

# 三色线阵 CCD 高速信号处理系统的优化设计

褚世冲 徐耀良 周奇聪 狄芬芬 杨波

(上海电力学院自动化工程学院 上海 200082)

**摘要:** 为提高线阵 CCD 测量系统的测量精度和抗干扰性能同时保证系统信号处理速度,总结并试验了几种常见的 CCD 信号处理方案,并提出对应优化设计。阐述了线阵 CCD 传感器、CCD 驱动电路的工作原理,着重分析研究了 CCD 测量系统中的信号采样和处理过程。详述了 CCD 输出电压特性,分压电路、滞回比较电路工作原理和 MCU 采样时序。试验结果表明,相比传统使用单比较器的方案,使用多滞回比较器的设计系统精度得到大幅提升,同时抗干扰性能也得到更好的保证。该设计已应用到印刷行业的纠偏控制器中。

**关键词:** 三色线阵电荷耦合器件;纠偏控制;滞回比较器;并行比较

**中图分类号:** TP247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Optimization design of tricolour linear CCD high speed signal processing system

Chu Shichong Xu Yaoliang Zhou Qicong Di Fenfen Yang Bo

(Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China)

**Abstract:** In order to improve the measurement precision and anti-interference performance of the tricolour linear CCD measurement system while ensuring the processing speed, kinds of signal processing methods were summarized and tested in this paper, and new optimization method were proposed. This paper introduced the character of the linear CCD sensor and its driving circuit. Emphatically analyzed the CCD signal processing in the measuring system, showed the CCD output signal feature, voltage division comparing circuit and micro control unit sampling sequence. Experiment results turn out that system processing speed, precision and anti-interference capability have significantly improved. The optimization design begins to use in position controller in printing industry.

**Keywords:** tricolour linear CCD; deviation control; hysteresis comparators; parallel compare

## 1 引言

线阵 CCD(电荷耦合器件)是 20 世纪 70 年代开始应用的新式半导体集成光电传感器,单元单边尺寸可达  $8\sim 14\ \mu\text{m}$ ,广泛适用于高精度位移控制<sup>[1-2]</sup>,高精度光学测量、条形码扫描等领域,尤其应用场合对传感器尺寸和处理速度有较高要求时,小尺寸线阵 CCD 不可替代。

近些年随着应用领域的扩展,以往常见的黑白线阵 CCD 由于只能输出灰度信息已不能满足行业实际需求,三色线阵 CCD 开始逐步受到人们重视。三色线阵 CCD 的信号处理中面临两大问题:一是三色 CCD 数据采集速度与数据精度之间的矛盾;二是驱动电路尺寸限制与实际应用中系统处理性能要求的提升。因此在 MCU 主频、尺寸有限情况下尽可能提高系统的精度和处理速度至关重要<sup>[3]</sup>。目前线阵 CCD 信号处理方法常见为两种:

1)使用模数转换器用于处理 CCD 像元输出信号<sup>[4-5]</sup>,

线阵 CCD 像元个数一般在  $2\ 500\sim 7\ 200$  个,以每次模数转换周期为  $1\ \mu\text{s}$  计算,每个像元信号都进行模数转换信号处理过程最少消耗时间为  $2\sim 3\ \text{ms}$ ;

2)使用 LM393 模拟比较器进行信号处理<sup>[6-8]</sup>,CCD 像元输出信号直接与比较器设定的阈值进行硬件二值化,不需要过多软件判断,缩短了软件处理时间,但是 CCD 输出信号的大部分信息被丢弃,无法达到精度要求较高的印刷行业要求。

针对三色线阵 CCD 实际应用指标,设计基于 Cortex-M3 内核的 MCU STM32C8T6,提出了基于多滞回比较器的高速 CCD 信号处理方案,相比基于 A/D 采样的信号处理方式提升了系统处理速度<sup>[9]</sup>,相比单模拟比较器方式提高系统精度,对优化后系统进行试验验证。系统结构和连接如图 1 所示。

