

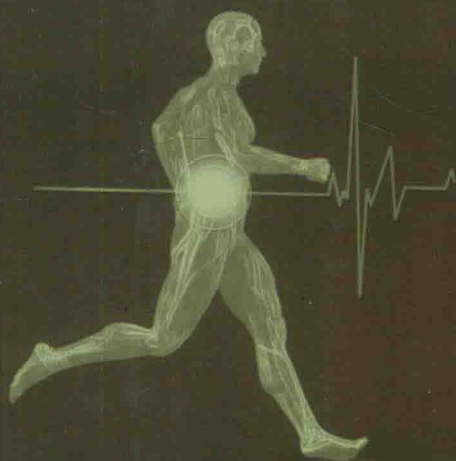
“十二五”国家高等教育规划教材配套实验教程

汤守健 陈 星 沈义民 王 平 编著

# 生物医学传感与检测实验教程

## Experimentation of Biomedical Sensors & Measurement

(第二版)



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

“十二五”国家高等教育规划教材配套实验教程

汤守健 陈 星 沈义民 王 平 编著

# 生物医学传感与检测实验教程

## Experimentation of Biomedical Sensors & Measurement

(第二版)



## 图书在版编目 (CIP) 数据

生物医学传感与检测实验教程 / 汤守健等编著.

—2 版. —杭州: 浙江大学出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-308-15124-5

I. ①生… II. ①汤… III. ①生物传感器—检测—实验—高等学校—教材 IV. ①TP212.3-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 213281 号

## 生物医学传感与检测实验教程(第二版)

汤守健 陈 星 沈义民 王 平 编著

责任编辑 张颖琪

责任校对 李 晨

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州中大图文设计有限公司

印 刷 富阳市育才印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 11.25

字 数 274 千

版 印 次 2016 年 3 月第 2 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-15124-5

定 价 28.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式: 0571-88925591; <http://zjdxcbbs.tmall.com>

# 前 言

---

---

没有精确的实验便没有真正的科学,在科学技术快速发展的今天尤其如此。大到基本物理、化学和生物规律的确定与修正,小到某一件产品的鉴定与评价,都少不了相应的实验。正因为如此,无论是科学家还是工程师都无一不珍视实验所得到的结果,而且往往不惜为之夜以继日地付出不懈的努力,不达目的誓不罢休。由此可见有意义的实验是非常重要的。

“生物医学传感与检测”课程具有突出的学科交叉性和理论与应用相结合的特点,既有较高的理论性,又具有较强的实践性。特别是理论与实践的有机结合是学好该课程的关键。根据这一特点,我们为课程开设了实验并编写了配套的实验教程,以理论与实践相结合的方式设计了最基本的实验内容。该实验教程包括了从常用的物理传感器及其检测系统到基本的化学和生物传感器及其检测系统,同时又结合了先进的虚拟仪器和计算机定量分析手段,通过实验课程的训练,使学生能够验证课堂上学到的理论知识、熟悉常用的传感器原理与使用方法、学会传感器实验数据的分析和处理方法,从而掌握现代生物医学传感器及其检测技术的基本原理和应用技术,为将来在该领域中的科学研究和应用开发打下良好基础。

实验课程常常是单调乏味和烦琐的,希望同学们不要轻视或草率行事,需要的是十分的仔细和耐心。科学实验来不得半点马虎,需要严肃认真、一丝不苟的科学态度。在着手本课程实验之前,应仔细阅读实验教程,认真思考,透彻理解实验原理,全面掌握实施方案。多想想为什么要这样而不是那样做,还有其他更好的方法吗?以便达到活跃思维和举一反三的目的。做实验时一定要做到严格要求自己,全心全意地做,三心二意是绝对做不好实验的,数据多的实验更要加倍留心,不要操之过急。实验报告不要停留在就事论事上,应该有的放矢地进行分析和讨论并提出自己的看法,这样才能写出有收获、有价值的合格实验报告。

