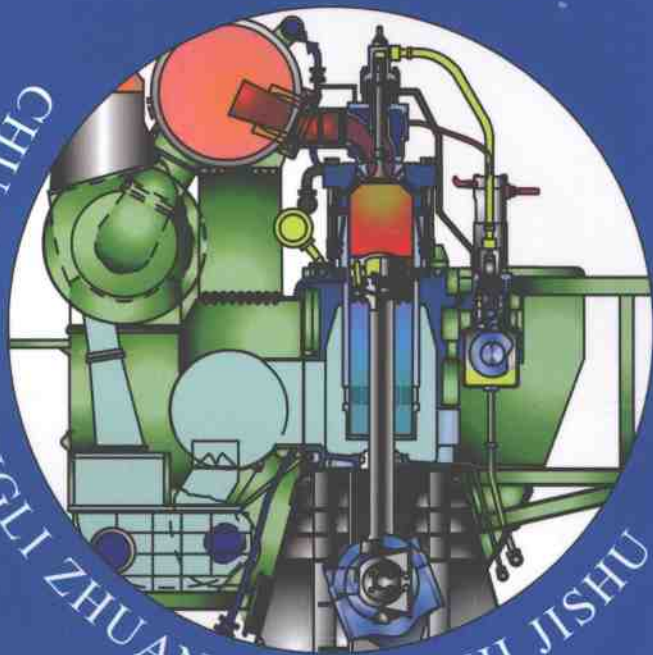


CHUANBO DONGLI ZHUANGZHI CESHI JISHU



段树林 邢 辉 武占华 编

船舶动力装置测试技术



大连海事大学出版社

船舶动力装置测试技术

段树林 邢 辉 武占华 编

大连海事大学出版社

© 段树林,邢辉,武占华 2009

图书在版编目(CIP)数据

船舶动力装置测试技术 / 段树林,邢辉,武占华编. —大连:大连海事大学出版社, 2009. 12

ISBN 978-7-5632-2383-1

I. ①船… II. ①段… ②邢… ③武… III. ①船舶—动力装置—测试技术—高等学校—教材 IV. ①U664.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 214712 号

大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌海路1号 邮政编码:116026 电话:0411-84728394 传真:0411-84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

大连华伟印刷有限公司印装 大连海事大学出版社发行

2009年12月第1版 2009年12月第1次印刷

幅面尺寸:185 mm × 260 mm 印张:8.75

字数:214千 印数:1~1500册

责任编辑:苏炳魁 版式设计:诚峰

封面设计:王艳 责任校对:王桂云

ISBN 978-7-5632-2383-1 定价:15.00元

前 言

随着科学技术的发展,测试技术已成为船舶动力装置科研、生产中不可缺少的手段,有关参数的测试方法、测试系统、测试结果的误差分析和数据处理已成为一个专门的学科,其地位和作用日显突出。

船舶动力装置测试技术是轮机工程专业的主要专业课之一。通过本课程的学习,使学生掌握船舶动力装置测试的基本原理和方法,掌握测试数据的处理方法和测量误差的分析方法,为今后在工作中解决工程实际问题打下良好的基础。

本书共分7章。第1章介绍了测试系统的基本组成、测试结果的误差分析和数据处理;第2章至第7章分别介绍了船舶动力装置中经常遇到的温度、压力、流量、液位、功率与转速、排气成分、烟度等参量的基本概念、检测方法、检测仪表原理及应用。

本书由大连海事大学段树林、邢辉、武占华编写。

由于本书涉及面较广,编者的学识、水平有限,故书中的错误在所难免,恳请使用本教材的师生及工程技术人员批评指正。

编 者
2009年9月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 测量概述	(1)
第二节 测量误差与测量精度	(5)
第三节 测量仪器的主要性能指标	(8)
第四节 测量数据的表示方法	(9)
思考题	(12)
第二章 温度检测	(13)
第一节 概述	(13)
第二节 膨胀式温度计	(15)
第三节 电阻式温度计	(18)
第四节 热电偶温度计	(23)
第五节 接触式测温技术	(36)
第六节 非接触式温度测量	(40)
思考题	(40)
第三章 压力检测	(42)
第一节 压力测量的基本知识	(42)
第二节 液柱式测压仪表	(43)
第三节 弹性测压仪表	(44)
第四节 电参量式测压仪表	(48)
第五节 气缸压力的测量	(56)
第六节 测压仪表的标定、安装和使用	(66)
思考题	(68)
第四章 流量检测	(69)
第一节 概述	(69)
第二节 容积式流量计	(73)
第三节 涡轮流量计	(80)
第四节 浮子流量计	(87)
第五节 差压式流量计	(92)
第六节 柴油机燃油消耗量的测定	(96)
思考题	(100)
第五章 液位检测	(101)
第一节 直读式液位计	(101)
第二节 浮力式液位计	(104)
第三节 压力式液位计	(106)

