



高等学校统编教材

柴油机测试技术

(修订本)

杨光昇 魏荣年 主编

国防工业出版社

内 容 介 绍

本书阐述柴油机测试技术的基础理论知识和主要参数的测试方法、测试系统以及测试仪表的工作原理、选用原则、测试系统的校准与标定等基本内容。全书共十二章，前三章阐述测试仪表特性、误差理论、实验数据整理与表示方法、变换器原理、记录设备等测试技术基础知识；第四章至第十二章分别阐述柴油机主要参数：转速、扭矩(功率)、流量(耗量)、应变、压力(示功图)、温度、振动、噪声、烟度及排气成分分析等基本知识。

本书可作为船舶动力工程专业与内燃机专业教材，也可供从事内燃机科研、设计、生产、使用等部门的科技人员参考。

柴油机测试技术

(修订本)

杨光昇 魏荣年 主编

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张19¹/₂ 452千字

1984年12月第一版 1984年12月第一次印刷 印数：0,001—4,600册

统一书号：15034·2067 定价：3.00元

前 言

本书是在一九八〇年第一版基础上修订再版。修订稿是以一九八二年七月的《柴油机测试技术》教材修订会议通过的修订大纲为依据,根据几年来的教学实践进行修编的。

随着科学技术的发展,柴油机测试技术是在现代柴油机的科研、设计、生产、使用的科学实践中逐步形成以研究柴油机测试技术的基础理论和主要参数测试方法、测试仪表等专门知识的一门相对独立的学科,并成为内燃机专业不可缺少的组成部分之一,现已成为高等院校内燃机专业本科生的必修课。

柴油机测试技术涉及机械、电工、电子、自动控制等学科的广泛知识。近年来,随着性能先进的新型变换器、测试仪表的出现,不仅有力地促进了测试方法的更新,同时也提高了测量精度。目前,由于微型电子计算机在柴油机测试中的应用,在控制被测信号的采集、实现测试系统及实验台的自动化、实验数据的处理等方面都取得了可喜的进展,从而推动了测试技术基础理论的发展。

根据编写大纲的要求,本书主要是阐述柴油机测试技术的基础理论和柴油机主要参数的测试方法等基本内容;学习本课程的基础知识是物理学、电工学、电子学、力学、机械设计等课程的有关内容。

本书第一、四、六、九、十、十一、十二章由魏荣年编写;第二、三章由田凤起编写;第五章由刘光祖编写;第七章由初立生编写;第八章由张天元编写。

本书主编为杨光昇、魏荣年。

全书图稿由李万吉、曲秀民、侯姓深绘制。修订时由曲秀民、侯姓深增绘了部分图稿。

本书第一版完稿后,由主审单位大连工学院主持召开了审稿会,参加单位有:大连工学院、上海交通大学、武汉水运工程学院、海军工程学院、华中工学院、华南工学院、上海内燃机研究所、七一一所等。由大连工学院孙有五、崔长豪任主审。

由于编者水平所限,本书的缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

于哈尔滨船舶工程学院

目 录

第一章 测量与误差分析	1	4.2 光电变换元件	56
第一节 测量	1	第五节 电容式变换器	62
1.1 被测量	1	5.1 工作原理及基本类型	62
1.2 测试系统	5	5.2 测量电路	66
1.3 测试仪表的特性	5	5.3 电容变换器的特点及应用	68
1.4 测量的分类	16	第六节 电阻式变换器	69
第二节 直接测量误差分析	16	6.1 电阻应变式变换器	69
2.1 真值与测量值	16	6.2 电阻温度变换器	80
2.2 误差的分类	17	第七节 电感式变换器	83
2.3 测量精度	17	7.1 工作原理	83
2.4 系统误差分析	18	7.2 差动式电感变换器及其测量电路	85
2.5 随机误差分析	19	7.3 差动变压器及其测量电路	87
2.6 最佳估值	20	7.4 电感变换器的特点及应用	91
2.7 标准误差与极限误差	21	第八节 传感器的评定及选择	91
第三节 函数误差	22	8.1 传感器的评定指标	92
3.1 误差传递的一般公式	22	8.2 提高传感器的抗干扰性	93
3.2 间接测量量的算术平均值	23	8.3 传感器的选择	96
3.3 间接测量量的标准误差	24	第三章 记录设备	97
3.4 函数误差的运算误差传递公式的应用	25	第一节 光线示波器	97
第四节 实验数据的处理与表示	27	1.1 工作原理	97
4.1 测量结果的计算步骤	27	1.2 磁电式振子特性	97
4.2 有效数字	31	1.3 振子的选择	101
4.3 可疑数据的剔除	33	第二节 记录仪及自动平衡式记录仪	107
4.4 实验数据的表示方法	34	2.1 记录仪	107
4.5 记录曲线的整理与标定	38	2.2 X-Y 记录仪	108
第二章 变换器原理	39	第三节 磁带记录器	110
第一节 压电式变换器	40	3.1 记录与重放的基本原理	110
1.1 压电效应	40	3.2 记录方式	112
1.2 压电材料	41	第四章 转速测量	116
1.3 压电变换器	43	第一节 平均转速测量	116
1.4 压电变换器对测量电路的要求	44	1.1 机械式转速表	116
第二节 磁电式变换器	48	1.2 电气式转速表	118
2.1 工作原理	48	1.3 数字式转速表	119
2.2 磁电式变换器的应用	48	1.4 转速表的校验	124
第三节 热电式变换器	50	第二节 瞬时转速测量	125
3.1 工作原理	50	2.1 转速-电压转换型瞬时转速测量仪	125
3.2 热电极材料及常用热电偶	52	2.2 测速发电机式瞬时转速测量仪	126
3.3 热电偶的冷端温度补偿	53	第五章 扭矩测量	127
第四节 光电式变换器	55	第一节 水力测功器	127
4.1 光电效应	55	1.1 水力测功器的基本工作原理	127

