



传感器与检测技术

CHUANGANQI YU JIANCE JISHU

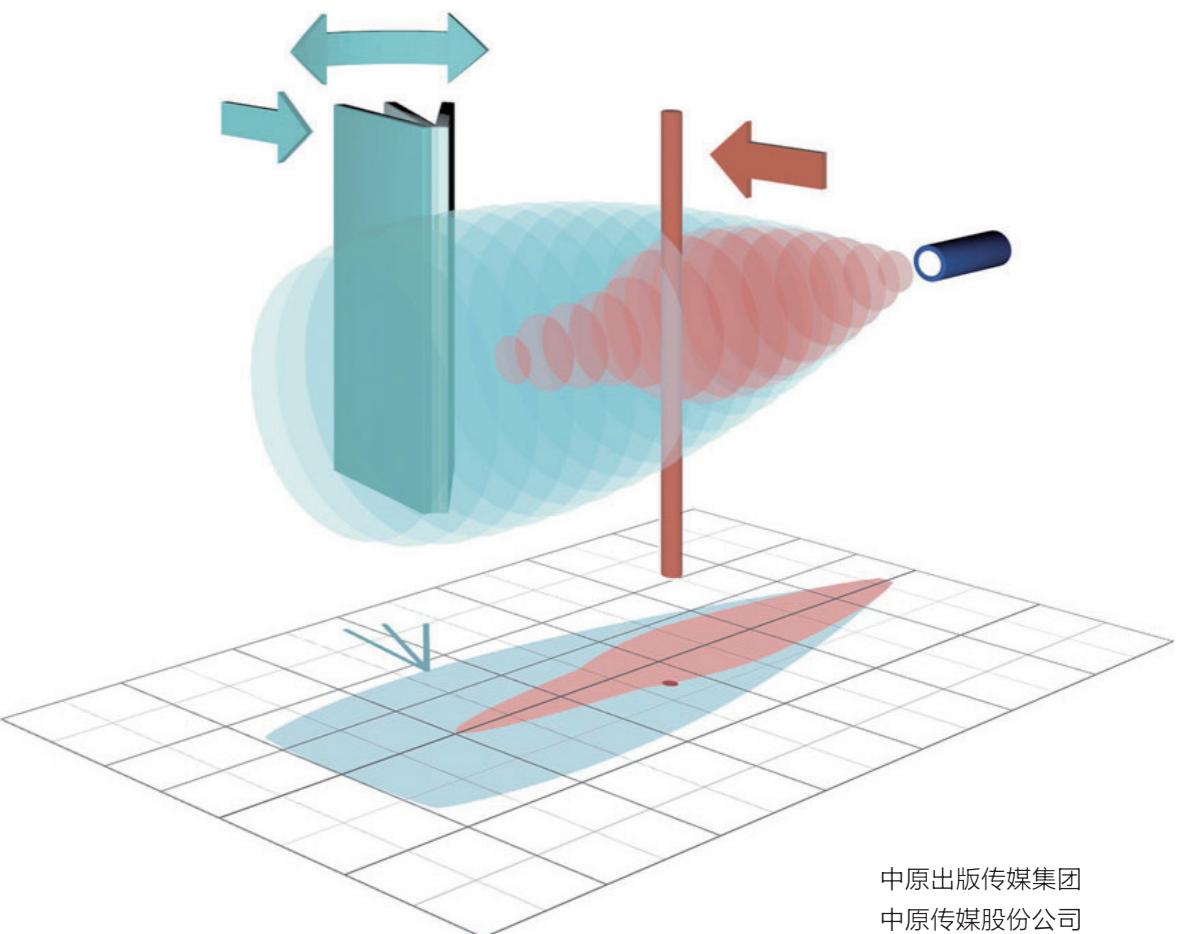
(第2版)

马质璞 主编

传感器与检测技术

(第2版)

马质璞 主编



出版人 乔辉
策划编辑 徐素军 王向阳
责任编辑 徐素军
责任校对 司丽艳
封面设计 张伟
责任印制 徐海东

中原出版
CENTRAL CHINA PUBLISH

ISBN 978-7-5725-2064-8
9 787572 520648
定价：38.00 元

河南科学技术出版社

中原出版传媒集团
中原传媒股份公司

河南科学技术出版社

传感器与检测技术

CHUANGANQI YU JIANCE JISHU

(第2版)

马质璞 主编

河南科学技术出版社
· 郑州 ·

《传感器与检测技术》编写人员

主 编 马质璞

副主编 杨子林 谢 靖 张 扬

编 者 (以姓氏笔画为序)

马质璞 王 伟 田达奇 杨子林

张 扬 张 抗 陈飞飞 范 乐

韩艳赞 谢 靖 谭 骥

图书在版编目 (CIP) 数据

传感器与检测技术 / 马质璞主编. --2 版. -- 郑州 : 河南
科学技术出版社, 2025. 5. -- ISBN 978-7-5725-2064-8

I . TP212

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025K2R192 号

出版发行：河南科学技术出版社

地址：郑州市郑东新区祥盛街 27 号 邮编：450016

电话：(0371) 65788865

网址：www.hnstp.cn

出版人：乔 辉

策划编辑：徐素军 王向阳

责任编辑：徐素军

责任校对：司丽艳

封面设计：张 伟

责任印制：徐海东

印 刷：河南新华印刷集团有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：787 mm×1092 mm 1/16 印张：14 字数：350 千字

版 次：2025 年 5 月第 2 版 2025 年 5 月第 1 次印刷

定 价：38.00 元

如发现印、装质量问题，影响阅读，请与出版社联系并调换。



传感器与检测技术

模块1

传感器技术基础

项目 1 传感器基础知识



扫一扫

○ 项目分析

在现代工业生产中，为了检查、监督和控制某个生产过程或运动对象，并且使它们处于最佳工况状态，就必须掌握它们各种特性参数，并测量这些参数的大小、方向、变化速度等。检测技术作为信息科学的一个重要分支，与计算机技术、自动控制技术、通信技术及人工智能（AI）技术深度融合，共同构建了现代信息技术的完整体系。

“没有传感器就没有现代科学技术”的观点已被科技人员所公认。

以传感器为核心的检测系统就像人的感官和神经一样，源源不断地向人类提供宏观与微观世界的种种信息，成为人们认识自然、改造自然的有力工具。人工智能的引入，进一步赋予传感器“智能决策”能力，推动检测技术从“被动测量”迈向“主动感知与预测”。

