智能感知技术

薛鹏 刘守兵 编著

作者声明

未经本书作者和出版社书面许可，任何单位和个人均不得以任何形式将《智能感知技术》中的【习题】做出解答后出版，不得翻印或在出版物中选编、摘录本书的内容，否则，将依照《中华人民共和国著作权法》追究法律责任。

前 言

党的二十大为我们描绘了新时代中国特色社会主义的宏伟蓝图，强调了创新是引领发展的第一动力。本教材《智能感知技术》正是在这样的时代背景下应运而生，旨在深入贯彻二十大精神，培养具有全球视野、创新意识和实践能力的新一代技术人才。我们坚信，通过本教材的学习，学生们能够深刻理解智能感知技术的基本原理，掌握关键技术，激发创新思维，为推动科技进步和社会发展贡献力量。教材内容紧密结合国家战略需求，突出原创性研究和应用实践，鼓励学生在智能感知领域的探索与创新。我们期待学生们能够将所学知识与技能应用于实际问题解决中，促进科技成果转化为现实生产力，为实现中华民族伟大复兴的中国梦贡献青春力量。

“中国制造2025”、“互联网+”等发展战略正前所未有地推进信息化与工业化深度融合，重构新时代人们的工作模式、生活范式和思维方式。先进的信息技术正成为引领和衡量社会迈向高度现代化的支撑性技术之一。传感器作为信息技术的载体，是信息传播、泛在感知和智能制造的基石。当我们步入这个充满智能与创新的时代，智能感知技术以其强大的力量悄然改变着我们的生活和社会。近年，传感器技术的发展正经历着前所未有的变革。新材料的涌现、制造工艺的精进，使传感器具备了更高的性能和更低的成本。智能化的算法融入其中，让传感器能够自主学习、自适应环境，实现更精准、更可靠的感知。智能感知技术已成为各行业发展的核心驱动力。在智慧城市的构建中，它让城市管理更加高效、便捷；在智能家居的打造中，为人们营造舒适、安全的生活环境；在航空航天领域，保障飞行的安全与稳定。新技术、新产业、新业态、新模式层出不穷，工业互联网强势崛起，以融合创新、智慧赋能为核心特征的数字经济与新经济互换“新工科”建设。传感器与检测技术被赋予新的、更加伟大的历史使命。

为进一步解放生产力、提高工作效率、提升工作质量、促进人的创造性劳动，满足人民日益增长的对美好生活的需要，我国政府高度重视仪器仪表产业的发展，紧紧抓住第三次信息技术浪潮和第四次工业革命的历史机遇，力推智能感知、物联网、大数据、人工智能、网络安全等战略性新兴产业；智能感知技术有关内容被列入国家中长期科技发展规划。与此同时，新型经济的发展、产业的升级、技术的进步、应用的拓展等需要大批高素质创新性应用人才为支撑。这对相关专业的人才培养提出了与时俱进的新要求。

本书探索适应新工科人才培养需求的智能感知技术教材建设路径，顺应智能检测技术与仪器发展趋势，针对新时期传感器和智能方法相关领域知识构建、素质提升和能力发展的现实需求，精准介绍传感器与智能算法的基础概念、基本原理和典型应用与技术发展。本书介绍了常用传感器的工作原理、传感器的基本特性及校准、传感器信号的调理和参数检测等基础内容，在次基础上进一步介绍了多元回归、神经网络技术、支持向量机技术等智能化功能在传感器系统中的应用，并给出了Python仿真实例。感兴趣的读者可以在此基础上进行深入研究。

本书可作为高等院校人工智能、自动化、电气工程及其自动化、智能物联网工程、智能感知工程、机器人工程、智能电网信息工程、工业智能等专业（方向）本科生教材，也可供从事传感器相关领域应用和设计开发的研究人员、工程技术人员作为参考。

本书的编著由河南工程学院薛鹏、刘守兵主编，任鹏飞参加了编写。其中，薛鹏编写了1、2、3、4章，刘守兵编写了5、6、7、8、9章，任鹏飞编写了第10章。全书由薛鹏和刘守兵共同负责统稿。以来自高校的教学团队为主要成员完成初稿编著，努力体现以学习者为中心，以知识目标、能力目标和思政目标的训练培养为引领方向，探索实践融合价值观、知识点和深度学习、深刻领会、深入转化的读者赋能模式。每一章都先给出导学内容，明确学习者的努力方向，强化自主学习和问题引导，彰显学习目标和教材内容的高度统一。本书经团队教学迭代，有丰富的学习资源支持，有不断更新的PPT演示文稿、有持续建设的微视频、习题库、试题库和课后习题参考答案等教学辅助资源。本书在组稿过程中得到出版社相关编辑的指导，特此表示感谢。

由于编著者水平有限，本书难免有各种不足之处，诚挚希望各位专家和读者不吝赐教，以利修正，让更多的读者受益。

编著者

2024年7月

**目录**

[第1章 怀抱理想，奋进有为——概述 1](#_Toc170810341)

[1.1 传感器概述 2](#_Toc170810342)

[1.1.1 传感器的定义 2](#_Toc170810343)

[1.1.2 传感器的组成与分类 2](#_Toc170810344)

[1.1.3 传感器技术的发展现状与趋势 4](#_Toc170810345)

[1.2 智能传感器技术 7](#_Toc170810346)

[1.2.1 智能传感器的概念 7](#_Toc170810347)

[1.2.2 智能传感器的结构 7](#_Toc170810348)

[1.2.3 智能传感器的作用 8](#_Toc170810349)

[1.3 智能传感器的主要功能与特点 9](#_Toc170810350)

[1.3.1 智能传感器的主要功能 9](#_Toc170810351)

[1.3.2 智能传感器的特点 9](#_Toc170810352)

[1.4 智能传感器的实现 10](#_Toc170810353)

[1.4.1 非集成化实现 10](#_Toc170810354)

[1.4.2集成化实现 11](#_Toc170810355)

[1.4.3 混合实现 12](#_Toc170810356)

[习题1 13](#_Toc170810357)

[第2章 精准敬业，校准心魂——传感器的基本特性及校准 15](#_Toc170810358)

[2.1 传感器系统的基本特性 16](#_Toc170810359)

[2.1.1 静态特性 16](#_Toc170810360)

[2.1.2 动态特性 21](#_Toc170810361)

[2.2 传感器系统的标定与校准 26](#_Toc170810362)

[2.2.1 传感器的静态特性标定 26](#_Toc170810363)

[2.2.2 传感器的动态特性标定 27](#_Toc170810364)

[2.3 传感器性能改善措施与传感器的选用原则 27](#_Toc170810365)

[2.3.1 提高传感器性能的途径 27](#_Toc170810366)

[2.3.2 传感器的选用原则 29](#_Toc170810367)

[2.4 技术指标的Python计算方法 31](#_Toc170810368)

[2.4.1 相关Python基础知识 31](#_Toc170810369)

[2.4.2 性能指标的Python求取方法 33](#_Toc170810370)

[习题2 35](#_Toc170810371)

[第3章 不懈追求，守正创新——常用传感器的工作原理 37](#_Toc170810372)

[3.1 电阻应变式传感器 38](#_Toc170810373)

[3.1.1 应变片与应变效应 38](#_Toc170810374)

[3.1.2 应变片的温度误差及补偿 42](#_Toc170810375)

[3.1.3 电阻应变式传感器的应用 44](#_Toc170810376)

[3.2 电感式传感器 46](#_Toc170810377)

[3.2.1 变磁阻式传感器 46](#_Toc170810378)

[3.2.2 差动变压器式传感器 50](#_Toc170810379)

[3.2.3 电涡流式传感器 55](#_Toc170810380)

[3.2.4 电感式传感器的应用 58](#_Toc170810381)

[3.3 电容式传感器 59](#_Toc170810382)

[3.3.1 电容式传感器的工作原理与结构形式 59](#_Toc170810383)

[3.3.2 电容式传感器的测量电路 64](#_Toc170810384)

[3.3.3 电容式传感器的应用 67](#_Toc170810385)

[3.4 磁敏式传感器 67](#_Toc170810386)

[3.4.1 磁电感应式传感器 68](#_Toc170810387)

[3.4.2 霍尔式传感器 71](#_Toc170810388)

[3.4.3 磁敏式传感器的应用 75](#_Toc170810389)

[3.5 其它新型传感器 76](#_Toc170810390)

[3.5.1 半导体传感器 76](#_Toc170810391)

[3.5.2光纤传感器 81](#_Toc170810392)

[习题3 85](#_Toc170810393)

[第4章 追求真理，实事求是——传感器信号调理与处理 87](#_Toc170810394)

[4.1 电桥 88](#_Toc170810395)

[4.1.1 直流电桥 88](#_Toc170810396)

[4.1.2 交流电桥 91](#_Toc170810397)

[4.1.3 电桥操作的技术规范 92](#_Toc170810398)

[4.2 信号放大 93](#_Toc170810399)

[4.2.1 同相放大电路和反相放大电路 94](#_Toc170810400)

[4.2.2 仪表放大器 95](#_Toc170810401)

[4.2.3 隔离放大器 97](#_Toc170810402)

[4.3 信号滤波 99](#_Toc170810403)

[4.3.1 滤波器的分类 100](#_Toc170810404)

[4.3.2 滤波器的性能指标 101](#_Toc170810405)

[4.3.3 无源滤波电路 102](#_Toc170810406)

[4.3.4 RC有源滤波电路 103](#_Toc170810407)

[4.4 信号变换 104](#_Toc170810408)

[4.4.1 电压/电流变换 104](#_Toc170810409)

[4.4.2 电压/频率变换 105](#_Toc170810410)

[4.5 微弱信号检测 106](#_Toc170810411)

[4.5.1 噪声 106](#_Toc170810412)

[4.5.2 微弱信号检测方法 108](#_Toc170810413)

[习题4 111](#_Toc170810414)

[第5章 思想铸魂，精准求真——参数检测 114](#_Toc170810415)

[5.1 概述 115](#_Toc170810416)

[5.1.1 测量的基本概念 115](#_Toc170810417)

[5.1.2 测量方法 115](#_Toc170810418)

[5.1.3 测量误差 117](#_Toc170810419)

[5.1.4 测量系统 121](#_Toc170810420)

[5.2 电量测量 123](#_Toc170810421)

[5.2.1 交流信号电压的测量 123](#_Toc170810422)

[5.2.2 电流的测量 124](#_Toc170810423)

[5.2.3 电功率的测量 126](#_Toc170810424)

[5.3 非电量测量 128](#_Toc170810425)

[5.3.1 温度检测 128](#_Toc170810426)

[5.3.2 湿度检测 129](#_Toc170810427)

[5.3.3 位移检测 129](#_Toc170810428)

[5.3.4 速度检测 129](#_Toc170810429)

[5.3.5 加速度检测 130](#_Toc170810430)

[5.3.6 压力检测 130](#_Toc170810431)

[习题5 131](#_Toc170810432)

[第6章 矢志探索，创新驱动——基本智能化功能与python实现 133](#_Toc170810433)

[6.1 非线性校正技术 134](#_Toc170810434)

[6.1.1 查表法 134](#_Toc170810435)

[6.1.2 曲线拟合法 137](#_Toc170810436)

[6.2自校零与自校准技术 138](#_Toc170810437)

[6.2.1 两基准法 139](#_Toc170810438)

[6.2.2 多基准法 141](#_Toc170810439)

[6.3 噪声抑制技术 142](#_Toc170810440)

[6.3.1 干扰与噪声 142](#_Toc170810441)

[6.3.2 传感器的噪声 143](#_Toc170810442)

[6.3.3 噪声的耦合方式 145](#_Toc170810443)

[6.3.4 传感器低噪化方法 147](#_Toc170810444)

[6.4 多传感器数据融合 148](#_Toc170810445)

[6.4.1 单传感器系统 148](#_Toc170810446)

[6.4.2 交叉敏感与传感器系统的稳定性 150](#_Toc170810447)

[6.4.3 多传感器技术改善传感器系统性能的基本方法 151](#_Toc170810448)

[6.5 频率自补偿技术 153](#_Toc170810449)

[6.5.1 传感器系统的动态误差 153](#_Toc170810450)

[6.5.2 数字滤波法 155](#_Toc170810451)

[6.5.3 频域校正法 158](#_Toc170810452)

[6.6增益的自适应功能 159](#_Toc170810453)

[6.7自诊断 161](#_Toc170810454)

[6.7.1 硬件冗余方法 161](#_Toc170810455)

[6.7.2 解析冗余方法 161](#_Toc170810456)

[6.8曲线拟合的Python实现 162](#_Toc170810457)

[习题6 164](#_Toc170810458)

[第7章 诚实守信，道义先行——多元回归法及其在智能传感器系统中的应用 166](#_Toc170810459)

[7.1 多元回归分析法与多元回归方程 167](#_Toc170810460)

[7.1.1 二元回归法 167](#_Toc170810461)

[7.1.2 三元回归分析法 170](#_Toc170810462)

[7.2 基于二元回归分析法实现压力传感器的温度补偿 172](#_Toc170810463)

[7.2.1二维标定实验 172](#_Toc170810464)

[7.2.2 数据处理 173](#_Toc170810465)

[7.2.3 数据融合处理后JCY-101型压力传感器性能的综合评价 174](#_Toc170810466)

[7.3多元回归法及其性能指标计算的Python实现 180](#_Toc170810467)

[7.3.1 多元回归法的python实现 180](#_Toc170810468)

[7.3.2 性能指标计算的python实现 182](#_Toc170810469)

[习题7 189](#_Toc170810470)

[第8章 同心协力，智网共生——神经网络技术及其在智能传感器系统中的应用 191](#_Toc170810471)

[8.1概述 192](#_Toc170810472)

[8.2 神经网络基础知识 192](#_Toc170810473)

[8.2.1 神经网络结构 192](#_Toc170810474)

[8.2.2 神经元模型 193](#_Toc170810475)

[8.2.3 神经元激活函数 194](#_Toc170810476)

[8.3 BP神经网络 197](#_Toc170810477)

[8.3.1 BP神经网络概述 197](#_Toc170810478)

[8.3.2 BP神经网络的网络结构 197](#_Toc170810479)

[8.3.3 BP神经网络的神经元模型 198](#_Toc170810480)

[8.3.4 BP神经网络的学习算法 199](#_Toc170810481)

[8.3.5 BP神经网络的优化器 202](#_Toc170810482)

[8.4 基于BP神经网络实现涡流传感器测量数据的拟合 202](#_Toc170810483)

[8.4.1 标定实验 202](#_Toc170810484)

[8.4.2 样本集划分 203](#_Toc170810485)

[8.4.3 样本数据归一化 203](#_Toc170810486)

[8.4.4 BP神经网络的设计与实现 203](#_Toc170810487)

[8.4.5 训练校验 204](#_Toc170810488)

[8.4.6 拟合效果评价 205](#_Toc170810489)

[8.5 BP神经网络的Python实现 205](#_Toc170810490)

[8.5.1 安装需要的第三方库 205](#_Toc170810491)

[8.5.2 引用第三方库 205](#_Toc170810492)

[8.5.3 输入样本数据 206](#_Toc170810493)

[8.5.4 划分训练集和测试集 206](#_Toc170810494)

[8.5.5 归一化数据 206](#_Toc170810495)

[8.5.6 创建并训练BP神经网络模型 207](#_Toc170810496)

[8.5.7 预测并评估模型性能 208](#_Toc170810497)

[习题8 210](#_Toc170810498)

[第9章 质疑求真，思辨明理——支持向量机技术及其在智能传感器系统中的应用 212](#_Toc170810499)

[9.1 支持向量机原理 213](#_Toc170810500)

[9.1.1 统计学习理论 213](#_Toc170810501)

[9.1.2 支持向量机分类 214](#_Toc170810502)

[9.1.3 支持向量机回归 218](#_Toc170810503)

[9.2 使用 SVC对两组分混合气体进行定性识别 220](#_Toc170810504)

[9.2.1 实验标定 221](#_Toc170810505)

[9.2.2 数据预处理 222](#_Toc170810506)

[9.2.3 标签转换 223](#_Toc170810507)

[9.2.4 样本集划分 224](#_Toc170810508)

[9.2.5 SVC模型结构的确定 224](#_Toc170810509)

[9.2.6 两组分混合气体四种模式的识别 224](#_Toc170810510)

[9.2.7 预测结果评估 225](#_Toc170810511)

[9.3 基于支持向量机的传感器非线性校正及应用 226](#_Toc170810512)

[9.3.1 一维标定实验 226](#_Toc170810513)

[9.3.2 数据的预处理 227](#_Toc170810514)

[9.3.3 样本集划分 227](#_Toc170810515)

[9.3.4 核函数的选择 228](#_Toc170810516)

[9.3.5 SVM参数的优化 229](#_Toc170810517)

[9.3.6预测结果验证 229](#_Toc170810518)

[9.3.7 模型的移植 230](#_Toc170810519)

[9.4 支持向量机的Python实现 230](#_Toc170810520)

[9.4.1 支持向量机回归（SVR）的实现 230](#_Toc170810521)

[9.4.2 支持向量机分类（SVC）的Python实现 234](#_Toc170810522)

[习题9 237](#_Toc170810523)

[第10章 德智双修，学才同心——智能传感器的设计与应用 239](#_Toc170810524)

[10.1 智能传感器设计概述 240](#_Toc170810525)

[10.1.1 智能传感器的系统分析 240](#_Toc170810526)

[10.1.2 智能传感器的硬件结构设计 240](#_Toc170810527)

[10.1.3 智能传感器的软件设计 245](#_Toc170810528)

[10.2 智能传感器设计实例 248](#_Toc170810529)

[10.2.1 分布式温度传感系统的性能指标 249](#_Toc170810530)

[10.2.2 分布式温度传感系统的总体结构 249](#_Toc170810531)

[10.2.3 分布式温度传感系统的硬件设计 250](#_Toc170810532)

[10.2.4 分布式温度传感系统的程序设计 251](#_Toc170810533)

[习题10 252](#_Toc170810534)

参考文献 [254](#_Toc170810524)

# 第1章 怀抱理想，奋进有为——概述

|  |  |
| --- | --- |
| 本章内容 | * 传感器的定义 * 传感器的组成和分类 * 传感器技术的发展现状与趋势 * 智能传感器概念 * 智能传感器结构 * 智能传感器的作用 * 智能传感器的主要功能与特点 * 智能传感器的实现途径   通过对传感器的定义、组成和分类的概述，及其发展现状与趋势的回顾，可以看到发展智能传感器是历史的必然。同时，全面介绍智能传感器的概念、结构、作用、主要功能、特点和实现途径。 |
| 知识目标 | * 1.了解本课程研究对象的发展现状、研究内容与特点； * 2.了解智能传感器与传统传感器的区别； * 3.掌握智能传感器的主要功能、特点与实现。 |
| 能力目标 | 能够用自己的语言表述传感器、智能传感器的概念；能够通过资料查阅对我国和世界传感器的发展现状有清晰的认识；能够结合应用场景表述智能传感器的结构和功能特点。 |
| 思政目标 | * 培养创新意识，初步具备对现有智能传感器进行改进和优化的思维意识； * 能够与团队成员有效沟通，共同完成设计智能传感器的项目目标任务并在团队中发挥个人优势，相互学习和支持； * 养成持续学习的习惯，跟进智能传感器领域的最新技术和研究成果，不断提升自己的专业水平； * 遵守职业道德规范，保护知识产权，确保智能传感器的开发和应用符合法律法规和伦理要求。 |
| 重点难点 | 重点：掌握智能传感器的主要功能、特点与实现。  难点：无。  本章节适合各种学时设置的教学安排。 |

## §1.1 传感器概述

### 1.1.1 传感器的定义

传感器是一种能够感受指定的被测量，并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置。传感器的输出有三层含义：

（1）传感器对规定的被测量有“反应”；

（2）传感器的输出与被测量之间建立了有规律的一一对应关系；

（3）传感器是一个器件或装置。

传感器又称为检测器、转换器等，这些都是在不同的技术领域中使用的术语。通常，传感器由敏感元件和转换元件组成。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分；转换元件是指传感器中能将敏感元件的输出转换为适合处理与输出的电参量或电信号的部分。在某些场合，如在电子技术领域，常把感受信号的电子元件称为敏感元件，如热敏元件、磁敏元件、气敏元件和光敏元件等。这些元件可以将被测量转换成电参量或电信号。此时，传感器的敏感元件和转换元件合二为一，通过转换电路输出电信号，所以传感器又等同于敏感元件。但是，这些提法在含义上相对狭窄，因此，传感器一词是使用最为广泛且概括性最强的用语。

传感器能够以多种不同的形式输出信号，包括电阻、电感和电容等电参数以及电压、电流、频率和脉冲等电信号。这些不同的输出形式是由传感器的原理所决定的。

### 1.1.2 传感器的组成与分类

#### 1.1.2.1 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、信号调理与转换电路和辅助电源组成，如图1-1所示。由于转换元件的输出可能是电参量，也可能是电信号，但一般都很微弱。因此，通常需要辅助电源以及信号调理与转换电路对信号进行放大、运算调制等，这也使得辅助电源和转换电路有时也作为传感器组成的一部分。

  
图1-1 传感器的组成

敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分。常见的敏感元件有热敏电阻器、压敏电阻器、光敏电阻器、力敏元件、气敏元件和湿敏元件等；此外，还有一些新型传感器，如谐振式压力传感器和差动变压器式位移传感器等，其敏感元件和传感器是完全融为一体的。

转换元件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电信号的部分。它可以直接感受被测量（一般为非电量），输出与被测量有确定关系的电量，如热电偶和热敏电阻；它也可以不直接感受被测量，而只感受与被测量有确定关系的其他非电量。例如，差动变压器式压力传感器并不直接感受压力，而只是感受与被测压力有确定关系的衔铁位移量，然后输出电量。一般情况下使用的都是后面这种传感器。

信号调理与转换电路的作用是把来自传感器的信号进行转换和放大，使其更适合于作进一步处理和传输。在多数情况下，它将各种电信号转换为电压、电流或频率等便于测量的电信号，并对其进行信号处理。例如，它可以对经过调理的信号进行滤波、调制与解调、衰减、运算和数字化处理等。常见的信号调理与转换电路有放大器、电桥、振荡器、电荷放大器和滤波器等。此外，传感器的基本部分和信号调理电路还需要辅助电源提供工作能量。

#### 1.1.2.2 传感器的分类

传感器的种类繁多，同一种被测量往往可以用不同类型的传感器来测量，如压力可用电容式、电阻式、光纤式等传感器来测量；同样地，同一原理的传感器也可以测量多种物理量，例如电阻式传感器可以测量位移、温度、压力及加速度等。因此，对传感器的分类方法各不相同，目前尚没有统一的分类方法。常见分类方法有以下几种。

#### 1. 按工作原理分类

根据这种分类方式，传感器可以被分为电参量式传感器（电阻、电感和电容）、磁电式传感器、压电式传感器、光电式传感器、热电式传感器、半导体传感器以及其它形式的传感器。

#### 2. 按被测量类型分类

这种分类方式以传感器测量对象的物理属性为依据，将传感器分为位移传感器、速度传感器、加速度传感器、温度传感器、力/力矩传感器、流量传感器以及其他（如CO传感器、湿度传感器和接近传感器等）形式的传感器。

#### 3. 按传感器的能源分类

根据是否需要外接电源，传感器可以被分为有源传感器和无源传感器。有源传感器是基于能量转换的传感器，例如，基于压电效应或热电效应制作的传感器，在被测量作用于传感器时，将直接产生电信号。无源传感器是能量控制型传感器，例如各种电参量式传感器。当被测量作用于传感器时，只会发生电参量的变化，而不会有能量交换。为了输出对应的电信号，需要外接电源和相应的信号调理电路。

在传感器的三种分类方式中，最常用的分类方式是按工作原理分类和按测量类型分类。前者侧重于强调传感器的物理原理，而后者则侧重于强调传感器的用途。

### 1.1.3 传感器技术的发展现状与趋势

#### 1.1.3.1 传感器发展现状

目前，世界各国，特别是发达国家，对传感器技术的发展极为重视。将其视为涉及国家安全、经济发展和科技进步的关键技术之一，并纳入国家科技发展战略计划。因此，近年来传感器技术发展迅速，传感器新原理、新材料和新科技的研究日益深入和广泛，传感器新品种、新结构、新应用层出不穷，不断涌现。

（1）传感器在现代自动化系统中扮演着不可或缺的角色，其发展对整个行业的进步起着至关重要的作用。传感器技术的发展能够为行业带来更多的创新和突破，推动整个行业的快速进步。例如，传感器技术在智能家居、智能交通、智能医疗等领域都有着广泛的应用前景，有望为我们的生活带来更多的便利、舒适和安全。因此，大力发展传感器技术，推动其在各个领域的应用，是推动行业发展的关键。只有传感器技术得到深入的发展，整个行业才能更好地实现自动化、智能化和高效化。

（2）新技术在传感器领域得到了广泛的应用。目前，传感器领域广泛应用了电子设计自动化（EDA）、计算机辅助制造（CAM）、计算机辅助测试（CAT）、数字信号处理（DSP）、专用集成电路（ASIC）及表面贴装（SMT）等新技术。

（3）传感器的功能正在日益完善。随着集成微光、机、电系统技术的迅速发展以及光导、光纤、超导、纳米技术、智能材料等新技术的应用，信息的采集、传输和处理变得更加集成化和智能化。此外，越来越多的新型传感器开始具备自检自校、量程转换、定标和数据处理等功能，使其性能更加灵敏和可靠。

（4）传感器的创新性更加突出。由于新型传感器的研究和开发时间相对较短，这些技术往往尚未完全成熟，因此蕴藏着更多的创新机会。这个领域的竞争非常激烈，而且研究成果往往具有重要的知识产权价值。因此，加快新型传感器的研究、开发和应用具有重大的意义。

（5）新型传感器的商品化和产业化前景非常广阔。在研究开发新型传感器的过程中，应同时关注新型材料、设计方法、生产工艺、测试技术和配套仪表等基础技术的同步发展。此外，还应更加注重实用性，以确保研究成果能够顺利转化为实际应用，从而加速产业化的进程。

#### 1.1.3.2 传感器发展趋势

传感器技术在科学研究、工农业生产、日常生活等方面发挥着越来越重要的作用。应用需求对传感器技术又提出了越来越高的要求，这推动着传感器技术不断的向前发展。同时，传感器技术是一门涉及多种学科、多个领域的高新技术。随着科技技术的不断提高，传感器技术的发展趋势主要表现为以下几个方面：

（1）开发新材料、研究新型传感器。传感器技术离不开材料的支持，可以说，材料是构成传感器技术的重要基础。随着传感器技术的发展，各种新材料相继出现。除了半导体材料和陶瓷材料，光导纤维、纳米材料、超导材料等新材料也相继问世。随着研究的不断深入，人们将进一步探索具有新效应的敏感功能材料。微电子、光电子、生物化学、信息处理等各种学科和新技术的互相渗透和综合利用，为研制开发新型传感器提供了可能。利用这些技术，可以开发出具有新原理、新功能的新型传感器。

传感器的各种应用中，半导体材料的使用无处不在，其用量始终居于首位。预计在未来一段时间内，半导体材料仍将在传感器技术中占据主导地位。半导体材料的灵活性使其能够被制作成各种类型的传感器，包括力敏、光敏、磁敏、红外敏等。展望未来，可以看到，随着机械加工技术、P-N结技术、离子注入技术、激光退火等表面处理技术的成熟，半导体材料的应用将会更加广泛。特别是在传感器技术的发展中，半导体材料的应用将会得到进一步的推广。

有机聚合物，也被称为高分子材料，正在成为一种新兴的传感器功能材料。除了具有介电性能外，它还具有半导体、导体、电光、电导等多种功能，这使得其在传感器领域具有广泛的应用前景。由于有机聚合物可以制作成热敏、力敏、声敏、导电敏、光敏、湿敏、气敏、离子敏等多种传感器，因此它有着广泛的应用领域。尽管目前而言，此类传感器尚在研制阶段，但可以坚信，将来它一定会成为热门方向。

（2）集成化、多功能化。集成化是传感器技术发展的重要趋势。所谓集成化，有双层的含义：①将同一类型的单个传感器排列在同一平面上，构成线型传感器或者面型传感器，如现在已经研制应用的2048像素的线型传感器和492×660像素的面型传感器；②将传感器和运放、放大及温度补偿等部分组装成一个器件，形成一体化。例如，集成固态压力传感器或组合式固态压力传感器就是这种集成化的体现。

传感器的多功能化是指传感器能够同时检测与转换两种或以上的不同物理量。这种多功能化可以通过集成不同的敏感元件来实现。例如，使用特殊的陶瓷把温度和湿度敏感元件集成在一起，做成温湿度传感器。另外，将检测不同气体的敏感元件用厚膜制造工艺制作在同一基片上，制成可以检测氧、氨、乙醇、乙烯四种气体的多功能传感器。同时，在同一硅片上制作应变计和温度敏感元件，制成同时测量压力和温度的多功能传感器。此外，该传感器还可以实现温度补偿。

（3）多传感器的融合。由于多传感器不可避免地存在不确定性，包括偶然的不确定性，这可能导致系统的全面性和鲁棒性不足，从而导致系统失效。多传感器集成与融合技术正好可以解决这方面的问题。多传感器不仅可以表示同一环境特征的多个冗余的信息，还可以描述不同的环境特征，具有冗余性、互补性、及时性和低成本等特点。

多传感器的集成与融合技术已经成为智能传感器与系统领域的一个重要研究方向。它涉及信息科学的多个领域，是新一代智能感知技术的核心基础之一。20世纪80年代初，以军事领域的研究为开端，多传感器的集成与融合技术迅速扩展到军事和非军事的各个应用领域，如目标的自动识别、自主车辆导航、遥感、生产过程监控、机器人及医疗应用等。

（4）学科的交叉融合，实现无线网络化。无线传感器网络是由大量无处不在的、有无线通信与计算能力的微小传感器节点构成的自组织分布式网络系统，能根据环境自主完成指定任务的“智能”系统。这是一种涉及微传感器、微机械、通信、自动控制和人工智能等多学科的综合技术。大量的传感器通过网络构成了一个分布式的、智能化的信息处理系统。这个系统以协同的方式工作，能够从多种视角、以多种感知模式对事件、现象和环境进行观察和分析，从而获得丰富的、高分辨率的信息。这极大地增强了传感器的探测能力，是近年来的新发展方向。这种技术的应用已经从军事领域扩展到了反恐、防爆、环境监测、医疗保健、家居、商业、工业等众多领域，具有广阔的应用前景。

（5）向微功耗及无源化发展。传感器通常从非电量转化为电量，工作时离不开电源。在野外现场或远离电网的地方，通常是用电池或太阳能等供电。因此，开发微功耗的传感器和无源传感器是必然的发展方向，这不仅可以节省能源，还可以提高系统的寿命。

（6）网络化和物联网。传感器网络化是传感器领域的一项新兴技术，它利用TCP/IP协议将传感器转化为监控网络中的一个独立节点。这样，现场测控数据可以直接采集并传输到网络上，与网络上有通信能力的节点直接进行通信，从而实现数据的实时发布和共享。由于传感器的自动化和智能化水平的提高，多台传感器联网已得到广泛应用。虚拟仪器、三维多媒体等新技术也开始实用化。因此，通过Internet，传感器与用户之间可异地交换信息和浏览。厂商能够直接与异地用户交流，及时完成传感器故障诊断、指导用户维修或交换新仪器改进的数据、软件升级等工作。这使得传感器操作过程更加简化，功能更换和扩展变得更加方便。

物联网，借助智能感知和识别技术与普适计算、泛在网络的融合应用，被视为继计算机和互联网之后，世界信息产业发展的第三次浪潮。物联网的英文全称为“The Internet of Things”，通常简称为IOT，意味着“物物相连的互联网”。这里有两层含义：①物联网的核心和基础仍然是互联网，是在互联网基础之上延伸和扩展的一种网络；②其用户端延伸和扩展到了任何物品与物品之间进行信息交换和通信。物联网，通过各种信息传感设备如RFID、红外传感器、全球定位系统和激光扫描器，按协议将任何物品与互联网连接。这实现了信息交换、通信，以及智能化的识别、定位、跟踪、监控和管理。

传感器技术的发展趋势正朝着多元化和高效化的方向发展。这些趋势共同描绘了一个充满活力和创新的传感器技术发展蓝图。随着新材料、集成化、多功能化、多传感器融合、学科交叉融合以及无线网络化等技术的不断进步，传感器技术将在各个领域发挥越来越重要的作用，为人类创造更美好的未来。

## §1.2 智能传感器技术

### 1.2.1 智能传感器的概念

智能传感器系统是一门现代综合技术，也是一项迅速发展的高新技术。然而，目前尚无统一明确的定义。智能传感器的概念最初由美国宇航局在开发宇宙飞船时提出，以解决太空探索中的复杂信息处理问题。人们需要知道宇宙飞船在太空中的飞行速度、位置、气压、空气成分等信息。此外，宇航员还需要在太空中进行各种实验，这都需要安装各种类型的传感器。这就需要处理从传感器获得的大量信息，然而，这是一项挑战。即使使用一台大型计算机，也很难同时处理如此庞大的数据，更不用说在宇宙飞船上了。因此，宇航局的专家们开始寻求新的解决方案，希望传感器本身具备信息处理功能。于是，他们将传感器与微处理器结合。这样，在20世纪70年代末，智能传感器应运而生。

早期，人们简单、机械地强调在工艺上将传感器与微处理器两者紧密结合，认为“传感器的敏感元件及其信号调理电路与微处理器集成在一块芯片上就是智能传感器”。

关于智能传感器的中、英文称谓，目前也尚未统一。“Intelligent Sensor”是英国人对智能传感器的称谓，而“Smart Sensor”是美国人对智能传感器的俗称。另外，1992年荷兰代尔夫特理工大学Johan H. Huijsing教授在“Integrated Smart Sensor”一文中按集成化程度的不同，将智能传感器分别称为“Smart Sensor”、“Integrated Smart Sensor”。对“Smart Sensor”的中文译名有译为“灵巧传感器”的，也有译为“智能传感器”的。

国内众多学者广泛认可这种概念，“传感器与微处理器赋予智能的结合，兼具信息检测与信息处理功能的传感器就是智能传感器（系统）”；模糊传感器也是一种智能传感器（系统），将传感器与微处理器集成在一块芯片上，这是构建智能传感器（系统）的一种方式。

### 1.2.2 智能传感器的结构

智能传感器主要由传感器、微处理器（或微计算机）及相关电路组成，其基本结构如图1-2所示。

  
图1-2 智能传感器的基本结构

传感器将被测量转化成相应的电信号，然后送到信号调理电路中。经过滤波、放大、模／数转换后，这些信号会被送到微处理器中。微处理器对接收到的信号进行计算、存储、数据分析和处理。一方面，它通过反馈回路对传感器与信号调理电路进行调节，以实现对测量过程的调节和控制；另一方面，它将处理后的结果传送到输出接口，经过接口电路的处理后，按照输出格式和界面定制输出数字化测量结果。智能传感器中，微处理器是智能化的核心，软件部分的运算及相关的调节与控制只有通过它才能实现。

### 1.2.3 智能传感器的作用

智能传感器与传统传感器相比，在作用上更加全面，几乎包括仪器仪表的全部作用，主要表现为以下几点：

（1）提高测量精度。利用微型计算机进行多次测量和求平均值的办法可削弱随机误差的影响；利用微型计算机进行系统误差补偿；利用辅助温度传感器和微型计算机进行温度补偿；利用微型计算机实现线性化，可以减少非线性误差；利用微型计算机进行测量前的零点调整、放大系数调整和工作中周期调整零点、放大系数等。

（2）增加功能。利用记忆功能获取被测量的最大值和最小值；利用计算对原始信号进行数据处理，可获得新的量值；用软件完成硬件功能，经济并减小体积；对数字显示具有译码功能；用微型计算机对周期信号特征参数进行测量；对诸多被测量具有记忆存储功能。

（3）提高自动化程度。可实现误差自动补偿；可实现检测程序自动化操作；可实现越限自动报警和故障自动诊断；可实现量程自动变换；可实现自动巡回检测。

（4）高信噪比与高分辨力。由于智能传感器具有数据存储、记忆与信息处理的特点，通过软件进行数字滤波、相关分析等处理，可以去除输入数据中的噪声，将有用信号提取出来；通过数据融合、神经网络技术，可以消除多参数状态下交叉灵敏度的影响，从而保证在多参数状态下对特定参数测量的分辨能力，所以智能传感器具有很高的信噪比与高分辨能力。

## §1.3 智能传感器的主要功能与特点

### 1.3.1 智能传感器的主要功能

目前还没有关于传感器智能化功能的明确定义，一般来说，可以从以下几方面概括其功能：

(1)在自我完善能力方面，

①具有改善静态性能，提高静态测量精度的自校正、自校零、自校准功能；

②具有提高系统响应速度，改善动态特性的智能化频率自补偿功能；

③具有抑制交叉敏感，提高系统稳定性的多信息融合功能。

(2) 在自我管理与自适应能力方面，

①具有自检验、自诊断、自寻故障、自恢复功能；

②具有判断、决策、自动量程切换与控制功能。

(3) 在自我辨识与运算处理能力方面，

①具有从噪声中辨识微弱信号与消噪的功能；

②具有多维空间的图像辨识与模式识别功能；

③具有数据自动采集、存储、记忆与信息处理功能。

(4) 在交互信息能力方面，具有双向通信、标准化数字输出以及拟人类语言符号等多种输出功能。

### 1.3.2 智能传感器的特点

与传统传感器相比，智能传感器具有以下显著特点。

#### 1. 精度高

智能传感器有多项功能来保证它的高精度。例如：自动零点校准以消除零点偏差；与标准参考基准实时对比以自动进行整体系统标定；自动进行系统误差校正以消除可能的系统误差对测量结果的影响；通过对采集的大量数据进行统计处理以消除偶然误差的影响等。这些功能共同保证了智能传感器的高精度。

#### 2. 高可靠性与高稳定性

智能传感器能自动补偿系统特性的漂移。这种漂移是由工作条件和环境参数的变化引起的，例如温度的变化可能会导致零点和灵敏度的漂移。在被测参数变化后，智能传感器能自动切换量程。智能传感器能实时自动进行系统的自我检验，并分析、判断所采集到的数据的合理性。如果发现异常情况，它会进行应急处理，如发出报警或故障提示。因此，有多项功能可以保证智能传感器的高可靠性与高稳定性。

#### 3. 高倍噪比与高分辨力

智能传感器具备数据存储、记忆和信息处理功能。它可以通过软件进行数字滤波和相关分析等处理，以去除输入数据中的噪声并提取有用信号。此外，智能传感器可以利用数据融合和神经网络技术消除多参数状态下的交叉灵敏度影响。这确保了在多参数状态下对特定参数的准确测量。因此，智能传感器具备高信噪比和高分辨力。

#### 4. 强自适应性

智能传感器具有判断、分析与处理功能。它能根据系统工作情况决策各部分的供电情况和与上位计算机的数据传送速率，使系统工作在最优低功耗状态和优化传送效率。

#### 5. 较高的性能价格比

智能传感器所具有的上述高性能，不是像传统传感器技术那样通过追求传感器本身的完善、对传感器的各个环节进行精心设计与调试、进行"手工艺品"式的精雕细琢来获得的，而是通过与微处理器/微计算机相结合，采用廉价的集成电路工艺和芯片以及强大的软件来实现的，所以具有较高的性能价格比。

由此可见，智能化设计是传感器传统设计中的一次革命，也是世界传感器的发展趋势。作为商品，智能传感器在20世纪80年代初期就已经出现。当时，美国霍尼韦尔公司生产了压阻式ST -3000型压力(差)智能变送器。后来，美国SMAR公司生产了LD302系列电容式智能压力(差)变送器，美国罗斯蒙特公司生产了电容式智能压力(差)变送器系列，日本横河电气株式会社生产了谐振式EJA 型智能压力(差)变送器。此外，世界各国正在利用计算机和智能技术研究、开发各种其他类型的智能传感器/变送器。

## §1.4 智能传感器的实现

目前，传感技术的发展正通过三条主要途径实现智能传感器。

### 1.4.1 非集成化实现

非集成化智能传感器是将传统的经典传感器(采用非集成化工艺制作的传感器，仅具有获取信号的功能)、信号调理电路、带数字总线接口的微处理器组合为一整体而构成的一个智能传感器系统。其框图如图1-3所示。

  
图1-3 非集成化智能传感器框图

图1-3中的信号调理电路用于处理传感器的输出信号。它将传感器输出信号进行放大并转换为数字信号，然后通过数字总线接口连接到现场的数字总线上。这是实现智能传感器系统的一种快速且有效的方法。例如，美国罗斯蒙特公司和SMAR公司生产的电容式智能压力（差）变送器系列产品就是这样实现的。他们在原有的非集成化电容式变送器的基础上，添加了一块带有数字总线接口的微处理器插板，并开发了配备通信、控制、自校正、自补偿、自诊断等功能的智能化软件，从而实现了智能传感器的功能。

非集成化智能传感器是在现场总线控制系统发展形势的推动下迅速发展起来的。这是因为这种控制系统要求挂接的传感器/变送器必须是智能型的。对于自动化仪表生产厂家来说，原有的一整套生产工艺设备基本不变。因此，对于这些厂家而言，非集成化实现是一种建立智能传感器系统最经济、最快捷的途径与方式。

### 1.4.2集成化实现

这种智能传感器系统是采用微机械加工技术和大规模集成电路工艺，利用半导体硅作为敏感元件的制作材料，将信号的调理电路、微处理器单元等集成在一块芯片上所构成的传感器，所以又称为集成智能传感器。它是将智能传感器的各个部分通过一定的工艺，分层集成在一块半导体硅片上。

随着微电子技术和微米、纳米技术的快速发展，大规模集成电路工艺日益完善，器件的集成度越来越高。这已经成功地提高了各种数字电路芯片、模拟电路芯片、微处理器芯片、存储器电路芯片的性能价格比。同时，这也促进了微机械加工技术的发展，形成了与传统传感器制作工艺完全不同的现代智能检测传感器。

集成智能传感器具备自适应性、高精度、高可靠性和高稳定性的特点。根据集成度的不同，其可以分为初级形式、中级形式和高级形式三种类型。

#### （1）初级形式。

初级形式的智能传感器没有微处理器单元，只有被封装在同一外壳里的敏感单元和信号调理电路组成。这是智能传感器系统最早出现的商品化形式，也是最广泛使用的形式。因此，它被称为"初级智能传感器"。从功能上看，它只具备简单的自动校零、非线性自校正和温度自动补偿功能。这些功能是通过硬件电路实现的，通常称为智能调理电路。

#### （2）中级形式。

中级形式的智能传感器在初级形式的基础上增加了微处理器和硬件接口电路，并扩展了自诊断（如故障和超量程检测）、自校正（进一步消除测量误差）以及数据通信等功能。这些功能主要通过软件实现，因此，它们具有更强的适用性。

#### （3）高级形式。

高级智能传感器的集成度进一步提高，实现了多维阵列化的敏感单元，并配备了更强大的信息处理软件，以具备更高级的智能化功能。这种传感器系统不仅具备1.3.1节所述的完善智能化功能，还具备更高级的传感器阵列信息融合、成像和图像处理等功能。

由于在一块芯片上实现智能传感器全系统，并不总是希望的，也并不总是必须的，所以，一种更为可行的混合实现智能化的方式迅速得到了发展。

### 1.4.3 混合实现

混合实现是指根据系统的需求和可行性，将系统的各集成化环节，如集成化敏感单元、信号调理电路、微处理器单元、数字总线接口等，以不同的组合方式集成在几块芯片上，并装在一个外壳里，如图1-4所示。

  
图1-4 智能传感器的混合实现原理

集成化敏感单元包括弹性敏感元件和变换器；信号调理电路包括多路开关、仪用放大器、基准和模/数转换器 (ADC) 等；微处理器单元包括数字存储（EPROM、ROM、RAM）、I/O接口、微处理器和数/模转换器 (DAC)等。

在图1-4(a) 中，三块集成化芯片被封装在一个外壳里；而在图1-4(b)、(c)、(d) 中，则有两块集成化芯片被封装在一个外壳里。在图1-4(a)、(c) 中的（智能）信号调理电路具备部分智能化功能，如自校零和自动进行温度补偿。这是因为这种电路带有零点校正电路和温度补偿电路。这些电路通常不与微处理单元一起封装，而是单独出售。在图 (a) 、(b) 中，集成化敏感单元也可以被片外外接的传感器所替代。

|  |  |
| --- | --- |
| * 价值观 | 奋进 |
| 在我国传感器发展的历程中，奋进精神如同一股强大的洪流，奔腾不息。面对国外技术的封锁和竞争的压力，我国的科研人员和企业展现出了无畏的勇气和坚定的决心。他们怀揣着对科技创新的执着追求，日夜钻研，不断探索传感器领域的未知。  奋进精神体现在科研人员无数个日夜的努力中。他们放弃了舒适与安逸，在实验室里反复试验、论证，哪怕一次次失败，也绝不气馁，只为在关键技术上取得突破。这种精神还展现在企业的拼搏进取中。他们不惧市场的风云变幻，加大研发投入，积极引进先进技术和人才，努力提升产品质量和性能，力求在国内外市场中占据一席之地。  在政策的支持和引导下，产学研各界齐心协力，共同奋进。从基础研究到应用开发，从技术创新到产业升级，每一个环节都凝聚着无数人的心血和努力。我国传感器领域正是凭借着这种一往无前的奋进精神，逐步缩小与国际先进水平的差距，实现了从跟跑到并跑，甚至在某些领域开始领跑的跨越。  未来，我国传感器的发展仍将在奋进精神的引领下，勇攀科技高峰，为我国的现代化建设和科技强国之路贡献更多的力量。 | |

## 习题1

1. 在通常意义上，传感器包含了敏感元件和（ ）两个组成部分。

A. 放大电路 B. 数据采集电路 C. 转换元件 D. 滤波元件

2. 传感器主要完成检测和（ ）两个方面的功能。

A. 测量 B. 感知 C. 信号调节 D. 转换

3. 下述传感器按照工作原理命名的是（ ）。

A. 应变式传感器 B. 温度传感器

C. 湿度传感器 D. 化学型传感器

4. 传感器是一种能感受 并按照 转换成可用输出信号的器件或装置。

5. 传感器一般由 、 和 等三部分组成。

6. 什么叫传感器？它通常由哪几部分组成？它们的作用是什么？

7. 请简述传感器技术的分类方法。

8. 请简述智能传感器的作用。

9. 请简述智能传感器的特点。

10. 简要说明智能传感器的实现途径。

# 第2章 精准敬业，校准心魂——传感器的基本特性及校准

|  |  |
| --- | --- |
| 本章内容 | * 传感器系统的基本特性 * 传感器的标定与校准 * 传感器的性能改善措施 * 传感器的选用原则 * 性能指标的Python计算方法   智能传感器是在经典传感器的基础上发展起来的，二者之间存在着密切的联系。智能化技术的重要任务之一是提高传感器的精度，改善传感器的性能。因此，我们首先通过对传感器系统的静态特性和动态特性进行回顾，了解决定传感器性能和精度的静态技术指标与动态技术指标，并对传感器的标定与校准进行了简要介绍。然后在此基础上，阐述了传感器的性能改善措施和选用原则。最后，对性能指标的Python计算方法进行了简要的介绍。 |
| 知识目标 | * 1. 了解传感器的基本特性； * 2. 掌握传感器的标定和校准方法； * 3. 掌握传感器性能改善的措施； * 4. 了解传感器的选型原则与方法。 |
| 能力目标 | 能够对给定的传感器的特性参数进行准确分析和评估；可以通过数据分析判断传感器的性能优劣和适用范围；熟练掌握传感器校准的实际操作步骤和技巧；能够正确使用校准设备和工具；能够针对传感器使用过程中出现的性能偏差，提出有效的校准和改进方案。 |
| 思政目标 | * 培养创新思维意识，思考如何优化现有的传感器校准方法，提高校准效率和精度，初步具有探索新的校准技术的意识； * 培养严谨、细致、实事求是的科学态度，认识到微小误差可能带来重大影响，注重数据的准确性和可靠性； * 培养安全意识，了解在传感器校准操作中的安全注意事项，确保实验和工作环境的安全。 |
| 重点难点 | 重点：1. 了解传感器系统的基本特性；  2. 掌握传感器性能改善措施；  难点：掌握传感器的标定与校准。  本章节适合各种学时设置的教学安排。 |

## §2.1 传感器系统的基本特性

传感器是一种以一定的精确度将被测量转换为与之有确定对应关系的、易于精确处理和测量的某种物理量（如电量）的测量部件或装置。通常，传感器会将非电量转换为电量进行输出。

传感器的基本特性是其输入-输出关系。这种特性反映了传感器内部结构参数的作用关系，如图2-1所示。

  
图2-1 传感器的基本特性

对传感器基本特性的研究主要应用于以下两个方面：

（1）用于建立测量系统。这时必须已知传感器系统的基本特性并测量输出信号，通过基本特性和输出来推断导致该输出的系统输入。这就是未知被测物理量的测量过程。

（2）用于系统本身的研究、设计与建立。这时必须观测系统的输入及其相应的输出，才能推断系统的特性。如果系统特性不满足要求，则应修改相应的内部参数，直到满足要求为止。

传感器所测量的物理量基本上有两种形式：稳态（静态或准静态）和动态（周期变化或瞬态）。稳态的信号不随时间变化，或变化很慢。相反，动态的信号是随时间变化而变化的。为了准确反映输入物理量的状态，传感器应具有不同的输入输出特性，包括静态特性和动态特性。一个高精度的传感器，要求具有良好的静态特性和动态特性，以确保检测信号能够无失真地转换，并尽量反映被测量物体的原始特征。

### 2.1.1 静态特性

传感器的静态特性是指在稳态信号下，传感器输入与输出之间的关系。静态特性所描述的传感器的输入-输出关系式中不含时间变量。通常使用标定曲线来评估检测系统的静态特性。对于理想的线性设备，其标定曲线是一条直线。然而，实际的检测系统的标定曲线可能并非一条直线。通常采用静态测量的方法获取输入-输出关系曲线，并作为标定曲线。

衡量传感器静态特性的主要指标包括测量范围与量程、线性度、灵敏度、迟滞、重复性、分辨力、阈值、稳定性、漂移和精度。

#### 2.1.1.1 测量范围与量程

测量范围是指传感器所能测量到的最小被测输入量（下限）至最大被测输入量（上限）之间的范围，即（，）。

量程是指检测系统测量上限和测量下限的代数差，即。例如，测量范围为的温度传感器，其量程为。

#### 2.1.1.2 线性度

线性度描述了传感器输出与输入之间的线性关系程度。传感器的理想输入输出特性应是线性的，因为这有助于简化传感器的理论分析、数据处理、制作标定和测试。然而，传感器的实际输入输出特性通常具有一定程度的非线性。如果传感器的非线性项的阶次不高，在输入量变化范围不大的条件下，可以用切线或割线拟合、过零旋转拟合、端点连线拟合等方法近似代表实际曲线的一段（多数情况下用最小二乘法求出拟合直线），这就是传感器非线性特性的“线性化”，如图2-2所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| （a）切线或割线 | （b）过零旋转 | （c）端点连线 |

图2-2 输入-输出特性的线性化

所采用的直线称为拟合直线，而实际特性曲线与拟合直线间的偏差称为传感器的非线性误差。为了评价非线性误差（或线性度），我们将其最大值与输出满刻度值之比作为指标。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.1） |

式中：—非线性误差（线性度）；

—最大非线性绝对误差；

—满量程输出值，指被测量达到最大值时，传感器对应的输出值。

#### 2.1.1.3 灵敏度

灵敏度（Sensitivity）是指传感器在稳态下输出量变化与输入量变化的比值，如图2-3所示。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）传感器线性测量系统 | （b）传感器非线性测量系统 |

2-3 传感器灵敏度

对于图2-3（a）所示的传感器线性测量系统，其灵敏度是一个常数，即输入-输出曲线的斜率，可以用增量的形式表示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.2） |

显然，曲线越陡峭，灵敏度越大；曲线越平坦，则灵敏度越小。

对于图2-3（b）所示的传感器非线性测量系统，其灵敏度为一变量，此时应以微量形式表示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.3） |

通常，用拟合直线的斜率来表示系统的平均灵敏度。一般希望传感器的灵敏度高，并且在全量程的范围内是恒定的，即输入-输出特性为线性。但要注意，灵敏度越高，越容易受外界干扰影响，系统的稳定性越差。

#### 2.1.1.4 迟滞

迟滞也称为“滞后量”或“滞环”，表征系统在全量程范围内，输入量由小到大(正行程)和由大到小(反行程)两个静态特性一致的程度，如图2-4所示。其值用引用误差形式表示:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.4） |

式中：表示同一输入量对应正、反行程输出量的最大差值。

  
图2-4 迟滞特性

#### 2.1.1.5 重复性

重复性表示系统输入量按同一方向作全量程、连续多次变动时，静态特性之间一致的程度，如图2-5 所示。

  
图2-5 重复性

如图2-5所示，正行程的最大重复性偏差为，反行程的最大重复性偏差为，这两个最大偏差之中的较大者为。重复性误差一般用输出最大不重复误差与满量程输出的百分比表示，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.5） |

式中：反映了同一输入量对应多次循环的同向行程输出量的分散程度。这种输出量之值的相互偏离反映了传感器的随机误差，故亦可按随机误差处理法则来确定。

#### 2.1.1.6 分辨力

分辨力是指传感器能够感知或检测到的最小输入信号增量，反映其分辨微小变化的能力。分辨力可以用能够分辨最小增量的绝对值表示；也可以用能够分辨最小增量与满量程的百分比来表示，此时也称为分辨率。通常，模拟式传感器的分辨力被规定为最小刻度分格值的一半，而数字式传感器的分辨力则被规定为能引起数字输出末位数改变所对应的输入增量。

#### 2.1.1.7 阈值

阈值是指传感器的输入从零开始缓慢增加时，只有当其超过某一特定值时，传感器的输出才会发生可观测的变化。这个使传感器输出端产生可观测变化的最小被测输入量值称为阈值，即零位附近的分辨力。

阈值也可以称为灵敏度界限（灵敏限）、门槛灵敏度、灵敏阈、失灵区或死区等。某些传感器在零位附近具有严重的非线性特性，形成所谓的“死区”，则可将死区的大小作为阈值。在大多数情况下，阈值主要取决于传感器的噪声水平，因此一些传感器仅提供噪声电平。

#### 2.1.1.8 稳定性

稳定性指的是传感器在相当长的工作时间内保持其性能的能力，因此也称为长期稳定性。

稳定性误差通常是在室温条件下，经过一定工作时间间隔后，用传感器的输出与起始标定时的输出之间的差值来表示。稳定性误差可以用相对误差或绝对误差表示。

#### 2.1.1.9 漂移

漂移是指传感器在输入保持不变的情况下，输出会随着时间或温度等因素的变化而发生变动的现象。漂移与被测输入量无关，将影响传感器的稳定性或可靠性。

产生漂移的原因主要有两个：一是传感器自身的敏感材料特性和结构参数会随着时间缓慢变化（即发生老化），称为时间漂移（简称时漂），可以分为零点漂移和灵敏度漂移。零点漂移是在规定条件下，一个恒定的输入在规定时间内的输出在标称范围最低值处（即零点）的变化；灵敏度漂移是指灵敏度随时间而产生的变化。二是在测试过程中周围环境（如温度、湿度、压力等）发生变化，最常见的情况是温度漂移（简称温漂），这是由周围环境温度变化引起的输出变化。温度漂移通常用传感器工作环境温度偏离标准环境温度（一般为20℃）时输出值变化量与温度变化量之比来表示。

#### 2.1.1.10 精度

精度指标有三个：精密度、正确度和精确度。

#### 1. 精密度

它说明测量结果的分散性，即对某一稳定的对象（被测量）由同一测量者用同一检测系统和测量仪表在相当短的时间内连续重复测量多次（等精度测量），其测量结果的分散程度。值越小，测量结果的精密度越高（对应随机误差）。

#### 2. 正确度

它说明测量结果偏离真值大小的程度，即示值有规则偏离真值的程度。它是指所测量与真值的符合程度（对应系统误差）。

#### 3. 精确度

它包含精密度与正确度的综合，即测量的综合优良程度。在简单的场合下，可取两者的代数和，即。通常，用测量误差的相对值来表示精确度。

在工程应用中，为了简洁地表示测量结果的可靠程度，引入了一个精确度等级概念，用A表示。检测系统与测量仪表精确度等级A以一系列标准百分数值（0.001，0.005，0.02，0.05，…，1.5，2.5，4.0…）进行分级。这个数值是检测系统和测量仪表在规定条件下允许的最大绝对误差值相对其满量程输出的百分比，可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.5） |

式中：—检测系统的精度；

—测量范围内允许的最大绝对误差；

检测系统设计和出厂检验时，其精度等级代表的误差指的是检测系统测量的最大允许误差。

**例2-1** 有一个位移传感器，对在0mm～5mm范围的位移进行了两个循环的测量，测量数据如表2-1所示。请以输出的平均值求端点连线拟合直线，并计算传感器的线性度、灵敏度、迟滞和重复性误差。

表2-1 某位移传感器当x在0mm～5mm之间变化时测得的输出情况

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|  | 上行程 | 0 | 4 | 9 | 14 | 20 | 25 |
| 下行程 | 0 | 5 | 10 | 16 | 21 | 25 |
| 上行程 | 0 | 5 | 10 | 15 | 19 | 25 |
| 下行程 | 0 | 5 | 11 | 16 | 20 | 25 |
|  | | 0 | 4.75 | 10 | 15.25 | 20 | 25 |

解：拟合直线由（0,0）和（5,25）两个端点确定，直线方程为：

比较线性化后的（，）各点对应的输出与实际测得的输出，最大线性误差为：

则线性度为：

灵敏度为：

最大迟滞误差发生在第一循环测量处，为:

则迟滞为：

对比上行程之间、下行程之间各点的输出偏差，最大重复性误差为:

则重复性误差为：

### 2.1.2 动态特性

大部分被测物理量是随时间变化的动态信号。这意味着输入信号是时间的函数，而不是常量。对动态信号的测量需要精确地测量信号幅值的大小，并记录反映动态信号变化过程的波形。这就要求传感器能迅速准确地测出信号幅值，并无失真地再现被测信号的波形。

检测系统的动态特性反映了其对动态信号进行准确测量的能力。理想情况下，当输入量发生变化时，检测系统的输出量应该能够立即、准确地跟随输入量的变化，而不会引入任何失真。然而，在实际的检测过程中，如果选用的检测系统不合适，其输出量可能无法良好地追随输入量的快速变化，从而导致较大的测量误差。因此，研究检测系统的动态特性对于确保准确测量动态信号非常重要。

系统的动态响应特性一般通过描述系统的微分方程、传递函数和频率响应函数等数学模型来进行研究。

#### 2.1.2.1 微分方程

忽略非线性和随机变化的因素，传感器系统的微分方程为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.6） |

式中：，，…，，和，，…，，为与系统结构参数有关的常数。

#### 2.1.2.2 传递函数

设输入的拉氏变换为，输出的拉氏变换为，对式（2.6）两边同时取拉氏变换，并设初始条件为零，得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.7） |

