

苏州大学研究生优秀教材建设资助项目

现代仪器分析

屠一锋 严吉林 编著
龙玉梅 张钱丽



科学出版社

苏州大学研究生优秀教材建设资助项目

现代仪器分析

屠一锋 严吉林 编著
龙玉梅 张钱丽

科学出版社

北京

内 容 简 介

本教材主要介绍在化学及材料科学、生命科学、环境科学等研究和应用领域中常用的现代仪器分析方法,包括传感器技术、电子显微、表面分析、质谱、电分析及纳米分析、现代分离科学及光谱技术等内容,涉及物质成分分析、性能分析、结构分析、表面分析、显微形态分析等,以及用于研究物质的转化、代谢及其动力学过程等规律的技术。研究对象不仅有化学物质,也包括各种新材料、纳米物质、生物(大、小)分子、环境物质等。教材内容有较大的覆盖面,重点介绍各种方法的原理、仪器结构与各部件功能、所能获得的信息及能解决的问题,有较强的可读性和参考价值。

读者对象为化学相关专业以及材料、环境、生命科学等专业研究生。

图书在版编目(CIP)数据

现代仪器分析/屠一锋等编著. —北京: 科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-031298-3

I. ①现… II. ①屠… III. ①仪器分析 IV. ①O657

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 102244 号

责任编辑: 刘凤娟 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

骏志印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2011 年 6 月第一次印刷 印张: 26

印数: 1—2 500 字数: 509 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

“现代仪器分析”课程是化学类及相关学科硕士研究生主要学位课程之一，该课程在化学及相关专业“仪器分析”课程基础之上，主要讲授在化学研究及材料科学、生命科学、环境科学等研究和应用领域中常用的现代仪器分析方法，内容包括传感器技术、电子显微、表面分析、质谱、电分析及纳米分析、现代分离科学及光谱技术等内容，这些仪器分析方法对开展化合物及材料表征、研究，以及生命科学和环境科学的研究工作都有重要的作用，是不可缺少的手段。相关专业研究生在开展毕业论文科研工作和今后的科研以及实际应用中，会经常使用到其中的分析方法，这些方法为科学研究和生产实践提供最主要的物质构成和性能信息。对于化学相关专业以及材料、环境、生命科学等专业硕士生而言是必须掌握的基础知识和技术。

国内出版的有关现代仪器分析的教材主要有两种类型，一是根据所在学科特点介绍部分技术，覆盖面不够宽；二是针对性讲授某种技术，理论深度较大，主要用于从事某一专门分析技术的研究人员参考。本教材主要考虑解决上述问题，用适当的篇幅比较全面地介绍这些重要的现代仪器分析方法，教材内容有较大的覆盖面，使学生对该学科领域有较全面的了解并掌握基本的知识基础，重点介绍各种方法的原理、仪器结构与各部件功能、所能获得的信息及能解决的问题，倾向于形成以定性讨论和叙述为特点的编写风格，力求避免过于深奥的公式推导和理论分析，使教材有较强的可读性和参考价值，拓宽思路，以帮助硕士研究生在今后的科研工作中能灵活地应用这些方法解决具体问题。教材内容主要涉及物质成分分析、性能分析、结构分析、表面分析、显微形态分析等，所涉及的研究对象不仅涉及化学物质，也包括各种新材料、纳米物质、生物（大、小）分子、环境物质等，以及用于研究物质的转化、代谢及其动力学过程等规律的技术。

本教材由屠一锋教授制定写作大纲，第1章由龙玉梅副教授负责编写，第2章由张钱丽副教授负责编写，第3、6章由严吉林副教授负责编写，第4、5章由屠一锋教授负责编写，全书由屠一锋教授修改并统稿，由任贺强工程师协助绘制书中插图，对所有参加编写人员的努力工作表示感谢。

