

CCD 原理及应用

实验（一）CCD 驱动实验

[实验目的]

- 1、掌握用双踪迹示波器观测二相线阵 CCD 驱动器各路脉冲的频率、幅度、周期和相位关系的测量方法。
- 2、通过测量 CCD 驱动脉冲之间的相位关系，掌握二相线阵 CCD 的基本工作原理。
- 3、通过测量典型线阵 CCD 的输出脉冲信号与驱动脉冲的相位关系，掌握 CCD 的基本特征。

[实验内容]

- 1、学习掌握线阵 CCD 的基本工作原理（参考相关教科书）。
- 2、学习掌握 TCD1200D 线阵 CCD 的基本工作原理。
- 3、掌握双踪示波器的基本操作。

[实验仪器]

- | | |
|---------------------|-----|
| 1、双踪同步示波器（20MHz 以上） | 1 台 |
| 2、CCD 原理应用实验箱 | 1 台 |

[实验原理]

CCD 是电荷耦合器件（Charge Coupled Device）的简称，它是由金属—氧化物—半导体（Charge Coupled Device）简称 MOS 构成的密排器件。主要用于两个领域，一是信息存储和信息处理，二是用于摄像装置。这里介绍摄像用的黑白两相线阵 CCD。

1、黑白两相线阵 CCD 结构简述

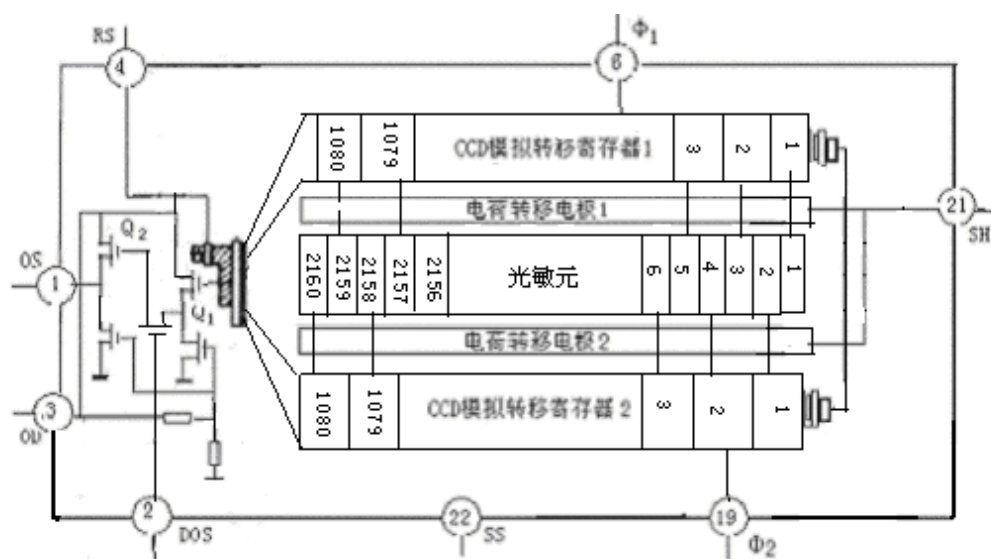
黑白两相线阵 CCD 有多种规格，实际上大同小异。这里以实验所用 TCD1200D 型 2160 像素的 CCD 为例进行简述。结构示意图如下：

它包括摄像机构、两个 CCD 模拟移位寄存器、输出机构和采样保持电路四部分。

摄像机构也称摄像区，它具有 2160 个光敏元和电荷转移电极组成，实际上为 2160 个 MOS 电容，电荷转移电极为 MOS 电容的栅极，通过电荷转移电极给栅极加脉冲电压。光敏元起光电转换作用，MOS 电容起暂存转换的电荷和向 CCD 模拟移位寄存器转移电荷包的作用。将 2160 个 MOS 电容的奇数位分别与 CCD 转移寄存器 1 相连，偶数位分别与 CCD 转移寄存器 2 相连。

CCD 模拟移位寄存器也是由一系列 MOS 电容组成。移位寄存器 1 和 2 各密排 1080 个，他们

对光不敏感， ϕ_1 、 ϕ_2 为MOS电容的栅极，通过 ϕ_1 、 ϕ_2 外加脉冲电压上。



电荷转移电极SH为摄像区MOS电容的控制电极，外加周期性脉冲电压。在脉冲电压低电平期间，摄像机构中的MOS电容形成势阱暂存光敏元转换的电荷，建立起一个与图像明暗成比例的电荷图像。高电平期间，摄像区的MOS电容中的电荷同时读出到CCD模拟移位寄存器的MOS电容中，奇数位信号转移到移位寄存器1。偶数位信号转移到移位寄存器2。在下一个周期的低电平期间，摄像区的MOS电容摄取第二帧图像，与此同时，CCD转移寄存器的MOS电容中的电荷，在 ϕ_1 、 ϕ_2 、脉冲电压的作用下，两个移位寄存器中的电荷包以奇、偶序号交替的方式逐个移位到输出机构中，恢复了摄像时的次序。

