

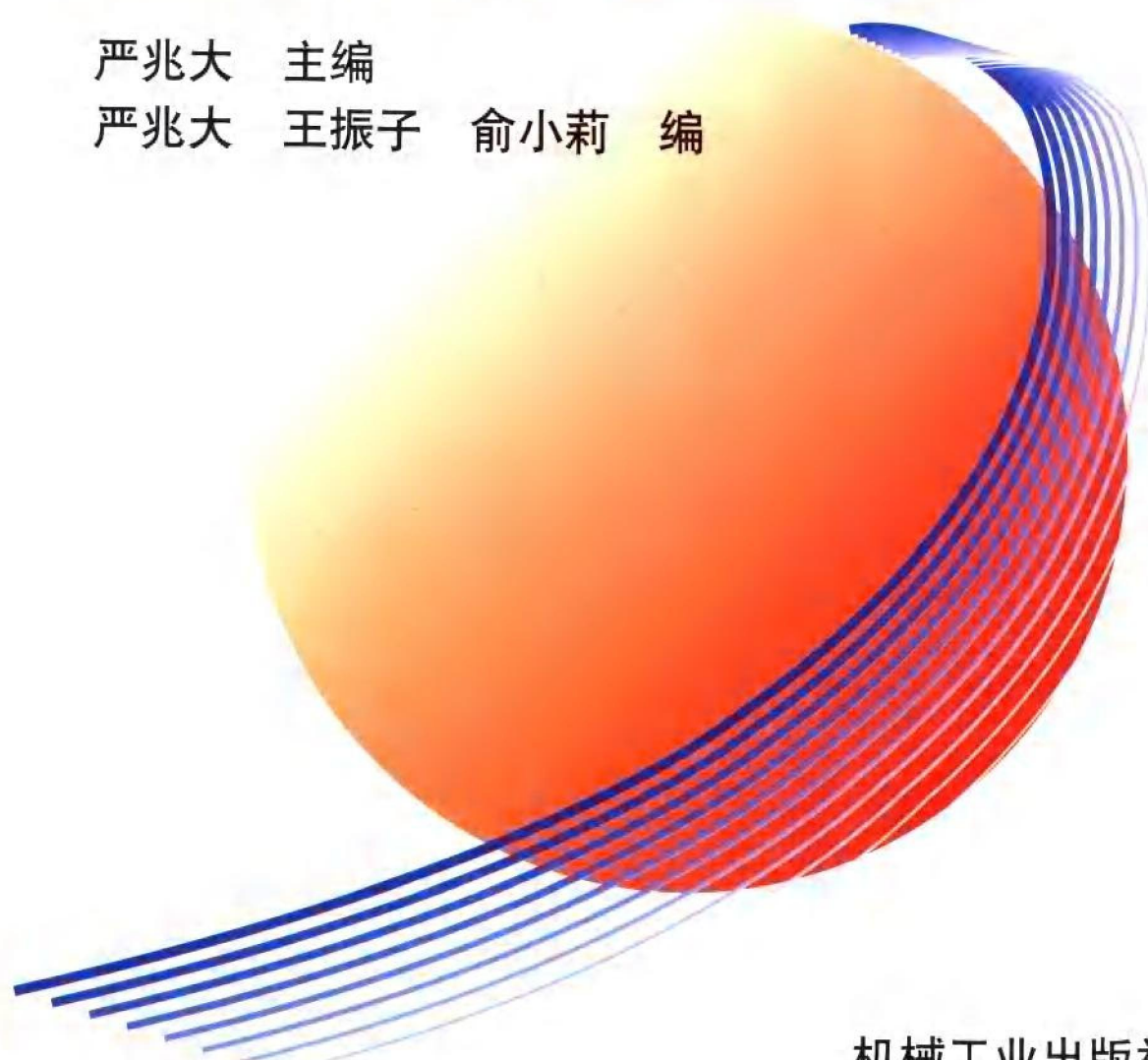
13

普通高等教育机电类规划教材

热能与动力机械 测试技术

严兆大 主编

严兆大 王振子 俞小莉 编



机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

热能与动力机械测试技术

严兆大 主编

严兆大 王振子 俞小莉 编

高宗英 主审

ND33/05



机械工业出版社

本书阐述了热能和动力机械工程领域主要参数的测量方法、测试系统和测量仪器的工作原理、测量误差分析和数据处理等内容。全书共分十三章,前四章主要介绍测量仪器的基础知识、误差分析理论和传感器原理等;从第五章开始,分别叙述热能与动力机械工程领域的主要参数,如温度、压力、转速和功率、流速和流量、液位、气体成分分析、振动和噪声等的测量方法、测试系统、所用仪表原理及测试结果分析,其中还介绍了一些现代测试技术和相应的测试系统。

本书为热能与动力机械类各专业本科生教材,也可供该领域从事试验研究、设计、制造、使用等的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热能与动力机械测试技术/严兆大主编. —北京:机械工业出版社, 1999.7

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-07236-7

I. 热… I. 严… III. ①热能-参数测量-高等学校-教材②动力机械-参数测量-高等学校-教材 IV. TK05

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第14272号

出版人:马九荣(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:赵爱宁 版式设计:冉晓华 责任校对:肖新民

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999年7月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·15.5印张·374千字

0 001—4 000册

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

根据 1996 年 11 月第二届全国高等学校动力工程类专业教学指导委员会第一次会议纪要，希望加快教改步伐、加强基础、淡化专业、拓宽学生的知识面，尽快过渡到口径更宽的“热能工程与动力机械”专业。会议确定《热能与动力机械测试技术》由浙江大学内燃机研究所编写，并作为普通高等学校机电类专业“九五”规划教材出版。此后，在 1997 年 4 月第二次教学指导委员会会议上，详尽审阅了该教材的编写大纲，会后做了修改，同时又书面征求了各委员的意见，在此基础上开始编写。本书于 1998 年 8 月完成初稿和主审，并提交第三次教学指导委员会审定。作者详细听取了委员的意见，并进行了修改和补充。

