

## 5. 实验[5] 发送-接收联合系统实验

### 5.1 实验目的

练习掌握工程原型试制电路的焊装和调测的基本操作技巧；

学习掌握嵌入式系统多种接口技术（模数转换 ADC 接口、PWM 信号发生接口、I2C 总线接口等）的工程应用方法；

初步掌握电子测量设计中调试校准的基本技巧；

通过设计实验获得设计开发较复杂工程电子系统的初步经验。

### 5.2 实验主要器材和设备

#### 5.2.1 嵌入式系统基本开发环境

电脑；TM4C1294NCPDT 实验板卡；A2000TM4 扩展板；调频发射实验单元板或调频接收实验单元板。

#### 5.2.2 仪器工具

台式稳压电源；数字示波器；多用电表；函数信号发生器。

#### 5.2.3 主要元件类器材

本实验的主要元件器材见列表 5-1。

表 5-1 实验主要元件类器材

型号或名称	规格 封装	数量	备注
50KΩ	多圈精密可调电阻	2	用作可调分压电阻
Z3. 3V/0. 5W	插脚	1	稳压二极管
LM75B 模块	专用模块	2	IIC 接口温度传感器
单排针	20 芯 2. 54mm	2 条	焊装做 LM75B 模块引脚； 做接线点或检测点等
单排座	15-18 芯 2. 54mm	1 条	焊装在洞洞板上，作为 LM75B 模块插座 40 芯分两半，掰分时会有损 失，所以写作 15-18 芯
TLV2372	DIP	2	运放芯片
IC 插座 8 脚	DIP	2	与 TLV2372 配用
TL431	插脚 TO-92	2	基准电压源
一单元洞洞板	课程定制线路板	2	用于焊装自制电路
香蕉头、螺母、垫圈	三件套装	8 套	与洞洞板配用，作为电路供电 接线柱（脚）
φ0. 8 焊锡		1 米 2 根	焊料
φ0. 5 导线	单芯硬线	1 米 2 根	焊连电路用
杜邦头跳接线	成品	5	线路连接用
色环电阻	0. 25W 系列，插脚	若干	根据设计选用
陶瓷电容	系列，插脚	若干	根据设计选用

### 5.3 各项主要技术的简明指导

### 5.3.1 带 I2C 接口的温度传感器 LM75B

恩智浦(NXP)半导体公司的温度传感器芯片产品 LM75B 内部集成了温度传感器和模数转换器,并带有 I2C 串行总线标准数据接口,供外部编程设置和读取其信息。图 1(a)和(b)分别是其内部组成逻辑框图和典型用法示意图。

为了方便使用,本实验中选用有关厂商以 LM75B 为核心器件做成的电路模块(而不是直接使用芯片为器件)。该模块有 5 个外部引脚,如图 5-2 中所示。2 个引脚用于供电;2 个引脚是 I2C 信号 SDA 和 SCL;1 个引脚是中断请求信号 OS(本实验中可以不用)。

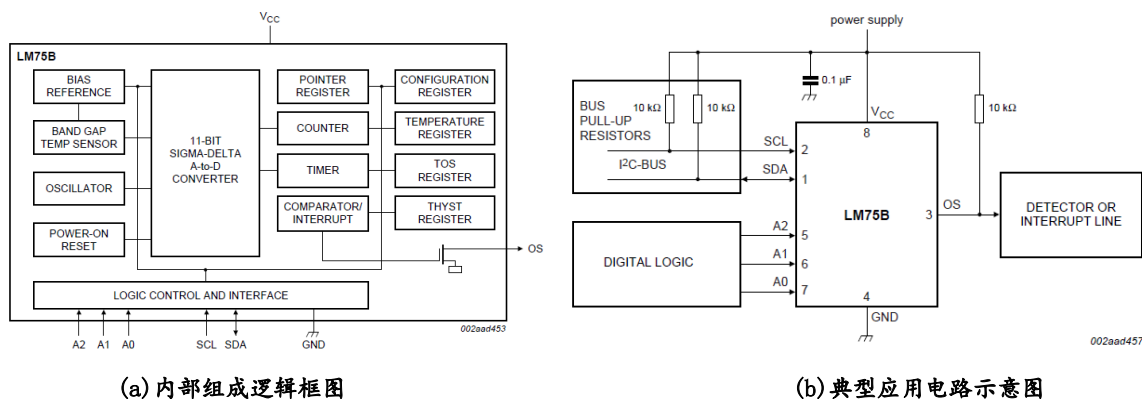


图 5-1 LM75B 应用示意图(引自厂商 Datasheet 资料)

在模块电路板上,还留有 3 处跳线焊位,可以对 I2C 总线地址最低 3 位 A2、A1、A0 进行灵活配置,见图 5-2(b)中。该模块用前要焊装上插针式引脚,方便使用。

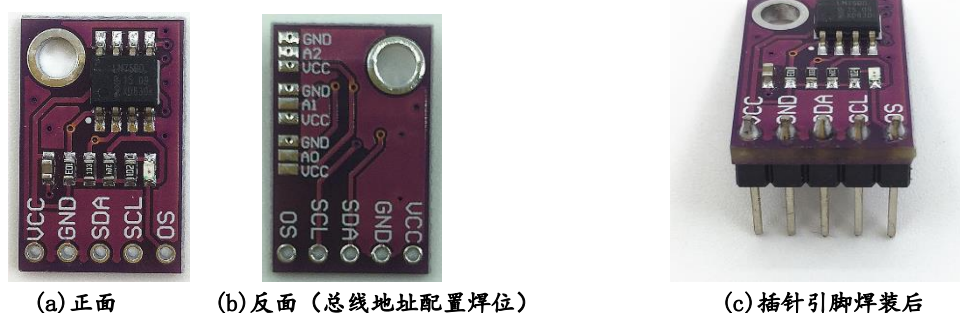


图 5-2 LM75B 模块

软件工程师和硬件工程师应通读 LM75B 器件 Datasheet,以获取完成设计所需必要信息。

### 5.3.2 调频(FM)发射模块和接收模块

本实验中,成对使用调频发射模块和接收模块,实现对音频信号的无线传输。

#### ➤ FM 发射模块

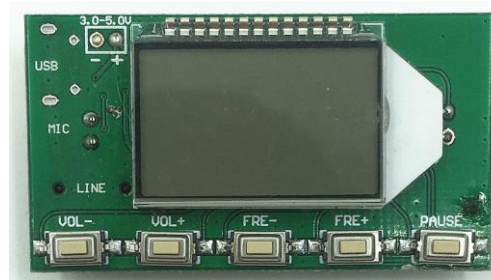
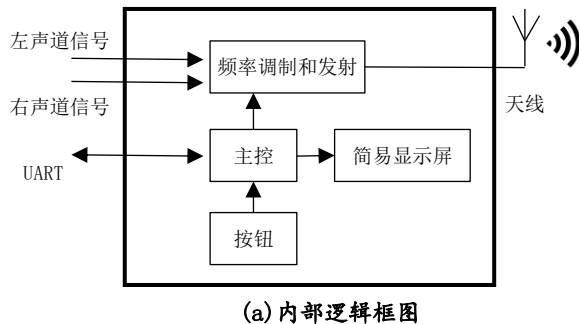