○ 学习目标

1. 了解检测技术的概念和检测系统的组成。
2. 掌握传感器的定义、组成和作用，了解传感器的分类。
3. 了解人工智能（AI）在传感器技术中的基本概念。

1.1 检测技术及检测系统的组成

1.1.1 检测技术的概念和作用

1. 概念

检测技术是人们为了对被检测对象所包含的信息进行定性了解和定量掌握所采取的一系列技术措施，是产品检验和质量控制的重要手段。

2. 作用

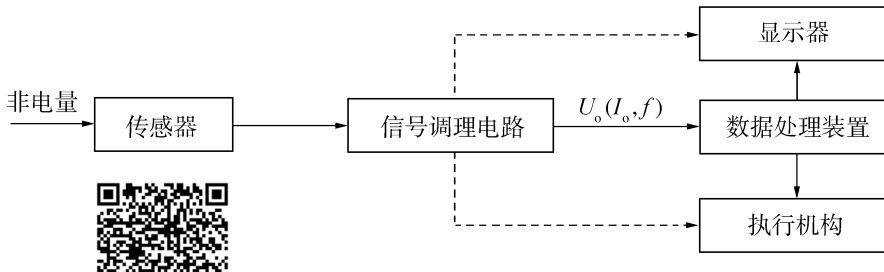
通过检测可对产品进行质量评价；检测能保证大型设备安全经济运行；生产中对多种参数进行长期动态检测，可及时发现异常情况，加强故障预防，达到早期诊断的目的，避免严重的突发事故，保证设备和人员的安全，提高经济效益；检测中可采用计算机来处理检测信息，对信息进行分析、判断，及时诊断出故障并自动报警或采取相应的对策；检测技术是自动化系统中不可缺少的组成部分。

1.1.2 检测系统的组成

在现代的自动检测系统中，各个组成部分常常以信息流的过程来划分，一般可分为信

息的获取、信息的转换、信息的显示和信息的处理等几个部分。

一个完整的检测系统或装置通常是由传感器、信号调理电路和显示记录装置等几部分组成，分别完成信息获取、转换、显示和处理等功能，如图 1.1 所示。



扫一扫

图 1.1 检测系统的组成

1. 传感器

传感器是把被测非电量转换成可被测量的物理量的装置。显然，传感器是检测系统与被检测对象直接发生联系的部件，是检测系统最重要的环节。检测系统所获取信息的质量往往是由传感器的性能决定的，因为检测系统的其他环节无法添加新的监测信息，并且不易消除传感器所引入的误差。传感器通常以电信号的形式输出，以便于传输、转换、处理和显示。输出电量的形式多种多样，如电压、电流等。输出信号的形式一般由传感器的原理确定。

2. 信号调理电路

信号调理电路包括放大（衰减）电路、滤波电路、隔离电路等。其中放大电路的作用是把传感器输出的电量变成具有一定驱动和传输能力的电压、电流或频率信号，以推动后级的显示器、数据处理装置及执行机构。

3. 显示器

显示器是检测人员和监测系统联系的主要设备，其主要作用是使人们了解被测物理量的大小或变化的过程。目前常用的显示记录装置有四类：模拟显示、数字显示、图像显示及记录仪等。模拟量是指连续变化量。模拟显示是利用指针相对标尺的位置来表示读数的，常见的有毫伏表、微安表、模拟光柱等。

4. 数据处理装置

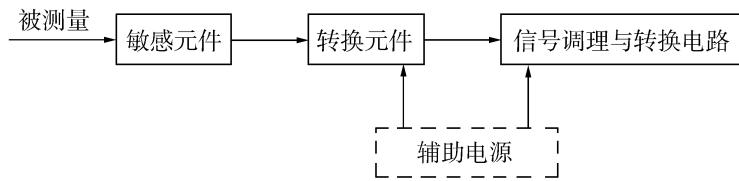
数据处理装置用来对测试所得的实验数据进行处理、运算、逻辑判断、线性变换，对动态测试结果做频谱分析（幅值谱分析、功率谱分析）、相关分析等，完成这些工作必须采用计算机技术。

5. 执行机构

执行机构通常是指各种继电器、电磁铁、电磁阀门、电磁调节阀、伺服电动机等。它们在电路中是起通断、控制、调节、保护等作用的电气设备。许多检测系统能输出与被测量有关的电流或电压信号，自动控制系统的控制信号，通过这些信号驱动相应的执行机构，并对测试结果做频谱分析、相关分析。

1.2 传感器的组成

传感器由敏感元件、转换元件、信号调理与转换电路组成，如图 1.2 所示。



扫一扫

图 1.2 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。

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。

信号调理与转换电路对信号进行放大、运算调制。

信号调理与转换电路以及传感器的工作必须有辅助电源。



扫一扫

1.3 传感器的分类

传感器有许多分类方法，常用的分类方法有两种：一种是按被测物理量来分类；另一种是按传感器的工作原理来分类。

按被测物理量划分的传感器，常见的有温度传感器、湿度传感器、压力传感器、位移传感器、流量传感器、位置传感器、力传感器、加速度传感器、转矩传感器等。

按工作原理可划分为电学量传感器、磁学量传感器、光电式传感器、电势型传感器、电荷传感器、半导体传感器、谐振式传感器、电化学式传感器。

1. 电学量传感器

电学量传感器是非电量电测技术中应用范围较广的一种传感器，常用的有电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、磁电式传感器及电涡流式传感器等。

(1) 电阻式传感器是利用变阻器将被测非电量转换为电阻信号的原理制成的。电阻式传感器一般有电位器式、触点变阻式、电阻应变片式及压阻式传感器等。电阻式传感器主要用于位移、压力、应变、力、力矩、气流流速、液位和液体流量等参数的测量。

(2) 电容式传感器是根据改变电容的几何尺寸或改变介质的性质和含量，使电容量发生变化的原理制成的，主要用于压力、位移、液位、厚度、水分含量等参数的测量。

(3) 电感式传感器是根据改变磁路几何尺寸、磁体位置来改变电感或互感的电感量或压磁效应的原理制成的，主要用于位移、压力、力、振动、加速度等参数的测量。

(4) 磁电式传感器是根据电磁感应原理，把被测非电量转换成电量，主要用于流量、

转速和位移等参数的测量。

(5) 电涡流式传感器是根据金属在磁场中运动切割磁力线可在金属内形成涡流的原理制成的，主要用于位移及厚度等参数的测量。

2. 磁学量传感器

磁学量传感器是根据铁磁物质的一些物理效应制成的，主要用于位移、转矩等参数的测量。

3. 光电式传感器

光电式传感器在非电量电测技术及自动控制技术中占有重要的地位。它是利用光电器件的光电效应和光学原理制成的，主要用于光强、光通量、位移、浓度等参数的测量。

4. 电势型传感器

电势型传感器是根据热电效应、光电效应、霍尔效应等原理制成的，主要用于温度、磁通量、电流、速度、光强、热辐射等参数的测量。

5. 电荷传感器

电荷传感器是根据压电效应原理制成的，主要用于力及加速度的测量。

6. 半导体传感器

半导体传感器是根据半导体的压阻效应、内光电效应、磁电效应、半导体与气体接触发生变化等原理制成的，主要用于温度、湿度、压力、加速度、磁场和有害气体的测量。

7. 谐振式传感器

谐振式传感器是利用改变电或机械的固有参数来改变谐振频率的原理制成的，主要用来测量压力。

8. 电化学式传感器

电化学式传感器是以离子导电为基础制成的。根据其电特性形成的不同，电化学式传感器可分为电位式传感器、电导式传感器、电量式传感器、极谱式传感器和电解式传感器等。电化学式传感器主要用于分析气体、液体或可溶于液体的固体成分，以及对液体的酸碱度、电导率及氧化还原电位等的测量。

