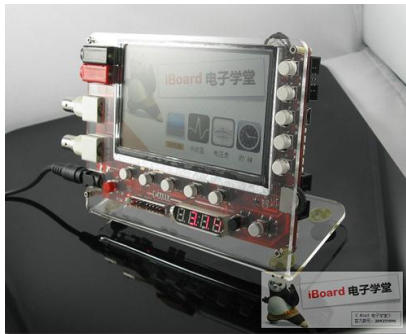


《iBoard 电子学堂》第五讲 数字存储示波器硬件解析

关于 《iBoard 电子学堂》



《iBoard 电子学堂》是一个综合型的电子研发开发平台，适合在校学生、一线工程师及电子爱好者等。

交流方式：

官方博客：XiaomaGee.cnblogs.com

官方论坛：www.oshcn.com

官方淘宝店铺：i-Board.taobao.com

QQ群：

《iBoard 电子学堂 群【A】》：204255896 (500 人，已满)

《iBoard 电子学堂 群【B】》：165201798 (500 人超级群)

《iBoard 电子学堂 群【C】》：215053598 (200 人高级群)

《iBoard 电子学堂 群【D】》：215054675 (200 人高级群)

《iBoard 电子学堂 群【E】》：215055211 (200 人高级群)

《iBoard 电子学堂 群【F】》：78538605 (200 人高级群)

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:32:41

我首先对这次群课做一个简介，本次群课以《iBoard 电子学堂》为参考，我来跟大家说一下，数字存储示波器的硬件原理。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:33:42

数字存储示波器，即 Digital Storage Oscilloscope，简称 DSO，是当今最常用的测试测量仪器之一。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:34:50

可以说，电子工程师研发、测试、维修等工作中，离不开这个仪器。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:36:19

《iBoard 电子学堂》从基础原理出发，通过一套简洁而不简单的数字存储示波器硬件，实现了简易的 DSO。虽然简单，但麻雀虽小，五脏俱全。

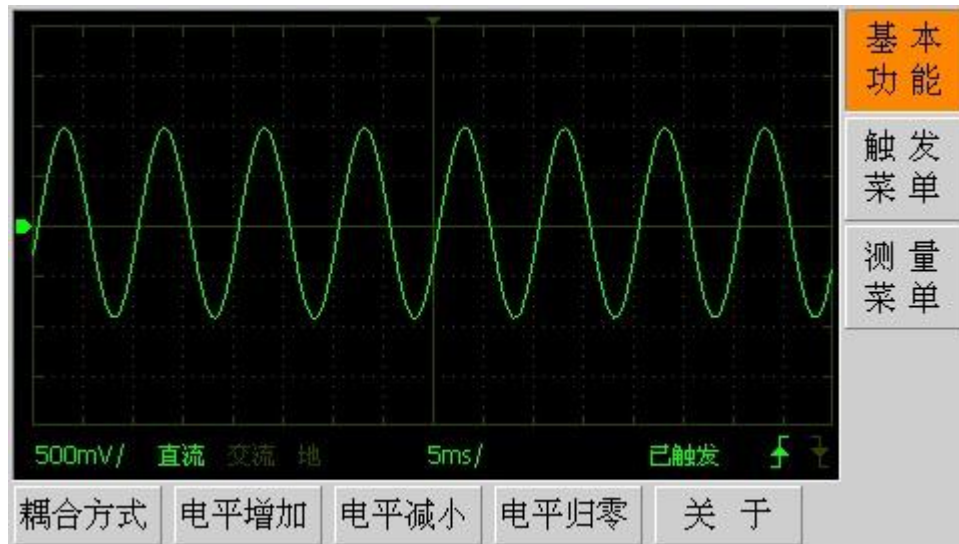
王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:36:45

