



航空发动机 强度振动测试技术

李其汉 胡碧刚 徐志怀 编著

北京航空航天大学出版社

V231.9

04

32820802

航空发动机强度振动测试技术

李其汉 胡碧刚 徐志怀 编著



HK21/03

北京航空航天大学出版社



C0339580

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机强度振动测试技术/李其汉编著. —北京:
北京航空航天大学出版社, 1995. 5
ISBN 7-81012-547-8

I. 航… II. 李… III. ① 航空发动机-结构强度-测试技
术② 航空发动机-结构振动-测试技术 IV. V 231.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 03786 号

内 容 简 介

本书主要介绍现代强度、振动测试技术的基本内容和方法;结合航空发动机的特点,介绍应力和振动测量的基本测试系统和信号分析基础;介绍实验应力分析和振动测试技术在工程中的应用。全书内容共分六章:应变量的电测法;光测实验应力分析;振动传感器和激振器;振动基本参量测试;信号分析基础和实验模态分析技术。内容新,技术起点高,反映了现代测试技术的最新成果;文字简明扼要,可读性强。

本书主要作为飞行器动力工程专业本科生的教材,也可供相关专业的研究人员、工程技术人员参考。

航空发动机强度振动测试技术

HANGKONG FADONGJI QIANGDU ZHENDONG CHSHI JISHU

李其汉 胡碧刚 徐志怀 编著

责任编辑 陶金福

北京航空航天大学出版社出版

(社址:北京学院路 37 号;邮编:100083;电话:2015720)

新华书店总店科技发行所发行 各地书店经销

北京市朝阳区科普印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张:10.25 字数:258 千字

1995 年 9 月第一版 1996 年 7 月 第二次印刷 印数:801~1800 册

ISBN 7-81012-547-8/V·039 定价:10.00 元

航空发动机强度振动测试技术

前 言

(三)302 7.~

张. 2. 张

本书是飞行器动力工程专业和流体机械及流体动力工程专业本科生的教材, 同时也可供相关专业的研究人员、工程技术人员参考。主要介绍现代强度、振动测试技术的基本内容和方法。结合航空发动机和流体旋转机械的特点, 介绍应力和振动测量的基本测试系统和信号分析基础; 介绍实验应力分析和振动测试技术在工程中的应用。

本书主要参考宋兆泓、李其汉等编写的《发动机强度振动测试技术》(国防工业出版社 1981 年版), 并在其基础上重新编写。全书内容共分六章: 第一章应变量的电测法; 第二章光弹性实验与全息干涉技术; 第三章振动传感器和激振器; 第四章振动基本参数测试; 第五章信号分析基础; 第六章实验模态分析技术。

本书作为北京航空航天大学、西北工业大学、南京航空航天大学三校统编教材, 由北航李其汉主编, 第二、六两章由李其汉编写, 第一、五两章由西工大胡碧刚编写, 第三、四两章由南航徐志怀编写。北航陈志英参加了编写大纲的讨论。

北京理工大学周生国、李兆民两位老师对本教材进行审定, 提出许多宝贵的修改意见, 谨致诚挚的谢意。

限于编者水平, 错误与不足之处, 望读者指正。

编者 1994 年 6 月

陈松
下礼拜(三)考试

目 录

前 言 概 论

<乱序一下 82页3405>
(二)

第一章 应变量的电测法

第一节 测量系统	(2)
一、电阻应变计	(2)
二、测量电路	(5)
三、电阻应变仪	(8)
四、记录仪	(12)
五、平面应力测量	(12)
第二节 非常温环境下的应变测量	(13)
一、温度效应、温度补偿	(13)
二、高温下的应变测量	(17)
第三节 旋转件的应变测量	(18)
一、刷环引电器	(19)
二、水银引电器	(21)
三、非接触式引电器	(22)
第四节 振动应力测量	(24)
一、静态振动应力测量	(24)
二、动态振动应力测量	(26)
思考题	(29)

第二章 光弹性实验与全息干涉技术

第一节 光弹性实验	(30)
一、平面光弹性的应力——光定律	(30)
二、平面偏振光通过受力模型后的光弹性效应	(32)
三、白光下的等差线——等色线	(36)
四、等差线的观测	(36)
五、等倾线的观测和主应力迹线	(37)
六、圆偏振布置中的光弹性效应	(39)
七、应力分离方法	(40)
八、模型材料的性质——条纹值	(41)
九、三维光弹性实验的基本思路	(42)
第二节 全息干涉法	(44)
一、全息照相	(44)

二、全息光弹法	(46)
三、全息干涉振动测量	(50)
四、TV全息	(51)
思考题	(53)

第三章 振动传感器和激振器

第一节 振动传感器	(54)
一、传感器的技术指标及分类	(54)
二、传感器工作的力学原理	(56)
三、压电式加速度传感器	(59)
四、速度式传感器	(64)
五、位移传感器	(66)
六、位移、速度和加速度之间的转换	(70)
第二节 激振器	(71)
一、压电式激振器	(71)
二、电涡流激振器	(73)
三、电磁式振动台和激振器	(76)
四、其它激振器	(80)
思考题	(81)