1.2 水力测功器的类型	129	4.1 运动件的应变测量	194
1.3 水力测功器的供水系统	130	4.2 高温电阻应变测量	197
1.4 简单摆锤式测力机构	132	第八章 压力测量与示功图测录	201
1.5 水力测功器的特性曲线	133	第一节 压力表	201
1.6 水力测功器的校正	134	1.1 弹簧管式压力表	201
1.7 提高水力测功器性能的措施	135	1.2 霍尔变送器压力表	202
第二节 电力测功器	137	1.3 压力表的校验	203
2.1 平衡式直流电力测功器	137	第二节 最高压力表	204
2.2 精密摆锤式测力机构	138	2.1 机械式最高压力表	205
2.3 直流平衡式电力测功器的原理线路图	139	2.2 电子式最高压力表	205
2.4 电力测功器的特性曲线	143	第三节 平均压力计	207
第三节 电涡流测功器	145	第四节 机械示功器	208
3.1 电涡流测功器的原理	145	第五节 气电式示功器	210
3.2 电涡流测功器的特性	147	第六节 电子示功装置	212
第四节 钢弦扭矩仪	148	6.1 电阻应变式示功装置	212
第五节 测功器评定	152	6.2 电容式示功装置	214
第六章 流量测量	156	6.3 压电式示功装置	218
第一节 燃油消耗量测量	156	6.4 电子式示功装置的标定	220
1.1 重量法	156	第七节 低压测量	222
1.2 容积法	158	第八节 确定上死点	223
第二节 冷却水与机油流量测量	160	第九节 示功图的整理计算	225
2.1 重量法和容积法	160	9.1 将 $p-\phi$ 图转换为 $p-v$ 图的图解法	226
2.2 涡轮流量计	161	9.2 解析法	226
第三节 空气流量测量	163	第十节 示功图测量中的误差因素	
3.1 标准孔板流量计	163	与示功装置的比较	230
3.2 双组线节流器	166	第九章 温度测量	234
3.3 柴油机空气流量测量系统	167	第一节 稳定温度测量	234
3.4 柴油机空气流量测量系统的误差分析	168	1.1 压力式温度计	234
第四节 气体流速测量	169	1.2 热电高温计	236
4.1 动压管	170	1.3 热电阻温度计	241
4.2 热线风速仪	172	1.4 温度测量误差	245
4.3 多普勒激光测速仪	174	1.5 温度计的校准	247
第七章 电阻应变测量	177	1.6 柴油机稳定温度测量	248
第一节 应变片的粘贴	177	第二节 零件温度测量	248
1.1 电阻应变片选用的原则	177	2.1 易熔合金法	248
1.2 电阻应变片的粘贴	177	2.2 硬度塞法	249
1.3 应变片的防潮处理	178	2.3 示温涂料法	249
第二节 应力与应变的计算方法	179	2.4 热电偶测温法	250
2.1 应力的计算方法	179	第三节 瞬时温度测量	251
2.2 应变花的应用与计算	179	3.1 利用热电阻或热电偶测量燃气	
第三节 电阻应变仪	181	的瞬时温度	251
3.1 电阻应变仪的工作原理	181	3.2 测量柴油机燃烧火焰瞬时温度	252
3.2 动态应变仪电路结构及工作原理	182	第十章 振动测量	254
3.3 应变测量中的误差	187	第一节 振动测量概述	254
第四节 运动件及高温件的应变测量	193	1.1 机械振动的分类	254
		1.2 简谐振动的数学模型	254

1.3 振动参数表示方法	255	2.3 声级计的校准	276
1.4 测振仪的分类	258	第三节 噪声测量	277
1.5 测振仪的基本环节	259	3.1 柴油机噪声测量点的选择	277
第二节 测振仪	260	3.2 噪声测量的典型环境	278
2.1 机械式测振仪	260	3.3 本底噪声的修正	279
2.2 磁电式测振仪	261	3.4 柴油机噪声测量注意事项	280
2.3 压电加速度计	264	第四节 频谱分析	280
第三节 振动测量点的选择	267	4.1 频率分析仪	281
3.1 振动测量的目的	267	4.2 频率分析仪的选择	285
3.2 振动测量参数选择	267	第十二章 烟度测量与排气	
3.3 振动测量点的选择	267	成分分析	286
第四节 测振系统的校准	268	第一节 烟度测量	286
4.1 测振系统的校准方法	268	1.1 烟度计	286
4.2 电磁振动台	270	1.2 柴油机烟度测量	293
第十一章 噪声测量	271	第二节 排气成分分析	296
第一节 声学基础知识	271	2.1 无燃烧装置化学烟气分析仪(奥氏型)	296
1.1 声压与声压级	271	2.2 气相色谱仪	298
1.2 声强与声强级	271	2.3 氢火焰离子化检测器	301
1.3 声功率与声功率级	272	2.4 红外线分析仪	302
1.4 噪声与等响度曲线	272	2.5 化学发光法	302
第二节 精密声级计	273	2.6 热磁法分析氧	304
2.1 传声器	274	2.7 排气分析气样的采集	305
2.2 测量放大器	274		

