

检修 TEK 576 曲线跟踪仪

TEK 576 Curve Tracer

William Xu Feb, 2020

2019 年 11 月的一天,我在剑桥(Cambridge, MA)的一位朋友给我来了一个电话,说他在哈佛大学附近捡到了一台很精致的仪器. 上边有示波器的屏幕和很多开关插座,问我感不感兴趣,还发来了一张照片. 照片显示这是一台 TEK 576 Curve Tracer.

多谢我的朋友给我送来了一个大玩具. 经过三个星期的精心修理,该机终于恢复了全部功能. 本文详细记录了修理的复杂过程以供各方参考. 事后得知,这种仪器在 Tektronix 公司从 1969 年总共生产了 21 年,当年的价格(\$18,440)是一辆 Mercedes Benz 汽车的价格. 见附录.



图 1. Tek 576 当年的广告



图 2. 我的 Tek576 修复后的照片

第一章 概述

这是一台几十年的老仪器,很多零件都到了寿命期,故而修理过程中故障接着一个故障使修理变得非常复杂. 幸运的是从网上找到了 Tek 576 Service Manual,故而修理工作可以往下进行. 本章列出了一个简表,读者可以一目了然地看到检修的全部过程. 这台仪器前后

换了多个零件经过 11 步修理,最后才被修复. 具体的技术细节将在后面几章分别叙述.

No.	现象	故障描述	修理
1	AC 上电, 绿色电源指示灯亮, 但是 CRT 没有光点和扫描线	内部电源供电系统故障. 本机有非常复杂的电源供电系统. 总计内部有 8 种不同的电源供电, 如 $\pm 12.5V$, $+100V$, $-75V$, $+5V$, $+225V$ 等等. 经过测试, 所有档次的电压都只有 1/3 的电压.	很难修理. 关键是各档电压是互锁的, 不清楚是哪档电压的故障引起所有的电压都变成 1/3. 最终发现 $+12.5V$ 的 $2400\mu F/50V$ 电解电容损坏. 替换, 供电系统故障修复.
2	CRT 出现光点和扫描线. 但是黄色指示灯 (Collector Voltage Disabled) 亮	黄色指示灯亮表示晶体管的集电极扫描电压被关闭. 直接原因是因为继电器 K323 没有接通 $-12V$ 电源. 	发现机内有一个 75 度华氏的温度控制器. 原来的功能是超过 75 度断开通路, 但现在常断. 没有替换零件, 暂时把它短路. 继电器 K323 工作正常.
3	黄色指示灯灭. 但 Step Generator 没有信号输出	Tek 576 至此已经能够进行 2 极管的测试. 但是 Step Generator 没有信号输出, 没法进行 3 极管的测试.	修理工作转向 Step Generator 线路板. 正在测试的过程中, CRT 光点和扫描线突然消失.
4	CRT 光点和扫描线突然消失	内部电源供电系统又出现故障. 但这一次故障和上一次不一样, 很多电压档降为 $0V$.	Tek 576 Service Manual 提供一张表, 表示某个电压短路时其他各档电压的参考值. 经过核对, 似乎应该是 $-75V$ 电压短路. 但是检查以后发现 $-75V$ 电压没有发生短路.
5	断开高压线路板的 $+100V$ 供电, 各档电压恢复正常.	这次供电系统故障与上一次不一样, 感觉可以采用断开各板电压供电的方式去排查.  $0.0068\mu F/5KV$	排查的结果是:如果断开高压线路板的 $+100V$ 供电, 各档电压恢复正常. 如此, 非常容易想到的就是两个可能: 1)高反压晶体管被击穿; 2)或是高压电容漏电. 高压线路板有三个高压电容 ($0.0068\mu F/5kV$). 检查以后发现其中一个漏电, 没有替换零件, 暂时断开.
6	CRT 出现光点和扫描线	但是 Step Generator 还是没有信号输出, 没法进行 3 极管的测试.	继续检查 Step Generator 线路板. Clock 以及计数器工作

			正常, 故障似乎在 D-A 转换器
7	多次按动 STEPS 开关, D-A 转换器有信号输出	D-A 转换器输出由 STEPS 这个开关控制	面板开关好久不用, 接触点开始氧化. 多次按动 STEPS 开关后有好转, 出现 Step 信号.
8	Step 信号只有电流信号没有电压信号	Step 电流信号用于测试晶体管; 电压信号用于测试场效应管.	
9	多次按动 REP 开关, 开始有 STEP 电流信号输出	Tek 576 面板开关好久不用, 接触点氧化接触不良是常见的问题.	面板开关好久不用, 接触点开始氧化. 多次按动 REP 开关后有好转, 出现 Step 电流信号.
10	能看到三极管测试曲线, 但图像全被压缩在第 1 象限.	估计是示波器垂直和水平放大的问题. 是否有什么共同的电源被断开了.	断开各板电压供电的方式去排查电源供电系统故障时(项目 5))切断了 Step Generator 的-75V, 但忘了接回.
11	接回切断的 -75V.	Tek 576 全部功能恢复正常	

表 1. Tek 576 检修的简要过程

第二章 电源供给系统故障

2.1 原始故障

如表 1 所示, 本机的原始故障是: 120 伏 AC 上电, 绿色电源指示灯亮, 但是 CRT 没有光点和扫描线. 经过初步测试, 发现所有档次的内部供电电源都只有 1/3 的电压. Tek 576 的电源供给系统非常复杂. 总计有 8 种不同的内部电源供给 (+12.5V, -12.5V, +5V, -75V, +100V, +15V, +225V, +50V). 为了保障系统运行的安全, 各档电源之间又是互锁的. 例如 +12.5V 的电压需要 6 个参考电压: +100V, -75V, +5V, (0V - +5.6V), 以及未曾稳压的+12.5V 电压. 只要有一个参考电压不正确, 这个+12.5V 电压就被自动关闭. 在 Tek 早期示波器的供电线路中, 也是用参考电压做互锁的. 但那个时候线路中总有一个原始的独立参考电压它不受其他电压互锁. 那么情况就简单得多, 只要从这个电压开始寻找故障即可. 但是 Tek 576 的各档电源之间全是互

鎖的，这就产生了故障寻找死循环的过程，不知道从哪里开始才是最佳的切入点。见图 11，电源供电系统方框图。

Tek的技术人员也知道这是一个比较难维修的部分，故而在Tek 576的Service Manual 手册中给出了一张表(见图4)，描述这么多电源里面如果有一个短路的时候各点的电压供修理人员参考。很可惜，这张表对我没用：本机的故障不是短路而是只有1/3的电压。

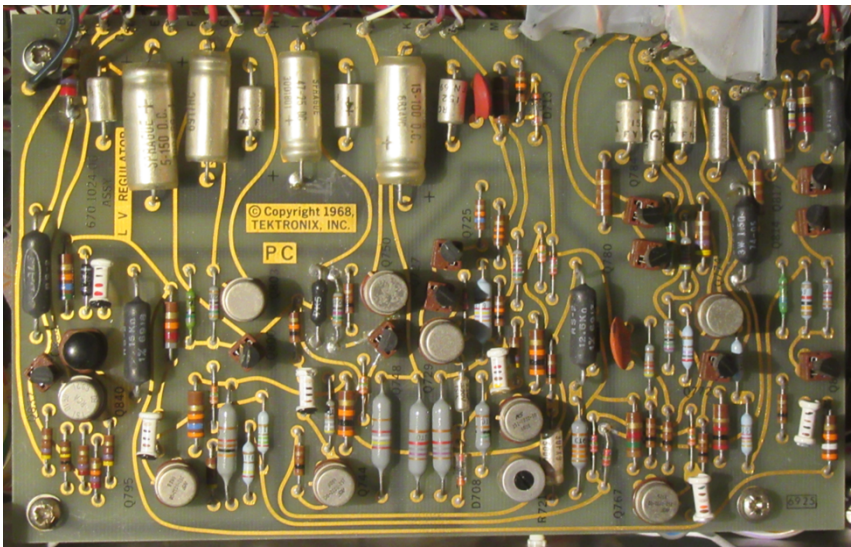


图3. 电源供电板

面对这个难题，我当时实在没有比较好的解决方案，只能用最笨的方式来解决：把整个电源供电板拆下来一个部分一个部分做独立的分开检查，虽然是笨，但是至少修理工作在往前进。具体的做法是：

- 1) 隔离各档电源，对于每一挡的电源查明白它需要的参考电压。
- 2) 在机外边提供待检查电源的参考电压和未稳定以前的电源。
- 3) 经过 1) 和 2) 这两项，待检查电源得到了所有需要的输入电压，如果没有零件损坏，该电源就应该提供正常的输出电压。

TABLE 4-8
Supply Voltages When One
Supply is Shorted to Ground

Shorted Supply	Supply Voltages (Approximate)								
	-75	-12.5	+12.5	+100	+225	-4 kV	+4.5*	+5	+15
-75	0	0	1	3	0	0	0	0.5	1
-12.5	-35	0	1.5	3	0	0	1	1	1
+12.5	-75	0	0	0	0	0	0	0	1.5
+100	-75	-1	1.5	0	0	0	0	0	0
+225	-75	-12.5	5	8	0	0	2	3	6
-4 kV	-75	-12.5	5	8	0	0	2	3	6
4.5*	-75	-12.5	+12.5	+100	+225	-4 kV	0	+5	+15
+5	-75	-12.5	+12.5	+100	+225	-4 kV	+4.5	0	+15
+15	-75	-12.5	+12.5	+100	+225	-4 kV	+4.5	+5	0