第四章 振动基本参数测试

第一节 频率和振型测试	(82)
一、静频和振型测试	(82)
二、动频和衰减率测量	(89)
第二节 旋转件振动的非接触测量	(93)
一、调频栅法(磁钢法)	(94)
二、脉冲调制法	(94)
三、间断相位法	(96)
第三节 噪声测量	(98)
一、评价噪声的技术参数	(99)
二、噪声测量	(103)
思考题	(107)

第五章 信号分析基础

第一节 周期信号的谱分析	(108)
一、傅里叶级数	(109)
二、周期信号的频谱	(110)
第二节 非周期信号的谱分析	(111)
一、傅里叶变换	(111)
二、非周期函数的能量密度	(112)
第三节 随机信号概述及其谱分析	(113)
一、随机信号的描述	(113)
二、随机信号的数据处理和谱分析	(114)

三、跟踪滤波器技术	(119)
思考题	(120)
第六章 实验模态分析	
第一节 概 述	(121)
一、结构动力学研究任务	(121)
二、模态分析技术的发展和应 用	(122)
三、机械阻抗与传递函数	(122)
第二节 模态分析原理	(127)
一、模态分析理论基础	(127)
二、多自由度系统的传递函数和模态分析	(131)
第三节 传递函数的测试技术	(135)
一、稳态正弦激励	(135)
二、瞬态激励	(137)
三、随机激励	(142)
第四节 模态参数识别	(143)
一、单自由度系统模态参数的图解识别法	(143)
二、多自由度系统模态参数识别	(148)
三、模态参数的计算机分析法	(153)
思考题	(154)
参考文献	(155)

概 论

在航空发动机零、部件和整机的设计、研制、使用和排放工作中,会遇到大量结构强度、结构动力学、寿命和可靠性问题。一方面,应根据载荷和使用条件进行强度和振动等计算分析;另一方面则需要根据实际或模拟条件进行实验应力分析和振动响应特性的实验分析,两者相辅相成。有时,当计算分析困难,则主要靠实验研究提供可靠的依据。

实验应力分析方法很多,如应变计电测法、光弹性法、云纹法、全息干涉法和电子散斑干涉法等。其中应用最广、最成熟的属应变计电测法和光弹性法。全息干涉法,作为一种非接触式的全场测量方法,能进行三维位移场的测量,对被测物体的表面状况和材料性质无特殊要求,且测量灵敏和精度高,因而其应用日趋广泛。将全息摄影与光弹性实验结合,可很方便地进行应力分析,并可避免光弹性的复杂计算。

同样,振动量的测量方法也很多,如电测法、光测法等,而振动量电测法是应用最广的一种。振动量电测传感器是进行振动测量的关键环节。适用于航空发动机零、部件和整机振动测量的高温类型传感器尚有待发展。随着计算技术的发展,数字式信号测量、滤波和分析系统已得到了迅速的发展,其趋势将会逐步取代信号的模拟量分析方法。

要完善地解决结构动力学问题,必须对结构的载荷(输入)特性、结构自身的动力特性以及结构在载荷作用下的响应(输出)特性等有全面了解。实验模态分析技术或模态参数识别技术对解决这类问题所占地位越来越重要,它已经并日益广泛地在工程问题中得到实际应用。

航空发动机应力和振动测量的最主要特点是高速旋转和高温下的测量。高速旋转和高温,一方面对传感器的敏感元件和结构本身,对传感器的安装防护,对连接电缆的焊接、安装和防护等均提出了一些特殊的问题和要求;另一方面对信号传递装置(如引电器等)也带来了不少特殊问题和要求。此外,航空发动机的整机振动,由于激振源复杂,再加上噪音,所以其振动特点实际是一宽带随机振动,因而对其振动数据的分析处理必须采用谱分析技术。总之,如何针对航空发动机的特点,迅速、可靠而准确地解决其应力和振动测量,尚需作大量的研究和推广工作,这也正是测试工作者应该为之奋斗的目标。

第一章 应变量的电测法

应变量的电测法有下列优点:① 应变计的尺寸小、重量轻,用它粘贴在构件表面上,对构件的工作状态和应力分布影响很小;② 测量范围广,一般能测量几十到数千 $\mu\epsilon$,如用大应变的应变计可以测量的应变值达 20%,它不但能测量静态载荷下的应变,也可以测量频率范围在 0 ~ 500kHz 的动态应变变量;③ 用途广,可直接测量应变变量,还可以制成测量各种物理量的传感器;④ 测量精度较高,一般误差可小于 1%;⑤ 测量得到的输出值为电信号,可以直接输入电子计算机进行数据处理,实现测量过程自动化。但是,这种测试技术也有一些局限性,如不适用于测量构件内部的应变变量,尽管应变计的栅长可以做得很小,但对应力梯度很大的测量仍不够精确。

