

2021 年全国大学生电子设计竞赛

信号失真度测量装置（A 题）



2021 年 11 月 7 日

摘要

本系统选用 TI 公司生产的 MSP432P401R 芯片作为主控芯片，设计了主要包含信号预处理电路、供电电路和蓝牙模块的信号失真度测量装置。

信号预处理电路由 ADC 前置电路及过零比较电路组成，ADC 前置电路将信号进行放大与抬高，保证单片机 ADC 能够正确采集。过零比较电路将信号整形为矩形波，方便单片机捕获测量信号周期。供电电路由线性稳压芯片 LM7805 和 LM7905 组成，为系统提供稳定电压。蓝牙模块负责将数据传输给手机。

本系统通过按键一键启动，实现了对周期信号进行采集分析，测得输入信号的总谐波失真度 THD ，并在 OLED 及手机上显示测量信息等功能。在测量过程中，系统会先测量信号频率，以此选择采样频率得到合适的频率分辨率，再对信号进行采集分析。

经测试，系统的性能指标满足题目要求，并具有良好的稳定性。此外，系统还能显示信号周期，将归一化幅值通过柱状图显示出来，人机界面友好。

关键词：快速傅里叶变换、MSP432P401R、信号失真度、总谐波失真度 THD

目录

1. 系统方案的设计及论证.....	1
1.1 ADC 前置电路的论证与选择.....	1
1.2 供电电路的论证与选择.....	1
1.3 显示模块的论证与选择.....	1
1.4 频率测量方案的论证与选择.....	1
2. 理论分析与计算.....	2
2.1 THD 计算分析.....	2
2.2 采样点数分析.....	2
2.3 采样频率分析.....	2
2.4 ADC 与 DMA 传输分析.....	4
3. 电路与程序设计.....	5
3.1 硬件设计.....	5
(1) 系统总体结构框图.....	5
(2) 硬件电路设计.....	5
3.2 程序结构与设计.....	6
(1) 程序控制流程图.....	6
(2) 程序软件设计.....	7
4. 结论与心得.....	8
5. 参考文献.....	8
附录一：主要原理图.....	9
附录二：测试方案与测试结果.....	10
1. 测试方案.....	10
(1) 硬件测试.....	10
(2) 程序测试.....	10
2. 测试仪器.....	10
3. 测试结果.....	10
(1) 测试结果.....	10
(2) 测试分析和结论.....	11
附录三：实物展示.....	12

信号失真度测量装置（A 题）

【本科组】

1. 系统方案的设计及论证

1.1 ADC 前置电路的论证与选择

方案一：采用高频三极管如 S9018 等分立元件搭建放大器，本方案带宽足够、增益高、成本低，但是电路设计复杂，稳定性差，容易发生自激，容易发生交越失真等，静态工作点与带宽参数难以调试。

方案二：采用精密仪表放大器，使用集成芯片在保证带宽足够的基础上，可有效抑制噪声，且性能稳定，电路搭建简单，调试方便。将精密仪表放大器作为前置放大器，能够有效地保证后级系统稳定和精度。

