



21世纪电气信息学科立体化系列教材

现代检测技术

● 主编 贺良华

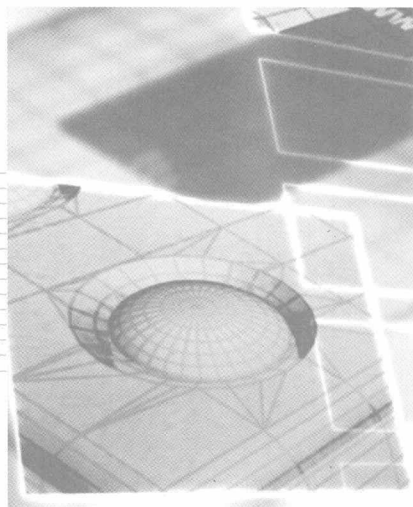
华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



21世纪电气信息学科立体化系列教材

现代检测技术

主 编 贺良华
副主编 杨 帆 刘小红 张秀芝
徐天奇 陈爱菊



华中科技大学出版社

(中国·武汉)

图书在版编目(CIP)数据

现代检测技术/贺良华 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2008年9月
ISBN 978-7-5609-4798-3

I. 现… II. 贺… III. 自动检测-高等学校-教材 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 110115 号

现代检测技术

贺良华 主编

策划编辑:王红梅

责任编辑:王红梅 肖 潇

责任校对:朱 霞

封面设计:秦 茹

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉众心图文激光照排中心

印 刷:湖北省通山县九宫印务有限公司

开本:787mm×960mm 1/16

印张:23 插页:2

字数:475 000

版次:2008年9月第1版

印次:2008年9月第1次印刷

定价:38.80元

ISBN 978-7-5609-4798-3/TP·661

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)



21世纪电气信息学科立体化系列教材

编审委员会

顾问：

潘 垣（中国工程院院士，华中科技大学）

主任：

吴麟章（湖北工业大学）

委员：（按姓氏笔画排列）

王 斌（三峡大学电气信息学院）

余厚全（长江大学电子信息学院）

陈铁军（郑州大学电气工程学院）

吴怀宇（武汉科技大学信息科学与工程学院）

陈少平（中南民族大学电子信息工程学院）

罗忠文（中国地质大学信息工程学院）

周清雷（郑州大学信息工程学院）

谈宏华（武汉工程大学电气信息学院）

钱同惠（江汉大学物理与信息工程学院）

普杰信（河南科技大学电子信息工程学院）

廖家平（湖北工业大学电气与电子工程学院）

内 容 简 介



本书是 21 世纪电气信息学科立体化系列教材之一。全书系统地阐述了现代检测技术的基本理论和相应的传感器工作原理、结构、特性以及大量的应用实例。全书共分 8 章:第 1 章介绍检测技术与传感器基础知识,第 2 章介绍电学参量的检测技术,第 3 章介绍机械量检测技术,第 4 章介绍温度检测技术,第 5 章介绍物化特性参数检测技术,第 6 章介绍新型检测技术,第 7 章介绍现代检测系统设计,第 8 章介绍现代检测技术的应用。

本书结构合理,内容丰富,具有系统性、先进性和实用性,反映了现代检测技术领域的新成果。为了帮助读者掌握各章节的内容,每章都设有一定的思考题和习题。

本书可以作为自动化类专业、测控技术专业、仪器仪表专业、电子与信息工程专业的本、专科教材,也可以作为相关专业的研究生教材及工程技术人员的参考书。

前 言

为了正确地认识对象,及时、准确地获取各种信息,解决人们在生产、工程、科研等各个领域遇到的各种问题,必须首先了解和掌握获取各类信息并合理处理信息的技术原理和方法。

现代科学技术的迅速发展,特别是电子技术、计算机技术、传感器技术、信息处理技术的发展,极大地促进了人们对信息资源的需求,也为人们提供了获取、处理与应用信息的新技术和新方法。

本书全面系统地介绍了各种经典和新型的检测技术原理和方法,涉及诸多行业、领域的参、变量检测。全书以“信号的采集—信号的处理与转换—数据处理—系统设计—应用”为逻辑主轴,介绍了现代检测技术的各个环节。

