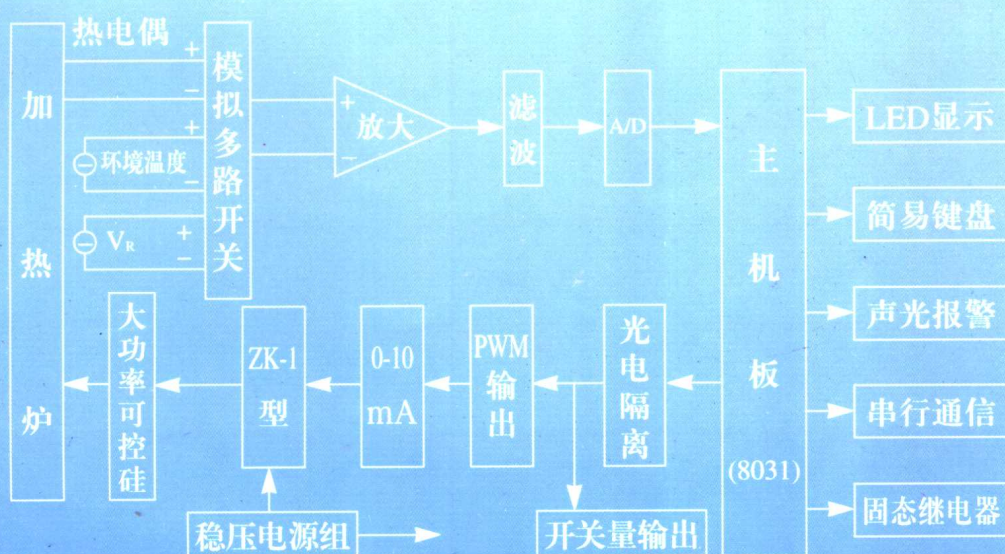


检测技术及系统设计

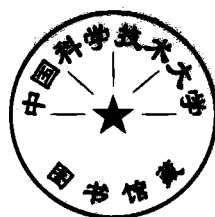
周杏鹏 王寿荣 况迎辉 编著



东南大学出版社

检测技术及系统设计

周杏鹏 王寿荣 况迎辉 编著



东南大学出版社

内 容 提 要

本书是在多年从事检测技术及系统设计的教学与科研基础上编著而成的。本书内容共分 12 章,包括几何量、运动量、力学量与压力、流量、物位、温度、湿度、化学成分及振动和噪声等的各种检测方法,传感(转换)原理以及现有各类参量检测系统(仪器)的特点和选用方法。对计量和标定的有关知识也作了必要的叙述。书中还以较大的篇幅介绍了以微机(包括单片机)为核心的自动检测系统的综合设计技术,并详尽提供了最近研制成功、具有很高性能价格比、工程实用的自动检测系统(仪器)的设计实例。内容全面、系统、实用、新颖、先进是本书的特点。

本书可作为高等院校仪器仪表类专业及自动控制类专业的教材或教学参考书;对有关工程技术人员及科研工作者,亦是一本有价值的参考书。

责任编辑:朱经邦

责任校对:孙 宁

检 测 技 术 及 系 统 设 计

周杏鹏 王寿荣 况迎辉 编著

*

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

江苏省新华书店经销 武进第二印刷厂印刷

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 17.75 字数 440 千

1996 年 9 月第 1 版 1998 年 12 月第 2 次印刷

印数:1201—3200 册

ISBN 7—81050—145—3/TP·20

定价:20.00 元

(凡因印装质量问题,可直接向承印厂调换)

前 言

随着科学技术的进步,工、农业生产的迅速发展,各行各业提出的检测任务与日俱增,对检测的要求也愈来愈高。检测技术涉及面非常广,即使是同一物理量,因各行各业的被测对象千差万别,所需的检测系统(仪器)也多种多样;其检测方法、传感原理、系统构成、精度、成本等都可能有很大的不同。随着我国大力实施由粗放型经济向集约型经济过渡,各行各业对检测技术必将提出更多、更高的要求。而大规模集成电路和单片机、微型计算机的大量普及应用,为我们设计各种高性能价格比的自动检测系统提供了良好的基础。

本书是根据1992年10月在南京召开的全国检测技术及仪器专业指导委员会确定和批准的大纲为基础进行编著的。全书由三大部分组成:第一部分为绪论和检测技术基础知识。第二部分以电测法为主、兼顾光学和其他一些目前仍沿用的方法,分别介绍了几何量、运动量、力学量、振动和噪声、压力、流量、物位、温度和湿度及化学成分量的各种检测方法,转换原理及现有检测系统(仪器)的特点、选用方法等,同时对量值传递和计量、标定的有关知识作了扼要的介绍。第三部分为自动检测系统(仪器)的综合设计技术与两个新颖、实用、性能价格比高的微机化检测系统(仪器)的设计实例。同时,还详尽探讨了如何综合运用有关知识进行工程上实用的(特别是关于在线的)自动检测系统的设计原则、方法、技巧及调试技术。