另外，根据传感器对信号的检测转换过程，传感器还可划分为直接转换型传感器和间接转换型传感器两大类。前者是把输入给传感器的非电量一次性地转换为电信号输出，如光敏电阻受到光照射时，电阻值会发生变化，直接把光信号转换成电信号输出；后者则要把输入给传感器的非电量先转换成另外一种非电量，然后再转换成电信号输出，如采用弹簧管敏感元件制成的压力传感器就属于这一类，当有压力作用到弹簧管时，弹簧管产生形变，传感器再把形变量转换为电信号输出。

1.4 AI 技术与传感器的融合

人工智能是通过计算机系统模拟人类智能行为的技术，其核心目标是实现自主学习、逻辑推理与自主决策。AI 技术涵盖多个分支，包括机器学习、深度学习、自然语言处理等。

实际上，“物联网”“大数据”和“机器人”等新兴技术并非孤立存在，而是紧密关

联，共同构成一个动态循环的技术生态链，在这一链条中，每一环节均对下一环节产生推动作用，形成正向反馈闭环。“物联网”连接的设备通过传感器实时采集环境与操作数据（如温度、位移、图像），成为整个生态的“感知层”；海量传感器数据汇聚成“大数据”，为机器学习提供训练基础；基于海量数据对算法模型（如深度学习）进行训练，让“机器学习”，AI 获得分析、预测与决策能力；AI 指导“机器人”执行精准操作（如工业分拣、手术辅助），其行动进一步触发传感器数据更新；机器人操作产生的反馈数据重新进入物联网，优化模型并提升系统整体性能，形成闭环从而进一步迭代。

如智能工厂中，传感器监测生产线状态→数据驱动 AI 预测设备故障→机器人执行预防性维护→维护结果反馈至传感器，持续改进系统，如图 1.3 所示。这一循环不仅强化了技术间的协同效应，更推动各领域向自动化、智能化方向加速演进。

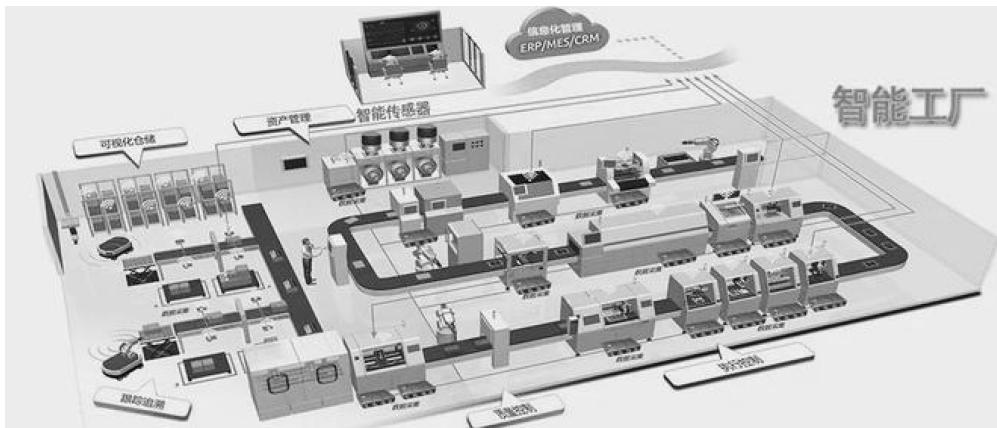


图 1.3 智能工厂

AI 通过赋予传感器“智能决策”与“主动学习”能力，显著扩展了传统传感器的功能边界。以下从数据分析、模式识别、预测性维护及多传感器协同四个维度，结合具体技术原理与应用场景，详细阐述 AI 对传感器的增强作用：

1.4.1 数据分析：从“原始数据”到“价值信息”

AI 通过赋予传感器智能化分析与决策能力，显著扩展了传统传感器的应用边界。

在数据分析方面，传统传感器通常仅输出原始物理量（如温度值或振动幅度），依赖人工或简单阈值判断效率较低，且难以挖掘数据深层关联。AI 技术通过时间序列分析或频域变换等方式实时提取关键特征（如峰值、周期性）。例如工业电机振动传感器（图 1.4）结合 AI 算法可快速定位轴承磨损的高频异常分量。

同时，AI 利用卡尔曼滤波或自编码器模型消除环境噪声干扰，提升数据可靠性。例如无人机气压传感器经 AI 降噪后飞行高度测量更加稳定。此外，AI 能够融合多源传感器数据（如视觉、雷达、惯性测量单元），通过贝叶斯网络或注意力机制生成全局感知结果，自动驾驶车辆融合摄像头与激光雷达数据来构建高精度环境地图便是典型应用。

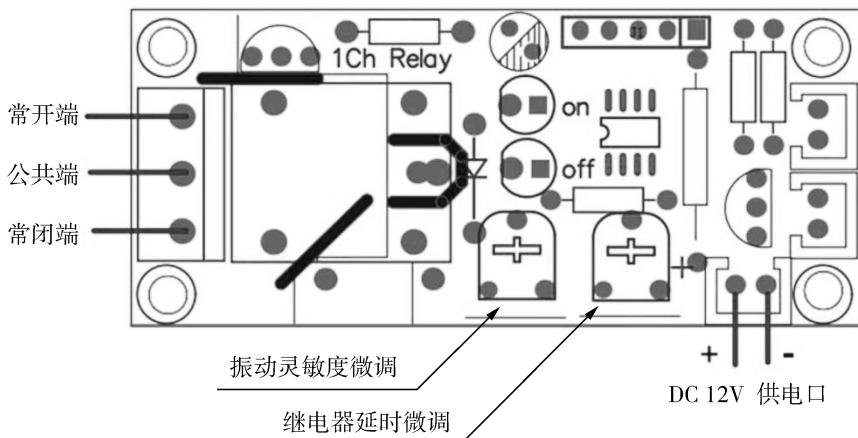


图 1.4 工业电机振动传感器

1.4.2 模式识别：从“单一测量”到“智能诊断”

在模式识别领域，传统传感器局限于单一物理量测量，无法识别复杂状态（如设备故障类型或生物特征）。

AI 通过无监督学习（如孤立森林算法）建立数据正常模式库，实时检测异常信号，例如电力系统电流传感器结合 AI 可精准识别短路风险。无监督学习是指一种机器学习算法，用于从没有标记响应的输入数据组成的数据集中进行推断。最常见的无监督学习方法是聚类分析，即将物理或抽象对象的集合分组为由类似的对象组成的多个类的分析过程。图 1.5 展示了无监督学习中，聚类分析算法的数据运行结果。