图 5-3 FM 发射模块

FM 发射模块的内部功能逻辑组成如图 5-3(a)，物理形态如图 5-3(b)。其核心是立体声频率调制发射电路，负责将左、右两声道音频信号调制到工作频率并进行无线发射。工作频率在一定范围内可改变。模块中含有单片机单元（主控），对外提供由按钮和简易显示屏组成的简易操作面板。用户可以人工按键操作改变调频工作频率、音频信号放大倍数（音量）等工作参数。单片机还通过 UART 接口接收外部编程信号的控制。UART 接口的控制信号指令是 ASCII 码形式，且均以“AT”字母开头，所以被称为 AT 指令集（早期曾用于控制调制解调器 MODEM 设备）。表 5-2 给出本实验所需的 AT 指令格式和参数，其中第 1 和第 5 条指令是本实验重点要使用的。

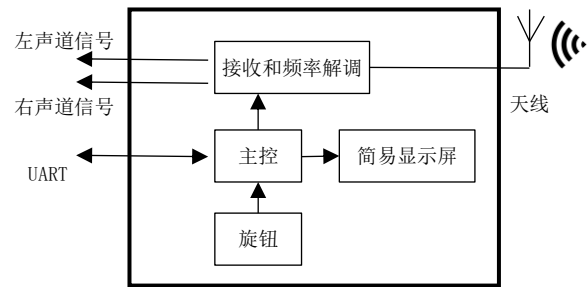
关于调频发射实验单元板，有一条重要的勘误，列在本文尾部，请关注。

表 5-2 FM 调频发射模块的 AT 指令格式（部分）

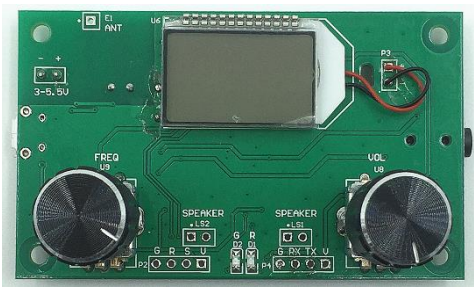
序号	指令名称	指令示例	指令说明	取值范围	返回值
1	设置当前频点	AT+FRE=875	设置当前频点为 87.5MHz	760-1080（开校园广播） 870-1080（关校园广播）	当前频点或 ERR（错误）
2	频点-0.1MHz	AT+FRED	单步频率-0.1MHz		当前频点
3	频点+0.1MHz	AT+FREU	单步频率+0.1MHz		当前频点
4	暂停/继续 播放	AT+PAUS			PLAY（播放） PAUS（暂停）
5	设置音量	AT+VOL=10	设置当前音量为 10	00-30	当前音量或 ERR
6	音量-	AT+VOLD	音量-1		VOL 值或 ERR
7	音量+	AT+VOLU	音量+1		VOL 值或 ERR
8	设置背光时间	AT+BANK=10	设置背光亮 10 秒	00-99 (00 代表马上熄灭；01 代表长亮不灭)	BANK 值或 ERR
9	开关校园广播	AT+CAMPUS=1	开校园广播模式	0（关）-1（开）	CAMPUS_OF 或 CAMPUS_ON

注：波特率 38400，8 位数据，1 个停止位； 以上指令字符串结尾处均应加“\r\n”（回车符、换行符）

➤ FM 接收模块



(a) 内部逻辑框图



(b) 物理形态

图 5-4 FM 接收模块

FM 接收模块内部组成和物理形态如图 5-4(a) 和 (b)。形式上与上述发射模块对偶，不过核心电路换成了频率解调接收电路。部分 AT 指令集如表 5-3。

表 5-3 FM 调频接收模块的 AT 指令格式（部分）

序号	指令名称	指令示例	指令说明	取值范围	返回值
1	设置当前频点	AT+FREQ=855	设置当前频点为 85.5MHz	880-1080	当前频点或 ERR（错误）

2	设置音量	AT+VOL=10	设置当前音量为 10	00-15	当前音量或 ERR（错误）
注：波特率 9600，8 位数据，1 个停止位。					

5.3.3 基准电压发生电路

与常规稳压电路相比，所谓“基准”（Reference）电压电路有更高的稳定度。前者的相对误差或相对稳定度通常只要求达到±5%以内，后者指标要高一个数量级以上。比如，本实验中选用的 TL431 器件可以稳定在±0.4%以内，属于一款常用中低档基准电压发生器件。更高性能的基准源稳定度可以达到 0.01%以上。

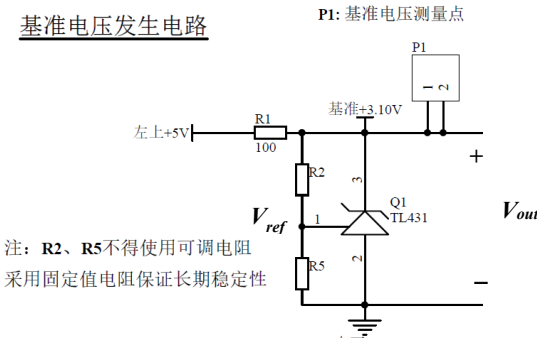


图 5-5 基准电压发生电路

如图 5-5，+5V 稳压供电的 TL431 电路，依据公式 5-1 合理设计 R2 和 R5 的值，可以获得比较高精度和稳定度的+3.10V 电压信号。请硬件工程师通读 TL431 器件 Datasheet 文件，了解更多原理。

$$V_{out} \approx V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_5}\right) \quad \text{其中 } V_{ref} \approx 2.5(V) \quad (\text{公式 5-1})$$

5.3.4 可调分压和电压跟随电路

本实验中，通过一个手动调节的电位器（如图 5-6 中 R4）的中间接头，获得一个可变的分压信号，最大为+3.10V，最小 0V。该信号要送单片机 ADC 端口做数模转换，并由单片机在人机界面输出电压读数。

