

罗次申 主编

dongli jixie

动力机械测试技术

ceshi jishu

上海交通大学出版社

708

T1205
L/X

上海交通大学“九五”重点教材

动力机械测试技术

罗次申 主编



A0957172

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书是原中国船舶工业总公司全国高等院校船舶动力专业“九五”重点建设教材。全书共分 11 章:第 1 章测量技术概述;第 2 章测量误差分析;第 3 章测量系统基本特性;第 4 章传感器技术;第 5 章计算机测试技术与系统;第 6 章温度测量;第 7 章压力与速度测量;第 8 章流量测量;第 9 章转速与扭矩测量;第 10 章动力机械烟度测量和废气分析;第 11 章湿度测量。

本书主要作为高等院校动力机械工程专业教学用书,亦可作为从事相关工作的研究生及工程技术人员参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

动力机械测试技术/罗次申主编. —上海:上海交通大学出版社, 2001
ISBN 7-313-02653-6

I. 动… II. 罗… III. 动力机械—测试技术
IV. TK05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 11223 号

动力机械测试技术

罗次申 主编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

常熟市印刷二厂印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:18.5 字数:454 千字

2001 年 6 月第 1 版 2001 年 6 月第 1 次印刷

印数:1~1550

ISBN 7-313-02653-6/TK·066 定价:30.00 元

版权所有 侵权必究

出版说明

根据国务院发(1978)23号文件批转试行的《关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定》,我们开展了全国高等学校船舶类专业规划教材编审、出版的组织工作。

为了做好教材编审组织工作,中国船舶工业总公司相应地成立了“船舶与海洋工程”、“船舶动力”、“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“流体传动与控制”、“水中兵器”七个教材委员会,聘请了有关院校的教授、专家50余人参加编审指导工作。船舶类专业教材委员会是有关船舶类专业教材建设研究、指导、规划和评审方面的专家组织,主要任务是协助政府机关做好高等学校船舶类专业教材的编审工作,对提高教材质量起审查把关作用。

经过前四轮教材建设,共出版教材300余种,建立了较完善的规章制度,扩大了出版渠道,在教材的编审依据、计划体制、出版体制等方面实行了卓有成效的改革,这些改革措施为“九五”期间船舶类专业教材建设奠定了良好基础。根据原国家教委对“九五”期间高校教材建设的要求:“抓好重点教材,全面提高质量,继续增加品种,整体优化配套,深化管理体制和运行机制的改革,加强组织领导”,船舶总公司于1996年组织制定了“全国高等学校船舶类专业教材(九五)选题规划”。列入规划的选题共129种,其中部委级重点选题49种,一般选题80种。

“九五”教材规划是在我国发展社会主义市场经济条件下第一个教材规划,为适应社会主义市场经济外部环境,“九五”船舶类专业教材建设实行指导性计划体制。即在指导性教材计划指导下,教材编审出版由主编学校负责组织实施,教材委员会进行质量审查,船舶工业教材编审室组织协调。

“九五”期间要突出抓好重点教材,全面提高教材质量,为此教材建设引入竞争机制,通过教材委员会评审、择优确定主编,实行主编负责制。教材质量审查实行主审、复审制,聘请主编校以外的专家审稿,最后教材委员会复审。全国高校船舶类专业规划教材,就是通过严密的编审程序和高标准、严要求的审稿工作来保证教材质量。

为完成“九五”教材规划,主编学校应充分发挥主导作用。规划教材的立项是由学校申报,立项后由主编校组织实施,教材出版后由学校组织选用,学校是教材编写与教材选用的行为主体,教材计划的执行主要取决于主编校工作情况。希望有关高校切实负起责任,各有关方面积极配合,为完成“九五”船舶类专业教材规划、为编写出版更多的精品教材而努力。

由于水平和经验局限,教材的编审出版工作和教材本身还会有很多缺点和不足,希望各有关高校、同行专家和广大读者提出宝贵意见,以便改进提高。

船舶工业教材编审室

1999 年 3 月

前 言

本教材是根据原中国船舶工业总公司船舶动力教材委员会 1996 年 4 月确定的船舶动力“九五”教材选题,并经 1996 年 8 月哈尔滨会议评审立项后组织编写的,后又按船舶动力教材委员会 1997 年 4 月广州会议重新审定的《动力机械测试技术》教学基本要求,对本教材内容作了一定的补充和修改。