本实验教程第一版 2013 年正式出版以来,得到了很多读者和使用单位的关心和支持,并提出了一些很好的意见和建议。在第二版中,我们对第一版中的错误和不当之处进行了认真修改,同时,在传感器的误差数据分析方面增加了国际上常用的规范计算和评估方法;在原有的实验仪器装置基础上,增加了与计算机接口和结合 NI 公司的数据采集和软件分析系统内容;在物理传感器方面,增加了实验中有关调制解调测量电路的原理分析和具体电路分析;在化学传感器方面,补充了有关气体检测和离子检测的内容;在生物传感器方面补充和增加了电化学生物传感器的原理及其实验内容。此外,为适应本课程的中英文双语教材的特点和方便读者的使用,在基本的专业词汇和术语方面增加了双语

内容。

由于我们的知识水平和能力不足,编写的时间有限,该教程仍可能会存在一些错误和不足,敬请大家在使用中提出宝贵的意见和建议。

**编著者**

2015年11月

# 目 录

## 上篇 生物医学传感与检测技术基础 Basics of Biomedical Sensors and Measurement

第 1 章 传感器和检测系统 Sensors and measurement system .....	3
1.1 传感器与检测的基本概念(basic concept of sensors and measurement) .....	3
1.2 传感器的静态特性和动态特性(static and dynamic characteristics of sensors) .....	4
1.2.1 传感器的静态特性(static characteristics of sensors) .....	4
1.2.2 传感器的动态特性(dynamic characteristics of sensors) .....	5
1.3 传感检测系统(sensor measurement system) .....	6
1.3.1 测量电路(measurement circuits) .....	7
1.3.2 微机与数字信号处理(microcomputer and digital signal processing) .....	8
第 2 章 实验设计及数据处理 Experimental design and data processing .....	9
2.1 传感器实验设计(experimental design of sensors) .....	9
2.2 误差和误差的分类(errors and classification of errors) .....	9
2.2.1 误差的表示方法(representation methods of errors) .....	10
2.2.2 误差的分类(classification of errors) .....	10
2.3 实验设计思路与步骤(experimental design and procedures) .....	12
2.4 实验数据的处理(data processing) .....	12
2.4.1 测量数据有效数字的表示方法(representation of the measurement data with effective number).....	13
2.4.2 实验数据的处理方法(processing methods of experimental data) .....	14
2.4.3 数据处理软件中列表法、作图法和方程法的实现(list, mapping and equation in data processing software) .....	25
2.5 化学和生物传感器标定方法及检测指标(calibration of chemical sensors and biosensors and test index) .....	27
2.5.1 气体浓度换算(gas concentration conversion) .....	27

2.5.2	化学和生物传感器的常用指标计算(computing of common indicators of chemical and biological sensors)	28
<b>第3章</b>	<b>人体基本生理信息及其检测方法 Human basic physiological information and detection methods</b>	<b>29</b>
3.1	循环系统生理信息(physiological information circulatory system)	29
3.1.1	心电(ECG)	30
3.1.2	心音(heart sound)	32
3.1.3	血压(blood pressure)	32
3.1.4	脉搏(pulse)	34
3.2	呼吸系统生理信息(respiratory system physiological information)	35
3.2.1	呼吸的全过程(whole process of breathing)	35
3.2.2	呼吸系统主要生理参数(main physiological parameters respiratory system)	35
<b>第4章</b>	<b>常用传感器原理及应用简介 The principle and application of commonly used sensors</b>	<b>38</b>
4.1	电阻应变式传感器(resistance strain sensor)	38
4.1.1	电阻应变片的工作原理(working principle)	38
4.1.2	电阻应变片的种类(types of resistance strain gauges)	40
4.1.3	测量电路(measurement circuits)	41
4.2	差动变压器式电感传感器(differential transformer inductive sensors)	44
4.2.1	工作原理(working principle)	44
4.2.2	基本特性(basic features)	45
4.2.3	测量电路(measurement circuits)	46
4.3	电涡流式传感器(eddy current sensors)	47
4.3.1	工作原理(working principle)	47
4.3.2	电涡流形成范围(form range of eddy current)	48
4.3.3	测量电路(measurement circuits)	49
4.4	电容式传感器(capacitive sensors)	50
4.4.1	工作原理(working principle)	50
4.4.2	测量电路(measurement circuits)	51
4.5	压电式传感器(piezoelectric sensors)	53
4.5.1	工作原理(working principle)	53
4.5.2	测量电路(measurement circuits)	55
4.6	磁电感应式传感器(electromagnetic inductive sensor)	56
4.6.1	工作原理(working principle)	56
4.6.2	基本特性(basic features)	57
4.6.3	测量电路(measurement circuits)	58

