

CCD 不均匀性校正

徐 伟

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——研制了 CCD 不均匀性校正系统, 实现了通常校正中忽略的暗电流不均匀性的实时校正。不均匀性校正精度为 1.7%, 系统由硬件实现, 工作频率达 10 MHz 以上。讨论了系统的校正原理、实现方法和设计思想。用校正后的系统进行了测量实验, 得到了较好的实验结果。

一、引 言

在线检测中使用 CCD 阵列, 对于比较精密的检测要求, 必须解决不均匀性校正的问题, 由于在线检测的速度和精度要求, 校正也必须是实时高速和高精度的。本文讨论了校正的方法, 并设计制作了相应的系统, 用校正后的系统进行了物体线度测量实验, 得到了较好的结果。

二、CCD 不均匀性校正

1. 校正原理及方法

CCD 列阵各单元探测器响应函数可近似认为是线性的, 即

$$I_i(E) = A_i E + B_i \quad (1)$$

式中, E 为入射到第 i 单元的光照度; I_i 为第 i 单元输出信号; A_i 为直线的斜率, 反映了探测器响应率的大小; B_i 为直线的截距, 反映了探测器暗电流的大小。

在相同的光照度 E 下, 由于 CCD 的不均匀性, 各单元参数 A_i 和 B_i 不相同, 从而导致 CCD 输出信号大小也不相同, 其响应曲线如图 1 所示。为校正 CCD 的不均匀性, 须测出每个单元的响应曲线, 求得参数 A_i 和 B_i , 并存贮起来, 实时地取出进行反运算, 使各单元的输出信号相互一致:

$$I'_i(E) \propto \frac{I_i(E) - B_i}{A_i} \propto E. \quad (2)$$

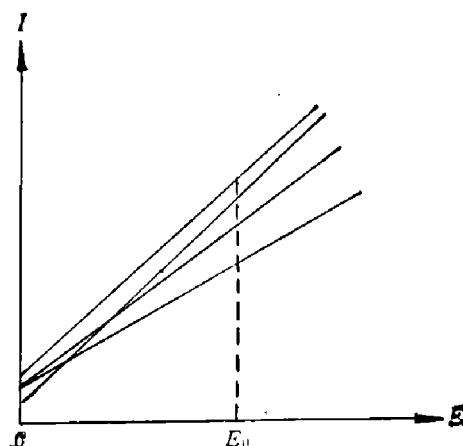


图 1 CCD 响应曲线
Fig. 1 I - E curve of CCD

校正的关键是比较精确地测出各单元的参数值。可以改变光照度 E , 测出一组 (I, E) 值, 进行直线回归, 求出参数值。但是, 在实际测量信号 I 值的同时, 高精度地测出 E 值有一定的困难, 故采用了对于平均值进行校正这一简单而实用的方法。将 CCD 响应方程对所有单元求平均得

$$\overline{I(E)} = \overline{A}E + \overline{B}; \quad (3)$$

式(3)代入方程(1)得:

$$I_i(E) = \frac{A_i}{\overline{A}} [\overline{I(E)} - \overline{B}] + B_i = A'_i I'(E) + B_i; \quad (4)$$

式中, $A'_i = A_i/\overline{A}$; $I'(E) = \overline{I(E)} - \overline{B}$ 。

显然 $I_i(E)$ 与 $I'(E)$ 仍然保持着线性关系, 且由于所有数据都是由输出信号同时采集的, 精度较高, 最终的校正结果也证明了这种方法的优越性。

改变 E 测得 N 组数据, 用最小二乘法进行回归运算, 可拟合出最佳直线参数的计算公式为

$$\begin{cases} A'_i = \frac{N \sum_{j=1}^N I'_j \cdot I_{ij} - \sum_{j=1}^N I'_j \cdot \sum_{j=1}^N I_{ij}}{N \sum_{j=1}^N (I'_j)^2 - (\sum_{j=1}^N I'_j)^2}; \\ B_i = \frac{\sum_{j=1}^N I_{ij}}{N} - A'_i \cdot \frac{\sum_{j=1}^N I'_j}{N}. \end{cases} \quad (5)$$