这个图是《iBoard 电子学堂》整机图



XiaomaGee(15959622) 20:37:20

通过 4.3 寸的液晶，我们实现了如下的示波器界面



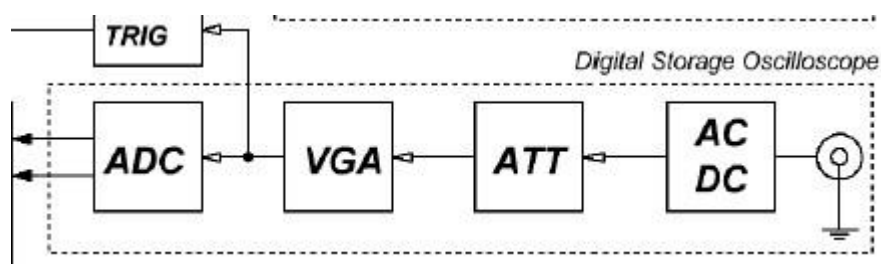
XiaomaGee(15959622) 20:37:59

现在进入主题，请大家把刚才下载的原理图翻到最后一页。也就是整机框图页面。

XiaomaGee(15959622) 20:39:05

最后一页是整个《iBoard 电子学堂》的原理框图，我们今天仅仅讲授数字存储示波器部分，也就是右下角的一部分。

XiaomaGee(15959622) 20:39:16



XiaomaGee(15959622) 20:40:22

大家可能注意到了，右下角其实包含了两部分，一部分是数字存储示波器，一部分是任意波发生器。任意波发生器部分上次课已经讲解完毕。

XiaomaGee(15959622) 20:41:35

我们先从框图看去，从右至左，框图分别为：BNC 端子输入 -> ACDC -> ATT -> VGA ->ADC 和 TRIG，然后信号就进入 FPGA 了

XiaomaGee(15959622) 20:42:47

测试测量仪器中，很多部分都使用了 BNC 接头，这种接头屏蔽性较好，也很实用，我们这里也是使用它。图片如下：



XiaomaGee(15959622) 20:43:51

信号通过 BNC 连接器输入后，我们进入了 AC/DC 选择部分；AC /DC 的含义为：交流/直流 耦合选择的意思。

XiaomaGee(15959622) 20:44:34

为啥要做 AC/DC 耦合选择呢，其实主要是为了不同的测试对象来说的。

XiaomaGee(15959622) 20:45:01

通过关注实物不同的属性，忽略次要因素，才能达到我们测试的目的。

XiaomaGee(15959622) 20:45:23

例如我们要测试一个开关电源输出的纹波，我们则需要用 AC 耦合。

XiaomaGee(15959622) 20:45:51

不然的话，纹波会被较大的直流电平淹没，根本表现不出来。

XiaomaGee(15959622) 20:46:14

AC/DC 选择后，进入了 ATT 阶段，也就是“衰减器”阶段。

好好学习(272729928) 20:46:55

ATT 是什么缩写

XiaomaGee(15959622) 20:47:12

attenuation

XiaomaGee(15959622) 20:47:14

大家都知道，示波器的 ADC 位数一般都比较低，为了达到较好的测试效果，示波器均配有不同的量程。

XiaomaGee(15959622) 20:47:55

我们的设计效果，就是通过衰减器配合后级的放大器，组合出不同的电压量程。

XiaomaGee(15959622) 20:48:36

ATT 输出后, 进入 VGA 阶段。大家注意了, 这个 VGA 不是 我们显示器接口 VGA 的意思, 而是可变增益放大器的意思。

XiaomaGee(15959622) 20:49:07

具体的电路, 一会讲解, 我们先把原理通一下。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:50:19

VGA 输出后, 我们已经把信号“调理”到一个合适的电压范围之内, 这时候, 我们该进入 AD 转换了, ADC 对模拟电压的采样, 然后通过液晶显示器显示出来; 这样, 一个示波器通道就形成了。

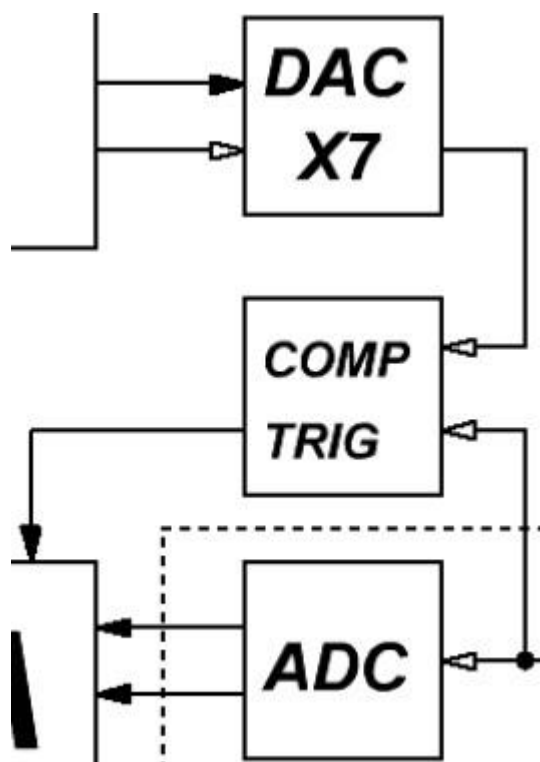
王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:50:56

这里还的说一下, 为了达到良好的触发效果, 我们这里使用了一个比较器作为触发源。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:51:41

触发效果是评价一个示波器的很重要的因素, 特别是数字存储示波器。它的重要性甚至超过了存储深度等大家关心的指标。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:52:00



王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:52:10

触发电路的框图如上。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:52:39

框图我们说完了, 下面我们看下具体的电路实现。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:53:55

