

高等学校教材

锻压测试技术

(修订本)

东北重型机械学院 黄学玲 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

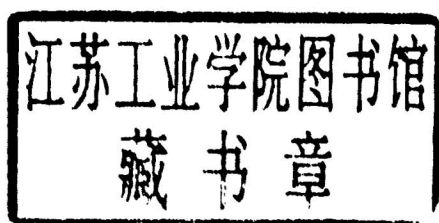
机械工业出版社

高等学校教材

锻压测试技术

(修订本)

东北重型机械学院 黄学玲 主编



机械工业出版社

期 限 奉

本书是1983年出版的高等学校试用教材《锻压测试技术》一书的修订本,该修订本在基本保持原书的体系、基本内容和深度的基础上,又对具体章节进行了精选和增补,压缩了一部分内容,力求使该书更趋完善。全书共分四章,第一章介绍电测法的原理和仪器;第二章介绍各种参量的电测原理和方法以及模型试验和数据处理等内容;第三章介绍光弹试验的原理和方法;第四章介绍密栅云纹试验的原理和方法。本书可作为高等学校锻压专业教材,也可供有关专业师生和工程技术人员参考。

锻 压 测 试 技 术

(修 订 本)

东北重型机械学院 黄学玲 主编

*

责任编辑:杨 燕 版式设计:吴静霞

封面设计:田淑文 责任校对:李广孚

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $10^{1/2}$ ·字数 254 千字

1983年6月北京第一版

1987年11月北京第二版·1987年11月北京第五次印刷

印数 15,301—18,500·定价:1.80 元

*

统一书号:15033·5440

前 言

本书是在 1983 年出版的高等学校试用教材《锻压测试技术》基础上,根据 1983 年 11 月高等学校锻压专业教材分编审委员会制订的新教学计划和教学大纲以及 1985 年 8 月审定的修改大纲修订的。

本修订本基本保持原书的体系、基本内容和深度,只在具体内容上作了适当的精选和增补,文字上作了大幅度的压缩。

全书共分四章。第一章介绍电测法的原理和仪器,重点以电阻应变法为主。第二章介绍各种参量的电测原理和方法,其中包括应变应力、各种力参量、运动参量、液压参量、振动参量和电功率的测量,还介绍了模型试验和数据处理等内容。第三章介绍了光弹试验的原理与方法,着重介绍平面光弹和立体光弹“冻结”切片法。第四章介绍密栅云纹试验的原理与方法。

本书是高等工业学校锻压专业教材,也可供有关专业师生和工程技术人员参考。

本书的第一、二、三章由东北重型机械学院黄学玲修订;第四章由清华大学曹起骧和叶绍英修订。主编黄学玲,主审华中工学院蒋希贤。

在修订过程中,得到各院校的大力支持和帮助,提供了宝贵的修改意见。主审对修订稿进行了详细的审阅和修改,编者在此表示感谢。

由于编者水平所限,书中错误和不当之处,敬请读者批评指正。

编者

1986 年 10 月

目 录

绪论	1	§ 1-8 数字式数据分析系统简介	55
第一章 电测法的原理和仪器	3	一、数据的数字化	56
§ 1-1 电测法的基本概念	3	二、计算机	58
一、电测法的基本原理和电测装置的组成	3	三、举例	58
二、被测参量的特征及其频谱分析	4	第二章 各种参量的测量	60
三、电测装置的静态特性和动态特性	7	§ 2-1 机器零件应变应力的测定	60
四、输出信号的失真	10	一、应变测量和应力计算	60
五、对电测装置的基本要求	13	二、测点选择、布片和选片原则	64
§ 1-2 转换器的工作原理及其特点	13	§ 2-2 模型试验问题	65
一、电阻式转换器	13	一、弹性结构模型的相似准则	66
二、电容式转换器	14	二、模型的设计, 模型与实物间应力、应	
三、电感式转换器	14	变和位移的换算	68
四、压磁式转换器	15	三、模型的几何相似比和材料的选择	69
五、磁电式转换器	16	§ 2-3 各种力参量的测量	70
六、压电式转换器	16	一、测力传感器的弹性元件和转换器	70
七、霍尔元件式转换器	17	二、测量各种力参量时的贴片和	
八、热电转换器	17	接桥方法	72
九、光电转换器	19	§ 2-4 位移和速度的测量	77
§ 1-3 电阻应变片	20	一、位移的测量	77
一、电阻应变片的结构和工作原理	20	二、速度的测量	81
二、应变片的类型、材料和主要参数	23	§ 2-5 加速度的测量	83
三、影响应变片测量性能的几个因素	25	一、线加速度的测量	83
四、应变片的选用	26	二、角加速度的测量	84
§ 1-4 测量电桥	27	§ 2-6 液体压力和流量的测量	86
一、电桥的工作原理	27	一、液体压力的测量	86
二、电桥输出的读数方法	30	二、液体流量的测量	87
三、电桥的预调平衡	32	§ 2-7 传感器的动态分析和设计要点	89
四、应变片在电桥中的接法	33	一、传感器的动态分析	89
§ 1-5 载波放大和相敏检波原理	35	二、传感器的设计要点	91
一、载波放大原理	35	三、传感器的主要性能指标	93
二、相敏检波原理	38	§ 2-8 传感器的标定	94
§ 1-6 电阻应变仪及其使用	40	一、静态标定	94
一、电阻应变仪的种类和特点	40	二、动态标定	95
二、应变仪的使用	41	§ 2-9 转动机件测量中电信号的传输	96
§ 1-7 记录器	43	一、集电器	96
一、光线示波器	43	二、遥测技术简介	98
二、磁带记录器简介	51	§ 2-10 机械振动测试简介	99

