



普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材

传感器原理及检测技术 学习与实践指导

主编 梁福平
主审 孔力



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材

传感器原理及检测技术

学习与实践指导

主 编 梁福平

副主编 王晓飞 苑惠娟

刘波峰 牛春晖

参 编 李恒灿 李志华 莫文琴

刘桂礼 蔡利民 潘志康

郑青玉

主 审 孔 力



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书是与“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《传感器原理及检测技术》(梁福平主编,华中科技大学出版社,2014年3月)配套的教学辅导教材。全书共分三个部分:第一部分(第1~13章)为传感器原理及检测技术学习指导,按章从内容提要、基本要求和重点与难点的角度提供学习指导,并对典型例题进行讲解,同时附配套的教材习题的全部解答;第二部分(第14章)为实验指导,对实验设备和典型实验加以介绍说明;第三部分(附录)为题库,包括模拟试卷和期末考试的一些试题,供学生和读者进一步学习和练习。第一部分和附录A均按配套教材的章节次序编写。

本书可作为测控技术与仪器、机电一体化、电子信息工程、检测技术、自动化和仪器仪表、机械设计制造及其自动化、电气工程及其自动化、通信工程、光信息科学与技术、电子信息科学与技术及新设立的物联网工程等专业的学习参考用书,也可作为其他相近专业高年级本科生和硕士研究生的自学参考书,同时还可作为与上述领域相关的科研人员和工程技术人员的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及检测技术学习与实践指导/梁福平主编. —武汉:华中科技大学出版社,2014.7
ISBN 978-7-5680-0227-1

I. ①传… II. ①梁… III. ①传感器-高等学校-教学参考资料 IV. ①TB212

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第155244号

传感器原理及检测技术学习与实践指导

梁福平 主编

策划编辑:万亚军

责任编辑:刘 飞

封面设计:范翠璇

责任校对:何 欢

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:华中理工大学印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:13.25

字 数:348千字

版 次:2014年11月第1版第1次印刷

定 价:25.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材

编委会

主任：

钟毓宁

(湖北汽车工业学院校长, 教育部高等学校仪器科学与技术专业教学指导委员会副主任委员)

副主任：

孔 力

(华中科技大学教授, 教育部高等学校仪器科学与技术专业教学指导委员会委员)

许贤泽

(武汉大学教授, 教育部高等学校仪器科学与技术专业教学指导委员会委员)

委员：(以姓氏笔画为序)

王连弟 (华中科技大学出版社)

王先培 (武汉大学)

史红梅 (北京交通大学)

李威宣 (武汉理工大学)

杨 帆 (武汉工程大学)

张思祥 (河北工业大学)

何 涛 (湖北工业大学)

周荣政 (江汉大学)

胡春海 (燕山大学)

郭天太 (中国计量学院)

康宜华 (华中科技大学)

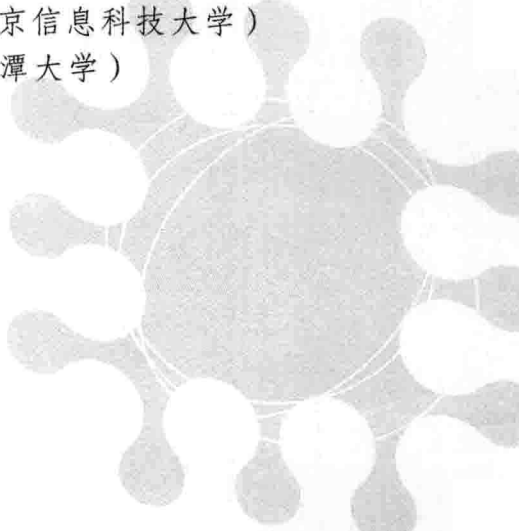
梁福平 (北京信息科技大学)

董浩斌 (中国地质大学)

曾以成 (湘潭大学)

秘书：

刘 锦 万亚军





普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材

总 序

测控技术与仪器专业是在合并原来的11个仪器仪表类专业的基础上新设立的专业，目前设有该专业的高校已经超过250所，是当前发展较快的本科专业之一。经过两届全国高等学校仪器科学与技术教学指导委员会的努力，形成了《测控技术与仪器专业本科教学规范》（以下简称《专业规范》）。《专业规范》颁布后，各高校开始构建面向21世纪的测控技术与仪器本科专业的课程体系，并进行教学改革，以更好地满足科学技术和国民经济发展的需要。

