

高等院校教材

传感器与传感器技术

何道清 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了传感器的基本知识和基本特性、传感器的标定和校准方法以及应用技术,重点阐述了各类传感器(电阻应变式、电感式、电容式、压电式、热电式、光电式、数字式、磁敏、气敏、湿敏传感器等)的转换原理、组成结构、特性分析、设计方法、信号调理技术及其在日常生活和生产过程中的典型应用,并对其他现代新型传感器作了简要介绍。每章后面附有相当数量的思考题与习题,书末附有全部计算题参考答案。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、机电一体化等专业的教材,也可作为其他相近专业高年级本科生和硕士研究生的学习参考书,同时可供从事电子仪器及测控技术工作的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与传感器技术/何道清编著. —北京:科学出版社,2004
高等院校教材
ISBN 7-03-013369-2

I. 传… II. 何… III. 传感器-高等学校-教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 043926 号

责任编辑:马长芳 资丽芳/责任校对:陈丽珠

责任印制:张克忠/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>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 8 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2006 年 5 月第三次印刷 印张: 29 3/4

印数: 5 501—7 000 字数: 577 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

前 言

传感器 (transducer/sensor) 是获取信息的工具, 它能感受规定的被测量, 并按照一定规律转换成可用输出信号 (一般为电信号); 传感器技术是关于传感器的设计、制造及应用的综合技术。随着科学技术的发展, 在现代工业生产尤其是自动化生产过程中, 传感器是自动检测与自动控制系统的主要环节, 对系统测控质量起决定作用。测控系统的自动化程度愈高, 对传感器的依赖性愈大。随着 21 世纪信息化时代的到来, 传感器与传感器技术的重要性更为突出。信息社会的特征是人类社会活动和生产活动的信息化。现代信息科学 (技术) 的三大支柱是信息的采集、传输与处理技术, 即传感器技术、通信技术和计算机技术。传感器既是现代信息系统的源头或“感官”, 又是信息社会赖以存在和发展的物质与技术基础。如果没有高度保真和性能可靠的传感器, 没有先进的传感器技术, 那么信息的准确获取和精密检测就成了一句空话, 通信技术和计算机技术也就成了无源之水、无本之木。因此, 应用、研究和发展传感器与传感器技术是生产过程自动化和信息时代的必然要求。传感器与传感器技术正日益广泛地应用于航空航天、资源探测、石油化工、交通通信、灾害预报、安全防卫、环境保护、医疗卫生和日常生活等各个领域, 从而促进现代科学技术的迅速发展。

本书系统地介绍了传感器的基本知识、标定和校准方法以及工程应用技术, 重点阐述了各类传感器 (电阻应变式、电感式、电容式、压电式、热电式、光电式、数字式、磁敏、光纤、气敏、湿敏传感器等) 的转换原理、组成结构、基本特性、设计方法、信号调理技术及其在日常生活和生产过程中的典型应用, 并对其他现代新型传感器作了简要介绍。本书主要作为高等院校测控技术与仪器、电子信息工程、自动化、机电一体化等专业的教材, 也可作为其他相近专业高年级本科生或硕士研究生的学习参考用书, 同时可供从事电子仪器及测控技术工作的工程技术人员参考。书中各章内容有一定的独立性, 可根据不同学时、不同专业要求和特点, 选用不同章节。另外, 本书有配套的电子课件和习题解答。如果需要, 可与科学出版社联系, 电子邮件: zilifang@mail.sciencep.com。

本书在编写过程中, 力求做到取材广泛、概念清楚、通俗易懂、便于学习, 并注重理论与工程实际相结合, 尽可能反映传感器与传感器技术的发展水平。每章后面附有相当数量的思考题与习题供使用, 以便加深理解、巩固知识。书末附有全部计算题参考答案。编写时参考了国内外有关传感器技术方面的书籍和资料, 谨向其作者及译者表示感谢。张禾、蒲正刚绘制和处理了所有图稿, 并提供部分习题, 在此一并致谢。

由于编者水平有限, 恳请读者对书中不妥和错误之处给予批评指正。

编 者
2003 年 10 月

目 录

前 言	
绪 论	1
第 1 章 传感器的一般特性	7
1.1 传感器的静态特性	7
1.2 传感器的动态特性	11
1.3 传感器动态特性分析	17
1.4 传感器无失真测试条件	26
1.5 机电模拟和变量分类	27
思考题与习题	31
第 2 章 电阻应变式传感器	33
2.1 金属电阻应变式传感器	33
2.2 半导体应变片及压阻式传感器	62
2.3 电位计式传感器	70
思考题与习题	74
第 3 章 电感式传感器	76
3.1 电感式传感器	76
3.2 差动变压器	95
3.3 电涡流式传感器	111
思考题与习题	122
第 4 章 电容式传感器	124
4.1 电容式传感器的工作原理及结构类型	124
4.2 电容式传感器的静态特性	125
4.3 电容式传感器的等效电路	131
4.4 电容式传感器的特点和设计要点	132
4.5 电容式传感器的测量电路	136
4.6 电容式传感器的应用	142
附录 A 具有固体介质的变间隙电容式传感器原理特性分析推导	149
附录 B 变介电常数电容式传感器原理特性分析推导	149
附录 C 电容测厚原理推导	151
思考题与习题	151
第 5 章 压电式传感器	154
5.1 压电式传感器的工作原理	154
5.2 压电材料的主要特性	160
5.3 压电元件常用的结构形式	162

5.4	压电式传感器的信号调理电路	164
5.5	压电式传感器的应用	171
	思考题与习题	177
第6章	磁电式传感器	179
6.1	磁电式传感器的原理和结构	179
6.2	磁电式传感器的设计要点	181
6.3	磁电式传感器的应用	183
	思考题与习题	187
第7章	热电式传感器	188
7.1	热电阻	188
7.2	PN结型温度传感器	201
7.3	热电偶	207
	思考题与习题	229
第8章	光电式传感器	231
8.1	光电效应	231
8.2	光电器件	233
8.3	光源及光学元件	248
8.4	光电式传感器的应用	251
8.5	光纤传感器	257
8.6	红外传感器	273
8.7	图像传感器简介	287
	思考题与习题	294
第9章	磁敏传感器	296
9.1	霍尔传感器	296
9.2	磁敏电阻	316
9.3	结型磁敏管	327
	思考题与习题	336
第10章	数字式传感器	337
10.1	光栅传感器	337
10.2	磁栅传感器	348
10.3	感应同步器	352
10.4	角数字编码器	359
10.5	频率式数字传感器	363
	思考题与习题	375
第11章	气体传感器	377
11.1	热导式气体传感器	377
11.2	接触燃烧式气敏传感器	378
11.3	半导体气体传感器	380
11.4	红外气体传感器	395

11.5 湿式气体传感器	396
思考题与习题	396
第 12 章 湿度传感器	397
12.1 湿度及湿度传感器的特性和分类	397
12.2 电解质系湿度传感器	399
12.3 半导体及陶瓷湿度传感器	403
12.4 有机物及高分子聚合物湿度传感器	407
12.5 非水分子亲合力型湿度传感器	409
12.6 湿度传感器的应用	410
思考题与习题	414
第 13 章 其他传感器简介	415
13.1 超声波传感器	415
13.2 微波传感器	425
13.3 超导传感器	429
13.4 智能传感器	434
思考题与习题	442
第 14 章 传感器的标定与校准	444
14.1 传感器的静态特性标定	444
14.2 传感器的动态特性标定	445
14.3 压力传感器的标定和校准	447
14.4 振动传感器的标定和校准	452
14.5 温度传感器的标定和校准	454
思考题与习题	454
习题参考答案	456
参考文献	458

绪 论

0.1.1 传感器与传感器技术的地位和作用

传感器是获取信息的工具。传感器技术是关于传感器设计、制造及应用的综合技术。它是信息技术(传感与控制技术、通信技术和计算机技术)的三大支柱之一。

产业革命以来,发明了各种各样的机器以代替人力劳动,人类的生产活动逐步进入工业社会时代。人们为了改善机器性能和提高机器的自动化程度,需要实时地测量反映机器工作状态的信息,并利用这些信息去控制机器,使之处于最佳工作状态。为了便于测量和控制,传感器就应运而生了,它能将各种被测控量(信息)检出并转换成便于传输、处理、记录、显示和控制的可用信号(一般为电信号)。传感器在现代工业生产尤其是自动化生产过程中的作用可用下图说明。

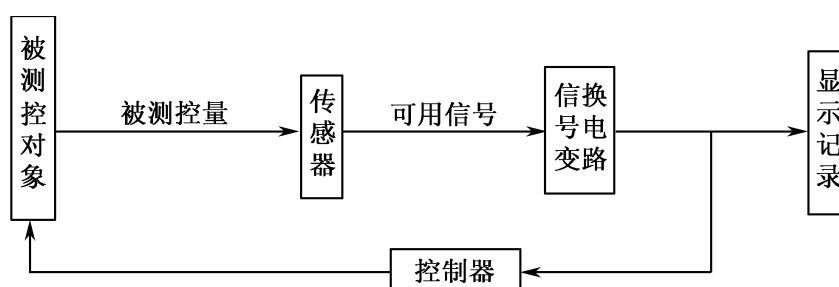


图 0-1 自动测控系统

由此可见,在自动检测与自动控制系统中,传感器位于系统之首,其作用相当于人的五官,直接敏感外界信息。传感器能否正确感受信息并将其按相应规律转换为可用信号,对系统测控质量起决定作用,自动化程度愈高,系统对传感器的依赖性就愈大,传感器是系统的重要部件。所以,国内外都将传感器列为高技术,在美、日等发达国家传感器倍受重视。

