

带宽直流放大器

参赛队号：

宽带直流放大器 (C 题)

摘要

本作品主要由三个模块电路构成：前级放大电路、后级功率放大电路和单片机显示与控制模块。在前级放大电路中，用宽带可控增益运算放大器 AD603 两级级联放大输入信号以达到足够的电压增益，再经过后级功率放大电路提供足够的功率输出。AT89S52 单片机的显示、控制和数据处理模块除可以程控调节放大器的增益外，还可以预置并显示输出电压增益及放大器的带宽。作品完成了题目的基本要求和大部分发挥要求。

运用在负载电阻与地之间串接电感的方法补偿部分由幅频特性所带来的增益损失，增强了 AGC 作用，并扩展了整体电路的通频带，同时还起到相位补偿的作用，藉此提高整体电路的性价比，是本设计的一大特色。

一、方案论证与比较

1. 可控增益放大器部分

方案一：放大电路可由分立器件搭建而成，由于 60dB 的增益要求较高，单级放大电路较难实现，故可采用多级放大电路级联。输出端采用三极管射极包络检波产生反馈电压调节前级电路实现自动增益的调节。本方案由于采用分立元件较多，而且必须采用高速 BJT 或 FET，电路较为复杂，设计难度大，工作点难于调整，增益的定量调节、AGC 自动增益控制和高带宽均非常困难，而且电路稳定性差，容易产生自激现象，不可控因素较多，调试难度大，故不予考虑。

方案二：为了易于实现发挥部分中要求的最大 60dB 的增益调节，本着优质低价的原则，可以采用较为廉价的 D/A 芯片 DAC082，利用 DAC0832 当中的电阻 T 型网络改变反馈电压，进而控制环路增益。同时考虑到 DAC0832 是一种廉价的 8 位 D/A 转换芯片，其输出 $V_{out} = D_n \times V_{ref} / 256$ ，其中 D_n 为 8 位数字量输入的二进制值，可满足 256 挡增益调节，满足题目的精度要求。它由 CMOS 电流开关和梯形电阻网络构成，具有结构简单、精确度高、体积小、控制方便、外围布线简化等特点，故可以采用 DAC0832 来实现信号的程控衰减。但由于控制的数字量和最后的增益不成线性关系而是成指数关系，造成增益调节不均匀，精度降低，故放弃此方案。

方案三：由于题目要求放大电路的增益可控，以此可以考虑直接选取增益可调的运放实现，如 AD603。其内部由 R-2R 梯形电阻网络和固定增益放大器构成，加在其梯型网络输入端的信号经衰减后，由固定增益放大器输出，衰减量是由加在增益控制接口的参考电压决定；而这个参考电压可通过嵌入式系统进行运算并控制 D/A 芯片输出控制电压得来，从而实现较精确的数控。此外根据芯片手册，AD603 在模式二工作条件下能够提供由直流到 30MHz 的工作带宽以及 0-40dB 的增益，单级实际工作时可提供超过 20dB 的增益，两级级联后即可得到 40dB 以上的增益，通过后级放大器放大输出，在高频时也可提供超过 60dB 的增益。这种方法的优点是电路集成度高、总体电路较为简单，根据芯片手册即可迅速搭建高性能的实际电路，所需要解决的问题就是极间的调试及外围电路的去耦，如能正确使用合理的级联、阻抗匹配及去耦技术，其工作量在四天三夜之内应该可以完成，而且总体思路较为清晰、控制方便、易于数字化，便于使用嵌入式系统进行处理，故此方案可行性较高。

综上所述，选用方案三。利用可变增益宽带放大器 AD603 来提高增益，AGC 稳定性高，增益可控范围大，加入后级负反馈互补输出电路，完成增益带宽积的提高与功率提升。利用 AT89S52 单片机和数字处理技术对增益和带宽进行预置并显示。因为 AD603 是一款低噪声、精密控制的可变增益放大器，温度稳定性高，最大增益误差为 0.5dB，满足题目要求的精度，其增益 (dB) 与控制电压 (V) 成线性关系，因此可以很方便的使用 D/A 输出电压控制放大器的增益。

2. 后级功率放大部分

由两片 AD603 级联构成的前级放大电路，对不同大小的输入信号进行前级放大。由于 AD603 的最大输出电压较小，不能满足题目要求，所以前级放大信号需经过后级放大达到更高的输出有效值。

