

实验二 温度报警器电路设计

一、实验：

实验报告需包含以下内容：设计计算书、元器件参数选型过程、选型时资料佐证截图、仿真电路图、仿真关键波形图、原理图（原理图设计说明）、器件 BOM 清单、成功转网表文件截图等。

实验步骤如下：

结合前面的温度传感器电路、波形发生器电路和 LED 驱动电路的讲解，自行设计一个温度报警电路，要求工作温度范围为 $-20^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ ，实现下面功能：

- 1) 当温度高于 36 摄氏度时，以 800Hz 的频率驱动蜂鸣器发声，并亮红灯；
- 2) Micro USB 5V 供电

其中，蜂鸣器选用无源蜂鸣器（内阻 16 欧姆）。

要求：

- 1、报警时：蜂鸣器上的电压是幅值 3V 左右，800Hz 的方波电压；
- 2、LED 设计时需要考虑 LED 的电流，大致在 20mA 左右，电流太小，灯不会亮，报警时，灯长亮，不闪烁。
- 3、设计的温度传感器电路，请给出计算、设计过程以及做温度仿真（报警时和正常时温度采样电压波形）。

（一）组内分工

自动化5班-200320512-宣盈盈：LED驱动电路设计及报告、蜂鸣器驱动电路具体参数计算及报告、总体方案设计报告、方波发生器报告、问题与解决方法部分、体会建议部分

自动化6班-200320602-黄伊纯：蜂鸣器驱动电路设计及报告

自动化5班-200320517-覃漫婷：温度传感器电路设计及报告、问题与解决方法部分、体会建议部分

（二）总体技术方案

总体方案设计：本次实验要求实现温度报警器电路，工作温度范围为 $-20^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ ，在温度高于 36°C 时，以 800Hz 的频率驱动蜂鸣器发声，并亮红灯，Micro USB 5V 供电。单电源供电，用 LM2904 搭建方波发生器；温度检测采用热敏电阻，配合电压比较器，在温度超过 36°C 时输出高电平信号；LED 驱动电路利用晶体管（具体选用三极管）放大电流，以驱动 LED；蜂鸣器选用三极管放大电路并使用方波驱动，使得报警时，蜂鸣器可以按 800Hz 频率发声。

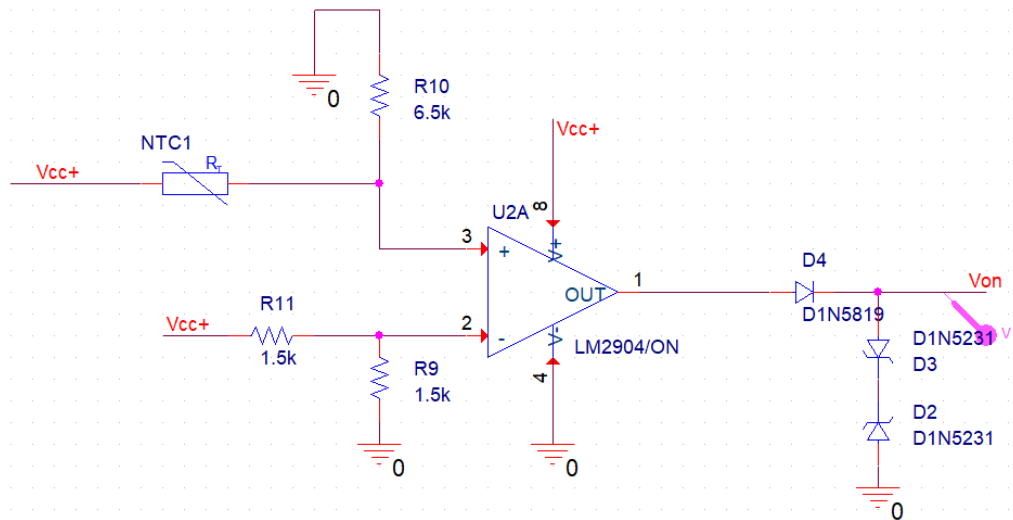
a) 温度传感器电路

选择 C619_10000 热敏电阻，其阻值随温度变化公式为

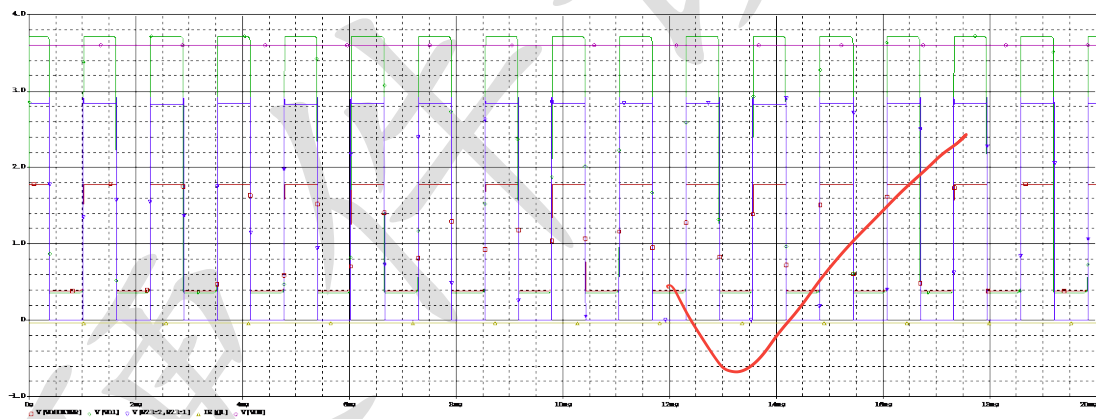
$$R_T = R_N \times e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N})}$$