本书内容涉及动力机械、热能及制冷工程中主要参数的测量原理和技术、测试系统以及测量误差分析和数据处理，既包括基础知识，又力求反映该领域中测试技术的新进展。

本书由严兆大教授主编，其中第一、二、三、十二章由严兆大编写，第四、五、六、十章由王振子编写，第七、八、九、十一、十三章由俞小莉编写。全书由江苏理工大学高宗英教授主审。

编写过程中参考了许多兄弟院校的资料，得到全国高等学校动力工程类专业教学指导委员会和许多同行的关心和支持，特此一并致以深切的谢意。

由于本书内容涉及面广，而编者水平有限，故缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 概述 1

- 第一节 热能与动力机械测试技术发展概况 1
- 第二节 测量的基本概念 1
- 第三节 测量仪器的组成和分类 3
- 第四节 测量仪器的主要性能指标 4
- 第五节 仪器在瞬变参数测量中的动态特性 6
- 第六节 测量仪器的动态标定 13
- 第七节 工程中的测量系统简述 14

第二章 误差理论及应用 16

- 第一节 误差的来源与分类 16
- 第二节 系统误差 17
- 第三节 随机误差 19
- 第四节 可疑测量数据的剔除 25
- 第五节 随机误差的计算 28
- 第六节 传递误差 35

第三章 试验设计与数据整理 39

- 第一节 正交试验设计与分析 39
- 第二节 有效数字与计算方法 44
- 第三节 试验数据的图示法 45
- 第四节 回归分析与经验公式 47
- 第五节 计算机数据处理系统简述 53

第四章 传感器的基本类型及其工

作原理 55

- 第一节 概述 55
- 第二节 电阻式传感器 55
- 第三节 电感式传感器 60
- 第四节 电容式传感器 62
- 第五节 压电式传感器 64
- 第六节 磁电式传感器 67
- 第七节 热电式传感器 68

第八节 光电式传感器 74

第九节 霍尔传感器 81

第十节 数字式传感器 83

第五章 温度测量 85

- 第一节 概述 85
- 第二节 接触式温度计 87
- 第三节 非接触式温度计 99
- 第四节 气体温度计和蒸汽压温度计 104

第六章 压力测量 108

- 第一节 测压仪表 108
- 第二节 气缸动态压力的测量 115
- 第三节 气流压力测量 120
- 第四节 测压仪表的标定、安装和使用 127

第七章 流速测量 132

- 第一节 皮托管测速 132
- 第二节 热线流速仪测速 137
- 第三节 激光多普勒流速仪测速 139

第八章 流量测量 147

- 第一节 流量及其测量仪表概述 147
- 第二节 流速法测量流量 149
- 第三节 差压式流量计 150
- 第四节 转子流量计 153
- 第五节 涡轮流量计 156
- 第六节 冲量式固体粉粒流量计 159
- 第七节 光纤流量计 160
- 第八节 超声波流量计 162

第九章 液位测量 164

- 第一节 概述 164
- 第二节 差压式液位测量法 164
- 第三节 电容式液位测量法 168
- 第四节 电阻式液位测量法 170
- 第五节 光纤传感技术在液位测量中的

应用	172	第一节 概述	207
第十章 转速和功率测量	174	第二节 振动测量的基本原理	207
第一节 转速测量	174	第三节 测振系统及其分类	209
第二节 功率测量	177	第四节 典型测振仪与激振器简介	209
第三节 转矩仪	190	第五节 振动测量的实施	214
第十一章 气体成分分析	196	第六节 内燃机振动测量	216
第一节 概述	196	第七节 叶片、叶轮振动的测量	219
第二节 氧含量测量	196	第八节 测振系统的校验	224
第三节 色谱法测量气体成分	199	第九节 振动分析和数据处理简述	226
第四节 红外光谱法测量气体成分	202	第十三章 噪声测量	228
第五节 化学发光法测量氮氧化物浓度 ...	203	第一节 噪声测量中的声学概念	228
第六节 烟度测量	204	第二节 噪声评定值	232
第十二章 振动测量	207	第三节 噪声测量仪器	234
		第四节 噪声测量方法与测量环境	236
		参考文献	240

第一章 概 述

第一节 热能与动力机械测试技术发展概况

测试技术对自然科学、工程技术发展的重要性,越来越为人们所认识和重视,并已成为科学研究不可缺少的重要手段。与其他学科一样,在热能与动力机械领域中,测试技术的发展也经历了一个漫长的历程。50年代以前,作为参数测量的感受元件较多属于机械式传感器,如弹簧压力表、膨胀式温度计等。进入60年代后,开始应用非电量电测技术和相应的二次仪表,使测试技术上了一个新的台阶。随着计算机与电子技术的发展,测试技术开始了一个新的发展阶段。80年代开始应用计算机和智能化仪表,以实现动态参数的实时检测和处理;随后,即80年代至今,许多新型传感技术的相继出现,诸如激光全息摄影技术、光纤传感技术、红外CT技术、超声波测试技术等高新技术,均已逐步深入到热能与动力机械研究的各个领域,用于对燃烧过程、流动过程、燃烧产物的浓度和粒度场、传热传质过程等的高速瞬变动态参数的测量,从而使得对热能与动力机械的研究,从宏观过程的研究深入到微观、瞬变过程的研究。许多研究成果表明,这些高科技的传感技术,加上智能化的二次仪表和计算机的应用,起到了极其重要的作用。由于对热能与动力机械中各种过程内在规律的深入研究,对过去的传统观念作出了新的解释,并有新的发现,从而大大促进了学科的发展。

随着科学技术的进步,测试技术已逐步成为一门完整、独立的学科,同时它又是与传感技术、电子及计算机技术、应用数学及控制理论等相互交叉的学科。这一学科的发展,无疑将会大大促进热能与动力机械工程领域科学研究和应用技术的发展。

