

教育规划教材

化工安全工程 实验教程

闫兴清 喻健良 编著



化学工业出版社

高等教育规划教材

化工安全工程 实验教程

闫兴清 喻健良 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《化工安全工程实验教程》从易燃易爆介质基础特性测量、易燃易爆介质传播行为研究、化工过程安全特性研究、燃爆防治技术研究等四个方面对化工安全领域的 17 个实验进行了全面系统阐述,以期通过对实验流程的理解和实验现象的观察,加深对化工安全基本理论与概念的理解,掌握化工安全测试技术及操作技能,培养自主分析问题、设计试验方案、分析试验结果并归纳研究结论的能力,提高理论联系实际、解决实际工程问题的能力。

《化工安全工程实验教程》旨在为高等院校安全工程、过程装备与控制工程、化工与制药类专业(如应用化学、化学工程与工艺、高分子材料与工程、能源化学工程、制药工程、化工安全工程等)本科及研究生提供全面的实验教学用书,同时也可化工领域安全生产技术与管理人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工安全工程实验教程 / 闫兴清, 喻健良编著. —北京:
化学工业出版社, 2018. 9
高等教育规划教材
ISBN 978-7-122-32390-3

I. ①化… II. ①闫… ②喻… III. ①化工安全-高等学
校-教材 IV. ①TQ086

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 127722 号

责任编辑: 杜进祥
责任校对: 王素芹

文字编辑: 孙凤英
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 三河市延风印装有限公司

787mm × 1092mm 1/16 印张 6 字数 154 千字 2018 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 24.00 元

版权所有 违者必究

党的十九大报告提出的“树立安全发展理念，弘扬生命至上、安全第一的思想，健全公共安全体系，完善安全生产责任制，坚决遏制重特大安全事故”，为各行业安全发展提供了依据。然而，近年来发生的化工行业重特大事故，暴露出制约我国化工行业发展的深层次安全问题依然存在，安全生产形势极其严峻。

2012年，国家安监总局、教育部联合召开高等学校化工安全复合型人才培养座谈会，指出要加快复合型人才培养步伐，为化工行业安全生产形势持续稳定好转提供源源不断、高质量人力支撑。2014年，又联合发布了《关于加强化工安全复合型人才培养工作的指导意见》，明确提出了多项举措以培养化工安全复合型人才。

实验教学是化工安全复合型人才培养体系的重要组成部分。实验教学相对于理论教学更具有直观性、综合性和创新性，对于提高学生的综合素质、工程实践能力和科技创新能力具有不可替代的作用。化工安全实验教学的主要任务是通过对实验设备的操作和实验现象的观察，加深对化工安全基本理论与概念的理解，掌握化工安全测试技术及操作技能，培养自主分析问题、设计试验方案、分析试验结果并归纳研究结论的能力，提高理论联系实际、解决实际工程问题的能力。

然而在实验教学过程中发现，化工安全实验教材非常少，难以满足人才培养的需求。大连理工大学于1988年开始培养安全工程学科研究生，2010年开始招收安全工程专业本科生。作为化工特色显著的安全工程人才培养高校，被国家安监总局确定为化工安全复合型人才培养重点院校。大连理工大学综合对本科生及研究生化工安全实验的教学经验，对自编的《化工安全实验讲义》进行了修改、补充和完善，编写了本书。

化工安全实验种类繁多。很多实验并没有标准仪器设备，采用的是自主搭建的装置。即使存在实验标准，对同一实验，不同厂家的实验仪器及操作方法也显著不同。这为教材的编写带来了很大难度。笔者认为，虽然实验人员面对的仪器设备及操作方法不同，但是实验原理及装置的流程类似。本书并没有详细描述某设备如何操作，而是将实验原理及测试流程作为重点，详细叙述为了实现测试目标应该如何设计实验并搭建实验装置，以培养学生解决实际工程问题的能力。

本书从化工安全与实验概述、测试技术概论、误差分析及数据整理、易燃易爆介质基础性测量类实验、易燃易爆介质传播行为研究类实验、化工过程安全特性研究类实验、燃爆防治技术研究类实验七章阐述，共设置17个实验。本书力求做到化工安全实验项目的科学性、合理性、适用性和可操作性，同时兼顾实验知识结构的广度和深度。

本书旨在为高等院校安全工程、过程装备与控制工程、化工与制药类专业（如应用化

学、化学工程与工艺、高分子材料与工程、能源化学工程、制药工程、化工安全工程等)本科及研究生提供全面的实验教学用书,同时也可作为化工领域安全生产技术与管理人员提供参考。

本书第一章~第三章由大连理工大学喻健良编著,余下各章由大连理工大学闫兴清编著,全书由闫兴清统稿,喻健良最终定稿。在本书编著过程中,得到了大连理工大学领导及研究生的大力支持和帮助,在此表示感谢!同时本书还参考了相关文献,向文献作者表示衷心感谢!

