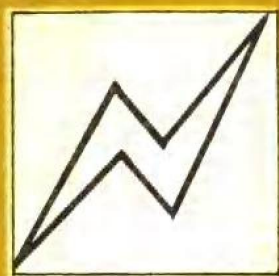
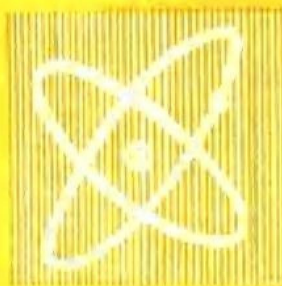
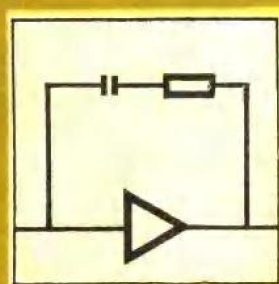
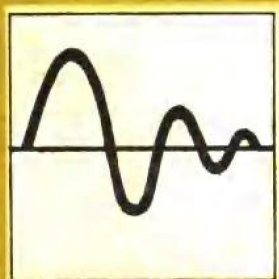
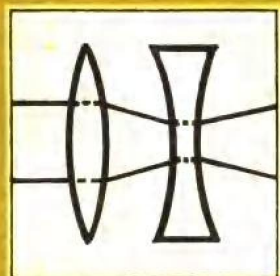


高等学校试用教材



几何量电测量仪

哈尔滨工业大学强锡富 主编



机械工业出版社

前 言

这本教材是根据 1978 年 4 月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会精神和同年 7 月在天津召开的精密计量仪器专业有关课程教材会议制订的《几何量电测量仪》教材编写大纲编写的。

近年来,几何量电测量仪发展很快,这本教材基本上反映了这种情况。书中收集的材料大都比较成熟,经过使用检验,加以总结并使之条理化。本书正文共分五章,分别为:传感器、模拟式量仪、数字式量仪、自动分选机、主动测量仪。传感器一章编写了几何量测量仪器中常用的 10 种,着重说明工作原理,同时也给出一些设计计算方法。二、三两章先叙述组成部件,然后以典型仪器作为实例,力求反映其概貌。四、五两章是自动量仪,它们与电测量仪关系紧密,也可说是电测量仪的一个方面,所以编入本教材。

本书可作为高等学校精密计量仪器专业学生的试用教材,亦可供其他有关专业学生和有关工程技术人员参考。

本书由哈尔滨工业大学副教授强锡富担任主编,参加编写的有天津大学张国雄、金篆芷、李金泉、合肥工业大学任光辉、高时安、哈尔滨工业大学强锡富、于汶等同志。中国计量科学研究院毛启广同志担任主审,参加审查的还有中国计量科学研究院其他同志。

由于我们的政治思想水平和业务水平有限,实践经验又少,加之时间仓促,不当和错误之处,在所难免,恳切希望读者提出批评和宝贵意见。

目 录

绪 言	1	一、计量光栅的类型	41
第一章 传感器	3	二、莫尔条纹形成原理及其特点	43
§ 1-1 电感传感器	3	三、光栅常用的光路	46
一、工作原理	3	四、结构举例	48
二、类型	3	五、设计要点	49
三、结构举例	7	§ 1-8 感应同步器	53
四、转换电路	9	一、工作原理	54
五、传感器灵敏度	11	二、类型与结构	55
六、零点残余电压	12	三、信号处理方式	58
七、参数选择	14	四、设计要点	60
§ 1-2 互感传感器	15	§ 1-9 磁栅传感器	62
一、工作原理	15	一、磁栅	62
二、类型	16	二、磁头	63
三、结构举例	19	三、信号处理方式	65
四、转换电路	19	§ 1-10 激光传感器	66
五、零点残余电压的补偿	20	一、激光干涉传感器	66
§ 1-3 电容传感器	21	二、激光衍射传感器	69
一、工作原理和类型	22	三、激光扫描传感器	70
二、结构举例	22	§ 1-11 各种传感器的比较	70
三、转换电路	23	第二章 模拟式量仪	73
四、参数选择	26	§ 2-1 概述	73
§ 1-4 电触传感器	26	§ 2-2 测微放大电路	73
一、工作原理	26	一、调幅电路	73
二、结构与电路举例	27	二、调频电路	77
三、误差及其测定	30	三、脉宽调制电路	77
四、设计要点	30	四、运算式调制电路	79
§ 1-5 压电传感器	31	§ 2-3 信号分离电路	81
一、压电效应与压电材料	31	一、滤波器	81
二、压电晶片的等效电路	33	二、谐波分解电路	88
三、双片悬臂元件	34	§ 2-4 运算电路	90
四、结构举例	35	一、峰值电路	90
五、压电测量电路	35	二、算术平均偏差和均方根偏差的运算 电路	91
§ 1-6 光电传感器	38	三、支承系数 t_p 的运算电路	93
一、工作原理与类型	38	§ 2-5 指示表和平均表	94
二、光电元件	39	一、指示表	94
三、光电转换电路	41	二、平均表	95
§ 1-7 光栅传感器	41		

IV

§ 2-6 记录器	96	一、仪器的基本原理	195
一、概述	96	二、光电转换与前置放大器	197
二、划线方法	98	三、开门脉冲及关门脉冲形成电路	198
三、记录头的特性	98	四、量程选择电路	200
四、记录器举例	100	五、门电路与计数器、寄存器	201
§ 2-7 电动测微仪	104	六、数-模转换电路	202
一、概述	104	§ 3-9 感应同步器数显装置	206
二、电动测微仪举例	104	一、仪器的工作原理	206
三、操作方法和维护	113	二、前置放大器、滤波器及误差放 大器	207
四、精度指标及对各部件的要求	114	三、门槛电路	209
§ 2-8 轮廓仪	115	四、时序控制脉冲形成电路	210
一、表面光洁度的概念及评定准则	115	五、逻辑控制电路	211
二、轮廓仪的原理与类型	117	六、显示计数器和转换计数器	215
三、轮廓仪举例	119	七、数-模转换电路	216
四、轮廓仪的修理	126	第四章 自动分选机	218
第三章 数字式量仪	129	§ 4-1 自动分选机的组成	218
§ 3-1 概述	129	一、上料装置	218
§ 3-2 电子细分	130	二、运送机构	224
一、非调制信号细分法	131	三、测量部件	226
二、调制信号细分法	141	四、执行机构	227
三、锁相倍频细分法	156	§ 4-2 自动分选机举例	229
四、各种细分方法的比较	157	一、圆柱滚子自动分选机	229
§ 3-3 辨向	158	二、轴承套圈外径自动分选机	236
一、辨向原理	158	§ 4-3 自动分选机的误差测定	239
二、辨向电路举例	159	一、实测法	239
三、符号显示和加减计数控制电路	161	二、分错率法	240
§ 3-4 电子计数器	163	三、双标准件法	241
一、非同步计数器	164	四、电表指示法	242
二、同步计数器	168	§ 4-4 自动分选机的设计要点	242
三、置数、比数及求补电路	172	第五章 主动测量仪	245
§ 3-5 脉冲当量换算电路	176	§ 5-1 自动定寸仪	245
一、乘法器(累加器)	176	一、自动定寸仪的功用与类型	245
二、脉冲删增电路	180	二、自动定寸仪的测量装置	246
§ 3-6 数字打印机	185	三、自动定寸仪的测量控制电路	254
一、碰撞式打印机	185	四、自动定寸仪的误差分析	261
二、非碰撞式打印机	186	五、自动定寸仪的设计要点	262
三、LY4型数字打印机的工作原理	187	§ 5-2 自动补调仪	263
§ 3-7 数显电感测微仪	189	一、自动补调的功用与方法	263
一、模-数(A-D)转换的工作原理	189	二、自动补调仪的测量装置	264
二、工作过程	192	三、自动补调仪的误差及警告界限 的确定	267
三、主要电路—积分器和鉴零器	193		
§ 3-8 传动链测试仪	195		

