

編號 SA-016
隊名 怪人 Phreak

版本 0.9.0

題目

示波鐘 Oscilloclock

動機

事實上.. 動機並沒有那麼簡單。

過去我曾妄想過做一架雷達（或聲納？）系統，以 PPI 掃描作為螢幕顯示。自然對於螢幕掃描模式和回波偵測系統作了一些研究，但是由於沒有適當的顯示管（磷光體速率太快），這個計劃仍然只存在於紙上。

過了一段時間，我根本就把雷達這回事給忘了。一直到我看到 David Forbes 的 Scope Clock™ 他不使用像素和一般的掃描系統，而是用電子束去「畫畫」。使用正、餘弦波和鋸齒波畫出圓弧和線段，如同手寫一般地在螢幕上畫出數字，原本我也想仿製一台。後來我想到雷達 PPI 螢幕掃描模式，雖然不盡相同，但都使用了正、餘弦波和鋸齒波。這導引我想到使用微控制器主控，結合「畫數字」和 PPI 掃描模式，作成指針式時鐘。我立刻以 OSS 的精神詢問 David，沒想到被檔信（當時我不知道美國 ISP 將台灣的免費電郵當作是垃圾、病毒信轉發機而〔有時〕拒收），又聽老師提到本競賽，才決定將本「怪怪的計劃」拿來比賽。

目的

廢物怪用，非關比賽，純個人興趣。即使沒有比賽，我也會慢慢將它完成，但現在它加入比賽，使得整個製作過程帶著幾分緊張與壓力。

過程

嘴上功夫

最初計劃使用微控制器作為核心，由於系統簡單，找到 Microchip PIC Micro。我和大部分的學生一樣，對於 Intel 的 MCS-48、MCS-51 MCU 較為熟悉，要瞭解、活用一顆 MCU 需要一段時間，並且需要使用另一套開發工具（燒錄器是最基本的）。由於加入本競賽，所以時間可能不足以完成，我將要求降低：使用數位邏輯 IC（事實上會增加了實際製作的難度，因為需要連接大量的 IC），鐘盤上只畫出刻度，不畫數字。

電路的架構是以市電頻率注入漣波計數器，得到各指針的角度值。將此數值送入波形唯讀記憶體取得該針之正、餘弦函數值，用以調變鋸齒波（相乘），這就是 PPI 的掃描方式。控制資料時序的是另一個較高頻率的系統時脈，經由類似的計數器 / 除頻器序列得到系統控制時序。至於指針和刻度，就是使用比較器偵測鋸齒波電壓是否到達螢幕上相應的掃描半徑，決定是否遮沒光跡。在設定方面，沒有必要做得太複雜，只要將較高頻率的系統時脈注入漣波計數器即可。

為什麼使用市電 60Hz 作為計時時脈？

任何晶體震盪器的特性就是「穩定的震盪頻率」，如果頻率有所誤差，也是非常穩定的。這就說明為什麼便宜的石英鐘一段時間就要調整一次。電力公司要維持供電頻率的穩定，否則會由於相位差或電感抗造成多餘的損失，這使得市電頻率在長時間監視下相當精確而穩定。本時鐘由於使用陰極射線管，耗電量不小，而停電時使用電池供電也不切實際，所以使用市電頻率作為計時時脈是很好的。

為什麼要使用波形記憶體？

理論上我們可以看出三個極低頻正、餘弦波產生器分別工作於 1/60、1/3600、1/43200 Hz 調變鋸齒波，畫出三根指針。這麼低頻的訊號，實際的類比電路根本做不出來，也沒有辦法同步。記憶體的另一種想法就是「任意函數」，將正、餘弦函數的數值依照角度順序存在記憶體內，只要輸入角度，就可以得到數值，再將此數值輸入數類轉換器，就能夠得到任意角度對應的函數電壓值。

預期的成果是：一個螢幕上畫出綠色的刻度和指針，為避免產生螢幕燒痕，每十分鐘整個鐘盤會移動一次，位置由亂數產生器決定。可以分別設定秒、分、時針和鬧鐘。鬧鐘的長度可以設定由 .4 到 3.6 分鐘，由於本時鐘是十二時制的，一天內會觸發兩次鬧鈴。

紙上作業

鐘盤設計

一般類比時鐘的秒針都是一格、一格在跳動的，其他指針則是「看起來」平順轉動。使用漣波計數器得到各指針的角度，並沒有辦法輕易地達成秒針跳動的效果，只能像其他指針一樣平順轉動。某些時鐘（如發條時鐘）的秒針確實是幾乎平順地在轉動，所以應該不會造成嚴重的視覺效果問題。

用數位邏輯 IC 組成的控制器在螢幕上畫出數字不是辦不到，而是做出來以後人只剩下半條命：p，所以鐘盤上只畫出長、短刻度。

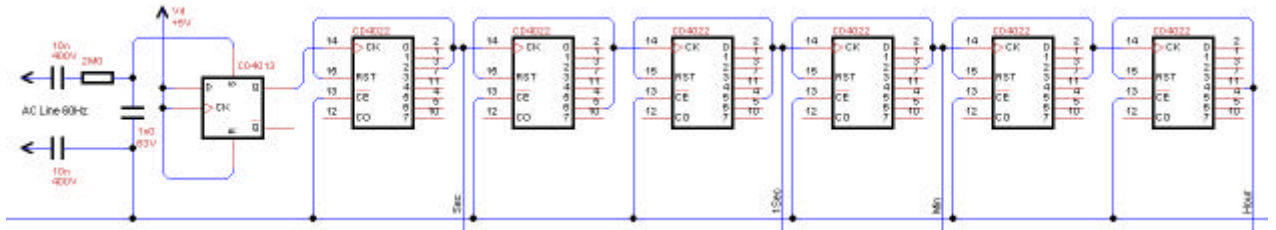
計時時脈電路

既然秒針要「平順」轉動，到底要多「平順」？一個刻度有 6 度角，每步 .2 度，一週就有 1,800 步，也就是在波形記憶體內佔有 1.76Kb 的表格資料，一顆 2732 就可以儲存所有資料，而且可以符合 60Hz 的輸入時脈。

秒針每秒前進 6 度，或每 1/30 秒 1 步；

分針每分前進 6 度，或每 2 秒 1 步；
 時針每時前進 30 度，或每 24 秒 1 步。

所以第一步要將市電 60Hz 除以 2，送進秒計數器，之後除以 60 送進分計數器，最後再除以 12 送進時計數器，得到如下電路：



在 D-FF 的前方是一節低通濾波器，濾除不必要的高頻雜訊；濾波器直接與 115VAC 電源連接，濾波器的電阻和 D-FF 內的保護二極體構成的鉗位電路可以確保輸入級正常工作不致燒毀。