其中， R_T 为热敏电阻在温度 T 下的阻值， R_N 为热敏电阻在温度 T_N 下的阻值， T 和 T_N 均为开尔文温度。

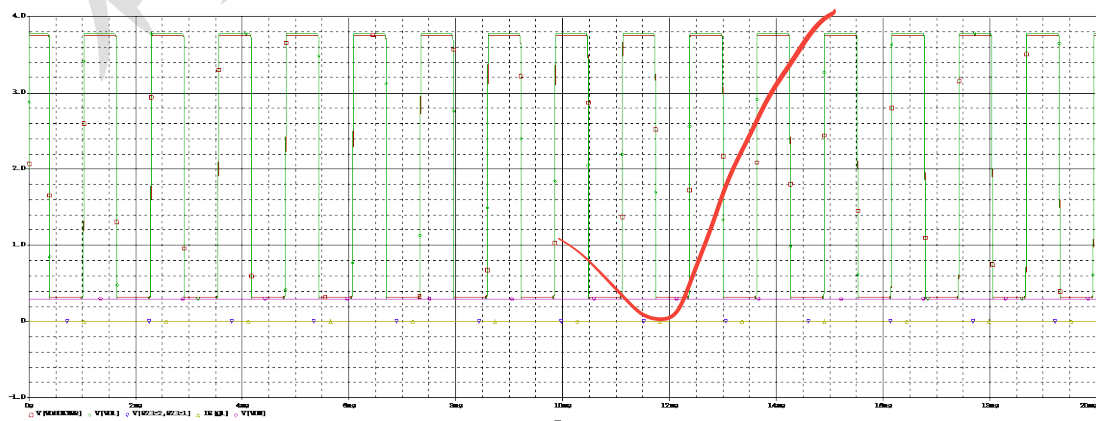
经计算，该热敏电阻在 36°C 时电阻值约为 $6.5\text{k}\Omega$ ，因此设计电压比较器电路如下：



当温度高于 36°C 时， V_{on} 输出高电平，图示温度为 50°C 时的仿真波形图（紫红色线对应为 V_{on} 波形）。

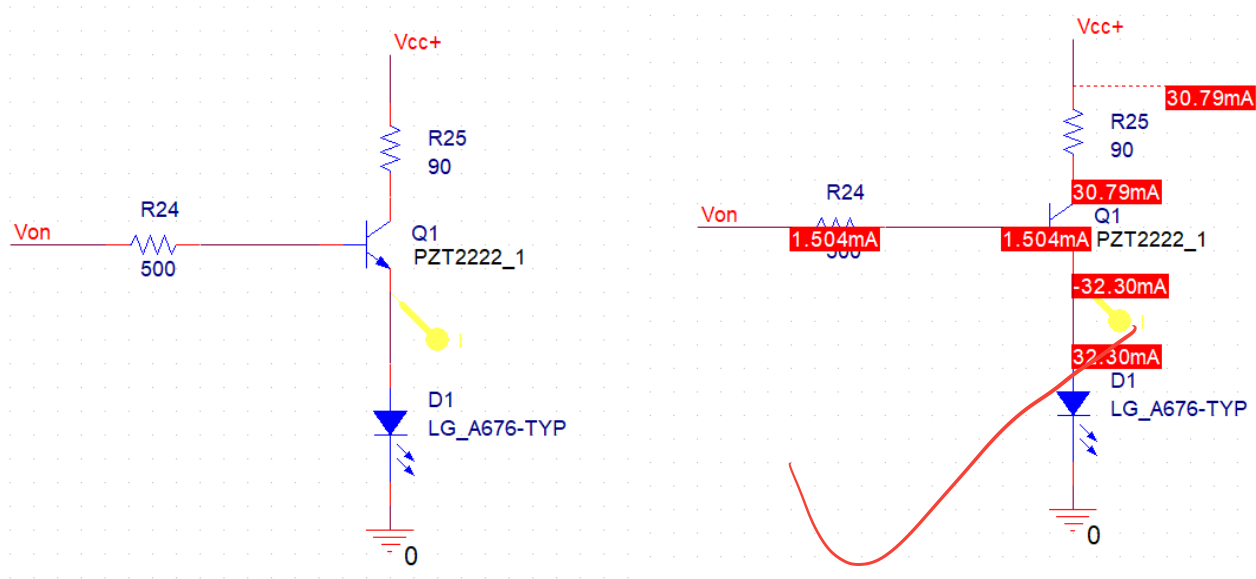


当温度低于 36°C 时， V_{on} 输出低电平，图示温度为 20°C 时的仿真波形图（紫红色线对应为 V_{on} 波形）。



b) LED驱动电路

电路图：



参数计算：

1. 限流电阻 R_{25} ：LED的导通压降在1.5V到3V之间，计算时暂定为2.5V，工作电流为20mA，则限流电阻 R_{25} 上的电压为 $V_{cc}-0.7V-2.5V = 5V-0.7V-2.5V = 1.8V$ ，则可计算限流电阻

$$R_{25} = \frac{1.8V}{20mA} = 90\Omega, \text{ 则取值为 } 90\Omega。$$

2. 基极限流电阻 R_{24} ：三极管集电极（c极）为发光二极管电流，取 $I_c = \frac{1.8V}{90\Omega} = 20mA$ ，由于选择的运放LM2904输出电流能力在mA级别，最大不能超过10mA，故需要添加三极管基极处的限流电阻 R_{24} ，由方波发生器的设计可得其输出电压大致为0到3.7V区间，取 I_b 为1mA时，电阻 $R_{24} = \frac{3.7V - 0.7V - 2.5V}{1mA} = \frac{0.5V}{1mA} = 500\Omega$ ，则取值为500 Ω 。

器件选型：

根据 I_b 和 I_c 的大小，可以计算得到三极管的电流放大倍数满足 $\beta = \frac{I_c}{I_b} = \frac{20mA}{1mA} = 20$ ，即三极管的放大倍数 β 至少要在20以上，才能保证三极管工作于饱和区。选择三极管NPN的极性，首先耐压需大于 $V_{cc+} = 5V$ ，选择 $I_c > 20mA$ ，电流放大倍数 $h_{fe} > 20$ ，即可挑选出满足设计要求的管子，起初选择PZT2222，部分参数如下。