第四节	电参量式液位计	(109)
第五节	雷达式液位计	(112)
思考题	(114)
第六章	转速、功率和扭矩检测	(115)
第一节	转速测量	(115)
第二节	功率测量	(117)
第三节	扭矩测量	(120)
思考题	(122)
第七章	排气成分及烟度的检测	(123)
第一节	氧化锆氧测量仪	(123)
第二节	红外气体分析仪	(125)
第三节	氢火焰离子分析仪	(126)
第四节	化学发光分析仪	(127)
第五节	烟度测量	(128)
思考题	(131)
参考文献	(132)

第一章 绪 论

第一节 测量概述

一、测量的意义

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。在这一过程中,人们借助于专门工具,通过测量和对测量数据的分析计算,求得被测量的值,获得对于客观事物的定量的概念和内在规律的认识。因此,测量就是为取得未知参数值而做的全部工作,包括测量的误差分析和数据处理等。

在自然科学与工程技术领域内,众多的发现与发明往往是以测量技术的发展为基础的,新工艺、新设备的产生也依赖于测试技术的发展水平。许多试验需要用新的测量手段来进行,而新测量手段的应用又为自然科学与工程技术提出了新的研究方向,从而促进了双方的发展。只有通过可靠的测量,然后正确地判断测量结果的意义,才有可能进一步解决自然科学与工程技术发展过程中出现的问题。总之,自然科学与工程技术的进步推动了测量技术的发展,同时,测量技术的发展又推动了自然科学与工程技术的前进。

测量技术对自然科学、工程技术的重要作用越来越为人们所重视,它已逐步形成了一门完整的、独立的学科。这门学科的主要研究内容包括测量原理、测量方法、测量系统和测量数据处理等四方面。本书将在讨论有关测量问题的基本原理的基础上,重点讨论涉及轮机工程和船舶动力装置的测试技术。

船舶动力装置测试技术的应用主要在以下两个方面:

(1) 过程监测——对过程参数的监测。为了船舶安全、经济地航行,必须对船舶动力装置运行过程中的各种参数,如柴油机排气温度、冷却水温度、润滑油压力、柴油机转速、气缸压力等进行间歇或连续的测量。

(2) 过程控制——在自动控制系统中,测量环节是控制量输出的依据,例如,为了确保重质燃油良好的雾化和燃烧,必须控制燃油以规定的黏度(通常 12 ~ 25 cSt)喷入柴油机的燃烧室。因此需要首先测量燃油单元中流过黏度控制器内燃油的黏度,从而控制加热燃油的蒸汽流量,确保供给到柴油机喷射系统的燃油在预设的温度(一般为 100 ~ 150℃)。

在实践中,往往需要知道某个物理量在某一时刻数值的大小,因而必须对它进行检测,我们将所需检测的物理量称为被测参数或被测量。在轮机工程和船舶动力装置的测量中,经常涉及到的被测参数主要有温度、压力、流量、液位、转速、扭矩、位移、振动、排气成分等。

下面以图 1-1 所示的船舶主动力装置及其燃油系统为例,来说明测试技术在船舶动力装置中的应用。首先燃油从港口加油船驳运到燃油舱中储存,轮机主管人员需要知道确切的加油数量及船上存油数量,因此需要对燃油舱液位进行测量,然后根据船舶舱容表计算加油和存油吨数。同样在船舶航行中,需要每天测量燃油舱液位来计算当天及该航次的燃油消耗量及存量。对燃油舱液位的测量通常都有两套方案,即液位传感器遥测并自动远传和人工使用量

