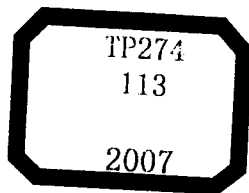


智能检测技术及仪表

李邓化 彭书华 许晓飞 编著



智能检测技术及仪表

李邓化 彭书华 许晓飞 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书旨在全面介绍智能检测技术与仪表领域的基本原理及典型应用,全书共分13章,第1章主要介绍了检测技术的基本知识与智能检测系统的基本组成;第2~9章分别介绍了各种常用传感器的基本原理与应用,主要包括热敏传感器、电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、光电与光纤传感器、数字化传感器、智能传感器等;第10章介绍了模拟与数字仪表的设计及应用;第11、12章分别介绍了智能仪器与虚拟仪器技术;最后一章介绍了智能检测领域的主要新技术。书后还附有一些主要章节的习题。

本书图文并茂,突出了与工程应用技术相关的主要内容,并含有大量的应用实例。本书可作为高等学校自动化专业及测试计量技术及仪器专业的教材或参考书使用,也可供有关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能检测技术及仪表/李邓化,彭书华,许晓飞编著.——北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-018741-3

I. 智… II. ①李…②彭…③许… III. 自动检测系统
IV. TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第035180号

责任编辑:王志欣 潘继敏 / 责任校对:刘小梅

责任印制:刘士平 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年3月第一版 开本:B5(720×1000)

2007年3月第一次印刷 印张:22 1/2

印数:1—3 000

字数:427 000

定价:30.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前 言

智能检测是伴随着自动化技术、计算机技术、检测技术和智能技术的深入发展而产生和形成的新的研究领域,智能检测与智能仪表是未来检测技术的主要发展方向。智能检测是将传统学科和新技术进行综合集成和应用的一门学科,体现了多学科的交叉、融合和延拓,其应用范围遍布国民经济的诸多方面。

本书是在作者多年教学实践的基础上,结合现有的教学讲义和最新技术发展编写而成的,书中融入了作者多年来大量的科研工作与成果。本书在内容安排上以检测技术基本原理为基础,结合智能检测技术的最新发展,以应用为核心,重点介绍了检测技术的基本原理和工程实现方法,体现了理论教学和实践教学并重的宗旨。

本书旨在全面介绍智能检测技术与仪表领域的基本原理及典型应用,全书共分13章,第1章主要介绍了检测技术的基本知识与智能检测系统的基本组成;第2~9章分别介绍了各种常用传感器的基本原理与应用,主要包括热敏传感器、电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、光电与光纤传感器、数字化传感器、智能传感器等;第10章介绍了模拟与数字仪表的设计及应用;第11、12章分别介绍了智能仪器与虚拟仪器技术;最后一章介绍了智能检测领域的主要新技术。其中,第1~8章由李邓化编写,其余部分由彭书华和许晓飞编写。

本书可作为自动化专业、智能科学与技术、检测技术与自动化装置、测试计量技术与仪器等专业的本科生和硕士生的教材或参考书,也适用于相关专业的工程技术人员。不同院校与专业的学生也可根据实际情况和课时需要选学部分内容。