第一节 测量系统

应变量的电测法主要通过图 1-1 所示测试系统来测量零件或部件上的应变。

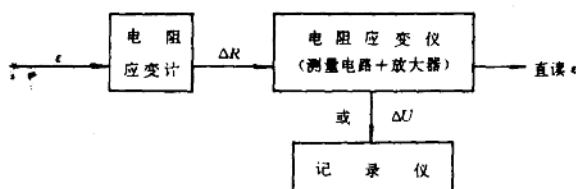


图 1-1 应变测试框图

下面主要介绍电阻应变计、电阻应变仪及各种记录仪器。

一、电阻应变计

(一) 电阻应变计的工作原理

电阻应变计的工作原理是基于金属导线的应变-电阻效应,即当金属导线受力产生机械变形时,它的电阻也发生变化。

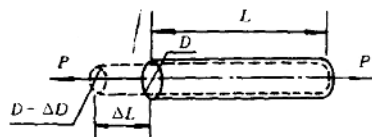


图 1-2 金属丝受拉伸变形

由物理学知道,金属导线的电阻值 R 与其长度 L 成正比,与其截面积 A 成反比,用公式表示为

$$R = \rho L / A \quad (1-1)$$

式中: ρ 是导线的电阻率。

如果金属导线沿其轴线方向受力而产生变形(见图 1-2),则其电阻值也随之发生变化,这一物理现象被称为金属导线的应变-电阻效应。为了说明这一效应的原因,可将式(1-1)取对数进行微分后得:

$$dR/R = dL/L - dA/A + d\rho/\rho \quad (1-2)$$

式中:的 dL/L 为金属导线的长度相对变化,用应变变量 ϵ 来表示则为

$$\epsilon = dL/L \quad (1-3)$$

dA/A 为导线截面积的变化,对于圆形截面的导线,若其直径为 D ,则

$$dA = d(\pi D^2/4) = (\pi/2)DdD$$

$$dA/A = [(\pi/2)DdD]/[(\pi/4)D^2] = 2dD/D$$

导线直径的相对变化 $dD/D = -\mu dL/L$ (μ 为导线材料的泊松比),代入上式可得:

$$dA/A = -2\mu dL/L \quad (1-4)$$

将式(1-3)和(1-4)分别代入式(1-2)得

$$dR/R = (1 + 2\mu)\epsilon + d\rho/\rho \quad (1-5)$$

普里特曼在研究高压对金属丝的作用时,发现金属丝的电阻率也随着它的体积变化而变化。在一定的应变范围内,金属丝的电阻率相对变化与它的体积相对变化有下列关系:

$$d\rho/\rho = c dV/V \quad (1-6)$$

式中: c 一对于一定的金属材料和加工方法来说是常数。而 dV/V 与应变 ϵ 有下列关系:

$$dV/V = dL/L + dA/A = (1 - 2\mu)\epsilon \quad (1-7)$$

将式(1-7)代入式(1-6)中得:

$$d\rho/\rho = c(1 - 2\mu)\epsilon \quad (1-8)$$

将式(1-8)代入式(1-5),并整理后得:

$$dR/R = [1 + 2\mu + c(1 - 2\mu)]\epsilon$$

设 $K = 1 + 2\mu + c(1 - 2\mu)$, 则:

$$dR/R = K\epsilon \quad (1-9)$$

式中: K 称为灵敏系数,在一般情况下为常数。

由式(1-9)看出,金属导线受力变形后,由于其几何尺寸发生变化,从而使其电阻发生变化。可以设想,如果将一根直径较细的金属丝粘贴在工件的表面上,利用金属丝的应变-电阻效应,把构件表面的应变变量直接变为电阻的相对变化量,这样就可以用电测的方法来进行应变测量。电阻应变计就是利用这一原理而制成的传感元件。

(二) 电阻应变计的结构和分类

电阻应变计一般由敏感栅、基底、盖层、粘结剂和引线等组成(见图 1-3)。敏感栅是把应变变量转换成电阻变化量的主要部分,一般是由金属或半导体材料制成的单丝或栅状体。基底是用以保持敏感栅、引线的几何形状和相对位置的部分。基底的尺寸通常代表应变计的外形尺寸。盖层是用来保护敏感栅而覆盖在上面的绝缘层,有的应变计没有盖层。粘结剂是具有一定电绝缘性能的粘结材料,用它将敏感栅固定在基底上,或者将应变计的基底固定在被测试件的表面上。引线是用以从敏感栅引出电信号的丝状或带状的导线。

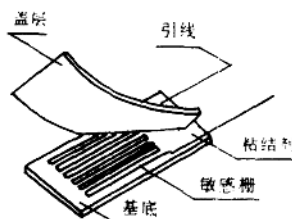


图 1-3 应变计的构造

应变计的分类(见图 1-4),如按敏感栅的材料不同可分为金属电阻应变计和半导体应变计两大类;按敏感栅的形状不同可分为丝式和箔式电阻应变计两类;按基底材料不同可分为纸基、胶基和金属基底三大类;按使用方式不同可分为粘贴式、焊接式、喷涂式和埋入式四类;按