绪 言

几何量电测量仪（常称“电动量仪”）是指把被测量转换成电信号进行测量的几何量计量仪器。在仪器的瞄准和读数两大部份中，只要有一部分是上述情况，就可称为电测量仪。目前在生产和科研中广泛使用的电动测微仪、轮廓仪、圆度仪、光电显微镜、光电自准光管、电动式齿轮测量仪、电动式丝杠测量仪、电动式自动分选机、电动式主动测量仪等等都属电测量仪。

近代几何量计量仪器，正逐步从机械式、光学式、光学机械式、单纯电测式，发展成为光、机、电相结合的新型量仪，往往在仪器的某些重要部位如瞄准定位系统、转换处理系统、显示读数系统中采用了电测量仪技术。可以说，在近代高效率、自动化、数字化量仪以及动态检测和自适应控制测量系统中，电测量仪技术是必不可少的基本组成部份，占有十分重要的地位。

电测量仪的工作原理是把被测参数（直线位移、角位移等）的变化，转换成电信号，再经过电子放大或运算等处理后，推动显示执行机构动作。显然，电测量仪主要由三部份组成：传感器、测量电路和显示执行机构。传感器又称电测头，它直接与被测对象发生关系，感受被测参数的变化，并将它转换为传感器电参数的变化。测量电路的任务是把传感器电参数的变化测量出来，把它转换成电信号，进行适当处理。成为人们需要的形式，并进行放大，足以驱动显示执行机构。显示执行机构可以是表头、数字显示器、自动记录器、自动打印机，也可以是把工件自动分组的机构或控制机床动作的机构等。

电测量仪可根据用途分类，如分为测微仪、轮廓仪、圆度仪、渐开线测量仪、电子水平仪等等。可根据传感器原理分类，如电感式、电容式、压电式、光栅式、磁栅式、感应同步器式等等。可根据自动化程度分类，如手动的、半自动的、全自动的等。例如有一台电感式半自动齿轮周节检查仪，这个名称就把仪器的用途、自动化程度、传感器原理都指明了。

由于电路原理不同，可分为模拟式量仪和数字式量仪两大类。图 0-1 所示为模拟式量仪按信号走向的组成方块图。电箱中的测微放大电路的作用，是把传感器送来的测量信号进行放大和处理，得到一个与被测参数变化完全对立的可以推动表头、记录器或其他执行机构的电信号。信号分离电路的作用，是把有用信号分离出来，或把无用的信号消除掉。运算电路的作用是对测量信号进行运算，以便获得人们需要的测量结果。

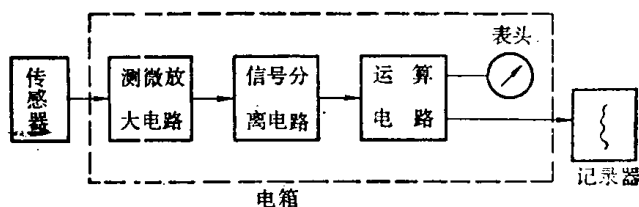


图 0-1

图 0-2 所示是增量码数字式量仪的大致方框图。传感器输出的一般是周期信号，经放大整形后，由细分电路进行细分，由辨向电路进行辨向。脉冲当量变换电路的作用是变换当量值。可逆计数器根据被测参数变化方向进行计数，最后进行译码显示，或送打印机打印。由于传感器原理不同、信号编码方式不同，数字式量仪的构成也有很大差别，这些问题将在第

三章叙述。

不管是模拟式量仪，还是数字式量仪，因测量对象不同、测量要求不同、自动化程度不同，还将具有某些特定环节及某些控制电路。这两类量仪的划分也不是绝对的，就是说，数字式量仪中也有模拟电路环节，模拟式量仪中也可能有数字电路环节。

电测量仪具有下列特点：（1）精度高。例如在目前生产条件下，电动测微仪的精度能达到 $0.02\mu\text{m}$ ，因而能应用于实验室作为高精度仪器，以检定标准量具和量仪。（2）测量

信号能远距传送，并可在一般机械量仪、光学量仪不能进行测量的地方进行测量。

测头体积可做得很小，并能和读数装置分开，把测头装在被测对象处，而指示表或显示器可放在较合适的地方。（3）能进行和差测量或其它演算测量，能较方便地精密测量如不平行度、不柱度、不圆度、直径平均值等。（4）能进行多点切换测

量。如复杂工件的若干个尺寸，可以使用

若干个测头，用多点切换快速逐点测量。（5）换档方便。可以按被测工件的测量需要，改换分度值和示值范围。（6）测量结果自动记录或自动打印，以便分析研究和长期保存。（7）可按一定程序对复杂工件进行测量，测量结果自动地送计算机或其他计算电路计算和处理，大大提高工作效率。（8）易于实现检验自动化，其中包括对加工后的工件进行自动分选，或在加工过程中对工件进行主动测量等。

电测量仪出现在二十世纪三十年代初。随着电子技术及其他新技术的发展而得到异常迅速的发展。目前，我国已能制造各种类型的电测量仪，其中水平较高的有精度达到 $0.01\mu\text{m}$ 的数显电感测微仪、检查一米线纹尺误差为 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 的激光光波自动比长仪、能测出全误差的光栅式齿轮单面啮合综合检查仪等，标志着我国电测量仪领域已经达到一定的水平。

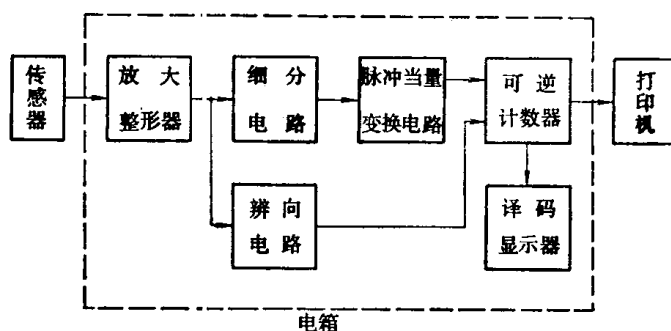


图 0-2

第一章 传 感 器

传感器是电测量仪的重要组成部分之一。传感器的作用是感受被测对象的微小变化，并精确地转换成电路参量（如电感、互感、电容等）的变化，或者转换成电量（例如电压、电荷等）的变化。前者属于参量传感器一类，将此参量接入转换电路后，即可转换成电信号，经放大或适当处理后用指示仪表指示出来。后者属于发电传感器一类，因为它们直接发出电信号，所以一般可直接送去放大和处理，再用指示仪表指示出来。

传感器担负着感受与传送“第一手信息”的重要任务，它的质量好坏将对整台仪器的全局有着举足轻重的影响。对它的主要要求是，工作可靠、精度高、长期工作稳定性好、温度稳定性好。此外，亦应考虑结构简单、使用维护方便、抗干扰能力强等要求。