当今人类社会正由高度工业化社会向信息社会过渡,21 世纪将是信息化时代,传感器与传感器技术的重要性更为突出。信息社会的特征是人类社会活动和生产活动的信息化。现代信息科学(技术)的三大支柱是信息的采集、传输与处理技术,即传感器技术、通信技术和计算机技术。传感器是信息采集系统的首要部件,可以认为,它既是现代信息技术系统的源头或“感官”,又是信息社会赖以存在和发展的物质与技术基础。如果没有高度保真和性能可靠的传感器,没有先进的传感器技术,那么信息的准确获得和精密检测就成了一句空话,通信技术和计算机

技术也就成了无源之水、无本之木,现代测量与自动化技术亦会变成水中月、镜中花。因此应用、研究和发展传感器与传感器技术是信息化时代的必然要求。

目前,传感器已广泛应用于各个学科领域,如现代化工农业生产、交通运输、航空航天技术、军事工程、资源探测、海洋开发、环境监控、安全保护、医疗诊断、生物工程、家用电器等,而且传感器的应用促进了上述各领域的发展。例如“阿波罗10”的运载火箭部分共用2077个传感器,宇宙飞船部分共有各种传感器1218个,保证了宇宙飞船的精密测控。

当然,由于现代科学技术的发展也促进了传感器与传感器技术的发展。特别是微电子加工技术、微计算机技术、信息处理技术、材料科学与技术的发展,使传感器技术得到飞速发展,传感器的体积越来越小,精度越来越高,数字化、多功能化、智能化、集成化等已成趋势。

0.1.2 传感器

1 传感器的定义和组成

传感器亦称为换能器、变换器、变送器、探测器等。根据中华人民共和国国家标准(GB 7665-87),传感器(transducer/sensor)的定义是:能感受规定的被测量并按照一定的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(见图0-2)。其中敏感元件(sensing element)是指传感器中能直接感受或响应被测量并输出与被测量成确定关系的其他量(一般为非电量)部分,如应变式压力传感器的弹性膜片就是敏感元件,它将被测压力转换成弹性膜片的变形;转换元件(transduction element)是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的可用输出信号(一般为电信号)部分,如应变式压力传感器中的应变片就是转换元件,它将弹性膜片在压力作用下的变形转换成应变片电阻值的变化。如果敏感元件直接输出电信号,则这种敏感元件同时兼为转换元件,如热电偶将温度变化直接转换成热电势输出。

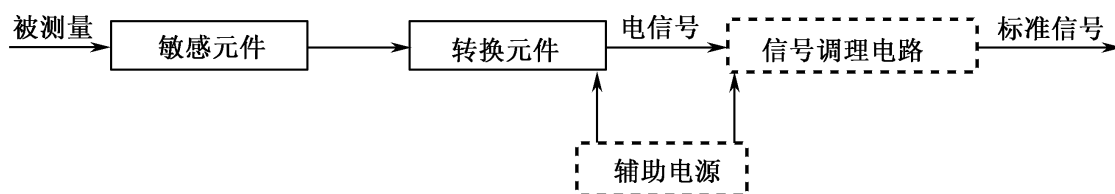


图 0-2 传感器组成框图

由于传感器输出电信号一般较微弱,而且存在非线性和各种误差,为了便于信号的处理,传感器还需配以适当的信号调理电路,将传感器输出电信号转换成便于传输、处理、显示、记录和控制的有效信号,常用的电路有电桥、放大器、振荡器、阻抗变换、补偿等。如果传感器信号经信号调理后输出信号为规定的标准信号(0~

10mA, 4~ 20mA; 0~ 2V, 1~ 5V; …)时,通常称为变送器,如热电偶温变器可将热电偶的热电势放大、线性校正和冷端补偿后输出需要的标准信号。由于集成电路技术的发展,信号调理电路集成化后,常与传感器组合在一起,构成可直接输出标准信号的一体化传感器,这是目前传感器技术的主要趋势。特别是二线制电流型变送器,以 20mA 电流信号为满刻度值,以满刻度值的 20% 即 4mA 表示零点,这种“活零点”安排有利于识别仪表断电、断线故障,应用更广。

2 传感器的分类

传感器的种类繁多、原理各异,检测对象几乎涉及各种参数,通常一种传感器可以检测多种参数,一种参数又可以用多种传感器测量。所以传感器的分类方法至今尚无统一规定,主要按工作原理、输入信息和应用范围来分类。

(1) 按工作原理分类。按传感器的工作原理不同,传感器大体上可分为物理型、化学型及生物型三大类(见图 0-3)。

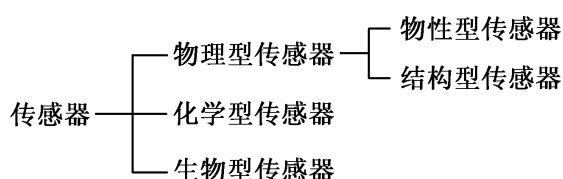


图 0-3 传感器的分类

物理型传感器是利用某些变换元件的物理性质以及某些功能材料的特殊物理性能制成的传感器,它又可以分为物性型传感器和结构型传感器。

物性型传感器是利用某些功能材料本身所具有的内在特性及效应将被测量直接转换为电量的传感器。例如,热电偶制成的温度传感器,就是利用金属导体材料的温差电动势效应和不同金属导体间的接触电动势效应实现对温度的测量;而利用压电晶体制成的压力传感器则是利用压电材料本身所具有的正压电效应而实现对压力的测量。这类传感器的“敏感体”就是材料本身,无所谓“结构变化”,因而,通常具有响应速度快的特点,而且易于实现小型化、集成化和智能化。结构型传感器是以结构(如形状、尺寸等)为基础,在待测量作用下,其结构发生变化,利用某些物理规律,获得比例于待测

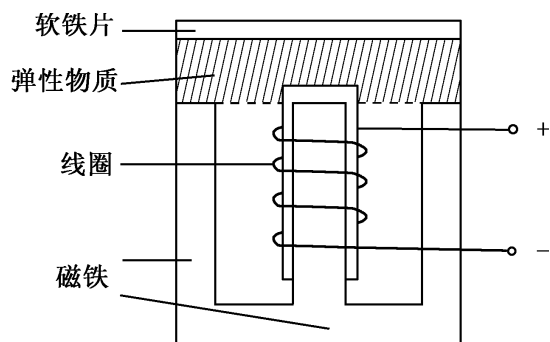


图 0-4 磁电式地震检波器

非电量的电信号输出的传感器。例如石油天然气地震勘探中的检波器(磁电式传感器,见图 0-4)。当地面存在地震波机械振动时,线圈相对于磁铁运动而切割磁力线,根据电磁感应定律,线圈中产生感生电动势,且感生电动势的大小与线圈和磁铁间相对运动速度成比例,线圈输出的电信号与地面机械振动的速度变化规律是一致的。这类传感器性能与其结构材料关系不大,仅与其“结构变化”有关。

化学传感器是利用敏感材料与物质间的电化学反应原理,把无机和有机化学成分、浓度等转换成电信号的传感器,如气体传感器、湿度传感器和离子传感器等。

生物传感器是利用材料的生物效应构成的传感器,如酶传感器、微生物传感器、生理量(血液成分、血压、心音、血蛋白、激素、筋肉强力等)传感器、组织传感器、免疫传感器等。

(2) 按输入信息分类。传感器按输入量分类有位移传感器、速度传感器、加速度传感器、温度传感器、压力传感器、力传感器、色传感器、磁传感器等,以输入量(被测量)命名。这种分类对传感器的应用很方便。

(3) 按应用范围分类。根据传感器的应用范围不同,通常可分为工业用、农用、民用、科研用、医用、军用、环保用和家电用传感器等。若按具体使用场合,还可分为汽车用、舰船用、飞机用、宇宙飞船用、防灾用传感器等。如果根据使用目的的不同,又可分为计测用、监视用、检查用、诊断用、控制用和分析用传感器等。

0.1.3 传感器技术

传感器技术是关于传感器的研究、设计、试制、生产、检测和应用的综合技术,它已逐渐形成一门相对独立的专门学科,并具有以下特点:

1 内容的离散性

传感器技术所涉及和利用到的物理学、化学、生物学中的基本“效应”、“反应”和“机理”,不仅为数甚多,而且往往彼此独立,甚至完全不相关。

2 知识的密集性

传感器技术是以材料的力、热、声、光、电磁等功能效应和功能形态变换原理为理论基础,并综合了物理学、微电子学、化学、生物工程、材料科学、精密机械、微细加工和试验测量等方面的知识和技术而形成的一门科学,因此具有突出的知识密集性和学科边缘性,所以它与许多基础学科和专业工程学关系极为密切。正因为如此,在上述领域中,一但有新的发现,就有人迅速地应用于传感器技术。如超导材料的约瑟夫逊效应发现不久,以该效应作为工作原理的超导量子干涉器件(SQUID)测磁传感器就问世了,它具有极高的灵敏度,可测 10^{-9} Gs 的极弱磁场。