第二节 测量的基本概念

测量是人类对自然界中客观事物取得数量观念的一种认识过程。它是用特定的工具和方法,通过试验手段将被测物理量与另一同名的作为单位的物理量比较,以确定两者之间的比值。因此,测量过程实际上是确定一个数值未知的物理量的过程。

在热能与动力机械工程中,被测的基础物理量有:温度、压力、流量、功率、转速等。由于这些物理量的性质以及测量的目的和要求不同,所以测量方法和所用的仪器也各异。

一、测量方法

按照得到最后结果的过程不同,测量方法可分为下述三类。

1. 直接测量

凡被测量的数值可以直接从使用的测量仪器上读得的,称为直接测量,如用压力计测量压力、用温度计测量温度等。直接测量是测量的基础。对于稳态物理量,直接测量时常用的方法有如下几种:

(1) 直读法 用度量标准直接比较,或从仪表上直接读出被测量的绝对值,如用刻度尺测量长度,用弹簧秤测定质量等。

(2) 差值法 从仪表上直接读出两量之差值作为所求之量, 如用 U 形液柱式差压计测量介质的压差。

(3) 代替法 用已知量代替被测量, 即调整已知量, 使两者对仪表的影响相等, 此时被测量即等于已知量, 如用光学高温计测量温度。

(4) 零值法 使被测量对仪表的影响被同类的已知量的影响相抵消, 则被测量便等于已知量, 如用天平秤测定物质的质量、用电位计测量热电势等。

测量方法的选择应取决于测试工作的具体条件和要求。在满足测量精度的前提下, 应力求简便、迅速, 不苛求使用高精度的仪表。

2. 间接测量

被测量的数值不能直接从测量仪器上读得, 而需要通过直接测量得到与被测量有一定函数关系的量, 然后经过运算得到被测量的数值。凡属此类测量, 均称为间接测量。如内燃机功率 (kW), 可借助下述函数关系求得

$$P = \frac{Tn}{9549}$$

式中, T 为内燃机曲轴转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$); n 为转速 (r/min)。

首先, T 及 n 分别采用转矩仪和转速仪直接测量, 然后用上述函数关系计算相应的功率 P 。

3. 组合测量

测量中使各个未知量以不同组合形式出现 (或改变测量条件以获得不同的组合), 根据直接测量或间接测量所得数据, 通过求解联立方程组求得未知量的数值。凡属此类测量, 均称为组合测量。在组合测量中, 未知量与被测量之间存在一定的关系。例如, 用铂电阻温度计测量介质温度时, 电阻值和温度的关系为

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2)$$

式中, R_t 为 t ($^{\circ}\text{C}$) 时的铂电阻值 (Ω); R_0 为 0°C 时的铂电阻值 (Ω); a 、 b 为铂电阻的温度系数 ($\Omega/^{\circ}\text{C}$)。

为确定铂电阻的温度系数, 首先需测得在不同温度下的电阻值, 然后再经组合解联立方程组, 以获得 a 、 b 的数值。

组合测量在动力机械中较为常用, 如汽轮机空载下由功率损失与转速关系建立经验公式, 以确定转速系数与指数等。

二、非稳态和瞬变参数的测量

随时间不断改变数值的被测量, 称为非稳态和瞬变参数 (或称动态参数), 如非稳定工况或过渡工况时内燃机的转速、功率; 在制冷过程中冷库的温度等等。这些参数随时间变化的函数可以是周期函数、随机函数等。

此类参数需要用显示式记录方式观察和记录被测量的变化过程和大小。对缓慢变化现象的参数, 可以用慢扫描示波器、X-Y 函数记录仪或其他机械式记录仪来测量变化图形。对一些快速瞬变参数, 则需采用灵敏度更高的记录或显示仪器, 如用电测、光测的方法记录和显示。

三、模拟测量与数字测量系统

有时被测参数的量或它的变化, 不表现为“可数”的形式, 而是在测量过程中首先将被测物理量转换成模拟信号, 并最终在仪表指针的位置或记录仪描绘的图形显示测量的结果。凡属此类测量, 均称为模拟测量, 其相应的测量系统称为模拟测量系统。该系统的主要优点是

直观性强、灵活、简便、价格低；主要缺点是测量精度低，指示器读数误差难以达到小于 $\pm 0.5\%$ 的要求。

随着计算机和电子技术的发展，数字测量系统在热能与动力机械测试技术中的应用日趋广泛。这类测量可直接用数字形式表示。由于模/数(A/D)转换技术已能足够精确地将模拟形式的信号转换成数字形式，所以模拟与数字测量两者的转换已不存在技术上的困难，且数字测量系统的主要优点是能排除人为的读数误差，并可直接由数字记录或打印机记录数据，或与计算机相联实现数据自动处理。但由模拟信号表示的模拟量和由数字信号表示的数字量仍有本质上的区别。模拟信号含有“仿真”的意思，即模拟电压和电流信号的电平可以连续地或以无限小的阶跃量仿照被测量的变化而改变，理论上模拟信号的分辨能力是无限的。在数字信号中，电压或电流的电平不再代表信号幅值的大小。这里只有两种电平，即“通”(或逻辑“1”)和“断”(或逻辑“0”)，信号的幅度是用几个“通”或“断”电平的组合表示。所以，数字信号只能取有限个数值，只能按照断续阶跃量的形式来表达连续的时变信号，它的分辨能力决定于所取增量的大小。因此，模拟测量系统的测量过程是连续的，它能给出被测变量的瞬时值。数字测量系统的测量过程则是断续的，它给出的数值是被测量在一段时间内的平均值。

