

浙江大学



本科实验报告

姓名:

学院: 生物医学工程与仪器科学学院

系: 生物医学工程

专业: 生物医学工程

学号:

指导教师: 陈凌翔

2025 年 4 月 3 日

浙江大学实验报告

课程名称: 生物医学传感与检测 实验类型: _____

实验项目名称: 压电与热电传感器的特性及其应用

同组学生姓名: _____

指导老师: 陈凌翔

实验地点: 教7西裙楼-301 实验日期: 2025年4月17日

一、实验目的和要求

- 1、了解压电式传感器的结构、原理及应用。
- 2、了解热电偶的工作原理和工作特性。

二、实验内容和原理

1、压电传感器

压电加速度计是根据压电原理制成的测量振动的传感器，图 6.1 是一种压电加速度计的结构示意图。

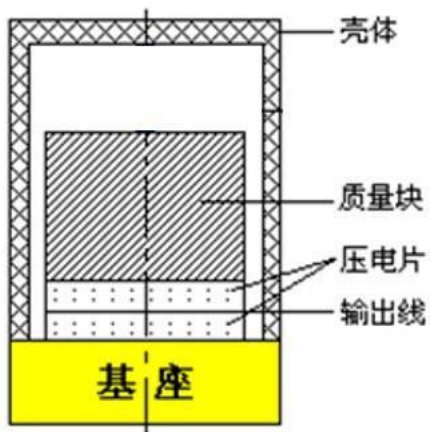


图 6.1 压电加速度传感器的结构示意图

压电元件固定在外壳基座上，其上的质量块施加预压力，当有一个振动激励该系统时，传感器内部的敏感质量块感受到振动后对压电元件施加作用力，作用力 F 可用下式表示：

$$F = ma$$

式中 m ——敏感块的质量；

a ——敏感质量块的加速度。

由于压电元件的压电效应，压电元件受力后产生的电荷量与所其受到的力成正比，即

$$q = d_{ij} F = d_{ij} ma$$

式中 d_{ij} ——压电材料的压电系数。

对于每只压电加速度计，其内装压电晶体的压电系数和敏感块质量均为常量，所以压电元件受力后产生的电荷量 q 与加速度 a 成正比。因此，只要测量压电加速度计输出的电荷量，即可确定振动所产生的加速度值，并可由此测量振动幅度。（振幅大，瞬时加速度大）

为了改善压电传感器的低频特性，常采用电荷放大器。电荷放大器由一个反馈电容 C_f 和高增益运算放大器构成，电荷放大器等效电路如下图 6.2 所示。

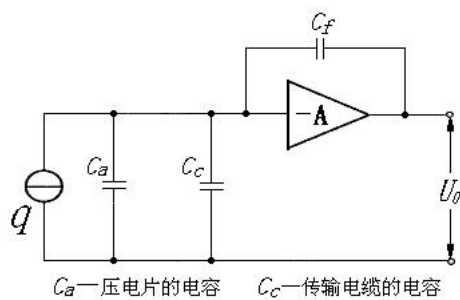


图 6.2 电荷放大器等效电路

当运算放大器的开环增益足够大时，电缆电容 C_c 和传感器电容 C_a 可以忽略，输出电压仅为输入电荷及反馈电容的函数：

$$U_o = -q/C_f$$

电荷放大器的输出电压与电缆电容无关，因此可以采用长电缆进行远距离测量，并且电缆电容变化也不影响灵敏度，这是电荷放大器的最大特点。

压电传感器不能用于静态测量，因为经过外力作用后产生的电荷，只有在测量电路具有无限大的输入阻抗时才能保存。而实际情况无法做到这样，这就决定了压电传感器只能测量动态的应力。在本实验中，当振动频率过低($<3\text{Hz}$)时，电荷放大器将无输出。

2、热电传感器

热电偶的基本工作原理是热电效应。两种不同导体 A 和 B 组成闭合回路，如果两结点的温度不同，在回路中就会产生电动势，有电流流过，这种现象称为热电效应或塞贝克效应。