当前科学技术的迅速发展,培养学生掌握一定的实验测试知识与技能是十分重要的,而且这已成为不可缺少的教学环节。尤其现今计算机技术、传感器技术、激光技术、红外技术、信息处理技术等的应用,为测试技术注入了大量新的内容,提供了更多、更先进的方法与途径。为此本教材在编写时既注意保持了基础性的、应用广泛的一些动力机械测试技术的理论和知识,又力求反映国内外测量技术的新发展与新成就。

教材中某些章节提供了一些附表,便于读者查用,也可供实际测量应用时参考。为了帮助读者学习,书中各章后均附有一些习题与思考题。

本教材是由上海交通大学动力与能源工程学院多学科组成的“热工测试技术课”课程组教师,在多年科研和教学实践基础上合作编写的。全书共 11 章,其中第 1、8、9 章由刘国庆编写;第 2、10、11 章由周校平编写;第 3、6 章由罗次申编写;第 4、5 章由陈峻编写;第 7 章由黄德中编写。全书由罗次申整理并统稿。武汉交通科技大学张敬国副教授对书稿进行全面审阅,提出了很好的建议和意见,对此深表谢意。

本书在编写过程中,参考了不少兄弟院校主编的教材,亦得到校内外许多同行们的支持和帮助,在此一并致谢。

限于编者的水平,错误及不妥之处恳请读者批评指正。

编 者

2001 年 4 月于上海交通大学

目 录

第 1 章 测量技术概述	1
1.1 测量的意义、测量方法.....	1
1.2 测量系统组成	3
1.3 典型的智能化测量系统	4
1.4 测量误差与测量精度	6
1.5 测量数据与误差的表达	9
习题与思考题	10
第 2 章 测量误差分析	11
2.1 随机误差的分布规律.....	11
2.2 直接测量的误差分析与处理.....	16
2.3 粗大误差.....	24
2.4 系统误差.....	27
2.5 间接测量误差分析处理.....	29
2.6 最小二乘法.....	35
2.7 误差的综合.....	39
习题与思考题	41
第 3 章 测量系统基本特性	46
3.1 测量系统静态特性.....	46
3.2 测量系统动态特性.....	51
3.3 测量系统的校准.....	61
习题与思考题	66
第 4 章 传感器技术	67
4.1 传感器基本形式及原理.....	67
4.2 信号转换与传输.....	77
4.3 信号处理.....	84
4.4 测量电路噪声与抑制.....	86
习题与思考题	90
第 5 章 计算机测试技术与系统	92
5.1 智能传感器.....	92

5.2	自动数据采集系统	96
5.3	计算机辅助测试系统	102
5.4	虚拟仪器及系统	107
	习题与思考题	115
第6章	温度测量	116
6.1	温度测量基本概念	116
6.2	热电偶测温	121
6.3	热电阻测温	132
6.4	接触式测温技术与误差分析	139
6.5	辐射式测温法	152
	习题与思考题	170
第7章	压力与流速测量	172
7.1	气流压力的测量	173
7.2	压力指示仪	178
7.3	多点压力测量系统	183
7.4	气流速度测量	188
7.5	热线测速技术	194
7.6	激光测速技术	199
	习题与思考题	209
第8章	流量测量	210
8.1	流速法测流量	210
8.2	压差法测流量	213
8.3	涡轮流量计	221
8.4	电磁流量计	224
8.5	流量计的校准和标定	226
	习题与思考题	228
第9章	转速和扭矩的测量	230
9.1	频率计数法测量转速	230
9.2	模拟式转速表	236
9.3	比较法测转速	238
9.4	平衡力法扭矩测量	238
9.5	传递法测扭矩	247
	习题与思考题	251

第 10 章 动力机械烟度测量和废气分析	253
10.1 发动机排气污染物的测量.....	253
10.2 内燃机排放法规.....	259
10.3 排气污染物测试试验数据处理.....	264
习题与思考题.....	267
第 11 章 湿度测量	268
11.1 湿度的衡量标准.....	268
11.2 干湿球温度法湿度测量.....	270
11.3 氯化锂电湿度计.....	273
11.4 毛发湿度计.....	276
11.5 计算举例.....	277
习题与思考题.....	278
参考文献.....	284