計數器電路

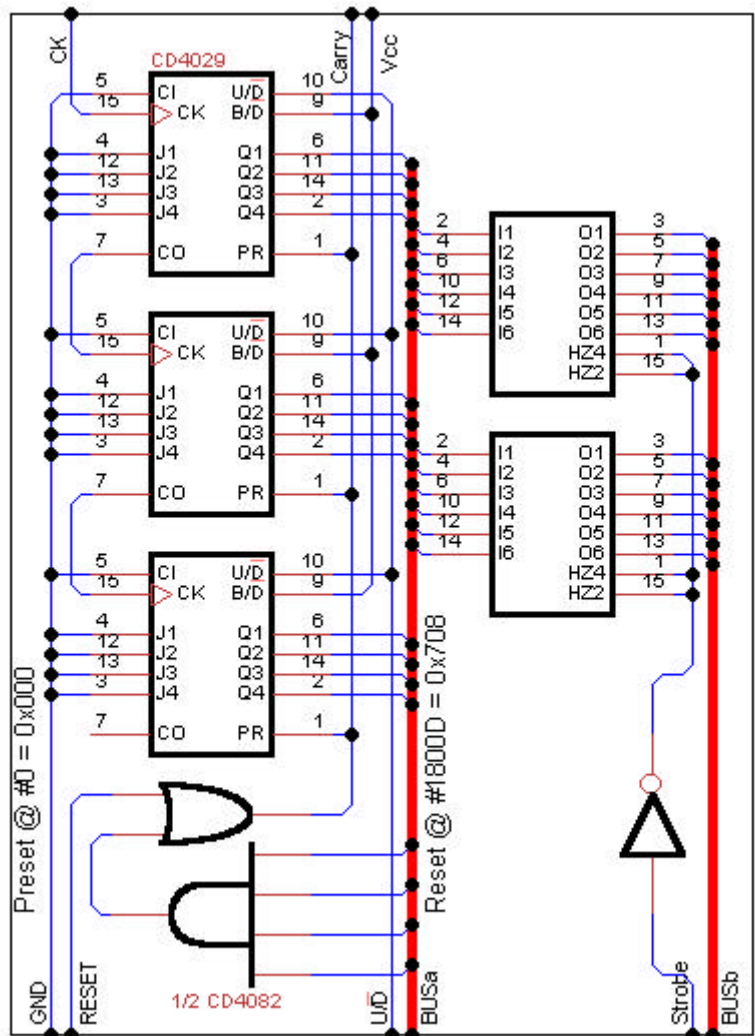
指針轉動 1800 步完成一週，所以計數器設定為模 1800 二進位連波計數器，輸出成為匯流排 a (ungated bus)。匯流排 a 再接到三態非反相緩衝器形成的資料開關，輸出行成匯流排 b (gated bus)。如下圖：

匯流排 a 提供的是即時資料，主要提供開鈴電路使用；匯流排 b 則是在需要時輸出一次資料，主要提供掃描參數設定使用。

系統時脈電路

因為不是使用低速磷光體 (P2, P7, P10, P17, P19, P21, P25 [磷光體編號])，所以要作中等速率掃描 (個人覺得用低速磷光體別有一種質感，可是不易取得)。掃描頻率約為 60Hz，每次掃描有 64 條線 (60 條刻度和 4 根針)，所以每條掃描線的頻率為 3.84KHz，調整為較易處理的 3.6KHz，所以掃描頻率為 56.25Hz。

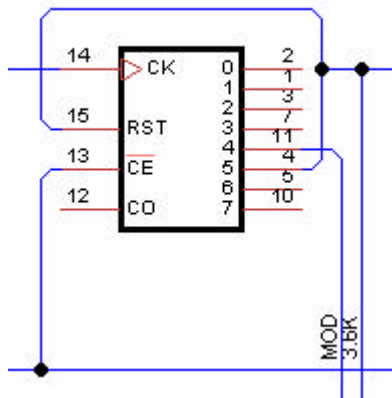
我們可以知道每 1/3600 秒就要讀取、輸出一向量資料。而每組向量資料由水平 (sine) 和垂直 (cosine) 分量組成，所以應該是每 1/3600 輸出兩次向量資料，再加上 ROM 輸出資料穩定時間和 DAC 輸出穩定時間的因素，位址 (角度) 輸入時間應該是越早越快越好。



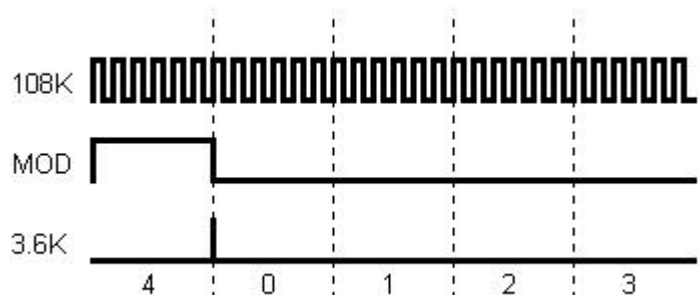
為什麼水平向量為正弦，垂直向量為餘弦函數？

因為在這裡 0 度和正負角度方向和一般數學上的習慣不同，0 度為垂直向上（Y 軸正向），而正廣義角旋轉方向為順時鐘。所以 X 向量為 sine，Y 向量為 cosine。

我們希望用 3.6KHz 的猝發脈衝觸發鋸齒波產生器，所以在該脈衝之前就必須完成掃描參數設定。系統時脈電路一樣是使用漣波十進計數器得到系統時脈，所以這一級的計數器設定如下：



MOD 為 1 時設定掃描參數，之後參數便鎖定直到下次。這一部分的時序如下：



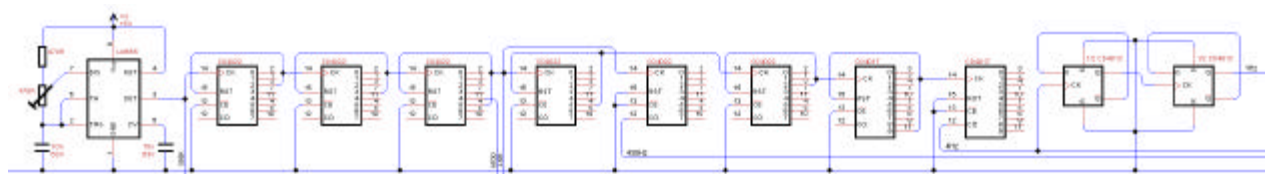
為了在一個 MOD 期間取出一組向量，資料閃控（Strobe）至少要在 MOD 期間有 2 週期。同時刻度計數器每 $1/3600$ 秒要前進 30 步（6 度），所以刻度計數器的時脈要為 $3.6\text{KHz} * 30 = 108\text{KHz}$ 。資料閃控則由 MOD 控制 108KHz 得到。

在 3.6KHz 之後則是三組除頻器得到 450Hz、4Hz 和 1Hz，三者 AND 之後成為鬧鈴信號。

為什麼用 450Hz 作為鬧鈴基音？

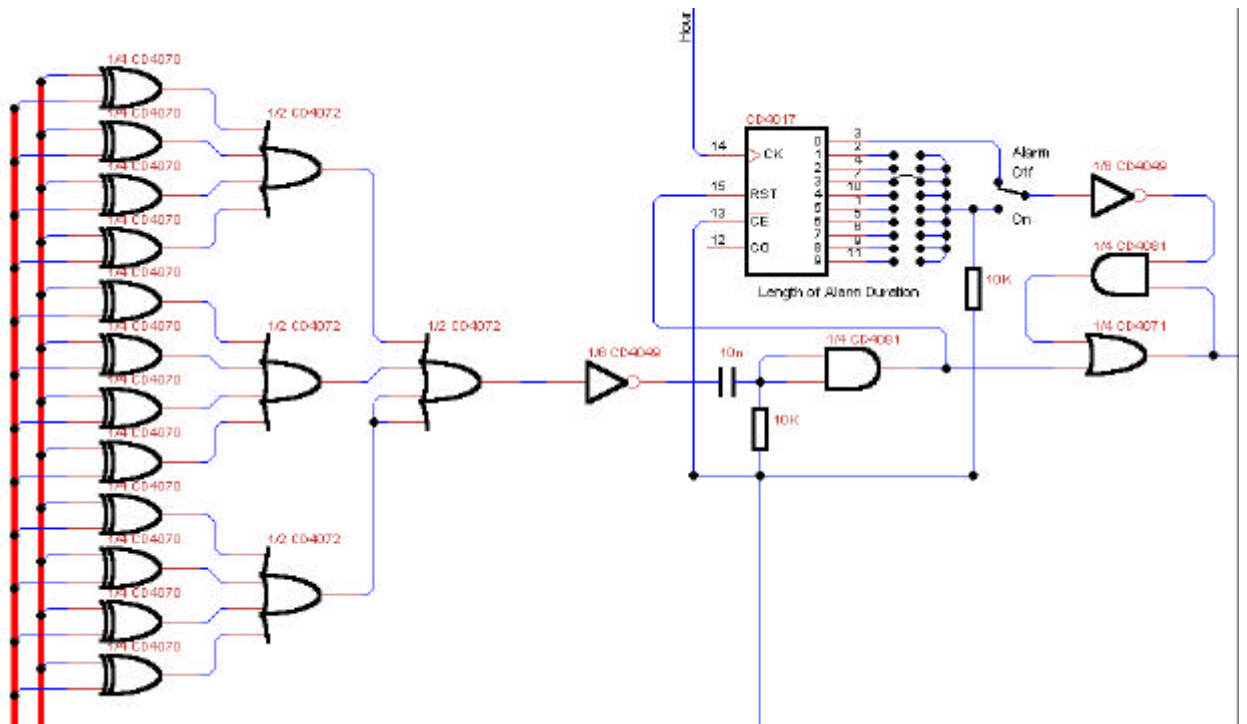
這是非理性的因素。個人對於單音信號（eg, Morse Code）傾向於使用 A(La), 441Hz，但 441Hz 在此不易達成，故選 $3.6\text{KHz} / 8 = 450\text{Hz}$ 作為鬧鈴基音。

