



《传感器技术》

主讲人：李刚

04

电感的传感原理与测量

4.1 概述

4.1 概述

本章介绍自感传感器和差动变压器的结构、分类、工作原理、特性参数、测量转换电路、零点残余电压、相敏检波电路、差动整流电路，电感传感器用于微小位移的测量。电流输出型传感器，以及一次仪表和二线制仪表的相关知识。也简单介绍了磁电式传感器的原理及应用。

电感传感器的传感基本原理：以磁场为媒介或基于电磁感应，利用被测量产生或引起的磁阻变化使传感线圈的电感变化实现感测。

电感传感器可分为自感式和互感式两大类。人们习惯上说的电感式传感器通常指**自感式传感器**，而由于互感式传感器是利用变压器原理，又往往做成差动式，故常称为**差动变压器**。

自感系数常用 L 来表示，简称自感或电感。线圈的自感与线圈的直径、长短、匝数等因素有关。线圈面积越大、线圈越长、单位长度匝数越密，它的自感就越大。有铁芯的线圈的自感比没有铁芯时大很多。

自感的单位是亨利，简称亨，符号是 H 。常用的较小的单位有毫亨(mH)和微亨(μH)。

自感传感器的数值多为 mH 数量级。

4.2 自感式电感传感器 原理测量方法

4.2.1 自感的传感原理

基本原理：以磁场为媒介或基于电磁感应，利用被测量产生或引起的磁阻变化使传感线圈的电感变化实现感测。

可变电感(自感/互感)是传感器的核心，特征是有线圈绕组。因难以微型化，电感传感器在微传感器中少见。

测量特点：实现电感的作用方式属于间接式；除了能感测可通过机构转换成位移的非电量外，也可测量能借助磁特性变化引起线圈电感变化的参量。

性能特点：结构简单可靠，输出功率大，抗干扰能力强，对工作环境要求不高，灵敏度和分辨力较高，传感器输出信号强，线性度和重复性较好；但频率响应低、不宜快速动态测量、尺寸因线圈限制难以减小。

先看一个实验:

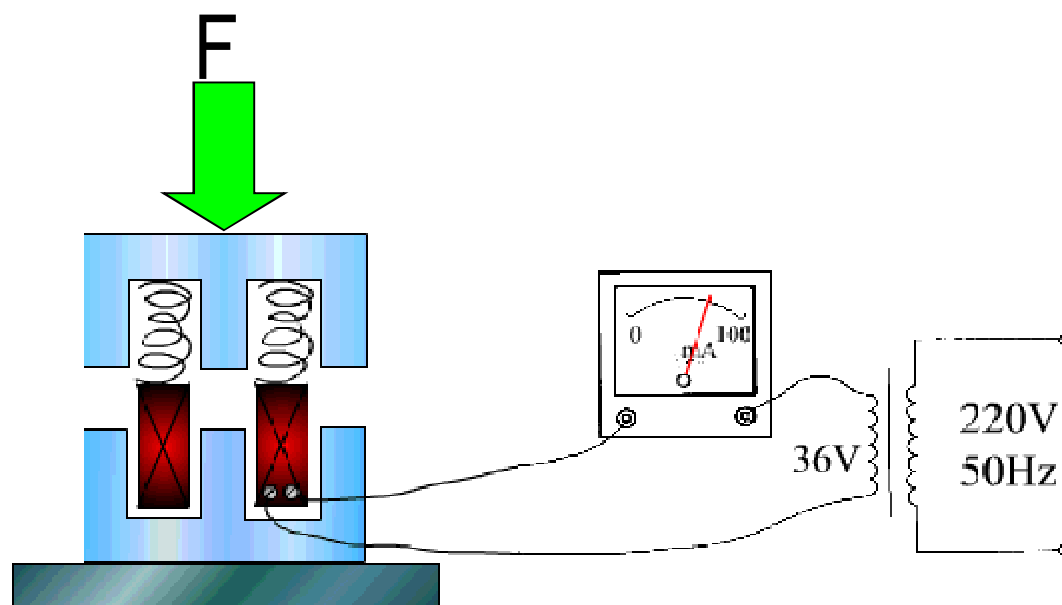
将一只380V交流接触器绕组与交流毫安表串联后，接到机床用控制变压器的36V交流电压源上。毫安表的初始值约为几十毫安。若慢慢将接触器的活动铁心（称为衔铁）往下按时，会发现毫安表的读数逐渐减小。当衔铁与固定铁心之间的气隙等于零时，毫安表的读数只剩下十几毫安。

电感传感器的基本工作原理演示

准备工作



电感传感器的基本工作原理演示



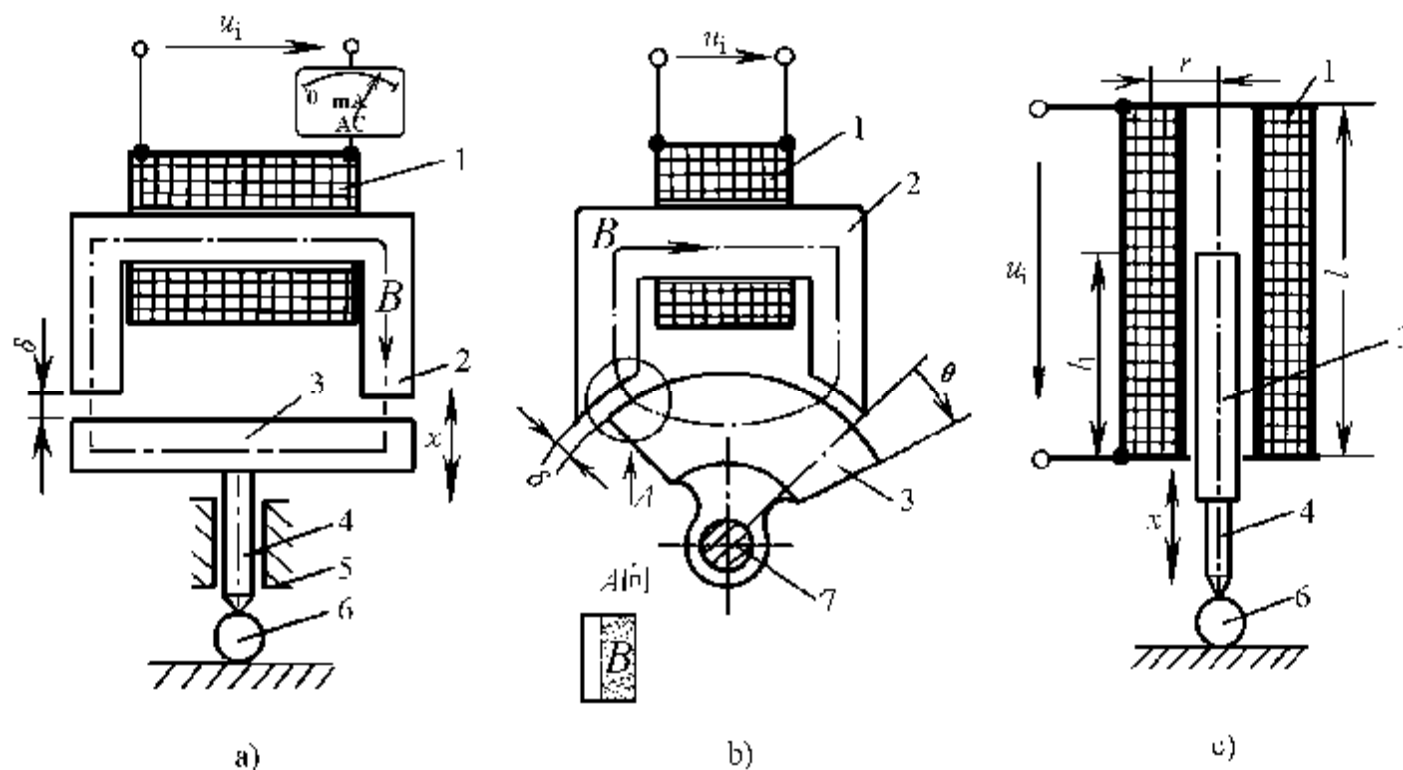
气隙减小，电感变大，电流变小

变隙式电感传感器的基本工作原理

当铁心的气隙较大时，磁路的磁阻 R_m 也较大，线圈的电感 L 及感抗 X_L 较小，所以电流 I 较大。当铁心闭合时，气隙 δ 变小，磁阻变小，电感 L 变大，电流 I 减小。

$$L \approx \frac{N^2 m_0 A}{2d} \quad I = \frac{U}{Z} \approx \frac{U}{X_L} = \frac{U}{2\pi f L}$$

自感式电感 传感器常见 的形式

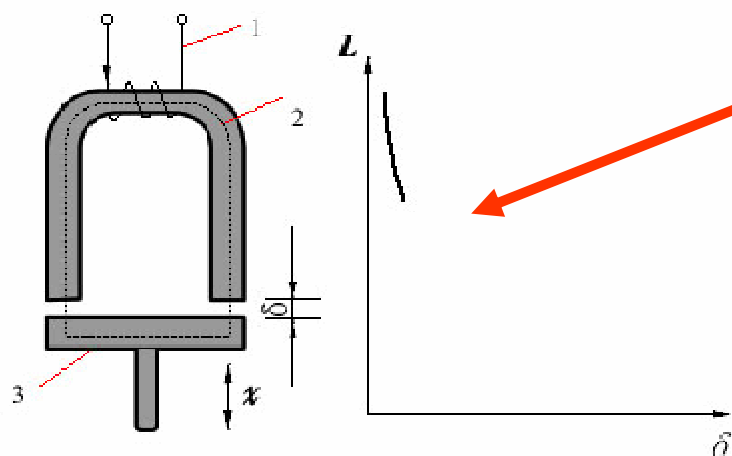


a) 变隙式 b) 变截面角位移式 c) 螺线管式

1 - 绕组 2 - 铁心 3 - 衔铁 4 - 测杆

5 - 导轨 6 - 工件 7 - 转轴

变极距式电感传感器的特性近似双曲线



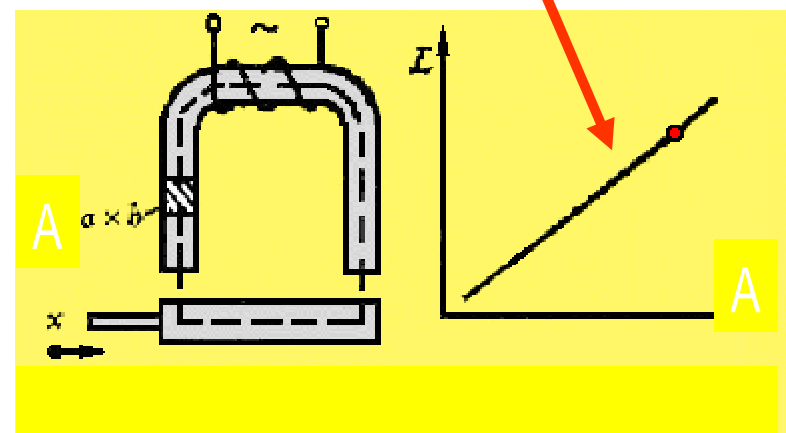
可变阻式传感器基本原理

1—线圈 2—铁心 3—衔铁

1-绕组 2-铁心 3-衔铁

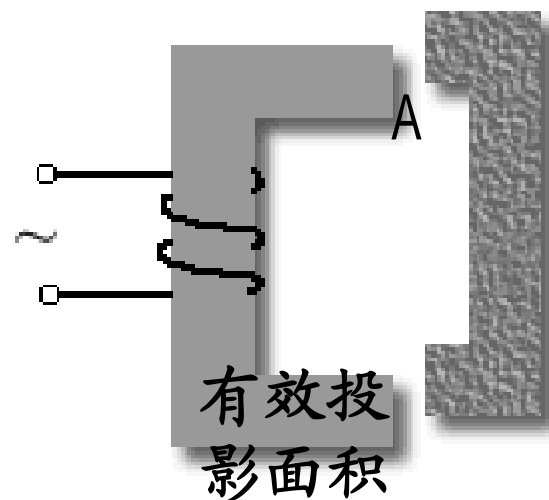
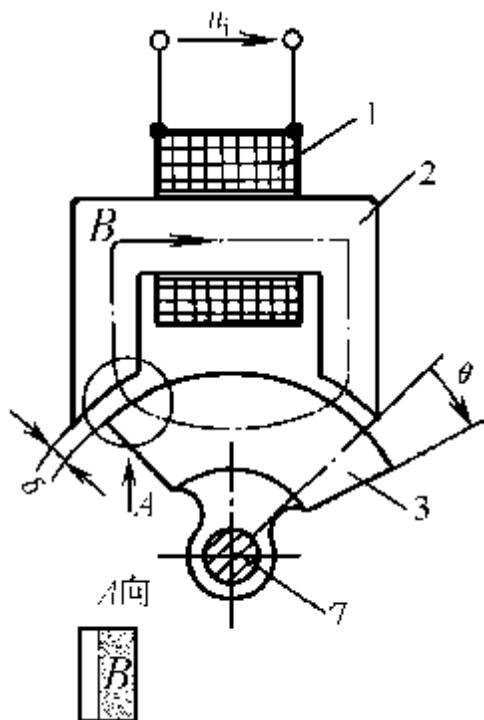
B 减小铁心与衔铁之间的有效投影面积，在较小的范围内，电感成比例减小。