本书首先介绍了检测技术与传感器的基础理论知识;接着详细介绍了获取各类信息(如电学量、机械量、热参量、物化参数、光学信息等)的各种传感器检测技术的原理和方法,以及新型检测技术;然后对获得的信息的处理与转换技术以及数据处理技术作了深入探讨;并对现代检测系统设计的一些关键技术予以了详细介绍;最后列举了大量工程应用实例。

本书是 21 世纪电气信息学科立体化系列教材之一。为了适应新形势的要求,本书在编写过程中既注重基础知识,又注重知识的新颖性;在结构体系和内容安排上注重系统性、先进性和实用性;内容丰富,图文并茂,并列举了大量实例、思考题和习题,既可以做教材,也适合自学。与同类书籍相比,本书的特点如下。

- (1) 既有传统检测技术原理和方法的介绍,又有新型检测技术的详细讲述,并以“技术”为重点组织各章节内容,对有关的检测技术知识做了详略得当的处理;
- (2) 既注重基础知识讲述,又注重实用技术和方法介绍,使初学者既能掌握基本理论知识,又能获得实践技能;
- (3) 突出被测参量,围绕被测参量介绍相关的检测技术,便于工程技术人员参考;
- (4) 在详细介绍理论知识的基础上,列举了大量工程应用实例,从理论到实践,使读者容易掌握相关的检测技术知识。

本书是作者在多年的教学和科研的基础上精心组织编写的。第 1 章由杨帆编写,第 2、7、8 章由贺良华编写,第 3 章由张秀芝编写,第 4 章由徐天奇编写,第 5 章由刘小红编

写,第6章由贺良华与陈爱菊共同编写(其中陈爱菊编写1~3节,贺良华编写4~7节)。本书编写大纲由贺良华提出,经编写组共同深入、细致地研究制定,全书由贺良华负责修改和统稿。

在编写过程中,许多同行专家对本书提出了宝贵意见和建议,也得到了华中科技大学出版社的大力支持,在此表示衷心感谢。同时,本书在编写过程中参考了许多文献,在此对所有文献的作者表示崇高的敬意和由衷的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

21 世纪电气信息学科立体化系列教材

《现代检测技术》编写组

2008 年 4 月



1 传感器与检测技术基础	(1)
1.1 检测技术基础	(1)
1.2 传感器基础知识	(17)
本章小结	(29)
思考题与习题	(30)
2 电学参量检测技术	(31)
2.1 电学参量及其检测技术概述	(31)
2.2 普通电压、电流的检测	(31)
2.3 频率、周期、相位的检测	(40)
2.4 功率及功率因数的检测	(47)
2.5 电学参量的电力检测技术	(48)
本章小结	(55)
思考题与习题	(55)
3 机械量检测技术	(57)
3.1 机械量及其检测技术概述	(57)
3.2 力的检测	(58)
3.3 压力的检测	(71)
3.4 力矩的检测	(83)
3.5 位移的检测	(85)
3.6 物位的检测	(92)
3.7 速度、加速度及振动检测	(96)
3.8 流量的检测	(105)
3.9 无损探伤	(113)
本章小结	(115)
思考题与习题	(116)

4 温度检测技术	(119)
4.1 温度及其检测技术概述	(119)
4.2 热电偶温度检测技术	(122)
4.3 热电阻温度检测技术	(132)
4.4 温度变送器	(134)
4.5 半导体温度检测技术	(139)
4.6 其他温度检测技术	(146)
本章小结	(149)
思考题与习题	(150)
5 物化特性参数检测技术	(151)
5.1 物化特性参数及其检测技术概述	(151)
5.2 气体检测	(152)
5.3 颜色识别	(162)
5.4 湿度检测	(170)
5.5 黏度检测	(177)
5.6 密度检测	(183)
5.7 电导率检测	(192)
5.8 磁场强度检测	(197)
5.9 酸碱度检测	(206)
5.10 物质成分检测	(215)
本章小结	(231)
思考题与习题	(231)
6 新型检测技术	(233)
6.1 光电池	(233)
6.2 光敏半导体器件	(236)
6.3 图像检测技术	(243)
6.4 生物传感技术	(248)
6.5 仿生传感器	(259)
6.6 微传感器技术	(266)
6.7 智能传感器技术	(271)
本章小结	(275)
思考题与习题	(276)