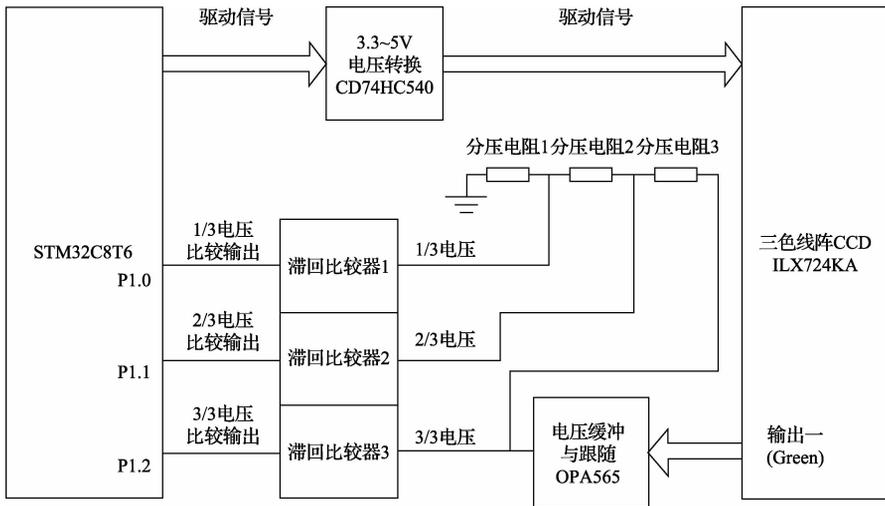


图 1 信号处理电路结构连接

## 2 三色线阵 CCD 驱动硬件设计

本设计选用的线阵 CCD 为 SONY 公司的高性能三色线阵 CCD ILX724KA, 具备 2700 个有效光敏单元, 光敏单元尺寸为  $8\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$ , 更突出的一点是, 其尺寸仅为  $32\text{mm} \times 10\text{mm}$ , 在相同精度和光敏单元数目的 CCD 中为尺寸最小的。表 1 为 ILX724KA 与市面常用 TCD1206D 在动态范围、精度、尺寸等指标的对比, 可以看出 ILX724 在动态范围和电压输出的优势, 说明 ILX724KA 测量范围更广, 对环境亮度适应范围更广。

表 1 主要性能

特性	ILX724KA	TCD1206	单位
像元数目	270×3	2 160	
像元尺寸	8×8	14×14	$\mu\text{m} \times \mu\text{m}$
灵敏度	4.3(Green)	45	V/lx, s
动态范围	10 670	1 700	
饱和电压输出	3.2	1.7	V
尺寸	32×10	41×10	mm×mm

需要指出的是, 时钟脉冲驱动信号的电压幅值至少要达到 4.75 V, 因此针对 STM32 设计了基于 CD74HC540 高速输出缓冲器的 3.3 V 转 5 V 的电平转换电路。该电路是利用了 CMOS 芯片对输入信号兼容范围广泛的原理。(当 CD74HC540 供电电源为 5.0 V 时, 高电平输入电压最低可达 3 V, 对应输出为 4.9 V)。ILX724KA 采用双相脉冲驱动方式, 驱动信号分为: 读出门脉冲输入(ROG), 时钟脉冲(ph1, ph2, LH), 复位脉冲(RS)。

STM32F103 集成开发环境 Keil MDK 中, 为提高引脚输出速度可以使用“位段”(BitBand)的方式, 其执行效率与直接对寄存器操作相当, 远高于使用 ST 提供的固件库 GPIO 操作函数。关键代码示例如下。

//IO 口操作宏定义

```
# define BITBAND ( addr, bitnum ) (( addr &
0xF0000000)+0x2000000+((addr&0xFFFF)<<5)+
(bitnum<<2))
# define MEM_ADDR(addr) * ((volatile unsigned
long *) (addr))
# define BIT_ADDR (addr, bitnum) MEM_ADDR
(BITBAND(addr, bitnum))
# define PAout(n) BIT_ADDR(GPIOA_ODR_Addr,
n) //定义输出操作
# define PAin(n) BIT_ADDR(GPIOA_IDR_Addr, n)
//定义输入操作
```