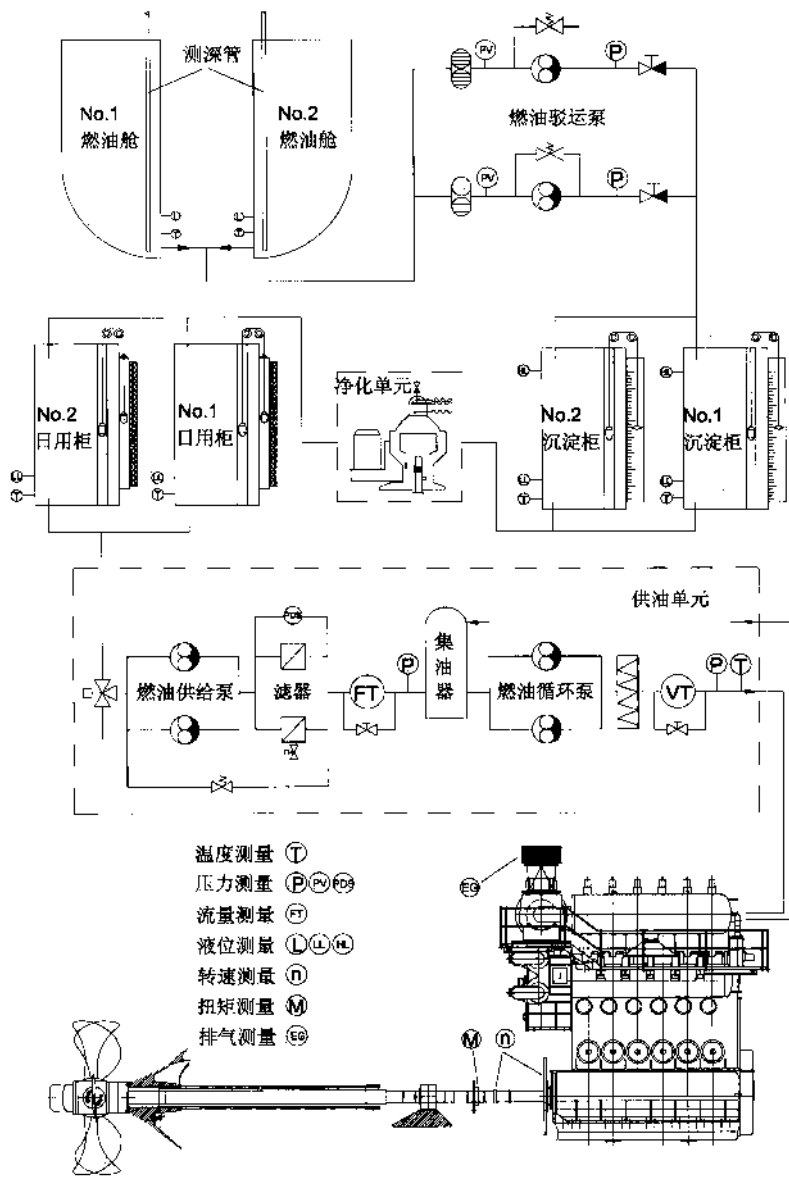


图 1-1 船舶主动力装置及其燃油系统示意图

油卷尺手动测量。沉淀柜和日用柜中有现场浮子式液位指示和液位传感器远传到机舱集控室集中显示,同时还设有高、低位报警和控制。当沉淀柜液位低时控制燃油驳运泵自动起动驳油,驳至高位时泵自动切断,出现异常情况时通过高、低位传感器报警。为了保持劣质燃油的流动性,燃油舱中布置了蒸汽或热油加温盘管,将燃油加热到 30 ~ 40℃,相应的有温度现场指示和远传到机舱集控室集中显示。在以后的燃油沉淀柜、离心净化单元、日用柜、供油单元等也都需要有燃油温度的监测、显示和调节,为主管人员将燃油逐级加热到预设的温度提供参考。在各泵的进、出口都设有现场压力真空表、压力表、压力传感器和差压开关,进行现场压力显示和集控室集中显示。一般两台泵都设在自动备用位置,当运转中的泵出现故障,出口管路

压力或进出口管路差压降低,备用泵自动起动投入工作。供油单元中在供给泵和集油器之间设有流量计,一般可指示瞬时流量和累积流量。另外,在主动动力装置输出轴上有扭矩测量装置,以及2~3个转速传感器,最终在集控室主机操纵台上进行转速和功率显示。

被测参数在整个测量过程中的数值大小不随时间变化的量,称为静态参数,例如:环境大气压力、柴油机稳定工况下的转速以及排气温度等。当然,严格地讲,这些参数的数值并非绝对恒定不变,只是在测量的时间间隔内变化甚微而已。

被测参数测量过程中的数值大小随时间变化的量,称为动态参数,例如:过渡工况下柴油机的转速、缸内压力、机械设备振动加速度等。这些参数随时间变化的函数可以是周期函数,也可以是随机函数。

二、测量方法

按照测量结果产生的方式进行分类,通常把测量方法分为直接测量法、间接测量法、组合测量法。

1. 直接测量法

直接测量是指被测量的数值可直接从测试设备上获取,而不需对所获取的数值进行运算的测量。例如:用水银温度计测量温度,用万用表测量电压、电流、电阻,用弹簧管压力表测量容器内介质的压力、用玻璃管水位计测量水箱液位等均属于直接测量法。

直接测量法的优点是测量过程简单、迅速,是工程技术中应用最为广泛的测试方法,也是间接测量法和组合测量法的基础,因此它是一种最基本的测量方法。

2. 间接测量法

间接测量是指不直接测量被测量数值,而是对与被测量数值有某种确定函数关系的其他变量进行直接测量,然后将所测得的数值代入函数关系表达式进行计算,从而求得被测量数值的方法。例如:测量柴油机(或透平机械)输出轴的有效功率 P 时,可以通过直接测量输出轴的扭矩 $M(N \cdot m)$ 和转速 $n(r/min)$,再通过函数关系式

$$P = \frac{M \cdot n}{9550} (\text{kW}) \quad (1-1)$$

即可求出输出轴的有效功率 P 。

间接测量相对烦琐,一般在采用直接测量法不方便、误差较大或缺乏直接测量所需仪器时才采用。

3. 组合测量法

测量中,各个未知量以不同的组合形式出现(或改变测量条件以获得这种不同的组合),根据直接测量和间接测量所得到的数据,通过解联立方程而求出未知量的数值,这类测量方法称为组合测量法。在组合测量中,未知量与已知量存在已知的函数关系。例如:用铂电阻温度计测量介质温度时,其电阻值 R 与温度 t 的关系是

