

传感器动态特性

的

实用研究方法

徐科军 著

中国科学技术大学出版社

传感器动态特性的实用研究方法

徐科军 著

中国科学技术大学出版社

1999 • 合肥

图书在版编目(CIP)数据

传感器动态特性的实用研究方法/徐科军 著. —合肥:中国科学技术大学出版社,1999
ISBN 7-312-01041-5

I. 传… II. 徐… III. 传感器-动态特性-研究方法 IV. TP212.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 00253 号

中国科学技术大学出版社出版发行
(安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026)
中国科学技术大学印刷厂印刷
全国新华书店经销

开本:787×1092/16 印张:11.25 字数:270 千
1999 年 2 月第 1 版 1999 年 2 月第 1 次印刷
印数:1—2000 册
ISBN 7-312-01041-5/TN·34 定价:20.00 元

前言

传感器的动态特性至关重要:(1)随着生产和科技的发展,人们愈来愈多地要求测量动态非电量;(2)传感器广泛应用于生产过程的自动检测,这就要求它准确、迅速地反映被测参数的变化。否则,整个控制系统就不能正常工作;(3)传感器作为机器人的“五官”,其动态品质的好坏直接影响到机器人功能的发挥。

在传感器动态特性研究中,动态标定是考核传感器动态性能的实验。动态数学模型定量描述传感器输入-输出关系,是研究其工作机理的重要手段。依据动态数学模型,可正确评价传感器的动态性能,可在计算机上对传感器进行数字仿真,可设计动态补偿数字滤波器。时域建模和频域分析是从两个不同的角度研究传感器的动态特性。数字仿真是依据已建立的数学模型,输入不同的激励信号,进行机上实验,可弥补实验设备的局限。动态补偿和动态误差修正是改善动态性能的有效手段,动态解耦是多维传感器和复合型传感器研制中的关键技术,微处理器的普及为这些方法的应用提供了有利条件。本书针对传感器动态特性研究中实验、建模、分析、补偿和解耦等基本、关键问题,以实验为基础,采用系统辨识建模、计算机仿真和动态补偿相结合的方法,采用时域分析与频域估计相结合的方法,具体研究若干种传感器的动态特性,建立准确的数学模型,分析其频率特性,设计瞬态性能补偿、动态误差修正和动态解耦环节,提高其动态品质,并总结出较为完整、系统的方法,推广运用于其它传感器,以推动我国此方面研究工作的发展。

第二章介绍机理建模方法。根据传感器的工作原理和结构特点,将其近似为一、二阶系统,列出其微分方程或偏微分方程,用解析方法推导出动态响应的表达式,或者用数值方法求解得到动态响应过程的数值。

第三章介绍动态标定的方法:脉冲响应法、阶跃响应法和频率响应法,以及各种传感器动态标定的实例。介绍对采集数据预处理的方法。

第四章介绍依据动态标定的实验数据,用系统辨识方法、沃尔什变换方法、最大熵谱法和自适应方法,建立腕力传感器和压力传感器的数学模型,其理论结果与实测值吻合。又用最大熵谱法建立腕力传感器多维 AR 模型,以全面反映传感器的多路输出情况和维间干扰。介绍采用神经网络方法建立传感器模型的结果和特点。

第五章介绍用基于快速傅里叶变换的经典谱估计方法、用基于伯格算法的现代谱估计方法和基于模型的频域分析方法,分析传感器输入、输出信号的功率谱,计算频率响应函数和相干函数,确定固有频率和阻尼比等。

第六章介绍改善传感器瞬态响应的补偿方法。分别依据控制理论,采用零极点配置的方法;依据传感器理想输出的要求,采用系统辨识的方法;依据“逆模型”思想,采用神经网络方法,设计动态补偿数字滤波器。又分别用运放和微处理器,实现动态补偿环节,提高传感器动态响应的快速性。