图 4. 电源短路互查表（见 Service Manual P. 4-9）

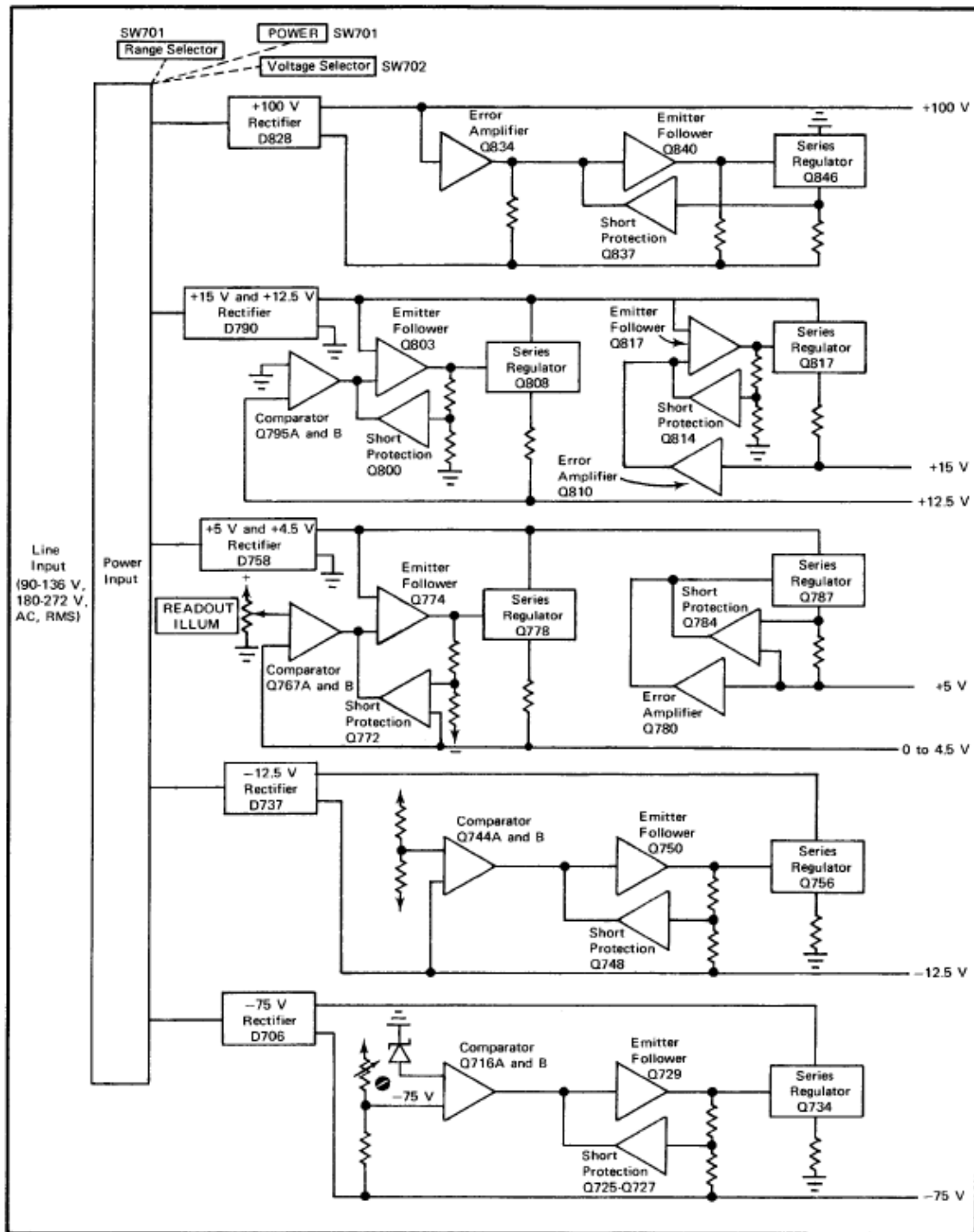


图5. 电源供电系统方框图

2.2 隔离分开检修各档电源输出电压

以下用-75v 的电源供电线路作为例子说明是怎样检查的.

图 6 显示了 -75v 的电源供电线路. 请注意图上的 L, K, W, S 这几个节点, 这几个点是我们用来外接电源和外接晶体管的(替代 Q734). 另外从图 11 我们也可以看到 -75v 的电源供电需要的参考电压有: +12.5V, -12.5V, 以及未稳定以前的+12.5V.

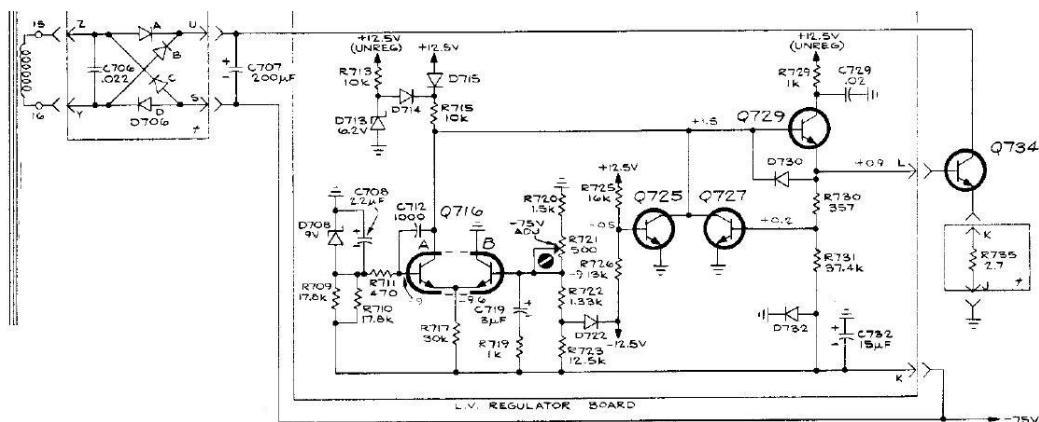


图 6. -75v 的电源供电线路

由此我们就得到了图 7, 独立检修 -75v 电源供电的线路图. 请注意图上的 A, M, V 接地线, H, F, I 接相应的参考电压, L 接外接大功率晶体管, 用以替代图 6 中的 Q734.

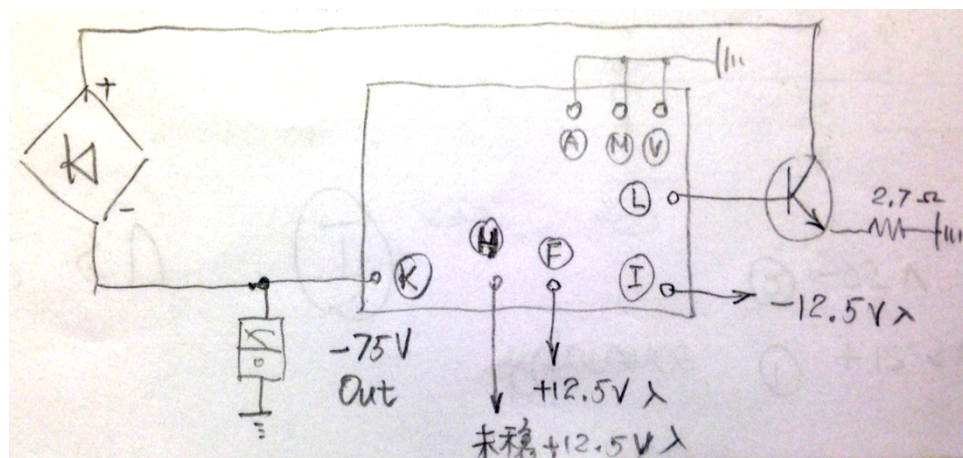


图 7. 独立检修 -75v 电源供电

附带说一句, 图 6, 图 7 上的 A, M, V, H, F, I, L 等等都是印刷版上的连接点, 它们均标在线路板上见图 8.

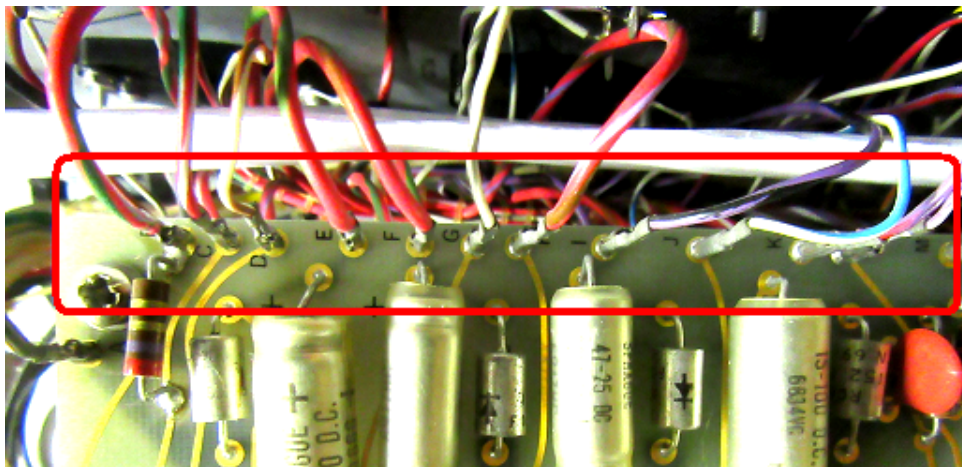


图 8. 印刷版上的连接点 A, B, C, ... Z

2.3 用计算机辅助设计来帮助分析电路

PSpice 是我经常使用的计算器辅助设计软件. 它可以很容易地模拟电子线路, 给出各点的电流和电压. 我用它来模拟 Tek 576 电压稳压器, 近似率可达千分之一.

下面是一个例子, 如何用 PSpice 模拟 Tek 576 的 -75v 电源供电. 各元件的数值从 Service Manual 上照抄. 并且假定交流整流以后得到的电压是 80V. PSpice 计算结果表明, 大功率晶体管 Q734 降压 4.999 伏, 最后的输出是 75.000V. 非常准确.