第三节 测量仪器的组成和分类

一、测量仪器的组成

用图 1-1 所示热电偶测定温度的简图来说明模拟测量系统的组成。由工作原理可知，热电偶用热电动势的形式来感知温度，构成测量仪器的感受件，通常称为传感器。

热电动势用补偿导线来完成传递信号的作用，构成测量仪器中的中间件。如果信号过弱，有时需放大。

热电动势由电压计指针的偏转位置或数字显示给出指示，构成测量仪器的指示或记录件，或称效用件。

因此，按工作原理，任何测量仪器都包括感受件、中间件和效用件三个部分，下面分别作简要介绍。

1. 感受件

它直接与被测对象发生联系（但不一定直接接触），感知被测参数的变化，同时对外界发出相应的信号。

作为仪器的感受件必须满足下述三个条件：

1) 它必须随被测参数的变化而发生相应的内部变化（这个内部变化就是传感器的输出信号）。如热电偶的一端受热后，因金属的热电效应而产生热电动势。

2) 它只能随被测参数的变化而发出信号（即不受其他任何参数的影响）。如热电偶产生热电动势的大小只随温度而变化，其他如压力等参数的变化则不引起热电动势的改变。

3) 感受件发出的信号与被测参数之间必须是单值的函数关系，即一个确定的信号只能与参数的一个值相对应。

实际上，这三个条件是难以完全得到满足的，特别是其中第 2) 项条件。因此，任何传感器都不可能是十全十美的，都受一定使用条件的限制。如在使用上不加以注意，就会得出错误的测量结果。

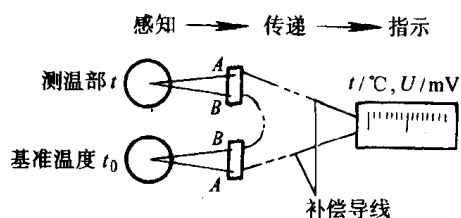


图 1-1 测量仪器组成示意图

2. 中间件

最简单的中间件是单纯起“传递”作用的元件，它将传感器的输出原封不动地传给效用件。这种单纯的传递件一般只有当传感器输出的信号较强，感受件与效用件之间的距离不大或效用件的灵敏度很高（或消耗的能量很小）时才有可能采用。常采用的中间件有导线、导管、光导纤维、无线电通信等。

在近代的热能与动力机械测试工作中，都要求实现数据集中观测、遥测和自动记录。所以，大多数测量仪器的中间件还必须完成“放大”、“变换”和“运算”任务。

仪器的放大件有两类：一类是感受件发出的信号较强，放大时不需外加能量，它只利用机械构件扩大指针和标尺之间的相对位移，使之易于观测；另一类是需要外加能量的，这在电测仪器中用得很多。例如，用电子电位计测量热电动势时，就要将电动势放大 10 万倍才足以驱动伺服电动机带动指针作出指示。这类放大在电测仪器中利用电子器件来完成。

有时，为了信号放大或改变传感器输出信号性质的需要，在电测仪器的测量电路中设有信号“变换器”和“运算器”。

3. 效用件

它直接与观测者发生联系，其作用是根据传感器输出信号的大小向观测者指出被测参数在数量上的大小。最简单而常见的仪器效用件是指示件，它通过标尺和指针（或液面、光线等）的相对位置来反映被测参数的瞬时值，有这种效用件的仪器被称作指示式仪器。效用件将被测参数变化历程记录下来的仪器称为记录式仪器，如笔式记录仪、磁带记录仪等。

记录式仪器所能反映的是被测参数在各个瞬时的变化情况，但有时需要知道被测参数对时间的积分。例如，在测定流量时，不仅要知道流量的瞬时值，而且还要知道在某个时间间隔内流过的总流量，如以 q_v 表示瞬时体积流量 (m^3/s)，则 $\int_{t_1}^{t_2} q_v dt$ 就是从时间 t_1 到 t_2 间隔内流过的总体积流量。若这一积分过程可由测量仪器本身来完成，则这样的测量仪器称积分式仪器或累计仪器，如流量计、电度表等。

此外，按照效用件的功能来分类可分为：数字式仪器、信号式仪器、电接触式仪器、调节式仪器等等。

二、测量仪器的分类

测量仪器按其用途可分为范型仪器和实用仪器两类。

范型仪器是准备用以复制和保持测量单位，或是用来对其他测量仪器进行标定和刻度工作的仪器。这类仪器的准确度很高，对它的保存和使用有较高的要求。

实用仪器是供实际测量使用的仪器，它又可分为试验室用仪器和工程用仪器。前者必须要提供关于它们读数的标定曲线或数值表，使用时应考虑周围环境对示值的影响（如温度、压力、磁场、振动等），其测量结果具有较高的准确度；后者并不需要标定资料，它们的准确度是预先根据其结构、制造和运用条件定出的。对它的要求是动作迅速，使用简单、可靠，其测量结果应能满足工程测量误差所允许的范围。

第四节 测量仪器的主要性能指标

测量仪器的性能指标决定了所得测量结果的可靠程度，其中主要有：准确度、恒定度、灵

敏度、灵敏度阻滞、指示滞后时间等。

1. 准确度

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

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

式中， δ_y 为允许误差； Δ_i 为允许的最大绝对误差； A_a 、 A_b 为仪器刻度的上限和下限值。

例如，有一温度计的刻度是从 $-30 \sim 120^\circ\text{C}$ ，而允许的最大绝对误差为 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，则其允许误差为

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

测量仪器采用允许误差来表示仪器准确度的级别，例如允许误差为 $\pm 1.5\%$ 的仪器为“1.5级”。通常工程用仪器为 0.5~4 级；试验室用仪器为 0.2~0.5 级；范型仪器在 0.2 级以上。仪器的准确度级别一般都标志在其标尺板上。

因此，在选用仪器时，应在满足被测量要求的条件下，尽量选择量程较小的仪器，一般应使测量值在满刻度的 $2/3$ 以上为宜（见第二章第五节中间接测量的误差计算举例），并根据对被测量绝对误差的要求选择测量仪器的精度等级。