方案一：使用分立元件自行搭建后级放大器。使用分立元件设计困难，调试繁琐，本题要求信号频谱宽度较大，普通晶体管高频响应较差，即便使用高速

功率管稳定性依然较差，必然对反馈信号造成影响，且容易产生自激而又较难消除，不可控因素较多，因此放弃此方案。

方案二：使用集成电路芯片。使用集成电路芯片电路简单、使用方便、性能稳定、有详细的文档说明，只需按照题目要求的指标选取合适的芯片即可。而且本题题眼并不在此，因而不应将主要精力放在此处，故而使用集成电路芯片是快速完成后级功率放大部分的最佳选择。

二、系统设计

按照题目的要求，结合前期的方案论证比较，我们小组充分利用模拟系统与数字系统各自的特点，发挥其优势，采用单片机预置和控制放大器增益的方法，大大提高了系统的精度和可控性；后级放大器使用由高带宽的集成电路芯片设计的功率放大器，提高了输出电压有效值，再辅以电阻与地之间串接的小电感在信号高频时提供的额外阻抗，进一步提高了输出电压有效值及带宽。通过单片机的数字算法控制使信号能够得到最合理的前级放大，使其放大倍数精确。图 1 所示即为本系统原理框图。

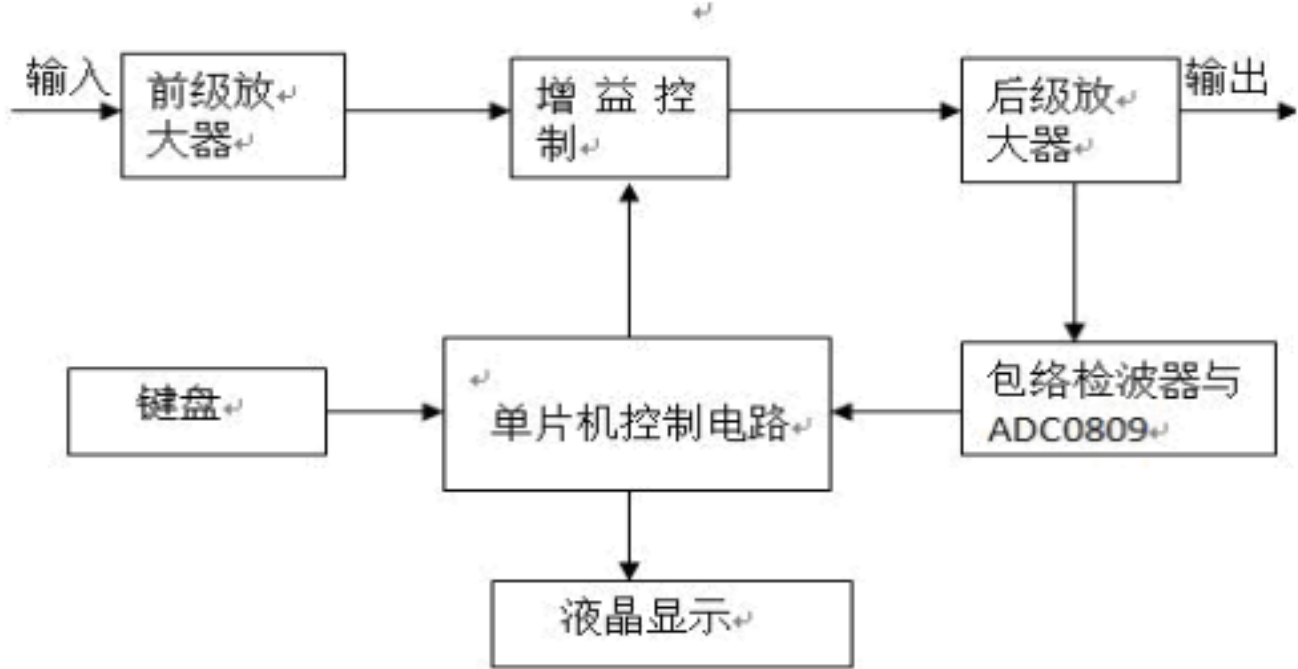


图 1

输入信号通过前级可控增益放大，放大倍数由单片机通过 D/A 转换提供的电压控制。AD603 在模式 2 时的 $V_g(=V_1-V_2)$ 根据公式 增益 $GAIN=40 \times V_g+20(\text{dB})$ 来设定，而在 AGC 模式下，此控制电压 V_g 是由 AGC 电路的反馈电压得到，不受单片机控制。经过前级放大后的信号最后经过后级放大得到需要的输出信号，前级和后级增益的搭配，都是经过精确的测量和计算的。输出电压经峰值检波电路得到，反馈到单片机，经运算和线性补偿得到有效值，同时又由单片机进行显示。为了使得人机交互界面更加人性化，我们决定采用 12864 大液晶进行显示，由于本系统中单片机资源过剩，而控制所需要的按键又比较少，所以我们采用独立按键控制，以降低软件设计的复杂程度。工作流程可简单概括为：采用键盘输入初值，然后通过 DA 转换来控制 AD603 的增益并通过显示器件来显示预置初值，从而达到人机交互的目的。

