



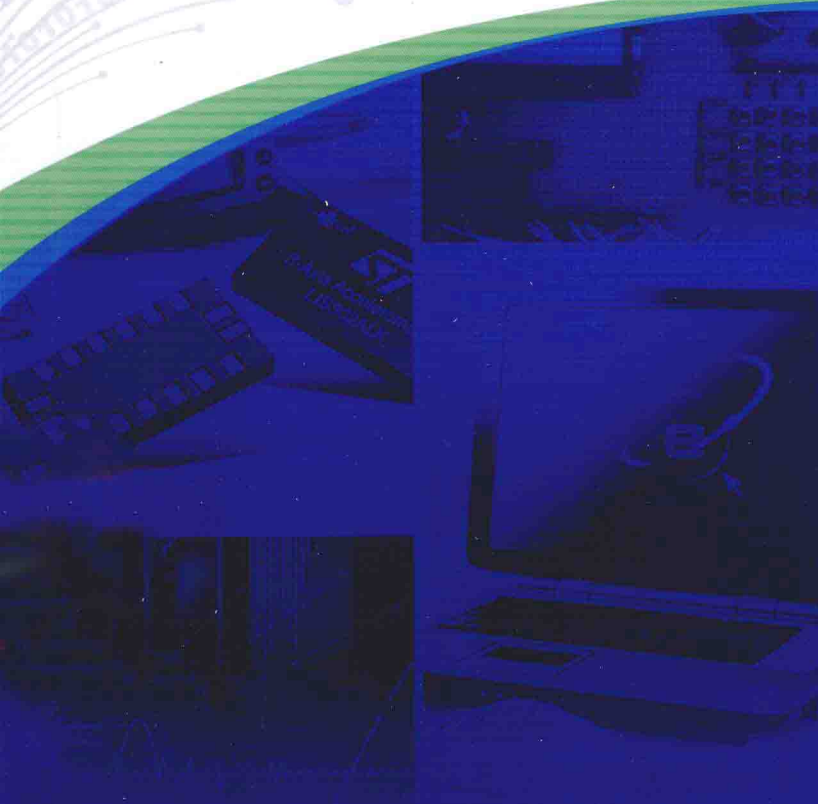
应用型本科高校系列教材·电气信息类

传感器与 检测技术

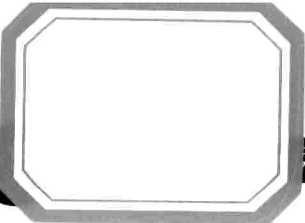


蒋全胜 林其斌 ◎ 主编

101010101010101
101010101010101



中国科学技术大学出版社

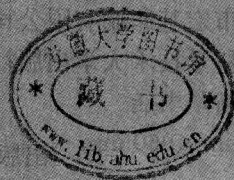


列教材·电气信息类

传感器与 检测技术

主 编 蒋全胜 林其斌

副主编 宁小波 李素平 王玉勤



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书全面介绍了传感器与检测技术的基本概念、基本原理和典型应用,内容注重经典与现代的结合,叙述力求由浅入深,强调对工程实践应用能力的培养,突出应用性的特点,使本书适应教学需要并具有很高的可读性。同时,本书中新器件、新技术的有关内容可使读者了解学科前沿。

全书按照传感器原理和检测技术两大模块组织内容,传感器原理模块主要内容包括传感器基础、常用传感器的工作原理、数字式传感器、新型传感器;检测技术模块主要内容包括检测技术基础、常用检测技术以及检测系统误差分析等。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、电子信息工程、机械设计制造及其自动化、自动化、测控技术与仪器、通信工程等专业的本科生教材,也可供从事传感器与检测技术相关领域应用和设计开发的研究人员及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/蒋全胜,林其斌主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,
2013. 1

(应用型本科高校系列教材·电气信息类)

