

成 绩

2025 年 6 月



课程名称: 材料力学实验

实验选题: 圆环式力传感器

指导老师:

选课班级: 周二 3—4 节

团队成员 (姓名学号):

徐屹寒 3230103743

张浩天 3230103456

林佳润 3230105427

王涵 3230103093

力学国家级实验教学示范中心 (浙江大学)

National Demonstration Center for Experimental Mechanics Education
Zhejiang University

目录

一、摘要	3
二、背景简介	3
三、原理	3
四、实验方案及实施	4
4.1) 目标及简介	4
4.2) 弹性元件几何尺寸和基本参数	4
4.3) 强度校核	5
4.4) 确定贴片和组桥方案	5
4.5) 灵敏度系数计算	6
4.6) 制作	7
4.7) 标定	9
4.8) 确定输出灵敏度系数	10
4.9) 确定精度等级和有效量程	10
五、实验数据及其处理	10
5.1) 引伸计标定	10
5.2) 引伸计实际灵敏度系数计算	11
5.3) 确定精度等级和有效量程	12
5.4) 误差分析	12
六、结论	13
七、实验心得体会	14
八、参考文献	15

一、摘要

本实验旨在设计、制作并标定一个量程为 30 kg 的圆环式力传感器。实验首先进行了弹性元件的理论设计与强度校核，确认其在目标载荷下满足安全要求。随后，采用四片应变片组成全桥测量电路，粘贴于圆环内外壁的特定位置，以提高灵敏度并补偿温度影响。通过加载标准砝码，利用应变仪采集了不同载荷下的应变数据。对采集的力-应变数据进行线性拟合，得到了传感器的标定方程为 $F = 0.0800\varepsilon - 1.4860$ (F 单位 N, ε 单位 $\mu\varepsilon$)。基于 30kg 设计载荷及单片应变片灵敏度系数 $K_p = 2.0$ 的理论计算传感器输出灵敏度约为 1.96 mV/V, 而基于实测最大全桥等效应变计算的传感器实际输出灵敏度约为 1.847 mV/V。通过对不同载荷点测量误差的分析, 确定了当相对误差绝对值小于 1% 时, 传感器的有效测量范围为 9 kg (88.2 N) 至 30 kg (294 N)。在此有效量程内, 最大相对误差的绝对值为 0.28%, 评定传感器精度等级为 0.5 级。实验结果表明, 所设计的传感器在有效量程内表现出良好的线性度和精度, 但在小载荷区域误差相对较大。

二、背景简介

本实验旨在综合运用理论力学与材料力学知识, 设计并制作一台具有实际应用价值和一定精度的简易电子秤。该电子秤的核心部件为应变片式力传感器, 这是一种在工业生产和日常生活中得到广泛应用的传感器类型。例如, 在各种重量衡器、汽车工业、结构健康监测、航空航天以及自动化、人工智能和机器人等领域, 应变片式传感器都扮演着至关重要的角色。

应变片式传感器因其结构简单、重量轻、使用方便、成本低廉, 同时具备高精度、高分辨率、稳定可靠以及能适应各种复杂环境等优点而备受青睐。通常, 这类传感器由弹性元件和粘贴其上的应变片组成。通过感知弹性元件在受力时产生的微小形变, 并将其转换为电信号输出, 从而实现对力的精确测量。

三、原理

本实验设计的简易电子秤, 其核心工作原理基于电阻应变效应。当金属导体或半导体材料在外力作用下发生机械形变(拉伸或压缩)时, 其电阻值会相应发生改变, 这种现象称为电阻应变效应。应变片正是利用这一效应将力学量(如应变)转换为电学量(如电阻变化)的敏感元件。

电子秤主要由弹性元件和应变片组成。弹性元件(在本实验中为圆环形弹性元件)在受到外加载荷(即被测物体的重量)时会产生形变。粘贴在弹性元件特定区域(应变敏感区)的应变片会随之发生同样的形变, 导致其电阻值发生变化。根据胡克定律, 在弹性变形范围内, 应力与应变成正比, 因此应变的大小直接反映了所加载荷的大小。

电阻应变效应可表示为:

$$\Delta \frac{R}{R} = K_p \varepsilon$$

其中, ΔR 为应变片电阻值的变化量, R 为应变片初始电阻值, ε 为应变片所感受到的应变, K_p 为单片应变片的灵敏度系数, 是一个表征应变片材料物理特性的常数。

为了精确测量微小的电阻变化并提高测量灵敏度、消除温度等干扰因素的影响, 通常将应变片接入惠斯登电桥电路。对于四臂全桥 (如本实验所采用的方案), 其输出电压 ΔU 与供桥电压 U 的关系为:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{4} K_p (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

其中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ 分别为桥路中四个臂上应变片的应变值。通过合理布置应变片的位置和接入方式 (遵循加减法则), 可以使电桥输出对目标力学量 (如弯曲应变) 的灵敏度最大化, 同时抵消温度变化、轴向力或扭转等非目标因素的影响。

