

CHUANGANQIYUANLIYUYINGYONG

张正伟 许广合 齐薇 编

中央广播电视大学出版社

15
传感器原理与应用
学习指导
M5/1

传感器原理与应用学习指导

张正伟 许广合 齐 薇 编

中央广播电视大学出版社

(京)新登字163号

传感器原理与应用学习指导

张正伟 许广合 齐 薇 编

*

中央广播电视大学出版社出版
新华书店总店科技发行所发行
北京师范学院印刷厂印装

*

开本787×1092 1/16 印张 4.75 千字117
1991年10月第1版 1991年10月第1次印刷
印数 1—7000
定价 2.20元

ISBN 7-304-00635-8/TN·13

前 言

本书是根据《传感器原理与应用》课程的教学大纲及其主教材编写的，拟作为该课程的辅导教材。二者配合紧密，特别适用于自学。

本书包括两部分，第一部分为学习指导，第二部分是实验指导。

学习指导的章、节编排顺序与教材一致，每节内容包括复习要求和复习思考题选解，通过对主教材中复习思考题进行选解，达到帮助学生进一步加深理解所学知识，掌握解题思路和解题方法，提高分析与解决问题的能力。此外个别的节次还附有名词解释和难点分析。

实验指导部分包括工程中常用的五个检测内容。要求学生学会正确的测试方法、理解每个实验的基本理论与主要依据、掌握数据处理和基本误差的分析与计算，从而达到培养和提高实验技能的目的。为了培养学生的独创精神，本书所介绍的实验系统与步骤仅供参考，实验指导教师可根据本校现有设备，按照实验目的与要求，自行组织实验内容，并鼓励学生根据实验要求，独立设计实验系统与实验步骤。

本书的第一部分由张正伟、许广合编写，第二部分由齐薇等编写。全书由吉林工业大学高福华副教授、李桂成副教授审阅。

本书在编写过程中，得到河北广播电视大学祝亚力等同志的不少帮助，在此深表感谢。

编 者

1991. 2

1077

目 录

第一章 传感器和测量的基本知识	1
§1-1 测量的基本概念.....	1
§1-2 传感器的一般特性.....	1
§1-3 传感器中的弹性敏感元件.....	2
第二章 电阻式传感器及应用	3
§2-1 热电阻.....	3
§2-2 电位器.....	4
§2-3 电阻应变片.....	5
第三章 电感式传感器及应用	8
§3-1 自感式.....	8
§3-2 差动变压器式.....	10
§3-3 电涡流式.....	12
第四章 电容式传感器及应用	14
§4-1 电容式传感器的工作原理及结构形式.....	14
§4-2 电容式传感器的测量电路及应用.....	15
第五章 谐振式传感器及应用	18
§5-1 振弦式.....	18
§5-2 振筒式.....	18
§5-3 振膜式.....	20
第六章 光传感器及应用	21
§6-1 真空光电器件.....	21
§6-2 光敏元件.....	23
§6-3 计量光栅.....	25
第七章 电势型传感器	27
§7-1 热电偶.....	27
§7-2 光电池.....	28
§7-3 压电石英晶体和压电陶瓷.....	28
§7-4 霍尔元件.....	30
§7-5 磁电式.....	32
第八章 其它半导体传感器及应用	33
§8-1 热敏电阻.....	33
§8-2 固态压敏电阻.....	34
§8-3 湿敏电阻.....	35
§8-4 磁敏元件.....	35

§8-5 气敏元件.....	36
实验一 光电传感器实验.....	38
实验二 应变片灵敏度实验.....	41
实验三 热电偶测温.....	48
实验四 铜热电阻和半导体热敏电阻的测温实验.....	53
实验五 差动变压器式传感器特性实验.....	60
附 中央广播电视大学机电工程专业《传感器原理与应用》教学大纲.....	67