三、主要电路以及原理分析

1. 直流稳压电源

本电源采用桥式整流、大电容滤波、三端稳压器稳压的方法，产生各种直流电压，我们设计的电路需要的电压为正负 15V 和正负 5V，而市面上很容易买到相应的固定输出的三端稳压芯片，如 LM7815、LM7915、LM7805、LM7905。

脚号	名称	功能描述
1	GPOS	增益控制的正电压端
2	GNEG	增益控制的负电压端
3	VINP	输入端(同相)
4	COMM	运放共地端
5	FEBK	外接电阻反馈端
6	VNEG	负电源
7	VOUT	输出端
8	VPOS	正电源

图 5

一般,利用反馈网络 (VOUT 与 FDBK 端的连接方式)来设计 AD603 的增益时 ,可设置为一下三种模式 :

模式一：将 VOUT 与 FDBK 短路 ,即宽频带模式 (90MHz 带宽)时增益变化范围为 -10dB ~ +30dB ;

模式二：VOUT 与 FDBK 之间外接一个电阻 REXT, FDBK 与 COMM 端之间接一个 5.6pF 的电容器用于频率补偿 .根据放大器的增益关系式 ,选取合适的 REXT,可获得所需要的模式一与模式三之间的增益值 .当 REXT=2.15k 时,增益变化范围为 0 ~ +40dB ;

模式三：VOUT 与 FDBK 之间开路 , FDBK 与 COMM 连接一个 18pF 的电容器用于扩展频率响应 ,该模式为高增益模式 ,增益范围为 10dB ~ 50dB,带宽为 9MHz。