## 3 CCD 信号处理优化设计原理

如图 2 所示, 线阵 CCD 一个像素单元的输出信号不仅有谷底的有用信号中间还夹杂了每个像素单元的复位电压和参考电压, 因此简单的采样转换得出的数值不可靠。目前线阵 CCD 常用的信号采集处理有以下方式, ADC 模数转换, 硬件二值化, 软件二值化, 电压变化触发, 相关双采样等方式。

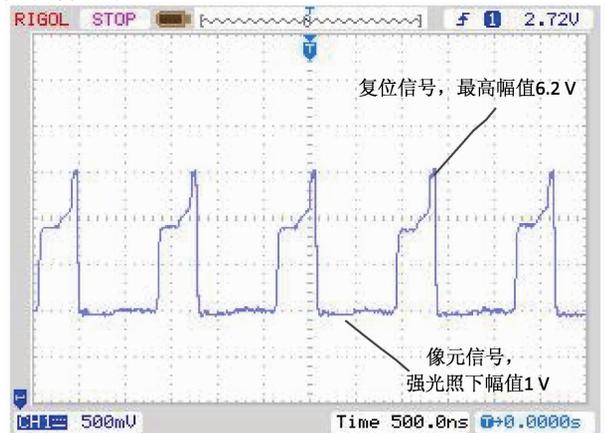


图 2 ILX724KA 输出图像

模数转换是通过多次采集的方式最大限度的采集到有用信号,优点是,精度高,缺点是由于需要采集的像素数目多,浪费处理器 ADC 资源,整个采集转换周期时间也很长。

硬件二值化,使用比较器方式与固定的预设阈值进行比较,输出开关量信号,优点是,速度快,缺点是丢失了原信号大量有用信息,精度太低,而且由于常用的比较器没有“滞回”功能,实际使用中,当信号电压处于阈值附近时会引起比较器输出振荡,造成采样错误率增大。

软件二值化,先将信号进行模数转换再利用软件算法进行软件二值化,精度比硬件二值化更高,但是整个采样周期依然较长。

电压变化触发方式,使用基于电容充放电和比较器原理的模拟电路搭建,优点是相对硬件二值化其输出结果显示了信号高低变化信息,速度快,但是在实际使用中,由于线阵 CCD 信号杂乱信号干扰其精度和准确性不比硬件二值化高。

相关双采样方式,对  $1/f$  噪声和低频噪声有一定抑制作用,但是其采样速率一般不高且硬件成本较高。

综合以上方式后,本设计采取对线阵 CCD 输出进行 3

段均分压,后经由 3 片施密特触发器同时进行三次滞回比较,采集施密特输出信号进行后期数据处理的方式,可以在保证精度情况下,增强电路抗干扰能力,尽可能缩短采样周期。

### 3.1 硬件电路优化

如图 3 所示,线阵 CCD 信号采集处理电路。STM32C8T6 产生驱动信号由 3.3 V 转 5 V 后直接驱动 ILX724KA,为提高 CCD 输出端带负载能力,利用三极管 2SC2785 构成射极跟随电路进行电流放大,随后进入电压跟随模块,在选取放大器型号时应注意:1)放大器可稳定工作于低增益状态;2)输出电压幅值能达到 10 V。本设计采用的放大器为单位增益稳定的高速放大器 OPA656,非常适合作为电压跟随器。在 OPA656 输出信号分压电路中,分压电阻阻值过高会影响跟随器输出使输出波形振荡。OPA656 信号经 3 电阻均分压后输入三路施密特触发器中,与比较器阈值进行并行比较。由于施密特触发器具备双迟滞特性,如图 4 滞回曲线所示,  $V_n$  和  $V_p$  分别为负向阈值和正向阈值,输入为 5 V 电压下  $V_n$ 、 $V_p$  典型值分别为 1.9 V、2.9 V。在实际使用时,根据图 2 显示的有效像素单元信号变化情况可认为比较阈值为  $V_p$  (2.9 V)。

