

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 3 月 20 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： 电感传感器性能测试及其应用

指导老师： 陈凌翔

实验地点： 教7西裙楼 - 301 实验日期： 2025 年 3 月 20 日

一、实验目的和要求

- 1、了解电感式差动变压器的基本结构及原理；
- 2、通过实验验证电感式差动变压器的基本特性。
- 3、利用差动变压器式电感传感器测量系统进行位移和振动测量。

二、实验内容和原理

差动变压器的基本元件有衔铁、初级线圈、次级线圈和线圈骨架等。初级线圈作为差动变压器激励用，相当于变压器的原边，而次级线圈由两个结构尺寸和参数相同的线圈反相串接而成，形成变压器的副边。差动变压器是开磁路，工作是建立在互感变化的基础上的。当传感器随着被测体移动时，由于初级线圈和次级线圈之间的互感发生变化，促使次级线圈感应电势产生变化，一只次级感应电势增加，另一只感应电势则减少，将两只次级线圈反向串接（同名端连接），就引出差动输出，其输出电势反映出被测体的移动量。

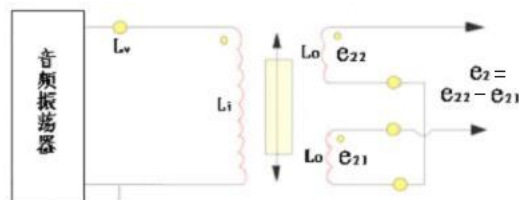


图 1. 1 电感式差动变压器工作原理

而在应用方面，差动变压器式电感传感器测量小位移时，输出信号过小，所以要接入放大器。测量电路中采用相敏检波器，以最大程度地消除零点残余电压影响，并保证测量电路的输出电压能充分反映被测位移量的变化。相敏检波器要求参考电压与差动变压器式电感传感器的输出电压频率相同、相位相同或相反，因此需要在音频振荡器的输出与相敏检波器的参考电压输入端之间接入移相器。相敏检波器的输出信号经低通滤波器消除高频分量后，得到与衔铁运动一致的有用信号。电桥中 RW1 和 RW2 用于零点残余电压补偿：当衔铁位于中间位置时，由于线圈的不对称性使系统存在零点残余电压，通过反复调节 RW1 和 RW2 使电路的输出达到最小，实现零点残余电压补偿的目的。

三、主要仪器设备

差动变压器、差动变换（放大）器 II、音频振荡器、移相器、相敏检波器、低通滤波器、测微头、示波器、数字电压表（量程 20V）、低频振荡器、振动台。

四、操作方法和实验步骤

1、差动变压器式电感传感器的性能

- (1) 音频振荡器输出调至频率 5kHz、峰-峰值 4V，用示波器观察初级波形。
- (2) 根据图 1.2 接线，将差动变压器、音频振荡器、示波器连接起来，组成一个测量线路。

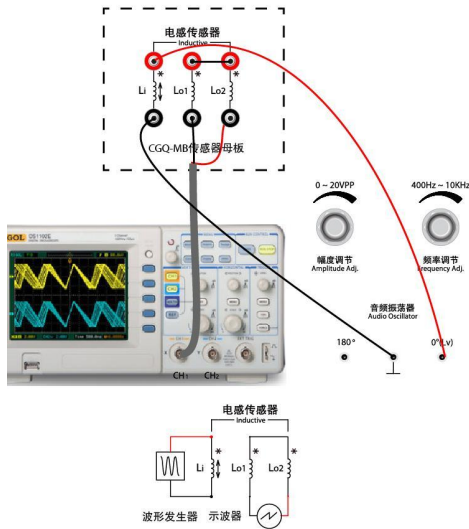


图 1.2 接线参考图

(3) 测微头与圆盘工作台吸合，旋转测微头调节工作台位置，将衔铁置于差动变压器中间，此时次级输出最小，这个最小电压即为零点残余电压，此位置标记为位移零点。

(4) 转动测微头，使振动平台位移 $\pm 5\text{mm}$ ，每次位移 0.5mm ，用示波器读出差动变压器输出端的峰峰值，根据所得数据计算灵敏度 S 。读数过程注意观察初、次级波形的相位关系。

