

机械检测技术基础

田保祥 胡志鸿 郭晋荣 编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目(CIP)数据

机械检测技术基础/田宝祥,胡志鸿,郭晋荣编.
2版. —成都:西南交通大学出版社,2002.1
ISBN 7-81022-189-2

机... 田... 胡... 郭... 机械设
备-动态检验 .TH16

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第000822号

机械检测技术基础

田保祥 胡志鸿 郭晋荣 编

*

出版人 宋绍南

责任编辑 唐元宁

封面设计 肖勤

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码:610031 发行科电话:7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:7.375

字数:173千字 印数:5001—8000册

1990年12月第1版 2002年1月第3次印刷

ISBN 7-81022-189-2/TH·272

定价:10.00元

内 容 提 要

本书主要介绍机械工程中常见动态物理量检测的基本原理和方法。全书共十章,可分为两部分:第一部分介绍检测技术的基本组成及工作原理;第二部分介绍机械工程中各种动态物理量(力、速度、转速、流量、位移、温度、振动、噪声)的常用测量方法及传感器的工作原理和结构。

本书可供中等专业学校机械类专业使用,也可供从事非电量检测的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械检测技术基础/田宝祥,胡志鸿,郭晋荣编.
—成都:西南交通大学出版社,1990.12(2002.1重印)
ISBN 7-81022-189-2

机... 田... 胡... 郭... 机械设
备-动态检验 . TH16

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第000822号

机械检测技术基础

田保祥 胡志鸿 郭晋荣 编

*

出版人 宋绍南
责任编辑 唐元宁
封面设计 肖勤

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码:610031 发行科电话:7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:7.375

字数:173千字 印数:5001—8000册

1990年12月第1版 2002年1月第3次印刷

ISBN 7-81022-189-2/TH·072

定价:10.00元

前 言

本书是根据铁道部中等专业学校“机械检测技术”课程1985年初定教学大纲及1988年新教学大纲编写的，适用于机械设备、机械制造类专业，教学总时数为60学时。

本书于1986年完成初稿后，先后召开两次审稿会议。第一次审稿会于1987年11月在株洲铁路电机学校召开。第二次审稿会于1988年9月在株洲铁路机械学校召开。本书是根据这两次审稿会议精神进行修改、完成的。

机械检测技术涉及诸多学科，具有一定深度和广度。随着科学技术的发展，检测技术在科研、生产中的作用越来越重要。从事机械类专业的技术人员也迫切需要加强这方面的知识。本书是为中等专业学校机械类专业编写，为同学们以后从事检测技术工作打下一定基础。

本书力求做到具有适应中等专业学校的特点，介绍了检测技术的发展概况、动态检测的基本原理及常见动态物理量的检测方法。在内容上尽量避免过多的理论分析，注重适用性和培养学生的自学能力。

本书由太原铁路机械学校田保祥主编。参加编写的有田保祥（第二、第三、第四、第十章）、株洲铁路机械学校胡志鸿（第五、第七、第九章）、太原铁路机械学校郭晋荣（绪论、第一、第六、第八章）。

株洲铁路电机学校张惠甫高级讲师担任本书的主审。参加两次审稿的还有：沈阳铁路机械学校邱景山，武汉铁路运输学校熊远康、程宝琳，株洲铁路机械学校詹程嵩，济南铁路机械学校陈红康，株洲铁路电机学校朱鹏超等同志。沈阳铁路机械学校魏民老师、昆明铁路机械学校朱正老师也提出了宝贵意见。本书还得到专业教材编审委员会主任周均民老师的大力支持，在此一并表示衷心感谢！

由于编者水平有限，不妥之处在所难免，敬请读者给予批评指正。

编 者

1990年4月

出版说明

本书自 1990 年 12 月出版以来，一直作为各铁路专业学校及其它大中专学校“机械检测技术”课程的教材，并得到广泛应用，也深受机械工程专业人员的欢迎。

由于本书主要介绍的是机械检测技术中动态检测的基本原理及常见动态物理量的检测方法，均为检测技术的基础知识，有较强的适用性，故此次重印，内容未作改动，只对书中的一些量和单位按照现行标准作了修改。恳请读者对书中存在的问题和不足之处批评指正。