华中科技大学出版社邀请多位全国高等学校仪器科学与技术教学指导委员会委员和具有丰富教学经验的专家编写了这套“普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材”，这对于满足各高校测控专业建设需要，加强高校测控专业的建设，进一步落实《专业规范》精神，具有积极的作用。

这套教材基本涵盖了测控技术与仪器专业的专业基础课程和部分专业课程，编写定位清晰，内容适应了加强工程教学的趋势，注重了教材的实用性和创新性教育的推进。这套教材的出版，是测控专业教学领域“百花齐放、百家争鸣”的一个体现，它为测控专业教学选用教材又提供了一个选择。

由于时间所限，这套教材可能存在这样那样的问题。随着这套教材投入教学使用和通过教学实践的检验，它将不断得到改进、完善和提高，为测控专业人才的培养做出积极的贡献。

谨为之序。

全国高等学校仪器科学与技术教学指导委员会主任委员

刘心唐

2009年7月



序

在现代科学技术的推动下，仪器科学与技术学科，也紧跟国际发展的步伐，在实现微型化、数字化、智能化、集成化和网络化等方面取得了显著的进展。测控技术与仪器专业属于仪器科学与技术学科领域，它研究信息的获取和预处理，同时对相关要素进行控制，是将电子、光学、精密机械、计算机技术和信息技术等多学科互相渗透融合而形成的一门高新技术密集型综合学科。目前设有该专业的高校已经超过250所，是当前发展较快的本科专业之一。在全国高等学校仪器科学与技术教学指导委员会的指导下，华中科技大学出版社组织具有丰富教学经验的专家编写了这套“普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材”，这对促进我国仪器科学与技术的人才培养是一件大好事。本书就是这套规划教材中的一本。

传感技术完成对信息的获取、传输和处理，是现代信息技术和物联网技术的源头，在信息技术中起着相当重要的作用。因此，“传感器原理及检测技术”是本科教学中的主干专业课，目前几乎所有有工科研究背景的院校都开设了相关的课程。本教材由多所院校多位教师编写，他们既有在工厂和研究所工作的实际经验，又有在高校教学的丰富经验。在编写过程中，能遵循简明、系统、实用、新颖的原则，力求理论联系实际，使教材具有一定的实用和参考价值。我相信，本教材的出版发行，一定会使更多的同学热爱传感器技术，学好传感器技术，应用好检测技术，一定会对仪器科学与技术学科人才的培养起到积极的推进作用。

中国工程院院士



2014年10月

前 言

我国“两弹一星”的元勋、“航天之父”、著名科学家钱学森明确指出：“发展高新技术信息技术是关键，信息技术包括测量技术、计算机技术和通信技术。测量技术是关键和基础。”测控技术与仪器包含测量技术、控制技术和实现这些技术的仪器仪表及系统，是多学科交叉融合的专业，知识面非常广，开设的课程也较多，具体涉及测量与控制技术、仪器仪表技术、计算机技术、信息技术、系统与网络技术等多个学科的知识。

测控技术与仪器专业源于高等教育仪器仪表类专业。为顺应学科发展需求，教育部 1997 年调整本科专业时，把仪器仪表类 11 个专业（精密仪器、光学技术与光电仪器、检测技术与仪器仪表、电子仪器及测量技术、几何量计量测试、热工计量测试、力学计量测量、光学计量测量、无线电计量测试、检测技术与精密仪器、测控技术与仪器）归并为新的宽口径专业——测控技术与仪器。这是我国高等教育由专才教育向通识教育转变的重要里程碑。

在当今自动化、信息化时代，对各类信息的采集、处理、传输及自动控制技术的研究、开发与应用就显得非常重要；社会急需掌握先进的测控技术，特别是传感器技术、计算机技术、数字化信息技术及其综合应用能力的人才。为此，进入 21 世纪以来，仪器仪表专业的发展速度更是空前，测控技术与仪器专业急速扩大，学生人数也在快速增加。在 2009 年召开的全国高等学校仪器科学与技术本科教学研讨会上，教学指导委员会主任委员胡小唐教授在题为《以质量工程为抓手，推进仪器科学与技术创新教育》的报告中指出：全国开设测控技术与仪器专业的本科院校已从 2000 年的 96 所增加到 2009 年的 257 所，增长 168%；在校本科生人数由 2000 年的 27600 人增加到 2009 年的 85700 人，增长 211%；研究生达 10000 余人。