ISBN 978-7-312-03132-8

I. 传… II. ①蒋…②林… III. 传感器—检测—教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 292216 号

出版 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

印刷 合肥市宏基印刷有限公司

发行 中国科学技术大学出版社

经销 全国新华书店

开本 710 mm×960 mm 1/16

印张 15.5

字数 304 千

版次 2013 年 1 月第 1 版

印次 2013 年 1 月第 1 次印刷

定价 28.00 元

前 言

21 世纪是信息化时代,其特征是人类社会活动和生产活动的信息化。人们在研究自然现象和规律及生产活动的过程中,必须从外界获取信息,传感器和检测技术作为能及时正确地获取这些信息的有效手段,而成为现代科学技术研究的一个重要领域。

“传感器与检测技术”是机电、自动化、电气工程及电子信息等工程类专业的一门重要专业基础课。该课程以研究自动检测系统中的信息提取、信息转换和信息处理的理论和技术为主要内容,涉及物理量、化学量等量的测量、变换和处理。这一门课程所讲述的技术应用十分广泛,对工农业生产、国防等具有十分重要的意义。

本书是作者根据高校电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、自动化、电子信息工程、测控技术与仪器等专业的“传感器与检测技术”课程的基本要求,在吸收近年来各高校的教学经验基础上编写而成的。在编写过程中力求内容丰富、全面、新颖,叙述由浅入深,对传感器原理力争讲清物理概念,对传感器的应用则充分结合生产和工程实践,按照少而精和理论联系实际的原则编写,使本书具有一定的实用性和学习参考价值。

全书共分为 7 章,按照传感器原理和检测技术两大模块来组织内容。第 1 章为传感器基础知识,主要介绍了传感器技术的基本知识。第 2 章为常用传感器的工作原理,阐述了工程中常用的 7 类传感器和其工作原理、结构、特性与应用。第 3 章为数字式传感器,主要介绍了光栅、磁栅式传感器及感应同步器的工作原理、结构及应用。第 4 章为新型传感器,主要介绍了生物、智能、微型和网络传感器的结构和应用特点。第 5 章为检测技术基础,主要介绍了检测技术及检测系统的基本特性、无失真检测条件等。第 6 章为常用检测技术,详细介绍了力学量、运动量、振动量、温度、光电和图像等常用参量的检测技术以及应用特点与过程。第 7 章为检测系统误差分析,主要讲述了检测误差的基本概念和处理方法。

本书由蒋全胜和林其斌任主编,并负责全书的统稿和审校。参加编写的有:蒋全胜(第 1、5、7 章);林其斌(第 2 章);宁小波(第 3 章);王玉勤、蒋全胜(第 4 章);李素平、蒋全胜(第 6 章)。

在本书的编写过程中,参考和引用了许多专家学者的论著,在此对本书所引用文献的有关作者表示衷心的感谢。

由于作者学识水平与能力有限,本书难免有错误及不妥之处,敬请广大读者和同仁批评指正。

编者

2012年12月

目 录

前言	(i)
第 1 章 传感器基础知识	(1)
1.1 传感器概述	(1)
1.1.1 传感器的概念	(2)
1.1.2 传感器的分类	(2)
1.2 传感器的基本特性	(4)
1.2.1 传感器的静态特性	(4)
1.2.2 传感器的动态特性	(5)
1.2.3 传感器的性能指标一览	(6)
1.3 传感器的选用原则	(7)
1.4 传感器的发展趋势	(8)
习题	(9)
第 2 章 常用传感器的工作原理	(10)
2.1 电阻式传感器	(10)
2.1.1 工作原理	(10)
2.1.2 电阻应变片的特性	(13)
2.1.3 电阻应变片的测量电路	(19)
2.1.4 电阻应变式传感器的应用	(24)
2.2 电感式传感器	(28)
2.2.1 自感式传感器	(29)
2.2.2 互感式传感器	(36)
2.2.3 电涡流式传感器	(42)
2.3 电容式传感器	(48)
2.3.1 工作原理	(48)
2.3.2 电容式传感器的特点及等效电路	(49)