整個系統時脈電路如下：



鬧鈴電路

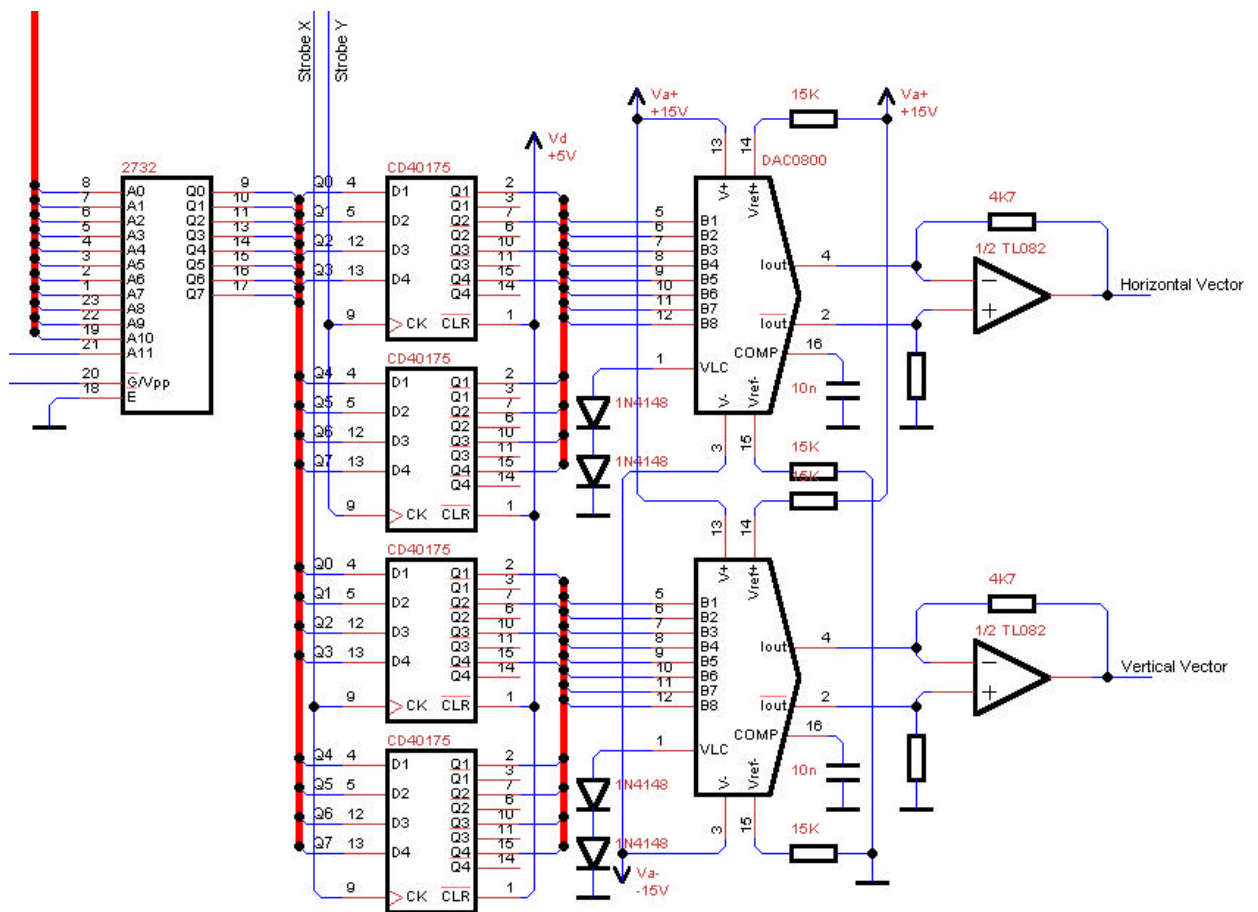
鬧鈴電路只是一組相等閘，隨時比較兩組輸入的相等。我們將時計數器和鬧鈴計數器的匯流排 a 接到相等閘，當兩針角度相等時，相等閘輸出為 1，經過單擊電路（高通濾波器）產生正脈衝觸發保持電路，啟動鬧鈴。鬧鈴長度是以時計數時脈個數決定，時脈輸入十進計數器，由外部跳線決定在第幾個脈衝時釋放保持電路。時計時脈每 24 秒一個脈衝，所以鬧鈴可以設定為 $(.4n)$, $\{n | 0, 1, 2, \dots, 9\}$ 分鐘。鬧鈴電路如下：



