

文章编号:1007-2780(2020)06-0531-06

基于 MSP430 的高精度光照功率计设计

王磊^{1*}, 朱可¹, 王军^{1,2}, 何昕²

(1. 苏州科技大学, 江苏 苏州 215009;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对传统光照功率计采用积分法测量功率引起的高误差,从应用角度出发,提出一种 MSP430 为主控制器的高精度光照功率计。光电传感器将光信号转换为毫安级电流信号,经过负反馈电流放大转换电路,再通过差分放大和滤波电路,经过 24 位高精度 AD 模数转换芯片将模拟信号转为数字信号,再融合递推和中位值数字滤波算法,计算得到光照功率。通过 LCD 实时显示测量值,并经过 Savitzky-Golay 滤波器后显示随时间变化的测量曲线。实验证明,所设计的光照功率计误差低于 0.3%,具有功耗低、系统稳定、显示界面友好的优点,可以存储测量数据,显示光功率曲线。

关键词:低功耗;24 位高精度;数字滤波;功率曲线

中图分类号:TP277 文献标识码:A doi:10.3788/YJYXS20203506.0531

Design of high precision optical power meter based on MSP430

WANG Lei^{1*}, ZHU Ke¹, WANG Jun^{1,2}, HE Xin²

(1. Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Aiming at the high error caused by the integral method for the traditional optical power meter, from the application point of view, a high-precision optical power meter with MSP430 is proposed. The photoelectric sensor converts the light signal into mA current signal, through a negative feedback current amplification, and then through a differential amplification and filtering circuit, and converts analog signal into a digital signal through a 24-bit high-precision AD chip. The optical power is calculated using recursive and median digital filter. The measured value is displayed on the LCD. The optical power curve is also displayed after through the Savitzky-Golay filter in measurement phase. The experiment proves that the optical power meter has an error of less than 0.3%, low power consumption, stable system, friendly display interface, it can store measurement data and display optical power curve.

Key words: low power consumption; 24-bit high-precision; digital filter; power curve

收稿日期:2019-11-16;修订日期:2020-03-03.

* 通信联系人, E-mail: 815522176@qq.com

1 引言

传统固化行业采用高压汞灯快速固化,但污染严重,逐渐被 LED 灯所取代。传统检测 LED 光功率采用的是积分法,采用固定时间段内检测光能量除以固定时间得到平均光功率。此方法采集的光能量存在采集误差,求得平均值后的光功率也只能表示固定时间段内光功率的平均值,与实时值存在误差;在软件除法处理中存在误差,进一步扩大了误差。

为提高光功率计的精确度,本文采用光电传感器转换的紫光信号,经过负反馈电流放大、差分放大和滤波电路,并通过 24 位高精度 AD 芯片转化为数字信号,结合递推平均滤波法和中位值平均滤波算法得到精确的光功率值,并在 LCD 上显示实时数值和测量曲线。实验证明,所设计的光照功率计误差低于 0.3%,具有功耗低、系统稳定、显示界面友好的优点,可以存储测量数据,显示光功率曲线。

2 总体设计

高精度光照功率计包括前端光照采集、按键控制、数据存储和显示 4 部分。光电传感器将光转换成微弱电流信号,经过负反馈电流放大电路、差分放大和滤波电路转换成电压信号^[1-2],经过 AD 模数转换芯片转换为数字信号,主控制器通过数字滤波将数据存储在存储器,并将功率值实时显示在屏幕。按键可以切换显示界面内容。总体框图如图 1 所示。