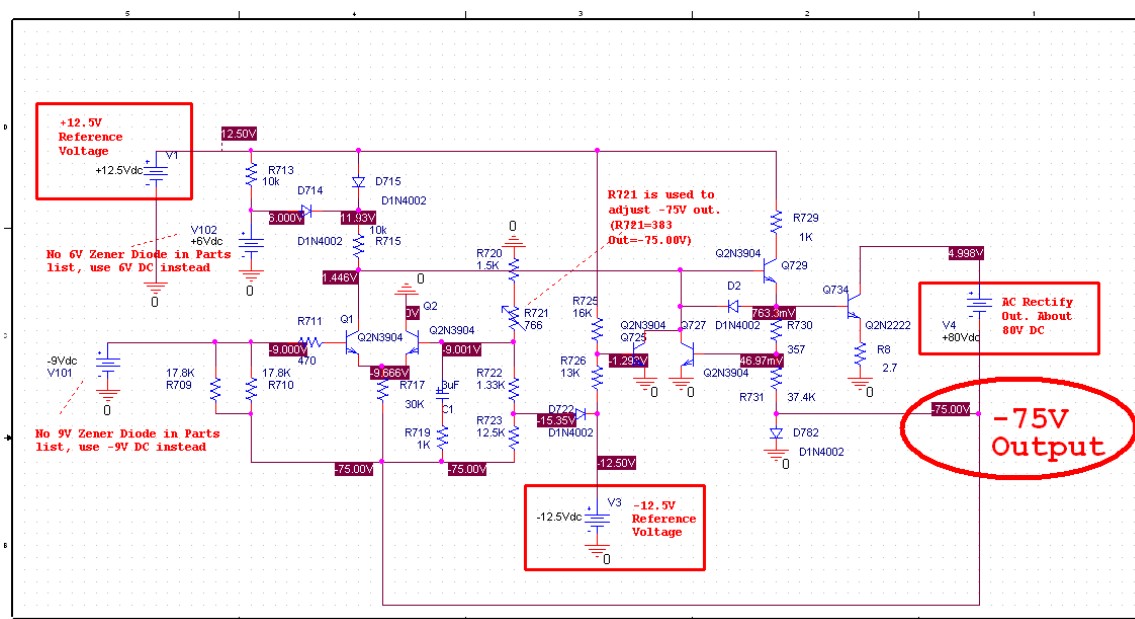


图 9. PSpice 模拟 Tek 576 的 -75v 电源供电

因为各点的电压都在 PSpice 图纸上精确计算出来了, 如果线路工作不正常, 查各点电压, 故障在数分钟内就可以找到。

2.4 大失所望, 每个电源独立运行都没有故障

至此, 似乎计划完善, 损坏的电源一定会被找到。非常可惜, 用了好多时间检查各档电源, 竟然发现每个电源独立运行都没有故障! 换句话说这个电源供电板没有毛病, 故障在电源板以外的地方。

2.5 原始故障 - C791 断路

仔细查看整个电源电路的线路, (见图 11 电源供电系统), 电源板以外的都是一些大零件。如大电流的晶体三极管, 几千微法的大电容器, 以及大功率的降压电阻等等。

对电源板以外的零件, 第一步是仔细测量各电源未稳压以前的输入电压。这些输入电压都是从 AC 由两级管整流, 经过一个大容量电容器滤波以后得到的电压。从原理上说, 它的电压应该略高于被稳后的电压。但是应该高多少并没有确切的数值。经过测定, 只有+12.5V 的输入电压有点可疑: 它只有+14.34V。

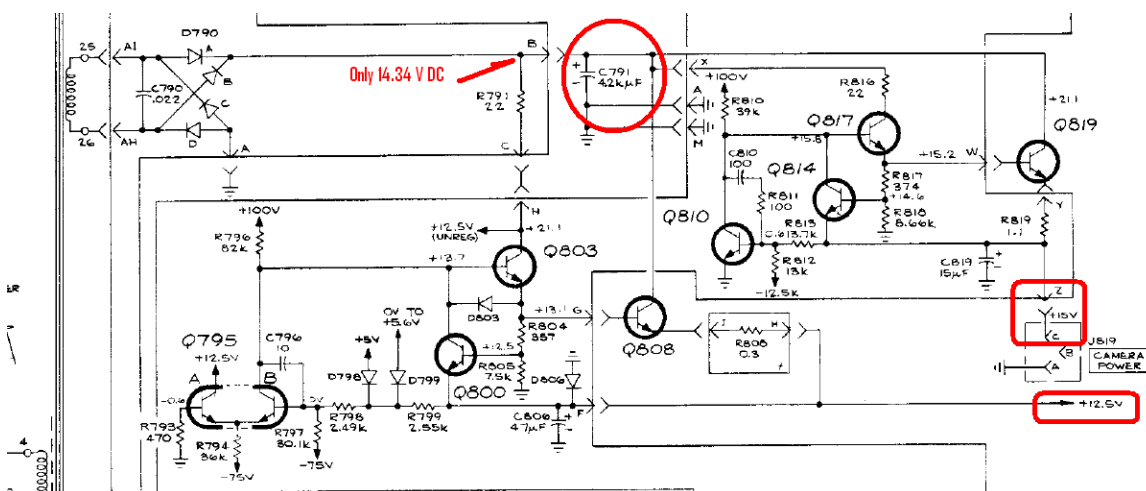
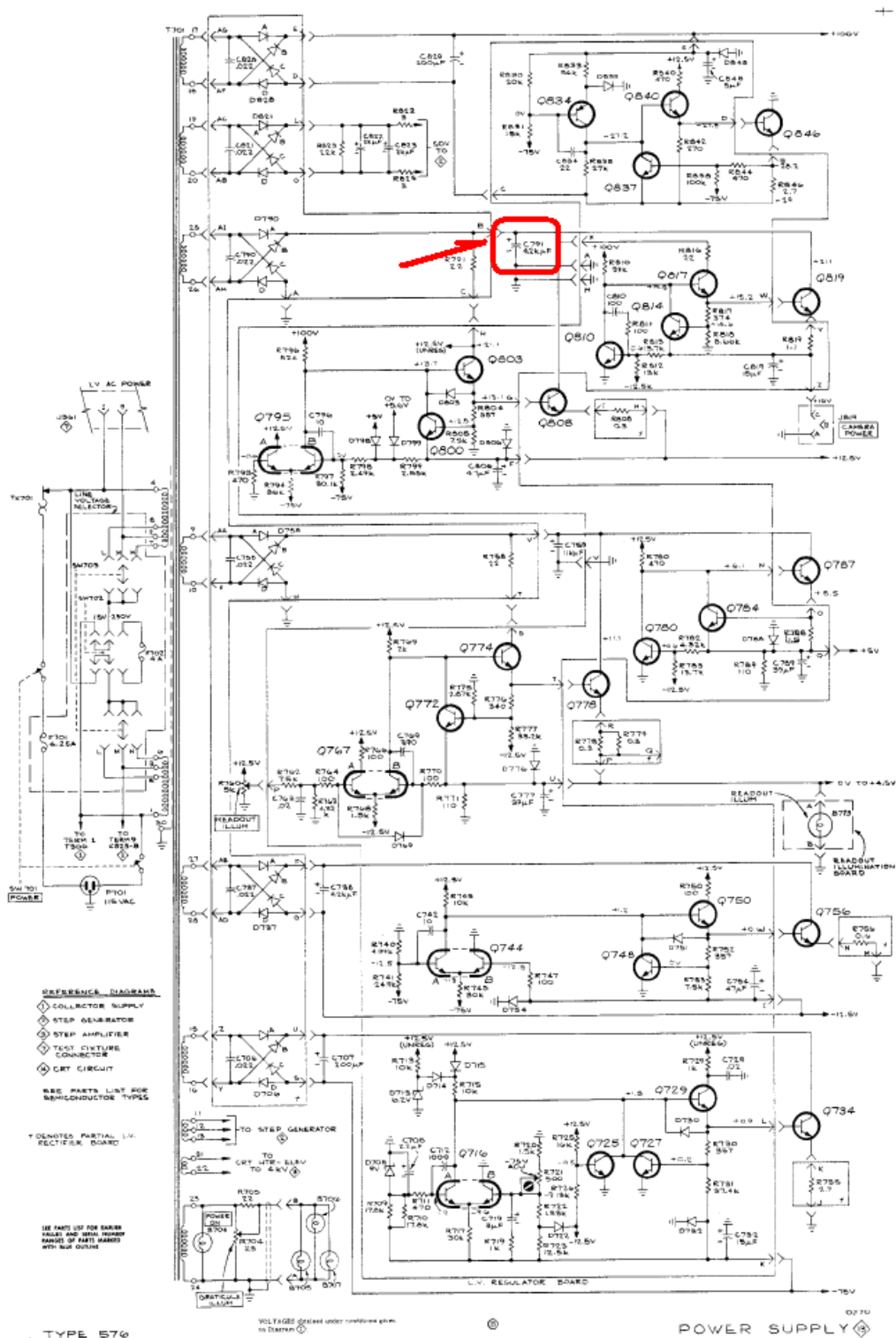


图 10. 12.5V 的输入电压有点可疑: 它只有+14.34V。

其实各档输入电压在修电源供电板以前我就测试过。对+12.5V 电源, 我当时觉得输入+14.34V 已高于+12.5V 就认为 OK, 没有往下细查。现在知道这是犯了一个很大的错误。现在仔细一看, 原来这处的电压还

要提供+15V 的照相机用电. 如只有+14.34V 这就变成不可能, 故障一定在这个地方.