3 技术(工艺)的复杂性

传感器的制造涉及许许多多的高新技术,如薄膜技术、集成技术、超导技术、键合技术、高密封技术、特种加工技术,以及多功能化、智能化技术等。传感器的制造工艺难度大、要求高,如微型传感器尺寸 $\leq 1\text{mm}$; 半导体硅片厚度有时 $< 1\mu\text{m}$; 温度传感器测量范围 $-196\sim 1800^{\circ}\text{C}$; 压力传感器的耐压范围 $10^{-6}\text{Pa}\sim 10^2\text{MPa}$ 等。

4 品种的多样化与用途的广泛性

传感器与传感器技术已广泛应用于科学研究、生产过程和日常生活各个领域,几乎无处不使用传感器,无处不需要传感器技术。传感器技术的广泛应用,则需要测量的量(待测量)很多,而且一种待测量往往可用多种传感器来检测(如线位移传感器,其品种近 20 种之多)。因此,传感器产品的品种极为复杂、繁多。而传感器作为一种商品,用户对其品种的要求通常很多,但对每一品种需求的数量往往甚

少,品种多、数量少的矛盾不仅使传感器成为高价位商品,而且有碍传感器的快速发展。

正确认识传感器技术上述特点,才能有效地促进传感器的研究、开发和应用。

0.1.4 传感器与传感器技术的发展趋势

随着现代科学技术的发展,作为“五官”(感觉)的传感器远远赶不上作为“大脑”的计算机的发展速度,信息采集技术滞后于信息处理技术。特别是现代测控系统自动化、智能化的发展,要求传感器的准确度高、可靠性高、稳定性好,而且具有一定的数据处理能力和自检、自校、自补偿能力,有些场合还需要能同时测量多个参数的体积小的多功能传感器。传感器与传感器技术的发展水平已成为判断一个国家科学技术现代化程度与生产水平高低的重要依据,也是衡量一个国家综合实力的重要标志。传感器的研究、开发和应用技术受到各国政府和科技人员的高度重视。

目前,传感器与传感器技术的主要发展趋势:一是开展基础研究,探索新理论,发现新现象,开发传感器的新材料和新工艺;二是实现传感器的集成化、多功能化和智能化。

1 发现新现象

传感器工作的基本原理就是各种物理现象、化学反应和生物效应,所以发现新现象与新效应是发展传感器技术、研制新型传感器的重要理论基础。例如日本夏普公司利用超导技术研究成功高温超导磁传感器,是传感器技术的重大突破,其灵敏度比霍尔器件高,仅次于超导量子干涉器件(SQUID),而其制造工艺远比超导量子干涉器件简单,它可用于磁成像技术,具有广泛的推广价值。

2 开发新材料

新型传感器敏感元件材料是研制新型传感器的重要物质基础,因此必须开发新型的传感器敏感元件,特别是物性型敏感材料。例如半导体氧化物可以制造各种气体传感器;而陶瓷传感器工作温度远高于半导体;光导纤维的应用是传感器材料的重要突破,用它研制的传感器与传统的传感器相比较具有其突出特点;高分子聚合物材料作为传感器敏感材料的研究,已引起国内外学者极大兴趣。

3 采用微细加工技术

半导体技术中的加工方法如氧化、光刻、扩散、沉积、平面电子工艺、各向异性腐蚀以及蒸镀、溅射薄膜工艺都可引进用于传感器制造,因而产生了各式各样新型传感器。例如,利用半导体技术制造出压阻式传感器;利用晶体外延生长工艺制造出硅-蓝宝石井下数字压力传感器;利用薄膜工艺制造出快速响应的气敏传感器;利用各向异性腐蚀技术进行高精度三维加工,在硅片上构成孔、沟、棱、锥、半球等各种形状研制出全硅谐振式压力传感器。

4 智能传感器

智能传感器(intelligent sensor/smart sensor)是传统传感器与微处理器赋予智能的结合,兼有信息检测与信息处理功能的传感器(系统)。智能传感器充分利用微处理器的计算和存储功能,对传感器的数据进行处理并能对它的内部进行调节,使其采集的数据最佳。

智能传感器的结构可以是集成的,也可以是分离的,按结构可以分成集成式、混合式和模块式三种形式。集成智能传感器(integrated smart sensor)是将传感器与微处理器、信号调理电路做在同一芯片上所构成的,集成度高、体积小,这种传感器在目前技术水平上较难实现。混合集成式传感器(hybrid smart sensor)是将传感器的微处理器、信号调理电路作在不同芯片上构成的,目前这类结构的传感器较多。初级智能传感器也可以由许多相互独立的模块组成,如将微计算机、信号调理电路模块、输出电路模块、显示电路模块与传感器装配在同一壳体内,则组成模块式智能传感器。这种传感器虽集成度不高,体积大,但在目前技术条件下,仍不失为一种实用的结构形式。

5 多功能传感器

多功能传感器能转换两种以上的不同物理量。例如,使用特殊陶瓷把温度和湿度敏感元件集成在一起,构成温湿度传感器;将检测 Na^+ 、 K^+ 和 H^+ 的敏感元件集成在 $2.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 的芯片上构成多离子传感器,可直接用导管送到心脏内检测血液中的钠、钾和氢离子浓度,对诊断心血管疾病有很大的意义;利用厚膜制造工艺将六种不同的敏感材料(ZnO 、 SnO_2 、 WO_3 、 $\text{WO}_3(\text{Pt})$ 、 $\text{SnO}_2(\text{Pd})$ 、 $\text{ZnO}(\text{Pt})$)制作在同一基板上,具有同时测量 H_2S 、 C_8H_{18} 、 $\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}$ 、 NH_3 四种气体的多功能传感器,如果将六个敏感膜所输出的信息输入微计算机,就是一种多功能智能传感器。

作为多功能传感器的智能传感器,最成功的典型产品是美国 Honeywell 公司研制的 ST-3000 型智能差压压力传感器,在 $3\text{mm} \times 4\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ 的一块基片上,采用半导体工艺,制作静压、差压、温度三种敏感元件和 CPU、EPROM,其精度高达 0.1%。工作温度范围 $-40 \sim 110^\circ\text{C}$,压力量程 $0 \sim 2.1 \times 10^7 \text{Pa}$,具有自诊断、自动选择量程、存贮补偿数据等功能。

传感器与传感器技术是现代检测与控制系统的关键部件和技术,其应用已深入到国民经济和人们日常生活各个领域,传感器与传感器技术的研究和开发工作,具有广阔的前景。

第 1 章 传感器的一般特性

传感器测量系统的示意图如图 1-1 所示。传感器系统的基本特性是指系统的输出-输入关系特性,即系统输出信号 $y(t)$ 与输入(被测物理量)信号 $x(t)$ 之间的关系。从误差角度去分析输出-输入特性是测量技术研究的主要内容之一。输出-输入特性虽然是传感器的外部特性,但与其内部参数密切相关。对传感器系统的基本特性研究,主要用于两个方面:

第一,用作为一个测量系统。这时必须已知传感器系统的基本特性,才能测量输出信号 $y(t)$ 。这样可通过基本特性和输出来推断导致该输出的系统的输入信号 $x(t)$ 。这就是未知被测物理量的测量过程。

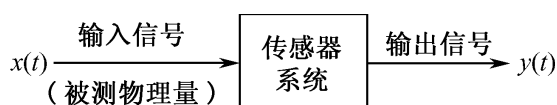


图 1-1 传感器系统

第二,用于传感器系统本身的研究、设计与建立。这时必须观测系统的输入 $x(t)$ 及与其相应的输出 $y(t)$,才能推断、建立系统的特性。如果系统特性不满足要求,则应修改相应的内部参数,直至合格为止。

根据输入信号 $x(t)$ 是随时间变化的还是不随时间变化,基本特性分为静态特性和动态特性,它们是系统对外呈现出的外部特性,但这类特性由其自身的内部参数决定。不同的传感器具有不同的内部参数,其基本特性也表现出不同的特点,对测量结果的影响也各不相同。一个高精度的传感器,必须具有良好的静态特性和动态特性,这样才能完成信号无失真的转换。

1.1 传感器的静态特性

传感器在稳态信号($x(t) = \text{常量}$)作用下,其输出-输入关系称为静态特性。衡量传感器静态特性的性能指标是线性度、灵敏度、分辨率、迟滞、重复性和量程等。

1.1.1 线性度(非线性误差)

传感器的线性度(linearity)是指传感器的输出与输入之间的线性程度。传感器的理想输出-输入线性特性,具有以下优点:

- (1) 可大大简化传感器的理论分析和设计计算;
- (2) 为传感器的标定和数据处理带来很大方便,只要知道线性输出-输入特性

上的两点(一般为零点和满度值)就可以确定其余各点;

(3) 可使仪表刻度盘均匀刻度,因而制作、安装、调试容易,提高测量精度;