一、振动测试系统的组成	99	三、平面模型内各点应力值的确定	131
二、振动测量的典型系统	103	§ 3-4 光弹材料及模型	133
§ 2-11 电功率的测量	105	一、对光弹材料的要求	133
一、功率振子与功率变换器	105	二、环氧树脂光弹材料	133
二、单相交流电功率的测量	106	三、光弹材料的性能	133
三、三相电机功率的测量	108	四、光弹试验模型	134
四、功率标定	109	§ 3-5 立体光弹试验的原理与方法	135
§ 2-12 实验的误差分析和数据处理	110	一、光弹材料的“冻结”特性	135
一、实验误差的基本概念	110	二、立体光弹的应力-光学定律	136
二、实验误差分析	111	三、模型切片的直射法	137
三、间接测量时误差的计算	115	第四章 密栅云纹法	140
四、实验数据的表示方法	116	§ 4-1 密栅云纹法的原理及几何算法	140
第三章 光弹试验的原理和方法	120	一、密栅云纹法的基本原理	140
§ 3-1 平面光弹的基本原理	120	二、平行云纹与应变的关系	141
一、平面光弹的应力-光学定律	120	三、转角云纹与应变的关系	142
二、平面偏振光系统的分析	120	§ 4-2 用位移场方法测定应变	143
三、等倾线和等差线	121	一、云纹的基本性质	143
四、等倾线的消除	123	二、小变形情况下由云纹图求应变	145
§ 3-2 光弹仪及其实践	124	三、位移偏导数正负号的确定	146
一、光弹仪及其调整	124	四、由位移导数确定应变的方法	148
二、等差线的观测	125	五、大应变和大转动情况下的应变和位移 的关系式及其在弹、塑性变形中应用 的特点	150
三、等倾线的观测	127	§ 4-3 密栅云纹方法的应用和发展	155
四、光弹材料条纹值的测定	127	一、提高云纹方法的量测精度	155
§ 3-3 平面模型应力值的确定	129	二、各种云纹方法和技术的发展	157
一、平面模型边界应力值的确定	129		
二、平面模型内切应力值的确定	130		

绪 论

一、测试工作的重要性

测试技术是实验科学的一部分，主要研究各种物理量或参量的测量原理和方法。它是进行科学试验和生产过程参量检测等必不可少的手段。

测试是人们认识客观事物的重要手段。通过测试可以揭露事物的内在联系和发展规律，从而去利用和改造它，推动科学技术的发展。科学技术发展的历史事实说明，很多新的发现和发明，都是与测试工作分不开的。同时，科学技术的发展，又为测试提供了新的测试方法和装置，促进测试技术的发展。

对于锻压生产领域，测试工作的重要性也不例外。无论是对现有工艺、设备、产品质量的剖析，以求进一步明确改进方向和改进方案；或者是对新的理论、设备和工艺过程的研究和分析，都离不开测试工作。通过对测试结果的综合分析，可为验证现有理论和建立新理论、确定最佳设计方案、确定最佳工艺参数等提供试验依据。

例如设计一台新型压机，在进行方案设计时，一方面要借助前人的经验包括实践经验和理论知识，拟定初步方案；另一方面还需要通过模型试验，以确定最佳方案。机器制造完毕后，一般也要进行鉴定性试验。如测定其主要零件的受力状况、运动部件的运动规律和力能传递规律等，从而判断该机器的性能是否符合设计要求。

对于工艺问题，其影响因素就更多，要想依靠纯理论来解决，目前尚有困难；而用试验方法来解决却比较直接简单，而且通过试验还能找出各种因素的影响规律，促进理论工作的完善和发展。

此外，在锻压生产的自动控制系统中，也需要对有关参量进行测量或检测，作为系统的反馈信号，实现自动控制。

二、常需测量的参量

试验研究和生产过程自动化等都需要对一些参量进行测量，而且所需测量的参量直接与研究的问题或控制的参量有关。但总的说来，常需测量的参量可概括如下：

1. 应力和应变参量 研究机器构件的强度，涉及到应力应变的测量；研究金属在塑性变形过程的应变和应力分布，也归结为应力应变的测量。但后者是非线性问题。
2. 各种力参量 研究机器的实际负荷和锻件的变形力等，都要对一些力参量进行测量。如压机的工艺力，曲轴的扭矩等。
3. 运动参量 研究机器工作部件和传动部件的运动规律和性能，常常要测定位移、速度和加速度等运动参量。
4. 功能参量 研究机器的功能关系，要涉及变形功、摩擦功、电机功等参量的测量。有时还需测量动能，如锤头的动能、曲轴飞轮的动能。
5. 液压参量 研究液压传动系统，要对液压、流量等进行测定。如研究液压机在工作过程中液压系统的液压冲击、传动效率等，就涉及液压、流量的测量。
6. 振动参量 研究机器的振动，需要对振动参量进行测试，通过测试可了解其振动强度