第七章介绍传感器动态误差的修正方法:频域法、迭加积分法、反滤波法和实时数值微分法。

第八章介绍多维力传感器的维间耦合问题,静态解耦方法,动态解耦方法,动态解耦补

偿方法,以及静动态联合解耦补偿方法。

第九章介绍用机理分析和实验建模相结合的方法,研究传感器的动态负载效应,在时域给出反映参数与负载关系的表达式;在频域确定其固有频率和阻尼比。提出自适应多维动态补偿方法,用以数字信号处理器为核心的处理系统实现。

第十章介绍在频域研究传感器的动态非线性特性,估计二次非线性传递函数。在时域采用基于函数联接型神经网络的动态非线性建模方法,更为准确地描述传感器的动态特性。

本书的特点是:(1)理论与实验及实现相结合,以实验为基础,以实用为目的;(2)着重于各种方法的应用;(3)由建模、仿真、补偿和解耦形成较为完整的研究、改善传感器动态性能的方法;(4)传感器多维建模、动态解耦和自适应多维动态补偿等新方法的提出与研究。

本书的大部分内容是作者在国家自然科学基金、机械工业部高校跨世纪优秀人才专项基金、安徽省自然科学基金和八六三计划及网点实验室基金资助下,与学生们所做工作的总结。先后参加作者课题研究的本科生有:陶有军、邹锦、戎锁定、杜涛、唐霆、韩泓和周胜生等,硕士研究生张颖、江敦明和殷铭,博士研究生李成。作者感谢上述基金会的资助,感谢学生们所做的出色工作。

作者曾得到中国科学院合肥智能机械研究所王国泰研究员及课题组的老师们、陈效肯研究员,哈尔滨工业大学博士生导师赵新民教授,清华大学博士生导师周兆英教授,合肥工业大学马文教授和博士生导师费业泰教授等的指导和帮助,在此一并致谢。

作者引用了有关专家的成果,特别是北京航空航天大学黄俊钦教授的论著,始终给作者以指导,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中的错误和缺点难免,敬请广大读者和有关专家批评指正。

作者于合肥工业大学自动化所

1998年7月

内 容 简 介

随着科技和生产的发展,人们愈来愈多地要求测量动态非电量。在测控系统中,传感器是关键部件,其动态性能的优劣直接影响测量的准确性和控制的实时性。因此,传感器的动态特性变得更为重要,其研究日益受到人们的重视。但是,国内在此方面所做的工作不多,研究基础比较薄弱,全面、系统地介绍传感器动态特性研究方法的书较少。为此,作者以本人工作为基础,以实用方法为线索,以应用为主,较系统地介绍传感器动态实验、建模、分析、补偿、解耦和非线性研究方法,列举了在多维力、压力、温度、加速度和流量等传感器中应用的实例。

本书可供从事工业自动化、仪器仪表、计量测试和计算机应用等方面的科技人员阅读,也可供高等院校有关专业的师生参考。

DV23/01

目 录

1	绪论	1
1.1	研究传感器动态特性的意义	1
1.2	动态数学模型	2
1.3	动态性能指标	6
2	机理建模方法	9
2.1	瞬态响应	9
2.2	频率响应	13
2.3	压力传感器动态响应	15
2.4	温度传感器动态响应	17
2.5	电子吊秤的动态模型	19
2.6	压电式加速度传感器动态模型	21
3	动态标定实验	23
3.1	冲击响应法	23
3.2	频率响应法	25
3.3	阶跃响应法	26
4	时域的实验建模方法	28
4.1	系统辨识方法	28
4.2	系统辨识法建模实例	31
4.3	沃尔什变换方法	37
4.4	最大熵谱法	44
4.5	自适应方法	51
4.6	神经网络方法	55
5	频谱估计方法	62
5.1	概述	62
5.2	经典谱估计方法	63
5.3	现代谱估计方法	69
5.4	基于模型的频域分析	72
5.5	由瞬态响应求传递函数的两步法	75
6	动态补偿方法	78
6.1	动态补偿器设计	78
6.2	动态补偿器实现	92
6.3	热电偶的补偿	96
6.4	热式流量传感器的补偿	99
7	动态误差修正方法	101
7.1	概述	101