由于时间仓促,水平有限,书中难免有不足之处,诚恳欢迎各位读者对本书提出批评指正,可 E-mail 至 psh01@163.com,欢迎赐教,不胜感激。

作 者

2007年1月

目 录

前言

第 1 章 检测技术基础	1
1.1 基础知识	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 检测仪表的品质指标	3
1.1.3 量值传递与仪表的校准	8
1.2 测量误差与数据处理基础.....	10
1.2.1 测量误差及其分类	10
1.2.2 系统误差的消除方法	14
1.2.3 随机误差及其估算	16
1.2.4 测量误差的合成及最小二乘法的应用	21
1.2.5 测量结果的数据处理	28
1.3 智能检测系统.....	35
1.3.1 智能检测系统中的传感器.....	35
1.3.2 数据采集.....	40
1.3.3 输入输出通道处理电路	45
1.3.4 智能检测系统中的软件	48
第 2 章 热敏元件、温度传感器及应用	49
2.1 热电偶.....	49
2.1.1 热电效应.....	49
2.1.2 热电偶的基本法则	52
2.1.3 热电偶冷端温度及其补偿.....	54
2.2 热电阻.....	57
2.2.1 铂电阻	58
2.2.2 铜热电阻.....	58
2.2.3 其他热电阻	58
2.3 热敏电阻.....	59
2.3.1 NTC 热敏电阻的温度特性	59
2.3.2 NTC 热敏电阻的温度系数	60
2.3.3 伏-安特性 $U=f(I)$	60

2.3.4	NTC 热敏电阻的安-时特性	61
第 3 章	应变式电阻传感器及应用	62
3.1	应变式电阻传感器的工作原理	62
3.2	测量电路	65
3.2.1	直流电桥	65
3.2.2	交流电桥	71
3.3	应变式传感器的温度特性	73
3.3.1	使应变片产生热输出的因素	73
3.3.2	电阻应变片的温度补偿方法	74
3.4	应变式电阻传感器的应用	76
3.4.1	几种常见的弹性元件的应变值 ϵ 与外作用力 F 之间的关系	76
3.4.2	应变式电阻传感器的应用	78
第 4 章	电感式传感器及应用	80
4.1	变磁阻式传感器	80
4.1.1	工作原理	80
4.1.2	输出特性	81
4.1.3	测量电路	83
4.1.4	变磁阻式传感器的应用	85
4.2	差动变压器式传感器	86
4.2.1	工作原理	86
4.2.2	基本特性	88
4.2.3	差动变压器式传感器测量电路	89
4.2.4	差动变压式传感器的应用	92
4.3	电涡流式传感器	92
4.3.1	工作原理	93
4.3.2	基本特性	93
4.3.3	电涡流形成范围	94
4.3.4	电涡流式传感器的应用	96
第 5 章	电容式传感器及应用	99
5.1	电容式传感器的工作原理和结构	99
5.1.1	变极距型电容传感器	99
5.1.2	变面积型电容式传感器	101
5.1.3	变介质型电容式传感器	101
5.2	电容式传感器的灵敏度和非线性	102
5.3	电容式传感器的信号调节电路	104

5.3.1	运算放大器式电路	104
5.3.2	电桥电路	105
5.4	电容器式传感器的应用	106
5.4.1	电容式位移传感器	106
5.4.2	电容式荷重传感器	107
5.4.3	电容式压力传感器	108
第6章	压电传感器及应用	110
6.1	压电效应	110
6.1.1	压电材料的主要特性参数	110
6.1.2	压电晶体的压电效应	111
6.1.3	压电陶瓷的压电效应	113
6.2	压电方程	114
6.2.1	电场为零	114
6.2.2	应力为零	115
6.3	电荷放大器	115
6.3.1	电荷放大器的输出电压	115
6.3.2	实际电荷放大器的运算误差	117
6.3.3	电荷放大器的下限截止频率	118
6.3.4	电荷放大器的噪声及漂移特性	119
6.4	压电传感器的应用	120
6.4.1	压电水下声学接收换能器——水听器	120
6.4.2	压电式加速度传感器	124
6.4.3	压电式压力传感器	127
第7章	光电与光纤传感器及应用	129
7.1	光电效应	129
7.1.1	外光电效应	129
7.1.2	内光电效应	129
7.2	光敏电阻	130
7.2.1	光敏电阻的原理和结构	130
7.2.2	光敏电阻的主要参数和基本特性	131
7.2.3	光敏电阻与负载的匹配	134
7.3	光电池	135
7.3.1	光电池的结构原理	135
7.3.2	基本特性	137
7.3.3	光电池的转换效率及最佳负载匹配	138

