

检修 TEK FG-502 Function Generator

William Xu March, 2020

FG-502 是多功能函数发生器, Tektronix 公司 1973 年的产品. 见图 1. 数年以前我从旧货市场把 Tektronix TM-504 买来的时候它装在 TM-504 的第 1 个 Bay 上. 见图 3.



图 1. FG-502 当年的广告



图 2. 我的 FG-502 修复后的照片

The Tektronix TM504 is a four-bay mainframe for the TM-500 system. 它可以插入四个 500 系列的组合件. 当时这 TM-504 带有一个信号发生器 FG-502, 一个数字式多用电表 DM-502, 一个计数器 DC-504, 还有一个电源供给器 PS-503A. 这个 TM-504 组合了一个综合测试仪, 一般修理要用的仪器都在上面了. 可是非常不幸, 这个四个组合件中间没有一个是完好的. 本文叙述如何修好 FG-502 这个多功能函数发生器. 其他组件的修理将另文叙述.

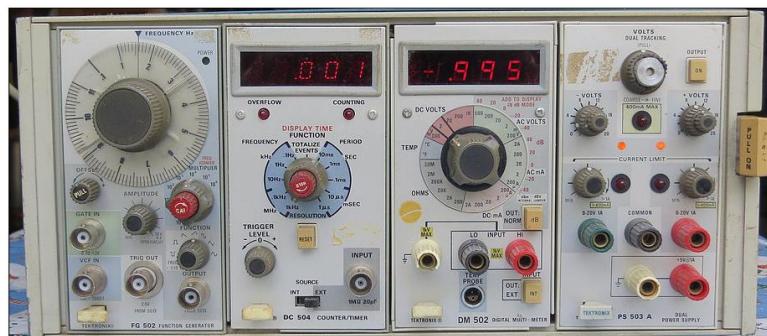


图 3. TM-504

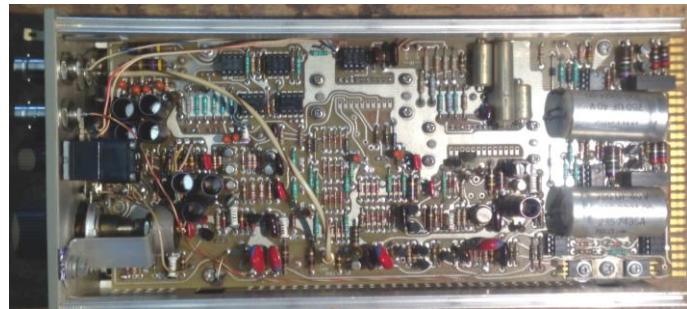
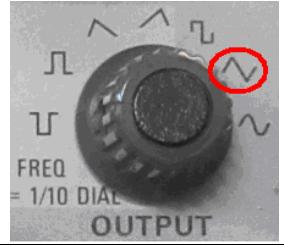


图 4. FG-502 内部

第一章 概述

FG-502 是 1974 年产的仪器，不算太老。从网上找到了 Service Manual (FG-502 INSTRUCTION MANUAL, Oct. 1973) 故而修理工作可以往下进行。Service Manual 中的 THEORY OF OPERATION 那一章非常重要，不看它修起来还真有点难度。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。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，产生的波形不正常 	本机原可以产生正负脉冲波，上下锯齿波，三角波，方波和正弦波七种波形。但是本机上电后有的波形有，有的波形没有，非常不正常。	阅读 Service Manual 中的 THEORY OF OPERATION 那一章。
2	从图 4 的 FG-502 函数发生器方框图，画出我自己的简易线路图，见图 6。	本机产生的函数可以分为两大类型：对称型和不对称型。 三角波，方波和正弦波等为对称型；正负脉冲波，上下锯齿波等为不对称型。	对称型波又以三角波为基础，先修理三角波。把波形开关拨到三角波位置。 
3	图 6 中充电电容 C 上的充电波形正负不	根据 THEORY OF OPERATION 的描述，对称型波以三角	充电电容上的充电波形电压正负不平衡，很可能是正负

