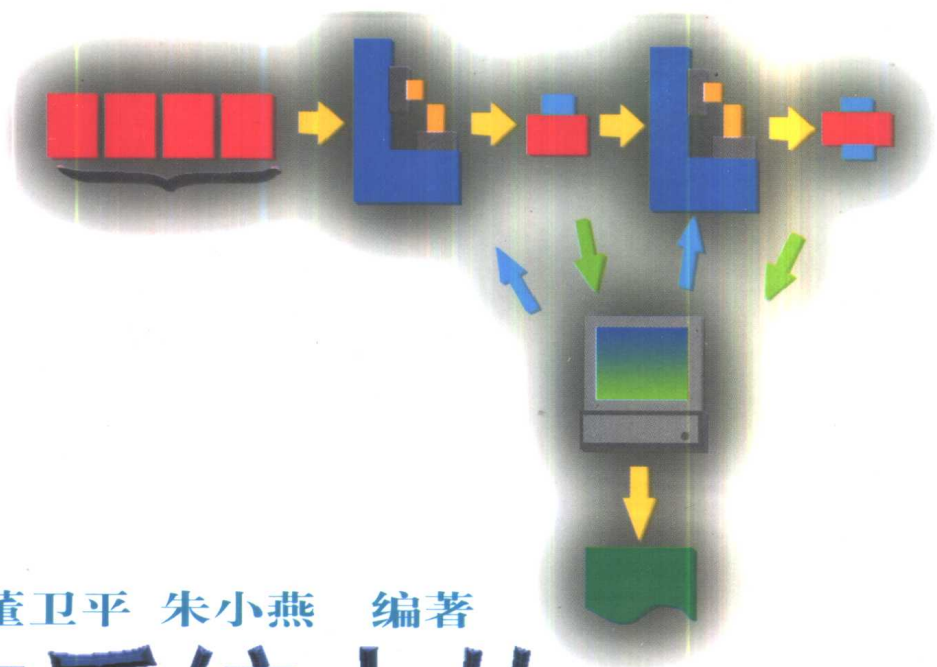
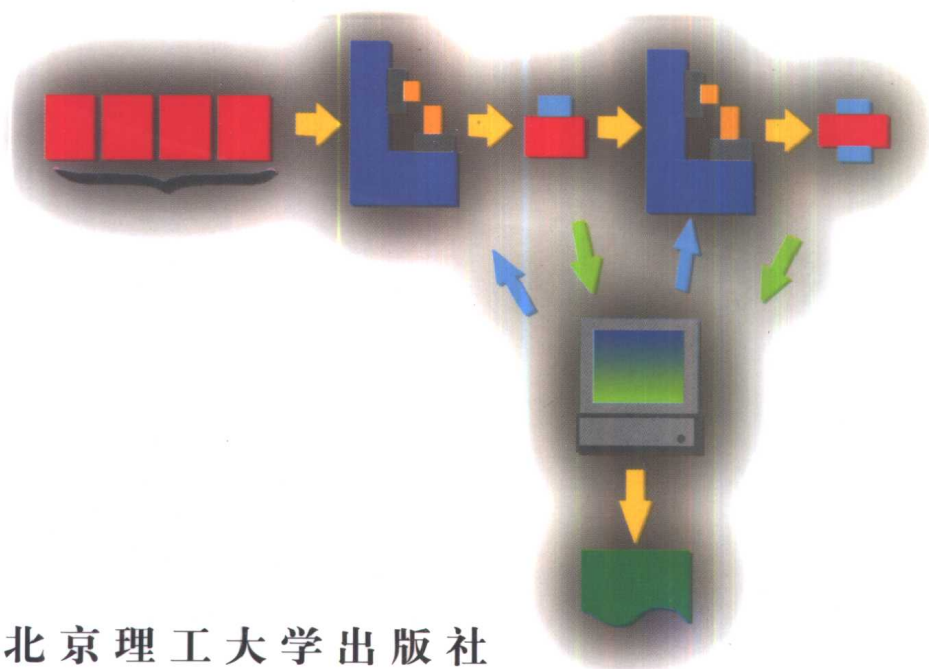




王信义 董卫平 朱小燕 编著

生产系统中的 监控检测技术



北京理工大学出版社

生产系统中的监控检测技术

王信义 董卫平 朱小燕 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书主要论述先进制造系统中产品质量(零件尺寸、形状、表面粗糙度等)的监测原理、方法,常用传感器,信号的调带、传送与数据处理,以及保证产品质量及生产系统正常运行、提高生产效率的关键技术如切削状态(刀具破损、磨损等)监测和设备(或系统)的故障监测、诊断技术。内容丰富,取材新颖,紧密结合生产实际。可作为高等工科院校的本科生、研究生教材,亦可供工厂与研究单位的工程人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

生产系统中的监控检测技术/王信义等编著. —北京:北京理工大学出版社,1998.3
高校教材

ISBN 7-81045-376-9

I. 生… II. 王… III. 生产过程-自动检测-高等学校-教材 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 01109 号

责任印制:刘京凤 责任校对:陈玉梅

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路7号)