弹性元件在实际工作中应处于小变形状态, 其应力应远低于材料的屈服极限, 以保证线性和可重复性。因此, 需要运用材料力学强度理论对其进行强度校核, 确保在满量程加载时, 弹性元件的最大工作应力 σ_{\max} 低于材料的许用应力 $[\sigma]$ 。许用应力的计算通常会引入一个较大的安全系数 (本实验建议取 1.5~3), 即 $[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n}$, 其中 σ_s 是材料的屈服强度, n 是安全系数。

传感器设计还需遵循选择应变敏感区 (如应力集中点或最大应力点附近) 粘贴应变片的原则, 同时注意避免圣维南效应的影响, 即贴片位置应远离载荷作用点和固定约束端的一定距离。通过标定实验, 可以建立电桥输出电压 (或经过放大和转换后的显示值) 与所加载荷 (质量) 之间的精确对应关系, 从而实现电子秤的计量功能。

四、实验方案及实施

4.1) 目标及简介

- (1) 确定力传感器的量程;
- (2) 确定力传感器的精度等级;
- (3) 确定力传感器的输出灵敏度。

4.2) 弹性元件几何尺寸和基本参数

弹性元件几何数据自测: 内径 $d = 39.2 \text{ mm}$ 、外径 $D = 45 \text{ mm}$ 、厚度 $h = 10 \text{ mm}$ 、宽度 $b = 2.9 \text{ mm}$ 。材料为铝合金, 屈服强度取 435 MPa , 弹性模量按 70.0 GPa 计算。弹性元件的最大应力需低于许用应力, 许用应力计算时安全系数要比一般的结构计算取得更大, 一般在 1.5~3 之间, 这里取为 3。

考虑到实际应用的便捷性和日常称量的习惯, 并结合指导老师的建议, 本设计将传感器

的目标量程设定为 30 kg (约等于 $30 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 294 \text{ N}$)。选择整数倍量程 (如 1 kg, 5 kg, 10 kg, 30 kg 等) 更符合一般使用习惯, 具有较好的实用性。

4.3) 强度校核

针对设计的 30 kg (294 N) 量程, 对弹性元件进行强度校核。最大工作应力 σ_{\max} 发生在圆环内壁中点, 根据公式:

$$\sigma_{\max} = \frac{1.91FD}{bh^2}$$

$$\sigma_{\min} = -\frac{1.09FD}{bh^2}$$

材料的许用应力为: $[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n} = \frac{435 \text{ MPa}}{3} = 145 \text{ MPa}$ 。

将最大设计载荷 $F = 294 \text{ N}$ 及弹性元件几何参数 (外径 $D = 45 \text{ mm}$, 宽度 $b = 2.9 \text{ mm}$, 厚度 $h = 10 \text{ mm}$) 代入最大应力公式, 计算得到的最大工作应力

$$\sigma_{\max} = 87.14 \text{ MPa}$$

小于许用应力 $[\sigma] = 145 \text{ MPa}$ 。因此, 所选弹性元件尺寸满足 30 kg 量程的强度设计要求。(尽管按此尺寸及材料, 元件的理论极限承载能力允许 $F < 489.24 \text{ N}$, 但为确保良好的线性度、测量精度和使用寿命, 并结合实际应用需求, 本设计量程确定为 30 kg。)

4.4) 确定贴片和组桥方案

传感器应变片应贴在应变敏感区, 如圆环中点。但考虑到圣维南效应, 贴片点应至少离开固定端 $2h$ 距离。传感器应变片布置: 在圆环内、外壁中点各贴 1 片纵向应变片 ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$), 对称位置贴纵向应变片 ($\varepsilon_3, \varepsilon_4$) 用于温度补偿。

显然内侧的两片大小、符号相同, 外侧两片大小、符号相同, 内外符号相反, 温度效应、非线性效应等可认为相等。根据惠斯登电桥加减特性, 按上图右组桥 (全桥电路), 可自动消除温度和非线性效应, 并将输出灵敏度提高 4 倍。