这两种导体的组合称为热电偶。如图 10.1 所示，热电偶的两端是将两种导体焊在一起，其中置于被测介质中的一端称为工作端；另一端称为参比端或冷端，处于恒温条件下。当工作端被测介质温度发生变化时，热电势随之发生变化，将热电势送入显示、记录装置或用微机处理，即可得到温度值。 T 与 T_0 的温差越大，热电偶的输出电动势就越大，因此，可用热电势衡量温度的大小。

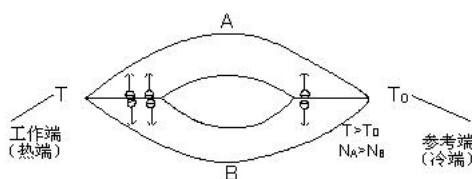


图 10.1 热电偶热电效应原理

三、主要仪器设备

压电加速度计、电荷放大器、低通滤波器、示波器、低频振荡器、转速 / 频率表、电源。

热电偶、差动变换（放大）器 I、电压表（2V 量程）、加热器、直流电源、数字温度计。

四、操作方法和实验步骤

1、压电传感器

(1) 观察压电加速度计结构，并将其安装在圆盘振动台上。

(2) 压电加速度计与电荷放大器的接线用屏蔽线或者短线连接，实验接线参考图 6.3。

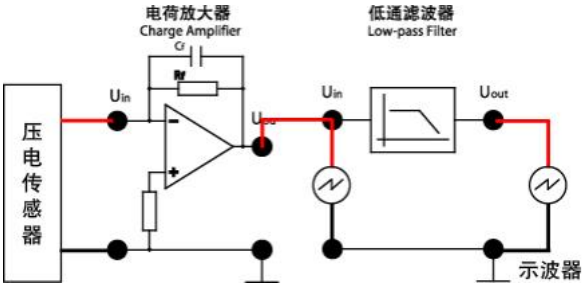


图 6.3 接线参考图

(3) 将低频振荡器的输出端与频率表的输入端及振动源相连，图 6.4。

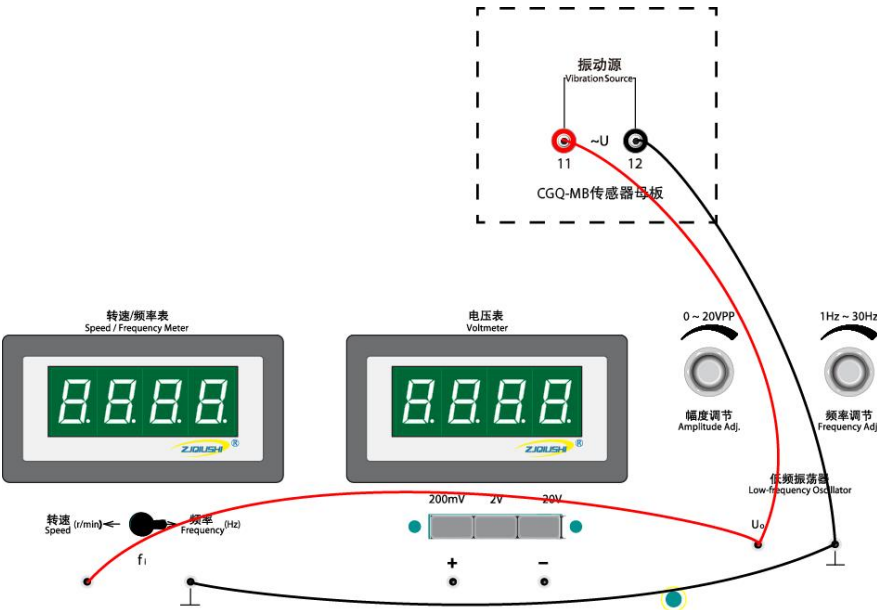


图 6.4 振动接线参考图

(4) 将低频振荡器的频率打到 7~20HZ 范围内，频率表监测，调节低频振荡器的幅度旋钮，使整个频率范围圆盘工作台振动不至于过大。

(5) 用示波器的两个通道同时观察电荷放大器与低通滤波器的输出波形，说明观察到的现象并解释原因。

(6) 用手轻击试验台，观察输出波形的变化。可见敲击时输出波形会产生“毛刺”，试解释原因。

(7) 保持低频振荡器的输出幅度不变，用频率表或示波器的一个通道读取低频振荡器的输出频率，改变输出频率 f ，从 7Hz 到 20Hz，用示波器的另一通道读取不同振动频率下测量系统输出电压的峰—峰值 V_{p-p} ，记录实验数据。

(8) 根据实验结果，作出圆盘工作台的振幅——频率特性曲线，并指出圆盘工作台自振频率的大致数值。

2、热电传感器

(1) 观察热电偶在实验仪上的位置，它封装在双孔悬臂梁外侧。实验仪所配的热电偶是由铜——康铜组成的简易热电偶，分度号为 T，见表 10.1。

表 10.1 T 型热电偶分度表

| 温度℃ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 热电动势 mV | | | | | | | | | | |
| -40 | -1.475 | -1.510 | -1.544 | -1.579 | -1.614 | -1.648 | -1.682 | -1.717 | -1.751 | -1.785 |
| -30 | -1.121 | -1.157 | -1.192 | -1.228 | -1.263 | -1.299 | -1.334 | -1.370 | -1.405 | -1.440 |
