例关系。系统可采用 3 次曲线拟合,拟合的曲线公式为:

$$U = a_0 + a_1 E + a_2 E^2 + a_3 E^3 \quad (4)$$

其中 U 为电压值, E 为照度值。

图 4 中 5 条曲线从左至右分别为 28 °C、25 °C、23 °C、21 °C、18 °C、16 °C 的测量曲线,由图可知,28 °C 时输入照度在 1 160 lx 以下线性关系较明显,超过此值非线性效应明显。25 °C、23 °C、21 °C、18 °C、16 °C 时输入小于 1 400 lx 为线性关系。1 400 lx 附近为线性区域与非线性区域的

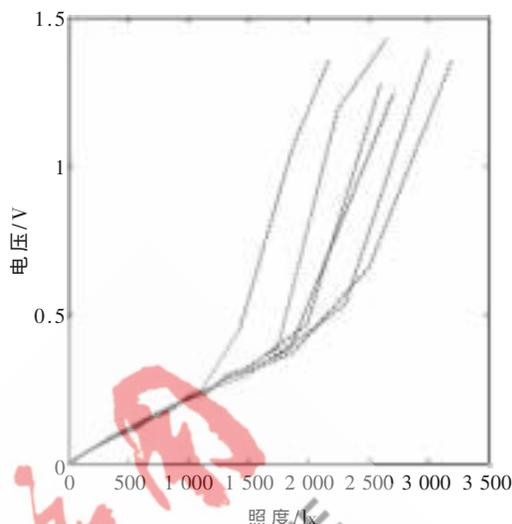


图 4 光照度与电压的关系

临界点,即大于 1 400 lx 非线性效应较明显。因此,可以根据式(4)进行反演,通过测量电压值反算出照度值。将式(4)变换为:

$$E = b_0 + b_1 U + b_2 U^2 + b_3 U^3 \quad (5)$$

标定出不同温度下的系数 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 ,并测量出电压,按照式(5)就可以间接测量光照度。标定前,需考虑光电池零误差的影响。具体做法是将整个装置放入暗箱,测量电压值,然后对测量值进行修正。

2.2 数据处理

输入光照度与电压之间存在非线性关系。在测量照度时,解决非线性的方法主要有硬件补偿法^[8]和软件算法补偿法^[9-10]。本文的光照度测量系统采用查表法结合插值方法来解决输入输出的非线性问题。标定出不同温度下的多项式系数。标定时,单片机将温度和电压通过 RS232 发送至上位机,根据上位机计算的结果修正单片机测量程序的系数,即将不同温度下的系数分别存储。测量时,单片机通过不同温度系数查表,计算光照度,并用 LCD1602 显示其大小。

根据光照度与电压关系测量实验结果可知,输入光照度小于 1 160 lx 时,电压与光照度为线性关系;而大于 1 160 lx 时,采用线性关系处理显然不妥,而全部采用三次多项式插值既增加了测量误差又增加了计算的复杂度。为了减少测量误差,测量系统数据处理时采用分段法处理,即线性与非线性拟合相结合的方法。

将测量区间分成线性和非线性两个区间,其中线性区间采用线性拟合方法计算系数。先用软件采用最小二乘法求出系数,插值后得到如图 5 曲线。图中离散点为测量值,实线是根据电压值线性插值计算的照度值。计算公式如式(6)。