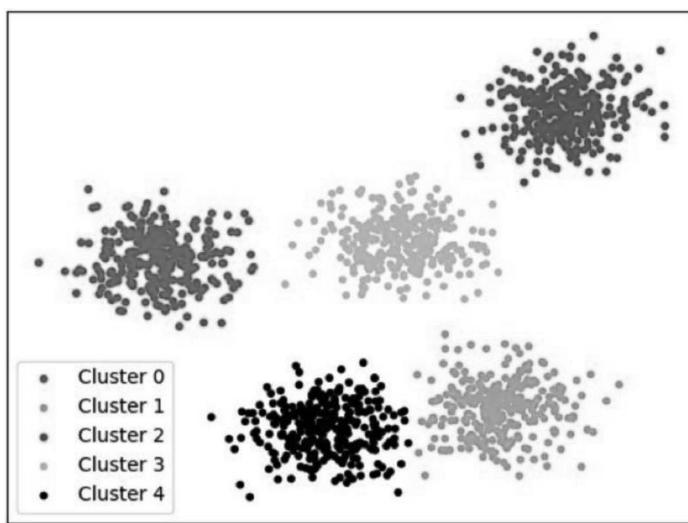


图 1.5 无监督学习（聚类）算法数据运行结果

深度学习模型进一步提升了非结构化数据的处理能力，医疗内窥镜图像传感器通过 AI 识别肿瘤边界，辅助医生精准手术。深度学习特指基于深层神经网络模型和方法的机器学习，而机器学习是实现人工智能的必经路径。深度学习通过组合低层特征形成更加抽象的

高层表示属性类别或特征，以发现数据的分布式特征表示。图 1.6 描述了深度学习中，前馈神经网络算法的结构。

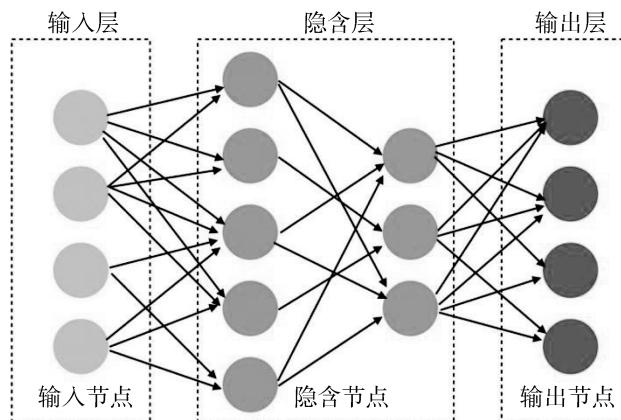


图 1.6 深度学习（前馈神经网络）结构示意

自然语言处理技术则扩展了语音传感器的功能，智能客服系统通过麦克风中的声音传感器采集语音数据，AI 实时转译并分类用户需求，实现自动化�单处理。自然语言处理是 AI 领域的一个重要分支，旨在让计算机能够理解、理解和生成人类语言。自然语言处理的一般流程如图 1.7 所示。

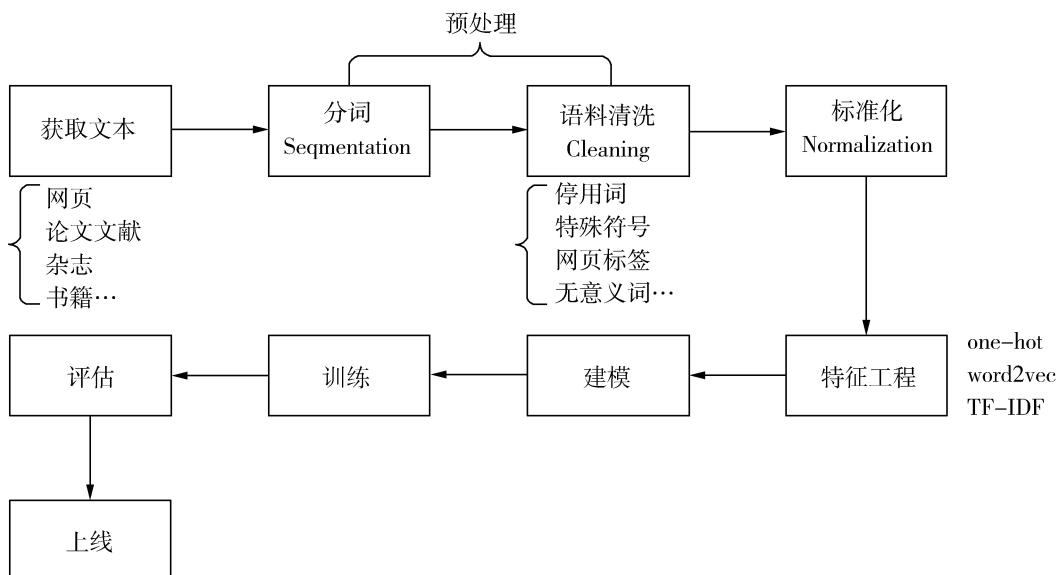


图 1.7 自然语言处理一般流程

1.4.3 预测性维护：从“被动响应”到“主动预防”

预测性维护是 AI 增强传感器的另一核心方向。传统维护依赖定期检修或故障后维修，成本高且被动。AI 基于传感器历史数据（如振动、温度等）训练长短期记忆网络模型或

随机森林模型，预测设备剩余寿命，例如风力发电机振动数据可提前6个月预警轴承失效。

同时，AI也可以结合实时数据动态生成设备健康评分，数控机床通过电流传感器评估刀具磨损程度，提示最佳更换时机。

强化学习技术进一步优化设备运行参数，例如暖通空调系统根据温湿度传感器反馈动态调节压缩机功率，能耗降低达20%。

1.4.4 多传感器协同：从“孤立运行”到“全局优化”

多传感器协同方面，传统系统常因数据孤立导致决策片面化。AI通过时间戳同步与空间标定对齐多传感器数据，例如机器人导航系统中，将视觉传感器与激光雷达数据融合，进而提升即时定位与地图构建系统精度。

联邦学习技术支持分布式模型训练，智慧城市交通摄像头通过共享数据，优化拥堵预测模型，同时保护隐私。

AI还可动态分配传感器资源，例如环境监测网络根据污染浓度调节气体传感器采样频率，可以兼顾精度与能耗。表1.1对比了传统传感器与AI增强传感器的区别。

表1.1 传统传感器与AI增强传感器的对比

功能	传统传感器	AI增强传感器
数据处理	输出原始数据，依赖人工分析	实时分析、特征提取与决策支持
异常检测	基于固定阈值，误报率高	自主学习模式，精准识别异常
维护策略	定期检查或故障后被动维修	预测性维护，主动降低风险
环境适应性	参数固定，难以应对复杂场景	动态优化，自适应环境变化
多传感器协同	独立工作，数据孤立	多源融合，全局智能决策