| -20 | -0.757 | -0.794 | -0.830 | -0.867 | -0.903 | -0.904 | -0.976 | -1.013 | -1.049 | -1.085 |
| -10 | -0.383 | -0.421 | -0.458 | -0.495 | -0.534 | -0.571 | -0.602 | -0.646 | -0.683 | -0.720 |
| 0- | -0.000 | -0.039 | -0.077 | -0.116 | -0.154 | -0.193 | -0.231 | -0.269 | -0.307 | -0.345 |
| 0+ | 0.000 | 0.039 | 0.078 | 0.117 | 0.156 | 0.195 | 0.234 | 0.273 | 0.312 | 0.351 |
| 10 | 0.391 | 0.430 | 0.470 | 0.510 | 0.549 | 0.589 | 0.629 | 0.669 | 0.709 | 0.749 |
| 20 | 0.789 | 0.830 | 0.870 | 0.911 | 0.951 | 0.992 | 1.032 | 1.073 | 1.114 | 1.155 |
| 30 | 1.196 | 1.237 | 1.279 | 1.320 | 1.361 | 1.403 | 1.444 | 1.486 | 1.528 | 1.569 |
| 40 | 1.611 | 1.653 | 1.695 | 1.738 | 1.780 | 1.822 | 1.865 | 1.907 | 1.950 | 1.992 |
| 50 | 2.035 | 2.078 | 2.121 | 2.164 | 2.207 | 2.250 | 2.294 | 2.337 | 2.380 | 2.424 |
| 60 | 2.467 | 2.511 | 2.555 | 2.599 | 2.643 | 2.687 | 2.731 | 2.775 | 2.819 | 2.864 |
| 70 | 2.908 | 2.953 | 2.997 | 3.042 | 3.087 | 3.131 | 3.176 | 3.221 | 3.266 | 3.312 |
| 80 | 3.357 | 3.402 | 3.447 | 3.493 | 3.538 | 3.584 | 3.630 | 3.676 | 3.721 | 3.767 |
| 90 | 3.813 | 3.859 | 3.906 | 3.952 | 3.998 | 4.044 | 4.091 | 4.137 | 4.184 | 4.231 |
| 100 | 4.277 | 4.324 | 4.371 | 4.418 | 4.465 | 4.512 | 4.559 | 4.607 | 4.654 | 4.701 |