7.2	反滤波动态误差修正法	103
7.3	实时数值微分修正方法	104
7.4	频域修正方法	108
8	动态解耦方法	113
8.1	多维传感器的维间耦合	113
8.2	静态解耦	113
8.3	动态耦合	118
8.4	不变性动态解耦方法	120
8.5	迭代动态解耦方法	126
8.6	动态解耦补偿方法	129
8.7	静动态联合解耦补偿方法	140
9	自适应动态补偿	144
9.1	称重传感器自适应动态补偿	144
9.2	六维腕力传感器动态负载效应	147
9.3	自适应多维动态补偿方法	150
9.4	基于 ADSP 的自适应多维动态补偿器	152
10	动态非线性研究	159
10.1	动态非线性原因与评定	159
10.2	二次非线性的频域估计	160
10.3	基于 FLANN 的时域建模	164
	参考文献	167

1 绪 论

1.1 研究传感器动态特性的意义

传感器是仪器仪表和测量系统的核心部件,是过程控制系统的首要环节,是机器人的“五官”,是自动获取信息的重要装置,是推广和普及计算机应用必不可少的器件,其重要性已被人们充分认识,并成为研究和开发的热点。

传感器性能指标是衡量其优劣的标准,是其设计的目标,是用户选择的依据。根据被测量是否随时间变化,传感器的性能指标分为静态和动态两大类。目前,国内外对传感器的静态特性研究较为深入和全面,而对动态特性研究较少。国内在此方面更为落后,其主要原因有:(1)技术的发展滞后于发达国家,探索工作还没有进行到这一步;(2)受实验设备的限制,有些专业生产厂家不具备动态标定设备;(3)没有认识到动态特性的重要性,有些产品甚至给不出动态性能指标。

1.1.1 传感器动态性能的重要性

(1)随着科技的发展,人们愈来愈多地要求测量动态非电量或运动过程中测量非电量。例如,航空、航天飞行器某些部件的瞬变温度和压力的测量;物体在装卸时或运动中称重;对切削力的大小和变化进行检测;枪炮的膛内压力、发动机爆震压力、冲击波压力的瞬变过程的测量;脉动流量的测量,等等。若传感器动态性能不佳,就无法快速、准确地反映被测量的变化。例如,测量人体温度的水银温度计,在放入腋下 3~5 分钟后才能得到正确的体温读数,无法测量瞬变温度。用机械式的百分表就很难准确测量物体振动的振幅,因为它的惯性大,不能及时跟踪被测量的变化。

设某个传感器的幅频特性如图 1.1 所示。当被测信号的频率 $\omega < \omega_1$ 时,输入和输出在幅频上是线性关系,传感器可以准确地反映被测量的变化;当 $\omega_1 < \omega < \omega_2$ 时,输入与输出信号的幅值比随频率而变化,传感器对被测量中不同频率分量的转换系数不一样,将导致信号失真。当 $\omega > \omega_2$ 时,输出信号接近于零,传感器无法反映被测量的变化。此外,还应该考虑相频特性。

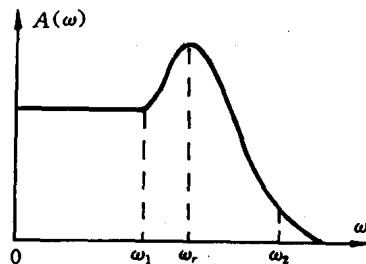


图 1.1 传感器的幅频特性

(2)传感器广泛应用于生产过程的自动检测,这就要求它准确、迅速地反映被测参量的变化,否则,整个控制系统就不能正常工作。随着生产的发展,在许多工艺中,反应速度加快

了,设备的结构尺寸变小了,即控制对象的时间常数日益减小,需要选用快速响应的传感器。

(3)传感器是机器人必不可少的器官,为机器人的操作和控制提供信息,其动态性能优劣直接影响到机器人功能的正常发挥。如果机器人力控制系统的控制周期是 6ms,那么,作为系统中一个环节的传感器,其动态响应的过渡过程时间应该小于 6ms。随着机器人从低速向高速运动发展,传感器的动态品质将更为引起人们的重视。

