



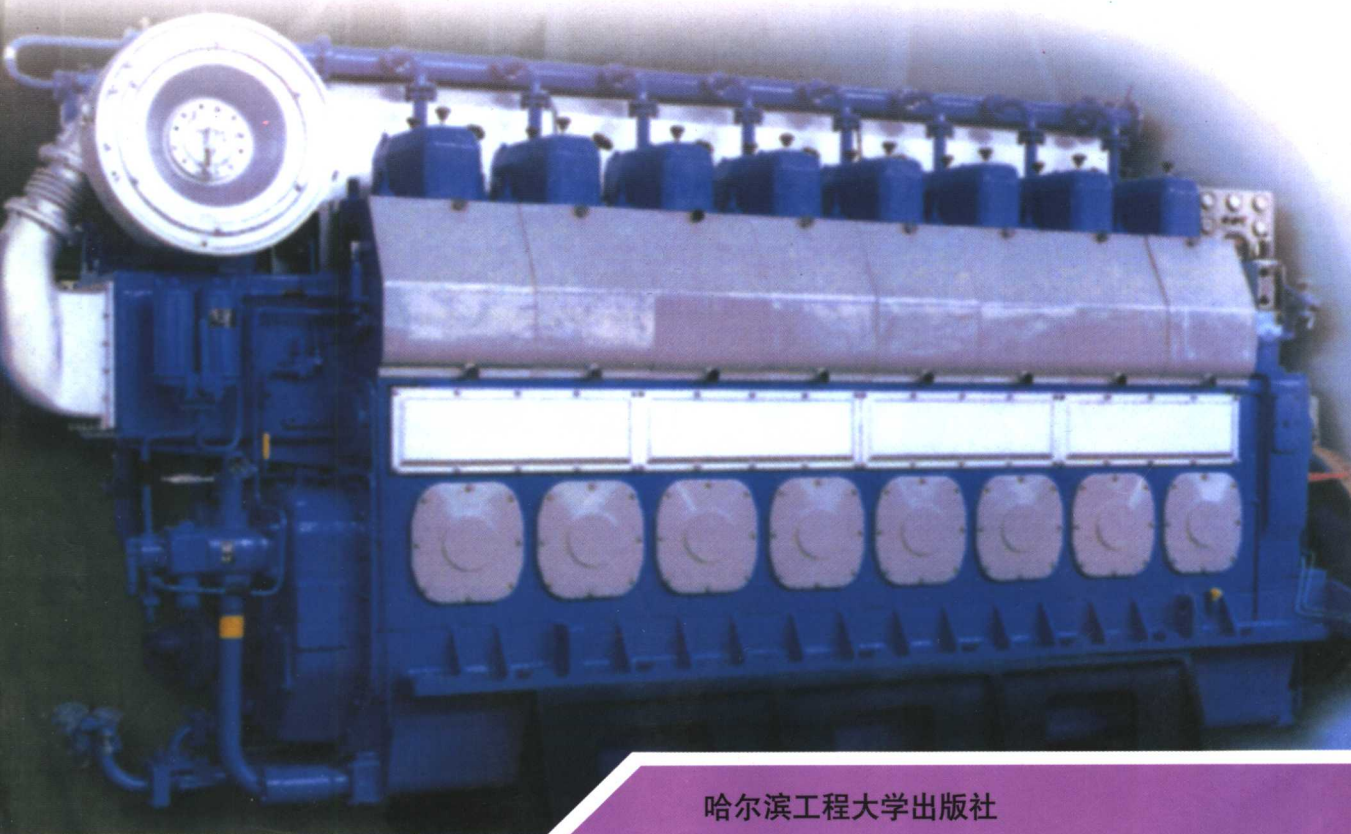
21世纪高职船舶系列教材
SHIJI GAOZHI CHUANBO XILIE JIAOCAI

船舶动力专业 ➡

内燃机及动力装置 测试技术

**NEIRANJI JI DONGLI
ZHUANGZHI CESHI JISHU**

主编 罗红英
主审 张敬国



哈尔滨工程大学出版社



21世纪高职船舶系列教材
SHIJI GAOZHI CHUANBO XILIE JIAOCAI

船舶动力专业 >>>

内燃机及动力装置 测试技术

**NEIRANJI JI DONGLI
ZHUANGZHI CESHI JISHU**

主 编 罗红英

副主编 徐立华 刘江波

主 审 张敬国

江苏工业学院图书馆
藏书章

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书内容包括测试系统的基本组成、测试仪表特性、记录设备、传感器原理等测试技术的基本知识,内燃机与动力装置中经常遇到的功率与转速、压力、示功图、温度、流量、振动与噪声、排气成分、烟度等参量的基本概念、测量方法、测试仪表原理及应用,还介绍了测量误差分析与数据处理在测试技术中的应用。

本书可作为高职高专院校轮机工程专业内燃机及动力装置测试技术课程教材,亦可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机及动力装置测试技术/罗红英主编. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社, 2006
ISBN 7-81073-877-1