经过检查整流两级管没有损坏，故障是大容量滤波电容器 C791 2, 400uF/50V 断路。当时没有这么大的电容可以替代，找了一个大概十分之一的电容临时换上去，OK，所有各档的电压都恢复正常！原来原始故障就是因为+12.5 伏的输出电压过低，引起所有档次的供电电源都只有 1/3 的电压。

第三章 检修高压保护系统故障

3.1 高压保护黄灯亮

滤波电容器 C791 替换以后示波器的显像管出现了绿色的扫描信号。当时非常高兴，以为故障扫除机器修复。很可惜这只是第一步，后面还有很多工作要做。马上就发现面板上有个黄灯亮，“COLLECTOR VOLTAGE DISABLE”。下面还有一行小字：(USE PROTECTIVE BOX)。按照手册的描写，在测试电压小于 15V 的时候是不应该亮的。黄灯亮表示测试电压已被切断。

3.2 Tek 576 的高压保护机构

为修理黄灯亮的故障不得不了解一下 Tek 576 的高压保护机构。当开关“MAX PEAKVOLTS”拨在 15V 以上时(见图 12. 即 75V, 350V, 或 1500V 等)，Tek 576 的高压保护机构开始运作。高压保护机构有以下三个部件(图 12, 图 13)：

- 1) 晶体管基座的高压保护塑料罩。
- 2) 高压保护黄灯 -- 当测试电压大于 15 伏，如保护塑料罩没盖上，黄灯亮。这个时候测试高压自动切断。
- 3) 高压保护红灯 -- 当测试电压大于 15 伏，如保护塑料罩已盖上，这时可以做晶体管的正常测试。红灯亮表示有高压在晶体管基座，小心高压！



图 12. 测量高压的保护系统 - 高压保护塑料罩

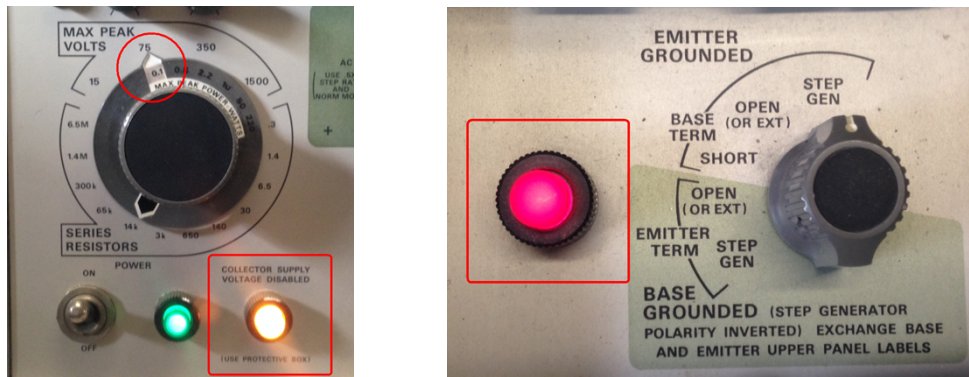


图 13. 测量高压的保护系统 - 黄灯和红灯

3.3 Tek 576 高压保护机构线路图

图 14 显示了保护机构的方框图。从这个方框图我们可以看出上面 3.2 一节叙述的的保护动作是如何进行的。

K323 是一个继电器，正常工作的时候它是常通电的。当 MAX PEAKVOLTS 是 15V 时，继电器 K323 的一端经过开关 1R1 接地，另一端接 -12.5V，因此继电器通电吸下；当工作电压大于 15 伏，继电器必须通过红灯和塑料盖下面的触点才能接通。这时就起了高压保护作用。另外当继电器断电的时候，黄灯通过继电器触点 K323-A 接地线而点亮，同时 T 300 来的测试高压被 K323-B 切断。这就是 "COLLECTOR VOLTAGE DISABLE" 和 (USE PROTECTIVE BOX) 如何动作的原理。

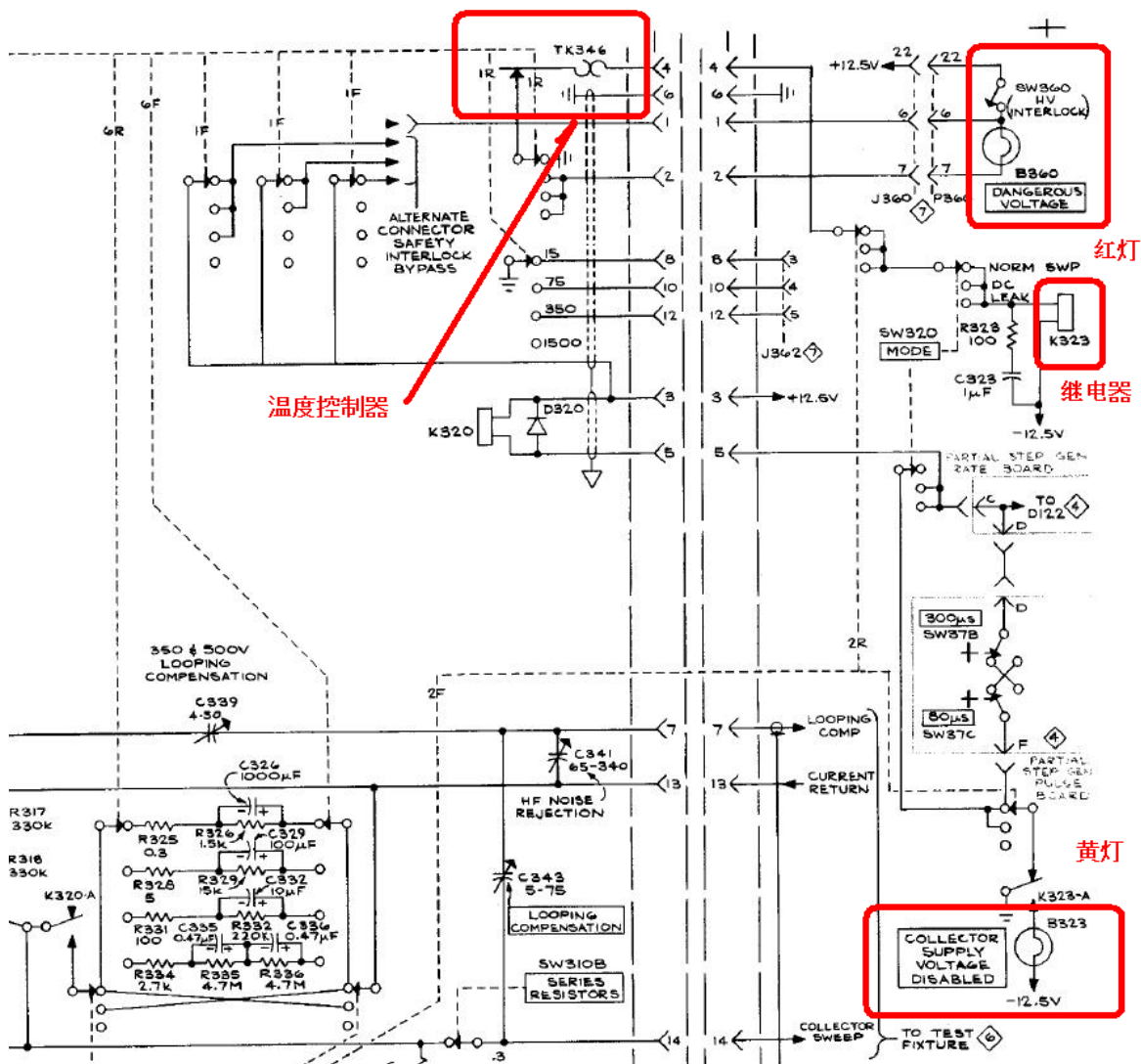


图 15. Tek 576 高压保护机构线路图

图 16 表示了 TK346 温度控制器在整个机器的哪一个部位. 很显然它加在几个大电阻的散热器上, 如果散热器太烫它就切断从 T 300 来的测试电源.

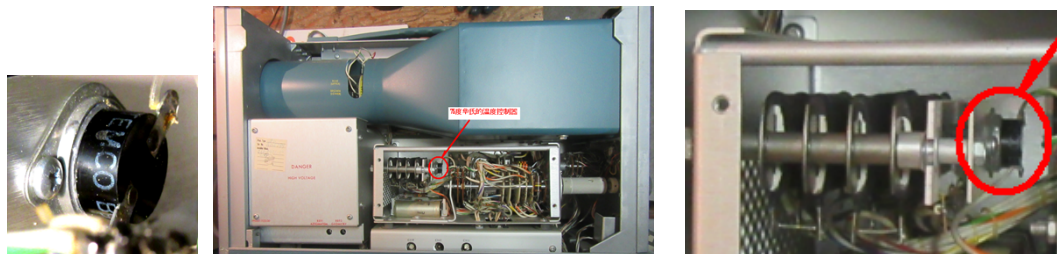


图 16. TK346 温度控制器

温度控制器修完以后已经可以进行两级管的测试。图 17 显示了一个 Silicon 2 极管的测量曲线。但是还没完, 还有更多的毛病要修理。见下面一章, STEP GENERATOR 故障。

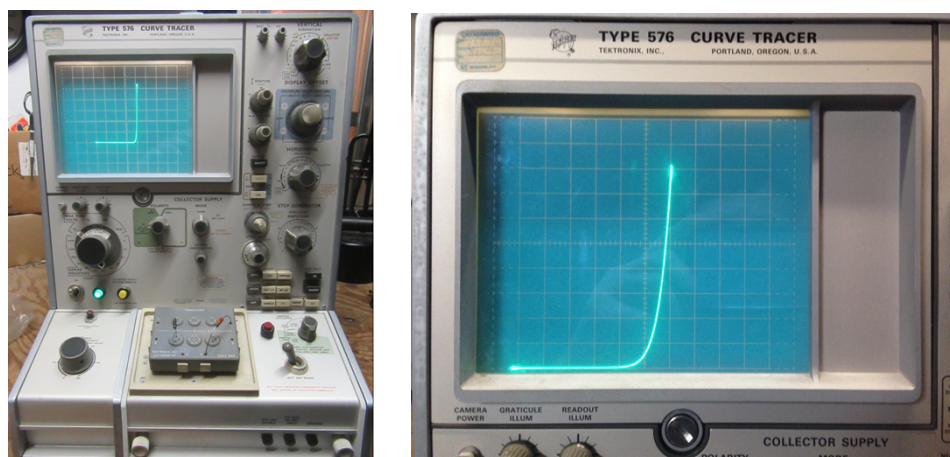


图 17. Silicon 2 极管的测量曲线

第四章 STEP GENERATOR 故障

4.1 STEP GENERATOR 有故障

经过第三章所描述的各点修理, 本机已可以进行两级管的测试, 但是无法测试晶体三极管。原因是测试三极管所需要的步进电流或步进电压没有产生(图 18)。在本机的前面有三个香蕉插座, 最左的那个 STEP GEN OUTPUT(图 19)就可以测试步进电流或步进电压有没有产生。示波器显示这里的信号是 0, 也就是表示 STEP GENERATOR 有故障。