按照教学大纲的要求，本课程为高等院校测控技术与仪器专业的一门必修的重要专业课，它的主要任务是通过课程学习，使学生掌握传感器的基本工作原理、转换电路设计及传感器应用技术。

同时，本课程也是高等院校机电一体化、电子信息工程、检测技术、自动化和仪器仪表、机械设计制造及其自动化、电气工程及其自动化、通信工程、光信息科学与技术、电子信息科学与技术，以及新设立的物联网工程等专业的专业重要专业课。建议课时 48~64 学时。

“传感器原理及检测技术”是一门涉及传感器技术、电工电子技术、光电检测技术、控制技术、计算机技术、数据处理技术、精密机械设计技术等众多基础理论和技术的综合性技术。现代检测系统通常集光、机、电、计算机于一体，软硬件相结合。

因此，要学好“传感器原理及检测技术”，必须要有良好的高等数学、大学物理、模拟电子技术、数字电子技术、电路分析基础、测控电路、信号与系统、概率论与数理统计等先修课程的基础。本课程要求学生掌握传感器的基本概念、基本特性、基本测量电路及其应用，了解改善传感器性能的途径、传感器的标定和校准方法，同时了解其他现代新型传感器和传感器技术的发展，并着重培养学生熟练掌握各类传感器（包括电阻式、电感式、电容式、压电式、磁电式、热电式、光电式、数字式和光纤式传感器等）的工作原理、组成结构、主要特性及其在生产过程和日常生活中的典型应用和选用原则，了解并掌握传感器检测系统。

本课程是一门实践性很强的课程,因此,除了要求学生在课堂上要认真听讲、搞好理论学习的同时,还要认真思考,最好能独立完成课后的习题作业;同时还要求学生注意理论与实际的结合,充分利用实验室的设备,能通过一系列实验和实践,熟练掌握各类典型传感器的基本原理及其应用,达到理论与实践高度统一,提高综合实践的能力,突出能力的培养。

本书的编者一向提倡学生要独立完成作业,提倡学习要独立思考,真正弄懂弄通原理,学会理论联系实际,并学会举一反三。在本课程的教学过程中,我们也注意到:有些学生觉得本课程内容多、头绪多、概念原理多、应用复杂交叉,要求老师辅导;许多读者还要求对章后的习题有个解答的过程,并在网上搜索寻求答案。因此,为满足广大读者要求,我们特组织参与教材编写的各个院校的老师 and 北京信息科技大学多年从事本课程教学的老师一起编写了本书,从课程学习和实践两方面进行必要的指导,以飨读者。本书可作为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《传感器原理及检测技术》的教学辅导教材。

全书共分三个部分,由6所院校的老师共同参加本书的编写,梁福平教授任主编。第一部分(第1~13章)为传感器原理及检测技术学习指导,按章从内容提要、基本要求和重点与难点的角度给以学习指导,并对典型例题进行讲解,同时给出了教材书后习题的全部解答;第二部分(第14章)为实验指导,对实验设备和开设的典型实验加以介绍说明;第三部分(附录)为题库,包括模拟试卷和期末考试的一些试题,供学生和读者进一步学习和练习用。第一部分和附录A均按配套教材的章节次序编写。

本书的第1、2、13章由北京信息科技大学梁福平教授编写;第3、6章由哈尔滨理工大学苑惠娟教授编写;第4、11章由华北水利水电大学李恒灿副教授编写;第5章和第12章第6节由中国地质大学(武汉)李志华副教授和莫文琴博士编写;第7章由湖南大学刘波峰副教授编写;第8章、第10章和第12章第1~5节由北京信息科技大学牛春晖副教授编写;第9章由江汉大学蔡利民副教授编写。北京信息科技大学刘桂礼教授、王晓飞教授、潘志康讲师对各章习题和题库的编写做了大量的工作。其中北京信息科技大学刘桂礼教授对第8、12章,牛春晖副教授对第9、10、11、13章,潘志康讲师对第5、6、7章,梁福平教授对第1、2、3、4章进行了整理、补充,王晓飞补充了全部章节的应用题。第14章由北京信息科技大学郑青玉高级实验师编写,潘志康讲师和王晓飞教授审校。感谢哈尔滨理工大学、华北水利水电大学、湖南大学和北京信息科技大学提供了一些历届期末考试的试题。全书由梁福平教授负责统稿,由王晓飞教授协助统稿,由华中科技大学孔力教授主审。