2、差动变压器式电感传感器的应用

(1) 旋转测微头，衔铁置于中间位置（次级输出最小处）。差动放大器 II 调零。实验接线如图 1.3 所示。

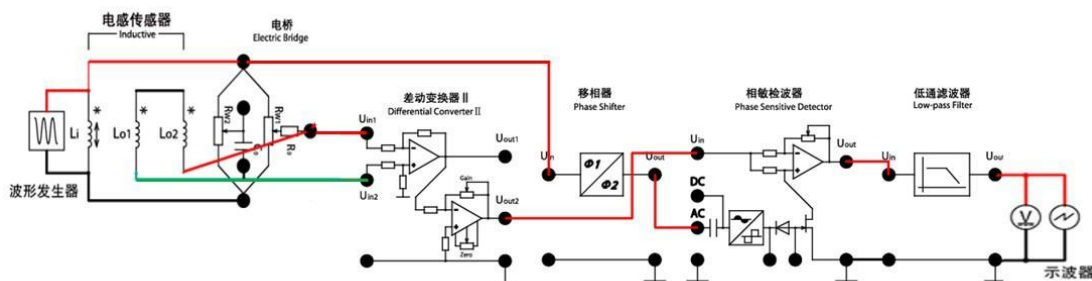


图 1.3 接线参考图

(2) 音频输出频率 5kHz ，峰-峰值 4V 。用示波器两通道同时观察移相器输出波形、相敏检波器输入波形，调节“移相”旋钮，使这两路信号同相或反相。

(3) 调节平衡电位器 RW1 和 RW2 ，使系统输出为零。如无法到零，则需调节测微头微调衔铁的位置。

(4) 旋转测微头，带动衔铁 $\pm 5\text{mm}$ 位移，用数字电压表读取系统的输出电压，每 0.5mm 记录一次读数。

(5) 作出电压 U —位移 X 的特性曲线，计算系统的灵敏度和 $\pm 5\text{mm}$ 内的线性度。

(6) 测微头与圆盘工作台分离，将低频振荡器与振动源相连，以及将低频振荡器与转速/频率表相连（连线见图 1.4），开启电源，调节低频振荡器幅度旋钮置中，频率从最小慢慢调大，让振动台起振并振动幅度适中（如振动幅度太小可调大幅度旋钮）。

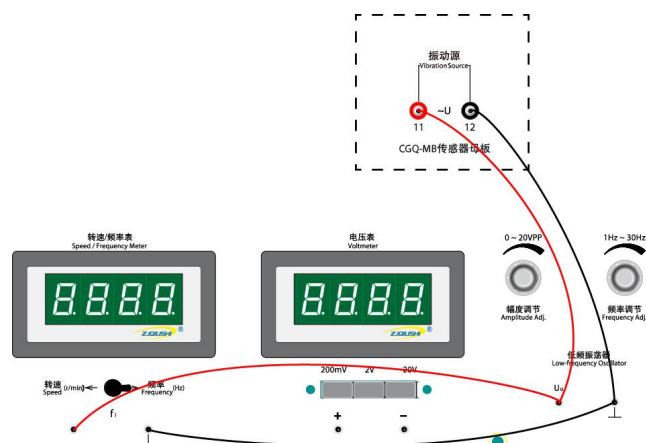


图 1.4 振动接线参考图

(7) 保持低频振荡器的幅度不变，调节低频振荡器的频率，用示波器观察低通滤波器的输出，读出电压峰一峰值。频率太小或太大时振幅很小，不利于数据记录，可以多记录自振频率附近的数据。

(8) 根据实验结果作出振动平台的振幅——频率(幅频)特性曲线，指出振动平台自振频率（谐振频率）的大致值。

(9) 实验完毕，关闭电源。

五、实验数据记录和处理

1、差动变压器式电感传感器的性能

X (mm)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
V _{pp} (mV)	48	120	200	280	360	440	512	580	660	728	800
X (mm)	0	-0.5	-1	-1.5	-2	-2.5	-3	-3.5	-4	-4.5	-5
V _{pp} (mV)	56	120	200	288	344	432	512	584	656	720	818