式中：为复变量，,。

定义与 之比为传递函数，并记为，则：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.8） |

#### 1. 传递函数的特点

（1）传递函数表示了系统本身的动态性能，与输入量大小及性质无关。对于具体的系统，其传递函数不因输入的变化而不同，对任何一个输入都有确定的输出。

（2）传递函数不拘泥于系统的物理结构，而只反映其动态性能。不同的物理系统可以用相同的传递函数描述，称为相似系统。

（3）传递函数可以有单位，也可以没有单位。

（4）传递函数是复变量的有理分式。对于实际系统，分子阶次，分母最高阶次为输出量最高阶导数的阶次，确定系统的阶次，定义为阶系统。

#### 2．常见测试装置的传递函数

（1）一阶系统。传递函数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.9） |

式中：—时间常数，单位为s。

（2）二阶系统。 传递函数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.10） |

式中：—系统的灵敏度；

—系统的阻尼比；

—系统的无阻尼固有频率。

#### 2.1.2.3 频率响应函数

在初始条件为零的情况下，输出信号的傅里叶变换与输入信号的傅里叶变换之比为系统的频率特性，记为或：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.11） |

下面比较拉普拉斯变换与傅里叶变换的形式。

拉普拉斯变换:

傅里叶变换：

对比可见，频率响应函数是实部时的传递函数。我们可以令，直接由传递函数即可写出频率响应函数。

（1）一阶系统。频率响应函数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.12） |

其幅频特性和相频特性分别为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.13） |
|  |  | （2.14） |

其中，负号表示输出信号滞后输入信号。

一阶系统的幅频、相频特性如图2-6所示。

  
（a）幅频特性  
  
（b）相频特性  
图2-6 一阶系统的频率特性

由图2-6可见，随着的增加，一阶系统的幅频特性曲线呈单调衰减，衰减速度很快，所以一阶系统具有低通滤波的特性。在一阶系统特性中，应特别注意以下几点：

1）当激励频率远小于时，输出与输入的幅值几乎相等，接近1。而当，系统相当于一个积分器，几乎与激励频率成反比，相位滞后近，故一阶系统适合测试缓变或低频的被测量。

2）时间常数是反映一阶系统特性的重要参数，其值决定系统适用的频率范围。

（2）二阶系统。频率响应函数为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2.15） |

相应的幅频特性和相频特性分别为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2.16） |
|  | （2.17） |

二阶系统的幅频、相频特性如图2-7所示。

  
（a）幅频特性  
  
（b）相频特性  
图2-7 二阶系统的频率特性

由图2-7可见，二阶系统具有以下的特点：

1）当，时，，很小，，即相位差与频率呈线性关系。在这种情况下，系统的输出可以真实准确地再现输入的波形。然而，当时，。

2）影响二阶系统动态特性的参数是固有频率和阻尼比，其中固有频率的选择应以工作频率范围为依据。需要注意的是，当时，，，系统会发生共振，幅频特性受阻尼系数的影响极大。因此，在实际测量时，应避免这种情况。

3）当时，很小，并且与频率近似成正比增加。当时，趋近于，即输出信号几乎与输入反相。需要注意的是，在趋近区间，会随频率的变化而剧烈变化，且越小，变化越剧烈。

4）二阶系统是一个振荡环节，要选择恰当的固有频率和阻尼比的组合，以获得较小的误差。

通过上面的分析可以得出结论：为了使测试结果能够精确地再现被测信号的波形，在传感器设计时，必须使其阻尼系数，固有角频率至少应大于被测信号频率的3～5倍，即。

在实际测试时，如果被测量为非周期信号，可将其分解为各次谐波，从而得到其频谱。实践证明，如果被测信号的波形与正弦波相差不大，则被测信号谐波中最高频率可以用其基频的2~3倍代替。因此，选用和设计传感器时，要保证传感器固有角频率。

## §2.2 传感器系统的标定与校准

为了确保传感器测量结果的可靠性和精度，国家制定了各类传感器的检定标准，并配备了标准的测试装置和仪器作为测量值传递的基准。新生产的传感器或使用过一段时间的传感器都可以进行灵敏度、频率响应、线性度等校准，以确保测量数据的可靠性。这不仅有利于统一测量方法，也方便了测量值的传递。

### 2.2.1 传感器的静态特性标定

#### 2.2.1.1 静态标定条件

静态标定是在输入信号不随时间变化的静态标准条件下，确定传感器的静态特性指标，如线性度、灵敏度、迟滞、重复性等。静态标定的条件包括：无加速度、无振动、无冲击、环境温度通常为室温、相对湿度不大于，以及大气压为kPa。

#### 2.2.1.2 标定仪器设备精度等级的确定

对传感器进行静态特性标定是指根据实验数据确定其性能指标和测量精度。因此，在标定传感器时，测量仪器的精度应至少比传感器的精度高一个等级。只有这样，通过标定确定的传感器的静态性能指标才是可靠的，所确定的精度才是可信的。

#### 2.2.1.3 静态特性标定的方法

对传感器进行静态特性标定，首先要创造一个静态标定条件，然后选择一个与传感器精度匹配的标准设备，最后才能对传感器进行静态特性标定。

标定过程如下：

（1）将传感器的全量程分成若干等间距的点。

（2）根据传感器的量程分点，逐渐从小到大输入标准量程，并记录下每个输入值对应的输出值。

（3） 逐渐将输入值从大到小减小，并同时记录下每个输入值对应的输出值。

（4）按步骤（2）和（3）所述的过程，对传感器进行多次正、反行程测试，并将得到的输出/输入测试数据列入表格或绘制成曲线。

（5）对测试数据进行必要的处理，并根据处理结果确定传感器的线性度、灵敏度、迟滞和重复性等静态性能指标。

### 2.2.2 传感器的动态特性标定

动态标定主要是研究传感器的动态响应特性。根据动态性能指标，传感器的动态标定主要涉及一阶传感器的时间常数、二阶传感器的固有角频率和阻尼系数等参数的确定。对传感器进行动态标定时，需要对其输入一个已知的标准激励信号源，如正弦信号或阶跃信号。

对于一阶传感器，可以通过施加阶跃信号并测量其阶跃响应来确定时间常数，该时间常数是输出值达到最终值的所经历的时间。然而，为了准确确定一阶传感器的时间常数，通常需要考察传感器的阶跃响应。一阶传感器的单位阶跃响应函数为:

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2.18） |

整理后可得：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2.19） |

或，即和呈线性关系，且有

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2.20） |

因此，只要测量出一系列的-对应值，就可以通过数据处理，由式（2.20）确定一阶传感器的时间常数。

## §2.3 传感器性能改善措施与传感器的选用原则

### 2.3.1 提高传感器性能的途径

随着传感器发展的进程，相关工作者始终不渝地以提高传感器性能为目标，致力于提高其稳定性、可靠性、精度以及宽的频带等特性。其主要途径如下：

#### 1. 合理选择结构、材料和参数

传感器的性能指标涵盖了广泛的范围。如果要求传感器在所有指标上都表现优秀，就会在设计和制造过程中面临巨大的挑战，而且这也是不实用的。因此，应根据实际需求和可能性，合理选择传感器的结构、材料和参数。

选择传感器时，应根据实际需求优先保证主要指标，适度放宽次要指标，以获得更高的性价比。传感器研究和生产部门应提供一系列满足不同需求的产品供用户选择。用户应根据实际需求选择能满足要求的产品，避免在选择主要性能指标时盲目追求高标准。

#### 2．使用差动技术

在传感器系统中，温度、压力、电磁场等因素可能导致传感器输出信号偏移或失真。差动技术通过比较不同位置传感器信号的差异，有效消除干扰因素，提高测量精度和稳定性。

#### 3．应用平均技术

传感器中广泛采用的平均技术能够产生平均效应。这种技术的原理是多个传感器单元同时进行测量，输出则是这些单元输出的平均值。假设每个单元可能产生的误差是服从均方差为的正态分布的随机误差，根据误差理论，总误差将减小为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2.21） |

式中：—传感器单元数。

可见，利用平均技术不仅可以减小传感器误差，还可以增大信号量，从而提高传感器的灵敏度。

#### 4．采用补偿和修正技术

当传感器或测试系统的系统误差变化规律过于复杂时，可以采用一定的方法进行补偿或修正。

补偿与修正技术主要针对以下两种情况：

（1）针对传感器特性，找出误差的变化规律或测出其大小和方向，采用适当的方法加以补偿或修正。

（2）针对传感器工作条件或外界环境进行误差补偿，也是提高传感器精度的有力技术措施。不少传感器对温度敏感，由温度变化引起的误差十分可观。为了解决这个问题，可以在必要时控制温度，使用恒温装置。然而，这种方法费用较高或现场条件不允许。相比之下，在传感器内引入温度误差补偿通常是可行的。此时，应找出温度对测量值的影响规律，并引入相应的温度补偿措施。

补偿与修正可以利用硬件电路实现，也可以采用软件编程实现。

#### 5．进行稳定性处理

传感器作为长期测量或反复使用的设备，其稳定性至关重要。在那些难以或无法定期标定的场合，传感器的稳定性更显得尤为关键。传感器的材料与元器件的性能可能会随着时间的推移和环境条件的变化而发生变化，这就是导致传感器性能不稳定的原因。因此，为了提高传感器性能的稳定性，需要对材料、元器件和传感器整体进行必要的稳定性处理。提高传感器性能稳定性的措施包括：对结构材料进行时效处理和低温处理；对永磁材料进行时间老化、温度老化、机械老化和交流稳磁处理；对电气元件进行老化筛选等。如果测量要求较高，还需要对附加的调整元件和后续电路的关键元器件进行老化处理。

#### 6．实施屏蔽隔离和干扰抑制

传感器大多在现场工作，现场条件往往难以预料，有时极其恶劣。外界因素会影响传感器的精度和性能。为了减少测量误差并保持传感器的性能，应设法削弱或消除外界因素对传感器的影响。方法包括：

（1）降低传感器对影响因素的灵敏度。

（2）减弱外界因素对传感器实际作用的程度。

对于电磁干扰，可以采用屏蔽和隔离措施，或使用滤波等方法进行抑制。对于温度、湿度、机械振动、气压、声压、辐射和气流等干扰因素，可采取相应的隔离措施，如隔热、密封和隔振等，或在信号转换为电量后对干扰信号进行分离或抑制，以减小其影响。

### 2.3.2 传感器的选用原则

现代传感器在原理与结构上千差万别，如何根据具体的测量目的、测量对象以及测量环境合理地选用传感器，是在进行某个量的测量时首先要解决的问题。当传感器确定后，与之相配套的测量方法和测量设备也就随之可以确定。测量结果的成败在很大程度上取决于传感器的选用是否合理。

选择传感器时，往往需要考虑很多因素，但不可能面面俱到，也无需满足所有的要求。需要根据传感器的实际用途、指标和环境等因素来选择侧重点。例如，对于机械加工或化学分析等时间较短的工序过程，需要选择具有较好灵敏度和动态特性的传感器。而对于长时间连续使用的传感器，则需要重点考虑长期稳定性。此外，还需要合理选择设置场所，注意传感器的安装方法，并了解其外形尺寸和重量等因素。综合考虑这些因素后，可以最终确定最合适的传感器。一般来说，正确选择传感器需要从以下几个方面考虑。

#### 1．灵敏度的选择

通常来说，传感器的灵敏度越高越好，因为较高的灵敏度意味着传感器能够感知到更小的变化。只要被测物体有微小变化，传感器就能产生较大的输出。但是，在确定灵敏度时，需要考虑以下问题：

（1）当传感器的线性工作范围一定时，灵敏度越高，干扰噪声就越大。这可能导致传感器的输入难以在线性区域内工作。因此，过高的灵敏度可能会限制其适用的测量范围。在这种情况下，应优先考虑提高传感器的信噪比。

（2）如果被测量是一个单向量，那么传感器的单向灵敏度应尽可能高，而横向灵敏度应尽可能低。如果被测量是二维或三维的向量，那么传感器的交叉灵敏度应尽可能低。

#### 2．频率响应特性

传感器的频率响应特性是指在所测频率范围内，能够保持不失真测量的能力。然而，实际上传感器的响应都会有一定延迟，尽管希望这种延迟的时间越短越好。

一般物性型传感器，如光电效应式传感器、压电效应式传感器等，响应时间短，工作频率宽；而结构型传感器，如电感式传感器、电容式传感器、磁敏式传感器等，由于受到结构特性的影响或机械系统惯性质量的限制，其固有频率低、工作频率范围窄。在动态测量中，传感器的频率响应特性对测试结果有直接的影响，选用时，应充分考虑被测物理量的变化特点（如稳态、瞬变、随机等）。

#### 3．线性范围

在传感器的线性范围内，输出与输入成比例关系。线性范围越宽，传感器的工作量程越大。传感器工作在线性区域内是保证测量精度的基本条件。以机械式传感器为例，其材料的弹性极限决定了测力量程。如果超出了测力元件的弹性范围，就会产生非线性误差。

在某些情况下，确保传感器完全工作在线性区域内可能会有困难。但在允许的范围内，可以选择其近似线性区域。例如，对于变间隙型的电容或电感式传感器，工作区域通常选择在初始间隙附近。同时，必须考虑被测量的变化范围，以确保非线性误差在允许范围内。

#### 4．稳定性

传感器的稳定性是指其在长期使用后输出特性不发生变化的性能。为了保证传感器长期稳定地工作，而无需经常更换或校准，在选择和使用传感器时应注意以下两个问题：

（1）根据环境条件选择传感器。例如，如果选择电阻应变式传感器，应考虑湿度的影响。对于变极距型电容式传感器和光电传感器，如果环境中的灰尘或油剂浸入间隙，会改变电容器的介质和感光性质。对于磁电式传感器或霍尔效应元件，应考虑周围电磁场可能带来的测量误差。如果滑线电阻式传感器的表面有灰尘，可能会引入噪声。

（2）要创造或保持良好的使用环境。

#### 5．精确度

传感器的精确度表示传感器的输出与被测量的对应程度。

传感器处于测试系统的输入端，其能否真实反映被测量，对整个测试系统具有直接的影响。

在某些情况下，传感器的精确度越高越好。例如，在测量现代超精密切削机床的运动部件的定位精度，主轴的回转运动误差、振动及热形变等时，通常要求测量精确度在0.1～0.001mm范围内。

在实际应用中，同时需要兼顾测量目的和经济性。对于定性分析的实验研究，应要求传感器的重复精度高，而不要求测试的绝对量值准确；对于定量分析，就必须获得精确量值。

#### 6．测量方式

传感器在实际条件下的工作方式多种多样，包括接触式和非接触式测量、破坏性和非破坏性测量以及在线和离线测量等。这些工作方式的选择取决于具体的应用场景和需求。

例如，在机械系统中，对于运动部件的参数，通常采用非接触测量方式。对于回转轴的误差、振动、扭矩等，非接触式传感器如电容式、涡流式、光电式等是非常方便的选择。如果选用电阻应变片，则需要配置遥测应变仪。在生产过程监测或产品质量在线检测中，建议采用非破坏性检验方式，如涡流探伤、超声波探伤、核辐射探伤和声发射检测等，以直接获得经济效益。

在线测试是一种与实际情况保持一致性的测试方法，这在自动化过程检测与控制系统中尤为重要。然而，实现在线检测是比较困难的，因为这对传感器与测试系统都有一定的特殊要求。例如，在加工过程中，要实现表面粗糙度的检测，传统的光切法、干涉法、触针法等都无法使用，而需要使用激光、光纤或图像检测法。因此，研制适用于在线检测的新型传感器是当前测试技术发展的重要方向之一。

除了以上选用传感器时应充分考虑的一些因素外，还应尽可能兼顾结构简单、体积小、重量轻、价格便宜、易于维修和更换等条件。

以上是有关选择传感器时主要考虑的因素。另外，为了提高测量精度，应选择显示值在满量程的50%左右的传感器，并相应地选择测量范围或刻度范围。选择传感器时，应考虑其响应速度，以利用输入信号的频带宽度，从而获得高信噪比。对于高精度传感器，需要谨慎使用，合理选择测试现场，并详细了解其安装方法。总之，综合考虑各种因素，以选择最适合的传感器。

根据以上原则，可将选择传感器的一般步骤总结如下：

（1）借助传感器的分类表，根据被测量的性质，找出符合用户需要的传感器类别，再从典型应用中初步确定几种传感器。

（2）借助常用传感器的比较表和价格表，根据被测量的测量范围、测量精度、测量要求和环境要求，再次确定传感器的类别。

（3）借助传感器的产品目录选用样本或传感器的手册，查出传感器的规格型号，性能参数及结构尺寸。

## §2.4 技术指标的Python计算方法

在标定传感器时，如果面临大量测试数据，手动计算性能指标可能会变得非常困难。因此，本节将简要介绍如何利用Python编程来高效地计算这些指标。

### 2.4.1 相关Python基础知识

采用Python编程方法计算传感器的性能指标，需要用到两个第三方库：用于数组计算的numpy库和机器学习库sklearn。为此，我们必须首先使用pip命令（也可以采用其它的安装方法）安装这两个库。

numpy的安装方法是：

pip install numpy

sklearn的安装方法是：

pip install scikit-learn

一旦安装完成，就可以在Python程序中引入这两个库，并在后续的程序中使用它们。

numpy的引用代码如下：

import numpy as np

在本节，我们只用了sklearn库的线性回归子模块linear\_model，因此只需要引用这一个子模块即可，其引用代码如下：

from sklearn import linear\_model

在本节中，numpy库的主要作用是将测试数据存储到变量中。具体的代码如下：

x=np.array([元素值])

在这句代码中，x是存储测试数据的变量名，可以用任意合法的标识符代替；元素值用具体的测试数据值代替。

对于一维数据，其实例代码如下：

x=np.array([0, 1, 2, 3, 4, 5])

对于二维数据，其实例代码如下：

x1=np.array([[0, 1], [1, 1], [2, 1], [3, 1], [4, 1], [5, 1]])

在本节中，sklearn库的主要作用是训练线性回归模型并进行预测。首先，需要定义一个回归模型对象，其代码如下：

clf = linear\_model.LinearRegression() # clf为定义的对象名

模型的训练，需要用到对象的fit方法。该方法有两个参数，分别是模型的输入和输出。但是要注意的是，sklearn库接受的输入变量是二维变量或以上，如果是一维变量，比如采用reshape方法把它变成二维变量。

对于二维输入变量xx，输出变量yy，模型训练的代码为：

clf.fit(xx, yy) # clf为前面定义的模型对象名

对于一维输入变量xx，输出变量yy，模型训练的代码为：

clf.fit(xx .reshape(-1, 1), yy)

训练后，即可得的拟合直线的斜率k和截距b，具体的代码如下：

|  |
| --- |
| k=clf.coef\_[0] |
| b=clf.intercept\_ #下划线不可以省略不写 |

模型训练好后，即可采用对象的predict方法进行预测。该方法只需要一个一个参数，即模型的输入。与fit方法类似，此参数的维度也必须大于等于2。

对于二维输入变量x，其预测代码为：

y\_pre=clf.predict(x)

对于一输入变量x，其预测代码为：

y\_pre=clf.predict(x.reshape(-1, 1))

其中，y\_pre即为每一个测试数据在拟合直线上的纵坐标，可以由其计算出非线性绝对误差，进而计算线性度。

另外，在计算传感器的性能指标时，经常需要求取一个数组的绝对值、最大值和最小值，这就用到abs函数、max方法和min方法，具体的代码可以参见下一小节的内容。

### 2.4.2 性能指标的Python求取方法

#### 1. 线性度

根据公式（2.1），求取线性度的代码如下：

|  |
| --- |
| **deltay= abs(y\_pre-y)**  **deltay\_max= deltay.max()**  **xxd=deltay\_max/max(y)** |

#### 2. 灵敏度

根据公式（2.2），求取线性度的代码如下：

lmd=(y.max()-y.min())/(x.max()-x.min())

#### 3. 迟滞和重复性误差

由公式（2.4）和公式（2.25）可知，计算迟滞和重复性误差可以使用相同的程序代码，两者的区别在于求取偏差时代入的数据不同，即y1和y2的值不同。求取迟滞时，代入的分别是上行程和下行程的数据；求取重复性误差时代入的是同为上行程数据或下行程的数据，其代码如下：

**delta= abs(y1-y2)**

**delta\_max= delta.max()**

**cz=deltay\_max/max(y)**

**例2-2** 有一个位移传感器，对在0mm～5mm范围的位移进行了两个循环的测量，测量数据如表2-2所示。请采用Python编程的方法求取以输出的平均值求端点连线的拟合直线，并计算传感器的线性度、灵敏度、迟滞和重复性误差。

表2-2 某位移传感器当x在0mm～5mm之间变化时测得的输出情况

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|  | 上行程 | 0 | 4 | 9 | 14 | 20 | 25 |
| 下行程 | 0 | 5 | 10 | 16 | 21 | 25 |
| 上行程 | 0 | 5 | 10 | 15 | 19 | 25 |
| 下行程 | 0 | 5 | 11 | 16 | 20 | 25 |

解：相关代码如下：

|  |
| --- |
| #引用第三方库  **import numpy as np**  **from sklearn import linear\_model**  #将表中测试数据存入python变量  **x=np.array([0, 1, 2, 3, 4, 5])**  **y01=np.array([0, 4, 9, 14, 20, 25])**  **y11=np.array([0, 5, 10, 16, 21, 25])**  **y02=np.array([0, 5, 10, 15, 19, 25])**  **y12=np.array([0, 5, 11, 16, 20, 25])**  #求取输出平均值  **y=(y01+y11+y02+y12)/4**  #求取端点坐标  **xx=np.array([x.min(), x.max()])**  **yy=np.array([y.min(), y.max()])**  #求取拟合直线  **clf = linear\_model.LinearRegression()**  **clf.fit(xx.reshape(-1, 1),yy)**  **k=clf.coef\_[0]**  **b=clf.intercept\_**  **y\_pre=clf.predict(x.reshape(-1, 1))**  #打印拟合直线的斜率和截距  **print("拟合直线的斜率: ", k)**  **print("拟合直线的截距: ", b)**  #计算性能指标  **deltay\_max=np.array([abs(y\_pre-y01),abs(y\_pre-y02), \**  **abs(y\_pre-y11),abs(y\_pre-y12)]).max()**  **xxd=deltay\_max/max(y)**  **lmd=(y.max()-y.min())/(x.max()-x.min())**  **deltah\_max=np.array([abs(y11-y01),abs(y12-y02)]).max()**  **cz=deltah\_max/max(y)**  **cf\_max=np.array([abs(y02-y01),abs(y12-y11)]).max()**  **cfwc=cf\_max/max(y)**  #打印性能指标  **print("线性度: ", xxd)**  **print("灵敏度: ", lmd)**  **print("迟滞: ", cz)**  **print("重复性误差: ", cfwc)** |

执行上述代码，可以得到以下结果：

|  |
| --- |
| 拟合直线的斜率: 5.0  拟合直线的截距: 0.0  线性度: 0.04  灵敏度: 5.0  迟滞: 0.08  重复性误差: 0.04 |

这些结果与例2-1中手工计算的结果完全一致。这验证了Python程序的正确性。事实证明，使用Python进行这类计算不仅准确，而且效率高，非常可行。这对于处理大量数据或复杂计算尤其有用。

|  |  |
| --- | --- |
| * 价值观 | 敬业 |
| 对于从事传感器校准的专业人员来说，敬业精神体现在对工作的高度责任感。他们深知传感器校准的准确性对于众多应用领域的重要性，从工业生产中的质量控制到科学研究中的精确测量，每一个数据的准确度都可能影响重大决策和研究成果。因此，他们以高度的责任感对待每一次校准任务，不允许有丝毫的马虎和疏忽。  敬业精神还表现在对专业知识的不懈追求和深入钻研。传感器校准需要掌握复杂的物理原理、数学模型和先进的校准技术。他们不断学习新的理论和方法，提升自己的专业素养，以应对不断更新的传感器类型和更高的校准精度要求。  在实际工作中，敬业精神意味着耐心和细致。校准过程可能繁琐而重复，但他们始终保持专注，认真对待每一个测量数据，对微小的误差也绝不放过，通过反复调试和验证，确保校准结果的可靠性。  在遇到校准难题时，他们不轻易放弃，而是积极寻找解决方案，不断尝试和改进方法，直到达到满意的校准效果。传感器的校准工作需要从业者以敬业精神为支撑，用责任、专注、钻研和坚韧，为保障传感器的准确可靠运行贡献自己的力量。 | |

## 习题2

1. 衡量传感器静态特性的指标不包括（ ）。

A. 线性度 B. 灵敏度 C. 时域响应 D. 重复性

2. 传感器的静态特性，是指当传感器输入、输出不随（ ）变化时，其输出-输入的特性。

A. 时间 B. 被测量 C. 环境 D. 地理位置

3. 迟滞表明的是在（ ）期间输出-输入特性曲线不重合的程度。

A. 多次测量 B. 同次测量 C. 正反行程 D. 不同测量

4. 是指传感器在输入量不变的情况下，输出量随时间或温度变化的现象。

5. 一个高精度的传感器必须有良好的 和 ，才能完成信号无失真的转换。

6. 传感器的静态特性指标主要有哪些？写出说明及相关表达式。

7. 请简述传感器静态标定的过程。

8. 提高传感器性能的途径有哪些？

9. 某线性位移传感器，在输入量变化5mm时，输出电压变化为200mV，求其灵敏度。

10. 某压力传感器的测试数据如下表示，试据此计算某压力传感器的迟滞误差和重复性误差。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 行 程 | 输入压力  （×105Pa） | 输出电压(mV) | | |
| （1） | （2） | （3） |
| 正行程 | 2.0 | 190.9 | 191.1 | 191.3 |
| 4.0 | 382.8 | 383.2 | 383.5 |
| 6.0 | 575.8 | 576.1 | 576.6 |
| 8.0 | 769.4 | 769.8 | 770.4 |
| 10.0 | 963.9 | 964.6 | 965.2 |
| 反行程 | 10.0 | 964.4 | 965.1 | 965.7 |
| 8.0 | 770.6 | 771.0 | 771.4 |
| 6.0 | 577.3 | 577.4 | 578.4 |
| 4.0 | 384.1 | 384.2 | 384.7 |
| 2.0 | 191.6 | 191.6 | 192.0 |

# 第3章 不懈追求，守正创新——常用传感器的工作原理

|  |  |
| --- | --- |
| 本章内容 | * 电阻应变式传感器 * 电感式传感器 * 电容式传感器 * 磁敏式传感器 * 其它新型传感器   在上一章中，我们主要介绍了传感器的性能指标和性能改善。本章将重点介绍常见传感器的工作原理、测量电路和应用。我们将详细探讨电阻应变式传感器、电感式传感器、电容式传感器、磁敏式传感器等常见传感器，并简要介绍一些新型传感器，为后续全面介绍智能传感器做好准备。通过对这些传感器的学习，我们可以更好地理解它们的工作原理和应用，并在实际应用中更好地运用这些技术。 |
| 知识目标 | * 1. 了解常用传感器的原理； * 2. 掌握常用传感器的测量电路； * 3. 掌握常用传感器的工作特点和应用。 |
| 能力目标 | 能够准确理解各类常见传感器的工作原理，能够分析其中涉及的关键技术和参数；能够运用所学的传感器工作原理知识解决实际工程中简单检测和测量问题；能够记录实验数据，并对数据进行初步的处理和分析；能够运用所学知识进行初步的故障诊断和排查。 |
| 思政目标 | * 培养创新思维意识，敢于对既有方案进行独立思考，具有设计简单检测系统或改进现有传感器应用的意识； * 培养独立思考、自助学习能力，不断提高了解传感器领域的最新技术和发展动态的自觉性和主动性； * 培养拓展能力，积极不断拓展自己的知识领域，提升将传感器原理与其他相关学科知识进行融合的意识。 |
| 重点难点 | 重点：掌握常用传感器的测量电路；掌握常用传感器的工作特点和应用。  难点：掌握常用传感器的测量电路。  本章节适合各种学时设置的教学安排。 |

## §3.1 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器（Resistance strain sensor）是一种利用电阻应变片将被测非电量的应变转变为电阻变化的传感器。

任何非电量只要能转化为应变量就可以利用电阻应变式传感器进行测量。电阻应变式传感器以其简单的结构、较高的线性度和良好的稳定性，可以与相应的测量电路配合，形成用于测量压力、质量、位移、加速度和扭矩等多种物理量的检测系统。电阻应变式传感器的种类多样，应用范围广泛，已经成功地被应用于航空、机械、电力、化工、建筑以及医疗等多个领域。

### 3.1.1 应变片与应变效应

#### 3.1.1.1 金属电阻的应变效应

任何在线性范围内变形的弹性体，当其受力发生变形时，长度都会发生改变。这种引起长度改变的现象称之为应变效应。将长度的相对变化称为应变，用表示。在这里，，其中是原始长度，是变化量。

电阻应变式传感器是一种将应变转化为电阻变化的传感器，其核心部件是电阻应变片。

应变式传感器的工作原理是：当机械弹性结构体受到力的作用而发生变形时，会产生应变效应。通过粘贴在机械弹性结构体上的电阻应变片来检测这种应变效应，然后由电桥完成信号的转换，最终输出与弹性体受力成对应关系的电信号。

为了理解电阻应变片的工作原理，首先考察单根金属电阻丝受力变形后的电阻变化，如图3-1所示。图中实线表示拉伸前的状态，虚线表示拉伸后的状态。

  
图3-1 金属丝的圆截图

在未受力前，原始电阻值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.1） |

式中：—金属丝的电阻；

—金属丝电阻率；

—长度；

—截面积。

当电阻丝受到拉力的影响时，它会伸长，其截面积会相应地减小。同时，电阻率也会因为形状的变化而改变。因此，可通过对公式（3.1）进行全微分，来计算这种变化引起的电阻值的相对变化量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.2） |

结合式（3.1）可得相对变化量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.3） |

为分析方便，假设电阻丝是圆截面，即 （为电阻丝的半径），微分后可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.4） |

则圆形电阻丝的截面积相对变化量转换成半径的相对变化量应为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.5） |

将式（3.5）代入（3.3）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.6） |

因变化量小，、、可分别用、、代替，于是可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.7） |

杆件在轴向受拉或受压时，其纵向应变与横向应变的关系为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.8） |

式中：—金属丝材料的泊松系数，负号表示应变方向相反。

令电阻丝的轴向应变为，将式（3.8）带入式（3.7）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.9） |

通常把单位应变所引起的电阻值变化称为金属丝的灵敏度系数，其表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.10） |

由式（3.10）可以看出，金属丝的灵敏度系数由两部分组成。第一项是由于金属丝受到力的影响后，材料的几何尺寸发生变形引起的；第二项是由于材料发生变形后，其自由电子的活动能力和数量均发生变化而导致材料电阻率发生变化所引起的。对于金属材料，的值要比小很多，可以忽略。然而，对于半导体材料，要比大很多。大量实验表明，在金属丝拉伸比例极限内，电阻的相对变化与应变成正比，即为常数，其值在1.7到3.6之间。

#### 3.1.1.2 应变片的结构

在实际应用中，使用的电阻应变片通常是将金属导体（如丝或箔片）制成栅状结构，并放置在绝缘基底上。金属应变片的结构如图3-2所示。

  
图3-2 金属应变片的结构

尽管应变片的结构形式多样，但其主要组成部分基本一致。具体如下：

1. 敏感栅

应变片中实现应变-电阻转换的元件。通常由直径为0.01～0.05mm的金属丝绕成栅状，或用金属箔腐蚀成栅状。

2．基底

为保持敏感栅固定的形状、尺寸和位置，通常用黏结剂将其固定在纸质或胶质的基底上。工作时，基底起着把试件应变准确地传递给敏感栅的作用。因此，基底必须很薄，一般为0.02～0.04mm。

3．引线

它起着敏感栅与测量电路之间的过渡连接和引导作用。通常取直径约0.1～0.15mm的低阻镀锡铜线，并用钎焊与敏感栅端连接。

4．盖层

它是由纸、胶制成的保护层，覆盖在敏感栅上，起到防潮、防腐蚀等作用。

5．黏结剂

在制造应变片时，用于将盖层和敏感栅粘贴于基底上；在使用应变片时，用于将应变片基底粘贴在试件表面的被测部位，因此，它也起到传递应变的作用。

#### 3.1.1.3 应变片类型

应变片主要分为金属应变片和半导体应变片两大类。其中，金属应变片包括丝式、箔式等多种形式，如图3-3所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| （a）金属丝式应变片 | （b）金属箔式应变片 | （c）半导体应变片 |

图3-3 应变片的结构

金属丝式应变片是最早使用的，主要有纸质型和胶基型两种。这种应变片的制造技术和设备相对简单，价格低廉，通常在短期的室内实验中使用。它的缺点是其端部弧形段会产生横向效应。

金属箔式应变片是通过光刻和腐蚀等工艺在绝缘基片上制成各种图案的电阻箔片，其厚度通常在0.001～0.1mm之间。与丝式相比，它的面积大得多，散热效果好、通过电流大、横向效应小、柔性好、寿命长、工艺成熟且适于大批量生产，因而得到广泛使用。

半导体应变片是由半导体材料制成的敏感栅，其工作原理基于半导体材料的压阻效应。相较于金属丝式、箔式应变片，半导体应变片的灵敏度一般高出几十倍，而且横向效应较小，因此其应用日趋广泛。

#### 3.1.1.4 应变片的参数

应变片的参数主要有以下几项：

1．标准电阻值（）

标准电阻值指的是在无应变的情况下的电阻值，单位为。

2．绝缘电阻（）

绝缘电阻是指已粘贴的应变片的引线与被测试件之间的电阻值，通常要求在以上。

3．灵敏度系数（）

灵敏度系数是指应变片安装到被测物体表面后，在其轴线方向上的单向应力作用下，应变片阻值的相对变化与被测物表面上安装应变片区域的轴向应变之比。

4．应变极限（）

在恒温条件下，使非线性达到10％时的真实应变值称为应变极限。应变极限是衡量应变片测量范围和过载能力的指标。

5．允许电流（）

允许电流是指应变片允许通过的最大电流。

### 3.1.2 应变片的温度误差及补偿

#### 3.1.2.1 应变片的温度误差

测量现场环境温度的改变而给测量带来的附加误差称为应变片的温度误差。产生应变片温度误差的主要因素有以下两个方面：

1. 电阻温度系数的影响

当温度变化时，金属电阻丝的电阻也会改变。敏感栅的电阻丝阻值随温度变化的关系可表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.11） |

式中：—温度为时的电阻值；

—温度为时的电阻值；

—温度为时的金属丝的电阻温度系数；

—温度变化值，。

当温度变化时，电阻丝电阻的变化值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.12） |

2．试件材料和电阻丝材料的线膨胀系数不同的影响

当试件材料和电阻丝材料的线膨胀系数相同时，环境温度的变化不会产生附加形变，也就不会带来附加误差。但当它们的线膨胀系数不同时，就会带来附加误差。

设电阻丝和试件在温度为0℃时的长度均为，它们的线膨胀系数分别为和，若两者不粘贴，则它们的长度分别为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.13） |
|  |  | （3.14） |

当两者粘贴在一起时，电阻丝产生的附加变形、附加应变和附加电阻变化分别为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.15） |
|  |  | （3.16） |
|  |  | （3.17） |

由式（3.12）和式（3.17），可得由于温度变化而引起的应变片总电阻相对变化量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.18） |

由式（3.18）可知，因环境温度变化而引起的附加电阻的相对变化量，除了与环境温度有关外，还与应变片自身的性能参数（，，）以及被测试件线膨胀系数有关。

#### 3.1.2.2 电阻应变片的温度补偿方法

电阻应变片的温度补偿方法通常有线路补偿法和应变片自补偿法两大类。

1．线路补偿法

电桥补偿是一种常用且效果良好的线路补偿方法。电桥补偿法的原理如图3-4所示。

  
图3-4 电桥补偿原理

电桥输出电压与桥臂参数的关系为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.19） |

式中：—由桥臂电阻和电源电压决定的常数。

由式（3.19）可知，当和为常数时，工作应变片和补偿应变片对电桥输出电压的作用方向相反。利用这种关系，可实现电阻应变片的温度补偿。

在测量应变时，工作应变片粘贴在被测试件表面上。补偿应变片粘贴在与被测试件材料完全相同的补偿块上，且仅工作应变片承受应变，如图3-5所示。

  
图3-5 电桥补偿应变片粘贴

当被测试件不承受应变时，和又处于同一环境温度为的温度场中。调整电桥参数使之达到平衡，此时有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.20） |

工程上，一般按选取桥臂电阻。

当温度升高或降低时，两个应变片因温度而引起的电阻变化量相等，电桥仍处于平衡状态，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.21） |

如果被测试件受到应变的影响，工作应变片电阻会有新的增量。由于补偿片不承受应变，所以不会产生新的增量。此时，电桥的输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.22） |

由式（3.22）可知，电桥的输出电压仅与被测试件的应变有关，而与环境温度无关。值得注意的是，如果要实现完全补偿，上述分析过程必须满足以下四个条件：

（1）在应变片工作过程中，保证。

（2）和两个应变片应具有相同的电阻温度系数、线膨胀系数、应变灵敏度系数和初始电阻值。

（3）粘贴补偿片的补偿块材料和粘贴工作片的被测试件材料必须一样，两者线膨胀系数相同。

（4）两应变片应处于同一温度场。

2．应变片的自补偿法

这种温度补偿法是利用自身具有温度补偿作用的应变片（称为温度自补偿应变片）来补偿的。根据温度自补偿应变片的工作原理，可由式（3.18）得出，要实现温度自补偿，必须有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.23） |

式（3.23）表明，当被测试件的线膨胀系数已知时，如果合理选择敏感栅材料，即其电阻温度系数、灵敏系数以及线膨胀系数，满足式（3.23），则不论温度如何变化，均有，从而达到温度自补偿的目的。

### 3.1.3 电阻应变式传感器的应用

电阻应变片除直接用以测量机械、仪器及工程结构等的应力、应变外，还常与某种形式的弹性敏感元件相结合，专门制成各种应变式传感器，用来测量力、压力、扭矩、位移和加速度等物理量。下面以膜片式压力传感器为例介绍电阻应变式传感器的应用。

膜片式压力传感器测量容器内液体重量的示意图如图3-6所示。

  
图3-6 膜片式压力传感器测量容器内液体重量的示意图

传感器下端的感压膜感受液体压力。传压杆将该压力传递到上端的微压传感器进行检测。当容器中的溶液增多时，感压膜感受到的压力会增大，从而导致微压传感器的输出增大。

微压传感器可以等效为一个感压的电桥电路，如图3-7所示。此时输出电压为：

  
图3-7 微压传感器等效电桥电路

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.24） |

式中：—传感器传输系数；

—感压膜距液面的深度；

—液体的密度；

—重力加速度，。

由于表征感压膜上面液体的重量，因此：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.25） |

式中：Q—容器内感压膜上面溶液的重量；

A—柱形容器的截面积。

式（3-25）表明，电桥输出电压与柱式容器内感压膜上面溶液的重量呈线性关系。因此，这种方法可以用来测量容器内储存的溶液重量。

## §3.2 电感式传感器

电感式传感器（Inductance Sensor）是一种利用电磁感应原理，将被测的非电量转换成电磁线圈的自感或互感量变化的测量装置，可以用来测量位移、压力和振动等参数。电感式传感器具有结构简单、灵敏度高、分辨力高和线性度好的特点。然而，由于这种传感器频率响应低，因此其不适于快速动态测量。

电感式传感器的种类很多，根据转换原理不同，可分为变磁阻式（自感式）、变压器式（互感式）、电涡流式（互感式）传感器等。

### 3.2.1 变磁阻式传感器

#### 3.2.1.1 变磁阻式传感器工作原理

变磁阻式传感器的结构如图3-8所示。它由线圈、铁芯和衔铁三部分组成。铁芯和衔铁之间有气隙，气隙厚度为。传感器的运动部分与衔铁相连。当衔铁移动时，气隙厚度发生改变，引起磁路中磁阻变化，从而导致电感线圈的电感值变化。因此，只要能测出这种电感量的变化，就能确定衔铁位移量的大小和方向。

  
图3-8 变磁阻式传感器的结构

线圈的电感值由下式确定：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.26） |

式中：—回路内的磁链数；

—每匝线圈的磁通量；

—线圈中所通电流的有效值；

—线圈匝数；

—磁路的总磁阻。

若忽略磁路铁损，则磁路总磁阻为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.27） |

式中：—铁芯的磁导长度；

—衔铁的磁导长度；

—铁芯的磁导率；

—衔铁的磁导率；

—空气的磁导率，；

—铁芯磁导截面积；

—衔铁磁导截面积；

—空气磁导截面积；

—空气隙的长度。

气隙磁阻远大于铁芯和衔铁的磁阻。因此，磁路总磁阻可近似为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.28） |

联立式（3.26）和式（3.28）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.29） |

由此可以看出，当线圈匝数确定后，只要改变和，即可导致电感的变化。

如果保持空气隙的长度不变，而使空气磁导截面积随位移变化，则可构成变截面式自感传感器。如果保持不变，则为的单值函数，从而可构成变气隙式自感传感器。

#### 3.2.1.2 变截面式自感传感器

保持气隙不变，令截面积随被测电量变化，即构成变面积式自感传感器。在图3-8中，令气隙面积。初始时，衔铁与铁芯覆盖的长度为a，此时电感为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.30） |

如果衔铁沿水平方向左移，则其电感值变化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.31） |

则电感值的变化量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.32） |

通常把单位位移所引起的电感值变化称为变截面式自感传感器的灵敏度系数，其表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.33） |

可见电感值的变化与重叠长度的变化（即与重叠面积的变化）呈线性关系。但是单元件结构灵敏度比较低，故在实际应用中常采用差动式结构，如图3-9所示。

  
图3-9差动变面积式自感传感器

初始时，铁芯置于两个线圈之间，且两个线圈绕向方向相反。因此，上下线圈在中段气隙部分产生的磁通方向相反，进而抵消。故此时线圈电感值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.34） |

式中：—衔铁与铁芯的起始重叠长度；

—衔铁外径；

—线圈圆柱的内径。

工作时，衔铁上移Δb，则上气隙电感变化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.35） |

下气隙电感变化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.36） |

由于两线圈方向相反、故总的电感变化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.37） |

类似地，把单位位移所引起的电感值变化称为差动变面积式自感传感器的灵敏度，可表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.38） |

通过分析可见，差动式结构的灵敏度提高了一倍。此外，这种结构不但具有抗外界干扰的能力，而且具有消除环境温度变化、电源波动和电磁吸力等因素影响的作用。

#### 3.2.1.3 变气隙式自感传感器

图3-8中，若传感器的气隙面积不变，当气隙厚度减少时，电感值将增加。根据式（3.29）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.39） |

当时，利用幂级数展开式，得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.40） |

忽略高次项，做线性化处理，得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.41） |

变气隙自感式传感器的灵敏度系数定义为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.42） |

可见，欲提高变气隙自感式传感器的灵敏度，需减小气隙的长度。但是，这又会受到工艺和结构的限制。因此，在实际测量中，我们通常会采用差动变气隙式电感传感器来提高灵敏度。这种传感器的结构如图3-10所示。

  
图3-10差动变气限式自感传感器

当衔铁从平衡位置变动时，上气隙变为，使得上线圈电感增加了，而下气隙变为，导致下线圈电感减少了。电感总变化量可表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.43） |

忽略高次项，对式（3.43）进行线性化处理可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.44） |

差动变气隙式自感传感器的灵敏系数可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.45） |

比较式（3.42）和式（3.45）可以看出，差动变气隙式自感传感器的灵敏度提高了一倍。

### 3.2.2 差动变压器式传感器

把被测的非电量变化转换为线圈互感变化的传感器称为互感式传感器。这种传感器是根据变压器的基本原理制成的，并且次级绕组以差动方式连接，故也称差动变压器式传感器。

差动变压器有多种结构形式，有变隙式、变面积式和螺线管式等，但其工作原理基本相同。在非电量测量中，应用最多的是螺线管式差动变压器，它可以测量1～100mm机械位移，并具有测量精度高、灵敏度高、结构简单、性能可靠等优点。

#### 3.2.2.1 螺线管式差动变压器

1．螺线管式差动变压器的工作原理

螺线管式差动变压器的结构如图3-11所示。

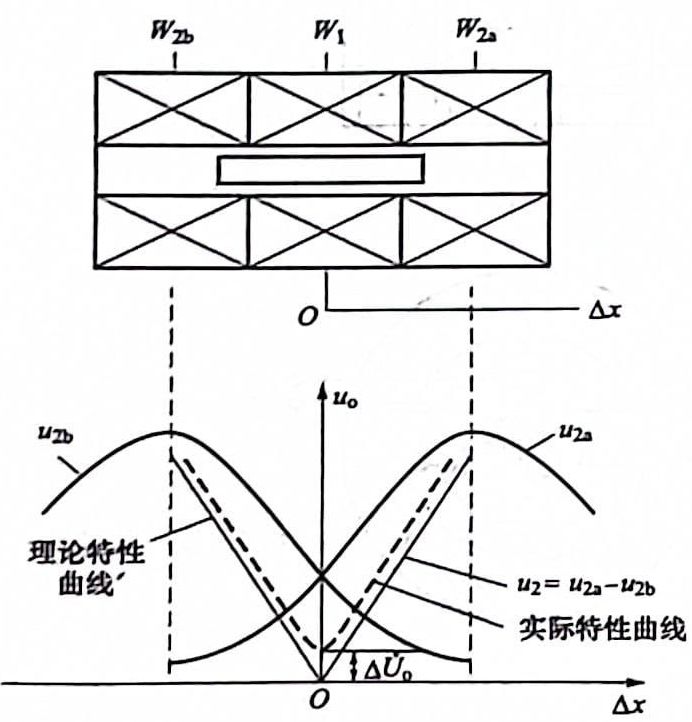
  
图3-11 螺线管式差动变压器的结构

在螺线管式差动变压器中，将其两个次级绕组反相串联，并且忽略铁损、导磁体磁阻和线圈分布电容，等效电路如图3-12所示。

  
图3-12 螺线管式差动变压器的等效电路

当初级绕组施加激励电压时，根据变压器的工作原理，在两个次级绕组和中便会产生感应电势和。如果工艺上保证变压器结构完全对称，则当活动衔铁处于初始平衡位置时，必然会使两互感系数，根据电磁感应原理，将有 。由于变压器两次级绕组反相串联，因而，即差动变压器输出电压为零。

当活动衔铁向上移动时，由于磁阻的影响，中磁通将大于，使，因而增加，而减小；反之，增加，减小。因为，所以当、随着衔铁位移x变化时，也必将随变化。图3-13所示为差动变压器输出电压与活动衔铁位移的关系曲线，实线为理论特性曲线，虚线为实际特性曲线。可以看出，当衔铁位于中心位置时，差动变压器输出电压并不等于零，我们把差动变压器在零位移时的输出电压称为零点残余电压，记作，它的存在会使传感器的输出特性不经过零点，造成实际特性与理论特性不完全一致。

  
图3-13 差动变压器输出电压与活动衔铁位移的关系曲线

零点残余电压主要是由传感器的两次级绕组的电气参数、几何尺寸不对称或磁性材料的非线性等引起的。零点残余电压的波形十分复杂，主要由基波和高次谐波组成。基波产生的主要原因是传感器的两次级绕组的电气参数和几何尺寸不对称。这导致它们产生的感应电动势幅值不等、相位不同。因此，无论怎样调整衔铁位置，两线圈中的感应电动势都不能完全抵消。高次谐波中起主要作用的是三次谐波。其产生的原因是磁性材料磁化曲线的非线性（磁饱和、磁滞）。零点残余电压一般在几十毫伏以下。在实际使用时，应设法减小，否则将会影响传感器的测量结果。

2．螺线管式差动变压器的基本特性

差动变压器等效电路如图3-12所示。当次级开路时：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.46） |

式中：—初级绕组激励电压；

—激励电压的角频率；

—初级绕组激励电流；

—初级绕组直流电阻；

—初级绕组直流电感。

根据电磁感应定律，次级绕组中感应电势的表达式分别为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.47） |
|  |  | （3.48） |

式中：、—初级绕组与两次级绕组的互感。

由于次级两绕组反相串联，且考虑到次级开路，则由以上关系可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.49） |

输出电压的有效值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.50） |

上式说明：当励磁电压的幅值、角频率、初级绕组的直流电阻和电感为定值时，差动变压器输出电压仅仅是初级绕组与两个次级绕组之间互感之差的函数。因此，只要求出互感和对活动衔铁位移的关系式，再代入式（3.50）即可得到螺线管式差动变压器的基本特性表达式。

（1）活动衔铁处于中间位置时：

故输出电压为：

（2）活动衔铁向上移动时：

故输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.51） |

与同相。

（3）活动衔铁向下移动时：

故输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.52） |

与同相。

#### 3.2.2.2 差动变压器的测量电路

差动变压器式传感器的输出电压是调幅波。如果用交流电压表测量，它只能反映衔铁位移的大小，而不能反映移动的方向。为了判别衔铁的移动方向和消除零点残余电压，需要进行解调。实际测量时，常采用差动整流电路和相敏检波电路进行解调。

1. 差动整流电路

全波差动整流电路如图3-14所示。

  
图3-14 全波差动整流电路

图3-14所示的全波差动整流电路将差动变压器的两个次级电压分别整流，然后将其整流的电压或电流的差值作为输出。由电路结构可知，不论两个次级线圈的输出瞬时电压极性如何，流经电容C1的电流方向总是从2到4，流经电容C2的电流方向总是从6到8，故整流电路的输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.53） |

当衔铁在中间位置时，。然而，当衔铁在零位以上或以下时，输出电压的极性相反，这使得零点残余电压能够自动抵消。可见，这种电路结构简单，不需要参考电压，无需考虑相位调整和零点残余电压的影响。它对感应和分布电容不敏感，并且经差动整流后变成直流输出，便于远距离输送。因此，这种电路得到了广泛的应用。

2. 相敏检波电路

相敏检波电路具有鉴别信号相位和选频的能力。差动相敏检波电路的形式较多，其中二极管全波相敏检波电路如图3-15所示。为差动变压器的输入电压。为的同频参考电压，且。为了提高检波效率，常取。在相敏检波电路中，作用于变压器，作用于变压器。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）电路中电流极性 | （b）电路中电压极性 |

图3-15 二极管全波相敏检波电路

（1）当时，在的作用下，正半周二极管D3、D4导通，电流、从反方向流过电表。只要，且D3、D4性能相同，通过电表的电流就等于零，故输出为零。负半周时，D1、D2导通，、反相，输出仍为零，如图3-15（a）所示。

（2）当时，有以下两种情况：

1)当和同相时，有两种可能情况。正半周时，电路中电压极性如图3-15（b）所示。由于，D3、D4导通，但作用于D4两端的信号是，增加，而作用D3两端的电压为，减小，则（为正）。负半周时，D1、D2导通，在和作用下，增加，减小，，输出仍为正。

2)当和反相时，亦有两种情况。负半周时，D3和D4导通，但增加，减小，，输出为负。正半周时，，同样输出为负。

因此，上述相敏检波电路，可以通过电表的平均电流的大小和方向来判别差动变压器的位移大小和方向。

### 3.2.3 电涡流式传感器

电涡流式传感器是根据涡流效应制作而成的一种测量装置。所谓涡流效应，指的是当金属导体处于交变磁场中时，导体内部会产生呈旋涡状的闭合回线的感应电流（称为电涡流）。

电涡流式传感器可以非接触地连续测量位移、厚度、表面温度、速度、压力和材料损伤等。同时，它具有体积小、灵敏度高、测量线性范围大和频率响应宽等特点。

#### 3.2.3.1 电涡流式传感器的工作原理

根据法拉第定律，当传感器线圈通以正弦交变电流时，线圈周围空间必然产生正弦交变磁场。这会使置于此磁场中的金属导体感应电涡流，而又会产生新的交变磁场。的存在将抵消原磁场的变化。由于磁场的作用，涡流要消耗一部分能量。这会导致传感器线圈的等效阻抗发生变化，如图3-16所示。

  
图3-16 电涡流式传感器的原理结构

由此可知，线圈阻抗的变化完全取决于被测金属导体的电涡流效应。电涡流效应与被测体的电阻率、磁导率、几何形状、线圈的几何参数、线圈中励磁电流频率以及线圈与导体间的距离有关。因此，传感器线圈受电涡流影响时的等效阻抗的函数关系式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.54） |

式中：—线圈与被测体的尺寸因子。

如果保持上式中其他参数不变，而只改变其中一个参数，传感器线圈阻抗就仅仅是这个参数的单值函数。可以通过与传感器配用的测量电路测出阻抗Z的变化量，从而实现对该参数的测量。

#### 3.2.3.2 电涡流式传感器的等效电路

电涡流式传感器与被测金属导体的等效电路如图3-17所示。

  
图3-17 电涡流式传感器与被测金属导体的等效电路

金属导体被抽象为一短路线圈，它与传感器线圈磁性耦合。两者之间定义一个互感系数表示耦合程度，该系数随间距的增大而减小。为电涡流短路环等效电阻，其表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.55） |

式中：—电涡流短路环等效电阻；

—电涡流的深度（，可见频率越高，电涡流渗透的深度就越浅，趋肤效应越明显）；

、—短路环的外径和内径。

根据基尔霍夫第二定律，可列出如下方程：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.56） |

式中：—线圈励磁电流角频率；

、—线圈电阻和电感；

—短路环等效电感；

—短路环等效电阻；

—互感系数。

由式（3.56）解得等效阻抗Z的表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.57） |

式中：—线圈受电涡流影响后的等效电阻；

—线圈受电涡流影响后的等效电感。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.58） |
|  |  | （3.59） |

线圈的等效品质因数Q值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.60） |

综上所述，根据电涡流式传感器的简化模型和等效电路，运用电路分析的基本方法得到的式（3.58）～式（3.60），为电涡流传感器基本特性表示式。

#### 3.2.3.3 电涡流式传感器的测量电路

用于电涡流传感器的测量电路主要有调频式电路和调幅式电路两种。

1. 调频式电路

将传感器线圈接入振荡回路中。当传感器与被测导体的距离发生变化时，传感器的电感会在涡流的影响下发生变化。这将导致振荡频率的变化。因此，这个变化的频率是距离的函数，可以表示为。可以使用数字频率计直接测量振荡频率。另外，也可以通过变换，使用数字电压表来测量相应的电压。调频式电路的示意图如附图3-18所示。

  
图3-18 调频式电路

振荡器的频率为:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.61） |

为了避免输出电缆的分布电容的影响，通常将、装在传感器内。

2. 调幅式电路

由传感器线圈、电容器和石英晶体组成的石英晶体振荡电路如图3-19所示。

  
图3-19 调幅式电路

石英晶体振荡器起恒流源的作用，给谐振回路提供一个频率（）稳定的激励电流，回路输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.62） |

式中：—回路的阻抗。

当金属导体远离或去掉时，并联谐振回路的谐振频率即为石英振荡频率。此时，回路呈现的阻抗最大，谐振回路上的输出电压也最大。然而，当金属导体靠近传感器线圈时，线圈的等效电感会发生变化。这会导致回路失谐，从而使输出电压降低。值得注意的是，是随距离的变化而变化的。因此，输出电压也会随的变化而变化。最后，输出电压经过放大和检波后，由指示仪表直接显示出的大小。

### 3.2.4 电感式传感器的应用

电感式传感器具有结构简单、灵敏度高、分辨率高、线性度好的特点，被广泛用于测量位移、压力、振动等物理量。下面以涡流式测温传感器为例，介绍电感式传感器的应用。

由电工技术可知，在较小的温度范围内，导体的电阻率与温度的关系为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.62） |

式中：—温度为时的电阻率；

—温度为时的电阻率；

—导体的电阻温度系数。

图3-20所示为涡流式测温传感器。

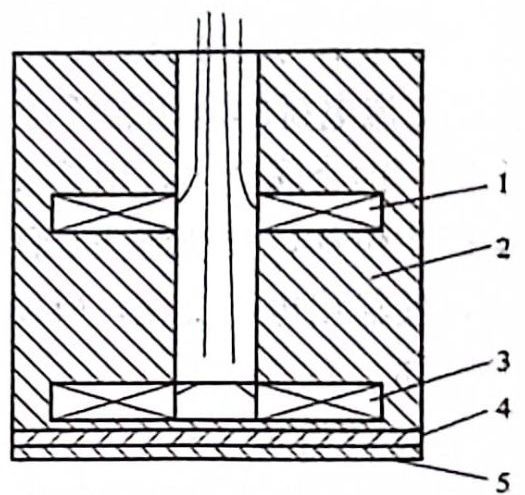
  
图3-20 涡流式测温传感器

图3-20 所示的涡流式测温传感器由补偿线圈1、管架2、测量线圈3、隔热衬垫4及温度敏感元件5组成，用来测量气体或液体的温度。根据式（3.62），被测物的温度变化将引起其电阻率的变化。若保持电涡流式传感器的各参数不变，当导体的电阻率随温度发生变化时，涡流传感器的输出亦将发生变化，其变化量正比于温度变化值，从而实现对被测物温度的测量。

## §3.3 电容式传感器

电容式传感器（Capacitance sensor）采用电容器作为传感元件，将各种物理量的变化转换为电容量的变化。电容式传感器具有低功率、高阻抗、小的静电引力和良好的动态特性，可进行非接触测量。电容式传感器广泛用于压力、位移、厚度、加速度、液位、物位、湿度和成分含量等物理量的测量。

### 3.3.1 电容式传感器的工作原理与结构形式

电容式传感器由敏感元件与转换元件为一体的电容量可变的电容器和测量电路组成，其工作原理如图3-21所示。

  
图3-21 电容式传感器工作原理

由物理学可知，对平行极板电容器，当忽略电容器边缘效应时，其电容量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.63） |

式中：—电容极板间介质的介电常数；

—真空介电常数；

—极板间介质的相对介电常数；

—两平行板所覆盖的面积；

—两平行板之间的距离。

可见，在、、三个参量中，改变其中任意一个量，均可使电容量改变。换句话说，如果被检测参数（如位移、压力、液位等）的变化引起、、三个参量之一发生变化，就可利用相应的电容量的改变实现该参数的测量。基于这个原理，电容式传感器可分为以下三大类：

（1）极距变化型电容式传感器；

（2）面积变化型电容式传感器；

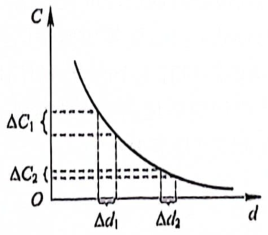
（3）介质变化型电容式传感器。

#### 3.3.1.1 变极距型电容式传感器

变极距型电容式传感器的原理图如图3-22所示。

  
图3-22 变极距型电容式传感器的原理图

由式（3.63）可知，电容量与极极间距的关系曲线为一双曲线，如图3-23所示。

  
图3-23 电容量与极极间距的关系曲线

当传感器的和为常数，初始极距为时，可计算出其初始电容量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.64） |

当间隙减小时，电容量将增大，因此：

电容的相对变化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.65） |

当时，将上式按泰勒级数展开，得：

可见，电容的相对变化与位移之间呈现的是一种非线性关系。在误差允许范围内通过略去高次项得到其近似的线性关系：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.66） |

故电容传感器的灵敏度为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.67） |

如果只考虑二次非线性项，忽略其他高次项，则非线性误差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.68） |

根据以上分析，变极距型电容式传感器只有在很小时，才有近似的线性输出。另外，在较小时，对于同样的变化所引起的可以增大，从而使传感器灵敏度提高。但过小，容易引起电容器击穿或短路。为此，极板间可采用高介电常数的材料（云母、塑料膜等）作介质，其原理图如图3-24所示，此时电容变为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.69） |

式中：—云母的相对介电常数，；

—空气的介电常数，；

—空气隙厚度；

—云母片的厚度。

  
图3-24 变极距型电容式传感器原理图

云母片的相对介电常数是空气的7倍，其击穿电压不小于，而空气仅为。因此有了云母片，极板间起始距离可大大减小。同时，式（3. 69）中的项是恒定值，这有助于改善传感器输出特性的线性度。