| 110 | 4.749 | 4.796 | 4.844 | 4.891 | 4.939 | 4.987 | 5.035 | 5.083 | 5.131 | 5.179 |
| 120 | 5.227 | 5.275 | 5.324 | 5.372 | 5.420 | 5.469 | 5.517 | 5.566 | 5.615 | 5.663 |
| 130 | 5.712 | 5.761 | 5.810 | 5.859 | 5.908 | 5.957 | 6.007 | 6.056 | 6.105 | 6.155 |
| 140 | 6.204 | 6.254 | 6.303 | 6.353 | 6.403 | 6.452 | 6.502 | 6.552 | 6.602 | 6.652 |
| 150 | 6.702 | 6.753 | 6.803 | 6.853 | 6.903 | 6.954 | 7.004 | 7.055 | 7.106 | 7.150 |
| 160 | 7.207 | 7.258 | 7.309 | 7.360 | 7.411 | 7.462 | 7.513 | 7.564 | 7.615 | 7.660 |
| 170 | 7.718 | 7.769 | 7.821 | 7.872 | 7.924 | 7.975 | 8.027 | 8.079 | 8.131 | 8.183 |
| 180 | 8.235 | 8.287 | 8.339 | 8.391 | 8.443 | 8.495 | 8.548 | 8.600 | 8.652 | 8.705 |
| 190 | 8.757 | 8.810 | 8.863 | 8.915 | 8.968 | 9.021 | 9.074 | 9.127 | 9.180 | 9.233 |
| 200 | 9.286 | 9.339 | 9.392 | 9.446 | 9.499 | 9.553 | 9.606 | 9.659 | 9.713 | 9.767 |
| 210 | 9.820 | 9.874 | 9.928 | 9.982 | 10.036 | 10.090 | 10.144 | 10.198 | 10.252 | 10.306 |
| 220 | 10.360 | 10.414 | 10.469 | 10.523 | 10.578 | 10.632 | 10.687 | 10.741 | 10.796 | 10.851 |
| 230 | 10.905 | 10.960 | 11.015 | 11.070 | 11.128 | 11.180 | 11.235 | 11.290 | 11.345 | 11.401 |
| 240 | 11.450 | 11.511 | 11.566 | 11.622 | 11.677 | 11.733 | 11.788 | 11.844 | 11.900 | 11.956 |