1.1.2 传感器动态特性的定义

传感器动态特性是指对于随时间变化的输入量的响应特性。动态特性与静态特性的区别是:动态特性中输入量与输出量的关系不是一个定值,而是时间的函数,它随输入信号的频率而变化。动态响应特性可以分为稳态响应特性和瞬态响应特性。

所谓稳态响应特性是指传感器在振幅稳定不变的正弦形式非电量的作用下的响应特性。稳态响应的重要性在于工程上所遇到的各种非电量变化曲线都可以展成富里叶级数或进行富里叶变换。即可以用一系列正弦曲线的叠加来表示原曲线。因此,当我们知道了传感器对正弦变化的非电量的响应特性,也就可以判断它对各种复杂变化曲线的响应了。

所谓瞬态响应特性是指传感器在瞬变的非周期非电量作用下的响应特性。瞬变的波形多种多样,一般只选几种比较典型规则的波形,对传感器进行瞬态响应的分析。如阶跃、脉冲和半正弦等。

1.1.3 传感器动态特性的主要内容

动态标定方法和实验,动态性能指标的定义和计算,动态数学模型的表示,时域动态建模方法,频域分析方法,动态响应的计算机仿真,瞬态性能补偿方法,动态误差修正,动态解耦和实际工作特性的研究等。其中,动态实验是基础,动态建模是关键,动态补偿、动态误差修正和动态解耦是目的。

1.2 动态数学模型

1.2.1 动态建模的意义

(1)动态数学模型定量描述传感器输入、输出以及结构参数之间的关系,是研究其工作机理的重要手段,是制定各项标准和规程的依据。

(2)根据动态数学模型,可以正确评价传感器的动态性能。若直接根据传感器动态标定的实测曲线估算其性能指标,有时可能得到不合理的结果。这是因为在实验中不可避免地受到各种噪声的干扰,在测量中或多或少地存在误差。而通过模型的拟合,在一定程度上可以消除测量误差^[1]。

(3)有了正确的数学模型,就可以在计算机上对传感器进行数字仿真,即用程序产生不同的激励信号,输入给传感器的模型,计算其输出,观察动态响应。在计算机上进行仿真实

验,可以不受实际设备的局限(这些装置只有少数单位才具备),克服实验研究的困难。

(4)对于机电互易型传感器,如压电、磁电和力平衡式传感器,依据数学模型,可以实现在线动态校准。

(5)基于动态模型,可以设计和研制模拟电路网络或数字运算环节,去提高响应的快速性,修正动态误差,实现动态解耦。

1.2.2 动态数学模型的表示

1. 微分方程

对于属于线性时不变系统的传感器,可以用高阶常系数线性微分方程描述其动态特性

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\ b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t) \end{aligned} \quad (1.1)$$

式中, $u(t)$ 为输入量, $y(t)$ 为输出量, $a_0, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m$ 是系数,与传感器本身的工作原理和结构参数有关。虽然微分方程是描述传感器动态特性的基本方法,但是运用起来很麻烦。一是传感器的转换原理和结构形式复杂,很难建立较为准确的微分方程。二是即便给出了微分方程,也很难求解。三是采简化方法推出的方程,与实际情形相差较大,没有意义。

2. 传递函数

对于线性时不变传感器,可以用传递函数来表示它的动态特性。若传感器的初始条件为零,对式(1.1)进行拉普拉斯变换,得

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1.2)$$

式中,分母中 s 的幂次代表传感器的阶数。传递函数有以下特点:

- 它仅仅适用于线性系统,且初始条件为零。
- 它与传感器的输入、输出无关,只反映其本身的固有特性。
- 与其具体的原理和结构无直接关系。同一个传递函数可以表示两个完全不同的物理系统。例如,电阻式温度计与RC低通滤波器均为一阶系统。