使用温度不同可分为低温、常温、中温和高温四类。

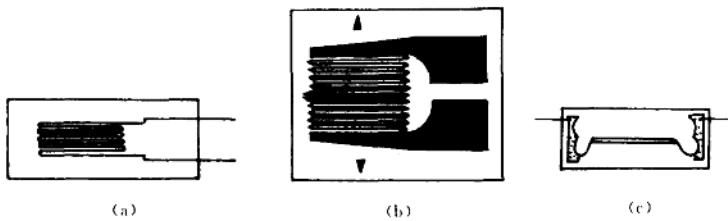


图 1-4 电阻应变计

(a) 丝式应变计; (b) 箔式应变计; (c) 半导体应变计

箔式应变计的敏感栅是用高阻值的金属片经光刻腐蚀成栅状。箔片常用的材料是很薄的(0.002~0.005mm)康铜、镍铬合金,比较柔软,可粘贴于复杂形状的构件表面,较真实地反映其应变值。箔式应变计敏感栅的横向部分可以做得比较宽,所以其横向效应小。由于箔栅薄而柔软,因而有粘贴牢固、散热性好、疲劳寿命长、蠕变小等优点,所以目前广泛采用。

半导体电阻应变计的敏感栅是一狭长的单晶硅半导体,硅片两端镀有黄金膜,引线自黄金膜上焊出,它的基底一般都是酚醛树脂,其特点是灵敏系数比较大(高达 250),缺点是热稳定性差,非线性严重。一般可在传感器中用作敏感元件。

(三) 电阻应变计的工作特性

工作特性是为了满足实际测量工作的需要而规定的。按照国家专业标准规定,电阻应变计的工作特性共 18 项。由于应变计的使用范围非常广泛,使用条件相差甚远,对应变计性能的要求也不相同。下面介绍常温下应变计的工作特性。

(1) 应变计的电阻值:室温时应变计未经安装且不受外力的情况下,所测量的电阻值。它包括单片电阻值、平均名义电阻值和标准电阻值。标准电阻值是指国家推荐的标准名义电阻值:60、120、200、350、500、1 000Ω。在允许通过同样工作电流的情况下,选用较大的电阻可以提高测量灵敏度。电阻应变计等常用应变测量仪器的桥臂电阻习惯上按 120Ω 设计,故 120Ω 的电阻应变计为最常用的应变计。

(2) 应变计的灵敏系数 K :在应变计轴线方向的单向应力作用下,应变计电阻的相对变化与安装应变计试件轴向应变的比值,即单位应变所引起的电阻相对变化。由式(1-9)得:

$$K = (dR/R)/\epsilon = 1 + 2\mu + c(1 - 2\mu) \quad (1-10)$$

灵敏系数 K 取决于材料特性 μ 和 c ,当材料进入塑性变形范围,泊松比 $\mu \approx 0.5$,在弹性区时 $\mu = 0.2 \sim 0.4$,即体积基本不变, $K \approx 2.0$ 。希望各种导线的灵敏系数最好是常数。实验表明,大多数金属导线在弹性范围内电阻的相对变化与应变值之间的关系是线性的,即 K 为常数。特别应当指出,康铜的灵敏系数 K 从弹性区到塑性区基本保持不变。因此大应变的应变计常用康铜制成。

(3) 绝缘电阻值:应变计的敏感栅和引线与被测试件之间的电阻值,一般要求在 500MΩ 以上。绝缘电阻低,使测量灵敏度下降,并引起零漂。提高绝缘电阻的途径,主要是选用电绝缘性能良好的粘结剂和基底材料,采取防潮措施等。

(4) 机械滞后:应变计安装在构件上,在恒温条件下加载和卸载过程中,在同一机械应变量情况下,指示应变的差值。通常在正式试验之前预先加载卸载若干次,以减少机械滞后的影

响。

(5) 疲劳寿命:在恒幅交变应力作用下,应变计连续工作到产生疲劳损坏时的循环次数。疲劳寿命是反映应变计对动态应变适应能力的参数,一般要求疲劳寿命达 $10^5 \sim 10^7$ 循环次数。为了提高疲劳寿命,要特别注意引线的连接方式和焊接点的质量,使引线和敏感栅的连接处都与应变计的轴线呈 45° 方向,可提高应变计的疲劳寿命。

(6) 热输出:应变计粘贴在允许自由膨胀的构件上且不受外力作用,在缓慢变化的均匀温度场中,应变计输出的指示应变值。

二、测量电路

电阻应变计是把构件的应变值 ϵ 转换成 $\Delta R/R$ 。由于一般测量的应变值很小,如测量应变量为 $5\mu\epsilon$,应变计的阻值 $R=120\Omega$,灵敏系数 $K=2$ 时,则电阻变化 $\Delta R=0.0012\Omega$;如直接测量 $R+\Delta R=120.0012\Omega$,必须采用六位以上的精密电桥,而一般较精密的五位电桥就需在恒温室内使用,所以直接测量较困难。因此,一般采用专门的测量电路,把 $\Delta R/R$ 转换成电压或电流的变化。目前电阻应变计中采用的测量电路主要有两种:一种是电桥线路,另一种是电位计式线路。

(一) 直流电桥

如图 1-5 所示, R_1, R_2, R_3 和 R_4 分别为桥臂电阻, AC 两端接直流电源 E , BD 两端接一内阻为 R_g 的检流表, R_g 可看作电桥负载,其电压 U 即电桥的输出。