以上讨论中, 认为每个单元的 A_i 和 B_i 是固定不变的, 但实际上截距因子 B_i 并非常量, 影响 B_i 的主要原因是 CCD 的暗电流, 它是由于衬底内部和表面晶体缺陷所产生的电荷引起的, 故对环境温度相当敏感。一般, 温度每增加 7°C , 暗电流的不均匀性就要增加近一倍, 一年四季温度的变化将引起暗电流不均匀性的变化是不能忽略的。

由于 CCD 的所有单元是在同一材料上用相同工艺制成的, 尽管由于工艺的原因会产生不一致因素, 但可假设其各单元的温度特性是一致的, 即具有相同的温度变化函数,

$$B_i(T) = C(T) \cdot B_i(T_0); \quad (6)$$

式中, $C(T)$ 为一比例因子, 是温度 T 的函数, 由上述假设, 各单元具有相同的函数形式, 对 CCD 的暗参考元也有:

$$B(T) = C(T) \cdot B(T_0); \quad (7)$$

(6)、(7)两式相除可得不随温度改变的量 B'_i :

$$B'_i = B_i(T)/B(T) = B_i(T_0)/B(T_0)。 \quad (8)$$

将 B'_i 存贮, 在校正时实时地取出反映当时温度的暗参考元值 $B(T)$, 与各单元的 B'_i 相乘可得与实时环境温度相对应的校正参数, 即

$$\begin{aligned} B''_i &= B'_i \cdot B(T) = \frac{B_i(T_0)}{B(T_0)} \cdot B(T) = \frac{B_i(T_0)}{B(T_0)} \cdot C(T) \cdot B(T_0) \\ &= C(T) \cdot B_i(T_0) = B_i(T)。 \end{aligned} \quad (9)$$

2. 电路设计

考虑实时检测的高速要求, 校正全部由硬件实现, 电路框图见图 2。两路 CCD 信号经过前置处理后, 由箝位器消去直流电平, 经多路转换器变为一组信号后送 A/D 转换器, 转换后的数字信号由运算电路进行不均匀校正运算。EPROM I 和 EPROM II 中分别存贮校正

参数 B_i 和 A_i , RAM 作为参数的暂存区, 寄存器和乘法器 I 用来完成实时校正参数 B_i' 的获得, 减法器 and 乘法器 II 完成对 B_i 和 A_i 的校正。

电路的设计主要考虑保证足够高的工作速度和校正精度, 为此作以下几点考虑:

(1) CCD 的两路信号是叠加在直流电平上的, 两路的直流电平值也不尽相同, 因此必须将此电平值消去。通常采用的箝位电路的精度较低, 易受外界干扰, 特别在系统工作频率较高时尤为突出, 为此, 采用由采样保持电路和减法器构成的高精度箝位电路, 在每次信号输入时, 采样保持器采样并保存直流电平值, 由减法器从信号中减去直流电平, 从而达到消除直流电平的目的。经测量箝位精度优于 1mV 。

(2) 校正采用数字信号处理, 位数选择决定了校正精度, 选用 8 位高速 A/D 转换器, 在不考虑其它误差情况下, 校正精度可达 $1/256=0.4\%$ 。采用高精度低漂移基准源作为 A/D 转换器的电压参考源, 以保持转换精度。

(3) 时序电路设计成流水线结构, 当时钟处于第 i 个周期时, 前半部分电路在第 $i-1$ 单元作暗电流校正, 后半部分电路在第 $i-2$ 元的斜率校正, 使时间得到充分利用, 有利于高速工作, 所有数据实行边缘触发有效, 消除了由于各电路延迟特性不同可能引入的运算错误。

(4) 为使电路有较高的工作速度, 必须提高运算速度, 所设计的电路速度指标为 10MHz , 即校正一个数据的时间小于 100ns , 而完成对整个 CCD 信号的一次校正时间仅为 0.2ms 。

(5) 运算电路包括减法和乘法器, 减法器用四位电路拼成八位运算器, 进行两个八位运算的时间为 25ns 。

乘法器运算速度一般较慢, 故采用并行乘法器进行运算, 由四个 $4\times 4\text{bit}$ 的并行乘法器连接起来, 产生因数的部分积, 再按照华莱斯树 (Wallace tree) 的原理将部分积进行累加, 累加器之间有超前进位发生器, 使累加速度大为提高, 扩展后的 $8\times 8\text{bit}$ 乘法器的实际运算时间小于 50ns 。