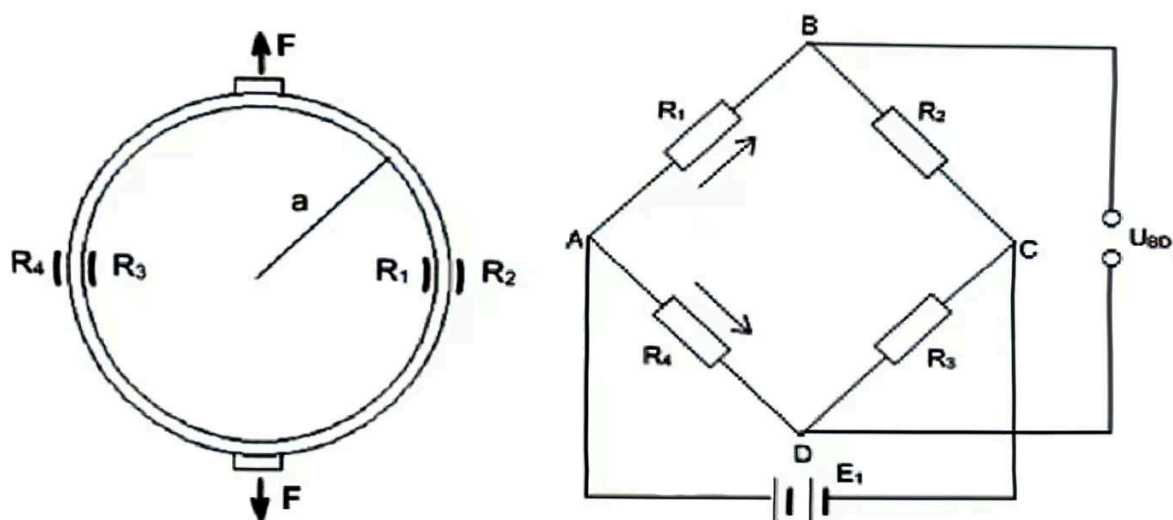


图 4.4.1: 组桥方案及贴片方案示意图

4.5) 灵敏度系数计算

传感器的理论输出灵敏度可以根据设计载荷下的应变情况进行计算。本设计的目标量程为 30 kg (294 N)。根据“强度校核”部分，当 $F = 294\text{N}$ 时：

- 最大工作应力 $\sigma_{\max} = 87.14 \text{ MPa}$
- 最小工作应力 $\sigma_{\min} = -\left(\frac{1.09}{1.91}\right) \cdot \sigma_{\max} = -49.72 \text{ MPa}$

材料的弹性模量为：

$$E = 70 \text{ GPa} = 70000 \text{ MPa}$$

单个应变片在设计载荷(30 kg)下的理论应变为：

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \frac{\sigma_{\min}}{E} = -710.3 \mu\varepsilon$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = \frac{\sigma_{\max}}{E} = 1244.9 \mu\varepsilon$$

全桥输出的等效总应变为 ε_r ：

$$\varepsilon_r = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = -3910.4 \mu\varepsilon$$

若单片应变片的灵敏度系数 $K_p = 2.0$ ，则传感器的理论输出灵敏度 $\frac{\Delta U}{U}$ 为：

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{4} K_p \varepsilon_r = -1.96 \text{ mV/V}$$

因此，在 30 kg 设计载荷下，传感器的理论输出灵敏度为 1.96 mV/V (取绝对值)。

4.6) 制作

1. 应变片粘贴：首先，对待粘贴的弹性元件表面进行清洁处理，去除油污和氧化层，以确保粘贴牢固。根据预定的贴片方案（详见图 4.4.1），精确标定应变片在圆环内外壁的粘贴位置。选用 502 胶水作为粘合剂，将应变片小心地粘贴在指定区域。操作过程中需确保胶层均匀、无气泡，并施加适当压力待胶水固化，以保证应变能够有效传递。