I. 内… II. 罗… III. 内燃机-测试技术②动
力装置-测试技术 IV. TK

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 087005 号

出版发行	哈尔滨工程大学出版社
社 址	哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码	150001
发行电话	0451-82519328
传 真	0451-82519699
经 销	新华书店
印 刷	黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂
开 本	787mm×1 092mm 1/16
印 张	12.25
字 数	260 千字
版 次	2006 年 9 月第 1 版
印 次	2006 年 9 月第 1 次印刷
印 数	1—2 000 册
定 价	20.00 元

高等职业教育系列教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任	孙元政			
副主任	刘 义	刘 勇	罗东明	季永清
	施祝斌	康 捷		
委 员	丛培亭	刘 义	刘 勇	孙元政
	陈良政	肖锦清	罗东明	季永清
	俞舟平	胡适军	施祝斌	徐立华
	康 捷	蔡厚平		

前言

内燃机及动力装置测试技术

NEIRANJI JIDONGJIZHIGANGZHUICHESHISHU

随着科学技术的发展,测试技术已成为内燃机及动力装置的科研、设计、生产和使用中不可缺少的手段,其有关参数的测试方法、测试系统、测试仪表及测量结果的误差分析和数据处理知识,已形成了一个专门的学科,地位和作用日渐重要。

本书是轮机工程专业的一门专业基础课。为了与现代内燃机及动力装置测试技术相适应,满足课程教学改革的需要,本教材主要体现以下三个特色:①最新的内燃机及动力装置测试技术知识;②与高职高专培养目标相适应;③侧重实际应用。

本书共分十二章,前四章主要阐述测试系统的基本组成、测试仪表的特性、记录设备、传感器原理等基本知识;第五章至第十一章是测试基础知识在内燃机及动力装置中的具体应用,包括内燃机与动力装置中经常遇到的功率与转速、压力、示功图、温度、流量、振动与噪声、排气成分、烟度等参量的基本概念、测量方法、测试仪表原理及应用;第十二章介绍测量误差分析与数据处理在测试技术中的应用。

本书由罗红英副教授主编,徐立华副教授、刘江波高级工程师为副主编。徐立华编写第一、二、四章,罗红英编写第三、五、六章,刘江波编写第七、八、九章,张骞编写第十章,郑学贵编写第十一、十二章。

武汉理工大学张敬国教授担任本书的主审,并提出了宝贵的意见与建议,编者深表谢意。

由于编者水平有限,衷心地期望使用本教材的教师、工程技术人员及学生对不当之处批评指正,提出宝贵意见,为提高该教材的质量而共同努力,为此我们将不胜感激!

编 者

2006年5月

目 录

21世纪高职船舶系列教材
SHIJI GAOZHI CHUANBO XILIE JIAOCAI

内燃机及动力装置测试技术

第一章 概论	1
第一节 测试技术的作用和意义	1
第二节 测试系统的组成	2
第三节 评定测量仪表质量的主要指标	2
第四节 测量仪器的基本特性	4
第五节 微型计算机与测试技术	9
第二章 传感器原理	14
第一节 电阻应变式传感器	14
第二节 电感式传感器	19
第三节 电容式传感器	21
第四节 磁电式传感器	24
第五节 压电式传感器	25
第六节 光电式传感器	28
第七节 霍尔传感器	32
第三章 记录设备	34
第一节 描笔式记录仪	34
第二节 数字式记录设备	36
第三节 磁带记录仪	39
第四节 光盘式记录	43
第四章 有效功率测量	46
第一节 吸收式测功器	46
第二节 扭矩仪	52
第三节 各类测功器的比较	56
第四节 转速测量	57
第五章 压力测量	61
第一节 缓变压力测量	61
第二节 最高压力测量	67
第三节 平均压力测量	69
第六章 示功图测录	71
第一节 机械示功器	71
第二节 电子示功装置	74
第三节 动态参数采集和处理系统	80
第四节 上死点的测定	82
第五节 示功装置的压力标定	85
第六节 示功图测录中的误差分析	87

目 录

21世纪
高职船舶系列教材
SHIJI GAOZHICHUANBOXILIE JIAOCAI

内燃机及动力装置测试技术

第七章 温度测量	91
第一节 玻璃管液体温度计	91
第二节 压力式温度计	92
第三节 热电偶温度计	93
第四节 热电阻温度计	108
第五节 温度计的校验	111
第六节 测温元件的安装与温度测量误差	113
第八章 燃油消耗量的测量	116
第一节 容积法测量燃油消耗量	116
第二节 称量法测量燃油消耗量	118
第三节 流量计测量燃油消耗量	120
第九章 振动的测量	123
第一节 内燃机振动及其分类	123
第二节 振动测试系统	125
第三节 振动测量的目的及方法	128
第四节 曲轴扭振测量	130
第五节 测振系统的校准	132
第六节 振动分析和数据处理简述	134
第十章 噪声测量	137
第一节 有关噪声的声学知识	137
第二节 噪声测量仪器	143
第三节 内燃机噪声的来源及测试方法	150
第十一章 废气分析	156
第一节 红外线吸收分析仪	156
第二节 奥氏气体分析仪	160
第三节 火焰电离测定仪	163
第四节 化学发光法 NO _x 分析仪	163
第五节 烟度的测量	165
第十二章 测量误差及实验数据处理	171
第一节 概述	171
第二节 测量误差	173
第三节 直接测量的随机误差	176
第四节 间接测量的随机误差	178
第五节 测量数据检验及坏值的剔除	180
第六节 系统误差的判别和消除	181
第七节 测量数据的处理和表达	184