第一章 传感器和测量的基本知识

§1-1 测量的基本概念

有关测量方面的知识很多，本节仅介绍测量的定义、直接测量方法、精确度等，使读者对测量有个较准确的概念。

复 习 要 求

一、掌握内容

1. 直接测量和间接测量。
2. 测量仪表的精密度、准确度和精确度的定义。
3. 分辨率的定义。

二、理解内容

1. 测量的定义。
2. 直接测量的三种方法及其优缺点的比较。

复 习 思 考 题 选 解

3. 直接测量方法有几种？它们的定义是什么？

答：直接测量中有零位法、偏差法和微差法。

零位法是指被测量与已知标准量在比较仪器中进行比较，当指零机构平衡(指零)时，确定被测量就等于已知标准量。

偏差法是指用测量仪表的指针相对于表盘上刻度线的位移来直接表示被测量的大小。

微差法是零位法和偏差法的组合。先将被测量与一个已知标准量进行比较，当然该标准量尽量接近被测量，这相当于不彻底的零位法。不足部分，也就是被测量与已知标准量之差，再用偏差法测出。

4. 仪表精度有几个指标？它们的定义是什么？

答：与精度有关的指标有三个：精密度、准确度和精确度等级。

精密度：描述测量仪表指示值不一致程度的量。

准确度：描述仪表指示值有规律地偏离真值程度的量。

精确度等级：精密度和准确度的总和称精确度，以测量误差的相对值表示。其等级是仪表在规定条件下，最大允许误差值相对仪表测量范围的百分数。

§1-2 传感器的一般特性

本节是使读者对传感器的几个技术指标有个准确的概念，以便后序各章的学习。

复 习 要 求

掌握内容

1. 传感器静态和动态特性的定义。
2. 传感器几个静态特性指标的定义。

复 习 思 考 题 选 解

3. 传感器静态特性的技术指标及其定义是什么？

答：传感器静态特性的技术指标有线性度、灵敏度、迟滞和重复性。

线性度：指实际输出-输入特性曲线和理论曲线两者之间的偏差与输出满度值之比。

灵敏度：指传感器在稳态标准条件下，输出变化量与输入变化量的比值。

迟滞：指传感器输入量增大行程期间和输入量减小行程期间，其两条输出-输入特性曲线不重合的程度。

重复性：指传感器输入量在同一方向（增加或减小）做全程内连续重复测量所得输出-输入特性不一致的程度。

§1-3 传感器中弹性敏感元件

机械弹性敏感元件在传感器中经常用到。这里将各种各样的机械弹性敏感元件集中起来介绍，使读者对这些元件有一个更系统、更完整的概念。

复 习 要 求

一、掌握内容

1. 敏感元件和传感元件的定义。
2. 机械弹性敏感元件的输入量和输出量。
3. 弹性元件刚度和灵敏度的定义。
4. 弹性元件的分类。

二、了解内容

弹性敏感元件的形式及其应用范围。

复 习 思 考 题 选 解

3. 弹性元件的弹性特性用什么表示？其定义是什么？

答：弹性元件的弹性特性是指作用在弹性元件上的外力与相应变形间的关系，通常用刚度或灵敏度表示。

刚度：弹性元件单位变形下所需的力，是弹性元件受外力后变形大小的量度。

灵敏度：单位力作用下弹性元件产生的变形。它是弹性元件刚度的倒数。

第二章 电阻式传感器及应用

§2-1 热 电 阻

复 习 要 求

一、掌握内容

1. 热电阻效应和热电阻的工作原理。
2. 常用热电阻的种类、特点和测温范围。
3. 对电阻体材料的主要要求。

二、理解内容

1. 热电阻测温的工作原理。
2. 热电阻式流量计的工作原理。

三、了解内容

普通工业用热电阻式传感器的简单结构。

复 习 思 考 题 选 解

1. 什么叫热电阻效应？金属热电阻效应的特点和形成的原因。

答：物质的电阻率随温度变化而变化的物理现象叫热电阻效应。金属热电阻效应的特点是其电阻-温度特性曲线为正斜率。即金属材料的电阻率随温度的升高而增加。产生上述特点的原因是由于金属材料的载流子为自由电子，当温度在一定范围内升高时，虽然自由电子的总数基本不变，但是，每个自由电子的动能将增加，造成自由电子作定向运动的阻力增加，这就是形成金属热电阻效应的原因。

2. 阐述热电阻式传感器的概念、功能及分类。

答：根据热电阻效应制成的传感器叫热电阻式传感器。热电阻式传感器的功能是将被测非电量温度的变化转换为电阻的变化。按电阻-温度特性的不同，该传感器可分为金属热电阻（一般称热电阻）和半导体热电阻（一般称热敏电阻）两大类。