2002 年 1 月

目 录

绪 论

机械检测技术及其发展概况	1
检测系统的组成	2
本课程的任务、内容和特点	3

第一章 传感器

第一节 概 述	4
第二节 电阻式传感器原理	5
第三节 电感式传感器原理	7
第四节 电容式传感器原理	11
第五节 压电式传感器原理	14

第二章 中间转换器

第一节 中间转换器的分类与作用	17
第二节 静态电阻应变仪的结构及工作原理	17
第三节 动态电阻应变仪的结构及工作原理	21

第三章 显示与记录仪器

第一节 光线示波器	25
第二节 磁记录器	32
第三节 数字显示仪表	34

第四章 测量误差及数据处理

第一节 误差的基本概念	40
第二节 测量数据的处理	44

第五章 力和扭矩的测量

第一节 力的测量	50
第二节 扭矩的测量	54

第六章 位移和转速的测量

第一节 位移的测量	58
第二节 转速的测量	67

第七章 温度的测量	
第一节 温度标准及测温方法	70
第二节 接触式测温仪表	71
第三节 非接触式测温仪表	77
第八章 压力和流量的测量	
第一节 压力的测量	81
第二节 流量的测量	84
第九章 超声波检测	
第一节 超声波传播原理及特性	89
第二节 超声波检测	91
第十章 振动与噪声的测量	
第一节 振动的测量	100
第二节 噪声的测量	105
参考资料	112

第一章 传 感 器

第一节 概 述

一、传感器的作用

在检测系统中，能直接或间接地把被测量的非电量信号转换成电量信号的装置，叫做传感器，有时也被称为变换器、换能器、检测器和测量头等。

传感器的作用类似于人的感觉器官，它把诸如温度、压力、流量、力、应变、位移、速度、加速度等被测量的信号，转换成便于检测、传输和处理的电的能量信号（如电流、电压等）或电的参数信号（如电阻、电感、电容等），供后续设备进行变换和显示记录。它是检测系统的输入环节，它的静态特性和动态特性、灵敏度、线性度等性能，对整个检测系统的性能和检测质量有着直接的影响。

二、传感器的主要性能指标及要求

（一）主要性能指标

传感器质量的好坏，通常用若干个性能指标来进行评价。

1. 测量范围 测量范围指测量上限和下限之间的区间。例如，一个位移传感器的测量下限为 -5 mm ，测量上限为 $+5\text{ mm}$ ，这个传感器的测量范围为 $-5\sim+5\text{ mm}$ 。

2. 精度 精度表示被测值与真实值的偏差程度。一般用最大相对误差的百分比表示，即 $\delta_1 = [(X - A) / A] \times 100\%$ （式中， X 为被测值； A 为真实值），偏差程度愈小，精度愈高；反之，精度愈低。

3. 灵敏度 灵敏度表示传感器在稳定工作状态下，输出量 Y 的变化与引起此变化的输入量 X 的变化之比值，即用 $S = dY/dX$ 来表示。

4. 分辨力 分辨力表示传感器能够检测出的被测量的最小增量。最小增量的值愈小，则分辨力愈大，说明传感器检测微量的能力愈高。

5. 线性度 线性度表示传感器特性曲线（一般用标定曲线）与刻度直线的偏离程度。偏离程度愈小，则线性度愈好，传感器失真就愈小。

（二）对传感器的要求

1. 输入信号与输出信号之间尽量要成线性关系；
2. 要有一定的灵敏度和精度；
3. 内部产生噪声要小，并且不受外界环境的干扰；
4. 工作所需要的能量和功耗要小；

5. 对被测对象影响要小；
6. 动态特性良好；
7. 稳定性、重复性、可靠性及方向性要好；
8. 防水、防爆、防化学腐蚀等性能要好；
9. 使用、维修及校准要方便。

当然，一个传感器不可能全部满足上述的性能要求。我们应根据具体的测量目的、使用环境、被测对象、精度要求和信号处理等条件作全面考虑，选择适当的转换原理、材料元件和结构形式，以便尽可能多地满足上述的性能要求。

第二节 电阻式传感器原理

电阻式传感器是利用电阻元件将被测物理量的变化转换成电阻阻值变化的传感器。

电阻式传感器按其工作原理分为电阻应变片式和变阻器式两大类。

电阻应变片式传感器一般由电阻应变片和弹性元件组成，它可将被测物体或弹性元件的应变变化转换成电阻阻值的变化。电阻应变片是传感器的敏感元件，其敏感量是应变。电阻应变片式传感器在实际中应用很广，因此，我们应作重点了解。

一、电阻应变片的种类

电阻应变片的种类很多，分类方法也各异。例如，根据敏感元件材料的不同，电阻应变片分为金属式和半导体式两类；根据基底材料的不同又可分为纸基电阻应变片、胶基电阻应变片和金属基电阻应变片等种类；根据安装方法的不同，又可分为粘贴式、焊接式、喷涂式和埋入式等类型。此外，还可根据工作温度、敏感元件的几何形状等来分类。