第 1 章 测量技术概述

测量技术是一门探求事物之间量、质关系的科学,它与其他学科有着广泛而密切的联系。

要正确地对物理量进行测量,首先必须要有正确的测量方法,根据不同的应用场合,测量方法可以有直接测量和间接测量、稳态测量和动态测量等不同的分类;其次是根据测量的复杂程度合理组成测量系统。因此测量系统也就有简单测量系统和复杂测量系统。在测量系统中,计算机技术应用越来越广泛,从而为提高测量精度提供了必要条件。任何测量都不可避免地含有误差,测量误差是对测量结果误差量值和精度的表达形式。误差理论是测量技术的核心,它能够分析和判断测量结果的可靠性和有效性。而数据处理则是运用数学的方法对大量测量数据加以整理,分析和研究,从而得出反映事物之间联系的规律。

1.1 测量的意义、测量方法

1.1.1 测量的意义

在自然界中,对任何不同的研究对象,都要从数量方面对它进行研究,都要通过测量代表其特性的物理量来实现。例如要了解某发动机的性能就必须准确地测量其转速、扭矩、温度、压力等。因此无论在科学实验还是在生产过程中都离不开测量技术,否则会给工作带来巨大的盲目性,只有通过可靠的测量,然后用误差理论正确判断测量结果的可靠性和有效性,才能进一步解决工程技术上提出的问题。由此可见测试技术水平的高低,将直接影响科技的发展。只有测量技术的发展,才能有助于科学技术的发展;科学技术的发展又推动测量技术的发展。周而复始,使当今的测量技术和科技水平都达到一个崭新的阶段。

所谓“量”即是表征物质(或物体)和现象的一种既可定性又可定量确定的属性,如质量、密度、温度、压力、电阻等均属于“量”,因此“量”即是含有量纲的数值。测量单位就是人们约定选取的固定同类量,它有明确的定义和名称,并令其数值为 1。由于单位是一个约定,所以长期以来同一种量在不同的国家存在着不同的量,为了解决这个问题,目前世界上建立了统一的单位制——国际单位制。测量是一个变换、选择、放大、比较、运算、显示诸功能的综合作用,又是一个对比、示差、平衡、读数的比较过程。

1.1.2 测量方法分类

测量方法是实现被测量与单位(亦称标准量)比较的方法。测量方法有不同的分类。

1. 按照获得测量结果的方法不同分类

可以分成直接测量和间接测量两大类。这种分类法有利于研究测量误差。

1) 直接测量

将被测量直接与测量单位进行比较,或用预先标定好的测量仪器进行测量,从而直接求得

被测量数值的方法,称直接测量法。例如液柱温度计测量温度、压力表测量压力、转速表测发动机转速等均属于直接测量。直接测量法又可分为直读法和比较法两种:

(1) 直读法 直接从测量表上读得结果,如从压力表、温度表上直接读得压力值和温度值。

(2) 比较法 这种测量方法不是直接从测量仪表上读得测量结果,而是与某一已知量或标准量具进行比较,因此测量手续比较麻烦,但是测量仪表本身的误差以及其他某些误差往往在测量过程中被抵销,故测量精度一般比直读法高。比较法又分以下三种方法:零示法、差值法和替代法。零示法使被测量对仪表的影响被同类的已知量的影响相抵销,则被测量等于已知量,如天平秤测定物质的质量,用电位差计测热电势等。差值法是从仪表上直接读出两量之差值即为所求之量,如用 U 型液柱式压差计测量介质的压差。替代法是用已知量代替被测量,使两者对仪表的影响相等,则被测量等于已知量,如用光学高温计测量温度。

2) 间接测量

在工程上许多测量参数往往是不能用直接测量法得到的,如内燃机有效功率 P 。

$$P = \frac{Mn}{9550}, \quad (1.1)$$

式中: P 为内燃机有效功率(kW); M 为内燃机输出扭矩($N \cdot m$); n 为内燃机输出转速(r/min)。必须用直接测量的方法分别测量出扭矩 M 和转速 n ,然后通过公式计算得到有效功率 P 。