邮政编码 100081 电话 (010) 68912824

各地新华书店经售

北京房山先锋印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 431 千字

1998 年 3 月第一版 1998 年 3 月第一次印刷

印数:1—2000 册 定价:22.00 元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

前 言

在现代制造系统的发展中,由于数控机床、加工中心、柔性制造系统(FMS)的普及,以及智能制造系统(IMS)、计算机集成制造系统(CIMS)的兴起,使制造系统正向自动化、集成化、智能化方向方展。随着这些发展,加工过程中工件、刀具和机床状态的实时监控、检测技术的作用越来越重要。据统计,在自动化加工过程中采用实时监控检测技术后,可将由于人和技术因素引起的故障停机时间减少 75%,并开辟了有效利用第二、三班和节假日时间的途径。为了实现高效低成本加工,自动化的机床大多在较高的切削速度下连续加工,一旦刀具破损或机床出现故障,如不及及时发现、处理就会造成重大损失。为了确保制造系统的加工质量、设备和工件的安全,避免重大事故,提高机床利用率和加工生产效率,必须借助监控检测系统。在上述需求背景下,作者根据多年来的教学、科研实践编著了本书。

本书的特点是紧密结合 FMS、CIMS 等自动化生产系统监控检测的实际,介绍当前最新的科学研究成就和发展动态,因此有很大的实用性和可操作性。全书共 13 章,分别为:检测系统的基本特性,监测误差与不准确度,信号的转换、滤波和预处理,数字信号处理,二维数字信号处理,工件的尺寸、形状检测,三坐标测量机的应用,表面粗糙度检测,生产系统中的自动识别技术,目视检测的自动化技术,切削状态的监测技术和设备故障诊断技术。

本书由王信义主编。第 1,2,6,9 章由董卫平编著;第 4,5 章由朱小燕编著;第 3,7,8,10,11,12,13 章由王信义编著。全书由清华大学王先逵教授审稿。

本书可作为工科高等院校研究生、本科生高年级的参考教材,亦可作为工厂,研究所技术人员参考。不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

1997 年 5 月 10 日

目 录

第 1 章 检测系统的基本特性	(1)
1.1 检测系统的静态特性	(1)
1.2 检测系统的动态特性	(5)
1.3 检测系统性能的综合评价与标定	(15)
第 2 章 检测误差与不确定度	(19)
2.1 误差的来源与分类	(19)
2.2 系统误差的处理	(22)
2.3 随机误差的处理	(25)
2.4 回归分析与曲线拟合	(31)
2.5 检测过程的不确定度	(33)
第 3 章 监测系统常用传感器	(38)
3.1 加速度传感器	(38)
3.2 位移传感器	(41)
3.3 压力传感器	(46)
3.4 力觉传感器	(48)
3.5 超声波传感器	(51)
3.6 物流系统用接近开关	(52)
3.7 光导纤维传感器	(55)
3.8 栅网开关	(57)
3.9 霍尔电流传感器	(59)
3.10 AE(声发射)传感器	(62)
3.11 CCD(Charge Coupled Device)图像传感器	(66)
第 4 章 信号的转换、滤波和预处理	(69)
4.1 信号转换简介	(69)
4.2 模拟信号与数字信号间的转换	(72)
4.3 信号的放大	(73)
4.4 模拟滤波器	(75)
4.5 数字滤波器	(80)
4.6 信号预处理	(88)
第 5 章 一维数字信号处理	(92)
5.1 信号与系统的基本概念	(92)
5.2 模拟信号离散化	(98)
5.3 Z 变换	(101)
5.4 离散傅里叶变换(DFT)和快速傅里叶变换(FFT)	(106)
5.5 相关分析及其应用	(113)
5.6 功率谱分析与估计	(118)

5.7	短时傅里叶变换	(124)
5.8	小波变换简介	(130)
第6章	二维数字信号处理	(132)
6.1	二维数字信号及系统	(132)
6.2	二维离散傅里叶级数与离散傅里叶变换	(138)
6.3	二维离散傅里叶变换的计算	(143)
6.4	二维数字滤波	(146)
6.5	二维信号相关函数与功率谱密度估计	(153)
第7章	工件的尺寸、形状检测	(160)
7.1	概述	(160)
7.2	工件尺寸的在线检测	(161)
7.3	工件直线度的在线测量	(162)
7.4	平面形状误差的检测	(167)
第8章	三坐标测量机的应用	(172)
8.1	概述	(172)
8.2	三坐标测量机在自动化生产中的应用	(173)
8.3	三坐标测量机的精度	(176)
8.4	三坐标测量机的误差补偿	(181)
第9章	表面粗糙度的检测	(184)
9.1	工程表面轮廓	(185)
9.2	触针式表面轮廓仪	(187)
9.3	光学式表面轮廓仪	(194)
9.4	三维表面粗糙度的检测	(196)
9.5	表面粗糙度的在线检测技术	(200)
9.6	表面粗糙度的特征化	(204)
第10章	生产系统中的自动识别技术	(216)
10.1	概述	(216)
10.2	数据载体的原理	(217)
10.3	数据载体的应用	(225)
第11章	目视检测的自动化技术	(228)
11.1	概述	(228)
11.2	图像检测系统	(229)
11.3	掩膜缺陷目视检测自动化	(230)
11.4	简易图像自动检测装置	(234)
第12章	切削状态的监测技术	(241)
12.1	概述	(241)
12.2	电机电流监测法	(242)
12.3	声发射(Acoustic Emission, AE)法	(244)
12.4	流体介质传递信号的新监测方法	(247)
12.5	用人工神经网络进行刀具切削状态的识别	(248)
12.6	FMS 加工状态监测系统	(250)
第13章	设备故障诊断技术	(257)
13.1	概述	(257)