变面积式电感传感器的理论特性为线性



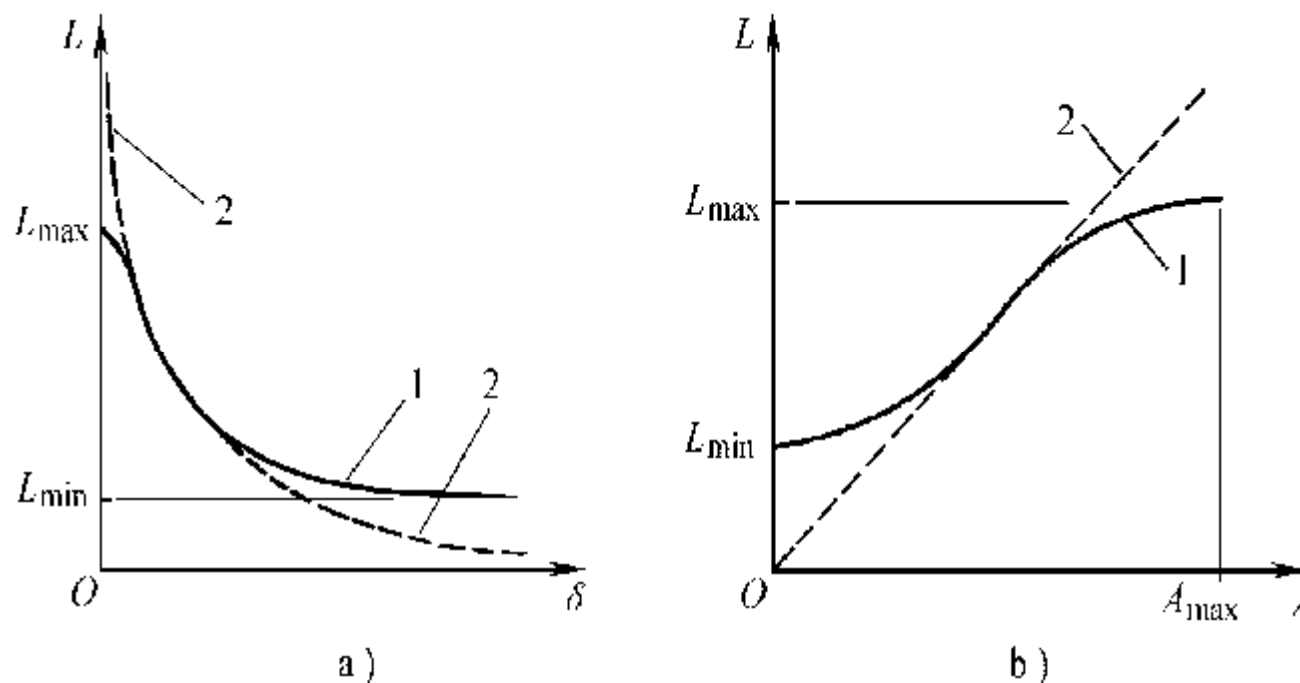
变面积式电感传感器

也称为变截面式电感传感器。必须保持气隙 δ 固定不变，电感 L 是气隙与固定铁心之间的有效投影截面积 A 的函数。



可变磁阻式传感器
可变导磁面积型

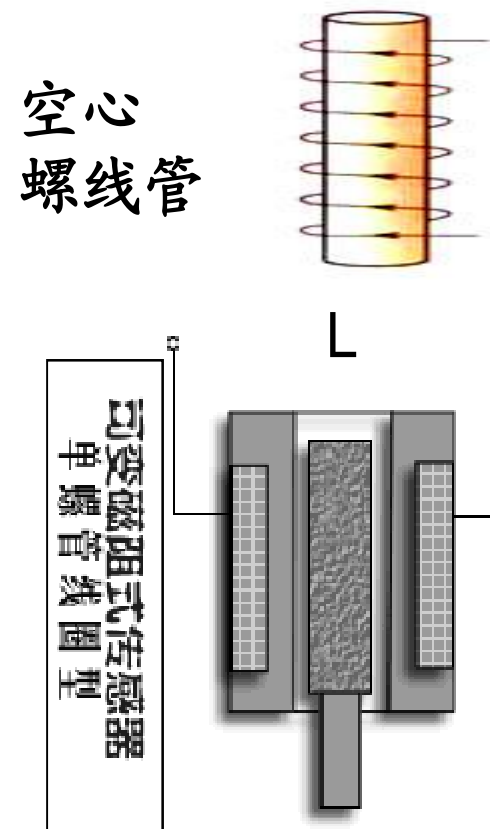
衔铁上下移动，导致衔铁与铁心的有效投影面积和电感的改变。

电感传感器的
输出特性a) 变隙式电感传感器的 d - L 特性曲线b) 变面积式电感传感器的 A - L 特性曲线

1 - 实际输出特性 2 - 理想输出特性

螺线管式电感传感器

螺线管是具有多重卷绕的导线，卷绕内部可以是空心的，或者有一个磁芯。当有电流通过导线时，螺线管中间部位会产生比较均匀的磁场。作为传感器，螺线管电感传感器的主要元器件是一只螺线管和一根可移动的圆柱形衔铁。衔铁插入绕组后，将引起螺线管内部的磁阻的减小，电感随插入的深度而增大。



X

螺线管式电感传感器的线性区

对于长螺线管 ($l \gg r$)，当衔铁工作在螺线管接近中部位置时，可以认为绕组内磁场强度是均匀的，此时绕组的电感量 L 与衔铁插入深度成正比。螺线管越长，线性区就越大。螺线管式电感传感器的线性区约为螺线管长度的 $1/10$ 。测杆应选用非导磁材料，电导率也应尽量小，以免增加铁磁损耗和电涡流损耗。

例：采用螺线管电感传感器测量直径为100mm的工件是否合格，被测工件的最大允许误差为 $\pm 1.5\text{mm}$ ，

求：应选长度大于多少毫米的螺线管？

解： $\Delta D = 2 \times 1.5\text{mm} = 3\text{mm}$ ，则螺线管长度为：

$$l > 3\text{mm} \times 10\text{倍} = 30\text{mm} \text{ (不包括外壳)}。$$

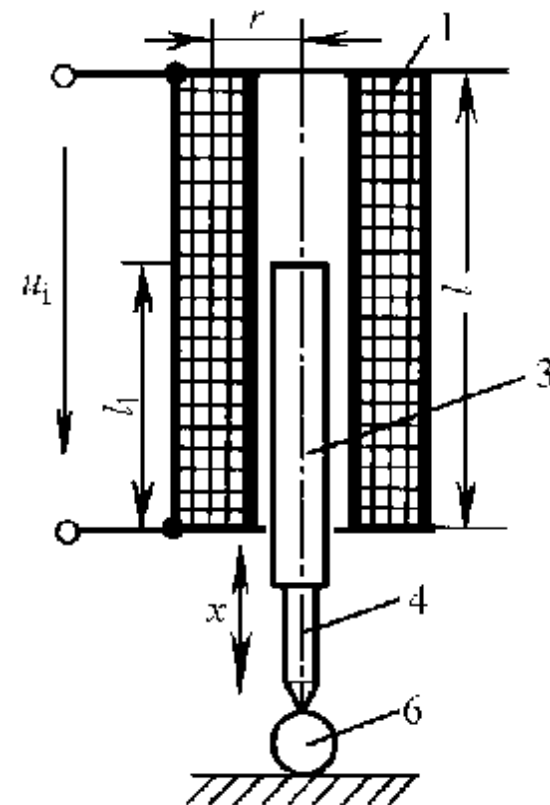
电感传感器的灵敏度

采取以下措施可以提高电感灵敏度：

①在绕组不致过热的情况下，可适当提高励磁电压，但以不超过10V为宜；

②激励源电源频率以1~10kHz为好。如果频率太低，感抗较小，激励电流较大；频率太高，衔铁的磁滞损耗加大，分布电容也将引起绕组的Q值下降；

③选用导磁性能好、铁损小、电涡流损耗小的导磁材料作为衔铁的材料，例如铁氧体、非晶铁磁材料等。

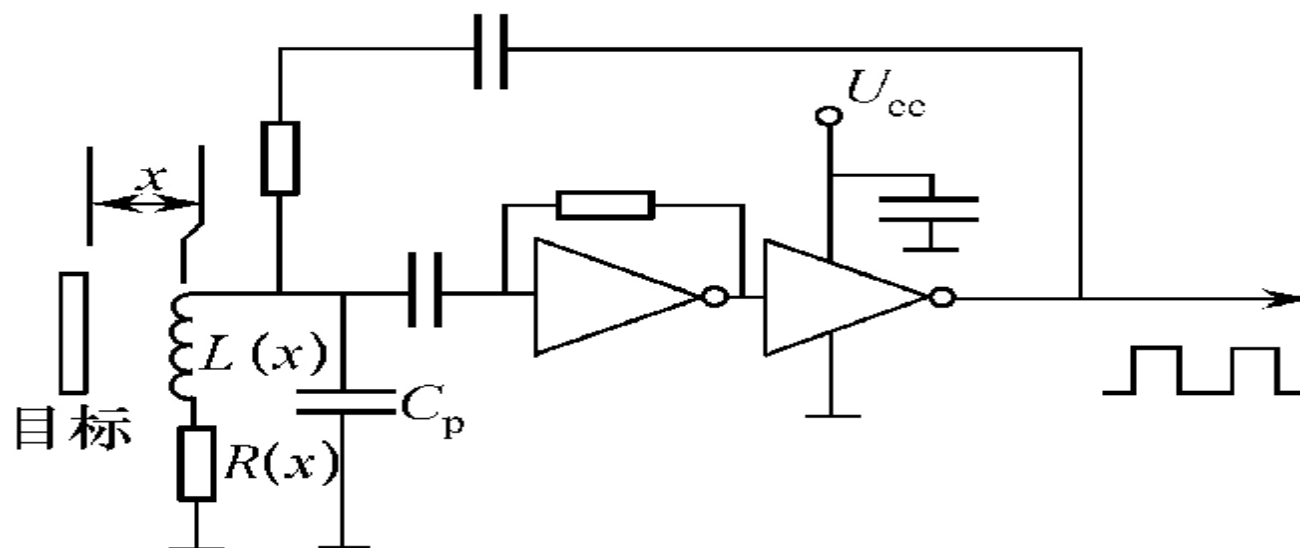


1 - 绕组 3 - 可动衔铁
4 - 测杆 6 - 被测工件

单线圈参数的测量方式主要有调频式和调幅式。

调频式测量与电路：

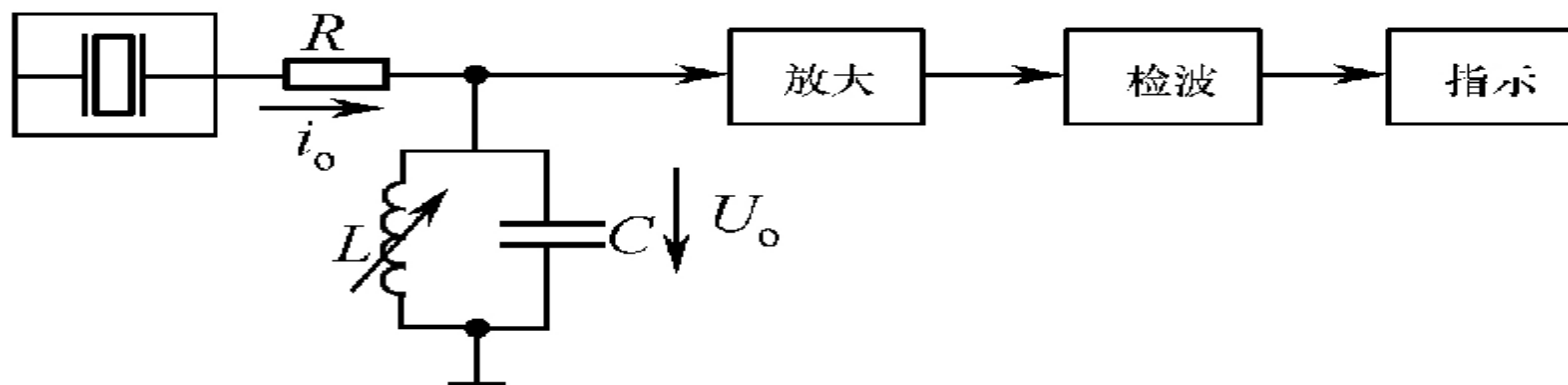
传感线圈接入LC振荡器回路，间距改变时，传感线圈的电感变化导致振荡频率变化。



调幅式测量与电路:

传感线圈和测量电路的电容 C 并联组成谐振回路。石英晶振起恒流源作用，给谐振回路提供稳频激励电流 i_0 ，LC回路的输出 $U_o = i_0 f(Z)$ ， Z 为LC回路阻抗。

L 随 x 变化，导体移去时，谐振回路的谐振频率接近晶振频率，回路呈最大阻抗，输出最大。导体靠近线圈时，线圈等效电感变化使回路失谐，输出降低。



差动电感传感器

当衔铁偏离中间位置时，两个绕组的电感一个增加，一个减小，形成差动形式。

a) 变隙式差动传感器

b) 螺线管差动传感器

1 - 上差动绕组

2 - 铁心

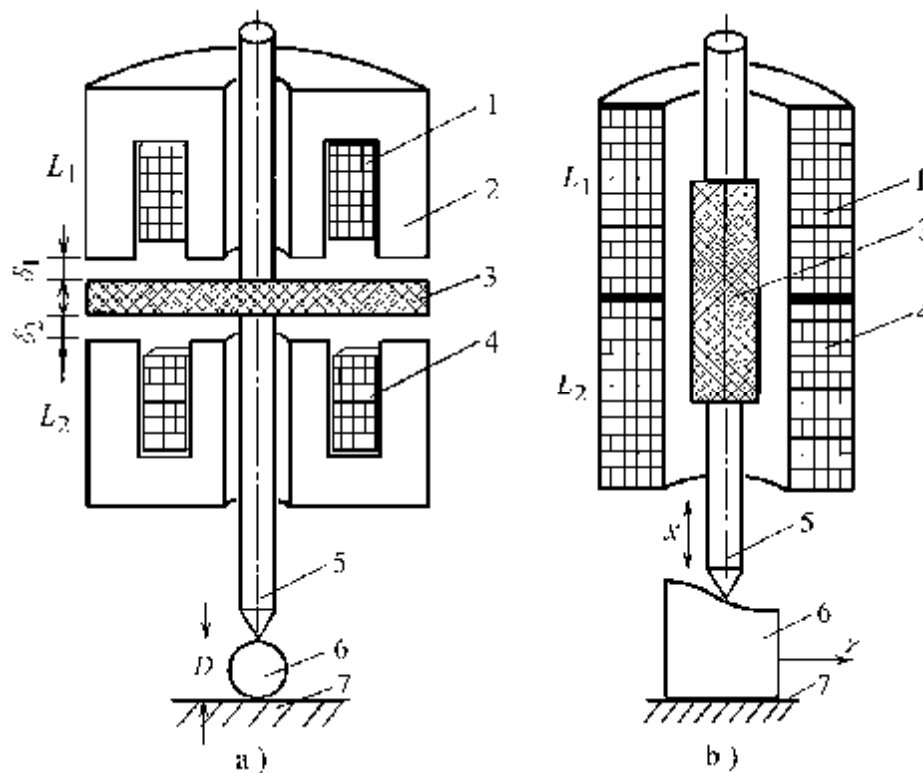
3 - 衔铁

4 - 下差动绕组

5 - 测杆

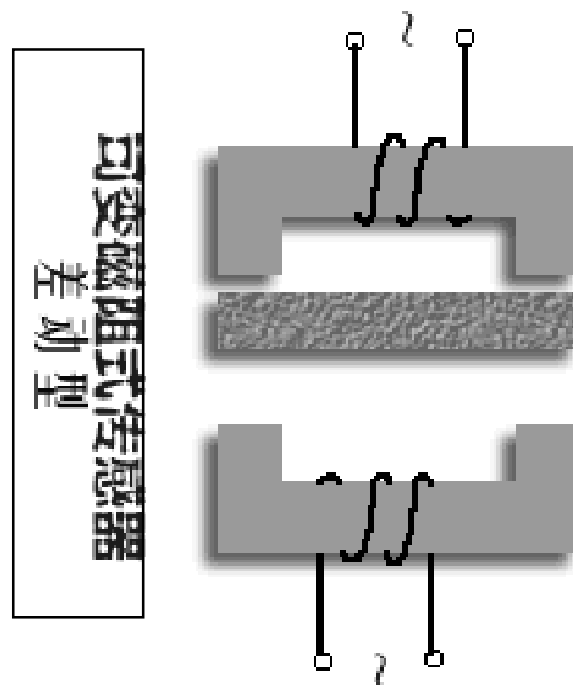
6 - 工件

7 - 基座

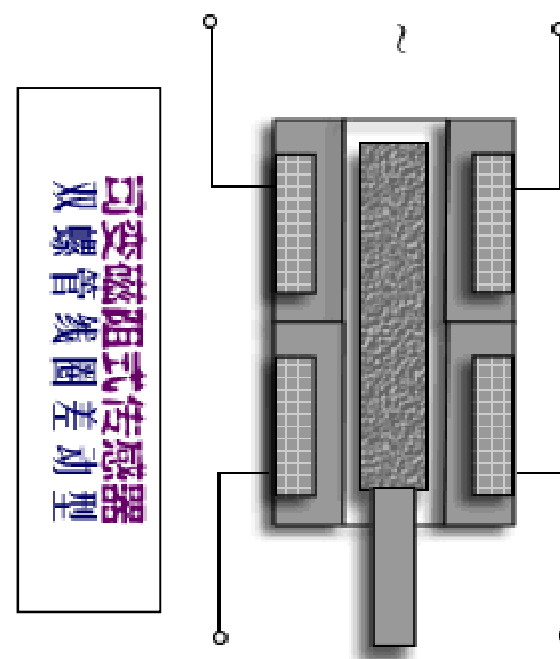


差动电感传感器动作演示

差动变隙式



差动螺线管式

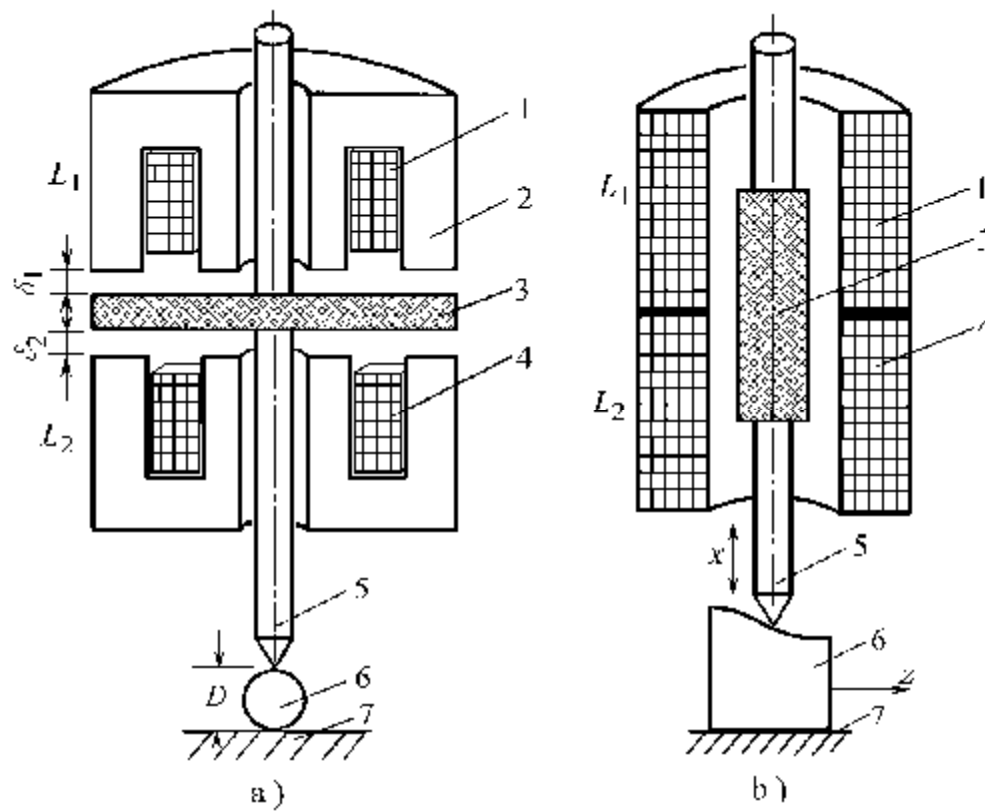


- 由于两个绕组的结构完全对称，
- 电磁吸力以及温漂相互抵消。

采用差动型式的优点

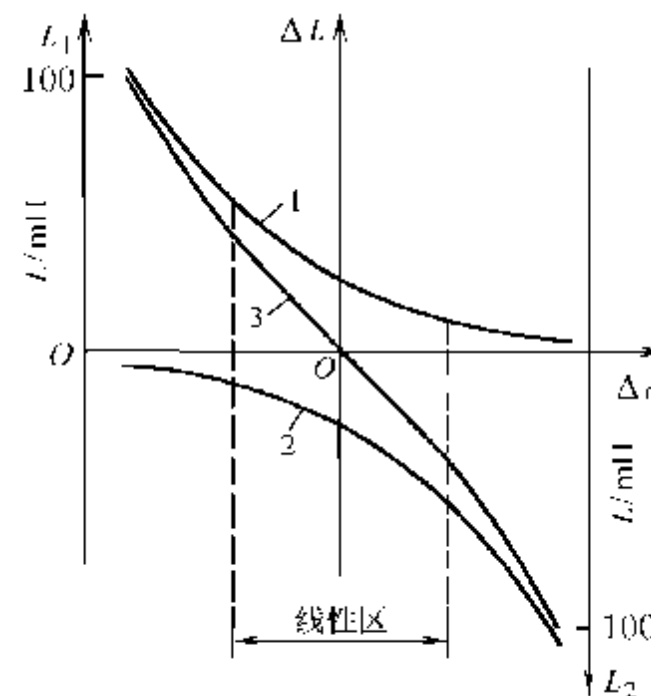
差动式电感传感器对外界影响，如温度的变化、电源频率的变化等基本上可以互相抵消，衔铁承受的电磁吸力也较小，从而减小了测量误差。

线性度改善，灵敏度增加一倍。



差动电感传感器的特性

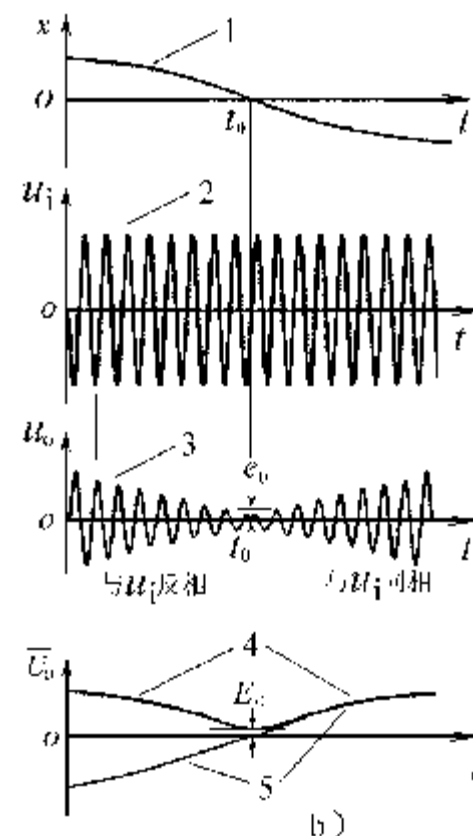
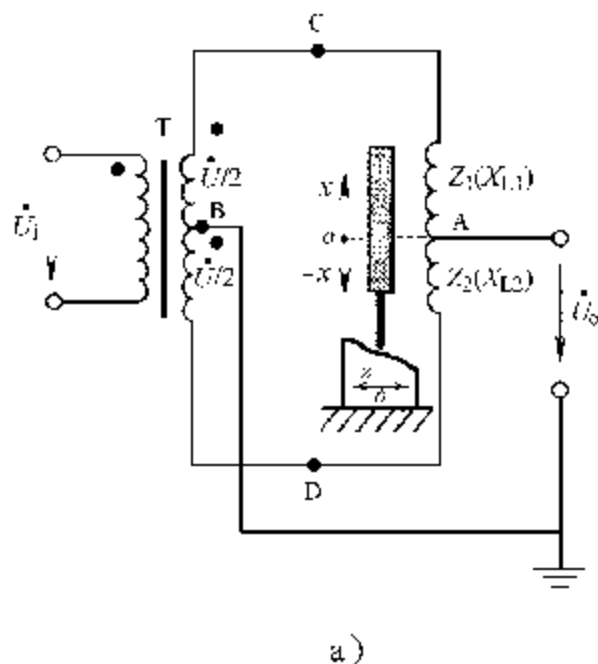
从曲线图可以看出,与非差动电感传感器相比较,差动式电感传感器的特性曲线的斜率变大,灵敏度提高;输出曲线变直,线性度改善。