参考以上三种模式 , 我们选择了使用模式二作为两个 AD603的工作模式 , 此模式兼顾带宽与增益 ,其原理电路如图 6 所示。

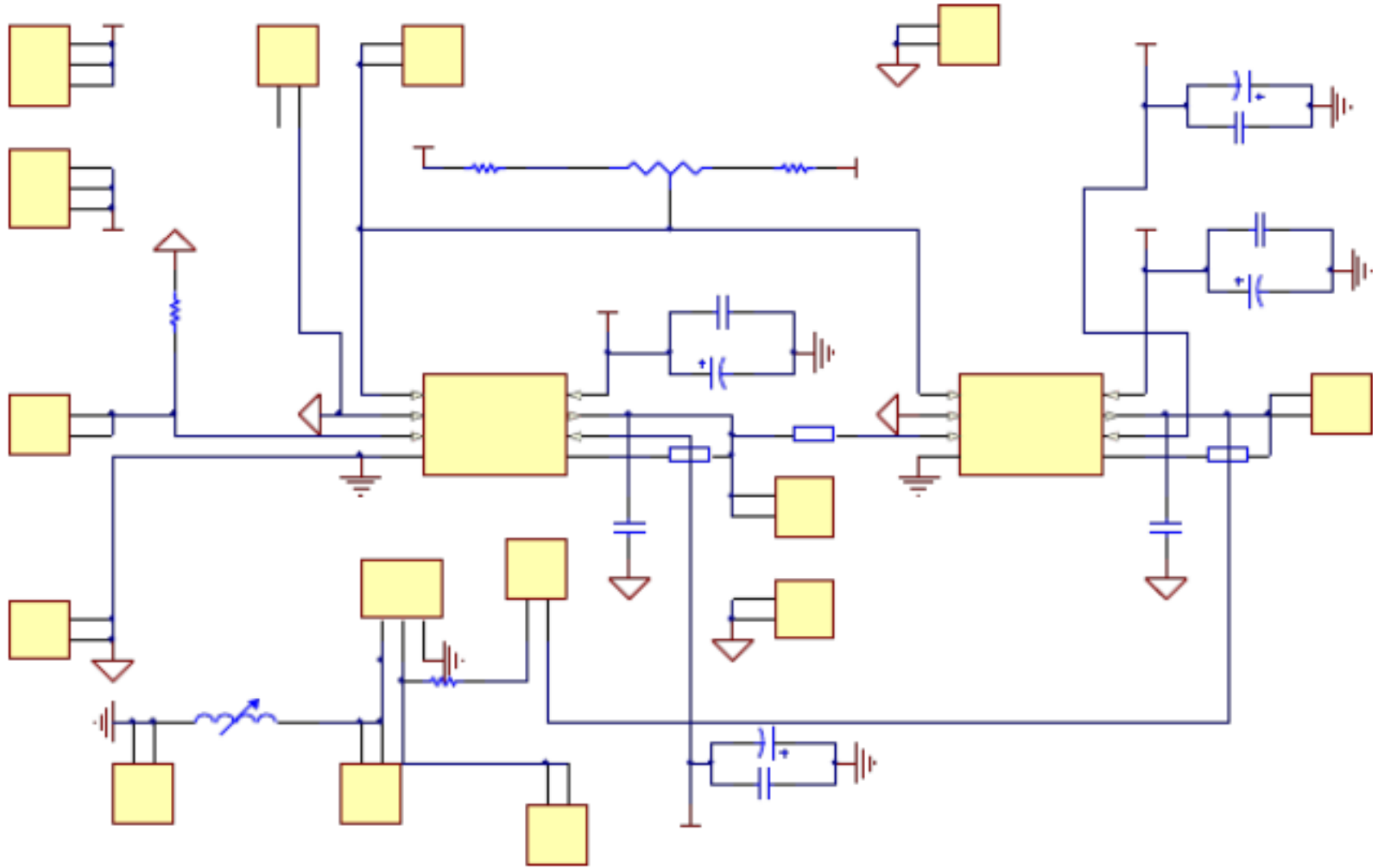


图 6

使用 AD603制作前置放大器时 , 主要考虑了共模干扰问题。 前置放大器采用

单端输入方式，这时要求运算放大器的另一个输入端与信号输入端阻抗平衡，否则在相位相同的电磁干扰情况下，将产生共模信号输出。AD603 输入阻抗为 100 Ω ，低的输入阻抗将带来如功率、阻抗匹配等若干问题，因此我们在输入前级用 AD847 搭设了射极跟随器，用以提高输入阻抗，使输入阻抗大于 50 Ω 。

有时由于接收环境的不同、外界干扰的影响，接收到信号的强弱可能变化很大。特别是在研究本题要求的信号时，由于频带宽、电磁干扰严重，不可能无失真地放大。为了较好地解决这个问题，可使用自动增益控制电路，即 AGC 电路。它取出放大器输出的峰值作为增益的控制电压，使最终输出的电压信号保持在某一峰峰值之间，输出较稳定的信号。

在图 6 中，两级 AD603 可构成具有自动增益控制的放大电路，其输出信号送到由 2N3904 和 R7 组成的三极管包络检波器当中（图 6 中未画出，我们制 PCB 版时只先做了前级放大），用于检测输出信号幅度的变化。由 C11 形成自动增益控制电压 V_{agc} ，流进电容 C11 的电流为 2N3906 和 2N3904 两管的集电极电流之差，而且其大小随第二级 AD603 输出信号的幅度大小变化而变化，这使得加在两级放大器 1 脚的自动增益控制电压 V_{agc} 随输出信号幅度变化而变化，从而达到自动调整放大器增益的目的。

3. 手动增益预置和控制的实现

开环增益手动控制的基本思路是由单片机数字程控，经 D/A 转换产生控制输出电压，加到图 5 中两块 AD603 的 1 脚来控制。我们本想利用 ADUC812 单片机自带的 D/A 转换功能，但经实践发现其 D/A 输出很不稳定，难以滤除，而控制电压要求纹波非常小，否则就会给输出信号带来很大噪声。故我们改变了设计，考虑使用电阻网络 AD7520 进行控制，其原理如图 7 所示。单片机通过 74LS373 给 AD7520 赋值，电阻 R0 用于调节 AD7520 的参考电压，从而由 AMP1 得到 D/A 结果，再由 AMP2 幅度搬移至前放所需的控制电压 -0.5 ~ +0.5V 之间，提供给 AD603。