13.2	设备故障诊断中常用的监测方法.....	(258)
13.3	故障诊断专家系统.....	(262)
13.4	设备的远距离故障诊断专家系统.....	(267)
13.5	基于人工神经网络的故障诊断系统.....	(268)
参考文献		(272)

第 1 章 检测系统的基本特性

无论是对于用户还是检测系统的设计者来说,首先最感兴趣的是系统的性能。即一个系统具有哪些基本特性?能完成什么任务?在什么程度上完成这些任务?性能指标能不能满足用户的基本要求?是否有优良的性能价格比等。

概括来说,一个系统的基本性能包括了静态和动态特性两个方面。前者主要是指在常量输入下的系统的一些性能指标,如灵敏度、不确定度、输入范围、分辨率等;后者是指在动态或变态信号输入下,与系统的频率响应有关的特性。这些基本特性决定了系统能不能进行所需的检测和完成所需检测的程度。

为了对检测系统的特性有个全面的了解,本章将从三个方面来概括叙述系统的特性及保证系统特性的标定问题,即系统的静态特性、系统的动态特性以及系统的标定。这三个方面在分类上是相对独立的,但所包含的内容以及对于整个检测系统的影响又是相关的。

尽管本章介绍的内容是检测系统的一些最基本的东西,但是理解和掌握这些内容有助于经济地购买和准确、有效地使用一个系统,并且对于在检测监控领域建立一个技术上的共同语言也是很有裨益的。

1.1 检测系统的静态特性

为了能对检测系统的静态特性有个系统的了解,我们将系统的静态特性分为两类来介绍。第一类属于系统的基本功能特性,它往往决定了系统的工作能力;第二类属于系统的精度特性。它往往决定了系统在什么程度上完成所需的检测。我们将从一些基本的定义出发来介绍这些特性。

一、检测系统的基本特性

检测系统的基本特性可以归纳为如下几个方面:

(1)测量范围(Range)。测量范围是指系统能够实现不失真测量时的最大的输入信号范围。测量范围是以上限与下限值给出的,如一台温度监测系统的测量范围可能是 $200^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$,而一台位移测量系统的测量范围则有可能是 $\pm 0.5\text{mm}$ 。值得指出的是一套测量系统可能有几个不同的测量范围(由不同的放大器的增益决定),这些范围可能不重叠或部分重叠。因此在询问或叙述一个系统的测量范围时,最好是给出系统的最高测量限值和最低测量限值。

(2)跨度(Span)。跨度是范围的导出量。它是测量范围上限与测量范围下限的算术差值。如上面所述的温度测量系统,其跨度为 $800 - 200 = 600^{\circ}\text{C}$;而上述位移测量系统的跨度为 $0.5 - (-0.5) = 1\text{mm}$ 。当测量范围的下限为 0 时,跨度与测量范围具有相同的意义。

(3)灵敏度(Sensitivity)。系统的灵敏度通常是指系统的静态灵敏度。它表示系统输出信号的变化相对于输入信号的变化比值。设输入信号为 x ,输出信号为 y ,则系统的灵敏度表示为

$$K(x) = \frac{\text{输出信号的变化}}{\text{输入信号的变化}} = \frac{dy}{dx} \quad (1.1)$$

如图 1.1(a)所示,当输入与输出关系为线性时,系统的灵敏度为一常数;而当输入与输出为非线性关系时(图 1.1(b)),系统的灵敏度为输入信号的函数。

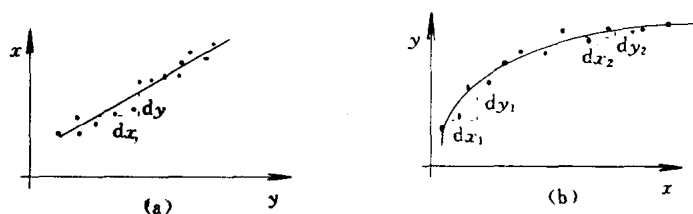


图 1.1 系统的输入与输出关系

(a)线性关系 (b)非线性关系

通常一个检测系统是由多个部分或环节组成的,如传感器前置放大器,调制器,功率放大器等。该系统的灵敏度为各环节灵敏度的综合。设每一个环节的灵敏度为 $K_1, K_2, \dots, K_n$,如图 1.2 所示,则整个系统的灵敏度将为

$$K = K_1 K_2 \cdots K_n \quad (1.2)$$

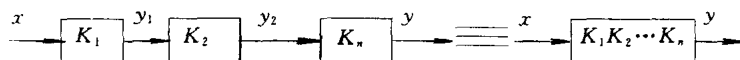


图 1.2 多环节系统的灵敏度

举例来说,一个粗糙度检测系统由传感器、放大器和纸带记录仪组成。设传感器灵敏度为 $0.5\text{mV}/\mu\text{m}$;放大器增益为 $2\text{V}/\text{mV}$;纸带记录仪灵敏度为 $2\text{mm}/\text{V}$,则系统总的灵敏度为 $K = K_1 K_2 K_3 = 0.5 \times 2 \times 2 \text{ mm}/\mu\text{m}$ 。即每当表面高度变化 $1\mu\text{m}$ 时,记录针在纸带记录仪上的高度差变化将为 2mm 。