和寻找振源。

7. 其他参量 如温度、时间、金属的力学性能和金相组织等。

三、测量的方法

上述参量的测量方法较多，按照其测量原理可分为：机械测量法、电测法、光测法等。

机械测量法是利用机械器具对被测参量进行直接测量。如用杠杆应变计测量应变，用机械式测振仪测量振动参量。

电测法是将被测参量转换成电量，再用电测仪表进行测量的方法。如利用电阻应变仪测量应变应力，用电动式测振仪测量振动参量。电测法是目前应用最广泛的一种测试方法。

光测法是利用光学原理对被测参量进行测量的方法。如应力应变的光测法就有：光弹试验法、密栅云纹法等。

四、课程内容

测量各种参量的原理和方法是测试技术的研究内容。但由于教学时数有限，并考虑课程之间的分工，本课程不可能对各种参量的所有测试方法都进行介绍，而是有所侧重。同时为了叙述方便，按测试原理分电测法、光弹试验法和密栅云纹法而分章讨论。

测试技术所涉及的知识面较广，需要数学、力学、电学、光学等方面的知识。在学习本课程中，应以掌握测试的基本原理、方法和数据处理为主，并注重灵活运用这些基本知识来解决实际问题。

测试技术是实践性很强的课程，必须与实验课密切配合，理论与实践相结合，才能在理论上掌握测试的原理和方法，在实践上掌握测试技能。

第一章 电测法的原理和仪器

§ 1-1 电测法的基本概念

一、电测法的基本原理和电测装置的组成

电测法是将需要测量的非电量转换成电量后,再进行测量的一种方法。其优点是:测量准确度和灵敏度高,测量范围广,能连续测量和记录,能实现远距离测量;此外,还能方便地用于控制系统中,使生产过程自动化。因此,电测法得到了迅速发展和广泛应用。

电测法首先要将非电量转换成电量。在电测装置或测量系统中,完成这种转换作用的元件,称为转换器或变换器。

电测装置是各式各样的,它直接与所测非电量的性质和所采用的转换器形式有关。但从电测过程中信号的转换、传递来看,电测装置一般由以下环节组成:机械变换器、转换器、测量电路、放大器、指示器或记录器以及数据处理仪等。如图 1-1 所示。

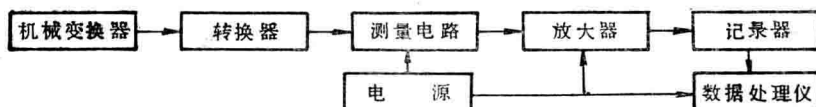


图1-1 电测装置的组成框图

1. 转换器 由某些元件或组件组成的转换器,能在非电量作用下产生电的效应,将非电量转换成电量。如常用的应变片就是转换器的一种,它在应变作用下会产生电阻的变化,将应变量转换成电阻量。又如电感转换器,能将位移量转换成电感量。

2. 机械变换器 常用的转换器仅能将某一机械量转换成电量,如应变片仅能将应变量转换成电阻量;为了扩大其测量范围,往往在转换器之前加入一机械变换器,将所需测的机械量变换成能使转换器工作的机械量。如测力传感器的受力圆筒,它受力后产生弹性变形,此变形就使应变片或其他转换器工作,故该圆筒就属于机械变换器。

在一般情况下,机械变换器和转换器是组装在一起的,合称为传感器。如测力传感器、液压传感器、加速度传感器等。

3. 测量电路 传感器能把需测的非电量转换成电量,但要进行测量,就需把传感器接成一定的电路形式,把传感器的输出量变换成易于测量的电压量或电流量。该电路称为测量电路。测量电路的形式与传感器形式有关,常用的是测量电桥。

4. 放大器 测量电路的输出信号一般是很微弱的,不能推动指示器或记录器工作,故需用放大器进行放大。但在个别情况下,即当测量电路的输出足够大时,如电感式转换器的电测装置就可不用放大器。

测量电路和放大器一般组合在一起构成专用的测量仪器。如电阻应变仪就是此类仪器。

5. 指示器或记录器 它们的作用是显示或记录测量信号,以便进一步分析处理。

6. 数据处理仪 目前, 大部分实验数据的进一步分析处理, 还是靠人工来完成。但是随着电子计算技术的发展, 有条件采用数据处理仪 (如电子计算机、微处理机等) 进行数据处理。

用电测法来测量某一压力机的工艺力, 需制造一个相应的测力传感器, 再配上电阻应变仪和示波器 (记录器), 其测试框图及信号转换过程如图 1-2 所示。

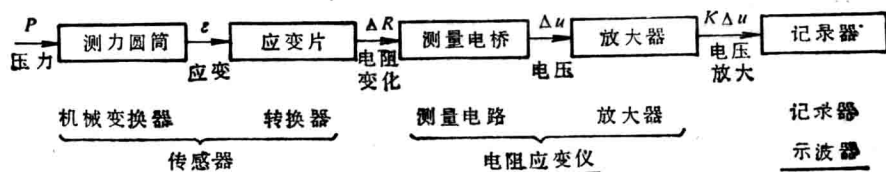


图1-2 测量压力的测试框图

用电测法 (转换器仍用应变片) 测量压力机的其他参量, 如液压、行程等, 则只要改变一下机械变换器, 即根据所测的机械量设计一个新的传感器, 其测量转换过程与上述相同。