这种通过直接测量与被测量有确定函数关系的各变量,然后将所测得的数值代入函数关系式进行计算,从而求得测量值的方法,称间接测量法。

2. 按照测量状态及条件分类

这种分类方法便于了解在各种测量条件、状态下测量方法的特点。

(1) 按等精度和非等精度分类 在试验中,按测量条件是否改变,可以分成等精度测量和非等精度测量。在完全相同条件(测量者、仪器、测量方法、环境等)下进行一系列重复测量称为等精度测量。反之,在多次测量中测量条件不尽相同,则称测量为非等精度测量。

(2) 按动态和稳态分类 如果被测物理量的值不随时间变化或随时间变化极其缓慢,则称这些量为稳态参数。例如环境温度、大气温度、大气压力和湿度、动力机械在稳定工况时的转速、扭矩等也均可看作稳态参数,相应的测量称稳态测量。

若在测量过程中被测量随时间变化明显,则这种被测量称为动态测量。例如,在极短时间内变化剧烈的燃气温度和压力、内燃机在过渡工况时的转速和扭矩等都是动态参数。动态参数与时间的关系,可以是周期性函数、非周期函数或随机函数。

相对于稳态测量,动态参数测量更为困难。这不仅在于动态参数本身的变化可能是复杂的,而且对测量系统的要求更高,不仅要考虑测量系统的静态特性,还要关注该测量系统的动态响应要求。同时测量数据的处理在某些方面与稳态测量有不同的原理和方法。

(3) 按测量点不同分类 在工程测量中,对某些参数只要测量一个点即可表示整个平面或空间的物理状态。如柴油机排气温度只要测量一个点即可,这种测量称点参数测量。有些量是以空间或平面不均匀分布,例如内燃机在运行过程中的每一个瞬间,其燃烧室内各点温度是不均匀分布的;又如气流在弯管内流动时,通道截面上各点的速度分布是不均匀的,必须进

行多点测量,这种多点测量称场测量。

(4) 按接触和非接触被测物体分类 按测量器具接触和不接触被测量体,分为接触测量和非接触测量。如测量转速有接触式转速表和非接触式转速表之分;点温计是接触被测物体表面,测其表面温度的,而光学高温计是不接触被测物体测量温度的。

以上各种测量方法都有各自的特点,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,选择合适的测量方法和尽可能经济的测量系统,力求测量简便、迅速、不苛求于使用高精度的仪表。

1.2 测量系统组成

一般来说,为了测量某一被测量的值,根据测量的精度要求,将若干测量设备(包括测量仪表、装置、元件及辅助设备等)按照一定的方式连接起来,这种连接组合即构成了一种测量系统。测量系统都是为一定的测量目的与要求而设计的。因此,测量的目的和要求不同,所使用的仪表也会有悬殊的差别,它可以是一台简单的仪器,也可以是由许多设备组成复杂的测量系统。但是就其测量过程中测量系统各部分不同的作用看,一般测量系统都可由感受元件、转换和处理、显示和信号传输四个部分组成。

1.2.1 感受元件部分

感受元件(敏感元件)中包含着两个必不可少的功能,即拾取信息和把拾取到的信息进行变换。感受元件输出的信号一般是随被测信号变化的另一种物理变量如位移、压差、电压等。变换有两种方式,一种方式是非电信号的变换,如水银温度计的感受部分感受到被测介质温度的变化,并传出与之相应的水银柱位移信号;又如无源感受元件热敏电阻,它可以把温度变化转换成电阻变化,这是一种非电量的变换,这类感受元件输出的电阻变化信号再通过转换电路可以转换成电信号;另一种方式是感受元件把感受到的被测信号直接变换成电信号输出,如有源感受元件——热电偶就是将变化的温度值直接转换成相应的电势信号。

理想的感受元件应该具有变换速度快、抗干扰能力强、良好的线性变换,在允许的情况下尽量不干扰被测介质的状态。

1.2.2 转换和处理部分

这部分的作用是根据感受部分和显示部分的需要,将感受元件输出的信号转换成显示部分易于接收的信号。

对不同的测量系统,转换和处理一般有两种形式:一种是非电量的转换,如手持模拟式转速表中的飞块机构把转速信号转换成指针位移信号,供显示转速;另一种是电量的转换和处理,其原理如图 1-1 中所示。

从信号调理到输出接口都属于测量系统的电量转换和处理部分,这是非电量电测技术的核心部分,对于不同的测量系统这部分所包含的内容亦有所不同(可以是整个部分,也可以是其中一部分,如从信号调理直接到显示)。