二、电阻应变片的结构

电阻应变片的基本组成都是由敏感元件、基底、覆盖层和引出线构成的。只是由于敏感元件的材料和形状不同，其结构有所区别。

图 1 - 1 为金属丝式电阻应变片的典型结构。它是由一根具有高电阻率的金属丝（材料为康铜或镍铬合金等高电阻率的电阻丝，直径约为 0.025 mm 左右）在专门工具上绕制成栅形状，用胶粘剂粘贴在绝缘的基片上（基片是用纸或有机聚合物制成）并粘贴有覆盖层（保护用），栅丝两端由引出导线接于电路上。应变片的规格一般以使用面积（常用 $B \times L$ 表示）和电阻值来表示。如 $3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ， 120Ω 。

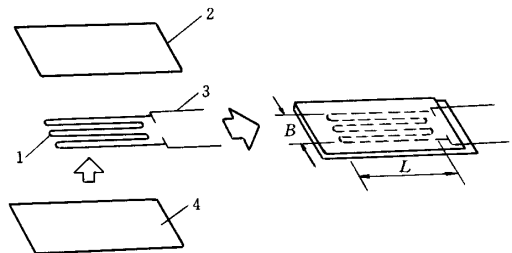


图 1 - 1 金属丝式电阻应变片的结构
1—敏感栅；2—覆盖层；3—引出线；4—基底

图 1 - 2 为金属箔式电阻应变片的典型结构。金属箔式电阻应变片是用栅状金属箔代替栅状金属丝。金属箔栅是用光刻

技术，将高阻值的金属箔片腐蚀而成的。它的形状不受一般金属丝栅的固定截面所限，根据不同的测量目的可以做成许多复杂的形状。箔片材料常见的是康铜、镍铬合金等。箔的厚度一般为 $3\sim 10\ \mu\text{m}$ 。箔栅的表面积一般都比丝式的大，这既有利于通过大电流，又有利于散热。此外，箔式电阻应变片灵敏度高，可贴于形状复杂的表面上，而且粘贴牢固。箔式电阻应变片的线条均匀，尺寸准确，制造方便，便于大批量生产，故成本比较低廉。

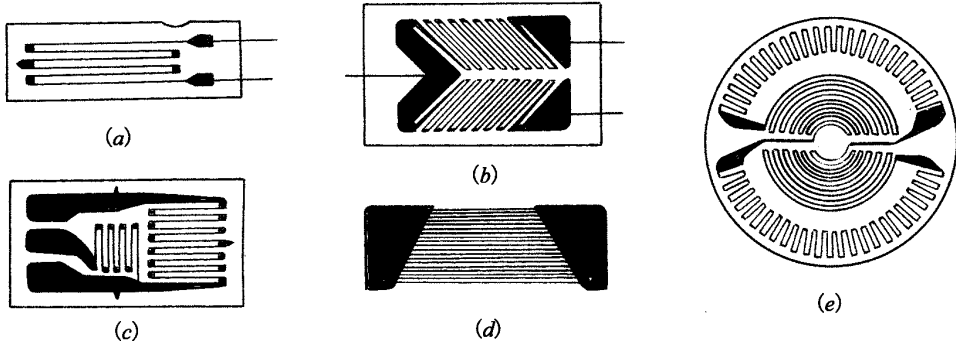


图 1-2 几种金属箔式电阻应变片的结构

三、电阻应变片的工作原理

我们先以一根金属电阻丝为例，在不受外力时，其初始电阻值为

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\Omega) \quad (1-1)$$

式中 ρ ——材料的电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$);

L ——电阻丝长度 (m);

A ——电阻丝的截面积 (mm^2).

当它承受拉力后，长度 L 增加了，截面面积 A 减小了，如图 1-3 所示，电阻率 ρ 也因晶格的变化而改变了，因而引起了电阻 R 的变化。

对式 (1-1) 两边取自然对数，得

$$\ln R = \ln \rho + \ln L - \ln A \quad (1-2)$$

将式 (1-2) 进行微分，得到电阻 R 的变化率

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}$$

(1-3)