在本书的编写过程中,各位作者倾注了教学与参与科研实践的经验,同时查阅和参考了大量文献。特别荣幸的是,本书得到了参编的各个单位的领导、浙江高联科技开发有限公司、现代测控技术教育部重点实验室,以及兄弟院校许多老师的大力支持,在此一并表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限,尽管有多位老师反复审校,书中可能还会有疏漏、欠妥和错误之处,恭请读者不吝赐教。

编 者

2014年5月

目 录

第 1 章 传感器检测技术概论	(1)
1.1 学习指导	(1)
1.2 典型例题	(1)
1.3 习题解答	(8)
第 2 章 电阻式传感器	(12)
2.1 学习指导	(12)
2.2 典型例题	(13)
2.3 习题解答	(20)
第 3 章 电感式传感器	(27)
3.1 学习指导	(27)
3.2 典型例题	(28)
3.3 习题解答	(32)
第 4 章 电容式传感器	(39)
4.1 学习指导	(39)
4.2 典型例题	(39)
4.3 习题解答	(50)
第 5 章 压电式传感器	(59)
5.1 学习指导	(59)
5.2 典型例题	(60)
5.3 习题解答	(66)
第 6 章 磁电式传感器	(68)
6.1 学习指导	(68)
6.2 典型例题	(68)
6.3 习题解答	(72)
第 7 章 热电式传感器	(76)
7.1 学习指导	(76)
7.2 典型例题	(77)
7.3 习题解答	(83)
第 8 章 光电式传感器	(88)
8.1 学习指导	(88)
8.2 典型例题	(88)
8.3 习题解答	(93)
第 9 章 数字式传感器	(95)
9.1 学习指导	(95)
9.2 典型例题	(95)

9.3 习题解答·····	(99)
第 10 章 光纤传感器 ·····	(102)
10.1 学习指导·····	(102)
10.2 典型例题·····	(102)
10.3 习题解答·····	(104)
第 11 章 其他传感器简介 ·····	(109)
11.1 学习指导·····	(109)
11.2 典型例题·····	(109)
11.3 习题解答·····	(116)
第 12 章 传感器检测系统 ·····	(119)
12.1 学习指导·····	(119)
12.2 典型例题·····	(119)
12.3 习题解答·····	(121)
第 13 章 传感器的标定和选用 ·····	(125)
13.1 学习指导·····	(125)
13.2 典型例题·····	(125)
13.3 习题解答·····	(126)
第 14 章 传感器原理及检测技术实验指导 ·····	(129)
14.1 传感器原理及检测技术实验设备简介·····	(129)
14.2 传感器原理及检测技术实验·····	(131)
附录 A 各章练习题 ·····	(153)
附录 B 期末考试题 ·····	(186)
参考文献 ·····	(201)

第1章 传感器检测技术概论

1.1 学习指导

1.1.1 内容提要

本章简要阐述了传感器的基本概论、传感器的基本特性、传感器的技术性能指标、改善传感器性能的技术途径,以及传感器技术的发展。

传感器的基本概论包括传感器的定义、传感器的组成、传感器的基础定律、传感器的分类、传感器的命名及代号和传感器的图用图形符号。

传感器的基本特性包括传感器的静态特性和动态特性。

传感器的技术性能指标包括基本参数指标,环境参数指标,可靠性指标,以及使用、结构、安装等其他指标。

改善传感器性能的技术途径有差动技术,平均技术,零示法和微差法,闭环技术,屏蔽、隔离与干扰抑制,补偿与修正技术和稳定性处理。

传感器技术的发展主要是产业的发展、市场的发展和技术方面的发展。

1.1.2 基本要求

(1) 熟练掌握传感器的定义、传感器的组成,掌握传感器的分类,理解传感器的基础定律,对于传感器所涉及的基础效应要先了解、后熟悉、再掌握,了解传感器的命名及代号和传感器的图形符号。

(2) 掌握传感器的基本特性包括传感器的静态特性和动态特性。

(3) 掌握传感器的技术性能指标和改善传感器性能的技术途径。

(4) 了解传感器技术的发展。

1.1.3 重点与难点

(1) 重点 传感器的定义、传感器的组成及传感器的分类,传感器的基础效应,传感器的基本特性,传感器的技术性能指标和改善传感器性能的技术途径。

(2) 难点 传感器的基本特性中的静态特性和动态特性,静态特性中的直线拟合方法,特别是最小二乘法;动态特性中的频率响应特性及性能指标,阶跃响应特性及性能指标和典型环节的动态响应。

1.2 典型例题

例 1-1 传感器由哪几部分组成的? 各部分的作用是什么?