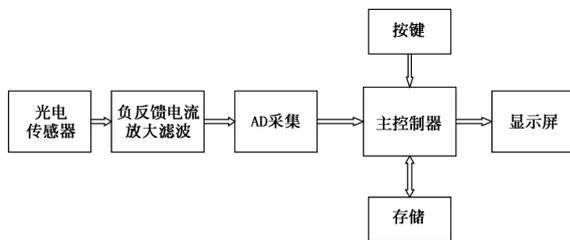


图 1 系统总体框图

Fig.1 Block diagram of system

3 功率计硬件设计

3.1 校零光检测前段采集电路设计

在图 2(b)所示电路中,硅光传感器 D₂ 将光

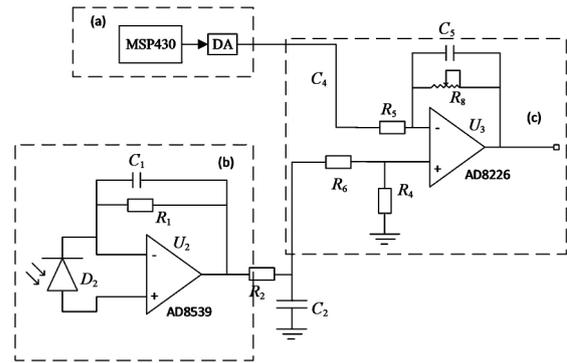


图 2 光照前端采集电路图

Fig.2 Circuit diagram of optical collection

转换为电流信号,经过 R_1 精密电阻和 U_2 放大器构成的负反馈电流放大电路后输出 $(V_{out})_b$,且

$$(V_{out})_b = -(I_{D2} \times R_1) \quad (1)$$

系统电压噪声频谱密度为(1 μ A 电流转 1 V 信号):

$$\frac{e_n}{\sqrt{\Delta f}} = \sqrt{\Delta (R_1)_{noise}^2 + (i_n \times R_1)^2 + e_n^2} \quad (2)$$

其中电阻热噪声:

$$(R_1)_{noise}^2 = 4kTR_1 \quad (3)$$

其中: k 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度^[3],由式(2)得系统电压噪声频谱密度为:

$$\frac{e_n}{\sqrt{\Delta f}} \approx \sqrt{(129 \text{ nV})^2 + (10 \text{ nV})^2 + (10 \text{ nV})^2} \approx$$

130 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$,比传统采用的输出电流经过一个对地的电阻转换电压再通过电压放大电路的电压噪声频谱密度小了 100 倍,减小运放噪声显著提高了精度。

由于采集探头存在环境光的暗电流,所以为提高采集精度,需要将暗电流消除。图 2 中(a)部分在(c)部分的差分放大电路的负端接入一个可编程的 DA 芯片输出可调电压以消除探头中的暗电流,实现校零功能。经过运算放大后 $(V_{out})_c$:

$$(V_{out})_c = (I_{D2}R_1 - V_{环境}) \times \frac{R_8}{R_5} \quad (4)$$

其中: $V_{环境}$ 为软件校零 DA 输出的电压,滤除环境光中的暗电流噪声。

3.2 24 位高精度采集电路设计

24 位高精度 AD 采集芯片具有单端采集、差分采集等多种模式,传统的单端采集一端接入处理后的电压信号,一端接地,但是此方法接地回路

干扰较大、抗环境共模干扰能力较低,所以采用差分采集模式。可编程 AD 芯片设置采集增益为 1,更新速率为 4.17 Hz 时,均方根噪声为 40 nV。将图 2(c)部分输出的 $(V_{out})_c$ 单端电路转为图 3 差分电路,图中 $R_2 = R_3$ 、 $R_1 = R_4$ 、 $R_6 = R_7$ 、 $R_5 = R_8$,从而差分电压两端输出电压为:

$$(V)_+ = (V_{out})_c + 1.25 \quad (5)$$

$$(V)_- = -(V_{out})_c + 1.25 \quad (6)$$

MSP430 主控制器通过 SPI 接口配置 AD7793^[4],并且读取差分转换的数据。

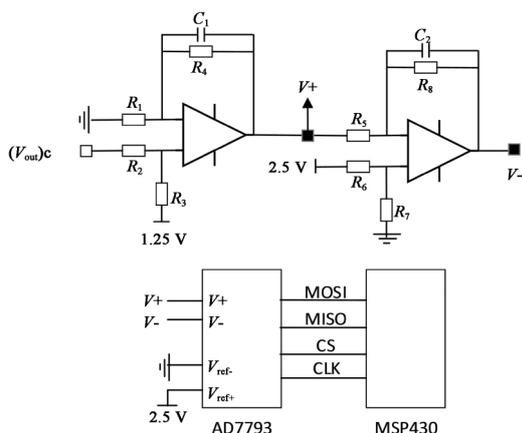


图 3 单端转差分采集电路图

Fig.3 Circuit diagram of differential acquisition

4 功率计软件设计

4.1 AD 采集及校零算法设计

在环境光下,由于暗电流,硅光传感器输出存在环境噪声,通过 AD 采集,此时会在显示屏上显示一个环境光功率,通过校零,MSP430 主控制会通过 DA 产生一个对应的电压,通过减法电路,滤除环境光带来的暗电流,循环执行直到在检测环境下显示屏上显示实时功率为 0 完成校零^[5-7],流程图如图 4 所示。

4.2 数字滤波算法设计

本文融合递推和中位值平均滤波算法的优点,有效抑制周期性干扰,且平滑度较好。将连续采集的 N 个光功率 P 看成一个队列,队列长度固定为 N 。每次采样到一个新的紫光功率 P_n 数据放入队尾,去掉队首的 P_{n-10} 。然后将 $\{P_{n-9}, P_{n-8}, \dots, P_n\}$ N 个功率 P 进行冒泡排序,去掉 P_{max} 和 P_{min} ,再将队列中的 $N-2$ 个数据进行算

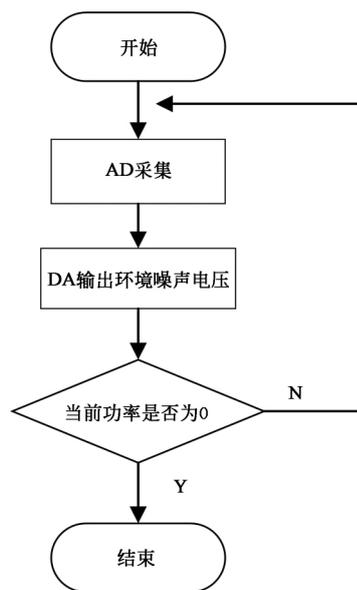


图 4 校零流程图

Fig.4 Flowchart of check to 0

术平均运算:

$$P_{avg} = \frac{\sum_{i=n-9}^n P_i}{n-2} \quad (7)$$

就可获得当前功率值,流程图如图 5 所示。

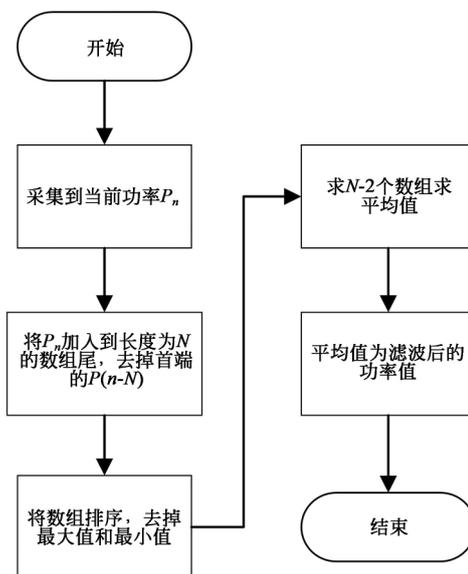


图 5 数字滤波流程图

Fig.5 Flowchart of digital filter

4.3 LCD 曲线平滑算法设计

直接将光功率值显示,曲线尖锐,而实际应用 中光功率的测量变化趋势更为重要,采用

Savitzky-Golay 滤波器^[8]将测量值滤波后曲线显示平滑。采集到的光功率值 $P(N)$ 中连续的一组数据为 $P(n)$, 其中 $n = -M, -(M-1), \dots, 0, \dots, M-1, M$ 。将这组数据滤波后得到 $y(n)$, 确定式(8)中 a_0, a_1, \dots, a_T 系数可确定 $y(n)$ 多项式:

$$y(n) = a_0 + a_1 n^2 + a_2 n^3 + \dots + a_T n^T = \sum_{k=0}^T a_k n^k T \leq 2M \quad (8)$$