第一章 测量与误差分析

柴油机测试技术的任务是研究对柴油机诸参数进行测量的方法和仪表。任何测量都是由测量者使用一定的仪器，在一定的环境条件下，按着一定的测量方法和程序进行的。尽管被测量在一定的条件下，具有客观存在的确定的真值，但是，由于受到测量者、仪器、测量方法、计量单位和环境条件等因素的影响，所获得的测量结果事实上并不等于真值，而只能是接近于真值的近似值，称为测量值。误差理论把测量值与真值之差称为误差。任何测量都存在着误差，这是绝对的，不可避免的。因此任何测量所得到的测量结果都必须指出误差范围，否则该测量结果便无任何意义。误差分析就是研究在测量中所产生的误差的性质、大小、产生原因，并对测量结果作出评价。

第一节 测 量

1.1 被 测 量

在柴油机实验中所测试的参数大体上可归纳为：转速、扭矩（功率）、流量（耗量）、压力、温度、应变、位移（升程）、振动、噪声、烟度及排烟气体成分分析等。把这些被测参数称为被测量或被测信号，而把测量结果（测量值）称为数据。

信号与数据按其性质不同可分为确定性的与非确定性的两大类型。

1.1.1 确定性信号 确定性信号可以用明确的数学关系式相当精确地描述。可以根据它的时间历程的记录是否有规律的重复出现而分为周期信号与非周期信号两类。其中周期信号又可分为正弦周期信号与复杂周期信号；非周期信号又可以分为准周期信号与瞬态信号。

(1) 周期信号 周期信号是一定时间间隔重复出现的信号，可用周期信号的时变函数来表示。即

$$x(t) = x(t + nT) \quad (1.1-1)$$

式中 T —— 重复周期；

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

正弦信号是最简单的一种周期信号，其表达式为：

$$x(t) = X_m \sin(\omega t + \theta) \quad (1.1-2)$$

式中 X_m —— 振幅；

θ —— 初相角；

ω —— 圆频率

$$\omega = 2\pi f,$$

f —— 频率

$$f = \frac{1}{T},$$

T —— 周期。

正弦周期信号是由单一频率 f 组成的, 其频谱图为单一谱线, 属于离散型谱类。

在频谱分析中用复数形式表示信号更为方便。正弦信号的复数表达式为:

$$x(t) = ce^{-j\omega t} + c^*e^{j\omega t} \quad (1.1-3)$$

式中

$$c = j \frac{X_m}{2} e^{-j\theta}$$

$$c^* = -j \frac{X_m}{2} e^{j\theta}$$

c 与 c^* 互为共轭复数。

复杂周期信号是由不同频率的正弦信号叠加而成, 其频率比为有理数。在数学表达式上, 可将复杂周期信号展开为傅里叶级数:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (1.1-4)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{2\pi}{T} \\ a_0 &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos(n\omega t) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \sin(n\omega t) dt \end{aligned} \right\} \quad (1.1-5)$$

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

式 (1.1-4) 又可改写为:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(n \cdot \frac{2\pi}{T} t + \theta_n\right) \quad (1.1-6)$$

式中

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\operatorname{tg} \theta_n = -\frac{b_n}{a_n}$$

式 (1.1-4) 和 (1.1-5) 表示复杂周期函数 $x(t)$ 展开为傅里叶级数是无穷级数。即 $n \rightarrow \infty$, 这就表明在复杂周期信号中可能包含有无穷多频率成分。由于 n 为整数, 所以相邻频率间隔为 $\frac{2\pi}{T}$ 。亦即有:

$$\omega_1 = \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\omega_2 = \frac{4\pi}{T}$$

$\vdots$

$$\omega_n = \frac{2n\pi}{T}$$

当以圆频率 ω 为横坐标分别绘出 $A-\omega$ 和 $\theta-\omega$ 图,便称为幅频图和相频图。

把 $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ 称为基频,把 n 次倍频成分 $A_n \cdot \cos(n\omega t + \theta_n)$ 称为 n 次谐波。把获取幅频图和相频图称为作谐波分析。在对周期信号进行谐波分析中, A_n 具有与 $x(t)$ 相同的量纲,因此 $A_n-\omega_n$ ($n=1,2,3,\dots$)图为幅值谱。

复杂周期信号 $x(t)$ 用复数形式的傅里叶级数表示为:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\omega t} + \frac{a_n + jb_n}{2} e^{-jn\omega t} \right) \quad (1.1-7)$$

令 $c_0 = a_0$, c_0 称为静态分量(直流分量)

$$c_n = \frac{a_n - jb_n}{2}$$

$$c_{-n} = c_n^* = \frac{a_n + jb_n}{2}$$

则可写成:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega t} \quad (1.1-8)$$

用复数形式展开 $x(t)$,就可以把频率范围从 $0 \sim \infty$ 扩展到 $-\infty \sim +\infty$,但其谱线仍然是离散的,其中系数 c_n 与 c_n^* 互为共轭复数。