在聲音輸出部分，原本的方波先經過衰減後再進入低通濾波器，最後再由射極隨耦器推動喇叭。

掃描參數設定-- 基本向量產生電路

我們將匯流排 b 的前 11 位元接到 2732 的前 11 條位址線，2732 將輸出位址線（角度）所對應的八位元滿刻度函數值。

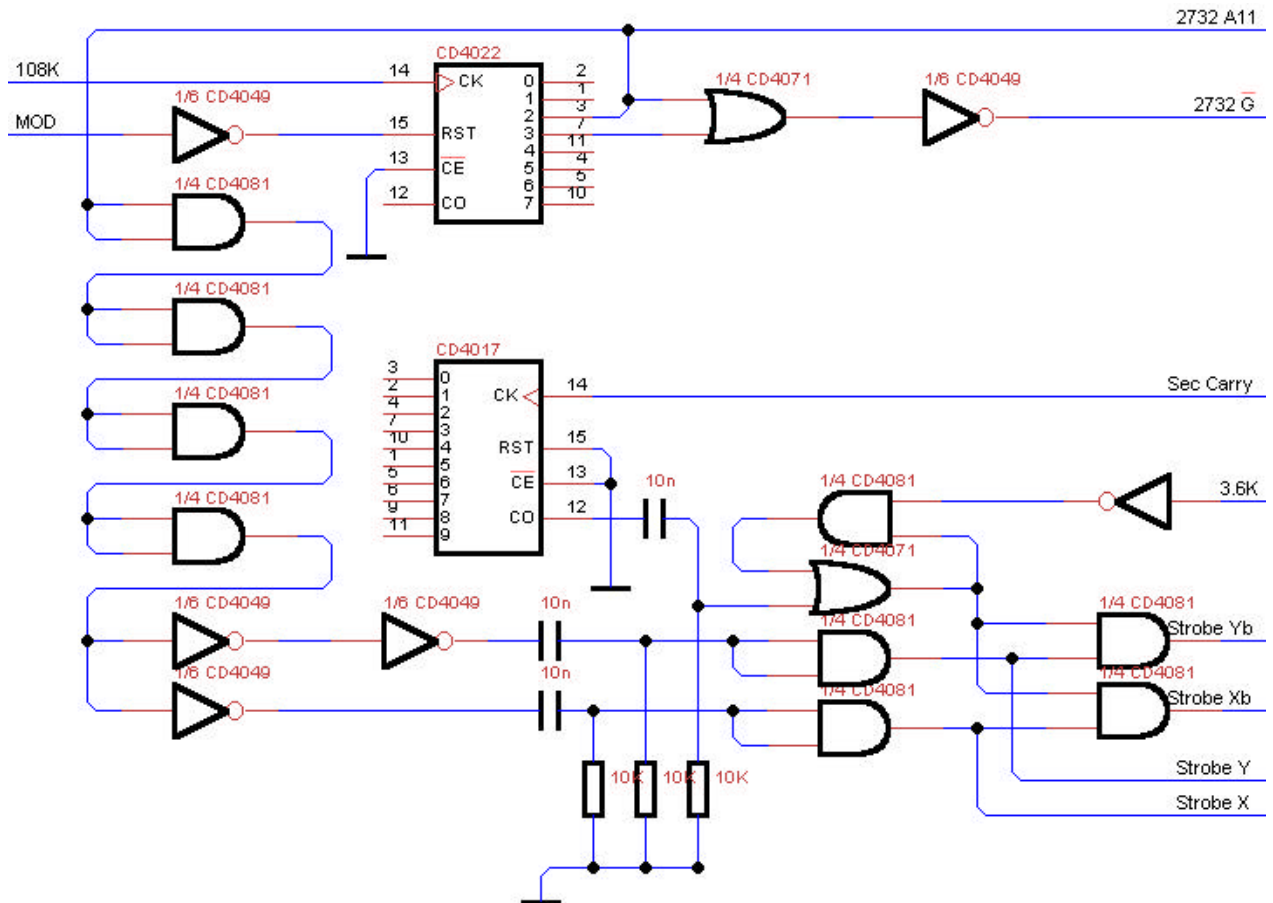


其中第 12 條位址線 A11 由向量時序電路控制，決定輸出為正弦或餘弦函數值。在 2732 之後為二組 D-FF，鎖定 2732 的輸出資料，輸入數類轉換器，得到類比向量。

掃描參數設定-- 向量時序電路

前面提到：在 MOD 期間要取出兩個向量，用 108KHz 產生閃控。在一個 MOD 期間有 6 個 108KHz 週期，我們以中間兩個連續週期取出向量。由 2732 交流規格可知：在位址輸入穩定後最長約需 400ns 可得到穩定資料輸出，即反應時間 400ns，所以後方的 D-FF 要在閃控之後約 400ns 才可以鎖定資料。這個延時電路是由 4 個串接的 AND 閘完成。

除了基本向量，還有一個保護磷光體的偏移向量，每十分鐘改變一次整個鐘盤在螢幕上的位置。我們將秒計數器的進位訊號接到模 10 計數器時脈輸入，則每 10 分鐘就會從亂數產生器取出一組偏移向量。此部份電路如下：



一個小問題。

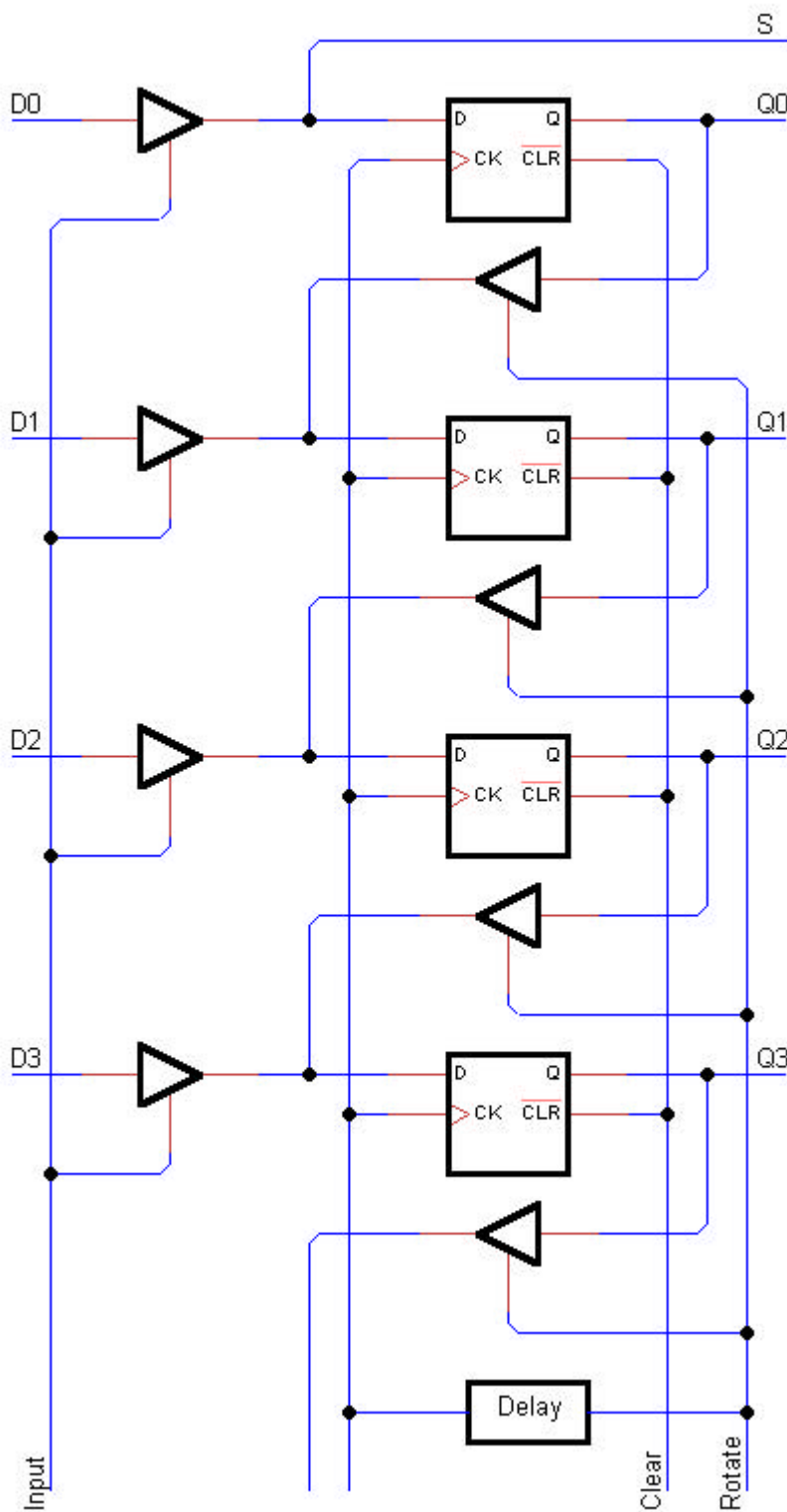
刻度計數器使用 108KHz 時脈，而資料閃控也是 108KHz。這會使取出垂直和水平向量的角度相差 .2 度，由於不易察覺，8 位元的解析度也無法明顯地表示出其差異，所以不會造成視覺上的影響。

掃描參數設定-- 亂數產生器

亂數產生器就是帶有回授運算電路的移位暫存器，只要亂數種子（初始值）不為 0，就能夠產生亂數。8 位元亂數產生器的回授值

$$S = Q1 \quad Q2 \quad Q3 \quad Q7.$$

由於 CD4000 數位邏輯 IC 沒有適當的移位暫存器，所以要用 D-FF 和資料開關自行組合，如下圖：



你應該可以發現，在移位暫存器部分我們也使用了延遲電路。原因很簡單：因為 D-FF 只鎖定在時脈上緣時的資料，所以要先等旋轉資料和回授值 S 穩定後再提供時脈。由於是以移位暫存器產生亂數，前後兩數值會傾向於 2 倍的關係。如果將輸出作不規則對調，則可得到更佳的亂數分布。