值得注意的是,叙述灵敏度的同时必须强调灵敏度的量纲,有了量纲灵敏度才具有物理意义,否则很难从数值上理解系统的灵敏度。如一个转角测量系统,如果被检测信号有一度角的变化,检测系统的输出也是一度角的变化。则其灵敏度的值为 1。仅看这个数值似乎没有什么意义,但把量纲考虑进去后就很容易理解,该测量系统的灵敏度是一度的转角变化相对于一度的输出。正如测量范围一样,一个检测系统可以有多个灵敏度供选用。测量范围不同,系统的灵敏度也有可能不同。

(4)分辨率(Resolution)。分辨率是指能使系统的输出发生变化所对应的最小的输入变化量。换句话说,分辨率是当输出不发生变化时所允许的最大的输入变化量。举例来说,一个测量范围为 $0 \sim 1\,000\text{N}$ 的力测量系统对任何小于 0.2N 的力的变化没有任何反应,而对于 0.2N 的力的变化有所反应,则系统的分辨率可视为 0.2N 。

根据分辨率的定义,系统的输入-输出特性如图 1.3 所示。对应于输入的变化 Δx ,输出呈阶跃变化 Δy 。如果输入变化为 $\delta \cdot \Delta x, 0 < \delta < 1$,则输出将仍为 Δy 。

对于一个模拟量检测系统来说,系统的分辨率往往取决于测量元件的物理与机械特性,如摩擦、工作死区、滞回特性等。然而,对于目前许多用于生产过程检测监控的数字测量系统来说,它们都具有模数转换(A/D)装置。模拟量至数字量的转换亦具有图 1.3 相同的特性。因此,A/D 装置也将对分辨率产生影响,并且这个影响往往大于其它机械物理特性的影响。故对数字系统来说,A/D 的量化位数在很大程度上决定了系统的分辨率。对于一个只有 12 位 A/D 的位移测量系统,如其跨度为 2mm,则系统的分辨率为 $2/2^{12} \approx 0.488\mu\text{m}$ 。显然,对于一个固定位数的 A/D 装置,当跨度增大时,系统的分辨率将降低。

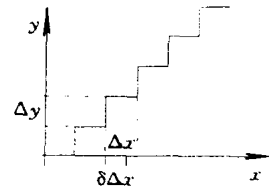


图 1.3 阶跃的输入输出特性

(5) 跨度-分辨率比(Ratio of span to resolution)。跨度给出了系统最大的检测区间,分辨率给出了能够分辨出的最小信号变化,它们两个的比值则表达了一个系统对于输入信号大小的综合检测能力。比值越大表明系统的工作性能越好,即使在大跨度测量的条件下仍能得到较高的分辨率,不至于由于跨度不够而不能完成检测任务,或由于分辨率不够而降低了测量的准确度。当系统的测量范围下限为 0 时,跨度-灵敏度比也可称为范围-灵敏度比(Ratio of range to resolution)。

二、检测系统的精度特性

在这里我们用了“精度”这一词,它是指与测量的准确度、精密度、测量误差、测量系统的线性等有关的特性,是一类特性的统称。但习惯上,它极易与下面要介绍的准确度与精密度混淆,后两者是特指确定的性能。严格地说,精度作为仪器某一方面特性的统称而非具体的某一个特性更为恰当。下面将归纳一下几个与精度有关的系统特性。

(1) 误差(Error)。误差定义为测量值与理想值的算术差值。

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{理想值} \quad (1.3)$$

尽管每一次测量的实际值或理想值是难以准确知道的,但每一次测量都必定会存在一个确定的误差。一个系统的最大测量误差是可以大致估计出的,而这个估计所在的区间就是下面要叙述的不确定度。

(2) 不确定度(Uncertainty)。不确定度是近年来才引起人们更多重视的对检测结果的评价量。它是指可能的或被认为的误差范围,也就是一种对于测量值能够多大程度地代表实际值的一种猜测。人们已注意到,无论测量误差如何矫正,总是存在测量值对于实际值正确表示的不确定性。误差是一种确定的存在,而不确定度则是这种存在的可能范围。举例来说,一个零件加工前总要给出其名义值和公差范围,其最终加工的尺寸是未知的,但实际尺寸的大小应在公差范围之内。当零件加工后,尺寸成为确定量,尺寸偏差也成为确定量。对于合格产品来说,零件尺寸及偏差必定在给定的公差范围内。因此,尺寸偏差就对应于误差,而公差范围则对应于不确定度。由于不确定度是个比较新的概念,我们在第三章中将其重点论述。

(3) 准确度(Accuracy)。准确度定义为测量结果接近于理想值的程度。从量上来说,准确度可以用测量值相对于理想值的最大误差来表示,但更多的情况下,准确度是以相对于跨度的百分比形式表示,即

$$\text{准确度} = \frac{|\text{测量值} - \text{理想值}|_{\max}}{\text{跨度}} \times 100\% \quad (1.4)$$

图 1.4 显示了准确度的求法。测量结果将位于图中所示的虚线之内,故准确度将为 $\Delta/(y_{\max}-y_{\min})$ 。数值越小,测量值就越接近于理想值,准确度也就越高。注意,准确度主要是就检测系统本身的特性而言,它不包括操作者及其它因素产生的误差。