一般变极距型电容式传感器的起始电容在之间，极板间距离在的范围内，最大位移应小于间距的，故在微位移测量中应用最广。

#### 3.3.1.2 变面积型电容式传感器

变面积型电容式传感器通常分为线位移型和角位移型两大类。

1. 线位移变面积型电容式传感器

线位移变面积型电容式传感器的原理图如图3-25所示。

  
图3-25 线位移变面积型电容式传感器原理图

被测量的变化会引发动极板的移动，这种移动进而会改变两极板的有效覆盖面积，最终导致电容量的变化。当动极板相对于定极板沿长度方向平移时，电容变化量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.70） |

式中：—初始电容，。

电容相对变化量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.71） |

很明显，这种形式的传感器的电容相对变化量与水平位移呈线性关系。

2. 角位移变面积型电容式传感器

角位移变面积型电容式传感器原理图如图3-26所示。

  
图3-26 角位移变面积型电容式传感器原理图

当动极板发生角位移时，其与定极板间的有效覆盖面积将变为图3-26中阴影部分的面积，从而改变了两极板间的电容量。当时，初始电容量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.72） |

式中：—介质相对介电常数；

—两极板间距离；

—两极板间初始覆盖面积，。

当时，电容量改变为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.73） |

电容改变量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.74） |

电容相对变化量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.75） |

从式（3.75）可以看出，传感器的电容相对变化量与角位移呈线性关系。

#### 3.3.1.3 变介质型电容式传感器

变介质型电容式传感器原理图如图3-27所示。

  
图3-27变介质型电容式传感器原理图

设被测介质的介电常数为、液面高度为、变换器总高度为、内简外径为、外筒内径为，此时变换器电容值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.76） |

式中：—空气介电常数；

—由变换器的基本尺寸决定的初始电容值，。

电容改变量：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.77） |

由式（3.77）可知，变介质型电容式传感器的电容增量正比于被测液位高度。

### 3.3.2 电容式传感器的测量电路

#### 3.3.2.1调频电路

在调频电路中，电容式传感器被作为振荡器谐振回路的一部分。当输入量导致电容量发生变化时，振荡器的振荡频率就会相应地发生变化。频率可以直接作为测量系统的输出量，用以判断被测非电量的大小。然而，此时的系统是非线性的，不易校正。为了解决这个问题，必须加入鉴频器，将频率变化转换为电压振幅变化，从而可以经过放大后用仪器指示或记录仪记录下来。调频式测量电路原理如图3-28所示。

  
图3-28 调频式测量电路原理

在图3-28中，调频振荡器的振荡频率为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.78） |

式中：—振荡回路的电感；

—振荡回路的总电容，，其中为振荡回路固有电容，为传感器引线分布电容，为传感器的电容。

当被测信号为时，，则，所以振荡器有一个固有频率，其表示式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.79） |

当被测信号不为时，，这会导致振荡器的频率发生相应的变化。此时频率为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.80） |

调频电容传感器测量电路具有较高的灵敏度，可以测量高至级的位移变化量。信号的输出频率易于数字仪器测量，并可与计算机通信，抗干扰能力强，能够发送和接收信号，以实现遥测遥控。

#### 3.3.2.2 运算放大器式电路

运算放大器的放大倍数非常大，输入阻抗也很高。因此，它非常适合用作电容式传感器的测量电路，其原理如图3-29所示。

  
图3-29 运算放大器式电路原理

在图3-29中，为电容式传感器电容；是交流电源电压；是输出信号电压；是虚地点。根据运算放大器的工作原理可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.81） |

如果传感器是一只平板电容，则，代入式（3.81），可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.82） |

式中：“”号表示输出电压的相位与电源电压反相。

式（3.82）说明运算放大器的输出电压与极板间距离d呈线性关系。

运算放大器式电路虽解决了单个变极距型电容式传感器的非线性问题，但要求输入阻抗和放大倍数足够大。为保证仪器精度，还要求电源电压的幅值和固定电容值稳定。

#### 3.3.2.3 二极管双T形交流电桥

二极管双T形交流电桥电路原理图如图3-30所示。

  
图3-30二极管双T形交流电桥电路原理图

在图3-30中，是高频电源，它提供了幅值为的对称方波。VD1、VD2为特性完全相同的两只二极管，固定电阻。、为传感器的两个差动电容。为负载电阻。

当传感器没有输入时，。其电路工作原理如下：当为正半周时，二极管VD1导通，而VD2截止。在此时，电容开始充电。随后，当负半周出现时，电容上的电荷通过电阻和负载电阻放电。在此时，流过的电流为。当为负半周时，VD2导通、而VD1截止。在此时，电容开始充电。其等效电路如图3-31（b）所示。随后，当正半周出现时，通过电阻和负载电阻放电。在此时，流过的电流为。根据上述条件，电流，但方向相反。因此，在一个周期内，流过的平均电流为零。

|  |  |
| --- | --- |
| （a） | （b） |

图3-31二极管双T形交流电桥等效电路

若传感器输入不为0，则，。此时在一个周期内通过上的平均电流不为零，因此产生输出电压。输出电压在一个周期内平均值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.83） |

式中：—电源频率。

当已知，式（3.83）中

这里是一个常数。因此有：

由此可见，传感器的输出电压不仅与电源电压的频率和幅值有关，而且与T形网络中的电容和的差值有关。当电源参数确定后，输出电压只是电容和的函数。

该电路输出电压较高。当电源频率为，电源电压时，电容在pF变化，可以在负载上得到的直流输出电压。电路的灵敏度与电源电压幅值和频率有关，因此输入电源需要保持稳定。当幅值较高，使二极管VD1、VD2工作在线性区域时，测量的非线性误差很小。电路的输出阻抗与电容无关，而仅与及有关，约为。输出信号的上升沿时间取决于负载电阻，对于的负载电阻上升时间为左右，故可用来测量高速的机械运动。

### 3.3.3 电容式传感器的应用

电容式传感器具有结构简单、耐高温、耐辐射、分辨率高和动态响应特性好等优点，广泛用于压力、位移、加速度、厚度、振动、液位等物理量的测量中。下面以电容式压力传感器为例介绍电容式传感器的应用。

差动电容式压力传感器的结构图如图3-32所示。它由一个膜片动电极和两个在凹形玻璃上电镀成的固定电极组成差动电容器。差动结构的好处在于灵敏度更高、非线性得到改善。

  
图3-32 差动电容式压力传感器结构

在图3-32中，压力传感器的两个膜片室中充满了硅油。当左右两室分别承受压力和时，由于硅油的不可压缩性和流动性，差压将被传递到膜片上。当左右两侧相等，即差压时，膜片两侧的电容器的电容量完全相等。然而，当压力差大于零时，膜片会发生变形，动极板会向低压侧移动，导致一个电容器的电容量增加，另一个电容器的电容量减小。这种变化可以转化为电容的改变，从而实现了压力到电容的转换。这种转换与介电常数无关，只与压力差成正比。如果采用脉冲宽度调制电路，测量电路的输出电压将与压力差成线性关系。这种传感器的结构简单，灵敏度高，响应速度快，能够测量微小的压力差(0~0.75Pa)。

## §3.4 磁敏式传感器

磁敏式传感器（Magnetic Sensor）是通过磁电作用将被测量（如振动、位移、转速等）转换为电信号的传感器。磁电作用主要分为磁电感应和霍尔效应两种。因此，相应的磁敏式传感器可分为磁电感应式传感器和霍尔式传感器两种。磁电感应式传感器是根据电磁感应原理，利用导体和磁场的相对运动产生感应电动势的传感器；霍尔式传感器是根据霍尔效应，利用载流半导体在磁场中产生电动势的传感器。

### 3.4.1 磁电感应式传感器

磁电感应式传感器也称为电动式传感器或感应式传感器。它是根据电磁感应原理，利用导体和磁场的相对运动在导体两端产生感应电动势而制成的。这是一种有源传感器，即不需要辅助电源就能将被测对象的机械量直接转换为电信号。

磁电感应式传感器电路简单、性能稳定、输出阻抗小、输出功率大，具有一定的工作带宽（），适用于振动、转速、扭矩等测量。特别是，由于这种传感器具有“双向”性质，可以作为“逆变器”应用于近年来发展起来的“反馈式”（也称力平衡式）传感器。然而，这种传感器的尺寸和重量都比较大。

#### 3.4.1.1 磁电感应式传感器的工作原理及结构类型

磁电感应式传感器基于电磁感应原理。根据电磁感应定律，当导体在稳恒均匀磁场中沿垂直磁场方向运动时，导体内会产生感应电动势：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.84） |

式中：—线圈包围的磁通量；

—稳恒均匀磁场的磁感应强度；

—导体的有效长度；

—导体相对磁场的运动速度。

当一个匝线圈在磁场中旋转作切割磁力线运动时，如果设穿过线圈的磁通为，那么线圈内的感应电动势与磁通变化率有如下关系：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.85） |

式中：—线圈的面积；

—线圈在工作气隙磁场中的匝数；

—线圈的转速。

当传感器的结构参数（即、、）确定后，感应电动势与线圈相对磁场的运动速度（或）成正比。

磁通量的变化可以通过多种方式实现，例如磁铁与线圈之间的相对运动、磁路中磁阻的变化、恒定磁场中线圈面积的变化等。根据磁通量的变化方式，磁电感应式传感器通常分为恒磁通式和变磁通式两类。

1. 变磁通式磁电感应传感器

变磁通式磁电感应传感器通常设计为转速传感器，其输出为感应电动势的频率，该频率取决于磁通变化的频率。变磁通式转速传感器的结构分为开磁路和闭磁路两种。

开磁路变磁通式传感器结构图如图3-33所示。

  
图3-33 开磁路变磁通式传感器结构图

如图3-33所示，线圈和磁铁保持静止，而测量齿轮安装在被测旋转体上，并随其一起转动。每当齿轮转动一个齿，它与软铁之间构成的磁路的磁阻就会变化一次，从而使磁通也变化一次。这种变化使线圈中产生感应电势，其变化频率等于被测转速与测量齿轮上齿数的乘积。这种传感器适用于需要简单结构和小输出信号的场合，但由于加装齿轮存在危险，因此不适合测量高转速。

闭磁路变磁通式传感器结构图如图3-34所示。

  
图3-34 闭磁路变磁通式传感器结构图

如图3-34所示，闭磁路变磁通式传感器由装在转轴上的内齿轮、装在外壳上的外齿轮、永久磁铁和感应线圈组成。这里，内齿轮和外齿轮的齿数是相同的。当转轴连接到被测转轴上时，外齿轮保持静止，而内齿轮随被测轴转动。这种内外齿轮的相对转动导致气隙磁阻产生周期性变化，进而引起磁路中磁通的变化，从而在线圈内产生周期性变化的感应电动势。显然，感应电动势与被测转速成正比。

2. 恒磁通式磁电感应传感器

恒磁通式磁电感应传感器的磁路系统产生恒定的直流磁场。由于磁路中的工作气隙保持固定，气隙中的磁通也保持恒定。它的运动部件可以是线圈（动圈式），如图3-35（a）所示，也可以是磁铁（动铁式），如图3-35（b）所示。这两种恒磁通式磁电感应传感器的工作原理是完全相同的。

  
图3-35 恒磁通式磁电传感器结构图

当被测振动体振动时，壳体会随之一起振动。由于运动部件质量大且弹簧柔软，当振动频率高时（远大于传感器固有频率），运动部件惯性大，无法及时跟随振动，几乎静止。永久磁铁与线圈之间的相对运动速度接近振动体的振动速度。这种相对运动切割磁力线，从而产生感应电动势，其值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.86） |

式中：—工作气隙磁感应强度；

—每匝线圈平均长度；

—线圈在工作气隙磁场中的匝数；

—相对运动速度。

因此，一旦确定了传感器的结构参数，感应电动势就会与相对运动速度成正比。通过测量感应电动势的大小，就可以确定被测速度的大小。

#### 3.4.1.2 磁电感应式传感器的测量电路

磁电感应式传感器可以直接输出感应电动势信号，且通常具有较高的灵敏度，因此其测量电路不需要高增益放大器。然而，磁电感应式传感器仅用于测量动态量，可以直接测量振动物体的线速度或旋转体的角速度。如果在其测量电路中接入积分电路（）或微分电路，那么就可以测量位移或加速度。图3-36所示为磁电感应式传感器的测量电路。

  
图3-36 磁电感应式传感器的测量电路

### 3.4.2 霍尔式传感器

霍尔元件是利用霍尔效应制成的磁传感器。这种器件以霍尔效应为工作基础，可以检测磁场及其变化，被广泛应用于各种与磁场有关的场合中。

霍尔器件具有许多优点，如结构牢固、体积小、重量轻、寿命长、安装方便、功耗低、频率高、耐振动，不怕灰尘、油污、水汽及盐雾等的污染或腐蚀。

#### 3.4.2.1 霍尔效应

霍尔效应是物质在磁场中表现的一种特性，由运动电荷在磁场中受到洛伦兹力的影响而产生。简单来说，当电流通过放置在磁场中的导体或半导体时，会在电流和磁场方向垂直的地方产生电动势。这种现象称为霍尔效应，而产生的电动势被称为霍尔电动势，如图3-37所示。

  
图3-37 霍尔效应原理图

在电场的作用下，电流使金属中的自由电子或半导体中的载流子（电子）做定向运动。此时，每个电子受洛伦兹力的作用，其大小为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.87） |

式中：—电子电荷；

—磁场的磁感应强度；

—电子运动平均速度。

如图3-37所示，的方向是向内的。此时，电子不仅沿电流反方向做定向运动，而且在的作用下发生偏转。这导致金属导电板内侧积累电子，外侧则失去电子而带正电。这样，就形成了一个附加的内电场，也称为霍尔电场，其电场强度为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.88） |

式中：—霍尔电动势。

由于霍尔电场的存在，定向运动的电子不仅受洛伦兹力作用，同时也受到霍尔电场力的影响。霍尔电场力的大小为，这种力阻碍了进一步的电荷积累。由于内、外侧电荷的累积增加，霍尔电场及其对电子的影响力随之增大。当霍尔电场力与洛伦兹力的大小相等但方向相反时，即满足：

有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.89） |

这样一来，电荷不再向两侧面积累，达到平衡状态。

若金属导电板单位体积内电子数为，电子定向运动平均速度为，则激励电流，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.90） |

将式（3.90）代入式（3.89）得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.91） |

将上式代入式（3.88）得：

令，称之为霍尔常数，其大小取决于导体载流子密度，则：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.92） |

式中：称为霍尔片的灵敏度。

由式（3.92）可见，霍尔电势正比于激励电流和磁感应强度，其灵敏度与霍尔系数成正比而与霍尔片厚度成反比。为了提高灵敏度，霍尔元件常制成薄片形状。

如果磁场与薄片法线有夹角，那么：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.93） |

由于材料的电阻率，因此，霍尔系数与载流体材料的电阻率和载流子迁移率的关系为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.94） |

由式（3.94）可知，霍尔常数等于霍尔片材料的电阻率与电子迁移率的乘积。若要霍尔效应强，则希望有较大的霍尔系数，因此要求霍尔片材料有较大的电阻率和载流子迁移率。一般金属材料载流子迁移率很高，但电阻率很小；而绝缘材料电阻率极高，但载流子迁移率极低。因此，只有半导体材料才适合制造霍尔片。

目前，常用的霍尔元件材料包括锗、硅、砷化铟、锑化铟等半导体材料。其中，N型锗易于加工制造，具有良好的霍尔系数、温度性能和线性度。N型硅的线性度最佳，其霍尔系数和温度性能与N型锗相同。锑化铟对温度最为敏感，尤其在低温范围内，其温度系数较大，但在室温时，其霍尔系数也较大。砷化铟的霍尔系数和温度系数均较小，但其输出特性线性度良好。

#### 3.4.2.2 霍尔元件的基本结构

霍尔元件由霍尔片、四根引线和壳体构成，如图3-38（a）所示。霍尔片是一块矩形半导体单晶薄片，四根引线分别为：1、1＇引线（激励电极或控制电极），用于施加激励电压或电流；2、2＇引线（霍尔电极），用于霍尔输出。霍尔元件的壳体由非导磁金属、陶瓷或环氧树脂制成。在电路中，霍尔元件通常用两种符号表示，如图3-38（b）所示。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）外形结构示意图 | （b）图形符号 |

图3-38 霍尔元件

#### 3.4.2.3 霍尔元件的基本特性

1. 额定激励电流和最大允许激励电流

当霍尔元件自身温升时，所流过的激励电流称为额定激励电流；以元件允许最大温升为限制所对应的激励电流称为最大允许激励电流。霍尔电势与激励电流之间存在线性关系，即激励电流增加时，霍尔电势同样也会增加。因此，在使用霍尔元件时，需要特别关注其散热条件的改善，以允许更大的激励电流通过，进而提高霍尔电势。

2. 输入电阻和输出电阻

激励电极之间的电阻值称为输入电阻。霍尔电极的输出电势可以视为一个电压源，而该电压源的内阻就是输出电阻。这些电阻值是在磁感应强度为零且环境温度为时所确定的。

3. 不等位电势和不等位电阻

当霍尔元件的激励电流为I且所处位置的磁感应强度为零时，理论上其霍尔电势应为零。然而，实际测量中发现，霍尔电势并非为零。这种情况下测得的空载霍尔电势被称为不等位电势，如图3-39所示。不等位电势的产生可能有以下几个原因：

（1）霍尔电极安装位置不对称或不在同一等电位面上。

（2）半导体材料不均匀造成了电阻率不均匀或几何尺寸不均匀。

（3）激励电极接触不良造成激励电流不均匀分布等。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）位置不对称 | （b）等位面倾斜 |

图3-39 不等位电势示意图

不等位电势也可用不等位电阻表示，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.95） |

式中：—不等位电势；

—不等位电阻；

—激励电流。

由式（3.95）可以看出，不等位电势就是激励电流流经不等位电阻所产生的电压。

4. 寄生直流电势

在外加磁场为零的条件下，用交流激励霍尔元件时，霍尔电极的输出除了交流不等位电势外，还会产生直流电势，这被称为寄生直流电势。寄生直流电势的产生可能有以下几个原因：

（1）激励电极与霍尔电极接触不良，形成非欧姆接触，造成整流效果。

（2）两个霍尔电极大小不对称，则两个电极点的热容不同，散热状态不同而形成极间温差电势。

寄生直流电势的值通常低于，是影响霍尔片温度漂移的主要因素之一。

5. 霍尔电势温度系数

在一定的磁感应强度和激励电流下，当温度每变化时，霍尔电势变化的百分比被定义为霍尔电势温度系数。这个系数也可以被视为霍尔系数的温度系数。

#### 3.4.2.4 霍尔式传感器的测量电路

霍尔式传感器的基本测量电路如图3-40所示。

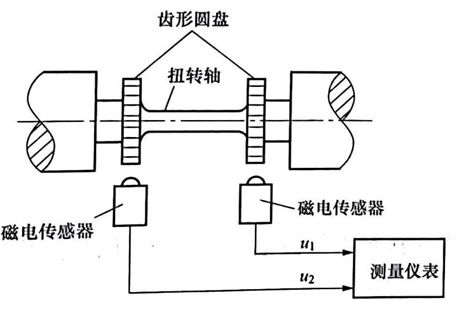
  
图3-40霍尔式传感器的基本测量电路

如图3-40所示，电源提供激励电流；可变电阻用于调节激励电流的大小；为输出霍尔电动势的负载电阻，通常用于表征显示仪表、记录装置或放大器的输入阻抗。

### 3.4.3 磁敏式传感器的应用

#### 3.4.3.1磁电式扭矩传感器

磁电式扭矩传感器的工作原理图如图3-41所示。

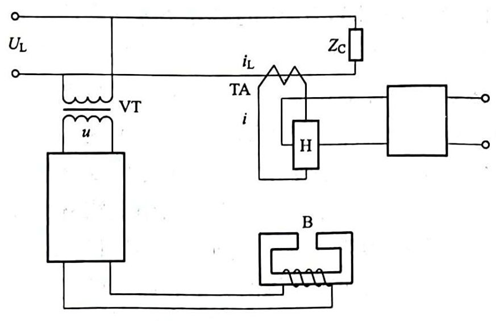
  
图3-41 磁电式扭矩传感器的工作原理图

如图3-41所示，驱动源和负载之间的扭转轴两侧各装有一个齿形圆盘，每个齿形圆盘旁边都配有一个相应的磁电传感器。

当齿形圆盘旋转时，圆盘齿的凸凹会引起磁路气隙的变化，从而使磁通量发生变化。这种变化在线圈中感应出交流电压，其频率等于圆盘上齿数与转速的乘积。当扭矩作用在扭转轴上时，两个磁电传感器输出的感应电压和会产生相位差。这个相位差与扭转轴的扭转角成正比，因此传感器可以将扭矩引起的扭转角转换为相应电位差的电信号。

#### 3.4.3.2霍尔功率传感器

霍尔功率传感器的工作原理图如图3-42所示。

  
图3-42 霍尔功率传感器的工作原理图

在图3-42中，负载电流经电流互感器变换后送到霍尔元件的控制端，则控制电流正比于负载电流。负载电压通过电压互感器变换后，被接到霍尔元件的励磁电路上。励磁线圈被绕在有开口间隙的铁芯上，而霍尔元件则被放置在开口间隙处。这样，铁芯中的磁感应强度就会与负载电压成正比。与之间的相位差可以通过阻容相位补偿网络进行消除。这样就可以保证与电压互感器的副边电压保持同相位。

当负载电压及电流都是交流量时，霍尔输出电压中也包含交流成分。设电压互感器及电流互感器的输出分别为，，其中、是两互感器的变比，是负载功率因数角，则霍尔输出电压的瞬时值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.96） |

可见，中的直流分量即为有功功率。因此，必须将输出电压中的二次谐波分量滤掉，才能得到准确的有功功率。

从以上分析可知，用霍尔元件组成功率传感器，其技术难点在于：如何确保霍尔元件的磁感应强度与负载电压同相位以及如何滤掉输出电压中的交流分量而不损失直流成分。

## §3.5 其它新型传感器

### 3.5.1 半导体传感器

半导体传感器（Semiconductor Sensor）是利用半导体材料的各种物理特性、化学特性和生物特性，将力、热、光、磁、气、湿度、射线、离子等一些物理量、化学量和生物量的变化转换为便于处理的电信号的传感器。随着材料科学和固体物理效应的不断发现，目前已陆续制成了热敏、光敏、力敏、磁敏、气敏、湿敏等多种类型的传感器，并在工业控制领域和人们的日常生活中得到越来越广泛的应用。

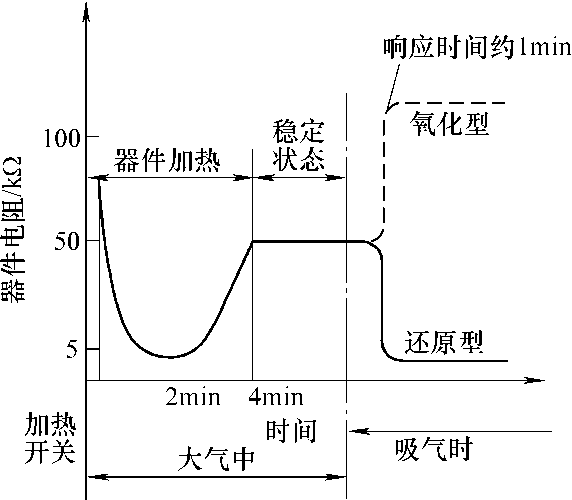
半导体传感器以半导体敏感元件为核心，具有灵敏度高、响应速度快、结构简单、体积小、质量轻、成本低、便于集成化和智能化等优点。然而，在某些情况下，由于其特性分散性、温度不稳定性以及易受干扰性，半导体传感器的应用受到了很大的限制。

接下来，将以常用的电阻半导体式气体传感器为例，简要介绍半导体传感器的工作原理与应用。

#### 3.5.1.1 工作原理

电阻半导体式气体传感器的敏感元件由氧化锡、氧化锌等金属氧化物材料制成。这种传感器通过检测敏感材料接触气体时电阻值的变化，来确定气体的成分或浓度。传感器的核心部分是气敏电阻，通常根据化学计量比和杂质缺陷合成。为了提高气敏元件对某些气体成分的选择性和灵敏度，可以在合成材料时添加金属元素催化剂，例如钯、铂、银等。

当N型半导体吸附气体时，元件的阻值会发生变化，如图3-43所示。

  
图3-43 N型半导体吸附气体时元件阻值变化

如图3-43所示，当半导体气敏元件被加热至稳定状态并接触到气体时，气体分子会在器件表面进行物理吸附和自由扩散，从而失去运动能量。同时，部分分子会蒸发，剩余的分子则通过热分解在器件表面形成化学吸附。若元件的功函数小于吸附分子的电子亲和力，吸附分子将从元件中夺取电子并转化为负离子吸附。这类气体，如和等，被称为氧化型或电子接收型气体。相反，若元件的功函数大于吸附分子的离解能，吸附分子将向器件释放电子并转化为正离子吸附。这类气体，如、CO、碳氢化合物和醇类等，被称为还原型或电子供给型气体。

由半导体表面态理论可知，当氧化型气体吸附到N型半导体（如、、或还原型气体吸附到P型半导体（如、）上时，将使多数载流子（价带空穴）减少、电阻增大。相反，当还原型气体吸附到N型半导体上，或氧化型气体吸附到P型半导体上时，将使多数载流子（导带电子）增多，电阻下降。图3-43显示了气体接触到N型半导体时所产生的元件阻值变化。规则总结如下：

* 氧化型气体+N型半导体：多数载流子数下降，电阻增加；
* 还原型气体+N型半导体：多数载流子数增加，电阻减小；
* 氧化型气体+P型半导体：多数载流子数增加，电阻减小；
* 还原型气体+P型半导体：多数载流子数下降，电阻增加。

空气中的氧成分大体上是恒定的，因此氧的吸附量也是恒定的，气敏元件的阻值大致保持不变。如果被测气体进入这种环境中，元件表面将产生吸附作用，元件的阻值将随气体浓度变化。通过观察浓度与电阻值的变化关系即可得知气体的浓度。

气敏元件的灵敏度特性如图3-44所示。

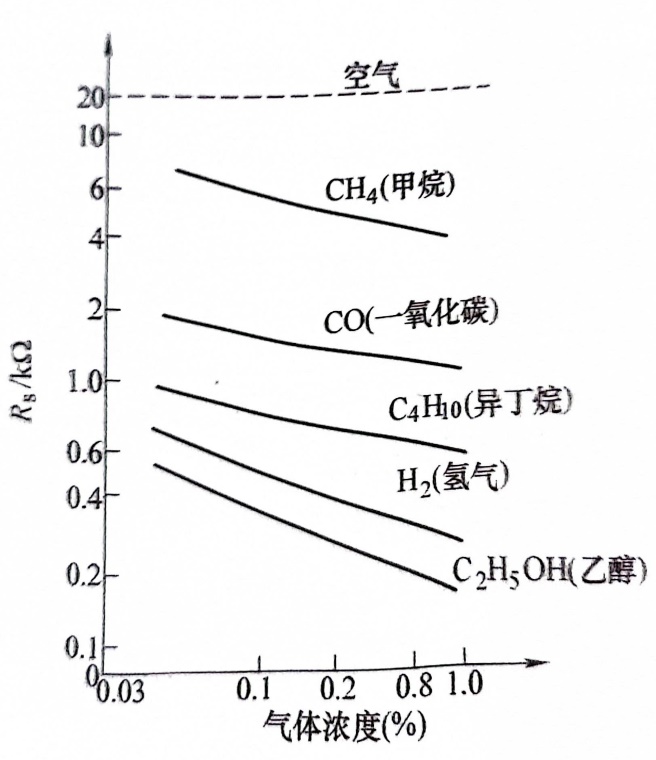
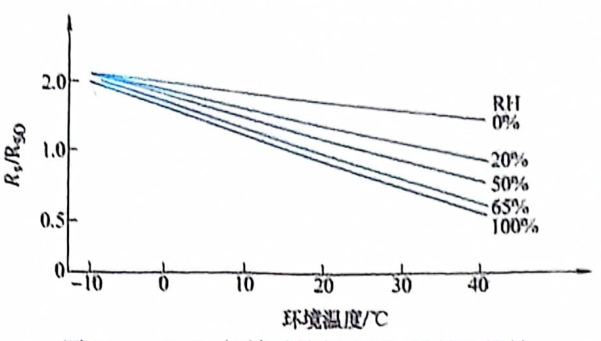
  
图3-44 气敏元件的灵敏度特性

图3-44显示了不同气体浓度下气敏元件的电阻值。由图可见， “喝”白酒后也会“飘”（电阻值下降）。薄膜对多种气体敏感，因此如何提高气敏器件的选择性和灵敏度一直是研究的重点。主要的改进措施包括在基体材料中加入不同的贵金属或金属氧化物催化剂，设置合适的工作温度，利用过滤设备或透气膜过滤敏感气体等。

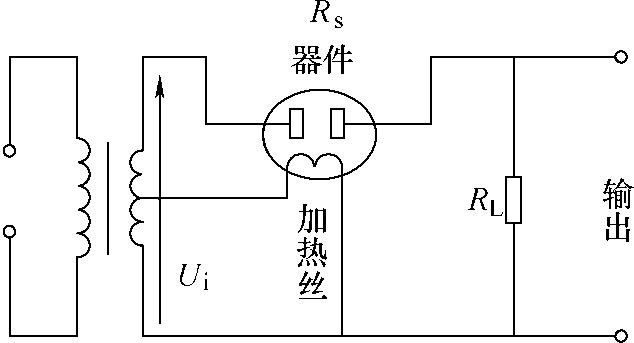
气敏元件的电阻-温湿度特性如图3-45所示。

  
图3-45 气敏元件的电阻-温湿度特性

在图3-45中，代表其在一般温湿度条件下（、）的电阻值。由此可见，其电阻值易受环境温湿度的影响。因此，这类器件在标定之前，通常需要1～2周的老化时间。也就是说，在不通电的状态下放置一段时间，使其阻值趋于稳定。另外，在使用时通常需要加入湿度补偿，以提高检测精度和可靠性。

气敏电阻通常工作在高温状态下，其工作温度一般在至之间。这种高温环境可以去除气敏电阻上附着的油、雾、尘埃等有害物质，并加速气体与金属氧化物的氧化还原反应，从而提高气敏电阻的灵敏度和响应速度。因此，气敏元件的结构上包含电阻丝加热器。

气敏电阻被分为加热支路和测试支路，分别接入所用的测量电路，如图3-46所示。

  
图3-46 气敏电阻的基本测量电路

当所测气体浓度变化时，气敏电阻值会随之变化。由于气敏电阻与负载电阻是串联的，输出电压也将随之变化。输出电压的大小可表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.97） |

式中：—气敏电阻测试支路的电阻；

—负载电阻（兼作取样电阻）。

由上式可知，当减小时，输出电压增大；反之，当增大时，输出电压减小。因此，可以通过测量输出电压来测得气敏元件的阻值，进而确定被测气体的成分和浓度。

#### 3.5.1.2 电阻式半导体气体传感器的特点

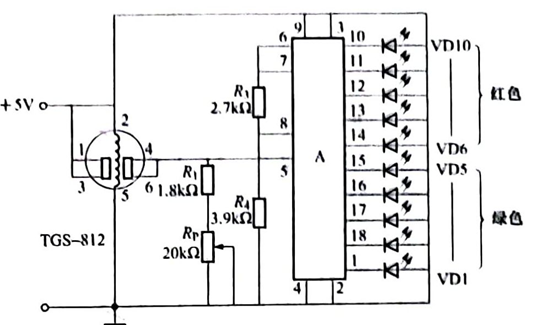
电阻式半导体气体传感器的优点在于工艺简单、价格低廉、使用方便。当气体浓度发生变化时，其响应速度较快。即使在低浓度下，其灵敏度也较高。然而，其也存在一些缺点，例如老化速度较快、气体识别能力较弱以及各器件之间的特性差异较大等。

目前电阻式气体传感器已广泛应用于液化石油气、管道煤气等可燃性气体的泄漏检测和（浓度）定限报警等领域。

#### 3.5.1.3半导体传感器应用

半导体传感器的主要应用领域包括工业自动化、遥测、工业机器人、家用电器、环境污染监测、医疗保健、医药工程和生物工程等。下面以酒精测试仪为例，介绍半导体传感器的应用。

酒精测试仪电路如图3-47所示。

  
图3-47 酒精测试仪电路

在图3-47的酒精测试仪电路中，选用TGS-812作为其气体传感器。显示驱动电路A共有10个输出端，每个输出端都可以驱动一个发光二极管。根据第5脚的电压高低，可以确定依次点亮发光二极管的级数。酒精含量越高，点亮的二极管级数就越大。上面5个发光二极管为红色，表示酒精含量超过安全水平；下面5个发光二极管为绿色，代表酒精含量在安全水平内，即不超过0.05％。当TGS-812气体传感器探测不到酒精时，其1、4脚间的电阻较大。这会使A的第5脚电平为低电平，导致A不工作，发光二极管不亮。然而，当气体传感器探测到酒精时，其1、4间的电阻会变低。这会使A的第5脚电平变高，从而推动A工作，驱动发光二极管点亮。酒精含量越高，TGS-S12的内阻阻值就越小，A的第5脚电平就越高，从而依次点亮更多的发光二极管。TGS-812的2和5脚是加热丝，用于加热以去除附着在敏感元件表面的尘垢和油污，从而加速气体的吸附，提高器件的灵敏度和响应速度。同时，的作用是调节第5脚的电压，使其在进行气体探测前处于低电平状态。

### 3.5.2光纤传感器

光纤传感器(Optical Fiber Sensor)是近年来随着光导纤维技术的发展而出现的一种以光作为信息载体的新型传感器。与以电作为信息载体的传感器相比，光纤传感器具有许多固有的优点。例如：

（1）传输光的介质光纤是由石英玻璃等绝缘材料制作的，具有良好的电绝缘性和抗电磁干扰性，适用于强电系统的测试；

（2）光纤信息传输损耗低、具有极高的灵敏度，适用于精密测量和遥测技术；

（3）光纤可以任意弯曲，柔性极好，适用于探测其他传感器无法测试的地方；

（4）光纤耐水浸、耐腐蚀、耐高温等，环境适应性好，有利于在核电业、航天机械、医疗器械、石油化工等特殊环境下使用。

目前已研制出多种光纤传感器，可用于位移、速度、加速度、液位、压力、流量、振动、水声、温度、电压、电流、磁场、核辐射等方面的测量。

#### 3.5.2.1光纤结构及导光原理

1. 光纤结构

光纤的结构示意图如图3-48所示。

  
图3-48 光纤的结构示意图

光纤呈圆柱形，通常由玻璃纤维芯（纤芯）、玻璃包皮（包层）两个向心圆柱的双层结构组成。

纤芯位于光纤的中心部位，光主要在这里传输。其折射率比包层折射率略大一些，因此两层之间形成了良好的光学界面，使得光线能在这个界面上反射传播。

2. 光纤导光原理及数值孔径

在开放空间中，光是沿直线传播的。然而，在光纤中，由于全内反射的特性，光被限制在光纤内部，可以走很远的距离。

设纤芯的折射率为（典型值是1.46∼1.51），包层的折射率为（典型值是），且。当光线从空气（折射率为）中射入光纤的一个端面，并与其轴线的夹角为，则在光纤内折射成角的光线B。然后，光线B以（）角入射到纤芯与包层的交界面上。由于纤芯与包层的折射率不等（即），光线B的一部分光被反射，成为反射光D；而另一部分光则折射成为折射光C。在这种情况下，入射光线与折射光线应满足：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.98） |

由于，当入射角达到某一特定值时，折射角将等于。此时，折射光沿界面传播，这种现象称为全反射。将使等于的值定义为临界角，记作。由式（3.98）可知，其临界角为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.99） |

若继续加大入射角，（即），光不再产生折射，而形成了光的全反射，光线被限制在纤芯中传播，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.100） |

为满足光在光纤内的全反射，光入射到光纤端面的临界入射角应满足：

所以：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.101） |

在实际应用中，光纤需要弯曲。只要满足全反射条件，光线仍然可以继续传播。这里的光线“转弯”实际上是由光的全反射形成的。

一般光纤所处环境为空气，则，由式（3.101）得

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.102） |

这样在界面上产生全反射，在光纤端面上的光线入射角为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.103） |

纤维光学中把式（3.103）中的定义为“数值孔径”（NA）。数值孔径反映了纤芯接收光的入射角范围。无论光源的发射功率有多大，只有当入射光处于的光锥内时，光纤才能导光。纤芯与包层的折射率差值越大，数值孔径就越大，光纤的集光能力越强。

在之前的讨论中，忽略了光在传播过程中的各项损耗。实际上，入射于光纤中的光存在各种损耗，如费涅耳反射损耗、光吸收损耗、全反射损耗、弯曲损耗等。因此，光纤不可能百分之百地将入射光的能量传播出去，因为其中一部分光在传播途中就会损失。

#### 3.5.2.2 光纤传感器的工作原理

以电为基础的传统传感器是一种将被测量转变为可测电信号的装置。光纤传感器则是一种将被测量转变为可测光信号的装置。光纤传感器由光发送器、敏感元件（光纤或非光纤的）、光接收器、信号处理系统以及光纤构成。光发送器发出的光通过光纤引导至敏感元件，其中光的某一性质受到被测量调制。已调制的光通过接收光纤耦合到光接收器，将光信号转换为电信号。信号处理系统将这些电信号转化为实用的测量结果。

从基本原理上看，光是一种电磁波，其波长范围从极远红外的1nm到极远紫外线的10nm。电磁波的物理作用和生物化学作用主要由其中的电场引起的。因此，在讨论光的敏感测量时，必须考虑电矢量的振动。通常用下式表示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.104） |

式中：—电场的振幅矢量；

—光波的振动频率；

—光相位；

—光的传播时间。

可见，只要使光的强度、偏振态、频率和相位等参量之一随被测量变化，或者说受被测量调制，就有可能获得所需的被测量信息。这可以通过对光的强度调制、偏振调制和相位调制等进行解调来实现。

#### 3.5.2.3光纤传感器的应用

光纤传感器具有许多固有优点，使其在许多方面优于以电作为信息载体的传感器。因此，光纤传感器广泛应用于位移、速度、加速度、液位、压力、流量、振动、水声、温度、电压、电流、磁场、核辐射等方面的测量。接下来，以光纤电流传感器为例，介绍光纤传感器的应用。

法拉第磁光效应如图3-49所示。

  
图3-49 法拉第磁光效应

图3-49所示的法拉第磁光效应表明，在磁场作用下，偏振光的振动面发生旋转，旋转的角度与光在物质中传播的距离以及磁场强度成正比，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.105） |

式中：—物质的费尔德常数。

法拉第磁光效应可以用来测量高压大电流。当高压输电线上的电流为时，如果在高压输电线上绕有N圈光纤，那么光纤中传输的线偏振光在高压输电线形成的磁场作用下，偏振面的旋转角度将为。利用式（3.105）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.106） |

如果这个磁场是由长直载流导线产生的，根据安培环路定律可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.107） |

式中：—载流导线中的电流强度；

—光纤缠绕半径；

根据法拉第磁光效应，引起光纤中线偏振光的偏转角为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.108） |

由检测及信号处理后得输出信号为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.109） |

式中：—受磁场作用光纤长度；

—光纤圈数。

由于光纤材料的费尔德常数非常小，因此使用这种方法测量的电流值可以在几十到几十万安之间。

|  |  |
| --- | --- |
| * 价值观 | 守正出新 |
| 电阻式、电感式和电容式传感器是相对传统的传感器，尽管出现较早，但在信号检测中仍然发挥着重要作用，并且不断发展。例如，智能手机的触摸屏就使用了电容式传感器。传统的不等于过时，只要是精华，仍然要坚持，并在此基础上不断发展，正所谓守正出新。  在传感器的发展历程中，守正创新精神发挥着至关重要的作用。  守正意味着坚守传感器发展的根本原则和核心价值。这包括对测量精度、稳定性、可靠性的不懈追求，遵循科学规律和工程标准，以及传承和发扬经过实践检验的成熟技术和方法。  例如，在压力传感器的发展中，始终坚守对压力测量准确性的追求，不断优化传统的压阻式、电容式等传感原理，使其在工业控制、航空航天等领域能够提供可靠的数据支持。  创新是传感器发展的动力源泉，体现在不断探索新的传感材料、原理和技术，以满足日益多样化和复杂化的应用需求。  以生物传感器为例，创新精神促使研究人员将生物技术与传感器技术相结合，开发出能够检测生物分子、细胞活动的新型传感器，为医疗诊断、环境监测等领域带来革命性的变化。  在微机电系统（MEMS）传感器的发展中，创新精神推动了制造工艺的突破，实现了传感器的微型化、集成化和智能化，使其广泛应用于智能手机、可穿戴设备等消费电子产品中。  守正与创新并非孤立存在，而是相互促进、相辅相成的。守正是创新的基础，只有在坚守根本原则和核心价值的前提下进行创新，才能确保传感器的发展方向正确，避免走入歧途。创新是守正的发展和延伸，通过不断创新，为传感器的性能提升和应用拓展注入新的活力，使传感器在保持传统优势的同时，不断适应新的需求和挑战。  总之，传感器发展中的守正创新精神，是在传承经典的基础上勇于开拓，是对科学真理的执着追求与对未知领域的大胆探索的有机结合，推动着传感器技术不断向前发展，为人类社会的进步和发展提供了强大的支撑。 | |

## 习题3

1. 金属丝的电阻随着它所受的机械变形(拉伸或压缩)的大小而发生相应的变化的现象称为金属的（ ）。

A. 电阻形变效应 B. 电阻应变效应 C. 压电效应 D. 压阻效应

2. 差动螺线管式电感传感器配用的测量电路有（ ）。

A．直流电桥 B．变压器式交流电桥

C．相敏检波电路 D．运算放大电路

3. 如将变面积型电容式传感器接成差动形式，则其灵敏度将（ ）。

A. 增大一倍 B. 增大两倍 C. 减小一倍 D. 保持不变

4. 磁电式传感器测量电路中引入积分电路是为了测量（ ）。

A. 位移 B. 速度 C. 加速度 D. 光强

5. 产生电阻应变片温度误差的主要因素有 和 。

6. 电感式传感器是建立在 基础上的，电感式传感器可以把输入的物理量转换为线圈的 或 的变化，并通过测量电路进一步转换为电量的变化，进而实现对非电量的测量。

7. 电容式传感器利用了将 的变化转化为 的变化来实现对物理量的测量。

8. 磁电式传感器是利用 而在 产生感应电势的原理进行工作的。

9. 霍尔传感器的灵敏度与霍尔系数成正比而与 成反比。

10. 光纤工作的基础是 。

11. 应变片的种类有哪些？各有什么特点？

12. 应变片产生温度误差的原因及减小或补偿温度误差的方法是什么？

13. 电感式传感器的工作原理是什么？根据转换原理，其可以分为哪几类？

14. 根据电容式传感器工作时变换参数的不同，可以将电容式传感器分为哪几种类型？各有何特点？

15. 试简述变磁通式和恒磁通式磁电感应传感器的工作原理。

16. 磁电式传感器与电感式传感器有哪些不同？

17. 什么是霍尔效应？霍尔电动势与哪些因素有关？

18. 如何提高霍尔传感器的灵敏度？

19. 试简述电阻式气体传感器的工作原理。

20. 试简述光纤传感器的工作原理。

# 第4章 追求真理，实事求是——传感器信号调理与处理

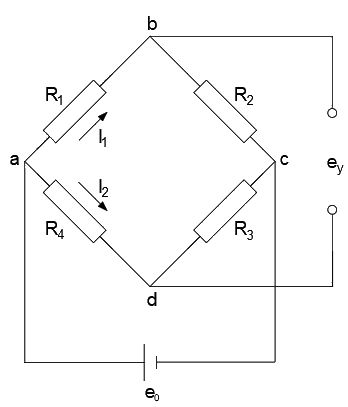
|  |  |
| --- | --- |
| 本章内容 | * 电桥 * 信号放大 * 信号滤波 * 信号转换 * 微弱信号检测   上一章主要介绍了常见传感器的工作原理。本章将重点介绍传感器信号处理与分析的相关技术，包括电桥、信号放大、信号滤波、信号转换以及微弱信号检测等内容。通过学习这些技术，有助于更好地理解传感器信号处理与分析的过程，并在实际应用中更好地运用这些技术。 |
| 知识目标 | * 1.掌握电桥的原理； * 2.掌握信号放大电路与信号转换电路的基本原理； * 3.了解滤波器的工作原理与分类、性能指标以及如何设计滤波器。 * 4.了解微弱信号检测的基本原理。 |
| 能力目标 | 熟悉常见传感器的工作原理和特性，具备运用数学工具对传感信号进行分析和建模的能力；学会设计和搭建传感器信号调理电路，能够优化电路参数以提高信号质量；了解微弱信号检测的基本原理。 |
| 思政目标 | * 培养科学思维和创新精神。鼓励学生在信号处理领域不断探索和尝试新的方法； * 强化工程伦理意识，使学生在开展数据分析时遵循职业道德和规范，保证数据的真实性和安全性； * 提升学生的抗压能力和解决问题的毅力，在面对复杂信号处理难题时能够保持积极的心态并努力克服； * 增强自主学习意识和终身学习观念，始终保持持续跟进传感器信号处理技术发展的积极性。 |
| 重点难点 | 重点：掌握电桥的原理；掌握信号放大电路与信号转换电路的基本原理；掌握滤波器的工作原理。  难点：掌握电桥的原理。  本章节适合各种学时设置的教学安排。 |

## §4.1 电桥

电桥是将电阻、电容、电感等参数的变化转换为电压或电流输出的一种测量电路，是测量电路中应用最广泛的电路。电桥利用比较法中的平衡原理进行测量，对微小信号具有较高的灵敏度，有利于获得准确的测量结果。电桥可以根据所采用的激励电源类型分为直流电桥和交流电桥；根据工作原理分为平衡电桥和不平衡电桥；按桥臂接入的阻抗元件不同，分为电阻电桥、电容电桥和电感电桥。

### 4.1.1 直流电桥

直流电桥通过改变四个桥臂中一个或多个的阻值，来引起电桥输出电压的变化，如图4-1所示。

  
图4-1 直流电桥的结构形式

#### 4.1.1.1 平衡条件

在图4-1的直流电桥中，a和b之间的电位差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.1） |

a和d之间的电位差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.2） |

则电桥的输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.3） |

电桥平衡时，即电桥无输出电压，根据式（4.3）可知：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.4） |

这就是电桥平衡的条件，即两个相对桥臂的电阻乘积相等。

#### 4.1.1.2 电压灵敏度

为了测量电阻应变片的微小电阻变化，通常需要使用放大器。由于放大器的输入阻抗远大于电桥的输出阻抗，电桥可以被视为处于开路状态。当产生应变时，如果电阻应变片电阻变化为（其中，工作电阻应变片的电阻为），并且其它桥臂保持不变，则电桥平衡被打破，其输出电压将不再为0。即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.5） |

假设桥臂比为。由于远小于，因此在分母中可以忽略。结合电桥的平衡条件，可以将式（4.5）简化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.6） |

电桥的电压灵敏度定义为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.7） |

电压灵敏度越大，意味着在电阻应变片的电阻相对变化保持不变的情况下，电桥的输出电压会更大，因此电桥的灵敏度也会更高。这就是电压灵敏度的物理含义。根据式（4.7），可以知道：

（1）电桥的电压灵敏度与电桥的供电电压成正比。如果想要提高电桥的灵敏度，可以增加电源电压，但是必须考虑到电阻应变片的功耗限制。

（2）电桥的电压灵敏度是桥臂电阻比值的函数，选择合适的值有助于获得更高的灵敏度。当固定时，可以通过计算导数来找到使最大的条件。即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.8） |

因此，当（通常）时，的值达到最大，此时电桥的电压灵敏度也最高。具体的表现为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.9） |
|  |  | （4.10） |

由此可知：当电源的电压和电阻相对变化量保持不变时，电桥的输出电压及其灵敏度也将保持不变，而且这与各桥臂电阻的阻值大小无关。

#### 4.1.1.3 非线性误差及其补偿

式（4.6）是在略去分母中的较小量后得到的理想值。输出电压的实际值应为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.11） |

由于近似处理造成的非线性误差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.12） |

如果是四等臂电桥，即，，则：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.13） |

对于电阻相对变化较大的情况，如果非线性误差不能满足要求，就必须消除这些误差。减少或消除这些非线性误差的方法包括：

（1）提高桥臂比。由式（4.12）可知，提高桥臂比可以减小非线性误差。然而，根据式（4.7），这将降低电桥的电压灵敏度。因此，为了保持灵敏度不降低，必须相应地提高供电电压。

（2）采用差动电桥。差动电桥分半桥差动和全桥差动两种情形，如图4-2所示。

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\qq251\Desktop\111.jpg  （a）半桥差动 | C:\Users\qq251\Desktop\111.jpg  （b）全桥差动 |

图4-2 差动电桥的结构形式

在图4-2（a）所示的半桥差动电路中，只有两个相邻桥臂接入电阻应变片，其输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.14） |

如果，，则得到：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.15） |
|  |  | （4.16） |

可见，与 呈线性关系，即半桥差动测量电路无非线性误差，且电桥电压灵敏度比单臂电阻应变片工作时提高了一倍。

若将电桥四臂都接入电阻应变片，即可构成全桥差动测量电路，如图4-2（b）所示。其输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.17） |

如果，且，则得到：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.18） |

可见，全桥差动测量电路不仅没有非线性误差，且电压灵敏度是单臂电阻应变片工作时的4倍。

### 4.1.2 交流电桥

当电桥的供桥电压为交流电压时，电桥转换电路为交流电桥。与直流电桥比，由于交流电桥双向供电，有利于消除零漂，所以实用的电桥转换电路多为交流电桥。交流电桥与直流电桥的不同点主要在以下两点：

（1）激励电源为交流电源；

（2）桥臂可以是电阻、电感或电容。

交流电桥的结构如图4-3所示。

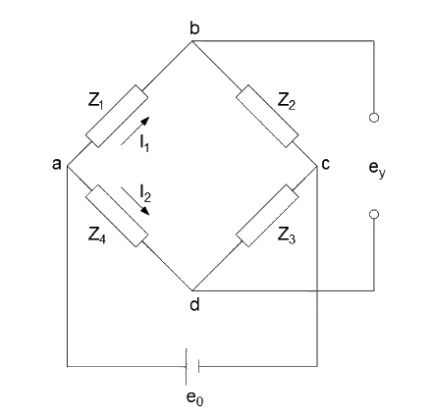


图4-3 交流电桥的结构

由图4-3可见，若在测量前电桥输出电压为0，电桥达平衡状态，则可得电桥平衡条件为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.19） |

正弦交流电压供电情况下，各桥臂阻抗可以用复数表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.20） |

将式（4.20）代入式（4.19）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.21） |

交流电桥平衡条件分为幅值和相角两个部分：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.22） |

其中，阻抗角表示桥臂电流与电压之间的相位差。当桥臂为纯电阻时，；若为电感性阻抗时，；若为电容性阻抗时，。桥臂结构可采取不同的组合方式，以满足相对桥臂阻抗角之和相等这一条件。常见的交流电桥有电容式电桥和电感式电桥两种，如图4-4所示。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）电容式电桥 | （b）电感式电桥 |

图4-4 常见的交流电桥的结构形式

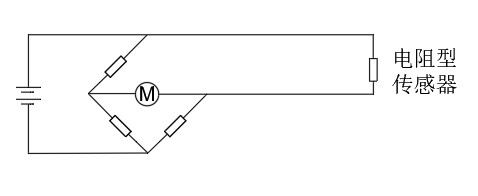
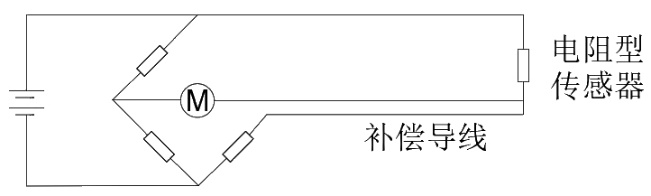
交流电桥测量精度主要受以下几个因素的影响：①电桥各元件之间的互感耦合；②泄漏电阻以及元件间、元件对地之间的分布电容；③邻近交流电路对电桥的感应影响等。

另外，交流电桥对其激励电源也有着严格的要求。激励电源的电压和频率必须具有很好的稳定性，否则交流电桥无法正常工作。

### 4.1.3 电桥操作的技术规范

#### 1. 连接导线的补偿

当传感器与电桥距离较远的时候，为了保证电桥的正常工作，需要对电路进行补偿，如图4-5所示。

  
（a）具有远距离连接传感器的电桥  
  
  
（b）带补偿电缆的电桥  
图4-5 电桥接线的补偿方法

#### 2. 电桥灵敏度的调节

在输入导线的一根或两根上串联可变电阻，即可实现电桥灵敏度的调节，如图4-6所示。

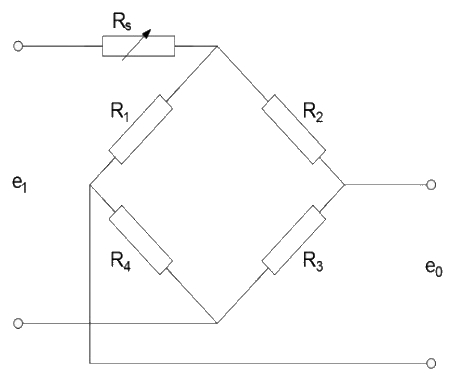


图4-6 电桥灵敏度的调节方法

在图4-6中，设电桥所有臂的电阻值均为，则由电压源所看到的电阻值亦将为。串联可变电阻后，由分压电路原理可得电桥的输入将被减小一个因子，如式（4.23）所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.23） |

称为电桥因子。调节串联电阻即可改变电桥的灵敏度。越小，电桥灵敏度越小；反之，越大，电桥灵敏度越大。

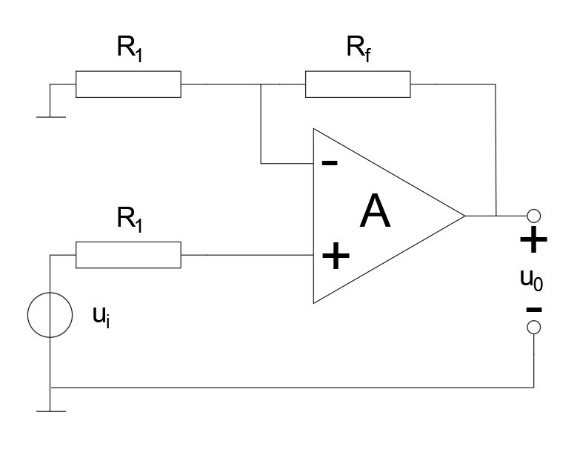
## §4.2 信号放大

信号放大电路可用于放大微弱的电压、电流或电荷信号。使用可调增益的放大器可以更好地与A/D转换器的输入电压范围匹配，以满足所需的分辨率。常见的放大电路类型包括同相放大器、反相放大器、仪表放大器、差动放大器、可变增益放大器和隔离放大器等。

信号放大电路主要分为三类：由分立元件组成的电路、由通用集成运算放大器组成的电路以及由单片集成芯片实现的电路。

### 4.2.1 同相放大电路和反相放大电路

图4-7所示的是同相运算放大电路。

  
图4-7同相运算放大电路

在图4-7所示的同相运算放大电路中，运放的同相输入端接信号，反向输入端通过电阻接地，输出电压与输入电压同相，通过电阻和反馈到运放的反相输入端，构成电压串联负反馈放大电路。

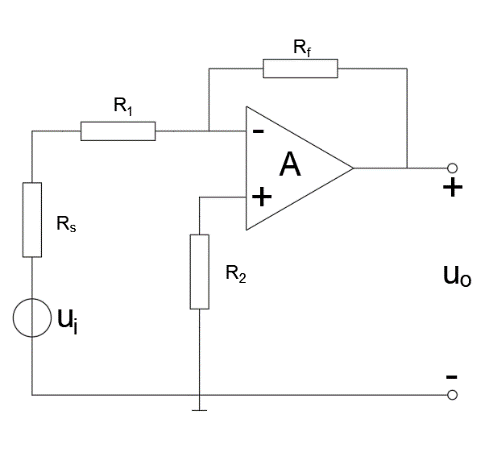
根据虚短和虚断原理，可求得输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.24） |

式中：—同相运算比例系数。

同相运算放大电路具有输入电阻高、输出电阻低和共模抑制比高的特点。

图4-8所示的是反相运算放大电路。

  
图4-8 反相运算放大电路

在图4-8所示的反相运算放大电路中，运放的反相输入端接信号，同向输入端通过电阻接地，输出电压与输入电压反相，通过电阻反馈到运放的反相输入端，构成负反馈放大电路。

根据虚短原理，可求得输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.24） |

式中：—反相运算比例系数。

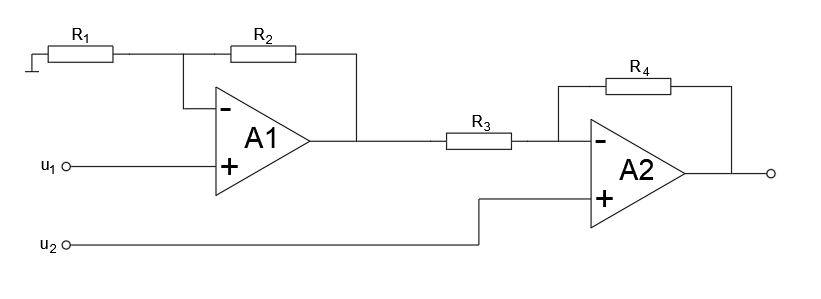
当两个电阻的值相等（即）时，反相放大器的增益将为-1，使输出电压成为输入电压的互补形式，即。这种类型的反相放大器配置通常被称为单位增益反相器，或简单地称为反相缓冲器。

### 4.2.2 仪表放大器

仪表放大器是一种精密差分电压放大器。这种放大器源于运算放大器，并在许多方面优于运算放大器。仪表放大器具有许多优点，包括高共模抑制比、高输入阻抗、低噪声、低线性误差、低失调漂移，以及增益设置灵活和使用方便。仪表放大器在多个领域有广泛的应用，如数据采集、传感器信号放大、高速信号调节、医疗仪器和高档音响设备。

#### 4.2.2.1 双运放组成的仪表放大器

如图4-9所示的是双运放电路组成的仪表放大器。

  
图4-9 双运放电路组成的仪表放大器

在图4-9所示的双运放电路组成的仪表放大器中，A1和A2都是理想运算放大器，并满足和。

A1为同相放大器，其输出电压为：

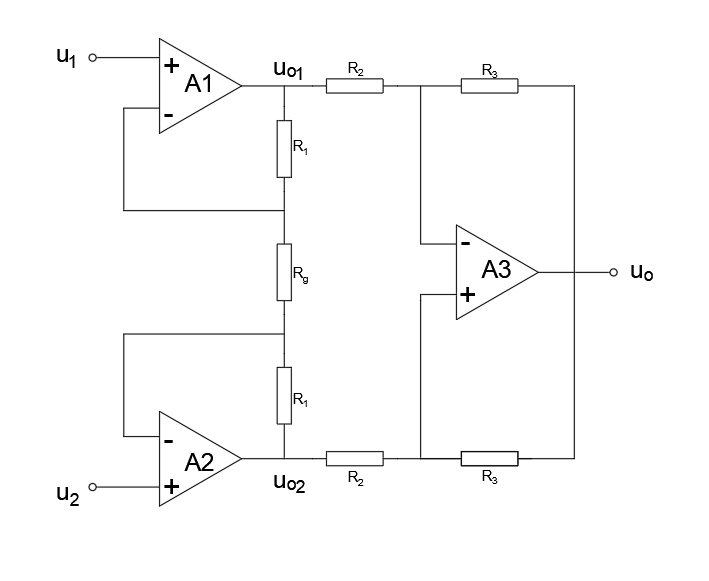
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.25） |