综合考虑，本设计选用方案二。

1.2 供电电路的论证与选择

方案一：LM2596 DC/DC 电源芯片，输出线性好，误差小，但输出电压纹波大，会影响到单片机 ADC 采样和运放正常工作。

方案二：LM7805 和 LM7905 线性稳压芯片，效率低，但输出电压纹波小。

综上所述，考虑到单片机和运放工作的稳定性，选择方案二。

1.3 显示模块的论证与选择

方案一：使用 UART 串口屏，可以图形化编程，UART 串口控制，操作较为简单，但内置非 TI 的 MCU，不符合题目要求。

方案二：使用 IIC 协议 OLED 屏，尺寸小，低功耗，显示字符方便，MSP432 可一路驱动 2 个至多个 OLED 屏，配置简单，传输速率高。

综上所述，选择方案二。

1.4 频率测量方案的论证与选择

方案一：通过单片机最高采样率采集信号，通过 FFT 计算频率，优点是不需要外部电路，缺点是有频率分辨率的限制。

方案二：使用过零比较电路将信号整形成矩形波，单片机捕获高低电平从而计算频率。优点是处理方便，响应速度快，输入捕获分辨率可达 $1/3\mu\text{s}$ 。

综上所述，选择方案二。

2. 理论分析与计算

2.1 THD 计算分析

当放大器输入为正弦信号时，放大器的非线性失真表现为输出信号中出现谐波分量，即出现谐波失真，通常用总谐波失真 THD 定量分析放大器的非线性失真程度。若放大器的输入交流电压为 $u_i = U_i \cos \omega t$ ，出现谐波失真的放大器输出交流电压为 $u_o = U_{o1} \cos(\omega t + \theta_1) + U_{o2} \cos(\omega t + \theta_2) + U_{o3} \cos(\omega t + \theta_3) + \dots$ ，则 u_o 的总谐波失真定义为

$$THD = \frac{\sqrt{U_{o2}^2 + U_{o3}^2 + U_{o4}^2 + \dots}}{U_{o1}} \times 100\% \quad (2-1-1)$$

本次题目失真度测量采用近似方式，测量和分析输入信号谐波成分时，限定只处理到 5 次谐波。定义失真度的标称值为

$$THD_o = \frac{\sqrt{U_{o2}^2 + U_{o3}^2 + U_{o4}^2 + U_{o5}^2}}{U_{o1}} \times 100\% \quad (2-1-2)$$

若失真度测量值为 THD_x ，则失真度测量误差的绝对值为

$$\Delta = |THD_x - THD_o| \quad (2-1-3)$$

实际中我们将单片机 ADC 采集得来的数据进行 FFT 可得到 N 点复数，由于 FFT 运算结果的对称性，我们只分析前 $N/2$ 个点。因为我们信号处理电路所添加的直流分量远远大于信号幅值，所以选取各点的第一峰值为直流分量，第二峰值即为基波分量，设该点为第 x 个点，则二次谐波分量点数应为 $2x$ ，而对应分量幅值即为该点的模值除以 $N/2$ ，后续以此类推，找出相应谐波分量的幅值。但实际情况并没有那么理想，我们在计算各次谐波分量幅值时，往往在对应谐波分量的范围中取最大值，从而逼近理论值。

2.2 采样点数分析

考虑到频率分辨率 $\Delta f = \frac{f_s}{N}$ ，而 Δf 是分辨两个不同频率信号的最小间隔，在实际运算中越小越好，MSP432 中 DMA 传输的采样点数 N 为 2 的整数倍，最大值为 1024，故取 N 为 1024。

2.3 采样频率分析

题目中要求信号基波频率最高到 100kHz，而 THD 计算需要准确采样到五次

谐波，因此有效信号频率应大于 500kHz，根据奈奎斯特定理可知采样频率需要大于等于 1MHz。但由于采样点数相对固定，一味追求高采样频率 f_s ，会导致 Δf 过大，可能会得不到被测信号的准确频谱，于是我们选择根据不同的信号频率来选取合适的 f_s ，从而减小 Δf ，提高频率分辨率。

其中 f_s 选取条件是当采样序列的长度为被测信号周期的整数倍时，各次谐波的频率才会刚好与各谱线位置重合，且互不影响，如不满足这一条件，通过 FFT 得到的并非为被测信号的准确频谱，对应公式为

$$\frac{N}{f_s} = \frac{M}{f} \quad (2-3-1)$$

其中 f 为信号频率， M 为对应的整数值。根据题意可知应准确采样到五次谐波，根据奈奎斯特定理可知采样频率需要大于等于十倍的 f ，即 $f_s \geq 10f$

