

机械工程电测技术基础

郑州粮食学院机械系

一九八八年八月

绪 论

(一)

科学技术的发展，同测试技术的发展息息相关。除了极个别的学科之外，现代的科学技术是离不开测试工作的。

诚然，现代测试方法和装置的出现，是科学技术发展的结果，然而，从另一方面来说，精确的测试又是促成科学技术的新发现和新发展的强有力的工具。这类事例在各个科学部门和技术行业中都数不胜数。因此，使用先进的测试技术是科学技术现代化的重要标志之一。也是科学技术现代化必不可少的条件。

现代机械工程技术人员，不仅面临着静态几何量的测量，而且随着科学技术的发展，还越来越多地面临着许多不可避免的动态物理量（如位移、振动、噪声、力和温度等）的测量。这些测量有多种方法（如机械测量法、光测法和电测法等）。但大量使用的是非电量电测法。即通过传感器将被测物理量转换成电信号，而后对电信号进行各种中间变换来最终达到测量的目的。因此，机械工程技术人员应当掌握常见动态物理量电测法的有关知识。

本课程的主要任务是利用现代的测试手段对所研究的机械进行检测，以便获得在各种工作状态下，主要零件的力学性能，部件、机构及整机的运动规律和动力传递规律。从而判断该机械的性能是否符合设计要求。通过对试验数据的分析处理，为科研人员验证现有理论和建立新理论，设计人员进行最佳设计，工艺人员改进制造工艺提供依据。不仅如此，在自动控制过程中，有关动态物理量的

检测性能及时把控制过程中的有关参数显示出来，并据此对控制过程进行反馈调节。

本课程研究的对象是机械工程中常见动态物理量的电测法。

(二)

任何一个物理量的测量装置，是由许多功能不同的器件所组成的。典型的测量装置如图0—1所示。被测信号首先经过传感器转换成便于输送、转换和测量的电信号之后送进中间变换器；中间变换器用来实现信号的再转换、放大或衰减、调制和解调、阻抗变换、分析和运算等项处理，使信号变成一些合于需要又便于记录和显示的信号，并最后被记录器、显示器记录或显示出来，供测量者应用。

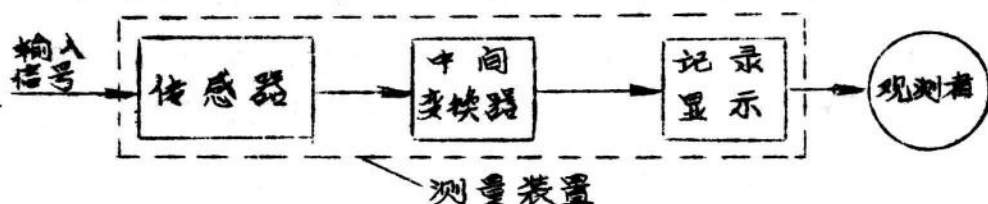


图0—1 测量装置的方框图

完成一次科学的测试，要掌握多方面的知。首先，要深入了解各种信号的基本特性和分析方法。因为信号本身的特性，特别是它的频率结构对正确选择和运用测量装置有着重大影响。

其次应当掌握实验数据的处理方法。因为只有经过科学处理后的实验结果才可能是合于需要和可靠的。

其三，必须了解传感器的变换原理和测量装置的基本特性。只

有这样，才能依据被测量的性质和测量的目的正确选择和运用各种传感器和测量装置的其它部分。

最后，由于被测量本身的物理特性及某些变化规律是建立测量方法和分析测量结果的依据，因此，必须了解被测量的这些规律，并结合这些规律来研究相应的测试方法。

本书将逐一论述上述四点要求的内容。

(三)

由于本课程中将非电量转换成电量的方法很多，同时还有中间转换和显示记录仪器，因此与它有联系的课程很多，关系也较密切。直接与本课程有关的基础有数学、物理学、工程力学、电工学、电子学、自动控制理论、数字技术、仪器零件等。尤其是物理学和电子学两门课更为密切，因为传感器的原理主要是基于各种物理现象和物理效应的，而中间变换器又是以电子学为基础的。因此在学习本课程时，必须对上述课程有一定的基础。