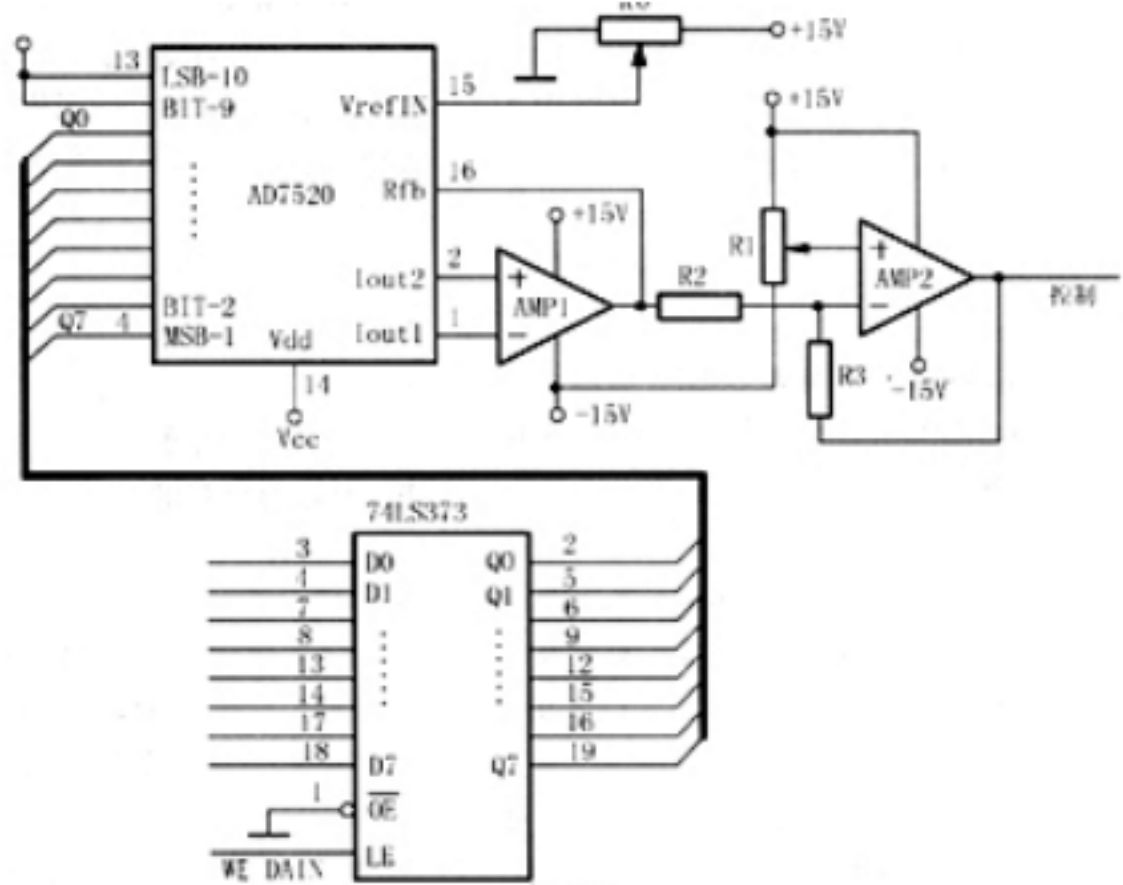


图 7

4. 后级放大原理

后级放大电路由 AD847 构成的电压跟随器构成，因为前级放大器仅能放大电压，而不能放大电流，如果直接带上 50 Ω 负载会导致输出电压迅速降低。而加入电压跟随器后电压输出不变，但是电流放大能力大大增强，从而保证了足够

的功率输出。

5. 峰值检波电路

将取样回来的输出电压经过二极管和电容进行峰值检波，并经过高精度运算放大器进行衰减和保持后输入 A/D 转换器转换为数字信号进行显示，这样精度可以得到保证，不过会有一定的管压降，使用检波用肖特基二极管大概会有 0.2V 压降，完全可以通过单片机进行显示上的补偿。

6. 单片机系统

单片机是整个放大器控制的核心部分，它主要完成以下功能：接收用户按键信息以控制增益；接收峰值检波电路的反馈电压以计算有效值；对 AD603 的增益控制电压进行控制。程序流程图如附录中图 8 所示。各个功能由不同的模块实现：

键盘检测模块 记录用户对键盘的操作，将设定的增益数值记录下来。

控制电压模块 根据用户对增益的设置，查表得到对 D/A 转换器的控制字串，输出给 D/A 转换器以产生精确的控制电压。

有效值模块 由于输入输出是标准的正弦信号，峰值检波电压值根据经验公式 $V_{\max} = 2V_{\text{rms}}$ 计算，并经过线性修正得到有效值，经测试显示误差不超过 0.5%。显示模块 按用户需要将预置增益值或者有效值显现在液晶屏上。