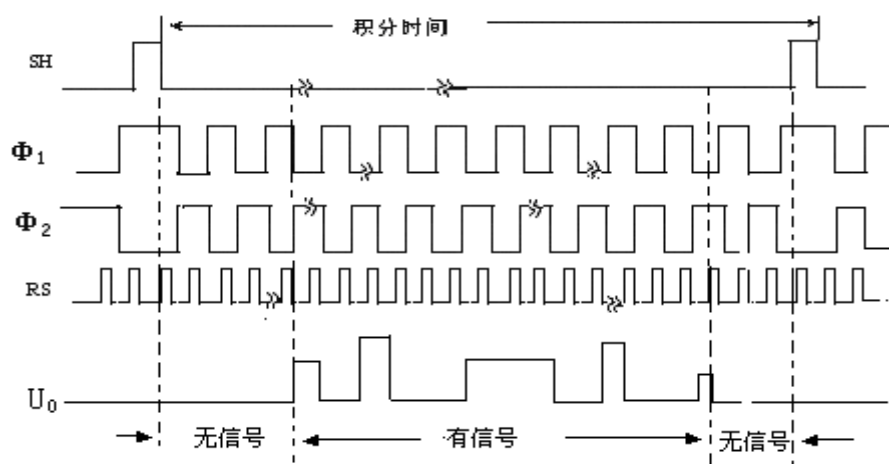
由场效应管 Q_1 、 Q_2 构成的两个源极跟随器构成输出机构，将来自CCD移为寄存器携带图像信息的电荷包以电压的形式送到器件外，OS是输出电极。

输出机构接有复位电极RS，接到 Q_1 的栅极，每当前一个电荷包输出完毕，下一个电荷包尚未输出之前，RS上应出现复位脉冲，将前一个电荷包抽走，使 Q_1 栅极复原，准备接收下一个电荷包。

DOS 为采样保持电路的控制端，当 DOS 加适当脉冲电压时，CCD 输出信号得到了采样保持，OS 端输出连续信号，DOS 加直流电压时，采样保持电路不起作用，OS 端输出信号与光强成正比，通常均用此种情况

2、驱动脉冲及时序要求

要使CCD器件正常工作，至少要在SH、 ϕ_1 、 ϕ_2 、RS电极上加四路脉冲电压。这四路脉冲的周期和时序要满足下图所示要求，图中 U_0 为CCD输出信号。



SH 为电荷转移电极控制脉冲。SH 为低电平时处于“采光期”，进行摄像，摄像区的 MOS 电容对光生电子进行积累；SH 为高电平时，摄像区积累的光生电子按奇偶顺序移向两侧的移位寄存器中，时间很短，所以 SH 脉冲的周期决定了器件采光时间的长短。SH 脉冲的周期称为积分时间。

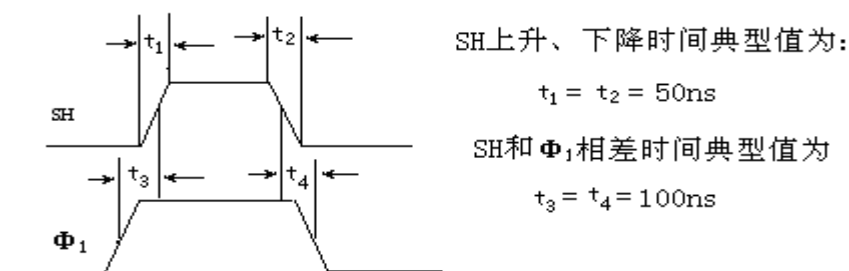
Φ_1 、 Φ_2 为加在移位寄存器 MOS 电容上的脉冲，称为驱动频率。在 SH 脉冲的一个周期里，两侧的移位寄存器在 Φ_1 、 Φ_2 驱动脉冲的作用下，把上一周期转移来的电荷包逐个依次输出到器件外。每当 Φ_1 或 Φ_2 高电平时就输出一个电荷包，按奇偶顺序移， Φ_1 移奇数位， Φ_2 移偶数位。因此， Φ_1 、 Φ_2 的位相必须相反。关于电荷传输的原理请参见下一实验。

驱动频率的大小要适当，因为电荷的传输是从一个势井依次传到下一势井，需要一定的时间， Φ_1 、 Φ_2 的周期若小于这一时间，势井的电荷不能全部输出，则影响输出信号幅度和精度，太大会使噪声增大。

SH 和 Φ_1 、 Φ_2 必须满足：SH 的周期等于或稍大于 $2160/2$ 个 Φ_1 、 Φ_2 脉冲周期，小于时则电荷包不能全部输出，会影响下个周期输出信号的精确度；太大会影响器件的速率。

RS 脉冲为复位脉冲，其频率为 Φ_1 、 Φ_2 脉冲频率的两倍。

以上四个脉冲除频率要满足以上要求外，脉冲波形也有一定要求，尤其是 SH、 Φ_1 、 Φ_2 脉冲之间的关系，当 SH 为高电平时， Φ_1 必须同时为高电平，且 Φ_1 必须比 SH 提前上升，当 SH 为低电平时， Φ_1 必须同时为低电平，且 Φ_1 必须比 SH 迟后下降。如下图所示：