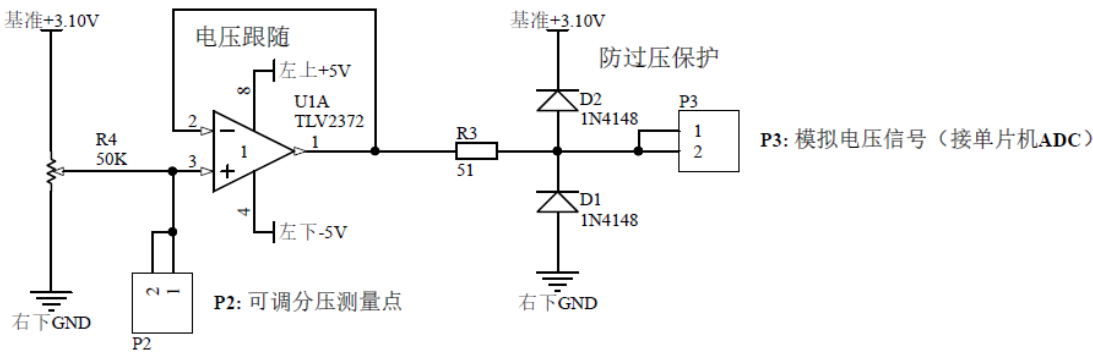


图 5-6 可调分压和电压跟随电路

不过，如果直接把图 5-6 中分压点 P2 信号送 ADC 端口，结果会不稳定，读数存在系统误差。图 5-7 简明解释了其中原理。因为 ADC 端口的等效输入阻抗一般比较有限，如果直接连在电位器中间接头上，会与电位器的下半段电阻形成并联效果，进而导致分压比出现波动。

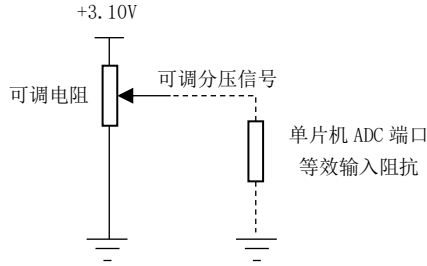


图 5-7 ADC 端口阻抗影响分压比例

在工程电路图 5-6 中，运算放大器单元 U1A 组成的电路是典型的“电压跟随器”电路。运放器件的输入阻抗很大（在本例中可近似认为无穷大），而输出阻抗很小（本例应用中可视为零），所以加一级跟随器就能良好地解决上述问题。

图 5-6 中还用 R3、D1、D2 组成“防过压”保护电路，防止 P3 电压高于 3.10V 或低于 0V。单片机的 ADC 端口与它的其它输入端口一样，输入信号的电压禁止超过供电上电轨、下电轨[+3.3V, 0V]区间，否则可造成引脚电路或整个芯片的永久性损坏。

### 5.3.5 频率信号整形调理电路

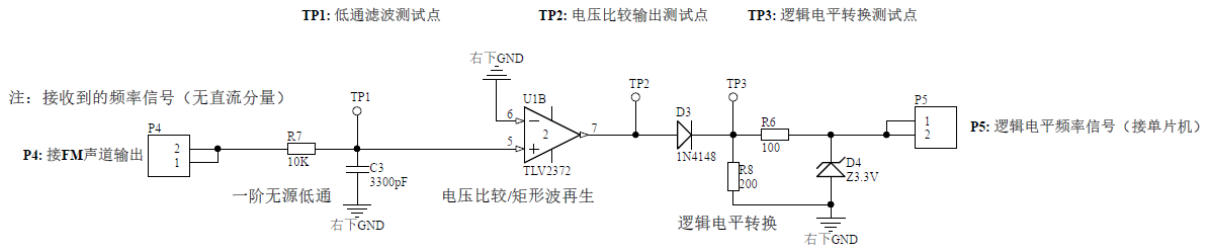


图 5-8 频率信号整形调理电路

本实验中，在接收端需要用单片机程序测量收到的音频信号的频率值。由于原始被测信号不是矩形波，更不满足单片机逻辑电平要求，所以图 5-8 专门电路把被测信号做整形调理，转化成适合单片机端口接收的逻辑电平信号。

该电路输入的是无直流成分的音频交流信号（比如 FM 接收模块的输出信号就符合这一特点）。电路的第一部分是 R7、C3 组成的无源低通滤波网络，可以将输入信号中的高频噪声成分适当滤去一些。运放单元 U1B 接成电压比较器，其上下供电电轨分别是 +5V 和 -5V；以零电位（GND）为比较基准，高于零的电位信号转化为高电平（约 +5V）输出，电位低于零的信号则为低电平（约 -5V）。然后，再由开关二极管 D3、稳压二极管 D4、电阻 R6、R8，组成简易的逻辑电平转换网络，在 P5 处得到低电平 0V、高电平约 3.3V 的矩形波，可送单片机输入端。

### 5.3.6 信号频率测量原理

本实验中，要由单片机程序测量信号频率。此处的被测信号是数字逻辑电平信号，已接入单片机 GPIO 端口。



图 5-9 频率/周期测量原理示意

在工程实现上有两种常用做法，分别被通俗地称为“测频率法”和“测周期法”。它们的数学逻辑

辑原理均可借助图 5-9 来说明。图中有所谓门控信号，形成有效持续时间为  $T$  的时间“窗口”，对出现在该窗口中的计数脉冲信号上升沿（或下降沿）进行计数，假设计数值为  $n$ 。

如果是测频率法，则门控信号由单片机内部定时器提供，把被测信号作为计数脉冲信号，被测频率计算公式为

$$f \approx \frac{n}{T} \quad (\text{公式 5-2})$$

如果是测周期法，则门控信号由被测信号的一个周期转化生成（如图 5-10）；计数脉冲信号由单片机内部定时生成，若计数频率用  $f_0$  表示。先可得到被测信号周期

$$T \approx \frac{n}{f_0} \quad (\text{公式 5-3a})$$

$$\text{而频率即为} \quad f \approx \frac{f_0}{n} \quad (\text{公式 5-3b})$$

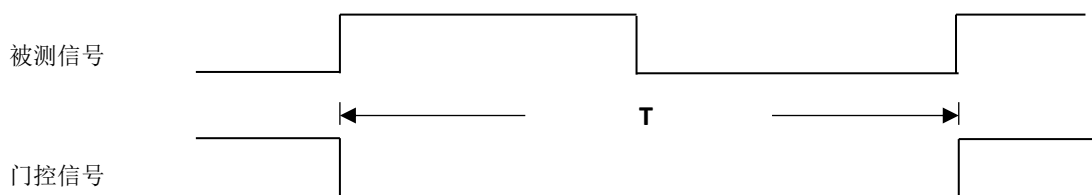


图 5-10 由被测信号生成门控信号

脉冲计数机制在门控窗口中存在  $\pm 1$  的随机误差，所以上述公式均采用约等号形式。显然，相对于单片机内部计时基准，若被测信号频率较高时，则适合采用测频率法；若被测信号频率较低，周期较大时，采用测周期法会更准确。