第一章 概 论

第一节 测试技术的作用和意义

测试就是借助专门的技术手段,通过试验和测量,以得知被测物的量值和性质。这种客观观察与逻辑思维相结合,是研究自然科学的主要方法。古今中外历次科学技术上的重大进步,无不与测试密切相关。在某种意义上说,没有测试就没有科学。特别是现代科学研究与生产,更是离不开测试。

在机械工程领域中,测试的主要作用可以归纳为以下四类。

1. 监视和控制生产过程的正常运行

测试装置是生产流程系统的必要组成部分,其作用是随时观测与运行条件有关的一些参数,保证其量值在规定的范围之内。例如发动机在运行过程中,必须随时监测其转速、冷却水温度、润滑油压力及温度、排气温度等,将监测值与要求值比较,随时进行调节。在自动化生产过程中,将监测值与要求值的比较结果反馈,自动调节有关参数,使生产过程在最佳状态下运行。测量是控制和调节的基础,也就是生产过程正常运行的基础,因此必须有正确的测量方法和合适的测量仪表。

2. 为设计工作提供有效的数据资料

在进行机械设计时,除了最简单的设计问题外,仅凭已有的理论公式计算,往往是不够准确的。而且许多复杂的结构和特殊的条件,还没有公式可依据。所谓经验公式,本来就是从测试数据的处理得来的。

在现代设计工作中,往往是先进行模拟试验研究(预研),精确测定各种必需的物理量,寻找或判断最佳条件作为实际设计的基础。在制成样机并进行一系列运行测试后,才能最终解决机器性能是否正常的问题,进而确定是否发展该机型。这就是所谓的试验法设计。试验程序已成为现代复杂工程设备设计的必要步骤和有效手段,利用现代测试手段所进行的预研,使传统的设计周期大大缩短了。

3. 评价产品的质量

任何质量指标都要通过一定的数量来表示,例如内燃机的功率、油耗率等。人们就是借助测试所获得的各种参数的数值来定量地评价产品的质量。

4. 作为科学研究的必要手段和基础

在自然科学和工程技术领域中所进行的一切研究的目的,无非是探求客观事物与量的关系,它们是离不开测试的。测试技术的不断完善,推动着科学技术的新发现,并将其应用于实践中。

测试技术对从事科学技术的各部门都有重要意义,测试技术发展的状态直接反映了国家试验的能力和科学技术的水平的高低。



第二节 测试系统的组成

在动力工程中,需测量的参数大致为转速、扭矩(功率)、流量、压力、温度、应变、位移、振动、噪声及废气成分等。根据不同被测参数的特性和测量要求,将选择不同的测试仪表组成相应的测试系统。测试系统就其在测量过程中所起的作用,基本可分为感知、传递、指示记录三个部分,如图 1-1 所示。

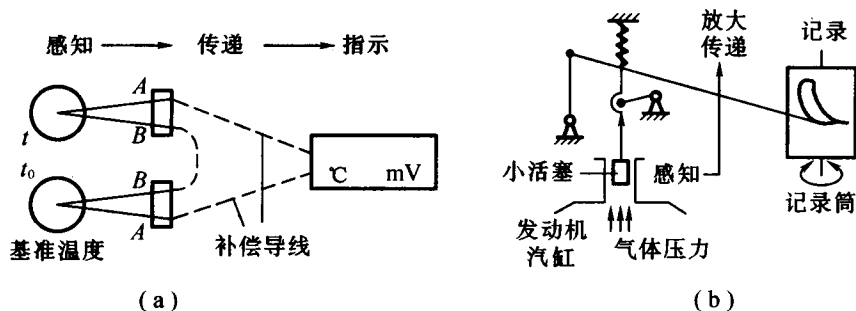


图 1-1 测试系统的组成示意图

(a)用热电偶测定温度的简图;(b)机械示功器的机构图

一、感知部分

感知部分类似于人的感觉器官,它的作用是感受被测量,并将它转化为便于传递的物理量,例如图 1-1 中热电偶将感受的温度转化为热电势;机械示功器中小活塞和弹簧将感受的气体压力转化为位移。通常将感知部分的敏感元件称为变换器,例如热电偶丝(热电极);将感知部分的构件(变换器及其他附件)总体称为传感器,例如热电偶丝及其绝缘子、保护套管、接线柱、外壳体等构成的一个总体。

二、传递部分

传递部分类似于人的神经系统,它的作用是将感知部分的输出信号进行传输及再转换(如放大、调制、解调、阻抗变换、滤波、微分或积分运算等),使之适于指示记录或后续处理,例如补偿导线传输热电势;机械示功器中杠杆机构传递并放大小活塞的位移信号。

三、指示记录部分

指示记录部分类似于人的大脑显示和记忆,它的作用是将信号变为人们感官所能接受的形式(如指针位移、数字显示、示波图等)或将信息记录下来供以后分析之用,例如热电势用毫伏计指针位移指示;示功器用记录笔位移将信息记录在转筒上。