1 - 上绕组特性 2 - 下绕组特性
3 - L_1 、 L_2 差接后的特性

4.2.2 电感传感器的测量 转换变压器桥路

- 1 - 衔铁的位移曲线
- 2 - 激励源波形
- 3 - 交流电桥的输出波形
- 4 - 普通检波之后的直流平均值
- 5 - 相敏检波之后的直流平均值



t_0 - 衔铁上下位移到达差动螺线管绕组中间位置的时刻
 e_0 - 零点残余电压的瞬时值 E_0 - 零点残余电压的平均值

采用相敏检波电路的必要性

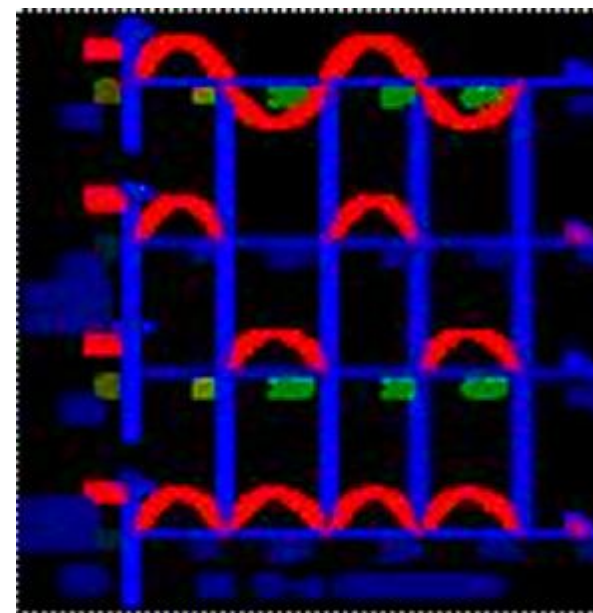
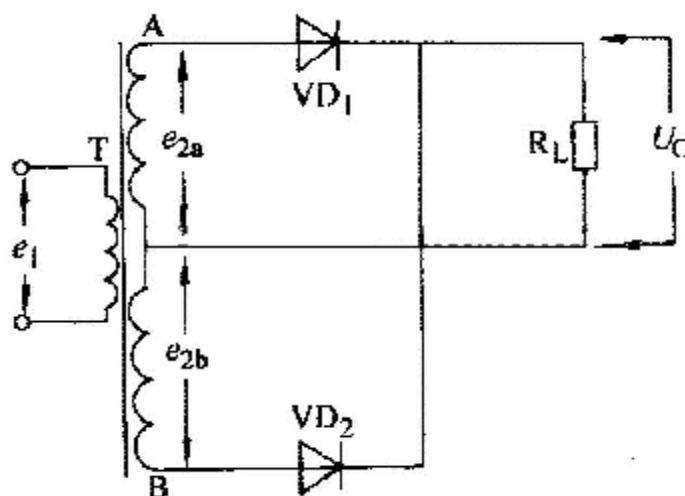
检波：将交变信号转换为直流平均值。

检波电路的作用是将电感的变化转换成直流电压或电流，以便用仪表指示出来。但若仅采用电桥电路配以普通的检波电路，则只能判别位移的大小，却无法判别输出电压的相位和位移的方向。

如果在输出电压送到指示仪前，经过一个能判别相位的检波电路，则不但可以反映幅值（位移的大小），还可以反映输出电压的相位（位移的方向）。这种检波电路称为相敏检波电路。

普通的整流电路及波形

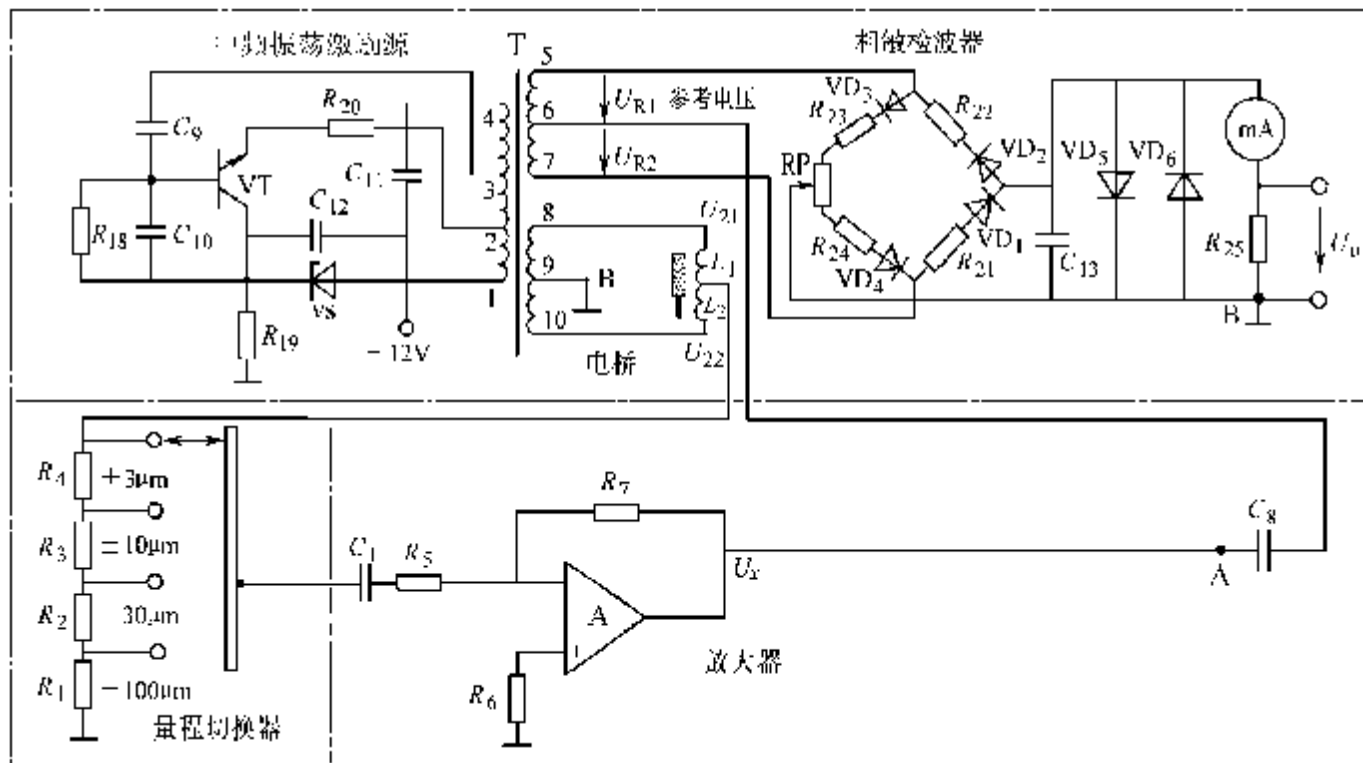
只能得到单一方向的直流电，不能反映被整流信号的相位。



检波用于信号转换；
整流用于功率转换。

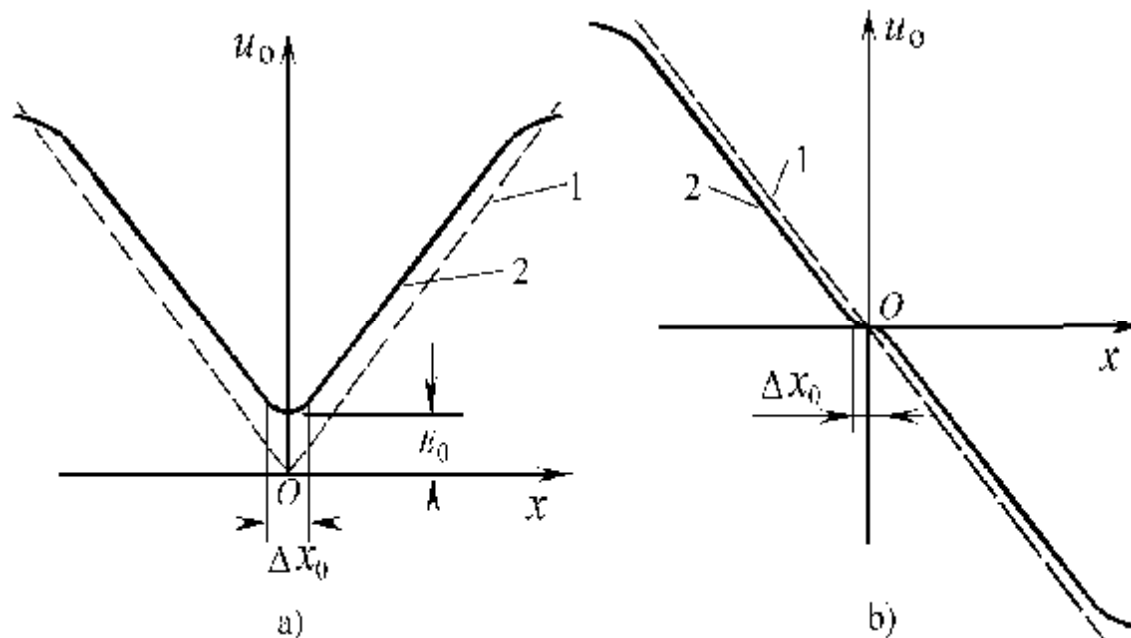
全波整流后，正负半周均变为正电压

一种典型的相敏检波电路（有配套模块）



参考电压 U_R 起相敏开关电路作用，并能克服检波二极管死区电压对小信号检波的影响。

相敏检波输出特性与非相敏检波比较



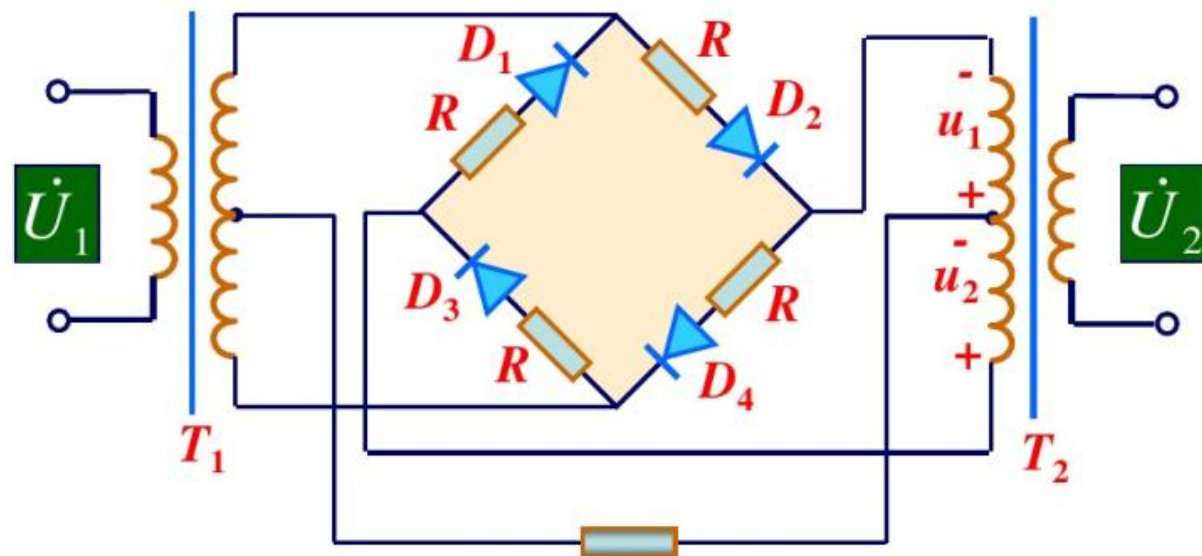
a) 普通检波 b) 相敏检波

1 - 理想特性曲线 2 - 实际特性曲线

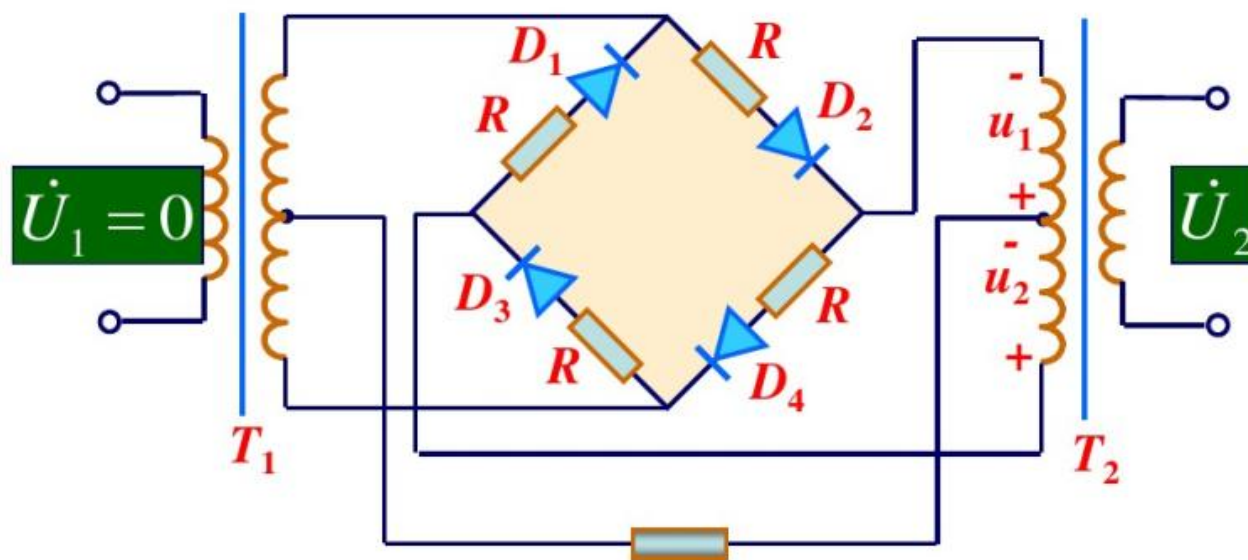
 E_0 - 零点残余电压 Δx_0 - 位移的不灵敏区具有中央零
位的
指示仪表