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

为了确定常数 a, b ,首先需要测得铂电阻在不同温度下的电阻值 R_t ,然后再建立联立方程求解,得到 a, b 的数值。

组合测量法的测量过程比较烦琐,费时较多,一般在实验室和其他一些特殊场合应用。

三、测量系统

为了测得某一被测物理量的值,在测量中总要使用若干个测量设备,并把它们按一定的方

式组合起来。例如,为准确地测量水的流量,常用标准孔板获得与流量有关的差压信号,然后将差压信号输入差压流量变送器,经过转换、运算,变成电信号,再通过连接导线将电信号传送到显示仪表,显示出被测流量值。为实现一定的测量目的而将测量设备进行的组合称为测量系统。任何一次有意义的测量,都必须由测量系统来实现。由于测量原理不同,测量精度要求不同,测量系统的构成会有很大的差别。

现代测量技术的一个显著特点是采用电测法,即电测非电量。采用电测法,首先要将被测物理量转换成电量,然后进行必要的调节、转换及运算,最后以适当的形式输出。这一转换过程决定了测试系统的组成。

一个完整的测量系统由以下几个基本环节组成:传感器、信号变换与调理元件、显示元件、传送元件,如图 1-2 所示。

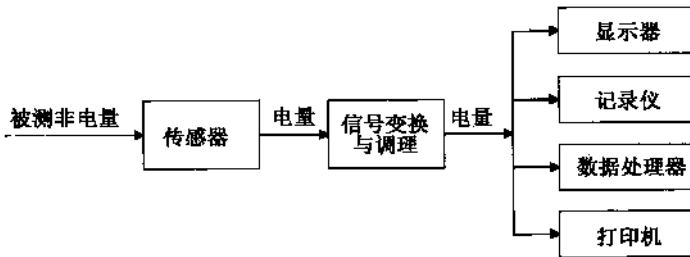


图 1-2 测量系统的组成

1. 传感器

传感器是测量系统直接与被测对象发生联系的部分,是测量系统中采集信息的首要环节,所以有时称传感器为测量系统的一次仪表,其余部分为二次仪表或三次仪表。传感器的作用是将被测非电量转换成便于放大、记录的电量。

传感器能否精确、快速地产生与被测量相应的信号,对测量系统的测量质量有着决定性的影响。因此,理想的传感器应该满足如下几方面的要求:

(1)传感器的输入与输出之间应该有稳定的单值函数关系。

(2)传感器应只对被测量的变化敏感,而对其他一切可能的输入信号(包括噪声信号)不敏感。

(3)在测量过程中,传感器应不干扰或尽量少干扰被测介质的状态。

2. 信号变换与调理元件

信号变换与调理元件是对传感器所输出的信号作进一步的加工和处理,包括对信号的转换放大、滤波、存储以及一些专门的信号处理。这是因为从传感器出来的信号除了有用信号之外,往往还夹杂各种有害的干扰和噪声,因此,对信号作进一步处理之前必须将干扰和噪声除掉。对信号的后处理通常采取电的方式,因此必须把传感器输出信号进一步转换为适于电路处理的电信号,包括信号的放大。经过上述处理,可将传感器输出的信号变换成显示元件易于接收的信号。

对于信号变换与调理元件,不仅要求它的性能稳定、精确度高,而且应使信息损失最小。

3. 显示元件

显示元件是测量系统直接与观测者发生联系的部分,其作用是把信号变换与调理元件输出的信号不失真地显示出来。显示元件可以对被测量进行指示、记录,有时还带有调节功能,

以控制生产过程。

显示元件主要有 3 种基本形式：

(1) 模拟式显示元件。最常见的结构是以指示器与标尺的相对位置来连续指示被测参数的值。记录时,以曲线形式给出数据,如自动平衡记录仪、X - Y 记录仪、电子示波器、波形记录仪等。模拟式显示元件结构简单、价格低廉,但容易产生视差。

(2) 数字式显示元件。直接以数字形式给出被测参数的值,不会产生视差。但直观形象性差,且有量化误差。记录时,可以打印输出数据。

(3) 屏幕显示元件。既可按模拟方式给出指示器与标尺的相对位置、参数变化的曲线,也可直接以数字形式给出被测参数的值,或者二者同时显示,是目前最先进的显示方式。屏幕显示具有形象性和显示大量数据的优点,便于比较判断。

4. 传送元件

如果测量系统各环节是分离的,那么就需要把信号从一个环节送到另一个环节。实现这种功能的元件称为传送元件,其作用是建立各测量环节输入、输出信号之间的联系。

传送元件可以比较简单,但有时也可能相当复杂。导线、导管、光导纤维、无线电通信,都可以作为传送元件的一种形式。

传送元件一般较为简单,容易被忽视。实际上,由于传送元件选择不当或安排不周,往往会造成信息能量损失、信号波形失真、引入干扰,致使测量精度下降。例如,压力测量时,如果导压管过细过长,容易使信号传递受阻,产生传输迟延,影响动态压力测量精度;导线的阻抗失配,将导致电压、电流信号的畸变。

应该指出,上述测量系统组成及各组成部分的功能描述并不是唯一的。尤其是传感器件、变换元件的名称与定义目前还没有完全统一。即使是同一元件,在不同场合下也可能使用不同的名称。