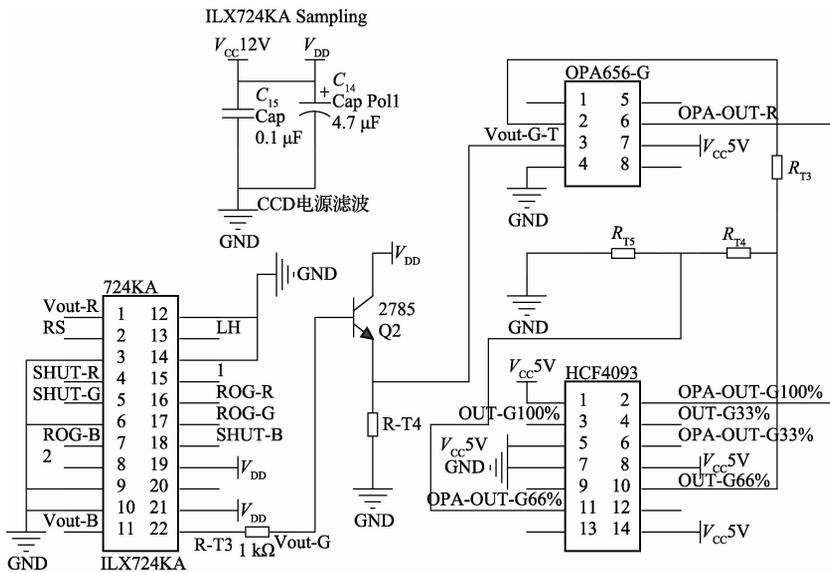


图 3 线阵 CCD 信号采集处理电路

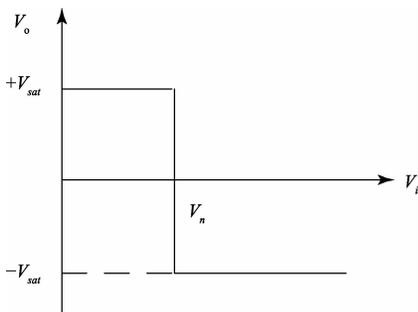


图 4 普通比较器输出特性

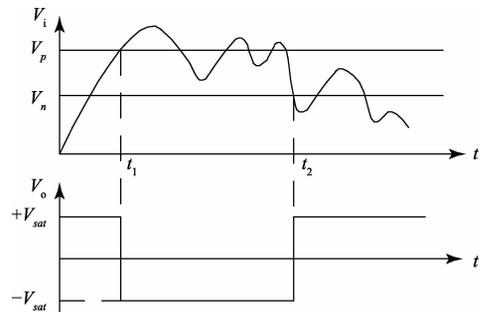


图 5 HCF4093 输入输出

如图 5 HCF4093 输入输出曲线所示,当输入电压在  $t_1$  到  $t_2$  时间段内在比较器阈值上下小幅波动时,滞回比较器的输出依然保持很稳定输出状态,而对于普通比较器而言,如图 4 所示由于其阈值只有一个,在此情况下比较器输出会产生输出剧烈波动,不利于 MCU 读取数值,其抗干扰性能有限。根据图 5 所示输入输出曲线和图 2 所示的 CCD 输出信号变化趋势,MCU 在有效像素单元信号建立后读取 HCF4093 数值。此时,当 CCD 分压后的电压呈下降状态降至阈值  $V_p$  时,会使 HCF4093 输出偏转,HCF4093 输出规则变化如下。 $U_o$  为 HCF4093 输出,  $V_i$  为 CCD 输出经分压后电压,  $V_i'$  为 CCD 输出电压变化趋势,  $-V_{sat}$  在 5V/0V 单极性供电电源情况下为 0 V,  $+V_{sat}$  为 5 V。

$$\begin{cases} V_o = -V_{sat}; (V_i' > 0, V_i > V_n; V_i' < 0, V_i > V_p) \\ V_o = +V_{sat}; (V_i' > 0, V_i < V_n; V_i' < 0, V_i < V_p) \end{cases}$$

### 3.2 高速信号处理的软件实现

软件设计指标与功能实现:使用多回路滞回比较器使得处理器可以获得原始 CCD 输出电压,2/3 输出电压和 1/3 输出电压与  $V_p = 2.9\text{ V}$  的比较结果,如表 2 和图 6 所示。