根据用途、结构类型和工作原理的不同，传感器是多种多样的。下面只按工作原理选择常用的几种加以介绍。

§ 1-1 电 感 传 感 器

一、工作原理

电感传感器的作用是把被测工件几何量的微小变化转换成电感 L 的变化。当把电感 L 接入一定的转换电路，便可转换成电信号。

如图 1-1 所示，在用导磁体做成的铁心 2 上绕一个线圈 1，铁心的下方放置一个用导磁体做成的衔铁 3，测杆 4 与其固接在一起，这便成了一个简单的电感传感器。在线圈上接以交流电源 u ，在测杆下放入被测工件 5，由电流表 A 读取电流值。可以发现，不同的被测工件，尽管电源电压不变，电流读数不同，说明线圈的电感值有了变化。这电感值的变化是由于被测工件尺寸改变引起测杆和衔铁位移致使气隙厚度 δ 改变而造成的。

由此可见，可以利用电流变化来表示工件尺寸的变化，这就实现了“测量”。还可看出，电感传感器的核心部分是一个可变电感。

二、类型

1. 气隙型

图 1-1 所示的传感器是通过气隙 δ 变化而使电感变化的，因此称为气隙型。

线圈的电感可按下式计算：

$$L = w^2 / R_m \quad [\text{H}] \quad (1-1)$$

式中 w ——线圈匝数；

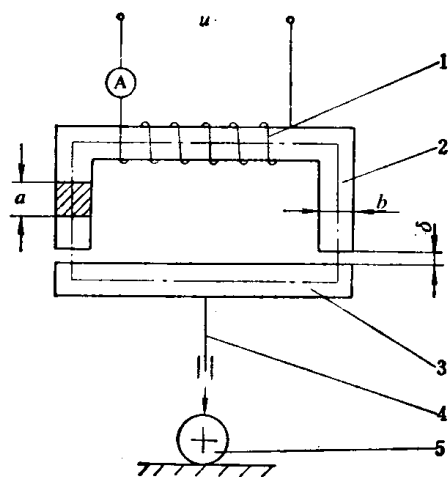


图 1-1

R_m ——磁路（图 1-1 中点划线表示磁路）的总磁阻。

对于图 1-1 所示的情况，若空气隙 δ 较小，且不考虑磁路的铁损，则总磁阻为

$$R_m = \sum \frac{l_i}{\mu_i S_i} + \frac{2\delta}{\mu_0 S} \quad [\text{H}^{-1}]$$

式中 l_i ——各段导磁体的长度 (m)；

μ_i ——各段导磁体的导磁系数；

S_i ——各段导磁体的截面积 (m^2)；

μ_0 ——空气的导磁系数， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ；

S ——空气隙截面积 ($S = a \cdot b$, m^2)。

一般，导磁体的磁阻与空气隙的磁阻相比是很小的，计算时可忽略之，则上式电感值为

$$L = w^2 \mu_0 S / 2\delta \quad (1-2)$$

由此可见， L 与 δ 的关系为双曲线，如图 1-2 所示。若工作点选在 δ_0 (原始气隙)，相应地电感为 L_0 ，则当气隙有了增量 $\Delta\delta$ 时，电感增量 ΔL 为

$$\Delta L = \frac{w^2 \mu_0 S}{2(\delta_0 - \Delta\delta)} - \frac{w^2 \mu_0 S}{2\delta_0} = L_0 \left[\frac{\Delta\delta}{\delta_0 - \Delta\delta} \right] \quad (1-3)$$

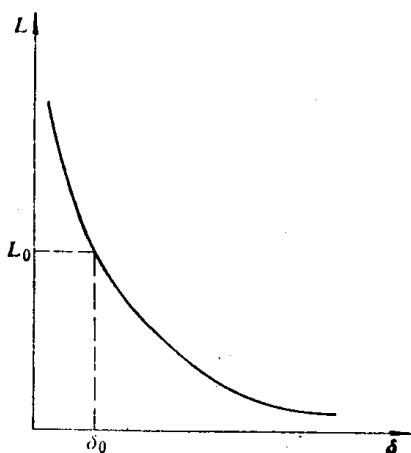


图 1-2

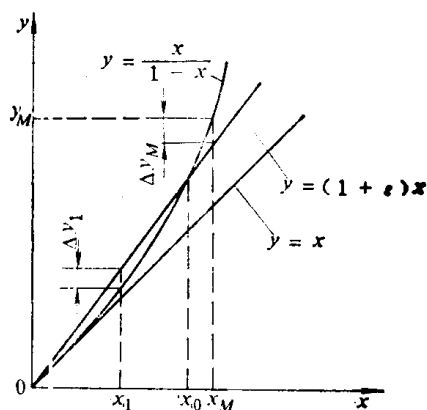


图 1-3

可见 $L-\delta$ 特性不是线性的，粗略地作线性化处理，可忽略式 (1-3) 分母中的 $\Delta\delta$ ，则得

$$\Delta L = L_0 \Delta\delta / \delta_0 \quad (1-4)$$

式 (1-4) 只是粗略地表示出电感增量与气隙增量之间的关系。

取 $y = \Delta L / L_0$ ， $x = \Delta\delta / \delta_0$ ，则式 (1-3) 可写成

$$y = \frac{x}{1 - x} \quad (1-5)$$

这是电感相对增量与气隙相对增量之间的关系方程式。若用线性方程 $y = x$ ，即式 (1-4) 来代替，如图 1-3 所示，显然非线性误差太大。为此采取线性方程 $y = (1 + \epsilon)x$ ，并使其在最大量程 x_M 处产生的正误差 Δy_M 和在 x_1 处产生的负误差 Δy_1 ，在数值上相等，即取

$$\Delta y_1 = -\Delta y_M \quad (1-6)$$

ϵ 为接近 0 的小正数。因为原始方程与线性方程之差为

$$\Delta y = \frac{x}{1 - x} - (1 + \epsilon)x \quad (1-7)$$

x_1 点的位置可按 $\frac{d(\Delta y)}{dx} = \frac{1}{(1-x)^2} - (1+\varepsilon) \Big|_{x=x_1} = 0$ 求得, 即

$$x_1 = 1 - 1/\sqrt{1+\varepsilon}$$

将 x_1 代入式 (1-7) 得

$$\Delta y_1 = 2\sqrt{1+\varepsilon} - (1+\varepsilon) - 1 = 2\left(1 + \frac{\varepsilon}{2} - \frac{\varepsilon^2}{8}\right) - (1+\varepsilon) - 1 = -\frac{\varepsilon^2}{4}$$

把 $x = x_M$ 代入式 (1-7), 并考虑到式 (1-6) 可得

$$\frac{x_M}{1-x_M} - (1+\varepsilon)x_M = \frac{\varepsilon^2}{4}$$

即

$$\varepsilon^2 + 4x_M\varepsilon - \frac{4x_M^2}{1-x_M} = 0$$

得

$$\varepsilon = 2x_M \left(\sqrt{\frac{2-x_M}{1-x_M}} - 1 \right) \quad (1-8)$$

式 (1-8) 表示在满足 $\Delta y_1 = -\Delta y_M$ 的条件下, ε 与 x_M 的关系。

设非线性相对误差为 η , 则

$$\eta = \frac{\Delta y_M}{y_M} = \frac{\frac{x_M}{1-x_M} - (1+\varepsilon)x_M}{\frac{x_M}{1-x_M}} = 3x_M - 2x_M^2 - 2x_M\sqrt{(2-x_M)(1-x_M)}$$

$$\approx 3x_M - 2x_M^2 - 2\sqrt{2}x_M \left(1 - \frac{3}{4}x_M + \frac{x_M^2}{4} \right)$$