7 现代检测系统设计	(277)
7.1 现代检测系统的结构设计	(277)
7.2 现代检测系统设计方法	(278)
7.3 智能仪器	(303)
7.4 个人仪器及系统	(313)
7.5 虚拟仪器及系统	(316)
本章小结	(319)
思考题与习题	(319)
8 现代检测技术的应用	(321)
8.1 电学参量的检测	(321)
8.2 机械量检测	(324)
8.3 温度检测	(325)
8.4 物化特性参数检测	(327)
8.5 图像检测	(330)
8.6 RLC 智能检测	(331)
8.7 虚拟仪器设计	(336)
本章小结	(338)
思考题与习题	(339)
附录	(340)
附录 1 常用电学参量电力检测传感器	(340)
附录 2 各类机械量传感器性能比较	(342)
附录 3 常用热电偶分度表	(350)
附录 4 各种黏度和密度检测方法	(351)
参考文献	(355)

1

传感器与检测技术基础

本章内容主要由检测技术基础与传感器基础知识两部分组成。

第1节首先介绍检测技术基础知识、检测技术概念及其发展,接着介绍常见的转换技术(电桥、调制解调、滤波、模/数转换),阐述在检测过程中常用的、主要的名词术语,最后介绍误差的表示方法、分类和来源,误差的估计和校正,各种误差的合成与分配等处理办法。第2节详细介绍传感器基础知识,包括它的概念、组成以及分类,静态、动态特性,以及传感器的应用领域和发展趋势。

1.1 检测技术基础

检测技术是自动化学科的重要组成部分,一个完整的检测过程包括信号的获取,信号的转换、存储与传输,信号的分析处理及显示记录。只有了解和掌握了基本技术理论,再辅以现代检测手段,才能实施有效、精确的测量,以验证科学理论或研究成果的正确性和可靠性。

1.1.1 检测技术概述

检测技术属于信息科学范畴,是信息技术三大支柱(检测控制技术、计算机技术、通信技术)之一,也是现代信息链(获取→处理→传输→应用)的源头技术。获取被测对象的信号并进行处理,将有用信息输送给自动控制系统或操作者,这些工作均需要以检测技术为基础。另外,测量各种物理量、化学量或生物量等参数量值、检测产品质量,进行计量标准的传递和控制等工作,也都需要以检测技术为基础。

检测技术的基本任务是获取有用信息,通常包括测量、计量、计算、检验、判断等多层含义,具有比单纯的测量更为丰富的内容,具体工作如下。

(1) 比较被测量与标准量,获得被测对象的数值结果。

(2) 比较被测量与设定值,获得被测对象在性能、参数、质量、功能等方面的评价,常用通过/不通过、合格/不合格、正常/超限、好/坏等来表示。

(3) 对测试数据进行各种处理,根据测试要求不同,处理结果形成各种信息;也可进行各种操作。

据统计资料显示,在现代化工程装备中,检测环节的成本已达到装备系统总成本的50%~70%。检测环节已成为保证装备实际性能指标和正常工作的重要手段。如为保证火箭的正常发射和运行,需要得到火箭的飞行速度、加速度、航向等几百个状态参数;大规模集成电路的加工中,微米、亚微米线宽必须以亚微米或纳米级的高精度检测技术来保证。

检测技术已渗透到科学研究、工程实践和日常生活的各个方面,其发展代表着科技进步的前沿,决定生产力和科学技术的发展水平。科学技术的迅猛发展,尤其是微电子、计算机和通信技术的发展,以及新材料、新工艺的不断涌现,使得检测技术在建立检测理论的基础上不断向数字化、网络化和智能化方向发展,成为以计算机为核心的现代检测技术。

现代检测技术将传感器技术、通信技术、计算机技术三大信息技术有机结合,使检测领域发生了巨大变化。

计算机技术与传感器技术的结合产生了智能传感器,智能传感器技术及其研究在国内外测控领域扮演着举足轻重的角色;计算机技术和通信技术的结合产生了计算机网络技术,使人类真正进入信息时代;计算机网络技术与智能传感器的结合产生了基于TCP (transfer control protocol) / IP(internet protocol)的网络化智能传感器,使各种现场数据直接在网络上传输、发布和共享,且可在网络的任何节点上对现场传感器进行在线编程和组态,使测控系统结构和功能发生质的变化。