用模拟示波器是很难测出这些时间的。

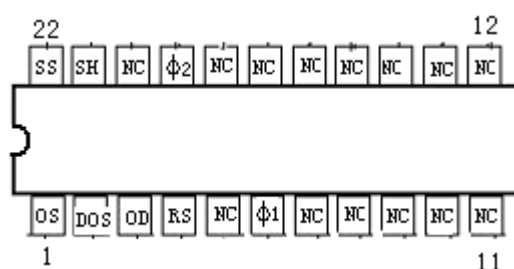
[实验仪器简介]

1、TCD1200D 线阵 CCD 图像传感器

特性：

- 像敏单元数目：2160 像元
- 像敏单元大小： $14\mu\text{m} \times 14\mu\text{m} \times 14\mu\text{m}$ （相邻像元中心距 $14\mu\text{m}$ ）
- 光敏区域：采用高灵敏度 PN 结作为光敏单元
- 时钟：二相（5V）
- 内部电路：包含采样保持电路，输出预放大电路
- 封装形式：22 脚 DIP 封装

管脚定义



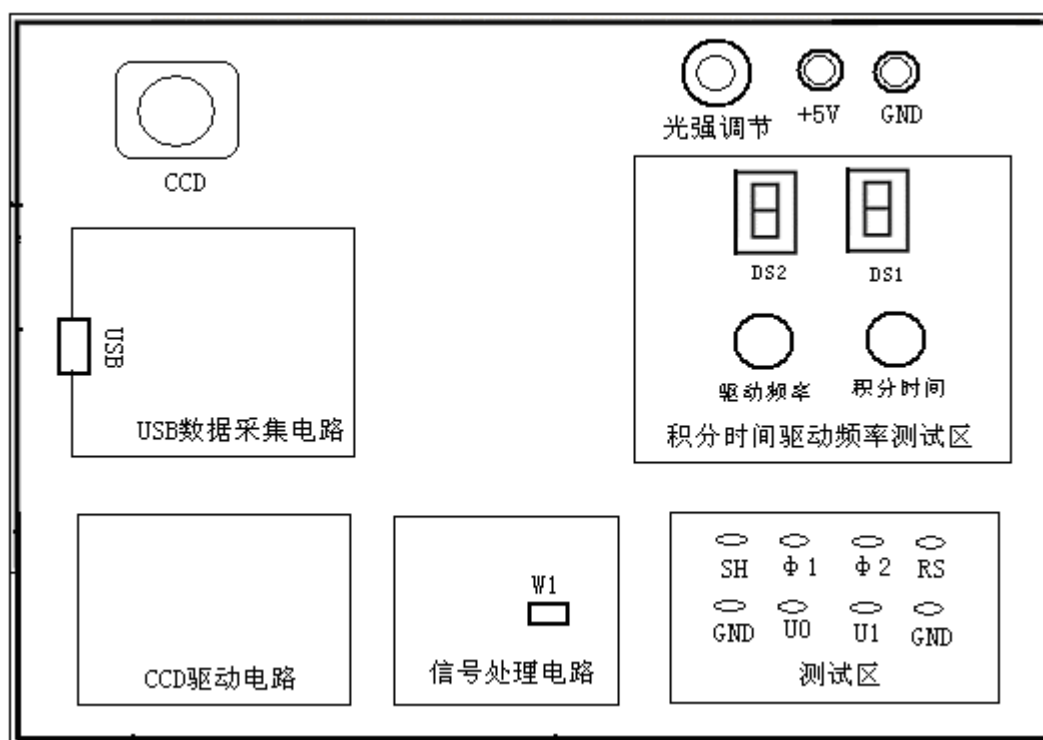
$\phi 1$	时钟 1	OS	信号输出
$\phi 2$	时钟 2	DOS	补偿输出
SH	转移控制栅	OD	电源
RS	复位栅	SS	地
NC	空脚		

工作条件：

特性		符号	最小值	典型值	最大值	单位
时钟脉冲电压	高电平	V_{ϕ}	4.5	5	5.5	V
	低电平		0	0.2	0.5	
转移脉冲电压	高电平	V_{SH}	4.5	5	5.5	V
	低电平		0	0.2	0.5	
复位脉冲电压	高电平	V_{RS}	4.5	5	5.5	V
	低电平		0	0.2	0.5	
电源电压		V_{OD}	11.4	12	13	V
时钟脉冲频率		f_{ϕ}	0.1	0.5	1.0	MHz
复位脉冲频率		f_{RS}	0.2	1.0	2.0	MHz

2、CCD 原理及应用实验箱

板面布置如下图



仪器由六部分组成

CCD 驱动电路：产生 CCD 驱动所需的各种驱动脉冲；

积分时间驱动频率测试电路：

1) 调整 SH 脉冲的周期，按“积分时间”，DSI 轮番显示 0、1、2、3，对应不同的 SH 脉冲周期，0 对应最小周期，3 对应最大周期；

2) 调整时钟脉冲频率和复位脉冲频率，按“驱动频率”，DS2 轮番显示 0、1、2、3，对应不同的时钟频率，0 对应最大频率，3 对应最小频率。

为保证 SH 脉冲的周期等于或稍大于 $2160/2$ 个 ϕ_1 、 ϕ_2 脉冲周期，调整时钟脉冲频率时，SH 脉冲的周期随之变化，而调整 SH 脉冲的周期时，时钟脉冲周期不变。