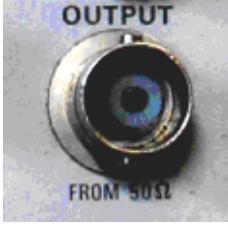
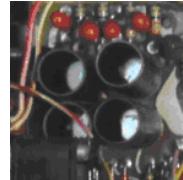
	平衡, (B) 点波形全部偏在零线以下.	波为基础, 方波和正弦波均由三角波滤波后产生.	充电常数不同或是正负充电电压不等.
4	经测量. 正负充电电压相等($+/ - 17.0V$)；充电电阻也一样(都是 $2.15K$).	既然正负充电常数同, 正负充电电压相等, 但是充电波正负不平衡, 那一定是切换开关的直流电平降到了零线以下.	据 THEORY OF OPERATION 的描述, 切换开关的直流电平应该以 $0V$ 为基线, 上下 $5V$ 的开关电压.
5	在(A)点的充电切换信号应是 $+5V/-5V$ 的方波, 但现在波形全部偏在零线以下.	据 THEORY OF OPERATION, $+5V/-5V$ 的充电切换信号方波是由 8 个两极管阵 (CR300, \cdots CR316) 钳位晶体管 Q292 的集电极电压产生. 见图 7.	图 7 中, 看到切换信号电压还受晶体管 Q315, 两极管 CR315 控制. 它们是 GATE 控制的一部分. 临时断开两极管 CR315, 看有什么反应?
6	断开两极管 CR315 后切换信号正常. 呈现以 $0V$ 为基线, 上下 $5V$ 的开关电压.	切换信号正常后查图 6 的(B)点, 三角波也正常了.	GATE 部分不工作不影响其他部分, 暂时断开两极管 CR315 继续往下检查故障.
7	机器最终的输出点 (OUTPUT) 三角波还是不正确 	查 FG-502 输出放大器(图 10)： 1) 放大器的输入端 (R460) 三角波正常 2) 在 AMLITUDE 的中心端 三角波上部被压缩削波 3) 机器最终的输出点 (OUTPUT) 三角波上部也被压缩削波	输出放大四个晶体管散热器互相碰到产生故障, 使波形失真. 注意到线路有输出负反馈, 因此 AMLITUDE 的中心端 三角波上部也被压缩削波. 调整晶体管散热器位置以后解决. 
8	三角波正常以后调节波形开关测试其他波形 	正负脉冲波, 上下锯齿波, 三角波, 锯齿波, 方波和正弦波七种波形全部正常.	机器最终修理完毕.