AI技术的引入，使传感器从“单一数据采集”升级为“智能感知终端”，推动检测系统向自动化、预测化、协同化方向发展，契合智慧物联的时代需求。

1.4.5 传感器数据与AI的结合流程

1. 数据采集与预处理

传感器数据的采集是AI应用的基础，其质量直接影响后续分析的可靠性。传统传感器通常以固定频率输出原始信号（如电压、电流或数字量），但数据中常包含噪声（如电磁干扰、温漂）或缺失值。AI系统可通过预处理技术提升数据可用性：一方面，采用滑动窗口平均、中值滤波或小波变换等方法消除高频噪声；另一方面，对缺失数据进行插值填补或时间序列对齐，确保数据连续性。例如，在智慧农业中，土壤湿度传感器可能因通信中断导致数据丢失，AI通过历史数据规律插值修复，维持灌溉决策的连贯性。

预处理后，数据需进行标准化或归一化，以适配不同传感器的量纲差异。例如，工业场景中振动传感器的加速度数据（单位g）与温度数据（单位℃）需统一缩放至相同数值范围，避免模型训练时因量纲差异导致权重偏移。此外，针对特定任务（如异常检测），还需通过数据增强（如添加合成噪声、时间偏移）扩充数据集，提升模型的泛化能力。

2. 特征提取与模型训练

特征提取是 AI 处理传感器数据的核心环节，旨在从原始信号中挖掘可解释的规律性信息。对于时序数据（如振动、温度），常用方法包括时域分析（均值、方差）、频域分析（傅里叶变换提取主频成分）及频联合分析（小波变换捕捉瞬态特征）。例如，电机振动传感器信号经频谱分析后，可提取轴承故障特征频率，供 AI 模型分类使用。对于非结构化数据（如图像、声音），卷积神经网络（CNN）可自动提取边缘、纹理等高级特征，如智能摄像头通过 CNN 识别生产线上的产品缺陷。

模型训练阶段需根据任务类型选择算法：监督学习（如支持向量机、随机森林）适用于分类与回归任务，依赖标注数据；无监督学习（如聚类、自编码器）适用于异常检测或数据降维。以预测性维护为例，长短期记忆网络可捕捉振动数据的长期依赖关系，预测设备剩余寿命。训练过程中需划分训练集与验证集，通过交叉验证防止过拟合。过拟合即在机器学习中，AI 不仅学会了数据中的规律，还把噪声和细节当成规律记住了。例如，医疗穿戴设备的心率传感器（图 1.8）数据需要经过数据标注，即标注正常心率与多种不正常心率以防止过拟合，进而训练轻量化神经网络（如 MobileNet），经过训练的 AI 可在移动端通过识别心率传感器数据，实时预警心律失常。

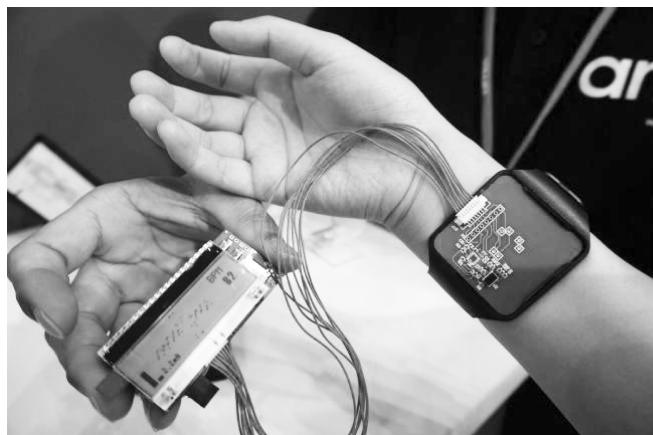


图 1.8 心率传感器

3. 模型部署与应用

模型部署是 AI 落地的关键步骤，需兼顾实时性与资源限制。边缘计算设备（如树莓派、嵌入式 AI 芯片）适合低延迟场景，例如工厂中的振动传感器结合边缘设备实时分析数据，5 毫秒内触发停机保护。云端部署则适用于数据量大、计算复杂的任务，如城市交通摄像头数据上传至云端，AI 全局优化信号灯配时。部署时需进行模型压缩（如量化、剪枝）以适应硬件资源，例如谷歌的 Tensor Flow Lite 框架可将深度学习模型转换为轻量格式，供物联网设备高效运行。

系统运行中需持续收集新数据，通过在线学习或增量学习更新模型，以适应不同的环境变化。例如，智能家居温湿度传感器随季节变化采集新数据，AI 模型可每月微调一次，保持控温策略的准确性。同时，建立反馈机制评估模型性能：若预测误差超过阈值（如温度预测偏差 $>2^{\circ}\text{C}$ ），则触发模型重训练。这种“采集→分析→优化”的闭环流程，使 AI

系统具备动态进化能力，例如自动驾驶车辆通过实时路况数据迭代优化感知算法，提升驾驶安全性。

知识拓展

随着人工智能与传感器技术的深度融合，工业检测与自动化领域正经历从“感知”到“认知”的范式跃迁。未来技术发展将聚焦两大方向：智能化自愈及量子级精度。一方面，传感器将突破传统功能边界，通过嵌入式AI实现自我诊断与动态修复，大幅提升复杂环境下的可靠性；另一方面，量子传感技术借助AI算法突破噪声瓶颈，在医疗、勘探等场景中解锁纳米级检测能力。

1. 自愈型传感器与AI融合

自愈型传感器的核心在于通过AI实时监控传感器自身健康状态，并主动修复或规避故障。其工作原理基于嵌入式诊断算法与冗余设计：AI持续分析传感器输出信号的稳定性、噪声水平及漂移趋势，结合历史数据训练预测模型（如随机森林或时序神经网络），提前识别潜在故障（如温漂、电路老化）。一旦检测到异常，系统自动切换至备用传感器模块或调整参数补偿偏差，确保数据连续性。例如，在核电站辐射监测系统中，若自愈型传感器探测到某探头因辐射损伤导致读数异常，AI会立即启动备用探头并校准数据，从而避免监测中断引发的安全隐患。

在实际应用中，自愈能力显著提升了复杂环境下的系统可靠性。以深海勘探设备为例，其需承受高压、低温与腐蚀性环境，传统传感器易因硬件损耗失效。配备AI的自愈型传感器可通过振动与温度数据实时诊断机械结构疲劳度，并动态调整工作模式（如降低采样频率以延长寿命）。未来发展方向将聚焦于提升自愈响应速度与多故障协同处理能力，例如通过联邦学习实现分布式传感器网络的全局健康管理，或在微型化设计中集成更多冗余单元，以满足航空航天等领域对高密度传感器的需求。

2. 量子传感器与AI融合

量子传感器利用量子态特性（如叠加与纠缠）实现远超传统传感器的灵敏度。例如，原子磁力计通过激光冷却原子云，测量外界磁场引起的能级跃迁，可探测地磁场的微小变化；量子陀螺仪则基于超流体氦的量子干涉效应，实现无机械部件的超高精度角速度测量。然而，量子系统极易受环境噪声干扰，信号常被淹没在背景波动中。AI通过降噪算法（如小波变换结合卷积神经网络）从原始数据中提取有效信号。