(2) 非周期信号 凡是能用明确的数学关系描述的,而又不属于周期信号均称为非周期信号。非周期信号包括准周期信号和瞬态信号。

准周期信号是由彼此的频率比不全为有理数的两个以上的正弦信号叠加而成的。可以表示为:

$$x(t) = x_1 \sin(t + \theta_1) + x_2 \sin(t + \theta_2) + x_3 \sin(\sqrt{50}t + \theta_3) + \dots \quad (1.1-9)$$

上述这种没有公共整数周期的各个分量所合成的信号虽然是非周期信号,但由于它仍然保持离散谱的特点,所以称为准周期信号。

除了准周期信号以外的非周期性的确定性信号均称为瞬态信号。

瞬态信号可通过傅里叶变换,获得其频域的描述:

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1.1-10)$$

把计算的 $X(\omega)$ 称为瞬态信号 $x(t)$ 的傅里叶变换, $X(\omega)$ 为实变量 ω 的复函数。其反变换为:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (1.1-11)$$

式(1.1-10)和(1.1-11)为一个瞬态信号的频域表达式和时域表达式的互相变换,简称为傅里叶变换。从式(1.1-10)可见,瞬态信号的频谱是连续型的,而且频率范围是无限的。在这一点上与具有离散谱的周期信号及准周期信号有明显的区别。

描述瞬态信号的频域函数 $X(\omega)$ 是一个复函数,它既包含有幅值信号又包含有相位信息。

$$X(\omega) = |X(\omega)|e^{-j\varphi(\omega)} = A(\omega) - jB(\omega) \quad (1.1-12)$$

式中

$$A(\omega) = |X(\omega)|\cos\varphi(\omega)$$

$$B(\omega) = |X(\omega)|\sin\varphi(\omega)$$

其中 $|X(\omega)|$ 表示其幅频特性； $\varphi(\omega)$ 表示其相频特性，分别用公式表示如下：

$$|X(\omega)| = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)} \quad (1.1-13)$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{tg}^{-1} \frac{B(\omega)}{A(\omega)} \quad (1.1-14)$$

应该指出 $X(\omega)$ 的量纲与 $x(t)/\omega$ 的量纲相同，称为频谱密度函数。

1.1.2 非确定性信号 非确定性信号具有随机特点，每次测量结果都不相同，更不能预测，因此又称为随机信号。它反映的物理现象是随时间而变化的随机过程。随机过程 $\{x(t)\}$ 是依赖于参数 t 的随机变量 $x(t)$ 的集合。其中参数 t 为时间，若规定时间 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ ，则随机变量分别对应为 $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n)$ 。在研究随机过程中随机变量是一个函数，而不是通常定义的变量。对随机过程 $\{x(t)\}$ 进行一次测量可得到一个确定的 $x(t)$ ，称为相应随机过程的一个样本函数个体。在时间参数是离散的情况下，相应样本函数是一个序列，通常称为时间序列。样本函数的集合称为总体（母体）。

根据随机变量的统计特性是否随时间而变化，可把随机过程分为平稳过程和非平稳过程，其中平稳过程又可进一步分为遍历过程和非遍历过程两类。

所谓平稳过程就是其统计特性不随时间而变化的一类随机过程。即随机样本函数总体满足下列关系式：

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n(t_2) = \dots = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n(t_m) \quad (1.1-15)$$

$$\begin{aligned} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n(t_1)x_n(t_1+\tau) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n(t_2)x_n(t_2+\tau) = \dots \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n(t_m)x_n(t_m+\tau) \end{aligned} \quad (1.1-16)$$

对于平稳过程的一个样本函数，其统计特性满足下列关系式：

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n(t) \quad (1.1-17)$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n(t)x_n(t+\tau) \quad (1.1-18)$$

则表示此随机过程具有遍历性。由于遍历随机过程的统计特性可以用单个样本函数的时间平均来描述，因此遍历随机过程在实际应用中是非常重要的随机过程。工程实际中的大部分随机过程都可以近似地认为是遍历随机过程。对随机信号的数据处理就是建立在过程具有遍历性的基础上。只要时间足够长，用一个样本函数就能描述出随机过程

的总体统计特性。

随机过程的各个样本记录都不一样，因此不能象确定性信号那样用明确的数学关系式来表达，但这些样本记录却都具有共同的统计特性，因此随机信号可以用概率统计特性来描述。常用的有以下几个主要的统计函数：

- (1) 均方值、均值和方差，用以分别描述信号的强度、静态分量和动态分量。
- (2) 概率密度函数，用以描述信号落在指定范围的概率。
- (3) 自相关函数，用以描述一个时刻的信号取值与另一个时刻的信号取值的依赖关系。
- (4) 功率谱密度，用以描述信号的频率结构。
- (5) 联合统计特性，用以描述两个以上的随机过程的相互依赖关系。

柴油机的被测参数有的可以看作是复杂周期信号；有的可以看作是准周期信号；有的则可以看作是随机信号。需要根据具体情况进行具体分析才能确定。例如对于稳定工况下气缸内气体压力(示功图)则可以看作是以柴油机一个工作循环为周期的复杂周期信号；对于多台柴油机组成的机组，每台柴油机发出的不相关的周期振动信号混合起来对基础的作用便是不同步的振动响应信号，因此可看作是准周期信号；而在过渡工况下的冲击振动、噪声、转速等均可看作是瞬态信号。总之，只有对被测参数进行具体分析，才能确定被测参数的性质，才能正确地选择测试仪表。