信号处理电路：用硬件对 CCD 输出信号进行二值化处理，W1 电位器可调整阈值电平。

测试区：为转移脉冲 SH、时钟脉冲 ϕ_1 、 ϕ_2 、复位脉冲 RS、CCD 输出 U_0 、二值化处理后信号 U_1 的输出引出端。

USB 数据采集电路：为 CCD 输出与计算机接口电路，目的是通过软件对 CCD 输出信号进行二值化处理。

光源与 CCD 暗箱：包含光源和 CCD 传感器，光源用实验箱上的 0~12V 电源驱动，光强度可调，CCD 传感器用电缆接入实验箱上的“CCD”接口。

[实验步骤]

注意：使用多踪示波器检测信号时，示波器与 CCD 原理应用实验箱应共地。

1、实验准备

将仪器各部分连接好，打开 CCD 原理与应用实验箱的电源开关，用“积分时间”按钮调整转移脉冲 SH 周期档为 0 档，用“驱动频率”按钮调整时钟脉冲频率为 0 档，观察积分时间显示窗口和驱动频率显示窗口的显示数据，并用积分时间设置按钮调整积分时间档为 0 档（按红色按钮依次由 0→1→2→3→0），用频率设置按钮调整频率为 0 档（按红色按钮依次由 0→1→2→3→0）。然后打开示波器的电源开关，用双踪示波器检查 CCD 驱动器的各路脉冲波形是否正确（参考实验箱面板上时序图）。如符合，则继续进行以下实验；否则，应请指导教师进行检查。

2、驱动时序和相位的测量

（1）用 CH1 探头测试转移脉冲 SH，用 CH1 做触发信号，调节扫描速度和同步使之同步，使 SH 脉冲至少出现一个周期。

（2）用 CH2 探头测试 Φ_1 ，调节示波器扫描速度展开 HS，观察 Φ_1 和 HS 的时序和相位是否符合要求。

（3）用 CH1 探头测试 Φ_1 ，用 CH2 分别测试 Φ_2 、RS，，观察时序和相位是否符合要求。

3、驱动频率的测量：分别测出各频率挡 Φ_1 、 Φ_2 、RS 的周期、频率、幅度，填入下表中。

驱动频率	项目	Φ_1	Φ_2	RS
0 档	周期 (ms)			
	频率 (Hz)			
	幅度 (V)			
1 档	周期 (ms)			
	频率 (Hz)			
	幅度 (V)			
2 档	周期 (ms)			
	频率 (Hz)			
	幅度 (V)			
3 档	周期 (ms)			
	频率 (Hz)			
	幅度 (V)			

4、积分时间的测量

(1) 将频率设为 0 (档), 用 CH1 观测 SH 脉冲周期, 分别测出各积分时间档位的积分时间。填入下表中。

(2) 再改变驱动频率, 测出不同档位的积分时间。

驱动频率 0 档		驱动频率 1 档		驱动频率 2 档		驱动频率 3 档	
积分时间 (档)	SH 周期 (ms)	积分时间 (档)	SH 周期 (ms)	积分时间 (档)	SH 周期 (ms)	积分时间 (档)	SH 周期 (ms)
0		0		0		0	
1		1		1		1	
2		2		2		2	
3		3		3		3	

5、关机结束。关闭 CCD 原理应用实验箱电源, 关闭示波器电源。

[实验思考题]

综合测量结果, 画出 HS、 Φ_1 、 Φ_2 、RS 的波形, 说明时序和相位关系, 进而说明 TCD1200D 的基本工作原理。

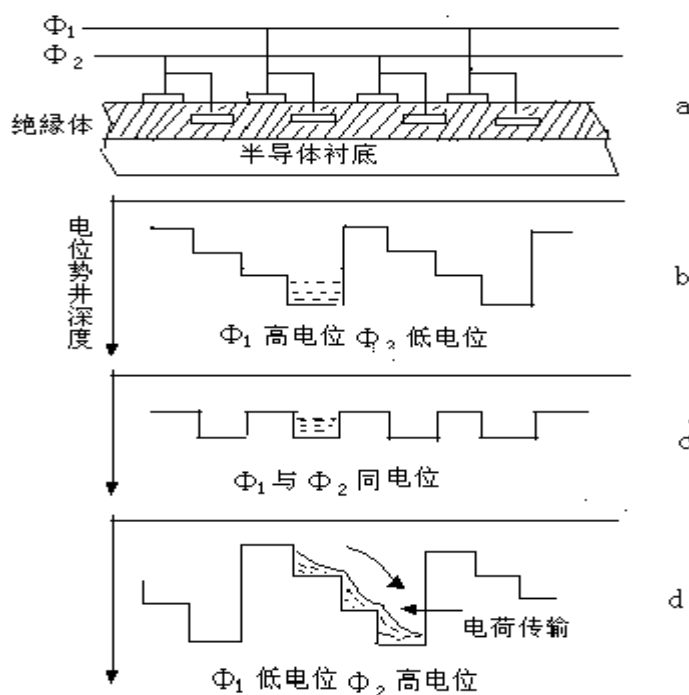
实验（二） CCD 特性测试实验

[实验目的]