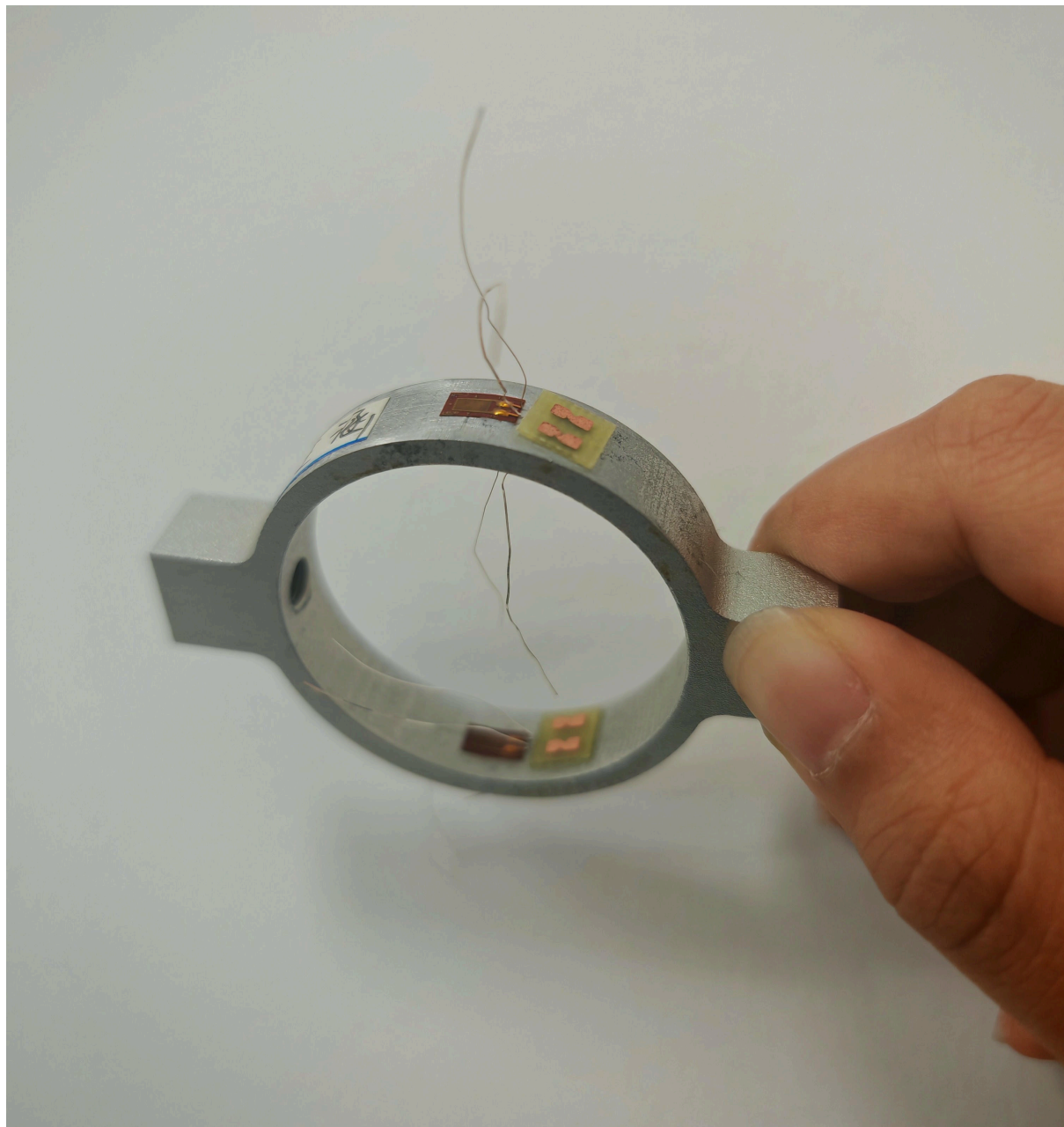


图 4.6.1：贴片

2. 引线焊接：待应变片粘贴牢固后，进行引线的焊接。使用电烙铁和焊锡膏，将应变片的引出端与准备好的铜导线进行焊接。焊接时需注意控制焊接温度和时间，避免过热损伤应变片基底或敏感栅。焊点应饱满、光滑、无虚焊，确保电气连接的可靠性。