请大家把 原理图 PDF 翻到第十页。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:54:21

这一页, 就是我才说的框图的具体电路的实现。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:55:03

我们首先从左上角看起，J14 就是我们刚才说的信号输入的 BNC 端子。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:56:09

信号从 BNC 输入后，经过一个单刀双掷的继电器进行 AC/DC 选择

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:56:42

电路图很容易看明白，当继电器触点打到 1 脚时，c115 耦合电容被短路，所以是直流耦合

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:57:36

当触点打到 6 脚时，信号智能通过 c115 耦合电容耦合进去，所以为交流耦合（电容有隔直通交流的效果）

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:58:29

这个继电器，就是我们板上蓝色的那俩其中的一个，我截个图给大家看看

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:59:02



王紫豪-XiaomaGee(15959622) 20:59:25

那两个 白色的 bnc 头，其中一个就是示波器信号输入端子。

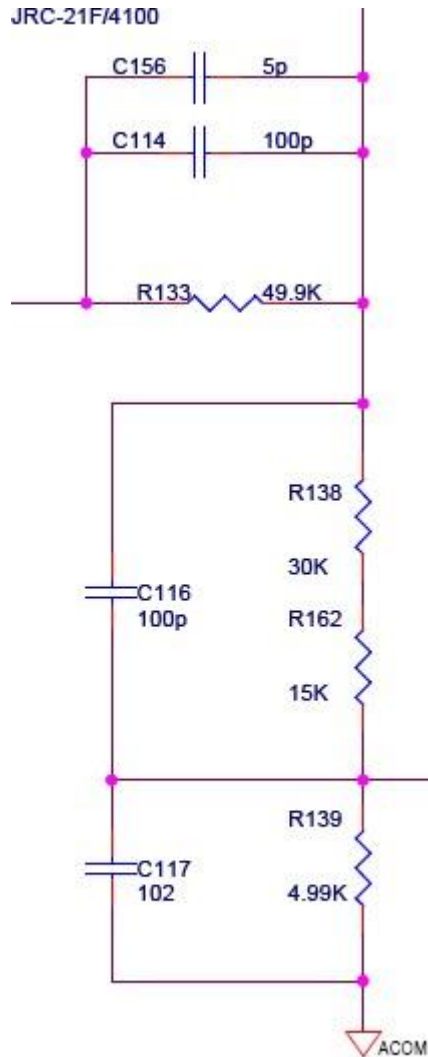
王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:00:11

经过 AC 或者 DC 耦合后，信号进入衰减电路。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:00:29

这个衰减电路的阻抗，也就是我们示波器的输入阻抗。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:00:38



王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:01:26

市面上商业化的示波器一般都是 1M 的输入阻抗；我们这里为了减小噪声（没有屏蔽的条件），我们选用了 100K 欧姆作为输入阻抗。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:01:56

当然，喜欢 diy 的朋友也可以换成 1M 的阻抗，电路结构是一样的，无非换几个电阻而已。

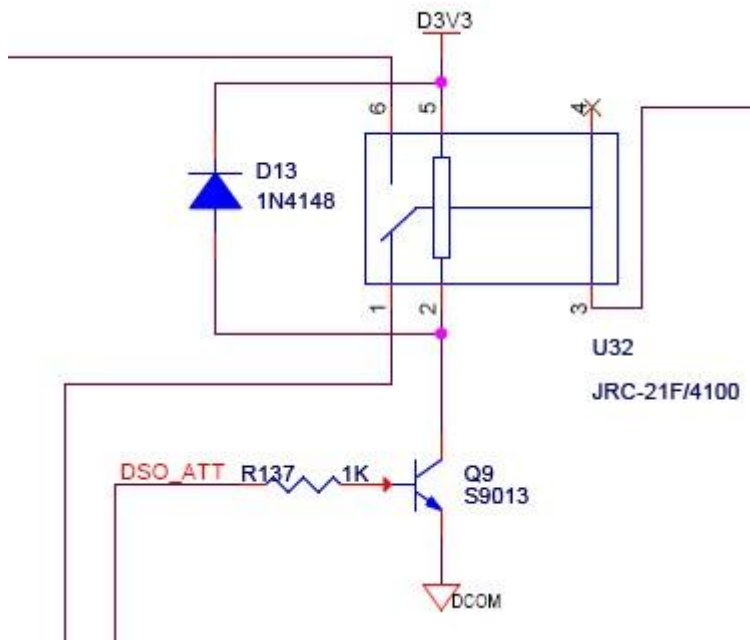
王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:03:07

根据图纸我们可以看出，这个衰减网络我们实现了 1:2 和 1:20 的衰减功能。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:03:29