A2的反相输入电压为，同相输入电压为。根据电路线性叠加原理，其输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.26） |

#### 4.2.2.2 三运放组成的仪表放大器

如图4-10所示的是由两级放大器组成的三运放仪表放大器。

  
图4-10 三运放组成的仪表放大器电路

如图4-10所示的三运放仪表放大器由两级放大器组成。第一级是由运算放大器A1、运算放大器A2、电阻和电阻组成的同相输入式差动放大器，具有非常高的输入阻抗。第二级是由运算放大器A3、电阻和电阻组成的减法器，将双端输入变成单端输出。假设这三个运算放大器都是理想运算放大器，满足虚短和虚断条件。

根据电路线性叠加原理及基本定理可得，A1运算放大器的输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.27） |

A2运算放大器的输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.28） |

和作为A3运算放大器的输入信号，输出电压为：

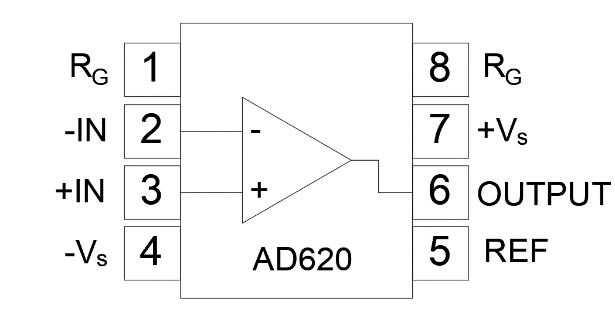
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.29） |

在集成运算放大器中，为外接电位器，可通过改变的大小改变增益。

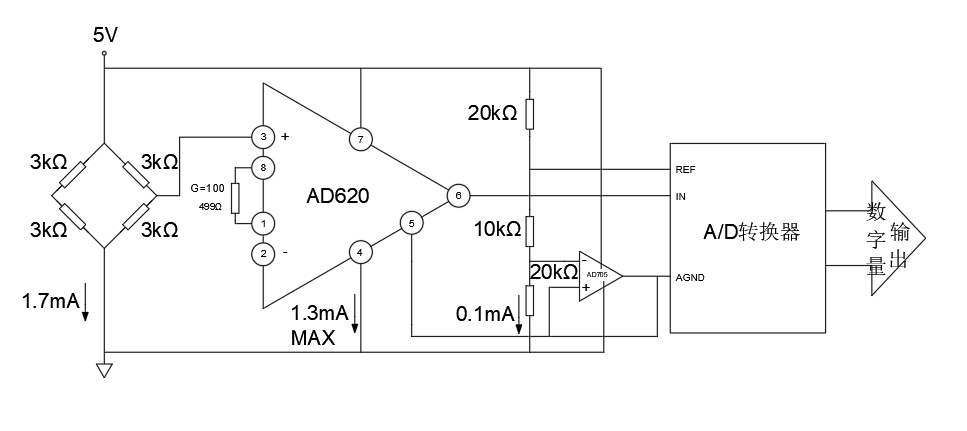
#### 4.2.2.3 集成仪表放大器

在高精度应用中，常采用集成仪表放大器，例如美国模拟器件公司的AD62x系列。以下将以AD620为例，对其进行详细的介绍。

AD620是一款低成本、高精度的单芯片仪表放大器，性能优于传统的三运放分立仪表放大器。采用经典的三运放改进设计，通过一个外部电阻即可设置增益，增益范围为1~10000。尺寸小于分立电路设计，且功耗更低，最大电源电流仅1.3A。AD620采用8引脚SOIC和DIP封装，如图4-11所示，适用于电池供电的便携式或远程应用，例如电子秤和医疗仪器。

  
图4-11 AD620的8引脚SOIC和DIP封装示意图

利用集成仪表放大器AD620实现的压力检测仪电路如图4-12所示。

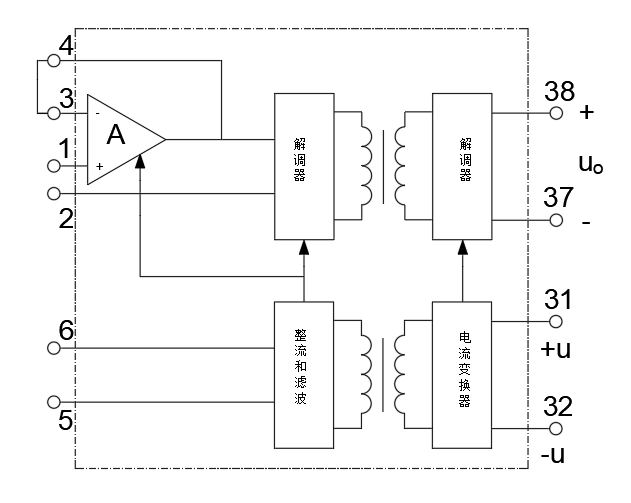
  
图4-12 压力检测仪电路原理图

在图4-12所示的压力检测仪电路中，压力传感器电桥使用5V电源供电，功耗极低，仅1.7mA。添加AD620和缓冲分压器(AD705)后，可以对信号进行调理，整个系统的电源电流仅为3.8mA。AD620的低噪声和低漂移特性使其非常适合于无创血压测量。

### 4.2.3 隔离放大器

隔离放大器是一种特殊的测量放大电路。其输入、输出和电源电路之间没有直接电路耦合，即信号在传输过程中没有公共接地端。输入电路和放大器输出之间通过欧姆隔离器件隔离。检测系统的传感器信号中往往包含高共模电压和干扰，采用隔离放大器可以隔离共模电压和干扰信号，同时放大有用信号。在工业中，隔离放大器用于防止电网电压因故障对低压信号电路（包括计算机）造成损坏。根据耦合方式的不同，隔离放大器可分为变压器耦合、电容耦合和光电耦合三种。

AD204是一种变压器耦合、微型封装的精密隔离放大器。它利用片内变压器实现输入和输出的电气隔离。AD204变压器耦合隔离放大器电路如图4-13所示。

  
图4-13 AD204变压器耦合隔离放大器电路

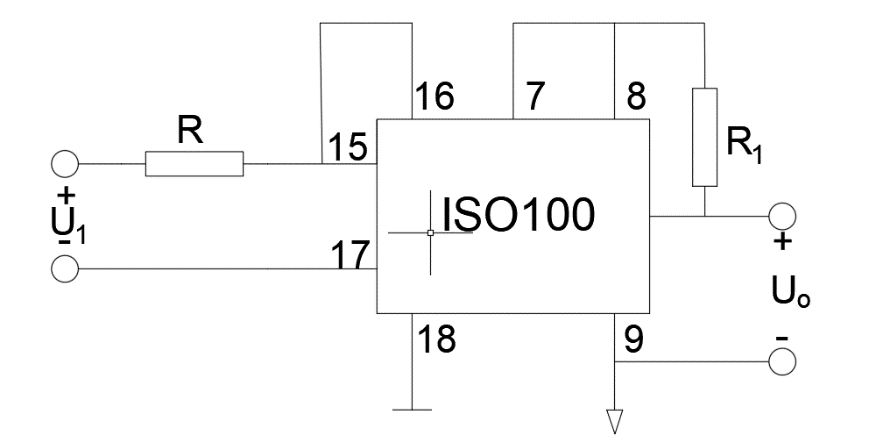
在图4-13所示的AD204变压器耦合隔离放大器电路中，1~4引脚为放大器的输入接线端，一般可接成跟随器，或根据需要，通过外接电阻接成同相放大器或反相放大器，以便放大输入信号。输入信号经调制器调制成交流信号后，通过变压器耦合送到解调器，最后通过37、38引脚输出。31、32引脚为芯片电源输入端。片内的DC/DC电流变换器将输入直流电压变换并隔离，然后将隔离后的电源供给放大器输入级，并通过5、6引脚输出。这样，隔离放大器的输入级与输出级不共地，从而达到输入、输出隔离的目的。

ISO122是精密的电容耦合隔离放大器，采用新颖的占空比调制解调技术。发送信号时，数字信号通过一个2pF的差动电容隔离栅，具有数字调制特性的隔离栅不会影响数字信号的完整性，因此具有极好的可靠性和高频瞬态抑制特性。放大器和栅电容被一同密封在DIP内。

光电耦合隔离放大器一般由三部分组成：光的发射、光的接收和信号放大装置。输入的电信号驱动发光二极管，使之发出一定波长的光。这个光被光探测器接收并转化为光电流，再经过进一步放大后输出，从而完成了电–光–电的转换，起到输入、输出和隔离的作用。由于光电耦合器输入、输出间通过光信号传送实现耦合，输入和输出之间没有直接的电气联系，因此具有很强的隔离作用。电信号传输具有单向性等特点，因此具有良好的电绝缘能力和抗干扰能力。ISO100光电耦合隔离放大器的结构如图4-14所示。

  
图4-14 ISO100光电耦合隔离放大器结构图

如图4-14所示，ISO100光电耦合隔离放大器由两个运算放大器A1和A2，两个恒流源和以及光电耦合器组成。光电耦合器有一个发光二极管和两个光电二极管与。的作用是从信号中引入反馈。的作用是将信号进行隔离耦合传送。ISO100光电耦合隔离放大器在实际应用中的基本接线如图4-15所示。

  
图4-15 光电耦合隔离放大器接线图

在图4-15中，和为外接电阻，用来调整放大器的增益。

## §4.3 信号滤波

由于传感器工作环境中的强电和电磁干扰，以及传感器和放大电路本身的影响，被测信号中往往夹杂多种频率成分的噪声。噪声干扰引起的输出信号变化与被测对象引起的输出信号变化对于传感器是无法分辨的，这势必影响测量结果的准确性。因此，检测系统中必须有相应的措施来减小和抑制干扰的影响。

滤波是一种信号处理方法，保持需要的频率成分，去除不需要的频率成分。滤波器是实现这种选频功能的电路，允许某一部分频率的信号顺利地通过，而另外一部分频率的信号则受到较大的抑制。滤波器中，信号能够通过的频率范围称为通带，信号受到很大衰减或完全被抑制的频率范围称为阻带。通带和阻带之间的分界频率称为截止频率。理想滤波器在通带内的电压增益为常数，在阻带内的电压增益为零。然而，实际滤波器的通带和阻带之间存在一定的过渡带。

### 4.3.1 滤波器的分类

滤波器的分类方式有多种。按所处理的信号，滤波器可分为模拟滤波器和数字滤波器两种。按所通过信号的频率范围，滤波器可分为低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器四种。按所采用的元器件，滤波器可分为无源滤波器和有源滤波器两种。按微分方程或传递函数的阶数，滤波器可分为一阶滤波器、二阶滤波器和高阶滤波器等。

#### 1. 模拟滤波器和数字滤波器

（1）模拟滤波器。模拟滤波器是一种能对模拟或连续时间信号进行滤波的电路和器件。

（2）数字滤波器。数字滤波器是由数字乘法器、加法器和延时单元组成的一种算法或装置。它的主要功能是对输入的离散信号进行运算处理，以改变信号的频谱。

#### 2. 低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器

滤波器可以根据所通过信号的频率范围分为四种类型：低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器，其幅频特性如图4-10所示，其中实线为理想滤波器的幅频特性曲线，虚线为实际滤波器的幅频特性曲线。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | | 低通滤波器 | 高通滤波器 | | 带通滤波器 | 带阻滤波器 | |  |
|  |  |

图4-16 滤波器的幅频特性

如图4-16所示，这四种滤波器的特点如下：

低通滤波器：允许信号中的低频或直流分量通过，抑制高频分量的干扰和噪声。

高通滤波器：允许信号中的高频分量通过，抑制低频或直流分量。

带通滤波器：允许一定频段的信号通过，抑制低于或高于该频段的信号、干扰和噪声。

带阻滤波器：抑制一定频段内的信号，允许该频段以外的信号通过。

#### 3. 无源滤波器和有源滤波器

（1）无源滤波器。无源滤波器是一种由无源元件（如电阻、电感和电容）构成的滤波器。它利用电容和电感元件的电抗随频率变化的原理来实现滤波。无源滤波器具有简单的电路结构，无需直流电源供电，且具有高可靠性。然而，它的缺点包括：在通带范围内的信号会有能量损耗；无源滤波器对负载的影响比较明显；在使用电感元件时容易引起电磁感应现象；在低频域使用时，电感元件的体积和重量较大。

（2）有源滤波器。有源滤波器由无源元件（通常是电阻器和电容器）和有源器件（如集成运算放大器）构成。它的优点包括：通带内的信号不会有能量损耗，并且可以得到放大；负载效应不明显；多级相连时，各级之间的相互影响极小，这使得通过简单的级联方法构成高阶滤波器变得容易；有源滤波器的体积小且重量轻，并且由于不使用电感元件，因此不需要磁屏蔽。然而，它的缺点包括：通带范围受限于有源器件的带宽；需要直流电源供电；并且在可靠性方面不如无源滤波器，在高压、高频、大功率的应用场合不适宜。

#### 4. 一阶滤波器、二阶滤波器和高阶滤波器

按微分方程或传递函数的阶数，滤波器可分为一阶滤波器、二阶滤波器和高阶滤波器等。设计和组成模拟滤波器时，高阶滤波器通常由多级一阶滤波器和二阶滤波器串联而成。因此，一阶滤波器和二阶滤波器是设计的关键。

实际滤波器幅频特性与理想滤波器的差异主要表现在两方面：①通带不平坦；②存在过渡带。滤波器有两种经典的设计方法，它们采用不同的设计准则使实际的滤波器特性接近理想滤波器。一种称为巴特沃斯型滤波器设计方法，其指导思想是使通带内有最大平坦的幅频特性，但这会导致阻带衰减较慢。另一种是切比雪夫型滤波器设计方法，其指导思想是阻带内衰减较快，但通带内存在的纹波。一般来说，滤波器阶次越高，幅频特性越接近理想，但随之而来的问题是系统复杂、相位滞后大。在具体设计时，滤波器类型和阶次的选择需要依信号的频域特性而定。

### 4.3.2 滤波器的性能指标

在了解了滤波器的分类后，将进一步探讨滤波器的性能指标。这些指标是评估滤波器性能的重要工具，它们直接影响滤波器在实际应用中的效果。接下来，将详细介绍这些性能指标及其对滤波器性能的影响。

（1）通带增益

滤波器的通带增益是指通带内的电压放大倍数。对于低通滤波器，为时的增益；对于高通滤波器，为时的增益。

（2）固有频率和截止频率

固有频率由滤波器电路的元件参数决定。截止频率是滤波器通带与阻带之间的分界线。通常以幅频特性下降到通带增益的时对应的频率作为截止频率，。

（3）通带截止频率和阻带截止频率

通带截止频率为通带与过渡带边界点的频率，在该点信号增益下降到一个规定的下限，。

阻带截止频率为阻带与过渡带边界点的频率，在该点信号衰耗（增益的倒数）下降到一个规定的下限，。

（4）阻尼系数和品质因数

阻尼系数是表征滤波器对角频率为的信号的阻尼作用，是滤波器中表示能量衰耗的一项指标。阻尼系数的倒数称为品质因数，是评价带通与带阻滤波器频率选择特性的一个重要指标，。其中，为带通滤波器或带阻滤波器的带宽。

### 4.3.3 无源滤波电路

无源滤波器具有结构简单、噪声小和动态范围大等特点。如图4-17所示为一阶无源低通滤波器，如图4-18所示为一阶无源高通滤波器。它们统称为RC无源滤波器。

|  |  |
| --- | --- |
| 图4-17一阶无源低通滤波器 | 图4-18一阶无源高通滤波器 |

在如图4-17所示的一阶无源低通滤波器中，其输入电压为，输出电压为，则该滤波器的微分方程为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.30） |

令时间常数，并对式（4.30）取拉普拉斯变换,可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.31） |

或：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.32） |

根据（4.32），一阶无源低通滤波器的幅频特性为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.33） |

相频特性为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.34） |

分析可知，当很小时，，信号不受衰减的影响，可以通过；当很大时，，信号完全被阻挡，不能通过。

但由于无源滤波器存在损耗电阻，信号在传递过程中能量损耗大，且滤波器外接负载电阻对滤波器的特性参数(如通带增益、截止频率等)影响较大，使无源滤波器的应用受到一定的限制。

### 4.3.4 RC有源滤波电路

RC有源滤波器由电阻、电容和集成运算放大器组成。利用有源器件的放大和隔离作用，RC有源滤波器在通带内有一定的增益和很强的带负载能力。

典型的一阶RC有源低通滤波器如图4-19所示。

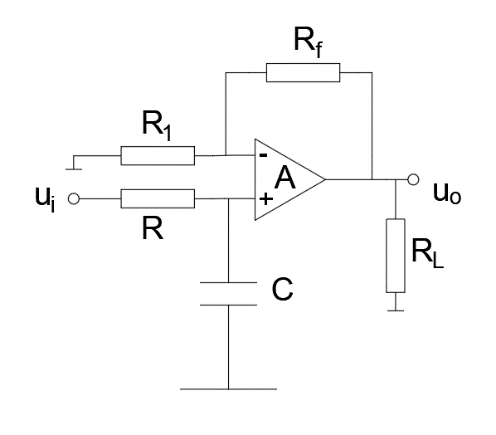


图4-19 一阶RC有源低通滤波器

在如图4-19所示的一阶RC有源低通滤波器中，集成运算放大器位于RC滤波器和负载之间，起到信号放大和隔离的作用。该滤波器的频率响应特性为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.35） |

式中：—滤波器的固有角频率，。截止角频率等于固有角频率时，其通带增益为。

若将图4-19中的R和C位置互换，其他接法不变，此时的电路具有高通滤波器的特性。这种电路被称为典型的一阶RC有源高通滤波器。

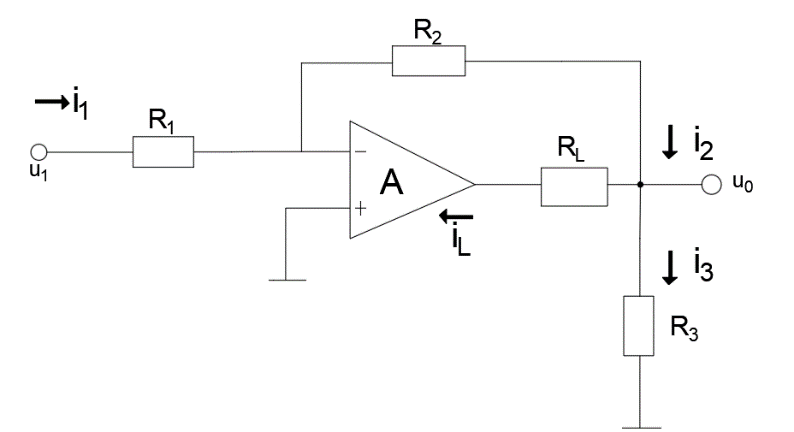
## §4.4 信号变换

### 4.4.1 电压/电流变换

为了减小长线传输过程中线路电阻和负载电阻变化的影响，通常采用电流传输的形式。因此，需要进行电压/电流变换，以将电压信号转换为电流信号。目前国际标准的信号制式是4~20mA输出，这意味着在量程范围内，被测量的最小值和最大值分别对应4mA和20mA的输出。

#### 1. 负载浮置的电压/电流转换电路

负载浮置的电压/电流转换电路如图4-20所示。

  
图4-20 负载浮置的电压/电流转换电路

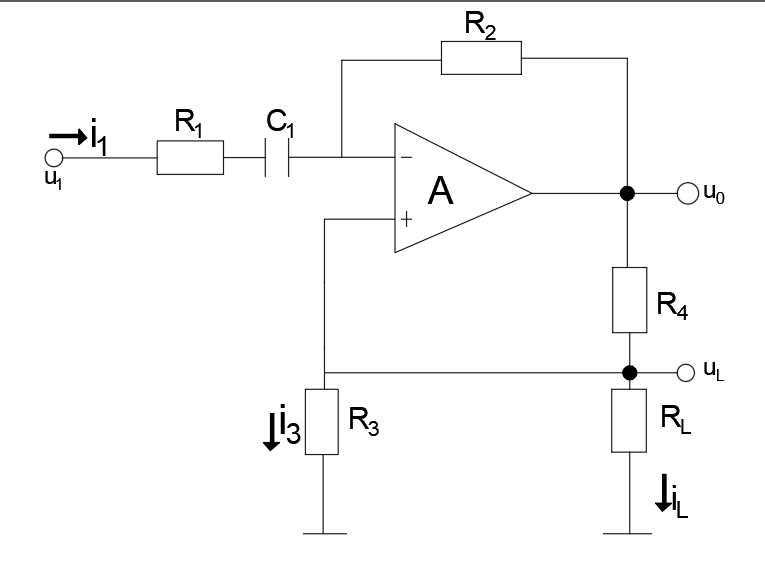
如图4-20所示，负载浮置的电压/电流转换电路实际上是一个负载接在输出端的反相运算放大器电路。由图可知，，，，则：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.36） |

由式（4.36）可知，这种变换电路的负载电流由输入电压和运算放大器的输出电压共同决定，可以通过调整电阻的大小来调节负载电流。但由于这种电路的负载电流受到运算放大器带载能力的限制，一般在数毫安以下。

#### 2. 负载接地的电压/电流变换电路

在实际应用中，负载电阻通常需要接地以便连接后续电路。为此，可以使用由单个或两个运算放大器电路组成的负载接地的电压/电流变换器。负载接地的单运算放大器电压/电流变换电路如图4-21所示。

  
图4-21 负载接地的电压/电流变换电路

令，可知，则有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.37） |

当单运算放大器电压/电流变换器采用的电阻满足式（4.37）时，负载电流与输入电压呈线性关系，与负载电阻无关。在选择电阻参数时，通常将、阻值取大一些，以减小输入信号源的电流和的分流作用，、阻值要取小一些，以减小、上的电压降。

### 4.4.2 电压/频率变换

电压/频率(V/F)变换是一种将模拟输入电压转换成与之成正比的振荡频率的技术。这种变换技术可以将频率信息远距离传递，并且具有优良的抗干扰能力。除此之外，作为一种将模拟量转换成数字量的方式，V/F还提供了一种节省系统接口资源的选择方式。

电荷平衡型V/F变换电路如图4-22（a）所示，其关键节点的波形如图4-22（b）所示。在这个电路中，单稳态定时器的输出经由模拟开关S控制积分器的充放电过程。当开关S断开时，积分器的输出电压会线性下降。当下降到 0时，电压比较器会输出一个正脉冲。这个正脉冲会触发单稳态定时器进入暂态过程，这个暂态时间由和决定。在单稳态定时器处于暂态时，它会输出高电平，使得开关S合上。由于，积分器的输出会线性上升，直到暂态时间结束，开关S会断开。这个过程会一直循环往复，最后由作为缓冲器的共射电路VT输出振荡波形。这个振荡频率与输入电压的关系为。

|  |
| --- |
| C:\Users\qq251\Desktop\11111111.jpg （a）电路    （b）波形 |

图4-22电荷平衡型V/F变换电路及其波形

## §4.5 微弱信号检测

微弱信号是一种信噪比极低且幅度的绝对值相对于背景噪声非常小的信号。尽管传统观点认为信号弱于噪声时无法进行检测，但随着科学技术的发展，已经可以检测到各种被噪声掩盖的微弱信号，如弱光、弱磁、微位移等。微弱信号检测这种新兴的检测技术分支，主要任务是利用电子学、信息论、计算机科学以及物理学和数学的方法将有用信号从噪声中提取出来，或者采用新技术和新方法来提高检测系统的信噪比。随着技术的发展，可检测信号的下限已经可以低于噪声水平。

### 4.5.1 噪声

噪声是影响微弱信号检测结果的重要因素。在微弱信号检测中，有效地克服噪声能够提高信号检测的灵敏度。噪声无处不在，而且总是与信号共存。在进行微弱信号检测时，应首先设法抑制噪声，然后再提取出噪声中的有用信号。因此，微弱信号检测是一种专门与噪声作“对抗”的技术。

噪声是对有用信号的不期望的扰动。扰动分为外部来源和内部产生两种。外部噪声可能源于自然界的宇宙射线、电磁干扰或人为的电气活动。这些干扰可通过屏蔽减小或消除。内部噪声由电路材料的物理特性和温度变化引起。这种噪声是随机的，不能完全排除，但我们可以尝试减少或控制它。

作为一种连续型随机变量，噪声在不同时刻可能出现不同的值。因此，对噪声的度量要分析噪声的统计特征。

#### 1. 噪声的概率分布

噪声电压在时刻的大小只能通过概率分布密度函数表示，其中表示噪声电压在时刻取值为的概率。一旦知道，就可以确定在时刻，噪声电压取值在与之间的概率为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.38） |

根据式（4.38），可求得该噪声的期望为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.39） |

根据式（4.38）和式（4.39），可求得其方差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.40） |

电路处于稳定状态时，噪声的数学期望和方差一般不再随时间变化。噪声各种状态等概率出现的性质使得其统计平均可用时间平均来计算，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.41） |
|  |  | （4.42） |

#### 2. 噪声的相关函数

（1）噪声的自相关函数

噪声在电子电路中表现为一种平稳随机过程。平稳随机过程的一个重要特征是其自相关函数，表示随机过程在不同时间点上的相关性。相关函数定义为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.43） |

电噪声的相关函数具有以下特性：

1）仅与时间差有关，与计算的时间起点无关。

2）由于绝大多数噪声相互独立，因此随增加而衰减，表示随机过程的时间相关性逐渐减小。当时，。

3）当时，具有最大值：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.44） |

4）是一个偶函数，即。

5）对于周期性的，相关函数具有与相同的频谱。

（2）噪声的互相关函数

研究放大器的输出噪声时，经常会遇到几个噪声源同时干扰的情况，这涉及噪声的互相关问题。互相关函数描述了两个不同随机变量的统计关联。两个不同随机过程和之间的互相关性可用互相关函数来描述，定义为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.45） |

对于各种状态等概率出现的平稳随机过程，令 ，, 则有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.46） |

同理有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.47） |

互相关函数的特性如下：

1） 仅与时间差 有关，与计算时间的起点无关。

2）。

3）。

4）具有保留和的基频和共有谐频的频谱特征。

5）。

当两个随机过程互不相关(如被检测信号和系统的观察噪声之间不存在相关性) 时，则有；反之，如果互相关函数为非0值，则表示两者间有一定的统计相关性。这正是从噪声中检测微弱信号的理论基础。

### 4.5.2 微弱信号检测方法

在电子电路中，噪声的存在会干扰并削弱微弱信号，从而对其检测造成困扰。因此，需要采用特定的检测方法来有效地从噪声中提取出微弱信号。微弱信号检测的常用方法包括相关检测法和同步积累法。相关检测方法通过信号与噪声的相关性抑制噪声，提升精度。同步积累法通过信号同步积累增强能量，提高检测灵敏度。同步积累法对信号与噪声的相关性要求低，具有更广泛的适用性。鉴于同步积累法的优点，下文将着重介绍这种方法。

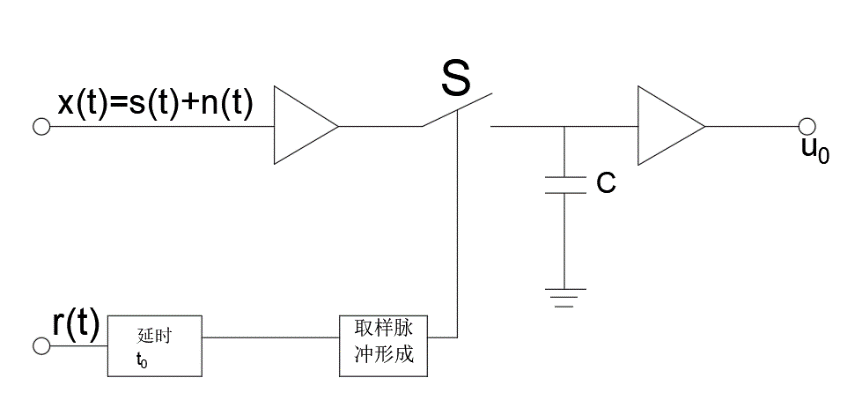
同步积累法基于信号的稳定特性和噪声的随机特性。信号具有周期性重复性，而噪声不具备这一特性。因此，接收端在每个周期中收到的信号会受到不同的干扰，产生不同的畸变。通过比较这些畸变信号，可以识别出信号的真实形态。信号的重复次数越多，输出的信号越接近其原始形态，从而提高了信噪比和系统的噪声抑制能力。在接收端，同步积累法将重复收到的信号进行叠加，并累积多次获得的部分信息，以得到完整的测量信息。

同步积累器的工作原理：假设信号为周期的一串窄脉冲。信号通路接入分配器，每个输出端都连接到一个积累器。分配器的工作周期假设为与信号周期相同，并且可以忽略输出间的切换时间。因此，分配器的工作周期被划分为与积累器数量相等的时间区间。在信号到达的时间区间内，信号通路始终连接到同一个积累器。这种方法称为同步积累。通过足够多次的信号重复，可以从噪声中提取微弱信号。重复的次数越多，提取的能力就越强。

目前，利用同步积累法制作的同步积分器、取样积分器和数字多点平均器等已得到了较好的应用。在这些设备中，取样积分器因为其广泛的应用而备受瞩目。它通过对信号进行逐点多次采样、积分求平均值的方法，有效地提取了淹没在噪声中的周期脉冲信号。接下来，将详细介绍取样积分器如何实现微弱信号的检测。

取样积分器通过对信号进行多次采样和积分，以求得平均值。为了测量淹没在噪声中的周期脉冲信号，需要使用采样时间极短的采样保持器周期性地采集信号，且采样间隔必须满足采样定理。如果采样周期和信号周期相同，采集点相对于波形的位置将保持不变。随机噪声可能会导致采样数值偏离信号的瞬时值。但是，如果采样保持器的电容足够大，其积分作用可以减弱噪声的影响。采样次数越多，噪声的平均值就越小。当采样次数足够多时，噪声可视为0，而有用的信号保持不变。

取样积分器原理框图如图 4-23所示。

  
图 4-23 取样积分器原理框图

在图4-23中，参考信号与被测信号的频率相同。延时后，形成取样脉冲。该脉冲驱动取样开关S，以取样输入信号。每隔周期 T取样一次，电容上积累的电压直接反映取样信号的强度。为防止积累溢出及平均处理积累信号，可用计算机存储器替代电容。因此，取样积分器恢复噪声中周期脉冲信号涉及两个步骤：周期性取样和信号积累平均。

经过次积累平均后，输出信号可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.48） |

式中：—输入信号；

—被测信号；

—噪声信号。

如果噪声为白噪声，不同时刻的噪声值不相关，则：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.49） |

输出信号主要由被测信号组成：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4.50） |

通过以上分析，可以看出取样积分器在微弱信号检测中的重要作用。它通过周期性的取样和积累平均的方法，有效地从背景噪声中提取出有用信号，极大地提高了信号的可识别度。

|  |  |
| --- | --- |
| ☆价值观 | 求实 |
| “没有调查，没有发言权”，科学研究和技术进步总是离不开调查，传感器的信息采集就是开展“调查”的重要手段之一。“科学是实实在在的，来不得半点虚假”，调查研究是唯物主义认识路线的具体体现，是发挥人的主观能动性把握客观规律的具体途径，是一切从实际出发的根本方法，是贯彻实事求是思想路线的必然要求。  在传感器信号处理中，求实精神具有至关重要的意义。  求实精神首先体现在对信号的精确测量和准确采集上。传感器所获取的信号往往包含着各种噪声和干扰，具有求实精神的研究人员和工程师会致力于采用最恰当的采样技术和设备，以确保所采集到的信号真实反映被测量的物理量，不夸大也不缩小实际情况。  在信号处理算法的选择和设计中，求实精神要求依据实际信号的特点和处理需求，选取或开发最为合适的算法，而不是盲目追求复杂或新颖的方法。例如，对于实时性要求高的应用，会优先考虑计算效率高的算法；对于精度要求极高的情况，则会选用能够最大程度去除噪声和误差的算法。  在数据分析阶段，求实精神意味着对数据进行客观、全面的分析，不回避异常数据，而是深入探究其产生的原因。通过反复验证和对比，得出真实可靠的结论，为后续的决策和应用提供坚实的依据。  在系统优化和改进方面，求实精神促使人们不断寻找实际应用中存在的问题和不足，以实际效果为导向，对传感器系统和信号处理流程进行有针对性的调整和完善。  同时，求实精神还体现在对结果的诚实报告和评估上。不夸大处理效果，不虚报性能指标，以实事求是的态度对待研究成果和应用效果，为传感器信号处理领域的健康发展奠定基础。  总之，在传感器信号处理中，求实精神贯穿始终，是保障处理结果准确、可靠、有效的关键，也是推动该领域不断进步的重要动力。 | |

## 习题4

1. 为减小或消除直流电桥测量结果非线性误差的方法可采用（ ）。

A. 提高供电电压 B. 提高桥臂比

C. 提高桥臂电阻值 D. 提高电压灵敏度

2. 全桥差动电路的电压灵敏度是单臂工作时的（ ）。

A. 不变 B. 2倍 C. 4倍 D. 6倍

3. 为了避免50Hz电网电压的干扰进入放大器，应选用（ ）滤波电路。

A. 低通 B. 高通 C. 带通 D. 带阻

4. 将正弦电压叠加上一个直流量应选用（ ）电路。

A. 加法运算 B. 同相运算 C. 积分运算 D. 微分运算

5. 直流电桥平衡条件是 。

6. 减小或消除非线性误差的方法有 和采用差动电桥，其中差动电桥可分为 和 两种方式。

7. 为了获得输入电压中的高频信号，应选用 滤波电路。

8. 什么是直流电桥？若按桥臂工作方式不同，可分为哪几种？各自的输出电压如何计算？

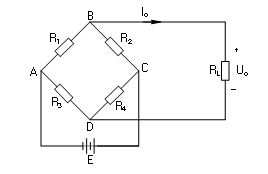
9. 在传感器测量电路中，直流电桥与交流电桥有什么不同，如何考虑应用场合？用电阻应变片组成的半桥、全桥电路与单桥相比有哪些改善？

10. 在下图中，负载电阻为无穷大（开路），，。

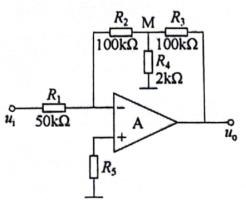
（1）为金属应变片，其余为外接电阻，当的增量为时，试求电桥的输出电压。

（2），都是应变片，且批号相同，感应应变的极性和大小都相同，其余为外接电阻，试求电桥的输出电压。

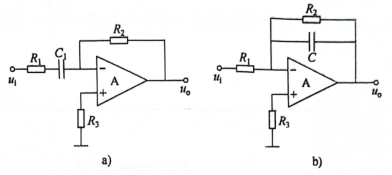
（3），都是应变片，且批号相同，感应应变的大小为，但极性相反，其余为外接电阻，试求电桥的输出电压。



11. 电路如下图所示，试求其输入电阻和放大倍数。



12. 分别推导下图所示各电路的传递函数,并说明它们属于哪种类型的滤波电路。



13. 什么是电压/频率变换，它有什么应用？

14. 取样积分器是如何实现微弱信号检测的？

# 第5章 思想铸魂，精准求真——参数检测

|  |  |
| --- | --- |
| 本章内容 | * 测量、测量系统的基本概念 * 测量方法及其分类 * 测量误差 * 测量系统的结构、基本类型 * 常见物理量的测量方法   在对物理量的检测过程时，需要借助一定的检测手段取得必要的测量数据，并对其进行分析以获得检测结果。为此，本章首先阐述了测量的基本概念，测量的方法及其分类，以及测量误差。然后介绍了测量系统的基本概念、结构和基本类型。最后，在此基础上，对常见物理量的测量方法进行了简介。 |
| 知识目标 | * 1.了解参数测量的基本原理； * 2.掌握测量系统的结构、基本类型； * 3.掌握电量测量的原理与过程； * 4.了解常见非电量测量的原理与过程。 |
| 能力目标 | 熟练掌握传感器参数检测方法和流程，熟悉测量方法，能够根据传感器的特点选择合适的检测手段；具备对检测数据进行分析和处理的能力，能够识别数据中的异常值和误差，并进行有效的修正；掌握传感器参数检测中的误差来源和控制方法，提高检测精度和可靠性；熟练操作常见检测一起，准确读取和记录检测数据。 |
| 思政目标 | * 培养严谨认真、实事求是的科学态度，检测中严格遵循操作规范，确保数据的真实性和可靠性； * 增强责任心和质量意识，认识到传感器参数检测对于产品质量和系统性能的重要性； * 培养安全意识和环保意识，在检测过程中正确使用设备，避免安全事故，注意减少对环境的影响； * 塑造职业素养和道德规范，坚持职业操守，保守检测数据的机密性，不弄虚作假。 |
| 重点难点 | 重点：了解参数测量的基本原理；掌握测量系统的结构、基本类型。  难点：了解参数测量的基本原理。  本章节适合各种学时设置的教学安排。 |

## §5.1 概述

在对几何量、机械量及其他物理量进行检测时，首先需要使用一定的检测手段来获取必要的测量数据，然后分析这些数据以获得测量结果。在测量过程中，设备、仪表、被测对象、测量方法以及测量者都会受到各种内外环境因素的影响。这些因素会在不同程度上改变测量结果。另外，只有当被测量对测量系统产生作用时，测量系统才能输出结果。这通常意味着测量过程会改变被测对象的初始状态。因此，测量结果并不总是反映被测对象的真实情况，通常会存在不可避免的测量误差。可以说，误差是所有科学实验和测量过程中的常见现象。在科技迅速发展的今天，人们对产品的精度和测量技术的准确性有更高的期望。因此，研究测量误差，了解其特性，掌握相应的处理原则，有效地减少和消除测量误差的影响，以便做出科学的判断和决策，具有重大的理论和实际应用价值。

### 5.1.1 测量的基本概念

测量是以确定被测量为目的的一系列操作。这些操作是利用物质的物理、化学或生物特性，对被测对象的信息进行提取、转换和处理，从而获得定性或定量结果的过程。测量通常包括两个过程：一是能量形式的一次或多次转换；二是将被测量与其相应的标准量进行比较，以确定被测量对标准量的倍数。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.1） |

式中：—被测量；

—比值，无量纲（一般含有测量误差）；

—标准量，即测量单位。

这是理想的线性关系。然而，实际的测量系统不可避免地存在非线性输出和零位输出。经测量过程所获得的被测量的量值称为测量结果。测量结果有多种表示方式，如数值、曲线或图形等。根据式（5.1），无论采用何种表示方式，测量结果应包括两个部分：比值和测量单位。严格来说，还应包括测量误差或测量精度，以表明测量结果的可信程度。值得注意的是，应使用规范的测量单位。国际单位制（SI）是被世界各国普遍采用的单位制，适用于所有测量应用。

### 5.1.2 测量方法

测量方法是实现测量过程所采用的具体手段。应根据被测量的性质、特点和测量任务的要求来选择合适的测量方法。根据测量手段，可以分为直接测量和间接测量；根据获得测量值的方式，可以分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量；根据传感器是否与被测对象直接接触，可以分为接触式测量和非接触式测量；根据被测对象的变化特点，可以分为静态测量和动态测量。

#### 1．直接测量和间接测量

（1）直接测量是一种使用事先标定好的仪表，直接读取被测结果的方法。直接测量是工程技术中大量采用的方法，优点是直观、简便、迅速，但不易达到很高的测量精度。

（2）间接测量一种首先对与被测量有确定函数关系的几个量进行测量，然后再将测量值代入函数关系式，经过计算得到所需结果的方法。间接测量的优点是精度高。这因为间接测量通过计算和转换，可以消除或减小直接测量中的一些系统误差，从而提高测量的精度。同时，间接测量还可以测量那些直接测量无法或难以测量的量。然而，间接测量的过程可能更复杂，需要更多的时间和手续，这是其主要缺点。

#### 2．偏差式测量、零位式测量和微差式测量

（1）偏差式测量是利用测量仪表指针相对于刻度初始点的位移（即偏差）来表示被测量的大小的测量方法。它以间接方式实现被测量与标准量的比较。

偏差式测量仪表在进行测量时，会利用被测量产生的力或力矩使仪表的弹性元件变形。这种变形会产生一个相反的作用，直到与被测量所产生的力或力矩达到平衡。在力或力矩与被测量所产生的力或力矩达到平衡时，弹性元件的变形便会终止。这种变形通过一定的机构转变成仪表指针相对于标尺起点的位移，指针所指示的标尺刻度值即为被测量的数值。偏差式测量简单，迅速，但其精度相对较低。尽管如此，由于其操作简便和测量速度快的特点，这种测量方法在工程测量领域仍得到了广泛的应用。

（2）零位式测量是使用已知的标准量来平衡或抵消被测量的作用，并通过指零式仪表来检测测量系统是否达到平衡状态，从而判定被测量值等于已知标准量的方法。例如，使用天平测量物体的质量就是零位式测量的一个简单例子。

（3）微差式测量是一种融合了零位式测量和偏差式测量优点的测量方法。其基本思路是首先将被测量的大部分作用与已知标准量的作用相抵消，然后再将剩余部分（即两者的差值）用偏差法进行测量。在微差式测量中，总是设法将差值降至最低。因此，即使差值的测量精度不高，通过使用高灵敏度的偏差式仪表，仍能使最终结果达到较高的精度。

#### 3. 接触式测量和非接触式测量

接触式测量是指测量敏感元件与被测介质直接接触的测量；否则称为非接触式测量。

#### 4. 静态测量和动态测量

如果被测量在测量过程中是固定不变的，或随时间变化非常缓慢，对这种被测量的测量称为静态测量。静态测量不需要考虑时间因素。

如果被测量在测量过程中是随时间不断变化的，对这种被测量的测量称为动态测量。动态测量必须考虑时间因素对测量结果的影响，即测量结果中一定包含时间量。

### 5.1.3 测量误差

在检测过程中，被测对象、检测系统、检测方法和检测人员都会受到各种因素的影响。并且，对被测量的转换有时也会改变被测对象原有的状态。这就造成了检测结果与被测量的客观真值之间存在一定的差值。这个差值称为测量误差。测量误差的主要来源可以概括为工具误差、环境误差、方法误差和人员误差等。

在分析测量误差时，所采用的被测量真值是指在确定的时间、地点和状态下，被测量表现出来的实际大小。一般来说，真值是未知的，因此误差也是未知的。但有些值可以作为真值来使用，例如理论真值，这是理论设计和理论公式的表达值；还有计量学约定真值，这是由国际计量学大会确定的长度、质量、时间等基本单位。

#### 5.1.3.1 误差产生的原因

产生误差的原因多种多样，根据检测系统的各个环节可分类如下：

（1）被检测物理模型的前提条件通常是理想的，但这可能与实际检测条件有出入。

（2）测量器件的材料性能或制作方法不佳使检测特性随时间劣化。

（3）电气、空气压、油压等动力源的噪声及容量的影响。

（4）检测线路接头之间存在接触电势或接触电阻。

（5）检测系统的惯性，也就是迟延传递特性，可能不符合检测的目的要求，因此需要同时考虑系统的静态特性和动态特性。

（6）检测环境，包括温度、气压、振动、辐射等，可能会影响测量结果。

（7）由于不同采样得到的测量值之间的差异，可能会产生误差。

（8）人为因素，包括个人读表偏差、知识和经验的深浅、体力及精神状态等，可能会造成误读。

（9）测量器件进入被测对象，破坏了所要测量的原有状态。

（10）被测对象本身变动大，极易受到外界干扰，从而导致测量结果不稳定。

#### 5.1.3.2 绝对误差、相对误差和引用误差

1．绝对误差

绝对误差是仪表的指示值与被测量的真值之间的差值，记作。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.2） |

绝对误差是有符号和单位的，它的单位与被测量相同。

引入绝对误差后，被测量真值可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.3） |

其中，为误差修正值，含有误差的指示值加上修正值后，可以消除误差的影响。在计量工作中，通常采用加修正值的方法来保证测量值的准确可靠，修正值可以是数值、曲线、公式或数表等。仪表送上级计量部门检定，其主要目的是获得一个准确的修正值。

绝对误差越小，说明指示值越接近真值或测量精度越高。但这一结论只适用于被测量值相同的情况，而不能说明不同值的测量精度。例如，某测量长度的仪器，测量10mm的长度，绝对误差为0.001mm；另一仪器测量200mm长度，误差为0.01mm。这就很难仅根据绝对误差的大小来判断测量精度的高低。这是因为后者的绝对误差虽然比前者大，但相对于被测量的值却显得较小。因此，需要引入相对误差的概念。

2. 相对误差

相对误差是仪表指示值的绝对误差δ与被测量真值的比值，常用百分数表示，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.4） |

相对误差比绝对误差能更好地说明测量的精确程度。在上面的例子中，

显然，后一种长度测量仪表的精度更高。

在实际测量中，由于被测量真值是未知的，而指示值又很接近真值，因此可以用指示值代替真值来计算相对误差。

相对误差可以用来评定测量结果的准确程度。然而，它并不能全面地衡量测量仪表本身的质量。因为同一台仪表在整个测量范围内的相对误差不是一个定值，而是随着被测量的减小而变大。为了更合理地评价仪表的质量，需要引入引用误差的概念。

3. 引用误差

引用误差是绝对误差与仪表量程的比值，通常以百分数表示，如式（5.5）所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.5） |

式中：—仪表量程。

如果以测量仪表整个量程中可能出现的绝对误差最大值代替，则可得到最大引用误差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.6） |

对于特定的仪表或检测系统，其最大引用误差是一个定值。

测量仪表一般采用最大引用误差不能超过的允许值作为划分精度等级的尺度。工业仪表常见的精度等级有0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、5.0级。精度等级为1.0的仪表在使用时，其最大引用误差不超过±1.0％。也就是说，这种仪表在整个量程内的绝对误差最大值不会超过其量程的±1％。

在具体测量某个量值时，相对误差可以根据精度等级所确定的最大绝对误差和仪表指示值进行计算。

#### 5.1.3.3 系统误差与随机误差

1．系统误差

在相同条件下，多次重复测量同一量时，误差的大小和符号保持不变，或按照一定的规律变化，这种误差称为系统误差。检测装置本身性能不完善、测量方法不完善、测量者对仪器使用不当、环境条件变化等原因都可能产生系统误差。例如，如果某仪表的刻度盘分度不准确，就会造成读数偏大或偏小，这可能产生恒值系统误差。另外，环境条件（如温度、气压）的变化，以及仪表电池电压随使用时间增长而逐渐下降，都可能产生变值系统误差。

尽管系统误差对测量结果的影响具有累积性，但由于其具有规律性，可以采取以下措施来减小甚至消除这种误差：

（1）采用修正值或补偿校正的方法。

（2）从每个环节的元、器件带来的系统误差入手来减小系统误差。然而，过分追求高质量的元、器件，只能增加仪器的成本和制造难度。

（3）若使系统误差减小至相当于其随机误差的大小时，可以不必对系统误差进行单独处理，而将其统一作为随机误差处理。

这样，就可以在保证测量精度的同时，有效地控制测量成本。这是处理系统误差时需要考虑的一个重要因素。总的来说，理解并妥善处理系统误差对于提高测量的准确性和可靠性至关重要。

2．随机误差

在相同条件下，多次测量同一量时，误差的大小和符号以不可预见的方式变化，这种误差称为随机误差。随机误差是测量过程中许多独立、微小和偶然因素引起的综合结果。

精确度是测量正确度和精密度的综合反映。精确度高意味着系统误差和随机误差较小。精确度有时简称为精度。图5-1清晰地展示了系统误差、随机误差对测量结果的影响，并解释了正确度、精密度和精确度的含义。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| （a） | （b） | （c） |

图5-1 系统误差和随机误差对测量结果的影响

图5-1（a）的系统误差较小，正确度较高，然而随机误差较大，精密度低；图5-1（b）的系统误差大，正确度较差，然而随机误差小，精密度较高；图5-1（c）的系统误差和随机误差都较小，也就是说正确度和精密度都较高，因此精确度高。因此，一切测量都应当力求精密而又正确。

3. 粗大误差

明显偏离测量结果的误差称为粗大误差，也称过失误差。粗大误差主要是人为因素造成的。例如，测量人员在工作时疏忽大意，可能会出现读数错误、记录错误、计算错误或操作不当等。此外，测量方法不恰当或测量条件突然发生意外变化，也可能造成粗大误差。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值，需要从测量结果中剔除。在实际测量工作中，由于粗大误差数值特别大，容易从测量结果中发现。一旦发现粗大误差，就应认为该次测量无效，并剔除测量数据，以消除其对测量结果的影响。

**例5-1** 某1.0级电流表，满度值，求测量值分别为，，时的绝对误差和相对误差。

解：因为精度等级，即最大引用误差为：

所以可求得最大绝对误差为：

依据误差的整量化原则，仪器在同一量程的各示值处的绝对误差均等于。故三个测量值处的绝对误差分别为

三个测量处的相对误差分别为：

由例5-1可见，为了减小测量误差，在选择量程时应使示值尽可能接近满度值，通常不小于其。

### 5.1.4 测量系统

#### 5.1.4.1 测量系统的结构

测量系统由传感器、数据传输、数据处理和数据显示等环节组合而成，形成一个有机整体，以完成信号测量目标。典型测量系统的结构框图如图5-2所示。

  
图5-2 测量系统的结构框图

传感器：感知被测量的大小并输出相应信号的设备或装置。

数据传输环节：负责在测量系统的各个功能环节之间传输数据。

数据处理环节：负责处理和转换传感器的输出信号，如放大、滤波、运算、线性化、A/D或D/A转换等，以便于显示、记录和处理。

数据显示环节：负责将测量结果转换为易于理解的形式并输出，以便于监视、控制或分析。显示方式可以是模拟或数字，具体形式如数字、图表、声音等，取决于显示设备（如仪表、监视器、打印机、扬声器等）。

#### 5.1.4.2测量系统的基本类型

根据是否存在反馈通道或信号的传递情况，可以将测量系统分开环测量系统与闭环测量系统两种基本类型。

1. 开环测量系统

如果测量系统没有反馈通道，信息的变换只沿一个方向进行，这样的测量系统称为开环测量系统，如图5-3所示。

  
图5-3 开环测量系统框图

在图5-3中，是输入量，是输出量，为各个环节的传递系数，则输出可表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.7） |

当开环测量系统受到外界干扰时，系统的输出不仅取决于各环节的传递系数和输入量，还会受到各环节干扰的影响。如果不提高各环节的抗干扰能力，开环测量系统将难以获得高测量精度。因此，开环测量系统一般用于简易测量。

开环测量系统由各环节串联而成的，其相对误差（）等于各环节相对误差（、、…、）之和，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.8） |

开环测量系统的灵敏度（）等于各环节灵敏度（、、…、）之积，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.9） |

由式（5.8）、式（5.9）可知，要提高测量系统的灵敏度，需要增加环节的个数或提高环节的灵敏度。如果增加环节的个数，仪表的相对误差将会增大。如果不增加环节的个数，而提高环节的灵敏度，那么对应较小的输入信号，就能得到相同的指针偏转，这将导致仪表的测量范围减小。如果绝对误差不变，那么随着灵敏度的增大，系统的相对误差也必将增大。因此，开环测量系统的灵敏度增加时，系统的相对误差也会相应增大，这将降低系统的测量精度。另一方面，灵敏度的增加会大大降低系统的稳定性。为了保证仪表的稳定性，开环测量系统的灵敏度不应过高。一般来说，在同一量程条件下，灵敏度高的系统的精度不一定都高。但是，如果一个系统的精度高，那么它的灵敏度通常也会较高。

2. 闭环测量系统

闭环测量系统有两个通道：正向通道和反馈通道，如图5-4所示。

  
图5-4 闭环测量系统框图

在图5-4中，为正向通道的输入量，为反馈环节的传递系数，正向通道的总传递系数。经推导可得:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.10） |

当时，有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.11） |

由式（5-10）可知，对于闭环结构的测量系统，如果正向通道的传递系数足够大，则整个系统的输入、输出关系由反馈环节的特性（）决定。这意味着，即使正向通道的放大器等环节特性（）发生变化，也不会影响测量结果。这个特性对于设计和制造仪表有很大的好处。只需要精心挑选反馈通道所需的元器件，而无需对正向通道有过高的要求，就可以获得高精度和高灵敏度的测量系统。

闭环测量系统的相对误差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.12） |

式中：—测量系统的相对误差；

—反馈通道的相对误差。

闭环测量系统的灵敏度为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.13） |

式中：—测量系统的灵敏度；

—反馈通道的灵敏度。

## §5.2 电量测量

### 5.2.1 交流信号电压的测量

#### 5.2.1.1 峰值

周期性交流电信号偏离零电平的最大值称为峰值。典型的周期性交流电信号是正弦信号，其中不含直流成分的正弦信号可表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.14） |

这种信号的正负峰值是相等的。如果交流电信号的正负峰值不相等，可以用和来分别表示信号的正负峰值。

#### 5.2.1.2 平均值

周期性交流电信号的平均值定义为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.15） |

为信号的周期。显然，正弦信号的平均值为零。

在电子测量中，经常要测量交流信号检波（整流）后的平均值。交流信号的整流分为全波整流和半波整流两种，其中全波整流的平均值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.16） |

#### 5.2.1.3 有效值

如果某个交流电和一个直流电分别加在同一个纯电阻上，当它们产生的焦耳热相等时，这个交流电的有效值等于直流电。这个关系可以写成：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.17） |

值得注意的是，使用交流电压表测量交流电时，其输出显示的就是这个有效值。

### 5.2.2 电流的测量

电流的测量方法分为直接测量法和间接测量法。直接测量法是指在被测电流的通路中串入量程适当的电流表进行测量；间接测量法是指把电流转换成电压、频率、磁场强度等物理量进行测量。

#### 5.2.2.1直接测量法

直接测量电流的方法通常是在被测电流的通路中串入适当量程的电流表，让被测电流的全部或一部分流过电流表。从电流表上直接读取被测电流值或被测电流分流值。电流表直接测量的示意图如图5-5所示。

  
图5-5 电流表直接测量示意图

在图5-5中，被测电流实际值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.18） |

考虑电流表本身的内阻，可将图5-5所示的示意图等效为：

  
图5-6 电流表串接测量示意图

在图5-6中，流过电流表的电流为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.19） |

相对误差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.20） |

由式（5.20）可见，为使电流表读数值尽可能接近被测电流实际值，电流表的内阻r应尽可能接近于0。换句话说，电流表的内阻越小，其性能越好。

当直接使用电流表测量不方便或没有合适的电流表时，可以采用间接测量的方法。这种方法是将电流转换为电压、频率、磁场强度等其他物理量进行测量，然后根据这些测量值与被测电流之间的关系来计算电流值。

#### 5.2.2.2 电流-电压转换法

在被测电流回路中串入一个很小的标准电阻r，以将被测电流转换为被测电压，如式（5.21）所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.21） |

当满足条件时，有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.22） |

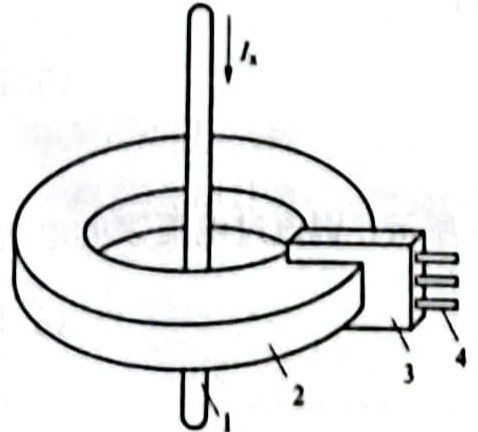
则，或。

若被测电流很大，可以直接用高阻抗电压表测量标准电阻两端电压。若被测电流较小，应将放大到接近电压表量程的适当值后，再由电压表进行测量。此外，电压放大电路应具有极高的输入阻抗和极低的输出阻抗。

串入测量电路的标准电阻要求很小，即满足。如果不满足这个条件，那么测量结果可能会受到影响。

#### 5.2.2.3电流-磁场转换法

无论是直接使用电流表测量电流，还是通过电流-电压转换法间接测量，都需要切断电路并接入测量装置。当不允许切断电路或被测电流过大时，可以通过测量电流产生的磁场来间接获取电流值。一个典型的例子是使用霍尔式钳形电流表进行测量，如图5-7所示。

  
图5-7 霍尔式钳形电流表

在图5-7中，作用于霍尔片的磁感应强度B为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.23） |

式中：—电磁转换灵敏度。

霍尔片输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.24） |

式中：—霍尔片控制电流；

—霍尔片灵敏度；

—电流表灵敏度，。

若为直流，则为直流；若为交流，则为交流。霍尔式钳形电流表可以测量的最大电流超过，这使得其可以用于测量输电线上的电流。此外，它还可以用于测量电子束、离子束等无法用普通电流表直接测量的电流。

#### 5.2.2.4 电流互感器法

电流互感器法可以在不切断电路的情况下测量电路中的电流，如图5-8所示。

  
图5-8 电流互感器法

假设被测电流为，原边匝数为，副边匝数为，则副边电流为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.25） |

只要测得副边电流，就可得知被测电流的大小。

### 5.2.3 电功率的测量

第3章已经介绍了霍尔功率传感器。本小节将重点讨论如何利用霍尔传感器测量交流电功率。

#### 5.2.3.1 采用瞬时采样法测量交流电功率

微型机和单片机的运算速度正在提高，同时高速A/D转换器也在不断发展。这些进步使得直接采用交流采样的方法测量电参数成为可能。当被测波形为非正弦波或正弦波发生畸变时，采用传统的直流采样技术可能会带来较大的误差。因此，对于需要高精度的电参量测量，可以考虑采用交流采样法来测得交流量的真有效值。交流电功率的计算公式为:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.26） |

将其离散化，即在一个周期内采样次，由采集到的瞬时值计算，即可求得被测值为:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.27） |

显然，交流采样法的精度取决于一个周期内的采样点数。越大，精度就越高。如果单片机主频为12MHz，并且A/D转换器的转换时间为级，则在400Hz交流波形的一个周期内，采样点数可以达到几十个，基本可满足精度的要求。

交流瞬时采样原理图如图5-9所示。

  
图5-9 交流瞬时采样原理图

在公式（5.27）中，采样点数是固定的。然而，如果被测信号的频率变化，而一个周期内的采样点数保持不变，就会产生较大的测量误差。如果频率升高，周期缩短，那么测得的值将比实际值偏大。相反，如果频率降低，周期延长，那么测得的值将偏小。因此，需要采用频率跟踪技术，以确保将一个周期均匀地等分为点，进行瞬时采样。这样可以保证测量精度，但同时也会增加系统硬件和软件的复杂程度。

#### 5.2.3.2 采用霍尔传感器和直流采样法测量交流电功率

本方法基于正弦交流电有功功率的定义，即。在这个公式中，、分别代表电压和电流的有效值，而则代表负载功率因数。这种方法的关键问题在于如何准确测量出、和相位差。如果采用电磁式电压电流互感器，由于互感器的非理想性，不仅存在变比误差，而且还存在较大的相位误差，这就使得测得的值不能真实地反映负载的性质。为了解决这个问题，通常会采用软件补偿法。然而，由于互感器的相位误差与其工作状态有关，因此不易得到完全补偿。这也会增加编制软件的工作量。

直流采样法测功率原理图如图5-10所示。霍尔传感器可以不失真地传递原边的波形，从而大大提高了相位差的测量精度，使测量原理更为简便。此外，它还可以测量从直流到100kHz的任意波形的交流量，从而克服了电磁式互感器只能在特定的额定频率下工作的弊端。交、直流真值转换器可以将正弦波形或任意波形的交流量转换为直流量，且直流输出的大小正比于交流量的有效值，转换精度可达0.5％。