第三节 评定测量仪表质量的主要指标

测量仪表的质量决定所得测量结果的可靠程度,其中主要的有精度、恒定性、灵敏度、灵



敏度阻滞、指标滞后时间。

1. 精度

仪表的指示值接近于被测量的实际值的准确程度,称为精度或准确度。它通常以“允许误差”的大小来表示。允许误差的物理意义是仪表读数允许的最大绝对误差折合为该仪表量程的百分数,即

$$\delta_y = \pm \frac{\Delta_j}{A_a - A_b} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 δ_y ——允许误差;

Δ_j ——允许的最大绝对误差;

A_a, A_b ——仪表刻度的上限和下限值。

例如一温度计的刻度是 $-30 \sim 120^\circ\text{C}$,而允许的最大绝对误差为 $\pm 2^\circ\text{C}$,则其允许误差为

$$\delta_y = \pm \frac{2}{120 - (-30)} \times 100\% = \pm 1.3\%$$

测量仪表采用允许误差来表示仪表准确度的级别,例如允许误差为 $\pm 1.5\%$ 的仪表为“1.5级”。通常工程用仪表为 0.5~4 级,实验室用仪表为 0.2~0.5 级;范型仪表在 0.2 级以上。仪表的准确度级别一般都标在仪表的标尺板上。选用仪表时,应在满足被测量要求的条件下,尽量选择量程较小的仪表,使测量值在满刻度的 $2/3$ 以上为宜,并根据对被测量绝对误差的要求选择测量仪表的精度等级。

2. 恒定度

仪表多次重复测量时,其指示值的稳定程度称为恒定度,通常以读数的变差来表示。当外部条件不变,用同一仪表对某一物理量的同一参数值重复进行测量或是相隔一段时间再测量时,指示值之间的最大差数与仪表量程之比的百分数为读数的变差。读数的变差特例是,当仪表指针上升(正行程)与下降(反行程)时,对同一被测量所得读数是有误差的(由于仪表内部有阻尼,传动系统中有摩擦和间隙,这种变差是存在的)。但是,仪表读数的变差不应超过仪表的允许误差。

3. 灵敏度

仪表指针的线位移或角位移与引起这些位移的被测量的变化值之间的比例为

$$S = \Delta\alpha / \Delta A \quad (1-2)$$

式中 $\Delta\alpha$ ——指针的线位移或角位移;

ΔA ——被测量的变化值。

4. 灵敏度阻滞

灵敏度阻滞又称为感量,此量是足以引起仪表指针从静止作极微小移动的被测量的变化值。这一特性参数对用在零值法中的指零仪表有着重要的意义。一般仪表的灵敏度阻滞应不大于仪表允许误差的一半。

5. 指标滞后时间

从被测参数发生变化到仪表指示出该变化值所需的时间称为指示滞后时间,或称时滞。时滞主要由仪表的惯性所引起。因为仪表均存在引起惯性的因素,如机械仪表中运动件的质量、电测仪表中的电感或电容、传热式仪表中的热容量等,故时滞是无法避免的。

此外,还有一些用来评定仪表质量或特性的参数将在有关的章节中加以说明。



关于仪表的这些指标,在仪表的使用和保管过程中并非固定不变,其精度往往是逐渐降低的,因此必须及时加以检验和校正。如果检验结果显示仪表的误差超出允许范围而又无法校正时,就应报废。

对于实验室用的仪表,为了求得更为可靠的测量结果,应将其与准确度更高的标准仪表读数相比较进行校验,即将它标尺上各点实际误差测出,作出记录(校正曲线或数值表),而在使用时对该仪表的读数引入一个校正数。仪表标尺上某一点的读数校正数是