由于系统工作速度高, 而用于存贮参数的 EPROM 的读取时间长, 一般为几百 ns, 难以满足要求, 故在 EPROM 与运算器之间, 加入 RAM 作为中继存贮器, 在每次开机时, 直接从 RAM 中读取数据, RAM 的读取时间一般小于 100ns , 大大提高了工作速度。另外, 还设置了手动转移按钮, 可随时在开机状态下进行数据转移。

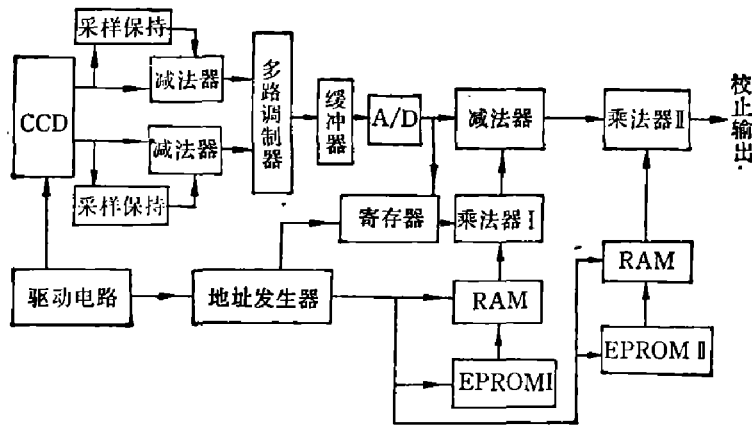


图 2 不均匀校正电路框图
Fig. 2 Block diagram of circuits for nonuniformity correction.

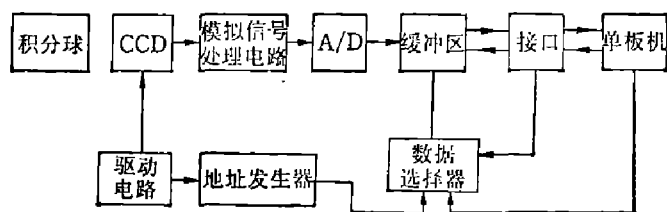


图 3 校正参数测量装置
Fig. 3 Set-up for Measurement of correction parameters.

(3) 校正参数的测量

需要测量的校正参数共为 4096 个,其测量装置见图 3。

作为校正用的标准光源,其均匀性必须达到一定要求,采用积分球作为标准光源,积分球直径为 $\phi 300$ mm,输出窗口为 $\phi 60$ mm。

测量数据的时钟频率与实际使用时的时钟频率一致,否则会由于频率的改变使测得的参数值与实际使用时的参数值有一定偏差,从而影响校正结果,故在测量装置中设计了异步输入装置来满足这一要求。改变不同的入射光照度,进行多次测量,取测量次数 $N=8$,将所测数据由式(5)通过单板机计算出 2048 个 A_i 和 B_i ,最后由写入器写入 EPROM。

三、校正结果和讨论

1. 校正结果

采用 Fairchild 公司 CCD 143DC 型 2048 元线阵 CCD,其不均匀性典型值为 15%,所测得的不均匀性实际值为 17%,实验中取数据时钟 $f=4$ MHz,积分时间 $t=1.0$ ms。



图 4 输出信号

Fig.4 Output signal.

校正前后的 CCD 响应信号波形见图 4。经过校正后的不均匀性达到 1.7%,较校正前提高了一个数量级。

2. 校正误差分析

引起校正误差的原因是多方面的,主要有 CCD 响应的非线性。光源的不均匀性。电路噪声及不稳定性、计算参数的误差等,我们对误差分别进行了估算

(见附录),并得到总的校正误差为 $E=1.5\%$,与实际校正结果基本一致。

3. 重复性测量

在六天中每天对校正结果进行一次测量,其重复性良好,不均匀性平均值为 1.7%。

四、应用实验

用经过不均匀校正后的系统进行了物体线度测量实验,基本原理是由 CCD 对被测物成象,然后对象所对应的 CCD 单元数进行计数,通过适当的变换后就可以得到被测物线度的大小。