由于涉及面宽，作者对各种方法的掌握也不尽完善，一定还存在很多不妥和疏漏之处，请读者批评指正。

作 者

目 录

绪论	1
第 1 章 现代传感技术	4
1.1 传感器概论	4
1.1.1 传感器及传感技术	5
1.1.2 传感器的基本特性	6
1.2 物理传感器	10
1.2.1 电学式传感器	11
1.2.2 光电式传感器	22
1.2.3 热、磁传感器	35
1.2.4 其他物理传感器	42
1.3 化学传感器	49
1.3.1 离子选择性电极	49
1.3.2 气体传感器	56
1.3.3 化学修饰电极、微/纳米电极和阵列	61
1.3.4 压电传感与石英晶体微天平	69
1.4 生物传感器	74
1.4.1 生物传感器概述	75
1.4.2 生物识别机理	78
1.4.3 生物活性材料固定化技术	82
1.4.4 生物传感机理及应用	85
推荐书目	94
第 2 章 现代分离科学	95
2.1 现代色谱分析技术	96
2.1.1 高效薄层色谱法	96
2.1.2 凝胶色谱法	103
2.1.3 亲和色谱	108
2.1.4 离子色谱	116
2.1.5 超临界流体色谱	125
2.2 毛细管电泳	129

2.2.1	毛细管电泳基本原理	130
2.2.2	毛细管电泳硬件系统	134
2.2.3	毛细管电泳分离条件选择策略	137
2.2.4	毛细管电泳联用技术	141
2.3	微流控芯片实验室	144
2.3.1	微流控芯片	145
2.3.2	微流控芯片实验室系统集成	149
	推荐书目	161
第 3 章	现代光谱分析	163
3.1	近红外光谱分析	163
3.1.1	近红外光谱分析原理	164
3.1.2	近红外光谱测量与化学计量学	166
3.1.3	近红外分析步骤、特点和应用	172
3.2	激光光谱分析	176
3.2.1	激光及其特性	176
3.2.2	激光光声光谱	177
3.2.3	激光感生击穿光谱	184
3.3	拉曼光谱分析	191
3.3.1	拉曼光谱分析的基本原理	191
3.3.2	拉曼光谱分析技术与特点	195
3.3.3	拉曼光谱技术的应用	197
3.3.4	拉曼光谱新技术	199
3.4	荧光光谱分析	200
3.4.1	荧光分析基本原理	200
3.4.2	荧光性质与参数	205
3.4.3	荧光分析仪器和荧光方法的应用	210
3.5	化学发光分析	214
3.5.1	化学发光基本原理	214
3.5.2	化学发光类型及常见化学发光体系	216
3.5.3	电化学发光	220
3.5.4	化学发光分析的应用	222
3.6	核磁与电子顺磁共振	226
3.6.1	核磁共振基本原理	227
3.6.2	核磁共振波谱仪及核磁共振应用	233

3.6.3	电子自旋共振	237
	推荐书目	243
第 4 章	现代质谱分析	244
4.1	质谱分析概论	245
4.1.1	质谱技术的基本特征	245
4.1.2	质谱仪性能指标	248
4.1.3	有机质谱研究分子结构的一般原则	250
4.2	质谱分析主要功能部件	252
4.2.1	进样单元	252
4.2.2	离子源	255
4.2.3	质量分析器	263
4.2.4	检测器和真空系统	272
4.3	质谱联用技术	272
4.4	现代质谱技术应用	281
	推荐书目	288
第 5 章	显微成像技术	289
5.1	光学显微技术	290
5.1.1	光学显微成像原理	291
5.1.2	光学显微成像分辨率极限及主要技术指标	292
5.1.3	光学显微镜结构	295
5.1.4	现代光学显微技术	298
5.1.5	荧光显微与激光共聚焦显微技术	299
5.2	透射电子显微镜	305
5.2.1	透射电子显微镜结构和成像原理	305
5.2.2	透射电子显微镜的分辨率及主要性能	314
5.2.3	透射电子显微镜的发展和应用	319
5.3	扫描电子显微镜	323
5.3.1	扫描电子显微镜成像原理	324
5.3.2	扫描电子显微镜结构	332
5.3.3	扫描电镜的应用	335
5.4	扫描探针显微技术	341
5.4.1	扫描探针显微镜概述	342
5.4.2	扫描隧道显微镜	344
5.4.3	原子力显微镜	350

5.4.4	几种新型扫描探针显微镜	357
	推荐书目	359
第 6 章	表面分析技术	360
6.1	电子能谱分析	361
6.1.1	X 射线电子能谱分析	362
6.1.2	紫外光电子能谱分析	373
6.1.3	俄歇电子能谱分析	376
6.2	探针技术	380
6.2.1	电子探针技术	381
6.2.2	离子探针技术	390
6.2.3	二次离子质谱	394
	推荐书目	400
主要参考文献		401