### 5.3.7 数值信息的频率编码传输

在本实验中，发射机一侧需要将至少一项数值信息有效传送到接收端。传送信息使用 FM 通信信道的立体声音频通道（左声道、右声道）。每个声道的有效音频区间可大致认为是  $[300\text{Hz}, 4000\text{Hz}]$ 。如果需要传送的数值信息是环境温度，精确到  $0.1^\circ\text{C}$ ，人为认定合理变化范围  $[0.0^\circ\text{C}, 40.0^\circ\text{C}]$ 。则可以构建一个温度-频率转换的函数关系，通常使用线性函数（如图 5-11），关系式为

$$\text{Frequency} = \frac{4000 - 300}{40.0 - 0.0} \cdot \text{Temperature} + 300 \quad (\text{公式 5-4})$$

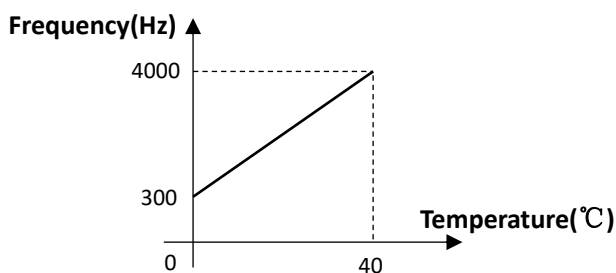


图 5-11 温度-频率函数关系

这种做法实际上就是一种编码规则，将温度数值编码为音频信号的频率数值，在声道中传送该频率值的音频信号，到达接收端后再依据解码规则（即公式 5-4 的反函数关系式）还原为温度信息。

## 5.4 实验任务要求

### 5.4.1 编程控制 FM 模块（实验任务 5\_1）

实验任务 5\_1 以软件编程为主，是发射组、接收组都有的任务，双方各自完成。发射端程控对

象是 FM 发射模块，接收端是 FM 接收模块，两种模块的程控接口均为 UART。请参考使用 5.3.2 中技术信息，灵活运用所学知识和实验技能，达成以下简明实验要求：

- 1) 适当选择单片机端口，正确连线；
- 2) 将 FM 模块的射频工作频率设为 87.6MHz；
- 3) 将 FM 模块的声道音量等级设为最大值；
- 4) 可借助 FM 模块自带显示验证实验效果，无须另做界面。

#### 5.4.2 电压信号发生与测量显示（实验任务 5\_2）

实验任务 5\_2 既需要焊装硬件电路，也需要软件编程；且是发射组、接收组都有的任务，双方各自完成以下任务步骤：

- 1) 参照 5.3.3 和课程实验其他教程资料，使用洞洞板等器材，焊装制作“基准电压发生电路”；图 5-5 中 R2 和 R5 取值需自行设计，为了获得更精准的阻值，实际中可以灵活使用两个或多个电阻元件串并联，对应原理图中一个电阻符号；
- 2) 做实验测量 P1 点电压，需达到 $+3.10V \pm 0.01V$ 误差要求；
- 3) 参照 5.3.4 和课程实验其他教程资料，继续焊装制作“可调分压和电压跟随电路”；
- 4) 做实验连续调节 R4，测量 P2、P3 两点电压，验证电压值连续可变，且两点电压基本一致；
- 5) 利用课程提供的 ADC 例程，合理连线（P3 接 ADC 端口），做实验使作品能测量显示 P3 点电压数值；
- 6) 使用多用电表（作为标准仪器）测量 P3 电压，在各种情况下，作品上电压示数需达到误差小于等于 0.01V 的要求；若不能满足，应自行做标定测试实验，校准修正代码中的有关运算关系；
- 7) 试用 P2 接 ADC 端口，对比步骤 6 的情况，观察读数误差变动，思考和理解电压跟随电路的实际作用。

#### 5.4.3 频率信号发生（实验任务 5\_3）

实验任务 5\_3 是发射组独有任务，以软件编程为主，完成以下任务步骤：

- 1) 利用课程提供的 PWM 例程，在单片机合适 GPIO 端口引脚上输出一定频率的方波信号；
- 2) 使用示波器观测该引脚信号，可调仪器功能测量显示信号频率，验证实验效果；
- 3) 修改程序代码，使用生成的方波信号频率为 3.8KHz，重复步骤 2。

#### 5.4.4 信号调理和频率测量（实验任务 5\_4）

实验任务 5\_4 是接收组独有任务，既需要焊装硬件电路，也需要编程配合，完成以下任务步骤：

- 1) 参照 5.3.5 和课程实验其他教程资料，继续焊装制作“频率信号整形调理电路”；
- 2) 做实验使用函数信号发生器，设“负载阻抗”为高阻状态（HIZ），输出正弦波信号（1KHz、200mVpp、偏置电压为 0），接入 P4 点（见图 5-8）；
- 3) 使用双通道或多通道示波器，通道 1 固定观测 P4 点波形，并设为“触发源”，同时用其他通道分别观察 TP1、TP2、TP3、P5 点波形；
- 4) 分别记录上述各点波形（建议使用仪器功能将波形截图存入 U 盘），特别要关注和比较波形的形态和最高、最低电平数值的不同，思考和理解电路原理功能；
- 5) 函数信号发生器输出改为方波信号（1KHz、200mVpp、偏置电压为 0），重复步骤 3 和 4；
- 6) 函数信号发生器输出改为三角波信号（4KHz、2Vpp、偏置电压为 0），重复步骤 3 和 4；
- 7) 利用课程提供的 Frequency\_Measure 例程，将 P5 连接合适的单片机 GPIO 端口，做实验使作品能测量显示 P5 信号频率，被测信号频率[300Hz, 4000Hz]区间，读数误差小于等于 3Hz。

#### 5.4.5 环境温度测量和显示（实验任务 5\_5）

实验任务 5\_5 是发射组独有任务，既要焊装硬件电路，也需要编程配合，完成以下任务步骤：

- 1) 参照图 5-12，在洞洞板上继续焊装制作“带 I2C 总线接口的温度传感器模块电路”；



- 2) 将两个温度传感器模块的总线地址配置成相异（可以参考例程中定义）；
- 3) 利用课程提供的 LM75BD 例程（注：代码中传感器模块地址码要与步骤 2 中一致），合理连线，做实验使作品能读取并显示两路温度数值；
- 4) 通过适当干预传感器人为导致读数有所变化（比如用手接触传感部件），定性验证功能的有效性。