测量精度由测量范围和 CCD 的单元数共同决定,当 CCD 选定后,为保证一定的测量范围,就会使测量误差比较大,所以在实验中采用内插的方法对探测单元进行细分。而 CCD 不均匀性的校正使得内插细分的精度得到了保证;假若 CCD 有较大的不均匀性,就会产生较大的测量误差,此时再进行细分将毫无意义。

实验的数字信号处理部分采用经功能扩充后的单板机代替,即用高速采样,高速不均匀校正,最后通过数据缓冲区由单板机进行慢速处理,其效果与直接用硬件处理一样。由所确定的阈值和实验数据,选择进行五级细分以提高测量精度,实验结果令人满意。

五、结 论

研制了 CCD 实时不均匀性校正系统, 且实现了通常校正所忽略的暗电流不均匀的实时校正, 完全能满足高速、高精度的检测要求。

实验表明 CCD 检测系统具有制作方便、结构简单、成本低、检测精度较高等优点; 可用于各种物体的宽度、厚度及直径的无接触在线测量, 还可推广用于物体的表面缺陷的检测, 所以, CCD 检测系统具有较高的实用价值和推广意义。

致谢——本工作是在薛永祺、林金华两位导师的精心指导下完成的, 对此深表谢意。

附录 不均匀性校正的误差分析

校正后的输出值为 $I'_i = \frac{I_i - B_i}{A_i}$,

可求出其均方根误差为:

$$\sigma_{2i}' = \sqrt{\left(\frac{\partial I'_i}{\partial A_i}\right)^2 \cdot \sigma_{A_i}^2 + \left(\frac{\partial I'_i}{\partial I_i}\right)^2 \cdot \sigma_{I_i}^2 + \left(\frac{\partial I'_i}{\partial B_i}\right)^2 \cdot \sigma_{B_i}^2} = \frac{1}{A_i} \sqrt{(I_i)^2 \cdot \sigma_{A_i}^2 + \sigma_{I_i}^2 + \sigma_{B_i}^2}$$

对各项误差分别讨论如下:

1 CCD 响应非线性的影响

严格地说, CCD 响应应具有如下形式: $I = \sum_{i=0}^n a_i E^i$ 。

以此响应方程与非线性近似相比较可求出误差。考虑到 n 取得过大后运算的复杂性, 取二次近似作为估算, 即设响应函数为 $I = a_0 + a_1 E + a_2 E^2$,

仍用最小二乘法拟合, 可得各参数的计算公式为

$$a_0 = \frac{\Delta_0}{\Delta}; \quad a_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad a_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta};$$

$$\text{其中, } \Delta = \begin{vmatrix} N & \sum E_i & \sum E_i^2 \\ \sum E_i & \sum E_i^2 & \sum E_i^3 \\ \sum E_i^2 & \sum E_i^3 & \sum E_i^4 \end{vmatrix}; \quad \Delta_0 = \begin{vmatrix} \sum I_i & \sum E_i & \sum E_i^2 \\ \sum E_i I_i & \sum E_i^2 & \sum E_i^3 \\ \sum E_i^2 \cdot I_i & \sum E_i^3 & \sum E_i^4 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} N & \sum I_i & \sum E_i^2 \\ \sum E_i & \sum E_i \cdot I_i & \sum E_i^3 \\ \sum E_i^2 & \sum E_i^2 \cdot I_i & \sum E_i^4 \end{vmatrix}; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} N & \sum E_i & \sum I_i \\ \sum E_i & \sum E_i \cdot E_i & \sum E_i \cdot I_i \\ \sum E_i^2 & \sum E_i^3 & \sum E_i^2 \cdot I_i \end{vmatrix}.$$

代入实验数据, 可得到相对误差为 0.6%。

2. 光源不均匀性的影响

由于内壁涂料的不均匀, 标准光源积分球总有一定的不均匀性, 将 CCD 在积分球输出窗范围内作移动, 跟踪其一固定单元的输出信号, 得到不均匀性的标准偏差为 $\sigma_{I_1} = 0.60$ 。

3. 模拟电路的误差影响

模拟电路对校正结果的影响主要是噪声和漂移, CCD 噪声由所给参数决定, 为 2mV, 两个放大器的噪声和漂移总和取为 4mV, 将它们折合至输出端的误差为 $\sigma_{I_2} = 0.77$ 。