(4) 避免非线性补偿环节。

实际上许多传感器的输出-输入特性是非线性的,如果不考虑其迟滞和蠕变效应,传感器的静态特性可以由下列方程式表示为

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots + a_n x^n \quad (1-1)$$

式中, x —被测物理量; y —输出量; a_0 —零位输出; a_1 —传感器线性灵敏度,常用 K 表示; a_2 、 a_3 、 \cdots 、 a_n —待定系数。

从式(1-1)可见,一般的静态特性由线性项($a_0 + a_1 x$)和非线性项($a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots + a_n x^n$)所决定。当 $a_0 \neq 0$ 时,表示即使在没有输入($x = 0$)的情况下,仍有输出($y_0 = a_0$),通常称为零点偏移(零偏),零位值应从测量结果中设法消除。当 $a_0 = 0$ 时,静态特性通过原点。在不考虑零位情况下,静态特性可分为以下四种典型情况:

(1) 理想线性特性。如图 1-2(a)所示直线,其输出-输入特性方程式为

$$y = a_1 x \quad (1-2)$$

测量系统的灵敏度为

$$S_n = y/x = a_1 = \text{常数}$$

(2) 具有 x 偶次项的非线性。如图 1-2(b)所示,其输出-输入特性方程为

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \cdots \quad (1-3)$$

由于没有对称性,所以其线性范围很窄。一般传感器设计很少采用这种特性。

(3) 具有 x 奇次项的非线性。如图 1-2(c)所示,其输出-输入特性方程为

$$y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \cdots \quad (1-4)$$

具有这种特性的传感器,在原点附近较大的范围内具有较宽的准线性。这是比较接近于理想直线的非线性特性,它相对于原点对称的,即 $y(x) = -y(-x)$,所以它具有相当宽的近似线性范围。

(4) 普遍情况。如图 1-2(d)所示,其输出-输入特性方程为

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + \cdots \quad (1-5)$$

在实际使用非线性传感器时,如果非线性项的次数不高,则在输入量变化范围

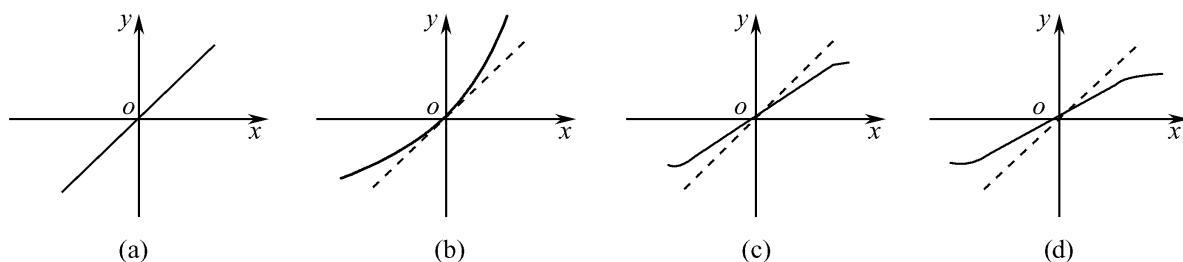


图 1-2 传感器的静态特性

不大的条件下,可以用切线或割线等直线来近似地代替实际的静态特性曲线的某一段,使传感器的静态特性近于线性,如图 1-3 所示。这种方法称为传感器非线性特性的线性化,所采用的直线称为拟合直线。实际静态特性曲线与拟合直线之间的偏差称为传感器的非线性误差,如图 1-3 中所示的 Δ 值,取其中最大值与输出满量程之比作为评价非线性误差(或线性度)的指标,即

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中, δ_L —非线性误差(线性度); Δ_{\max} —最大非线性绝对误差; $y_{F.S}$ —输出满量程。

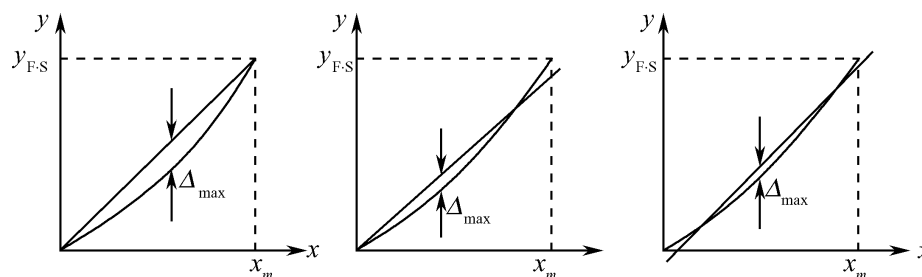


图 1-3 传感器静态特性的非线性

传感器的静态特性曲线是在静态标准条件下进行校准的。静态标准条件是没有加速度、振动、冲击(除非这些参数本身就是被测物理量);环境温度一般为室温($20 \pm 5^\circ\text{C}$);相对湿度不大于 85%;大气压力为 $101.3 \pm 8.0\text{kPa}$ 。传感器的静态特性是在这种标准条件下,利用一定等级的标准设备,对传感器进行反复测试,得到的输出-输入数据所列成的表格或曲线。

拟合直线的选取方法很多,一般是选取在标称输出范围中和标定曲线的各点偏差平方之和最小(即最小二乘法原理)的直线作为拟合直线(也称参考直线或理论直线)。

1.1.2 灵敏度

灵敏度(sensitivity)是指传感器在稳态下的输出变化对输入变化的比值,用 S_n 来表示,即

$$S_n = \frac{\text{输出量的变化量}}{\text{输入量的变化量}} = \frac{dy}{dx} \quad (1-7)$$

对于线性传感器,它的灵敏度就是它的静态特性的斜率(或传递系数),即 $S_n = y/x = K$ 。非线性传感器的灵敏度为一变量,如图 1-4 所示。一般希望传感器的灵敏度高,在满量

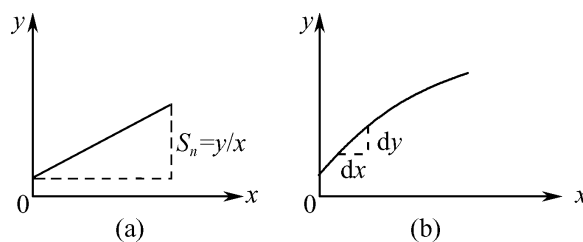


图 1-4 灵敏度定义
(a) 线性传感器; (b) 非线性传感器

程范围内是恒定的,即传感器的输出-输入特性为直线。为此,对一般的非线性传感器,常通过一些校正网络,使其输出-输入之间具有线性关系,此时传感器的灵敏度就可写成 $K = y/x$ 。

1.1.3 分辨率和分辨力

分辨率和分辨力(resolution)都是用来表示传感器能够检测被测量的最小量值的性能指标。前者是以满量程的百分数来表示,是一个无量纲比率的量;后者是以最小量程的单位值来表示,是一个有量纲的量值。

1.1.4 迟滞(滞环)

迟滞(hysteresis)特性表明传感器的正向(输入量增大)和反向(输入量减小)行程输出-输入特性曲线不重合的程度,如图 1-5 所示。亦即对于同一大小的输入信号,传感器的正、反行程的输出信号大小不相等,这就是迟滞现象。迟滞大小一般由实验测定,以正、反向输出量的最大偏差对满量程输出 $y_{F.S}$ 的百分数表示,即

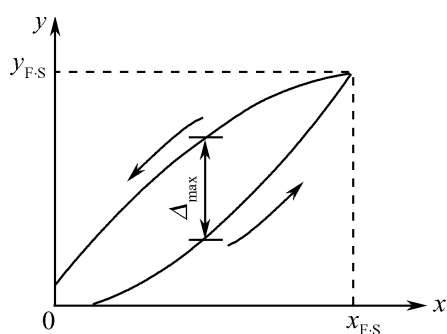


图 1-5 滞环特性示意图

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta_{max}}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-8)$$

1.1.5 重复性

重复性(repeatability)表示传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变动时所得特性曲线不一致的程度,如图 1-6 所示。多次重复测试特性曲线重复性好,误差就小。重复性指标(不重复性误差)一般采用输出最大不重复误差 Δ_{max} 与满量程输出 $y_{F.S}$ 的百分数表示,即

$$\delta_R = \pm \frac{\Delta_{max}}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-9)$$

不重复性误差是属于随机误差性质的,按上述方法计算就不太合理了。校准数据的离散程度是与随机误差的精密度相关的,应根据标准偏差来计算重复性指标。因此重复性误差可按下式计算:

$$\delta_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中, σ —标准偏差。

误差服从正态分布, σ 前的置信系数取

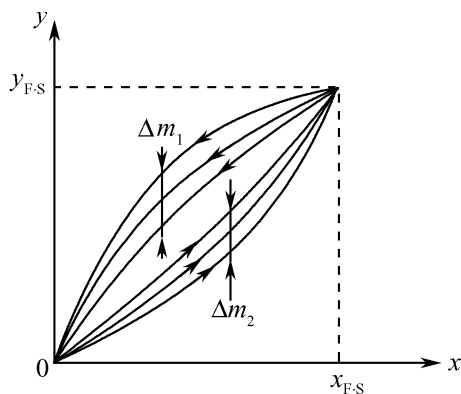


图 1-6 重复性

2, 则概率为 95%; 置信系数取 3, 概率为 99.73%。标准偏差可用贝塞尔 (Bessel) 公式计算:

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

式中, y_i —第 i 次的测量值; \bar{y} —测量值的算术平均值; n —测量次数。

1.1.6 精度

传感器的精度 (accuracy) 是指测量结果的可靠程度, 它以给定的准确度表示重复某个读数的能力, 误差愈小, 则传感器的精度愈高。

传感器的精度由其量程范围内的最大基本误差与满量程之比的百分数表示。基本误差是由系统误差和随机误差两部分组成的。迟滞与线性度所表示的误差为传感器的系统误差, 重复性所表示的误差为随机误差。所以传感器的精度 A 为

$$A = \frac{\Delta A}{y_{F.S}} \times 100\% = \delta_L + \delta_H + \delta_R \quad (1-11)$$

式中, ΔA —测量范围内允许的最大基本误差。

工程技术中为简化传感器精度的表示方法, 引用精度等级概念。精度等级以一系列标准百分比数值分档表示, 如压力传感器的精度等级分别为 0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.0 等。传感器设计和出厂检验时, 其精度等级代表的误差指传感器测量的最大允许误差。

传感器的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, 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 传感器的动态特性

动态特性是指传感器对于随时间变化的输入信号 $x(t)$ 的响应特性。它是传感器的输出值能够真实地再现随时间变化着的输入量能力的反映。理想的传感器, 其输出量 $y(t)$ 与输入量 $x(t)$ 的时间函数表达式应该相同。但实际上二者只能在一定的频率范围内, 在允许的动态误差条件下保持所谓的一致。动态特性用数学模型来描述, 对于连续时间系统主要有三种形式: 时域中的微分方程, 复频域中的传递函数 $H(s)$, 频率域中的频率特性 $H(j\omega)$ 。传感器的动态特性由其本身的固有属性所决定。

1.2.1 动态参数测试的特殊问题

静态信号测量时, 线性传感器的输出-输入特性是一条直线, 二者之间有一一

对应关系;而且因为被测信号不随时间变化,测量和记录过程不受时间限制。而在实际测试工作中,大量的被测信号是动态信号,传感器对动态信号的测量任务不仅需要精确地测量信号幅值的大小,而且需要测量和记录动态信号随时间变化过程的波形,这就要求传感器能迅速准确地测出信号幅值的大小和无失真地再现被测信号随时间变化的波形。

传感器的动态特性是指传感器对激励(输入)的响应(输出)特性。一个动态特性好的传感器,其输出 $y(t)$ 随时间变化的规律(变化曲线),将能同时再现输入 $x(t)$ 随时间变化的规律(变化曲线),即 $y(t)$ 与 $x(t)$ 具有相同的时间函数。这就是动态测量中对传感器提出的新要求。但实际上除了理想的比例特性环节外,输出信号不会与输入信号具有完全相同的时间函数,这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。

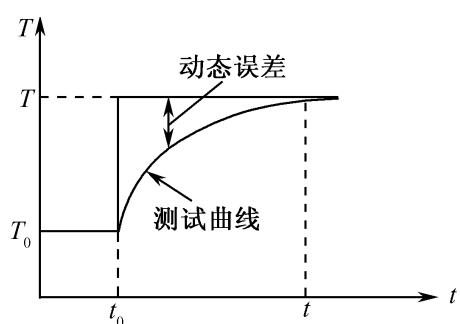


图 1-7 热电偶测温过程曲线

为了进一步说明动态参数测试中发生的特殊问题,下面讨论一个测量水温的实际过程。用一个恒温水槽,使其中水温保持 $T(^{\circ}\text{C})$ 不变,而当地的环境温度为 T_0 ,设 $T > T_0$ 。把一支热电偶放于此环境中一定时间,那么热电偶反映出来的温度应为 T_0 (不考虑其他因素造成的误差)。现将热电偶迅速插到恒温水槽的热水中(插入时间忽略不计),这时热电偶测量的温度参数发生一个突变,即从 T_0 突变到 T ,我们马上看一下热电偶输出的指示值,它并没有从 T_0 立即上升到 T ,而是从 T_0 逐步上升到 T 的。热电偶指示出来温度从 T_0 上升到 T ,历经了时间从 t_0 到 t 的过渡过程,如图 1-7 所示。没有这样一个过程就不会得到正确的测量结果。从 $t_0 \rightarrow t$ 的过程中,测试曲线始终与温度从 T_0 跳变到 T 的实际阶跃波形存在差值,这个差值就称为动态误差,从记录波形看,测试具有一定失真。

究其测试失真和产生动态误差的原因,可以肯定:首先,如果被测温度不产生变化,不会产生上述现象;其次就应考查热电偶(传感器)对动态参数测试的适应性能,即它的动态特性怎样。热电偶测量热水温度时,水的热量需通过热电偶的壳体传递到热接点上,热接点又具有一定的热容量,它与水温的热平衡需要一个过程,所以热电偶不能在被测温度变化时立即产生相应的反映。这种由热容量所决定的性能称为热惯性,这种热惯性是热电偶固有的,它就决定了热电偶测量快速温度变化时会产生动态误差。

传感器动态特性研究,就是从测量误差角度分析传感器产生动态误差的原因(固有特性)及其改善措施。

1.2.2 研究传感器动态特性的方法及其指标

动态特性用数学模型来描述,对于连续时间系统,研究其动态特性,可以从时域中的微分方程、复频域中的传递函数 $H(s)$ 、频率域中的频率特性 $H(j\omega)$ 几方面采用瞬态响应法和频率响应法来分析。由于输入信号的时间函数形式是多种多样的,在时域内研究传感器的响应特性时,只能研究几种特定的输入时间函数如阶跃函数、脉冲函数和斜坡函数等的响应特性;在频域内研究动态特性一般采用正弦函数得到频率响应特性。动态特性好的传感器暂态响应时间很短或者频率响应范围很宽。这两种分析方法内部存在必然的联系,在不同场合,根据实际需要解决的问题不同而选择不同的方法。

在对传感器进行动态特性分析和动态标定时,为了便于比较和评价,常常采用正弦变化和阶跃变化的输入信号。

在采用阶跃输入信号研究传感器时域动态特性时,用其输出信号 $y(t)$ 的变化曲线来表示。表征动态特性的主要参数有上升时间 t_r ,响应时间 t_s (过程时间),超调量 y_m (或 σ_p),衰减度 ψ 等,如图 1-8 所示。

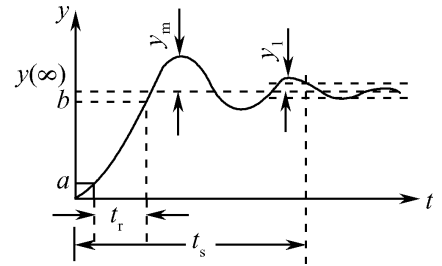


图 1-8 阶跃响应特性

上升时间 t_r 定义为传感器输出示值从最终稳定值的 5% (或 10%) 变到最终稳定值的 95% (或 90%) 所需要的时间。

响应时间 t_s 是指从输入量开始起作用到输出指示值进入最终稳定值所规定的范围内所需要的时间。最终稳定值的规定范围常取传感器的允许误差值 $\pm \gamma$, 在写出响应时间时应同时注明误差值的范围,例如 $t_s = 0.55s (\pm 5\%)$ 。

超调量 y_m 是指输出第一次达到稳定值后又超出稳定值 $y(\infty)$ 而出现的最大偏差,常用相对于最终稳定值的百分比 σ_p 来表示,即

$$\sigma_p = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-12)$$

衰减度 ψ 用来描述瞬态过程中振荡幅值衰减的速度,定义为

$$\psi = \frac{y_m - y_1}{y_m} \quad (1-13)$$

式中, y_1 为出现 y_m 一个周期后的 $y(t)$ 值。如果 $y_1 \ll y_m$, 则 $\psi \approx 1$, 表示衰减很快,该系统很稳定,振荡很快停止。

在采用正弦输入信号研究传感器频域动态特性时,常用幅频特性和相频特性来描述传感器的动态特性,其重要指标是频带宽度,简称带宽。带宽是指增益变化不超过某一规定分贝值的频率范围。

1.2.3 传感器的数学模型(微分方程)

传感器实质上是一个信息(能量)转换和传递的通道,在静态测量情况下,其输出量(响应)与输入量(激励)的关系符合式(1-1),即输出量为输入量的函数。在动态测量情况下,如果输入量随时间变化时,输出量能立即随之无失真地变化的话,那么这样的传感器可以看作是理想的。但实际的传感器(或测试系统),总是存在着诸如弹性、惯性和阻尼等元件,此时,输出 y 不仅与输入 x 有关,而且还与输入的速度 dx/dt 、加速度 d^2x/dt^2 等有关。

要精确地建立传感器(测试系统)的数学模型是很困难的。在工程上总是采取一些近似的方法,忽略一些影响不大的因素,给数学模型的确立和求解都带来很多方便。通常认为可以用线性定常(时不变)系统理论来描述传感器的动态特性。线性定常系统的数学模型为高阶常系数线性微分方程,即