第二节 测量误差与测量精度

一、误差的产生

测量过程中测量误差的存在是不可避免的,任何测定值都只能近似地反映被测量的真值。这首先是因为测量过程中无数随机因素的影响,使得即使在同一条件下对同一对象进行重复测量也不会得到完全相同的测定值。其次,被测量总是要对敏感元件施加能量才能使测量系统给出测定值,这就意味着测定值并不能完全准确地反映被测参数的真值。因此,无论所采用的测量方法多么完善,测量仪表多么精确,测量者多么精心,测量误差还是必然会存在。在科学研究中或在工程实践中,只有当测量结果的误差已经知道,或者测量误差的可能范围已经指出时,测量结果才是有意义的。

测量技术的水平、测量工作的价值全在于其精确度,也就是在于其误差的大小。因此,研究测量技术离不开对测量误差的研究。

产生误差的主要因素有：

(1) 设备误差——测量过程中采用的量具及测试仪器本身性能不完善所产生的测量误差。

(2) 方法误差——测量方法或计算方法不完善所产生的测量误差。

(3) 人为误差——测量人员本身因素所带来的测量误差。

(4) 环境误差——测量环境的条件不满足要求或发生变化,使测量设备或被测量发生应有的变化而产生的误差。如温度、湿度、振动、光照、电磁场等。

二、误差的分类

根据测量误差的性质不同,一般可将测量误差分为三类,即随机误差、系统误差和粗大误差。

1. 随机误差

在相同条件下对同一被测量进行多次测量,由于受到大量的、微小的随机因素影响,测量误差的大小和符号没有一定规律,且无法估计,这类误差称为随机误差。

随机误差的产生取决于测量过程中一系列随机因素的影响。所谓随机因素是指测量者无法严格控制的因素,例如,仪表内部存在有摩擦和间隙等不规则变化,测量过程中外界环境条件的无规则变化,测量时不定的读数误差等。随机误差的存在是不可避免的,而且在同一条件下重复进行的各次测量中,随机误差或大或小,或正或负,各有其特点而不雷同。因此,随机误差就个体而言是无规律的,不能通过实验的方法来消除。但是在等精度条件下,只要测量次数足够多,那么从总体来看,随机误差服从一定的统计规律,可以从理论上估计随机误差对测量结果的影响。

2. 系统误差

对同一被测量进行多次测量,误差的大小和符号或者保持恒定,或者按一定的规律变化,这类误差称为系统误差。前者称为恒值系统误差,后者称为变值系统误差。在变值系统误差中,又可按误差变化规律的不同分为累进系统误差、周期性系统误差和按复杂规律变化的系统误差。例如,仪表指针零点偏移将产生恒值系统误差;电位差计滑线电阻的磨损将导致累进性的系统误差;而测量现场电磁场的干扰,往往会引入周期性的系统误差。

系统误差就个体而言是有规律的,其产生的原因往往是可知的或者是能够掌握的。因此,系统误差的处理多属测量技术上的问题,可以通过实验的方法加以消除,也可以通过引入修正值的方法加以修正。修正值的数值与系统误差的数值相等,但符号相反。

3. 粗大误差

明显地歪曲了测量结果的误差称为粗大误差,也称疏失误差。粗大误差大多数是由于测量者粗心大意造成的,例如,测量时操作不当、读数错误、记录或运算错误、测量过程中外界条件突然改变(如机械冲击、电源瞬时波动等)引起仪器显示值的改变等。

粗大误差就其数值而言往往大大地超过同样测量条件下的系统误差和随机误差,它严重地歪曲了测量结果,使得测量结果完全不可信赖。因此,粗大误差一经发现,必须从测量数据中剔除。

必须指出,系统误差与随机误差既有区别又有联系,二者之间并无绝对的界限,在一定的条件下可以相互转化。对某一具体误差,在某一条件下为系统误差,而在另一条件下可为随机误差;反之亦然。过去视为随机误差的测量误差,随着对误差认识水平的提高,有可能分离出来作为系统误差处理;而有一些变化规律复杂、难以消除或没有必要花费很大代价消除的系统误差,也常当作随机误差处理。

三、真值与测量值

某一时刻某一物理量客观存在的量值称为真值,用 A_0 表示。通过测量仪器对该物理量检

测得到的结果称为测量值,用 A_x 表示。

严格地讲,客观存在的物质时刻都在变化之中,而且由于测量中总是存在误差,实际上真值 A_0 是难以测量到的。因此,在实际应用中一般就把相对高一级的仪器测量到的值 A 近似地看作真值,也称相对真值。例如,国家各级标准计量站所提供的标准质量在某种程度上就可以作为真值看待。