1.1.2 转换技术概述

被测物理量经传感环节转换为电阻、电容、电感或电压、电流、电荷等电参量的变化,为了用被测信号驱动显示、记录和控制等仪器,或进一步将信号输入计算机进行数据处理,以及消除或减小各个环节的干扰影响,通常需要对传感后的信号进行转换,以适应进一步处理的需要。本书简要介绍一些常见的转换技术(参见7.2节),其他更为复杂的信号转换及调制技术可参阅有关文献。

1. 电桥电路

电桥电路是将电阻、电容、电感等参数的变化转换为电压或电流输出的一种常用的测量转换电路。电桥电路简单可靠,而且具有很高的精度和灵敏度。电桥按其所采用的激励电源类型可分为直流电桥和交流电桥两类,按其工作原理又可分为归零法电桥和偏值法电桥两种,其中偏值法的应用更为广泛。

1) 直流电桥

电桥结构(见图 1-1)非常简单,电阻 R_1, R_2, R_3 和 R_4 构成四个桥臂, e_x 为激励电源, e_o 为电桥输出,该输出可以直接用于驱动仪表,也可以接入后续放大电路。

在测量电路中,利用直流电桥桥臂中一个或几个电阻值变化引起电桥输出电压变化的原理,可以采用电阻式敏感元件组成桥臂作为转换电路接入测量系统。

图 1-1 所示中电桥输出的电位差值(b、d 间)为

$$\begin{aligned} e_o = U_{ab} - U_{ad} &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} e_x - \frac{R_4}{R_3 + R_4} e_x \\ &= \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} e_x \end{aligned} \quad (1-1)$$

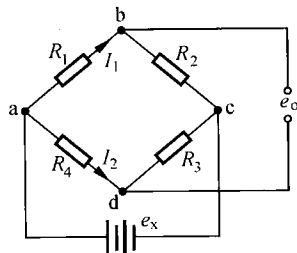


图 1-1 直流电桥

显然当 $R_1 R_3 - R_2 R_4 = 0$ 时,电桥输出为零,此时称电桥平衡。因此,直流电桥的平衡条件可以记作: $R_1 R_3 = R_2 R_4$,即对角电阻乘积相等。电桥中任一个或数个电阻值发生变化都将导致电桥失去平衡,引起电桥输出电压变化。因此,适当选取各桥臂阻值,可以使被测量引起的电阻值的变化转化为输出电压的变化。

常用的电桥连接形式有单臂电桥、半桥和全桥三种形式,如图 1-2 所示。图 1-2(a) 所示的是单臂电桥的连接形式,设初始时电桥平衡,工作时仅有一个桥臂电阻 R_1 随被测量的变化而发生改变,设该变化量为 ΔR_1 ,则电桥输出为

$$\begin{aligned} e_o = U_{ab} - U_{ad} &= \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) e_x \\ &= \frac{R_1 R_3 + R_3 \Delta R_1 - R_2 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} e_x \quad (\text{代入电桥平衡条件}) \\ &= \frac{R_3 \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} e_x \end{aligned}$$

上式的分子、分母同除以 $R_1 R_3$ 得

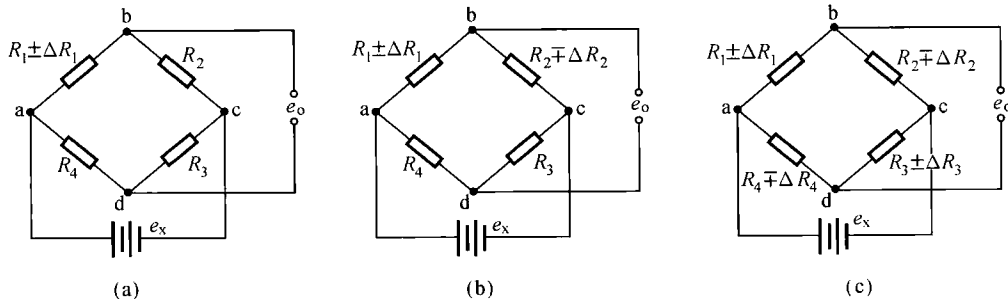


图 1-2 直流电桥连接形式

$$e_o = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)} e_x \quad (1-2)$$

由这个非线性的表达式可以看出,如果电阻的相对变化量 $\Delta R_1/R_1 \ll 1$, 则式(1-2)可以忽略式(1-2)分母中的 $\Delta R_1/R_1$; 同时,令桥臂比 $R_2/R_1 = R_4/R_3 = 1$, 有

