

电子科技大学
《模拟电路基础》应用设计报告

设计题目： 基于温度变化的灵敏度可调的火灾报警电路

学生姓名： 黄泽熙 学号： 2014030302014

教师姓名： 何松柏 日期： 2015. 12. 30

1. 设计任务

火灾报警器是人们为了早期发现通报火灾,并及时采取有效措施控制火灾的一种自动消防设施.基于温度变化的火灾报警电路设计任务与要求如下:

- (1) 在正常温度下,火灾报警电路无声光信号输出,发光二极管不亮,蜂鸣器不响.
- (2) 当环境温度达到阈值 $T_c = 50^{\circ}C$ 后,火灾报警电路有声光信号输出,发光二极管发光,蜂鸣器鸣叫.

2. 电路原理

2.1. 整体方案

完整的火灾报警器电路由图 1 中四个部分组成,包括温度传感电路,用于将外界温度变化的热信号转化为电信号;差分放大电路,用于将抑制噪声并放大输入电信号;电压比较电路,用于将放大后的电信号与标准电压进行比较,判断火灾是否发生;声光报警电路,用于最终将电信号转化为声信号和光信号便于人们察觉.在设计阶段产生的两个方案电路总图分别如图 2、图 3,在调试阶段中基于方案二进一步改良得到的方案三电路总图如图 4.

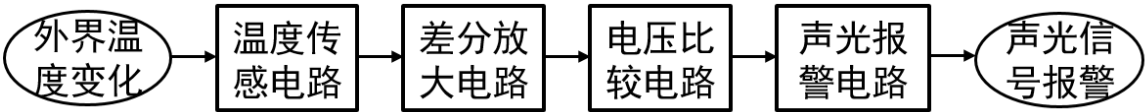


图 1 火灾报警电路方框图

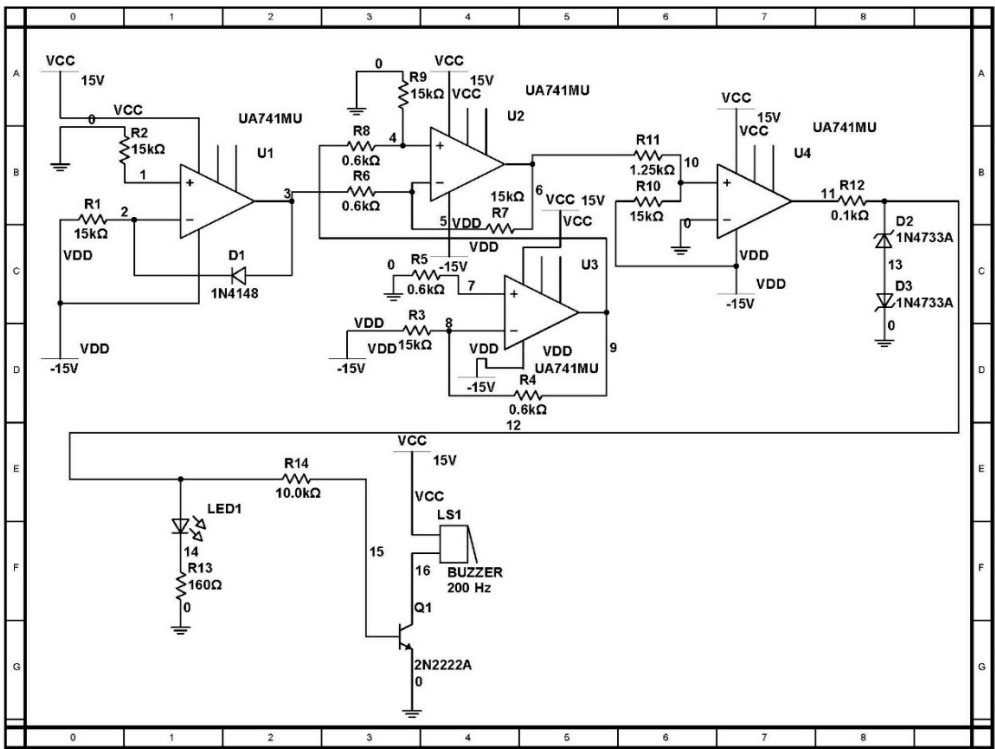


图 2 火灾报警电路方案一电路总图

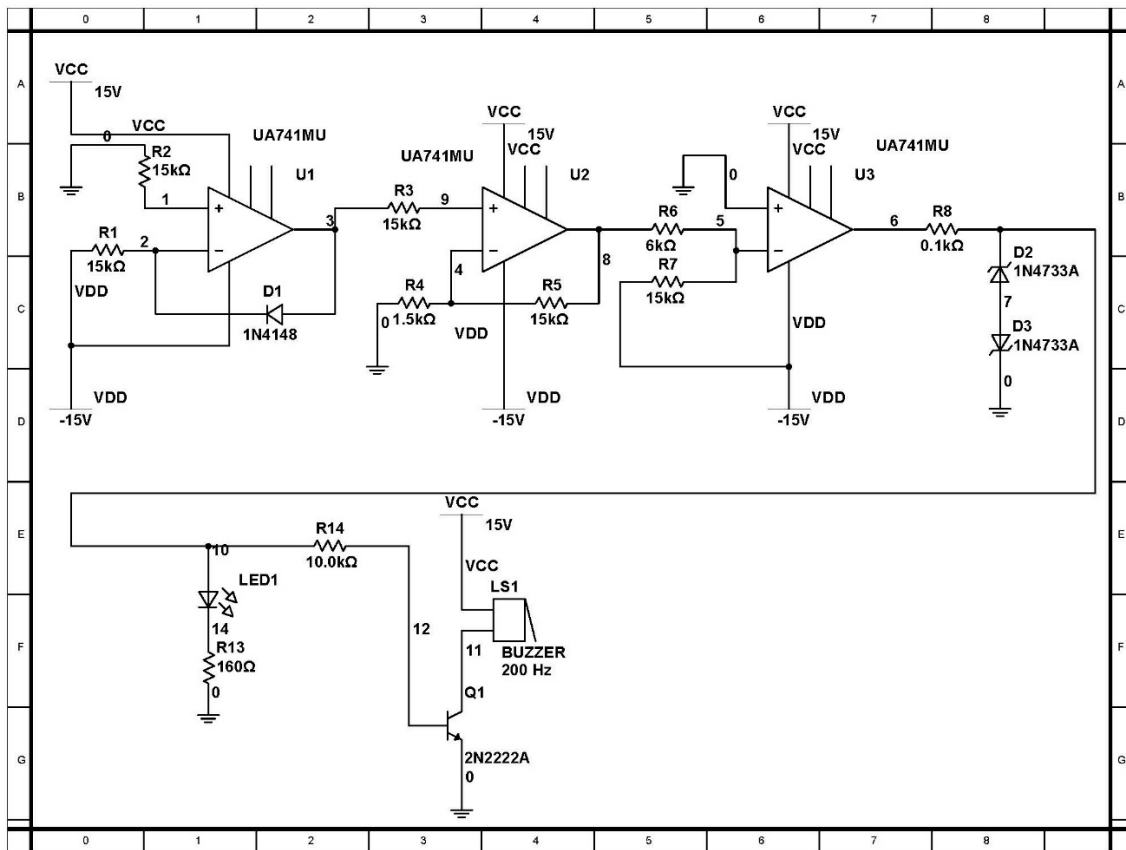


图 3 火灾报警电路方案二电路总图

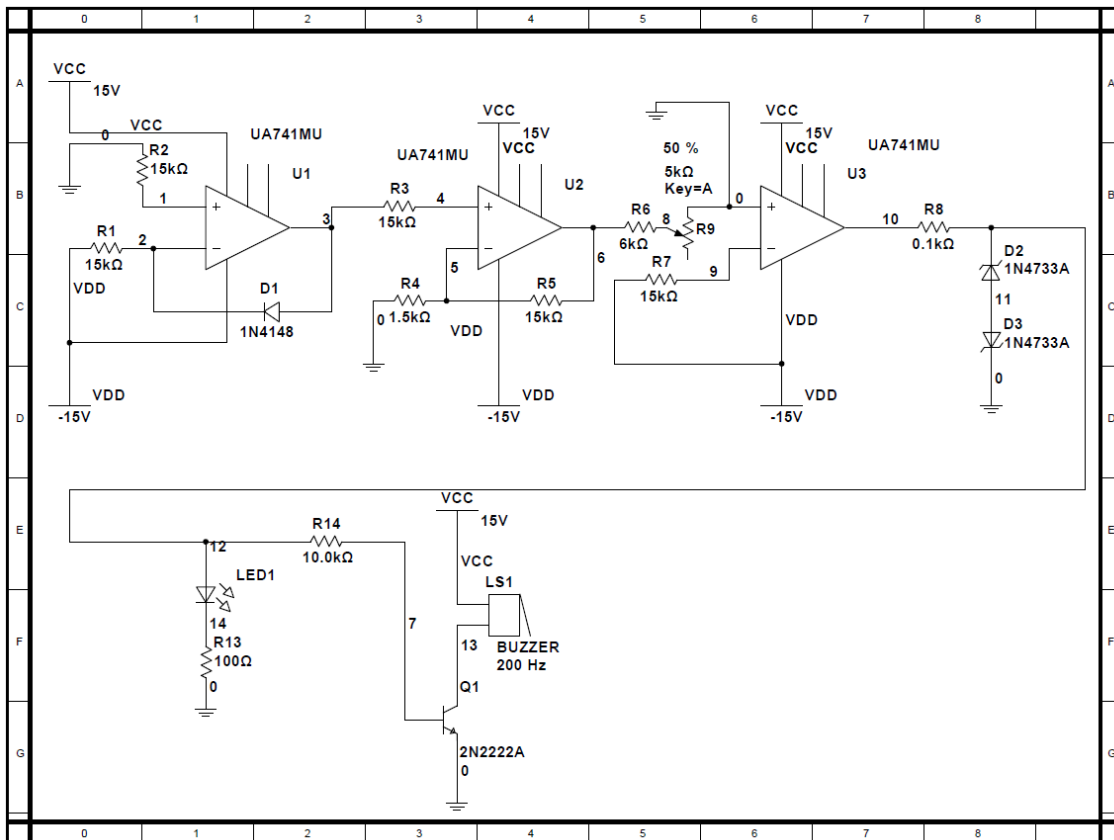


图 4 火灾报警电路方案三电路总图

2.2. 运算放大器

本次设计中采用的运算放大器均为 UA741 系列，该系列运放的温度范围表 1.为使各级电路在高温环境下仍能正常工作，选择温度范围最大的 UA741M.查芯片手册得到其工作的典型电压值为 $\pm 15V$ ，据此设定直流电源电压为

$$V_{CC} = -V_{DD} = 15V \quad (1)$$

Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
UA741C	0°C, +70°C	•	•
UA741I	-40°C, +105°C	•	•
UA741M	-55°C, +125°C	•	•
Example : UA741CN			

表 1 UA741 系列运放的工作温度

2.3. 温度传感电路

采用二极管 1N4148 作为温度传感器.从芯片手册上获取 1N4148 的允许通过的最大正向电流和温度的关系如图 5，不同温度下正向电流与正向电压的关系如图 6((1) $T = 175^{\circ}C$,典型值.(2) $T = 25^{\circ}C$,典型值.(3) $T = 25^{\circ}C$,极限值).当火灾发生时，环境温度 $T_c = 50^{\circ}C$ ，那么可得允许的最大工作电流约为 $I_M = 175mA$ ，但从图 5 中可以看出，当工作电流值很小时，不同温度间电压差别较大，为节约能源，使用小电流 $I_0 = 1mA$ 作为工作电流.温度传感器的电路部分如图 6，其中电阻阻值由

$$R_1 = \frac{-V_{DD}}{I_0} = 15k\Omega \quad (2)$$

确定.在本电路中，输出端电压即为二极管的正向电压.当温度变化时，二极管电流近似不变，由图 4 知，电压随温度的升高而降低，从而实现热信号到电信号的转换.