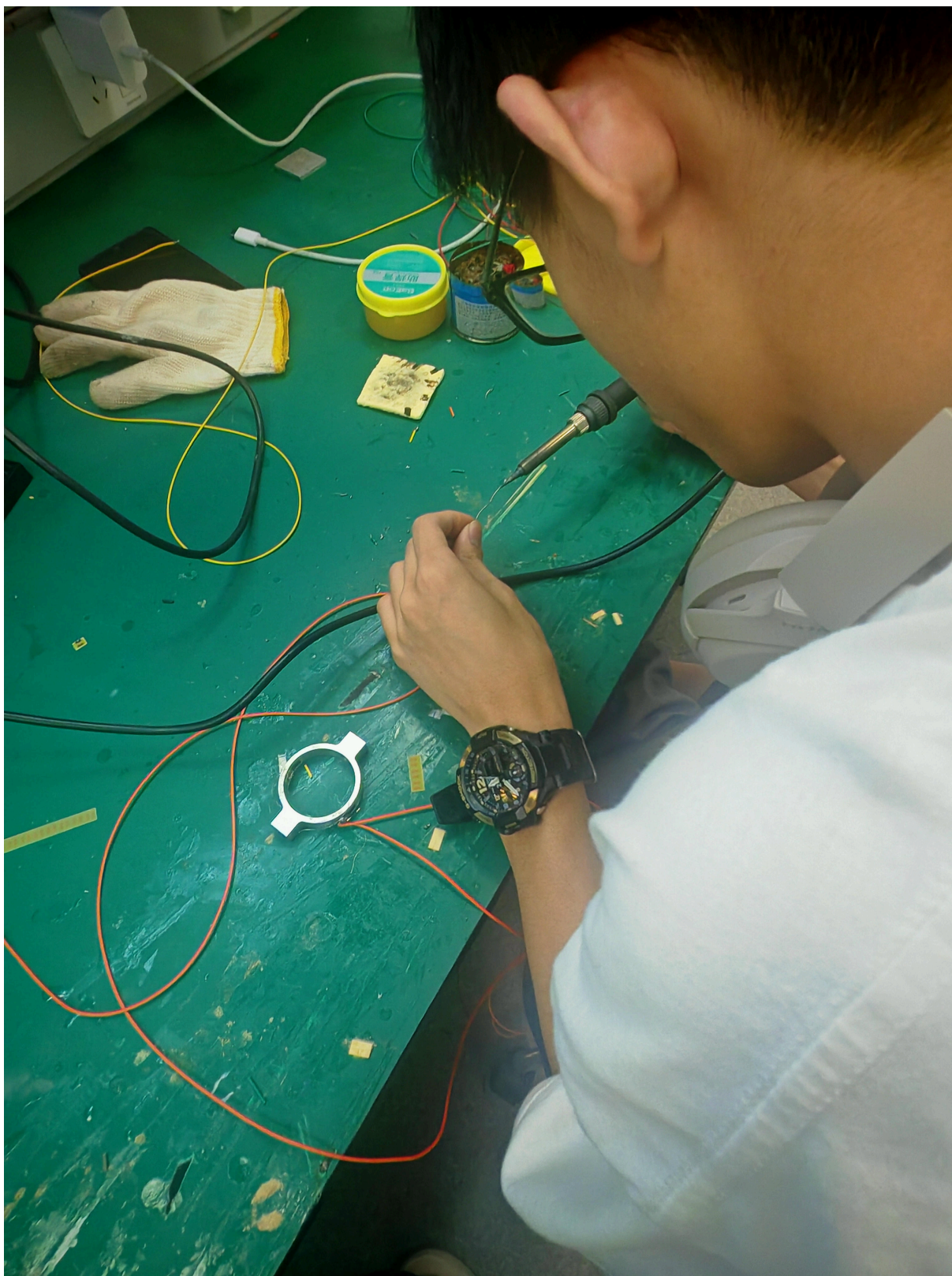


图 4.6.2: 焊接

3. 测量电桥组建：将焊接好引线的应变片按照设计的全桥电路方案（详见图 4.4.1）与静态应变仪的相应接线端子连接。仔细核对各应变片在桥路中的位置 (R_1, R_2, R_3, R_4)，