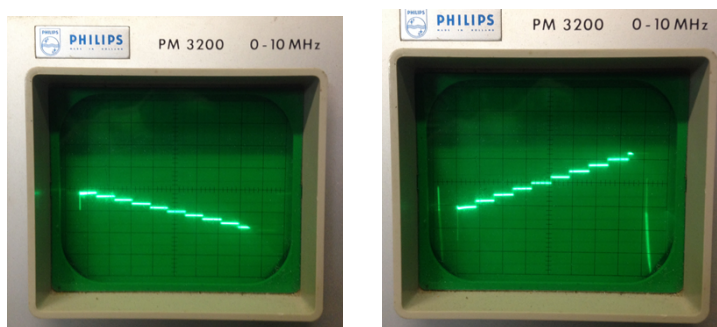


图 18. 测试三极管需要步进电流或步进电压

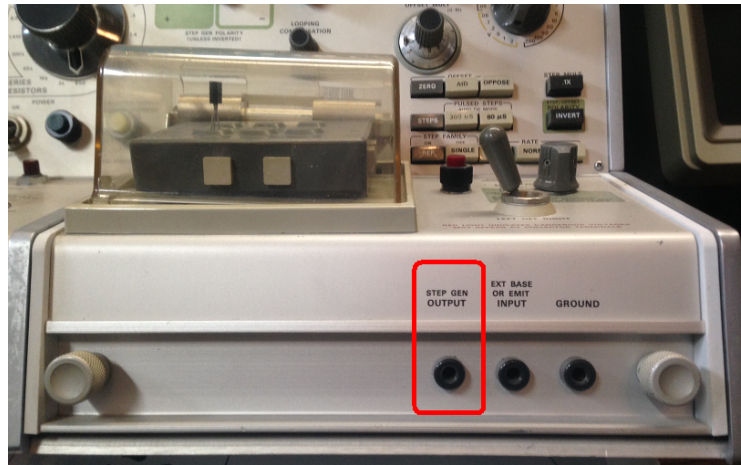


图 19. 前面有三个香蕉插座，最左的那个是 STEP GEN OUTPUT

4.2 晶体管测试原理

为修理 STEP GEN OUTPUT 的故障不得了解一下 Tek 576 的晶体管测试原理。图 20 是 Tek 576 测试晶体管的方框图。

Operating Instructions—Type 576

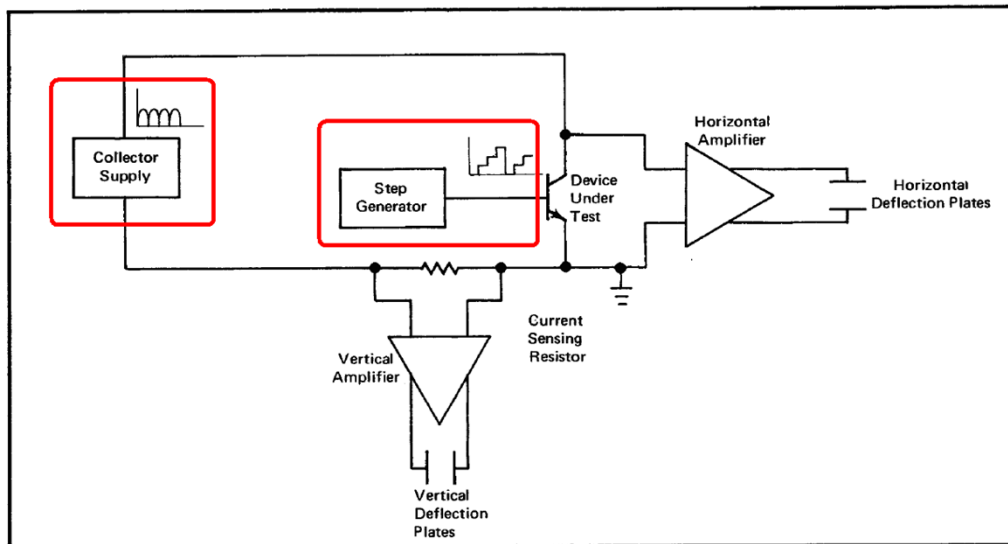


图 20. Tek 576 的晶体管测试原理。

为测试晶体管，被测晶体管的集电极必须加上 Collector Supply (MAX PEAKVOLTS) 的半波交流电压，晶体管的基极必须加上 Step Generator 产生的阶梯电流这样才能产生图 21 的晶体管特性波形。

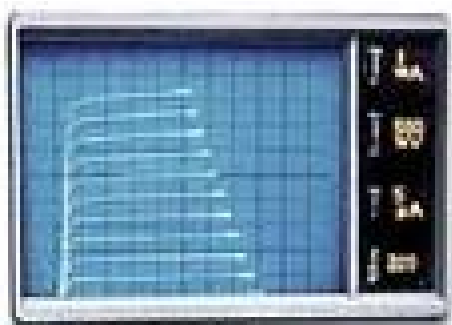


图 21. 典型的晶体管特性波形

4.3 STEP GENERATOR 工作原理

图 22 是 STEP GENERATOR 的电路板, 它用于产生阶梯电流/电压信号. 总的来说它包括以下几个部分:

- 1) 时钟脉冲产生器(图 24) - 产生时钟信号.
- 2) 计数器(图 25) - 控制产生几个阶梯, 也即是几条曲线.
- 3) D-A 转换器(图 28) - 数字信号转换为阶梯电流/电压信号.

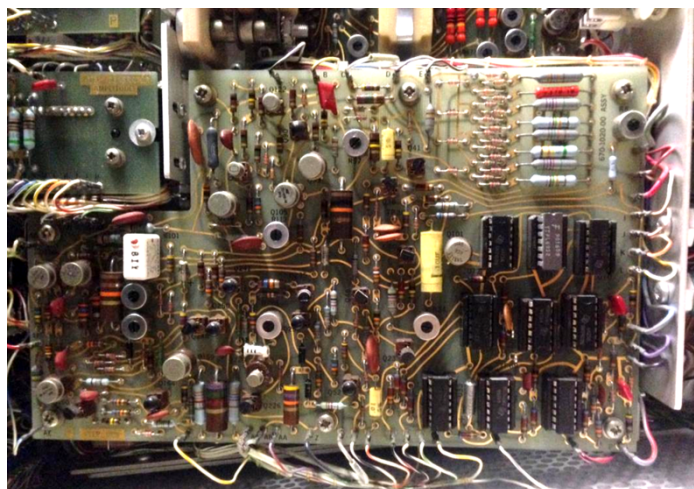


图 22. STEP GENERATOR 电路板

经检查, 在图 24 的 U22C 输出端有正常的脉冲信号输出, 因此时钟脉冲产生器没有故障.

下一步是检查计数器(图 25). 计数器是用于控制产生曲线的条数的. 例如图 21 所示的晶体管特性图上有 10 条曲线. 计数器最大可以计到 10. 计数多少由面板阶梯数控开关(图 23) 设定. 图 23 上是设定为 6 个阶梯, 也就是产生 6 条曲线.



图 23. 曲线数控开关(现设定为 6 条曲线)

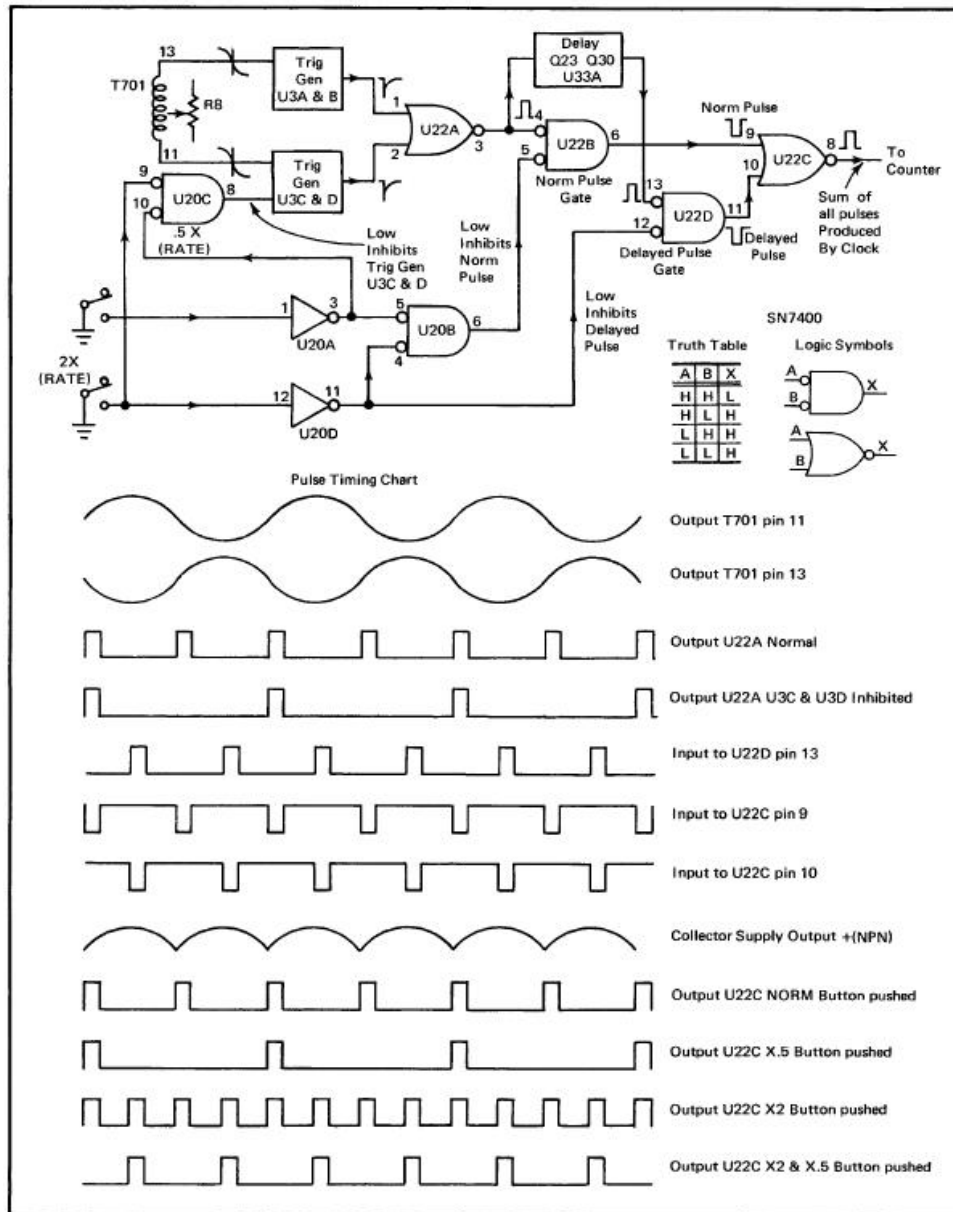


图 24. STEP GENERATOR 时钟脉冲产生器

经检查,在图 25 的 U69A 输入端有正常的脉冲信号, U69A 输出端没有脉冲信号. 这个信号是用来计数的, 没有计数信号计数器肯定不工作, 故障很可能就在这里.