1.2 测试系统

测试的最终目的是实现对被测量的指示或记录。为此，首先必须利用某种方式感知被测量(检出)，然后经过必要的途径将已检出的被测信号传递到指示或记录部分。因此检出——传递——指示或记录便构成了测试系统。图 1.1-1 所示为热电偶测温系统。

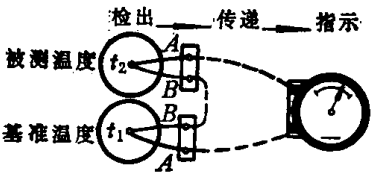


图1.1-1 热电偶测温系统

检出部分为热电偶；传递部分为补偿导线；记录或指示部分为毫伏计。

上述检出、传递、指示或记录部分仅是测试系统的最基本的组成部分，实际上的测试系统往往是相当复杂的。

1.3 测试仪表的特性

测试仪表的特性既是评价测试仪表的标准，也是选择测试仪表的依据。

1.3.1 静态特性 测试仪表的静态特性是指当输入信号不随时间变化（常量）时，其输出信号与输入信号之间的关系。

- (1) 灵敏度：输出信号的变化量与相应的输入信号变化量的比值。
- (2) 分辨率：所能检测的被测参数的最小量或最小变化量。
- (3) 线性度：输出信号的变化量与相应的输入信号变化量的比值为常数。通常用测试仪表在使用范围内的最大偏差 α 与输出信号的最大范围 A 的百分比来表示，如图 1.1-2所示。

$$\text{线性度} = \frac{a}{A} \times 100\%$$

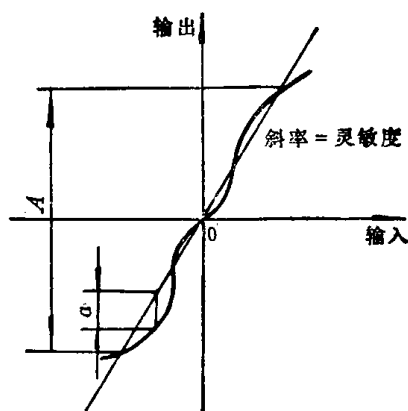


图1.1-2 线性度

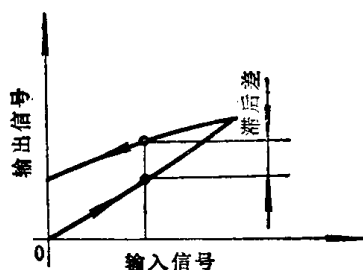


图1.1-3 滞后差

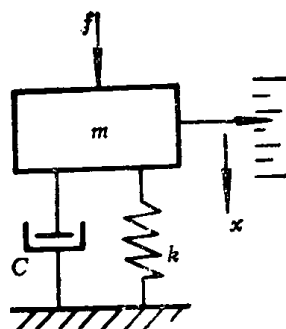


图1.1-4 质量-弹簧系统

(4) 滞后差: 当输入信号先是缓慢增加, 然后再缓慢减小时, 相对于同一输入信号的输出信号之差的极大值。如图1.1-3所示。滞后差是由于仪表内部的摩擦力、间隙及机械材料、电气元件等的滞后特性造成的。

1.3.2 动态特性 测试仪表的动态特性是指当输入信号随时间变化时, 输出与输入信号之间的关系。当测试系统的输入信号 x_i 为随时间变化的信号时, 其相应的输出信号 x_o 亦为随时间变化的信号。但是, 在一般情况下, x_i 与 x_o 之间并不完全一致, 两者之间的差异称为动误差。研究测试系统动态特性的目的则在于减小动误差。

(1) 传递函数 把输出信号与输入信号的比值定义为传递函数, 作为分析测试仪表输入、输出关系的数学模型。常用的测试仪表多属于一阶测量系统或二阶测量系统。

一阶测量系统的传递函数为一阶微分方程, 而二阶测量系统的传递函数为二阶微分方程。

(a) 一阶测量系统的传递函数 图1.1-4所示为质量-弹簧系统。当将该系统的质量 m 忽略不计 (即设 $m = 0$) 时, 该系统便可化简为质量为零的机械系统。在外力 f 与弹簧反力及阻尼器产生的阻力相平衡时, 下式成立:

$$C \frac{dx}{dt} + kx = f$$

式中 C —— 阻尼器的阻尼系数;

k —— 弹簧刚性系数。

定义时间常数为:

$$\tau = \frac{C}{k}$$

若采用微分算子 $D = d/dt$, 则上式可改写成:

$$\frac{xk}{f} = \frac{1}{\tau D + 1} \quad (1.1-19)$$

式 (1.1-19) 即为输入信号为外力 f 而输出信号为位移 x 时, 质量为零的简化机械系统的传递函数。

一阶测量系统传递函数的一般形式可写成:

$$\frac{x_o}{x_i} = \frac{1}{\tau D + 1} \quad (1.1-20)$$

式中 x_o ——输出信号;
 x_i ——输入信号;
 τ ——时间常数。

(b) 二阶测量系统的传递函数 测试仪表中的质量-弹簧系统的质量在一般情况下是不能忽略不计的, 因此当外力 f 与质量 m 所产生的惯性力, 阻尼器产生的阻力及弹簧的恢复力相平衡时, 下式成立:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + kx = f$$

若采用微分算子 $D = d/dt$, 则上式可写成:

$$\frac{x}{f} = \frac{1}{mD^2 + CD + k} = \frac{K\omega_n^2}{D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2}$$