本书由周杏鹏、王寿荣、况迎辉编著。其中,绪论和第1、9、11、12章及4.1、4.2节由周杏鹏编著,第2、3、5章及4.3节由王寿荣编著,第6、7、8、10章及4.4节由况迎辉编著。南京航空航天大学博士生导师陶宝琪教授审阅了本书。在本书编著过程中,得到了东南大学仪器科学与工程系金振华副教授(4.4节实例)、丁杰副教授(12.1节)、浙江省丝绸研究院金晓云高级工程师(12.2节)的大力帮助,他们无偿提供了有关资料;此外,本书还参考了许多有关的教材、书籍、期刊、产品样本、技术手册,对有关作者在此一并表示感谢。

由于我们水平有限,不当和错误之处在所难免,恳请广大读者批评、指正。

编著者于东南大学

1995年12月

目 录

0 绪论	(1)
0.1 检测技术的地位与作用	(1)
0.2 检测系统的组成	(2)
0.3 检测系统的分类	(4)
0.4 检测技术的发展趋势	(6)
1 检测系统的特性及主要性能指标	(8)
1.1 检测系统误差分析基础	(8)
1.2 检测系统的静态特性及其主要性能指标	(12)
1.3 检测系统的动态特性及其主要性能指标	(14)
2 几何量测量	(19)
2.1 概述	(19)
2.2 几何量测量系统	(23)
2.3 长度测量	(30)
2.4 角度测量	(38)
2.5 工程参量的测量	(41)
3 运动量测量	(50)
3.1 运动量测量系统	(50)
3.2 位移测量	(50)
3.3 速度测量	(62)
3.4 加速度测量	(70)
4 力学量检测	(79)
4.1 概述	(79)
4.2 力的检测	(79)
4.3 电子秤称重	(85)
4.4 转矩的检测	(91)
5 振动和噪声测量	(100)
5.1 振动和振动测量系统	(100)
5.2 振动测量与分析	(111)
5.3 噪声的量度和分类	(117)
5.4 噪声测量	(120)
5.5 振动和噪声信号的频谱分析	(126)
5.6 振动和噪声测量仪器的校准	(128)

6 压力检测	(132)
6.1 概述	(132)
6.2 压力的检测方法	(133)
6.3 真空度的检测方法	(139)
7 流量检测	(141)
7.1 概述	(141)
7.2 单相流量的检测方法	(142)
7.3 两相流量的检测	(156)
8 物位检测	(160)
8.1 概述	(160)
8.2 液位检测方法	(160)
8.3 料位检测方法	(176)
8.4 相界面的检测	(180)
9 温度测量	(182)
9.1 温标与标定	(182)
9.2 温度的基本测量方法	(185)
9.3 数字式温度计	(189)
9.4 辐射法测温	(192)
10 其它量检测	(204)
10.1 湿度检测	(204)
10.2 化学成分检测	(218)
11 自动检测系统的综合设计技术与方法	(230)
11.1 微机化检测系统的特点及一般组成	(230)
11.2 总体方案的制定	(231)
11.3 微机化检测系统设计原则与步骤	(233)
11.4 微机化检测系统的硬件设计方法	(236)
11.5 微机化检测系统的软件设计方法	(239)
11.6 检测系统的抗干扰技术	(241)
11.7 检测系统的可靠性设计	(248)
12 微机化检测系统设计实例与系统调试技术	(250)
12.1 设计实例之一——智能型温度测控仪设计	(250)
12.2 设计实例之二——智能动态线径测量系统设计	(260)
12.3 微机化检测系统的调试技术	(266)
习题与思考题	(270)
参考文献	(274)

0 绪论

0.1 检测技术的地位与作用

检测是指在工农业生产、科学研究、国防建设及医疗卫生等各个领域为及时获得生产过程、被测、被控对象的有关信息而实时或非实时地对一些参量进行定性检查和定量测量。因此,检测是意义更为广泛的测量。

对工业生产而言,采用各种先进的检测手段对生产全过程进行检查、测量,对确保安全生产,保证产品质量,提高产品合格率,降低能源和原材料消耗,提高企业的劳动生产率和经济效益是必不可少的。这里所说的检测手段就是各种检测仪器及检测系统。中国有句古话:“工欲善其事,必先利其器”,用这句话来说明检测技术在我国四化建设中的重要性是非常恰当的,今天我们所进行的“事”就是四化建设大业,而“器”则是先进的检测手段。工农业生产的发展和科学技术的进步,促进了检测技术的发展,而先进的检测手段又将加速生产的发展,促进科技和国防建设的进步,提高人民的生活水平。

“检测”是测量,“计量”也是测量,两者有什么区别?一般说来,“计量”是指用精度等级更高的标准量具、器具或标准仪器,对被测样品、样机进行考核性质的测量;这种测量,通常具有非实时及离线和标定的性质,一般在规定的具有良好环境条件的计量室、实验室中进行。而“检测”通常是指在生产、实验的现场,利用某种合适的检测仪器或系统对被测对象进行在线、实时的测量。