四、总结

本次设计通过综合运用模电、数电、单片机等技术完成了基本设计要求，发挥部分大部分达到设计要求。下面就设计当中出现的一些问题谈谈自己的体会。

存在的问题及未完成的原因：高频干扰还是设计当中存在的最大障碍。本设计偏重于模拟电路处理，需要得到很高的增益和较小的噪声。采用多种抗干扰措施来处理前级放大，选用集成芯片作增益控制，利用高带宽集成芯片作后级功率放大，对于基本的理论知识和实际动手能力提出了很高的要求，从指标来看我们各方面的指标基本都达到了或超过了赛题要求。由于时间仓促，用来测量输出电压有效值的峰值检波电路没有试验成功，实际增益为 45.667dB，离发挥要求还有一定差距。在软件上，我们参考了一些资料，编制了我们的程序。

最后的结果让我们有些激动，想到我们这么长时间的付出终于有了收获。心中有说不出的高兴。这几天的竞赛我们确实付出了全部的精力，尽了我们最大的努力，也从中学到了不少的知识。这些知识都是书本上所学不到的，我们也体会到了团队的力量，一个人的力量是有限的，但一个团队却可以创造一个人无法达到的力量。也正是我们能够同心协力，才使得我们最后有所收获。虽然比赛只有仅仅的四天的时间，但我们学到的知识是我们以前花更多时间都学不到。我们组员之间的感情也越加深厚了，通过这次的比赛，以及这么长时间的培训，对于电子竞赛又有了不一样的认识，通过参与电路的设计与制作，学会了很多，包括硬件电路的设计，电路板的制作，程序的编写以及小车硬件的制作，特别是我们队队员之间的合作以及与知道老师的交流，都受益非浅。

我想用我的亲身经历告诉那些准备参加竞赛的同学，只要你付出了，就一定会有收获！哪怕得不到奖项，你在竞赛培训中所学习到的知识，那都是受用一生的！

在以后的学习和工作中，我们将从实践中不断的完善提高自己！

最后对各位评委老师表示最最衷心的感谢，感谢各位老师对我们的悉心指导！

(附录)

一、系统调试及测试结果

1. 测试条件：

信号发生器：GFG-8250A

示波器：VP-5220A-1 20MHz

万用表：粤制 MC 03000125

负载电阻 :RL=50Ω

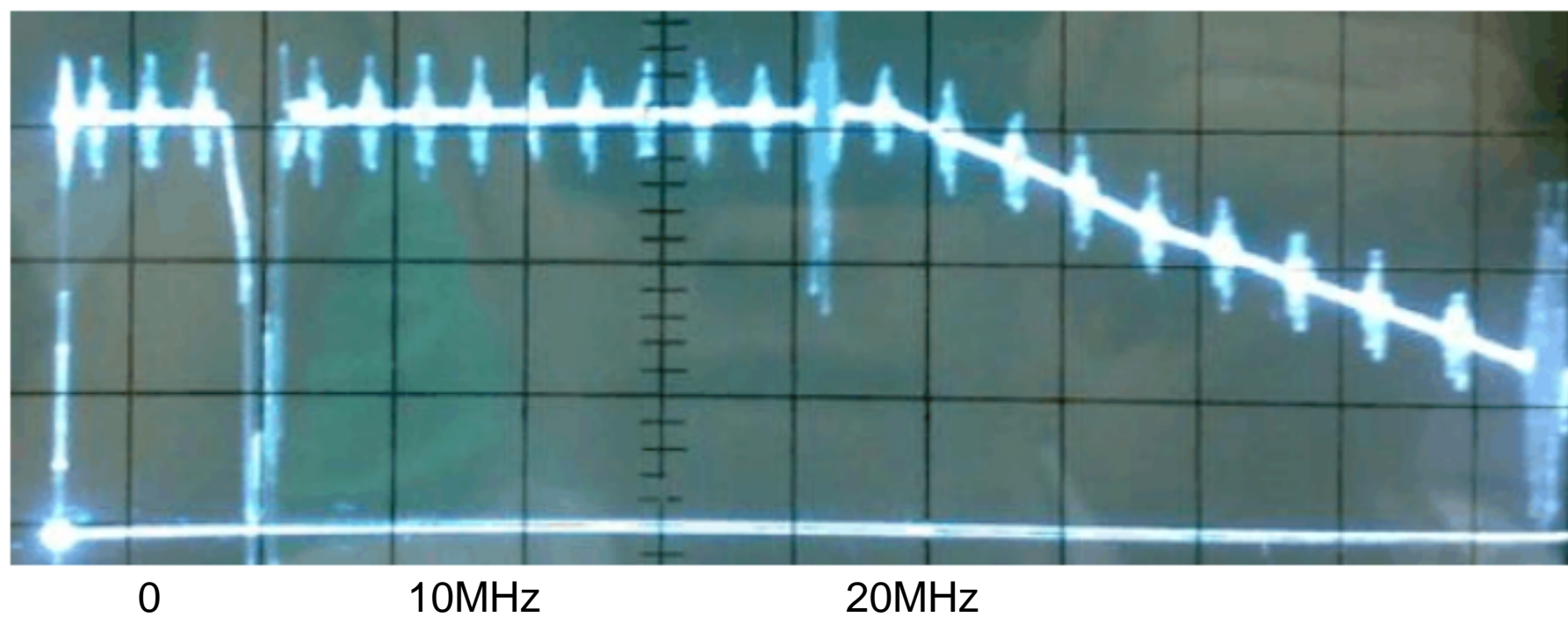
测试方法：将各部分电路连接起来，先调整 0dB，使输出信号幅度与输入信号幅度相等。接上 50Ω的负载电阻进行整机测试。