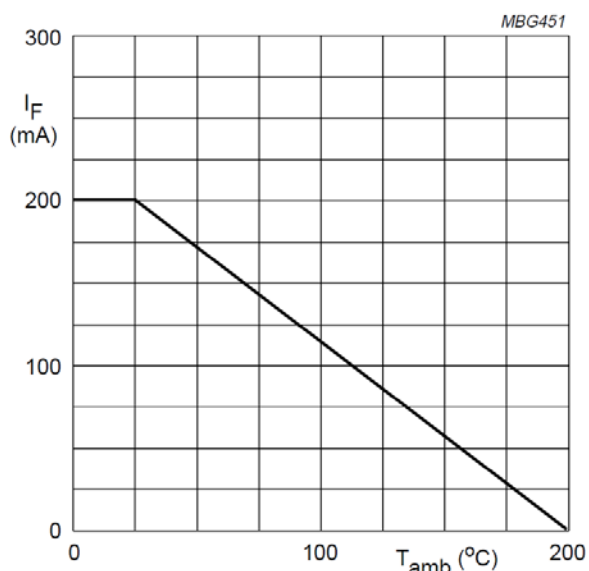


图 5 最大正向电流与环境温度的关系

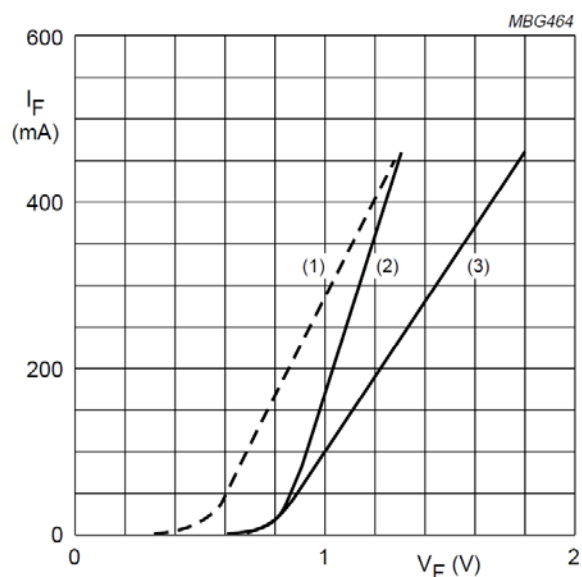


图 6 正向电压与电流的关系

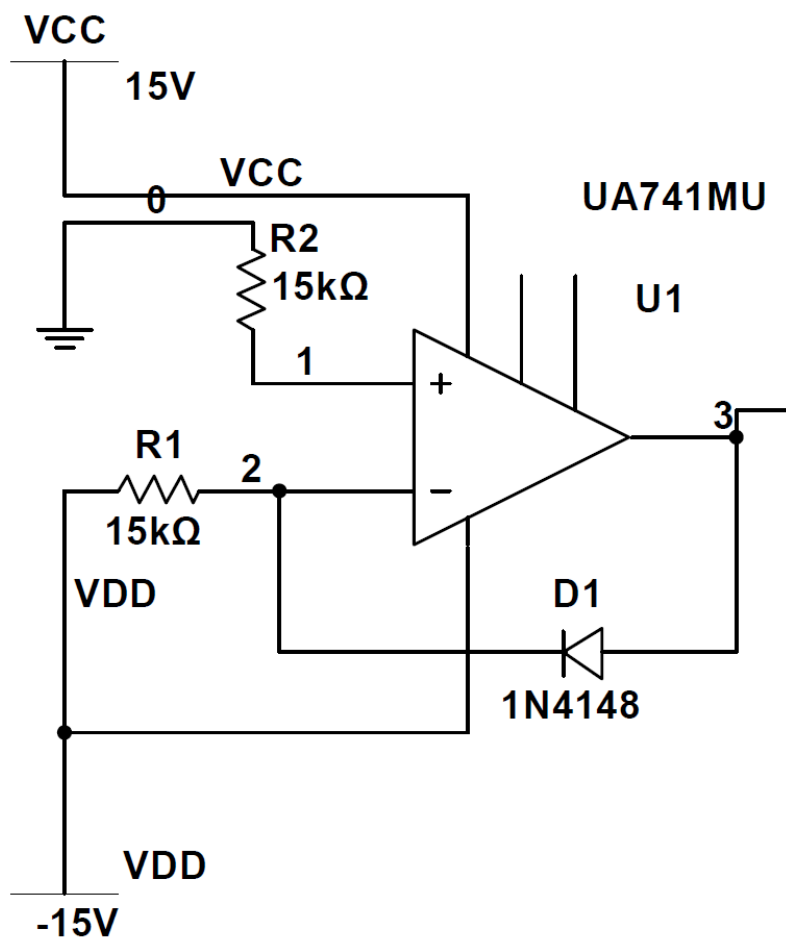


图 7 温度传感电路

为了确定电压的阈值, 利用温度扫描得到温度范围在 $0^{\circ}C \leq T \leq 100^{\circ}C$ 该电路输出电压与温度的关系如图 8, 其中, 温度 $T_1 = 0^{\circ}C$ 与 $T_2 = 100^{\circ}C$ 时的电压读数分别为 $U_1 = 648.8904mV \approx 650mV$, $U_2 = 449.8323mV \approx 450mV$ (见图 8)。

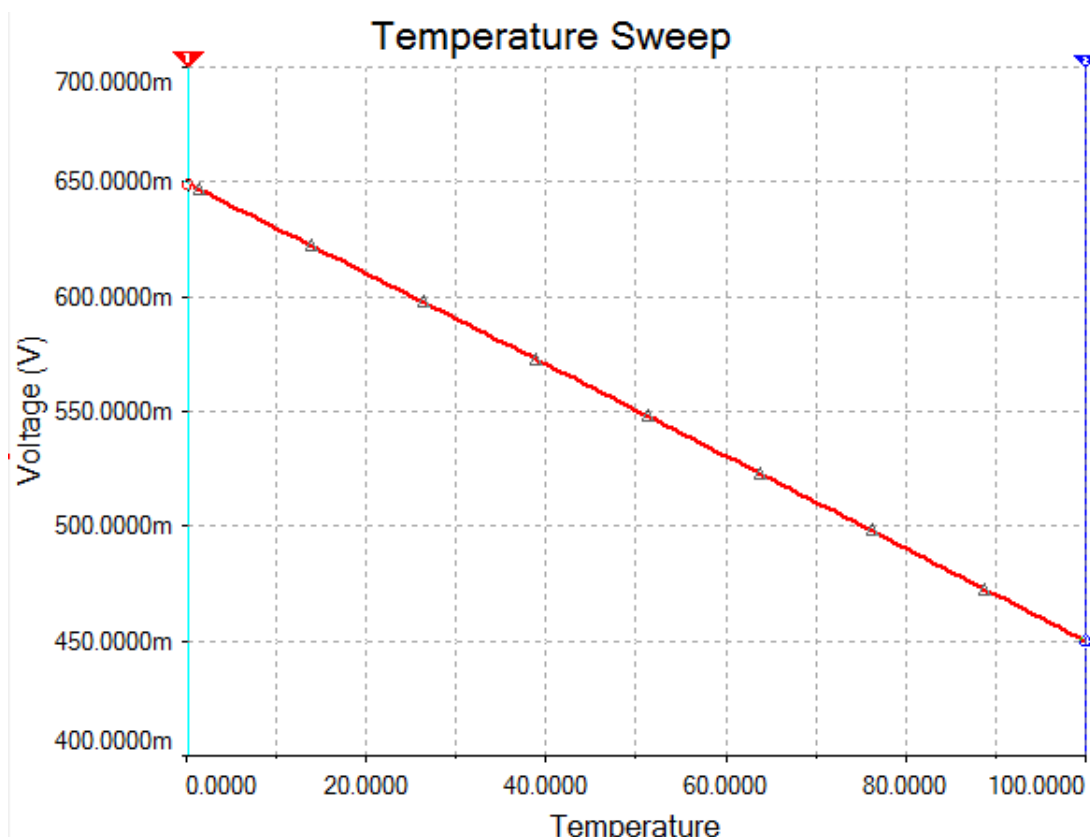


图 8 温度传感电路的输出电压与温度的关系

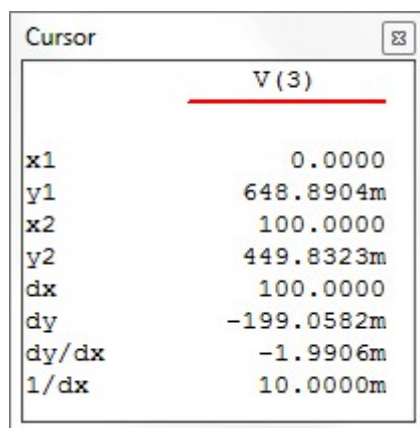


图 9 $T_1 = 0^\circ C$ 与 $T_2 = 100^\circ C$ 时温度传感器的输出电压

将数据导出至 SPSS 中进行线性回归得到的回归模型为

$$U = -0.002T + 0.650(V) \quad (3)$$

$$R^2 = 1.000, \beta = -1.000, p = 0.000$$

可见温度与输出电压的线性性极好，我们可以猜想 Multisim 本身就是利用一个线性模型来模拟电流不变时二极管正向电压和温度的关系。

由式(3)可得在环境温度为 $T_c = 50^\circ C$ 时，对应的电压值 $U_c = 0.550V$ 。取正常时的环境温度 $T_0 = 25^\circ C$ ，那么对应的电压 $U_0 = 0.600V$ 。

2.4. 差分放大电路

差分放大器是为了抑制共模噪声的干扰，将输入的差模电压信号进行放大，本设计中考虑的两种差分放大电路分别如图 10、图 11。

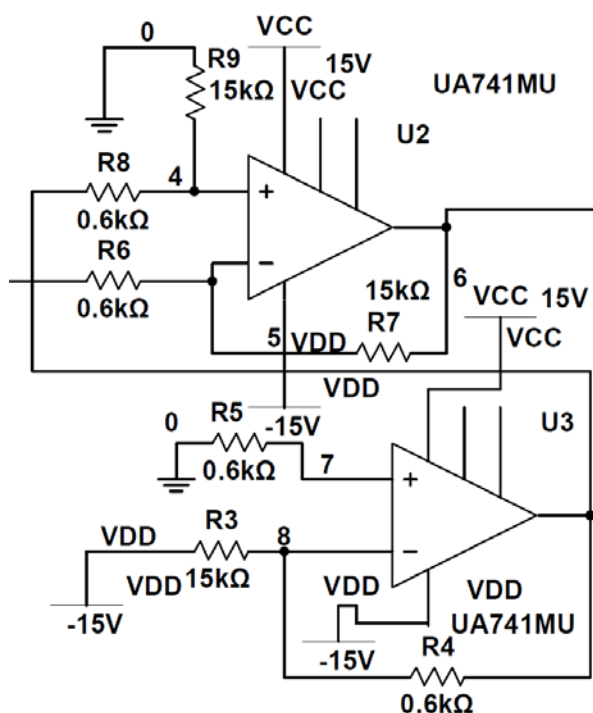


图 10 差分放大电路方案一

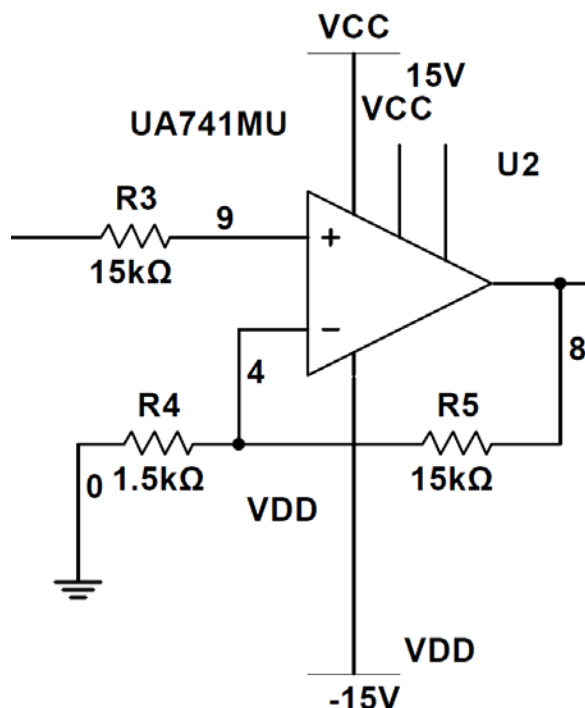


图 11 差分放大电路方案二

2.4.1. 方案一

方案一采用两个运放实现.运放 U3 组成一个反向放大器，用于从 V_{DD} 处获取参考电压 U_0 ，模拟在火灾发生时正常温度的电压值进行比较，这样差分放大电路的输入电压就是由温度造成的净输入电压。

取 $R_3 = 15k\Omega$ ，那么根据反向放大器的传输函数

$$\frac{U_0}{V_{DD}} = -\frac{R_4}{R_3} \quad (4)$$

有

$$R_4 = -\frac{U_0}{V_{DD}} R_3 = -\frac{0.600}{-15} \times 15k = 0.6k\Omega \quad (5)$$

对应同相端补偿电阻的阻值为

$$R_5 = R_3 \parallel R_4 = 0.577k\Omega \approx 0.6k\Omega \quad (6)$$

运放 U_2 组成一个加减运算电路，其同相端接由 U3 输出的参考电压 U_0 ，反向端接温度

传感器输出电压 U ，为保证 $R_N = R_P$ ，设 $R_6 = R_8$ ， $R_7 = R_9 = 15k\Omega$ ，则其输出电压为

$$U_{DO} = \frac{R_7}{R_6}(U_0 - U) \quad (7)$$

在发生火灾时， $U = U_T$ ， $U_0 - U = 50mV$ ，若使差模输出电压达到 $U_{DO0} = 1.25V$ ，则有

$$R_6 = R_8 = 0.6k\Omega \quad (8)$$

本方案的优点是差模输出电压的变化范围为

$$0 \leq U_{DO} \leq U_{DO0} = 1.25V \quad (9)$$

输出电压全部为信号分量，输出电压的范围变化明显，可以设置在运放工作电压内的任何值（在本设计中，理论上火灾发生时与正常状态下的差模输出电压可达电源电压 $15V$ ），缺点是需要两个运放和较多电阻，增大了电路连接和调试的难度以及系统的不稳定性。