目 录

绪 论	1
第一章 信号及其描述	1
§ 1—1 信号的分类	1
一、确定性信号	1
二、非确定性信号	2
§ 1—2 周期信号	3
一、周期信号	3
二、付里叶级数和周期信号的分解	4
§ 1—3 非周期信号	11
一、非周期信号和付里叶积分	13
二、付里叶变换的特性	17
§ 1—4 确定性信号的描述	26
§ 1—5 随机信号	27
一、随机过程的一般关系	27
二、各态历过程	29
第二章 测量装置的基本特性	32
§ 2—1 测量概述	32
一、测量误差	33
二、选择测量装置应当考虑的一些因素	34

§ 2—2 测量装置的基本特性.....	37
一、线性系统.....	37
二、测量装置的静态特性.....	38
三、测量装置的动态特性.....	40
§ 2—3 常见测量装置的动态特性.....	52
一、相似系统.....	52
二、常见测量装置的频率响应.....	58
三、常见测量装置的瞬态响应.....	56
四、 $H(j\omega)$ 、 τ 、 ω_n 和 D 的影响.....	62
§ 2—4 测量装置特性参数测定简介.....	64
第三章 常用传感器的变换原理.....	69
§ 3—1 传感器的分类和性能要求.....	70
一、分类.....	70
二、传感器应具有的性能.....	73
§ 3—2 电阻式传感器.....	73
一、电位器式传感器.....	73
二、电阻应变式传感器.....	78
三、热电阻式传感器.....	90
§ 3—3 电感式传感器.....	99
一、可变磁阻式传感器.....	99
二、涡流式电感传感器.....	103
三、差动变压器式电感传感器.....	106
§ 3—4 电容式传感器.....	109

一、极距变化型.....	109
二、面积变化型.....	111
§ 3—5 压磁式传感器.....	113
§ 3—6 压电式传感器.....	115
§ 3—7 热电式传感器.....	120
一、热电效应.....	120
二、接触电势.....	121
三、同一导体中的温差电势.....	122
§ 3—8 磁电式传感器.....	124
§ 3—9 光电式传感器.....	126
一、外光电效应及光电管.....	126
二、内光电效应及光导管.....	128
三、光生伏打效应及光敏晶体管.....	130
四、光电式传感器及其应用.....	131
第四章 测量装置的一些中间变换器.....	134
§ 4—1 电桥.....	134
一、直流电桥.....	135
二、交流电桥.....	139
三、变压器电桥.....	142
四、平衡电桥.....	143
§ 4—2 滤波器.....	144
一、理想滤波器.....	144
二、实际滤波器.....	145

§ 4—3 放大器	156
§ 4—4 调制与解调	159
一、电桥调幅与相敏检波	160
二、谐振调频器与鉴频器	164
§ 4—5 模拟数字转换器	167
一、概述	167
二、A/D 和 D/A 转换器的基本技术指标	168
三、D/A 转换器	172
四、A/D 转换器	176
第五章 示波器与记录器	182
§ 5—1 阴极射线示波器	182
一、示波器放大器	184
二、锯齿波振荡器或时基发生器	185
三、同步	187
四、亮度或 Z 轴变换	188
五、外部水平输入	188
§ 5—2 显示记录仪器	189
一、电位计式记录仪	189
二、检流计式记录仪	189
§ 5—3 磁带记录器	200
一、工作原理	200
二、记录方式	204
三、走带速度	206

第六章 信号分析.....	207
§ 6—1 相关分析及其应用.....	208
一、相关.....	208
二、自相关函数.....	210
三、互相关函数.....	214
四、自相关、互相关函数的测量与估计.....	220
§ 6—2 功率谱分析及其应用.....	221
一、自功率谱密度函数.....	221
二、互谱密度函数.....	227
§ 6—3 数字信号处理.....	233
一、数字信号处理的基本步骤.....	233
二、量化和量化误差.....	235
三、采样、混叠和采样定理.....	235
四、截断、泄漏和窗函数.....	239
五、离散付里叶变换及其快速算法.....	241
六、离散的谱密度估算.....	243
七、应用举例.....	248
第七章 位移测量.....	251
§ 7—1 常用的位移传感器.....	251
一、电阻式位移传感器.....	254
二、电阻应变式位移传感器.....	255
三、电感式位移传感器.....	256
四、电容式位移传感器.....	260