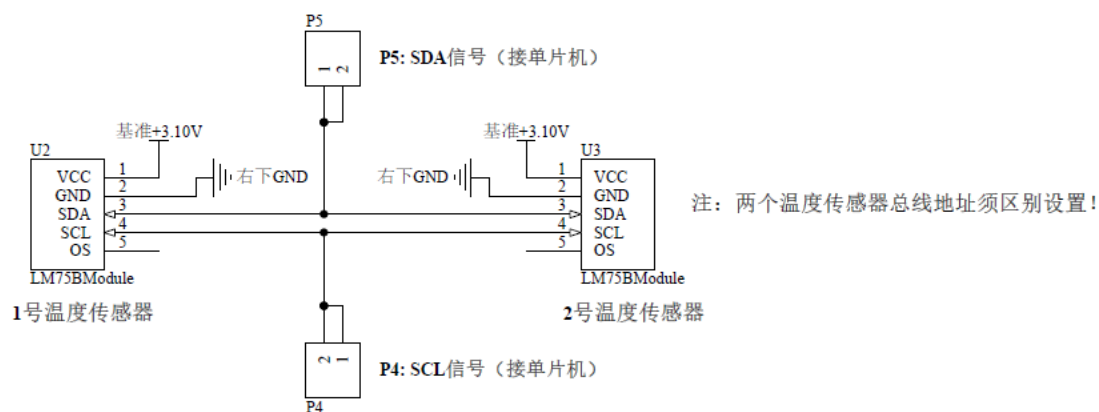


图 5-12 带 I2C 总线接口的温度传感器模块电路

焊装温度传感器时，不可直接把温度传感器焊接到洞洞板上，这很容易损坏温度传感器！请按照下面步骤进行焊接。

步骤一，从“实验 5 成套基本元件”拿出单排座，用斜口钳掰开，每个小单排座至少有 5 个引脚。见图 5-13。

步骤二，把两个小单排座，焊接到洞洞板上。见图 5-14。

步骤三，把温度传感器插到单排座上。见图 5-15。

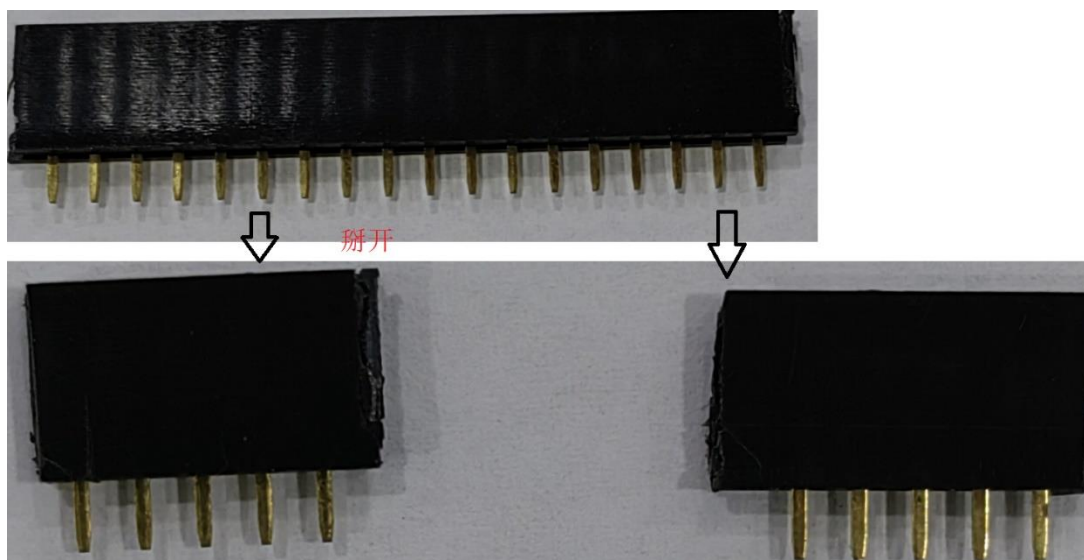


图 5-13 制作两个小单排座



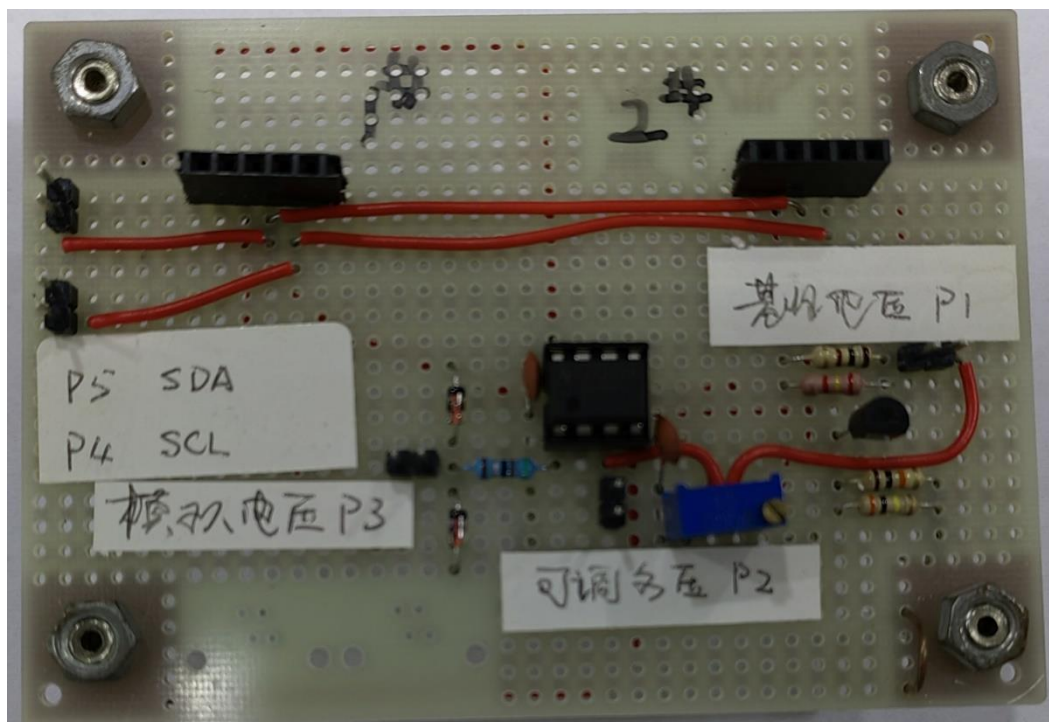


图 5-14 把小单排座焊接到洞洞板上

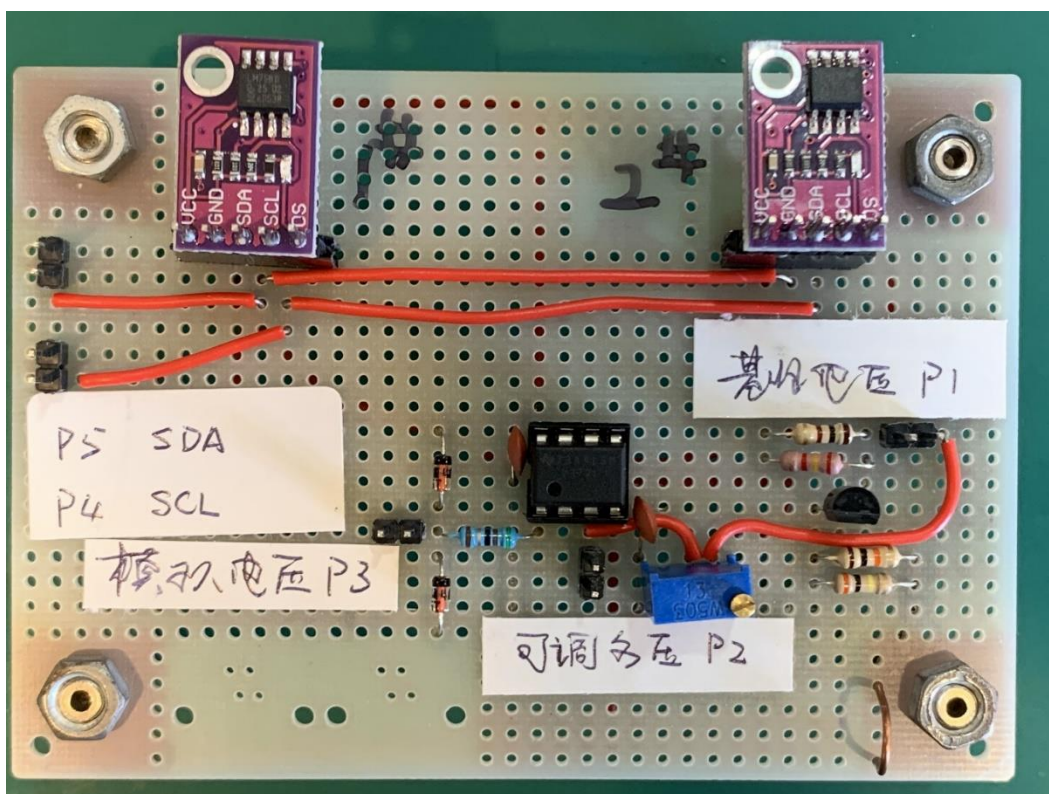
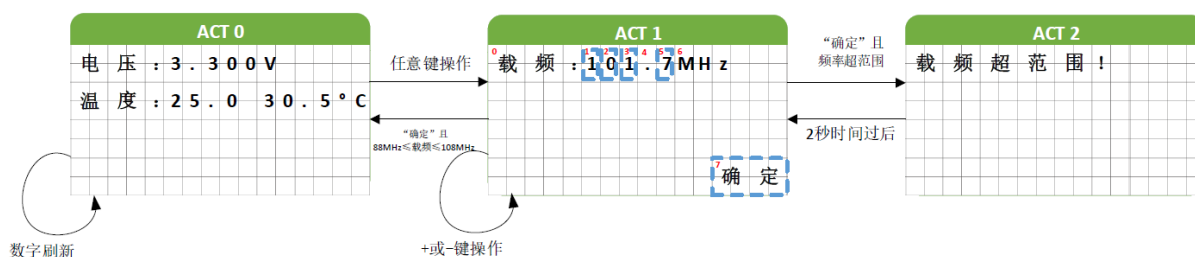
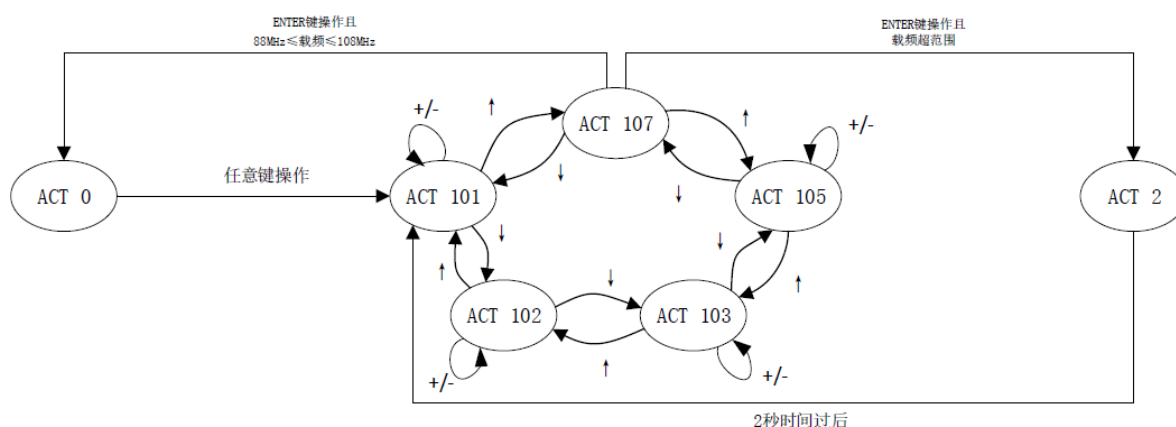


图 5-15 温度传感器插到单排座上

#### 5.4.6 发射端系统整合（实验任务 5\_6）



(a) 用户界面画面示意图



(b) 状态机转移逻辑图

图 5-16 发射端用户界面示意

发射组负责将本端各项功能整合成一体化作品。基本要求简要说明如下：

- 1) 以实验 4 用过的液晶屏和十字排布按键作为正式的用户界面（注：数码管、指示灯等仍可以用作面向开发者的调试目的）；
- 2) 界面的基本画面要求如图 5-16(a) 所示，允许按本组偏好适当优化，但不能随意简化；相应的状态机转移逻辑可参考（非强制）图 5-16(b)；
- 3) P3 点电压读数显示于界面首页（ACT0），显示精度 0.001V，测量误差限于 $\pm 0.01V$  以内，并能自动动态刷新；
- 4) 两路温度读数显示于界面首页，显示精度 0.1℃，并能自动动态刷新，定性考查功能有效性；
- 5) 通过按键可进入第 2 页画面（ACT1），设置 FM 模块射频工作频率，在用户按确定键后自动判断该参数合法性，数值合法区间规定为 $[88.0\text{MHz}, 108.0\text{MHz}]$ ，若数值非法则出现警示画面；
- 6) 自选一路温度数值，可按 5.3.7 描述的编码规则，由单片机产生频率信号并连接 FM 模块声道（左、右声道自选）传送。