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned} \quad (1-14)$$

式中, x —输入量; y —输出量; t —时间; a_0, a_1, \dots, a_n 和 b_0, b_1, \dots, b_m —系数。

线性定常系统有两个十分重要性质,即叠加性和频率保持性。根据叠加性质,当一个系统有 n 个激励同时作用时,其响应为这 n 个激励单独作用的响应之和,即

$$\sum_{i=1}^n x_i(t) \rightarrow \sum_{i=1}^n y_i(t)$$

也就是说,各个输入所引起的输出是互不影响的。这样在分析常系数线性系统时,总可以将一个复杂的激励信号分解成若干个简单信号的激励,如利用傅里叶变换,将复杂信号分解成一系列谐波或分解成若干个小的脉冲激励,然后求出这些分量激励的响应之和,便是总的激励的响应。频率保持性表明,当线性系统的输入为某一频率信号时,则系统的稳态响应也是同一频率的信号。即

$$x(t) = A \sin \omega t \rightarrow y(t) = B(\omega) \sin[\omega t + \varphi(\omega)]$$

理论上讲,由式(1-14)可以计算出传感器的输出与输入的关系,但是对于一个复杂的系统和复杂的输入信号,若采用式(1-14)求解肯定不是一件容易的事情。因此,在信息论和工程控制中,通常采用一些足以反映系统动态特性的函数,将系统的输出与输入联系起来,这些函数有传递函数、频率响应函数和脉冲响应函数,等等。

1.2.4 传递函数

传感器的输出-输入关系如图 1-9 所示。

在初始条件为零,即 $t \leq 0$ 时, $x(t)$ 和 $y(t)$ 以及它们的各阶时间导数的初始

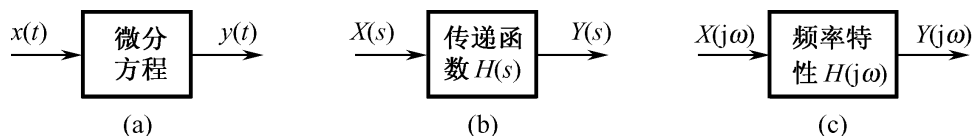


图 1-9 传感器的输出-输入关系
(a)时域;(b)复频域;(c)频域

($t=0$)值为零,输出信号 $y(t)$ 的拉氏变换 $Y(s)$ 与输入信号 $x(t)$ 的拉氏变换 $X(s)$ 之比为传感器系统的传递函数,记为 $H(s)$,

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1-15)$$

式中, $Y(s) = L[y(t)] = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt$ — $y(t)$ 的拉氏变换;

$X(s) = L[x(t)] = \int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt$ — $x(t)$ 的拉氏变换;

$s = \beta + j\omega$ 是复变量,且 $\beta > 0$ 。

传感器的一般方程式(1-14),当其初始值为零(即传感器系统原来处于静止状态),其拉氏变换式为

$$\begin{aligned} & (a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0) Y(s) \\ & = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0) X(s) \end{aligned}$$

则传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1-16)$$

式(1-16)等号右边是一个与输入 $x(t)$ 无关的表达式,它只与传感器系统的结构参数有关,因而它是传感器特性的一种表达式。它联系了输入与输出的关系,是一个描述传感器传递信息特性的函数。而且,由式(1-16)可见,引入传递函数概念之后, $Y(s)$ 、 $X(s)$ 和 $H(s)$ 三者之中,只要知道任意两个,第三个便可容易求得。从而为我们了解一个复杂系统传递信息特性创造了方便条件,这时不需要了解复杂系统的具体内容,只要给系统一个激励 $x(t)$,如简单的阶跃信号,得到系统对 $x(t)$ 的响应 $y(t)$,系统的特性就可以确定。

$$H(s) = \frac{L[y(t)]}{L[x(t)]} = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1-17)$$

一旦系统的传递特性 $H(s)$ 确定后,对于任意激励 $x(t) \rightarrow X(s) \rightarrow Y(s) = H(s) X(s) \rightarrow L^{-1}[Y(s)] = y(t)$ 。

1.2.5 频率响应函数(频率特性)

对于稳定的常系数线性系统,在初始条件为零的条件下,输出信号 $y(t)$ 的傅

氏变换 $Y(j\omega)$ 与输入信号 $x(t)$ 的傅氏变换 $X(j\omega)$ 之比为传感器系统的频率响应函数(频率特性), 记为 $H(j\omega)$ 或 $H(\omega)$ 。

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (1-18)$$

式中, $Y(j\omega) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-j\omega t} dt$ — $y(t)$ 的傅氏变换;

$X(j\omega) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$ — $x(t)$ 的傅氏变换。

现在我们比较式(1-15)和式(1-18)中的拉氏变换和傅氏变换之间的关系。可见, 频率特性是实部 $\beta = 0$ 时的传递函数的一个特例。我们令 $s = j\omega$, 直接由传递函数写出频率特性

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1(j\omega) + a_0} \quad (1-19)$$

频率响应函数 $H(j\omega)$ 是一个复数函数, 它可以用指数形式表示, 即

$$H(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (1-20)$$

式中, $A(\omega)$ — $H(j\omega)$ 的模; $\varphi(\omega)$ — $H(j\omega)$ 的相角。

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \sqrt{[H_R(\omega)]^2 + [H_I(\omega)]^2} \quad (1-21)$$

称为传感器的幅频特性。

$$\varphi(\omega) = \arctan H(j\omega) = - \arctan \frac{H_I(\omega)}{H_R(\omega)} \quad (1-22)$$

称为传感器的相频特性。

由两个频率响应分别为 $H_1(j\omega)$ 和 $H_2(j\omega)$ 的常系数线性系统串接而成的总系统, 如果后一系统对前一系统没有影响, 那么, 描述整个系统的频率响应 $H(j\omega)$ 和幅频特性 $A(\omega)$ 、相频特性 $\varphi(\omega)$ 为

$$\begin{cases} H(j\omega) = H_1(j\omega) \cdot H_2(j\omega) \\ A(\omega) = A_1(\omega) \cdot A_2(\omega) \\ \varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) \end{cases}$$

常系数线性测量系统的频率响应 $H(j\omega)$ 只是频率的函数, 与时间、输入量无关。如果系统为非线性的, 则 $H(j\omega)$ 将与输入有关。若系统是变系数的, 则 $H(j\omega)$ 还与时间有关。

1.2.6 冲激响应函数

由式(1-15)知, 传感器的传递函数为 $H(s) = Y(s)/X(s)$, 若选择一种激励 $x(t)$, 使 $L[x(t)] = X(s) = 1$, 就很理想了。这时自然会引入单位冲激函数, 即 δ 函数。根据单位冲激函数的定义和 δ 函数的抽样性质, 可以求出单位冲激函数的

拉氏变换,即

$$\Delta(s) = L[\delta(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)e^{-st} dt = e^{-st} \Big|_{t=0} = 1 \quad (1-23)$$

式中, $\delta(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ 1 & t = 0 \end{cases}$ 为 δ 函数。

由于 $\Delta(s) = 1$, 将其代入式(1-15)得

$$H(s) = \frac{Y(s)}{\Delta(s)} = Y(s) \quad (1-24)$$

将式(1-24)取拉氏逆变换,且令 $L^{-1}[H(s)] = h(t)$, 则有

$$h(t) = L^{-1}[H(s)] = L^{-1}[Y(s)] = y_{\delta}(t) \quad (1-25)$$

式(1-25)表明单位冲激函数的响应同样可以描述传感器(或测试系统)的动态特性,它同传递函数是等价的,不同的是一个在复频域($\beta + j\omega$),一个是在时间域。通常 $h(t)$ 称为冲激响应函数。

对于任意输入 $x(t)$ 所引起的响应 $y(t)$, 可以利用两个函数的卷积关系,即系统的响应 $y(t)$ 等于冲激响应函数 $h(t)$ 同激励 $x(t)$ 的卷积,即

$$y(t) = h(t) * x(t) = \int_0^t h(\tau) x(t - \tau) d\tau = \int_0^t x(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (1-26)$$

1.3 传感器动态特性分析

传感器的种类和形式很多,但它们一般可以简化为一阶或二阶系统。这样,分析一阶和二阶系统的动态特性,就对各种传感器的动态特性有了基本了解,而不必一一分别研究。

1.3.1 传感器的频率响应

传感器系统(线性定常系统)在正弦激励 $x(t) = A \sin \omega t$ 的作用下,经暂态过程后,其响应 $y(t) = B(\omega) \sin[\omega t + \varphi(\omega)]$, 仍为正弦信号,且频率保持不变。但其幅值和相位随频率 ω 发生了变化。因此,对正弦输入信号,传感器的动态特性一般用频域中的频率响应特性来评价。

1. 一阶传感器的频率响应

一阶传感器系统的微分方程为

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1-27)$$

可改写为

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \frac{b_0}{a_0} x(t)$$

或写成一阶传感器微分方程通式

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t) \quad (1-27')$$

式中, τ —具有时间量纲, 称为传感器的时间常数 ($\tau = a_1/a_0$); K —传感器静态灵敏度 ($K = b_0/a_0$), 具有输出/输入量纲。

由式(1-16)可得一阶系统的传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{K}{1 + \tau s} \quad (1-28)$$