然后经过继电器 U32 来实现切换。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:03:53



王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:04:30

经过衰减网络后，我们加了一级跟随器；用的运算放大器型号为 AD8065

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:05:11

关于这个跟随器的选型，主要有两个要点：①要输入阻抗尽量大，AD8065 为 fet 结构，阻抗达 G 欧姆

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:05:36

②带宽足够宽。我们示波器的带宽受到每一部分电路的限制。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:06:01

AD8065 的单位增益带宽达 145MHz

XiaomaGee(15959622) 21:06:48

当然，价格较便宜也是我们考虑的一部分；一直接触数字电路的朋友们可能不知道；这个小小的运放，很可能就比一个 dsp 或者 fpga 贵很多。

XiaomaGee(15959622) 21:07:46

跟随器输出后，信号进入了 VGA 器件 AD603

XiaomaGee(15959622) 21:08:47

AD603 是一个很强大的 ic，他能通过模拟电平，控制输出信号对输入信号的增益。

XiaomaGee(15959622) 21:09:31

并且模拟带宽最高可以做到 90MHz

XiaomaGee(15959622) 21:09:58

. 使用这些模拟器件，我们只需要按照他的 datasheet 做一个典型应用即可。

XiaomaGee(15959622) 21:10:27

喜欢问问题的朋友，不如首先把官方的文档吃透后在问别人；官方才是最值得信赖的，也是最有保证的。

XiaomaGee(15959622) 21:11:16

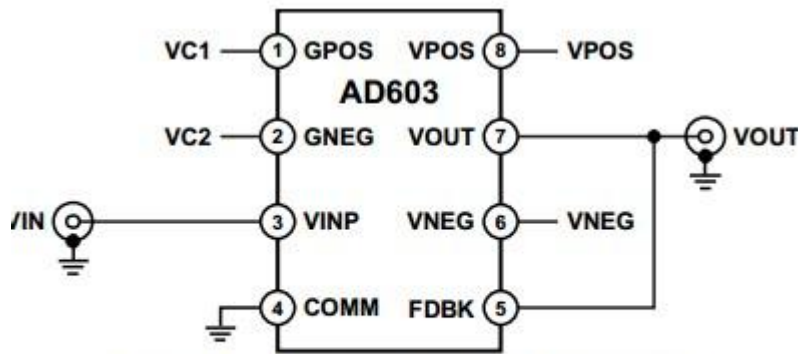


Figure 32. -10 dB to +30 dB; 90 MHz Bandwidth

XiaomaGee(15959622) 21:11:36

上图截图于 AD603 的 datasheet

XiaomaGee(15959622) 21:12:04

通过此种连接方法，我们实现了 -10dB 到 30dB 的增益。和 90M 的带宽。

XiaomaGee(15959622) 21:13:21

大家可能对 dB 有点不熟悉，30dB 相当于对输入信号进行了 31.6 倍的放大。

XiaomaGee(15959622) 21:15:08

这里说一下，为了达到良好的效果，我们使用了两个直流电平控制 AD603 的增益；电路图上分别为 DSO_VGAP 和 DSO_VGAN

XiaomaGee(15959622) 21:16:02

这两个电平都是通过 STM32 的 DAC 扩展出来的。

XiaomaGee(15959622) 21:16:38

pcb layout 的时候，让他们两个紧贴着走；使得抗噪声能力很强。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:17:09

因为我们需要的是 DSO_VGAP-DSO_VGAN，，噪声被抵消了

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:17:30

接着往下说。

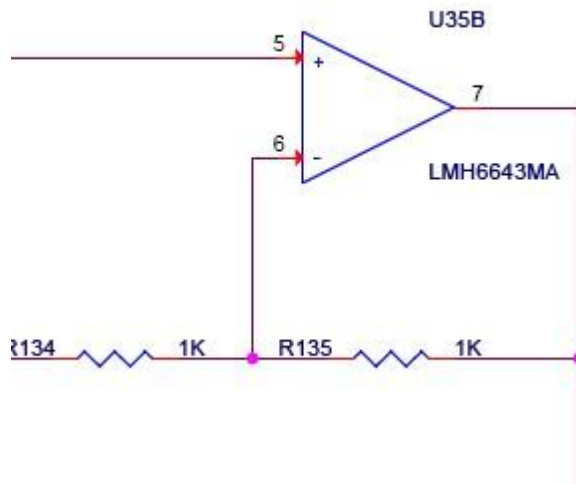
王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:18:01

信号经过 程控增益放大器后，进入了 DC 调节环节，

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:18:19

这里，我们使用了一个相对便宜的运放，LMH6643，双运放。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:18:50



王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:19:20

从图中，我们可以清楚地看到，我们实现了放大 2 倍的同相放大器。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:19:54

而且叠加了直流电平

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:20:15

网络标号为 DSO_OFFSET

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:20:37

这个直流电平是双极性的，可以是正，也可以是负。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:20:56