由上述可知, 电测法的实质就是通过电测装置各环节的信号转换或传递后, 用记录器加以记录的过程。记录器记录下来的曲线 (或示波图), 能否真实地反映出被测参量的变化过程和测量值, 对电测装置有那些基本要求, 要回答这些问题, 必须先对被测参量的频谱分析、电测装置的静特性与动特性、信号的失真等有关基本概念予以讨论。

二、被测参量的特征及其频谱分析

被测参量的特征一般是指其物理性质、量值大小、量值随时间而变化的情况等, 即指其物理特征、量值特征与时变特征, 因为这些特征都是选择与设计电测装置的主要依据。如根据物理特征和量值特征来选择电测装置的形式和量程大小; 根据时变特征选择电测装置的频率特性。后者是共性的问题, 现予以讨论。

在测试过程中有很多的被测参量是随时间而变的。若以 F 表示被测参量的量值, 则可用数学表达式 $F = F(t)$ 来表示被测量 F 随时间 t 的变化过程。也可用如图 1-3 的曲线来表示。图中的纵坐标表示被测参量 $F(t)$, 横坐标表示时间 t , τ 为被测量的持续时间, T 为工作周期。

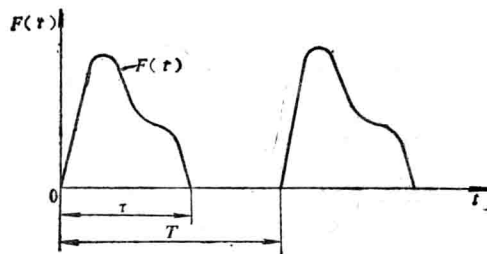


图1-3 被测参量的变化曲线图

按照被测量变化过程的特点可分为:

1. 静态过程 它的特点是 $F(t)$ 在一定时间 τ 内是不变的, 即 $F(t) = \text{常量}$, 一般 $\tau = 10\text{min}$ 或更大;

2. 动态过程 它的特点是 $F(t) = \text{变量}$ 。按照 $F(t)$ 是否周期地变化, 又可分为周期性与非周期性的动态过程。周期性动态过程的特点是 $F(t) = F(T + t)$, 其中 T 为工作周期。而非周期性动态过程的特点是 $F(t) \neq F(T + t)$ 。

被测参量随时间而变化的过程, 可用一时间函数来描述, 也即用时间域的描述方法。但在工程实际中, 被测参量的时变过程 (或信号) 是比较复杂的, 直接对该时变函数进行分析

和处理常有困难。为此,往往将一复杂的时变函数(或信号)展开成一系列正弦函数(谐波分量)的和或积分,即用频率域的描述方法。将复杂的时变函数按谐波分量进行展开的方法,称频谱分析或谐波分析。

(一) 周期过程的频谱分析

大家知道,凡满足狄氏条件的任何周期为 T 的周期性函数 $F(t)$, 都可以展开成富里哀级数。它的数学式是:

$$F(t) = F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\Omega t + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin n\Omega t \quad (1-1)$$

式中 $F(t)$ ——为满足狄氏条件的周期函数;

$\Omega = \frac{2\pi}{T}$ ——为 $F(t)$ 的圆频率;

$$\left. \begin{aligned} F_0 &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) dt \\ A_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) \cos n\Omega t dt \\ B_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) \sin n\Omega t dt \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

$n = 1, 2, 3 \dots$ 的正整数。

把 (1-1) 式利用三角函数关系整理, 可写成:

$$F(t) = F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} F_n \sin(n\Omega t + \varphi_n) \quad (1-3)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} F_n &= \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \\ \varphi_n &= \arctg \frac{A_n}{B_n} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式 (1-3) 的物理意义是: 任何周期性过程(非正弦曲线)都可以看作是成谐波关系的许多谐波分量(正弦曲线)的叠加。所谓成谐波关系, 就是 (1-3) 式中的 F_0 、 F_n 、 φ_n 要满足 (1-2) 与 (1-4) 式。式 (1-3) 中的第一项称零次谐波或平均值, 而 $F_n \sin(n\Omega t + \varphi_n)$ 称第 n 次谐波, $n\Omega$ 、 F_n 、 φ_n 分别为 n 次谐波的圆频率、幅值、相位; $n=1$ 的称一次谐波或基波, $n=2$ 的称二次谐波, 其余如此类推。

例如, 某内燃机活塞的加速度与时间的关系曲线如图 1-4 中的点划线所示, 此曲线可看成是成谐波关系的正弦曲线(如图中实线的一次谐波和二次谐波)的叠加。用频率域表示, 如图 1-4b), 横坐标表示各谐波的频率(ω), 纵坐标表示各谐波的幅值(F_n)或相位, 此图清晰地描述了各谐波分量的频率、幅值、相位间的关系, 称频谱图。

周期过程的频谱具有三个特点: ①频谱的不连续性, 是离散频谱; ②各谐波频率对基波频率有简单的倍数关系; ③谐波的幅值随其频率的增高而衰减。这三点分别称为周期过程频谱的离散性、谐波性和收敛性。