3. 制造电阻体的材料应具备哪些特点？常用热电阻材料有哪几种？

答：制造电阻体的材料应具备的特点为：（1）电阻温度系数 α 的数值较大且稳定，单值性好；（2）电阻率 ρ 尽可能大；（3）在使用的温度范围内，化学、物理性能稳定；（4）材料的提纯、可延、复制等工艺性好；（5）大量使用时，应考虑经济性。

常用热电阻材料有铂、铜、镍、铁与铁铬合金。目前工业上大量使用的为铂、铜、镍三种。

4. WZP和WZC各表示什么含义？它们的标准分度表的温度适应范围与铂电阻比各为多少？此表如何使用？

答: WZP和WZC分别为我国定型生产的铂热电阻温度计和铜热电阻温度计的符号。

WZP 的标准分度表的温度适应范围为 $-200\sim 650^{\circ}\text{C}$, 百度电阻比 $W(100)=1.3910\pm 0.0010$ 。WZC 的标准分度表的温度适应范围为 $-50\sim 150^{\circ}\text{C}$, 百度电阻比 $W(100)=1.428 0.002$ 。

WZP 的标准分度表有两种, 一种是初始电阻 $R_0=46.00\Omega$ (分度号为 BA_1), 另一种是 $R_0=100.00\Omega$ (分度号为 BA_2)。WZC 的标准分度表也有两种, 一种是初始电阻 $R_0=50.00\Omega$ (分度号为 $Cu50$), 另一种是 $R_0=100.00\Omega$ (分度号为 $Cu100$)。在使用标准分度表之前, 首先, 应确定所用热电阻是 WZP 还是 WZC, 其次, 应确定热电阻的分度号, 这样才能确定应该用哪种标准分度表。应用此表时, 已知热电阻的电阻值 R_t , 查表求取对应的非电量温度 t 。

5. 用热电阻传感器进行测温时, 常采用哪种测量线路? 热电阻与测量线路有几种连接方式? 通常采用哪种方式连接? 为什么?

答: 用热电阻传感器进行测温时, 常采用直流电桥为测量电路。热电阻与测量电路的连接方式有两线制、三线制和四线制三种。在工业测量中, 采用两线制和三线制接法, 为减小接线误差, 通常采用三线制接法。在标准和实验室中, 一般采用四线制接法 (测量电路用双电桥或电位差计), 目的是减小引线电阻和接触电阻的影响, 提高测量精度。

§2-2 电 位 器

复 习 要 求

一、掌握内容

1. 线性线绕电位器的空载特性 (特性方程、电压灵敏度、电阻灵敏度、线性度)。
2. 电位器的概念、组成、作用、特点、分类和用途。

二、理解内容

线性线绕电位器的负载特性及其物理意义。

三、了解内容

非线性线绕电位器的概念和常用非线性线绕电位器。

复 习 思 考 题 选 解

1. 试述电位器的基本概念、组成部分、主要作用和优缺点。

答: 电位器是一种将机械位移转换为与其成一定函数关系的电阻或电压的机电传感元件, 它由电阻元件和电刷两个基本部分组成。电位器可以作变阻器用, 也可以作分压器用。

电位器具有精度高、稳定性好、结构简单、受环境因素影响较小和输出信号较大等一系列优点, 它的主要缺点是存在摩擦和产生磨损。

2. 电位器的空载和有载特性的含义是什么? 电位器的非线性误差与哪些参数有关? 为什么?

答: 电位器空载运行 (不接负载, 即 $R_L=\infty$) 时的工作特性 (系指 U_0 或 R_x 与电刷实际行程 x 的函数关系) 称为空载特性, 而负载运行 (接负载) 时的工作特性则称为有载特性。

电位器的非线性误差 $\gamma_L = \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{R_x}{R_L} \left(1 - \frac{R_x}{R} \right)} \right] \times 100\%$, 对任何一个具体的电位器, 式