这就实现了我们常见的示波器上，零点上下调节的功能。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:24:22

也是为了观看被测信号的范围。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:29:10

这样说吧，如果我们的输入信号，是一个带有直流偏置的信号，偏差的很远，我们就需要直接调整 dc 值，才能达到良好观测的目的

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:35:02

LMH6643 是一个双运放，我们使用它其中的一路，进行了直流电平叠加；

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:35:25

这个运放也很牛的，单位增益带宽为 130MHz

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:35:43

大家可能注意到了，我为啥老说“单位增益带宽“呢

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:36:08

其实对于电压反馈的运放来说，他的带宽跟放大倍数几乎是成反比的。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:36:24

也就是放大倍数越大，则带宽越低。

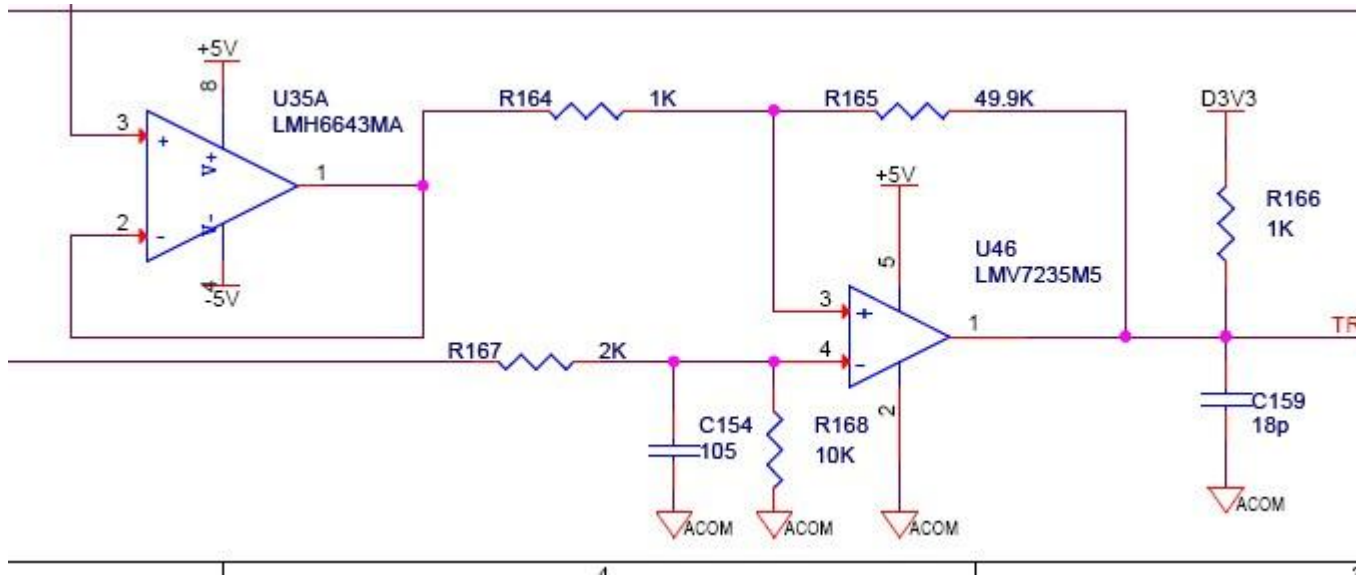
王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:36:40

细节部分不深究，大家可以去看书吧；继续讲。。。。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:37:23

LM6643 的另外一路运放，我们用作了一个跟随器，用于比较器的输入前端。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:37:38