2.测试结果：

题目基本要求	发挥要求	作品实际性能
电压增益 A_v 40dB，输入电压有效值 V_i 20mV。 A_v 可在 0~40dB 范围内手动连续调节。	最大电压增益 A_v 60dB，输入电压有效值 V_i 10mV。	3dB 通频带 15.213MHz，电压增益 45.677
最大输出电压正弦波有效值 V_o 2V，输出信号波形无明显失真。	在 $A_v = 60\text{dB}$ 时，输出端噪声电压的峰 - 峰值 V_{ONPP} 0.3V	噪声电压小于 0.3V 峰 - 峰值
3dB 通频带 0~5MHz;在 0~4MHz通频带内增益起伏 1dB	3dB 通频带 0~10MHz；在 0~9MHz 通频带内增益起伏 1dB	3dB 通频带 15.213MHz，9.309MHz 时增益比最大值小 1dB
放大器的输入电阻 50Ω，负载电阻 (50±2) Ω	最大输出电压正弦波有效值 V_o 10V，输出信号波形无明显失真。	最大输出有效值大于 10V
自制电源	进一步降低输入电压提高放大器的电压增益。	自制稳压电源，
无	压增益 A_v 可预置并显示，预置范围为 0~60dB，步距为 5dB	可实现步进调节增益，并可用液晶显示，预置值和实测值的误差，小于 1dB
无	其他	采用单片机、数字图像处理技术，增加抗干扰措施，合理布线减少干扰，模拟地和数字地分开处理，射随器和对耦电路的合理运用。

(附录)