绪 论

仪器分析是分析化学学科的一个重要组成部分,而分析化学作为化学学科的一个重要分支有其独特的地位,和传统的基础化学学科的不同在于分析化学既引进了大量非化学的手段,又在很大程度上服务于化学以外的学科,因此,在当今十分强调学科交叉的背景下,分析化学学科自然而然扮演了学科交叉中一个重要的角色。

我们都很强调物理原理在分析化学中应用而形成的所谓仪器分析方法,这是分析化学与物理学交叉所取得的最初阶段的成功,以此为契机,各种光学的、电化学的、其他谱学的技术以及分离技术蓬勃发展,极大地推动了分析化学学科的进步,有许多过去难于解决的分析化学任务得以迎刃而解,如快速高通量分析,成为现代分析科学领域一个重要的发展方向;同时,物理技术的应用,使得分析技术获取信息的能力大为加强,从过去以单一数据获取发展为二维乃至三维数据的获取,目前更是提出了图像学解决方案以及高维数据获取及分析的要求;在分析测试的实施上,从过去主要面对孤立样品的实验室静态测定发展到在线、在体、连续乃至活体以及动态的分析;从空间上看,分析测试也从常规实验室尺度发展到微纳水平空间上的分析,如芯片实验室及单个细胞的分析等,以及在宏观空间上的如遥感分析或基于无线通信网络的区域性检测系统,这些方面的发展无不得益于物理技术的介入。当然,分析化学学科的发展中也包括信息科学技术发挥的巨大作用,计算机在现阶段毫无疑问已经成为分析测试过程的一个重要组成部分,因为随着分析测试过程所获得的信息越来越丰富,信息的复杂性也不断提高,因此只有借助计算机技术才可能实现对分析信息的有效处理;自动化的控制也基本已经成为分析仪器操作的标准模式,而计算机技术则是现代自动化控制的核心。分析科学技术发展同样也得益于电子技术的快速发展,从早期笨重而体积庞大的分析仪器发展到现阶段轻便、高性能的设备,其主要的进步来源就是电子线路的高度集成化和数字化,所以很多的分析仪器逐步朝便捷化的方向发展,而且各种技术之间的联用也变得更为简单和易于实施,这在很大程度上又促进了分析测试技术的功能、效率和性价比的提高。

从另外一个方面看,在分析化学技术提高到目前水平的同时,其发挥的作用也远远超出了我们能够想象的范畴。实际上,用化学这一概念已经很难包容分析化学学科的最新应用,实际上分析技术已经并且将在更大程度上服务于化学以外的学科领域。同时,我们也充分认识到,分析化学科学所形成的一系列技术方法也有助于分析科学自身成为独立的研究领域,来解决其他学科领域尚未能很好解决的科学和技术问题,分析科学自身正在朝着一个独立的学科体系快速地发展。众所周知,早

期的分析化学技术主要应用于化学成分的定性和定量检测,而现代分析科学则将物质成分、结构、形态、性质、分布、变化等几乎所有信息都作为分析的目标,而且,所研究的对象也完全打破了传统的化学成分的界限,几乎所有以物质材料为对象的研究工作都离不开分析化学,包括能源、资源、食品(天然产物和加工食品、合理的和滥用的添加剂等)、药品(医药、农药、兽药及违禁和滥用药品等)、各种化学品(化工原料、中间体、产品、日化品等)、健康(进化、发育、疾病、衰老和死亡的化学基础、诊断、药物敏感性、新药开发、运动和体育等)、环境(污染类型、程度、机理、治理工程控制等)、军事和国防、航空航天航海、商品贸易(包括进出口)、生态保护、社会公共安全(包括刑侦、司法等)等人民生活涉及的所有方面,几乎没有不需要分析科学技术给予支撑的,因此,从这一点上说,分析化学科学已经成为国家政治、国民经济和人民社会生活的一个重要的组成部分,可以毫不夸张地说,人类文明发展的每一个阶段、一个民族的兴盛和衰败、每个人从出生到死亡,都是和分析化学密切相关的。