四、测量误差的表示

1. 绝对误差

测定值与被测量的真值之差,称为测量的绝对误差,或简称测量误差,记作

$$\delta = A_x - A_0 \quad (1-3)$$

式中, A_x ——测量值; A_0 ——被测量的真值。

从式中可见,绝对误差 δ 或大或小、或正或负。在实际应用中,由于 A_0 一般是未知的,通常用高一级的仪器的指示值 A 来代替真值。这样,绝对误差又可以写成

$$\delta = A_x - A \quad (1-4)$$

2. 相对误差

除了绝对误差外,我们经常用到相对误差 γ 的概念。相对误差是绝对误差与真值之比的百分数,记作

$$\gamma = (\delta/A_0) \times 100\%$$

与绝对误差中的问题一样,相对误差的表达式在实际应用中可写作

$$\gamma = (\delta/A) \times 100\% \quad (1-5)$$

相对误差为无量纲数,常以百分数(%)表示。对于相同的被测量,用绝对误差可以评定其测量精度的高低。但对于不同的被测量,则应采用相对误差来评定。

3. 引用误差

对于同一仪表,测量不同大小的被测量,其绝对误差变化不大,但相对误差却有很大变化。测量值越小,相对误差越大。因此,通常的相对误差不能反映仪表的准确性能,一般用引用误差来表示仪表的准确性能。

引用误差就是绝对误差与仪表量限 A_m (满刻度值)的百分比,记作

$$\gamma = (\delta/A_m) \times 100\% \quad (1-6)$$

引用误差实际上就是仪表最大读数时的相对误差。

通常以某仪表最大引用误差 γ_{\max} 来确定仪表的精确度等级。当 δ 取最大值 δ_{\max} 时,引用误差亦为该仪表的最大引用误差。仪表最大引用误差的表达式

$$\gamma_{\max} = (\delta_{\max}/A_m) \times 100\% \quad (1-7)$$

最大引用误差为仪器仪表划分精确度等级提供了方便,很多仪器仪表就是按最大引用误差值划分精确度等级的。例如,仪表精确度为 K 级,则表示该仪表引用误差不会超过 γ_{\max} 。通常工程用仪器为 0.5~4 级,实验室用仪器为 0.2~0.5 级。仪器的精度等级一般都标志在仪器明显的位置上,同时在仪器相应的使用说明书中列出。

【例】 用精度 1.5 级,量限为 20 MPa 的压力表甲和精度 0.4 级,量限为 100 MPa 的压力表乙分别测量某压力,读数皆为 10 MPa,试比较两次测量结果的准确性。

【解】 甲表的最大绝对误差:

$$\delta_{\text{甲}} = \pm \gamma_{\max} \cdot A_{\text{甲}} = \pm 1.5\% \times 20 = \pm 0.3 \text{ MPa}$$

甲表测量的最大相对误差:

$$\gamma_{\max\text{甲}} = (\delta_{m\text{甲}}/A) \times 100\% = (\pm 0.3/10) \times 100\% = 3\%$$

乙表的最大绝对误差:

$$\delta_{m\text{乙}} = \pm \gamma_{\max} \cdot A_{m\text{乙}} = \pm 0.4\% \times 100 = \pm 0.4 \text{ MPa}$$

乙表测量的最大相对误差:

$$\gamma_{\max\text{乙}} = (\delta_{m\text{乙}}/A) \times 100\% = (\pm 0.4/10) \times 100\% = 4\%$$

可以看出,乙仪表的精度虽然高,但测量结果的误差反而大,这是因为仪表的精度一定时,量程越大的仪表最大绝对误差越大。因此,在选择仪表时,应根据被测量的大小,兼顾仪表的精度等级和量程,不可片面地追求高精度仪表。通常要求仪表工作在其满量程的2/3区域。

第三节 测量仪器的主要性能指标

测量仪器的性能质量很大程度上决定着测量结果的可靠程度。此处仅就测量仪器的静态指标作简要介绍。

一、测量范围

测量系统所能测量的最小输入量(下限)至最大输入量(上限)之间的范围称为测量范围。测量上限与下限的代数差的绝对值称为仪器的量程。例如:某温度计的测量范围是 $-200^{\circ}\text{C} \sim +800^{\circ}\text{C}$,则说明其测量下限值为 -200°C ,上限值为 $+800^{\circ}\text{C}$,量程为 1000°C 。

二、灵敏度

灵敏度是测量系统在静态条件下输出量的变化 Δy 与对应输入量的变化 Δx 之比,即

$$S = \Delta y / \Delta x \quad (1-8)$$

对于线性系统,输出量与输入量的关系是一条直线,灵敏度就是该直线的斜率,为一常数。对于非线性系统,灵敏度随输入量的变化而变化。

灵敏度是一个有因次的量,在讨论测量系统灵敏度时,必须明确说明其因次。例如,用压力传感器测量压力时,其输入量的单位是压力单位(MPa),输出量的单位是电压单位(mV),则压力传感器的灵敏度单位是 mV/MPa 。