从感受元件输出的信号很小,如电压一般是毫伏级,电阻一般是微欧级。这就需要放大、整形等变换处理,这些经处理后的信号一般是模拟信号,可以直接送到显示部分,也可以通过

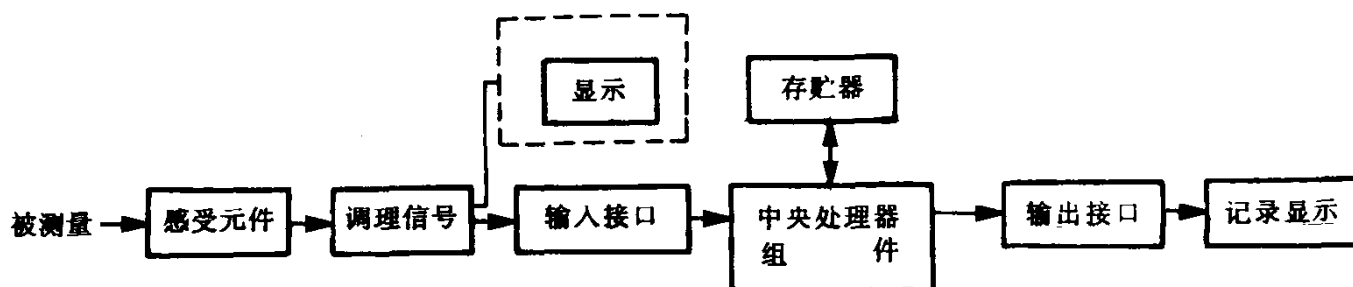


图 1-1 测量系统框图

A/D 转换器(输入接口)变换成数字量后,传输到计算机进行信息处理,当然也可以送到数字式仪表。

在这部分内容中,接口技术、计算机技术的应用,为测量技术的数字化、智能化提供了必要条件。

1.2.3 显示和记录部分

这部分的功能是把被测量的信息显示出来,显示可分模拟显示和数字显示。模拟显示器一般是指针式仪表、示波器等。数字显示器常用的是数字电压表、数字频率计等。而微机的 CRT 显示屏既能显示模拟信号,(如波形、图形等),也能显示数字信号和文字。

记录器用于记录测量过程中信号随时间变化的关系,特别是动态测试中难以观察的瞬变过程。常用的记录器有记录仪、光线示波器、磁带记录仪等。高瞬变过程可用记忆示波器、瞬态记录仪、高速数据采集仪等。另外打印机可打印数据,也可打印曲线。

1.2.4 信号传输部分

对于整个测量系统,需要把信号从感受部分传输到转换和处理部分,最后传输到显示部分。这之间的信号传输一般是以导线、导管、光导纤维、无线电通信等形式联结各个部分,从而成为一个完整的测量系统。

简单的测量系统其信号传输部分可以非常简单,只是一根导线或导管,如 U 型管压力计的信号传输只是橡皮管或塑料管。也可以非常复杂,如在图 1-1 所示的测量系统框图中的信号传输一般以模拟量和数字量两种形式进行。从感受部分到输入接口之间,以及输出接口到显示之间的部分信号都是以模拟信号形式传输。由于一般测量现场的条件较差,而且感受部分输出信号很微弱,因此如果信号传输部分选择不当或安排不当,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。如两导线并排传送信号将产生寄生电容,而采用双绞线则不会产生寄生电容。在输入接口到输出接口之间则以数字形式传输信号和进行数据处理,所以测量信号必须通过输入接口转换成数字量。在这之间通常以计算机内部总线形式进行信息的传输和处理。其输出常以串行或并行输出以适合各种外部设备。

由此可见,测量系统的信号传输过程是信息技术的综合应用,信号传输部分是测量系统的重要组成部分。

1.3 典型的智能化测量系统

随着计算机技术的迅速发展,使得测量系统的智能化成为主要的发展方向。这是因为智

能化测量系统无论是在测量的准确性、灵敏度、可靠性、自动化程度、运用功能以及解决测量技术问题的深度和广度等方向都优于一般常规仪器仪表。

智能化测量系统一般分为智能化仪器仪表和计算机辅助测量系统。

1.3.1 智能化仪器仪表测量系统

智能化仪器仪表一般是指内部装有单片机或微型计算机的仪器仪表。这类仪器仪表具有识别(判断)、记忆、分析计算和可编程等功能。如智能转速表,具有自动识别输入信号是每转 n 个信号,并经过计算自动输出正确的平均转速值。显然智能仪器仪表是计算机技术向测量技术移植的产物。