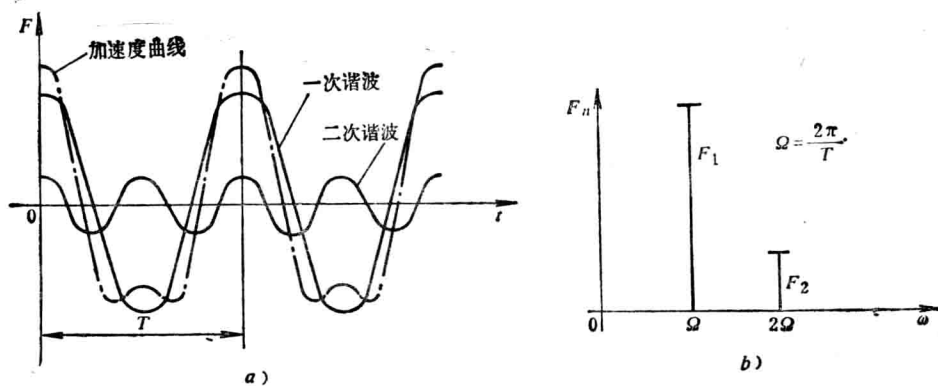


图1-4 周期过程的频谱分析实例

a) 用时间域描述 b) 用频率域描述

(二) 非周期过程的频谱分析

对于非周期过程也可以进行频谱分析, 但所采用的数学方法是富里哀变换。若非周期函数为 $F(t)$, 则它的频谱 $F(j\omega)$ 由富里哀变换求得:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) e^{-j\omega t} dt = |F(\omega)| e^{j\varphi} \quad (1-5)$$

式中 ω ——谐波分量的圆频率, 它是从 $0 \rightarrow \infty$ 的连续量, 故是连续频谱;

$|F(\omega)|$ 、 φ ——各谐波分量的幅值和相角。

$F(t)$ 就是 $F(j\omega)$ 的逆变换, 即各谐波分量 (频谱) 的总积分:

$$F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (1-6)$$

例如, 有一冲击过程如图 1-5 a) 所示。现对它进行频谱分析:

$$\begin{aligned} F(j\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} F(t) e^{-j\omega t} dt = \int_0^{\tau} a e^{-j\omega t} dt = \left. \frac{ja}{\omega} e^{-j\omega t} \right|_0^{\tau} \\ &= \frac{ja}{\omega} [e^{j\omega\tau} - 1] = \frac{2a}{\omega} \sin \frac{\omega\tau}{2} e^{-j\frac{\omega\tau}{2}} \end{aligned}$$

即

$$|F(\omega)| = \frac{2a}{\omega} \left| \sin \frac{\omega\tau}{2} \right|, \quad \varphi = -\frac{\omega\tau}{2}$$

$$\therefore \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{2a}{\omega} \sin \frac{\omega\tau}{2} = a\tau \quad \therefore |F(0)| = a\tau$$

所以 $\left| \frac{F(\omega)}{F(0)} \right| = \frac{2}{\omega\tau} \left| \sin \frac{\omega\tau}{2} \right|$ 、 $\varphi = -\frac{\omega\tau}{2}$ 就表示了各谐波分量的幅值、相角与频率 ω 间的关系。它的频谱图如图 1-5 b)、c) 所示。可见, 非周期过程的频谱是连续频谱, 并且各谐波的幅值是随其频率的增高而衰减, 即也具有幅值的收敛性。

总之, 无论是周期性或非周期性动态过程, 都可以利用频谱分析的方法分解成一系列的谐波分量, 即任一函数 $F(t)$ 都可看成是一系列谐波分量的和或积分。上述基本概念是理解和分析后面问题的基础。测试前利用这一概念, 可初步估算被测参量的频率范围, 以作为选

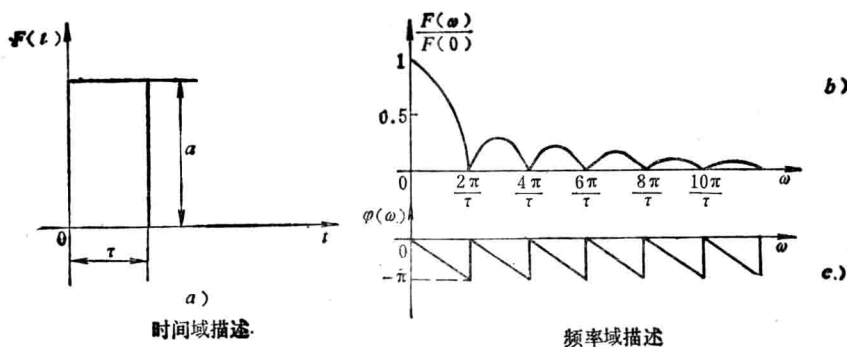


图1-5 非周期过程的频谱分析实例

a) 冲击脉冲 b) 幅频图 c) 相频图

择与设计电测装置的依据。处理试验数据时也可利用这一概念，根据实验结果利用图解法或频谱分析仪可直接求出各谐波分量或频谱图。

被测参量频率范围的估算 测试前被测量 $F(t)$ 是未知的，但周期过程的周期 T 、非周期过程的持续时间 τ 还是已知的，则周期过程的基波频率为 $\frac{1}{T}$ 、非周期过程的主要频率为 $\frac{1}{\tau}$ 。再根据谐波分量的幅值随其频率增高而衰减的特点，一般对周期过程的最高次谐波的 n 取到 7~10，对非周期过程其最高谐波频率取到 $\frac{1}{\tau}$ 的 4~5 倍。这样，被测参量的频率范围，对周期性动态过程为 $0 \sim \frac{n}{T}$ ，其中 $n = 7 \sim 10$ ；对非周期性动态过程为 $0 \sim \frac{n}{\tau}$ ，其中 $n = 4 \sim 5$ 。