1. 电压输出

当电桥输出与高阻抗负载(如数字电压表或磁带记录仪)相联,此时电桥输出端相当于开路状态,只能输出电压信号,电流输出近于零,即 $R_g=\infty, I_g\approx 0$ 。根据分压原理:

$$U_{BC} = ER_2/(R_1 + R_2)$$

$$U_{DC} = ER_3/(R_3 + R_4)$$

则输出电压为

$$U = U_{DC} - U_{BC} = E(R_1R_3 - R_2R_4)/[(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)] \quad (1-11)$$

当

$$R_1R_3 = R_2R_4 \quad (1-12)$$

输出电压 $U=0$, 则电桥处于平衡状态。

对于单臂电桥测量,即仅有一个桥臂为应变计参与应变,其余桥臂均为固定电阻,令 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$, R_1 (应变计) 的电阻增量为 ΔR , 且 $R \gg \Delta R$ 时,由式(1-11)输出电压为

$$\begin{aligned} U &= E[(R + \Delta R)R - R^2]/[(R + \Delta R + R)(2R)] \approx E(\Delta R R)/(4R^2) \\ &= (E/4)(\Delta R/R) \\ &= (E/4)K\epsilon \end{aligned} \quad (1-13)$$

若四个桥臂电阻均有变化,即 R_1, R_2, R_3 和 R_4 的增量分别为 $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3$ 和 ΔR_4 , 称为全桥测量,同样由式(1-11)可得:

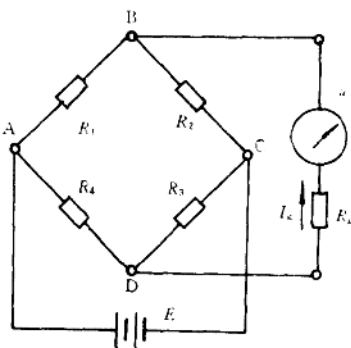


图 1-5 直流电桥

$$\begin{aligned} U &\approx (E/4)[(\Delta R_1/R_1) - (\Delta R_2/R_2) + (\Delta R_3/R_3) - (\Delta R_4/R_4)] \\ &= (E/4)[K(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)] \end{aligned} \quad (1-14)$$

2. 功率输出

当电桥输出端与电阻较小的负载(如光线示波器的振子等)相接时,电桥将有电流输出。为了获得最大的输出功率,要求负载阻抗 R_L 与电桥输出阻抗 R_0 相匹配,即 $R_L = R_0$ 。由图 1-5 电桥输出阻抗为

$$\begin{aligned} R_0 &= [(R_1 R_2)/(R_1 + R_2)] + [(R_3 R_4)/(R_3 + R_4)] \\ &= [R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)] / [(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)] \end{aligned} \quad (1-15)$$

由克希霍夫定律,并将输出电压 U 和输入电压 E 的关系(1-11)代入得:

$$\begin{aligned} I_g &= U/(R_g + R_0) = U/(2R_0) \\ &= [E(R_1 R_3 - R_2 R_4)] / [2R_0 (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)] \\ &= (E/2)(R_1 R_3 - R_2 R_4) / [R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)] \end{aligned} \quad (1-16)$$

当

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

输出电流 $I_g = 0$, 即电桥处于平衡状态。

对于单臂电桥测量,令 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, R_1 (应变计) 的电阻增量为 ΔR , 且 $R \gg \Delta R$, 由式(1-16)得电桥的输出电流为

$$\begin{aligned} I_g &= (E/2)[(R + \Delta R)R - R^2] / [(R + \Delta R)2R^2 + R^2(R + \Delta R + R)] \\ &\approx (E/2)(\Delta R R) / (4R^3) \\ &= (E/8R)(\Delta R/R) \\ &\approx (E/8R)K\epsilon \end{aligned} \quad (1-17)$$

对于全桥测量,若四个桥臂电阻 R_1, R_2, R_3 和 R_4 的电阻增量分别为 $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3$ 和 ΔR_4 , 同理由式(1-16)得输出电流为

$$\begin{aligned} I_g &\approx (E/8R)[(\Delta R_1/R_1) - (\Delta R_2/R_2) + (\Delta R_3/R_3) - (\Delta R_4/R_4)] \\ &= (E/8R)[K(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)] \end{aligned} \quad (1-18)$$

从式(1-13)、(1-14)、(1-17)和(1-18)得出,电桥的输出电压 U 或输出电流 I_g 均与应变计的电阻变化 $(\Delta R/R)$ 成正比,即与试件的应变 ϵ 成线性关系。

直流电桥的优点是没有分布电容的影响,对连接导线要求较低,容易预调平衡,且工作频率范围宽。缺点是直流放大器比较复杂,易受零飘和接地电位的影响。

(二) 交流电桥

为克服直流放大器的零漂问题,目前大多数静、动态应变仪都采用交流载波放大式方案,使用交流电桥,如图 1-6 所示。

设桥臂阻抗分别为 Z_1, Z_2, Z_3 和 Z_4 , 供桥电压也称为载波电压 $E = E_m \sin \omega t$ 。交流电桥的关系式和直流电桥相同,只要把电阻 R 改为阻抗 Z 。交流电桥输出的调幅波电信号的关系式与式(1-11)相似。