由于编著者水平所限,书中难免存在不足和疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编著者

2018年3月于大连

第一章 化工安全与实验概述	1
一、化工生产与安全	1
二、化工安全实验	2
三、本书内容	2
第二章 测试技术概论	4
一、测试技术作用	4
二、信号及测试系统组成	4
(一) 信号及其描述	4
(二) 测试系统组成	5
三、化工安全领域常用测试系统	5
(一) 传感器及其分类	5
(二) 中间变换器	6
(三) 显示及记录器	6
四、测试系统静态特性	7
(一) 理想测试系统	7
(二) 量程	7
(三) 线性度	7
(四) 灵敏度	8
(五) 分辨率	9
(六) 回程误差	9
(七) 漂移	9
第三章 误差分析及数据整理	10
一、误差	10
(一) 误差的表示方法	10
(二) 误差的来源	11

(三) 误差的分类	12
二、精度与误差	12
(一) 误差对测量值的影响	12
(二) 几种精度指标	12
三、随机误差的正态分布	13
(一) 实验数据的统计学处理	13
(二) 高斯正态分布及特征	14
四、多次测量的误差估计	15
(一) 统计参数估计	15
(二) 有效数字	16
五、测量数据的最小二乘法拟合	17

第四章 易燃易爆介质基础特性测量类实验

实验 1 可燃气体/蒸气爆炸极限测定实验	19
实验 2 可燃气体最大试验安全间隙 (MESG) 测量实验	23
实验 3 可燃液体闪点及燃点测定实验	27
实验 4 可燃粉尘爆炸强度参数测量实验	31

第五章 易燃易爆介质传播行为研究类实验

实验 5 管道内气相爆燃波传播特性实验	38
实验 6 初始压力对气相爆轰波传播影响实验	43
实验 7 开敞空间粉尘云火焰传播特性实验	47
实验 8 受限及密闭空间粉尘云火焰传播特性实验	51
实验 9 基于 PIV 的旋流突扩燃烧室冷态流场测量实验	54

第六章 化工过程安全特性研究类实验

实验 10 超声波测厚实验	58
实验 11 可燃物质燃烧热测定实验	61
实验 12 基于 VSP2 的化学反应失控特性实验	67
实验 13 油罐火灾沸溢特性研究实验	72
实验 14 管道内 CO ₂ 气体泄漏扩散实验	74

第七章 燃爆防治技术研究类实验

实验 15 细水雾抑制可燃气体爆炸实验	78
---------------------------	----

实验 16 压力容器超压泄放实验 81

实验 17 火灾应急处置及灭火器使用实验 86

参考文献 88

一、化工生产与安全

化学工业是原料经过物理加工或化学反应过程生产出所需产品的工业。化学工业为其他工业提供必需的物质基础,是国民经济的支柱产业,在衣食住行、农业、工业、国防、能源、医药等领域发挥重要作用。化学工业规模大、涉及面广,一般具有如下特点。

1. 化工原料种类繁多,危险化学品占比高

据统计,化工行业涉及化学品 15000 多种,其中,近 4000 种属于易燃、易爆、有毒、有害或者具有腐蚀性的危险化学品。在化工生产中若防护措施不到位,容易发生火灾、爆炸、中毒等事故。

2. 化工反应及工艺过程复杂,条件苛刻

化工生产反应繁多,如氧化、还原、氢化、硝化、水解、磺化、胺化等;工艺复杂,如反应、输送、过滤、蒸发、冷凝、精馏、提纯、吸附、干燥等。较多化工反应需要在高温、高压等条件下进行。例如合成氨的压力最高可达 32MPa,高压聚乙烯合成压力近 300MPa;乙烯裂解炉温度高达 1200℃,乙烯深冷分离温度需降至 -167℃ 等。高压、高温等条件对设备及材料提出了更高要求。一旦失效,将引发严重事故。另外,很多化工反应为放热反应。反应热量一旦不能及时移走,将使得反应容器内温度升高,导致反应速率加快,快速放热造成“飞温”“飞压”,引发反应失控现象,可能导致反应器爆炸。