直接计算多项式的所有系数比较复杂, 由于式(8)中 $y(0) = a_0$, 为降低 MSP430 运算复杂度, 减小功耗, 只需求 a_0 系数求出 $P(i)$ 数据中心值 $P(0)$ 的拟合值 $y(0)$ 。然后将选取的 $P(i)$ 当作一个“窗口”往右平移求中心值, 最终得

$$y(0) = a_0 = \frac{-2P(-3) + 3P(-2) + 6P(-1) + 7P(0) + 6P(1) + 3P(2) - 2P(3)}{21} \quad (12)$$

将拟合出的值通过画点函数在 LCD 屏幕上显示^[9]。

5 实验结果与分析

本文前端采集电路与传统法对比, 通过示波器可以看出, 图 6 光电传感器信号放大滤波后, 信号稳定, 纹波小于 20 mV, 有效滤除了环境噪声; 而图 7 传统法信号纹波高达 100 mV, 包含有 50 mV 环境噪声。

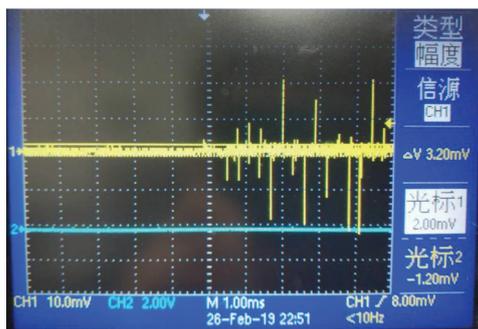


图 6 本设计放大滤波后信号

Fig.6 Waveform of our amplification filter

在相同测试环境下, 用传统法牛尾的检测仪器和本测试法的仪器对同一个面光源在不同强度下进行检测, 所得数据如表 1 所示。从测试数据中可知, 牛尾的测试值总是比光谱仪测的实际值

到 $P(N)$ 滤波后的数据 $y(N)$ 。 $y(N)$ 与 $P(N)$ 存在拟合误差, 设总的误差平方和为

$$E = \sum_{n=-M}^M [y(n) - P(n)]^2 \quad (9)$$

为使拟合曲线误差最小, 令 E 对各系数的导数为 0, 即

$$\frac{\partial E}{\partial a_i} = 0 = \sum_{n=-M}^M 2 n^i (y(n) - P(n)) = \sum_{n=-M}^M 2 n^i (\sum_{k=0}^T a_k n^k - P(n)) \quad (10)$$

$$\sum_{k=0}^T (\sum_{n=-M}^M n^{i+k}) a_k = \sum_{n=-M}^M n^i P(n) \quad i = 0, 1, 2, \dots, T \quad (11)$$

在实际过程中, 根据多次尝试发现, 当 $T = 3, M = 3$ 时效果最佳, 从而得:

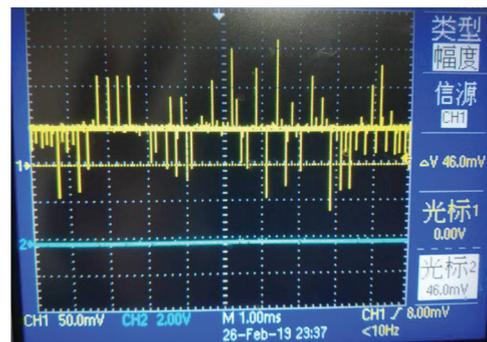


图 7 传统放大滤波后信号

Fig.7 Waveform of traditional amplification filter

大, 这是由于其中的环境噪声未滤除所导致, 而本文所测的数据与标称值误差小于 0.3%, 两种测试数据与标称值对比误差如图 8 所示。

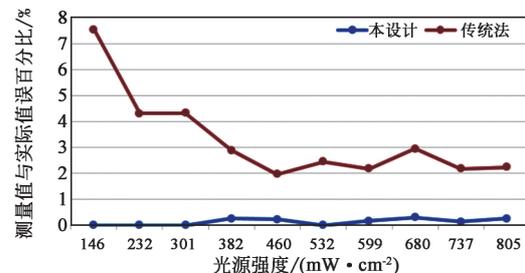


图 8 面光源不同强度下检测数据及误差分布图

Fig.8 Graph of two detecting methods under different luminance error

表 1 同一光源不同强度两种检测方法测得数据

Tab.1 Results of two detecting methods under different luminance with LED (mW · cm⁻²)

光源强度	本设计	传统法
146	146	157
232	232	242
301	301	314
382	383	393
460	459	469
532	532	545
599	598	612
680	682	700
737	736	753
805	807	823

为消除测试的偶然误差,同一测试环境下,同一面光源,针对 232,460,680 mW/cm² 三个代表性强度,两个检测仪器分别检测 10,30,50 次,所得测试数据平均值如表 2 所示,误差曲线如图 9 所示。测试数据可知校零光检测前段采集电路能够消除环境噪声,并且精度高,误差小。

表 2 同一光强不同强度两种检测方法多次测的数据平均值

Tab.2 Average value of two detecting methods under different luminance with LED (mW · cm⁻²)

LED 光源强度	测试次数	本设计平均值	传统法平均值
	10	231.4	241.2
232	30	232.5	243.2
	50	231.8	242.9
	10	460.8	470.2
460	30	459.1	469.4
	50	459.3	469.8
	10	681.9	697.2
680	30	681.5	700.7
	50	681.7	699.4

针对存储一次检测的数据在 LCD 上模拟出曲线,图 10 是直接将数据显示在 LCD 上,图 11

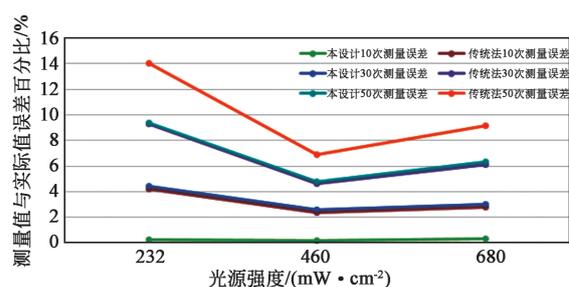


图 9 面光源不同强度下多次检测数据误差分布图
Fig.9 Graph of two detecting methods under different luminance and repeatedly detecting error