通过对典型线阵 CCD 在不同驱动频率和不同积分情况下输出信号的测量,进一步掌握 CCD 的有关特性,掌握积分时间的意义,以及驱动频率与积分时间对 CCD 输出信号的影响。

[实验原理]

两相线阵 CCD 电荷传输原理示意图如下:



每一相有两个电极（即原理中的一个CCD转移寄存器的MOS电容实际中用两个），这两个电极与半导体衬底间的绝缘体厚度不同，在同一外加电压下产生两个不同深度的势井，绝缘体薄的那个MOS电容比绝缘体厚的那个MOS电容势井深，只要不是过多的电荷引入，电荷总是存于右边那个势井。图b显示了相位相差 180° 的驱动脉冲 Φ_1 为高电位， Φ_2 为低电位时MOS电容的势井深度及电荷存储情况。图c表示 Φ_1 和 Φ_2 电位相等时的情况，这时电荷还不能移动；图d显示了 Φ_1 为低电位， Φ_2 为高电位时的情况，这时电荷流入 Φ_2 相的势井。当 Φ_1 和 Φ_2 电位再相等时停止流动。

电荷传输机理证明，电荷从一个势井传输到下一个势井需要一定的时间，且电荷传输随时间的变化遵循指数衰减规律，只有由 Φ_1 和 Φ_2 的频率所确定的电荷传输时间大于或等于电荷传输所需要的时间，电荷才能全部传输。但在实际应用中，从工作速率考虑，由频率所确定的电荷传输时间往往小于电荷本身传输所需要的时间。这就是说，电荷的转移效率与驱动频率有关。

[实验仪器]

- | | |
|---------------------|-----|
| 1、双踪同步示波器（20MHz 以上） | 1 台 |
| 2、CCD 原理应用实验箱 | 1 台 |

[实验内容]

- 1、不同驱动频率下测量物体的变化；
- 2、不同积分时间下测量物体的变化。

[实验步骤]

实验 2.1 不同频率下测量物体的变化

1、将 CCD 传感器用电缆接入实验箱上的“CCD”接口，利用实验箱面板电源驱动 CCD 传感器（电源接口红连红，黑连黑），将不透光的黑色长条状被测物体放置到 CCD 传感器底座狭缝中央，打开实验仪的电源开关。将积分时间开关置于 0 档，驱动频率开关置于 0 档，用 CH1 探头测量 Φ 、SH 并使之同步。通过 CCD 传感器圆柱体顶部电源插孔中间的黑色旋钮调节 CCD 像敏元的照度，用 CH2 测量输出信号 U_o ，直至在示波器中观测到正确的输出信号波形 U_o （思考正确的信号波形应为何种波形？）。观测 Φ 、SH 与 U_o 的关系，并画出其波形图。

2、积分时间不变化，将驱动频率分别切换为 1、2、3 档，观察并记录不同驱动频率条件下的信号波形 U_o 。

3、分析上述实验现象，并说明驱动频率与输出信号的变化关系。

实验 2.2 不同积分时间下测量物体的变化

1、将 CCD 传感器用电缆接入实验箱上的“CCD”接口，利用实验箱面板电源驱动 CCD 传感器（电源接口红连红，黑连黑），将不透光的黑色长条状被测物体放置到 CCD 传感器底座狭缝中央，打开实验仪的电源开关。将积分时间开关置于 0 档，驱动频率开关置于 0 档，用 CH1 探头测量 Φ 、SH 并使之同步。通过 CCD 传感器圆柱体顶部电源插孔中间的黑色旋钮调节 CCD 像敏元的照度，用 CH2 测量输出信号 U_o ，直至在示波器中观测到正确的输出信号波形 U_o （思考正确的信号波形应为何种波形？）。观测 Φ 、SH 与 U_o 的关系，并画出其波形图。

2、驱动频率不变化，将积分时间分别切换为 1、2、3 档，观察并记录不同积分时间条件下的信号波形 U_o 。

3、分析上述实验现象，并说明积分时间与输出信号的变化关系。

4、关机结束。关闭 CCD 原理应用实验箱电源，关闭示波器电源。

实验（三） CCD 输出信号的二值化处理实验

[实验目的]

通过该实验，进一步掌握 CCD 的基本特性，定性了解 CCD 进行物体测量的方法。

[实验内容]

学习二值化的原理，分析比较二值化前后信号改变。

[实验仪器]

- | | |
|---------------|-----|
| 1、CCD 原理应用实验箱 | 1 台 |
| 2、双踪同步示波器 | 1 台 |

[实验原理]