王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:38:38

比较器这里，是这个数字存储示波器的重点电路；

王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:38:56

从另一个角度来说，我们什么时候开始采样，大部分取决于这个比较器。

王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:39:30

数字存储示波器一般都是 【触发】--【采样】--【显示】这样周而复始的运行的。

王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:40:16

比较器我们这里使用 LMV7235M5 这个器件，好像是 70ns 左右的比较器。

王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:40:47

如果需要更高速的，我也用过很多，例如 LT1016, AD8561, LT1394, 1t1715 等等。

王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:41:06

回到电路上。

王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:41:34

大家可以看一下，比较器的两个输入我们分别加载了示波器波形和直流电平。

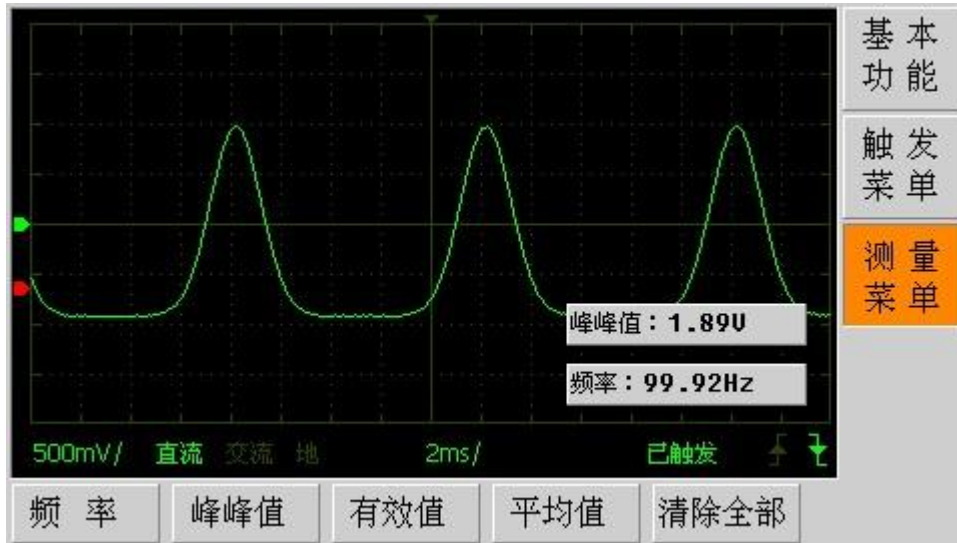
王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:41:57

这个直流电平的网络表为：TRIG_DC

王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:42:30

他也可以正负调节；示波器上触发电平的调节，就是通过这个电路来实现的。

王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:43:27



这个图中，红色的箭头，就是触发电平。如果触发电平偏离了波形，则示波器的波形看着不稳定

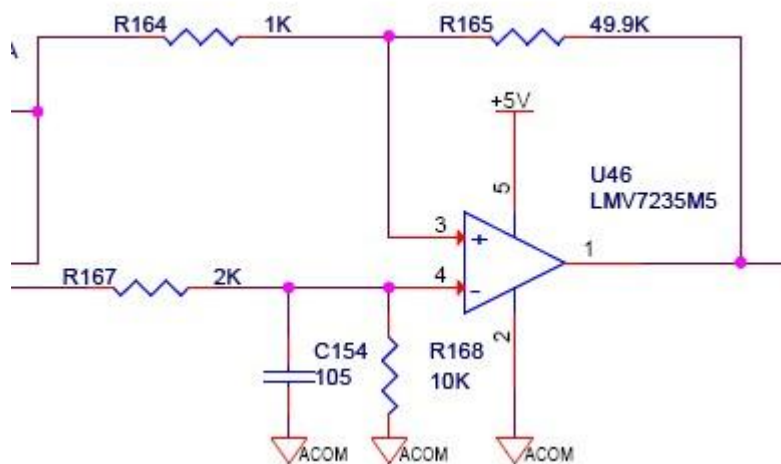
王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:44:23

手上的截图素材有限，就不贴图了。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:44:51

下面我说一下一个关键部分

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:45:04



王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:45:27

大家有没有注意到，我们这里通过电阻 R165 做了一个正反馈。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:45:48