五、旋转变压器式角位移传感器.....	261
六、微动同步器式角位移传感器.....	264
七、光栅式数字位移传感器.....	265
§ 7—2 位移测量应用实例.....	272
一、回转轴误差运动的测量.....	272
二、运动部件移动不均匀性的测量.....	281
三、物位的测量.....	284
第八章 振动的测试.....	286
§ 8—1 概述.....	286
一、旋转机械的动平衡.....	297
二、机床频率响应测试.....	290
§ 8—2 单自由度系统的受迫振动.....	292
一、由作用在质量上的力所引起的受迫振动.....	293
二、由基础运动所引起的受迫振动.....	294
§ 8—3 振动的激励.....	297
一、稳态正弦激振.....	297
二、随机激振.....	298
三、瞬态激振.....	299
§ 8—4 激振器.....	302
一、电动式激振器.....	302
二、电磁式激振器.....	304
三、电液式激振器.....	306
§ 8—5 振动的测量方法及测振传感器.....	307

一、磁电式速度计	309
二、压电式加速度计	311
三、伺服式加速度计	314
四、阻抗头	316
五、测振仪器的合理选择	317
§ 8—6 振动的分析方法与仪器	318
一、基于带通滤波器的频谱分析仪	319
二、用相关滤波的振动分析仪	321
三、跟踪滤波	323
四、数字信号处理方法	326
§ 8—7 机械系统振动参数的估计	327
一、自由振动法	327
二、共振法	328
第九章 应变和力的测量	331
§ 9—1 应变仪	331
一、应变仪的组成	332
二、应变片的布置和接桥方法	333
三、在平面应力状态下测定主应力	335
四、提高应变测量精确度的措施	336
五、测点的选择	338
§ 9—2 常用测力传感器的结构	339
一、电阻应变式	339
二、差动变压器式	341

三、电容式.....	341
四、测力传感器的定度.....	342
§ 9—3 多向测力传感器.....	347
一、电阻应变式.....	347
二、压电式.....	350
第十章 噪声的测量.....	351
§ 10—1 基本概念.....	351
一、噪声的物理量度.....	351
二、噪声的主观评价.....	354
§ 10—2 噪声测量常用仪器.....	361
一、传声器.....	361
二、声级计.....	368
三、声级计的校准.....	369
§ 10—3 噪声测量中的若干问题.....	373
一、一般的现场测量.....	373
二、声功率测量.....	375
三、声压相加.....	376
第十一章 温度的测量.....	379
§ 11—1 温度标准及基本测量方法.....	379
一、温标.....	379
二、测温法分类.....	380
§ 11—2 接触式测温方法.....	383
一、接触式测温仪器.....	383

二、接触式测温误差分析.....	393
§ 11—3 非接触式测温方法.....	397
一、热辐射的基本概念.....	397
二、热辐射的基本定律.....	399
三、辐射温度计.....	402
四、红外测温.....	403
§ 11—4 切削温度的测量.....	406
一、测量切削温度的方法.....	406
二、用热电偶测温时的寄生热电势.....	411
三、用热电偶法测定切削温度时的定度.....	413

第一章 信号及其描述

在生产和实验中，需要观测大量的物理现象和物理参数的变化，并且总是要把它们变换成一定形式的信号。所以，对这些物理现象和物理参数的分析，最终可归结为相对应信号的分析。

§ 1—1 信号的分类

虽然实际中的信号是各种各样的，但仔细观察，有些信号之间具有一定共性。这种共性使得我们能够用同一种分析法对它们进行分析。这样就简化了信号分析法。

作为时间的函数，信号可分为确定性信号和非确定性信号。

一、确定性信号

作为时间函数的确定性信号是能够用明确的数学关系式来描述的。例如集中参数的单自由度振动系统（图 1—1）作无阻尼自由振动时，其位移 $x(t)$ 这个信号可用下列关系式描述：

$$x(t) = x \cos \sqrt{\frac{K}{m}} \cdot t \quad (m)$$

(1—1)