中的总电阻 R 为常数, 因此, γ_L 是电刷实际行程电阻 R_x 和负载电阻 R_L 的函数。当 R_L 为定值时, γ_L 仅仅是 R_x 的单值函数, 由上式不难看出, 当 $R_x=0$ 或 $R_x=R$ 时, $\gamma_L=0$, 而当 $R_x=\frac{1}{2}R$ 时, γ_L 为最大值。当 R_x 为定值时, γ_L 又仅仅是 R_L 的单值函数, 由上式也不难看出, R_L 越大(负载越小), γ_L 越小, 空载时, $\gamma_L=0$ 。反之, R_L 越小(负载越大), γ_L 越大。

§2-3 电阻应变片

复 习 要 求

一、掌握内容

1. 电阻应变片的工作特性与参数。
2. 电阻应变片的温度误差及补偿方法。
3. 电阻应变片桥路。

二、理解内容

电阻应变片的工作原理。

三、了解内容

1. 电阻应变片的结构和材料。
2. 应变式力、压力和加速度传感器的组成与工作原理。
3. 电阻应变仪的组成部分和工作原理。

复 习 思 考 题 选 解

1. 说明电阻应变片的组成、规格及分类。

答: 电阻应变片由敏感栅、基片、覆盖层和引线等部分组成。应变片的规格一般以使用面积和敏感栅的电阻值 R_0 表示。所谓应变片的使用面积系指应变片的工作基长 l 与基宽 b 之积。

电阻应变片按敏感栅材料可分为金属电阻应变片和半导体应变片两大类, 常见的金属电阻应变片按敏感栅的型式分有丝式、箔式和薄膜式三种。

2. 什么叫应变效应? 利用应变效应解释金属电阻应变片工作原理。

答: 由于变形而引起导电材料电阻变化的现象, 称为应变效应, 其表达式为 $\frac{dR}{R} = K_s \epsilon$,

式中 K_s 称为导电材料的应变灵敏系数。实验证明, 金属与合金的 K_s 值, 在弹性极限内基本上都有各自的常数值。

以上分析说明, 金属电阻应变片的电阻相对变化 $\frac{dR}{R}$ 与金属材料的轴向应变 ϵ 成正比,

因此,利用电阻应变片,可以将非电量 ε 转换成与之成正比关系的电阻相对变化 $\frac{dR}{R}$,这就是金属电阻应变片的工作原理。

3. 电阻丝的应变灵敏系数 K_0 与应变片的灵敏系数 K 有何异同?

答:由电阻丝的应变灵敏系数 $K_0 = (dR/R)/\varepsilon$ 和应变片的灵敏系数 $K = (dR/R)/\varepsilon_s$ 两式可知, K_0 与 K 都反映单位应变所引起的电阻相对变化率,即二者的物强意义相同。二者的不同之处在于 ε 为电阻丝的纵向应变,而 ε_s 为试件主应力方向上的纵向拉应变。实验证明,在很大的应变范围内, K_0 与 K 不仅能保持各自的常数值,而且,由于应变片与试件间粘合剂的传递变形失真和应变片横向效应的存在,造成 K 恒小于 K_0 。

4. 什么叫横向效应?应变片敏感栅的结构形式与横向效应有何关系?

答:将直的电阻丝绕成U形敏感栅后,虽然长度不变,应变状态相同,但由于应变片敏感栅圆弧部分的电阻变化较小,因此,应变片的灵敏系数 K 总是小于电阻丝的灵敏系数 K_0 ,这种现象称为应变片的横向效应。

从横向效应考虑,短接线应变片和箔式应变片比U形应变片的横向效应小。对于U形应变片,大基长、窄敏感栅的应变片的横向效应较小。

5. 试述应变片温度误差的概念、原因和补偿方法。

答:由于测量现场环境温度偏离应变片标定温度而给测量带来的附加误差,称为应变片温度误差,又叫应变片的热输出。

产生应变片温度误差的主要原因有:(1)由于电阻丝温度系数的存在,当温度改变时,应变片的标称电阻值发生变化。(2)当试件与电阻丝材料的线膨胀系数不同时,由于温度的变化而引起附加变形,使应变片产生附加电阻。

电阻应变片的温度补偿方法有线路补偿法和应变片自补偿法两大类。电桥补偿法是最常用且效果较好的线路补偿法。应变片自补偿法是采用温度自补偿应变片或双金属线栅应变片来代替一般应变片,使之兼顾温度补偿作用。

6. 为什么应变式传感器大多采用交流不平衡电桥为测量电路?该电桥为什么又都采用半桥和全桥两种形式?