确保连接正确无误，以实现预期的应变测量和温度补偿效果。连接完成后，检查线路的连续性和绝缘性。

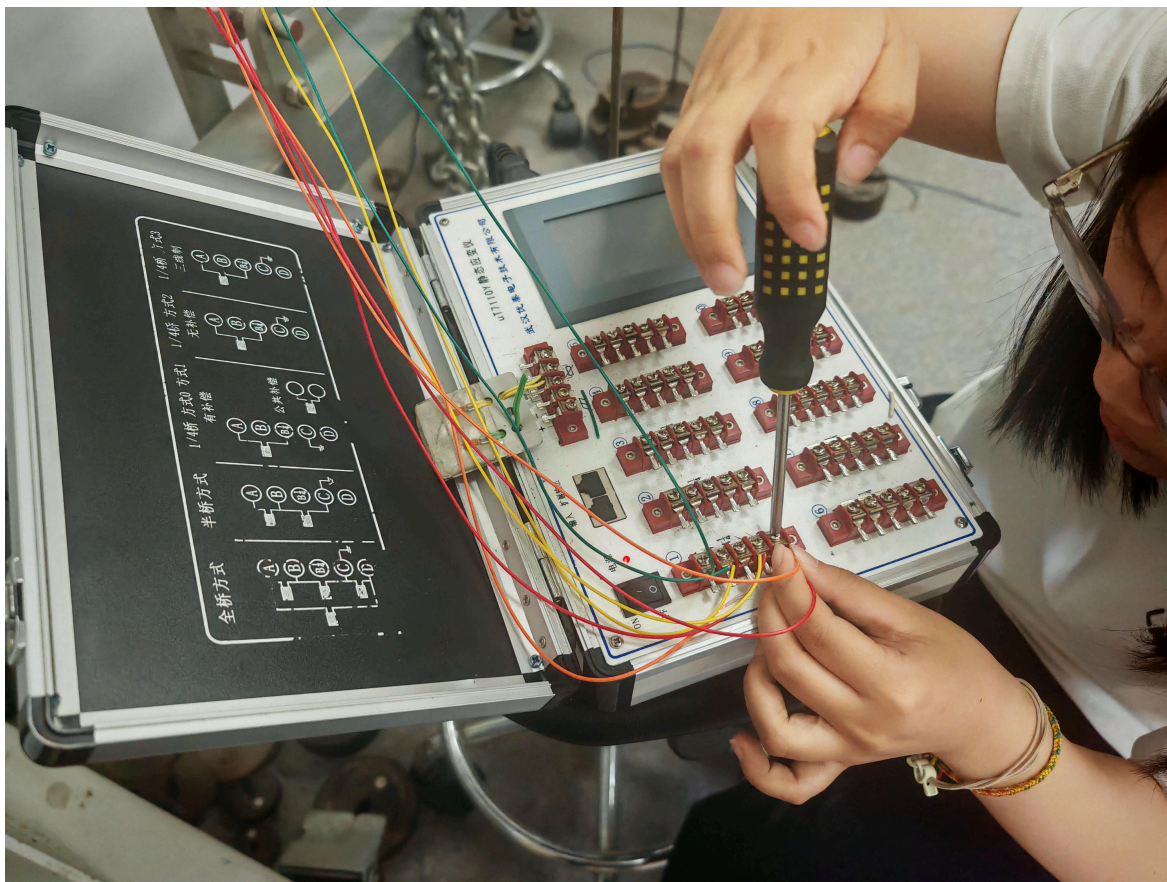


图 4.6.3: 组桥

完成上述步骤后，传感器基本制作完成，后续可进行标定实验。

4.7) 标定

传感器的标定是确定其输入（载荷 F ）与输出（应变 ε 或转换后的电信号）之间精确关系的过程。本实验中，连接应变仪并设定应变片灵敏度系数为 2.0，将应变片接入全桥测量电路。通过在传感器上施加一系列已知质量的砝码（标准载荷），记录对应的应变仪读数。为消除材料的弹性后效和初始安装应力影响，首先对传感器进行预加载，即在最大设计载荷（30 kg）范围内加载并卸载 3 次。

正式标定时，从 5 kg 开始，以 5 kg 为步长，逐级加载至 30 kg，每个载荷点重复测量 3 次应变值，并记录数据。然后计算每个载荷点三次应变读数的平均值。详细数据见“五、实验数据及其处理”部分。

利用得到的载荷 F （其中 $F = m \cdot g$ ，取 $g = 9.8\text{m/s}^2$ ）和对应的平均应变 ε_{avg} 数据点，进行线性拟合，得到标定方程：

$$F = C\varepsilon + a$$

其中 C 即为传感器的标定系数 (单位: $\text{N}/\mu\epsilon$), a 为截距 (单位: N), 理想情况下 a 接近于零。

4.8) 确定输出灵敏度系数

通过实验标定, 测得传感器在最大设计量程加载下的全桥等效应变值, 记为 ϵ_{\max} 。则引伸计实际灵敏度系数 S_{actual} 应为:

$$S_{\text{actual}} = \frac{K_p \epsilon_{\max}}{4}$$

其中, K_p 为单片应变片的灵敏度系数。

4.9) 确定精度等级和有效量程

将应变仪灵敏度系数值设为 $\frac{2}{C}$, 则应变仪显示值就是圆环式力传感器两端的力 F 的大小。在引伸计量程范围内取 5-10 个点设为 $F_{\text{理}}$, 以应变仪测量这些点, 得到相应的 $F_{\text{测}}$, 则相对误差:

$$\delta = \frac{F_{\text{测}} - F_{\text{理}}}{F_{\text{理}}}$$

以所取点的最大相对误差来确定精度等级和有效量程。

五、实验数据及其处理

5.1) 引伸计标定

在标定过程中, 使用标准砝码对圆环式力传感器进行加载, 并记录相应的应变仪读数。每个质量点测量三次, 取其平均值。重力加速度 g 取 9.8m/s^2 。原始数据及处理如下表所示:

砝码质量 m/kg	F/N	应变 $\epsilon/\mu\epsilon$			测量平均值 $\epsilon_{\text{avg}}/\mu\epsilon$
5	49	624	626	634	628
10	98	1245	1250	1251	1249
15	147	1866	1851	1852	1857
20	196	2465	2469	2470	2468
25	245	3083	3080	3091	3085
30	294	3690	3694	3698	3694