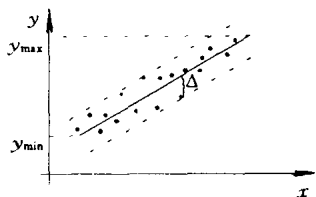


图 1.4 准确度的定义

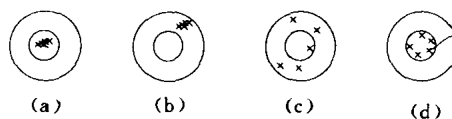


图 1.5 精密度与准确度示意图

(a) 高精密度, 高准确度 (b) 高精密度, 低准确度
(c) 低精密度, 低准确度 (d) 低精密度, 高准确度

(4) 精密度(Precision)。精密度是个极易与准确度混淆的概念。它是一种特指,表示在多次测量中测量结果自身的接近程度。重复测量值的接近程度很高,不代表与真值的接近程度很高。因此,一个高精密度的检测系统未必有高的准确度。图 1.5 示意了精密度与准确度的关系。由于精密度是某一方面特性的统称,故当精密度与准确度都较高时,我们称系统有较高的精度。

(5) 重复性(Repeatability)。重复性是描写在相同的条件下,对同一被测量连续测量时所得结果的一致性。这个定义似乎与精密度的定义很相近。在有些书中它们就被认为有相同的意义。但比较起来重复性更强调在同样条件下短时间内的重复测量结果本身。这些相同和重复条件包括:

- ① 相同的测量程度;
- ② 相同的实验观察者;
- ③ 仪器在完全相同的条件下使用;
- ④ 在相同的地点测量;
- ⑤ 在短时间内完成多次重复测量。

(6) 非线性(Non-linearity)。非线性有时也称为线性,它们对测量系统的标定值偏离线性的意义表达是一致的。也就是说如果一个系统有 1% 的非线性,也可以说成这个系统的线性是 1%。广义来说,非线性是指一条曲线偏离直线的程度。在检测系统中,非线性是指系统标定值偏离参考直线的最大偏差。作为参考直线本身来说没有一个既定的标准。比较通用的参考直线确定方法有:

- ① 最小二乘直线[图 1.6(a)]。即,使标定值相对于该直线的误差平方和为最小;
- ② 端点直线[图 1.6(b)]。即连接最小与最大标定值的直线;
- ③ 理论直线。通常检测系统的输入-输出特性都设计为线性的,这个理论上的直线可作为求非线性的基准直线。

在实际应用中,非线性常以最大非线性偏差相对于跨度的百分比表示,即

$$\text{非线性(线性)} = \frac{|\Delta|_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\% \quad (1.5)$$



图 1.6 非线性的定义
(a)最小二乘非线性； (b)端点非线性

(7) 滞回特性(Hysteresis)。在加载减载,加速减速,升温降温的过程中,对于同一个实际值,检测系统在不同的循环测量中,其测量结果是不一致的。这种在输入值增大和减小往复测量过程中所造成的对同一实际值测量所得结果不一致的现象称为滞回现象,如图 1.7 所示。滞回特性的存在往往是由于机械、电子元件的摩擦、空程、电磁滞后等特性造成的。在量值上,一个系统的滞回量常以最大滞回误差相对于跨度的百分比来表示,即

$$\text{滞回度} = \frac{\Delta_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\% \quad (1.6)$$

(8) 死区(Dead band)。死区是指当系统输出信号不发生变化时所对应的输入信号的变化范围,图 1.8 显示了死区特性的定义。死区特性主要是由系统元件的摩擦及空程等现象引起的。

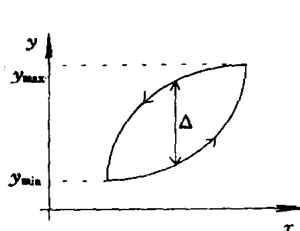


图 1.7 滞回特性

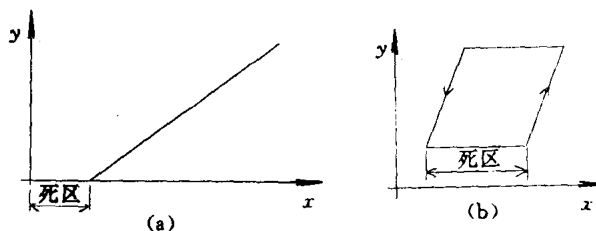


图 1.8 系统的死区特性
(a)单向工作过程； (b)往复工作过程

(9) 漂移(Drift)。漂移是指检测系统的输入-输出特性(如范围,增益,分辨率等)在一段时间内发生变化的现象。当一个检测系统长时间连续使用时,如数小时,数天,数月等,由于温度、环境、零部件磨损等将引起系统元件的机械、物理性能的变化,因而导致系统输入-输出特性的变化。根据所测对象的不同,在测量时间较短的情况下,如几秒钟至几分钟,系统的漂移特性将不足以影响测量的精度。

1.2 检测系统的动态特性

上节所述的系统静态特性是指系统在常量或缓慢变化的输入情况下的输出特性。实际上,在生产过程的检测监控中,大量遇到的还是变化的或动态的信号,如切削力,加速度,声发射等。在测量动态信号的情况下,系统的输入与输出就不仅仅是上节谈到的幅值上的关系,它们

在时间、空间或频率上也有着一定的关系。这种输入与输出在幅值与频率上的相互关系反映了系统的动态特性,其本身由系统元件的机械、物理及光、电、磁等特性决定。在本节中,我们将首先对与系统动态特性有关的概念、名词及系统的频率响应做一叙述。其次,将介绍经常遇到的基本的动态输入信号如冲击函数、阶跃函数、斜坡函数及正弦函数。最后再分别介绍不同阶数的动态系统的组成以及它们对不同的基本动态输入的响应。