Select	Product	Data Sheet	Compliance Status	Description	Polarity	Type	$V_{CE(sat)}$ Max (V)	I_c Cont. (A)	V_{CE0} Min (V)	h_{FE} Min	h_{FE} Max	f_T Min (MHz)	P_{TH} Max (W)	Package Type	
<div><div></div><div></div></div>			<div><div></div><div></div><div></div></div>		<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	
			<div>Halide free</div> <div>PPAP Capable</div>												
<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div> PZT2222A	<div><div></div><div></div></div>	<div>AEC Qualified</div> <div>Pb-free</div> <div>Halide free</div> <div>PPAP Capable</div>	Active	NPN Bipolar Transistor	NPN	General Purpose	1	0.6	40	100	300	300	1.5	SOT-223-4 TO-261-4

查阅PZT2222的datasheet，off特性（ $V_{(BR)CEO} = 40V$ 满足耐压大于5V的要求）和on特性（查看放大倍数）均满足上述设计要求。

OFF CHARACTERISTICS

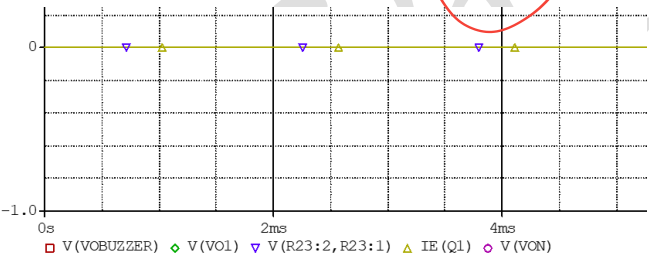
Collector–Emitter Breakdown Voltage ($I_C = 10\text{ mA}$, $I_B = 0$)	$V_{(BR)CEO}$	40	–	Vdc
Collector–Base Breakdown Voltage ($I_C = 10\text{ }\mu\text{A}$, $I_E = 0$)	$V_{(BR)CBO}$	75	–	Vdc
Emitter–Base Breakdown Voltage ($I_E = 10\text{ }\mu\text{A}$, $I_C = 0$)	$V_{(BR)EBO}$	6.0	–	Vdc

ON CHARACTERISTICS

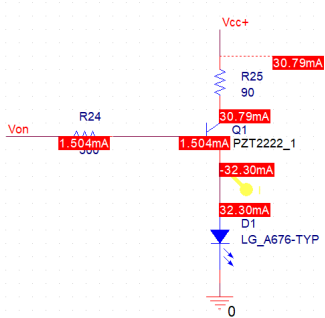
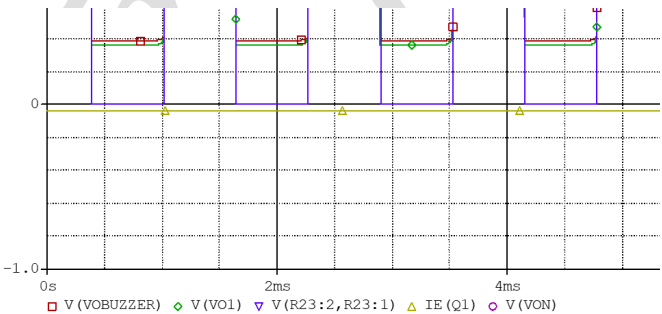
DC Current Gain ($I_C = 0.1\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ V}$) ($I_C = 1.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ V}$) ($I_C = 10\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ V}$) ($I_C = 10\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ V}$, $T_A = -55^\circ\text{C}$) ($I_C = 150\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ V}$) ($I_C = 150\text{ mA}$, $V_{CE} = 1.0\text{ V}$) ($I_C = 500\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ V}$)	h_{FE}	35 50 70 35 100 50 40	– – – – 300 – –	–
Collector–Emitter Saturation Voltages ($I_C = 150\text{ mA}$, $I_B = 15\text{ mA}$) ($I_C = 500\text{ mA}$, $I_B = 50\text{ mA}$)	$V_{CE(sat)}$	– –	0.3 1.0	Vdc
Base–Emitter Saturation Voltages ($I_C = 150\text{ mA}$, $I_B = 15\text{ mA}$) ($I_C = 500\text{ mA}$, $I_B = 50\text{ mA}$)	$V_{BE(sat)}$	0.6 –	1.2 2.0	Vdc

关键波形：

这部分电路主要关注流过LED的电流是否足够驱动LED，测量电流时，分别设置2个不同温度。当温度为20℃时，由于温度传感器电路提供低电平信号，流过LED电流为0；



当温度为50℃时，由于温度传感器电路提供高电平信号，流过LED电流为32.30mA（波形图粗略判断得不为0值，查看探针所得具体值为32.30mA），大于20mA，足够驱动LED。（测量时探针设置问题导致电流测得负值，不影响实验结果）



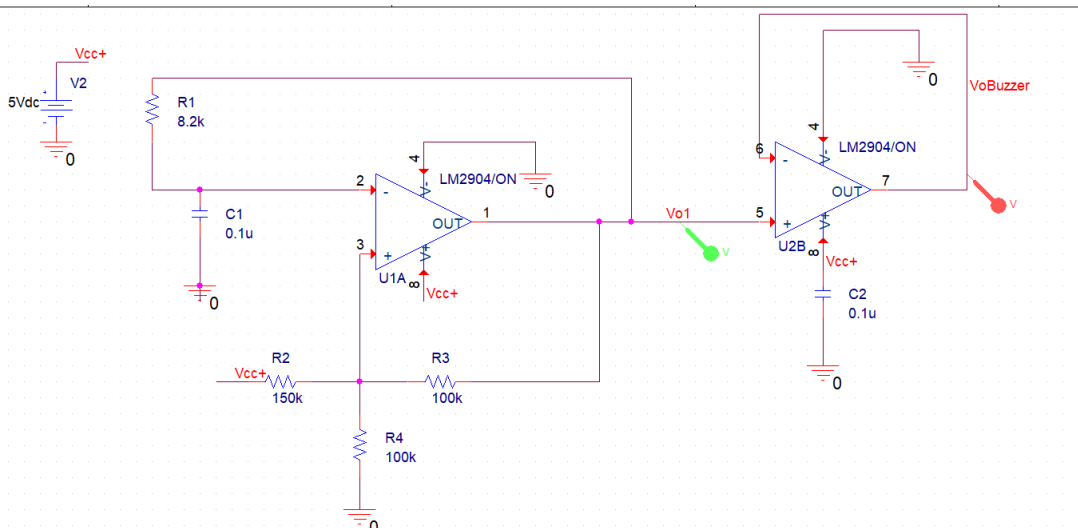
分析讨论：

LED驱动电路部分关键在于将温度传感器部分输出电流经过三极管放大，以驱动LED。将温度传感器输出电压 V_{on} 连接基极限流电阻 R_{24} 后接入三极管基极， R_{24} 起限流作用防止电流过大损坏三极管，集电极处的限流电阻 R_{25} 与三极管放大倍数保证了LED驱动电流的大小。该部分的整体电路效果为：测量电流时，分别设置36℃以上与以下的2个温度。