三、电测装置的静态特性和动态特性

电测装置是把被测参量 $F(t)$ 经过一系列的转换和放大，最后用记录器记录或数据处理仪处理。记录器所记录下来的量 $a(t)$ (电测装置的输出) 与被测量 $F(t)$ (电测装置的输入) 之间有一定的关系。其关系可用静态特性和动态特性来描述。

(一) 电测装置的静态特性

电测装置的静态特性是指在静态条件下其输出量与输入量间的关系。输出量 a 与输入量 F 在静态下的关系，可用一代数方程 $a = f(F)$ 来描述，此方程称电测装置的静态数学模型，也可用图 1-6 的曲线图来描述，此曲线称静态特性曲线或工作曲线。方程与曲线的形式完全取决于电测装置各组成环节的特性。电测装置的静态特性可用灵敏度、线性度等来表征。

1. 灵敏度 如图 1-6 所示，工作曲线上某点的斜率定义为该工作点的灵敏度 K_i ：

$$K_i = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta a}{\Delta F} = \frac{da}{dF} \quad (1-7)$$

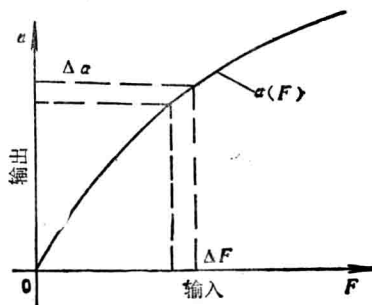


图1-6 静态特性曲线

假若工作曲线是线性的, 则各点的灵敏度相同。灵敏度越高, 表示电测装置越灵敏。

由于电测装置是由许多环节所组成, 所以总的工作曲线与各个环节的工作曲线有关。图 1-7 表示出各环节的输入输出量的传递关系, K_M 、 K_S 、 K_U 、 K_Y 、 K_a 等是各环节的灵敏度。

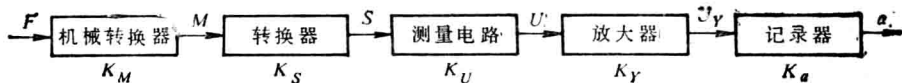


图1-7 电测装置的信号传递和灵敏度

∴

$$\Delta a = \Delta F K_M K_S K_U K_Y K_a$$

∴

$$K = \frac{\Delta a}{\Delta F} = K_M K_S K_U K_Y K_a \quad (1-8)$$

即电测装置总的灵敏度等于各环节灵敏度的连乘积。可见, 为了提高电测装置总的灵敏度, 必须提高各环节的灵敏度。

2. 线性系统和非线性 电测装置(系统)的输入输出成线性关系的称线性系统, 反之称非线性系统。线性系统最重要的特点是可用叠加原理。叠加原理说明, 如果输入是个复杂信号, 且可分解为几个简单分量, 则总输出就等于各分量单独作用下输出的叠加。这一点正是测试所要求的, 如对于动态测量, 必须采用线性系统, 否则会产生非线性失真(见本节四)。对于静态测量, 为了便于测量换算或仪器刻度读数方便, 也需采用线性系统。所以, 线性系统是个理想的测量系统。

测量时都希望采用线性系统, 即要求其工作曲线是线性的。但实际电测装置的工作曲线, 往往与理想的线性工作曲线有所偏离。为了描述其偏离程度, 以非线性来表示。如图 1-8, I 为实际工作曲线, II 为理想工作曲线, 最大偏离值 $\Delta a_{\max}$ 与额定输出值 $a_{\max}$ 之比就称非线性 η :

$$\eta = \frac{\Delta a_{\max}}{a_{\max}} \times 100\% \quad (1-9)$$

3. 滞后性 如图 1-9 所示, 当输入由小到大或由大到小即循环输入时, 其工作曲线不重合, 称滞后性。一般以两工作曲线的最大不重合值 H 与额定输出值 $a_{\max}$ 的比值来表示:

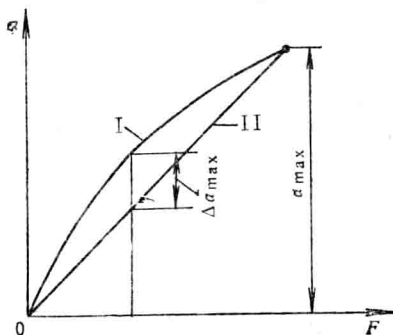


图1-8 实际和理想的工作曲线

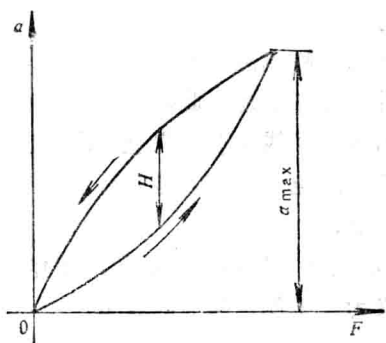


图1-9 滞后性

$$\delta = \frac{H}{\alpha_{max}} \times 100\%$$

滞后性是由于材料滞后（磁滞后和机械滞后）以及仪器的不工作区等引起的。对于电测系统来说，希望滞后性越小越好。

（二）电测装置的动态特性

电测装置的动态特性是指在动态条件下输出量 $\alpha(t)$ 与输入量 $F(t)$ 间的关系。其动态关系完全决定于电测装置各环节的特性。现仅介绍描述动态特性的一般方法。