2. 恒定度

仪器多次重复测量时，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。当外部条件不变时，用同一仪器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器量程之比的百分数为读数的变差。读数的变差的另一种特例是当仪器指针上升（正行程）与下降（反行程）时，对同一被测量所得读数之差（由于仪器内部有阻尼，传动系统中有摩擦和间隙，这种变差是存在的）。显然，仪器读数的变差不应超过仪器的允许误差。

3. 灵敏度

它以仪器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 S 来表示

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

式中， $\Delta\alpha$ 为指针的线位移或角位移； ΔA 为被测量的变化值。

4. 灵敏度阻滞

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

5. 指示滞后时间

从被测参数发生变化到仪器指示出该变化值所需的时间，称为指示滞后时间，或称时滞。时滞主要由仪器的惯性引起。因仪器均存在引起惯性的因素，如机械式仪器中运动件的质量、电测仪器中的电感或电容、传热式仪器中的热容量等，故时滞是无法避免的。

此外，还有一些用来评定仪器质量或特性的参数将在有关章节中加以说明。

应当指出,仪器的上述指标在仪器的使用和保管过程中并非固定不变,而往往逐渐变坏,因此必须及时加以检验和校正。如果仪器检定的结果表明,其误差超出允许范围而又无法校正时,即应报废。

对于试验室用仪器,为求得更为可靠的测量结果,应进行校正,即将被校仪器与准确度更高的标准仪器比较其读数,将标尺上各点实际误差测出,作校正曲线或数值表,如图 1-2 所示。使用时对该仪器的读数引入一个校正数。如仪器标尺上某一点的读数校正数为

$$\text{校正数} = \text{标准值} - \text{读数}$$

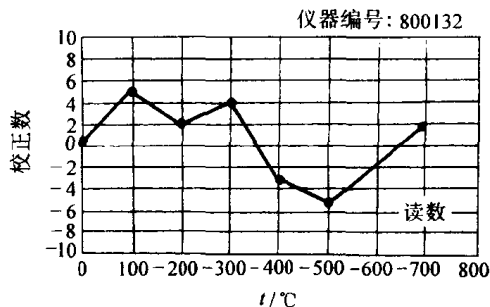


图 1-2 仪器读数的校正曲线

第五节 仪器在瞬变参数测量中的动态特性

在工程测量中稳态参数的测量和分析已有比较成熟的方法,但是随着科学技术的发展,对非稳态参数及瞬变过程的测试已日趋重要。如测量内燃机在燃烧过程中气缸内气体压力的波形、汽轮机压气机过渡工况时的气体流动等,都要对一些迅速变化的物理量进行测定。因此,要求动态测试仪器应具有较高的动态响应特性,但要完全满足这些要求将是十分困难的。这是由于测量仪器的指示和记录部分是一个具有一定质量的弹性系统,或是由各种电器元件组成的电气系统,这些系统不可避免地存在着“惯性”和“阻尼”,要推动记录元件势必消耗一定能量,因而出现种种衰减滞后现象。这就使得测量仪器所测录的结果与真实物理量之间存在着幅值和相位的差异,甚至使所测录的变化曲线完全失真。

因此,选择合适的测量仪器使其与所测参数的动态特性相匹配,并使测量的动态误差达到试验所允许的范围,这就成为动态测试技术中的关键问题。

一、仪器动态特性的数学描述

测量仪器的动态特性通常采用常系数线性常微分方程来描述,其输入量和输出量之间的关系通常可表达如下

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-3)$$

式中, y 为输出量; x 为输入量; t 为时间; 数组 $a_0, a_1, \dots, a_n$ 与 $b_0, b_1, \dots, b_m$ 为常数。

如果用算子 D 代表 d/dt , 方程式 (1-3) 可改写为

$$(a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \cdots + a_1 D + a_0) y = (b_m D^m + b_{m-1} D^{m-1} + \cdots + b_1 D + b_0) x \quad (1-4)$$

方程式 (1-4) 也常称为任意阶线性系统 (仪器或传感器) 用算子形式表示的运动微分方程。

二、传递函数与频率响应

研究传感器的动态特性时,常引用传递函数的概念。传递函数是指用输出信号对输入信号之比来表示信号间的传递关系,并用 H 表示。由式 (1-4) 可得算子形式的传递函数

$$H(D) = \frac{y}{x}(D) = \frac{b_m D^m + b_{m-1} D^{m-1} + \cdots + b_1 D + b_0}{a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \cdots + a_1 D + a_0} \quad (1-5)$$

若用方框图表示：

$$\begin{array}{c} x \rightarrow \boxed{\frac{b_m D^m + b_{m-1} D^{m-1} + \cdots + b_1 D + b_0}{a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \cdots + a_1 D + a_0}} \rightarrow y \end{array}$$

在研究动态测量时，最重要的一种情况是对正弦输入的动态响应，也就是当测量系统输入信号为 $x = A \sin \omega t$ 时，其系统的响应，如图 1-3 所示。输出信号在开始有一段非正弦波的过渡响应阶段，由于系统的阻尼随时间增长而衰减，直至消失而接近正弦信号，其后即进入稳态响应阶段，这时输出波形的稳态正弦信号为 $y = B \sin(\omega t + \varphi)$ 。可见，输出信号的频率 ω 和输入信号频率相同，但振幅有差异（动态误差），相位滞后 φ 。该系统相应的频率响应见图 1-3b，其中一条为幅频特性曲线，另一条是相频特性曲线。

对正弦波传递函数，可由式 (1-5) 中把 D 换成 $i\omega$ 得到

$$H(i\omega) = \frac{Y(i\omega)}{X(i\omega)} = \frac{b_m (i\omega)^m + b_{m-1} (i\omega)^{m-1} + \cdots + b_1 (i\omega) + b_0}{a_n (i\omega)^n + a_{n-1} (i\omega)^{n-1} + \cdots + a_1 (i\omega) + a_0} \quad (1-6)$$