$$e_o = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)} e_x \approx \frac{\Delta R_1}{4R_1} e_x \quad (1-3)$$

图 1-2(b) 和图 1-2(c) 所示的半桥和全桥的输入、输出关系的推导,请读者自己完成。需要注意的是:全桥和半桥中测量元件接入时,要使电桥输出发生变化,相邻两臂上的电阻变化方向应该为相反方向;否则电桥输出电压将不发生变化。在图 1-2 所示的单臂、半桥和全桥形式中,单臂电桥的输出与输入关系只是近似线性的,而全桥和半桥的输入、输出关系是线性的。

直流电桥的优点是采用直流电源作为激励电源,稳定性比较高,而且电桥输出为直流量,可以用直流仪表测量,测量精度较高;此外,电桥与后接仪表间的连接导线的分布参数对系统的影响也较小,对导线的连接方式要求较低。直流电桥的缺点是需要高精度的直流电源,而高精度直流电源的造价一般比较高,而且测量系统容易引入工频干扰。另外,由于输出为直流量,需要对其作直流放大,而直流放大器一般都比较复杂,容易受零漂和接地电位的影响。

2) 交流电桥

交流电桥的结构和直流电桥的基本一致,不同的是交流电桥使用交流电源作激励,电桥的桥臂可以是电阻、电感或电容,图 1-3 中分别用 z_1, z_2, z_3, z_4 表示四个桥臂的交流阻抗。

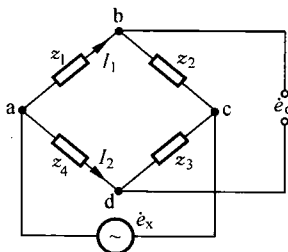


图 1-3 交流电桥

这里将电桥的阻抗、电流和电压用复数的形式表示,则直流电桥的平衡关系式可以直接用于交流电桥,即

$$\begin{aligned} \dot{e}_o &= \dot{U}_{ab} - \dot{U}_{ad} = \frac{z_1}{z_1 + z_2} \dot{e}_x - \frac{z_4}{z_3 + z_4} \dot{e}_x \\ &= \frac{z_1 z_3 - z_2 z_4}{(z_1 + z_2)(z_3 + z_4)} \dot{e}_x \end{aligned} \quad (1-4)$$

所以平衡条件为 $z_1 z_3 = z_2 z_4$

若电桥桥臂用指数形式表示为 $Z_i = z_i e^{j\varphi_i}$, 则可以得到电桥的交流平衡条件为

$$\begin{cases} z_1 z_3 = z_2 z_4 \\ \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4 \end{cases}$$

也就是说交流电桥平衡要满足两个条件,即两对角桥臂的阻抗模的乘积相等且其阻抗角

的和相等。

交流电桥在使用中,如果交流激励电源的频率较低,分布电容较小,满足 $\omega RC \ll 1$, 则其输入和输出之间的关系可以用直流电桥的输入、输出关系直接替代。但当频率比较高时,电桥电路中的分布电容和电感对电路影响增加,此外各元件之间的互感耦合、邻近交流电路对电桥的感应也增加,其输入、输出关系也因此变得更加复杂。因此,影响交流测量精度及误差的因素要比直流电桥多的多,在使用过程中应尽可能采取适当措施消除这些影响。另外,对于交流电桥的激励电源,要求其电压波形和频率必须具有很好的稳定性,否则会影响电桥的平衡。一般采用交流频率为 $5 \sim 10$ kHz 的交流电源。交流电桥的优点是输出为调制波,能很好地抑制外界工频干扰;而且其后接交流放大电路相对于直流放大来说,电路形式要简单许多,而且没有零漂的问题。