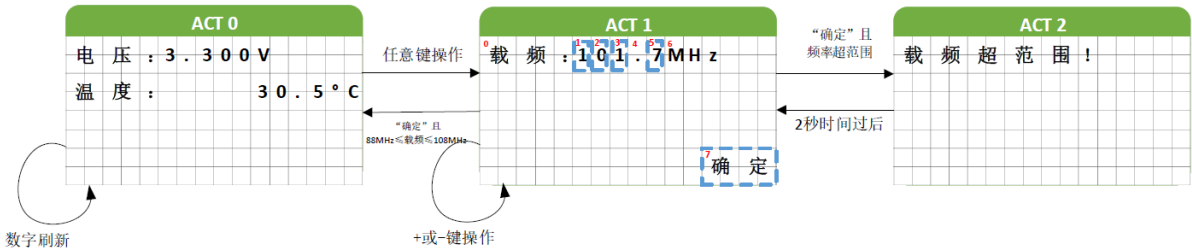
#### 5.4.7 接收端系统整合（实验任务 5\_7）

接收组负责将本端各项功能整合成一体化作品。基本要求简要说明如下：

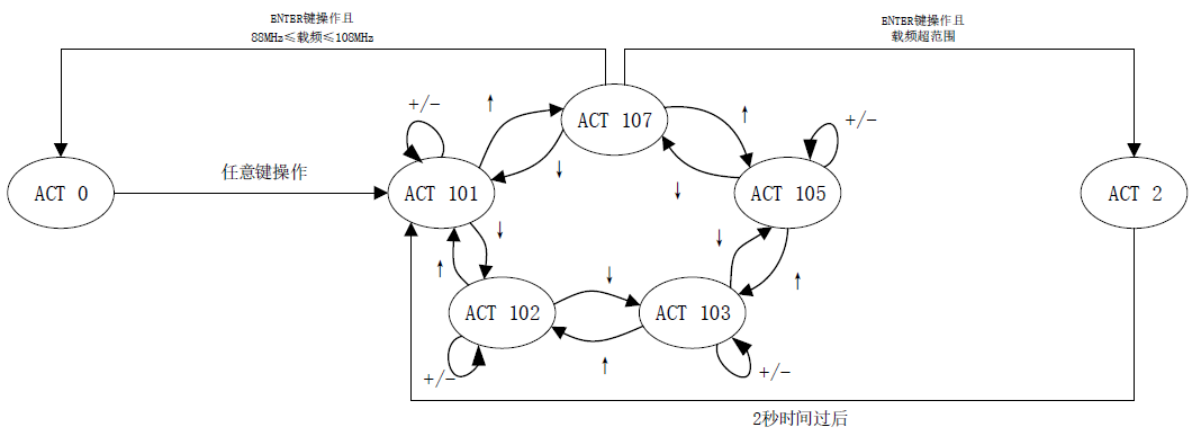
- 1) 以实验 4 用过的液晶屏和十字排布按键作为正式的用户界面（注：数码管、指示灯等仍可以用作面向开发者的调试目的）；
- 2) 界面的基本画面要求如图 5-17(a) 所示，允许按本组偏好适当优化，但不能随意简化；相应的状态机转移逻辑可参考（非强制）图 5-17(b)；
- 3) P3 点电压读数显示于界面首页（ACT0），显示精度 0.001V，测量误差限于 $\pm 0.01V$  以内，并能自动动态刷新；
- 4) 通过按键可进入第 2 页画面（ACT1），设置 FM 模块射频工作频率，在用户按确定键后自动

判断该参数合法性，数值合法区间规定为[88.0MHz, 108.0MHz]，若数值非法则出现警示画面；

- 5) 从 FM 模块声道接收来自发射端的频率编码信号，按 5.3.7 描述的或收发双方约定的编码规则，解码还原温度数值信息，并显示于界面首页，显示精度 0.1℃，并能自动动态刷新；当收发尚未连通时，可以用函数信号源给出信号到 P4（见图 5-8）作调试验证之用。



(a) 用户界面画面示意图



(b) 状态机转移逻辑图

图 5-17 接收端用户界面示意

### 5.4.8 发送-接收联合系统实验（实验任务 5\_8）

在完成实验任务 5\_6、5\_7 基础上，发射端、接收端采用相同射频工作频率，使两侧同时工作，温度数值信息有效传递并自动动态刷新，验证联合系统功能有效性。

## 5.5 实验结果的考评

课程组织现场考评，检查学习者对实验任务的完成情况。

- ◇ 对实验任务规定的作品外部可见功能和仪器设备，学习者应能熟练操作和展示；
- ◇ 学习者应能熟练掌握实验步骤中的具体操作，根据评测官现场要求（工作参数可能有别于已做内容）展示这些技能，比如临时改变界面显示内容、改变信号源设备输出信号等。

课程还对实验报告进行评价。

## 5.6 实验报告要求

根据自己的实验结果记录，按课程要求提交实验报告。

## 5.7 勘误

调频发射实验单元板 UART 接口对应的丝印标识有错。MCU\_TX、MCU\_RX 标识位置印反了（见图 5-18），所以要实现单片机和调频发射实验单元板 UART 模块通信，MCU\_TX 需要连接单片机 UART 模块相应 RX 引脚，MCU\_RX 需要连接单片机 UART 模块相应 TX 引脚。