AI与量子传感器的结合在医疗领域展现出巨大潜力。量子传感器能够检测人体器官发出的极微弱生物磁场（如心磁图或脑磁图），但传统方法需在超屏蔽室内操作且成本高昂。通过AI算法实时过滤环境电磁噪声，便携式量子心磁仪已在临床试验中实现心律失常的早期诊断。此外，量子传感器与AI的协同还可助力癌症早期筛查：纳米级量子点标记的肿瘤细胞会释放特定频率的荧光信号，AI通过频谱分析快速定位病灶，其灵敏度较传统影像技术提高百倍。

未来，量子传感器的小型化与AI算法的轻量化是技术突破的重点。例如，基于光子芯片的量子传感器可将体积缩小至厘米级，结合边缘计算设备实现实时处理；而AI模型压缩技术（如知识蒸馏）可降低对算力的依赖，推动量子传感技术在环境监测（如大气污染物追踪）或量子通信（如光子态识别）中的普及。然而，量子数据的特殊性（如高

维非结构化特征)对AI模型设计提出了新挑战,需开发适配的神经网络架构与训练范式,以充分释放量子传感的潜力。

思考与练习

1. 检测技术的含义是什么?
2. 检测系统由哪几部分组成?
3. 传感器由哪几部分组成?
4. AI技术如何提升传感器的数据分析能力?
5. 举例说明AI在预测性维护中的应用场景。

项目 2 传感器基本特性

○ 项目分析

传感器一般要将各种信息为电量，描述此种变换的输入与输出关系即传感器的基本特性。但对不同的输入信号，输出特性是不同的，对快变信号与慢变信号，由于受传感器内部储能元件的影响，反应大不相同。对快变信号要考虑输出的动态特性，即随时间变化的特性；而对慢变或稳定信号，则要研究其静态特性，即不随时间变化的输入与输出特性。一个高精度传感器，必须同时具有良好的静态特性和动态特性，才能完成对信号无失真的转换。这样检测结果才尽可能准确地反映被测量的原始特征。

○ 学习目标

1. 掌握传感器的静态特性。
2. 了解传感器的动态特性。
3. 掌握传感器的选用原则。

2.1 传感器的静态特性和动态特性

传感器必须要尽可能准确地反映输入物理量的状态，因此传感器所表现出来的输入-输出特性也就不同，即存在静态特性和动态特性。静态特性是指输入不随时间而变化的特性，表示传感器在被测量各值处于稳定状态下输入输出的关系。动态特性是指输入随时间而变化的特性，表示传感器对随时间变化的输入量的响应特性。静态特性和动态特性表现出不同的特点，对测量结果也产生不同的影响。

2.1.1 传感器的静态特性

当被测量不随时间变化或变化缓慢时，可以认为传感器与检测系统的输入量和输出量都与时间无关，由此确定的检测装置的性能参数称为静态特性。



扫一扫

1. 静态数学模型的描述

如果不考虑迟滞及蠕变效应，传感器的静态特性可用下列代数方程式来表示：

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \quad (2.1)$$

式中， x 表示传感器的输入量； y 表示传感器的输出量； a_0, a_1, \dots, a_n 表示决定特性曲线的形状和位置的系数，一般通过传感器的校准实验数据经曲线拟合求得，可正可负。

这种固体材料在保持应力不变的条件下，应变随时间延长而增加的现象称为蠕变。

理想线性情况下：

$$y = a_1 x \quad (2.2)$$

传感器的静态特性指标主要是通过校准实验来获取的。所谓校准实验，就是在规定的实验条件下，利用一定等级的校准设备，给传感器加上标准的输入量而测出其相应的输出量，进行反复测试，得到的输出-输入数据一般用表列出或曲线画出。

2. 静态特性主要性能指标

(1) 线性度。线性度又称非线性度或非线性误差，是指实际输入输出特性曲线与拟合直线（理想直线）之间的最大偏差与传感器满量程输出值的百分比，如图 2.1 所示。线性度可用公式 (2.3) 表示：

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{\text{FS}}} \times 100\% \quad (2.3)$$

式中， ΔL_{\max} 为实际输入输出曲线与拟合直线之间的最大偏差； Y_{FS} 为满量程输出值。

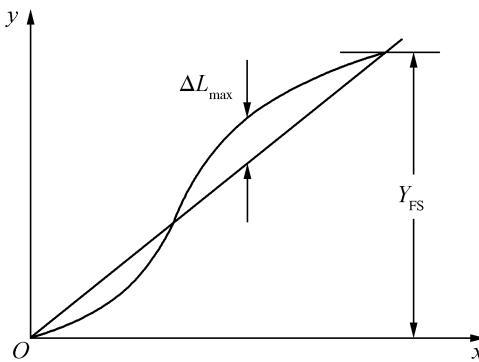


图 2.1 线性度示意图

(2) 迟滞性。迟滞性又称回差或滞后，是指传感器与检测系统在正（输入量增大）、反（输入量减小）行程中输入输出特性曲线之间最大差值与传感器满量程输出值的百分比，如图 2.2 所示。迟滞性可用公式 (2.4) 表示：

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{\text{FS}}} \times 100\% \quad (2.4)$$

式中， ΔH_{\max} 为输入输出特性曲线正、反行程之间的最大差值。

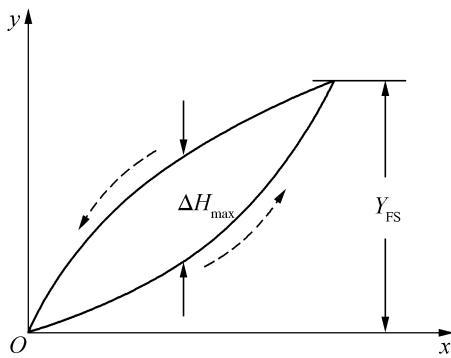


图 2.2 迟滞性示意图

(3) 重复性。重复性是指输入量按同一方向作全量程连续多次测试时所得特性曲线最大不重复误差与传感器满量程输出值的百分比。重复性可用公式(2.5)表示:

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{\text{FS}}} \times 100\% \quad (2.5)$$

式中, ΔR_{\max} 为输出最大不重复误差。

(4) 灵敏度。灵敏度是指传感器与检测系统对被测量变化的反应能力。当输入量 x 有一个变化量时, 引起输出量 y 相应的变化量 Δy , 则输出变化量与输入变化量之比称为灵敏度。

灵敏度可用公式(2.6)表示:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (2.6)$$

灵敏度的注意点:

- 1) 灵敏度 S 是有量纲的。但 x 与 y 是同类量时, S 无量纲, 其比值称为放大倍数 K 。
- 2) 若系统是由多个环节组成的串联式系统, 每个环节的灵敏度分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 , 则系统总灵敏度为各个环节灵敏度的乘积, 即 $S = S_1 S_2 S_3$ 。
- 3) 灵敏度越高, 测量精度越高, 但测量范围越窄, 稳定性越差。