2.4.2. 方案二

方案二中不再引入参考电压 U_0 ，改为直接将 U_2 的同相端通过 R_3 接温度传感器输出电压 U ，反相端通过 R_4 接地，用 R_5 形成反馈回路，组成一个同相比例放大器，其传输函数为

$$\frac{U_{DO}}{U} = 1 + \frac{R_5}{R_4} \quad (10)$$

其中，在正常温度到报警温度范围内，温度传感器输出电压的变化范围为

$$0.550V = U_T \leq U \leq U_0 = 0.600V \quad (11)$$

即

$$\Delta U = 0.05V \quad (12)$$

可见，若需要差模输出电压差别明显，如 $\Delta U_{DO} = 0.55V$ ，那么

$$\frac{R_5}{R_4} = 10 \quad (13)$$

取 $R_5 = 15k\Omega$ 即得

$$R_4 = 1.5k\Omega \quad (14)$$

本方案的差模输出电压的范围为

$$6.05V = U_T \frac{\Delta U_{DO}}{\Delta U} = U_{DO2} \leq U_{DO} \leq U_{DO1} = U_0 \frac{\Delta U_{DO}}{\Delta U} = 6.6V \quad (15)$$

与方案一的范围式(9)相比，差模输出电压的变化范围小，但是基准值大，这意味着差模输出电压很大一部分是直流分量，只有小部分是信号分量，并且，若需要进一步提升输出电压的变化范围的大小，那么变化范围很有可能超过运放工作的线性区（如取方案一中

$\Delta U_{DO} = U_{DO0} = 1.25V$ ，那么 $13.75V \leq U_{DO} \leq 15V$ ，已经达到了电源电压的值)，因此输出电压的变化范围不够明显.但是本方案的优点也十分明显，少用一个运放和若干电阻使得电路变得十分简单容易操作.

2.5. 电压比较电路

与差分放大电路的两种设计方案相对应,电压比较电路也有两种不同的方案分别如图 12、13.

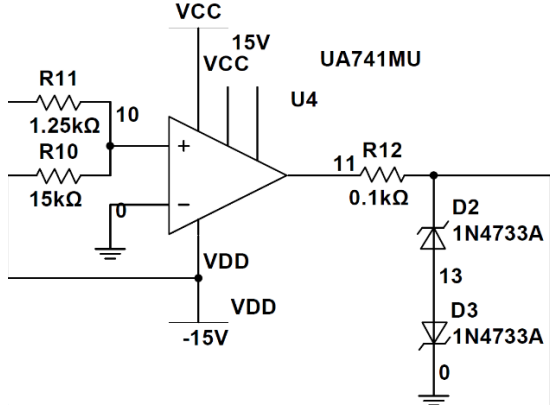


图 12 电压比较电路方案一

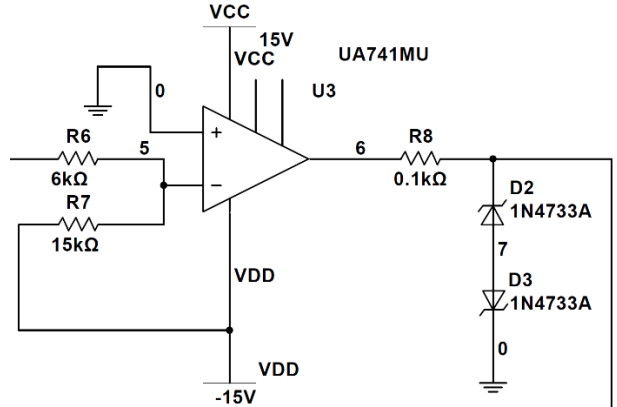


图 13 电压比较电路方案二

2.5.1. 方案一

电压比较电路的方案一与差模放大电路的方案一对应.

当温度与室温接近时，差模输出电压 $U_{DO} = 0$ ，而当发生火灾时，差模输出电压将升高，阈值电压 $U_C = U_{DO0} = 1.25V$ ，当 U_{DO} 由小于 U_C 到大于 U_C 时，比较器输出电平应从低电平变为高电平，故 U_{DO} 应接入运放的同相输入，参考端直接接入负电源 V_{DD} .

单限比较器的阈值电压

$$U_C = -\frac{R_{11}}{R_{10}} V_{DD} \quad (16)$$

取 $R_{10} = 15k\Omega$ ，得

$$R_{11} = 1.25k\Omega \quad (17)$$

为了降低输出电压的幅度，利用两个稳压管 1N4733A 实现稳压作用，其稳压值由手册查到约为

$$U_Z \approx 5.5V \quad (18)$$

由于运放输出的电流有限，因此 R_{12} 的取值应当使得运放的输出电流达到最大值，且输出电压应该在 5.5V 左右，故对 R_{12} 进行参数扫描，得到的输出电流与 R_{12} 阻值如图 14，电压与阻值

如图 15.由图可知，取 $R_{12} \leq 200\Omega$ 均可满足最大输出电流和输出电压，取 $R_{12} = 0.1k\Omega$.

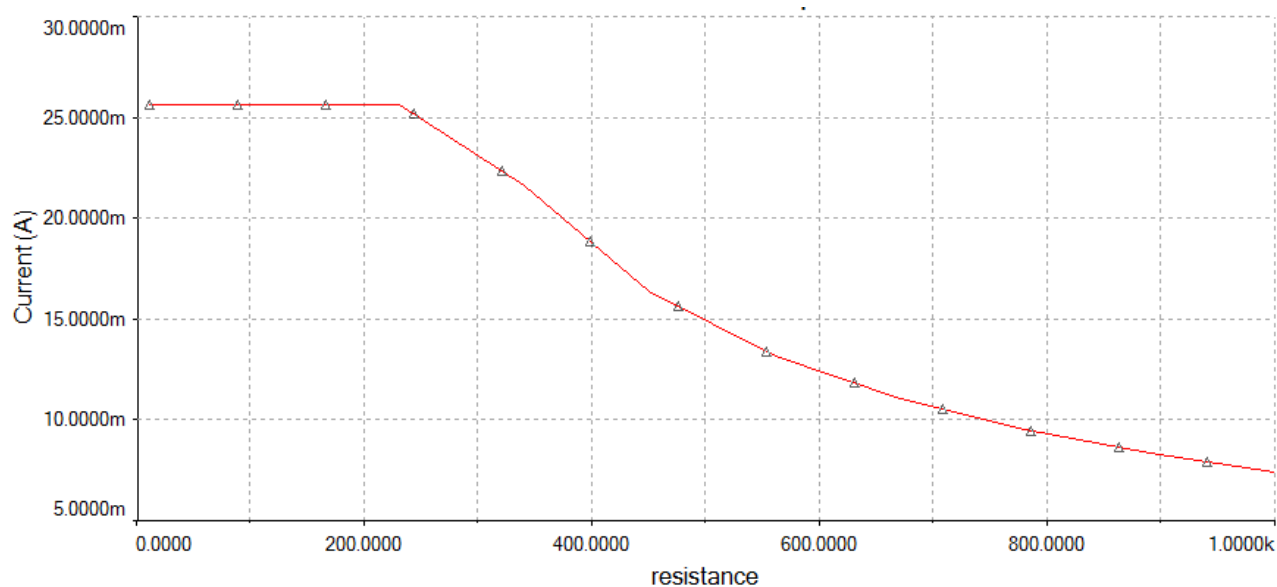


图 14 电压比较电路输出电流与 R_{12} 的关系

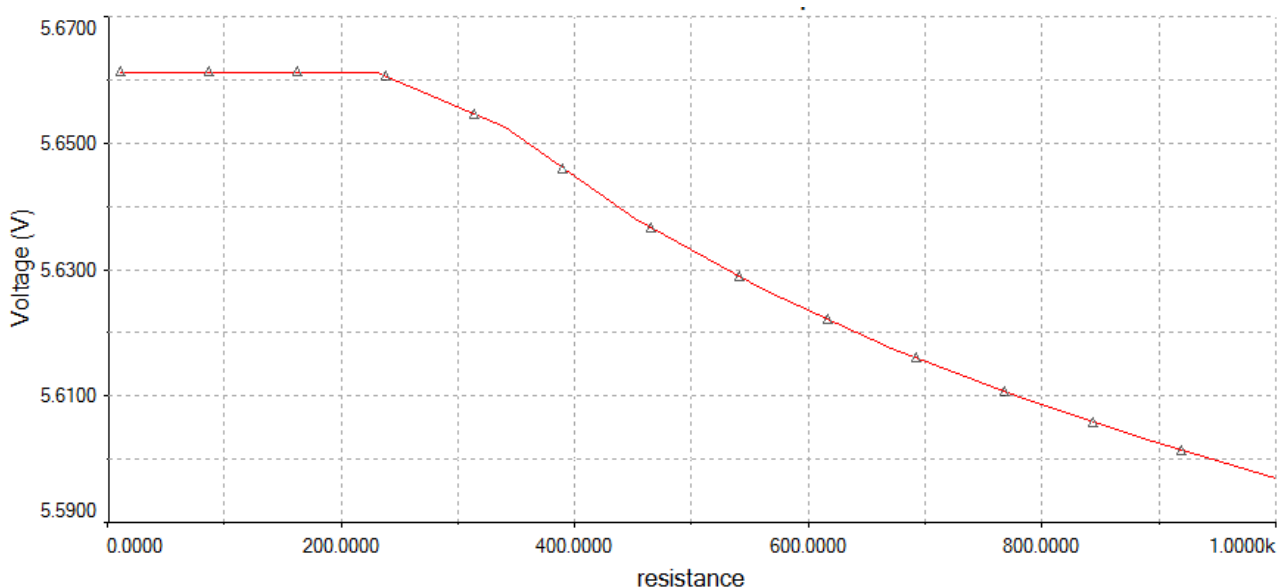


图 15 电压比较电路输出电压与 R_{12} 的关系

2.5.2. 方案二

电压比较电路的方案二与差模放大电路的方案二对应.

当温度与室温接近时，差分放大电路的输出电压为 $U_{DO1} = 6.6V$.火灾发生时，输出电压下降至 $U_{DO2} = 6.05V$ ，故当比较器输入电压由大于 U_{DO2} 到小于 U_{DO2} 时，输出应从低电平变为

高电平，故差模放大电路的输出端应接比较器的反相输入端，参考电压接负电源 V_{DD} 。

单限比较器的阈值电压

$$U_C = U_{DO2} = -\frac{R_6}{R_7} V_{DD} \quad (19)$$

取 $R_7 = 15k\Omega$ 得

$$R_6 = 6.05k\Omega \approx 6k\Omega \quad (20)$$

由于电压比较电路的输出电压与方案一一致，故稳压管的选择、电阻 R_8 阻值的讨论（对应方案一 R_{12} ）与方案一一致，即有 $R_8 = 0.1k\Omega$

2.6. 声光报警电路

声光报警电路的电路图如图 16 所示。

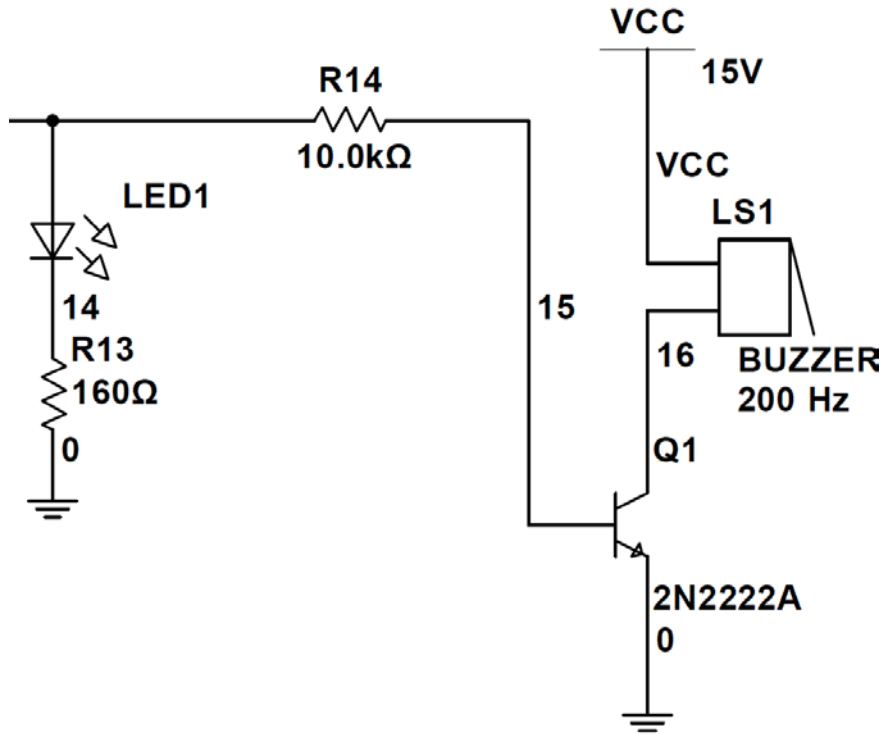


图 16 声光报警电路

光报警器采用1.83V，20mA的红色LED灯实现，其限流电阻阻值由下式决定

$$U_Z = R_{13} I_{LED} + U_{LED} \quad (21)$$

可得

$$R_{13} = 160\Omega \quad (22)$$

对于声报警器，蜂鸣器需求的最小输入电流与输入电压为

$$I_{in} = 0.05A, U_{in} = 9V \quad (23)$$

为保证电流的大小，在后端接一个三极管用来作功率放大器，选取 2N2222A 作为功率管，其工作的典型值为

$$U_{CE} = 10V, I_C = 10mA, I_B = 0.13mA \quad (24)$$

因此可以取

$$U_{CE} = V_{CC} = 15V \quad (25)$$

为确认限流电阻 R_{14} 的取值，对其进行参数扫描，得到的蜂鸣器输入电压和输入电流与 R_{14} 的关系分别如图 17、18.从图中可见， R_{14} 的取值在