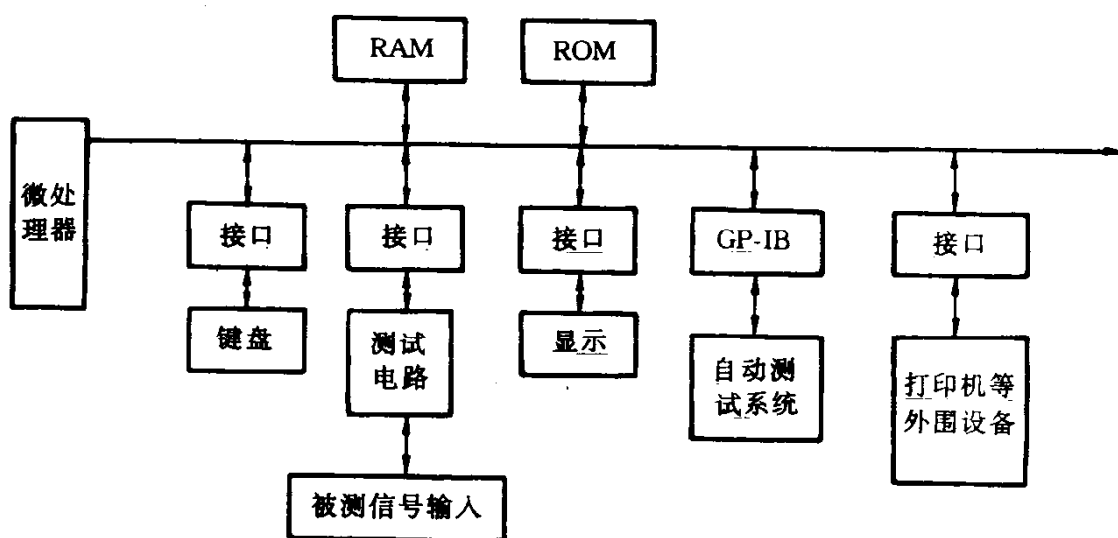


图 1-2 智能化仪器仪表框图

传统的仪器仪表与智能仪器仪表的区别在于前者的所有功能全是由硬件完成的,而后者是硬件和软件共同完成的。因此具有相当的灵活性,能自动修正各类误差、自动切换量程,并进行计算和处理信息。

智能化仪器仪表根据应用场合不同,形式有所不同,一般可分为专用型和通用型。如发动机燃烧分析仪是一种专用的发动机测试设备,数字式记忆示波器是一种通用测试设备。

从图 1-2 中可见智能化仪表是一个典型的计算机结构,所不同的是图中增加了专用测试电路,CPU 是根据固化在 ROM 中的程序运行,完成各种测试任务。全部功能的硬件装在仪表箱内组成测量系统。

智能化仪器仪表系统可简单可复杂,最简单系统如图 1-3 所示。

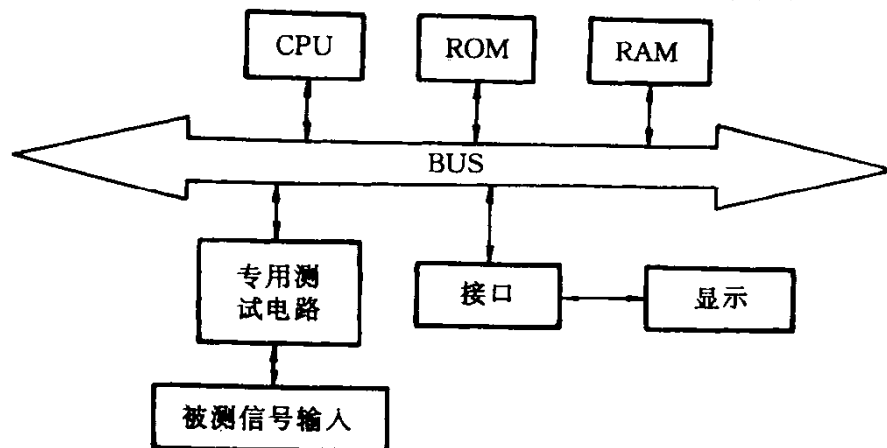


图 1-3 最简单智能仪器仪表框图

1.3.2 计算机辅助测试系统(CAT)