相敏检波原理分析

图中 U_2 为激励电压， U_1 为差动自感式传感器输出电压， U_1 与 U_2 同频，相位是由差动自感式传感器输出决定的，当差动自感式传感器的衔铁处于上部时 U_1 与 U_2 同相，处于中间位置时 U_1 为0，处于下部时 U_1 与 U_2 反相。且满足 $U_2 \gg U_1$ 。

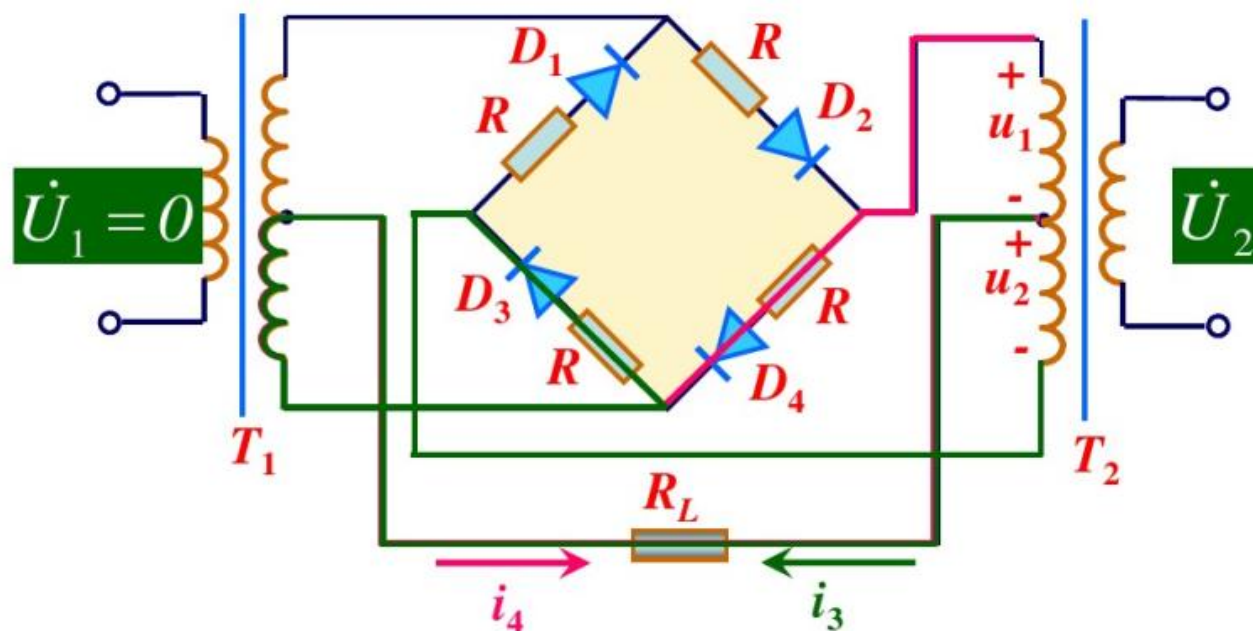


当衔铁在中间位置时，位移 $x(t)=0$ ，传感器输出电压 $U_1=0$ ，只有 U_2 起作用。



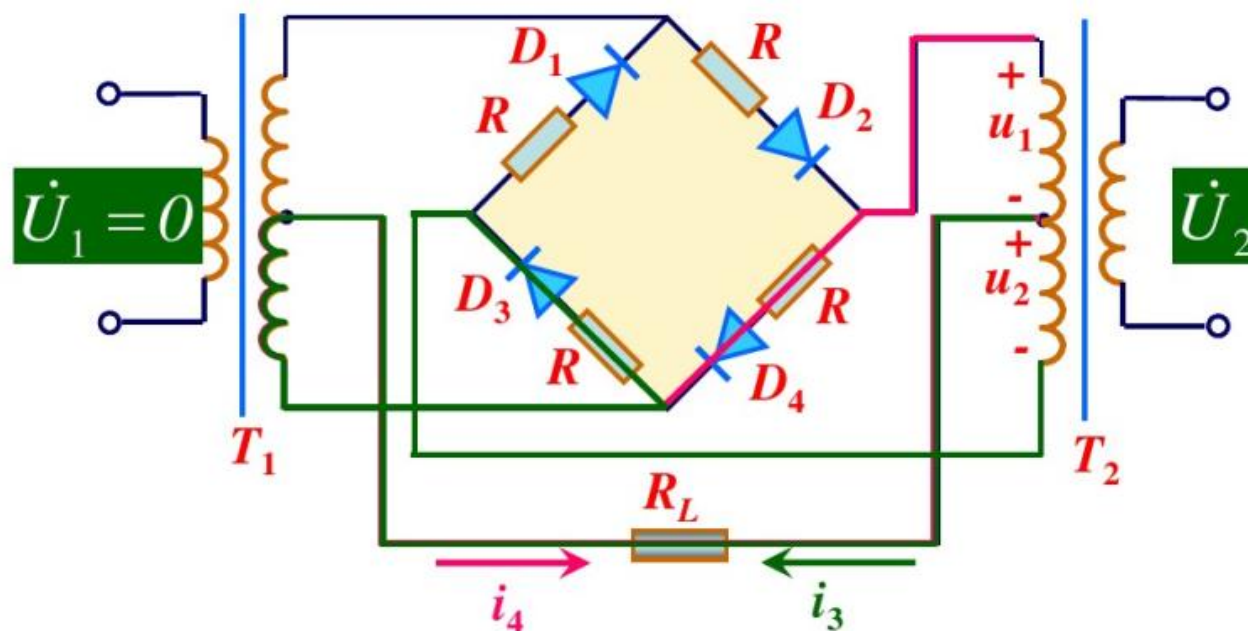
正半周时。 $i_4 = \frac{u_1}{R + R_L}$ $i_3 = \frac{u_2}{R + R_L}$

因为是从中心抽头，所以 $u_1 = u_2$ ，故 $i_3 = i_4$ 。流经 R_L 的电流为 $i_0 = i_4 - i_3 = 0$



负半周时。 $i_1 = \frac{u_2}{R + R_L}$ $i_2 = \frac{u_1}{R + R_L}$

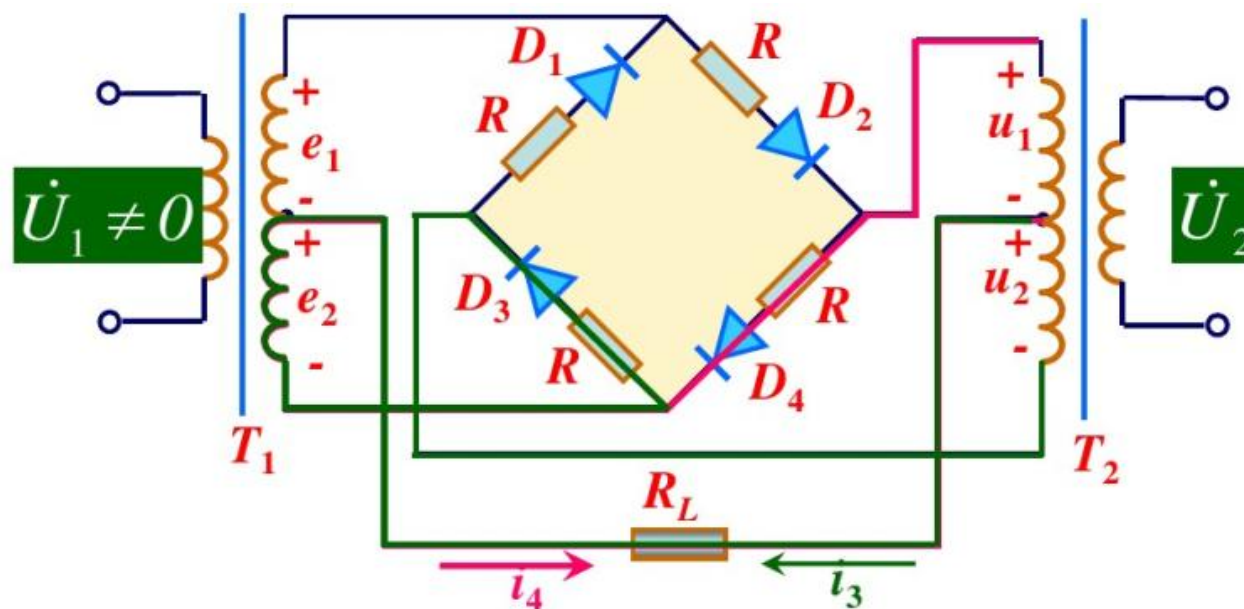
因为是从中心抽头，所以 $u_1 = u_2$ ，故 $i_1 = i_2$ 。流经 R_L 的电流为 $i_0 = i_1 - i_2 = 0$



当衔铁在零位以上时，位移 $x(t) > 0$ ， U_1 与 U_2 同频同相

正半周时
$$i_4 = \frac{u_1 + e_2}{R + R_L} \quad i_3 = \frac{u_2 - e_2}{R + R_L}$$

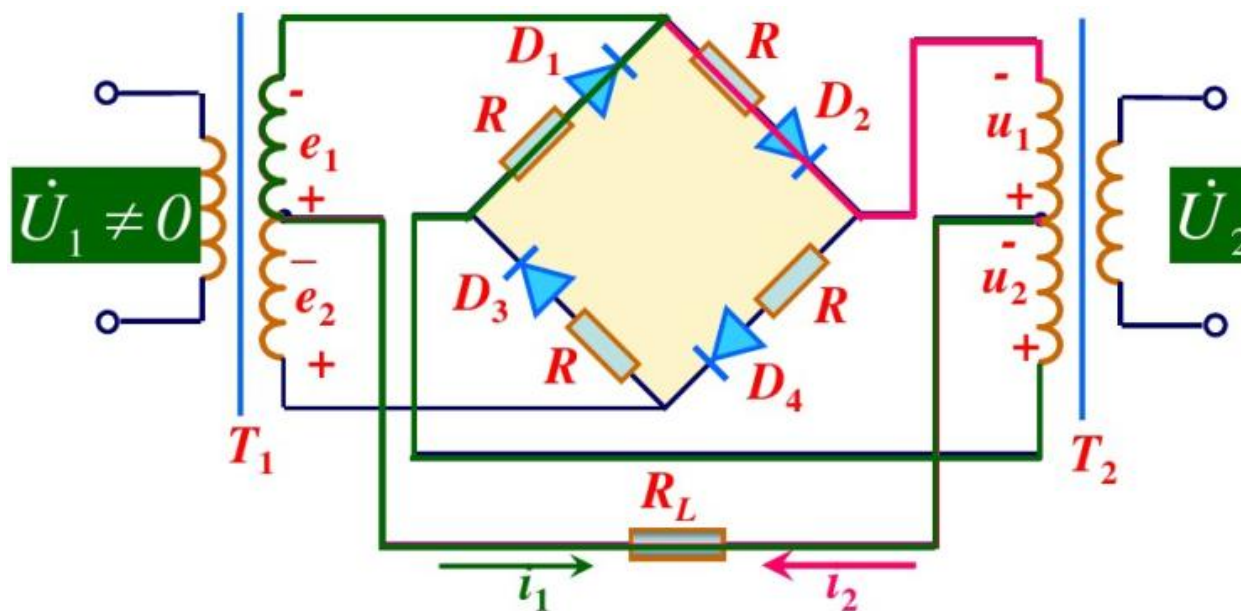
故 $i_4 > i_3$ ，流经 R_L 的电流为 $i_0 = i_4 - i_3 > 0$