校正数 = 标准值 - 读数

标尺上各点的读数可以作成图 1-2 的校正曲线。

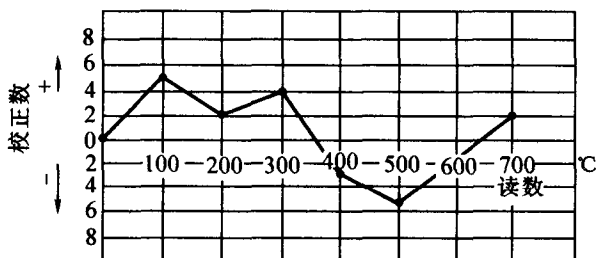


图 1-2 仪表读数的校正曲线

第四节 测试仪器的基本特性

为了保证测试结果的正确性,应正确地选择和使用测试仪器。为此,必须了解仪器的特性,即仪器的输出与输入关系。

一、测试仪器的静态特性

静态特性是指被测信号不随时间变化或极为缓慢变化时,输出与输入之间的关系。

1. 静态特性曲线

在静态标准条件下,由实测来确定输出与输入关系的过程称为静态校准或静态标定。所得的曲线称为静态校准曲线或静态特性曲线。

校准时,利用一定等级的校准设备给定输入值 x ,对被校准的测量装置进行测试,得到输出值 y ,由所得数据点通过适当方法求出其特性曲线,如图 1-3 所示。

2. 静态灵敏度 S

它的定义是输出变化量 ΔY 与输入变化量 ΔX 的比率,即特性曲线的斜率,其数学表达式为

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dy}{dx} \quad (1-3)$$

显然,具有线性特性的测量装置,其静态灵敏度为常数,而非线性特性的灵敏度将随输入值不同而变化。

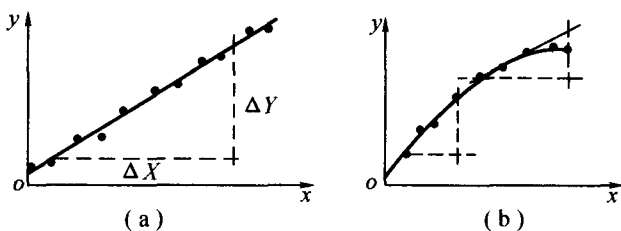


图 1-3 静态校准特性曲线及灵敏度

(a)校准曲线是直线;(b)校准曲线非直线



3. 线性

它是指校准曲线接近直线的程度。

一般在设计测量装置时,总是希望输出与输入保持直线关系,即灵敏度为常数,这样可以使模拟仪表刻度均匀,数字仪表可减少线性化处理环节,给分析处理数据带来方便。因此在许多情况下,实际校准曲线为非直线时,仍可按直线关系处理,该直线称为参考直线。参考直线与校准曲线之间的误差用线性度 δ_L 来度量,见图 1-4。

$$\delta_L = \frac{a}{A} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 a ——使用范围内校准曲线与参考直线的最大偏差;

A ——输出的最大变化范围。

常用的确定参考直线的方法有三种,最简单的方法是用特性曲线在使用范围内的两端点所连直线作为参考直线,由此所得的线性度称为端点线性度;第二种方法是过特性曲线与输出轴的交点作一直线,使得曲线偏离此线的最大正偏差与最大负偏差相等,由此所得线性度称为零基线性度;第三种方法是用回归分析方法拟合一条直线,使得 $\sum \Delta_i^2$ 为最小, Δ_i 为任一实测校准点与该直线的偏差,这种方法叫最小二乘法,所得直线为最佳直线,对应线性度叫独立线性度。

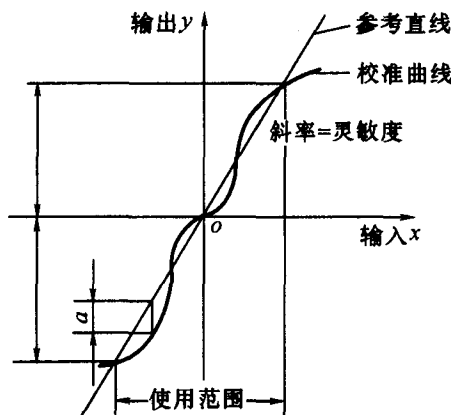


图 1-4 线性度

二、测试仪器的动态特性

1. 概述

动态特性是指输入为随时间变化的动态信号时,输出与输入之间的关系。

一般来说,动态信号输出与输入的变化规律存在差异,称为动误差。研究动态特性的目的就是研究这种差异及其影响,以减小动误差。

输入的被测信号称为激励,测量装置对应的输出称为响应。通常用一些典型信号作为输入,研究其响应,得出一系列动态参数来表征测量装置的动态特性。图 1-5 所示为阶跃函数,它的数学表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0 & (t \leq 0) \\ F_0 & (t > 0) \end{cases} \quad (1-5)$$

式中 t ——时间;

F_0 ——常数。



图 1-5 高度为 F_0 的阶跃函数

任意信号均可看作许多不同高度、不同时刻出现的阶跃信号的叠加,因此研究阶跃信号输入时的响应,即为阶跃响应,可在时间域中表达测量系统的动态特性。而满足一定条件的任意信号,可以通过傅里叶变换分解成一系列不同频率的正弦信号之和。所以研究正弦信号输入时,输出随频率而变化的特性,即频率响应,则可在频



率域中表达测量系统的动态特性。

除少数情况外,一般测试系统可以等效为一运动质量为 m 、弹性系数为 k 、阻尼系数为 c 的简化机械系统,如图 1-6 所示。可用二阶常系数线性微分方程描述其输出与输入的关系,因此也称为二阶测量系统,其关系式为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f(t) \quad (1-6)$$

式中 $f(t)$ ——输入;

x ——输出;

t ——时间。

(1-6)式表示惯性力、阻尼力、弹性反力与外力 $f(t)$ 相平衡。定义阻尼度 ζ 、系统固有圆频率 ω_n 及静态灵敏度 S 分别为

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad S = \frac{1}{k}$$

则式(1-6)可改写为

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = S\omega_n^2 f(t) \quad (1-7)$$

2. 阶跃响应量系统

当二阶系统输入 $f(t)$ 为阶跃信号式(1-5)时,则微分方程式(1-7)的解有 3 种:

$\zeta > 1$ 时(过阻尼)

$$x = SF_0 \left[1 - \frac{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} + \frac{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} \right] \quad (1-8)$$

$\zeta = 1$ 时(临界阻尼)

$$x = SF_0 [1 - (1 + \omega_n t) e^{-\omega_n t}] \quad (1-9)$$

$0 < \zeta < 1$ (欠阻尼)

$$x = SF_0 \left[1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t + \cos \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t \right) \right] \quad (1-10)$$