2、差动变压器式电感传感器的应用

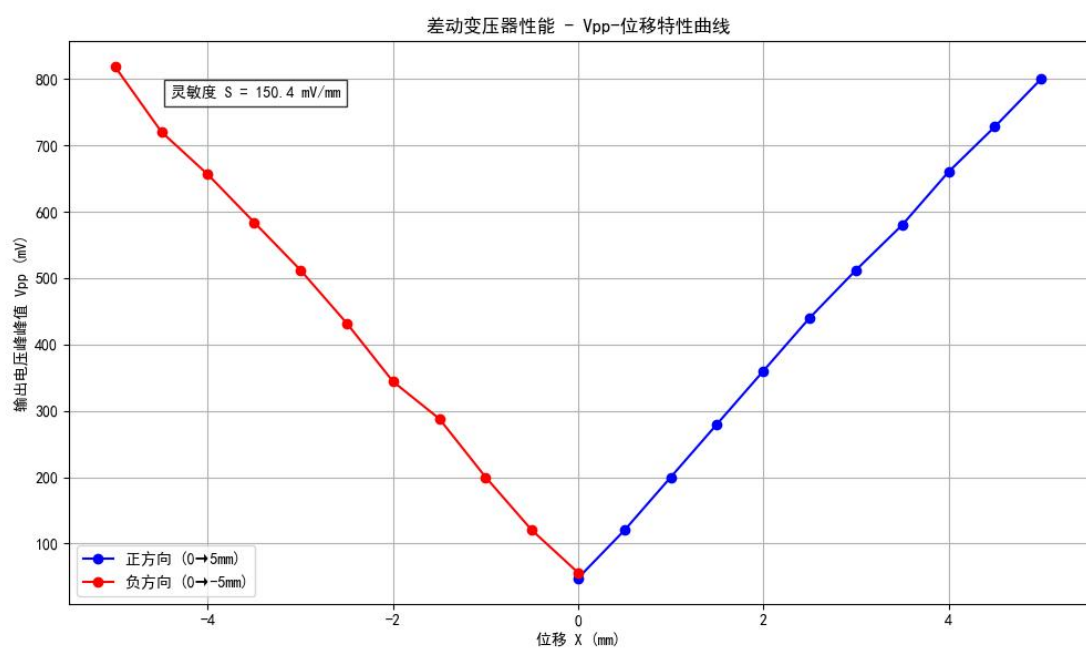
X (mm)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
U (V)	0	0.368	0.736	1.102	1.462	1.813	2.17	2.5	2.82	3.15	3.45
X (mm)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
U (V)	0	-0.377	-0.748	-1.13	-1.51	-1.88	-2.26	-2.62	-2.98	-3.33	-3.69

F (Hz)	14.5	14	13.88	13.73	13.35	13.02	12.88	12.6	12.47	12.3
V _{pp} (V)	0.96	1.08	1.2	1.32	1.48	1.8	1.96	2.32	2.56	3.08
F (Hz)	12.11	12.01	11.9	11.81	11.63	11.53	11.38	11.2	10.9	10.7
V _{pp} (V)	3.52	3.96	4.44	4.88	5.68	6.32	7.16	7.72	8.6	7.4
F (Hz)	10.6	10.4	10	9.925	9.72	9.47	9.05	8.5	7.75	
V _{pp} (V)	4.4	3.36	2.44	2.16	1.92	1.64	1.4	1.06	1	