而一阶系统的频率特性为

$$H(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega\tau} \quad (1-29)$$

其幅频特性为

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (1-30)$$

相频特性为

$$\varphi(\omega) = \arctan(-\omega\tau) = -\tan^{-1}(\omega\tau) \quad (1-31)$$

【例 1-1】 以热电偶测温元件为例, 如图 1-10 所示。当热电偶接点温度 T_0 低于被测介质温度 T_i 时, $T_i > T_0$, 则有热流 q 流入热偶结点, 它与 T_i 和 T_0 的关系可表示为

$$q = \frac{T_i - T_0}{R} = C \frac{dT_0}{dt}$$

式中, R —介质的热阻; C —热偶的比热。

若令 $\tau = RC$, 上式可写为

$$\tau \frac{dT_0}{dt} + T_0 = KT_i \quad (1-32)$$

式中, K —放大倍数, 此处 $K = 1$ 。

式(1-32)为一阶传感器微分方程, T_i 、 T_0 分别表示输入量、输出量, 相当于一阶传感器的 x 和 y 。利用式(1-28)~式(1-31)可得其相应的传递函数和频率特性。

【例 1-2】 弹簧-阻尼器组成的机械系统如图 1-11 所示, 也属于一阶传感器

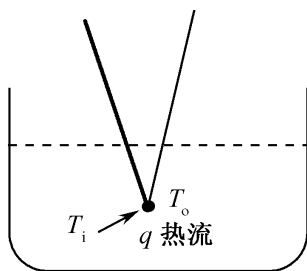


图 1-10 热电偶测温元件

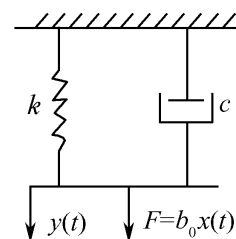


图 1-11 弹簧-阻尼系统

系统。其微分方程为

$$c \frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = b_0 x(t) \quad (1-33)$$

式中, c —阻尼系数; k —弹簧刚度。

式(1-33)可改写为下列形式

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t) \quad (1-34)$$

式中, τ —时间常数 ($\tau = c/k$); K —静态灵敏度 ($K = b_0/k$)。

同样, 利用式(1-28)~ 式(1-31)即可写出它的传递函数和频率特性等的表达式。

一阶传感器系统除以上两例外, 还有 $R-C$ 、 $L-R$ 电路、质量-阻尼系统等。

一阶传感器的频率响应特性曲线如图 1-12 所示。从式(1-30)、式(1-31)和图 1-12 看出, 时间常数 τ 越小, 频率响应特性越好, 当 $\omega\tau \ll 1$ 时:

$A(\omega)/K \approx 1$, 它表明传感器输出与输入为线性关系。

$\varphi(\omega)$ 很小, $\tan\varphi \approx \varphi$, $\varphi(\omega) \approx \omega\tau$, 相位差与频率成线性关系。

这时保证了测试是无失真的, 输出 $y(t)$ 真实地反映输入 $x(t)$ 的变化规律。

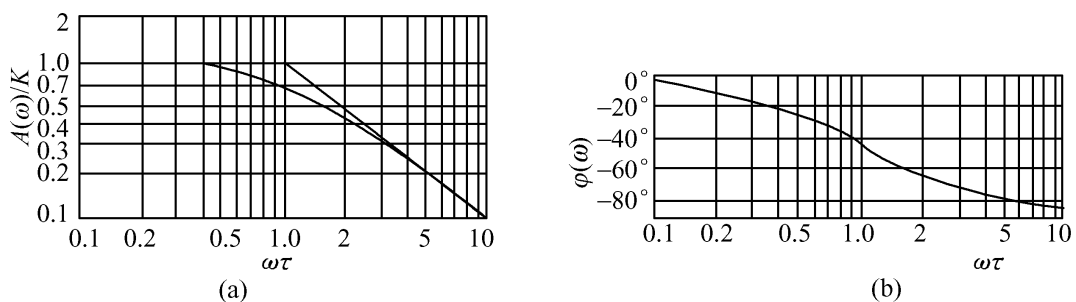


图 1-12 一阶传感器的频率特性

(a) 幅频特性; (b) 相频特性

2 二阶传感器的频率响应

二阶传感器系统的微分方程通式为

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1-35)$$

可改写为

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t) \quad (1-36)$$

式中, $\omega_n = \sqrt{a_0/a_2}$ —传感器的固有角频率; $\zeta = a_1/2\sqrt{a_0/a_2}$ —传感器的阻尼比; $K = b_0/a_0$ —传感器的静态灵敏度。其传递函数为

$$H(s) = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1} \quad (1-37)$$

频率特性为

$$H(j\omega) = \frac{K}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2j\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)} \quad (1-38)$$

幅频特性为

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + 4\zeta^2(\omega/\omega_n)^2}} \quad (1-39)$$

相频特性为

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\zeta(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad (1-40)$$

【例 1-3】 图 1-13 所示质量-弹簧-阻尼系统属于二阶传感器系统,其微分方程为

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + c \frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = F(t) \quad (1-41)$$

可改写为一般通式

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = KF(t) \quad (1-42)$$

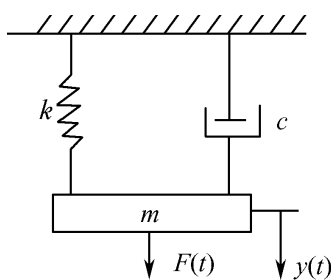


图 1-13 二阶传感器系统

式中, m —运动质量; c —阻尼系数; k —弹簧刚度; $F(t)$ —作用力; $y(t)$ —位移; ω_n —系统固有频率 $[\sqrt{k/m}]$; ζ —系统阻尼比 $[c/2\sqrt{km}]$; K —静态灵敏度 $(1/k)$ 。

加速度传感器一般属于这种二阶传感器系统。

图 1-14 为二阶传感器的频率响应特性曲线。从式(1-39)、式(1-40)和图1-14可见,二阶传感器频率响应特性好坏,主要取决于传感器的固有频率 ω_n 和阻尼比 ζ 。

当 $\zeta < 1, \omega_n \gg \omega$ 时:

$A(\omega)/K \approx 1$, 频率特性平直, 输出与输入为线性关系;

$\varphi(\omega)$ 很小, $\varphi(\omega)$ 与 ω 为线性关系。

此时, 系统的输出 $y(t)$ 真实准确地再现输入 $x(t)$ 的波形, 这是测试系统应有的性能。

由上分析可知, 为了使测试结果能精确地再现被测信号波形, 在传感器设计时, 必须使其阻尼比 $\zeta < 1$, 固有频率 ω_n 至少应大于被测信号频率 ω 的(3~ 5)倍, 即 $\omega_n \geq (3 \sim 5)\omega$ 。

从图 1-14 中还可看出, 当 ζ 趋于零时, 幅值在系统固有振动频率 $(\omega/\omega_0 = 1)$ 附近变得很大。在这种场合下, 激励使系统出现谐振。为了避免这种情况, 可增加

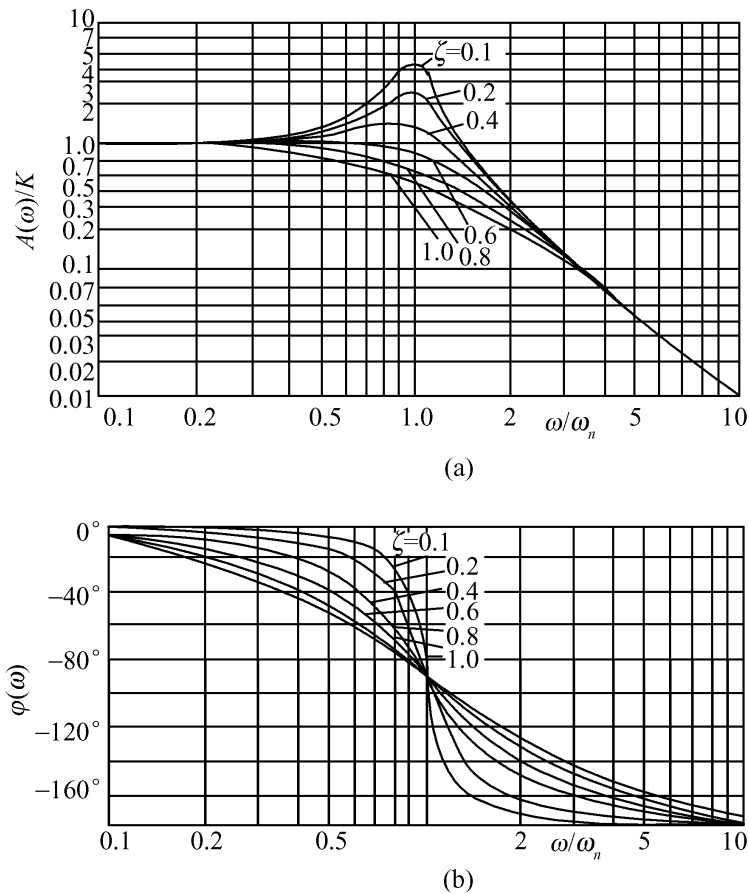


图 1-14 二阶传感器的频率特性
(a)幅频特性;(b)相频特性

ζ 值。当 $\zeta \geq 0.707$ 时,谐振就基本上被抑制了。

阻尼比 ζ 是传感器设计和选用时要考虑的另一个重要参数。 $\zeta < 1$,为欠阻尼; $\zeta = 1$,为临界阻尼; $\zeta > 1$ 为过阻尼。一般系统都工作于欠阻尼状态,综合考虑,设计传感器时,应使 $\zeta = 0.6 \sim 0.8$ 为宜。