从上述分析可以获知,而且许多直接的经验也给予证实,在自然科学和工程技术领域,只要所面临的研究对象是客观的物质对象而非抽象的理论概念,则或多或少都会和分析测试发生直接或间接的联系,因此,凡从事物质研究的各个学科领域的研究和应用技术人员,了解和掌握相关的分析科学知识、具备应用分析科学知识解决问题的能力,将是其工作中非常必需和重要的一个方面,尤其是在与化学、材料、生命、环境等学科相关的研究领域的专业人员,分析科学知识的重要性更为凸显,因此在相关专业的教学体系中都安排了分析化学(包括化学分析和仪器分析)的教学内容,但本科阶段的教学内容覆盖面相对还比较窄,所介绍的主要还是相对经典的方法,内容上也相对着重于方法基本原理的阐述,对实践应用的指导意义也不够充分。随着现代分析科学技术的快速发展,新的仪器分析方法不断涌现,一些经典方法也不断革新并获得新的应用,同样很多仪器分析方法的应用面不断拓展、性能不断提高,这些发展要求我们不断拓展对新的分析原理、方法、技术的理解和把握,从而能够更好地利用这些方法技术为科学研究和生产实践提供重要的保障和支撑,本教材即是以此为出发点,在本科分析化学的基础上,为各个相关学科的研究生介绍具有潜在应用的各种现代仪器分析方法。

本教材的覆盖面较宽,所涉及对象从无机、有机、高分子到生物分子,技术方法涵盖了传感器技术、光谱技术、电化学技术、分离技术、质谱技术、波谱技术、表面分析技术、微分析系统、表面形貌表征等多种类型,研究的物质对象可以是液体、气体、离子、化合物、纳米材料、块体材料、生物材料等各种形式,内容十分丰富,同时,在传统仪器分析范畴内讨论较为缺乏的物理传感器、光学显微、电子显微等技术,由于其越来越展现出在现代分析科学研究与应用中的重要价值,也作为重点介绍的内容,因此,如何处理好内容和篇幅之间的关系,也是本教材编写中要

解决的一个重要问题,我们力求以浅显易懂的文字来讨论各种分析方法的原理,尽可能减少纯粹的数学推导,而是从方法原理上来阐明各种分析方法获得检测信号的机理,讨论信号与本质特性之间存在的客观关系,着重解决如何利用检测信号完成分析目的,并在一定程度上对各种分析方法的技术应用给予了介绍,以期对实际使用有所帮助.

第1章 现代传感技术

所谓传感技术,是指具备感知特定信息能力的技术方法,从物理范畴讨论,传感技术的实现主要依赖于其硬件的功能,这样的硬件就被称为传感器。顾名思义,传感器是指对特定信息具有感知和转换作用的检测元件。事实上我们对传感器并不陌生,在自然进化的过程中,生物体本身即进化发展了多种类型的传感元件,比如我们的五官,能够有视觉、味觉、嗅觉和听觉等,就是因为在这些器官内存在各种功能的传感器件,甚至包括我们的皮肤,也具有对温度、湿度的感知功能和灵敏的触觉功能。人们对传感器的研究和应用从一开始就充满了期待,希望能够制造出对自然世界各种信息具备传感能力的检测器件。较早的传感器以物理器件居多,而且所能传感的信号也以物理信号为主,如力、光、热、磁等传感器。之后,人们对利用传感器实现对化学物质的检测产生了浓厚的兴趣,因此便有了化学传感器的快速发展。随着人们对生命运动理解的不断深入,发现生命过程中所发生的很多行为具有超乎想象的特异性能,如酶催化反应、免疫反应、基因、受体等都能够提供极高的选择性,并且反应效率极高,而这些正是在传感器研究中所期待的性能,从而生物传感器便应运而生。然而人们对传感器的兴趣并没有就此结束,我们都知道犬类的嗅觉特别灵敏,因此我们便产生了仿造动物器官实现传感的想法,这就是所谓的仿生传感器,如电子鼻等,这些研究都在快速的发展中。对于仪器分析技术而言,传感器也是不可或缺的一个重要组成部分。其一,传感器配合适当的能量提供和信号记录设备即可构成专门装备以完成所期待的分析检测目的;其二,许多传感器件是目前常用分析仪器内部的核心检测元件,如光电传感元件几乎是所有光学式分析仪器完成分析工作必不可少的;其三,现代分析仪器自动化程度越来越高,而对设备进行自动化控制的基本前提就是基于传感信号反馈的程序控制。传感器早已渗透到工业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程甚至文物保护等极其广泛的领域,毫不夸张地说,从茫茫太空到浩瀚海洋,以至各种复杂的工程系统,几乎每一个现代化项目,都离不开形形色色的传感器,传感器在现实世界中的作用和价值是不可估量的。