六、实验结果与分析

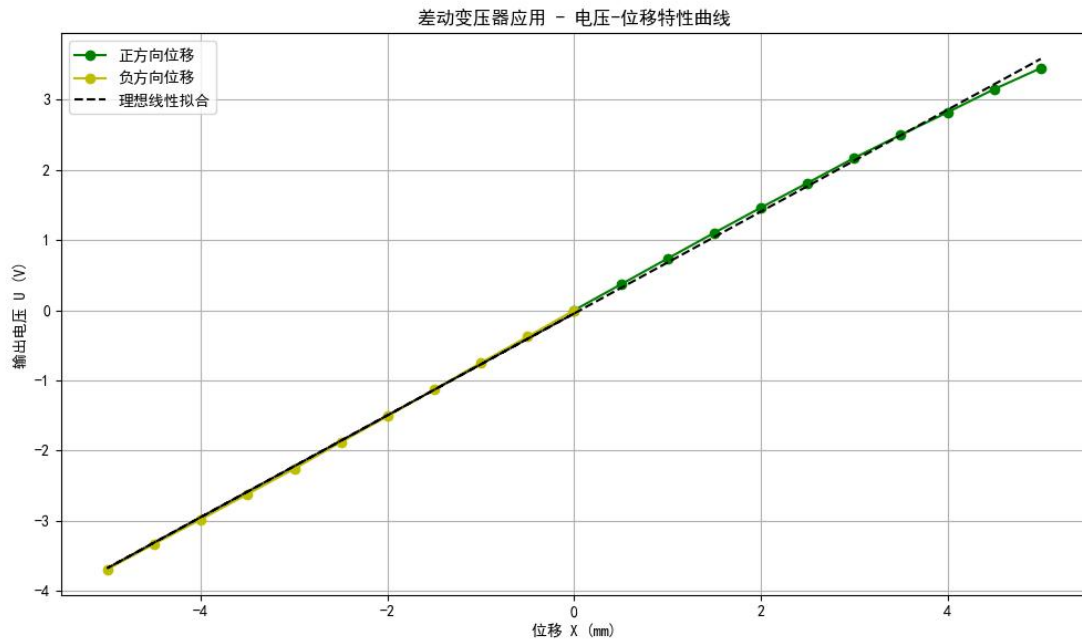
1、差动变压器式电感传感器的性能

$$S = \Delta V / \Delta X = 150.4 \text{ mV/mm}$$



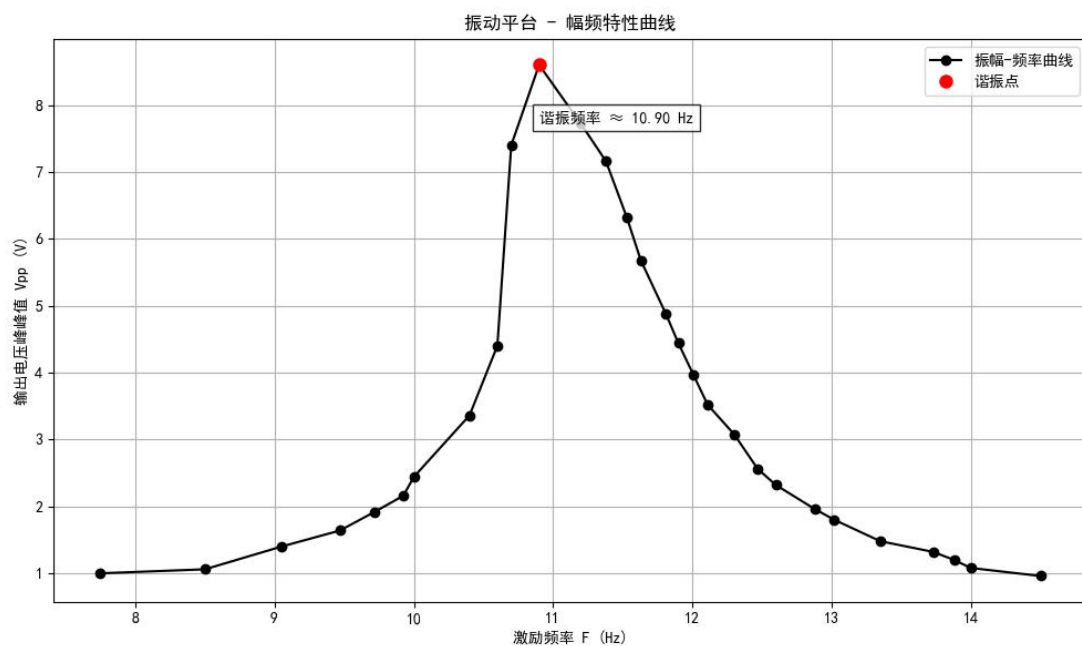
线性工作范围为 $[-5, 0]$ 和 $[0, 5]$ 。

2、差动变压器式电感传感器的应用



拟合方程为 $U=0.690X -0.045$ ，系统的灵敏度约为 0.690V/mm 。

计算每个数据点的 $\Delta=U_{\text{实际}}-U_{\text{拟合}}$ ，遍历得到最终的 $\Delta_{\text{max}}=0.102\text{V}$ ；而满量程输出以电压的极差 7.14V ，最终得到 $\pm 5\text{ mm}$ 内的线性度为 $0.102/7.14 \times 100\% = 1.43\%$ 。