表 1. Tek FG-502 检修的简要过程

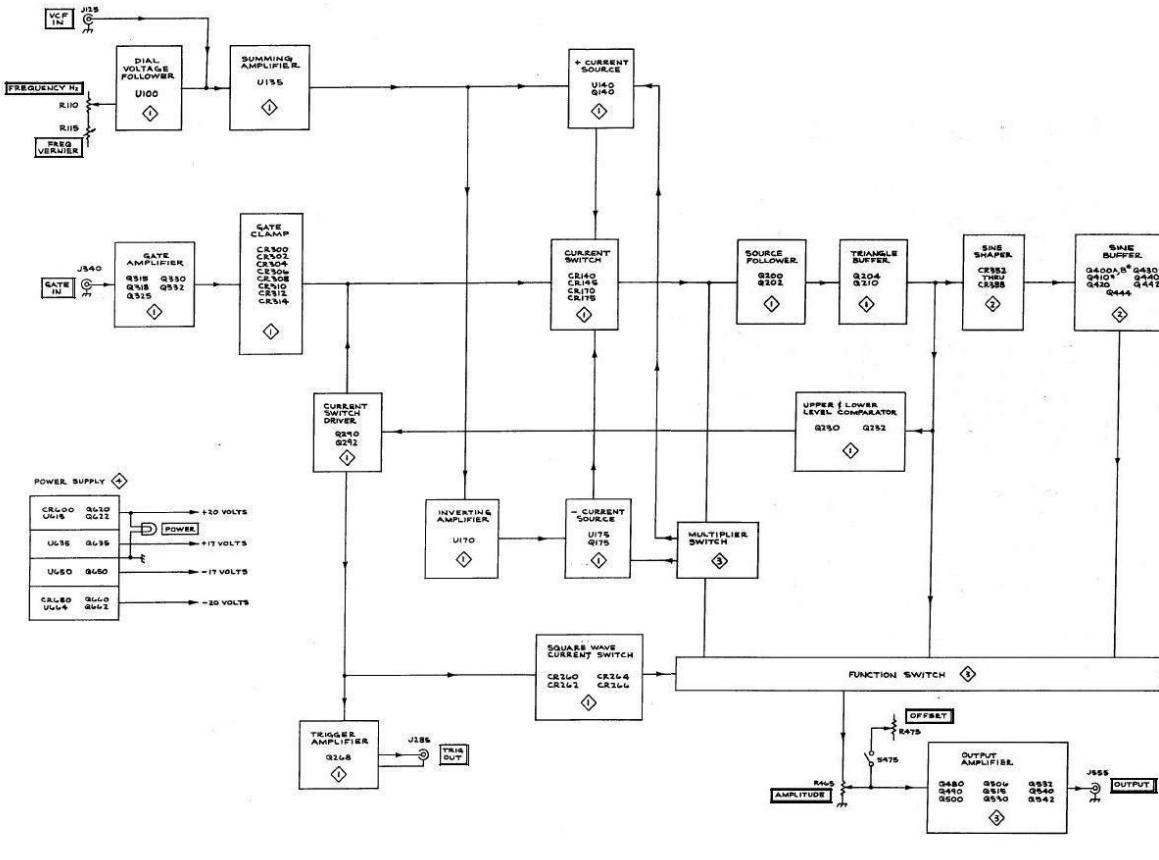


图 5. FG-502 函数发生器方框图

第二章 故障修理详述

2.1 原始故障

本机的原始故障是 AC 上电后产生的波形不正常。本机原可以产生正负脉冲波，上下锯齿波，三角波，方波和正弦波七种波形。但是本机上电后有的波形有，有的波形没有，非常不正常。仔细阅读 THEORY OF OPERATION (FG-502 INSTRUCTION MANUAL, P19)，明确了本机信号产生的原理：所有的波形都用三角波为基础处理后产生。因此决定先修理三角波：先把波形开关拨到三角波位置。

2.2 波形产生原理

FG-502 产生的函数可以分为两大类型：对称型和不对称型。

三角波，方波和正弦波等为对称型；

正负脉冲波，上下锯齿波等为不对称型。

按照手册的描写，所有的波形都以三角波为基础处理后产生。因此首先必须理解三角波的产生。FG-502 产生三角波的线路有点复杂。图 5 是 FG-502 函数发生器的方框图，但是它不便于线路分析。所以我修理的第一步是把三角波的产生简化成图 6 的线路。

波形的产生经常是使用电容器的充放电来实现的，FG-502 也不例外。在这个简化图中，我显示了产生三角波的核心部分：

- A) 充放电的电容器 C
- B) 正负向充电电阻 R+, R-
- C) 正负向充电电压 V+, V-
- D) 正负充电切换信号

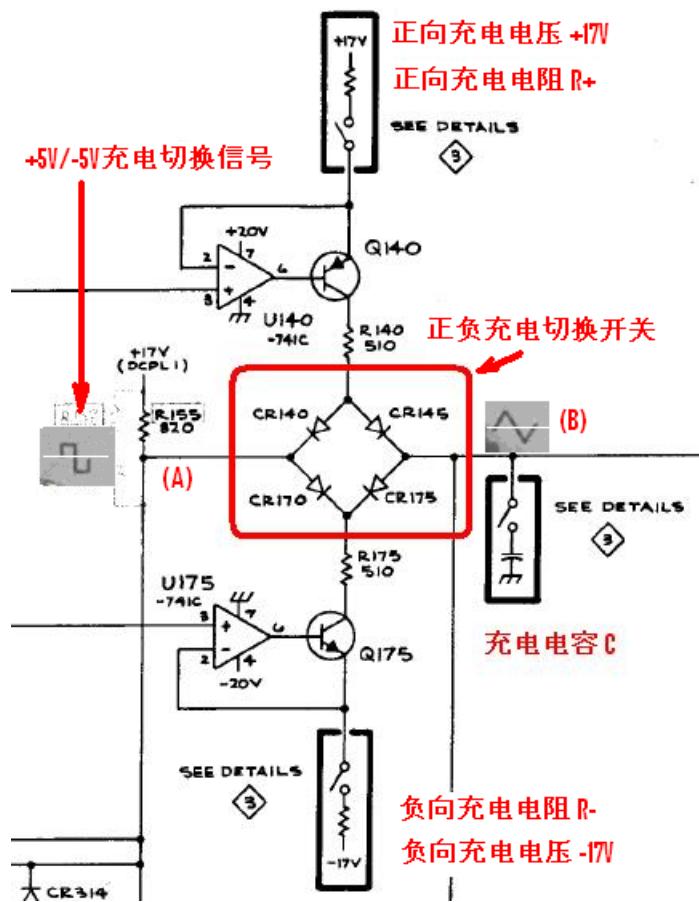


图 6. 我简化的线路图

下面描述三角波是怎么产生的 (见图 6) :