4.7	霍尔式传感器(Hall sensors)	58
4.7.1	工作原理(working principle)	58
4.7.2	基本特性(basic features)	60
4.7.3	霍尔元件补偿电路(Hall element compensation circuit)	61
4.7.4	测量电路(measurement circuits)	62
4.8	光纤传感器(fiber optic sensor)	63
4.8.1	光纤的结构(structure of fiber optic)	63
4.8.2	光纤的传输原理(transmission principle of optical fiber)	64
4.8.3	测量电路(measurement circuits)	65
4.9	热电式传感器(thermoelectric sensor)	66
4.9.1	热电阻传感器(thermoresistance sensor)	66
4.9.2	热电偶传感器(thermocouple sensor)	69
4.10	半导体气体传感器(semiconductor gas sensor)	71
4.11	湿度传感器(humidity sensor)	73
4.11.1	湿度定义(definition of humidity)	73
4.11.2	湿度检测(test of humidity)	74
4.12	离子传感器(ion sensors)	76
4.12.1	离子选择性电极(ion selective electrode)	76
4.12.2	玻璃电极(glass electrode)	78
4.13	生物酶传感器(biological enzyme sensor)	81
4.13.1	酶传感器的原理(working principle of enzyme)	81
4.13.2	生物酶传感器的应用(application of biological enzyme sensor)	82
4.13.3	测量原理与电路(measurement principle and circuits)	84
4.14	电化学传感器(electrochemical sensors)	85
4.14.1	电化学测量系统(measurement system of electrochemistry)	85
4.14.2	基本概念(basic concept)	86
4.14.3	电极分类(electrode classification)	91

## 下篇 生物医学传感与检测实验

### The experiments of biomedical sensors and measurement

实验一	电阻应变式传感器性能测试及其应用 The performance test and application of resistance strain sensors	95
实验二	移相器和相敏检波器实验 Phase shifter and phase sensitive detector	99
	一、移相器实验(experiment of phase shifter)	99
	二、相敏检波器实验(experiment of phase sensitive detector)	101
实验三	电感式传感器性能测试及其应用 The test and application of inductance sensors	105



	一、差动变压器式电感传感器的性能(performance differential transformer inductance sensor) .....	105
	二、差动变压器式电感传感器的应用(application of differential transformer inductance sensor) .....	106
	三、激励频率对差动变压器式电感传感器的影响(excitation frequency effect on differential transformer inductance sensor) .....	108
实验四	电涡流式传感器的性能测试及其应用 Performance test of eddy current sensor and its application .....	110
	一、电涡流式传感器静态标定(eddy current sensor static calibration) .....	110
	二、电涡流式传感器的应用(application of eddy current sensor) .....	112
实验五	电容式传感器的特性测试及其应用 Performance test of capacitive sensors and its application .....	114
实验六	压电加速度传感器的应用 Application of piezoelectric sensor .....	117
实验七	磁电式传感器的应用 Application of magnetoelectric sensors .....	120
实验八	霍尔式传感器特性测试及其应用 Performance test of Hall sensor and its application .....	122
	一、霍尔式传感器特性——直流激励(Hall sensor characteristics—DC excitation) .....	122
	二、霍尔式传感器——交流激励(Hall sensor characteristics—AC excitation) .....	124
实验九	光纤位移传感器的特性及其应用 Performance test of fiber optic sensor and its application .....	126
	一、光纤位移传感器的静态特性测量(test of static characteristics of fiber displacement sensor) .....	126
	二、光纤位移传感器的动态特性及振动和转速测量(dynamic characteristics and vibration and speed measurement of fiber displacement sensor) .....	128
实验十	热电式传感器的特性及其应用 Performance of thermoelectric sensor and its application .....	130
实验十一	化学离子传感器检测实验 The test and experiments of chemical ion sensors .....	133
实验十二	化学气体传感器检测实验 The test and experiments of chemical gas sensors .....	135
实验十三	湿度传感器检测实验 The test and experiments of humidity sensors .....	138
实验十四	生物酶传感器检测实验 The test and experiments of enzyme biosensors .....	140
实验十五	电化学免疫生物传感器实验 The experiment of electrochemical immunosensors .....	142