  
图5-10 直流采样法测功率原理图

霍尔传感器对交流电压和电流进行隔离和衰减。经过变送器转换，这些信号变为直流，其大小与原始交流信号的有效值成正比。这些直流电压经过A/D转换后被存储在微计算机中。另外，传感器副边输出的正弦交流信号被转换为方波，这样就可以计算出电压和电流的相位差和功率因数。求得、及后，即可由求得有功功率。

如要求三相负载的总功率，则可分别测得每相电压、电流的有效值及功率因数，并计算得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.28） |

由上可见，采用霍尔电压和电流传感器可以减小变比和相位误差。如果同时采用直流采样技术，可以大大降低硬件的成本，减小软件的工作量，并得到较高的测量精度。因此，这是一种实用的方法。

## §5.3 非电量测量

### 5.3.1 温度检测

温度是表征物体冷热程度的物理量。。作为工业生产过程中一个常见且重要的物理量，温度直接与安全生产、产品质量、生产效率、节约能源等重大技术经济指标相关。物体的许多物理现象和化学性质都与温度相关，对温度的测量和控制是许多生产系统必不可少的环节。

温度不能直接测量，只能借助于冷热不同的物体之间的热交换以及物体的某些物理性质随着冷热程度不同而变化的特性进行间接测量。温度的间接测量方法可分为接触式和非接触式两大类。

接触式测温要求温度敏感元件与被测对象接触，依靠热传导来进行热交换。这些元件包括热电偶、热电阻、热敏电阻或集成温度传感器等。当被测介质与感温元件达到热平衡时，温度敏感元件与被测介质的温度相等。这类温度传感器具有结构简单、工作可靠、测量精度高、稳定性好、价格低廉等优点。然而，它们的缺点是有较大的滞后现象，不适宜测量运动物体，测温范围受到感温元件材料性质的限制，被测对象的温度场受接触传感器的影响。

非接触式测温时，温度敏感元件不与被测对象接触，而通过热辐射实现热交换。这种方法使用的设备包括红外测温仪、微波测温仪、光纤温度传感器等。物体的辐射能量大小与其温度有关，以电磁波的形式向四周散发。当选择合适的接收检测装置时，可以测得被测对象发出的热辐射能量，并将其转换成可显示的各种信号，从而实现对温度的测量。非接触式测温可以测量高温、腐蚀、有毒、运动物体以及固体或液体表面的温度，而且不会干扰被测温度场。然而，这种方法的缺点是测量精度较低，测量结果容易受到测量距离和中间介质的影响。

### 5.3.2 湿度检测

湿度测量的基本原理是利用湿敏传感器与被测介质的接触，以确保水分的存在能引发感湿元件的物理和化学变化。这些变化会使感湿元件的特性参数发生与被测介质湿度信息有关的改变。通过测量电路，可以将这些改变转化为湿度读数，从而得到被测介质的湿度大小。目前，应用和发展较成熟的湿敏传感器及其分类如表5-1所示。

表5-1 湿敏传感器分类

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 类 别 | 常见类型 | 特 点 |
| 水分子亲和型 | 电解质湿度传感器 | 响应速度低，可靠性差，不能很好地满足工业生产和日常生活的使用要求 |
| MOS陶瓷湿度传感器 |
| MOS膜式湿度传感器 |
| 高分子湿度传感器 |
| 非水分子亲和型 | 热敏电阻式湿度传感器 | 响应速度快。灵敏度高，发展迅猛，应用越来越广泛 |
| 红外吸收式湿度传感器 |
| 微波式湿度传感器 |
| 超声波湿度传感器 |

### 5.3.3 位移检测

位移是指物体上某一点在一定方向上的位置变动，包括线位移和角位移。在工程应用中，位移测量分为模拟式测量和数字式测量两大类。

模拟式测量常用的传感器有电阻式传感器、电磁式传感器、电容式传感器、电涡流式传感器、光电式传感器、光导纤维传感器、超声波传感器、激光及辐射式传感器和薄膜传感器等。将上述传感器与相应的测量电路结合在一起，可以组成工程中常用的测量仪器和仪表，如电阻式位移计、电感测微仪、电容测微仪、电容液位计等。需要注意的是，各种位移测量仪表的测量范围和测量精度各不相同，使用时应根据测量任务选择合适的测量方法和测量仪表。

数字式测量主要是指在精密数控装置如数控机床和三坐标测量仪等设备中，将直线位移或角位移转换为数字脉冲信号输出的测量方法。常用的转换装置有感应同步器、旋转变压器、磁尺、光栅和各种脉冲编码器等。

### 5.3.4 速度检测

物体运动时单位时间内的位移变化量称为速度，单位是。速度检测根据不同的分类标准有多种类型。根据物体运动的形式可分为线速度测量和角速度测量。根据运动速度的参考基准可分为绝对速度测量和相对速度测量。根据速度的数值特征可分为平均速度测量和瞬时速度测量。根据获取物体运动速度的方式可分为直接速度测量和间接速度测量。速度的测量方法如下：

#### 1. 定义法

根据速度的定义，通过测量物体在时间内通过的距离来计算平均速度。

#### 2. 加速度积分法或位移微分法

如果能够测量到运动物体的加速度或位移，就可以通过对测量结果进行时间积分或微分来计算速度。这种方法在振动测量中有典型的应用。例如，可以使用加速度计来测量振动体的振动加速度，然后通过电路积分来计算振动速度；或者，可以使用振幅计来测量振动体的位移，然后通过微分来计算振动速度。

#### 3. 利用物理参数测量速度

可以利用速度与某些物理量之间的已知关系来间接测量物体的运动速度。例如，在固定磁感应强度的磁场中，当有效长度为的导线移动时，它会切割磁力线并产生感应电动势。然后，可以根据公式即可计算运动物体的速度。

#### 4. 多普勒效应测速度

多普勒效应是指当发射机和接收机之间的距离发生变化时，发射机发出信号的频率和接收机接收到信号的频率将不相同的现象。基于多普勒效应，可以通过测量运动物体反射的发射信号和接收信号的频率来实现速度的测量。

### 5.3.5 加速度检测

加速度是表征单位时间内速度改变程度的矢量，是描述物体速度变化快慢的物理量，等于速度变化量与发生这一变化所用时间的比值，单位是。加速度是矢量，其方向是物体速度变化量的方向，与合外力的方向相同。

加速度传感器是一种能够测量加速度的测量装置。这种传感器通常由质量块、阻尼器、弹性元件、敏感元件和信号调理电路等部分组成。在加速过程中，传感器通过测量质量块所受的惯性力，利用牛顿第二定律来计算加速度。根据加速度传感器的敏感元件的类型，可以将加速度传感器分类为电容式、电感式、压阻式和压电式。

### 5.3.6 压力检测

压力是工业生产过程中的重要参数之一。许多生产工艺要求在一定的压力条件下进行，以保证产品质量。此外，压力的监控往往也是安全生产的要求。因此，压力测量与控制在工业生产中具有特殊的地位和意义。

压力在物理学上称为压强（单位：Pa），定义为单位面积上的受力大小，因此，它是力和面积的导出量。压力测量可以转化为作用在已知面积上的力的测量。因此，压力的测量方法与力的测量方法基本相同。

压力传感器广泛应用于各种工业自控环境，涉及水利水电、铁路交通、智能建筑、生产自控、航空航天、军工、石化、油井、电力、船舶、机床、管道等众多行业。

工业生产中选用压力传感器的基本原则是，依据不同的应用场景和实际工艺生产过程，压力测量的用途、工艺指标、量程、精度要求、温度范围、介质特性、电和机械要求及生产安全等因素，对传感器做合理的选型，，既要经济合理，又要使用方便。

|  |  |
| --- | --- |
| * 价值观 | 精准 |
| 精准是一种科学的思维方法，更是一种务实的工作方法，正如习近平总书记多次强调的“要从细节处着手”。在传感器参数检测中，精准精神是核心要素，具有不可替代的重要性。  精准精神体现在对检测设备和工具的精心选择与校准上。检测人员会严格挑选具有高精度和高稳定性的检测仪器，并按照严格的标准和规范对其进行校准，确保测量的起点就是准确无误的。  在检测流程的设计和执行中，精准精神要求每一个步骤都经过精心规划，遵循科学合理的方法，严格控制各种可能影响检测结果的因素，如环境温度、湿度、电磁干扰等，将误差控制在最小范围内。  对于检测数据的采集和记录，精准精神意味着不放过任何一个细微的数据变化，以高度的责任心和专注力确保数据的完整性和准确性。每一个数据点都被视为关键信息，容不得半点疏忽。  在数据分析和处理阶段，精准精神驱使检测人员运用严谨的数学方法和统计工具，对数据进行深入剖析，剔除异常值，找出数据的内在规律和趋势，从而得出精确的检测结论。  同时，精准精神还促使检测人员不断自我反思和改进。当检测结果出现偏差或不确定时，他们会毫不犹豫地重新检测、重新分析，直到获得令人信服的精准结果。  总之，在传感器参数检测中，精准精神是对科学的尊重，是对质量的坚守，是保障传感器性能和可靠性的关键，也是推动相关技术不断发展和应用的强大动力。 | |

## 习题5

1. 测量者在处理误差时，下列哪一种做法是无法实现的（ ）。

A. 消除随机误差 B. 减小或消除系统误差

C. 修正系统误差 D. 剔除粗大误差

2. 仪表的精度等级是用仪表的（ ）来表示的。

A. 相对误差 B. 绝对误差 C. 引用误差 D. 系统误差

3. 在同一测量条件下，多次测量被测量，其绝对值和符号保持不变或按照一定规律出现的误差称为（ ）。

A. 绝对误差 B. 相对误差 C. 随机误差 D. 系统误差

4. 交流电压表指示的数值是（ ）。

A.有效值 B.平均值 C.峰值 D.幅值

5. 位移检测中，数字式测量主要是指（ ）。

A. 将直线位移或角位移转换为模拟信号输出

B. 将直线位移或角位移转换为数字脉冲信号输出

C. 仅通过光电式传感器进行测量

D. 仅通过超声波传感器进行测量

6. 什么是绝对误差、相对误差和引用误差？

7. 什么是系统误差？其产生的原因是什么？

8. 请描述测量系统的结构及各部分的作用？

9. 测量系统是如何分类的，各有何特点？

10. 某开环测量系统由传感器、放大器和记录仪组成，各环节的灵敏度分别为：，，，求该系统总的灵敏度。

# 第6章 矢志探索，创新驱动——基本智能化功能与python实现

|  |  |
| --- | --- |
| 本章内容 | * 非线性校正技术 * 自校零与自校准技术 * 噪声抑制技术 * 多传感器数据融合 * 频率自补偿技术 * 增益的自适应功能 * 自诊断 * 曲线拟合的Python实现   本章将重点介绍智能传感器的相关技术，包括非线性校正技术、自校零与自校准技术、噪声抑制技术、多传感器数据融合、频率自补偿技术、增益的自适应功能及自诊断等。同时，还将介绍曲线拟合的Python实现，以更好地理解和掌握智能传感器的特点和优势，并在实际应用中更好地运用这些技术。 |
| 知识目标 | * 1.了解传感器的非线性校正技术； * 2.掌握传感器的自校零与自校准技术的原理与实现； * 3.掌握传感器噪声抑制技术与自补偿技术的实现； * 4.掌握传感器增益自适应控制技术与多传感器信息融合技术的实现。 |
| 能力目标 | 了解智能传感器技术基础概念，准确描述非线性校准技术原理和要点；熟悉传感器自校零、自校准的技术要点和实现方法；对传感器噪声抑制问题有较深入的认识，能够应用自补偿技术解决工程问题；初步具备多传感器信息融合技术基础，并能在简单问题中进行应用。 |
| 思政目标 | * 强化责任意识，严格遵循科学方法和流程，保证噪声抑制和校正处理过程的准确性和可靠性； * 提升耐心和细心程度，仔细观察和处理信息细节，认真对待每一个环节，不放过任何一个微小的细节因素； * 提升学习能力和自我学习意识，不断跟进新技术和新方法。 |
| 重点难点 | 重点：掌握传感器的自校零与自校准技术；掌握噪声抑制技术与自补偿技术；掌握传感器增益自适应控制技术与多传感器信息融合技术。  难点：掌握传感器增益自适应控制技术。  本章节适合各种学时设置的教学安排。 |

## §6.1 非线性校正技术

非线性是描述传感器输入-输出特性曲线与所选定的拟合直线之间吻合程度的性能指标。智能传感器能够通过软件技术等方法来校正非线性输入-输出关系导致的误差，进而提高测量精度。

目前，大多数电子传感器是采用半导体工艺制造的。在理想情况下，信号处理单元期望传感器的输入输出特性能够呈现线性关系。然而，实际上，很多传感器的输入输出特性都是非线性的，这与理想情况有所偏离。智能传感器系统，无论前端传感器的输入-输出特性有多复杂，如图6-1（a）所示，都应该能够自动按照图6-1（b）所示的反非线性特性进行刻度转换，使转换后输出与输入呈理想的直线关系，如图6-1（c）所示。智能传感器系统进行非线性转换的框图如图6-2所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| （a） | （b） | （c） |

图6-1 智能传感器系统非线性转换示意图

  
图6-2 智能传感器系统进行非线性转换的框图

### 6.1.1 查表法

查表法是一种分段线性插值法。它根据精度要求对反非线性曲线进行分段，用若干段折线逼近曲线，如图6-3所示。将折点坐标存入数据表中。测量时，查找出输入值​对应的电压值处在哪一段折线上。根据这段折线的斜率进行线性插值，求得输出值。

  
图6-3 反非线性的折线逼近

逼近反非线性特性曲线的折线数量越多，输出值越接近实际值。然而，这也会使程序代码的编写变得更复杂。下面以三段为例，折点坐标值为：

横坐标:、、、；

纵坐标:、、、；

各线性段的输出表达式为：

|  |  |
| --- | --- |
| 第I段 |  |
| 第II段 |  |
| 第III段 |  |

输出表达式的通式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.1） |

式中：k—折点的序数，3条折线有4个折点，。

由求的非线性自校正流程图如图6-4所示。

  
图6-4 非线性自校正流程图

折线和折点的确定有两种方法：近似法与截线近似法，如图 6-5 所示。无论哪种方法，所确定的折线段与折点坐标值都与所要逼近的曲线之间存在误差。按照精度要求，各点误差都不得超过允许的最大误差界，即。

|  |  |
| --- | --- |
| (a) Δ近似法 | (b) 截线近似法 |

图 6-5 曲线的折线逼近

1. Δ近似法

折点处误差最大，折点在误差界上。折线与逼近的曲线之间的误差最大值为，且有正有负。

2. 截线近似法

在曲线上的折点，误差达到最小值，这个折点的坐标值是利用标定值得到的。折线与被逼近的曲线之间的最大误差出现在折线段的中部，我们应该控制这个误差值，使其小于允许的误差界。每个折线段的误差符号都是相同的，要么全部为正，要么全部为负。

### 6.1.2 曲线拟合法

曲线拟合法采用次多项式来逼近反非线性曲线。这个多项式的系数是通过最小二乘法确定的，具体步骤如下：

1. 对传感器及其调理电路进行静态实验标定，得到校准曲线。标定点的数据如下：

|  |  |
| --- | --- |
| 输入： | ，，，， |
| 输出： | ，，，， |

2. 假设反非线性特性曲线的拟合方程为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.2） |

其中的数值由所要求的精度确定。如果，则由式(6.2)得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.3） |

式中：、、、—待求解常数。

3. 根据最小二乘法原则确定常数、、、。这个方法的基本思想是：由式（6.3）确定的各个的值，与各个点的标定值的均方差最小，即：

为了找到使函数最小化的常数、、、，需要对函数求导并令其为零，即：

令，得：

令，得：

令，得：

令，得：

整理后可得矩阵方程：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.4） |

式中：—静态实验标定点的个数；

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

求解式(6.4)可得待定系数、、、。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

4. 存储常系数、、、，并据此求取输入被测量值。重写式(6.3)为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.5） |

每次只需要将采样值代入式(6.5)中即可求得对应于电压的输入被测值。

## §6.2 自校零与自校准技术

自校零与自校准功能的核心思想是：不论何种因素，如温度、电源电压波动或自身的老化，引起了传感器输入输出特性发生漂移，偏离了初始标定曲线。只要现场实时进行标定实验，测出漂移后的输入-输出特性，并按其进行刻度转换，就能消除特性漂移引入的测量误差，使输出的被测量值更接近实际的真实值。智能传感器系统具有自校零与自校准功能，不仅可以消除零点漂移和灵敏度漂移，还能进行非线性自校正的刻度转换，从而大大提高系统稳定性和综合测量精度。

这种智能化技术的优势在于，即使测量系统的精度、重复性和稳定性较低，也能获得较高精度的测量结果。这是因为测量精度主要取决于作为标准量的基准，而非测量系统本身。因此，无需在每一个测量环节都追求高精度、高稳定性和高重复性，而是应主要集中精力在获取高精度、高稳定性的参考基准上。这样既节省了精力，又提高了测量结果的精度。

根据现场实时需要建立的输入输出特性是线性的还是非线性的，所需的标定点数和基准数目会有所不同。对于具有线性特性的系统，采用两基准法，需要两个基准。而对于具有非线性特性的系统，采用多基准法，至少需要三个基准。

### 6.2.1 两基准法

两基准法也称为三步测量法，适用于正模型可用线性方程表示的测量系统。

假设有一传感器系统，其经标定实验得到的静态输入-输出特性为如下线性方程：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.6） |

式中：—零位值，即当输入时的输出值；

—灵敏度，也被为传感器系统的转换增益。

对于理想的传感器系统，与应为保持恒定不变的常量。但实际上，由于各种内在和外来因素的影响，、都不可能保持恒定不变。例如，决定放大器增益的外接电阻的阻值会因温度的变化而变化，并引起放大器增益改变，从而使得传感器系统总增益改变，也就是系统总的灵敏度发生变化。设,其中为增益的恒定部分，为变化量；又设，为零位值的恒定部分，为变化量，则：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.7） |

式中：—零位漂移；

—灵敏度漂移。

由式（6.7）可见，零位漂移会引入零位误差，灵敏度漂移会引入测量误差。

传统的传感器技术一直追求精心设计与制作、严格挑选高质量的材料及元器件，以期将及控制在某一限度内。但这需要以高成本作为代价。

智能传感器系统是传感器与微处理器结合的智能系统，通过两个基准对系统进行实时标定，以自动校正由零位漂移或灵敏度漂移引入的误差。

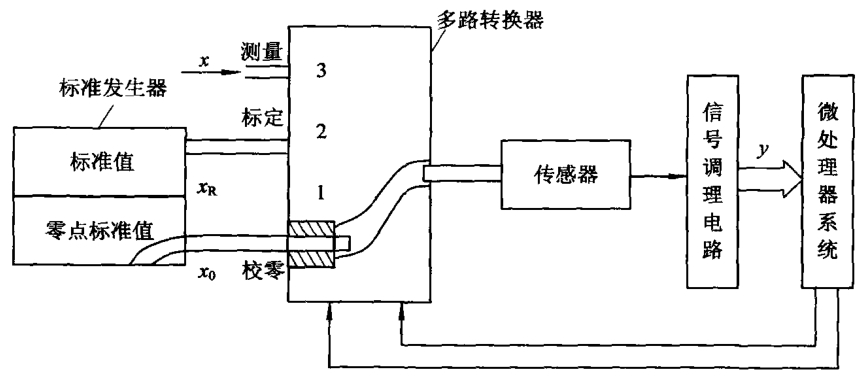
以压力传感器的自校准为例，智能压力传感器系统实现自校准功能的原理框图如图6-6所示。微处理器系统在每个特定周期内发出指令，控制多路转换器执行三步测量法，使自校准环节接通不同的输入信号。由于本系统的输入信号为压力，多路转换器实际上就是一个压力扫描阀。

1. 测量系统的零点（校零）

输入信号是零点标准值。以压力传感器为例，当测量的是相对于大气压的表压时，零点标准值即为大气压。这样，压力测量系统的输入就被设定为，从而保证系统的输出值。如果在零输入条件下，系统的输出值不为零，那么这种情况必然是由系统的误差源引起的，则有：

式中：—系统的增益；

—系统的误差源。

  
图6-6 智能传感器系统实现自校准功能原理框图

2. 实时测量系统的增益/灵敏度（标定）

输入信号是标准值，由标准压力发生器产生标准压力值，系统的输出值为。因此，被校准系统的增益/灵敏度可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.8） |

由于输出值也会受到误差源的影响，，故差值，即消除了误差源的影响。

3. 测量

输入信号为被测目标参量压力，测量系统相应的输出值为。因为：

故：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.9） |

传感器系统的精度取决于标准发生器的精度。只要系统的各环节，例如传感器、放大器、 A/D 转换器，在所需的三步测量时间内能保持稳定，就能达到较高的测量精度。在三步测量所需时间间隔之前和之后产生的零点漂移、灵敏度时间漂移、温度漂移等都不会引入测量误差。这种实时在线自校准，即使采用低精度的传感器、放大器、 A/D 转换器等环节，也能实现高精度测量。因此，智能传感器系统通过自校准功能可以实现高精度测量。

上面所述实现自校准功能的方法要求被校系统的输入输出特性呈线性，即符合式（6.6） 线性方程所描述的特性。这样，只需要两个标准值(其中一个是零点标准值)就可以完善地标定系统的增益/灵敏度。然而，对于非线性的输入输出系统，仅使用两个标准值进行三步测量的自校准方法可能无法达到理想的精度。

### 6.2.2 多基准法

当输出与输入特性出现零点或灵敏度的漂移时，仅依据标定时的输出和输入特性进行读数可能会导致较大的误差。如果在测量时的工作条件下，能对传感器系统进行实时在线标定实验，确定当前的输出/输入特性及其反非线性特性拟合方程式，并按其读数，就可以消除干扰。这是智能传感器系统实现自校准功能的理想方法。为了缩短实时在线标定的时间，虽然标定点数不能太多，但为了反映输出输入特性的非线性，标定点至少需要三个。因此，标准发生器需要至少提供三个标准值。按照这个思路实现实时在线自校准功能的步骤如下：

（1）在测量前，对传感器系统进行现场、在线的实时三点标定，即依次输入三个标定值、、，测得相应输出值、、。

（2）列出反非线性特性拟合曲线方程：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.10） |

（3）使用标准值来求解反非线性特性曲线拟合方程的系数、、。这里采用最小二乘法原则，使其方差和最小，即：

为了求得函数的极值（最小值），需要令其偏导数为零，即：

令，得：

令，得：

令，得：

整理后得到矩阵方程：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.11） |

式中：—在线实时标定点个数，；

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | |  | |  |
|  | |  | |  | |

由标定值计算出、、、、、、后，解式（6.11）矩阵方程可得待定常系数、、的表达式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

一旦确定、、的数值，就可以确定反非线性特性拟合方程式（6.10）。此时，智能传感器系统可以通过转换开关切换到测量状态，并根据公式（6.10）计算出输出值x(y)，这个值就代表了系统测量的输入目标参数x。因此，只要传感器系统在实时标定与测量期间保持其输出／输入特性不变，那么传感器系统的测量精度就完全取决于实时标定的精度。其他任何时间特性的漂移带来的不稳定性都不会引入测量误差。

## §6.3 噪声抑制技术

传感器获取的测量信号中常常会混入各种噪声和干扰信号。智能传感器系统不仅具有获取信息的功能，还具有信息处理的功能。这使得它能够从噪声中自动准确地提取出表征被检测对象特征的定量有用信息。如果信号和噪声的频谱不重合，可以使用滤波器来消除噪声。如果信号和噪声的频带重叠，或者噪声的幅值比信号大，就需要采用其他的噪声抑制方法来消除噪声。

### 6.3.1 干扰与噪声

#### 6.3.1.1 干扰与噪声的区别

噪声是绝对的，其产生或存在不受接收者的影响，是独立的，与有用信号无关。干扰是相对有用信号而言的，只有噪声达到一定数值，并和有用信号一起进入仪器并影响其正常工作时才形成干扰。

噪声与干扰是因果关系，噪声是干扰之因，干扰是噪声之果，是一个量变到质变的过程。

干扰在满足一定条件时才可以消除，噪声在一般情况下难以消除，只能抑制。

#### 6.3.1.2 形成干扰的三个因素

噪声形成干扰必须具备三个条件，主要包括噪声源、对噪声敏感的接收电路和噪声源到接收电路之间的耦合通道，其关系如图6-7所示。

  
图6-7 干扰的三要素

（1）干扰源。产生干扰信号的设备被称为干扰源，如变压器、继电器、微波设备、电机、无线电话和高压电线等产生的空间电磁信号等。

（2）传播途径。传播途径是指干扰信号的传播路径。

（3）接收载体。接收载体是指受影响的设备的某个环节。这个环节能够吸收干扰信号，并将其转化为能对系统造成影响的电器参数。

### 6.3.2 传感器的噪声

在传感器系统中，除了被检测信号等有用信号外，所有不需要的信号，也就是不希望出现的动态分量，都统称为传感器噪声。传感器噪声的表现形式通常是不规则和随机的。然而，也存在一些规则的表现形式，如电压纹波和放大器自激振荡。

#### 6.3.2.1 放电噪声

电子设备的噪声干扰通常是由电气放电现象引起的。在电气放电过程中，会向周围空间辐射出一系列从低频到高频的电磁波，这些电磁波能够传播得很远。这种由电气放电产生的干扰电磁波对各种电子设备，如通信设备、计算机设备等，都有影响。这种影响主要表现为电晕放电噪声、放电管（如日光灯、霓虹灯）放电噪声和火花放电噪声等几种形式。

#### 6.3.2.2 电气干扰源

电气噪声干扰主要包括工频、电子开关和脉冲发生器的感应干扰等几种。

（1）工频干扰。大功率输电线是典型的工频噪声源。低电平的信号线只要一定距离与输电线相平行，就会受到明显的干扰。如果工频的波形失真较大（如供电系统接有大容量的晶闸管设备），高次谐波分量的增多可能引起更大的干扰。

（2）射频干扰。高频感应加热、高频焊接等工业电子设备，以及广播机、雷达等设备，通过辐射或电源线传导，会对附近的电子测量仪器产生干扰。

（3）电子开关。电子开关虽然在通断时并不产生火花，但由于通断的速度极快，使电路中的电压和电流发生急剧的变化，形成冲击脉冲，成为噪声干扰源。在一定电路参数条件下，电子开关的通断还会带来相应的阻尼振荡，从而转化为高频干扰源。

#### 6.3.2.3 固有噪声源

检测装置内部元件因其物理性质引起的无规则波动形成的固有噪声主要分为：热噪声、散粒噪声和接触噪声。

1. 热噪声。

热噪声，亦称电阻噪声，是由电阻中电子的热运动形成的。由于电子的热运动是无规则的，因此在电阻两端形成的噪声电压也是无规则的，并且包含复杂的频率成分。电阻两端的热噪声的电压有效值可表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.12） |

式（6.12）表明，热噪声电压的有效值与电阻值的平方根成正比。因此，减小电阻、带宽和降低温度有利于降低热噪声。

2. 散粒噪声。

散粒噪声存在于电子管和晶体管中，是由于晶体管基区的载流子的无规则扩散，以及电子—空穴对的无规则运动和复合形成的。散粒效应的均方根噪声电流为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.13） |

式（6.13）表明，散粒噪声与电流的有效值与直流电流和带宽的平方根成正比。因此，减小直流电流和带宽有助于降低散粒噪声。

3. 接触噪声。

接触噪声是由于两种材料之间接触不完全，导致电导率的起伏而产生的。这种噪声主要发生在两个导体连接的地方，如继电器的接点、电位器的滑动接点等。接触噪声正比于直流电流的大小，其功率密度正比于频率的倒数，大小服从正态分布。每平方根带宽的噪声电流可近似地表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.14） |

式中：—平均直流电流；

—由材料和几何形状确定的常数；

—频率；

—带宽。

由于接触噪声功率密度正比于频率的倒数，因此在低频时接触噪声可能很大。接触噪声通常是低频电路中最重要的噪声源之一。

4. 噪声电压的叠加。

如果噪声电压（或噪声电流）的产生是彼此独立的，即不相关的，那么其总噪声电压可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.15） |

如果是两个相关的噪声电压，那么可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.16） |

式中：—相关系数，其取值范围为。当时，表示两个电压是不相关的；当在0和或0和之间时，表示两个电压是部分相关的。

### 6.3.3 噪声的耦合方式

干扰源通过一定的耦合形式对设备形成干扰通道，研究干扰的耦合途径以切断干扰通道，被认为是解决干扰问题的最有效途径。

噪声的耦合方式主要有以下几种。

#### 6.3.3.1 共阻抗耦合

共阻抗耦合发生在多个电路共享一个阻抗的情况下。具体来说，当电流通过其中一个电路时，它会在这个共享阻抗上形成一个压降。这个压降可以干扰与共享阻抗连接的其他电路。这种干扰耦合形式主要产生在以下几种情况中：

（1）电源内阻共阻抗耦合。当一个电源对几个电子线路或传感器供电时，电源内阻抗产生共阻抗耦合。

（2）公共地线的耦合。在传感器系统的公共地线上，有各种信号电流流过。由于地线本身具有一定的阻抗，在其上必然形成压降，该压降就形成对有关电路的干扰电压。

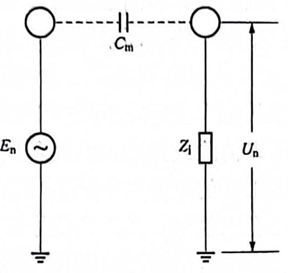
（3）信号输出电路的相互干扰。当传感器系统的信号电路有几路负载时，任何一个负载的变化都会通过输出阻抗的共阻抗耦合而影响其它输出电路。

（4）模拟系统与数字系统共地耦合干扰。通常数字系统的入地电流比模拟系统大得多，并且有较大的波动噪声，数字电路和模拟电路共地时尤为严重。

消除或减小电阻耦合的方法是采用单点供电和单点接地。在必须采用公共电源线和公共地线时，应尽量缩短公共线的长度，并加粗线径。

#### 6.3.3.2 静电耦合

静电耦合是由于两个电路之间存在寄生电容，使一个电路的电荷影响到另一个电路的现象。通常，静电耦合的等效电路如图6-8所示。

  
图6-8 静电耦合的等效电路

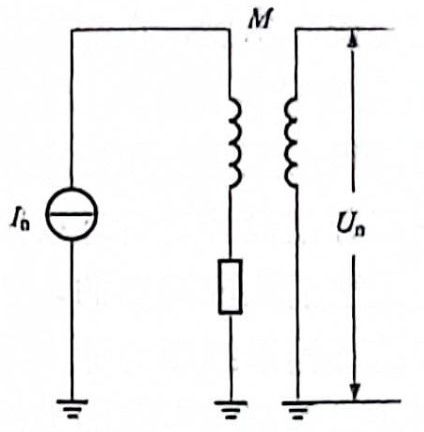
根据电路理论，上的干扰电压可表为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.17） |

式（6.17）表明，静电耦合的干扰电压与频率、寄生电容、阻抗和电场强度的乘积呈正比。因此，降低这些参数中的任何一个或多个都有助于减小静电耦合的影响。在实际应用中，调整电场强度是最为直接且有效的方式，而优化电路设计以减少寄生电容、阻抗和频率也是十分有效的方法。

#### 6.3.3.3 电磁耦合

电磁耦合，也称为互感耦合，是由于两个电路之间存在有互感，使得一个电路的电流变化能够通过磁交链影响到另一个电路的现象。电磁耦合的等效电路如图6-9所示。

   
图6-9 电磁耦合的等效电路

根据交流电路理论，可将表达式为：

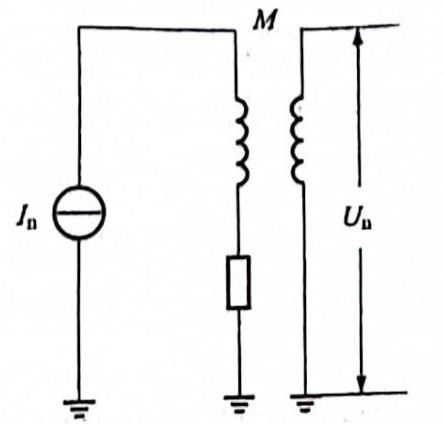
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.18） |

式中：—噪声源电流的角频率。

式（6.18）表明，干扰电压正比于噪声源电流角频率、互感系数和噪声电流。因此，降低这些参数中的任何一个或多个都有助于减小电磁耦合的影响。在实际应用中，频率的调整以及对电路进行优化设计来减小互感系数和噪声电流，将是非常有效的策略。

#### 6.3.3.4 漏电流耦合

当绝缘性能不佳时，流经绝缘电阻的漏电流会引起噪声干扰，这种现象被称为漏电流耦合。漏电流耦合的等效电路如图6-10所示。

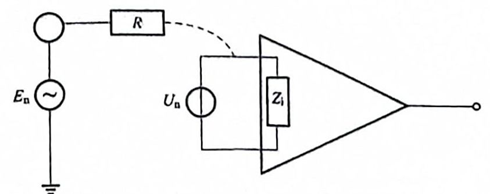
  
图6-10 漏电流耦合的等效电路

根据电路理论可得的表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.19） |

漏电流耦合经常发生在：用仪表测量较高的直流电压时；检测装置附近有较高的直流电压源时；高输入阻抗的直流放大器中。

例如：设直流放大器的输入阻抗，干扰源电动势，绝缘电阻，如图6-11所示。

  
图6-11 高输入阻抗放大器漏电干扰

根据上述给出的数据可以得出：

从上述估算可知，对于高输入阻抗放大器，即使是微弱的漏电流干扰，也将造成严重的后果，所以必须严密注意与输入端有关的电路的绝缘水平。

#### 6.3.3.5 传导耦合

传导耦合是一种噪声耦合方式，它通过导线检测到噪声，并将其传输到接收电路，从而形成干扰。最常见的情况是电源线通过噪声环境，将交变电磁场感应到电源回路中，形成感应电势。然后，这个感应电势通过电源线传送到各处，进入电子装置，造成干扰。这种干扰往往不易被发现，因此容易被忽视。

### 6.3.4 传感器低噪化方法

为了抑制噪声干扰，需要对其进行准确的分析。分析内容应该包括干扰的来源、性质、传播途径、耦合方式以及传感器电路中形成和接收干扰的电路等。抑制干扰的基本方法需要考虑形成干扰的“三要素”，在噪声源、耦合通道和干扰接收电路方面采取措施。

#### 6.3.4.1 消除或抑制噪声源

消除或抑制噪声源是抑制噪声干扰的最积极主动的措施，因为它能从根本上消除或减少干扰。在实际工作中，只有一部分在设计者管理权限范围内的噪声源可以消除或抑制，而大多数噪声源是独立存在的，无法消除或抑制。例如，自然噪声源、周围工厂的电器设备产生的噪声等。还有一种信号，传感器系统将其视为噪声，而其它设备则可能视为有用信号，对这类信号也不能进行抑制。总之，消除或抑制噪声源的方法是有一定限度的。

#### 6.3.4.2 破坏干扰的耦合通道

按传递方式不同，干扰的耦合通道分为两大类：以“路”的形式和以“场”的形式。对这两种不同传递形式的干扰，可以采用不同的对策来抑制噪声干扰。

（1）对于以“路”的形式侵入的干扰，可以采用阻截或给予低阻通路的方法，使干扰不能进入接收电路。例如，提高绝缘电阻以抑制漏电干扰；采用隔离技术来切断环路干扰；采用滤波、屏蔽、接地等技术给干扰以低阻通路，将干扰引开；采用整形、限幅等措施切断数字信号干扰传递的途径等。

（2）对于以“场”的形式侵入的干扰，一般采用屏蔽措施并兼用“路”的抑制干扰措施，使干扰受到阻截并难以以“路”的形式侵入电路。

#### 6.3.4.3 消除接收电路对于干扰的敏感性

不同的电路结构形式对于干扰的敏感程度不同。一般来说，高输入阻抗电路比低输入阻抗电路易接收干扰；模拟电路比数字电路易于接收干扰；布局松散的电子装置比结构紧凑的易于接收干扰。为了削弱电路对干扰的敏感性，可以采用滤波、选频、双绞线、对称电路和负反馈等措施。

#### 6.3.4.4 采用软件抑制干扰

对于一些已经进入电路的干扰，使用硬件抑制措施可能不容易实现或效果不佳。可以考虑在采用微处理器的智能传感器系统中，通过编入一定的程序进行信号处理和分析判断，以达到抑制干扰的目的。比如小波消噪。

## §6.4 多传感器数据融合

当今，多传感器智能化技术迅速发展，已成为改善传感器系统性能的最有效手段。多传感器智能化技术包括两大方面：

其一，将多个传感器与计算机（或微处理器）组建智能化多传感器系统；其深刻内涵是提高某点位置处（单点）某一个参量（单参量）的测量准确度，而不是一般意义的多点多参量测量系统。

其二，通过融合多个传感器获得的数据信息，实现智能化功能，从而改善传感器性能。这不仅可以抑制交叉敏感，提升传感器的稳定性，还能改善系统的线性度。

### 6.4.1 单传感器系统

通常，测量系统由单传感器系统组成。它有两个基本组成部分：传感器与数据处理单元，其框图如图6-12所示。

  
图6-12 单传感器测量系统框图

#### 6.4.1.1 单传感器系统的正模型与逆模型

在单传感器系统中，传感器部分和数据处理部分的输入输出关系均可通过数学模型进行描述。传感器部分通常使用正模型进行描述，而数据处理单元则使用逆模型进行描述。

（1）传感器部分，包含传感器及其调理电路，主要用于执行获取信息的任务。集成了调理电路的传感器部分能感知并检测物理量，并按照一定的规律将其转换为有用输出量。有用输出量，是指便于远距离传输的量，目前多为电量，如电压、电流、电脉冲的频率。输入与输出遵从一定的规律，具有一定的重复性，并可用数学表达式描述。这种描述传感器部分输入输出-关系的数学表达式称为传感器系统的正模型。对于单个传感器系统，其正模型通常为一元多项式。

（2）数据处理单元部分负责信息处理、分析和显示功能，主要任务是从传感器的输出信号数据中提取代表被测量的有效信息，并进行显示。简单来说，其最基本的功能是将传感器部分的输出量转换为被测量，并进行显示。显示的值与真值之间存在一定的偏差，而目标是尽可能地减小这个偏差。数据处理单元部分的这个基本功能称为“刻度转换”。在智能传感器系统中，刻度转换通常是由计算机或微处理器中的软件实现的。数据处理单元部分输出与输入关系的数学描述称为逆模型。对于单传感器系统，逆模型是正模型的反函数，通常为一元多项式。

#### 6.4.1.2单传感器系统的应用

单传感器系统不仅可用于单点单参量测量系统，还可以组建多点多参量测量系统。

1. 单点单参量测量系统

选用标称目标参量与被测参量同名的传感器，例如使用压力传感器测量压力，并且仅在压力传感器所在位置（单点）进行测量。常见的压力测量系统、位移测量系统、液位测量系统等一般都是基于单传感器系统的。

2. 多点多参量测量系统

多点多参量测量系统是由多个单传感器测量系统组成的，其原理框图如图6-13所示。

  
图6-13 由单传感器系统组成的多点多参量测量系统

在图6-13所示的系统中，每个传感器只能完成单点单参数的测量，如果要测量两个位置点的压力，则需要两个压力传感单元。通过多路模拟开关，可以将各点传感器输出的信号，，，按一定的顺序或同时并行地输入到微处理器中。然后进行独立的数据处理，按照各自的逆模型完成刻度转换，并输出被测参量,，，。在图6-13中，每个单传感器系统的正模型，，都与各自的逆模型，，相对应。由于模型的数学表达式都是一元多项式，图6-13所示的多点多参量测量系统在本质上仍然是单传感器系统。

### 6.4.2 交叉敏感与传感器系统的稳定性

#### 6.4.2.1 交叉敏感现象

无论是传统工艺制作的经典传感器，还是半导体工艺制作的现代传感器，都存在交叉敏感。交叉敏感是导致单传感器系统不稳定的主要因素。交叉敏感现象的主要表现是：当传感器的目标参数保持不变，而其他非目标参数发生变化时，传感器的输出值会发生变化。例如，湿度传感器的目标参数是湿度。但如果环境温度发生变化，传感器的输出值也会发生变化。这就是湿度传感器对非目标参数—环境温度的交叉敏感性。

大多数传感器不仅对温度有交叉敏感性，而且还有其他交叉敏感量。以压力传感器为例，其目标参数是压力。但是，当环境温度或供电电压/电流发生变化时，传感器的输出电压值也会发生变化。这表明压力传感器对环境温度和供电电压/电流这两个非目标参数有交叉敏感性。

#### 6.4.2.2 交叉敏感带来的问题

交叉敏感现象表明，用一元多项式方程来表征单传感器系统的正模型和逆模型是不完备的。对于上述对温度和供电电流具有交叉敏感的压力传感器，其正模型至少应用三元多项式来表征，而逆模型至少应用三元多项式来表征，才能达到较完备的效果。否则，如果正模型不能完全代表具有多元交叉敏感的实际传感器系统，那么根据这个不完备的正模型建立的逆模型得到的测量值将会有很大的误差。例如，当供电电流I恒定时，上述压力传感器在不同温度条件下的正模型和逆模型如图6-14所示。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）不同温度条件下的正模型 | （b）不同温度条件下的逆模型 |

图6-14 不同温度条件下压力传感器的正模型与逆模型

从图6-14可以看出，当传感器系统的工作环境温度从变至时，其特性也会随之漂移。如果仍然按照时的正、逆模型来求取测量值，那么它与实际值之间将存在很大的偏差。具有交叉敏感性的传感器系统性能不稳定，准确性差，这是常规单传感器系统普遍存在的问题。

### 6.4.3 多传感器技术改善传感器系统性能的基本方法

多传感器技术改善传感器系统性能的基本方法有模型法和冗余法两种。

#### 6.4.3.1 模型法

采用模型法消除干扰量影响，改善传感器稳定性的基本思路是：当主测参量为的传感器存在干扰量时，如果想要消除干扰量的影响，就需要监测该干扰参量，并建立一个测量与的多传感器系统。如果想要消除个干扰量的影响，就需要建立一个测量个参量的多传感器系统。基于模型法改善稳定性，消除两个干扰量影响的三传感器-智能传感器系统框图如图6-15所示。

   
图6-15 基于模型法的三传感器-智能传感器系统

1. 传感器单元

为主传感器及其调理电路单元。其目标参量为压力。、分别为辅传感器及其调理电路单元，它们的目标参量分别是温度和电流，这些参量是主传感器的干扰量。每个传感器的输出分别为：

主传感器（压力），是三元函数模型；

辅传感器（温度），可用一元函数模型近似；

辅传感器（电流），可用一元函数模型近似。

图6-15中的多传感器-智能传感器系统，是为消除个干扰量（温度、电流）改善压力传感器（压力）而建立的（）三传感器-智能传感器系统。系统中传感器的总数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.20） |

式中：—欲消除的干扰量数。

2. 数据融合处理单元

图6-15中的数据融合处理单元是存入计算机内进行数据融合的智能化软件模块。该模块实现了一种由个传感器输出的数据、和求目标参量的融合算法。根据已建立的逆模型

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.21） |

计算被测目标参量，其计算所得的值消除了干扰量与的影响，更接近实际值。

模型法不仅消除了交叉敏感性以提高传感器系统的稳定性，而且进行了非线性校正，从而改善了系统的线性度。

建立逆模型的方法有很多，本书将介绍两种常用的方法：多元回归分析法和机器学习算法（如神经网络和支持向量机）。

#### 6.4.3.2 冗余法

采用冗余法消除干扰量影响，改善传感器稳定性的基本思路是：使用至少三个与主测参数相同类型的传感器来建立一个多传感器系统，以测量主测参数，而不是监测主测参数的传感器的干扰量或探究干扰量对主测参数传感器的影响规律。这种方法可以消除干扰量的影响，从而改善传感器的稳定性。基于冗余法消除传感器漂移改善稳定性的多传感器-智能传感器系统框图如图6-16所示。

  
图6-16 基于冗余法的三传感器一智能传感器系统框图

1. 传感器单元

传感器单元均为主测同一参量的传感器，它们的输出均受干扰量，，的影响，每个传感器的输出分别为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 传感器 |  |  |
| 传感器 |  |  |
|  |  |  |
| 传感器 |  |  |

2. 数据融合处理单元。

图6-16中的数据融合处理单元是在计算机中进行数据融合处理的智能化软件模块，比如主成分分析法。

## §6.5 频率自补偿技术

### 6.5.1 传感器系统的动态误差

假设一个传感器系统的频率特性为，其理想频率特性为，两者之间存在误差。则动态幅值误差可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.22） |

式中：—动态幅值误差；

—测量系统频率特性的模；

—理想频率特性的模。

#### 6.5.1.1 一阶系统的动态误差

一阶系统的工作频段满足：

式中：—被测信号的角频率；

—系统转折角频率，，其中为系统的时间常数。

对于一阶系统，其频率特性为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.23） |

式中：—直流放大倍数；

令 ，则的幅频特性为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.24） |

一阶系统理想的频率特性的模为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.25） |

式中：—时一阶测量系统的直流放大倍数，为一常量。

将式（6.24）和式（6.25）代入式（6.22），可得一阶系统动态幅值误差表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.26） |

#### 6.5.1.2 二阶系统的动态误差

二阶系统的工作频段满足：

式中：—无阻尼固有振荡角频率。

对于二阶系统，其频率特性为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.27） |

式中：—直流放大倍数；

—阻尼比。

令，则的幅频特性为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.28） |

二阶系统理想的频率特性的模为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.29） |

式中：—时二阶测量系统的直流放大倍数，为一常量。

将式（6.28）和式（6.29）带入式（6.22），可得二阶系统动态幅值误差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.30） |

系统对不同角频率的输入信号会产生程度不同的动态误差。对于动态幅值误差，根据式（6.26）和式（6.30），有表6-1所示的关系。

表6-1 信号频率与动态幅值误差的关系

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 一阶系统 | 频率比 | 1/10 | 1/7 | 1/6 | 1/5 | 1 |
| 动态幅值误差 | 0.5% | 1% | 1.4% | 2% | 29.3% |
| 二阶系统 | 频率比 | 1/10 | 1/7 | 1/6 | 1/5 | 1/3 |
| 动态幅值误差 | 1% | 2% | 3% | 5% | 10% |

由表6-1可见，如果想要保证动态幅值误差，则一阶系统的转折频率应比信号频率大5倍，即。若是二阶系统，则无阻尼固有频率应比信号频率大7倍，即；所以，当信号的频率高，而测量传感器的工作频带不能满足测量允许误差的要求时，则希望扩展系统的频带，以改善系统的动态性能。智能传感器系统具有强大的软件优势，能够补偿原有系统动态性能不足。通常，主要采用两种方法实现频率补偿：数字滤波法和频域校正法。

### 6.5.2 数字滤波法

数字滤波法的补偿思想是：在现有的传递函数为的传感器系统中，附加一个传递函数为H(s)的环节，使系统总传递函数满足动态性能的要求。这个附加的串联环节，可以由软件编程设计的等效数字滤波器来实现。

#### 6.5.2.1 工作原理

以一阶环节为例，说明数字滤波法扩展频带的原理。已知传感器为一阶系统，其传递函数和频率特性分别为：

现欲将其频带扩展倍，即转折角频率为：

也就是将它的时间常数减小倍，即：

通过附加一个串联环节（称为校正环节）达到上述目的。

1. 校正环节的传递函数

串入一个校正环节后，与原传感器系统组成一个新的系统，如图6-17所示。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）系统框图 | C:\Users\qq251\Desktop\1111111111111111111111111111.jpg （b） |

图6-17 串联校正环节

应具有希望的动态特性，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.31） |

于是校正环节的传递函数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.32） |

2. 校正环节的实现

由后向差分法求得模拟滤波器的等效数字滤波器为：

其编程算式为：

再将上式改写为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.33） |

其中：

式中：—采样时序序号；

—采样间隔。

通过编程实现公式（6.33），就能构建所需的串联校正环节的等效数字滤波器。然而，为了实现这一点，必须了解扩展频带环节的原始动态特性。具体来说，需要知道表征一阶惯性环节动态特性的特征参数。确定值的方法有两种：一是频率特性法，要求输入信号为频率可调、幅值恒定的正弦波信号；二是阶跃响应法，要求输入信号为阶跃信号。对于被测量是非电量的传感器系统，通常采用阶跃响应法。这是因为获得非电量，如温度、压力的阶跃信号比获得正弦信号要容易得多。

#### 6.5.2.2 阶跃响应法测定时间常数

1. 阶跃响应特性。

一阶系统的输入信号为如下阶跃函数时：

该一阶系统的输出为一指数函数：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.34） |

为一阶系统的阶跃响应，如图6-18所示。

  
图6-18 一阶系统的阶跃响应

初始状态，，随时间增加按指数规律上升，时趋于稳态值。

时间常数是这样一个时间，当 时

输出值到达的时间越短，则值越小，系统的动态性能越好，对信号的响应越快。

2. 时间常数的确定

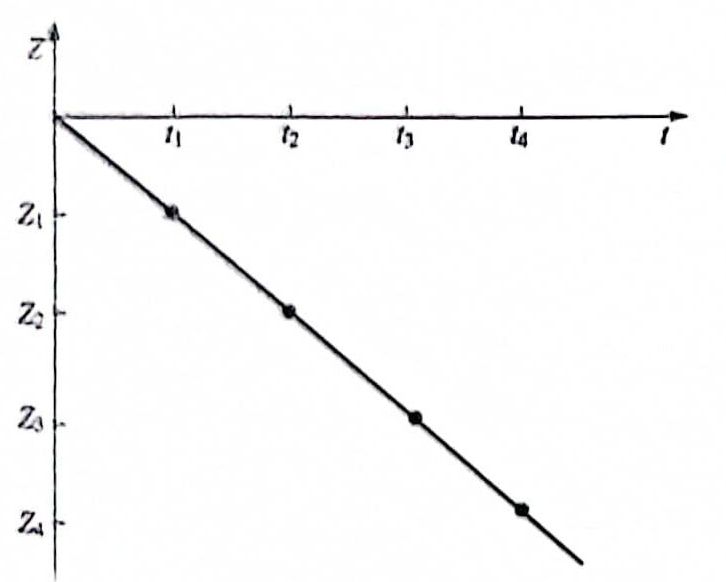
将式（6.34）改写为：

两边取对数得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.35） |

其中：

式（6.35）表明，与时间呈线性关系，如图6-19所示。

  
图6-19 -图

故由-图可求时间常数为:

### 6.5.3 频域校正法

系统动态特性频域校正法的过程如图6-20所示。

  
图6-20 系统动态特性频域校正法的过程

与数字滤波一样，这种方法也必须已知原系统的传递函数。否则，需要事先通过实验测定表征动态特性的特征参数，从而得出原系统的传递函数和频率特性，进而用软件实现频域校正。

频域校正步骤如下：

1. 采样

对输入信号的输出响应信号进行采样，得时间序列，，1，2，，。信号记录长度，为采样间隔，为采样频率。采样频率必须满足采样定理：

式中：—输入信号的最高频率。

2. 频谱分析

对采样信号进行频谱分析，即进行快速傅里叶变换（FFT），得出它的频谱，，1，，，其基波频率。

3. 做复数除法运算

已知系统频率特性为：

式中：—系统的输出信号的频谱；

—系统输入信号的频谱。

由于计算机是离散时间系统，只能得到离散的谱线，即：

式中：—谱线序号，，1，，。

故系统频率特性的离散时间表达式为：

将与做复数除法，可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.36） |

式中：—系统被测输入信号频谱。

4．进行傅里叶反变换

对频谱进行傅里叶反变换（IFFT）即可得原函数的离散时间序列，，1，2，，。这个原函数正是要测量的系统的输入信号的真值。这就意味着：若不施行频域校正，传感器系统输出的响应信号就会发生畸变，用畸变了的代表被测的输入信号，当然会存在误差。频域校正是把畸变的经过处理找到被测输入信号的频谱，进而获得了被测的输入信号的真值，于是便可以消除测量系统的误差。

## §6.6 增益的自适应功能

对智能传感器系统增益的设置需要综合考虑多个因素，包括系统自身的数据容量、被测量的范围、系统的精度、信噪比、灵敏度和分辨率等。增益过小可能导致数据信息容量浪费，信噪比降低，测量误差增大，无法满足测量要求。相反，增益过大可能导致系统内的数据信息容量不足，从而损失信息。因此，增益设置需要仔细权衡各种因素，根据具体情况进行折中确定，没有通用的规则。接下来，将通过一个例子来说明增益选择的基本规则。

**【例6-1】**考虑一个增益可控放大器跟随一个8位A/D转换器组成的子系统。由A/D转换器量化噪声产生的相对误差不得大于0.5％，试确定量程切换的判据。

解： 已知位A/D转换器的量化值为:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.37） |

式中：—A/D转换器满刻度输出时对应电压值；

—转换器的位数。

尽管输入的是从连续变化的模拟量，但是A/D转换器的输出只能将的电压值用个离散值来表示。如果某一输入电压在与之间，则：

（1）当时，A/D转换器输出为；

（2）当时，A/D转换器输出为。

因此，在A/D转换过程产生的量化误差可以看作随机变量—噪声。由于采取四舍五入形式，量化误差在之内。在最坏的情况下，有：

则最大量化误差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.38） |

根据题意要求，由A/D转换器量化噪声产生的相对误差不得大于0.5％，则有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.39） |

则输入电压：。

上述表明：输入电压的最小值不得小于100bit。也就是说，当输入电压经A/D转换后的数字量少于100bit时，必须指令前级放大器自动切换至高一档的增益。如果允许输入电压最大值，那么8位A/D转换器的输出将达到，这样会不可避免地损失信息，因为大于的值，也只能输出，所以应将上限切换电压设置得小于， 例如：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.40） |

这样，当时，系统自动切换量程将前级放大器的增益换小一挡。

综上所述，可得到量程切换的判据为：时，换小量程，增大增益；时，换大量程，减小增益。

由于增益自适应控制的情况千变万化，没有一个统一的规则，因此应当根据实际情况进行分析处理。但是，通过上述例子可以清楚地看出，增益自适应控制的出发点是固定增益电路出现了难以避免的不足，而增益自适应控制的优点也正是弥补了这个不足。需要强调的是：增益自适应控制是随着微控制器、大规模集成电路技术的发展应运而生的，这是实现增益自适应控制的硬件平台。

## §6.7 自诊断

科技的发展催生了各种航天器，如火箭和导弹等。这些航天器的控制系统中广泛使用了各种传感器，用于实时监测其运行状态。当这些传感器在使用过程中出现故障时，无论是硬故障（传感器损坏）还是软故障（传感器性能变差），都可能对整个系统的运行产生不利影响。因此，对于任何传感器故障，都需要及时进行检测和隔离，这项工作的重要性正在日益被认识到。

目前，传感器故障诊断主要采用三种方法：硬件冗余方法、解析冗余方法和人工神经网络方法。每种方法都有其优点和缺点。接下来，将简要介绍硬件冗余方法和解析冗余方法的优缺点。

### 6.7.1 硬件冗余方法

硬件冗余方法是最早采用的诊断方法，其核心思想是为容易失效的传感器设置备份，并通过表决器进行管理。换句话说，硬件由两个或更多完全相同的设备组成，这些设备测量的是相同的参数。通过比较冗余设备的输出，可以验证系统输出的一致性。

通常，双重冗余配置可以判断是否存在传感器故障，但无法分离故障；而三重冗余系统即可以判断故障的存在，还可以进行故障分离。硬件冗余方法的优点在于不需要被控对象的数学模型，并且具有很强的鲁棒性；然而，其缺点在于设备复杂，体积和质量较大，且成本较高。对于一些重要的系统，如火箭和航天飞机，硬件冗余备份方法是可行的。然而，在大多数情况下，特别是当需要大量参数时，硬件冗余方法的不足就变得明显。

### 6.7.2 解析冗余方法

解析冗余方法的核心是构建包含传感器的被测对象的动态模型。然后，通过比较模型输出和实际输出的差异，来判断传感器是否发生故障。其原理框图如图6-21所示。

  
图6-21 解析冗余方法原理框图

由图6-21可以看出，解析冗余方法的主要步骤如下：

（1）模型设计

根据被控对象的特性、传感器的类型、故障类型和系统要求等，建立相应的被控对象的数学模型。

（2）设计与传感器故障相关的残差

在相同控制量的作用下，传感器输出信号和模型预测值之差，即为残差。如果传感器没有故障，那么残差应该为零。然而，如果传感器出现故障，残差就不再为零，因为它包含了传感器的故障信号。

（3）进行统计检验和逻辑分析，以诊断某些类型的传感器故障

根据数学模型产生方式的不同，解析冗余方法可以分为多种不同的类型，如观测器组方法、故障检测滤波器方法、一致性空间方法、状态和参数辨识方法和基于知识的方法等。总的来说，解析冗余方法进行传感器故障诊断，能够定位故障来源，确定哪个传感器发生了故障，估计故障大小和严重程度。同时，该方法不需要增加硬件设备，因此成本较低。

然而，这种方法也有其局限性。当系统参数存在不确定性、随时间变化或系统中存在未知的输入干扰时，都会对诊断结果产生负面影响。这就要求方法具备鲁棒性，即传感器故障诊断和检验算法必须能够抑制系统参数时变、未知输入干扰等干扰因素的影响。此外，该方法还需要获得被控对象的精确数学模型。因此，当系统存在高度非线性，或者难以得到系统的精确数学模型时，这种方法就无能为力了。需要注意的是，该方法仅能用于传感器的故障诊断，而无法恢复故障传感器的信号。

要了解解析冗余方法的具体步骤，可以参阅容错控制方面的书籍。

## §6.8 曲线拟合的Python实现

在Python中，通常使用numpy库来实现曲线拟合。在前面的章节中，已经介绍过numpy库的安装与引用，这一节将重点介绍两个用于曲线拟合的函数：polyfit()和polyval()。

在这两种函数中，polyfit()函数的功能是根据给定的数据点找到一个合适的多项式函数，以便尽可能地拟合数据点的分布。其函数原型为：

numpy.polyfit(x, y, deg, rcond=None, full=False, w=None, cov=False)

输入参数为：

x：采样点的横坐标数组；

y：采样点的纵坐标数组；

deg：多项式的阶数。阶数越高，拟合精度越高，但会增加计算时间，甚至可能导致过拟合，因此需要权衡选择。

rcond：相对条件数，用于控制奇异值分解；

full：是否返回诊断信息；

w：y坐标的权重数组；

cov：是否返回估计值及其协方差矩阵

输出参数为：

p：一维数组，包含多项式的系数，按降幂排列；

V：只有当 full == False 和 cov == True 时才存在。这是多项式系数估计值的协方差矩阵，其中矩阵的对角线是每个系数的方差估计值。

另一个函数polyval()的功能是根据给定的多项式系数计算多项式在x中的点处的值。其函数原型为：

numpy.polyval(p, x)

输入参数为：

p：向量，表示多项式的系数，按降幂排序；

x：一个数，表示多项式的自变量。

输出参数为：

y: 函数返回多项式在x处的值。

实例代码如下：

# 引用第三方库

|  |
| --- |
| **import numpy as np**  # 定义输入样本数据  **x = np.array([0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0])**  **y = np.array([0.0, 0.8, 0.9, 0.1, -0.8, -1.0])**  # 使用numpy的polyfit函数进行数据拟合，得到多项式的系数  **coefficients = np.polyfit(x, y, 3)**  # 使用numpy的poly1d函数生成多项式方程  **polynomial\_equation = np.poly1d(coefficients)**  # 使用numpy的polyval函数进行预测  **y1= np.polyval(coefficients, 3.5)** |