细看 U69A 另一个输入端被 U69B 控制. 而且 U69B 又受到 “STEP FAMILY Button” 面板开关控制. 到此故障大概明白了: 多年不用的面板开关很可能接触不良的. 一定是哪个开关接触不良把信号锁住了.

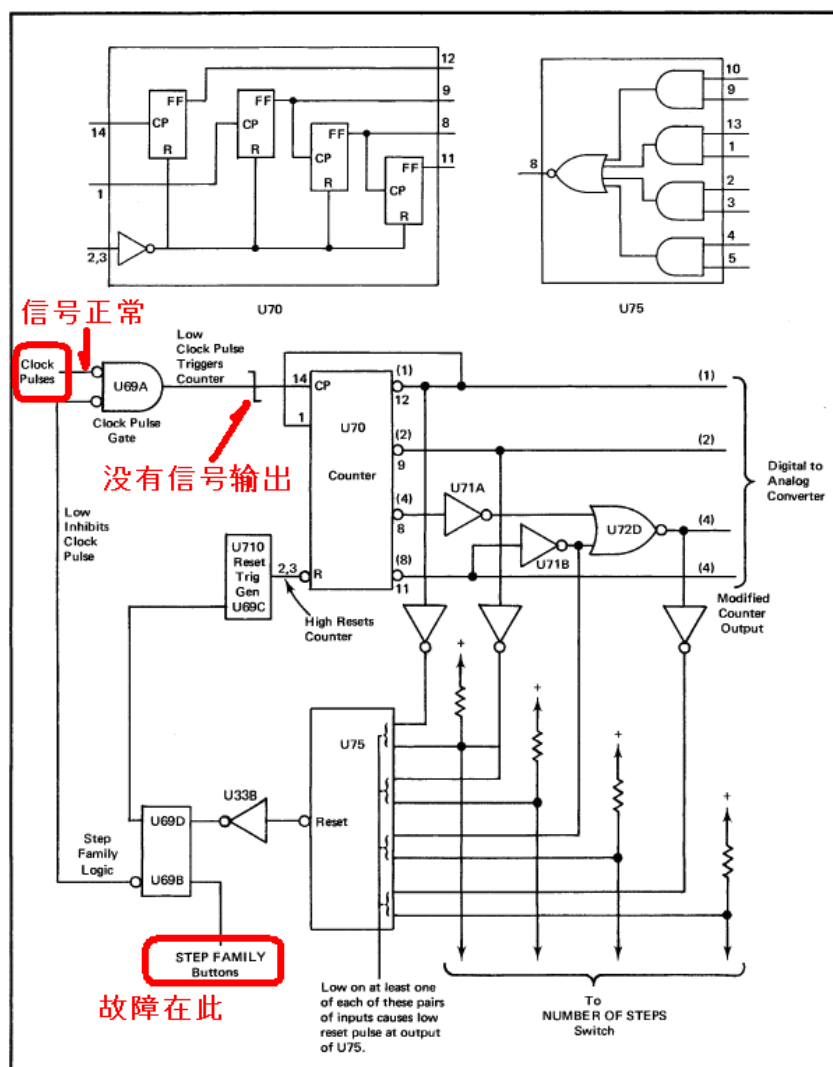


图 25. STEP GENERATOR 计数器

检查面板开关 STEP FAMILY Button (图 26). 果然不出所料, 多次反复按动 REP 和 SINGLE 这两个按钮以后, 阶梯信号出现! 在图 19 最左的那个 STEP GEN OUTPUT 输出端看到了图 18 的阶梯信号. 实际上就是

那个 REP (Repeat) 开关不良, 使机器永远处于 SINGLE 这个状态, 阶梯信号产生一次就不再重复, 因此示波器上就看不见信号. 另外图 26 上的这个 STEPS 按钮也有问题. 按得不好也会使阶梯信号消失.

注入少量的清洁剂 WD40 可以消除开关接触不良的毛病.

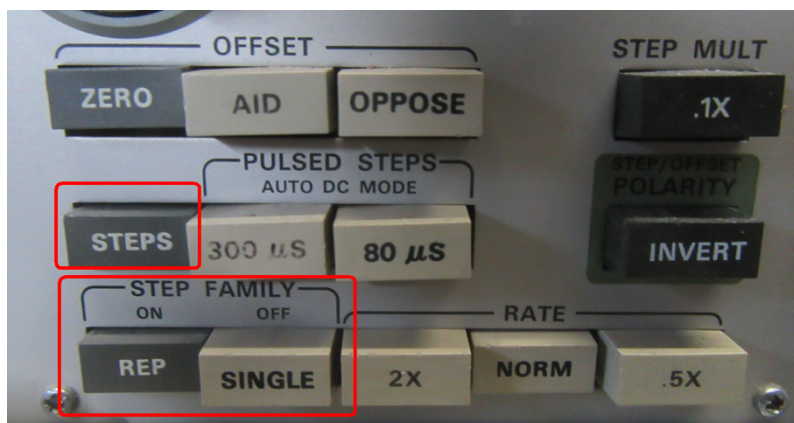


图 26. STEP FAMILY 面板开关



图 27. 清洁剂 WD40

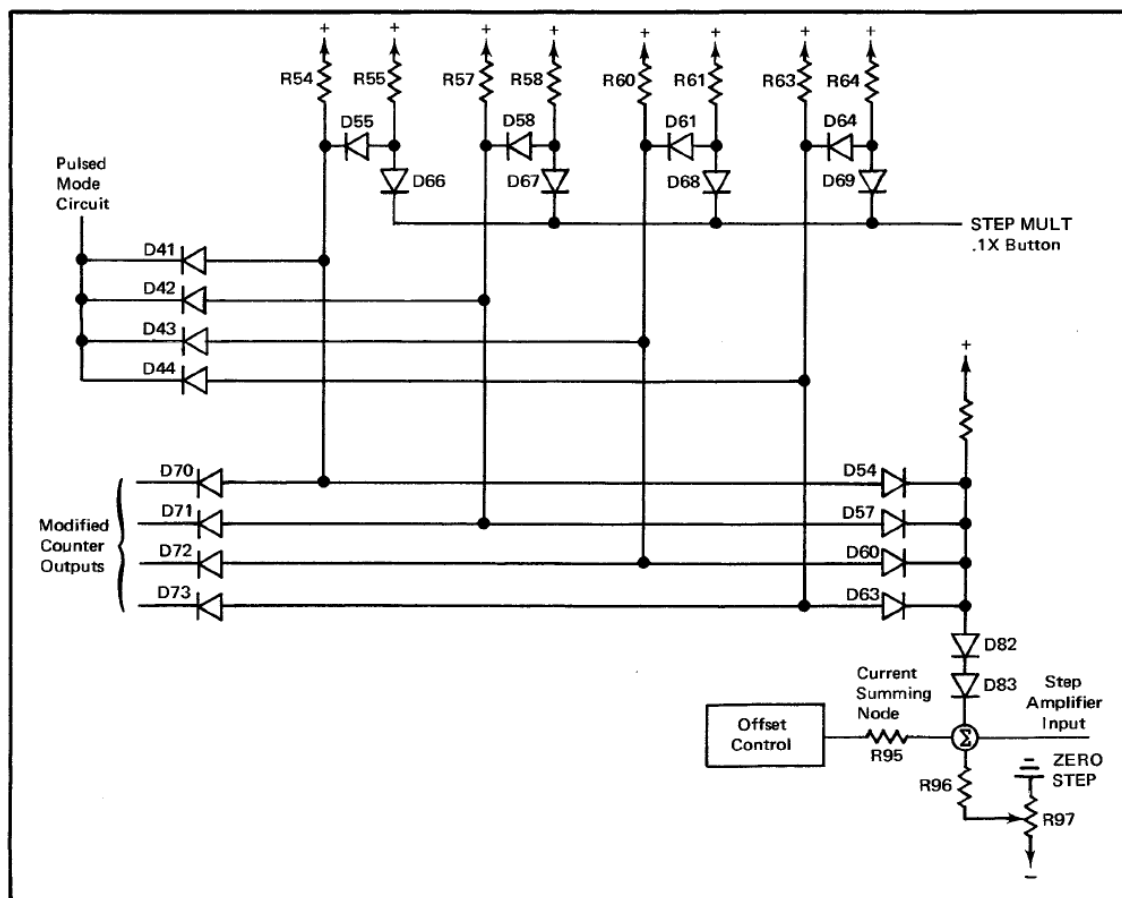


图 28. STEP GENERATOR D-A 转换器

第五章 示波管高压系统故障

4.4 好景不长

消除 STEP FAMILY 面板开关接触不良的故障以后本机已可以进行晶体两级管和晶体三极管的正常测试。然而好景不长, 刚刚拍完几张晶体管曲线的照片, CRT 光点和扫描线突然消失。