表 1: 传感器标定原始数据

将上述砝码质量 m 转换为力 $F = m \cdot g$ (其中 $g = 9.8\text{m/s}^2$), 并与对应的应变平均值 ϵ_{avg}

进行线性拟合，得到传感器的标定曲线和标定方程 $F = C\varepsilon + a$ 。

通过 MATLAB 对表 1 中的 F 和 ε_{avg} 数据进行线性拟合，得到结果如下图所示：

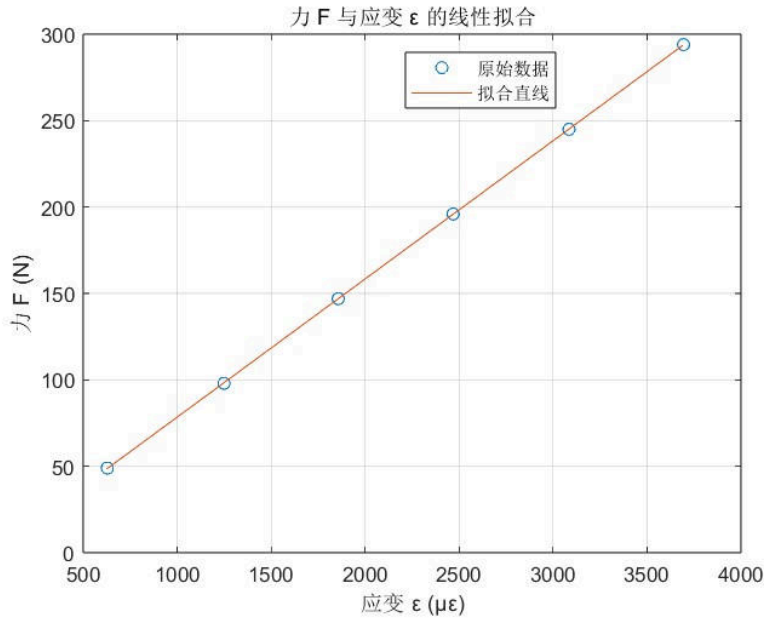


图 5.1.1：力 F 与应变 ε 的线性拟合曲线

线性拟合得到的标定方程为：

$$F = 0.0800\varepsilon - 1.4860$$

(其中 F 单位为 N ， ε 单位为 $\mu\varepsilon$)。

5.2) 引伸计实际灵敏度系数计算

此处的计算旨在根据实验测得的最大全桥等效应变，验证传感器的实际输出灵敏度，并与理论计算值进行比较。根据“四、实验方案及实施”中“确定输出灵敏度系数”一节的推导，我们使用以下公式计算传感器的实际输出灵敏度 S_{actual} ：

$$S_{\text{actual}} = \frac{K_p}{4} \cdot \varepsilon_{\text{max}}$$

在此公式中：

- $K_p = 2.0$ (实验中设定给应变仪的单片应变片灵敏度系数)
- $\varepsilon_{\text{max}} = 3694 \mu\varepsilon$ (最大量程 30kg 时测得的平均全桥等效应变值，来自表 1)

将 ε_{max} 转换为无量纲应变比值： $3694 \mu\varepsilon = 3694 \times 10^{-6}$ 。

代入数值进行计算：

$$S_{\text{actual}} = \frac{K_p}{4} \cdot \varepsilon_{\text{max}} = 1.847 \text{ mV/V}$$

这个值 (1.847 mV/V) 与理论计算的灵敏度 (1.96 mV/V) 较为接近, 其差异可能源于应变片粘贴工艺、实际材料参数与理论值的偏差以及测量误差等。

5.3) 确定精度等级和有效量程

为确定传感器的精度等级, 选取了不同质量的砝码进行加载, 记录对应的应变仪读数 $\varepsilon_{\text{测}}$ 。利用前述标定方程 $F = 0.0800\varepsilon - 1.4860$, 将测得的应变值转换为计算测量力值 $F_{\text{测}}$ 。理论力值 $F_{\text{理}}$ 由砝码质量乘以重力加速度 $g = 9.8\text{m/s}^2$ 得到。相对误差 δ 按公式 $\delta = \frac{F_{\text{测}} - F_{\text{理}}}{F_{\text{理}}} \times 100\%$ 计算。详细数据见表 2。

序号	砝码质量 m (kg)	理 论 力 值 F_理 (N)	测 量 应 变 值 ε_测 (με)	计 算 测 量 力 值 F_测 (N)	相 对 误 差 δ (%)
1	1	9.8	126	8.594	-12.31
2	2	19.6	251	18.594	-5.13
3	3	29.4	374	28.434	-3.29
4	4.5	44.1	560	43.314	-1.78
5	9	88.2	1118	87.954	-0.28
6	13.5	132.3	1670	132.114	-0.14
7	18	176.4	2226	176.594	0.11
8	23	225.4	2841	225.794	0.18
9	28	274.4	3454	274.834	0.16
10	29	284.2	3576	284.594	0.14
11	30	294.0	3697	294.274	0.09

表 2: 传感器精度等级评定数据

由表 2 可知, 当砝码质量为 9 kg (理论力值 88.2 N) 及以上时, 相对误差的绝对值均小于 1%。因此, 若取相对误差绝对值小于 1% 作为有效量程的判断标准, 则该传感器的有效量程可视为从 9 kg (88.2 N) 到 30 kg (294 N)。在此有效量程内, 最大的相对误差绝对值为 0.28% (对应砝码质量 9 kg 时)。根据常见的传感器精度等级划分, 该传感器在此有效量程内的精度等级可评定为 0.5 级 (即最大相对误差的绝对值不超过 0.5%)。

5.4) 误差分析

实验过程中可能引入误差的因素较多, 主要可归纳为以下几点:

1. 弹性元件与应变片自身特性:

- 弹性元件材料非理想均匀性、加工精度不足可能导致应力分布与理论计算存在偏差。
- 应变片灵敏度系数 K 值本身存在制造公差,且可能随温度、湿度等环境因素变化。
- 应变片粘贴工艺:若应变片粘贴位置不准确(例如未精确位于应力最大或特定对称点)、方向歪斜、粘贴层胶水厚薄不均或存在气泡,均会直接影响应变传递的准确性和一致性,引入测量误差。特别是应变片贴歪,会导致测量的应变并非纯粹的轴向应变或弯曲应变,可能引入了剪切应变的分量,或使得对称补偿效果减弱。

2. 加载与测量过程:

- 砝码精度:标准砝码虽然精度较高,但因锈蚀(特别是砝码生锈会使其质量增加)等原因导致其实际质量与标称值存在偏差。
- 加载方式:加载过程中未能保证载荷精确作用于预定加载点,或加载方向存在偏心、倾斜,会引起附加弯矩或扭矩,改变弹性元件的应力状态。
- 仪表误差:应变仪本身存在测量误差,包括零点漂移、非线性误差、分辨力限制等。

3. 数据处理与模型简化:

- 线性拟合的局限性:虽然传感器在设计量程内力求线性,但实际输出与输入之间可能存在轻微的非线性关系。线性拟合本身是一种近似处理,会引入一定的模型误差。
- 读数误差:人工读取应变仪数据时可能存在视差或估读误差。
- 计算误差:数据处理过程中的舍入误差。

针对本实验数据,尤其是在小载荷(如 1kg、2kg)时相对误差较大,除了上述普遍因素外,可能的原因还包括:

- 传感器在小载荷下的非线性特性更为显著。
- 初始标定时,零点的准确调整对小载荷测量影响较大。
- 砝码自身质量较小,其百分比误差相对较大,例如砝码生锈对小质量砝码的相对质量影响更大。

为减小误差,应严格控制实验条件,选用高精度仪器和标准件,规范操作,并进行多次测量取平均值。对于系统误差,可以通过更精密的标定和修正模型来补偿。

六、结论

通过本次实验,我们成功设计、制作并标定了一个圆环式力传感器。主要结论如下:

1. 传感器量程:设计的传感器目标量程为 30 kg (294 N)。强度校核结果表明,在此量程下,弹性元件的最大工作应力为 87.14 MPa,低于材料的许用应力 145 MPa,满足设计要求。

2. 标定方程：通过对实验数据的线性拟合，得到的传感器标定方程为 $F = 0.0800\varepsilon - 1.4860$ (其中 F 单位为 N , ε 单位为 $\mu\varepsilon$)。
3. 输出灵敏度：基于 30kg 设计载荷及单片应变片灵敏度系数 $K_p = 2.0$ 的理论计算传感器输出灵敏度约为 1.96 mV/V 。根据最大量程时的实测全桥等效应变，计算得到的传感器实际输出灵敏度约为 1.847 mV/V 。
4. 有效量程与精度等级：以相对误差绝对值小于 1% 为标准，确定传感器的有效测量范围为 9 kg (88.2 N) 至 30 kg (294 N)。在此有效量程内，最大相对误差的绝对值为 0.28% (对应砝码质量 9 kg 时)。根据常见的传感器精度等级划分，该传感器在此有效量程内的精度等级可评定为 0.5 级。

实验结果表明，所设计的圆环式力传感器在有效量程内具有较好的线性度和测量精度，基本达到了设计目标。但在小载荷区域，传感器的测量误差相对较大，这可能与传感器自身的非线性、初始零点标定以及小质量砝码的相对误差等因素有关，有待进一步优化。

七、实验心得体会

通过本次圆环式力传感器的设计、制作与标定实验，我们获得了许多宝贵的经验和深刻的体会：

1. 理论与实践的结合：实验将材料力学、理论力学、传感器原理等理论知识应用于实际传感器的设计与制作中，让我深刻理解了理论指导实践的重要性。例如，弹性元件的强度校核、应变片的选择与粘贴、惠斯登电桥的组桥原理等，都是理论知识在实践中的具体体现。
2. 动手能力的提升：从弹性元件的参数测量、应变片的粘贴、电路的焊接与连接，到最终的标定测试，每一个环节都需要细心和耐心。尤其是在应变片粘贴这样精细的操作中，稍有不慎就可能影响实验结果的准确性。这个过程极大地锻炼了我们的动手操作能力和严谨的实验态度。
3. 对误差的深入理解：实验数据的处理和误差分析让我认识到，任何测量都不可避免地存在误差。通过分析误差来源，如砝码精度、应变片粘贴工艺、环境因素、仪表精度等，我们学会了如何科学地评估实验结果的可靠性，并思考如何改进实验方案以减小误差。特别是在小载荷下误差较大的现象，也促使我们思考传感器在不同工作区间的性能差异。
4. 数据处理与分析：使用 MATLAB 进行数据拟合和图表绘制，不仅提高了数据处理的效率，也使得结果展示更为直观。学习如何从数据和图表中提取关键信息，并据此对传感器性能进行评价，是科研工作中一项重要的技能。
5. 团队协作：本次实验由小组成员共同协作完成，从实验方案的讨论、任务的分工、数据的采集与分析，到报告的撰写，每一环节都离不开团队的紧密配合与成员间的有效沟通。遇到问题时，我们共同查阅资料、探讨解决方案，这个过程不仅提高了我们解

决实际问题的能力,也加深了彼此的理解与信任,充分体会到了团队合作在科研实践中的重要性。

八、参考文献