往往把传递函数 $H(i\omega)$ 称为传感器（或线性系统）频率的响应函数，简称为频率响应或频率特性。

三、零阶仪器

最简单的情况是在方程式 (1-3) 中假定，除 a_0 、 b_0 外所有 a 、 b 系数都为零。这时方程变成最简单的代数方程

$$a_0 y = b_0 x \quad \text{或} \quad y = \frac{b_0}{a_0} x = Sx \quad (1-7)$$

用式 (1-7) 描述的仪器称为零阶仪器，式中 S 为静态灵敏度。

因式 (1-7) 是线性方程，所以不管 x 随时间如何变化，仪器输出不受干扰也没有时间滞后，因此可以认为零阶仪器（或传感器）有完全理想的特性。

测量位移的电位计就是零阶仪器的实例。图 1-4 为其示意图。在由电压 U_b 激励的电阻上有一个滑动触头，如果电阻在长度 L 上是线性分布，则可给出

$$u_o = \frac{U_b}{L} x_i = Sx_i \quad (1-8)$$

式 (1-8) 意味着不管 x_i 随时间如何变化，输出电压 u_o 总与 x_i 成一定比例。

在多数情况下，由于各种因素的影响，仪器的特性往往是非线性的。图 1-5 所示为方程中

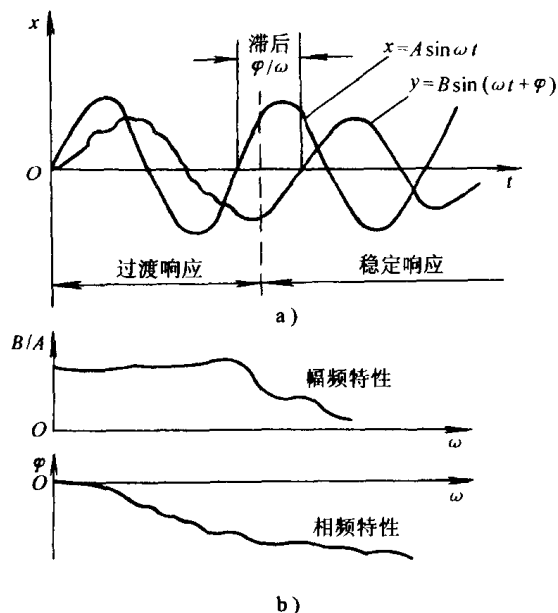


图 1-3 频率响应图

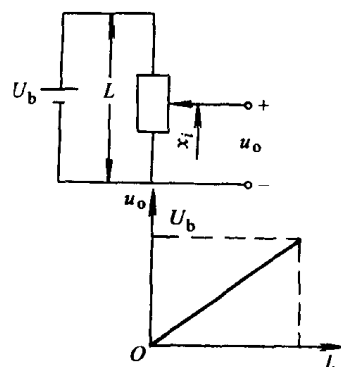


图 1-4 零阶仪器

包含有高次项的特性曲线,这对仪表的示值是不利的。但实际测量中,若非线性幂次不高,则在输入量变化不大的范围内,可以把实际曲线的某一段用切线或割线来代替,如图 1-5a 和 b 所示,把测量范围取在最接近直线的一段。如图 1-5a 中,将测量范围取在 $-x_c \sim x_b$ 的范围内,可得到近似线性特性。有些仪器的非线性程度很强烈,即使限制在很小的测量范围内,亦不能使非线性误差减小到允许的程度,这种特性称为根本非线性特性。这时,仪器只能采用非均匀分度。

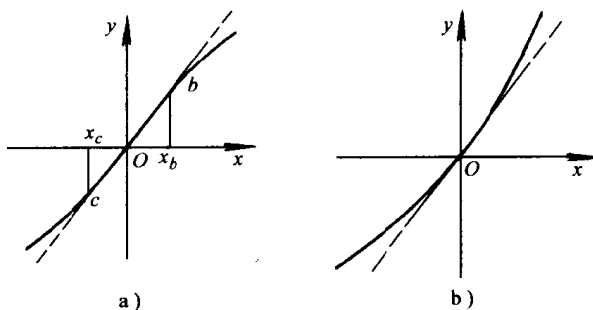


图 1-5 仪器的近似线性特性

四、一阶仪器

1. 一阶仪器的频率响应

若在方程式 (1-3) 中, a_2 、 b_1 以上的系数均为零,则可得如下微分方程

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (1-9)$$

这就是描述一阶仪器或传感器的微分方程。式 (1-9) 两边均除以 a_0 得

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b_0}{a_0} x \quad (1-10)$$

以热电偶测量介质温度 T_0 为例(图 1-6)。当热电偶突然放入温度为 T_0 的热水中,每一瞬间传给热电偶热接点的热量为 dQ

$$dQ = hA(T_0 - T)dt$$

式中, T 为热电偶瞬间温度; h 为对流时的表面传热系数; A 为热电偶热接点的表面积。

在不考虑导热及热辐射损失的情况下,介质传给热电偶的热量即为热电偶的储热量。若热电偶吸收热量 dQ 后,温度上升 dT , 于是

$$dQ = c_p m dT$$

式中, c_p 为热电偶热接点的比定压热容; m 为热电偶热接点的质量。

根据热平衡可得

$$hA(T_0 - T)dt = c_p m dT$$

经化简可得

$$\tau \frac{dT}{dt} + T = T_0 \quad (1-11)$$

式中, τ 称为时间常数

$$\tau = \frac{c_p}{h} \frac{m}{A} \quad (1-12)$$

方程式 (1-11) 是热电偶(测温传感器)数学模型的一阶线性微分方程,这类传感器称为一阶传感器。比较式 (1-10) 和式 (1-11), 可得

$$\frac{a_1}{a_0} = \tau \quad \frac{b_0}{a_0} = 1$$

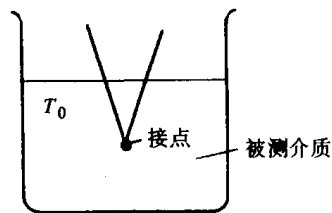


图 1-6 测温热电偶

于是式 (1-10) 可写成

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = x \quad (1-13)$$

式中, y 相当于热电偶传感器微分方程式 (1-11) 中的 T , x 相当于 T_0 。

若 $T_0 = T_m \sin \omega t$, 则由频率响应函数式 (1-6) 可得

$$H(i\omega) = \frac{Y(i\omega)}{X(i\omega)} = \frac{1}{i\omega\tau + 1} \quad (1-14)$$