$$0 \leq R_{14} \leq 10k\Omega \quad (26)$$

内均能使蜂鸣器鸣叫，为了保证管子的功率消耗不至于过大，取

$$R_{14} = 10k\Omega \quad (27)$$

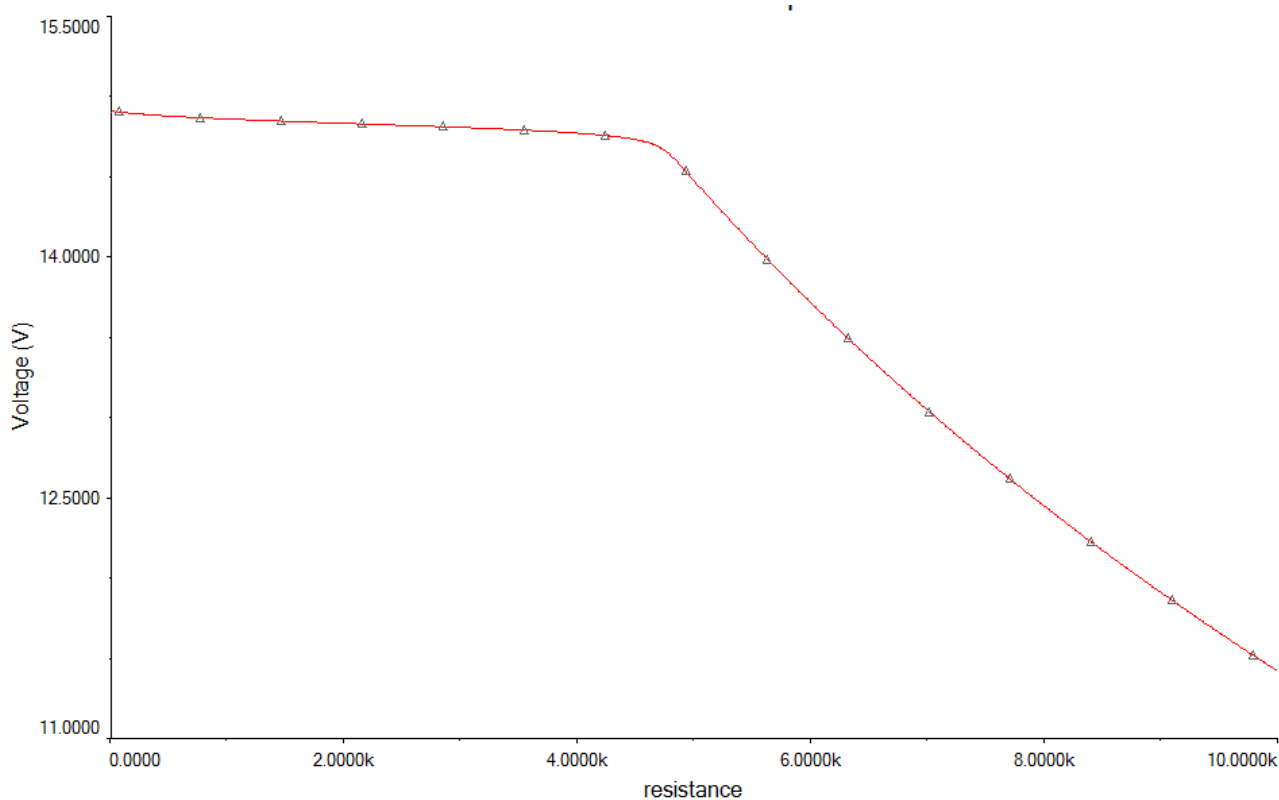


图 17 蜂鸣器输入电压与 R_{14} 的关系

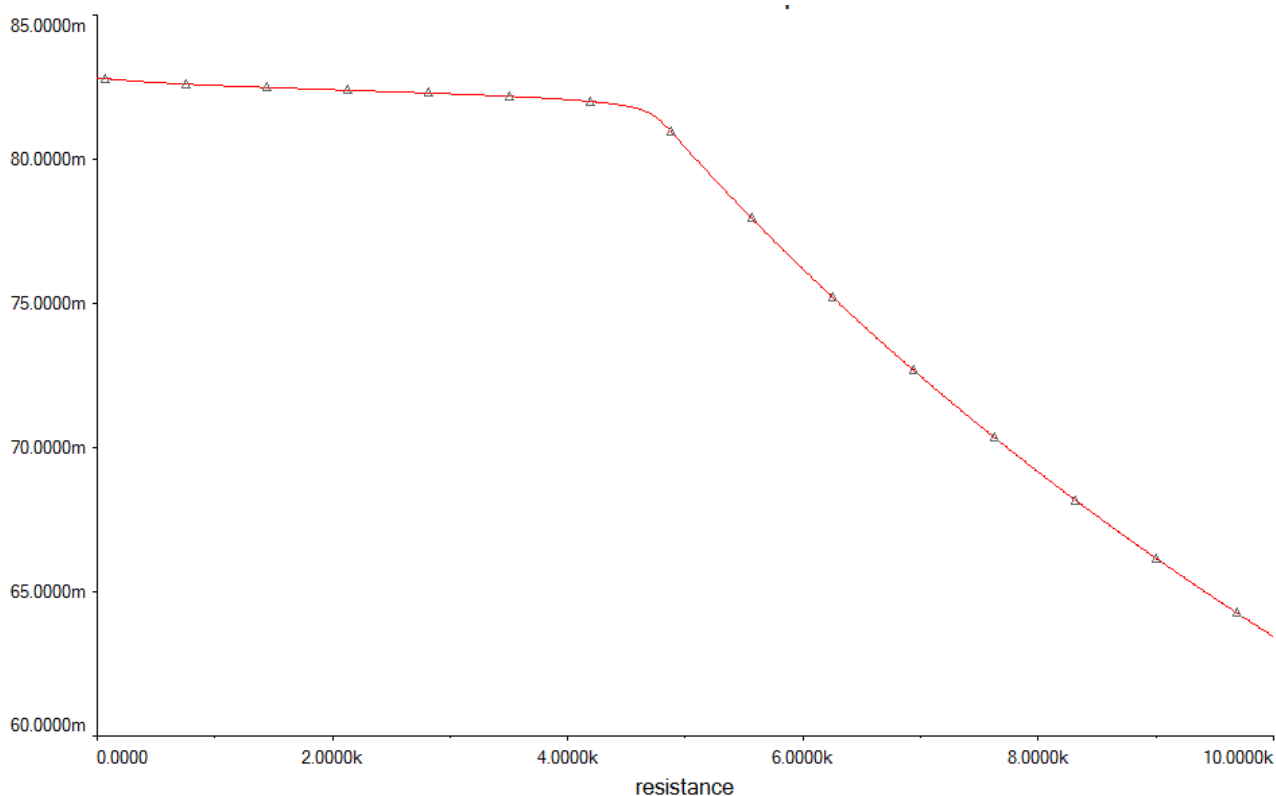


图 18 蜂鸣器输入电流与 R_{14} 的关系

3. 电路仿真和结果

3.1. 温度传感电路输出电压与温度的关系

温度传感电路的输出电压与温度的关系在确定阈值电压时已经讨论过，见图 8.

3.2. 差分放大电路输出电压与温度的关系

对方案一与方案二的声光报警电路的输入电压作温度扫描得到的电压与温度的关系如图 19、20. 从图 19 可知，当温度为正常温度 $T_0 = 25^\circ\text{C}$ 时，输出电压几乎为 0，当温度为报警温度 $T_c = 50^\circ\text{C}$ 时，输出电压约为 1.25V，这与式(9)的分析结果一致. 从图 20 可知，当温度为正常温度 $T_0 = 25^\circ\text{C}$ 时，输出电压约为 6.05V，当温度为报警温度 $T_c = 50^\circ\text{C}$ 时，输出电压约为 6.6V，这与式(15)的分析结果一致.