7.4	光敏二极管和光敏三极管	139
7.4.1	光敏管的结构和工作原理	139
7.4.2	光敏管的基本特性	141
7.4.3	光敏晶体电路的分析方法	143
7.5	光电传感器的类型及应用	144
7.5.1	光电传感器的类型	144
7.5.2	应用	145
7.6	光纤传感器	150
7.6.1	光导纤维导光的基本原理	150
7.6.2	光纤传感器及其应用	153
第8章	集成化与数字化传感器及应用	159
8.1	集成传感器	159
8.1.1	概述	159
8.1.2	集成压阻式传感器	160
8.1.3	集成霍尔式传感器	164
8.2	数字传感器	182
8.2.1	概述	182
8.2.2	振弦式传感器	182
8.2.3	压电式谐振传感器	186
第9章	智能传感器及应用	188
9.1	概述	188
9.2	智能传感器的系统构成与实现途径	190
9.2.1	智能传感器的系统构成	190
9.2.2	智能传感器的实现途径	193
9.3	智能传感器实例——基于 DS18B20 的智能数字温度传感器	194
9.3.1	DS18B20 简介	195
9.3.2	DS18B20 数字温度计	201
9.3.3	DS18B20 补偿热电偶冷端的数字温度计	201
9.4	智能传感器的最新标准	210
第10章	模拟及数字式仪表	213
10.1	模拟式显示仪表	213
10.1.1	动圈式显示仪表	214
10.1.2	自动平衡电位差计	223
10.1.3	自动平衡电桥	229
10.2	数字式显示仪表	235

10.2.1 概述	235
10.2.2 数字式显示仪表构成原理	235
10.2.3 数字显示仪表举例——热电偶数字温度表	251
第 11 章 智能仪器及应用	258
11.1 概述	258
11.1.1 智能仪器的工作原理	258
11.1.2 智能仪器的特点	259
11.1.3 智能仪器的基本结构	261
11.1.4 智能仪器的发展现状	262
11.2 数据采集	263
11.3 数据处理	265
11.3.1 误差处理算法	265
11.3.2 抗干扰和数字滤波	267
11.3.3 智能仪器的自校准	269
11.4 智能仪器的人机接口	271
11.5 智能仪器的发展趋势	272
第 12 章 虚拟仪器	275
12.1 虚拟仪器概述	275
12.2 LabVIEW 简介	276
12.3 数据采集原理	277
12.3.1 被测信号的实时采集	277
12.3.2 数据采集卡的性能指标	278
12.3.3 DAQ 板卡功能及应用	280
12.4 典型控制算法在虚拟仪器中的实现	281
12.4.1 数字 PID 控制算法原理	281
12.4.2 基于位置式 PID 算法的转盘转速控制系统	283
第 13 章 智能检测新技术	286
13.1 网络智能传感器技术	286
13.1.1 概述	286
13.1.2 智能传感器网络化的实现	287
13.1.3 网络化智能传感器技术标准 IEEE1451	294
13.2 多传感器信息融合技术	300
13.2.1 概述	300
13.2.2 基本原理	302
13.2.3 多传感器信息融合的应用实例	309

13.3 软测量技术简介.....	313
13.3.1 概述	313
13.3.2 软测量技术的构成要素	314
13.3.3 软测量技术的实现与应用.....	317
思考题与练习题.....	319
主要参考文献.....	348

第 1 章 检测技术基础

1.1 基础知识

1.1.1 概述

1. 工业过程检测

工业过程检测是指在生产过程中,为及时掌握生产情况和监视、控制生产过程,而对其中一些变量进行的定性检查和定量测量。

检测的目的是为了获取各过程变量值的信息。根据检测结果可对影响过程状况的变量进行自动调节或操纵,以达到提高质量、降低成本、节约能源、减少污染和安全生产等目的。

检测技术涉及的内容非常广泛,包括被检测信息的获取、转换、显示以及测量数据的处理等技术。随着科学技术的不断进步,特别是随着微电子技术、计算机技术等高新科技的发展以及新材料、新工艺的不断涌现,检测技术也在不断发展,并且已经成为一门实用性和综合性很强的新兴学科。