与式子(2-3-1)结合得

$$M \leq \frac{N \times f}{f_s} \quad (2-3-2)$$

代入 $N=1024$ 可得 $M \leq 102.4$

此外配置 MSP432 的定时器 A 输入时钟都为 48MHz，当作为 ADC 采样触发时钟源时，有如下关系

$$f_s = \frac{48\text{MHz}}{\text{ClkDiv}_{\text{tog}}(\text{CCR0}_{\text{tog}} + 1)} \quad (2-3-3)$$

其中 $\text{ClkDiv}_{\text{tog}}$ 为 ADC 触发时钟源的时钟分频， CCR0_{tog} 为 ADC 触发时钟源的自动重装载值。令 $Z = \text{ClkDiv}_{\text{tog}}(\text{CCR0}_{\text{tog}} + 1)$ ，代入式子(2-3-2)可得关系式

$$\frac{48\text{MHz} \times M}{N \times f} = Z \quad (2-3-4)$$

虽然 MSP432P4 的数据手册指出 ADC 时钟频率最高应为 25MHz，但实际上我们可以将其超频至 48MHz，以获得更高的 2MHz 采样频率，此时 $Z \geq 24$ ，最终根据上式(2-3-4)可计算出合适的 Z ，从而配置出适合的 f_s 。

我们使用了过零比较器接入定时器 A 输入捕获测量信号的频率，其关系为

$$f = \frac{48\text{MHz}}{\text{ClkDiv}_{cap}(\text{CCR}x_{cap} + 1)} \quad (2-3-5)$$

其中 ClkDiv_{cap} 为输入捕获定时器的时钟分频， $\text{CCR}x_{cap}$ 为输入捕获定时器的捕获值；综合上式(2-3-3)、(2-3-4)及(2-3-5)代入 $N=1024$ 后整理可得

$$\frac{M \times \text{ClkDiv}_{cap}}{1024}(\text{CCR}x_{cap} + 1) = \text{ClkDiv}_{tog}(\text{CCR}0_{tog} + 1) \quad (2-3-6)$$

定时器 A 中 ClkDiv_{cap} 取值有限制，倘若 M 取值不当，会使得 $\text{CCR}x_{cap}$ 与 $\text{CCR}0_{tog}$ 的换算会出现小数关系，导致存在浮点运算误差。

因此，在满足 $f_s = 1024/M \times f$ 的条件下，选取 $M = 64$ ，即 ADC 时钟触发源频率为 16 倍的信号频率，此时 f_s 满足奈奎斯特定理。

并且为了测量频率有较高的精度，我们令 $\text{ClkDiv}_{cap} = 16$ ，即将过零比较器的输入捕获定时器 16 分频，此时输入捕获分辨力为 $1/3 \mu s$ ；同时为了使得最高采样频率能达到 1.6MHz，我们令 $\text{ClkDiv}_{tog} = 1$ ，即 ADC 触发时钟源不分频。

综合上述配置条件，可得 $\text{CCR}x_{cap} = \text{CCR}0_{tog}$ ，即输入捕获定时器的捕获值恰好为 ADC 时钟触发源的自动重装载值，这样就解决了换算出现小数导致存在浮点运算误差的问题。

2.4 ADC 与 DMA 传输分析

DMA 能使得外围设备通过 DMA 控制器直接访问内存，能大幅提高数据的吞吐量，同时 CPU 可继续执行程序。

经实际测试，在不启用 DMA 时，ADC 采样频率最高约为 46kHz，远远达不到题目最低要求的 1MHz；

在启用 DMA 且 ADC 时钟配置为 24MHz 时，可以达到 1MHz 采样频率，能基本满足题目测量要求。而在启用 DMA 且 ADC 时钟配置为 48MHz 时，可以达到 2MHz 采样频率，能远远满足题目测量要求。