---

实验十六 人体温度、血压、呼吸和脉搏传感器及微机测量系统的应用 Integrated application of human body temperature, blood pressure, respiration and pulse sensors with microcomputer measurement system .....	144
一、体温测量(body temperature measurement) .....	144
二、血压测量(blood pressure measurement) .....	146
三、呼吸测量(respiration measurement) .....	150
四、脉搏测量(pulse measurement) .....	152
参考文献 .....	154
附录一 CSY <sub>10B</sub> 型传感器系统实验仪使用说明 .....	155
附录二 医学生理信号采集实验仪使用说明 .....	160
附录三 NI myDAQ 虚拟仪器教学套件使用说明 .....	162
附录四 CHI600E 系列电化学分析仪/工作站简介 .....	166

# 生物医学传感与检测技术基础

Basics of Biomedical Sensors and Measurement

上  
篇



# 第 1 章

## 传感器和检测系统

### Sensors and measurement system

#### 1.1 传感器与检测的基本概念 (basic concept of sensors and measurement)

传感器(sensor)是指将感受到的物理量、化学量和生物量等信息,按照一定规律转换成可用信号输出的器件或装置。由于电信号易于传输、处理和记录,所以一般概念上的传感器是特指将非电量转换成电信号输出的器件或装置。传感器系统通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用信号输出的转换元件以及相应的电子线路组成。

检测是检出和测量的总称。检出是指示某些特殊量的存在,但无需提供量值的过程;测量则被定义为以确定被测对象量值为目的的全部操作。因此,传感器检测技术是应用传感器将被测量信息转换成便于传输和处理的物理量,进而进行变换、传输、显示、记录和数据分析处理的技术。

传感器的分类方法有多种。例如,按能量关系分为:能量转换型(自源型)、能量控制型(外源型);按工作原理分为:应变式、光电式、电动式、热电式、压电式、压阻式、电化学式、光导式等;按输出量分为:模拟式、数字式;按输入被测量大类分为:物理量、化学量、生物量;按具体的输入被测量分为:位移、加速度、温度、流量、压力、气体、离子以及葡萄糖、细胞传感器等。在许多场合,也有将以上几种综合起来使用的分类方法,如应变式压力传感器、压阻式压力传感器、压电式加速度传感器,等等。

生物医学传感器是一类特殊的电子器件,它能把生物和医学中的各种通常难以观测的非电量转换为易观测的电量,扩大人的感官能力,是构成各种医学仪器和设备的关键部件。生物医学检测是对生物体包含的生命现象、状态、性质、变量和成分等信息进行检测和量化的技术,而其中的生物医学传感器是生物医学检测的关键技术。生物医学传感与检测技术是获取人体生理病理信息的关键技术,是生物医学工程学的重要分支学科。生物医学信号的一般特点是信号微弱,随机性强,噪声和背景干扰强,动态变化和个体差异大;这相应地要求传感器和检测系统的灵敏度高,噪声小,抗干扰能力强,分辨力强,动态特性好。因此,生物医学检测技术往往比一般工业检测技术更复杂,要求更严格。