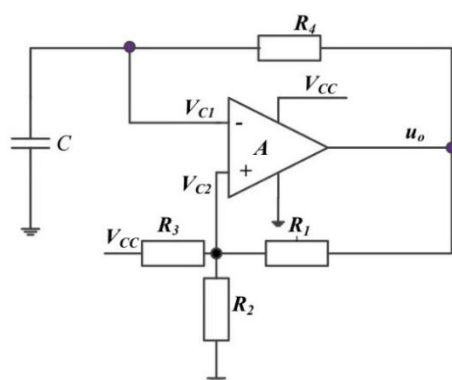
当温度为20℃时，由于温度传感器电路提供低电平信号 $V_{on} = 0.2\text{ V}$ 近似为0，则导致流过LED电流近似为0，不足以驱动LED，表现为LED不亮；

当温度为50℃时，由于温度传感器电路提供高电平信号 $V_{on}=3.7V$ ，流过LED电流为32.30mA，大于20mA，足够驱动LED，表现为LED长亮。

c) 方波发生器



参数计算：



在几 kHz 级别的波形发生器中，通用的电阻为 $k\Omega$ 级别，电容为 μF 级别，如果电容 C 选择 $0.1\mu F$ ， R_1 、 R_2 选择 $100k\Omega$ ， R_3 选择 $150k\Omega$ ， T 为 $1/(800Hz)$ ， $D=0.5$ ， $V_{o1}=4$

根据公式，可以计算出

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{CC} \times \frac{R_2 // R_1}{R_2 // R_1 + R_3} = 1.25 \\ V_2 &= V_{o1} \times \frac{R_2 // R_3}{R_2 // R_3 + R_1} + V_{CC} \times \frac{R_2 // R_1}{R_2 // R_1 + R_3} = 2.75 \\ T &= -\frac{R_4 C_1 \ln \frac{V_{o1} - V_2}{V_{o1} - V_1}}{D} = 1.25m \end{aligned} \quad \text{式 (2-6)}$$

可以得出 $R_4=7.93k\Omega$ ，选择电阻时，需要根据电阻常用的档位来进行选取，最终选取 $R_4=8.2k\Omega$ 。从上面可以看出，如果首先选择的电容值不同，则 R_1 、 R_2 、 R_4 也会不同，但是只要设计合理，都可以实现输出 $800Hz$ 矩形波。在实际使用时，可以根据手边已有的电阻、电容来挑选合适的器件。

器件选型：

运算放大器选型时参数要求：

- 1) 开环电压放大倍数： $A_{vd} \geq 80dB$ (A_{vd} 足够大)；
- 2) 差模输入电阻： R_{id} 比反馈网络的输出阻抗大 $1 \sim 2$ 个量级，由输入电阻引起的误差就可以忽略；
- 3) 输出电阻： R_o 比后级输出端外总负载电阻小 $1 \sim 2$ 个量级，由输出电阻引起的误差就可以忽略；
- 4) 单位增益带宽：比实际闭环增益带宽大 1 个量级以上；
- 5) 共模抑制比：CMRR 足够大，抗干扰设计中重要；
- 6) 输入失调电压： V_{io} 不超过系统精度要求的 $1/3$ 。

根据题目要求，工作范围为 $-20^\circ C$ 到 $70^\circ C$ ，则须关注运放的温度范围条件满足此区间。

大器。图 2-9 为筛选条件图，Number of Channels: 一个封装内运放单元的数量，我们使用了两个运放单元，所以选择 2; Total supply voltage (Max): 最大供电电压，由于输出为幅值 5.1V，所以电源电压至少比 5V 要高; GBW (MHz): 带宽参数，选择 10kHz~100kHz,中频段，因为我们需要 800Hz 的频率，带宽太低，可能失真，一般选择 10 倍以上的; Package: 封装形式，使用贴片封装，通用的有 SOIC, SO 等。这样可以粗略挑选出我们需要的运放，图 2-10 所示。

18 matching parts out of 721 total parts

Part Number	Number of Channels (N)	Total Supply Voltage (Max) (+5V~5, +/-5V~10)	GBW (Typ) (MHz)	Package Group	Total Supply Voltage (Min) (+5V~5, +/-5V~10)	Slew Rate (Typ) (V/us)	Rail-to-Rail	Vos (Offset Voltage @ 25C) (Max) (mV)	Iq per channel (Typ) (mA)	Vs at 1kHz (Typ) (mV/rHz)	Rating	Operating Temperature Range (C)	Approx. Price (US\$)
<input type="checkbox"/> LP2904 - Ultra-Low-Power Dual Operational Amplifiers	2	32	0.1	SOIC	3	0.05	In to V-	4	0.02125	80	Catalog	-40 to 85	0.45 (1ku)

(根据运放单元为2、最大供电电压大于5V、GBW处于中频段等要求进行挑选)

由题目知，要求输出频率为 800Hz，所以 R_4 和 C 充放电的频率也为 800Hz， R_4 和 C 充放电的幅值为 U_R ，如果取 $U_R=2.5V$ 左右，SR 需要大于 $2.5V \times 800Hz=2V/ms$ ，而 LP2904 的 SR 远大于 2V/ms，所以满足我们的要求。