答:应变式传感器配用交流电桥的主要理由有:(1)由于传感器输出信号极弱,因此电桥输出信号也非常弱,此信号须经放大后才能进行电测,为消除零点漂移,需采用交流放大器,要求电桥输出交流信号。(2)为减小外界干扰,传感器与电桥间需用电缆连接,当连接电缆分布电容的影响不能忽略时,也必须采用交流电桥予以克服。为了既能测量静态参量,又能测量动态参量,一般都采用不平衡交流电桥。

由于差动半桥与差动全桥不仅可以消除非线性误差,而且电压灵敏度也比单一工作应变片电桥高,同时还能起温度补偿作用,因此,应变式传感器多采用这类电桥。

难 点 分 析

1. 电阻应变片的主要特性及含义:

电阻应变片的主要特性包括应变片的灵敏系数 K 、应变片的横向效应和应变片的温度误差三项。

应变片的灵敏系数 K 是反映其变换能力的参数,由 $K = \frac{dR/R}{\varepsilon_x}$ 可知, K 越大,应变片将被测非电量应变 ε_x 变换成电阻相对变化量 $\frac{dR}{R}$ 的能力越强,也就是说, K 是决定应变片传输特性的主要性能指标,因此,应尽量选取 K 值较大且稳定的电阻应变片。

应变片的横向效应是直接影响其灵敏系数 K 的因素。横向效应越大,在同样应变 ε_x 的条件下,敏感栅电阻的相对变化量越小, K 减小的越多,为克服和减弱横向效应的影响,选取应变片的原则是:(1)当试件上的应力分布变化不大时,选用大基长、短敏感栅的 U 形应变片。(2)当试件上的应力分布变化大时,选用短接线应变片或箔式应变片。

应变片的温度误差是造成虚假视应变 ε_t 的根本原因,视应变 ε_t 与被测应变 ε_x 迭加后,带来测量误差。为减小此误差,要采用温度补偿,线路上常用差动半桥或差动全桥,应变片可选用温度自补偿应变片或双金属栅应变片。

2. 减小 U 形应变片横向效应的分析

U 形应变片应变效应表达式为

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x(1 - c\mu)\varepsilon_x$$

式中 K_x 为应变片主轴向灵敏系数, c 为应变片横向效应系数,它们的表达式为

$$K_x = \frac{2nl_1 + (n-1)\pi r}{2l} \cdot K_0$$

$$c = \frac{(n-1)\pi r}{2nl_1 + (n-1)\pi r}$$

式中 n 为敏感栅直线段数, l_1 为每条直线段长度, r 为敏感栅每个半圆弧半径, K_0 为敏感栅电阻丝的灵敏系数, l 为敏感栅电阻丝总长度。

下面分析如何才能将 U 形应变片的横向效应减小到可以忽略的程度。

(1) 不产生横向效应的条件

a. 当 $r=0$ 时,则 $c=0$, $K_x=K_0$,有 $\frac{\Delta R}{R} = K_0\varepsilon_x$,没有横向效应。

b. 当 $n=1$ 时,则 $K_x=K_0$, $c=0$,也没有横向效应。

(2) 产生横向效应的条件

当 $n>1$ 且 $r>0$ 时,产生横向效应,也就是说,当应变片敏感栅的直线段为两条或两条以上,且每两条之间又存在半径 $r>0$ 的半圆弧时,必然产生横向效应,而 U 形应变片正好具备以上两个条件。

(3) 减小 U 形应变片横向效应的分析

当 $n \gg 1$ 且 $l_1 \gg \pi r$ 时,有 $K_x \approx K_0$, $c \approx 0$,则 $\frac{\Delta R}{R} \approx K_0\varepsilon_x$ 。所以当采用敏感栅越窄、基长越长(满足 $l_1 \gg \pi r$),且直线段数较多($n \gg 1$)的 U 型应变片时,其横向效应可以忽略不计。