根据电测装置的物理特性，一般都可写出描述其输入输出动态关系的微分方程，即动态数学模型：

$$\begin{aligned} & a_n \alpha^n(t) + a_{n-1} \alpha^{n-1}(t) + \cdots + a_1 \alpha(t) + a_0 \alpha(t) \\ & = b_m F^m(t) + b_{m-1} F^{m-1}(t) + \cdots + b_0 F(t) \end{aligned} \quad (1-10)$$

式中的 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$; $b_m, b_{m-1}, \dots, b_0$ 是与电测装置物理性质有关的常数。微分方程(1-10)的解就是输出输入间的动态关系。这是时间域的描述方法。

也可用频率域的描述方法。其中最一般的是用传递函数 $K(S)$ 来描述。所谓传递函数是指测量系统在零初始条件下输出与输入的拉氏变换的比值：

$$\begin{aligned} K(S) &= \frac{L[\alpha(t)]}{L[F(t)]} = \frac{\alpha(S)}{F(S)} \\ \text{或} \quad \alpha(S) &= K(S) F(S) \end{aligned} \quad (1-11)$$

式中 $\alpha(S) = \int_0^\infty \alpha(t) e^{-st} dt$ ——输出的拉氏变换；

$F(S) = \int_0^\infty F(t) e^{-st} dt$ ——输入的拉氏变换。

对方程(1-10)两边取拉氏变换，并设初始条件为零，则有

$$\begin{aligned} & [a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \cdots + a_1 S + a_0] \alpha(S) \\ & = [b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \cdots + b_1 S + b_0] F(S) \end{aligned}$$

$$\therefore K(S) = \frac{\alpha(S)}{F(S)} = \frac{b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \cdots + b_1 S + b_0}{a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \cdots + a_1 S + a_0}$$

这就是传递函数的一般形式。

传递函数 $K(S)$ 中的 $S = \sigma + j\omega$ ，它可在复平面上沿任何轨迹取值。它的特殊情况是当 S 沿复平面上的虚轴变化时，即 $\sigma = 0$ 、 $S = j\omega$ ，这时的传递函数就称为频率响应函数 $K(j\omega)$ ：

$$K(j\omega) = K(S)|_{s=j\omega} = \frac{\alpha(j\omega)}{F(j\omega)} \quad (1-12)$$

式中 $\alpha(j\omega) = \int_0^\infty \alpha(t) e^{-j\omega t} dt$ ——输出的富氏变换；

$F(j\omega) = \int_0^\infty F(t) e^{-j\omega t} dt$ ——输入的富氏变换。

即频率响应函数是输出与输入富氏变换的比值，它反映了测量系统对各频率成分在输入与输出间的幅相关系。若在输入端加入正弦信号 $F \sin \omega t$ ，而其输出端的输出信号为 $\alpha \sin(\omega t + \phi)$ ，

则输出与输入的幅值比为 $K = \frac{a}{F}$, 而相位角 (差) 为 ϕ , 该幅值比 K 及相位角 ϕ 就是频率响应函数 $K(j\omega)$ (对频率为 ω 时) 的幅值与相角。

改变输入信号的频率 ω , 重复上述, 可得出各频率信号下的幅值比 $K(\omega)$ 与相位角 $\phi(\omega)$ 。其幅值比 $K(\omega)$ 与相角 $\phi(\omega)$ 同样是频率响应函数 $K(j\omega)$ 的幅值与相角, 即:

$$K(j\omega) = |K(j\omega)| e^{j\phi(\omega)} = K(\omega) e^{j\phi(\omega)} \quad (1-13)$$

$K(\omega)$ 称幅频特性, 它表明了输入与输出信号幅值的比值或放大倍数随其频率 ω 而变化的关系。 $\phi(\omega)$ 称为相频特性, 它表明了输出与输入信号之相位角 (差) 随其频率 ω 而变化的关系。幅频特性与相频特性的统称为频率特性。

幅频特性与相频特性一般都用曲线图来表示。如图 1-10 a) 是幅值比 $K(\omega)$ 与频率 ω 的关系曲线, 称幅频特性曲线; 图 1-10 b) 是相位角 $\phi(\omega)$ 与频率 ω 的关系曲线, 称相频特性曲线。两者统称频率特性曲线。

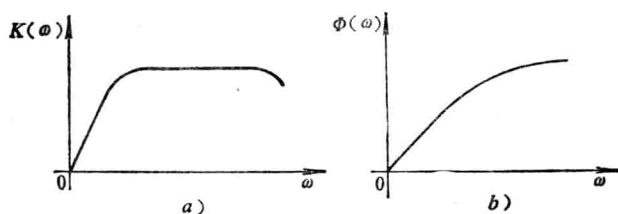


图 1-10 频率特性曲线图
a) 幅频特性曲线 b) 相频特性曲线

频率特性是用来描述系统动态特性最常用的一种方法。因为它描述了系统对不同频率的正弦信号或谐波分量的响应情况, 由幅频特性可知道各频率信号在幅值上放大了多少倍, 由相频特性可知各频率信号在相位上产生了多大的相位移。再根据叠加原理, 就可以方便地从已知的输入确定其输出, 或从已知的输出确定其输入。测量是属于后一种情况, 即由测试记录 $a(t)$ 求被测参量 $F(t)$ 。

