

生物医学传感与检测 实验教程

汤守健 陈星 沈义民 王平 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

生物医学传感与检测实验教程

汤守健 陈 星 编著
沈义民 王 平



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

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.

—杭州:浙江大学出版社, 2013. 1

ISBN 978-7-308-11028-0

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 006379 号

生物医学传感与检测实验教程

汤守健 陈 星 沈义民 王 平 编著

责任编辑 李桂云

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 10

字 数 256 千

版 次 2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-11028-0

定 价 25.00 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部邮购电话 (0571)88925591

前 言

从某种意义上说,没有精确的科学实验便没有真正的科学研究。在科学技术高水平发展的今天尤其是这样,大到基本物理定律的确定与修正,小到某一件产品的鉴定与评价,都少不了相应的科学实验。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的结果,而且往往不惜为之夜以继日地付出高昂的代价,不达目的誓不罢休。由此可见有意义的科学实验是很重要的。

根据传感与检测技术的特点,我们为《生物医学传感与检测》课程设置了一门综合实验课程,根据课程教学的需求和特点,安排了若干个实验,并编写了本实验教程。通过本实验的教学,使学生能够验证课堂上学到的理论知识、熟悉常用的传感器标定与使用方法、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,为学生将来在该领域中的科学研究和应用开发打下良好基础。

本书分为上、下二篇。上篇主要是围绕下篇的实验内容,简要介绍相关的基础知识和涉及的理论基础,包括实验中使用到的有关传感器的基础知识、人体生理信息及检测方法、实验用到的检测系统以及实验设计和数据处理的一般方法等。下篇主要围绕具体的实验内容介绍相应的实验装置、实验步骤以及相关工具和软件等。

值得特别提醒一下的是,实验工作常常是单调乏味的“重复劳动”,而且相当烦琐,希望学习者不要轻视或草率行事,这时真正需要的是十分的仔细和百倍的耐心。科学实验来不得半点马虎,需要具备严肃认真、一丝不苟的科学态度。

在着手实验之前,应仔细阅读实验指导教程,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做而不是那样做,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,不可操之过急。实验完成后的实验报告,不要停留在就事论事上,应该有的放矢地进行分析 and 讨论,把自己的看法和评价都写上,这样才能写出完美的实验报告。

大家应该本着理论和实践相结合的原则,在重视各门相关学科理论的同时,又重视相应的实践环节,勤于动手,勤于思考,这样才会在真才实学上有长足的进步。

本书涉及的知识领域比较广泛,由于作者的知识和经验所限,有错误和不足之处,诚恳地希望得到读者和使用者的批评指正。

编著者

2012年9月

目 录

上篇 生物医学传感与检测技术基础

第 1 章 传感器和检测系统	3
1.1 传感器与检测的基本概念	3
1.2 传感器的静态特性和动态特性	4
1.2.1 传感器的静态特性	4
1.2.2 传感器的动态特性	5
1.3 传感检测系统	6
1.3.1 测量电路	7
1.3.2 微机与数字信号处理	8
第 2 章 实验设计及数据处理	9
2.1 传感器实验设计	9
2.2 误差和误差的分类	9
2.2.1 误差的表示方法	10
2.2.2 误差的分类	10
2.3 实验设计思路与步骤	11
2.4 实验数据的处理	12
2.4.1 测量数据有效数字的表示方法	12
2.4.2 实验数据的处理方法	14
2.4.3 数据处理软件中列表法、作图法和方程法的实现	25
第 3 章 人体基本生理信息及其检测方法	27
3.1 循环系统生理信息	27
3.1.1 心电	28
3.1.2 心音	30
3.1.3 血压	30
3.1.4 脉搏	32