三、分辨率

分辨率是指测量仪器能测量到最小输入量变化的能力,即能引起输出量发生变化的最小输入变化量,用 ΔX 表示。由于测量系统或测量仪器在全量程范围内,各测量区间的 ΔX 不完全相同,因此,常用全量程范围内最大的 ΔX ,即 ΔX_{\max} 与测量系统满量程输出值 Y_{\max} 之比的百分数表示其分辨能力,称为分辨率,用 F 表示,即

$$F = (\Delta X_{\max}/Y_{\max}) \times 100\% \quad (1-9)$$

四、线性度

理想测量系统的输入—输出特性应该是线性的,而实际情况往往并非如此,如图1-3所示。测量系统的线性度是衡量测量系统实际特性曲线与理想特性曲线之间符合程度的指标,用全量程范围内测量系统的实际特性曲线与理想特性曲线之间的最大偏差 ΔL_{\max} 与满量程输出值 Y_{\max} 之比来表示。线性度也称为非线性误差,用 ξ_L 表示,即

$$\xi_L = (\Delta L_{\max}/Y_{\max}) \times 100\% \quad (1-10)$$

显然, ξ_L 越小,系统的线性度越好。实际测量中,经常会遇到非线性较为严重的情况,此

时,可采取限制测量范围、采用非线性拟合等技术措施提高系统的线性度。

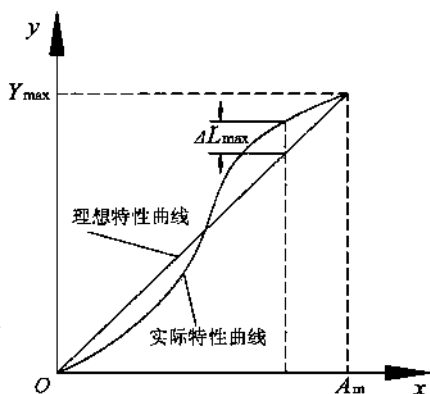


图 1-3 线性度(非线性误差)

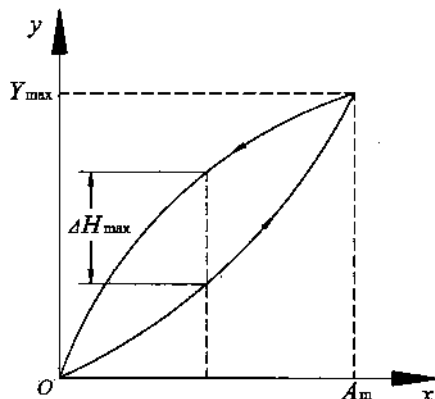


图 1-4 迟滞误差五、仪器的迟滞

五、仪器的迟滞

测量系统的输入量从量程下限增至量程上限的测量过程称为正行程,输入量从量程上限减至量程下限的测量过程称为反行程。理想测量系统的输入—输出关系应该是单值的,但实际测量中对于同一输入量,其正行程和反行程的输出量往往不相等,这种现象称为迟滞,也称为回差。正反行程造成的输出量之间的差值称为迟滞差值。图 1-4 表示了这种迟滞现象及迟滞差值。

$$\xi_H = (\Delta H_{\max} / Y_{\max}) \times 100\% \quad (1-11)$$

六、零漂

零漂表示传感器在零输入的状态下,输出值的漂移。一般分为时间零漂(时漂)和温度漂移(温漂)。

1. 时间零漂(时漂)

时间零漂一般是指在规定的时间内,在室温不变的条件下零输出的变化。对于有源的传感器,则是指在标准的电源条件下,零输出的变化情况。

2. 温度漂移(温漂)

绝大部分传感器在温度变化时特性会有所变化。一般用零点温漂和灵敏度温漂来表示这种变化的程度,即温度每变化 1°C ,零点输出(或灵敏度)的变化值。可以用变化值本身,或者用变化值与满量程输出之比来表示。

第四节 测量数据的表示方法

一、有效数字的处理

1. 有效数字的概念

有效数字与误差是两个不同的概念,但两者之间有着密切的联系。有效数字是针对测量精度提出的,其目的是使计算精度与测量精度一致。计算精度高于或低于测量精度都是不恰当的。

测量数据结果的表达,通常只允许最后一位是估计数字(也称为可疑数字),其他各位均

应是可靠的,这样的一组数字称为有效数字。例如,用刻度为 1°C 的水银温度计测量温度,其读数为 45.3°C ,这时,前两位数字“45”是可靠的,因为有刻度标志;末位数“3”是估计的,因而是可疑的、近似的,它可能是“2”或“3”。如果读作 45.32°C 就不符合实际情况了。因此,测量数据的有效数字是针对测量精度提出的,为了使计算精度与测量精度一致,计算(或测量读数)结果的位数应与测量所能达到的准确度相一致,计算的精度不应超过测量的精度。

在测量仪器的精度一定的情况下,随意把一个数值小数点后的位数增多,或者把测量值的估计位数增多,就认为能提高其测量精度的做法是错误的。

有效数字的位数与小数点的位置无关,小数点的位置取决于所用单位。例如,观测值为 27.6 kg ,若以吨为单位则为 0.0276 t ,若以克为单位则为 $27.6 \times 10^3\text{ g}$,有效数字均为3位。

有效数字的位数是这样确定的:从左向右,第一个不为0的数字是第一位有效数字,直到最末一位均为有效数字。例如, 30.04°C ,有效数字为4位; 0.00680 m ,有效数字为3位,表示这个数的误差为 0.00001 m 。