（注：调频接收实验单元板 UART 模块标识没有错。）

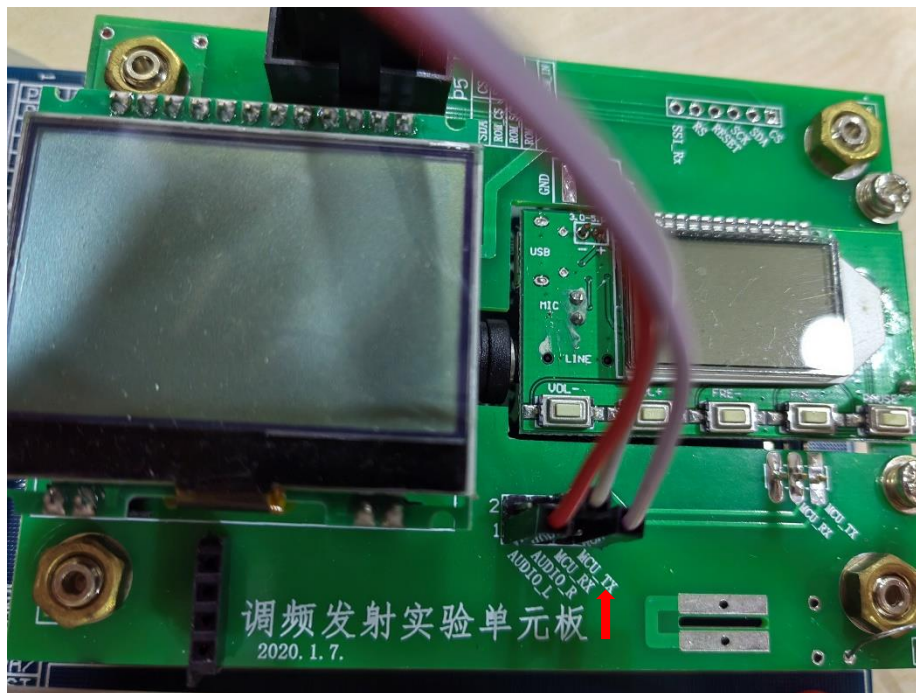


图 5-18 调频发射实验单元板

A

B

C

D

A

B

C

D

1

2

3

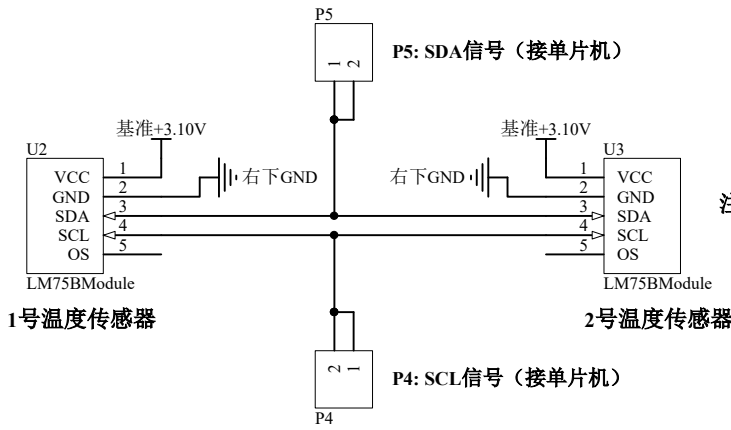
4

1

2

3

4



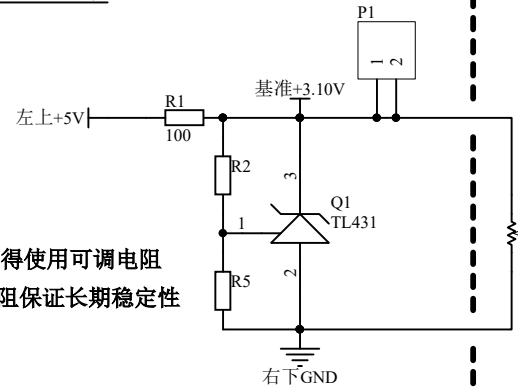
注：两个温度传感器总线地址须区别设置！

带IIC总线接口的温度传感器模块电路

# 发射机一侧 洞洞板电路 原理设计参考

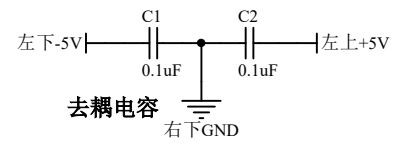
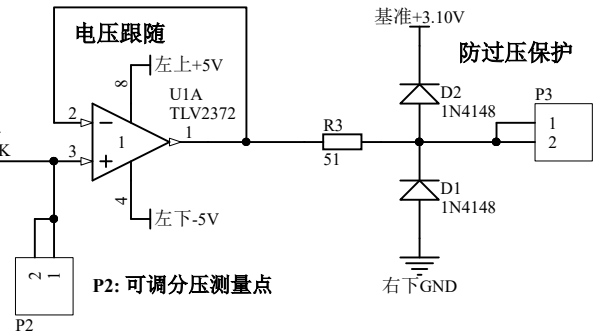
基准电压发生电路

P1: 基准电压测量点

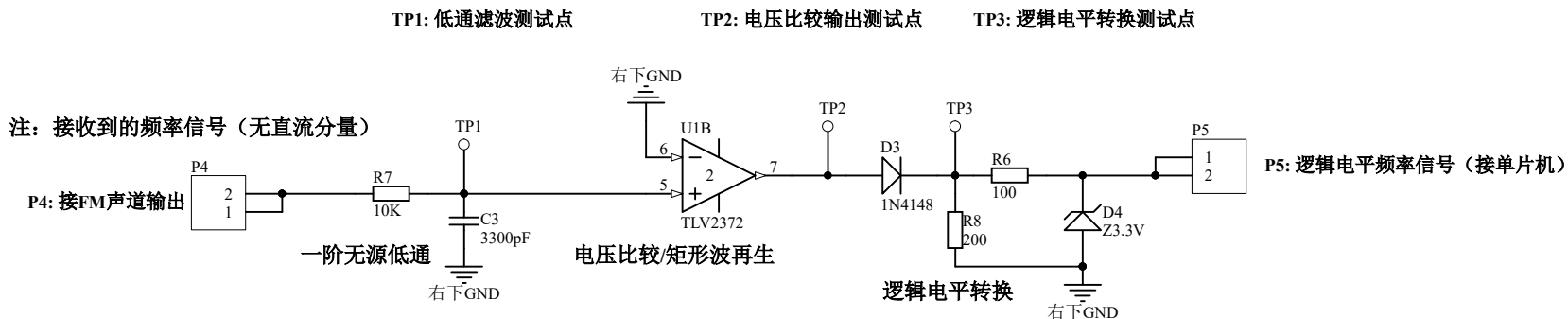


注：R2、R5不得使用可调电阻  
采用固定值电阻保证长期稳定性

可调分压和电压跟随电路







频率信号整形调理电路

# 接收机一侧 洞洞板电路 原理设计参考

基准电压发生电路

P1: 基准电压测量点

可调分压和电压跟随电路

注: R2、R5不得使用可调电阻  
采用固定值电阻保证长期稳定性