亂數產生器全圖於第 10 頁上方。

資料選擇電路

電路每秒掃描螢幕 56.25 次，所以每 $1/3600$ 秒要畫出一條線，每條線的角度是由計數器決定的。前 60 次掃描工作是畫刻度，之後四次分別畫秒、分、時和鬧鐘指針。畫刻度時，第一個為長（大）刻度，之後每隔 4 個短（小）刻度畫一個長刻度。其輸出分別控制 5 個計數器的輸出，決定匯流排 b 上為何種角度資料，並控制遮沒參數。

圖片於第 xi 頁上。

系統重置電路

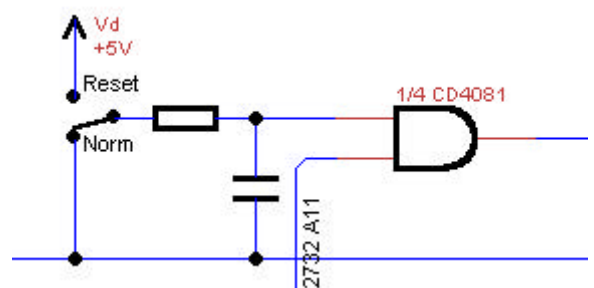
這個問題在沒有仔細思考之前，困擾我很久。因為我最初認為要重置所有計數器與時脈電路，這使得電路變得很複雜。其實不必如此，只要重置計數器部份就足夠了。

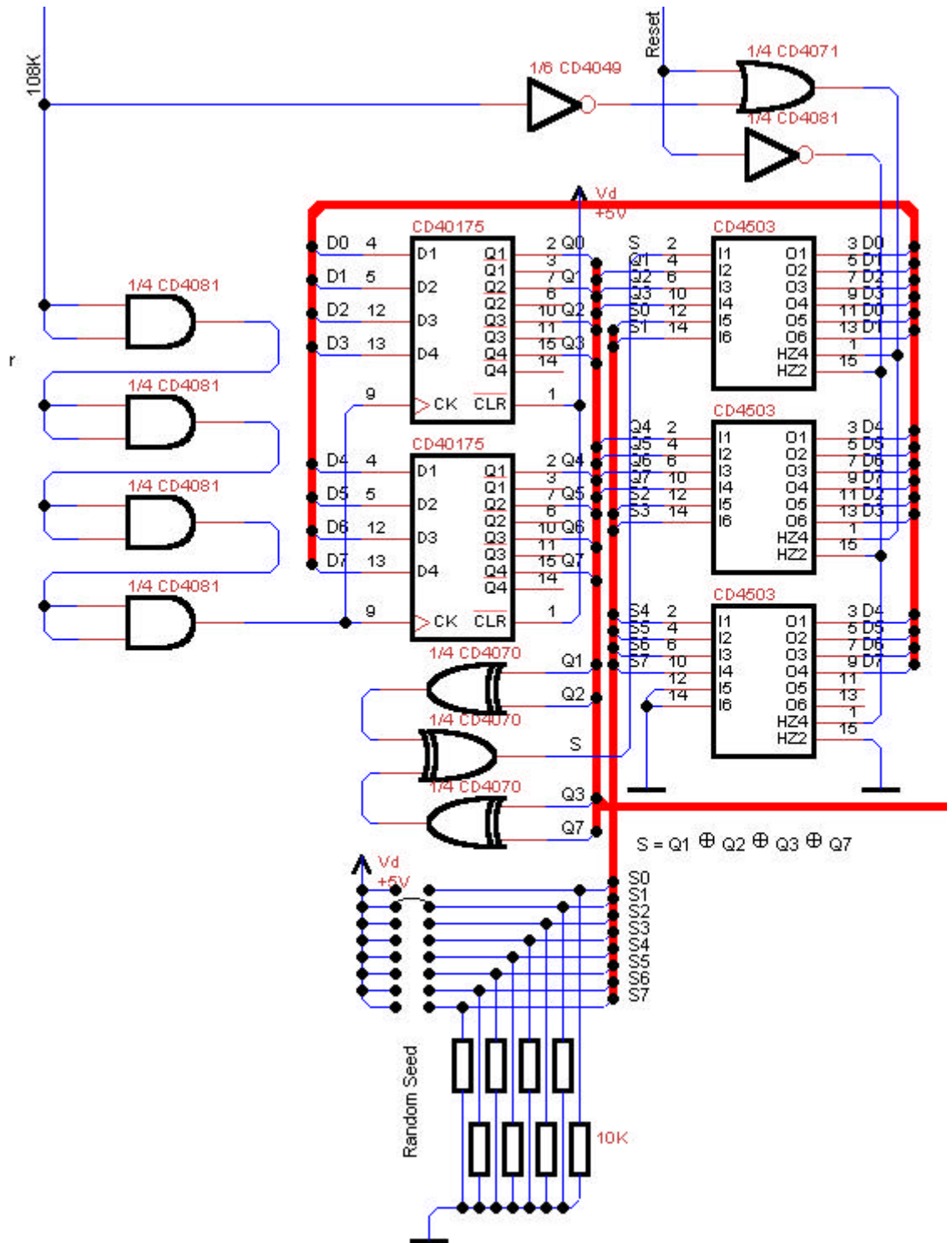
不可以直接將按鍵輸入直接接到重置輸入，這會造成刻度計數器與系統時序不同步。所以我們將按鍵

輸入和資料選擇時脈（2732 A11）AND 起來，重置之後所有計數器就會保持同步了。

時間、鬧鈴設定電路

一開始我希望藉計數器的遞增、遞減計數造成前進、後退的效果，但計數器組態為非同步式（漣波），無法使用。換個方法，只有前進，但加入額外的控制電路，使時間前進到「下一秒」、「下一分」或「下一時」。





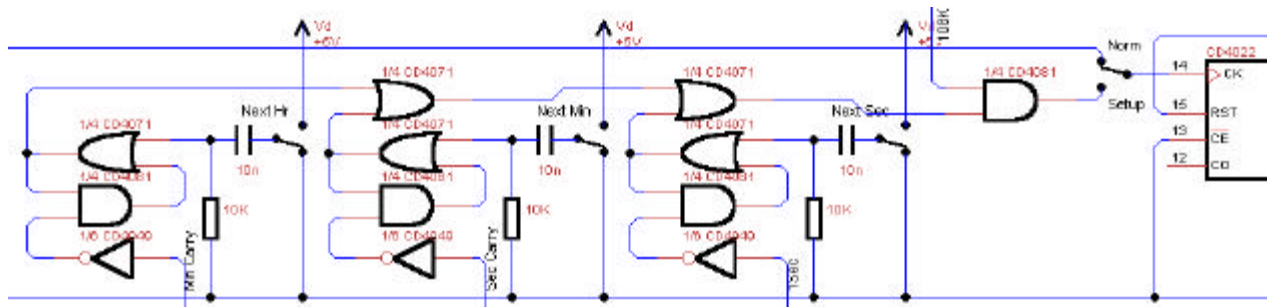
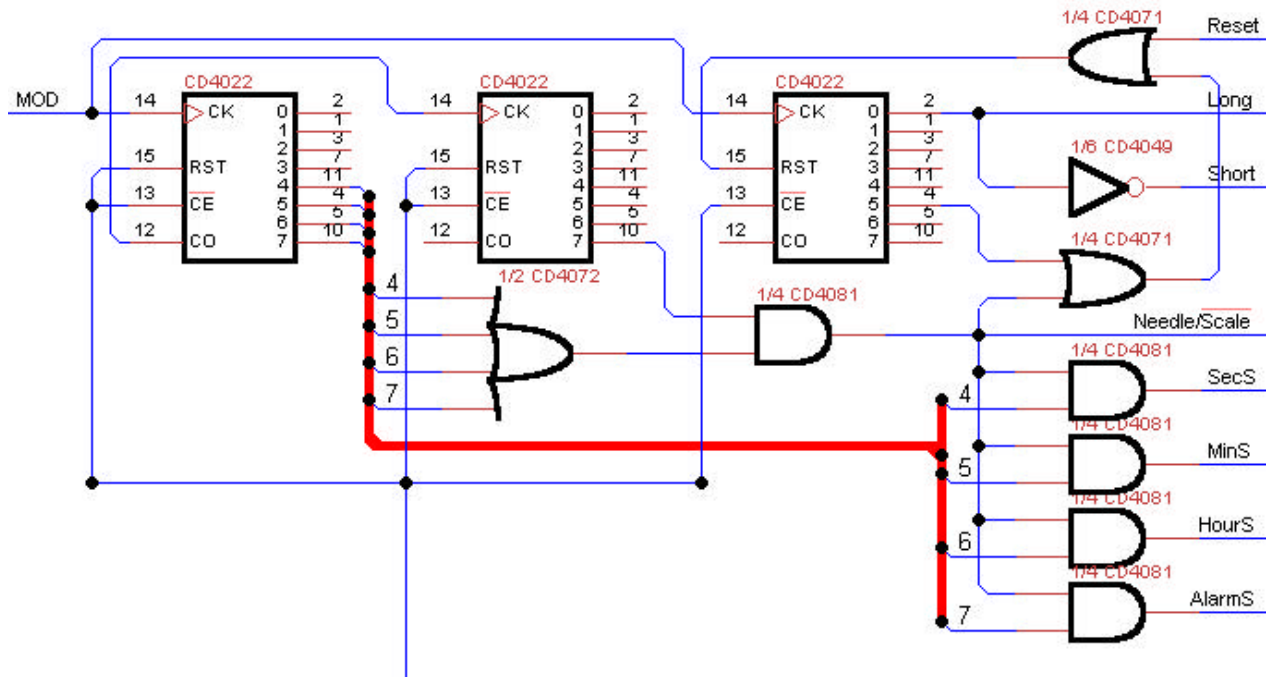
如現在時間為 12:34:56.16，「下一秒」會得到 12:34:57.00；「下一分」會得到 12:35:00.00；「下一時」則會得到 13:00:00.00。控制電路其實就是先將按鍵輸入鎖定（保持），直到進位訊號出現為止，將 108KHz 的時脈注入計時時脈電路。在鬧鈴設定電路上也是一樣的，不過設定單位為 10 分鐘。