2.3.3 电容式传感器的测量电路	(51)
2.3.4 电容式传感器的应用	(57)
2.4 压电式传感器	(59)
2.4.1 工作原理	(59)
2.4.2 等效电路	(61)
2.4.3 测量电路	(62)
2.4.4 压电式传感器的应用	(64)
2.5 磁电式传感器	(67)
2.5.1 磁电感应式传感器	(67)
2.5.2 霍尔传感器	(73)
2.6 光电式传感器	(77)
2.6.1 光电效应	(78)
2.6.2 光电导器件	(79)
2.6.3 光电式传感器的应用	(86)
2.6.4 光纤传感器	(90)
2.7 热电式传感器	(93)
2.7.1 热电偶	(93)
2.7.2 热电阻	(97)
2.7.3 热敏电阻	(99)
习题	(101)
 第3章 数字式传感器	 (103)
3.1 概述	(103)
3.2 光栅式传感器	(104)
3.2.1 光栅	(104)
3.2.2 光栅传感器的工作原理	(105)
3.3 磁栅式传感器	(109)
3.3.1 磁栅的结构和类型	(109)
3.3.2 磁头	(111)
3.3.3 信号处理方式	(114)
3.3.4 特点与误差分析	(115)
3.4 感应同步器	(116)
3.4.1 感应同步器的类型及结构	(116)
3.4.2 感应同步器的工作原理	(117)

3.4.3 输出信号的处理	(119)
3.5 码盘式传感器	(120)
3.5.1 光电码盘式传感器的工作原理	(121)
3.5.2 光电码盘的码制	(121)
3.5.3 光电码盘的应用	(126)
习题	(127)
 第4章 现代传感器	 (128)
4.1 生物传感器	(128)
4.1.1 概述	(128)
4.1.2 生物传感器原理、特点及类型	(129)
4.1.3 几种典型生物传感器	(131)
4.2 智能传感器	(136)
4.2.1 概述	(136)
4.2.2 智能传感器的结构与功能	(137)
4.2.3 智能传感器的特点	(138)
4.3 微型传感器	(139)
4.3.1 MEMS 技术与微型传感器	(139)
4.3.2 压阻式微型传感器	(141)
4.3.3 电容式微型传感器	(141)
4.4 网络传感器	(142)
4.4.1 网络传感器的概念	(142)
4.4.2 网络传感器的组成	(143)
4.4.3 网络传感器的类型	(143)
习题	(149)
 第5章 检测技术基础	 (150)
5.1 概述	(150)
5.2 检测系统的静态特性	(150)
5.3 检测系统的动态特性	(153)
5.4 无失真检测条件	(154)
5.5 现代检测系统	(156)
5.5.1 现代检测系统的作用	(156)
5.5.2 现代检测系统的组成	(157)

5.5.3 现代检测技术的发展方向	(159)
习题	(161)
第6章 常用检测技术	(162)
6.1 力学量检测	(162)
6.1.1 力的测量	(162)
6.1.2 压力的测量	(166)
6.2 运动量检测	(171)
6.2.1 位移检测	(171)
6.2.2 速度检测	(177)
6.2.3 加速度检测	(180)
6.3 振动的检测	(185)
6.3.1 概述	(185)
6.3.2 电测法振动测量系统	(186)
6.3.3 振动参量的测量	(188)
6.3.4 基于振动测试的故障诊断技术	(189)
6.4 温度检测技术	(192)
6.4.1 概述	(192)
6.4.2 热电偶温度计	(193)
6.4.3 热电阻温度计	(195)
6.4.4 热辐射测温	(197)
6.4.5 温度传感器的应用	(200)
6.5 光电检测技术	(204)
6.5.1 概述	(204)
6.5.2 光电检测系统的组成和特点	(204)
6.5.3 光电信号检测电路设计	(205)
6.5.4 光电检测技术的典型应用	(206)
6.6 图像检测技术	(208)
6.6.1 概述	(208)
6.6.2 光电成像器件	(208)
6.6.3 图像检测系统	(214)
习题	(216)