在进行数字修约时,应注意只能进行一次修约,而不能逐次修约。例如,将数据 1.327465 取到小数点后3位,则应为 1.327 。如果逐次修约,则 $1.327465 \rightarrow 1.32747 \rightarrow 1.3275 \rightarrow 1.328$,其最终结果是错误的。

2. 有效数字的舍入规则

由于计算或其他原因,所确定的有效数字位数比原有位数少,则应将多余的尾数舍弃。设有效数字位数为 n ,则 $n+1$ 位及以后的数字一律舍弃。为了使舍入误差尽量小,采用以下法则:

(1)第 $n+1$ 位数字小于5时,舍弃后,第 n 位数字不变。

(2)第 $n+1$ 位数字等于5,且以后各位不全为0,或第 $n+1$ 位数字大于5时,舍弃后,第 n 位数字加1。

(3)第 $n+1$ 位数字等于5,且以后各位均为0时,舍弃后,若第 n 位为偶数则不变,第 n 位为奇数则加1。

3. 有效数字的运算规则

对于精密度不同的数据进行运算时,必须遵循一定的法则。

(1)在加、减运算时,应将各数据小数点以后的位数取齐,以各数据小数点以后位数最少的位数为准。例如:

$$478.2 + 3.462 = 481.662 = 481.7$$

$$49.27 - 3.4 = 45.87 = 45.9$$

(2)在乘、除运算时,所得的积或商的有效数字位数应与其中有效数字位数最少的那个测量值的位数一致。例如:

$$843.5 \times 23.9 = 20159.65 = 2.02 \times 10^4$$

$$2569.4 \div 19.5 = 131.7641\cdots = 132$$

(3)在乘方或开方运算时,运算结果的有效数字位数应与底数或被开方数的有效数字位数相同。

(4)如果运算次数较多,为避免累积误差,在运算过程中可多保留一位数字。

(5)如果计算一测量列的平均值时,其测量值的个数在4个或4个以上,则平均值的有效数字位数可增加1位。

二、测量数据的表示方法

测量数据应采用人们易于接受的方式表述出来,常用的表述方法有表格法、图示法和解析法三种。对这些表述方法的基本要求是:能确切地将被测量的变化规律反映出来并便于分析和应用。对一组测量数据应根据需要选用适当的表达方法,有时采用一种方法,有时需要多种方法并用。

1. 表格法

表格法是把被测量的数据精选、定值,按一定的规律归纳整理后列于一个或几个表格中。该方法简单、有效,数据具体,形式紧凑,便于对比。一个完整的测量数据表格应包括表的序号、名称、项目、测量数据、函数推算值等,有时还应加一些说明。

列表时应注意以下几个问题:

(1)数据的写法要整齐规范,数值为“0”时不可遗漏,数据空缺时应记为“-”。

(2)表达力求统一、简明,同一竖行的数值小数点应上下对齐。数值过大或过小时,应以 10^n 表示。

(3)根据测量精度的要求,表中的所有数据的有效数字位数应取舍适当。

2. 图示法

图示法是把相关联的测量数据按照自变量和因变量的关系在适当的坐标系中绘制成曲线(曲面),用以表示被测量的变化规律和相关变量之间的关系。该方法的最大优点是在未知变量之间解析关系的情况下,易于看出数据的变化规律和数据中的极值点、转折点、周期性和变化率等。

图示法绘制曲线时应注意以下几个问题:

(1)合理布图。通常采用直角坐标系,一般从0开始,也可用稍低于最小值的某一整数为起点,用稍高于最大值的某一整数为终点,使所作的图形占据坐标系的大部分。

(2)正确选择坐标分度。坐标分度的粗细应与测量数据的精度相适应,即坐标的最小分度不应超过数据的实测精度。分度过粗将影响曲线的读数精度;相反,分度过细则曲线不能明显表现甚至会严重歪曲测量结果的规律性。

(3)灵活采用特殊的坐标形式。根据自变量与因变量的关系,有时为了使图形尽量成为一直线或要求更清楚地显示曲线的某一区段的特性,可采用非均匀分度或将变量加以变换,例如,燃油的黏—温曲线、主机选型曲线等。

(4)正确绘制曲线。当测量数据的数量过少且变量的对应关系不确定时,可将各点用直线连接成折线,当测量数据的数量足够多且变化规律明显时,可用光滑曲线表示。曲线不应有间断点,应光滑匀整,尽可能多地与测量点接近,但不必强求通过所有的测量点,曲线两侧的测量点分布尽量相等。

(5)标注要规范。坐标应标注单位。

3. 解析法

通过测试获得的一系列数据不仅可用图示法表示出函数之间的关系,而且可用于图形相对应的数学公式来描述函数之间的关系,从而进一步用数学分析的方法来研究这些变量之间的相互关系。这种数学公式被称为经验公式,又称为回归方程。建立回归方程的方法为回归分析。根据变量的个数以及变量之间的关系不同,所建立的回归方程也不同,有一元线性回归方程、一元非线性回归方程(曲线拟合)、多元线性回归和多元非线性回归等。