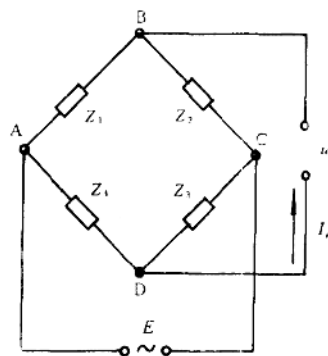


图 1-6 交流电桥

$$U = E(Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4) / [(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)] \quad (1-19)$$

则交流电桥的平衡条件为

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \quad (1-20)$$

Z 为复数, $Z = |Z|e^{j\varphi}$ 。上述公式表示交流电桥达到平衡时, 其桥臂阻抗的幅值和相位都必须满足下列条件:

$$\left. \begin{aligned} |Z_1||Z_3| &= |Z_2||Z_4| \\ \varphi_1 + \varphi_3 &= \varphi_2 + \varphi_4 \end{aligned} \right\} \quad (1-21)$$

因此, 具有交流电桥的应变仪中, 设置有电阻平衡和电容平衡的调节装置, 以使交流电桥达到初始平衡。当桥臂上应变计电阻发生变化时, 由式(1-13)可得电桥输出电压:

$$U = (E/4)K\varepsilon = (K/4)\varepsilon E_m \sin \omega t \quad (1-22)$$

测量不同性质的应变时, 电桥输出电压的幅值、频率和相位如图 1-7 所示。

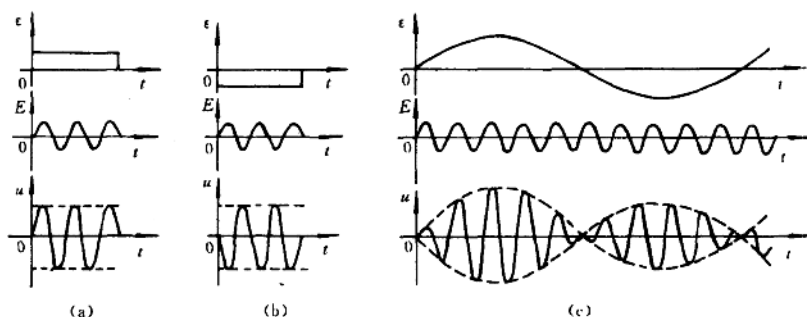


图 1-7 电桥的输出电压波形

(a) 拉伸应变; (b) 压缩应变; (c) 动态应变

1. 拉伸应变

拉伸应变, 即 $\varepsilon = \varepsilon_+$, 则有

$$U = (K/4)\varepsilon_+ E_m \sin \omega t \quad (1-23)$$

测量拉伸应变时, 输出电压的幅值与应变 ε 成正比, 频率和相位与载波电压相同 [1-7 (a)]。

2. 压缩应变

压缩应变, 即 $\varepsilon = -\varepsilon_+$, 则有

$$U = (K/4)(-\varepsilon_+) E_m \sin \omega t = (K/4)\varepsilon_+ E_m \sin(\omega t + \pi) \quad (1-24)$$

测量压缩变形时, 输出电压的幅值与应变成正比, 频率与载波电压相同, 相位差 180° [图 1-7(b)]。

3. 动态应变

动态应变, 设 $\varepsilon = \varepsilon_m \sin \Omega t$, 则有

$$\begin{aligned} U &= (K/4)\varepsilon_m \sin \Omega t E_m \sin \omega t \\ &= (K/8)\varepsilon_m E_m [\cos(\omega - \Omega)t - \cos(\omega + \Omega)t] \end{aligned} \quad (1-25)$$

测量动态应变时, 输出电压是由应变信号调制的调幅波, 它是由二个频率为 $\omega \pm \Omega$ 的等幅

波组成,其幅值与应变成正比[图 1-7(c)]。一般情况下,供桥电压即载波电压的频率 ω 比动态应变的频率 Ω 高 5~10 倍以上,故输出电压为窄带调幅电压,这是应变仪中窄带放大器的设计依据。

(三) 电位计电路

动态应变测量中,有时受到应变仪工作频率的限制,如 YD-15 动态应变仪的频响是 0~1 500Hz。而电位计式电路,配以交流线性放大器,可以测量更高的动态应变。

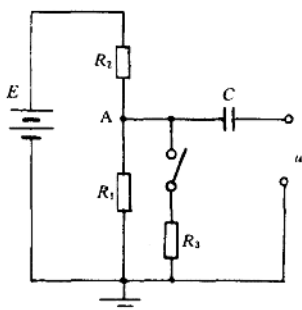


图 1-8 电位计式电路

电位计式电路如图 1-8 所示,它由应变计 R_1 , 固定电阻 R_2 , 标定电阻 R_3 和耦合电容 C 组成。应变计 R_1 的输出电压:

$$U = ER_1 / (R_1 + R_2) \quad (1-26)$$

试件受力变形, R_1 有一增量 ΔR , 则输出电压的增量为

$$\Delta U = E \{ [(R_1 + \Delta R) / (R_1 + \Delta R + R_2)] - [R_1 / (R_1 + R_2)] \} \quad (1-27)$$