忽略 x_M^3 项, 可得

$$x_M^2 + \sqrt{2}x_M - (4 + 3\sqrt{2})\eta = 0$$

$$\text{则 } x_M = -\frac{\sqrt{2}}{2} + \sqrt{\frac{1}{2} + (4 + 3\sqrt{2})\eta} \approx (3 + 2\sqrt{2})\eta \quad (1-9)$$

根据式 (1-9), 可按给定的量程求最大的非线性误差, 也可按给定的非线性误差求最大量程。例如, 选取 $\eta = 0.01$, 则 $x_M = 0.058 \approx 1/17$, 即 $\Delta\delta_{\max} = \delta_0/17$ 。

可见, 这种单线圈式电感传感器的线性不好, 所以在实际中大都采用差动式。如图 1-4 所示, 这里有两个电感线圈, 当衔铁位置变动 $\Delta\delta$ 时, 一个线圈电感量增加, 一个线圈电感量减小, 电感总变化量为

$$\Delta L_z = L_1 - L_2 = \left[\frac{w^2\mu_0 S}{2(\delta_0 - \Delta\delta)} - \frac{w^2\mu_0 S}{2(\delta_0 + \Delta\delta)} \right] = 2L_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0 - (\Delta\delta)^2/\delta_0} \quad (1-10)$$

令 $y = \Delta L_z/2L_0$, $x = \Delta\delta/\delta_0$, 则式 (1-10) 可写成

$$y = \frac{x}{1-x^2} \quad (1-11)$$

利用上述相同的方法求解, 可得下列关系

$$x_M = 2\sqrt{\eta} \quad (1-12)$$

若选取 $\eta = 0.01$, 则 $x_M = 0.2 = 1/5$, 即 $\Delta\delta_{\max} = \delta_0/5$ 。

由此可见, 差动式的与单线圈的相比, 具有线性好的优点。当气隙变化时, 差动式的电

感变化是单线圈的两倍,说明其灵敏度高。此外,温度变化、电源波动、外界干扰等对传感器精度的影响,由于能互相抵消而减小;电磁吸力对测力变化的影响也由于能互相抵消而减小。因此,在实际中大都采用差动式。单线圈式的由于结构简单,有时也应用于要求不高的场合。这些结论对下面讨论的截面型及管型电感传感器也同样适合。

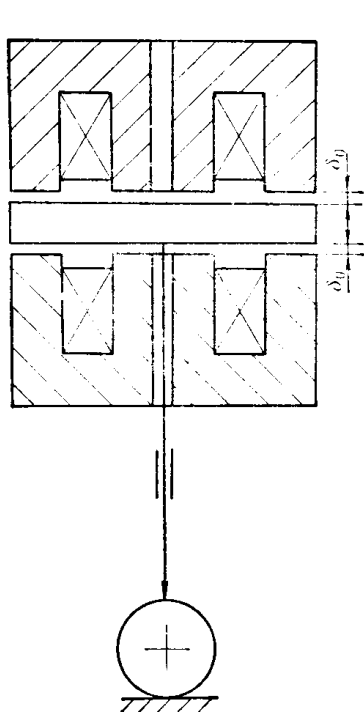


图 1-4

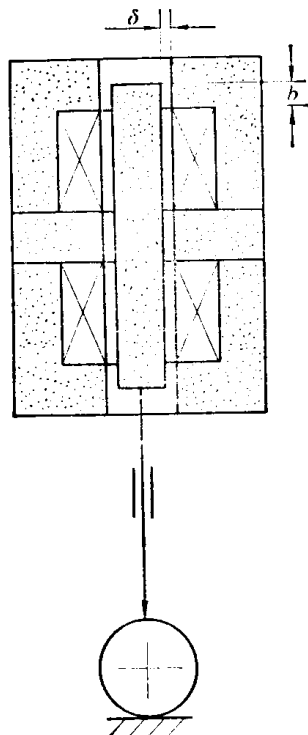


图 1-5

2. 截面型

图 1-5 所示是截面型差动式电感传感器原理图,它是通过导磁截面积的变化而使电感变化的。因为上下线圈通电时在中段气隙部分产生的磁通,由于方向相反而基本抵消,则可认为没有磁压降。若忽略导磁体部分的磁阻,则线圈电感为

$$L = \frac{\mu_0 S w^2}{\delta} \quad (1-13)$$

式中 $S = ab$;

b ——磁芯和磁环覆盖宽度;

a ——气隙环平均周长。

在原始状态, $b = b_0$, $L = L_0 = \frac{\mu_0 a b_0 w^2}{\delta}$, 当测杆位移 Δb 时, 电感增量为

$$\Delta L = L_0 \Delta b / b_0 \quad (1-14)$$

式 (1-14) 说明, 这类传感器的特性是线性的。但实际上由于边缘磁通等因素的影响, 仍存在非线性误差, 不过, 与前一类相比要好得多。

3. 管型

如图 1-6 所示, 线圈呈管状, 磁芯置于线圈的中部。由于磁路不是封闭的, 线圈长度又是有限的, 当给线圈通以电流时, 线圈内的磁场不是均匀的, 要精确计算线圈电感值有一定困难。若忽略一些次要因素, 同时用平均磁场强度进行计算, 假定 $h \gg R$, 则单个空心线圈

的电感值为

$$L = \frac{\mu_0 \pi R^2 w^2}{h} \quad (1-15)$$

式中 h ——线圈高度;

R ——线圈平均半径。

当长度与线圈高度相同、半径为 r 的磁芯放入线圈后, 电感值为

$$L = \frac{\mu_0 \pi w^2}{h} [R^2 + (\mu_r - 1)r^2]$$

式中 μ_r ——磁芯的相对导磁系数。

当磁芯伸入线圈的深度 $t < h$ 时, 单个线圈的电感值为

$$L = \frac{\mu_0 \pi w^2}{h} \left[R^2 + \frac{t}{h} (\mu_r - 1) r^2 \right] \quad (1-16)$$

在原始状态 $t = t_0$, $L = L_0$; 当 t_0 有增量 Δt 时, 电感增量为

$$\begin{aligned} \Delta L &= \frac{\mu_0 \pi w^2}{h^2} (\mu_r - 1) r^2 \Delta t \\ &= L_0 \Delta t / \left[1 + \frac{h}{t_0} \left(\frac{R}{r} \right)^2 \left(\frac{1}{\mu_r} - 1 \right) \right] t_0 \end{aligned} \quad (1-17)$$