3. 电路与程序设计

3.1 硬件设计

(1) 系统总体结构框图

本系统以单片机 MSP432P401R 为主控芯片，组成测量系统，详细框图如图所示。

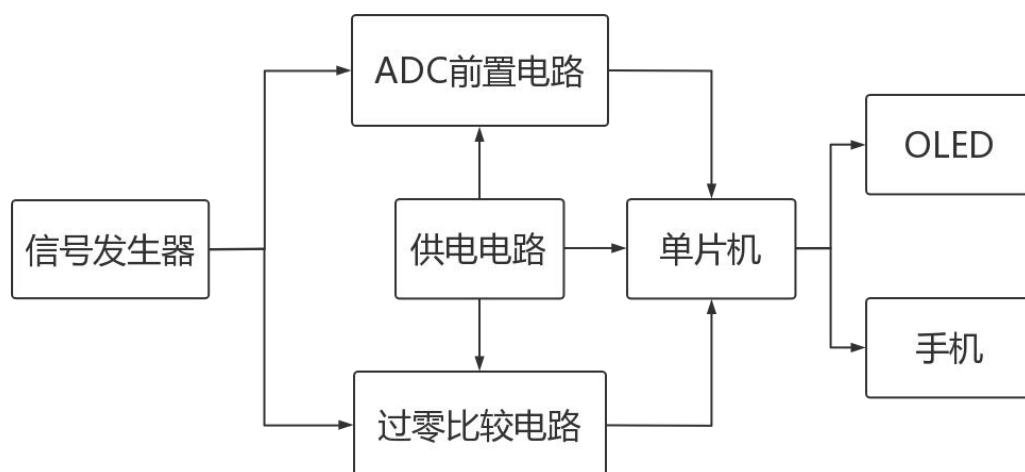


图 3-1 系统的结构框图

(2) 硬件电路设计（电路图见附录一）

① 供电电路

单片机供电电路采用 LM7805 芯片将航模锂电池的 12V 转换 5V。自制整流滤波电路，将 12V 交流转换成 17V 直流，并分压后采用 LM7805 和 LM7905 转换正负 5V 为运放电路提供稳定的电压。通过分别供电避免电源干扰。

② ADC 前置电路

具有输出电平移位，低输出阻抗的功能。为保证采样精度，ADC 采用内部 2.5V 参考电压，于是我们选择用 INA128 精密仪表放大器，将信号放大三倍方便采样，同时考虑到信号可能存在负值部分，MSP432 不能直接采样，需要添加直流偏置，选择电压跟随电路来提供。