1.1 传感器概论

虽然传感器的传感原理、传感对象等分别属于物理、化学、生物和仿生等不同范畴,它们之间仍然具有密不可分的内在联系,可以用很多相同的概念来界定传感

器的技术特征, 同样也可用很多相同的技术指标来衡量其性能。

1.1.1 传感器及传感技术

国家标准 GB7665—87 对传感器的定义是: 能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置, 通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用信号输出的转换元件构成。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形式的信息输出, 以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它是实现自动检测和自动控制的首要环节, 由敏感元件、转换元件、信号调节转换电路和其他辅助电路组成, 如图 1-1 所示。

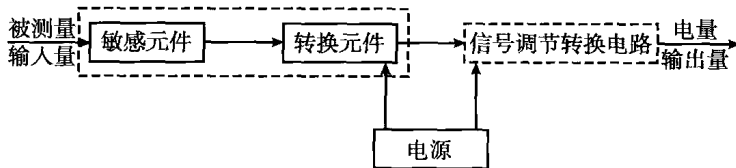


图 1-1 传感器组成框图

敏感元件是指能够灵敏地感受被测量并作出响应的元件, 其中有许多可兼做转换元件。转换元件实际上就是将敏感元件感受的被测量转换成电参数的元件, 如果敏感元件本身就能直接将被测量变成电参数, 那么该敏感元件就具有了敏感和转换两个功能。

传感器技术是利用各种功能材料实现信息检测的一门应用技术, 它是传感原理、材料科学、工艺加工、性能和应用等的综合技术。传感原理是指传感器工作时所依据的物理、化学和生物反应等机理。各种功能材料则是传感器发展的物质基础, 从某种意义上说, 传感器就是能感知外界各种信号的功能材料。就研究发展的历程看, 传感器基于其响应原理, 主要可分为物理传感器, 指将物理量如位移、运动、力、流量、光、电、热、磁等信号转换为可测电信号输出的装置或器件; 化学传感器, 指能够响应物质化学信号的传感装置或器件, 如离子选择性电极、化学修饰电极、气体传感器等; 生物传感器和仿生传感器, 如酶传感器、微生物传感器、免疫传感器、组织传感器等。但这些传感器又相互关联, 尤其是化学、生物和仿生传感器往往是建立在物理传感器的基础上。

根据能量转换关系, 传感器可分为能量转换型和能量控制型传感器。能量转换型传感器是由传感器输入量的变化直接引起能量的变化, 一般不需外部电源或外部电源只起辅助作用, 所以又称自源型传感器。基于压电效应、热电效应、光电动势效应等的传感器即属于此类传感器。能量控制型传感器是指其变换的能量是由外部电源供给的, 而传感器输入量的变化只起到控制的作用, 所以又称外源型传感器。

基于应变电阻效应、磁阻效应、光电效应、霍尔效应、热阻效应等的传感器则属于此类传感器。

传感器的种类繁多,一种被测量可以用不同的传感器来测量,而同一原理的传感器通常又可以测量多种被测量,因此分类方法各不相同。一般常见的分类方法如表 1-1 所示。

表 1-1 传感器的分类

分类依据	传感器名称	说明
按响应原理分类	物理传感器 化学传感器 生物传感器	基于物理效应 (光、电、声、热、磁) 基于化学效应 (选择、吸附性化学反应) 基于生物效应 (酶、抗体、激素等的分子识别和选择功能)
按输入量分类	压力、温度、湿度、位移、黏度、流速、气体等	传感器以被测量命名
按工作原理分类	电容式、电感式、电磁式、光电式、热电式、压电式、应变式等	传感器以工作原理命名
按输出信号分类	模拟式传感器 数字式传感器	输出为模拟量 输出为数字量
按能量关系分类	能量转换型 (自源型) 能量控制型 (外源型)	传感器工作无需外部电源或外部电源只起辅助作用 传感器工作需外部电源
按使用的敏感材料分类	半导体传感器、光纤传感器、陶瓷传感器、金属传感器、高分子材料传感器、复合材料传感器	传感器以使用的敏感材料命名