当衔铁在零位以上时，位移 $x(t) > 0$ ， U_1 与 U_2 同频同相

负半周时
$$i_1 = \frac{u_2 + e_1}{R + R_L} \quad i_2 = \frac{u_1 - e_1}{R + R_L}$$

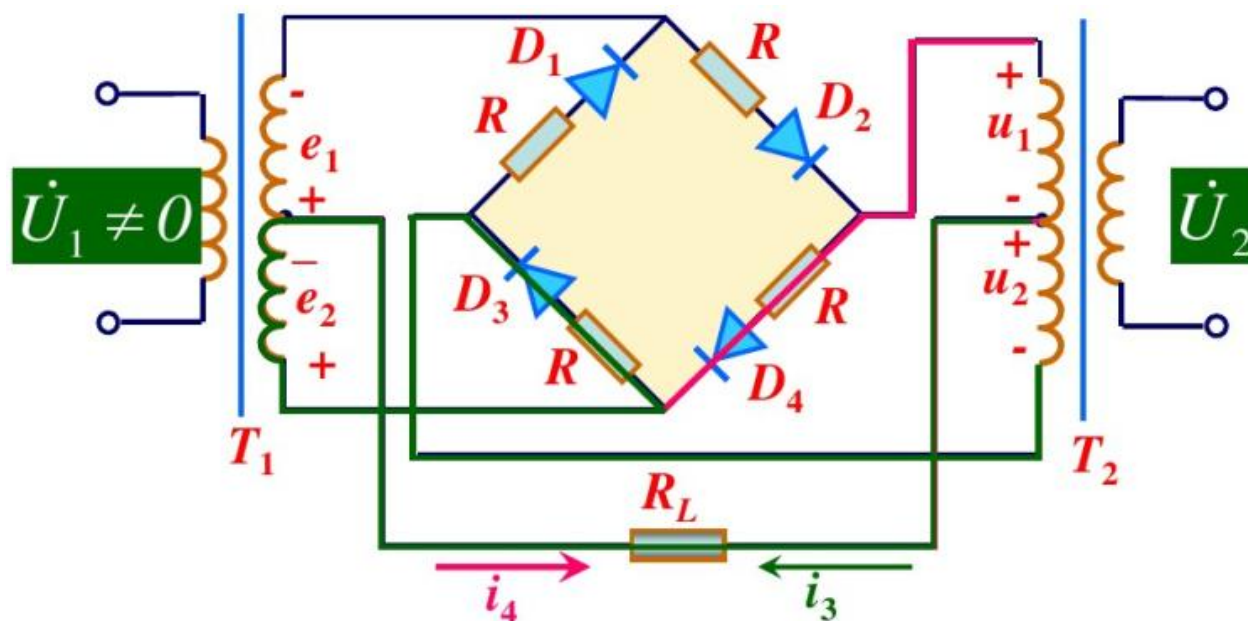
故 $i_1 > i_2$ ，流经 R_L 的电流为 $i_0 = i_1 - i_2 > 0$



当衔铁在零位以下时，位移 $x(t) < 0$, U_1 与 U_2 同频反相

U_2 正半周， U_1 负半周 $i_4 = \frac{u_1 - e_2}{R + R_L}$ $i_3 = \frac{u_2 + e_2}{R + R_L}$

故 $i_4 < i_3$ ，流经 R_L 的电流为 $i_0 = i_4 - i_3 < 0$

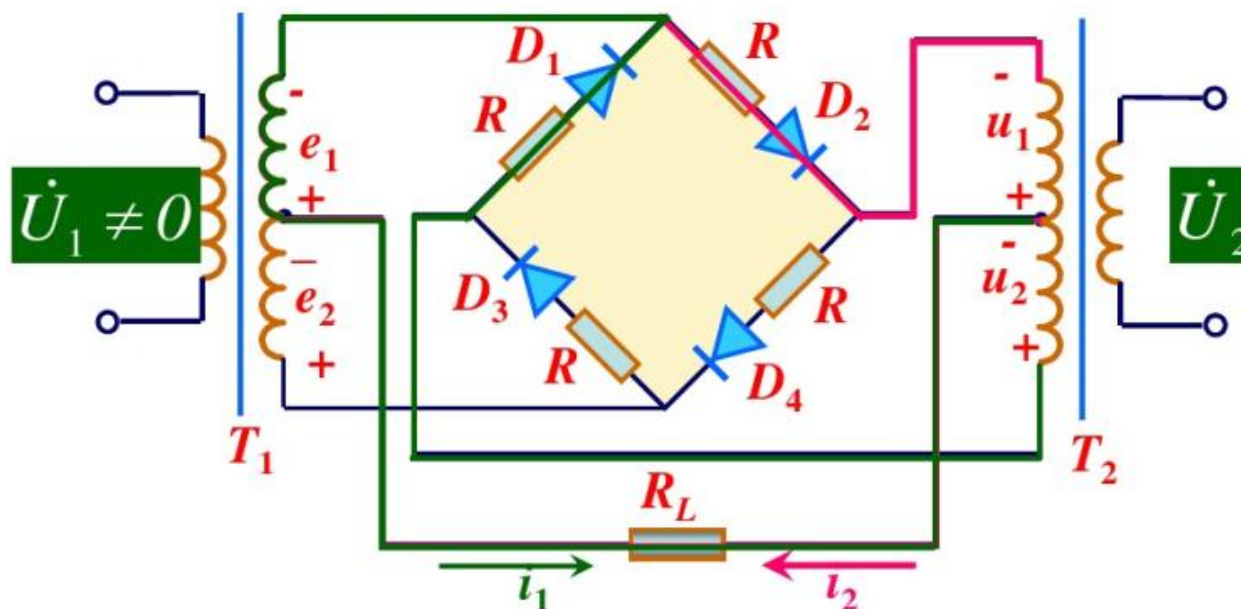


当衔铁在零位以下时，位移 $x(t) < 0$ ， U_1 与 U_2 同频反相

U2 负半周，U1 正半周

$$i_1 = \frac{u_2 - e_1}{R + R_L} \quad i_2 = \frac{u_1 + e_1}{R + R_L}$$

故 $i_1 < i_2$ ，流经 R_L 的电流为 $i_0 = i_1 - i_2 < 0$ 。与规定的正方向相反。



相敏检波结论:

- 1、衔铁在中间位置时，无论参考电压是正半周还是负半周，在负载上的输出电压始终为0。
- 2、衔铁在零位以上移动时，无论参考电压是正半周还是负半周在负载上的输出电压始终为正。
- 3、衔铁在零位以下移动时，无论参考电压是正半周还是负半周在负载上的输出电压始终为负。

自感传感器通常有两种结构:

- 1、由单线圈传感器结合调频或调幅电路并结合相关辅助电路组成;
- 2、由差动线圈传感器结合相敏检波电路以及相关辅助电路组成。

自感传感器在工程实践中通常被人们习惯性称为“电感传感器”，以区分差动变压器式电感传感器。

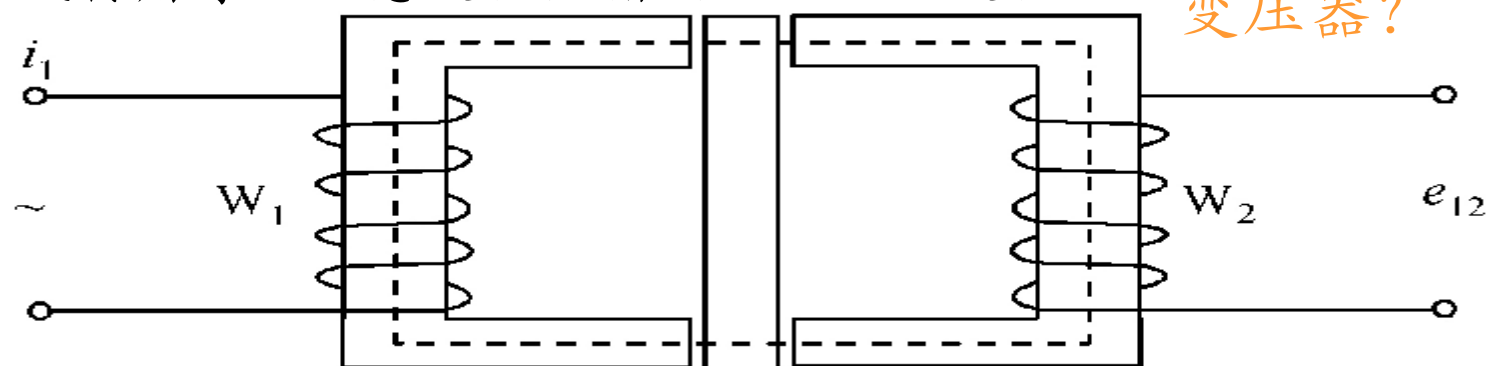
4.3 互感式电感传感器 原理测量方法

4.3.1 互感式电感传感原理

如图所示，当线圈 W_1 输入交流电流 i_1 时，线圈 W_2 中产生正比于 i_1 的变化率的感应电势 e_{12} ，即： $e_{12} = -M di/dt$ 。其中， M 为互感，表征线圈 W_1 和 W_2 之间的耦合程度，其大小与两线圈的相对位置及磁路的磁阻或周围介质的磁导率等有关。

互感式传感器实质是变压器：其一次线圈接稳定的交流激励，二次线圈因感应产生相应输出；

被测位移或转角等使互感变化，输出电压随之变化。



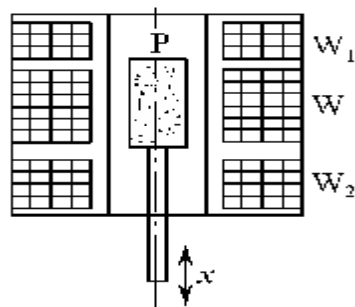
互感式传感器的二次侧常用两个线圈反串联接成差动形式，这种传感器又称差动变压器。

实用较多的是图a所示螺管式差动变压器，其线圈连接方式如图b所示。当一次线圈W加正弦交流电压 U_i 后，二次线圈的感应电势 e_1 和 e_2 与在线圈中的铁芯位置有关。

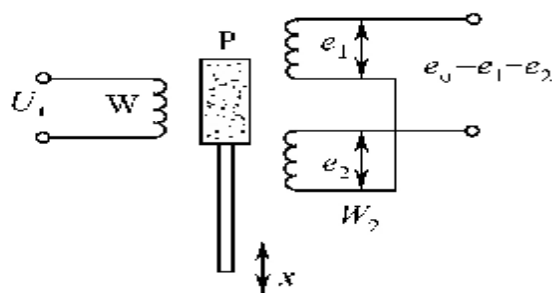
铁芯居中： $e_1=e_2$ ，输出 $e_0=e_1-e_2=0$ ；铁芯上移， $|e_1|>|e_2|$ ；

反之， $|e_2|>|e_1|$ ；上述两种情况下 e_0 的相位相差 180° ，其幅值随铁芯位移 x 的变化而变化，如图c所示。

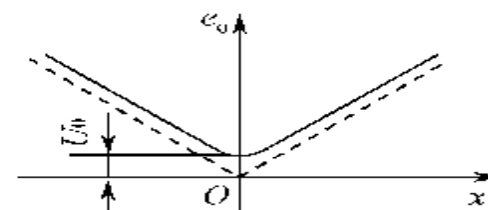
差动式互感传感器的测量电路不需要电桥。



(a) 结构图



(b) 原理图



(c) 输出电压的幅值特征

零点残余电压(零残): 实际中铁芯居中时 $e_0 = U_0$, 不为零, U_0 即零残。传感器实际输出特性如图c中的实线, 虚线为理想特性。

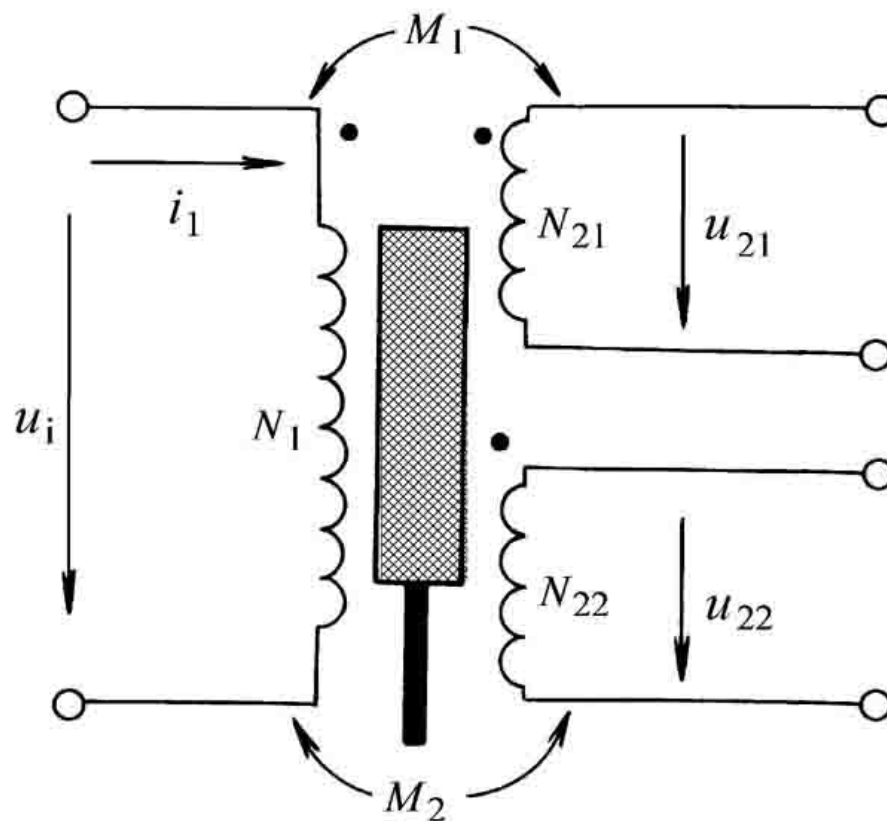
原因: 两个二次线圈的电气参数不可能完全相同、制作结构不对称以及铁芯的磁化曲线存在非线性。