(5) 分辨率。分辨率是指传感器能够检测出的被测量的最小变化量, 是有量纲的数。当被测量的变化小于分辨率时, 传感器对输入量的变化无任何反应, 对数字式仪表, 该表的最后一位数值就是它的分辨率; 一般模拟式仪表分辨率为最小刻度分格数值的一半。灵敏度越高, 分辨率越好。

(6) 测量范围与量程。传感器所能测量的最大被测量称为测量上限, 所能测量的最小被测量称为测量下限。用测量上限和测量下限表示的测量区间称为测量范围。测量上限和测量下限的代数差称为量程。如某温度计测量范围为 $-20 \sim 200$ °C, 其量程为 220 °C。

(7) 稳定性。稳定性是指传感器在较长时间内保持其原性能的能力, 反映相同输入量, 其输出量发生变化的程度。

(8) 漂移。漂移是指在外界干扰的情况下, 在一定的时间间隔内, 传感器输出量发生与输入量无关的变化程度, 分为时间漂移和温度漂移。时间漂移是指在规定的条件下, 零点或灵敏度随时间的缓慢变化; 温度漂移是指周围温度变化引起的零点或灵敏度的变化。最常见的漂移是温度漂移, 即周围环境温度变化而引起输出量的变化, 主要表现为温度零点漂移和温度灵敏度漂移。

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 °C)时输出值的变化量与温度的变化量之比(ξ)来表示, 即

$$\xi = \frac{y_t - y_{20}}{\Delta t} \quad (2.7)$$

式中, Δt 为工作环境温度 t 与标准环境温度 t_{20} 之差, 即 $\Delta t = t - t_{20}$; y_t 为传感器在工作环境温度为 t 时的输出值; y_{20} 为传感器在标准环境温度 t_{20} 时的输出值。

(9) 阈值。阈值是指传感器产生可测输出变化量时的最小被测输入量值。

2.1.2 传感器的动态特性

动态特性是指传感器的输入为随时间变化的信号时, 传感器的输出与输入之间的关

系。传感器的动态特性可通过动态数学模型和动态特性指标来描述。

在实际检测中，大量的被测量是随时间变化的动态信号，传感器的输出不但需要精确测量被测量的大小，而且要显示被测量随时间变化的规律。评价一个传感器的优劣，须从静态和动态两方面的特性来衡量。

1. 动态数学模型的描述

由于被测量是随时间变化的动态信号，用线性常系数微分方程来描述传感器输出量 $y(t)$ 与输入量 $x(t)$ 的动态关系：

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (2.8)$$

式中， a_0, a_1, \dots, a_n ； b_0, b_1, \dots, b_m 是与传感器的结构特性有关的常系数。

对于常见的传感器，其动态模型通常可用零阶、一阶、二阶的常微分方程来描述，分别称为零阶系统、一阶系统、二阶系统。

(1) 零阶系统。当式 (2.8) 中除了 a_0, b_0 外，其他系数均为零时，则 $a_0 y = b_0 x$ ，即 $y(t) = kx(t)$ ， $k = \frac{b_0}{a_0}$ 是传感器静态灵敏度或放大系数。这样的系统为零阶系统。

(2) 一阶系统。当式 (2.8) 中除了 a_0, a_1, b_0 外，其他系数均为零时，则 $a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$ ，即 $\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$ ；其中， τ 为时间常数， k 为静态灵敏度。这样的系统为一阶系统或惯性系统。

例如，不带套管的热电偶测温系统可看作一阶系统。

(3) 二阶系统。二阶系统的微分方程 $a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$ 可改写为

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = \omega_n^2 kx(t)$$

式中， ξ 为阻尼比； k 为静态灵敏度； ω_n 为系统的固有频率。

二阶系统分为两种情况：二阶惯性系统（特征方程的解为两个负实数）和二阶振荡系统（特征方程的解为一对带实部的共轭复数）。

带有套管的热电偶、RLC 振荡电路均可看作二阶系统。

用微分方程作为传感器的数学模型的优点是：求解微分方程容易分清暂态分量和稳态分量。

求解微分方程很麻烦，通常用传递函数来研究传感器的动态特性。

2. 动态特性的主要指标

研究传感器的动态特性有时需要从时域对传感器的响应和过渡过程进行分析，在进行时域分析时常用的标准输入信号有阶跃信号和脉冲信号。

动态特性的主要指标有时域单位阶跃响应性能指标和频域频率特性性能指标。

(1) 时域单位阶跃响应性能指标。

1) 二阶传感器。二阶传感器的时域单位阶跃响应在很大程度上取决于阻尼比 ξ 和固有频率 ω_n 。

ω_n 即等幅振荡的频率, 由传感器的结构参数决定, ω_n 越高, 传感器的响应越快。

图 2.3 所示为衰减振荡的二阶传感器输出的时域单位阶跃响应曲线。此时时域单位阶跃响应的性能指标主要有: 峰值时间、最大超调量、上升时间、延迟时间、调节时间、误差带、稳态误差。

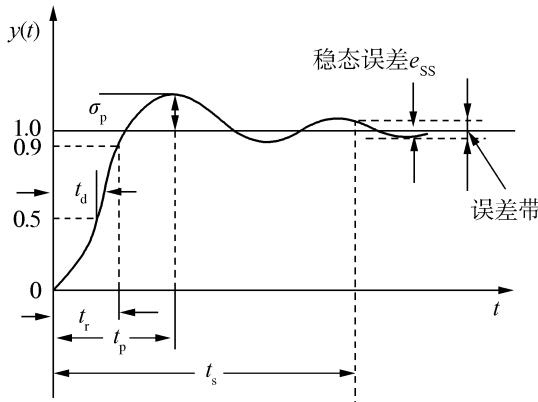


图 2.3 二阶传感器的时域单位阶跃响应曲线

- 峰值时间 t_p —— 振荡峰值所对应的时间。
- 最大超调量 σ_p —— 响应曲线偏离稳态值的最大值。
- 上升时间 t_r —— 响应曲线上升到稳态值的 90% 所需的时间。
- 延迟时间 t_d —— 响应曲线上升到稳态值的 50% 所需的时间。
- 调节时间 t_s —— 响应曲线进入并且不再超出误差带所需要的最短时间。
- 误差带 —— 通常规定为稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 。
- 稳态误差 e_{ss} —— 系统响应曲线的稳态值与希望值之差。

2) 一阶传感器。图 2.4 所示为一阶传感器输出的时域单位阶跃响应曲线。此时时域单位阶跃响应的性能指标主要有: 时间常数、延迟时间、上升时间。

- 时间常数 τ —— 响应曲线上升到稳态值的 63.2% 所需的时间。
- 延迟时间 t_d —— 响应曲线上升到稳态值的 50% 所需的时间。
- 上升时间 t_r —— 响应曲线上升到稳态值的 90% 所需的时间。