因此,化工生产危险因素多且广,涵盖火灾、爆炸、中毒、灼伤、窒息、触电、辐射、高空坠物、机械伤害等,潜在事故风险大。

3. 生产装置大型化、密集化

采用大型、密集装置可以明显降低单位产品的建设投资和生产成本,提高劳动生产能力,降低能耗。因此,化工生产装置越来越趋向于大型化及密集化。虽然这种方式对生产有利,但若发生事故,将造成很大的事故灾害。

化学工业的上述特点使得安全生产尤为重要。然而,伴随着化工行业的发展,化工安全事故不断发生。化工生产中可见的安全事故类型有火灾事故、爆炸事故、电气事故、静电及雷电事故、中毒事故、压力容器爆炸事故、腐蚀事故等。

近几年,我国化工行业发生了数起重特大事故:

- 2017 年临沂金誉石化“6·5”罐车泄漏重大爆炸着火事故;
- 2015 年天津港“8·12”瑞海公司危险品仓库特别重大火灾爆炸事故;

- 2014 年昆山中荣金属制品有限公司“8·2”特别重大爆炸事故;
- 2013 年青岛“11·22”中石化东黄输油管道泄漏爆炸特别重大事故;
- 2010 年大连中石油国际储运有限公司“7·16”特别重大输油管道爆炸火灾事故;

这些事故的发生,暴露出制约我国化工行业发展的深层次安全问题依然存在,安全生产形势极其严峻。

在化工事故中,由于化学物品本身不稳定、化工反应工艺过程本身不安全等内在因素造成的事故占大多数。控制化工安全事故,首先需要人们深入认识化工生产过程中存在的危险因素及危险源,并分析其潜在的风险及危害,继而提出降低风险、预防事故的措施。

二、化工安全实验

要深入理解化工生产过程中存在的危险因素及危险源,认识其潜在的风险及危害,实验研究是最主要的研究方法。实验是有目的、有计划地运用仪器设备,在人为控制条件下,使现象反复再现,从而进行观测,获得大量资料的一种科学研究方法。通过实验研究,可以发现新事物和探索新规律、验证理论研究成果、获得目标参数等。

在化工安全领域,发现化工原料危险现象、寻找其致灾规律等,均离不开实验。可以说,实验的水平一定程度上决定着化工安全研究水平。

人才的培养离不开教学。对于工程性很强的化工安全领域,实验教学更是人才培养的关键部分。实验教学相对于理论教学更具有直观性、综合性和创新性,可以激发学生的兴趣和求知欲,训练学生的实验方法,培养学生的科学态度和情感,以提高学生的综合素质、工程实践能力和科技创新能力。

化工安全实验教学的主要任务是通过对实验设备的操作和实验现象的观察,加深对化工安全基本理论与概念的理解,掌握化工安全测试技术及操作技能,培养自主分析问题、设计试验方案、分析试验结果并归纳研究结论的能力,提高理论联系实际、解决实际工程问题的能力。

三、本书内容

一个完整的实验教学,包括实验目的、实验原理、实验仪器、实验步骤及操作、实验结果记录及分析、实验思考等内容。在长期的化工安全实验教学过程中,笔者发现如下问题:

- 化工安全实验类型多样,过程复杂。很多实验无标准仪器,多为自主搭建的装置。即使有测试标准,对相同实验,不同厂家的仪器设备,其操作方法和步骤完全不同。
- 在实验教学过程中,若将较多时间花在实验仪器设备如何操作上,则学生不但会出现对不同设备的“水土不服”,而且无法理解实验原理,也无法培养其开展研究的能力。
- 随着自动化技术的高速发展,实验仪器设备的自动化程度逐渐提高。在一些实验过程中,学生仅靠两三个按键即可完成实验内容,获得实验结果。这种“按键式”操作方法显然不符合化工安全实验教学的培养目标。

针对上述情况,笔者认为,实验教学过程要有所侧重,实验教学的重点在于实验原理及实验流程。对同一个实验,无论不同厂家的仪器设备及操作如何不同,其实验原理及实验流程是类似的。深刻理解实验原理及流程,获得了解决问题的方法,才能够对测量设备“举一反三”,