令 $R_1 = R_2 = R$, 且有 $R \gg \Delta R$, 则

$$\begin{aligned} \Delta U &= E \{ [(R + \Delta R) / (2R + \Delta R)] - 1/2 \} \\ &= E [\Delta R / (4R + 2\Delta R)] \\ &\approx (E/4) (\Delta R / R) = (E/4) K \epsilon \end{aligned} \quad (1-28)$$

由上式得出电位计式电路的输出电压增量 ΔU 与应变 ϵ 成正比。

应变的标定方法是将标定电阻 R_3 处的开关闭合, R_3 与 R_1 并联, 在 R_1 上产生电阻变化:

$$\begin{aligned} \Delta R &= R_1 - [R_1 R_3 / (R_1 + R_3)] \\ &= R_1^2 / (R_1 + R_3) \end{aligned} \quad (1-29)$$

此电阻变化 ΔR 和由于应变 ϵ_1 引起的电阻变化应该一样, 若 $R_3 \gg R_1$, 则上式可改写为

$$\Delta R / R_1 = R_1 / (R_1 + R_3) \approx R_1 / R_3 = K \epsilon_1 \quad (1-30)$$

根据上式, 由标定应变 ϵ_1 和已知应变计 (K, R_1) 可计算出标定电阻 R_3 的大小。

三、电阻应变仪

电阻应变计将构件的机械应变转换成电阻变化, 其值很微小, 必须由电阻应变仪进行放大, 其工作原理是将应变计的电阻变化通过应变仪的电桥线路转换成电压信号, 经放大后由仪表指示应变数值。

(一) 应变仪的组成

电阻应变仪有多种型号, 目前国内广泛采用交流电桥、载波放大式应变仪。它主要由电桥、放大器、相敏检波器、低通滤波器、振荡器和电源等六大部分组成, 如图 1-9 所示。

1. 电桥-调制器(调幅器)

如前所述, 电桥的主要作用是将应变计的电阻变化转换成电压或电流的变化。为了使微弱的静应变(直流)或动应变(频率不高的缓变信号)的放大和传输效果最好, 往往采用调制的方法, 即用一个由缓变信号控制的高频信号来替代原来的缓变信号。

调制是利用缓变信号来控制高频振荡的过程。信号由幅值、频率和相位三个参数确定。高频振荡的幅值受缓变信号控制称为调幅, 以 A M 表示; 高频振荡的频率受缓变信号控制则称为调频, 以 F M 表示。通常称高频振荡为载波, 缓变信号为调制信号。幅值调制实质上是两个信号相乘。

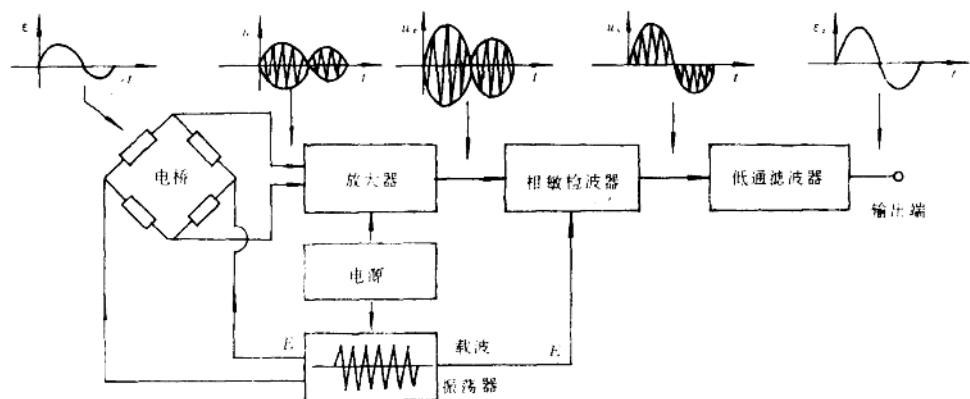


图 1-9 电阻应变仪原理框图

交流电桥是一个调幅器，本质上也是一个乘法装置。由式(1-19)可知，电桥的输出电压 U ，其幅值大小受应变计的电信号所控制。从信号调制的角度来看，供桥电压 $E = E_m \sin \omega t$ 是载波信号。应变信号 $\epsilon = \epsilon_m \sin \Omega t$ 是调制信号，电桥的输出电压是调幅波。其输入、输出的关系如图 1-9 所示，调制过程的波形关系如图 1-10(a)、(b)、(c) 所示。

调幅波 U 是载波 E 被调制信号 ϵ 调制结果，其频率和载波相同，而幅值则随调制信号 ϵ 而变化，其波峰连线(称为包络线)的形状和调制信号 ϵ 的波形一致，包络线与调制信号波形逼近的程度表征调制的精度。通常载波频率一般应大于调制信号频率 5~10 倍，有时取 20 倍。

载波信号是由振荡器产生的，它作为电桥的供桥电压和相敏检波器的参考电压。

2. 放大器

一般采用多级放大器，将电桥输出的微弱调幅波电信号进行不失真的电压或功率放大，以便得到足够的功率来推动仪表。由于调幅波段频率范围是 $\omega \pm \Omega$ ，这就为窄带交流放大器的设计提供了有利条件。