第 7 章 检测系统误差分析	(217)
7.1 检测误差的基本概念	(217)
7.1.1 误差的概念	(217)
7.1.2 误差的表示方法	(218)
7.1.3 检测误差的分类	(220)
7.1.4 检测系统的精度等级与容许误差	(221)
7.2 随机误差的处理	(223)
7.3 系统误差的分析	(226)
7.3.1 系统误差的特点及规律	(227)
7.3.2 系统误差的判定	(227)
7.3.3 减小和消除系统误差的方法	(229)
7.4 粗大误差的处理	(230)
7.5 测量不确定度	(232)
7.5.1 测量不确定度的有关术语	(232)
7.5.2 测量不确定度的评定	(233)
7.5.3 测量结果的表示与处理	(236)
习题	(237)
参考文献	(238)

第 1 章 传感器基础知识

21 世纪是人类全面进入信息电子化的时代。随着社会的发展和科学的进步,人类探知工程信息的领域和空间不断拓展,要求信息传递的速度加快和信息处理的能力增强,从而形成了现代电子信息系统三大核心技术:信息采集——传感技术、信息传递——通信技术和信息处理——计算机技术。其中传感器与检测技术是信息获取与交换的核心,被列为世界上近十年来最重要的现代电子技术之首,并成为 21 世纪人们争夺的信息工程技术领域的制高点。

先进的信息技术和自动化系统已成为引领各个国家迈向现代化的支撑性技术之一。传感器产业的发展水平能够衡量一个国家的综合经济实力和技术水平,传感器的技术水平、生产能力和应用范围已成为评价一个国家科学技术水平的重要标志,正如国外专家指出的:谁支配了传感器,谁就支配了当前的新时代。目前,我国信息科学技术的研究与产业化都取得了重大进展,在仪器仪表产品微型化、集成化、智能化、总线化等方向上紧跟国际发展步伐,并加大了具有自主知识产权的先进传感器及检测仪表的研制力度。传感器技术的发展、应用与研发,检测仪器的使用与维护都需要大批专门人才作为支撑,因此,对人才培养的内容和目标也提出了新要求。

1.1 传感器概述

传感器(Transducer/Sensor)是获取自然和生产领域中信息的主要途径与手段,它位于研究对象和测试系统的接口位置,为检测与控制之始。人们往往把传感器比拟为人的感官:眼——光敏传感器,鼻——气敏传感器,耳——声敏传感器,嘴——味觉传感器,手——触觉传感器;把计算机比作人的大脑;把通信技术比作人的神经系统。通过感官来获取信息(传感器),由大脑(计算机)发出指令,由神经系统(通信技术)进行传输,这些组成部分对现代信息技术来说缺一不可。

在科学研究和技术基础研发中,传感器能获取人类感官无法获得的大量信息。

如利用传感器和传感技术,观察物体可以精确到直径 1.0×10^{-10} cm 的微粒;计量时间可精确至 1.0×10^{-24} s。可以将一艘宇宙飞船看做是一个高性能传感器的集合体,它可以捕捉和收集宇宙之中的各种信息;一辆小轿车上所设置的传感器也有百余种之多,利用这些传感器可以测量油温、水温、水压、流量、排气量、车速、姿态等。传感器是感知、获取和检测信息的窗口,一切自动化生产过程和科学研究要获取的信息都须通过传感器获取并转换成容易传输和处理的电信号,其作用与地位十分重要。

1.1.1 传感器的概念

中国国家标准《传感器通用术语》(GB/T 7665—2005)中对传感器的定义和组成规定如下:“(传感器是)能够感受(或响应)规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。”国际电工委员会(International Engineering Consortium, IEC)给出的传感器定义为:“传感器是测量系统中的一种前置部件,它将输入变量转换成可供测量的信号。”

根据传感器的定义,传感器的基本组成为敏感元件和转换元件两部分,分别完成检测和转换两个基本功能。其中,敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分;转换元件是指传感器中能将敏感元件的感受或响应的被测量转换成适于传输和测量的电信号部分。传感器的共性就是利用物理定律或物质的物理、化学、生物特性,将非电量(如位移、力、速度、加速度等)输入转换成电信号(电压、电流、电容、电阻等)输出。传感器的组成如图 1.1 所示。



图 1.1 传感器的组成

传感器是一种检测装置,能感受到被测量的信息,并能将检测感受到的信息,按一定规律变换成为电信号或其他便于测量的信号输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等需要。它是实现自动检测和自动控制的首要 and 关键环节。

1.1.2 传感器的分类

传感器本身种类繁多、原理各异,检测对象也纷繁复杂,分类方法较多,目前尚无统一规定。下面是几种常见的分类方式。

1. 按传感器的工作原理分类

根据传感器工作原理,可将传感器分为物理传感器、化学传感器和生物传感器

三大类。物理传感器应用的是物理效应,诸如压电、磁致伸缩、离化、极化、热电、光电、磁电等效应,可分为应变式、压电式、压阻式、电感式、光电式、电容式、磁电式等。化学传感器包括以化学吸附、电化学反应等现象为因果关系的传感器,被测信号量的微小变化都将转换成电信号。生物传感器是利用微生物或生物组织中生命体的活动现象作为变换结构的一种传感器,这可为生物、医学领域提供一种有用的传感器。大多数传感器是以物理原理为基础运作的。

2. 按传感器的用途分类

按照传感器的用途进行分类,可分为压力传感器、温度传感器、湿度传感器、位移传感器、液面传感器、速度传感器、加速度传感器、热敏传感器等。

3. 按传感器输出的信号类型分类

根据输出信号类型不同可将传感器分为以下几种:

(1) 模拟传感器

将被测量的非电学量转换成模拟电信号。

(2) 数字传感器

将被测量的非电学量转换成数字信号(包括直接和间接转换)。

(3) 膺数字传感器

将被测量的信号量转换成频率信号或短周期信号(包括直接和间接转换)。

(4) 开关传感器

当一个被测量的信号达到某个特定的阈值时,传感器相应地输出一个设定的低电平或高电平信号。

4. 按能量的转换情况分类

按照传感器的能量转换情况不同,可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器两大类。

(1) 能量控制型传感器

需外部提供电源,只有信号转换,没有能量转换。

(2) 能量转换型传感器

不需外加电源,本身有能量转换,同时有信号转换。

5. 按传感器材料分类

在外界因素的作用下,所有材料都会做出相应的、具有特征性的反应。其中那些对外界作用最敏感的材料,即具有功能特性的材料,被用来制作传感器的敏感元件。传感器可应用的材料包括:金属聚合物、陶瓷混合物、导体、半导体、磁性材料、单晶、多晶、非晶材料等;可据此对传感器进行分类。现代传感器的发展进展某种程度上取决于用于传感器技术的新材料和敏感元件的开发强度。

随着计算机技术的飞速发展,近年来出现了一种带有微处理器且兼具监测和

信息处理功能的智能传感器,其各项性能相比传统传感器高很多,是传感器未来的发展方向。

1.2 传感器的基本特性

在对各种参数进行检测和控制过程中,要达到比较优良的控制性能,必须要求传感器能够感测被测量的变化并且不失真地将其转换为相应的电信号,这取决于传感器的基本特性。传感器的基本特性主要分为静态特性和动态特性两种。

1.2.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指对静态的不随时间变化的输入信号,传感器的输出量与输入量之间所具有的相互关系。研究静态特性主要考虑线性度、灵敏度、迟滞、重复性、漂移等方面。

1. 线性度

指传感器输出量与输入量之间的实际关系曲线偏离拟合直线的程度。

2. 灵敏度

灵敏度是传感器静态特性的一个重要指标。其定义为输出量的增量 Δy 与引起该增量的相应输入量增量 Δx 之比。它表示单位输入量的变化所引起传感器输出量的变化,显然,灵敏度 S 值越大,则传感器越灵敏。为了测量出微小的振动变化,传感器应有较高的灵敏度。

3. 迟滞

传感器在输入量由小到大(正行程)及输入量由大到小(反行程)变化期间其输入输出特性曲线不重合的现象称为迟滞。另言之,对于同一大小的输入信号,传感器的正反行程输出信号大小不相等,这个差值称为迟滞差值。

4. 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变化时,所得特性曲线不一致的程度。

5. 漂移

传感器的漂移是指在输入量不变的情况下,传感器输出量随着时间变化而变化,此现象称为漂移。漂移产生的原因来自于两个方面:一是传感器自身结构参数;二是周围环境(如温度、湿度等)改变。

最常见的漂移是温度漂移,即因周围环境温度变化而引起的输出量变化,温度漂移主要表现为温度零点漂移和温度灵敏度漂移。温度漂移通常为传感器工作环境温度偏离标准环境温度(一般为 20°C)时的输出值的变化量与温度变化量之比。

6. 测量范围(Measuring Range)

传感器所能测量到的最小输入量与最大输入量之间的范围称为传感器的测量范围。

7. 量程(Span)

传感器测量范围的上限值与下限值的代数差,称为量程。

8. 精度(Accuracy)

传感器的精度是指测量结果的可靠程度,是测量中各类误差的综合反映,测量误差越小,传感器的精度越高。传感器的精度用其量程范围内的最大基本误差与满量程输出之比的百分数形式表示,其基本误差是传感器在规定的正常工作条件下所具有的测量误差,由系统误差和随机误差两部分组成。

工程技术中为简化传感器精度的表示方法,引用了精度等级的概念。精度等级以一系列标准百分比数值分级表示,代表传感器测量的最大允许误差。如果传感器的工作条件偏离正常工作条件,还会带来附加误差,温度附加误差就是最主要的附加误差。

1.2.2 传感器的动态特性

传感器的动态特性是指传感器在输入变化时,其输出的特性。传感器的输入信号是随时间变化的动态信号,输入信号的变化引起输出信号也随时间变化,这个过程称为响应。动态特性就是指传感器对于随时间变化的输入信号的响应特性,通常要求传感器不仅能精确地显示被测量的大小,而且还能复现被测量随时间变化的规律,这也是传感器的重要特性之一。

在实际工作中,常用传感器对某些标准输入信号的响应来表示它的动态特性。这是因为容易用实验方法求得传感器对标准输入信号的响应,并且它对标准输入信号的响应与对任意输入信号的响应之间存在一定的关系,往往知道了前者就能推定后者。最常用的标准输入信号有阶跃信号和正弦信号两种,所以传感器的动态特性也常用阶跃响应和频率响应来表示。

对于阶跃输入信号,传感器的响应称为阶跃响应或瞬态响应,即传感器在瞬变的非周期信号作用下的响应特性。这对传感器来说是一种最严峻的状态,如果传感器能复现这种信号,那么就能很容易地复现其他种类的输入信号,其动态性能指标必定优秀。

对于正弦输入信号,传感器的响应则称为频率响应或稳态响应。它是传感器在振幅稳定不变的正弦信号作用下的响应特性。稳态响应的重要性,在于工程上所遇到的各种非电信号的变化曲线都可以展开成傅立叶(Fourier)级数或进行傅立叶变换,即可以用一系列正弦曲线的叠加来表示原曲线。因此,如果已知传感器对正弦信号的响应特性,则可以判断它对各种复杂变化曲线的响应情况。

分析传感器的动态特性的一种通用方法是建立动态数学模型。建立动态数学模型的方法有多种,如微分方程、传递函数、频率响应函数、差分方程、状态方程、脉冲响应函数等。建立微分方程是对传感器动态特性进行数学描述的基本方法。

1.2.3 传感器的性能指标一览

由于传感器的类型五花八门,使用要求千差万别,要列出可以全面衡量传感器质量优劣的统一指标极其困难。迄今为止,国内外还是采用罗列若干基本参数和比较重要的环境参数指标的方法来作为检验、使用和评价传感器的依据。表 1.1 列出了传感器的一些常用指标,可供读者参考。

表 1.1 传感器常用性能指标一览表

基本参数指标	环境参数指标	可靠性指标	其他指标
1. 量程指标: 量程范围、过载能力等。 2. 灵敏度指标: 灵敏度、满量程输出、分辨率、输入输出阻抗等。 3. 精度指标: 精度(误差)、重复性、线性、回差、灵敏度误差、阈值、稳定性、漂移、静态总误差等。 4. 动态性能指标: 固有频率、阻尼系数、频响范围、频率特性、时间常数、上升时间、响应时间、过冲量、衰减率、稳定误差、临界速度、临界频率等	1. 温度指标: 工作温度范围、温度误差、温度漂移、灵敏度温度系数、热滞后等。 2. 抗冲振指标: 各向冲振容许频率、振幅值、加速度、冲振引起的误差等。 3. 其他环境参数: 抗干扰、抗介质腐蚀、抗电磁场干扰能力等	工作寿命、平均无故障时间、保险期、疲劳性能、绝缘电阻、耐压、反抗飞狐性能等	1. 使用方面: 供电方式(直流、交流、频率、波形等)、电压幅度与稳定度、功耗、各项分布参数等。 2. 结构方面: 外形尺寸、重量、外壳、材质、结构特点等。 3. 安装连接方面: 安装方式、馈线、电缆等

1.3 传感器的选用原则

现代传感器在原理与结构上千差万别,如何根据具体的测量目的、测量对象以及测量环境合理地选用传感器,是进行检测时首先要解决的问题。测量的成败,很大程度上取决于传感器的选用合理与否。

传感器的选用一般遵循以下几个原则:

1. 根据测量对象与测量环境确定传感器的类型

要进行一个具体的测量工作,首先要考虑采用何种原理的传感器,这需要分析多方面的因素。因为,即使是测量同一物理量,也有多种原理的传感器可供选用,哪一种原理的传感器更为合适,则需要根据被测量的特点和传感器的使用条件考虑以下一些具体问题:量程的大小、被测位置对传感器体积的要求、测量方式(接触式还是非接触式)、信号的引出方法(有线或无线方式)等。

因此先确定选用何种类型的传感器,然后再考虑传感器的具体性能指标。

2. 灵敏度和检测极限

通常希望在传感器的线性范围内其灵敏度越高越好,但是灵敏度过高的话会对干扰信号太敏感,影响测量精度。因此,一般要求在满足要求的情况下,尽量选用灵敏度低和检测极限大、范围宽的传感器,以增强抗干扰能力。

3. 精度

精度是传感器的一个重要的性能指标,它关系到整个测量系统测量精度。传感器的精度包括精密度和准确度。精密度是指在同一条件下进行反复测量时,所得结果之间的差别程度,也叫重复性。传感器的随机误差小,精密度高,但不一定准确。准确度是指测量结果与实际真正的数值偏离程度。同样,准确不一定精密。故在选用传感器时,要着重考虑精密——重复性。因为准确度可以用其他方法进行补偿,而重复性是传感器本身固有的,外电路对此无能为力。

4. 频率响应特性

传感器的频率响应特性决定了被测量的频率范围,必须在允许频率范围内保持不失真的测量条件,实际上传感器的响应总有一定延迟,所以希望延迟时间越短越好。

传感器的频率响应高,可测的信号频率范围就宽;频率响应低的传感器可测信号的频率就低。在动态测量中,应根据信号的特点(稳态、瞬态、随机等)选择响应特性,以免产生过大的误差。