在 CCD 输出信号中涵盖了线阵 CCD 各像元的照度分布和像元位置信号，这在测量物体位置中显得非常重要。

当将不透明物体放置到 CCD 上后，我们观测到 U_0 的输出信号如图 3.1 所示。为了将物体的边界检测并描述出来，可以采用如图 3.2 所示的阈值法检测电路。在该电路中，电压比较器的“+”输入端接 CCD 输出信号 U_0 ，而其另一端接电位可以调整的电位器上，这样便构成了可调阈值电平的可调阈值二值化电路。

[实验步骤]

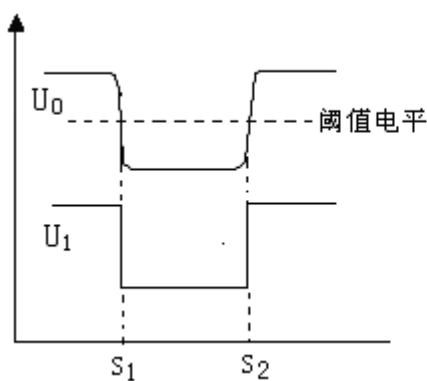


图 3.1

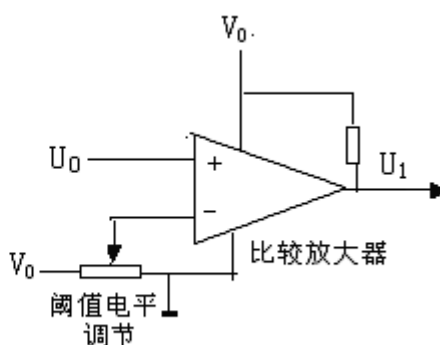


图 3.2

- 1、打开 CCD 原理应用实验箱电源，将示波器 CH1 探头接 CCD 输出信号 U_0 (用 CH1 作同步信号)，CH2 探头接硬件二值化后的信号 U_1 ，比较两路信号。
- 2、调节阈值调节电位器，观察二值化后的 CCD 信号的变化情况。
- 3、关机结束。关闭 CCD 原理应用实验箱电源，关闭示波器电源。

实验（四） 线阵 CCD 输出信号数据采集及物体宽度的测量

[实验目的]

- 1、掌握线阵 CCD 的 A/D 数据采集的基本原理；
- 2、掌握线阵 CCD 积分时间与光照灵敏度的关系；
- 3、进一步掌握线阵 CCD 驱动频率与光照灵敏度的关系；
- 4、掌握本实验仪配套软件的基本操作，熟悉各项设置和调整功能；
- 5、掌握 CCD 测量物体宽度的测量原理及方法；

[实验内容]

- 1、进行以 8 位 A/D 转换器件 TLC5510A 为核心器件构成的线阵 CCD 数据采集系统实验；
- 2、进行线阵 CCD 的 A/D 数据采集系统软件的基本操作（软件工作参数的设置、CCD 工作参数的设置等）；
- 3、进行线阵 CCD 的 A/D 数据采集系统数据文件的存储、打开、读出等的操作；
- 4、学会线阵 CCD 测量物体宽度的方法；

[实验仪器]

- | | |
|----------------|-----|
| 1. CCD 原理应用实验箱 | 1 台 |
| 2. 双踪同步示波器 | 1 台 |

[实验原理]

线阵 CCD 的输出信号包含了 CCD 各个像元的光强分布信息和像元位置信息，这就使我们能够测量物体的尺寸和位置。如图 4.1 所示：

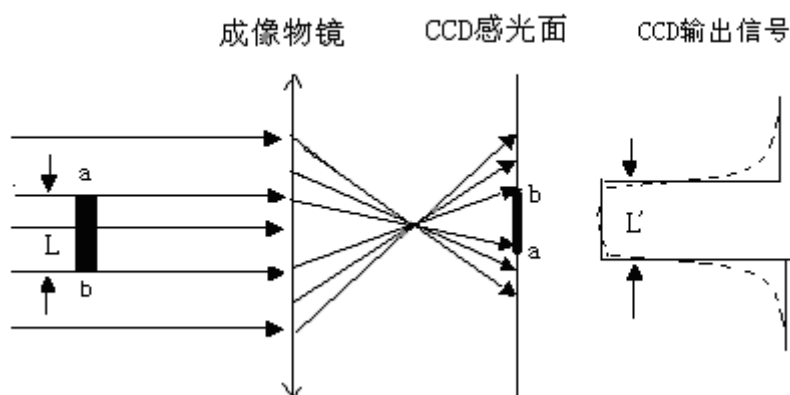


图 4.1

当尺寸为 L 的被测物体 ab 置于成像镜头的物面，线阵 CCD 的感光面置于成像镜头的像面，则在 CCD 的感光面上形成物体倒立的像 ba ，CCD 感光面上光强分布发生变化，从而输出电信

号强度发生变化，理想的反映光强分布的电信号曲线应如实线所示。根据这个曲线，可以测得物体 ab 经成像镜头在像面的尺寸 L' ，若已知光学放大倍数 f ，就可以计算物体的尺寸 L 。这是成像法。