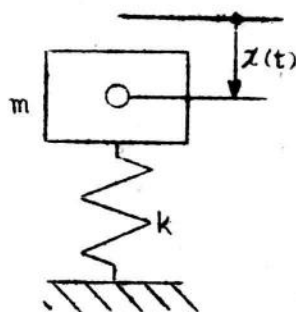


图 1—1

单自由度振动系统

式中: t —时间 (s);

k —弹簧常数 ($N \cdot m^{-1}$);

m —质量 (kg);

x —质量离平衡位置的最大距离 (m)。

式 (1-1) 确定了任何瞬时质量的精确位置。因此其位移信号是确定性的。

确定性信号可以进一步分为周期性信号和非周期性信号。(1-1) 所表达的位移信号是确定性信号, 也是周期信号; 而信号

$$y(t) = A e^{at} \quad (A, a \text{ 均为常数}) \quad (1-2)$$

虽是确定性的, 但却是非周期信号。

二、非确定性信号

非确定性信号作为时间的函数无法用明确的数学关系式来表达, 无法预测未来任何瞬时精确值。它们只能用概率术语来描述。环境的噪声和环境的振动都属于这一类信号。

非确定性信号也可进一步分为平稳的和非平稳的两种。

确定性信号和非确定性信号的判断, 通常以实验能否重复产生这些信号为依据。如果产生信号的实验, 重复多次能够得到相同的结果 (在一定实验误差范围内) 则一般可以认为这些信号是确定性的; 否则就是非确定性的。

§ 1—2 周期信号

尽管任何确定性信号，一般都可以用一个时间函数来表达。但实际信号都比较复杂，直接对其时间函数进行分析和处理常常有许多困难。为了克服这些困难，往往将一般的复杂信号展开成某种类型的基本信号的和。这些被采用的基本信号必须是一些易于实现、分析和处理比较方便的信号。然后，根据测试目的的不同，在时间域、频率域或幅位域上对信号中所包含的有用信息进行分析。

应用最广泛的基本信号之一是正弦信号。

一、周期信号

设一个随时间 t 而变的信号 $x(t)$ 。如果 $x(t - nT) = x(t)$ ， n 为任意整数， T 为常数，则 $x(t)$ 是一个周期信号。 T 称为周期(s)。周期信号 $x(t)$ 的频率记为 f_0 (Hz)，

$f_0 = \frac{1}{T}$ ，记 $2\pi f_0$ 为 ω_0 (rad/s)，称为角频率。

最简单又最有用的周期信号是正弦信号。因为，除了容易产生正弦信号和利用正弦信号激励测量装置容易分析测量装置的动态特性等原因之外，最主要的原因是任何一个周期信号(满足Dirichlet条件)都可以展开成由许多正弦谐波成分组成的付里叶(Fourier)级数，正弦信号的表达式为

$$\begin{aligned} x(t) &= X \sin(\omega_0 t + Q_0) \\ &= X \sin(2\pi f_0 t + Q_0) \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中： X —幅值；

Q_0 —初相角。

由于余弦信号可以改写成适当的正弦信号，因此，今后将两者

总称为正弦信号。

二、付里叶级数和周期信号的分解

描述周期信号的基本数学工具是付里叶级数。根据付里叶级数的理论。在满足狄利克莱 (Dirichlet) 条件下。任何一个周期为 T 的周期信号 $x(t)$ 都可展开成如下的付里叶级数

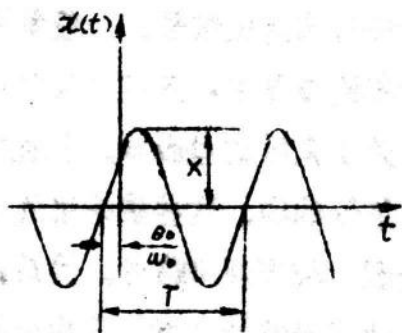


图 1-2 正弦信号

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (1-4)$$

($n=1, 2, 3, \dots$)

式中 $a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (1-5)$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (1-6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (1-7)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

式 (1-4) 也可改写成另一种形式