1.3.2 传感器的瞬态响应

传感器的动态特性除了用频域中的频率特性来评价外,也可以从时域中瞬态响应和过渡过程进行分析,阶跃信号、冲激信号和斜坡信号都是常用的激励信号。

下面着重讨论阶跃输入时的阶跃响应。

对传感器突然加载或突然卸载即属于阶跃输入,这种输入方式既简单易行,又能充分揭示传感器的动态特性,故常常被采用。

设单位阶跃信号为

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}$$

如图 1-15(a)所示,则它的拉氏变换为

$$X(s) = L[x(t)] = \int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt = \frac{1}{s}$$

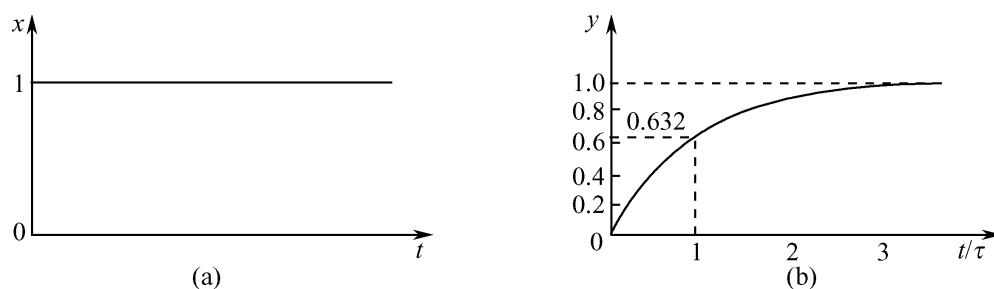


图 1-15 一阶传感器的阶跃响应
(a)单位阶跃信号; (b)一阶传感器阶跃响应曲线

1 一阶传感器的阶跃响应

对于一阶传感器,其传递函数为(为讨论方便,令 $K = b_0/a_0 = 1$)

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{1 + \tau s}$$

则

$$Y(s) = H(s) X(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \frac{1}{s} = \frac{1}{s} - \frac{\tau}{\tau s + 1} \quad (1-43)$$

对式(1-43)进行拉氏逆变换得

$$y(t) = 1 - e^{-t/\tau} \quad (1-44)$$

式(1-44)的响应曲线如图 1-15(b)所示。可以看出,输出的初始值为零,随着时间推移, y 接近于稳态值 1,当 $t = \tau$ 时, $y = 0.632$ 。 τ 是系统的时间常数,传感器的时间常数越小,响应就越快。故时间常数 τ 是决定一阶传感器响应速度的重要参数。

2 二阶传感器的阶跃响应

二阶传感器的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

则

$$Y(s) = H(s) X(s) = \frac{K\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (1-45)$$

(1) $0 < \zeta < 1$, 衰减振荡情形。式(1-45)可分解成

$$Y(s) = K \left[\frac{1}{s} - \frac{s + 2\zeta\omega_n}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \right]$$

其第二项分母特征方程在 $0 < \zeta < 1$ 时的解为复数,即

$$Y(s) = K \left[\frac{1}{s} - \frac{s + 2\zeta\omega_n}{(s + \zeta\omega_n + j\omega_d)(s + \zeta\omega_n - j\omega_d)} \right]$$

其中, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$, 称为阻尼振荡频率。这样上式可写成如下形式:

$$\begin{aligned} Y(s) &= K \left[\frac{1}{s} - \frac{s + 2\zeta\omega_n}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2} \right] \\ &= K \left[\frac{1}{s} - \frac{s + \zeta\omega_n}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2} - \frac{\zeta\omega_n}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2} \right] \\ &= K \left[\frac{1}{s} - \frac{s + \zeta\omega_n}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2} - \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \frac{\omega_d}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2} \right] \end{aligned}$$

求上式的逆拉氏变换可得

$$y(t) = K \left[1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \left[\omega_d t + \arctan \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} \right] \right] \quad (1-46)$$

请读者自证上式结果。

由式(1-46)知, 在 $0 < \zeta < 1$ 的情形下, 阶跃信号输入时的输出信号为衰减振荡, 其振荡角频率(阻尼振荡角频率)为 ω_d ; 幅值按指数衰减, ζ 越大, 即阻尼越大, 衰减越快。

(2) $\zeta = 0$, 无阻尼, 即临界振荡情形。将 $\zeta = 0$ 代入式(1-46), 得

$$y(t) = K[1 - \cos(\omega_n t)] \quad (t \geq 0) \quad (1-47)$$

这是一等幅振荡过程, 其振荡频率就是系统的固有振荡角频率 ω_n (即 $\omega_d = \omega_n$)。实际上系统总有一定阻尼, 故 ω_d 总小于 ω_n 。

(3) $\zeta = 1$, 临界阻尼情形。此时式(1-45)可写成

$$Y(s) = \frac{K\omega_n^2}{s(s + \omega_n)^2}$$

上式分母的特征方程的解为两个相等的实数, 由拉氏逆变换可得

$$y(t) = K[1 - e^{-\omega_n t}(1 + \omega_n t)] \quad (1-48)$$

上式表明传感器系统既无超调也无振荡。

(4) $\zeta > 1$, 过阻尼情形。此时式(1-45)可写成

$$Y(s) = \frac{K\omega_n^2}{s(s + \zeta\omega_n + \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1})(s + \zeta\omega_n - \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1})}$$

其拉氏逆变换为

$$\begin{aligned} y(t) &= K \left\{ 1 + \frac{1}{2(\zeta^2 - \zeta \sqrt{\zeta^2 - 1} - 1)} \exp \left[- \left[\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1} \right] \omega_n t \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2(\zeta^2 + \zeta \sqrt{\zeta^2 - 1} - 1)} \exp \left[- \left[\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1} \right] \omega_n t \right] \right\} \quad (1-49) \end{aligned}$$

它有两个衰减的指数项, 当 $\zeta \gg 1$ 时, 其中的后一个指数项比前一项衰减快得多, 可忽略不计, 这样就从二阶系统蜕化成一阶系统的惯性环节了。

对应于不同 ζ 值的二阶传感器系统的单位阶跃响应曲线如图 1-16 所示。由

图可见,在一定的 ζ 值下,欠阻尼系统比临界阻尼系统更快地到达稳态值;过阻尼系统反应迟钝,动作缓慢。所以阻尼比是传感器设计和选用时应考虑的一个重要参数。一般传感器系统大都设计成欠阻尼系统, ζ 取值一般为 0.6~0.8。

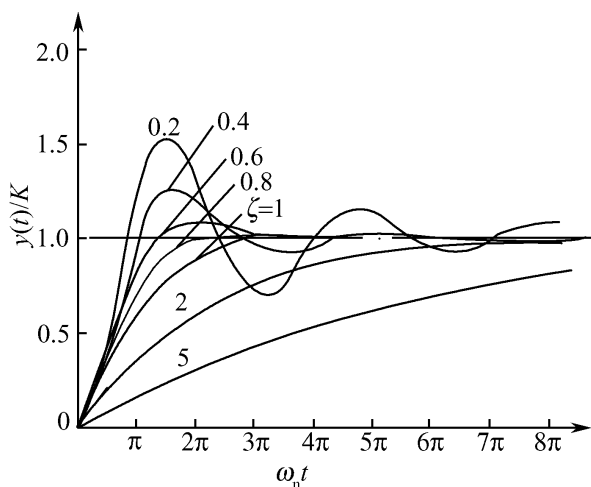


图 1-16 二阶系统的单位阶跃响应

二阶传感器在单位阶跃激励下的稳态输出误差为零。但是传感器的响应在很大程度上决定于阻尼比 ζ 和固有频率 ω_n 。传感器的固有频率为其主要结构参数所决定, ω_n 越高,其响应越快。阻尼比直接影响超调量和振荡次数。 $\zeta = 0$ 时,超调量为 100%,且持续不停地振荡下去,达不到稳态。 $\zeta > 1$,则传感器蜕化到等同于两个一阶环节的串联,此时虽然不产生振荡(即不发生超调),但也需经过较长时间才能达到稳态。如果阻尼比 ζ 选在

0.6~0.8 之间,则最大超调量不超过 2.5%~10%。若允许动态误差为 2%~5% 时,其调整时间也最短,为 $(3\sim 4)/(\zeta\omega_n)$,这也是很多传感器(测试系统)在设计时常把阻尼比 ζ 选在此区间的理由之一。

传感器的动态特性常用单位阶跃信号的瞬态响应曲线来表征。对于其他典型信号的响应见表 1-1。

表 1-1 一阶和二阶系统对各种典型输入信号的响应

输入	输出	
	一阶系统	二阶系统
$H(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$	$H(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$	$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$
$X(s) = \frac{1}{s}$	$Y(s) = \frac{1}{s(\tau s + 1)}$	$Y(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}$
单位阶跃 $x(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}$	$y(t) = 1 - e^{-t/\tau}$	$* y(t) = 1 - \left[e^{-\zeta\omega_n t} / \sqrt{1 - \zeta^2} \right] \cdot \sin(\omega_d t + \varphi_2)$