圖片於第 xi 頁中。

鋸齒波產生器電路

$$Q = It, \quad V = Q/C \Rightarrow V = It/C$$

$$\text{Constant } I, \quad C \Rightarrow V = kt$$



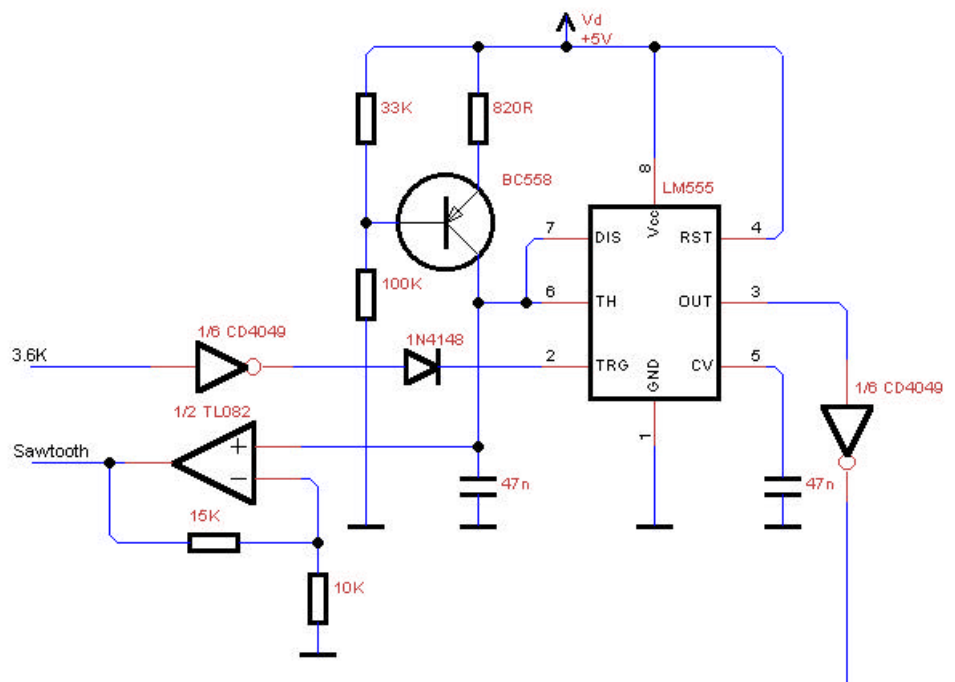
將 LM555 構成的單穩態震盪器之充電電路改為恆流源，另外再由 3.6KHz 的脈衝觸發，在電容器上就可以得到與系統同步的鋸齒波。

LM555 的第 3 腳便成為回掃遮沒訊號。

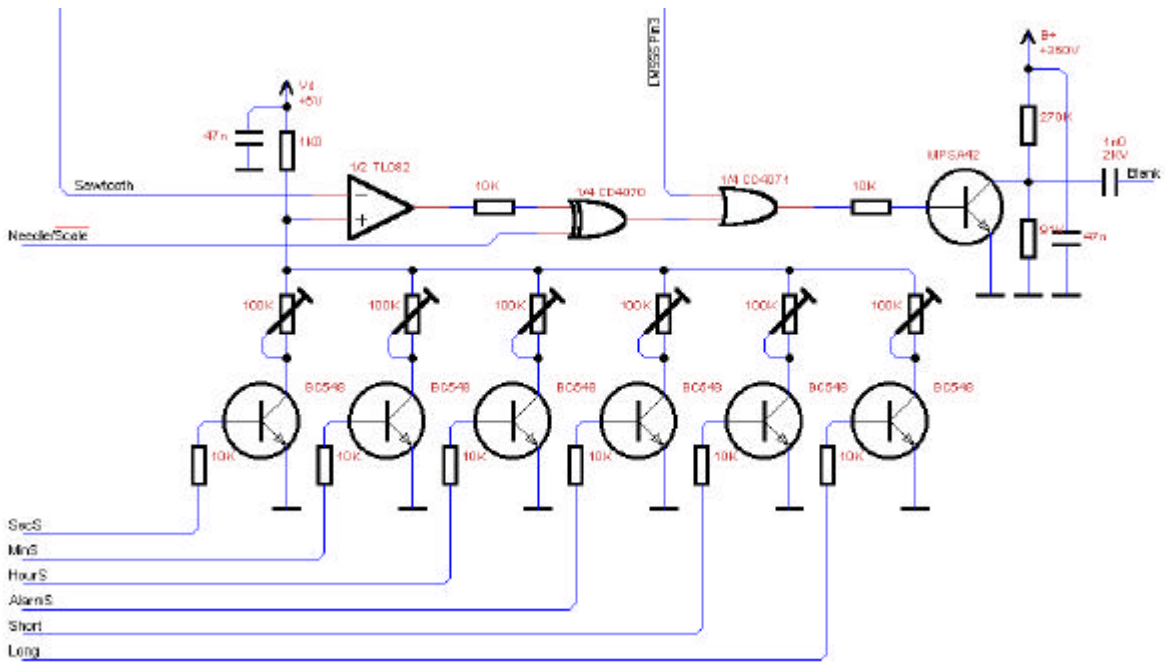
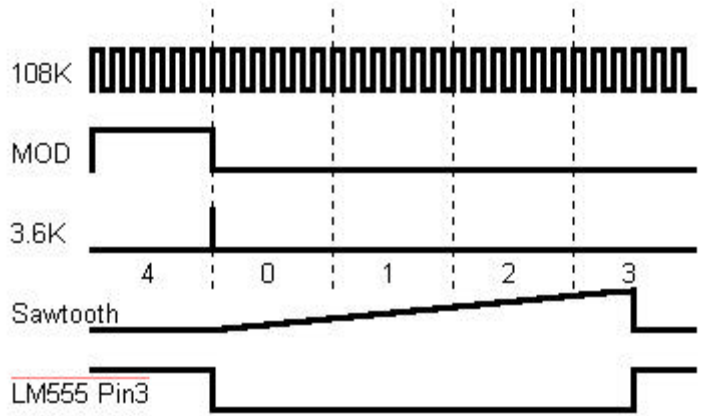
其時序圖於第 xii 頁上。