## 1.2 传感器的静态特性和动态特性(static and dynamic characteristics of sensors)

根据传感器所测量的量相对时间的变化,可将输入信号分为静态量和动态量两大类。所谓静态量是指固定状态的信号或变化极其缓慢的信号(准静态),而动态量是指相对时间变化的确定性信号或随机信号。选择或设计的传感器能否不失真地反映输入信号,主要取决于它的两个基本特性——静态特性和动态特性。要使传感器尽量不失真地反映测量信号,必须了解传感器的静态特性和动态特性。

### 1.2.1 传感器的静态特性(static characteristics of sensors)

传感器的静态特性是指当测量静态量时,传感器的输出值与输入值的数学关系表达式、曲线或数据表。

传感器的静态特性是在静态标准条件下进行校准的,用高一级精度的仪器对传感器进行往复循环测试,所得数据列成表格或画成曲线——静态校准曲线。静态特性指标可以从传感器的静态校准曲线得到。衡量传感器静态特性品质的指标主要有线性度、灵敏度、精度、迟滞、重复性等几种。

#### (1) 线性度(linearity)

传感器静态校准曲线与作为基准的拟合直线的最大偏差( $\Delta_{\max}$ )与传感器满量程输出( $Y_{FS}$ )的比值的百分数,称为传感器的线性度(或非线性误差)。线性度通常用最大相对误差的形式表示:

$$\epsilon = \frac{|\Delta_{\max}|}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中, $\epsilon$ ——线性度(非线性误差);

$\Delta_{\max}$ ——输出平均值与拟合直线的最大偏差;

$Y_{FS}$ ——传感器满量程输出。

#### (2) 灵敏度(sensitivity)

传感器输出量的增量与对应的输入量的增量的比值,定义为传感器的静态灵敏度。灵敏度通常用  $K$  来表示。线性传感器的静态灵敏度在整个测量范围内是一常数,非线性传感器的静态灵敏度则随输入量的变化而变化。

#### (3) 迟滞(hysteresis)

迟滞说明传感器的正向(输入量增大)和反向(输入量变小)特性的不一致程度,亦即对应于同一大小的输入信号,传感器在正、反行程输出数值不相等的程度。迟滞一般由实验确定,在数值上用输出值在正、反行程间的最大偏差与满量程的百分比表示。

$$\delta_H = \frac{|\Delta H_{\max}|}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中,  $\Delta H_{\max}$ ——输出值在正、反行程间的最大偏差。

#### (4) 重复性 (repeatability)

重复性表示传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变动时, 所得特性曲线的不一致程度。具体计算方法是先分别求出正、反行程多次测量的各个测试点的最大偏差, 再取这两个最大偏差中较大者为  $\Delta_{\max}$ , 计算与满量程输出的百分比, 得出重复性误差:

$$\delta_R = \frac{|\Delta_{\max}|}{Y_{FS}} \times 100\%$$

#### (5) 精度 (accuracy)

传感器精度是指传感器输出结果的可靠程度, 传感器精度的高低是用输出测量值和被测真值之间的偏差值来衡量的。精度通常以绝对误差或相对误差来表示。其中被测真值通常是未知的, 实际应用中以约定真值或相对真值替代。

传感器精度通常使用的是传感器满量程输出范围内的最大绝对误差与满量程的比值:

$$K' = \frac{\Delta A}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中,  $\Delta A$ ——传感器测量范围内最大绝对误差;

$Y_{FS}$ ——传感器满量程输出;

$K'$ ——传感器的精度等级。

#### (6) 检出限或灵敏限 (detection limit)

检出限指输入量的变化不致引起输出量有任何可见变化的量值范围。例如光纤式导管末端血压传感器加小于 1mmHg 的压力时无输出, 则其灵敏限为 1mmHg。

#### (7) 零点漂移 (zero shift)

传感器无输入或在某一输入值不变时, 每隔一段时间 (例如 10ms、1h、2h、4h 等) 对传感器输出进行读数, 其输出与零值 (或原指示值) 的偏离值即为零点漂移:

$$\text{零漂} = \frac{\Delta Y_0}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中,  $\Delta Y_0$ ——输出偏离值。