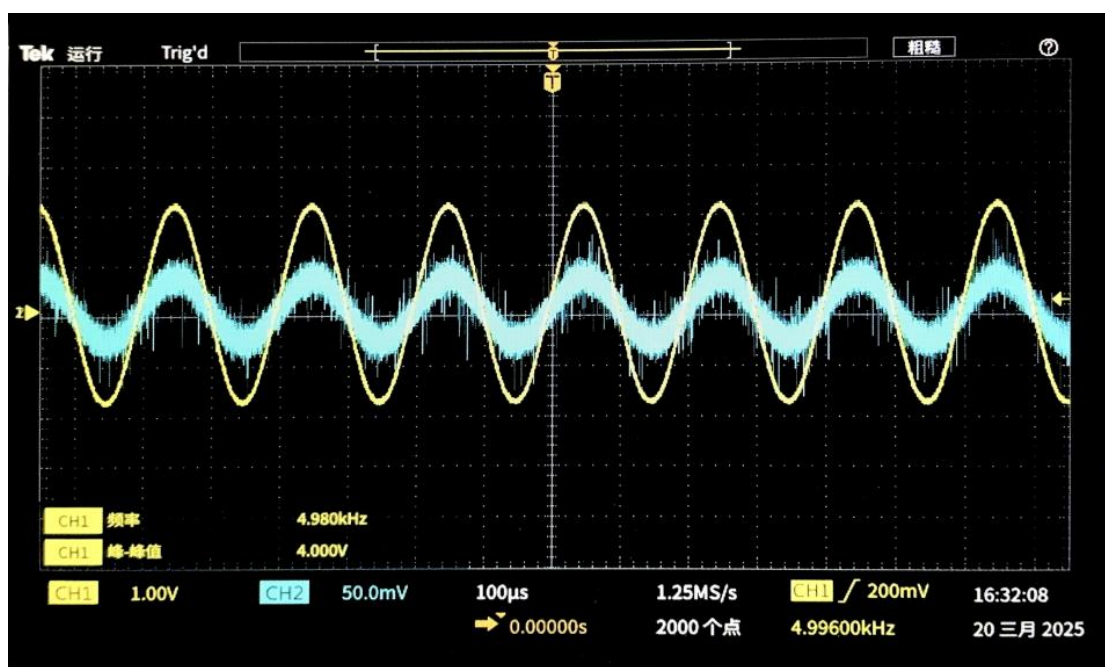
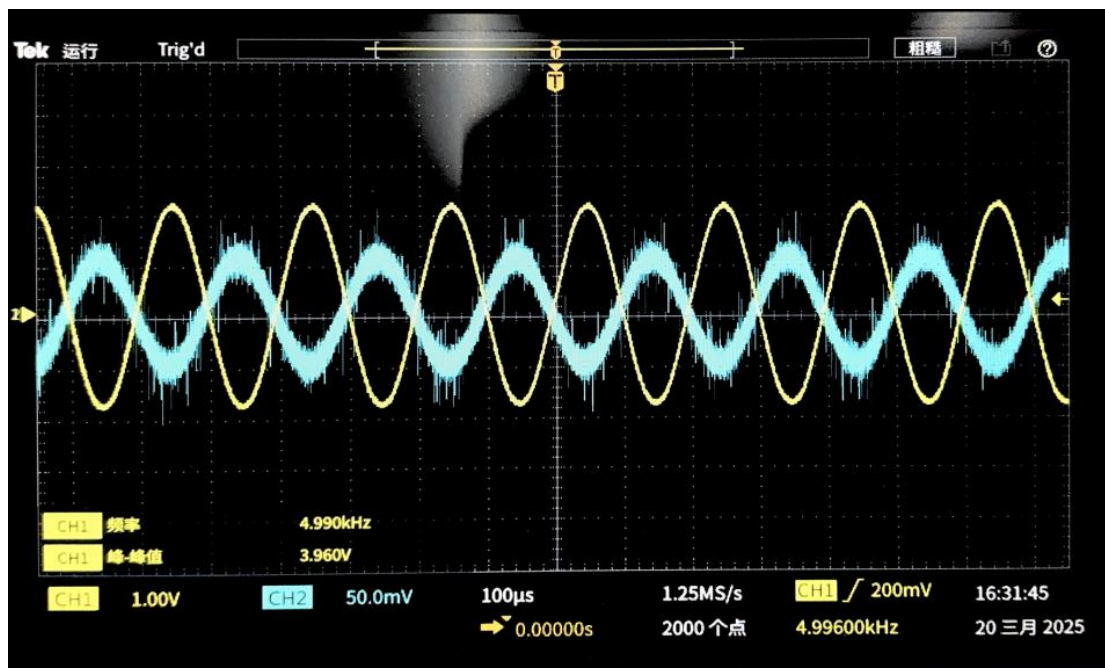
振动平台自振频率（谐振频率）的大致值为 10.90Hz 。