(2) 差动变换(放大)器 I 增益调到最大(右旋 10 圈到底, 出厂设置约 92 倍), 按图 10.2 接线, 此时加热器先不要接入+5V 直流电源, 开启电源, 在未加热状态调节差动变换(放大)器 I 调零旋钮, 使电压表显示为零。外置的数字温度表接直流电源和热电偶, 记录下未加热的热电偶温度, 即室温 t_1 。

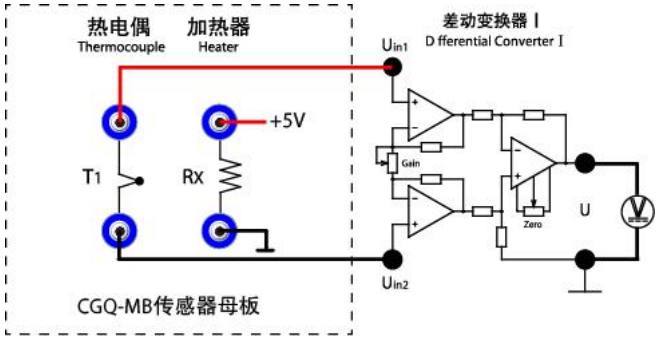


图 10.2 热电偶实验接线参考图

(3) 加热器一端接+5V 直流电源、另一端接地，观察电压表显示值的变化，待显示值稳定不变时（约十分钟）记录电压表显示的读数 E 。

(4) 根据热电势与温度之间的关系式 $E(t, t_0) = E(t, t_1) + E(t_1, t_0)$ ，查阅 T 型热电偶分度表求出热端温度 t 。

其中：

t —— 热电偶的热端（工作端或称测温端）温度；

t_1 —— 热电偶的冷端（自由端即热电势输出端）温度也就是室温；

t_0 —— 热电偶分度表参考端温度 0°C ；

$E(t, t_0)$ ——热端 t 、参考端 0°C 时的热电势，查表求出 t ；

$E(t, t_1)$ ——热端 t 、冷端室温时的热电势，

$E(t, t_1) =$ 测量所得电压表读数 $E/92$ （92 为差动放大倍数）；

$E(t_1, t_0)$ ——室温、参考端 0°C 时的热电势，即温度修正电动势，查表得。

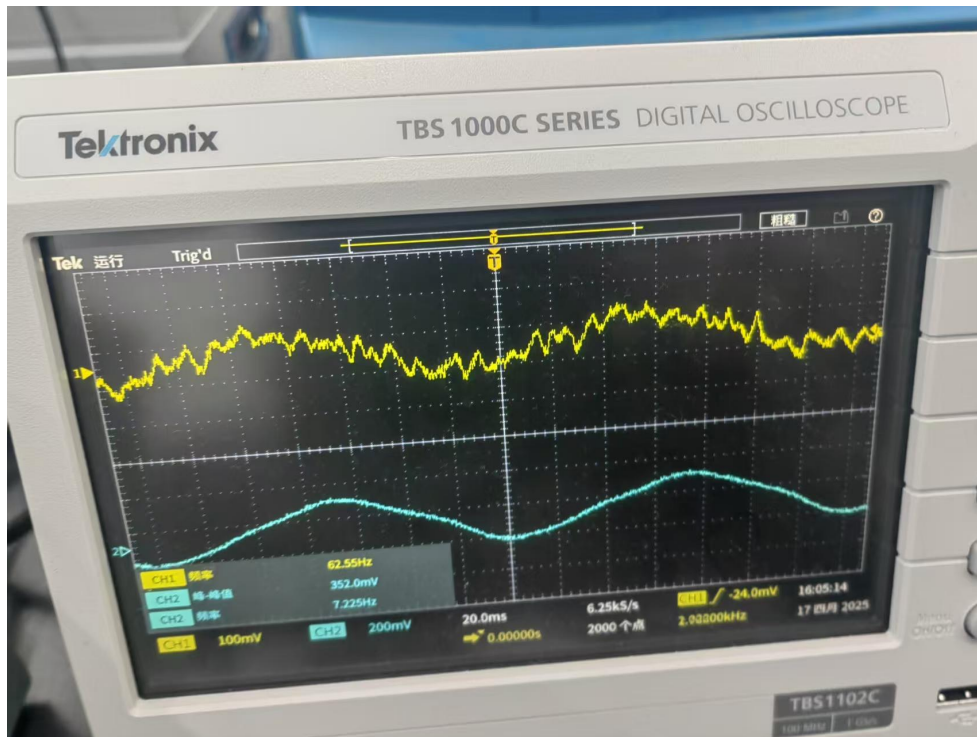
(5) 用外接的温度表读取热电偶热端温度 t ，与以上实验计算查表所得结果相比较。

五、实验数据记录和处理

1、压电传感器

| | | | | | | | |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
| f (Hz) | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| V_{p-p} (V) | 0.18 | 0.46 | 1.44 | 5.44 | 1.44 | 1.12 | 0.96 |
| f (Hz) | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| V_{p-p} (V) | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 |

当 $f < 10\text{Hz}$ 时，输出电压随频率升高而增大，反映系统处于共振前的受迫振动阶段；当 $f > 10\text{Hz}$ 后，电压迅速下降并在 14Hz 后稳定在 0.96V ，说明系统已远离共振区域，进入惯性控制区。结合实验现象，圆盘工作台的自振频率大致在 10Hz 左右。