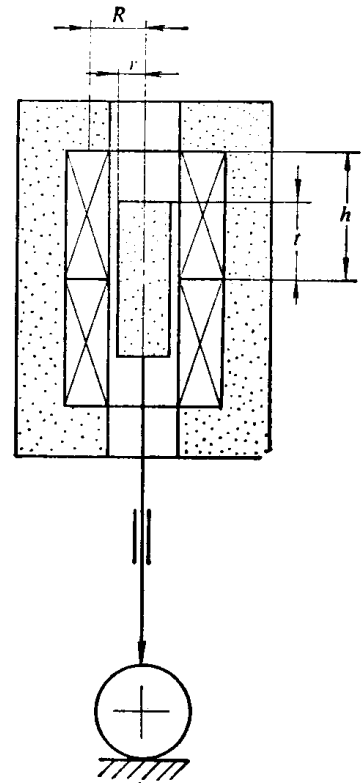


图 1-6

把上述三种类型比较一下。气隙型电感传感器灵敏度高, 因为原始气隙 δ_0 一般取得很小 ($0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$), 由式 (1-4) 可以看出, 当 $\Delta \delta = 1 \mu\text{m}$ 时, 电感相对变化量 $\Delta L/L_0$ 可达 $1/100 \sim 1/500$, 因而它对电路的放大倍数要求就低。它的主要缺点是: 非线性严重, 为了限制非线性误差, 示值范围只能较小; 它的自由行程小, 因为衔铁在运动方向上受铁心限制; 制造装配困难。由于这些原因, 近年来这种类型的使用逐渐减少, 不过在一些特殊场合还使用它。截面型电感传感器灵敏度较低, 这是因为 b_0 值一般取为 ($2 \sim 5$) mm, 由式 (1-14) 可见, 当 $\Delta b = 1 \mu\text{m}$, $\Delta L/L_0$ 将为数千分之一。若人为地把 b_0 值取小, 由于边缘磁通的存在, 其等效值仍较大, 且线性变坏。截面型的优点是具有较好的线性, 因而示值范围可取大些, 自由行程可按需要安排, 制造装配方便。管型电感传感器的灵敏度比截面型的更低, 但它也具备示值范围大, 自由行程任意安排, 制造装配方便等优点。此外, 管型与截面型相比, 批量生产中的互换性强, 即截面型传感器往往要和仪器电路配对使用, 不易互换, 而管型传感器较能保证其特性大体一致, 这对装配、调试、使用都带来方便, 尤其在需要使用两个 (和差测量) 或多个 (多点测量) 传感器时, 这一点更为重要。由于具备这些优点, 而灵敏度低的缺点可在放大电路方面加以解决, 因此目前管型传感器的应用越来越多。

三、结构举例

图 1-7 所示是一个轴向测量的电感传感器。可换的玛瑙测端 10 用螺纹拧在测杆 8 上, 测杆 8 可在滚珠导轨 7 上作轴向移动。这里滚珠有四排, 每排八粒, 尺寸差和形状误差都小于 $0.6 \mu\text{m}$, 选配时具有一定的过盈, 消除了径向间隙, 因而提高了测量精度, 且其灵敏性和寿

命都能达到较高指标。测杆的上端固定着磁芯 3，当测杆移动时，带动磁芯在电感线圈 4 中移动。线圈 4 置于磁筒 2 中。磁芯磁筒材料是铁氧体，型号 MX-1000。线圈匝数为 2×800 ，线径 $\phi 0.13$ ，每个电感约为 4mH 。两个电感线圈用导线 1 引出以便接入电路。测力由弹簧 5 产生，一般安排为 $0.2 \sim 0.4\text{N}$ 。防转件 6 用来限制测杆转动，以提高示值的重复性。密封件 9 用来防止尘土进入传感器内。外壳有标准直径 $\phi 8$ 和 $\phi 15$ 两个夹持部分，便于安装在其他仪器或比较仪座上使用。当要求安装刚度好时，最好夹持 $\phi 15$ 部分。

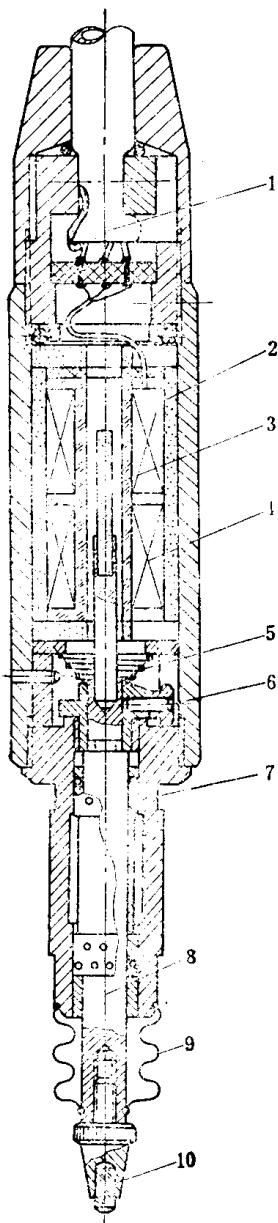


图 1-7

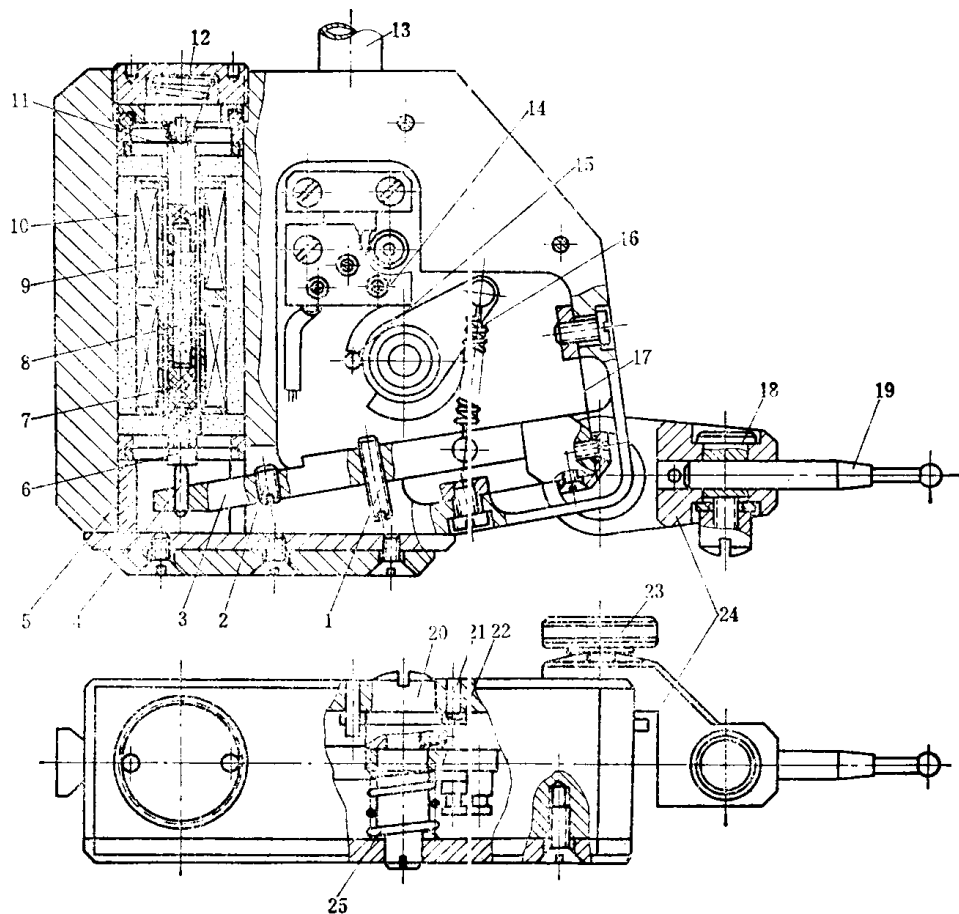


图 1-8

图 1-8 所示是一个杠杆式旁向测量的电感传感器。可换测杆 19 用锁紧件 18 紧固在测杆座 24 内。杠杆 3 用十字片簧 17 固定在壳体 5 上，并可绕其支点在一定角度内转动。杠杆右端有一圆柱头，测杆座 24 即固定在这一圆柱头上。杠杆左端装有触点 4，它通过触钉 6 和连杆 7 可使磁芯 8 在电感线圈 9 内移动。连杆 7 支持在两个圆片簧 11 上，电感线圈置于磁筒 10 内。测力由弹簧 12 和 16 产生。如图位置，由于 16 的弹力大于 12 的弹力，杠杆有一顺时针的测力。当顺时针转动测力换向机构 20 至另一位置时（此位置由换向机构上另一销钉孔确定），弹簧 16 失去作用，这时测力仅由弹簧 12 产生，因而杠杆有一逆时针的测力。这样该传感器既可顺时针测量，又可逆时针测量。在转动换向机构 20 时，先要将其向内压下，使销钉 21 与孔 22 分离，然后转动至另一位置（此转角由销钉 15 限程），此时由于弹簧 25 的作