图 1-7(a)表示式(1-8)~(1-10)的不同阻尼度的阶跃响应曲线,图 1-7(b)表示某一阻尼度时的阶跃响应。

曲线的形状取决于阻尼度 ζ 。 $\zeta > 1$ 时, $\frac{x}{SF_0}$ 慢慢增大,逐渐趋近于 1,但不会超过 1。当 $0 < \zeta < 1$ 时,系统作自由衰减振动;当 $\zeta = 1$ 时,介于两者之间,不产生振动。

在 $\zeta > 0$ 的情况下,输出与输入之间的差异随时间减小,理论上要时间趋于无穷大,此差异才会为零。实际工作中,给定一个允许误差范围 $\pm \Delta$ [图 1-7(b)],响应曲线最终进入此范围不再超出,则认为响应的过渡过程结束。定义从输入开始至响应最终进入给定允许误差范围所需的时间 t_s 叫响应时间。 t_s 反映了测量系统响应的速度。允许误差 Δ 给定后,可以找到一个最佳阻尼度,从而得到一个最短的响应时间,如 $\Delta = 5\%$,那么 $\zeta \approx 0.7$ 时, t_s 最小。

测量系统响应速度还与系统固有圆频率有关。 ζ 一定时, ω_n 越大,则响应越快; ω_n 越

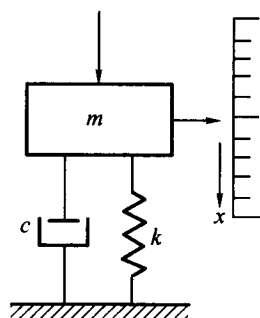


图 1-6 二阶测量系统

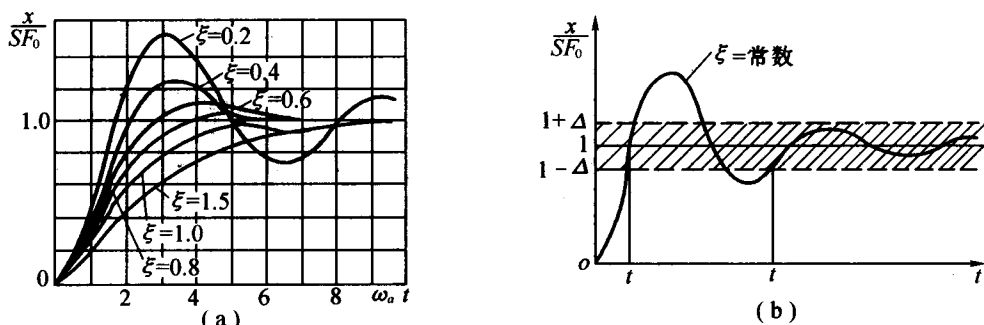


图 1-7 二阶系统的阶跃响应

小,响应越慢。

3. 频率响应

如图 1-6 所示,二阶系统输入 $f(t) = F_0 \sin \omega t$ 时,则式(1-6)变为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (1-11)$$

该方程的通解为

$$x = e^{\zeta \omega_n t} (A \cos \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t + B \sin \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t) + H S F_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (1-12)$$

式中 A, B 为特定边界条件决定的常数。

可以看出,右边第一项是暂态的, $\zeta \omega_n$ 足够大时,该项随时间的增长很快消失;第二项是稳态的,因此稳态频率响应为

$$x = H S F_0 \sin(\omega t - \varphi) = H x_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (1-13)$$

式中 x_0 ——静态响应幅值, $x_0 = S F_0 = \frac{F_0}{k}$;

H ——振幅畸变因数或幅值比(动态响应幅值 $H S F_0$ 与静态响应幅值 $S F_0$ 之比),表达

了强迫振动的振幅误差, $H = \frac{1}{\sqrt{(1 - q^2)^2 + 4 \zeta^2 q^2}}$;

q ——频率比, $q = \frac{\omega}{\omega_n}$;

φ ——滞后角,表达了强迫振动的相位误差, $\varphi = \arctan \frac{2 \zeta q}{1 - q^2}$ 。

H 和 φ 与频率的关系分别叫做幅频特性和相频特性,用曲线表示,如图 1-8 所示。由此可知,表征频率响应的参数仍为阻尼度 ζ 和固有圆频率 ω_n 。

通常希望幅值比 H 不随频率变化,但对于给定的阻尼度,只有一二个频率上出现理想情况 $H = 1$ 。因此,实际工作中给定幅值误差 $(1 - H)$ 一个允许范围,在此允许误差范围内的连续段作为测量仪器的工作频带范围。由图 1-8(a)可见, $\zeta \approx 0.7$,幅频曲线接近 $H = 1$ 的连续段最宽。若允许误差为 $\pm 5\%$,则此时工作频带的 q 值范围约为 $0 \sim 0.6$;若允许误差为 $\pm 1\%$,则工作频带的 q 值范围约为 $0 \sim 0.4$ 。