$$E = 4722.187U - 40.409 \quad (6)$$

其中 U 为电压值, E 为照度值。

非线性区间则按式(5)用最小二乘法求得不同温度

技术与方法

Technique and Method

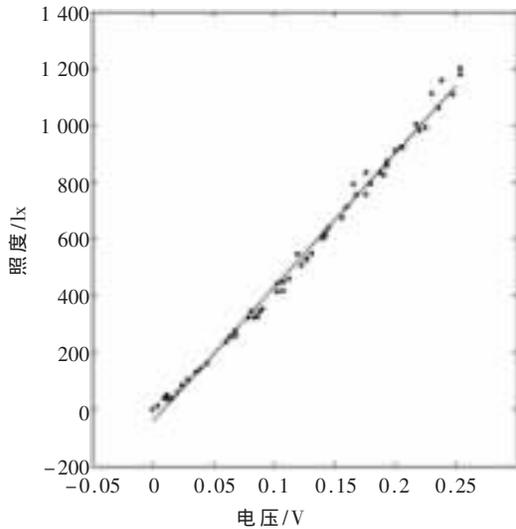


图5 线性插值

下的系数,见表1。直接将表1的系数保存在单片机程序段。测量时,单片机先获取环境温度,然后对电压A/D转换,并计算电压大小。当电压值 $\leq 0.25\text{ V}$ 时,直接用线性插值方法计算光照度;否则通过温度查表得到系数计算照度。如果温度不在表中范围,可以查出相邻温度系数得到照度,然后用线性插值方法求出对应温度的照度。

表1 不同温度下的系数

温度/ $^{\circ}\text{C}$	b_0	b_1	b_2	b_3
28	-39.237	5 574.9	-5 964.1	2 250.8
25	-117.45	5 932.0	-3 011.5	319.46
23	-11.938	3 929.2	4 071.1	-4 379.6
21	-47.383	4 865.2	-206.98	-1 546.1
18	-87.813	5 395.2	-1 147.1	-817.16
16	-111.4	6 608.2	-6 663.1	2 361.7

2.3 测量误差分析

为了研究采用上述方法设计的数字照度计的精度,将该照度计和 TES1330A 照度计分别对大功率 LED 灯的照度进行测量,结果如表2所示。其中测量值为本设计照度计所测,对比值为 TES1330A 照度计所测。

表2 实测值对比表 (单位:lx)

测量值	对比值	测量值	对比值
116.3	113.7	842.6	843.0
381.5	381.0	957.9	960.0
479.5	475.0	1 380.2	1 385
231.6	231.0	1 207.2	1 215
577.5	576.0	1 038.6	1 030
479.7	480.0	1 871.7	1 860
600.5	620.0	1 537.5	1 530
767.7	768.0	2 315.7	2 320

实测数据表明,测量值和对比值在线性区域的偏差较小,在非线性区域偏差较大。例如光照度在 3 000 lx 时,测量值为 2 931,对比值为 2 980,相差 49 lx。根据表2数据计算出的标准差为 $\pm 7.001 5\text{ lx}$ 。

应用上述方法设计了光照度测量仪,并用于大功率 LED 灯光照度测试。系统以硅光电池作为传感器,并进行了光谱函数补偿、余弦修正和零点修正。设计的照度计结构简单,测量精度在 10 lx 以内,测量照度范围在 0~3 000 lx,数据处理将区间分成两段,分别采用线性曲线和非线性曲线标定,有效地解决了光电池存在的非线性问题。在实际应用过程中取得了较好的效果。

参考文献

- [1] 黄启禄,吴逢铁,范丹丹.均匀照明的发光二极管阵列仿真与对比分析[J].华侨大学学报(自然科学版),2012,33(1):13-16.
- [2] 芦佳宁,余杰,童玉珍,等.实现大范围均匀照明的 LED 透镜二次光学设计[J].半导体光电,2012,33(3):334-337.
- [3] 谭东才,胥光申,罗声,等.用于面曝光快速成形系统的光照度测量系统研究[J].光电技术应用,2010,25(3):53-57.
- [4] 高英明,张环月,邹念育,等.一种多功能照度计的设计[J].计算机系统应用,2012,21(3):252-255.
- [5] 徐志如,崔继仁.基于单片机的温室智能测控系统的设计[J].传感器与微系统,2006,25(5):52-54.
- [6] 王小增,杨久红.UV 灯具辐照度检测方法[J].仪表技术与传感器,2010(10):90-99.
- [7] 郁道银,谈恒英.工程光学[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [8] 郭爱琴,郭午阳,朱利民,等.多传感器电子秤非线性补偿电路的研究[J].传感器与微系统,2006,25(1):39-43.
- [9] 江东,杨嘉祥,赵宏.Z-温度传感器的非线性补偿[J].传感器与微系统,2008,27(7):56-58.
- [10] 杨进宝,汪鲁才.称重传感器非线性误差的 RBFNN 补偿[J].仪表技术与传感器,2010(6):3-5.

(收稿日期:2013-01-23)

作者简介:

谭家杰,男,1968年生,博士,副教授,主要研究方向:光电检测、光无线通信及信号处理。