用,使另一孔套入销钉 21。螺钉 1 和 2 用于限制杠杆的行程。两电感线圈由接线板 14 和导线 13 接入电路。松开螺钉 23 可以改变测杆座 24 和杠杆 3 的相对位置,以适应在不同的角度位置上进行测量。

从上述结构举例中可以看出,轴向测量的传感器的机械精度(如示值变差、回程误差、灵敏阈、径向受力误差等等)主要取决于测杆的导向形式和导向精度。目前使用的测杆导向形式有三种:滑动式、滚动式和片簧式,如图 1-9 所示。

滑动式:测杆与导套间具有间隙,工作时测杆将倾侧,造成示值变差,径向受力很敏感。测杆运动方向变化时摩擦力变号,引起回程误差。由于有摩擦,灵敏阈也较大。制造时一般要研配,以适当控制其间隙,但一旦磨损,精度将大大下降,因此使用寿命低。

滚动式:测杆与套筒之间装入几排钢珠,消除了间隙,且具有一点过盈,摩擦是滚动摩擦,比滑动摩擦小得多。因此,回程误差、示值变差、径向受力误差、灵敏阈等都比滑动式为小。滚动磨损也小,使用寿命长。

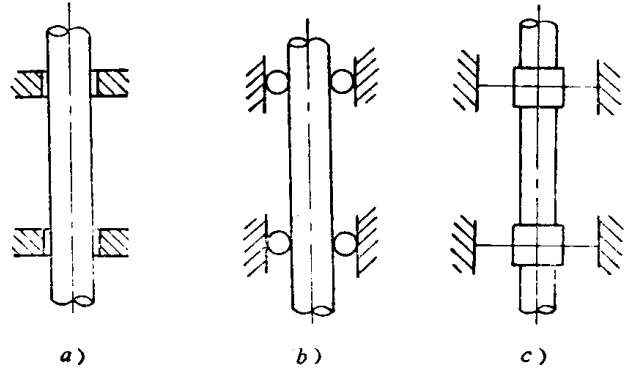


图 1-9

片簧式:将测杆支持在片簧上,片簧热处理质量要好,装配要求高,不能卡住。片簧导轨消除了间隙,摩擦基本没有(只存在分子摩擦)。因此,示值变差、回程误差、灵敏阈都很小,精度很高。缺点是测力变化大,径向受力较敏感,行程小(受片簧变形范围的限制),装配也较麻烦。由于要装片簧,传感器体积大。因此一般只用于高精度静态测量用的传感器。

对于杠杆式旁向测量传感器来说,机械精度主要决定于回转支承的形式和精度,亦可分为滑动式、滚动式和片簧式等。由于滑动式对精度影响太大,目前极少采用。滚动式的优点是无间隙,行程大,比较灵敏,缺点是怕尘土,制造也较麻烦。片簧式一般做成十字片簧的形式,优点是没有间隙,没有摩擦。缺点是测力变化大,行程比较小。且由于片簧比较娇,使用中若不注意,易于撞坏。有些传感器上做成单片片簧的形式,它与十字片簧比较,旋转中心不稳定,但结构要简单些,用于精度要求较低场合。

四、转换电路

电感传感器的转换电路的作用,是将电感量的变化转换成电压(或电流)信号,以便送入下级电路进行放大和处理。

电感传感器的转换电路通常采用桥路,此外也采用谐振电路。

图 1-10 所示为一电桥。电桥的两臂 Z_1 和 Z_2 为电感传感器两个线圈的阻抗(因为导线有电阻 r , 因此该阻抗可看成是电阻 r 与电感 L 的串联),另两臂为电源变压器次级线圈的两半(每半的电势为 u)。因为电桥有两臂是次级线圈,因此这种线路又称差动线路。电桥对角线上 A B 两点的电位差为空载输出电压 $u_{..}$ 。

假定接地的 B 点电位为零, D 点的电位为 u , C 点的电位为 $-u$, 则输出电压 $u_{..}$ 即为 A 点电位, 即

$$u_{sc} = u_A = u_D - \frac{u_D - u_C}{Z_1 + Z_2} Z_2 = -\frac{Z'_1 - Z_2}{Z'_1 + Z_2} u \quad (1-18)$$

下面分三种情况讨论:

(1) 当传感器的衔铁处于中间位置时, 两线圈的电感相等。若两线圈绕制很对称, 则阻抗也相等。因此 $Z_1 = Z_2 = Z$ (Z 表示 衔铁处于中间位置时每一线圈的阻抗)。将此代入上式得

$$u_{sc} = 0$$

这说明电桥平衡, 没有输出电压。

(2) 当测杆上升时, 上线圈阻抗增加, 即 $Z_1 = Z + \Delta Z$, 下线圈阻抗减少, 即 $Z_2 = Z - \Delta Z$ 。将此代入上式得

$$u_{sc} = \frac{\Delta Z}{Z} u \quad (1-19)$$

(3) 当测杆下降同样大小的位移时, 上线圈阻抗减小, 即 $Z_1 = Z - \Delta Z$, 下线圈阻抗增加, 即 $Z_2 = Z + \Delta Z$ 。将此代入前式得

$$u_{sc} = -\frac{\Delta Z}{Z} u$$

把此式与式 (1-19) 比较, 说明这两种情况的输出电压大小相等, 方向相反, 即相位差 180° 。

这两个式子所表达的输出电压都为交流信号, 如果用示波器去看它们的波形, 结果将是一样的。就是说, 只知道衔铁偏离中间若干位移, 但不知道是上升还是下降。为了要判别信号的相位 (方向), 要在后续电路中配置相敏整流器 (又称相敏检波器), 这个问题将在后面讨论。

因为 $Z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}$, $\Delta Z = \omega^2 L \Delta L / \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}$, 根据式 (1-19) 可算得输出电压有效值为

$$U_{sc} = \frac{\omega^2 L \Delta L}{r^2 + (\omega L)^2} U \quad (1-20)$$

因为 $U / \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} = I_0$ 为传感器平衡时通过线圈的电流, 上式可改写为

$$U_{sc} = \frac{\omega L}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} I_0 \omega \Delta L$$

当 $\omega L \gg r$ 时则得下式

$$U_{sc} = I_0 \omega \Delta L \quad (1-21)$$

这样, 可把图 1-10 a 的电路画成如图 1-10 b 所示的电路, 也就是等效为一个具有内阻为 $\sqrt{r^2 + (\omega L)^2} / 2$ 的电势源 u_{sc} 。根据这些等效参数来配置后面的放大器或其它电路。