解 对传感器的组成可以从两方面来分析,一方面是基本组成,它由敏感元件和转换元件

两部分组成。敏感元件完成直接感受或响应被测量的任务,转换元件的作用则是将敏感元件的输出转换成适于传输或测量的电信号。另一方面,由于由基本组成所构成的传感器的输出信号较弱,还需要信号调理电路将输出信号进行放大并转换为容易传输、处理、记录和显示的形式。如图 1.2.1 所示。因此,从广义上来看,传感器由敏感元件、转换元件、转换电路与信号调理、辅助电源组成。

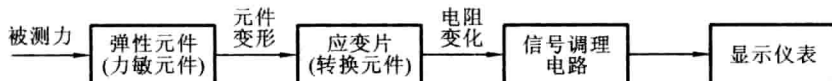


图 1.2.1 应变式测力传感器的组成框图

需要注意的是:应将传感器和变送器的概念明确区分开来,当传感器(transducer/sensor)的输出为“规定的标准信号”时,称之为变送器(transmitter)。所谓的“规定的标准信号”,即指新的国家标准规定的:若以电流形式输出,标准信号为 $4\sim 20\text{ mA}$;若以电压形式输出,标准信号为 $1\sim 5\text{ V}$ (原国家标准规定电流输出为 $0\sim 10\text{ mA}$,电压输出为 $0\sim 2\text{ V}$)。

例 1-2 选择题

下列不属于按传感器的工作原理进行分类的传感器是()。

- A. 电路参量式传感器
- B. 压电式传感器
- C. 化学型传感器
- D. 热电式传感器

解 按照传感器的工作原理分类,传感器分类如下。

① 电路参量式传感器:包括电阻式、电感式、电容式三种基本形式,以及由此衍生出来的差动变压器式、涡流式、压磁式、感应同步器式、容栅式等。

② 压电式传感器。

③ 磁电式传感器:包括磁电感应式、霍尔式、磁栅式等。

④ 光电式传感器:包括一般光电式、光栅式、光电码盘式、光纤式、激光式、红外式、固态图像式等。

⑤ 热电式传感器。

⑥ 波式传感器:包括超声波式、微波式等。

⑦ 射线式传感器。

⑧ 半导体式传感器。

⑨ 其他原理的传感器。

按照工作原理分类,有利于理解传感器的工作原理、工作机理。

化学型传感器是按照被测量或输入信号分类的,不属于按工作原理分类的传感器,所以选

C。

例 1-3 选择题

传感器的静态特性指标之一是()。

- A. 幅频特性
- B. 线性度
- C. 相频特性
- D. 稳定时间

解 幅频特性、相频特性和稳定时间均为传感器的动态特性指标之一,而线性度属传感器的静态特性指标之一,所以选 B。

例 1-4 选择题

利用光电效应的传感器属于()传感器。

A. 电阻型

B. 结构型

C. 物性型

D. 电感型

解 物性型传感器是基于物质定律构成的,如胡克定律、欧姆定律等。物质定律是表示物质某种客观性质的法则,这种法则大多数是以物质本身的常数形式给出的,这些常数的大小决定了传感器的主要性能。因此,物性型传感器的性能随材料的不同而异。

光电效应传感器是利用敏感材料的光电效应制作的,光电敏感材料不同,光电效应也不同。所以利用光电效应的传感器属于物性型传感器,所以选 C。

例 1-5 多选题

在时域内研究、分析传感检测系统的瞬态响应时,通常采用的激励信号是()。

A. 三角波信号

B. 余弦信号

C. 正弦信号

D. 阶跃信号

解 研究传感器动态特性时需要采用标准输入信号,经常使用的是正弦周期信号和阶跃输入信号,因此选 C 和 D。

例 1-6 填空题

传感器的静态特性可用方程_____表示。

解 方程为 $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n$

例 1-7 填空题

通过实际测试获得传感器的静态特性曲线后,在非线性误差不太大的情况下,总是采用_____的办法来线性化。

解 直线拟合。

例 1-8 对于二阶传感器的测试系统,为使系统响应最快,其阻尼比 ξ 取值最好为()。

A. 0~0.1

B. 0.1~0.6

C. 0.6~0.8

D. 0.8~1

解 对于二阶传感器的测试系统,为使系统响应最快,阻尼比 ξ 取值最好为 0.6~0.8,其中 $\xi \approx 0.7$ 称为最佳阻尼,所以选 C。

例 1-9 某温度传感器,当输入量变化 3°C 时,输出电压变化 2.4 mV ,问其灵敏度为多少?