定义: 阻尼率为 $\zeta = \frac{B}{2\sqrt{mk}}$

系统的固有频率为 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$

灵敏度为 $K = \frac{1}{k}$

二阶测量系统的传递函数的一般形式可写成:

$$\frac{x_o}{x_i} = \frac{K\omega_n^2}{D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2} \quad (1.1-21)$$

(2) 阶跃响应 当测量系统的输入信号为阶跃信号时, 其对应的输出称为阶跃响应。当已知阶跃响应之后, 可通过计算求得与任意随时间变化的输入信号相对应的输出信号。因此在时间域中阶跃响应可完全表达该系统的动态特性。阶跃信号的函数表达式为:

$$Au(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ A & (t > 0) \end{cases}$$

式中 A ——阶跃高度。

(a) 一阶测量系统的阶跃响应 当一阶测量系统的输入信号为阶跃信号 $Au(t)$ 时, 将其代入式 (1.1-20) 可得线性一阶非齐次微分方程:

$$(\tau D + 1)x_o = Au(t) \quad (1.1-22)$$

解这一线性一阶非齐次微分方程。

首先求式 (1.1-22) 的齐次方程的通解 x_{oe} , 其特征方程为:

$$\tau D + 1 = 0$$

则 D 的根为

$$r = -\frac{1}{\tau}$$

所以通解 x_{oe} 为:

$$x_{oe} = ke^{rt} = ke^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.1-23)$$

其次求非齐次方程 (1.1-22) 的特解 x_{0p} , 采用特定系数法, 根据函数 $Au(t)$ 为零次多项式, 则设特解 x_{0p} 为:

$$x_{0p} = C \quad (t > 0)$$

将特解 x_{0p} 代入式 (1.1-22), 则定出系数 $C = A$ 。

因此, 式 (1.1-22) 的通解 x_0 为:

$$x_0 = x_{0c} + x_{0p} = ke^{-\frac{t}{\tau}} + A \quad (1.1-24)$$

将初始条件 $x_0(0) = 0$ 代入式 (1.1-24) 得, 当 $t = 0$ 时, 系数 $k = -A$ 。

最后得到微分方程式 (1.1-22) 在阶跃输入下的解为:

$$x_0 = A \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (1.1-25)$$

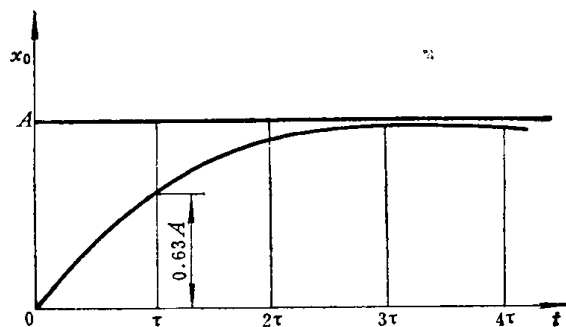


图1.1-5 一阶测量系统的阶跃响应

式 (1.1-25) 即是一阶测量系统的阶跃函数。其曲线如图1.1-5所示。

一阶测量系统阶跃响应有如下性质:

(i) 阶跃响应函数是指数曲线 (如图1.1-5(a) 所示), 初始值为零, 随着时间 t 的增大, 而不断增大, 最终趋于输入值 A 。由此可以明显看出输出与输入之间的差异: 输入是一阶跃曲线, 而输出是指数曲线。可见输出不能立刻达到输入值, 而是要经过一段时间才能达到输入值, 这种差异称为过渡响应动误差。

(ii) 指数曲线的变化率取决于常数 τ 。如图1.1-5(b) 所示, 当 τ 值越大, 曲线趋于 A 的时间越长, 输出与输入间的差异越大; τ 值越小, 曲线趋于 A 的时间越短, 输出与输入间的差异也就越小。由于 τ 有决定响应速度的重要作用, 因此定义 τ 为时间常数。当 $t = \tau$ 时, 由图1.1-5(a) 可知: $x_0 = 0.63A$, 即在 $t = \tau$ 时刻, 输出值达到输入的63%。而当 $t = 4\tau$ 时, 输出可达到输入的98%, 因此常取时间 4τ 来表示响应的快慢。由此可见, 决定一阶测量系统输出、输入间差异大小的因素是时间常数 τ 。

由于一阶测量系统的时间常数 τ 越小, 响应越快, 输出与输入间的差异越小, 因此减小过渡响应动误差的措施应是尽可能采用时间常数小的测量系统。

(b) 二阶测量系统的阶跃响应 当将输入阶跃信号 $x_i = Au(t)$ 代入式(1.1-21) 可得:

$$(D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2) = K\omega_n^2 Au(t) \quad (1.1-26)$$