此外, 还有采用如图 1-11 所示的各种桥路形式。图中 Z_1 、 Z_2 (Z'_1 、 Z'_2) 为传感器的线圈感抗, R 为桥臂电阻, u 为振荡电源。

总的说来, 图 1-10 所示的桥路目前采用较多, 因为这种桥路有两臂是振荡变压器次级线圈, 有两臂是电感传感器的线圈, 使用元件最少。而且这种桥路的内阻最小。

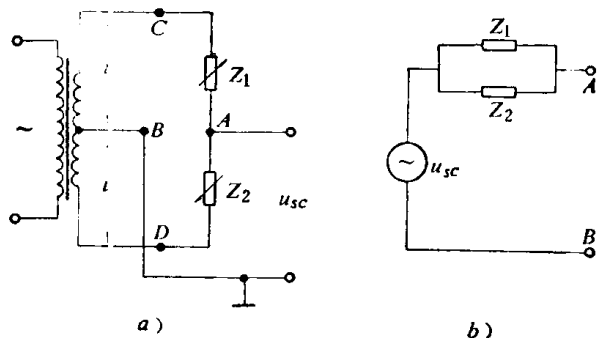


图 1-10

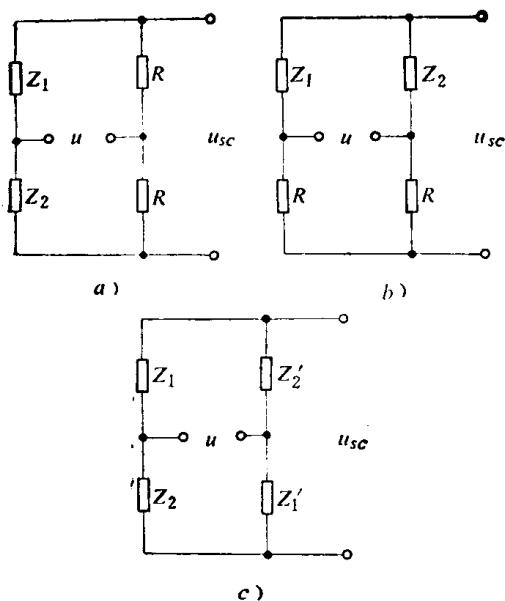


图 1-11

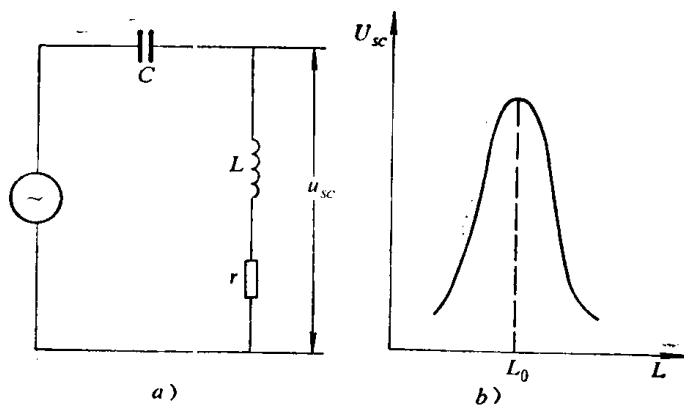


图 1-12

图 1-12 a 所示为单线圈电感传感器的电感线圈（电感 L 、电阻 r ）与电容 C 接成的串联谐振电路。图 1-12 b 所示为输出电压 U_{sc} 与电感 L 的关系曲线，其中 L_0 为谐振点的电感值。实际应用时可以使用特性曲线一侧接近线性的一段。这种线路的灵敏度很高，但线性不好，适用于线性要求不高的场合。

五、传感器灵敏度

传感器的灵敏度 k_g 定义为电感量相对变化与引起这一变化的测杆位移之比，即

$$k_g = \frac{\Delta L}{L} / \Delta x \quad (1-22)$$

式中 $\Delta L/L$ ——电感量相对变化；

Δx ——测杆位移。

为了获得电压信号，传感器的电感还必须接入转换电路。转换电路的灵敏度 k_d 定义为

$$k_d = U_{sc} / \frac{\Delta L}{L} \quad (1-23)$$

式中 U_{sc} ——空载输出电压。

由上可见，传感器灵敏度取决于传感器类型及其结构参数，转换电路灵敏度取决于电路形式及其参数。

必须指出，一般习惯上所谓传感器灵敏度是指传感器和转换电路二级的总灵敏度，也就是当测杆位移一个单位值（例如 $1\mu\text{m}$ ）时转换电路所输出的电压。由式（1-22）、（1-23）可得总灵敏度 k_z 为

$$k_z = k_g k_d = U_{sc} / \Delta x \quad [\text{V}/\text{m}] \quad (1-24)$$

假定采用了气隙型传感器，由式（1-4）可得 $k_g = 1/\delta_0$ ；采用图 1-10 所示的桥路，由式（1-20）可得 $k_d = U(\omega L)^2 / [r^2 + (\omega L)^2]$ 。总灵敏度将为

$$k_z = \frac{U_{sc}}{\Delta \delta} = \frac{(\omega L)^2}{r^2 + (\omega L)^2} \cdot \frac{1}{\delta_0} \cdot U \quad (1-25)$$

可见，传感器总灵敏度是三项的乘积。第一项决定于转换电路形式，如果采用其它电路，它

是要相应地改变的。第二项决定于传感器的类型,对气隙型传感器,它等于 $1/\delta_0$; 对管式传感器,它等于 $1/t_0 \left[1 + \frac{h}{t_0} \left(\frac{R}{r} \right)^2 \left(\frac{1}{\mu_r - 1} \right) \right]$ 。第三项决定于供电电源 U 值。

实际出厂的电感式量仪,常常在说明书中写明其传感器总灵敏度。例如图 1-7 所示的传感器,它配用图 1-10 所示的桥路,其总灵敏度大致为 $0.14\text{mV}/\mu\text{m}$ ($U=1\text{V}$),也就是说,当电桥供电电压 U 为 1V 时,测杆位移为 $1\mu\text{m}$ 时,电桥对角线上输出电压信号为 0.14mV 。

六、零点残余电压

前面在讨论桥路输出电压时曾说过,当两线圈的电阻 r 相等、两线圈的电感 L 相等时,输出电压等于零。实际上,这种情况是不能精确达到的。就是说不易达到交流电桥的绝对平衡。若画出磁芯位移与电桥输出信号电压有效值的关系曲线,如图 1-13 所示,虚线所示为理想特性曲线,实线所示为实际特性曲线。当磁芯处于中间时,空载输出电压 U_x 不等于零,而有零点残余电压 e_0 存在。

如果零点残余电压过大,非线性误差增大,不同档位的放大倍数有显著差别,甚至造成放大器末级趋于饱和,使仪器电路不能正常工作。在仪器的放大倍数较大时,这一点尤应注意。

因此,零点残余电压的大小是判别传感器质量的重要指标之一。在制造传感器时,要规定其零点残余电压不得超过某一定值。例如某电感测微仪的传感器,经 200 倍放大后,在放大器末级测量,零点残余电压不得超过 15mV ; 某电感轮廓仪的传感器,在 2000 倍的放大器末级测量,零点残余电压不得超过 80mV 。仪器在使用过程中,若有迹象表明传感器的零点残余电压太大,就要进行调整。