解 传感器输出的变化量 Δy 与引起此变化量的输入变化量 Δx 之比即为其静态灵敏度,其表达式为 $k = \Delta y / \Delta x$ 。

所以,该传感器的灵敏度为 $K = \Delta y / \Delta x = 2.4\text{ mV} / 3^\circ\text{C} = 0.8\text{ mV}/^\circ\text{C}$

例 1-10 某传感器的给定精度为 $2\%F_s$,满度值输出为 50 mV ,求可能出现的最大误差 δ (以 mV 计)。当传感器使用在满刻度的 $1/2$ 和 $1/8$ 时,计算可能产生的相对误差。由你的计算结果能得出什么结论?

解 传感器的最大误差为

$$\delta = 2\% \times 50\text{ mV} = 1\text{ mV}$$

当传感器使用在满刻度的 $1/2$ 时,可能产生的相对误差为

$$\gamma_1 = \frac{\delta}{\frac{1}{2}x_{Fs}} = \frac{1}{\frac{1}{2} \times 50} = 4\%$$

当传感器使用在满刻度的 $1/8$ 时,可能产生的相对误差为

$$\gamma_2 = \frac{\delta}{\frac{1}{8}x_{Fs}} = \frac{1}{\frac{1}{8} \times 50} = 16\%$$

由计算结果可见,使用在满刻度的 $1/8$ 时,可能产生的相对误差较大。因此,应当尽可能地在满量程处使用,或者说,应当选用量程和被测量相当的传感器。

例 1-11 有一只湿度传感器,其微分方程为 $30 \frac{dy}{dt} + 3y = 0.18x$, 式中: y 为输出电压,单位为 mV; x 为输入湿度,单位为 RH。试求该传感器的时间常数和静态灵敏度。

解 将该湿度传感器微分方程两边同除以 3, 得

$$10 \frac{dy}{dt} + y = 0.06x$$

与一阶传感器的微分方程 $a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$ 相比较, 可知该传感器的时间常数 $\tau = 10$ s, 静态灵敏度 $K = 0.06$ mV/RH。

例 1-12 某力传感器属二阶传感器, 已知该传感器的固有频率 $f_0 = 1000$ Hz, 阻尼比 $\xi = 0.7$, 试求用它测量频率为 $f = 600$ Hz 和 $f = 400$ Hz 的正弦交变力时的振幅相对误差和相位误差。

解 二阶传感器的幅频特性和相频特性分别为

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad \text{和} \quad \varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\xi \omega / \omega_n}{1 - (\omega / \omega_n)^2}$$

式中: $\omega_n = 2\pi f_0$ 为固有角频率; $\omega = 2\pi f$ 为被测信号角频率。

测量 $f = 600$ Hz 和 $f = 400$ Hz 的正弦交变力时, 代入数据, 求得

$$A(\omega)/K = 0.947, \quad \Phi(\omega) = -52.7^\circ$$

所以, 振幅相对误差为 $A(\omega) - 1 = 5.3\%$ (负值说明实际振幅小于理想振幅), 相位误差为 -52.7° (负值说明输出信号的相位落后于输入信号)。

测量 $f = 400$ Hz 的正弦交变力时, 代入数据, 求得

$$A(\omega)/K = 0.99, \quad \Phi(\omega) = -33.7^\circ$$

所以, 振幅相对误差为 $A(\omega) - 1 = 1.0\%$ (负值说明实际振幅小于理想振幅), 相位误差为 -33.7° (负值说明输出信号的相位落后于输入信号)。

例 1-13 已知某二阶传感器系统的固有频率 $f_0 = 20$ kHz, 阻尼比 $\xi = 0.1$ 。若要求传感器的输出幅值误差不大于 3% , 试确定该传感器的工作频率范围。

解 二阶传感器的幅频特性为

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

当 $\omega = 0$ 时, $A(\omega) = 1$, 无幅值误差; 当 $\omega > 0$ 时, $A(\omega)$ 一般不等于 1, 即出现幅值误差。