经检查内部电源供电系统又出现故障。但这一次故障和上一次不一样, 很多电压档降为 0V。查 Tek 576 Service Manual 提供的参考表格(图 4, 电源短路互查表, 该表格表示某个电压短路时其他各档电压的参考值)。经过核对, 似乎应该是-75V 电压短路。但是检查以后发现-75V 电压没有发生短路。

这次供电系统故障与上一次不一样, 感觉可以采用断开各板电压供电的方式去排查。排查的结果是: 如果断开高压线路板的+100V 供电, 各档电压恢复正常。如此, 非常容易想到的就是三个可能: 1) 高反压晶体管被击穿; 2) 高反压整流两极管被击穿; 3) 或是高压电容漏电。

4.5 高压电容漏电

高压线路板(图 30)有三个高压电容(0.0068uF/5kV)。检查以后发现其中一个漏电, 没有替换零件, 暂时断开。

4.6 Tek 576 全部功能恢复正常

断开高压电容 C888 以后开机测试, 电源供电系统恢复正常。几秒钟以后 CRT 光点和扫描线出现。仔细观察扫描线, 好像并没有因为缺省一个高压电容器而变坏。Tek 576 全部功能恢复正常。

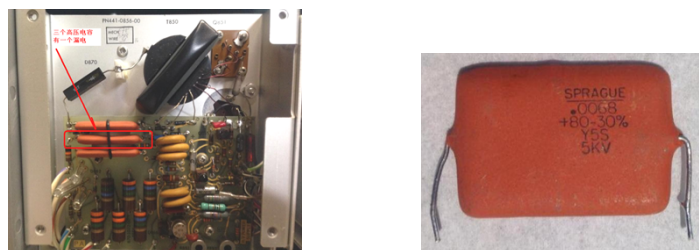


图 30. 高压线路板有三个高压电容(0.0068uF/5kV) 其中一个漏电

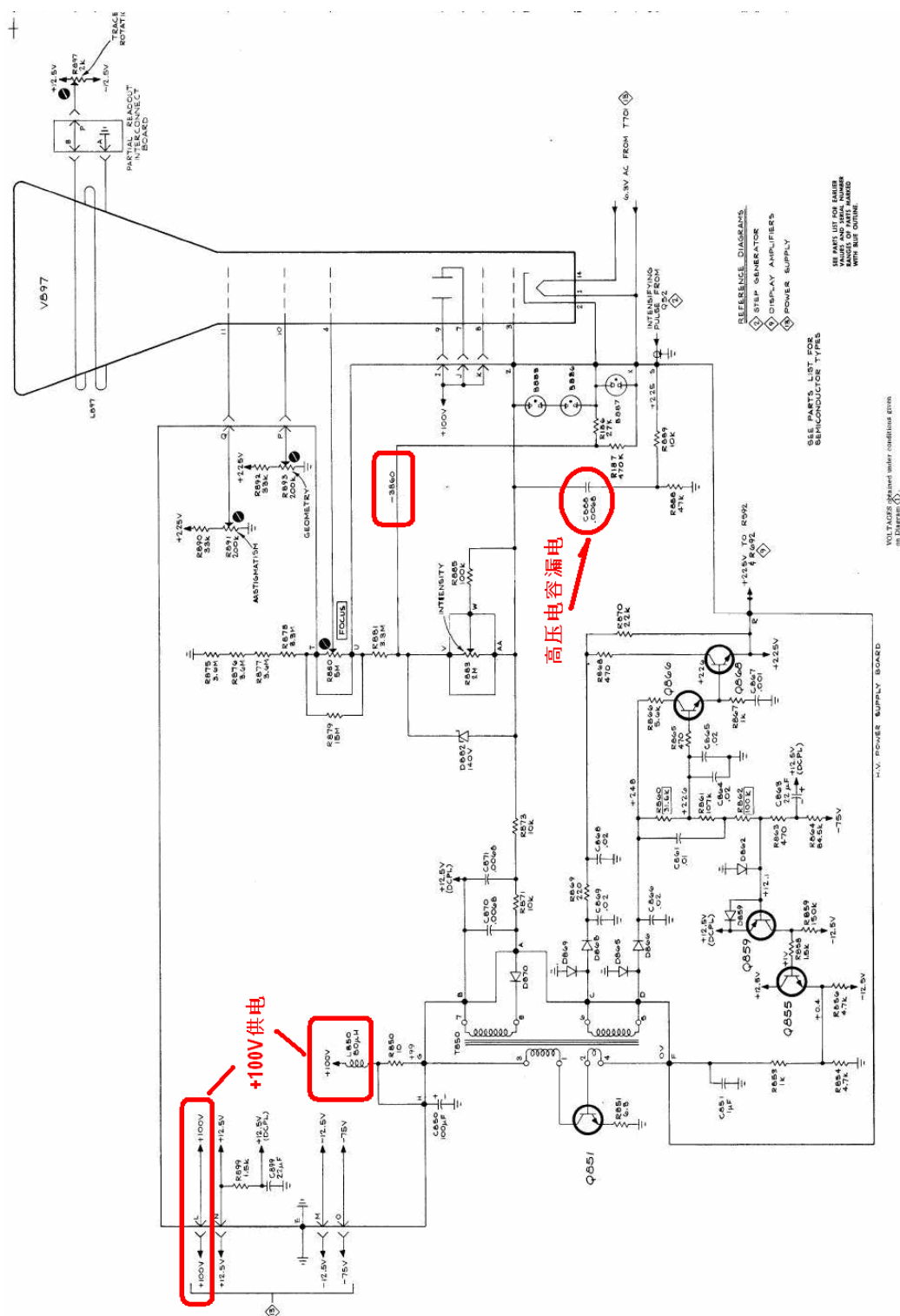


图 31. 高压产生线路板高压电容漏电

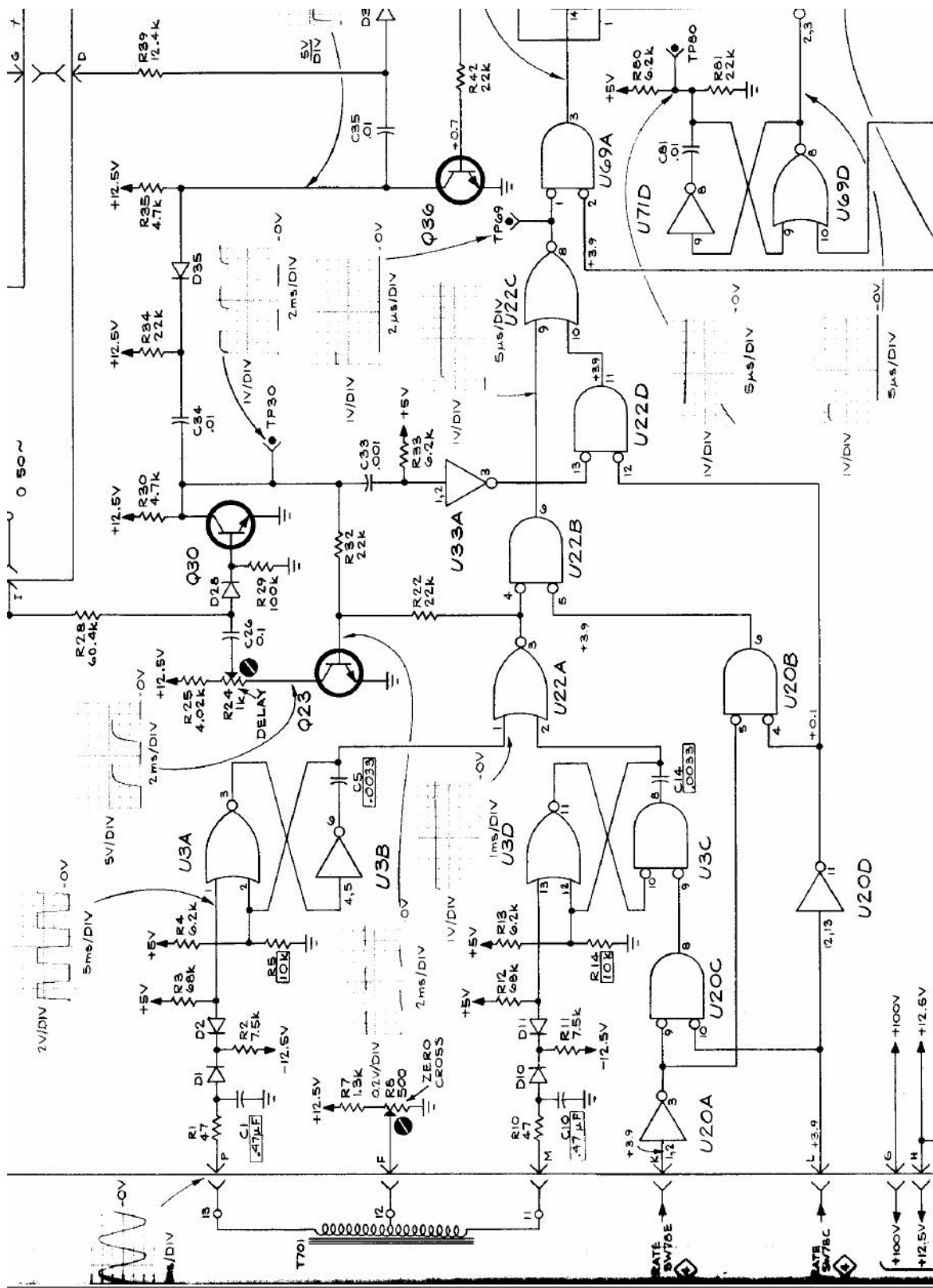
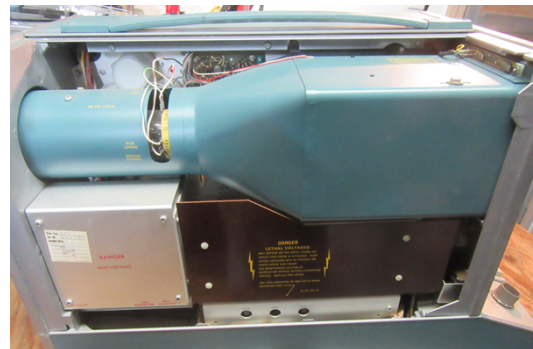
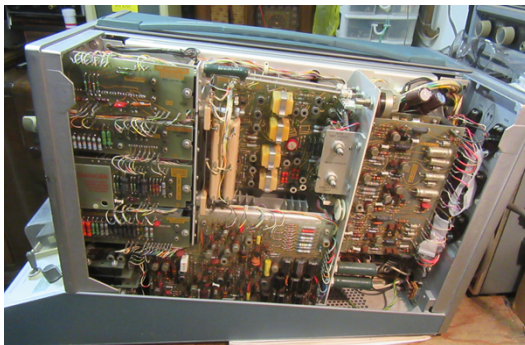