表 2 HCF4093 输出结果与 CCD 电压范围关系

HCF4093 输出结果			CCD 电压范围
3/3 分压	2/3 分压	1/3 分压	
1	1	1	$V_{ccd} < 2.9\text{ V}$
1	1	0	—
1	0	1	—
1	0	0	—
0	1	1	$2.9\text{ V} < V_{ccd} < 4.35(2.9 \times 1.5)\text{ V}$
0	1	0	—
0	0	1	$4.35(2.9 \times 1.5)\text{ V} < V_{ccd} < 8.7(2.9 \times 3)\text{ V}$
0	0	0	$V_{ccd} > 8.7(2.9 \times 3)\text{ V}$

微处理器在产生最后一个脉冲电压 300~600 ns 后即可读取到有效信号,因此经延时 500 ns 后直接采集相应引脚上的高低电平即可判断有效电压值范围<sup>[9-11]</sup>。

## 4 系统测试

最终实验结果如图 7 所示,图中蓝色曲线为 CCD “Green”端 100% 输出图像,红色为“Green”端输出电压经 HCF4093 处理后图像。实验条件为 1W LED 近距离照射下,ILX724KA 屏幕上预留一条 0.6 mm 缝隙,其他部分用黑色塑胶遮盖。根据图 6 所示的软件流程图,MCU 读取 HCF4093 输出的高电平个数为 78 个,理论值为 75 个,与理论值相差  $3 \times 8\mu\text{m}$ 。

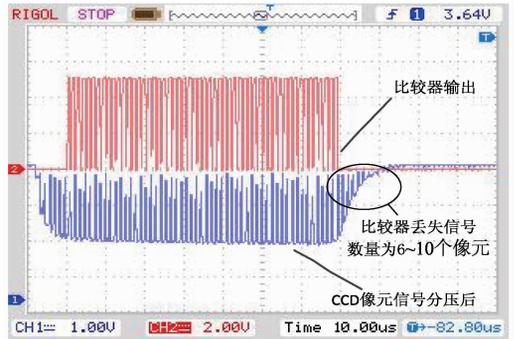


图 7 施密特输出实际效果

## 5 结论

试验表明,系统总体驱动、采样、处理周期为 3 ms。该线阵 CCD 驱动、采集、处理系统,硬件尺寸小巧,但抗干扰性强,简单实用。采集到的信号能满足一般工业场合对于位移控制要求,环境适应能力强。在不同的环境下可对硬件电路稍作调整即可运用到不同精度、速度要求的场合。实际应用场合中,伴随对图像色彩控制要求的提高,三色线阵 CCD 的使用范围越来越广,本设计涉及的线阵 CCD 驱动、采样方式会得到更广泛的应用。

## 参考文献

- [1] 黄彤津,朱礼尧,迟涵文,等.基于 CPLD 的线阵 CCD 驱动电路的设计[J].电子测量技术,2014,37(7):66-70.
- [2] 吴鸿,陈冲,李超,等.一种基于 PSD 的转速测量新方法[J].电子测量与仪器学报,2014,28(9):1033-1039.
- [3] 陈镇龙,叶玉堂,宋昀岑,等.应用于彩色线扫描机器视觉系统的图像校正方法[J].光学学报,2013,33(7):2-7.
- [4] 温焯婷,戴瑜兴,柴世杰,等.基于线阵 CCD 的位移检测系统的设计与实现[J].仪表技术与传感器,2010,