甚至可以设计实验装置并搭建实验平台。本教材在编写过程中,将实验原理及流程作为编写重点,而弱化实验装置的具体操作(具体操作的获取可参考仪器设备说明书)。

本书将化工安全实验分为易燃易爆介质基础特性测量类实验、易燃易爆介质传播行为研究类实验、化工过程安全特性研究类实验、燃爆防治技术研究类实验四大类。每一类均设置数个具体实验项目。

一、测试技术作用

实验过程离不开测试。通常来说,获取某些参量呈现的特性或现象是实验的重要目标,而实现这个过程则需要测试技术。测试可以理解为测量和试验的综合,是具有试验性质的测量。所谓测量,是指以确定对象属性度量为目的的操作,而试验则是对未知事物探索性的认识过程。测试技术的主要内容一般包括被测量的测量原理、测量方法、测量系统以及数据处理四个方面。

测试技术的基本任务及用途可以概括为以下三个方面:

1. 过程工艺及设备的运行监测

采用测试技术获得工艺参数(如压力、温度、流量、液位、组分等)以及机械性能(如应力、转速、振动等),实现运行状态的监测,这是测试技术的基本用途。

2. 过程工艺及设备的控制

将测量得到的工艺及设备目标参数,与预期数值对比。当出现超出预期的偏差时,通过调整影响目标参数变化的自变量参数,使目标参数达到希望的预期数值,实现控制过程。

3. 工程问题的实验分析

通过测试技术,既可以对工程问题用实验分析方法验证理论模型的可靠性,也可以在缺少相关理论的情况下获得半经验及经验解决方法,甚至可以通过对某些问题的实验分析来发展及完善相应理论。

二、信号及测试系统组成

(一) 信号及其描述

在介绍测试系统之前,首先要了解信息、信号的概念。所谓信息,是指人类社会和自然界中需要传送、交换、存储和提取的抽象内容,一般可理解为消息、情报或知识等。信息不是物质,也不具备能量,是物质所固有的,具备客观性。然而,信息具有抽象性,很多场合下不便于传送和交换,往往需要借助于某种便于传送和交换的物理量作为运载手段。

将传输信息的载体称为信号,信号的变化反映了所携带信息的变化。与信息相比,信号是具有能量的物质,是某种具体的物理量,如声音信号、光信号、电信号、位移信号、速度信号等。在作为信号的众多物理量中,电信号的应用最为广泛。因为电信号容易产生、传输及控制,也容易与其他物理量相互转换。

一般来说,任何一种物理量信息的描述,均需要由信号来实现。因此,测试技术的实质是获得待测物理量信息的信号特征。

(二) 测试系统组成

测试系统是为实现物理量测试而采用的,由相关器件、仪器和测试装置有机组合而成的具有获取某种信息的功能的整体,通常由传感器、中间变换器以及显示及记录器等组成,如图 2.1 所示。

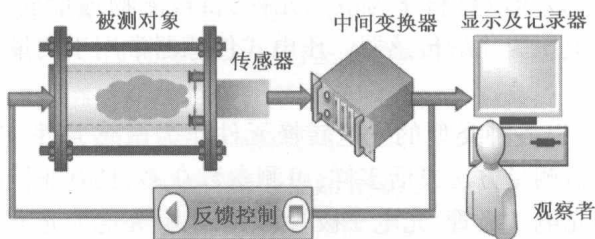


图 2.1 测试系统框图

(1) 传感器 直接作用于被测对象,感受被测物理量如压力、温度等,并能按一定规律将被测物理量转换成便于应用的信号形式输出,如机械的位移信号以及电量中的电压信号、电阻信号等。

(2) 中间变换器 很多工况下,来自传感器的信号因某些原因(如信号幅值过小、需要滤波、信号不便传输处理等)需要进行处理,完成这部分工作的设备称为中间变换器。中间变换器的功能可分为信号调整、信号处理两种:

◇ 信号调整 把来自传感器的信号转换成更适合于传输和处理的形式,如幅值放大、阻抗的变化转换成电压的变化、阻抗的变化转换成频率的变化等。

◇ 信号处理 接受调理后的信号,并进行各种运算、滤波、分析,将结果输至显示记录或记录器。

(3) 显示及记录器 显示或记录器的作用是将中间变换器处理后的信号以观察者易于识别的形式显示或存储供后续分析使用。

三、化工安全领域常用测试系统

(一) 传感器及其分类

传感器(transducer/sensor)是能感受被测物理量并按照一定的规律将其转换为可用于输出信号的器件或装置,由敏感元件和转换元件组成(GB 7665—2005)。敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测物理量的部分;转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测物理量转换成能够传输或测量的信号的部分。

随着电子技术的迅速发展,基于电信号的传感器因具有如下较多优点而逐渐成为传感器的首选:

- 响应速度快;
- 仪器通用性强,使用方便;
- 无线技术使得远距离传输不受限制;

- 适用范围广泛,尤其适用于环境恶劣导致测试技术无法接近的场合。

传感器的分类方法有很多。例如根据被测物理量,可分为压力传感器、温度传感器、位移传感器、加速度传感器、振动传感器、力传感器、力矩传感器、重量传感器、火焰传感器等。这些传感器均能将被测物理量转换成可用输出信号。

根据传感器输出信号类型的不同,化工安全领域常用的传感器有如下几种:

(1)电阻式传感器 把位移、力、压力、加速度、转矩等被测非电物理量变化转换为电阻变化的传感器。电阻应变片是最为典型的电阻式传感器。

(2)压电式传感器 以压电材料作为敏感元件,将被测物理量变化转换为因压电材料受机械力产生静电电荷或电压变化的传感器。压电式传感器常用于测量力和能变换为力的非电物理量。

(3)光电式传感器 以各种类型的光电转换元件作为敏感元件,将光通量转换为电量的一种传感器。光电传感器测量方法灵活多样,可测参数众多,具有非接触、高精度、高可靠性和反应快等特点。常用的光电二极管、光电三极管、光敏电阻等均为光电式传感器的典型类型。

(4)热电式传感器 某些材料或元件的性能随温度变化,以这些材料作为敏感元件,将温度变化转换为电量(如电阻、电势等)变化的传感器。把温度变化转换为电势的热电式传感器称为热电偶;把温度变化转换为电阻值的热电式传感器称为热电阻。

(5)电容式传感器 以各种类型的电容器作为敏感元件,将被测物理量转换为电容量变化的传感器。电容式传感器结构简单、耐高温、耐辐射、分辨率高、动态响应特性好,广泛用于压力、位移、加速度、厚度、振动、液位等测量中。

(二) 中间变换器

常用的中间变换器有以下几种。

(1)放大器 将传感器转换后输出的电信号进行电压或功率放大,以实现后续应用或减少测试系统对被测信号的影响。放大器一般由电子管或晶体管、电源变压器和其他电器元件组成。

(2)电桥 将传感器转换后输出的电阻、电容等参数,利用电桥转换为电压或电流输出。电桥电路简单,灵敏度高。

(3)调制与解调 有些物理量经传感器变换后,得到的是一些缓慢变化的电信号,这些接近于直流的电信号要得到高质量的放大比较困难,若把这些缓慢放大的电信号调制成适宜于用交流放大器的一定频率区间的信号,放大后再解调为与原来一样频率的信号,这样就易于得到高质量的放大信息。

(4)滤波器 滤波器的作用是使信号中规定的频率成分通过,而不允许或大大衰减其他频率成分,以达到对规定频率的成分进行分析的目的。

(5)A/D转换器 一般传感器所输出的信号都是被测物理量在测量时间内的连续变化量,称为模拟量。当需要进行数字显示或将模拟量输入计算机进行后续操作时,必须转换为离散的数字,称为数字量。完成模拟量与数字量转换的设备称为模数(A/D)转换器。而由数字量转换为模拟量的设备称为数模(D/A)转换器。随着计算技术的发展,A/D及D/A转换器在目前的数据采集及处理中应用广泛。

(三) 显示及记录器

得益于数字图像技术的发展,显示及记录器已经成为测试系统中最为成熟的一个环节,无

论是指示及显示仪表类,还是记录仪器类,均有大量不同类型、不同参数的设备可供选择。目前,较为常用的显示及记录仪器有示波器、记录仪以及电子计算机等。

四、测试系统静态特性

(一) 理想测试系统

如图 2.2 所示,假设被测量信号为 $x(t)$, 系统的传输或转换特性为 $h(t)$, 输出信号为 $y(t)$ 。通常的工程测试问题是处理输入量 $x(t)$ 、传输特性 $h(t)$ 和输出量 $y(t)$ 三者之间的关系。根据三者关系的不同,测试系统对应如下三种问题:

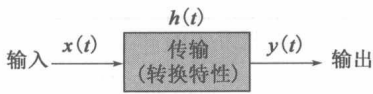


图 2.2 测试系统输入输出示意图

- 测量问题:若 $h(t)$ 已知,通过对 $y(t)$ 的观测,推断 $x(t)$;
- 标定问题:若 $x(t)$ 已知, $y(t)$ 可测,则可推断 $h(t)$;
- 预测问题:若 $x(t)$ 和 $h(t)$ 已知,则可推断和估计 $y(t)$ 。

若某测试系统,其输出和输入呈线性关系,即具有单值,确定的输入、输出关系,且不随时间变化(定常状态),则该测试系统为理想测试系统,可用式(2.1)表示:

$$y = kx \tag{2.1}$$

式中, k 为比例系数,为一常数。

然而,对实际测试系统,仅在工作范围和一定误差允许范围内才满足线性要求,且随时间变化。将描述实际测试系统与理想定常线性系统的接近程度的参数,定义为测试系统的特性。测试系统特性可分静态特性和动态特性两种。测试系统静态特性是在静态测试情况下描述实际测试装置与理想定常线性系统的接近程度。本书仅介绍与化工安全实验测试系统紧密相关的静态特性。动态特性的资料可参阅其他相关文献。

(二) 量程

测试系统所能测量到的最小被测量(输入) $x_{\min}$ 与最大被测量(输入) $x_{\max}$ 之间的范围称为测量范围。测量范围的上限值与下限值的代数和称为量程 R ,即:

$$R = x_{\max} - x_{\min} \tag{2.2}$$

【例 1】 某型压力传感器测量范围为 $-0.1 \sim 1\text{MPa}$,则其量程 $R = 1.1\text{MPa}$ 。

(三) 线性度

线性度是在静态测量中输出与输入之间是否保持线性比例关系的一种量度。如图 2.3 所示,用实验方法测出的实际输入输出关系曲线,称为“定度曲线”,定度曲线偏离理想特性曲线的程度称为线性度 γ ,又称非线性误差。即:

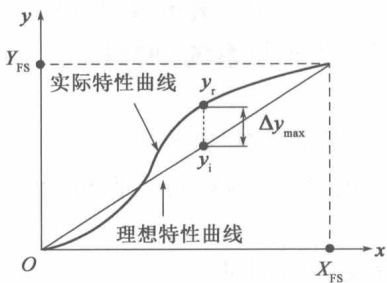


图 2.3 线性度示意图

$$\gamma = \frac{\Delta y_{\max}}{Y_{\text{FS}}} \times 100\% \tag{2.3}$$

式中, $\Delta y_{\max}$ 为实际特性曲线输出值 y_r 与理想特性曲线输出值 y_i 的最大偏差数值; Y_{FS} 为理论满量程输出值。

在图 2.3 中,实际特性曲线可以通过测量得到。然而,理想特性曲线往往难以真正获得。通常,认为测量点的拟

合直线为理想特性曲线。拟合的原则是使实际特性曲线与理想特性曲线上各点的线性误差的平方和最小(最小二乘法)。工程上希望线性度越小越好。

【例2】某型压力传感器,测量发现,在压力为0MPa时输出0mV,在压力为0.12MPa时输出最大且为16.50mV。压力在0~0.12MPa范围内逐次变化时,测量得到的电压输出值见表2.1。试计算该压力传感器线性度。

表 2.1 传感器输出电压数值 单位:mV

压力/MPa		0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
第一循环	正行程	0.56	3.96	7.40	10.88	14.42
	反行程	0.66	4.06	7.49	10.95	14.42
第二循环	正行程	0.61	3.99	7.43	10.89	14.47
	反行程	0.68	4.09	7.53	10.93	14.47
第三循环	正行程	0.64	4.03	7.45	10.94	14.46
	反行程	0.69	4.11	7.52	10.99	14.46