在工业生产中,为了保证生产过程能正常、高效、经济的运行,必须对生产过程的某些工艺参数(如温度、压力、流量等)进行检测与控制。例如化肥厂生产合成氨,需要严格控制合成塔中心的化学反应速度,而要控制反应速度,就要严格控制影响反应速度的主要因素——温度与压力,这就需要在在线、实时、高精度地检测与控制这两个参量。为保证设备完好及安全生产,需对动力设备、电气设备进行安全监测。例如对汽轮机的轴向位移和径向振动的监测,对压力容器和蒸汽锅炉在运行中的泄漏、裂纹及腐蚀程度的检测等都需要高性能的检测仪器及装置。

国防建设中,对检测的需求更多,要求更高:研制任何一种新武器,从设计零部件到样机试验,都要经过许多严格的检测。至于在导弹、卫星的研制和控制过程中,需检测的动态参量就更多,要求也更高。没有精确、可靠的检测手段,要使导弹准确命中目标和卫星准确入轨是根本不可能的。

至于农业生产所需的气象预报,温室的温度控制,水、土成分分析,水利工程等都需进行许多有关的检测。

随着生活水平的提高,检测技术与人们日常生活愈来愈密切,起居室中的温度、湿度、

防火、防盗及家用电器的测试;用先进的医疗仪器进行疾病的检查与诊断等等,这些都不难看出检测技术在现代社会中的地位与作用。

0.2 检测系统的组成

尽管检测仪器、检测系统的种类、型号繁多,用途、性能千差万别,但它们都是被用作参量检测,以获取有关参量的信息的,所以其组成单元通常以信号传递的流程来区分。一般可分为:信号的摄取——传感器(变送器);信号的调理——信号放大、滤波、A/D、D/A转换及其它转换电路等;信号的显示——模拟(指针式)显示、数字显示、屏幕显示,打印机、记录仪、绘图仪、声光信号输出等。

以上环节加上系统所需的交、直流稳压电源和必要的输入设备(如开关、按钮、拨盘、键盘等)便组成了一个完整的检测系统,其各部分关系如图 0.1 所示。

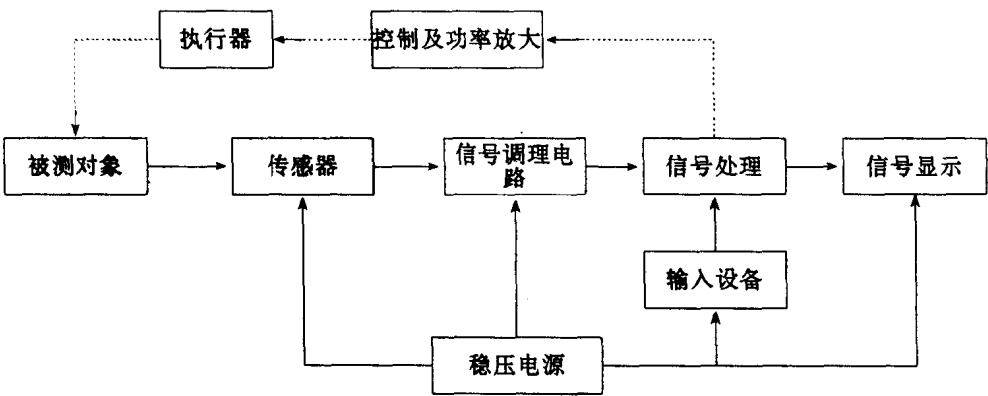


图0.1 完整检测系统组成框图

1) 传感器

是检测系统与被测对象直接发生联系的部分。它的作用是感受被测参量的变化,直接从对象中获取反映被测量变化的信息,并转换成相应的便于显示或传递的输出信号。例如,半导体应变片式传感器能把被测对象受力后微小的变形感受出来,通过一定的桥路转换成相应的电压信号输出。这样,通过测量传感器输出电压便可知道被测对象的受力情况。传感器的输出是检测系统的信号源,它的好坏直接影响检测系统的精度和其它指标,是检测系统中十分重要的环节,通常对传感器有如下要求:

- (1)准确性 传感器的输出信号必须准确地反应其输入量,即被测量变化。因此,传感器的输出与输入关系必须是严格的单值函数关系,最好是线性关系。
 - (2)稳定性 传感器的输入、输出的单值函数关系不随时间和温度而变化,受外界其他因素的干扰影响亦很小,重复性好。
 - (3)灵敏度 即要求较小的输入量便可得到较大的输出信号。
 - (4)其他 如经济性、耐腐蚀性、低能耗等。
- 传感器往往也被称为敏感元件、一次元件等。

2) 信号调理

它在检测系统中的作用是对传感器输出的微弱信号进行滤波、放大、线性化、传递和转换,以便于显示或供进一步处理。例如,工程上常见的热电偶型温度检测仪表其传感器输出信号(即热电偶电势)仅为毫伏级,且夹杂着 50Hz 等噪声电压,故后续信号调理电路通常包括滤波、放大、冷端补偿、线性化等环节。若是数字显示仪表,还应加上 A/D 转换环节,把模拟电压转换成数字信号;需要远传的话,通常采取 D/A 或 V/I 电路把获得的电压信号转换成标准的 4~20mA 或 0~10mA 信号后再进行远距离传送。检测系统种类繁多,复杂程度差异很大,信号的形式也多种多样,各系统的精度、性能指标要求各不相同,它们所配置的信号调理电路的多寡也不尽一致。