# 输出显示多项式方程和预测结果

**print("多项式方程为：", polynomial\_equation)**

**print("预测结果为：", y1)**

执行上述代码，我们可以得到以下结果：

|  |
| --- |
| 多项式方程为:  预测结果为： -0.3473 |

|  |  |
| --- | --- |
| * 价值观 | 创新 |
| 《孙子兵法》曰: “凡战者，以正合，以奇胜”。惟改革者进，惟创新者强，惟改革创新者胜。创新是引领发展的第一动力，是一个国家兴旺发达的不竭动力。在智能功能的发展进程中，创新精神犹如璀璨的星辰，照亮了前行的道路。  创新精神首先体现在对传统思维的突破上。不再满足于现有的智能功能模式和应用场景，勇于挑战既定的框架，以全新的视角审视问题和需求。比如，在智能家居领域，不再局限于简单的设备控制，而是通过创新，实现基于用户行为和习惯的自适应智能调节。  在技术研发方面，创新精神激发着研究人员不断探索前沿科技。将人工智能、大数据、物联网等技术深度融合，创造出更强大、更智能的功能。创新精神还体现在对用户体验的极致追求上。关注用户的细微需求和潜在期望，通过创新的设计和功能实现，为用户带来前所未有的便捷和价值。同时，创新精神也促使着行业间的跨界合作与交流。不同领域的知识和技术相互碰撞，激发出新的灵感和创意，共同推动智能功能向更广泛、更深入的方向发展。  总之，创新精神是智能功能发展的灵魂，引领着我们不断开拓未知的领域，创造出更加智能、高效、便捷的未来。创新的科学属性指明了行动方向：矢志探索，突出原创；聚焦前沿，独辟蹊径；需求牵引，突破瓶颈；共性导向，交叉融通。 | |

## 习题6

1. 在进行曲线拟合时，通常采用（ ）来确定多项式的系数。

A. 牛顿插值法 B. 拉格朗日插值法

C. 最小二乘法  D. 傅里叶变换法

2. 自校零与自校准技术通过（ ）来提高测量精度？

A. 增加传感器的数量

B. 实时监测和校正传感器的漂移

C. 减少测量时间

D. 提高传感器的制造精度

3. 下述抑制噪声干扰的措施中，不正确的是（ ）。

A. 使用滤波器消除噪声

B. 采用屏蔽和接地技术

C. 增加信号的幅值以覆盖噪声

D. 优化电路设计减少寄生电容

4. 交叉敏感现象在传感器系统中会引起（ ）。

A. 测量成本的提高 B. 测量精度的降低

C. 测量速度的增加 D. 测量范围的扩大

5. 解析冗余方法在传感器故障诊断中的主要优势是（ ）。

A. 不需要增加硬件设备

B. 能够自动修复故障传感器

C. 可以实时监测所有类型的故障

D. 对于非线性系统的诊断效果最佳

6. 曲线拟合法中，多项式的系数是通过 确定的，这种方法的基本思想是使 最小。

7. 自校零与自校准技术可以消除由于 、 或自身的老化等因素引起的传感器输入输出特性的漂移。

8. 交叉敏感现象是指当传感器的目标参数保持不变，而其它 发生变化时，传感器的输出值会发生变化，这会导致传感器系统的 下降。

9. 解析冗余方法在传感器故障诊断中，通过构建包含传感器的被测对象的 ，并比较模型输出和 的差异来判断传感器是否发生故障。

10. 什么是非线性校正技术？它的目的是什么？

11. 什么是查表法？它的基本原理是什么？

12. 什么是曲线拟合法？它的优点是什么？

13. 请简述自校零与自校准功能的核心思想。

14. 以压力传感器为例，简要说明两基准法的基本步骤。

15. 形成干扰的三个因素是什么？它们之间有什么关系？

16. 请简述抑制噪声干扰的措施。

17. 什么是多传感器数据融合，它包括哪两大方面？

18. 什么是交叉敏感现象？它会给传感器系统带来什么问题？

19. 什么是频域校正法？它的基本步骤有哪些？

20. 什么是解析冗余方法？它的主要步骤有哪些？

# 第7章 诚实守信，道义先行——多元回归法及其在智能传感器系统中的应用

|  |  |
| --- | --- |
| 本章内容 | * 多元回归法 * 多元回归方程 * 多元回归法在传感器温度补偿中的应用 * 多元回归法及其性能指标计算的Python实现   本章将重点介绍多元回归法及其在智能传感器系统中的应用，主要包括多元回归法、多元回归方程及其在传感器温度补偿中的应用。此外，本章还简要介绍了多元回归法及其性能指标计算的Python实现。通过对这些技术的学习，我们可以更好地理解和掌握多元回归方程的原理和应用，并在实际应用中更好地运用这些技术，从而提高传感器的测量精度和稳定性。 |
| 知识目标 | * 1. 掌握多元回归方程的原理和应用； * 2. 掌握传感器温度补偿的原理； * 3. 掌握传感器温度补偿的python实现方法。 |
| 能力目标 | 理解多元回归法的基本概念，准确描述多元回归方程的原理和要点；掌握传感器温度补偿的原理，了解其在智能传感器系统中的重要性；熟练掌握多元回归法及其性能指标计算的Python实现方法，能够应用这些技术解决实际问题；对于传感器的温度补偿问题，有深入的理解，能够运用多元回归法进行有效的补偿，提高传感器的测量精度和稳定性；初步具备多元回归法在智能传感器系统中的应用基础，能够在实际问题中进行应用。 |
| 思政目标 | * 强化责任意识，严格遵循科学方法和流程，保证传感器温度补偿过程的准确性和可靠性； * 提升耐心和细心程度，仔细观察和处理信息细节，认真对待每一个环节，不放过任何一个微小的细节因素； * 提升学习能力和自我学习意识，不断跟进新技术和新方法。 |
| 重点难点 | 重点：掌握多元回归方程的原理和应用；掌握传感器温度补偿的原理。  难点：掌握多元回归方程的原理。  本章节适合各种学时设置的教学安排。 |

## §7.1 多元回归分析法与多元回归方程

多元回归分析法建立逆模型的核心思想是：为了消除一个或多个干扰量对主传感器测量目标参量的影响，就要设置个监测干扰量的辅助传感器，以建立更完备的逆模型。这个逆模型是一个元常系数高阶回归方程，其中模型的阶数由允许的误差范围来决定。

当需要消除一个干扰量（即）时，需要建立一个包含两个传感器的智能传感器系统，其逆模型为二元回归方程，以进行两个传感器的数据融合。类似地，当需要消除两个干扰量（即）时，需要建立一个包含三个传感器的智能传感器系统，其逆模型为三元回归方程，以进行三个传感器的数据融合。

### 7.1.1 二元回归法

两个传感器可以测量并获取两个参量的信息。有多种算法可以融合这两个信息，其中一种是曲面拟合算法，也就是二元回归分析法。接下来，将以压力传感器为例来说明这种数据融合算法。

#### 7.1.1.1 二元回归分析法基本原理

假如压力传感器的输出电压对温度有交叉灵敏度。如果仅使用传统的一维标定实验来获取压力传感器的输入（压力）和输出（电压)特性曲线，并用其计算被测压力值，将会产生较大的误差。因为被测量不是输出电压的一元函数。为了更准确地测量压力，需要用另一个温度传感器的输出电压来表示温度，并用和的二元函数来描述压力，即：

由二维坐标（,）决定的位于一个平面上，可以用二次曲面拟合方程（即二元回归方程）来描述，即：

同理有：

忽略高阶无穷小，可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.1） |

式中为常系数；为回归方程式的项数，根据允许的误差来选取。

忽略高阶无穷小，可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.2） |

式中为常系数；

如果式（7.1）和式（7.2）中的常系数均已知，那么这两个式子就是求取被测量P或T更完备的逆模型，从而可以消除交叉敏感。为了得到这些常系数，需要首先进行二维标定实验，并利用最小二乘法原理来确定使均方误差最小的常系数。

#### 7.1.1.2 实验标定

在压力传感器的量程范围内，确定个压力标定点。同样，在工作温度范围内，确定个温度标定点。由压力与温度标准值发生器产生的在各个标定点的标准输入值为：

：，，，，

：，，，，

每个标定点都有一个标准输入值及其对应的输出值和。因此，就可以在个不同温度状态下对压力传感器进行静态标定。总共可以得到个标定点。每个标定点都有4个标定值，也称为一个样本对，包括两个传感器的输入量（即主测量压力和辅参量温度）以及它们相应的输出量（分别为和）。根据这些标定数据，可以获得不同温度状态的输入输出特性，即特性簇，如图7-1（a）所示。同时，还可以获得不同压力状态的温度传感器的输入输出特性，即特性簇，如图7-1（b）所示。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）特性簇 | （b）特性簇 |

图7-1 压力传感器输入输出特性

#### 7.1.1.3 二元回归方程待定常数的确定

为确定式（7.1）和式（7.2）所表征的二元回归方程式的常系数，通常采用最小二乘法，求取使均方误差最小的常系数值。系数和的求法相同。以下以为例说明求取步骤。

（1）第个标定点的压力数据计算值（以下简称计算值）为，，根据式（7.1）可得：

（2）第个标定点的压力标定值与计算值，之间的误差为，对应的方差为，则有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.3） |

式中，，，，，。

（3）所有标定点压力标定值与计算值之差的平方和为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.4） |

式中，为标定点总数，当压力标定点数，温度标定点数时，。

由式（7.4）可见，是常系数，，，，，的多元函数。

（4）要找到回归方程待定系数的最小二乘最优解，可以通过求解多元函数的极值来实现。对函数求关于的偏导数并令其等于0可得，，,。展开该式可得以下六个方程：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.5） |

由式（7.5）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.6） |

式中，，2 ，，；，1，2，，。

根据线性代数知识，可将式（7.6）写成矩阵形式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.7） |

式中：—待求常系数矩阵，;

—维系数矩阵，;

—由标定压力值构成的维列矩阵。

于是，回归方程待定常系数，，，，，的最小二乘最优解的求解式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.8） |

这就是求解最小二乘问题的方程组法。

### 7.1.2 三元回归分析法

#### 7.1.2.1 单一功能（只测一个目标参量）的三传感器数据融合

通过监测两个非目标参数，也就是两个干扰量，可以有效地消除这些干扰量对测量结果的影响，从而提高单功能传感器对目标参数的测量精度。为了实现这一目标，可以选择任何能够测量这两个干扰量的传感器。只需将它们与测量目标参数的传感器一起放置在同一测量场中，使其受到相同强度的干扰。

仍以压阻式压力传感器为例，其输出不仅受到工作环境温度的影响，还受到电源供电电流的影响。为了消除这两个参量的影响，需要对和分别进行监测，建立如图7-2所示的三传感器数据融合的智能传感器系统。

  
图7-2 三传感器数据融合智能传感器系统框图

对图7-2所示的三传感器数据融合智能传感器系统进行三维标定实验，确立三元回归方程：

式中：—规定的被测参量压力；

—压力传感器输入压力为P时的输出电压值；

—监测工作环境温度用温度传感器的输出电压值；

—监测供电电流用传感器的输出电压值；

—可忽略的高阶（大于二阶）无穷小量。

忽略高阶无穷小量，可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.9） |

利用三维标定实验得到的标定数据，就可以根据均方误差最小原则确定式（7.9）中的常系数。这个三元回归方程就可以用来建立图7-2所示的三传感器数据融合智能传感器系统，以抑制两个干扰量的交叉敏感，提高原传感器系统对温度漂移和电源波动的稳定性。

#### 7.1.2.2 三功能（测量三个参量）的传感器数据融合

以ST-3000智能变送器为例，该传感器可以测量压力（差）、静压和温度三个参量这三个参量的传感器之间存在交叉灵敏度，每个传感器的刻度转换逆模型都应是三元回归方程：

上述三个方程都如式（7.9）所示，共有个未知待定常数，需要由三维标定实验数据来确定。

为简化处理，可以先进行降维处理。假设对静压的测量精度要求不高，可将其视为一元函数来对待，即：

如果静压主要影响压力（差）的零点输出，则干扰量可以用表示。与静压输出的关系可以由阶多项式方程描述：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.10） |

式中：，，，，—可由标定实验确定的待定常系数。

选定个不同静压值（，2，3，，），测定相应压力（差）的零点（，2，3，，），即：

利用上述标定数据，可以根据均方误差最小原则确定式（7.10）中的常系数。

在测量过程中，首先需要对与三个输入量、、相应的三个输出量、、进行采样。然后根据采样值代入式（7.10）计算，最后与采样值做减法，得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.11） |

式中：—消除了零点干扰量后的压力（差）输出值

据此，被测压力（差）值降为二元函数，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.12） |

静压对温度输出基本上没有影响，故被测温度可以由二元函数表示，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.13） |

降元后，与的数据可以通过二传感器数据融合技术进行处理，即可以采用式（7.1）和式（7.2）来进行数据融合处理。

## §7.2 基于二元回归分析法实现压力传感器的温度补偿

本节拟设计一个具有温度自补偿功能的智能传感器系统，以实现压阻式压力传感器的温度补偿。该智能传感器的原理框图如图7-3所示。

  
图7-3 温度自补偿智能传感器系统原理框图

由图7-3可见，数据融合模块接收来自两个传感器的输入：一个是需要进行温度补偿的主传感器，即压力传感器；另一个是监测温度干扰的辅助传感器。对一个干扰量的回归模型分析，将式（7.1）作为逆模型进行两传感器数据融合。具体设计步骤如下。

### 7.2.1二维标定实验

主传感器是JCY-101型压阻式压力传感器，输入量为压力，输出量为电压。由于主传感器的输出会受到环境温度的影响，因此需要使用辅助传感器来测量温度，输出量为电压。

为了进行标定，采用压力标准值发生器为主传感器提供标准输入值，并采用恒温箱为辅助传感器提供标准温度值。在主传感器的量程内，选取个不同的压力值作为标定点。这些压力值分别为：

（）：0，1.0，2.0，3.0，4.0，5.0，，2，，；

同时，在主传感器的工作温度范围内（），选取个不同的温度值作为标定点。这些温度值分别为：

（）：21.5，28.0，34.0，44.0，50.0，70.0，，2，，。

主传感器和辅助传感器被放置在同一个恒温箱中，并逐一调整恒温箱的温度，使其达到每一个温度标定点。为保证实验数据的准确性，首先在每个温度环境下等待15分钟，使传感器达到稳定状态。然后，给主传感器依次施加每一个压力标定点。最后，依次记录主传感器和辅助传感器的输出电压和，以及施加的压力。本实验设置了组温度值和组压力值，共采集个标定数据点，如表7-1所示。

表7-1 JCY-101型压力传感器的二维实验标定数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | 0 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 |
| 21.5 |  | -13.84 | 10.69 | 28.88 | 47.05 | 65.19 | 83.36 |
|  | 27.64 | 26.95 | 26.43 | 25.92 | 25.45 | 24.94 |
| 28.0 |  | -13.49 | 9.32 | 26.34 | 43.12 | 59.99 | 76.82 |
|  | 34.41 | 33.93 | 33.47 | 32.93 | 32.47 | 31.91 |
| 34.0 |  | -10.80 | 7.54 | 24.84 | 42.05 | 59.25 | 76.38 |
|  | 37.76 | 36.92 | 36.44 | 35.97 | 35.39 | 35.09 |
| 44.0 |  | -9.72 | 6.56 | 23.87 | 41.21 | 58.58 | 75.87 |
|  | 54.88 | 53.97 | 52.87 | 52.41 | 51.93 | 51.55 |
| 50.0 |  | -8.62 | 4.86 | 21.84 | 38.70 | 56.32 | 73.75 |
|  | 65.77 | 64.79 | 63.84 | 62.91 | 61.99 | 61.06 |
| 70.0 |  | -7.72 | 3.72 | 21.25 | 38.60 | 55.56 | 73.28 |
|  | 86.12 | 84.94 | 83.78 | 82.65 | 81.55 | 80.45 |

### 7.2.2 数据处理

#### 7.2.2.1 计算常系数并建立二元回归方程

利用表7-1的实验标定数据和（）可以构成式（7.7）中的矩阵和矩阵。利用这两个矩阵求解方程组（7.8），即可得各常系数的值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |

将计算得出的常系数值代入式（7.1）中，即可确定用于消除交叉敏感的逆模型。利用这个逆模型编写的程序可以实现基于回归分析法的压力传感器的温度补偿。

#### 7.2.2.2 融合计算结果

将测量值代入上述常系数值确立的逆模型，可以计算得到目标参数P。这个参数，即融合结果，如表7-2所示。

表7-2 不同温度条件下压力标定值与融合处理输出的压力计算值（MPa）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 温度  目标参量  压力 | 21.5 | 28.0 | 34.0 | 44.0 | 50.0 | 70.0 | 平均值 |
| 1 | 标定值 | 0.00 | | | | | | |
| 计算值 | -0.19 | -0.14 | 0.02 | 0.11 | 0.16 | 0.12 | 0.03 |
| 偏差 | -0.19 | -0.14 | 0.02 | 0.11 | 0.16 | 0.12 | 0.03 |
| 2 | 标定值 | 1.00 | | | | | | |
| 计算值 | 1.12 | 1.10 | 1.02 | 1.03 | 0.95 | 0.82 | 1.02 |
| 偏差 | 0.12 | 0.10 | 0.02 | 0.03 | -0.05 | -0.18 | 0.02 |
| 3 | 标定值 | 2.00 | | | | | | |
| 计算值 | 2.11 | 2.03 | 1.98 | 2.02 | 1.94 | 1.90 | 2.00 |
| 偏差 | 0.11 | 0.03 | -0.02 | 0.02 | -0.06 | -0.1 | 0.00 |
| 4 | 标定值 | 3.00 | | | | | | |
| 计算值 | 3.10 | 2.96 | 2.94 | 3.03 | 2.94 | 2.97 | 3.00 |
| 偏差 | 0.10 | -0.04 | -0.06 | 0.03 | -0.06 | -0. 03 | 0.00 |
| 5 | 标定值 | 4.00 | | | | | | |
| 计算值 | 4.10 | 3.90 | 3.90 | 4.04 | 3.98 | 4.02 | 4.00 |
| 偏差 | 0.10 | -0.10 | -0.10 | 0.04 | -0.02 | 0.02 | 0.00 |
| 6 | 标定值 | 5.00 | | | | | | |
| 计算值 | 5.10 | 4.85 | 4.87 | 5.05 | 5.02 | 5.12 | 5.00 |
| 偏差 | 0.10 | -0.15 | -0.13 | 0.05 | 0.02 | 0.12 | 0.00 |

### 7.2.3 数据融合处理后JCY-101型压力传感器性能的综合评价

在评估数据融合效果时，主要关注的指标包括温度影响系数、线性度和误差系数。通过比较融合处理前后的温度影响系数，可以评估温度稳定性的改善程度。同样，通过比较融合处理前后的线性度指标，可以评估静态性能的改善程度。误差系数则用于评估压力拟合值和标定值之间的差异。

#### 7.2.3.1 温度影响系数

温度影响系数是评估传感器性能随温度变化情况的重要指标，其主要包括零位温度系数和灵敏度温度系数。

1. 零位温度系数

零位温度系数表示零位值 随温度漂移的速度，其数值等于温度改变，零位值的最大改变量与量程之比的百分数。

在融合处理之前，零位温度系数的计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.14） |

在融合处理之后，零位温度系数的计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.15） |

式中：—工作温度变化范围，；

—压力传感器满量程输出值；

—压力传感器满量程输入值；

—工作温度变化范围内，压力传感器零点漂移最大值；

—逆模型融合计算在范围内的零点压力最大偏差。

由表 7-1 所列实验标定数据及表 7-2 融合处理后数据分别可知：

于是可得

融合处理前：

融合处理后：

2. 灵敏度温度系数

灵敏度温度系数表示灵敏度随温度漂移的速度，其数值等于温度改变时，灵敏度的相对改变量的百分数。

在融合处理之前，灵敏度温度系数的计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.16） |

在融合处理之后，灵敏度温度系数的计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.17） |

式中：、—同一输入压力作用下，工作温度为、时，压力传感器的输入值；

、U—同一输入压力作用下，工作温度为、时，压力传感器的输出值；

—工作温度变化范围，。

由表7-1所列标定数据可知；压力传感器的输出电压信号随工作温度升高而减小，在满量程压力值（)输入时，输出电压值随温度变化有最大改变量为；且，则计算可得融合前灵敏度温度系数为：

由表7-2融合处理后数据可知，在温度范围内，融合计算值不存在随温度变化单调上升或下降的规律，而是围绕期望值（压力标定值）随机偏离，在满量程5.0 MPa时，两个温度点融合计算压力值的最大偏差== 5.104-5.123=-0.019MPa，则计算可得融合后灵敏度温度系数为：

可见，由以上二元二阶六项多项式表征的逆模型进行处理融合，处理前后的数据表明：零位温度系数由提高到；灵敏度温度系数由提高到。故传感器的温度稳定性得到了较大的改善。如果需要进一步提高融合效果，可以考虑增加逆模型多项式的项数（从而减小误差项的数值），或者尝试使用其他的融合算法。

#### 7.2.3.2 线性度

1. 融合处理前

使用标定的静态特性计算最小二乘法线性度，其拟合直线方程为：

由上述直线方程计算得到的压力拟合值、标定值及其拟合偏差列入表7-4中。

表7-4融合处理前拟合值、标定值及其拟合偏差

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 标定值 | 0 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 |
| 拟合值 | -0.151 | 1.131 | 2.081 | 3.301 | 3.979 | 4.929 |
| 拟合偏差 | -0.151 | 0.131 | 0.081 | 0.031 | -0.021 | -0.071 |

单位：;

量程：。

根据表7-4中的数据，可以得到最大的拟合偏差。因此，最小二乘法的非线性误差为：

2. 融合后

为了简化，使用理论线性度进行评估，其方程为：

式中：，。

由上述理论直线方程计算得到的压力拟合值、标定值及其拟合偏差列入表7-5中。

表7-5融合处理后拟合值、标定值及其拟合偏差

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 标定值 | 0 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 |
| 拟合值 | 0.038 | 1.056 | 2.030 | 3.01 | 4.003 | 4.998 |
| 拟合偏差 | 0.038 | 0.056 | 0.030 | 0.01 | 0.003 | -0.002 |

单位：;

量程：。

根据表7-5的数据，可以得到最大的拟合偏差。因此，最小二乘法的非线性误差为：

融合处理使得非线性引用误差从3％降低到1％，这显著提高了JCY-101型压力传感器的线性度。

#### 7.2.3.3 误差系数

误差系数是一组评估拟合值和标定值差异的重要指标。常用的误差系数包括均方误差、均方根误差、平均绝对误差、误差平方和、平均绝对百分比误差、决定系数和校正决定系数。

1. 均方误差

均方误差（Mean Squared Error, MSE）是拟合值与标定值差值平方的平均值。它衡量了拟合值与标定值之间的偏离程度。MSE的值越小，说明预测模型对实验数据的拟合更精确。其计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.18） |

式中：—标定值；

—拟合值；

—样本数量。

表7-2中的拟合偏差就是拟合值与标定值的差值，即，则式（7.18）可改写为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.19） |

在表7-2中，样本数量，则根据表中数据可求得。

2. 均方根误差

均方根误差（Root Mean Squared Error, RMSE）是均方误差的平方根。RMSE的值越小，说明预测模型对实验数据的拟合更精确。其计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.20） |

式中：—标定值；

—拟合值；

—样本数量。

表7-2中的拟合偏差就是拟合值与标定值的差值，即，则式（7.20）可改写为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.21） |

在表7-2中，样本数量，根据表中数据可求得，则。

3. 平均绝对误差

平均绝对误差（Mean Absolute Error, MAE）是拟合值与标定值差值绝对值的平均数。MAE的值越小，说明预测模型对实验数据的拟合更精确。其计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.22） |

式中：—标定值；

—拟合值；

—样本数量。

表7-2中的拟合偏差就是拟合值与标定值的差值，即，则式（7.22）可改写为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.23） |

在表7-2中，样本数量，则根据表中数据可求得。

4. 误差平方和

误差平方和（Sum of Squared Errors, SSE）是拟合值与标定值差值的平方和。SSE的值越小，说明预测模型对实验数据的拟合更精确。其计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.24） |

式中：—标定值；

—拟合值；

—样本数量。

表7-2中的拟合偏差就是拟合值与标定值的差值，即，则式（7.24）可改写为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.25） |

在表7-2中，样本数量，则根据表中数据可求得。

5. 平均绝对百分比误差

平均绝对百分比误差（Mean Absolute Percentage Error, MAPE）是拟合值与标定值差值与标定值的比值的绝对值的平均数，以百分比形式表示。MAPE的值越小，说明预测模型对实验数据的拟合更精确。其计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.26） |

式中：—标定值；

—拟合值；

—样本数量。

表7-2中的拟合偏差就是拟合值与标定值的差值，即，则式（7.26）可改写为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.27） |

在表7-2中，样本数量。然而，由于表中部分样本的标定值为零，无法计算平均绝对百分比误差（MAPE）。因此，对于这种特定样本，无法使用MAPE作为误差系数。

6. 决定系数

决定系数（Coefficient of Determination, R²）是一种用于衡量模型对样本数据拟合程度的统计量。它的值介于0和1之间，越接近1，说明模型对样本数据的拟合程度越好。其计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.28） |

式中：—标定值；

—拟合值；

—标定值的平均值；

—样本数量。

在表7-2中，样本数量，则根据表中数据可求得。

7. 校正决定系数

校正决定系数（Adjusted Coefficient of Determination, ）是对决定系数的修正，以考虑模型中自变量的数量。当模型中的自变量数量增加时，即使这些变量对因变量的影响不大，决定系数R²也可能会增加。因此，使用校正决定系数来调整自变量数量的影响，从而更准确地评估模型的性能。校正决定系数的计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7.29） |

式中：—标定值；

—拟合值；

—样本数量；

—自变量的维数。

在表7-2中，样本数量，自变量数量，则根据表中数据可求得。

计算结果表明，误差系数（包括均方误差、均方根误差、平均绝对误差和误差平方和）的值相对较小，决定系数和校正决定系数的值接近1。这表明模型对样本数据的拟合程度非常好，能够满足JCY-101型压力传感器温度补偿的需要。

## §7.3 多元回归法及其性能指标计算的Python实现

本节将首先介绍多元回归法的python实现，主要是通过scikit-learn库中的PolynomialFeatures和LinearRegression类实现多元回归。接着，将介绍如何利用Python实现性能指标的计算，主要包括温度影响系数和误差系数。

### 7.3.1 多元回归法的python实现

多元回归法的Python实现，依赖于scikit-learn库中的预处理PolynomialFeatures类和线性回归LinearRegression类。在使用这两个模块之前，必须先安装scikit-learn库并在程序中引用它们。scikit-learn库的安装在前面的章节中已经介绍过，本节着重介绍这两个类的使用。

PolynomialFeatures类的导入命令：

from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures

LinearRegression类的导入命令：

from sklearn.linear\_model import LinearRegression

PolynomialFeatures类用于生成由所有多项式组合构成的新特征矩阵，从而可以使用线性回归方法来实现非线性的多元回归，其类定义为:

class sklearn.preprocessing.PolynomialFeatures(degree=2, \*, interaction\_only=False, include\_bias=True, order='C')

该类的参数包括：

degree：多项式特征的程度，即多元回归方程中自变量的最高阶次，默认值=2；

interaction\_only：如果为True，只能交叉相乘，默认值为False；

include\_bias：默认True, 此时特征矩阵包含元素1，多元回归方程中包含常数项，否则不包含常数项；

order：在密集情况下输出数组的顺序。“ F”阶的计算速度更快，但可能会减慢后续的估计量。

该类的属性包括：

powers\_：指数输出；

n\_input\_features\_：输入特征的总数；

n\_output\_features：多项式输出特征的总数。

该类主要包括以下方法：

fit(X, y=None)：计算输入数据的所有多项式特征的组合。

transform(X)：根据fit方法的计算结果，将输入数据转换为多项式特征。

fit\_transform(X, y=None, \*\*fit\_params)：结合fit和transform两个操作，首先对输入数据进行fit操作，然后再对其进行transform操作。

使用该类生成特征矩阵的实例代码如下：

#创建一个PolynomialFeatures实例，其中degree根据允许的误差来选取

quadratic\_featurizer = PolynomialFeatures(degree=2)

#拟合数据，然后对其进行转换，x是初始数据，xx是转换后的数据

xx = quadratic\_featurizer.fit\_transform(x)

LinearRegression类用于执行最小二乘线性回归并生成多元回归方程的系数，其类定义为：

class sklearn.linear\_model.LinearRegression(\*, fit\_intercept=True, normalize=False, copy\_X=True, n\_jobs=None)

该类的参数包括：

fit\_intercept：是否计算此模型的截距，默认值为True，计算截距；

normalize：是否归一化处理，默认False，不进行归一化处理；

copy\_X：是否复制X，默认值为True，复制X；

n\_jobs：用于计算的核心数。

该类的属性包括：

coef\_：线性回归问题的估计系数；

rank\_：矩阵X的秩；

singular\_：X的奇异值；

intercept\_：线性模型中的截距项，如果设置fit\_intercept=False，则截距为0.0。

该类主要包括以下方法：

fit(X, y[, sample\_weight])：拟合线性模型。

predict(X)：使用线性模型进行预测。

score(X, y[, sample\_weight])：返回决定系数的预测。

使用LinearRegression实现线性回归的实例代码如下：

#创建一个LinearRegression实例

lr= LinearRegression()

#拟合线性模型，其中xx是PolynomialFeatures类生成的新特征矩阵

lr.fit(xx, y)

#提取多元回归方程的系数和截距

coef =lr. coef\_ #系数

intercept =lr. intercept\_ #截距

#预测，将待预测的变量以数组形式输入，在此以x1示例

y\_pred=lr.predict(quadratic\_featurizer.fit\_transform(np.array(x1)))

### 7.3.2 性能指标计算的python实现

在评估多元回归模型性能时，主要关注的指标包括温度系数、线性度和误差系数。前面的章节已经详细介绍了如何用Python实现线性度的计算。本章将重点介绍如何用Python计算温度系数和误差系数。

#### 7.3.2.1 温度系数计算的Python实现

本节主要内容是使用Python计算温度系数。以压力传感器为例，目标参量是压力（在程序中用P表示），对应的输出是输出电压（在程序中用U\_P表示）。干扰参量是（在程序中用T表示），通过温度传感器进行检测，其输出是温度传感器的输出电压（在程序中用U\_T表示）。这种方法具有通用性，只需在程序中将P和U\_P替换为目标参数传感器的输入和输出，将T和U\_T替换为用于检测干扰参数的传感器的输入和输出。

使用Python计算温度系数时，需要经过一系列计算步骤。这些步骤中，经常需要求取最大值和最小值。求取最大值和最小值主要有两种方法：一种是使用Python的内置函数max()和min()，另一种是使用pandas库的DataFrame或Series对象的.max()和.min()方法。选择哪种方法主要取决于数据的类型。如果数据是DataFrame或Series，那么应该使用.max()和.min()方法。如果数据是列表或元组，那么应该使用max()和min()函数。例如，如果将压力传感器的输出电压U\_P保存为一个数组，可以使用max(U\_P)求取压力传感器输出电压的最大值。如果将干扰参量温度保存为一个DataFrame类型T，那么需要使用.max()和.min()方法，即T.max()和T.min()求取最高温度和最低温度。此外，还会使用abs()函数计算绝对值，where()函数找到满足特定条件的索引。

接下来，详细介绍每个计算步骤和对应的Python代码实现：

1. 计算工作温度变化范围。这可以通过计算最高温度和最低温度之差实现。

delta\_T = T.max() - T.min()

2. 计算压力传感器满量程输出值和输入值。这可以通过找到压力传感器的最大输出值和最大输入值实现。

U\_FS = max(U\_P)

P\_FS = max(P)

3. 计算工作温度变化范围内的压力传感器零点漂移最大值和零点压力最大偏差。这可以通过在工作温度变化范围内，找到压力传感器零点漂移的最大值和零点压力的最大偏差实现。

#求取标定压力的列索引

zero\_pressure\_column = df.columns[df.columns == 0]

#求取标定压力时，压力传感器的输出电压

U\_P\_at\_zero\_P = df[df.iloc[:, 1] == 'U\_P'].loc[:, zero\_pressure\_column].values.flatten()

#求取最大偏差

delta\_U\_0m=abs(min(U\_P\_at\_zero\_P) - max(U\_P\_at\_zero\_P))

4. 计算逆模型融合计算在工作温度变化范围内的零点压力最大偏差。可以通过在工作温度变化范围内，找到逆模型融合计算的零点压力的最大偏差实现。在这里，y\_pred是逆模型融合计算的预测压力值。

#求取标定压力等于0的索引

zero\_pressure\_indices = np.where(P == 0)

#求取压力为0时的预测压力值

P\_pred\_at\_zero\_P = y\_pred[zero\_pressure\_indices]

#预测值与给定值0的差值的最大值

delta\_P\_0m = max(abs(P\_pred\_at\_zero\_P - 0))

5. 计算满量程时，压力传感器在最低温度和最高温度的输出电压。可以通过找到满量程压力对应的索引并获取相应的压力传感器输出值，然后获取所有的唯一温度值，并找到最小和最大温度对应的索引，实现求取最小和最大温度下的压力传感器输出值。

#找到满量程压力对应的索引

full\_scale\_pressure\_indices = np.where(P == P\_FS)

#获取满量程压力对应的压力传感器输出值

U\_P\_at\_full\_scale\_P = U\_P[full\_scale\_pressure\_indices]

#获取所有的唯一温度值

unique\_temperatures = np.unique(T)

#找到最小温度对应的索引

min\_temperature\_index = np.argmin(unique\_temperatures)

#获取最小温度下的压力传感器输出值

U\_P\_at\_min\_P=U\_P\_at\_full\_scale\_P[min\_temperature\_index]

#找到最大温度对应的索引

max\_temperature\_index = np.argmax(unique\_temperatures)

#获取最大温度下的压力传感器输出值

U\_P\_at\_max\_P=U\_P\_at\_full\_scale\_P[max\_temperature\_index]

6. 计算满量程时，在最低温度和最高温度的压力预测值。可以通过找到满量程压力对应的索引并获取相应的压力预测值，然后获取所有的唯一温度值，并找到最小和最大温度对应的索引，来实现求取最小和最大温度下的压力预测值。

#获取满量程压力对应的预测压力值

P\_pred=y\_pred[full\_scale\_pressure\_indices]

#获取最小温度下的预测压力值

P\_pred\_at\_min\_P=P\_pred[min\_temperature\_index]

#获取最大温度下的预测压力值

P\_pred\_at\_max\_P=P\_pred[max\_temperature\_index]

7. 计算温度系数。利用上面获取的数据，根据式（7.14）、（7.15）、（7.16）和（7.17），编程计算温度系数。

#计算零位温度系数

alpha\_0\_before = delta\_U\_0m / U\_FS \* 1 / delta\_T

alpha\_0\_after = delta\_P\_0m / P\_FS \* 1 / delta\_T

#计算灵敏度温度系数

alpha\_s\_before = (U\_P\_at\_min\_P - U\_P\_at\_max\_P) / (U\_P\_at\_min\_P \* delta\_T)

alpha\_s\_after = (P\_pred\_at\_min\_P - P\_pred\_at\_max\_P) / (P\_pred\_at\_min\_P \* delta\_T)

#### 7.3.2.2 误差系数计算的Python实现

利用Python编程计算误差系数的方法主要有两大类：使用内置库函数和自行编程计算。第一类适用于有内置的评估函数计算对应误差系数的情形，例如：计算均方误差、平均绝对误差和决定系数。第二类一般没有内置的评估函数直接计算，需要手动编程计算相应的误差系数，例如：均方根误差、误差平方和、平均绝对百分比误差和校正决定系数。

对于第一类，主要通过scikit-learn库的metrics子库中的函数实现，例如，使用mean\_squared\_error()计算均方误差，mean\_absolute\_error()计算平均绝对误差，以及r2\_score()计算决定系数。前面已经介绍过scikit-learn库的安装，这里主要介绍评估函数的引用，其引用命令如下：

from sklearn.metrics import mean\_squared\_error, mean\_absolute\_error, r2\_score

这三个评估函数的常用参数均是标定值y和预测值y\_pred，误差系数的示例代码如下：

#计算均方误差(MSE)

mse = mean\_squared\_error(y\_true, y\_pred)

#计算平均绝对误差(MAE)

mae = mean\_absolute\_error(y\_true, y\_pred)

#计算决定系数(R^2)

r2 = r2\_score(y\_true, y\_pred)

对于第二类，通常需要根据计算公式编程，其实例代码如下：

#计算均方根误差(RMSE)

rmse = np.sqrt(mse)

print("均方根误差: ", rmse)

#计算误差平方和(SSE)

sse = np.sum((y\_true - y\_pred) \*\* 2)

print("误差平方和: ", sse)

#计算平均绝对百分比误差(MAPE)

mape = np.mean(np.abs((y\_true - y\_pred) / y\_true)) \* 100

print("平均绝对百分比误差: ", mape)

# 计算校正决定系数

n = x.shape[0] # 样本数量

p = X\_poly.shape[1] # 特征数量

adjusted\_r2 = 1 - (1 - r2) \* (n - 1) / (n - p - 1)

根据上面的介绍，压力传感器温度补偿系统中进行回归模型拟合、预测和性能指标计算的Python程序如下：

import pandas as pd

from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures

from sklearn.linear\_model import LinearRegression

import numpy as np

from sklearn.metrics import mean\_squared\_error, mean\_absolute\_error, r2\_score

# 加载Excel文件

df = pd.read\_excel('dyhgsj.xlsx')

# 从DataFrame中提取U\_P、U\_T、T和P值

U\_P = df[df.iloc[:, 1] == 'U\_P'].iloc[:, 2:].values.flatten()

U\_T = df[df.iloc[:, 1] == 'U\_T'].iloc[:, 2:].values.flatten()

T = df[df.iloc[:, 1] == 'U\_P'].iloc[:, 0].values.repeat(df.columns[2:].shape[0])

P = np.tile(df.columns[2:].astype(float), df[df.iloc[:, 1] == 'U\_P'].shape[0])

# 将U\_P、U\_T和T组合成回归的输入特征

X = np.column\_stack((U\_P, U\_T))

# 创建degree=2的多项式特征

poly\_features = PolynomialFeatures(degree=2, include\_bias=False)

X\_poly = poly\_features.fit\_transform(X)

# 创建并训练模型

model = LinearRegression()

model.fit(X\_poly, P)

# 打印模型参数

print("截距: ", model.intercept\_)

print("系数: ", model.coef\_)

# 预测结果

y\_pred = model.predict(X\_poly)

# 计算工作温度变化范围

delta\_T = T.max() - T.min()

# 计算压力传感器满量程输出值和输入值

U\_FS = max(U\_P)

P\_FS = max(P)

# 计算工作温度变化ΔT范围内，压力传感器零点漂移最大值和零点压力最大偏差

zero\_pressure\_column = df.columns[df.columns == 0]

U\_P\_at\_zero\_P = df[df.iloc[:, 1] == 'U\_P'].loc[:, zero\_pressure\_column].values.flatten()

delta\_U\_0m=abs(min(U\_P\_at\_zero\_P) - max(U\_P\_at\_zero\_P))

# 计算逆模型融合计算在ΔT范围内的零点压力最大偏差

zero\_pressure\_indices = np.where(P == min(P))

P\_pred\_at\_zero\_P = y\_pred[zero\_pressure\_indices] # 压力为0时的预测压力值

delta\_P\_0m = max(abs(P\_pred\_at\_zero\_P - 0)) # 预测值与给定值0的差值的最大值

# 计算零位温度系数

alpha\_0\_before = delta\_U\_0m / U\_FS \* 1 / delta\_T

alpha\_0\_after = delta\_P\_0m / P\_FS \* 1 / delta\_T

# 找到满量程压力对应的索引

full\_scale\_pressure\_indices = np.where(P == P\_FS)

# 获取满量程压力对应的压力传感器输出值

U\_P\_at\_full\_scale\_P = U\_P[full\_scale\_pressure\_indices]

# 获取所有的唯一温度值

unique\_temperatures = np.unique(T)

# 找到最小温度对应的索引

min\_temperature\_index = np.argmin(unique\_temperatures)

# 获取最小温度下的压力传感器输出值

U\_P\_at\_min\_P=U\_P\_at\_full\_scale\_P[min\_temperature\_index]

# 找到最大温度对应的索引

max\_temperature\_index = np.argmax(unique\_temperatures)

# 获取最大温度下的压力传感器输出值

U\_P\_at\_max\_P=U\_P\_at\_full\_scale\_P[max\_temperature\_index]

# 获取满量程压力对应的预测压力值

P\_pred=y\_pred[full\_scale\_pressure\_indices]

# 获取最小温度下的预测压力值

P\_pred\_at\_min\_P=P\_pred[min\_temperature\_index]

# 获取最大温度下的预测压力值

P\_pred\_at\_max\_P=P\_pred[max\_temperature\_index]

# 计算灵敏度温度系数

alpha\_s\_before = (U\_P\_at\_min\_P - U\_P\_at\_max\_P) / (U\_P\_at\_min\_P \* delta\_T)

alpha\_s\_after = (P\_pred\_at\_min\_P - P\_pred\_at\_max\_P) / (P\_pred\_at\_min\_P \* delta\_T)

print("零位温度系数（融合处理之前）: ", alpha\_0\_before)

print("零位温度系数（融合处理之后）: ", alpha\_0\_after)

print("灵敏度温度系数（融合处理之前）: ", alpha\_s\_before)

print("灵敏度温度系数（融合处理之后）: ", alpha\_s\_after)

# 计算均方误差

mse = mean\_squared\_error(P, y\_pred)

print("均方误差: ", mse)

# 计算均方根误差

rmse = np.sqrt(mse)

print("均方根误差: ", rmse)

# 计算平均绝对误差

mae = mean\_absolute\_error(P, y\_pred)

print("平均绝对误差: ", mae)

# 计算误差平方和

sse = np.sum((P - y\_pred) \*\* 2)

print("误差平方和: ", sse)

# 计算平均绝对百分比误差

mape = np.mean(np.abs((P - y\_pred) / P)) \* 100

print("平均绝对百分比误差: ", mape)

# 计算决定系数

r2 = r2\_score(P, y\_pred)

print("决定系数: ", r2)

# 计算校正决定系数

n = P.shape[0] # 样本数量

p = X\_poly.shape[1] # 特征数量

adjusted\_r2 = 1 - (1 - r2) \* (n - 1) / (n - p - 1)

print("校正决定系数: ", adjusted\_r2)

执行上面的代码，可以得到以下结果：

|  |
| --- |
| 截距: 0.2786935362741745  系数: [5.03828723e-02 1.28222327e-02 1.69783360e-05 1.22306071e-04 -1.06769140e-04]  零位温度系数（融合处理之前）: 0.0015137424065536141  零位温度系数（融合处理之后）: 0.0007806260907334728  灵敏度温度系数（融合处理之前）: 0.0024932227872647757  灵敏度温度系数（融合处理之后）: -7.772234172944678e-05  均方误差: 0.008738506804008978  均方根误差: 0.09347998076598528  平均绝对误差: 0.07953333297866069  误差平方和: 0.3145862449443232  平均绝对百分比误差: inf  决定系数: 0.9970039405243398  校正决定系数: 0.9965045972783965 |

当部分样本的标定值为零时，平均绝对百分比误差的结果会是无穷大（inf）。这些结果与上一节手工计算的结果完全一致，证实了我们的Python程序是正确的。

|  |  |
| --- | --- |
| * 价值观 | 诚信 |
| 保证数据及其处理结果的真实、准确，可靠，是对来源于传感器的原始测量数据进行误差分析和数据处理应坚持的基本原则，也涉及测量领域的工程伦理和职业道德。追求“真、善、美”是中华民族传统文化的价值取向。  在智能传感器数据处理中，诚信精神是确保数据质量和可靠性的基石。  诚信精神体现在对数据采集的真实和准确上。这意味着不篡改、不虚报传感器所获取的数据，严格按照规定的流程和标准进行采集，数据源头的可信性。在数据传输和存储过程中，诚信精神要求保障数据的完整性和安全性，不丢失、不泄露数据，对数据的流向和使用有清晰、可追溯的记录。对于数据处理算法和模型的选择与应用，秉持诚信精神意味着不故意采用有偏差或误导性的方法，而是以客观、公正的态度选择最适合的技术，如实反映数据的特征和规律。在数据分析和解读阶段，诚信精神要求不夸大或曲解数据所表达的信息，以实事求是的态度得出结论，并如实报告结果，不隐瞒或歪曲任何可能影响结论的关键因素。  同时，诚信精神还体现在对数据处理过程中的错误和失误的坦诚对待。一旦发现问题，及时纠正并公开说明，承担相应责任。  总之，在智能传感器数据处理中，诚信精神维护了数据的尊严和价值，为基于数据的决策和应用提供了坚实的信任基础，推动智能传感器技术的健康、可持续发展。 | |

## 习题7

1. 多元回归分析法的核心思想是（ ）。

A. 通过增加传感器的数量来提高测量精度

B. 通过数据融合来消除干扰量对测量结果的影响

C. 利用单一传感器进行高精度测量

D. 通过机器学习算法预测测量结果

2. 在多元回归分析中，最小二乘法的作用是（ ）。

A. 预测未来的数据点 B. 确定回归方程的常系数

C. 评估模型的拟合优度 D. 进行数据的归一化处理

3. 回归方程的项数是由（ ）决定的。

A. 模型的复杂度 B. 数据的量

C. 允许的误差范围 D. 传感器的数量

4. 温度自补偿智能传感器系统的核心组件是（ ）。

A. 目标传感器 B. 温度传感器

C. 数据融合模块 D. 信号放大器

5. 在多元回归法的Python实现中，PolynomialFeatures类的作用是（ ）。

A. 生成多项式组合特征矩阵 B. 执行最小二乘线性回归

C. 计算均方误差 D. 评估模型的拟合优度

6. 在多元回归分析中，若有5个样本点，其预测值与实际值之间的偏差依次为2, -3, 4, 0, 1，则该数据集的均方误差（MSE）为（ ）。

A. 2.4 B. 4.6 C. 6.0 D. 9.0

7. 在多元回归分析中，如果一个模型的校正决定系数（Adjusted R²）比决定系数（R²）低，这通常意味着（ ）。

A. 模型过于简单 B. 模型过于复杂

C. 模型对数据拟合得很好 D. 模型对数据拟合得很差

8. 多元回归分析中，最小二乘法用于确定回归方程的 ，以便使预测误差的 达到最小。

9. 在多元回归分析中， 用于衡量模型对数据的拟合程度，而  
 用于识别模型是否过于复杂。

10. 温度补偿的目的是消除或减少环境 对传感器测量结果的 。

11. 什么是多元回归分析法的核心思想？

12. 什么是最小二乘法？它在多元回归分析中有什么作用？

13. 什么是交叉灵敏度？它会对传感器的测量结果产生什么影响？

14. 什么是均方误差最小原则？它在传感器数据融合中有什么作用？

15. 什么是温度影响系数？它包括哪两个方面？

# 第8章 同心协力，智网共生——神经网络技术及其在智能传感器系统中的应用

|  |  |
| --- | --- |
| 本章内容 | * 人工神经网络基础知识 * BP神经网络 * 神经网络技术在智能传感器系统中的应用 * BP神经网络的Python实现   在上一章中，主要介绍了多元回归法在传感器温度补偿中的应用及其Python实现。本章将重点介绍人工神经网络技术及其在传感器测量数据拟合中的应用，包括人工神经网络的基础知识、BP神经网络等内容。同时，还将介绍BP神经网络的Python实现方法。通过对这些技术的学习，可以更好地理解和掌握如何利用神经网络实现智能传感器系统，并在实际应用中更好地运用这些技术。 |
| 知识目标 | * 1. 理解BP神经网络的原理与训练方法； * 2. 掌握传感器测量数据拟合的原理； * 3. 掌握传感器测量数据拟合的python实现方法。 |
| 能力目标 | 理解人工神经网络的基础知识，准确描述BP神经网络的原理和训练方法；掌握传感器测量数据拟合的原理，了解其在智能传感器系统中的重要性；熟练掌握BP神经网络的Python实现方法，能够应用这些技术解决实际问题；对于传感器的测量数据拟合问题，有深入的理解，能够运用神经网络技术进行有效的拟合，提高传感器的测量精度和稳定性；初步具备神经网络技术在智能传感器系统中的应用基础，能够在实际问题中进行应用。 |
| 思政目标 | * 强化责任意识，严格遵循科学方法和流程，保证传感器测量数据拟合处理过程的准确性和可靠性； * 提升耐心和细心程度，仔细观察和处理信息细节，认真对待每一个环节，不放过任何一个微小的细节因素； * 提升学习能力和自我学习意识，不断跟进新技术和新方法。 |
| 重点难点 | 重点：掌握传感器测量数据拟合的原理；掌握传感器测量数据拟合的python实现方法。  难点：掌握传感器测量数据拟合的原理。  本章节适合各种学时设置的教学安排。 |

## §8.1概述

人工神经网络（Artificial Neural Networks, ANN）是一个大规模的非线性自适应系统，由大量处理单元构成。这种网络基于现代神经生理科学的研究成果。其设计目标是模仿人脑处理和记忆信息的方式，从而创造出一种具有类似人脑信息处理能力的新型“机器”。Kohonen曾为神经网络提出一个定义，他将其描述为一个由简单（通常是自适应）单元和层级组织构成的大规模并行系统。神经网络的目标是模仿生物神经系统处理实际问题的方法。尽管神经网络体现了人脑的信息处理和记忆机制，但它并不是对神经系统的实际描述，而是对其简化、抽象和模拟。

神经网络的研究可以追溯到20世纪40年代。1943年，心理学家麦克洛奇（W.McCulloch）和数理逻辑学家皮兹（W.Pitts）在《数学生物物理公报（Bulletin of Mathematical Biophysics）》上发表了关于神经网络的数学模型。该模型后来被称为M-P神经网络模型。他们总结了神经元的基本生理特征，提出了神经元的数学描述和网络结构方法，从此开启了神经网络的研究。到20世纪70年代，虽然由于人工智能、专家系统的发展，使得神经网络的发展一度出现低潮，但神经网络的研究并没有因此停滞不前，80年代神经网络又重新兴起。目前，神经网络在传感器信息处理、信号处理、自动控制、知识处理、运输和通信等领域得到了广泛应用。

## §8.2 神经网络基础知识

### 8.2.1 神经网络结构

如果将大量的基本神经元通过一定的拓扑结构组织起来，构成群体并行分布式处理的计算结构，那么这种结构就是人工神经网络。

根据神经元之间的不同拓扑连接结构，可将神经网络分为两大类：分层网络和相互连接型网络。

#### 8.2.1.1 分层网络结构

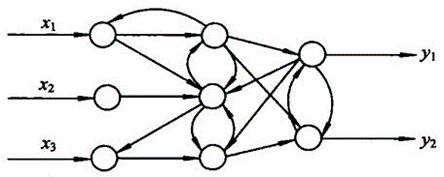
分层网络将一个神经网络模型中的所有神经元按功能分成若干层，通常有输入层、隐层（中间层）和输出层，各层按顺序连接，如图8-1所示。

  
图8-1 分层网络功能层次

输入层作为与外部激励的交互接口，接收外部输入并通过各输入神经单元将其传递到相应的隐层神经元。隐层（中间层，可能有多层）是网络内部处理单元的工作区域。不同模型在处理功能上的差异主要体现在对中间层的处理方式。输出层作为与外部显示设备或执行机构的交互接口，将网络的计算结果输出。同层之间神经元互不相连，相邻层神经元之间的连接强度由连接权值表示。为隐层第个神经元与输入层第个神经元之间的连接权值；为输出层第个神经元与隐层第个神经元之间的连接权值。

#### 8.2.1.2 相互连接型网络结构

所谓相互连接型网络，指的是网络中任意两个单元之间是可达的，即任意两个单元之间存在连接路径，如图8-2所示。

  
图8-2 相互连接型网络

在该网络结构中，对于给定的某一输入模式，由某一初始网络参数出发，网络会在一段时间内动态地调整其输出模式。最终，网络可能会稳定在某一输出模式，或者陷入周期性振荡。因此，相互连接型网络可以认为是一种非线性系统。

### 8.2.2 神经元模型

在人脑中，神经细胞之间的信息传递并非是一个神经细胞直接传递接收到的信息，而是对信息进行处理后再传递给另一个神经细胞。作为对人脑神经细胞的一种模拟，人工神经元也必须具有一定的信息处理能力。

神经元是人工神经网络的基本单元，图8-3展示了一个简单的人工神经元模型。

  
图8-3 神经元模型

在图8-3中，，，⋯，，⋯，表示神经元（序号）的个输入；表示该神经元（序号为）与前层第个神经元的连接权值；为偏置值，又称阈值；为神经元的输出。神经元的输入与输出关系的一般数学表达式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.1） |

其中：为该神经元（序号）的总输入；为表示神经元输入输出关系的函数，称为作用函数、响应函数或传递函数。当时，称为无偏置/无阈值神经元；当时，只有当接收到的输入达到一定强度时，神经元才会被激活，称为有偏置/阈值神经元。当时，为单输入神经元；当时，称为多输入或矢量输入神经元，此时连接权，，⋯，，⋯，组成一矢量。

通过式（8.1）所表示的神经元的输入输出关系，还可以看出神经元的两个基本特性：输出是所有输入综合作用的结果；神经元具有可塑性，即其输出可以通过调整连接权值来改变。

### 8.2.3 神经元激活函数

激活函数在神经网络中起着至关重要的作用。它们的主要目的是引入非线性因素，使得神经网络能够学习并逼近复杂的非线性关系。激活函数能够实现对输入数据的非线性变换，从而提高网络的表达能力和泛化能力。激活函数的种类有很多，常用的有线型激活函数（identity）、对数型激活函数（logistic）、双正切型激活函数（tanh）和修正线型激活函数（ReLU）。

#### 8.2.3.1 线型激活函数（identity）

线性函数是最简单的激活函数，没有非线性映射能力，只能用于建立目标变量和特征之间的线性关系。这种激活函数的数学表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.2） |

其函数曲线如图8-4所示。

  
图8-4 线性激活函数曲线图

#### 8.2.3.2对数型激活函数（logistic）

对数型激活函数，也被称为逻辑斯蒂函数，是一种常用的非线性激活函数。它可以将任何实数映射到0和1之间，因此常常被用于处理二分类问题。这种激活函数的数学表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.3） |

其函数曲线如图8-5所示。

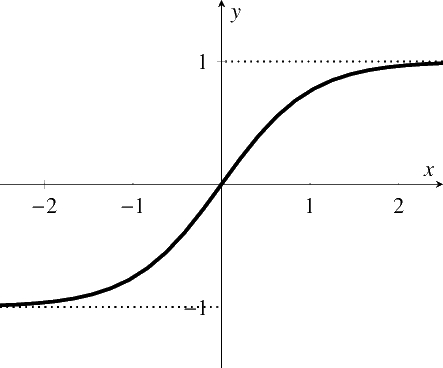
  
图8-5 对数型激活函数曲线图

#### 8.2.3.3 双正切型激活函数（tanh）

双正切型激活函数（tanh）是一种常用的非线性激活函数。这种激活函数能将输入的实数值映射到一个有界的范围，即-1和1之间，从而可以缓解梯度爆炸问题。同时，其导数可以用函数自身的值来表示，这在计算反向传播的梯度时非常有用。这种激活函数的数学表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.4） |

其函数曲线如图8-6所示。

  
图8-6 双正切型激活函数曲线图

#### 8.2.3.4修正线性激活函数（ReLU函数）

修正线性激活函数（ReLU）是一种常用的激活函数，具有非线性映射能力，可以用于捕捉和建立目标变量和特征之间的非线性关系。这种激活函数的数学表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.5） |

其函数曲线如图8-7所示。

  
图8-7 修正线性激活函数曲线图

选择激活函数并没有固定的规则，而是通常会根据具体的应用场景来决定。线性激活函数因其简单性，常被用于神经网络的输出层，用于建立目标变量和特征之间的线性关系。对数型和双正切型激活函数因其S型的非线性特性，常被用于多层神经网络的隐藏层，用于捕捉和建立目标变量和特征之间的非线性关系。修正线性激活函数因其在正区间的线性特性和负区间的零输出，在处理非线性问题时具有优势，也常被用于多层神经网络的隐藏层。总的来说，选择哪种激活函数取决于问题的性质和数据的特征。根据具体任务选择合适的网络结构、参数和优化算法，可以提高网络的性能和泛化能力。

神经元在大脑中的连接方式是多样的。根据这些连接方式的不同，可以构建各种类型的人工神经网络模型。目前，常用且成熟的网络可以从多个角度进行分类。如果从网络结构的角度进行分类，神经网络可以分为前馈神经网络和反馈神经网络。代表性的网络模型包括感知器、多层映射BP、RBF、双向联想记忆（BAM）和Hopfield模型等，它们从不同的角度描述和模拟了生物神经系统的不同层次。利用这些网络模型，我们可以实现函数逼近、数据采集聚类、模式分类、优化计算等功能。因此，神经网络在人工智能、自动控制、机器人、统计学等领域的信息处理中得到了广泛的应用。

前馈神经网络主要包括感知器神经网络、BP神经网络和RBF神经网络等。本章将重点介绍BP神经网络。

## §8.3 BP神经网络

### 8.3.1 BP神经网络概述

BP神经网络因其权值采用反向传播（Back Propagation）的学习算法而得名。Rumelhart、McClelland和他们的同事于1982年成立了一个PDP小组，研究并行分布信息处理方法，探索人类认知的微结构。经过三年的努力，他们于1985年发展了BP神经网络学习算法。BP网络是一种多层前馈神经网络，其神经元的激活函数通常是非线性激活函数。因此，它可以实现从输入到输出的任意的非线性映射。在确定了BP网络的结构后，利用输入输出样本集对其进行训练。也就是说，对网络的权值和偏置值（bias）进行学习和调整，以使网络实现给定的输入输出映射关系。经过训练的BP网络，对于不是样本集中的输入，也能给出合适的输出，这种性质称为泛化（generalization）功能。因此，BP神经网络具有拉格朗日（Lagrange）插值法、牛顿（Newton）插值法等类似的插值功能。不过，拉格朗日插值法和牛顿插值法只能用于二维空间的曲线插值，而BP神经网络可实现多维空间的曲面插值。

### 8.3.2 BP神经网络的网络结构

BP神经网络通常由一个或多个隐藏层组成。在实际应用中，最常见的是三层BP神经网络。图8-8和图8-9展示了一个简单的三层BP神经网络的网络模型。

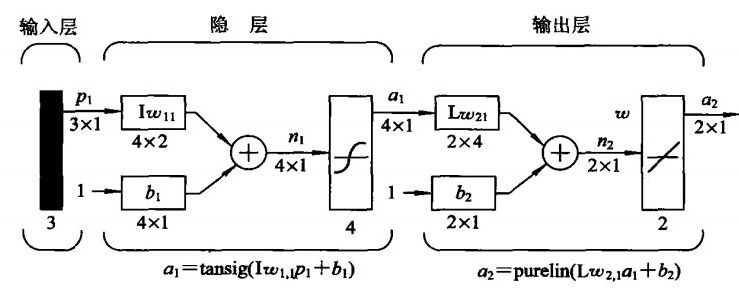
  
图8-8 BP神经网络的网络模型

  
图8-9 BP神经网络的模型示意图

在图8-8和图8-9所示的BP神经网络中，输入层包含（）个节点，隐层包含（）个节点，输出层有（）个节点。连接权值表示输入层第个节点与隐层的第个节点的连接权值，共有个权值。表示隐层第个节点与输出层第个节点的连接权值，共有个连接权值。