七、讨论、心得

1、根据实验结果，指出差动变压器式电感传感器的线性范围。

线性工作范围为 $[-5, 0]$ 和 $[0, 5]$ 。

2、当差动变压器中磁棒的位置由上到下变化时，示波器观察到的波形相位会发生怎样的变化？



如示波器结果，波形相位反相了。

3、用测微头调节振动平台位置，使示波器上观察到的差动变压器的输出端信号为最小，这个最小电压称作什么？由于什么原因造成？

这个最小电压被称为**零点残余电压**。其产生原因主要包括：

- (1) 线圈几何尺寸、绕组电气参数不对称，磁路不均匀；
- (2) 制造工艺误差（如线圈绕制松紧不一、匝数差异）；
- (3) 材料不均匀（如磁导率不一致），导致衔铁位于中间位置时，次级线圈感应电势无法完全抵消。

4、通过以上两个差动变压器应用的实例，请粗略说明一下制作差动变压器要注意的几个主要方面。

- (1) **结构对称性**：确保两次级线圈几何尺寸、电气参数（如匝数、电阻、电感）高度对称，磁路均匀，减少零点残余电压。
- (2) **线路连接**：次级线圈需正确反相串联，保证差动输出逻辑；注意相位匹配，避免测量电路信号混乱。
- (3) **材料与工艺**：选用耐磨、导磁率高、铁损小的材料（如铁芯）；优化制造工艺，确保衔铁移动灵活、调零便捷，减少机械结构误差。
- (4) **结构设计**：根据应用需求选择合适结构（如一节式、三节式），平衡灵敏度与零点残余电压等性能。

5、提高差动变压器式电感传感器的静态特性和灵敏度的途径？

- (1) **优化结构设计**：选择合适线圈绕组排列方式（如一节式灵敏度高）；保证两次级线圈结构、电气参数一致，提升对称性。
- (2) **改进测量电路**：采用差动整流电路、相敏检波电路，搭配补偿线路，抑制零点残余电压，提高信号质量。
- (3) **提升材料性能**：选用导磁率高、铁损小、涡流损耗低的铁芯材料；增大铁芯直径（接近线圈框架内径），提升磁路效率。
- (4) **调整电路参数**：适当增大放大器增益；提高激磁电源电压及频率，增大线圈 Q 值（如增加线圈匝数），增强信号输出能力。
- (5) **精准调零与测量**：确保衔铁在平衡位置附近测量，调零准确，减少初始误差对静态特性的影响。

通过本次“电感传感器性能测试及其应用”实验，我对差动变压器的原理与应用有了更深入的理解。在操作中，从连接电路、调节测微头到记录数据，每一步都紧扣实验原理，直观验证了差动变压器基于互感变化的工作机制。本次实验不仅巩固了我的理论知识，更锻炼了我的动手能力与数据处理能力。从接线调

试到分析结果，严谨的操作和细致的观察是获取准确数据的关键，也让我意识到工程实践中理论与实践结合的重要性，为后续专业学习和应用奠定了坚实基础。