影响: 零点残余电压使传感器在零点附近不灵敏, 并可能使后接放大器提前饱和, 可能使某些执行机构产生误动作。

对策: 有各种补偿电路, 其中差动变压器输出端接相敏检波电路, 可判断铁芯位移方向, 也能消减零残电压。

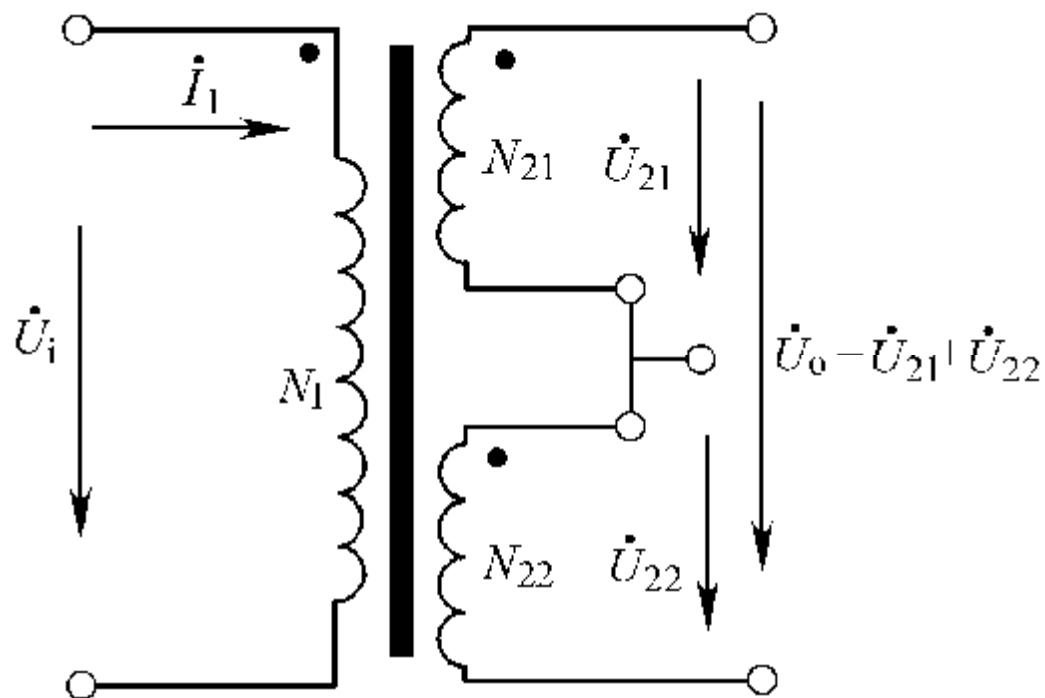
注: 相敏检波电路功能--鉴相、抑制偶次谐波、衰减奇次谐波

请将变压器的二次绕组 N_{21} 、 N_{22} 的有关端点按全波整流电路的要求正确地连接起来。

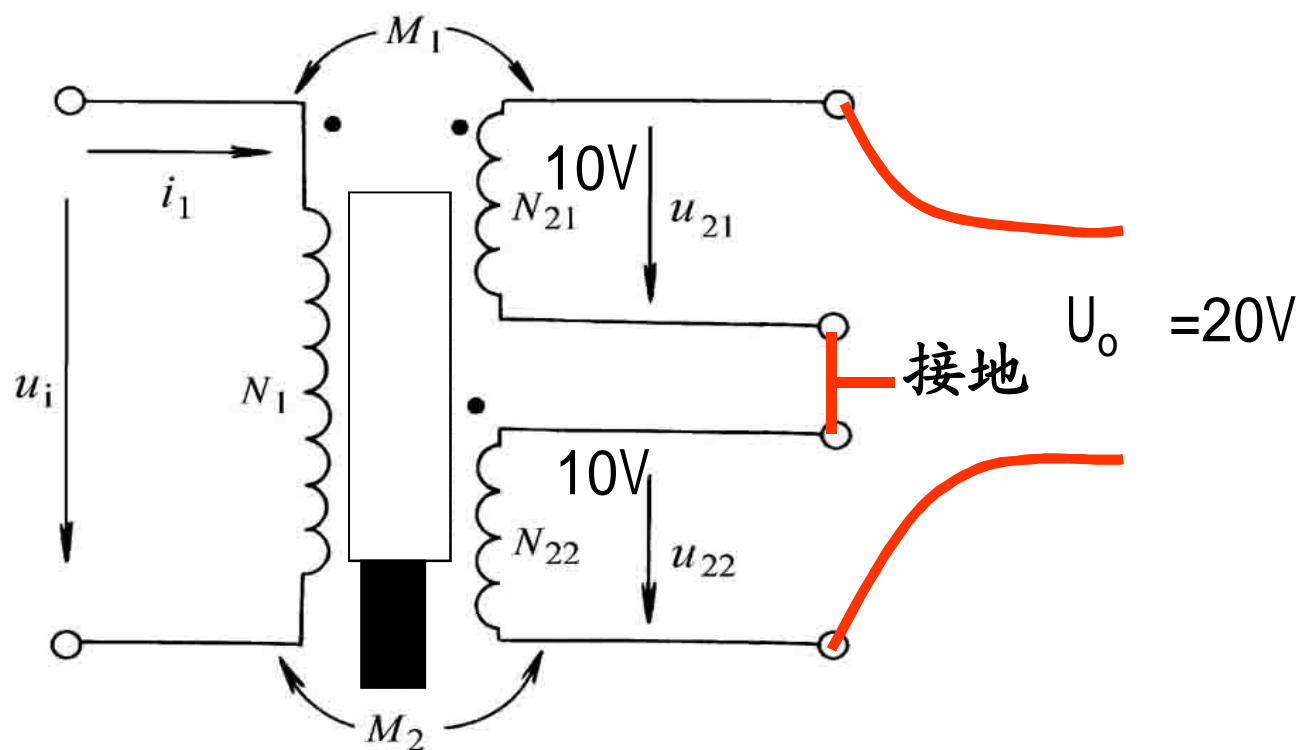


普通的全波整流变压器接线

两个二次侧绕组同向串联（第一个绕组的尾端与第二个绕组的首端相连），串联后的输出电压等于两个绕组电压之和。



变压器的两个二次绕组 N_{21} 、 N_{22} 的有关端点按全波整流电路的连接:



差动变压器传感器的工作原理

差动变压器是把被测位移量转换为一次线圈与二次绕组间的互感量 M 的变化的装置。由于两个二次线圈采用差动接法，故称为差动变压器。目前应用最广泛的结构型式是螺线管式差动变压器。

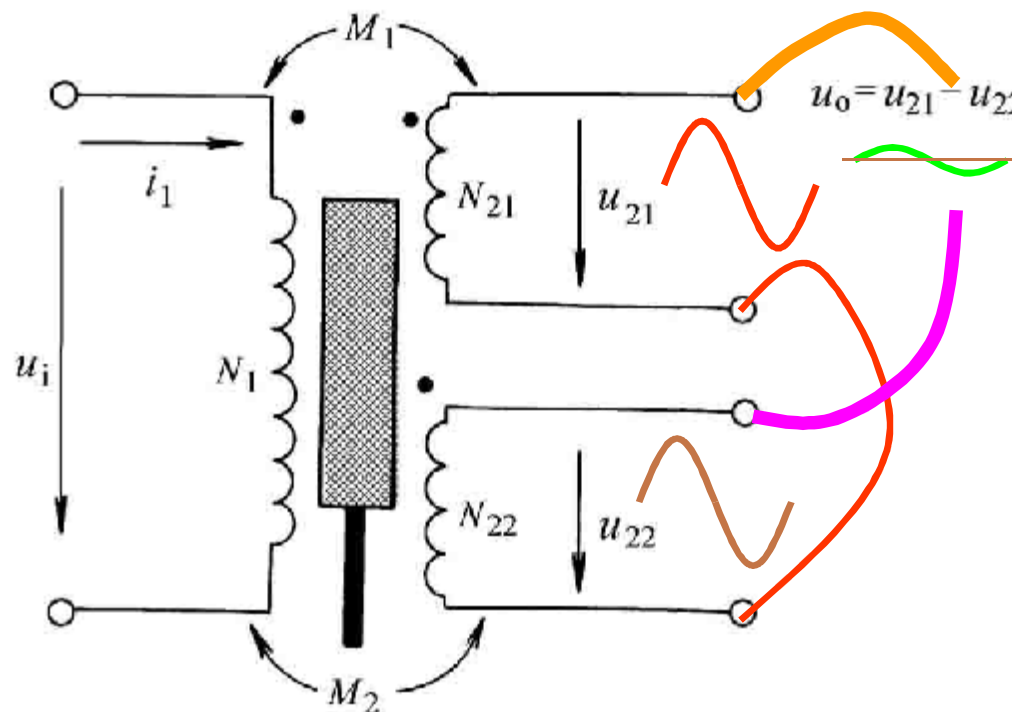
在差动变压器的线框上绕有一个输入绕组（称一次绕组）；在同一线框的上端和下端再绕制两个完全对称的绕组（称二次线圈），它们反向串联（输出电压相互抵消），组成差动输出形式。图中标有黑点的一端称为同名端，通俗的说法是指绕组的“头”。