### 8.3.3 BP神经网络的神经元模型

BP神经网络一般由多层神经元构成，所以它的神经元激活函数可以有多种类型，其神经元激活函数的选用需要视具体情况而定。由于BP神经网络是通过误差反向传播来实现的，因此，BP神经网络中神经元的激活函数必须是连续可微的，且不能选用限幅函数。对于输出范围比较小的网络，可以将其所有的神经元激活函数全部选为对数型激活函数；如果网络的输出范围比较大，则一般把隐含层神经元激活函数选为对数型激活函数，而把输出层神经元激活函数选为纯线性函数。理论上，这样选择神经元激活函数可以以任意精度逼近任何平滑函数。对于图8-8所示BP网络模型的神经激活函数选用情况如下：

1. 输入层神经元激活函数

输入层神经元激活函数选为纯线性激活函数，故节点的输出为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.6） |

式中：—第个节点的输入。

2. 隐层神经元激活函数

隐层神经元激活函数选用对数型激活函数，故节点的输出为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.7） |

其中节点的总输入为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.8） |

3. 输出层神经元激活函数选对数型激活函数。节点的输出：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.9） |

其中节点的总输入：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.10） |

### 8.3.4 BP神经网络的学习算法

当权值（个）、 （个）与阈值 （个）、（个）随机赋予初始值、确定分组输入，，，后，根据式（8.6）、式（8.7）、式（8.8）、式（8.9）和式（8.10）进行计算，就可得出输出层节点的输出与期望输出存在误差，输出层个节点的总误差取为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.11） |

网络学习也称为网络训练，就是通过反复的计算，求取，根据的大小调整网络参数，最终使得误差足够小。网络权值参数的修正数学表达式求取所遵循的规则称为学习规则，其基本思想是：使权值沿误差函数的负梯度方向改变，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.12） |
|  |  | （8.13） |

式中：—迭代次数；

—学习因子，又称步长。

按照误差反向传播算法，分别求取输出层训练误差和隐层训练误差，最后得出权值修正公式。

1. 输出层训练误差

输出层训练误差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.14） |

根据误差定义式（8.11）及式（8.9），可求得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.15） |

根据式（8.9）和（8.10）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.16） |

将式（8.15）、（8.16）代入式（8.14），得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.17） |

2. 隐层训练误差

隐层训练误差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.18） |

根据式（8.7）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.19） |

根据式（8.14）、（8.10）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.20） |

将式（8.19）、（8.20）代入式（8.18），得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.21） |

3. 权值修正公式

（1）的修正公式

将式（8.12）变换为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.22） |

其中：；

则有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.23） |

（2）的修正公式

将式（8.13）变换为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.24） |

其中：；

则有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.25） |

引入势态因子，最后修正公式变为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.26） |

4. 学习流程

BP网络的一个样本的学习流程如图8-10所示。

  
图8-10 BP网络训练过程及算法流程

（1）网络初始化，随机设定连接权值 ，阈值，学习因子，势态因子；

（2）向具有上述初始值的神经网络提供输入学习样本和序号；

（3）计算隐层输出值；

（4）计算输出层的输出；

（5）计算输出层和隐层训练误差；

（6）判断均方误差是否满足给定允许偏差。当满足时，结束训练；否则，进入下一步；

（7）修正权值，并转向（3）进行下一轮训练。

### 8.3.5 BP神经网络的优化器

在BP神经网络的训练过程中，优化器起着至关重要的作用。优化器的主要任务是调整网络的权值和偏置，以最小化网络输出和期望输出之间的误差。在实践中，常用的优化器有LBFGS、SGD和Adam。

LBFGS（Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno）是一种迭代优化方法，特别适用于大规模参数优化问题。LBFGS采用了一种有限内存方法，能够处理大规模的优化问题，同时保持了BFGS方法的超线性收敛性能。

SGD（Stochastic Gradient Descent）是常见的优化器之一，其特点是在每次更新时只使用一个训练样本。这种方法可以加快训练速度，但可能导致更新过程变得嘈杂和不稳定。

Adam优化器融合了动量和自适应学习率的概念，通常能够提供良好的训练性能。它通过计算梯度的一阶矩估计和二阶矩估计来调整每个参数的学习率。

在实际应用中，选择优化器主要取决于具体的问题和数据。有些问题可能会发现SGD表现最好，而其他问题可能会发现Adam或LBFGS更有效。在选择优化器时，可以考虑进行多轮实验，比较不同优化器的效果，以选择最适合当前问题的优化器。同时，也需要注意，优化器的选择和其他超参数（如学习率、批大小等）的设置是相互影响的，需要综合考虑。在神经网络训练过程中，合理的优化器选择和参数设置，可以大大提高训练效率和模型性能。

## §8.4 基于BP神经网络实现涡流传感器测量数据的拟合

智能传感器系统的研究内容丰富，除了上一章的温度补偿，本节将介绍测量数据拟合问题。具体步骤如下。

### 8.4.1 标定实验

本节选用的涡流传感器的量程为0~1.2mm，将其等分为30份，每份增量0.0414mm。在测试设备和环境满足要求下，从0mm起点开始，每次增加0.0414mm，直至达到1.2mm满量程。依次施加不同位移到传感器，并使用网络分析仪测量输出频率。记录每个位移值及其对应的输出频率，如表8-1所示。

表8-1涡流传感器位移-频率测量数据

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 位移 d/mm | 频率 f/Hz | 位移 d/mm | 频率 f/Hz | 位移 d/mm | 频率 f/Hz |
| 0 | 382.016 | 0.44 | 389.589 | 0.88 | 393.309 |
| 0.04 | 382.908 | 0.48 | 389.988 | 0.92 | 393.413 |
| 0.08 | 383.752 | 0.52 | 390.469 | 0.96 | 393.503 |
| 0.12 | 384.595 | 0.56 | 390.857 | 1 | 393.594 |
| 0.16 | 385.388 | 0.6 | 391.308 | 1.04 | 393.696 |
| 0.2 | 386.137 | 0.64 | 391.736 | 1.08 | 393.783 |
| 0.24 | 386.814 | 0.68 | 392.099 | 1.12 | 393.864 |
| 0.28 | 387.48 | 0.72 | 392.389 | 1.16 | 393.958 |
| 0.32 | 388.059 | 0.76 | 392.658 | 1.2 | 394.051 |
| 0.36 | 388.651 | 0.8 | 392.954 |  |  |
| 0.4 | 389.095 | 0.84 | 393.153 |  |  |

### 8.4.2 样本集划分

为了提高模型的泛化能力，通常将样本数据集划分为训练集和测试集，分别用于模型的训练和测试评估。本节使用的标定数据量较少，仅有31个样本。考虑到数据量较小，采用了较为保守的划分比例，即从量程范围内随机选取80%的数据作为训练集，另外20%作为测试集。这样可以确保测试集中有足够的样本数量来评估模型的泛化性能。具体来说，从标定数据的量程范围内随机选取24个样本作为训练集，剩余的7个样本作为测试集。在样本量较少的情况下，这种划分方式是较为标准和合理的。

### 8.4.3 样本数据归一化

归一化处理后的数据位于-1～＋1或者0～1之间，这有助于实现更好的数据融合。。数据归一化的公式有多种，例如：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.27） |

或

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8.28） |

式中：—归一化后的样本数据；

—归一化前的样本数据；

—X所在行的最小值；

—X所在行的最大值。

本例采用的是第一种归一化公式。

### 8.4.4 BP神经网络的设计与实现

设计实现BP神经网络的流程图如图8-11所示。

  
图8-11 设计实现BP神经网络的流程图

根据上述流程图，在Python环境下，可以利用Scikit-learn库建立BP神经网络模型，并进行训练与预测。详细的内容请参见8.5节。

### 8.4.5 训练校验

#### 8.4.5.1 条件

输入层节点数为1，隐层节点数为50，输出层节点数为1，最大迭代次数为10000，激活函数为tanh，优化器为lbfgs，初始学习率为0.01。这些参数的选择都是为了使模型能够更好地学习和预测。

#### 8.4.5.2 训练与测试

首先，运行编写的程序。程序会自动加载样本数据，并将其划分为训练集和测试集。接着，对数据进行归一化处理，然后持续进行10000次训练与校验。训练结束后，测试样本的网络输出如表8-2所示。通过与期望输出的对比，可以看到实际输出结果与期望输出结果的误差很小。其中，训练样本的均方差为，测试样本的均方差为。

表8-2 测试样本期望输出与实际输出对照表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 期望输出f/Hz | 383.752 | 393.958 | 390.469 | 389.095 | 393.783 | 393.594 | 393.309 |
| 实际输出f/Hz | 383.771 | 393.954 | 390.447 | 389.118 | 393.805 | 393.625 | 393.267 |
| 绝对偏差f/Hz | -0.019 | 0.004 | 0.022 | -0.023 | -0.022 | -0.031 | 0.042 |

#### 8.4.5.3 提取模型参数

首先，在安装有相关环境的电脑上，利用scikit-learn库中的MLPRegressor类训练BP神经网络。训练完成后，通过MLPRegressor类的coefs\_属性和intercepts\_属性提取模型参数。然后，利用这些提取的模型参数，设计并开发一个可以在微控制器中运行的预测函数。最后，将这个预测函数部署到微控制器中。这样，就可以在微控制器平台上实现涡流传感器测量数据的拟合。

### 8.4.6 拟合效果评价

#### 8.4.6.1 拟合后涡流传感器的静态特性

将表8-1中的所有样本进行拟合，拟合后的实际输出频率如表8-3所示

表8-3 拟合后涡流传感器的输出频率

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 位移 d/mm | 频率 f/Hz | 位移 d/mm | 频率 f/Hz | 位移 d/mm | 频率 f/Hz |
| 0 | 382.015 | 0.44 | 389.585 | 0.88 | 393.267 |
| 0.04 | 382.907 | 0.48 | 390.024 | 0.92 | 393.401 |
| 0.08 | 383.771 | 0.52 | 390.447 | 0.96 | 393.519 |
| 0.12 | 384.601 | 0.56 | 390.868 | 1 | 393.625 |
| 0.16 | 385.390 | 0.6 | 391.291 | 1.04 | 393.719 |
| 0.2 | 386.133 | 0.64 | 391.708 | 1.08 | 393.805 |
| 0.24 | 386.827 | 0.68 | 392.095 | 1.12 | 393.883 |
| 0.28 | 387.472 | 0.72 | 392.428 | 1.16 | 393.954 |
| 0.32 | 388.067 | 0.76 | 392.703 | 1.2 | 394.019 |
| 0.36 | 388.614 | 0.8 | 392.926 |  |  |
| 0.4 | 389.118 | 0.84 | 393.153 |  |  |

#### 8.4.6.2 拟合误差计算

在众多衡量拟合精度的指标中，最常用的是均方误差。将表8-3中的数据代入式（7.18）所示的均方误差公式可得，均方误差仅有，能够达到精度要求。

## §8.5 BP神经网络的Python实现

根据前面的介绍，利用Python实现BP神经网络的流程如下。

### 8.5.1 安装需要的第三方库

Python之所以功能强大，正是因为它拥有众多的第三方库。本章将使用numpy库和scikit-learn库来实现BP神经网络。由于这两个库的安装方法已经在前面的章节中介绍过，这里就不再赘述。但是，请确保您已经成功安装了它们。

### 8.5.2 引用第三方库

在使用第三方库之前，需要在程序中导入它们。为了实现BP神经网络，需要添加以下的导入语句：

import numpy as np

from sklearn.neural\_network import MLPRegressor

from sklearn.metrics import mean\_squared\_error

from sklearn.model\_selection import train\_test\_split

from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler

### 8.5.3 输入样本数据

样本数据的输入可以使用numpy库创建数据数组，示例代码如下：

X = np.array([]) #在[]内填入样本特征值，元素间用逗号分隔

y = np.array([]) #在[]内填入样本标签值，元素间用逗号分隔

### 8.5.4 划分训练集和测试集

为了将样本数据集分为训练集和测试集，可以使用scikit-learn库中model\_selection子模块提供的train\_test\_split()函数，定义如下：

X\_train, X\_test, y\_train, y\_test = train\_test\_split(train\_data, train\_target, test\_size, random\_state, shuffle)

输入参数：

train\_data：待划分的样本特征数据，可以是列表、数组、稀疏矩阵或数据框；

train\_target：待划分的样本标签数据，可以是列表、数组或数据框；

test\_size：测试集占总样本的比例或数量，可以是浮点数、整数或None，默认为None，表示自动设置为0.25；

random\_state：随机状态，可以是整数或随机数生成器实例，默认为None，表示每次分割都是随机的；

shuffle：是否打乱样本顺序，可以是布尔值，默认为True，表示打乱。

输出参数：

X\_train：训练集的特征数据；

X\_test：测试集的特征数据；

y\_train：训练集的标签数据；

y\_test：测试集的标签数据。

利用该函数，可以使用下面的语句实现训练集和测试集的划分：

X\_train, X\_test, y\_train, y\_test = train\_test\_split(X, y, test\_size=0.2, random\_state=0)

### 8.5.5 归一化数据

归一化数据是一种数据预处理方法。它的目的是将数据的数值范围统一到一个较小的区间，通常是[0,1]或[-1,1]。这样可以减少数据的差异性和异常值的影响，提高模型的稳定性和收敛速度。

scikit-learn库中preprocessing子模块提供了MinMaxScaler类，用于实现数据的归一化处理。语法如下：

scaler = MinMaxScaler(feature\_range=(0, 1), copy=True)

该类的参数说明如下：

feature\_range：指定归一化后的数值范围，可以是元组类型，默认为(0, 1)，表示收敛到[0,1]区间，也可以取其他范围值；

copy：指定是否对原数据进行拷贝操作，可以是布尔值类型，默认为True，表示对原数据组拷贝操作，这样变换后不会影响原数据；

该类的主要方法说明如下：

fit(X)：根据输入数据X计算归一化所需的最小值和最大值；

transform(X)：根据已经计算出的最小值和最大值对输入数据X进行归一化变换；

fit\_transform(X)：结合fit和transform两个方法，先计算最小值和最大值，再进行归一化变换

inverse\_transform(X)：根据已经计算出的最小值和最大值对输入数据X进行反向变换，还原为原始数据。

使用该类，可以利用如下的示例代码实现样本数据的归一化：

scaler = MinMaxScaler()

X\_train = scaler.fit\_transform(X\_train.reshape(-1,1))

X\_test = scaler.transform(X\_test.reshape(-1,1))

### 8.5.6 创建并训练BP神经网络模型

scikit-learn库中neural\_network子模块提供了MLPRegressor类，用于实现BP神经网络的回归预测。语法如下：

model=MLPRegressor(hidden\_layer\_sizes=(50,), activation='tanh', solver='lbfgs', max\_iter=10000, learning\_rate\_init=0.01)

参数说明如下：

hidden\_layer\_sizes：指定隐藏层的大小，可以是元组类型，默认为(100,)，表示只有一个隐藏层，有100个神经元；

activation：指定激活函数的类型，可以是字符串类型，默认为'relu'，表示使用修正线性单元函数，也可以取其他值，如'tanh'表示使用双曲正切函数；

solver：指定优化器的类型，可以是字符串类型，默认为'adam'，表示使用一种基于随机梯度的优化器，也可以取其他值，如'lbfgs'表示使用一种拟牛顿方法；

max\_iter：指定最大迭代次数，可以是整数类型，默认为200，表示最多进行200次迭代；

learning\_rate\_init：指定初始学习率，可以是浮点数类型，默认为0.001，表示初始时每次更新权重和偏置的步长为0.001；

主要方法说明如下：

fit(X, y)：根据输入数据X和标签数据y训练BP神经网络模型；

predict(X)：根据输入数据X预测输出数据y；

score(X, y)：根据输入数据X和标签数据y评估BP神经网络模型的性能；

使用该类的一个示例代码如下：

model=MLPRegressor(hidden\_layer\_sizes=(50,), activation='tanh', solver='lbfgs', max\_iter=10000, learning\_rate\_init=0.01)

model.fit(X\_train,y\_train)

### 8.5.7 预测并评估模型性能

预测并评估模型性能是机器学习中的一个重要步骤，可以帮助了解模型的泛化能力和优化方向。预测和评估模型性能的一个示例代码如下：

#使用训练好的模型model，根据测试数据X\_test预测输出数据y\_pred

y\_pred = model.predict(X\_test)

#使用mean\_squared\_error函数，计算均方误差，并赋值给变量mse

mse = mean\_squared\_error(y\_test,y\_pred)

**例8-2：**利用8.4节的样本数据，编写Python程序实现涡流传感器测量数据的拟合。

代码如下：

# 导入必要的库

import numpy as np

from sklearn.neural\_network import MLPRegressor

from sklearn.metrics import mean\_squared\_error

from sklearn.model\_selection import train\_test\_split

from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler

# 输入样本数据

X = np.array([0, 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.2, 0.24, 0.28, 0.32, 0.36, 0.4, 0.44, 0.48, 0.52, 0.56, 0.6, 0.64, 0.68, 0.72, 0.76, 0.8, 0.84, 0.88, 0.92, 0.96, 1, 1.04, 1.08, 1.12, 1.16, 1.2])

# 输出样本数据

y=np.array([382.016, 382.908, 383.752, 384.595, 385.388, 386.137, 386.814, 387.48, 388.059, 388.651, 389.095, 389.589, 389.988, 390.469, 390.857, 391.308, 391.736, 392.099, 392.389, 392.658, 392.954, 393.153, 393.309, 393.413, 393.503, 393.594, 393.696, 393.783, 393.864, 393.958 , 394.051])

# 划分训练集和测试集

X\_train, X\_test, y\_train, y\_test = train\_test\_split(X, y, test\_size=0.2, random\_state=0)

# 归一化数据

scaler = MinMaxScaler()

X\_train = scaler.fit\_transform(X\_train.reshape(-1,1))

X\_test = scaler.transform(X\_test.reshape(-1,1))

# 创建并训练BP神经网络模型

model = MLPRegressor(hidden\_layer\_sizes=(50,), activation='tanh', solver='lbfgs', max\_iter=10000, learning\_rate\_init=0.01)

model.fit(X\_train,y\_train)

# 预测并评估模型性能

y\_pred = model.predict(X\_test)

mse = mean\_squared\_error(y\_test,y\_pred)

print('均方误差:', mse)

执行上述代码，可以得到以下结果：

|  |
| --- |
| 均方误差: 0.0006585669133012904 |

这结果与上一节手工计算的结果完全一致。这证实了我们的Python程序是正确的。

|  |  |
| --- | --- |
| * 价值观 | 团结协作 |
| 神经网络结构本身在一定程度上体现了团结协作精神。  在神经网络中，各个神经元之间紧密连接、相互作用，就如同一个团队中的成员，每个神经元都承担着特定的功能和任务。输入层的神经元负责接收外部信息，就像团队中的信息收集员，将原始数据传递给网络。隐藏层中的神经元则通过复杂的连接和计算，对输入信息进行处理和转换，就好比团队中的核心成员，他们运用各自的专业知识和技能，对任务进行分析、加工，相互协作以提取出有价值的特征和模式。输出层的神经元最终给出处理结果，类似于团队中的成果汇报者，将团队共同努力的成果展示出来。每个神经元的作用虽然相对独立，但只有它们协同工作，整个神经网络才能实现有效的学习和准确的预测。这种相互依赖、相互支持的关系，充分体现了团结协作的精神。此外，神经网络中的连接权重也起着关键作用。它们决定了神经元之间信息传递的强度和方向，类似于团队成员之间的沟通效率和协作程度。通过不断地学习和调整权重，神经网络能够优化信息传递路径，提高整体性能，这也象征着团队在不断磨合中提升协作效率，以达到更好的工作效果。  综上所述，神经网络结构所呈现的这种协同运作、相互配合的模式，很好地诠释了团结协作精神在实现复杂任务中的重要性。神经网络中的神经元的连接告诉我们：个体的力量总是渺小的、有限的，一个团队(组合)的力量远大于单个个体的力量。团队不仅强调个人的工作成果，更强调团队的整体业绩。合作、协同有助于调动团队成员的所有资源与才智，为达到既定目标而产生一股强大而持久的力量。“合作共赢协同创新”“1+1>2”之道于物、于人皆成立。 | |

## 习题8

1. 激活函数在神经网络中的主要功能是（ ）。

A. 引入噪声，增加网络的鲁棒性

B. 引入非线性因素，提高网络的表达能力

C. 减少计算量，提高网络的运算速度

D. 标准化输入数据，使其分布均匀

2. BP神经网络中隐藏层的主要功能是（ ）。

A. 接收输入数据 B. 产生输出数据

C. 学习和表示数据的复杂特征 D. 减少网络的层数

3. 在神经网络的实现过程中，使用优化器的主要目的是（ ）。

A. 调整权重以最小化损失函数 B. 减少模型的训练时间

C. 增加模型的复杂性 D. 增加模型的泛化能力

4. 测量数据拟合中进行样本数据归一化处理的主要目的是（ ）。

A. 保证数据的物理意义 B. 使数据分布更接近正态分布

C. 避免数值计算中的溢出问题 D. 使不同特征具有相同的尺度

5. 在测量数据拟合过程中，进行模型验证和测试的主要目的是（ ）。

A. 验证模型的泛化能力 B. 增加模型的复杂性

C. 提高模型的训练效率 D. 减少模型的训练数据

6. 在测量数据拟合过程中，通常用于评估模型性能的指标是（ ）。

A. 训练时间 B. 模型大小

C. 均方误差（MSE） D. 数据集大小

7. 在神经网络中， 层负责接收外部输入，而 层负责将网络的计算结果输出。

8. BP神经网络通过 算法来调整网络的权值和 ，以实现给定的输入输出映射关系。

9. 在神经网络的训练过程中， 用于衡量模型预测与实际值之间的差异，是评价模型拟合优度的重要指标。

10. 在测量数据拟合任务中，神经网络的 层可以捕捉数据中的复杂特征，而 层直接产生最终的预测结果。

11. 数据归一化处理通常将数据的数值范围统一到 或 区间，有助于提高模型的稳定性和收敛速度。

12. 神经网络按照神经元之间的连接方式可以分为哪两类？各自的特点是什么？

13. 神经元模型的基本组成部分有哪些？它们之间的关系是什么？

14. 神经元的两个基本特性是什么？它们的意义是什么？

15. 激活函数的主要作用是什么？常用的激活函数有哪些？

16. BP神经网络的网络结构通常由哪些层组成？每层的节点数分别是多少？

17. 请简述BP神经网络的学习流程。

18. BP神经网络的优化器有哪些？它们的主要特点和优缺点分别是什么？

19. 什么是样本集划分？它的目的是什么？

20. 请简述利用Python实现BP神经网络的流程。

# 第9章 质疑求真，思辨明理——支持向量机技术及其在智能传感器系统中的应用

|  |  |
| --- | --- |
| 本章内容 | * 统计学习理论 * 支持向量机分类 * 支持向量机回归 * 基于支持向量机实现混合气体的定性识别 * 基于支持向量机实现传感器的非线性校正 * 利用Python实现支持向量机的方法   本章将重点介绍支持向量机技术及其在智能传感器系统中的应用。主要介绍统计学习理论、支持向量机分类、支持向量机回归及其应用等内容，并详细介绍如何利用Python实现支持向量机。通过对这些技术的学习，可以更好地理解和掌握如何利用支持向量机实现智能传感器系统，并在实际应用中更好地运用这些技术。 |
| 知识目标 | * 1. 理解支持向量机的原理； * 2. 掌握支持向量机的训练与检验； * 3. 掌握混合气体定性识别的原理； * 4. 掌握传感器非线性校正的原理； * 5. 掌握利用Python实现支持向量机的方法。 |
| 能力目标 | 具备扎实的数学基础，能够理解支持向量机的数学原理和算法；具备数据预处理能力，能够进行数据清洗、特征提取和选择，具有提高支持向量机模型性能的能力；具备设计实验和分析实验结果的能力，通过实验验证支持向量机在智能传感器系统中的有效性和优越性；能够熟练运用Python编程语言事项支持向量机算法，并将其用于传感器数据处理和分析。 |
| 思政目标 | * 强化工程实践意识，能够将理论知识与实际工程应用相结合，注重解决实际问题能力的提升； * 培养严谨的治学态度和科学精神，在数据处理、模型建立和结果分析中保持客观、准确； * 提升解决复杂问题的能力，坚持不懈地寻求解决方案。 |
| 重点难点 | 重点：掌握混合气体定性识别的原理；掌握传感器非线性校正的原理。  难点：掌握传感器非线性校正的原理。  本章节适合各种学时设置的教学安排。 |

## §9.1 支持向量机原理

传统统计学研究的是渐进理论，即当样本趋于无穷大时的极限特性。然而，在实际应用中，这一前提往往难以满足，导致一些理论上成熟的方法在实践中表现不佳。为了解决这个问题，统计学习理论应运而生，其针对有限样本统计问题而建立的一套全新的理论体系。其中最核心的概念是VC维概念，它是描述函数集或学习机复杂性的重要指标。基于这一理论，研究人员得出了一系列关于统计学习的重要结论，包括一致性、收敛速度和泛化性能等方面。在此理论基础上，发展出了一种新的通用学习方法——支持向量机（Support Vector Machine, SVM）。该方法已经初步展现出优于现有方法的性能，并为机器学习理论和技术的进一步发展提供了动力。

### 9.1.1 统计学习理论

机器学习的目的是根据给定的训练样本，求出对某系统输入输出之间依赖关系的估计，使它能够对未知输出做出尽可能准确的预测。可以通过风险函数(Risk function，也可称为期望风险)对学习效果进行评估。

对个相互独立并服从同一分布的观测样本，，⋯，，在给定输入为的情况下输出为，且变量与之间存在未知依赖关系，即遵循某一未知的联合概率。因此，机器学习的期望风险可定义为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.1） |

式中：—任何函数集合，又称作预测函数集；

—函数的广义参数；

—用对进行预测而造成的损失，称为损失函数。不同类型的学习问题有不同形式的损失函数。

学习的目的就是使期望风险最小。由于可以利用的信息只有样本数据，因此无法直接计算期望风险并进行最小化。因此，实际应用中通常依据大数定理，利用算术平均值的最小值来代替期望风险的最小值，这就是所谓的经验风险最小化原则（Empirical Risk Minimization，ERM)。但是，用ERM准则代替期望风险最小化没有经过充分的理论证明，只是直观上看起来合理的做法。ERM准则不成功的一个例子就是神经网络的“过学习”问题。训练误差小，不一定能够导致好的预测效果。在某些情况下，过小的训练误差可能会降低模型的推广能力，从而导致真实风险增加。

显然，在有限样本下，经验风险最小并不一定意味着期望风险最小。学习机器的复杂性不仅应与所研究的系统有关，也应适应有限的样本数量。

统计学习理论就是研究小样本统计估计和预测的理论，核心内容包括：基于经验风险最小化准则的统计学习一致性条件；统计学习方法推广性的界；在推广界的基础上建立的小样本归纳推理准则；实现新的准则的实际方法。其中，推广界是最有指导性的理论，其相关的核心概念是VC维（Vapnik-Chervonenkis Dimension）。

VC维的直观定义是：如果一个指示函数集能够将个样本按照所有可能的种形式分开，则称该函数集能够打散这个样本。函数集的VC维就是它能打散的样本数目的最大值。如果存在函数能够打散任意数量的样本，则该函数集的VC维被视为无穷大。通过设定一定的阈值，可以将有界实函数的VC维定义为指示函数。VC维反映了函数集的学习能力，VC维越大，学习机器就越复杂。目前尚没有通用的关于任意函数集VC维计算的理论，只知道一些特殊函数集的 VC维。

对于两类问题，经验风险和实际风险之间以至少概率满足如下关系：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.2） |

式中：—函数集的VC维；

—样本数。

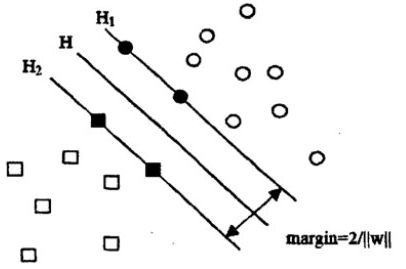
从理论上来说，学习机器的实际风险由两部分构成：一部分是经验风险（也就是训练误差），另一部分被称为置信范围，它与学习机器的VC维和样本数量有关。因此，可以将实际风险简洁地表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.3） |

这个公式表明，在有限样本的情况下，学习机器的VC维越高，置信范围越大，这可能会导致真实风险与经验风险之间的差距增大，从而导致过拟合的问题。在机器学习过程中，不仅要尽可能地减小经验风险，还应该尽量缩小置信范围，以获得较小的实际风险。这样的模型才能对未来的样本具有更好的泛化能力。支持向量机实际上就是这种思想的具体实现。接下来，将详细介绍支持向量机。

### 9.1.2 支持向量机分类

线性可分情况下的最优分类面如图9-1所示。

  
图9-1 线性可分情况下的最优分类面

在图9-1中，方形点和圆形点分别代表两类样本。H表示分类超平面，而H1和H2则是过两类样本中离H最近的点的平面，它们与H平行。H1和H2之间的距离被称为分类间隔（Margin）。最优分类面要保证正确地分开两类样本，并使分类间隔最大化。

设线性可分的样本集有个样本，其中，2，⋯，，，。在这里，和分别代表两类的类别标识。在高维空间中，将两类样本无错分开的分类超平面H满足：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.4） |

为了确保分类面能正确分类所有样本并具备分类间隔，需要满足以下约束条件：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.5） |

要使所有样本被无错误分开，应满足：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.6） |

在高维特征空间中，和之间的距离可以计算为。要使分类间隔最大，实际上就是要使

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.7） |

最小。因此，求解最优分类面就是在满足条件式（9.6）的约束下，求式（9.7）中的极值。过超平面和的样本点就是（9.7）式得到的极值的样本点，它们共同支持了最优分类面，因此称为支持向量（Support Vector）。

最大化分类间隔实际上是为了提高模型的泛化能力，这是SVM的核心思想之一。根据统计学习理论，在维空间中，如果样本分布在一个半径为的超球范围内，那么满足条件的正则超平面构成的指示函数集 （为符号函数）的VC维满足下面的界：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.8） |

因此，使最小就是使VC维的上界最小，从而在结构风险最小原理（Structural Risk Minimization，SRM）准则中选择函数的复杂性。

通过使用拉格朗日优化方法，可以将上述最优分类面问题转化为其对偶问题。即，在约束条件：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.9） |

下对求解下列函数的最大值：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.10） |

为与每个样本对应的拉格朗日乘子。这是一个不等式约束下二次函数寻优的问题，存在唯一解。容易证明，在解中，只有一部分（通常是少部分）不为零，对应的样本就是支持向量。解上述问题后得到的最优分类函数是：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.11） |

式中的求和实际上只对支持向量进行。是分类阈值，可以用任一个支持向量（满足（9.6）式中的等号）求得，或通过两类中任意一对支持向量取中值求得。

另外，可能存在一些样本不能被超平面正确分类，因此引入松弛变量

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | ，，，， | （9.12） |

显然，当分类出现错误时，大于零，是分类错误数量的一个上界。为此，引入错误惩罚系数。于是，构造广义最优分类超平面问题就转化为在约束条件

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | ，，，， | （9.13） |

下最小化函数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.14） |

的问题。

在式（9.14）中，错误惩罚系数为一个正值常数，越大，对错误的惩罚越重。其中第一项是样本到超平面的距离最大，从而提高泛化能力，第二项是使误差尽量小。广义最优分类面的对偶问题与线性可分情况下几乎完全相同，只是式（9.9）中第二个条件变为：

，，，，

对于线性不可分的样本，支持向量机的方法是将输入向量映射到一个高维的特征空间，并在该特征空间中构造最优分类面。它能够避免多层前向网络无法克服的一些缺陷。经过证明，我们得到了如下结论：如果选择适当的映射函数，大多数线性不可分的输入空间问题可以在特征空间中转化为线性可分问题。

然而，在将低维输入空间映射到高维特征空间时，由于空间维数急剧增加，在大多数情况下，直接计算特征空间中的最佳分类平面变得困难。为了解决这个问题，支持向量机通过定义核函数（Kernel Function），巧妙地将这一问题转化到输入空间进行计算。其具体机理如下：

在前面介绍的线性可分求解中都只涉及内积运算，因此可以假设有非线性映射：将输入空间的样本映射到高维特征空间中。在构造最优超平面时，训练算法仅使用特征空间中的点积运算。因此，如果能找到一个函数，使得，那么在高维空间中，实际上只需要进行内积运算，甚至不必知道变换的形式。

根据泛函的有关理论，只要一种核函数满足Mercer条件，它就对应某一变换空间中的内积。因此，通过在最优分类面中采用适当的内积函数， 可以实现某种非线性变换后的线性分类，而计算复杂度保持不变。此时目标函数（9.10）变为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.15） |

相应的分类函数也变为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.16） |

算法的其他条件均不变。由于最终的判别函数中实际只包含与支持向量的内积求和，因此识别时的计算复杂度取决于支持向量的个数。

支持向量机的示意图如图9-2所示。

  
图9-2 支持向量机示意图

由图9-2可以看出，支持向量机求得的决策函数形式上类似于一个神经网络，其输出是若干中间层节点的线性组合，而每一个中间层节点对应于输入样本与一个支持向量的内积，因此也被称作是支持向量网络。

在式（9.16）中，满足Mercer条件的内积函数称为核函数。核函数在支持向量机中起到了关键作用，它们可以将数据映射到更高维的特征空间，从而使得原本线性不可分的问题变得线性可分。在支持向量机中，常见的核函数有线性核函数、多项式核函数、径向基函数和Sigmoid核函数。

（1）线性核函数(linear)

线性核函数是最简单的核函数，它直接使用原始特征空间中的内积来进行计算。其数学表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.17） |

这种核函数没有引入额外的参数，计算简单，但只能处理线性可分的问题。

（2）多项式核函数(poly)

多项式核函数通过将数据映射到一个高维空间，引入了多项式的非线性关系。其数学表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.18） |

式中：—核函数的阶数；

—核函数的系数；

—核函数的独立项。

这种核函数适用于一些非线性可分但不过于复杂的问题。

（3）径向基函数（rbf）

径向基函数是一种常用的核函数，它可以将数据映射到无限维的空间。其数学表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.19） |

式中：—核函数的系数。

这种核函数可以处理更复杂的非线性问题。

（4）Sigmoid核函数(sigmoid)

Sigmoid核函数将数据映射到一个高维空间，并且其输出是有界的。其数学表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.20） |

式中：—核函数的系数；

—核函数的独立项。

这种核函数适用于一些需要将输出限制在某个范围内的问题。

选择核函数的关键在于对问题的理解和数据的特点。如果问题是线性可分的，线性核函数是一个简单且有效的选择。如果问题是非线性可分的，但不过于复杂，多项式核函数可以考虑。如果问题非常复杂且非线性，径向基函数是一个常用的选择。而如果需要将输出限制在某个范围内，可以考虑使用Sigmoid核函数。

### 9.1.3 支持向量机回归

回归分析又称为函数估计，其目标是通过有限个样本，建立反映输出和输入之间的函数关系，进而用所得回归函数对新的数据作出计算或预测。这种函数关系通常是连续的。如果输出和输入之间的联系是非线性关系，称为非线性回归分析。

设有回归模型实现映射，使得以求逼近目标函数。所产生的误差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.21） |

在回归分析中，首先需要考虑的是回归效果的估计，也是学习机最优化准则问题。为了在指定的函数类中选取“拟合最优”的函数，必须明确评优的标准，并对所有训练样本的累计误差最小。

计算累计误差的算法有很多，常用的误差函数如图9-3所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ：平方误差函数 | ：绝对值误差函数 | ：-不敏感误差函数 |

图9-3 常用误差函数

图9-3中，和为多元统计分析中常用的误差函数。通常只考虑误差值大小，正负是等价的，平方函数和绝对值函数都满足对原点的对称性。不难看出，常用的均方误差和均方根误差函数均属于平方误差函数一类。其特点是对于小误差不敏感，对大误差反映敏感。

在绝对值误差的基础上，Vapnik提出了“-不敏感损失函数”：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.22） |

如图9-3所示。当-不敏感损失函数中指定的参数时，等同于绝对值函数；时， 可以看作是把的两条射线分别向左右平移距离。其含义为：它定义了一个“拟合范围”，当估计器输出与期望输出误差绝对值小于时，误差可忽略不计，即为可忽略误差。当误差超过时，误差函数的值为实际误差减去的绝对值。或者说，这种误差函数中间有一个宽度为的不敏感带，称其为带或管道。

鉴于分类与函数逼近的内在联系，前面用于分类的SVM方法，也可类似地应用于回归。在回归中，要求最小化下式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.23） |

其中为上文中介绍的-不敏感损失函数。此时，支持向量机的输出函数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.24） |

其中，对于任意， ，且 。在约束条件（9.22）下构造拉格朗日函数，对各个变量求导，并令其求导函数等于零，解得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.25） |

将结果代入原始的拉格朗日函数，可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.26） |

其约束条件为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.27） |

式中：—为惩罚因子。

对于非线性函数，其逼近可以采用支持向量机分类中介绍的每一种核函数，其中采用较多的是径向基核函数。

如前所述，核函数以及 SVM 的参数选择会对 SVM结果产生一定的影响。因此，在实际应用中需要仔细选择SVM模型中的各个参数，主要包括目标函数中的惩罚系数，损失函数中的，以及核函数中的参数。

## §9.2 使用 SVC对两组分混合气体进行定性识别

与两种气体的谱线在其红外吸收区域存在交叉现象，这意味着测量这两种气体的红外传感器存在交叉敏感性。这种现象在实验标定数据中表现为当浓度不变而浓度变化时，不仅红外传感器的输出电压发生变化，红外传感器的输出电压也发生变化。气体传感器的交叉敏感会给气体类型的识别结果带来误差。

气体的定性识别，指的是判断气体是否存在。当气体的浓度小于规定的分辨率时，就认为这种气体不存在；当气体浓度大于规定的分辨率时，就认为这种气体存在。当然，气体传感器的分辨率必须满足所需的分辨率要求。在本节的标定实验中，每种气体都设置了对应的阈值。如果气体浓度低于这个阈值，就认为该气体不存在；如果气体浓度高于这个阈值，就认为该气体存在。

由于所识别的是两种气体的有无，其结果的组合有四种，所以这是一个多分类问题。

### 9.2.1 实验标定

在标定实验中，使用红外气体传感器对和的混合气体进行测量，并记录了在不同气体浓度条件下两种传感器的输出电压和。为了确定混合气体中是否存在或，设定了和气体的浓度阈值，分别为30ppm和5ppm。如果被测气体的浓度低于阈值，就认为该气体不存在；如果被测气体的浓度高于阈值，就认为该气体存在。标定实验数据如表9-3所示。

表9-3 SO2和NO2两种气体传感器输出电压与气体有无识别的标定数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 |  |  |  |  | 序号 |  |  |  |  |
| 1 | 0.00 | 0.00 | 0 | 0 | 39 | 34.31 | 35.55 | 1 | 1 |
| 2 | 0.59 | 4.52 | 0 | 0 | 40 | 34.49 | 36.93 | 1 | 1 |
| 3 | 0.94 | 7.25 | 0 | 1 | 41 | 35.91 | 15.44 | 1 | 0 |
| 4 | 1.57 | 12.09 | 0 | 1 | 42 | 36.50 | 19.97 | 1 | 0 |
| 5 | 2.11 | 16.22 | 0 | 1 | 43 | 36.86 | 22.69 | 1 | 1 |
| 6 | 2.57 | 19.74 | 0 | 1 | 44 | 37.49 | 27.54 | 1 | 1 |
| 7 | 2.86 | 22.03 | 0 | 1 | 45 | 38.02 | 31.66 | 1 | 1 |
| 8 | 3.04 | 23.41 | 0 | 1 | 46 | 38.48 | 35.18 | 1 | 1 |
| 9 | 4.28 | 1.84 | 0 | 0 | 47 | 38.78 | 37.47 | 1 | 1 |
| 10 | 4.87 | 6.36 | 0 | 0 | 48 | 38.96 | 38.85 | 1 | 1 |
| 11 | 5.22 | 9.09 | 0 | 1 | 49 | 37.56 | 16.15 | 1 | 0 |
| 12 | 5.85 | 13.93 | 0 | 1 | 50 | 38.15 | 20.67 | 1 | 0 |
| 13 | 6.39 | 18.06 | 0 | 1 | 51 | 38.50 | 23.40 | 1 | 1 |
| 14 | 6.85 | 21.58 | 0 | 1 | 52 | 39.13 | 28.24 | 1 | 1 |
| 15 | 7.15 | 23.87 | 0 | 1 | 53 | 39.67 | 32.37 | 1 | 1 |
| 16 | 7.33 | 25.25 | 0 | 1 | 54 | 40.13 | 35.89 | 1 | 1 |
| 17 | 8.16 | 3.51 | 0 | 0 | 55 | 40.43 | 38.18 | 1 | 1 |
| 18 | 8.75 | 8.03 | 0 | 0 | 56 | 40.60 | 39.56 | 1 | 1 |
| 19 | 9.10 | 10.76 | 0 | 1 | 57 | 40.01 | 17.21 | 1 | 0 |
| 20 | 9.73 | 15.60 | 0 | 1 | 58 | 40.60 | 21.73 | 1 | 0 |
| 21 | 10.27 | 19.73 | 0 | 1 | 59 | 40.96 | 24.46 | 1 | 1 |
| 22 | 10.72 | 23.24 | 0 | 1 | 60 | 41.59 | 29.30 | 1 | 1 |
| 23 | 11.02 | 25.53 | 0 | 1 | 61 | 42.12 | 33.43 | 1 | 1 |
| 24 | 11.20 | 26.92 | 0 | 1 | 62 | 42.58 | 36.94 | 1 | 1 |
| 25 | 22.65 | 9.74 | 1 | 0 | 63 | 42.88 | 39.23 | 1 | 1 |
| 26 | 23.24 | 14.26 | 1 | 0 | 64 | 43.06 | 40.61 | 1 | 1 |
| 27 | 23.60 | 16.99 | 1 | 1 | 65 | 1.97 | 2.33 | 0 | 0 |
| 28 | 24.23 | 21.83 | 1 | 1 | 66 | 3.21 | 5.65 | 0 | 0 |
| 29 | 24.76 | 25.96 | 1 | 1 | 67 | 2.71 | 8.01 | 0 | 1 |
| 30 | 25.22 | 29.48 | 1 | 1 | 68 | 4.53 | 22.05 | 0 | 1 |
| 31 | 25.52 | 31.77 | 1 | 1 | 69 | 4.49 | 3.41 | 0 | 0 |
| 32 | 25.70 | 33.15 | 1 | 1 | 70 | 4.27 | 4.74 | 0 | 0 |
| 33 | 31.45 | 13.52 | 1 | 0 | 71 | 5.22 | 9.09 | 0 | 1 |
| 34 | 32.03 | 18.05 | 1 | 0 | 72 | 7.95 | 24.21 | 0 | 1 |
| 35 | 32.39 | 20.77 | 1 | 1 | 73 | 37.96 | 19.23 | 1 | 0 |
| 36 | 33.02 | 25.61 | 1 | 1 | 74 | 39.85 | 23.98 | 1 | 1 |
| 37 | 33.55 | 29.74 | 1 | 1 | 75 | 42.44 | 39.71 | 1 | 1 |
| 38 | 34.01 | 33.26 | 1 | 1 |  |  |  |  |  |

注：（1）与分别为和两种气体传感器的输出电压（mV），作为SVC的样本集的特征；

（2）与分别为判定和两种气体有无的数据，0表示没有该种气体，1表示存在该种气体，作为样本集的标签。

### 9.2.2 数据预处理

在使用支持向量机进行数据处理之前，为了避免数量级的差异，必须对表9-3中的标定数据进行归一化处理。具体来说，使用公式：

将样本数据变换到（0，1）的范围之内。归一化后的数据如表9-4所示。

表9-4 归一化后的数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 |  |  |  |  | 序号 |  |  |  |  |
| 1 | 0.000 | 0.000 | 0 | 0 | 39 | 0.797 | 0.875 | 1 | 1 |
| 2 | 0.014 | 0.111 | 0 | 0 | 40 | 0.801 | 0.909 | 1 | 1 |
| 3 | 0.022 | 0.179 | 0 | 1 | 41 | 0.834 | 0.380 | 1 | 0 |
| 4 | 0.036 | 0.298 | 0 | 1 | 42 | 0.848 | 0.492 | 1 | 0 |
| 5 | 0.049 | 0.399 | 0 | 1 | 43 | 0.856 | 0.559 | 1 | 1 |
| 6 | 0.060 | 0.486 | 0 | 1 | 44 | 0.871 | 0.678 | 1 | 1 |
| 7 | 0.066 | 0.542 | 0 | 1 | 45 | 0.883 | 0.780 | 1 | 1 |
| 8 | 0.071 | 0.576 | 0 | 1 | 46 | 0.894 | 0.866 | 1 | 1 |
| 9 | 0.099 | 0.045 | 0 | 0 | 47 | 0.901 | 0.923 | 1 | 1 |
| 10 | 0.113 | 0.157 | 0 | 0 | 48 | 0.905 | 0.957 | 1 | 1 |
| 11 | 0.121 | 0.224 | 0 | 1 | 49 | 0.872 | 0.398 | 1 | 0 |
| 12 | 0.136 | 0.343 | 0 | 1 | 50 | 0.886 | 0.509 | 1 | 0 |
| 13 | 0.148 | 0.445 | 0 | 1 | 51 | 0.894 | 0.576 | 1 | 1 |
| 14 | 0.159 | 0.531 | 0 | 1 | 52 | 0.909 | 0.695 | 1 | 1 |
| 15 | 0.166 | 0.588 | 0 | 1 | 53 | 0.921 | 0.797 | 1 | 1 |
| 16 | 0.170 | 0.622 | 0 | 1 | 54 | 0.932 | 0.884 | 1 | 1 |
| 17 | 0.190 | 0.086 | 0 | 0 | 55 | 0.939 | 0.940 | 1 | 1 |
| 18 | 0.203 | 0.198 | 0 | 0 | 56 | 0.943 | 0.974 | 1 | 1 |
| 19 | 0.211 | 0.265 | 0 | 1 | 57 | 0.929 | 0.424 | 1 | 0 |
| 20 | 0.226 | 0.384 | 0 | 1 | 58 | 0.943 | 0.535 | 1 | 0 |
| 21 | 0.239 | 0.486 | 0 | 1 | 59 | 0.951 | 0.602 | 1 | 1 |
| 22 | 0.249 | 0.572 | 0 | 1 | 60 | 0.966 | 0.721 | 1 | 1 |
| 23 | 0.256 | 0.629 | 0 | 1 | 61 | 0.978 | 0.823 | 1 | 1 |
| 24 | 0.260 | 0.663 | 0 | 1 | 62 | 0.989 | 0.910 | 1 | 1 |
| 25 | 0.526 | 0.240 | 1 | 0 | 63 | 0.996 | 0.966 | 1 | 1 |
| 26 | 0.540 | 0.351 | 1 | 0 | 64 | 1.000 | 1.000 | 1 | 1 |
| 27 | 0.548 | 0.418 | 1 | 1 | 65 | 0.046 | 0.057 | 0 | 0 |
| 28 | 0.563 | 0.538 | 1 | 1 | 66 | 0.075 | 0.139 | 0 | 0 |
| 29 | 0.575 | 0.639 | 1 | 1 | 67 | 0.063 | 0.197 | 0 | 1 |
| 30 | 0.586 | 0.726 | 1 | 1 | 68 | 0.105 | 0.543 | 0 | 1 |
| 31 | 0.593 | 0.782 | 1 | 1 | 69 | 0.104 | 0.084 | 0 | 0 |
| 32 | 0.597 | 0.816 | 1 | 1 | 70 | 0.099 | 0.117 | 0 | 0 |
| 33 | 0.730 | 0.333 | 1 | 0 | 71 | 0.121 | 0.224 | 0 | 1 |
| 34 | 0.744 | 0.444 | 1 | 0 | 72 | 0.185 | 0.596 | 0 | 1 |
| 35 | 0.752 | 0.511 | 1 | 1 | 73 | 0.882 | 0.474 | 1 | 0 |
| 36 | 0.767 | 0.631 | 1 | 1 | 74 | 0.925 | 0.590 | 1 | 1 |
| 37 | 0.779 | 0.732 | 1 | 1 | 75 | 0.986 | 0.978 | 1 | 1 |
| 38 | 0.790 | 0.819 | 1 | 1 |  |  |  |  |  |

### 9.2.3 标签转换

根据表9-4，这个识别问题实际上是一个多输出的多分类问题。由于支持向量机无法直接处理这种问题，因此需要对标签进行转换。为了简化问题，可以直接将两位二进制转换为十进制，从而实现多输出到单输出的转换。这样，就可以使用支持向量机来处理这个问题了。转换后的样本集如表9-5所示。

表9-5 标签转换后的数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 |  |  | 类别 | 序号 |  |  | 类别 |
| 1 | 0.000 | 0.000 | 0 | 39 | 0.797 | 0.875 | 3 |
| 2 | 0.014 | 0.111 | 0 | 40 | 0.801 | 0.909 | 3 |
| 3 | 0.022 | 0.179 | 1 | 41 | 0.834 | 0.380 | 2 |
| 4 | 0.036 | 0.298 | 1 | 42 | 0.848 | 0.492 | 2 |
| 5 | 0.049 | 0.399 | 1 | 43 | 0.856 | 0.559 | 3 |
| 6 | 0.060 | 0.486 | 1 | 44 | 0.871 | 0.678 | 3 |
| 7 | 0.066 | 0.542 | 1 | 45 | 0.883 | 0.780 | 3 |
| 8 | 0.071 | 0.576 | 0 | 46 | 0.894 | 0.866 | 3 |
| 9 | 0.099 | 0.045 | 0 | 47 | 0.901 | 0.923 | 3 |
| 10 | 0.113 | 0.157 | 0 | 48 | 0.905 | 0.957 | 3 |
| 11 | 0.121 | 0.224 | 1 | 49 | 0.872 | 0.398 | 2 |
| 12 | 0.136 | 0.343 | 1 | 50 | 0.886 | 0.509 | 2 |
| 13 | 0.148 | 0.445 | 1 | 51 | 0.894 | 0.576 | 3 |
| 14 | 0.159 | 0.531 | 1 | 52 | 0.909 | 0.695 | 3 |
| 15 | 0.166 | 0.588 | 1 | 53 | 0.921 | 0.797 | 3 |
| 16 | 0.170 | 0.622 | 1 | 54 | 0.932 | 0.884 | 3 |
| 17 | 0.190 | 0.086 | 0 | 55 | 0.939 | 0.940 | 3 |
| 18 | 0.203 | 0.198 | 0 | 56 | 0.943 | 0.974 | 3 |
| 19 | 0.211 | 0.265 | 1 | 57 | 0.929 | 0.424 | 2 |
| 20 | 0.226 | 0.384 | 1 | 58 | 0.943 | 0.535 | 2 |
| 21 | 0.239 | 0.486 | 1 | 59 | 0.951 | 0.602 | 3 |
| 22 | 0.249 | 0.572 | 1 | 60 | 0.966 | 0.721 | 3 |
| 23 | 0.256 | 0.629 | 1 | 61 | 0.978 | 0.823 | 3 |
| 24 | 0.260 | 0.663 | 1 | 62 | 0.989 | 0.910 | 3 |
| 25 | 0.526 | 0.240 | 2 | 63 | 0.996 | 0.966 | 3 |
| 26 | 0.540 | 0.351 | 2 | 64 | 1.000 | 1.000 | 3 |
| 27 | 0.548 | 0.418 | 3 | 65 | 0.046 | 0.057 | 0 |
| 28 | 0.563 | 0.538 | 3 | 66 | 0.075 | 0.139 | 0 |
| 29 | 0.575 | 0.639 | 3 | 67 | 0.063 | 0.197 | 1 |
| 30 | 0.586 | 0.726 | 3 | 68 | 0.105 | 0.543 | 1 |
| 31 | 0.593 | 0.782 | 3 | 69 | 0.104 | 0.084 | 0 |
| 32 | 0.597 | 0.816 | 3 | 70 | 0.099 | 0.117 | 0 |
| 33 | 0.730 | 0.333 | 2 | 71 | 0.121 | 0.224 | 1 |
| 34 | 0.744 | 0.444 | 2 | 72 | 0.185 | 0.596 | 1 |
| 35 | 0.752 | 0.511 | 3 | 73 | 0.882 | 0.474 | 2 |
| 36 | 0.767 | 0.631 | 3 | 74 | 0.925 | 0.590 | 3 |
| 37 | 0.779 | 0.732 | 3 | 75 | 0.986 | 0.978 | 3 |
| 38 | 0.790 | 0.819 | 3 |  |  |  |  |

### 9.2.4 样本集划分

为了提高SVC模型的泛化能力并减少过拟合，需要将整个样本集划分为训练集和测试集，并分别用于模型的训练与测试。一般来说，通常会从量程范围内随机选取80%的数据作为训练集，剩余20%作为测试集。这样可以确保测试集中有足够数量的样本来评估模型的泛化性能。本节示例中共有75个样本，从中随机选取60个样本作为训练集，剩余15个样本作为测试集。这种划分方式可以在保证预测精度的同时提高模型的泛化能力。

### 9.2.5 SVC模型结构的确定

为了确定SVM的模型结构，需要使用从样本集中划分出来的训练集和测试集。训练集用于训练SVM的参数，包括核函数的类型和参数、参数、惩罚函数的类型等。测试集用于测试SVM的性能，包括分类准确率、误差率等。通过不断地调整训练集上的参数，使得测试集上的性能达到最优。当SVM的性能满足要求时，就可以确定SVM的模型结构，包括SVM的乘子和偏移量，这些参数决定了SVM的分类边界。这样，就可以使用SVM进行模式识别和预测了。

### 9.2.6 两组分混合气体四种模式的识别

将和两种红外气体传感器的实测输出电压代入已经确定的SVC模型，即可获得被测两组分混合气体成分的模式。

### 9.2.7 预测结果评估

在评估分类模型的性能时，通常会使用以下几种评估指标：

#### 1. 准确率（Accuracy）

准确率是分类正确的样本数占总样本数的比例。虽然准确率是最直观的评估指标，但在样本不平衡的情况下可能会产生误导。具体的计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.28） |

#### 2. 精确率（Precision）

精确率是被模型正确分类为正类的样本数占被模型分类为正类的样本数的比例。具体的计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.29） |

#### 3. 召回率（Recall）

召回率是被模型正确分类为正类的样本数占真正的正类样本数的比例。具体的计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.30） |

#### 4. F1分数（F1）

F1分数是精确率和召回率的调和平均数，同时考虑精确率和召回率。计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9.31） |

式中：TP—真正例（True Positive，TP），即被模型正确分类为正类的样本；

TN—真反例（True Negative，TN），即被模型正确分类为反类的样本；

FP—假正例（False Positive，FP），即被模型错误分类为正类的样本；

FN—假反例（False Negative，FN），即被模型错误分类为反类的样本。

#### 5. AUC-ROC

AUC-ROC(Area Under the Curve-Receiver Operating Characteristics)是以假正例率为横轴，真正例率为纵轴画出的ROC曲线下的面积。对于其计算，涉及到多个阈值下的TPR（True Positive Rate）和FPR（False Positive Rate），并需要计算曲线下的面积，通常不会直接给出计算公式，而是通过专门的数据分析工具或库来计算。AUC-ROC的值介于0.5（随机分类器）和1（完美分类器）之间。

在本节实例中，采用多项式核的测试样本输出结果如下：

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 期望输出 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 |
| 预测输出 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 |

采用Gaussian核的测试样本输出结果如下：

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 期望输出 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 |
| 预测输出 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 |

以上两个表格表明，无论是使用多项式核还是Gaussian核的SVM，都能对两种气体进行有效的辨识。根据表中数据可以看出，所有的预测结果都与期望输出相符，正确分类的样本数等于样本总数，假正例和假反例均等于0，故可计算出准确率为100%，精确率为100%，召回率为100%，F1分数也为100%，AUC-ROC为1，可实现完美分类。需要注意的是，采用Gaussian核时，必须正确调整核函数的带宽，否则，如果取值不当，可能会影响SVM的分类效果。

## §9.3 基于支持向量机的传感器非线性校正及应用

在传感器应用中，通常期望被测量与传感器输出信号之间呈线性关系。因此，非线性度是传感器或仪表的重要技术指标之一。它对整个测控系统最终精度的影响很大。无论传感器或仪表的精度有多高，非线性的存在总是无法完全避免的。因此，为满足生产过程高精度测量的需要，需要对工业过程传感器或仪表的输出输入特性进行非线性校正。这是传感器或仪表研究的重要课题之一。接下来，将以电容式差压变送器为例，详细介绍如何利用支持向量机进行传感器的非线性校正。

### 9.3.1 一维标定实验

本节选用的电容式差压变送器，测量范围为-40kPa~+40kPa，输出信号为0~2.5V的模拟电压（经过放大处理）。从批量生产的传感器中随机抽取了9个样本，样本数据如表9-1所示。

表9-1 电容式差压变送器标定数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| P  （） | 传感器输出（V） | | | | | | | | |
| 样本1 | 样本2 | 样本3 | 样本4 | 样本5 | 样本6 | 样本7 | 样本8 | 样本9 |
| 40 | 2.3769 | 2.3419 | 2.3410 | 2.3811 | 2.3550 | 2.3725 | 2.3529 | 2.3405 | 2.3292 |
| 35 | 2.2274 | 2.1960 | 2.1947 | 2.2343 | 2.2118 | 2.2261 | 2.2095 | 2.1955 | 2.1847 |
| 30 | 2.0814 | 2.0534 | 2.0510 | 2.0914 | 2.0695 | 2.0835 | 2.0690 | 2.0529 | 2.0427 |
| 25 | 1.9391 | 1.9139 | 1.9117 | 1.9516 | 1.9289 | 1.9437 | 1.9316 | 1.9116 | 1.9032 |
| 20 | 1.7996 | 1.7770 | 1.7744 | 1.8144 | 1.7903 | 1.8060 | 1.7966 | 1.7724 | 1.7662 |
| 15 | 1.6622 | 1.6421 | 1.6393 | 1.6797 | 1.6538 | 1.6701 | 1.6636 | 1.6354 | 1.6311 |
| 10 | 1.5270 | 1.5089 | 1.5061 | 1.5467 | 1.5193 | 1.5362 | 1.5324 | 1.5002 | 1.4975 |
| 5 | 1.3930 | 1.3767 | 1.3739 | 1.4147 | 1.3858 | 1.4033 | 1.4021 | 1.366 | 1.3649 |
| 0 | 1.2588 | 1.2445 | 1.2417 | 1.2829 | 1.2524 | 1.2702 | 1.2717 | 1.2318 | 1.2324 |
| -5 | 1.1247 | 1.1122 | 1.1095 | 1.1510 | 1.1188 | 1.1372 | 1.1413 | 1.0976 | 1.0995 |
| -10 | 0.9903 | 0.9796 | 0.9772 | 1.0188 | 0.9850 | 1.0039 | 1.0105 | 0.9631 | 0.9665 |
| -15 | 0.8543 | 0.8456 | 0.8434 | 0.8851 | 0.8499 | 0.8690 | 0.8784 | 0.8271 | 0.8318 |
| -20 | 0.7163 | 0.7095 | 0.7077 | 0.7493 | 0.7127 | 0.7322 | 0.7445 | 0.6887 | 0.6951 |
| -25 | 0.5760 | 0.5713 | 0.5697 | 0.6116 | 0.5734 | 0.5931 | 0.6084 | 0.5482 | 0.5560 |
| -30 | 0.4327 | 0.4305 | 0.4288 | 0.4705 | 0.4310 | 0.4510 | 0.4694 | 0.4046 | 0.4138 |
| -35 | 0.2860 | 0.2865 | 0.2843 | 0.3262 | 0.2853 | 0.3057 | 0.3273 | 0.2576 | 0.2681 |
| -40 | 0.1352 | 0.1390 | 0.1362 | 0.1781 | 0.1350 | 0.1561 | 0.1811 | 0.1059 | 0.1189 |