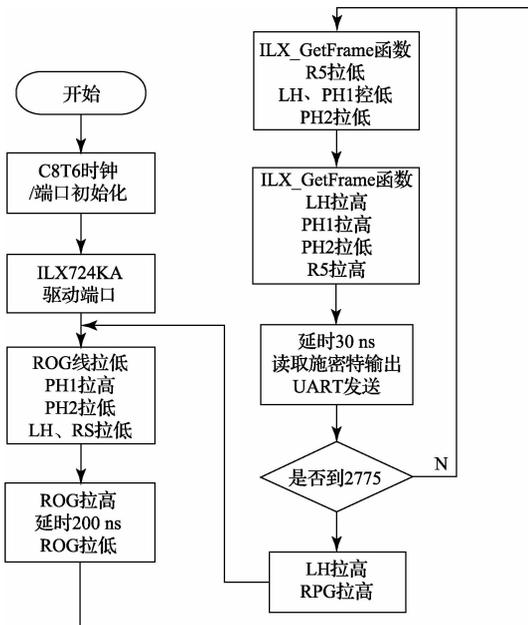


图 6 CCD 数据采集处理软件流程

- (7):66-68.
- [5] 田小超,李忠科. 基于双单片机的线阵 CCD 驱动及信号处理系统[J]. 现代电子技术,2014,37(20):59-61.
- [6] 于之靖,刘月林,诸葛晶昌. 高精度双线阵 CCD 非接触直径测量系统[J]. 传感器与微系统,2014,33(1):120-122.
- [7] 周建勇,陈红兵,袁世顺,等. 一种 CCD 驱动时序参量化设计方法[J]. 半导体光电,2013,20:1055-1059.
- [8] 唐亚军,郭喜庆,杨敬娴,等. 基于 51 单片机的线阵 CCD 驱动设计[J]. 微型机与应用,2013,32(12):73-76.
- [9] 秦付军,黄惟公,邓成中. 基于 STM32 的线阵 CCD 尺寸测量系统[J]. 西华大学学报,2013,32(1):64-67.
- [10] 李国宁,刘妍妍,张柯,等. 高频差分采样技术在 CCD 信号处理中的实现[J]. 电子测量与技术,2014,37(10):123-129.

- [11] 刘月林,诸葛晶昌. 一种光积分时间可调的线阵 CCD 驱动设计[J]. 工业控制计算机,2013,26(12):100-101.

## 作者简介

**褚世冲**,1990 年出生,硕士研究生。主要研究方向为智能仪器仪表、嵌入式图像处理。

E-mail:chushichong@163.com

**徐耀良**,1953 年出生,硕士生导师,教授级高级工程师。

**周奇聪**,1990 年出生,硕士研究生。主要研究方向为嵌入式系统应用。

**狄芬芬**,1990 年出生,硕士研究生。

**杨波**,1990 年出生,硕士研究生。

(上接第 101 页)

- [3] 杨汉西,胡蓉晖,艾新平. 电阻应变法用于密封电池内压变化的动态检测[J]. 电化学,1998,4(2):318-322.
- [4] 陈延禧,韩佐青,俞涛. MH-Ni 电池内压测量及研究的新方法[J]. 电源技术,1997,21(3):96-97.
- [5] 金彩虹,倪永,夏保佳,等. 内置压力感应器的蓄电池:中国,200820153456.1 [P]. 2009-07-01.
- [6] 娄豫皖,周明明,浦江艳,等. 一种圆柱形蓄电池内压测试装置:中国,201320825253.3 [P]. 2013-12-13.
- [7] 娄豫皖,夏保佳,毛王军,等. 一种镍氢电池荷电态的估算方法:中国,201110128382.2 [P]. 2011-05-16.
- [8] 兰春光,刘航,田玉基. 工程化光纤光栅液体压力传感器的研制[J]. 仪器仪表学报,2013,34(9):2153-2160.
- [9] 郑志霞,冯勇建. MEMS 接触电容式高温压力传感器的温度效应[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(12):1141-1147.
- [10] 方立德,卢庆华,李小亭,等. 一种新型分体式差压测量装置的研制[J]. 电子测量与仪器学报,2012,26(10):870-876.

- [11] 李党娟,吴慎将,杨远生. 基于 LabVIEW 的冲量测试系统开发[J]. 国外电子测量技术,2012,31(1):63-66.

- [12] 陈果,郭庆,王金宏,等. 基于 STM32 的蓄电池检测系统[J]. 国外电子测量技术,2012,31(1):70-73.

- [13] CUSCUETA D J, SALVA H R, GHILARDUCCI A A. Inner pressure characterization of a sealed nickel-metal hydride cell[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 4067-4071.

## 作者简介

**娄豫皖**,1971 年出生,博士,研究员。主要研究方向为化学电源及其材料。

E-mail: yuwanlou@163.com

**张竞择**,1989 年出生,硕士研究生,主要研究方向为锂离子电池。

**郑敏信**,1978 年出生,博士,讲师。主要研究方向为机电过程控制及自动化。

**王倩**,1988 年出生,博士研究生。主要研究方向为锂离子电池。