传递函数的作用为:

- 用方框图表示各环节的传递函数,当忽略负载效应时,可以方便地给出整个传感器或仪表的传递函数。
- 任一传感器均可视为一、二阶系统的串联组合。

3. 频率响应函数

用 $s=j\omega$ 代入传递函数,得到频率响应函数 $H(j\omega)$ 。它是复数,是 $H(s)$ 的特例。对于稳定的常系数线性系统,若输入为一正弦函数,则稳态时的输出也应是同一频率的正弦函数。通常,输出信号的幅值和相角与输入的不相等。输出与输入信号的幅值之比与频率的关系,称为幅频特性;输出与输入信号的相位之差与频率的关系,称为相频特性。

4. 差分方程

对于属于单输入/单输出线性定常系统的传感器,可以采用差分方程的单变量形式予以描

述

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \cdots + a_n y(k-n) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + \cdots + b_n u(k-n) + e(k) \quad (1.3)$$

式中,

$$e(k) = \varepsilon(k) + c_1 \varepsilon(k-1) + \cdots + c_n \varepsilon(k-n) \quad (1.4)$$

$\{u(k), y(k)\}$ 为实测的输入、输出序列; $\{e(k)\}$ 为零均值同分布的不相关的随机变量序列; $\varepsilon(k)$ 为白噪声; n 为模型阶数。该模型为可控的自回归滑动平均模型(CARMA 模型)。

在式(1.3)中,若 $e(k) = \varepsilon(k)$, 则该式变为

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \cdots + a_n y(k-n) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \cdots + b_n u(k-n) + \varepsilon(k) \quad (1.5)$$

该模型为可控的自回归模型(CAR 模型)。

当式(1.3)中的 $b_0 = b_1 = \cdots = b_n = 0$, 则该式变为

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \cdots + a_n y(k-n) = \varepsilon(k) + c_1 \varepsilon(k-1) + \cdots + c_n \varepsilon(k-n) \quad (1.6)$$

该式为自回归滑动平均模型(ARMA 模型)。

当式(1.3)中的 $b_0 = b_1 = \cdots = b_n = 0, c_1 = c_2 = \cdots = c_n = 0$, 则变为自回归模型(AR 模型)

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \cdots + a_n y(k-n) = \varepsilon(k) \quad (1.7)$$

当式(1.3)中的 $a_1 = a_2 = \cdots = a_n = 0, b_0 = b_1 = \cdots = b_n = 0$, 则变为滑动平均模型(MA 模型)

$$y(k) = \varepsilon(k) + c_1 \varepsilon(k-1) + \cdots + c_n \varepsilon(k-n) \quad (1.8)$$

描述属于多输入、多输出线性系统的传感器的差分方程为

$$Y(k) + A_1 Y(k-1) + \cdots + A_n Y(k-n) = B_0 U(k) + B_1 U(k-1) + B_2 U(k-2) + \cdots + B_n U(k-n) \quad (1.9)$$

式中, $A_i \in R^{mm}, B_i \in R^{mr}, i = 0, 1, 2, \cdots, n$ 。

5. 状态方程

由微分方程可以转换成连续时间的状态方程,进而可以转换成离散时间状态方程

$$\begin{cases} X(k+1) = AX(k) + BU(k) \\ Y(k) = CX(k) + DU(k) \end{cases} \quad (1.10)$$

式中,状态向量 $X \in R^n$, 输入向量 $U \in R^r$, 输出向量 $Y \in R^m$; 系数矩阵 A 、驱动矩阵 B 、输出矩阵 C 和传递矩阵 D 均是适当维的参数矩阵。它不但表达传感器的输入、输出关系,而且还描述决定传感器运动的状态变量情况。