CH1 为低通滤波器前，CH2 为去除高频噪声的最终输出波形。

2、热电传感器



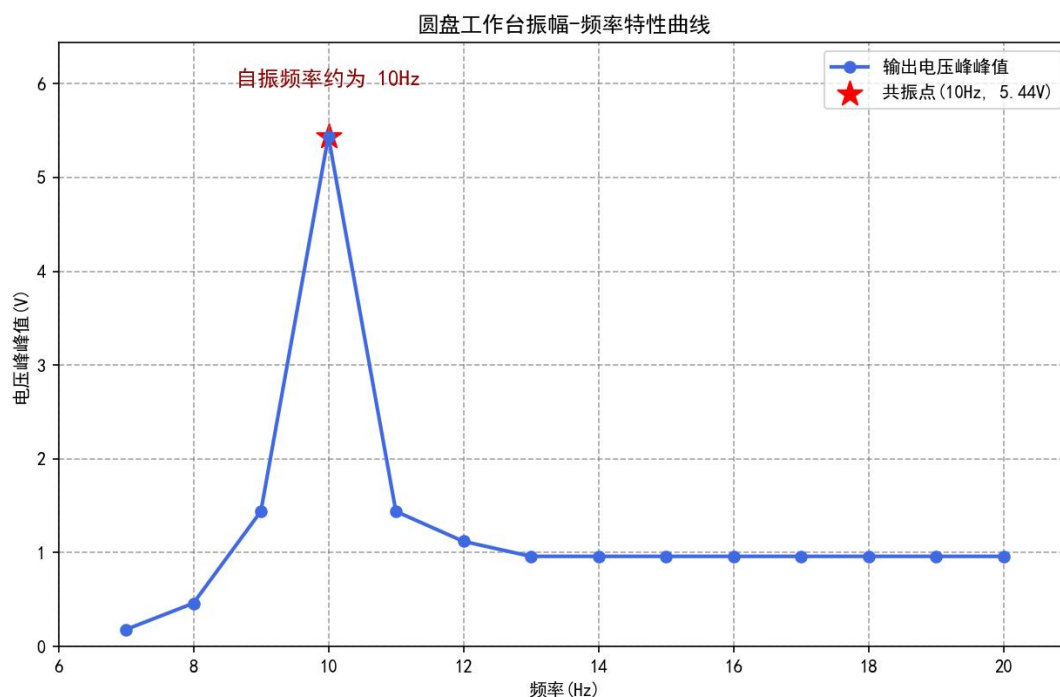
$$t_1 = 25^{\circ}\text{C}$$

$$E = 0.098\text{V}$$

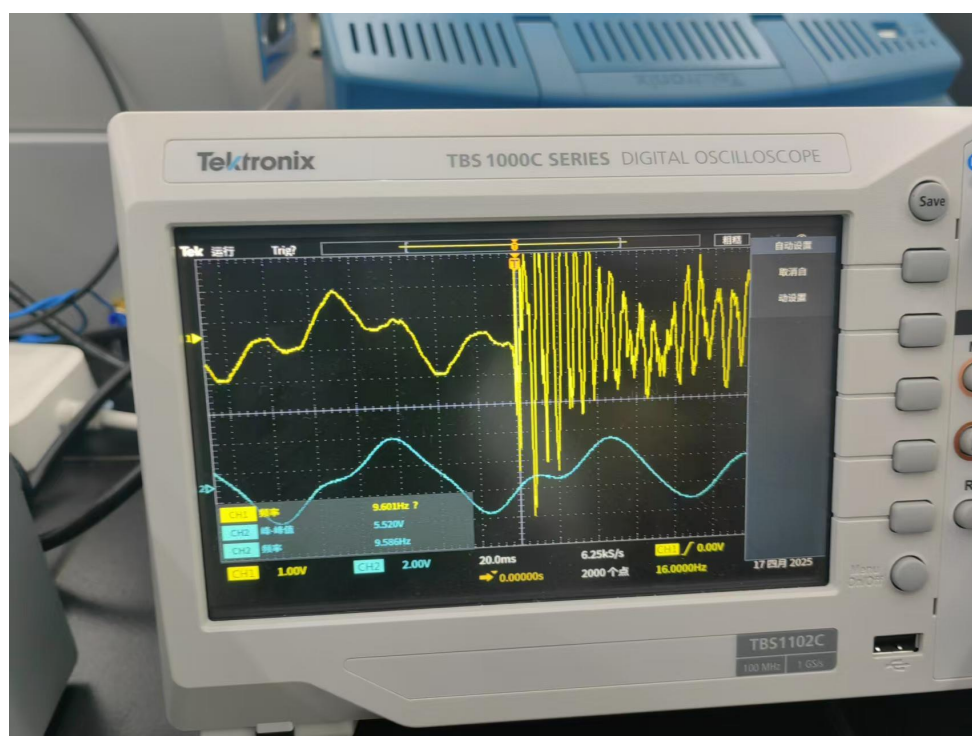
$$t = 51^{\circ}\text{C}$$

六、实验结果与分析

1、压电传感器



在频率 $f=10\text{Hz}$ 时, V_{p-p} 达到峰值 5.44V , 显著高于其他频率下的输出。这是由于此时振动频率接近圆盘工作台的固有频率, 引发系统共振, 导致振幅急剧增大。根据压电传感器原理, 加速度与电荷量成正比, 而振幅越大 (对应瞬时加速度越大), 电荷放大器输出电压越高, 符合 “振幅大则瞬时加速度大” 的理论预期。



轻击试验台时输出波形出现 “毛刺”, 是由于瞬时冲击产生的高频振动信号

被压电传感器捕捉。压电传感器对动态应力敏感，而静态或低频（<3Hz）信号会因电荷泄漏无法测量，与理论分析一致。

2、热电传感器

由公式可得 $10.1, 98 \text{ mV} / 92 + 0.992 = 2.057 \text{ mV}$

查表可知，2.057mV 介于 50℃（2.035mV）和 51℃（2.078mV）之间，线性插值计算得 $t \approx 50.6^\circ\text{C}$ ，与实际测量值 51℃高度吻合，验证了热电偶测温原理的正确性。

七、讨论、心得

1、为什么电荷放大器与压电加速度计的接线必须用屏蔽线或者短线，否则会产生什么问题？