一、检测系统的频率响应

任何一个检测过程都可以看作由三部分组成:一是被检测信号 $x(t)$;二是检测系统的自身特性 $h(t)$;三是系统的输出信号 $y(t)$ 。这三者之间的关系如图 1.9 所示。根据数学、力学原理, t 时刻的输出信号将是 t 时刻之前的输入对系统作用影响的综合。因此,输出可表示为输入与系统自身特性的卷积,即

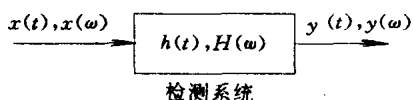


图 1.9 输入、输出与检测系统的关系

$$y(t) = \int_0^t h(t-\tau)x(\tau)d\tau = \int_0^t x(t-\tau)h(\tau)d\tau = h(t) * x(t) \quad (1.7)$$

在式(1.7)中,当输入信号为脉冲信号满足

$$x(t) = \delta(t) = \begin{cases} \infty & t=0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \quad \int_{-\infty}^{\infty} x(t)dt = 1 \quad (1.8)$$

则系统的对应输出为 $y(t) = h(t)$ 。这意味着如果对系统施加一个脉冲输入,输出即为系统特性本身。因此 $h(t)$ 又常称为脉冲响应或冲击响应函数。

对式(1.7)两端进行傅氏变换并通过适当的推导,我们可得输入-输出与检测系统特性在频率域的关系为

$$\begin{aligned} Y(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-j\omega t}dt = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^t x(\tau)h(t-\tau)e^{-j\omega t}d\tau dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau \int_0^{\infty} h(t-\tau)e^{-j\omega(t-\tau)}dt = X(\omega)H(\omega) = X(\omega)|H(\omega)|e^{j\varphi(\omega)} \end{aligned} \quad (1.9)$$

式中 $Y(\omega)$ 、 $X(\omega)$ 与 $H(\omega)$ 分别为输出、输入及系统在频率域中的特性; $\omega = 2\pi f$ 为角频率; f 为频率。(1.9)式即表达了输出对于输入的频率响应。显然,输入对于系统特性的卷积关系[式(1.7)]在频域中变成了输入对于系统的乘积关系。直观上来看,输入、输出及系统特性在数学表达式上得到了简化,输出 $Y(\omega)$ 正比于输入信号 $X(\omega)$ 。这个比例关系由系统频率特性 $H(\omega)$ 决定。当输入信号为脉冲函数时[式(1.8)],其对应的频域信号为 $X(\omega) = 1$ 。由(1.9)式知,此时输出的频率特性等价于系统的频率响应函数。其中 $|H(\omega)|$ 称为系统的幅值响应特性, $\varphi(\omega)$ 为系统的相位响应特性。

通常我们希望检测系统的输出信号能够不失真地反映输入信号。所谓不失真即信号的形状及时间、幅值等的相对关系均不发生变形,如图 1.10(a)所示,输出信号相对于输入信号发生了畸变。这表明系统的频率响应函数不能满足检测要求。在图 1.10(b)中,虽然输出的幅值、相位相对于输入发生了变化,但信号的形状、幅值与时间之间的相对关系相对于输入信号并没有发生变化。因此图 1.10(b)所示的系统满足检测要求。

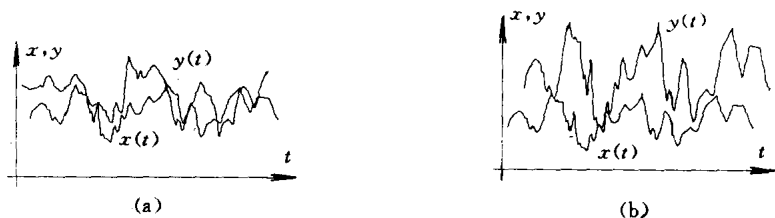


图 1.10 失真与未失真的输出信号
(a)输出信号失真； (b)输出信号未失真

为了考察实现不失真测量对检测系统的要求,根据图 1.10(b),可假设输出与输入的关系为

$$y(t) = Ax(t - \tau) \quad (1.10)$$

即输出与输入仅有常量幅值和相位上的差异。对(1.10)式进行傅氏变换并考虑到傅氏变换的时间位移特性,得输出的频率特性为

$$Y(\omega) = Ae^{-j\omega\tau}X(\omega) \quad (1.11)$$

比较(1.9)与(1.11)式,我们知道要想实现不失真测量,系统的幅值响应特性在输入信号的频率范围内必须是一常量,即

$$|H(\omega)| = A \quad (1.12)$$

而相位响应特性必须是频率的线性函数,即

$$\varphi(\omega) = -\omega\tau \quad (1.13)$$

满足这两个条件,系统就能实现不失真测量。

实际上这两个条件是完全理想化的,任何一个物理上可实现的系统很难百分之百地满足这两个条件。在实际检测系统中,系统的幅值响应特性往往在小范围内波动,并且在截止频率处,幅值响应也不是理想的突变,而是逐渐的衰减如图 1.11(a)所示。另外相位特性也往往只能在一定范围内实现线性如图 1.11(b)所示。在工程中,当幅值波动较小且线性相位存在时,输出信号仍认为是可信的。