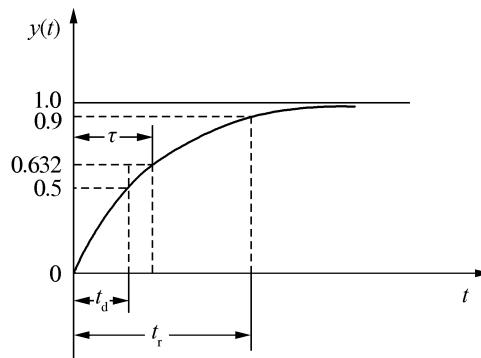


图 2.4 一阶传感器的时域单位阶跃响应曲线

(2) 频域频率特性性能指标。频域频率特性性能指标反映的是传感器接收各种频率不同而幅值相同初相位为0的正弦信号时其输出的正弦信号的幅值和相位与频率之间的关系。

与频率响应特性有关的指标：频带、时间常数、固有频率。

- 1) 频带：传感器增益保持在一定范围内时对应的上、下截止频率之间的频率。
- 2) 时间常数 τ ：一阶传感器（如测温传感器等）用 τ 表征其动态性能， τ 越小，频带越宽。
- 3) 固有频率：固有频率表征二阶传感器（如加速度传感器等）的动态特性。



2.2 传感器的选用

扫一扫

由于传感器在原理与结构上千差万别，即使是测量同一物理量，也有多种原理的传感器可供选用。如何合理选用传感器，是应用时首先要解决的问题。一般来说，传感器的选择应根据测量对象与测量环境，综合考虑测量条件与测量目的、传感器的性能指标、传感器的使用条件、数据采集和辅助设备配套情况以及价格、备件和售后服务等多种因素。

传感器的选用原则

在现代社会，传感器得到了广泛应用。各类传感器性能技术指标很多，如果要求一个传感器具有全面的性能指标，可能给设计、制造带来困难，在实际应用中也没有必要。因此应根据实际需要，在确保主要指标实现的基础上，放宽对次要指标的要求，以达到较高的性能价格比。

传感器选用总的原则是：在满足检测系统对传感器所有要求的情况下，价格低廉、工作可靠、容易维修。在具体选用传感器时，可综合考虑以下六个方面：灵敏度、响应特性、线性范围、稳定性、精确度、测量方式。

1. 灵敏度

一般来说，传感器灵敏度越高越好。灵敏度越高，意味着传感器所能感知的变化量越小，被测量有一微小变化，传感器就有较大的输出。但是，在确定灵敏度时，要考虑以下两个方面：

(1) 当传感器的线性工作范围一定时，传感器的灵敏度越高，干扰噪声越大，难以保证传感器的输入在线性区域内工作。过高的灵敏度，影响其适用的测量范围，应要求传感器的信噪比越大越好。

(2) 当被测量是一个向量并且是一个单向向量时，就要求传感器单向灵敏度越高越好，而横向灵敏度越小越好；如果被测量是二维或三维的向量，那么还应要求传感器的交叉灵敏度越小越好。

2. 响应特性

传感器的响应特性是指在所测频率范围内，保持不失真的测量条件。实际上传感器的响应总不可避免地有一定延迟，但总希望延迟的时间越短越好。

一般物性型传感器，如光电效应、压电效应等传感器，响应时间短，工作频率宽；而

结构型传感器，如电感、电容、磁电等传感器，由于受到结构特性的影响和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，传感器的响应特性对测试结果有直接影响，在选用时，应充分考虑到被测量的变化特点，如稳态、瞬变、随机等。

3. 线性范围

在线性范围内，传感器的输出与输入成比例关系，线性范围愈宽，表明传感器的工作量程愈大。为了保证测量的精确度，传感器工作在线性区域内是保证测量精度的基本条件。例如，机械式传感器中的测力弹性元件，其材料的弹性极限是决定测力量程的基本因素，当超出测力元件允许的弹性范围时，将产生非线性误差。

然而，在某些情况下，保证传感器绝对工作在线性区域内也是不容易的，在许可限度内，也可以取其近似线性区域，而且必须考虑被测量的变化范围，令其非线性误差在允许限度以内。例如，变间隙型的电容、电感式传感器，其工作区均选在初始间隙附近。

4. 稳定性

传感器的稳定性是指经过长期使用以后，其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，而不需经常地更换或校准。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，选择电阻应变式传感器时，应考虑湿度的影响；对变极距型电容式传感器和光电传感器，环境灰尘油剂浸入间隙时，会改变电容器的电介质和光电传感器的感光性质；对于磁电式传感器或霍尔效应元件等，应考虑周围电磁场带来的测量误差；滑线电阻式传感器表面有灰尘时，将会引入噪声。

(2) 要创造或保持良好的使用环境。

5. 精确度

传感器的精确度是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，因此，传感器能否真实地反映被测量，对整个测试系统具有直接的影响。

在某些情况下，要求传感器的精确度愈高愈好。例如，对现代超精密切削机床，测量其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，往往要求它们的测量精确度在 0.001~0.1 mm 范围内。

然而，传感器的精确度也并非越高越好，还应考虑到经济性。传感器精确度越高，价格就越昂贵。

因此，应从实际出发，尤其应从测试目的出发来选择。首先应了解测试目的，判定是定性分析还是定量分析。如果属于定性试验研究，只需获得相对比较值即可，无须要求绝对量值；如果是定量分析，就必须要获得精确值，因此要求传感器有足够高的精确度。

在实际中，需要同时兼顾测量目的和经济性。对于定性分析的试验研究，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，则必须获得精确量值。

6. 测量方式

传感器在实际条件下的工作方式，也是选择传感器时应考虑的重要因素。例如，接触与非接触测量、破坏性与非破坏性测量、在线与非在线测量等。

工作方式不同，对传感器的要求也不同。在机械系统运动部件的测试（如回转轴的回

转误差、振动、扭力矩等)中,往往需要非接触测试。因为对部件的接触式测试不但会造成对被测系统的影响,而且还存在诸如测量头的磨损、接触状态的变动等问题。而采用电容式、涡电流式等非接触式传感器,将会更加方便。

在线测试是与实际情况更接近的测试方式。特别是自动化过程的控制与检测系统,必须在现场实时条件下进行检测。实现在线检测是比较困难的,对传感器及测试系统都有一定的特殊要求。

在加工过程中,若要实现表面粗糙度的在线检测,光切法、干涉法、触针式轮廓检测法等都不能运用,取而代之的是激光检测法。

在机械系统中,对运动部件的被测参数,往往采用非接触测量方式。例如,回转轴的误差、振动、扭矩等情况,采用电容式、涡电流式、光电式等非接触式传感器很方便,若选用电阻应变片,则需配以遥测应变仪。

生产过程监测或产品质量在线检测等,宜采用涡流探伤、超声波探伤、核辐射探伤以及声发射检测等,应尽可能选用非破坏性检验,以直接获得经济效益。研制新型的在线检测传感器,也是当前测试技术发展的一个重要方面。

知识拓展

以设计一款新空调(图2.5)作为案例,详解传感器的选用。



图2.5 传感器在新空调中的应用



扫一扫



扫一扫

思考与练习

1. 传感器的静态特性指标有哪些?
2. 传感器的选用原则有哪些?
3. 观察生活中哪些地方用到传感器。