③ 过零比较电路

选择 TLV3501 构建过零比较电路，将信号整形形成矩形波，送入单片机定时器捕获，从而得到频率。

3.2 程序结构与设计

(1) 程序控制流程图

本系统中的程序主要是通过单片机先测量信号频率，计算合适的采样频率再进行采样。本系统主程序控制流程图如图所示。

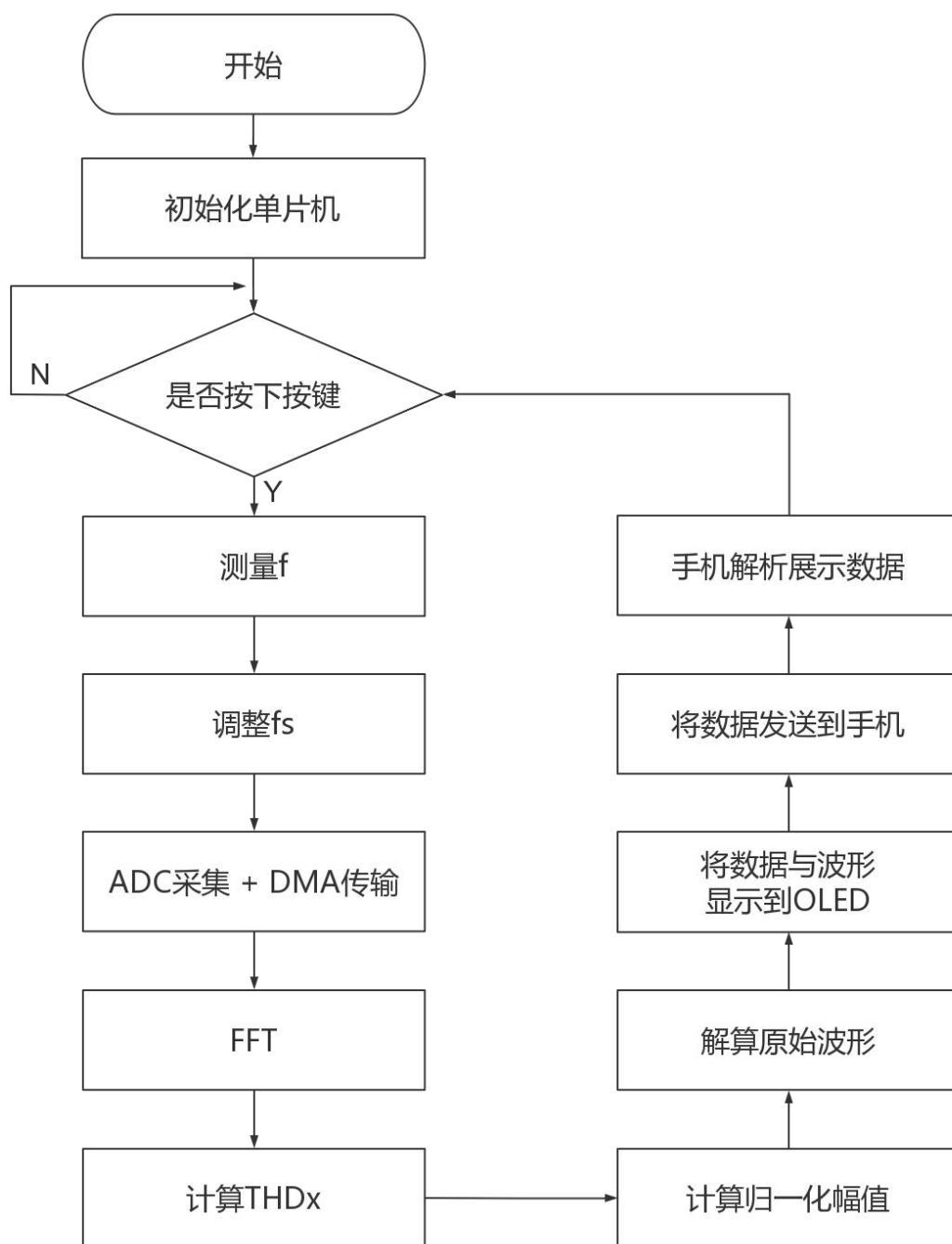


图 3-2 主程序控制流程图

(2) 程序软件设计

① 显示波形

题目要求画出一个周期的波形，如果采用传统的做法，利用 ADC 采样画出波形，那在极限情况下，例如：采用 1MHz 的 f_s 对 100kHz 的信号进行采样，那么一个周期只有 10 个点，画出来的波形将会十分粗糙，因此我们通过之前的程序得到的归一化幅值，直接在单片机本地计算还原出原来的波形，实践中得到了很好的效果。