解线性二阶非齐次微分方程。

式 (1.1-26) 的特征方程为:

$$D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2 = 0$$

则 D 的根 r_1, r_2 为:

$$r_1 = (-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$$

$$r_2 = (-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$$

随着 ζ 有三种不同情况, 根 r_1 和 r_2 将不同, 则微分方程(1.1-26)有三种解。

(i) 当 $\zeta > 1$ 时, 根 r_1 和 r_2 为实根。式(1.1-26)的齐次方程的通解 x_{0c} 为:

$$x_{0c} = k_1 e^{r_1 t} + k_2 e^{r_2 t}$$

求式(1.1-26)非齐次微分方程的特解 x_{0p} , 采用待定系数法, 根据函数 $Au(t)$ 是零次多项式, 则设特解 x_{0p} 为常数:

$$x_{0p} = c$$

代入式(1.1-26)中, 则定出系数 $c = KA$ 。

因此, 式(1.1-26)的通解 x_0 为:

$$x_0 = x_{0c} + x_{0p} = KA + k_1 e^{r_1 t} + k_2 e^{r_2 t} \quad (1.1-27)$$

考虑初始条件, 即 $t = 0$ 时, $x_0 = 0$, $x'_0 = 0$, 从而可得 k_1 和 k_2 ,

$$\begin{aligned} k_1 &= -KA \left(\frac{r_2}{r_2 - r_1} \right) \\ k_2 &= KA \left(\frac{r_1}{r_2 - r_1} \right) \end{aligned}$$

代入式(1.1-27)得:

$$x_0 = KA \left\{ 1 - \frac{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} + \frac{3 - \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} \right\} \quad (1.1-28)$$

式(1.1-28)便是当 $\zeta > 1$ 时, 二阶测量系统的阶跃响应函数。

(ii) 当 $\zeta = 1$ 时, 根 r_1 和 r_2 为等根。即特征方程的根 r_1 和 r_2 相等:

$$r_1 = r_2 = r = -\omega_n$$

式(1.1-26)齐次方程的通解 x_{0c} 为:

$$x_{0c} = e^{rt}(k_1 + k_2 t)$$

求得式(1.1-26)非齐次微分方程的特解 x_{0p} , 用待定系数法, 根据函数 $Au(t)$ 是零次多项式, 则设特解 x_{0p} 为常数:

$$x_{0p} = C$$

代入式(1.1-26), 则定出系数 $C = KA$ 。

因此式(1.1-26)的通解 x_0 为:

$$x_0 = x_{0c} + x_{0p} = KA + e^{rt}(k_1 + k_2 t) \quad (1.1-29)$$

考虑初始条件, 即 $t = 0$ 时, $x_0 = 0$, $x'_0 = 0$, 从而求得 k_1 和 k_2 :

$$\begin{aligned} k_1 &= -KA \\ k_2 &= -KA r \end{aligned}$$

代入式(1.1-29)得:

$$x_0 = KA[1 - (1 + \omega_n t)e^{-\omega_n t}] \quad (1.1-30)$$

式(1.1-30)便是当 $\zeta = 1$ 时, 二阶测量系统的阶跃响应函数。

(iii) 当 $\zeta < 1$ 时, 根 r_1 和 r_2 为共扼复根。特征方程的根 r_1 和 r_2 为:

$$\begin{aligned} r_1 &= -\zeta\omega_n + j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \\ r_2 &= -\zeta\omega_n - j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \end{aligned}$$

式(1.1-26)的齐次方程的通解 x_{0c} 为:

$$x_{0c} = Be^{\alpha t} \sin(\beta t + \phi)$$

其中 α 是根的实部, β 是根的虚部, B 和 ϕ 为任意常数。

求式 (1.1-26) 非齐次微分方程的特解 x_{0p} , 仍用待定系数法, 根据函数 $Au(t)$ 是零次多项式, 则设特解 x_{0p} 为常数:

$$x_{0p} = C$$

代入式 (1.1-26), 则可定出系数 $C = KA$ 。

因此, 式 (1.1-26) 的通解 x_0 为:

$$x_0 = x_{0c} + x_{0p} = KA + Be^{\alpha t} \sin(\beta t + \phi) \quad (1.1-31)$$

考虑初始条件, $t = 0$ 时, $x_0 = 0$, $x'_0 = 0$,

从而求得 B 和 ϕ :

$$B = -\frac{KA}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

$$\phi = \sin^{-1} \sqrt{1-\zeta^2}$$

代入式 (1.1-31) 得:

$$x_0 = KA \left[1 - \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t + \sin^{-1} \sqrt{1-\zeta^2}) \right] \quad (1.1-32)$$

式 (1.1-32) 便是当 $\zeta < 1$ 时, 二阶测量系统的阶跃响应函数。

二阶测量系统的阶跃响应函数曲线如图 1.1-6 所示。图中纵坐标取 x_0/KA , 横坐标取 $\omega_n t$, 使之无量纲化。

二阶测量系统的阶跃响应有如下性质:

(i) 阶跃响应函数曲线的形状有三种。当 $\zeta > 1$ (过阻尼) 时, x_0/KA 慢慢地增大, 逐渐趋近于 1, 然而不会超过 1; 当 $\zeta < 1$ (欠阻尼) 时, x_0/KA 必然超过 1, 然后作振幅逐渐减小的振动; 当 $\zeta = 1$ (临界阻尼) 时, 介于前两者之间, 不产生振动。由此可明显的看出输入和输出

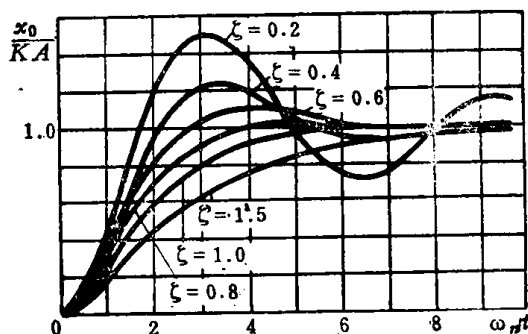


图 1.1-6 二阶测量系统阶跃响应

之间的差异: 输入为一阶跃曲线, 而输出则是上述三种曲线之一, 即输出不能立刻达到输入值, 而是要经过一段时间之后, 才能达到输入对应值。这种差异称为过渡响应误差。