相应的幅频特性和相频特性分别为

$$|H(i\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(i\omega\tau)^2 + 1}} \quad (1-15)$$

$$\varphi = \arctan(-\omega\tau) \quad (1-16)$$

图 1-7 为一阶仪器的幅频、相频特性曲线。由图和式 (1-15) 可见, 只有当 $\omega=0$ 时, $|H(i\omega)|$ 才等于 1。这说明一阶仪器的输出和输入相等, 即仪器能真实反映被测量。当 $\omega>0$ 时, $|H(i\omega)| = 1/\sqrt{(i\omega\tau)^2 + 1}$, 即传感器输出值比输入幅值要小 $1/\sqrt{(i\omega\tau)^2 + 1}$ 倍, 这是因为传感器本身的时间常数 τ 和被测量频率变化引起了误差。这种误差称为动态误差, 它随 τ 和 ω 而变化。

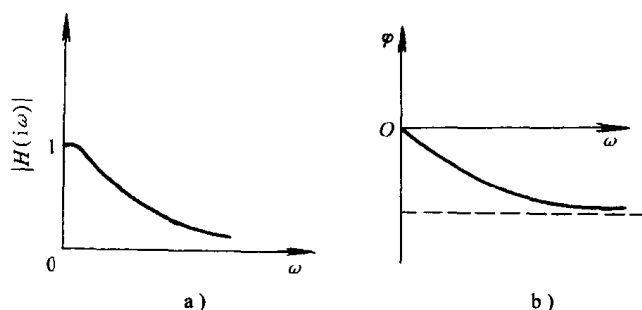


图 1-7 一阶传感器的幅频特性与相频特性

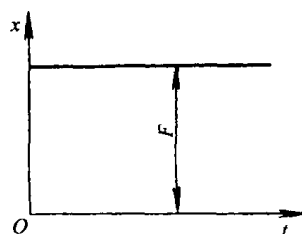


图 1-8 阶跃信号

2. 一阶仪器的阶跃输入响应

阶跃输入信号 $x(t)$ 如图 1-8 所示。其特点是有直上直下的前沿, 即 $t=0$ 时信号以无限大的速率上升; 当 $t>0$ 时, 信号不再随时间变化而保持信号高度 F , 在这一段它具有静态特性。现讨论一阶仪器对这种阶跃信号的输入响应。

仍以前面测温热电偶为例进行分析。设当 $t=0$ 时, 输出量 $T=0$; 当 $t>0$ 时, 热电偶突然被放入介质中, 输入量突然升至 T_0 , 即相应图 1-8 中的 F 值。这一过程可用微分方程式 (1-11) 描述。求解此方程, 可得到热电偶在阶跃输入下的响应, 现用算子形式表示上述方程

$$(\tau D + 1)T = T_0 \quad (1-17)$$

该微分方程的解由两部分组成

$$T = T_1 + T_2 \quad (1-18)$$

其中, T_1 为 $(\tau D + 1)T = 0$ 的通解, 其值为

$$T_1 = Be^{-t/\tau} \quad (1-19)$$

式中, B 为积分因子, 将由初始条件确定。

T_2 为方程式 (1-17) 的特解, 这时 $T_2 = T_0$ 。因此微分方程式 (1-17) 的解可写成

$$T = T_1 + T_2 = Be^{-t/\tau} + T_0 \quad (1-20)$$

将初始条件 $t=0$ 时, $T=0$ 代入式 (1-20), 则可求得

$$B = -T_0$$

于是

$$T = T_0(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1-21)$$

与式 (1-21) 相应的曲线如图 1-9 所示。

由图 1-9 可见, 由于热电偶的热惯性, 它的输出值 T 不可能以无限大的速率突升至 T_0 , 而需要有一个上升过程, 即它的响应对于激励有一个时间滞后。但随时间的推移, T 将越来越接近于 T_0 。当 $t=\tau$ 时, $T=0.63T_0$ 。时间常数 τ 是由热电偶的几何参数和热特性确定 [见式 (1-12)], 它的大小直接影响到滞后时间, τ 越小表示热惯性小, 达到稳态值的时间越短; 反之, 时间就越长。所以, τ 值是决定响应函数的重要参数。为进行可靠的动态测量, 应使测量系统的时间常数尽可能小。

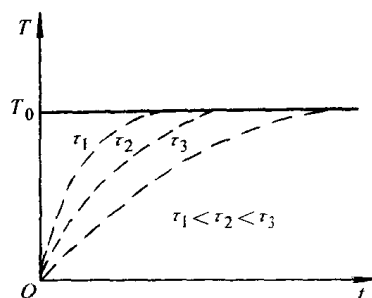


图 1-9 一阶仪器的阶跃响应

五、二阶仪器

1. 二阶仪器的频率响应

二阶仪器或传感器典型的实例为测振仪, 如图 1-10 所示 (具体结构见第十二章)。描述质量 m 的运动微分方程为

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = f(t) \quad (1-22)$$

式中, c 为阻尼系数, k 为弹性系数, $f(t)$ 为干扰力。

这是一个强迫阻尼振动微分方程。

将式 (1-22) 和式 (1-3) 比较可得

$$a_2 = m, a_1 = c, a_0 = k, b_0 = 1$$

式 (1-22) 中的 $f(t)$ 相当于 x , 则有

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = x \quad (1-23)$$

式 (1-23) 两边各除以 k 可得

$$\frac{m}{k} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{c}{k} \frac{dy}{dt} + y = \frac{x}{k}$$