另外，我们查阅资料，此运放的供电电源如下图：可以用+5V 供电，运放满足要求。

6.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾

		MIN	MAX	UNIT
V _{CC}	Supply voltage range ⁽²⁾		±16 or 32	V

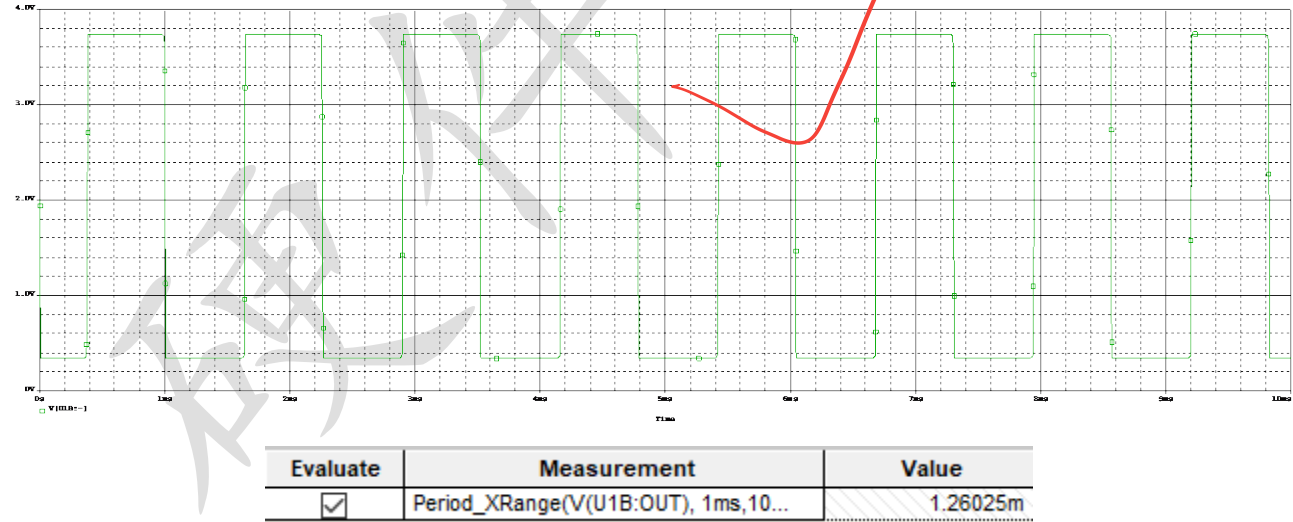
6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

			MIN	MAX	UNIT
V _{CC}	Supply voltage		3	32	V
V _{CM}	Common-mode voltage		0	V _{CC} - 1.5 V	V
T _A	Operating free-air temperature	LP358	0	70	°C
		LP2904	-40	85	

故最终选择运放型号LM2904。

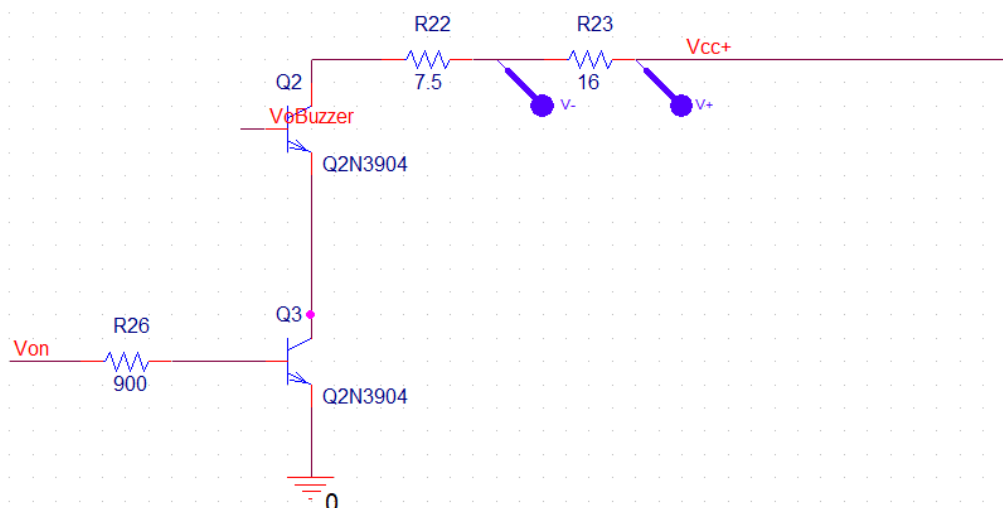
关键波形：基本满足800Hz要求。



分析讨论：

这部分电路选取电容 $C = 0.1 \mu F$ ， $R_1 = R_2 = 100k\Omega$ ， $R_3 = 150k\Omega$ ， $R_4 = 8.2k\Omega$ ， $D = 0.5$ ， $V_{O1} = 4V$ ， $V_1 = 1.25V$ ， $V_2 = 2.75V$ ，计算得 $T=1.29ms$ ， $f=773.4Hz$ 。仿真周期为 $T=1.26025ms$ ，仿真频率为 $f=793.493Hz$ ，基本满足 800Hz 要求。计算的矩形波发生器的频率和仿真的频率有差异，因仿真时的计算步长、模型的精度有限等原因，无法保证仿真周期和计算周期完全相等。

d) 蜂鸣器驱动电路



参数计算:

1. 基极电阻 R_{26} : 为防止三极管导通时将温度传感器输出电压 V_{on} 下拉到地, 接入基极电阻 R_{26} , 取基极电流足够小为 0.33mA , $R_{26} = \frac{3.7V - 0.65V}{0.33\text{mA}} = \frac{3.05V}{0.33\text{mA}} = 924\Omega$, 故选择 R_{26} 为 900Ω , 以保证 V_{on} 受到地的影响较少, 且导通时不影响该电路其他部分分压。
2. 分压电阻 R_{22} : 要保证蜂鸣器 ($R_{23} = 16\Omega$) 工作则需工作电压达到幅值 $3V$ 左右, 此时进行分压, $R_{22} = \frac{V_{cc+} - V_{23}}{V_{23}} R_{23} = \frac{5V - 3V}{3V} \cdot 16\Omega = 10.67\Omega$, 此处取 $R_{22} = 7.5\Omega$ 左右即可使得蜂鸣器两端电压到达 $3V$ 左右 (仿真时已到达 $2.85V$, 约为 $3V$ 左右, 如需再提高电压幅值, 可适当再降低 R_{22})。