也可采用简单的透射法，如下图 4.2 所示（本实验采用这种方法）：

均匀的平行光垂直入射 CCD 感光面，将宽为 L 的物体放入光路，则 CCD 感光面接收到的光强，从而 CCD 输出信号将发生变化，理想情况如实线所示，但由于入射光非平行性和直边衍射等因素的影响，实际输出信号的强度变化如虚线所示，不能唯一确定 L' ，如图 4.2 所示，要实际进行定量测量，必须对 CCD 输出信号进行处理。

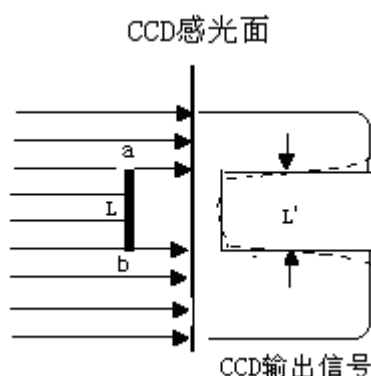


图 4.2

其处理方法就是对虚线所示输出信号进行所谓“二值化处理”。图 4.3 是硬件固定阈值二值化处理电路及处理结果图：

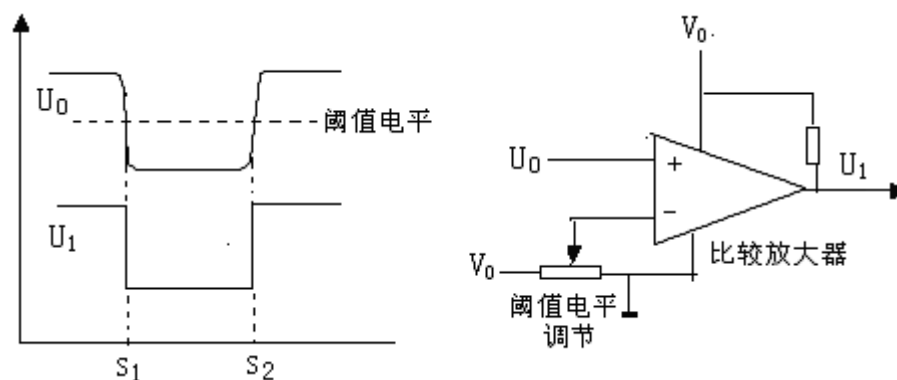


图 4.3

比较放大器的正相输入端接 CCD 的输出信号 U_0 ，反相输入端接一电位器，通过此电位器调节反相输入端的电平，此电平称为阈值电平。只有 U_0 大于阈值电平时，放大器才有输出信号 U_1 ， U_1 称为二值化输出信号，可用示波器观察。

硬件二值化过程只能定性观察，要定量测量，需通过软件来实现，由 USB 数据采集电路采集 U_0 信号，再给出阈值电平，则可提取表示物体边缘的像元 S_1 和 S_2 ， S_1 和 S_2 的差值即为被测物体在 CCD 像面上所占据的像元数目。若已知像元间距，进而可求得物体 ab 的尺寸 L' 。显然，这样求得物体 ab 的尺寸 L' 与阈值电平有关，这是固定阈值二值化处理的缺点。

线阵 CCD 的 A/D 数据采集的种类和方法很多，这里只介绍实验仪所采用的 8 位并行接口方式的数据采集基本工作原理。

如图 4.4 所示为以 8 位 A/D 转换器件 TLC5510A 为核心器件构成的线阵 CCD 数据采集系统。以单片机完成地址译码器、接口控制、同步控制、存储器地址译码等逻辑功能。计算机软件通过向端口发送控制指令对单片机复位。单片机等待 SH 上升沿（对应于 CCD 第一个有效输出信号）触发 AD 开始工作，AD 器件则通过 RS 信号完成对每个像元的同步采样，A/D 转换输出的 8 位数字信号则存储在静态缓存器件（IDT72241）中，当一帧像元的数据转换完成后，单片机（U29）会生成一个标志转换结束的信号，同时停止 A/D 转换器和存储器的工作。单片机（U23）将此帧像元的数据进行处理，并通过 USB 接口芯片将采集信号送给计算机软件进行相关显示处理。当软件读取并处理完一行数据后，再次发送复位指令循环上述过程。

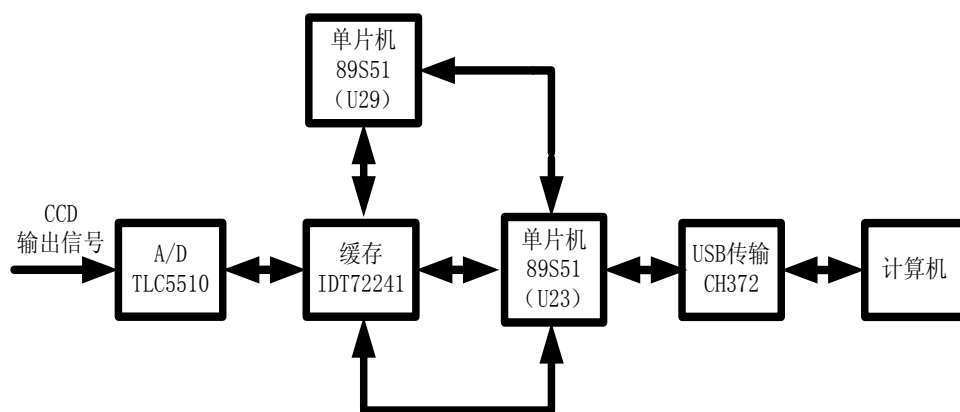


图 4.4

[实验步骤]