第三章 电感式传感器及应用

§3-1 自 感 式

复 习 要 求

一、掌握内容

1. 单线圈变隙式和差动变隙式、螺线管式电感传感器的工作原理和基本特性。
2. 带相敏整流的交流电桥的电路组成、工作原理和输出特性。

二、理解内容

变压器式交流电桥的工作原理与主要问题。

三、了解内容

1. 变隙式和螺线管式电感传感器基本性能的比较。
2. 电动测微仪的组成和工作原理。

复 习 思 考 题 选 解

1. 说明单线圈和差动变隙式电感传感器的主要组成、工作原理和基本特性。

答：单线圈变隙式电感传感器主要由线圈、衔铁和铁芯组成。差动变隙式电感传感器主要由两个相同的电感线圈、铁芯、衔铁和导杆组成。

两种传感器工作原理的共同点是：它们的衔铁都随被测体同步移动，引起磁路中气隙的磁阻发生相应的变化，从而导致线圈电感的变化，只要能测出线圈电感变化的大小和极性，就能确定被测体位移的大小和方向。两种传感器工作原理的不同点是：差动式两线圈的电感产生大小相等、极性相反的变化，配用差动电桥测量电路。单线圈变隙式只有一个线圈，测量电路配用单臂电桥。

单线圈变隙式电感传感器基本特性的台劳级数展开式为 $\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 \pm \frac{\Delta \delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 \pm \dots \right]$,

差动变隙式电感传感器基本特性的台劳级数展开式为 $\frac{\Delta L}{L_0} = 2 \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right]$ 。以上两式

说明，差动式与单线圈式相比，前者的灵敏度高，线性度好。

2. 为什么螺线管式电感传感器比变隙式电感传感器有更大的测位移范围？

答：差动变隙式电感传感器的灵敏度 $K_s = \frac{2}{\delta_0}$ ，非线性项为 $\frac{\Delta \delta}{\delta_0}$ 的高次项，式中的 $\Delta \delta$ 为

被测位移范围（衔铁与铁芯间气隙变化的范围）， δ_0 为初始气隙。因此，为提高灵敏度，需减小 δ_0 ；而为提高线性度，又需使 $\Delta \delta \ll \delta_0$ ，也就是说，为使传感器具有较高的灵敏度与较好的线性度，必须限制测位移范围。

差动螺线管式电感传感器的灵敏度为 $K_1 = \frac{\pi \mu_0 W^2 (\mu_r - 1) r_c^2}{l}$, 当每个线圈匝数 W 、活动

铁芯的相对导磁率 μ_r 、活动铁芯半径 r_c 和线圈长度 l 确定后, 灵敏度 K_1 为与被测位移范围无关的常数, 因此, 理论上可做到相当大的测位移范围。

4. 电感式传感器测量电路的主要任务是什么? 变压器式电桥和带相敏整流的交流电桥谁能更好地完成这一任务? 为什么?

答: 电感式传感器测量电路的主要任务是将传感器输出的电感量, 转换成与此电感成一定关系的电信号(电压、电流、频率等), 以使用电测仪表进行测试。

带相敏整流的交流电桥能更好地完成上述任务, 因为该电桥不仅消除了零点残余电压, 而且其基本特性既能反映位移的大小, 又能反映位移的方向。

难 点 分 析

《传感器原理与应用》中图3-6(c)所示的带相敏整流的交流电桥电路, 当活动铁芯向线圈1方向移动 ($Z_1 = Z_0 + \Delta Z$, $Z_2 = Z_0 - \Delta Z$) 和向线圈2方向移动 ($Z_1 = Z_0 - \Delta Z$, $Z_2 = Z_0 + \Delta Z$) 时, 试分析输出电压 U_o 的非线性误差。

当活动铁芯向线圈1方向移动时, 输出电压 U_{o1} 的表达式为

$$U_{o1} = \frac{\Delta Z}{2Z_0} U_i \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta Z}{2Z_0}\right)^2} U_i$$

当 $\frac{\Delta Z}{2Z_0} \ll 1$ 时, 上式可用台劳级数近似, 即

$$U_{o1} = \frac{\Delta Z}{2Z_0} U_i \left[1 + \left(\frac{\Delta Z}{2Z_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Z}{2Z_0}\right)^4 + \dots \right]$$

对上式进行线性处理得 $U'_{o1} = \frac{\Delta Z}{2Z_0} U_i$, 进行非线性处理得 $U''_{o1} = \frac{\Delta Z}{2Z_0} U_i \left[1 + \left(\frac{\Delta Z}{2Z_0}\right)^2 \right]$, 据