② 蓝牙 APP

单片机端：将数据拆分为字节，并按照一定顺序将数据一次性快速发出。

手机端：调用安卓蓝牙模块接受信息，利用 HTML 将 echarts 图表渲染到页面上，实现数据和波形的展示。

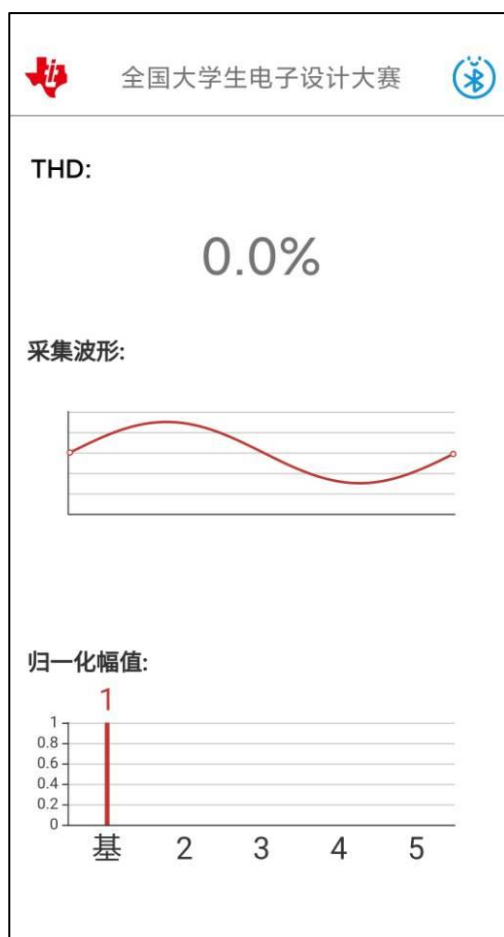


图 3-3 手机 APP 界面图

4. 结论与心得

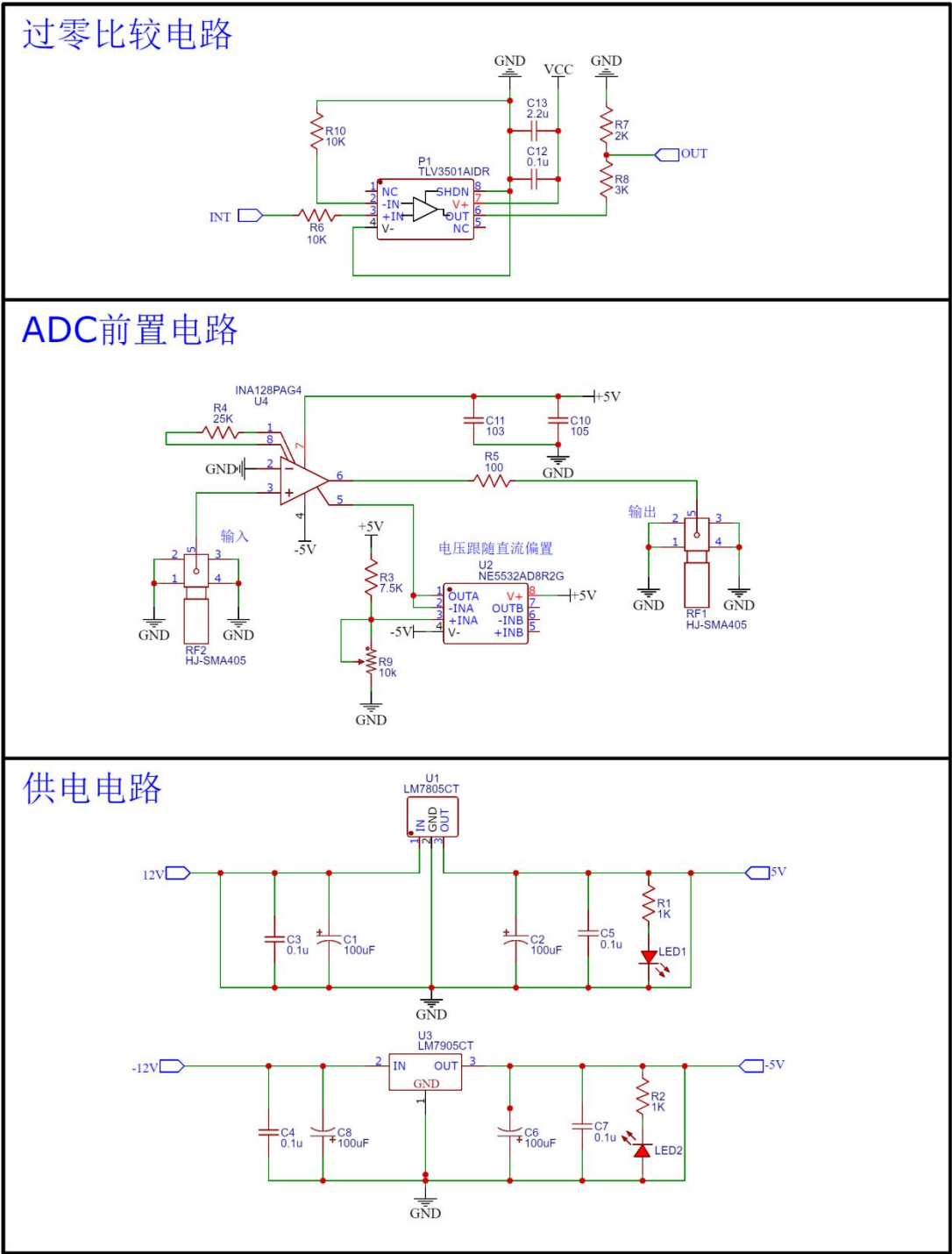
此次电子设计大赛我们收获颇丰，起初由于对单片机 DMA 配置的不熟悉，导致 ADC 采样频率无法满足题目要求。后面又因为一味追求过高的采样频率，导致频率分辨率较低，许多频率的信号无法准确测量，后续我们认识到这个问题，并通过理论分析，改进算法。