1.1.2 传感器的基本特性

传感器的特性主要指其转换信息的能力和性质,对传感器的响应特性通常可用静态特性和动态特性描述。

1. 静态特性

静态特性表示传感器在被测输入量的各个值处于稳定状态时的输入-输出关系。通常要求传感器在静态情况下的输入-输出关系保持线性。实际上,其输出量和输入量之间的关系 (不考虑迟滞及蠕变效应) 可由下列方程式确定:

$$Y = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \cdots + a_nX^n \quad (1-1)$$

式中, Y 为输出量; X 为输入量; a_0 为零位输出; a_1 为传感器的线性灵敏度; a_2, a_3, \cdots, a_n 为非线性项待定常数。在理想情况下,式 (1-1) 给出的是线性关系,但在实际工作中,由于非线性 (高次) 项的影响和随机变化量等因素的影响,不可能是线性关系。所以,衡量传感器静态特性的主要指标包括线性度、迟滞、重复性和灵敏度等。

1) 线性度

线性度又称非线性误差,是在规定条件下,表征传感器输入-输出量与校准曲线之间吻合或偏离程度的指标,如图 1-2 所示.通常用相对误差表示其大小

$$e_L = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中, Δ_{\max} 为输出量和输入量实际曲线与拟合直线之间的最大偏差; Y_{FS} 为理论满量程输出.

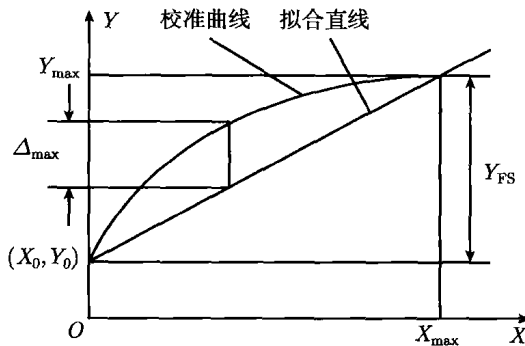


图 1-2 传感器的线性度

2) 灵敏度、灵敏阈与检出限

传感器的灵敏度指到达稳定工作状态时输出变化量与引起此变化的输入变化量之比,即

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX} \quad (1-3)$$

显然,对于线性传感器,灵敏度是拟合直线的斜率;对于非线性传感器,灵敏度不是常数,应以 dY/dX 表示(图 1-3).灵敏度反映了传感器对输入信号的敏感程度.通常,灵敏度越高越好,但灵敏度越高,测量范围往往越窄,稳定性越差.

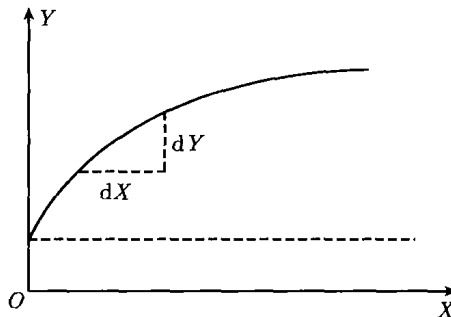


图 1-3 传感器的灵敏度

灵敏阈是指传感器能够区分出的最小变化量. 从物理含义看, 灵敏度是广义的增益, 而灵敏阈则是死区或不灵敏度.

检出限是衡量灵敏度的另一种指标, 国际纯粹与应用化学联合会 (IUPAC) 于 1998 年发表的《分析术语纲要》中规定: “检出限以浓度 (或质量) 表示, 是指由特定的分析步骤能够合理地检测出的最小分析信号求得的最低浓度 (或质量).” 简而言之, 它代表了某检测方法 (在此即指传感器) 能测知的最低被检测量.

3) 迟滞

迟滞是反映传感器正 (输入量增大)、反 (输入量减小) 行程过程中, 输入-输出曲线的不重合程度, 如图 1-4 所示.