检测技术及仪表作为人类认识客观世界的重要手段和工具,应用领域十分广泛,工业过程是其最重要的应用领域之一。工业过程检测具有如下特点:

(1) 被测对象形态多样。有气态、液态、固态介质及其混合物,也有的被测对象具有特殊性质(如强腐蚀、强辐射、高温、高压、深冷、真空、高黏度、高速运动等)。

(2) 被测参数性质多样。有温度、压力、流量、液位等热工量,也有各种机械量、电工量、化学量、生物量,还有某些工业过程要求检测的特殊参数(如纸浆的打浆度)等。

(3) 被测量变量的变化范围宽。如被测温度可以是 1000°C 以上的高温,也可以是 0°C 以下的低温甚至超低温。

(4) 检测方式多种多样。既有断续测量,又有连续测量;既有单参数检测,又有多个参数同时检测;还有每隔一段时间对不同参数的巡回检测,等等。

(5) 检测环境比较恶劣。在工业过程中,存在着许多不利于检测的影响因素,如电源电压波动,温度、压力变化,以及在工作现场存在水汽、烟雾、粉尘、辐射、振动等,因此要求检测仪表具有较强的抗干扰能力和相应的防护措施。

为了适应工业过程检测的上述特点,要求检测仪表不但具有良好的静态特性和动态特性,而且要针对不同的被测对象和测量要求采用不同的测量原理和测量

手段。因此,检测仪表的种类繁多,而且为了适应工业过程对检测技术提出的新要求,还将有各式各样的新型仪表不断涌现。

2. 检测仪表的分类与组成

检测仪表是能确定所感受的被测变量大小的仪表。它可以是传感器、变送器和自身兼有检出元件和显示装置的仪表。

传感器是能接受被测信息,并按一定规律将其转换成同种或别种性质的输出变量的仪表。输出为标准信号的传感器称为变送器。所谓标准信号,是指变化范围的上下限已经标准化的信号(如4~20mA DC等)。

检测仪表可按下述方法进行分类:

(1) 按被测量分类。可分为温度检测仪表、压力检测仪表、流量检测仪表、物位检测仪表、机械量检测仪表以及过程分析仪表等。

(2) 按测量原理分类。可分为电容式、电磁式、压电式、光电式、超声波式、核辐射式检测仪表等。

(3) 按输出信号分类。可分为输出模拟信号的模拟式仪表、输出数字信号的数字式仪表,以及输出开关信号的检测开关(如振动式物位开关)等。

(4) 按结构和功能特点分类。可按照测量结果是否就地显示,分为测量与显示功能集于一身的一体化仪表和将测量结果转换为标准输出信号并远传至控制室集中显示的单元组合仪表;或者按照仪表是否含有微处理器,而分为不带微处理器的常规仪表和以微处理器为核心的微机化仪表。后者的集成度越来越高,功能越来越强,有的已具有一定的人工智能,常被称为智能化仪表。目前,有的仪表供应商又推出了“虚拟仪器”的概念。所谓“虚拟仪器”是在标准计算机的基础上加一组软件或(和)硬件,使用者操作这台计算机,即可充分利用最新的计算机技术来实现和扩展传统仪表的功能。这套以软件为主体的系统能够享用普通计算机的各种计算、显示和通信功能。在基本硬件确定之后,就可以通过改变软件的方法来适应不同的需求,实现不同的功能。虚拟仪器彻底打破了传统仪表只能由生产厂家定义,用户无法改变的局面。用户可以自己设计、自己定义,通过软件的改变来更新自己的仪表或检测系统,改变传统仪表功能单一或有些功能用不上的缺陷,从而节省开发、维护费用,减少开发专用检测系统的时间。

不同类型检测仪表的构成方式不尽相同,其组成环节也不完全一样。通常,检测仪表由原始敏感环节(传感器或检出元件)、变量转换与控制环节、数据传输环节、显示环节、数据处理环节等组成。检测仪表内各组成环节,可以构成一个开环测量系统,也可以构成闭环测量系统。开环测量系统是由一系列环节串联而成,其特点是信号只沿着从输入到输出的一个方向(正向)流动,如图1-1所示。一般较常见的检测仪表大多为开环测量系统。例如,图1-2所示的温度检测仪表,以被

测温度为输入信号,以毫伏计指针的偏移作为输出信号的响应,信号在该系统内仅沿着正向流动。闭环测量系统的构成方式如图 1-3 所示,其特点是除了信号传输的正向通路外,还有一个反馈回路。在采用零值法进行测量的自动平衡式显示仪表中,各组成环节即构成一个闭环测量系统。

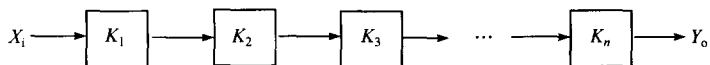


图 1-1 开环测量系统的构成方式

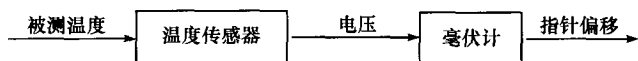


图 1-2 温度检测系统示例

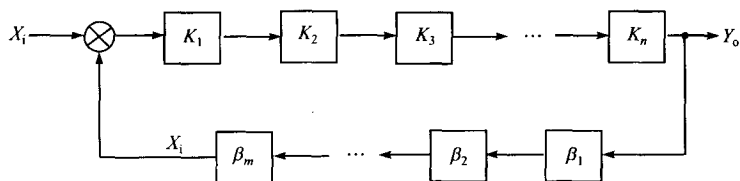


图 1-3 闭环测量系统的构成方式

1.1.2 检测仪表的品质指标

1. 灵敏度

灵敏度(sensitivity)是指检测仪表在到达稳态后,输出增量与输入增量之比,即

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (1-1)$$

式中, K 为灵敏度; ΔY 为输出变量 Y 的增量; ΔX 为输入变量 X 的增量。

当仪表的输出-输入关系为线性时,其灵敏度 K 为常数,如图 1-4 所示。反之,当仪表具有非线性时,其灵敏度将随着输入变量的变化而改变,以 dy/dx 表示,如图 1-5 所示。

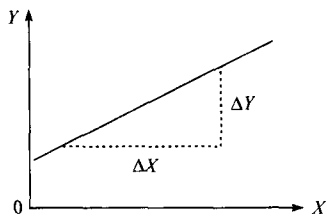


图 1-4 输出-输入关系为线性

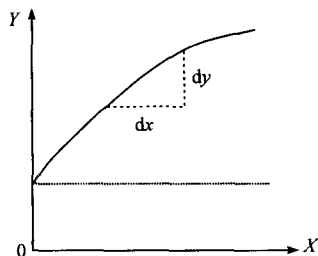


图 1-5 输出-输入关系为非线性

2. 线性度

线性度又称非线性(linearity or non-linear),是表征仪表输入-输出校准曲线与所选定的拟合直线(作为工作直线)之间的吻合(或偏离)程度的指标,如图 1-6 所示。通常用相对误差来表示线性度

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中, ΔL_{\max} 为校准曲线与拟合直线间的最大偏差; $Y_{F.S}$ 为理论满量程输出值。

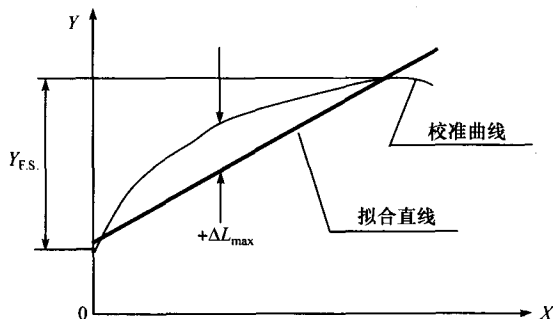


图 1-6 校准曲线与所选定的拟合直线

3. 分辨率

分辨率(resolution)反映仪表能检测出被测量的最小变化的能力,又称分辨能力。当输入变量从某个任意值(非零值)缓慢增加,直至可以观测到输出变量的变化时为止的输入变量的增量即为仪表的分辨率。分辨率可以用绝对值也可以用满刻度的百分比来表示。如角度传感器,满量程输出为 $10^\circ/1000\text{mV}$,若其分辨率为 0.01° ,即每变化 0.01° ,其输出就应有 1mV 的变化。

4. 迟滞度

在外界条件不变的情况下,当输入变量上升(从小到大)和下降(从大到小)时,仪表对于同一输入所给出的两个相应输出平均值间(若无其他规定,则指全行程范围内的)最大差值 ΔH_{\max} 即为迟滞度(hysteresis)也叫回差,如图 1-7 所示。通常以输出量程的百分数来表示

$$\delta_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-3)$$

回差是由于仪表内有吸收能量的元件(如弹性元件、磁化元件等),机械结构中

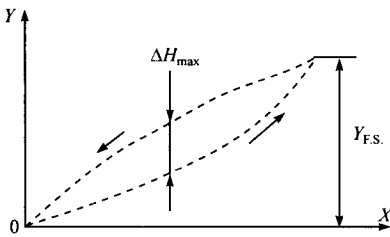


图 1-7 输入-输出的迟滞关系

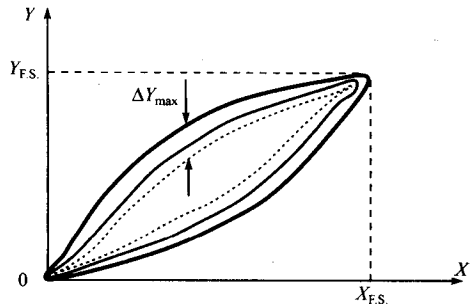


图 1-8 输入-输出的重复性

有间隙以及运动系统的摩擦等原因所造成的。

5. 重复性

在同一工作条件下,对同一输入值按同一方向连续多次测量时,所得输出值之间的相互一致程度为重复性(repeatability),如图 1-8 所示。

仪表的重复性用全测量范围内的各输入值所测得的最大重复性误差来确定。所谓重复性误差,是对全范围行程在同一工作条件下,从同方向对同一输入值进行多次连续测量所得输出值的两个极限值之间的代数差或均方根误差,它反映的是校准数据的离散程度,属随机误差,因此应根据标准偏差计算

$$\delta_R = \pm \frac{a\sigma_{\max}}{Y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中, σ_{\max} 为各校准点正行程与反行程输出值的标准偏差中之最大值; a 为置信系数,通常取 2 或 3。 $a=2$ 时,置信概率为 95.4%; $a=3$ 时,置信概率为 99.73%。

一般用贝塞尔公式法计算标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$$

式中, y_i 为某校准点之输出值; \bar{y} 为输出值的算术平均值; n 为测量次数。

6. 精确度

被测量的测量结果与(约定)真值间的一致程度称为精确度(accuracy)。仪表按精确度高低划分成若干精确度等级。根据测量要求,选择适当的精确度等级是检测仪表选用的重要环节。

7. 长期稳定性

长期稳定性(long term stability)是仪表在规定时间内保持不超过允许误差范

围的能力。

随着时间的增加,传感器的特性将发生变化,对于同一输入量,即使环境条件不变,所得的输出量也不同,输出量向一定方向偏离,这种现象叫漂移,即使输入为零,漂移也是存在的。

漂移包括零点漂移和灵敏度漂移,零点漂移和灵敏度漂移又可分为时间漂移和温度漂移。时间漂移是指在规定条件下,零点或灵敏度随时间的缓慢变化;温度漂移为周围温度变化引起的零点或灵敏度漂移。

8. 动态特性

动态特性(dynamic characteristics)指被测量随时间迅速变化时,仪表输出追随被测量变化的特性。

很多被测量要在动态条件下检测,被测量可能以各种形式随时间变化。只要输入量是时间的函数,则输出量也将是时间的函数,其间关系要用动态特性来说明,即用动态误差来说明。

动态误差包括两个部分:

- (1) 输出量达到稳定状态以后与理想输出量之间的差别;
- (2) 当输入量发生跃变时,输出量由一个稳态到另一个稳态之间的过渡状态中的误差。

由于实际测试时输入量是千变万化的,且往往事先并不知道,故工程上通常采用输入“标准”信号函数的方法进行分析,并据此确立若干评定动态特性的指标。常用的“标准”信号函数是正弦函数与阶跃函数,因为它们既便于求解又易于实现。从而仪表(或传感器)的性能指标里就出现了频率响应(仪表对正弦输入的响应)和阶跃响应(仪表对阶跃输入的响应)。

1) 频率响应(frequency resonance)特性

由物理学可知,在一定条件下,任意信号均可分解为一系列不同频率的正弦信号,也就是说,一个以时间作为独立变量进行描述的时域信号,可以变换成一个以频率作为独立变量进行描述的频域信号。一个复杂的被测实际信号,往往包含了许多种不同频率的正弦波。如果我们把正弦信号作为仪表的输入,然后测出它的响应,就可以对仪表(或传感器)的频域动态性能做出分析和评价。

将各种频率不同而幅值相等的正弦信号输入传感器,其输出正弦信号的幅值、相位与频率之间的关系称为频率响应特性。

设输入幅值为 X 、角频率为 ω 的正弦量

$$x = X \sin \omega t$$

则获得的输出量为

$$y = Y \sin(\omega t + \varphi)$$

式中, Y 、 φ 分别为输出量的幅值和初相角。

其频率传递函数的指数形式为

$$\frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{Y e^{j(\omega t + \varphi)}}{X e^{j\omega t}} = \frac{Y}{X} e^{j\varphi}$$

由此可得频率特性的模

$$A(\omega) = \left| \frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} \right| = \frac{Y}{X} \quad (1-5)$$

称为传感器的动态灵敏度(或称增益)。 $A(\omega)$ 表示输入、输出的幅值比随 ω 而变, 故又称为幅频特性, 一般用分贝表示

$$\text{dB} = X \lg A(\omega), \quad X=10 \text{ 或 } 20$$

当 $A(\omega)=1$ 时, 则增益 dB 为 0。

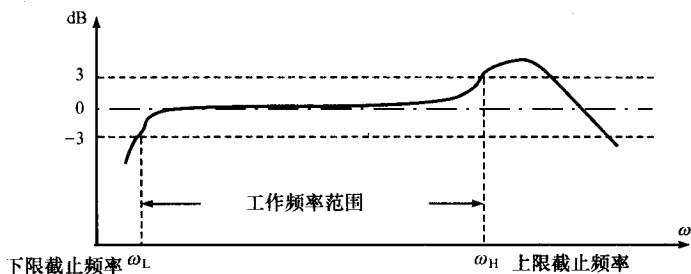


图 1-9 典型的对数幅频特性

图 1-9 中 0dB 水平线表示理想的幅频特性。工程上通常将 $\pm 3\text{dB}$ 所对应的频率范围作为频响范围, 又称通频带, 简称频带。对于仪表(或传感器), 则常根据所需测量精度来确定正负分贝数, 所对应的频率范围即为频响范围, 或称工作频带。

2) 阶跃响应 (step resonance)

当给静止的仪表(或传感器)输入一个如图 1-10 所示的单位阶跃信号

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$$

时, 其输出信号为阶跃响应, 如图 1-11 所示。

当施加一个阶跃信号, 仪表的输出在一段时间内非线性向终值(100%输出值)变化。

(1) 响应时间。输出上升到终值的 95%(或 98%)所需的时间。总体上反映仪表响应的快慢。

(2) 上升时间。规定为由终止值的 10% 上升到终止值的 90% 所需的时间。仪表(或传感器)在初始阶段响应的快慢。