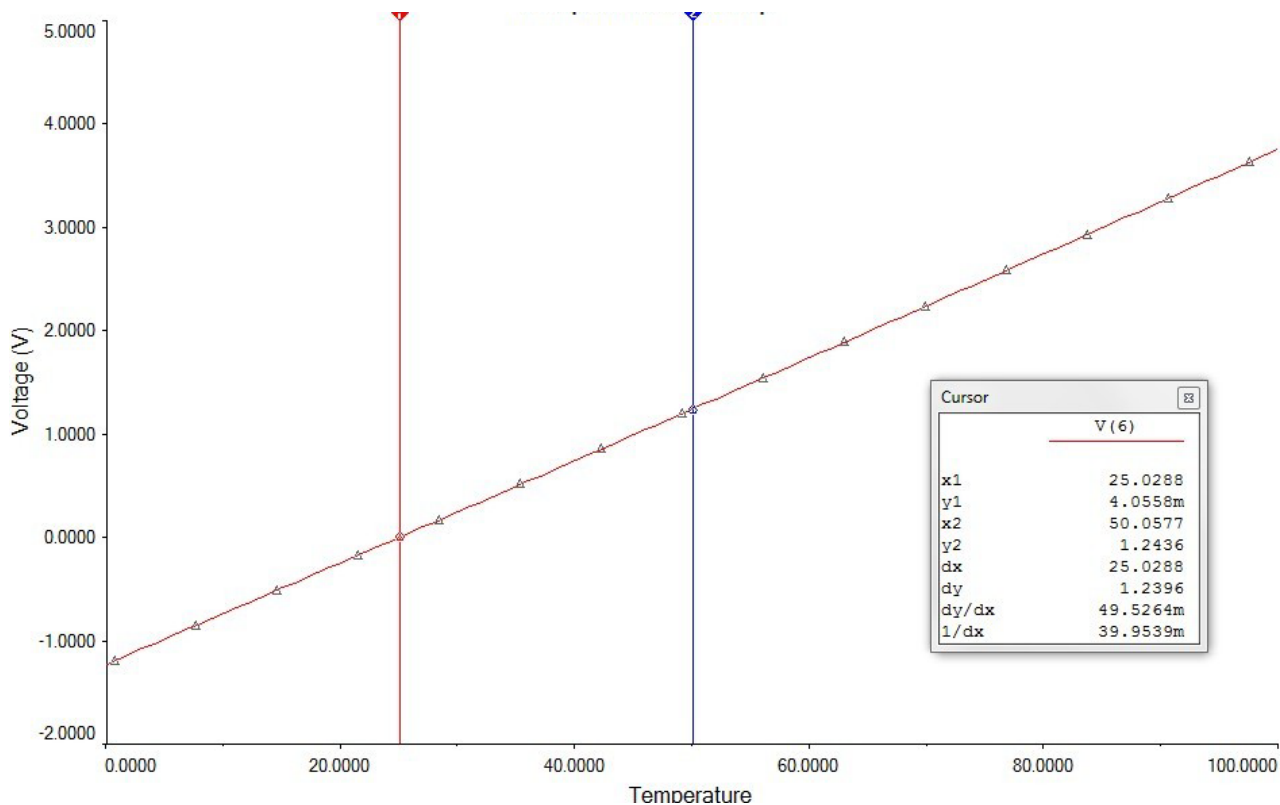


图 19 方案一差分放大电路输出电压与温度的关系

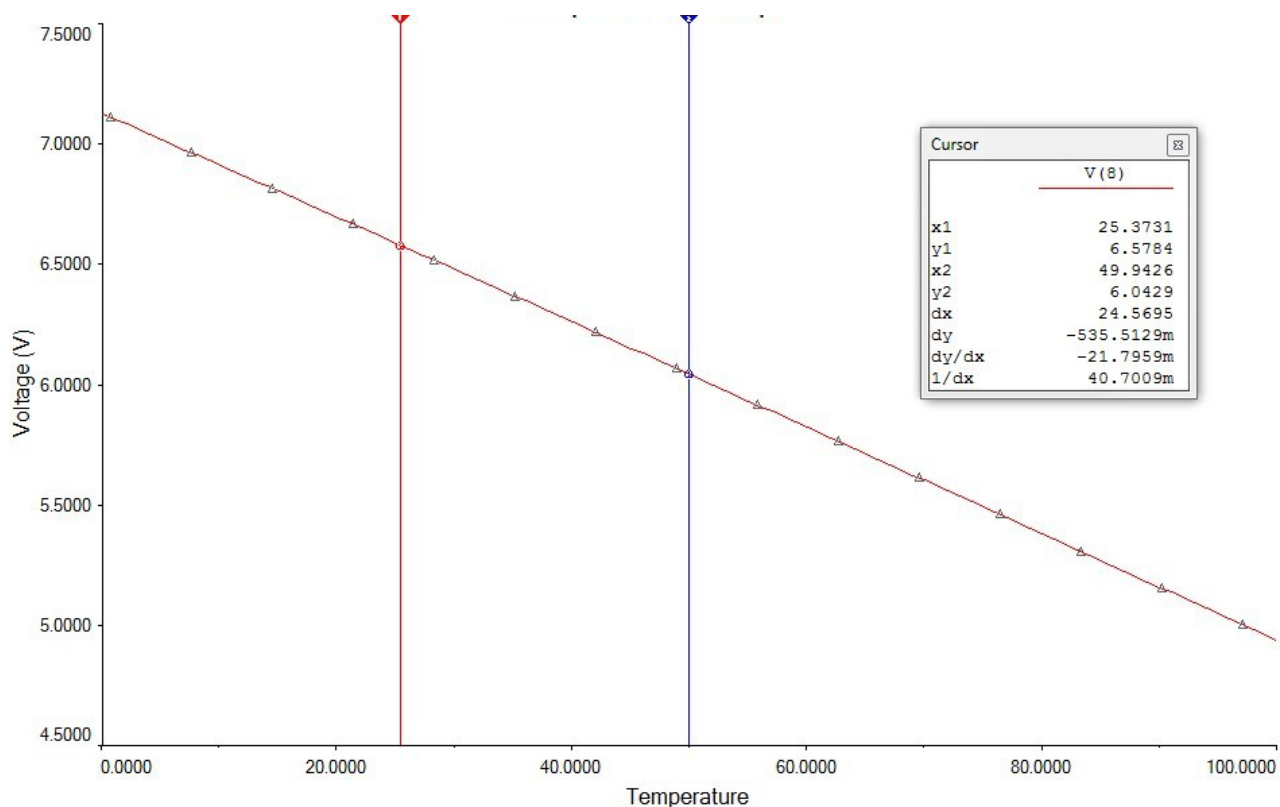


图 20 方案二差分放大电路输出电压与温度的关系

3.3. 电压比较电路输出电压与温度的关系

对方案一与方案二的声光报警电路的输入电压作温度扫描得到的电压与温度的关系如

图 21、22.从图 21、22 可见，当温度达到报警温度 $T_C = 50^{\circ}C$ 后，两报警电路的输入电压立即从约 $-5V$ 提升至约 $5V$ ，这与之前的分析一致.

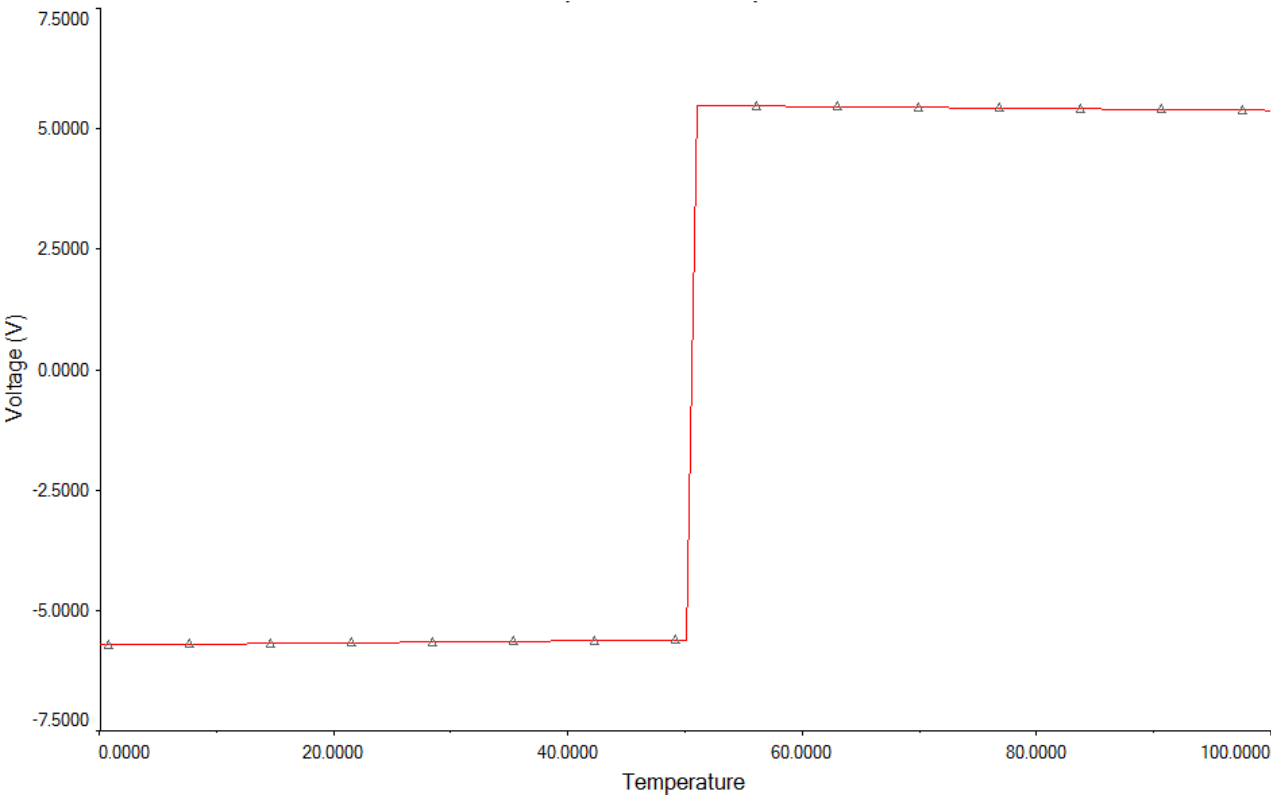


图 21 方案一报警电路输入电压与温度的关系

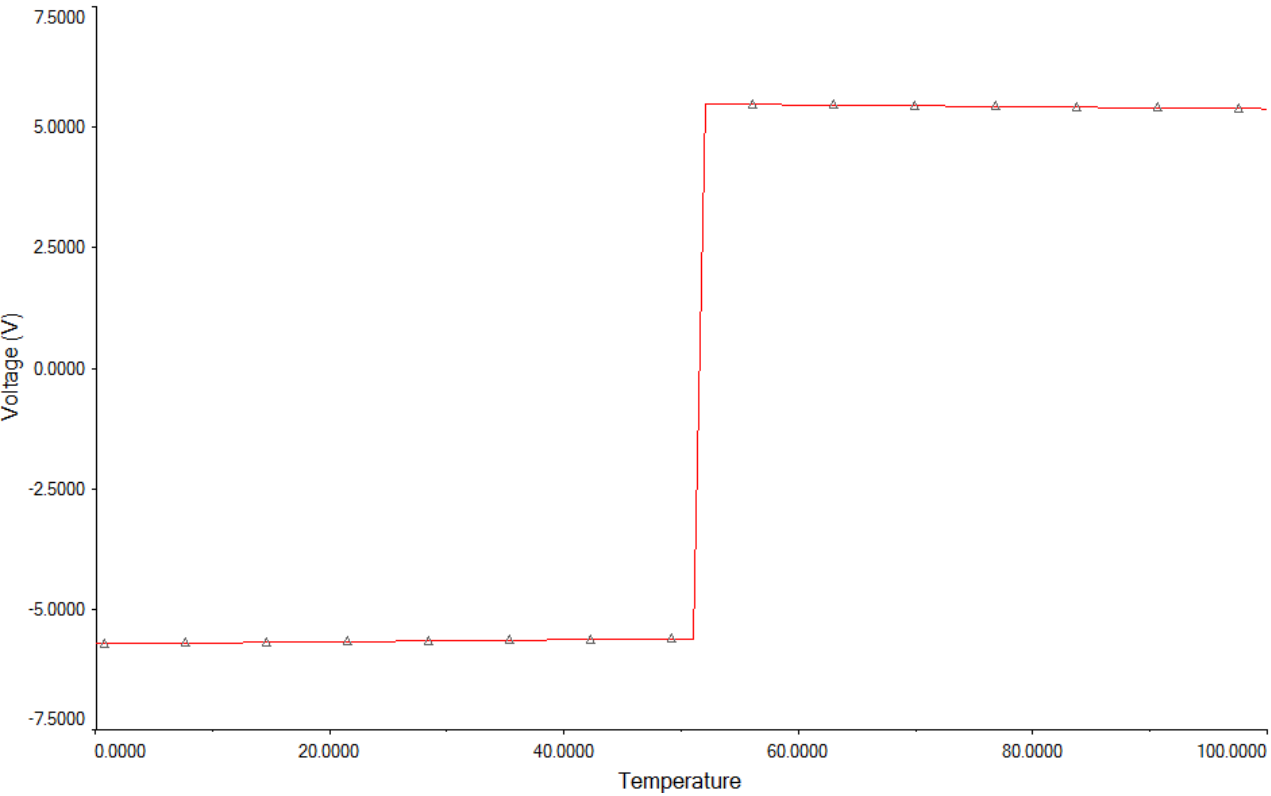


图 22 方案二报警电路输入电压与温度的关系

3.4. 声光报警电路输出声光信号与温度的关系

分别在正常温度 $T_0 = 25^\circ\text{C}$ 和报警温度 $T_c = 50^\circ\text{C}$ 下对两个方案的电路进行测试，在 $T_0 = 25^\circ\text{C}$ 时，两电路 LED 灯均不亮，蜂鸣器不响，如图 23 所示，在 $T_c = 50^\circ\text{C}$ ，两点路 LED 均亮，蜂鸣器鸣响，如图 24 所示.可见，两个方案都能很好的完成火灾报警电路的任务.

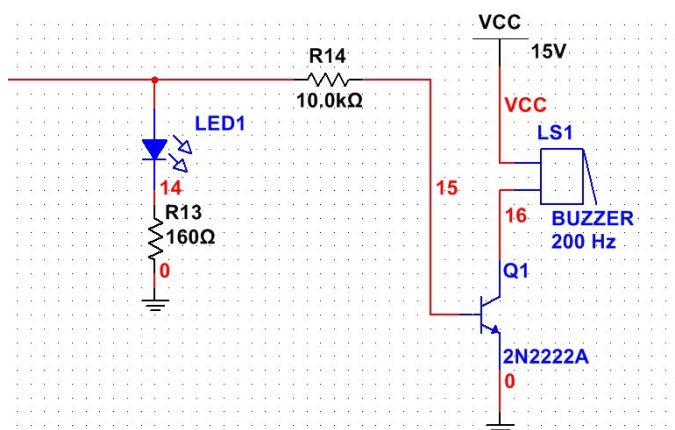


图 23 $T_0 = 25^\circ\text{C}$ 时 LED 灯不亮、蜂鸣器不响

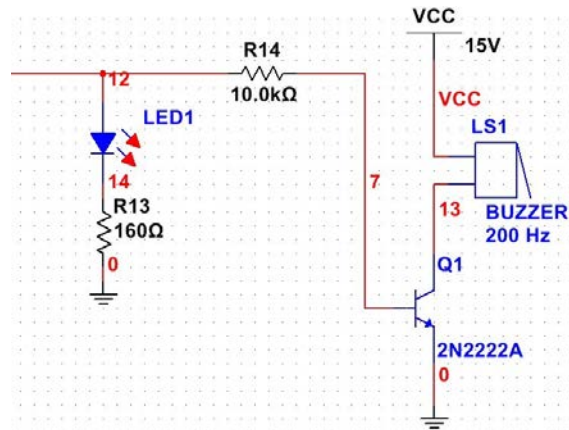


图 24 $T_c = 50^\circ\text{C}$ 时 LED 灯亮、蜂鸣器响

4. 电路加工和测试

4.1. 电路版面布置

电路实现时采取之前讨论的方案二，采用一块面包板搭建电路，电路的实物图如图 25、26 所示.在电路中，从左至右按照各电路模块的功能进行布置，分别为温度传感电路，差分放大电路，电压比较电路和声光报警电路，各模块围绕运放进行布置，橙色引线用于将各个模块的输出引至下个模块的输入.在版面的左上角的排针为正电压 V_{CC} 的引入处，最上端一排的引线用于输出正电压，所有连接正电压的引线均为红色.版面的左下角的排针为负电压 V_{EE} 的引入处，最下端一排的引线用于输出负电压，所有连接负电压的引线均为黄色.版面的右下角处的排针为共地端，所有接地的引线均用绿色.版面中间电路的主要部分中，最左端由温度传感电路部分引出的黑白色杜邦线用于将温度传感器——二极管 2N4148 引出方便对其进行加热测试性能.