显然,提高系统的固有圆频率 ω_n ,可以增大允许误差内的工作频率范围;反之, ω_n 越低,则此工作频率范围越窄。

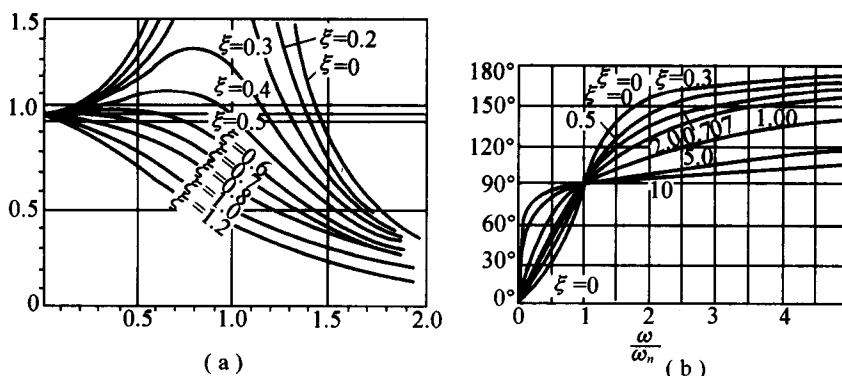


图 1-8 二阶系统的频率响应

(a) 幅频特性; (b) 相频特性

由相频特性可知:

当 $\zeta = 0, \omega = \omega_n$ 时, 输出与输入的相位差 φ 由零突变为 180° ;

当 $\zeta > 0$, 不论 ζ 多大, $\omega = \omega_n$ 时, $\varphi = 90^\circ$, 利用这一特点, 可用来测定系统的固有频率, 称为相位共振法; $\zeta > 0$ 时, φ 随频率比 q 值减小而减小;

当 $\zeta \approx 0.7, \omega < \omega_n$ 时, 相频特性近似为一直线 $\varphi \approx aq$ (a 为常数), φ 相对于输入的时间为

$$t_\varphi = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{a}{\omega_n}$$

即此时当选定仪表 ω_n 后, 对于不同频率成分的信号, 滞后时间均近似相同。

4. 测试系统的频率选择

从上述分析可知, 二阶测试系统的动态特性主要决定于测试系统的阻尼度及被测信号频率与系统固有频率之比。最佳阻尼度为 $\zeta \approx 0.7$, 它使阶跃时间最短, 工作频率范围最宽, 时间滞后与被测信号频率无关, 这种滞后对于只是为了精确测定输入, 是无妨的, 波形并无失真。但毕竟是滞后, 对于某些对滞后有限制的情况, 可以通过提高仪表固有频率来减少时间滞后。

提高仪表的固有频率在任何情况下都有利于改善动态特性, 它是减小动态误差的最有效的途径。由图 1-8 可见, 当频率比 q 值非常小, 即仪表固有频率远大于被测信号频率时, 虽然阻尼度不同, 均有幅值比 H 接近于 1, 相位差接近于零。

为提高测量系统的固有频率, 必须提高测量弹簧的弹性系数和减小运动部分的质量。但弹性系数的增大将引起仪表灵敏度的降低, 从而导致其他测量误差增大, 因此在选择仪表固有频率时, 应进行综合考虑。

在实际测量中, 被测动态信号一般都不是单一的正弦波, 大多数稳态的或瞬态的复合动态信号, 都可以用正弦级数来表示, 其关系为

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1-14)$$

式中 a_n ——系数;

a_0 —— $f(t)$ 的平均值分量, 或称直流分量;



n —— $1 \sim \infty$ 的正整数,称为谐波阶数,对应的正弦项称为 n 次谐波项,各谐波项振幅 a_n 的大小随 n 增大而减小。

为了不失真地处理被测信号,必须采用 0.7 左右的阻尼度,以保证各次谐波的 φ_n 所对应的滞后时间相同。另外,必须保证各次谐波的振幅畸变都在允许范围之内,这实际上是不可能的。因为测量仪器的固有频率是有限的,所以能测量信号的工作频率范围也是有限的。但高次谐波振幅很小,故可忽略其影响,即选择仪器固有圆频率时,只需考虑到足够高的谐波频率作为工作频率即可。一般原则是应考虑到振幅为基波(一次谐波)振幅 2% 的第 k 次谐波,即以 $k\omega$ 作为工作频率。对于周期方波, $k=51$; 对于三角波, $k=70$ 。

5. 低频系统

由图 1-8 可见,当频率比 q 很大,即仪表固有圆频率 ω_n 远小于被测信号频率 ω 时,幅值比 H 趋向于零,相位滞后角 φ 趋向于 180° 。这表明测试系统这时对正弦信号已无响应输出。对于式(1-14)所表达的复合信号输入,系统对各次谐波均不产生输出,但其平均值分量却可以同输入静态信号一样产生输出,因此低频测试系统($\omega_n \ll \omega$)所反映的是信号的平均值。这种情况可用于测量动态气体压力平均值的 U 形管压力计及机械式气体平均压力计等,也可用来设计不受外界高频振动干扰影响的隔振装置。

第五节 微型计算机与测试技术

自 20 世纪 70 年代以来,由于大规模、超大规模及甚大规模集成电路技术的发展,计算机进入了微型计算机时代。微型计算机具有功能强大、体积小、功耗低、性价比高等特点,使其与测试技术愈来愈紧密地结合在一起。而且,由于通信、网络、微/纳米技术、微机电技术及新型传感器技术的发展,又赋予计算机化测试技术新的内容,促进了测试技术不断发展。