3.2	呼吸系统生理信息	33
3.2.1	呼吸的全过程	33
3.2.2	呼吸系统主要生理参数	33
第4章	常用传感器原理及应用简介	36
4.1	电阻应变式传感器	36
4.1.1	电阻应变片的工作原理	36
4.1.2	电阻应变片的种类	38
4.1.3	测量电路	39
4.2	差动变压器式电感传感器	42
4.2.1	工作原理	42
4.2.2	基本特性	43
4.2.3	测量电路	44
4.3	电涡流式传感器	45
4.3.1	工作原理	45
4.3.2	电涡流形成范围	46
4.3.3	测量电路	48
4.4	电容式传感器	48
4.4.1	工作原理	48
4.4.2	测量电路	49
4.5	压电式传感器	51
4.5.1	工作原理	51
4.5.2	测量电路	53
4.6	磁电感应式传感器	54
4.6.1	工作原理	54
4.6.2	基本特性	55
4.6.3	测量电路	56
4.7	霍尔式传感器	56
4.7.1	工作原理	56
4.7.2	基本特性	58
4.7.3	霍尔元件补偿电路	59
4.7.4	测量电路	60
4.8	光纤传感器	61
4.8.1	光纤的结构	61
4.8.2	光纤的传输原理	61
4.8.3	测量电路	62
4.9	热电式传感器	63
4.9.1	热电阻传感器	64

4.9.2	热电偶传感器	67
4.10	半导体气体传感器	69
4.11	湿度传感器	71
4.11.1	湿度定义	71
4.11.2	湿度检测	71
4.12	离子传感器	74
4.12.1	离子选择性电极	74
4.12.2	玻璃电极	76
4.13	生物酶传感器	78
4.13.1	酶传感器的原理	78
4.13.2	Clark 氧电极	79
4.13.3	葡萄糖酶电极传感器	80
4.13.4	测量原理与电路	82

下篇 生物医学传感与检测实验

实验一	电阻应变式传感器性能测试及其应用	85
实验二	移相器和相敏检波器实验	89
	一、移相器实验	89
	二、相敏检波器实验	91
实验三	电感式传感器性能测试及其应用	95
	一、差动变压器式电感传感器的性能	95
	二、差动变压器式电感传感器的应用	96
	三、激励频率对差动变压器式电感传感器的影响	98
实验四	电涡流式传感器的性能测试及其应用	100
	一、电涡流式传感器静态标定	100
	二、电涡流式传感器的应用	102
实验五	电容式传感器的特性测试及其应用	104
实验六	压电加速度传感器的应用	107
实验七	磁电式传感器的应用	110
实验八	霍尔式传感器特性测试及其应用	112
	一、霍尔式传感器特性——直流激励	112
	二、霍尔式传感器——交流激励	114
实验九	光纤位移传感器的特性及其应用	116
	一、光纤位移传感器的静态特性测量	116
	二、光纤位移传感器的动态特性及振动和转速测量	118
实验十	热电式传感器的特性及其应用	120
实验十一	酒精气体检测实验	122

实验十二	空气湿度检测实验	124
实验十三	化学离子检测实验	126
实验十四	生物酶传感器检测实验	129
实验十五	传感器在人体温度、血压、呼吸和脉搏测量中的应用	131
	一、体温测量	131
	二、血压测量	133
	三、呼吸测量	136
	四、脉搏测量	138
参考文献	141
附录一	CSY _{10B} 型传感器系统实验仪使用说明	142
附录二	医学生理信号采集实验仪使用说明	147
附录三	NI myDAQ 虚拟仪器教学套件使用说明	149

生物医学传感与检测技术基础

上篇

第 1 章

传感器和检测系统

1.1 传感器与检测的基本概念

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 and 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

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

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

传感器静态校准曲线与作为基准的拟合直线的最大偏差(Δ_{\max})与传感器满量程输出($Y_{F.S}$)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:

$$\epsilon = \frac{|\Delta_{\max}|}{Y_{F.S}} \times 100\%$$

式中 ϵ ——线性度(非线性误差);

Δ_{\max} ——输出平均值与拟合直线的最大偏差;

$Y_{F.S}$ ——传感器满量程输出。

(2) 灵敏度

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

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。

$$\delta_H = \frac{|\Delta H_{\max}|}{Y_{F.S}} \times 100\%$$

式中 ΔH_{\max} ——输出值在正、反行程间的最大偏差。

(4) 重复性

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 Δ_{\max} , 计算与满量程输出的百分比,得出重复性误差:

$$\delta_R = \frac{|\Delta_{\max}|}{Y_{F.S.}} \times 100\%$$

(5) 精度

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:

$$K' = \frac{\Delta A}{Y_{F.S.}} \times 100\%$$

式中 ΔA ——传感器测量范围内最大绝对误差;