- 1) 在(A)和(B)两点中有四个两极管 (CR140, CR145, CR170, CR175) 他们组成一个正负充电切换开关, 用于给充电电容 C 充电.
- 2) 当充电切换开关正向开通的时候, 正向充电电压 +17V 通过正向充电电阻 R+给电容 C 正向充电.
- 3) 当充电切换开关负向开通的时候, 负向充电电压 -17V 通过负向充电电阻 R-给电容 C 负向充电.
- 4) 在(A)点加有充电切换信号, 它是+5V/-5V 的方波. 当方波是+5V 时, 切换开关正向开通, 电容 C 正向充电; 当方波是-5V 时, 切换开关负向开通, 电容 C 负向充电.

由 1) 到 4), 可以明白如果正负两边充电电压和充电电阻相等, 那么如在(A)点加上充电切换信号, 在(B)点以就可以得到对称的三角波.

2.3 故障修理详述

有了图 6 的简化线路就很容易分析故障. 示波器显示, 图 6 中充电电容 C 上的充电波正负不平衡, (B) 点波形全部偏在零线以下. 根据 THEORY OF OPERATION 的描述, 三角波应是以零线为对称的对称型波. 充电电容上的充电波形正负不平衡, 很可能是正负充电电阻不同或是正负充电电压不等.

经测量, 正负充电电压相等 (+/- 17.0V); 充电电阻也一样 (都是 2.15K). 既然正负充电常数同, 正负充电电压相等, 但是充电波正负不平衡, 那一定是切换开关的直流电平降到了零线以下. 据 THEORY OF OPERATION 的描述, 切换开关的直流电平应该以 0V 为基线, 上下 5V 的开关电压.

在(A)点的充电切换信号应是+5V/-5V 的方波. 但现在示波器显示波形全部偏在零线以下. 据 THEORY OF OPERATION, 充电切换信号方波的+5V/-5V 是由 8 个两极管阵 (CR300, … CR316) 钳位晶体管 Q292 的

集电极电压产生, 见图 7. 另外, 图 7 中还看到切换信号电压还受晶体管 Q315, 两极管 CR315 控制. 它们是 GATE 控制的一部分.