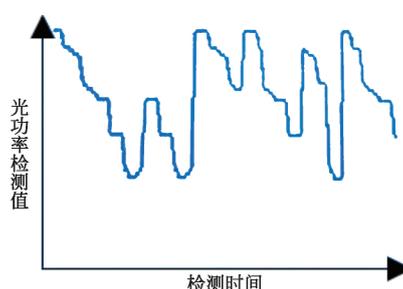


图 10 未滤波曲线

Fig.10 Waveform without filter

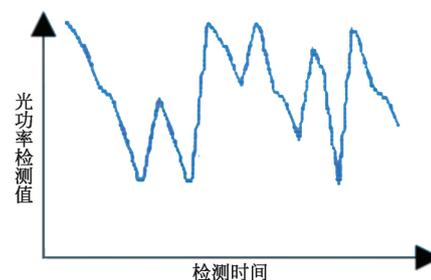


图 11 滤波后曲线

Fig.11 Waveform with filter

是将数据经过 Savitzky-Golay 数字滤波器后显示的 LCD。对比可看出曲线明显平滑,并且曲线特性也显示在 LCD 上。

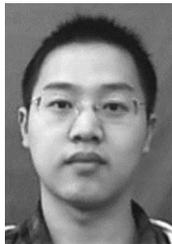
6 结 论

经过多次测量数据对比,本设计采用的环境噪声滤除、负反馈电流放大前置采集电路能有效滤除环境噪声;采用的 24 位高精度数模转换和多数字滤波器相融合的方法能显著提高光源光功率的采集精度和稳定性,可以广泛应用于工业 LED 光功率测量领域。

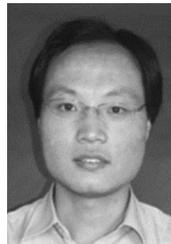
参 考 文 献:

- [1] 闫冰,丁锋.基于光纤光栅地震检波解调系统的微弱信号检测电路设计[J].光电技术应用,2013,28(5):65-68.
YAN B, DING F. Design of weak signal detection circuit based on fiber Bragg grating seismic demodulation system [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2013, 28(5): 65-68. (in Chinese)
- [2] 陈志诚.基于磁阵列的海底管道探测技术研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2018.
CHEN Z C. Research on submarine pipeline detection technology based on magnetic array [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2018. (in Chinese)
- [3] 张子儒,丁雷,张冬冬.无线光传输系统接收机的设计及特性分析[J].红外,2018,(6):27-33.
ZHANG Z R, DING L, ZHANG D D. Design and characteristics analysis of receiver for wireless optical transmission system [J]. *Infrared*, 2018, 39(6): 27-33. (in Chinese)
- [4] 谭靖.基于 AD7792 的 pH 在线监测传感器采集电路设计[J].电子科技,2013,26(12):93-95.
TAN J. Design of acquisition circuit for pH online meter based on AD7792 [J]. *Electronic Science and Technology*, 2013, 26(12): 93-95. (in Chinese)
- [5] 冯骅,陈昌鑫,岳晗,等.基于 MSP430 的空气质量自适应测控系统设计[J].电子器件,2018,41(5):1304-1309.
FENG H, CHEN C X, YUE H, et al. Design of air quality adaptive measurement and control system based on MSP430 [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2018, 41(5): 1304-1309. (in Chinese)
- [6] 许燕.基于 MSP430 Launchpad 的简易光照度检测仪设计[J].自动化应用,2019(5):59-60.
XU Y. Design of simple illumination detector based on MSP430 launchpad [J]. *Automation Application*, 2019(5): 59-60. (in Chinese)
- [7] 陈燕.基于 ARM 的矿用便携式多气体检测仪的研制[D].西安:西安科技大学,2013.
CHEN Y. Design of ARM-based portable multi-gas detector for coal mine [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [8] 郭文川,董金磊.高光谱成像结合人工神经网络无损检测桃的硬度[J].光学精密工程,2015,23(6):1530-1537.
GUO W C, DONG J L. Nondestructive detection on firmness of peaches based on hyperspectral imaging and artificial neural networks [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1530-1537. (in Chinese)
- [9] 王军,张福弟,王磊,等.基于 STM32 的 R61581 驱动液晶屏显示方法研究[J].液晶与显示,2016,31(1):93-96.
WANG J, ZHANG F D, WANG L, et al. Method of LCD display by R61581 driving based on STM32 [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(1): 93-96. (in Chinese)

作者简介:



王磊(1991—),男,江苏东台人,硕士,助理工程师,2016年于苏州科技大学获得硕士学位,主要从事嵌入式智能化方面研究。E-mail: demowl@163.com



王军(1978—),男,江苏徐州人,博士,副教授,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事仪器仪表方面研究。E-mail: 815522176@qq.com