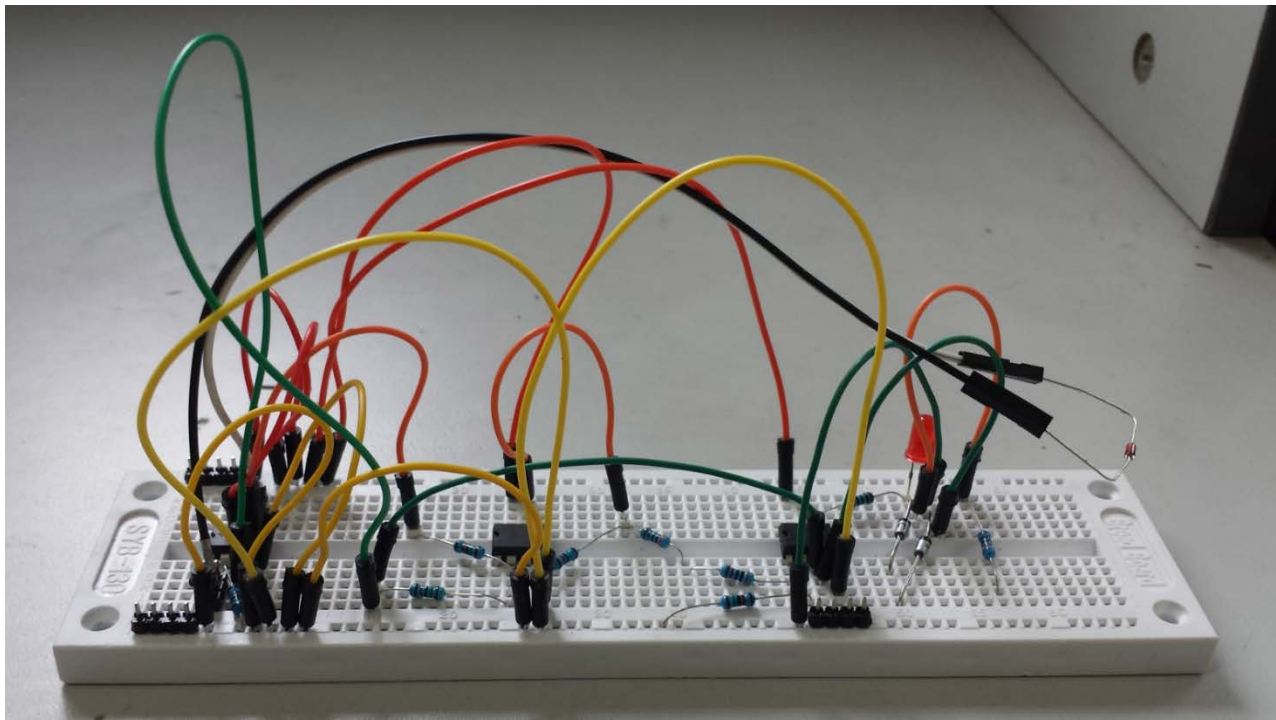


图 25 方案二电路的实物图（正视图，未加装蜂鸣器）

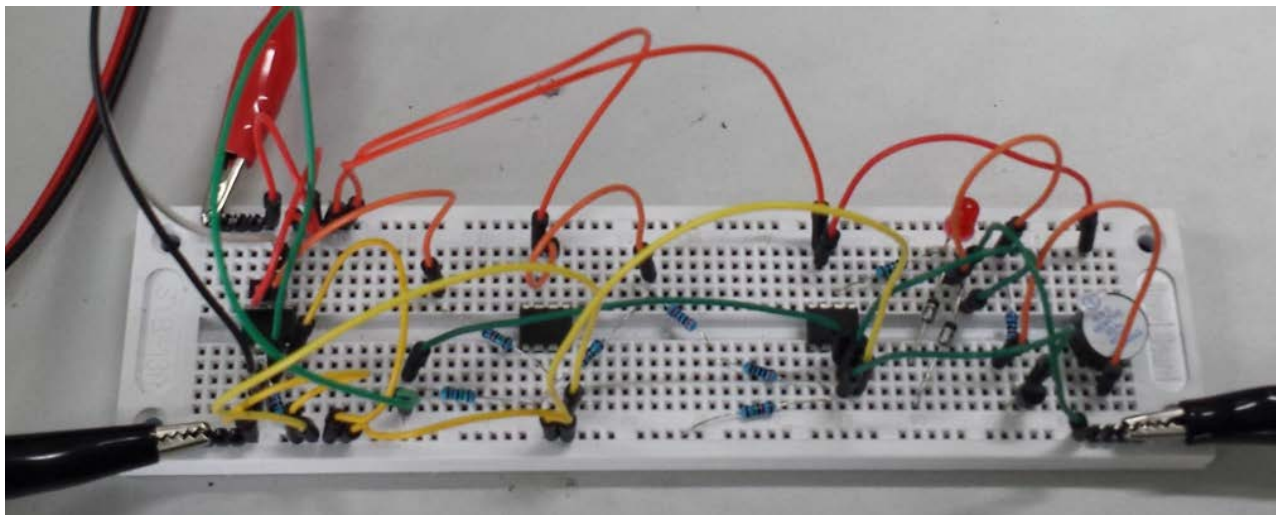


图 26 方案二电路的实物图（俯视图，加装蜂鸣器）

4.2. 电路性能测试

将电路引入 $V_{CC} = 15V$ ， $V_{EE} = -15V$ ，连接后的电路如图 27 所示.先在常温下测量各个模块的输出电压值.温度传感电路的输出电压为 $0.63V$ ，如图 28 所示，与理论值 $0.600V$ 一致；差分放大电路的输出电压为 $6.98V$ ，与理论值 $6.55V$ 一致，如图 29 所示；电压比较电路的输出电平为低，电压为 $-5.85V$ ，与理论值 $-5.5V$ 一致，如图 30 所示.