对于半径为 r 的圆电阻丝，其截面积为 $A = \pi r^2$ ，微分后可得

$$dA = 2\pi r dr \quad (1-4)$$

因此

$$\frac{dA}{A} = \frac{2\pi r dr}{\pi r^2} = 2 \frac{dr}{r} \quad (1-5)$$

由材料力学可知，纵向应变 $\varepsilon = dL/L$ 和横向应变 $\varepsilon' = dr/r$ 的关系为

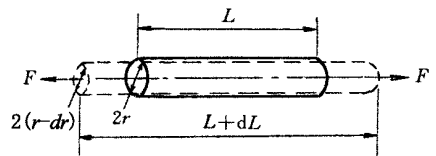


图 1-3 电阻丝受力变形情况

$$\frac{dr}{r} = -\mu \frac{dL}{L} = -\mu \varepsilon \quad (1-6)$$

式中 μ ——电阻丝材料的泊松比。

$$\text{所以} \quad \frac{dA}{A} = -2\mu \varepsilon \quad (1-7)$$

试验表明，电阻率的变化与电阻丝轴向所受的正应力 σ 有关，即

$$\frac{d\rho}{\rho} = \lambda \sigma = \lambda E \varepsilon \quad (1-8)$$

式中 λ ——电阻丝材料的压阻系数；

E ——电阻丝材料的弹性模量。

将以上各式代入式 (1-3)，可得

$$\frac{dR}{R} = \lambda E \varepsilon + \varepsilon + 2\mu \varepsilon = (1 + 2\mu + \lambda E) \varepsilon \quad (1-9)$$

当电阻丝材料一定时， μ 、 λ 和 E 均为常数，故

$$\frac{dR}{R} = K_0 \varepsilon \quad (1-10)$$

式中， $K_0 = 1 + 2\mu + \lambda E$ ，称为电阻丝的灵敏度系数。

在 K_0 表达式中， $(1 + 2\mu)$ 项是由电阻丝受力后，几何尺寸变化而引起的， λE 项是由电阻丝受力后材料的电阻率发生变化而引起的，对于不同的电阻应变片， K_0 可以进一步简化。

对于金属电阻应变片来说，由于 λE 很小，与 $(1 + 2\mu)$ 相比可忽略不计，这样式 (1-9) 就可以简化为

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \varepsilon \quad (1-11)$$

其灵敏度系数 $K_0 = 1 + 2\mu$ ，通常取 $K_0 = 2$ 。

第三节 电感式传感器原理

电感式传感器是利用电感元件把被测物理量（如位移、压力、振动等）的变化，转换成自感系数 L 或互感系数 M 的变化，再由中间转换电路转换成电信号的变化装置。

电感式传感器按照电感变化方式可分为自感型和互感型两大类。自感型包括可变磁阻式和涡流式等，互感型包括差动变压器式等。

一、可变磁阻式电感传感器

(一) 工作原理

可变磁阻式传感器的工作原理和特性曲线如图 1-4 所示。

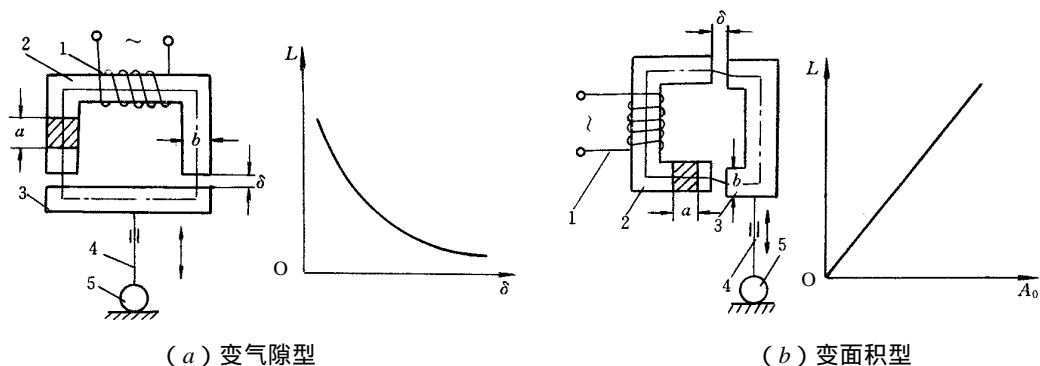


图 1-4 可变磁阻式传感器及其特性

1—线圈；2—铁芯；3—衔铁；4—测杆；5—被测物

它由线圈 1、铁芯 2 和衔铁 3 组成。在铁芯与衔铁之间有一个空气隙，其厚度为 δ ，传感器的测量杆 4 与衔铁相连，当衔铁位置发生变化时，使空气隙厚度 δ 或空气隙导磁截面积 A_0 发生变化，均可导致电感变化。