二、扫频仪显示结果



三、程序流程图

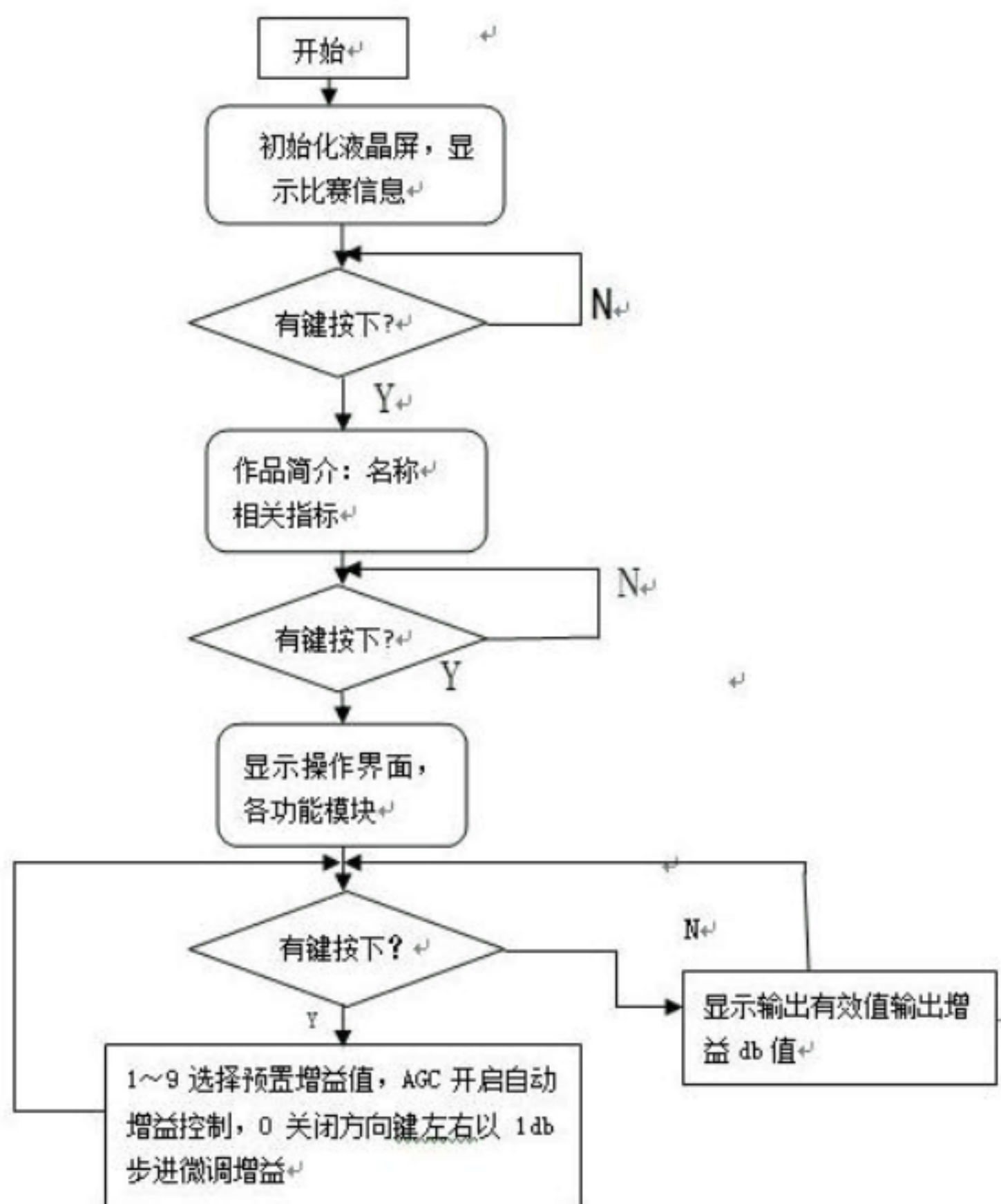


图 8

(附录)

五、关于本作品中采用的几处技巧与特色

1. 跳线帽的使用

(1) 基本要求中的 A_v 可在 0-40dB 范围内手动连续调节。

我在 AD603 的可变增益调节引脚 1、2 之间加装了一个跳线，通过跳线即可实现通过滑动变阻器调节增益或者使用键盘通过单片机控制实现增益的变化。

(2) 基本要求中负载电阻 ≥ 50 欧。

为了方便测量，我把负载电阻上端接在电路输出端，而下端插在插槽中并与跳线中间位置相连。这样在需要测量负载电阻的时候只需要将电阻下端从插槽中取出便可准确测量负载电阻的大小，可以避免电路输出电阻对测量结果的影响。

(3) 上面(2)中的跳线左端通过一个电感接地，而右端直接接地。这样即可方便的测试负载与地之间串接电感对电路性能的改善。

2. 电感对电路性能的改善

由于 603 内部结构的原因，输出电流取决于内部 R-2R 梯形网络的接法，因此外部输出电压 $V_o = \text{输出电流} \times \text{外部负载}$ 。当信号频率较低时，电感不起作用，电阻起主要作用，将电流输出转化为电压有效值输出；当信号频率增大时，由于器件的非线性与高频响应，会造成输出电流减小，若外接阻抗不变，必然导致输出电压有效值的降低。如果在负载与地之间加入合适的电感，电感会在信号频率升高的同时增大感抗，从而补偿了部分由于输出电流减小带来的输出电压有效减小问题。

3. 关于为什么使用 8 位 A/D、D/A

本着“少花钱、多办事，低功耗、性价比的”的精神，经过缜密的计算，我认为完全没有必要使用 10 位甚至 12 位的 A/D、D/A。

计算过程如下：

AD603 的 2 脚加 0.5V 电压，那么 1 脚电压应控制在 0~1V 这个范围以内，因此我的 DAC0832 只需 1.28V，作为一个 8 位的 D/A，2 的 8 次幂为 256，那么其分辨率为 $1.28V/256 = 5mV$ 。题目要求 0~40dB 可调，首先假设步进为 1dB，那么 $A_v = 40V_g + 20$ 从而算出 A_v 变化 1dB，则要求 V_g 变化量为 25mV 与刚才的 DAC 控制精度 5mV 相比，发现 8 位 DAC 已经能够胜任本题的控制精度。而发挥的第六小题才要求按照 5dB 进行步进，比刚才 1dB 的假设粗糙的多。因而得出结论，8 位 DAC 已经足够完成精度控制要求。至于转换速率本题并没有要求，而且联系实际也发现没有使用高速 DAC 的必要，故而我们使用的是 8 位 DAC0832。