3) 实用电桥电路

实际使用中,通常需要对电桥进行初始调平衡、调整灵敏度并进行校准,因此需要在电桥电路中附加一些特殊功能。图 1-4 所示的为一种具有灵敏度调节、校准和平衡调整的多功能实用电桥。

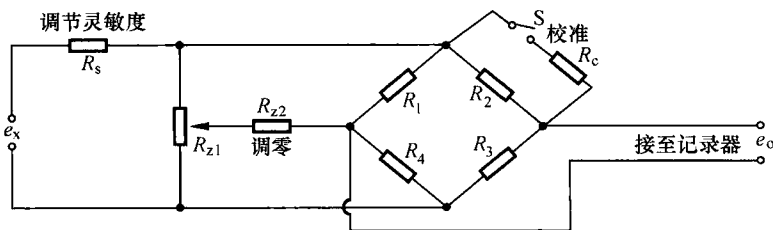


图 1-4 实用电桥电路

(1) 图中 R_c 用来进行电桥灵敏度的校准。若电桥初始平衡,则开关 S 闭合后相当于在 R_2 桥臂引入了一个并联电阻,电阻改变量为

$$\Delta R_2 = R_2 - \frac{R_2 R_c}{R_2 + R_c}$$

然后读出输出电压 e_o , 那么校准的电桥灵敏度为

$$s = \frac{e_o}{\Delta R} (\text{V}/\Omega)$$

(2) 在不改变电源电压的情况下,调节变阻器 R_s , 可以调整串联分压,使得电桥供电电压改变,从而达到调节电桥的灵敏度的目的。

(3) 另外通过调整变阻器 R_{z1} 来调整电桥的初始平衡,即使桥臂并非完全匹配,也可以使零输入时输出电压精确地调为零。

2. 调制与解调

调制是指利用某种信号来控制或改变另一个高频率的振荡信号的幅值、频率或相位的过程,分别称为调幅(AM)、调频(FM)或调相(PM)。通常将控制高频信号的低频信号

称为调制波,而该高频信号则称为载波,经过调制过程得到的高频振荡波称为已调制波。从时域上看,调制过程就是使载波的某个参数随调制波变化而变化的过程;从频域上看,调制过程则是一个移频过程。解调是与调制相反的过程,也就是要从已调制波中恢复原有的低频调制信号。

调制和解调在工程上有着广泛的应用。如在无线电技术中,为了防止各种信号的相互干扰,通常将需要发送的信号调制到不同频段的载波信号上进行传输,接收方则利用解调技术获得原始信号。又如在测量过程中经常会碰到一些变化缓慢的物理量,经过传感器所得到的信号是一些低频信号。如果直接采用直流放大,则会带来零漂和级间耦合的问题,造成信号的失真。常用的手段是先将这些低频信号通过调制变为高频信号,然后采用简单的交流放大器进行放大,从而可避免直流放大中遇到的问题,再采取解调措施最终获得变化缓慢的被测量。

一般来说,载波信号可以是任何形式的波,如正弦信号、方波信号等。为方便说明,这里仅以载波信号是正(余)弦信号的例子来介绍调制与解调。

1) 幅值调制与解调

调幅过程是将一个高频载波信号与调制信号相乘,使载波信号的幅值随着调制信号的变化而变化的过程。调制装置实质上是一个乘法器。

在图 1-5 中,设调制信号为 $x(t) = A_s \sin \omega_s t$,载波信号为 $y(t) = A_c \sin \omega_c t$,这里 A_s 和 ω_s 分别是调制信号的幅值和频率、 A_c 和 ω_c 分别是载波信号的幅值和频率。经过调制后得到的已调制波为

$$\begin{aligned} x_m(t) &= x(t) \cdot y(t) = A_s \sin \omega_s t \cdot A_c \sin \omega_c t \\ &= \frac{A_s A_c}{2} [\cos(\omega_c - \omega_s)t - \cos(\omega_c + \omega_s)t] \end{aligned}$$