不论在动力机械测试中还是在其他测试领域,计算机辅助测试系统的应用是相当广泛的。图 1-4 是计算机辅助测试系统的常规模式。

CAT 测试系统包括被测对象,传感器、放大器、可编程仪表(智能仪表)、控制器(外部计算机)、GP-IB 接口以及软件等。

可编程仪表本身就是一个测试系统,可以进行数据采集、分析、运算、结果显示打印等功能。可编程仪表一般配有 GP-IB 接口、或串型、并型接口,与外部计算机组成 CAT 测试系统,由计算机控制可编程仪表的所有功能。

GP-IB 接口是 IEEE-488 标准国际通用接口,是一种总线结构,总线上的器件可以是控制器(计算机)、讲者(发信号)、听者(收信号)。总线只有一部控制器,通常总线上的控制器是计算机。总线上可以挂有多台仪表,它们可以讲,也可以听。使用者只要在计算机内插入 GP-IB 接口板并与配有 GP-IB 的可编程仪表,再配上软件即可使用。

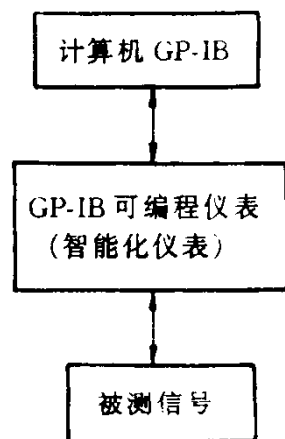


图 1-4 计算机辅助测试系统框图

1.4 测量误差与测量精度

1.4.1 测量误差存在的绝对性

如果测量过程是在理想的环境、条件下进行,即假设一切影响因素都不存在,测量将是十分正确的。但是这种理想的环境和条件在实际上是不存在的。无论是传感器、仪表、测量对象、测量方法等,都不同程度地受到各种因素的影响,当这些因素变化时,必然会影响到被测量示值的大小,使示值与被测量值之间产生差异,这个差异就是测量误差。

测量系统对被测物理量进行测量,最后从显示器上得到的数值称为测量值 x ,被测物理量所具有的客观存在的量值称为真值 x_0 ,任何方式下测得的值 x 都不可能是真正的被测量值——真值 x_0 ,只能是对 x_0 的近似。近似程度的大小,即是误差的大小。如测量发动机稳态转速,可以用精度差的转速表,误差就大,离真值就远。改用精度高的转速表,误差就小,离真值就近。但即使使用更高精度的转速表,误差还是存在,只是小些而已。所以测量结果都具有误差,误差自始至终存在于一切科学实验和测量过程中。

误差的大小与仪表的精度、测量过程的随机因素、测试方法等许多因素有关。随着科学技术水平的不断提高,误差有可能被控制得越来越小,人们的目标是获得尽可能接近于真值 x_0 的测量值 x ,或者应用误差理论分析产生误差的原因和性质,并采取必要的措施,使测量误差控制在可以被接受的合理范围之内。

1.4.2 误差的表达形式

误差一般有绝对误差和相对误差两种表达形式。

1) 绝对误差

$$\Delta x = x - x_0, \quad (1-2)$$

测量值 x 与真值 x_0 之差称为绝对误差 Δx 。它表示测量误差绝对量的大小。对于测量结果可以记作：

$$x \pm \Delta x. \quad (1-3)$$

2) 相对误差

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%, \quad (1-4)$$

绝对误差 Δx 与测量值 x 之比称为相对误差 δ ，用百分率表示。用相对误差表示的测量结果，记作：

$$(1 \pm \delta)x. \quad (1-5)$$

绝对误差只能表示出误差量值的大小，而不能表示出测量结果的精度。例如有两个温度测量值 $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$ 和 $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$ ，尽管它们的绝对误差均为 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，显然后者的测量精度明显高于前者，因为 $\delta_1 = 6.7\%$ ， $\delta_2 = 2\%$ 。