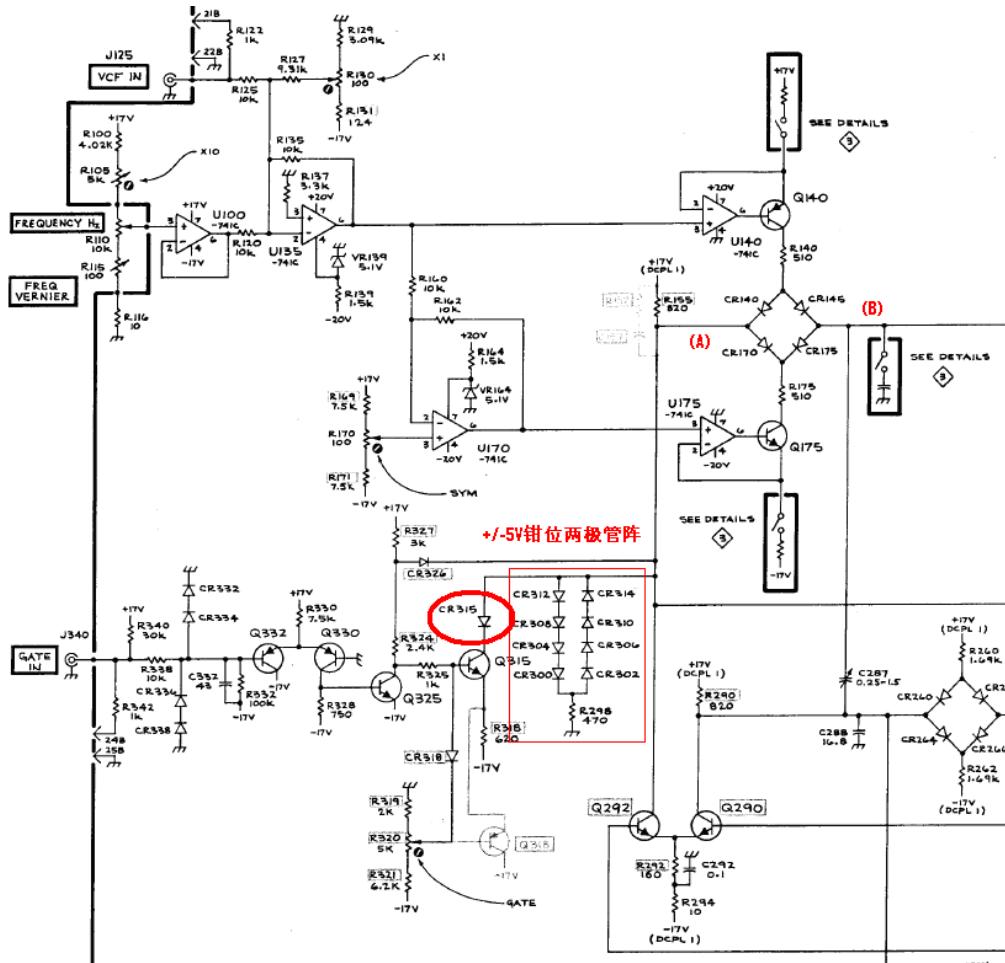


图 7. FG-502 三角波产生器部分图, CR315 断开以后三角波正常

临时断开两极管 CR315, 看有什么反应? 断开两极管 CR315 后切换信号正常! 呈现以 0V 为基线, 上下 5V 的开关电压. 切换信号正常后查图 6 的(B)点, 三角波也正常了.

GATE 部分不工作不影响其他部分，暂时断开两极管 CR315 继续往下检查故障。

很不幸, 机器最终的输出点(OUTPUT)三角波还是不正确, 这时故障应该在 FG-502 输出放大器. 查 FG-502 输出放大器(图 10). 以下 是使用示波器测量的结果:

- 1) 放大器的输入端 (R460) 三角波正常.
- 2) 在 AMLITUDE 的中心端, 三角波上部被压缩削波.
- 3) 机器最终的输出点 (OUTPUT) 三角波上部也被压缩削波.

从故障现象可以推断, 输出放大器的正向放大大部分有问题. 经过仔细检查, 发现放大器末的四个输出晶体管散热器互相碰到, 产生故障使放大器的正向放大失效, 因此输出波形正向失真. 注意到线路有输出负反馈, 因此 AMLITUDE 的中心端的输入三角波上部也被压缩削波.

调整晶体管散热器位置以后解决故障, 三角波正常.

三角波正常以后调节波形开关测试其他波形. 正负脉冲波, 上下锯齿波, 三角波, 锯齿波, 方波和正弦波七种波形全部正常. 机器最终修理完毕.

故障修理后七种输出波形:

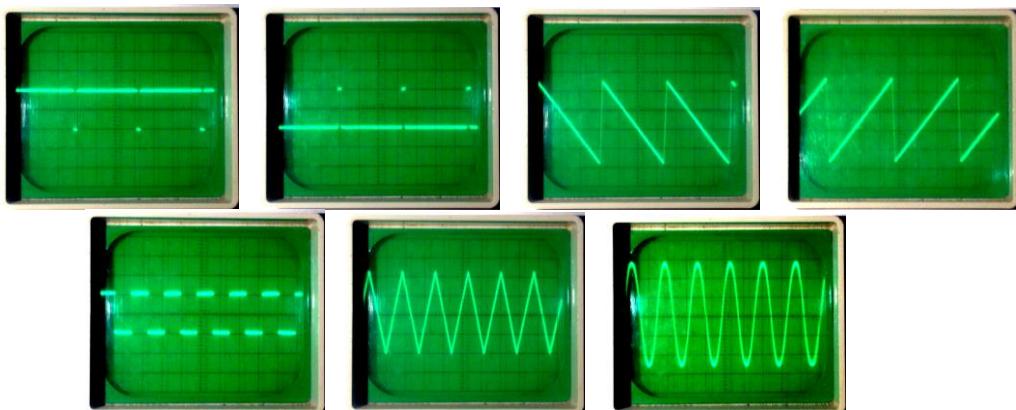


图 8. FG-502 七种输出波形

FG-502 输出波形的性能不错, 下表列出了一部分性能

Characteristics	Performance Requirements
Sinewave Distortion	< 0.5% from 10 Hz to 50 kHz.
Triangle Symmetry	Within 1 o/o from 0.1 Hz to 1.1 MHz
Triangle Linearity	Within 1 .0% from 0.1 Hz to 110kHz; Within 3% from 100 kHz to 1 .1 MHz