在整个过程中，我们不仅在通力合作中体会到了团结的重要性。还将理论与实践结合了起来，培养了一定的科研能力，拓宽了知识面。一步一步的解决相应的任务；逐步的实现了任务需求，更是认识到 MSP432 的高性能低功耗，高精度的 ADC，令我们印象深刻。

5. 参考文献

- [1]谭浩强. C 语言程序设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2012.
- [2]黄智伟. 全国大学生电子设计竞赛训练教程. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [3]王福瑞等. 单片微机测控系统设计大全 [M] . 北京航空航天大学出版社, 1998 (331—337) .
- [4]陈友兴等. 数字信号处理原理及应用 [M] . 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [5]刘杰. 基于固件的 MSP432 微控制器原理及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2016.

附录一：主要原理图



附录二：测试方案与测试结果

1. 测试方案

(1) 硬件测试

测试单片机能否正常工作，各项参数是否准确。同时，检查电路焊接是否正确，各部分接线是否正确。

(2) 程序测试

用 KEIL 软件编程和编译下载，通过 CCS 软件多次调试，Android 软件使用 Java 编程语言开发，并且使用 HTML, JavaScript 语言渲染图表进行展示。

2. 测试仪器

测试仪器：信号发生器、示波器、万用表。

3. 测试结果

(1) 测试结果

① 基本要求的测试

1) 300mV 1kHz 信号测量

表 A-1 基础部分 1 测试结果

次数	1	2	3	4	5
THD_o	38.87%	11.80%	5.00%	50.00%	25.00%
THD_x	39.34%	13.82%	5.66%	49.13%	26.55%

2) 600mV 1kHz 信号测量

表 A-2 基础部分 2 测试结果

次数	1	2	3	4	5
THD_o	38.87%	11.80%	5.00%	50.00%	25.00%
THD_x	39.34%	13.82%	5.66%	49.13%	26.55%

② 发挥部分的测试

1) 30mV 100kHz 信号测量

表 B-1 发挥部分 1 测试结果

次数	1	2	3	4	5
THD_o	38.87%	11.80%	5.00%	50.00%	25.00%
THD_x	39.34%	13.82%	5.66%	49.13%	26.55%

2) 600mV 100kHz 信号测量

表 B-2 发挥部分 1 测试结果

次数	1	2	3	4	5
THD_o	38.87%	11.80%	5.00%	50.00%	25.00%
THD_x	40.41%	12.45%	6.11%	51.22%	24.52%

③ 自由发挥

在完成题目规定要求后，自制高精度稳压电源为单片机供电，保证 ADC 采样稳定，还能显示信号周期，将归一化幅值通过柱状图显示出来，人机界面友好。

(2) 测试分析和结论

根据上述测试数据，可以得出以下结论：

- ①通过 MSP432 可很好地完成基本功能和发挥功能。
- ②信号失真度的测量和显示（单片机和手机端）的时间较快。

综上所述，本设计基本达到设计要求。

附录三：实物展示