由于电测装置是由各个环节串联而组成, 所以其总的频率响应函数等于各个环节的频率响应函数的连乘积, 即:

$$K(j\omega) = K_M(j\omega) K_S(j\omega) K_U(j\omega) K_Y(j\omega) K_a(j\omega) \quad (1-14)$$

式中 $K_M(j\omega)$ 、 $K_S(j\omega)$ 等是各环节的频率响应函数 (见图 1-7)。根据复数的运算法则, 对于幅频特性和相频特性分别有:

$$\left. \begin{aligned} K(\omega) &= K_M(\omega) K_S(\omega) K_U(\omega) K_Y(\omega) K_a(\omega) \\ \phi(\omega) &= \phi_M(\omega) + \phi_S(\omega) + \phi_U(\omega) + \phi_Y(\omega) + \phi_a(\omega) \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

即电测装置总的幅频特性 $K(\omega)$ 为各环节幅频特性之积, 其总的相频特性 $\phi(\omega)$ 为各环节相频特性之和。

四、输出信号的失真

一个理想的电测装置, 应该能把被测量的变化过程真实地记录下来, 也即 $a(t)$ 应与 $F(t)$ 完全相似, 即存在 $a(t) = KF(t)$ 的关系。如不能达到这一点, 就叫输出信号失真。输出信号的失真按其产生的原因有: 非线性失真、幅频失真和相频失真三种。

(一) 非线性失真

非线性失真是由于电测装置的工作曲线 (即幅值特性曲线) 的非线性所引起的。图 1-11

示出了工作曲线为非线性情况下输出与输入波形间的相互关系, 图 a) 为工作曲线 (非线性的); b) 为输入 $F(t)$ 的波形; c) 为其输出 $a(t)$ 的波形。由图可见, $a(t)$ 与 $F(t)$ 的波形完全不相似, 这就是非线性失真。非线性失真的实质就是由于工作曲线的非线性, 而使 $a(t)$ 波形中产生了 $F(t)$ 波形中所没有的谐波成分。如图的 $F(t)$ 为正弦波, 而 $a(t)$ 是非正弦波。根据频谱分析, $a(t)$ 是由基波 [与 $F(t)$ 成正比的正弦波] 和高次谐波所组成的, 其高次谐波是输入波形中所没有的, 是由于工作曲线的非线性所引起的。

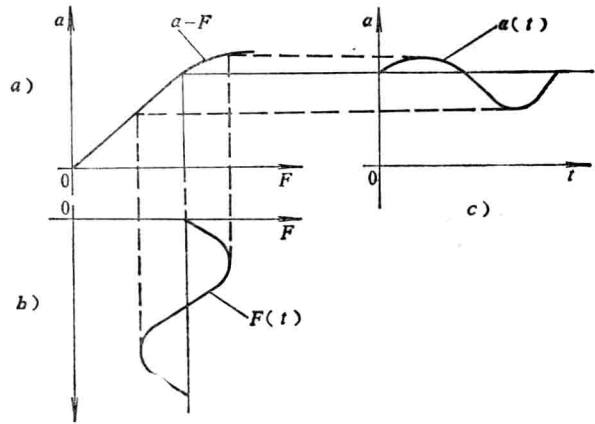


图1-11 非线性失真

a) 工作曲线 (非线性) b) 输入 $F(t)$ 的波形 c) 输出 $a(t)$ 的波形

该例说明, 非线性测量系统不能保证输入与输出信号频率成分的不变性, 从而产生非线性失真; 但线性测量系统却能保证频率成分的不变性, 不产生非线性失真。

因此, 要使电测装置不产生非线性失真, 就要求其工作曲线是线性的, 即线性测量系统。由于系统总的工作曲线与各环节的工作曲线有关, 所以也要求各环节要在线性状态下工作。

(二) 幅频失真

幅频失真由于电测装置对于输入 $F(t)$ 所包含的谐波分量具有不同的幅值比或放大倍数所引起的。假如电测装置对 $F(t)$ 的各谐波分量的幅值比不同, 即各分量在幅值上得到不同的放大, 那么就会引起输出 $a(t)$ 与输入 $F(t)$ 波形的不同, 即产生了失真, 称幅频失真。

如被测量 $F(t)$ 为:

$$F(t) = F_0 + \sum_{n=1}^n F_n \sin(n\Omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

而电测装置对 $F(t)$ 各谐波分量的幅值比不同, 则 $a(t)$ 为:

$$a(t) = K_0 F_0 + \sum_{n=1}^n K_n F_n \sin(n\Omega t + \varphi_n) \quad (2)$$

因 K_0 、 K_1 、 K_2 ……不相等, 无法抽出公因子, 故 (1) 与 (2) 式就没有相似关系, 即 $a(t)$ 产生了失真。

假若电测装置对 $F(t)$ 各谐波分量的幅值比相同, 即 $K_1 = K_2 = K_3 = \dots = K_0$, 则:

$$a(t) = K_0 \left[F_0 + \sum_{n=1}^n F_n \sin(n\Omega t + \varphi_n) \right] \quad (3)$$

即 $a(t)$ 与 $F(t)$ 波形完全相似, 没有产生幅频失真。

可见, 要不产生幅频失真, 就要求电测装置的幅频特性曲线是水平直线, 见图 1-12 曲