差动变压器式传感器的等效电路及接线

结构特点：

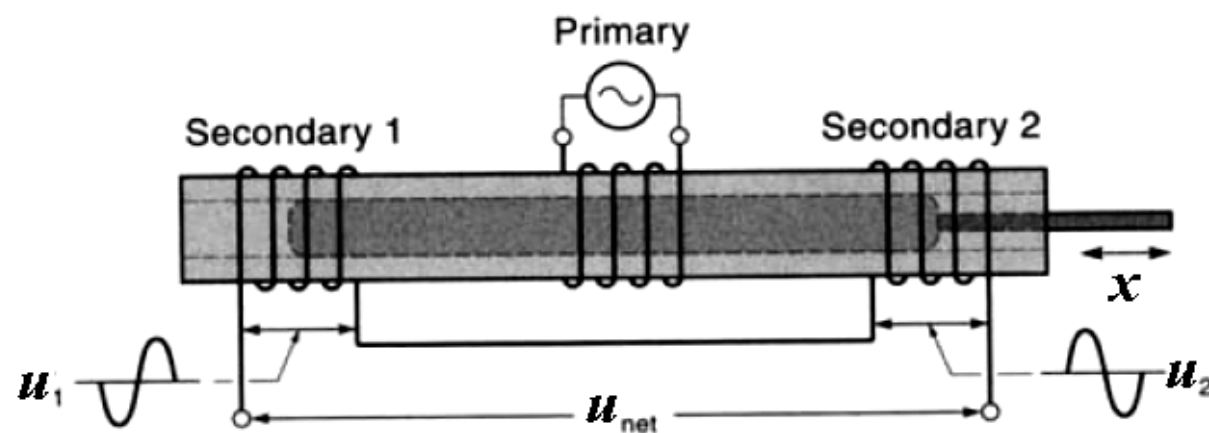
两个二次绕组反向串联，组成差动输出形式。

请将二次绕组 N_{21} 、 N_{22} 的有关端点正确地连接起来，并指出哪两个为输出端点。

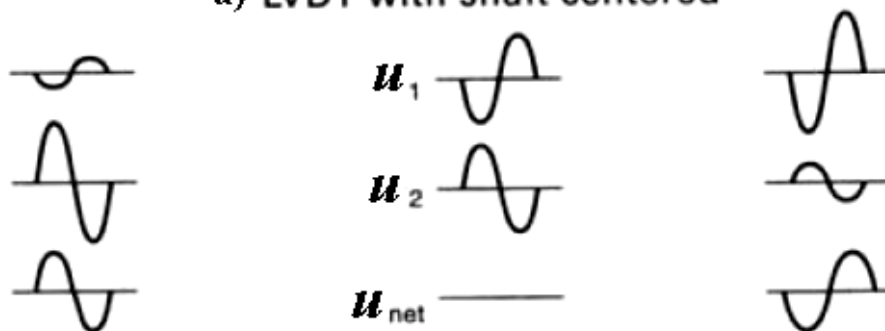


差动接法的输出电压为 $u_o = u_{21} - u_{22}$

差动变压器的输出波形



a) LVDT with shaft centered

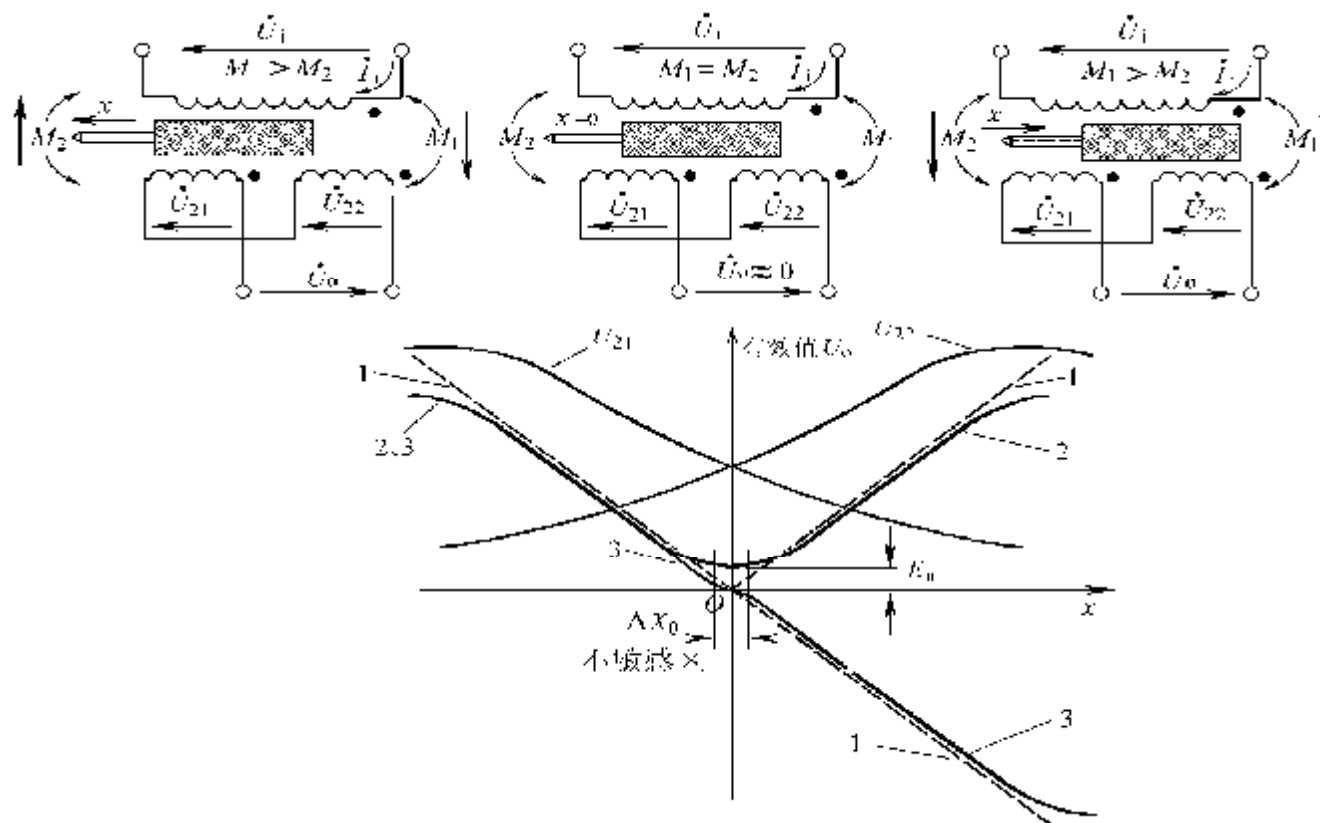


b) Shaft right

c) Shaft centered

d) Shaft left

差动变压器的 输出特性



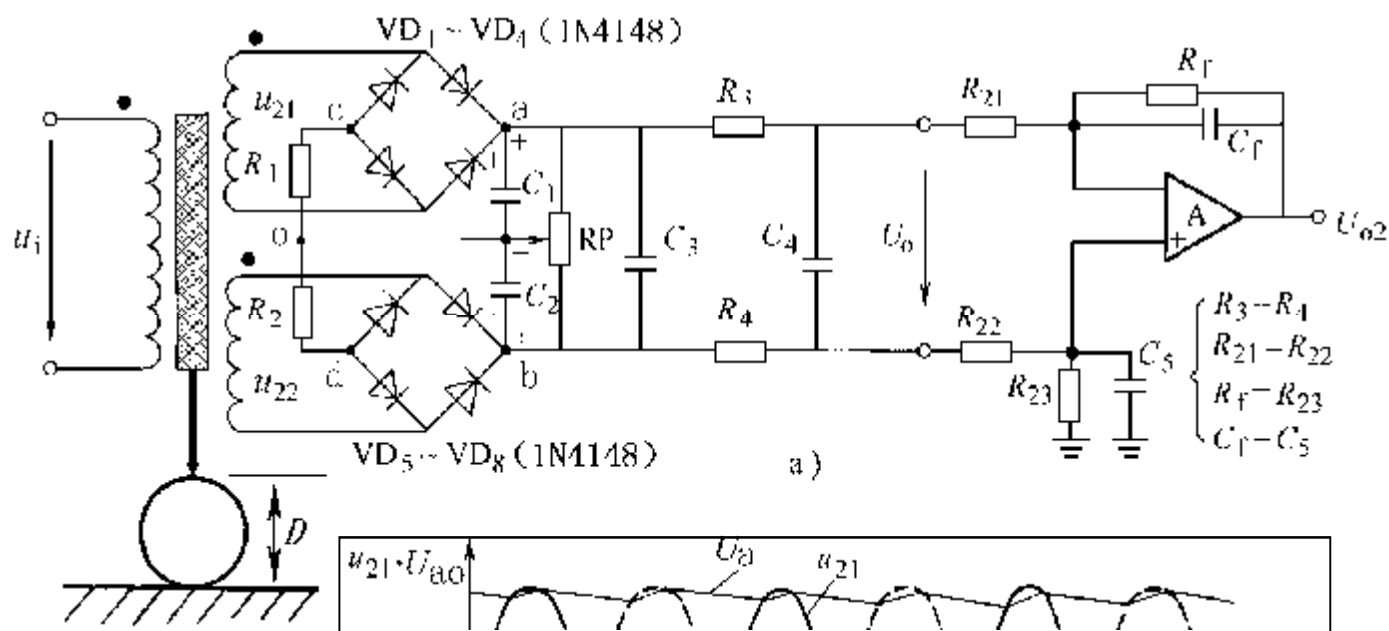
- 1 - 理想输出特性 2 - 非相敏检波实际输出特性
3 - 相敏检波实际输出特性 Δx_0 - 位移的不灵敏区

灵敏度与线性度

差动变压器的灵敏度一般可达 $10\text{mV}/(\text{mm}\cdot\text{V})$ ，行程越小，灵敏度越高。为了提高灵敏度，励磁电压不超过 10V 为宜。电源频率以 $1\sim 10\text{kHz}$ 为好。差动变压器线性范围约为线圈骨架长度的 $1/10$ 左右。

例：欲测量 $\Phi 120\text{mm}\pm 2\text{mm}$ 轴的直径误差，应选择线圈骨架长度为多少的差动变压器（或电感传感器）为宜？（注： $\Delta x=4\text{mm}$ ）

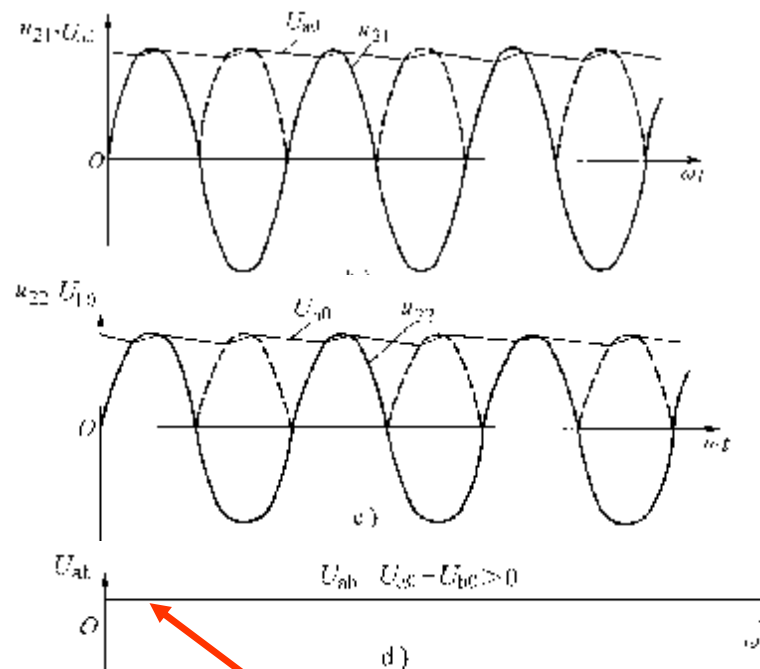
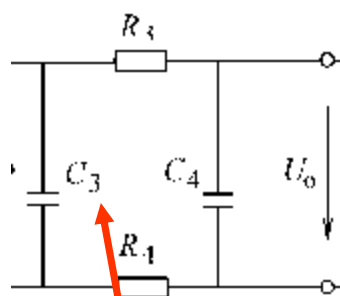
差动变压器的 差动整流 测量电路



差动变压器的二次电压 u_{21} 、 u_{22} 分别经 $VD_1 \sim VD_4$ 、 $VD_5 \sim VD_8$ 组成的两个普通桥式电路整流，变成直流电压 U_{a0} 和 U_{b0} 。由于 U_{a0} 与 U_{b0} 是反向串联的，所以 $U_{C3} = U_{ab} = U_{a0} - U_{b0}$ 。该电路是以两个桥路整流后的直流电压之差作为输出，不涉及相位。 RP 是调零电位器。

工件直径D增大，衔铁上移时的输出波形在第一象限

$$U_{a0} > U_{b0}, \text{ 所以 } U_{ab} > 0$$

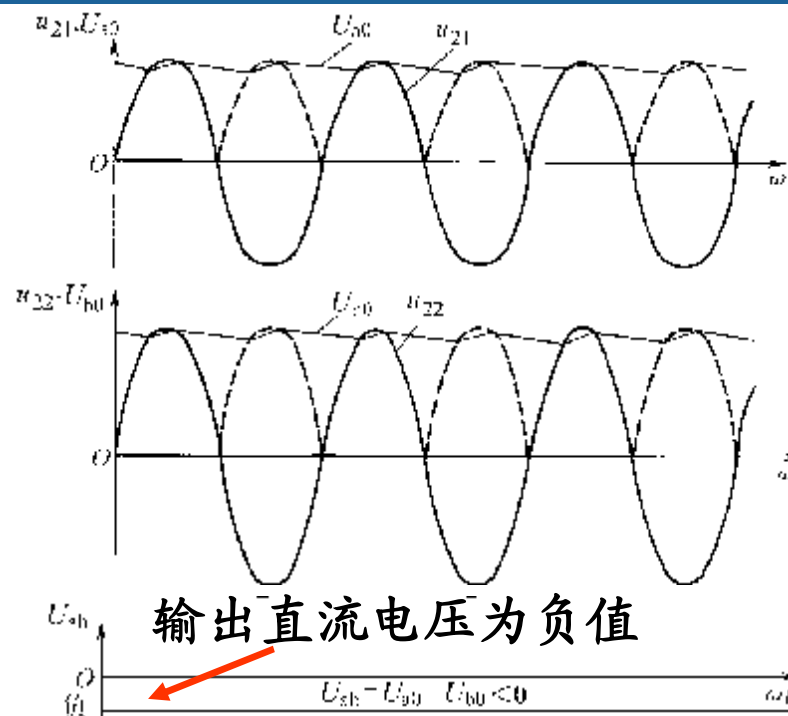


输出直流电压为正值

C_3 、 C_4 和 R_3 、 R_4 组成低通滤波电路，其时间常数 $\tau \geq 10T$ （ T 为激励源的周期）

工件直径 D 减小, 衔铁下移时的输出波形在第四象限, 可以从输出电压的正负值来判断衔铁位移的方向。

$$U_{a0} < U_{b0}, \quad \text{所以 } U_{ab} < 0$$



当差动变压器采用差动整流测量电路时, 应恰当设置二次绕组的电压, 使在衔铁最大位移时, 仍然能大于二极管的死区电压 (0.5V) 的10倍, 才能克服二极管的正向非线性性的影响, 减小测量误差。

差动整流的特点

电路是以两个桥路整流后的直流电压之差作为输出的，所以称为差动整流电路。它不但可以反映位移的大小（电压的幅值），还可以反映位移的方向。

上图中的RP是用来微调电路平衡的， $VD_1 \sim VD_4$ 、 $VD_5 \sim VD_8$ 组成普通桥式整流电路， C_3 、 C_4 、 R_3 、 R_4 组成低通滤波电路， A_1 及 R_{21} 、 R_{22} 、 R_f 、 R_{23} 组成差动减法放大器，用于克服a、b两点的对地共模电压。

线性差动变压器 (LVDT)

随着微电子技术的发展，目前已能将差动整流电路中的激励源、相敏或差动整流电路、信号放大电路、温度补偿电路等做成厚膜电路，装入差动变压器的外壳（靠近电缆引出部位）内，它的输出信号可设计成符合国家标准的1~5V或4~20mA，这种型式的差动变压器称为线性差动变压器。