#### (8) 温漂 (temperature shift)

温漂表示温度变化时, 传感器输出值的偏离程度。一般以温度变化 1°C 时, 输出最大偏差与满量程之比表示。

$$\text{温漂} = \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS} \times \Delta T}$$

式中,  $\Delta T$ ——温度变化值。

#### (9) 测量范围 (measurement range)

由被测量最小值和最大值两个极值所限定的范围, 在这个范围内测量是按规定精度进行的。

## 1.2.2 传感器的动态特性 (dynamic characteristics of sensors)

传感器的动态特性是指传感器对于随时间变化的输入信号的响应特性。传感器的时

间响应可分成两个部分,即瞬态响应和稳态响应。瞬态响应是指传感器从初始状态到达稳定状态的响应过程。稳态响应指的是时间趋于无穷大时,传感器的输出状态。因为实际的被测量随时间变化的形式可能是各种各样的,所以在研究动态特性时输入“标准”的信号来分析传感器的时间响应特性。标准输入信号有两种:正弦信号和阶跃信号。传感器的动态特性分析和动态标定以这两种标准输入信号为依据。

### (1) 时域内常用的动态性能指标 (commonly used time domain dynamic performance)

在研究传感器的动态特性时,有时需要从时域中对传感器的响应和过渡过程进行分析,这种分析方法是时域分析法。一般把传感器对阶跃信号的响应称为瞬态响应。

- ① 时间常数 (time constant)  $\tau$ : 指传感器输出值达到稳态值的 63% 时所需的时间。
- ② 上升时间 (rise time)  $t_r$ : 指传感器输出值从稳态值的 10% 上升到 90% 所需的时间。
- ③ 响应时间 (response time)  $t_s$ : 输出值从响应到稳定并保持在允许误差范围 ( $\pm 5\%$ ) 内所需的时间。

④ 超调量 (super tone)  $\alpha$ : 超过稳态输出值的最大输出量值, 叫做最大超调量  $\alpha = y_{\max} - y_c$ 。通常采用  $(\alpha/y_c) \times 100\%$  表示。

⑤ 迟延时间 (delay time)  $t_d$ : 指传感器输出值第一次达到稳态值的 50% 时所需的时间。

⑥ 衰减度 (attenuation degree)  $\psi$ : 指相邻两个波峰 (或波谷) 高度下降的百分数,  $\psi = (\alpha - \alpha_1) / \alpha \times 100\%$ 。

上述时域性能指标中  $\tau$ 、 $t_r$ 、 $t_s$  是反映系统响应速度的指标。 $\psi$ 、 $\alpha$  反映系统的相对稳定性。

### (2) 传感器的频率响应特性指标 (commonly used time frequency dynamic performance)

传感器对正弦输入信号的稳态响应称为频率响应。频率响应法是在某一频率范围内,通过改变输入信号的频率来研究传感器输出特性的变化的方法。当输入信号为正弦波时,输出信号随着时间的增长,暂态响应部分逐渐衰减以至消失,经过一段时间后,只剩下正弦波稳态输出。观察输入信号  $X(t)$  和输出信号  $Y(t)$ , 可以发现,在稳态时  $X(t)$  和  $Y(t)$  的频率相同,但幅度不等,并有相位差。

① 频率响应范围 (frequency response range): 是指在幅频特性曲线上幅值衰减小于 3dB 时所对应的频率范围。

② 幅值误差 (amplitude error): 在频响范围内与理想传感器相比产生的幅值误差。

③ 相位误差 (phase error): 在频响范围内与理想传感器相比产生的相位误差。

## 1.3 传感检测系统 (sensor measurement system)

传感检测系统一般由传感器、测量电路 (传感器接口与信号预处理电路) 和输出机构三个部分组成。传感器的作用是检测出测量环境中的被测信号,通常情况下是感应被测量的变化并将之转换成其他量。例如在测量人体温度时,将半导体热敏电阻 (传感换能器) 放置在人体体表某处,这时热敏电阻的阻值将反映体表温度的变化,这是一种将热学