图 32. STEP GENERATOR CLOCK 线路

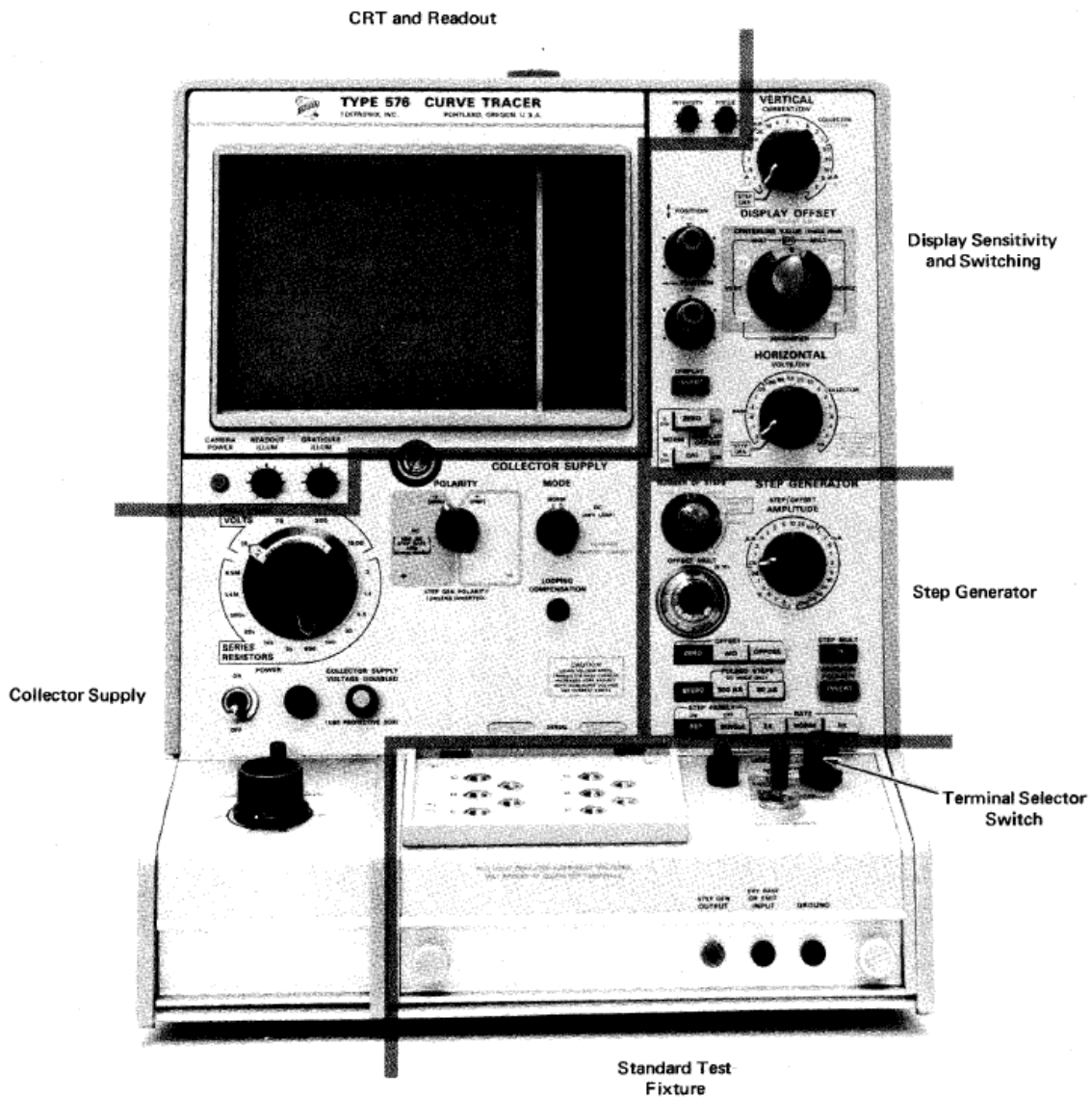
Appendix

1. Tektronix 576 Curve Tracer



2. Tektronix 576 Control Areas

- A) CRT and Readout
- B) Collector Supply
- C) Display Sensitivity and Switching
- D) Step Generator
- E) Terminal Selector Switch



3. Tektronix 576 Troubleshooting Chart

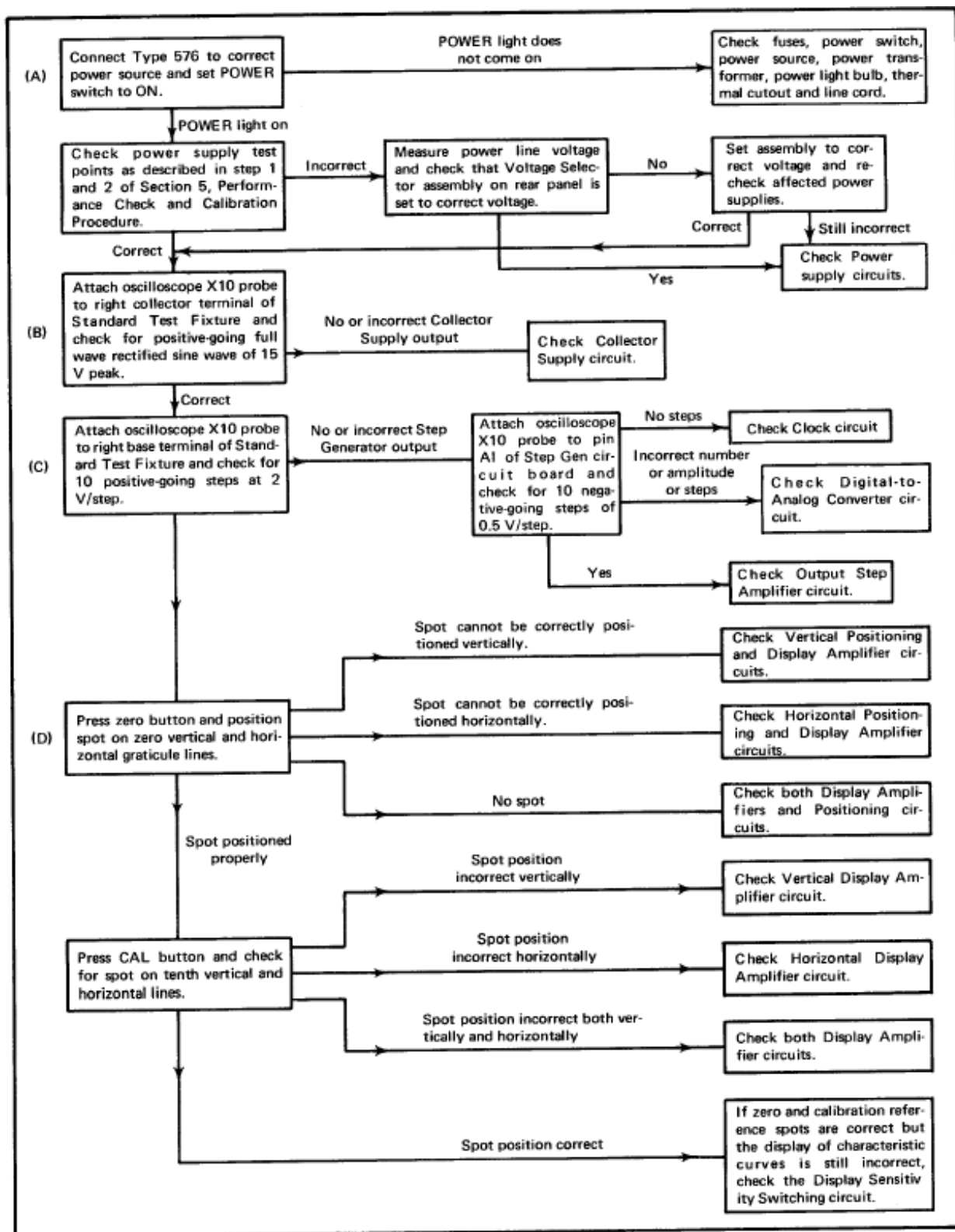


Fig. 4-3. Troubleshooting chart.

4. Tektronix 576 Curve Tracer 1969 Price

<https://jacmusic.com/Tube-testers/TEK-576/Tek-576-index.htm>

Prices of the TEK 576. From what I found, it was it least build for 21 years from 1969 to 1990, and last units were sold in 2000. Perhaps somebody has more information for me. In 1969 it was more expensive than a Chrysler Rambler 6-Cylinder, two door Sedan Coupe. In 1990 it was sold for the price of a Mercedes Benz. It seems as if they tried to stop sales of it, by price increases, but that didn't work.

1969 Price Comparison		
(Based on prices in effect Oct. 21, 1968. All figures are dealer make-ready.)		
COMPACTS		
	4-Door Sedan	2-Door Sedan, Coupe
Rambler 6	\$2,076	\$1,998
Rambler 440 6	2,218
Corvair 500 6
Falcon 6	2,316	2,266
Chevy Nova 6*	2,329	2,299
Valiant 100 6	2,337	2,290
Rambler Rogue 6

Catalog prices:

\$2125 (1969)
\$2800 (1973)
\$5200 (1977)
\$8775 (1982)
\$11455 (1985)
\$17050 (1989)
\$18440 (1990)