表 2. FG-502 三角波, 正弦波输出性能

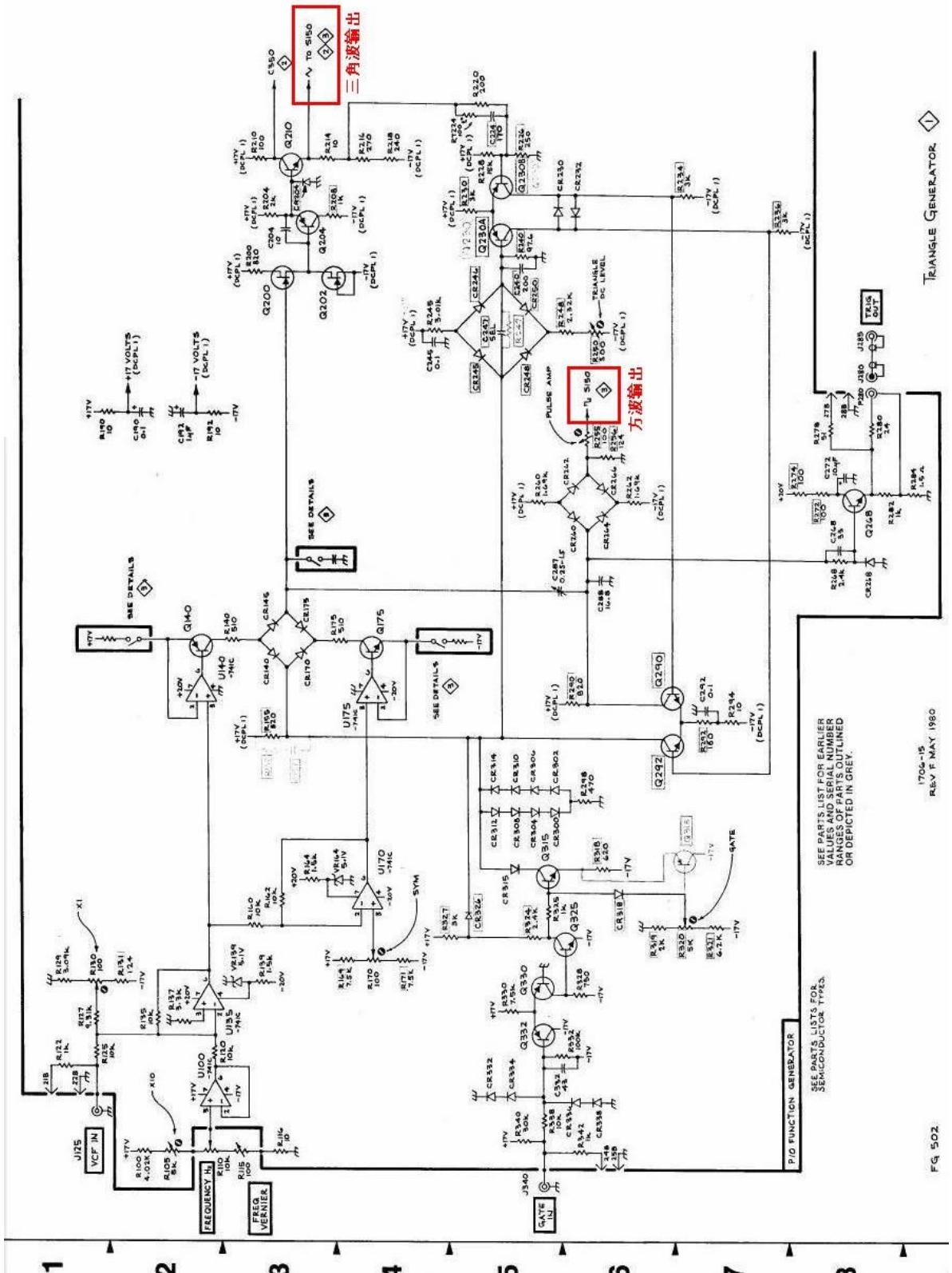


图 9. FG-502 三角波产生器

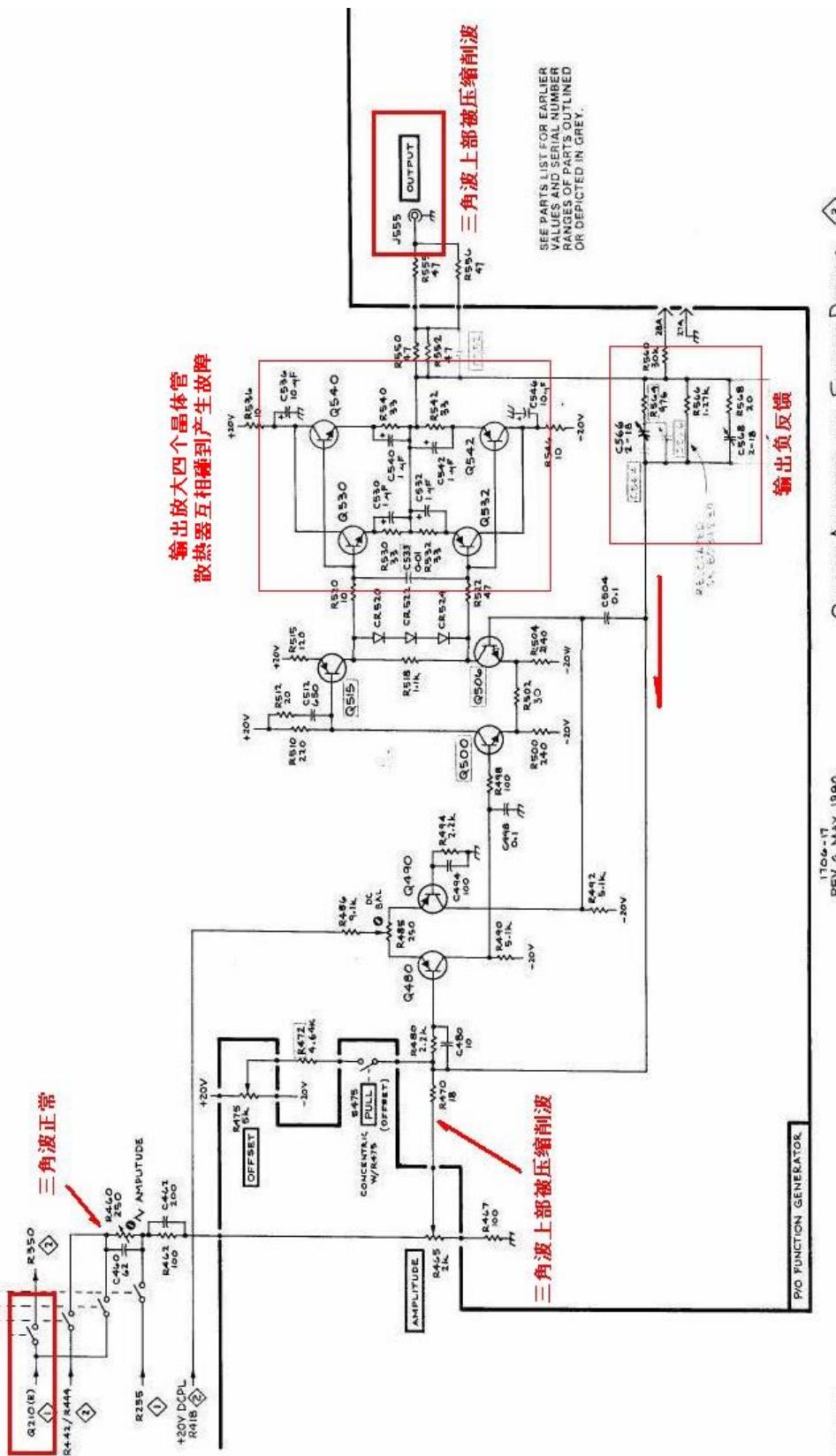


图 10. FG-502 输出放大器

Appendix:

1. FG-502 控制面板

CONTROLS AND CONNECTORS

① **OFFSET Control**

Pull and adjust for output waveform DC offset.

② **AMPLITUDE Control**

Adjusts amplitude of output waveform.

③ **GATE IN Connector**

Voltage applied permits gating of output waveform.

④ **VCF IN Connector**

Applied external voltage changes output waveform frequency.

⑤ **LATCH**

Pull to remove plug-in.

⑥ **TRIG OUT Connector**

Square-wave output for applications requiring an external trigger.

⑦ **OUTPUT Connector**

BNC connector for waveform output.

⑧ **FUNCTION Switch**

Selects output waveform.

⑨ **VERNIER Control**

Allows fine adjustment of output frequency.

⑩ **MULTIPLIER Switch**

Sets basic frequency range.

⑪ **FREQUENCY Hz Dial**

Multiply dial reading by MULTIPLIER setting for frequency out.