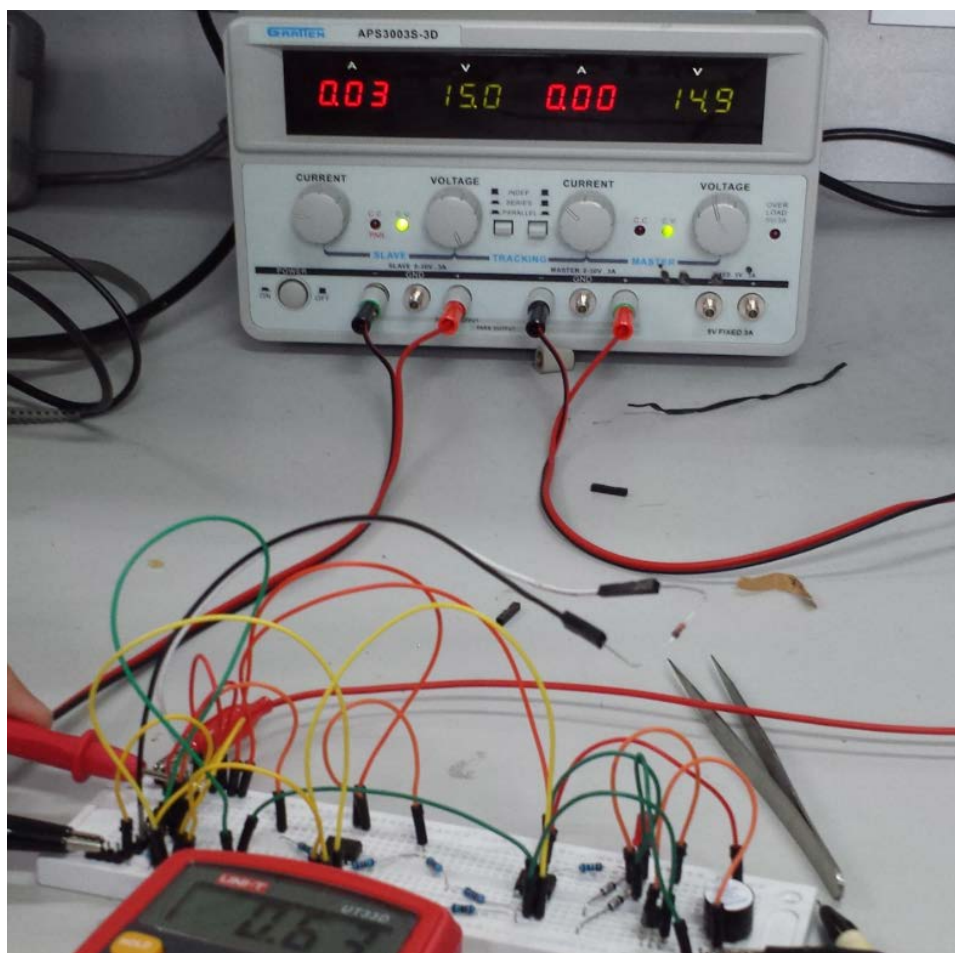


图 27 连接上 $\pm 15\text{V}$ 电压源后的电路

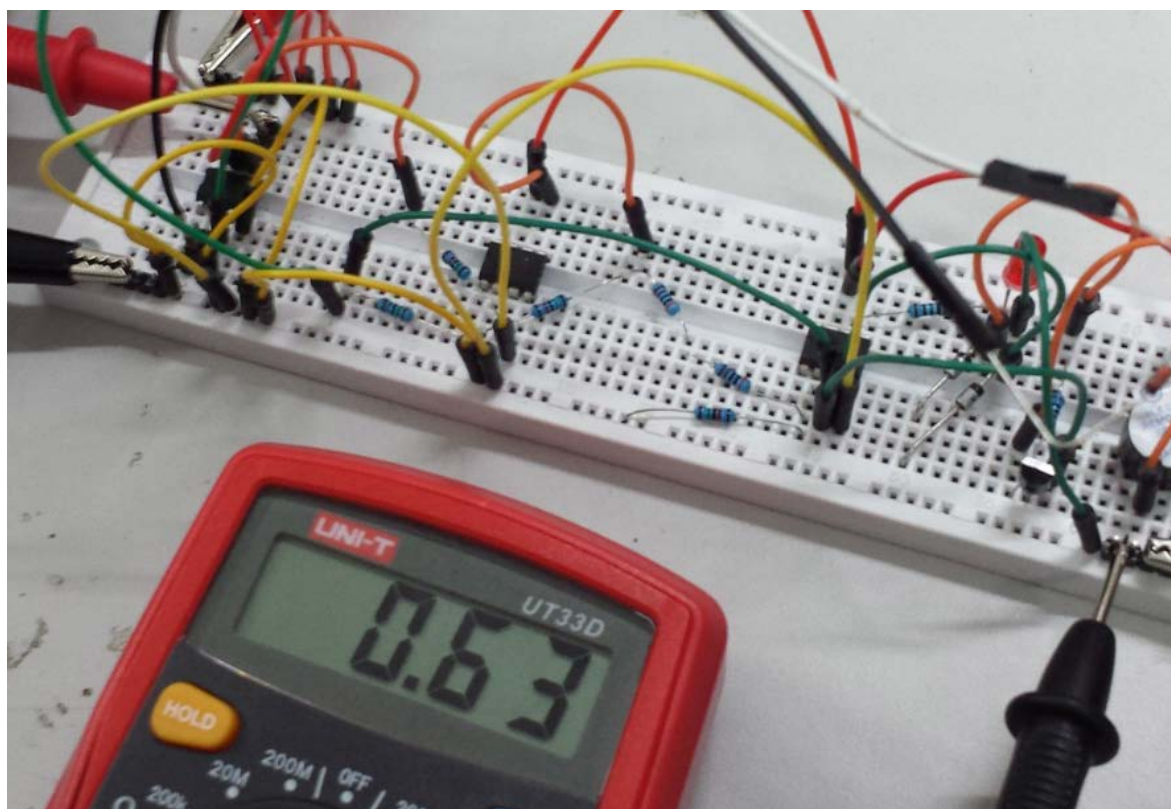


图 28 常温下温度传感电路的输出电压测量值

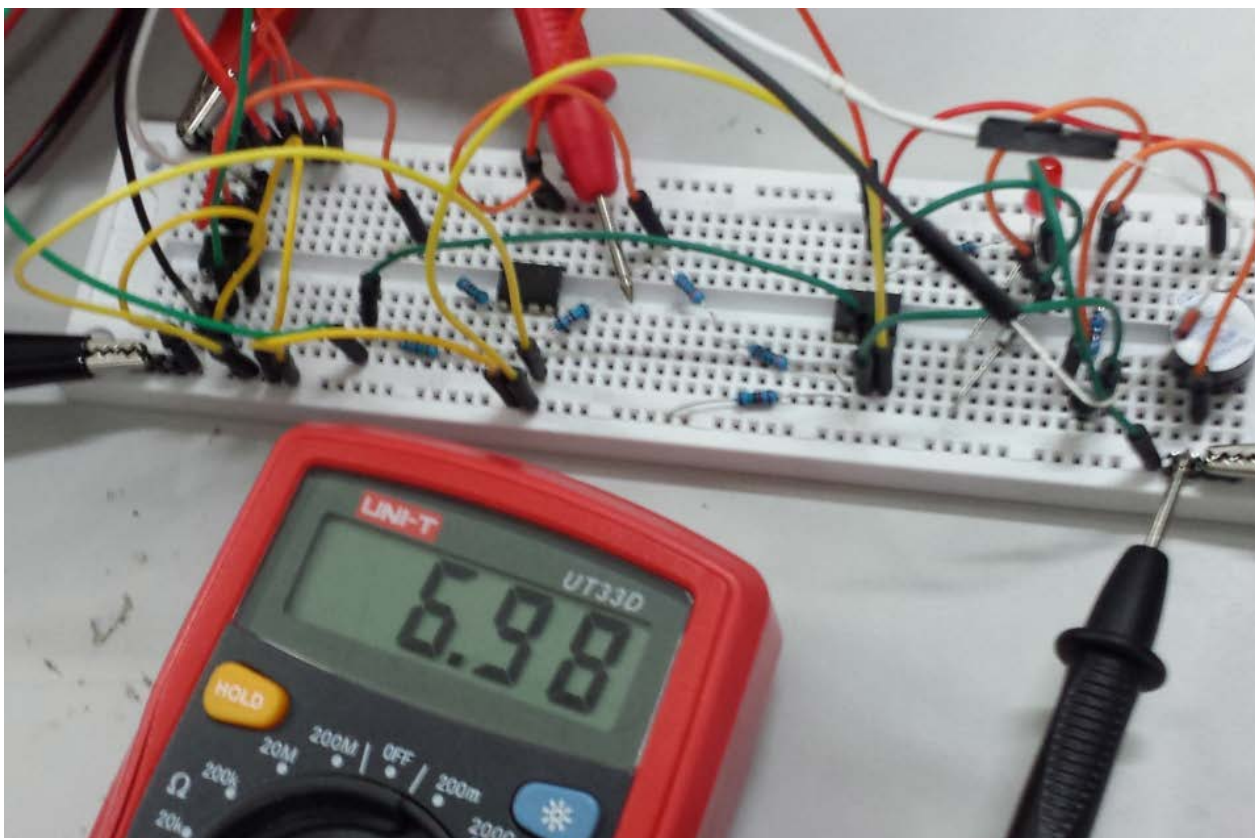


图 29 常温下差分放大电路的输出电压测量值

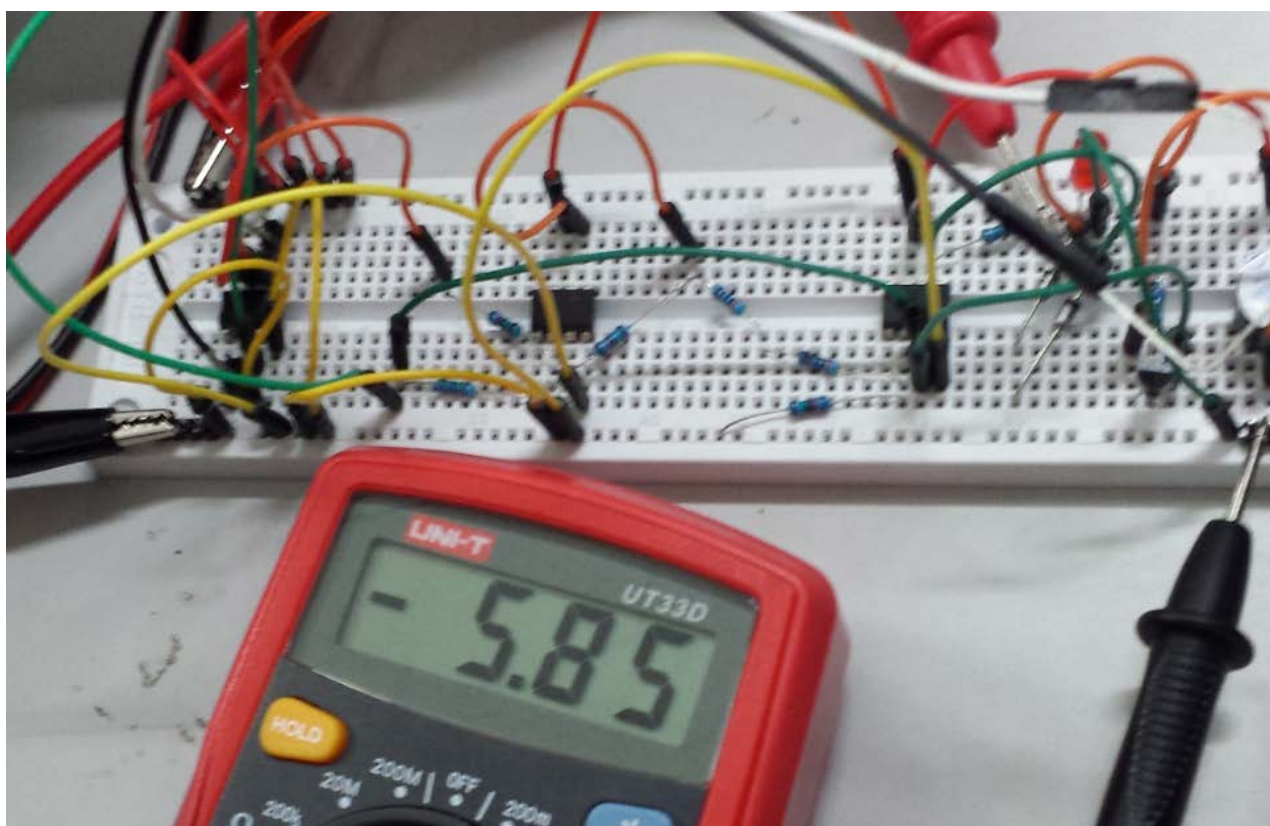


图 30 常温下电压比较电路的输出电压测量值

利用电烙铁对由黑白色杜邦线引出的二极管加热片刻，LED 灯亮，此时再测试各个模块的输出电压.温度传感电路的输出电压为 0.39V，如图 31 所示，满足理论要求 $U < 0.55V$ ；差

分放大电路的输出电压为3.99V，如图 32 所示，满足理论要求 $U < 6.05V$ ；电压比较电路的输出电平为高，电压为2.08V，如图 33 所示，与理论要求 $U > 0$ 一致.由此可见，本设计具有可实现性，能够完成课题的各个要求，且理论和实际能够较好的吻合。