解:要求线性度,需要确定实际特性曲线与理想特性曲线的最大偏差。理想特性曲线一般通过最小二乘法拟合等获得。由于测量了三次循环数据,故首先采用求平均值方法确定拟进行最小二乘的数据,见表2.2。

表 2.2 测量平均值

压力/MPa	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12
测量平均值/mV	0	0.64	4.04	7.47	10.93	14.45	16.50

依据表2.2数据作图,并作数据的最小二乘拟合曲线,结果见图2.4,得到理想特性曲线,以及各测量点与理想数值的偏差。可知, $\Delta y_{\max} = 1.2825$ 。则线性度为 $\frac{1.2825}{16.50} \times 100\% = 7\%$ 。

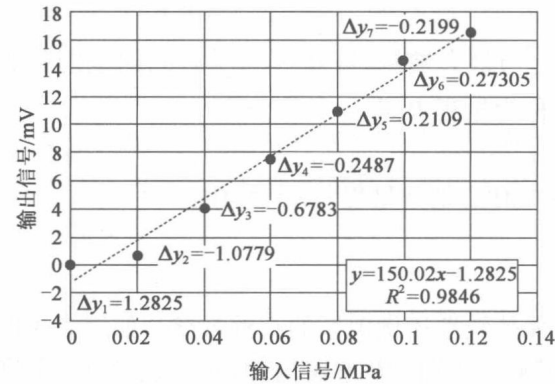


图 2.4 测量数据最小二乘拟合曲线

置的灵敏度数值。

灵敏度的量纲取决于输入-输出的量纲。当输入与输出的量纲相同时,则灵敏度是一个无量纲的数,常称为放大倍数(amplification)或增益(gain)。系统的灵敏度越高,越容易受外界干扰的影响,即装置的稳定性越低。

【例3】某位移传感器,其灵敏度为200mV/mm。则其含义为当测量位移变化1mm时,其输出电压变化200mV。

(四) 灵敏度

灵敏度 S 是测试系统输出增量 Δy 与输入增量 Δx 的比值,反映了测试系统对被测物理量变化的响应能力,即:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{2.4}$$

根据式(2.4),对理想定常线性系统 $y = kx$,灵敏度 $S = \Delta y / \Delta x = k$ 。对于非理想系统,其灵敏度数值并非常数。但一般可以用测量数据的拟合曲线(近似为理想系统)的斜率作为装

(五) 分辨率

分辨率是指测试系统所能检测出来的输入量的最小变化量,如果输入量从某一非零值缓慢变化,当输入变化值未超过某一数值时,传感器的输出不会发生变化,即传感器对此输入量的变化分辨不出来。只有当输入量变化超过分辨率时,其输出才能发生变化。通常是以最小单位输出量所对应的输入量来表示,即:

$$\text{分辨率} = \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (2.5)$$

分辨率是灵敏度的倒数。测试系统的分辨率越高,表示所能检测出的输入量的最小变化量值越小。分辨率也称为灵敏阈或灵敏限。

(六) 回程误差

由于仪器仪表中的磁性材料的磁滞、弹性材料迟滞、机械结构的摩擦和游隙等原因,往往引起测试过程中输入量在递增过程中的定度曲线与输入量在递减过程中的定度曲线不重合,即同一个输入量对应两个数值不同的输出量,这种现象称为迟滞,见图 2.5。

若最大迟滞值为 $h_{\max}$, 满量程输出为 Y_{FS} , 则定义回程误差为:

$$\Omega = \frac{h_{\max}}{Y_{\text{FS}}} \quad (2.6)$$

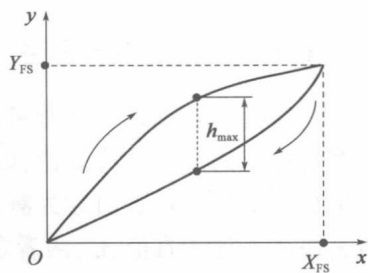


图 2.5 迟滞示意图

(七) 漂移

漂移是指测试系统在输入不变的条件下,输出随时间而变化的趋势。在测试系统测试范围最低值处的漂移,称为零点漂移,简称零漂。

漂移有两个方面原因:一是仪器自身结构参数的变化;二是周围环境的变化(如温度、湿度等)对输出的影响。最常见的漂移是温漂,即由于周围的温度变化而引起输出的变化,进一步引起测试系统的灵敏度和零位发生漂移,即灵敏度漂移和零点漂移。