显然,通过调制,已调制波的频谱位于载波信号频率 ω_c 左右相差调制信号频率 ω_s 处,其幅值大小等于 A_s 与 A_c 乘积的 $1/2$ 。

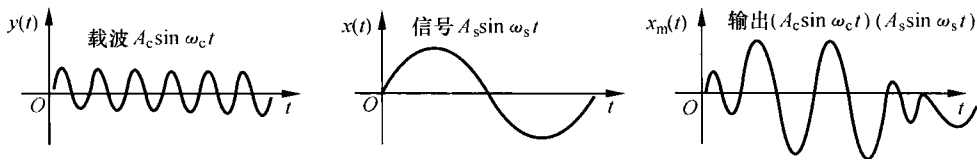


图 1-5 正弦信号幅值调制

调幅信号的解调方法有多种,常用的有同步解调、整流检波解调和相敏解调等。

所谓同步解调是把调幅波与原载波信号相乘,也就是把调制信号的频谱进行两次移频。对于已调信号 $x_m = x(t) \cdot y(t) = x(t) \cdot A_c \sin \omega_c t$ 再乘上 $A \sin \omega_c t$,即

$$x(t) A_c \sin \omega_c t A \sin \omega_c t = \frac{x(t)}{2} A_c A + \frac{1}{2} A_c A x(t) \cos 2\omega_c t$$

那么,只需要将频率为 $2\omega_c$ 的高频分量滤掉就可以得到原信号 $x(t)$ 了。同步解调方

法虽简单,但要求具有性能良好的线性乘法器,否则将引起信号失真。图 1-6 为调幅调制和解调过程的原理图。

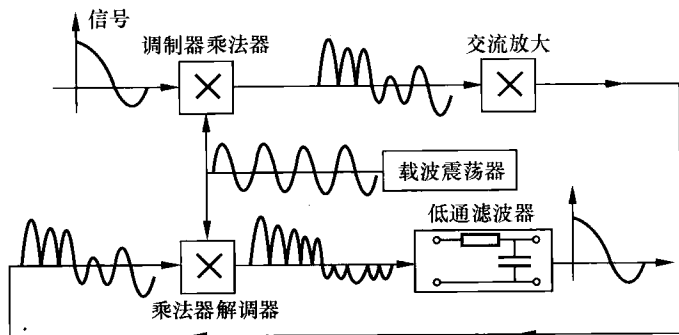


图 1-6 调制解调原理图

整流检波解调是另一种简单的解调方法。原理是:对调制信号偏置一个直流分量 A , 使偏置后的信号具有正电压值,那么该信号调幅后得到的已调波 x_m 的包络线将具有原信号的形状。对 x_m 进行简单的整流(全波整流或半波整流)和滤波,再准确减去所加的偏置电压,就可以恢复原调制信号。该方法关键是准确地施加偏置电压。如果所加偏置电压未能使信号电压位于零值的同一侧,那么调幅后就不能简单地通过整流滤波来恢复信号,而需要通过相敏解调来解决这个问题。

相敏解调用来鉴别调制信号的极性,交变信号在过零位时正负极性发生突变,使调幅波相位与载波相位相比也相应地产生 180° 相位跳变,从而既能反映信号幅值又能反映其相位。

2) 频率调制与解调

利用调制信号控制高频载波信号频率变化的过程称为频率调制。调制过程中载波幅值不变,仅频率随调制信号幅值的变化成正比地变化,因此调频波的功率是一个常量。调制后的信号称为已调频信号。另外,还有一类信号,其相位按照调制信号规律变化而变化,称为调相信号。这两类调制(调频或调相)统称为角度调制。这里主要分析调频调制及解调的原理。

设一频率与相位均为常量的调制信号 $e(t) = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, 其总相角为 $\theta(t) = \omega_0 t + \varphi_0$, 那么角频率 $\omega_0 = d\theta(t)/dt$; 这里角频率为一常量。一般情况下总相角的导数可以不是常数,并定义总相角的导数为瞬时角频率,用 $\omega_i(t)$ 表示,即

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$$

如果设调制信号为 $f(t)$, 由于载波信号的角频率随 $f(t)$ 变化成线性变化,因而

$$\omega_i(t) = \omega_0 + kf(t) \quad (k \text{ 为比例因子})$$

因此调频信号总相角