器件选型:

起初选择两个场效应管Q2N7000, 但由于场效应管的内阻过大导致蜂鸣器两端的分压太小。经过实际选型和测试, 以及成本考虑, 选择两个三极管Q2N3904。

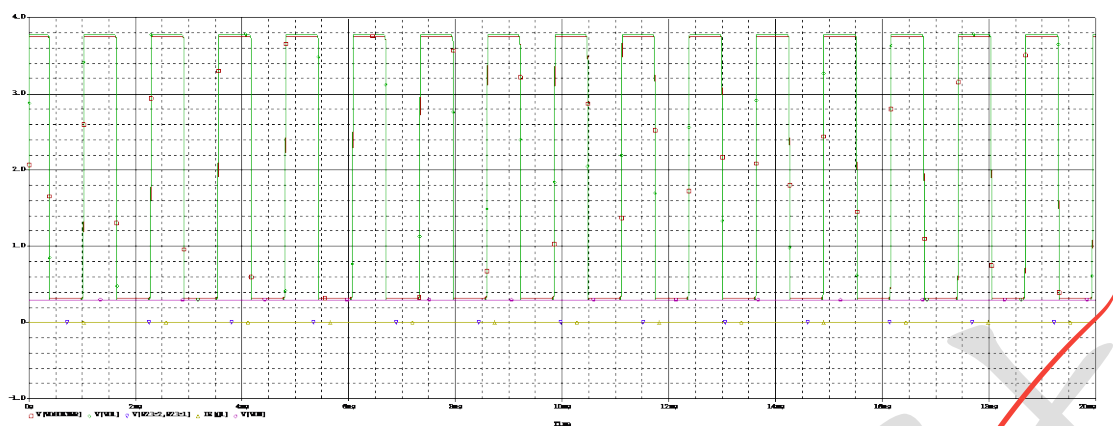
要满足蜂鸣器两端的电压为 $3V$ 左右, 则 $I_C \geq \frac{3V}{16\Omega} = 0.1875A$, 又因为 $V_{oBuzzer}$ 在高电平时大约为 $1.8V$, 所以 $Q_3 \geq 1.5V - 0.65V = 1.15V$, 即 $U_{CE} \geq 1.15V$, 查阅Q2N3904的资料, 满足以上要求。

Product Group	状况	CAD Models	Compliance	Polarity	Type	VCE(sat) Max (V)	Ic Cont. (A)	VCEO Min (V)	VcBO (V)	VEBO (V)	VBE(sat) (V)	VBE(on) (V)
2N3904T Datasheet	Active				General Purpose	0.3	0.2	40	60	6	0.65	-

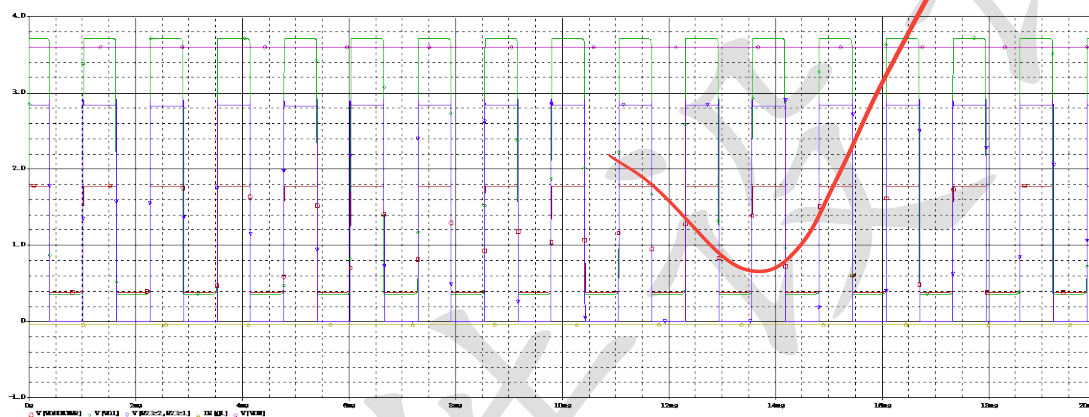
关键波形:

蜂鸣器的波形为蓝色

20℃，蜂鸣器两端电压为0V

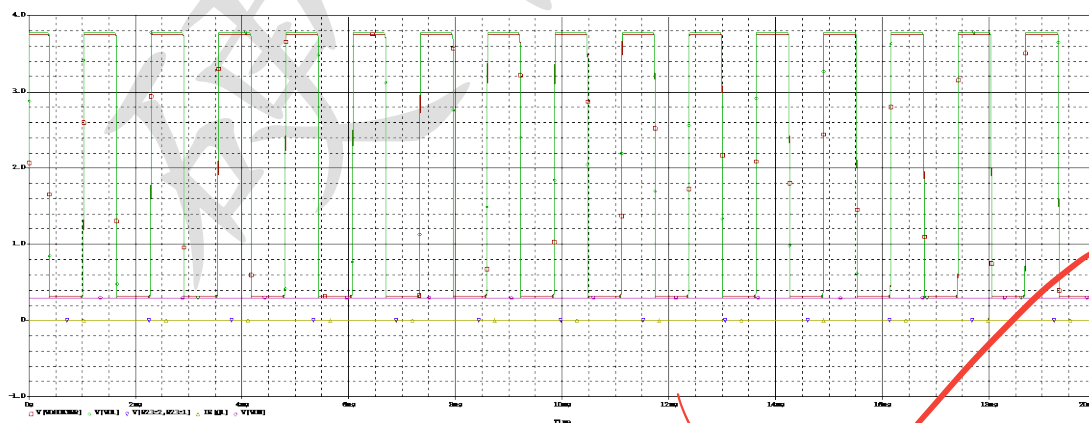


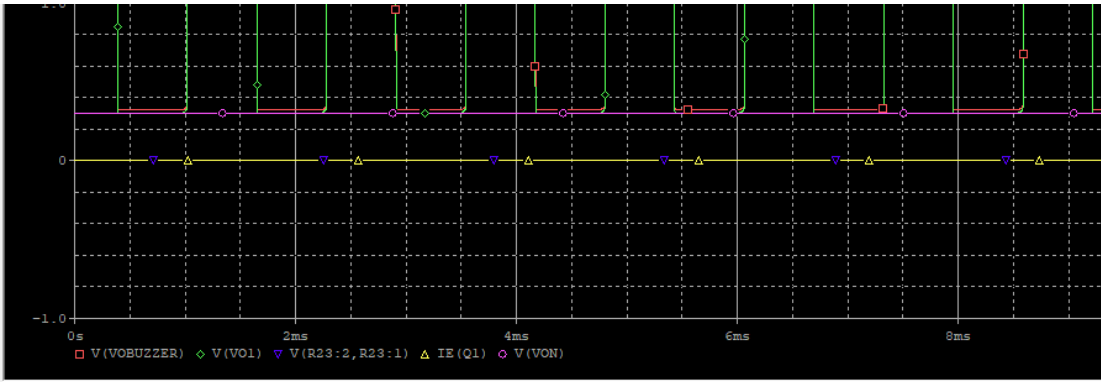
50℃，蜂鸣器两端电压为幅值为2.81V左右的方波，频率为800Hz。



e) 波形图（整体效果）

20℃





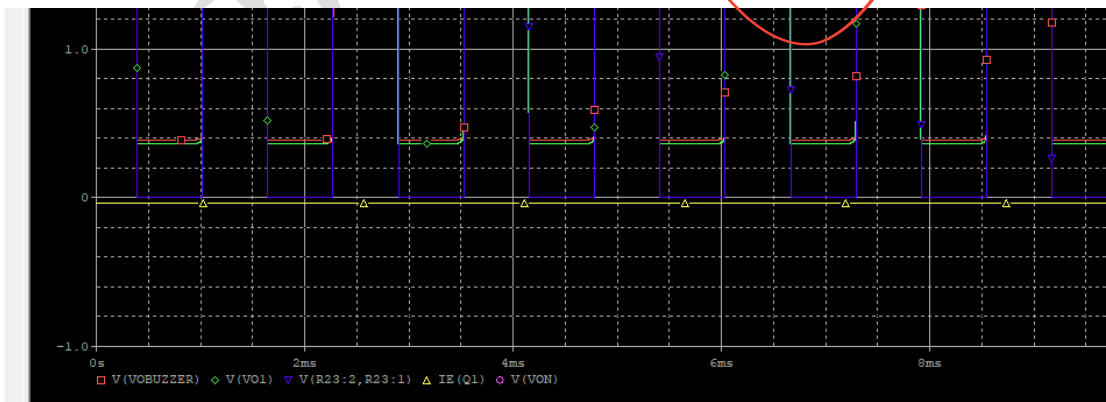
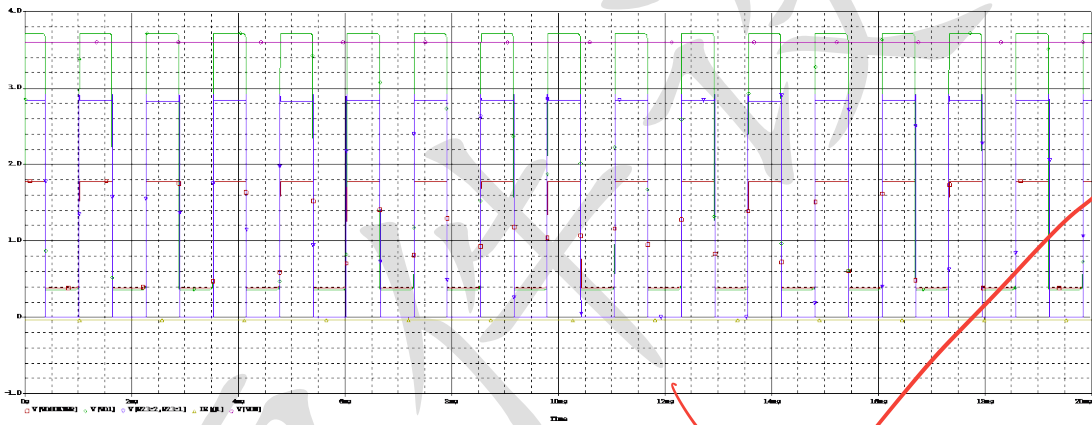
1234 (ao...)

```
ice> Initializing Scripting...
ding C:/Cadence/Cadence_SPB_16.6/tools/pspice/tclscripts/ps
ding C:/Cadence/Cadence_SPB_16.6/tools/pspice/tclscripts/ps
```

ice>

Temperature = 20.0
Time step = 1.000E-06 Time = .02 End = .02

50°C



1234 (ao...)

```
Spice> Initializing Scripting...
loading C:/Cadence/Cadence_SPB_16.6/tools/pspice/tclscripts/ps
loading C:/Cadence/Cadence_SPB_16.6/tools/pspice/tclscripts/ps
```