大家都知道，在运算放大器中，正反馈是不稳定的。为啥这里这样用呢？

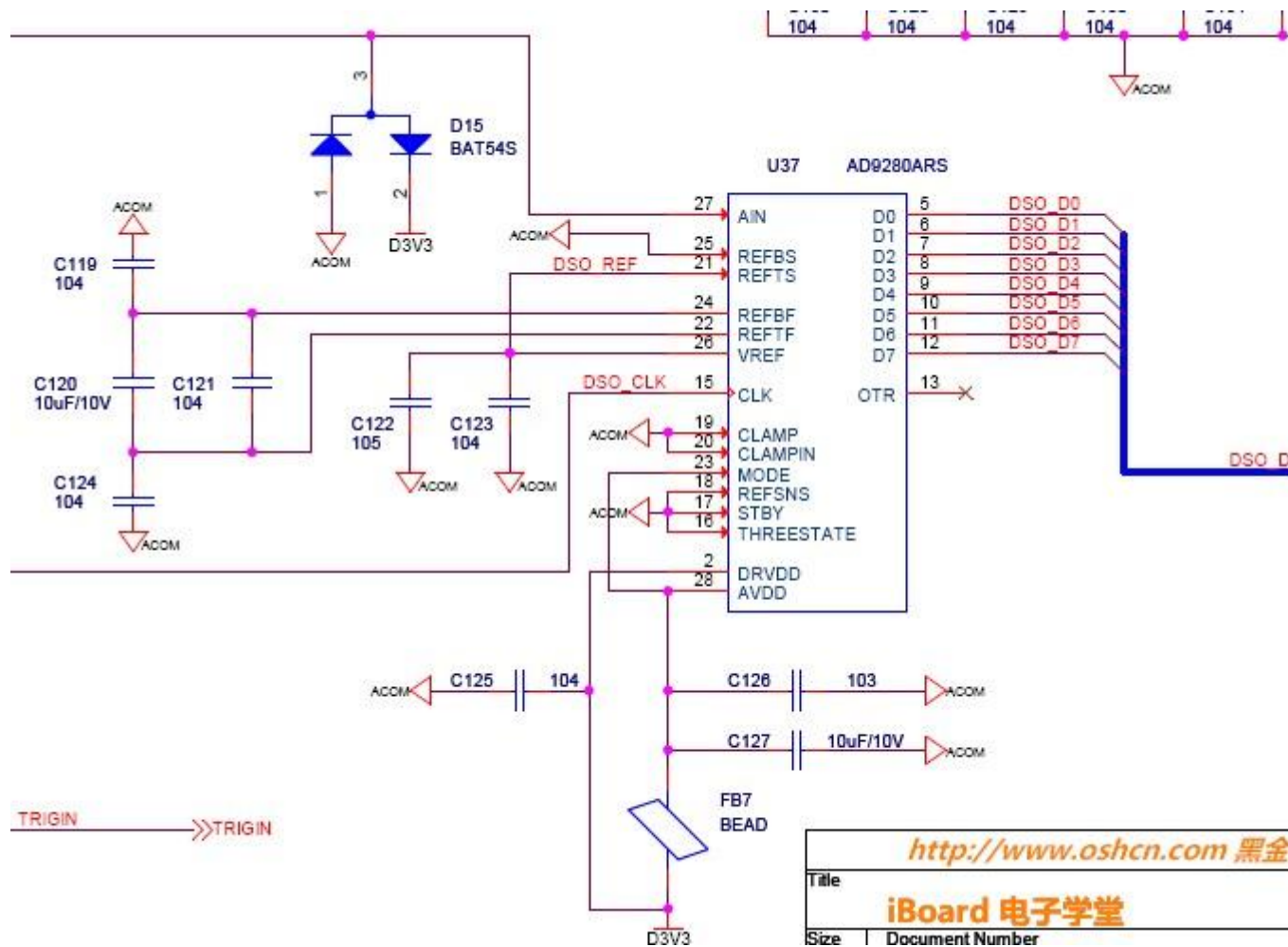
王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:46:34

其实，我们通过使用正反馈，来达到一个迟滞效果；在比较电平中实现了一个迟滞电压。

王紫豪-XiaomaGee(15959622) 21:47:17

如果没有这个电路，我们用示波器测量低频信号（如 10Hz）的正弦波时，会有触发抖动。

王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:47:36
 速度越快的比较器，抖动的越厉害。
 王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:48:01
 这个跟数字电路中的施密特触发器原理类似。
 王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:48:39
 算下就知道了，很简单的公式
 王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:49:15
 下面说下 ADC 部分。
 王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:49:51
 我们这里选用了 AD9280 这个 ADC，他的官方最大采样率为 32M
 wei (34103820) 21:49:50
 能否说下那个简单的公式
 王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:50:07
 就是电阻比例值
 王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:50:40
 这样的电路，一般都需要调试才能达到良好的效果。
 王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:50:51
 具体设置多大的回差，是算不出来的。
 王紫豪-XiaomaGee (15959622) 21:51:21