若要求传感器的幅值误差不大于 3% , 则应满足 $0.97 \leq A(\omega) \leq 1.03$ 。

解方程

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} = 0.97$$

得

$$\omega_1 = 1.41\omega_n$$

解方程

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} = 1.03$$

得

$$\omega_2 = 0.172\omega_n, \quad \omega_3 = 1.39\omega_n$$

由于 $\xi=0.1$, 根据二阶传感器的特性曲线可知, 上面的三个解确定了两个频段, 即 $0 \sim \omega_2$ 和 $\omega_3 \sim \omega_1$, 前者在特性曲线谐振峰左侧, 后者在特性曲线谐振峰右侧。对于后者, 尽管在该频段内也有幅值误差不大于 3%, 但是, 该频段相频特性很差而通常不被采用。所以, 只有 $0 \sim \omega_2$ 频段为有用频段。由 $\omega_2 = 0.172\omega_n$, 得

$$f_H = 0.172, \quad f_0 = 0.172 \times 20 \text{ kHz} = 3.44 \text{ kHz}$$

所以工作频率范围即为 $0 \sim 3.44 \text{ kHz}$ 。

例 1-14 某传感器为一阶系统, 当受阶跃信号作用时, 在 $t=0$ 时测得输出为 10 mV ; $t \rightarrow \infty$ 时测得输出为 120 mV ; 在 $t=6 \text{ s}$ 时, 输出为 60 mV 。求该传感器的时间常数。

解 阶跃响应法是以阶跃信号作为测试系统的输入, 通过对测试系统输出响应的测试, 从中计算出其动态特性参数。对于一阶测试系统, 时间常数 τ 是唯一表征其动态特性的参数。可取输出响应值达到最终稳定值的 63.2% 所经过的时间作为时间常数 τ 。显然, 这种方法很难做到精确的测试, 同时未涉及响应的全过程, 所以测量结果的可靠性很差。

一阶系统的阶跃响应函数还可以表示为

$$y(t) = y_c(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

本题的实验曲线如图 1.2.2 所示, 阶跃响应函数为 $y(t) = y_0 + y_c(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$, 理论上应有 $y_0 = 0$ 。

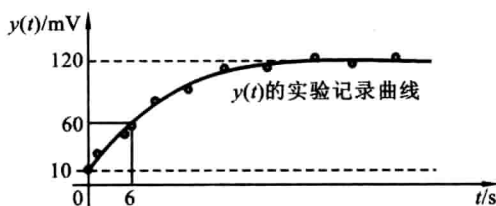


图 1.2.2 一阶系统时间常数的阶跃响应实验

由题意可知, 在 $t=0$ 时, 输出为 10 mV , 即

$$y_0 = 10 \text{ mV}$$

在 $t \rightarrow \infty$ 时, 输出为 120 mV , 即稳态值

$$y_c = 120 \text{ mV} - 10 \text{ mV} = 110 \text{ mV}$$

而在 $t=6 \text{ s}$ 时, 输出为 $y(6) = 60 \text{ mV}$, 即

$$y(6) = y_0 + y_c(1 - e^{-\frac{6}{\tau}})$$

有

$$60 = 10 + 110(1 - e^{-\frac{6}{\tau}})$$

解得

$$\tau = 9.9 \text{ s}$$

该传感器的时间常数为 9.9 s 。

例 1-15 如何利用最小二乘法求拟合直线并计算非线性误差?

解 测量系统的输入和输出分别为 x_i 和 $y_i, i=1 \sim n$ 。

设所求直线方程为 $y=kx+b$, 则测量曲线与拟合直线的偏差

$$\Delta_i = y_i - (b + kx_i)$$

使

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \min$$

分别对 k 和 b 求一阶偏导:

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum [y_i - (b + kx_i)]^2 = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum [y_i - (b + kx_i)]^2 = 0$$

可求得

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \cdot \sum y_i - \sum x_i \cdot \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

将 k, b 代入方程 $y = kx + b$ 即可得到拟合直线。拟合直线与实测平滑曲线之间的最大偏差即为非线性误差绝对值。

例 1-16 对某检测装置中的温度传感器进行校准,测得输入的温度值 T 与所对应输出的电压值 Y 的实验数据如下表。

温度值 $T/^\circ\text{C}$	36.9	46.7	63.7	77.8	84.0	87.5
电压值 Y/mV	181	197	235	270	283	292