1.4.3 测量误差的分类

1. 按误差出现的规律分类

在测量过程中产生误差的因素是多种多样的，如果按照这些因素出现的规律以及它们对测量结果的影响程度来区分可以分为三大类误差。

1) 系统误差

在相同条件下对某一个量进行多次测量时，误差的绝对值和符号均保持恒定，或者按照一定的规律变化，这类测量误差称为系统误差。前者称恒值系统误差，后者称变值系统误差。这类误差是由某些固定的因素所造成的。如仪表的零位不准将产生恒值系统误差。而变值系统误差又可分为累进系统误差、周期性系统误差和按复杂规律变化的系统误差。如电子电位差计滑线电阻的磨损将产生累进系统误差，而测量现场的电磁场干扰会产生周期性的系统误差。

系统误差产生的原因通过仔细的检查、校验，可以被发现，采取相应的校正措施后，系统误差可以减小或者消除。

2) 随机误差

对同一个被测量进行多次测量时，由于受到某些不可知随机因素的影响，测量误差时大时小地变化没有一定规律，并且无法估计。这类误差称为随机误差。

随机误差的出现是无法控制的，所以在任何测量过程中，随机误差的存在是不可避免的。从测量数据的个体来说，随机误差的大小是无规律的，有其不可预测的随机性。但只要在等精度条件下进行测量，而且测量次数足够多，则从总体上来看，随机误差又有其一定的统计规律性。因此可以通过数理统计的方法从理论上估计随机误差对测量结果的影响。

3) 粗大误差

凡在测量过程中完全由于人为过失而明显造成了歪曲测量结果的误差称为粗大误差。如读错刻度值、记录错误、计算错误等。粗大误差的值大大超出同样测量条件下所测得的正确数值。一旦发现粗大误差，这类数据必须予以剔除，并通过主观努力克服这种错误。

2. 按测量误差产生的来源分类

1) 人为误差(也称为操作误差)

这是由于操作者分辨能力,反映速度的快慢,某些固有习惯以及操作熟练程度的不同等原因引起的误差。

2) 环境误差

环境误差是由于测量环境(如温度、气压、湿度、光线、电场、磁场等)不符合测量要求而产生的附加误差。

3) 方法误差(理论误差)

它是由于测量方法的不完善,或者由于测量所依据的理论不完善而形成的误差。

4) 动态误差

在动态测量时,由于测量系统中自振频率、阻尼的关系,存在响应快慢的问题。因此被测瞬态参数的输入与输出之间存在振幅和相位的误差。

5) 仪表误差(或称装置误差)

它是由于测量仪表或装置本身的误差所引起的,其值与仪表或装置的制造精度、结构、安装以及技术状况的优劣有关。

1.4.4 测量的正确度、精密度、准确度、不确定度

通常相对误差的值不能区分是系统误差或随机误差或两者共同引起的。因此引入正确度、精密度、准确度的概念,以说明测量误差来源于哪一类误差,并进一步表示测量结果与被测真值的逼近程度。

1) 正确度

在等精度测量条件下对同一被测量进行多次测量,测量值偏离真值 x_0 的程度称正确度。一般可由系统误差的大小来表征,系统误差大,意味着测量的正确度低,反之就高。

2) 精密度

在等精度测量条件下,对同一被测量进行多次测量,测量值重复一致的程度,或者说测量值分布的密集程度,称为测量的精密度,一般可由随机误差的大小来表征,随机误差越大,测量的精密度就越低,数据的弥散程度越大。

3) 准确度

准确度是随机误差和系统误差的综合反映,同样也是正确度和精密度的综合反映,表示测量结果与真值的一致程度。准确度高意味着正确度和精密度都好。

以上三者之间关系可举如图 1-5 打靶例子说明,靶心为真值 x_0 ,小黑点表示每次测定值,图 1-5 中(a)表示随机误差大、精密度低,系统误差小、正确度高;(b)表示随机误差小、精密度高,系统误差大、正确度低;(c)表示正确度和精密度都高则准确度高。

4) 不确定度

由于测量中含有误差,而误差的大小、方向未知,这种用测量值来代表被测量真值不能肯定的程度称不确定度。它是对被测量的真值,以多大的可能性处于由测量值所决定的某个量值范围之内的一个估计。不确定度小的测量结果表明准确度高。

不确定度按误差性质可分为系统不确定度和随机不确定度。