6. 脉冲响应函数

对于线性传感器,可以把任意形式的输入量 $u(t)$ 看成是由无数个“脉冲”叠加组成的,即 $u(t)$ 是由 $u_1(t), u_2(t), \cdots$ 等组成,对应于这许多个脉冲,传感器都有一个响应,即 $y_1(t), y_2(t), \cdots$ 。那么,总的输出 $y(t)$ 就是 $y_1(t), y_2(t), \cdots$ 之和。根据卷积公式

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) h(t-\tau) d\tau \quad (1.11)$$

式中, $h(t)$ 为脉冲响应函数。

总之,描述传感器动态模型的形式有多种。可分为参数与非参数模型。其中,微分方程、差分方程、传递函数和状态方程等为参数模型;脉冲响应、幅频特性和相频特性等为非参数模型。可分为连续系统与离散系统模型。其中,微分方程、传递函数和状态方程等描述连续系统;差分方程、离散传递函数和离散状态方程等描述离散系统。还可分为线性与非线性模型,确定性与随机模型等。

不同的动态模型各有特点。参数模型是个表达式,而非参数模型是条曲线。动态模型可以相互转换。微分方程经拉普拉斯变换,转化成传递函数,再经双线性变换转化成差分方程。有些模型之间存在本质的区别。如线性与非线性模型。迭加原理可以用于线性系统,而不适用于非线性系统。

1.2.3 动态建模方法

动态建模方法可以分为两大类:机理分析法和实验建模法。

1. 机理分析法

机理分析法是依据力学、电磁学、热力学和化学等基本理论,对传感器的转换原理进行分析和抽象,提出模型,列出微分方程。对微分方程进行拉普拉斯变换,在初始条件为零的情况下,写出传感器的传递函数。考虑到复频域的物理意义不明显,将变量 s 用 $j\omega$ 代替,由此得到传感器的频率响应函数,进而可以推出幅、相频特性曲线。当然也可以直接对传递函数进行拉普拉斯反变换,得到时域的响应曲线。

机理分析法的特点是:

- a. 推导过程清晰,所得解析表达式反映了传感器输入、输出和参数之间的关系;
- b. 适用于结构和原理较简单的传感器;
- c. 在建模时,一般要对实际情况作较大简化,所得结果往往与实测值不符。以往人们大多用机理分析方法研究传感器的动态特性,故本书首先简单介绍机理分析法的建模和求解过程。

2. 实验建模法

首先,对传感器进行动态标定,采集其输入、输出数据。其次,采用系统辨识、时间序列分析和沃尔什(Walsh)变换等方法,建立其差分方程或微分方程形式的数学模型。或者,直接对实验数据进行变换,得到频率响应曲线等非参数模型。此类方法是把传感器看作一个系统、一个“黑箱”,仅仅根据其外部特性来建模。

实验建模法的特点是:

- a. 需要动态标定和数据采集、记录设备;
- b. 要选择合适的标定方法和激励信号,既要简单、易行,又要能充分考核传感器的动态特性;
- c. 其模型并不直接反映传感器的结构和原理;
- d. 所建模型便于与实验结果对照,准确、可靠。

实验建模法可以在时域、频域和时频域中进行。在时域中,用系统辨识法、沃尔什变换法等建立参数形式的动态模型。在频域中,用快速傅里叶变换、时间序列法求频率特性曲线。用小波分析法得到时频模型。本书着重介绍实验建模法。

1.3 动态性能指标

动态模型是研究传感器动态特性的手段,动态性能指标是评价传感器动态特性优劣的标准。与静态性能指标相比,它较为复杂,可以分为时域和频域两大类。

1.3.1 时域性能指标

通常以传感器对单位阶跃输入量的瞬态响应形式给出,并采用标准的初始条件,即传感器最初处于静态状态,输入量和输出量对时间的各阶导数都等于零。阶跃输入对传感器来说是最严峻的工作状态。若传感器在阶跃函数作用下,其动态特性能够满足要求,那么,在其它形式的输入作用下,其动态特性也是令人满意的。

1. 上升时间 t_r

通常定义响应从稳态值的 10% 上升到 90% 所需要的时间为上升时间。它是传感器响应速度的一种度量。上升时间愈小,响应愈快。对于欠阻尼二阶系统,定义响应从 0 到 100% 所需的时间为上升时间。