两个处理式可得相对非线性误差 γ_{o1} 的表达式, 即

$$\gamma_{o1} = \frac{|U''_{o1} - U'_{o1}|}{|U'_{o1}|} \times 100\% = \left(\frac{\Delta Z}{2Z_0}\right)^2 \times 100\%$$

当活动铁芯向线圈2方向移动时, 输出电压 U_{o2} 的表达式为

$$U_{o2} = -\frac{\Delta Z}{2Z_0} U_i \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta Z}{2Z_0}\right)^2}$$

按上述相同方法, 可得 U_{o2} 的台劳级数式, 即

$$U_{o2} = -\frac{\Delta Z}{2Z_0} U_i \left[1 + \left(\frac{\Delta Z}{2Z_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Z}{2Z_0}\right)^4 + \dots \right]$$

对上式进行线性处理得 $U'_{o2} = -\frac{\Delta Z}{2Z_0} U_i$, 进行非线性处理得 $U''_{o2} = -\frac{\Delta Z}{2Z_0} U_i \left[1 + \left(\frac{\Delta Z}{2Z_0}\right)^2 \right]$, 同

理, 可得相对非线性误差 γ_{o2} 的表达式, 即

$$\gamma_{02} = \frac{|U'_{02} - U_{02}|}{|U'_{21}|} \times 100\% = \left(\frac{\Delta Z}{2Z_0}\right)^2 \times 100\%$$

以上分析说明, 不论活动铁芯向线圈 1、2 哪个方向移动, 带相敏整流的交流电桥输出电压的相对非线性误差相同, 均为 $\left(\frac{\Delta Z}{2Z_0}\right)^2 \times 100\%$ 。

§3-2 差动变压器式

复 习 要 求

一、掌握内容

1. 螺线管式差动变压器的组成部分、等效电路、工作原理、基本特性与主要性能, 零点残余电压及消除方法。

2. 差动相敏检波电路和差动整流电路的组成、工作原理。

二、理解内容

变隙式差动变压器的工作原理、输出特性和主要优缺点。

三、了解内容

1. 差动变压器式振动传感器的工作原理。

2. 差动变压器式微压传感器的工作原理。

复 习 思 考 题 选 解

1. 概述变隙式差动变压器的组成、工作原理和输出特性。

答: 变隙式差动变压器由铁芯、初级绕组、次级绕组和衔铁等部分组成。

差动变压器的输出特性为 $\dot{U}_0 = -\frac{W_2}{W_1} \cdot \frac{\dot{U}_1}{\delta_0} \cdot \Delta\delta$ 。式中 W_1 、 W_2 分别为初、次级绕组匝数, δ_0 为衔铁与两铁芯间的初始气隙, $\dot{U}_1$ 为输入电压, $\dot{U}_0$ 为输出电压, $\Delta\delta$ 为衔铁位移。当衔铁向上移动时, $\Delta\delta$ 为正, 由上式可知 $\dot{U}_0$ 与 $\dot{U}_1$ 反相, 否则当衔铁向下移动时, $\Delta\delta$ 为负, $\dot{U}_0$ 与 $\dot{U}_1$ 同相。

变隙式差动变压器的工作原理可利用上述输出特性说明: (1) 当 W_1 、 W_2 、 $\dot{U}_1$ 、 δ_0 为常数时, $\dot{U}_0$ 正比于 $\Delta\delta$, 即可用差动变压器输出电压 $\dot{U}_0$ 的大小反映位移 $\Delta\delta$ 的大小。(2) 可用 $\dot{U}_0$ 的极性反映位移 $\Delta\delta$ 的方向。

2. 根据螺线管式差动变压器的基本特性, 说明其灵敏度和线性度的主要特点。

答: 以三节螺线管式差动变压器为例进行说明。

在螺线管式差动变压器结构参数确定的情况下, 差动变压器的灵敏度 K_E 是激磁电压 U_1 (或激磁电流 I_1) 和激磁频率 f 的函数。理论上, K_E 与 U_1 、 f 均成正比关系。实际上, 由于传感器结构的不对称、铁损、漏磁等因素的影响, K_E 与 f 不成正比关系, 一般在 $400\text{Hz} < f < 10\text{kHz}$ 范围内, K_E 具有较大的稳定值。另外, 不论在理论上, 还是实际上, 灵敏度 K_E 与 U_1 虽然都能保持较好的线性关系, 但是由于差动变压器的功率一般限制在 1 瓦左右, 因此, U_1 一般取值在 3~8 伏范围之内。