3. 相敏检波器——解调器

调制的目的是使缓变信号便于放大和传输，解调的目的则是为了恢复原信号。解调过程实质上是调幅波与载波信号再一次相乘。

应变仪中广泛采用环形相敏检波器(图 1-11)它能起检波和辨别相位的作用。

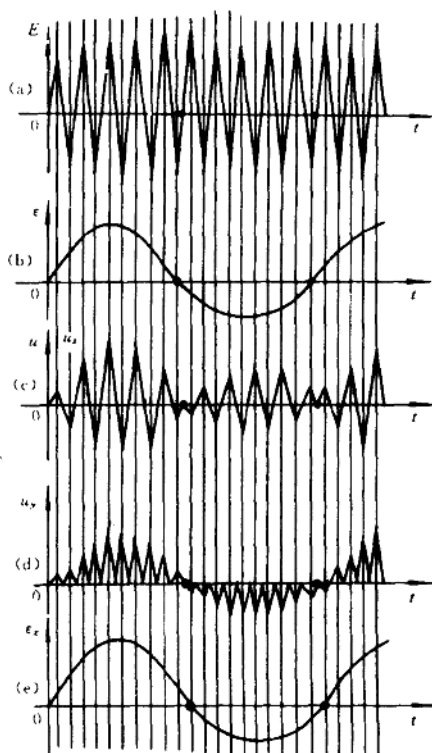


图 1-10 调幅波在调制和解调时的波形

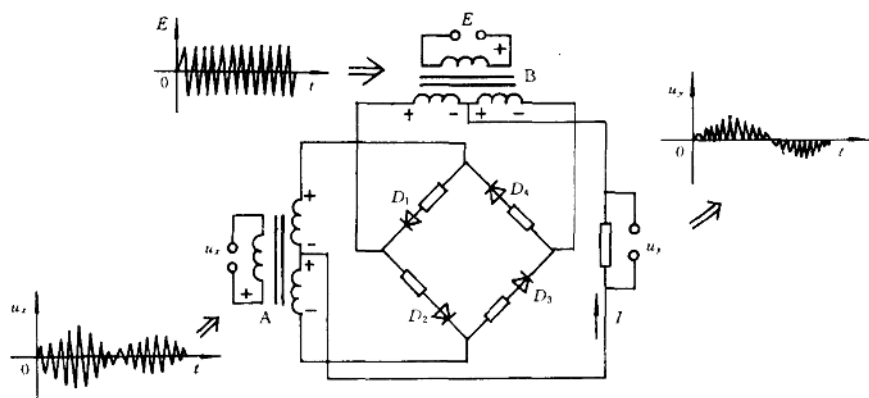


图 1-11 相敏检波器的原理图

U_x 是从放大器输出的调幅波, E 是从振荡器来的参考信号电压即载波, $E \gg 2U_x$ 。二极管 D_1, D_2, D_3, D_4 在电路中起开关作用, 由参考电压 E 控制其通或不通。如参考电压 E 为正半周时, D_2, D_3 导通, D_1, D_4 截止; 如为负半周时, 则相反。这样, 参考电压和二极管合起来起着转换开关的作用。

解调过程如图 1-10(d)、(e), 根据上述分析可得出, 当调制信号 ϵ 为正时, 参考电压 E (载波信号见图 1-10(a)) 和调幅波 U_x (图 1-10(c)) 始终同相位, 因此, 通过相敏检波器后波形都为正。而当调制信号 ϵ 为负时, 则参考电压与调幅波始终反相, 通过相敏检波器的波形总是负的。这样保证了解调后的信号 U_y 与原调制信号 ϵ 极性完全一致。同时, 解调后, 频率比原调制波的频率提高了一倍。

由上所述, 调幅波通过相敏检波后, 得到的是一个随原调制信号 ϵ 幅值和相位变化而变化的高频波 U_y ; 再通过适当频率的低通滤波器就得到与原调制信号 ϵ 一致的, 但已放大的信号 ϵ_x , 达到了解调的要求。

(二) 应变仪的分类与发展

电阻应变仪按供电电压分为直流电桥和交流电桥两种, 由于早期的直流放大器漂移大, 线性差, 所以大都采用交流电桥和载波式放大器组成的应变仪。

近年来出现了新波式直流放大器和低噪声、低漂移的高增益运算放大器, 使直流电桥应变仪又逐渐增多。

目前, 国内应变仪种类很多, 按应变仪频响高低分为静态、动态、超动态三类, 见表 1-1。

1. 静态应变仪

通常只有一个通道, 多点测量需配预调平衡箱。如 YJ-5 型采用电子管线路, 性能稳定、可靠, 测量精度高, 并设有灵敏系数调节装置。近年来, 对大型构件进行应变测量时, 应变计数量多达数百片甚至上千片, 要求检测速度快、精度高、数据自动处理。需要静态应变多点自动测量装置, 如 YJS-14。它能自动平衡, 自动换点, 切换时间最快 0.1s/点, 还有自动测量, 自动显示和打印, 几分钟之内, 可以提供数百点的应力测量数据。

2. 动态应变仪