2. 峰值时间 t_p

响应超过稳态值,到达第 1 个峰值所需的时间。

3. 过渡过程时间 t_s (又称调整时间)

响应到达并停留在稳态值的 $\pm 5\%$ 误差范围内所需要的最小时间。

4. 超调量 M_p

在传感器响应过程中,输出量的最大值为 $y(t_p)$ 。如果 $y(t_p)$ 小于稳态值 $y(\infty)$,则响应无超调;如果 $y(t_p)$ 大于 $y(\infty)$,则定义超调量为

$$M_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1.12)$$

应当指出,这些性能指标并非在任何情况下都必须全部采用。

1.3.2 频域性能指标

1. 幅值频率误差 δ 和相位频率误差 ϕ

当用传感器测量随时间变化的周期信号时,则必须求出传感器所能测量周期信号的最高频率 ω_p ,以保证在 ω_p 范围内,幅值频率误差和相位频率误差不超过给定数值。设传感器幅频特性为

$$|H(j\omega)| = P(\omega) + jQ(\omega) = A(\omega)\exp[jQ(\omega)] \quad (1.13)$$

定义幅频误差为

$$\delta = \frac{A(0) - A(\omega_p)}{A(0)} \times 100\% \quad (1.14)$$

式(1.14)表示输入信号频率从零变到 ω_p ,幅频特性的相对变化量。有时规定幅值误差 $\pm 10\%$ (或 $\pm 5\%$) 的频段 $0 \leq \omega \leq \omega_g$ 为工作频带,这是一个比较实用的频域指标。

定义相位频率误差为

$$\varphi = \theta(\omega_p) - \theta(0) \quad (1.15)$$

式(1.15)表示输入信号频率从零变到 ω_p ,相频特性的相移。当给定 δ 和 φ 值后,可以根据式(1.14)和式(1.15)求出对应的 ω_p 。用传感器测量频率低于 ω_p 的周期信号时,可以保证幅、相频误差不超过给定值。

2. 截止频率和通频带

当传感器的对数幅频特性曲线下降到零频率值以下3分贝时,对应的频率为截止频率。传感器的幅值不低于-3分贝时,对应的频率范围 $0 \leq \omega \leq \omega_b$ 称为传感器的通频带。通频带表明传感器的响应速度。

工作频带与通频带的关系如图1.2所示。

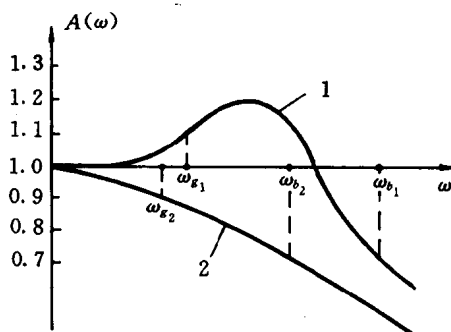


图 1.2 工作频带与通频带关系:

- 1-欠阻尼系统;
- 2-过阻尼系统。

3. 谐振频率和固有频率

幅频特性曲线在某一频率处有峰值,那么这个频率就是谐振频率 ω_r 。 ω_r 表征瞬态响应的速度, ω_r 的值越大,时间响应速度越快。

对于二阶系统,当阻尼比 ξ 趋于零时,谐振频率趋近于无阻尼固有频率 ω_n 。当 $0 \leq \xi \leq 0.707$ 时, ω_r 小于有阻尼固有频率 ω_d 。当 $\xi > 0.707$ 时,不产生谐振峰值。

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (0 \leq \xi \leq 0.707) \quad (1.16)$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (0 \leq \xi \leq 1) \quad (1.17)$$