试用最小二乘法建立输出电压值 Y 与输入温度值 T 之间关系的经验公式 $Y = kT + b$ 。

解 采用最小二乘法拟合,可拟合出一条温度与电压之间关系的基准直线,设该拟合的基准直线方程为

$$Y = kT + b$$

式中的 k 和 b 值可由下式求得

$$k = \frac{n \sum T_i Y_i - \sum T_i \sum Y_i}{n \sum T_i^2 - (\sum T_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum T_i^2 \sum Y_i - \sum T_i \sum T_i Y_i}{n \sum T_i^2 - (\sum T_i)^2}$$

为方便计算,列表如下。

i	T_i	Y_i	T_i^2	$T_i \cdot Y_i$
1	36.9	181	1361.61	6678.9
2	46.7	197	2180.89	9199.9
3	63.7	235	4057.69	14969.5
4	77.8	270	6052.84	21006.0
5	84.0	283	7056.00	23772.0
6	87.5	292	7656.25	25550.0
Σ	396.6	1458	28365.28	101176.3

故

$$k = \frac{n \sum T_i Y_i - \sum T_i \sum Y_i}{n \sum T_i^2 - (\sum T_i)^2} = \frac{6 \times 101176.3 - 396.6 \times 1458}{6 \times 28365.28 - (396.6)^2}$$

$$= \frac{28815}{12900.12} \approx 2.2337 \approx 2.234$$

$$b = \frac{\sum T_i^2 \sum Y_i - \sum T_i \sum T_i Y_i}{n \sum T_i^2 - (\sum T_i)^2} = \frac{28365.28 \times 1458 - 396.6 \times 101176.3}{6 \times 28365.28 - (396.6)^2}$$

$$= \frac{1230057.7}{12900.12} \approx 95.3524 \approx 95.35$$

所以用最小二乘法建立的温度-电压经验公式为

$$Y = 2.234T + 95.35$$

例 1-17 如何利用实验方法获得传感器的迟滞误差和重复性误差?

解 迟滞性误差获得方法:传感器输入从最小至最大变化,测量对应的输出值;然后输入再从最大变至最小,同样测量传感器的输出值。以传感器的输入为横坐标,输出为纵坐标,用平滑曲线画出两条输出-输入关系曲线,找出两条曲线在纵坐标方向上的最大偏差即为迟滞性误差的绝对值。

重复性误差获得方法:传感器输入从最小至最大变化,测量对应的输出值,多次重复这个测量过程。以传感器的输入为横坐标,输出为纵坐标,用平滑曲线画出多条输出-输入关系曲线,找出这些曲线在纵坐标方向上的最大偏差 $\Delta R1$;然后传感器输入从最大至最小变化;以同样的方法获得逆行程的最大偏差 $\Delta R2$;两者中的大者即重复性误差的绝对值。

例 1-18 一阶传感器动态误差和稳定时间如何计算?

解 当输入阶跃函数 $y = k(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ 时,动态误差为

$$\gamma = \frac{k - k(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})}{k} = e^{-\frac{t}{\tau}}$$

可根据等待时间计算动态误差,如图 1.2.3 所示。

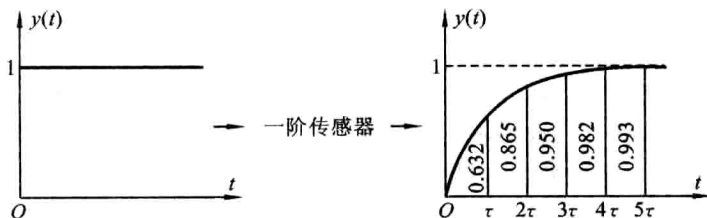


图 1.2.3 一阶传感器阶跃信号响应

例如: $t = 3\tau$ 时, $\gamma = 0.05$; $t = 5\tau$ 时, $\gamma = 0.007$ 。

一阶传感器输入阶跃信号后在 $t = 5\tau$ 之后采样,可认为输出已接近稳态,其动态误差可以忽略,也可根据给定的允许误差计算所需的稳定时间 $t_w = -\tau \ln \gamma$ 。

例 1-19 传感器的重复性和灵敏度哪个该优先考虑?

解 应优先考虑重复性。

重复性不好根本无法准确测量,灵敏度低的问题可以采用放大器对信号进行放大来解决。

例 1-20 精度和精密度的意义一样吗?各表征什么呢?

解 不一样。

精度表征的是真值与测量值相符合的程度;精密度表征的是随机误差接近于零的程度。

例 1-21 精度、灵敏度、误差的意义一样吗?

解 精度表征了真值与测量值相符合的程度;误差表征了真值与测量值相差的程度,所以