根据电磁感应定律；当线圈通以电流 i 时，产生磁通 F_m ，其大小与电流成正比，即

$$NF_m = Li \quad (1-12)$$

式中 N ——线圈匝数；

L ——自感系数 (H)。

又根据磁路欧姆定律

$$F_m = \frac{Ni}{R_m} \quad (1-13)$$

式中 Ni ——磁通势 (安匝)；

R_m ——磁路的磁阻 (H^{-1})。

将此式代入 (1-12)，得

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (1-14)$$

如果空气隙 δ 较小，而且不考虑磁路的铁损时，总磁阻为

$$R_m = \frac{l}{\mu A} + \frac{2\delta}{\mu_0 A_0} \quad (1-15)$$

式中 l ——铁芯导磁长度 (m)；

μ ——铁芯磁导率 (H/m)

A ——铁芯导磁截面积， $A = a \times b$ (m^2)；

δ ——空气隙厚度 (m)；

μ_0 ——空气磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)；

A_0 ——空气隙导磁横截面积 (m^2)

一般情况下，铁芯的磁阻远远小于空气隙磁阻，即 $l/\mu A \ll 2\delta/(\mu_0 A_0)$ ，计算时可忽略不计，故

$$R_m = \frac{2\delta}{\mu_0 A_0} \quad (1-16)$$

将式 (1 - 16) 代入式 (1 - 14), 得

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A_0}{2\delta} \quad (1 - 17)$$

此式表明, 线圈的电感 L 与空气隙厚度 δ 成反比, 而与空气隙导磁截面积 A_0 成正比。因此, 改变空气隙厚度或与改变空气隙导磁截面积都能引起电感 L 的变化。

(二) 传感器特性及应用范围

可变磁阻式传感器的特性曲线可由式 (1 - 17) 作出, 见图 1 - 4。从式 (1 - 17) 可看出, 当 A_0 固定不变, δ 变化时 L 与 δ 呈非线性 (双曲线) 关系, 见图 1 - 4 (a); 当固定 δ 而改变空气隙导磁截面积 A_0 时, L 与 A_0 呈线性关系, 见图 1 - 4 (b)。

当 L 与 δ 呈双曲线关系时, 传感器的灵敏度为

$$S = \frac{dL}{d\delta} = -\frac{N^2 \mu_0 A_0}{2\delta^2} \quad (1 - 18)$$

灵敏度与空气隙厚度的平方成反比, δ 愈小灵敏度愈高, 由于 S 不是常数, 将会产生非线性误差, 这就限制了传感器只能在较小的范围内工作。因此, 改变空气隙厚度的可变磁阻传感器, 仅适用于小位移或使衔铁作小位移的各种物理量的测量。

当 L 与 A_0 呈线性关系时, 传感器的灵敏度就为一个常数, 传感器的工作范围也就比较大。

以上两种传感器在工作时, 电感线圈中通有电流, 由线圈流往负载的电流不可能为零, 衔铁始终受到吸引力, 线圈受温度影响有温度误差, 而且也不能反映极性 (即被测量的变化方向), 因此实际应用较少。最常用的是将两个相同的电感线圈结合在一起, 组成的“差动式电感传感器”, 如图 1 - 5 所示。变压器次边两半绕组的匝数相等, 当衔铁位于中间位置 (位移为零) 时, 两线圈的自感相等, 此时两线圈中的电流也相等, 即 $i_1 = i_2$, 负载 Z_L 上的电流 $\Delta i = 0$, 则输出电压 $u_C = 0$ 。当衔铁在外界作用下产生偏移时, 一个传感器的空气隙增加, 而另一个的空气隙减小, 即一个线圈的自感增加, 另一个线圈的自感减小。此时 $L_1 > L_2$, $i_1 > i_2$, 负载 Z_L 上的电流 $\Delta i \neq 0$, 输出电压 $u_C \neq 0$, 而 u_C 的大小反映了衔铁的位移量, u_C 的极性不同反映了衔铁的位移方向, 如若位移使 i_1 增大 Δi , 则必定使 i_2 减小 Δi , 这样就使通过负载的电流产生 $2\Delta i$ 的变化。显然这相当于两个单个传感器的电流变化量, 所以, 差动式电感传感器的灵敏度可提高一倍, 并能改变其线性特性。但其缺点是输出量与电源频率有密切的关系, 要求有一定频率稳定的电源。其输出特性见图 1 - 5。

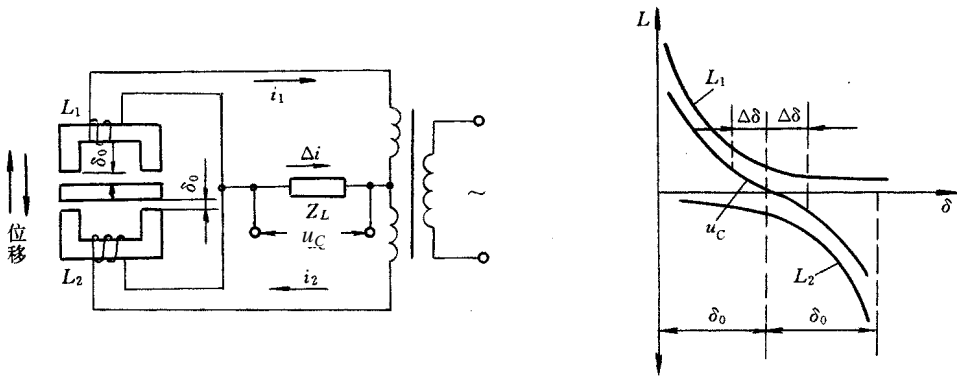


图 1 - 5 差动式电感传感器工作原理及输出特性

二、涡流式电感传感器

根据电磁感应原理，将金属体置于变化着的磁场中，或在磁场中运动时，金属体内就要产生感应电流。这种电流在金属体内自成闭合回路，而且形状呈现旋涡状，所以称之为涡流。涡流的产生必然要消耗磁场的能量，从而使产生变化磁场的线圈的阻抗发生变化。阻抗变化的大小与涡流的大小有关，而涡流的大小又与金属体内的电阻率 ρ 、导磁率 μ 、厚度 h 、线圈距金属体的距离 δ ，以及线圈的激磁电流角频率 ω 等参数有关。若固定其它参数，仅改变其中某一参数，就可根据线圈阻抗变化的大小，测量出该参数来。利用这一原理制成的传感器就是涡流式电感传感器，简称涡流传感器。它的敏感元件是一个线圈，其工作原理如图 1-6 所示。

涡流式电感传感器是一只固定在框架上的具有自感量 L_1 的扁平线圈。当没有被测金属体接近时，传感器的线圈由于高频（1 MHz 以上）电流 i_1 的激励，将产生一高频交变磁场 Φ_i 。当被测金属体接近传感器线圈时，由于电磁感应，在金属体表面将产生涡流，而涡流又产生一交变磁场 Φ_e 。根据楞次定律，涡流的交变磁场与线圈的交变磁场变化方向相反，这就削弱了线圈的磁通量 Φ_i 。由于线圈交变磁场的能量损耗，线圈内的等效阻抗就要发生变化。

为了使传感器具有较高的灵敏度，涡流式传感器的线圈总是并联一只固定电容器 C_1 ，构成并联谐振电路，其自振频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1-19)$$

线圈的固有谐振曲线为图 1-7 中的曲线 1。由于被测金属体有铁磁材料和非铁磁材料之分，它们对线圈回路的自感 L 影响也有所不同。对于一般非铁磁材料的导体（如铜、铝等），由于 Φ_e 的影响，使回路的自感下降。因此，回路的自振频率上升；而对于铁磁材料的导体，由于其导磁系数 μ 远大于空气的导磁系数 μ_0 ，结果反而加强了线圈的磁通 Φ_i ，因而使回路的自感上升，回路的自振频率下降。

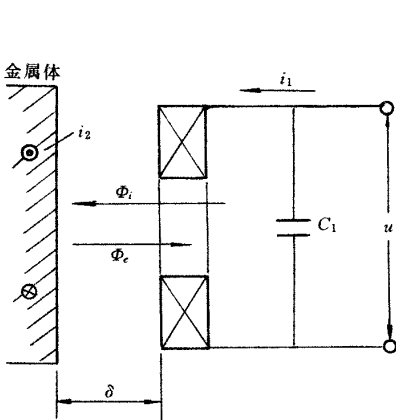


图 1-6 涡流式电感传感器工作原理

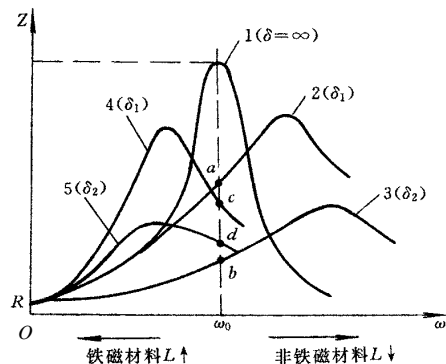


图 1-7 谐振曲线

对于一个已调谐到某一固定频率的传感器的线圈，当它接近被测金属体时，回路将失谐。当被测对象为非铁磁材料的时候，谐振曲线将右移，即向自振频率升高的方向移动；如果被测对象为铁磁材料，线圈的谐振曲线将向左移，即向自振频率降低的方向移动。

下面对图 1-7 进行分析。曲线 1 是线圈的固有谐振曲线，也就是传感器没有靠近被测对象时，即它们之间的距离为 $\delta = \infty$ 时的谐振曲线，此时的自振频率 ω_0 即是电源的频率。当传感器线圈移近被测对象时，如果被测对象为非铁磁材料，间隙为 δ_1 ，则线圈的谐振曲线变为曲线 2，而这时电源的频率仍为 ω_0 ，所以线圈对电源的阻抗是 a 点的纵坐标值。如果间隙是 δ_2 ($\delta_2 < \delta_1$)，则线圈的谐振曲线变为曲线 3，这时它对电源的阻抗就是 b 点的纵坐标值。如果被测对象是铁磁材料，间隙仍为 δ_1 和 δ_2 时，其谐振曲线分别为曲线 4 和曲线 5，线圈对电源的阻抗分别是 c 点和 d 点的纵坐标值。

由以上所述可看出：

1. 回路的阻抗 Z 和被测对象的电阻率 ρ 、磁导率 μ 、电源频率 ω_0 及传感器与被测对象之间的距离 δ 等因素有关。可用数学式表示为

$$Z = f[\delta, \rho, \mu, \omega_0] \quad (1-20)$$

如果被测对象的材料已确定，电源频率 ω_0 也已确定，这时 ρ, μ, ω_0 就都是常数了，从而有

$$Z = f(\delta) \quad (1-21)$$

即传感器线圈的阻抗是它与被测对象之间间隙的函数。

2. 当间隙不同时，线圈有不同的谐振曲线，在不同间隙情况下，线圈对固有频率为 ω_0 的电源的阻抗就是此谐振曲线和直线 $\omega = \omega_0$ 的交点的纵坐标值。

这就是说，我们可以把传感器线圈和被测对象之间的间隙的变化，转化为线圈本身阻抗的变化。因此，我们只要测出这一变化的阻抗值就可测出间隙 δ 。

由涡流式传感器转换成的线圈对电源的阻抗 Z 的变化，可通过中间转换电路转换成电压 u 的变化，电压 u 与间隙 δ 的特性曲线如图 1-8 所示。在曲线中间一般呈线性关系，其范围为平面线圈外径的 $1/5 \sim 1/3$ （线性误差为 $3\% \sim 4\%$ ），传感器的灵敏度还与线圈的形状和大小有关，线圈的形式最好是尽可能窄而扁平。当线圈外径增大时，线性范围也增大，但灵敏度就会相应降低。

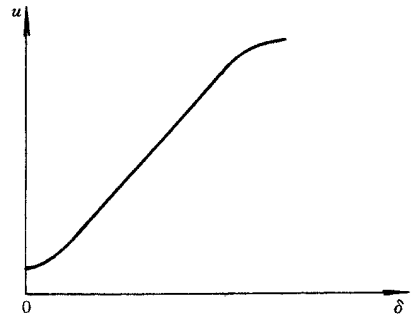


图 1-8 电压与间隙的特性曲线

第四节 电容式传感器原理

电容式传感器是将被测物理量转换为电容器的电容量变化的传感器。它实质上是一个具有可变参数的电容器。一般情况下，它是由两金属平行板组成，以空气为介质的电容器，其电容量为（忽略其边缘效应）

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{\delta} = \frac{\epsilon A}{\delta} \quad (F) \quad (1-22)$$

式中 ϵ_0 ——真空中介电常数， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ (F/m)

ϵ_r ——极板间介质的相对介电常数，在空气中， $\epsilon_r = 1$ ；

ϵ ——极板间介质的介电常数， $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ；

A ——两极板相互覆盖面积 (m^2);

δ ——两极板间的距离 (m).

由上式可知,在 ϵ 、 A 、 δ 三个参数中,任意保持其中两个参数不变,而仅改变其中一个参数,就可以把该参数的变化转换为电容量的变化,这就是电容式传感器的工作原理。

根据电容器参数变化的不同,电容式传感器可分为极距变化型、面积变化型和介质变化型三类。本节只介绍前面两种。

一、极距变化型电容传感器

极距变化型电容传感器的工作原理如图 1-9 所示。图中极板 1 是固定不动的,极板 2 是可动的,两极板相互覆盖面积和极板间的介质不变。当极板 2 由被测的物理量变化而引起移动时,就改变了两极板之间的距离 δ ,从而使电容量发生变化。