遮沒產生電路

遮沒的目的，就如同寫字時將筆尖抬離紙面一樣。畫刻度和畫指針的方法是相同的：每次掃描線都是掃過整個半徑，但在特定區域遮沒。畫刻度時，掃描半徑要超過設定值才開始畫線，而畫指針時，則是掃描半徑超過設定值後遮沒。其做法是使用不同的分壓網路供比較器和鋸齒波比較，在同一時間只有一個分壓網路被致能。



比較器是由運算放大器構成，使用其高開環路增益特性，當非反相輸入大於反相輸入時輸出為真。由於運算放大器工作於 +/- 15V 的電壓，所以在輸出串聯一電阻，和數位邏輯 IC 的輸入保護二極體形成鉗位電路使邏輯電壓維持在安全範圍內。比較器後方的 XOR 形成可程式反相/非反相緩衝器，用來轉換刻度和指針遮沒模式。鋸齒波產生器的回描遮沒和掃描遮沒 OR 起來就成為遮沒訊號。



遮沒信號控制一顆高壓電晶體，電晶體的工作就是將分壓網路下半在遮沒期間短路，使分壓網中點電壓降為 0。分壓網中點電壓經由一高壓電容器耦合至陰極射線管之控制柵極。視覺遮沒的柵極電位最大不超過 -100V (with respect to cathode)，所以分壓網路要將 B+ 電壓分成約 100V，所以當分壓網中點電壓由 100V 降到 0 時，控制柵極電位可能從 -1500V 降到 -1600V。

類比運算電路

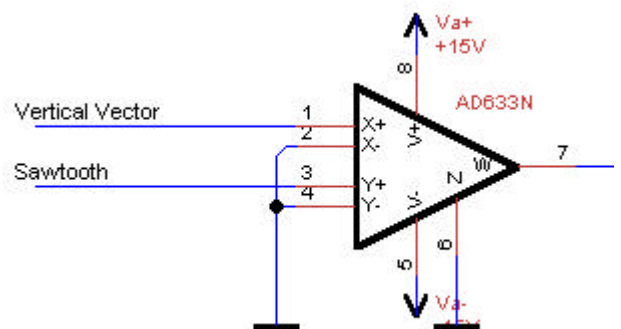
前面向量產生電路所產生的向量，我們都將它視為單位向量，經由類比運算電路的相加和相乘，我們就可以得到掃描訊號。

Analog Device 公司的 AD633 是一顆四象限類比乘法器 IC，具有兩組對稱輸入 (X1, X2, Y1, Y2) 和一個非對稱加法輸入 (Z)，其輸出

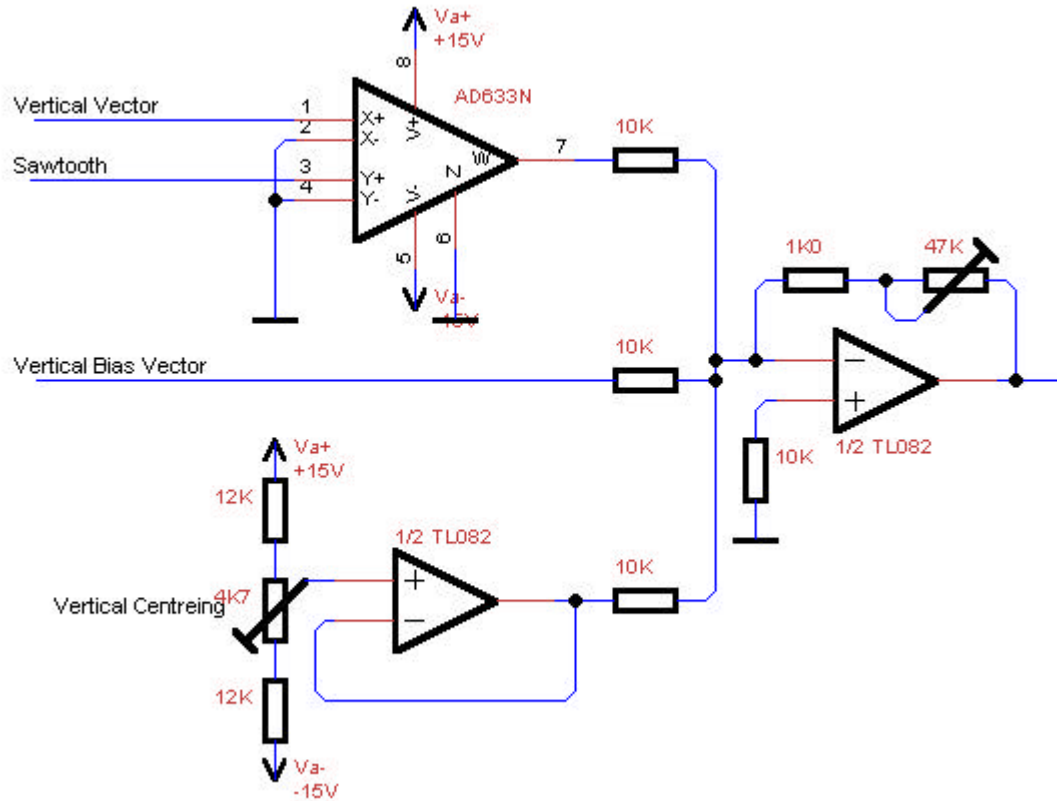
$$W = [(X1 - X2) * (Y1 - Y2) / 10] + Z.$$

在此，X2、Y2 和 Z 不需要，直接下地。X1 連接基本向量，Y1 連接鋸齒波，則 W 可得到本次掃描的垂直或水平基本掃描訊號。

基本掃描訊號還要和偏移向量、置中向量相加，才能夠得到掃描訊號。置中向



量的目的，就是使鐘盤在偏移量為 0 時，其中心對準螢幕中心。另外偏移向量有一個限制，就是在最大偏移時不能使鐘盤的任一部分超出螢幕顯示範圍。

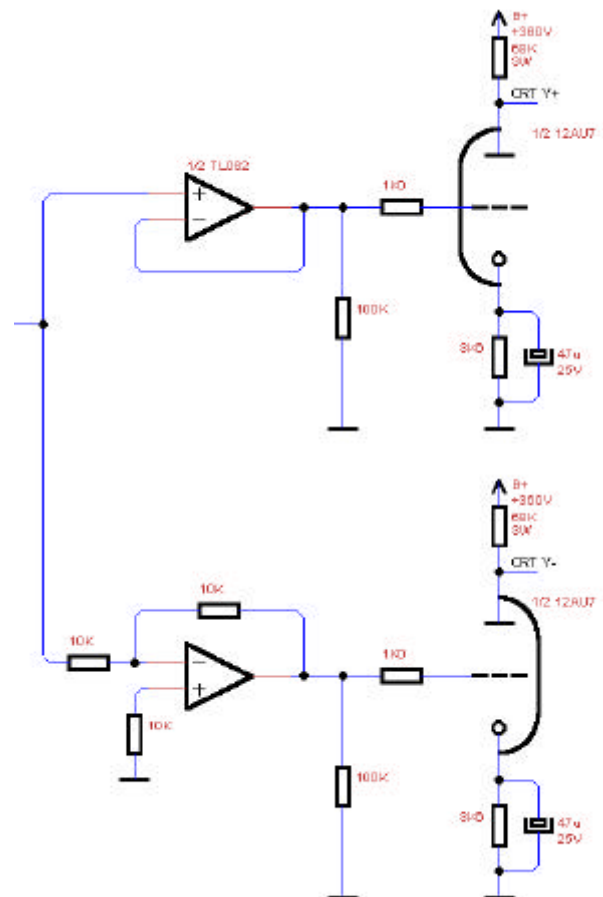


掃描放大電路

掃描放大電路，就是驅動 CRT 偏向板的放大器。偷懶的方式，可以將其中一片偏向板下地，另一片接到放大器輸出，就是所謂的非對稱，或不平衡，驅動。這樣做會有一種不嚴重但令人討厭的缺點，就是梯形失真 (Trapezoidal Distortion)。因為兩偏向板中心電位不固定，會影響電子束的速率：當偏向板電位為正時，中心電位約為偏向板中心的一半，電子束此時被偏向板加速，造成偏向靈敏度降低；反之，當偏向板電位為負時，電子束被減速，造成偏向靈敏度提昇，在螢幕上就形成梯形失真。所以除了非對稱驅動專用的 CRT，最好使用對稱式驅動電路。