XiaomaGee (15959622) 21:52:57

通常意义的示波器，几乎都是采用 8bit adc 的，所以，示波器不具备精确测量效果。

XiaomaGee(15959622) 21:53:23

不管谁家的 示波器，你让他去精密测量电压，那就是大才小用了。

XiaomaGee(15959622) 21:53:58

群里有个网友说得好：示波器主要的功能是“示波”的，如何示好波，才是他的关键。

XiaomaGee(15959622) 21:54:18

所以，我们这里也选了一个 8bit adc

XiaomaGee(15959622) 21:54:54

对于《iboard 电子学堂》来说，指标不是关键，就像刚才的电路，我们把 adc 换成一个采样率搞的，就能轻松达到 200M 采样率，

XiaomaGee(15959622) 21:55:12

我的目的，是通过这个电路，去传递思想和设计思路。

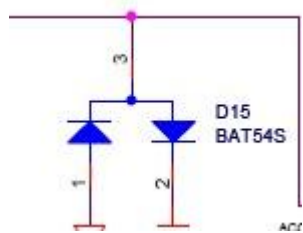
XiaomaGee(15959622) 21:55:52

而不是追求指标；追求指标，就是拿钱烧出来的；毕竟学生们都不能自给自足的。

XiaomaGee(15959622) 21:58:12

再 ADC 前端有个保护，这里大家也要注意一下
毕竟示波器的调节和输入是不确定的。

XiaomaGee(15959622) 21:58:29

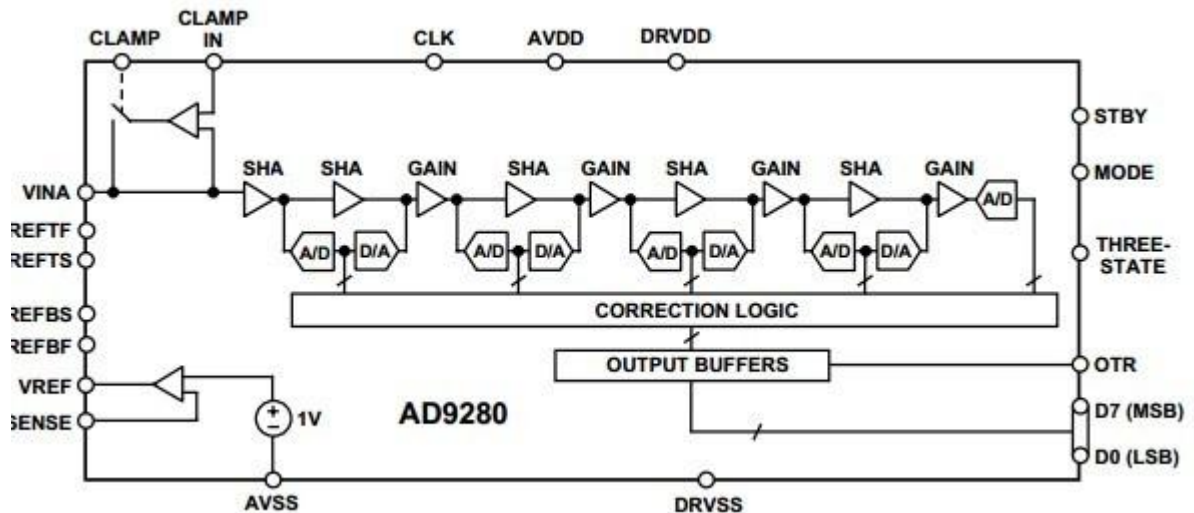


XiaomaGee(15959622) 21:59:35

bat54s 的压降非常小；所以保护效果好。

XiaomaGee(15959622) 22:00:17

这个是 AD9280 的框图，对于这些芯片，我们会用就行了，没必要研究内部结构。其实，内部结构远远比框图复杂得多。



XiaomaGee(15959622) 22:01:30

至此，一个数字存储示波器的模拟通道我就说完了，

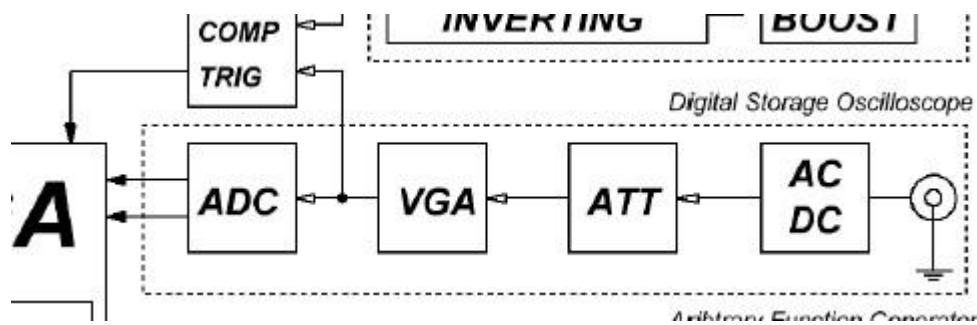
XiaomaGee(15959622) 22:01:45

下面，我们再把原理图翻到最后一页。

XiaomaGee(15959622) 22:02:01

继续看一下框图。

XiaomaGee(15959622) 22:02:11



XiaomaGee(15959622) 22:02:44

通过刚才的讲解，现在看起来，就相当好理解了。

XiaomaGee(15959622) 22:03:08

下面还有一点时间，我说说我们的数据，ADC 输出后的走向。

XiaomaGee(15959622) 22:04:15

我们的示波器通道，一共输入到 fpga 有两路信号；①触发信号

②ADC 转换值。

XiaomaGee(15959622) 22:05:09

触发信号有两个作用：

①通知 fpga 何时进行采样；这里可以实现上升沿或者下降沿触发

②频率测量

XiaomaGee(15959622) 22:06:05

fpga 通过内建的 FIFO，触发信号来后，进行采样；当 fifo 满后，cpu（这里是 stm32）读取 fifo 中的数据并显示。

XiaomaGee(15959622) 22:06:51

然后快速地、周而复始地执行这个过程；最终就达到了示波器测量波形的效果。

XiaomaGee(15959622) 22:07:49

好了，今天的课就讲到这里。关于 DSO 的软件部分，以后的课程在讲解。

XiaomaGee(15959622) 22:07:54

谢谢大家。