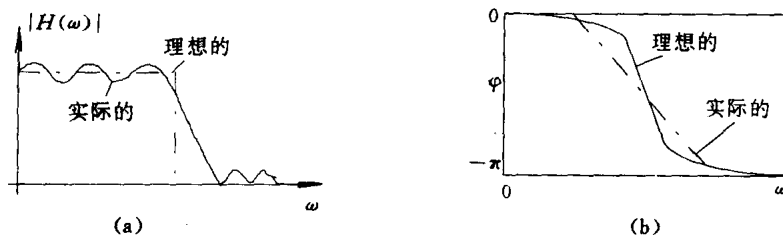


图 1.11 系统的幅值与相位响应特性
(a)幅值响应特性； (b)相位响应特性

二、典型动态输入信号

为了考察检测系统对于不同信号输入时的动态响应,这里首先介绍几个理想的基本的动态输入信号。

(1)阶跃信号。试想一个瞬态加载过程。当载荷由 x_0 瞬时加到 x_t 并维持在这个水平时,这个载荷信号则可称之为阶跃信号,如图 1.12(a)所示。阶跃信号的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} A_0 & t \leq t_0 \\ A & t > t_0 \end{cases} \quad (1.14)$$

(2)斜坡信号。斜坡信号相当于一个匀速加载过程[图 1.12(b)]。它的数学表达式为

$$x(t) = Kt \quad t \geq 0 \quad (1.15)$$

(3)正弦信号。这是一个很常用的信号[见图 1.12(c)]。其数学表达式为

$$x(t) = A \sin \omega t \quad (1.16)$$

其中 A 为常数, $\omega = 2\pi f$ 为信号的角频率。

(4)随机信号。随机信号是在检测监控中经常遇到的一种信号[图 1.12(d)],它无法用确定的函数来描述,但其统计意义可用概率分布和均值与方差等表示。根据信号类型的不同,随机信号又具有宽带随机(白噪声, White noise)和窄带随机(Pink noise)等不同类型。

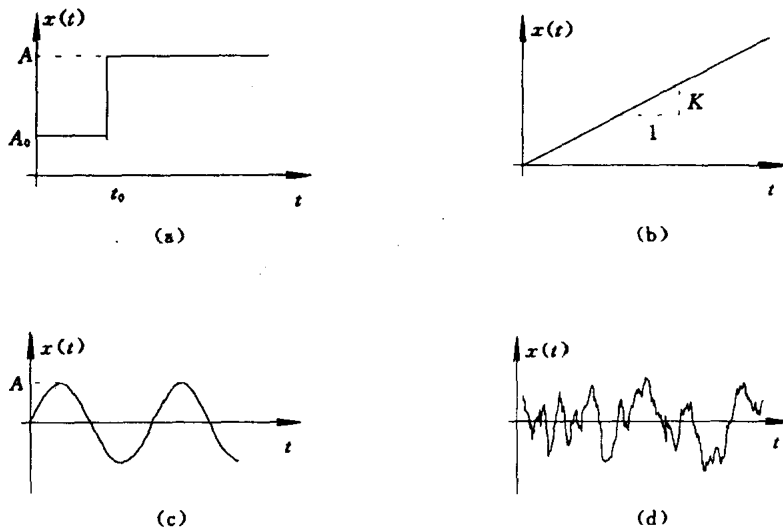


图 1.12 典型动态输入信号

(a)阶跃信号; (b)斜坡信号; (c)正弦信号; (d)随机信号

三、零阶系统及其特性

上节曾用卷积的方式表达了检测系统的输入、输出以及系统自身特性之间在时域中的关系。实际上,一个检测系统的动态特性也可以用输入输出的微分方程来表示。对于输入为 $x(t)$, 输出为 $y(t)$ 的 n 阶微分方程

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = x(t) \quad (1.17)$$

我们也称其为 n 阶系统。最基本的动态系统为 $n=0, 1, 2$ 阶,高阶系统特性往往可看作是由这些低阶系统特性组成的。因此在本节和以下两节中,我们将主要介绍零阶、一阶及二阶系统的特性。

当(1.17)式中 $n=0$ 时,我们得到零阶系统的输入与输出关系为

$$y = x/a_0 \quad (1.18)$$

该式表明,系统的输出正比于输入,比例常数 $1/a_0$ 。恰为系统的静态灵敏度或系统的增益。此时系统具有零相位特性。因此,系统对于任一频率的被测信号都将产生不失真的输出。

典型的零阶系统如图 1.13 所示的电阻应变传感器,当电阻丝发生纵向应变 $\Delta l/l$ 时,相应的电阻 R 的相对变化为

$$\Delta R/R, \text{ 因此系数 } a_0 = \frac{\Delta l/l}{\Delta R/R}.$$

零阶系统仅是一个理想的系统,它能提供良好的检测特性,实现不失真测量。然而,实际上一个复杂的系统很难实现零阶特性。

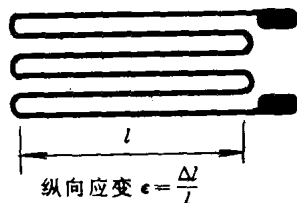


图 1.13 零阶电阻应变系统

四、一阶系统及其动态特性

在实际中,我们常能遇到一些一阶系统,如图 1.14(a)所示为一个无质量的弹簧与阻尼力作用系统。图 1.14(b)则为一常见的 RC 电路。对于这两个系统,我们可得到系统的微分方程分别为

$$c \frac{du}{dt} + ku = f_0(t), \quad \frac{c}{k} \cdot \frac{du}{dt} + u = f_0(t)/k \quad (1.19)$$