对信号调理电路的一般要求是:

(1)能准确、稳定、可靠地传输、放大和转换信号。

(2)抗干扰性能要好。

3) 信号显示

通常人们都希望知道被测量的瞬时值、累积值或其随时间的变化情况,因此,一般的检测系统均有各种形式的显示器或记录设备或两者兼而有之。显示器和记录设备是检测系统与人联系的主要环节之一,显示器一般可分为指示式、数字式和屏幕式三种。

(1)指示式显示,又称模拟式显示:被测量数值大小由指示器或指针在标尺上的相对位置来表示。有形的指针位移用于模拟无形的被测量是较方便、直观的。指示式仪表结构简单、价格低廉、显示直观,一直被大量应用;有的还带记录机构,以曲线形式给出被测量随时间变化的数据。但这种仪表读数的精度和仪器的灵敏度等受标尺最小分度的限制,且读数会引入主观误差。

(2)数字式显示:直接以数字形式给出被测量数值的大小,也可附加打印设备,打印出数据。数字式显示减少了读数的主观误差,提高了读数的精度,还能方便地与计算机连接,这种仪表正越来越多地被采用。

(3)屏幕显示:实际上是一种类似电视显示方法。它由计算机控制,具有形象性和易于读数的优点,又能同时在一屏幕上显示一个被测量或多个被测量的(大量数据式)变化曲线,有利于对它们进行比较、分析。

4) 信号记录

检测系统常用的记录设备有:

(1)打印机 打印机型号众多、体积和性能差异很大,通常根据需要选用定型的(作为产品批量生产)打印机,作为检测系统的外部设备配合工作。

(2)磁带记录 用盒式录音机或磁带机作检测系统的外部记录设备,经转换的信息进入录音机或磁带机,存贮在磁带上。

(3)各种形式的绘图仪 有的需要模拟信号驱动,有的只能接受数字信号,有的模拟和数字信号可任选,选用时要仔细阅读说明书。

5) 信号处理

检测仪表、检测系统种类繁多,用户对仪表和系统的要求也各不相同,对检测信号的信号处理环节来说,只要能满足用户对信号处理的要求,则是愈简单愈可靠、成本愈低愈好。对一些简单的检测系统(仪表)用户只要求被测量不要超过某一上限值,一旦越限,送出声(喇叭或蜂鸣器)、光(指示灯)信号即可。这种系统的信号处理电路,只需设置一个比

较电路,比较电路一端为被测信号,另一端为表示上限值的固定电平;当被测信号小于设定的固定电平值,比较器输出为低,声、光、报警器不动作,一旦被测信号电平大于固定电平,比较器翻转,经功率放大驱动扬声器、指示灯工作。这种简单系统的信号处理就很简单,只要一片集成比较器芯片和几个分立元件就可构成。但对于像热处理炉的炉温检测、控制系统来说,其信号处理电路将大大复杂化。因为热处理炉炉温测控系统,用户不仅要求系统高精度地实时测量炉温,而且需要系统根据热处理工件的热处理工艺制订的时间—温度曲线进行实时控制(调节)。像这一类检测系统,其信号处理任务均需要有以单片机、微处理器为核心的处理功能板(模块)支持。

由于微处理器、单片机和大规模集成电路技术的迅速发展和这类芯片价格不断降低,对稍复杂一点的检测系统(仪器)都应采用微处理器或单片机,从而使所设计的检测系统具有较高的性能价格比。

6) 输入设备

输入设备是操作人员和检测系统联系的另一主要环节,用于输入参数、下达有关命令等。最常用的输入设备是各种键盘、拨码盘等,也有通过磁带机、录音机接口输入信息和数据的。最简单的输入设备是各种开关、按钮,模拟量输入,往往借助电位器进行。

7) 电源

一个检测系统往往既有模拟电路部分,又有数字电路部分,需要多组要求各异的稳定电源。这些电源,在检测系统使用现场一般无法直接提供,通常只能提供 220V 工频电源或 24V 直流电源。检测系统的设计者需要根据使用现场的供电电源情况及检测系统内部电路的实际需要,统一设计各组电源,供系统各部分使用。

最后,值得一提的是,以上七个部分不是所有的检测系统(仪表)都具备的,而且对有些简单的检测系统,其各环节之间的界线也不是十分清楚,需根据具体情况进行分析。

另外,在进行检测系统设计时,对于把以上各环节具体相连的传输通道,也应予以足够的重视。传输通道的作用是联系仪表的各个环节,给各环节的输入、输出信号提供通路。它可以是导线、管路(如光导纤维)以及信号所通过的空间等。信号传输通道比较简单,易被人所忽视,如果不按规定的要求布置及选择,则易造成信号的损失、失真及引入干扰等,影响检测系统的精度。

0.3 检测系统的分类

随着科技和生产的迅速发展,检测系统(仪表)的种类不断增加,对其分类方法也很多,工程上常用的几种分类法如下所述。

0.3.1 按被测参量分类

常见的被测量可分为以下几类:

(1)电工量 电压、电流、电功率、电阻、电感、电容、频率、磁场强度、磁通密度等。

(2)热工量 温度、热量、比热、热流、热分布;压力、压差、真空度;流量、流速、风速;物位、液位、界面等。

(3)机械量 位移、形状;力、应力、力矩;重量、质量;转速、线速度;振动、加速度、噪声

等。

(4)物性和成分量 气体成分、液体成分、固体成分、酸碱度、盐度、浓度、粘度、粒度、密度、比重。

(5)状态量 颜色、透明度、磨损量、裂纹、缺陷、泄漏、表面质量等。

严格地说,状态量范围很广,但是习惯上不少量已归纳为热工量、机械量、成分量等,因此在这里指的状态量是除了上面所列的一些量以外的状态量。

0.3.2 按被测量的检测转换方法分

被测量通常是非电量,需用传感器把被测量转换成电量,非电被测量转换成电量的方法很多,最主要的有下列几类:

1) 电磁检测

电阻式、电位计式、应变丝式、压阻式、热电阻式、电感式、自感式、互感式(差动变压器)、电容式、阻抗式(电涡流式)、磁电式、热电式、压电式、霍尔式、振频式、振弦式、振筒式、振片式、感应同步器、磁栅。

2) 光学检测

光电式、激光式、红外式、光栅、光导纤维式。

3) 超声波检测

4) 核幅射检测

5) 微波检测

6) 电化学检测

0.3.3 按使用性质分类

常见的有标准表、实验室表和工业用表等三种。“标准表”顾名思义是专门用于校准非标准仪表和系统的。它本身必须经过有关计量部门的定期检定,并具有检定合格证书,方可使用。标准表的精度等级必须高于被校表,而其本身又是根据量值转递的规定由更高一级的标准表检定之。

“实验室表”多用于实验室中,它的使用环境条件较好,故往往无特殊的防水、防尘措施。对于温度、相对湿度、机械振动等的允许范围也较小。这类仪表与系统的精度等级虽较工业用表为高,但使用条件要求较严,只适于实验室条件下读数,不适于远距离观察及传送信号等。

“工业用表”是长期安装使用于实际工业生产现场上的仪表与系统。这类仪表与系统为数最多,据安装地点的不同,又有现场安装及控制室安装之分。前者应有可靠的防护,能抵御恶劣的环境条件,其显示也应醒目。工业用表的精度一般不很高,但能长期连续工作,并具有足够的可靠性。在某些场合下使用,还必须保证不因仪表引起事故,如在易燃、易爆环境条件下使用时,应有很好的防爆能力等。

此外,按检测系统的显示方式可分为指示式(主要是指指针式)显示,数字式显示,屏幕式显示等几类。其余还有分成模拟式、数字式、智能型(以 CPU 为核心,具有常规数字系统所没有的性能)等等。

0.4 检测技术的发展趋势

检测技术虽然已经得到广泛的应用,但是随着现代科学技术的发展,对它提出了愈来愈高的要求,因此仍然在继续不断地向前发展。当前除不断提高性能外,总的趋向是小型、轻量化,机、电、仪一体化,非接触化,智能化,具体地说可以有以下几个方面。

0.4.1 不断提高系统的性能,扩大应用范围

随着科学技术的发展,对仪器及系统的性能要求愈来愈高,需要研制解决工艺过程中极端参数检测用的仪器和系统。例如,连续测量液态金属的温度,长时间连续测量高温介质($2500\sim 3000^{\circ}\text{C}$),固体物质表面高温测量,极低温度测量(超导),混相流量测量,脉动流量测量;微差压(几十个帕)测量,超高压测量,高温高压下成分测量,分子量测量,高精度(0.02%)重量称重,大吨位($3\times 10^7\text{N}$ 以上)测量等,所以仪器要在原有的基础上不断地提高技术性能指标,扩大应用范围。

仪器系统的可靠性对其质量来说已成为一个重要的指标。从60年代开始,一些主要国家就开始大量对仪表可靠性进行研究,这方面内容包括了仪表可靠性和故障率的数学模型和计算方法的研究;仪表可靠性设计、分配、预测、检验和分析试验的研究;仪表系统组件可靠性对仪表整机性能的影响和确定整机可靠性的方法研究等。

0.4.2 研究材料、器件、电路一体化的仪表

鉴于传感器与测量电路分开,有时常会受到电磁干扰信号的影响,而且也不方便,所以希望能把传感器与测量电路合成在一起。近年来,国外正在研究的一种物性型检测传感器,就是在半导体技术基础上,进一步实现“材料、器件、电路、系统一体化”的新型仪表,它利用某些固体材料的物性变化(机械特性、电特性、磁特性、热特性、光特性、化学特性)来实现信息直接变换。也就是说,他们是利用不同材料的物理、化学、生物效应做成器件,直接测量对象物的信息,而且把电路也做在一起。这样,它与一般传感器相比,有构造简单、体积小、无可动部件、反应快、灵敏度高、稳定性好的特点,能解决许多原先难以实现的参数测量、成分分析和非接触测量等问题。

0.4.3 研究非接触检测技术

在检测过程中,把传感器置于被测对象上,相当于加一负载在上面,这样多少会影响测量的精度;而在有些被测物上,根本不可能安装传感器,例如测量高速旋转轴的振动、转矩等。因此,国际上都在研究采用无接触式的检测技术,目前已采用的光电式传感器、电涡流式传感器、超声波仪表、核辐射仪表等都是在这个要求上发展起来的。微波技术原来是用于通讯的,现在也被用来作为非电量检测技术的一种手段,而且还在研究用其它的原理和方法来进行无接触式的测量。

0.4.4 采用微处理机,使检测系统智能化

自70年代以大规模集成电路为基础的微处理器问世后,已大量应用到检测技术中,

使检测仪器及系统智能化,从而扩展了功能,提高了精度。带微处理器的检测仪器与传统的仪器相比,还有如下的特点:

(1)自校正功能 可以通过功能键送入的指令,按预先编制并在机内存贮的操作程序,完成自校准、自调零、自选量程、自动测试和自动分选。这样就能对传感器的非线性及仪器零点进行校准,能根据机内或机外基准定期作自校准,提高仪器的精度,而且可降低对元器件长期稳定性的要求。

(2)信息交换功能 它可以按参数之间的关系式,通过计算进行参数变换,因而可以通过某些参数的测试而自动求出一系列其它有关的未知数,便于实现多功能、多参数测试,或者通过最易测的参数测量,而获得难测甚至无法测出的参数。

(3)统计处理功能 可将测量得到的数据,根据误差理论对测得的数据进行处理,求出误差,并从测量结果中扣除,这就提高了仪器的测量精度。它可以根据工作条件(例如环境温度、相对湿度、大气压力等)的变化,根据一定公式计算修正值,并修正测量结果;这样就使测量的精度提高,结果更为可靠。它还可以采用多次读数的平均值或作相关计算方法来抑除噪声,以检测出被噪声完全淹没的信号。

(4)记录、存贮功能 可根据需要把瞬时测量值、中间结果等按时间存贮或记录输出,供分析改进用。

(5)具有远传输入、输出功能 可配置远传通讯接口,传递检测数据和各种操作命令、控制信息、输入参数等,可方便地接入自动检测、控制的大网络系统。

(6)具有故障检测、诊断和自恢复功能 经过合理的设计,均可使智能仪器、智能检测系统具有故障自诊断、检测,经冗余设计的智能仪器、智能检测系统,还能具备一定的故障自恢复能力。

另外,由于包括微处理器、单片机在内的大规模集成电路的成本和价格不断降低,功能和集成度不断提高,使得智能仪器、智能检测系统与传统仪表和相应的传统检测系统相比具有更高的性能/价格比。

正是由于采用微处理器、单片机的智能检测仪器和系统具有上述优点,所以有关它们的研制、生产、应用与日俱增。

为使用、操作、维护方便和提高检测系统整体性能,许多科学研究、过程控制和综合测试方面的应用,均要求提供机、电、仪一体化,智能化,多功能、多参量的综合检测系统,而且这一趋势正随着科技进步、生产发展而不断加强。

1 检测系统的特性及主要性能指标

在设计检测(仪器)系统时,首先需要根据设计任务书所规定的(系统)技术性能指标进行方案设计;如提出几个不同的可行性方案,进一步选择去舍,通常是对这些方案分别进行误差分析和成本估算,并经相互比较后才能最后确定哪一个是应进一步付诸实施的最佳方案。

另外,在工程实践中经常碰到这样的情况:某个新设计、研制、调试成功的检测(仪器)系统在实验室里测得的精度完全能达到甚至超过原设计指标,但一旦安装到环境比较恶劣、干扰严重的工业现场,其实测精度往往大大低于实验室能达到的水平,甚至出现严重超差。这时就需要根据该检测系统本身的静、动态特性、现场的安装、连接情况与现场干扰特点结合起来,综合分析研究,找出影响系统精度的各种原因,然后对症下药采取相应措施。这就是通常所说的现场调试。现场调试完成了,系统就能投入正常运行了。

为便于以后各章、特别是最后两章的介绍,下面对测量误差的一些术语、概念、检测系统的一般静态、动态特性及主要性能指标作一简要的介绍。

1.1 检测系统误差分析基础

1.1.1 误差的基本概念

1) 误差

检测是一个变换、放大、比较、显示、读数等环节的综合作用过程,由于检测系统(仪表)不可能绝对精确,测量原理的局限、测量方法的不尽完善、环境因素和外界干扰的存在以及测量过程可能会影响被测对象的原有状态等,使得测量结果不能准确地反映被测量的真值而存在一定的偏差,这个偏差就是测量误差。

2) 真值

一个量严格定义的理论值通常叫理论真值,如三角形三内角和为 180° 等。由于理论真值在实际工作中难以获得,常采用下述方法,获得约定真值和相对真值代替理论真值。

(1)约定真值 根据误差对称分布时正负差出现概率相等,在没有系统误差(或通过校正可消除)情况下,用足够多次重复测量值的平均值代替真值,此平均值即称为约定真值。

(2)相对真值 如果高级控制仪器(计量器具)的误差仅为低一级检测仪器的误差的 $1/3 \sim 1/10$,则可认为前者是后者的相对真值。例如,高精度的石英钟可视为普通机械闹钟的相对真值。

1.1.2 误差的分类

从不同的角度,测量误差可有不同的分类方法。

1) 按误差的性质(或出现的规律)分类

(1)系统误差 在相同条件下多次测量同一物理量时,其误差的绝对值和符号保持恒定,或在条件改变时,按某一确定的规律变化的误差,称为系统误差。其误差值不变的又称为定值系统误差或恒差;其误差值变化的则称为变值系统误差或变差。变值系统误差又可分为累进性的、周期性的以及按复杂规律变化的几种。

系统误差产生的原因大体上有:由测量所用的工具(仪器、量具等)本身性能不完善或安装、布置、调整不得当而产生的误差;由在测量过程中因温度、湿度、气压、电磁干扰等环境条件发生变化所产生的误差;由测量方法不完善、或者由于测量所依据的理论本身不完善等原因所产生的误差;由操作人员视读不准造成的误差等。总之,系统误差的特征是:系统误差出现的规律性和产生原因的可知性。所以应尽可能预先了解各种系统误差的成因,并设法消除其影响和确定或估计出未能消除的系统误差值。

在一个测量系统中,测量的准确度由系统误差来表征。系统误差愈小,则表明测量准确度愈高。

(2)随机误差 在相同条件下多次测量同一物理量时,在已经消除引起系统误差的因素之后,测量结果仍有误差,而其变化是无规律的随机变化,这类误差称为随机误差。随机误差服从统计规律(如正态分布、均匀分布、离散双值分布、辛普森分布等)。随机误差表现了测量结果的分散性,通常用精密度表征随机误差的大小。随机误差越大,精密度越低;反之,精密度就越高。测量的精密度高,亦即表明测量的重复性好。

产生随机误差的原因很多,如元器件性能的不稳定,外界温度、湿度、振动、电磁波影响、电网的畸变与波动干扰等等。

(3)粗大误差 是指显然与事实不符的误差,其特点是误差的数值大且无规律。粗大误差一般由外界重大干扰或仪器故障或不正确的操作所引起。存在着粗大误差的测量值一般不难发现,一经发现,应立即剔除。

精确度是反映仪器的综合指标,因此精确度高必须做到准确度高、精密度也高,也就是说必须使系统误差和随机误差都小。

系统误差和随机误差虽然是两类性质不同的误差,但两者并不是彼此孤立的。它们总是同时存在并对测量结果产生影响。实际上,我们很难把它们严格区分开来,有时我们不得不把没有完全掌握的或者分析起来过于复杂的系统误差当作随机误差来处理。例如,生产一批应变片,就每一只应变片而言,它的性能、误差是完全可以确定的,属于系统误差。但是由于应变片误差测定方法的限制,不允许逐只进行测定,而只能在批量生产中抽出若干只来测定,按允许误差来估计。这一估计具有随机误差的特点,是按随机误差方法来处理系统误差的。

同样,某些随机误差(如环境温度、电源电压波动等所引起的),当掌握它的确切规律后,就可以作为系统误差并设法加以修正。

由于在任何一次测量中,系统误差与随机误差一般都是同时存在,所以常按其对于测量结果的影响程度分三种情况来处理:当系统误差远大于随机误差,此时按纯粹系统误差处理;系统误差很小,已经校正,则可按纯粹随机误差处理;系统误差和随机误差两者影响差不多,此时应分别按不同方法来处理。

2) 按被测量与时间的关系分类

(1)静态误差 在被测量不随时间变化时所测得的误差称为静态误差。

(2)动态误差 在被测量随时间变化过程中进行测量时所产生的附加误差称为动态误差。动态误差是由于检测系统(或仪表)对输入信号变化响应上的滞后,或输入信号中不同频率成分通过检测系统时受到不同的衰减和延迟而造成的误差。动态误差的大小为动态时测量和静态时测量所得误差值的差值。

3)按产生误差的原因分类

按产生误差的原因,可把测量误差分为原理性误差(也叫方法误差)与构造误差(也叫工具误差)。由于测量原理、方法的不尽完善,或对理论特性方程中的某些参数作了近似,或略去了高次项而引起的误差叫原理误差。因检测仪器(系统)在结构上,在制造、调试工艺上不尽合理、完善而引起的误差叫构造误差。