现假设极板 2 安装好以后未动时的电容量为

$$C_0 = \frac{\epsilon A}{\delta_0} \quad (1-23)$$

当极板 2 向左移动 $\Delta\delta$ 值后,即极距为($\delta_0 - \Delta\delta$)时,其电容量为

$$C = \frac{\epsilon A}{\delta_0 - \Delta\delta} \quad (1-24)$$

由此式可见,电容量 C 与 $\Delta\delta$ 不是线性关系,上式可写成

$$C = \frac{\epsilon A}{\delta_0 \left(1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)} = \frac{\epsilon A \left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)}{\delta_0 \left(1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)} \quad (1-25)$$

当 $\Delta\delta \ll \delta_0$ (即量程 $\Delta\delta$ 远小于极板初始距离 δ_0)时,

$$1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \approx 1$$

$$\text{则} \quad C = \frac{\epsilon A}{\delta_0} \left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right) = C_0 \left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right) \quad (1-26)$$

此时, C 与 $\Delta\delta$ 近似有线性关系,但量程范围很小。

如果把传感器的输出改为容抗 $X_C = 1/(\omega C)$,则容抗 X_C 和极距 δ 就成为线性关系,其关系为

$$X_C = \frac{\delta}{\omega \epsilon A} \quad (1-27)$$

这时就不需要满足 $\Delta\delta \ll \delta_0$ 这一条件了。

极距变化型电容传感器具有可进行动态非接触式测量,对被测系统的影响较小,灵敏度

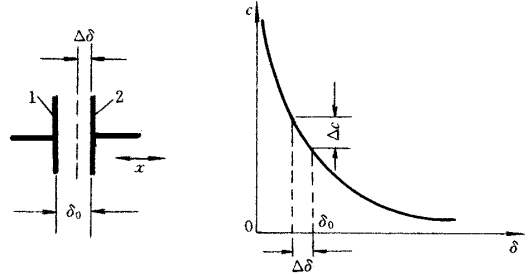


图 1-9 极距变化型电容传感器
1、2—极板

高等优点。但这种传感器有输出非线性特性，传感器的杂散电容对灵敏度和测量精度也有影响。另外与传感器配合使用的电子电路较复杂，因此，它适用于小位移的测量。

二、面积变化型电容传感器

改变极板覆盖面积形式的电容传感器，按其工作方式不同分为角位移型和线位移型两种。

(一) 角位移面积变化型电容传感器

这种传感器的工作原理如图 1-10(a) 所示。两极板中的一个为定板，另一个为可转动的动板，动板对定板作相对转动。当动板有一转角 θ 时，两板之间相互覆盖的面积就变化，因而导致两极板间的电容量发生变化。

当 $\theta = 0$ 时

$$C_0 = \frac{\epsilon A}{\delta} \quad (F)$$

当 $\theta \neq 0$ 时

$$C_\theta = \frac{\epsilon A \left(1 - \frac{\theta}{p}\right)}{\delta} = C_0 \left(1 - \frac{\theta}{p}\right) \quad (F)$$

由此可见，这种传感器的电容 C_θ 与角位移 θ 成线性关系。

(二) 线位移面积变化型电容传感器

图 1-10(b) 所示为平面线位移面积变化型电容传感器的原理图。它有两个极板，一个是动板 1，另一个是定板 2，二极板彼此相距为 δ ，当动板沿 x 方向平移 Δx 时，两极板的覆盖面积就发生变化，电容量也随着变化。

当 $\Delta x = 0$ 时

$$C_0 = \frac{\epsilon a b}{\delta} \quad (F)$$

当 $\Delta x \neq 0$ 时

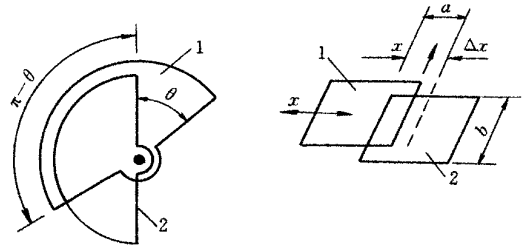
$$C_{\Delta x} = \frac{\epsilon b(a - \Delta x)}{\delta} = C_0 \left(1 - \frac{\Delta x}{a}\right) \quad (F)$$

传感器的灵敏度

$$S = \frac{dC_{\Delta x}}{d\Delta x} = -\frac{\epsilon b}{\delta}$$

对于线位移面积变化型电容传感器，它的灵敏度是一常数，则输出电容量与输入位移量也成线性关系。

面积变化型电容传感器的优点是输出量与输入量均成线性关系，故其精度较高。但它与极距变化型相比，则有灵敏度较低的缺点，因此，它只适用于较大直线位移和角位移的测量。



(a) 角位移型 (b) 平面线位移型

图 1-10 面积变化型电容传感器

1—动板； 2—定板