Spice>

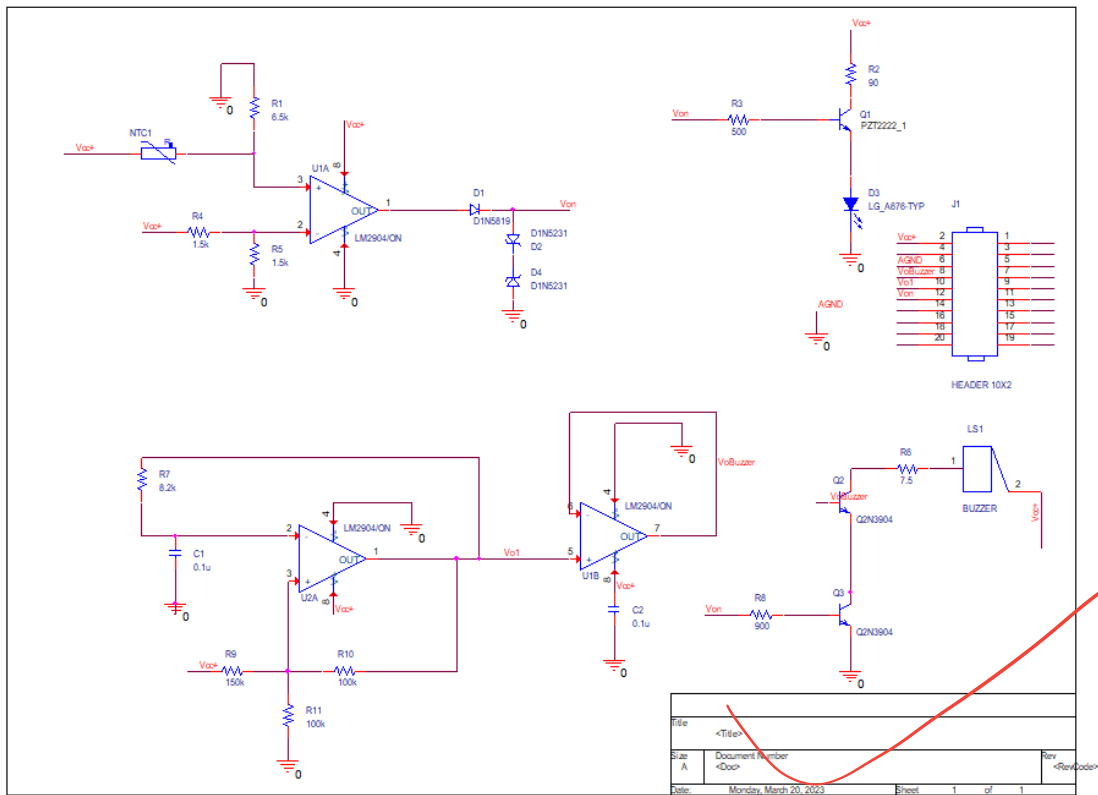
Temperature = 50.0
Time step = 1.000E-06 Time = .02 End = .02

Analysis Watch Devices

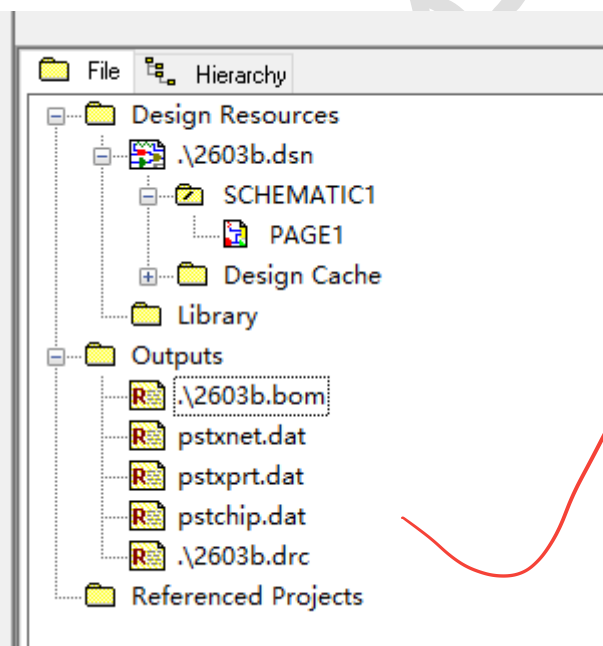
00320602\ltsh\1\0315-PSpiceFiles\SCHEMATIC1\1234\1234.dat (active)

(三) 报警器原理图

a) 原理图



b) 5个处理文件截图



c) BOM清单

1: Revised: Monday, March 20, 2023

2: Revision:

3:

4:

5:

6:

7:

8:

9:

10: Bill Of Materials

March 20,2023

12:27:55

Page1

11:

12: Item

Quantity

Reference

Part

PCB Footprint

13:

14:

15: 1 2 C1,C2 0.1u 0805

16: 2 1 D1 D1N5819 do41-1

17: 3 2 D2,D4 D1N5231 do41-1

18: 4 1 D3 LG_A676-TYP do41-1

19: 5 1 J1 HEADER 10X2 temp

20: 6 1 LS1 BUZZER 0805

21: 7 1 NTC1 C619_10000/EPC 0805

22: 8 1 Q1 PZT2222 to39

23: 9 2 Q2,Q3 Q2N3904 to39

24: 10 1 R1 6.5k 0805

25: 11 1 R2 90 0805

26: 12 1 R3 500 0805

27: 13 2 R4,R5 1.5k 0805

28: 14 1 R6 7.5 0805

29: 15 1 R7 8.2k 0805

30: 16 1 R8 900 0805

31: 17 1 R9 150k 0805

32: 18 2 R10,R11 100k 0805

33: 19 1 U1 LM2904/ON fmq

34: 20 2 U1,U2 LM2904/ON soic8

35:

二、实验中遇到的问题和解决方法

1. 在设计过程中，未注意热敏电阻型号与阻值的关系。查找资料，找到热敏电阻型号上表明阻值相关信息的位置。
2. LED 驱动电路挑选基极与集电极电阻阻值时起初计算有误，导致驱动电流不够大，难以驱动，后续根据温度传感器实际输出电压的幅值修改计算过程后，得出合适电阻阻值，得到足够大的 LED 驱动电流。
3. 蜂鸣器驱动电路起初使用场效应管，整体分压效果差，难以驱动蜂鸣器。后续更换为三极管，并在与温度传感器输出电压相连的基极处添加基极电阻，以保证 V_{on} 受 e 级接地的影响较少。

三、实验体会与建议

1. 通过本次实验设计，小组各成员增强了沟通协作能力与团队责任心。
2. 通过本次实验设计，小组各成员增强了基本的硬件设计的专业知识储备及动手实践能力。
3. 通过本次实验设计，小组各成员明白了善于与指导老师进行沟通交流的重要性。
4. 通过本次实验设计，小组各成员对器件选型原理及操作有了更深刻的认识，分析不同器件的差别。