当 x 为正弦输入信号时, 其频率响应函数为

$$H(i\omega) = \frac{Y(i\omega)}{X(i\omega)} = \frac{1/k}{\frac{m}{k}(i\omega)^2 + \frac{c}{k}(i\omega) + 1} \quad (1-24)$$

令 $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ 为二阶仪器的无阻尼振动固有频率; $\zeta = c/2\sqrt{km}$ 为阻尼比, 其中 $2\sqrt{km}$ 称为临界阻尼; $K=1/k$ 为柔性系数。于是式 (1-24) 可改写成

$$H(i\omega) = \frac{K}{\left(\frac{i\omega}{\omega_0}\right)^2 + \frac{2\zeta}{\omega_0}(i\omega) + 1} = \frac{K}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2\zeta i \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)} \quad (1-25)$$

这时对应于二阶系统的幅频特性和相频特性分别为

$$H(i\omega) = \frac{K}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta \frac{\omega}{\omega_0}\right]^2}} \quad (1-26)$$

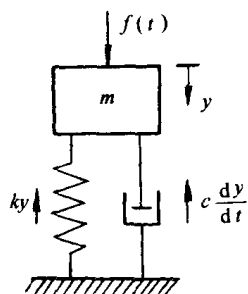


图 1-10 二阶仪器示例
(测振仪等效图)

$$\varphi = -\arctan \frac{2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2} \quad (1-27)$$

与上述两式相应的幅频特性和相频特性曲线见图 1-11。

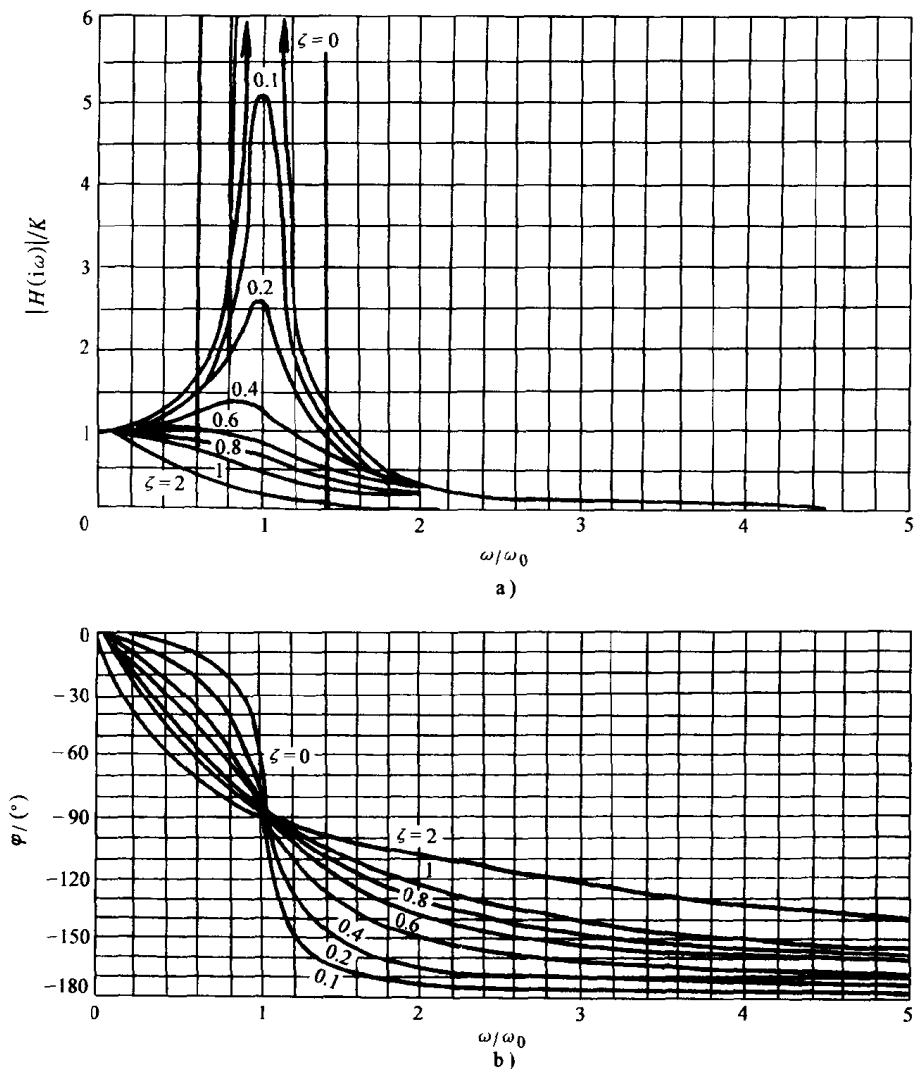


图 1-11 二阶系统的频率响应

由图 1-11 可见二阶仪器的频率响应有如下性质：

1) 幅频特性曲线的纵坐标实际上表示在不同测量条件下的振幅动态误差。由图可见，在不同阻尼比 ζ 时，输入和输出信号振幅比（即纵坐标值）也随之不同。在 $\zeta=0.6\sim 0.8$ 之间， $|H(i\omega)|/K$ 近似等于 1，所占有的 ω/ω_0 变化范围为最大，即表示在此范围内振幅动态误差最小。

2) 由相频特性曲线可看出，在任何 ζ 条件下，相位差 φ 都是以不同曲线从 0° 变到 180° ，而在 $\zeta=0.6\sim 0.8$ 之间，在对应于 $|H(i\omega)|/K$ 范围内， φ 与 ω/ω_0 呈近似于线性关系变化，因而相位误差也较小。

综上所述，对二阶测量系统，阻尼比取 $\zeta=0.6\sim 0.8$ （一般取 $\zeta=0.707$ ）时，可获得较小