理论上, 对一个设计定型的差动变压器, 它的线性度 γ_f 仅仅与满量程的平方 (即 Δx_{max}^2)

成正比。当 $\Delta x_{\max}$ 为常数时, γ_f 亦为定值。实际上, 为使差动变压器具有较好的线性度, 一般取测量范围为线圈骨架长度的 $\frac{1}{10}$ 到 $\frac{1}{4}$, 激磁频率 $f = 400\text{Hz} \sim 10\text{kHz}$ 以及配用相敏检波式测量电路等。

4. 何谓零点残余电压? 说明该电压的产生原因及消除方法。

答: 差动变压器在零位移时的输出电压称为零点残余电压, 或称为零位输出电压, 简称零位电压。

对零点残余电压进行频谱分析, 发现其频谱主要由基波和三次谐波组成。基波产生的原因主要是传感器两个次级绕组的电气参数与几何尺寸不对称, 三次谐波产生的原因主要是磁性材料磁化曲线的非线性(磁饱和、磁滞)所造成的。

消除或减小零点残余电压的主要方法有: (1) 尽可能保证传感器几何尺寸、线圈电气参数和磁路的相互对称, 这是减小零点残余电压的最有效方法。(2) 传感器设置良好的磁屏蔽, 必要时再设置静电屏蔽。(3) 将传感器磁回路工作区域设计在铁芯磁化曲线的线性段。(4) 采用外电路补偿。(5) 配用相敏检波测量电路。

难 点 分 析

关于变隙式差动变压器输出电压 $U = -\frac{W_2}{W_1} \dot{U}_1 \cdot \frac{\delta_b - \delta_a}{\delta_b + \delta_a}$ 的推导:

参照《传感器原理与应用》中图3-14中所示的差动变压器等效电路图, 根据电磁感应定律, 差动变压器输出电压的表达式为

$$\dot{U}_0 = \dot{E}_{2a} - \dot{E}_{2b} = -j\omega \dot{I}_1 (M_a - M_b)$$

式中的 ω 为变压器初级电压 $\dot{U}_1$ 的角频率, $\dot{I}_1$ 为变压器初级电流, M_a 和 M_b 为互感系数, 由互感定义和磁路欧姆定律有

$$M_a = \frac{W_{2a}}{I_1} \phi_{2a} = \frac{W_{2a}}{I_1} \cdot \frac{I_1 W_{1a}}{R_{ma}} = \frac{W_1 W_2}{R_{ma}}$$

$$M_b = \frac{W_{2b}}{I_1} \phi_{2b} = \frac{W_{2b}}{I_1} \cdot \frac{I_1 W_{1b}}{R_{mb}} = \frac{W_1 W_2}{R_{mb}}$$

当两个初级绕组的品质因数相当高时, 即 $r_{1a} \ll \omega l_{1a}, r_{1b} \ll \omega l_{1b}$, 有

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{j\omega(L_{1a} + L_{1b})}$$

再根据电感定义和磁路欧姆定律有 $L_{1a} = \frac{W_1^2}{R_{ma}}, L_{1b} = \frac{W_1^2}{R_{mb}}$, 联立以上各式并简化, 得

$$\dot{U}_0 = -\frac{W_2}{W_1} \dot{U}_1 \frac{R_{mb} - R_{ma}}{R_{mb} + R_{ma}}$$

由上式可知, 当 W_1, W_2, U_1 为定值时, 差动变压器输出电压 $\dot{U}_0$ 仅仅是气隙磁阻 R_{ma} 和 R_{mb} 的函数。由于铁芯与衔铁的磁阻远小于气隙磁阻, 因此, 可以认为闭合磁路的磁阻仅仅为空气

隙的磁阻, 即 $R_{ma} = \frac{2\delta_a}{\mu_0 S}, R_{mb} = \frac{2\delta_b}{\mu_0 S}$, 代入上式并整理得: