

粮食电子技术装备

粮食 电子 技术 与 装备

陈世平 沙立仁 主编

海洋出版社

海
洋
出
版
社

23.79
604

73.78
604

粮食电子技术与装备

陈世平 沙立仁 主编

海洋出版社

1988年·北京

内 容 简 介

本书以粮食行业中电子技术的应用为背景,介绍了各种电子检测技术和装置,顺序控制器和自动控制技术,微型计算机及其应用。各章均有若干个典型的应用实例。本书可作为粮食行业各部门大专院校应用电子系、自动控制系的专业课教材,也可供从事粮食电子装备工作的科研人员和工程技术人员参考。对于具有电子技术基础知识的粮食部门工作人员,也可以本书为自学读物。

DL74/07

责任编辑:刘莉蕾

特约编辑:王晓霞

粮 食 电 子 技 术 与 装 备

陈世平 沙立仁 主编

海 洋 出 版 社 出 版 (北京市复兴门外大街1号)

新华书店北京发行所发行 国防科工委印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 14.375 字数: 250千字 插页: 6

1988年4月第一版 1988年4月第一次印刷

印数: 1—6600册

ISBN 7-5027-0186-9/TP·5

统一书号: 15193·0926 定价: 4.90元

前 言

原粮食部教育局于1980年6月在重庆召开的十大城市职工教育协作会上决定,北京、天津和上海粮食部门合编一本电子技术在粮食行业中的应用方面的教材,作为粮食行业各部门电视大学和职工大学有关专业的专业课教材。“粮食电子技术及装备”课程是一门综合运用电子技术、控制技术和计算机技术的专业课程,它涉及的基础技术较为广泛。根据课程的性质,本书不可能详细介绍电子技术的基本原理和基础知识。本书读者需要具备这方面的基本知识。本书的重点是电子技术的综合应用;从检测技术、控制技术及微型计算机技术三方面着手,介绍它们的基本工作原理以及它们在粮食行业中的应用。在内容组织上以实际应用为主,兼顾必要的基本原理,通过剖析典型的应用范例,综合运用所学的基本知识,以期收到举一反三的效果。

在一定程度上,可以说本书是编写者们近年来在粮食电子技术领域中工作、学习和实践的小结。随着科学技术的不断发展,粮食行业应用电子技术,今后必然日新月异。希望这本书的问世,能为提高我国广大粮食职工、科技人员的电子技术水平,为促进粮食科学技术的发展作出贡献。

本书编写组的成员有:北京市粮食局工业处陈世平,北京市粮食工业公司吴东林、朱润临、宋伟,天津市粮油科研所丁新一、杨云伟、张燕,上海市粮食局职工大学刘正顺、沙立仁、励士杰。全书由陈世平、沙立仁主编。南京工学院自动控制系徐南荣教授主审。在本书编写过程中,得到原粮食部教育局、北京市、天津市和上海市粮食局的支持和指导。郑州粮食学院、郑州粮食科学研究设计所、武汉粮食工学院、无锡轻工学院、辽宁粮校、武汉粮食局教育办公室、湖北安陆粮机厂、原粮食部工业局、科技局、储运局、供销局等单位,以及北京市粮食科研所叶榕、北京市粮食工业公司王幼萍、天津市八一面粉厂李文俊、上海市粮食科研所周耀中和王寅观、上海饲料科研所陈焕章、上海市粮食储运公司郭奕伟、上海市第一粮库梁世丰、上海市第六粮库陈基珉、上海市第四粮食采购供应站谭承伟等同志也给予了具体帮助,提出了许多宝贵意见。北京市面粉四厂李富华、郝美湘同志参加了校订工作。在审稿过程中提出了许多指导性意见,对于改善本书的质量起到重要作用。中国科学院声学研究所王晓霞同志校核稿件的过程中给予了大量帮助,特在此一并表示谢意。

由于编者的水平有限,本书定有许多不妥和错误之处,希望读者批评指正。

《粮食电子技术及装备》编写组

1985年5月

目 录

绪 论	(1)
-----------	-------

第一篇 检测技术

第一章 传感器	(3)
---------------	-------

1-1 基本概念	(3)
----------------	-------

1-1-1 传感器的作用与分类	(3)
-----------------------	-------

1-1-2 传感器的测量电桥	(5)
----------------------	-------

1-1-3 传感器的性能指标	(9)
----------------------	-------

1-2 电阻式传感器	(9)
------------------	-------

1-2-1 应变片式电阻传感器的工作原理	(10)
----------------------------	--------

1-2-2 应变片式传感器的测量电路	(11)
--------------------------	--------

1-3 电感式传感器	(13)
------------------	--------

1-3-1 自感式传感器	(13)
--------------------	--------

1-3-2 差动变压器	(15)
-------------------	--------

1-3-3 测量电路	(16)
------------------	--------

1-4 电容式传感器	(17)
------------------	--------

1-4-1 工作原理	(17)
------------------	--------

1-4-2 测量电路	(20)
------------------	--------

1-5 光电式传感器	(21)
------------------	--------

1-5-1 基本原理	(22)
------------------	--------

1-5-2 基本性能参数	(22)
--------------------	--------

1-5-3 常用光电式传感器	(24)
----------------------	--------

1-6 压电式传感器	(30)
------------------	--------

1-6-1 石英晶体	(31)
------------------	--------

1-6-2 铁电体	(33)
-----------------	--------

1-7 热工测量用传感器	(33)
--------------------	--------

1-7-1 分类	(33)
----------------	--------

1-7-2 温度传感器	(34)
-------------------	--------

1-7-3 压力传感器	(40)
-------------------	--------

1-7-4 流量传感器	(42)
-------------------	--------

1-7-5 物位传感器	(45)
-------------------	--------

第二章 信号放大及转换	(47)
-------------------	--------

2-1 信号放大器	(47)
-----------------	--------

2-1-1 基本线性放大器	(47)
---------------------	--------

2-1-2 桥路放大器	(49)
-------------------	--------

2-1-3 电荷放大器	(51)
2-1-4 调制放大器	(53)
2-1-5 自动稳零双通道式信号放大器	(56)
2-2 信号比较器	(58)
2-2-1 比较电路及其主要技术指标	(58)
2-2-2 常用比较电路	(59)
2-3 模拟量与数字量的转换	(62)
2-3-1 模拟量与数字量	(62)
2-3-2 数字/模拟转换	(63)
2-3-3 模拟/数字转换	(67)
第三章 粮食电子检测装置	(72)
3-1 料位计	(72)
3-1-1 定点式料位计	(72)
3-1-2 连续式料位计	(75)
3-2 多点巡回测温器	(75)
3-2-1 采样器	(76)
3-2-2 模/数转换器	(77)
3-2-3 报警器	(79)
3-3 液体浓(密)度计	(79)
3-3-1 超声波式浓度计	(80)
3-3-2 谐振式浓度计	(82)
3-3-3 折光式浓度计	(88)
3-4 白度计	(89)
3-4-1 静态白度计	(90)
3-4-2 动态白度计	(90)
3-5 水分的测定	(92)
3-5-1 各种测水仪的工作原理	(92)
3-5-2 动态小麦水分测定仪	(93)
3-6 重量的测定	(95)
3-6-1 电子秤	(95)
3-6-2 自动售粮机	(98)
3-6-3 液体储罐称量计	(100)
3-7 流量的测定	(103)
3-7-1 皮带式流量计	(103)
3-7-2 冲击式流量计	(105)
3-7-3 液体流量计	(109)

第二篇 控制技术 (115)

第四章 顺序控制器 (115)

4-1 顺序控制器概述	(115)
4-1-1 顺序控制器的功能	(115)
4-1-2 顺序控制器的分类及形式	(116)

4-2 矩阵式顺序控制器	(117)
4-2-1 矩阵式顺序控制器的基本构成	(117)
4-2-2 步进式顺序控制器工作过程	(123)
4-2-3 步进式顺序控制器举例	(129)
4-3 可编顺序控制器简介	(134)
4-3-1 可编顺序控制器的工作原理和基本构成	(134)
4-3-2 可编顺序控制器举例	(136)
4-4 顺序控制器的应用	(139)
4-4-1 矩阵式自动倒仓控制装置	(139)
4-4-2 自动面粉码垛机	(141)
4-4-3 大米包自动堆包机	(145)
第五章 自动控制	(150)
5-1 自动控制的基本概念	(150)
5-2 对自动控制系统的基本要求	(151)
5-2-1 对自动控制系统的要求	(151)
5-2-2 自动控制系统的性能指标	(152)
5-3 自动控制系统的分类	(154)
5-4 粮食自动控制装置	(154)
5-4-1 磨谷机自动测速调速装置	(154)
5-4-2 气压磨粉机自动控制装置	(158)
5-4-3 碾米机负荷自动调节装置	(162)
第三篇 计算机的应用	(167)
第六章 微型计算机的基本结构和工作原理	(167)
6-1 硬件的基本结构	(168)
6-1-1 微计算机的工作过程	(169)
6-1-2 中央处理器 (CPU)	(170)
6-1-3 存储器	(171)
6-1-4 输入/输出接口	(172)
6-1-5 中断系统	(175)
6-2 软件基础	(178)
6-2-1 指令字的组成与寻址方式	(178)
6-2-2 指令的分类	(180)
6-2-3 程序设计	(181)
6-2-4 应用程序设计举例	(184)
第七章 微计算机检测和控制系统	(187)
7-1 系统的组成	(187)
7-1-1 数据处理方法设计	(187)
7-1-2 系统控制方法设计	(191)
7-1-3 计算机系统结构设计	(195)
7-2 ISMS系统硬件	(196)
7-2-1 主机及其扩展板	(196)

7-2-2 IEEE796总线	(197)
7-2-3 输入/输出通道板	(197)
7-2-4 外部设备	(199)
7-3 信号的输入	(208)
7-3-1 模拟量的输入	(208)
7-3-2 脉冲量的输入	(209)
7-3-3 开关量的输入	(209)
7-4 信号的输出及功率驱动	(209)
7-4-1 模拟量输出	(209)
7-4-2 脉冲量输出	(210)
7-4-3 开关量输出	(210)
7-5 ISMS系统软件	(211)
7-5-1 FORTH语言	(211)
7-5-2 支持程序	(213)
7-5-3 应用程序	(213)
7-5-4 实时管理	(214)
7-6 屏蔽技术和运行可靠性问题	(215)
7-6-1 干扰的来源	(215)
7-6-2 干扰输入的途径	(216)
7-6-3 抗干扰措施	(217)
7-7 在粮食行业中的应用	(219)
7-7-1 粮食温度检测	(219)
7-7-2 粮仓料位的检测	(220)
7-7-3 料仓门的自动控制	(220)
7-7-4 磨粉机组的微计算机巡回检测	(220)

绪 论

在我国粮食行业中应用电子技术首先开始于粮食温度的检测，进而应用于自动化售粮技术。70年代以后，在粮食自动检测技术方面有了较大的发展，从测量温度发展为测量粮食水分、食油浓度、面粉白度、麦仓料位等。在控制技术方面，自动堆包机、自动装包机、碾米机、磨粉机、粮食料门的自动控制等技术革新成果中都广泛应用了电子技术，所采用的电子元件，也由分立元件逐步过渡到集成电路元件。1976年以后，在粮食生产过程中开始将电子计算机应用于生产指标的检测和生产过程的控制，并取得了较好的成效。随着我国微型计算机工业的发展，粮食行业也已开始应用微型计算机。但是，与其他行业相比，目前粮食行业中对电子技术的应用，仍存在着很大的差距。

目前电子技术在粮食行业中主要应用于检测和控制两个方面。电子数字计算机作为一种新型的工具，则兼有检测和控制的功能。本书设有三篇。第一篇为检测技术，第二篇为控制技术，第三篇为计算机应用。

第一篇检测技术分为三章。第一章介绍在粮食行业中广泛使用的各种传感器，这是检测技术的基础。通过传感器，将粮食行业中各种待测的非电量转化为电量；第二章介绍如何把已经转换为电量的信号进行放大和变换为数字量，并着重介绍了各式各样的常用的放大电路，模拟量和数字量相互转换的装置；第三章介绍粮食电子检测装置。虽然由于篇幅限制，不可能介绍目前所有的粮食电子检测装置，但在各节中都讨论了具有代表性的一些例子。

第二篇控制技术分为两章。第四章介绍顺序控制器，这部分属于开环控制系统的范畴；第五章介绍属于闭环系统的自动控制。各章在分别介绍控制原理的基础上，都列举一些粮食行业中的实例以说明其应用方法。

第三篇着重介绍微型计算机技术及其在粮食行业中的应用。分为两章，第六章介绍微型计算机本身的原理和技术，包括硬件和软件两部分；第七章主要讨论怎样构成一个计算机检测和控制系統，并举出了微型计算机在粮食行业应用的一些具体实例。

第一篇 检测技术

在粮食行业中，需要经常测量各种物理量。例如在面粉加工过程中，需要监测各处的温度、水分、流量、物位等物理量的变化。操作人员通过各种仪器设备观察到这些物理量的大小和变化，据此了解实际的生产状况，并调节有关的执行部件（如阀门、开关）以控制生产。

由于电信号（如电压、电流）的放大、变换和传输比较容易实现，因此，在绝大多数检测装置中总是先把各种非电物理量转换成电量，再加以放大和转换处理，最后通过各种方式将所检测的信号显示、打印出来。如果需要，还可以利用所检测出的信号来自动控制生产过程。信号的检测过程可以用图1-1表示。

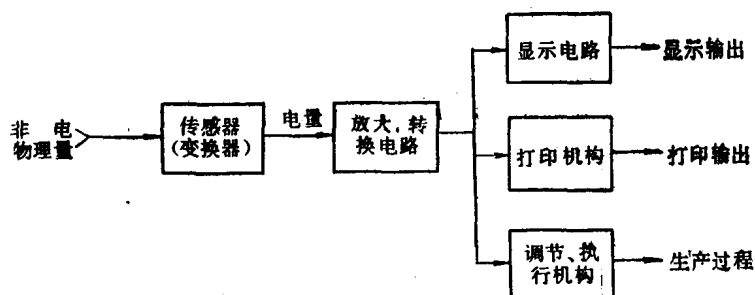


图1-1 信号检测过程框图

本篇讨论各种信号的检测技术，分为三章。第一章介绍能够实现非电物理量转变为电量（电信号）的各种器件（通称传感器）；第二章讨论电信号的放大与转换；第三章介绍各种粮食电子检测装置。关于应用微型计算机进行检测的问题将在第七章另作介绍。

第一章 传 感 器

1-1 基 本 概 念

1-1-1 传感器的作用与分类

任何一个现代化生产的工厂里，在粮食加工、食品加工过程中，使用着各种各样的测量仪器，用它们检测和操纵生产过程。在各类生产过程中，人们会遇到多种表征生产过程状态的物理量，如温度、压力、流量、重量、长度、速度、浓度等。为了进行生产过程中的各种技术操作、管理、调度和控制，必须设法测量出这些状态。现代测量技术发展上的一个显著特点，就是普遍采用电气、电子测量仪器来测定实际上几乎一切的物理量。这是由于电气、

电子测量仪器具有一系列的优点：可以连续测量和记录；可以实施远距离测量；测量的准确性和灵敏度高；测量范围广等。为了使用电气、电子仪器来检测各种非电物理量（温度、压力、流量、重量、浓度等），首先应该解决的是如何将非电物理量转变为电量的问题。在检测技术中，能够将非电量变换为电量的器件被称为传感器，有时，人们将传感器也称为一次仪表。

传感器应用在非电量电测技术领域，它将诸如温度、压力、应变、流量、转速、振动幅度等等非电量转换为电量（如电压信号），然后送至电气测量线路或电子仪器进行测量、显示和记录。由于测量对象牵涉面极为广泛，另一方面，对于同一物理量又可以采用不同的传感器实现转换过程，所以各种形式的传感器的工作原理差异也就很大。

可以从不同的角度对传感器进行分类。

1. 根据输入物理量分类

例如可分为速度传感器、温度传感器、压力传感器等等。这种实际上依用途分类的方法给使用者带来一定的方便，容易根据测量对象选择所需要的传感器，但缺点是名目品种繁多，对建立传感器的基本概念，掌握其基本工作原理和分析方法是不合适的。

2. 按工作原理分类

依据工作原理对传感器进行分类的方法是最为合适的。例如可分为压电式、动圈式、电磁式、差动变压器式等。这种分类法的优点是有益于对传感器的工作原理作归纳性的研究。

3. 按能量传递方式分类

所有传感器可分为有源传感器和无源传感器两大类。如果被测的非电量在传感器中被变换为电势，则我们称这类传感器为有源传感器；如果被测的非电量在传感器中被变换为各种电参数，如电阻、电感或电容，我们称这类传感器为无源传感器。有源传感器正如一台微型发电机，它能将非电量转换为电功率，它所配合的测量电路，通常是信号放大器。这类传感器最典型的有电磁式、电动式、压电式、热电式（热电偶）等等。在一部分传感器中，能量的传递是可逆的。无源传感器并不起换能作用，被测非电量仅对传感器中的能量起控制或调制作用，它必须配有辅助能源（电源）。这类传感器最典型的有电阻式、电感式、电容式等等。因为无源传感器本身并不是一个信号源，所以它所配合的测量放大器与有源传感器不一样，通常是电桥电路或谐振（用在失谐状态）电路。

有些传感器需要配有一次敏感元件，如图1-2所示的压力传感器。膜片先把压力转换成位移，然后再通过电阻应变片把位移转换为电信号。膜片就称为一次敏感元件。又如图1-3所示的测量动态力的电动式（动圈式）传感器，它配有弹簧、阻尼、质量块等组成的力学系统的一次敏感元件。根据测量需要，有各种各样的一次敏感元件，它们的性能对传感器的输入特性起着关键作用。

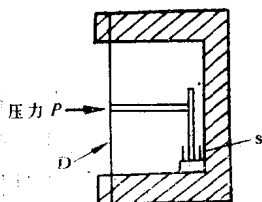


图1-2 压力传感器
D是膜片，s是电阻应变片

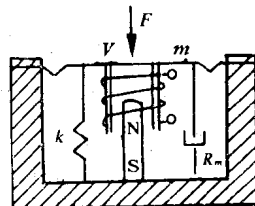


图1-3 电动式测力传感器原理图
 m 是质量块质量， R_m 是阻尼系数， k 是弹性系数

4. 根据输出信号的性质分类

有模拟式传感器和数字式传感器两大类。模拟式传感器如要配合数字显示或数字控制装置,则需要附加模-数(A/D)转换环节,而数字式传感器不需要进行A/D转换,因此当需要进行数字显示和控制时就比较方便。但是,数字式传感器的研制工作比较困难,成本也较高。

1-1-2 传感器的测量电桥

电阻、电感、电容式等无源传感器的测量电路通常采用电桥电路或谐振电路(指电感或电容谐振电路,用在失谐状态)。电阻式传感器可采用直流电桥或交流电桥,而电感、电容式传感器则必须采用交流电桥。

1. 直流电桥

图1-4所示为一直流单臂电桥,电桥桥臂的电阻为 $R_1 \sim R_4$,联接在b, d间的测量指示仪表G的内阻为 R_g ,外加电源电压 V_s 接在a, c间。在传感器中采用的不平衡直流电桥一般具备下列条件:电源电压 V_s 的数值通常是恒定的(或者至少它的变化是很小的),四个电阻桥臂中三个为已知电阻,另一个为待测量的未知电阻。在已知电压 V_s 条件下,我们可以根据指示仪表所反映出的不平衡电流 I 求得未知电阻值。

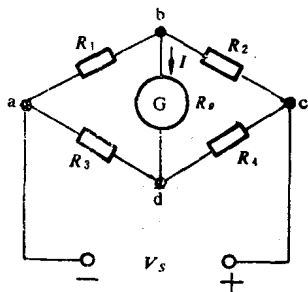


图1-4 直流电桥

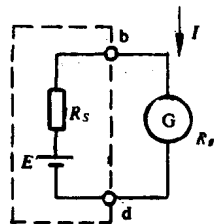


图1-5 等效电路

分析桥路时,当认为电源电压 V_s ,电阻 $R_1 \sim R_4$ 为已知,我们来推导出不平衡电流 I 的关系式。应用等效发电机原理,把指示仪表G以外的电路等效成一个具有内阻 R_s ,电动势为 E 的电源,如图1-5所示。其中 E 等于引出端b, d的开路电压

$$E = \frac{V_s R_1}{R_1 + R_2} - \frac{V_s R_3}{R_3 + R_4} \quad (1-1)$$

R_s 就是把原来电路中的电源短接后,引出端b, d间的总电阻

$$R_s = R_1 // R_2 + R_3 // R_4 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \quad (1-2)$$

这样就可以得到流过指示仪表G的不平衡电流 I 为

$$I = \frac{E}{R_s + R_g} = V_s \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_g (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)} \quad (1-3)$$

如果电桥平衡($I = 0$),就有 $R_1 R_4 = R_2 R_3$ 。若电桥的一个桥臂是未知电阻 R_x ,设 $R_1 = R_x$,可得 $R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4}$ 。

图1-4的b, d端通常接至放大器, 一般放大器的输入阻抗比较大, 可以认为电桥输出端近似开路, 这样, 式(1-1)所示的电压 E 可认为就是电桥的输出电压。

为了分析电桥的输出电压与电桥桥臂电阻变化量之间的关系, 我们假设原始的电桥电阻 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$, 设电桥对臂两电阻 R_1 和 R_3 的阻值按正方向变化, $R'_1=R'_3=R+\Delta R$, 令电桥另一对臂的两电阻 R_2 和 R_4 的阻值按负方向变化, $R'_2=R'_4=R-\Delta R$, 这样, 当电桥各臂阻值变化 ΔR 后, 电桥的输出电压 V_{bd} 为

$$V_{bd} = E = \frac{\Delta R}{R} V_s \quad (1-4)$$

可见, 在这种情况下, 电桥的输出电压与桥臂电阻的变化量呈线性关系。以后, 我们会看到, 电阻应变片的桥路经常采用这种接法。

2. 交流电桥

交流电桥的电路图如图1-6所示, 电桥各桥臂上的阻抗可以包含有电阻、电感、电容。在电桥a, c两端之间接入正弦交流电压 $\dot{U}$, 电桥各臂的阻抗为 $Z_1 \sim Z_4$, 如果交流电桥平衡 (即 $I_0=0$), 则有如下关系:

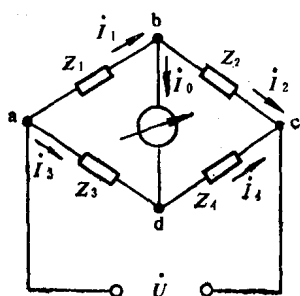


图1-6 交流电桥

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2, \quad I_3 = I_4, \\ I_1 Z_1 &= I_2 Z_2, \quad I_3 Z_3 = I_4 Z_4 \end{aligned}$$

求得交流电桥平衡的条件为

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (1-5)$$

把各臂的阻抗用复数形式展开

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jX_1, & Z_2 &= R_2 + jX_2, \\ Z_3 &= R_3 + jX_3, & Z_4 &= R_4 + jX_4 \end{aligned}$$

代入式(1-5)中得

$$(R_1 R_4 - X_1 X_4) + j(R_4 X_1 + R_1 X_4) = (R_2 R_3 - X_2 X_3) + j(R_3 X_2 + R_2 X_3) \quad (1-6)$$

由式(1-6)进一步得到交流电桥的平衡条件为

$$\begin{cases} R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3, \\ R_4 X_1 + R_1 X_4 = R_3 X_2 + R_2 X_3. \end{cases} \quad (1-7)$$

由以上两个等式可知, 要使交流电桥达到平衡, 至少要调节电桥电路的两个参数。

一般情况下, 传感器采用推挽接法 (或称差动接法)。在交流电桥中推挽传感器有两种接法, 分别如图1-7中(a)和(b)所示。在忽略具有高 Q 值的电感传感器的电阻的条件下, 对于图1-7(a)的桥路, 其输出电压 $\dot{U}_0$ 近似为

$$\dot{U}_0 \approx \left(\frac{R}{2R} - \frac{j\omega(L - \Delta L)}{2j\omega L} \right) \cdot \dot{U}_s = \frac{1}{2} \dot{U}_s \frac{\Delta L}{L}$$

$\dot{U}_0$ 与 $\dot{U}_s$ 的相位相同, 取它们的有效值, 即有

$$U_0 \approx \frac{1}{2} U_s \frac{\Delta L}{L} \quad (1-8)$$

对于图1-7(b)的接法, 在相同的条件下, 如果令 $\omega L = R$, 可求出桥路输出电压 U_0 , 这时, 交流电桥的输出电压 U_0 将近似地为图1-7(a)中电桥接法下输出电压的两倍。

从式(1-4)、式(1-8)可知, 对于不平衡电桥, 输入电压 V_s 的变化量 ΔV_s 将使输出端

有一个共模信号输出，这是我们所要注意避免的。而平衡电桥就不会产生这样的问题。

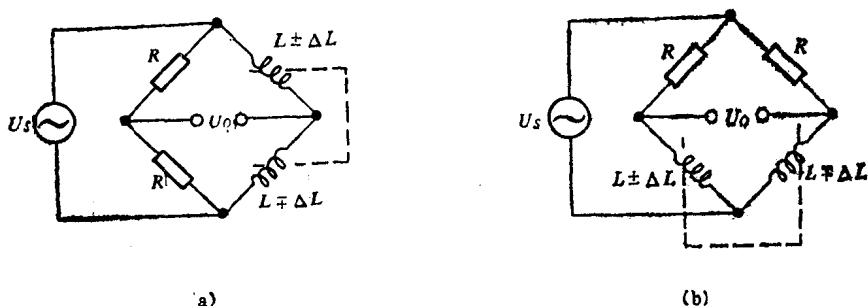


图1-7 推挽式传感器电桥电路

3. 勃鲁宁 (Blumlien) 电桥

这是一种具有强耦合比率臂的桥路，如图1-8所示。耦合比率臂可以化成图1-9(a)的四端网络，它的T型等效网络如图1-9(b)所示。如果忽略比率臂的电阻，那么将有

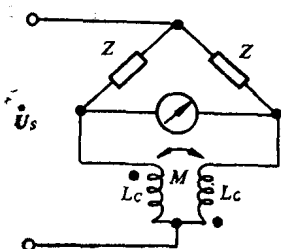


图1-8 勃鲁宁电桥

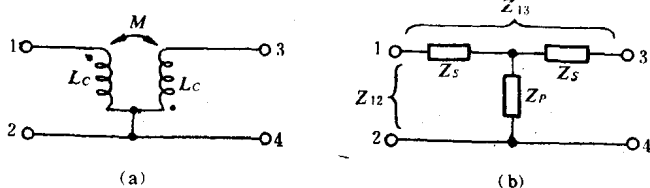


图1-9 强耦合比率臂的四端网络

(a)耦合比率臂的四端网络 (b)T型等效网络

$$Z_s = j\omega(L_c + M), \quad Z_p = -j\omega M \quad (1-9)$$

和

$$Z_{11} = Z_s + Z_p = j\omega L_c, \quad Z_{13} = 2Z_s \quad (1-10)$$

耦合系数为

$$K = \frac{Z_p}{Z_s + Z_p} = 1 - \frac{Z_s}{Z_{11}} \quad (1-11)$$

和

$$Z_s = Z_{11}(1 - K) = j\omega L_c(1 - K) \quad (1-12)$$

比率臂线圈的绕向可以作如下的安排，在电桥平衡时电流从电源经过比率臂使 K 为正值，这时，比率臂的阻抗 $Z_s = Z_{11}(1 - K)$ ，由于因子 K 的关系， Z_s 减少了。当 $K = 1$ ， Z_s 将变为零（即100%耦合），这意味着比率臂两端没有电压降，与比率臂并联的杂散电容与电缆电容都不能起作用。勃鲁宁电桥的这种重要特性，使电桥的接地和屏蔽问题简化了，也就是说电路的零点稳定度得到了很大改善。对于不平衡电流，由于这时电流的流向是从1端到3端，或反之，所以这时耦合系数 K 具有相反的符号（参阅图1-9(a)）。在100%耦合情况下耦合系数 $K = -1$ ，这时 $Z_s = Z_{11}(1 - K) = 2Z_{11}$ 。电感比率臂两端有了电压降。

图1-10表示当勃鲁宁电桥的耦合比率臂用图1-9(b)的T型等效网络代替后的阻抗电桥，其输出电压 U_0 可推导出如下：

$$\dot{U}_o = \frac{\Delta Z}{Z} \dot{U}_s \frac{\left\{1 + \frac{Z_{11}(1-K)}{Z}\right\} / \left\{1 + \frac{Z_{11}(1+K)}{Z}\right\}}{1 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{Z_{11}(1-K)}{Z} + \frac{Z}{Z_{11}(1-K)} \right\} + \frac{Z + Z_{11}(1-K)}{Z_o}} \quad (1-13)$$

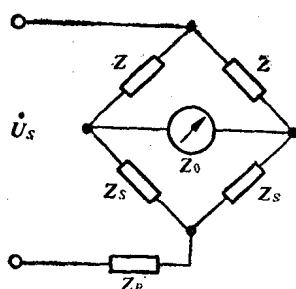


图1-10 T型网络的阻抗电桥

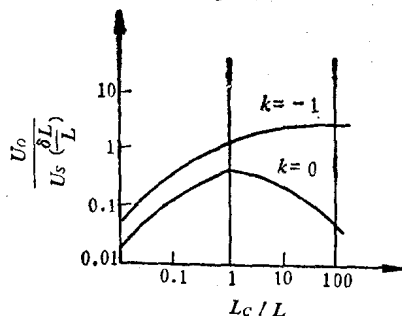


图1-11 勃鲁宁电桥推挽式电感传感器的灵敏度特性

(1) 高Q值推挽电感传感器 这时 $Z = j\omega L$, $\Delta Z = j\omega \Delta L$, 设 $K = -1$, $Z_o \rightarrow \infty$, 代入式(1-13) 近似地得到输出电压 U_o 为

$$U_o = \frac{\Delta L}{L} U_s \frac{4L_c/L}{2L_c/L + 1} \quad (1-14)$$

式(1-14) 对应的灵敏度特性曲线如图1-11所示。为了比较起见, 图中同时画出了去耦比率臂 ($K=0$) 时的输出电压 U_o 的灵敏度特性曲线, 其值为

$$U_o = \frac{\Delta L}{L} U_s \frac{2L_c/L}{(L_c/L + 1)^2} \quad (1-15)$$

可以看出, 具有强耦合比率臂电桥在整个范围内具有较高的灵敏度。在 L_c/L 值低的时候, 这个系数是变化的。在 $L_c/L > 2$ 时, 可以得到较平坦的灵敏度特性。而去耦合比率臂电桥得不到平坦的灵敏度特性。

(2) 推挽式电容传感器 这时 $\Delta Z/Z = \Delta C/C$ 。在 100% 耦合情况下, $K = -1$, 如果 $Z_o \rightarrow \infty$, 则根据式(1-13) 可得

$$U_o = \frac{\Delta C}{C} U_s \frac{4\omega^2 L_c C}{2\omega^2 L_c C - 1} \quad (1-16)$$

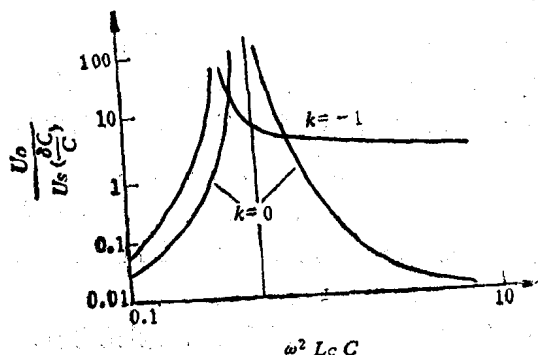


图1-12 勃鲁宁电桥推挽式电容传感器的灵敏度特性

因子 $\frac{4\omega^2 L_c C}{2\omega^2 L_c C - 1}$ 代表桥路的灵敏度, 这个灵敏度与 $\omega^2 L_c C$ 的关系曲线示于图 1-12。

谐振发生在 $\omega^2 L_c C = \frac{1}{2}$ 。当低于谐振点时, 灵敏度系数随 $\omega^2 L_c C$ 变化; 当高于谐振点时, 灵敏度系数倾向接近 2。因此为获得优良稳定的灵敏度特性, 应使 $\omega^2 L_c C > 2$ 。

如果是去耦合比率臂 ($K=0$), 那么电桥输出电压 U_o 为

$$U_o = \frac{\Delta C}{C} U_s \frac{-2\omega^2 L_c C}{(\omega^2 L_c C - 1)^2} \quad (1-17)$$

对应的灵敏度曲线也示于图1-12, 可以看出, 它得不到平坦的灵敏度特性。

1-1-3 传感器的性能指标

传感器质量的好坏, 一般通过若干性能指标来表示, 下面介绍传感器的一些主要的性能指标。

(1) 量程 传感器的量程是指测量上限和下限的代数差。例如, 一个位移传感器的测量下限是 -5mm , 测量上限是 $+5\text{mm}$, 则这个传感器的量程为 10mm 。

(2) 范围 传感器能按规定精确度进行测量转换的被测量的上限和下限之间的区间。

(3) 灵敏度 传感器的灵敏度是指在稳定状态下它的输出变化量对输入变化量的比值, 一般用 S 表示。它也就是在稳定状态下传感器的输入输出静特性曲线上各点的切线斜率。具有线性静特性的传感器的灵敏度 S 是常数, 而具有非线性静特性的传感器的灵敏度在整个量程内是变化的, 它不是一个常数。

(4) 分辨力 传感器可能检测出的被测信号的最小增量。

(5) 误差 传感器的误差是被测量的指示值与真实值之间的差。

(6) 重复性 传感器在同一工作条件下, 对被测量的同一数值在同一方向上进行重复测量时, 测量结果的一致性。

(7) 线性度 线性度用来说明传感器的输出量与输入量的实际关系曲线偏离直线的程度。通常采用如下的最简单的线性度表示法。首先校正传感器的零点和对应于最大输入量 $x_{\max}$ 的最大输出量 $y_{\max}$ 点, 并以这二点所决定的直线作为基准直线, 然后在图上求出输入、输出实际特性曲线与基准线之间的最大偏差值 $|y_i - y'_i|_{\max}$, 线性度 E_L 定义为

$$E_L = |y'_i - y_i|_{\max} / y_{\max}$$

如果传感器的实际特性为理想的直线关系, 则 E_L 就成为线性误差。

(8) 过载 表示传感器的规定性能指标在不致引起永久改变的条件下, 允许超过测量范围的能力。一般用允许超过测量上限 (或下限) 的被测量值与量程的百分比表示。

1-2 电阻式传感器

电阻式传感器是利用电阻元件把待测的非电物理量如力、位移、形变及加速度等变换成电阻阻值的变化, 通过对电阻阻值的测量达到测量该非电物理量的目的。电阻式传感器按其工作原理可分为电位计式电阻传感器和应变片式电阻传感器二类。

电位计式传感器工作于电阻阻值变化较大的状态, 适用于被测量变化较大的场合, 这类传感器原理与一般电位计相同, 故不再赘述。

应变片式电阻传感器工作于电阻阻值变化极小的状态, 它的灵敏度较高。

1-2-1 应变片式电阻传感器的工作原理

导体或半导体材料在外界条件作用下 (如压力等) 产生机械变形, 其阻值将发生变化,