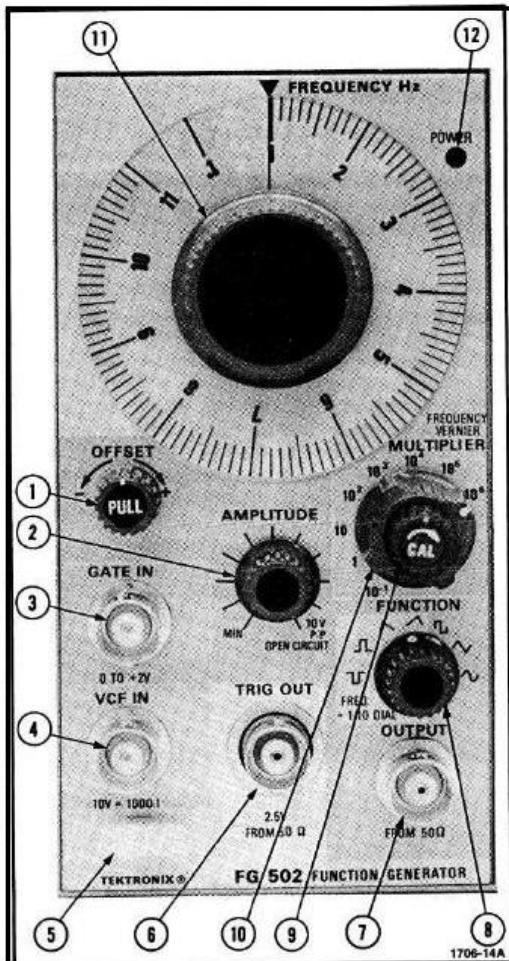


Fig. 2-2. Controls and Connectors.

⑫ **POWER On Pilot Light**

Illuminated when power is applied to unit.

图 11. FG-502 控制面板

2. FG-502 修理趣闻

发现 46 年以前的装配错误 — 假焊的晶体管.

在检修(A)点和(B)点的三角波时(图 12)，曾经怀疑 Q140, Q175 两个晶体管有问题，所以对此做了仔细检查。没有料到这两个晶体管在印刷板上竟然都是假焊接，轻轻一拔就取下来了！再仔细看一下这两个晶体管的六条腿都是金色的没有上过焊锡。

相信 1973 年的时候装配线上都已经用波峰焊生产线工艺了，没有焊接上一定是这两个晶体管各腿外涂料不一样的原因。照此推理，这条生产线上生产的其他 FG-502 也差不多，Q140, Q175 两个晶体管可能全是假焊的！

开始的时候我很高兴，以为故障点找到了。很可惜这个不是故障点。虽然假焊 46 年，可直至今天这两个晶体管对印刷板接触仍然非常良好，难以相信。

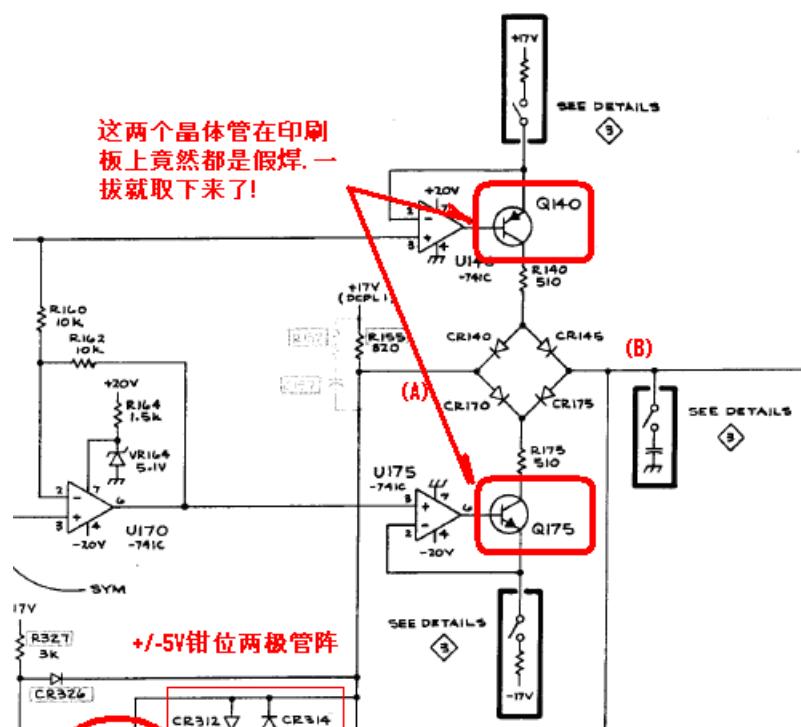


图 12. 发现假焊的晶体管 Q140, Q175