有阻尼固有频率 ω_d 为瞬态振荡频率,随着阻尼比 ξ 而变化。对于弱阻尼系统, ω_r 与 ω_d 是很接近的。

1.3.3 时域与频域两类性能指标的关系

对于一阶系统和二阶系统,通频带与瞬态响应速度有明确的函数关系。设一阶系统的传递函数为

$$H(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (1.18)$$

式中, T 为时间常数。按通频带定义,可以求出

$$\omega_b = 1/T \quad (1.19)$$

若取5%误差带时的调整时间 $t_s = 3T$,上升时间 $t_r = 2.20T$,则

$$t_s = 3T = 3/\omega_b \quad (1.20)$$

$$t_r = 2.20T = 2.20/\omega_b \quad (1.21)$$

可见,通频带与上升时间和调整时间成反比。

对于欠阻尼二阶系统,上升时间为

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (1.22)$$

式中, β 为 $\tan^{-1} \frac{\omega_d}{\sigma}$, σ 为 $\xi\omega_n$ 。调整时间为

$$t_s = \frac{3}{\xi\omega_n} \quad (1.23)$$

可见, t_r 和 t_s 均与 ω_n 成反比。而通频带与 ω_n 成正比。因此, t_r 和 t_s 均与通频带成反比。

若欠阻尼二阶系统的传递函数为

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1.24)$$

根据通频带定义, 有

$$\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_b^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4\xi^2 \frac{\omega_b^2}{\omega_n^2}} = \sqrt{2} \quad (1.25)$$

故

$$\frac{\omega_b^2}{\omega_n^2} = (1 - 2\xi^2) \pm \sqrt{(1 - 2\xi^2)^2 + 1} \quad (1.26)$$

由于 ω_b 是正值, 所以

$$\omega_b = \omega_n [(1 - 2\xi^2) + \sqrt{(1 - 2\xi^2)^2 + 1}]^{1/2} \quad (1.27)$$

2 机理建模法

人们为了分析问题的方便,或者暂时找不到更合适的方法以及不具备实验条件,常常采用机理建模法分析传感器的动态特性。即根据传感器的工作原理和结构特点,将其近似为一、二阶系统,列出其微分方程或偏微分方程,用解析方法推导出动态响应的表达式,或者用数值方法求解得到动态响应过程的数值。虽然机理建模法有局限性,但是,目前这一方法应用还相当普遍。随着计算机的普及和应用,这一方法也在发展。

本章采用控制理论中的系统分析方法^[3],研究传感器动态响应及性能。然后,介绍传感器建模和求解的具体实例。

2.1 瞬态响应

传感器的动态响应由瞬态响应和稳态响应两部分组成。瞬态响应是指传感器从初始状态到最终状态的响应过程。本节讨论传感器对非周期信号(例如阶跃函数,斜坡函数和脉冲函数等)的响应。分析传感器的动态特性究竟采用哪一种或哪几种典型的输入信号,取决于传感器在正常工作情况下,最常见的输入信号形式。

2.1.1 一阶系统的瞬态响应

1. 单位阶跃响应

一阶系统的传递函数如式(1.18)所示,作拉普拉斯反变换,可得

$$y(t) = 1 - e^{-t/T} \quad (t \geq 0) \quad (2.1.1)$$

可见,输出量输出是按指数规律上升,最终将变为1。传感器的时间常数越小,响应就越快。实际中,常以4倍时间常数作为评价响应时间长短的合理标准。

2. 单位脉冲响应

当输入量为单位脉冲信号时,其拉普拉斯变换为1。所以,传感器的输出为

$$y(t) = \frac{1}{T} e^{-t/T} \quad (t \geq 0) \quad (2.1.2)$$

2.1.2 二阶系统的瞬态响应

1. 阶跃响应

二阶系统的传递函数如式(1.24)所示。其动态特性可以用阻尼比 ξ 和无阻尼固有频率 ω_n 来描述。如果 $0 < \xi < 1$,则极点为共轭复数,并且位于左半 s 平面。此为欠阻尼系统,其瞬态响应是振荡的。如果 $\xi = 1$,则为临界阻尼系统。而当 $\xi > 1$ 时,为过阻尼系统。临界阻尼系