量(非电学量)转换成电阻(电参数)的测量方法。通常也把传感器称为一次仪表,而把后面的测量电路和输出电路称作二次仪表。

随着微处理机技术的发展,传感检测系统的组成也有了新的发展。带有微处理机的智能传感检测系统是现代传感检测技术的发展方向,其基本组成如图 1.3.1 所示。

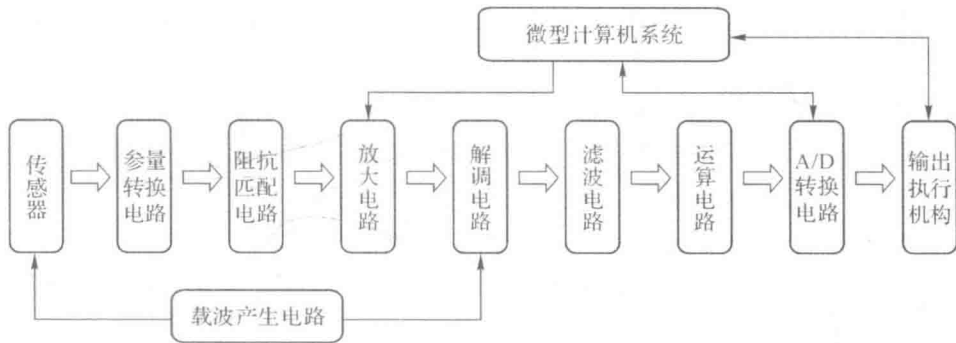


图 1.3.1 智能传感检测系统基本构成

### 1.3.1 测量电路(measurement circuits)

在测量过程中,可将测量电路分成传感器接口与信号预处理电路两个部分。传感器接口是指从传感器到信号预处理电路之间电路结构组成,通常由参量转换(基本转换电路)、传感器输出信号的调制和阻抗匹配等功能模块电路组成,它的主要功能是提取被测信号。信号的预处理电路通常由运算、解调、滤波、A/D 和 D/A 组成,它的主要功能是检出被测信号,并在必要的情况下对信号进行离散化处理。

#### (1) 参量转换(parametric conversion)

当在被测信号的作用下,传感器的电学性能发生了变化,即当被测信号的变化造成传感器的电阻、电感或电容等电参数的变化,则需要相应的接口电路将其转换成电压、电流或电荷等易于测量的电量信号,或者将其转换成数字量输出。已知为电量输出时则不需要这样的转换电路。

#### (2) 调制解调(modulation and demodulation)

在传感器的输出量值比较微弱的情况下,放大器的噪声电压、测量电路直流放大的温漂、零漂和级间耦合现象都会给测量结果带来严重误差,为提高测量的抗干扰能力,在参量转换电路中对传感器的输出信号进行调制,也即使之输出一个变化的交流信号,传感器输出信号的变化对应于交流信号幅度、频率或相位的变化,在测量电路中可采用窄带滤波放大和相应的解调技术检测得到感兴趣的被测信号。这是微弱信号检测中常用的方法。一般将控制高频振荡的缓变信号称为调制波(被测信号);载送交变信号的高频振荡波称为载波(在参量转换电路中的激励信号);经过调制的高频振荡波称为已调波(传感器的输出信号)。解调或检波是对已调波进行鉴别以恢复缓变的被测信号。

#### (3) 阻抗变换(impedance conversion)

传感器可以看成是具有一定输出阻抗的信号源,而与之接口的后继电路具有一定的输入阻抗,为了使传感器的输出信号尽量不受测量电路输入阻抗的影响,在一般的传感器