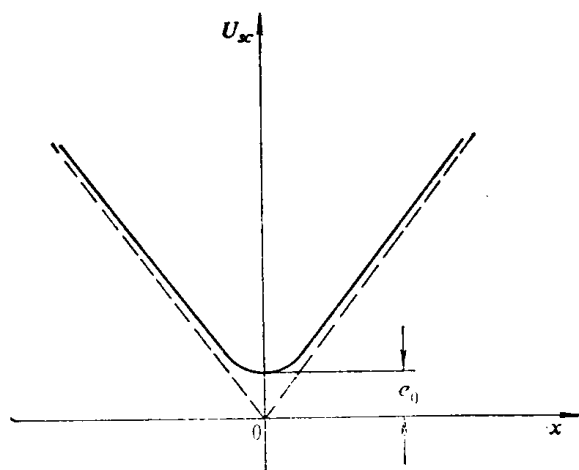


图 1-13

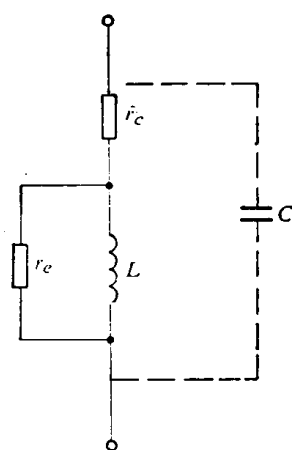


图 1-14

造成零点残余电压的原因,总的说来,是两电感线圈的等效参数不对称。电感线圈的等效电路如图 1-14 所示。其中 L ——电感; r_c ——铜损电阻; r_e ——铁损电阻(铁心中的涡流损耗); C ——线圈匝间电容。由于两线圈绕制时排列松紧不可能完全一样,两个 r_c 不会完全相等。由于上下磁路不对称,上下磁性材料的特性不一致,两个 r_e 也不会完全相同。这些都是引起零点残余电压的因素。为了尽可能地减小零点残余电压,在设计和制造上应采取适当的措施:线圈排列要均匀、松紧要一致,最好每层的匝数都相等;上下磁路一定要对称,磁筒、磁盖、磁芯要配套挑选;设计时尽量减小 r_e 、增大 L ,提高线圈的品质因数。至于匝

间电容 C ，其值较小，在高频时要考虑，在音频范围内关系不大。

为了进一步减小残余电压，在生产时一般要进行必要的调整。如图 1-15 所示，首先用试探法在其中一臂串入一个电阻 R_1 ，可用电位器，也可用康铜丝。串入哪一臂应视残余电压是否有所减小而定。调 R_1 的大小（其值约为 $0.1 \sim 5\Omega$ ）使两线圈电阻分量达到平衡。调整时用示波器观察放大器末级输出，一面调 R_1 ，一面移动磁芯的位置，直至示波器上没有基波

（振荡电源频率）信号为止。但这时还会剩下二次或三次谐波，这是由于传感器磁芯的磁化曲线非线性所致。虽然外加电压（振荡电源）是正弦的，而通过线圈的电流却产生了畸变，包含了高次谐波，又因两线圈的非线性不一致，高次谐波不能完全抵消，就在输出电压中显了出来。对此一方面要在制造时精心挑选磁性零件，使它们配套，另外在调整中用并联电阻 R_2 （数十至数百千欧）的方法，对某一线圈分流，使流入该线圈的电流变化，改变磁化曲线上的工作点，从而改变其谐波分量，将高次谐波减至最小。

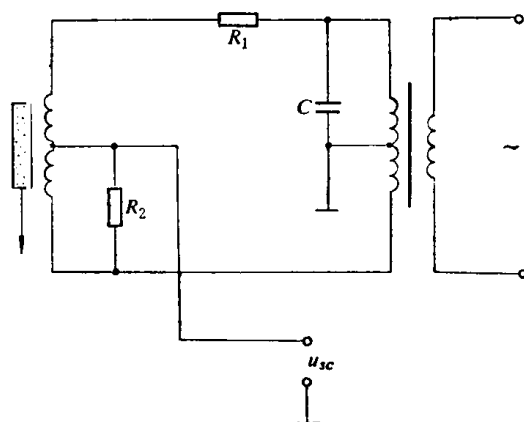


图 1-15

此外，有时因振荡变压器次级线圈不对称，其电压相位不是呈 180° 而引起较大的零点残余电压，这时可将传感器拔去，用两个阻值相同的电阻接入桥路，用试探法在次级线圈上并一电容，其值为 $100 \sim 500\text{pF}$ ，直至零点残余电压达到最小为止。

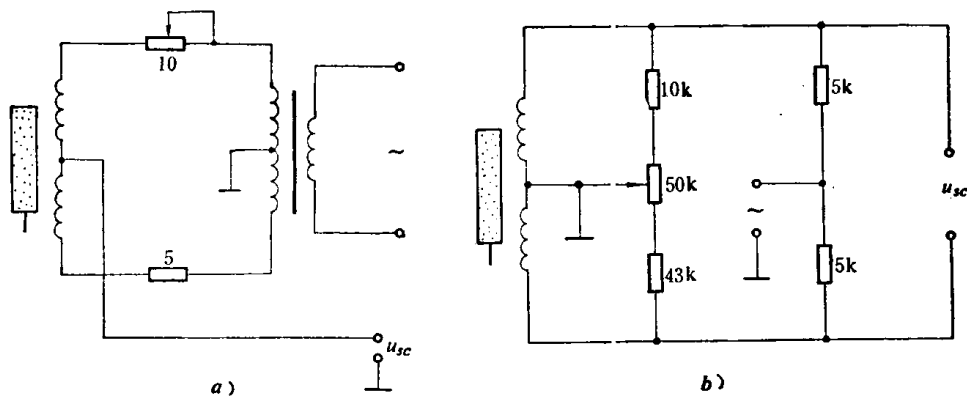


图 1-16

上述三项措施，可以综合使用，也可单项使用，视制造厂的工艺情况和仪器要求而定。在图 1-16 a 中在两臂分别串入 5Ω 电阻和 10Ω 电位器，调整电位器使两臂电阻分量达到平衡。图 1-16 b 中在两臂并联电阻 $10\text{k}\Omega$ 、 $43\text{k}\Omega$ 和电位器 $50\text{k}\Omega$ ，调节电位器，压低高次谐波的影响。

在早期的电动量仪产品中，因为零点残余电压大，不使用两电感值相等的点作为工作零点，而只使用特性曲线的一边，如图 1-17 中所示的 $m n$ 段，工作零点移至 o 点。在这种情况下，当将信号放大以后，不用相敏整流器，只需用一般的整流器整流后用

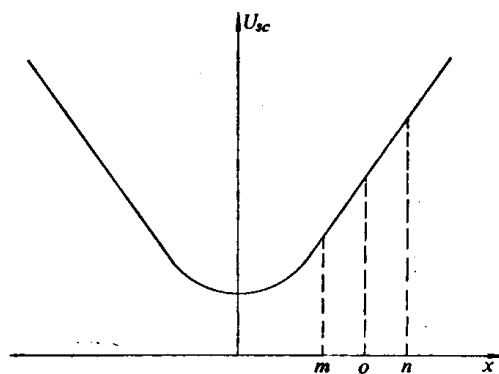


图 1-17