$$RC \frac{dv}{dt} + v = v_0(t) \quad (1.20)$$

若设 $c/k = \tau$ 或 $RC = \tau$, 上两式写成一个通用的式子

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = x(t) \quad (1.21)$$

其中 τ 被称为时间常数,此时

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega\tau} \quad (1.22)$$

在不同的输入作用下,系统的输出响应将有所不同。

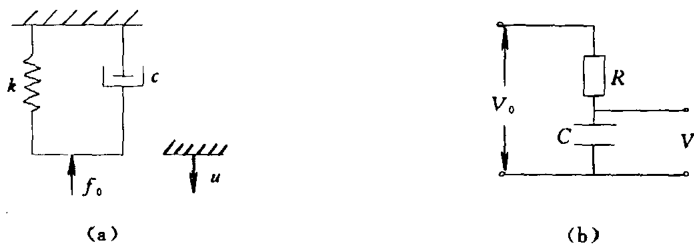


图 1.14 典型的一阶系统
(a)一阶力作用系统; (b)一阶电路系统

1. 一阶系统对于阶跃输入的响应

对于一阶系统当输入为式(1.14)所示的阶跃函数时(设 $t_0=0, A_0=0$),解(1.21)所示的微分方程或对(1.22)式进行傅氏变换,可解得

$$y(t) = A(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1.23)$$

对于不同的时间常数 τ , 我们做一阶系统的阶跃响应如图 1.15。显然,系统由快速上升段(瞬态

响应)与稳定状态段(稳态响应)两部分组成。当时间 t 趋于无穷大时,输出将趋于阶跃输入的常量。实际上,当 $t=4\tau$ 时,输出已接近于输入的 98.2%。而当 $t=\tau, 2\tau$ 与 3τ 时,输出分别为输入的 63.3%、86.5% 及 95%。通常为了描述一个系统接近稳态输出的时间,常用输出达到与稳态值的误差为 2% 时的时间来表示,这个时间就称为稳态时间(Settling time)。一阶系统对于阶跃输入的响应,其稳态时间为 4τ 。

由图 1.15 还可知道对于阶跃输入响应的速率完全由时间常数 τ 决定, τ 越小,系统响应越快,即系统输出能很快的趋于阶跃输入量。响应速率的大小,亦可由输出在零点处的斜率 A/τ 来反映。零点处切线的延长线相交于输入量的横坐标,即为时间常数 τ 。

2. 一阶系统对于斜坡输入的响应

当输入为(1.15)式所示的斜坡输入时,由(1.21)与(1.22)式可解得系统的斜坡响应为

$$y(t) = K(\tau e^{-t/\tau} + t - \tau) \quad (1.24)$$

一阶系统斜坡响应由三部分组成。第一部分为瞬态指数项,如上节所述该指数项将迅速衰减,其起作用的有效时间很短,当 $t=4\tau$ 时,它对输出的影响将是微不足道的。

第二部分为一负的常数。由于该项的存在,使得输出始终滞后于输入(见图 1.16)。当 t 较大时,响应滞后于输入一个常量。

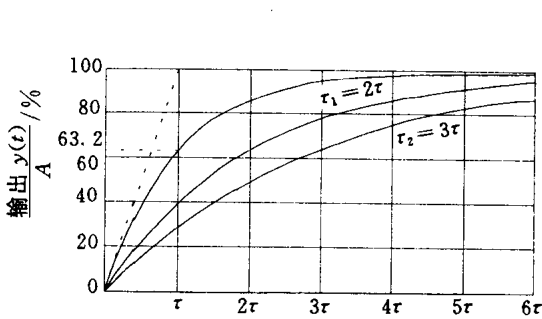


图 1.15 一阶系统的阶跃响应

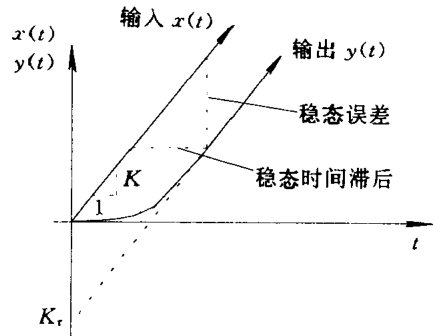


图 1.16 一阶系统对于斜坡输入的响应

(1.24)式的第三项等价于斜坡函数本身。当 t 较大时它使得输出的斜率等同于输入的斜率,这样可使输出跟踪输入,两者仅在幅值上相差一个常数。

由(1.24)式可知,要想使一阶系统的输出能够迅速地跟踪斜坡输入信号,时间常数 τ 应该尽量小,此时的输出也将能够尽量地接近输入。

3. 一阶系统对于正弦输入的响应

对于(1.16)式所示的正弦信号,由(1.21)或(1.22)式可解得系统的输出为

$$\begin{cases} y(t) = \frac{A\omega}{\tau^2\omega^2 + 1} e^{-t/\tau} + \frac{A}{\sqrt{\tau^2\omega^2 + 1}} \sin(\omega t + \varphi) \\ \varphi = \arctan(-\omega\tau) \end{cases} \quad (1.25)$$

显而易见,一阶系统对于正弦输入的响应亦由两部分组成。第一部分瞬态项将在短时间内衰减。一定时间后,响应将由第二项即稳态项主导。稳态输出具有与输入相同的频率,但在相位上具有一个与频率有关的相位差。另外,输出信号的幅值亦小于输入信号的幅值,并且对于不同的频率,输出幅值的衰减程度也并不一样。图 1.17 显示了一阶系统在不同频率正弦输入