我們讓掃描訊號分別通過反相和非反相緩衝器，得到對稱訊號，再送進 12AU7，由屏極直接驅動偏向板。由於頻率不高，對信號要求亦不嚴格，所以在此不使用視頻放大器，或使用回授、補償等技術，使線路簡單化。

某些早期的 CRT 偏向靈敏度低，可達 350V / inch，而偏滿螢幕的電壓甚至高達 500V！為了能夠滿足其需要，偏向放大器必須要能夠產生足夠的「電位差」。使用非對稱電路，就需要至少 500V 的電源電壓，使用對稱式驅動電路，只需



要一半的電源電壓就能夠達成相同的電位差。高壓電晶體貴又難找（在台北光華商場），手邊又是一堆真空管（好幾箱！），所以選用真空管也是不足為奇的。

驅動電路單邊輸出振幅需要 125V，所以電源至少要 250V。同時驅動電路阻抗不可太高，避免感染太多雜訊。由 12AU7 平均屏極特性圖得知：將電源電壓設定為 250V 時，振幅無法到達 125V。我們將平衡電壓（屏極靜態電壓）設為 175V，電源電壓設為 350V，則輸出振幅即可達到 125V，平衡峰對峰電位差將可達到 500V。在此情況下，12AU7 會流過約 2.5mA 的屏極電流，柵極約需 -9V 的偏壓，所以屏極電阻為

$$R_p = 175V / 2.5mA = 70K\Omega \sim 68K\Omega$$

陰極電阻為

$$R_k = 9V / 2.5mA = 3.6K\Omega$$

偏壓退交連電容為（簡便計算）

$$C_k = 1 / (2 * \pi * 1.8KHz * 3.6K\Omega) = 24.5nF$$

但使用 47uF 也不會出問題。由於使用陰極偏壓，所以電源電壓要再加上偏壓值成為 360V。

CRT 電壓分配電路

自古以來（有 CRT 開始），除了末端加速陽極使用獨立電源，CRT 的電壓分配電路都是以電阻分壓網路為主，這裡也不例外。3JP1 的參數如下：

$V_{A3} = 3000V$, for Post Deflection Accelerator (PDA)

$V_{A2} = 1500V$, for Accelerator

$V_{A1G2} = 300 \sim 515V$, for focusing

$V_{G1} = -22.5 \sim -67.5V$, for visual extinction of undeflected focused spot

$V_{DX} = 94 \sim 128V / inch$, for vertical deflection

$V_{DY} = 127 \sim 173V / inch$, for horizontal deflection

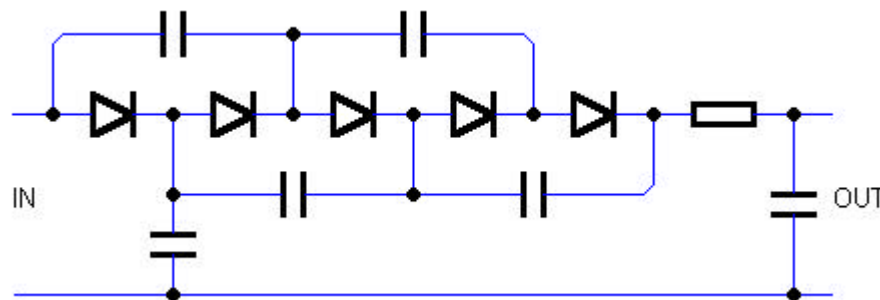
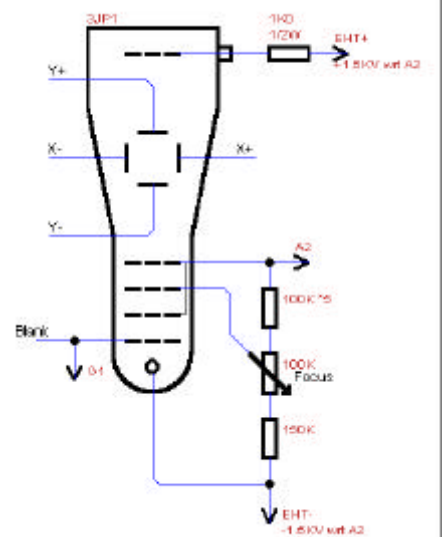
其中偏向板平均電位最好在第二陽極電位的附近，以降低失真。

電源電路--低壓部分

個人並沒有太多製作交換式電源的經驗，而且時間不允許，所以使用線性電壓調整器。低壓部分需要提供數位與類比電路，包括偏向放大電路的電壓。

電源電路--高壓部分

高壓部分就是 CRT 電源電路，我們使用現在少見的 Cockroft's Ladder 倍壓電路，此電路有另一種較常見的畫法如下：



這一部分電路的參考電位並沒有下地，而是被「墊高」成 180V，因為參考電位是接往第二陽極，與偏向板電位大致相等。另外柵極偏壓電路也是獨立產生，再下落

製作電路板時，由於是雙面板而且線路細小，所以兩面對齊時要有一定程度的精確，不似普通音響電路，偏移 500um 也沒關係。曝光後到蝕刻完畢之前，要小心不要刮傷感光膜，否則以後補線會很辛苦，而且難看。

結論

這個計劃應該是一個 Scope Clock™ 的對等品或變形，沒有商業價值。然而這東西可以考驗一個人在這方面的創意和邏輯能力，繼續發展下去，但仍然沒有商業價值。個人認為這就是這類活動迷人的地方。

參考資料

Allen B Du Mont Lab Inc
3JP- Cathode Ray Tubes

Analog Devices
AD633

David Forbes
Scope Clock™ <http://www.cathodecorner.com/>

Fairchild Semiconductor
CD4013BC CD4017BC, CD4022BC CD4029BC CD4049UBC, CD4050BC
CD4070BC CD40174BC, CD40175BCCD4503BC

General Electric
12AU7-A, 12AU7, 7AU7

Motorola Inc
MPSA42, MPSA43 BC546, BC547, BC548 BC556, BC557, BC558

National Semiconductor
AN20, An Application Guide for OP Amps
DAC0800/DAC0802
LM555/LM555C
TL082

Philips Technical Library
Dr R Kretzmann, Industrial Electronics Handbook 1964, Chapter 9
Cathode-ray Tubes

SGS-Thomson Microelectronics
HCC4073B/81B/82B
M3732A

Sylvania
3JP1, 3JP7, 3JP12

Texas Instruments
CD4071B, CD4072B, CD4075B

Copyright (c) 2002 Isaac "Lunatic" Yeh

Permission is granted to copy, distribute and modify this document under the terms of the GNU Free Documentation Licence, Version 1.1 or any later version published by the Free Software Foundation; With the Invariant Sections being this statement, with no Front-Cover Texts, and with no Back-Cover Texts. A copy of the licence is included in the appendix entitled "GNU Free Documentation Licence".