### 9.3.2 数据的预处理

在本节的模型讨论中，统一以传感器输出电压为自变量，以被测差压为因变量，因为这样建模更方便实际使用。

不失一般性，这里以标定数据样本3为样本集进行建模和预测。在使用支持向量机进行数据处理之前，为了避免数量级的差异，必须对表9-1中的标定数据进行归一化处理。具体来说，使用公式

将样本数据变换到（0，1）的范围之内。归一化后的数据如表9-2所示。

表9-2 归一化后的数据

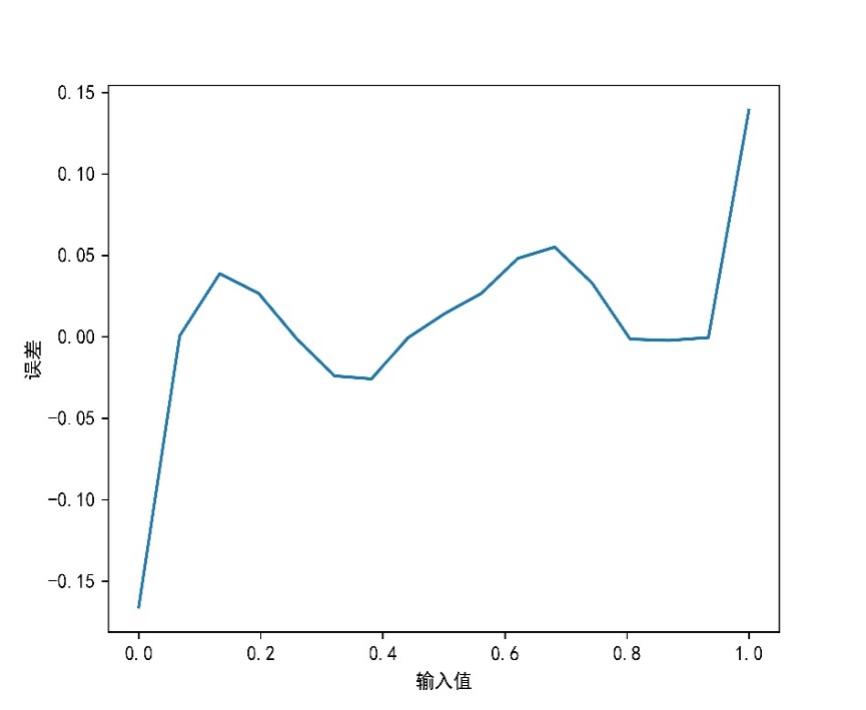
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| P  （） | 传感器输出（V） | | | | | | | | |
| 样本1 | 样本2 | 样本3 | 样本4 | 样本5 | 样本6 | 样本7 | 样本8 | 样本9 |
| 40 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 35 | 0.9333 | 0.9338 | 0.9336 | 0.9334 | 0.9355 | 0.9339 | 0.9340 | 0.9351 | 0.9346 |
| 30 | 0.8682 | 0.8690 | 0.8685 | 0.8685 | 0.8714 | 0.8696 | 0.8693 | 0.8713 | 0.8704 |
| 25 | 0.8047 | 0.8057 | 0.8053 | 0.8050 | 0.8081 | 0.8065 | 0.8060 | 0.8081 | 0.8073 |
| 20 | 0.7425 | 0.7436 | 0.7430 | 0.7428 | 0.7456 | 0.7444 | 0.7439 | 0.7458 | 0.7453 |
| 15 | 0.6812 | 0.6823 | 0.6817 | 0.6816 | 0.6841 | 0.6831 | 0.6826 | 0.6845 | 0.6842 |
| 10 | 0.6209 | 0.6219 | 0.6213 | 0.6212 | 0.6236 | 0.6227 | 0.6222 | 0.6240 | 0.6237 |
| 5 | 0.5611 | 0.5619 | 0.5614 | 0.5613 | 0.5634 | 0.5627 | 0.5622 | 0.5639 | 0.5637 |
| 0 | 0.5012 | 0.5018 | 0.5014 | 0.5015 | 0.5033 | 0.5027 | 0.5022 | 0.5038 | 0.5038 |
| -5 | 0.4414 | 0.4418 | 0.4414 | 0.4416 | 0.4432 | 0.4427 | 0.4421 | 0.4438 | 0.4437 |
| -10 | 0.3815 | 0.3816 | 0.3814 | 0.3816 | 0.3829 | 0.3825 | 0.3819 | 0.3836 | 0.3835 |
| -15 | 0.3208 | 0.3208 | 0.3208 | 0.3209 | 0.3220 | 0.3216 | 0.3211 | 0.3227 | 0.3225 |
| -20 | 0.2592 | 0.2590 | 0.2592 | 0.2593 | 0.2602 | 0.2599 | 0.2594 | 0.2608 | 0.2607 |
| -25 | 0.1966 | 0.1962 | 0.1966 | 0.1968 | 0.1975 | 0.1972 | 0.1967 | 0.1979 | 0.1978 |
| -30 | 0.1327 | 0.1323 | 0.1327 | 0.1327 | 0.1333 | 0.1331 | 0.1327 | 0.1337 | 0.1334 |
| -35 | 0.0673 | 0.0670 | 0.0672 | 0.0672 | 0.0677 | 0.0675 | 0.0673 | 0.0679 | 0.0675 |
| -40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

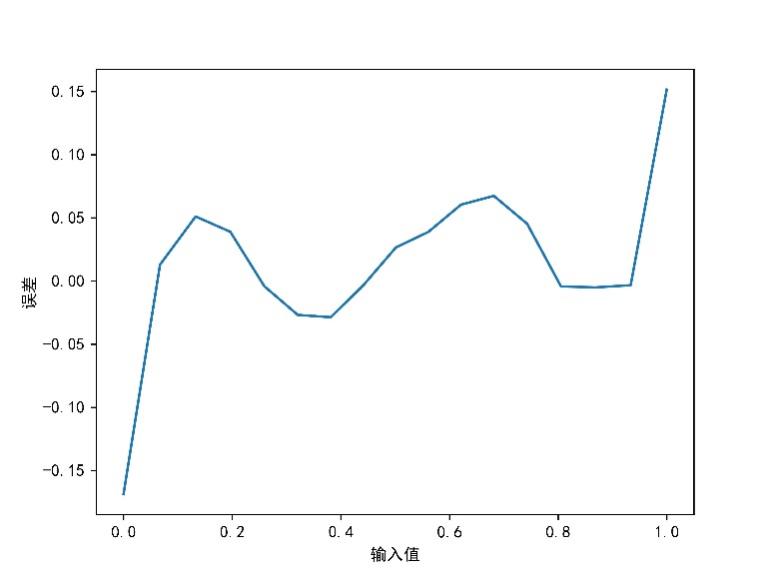
### 9.3.3 样本集划分

如果直接使用整个样本集进行训练和预测，虽然预测的精度可能很高，但模型的泛化能力可能较低。这可能导致得到的拟合曲线是一条振荡曲线，而非期望中的直线。因此，需要将整个样本集划分为训练集和测试集。由于样本3中的标定数据较少，仅有17个，因此采用了较为保守的划分比例，即从量程范围内随机选取80%的数据作为训练集,另外20%作为测试集。这样做可以确保测试集中有足够数量的样本来评估模型的泛化性能。具体来说,在标定数据的量程范围内随机选取了14个样本作为训练集，剩余3个样本作为测试集。这种划分方式在样本量较少的情况下较为标准和合理。

### 9.3.4 核函数的选择

目前对于如何选择支持向量机的核函数并无统一的理论指导。针对本样本数据，这里分别选用常用的径向基核函数和sigmoid核函数进行建模。图9-4和图9-5分别展示了基于径向基核函数和sigmoid核函数的模型预测后的误差曲线。

  
图9-4 基于径向基核函数拟合后的误差曲线

  
图9-5 基于sigmoid核函数模型拟合后的误差曲线

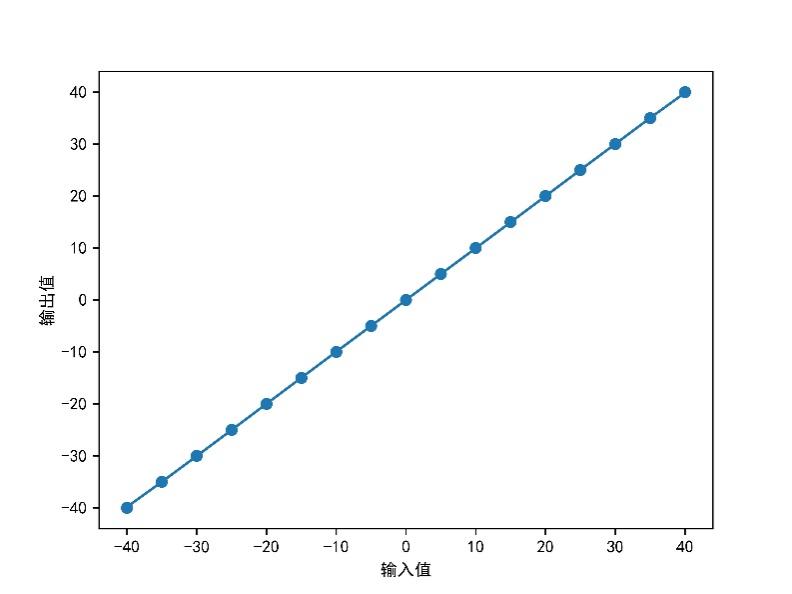
从上面两个图中的效果看，基于sigmoid核函数训练得到的最大误差为，而基于径向基核函数训练得到的最大误差为。由于径向基核函数的预测精度更高，因此本节选择效果理想的径向基核函数作为待训练SVM模型的核函数。

### 9.3.5 SVM参数的优化

如果直接采用默认参数去训练SVM模型进行预测，其预测精度一般较低，无法满足需要。为此，需要采用合适的优化方法来优化SVM模型的超参数。常用的优化方法主要有粒子群优化方法，蚁群优化方法等，可以自行学习相关的优化方法。SVM模型需要的超参数主要有目标函数中的惩罚系数、损失函数中的、以及核函数中的参数。对于本节选用的径向基核函数，需要优化的主要有惩罚系数C、损失函数中的ε和核参数。可以自行选择合适的优化方法对这些超参数进行优化，在这里直接给出优化结果：，，。

### 9.3.6预测结果验证

选用优化后的超参数训练SVM模型，并采用训练好的SVM模型对样本3进行预测，预测结果如图9-6所示。

  
图9-6 预测结果图

由图9-6可以看出，校正后，拟合曲线基本上就是一条直线，线性度较高，可以达到非线性校正的目的。

为了进一步说明非线性校正的效果，下面通过

计算线性度来进行定量说明。

校正前：

拟合直线为，将传感器输入代入并与传感器的输出比较，可得到最大拟合误差为，而量程，代入可得：

校正后：

拟合直线为，将传感器输入代入并与传感器的输出比较，可得到最大拟合误差为，而量程，代入可得：

校正后，线性引用误差由降低到，线性度大大提高。

### 9.3.7 模型的移植

完成了模型的训练和验证后，需要将模型移植到实际的传感器系统中，以实现传感器的非线性校正。传感器在现场实际使用的过程中，其实际测量输出一般需要通过单片机或DSP进行数据处理。然而，这些硬件环境无法安装Python等大型开发环境，因此需要进行移植。移植的步骤如下：

（1）在PC计算机上利用Python开发环境或其它大型数值计算软件训练支持向量机；

（2）提取已训练支持向量回归机SVR的权重（）和偏置项（）。可以使用以下Python代码来提取这些参数：

**dual\_coef = model.dual\_coef\_**  #权重

**intercept = model.intercept\_**  #偏置项

（3）输入待处理的向量，即传感器实际测量的值；

（4）根据核函数求取核函数矩阵的数值；

以RBF核函数为例，其计算公式为：

式中：—待处理的向量；

—支持向量；

—RBF的带宽。

（5）根据支持向量机训练得到的权重系数矩阵、偏置和公式，求取处理结果。

利用C语言编写程序实现上述功能，即可将支持向量机模型移植到单片机或DSP中，以在现场实际环境中使用传感器。

## §9.4 支持向量机的Python实现

### 9.4.1 支持向量机回归（SVR）的实现

#### 9.4.1.1 安装需要的第三方库

支持向量机回归（SVR）的实现主要需要三个第三方库：numpy、scikit-learn和pandas。前面已经详细介绍了前两个库的安装方法，下面着重介绍pandas库的安装。其安装命令如下：

pip install pandas

#### 9.4.1.2 引用第三方库

在使用第三方库之前，需要在程序中导入它们。为了实现SVR，需要添加以下导入语句：

**import pandas as pd**

**import numpy as np**

**from sklearn.svm import SVR**

**from sklearn.model\_selection import train\_test\_split**

**from sklearn.metrics import mean\_squared\_error**

#### 9.4.1.3 导入样本数据集

如果样本数据较少，可以直接使用numpy库创建样本数据数组并输入到程序中。但是，当样本数据较多时，通常会先将数据存储为文件，然后再通过pandas库导入到python环境中进行后续处理。在本节案例中，由于样本数据较多，采用后一种方法。事先已经将数据存储为data.xlsx文件，因此可以使用pandas库中的read\_excel()函数来读取数据。read\_excel()是pandas库中用于读取Excel文件并将其转换为DataFrame的函数。其原型为：

pandas.read\_excel(io, sheet\_name=0, header=0, names=None, index\_col=None, usecols=None, dtype=None, skiprows=None, \*)

它具有许多参数，可以根据需求进行调整。下面是一些常用参数的介绍：

**io**：文件路径或类似文件的对象。可以是字符串、路径对象或具有read()方法的对象。

**sheet\_name**：指定要读取的工作表的名称或索引，默认为0，表示读取第一个工作表。

**header**：指定用作列名的行号，默认为‘infer’，表示自动推断。

**names**：指定列名，如果不指定，则使用header参数推断列名。

**index\_col**：指定用作行索引的列号或列名。

**usecols**：指定要读取的列。

**dtype**：指定每列的数据类型。

**skiprows**：指定要跳过的行数或要跳过的行号列表。

为了降低编程难度，一般在数据文件中只存放要处理的数据，包括特征和标签，而去掉所有的行号和列名。读取data.xlsx文件中数据的实例代码为：

data = pd.read\_excel(‘data.xlsx’)

#### 9.4.1.4归一化数据

归一化数据是一种数据预处理方法，目的是将数据的数值范围统一到一个较小的区间，通常是[0,1]或[-1,1]，以减少数据的差异性和异常值的影响，提高模型的稳定性和收敛速度。根据最小-最大特征缩放原理，可以采用如下代码实现数据的归一化：

normalized\_data = (data - data.min()) / (data.max() - data.min())

#### 9.4.1.5划分训练集和测试集

采用scikit-learn库中model\_selection子模块提供的train\_test\_split()函数划分训练集和测试集，上一章已经介绍，本章不再重复。

#### 9.4.1.6 创建并训练SVR模型

scikit-learn库中的svm子模块提供了SVR类，用于实现支持向量机回归预测。该类的语法如下：

model = SVR(kernel='rbf', degree=3, gamma='scale', coef0=0.0, tol=0.001, C=1.0, epsilon=0.1, shrinking=True, cache\_size=200, verbose=False, max\_iter=-1)

参数说明如下：

**kernel**：指定算法中使用的核函数类型，可以是字符串类型，默认为‘rbf’，表示使用径向基函数，也可以取其他值，如‘linear’表示使用线性核函数；

**degree**：指定多项式核函数的次数，可以是整数类型，默认为3，表示多项式核函数的次数为3；

**gamma**：指定核函数的系数，可以是字符串类型或浮点数类型，默认为‘scale’，表示使用`1 / (n\_features \* X.var())`作为gamma的值；

**coef0**：指定核函数中的独立项，可以是浮点数类型，默认为0.0；

**tol**：指定停止准则的容忍度，可以是浮点数类型，默认为0.001；

**C**：指定正则化参数，可以是浮点数类型，默认为1.0，表示正则化强度与C成反比；

**epsilon**：指定epsilon-SVR模型中的epsilon值，可以是浮点数类型，默认为0.1，表示在训练损失函数中与实际值距离epsilon以内的点不会受到惩罚；

**shrinking**：指定是否使用收缩启发式方法，可以是布尔类型，默认为True；

**cache\_size**：指定内核缓存的大小（以MB为单位），可以是浮点数类型，默认为200；

**verbose**：指定是否启用详细输出，可以是布尔类型，默认为False；

**max\_iter**：指定求解器内部迭代次数的硬限制，可以是整数类型，默认为-1，表示没有限制。

主要方法说明如下：

**fit(X, y)**：根据输入数据X和标签数据y训练支持向量机回归模型；

**predict(X)**：根据输入数据X预测输出数据y；

**score(X, y)**：根据输入数据X和标签数据y评估支持向量机回归模型的性能；

使用该类的示例代码如下：

**from sklearn.svm import SVR**

**model = SVR(kernel='rbf', C=1.0, epsilon=0.1)**

**model.fit(X\_train, y\_train)**

#### 9.4.1.7 预测并评估模型性能

预测并评估模型性能是机器学习中的一个重要步骤，它有助于了解模型的泛化能力和优化方向。具体方法在上一章已介绍，本章不再赘述。

**例9-1** 编写Python程序，实现9-3节的涡流传感器的非线性校正。

代码如下：

# 导入必要的库

import pandas as pd

import numpy as np

from sklearn.svm import SVR

from sklearn.model\_selection import train\_test\_split

from sklearn.metrics import mean\_squared\_error

# 假设您的数据存储在一个名为"data.csv"的文件中

data = pd.read\_csv("data.csv", header=None, index\_col=None)

# 按列归一化

normalized\_data = data.copy()

normalized\_data.iloc[:, 1:] = (data.iloc[:, 1:] - data.iloc[:, 1:].min()) / (data.iloc[:, 1:].max() - data.iloc[:, 1:].min())

# 样本3 传感器的输出

x = normalized\_data.iloc[:, 3].values.reshape(-1, 1)

# 样本3 传感器的输入

y = normalized\_data.iloc[:, 0].values

# 划分训练集和测试集

x\_train, x\_test, y\_train, y\_test = train\_test\_split(x, y, test\_size=0.2)

# 创建SVR模型

svr = SVR(kernel='rbf', C=1000, gamma=1, epsilon=0.001, max\_iter=10000)

# 训练模型

svr.fit(x\_train, y\_train)

# 计算拟合后的输出值

y\_fit = svr.predict(x\_test)

# 计算拟合误差

mse = mean\_squared\_error(y\_test, y\_fit)

### 9.4.2 支持向量机分类（SVC）的Python实现

#### 9.4.2.1 安装需要的第三方库

支持向量机分类（SVC）的实现需要三个第三方库：numpy、scikit-learn和pandas。这些库的安装方法已经在前面详细介绍过，这里不再赘述。可以根据前面的介绍安装这些库，以便在程序中使用。

#### 9.4.2.2 引用第三方库

在使用第三方库之前，需要在程序中导入。为了实现支持向量机分类（SVC），需要添加以下导入语句：

import numpy as np

import pandas as pd

from sklearn.svm import SVC

from sklearn.model\_selection import train\_test\_split

from sklearn.metrics import accuracy\_score

这些语句将导入numpy库、pandas库、scikit-learn库中的SVC类、train\_test\_split函数和accuracy\_score函数，以便在程序中使用。可以根据需要添加其他的导入语句。

#### 9.4.2.3 导入样本数据集

与SVR类似，本节仍然使用pandas库导入样本数据。但是，与上一次介绍的导入语句相比，本节增加了一个lambda匿名函数，以实现将多输出转换为单输出。具体的示例代码如下：

**data = pd.read\_csv('data1.csv')**

**X = data.iloc[:, :2]**

**y = data.iloc[:, 2:].apply(lambda x: x[0]\*2 + x[1], axis=1)**

#### 9.4.2.4划分训练集和测试集

采用scikit-learn库中model\_selection子模块提供的train\_test\_split()函数划分训练集和测试集，前面已经介绍，本节不再重复。

#### 9.4.2.5归一化数据

SVC的归一化与SVR完全一致，本节不再赘述，可以自行参阅9.4.1.4。

#### 9.4.2.6 创建并训练SVC模型

scikit-learn库中的svm子模块提供了SVC类，用于实现支持向量机分类预测。该类的语法如下：

model = SVC(\*, C=1.0, kernel='rbf', degree=3, gamma='scale', coef0=0.0, shrinking=True, probability=False, tol=0.001, cache\_size=200, class\_weight=None, verbose=False, max\_iter=-1, decision\_function\_shape='ovr', break\_ties=False, random\_state=None)

参数说明如下：

**C**：正则化参数，浮点数，默认为1.0。正则化强度与C成反比。必须严格为正。惩罚是平方l2惩罚；

**kernel**：指定算法中使用的核函数类型，可以是字符串类型或可调用类型，默认为'rbf'，表示使用径向基函数，也可以取其他值，如'linear'表示使用线性核函数；

**degree**：指定多项式核函数的次数，可以是整数类型，默认为3，表示多项式核函数的次数为3；

**gamma**：指定核函数的系数，可以是字符串类型或浮点数类型，默认为'scale'，表示使用1 / (n\_features \* X.var())作为gamma的值；

**coef0**：指定核函数中的独立项，可以是浮点数类型，默认为0.0；

**shrinking**：指定是否使用收缩启发式方法，可以是布尔类型，默认为True；

**probability**：指定是否启用概率估计，可以是布尔类型，默认为False；

**tol**：指定停止准则的容忍度，可以是浮点数类型，默认为0.001；

**cache\_size**：指定内核缓存的大小（以MB为单位），可以是浮点数类型，默认为200；

**class\_weight**：设置类i的参数C为class\_weight [i]\*C for SVC。如果未给出，则所有类都应具有权重1。 “平衡”模式使用y的值自动调整权重与输入数据中类频率成反比，即n\_samples / (n\_classes \* np.bincount(y))；

**verbose**：指定是否启用详细输出，可以是布尔类型，默认为False；

**max\_iter**：指定求解器内部迭代次数的硬限制，可以是整数类型，默认为-1，表示没有限制。

主要方法说明如下：

**fit(X, y)**：根据输入数据X和标签数据y训练支持向量机分类模型；

**predict(X)**：根据输入数据X预测输出数据y；

**score(X, y)**：根据输入数据X和标签数据y评估支持向量机分类模型的性能；

使用该类的示例代码如下：

**from sklearn.svm import SVC**

**model = SVC(kernel='rbf', C=1.0)**

**model.fit(X\_train, y\_train)**

#### 9.4.2.7 预测并评估模型性能

预测并评估模型性能是机器学习中的重要步骤之一，它有助于了解模型的泛化能力和优化方向。在SVC模型中，可以使用训练好的模型在测试集上进行预测，并计算各种评价指标来评估模型性能。下面是一个简单的示例代码：

# 在测试集上进行预测

y\_pred = clf.predict(X\_test\_scaled)

# 计算评价指标

accuracy = accuracy\_score(y\_test, y\_pred)

precision = precision\_score(y\_test, y\_pred, average='macro')

recall = recall\_score(y\_test, y\_pred, average='macro')

f1 = f1\_score(y\_test, y\_pred, average='macro')

在这段代码中，首先使用训练好的模型clf对测试数据X\_test\_scaled进行分类预测，得到预测输出数据y\_pred。然后，使用accuracy\_score、precision\_score、recall\_score和f1\_score函数分别计算准确率、精确度、召回率和F1值。这些评价指标有助于了解模型在测试集上的性能，并为后续的模型优化提供参考。

|  |  |
| --- | --- |
| * 价值观 | 质疑 |
| 质疑是科学的基本精神之一，它既不是全盘否定，也不是初学者尚未明白就里时想澄清的几点“疑问”，而是质疑者经过一定思考后指出可能存在的某种错误。学起于思，思源于疑。“学贵有疑，小疑而小进，大疑则大进；疑者，觉悟之基也”。  在智能传感器技术的发展过程中，质疑精神有着显著的体现。  首先，研究人员不断质疑传统传感器技术的局限性和不足。他们思考为什么传统传感器在某些场景下无法满足精度、速度或适应性的要求，从而推动智能传感器技术的研发。对于现有的智能传感器设计方案和算法，研发者们持有质疑态度。他们会问：这种设计是否能应对未来更复杂的应用场景？算法是否还有优化空间以提高效率和准确性？在数据处理方面，质疑精神促使人们思考所采用的数据清洗和融合方法是否合理，是否可能导致信息丢失或错误解读。对于智能传感器在不同行业的应用效果，也存在质疑。例如在医疗领域，人们会质疑传感器所提供的数据是否足够准确可靠，能否真正辅助医生做出精准诊断和治疗决策。  同时，当新的技术和材料出现时，智能传感器领域的研究者会质疑其是否能为传感器性能带来实质性的提升，以及在实际应用中可能面临的挑战和问题。正是这种持续的质疑精神，推动着智能传感器技术不断自我完善、创新发展，以更好地适应日益多样化和苛刻的应用需求。  质疑的精髓并非随意向别人提问，而是表现为独立思考的能力和不断自我解决疑问的执着精神。善于提出问题是实现创新的基本能力，坚持与时俱进的科学精神，围观、好奇心、想象力、质疑追问……更有利于脑洞大开，激发解决技术问题的灵感。 | |

## 习题9

1. 在支持向量机回归（SVR）中，-不敏感损失函数的主要作用是（ ）。

A. 增加模型的泛化能力 B. 减少模型的训练误差

C. 使模型对异常值不敏感 D. 强制模型输出在某个范围内

2. 在采用支持向量机回归（SVR）模型进行非线性校正时，通常通过（ ）来评价校正效果。

A. 计算模型的准确率 B. 计算模型的线性度

C. 观察模型的决策边界 D. 比较模型的复杂度

3. 在支持向量机模型中，惩罚系数C的主要作用是（ ）。

A. 调整模型的预测阈值 B. 决定模型的核函数类型

C. 影响模型的拟合度 D. 控制模型的正则化强度

4. 在智能传感器系统中，使用支持向量机进行混合气体定性识别的主要优势是（ ）。

A. 能够处理非线性关系 B. 计算速度快

C. 易于实现在线更新 D. 对数据量要求低

5. 在基于支持向量机实现非线性校正时，核函数的主要作用是（ ）。

A. 增加模型的正则化 B. 将数据映射到高维空间

C. 减少模型的计算复杂度 D. 优化模型的超参数

6. 在使用支持向量机进行传感器数据拟合时，选择最佳的模型参数通常通过（ ）。

A. 通过手动调整 B. 通过网格搜索和交叉验证

C. 通过增加更多的训练数据 D. 通过减少模型的正则化

7. 在支持向量机中，核函数的主要作用是将数据映射到 空间，从而实现非线性可分数据的 分割。

8. 在支持向量机模型中，松弛变量的引入是为了允许一些样本点被 分类，同时通过惩罚系数C来控制模型对这些误差的 。

9. 在使用支持向量回归机（SVR）进行传感器非线性校正时，通常需要对数据进行 处理，以减少数据的差异性和异常值的影响，提高模型的 。

10. 在支持向量机的Python实现中，通常使用scikit-learn库中的 类来实现回归任务，而分类任务则使用 类。

11. 常见的核函数有哪些？它们各自适用于什么样的问题？

12. 什么是惩罚系数？它有什么影响？

13. 什么是松弛变量？它有什么作用？

14. 常用的误差函数有哪些？它们的特点是什么？

15. 如何对标签进行转换？

16. 如何确定SVC模型的结构？

17. 什么是准确率、精确率、召回率、F1分数和AUC-ROC？

18. 什么是传感器非线性校正？为什么需要进行非线性校正？

19. 如何评价SVM模型的非线性校正效果？需要使用哪些指标？

20. 请简述将SVM模型移植到实际的传感系统中的步骤？

# 第10章 德智双修，学才同心——智能传感器的设计与应用

|  |  |
| --- | --- |
| 本章内容 | * 智能传感器系统分析 * 智能传感器硬件结构设计 * 智能传感器硬件电路设计 * 智能传感器程序设计 * 智能传感器设计实例   本章将继续深入探讨智能传感器的设计与应用，包括硬件结构设计、硬件电路设计、程序设计等，并通过实例展示如何设计和实现智能传感器系统。通过对这些技术的深入学习，可以更好地理解和掌握智能传感器系统的设计原理和实现方法，并在实际应用中更好地运用这些技术。 |
| 知识目标 | * 1.了解智能传感器的设计方法； * 2.掌握智能感知系统的设计过程。 |
| 能力目标 | 掌握智能传感器的基本原理、结构和工作特点，熟悉传感器硬件电路和结构，能够根据具体应用需求选择合适的传感器类型和技术参数；初步具备开发智能传感器应用软件的能力，实现对传感器数据的采集、处理和分析；能够将多个传感器进行集成融合构建复杂传感网络。 |
| 思政目标 | * 强化学生的工程伦理意识和社会责任感，在设计和应用中充分考虑安全、环保、可持续发展等因素； * 培养严谨的科学态度和务实的工作作风，在设计、实验和测试过程中注意细节，保证数据的准确性和可靠性； * 培养创新思维和创新能力，激发在传感器设计和应用中提出新颖的想法和解决方案的意识和能力； * 培养国际视野和跨文化交流能力，了解国际智能传感器发展趋势和先进技术，为参与国际合作和竞争做好准备。 |
| 重点难点 | 重点：掌握智能感知系统的设计过程。  难点：掌握智能感知系统的设计过程。  本章节适合各种学时设置的教学安排。 |

## §10.1 智能传感器设计概述

### 10.1.1 智能传感器的系统分析

设计智能传感器，首要任务在于明确其基本功能需求和技术指标，这是设计的基石。因此，在软硬件设计之前，需要对智能传感器进行系统分析。

#### 10.1.1.1 系统分析解决的核心问题

系统分析是确定系统总体方向的关键阶段，主要对即将设计的智能传感器系统进行全面的探讨和研究。在现有技术和软硬件条件下，选择最优设计方案，以达成预期目标。

系统分析主要解决以下问题：

（1）明确设计目标与系统功能。

（2）提出初步方案，评估其合理性和可行性。

（3）制定实施计划，包括资金、人力、物力和设备的分配和使用情况等。

（4）识别关键技术问题，并深入研究。

#### 10.1.1.2 智能传感器系统分析工作步骤

智能传感器系统分析工作主要分为三步：

（1）明确任务。根据系统性能要求、功能范围、时间进度、人力资源等因素，明确关键问题。

（2）提出初步方案。分析系统需求，确定设计目标、功能和范围、总体或局部功能划分、组织结构或物理结构、组织方案、进度计划和经济预算等。

（3）进行可行性分析。从技术、经济、工程等方面进行调查研究和分析比较，并对项目建成以后可能取得的财务、经济效益及社会环境影响进行预测和评价。

### 10.1.2 智能传感器的硬件结构设计

智能传感器的硬件部分通常由传感器及信号调理电路、微处理器、ROM、RAM、I/O接口、定时/计数电路、人-机联系部件和接口电路及串行或并行数据通信接口等组成。其中，微处理器是智能传感器的核心所在。

#### 10.1.2.1 微处理器的选择

目前，智能传感器广泛采用了模块化积木式结构设计，其中微处理器作为其核心组件，其选择显得尤为关键。微处理器通常有两种类型，标准微处理器（即单片机）和嵌入式微处理器。标准微处理器，即单片机，适用于中低成本控制应用，因其强大的位控能力、低成本和易用性而受到广泛关注。

1. 单片机的优点

（1） 硬件通用性强，应用灵活。在不同场合应用时，无需改变硬件的结构，只需改变存储器里的程序，就可以更新换代成新产品。

（2）指令系适合实时控制。

（3）体积小，执行速度快。

（4）可靠性高，抗干扰能力强。

（5）可以方便地实现多机分布式控制。

（6）产品开发周期短，开发效率高。

（7）同一系列和配置接口的芯片种类多，功能全，便于挑选。

2. 标准微处理器的选择原则。

（1）主芯片选择

目前，自动化领域中应用广泛且备受青睐的单片机产品除了Intel公司的MCS-51单片机及其兼容系列（ATMEL、PHILIPS、TEMIC、ISSI、WINEOND、LG等）外，还有美国Microchip公司基于RISC指令集的PLC系列单片机、Motorola公司的MC系列单片机、西门子公司的C500系列单片机和C166系列单片机等。为了缩短开发周期和降低成本，应尽可能选择熟悉指令集的系列产品，并在同等条件下选择价格较低的产品。

（2）主机字长选择

智能传感器系统的许多功能与主芯片的字长有着密切关系。字长越长，其运算能力和控制能力就越强，但成本也随之增加。8位单片机是目前应用广泛的一种，可以用于数据处理或一般的监控系统。16位单片机组成的系统是一种高性能的计算机系统，主要用于数据处理并兼顾控制方面的要求。其特点是处理速度快、精度高、功能强，能满足实时性要求。

（3）寻址范围选择

单片机的地址长度决定了系统中可存放的程序和数据量的范围。例如，8位单片机的地址长度为16位，因此其可寻址的范围为64K。设计时，应根据应用系统的要求确定合理的存储容量。

（4）指令功能

一般来说，单片机的指令条数越多，其操作功能就越强，从而可使编程变得更灵活有效。但不能仅通过指令数量来评价单片机的功能强度，每条指令的具体内存和不同厂商的指令计算方式也是重要考虑因素。

所选取的单片机，其指令功能应该面向所要处理的问题。若侧重于控制，要特别注意访向外部设备（或接口）指令的功能；如果侧重于数据处理，则应该注意数据操作指令的功能，如算术和逻辑运算、十进制调整、位操作指令、控制转移等指令的功能是否齐全。

（5）处理速度

通常情况下，时钟周期越短，执行速度越快。然而，不能仅依靠时钟频率来衡量微处理器的执行速度。实际上，指令的执行时间需要结合时钟频率和执行该指令所需的周期数来计算。对于需要较短采样周期和大量实时计算的数据处理任务，应选择高速单片机。

（6）中断能力

在实际应用中，有时，为处理紧急任务，单片机需要暂停主程序，转而执行特定的服务子程序。对于需要快速处理多任务并实时响应的场景，应选择中断功能强大且具有优化判断电路的单片机。因为这可以有效地处理多个中断源，从而提高系统的整体效率。

（7）功耗

功耗受到器件工艺、器件复杂性和时钟速率的影响。就器件工艺而言，高速双极性单片机的功耗较高，NMOS和PMOS单片机的功耗居中，而CMOS单片机的功耗最低。在较低的时钟速率下，单片机的功耗较低。此外，还应根据系统允许的工作范围和工作环境等条件来选择适用功耗的单片机。

3. 嵌入式微处理器及其特点

嵌入式微处理器的基础是通用计算机中的CPU，是嵌入式系统的核心。为满足嵌入式应用的特殊要求，嵌入式微处理器在功能上与标准微处理器基本相同，但在工作温度、抗电磁干扰等方面进行了各种增强。与工业控制计算机相比，嵌入式微处理器具有体积小、质量轻、成本低、可靠性高的优点。嵌入式微处理器具有以下特点：

（1）具有强大的实时和多任务支持能力，能够完成多任务并具有短的中断响应时间，从而将内部代码和实时操作系统的执行时间降至最低。

（2）具有强大的存储区保护功能。由于嵌入式系统的软件已模块化，为防止软件模块间的错误交互，需要设计强大的存储区保护功能，这也有利于软件诊断。

（3）具有可扩展的处理器结构，能够迅速扩展以满足高性能嵌入式微处理器的应用需求。

（4）嵌入式微处理器的功耗必须很低，特别是在便携式的无线和移动计算及通信设备中的嵌入式系统，这些系统由电池供电，其功耗低至微瓦级。

4. 嵌入式处理器的技术指标。

（1）接口种类和数量

接口的种类和数量是嵌入式处理器的重要技术指标之一。处理器集成了多种外部接口，可以减少外围扩展的需求，提高系统的可靠性，降低成本。因此，在选择处理器时，应根据系统的需求选择集成所需接口种类和数量的处理器。

（2）字长

字长，即参与运算的数的基本位数，由寄存器、运算器和数据总线的宽度决定，直接影响硬件的复杂程度。字长越长，包含的信息量越多，能表示的数据有效位数也越多，从而提高计算精度。此外，当处理器的指令较长时，指令系统的功能就较强。字长通常为1、4、8、16、32、64位。

（3）处理速度

通常，通过计算单位时间内各类指令的平均执行条数来衡量处理速度，这是根据各种指令的使用频度和执行时间来计算的，如式(10.1)所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （10.1） |

式中：—第类指令在程序中的使用频度；

—第类指令的执行时间；；

—平均指令执行时间，其倒数就是处理器的运行高速度的指标，单位为MIPS。

此外，还有其他的方法来衡量处理器的速度，例如MFLOPS（每秒百万次浮点运算）和主频等。

（4）工业温度

商业级（0～55℃）、工业级（-40～85℃）、军用级（-55～125℃）、航天级（更宽）。

（5）功耗

嵌入式处理器的功耗通常包括待机功耗和工业功耗，这些功耗与运行频率和电源电压有关。

（6）寻址功能

寻址功能与地址总线的宽度有关，但对于集成了存储器的处理器，这个功能的重要性较小。

（7）其他

包括性价比、工艺等。

5. 嵌入式微处理器的选择原则。

（1）CPU总线位数

CPU总线的位数应根据系统处理的主要数据类型来确定。如果主要数据的位数大于8位，应选择16位或32位的CPU。例如，如果在信号采样时，A/D转换器或D/A转换器位数为12位，则应使用16位或32位的CPU。这样可以避免在输入、输出以及中间的数据处理过程中进行数据类型转换，从而提高程序运行效率。

（2）价格与供货的稳定性和可靠性

在工业应用中，价格是影响CPU选型的一个重要因素。8位的MCU的价格基本都在1$以下，而32位的CPU相对较贵。然而，对于武器系统，供货的稳定性和可靠性通常是选择CPU的一个非常重要的因素。因为从武器设计到退役可能需要几十年，不仅要在设计时能买到CPU，而且在设备维护时也需要有相应的备件来替换。

（3）开发工具的支持

开发工具在嵌入式系统的开发中具有重要地位，不仅影响开发的进度，而且直接关系到设备的性能甚至项目的成败。

（4）操作系统的支持

对于一般的简单机电系统应用，可以直接使用汇编语言或C语言进行编程，并使用8位MCU来完成任务。然而，对于更复杂的应用，通常需要操作系统的支持。

（5）代码继承性

代码的继承性通常是决定CPU选择的关键因素。例如，在军用设备中，为了确保系统的可靠性和研制周期，通常会直接使用原来的CPU类型。

（6）供应商的因素

当功能扩展到原来选择的CPU无法满足系统需求时，供应商应提供相应的升级或替换CPU，并提供技术支持。

#### 10.1.2.2 智能传感器的硬件电路设计

在选择好微处理器之后，就可以开始进行硬件电路的设计。硬件电路的构成与测量信号的特性、微处理器的情况和对传感器性价比的要求都有直接的关系。

在智能传感器中，微处理器具有强大的功能。这使得许多过去由硬件电路承担的工作，现在可以通过软件来完成。因此，充分利用软件可以简化硬件电路、降低成本、减小体积、提高精度和增加可靠性。然而，有些功能是软件无法实现的。另外，有些功能如果采用软件来完成，可能会使程序变得相当复杂，从而降低运行速度。相反，如果用硬件来完成这些功能，可能会更简单。在这些情况下，仍需要使用硬件来完成。因此，在设计的开始阶段，应反复权衡硬件和软件的比例。合理地将智能传感器的功能划分成若干部分，并确定哪些由硬件实现、哪些由软件完成。这种计划的完成可以节省投资和研制时间。

智能传感器的硬件包括信号调理电路、A/D转换器、微处理器、存储器、I/O接口及其他逻辑电路、数据采集通道、人–机对话装置、输出执行部件和通信接口等。设计过程一般需要经过以下几个步骤：

（1）电路原理图的设计阶段

硬件电路设计的第一步是根据功能要求进行电路原理图的设计。这包括确定电路结构、计算元器件参数等。这一步是整个设计过程的基础，对传感器的性能、成本和精度等方面都有重要影响。在设计时，应考虑技术可行性和经济合理性。如果设计中有重大革新或创新性质的环节，应先通过实验验证其可行性，然后才能在电路原理图中使用。

（2）实验板实验阶段

硬件电路的书面设计是一方面，而保证它能付诸实际工作则又是另一方面。因此，通常需要制作电路实验板进行实验。电路实验板可以是一个功能模块，也可以是整个传感器的硬件电路。在电路实验板上，组件的安装、排列、布置和走线并不是主要的，重点应考虑电气性能。

实验阶段与电路原理图设计阶段往往要反复进行。通过实验发现问题后，需要进行修改设计。重新设计后，又要再次进行实验，直至最终达到完美。

（3）印刷电路板设计与安装调试阶段

在电路设计定型后，就需要设计和制作正规的印刷电路板。在设计印制电路板时，应认真考虑组件的安排和走线等因素，因为印制电路板的合理性对传感器的正常工作有很大影响。

印制电路板安装完成后，首先要进行功能和逻辑检查，确保它能正常工作。然后才能用于整个系统的电路仿真。通过在仿真中发现并排除问题，直到工作正常为止。

（4）软、硬件总调阶段

在硬件与软件分别进行初步调试以后，必须对传感器系统进行总体调试。在总体调试中，将进一步发现硬件和软件两方面的问题，其中最主要的是检验软、硬件能否协调运行。总体调试通过后，设计研制工作才算完成。

### 10.1.3 智能传感器的软件设计

在确定硬件电路之后，传感器的功能将依赖于软件程序来实现。优秀的软件程序不仅能实现强大的功能，而且还应具有结构化、简单易读、调试方便、占用系统资源少和运行速度快等特点。只有掌握正确的软件设计方法，才能高效、高质量地完成智能传感器软件设计任务。

#### 10.1.3.1智能传感器的软件系统组成

智能传感器的软件通常由监控程序、测量控制程序、数据处理程序、中断处理程序等组成。

1. 监控程序

监控程序是控制系统按预定操作方式运行的核心程序。它负责引导智能传感器进入正常工作状态，并协调各部分软硬件有序地工作。监控程序的主要功能包括管理键盘和显示器，接收来自输入/输出接口、内部电路等的中断请求信号，并按照中断优先级顺序进入相应的服务程序，以及对定时器进行管理，实现传感器的初始化和自检等。

2. 测量控制程序

测量控制程序主要完成测量以及测量过程的控制等任务。例如，多路切换、采样、A／D转换、D／A转换、超限报警、程控放大器增益控制等。这些程序可以由若干程序模块实现，供监控程序或中断服务程序调用。

3. 数据处理程序

数据处理程序主要实现各种数值运算（算术逻辑运算和各种函数运算）、非数值运算（如查表、排序等）和数据处理（非线性校正、稳定补偿、数字滤波和标度变换等）。

4. 中断处理程序

数据处理程序用来处理各种中断服务请求，可能会调用测量控制程序或数据处理程序。

#### 10.1.3.2 智能传感器软件设计的内容

1. 量程自动转换

如果传感器和显示器的分辨率一定，而仪表的测量范围很宽，为了提高测量精度，智能传感器应能自动转换量程。在多传感器检测系统中，为保证计算机的信号一致（0～5V)，也必须能够进行量程的自动转换。量程自动转换是指采用一种通用性很强的可编程增益放大器PGA，根据需要通过程序调节放大倍数，使A／D转换器满量程信号达到一致化，从而大大提高测量精度。

2. 标度变换

在实际应用中，各个被测参数通常有着不同的量纲和数值。根据不同的检测参数，采用不同的传感器，就会有不同的量纲和数值。例如，在检测温度时，常用的热电偶有铂铑-铂热电偶和镍铬-镍铬热电偶，它们在不同温度下输出的热电动势各不相同。测量压力时，常用的弹性元件有膜片和膜盒等，它们的压力范围不尽相同。所有这些参数都经过传感器和检测电路转换成A/D转换器所能接受的0～5V统一电压信号，然后由ADC转换成12位数字量，以便CPU进行各种数据处理。为了进一步进行显示、记录、打印和报警等操作，必须将这些数字量转换成带有量纲的数据供输出。这样，操作人员就能够对生产过程进行监视和管理。这个过程称为标度变换或工程量变换。被测参数和传感器的类型不同，标度变换的方法也不同。因此，应根据实际情况选择适当的标度变换方法。

3. 数字调零

在传感器系统的输入电路中，通常会出现零点漂移、增益偏差和器件参数不稳定等现象。这些现象会对测量数据的准确性产生影响。因此，需要对它们进行自动校准。在实际应用中，通常会通过各种程序来实现偏差校准，这种技术被称为数字调零。此外，还可以定期自动测量基准参数，以实现自动校准。

4. 非线性补偿

在测试系统中，往往期望传感器具有线性特性。因为这样不但读数方便，而且能使传感器在整个刻度范围内灵敏度保持一致，便于对系统进行分析处理。然而，传感器的输人/输出特性往往具有一定的非线性。为此，必须对其进行补偿和校正。

5. 温度补偿

环境温度的变化可能对测量结果产生显著影响。在智能传感器系统中，首先，需要建立一个数学模型（例如，多项式）来表达温度变化。接着，使用温度传感器测量传感器周围的环境温度，并将温度传感器的输出信号经过放大和A/D转换后，送入微处理器进行处理。最后，将两个传感器的输出信号代入模型，并使用插值或查表等数据处理方法进行温度补偿，从而实现温度误差的校正。

6. 数字滤波

当传感器信号经过A/D转换输入微处理器时，可能会混入随机噪声信号。尤其在传感器的输出电压很低时，这种干扰更不可忽视，必须予以消除。对于周期性的工频（50Hz）干扰，采用积分时间等于20ms整数倍的双积分A/D转换器，可以有效地消除其影响。对于随机干扰信号，需采用软件数字滤波技术解决。而采用数字补偿技术可以使传感器的精度提高一个数量级。

#### 10.1.3.3 智能传感器常用的软件设计方法

常用的软件设计方法有自顶向下的程序设计、模块化程序设计和结构化程序设计。这三种设计方法通常被综合使用，通过自顶向下、逐步细化、模块化设计、结构化编码来保证软件的快速实现。

1. 自顶向下的程序设计

程序设计主要有两种方法：“自顶向下，逐步细化”和“自底向上，逐步积累”。 “自顶向下”的设计方法首先明确整体目标，然后将其分解成各个子任务，逐层细化，直到每个任务都可以单独处理。 “自底向上”的设计方法首先解决细节问题，然后将这些细节整合起来，实现整体任务的完成。“自底向上”的设计方法可能没有对整体任务进行透彻的分析。一旦出现未预料到的情况，需要进行修改和重新设计。因此，通常推荐使用“自顶向下”的设计方法。

2. 模块化程序设计

在明确了软件设计的总体任务之后，通常采用“自顶向下”的方法，将总任务逐步细分，直到可以具体处理的基本单元。如果一个基本单元的定义明确，并且可以独立地进行设计、调试、纠错及移植，那么就称它为“模块”。每个模块都是独立开发和测试的，最后再组装成整个软件。这种开发方法是“分而治之”原则在软件工程领域的具体应用，它通过分解任务来降低软件开发的复杂性。模块化的结构具有清晰的结构概念、灵活的组合方式以及易于调试和纠错的优点。在处理故障或改变功能时，通常只需要修改局部模块，而不会影响整体。因此，模块化设计是一种常用的理想结构。

（1）模块化设计的目的

模块是一个单独命名的元素，可以组合成层次结构形式，形成一个可执行的软件。模块化设计的目的是降低软件的复杂性，简化软件设计、调试和维护的过程。一个模块具有四个特性：输入/输出、功能、内部数据和程序代码。输入/输出是模块需要的和产生的信息，功能是模块所做的工作，程序代码用于完成这些功能，内部数据是模块内部使用的数据。对于模块的外部环境，只需了解模块的输入/输出和功能。在软件设计阶段，通常先确定这些外部特性，然后再确定模块的内部数据和程序代码。

（2）模块化设计方法的规则

模块化设计方法的关键是如何将系统分解成模块，以及在模块设计中应遵循的规则。把系统分解成模块，应遵循以下规则：

1）最高的模块内聚性，即模块内部有最大限度的关联，只实现单一功能的模块具有很高的内聚性。

2）最低的耦合度，即尽可能减弱不同模块之间的关系。

3）模块间的链深度不可过多，即模块的层次不能过高，一般应控制在7层左右。

4）接口清晰，信息隐蔽性好。

5）模块大小适度。

6）尽量采用已有的模块，提高模块重用率。

3. 结构化程序设计

进行程序设计时，一般先根据程序的功能编制程序流程图，然后用汇编语言或高级程序语言根据流程图编写程序。对于中小规模的程序，这种方法可行。但是，对于规模较大、结构复杂的程序，画出完整的程序流程图是困难的。虽然可以将程序分解成小模块并连接起来，但在复杂的连接中容易出错。程序流程图一般只表示算法的过程，不提供数据的详细信息。在连接程序段时，信息接口非常重要。如果后一段程序不能从前一段程序获得必要的正确数据，程序就无法正常运行。结构化编程是一种清晰易懂的方法，用于表示程序文本与其对应过程之间的关系，从而组织程序的设计和编码。

结构化程序设计方法的核心原则是，一个模块只有一个入口和一个出口。这意味着，一个模块只能被其他模块调用一次，并且只有一个地方可以退出模块。根据这一原则，如果一个模块有两个或两个以上的入口或出口，应该重新划分为两个或两个以上的模块。结构化程序具有清晰明了的脉络，而非结构化程序则网状交织，条理不分明。

在结构化程序设计中，仅允许使用三种基本结构，即顺序结构、选择结构和循环结构。

## §10.2 智能传感器设计实例

前面已经介绍了智能传感器的设计原则和方法，包括系统分析、硬件结构设计、硬件电路设计和软件设计。接下来，将通过一个实例—分布式温度传感系统的设计与应用来进一步了解智能传感器的设计过程。希望这个实例能够帮助更好地理解智能传感器的设计方法和应用。

### 10.2.1 分布式温度传感系统的性能指标

评估分布式温度传感系统的关键性能指标包括：温度分辨率、空间分辨率和时间分辨率。在系统设计过程中，这三项指标是相互影响的。因此，优良的系统应综合考虑这三点，以实现性能最优化。此外，温度传感距离和温度传感范围也是重要的性能指标。

本系统的主要性能指标包括：①温度分辨率：；②空间分辨率：1m；③时间分辨率：15s；④温度传感距离：≥5km；⑤ 温度传感范围：-100～600℃。

为实现上述性能指标，在电路设计过程中有许多注意事项，主要的设计要求如下：①光源系统产生光脉冲宽度不大于10ns；②高性能的温度控制电路；③高压电路产生300～600V直流电压；④高速数据采集电路不小于100M；⑤高质量的光纤。

### 10.2.2 分布式温度传感系统的总体结构

分布式温度传感系统总体结构如图10-1所示。

  
图10-1 分布式温度传感系统总体结构

由图10-1所示，分布式温度传感系统主要由主处理器、单片机、脉冲驱动电路、温度控制电路、激光器、掺铒光纤放大器、光耦合器、Anti-Stokes光滤波器、Stokes光滤波器、高压电路、光电转换与信号放大电路和高速数据采集电路等构成。

主处理器是分布式温度传感系统的核心，通过IIC总线向各个电路发送指令并处理返回的数据，控制整个系统。在系统运行过程中，主处理器控制脉冲驱动电路使激光器产生稳定的、固定波长的、脉冲宽度可调的光脉冲信号。激光器产生的光脉冲波长会随温度变化而有一定的漂移，为保证产生波长稳定的光脉冲，需设计温度控制电路，保证激光器处于稳定温度状态。

光脉冲经过掺铒光纤放大器后，其功率会得到放大。放大后的光脉冲耦合进入光纤。在光纤内传输时，光脉冲会产生拉曼散射。在这些散射光中，后向拉曼散射光会沿着光路返回到光耦合器。拉曼散射包含了两种频率的光—斯托克斯光和反斯托克斯光，两者的频率分布在入射光频率两侧。光滤波器可以分离出带有温度信息的反斯托克斯散射光和作为参考信息的斯托克斯散射光。然后，这两种光会进入不同的光路进行处理。

斯托克斯光和反斯托克斯光分别通过雪崩光电二极管进行光电转换。由于雪崩光电二极管需要在高压环境下才能正常工作，需设计高压电路控制雪崩光电二极管端的电压值。由于雪崩光电二极管在光电转换过程中会受到温度的影响，也需要设计温度控制电路。光信号转换成电信号后，由于电信号十分微弱，必须将信号放大。放大后，电信号由高速数据采集电路采集，经主处理器处理可计算出温度值。再经过光时域反射技术确定发生散射的位置点，这样就可以将光纤中的位置点与其温度值相对应。如此多次计算，确定光纤上多个点的温度值，就能分布式地展现整个光纤上的温度分布情况，这就是基于拉曼散射的分布式温度传感系统的基本结构与工作过程。

在电路设计过程中，整个系统被分为以下几个子系统，每个子系统的组成部分如下所示：

（1）光源系统。它由脉冲驱动电路、单片机、温度控制电路和激光器组成。

（2）光传输与分光系统。它由掺铒光纤放大器、光耦合器、反斯托克斯光滤波器和斯托克斯光滤波器组成。

（3）光接收系统。它由高压电路、单片机、温度控制电路、光电转换与信号放大电路和高速数据采集电路组成。

### 10.2.3 分布式温度传感系统的硬件设计

#### 10.2.3.1 光源系统设计

光源系统结构如图10-2所示。

  
图10-2 光源系统结构

由图10-2可见，FPGA产生的信号通过光脉冲驱动电路产生光脉冲驱动信号。该信号进一步驱动激光器，从而产生具有稳定波长的光脉冲。此过程需要温度控制电路控制激光器处于恒温状态，保证光脉冲的质量。光源系统控制电路以单片机为微控制单元与主处理器通信，实现对光脉冲驱动电路与温度控制电路的控制。

#### 10.2.3.2 光接收系统

光接收系统结构如图10-3所示。

  
图10-3 光接收系统结构

由图10-3可见，光电转换与信号放大电路将反斯托克斯光信号与斯托克斯光信号转换成反斯托克斯电信号与斯托克斯电信号，并将信号强度放大。光电转换过程由高压偏置电路提供偏置电压，并由温度控制电路保证光电转换元件工作于恒温状态。转换后的电信号被采集并进行数据处理，减少数据中的噪声干扰。

### 10.2.4 分布式温度传感系统的程序设计

光源系统与光接收系统的总线通信控制由ATmega16单片机实现。ATmega16单片机通过IIC总线接收主处理器的指令，完成相应的操作，并将对应的数据再通过IIC返回给主处理器。本节的主要内容是：设计ATmega16的IIC通信程序，使其具有数据收发功能，并能根据收到的指令完成对应的操作。

|  |  |
| --- | --- |
| * 价值观 | 友善 |
| 在智能传感技术中，友善精神体现在多个方面。  从设计理念来看，智能传感技术旨在为人们的生活提供便利和帮助，使人们的生活更加舒适和安全。例如，智能家居中的智能传感器可以自动调节室内温度、照明和湿度，以适应居住者的需求，体现了对人的关怀和友善。在医疗领域，智能传感器用于监测患者的生命体征，及时向医护人员发送警报，保障患者健康。这种应用体现了对患者的友善，致力于减轻病痛和拯救生命。智能传感技术在环境保护方面也有所贡献，通过监测空气质量、水质和土壤状况等，为改善生态环境提供数据支持，这是对整个地球生态系统的友善之举。  此外，在智能交通系统中，传感器可以帮助优化交通流量，减少拥堵和事故，提高出行效率，这是对广大出行者的友善。而且，智能传感技术在工业生产中的应用，能够提高生产效率，减少资源浪费，降低对工人身体的潜在危害，体现了对劳动者的友善。  总之，智能传感技术以其多种应用和功能，展现了对人类、对环境、对社会的友善精神，致力于创造一个更美好的世界。 | |

## 习题10

1. 在智能传感器硬件结构的设计过程中，选取微处理器时应综合考虑的主要因素包括（ ）。

A. 价格和品牌 B. 处理速度和功耗

C. 外观和尺寸 D. 软件兼容性

2. 在智能传感器设计中，软件设计的主要目的是（ ）。

A. 降低硬件成本

B. 减少软件的调试时间

C. 增加硬件的复杂性

D. 提高系统的灵活性和可扩展性

3. 智能传感器设计时，量程自动转换的目的是（ ）。

A. 增加传感器的测量范围 B. 降低传感器的成本

C. 提高测量精度 D. 减少传感器的功耗

4. 智能传感器的硬件部分通常由传感器及信号调理电路、、ROM、RAM、I/O接口、定时/计数电路、人-机联系部件和接口电路及串行或并行数据通信接口等组成。其中， 是智能传感器的核心所在。

5. 智能传感器的软件设计通常由 、测量控制程序、数据处理程序、中断处理程序等组成。其中， 是控制系统按预定操作方式运行的核心程序。

6. 简述智能传感器系统分析的目的及要解决的问题。

7. 请简述智能传感器设计时标准微处理器的选择原则。

8. 请简述智能传感器设计时嵌入式微处理器的选用原则。

9. 简述智能传感器软件设计的方法和主要内容。

10. 简述分布式温度传感器系统的设计过程。

# 参考文献

1. 佟维妍, 高成, 李文强, 等. 传感器与检测技术[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2022.
2. 陈雯柏, 李邓化, 何斌, 刘辉翔, 苏明灯. 智能传感技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.
3. 吴盘龙. 智能传感器技术[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2024.
4. 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 6版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
5. 胡向东. 传感器与检测技术[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2013.
6. 刘君华. 智能传感器系统[M]. 2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.
7. 何金田, 刘晓旻. 智能传感器原理、设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
8. 戴焯. 传感器原理与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
9. 林玉池, 曾周末. 现代传感器技术与系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
10. 赵勇, 胡涛. 传感器与检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
11. 周杏鹏, 孙永荣, 仇国富. 传感器与检测技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
12. 余成波. 传感器与自动检测技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
13. 樊尚春. 传感器技术及应用[M]. 2版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
14. 陈杰, 黄鸿. 传感器与检测技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2010.
15. 潘雪涛, 温秀兰. 传感器原理与检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
16. 凌志浩. 智能仪表原理与设计技术[M]. 2版. 上海: 华东理工大学出版社, 2008.
17. 梁福平. 传感器原理及检测技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.
18. 叶湘滨, 熊飞丽. 传感器与检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
19. 宋雪臣, 单振清. 传感器与检测技术[M]. 2版. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
20. 郁有文. 传感器原理及工程应用[M]. 3版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
21. 严钟豪, 谭祖根. 非电量电测技术[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2004.
22. 张国雄. 测控电路[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
23. 梁福平. 传感器原理及检测技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.
24. 索雪松, 纪建伟. 传感器与信号处理电路[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
25. 吕俊芳, 钱政, 袁梅. 传感器调理电路设计理论及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
26. 祝诗平. 传感器与检测技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.
27. 董永贵. 传感器技术与系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
28. 王伯雄, 王雪, 陈非凡. 工程测试技术[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2012.
29. 邵军, 刘君华, 乔学光. 利用BP神经网络提高光纤光栅压力传感器的选择性[J]. 传感技术学报, 2007, 20(7): 1531-1534.
30. 王阳光, 尹项根, 游大海. 无线传感器网络应用于智能电网的探讨[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 7-11.
31. 雷宇. 分布式光纤温度传感系统的研究与设计[D]. 南京: 南京理工大学硕士论文, 2014.