一、自动测试系统的构成

尽管微机在测试技术中的应用场合不同,目的不一,但就其共性来说,一般包括硬件和软件两大部分。其中,硬件主要由两部分构成,一是传感器及其信号的放大装置,即通常所说的二次仪表;二是微型计算机,二者通过一定的接口

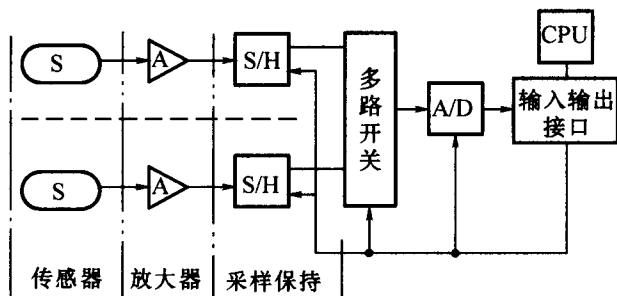


图 1-9 微型计算机构成数据检测系统的典型组成

进行连接,其典型的组成如图 1-9 所示。各种形式的非电量信号,都要经过传感器转变为电量信号,再经放大器放大后送到采样保持器 S/H(Sampler/Hold)。S/H 根据系统的要求,相应完成信号采样及采样值保持两种功能,多路开关从 S/H 输出的数据中根据要求选择一路送到模数转换器 A/D(Analogue to Digital Converter)进行模拟—数字信号转换,转换后的数字量经输入输出 I/O 接口(Input/Output)送到计算机。下面对上述各部分的作用作一简单说明。

1. 传感器

它的作用是将被测参数(如温度、压力、流量、速度、液位、成分等各种非电量)转换成电量,以便利用计算机进行测量。动力工程测试技术中常见的传感器在第二章中将作详细的



介绍,在用于自动测试时,应当注意以下几个问题:

(1)理想的传感器不应当从被测系统中获取能量,实际设计时,传感器要求从外界获取的能量越少越好,但相应的输出信号也就相当微弱,比如低到 10^{-9} V;

(2)抗干扰能力强,由于传感器输出信号较弱,容易受到环境条件的变化而产生干扰电平,最大可达几毫伏甚至几伏,因此必须采取适当的抗干扰措施;

(3)对于非电流或电压信号输出的传感器,如电容、电阻或电感量,测量时应当考虑消除引线及机械结构所造成的寄生参数的影响;

(4)需要外加激励电源的传感器,要注意该外加激励电源的精度和稳定性,因为它们对输入信号的精度和稳定性有直接影响;

(5)理想的要求是传感器的输入、输出信号特性是线性的,但一般情况下难以做到,所以对输入量要加以适当补偿。

总之,传感器的精度直接影响到整个自动测试系统的精度,应当慎重设计。

2. 放大器

它的主要作用是把传感器输出的微弱电信号加以放大,以便与计算机的模拟输入通道进行对接,同时也可对检测信号进行滤波,以达到降低噪声、控制增益以及变换阻抗等目的。由于传感器的种类繁多,输出各异,所以放大器的形式也不尽相同,因此要根据不同传感器的要求加以选择。目前,多采用集成运算放大器和仪器专用放大器。

选择放大器的基本原则:

- (1)低噪声,零点漂移小,以保证输出信号的稳定可靠;
- (2)精度高,满足测量要求;
- (3)输入阻抗高,这样可以有效地抑制干扰信号;
- (4)频带宽,以适应测量信号大幅度变化的需求。

3. A/D 转换器

它的主要作用就是把被测参数的模拟量转换成微型计算机所能接收的数字量。A/D 转换器的精度随位数的增加而增加,目前广泛采用的有 8 位、10 位和 12 位 A/D 转换器,它们大多以集成电路块的形式提供给用户,或制成模板式供选用。对 A/D 转换器的要求是:

- (1)精度高,因为 A/D 转换器的精度与最终测试结果的准确性直接相关;
- (2)速度快,特别是对有特殊要求的高速采集过程,尤为重要。

4. 采样保持器

在多路采集系统中,由于计算机是分时工作的,并且 A/D 转换需要一定的时间,因此必须保证在 A/D 转换过程中采集的参数值不变,否则转换过程要发生混乱。采样保持器 S/H 正是为满足这一需要而设计的,它有两种工作方式,即采样方式和保持方式。采样时,其输出跟踪模拟输入电压变化;保持时,则使输出值保持在命令发出时刻的输入值。S/H 的基本工作原理是一个电容的充放电过程,目前常用的采样保持器由一块集成电路芯片和一个存储电容构成。对采样保持器 S/H 的要求是:

- (1)采样时,存储电容必须尽可能很快地充电,以便跟随输入参量的变化;
- (2)保持时,存储电容的漏电流必须接近于零,使其在一定的时间内输出值保持不变。

5. 多路开关

由于 A/D 转换器的价格较高,所以在多路系统中,通常几个模拟量通道共用一个 A/D 转换器。多路开关的作用就是分时地将各被测参数接通,以便进行 A/D 转换,它相当于一