此外, 一阶和二阶测量系统阶跃响应之间也有很大不同。最明显的是一阶测量系统的阶跃响应不会出现振动, 而二阶测量系统当 $\zeta < 1$ (欠阻尼) 时, 将产生振动。

(ii) 曲线的形状只取决于 ζ 。 ζ 是表示阻尼程度的, 定义为阻尼率。测量系统的响应速度取决于 ζ 。 ζ 值过大, 趋于最终值的时间过长; ζ 值过小, 由于会产生振动的缘故, 趋于最终值的时间仍然很长; 为了提高响应速度, 通常将测试系统的阻尼率设计在 $\zeta = 0.6 \sim 0.8$ 之间。

(iii) 测量系统阶跃响应速度将随 ω_n 的变化而不同。 ω_n 是当阻尼率 $\zeta = 0$ 时的圆

频率, 并称为固有圆频率。为便于分析, 设将图1.1-6中横坐标 $\omega_n t$ 改为 t , 则原图中横坐标均须除以 ω_n , 若取 $\omega_n = 1$ 弧度/秒时, 则横坐标原刻度不变; 若取 $\omega_n = 0.5$ 弧度/秒时, 则原横坐标 $\omega_n t = 1$ 处, 便相当于 $t = 2$ 秒, 也就是 x_0/KA 达到同一对应高度时, $\omega_n = 1$ 时, 仅需要 1 秒的时间, 而对于 $\omega_n = 0.5$ 时, 则需要 2 秒的时间, 由此可见, 在 ζ 一定时, ω_n 越大则响应速度越高, 反之, ω_n 越小则响应速度越低。

由于二阶测量系统的响应速度取决于系统的阻尼率 ζ 和固有频率 ω_n , 为提高响应速度, 减少过渡响应误差, 应取测量系统的阻尼率 $\zeta = 0.6 \sim 0.8$, 同时还应使测量系统的固有频率 ω_n 尽可能提高。

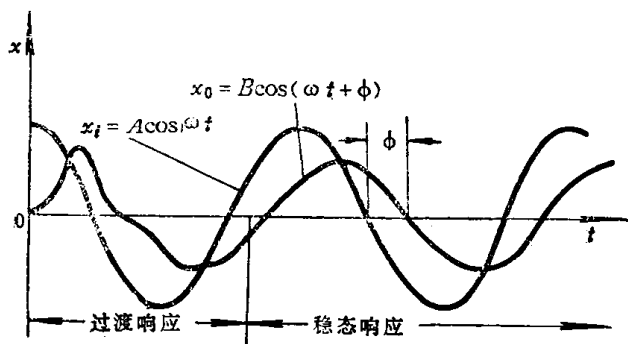


图1.1-7 测量系统对余弦信号的响应

(3) 频率响应 设向测量系统

施加的输入信号为余弦信号 $x_i = A \cos \omega t$ 时, 其输出信号 x_0 如图1.1-7所示。

在开始阶段为过渡响应阶段, 此时输出信号并不是余弦信号, 但过渡响应部分将随着时间的增长而衰减, 以至消失, 在某一时刻便进入稳态响应阶段, 此时的输出信号便为余弦信号。设该稳态响应的余弦信号为: $x_0 = B \cos(\omega t + \phi)$ 。

频率响应是研究在稳态阶段的输出和输入之间的关系。在稳态阶段比较输出和输入之间的差异可见: 输入信号振幅为 A , 而输出信号的振幅则为 B ; 输出信号与输入信号之间相位差为 ϕ 。当输入信号振幅 A 一定时, 输出信号振幅 B 和相位差 ϕ 都随频率 ω 而变化。将振幅比 B/A 和相位差 ϕ 随频率 ω 的变化规律称为频率响应。在频率域中, 频率响应可以完全表达该系统的动态特性。特别是当测量系统的输入信号中包含有若干次谐波分量的余弦(正弦)信号时, 系统的动态特性受频率响应的影响是不能忽视的。

在分析频率响应时, 为简便起见, 常采用复数形式来表示输出和输入信号。即将输入余弦信号 $A \cos \omega t$ 用复数表示为: $Ae^{j\omega t}$; 而将输出余弦信号 $B \cos(\omega t + \phi)$, 用复数表示为: $Be^{j(\omega t + \phi)}$ 。

(a) 一阶测量系统的频率响应 把输入余弦信号 $x_i = Ae^{j\omega t}$ 代入式(1.1-20)可得:

$$(\tau D + 1)x_0 = Ae^{j\omega t} \quad (1.1-33)$$

解这一线性一阶非齐次微分方程。

首先求式(1.1-33)的齐次方程的通解 x_{0c} , 其特征方程为:

$$\tau D + 1 = 0$$

则 D 的根 r 为:

$$r = -\frac{1}{\tau}$$

因此, 通解 x_{0c} 为:

$$x_{0c} = ke^{rt} = ke^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.1-34)$$

由式(1.1-34)可知, 响应的这一部分是按负指数规律变化, 当 t 增大时, x_{0c} 趋于零, 因此 x_{0c} 是过渡响应部分。而过渡响应部分的长短取决于时间常数 τ , τ 越小, 过渡部分越短, 输出更趋近于输入, 这正是所希望的。