

实验方法与测试技术

中国矿业学院机械制造教研室

一九八〇年四月

前 言

现代科学技术的发展速度不断的提高，实验技术也越发的显得重要。实践证明实验技术既是创立科学理论的手段，也是验证科学理论的手段。

近年来，机械工业的自动化进展很快，目前，越发明显地朝着深度和广度的方向发展。这个进步是以半导体技术，数字技术和电子技术的发展作为背景，根据生产的自动化高效率的要求发展起来的。现阶段不是简单地停留在自动化水平上，而是明显地出现了新的系统倾向，是把生产体系作为一个整体机构来考虑的。这个方案是把自动化的各种系统巧妙地相互连接起来，在提高整体机构生产效率的想法基础上，充分利用测量和控制的新技术，使整个系统能做到稳定操作，确保产品质量。如果把整个生产系统比做人的话，那么，测量技术正好相当于人的中枢神经和感觉器官，许许多多的测量仪表也就自然成了神经系统的重要通道。同时我们应用先进的测量系统将能提供大量的实验数据资料，有力的配合科研工作的进行。因此，本课程是向四个现代化进军的重要一环，通过本课程的学习，应使学生初步掌握电气测量和光学测量的原理，各种传感器的结构，基本测量电路，和常用机械参量的各种测量方法以及常用测量仪器的选择，实验数据的处理。同时通过本课程的学习还应使学生初步掌握多因素实验的设计方法及模型实验的转换规律。

本课程除了课堂讲授之外应进行课内实验和系统实验，以解决对传感器、常用测试仪器的性能及使用。同时培养学生进行系统实验的设计、组织、分析能力和研究能力。

17. 振动与声
18. 机床振动学
19. 机械振动与冲击测量
20. 工业中的声学测量
21. “机床”
22. 激光及其应用
23. 激光和它的未来
24. 全息学原理
25. 全息照像在精密测量中的应用
26. 全息法在实验力学中的应用
27. 全息照像与无损检验
28. 示波器原理及应用
29. 光线示波器
30. 振动测试技术
31. 误差理论与实验数据处理
32. 测量实践的数根处理
33. 机器的机械参量传感器
34. 正交设计
35. 正交实验法
36. 正交实验设计法
37. 光弹性实验应力分析讲义
38. 光弹性实验
39. 光测弹性力学
40. 岩石力学原理
41. 计测工学 (日)
42. *Measurement Systems*
43. *Dimensional analysis*
44. 工业技术应用数理统计学
45. 铣床通讯

目 录

前 言

第一章 概 论

- (一) 测量系统的组成及特点..... (1)
- (二) 测量装置使用的选择..... (2)

第二章 常用变换器原理及有关电路

- (一) 常用的变换方法..... (4)
 - 1. 利用改变电阻 R 的变换器..... (4)
 - 2. 利用改变电感的变换器..... (6)
 - 3. 利用改变电容的变换器..... (11)
 - 4. 利用压电效应的变换器..... (13)
 - 5. 霍尔效应..... (14)
 - 6. 光电效应..... (14)
 - 7. 磁电效应..... (19)
 - 8. 热电效应..... (20)
- (二) 光栅 测量..... (21)
- (三) 感应同步器 测量..... (27)
- (四) 磁栅 测量..... (34)
- (五) 常用测量 电路..... (35)
 - 1. 电桥电路..... (35)
 - 2. 放大器..... (41)
 - 3. 相敏检波..... (52)
 - 4. 线性集成电路及其应用〈运算放大器〉..... (61)
 - 5. A/D 和 D/A 变换..... (74)

第三章 微小位移的测试

- (一) 常用位移变换器及其使用 范围..... (83)
- (二) 主轴回转精度的测试..... (85)
- (三) 表面光洁度的电测法..... (91)
- (四) 滑动轴承膜厚度的测量..... (98)

第四章 振动及其动力参数的测量

(一) 振动的基本原理	(100)
1. 机械加工中振动的分类	(100)
2. 单自由度系统的强迫振动	(101)
(1) 系统的固有圆频率 ω_0	(101)
(2) 阻尼率	(102)
(3) 自然圆频率	(102)
(4) 衰减系数	(102)
(5) 对数衰减率 δ	(102)
(6) 强迫振动的位移与干扰力的相位差 ϕ	(102)
(7) 强迫振动的振幅 X 和振幅放大系数 λ	(103)
3. 第二类强迫振动	(104)
4. 多自由度系统受迫振动的特点	(106)
5. 表征机床抗振性的主要参数	(107)
(二) 振动测量仪器及其应用	(108)
1. 测振传感器	(108)
(1) 压电式加速度计	(108)
(2) 磁电式速度计	(113)
(3) 地震式振动传感器	(114)
2. 测振仪器	(118)
(1) 测振仪	(119)
(2) 频率分析仪	(119)
(3) 传递函数分析仪	(119)
3. 激振器	(121)
(三) 结构动力参数的确定	(122)
1. 李沙育图形的分析法	(123)
(1) 固有频率的测定	(123)
(2) 当量阻尼常数 C 的测定	(123)
(3) 当量质量 M 的测定	(124)
2. 幅频曲线和相频曲线的分析法	(124)
(1) 固有频率的确定	(125)
(2) 阻尼率 D 的确定	(125)
(3) 其它参数的确定	(127)
3. 自由衰减振动曲线的分析	(127)
(1) 阻尼率 D 的确定	(127)
(2) 固有频率 ω_0	(129)

(四) 振型的测定	(129)
(五) 振动系统的模拟	(132)
(六) 动态响应特性的测试	(133)
(七) 机床振动的分析	(134)

第五章 噪声的测定

(一) 关于噪声的一般概念	(139)
1. 声音的一般概念	(139)
2. 基本术语	(139)
(1) 声压	(139)
(2) 静压强 P_0	(139)
(3) 瞬时声压	(139)
(4) 有效声压 P	(140)
(5) 声压级 (SPL)	(140)
(6) 强度级 (IL)	(140)
(7) 声功率级 (PWL)	(140)
(8) 声级	(140)
(9) 响度级	(140)
(10) 等响度曲线	(140)
(11) 响度	(142)
3. 分贝标度及与人的关系	(142)
(二) 噪声的测定	(143)
1. 声级测量仪器及其选择	(143)
(1) 声级计	(143)
(2) 传声器	(145)
(3) 测量方法	(146)
2. 噪声测试分析	(147)

第六章 力, 应力和应变的测试

(一) 电阻应变片测试法	(151)
1. 电阻应变片的种类和构造	(151)
2. 电阻应变片的粘贴工艺	(154)
3. 电阻应变片的横向效应	(159)
4. 电阻应变片的温度补偿	(160)
5. 电阻应变片的防潮湿	(166)
6. 电阻应变片粘贴方位的误差对测量精度的影响	(167)
7. 应变片的布置和电桥的组合	(169)

8. 应变仪.....	(171)
9. 应变和应力的计算.....	(175)
(二) 切削力的测试.....	(178)
1. 切削力测力仪应具备的性能.....	(178)
2. 几种典型测力仪的介绍.....	(180)
(1) 八角环测力仪.....	(180)
(2) 消边顶尖测力仪.....	(181)
(3) 钻削测力仪.....	(181)
(4) 压电式磨削测力仪.....	(181)
3. 测力仪的标定.....	(183)
4. 测力仪的动态误差.....	(186)
(三) 扭矩的测量.....	(190)
1. 重力平衡法.....	(190)
2. 弹性元件扭转法.....	(190)
3. 反作用力矩法.....	(192)
(四) 光弹性试验应力分析.....	(194)
1. 光弹性的力学和光学基础.....	(194)
2. 平面光弹性应力——光律.....	(197)
3. 光程差的测量, 等倾线与等色线.....	(197)
4. 等色线及条纹值的确定.....	(200)
5. 等倾线与主应力线.....	(207)
6. 等倾线的消除与半级数等色线条纹的测定.....	(210)
7. 应力的计算——剪应力差法.....	(215)
8. 材料, 模型, 和试验装置.....	(223)

第七章 温度的测试

(一) 温度和测温方法分类.....	(225)
1. 温标的基本概念.....	(225)
2. 电阻温度计.....	(225)
(二) 膨胀式温度计和电阻温度计.....	(226)
1. 膨胀式温度计.....	(336)
2. 电阻温度计.....	(226)
(三) 热电偶测温法.....	(227)
1. 热电偶测温原理.....	(227)
2. 热电偶的冷端温度影响的消除.....	(230)
3. 热电偶的校准.....	(231)
(四) 利用辐射的温度计.....	(232)

(五) 消除温度的测试	(233)
1. 消除寄生电势问题	(233)
2. 标定问题	(235)
3. 动态温度的测量误差	(236)

第八章 激光技术及其在测量中的应用

(一) 激光的基础知识	(238)
1. 光的本质的简介	(238)
2. 激光的产生	(239)
3. 激光的特性	(242)
4. 相干性问题	(243)
5. 常用激光器	(244)
(二) 激光技术在测量中的应用	(246)
1. 激光干涉测长	(246)
2. 激光准直	(249)
3. 速度的测定	(251)
4. 全息干涉计量技术	(252)
(1) 全息摄影原理及其系统	(252)
(2) 记录材料和处理	(255)
(3) 全息摄影干涉术的运用	(257)
(4) 全息摄影干涉术的应用	(258)

第九章 常用测试记录仪器及其使用

(一) 通用示波器	(260)
1. 电路组成	(260)
2. 几种典型的使用方法	(260)
(二) 光线记录示波器	(265)
1. 光学系统	(265)
2. 磁系统	(267)
3. 振动物	(267)
4. 记录的分析	(272)
5. 光线示波器的一般使用程序	(274)
(三) 笔式记录仪	(277)
(四) 磁带数据记录仪	(279)

第十章 实验数据的处理

(一) 基本概念	(281)
1. 真值与平均值	(281)
2. 误差与误差的分类	(282)
3. 误差的表示法	(284)
4. 精确度与准确度	(285)
(二) 有效数字及其计算	(286)
1. 有效数字	(286)
2. 计算法则	(286)
(三) 误差的理论基础	(288)
1. 误差的正态分布	(288)
2. 高斯误差定律	(290)
3. 精确度指数 H 的物理意义	(291)
4. 概率积分	(292)
5. 实验数据抛弃准则	(293)
6. 误差传递	(294)
7. 权的概念	(296)
(四) 实验数据的表示方法及经验公式	(297)
1. 实验数据图形表示法	(297)
2. 实验数据的列表法	(299)
3. 实验数据方程表示法	(299)
(五) 插值法	(299)
1. 比例法	(299)
2. 拉格朗日内插公式	(300)
(六) 回归分析	(301)
1. 回归方程的意义	(301)
2. 二元线性回归方程的讨论	(302)
3. 多元线性回归的概念	(305)
(七) 动态特性测定的统计方法	(506)
1. 随机信号的统计描述	(306)
2. 自相关函数和功率谱密度函数	(308)
(八) 频谱分析和数据处理	(310)
1. 模拟量频谱分析法	(310)
2. 平稳随机振动的功率谱分析	(311)
3. 数字量的频谱分析	(311)
4. 数据处理的计算机技术	(313)

第十一章 实验设计

概 述

(一) 多因素试验的数学方法.....	(315)
1. 问题的提出.....	(315)
2. 用正交表安排试验.....	(315)
3. 交互作用.....	(318)
4. 正交表的方差分析.....	(321)
5. 三水平正交表的运用.....	(324)
6. 重复检验与重复取样.....	(328)
7. 正交设计运用实例.....	(332)
(二) 量钢和量纲分析.....	(334)
1. 量钢, 单位及量纲分析的概念.....	(334)
2. π 定理 (Buckingham定理)	(337)

附 录

X6132与X62W型升降台式万能铣床动刚度试验	(343)
--------------------------------	-------

参 考 书 目

1. 非电量电测法
2. 非电量电测法
3. 测试技术
4. 机械制造工艺学
5. 机械工程手册第21篇 (振动)
6. 机械工程手册第64篇 (长度测量自动)
7. 电子技术
8. 半导体器件在机械工业中的应用
9. 电阻应变片
10. 应变片电测技术
11. 电子式模拟——数字转换
12. 晶体管放大与振荡电路
13. 常用电子测量及仪表
14. 自动验测仪表 (译文集)
15. 普通物理
16. 声学

第一章 概 论

现代工业及科学研究中测试技术是十分重要的，而且涉及面很广泛的。需要测量的参数是很多的。但这些参数是很难于用直接测量方法来测量的，而是必须将它们的变化转换成另外的某些参数的变化。然后对转换后的参数进行测量。目前广泛采用的方法是将各种非电量的被测参数转换成电量而后再进行测量的方法。这种方法有一系列优点：

(1) 可以将不同的被测参数转换成相同的电量，因而可以使用相同的测量和记录仪表。

(2) 输出的电信号可以作远距离的传输，有利于远距离操作和自动控制。

(3) 采用电测法可以对变化的参数进行动态测量，可以测量记录其瞬时值和变化过程。

(4) 易于同许多后续的数据处理仪器连用，从而能够对复杂的测量结果进行运算和处理。

(一) 测量系统的组成及特点：

一般的测试系统是由如下的测试元件所组成的：

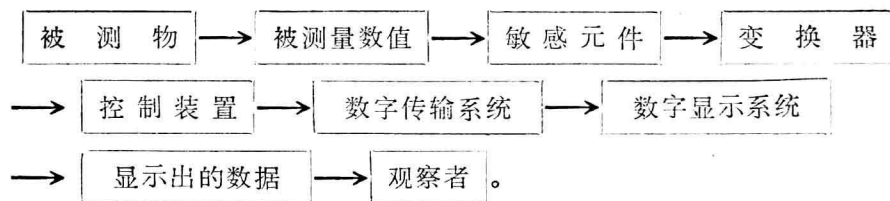


图 1—1

敏感元件是从被测物那里接受能量，并且输出一定的测量数值，但是值得注意的是这一测量数值总要受到测量装置本身的影响。制造一个理想的测量装置是不可能的。设计一台好的测量装置应使这种干扰减到最低限度。敏感元件所输出的信号是一些物理量如位移，电压等。

变换器又叫传感器，转换器，发送器等。它的作用是将被测参数变换成电量，并把它送到控制装置中进行计算处理。

根据其变换的工作原理来分：常用的变换器有电阻式，电感式，电容式，磁电式，压电式，光电式，霍尔效应等等。

控制装置的作用是对变换器输出的电信号进行测量计算，并使测量结果能在显示器上显示出来或者推动记录器把测量结果记录下来。

控制装置中往往包括电子放大器，以便将信号放大。此外根据变换器的类型和对测量结果的要求，有时在控制装置中还包括有振荡电路，整流回路，运算电路，脉冲电路等等。

显示系统是用来显示测得的数值。一般分模拟显示和数字显示两种。前者一般用指针指示；后者一般用数字形式显示出测量结果。这是比较先进的一种方法。

在许多情况下，不仅需要获得被测参数的平均值或有效值，而且需要记录它的变化过程和瞬时值，用指示器是无法达到目的的。这时必须使用记录仪将信号记录在纸上或磁带上，然后从记录纸上读取瞬时值和变化过程。记录仪器往往成为一独立的通用部件，能够与不同测量电路配合使用。

（二）测量装置使用的选择：

我们可以按不同的方法对测量仪表进行选择

（1）使用在监控过程中

测试仪表的某些使用本质上讲可以起着监控作用。例如温度计，气压计，风速计就起着这样的作用，他们只是简单地指示周围环境的条件，他们并不起控制的作用。

（2）使用在控制过程中

使用测量仪表非常重要的方面是用于组成自动控制系统。

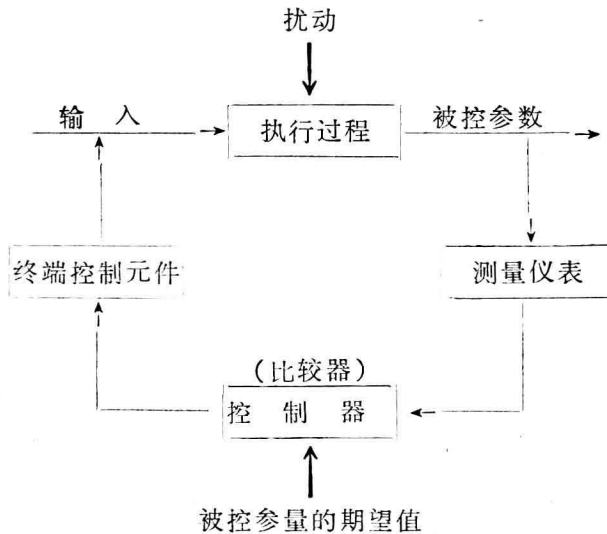


图 1—2 反馈控制系统

这样的系统可用图 1—2 来说明，为了控制一个变量经常采用反馈的方法。这种类型的例子是很多的，例如室内恒温控制设备就是如此。温度控制仪表（经常是双金属元件）感受到室内温度，由此提供了控制系统所需要的信息。非常多的采用先进技术的大量例证可以从喷气飞机和导弹系统中找到。

（3）进行实验工程分析

在解决实际工程问题时，经常用两种方法即理论方法和实验方法。致于使用哪一种方法

则取决于问题的性质。对于尖端科学知识的问题只有足够的理论是不够的，还需要非常广泛的实验研究。这两种方法应当是彼此互相结合的，抱有这种态度的工程人员，通常在解决问题方面要比在这两种手段中忽视其中之一的要有效的多。

在实验工程分析中，对所遇到的问题进行分类是有用的。实验分析的类型可按如下几方面进行。

1) 根据简单的假设，对理论预测的可靠性进行实验。例如机械调谐频率的频率响应试验。

2) 在没有足够的理论根据时，可用归纳经验公式。例如流体管路中湍流摩擦系数的测定。

3) 材料，元件，系统参数；变量和性能指标的测定。例如合金钢屈服点的测定；电机的速度转矩曲线；蒸汽透平的热效率。

4) 与理论发展有关问题的研究。例如用电子显微镜观察金属疲劳裂纹。

5) 用类推法解数学方程进行分析

第二章 常用变换器原理及有关电路

(一) 常用的变换方法

1. 利用改变电阻 R 的变换器

通过机械结构使电阻数值改变，因而引起电压或电流的变化，利用变化的电压或电流来

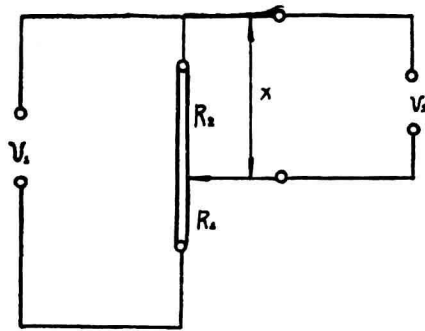


图 2-1

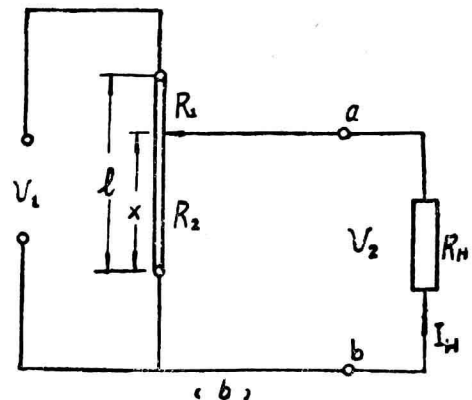
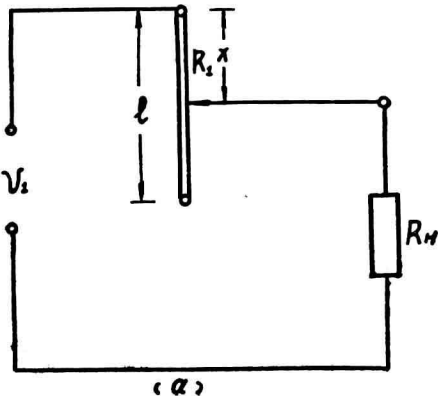
进行测量或反馈到输入端作为控制之用。一个变阻器如图 2-1 所示

当位移 x 有变化时 R_2 就有变化，间接改变了输出量。由此可见

$$U_2 = f(x)$$

因此 U_2 是位移量 x 的函数。

常见的变阻变换器的接线方式如图 2-2 所示



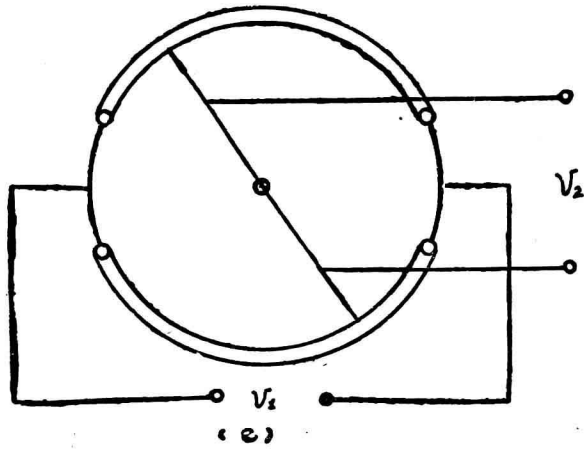
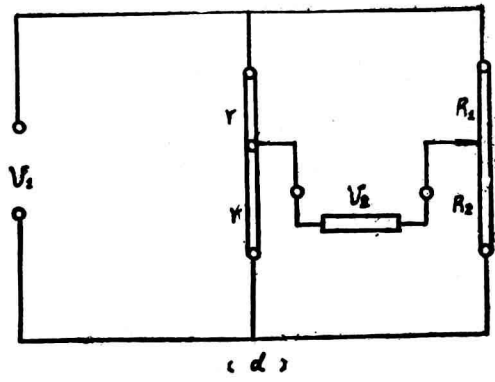
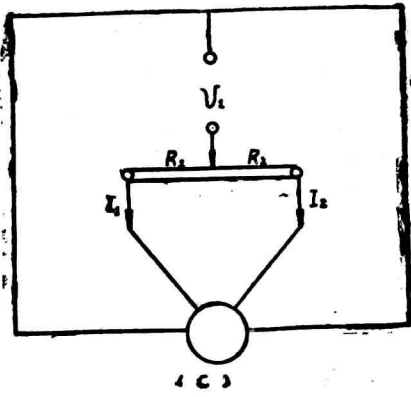


图 2-2

图 2-2 (a) 中电流 $I = \frac{U_1}{R_1 + R_H}$, 即 $I = f_1(R_1) = f_2(x)$

但从公式可以看出 $I-R_1$ 间关系不是线性, 因此在自动系统上不常应用。

图 2-2 (b) 中是一个电位计线路, 利用等效发电机原理可以求出:

$$I_H = \frac{U_{ab}}{R_H + R_i}$$

式中 R_i 为 ab 处等效电阻 $R_i = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

U_{ab} 为 ab 开路的电压 $U_{ab} = \frac{U_1}{R_1 + R_2} R_2$

$$\therefore I_H = \frac{U_1}{(R_1 + R_2)(R_H + R_i)} \cdot R_2$$

式中 $(R_1 + R_2)$ 为常数, 如 $(R_H + R_i)$ 也是常数则 I_H 就正比于 R_2 , 其关系是线性的, 但实际情况下 I_H 和 R_2 的关系如图 2—3 中实线所示。

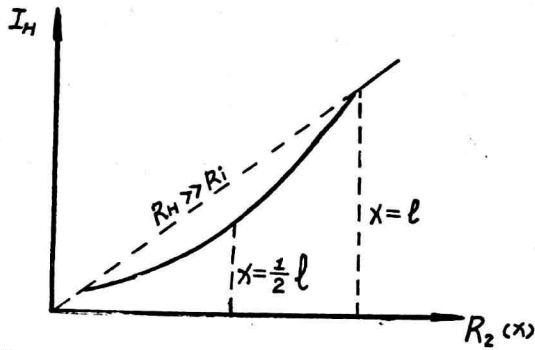


图 2—3

如 $R_H \gg R_i$ 则上式可简化为

$$I_H = \frac{U_1}{(R_1 + R_2) R_H} R_2 = f_1(R_2) = f_2(x)$$

此时化为线性关系如图 2—3 中虚线所示, 但实际上常常 R_i 是不能忽略, 因此必然还要考虑它的误差。

图 2—2 (c) 是流比计线路, 它可避免由于电源电压波动所引起的误差。

图 2—2 (d) 为电桥线路, 触点在正中时, $I_H = 0$, 触点不在正中, $I_H \neq 0$; 有正有负, 因此是一种有方向性的, 灵敏度很高的线路, 在自动系统测量电路中常为应用。

图 2—2 (e) 中仍是电桥电路, 其两个触点都是可动的, 其灵敏度比图 2—2 (d) 高出一倍。

除上述电阻变换器外还有炭阻变换器和电阻丝变换器等。关于电阻丝变换器的功用将在专门的章节讨论。

2. 利用改变电感的变换器

利用改变电感 L 的变换器是使带铁心的感应线圈的衔铁发生移动时, 线圈的电感就发生变化, 利用位移改变衔铁的位置, 就可以使电路中交流电流因电感变化而改变, 所以电流的变化表示出位移 x 的变化。

这种变换器应用很广, 因为它有如下优点:

- a. 简单, 可靠, 没有滑动触点——没有摩擦。
- b. 输出功率很大, 可直接用以测量或反馈。
- c. 可以在工业交流频率下工作。

它亦有缺点, 即其输出量大小与电源电压的频率有密切的关系。此种变换器多用在较小

的角位移和线位移的测量和控制跟踪系统，航空上作自动驾驶的敏感元件等。现在将一些电感变换器分别介绍如下。

(1) 改变自感系数的电感变换器

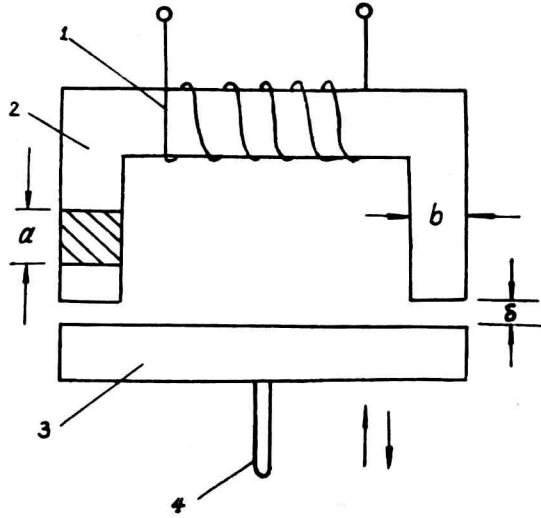


图 2-4

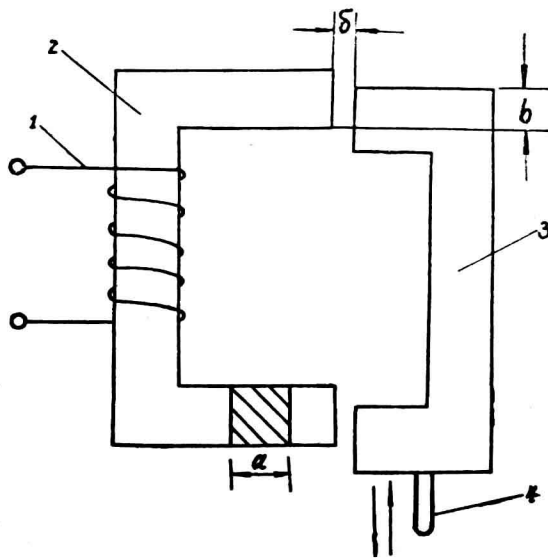


图 2-5