- 1、 首先将实验箱的 USB 端口和计算机 USB 端口用专用 USB 数据线缆连接良好；
- 2、 打开计算机电源，完成系统启动后进入下面的操作；
- 3、 打开实验箱主电源开关，用示波器测量 Φ_1 、 Φ_2 、RS、SH 等各路驱动脉冲的波形是否正确。如果与实验一所示的波形相符，继续进行下面实验；否则，应请指导教师检查；
- 4、 检查 U0、UI 波形是否与实验二、实验三一致。否则，应请指导教师检查；
- 5、 运行 CCD 应用软件，如果显示打开设备失败，应请指导教师检查；
- 6、 如正常连接，计算机任务栏右下角会有图标（绿色箭头）显示。
- 7、 软件界面如图 4.5：

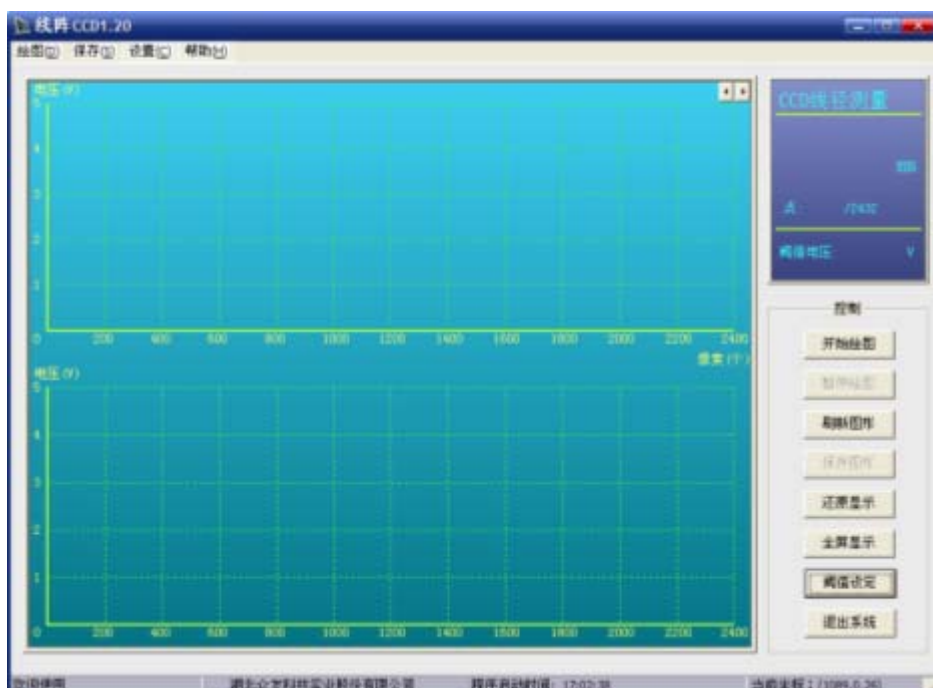


图 4.5 软件主界面

选择开始绘图开始数据采集。主窗口观察数据采集波形，上面为二值化的波形，下面为 CCD 输出信号波形。此处需要注意的是，由于数据采集对输入波形信号幅度的要求是 0~4V，软件界面上显示的波形幅度也只能在 0~4V，与示波器显示值并不相等。

鼠标双击波形指定位置，将放大显示双击位置的像素幅值大小，每个页面显示 50 个像素，可以通过点击右上角分别指示左右的小三角符号显示相邻页面的像素。通过点击还原显示回到波形显示界面。

主界面右上角 CCD 线径测量下面显示物体宽度（即二值化后中间低电平部分宽度）。

点击阈值设定，可以对 CCD 输出信号进行软件二值化处理。阈值设定数值范围为：0~255，对应阈值电压为：0~4V（界面右上角显示对应阈值电压）。

6、调零处理。不放物体，打开软件，初步估计波形中两旁无效像元点个数，即 U0 波形两旁低电平对应的像元总个数，暂时将其设定为无效像元点的个数（一般在 400—1000），然后通过尝试改变所设定无效像元的数目来校正，使其显示的宽度正好由正数变为零。要排除虚零现象，即当无效像元的数目设定太大，没放物体也会显示为零，此时为虚零，并非真正的零。如果测量是在虚零的情况下，测得的物体宽度会不准确。

7、从孔中放入物体，物体必须放在孔的中间，且与孔的边缘垂直，待波形稳定，此时显示的宽度即为物体的宽度。

8、点击保存可以保存波形图像定位置。

9、实验完成后，关闭实验仪。