电荷放大器与压电加速度计的接线必须采用屏蔽线或短线，核心原因在于压电传感器输出的是**微弱电荷信号**（量级通常为 pC 级），极易受外界电磁干扰（如工频噪声、设备漏电流）影响。

屏蔽线的金属网层可形成电磁屏蔽层，有效阻隔空间电磁场对信号的耦合干扰；而短线连接则是因为尽管电荷放大器理论上可忽略电缆电容（ C_c ）的影响（输出电压 $U_0 = -q/C_f$ 与 C_c 无关），但过长电缆会引入较大分布电容和电阻，导致信号衰减及噪声信噪比下降。若未采用屏蔽线或使用长线，可能出现输出波形叠加高频杂波、基线漂移等问题，严重时甚至会淹没有效信号，影响振动加速度测量精度。

2、测温度的传感器除了热电偶还有什么类型，列举一两种类型说明其工作原理、适用范围。

（1）热电阻

热电阻基于金属电阻随温度变化的特性。当温度升高时，金属的电阻值会增加，通过测量电阻值的变化可以确定温度。

（2）热敏电阻

热敏电阻是一种基于半导体材料的传感器，其电阻值随温度变化而显著改变。根据材料特性，热敏电阻可分为正温度系数（PTC）和负温度系数（NTC）两种类型。

型。

（3）红外测温传感器

红外测温传感器通过测量物体表面辐射的红外线能量来确定温度。根据斯特藩-玻尔兹曼定律，温度较高的物体会辐射出更多的红外线能量。

（4）光纤温度传感器

光纤温度传感器基于光纤中光的传播特性与温度之间的关系，通过测量光的传播时间或相位差来确定温度。

本次实验以 "压电与热电传感器的特性及其应用" 为主题，通过对压电加速度计和热电偶的原理探究、电路搭建及数据实测，我系统掌握了两类传感器的核心工作机制与工程应用要点。