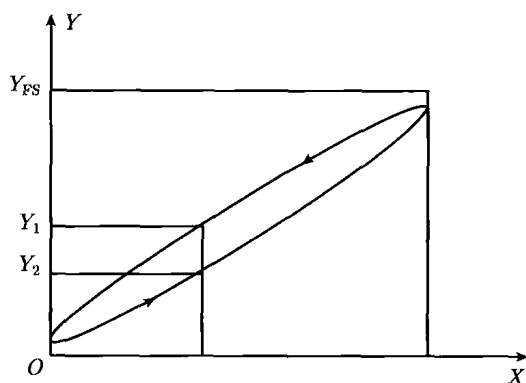


图 1-4 迟滞特性

通常用正反行程中输出的最大偏差量 Δ_{\max} ($\Delta_{\max} = Y_2 - Y_1$) 与满量程输出 Y_{FS} 之比的百分数来表示, 即

$$e_H = \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-4)$$

各种材料的物理性质是产生迟滞现象的原因. 如把应力加于某弹性材料时, 弹性材料产生变形, 应力虽然取消了但材料不能完全恢复原状. 又如, 铁磁体、铁电体在外加磁场、电场作用下均有这种现象. 迟滞也反映了传感器机械部分不可避免的缺陷, 各种各样的原因混合在一起导致了迟滞现象的发生.

4) 重复性

重复性是衡量传感器输入量按同一方向作全量程多次测试时, 所得特性曲线不一致的程度, 如图 1-5 所示.

特性曲线越重合, 重复性就越好. 重复性误差反映的是校准数据的离散程度, 属于随机误差, 因此, 可根据标准偏差来计算

$$e_R = \pm \frac{\sigma_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中, σ_{\max} 为各校准点正、反行程输出值的标准偏差的最大值; a 为置信系数, $a = 2$ 时, 置信概率为 95.4%; $a = 3$ 时, 置信概率为 99.7%。

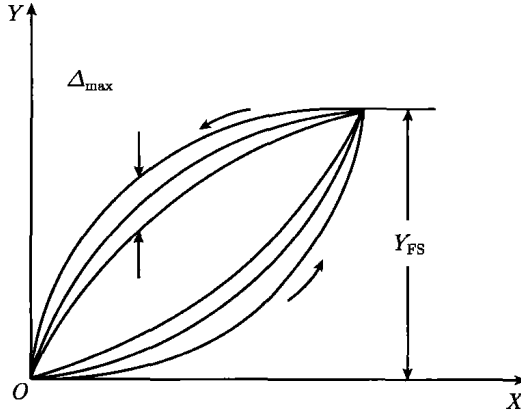


图 1-5 传感器响应的重复性

5) 稳定性

理想的情况是, 不管什么时候传感器的灵敏度等特性参数不随时间变化。但实际上, 随着时间的推移, 大多数传感器的特性会改变。这是因为传感元件或构成传感器的部件的特性随时间发生变化, 产生一种经时变化的现象。

稳定性有短期稳定性和长期稳定性之分。对于传感器, 常用长期稳定性来描述, 即传感器在相当长的时间内仍保持其原性能的能力。稳定性一般指在室温条件下, 经过规定的时间间隔后传感器的输出与起始标定的输出之间的差异。有时, 也用标定的有效期来表示传感器的稳定程度。

6) 漂移

漂移是指在一定的时间间隔内, 传感器的输出存在与被测输入量无关的、不需要的变化。漂移通常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(时漂)和温度漂移(温漂)。时漂是指在规定的条件下, 零点或灵敏度随时间有缓慢的变化; 温漂是指由周围温度变化所引起的零点或灵敏度的变化。

2. 动态特性

动态特性是指传感器对随时间变化的输入信号的响应特性。动态特性好的传感器, 其输出量随时间变化的规律(输出变化曲线)应与相应输入量随同一时间变化的规律(输入变化曲线)相同或近似。但实际上, 输出信号与输入信号不会具有完全相同的时间函数, 这种输入与输出间的差异称为动态误差。

为了分析传感器的动态特性, 可建立动态数学模型。动态数学模型是指传感器在动态信号作用下, 其输出和输入信号的一种数学关系, 对于任意线性系统, 可以