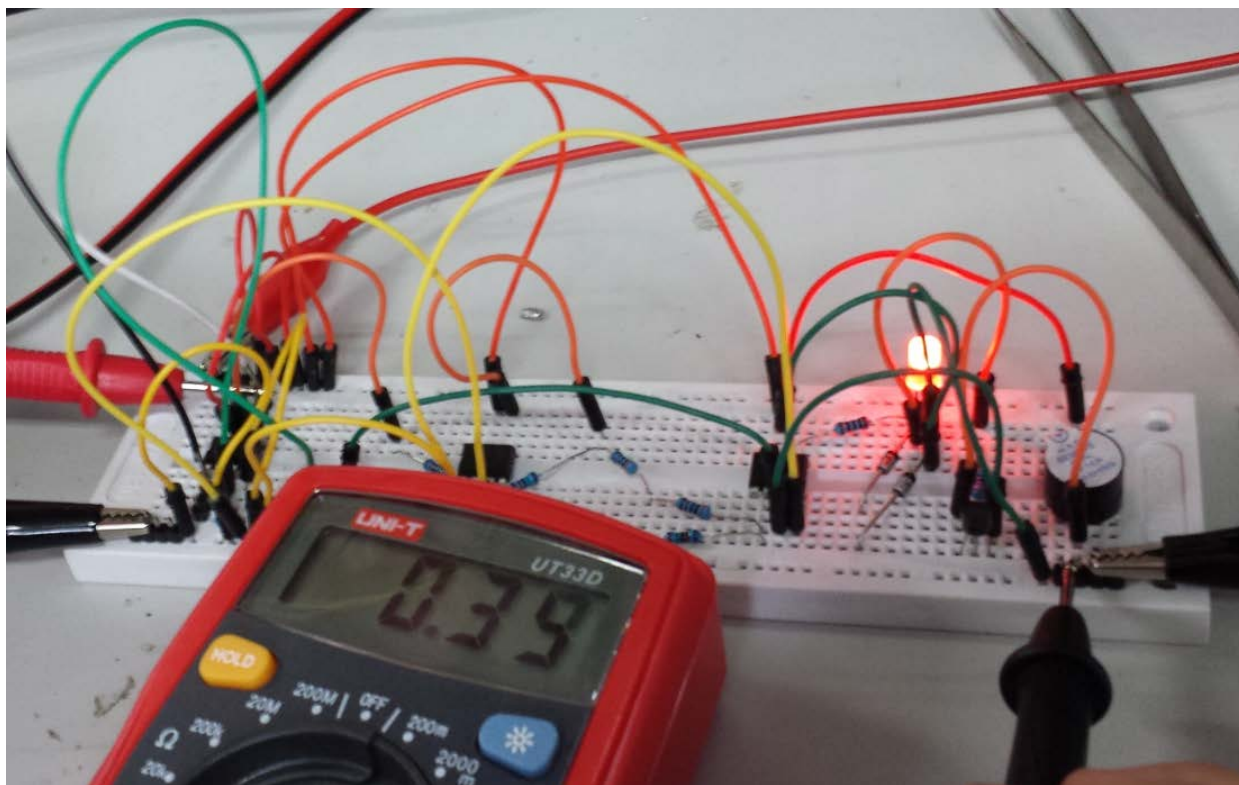


图 31 加热温度传感器后温度传感电路的输出电压测量值

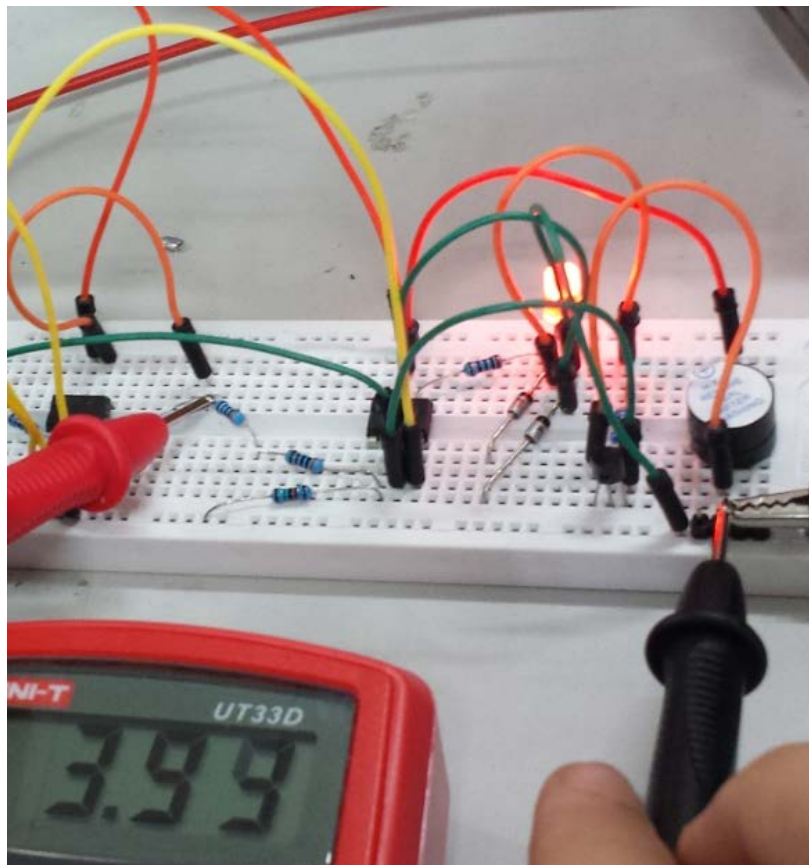


图 32 加热温度传感器后差分放大电路的输出电压测量值

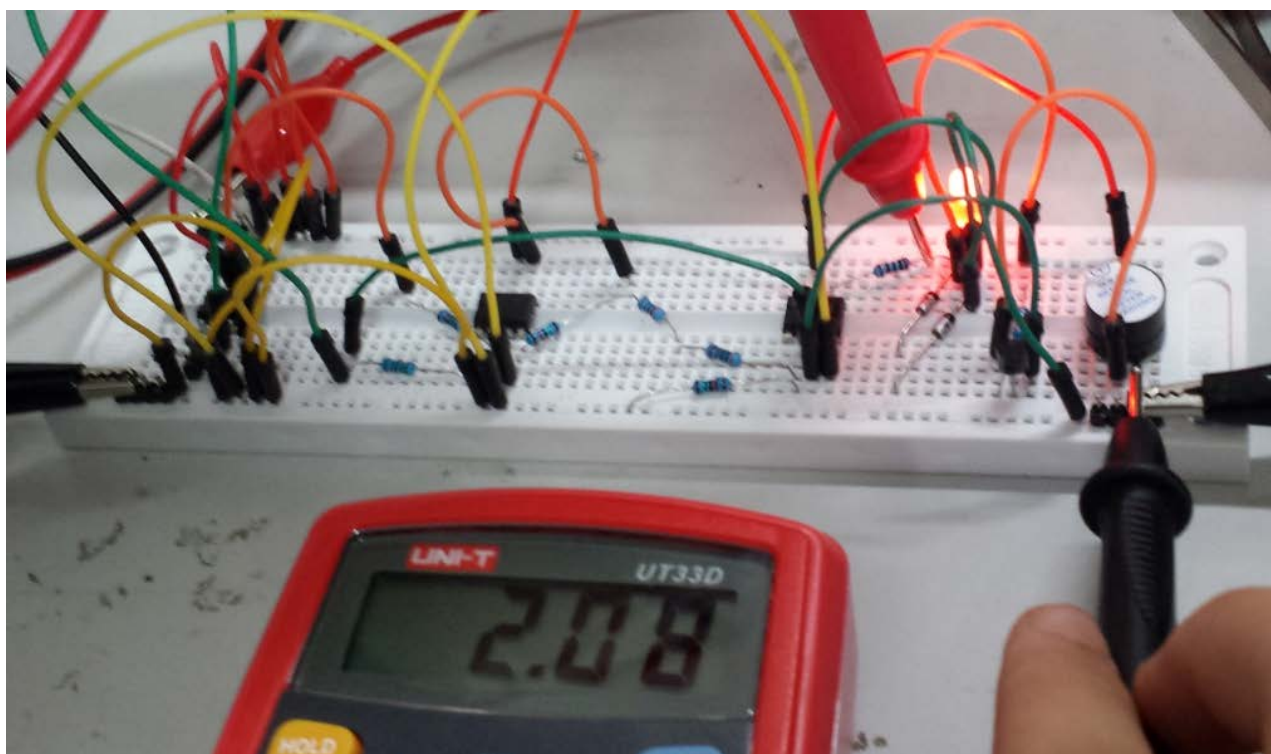


图 33 加热温度传感器后电压比较电路的输出电压测量值

4.3. 电路进一步改进

因为理论规律及仿真结果仍与实际电路有一定的差距,导致虽然以上电路能够完成设计的要求,但是灵敏度不够高.在对温度传感器进行加热时,需要较长的一段时间(约十秒左右)才能使传感器升高到电压比较器输出高电平所需要的温度.因此,为了提高该火灾报警电路的灵敏度,可以根据电路的实际参数调节阈值电压,使得在更短的加热时间内火灾报警电路能够正常报警.

根据方案二的原理,在温度升高时电压比较器的输入电压应该降低,方案二中设计的高温时的输入电压的值为 $U_{DO2} = 6.05V$ (即比较器的阈值电压),而实际上电路报警时的输入电压的一组测量值仅为 $3.99V$,可见真实情况下的高温时的输入电压的转变值(使比较器输出高电平的值)比 $6.05V$ 要低,故应当增大比较器的阈值,由式(19)知,在 R_7 和 V_{DD} 都不变的情况下,可以通过改变 R_6 来提升阈值电压.为此,在 R_6 支路上再串接一个 $5k\Omega$ 的电位器,通过调整电位器即可使得电路在较低温度下就处于报警状态,经过这样改进后的电路图如图 34、35,由杜邦线引出的温度传感器的特写如图 36.

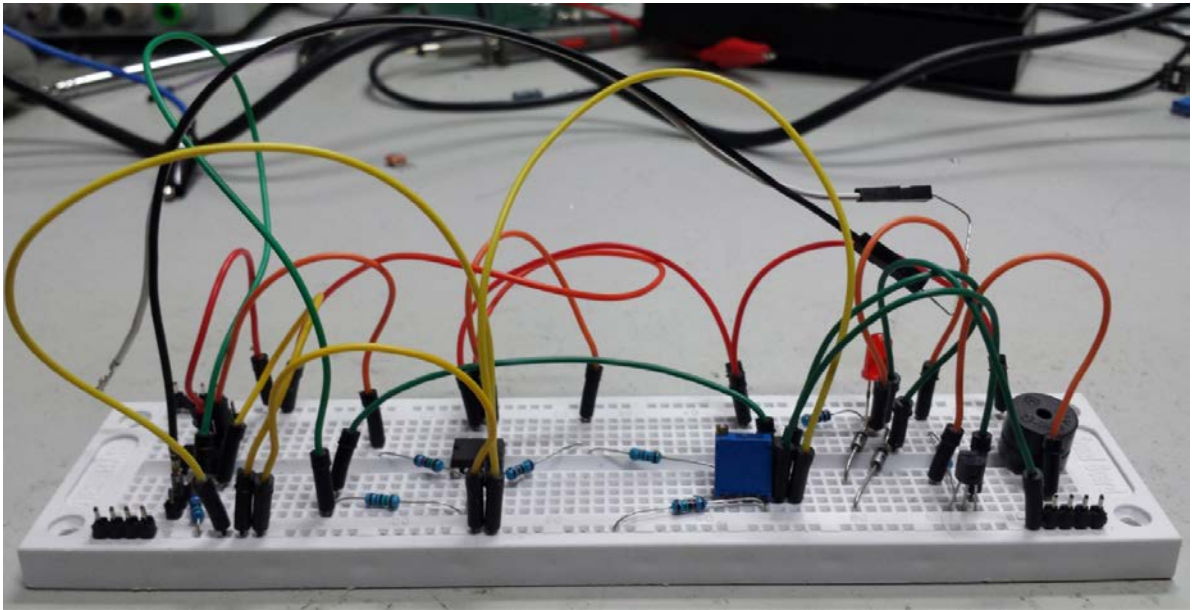


图 34 改进后电路的实物图（正视图）

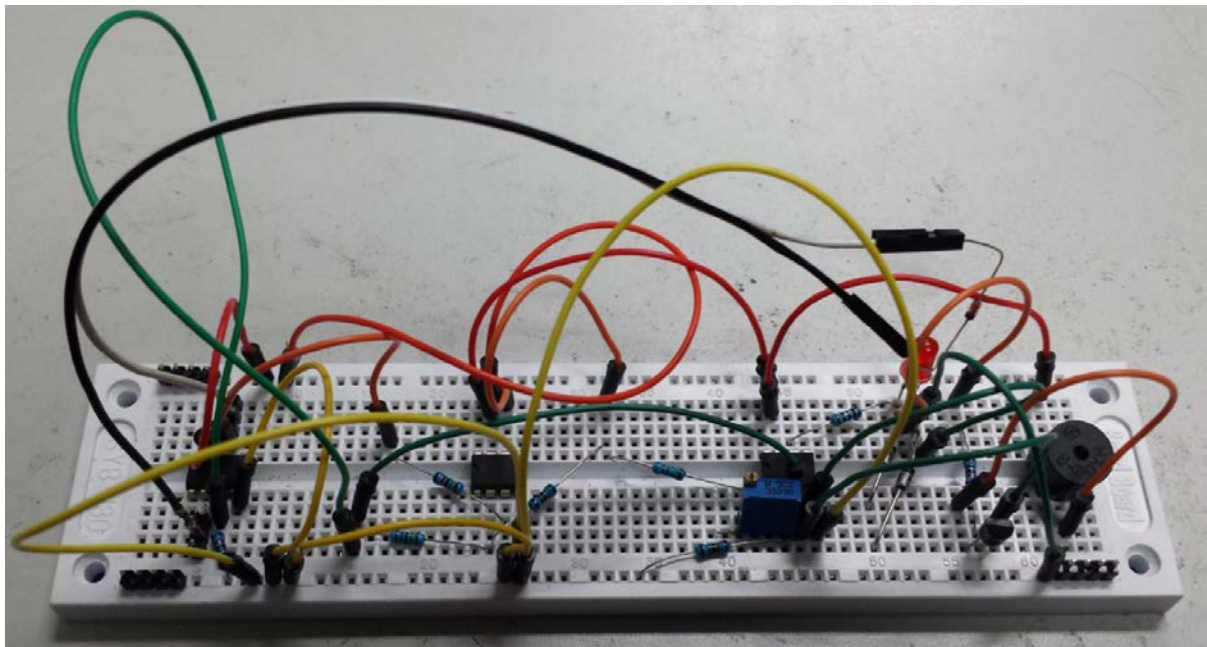


图 35 改进后电路的实物图（俯视图）

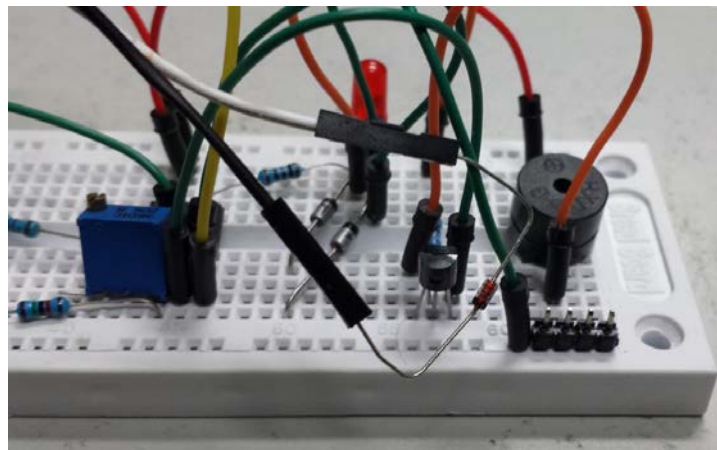


图 36 由杜邦线引出的温度传感器的实物图

在调整之后，常温下的温度传感器的输出电压如图 37 所示，为 0.600V，差分放大电路的输出电压为如图 38 所示，为 6.675V，电压比较电路的输出电平为低电平。



图 37 改进后电路常温下温度传感电路的输出电压测量值



图 38 改进后电路常温下差分放大电路的输出电压测量值

5. 总结与反思

本设计依据模拟电路课程中所学的基本知识与典型电路,完成了基于温度变化的火灾报警装置的设计.电路的各个参数取值由各元件手册、理论规律计算和扫描仿真共同综合得到,仿真结果完全达到了设计任务的要求.实际搭建电路过程中,按照模块进行版图布置,根据引线功能确定颜色,并把温度传感器部分单独引出便于测试.实际测试结果效果明显,各个模块的输入输出均与理论推导的结果保持一致,并且,在经过实际测试的进一步改进后,电路对温度的灵敏度也得到了保证.

在整个设计与测试过程中,得到的经验与反思如下:

1. 在电路参数选择时,许多参数的选取均不是唯一确定的,需要结合各方面条件综合选择.如本设计中,电阻 R_1 的选取考虑到了节能的要求,电阻 R_3 、 R_5 、 R_7 、 R_9 的取值均为 $15k\Omega$,是考虑到搭建电路时方便.
2. 在电路参数选择时,因为元件的非线性性,许多参数不能由计算得到,需要利用仿真中的参数扫描确定最佳的取值.如本设计中,电阻 R_{12} 、 R_{14} 阻值的确定就是利用输出电压和输出电流关于电阻进行参数扫描得到的结果.
3. 在电路方案选择时,需要权衡多种因素考虑.如本设计中,两种方案的选择是基于其操作与调试难度、电路稳定性、需要的元件数量、输出电压变化范围的可行性等多个实际方面.
4. 在电路搭建过程时,应当按照模块进行版面布置,按照导线的功能选择颜色,方便之后的进一步调试与交流.如本设计中,面包板整体版面从左至右分别为温度传感电路、差分放大电路、电压比较电路和声光报警电路,用红色导线连接正电源,黄色导线连接负电源,绿色导线连接低,橙色导线连接模块间的输入输出.
5. 在电路性能调试时,要认识到理论的一致性与差别,测量值在理论值的误差范围内说明电路连接正确,而偏差太大时则应考虑电路连线是否存在问题.如本设计中,调试所得的各个模块的输出电压均在理论值的一定误差范围内,说明电路连接正确;在调试过程中,当测得电压明显偏离理论值(如约等于电源电压时),就应立即断开电源检查电路是否出现了短路与断路情况,确认无误后再接点调试,以防元件烧坏.
6. 在电路性能调试时,应该慢慢提高电源电压以免因为短路带来的元件损毁.如在本设计中,调试总是在低电压($U < 5V$)下输出电压处于该电压下的正常范围内时,才进一步提高电源电压进行进一步调试.
7. 在电路性能调试时,应当逐级调试,不可一蹴而就.如在本设计中,先测试温度传感电路的输出电压是否满足要求,调节满足后再接后一级差分放大电路,进一步测试差分放大电路的输出电压是否满足要求,最后连接比较电路和报警电路,测量输出电压值并观察现象.
8. 在电路进一步改进时,由于理论推导及仿真结果与实际情况总存在差距,可以调整部分参数的值获得更好的电路性能.如在本设计中,直接采用方案二的火灾报警电路灵敏度不够高,需要加热十秒左右才能报警,而加了电位器修正了 R_6 的值之后只需要加热不到一秒时间就会立即进行报警,提高了电路的灵敏度.