1.1.3 误差的表示方法

检测系统(仪器)的基本误差有如下几种形式:

1) 绝对误差

系统的指示值 X 与被测量的真值 X_0 之间的代数差值称为系统示值的绝对误差,符号为 δ ,表示为

$$\delta = X - X_0 \quad (1.1)$$

式中,真值 X_0 可为约定真值,也可由高精度标准器所测得的相对真值。绝对误差 δ 说明了系统示值偏离真值的大小,它能够说明系统测量的精确度。

在校准或检定系统时,常采用比较法,即对于同一被测量,将标准器的示值 X_0 (真值)与被校系统的示值 X 进行比较,则它们的差值就是被校系统示值的绝对误差。如果它是一恒定值,则成为检测系统的“系统误差”。它可能是系统在非正常工作条件下使用而产生的,或其它原因所造成的附加误差,此时仪表的示值应加以修正,修正后才可得到被测量的实际值 X_0 。

$$X_0 = X - \delta = X + c \quad (1.2)$$

式中,数值 c 称为修正值或校正量。修正值与示值的绝对误差的数值相等,但符号相反,即为

$$c = -\delta = X_0 - X \quad (1.3)$$

试验室用的标准器常由高一级的标准器校准,检定结果附带有示值修正表,或修正曲线 $c=f(x)$ 。

2) 相对误差

系统示值的绝对误差 δ 与被测量真值 X_0 的比值,称之为系统示值的相对误差 γ 。 γ 常用百分数表示:

$$\gamma = \frac{\delta}{X_0} \times 100\% = \frac{X - X_0}{X_0} \times 100\% \quad (1.4)$$

指示值的相对误差比其绝对误差能更好地说明测量的精确程度。但在评价系统质量时,利用相对误差作为衡量标准也很不便。因为使用系统时,一般不应测量过小的量(如靠近测量范围下限的量),而多用在测量接近上限的量(如 $2/3$ 量程处)。故用下面的引用误差的概念来评价系统质量更为方便。

3) 引用误差

系统指示值的绝对误差 δ 与系统量程 L 之比值,称为系统示值的引用误差 q ;引用误差 q 常以百分数表示

$$q = \frac{\delta}{L} \times 100\% \quad (1.5)$$

比较式(1.5)及式(1.4)可知:在 q 的表示式中虽利用量程 L 代替了真值 X_0 ,但分子仍为绝对误差 δ 值;当测量值取系统测量范围的各个示值或在刻度标尺的不同位置时,示值的绝对误差 δ 值也是不同的,因此引用误差仍与仪表的具体示值 X 有关。为此,取引用误差的最大值,既能克服上述的不足,又更好地说明了系统的测量精度。

4) 引用误差的最大值(或满度最大引用误差)

在规定的工作条件下,当被测量平稳增加和减少时,在系统全量程所取得的诸示值的引用误差(绝对值)的最大者,或诸示值的绝对误差(绝对值)的最大者与量程的比值的百分数,称为系统的最大引用误差,符号为 $q_{\max}$,可表示为

$$q_{\max} = \frac{|\delta|_{\max}}{L} \times 100\% = \frac{|X - X_0|_{\max}}{L} \times 100\% \quad (1.6)$$

最大引用误差是系统基本误差的主要形式,故也常称为系统的基本误差。它是系统的主要质量指标,它很好地说明了系统的测量精确度。

1.1.4 检测仪器(系统)的精度等级

1) 允许误差

允许引用误差,简称允许误差,符号为 Q 。顾名思义,它指在出厂时所定仪器或系统示值的最大引用误差不能超过其允许值,即有 $q_{\max} \leq Q$ 。

2) 精度等级

工业检测仪表常以允许误差作为判断精度等级的尺度。人为规定:取允许误差百分数的分子作为精度等级的标志,也即用允许误差去掉百分号(%)后的数字来表示精度等级,其符号是 G ,则 $G=Q \times 100$ 或 $Q=G\%$ 。

各种仪表的精度等级的数字有一定的规定,工业仪表常见的精度等级如表 1.1 所示。

表 1.1 工业仪表常见精度等级

精度等级 G	0.1	0.2	(0.3)	0.5	1.0	2.5	5
允许误差 $ Q \%$	0.1	0.2	(0.3)	0.5	1.0	2.5	5
引用误差 $ q \%$	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 2.5	≤ 5

一般情况下,1 级精度仪表,表示其允许误差 Q 的绝对值 $|Q| = |\pm 1\%| = 1\%$,也可省去绝对值符号,简记为 $Q=1\%$;当记为 $Q=\pm 1\%$ 时,则表示允许误差的变化范围可以从 -1% 至 $+1\%$ 。其次,值得注意的是:精度等级化说明了引用误差允许值的大小,它决不意味着该仪表某次实际测量中出现的具体误差值是多少。当然,仪表精度等级的数字愈小,仪表的精度愈高,0.5 级的仪表精度优于 1.0 级仪表,而劣于 0.2 级仪表,等等。工业检测中,单次测量值的误差就是用工业仪表的精度等级来估计的。