4. 量化误差的影响

进行 A/D 变换时会引入量化误差, 认为量化误差的概率密度函数为均匀分布的, 可求出其均方差值为:

$$\sigma^2 = \int_{-\frac{1}{2}q}^{\frac{1}{2}q} e^2 p(e) de = \frac{q^2}{12} = V_c^2 / 12 \cdot 2^{2b};$$

$$\sigma = V_0 / \sqrt{12} \cdot 2^b;$$

其中, q 为量化宽度, $q = V_0 / 2^b$; V_0 为输入满度电压; b 为 A/D 转换的位数。取 $V_0 = 2V$, $b = 8$, 代入上式可得 $\sigma = 2.25 \text{ mV}$, 折合到最终的输出误差 $\sigma_{I_i} = 0.29$ 。

5. 计算参数时的误差

此项误差包括两部分, 一部分是采用数字计算时的误差; 另一部分是由于测量数据本身的偏差传递到结果的误差。

对 A_i 采用的字节16位运算, 最大误差为 $\sigma_{A_{i1}} = 2^{-8} \approx 4 \times 10^{-3}$, 对 B_i 采用 8 位运算, 最大误差为 $\sigma_{B_{i1}} = 1$ 。

对测量数据, 得其偏差为 $\sigma_I^2 = \frac{\sum(\delta I_n)^2}{k-1} = 0.84$, 传递到最后的参数偏差为

$$\sigma_{A_{i2}}^2 = \frac{\sigma_I^2}{N \sum_{j=1}^N (\bar{I}_j)^2 - (\sum_{j=1}^N \bar{I}_j)^2} = 1.8 \times 10^{-5},$$

$$\sigma_{A_{i2}} = 4.3 \times 10^{-3};$$

$$\sigma_{B_{i2}}^2 = \left\{ \frac{1}{N} + \frac{\sum_{j=1}^N \bar{I}_j}{N} \cdot \frac{1}{[N \sum_{j=1}^N (\bar{I}_j)^2 - (\sum_{j=1}^N \bar{I}_j)^2]} \right\} = 0.29,$$

$$\sigma_{B_{i2}} = 0.54;$$

故:

$$\sigma_{A_i} = \sqrt{\sigma_{A_{i1}}^2 + \sigma_{A_{i2}}^2} = \sqrt{(4 \times 10^{-3})^2 + (4.3 \times 10^{-3})^2} = 5.9 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{B_i} = \sqrt{\sigma_{B_{i1}}^2 + \sigma_{B_{i2}}^2} = \sqrt{1^2 + 0.54^2} = 1.14$$

综合以上各项误差, 可求出总的均方根误差。取 $\sigma_{A_i} = 5.9 \times 10^{-3}$; $\sigma_{B_i} = 1.14$; $A_i = 1$; $I'_i = 125$;
 $\sigma_1 = \sqrt{\sigma_{I_1}^2 + \sigma_{I_2}^2 + \sigma_{I_3}^2} = \sqrt{125^2 + (5.9 \times 10^{-3})^2 + 1.14^2 + 1.02^2} = 1.70$;

相对误差为 $\frac{\sigma'_1}{I'_i} = \frac{1.70}{125} = 1.36\%$ 。

以上考虑是在作了直线假设下得到的, 若考虑了非线性响应后, 可得总的误差为

$$E = \sqrt{(1.36\%)^2 + (0.6\%)^2} \approx 1.5\%;$$

其结果与校正结果基本一致。

参 考 文 献

- [1] Carison C. L. and Foss N. A., *Proc. SPIE*, **178**(1979), 99~109.
- [2] Helfrich R. W., *Proc. SPIE*, **179** (1979), 110~121.
- [3] Helfrich R. W., *Proc. SPIE*, **217**(1980), 162~177.
- [4] 森利宏, *オプトロニクス*(1984), 3: 63~65.

CORRECTION OF NONUNIFORMITY OF CCD

XU WEI

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

A correction system for COD nonuniformity is developed. The real time correction of dark current nonuniformity, which was usually neglected, is realized. The correction precision is 1.7%. The function of the system is implemented by hardware. The working frequency of the system is over 10 MHz. The correction principle, method and thinking of design are discussed. Experimental results are satisfactory.