$Y_{F.S.}$ ——传感器满量程输出;

K' ——传感器的精度等级。

(6) 灵敏限

灵敏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

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:

$$\text{零漂} = \frac{\Delta Y_0}{Y_{F.S.}} \times 100\%$$

式中 ΔY_0 ——输出偏离值。

(8) 温漂

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℃ 时,输出最大偏差与满量程之比表示。

$$\text{温漂} = \frac{\Delta_{\max}}{Y_{F.S.} \times \Delta T}$$

式中 ΔT ——温度变化值。

(9) 测量范围

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

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

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 τ :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 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 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 α :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 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 ψ :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 τ 、 t_s 、 t_r 是反映系统响应速度的指标。 ψ 、 α 反映系统的相对稳定性。

(2) 传感器的频率响应特性指标

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: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: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: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

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。

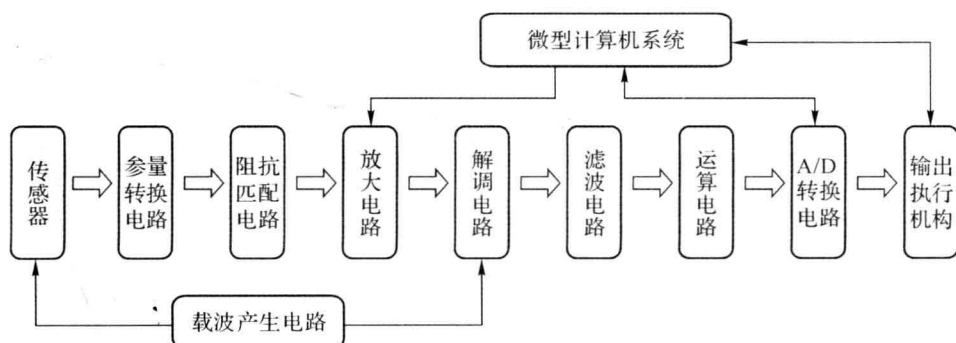


图 1.3.1 智能传感检测系统基本构成

1.3.1 测量电路

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

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

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

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,在一般的传感器接口电路的设计中应考虑阻抗变换,即将高输出阻抗的传感器通过高输入阻抗的运放变成低阻输出。

(4) 运算电路

在测量电路中运算电路主要有比例、加减、积分、微分、对数、指数、乘除等,根据测量

需要,它们对信号起着线性或非线性变换的作用。

①比例运算

传感器的输出信号一般来说都比较小,通常为毫伏级。因此,为达到后继处理电路的输入水平,一般应对传感器的输出信号进行放大。选择集成运算放大器作为信号放大电路的器件在设计中是十分方便的。

②加、减运算

实现几个不同信号的加减法运算和信号偏置幅度的调整。差分放大电路是此类电路中的基本类型之一。

③对数、指数运算

完成电路中的非线性运算。例如对数运算电路可将指数形式输出的传感器信号线性化。

(5)模拟滤波器

在测量系统中,信号预处理电路中的模拟滤波器的设计是十分关键的一个环节,它具有选择信号中感兴趣频率成分的功能。滤波器使信号中特定的感兴趣的频率成分通过而极大地衰减其他频率成分,从而达到滤除信号中干扰噪声的目的。

(6)模数、数模转换电路

信号从传感器到传感器接口和预处理电路涉及的都是模拟信号,因而这些都是模拟测量电路的设计。为了能在测量系统中发挥数字信号处理技术的作用,模拟信号必须转换为计算机能处理的数字信号。通常当测量系统中存在执行器件时,计算机还要将处理后输出的数字信号转换成模拟信号。A/D接口、D/A接口和微机构成一个智能闭环测控系统。

1.3.2 微机与数字信号处理

微机与数字信号处理技术在测量系统中的应用使测量系统产生了质的飞跃。测量数据的微机处理,不仅可以对信号进行分析、判断、推理,还可以用数字显示测量结果。在微机检测系统中,除CPU之外,系统通常还有数据存储器、程序存储器、输入、输出、通讯等其他一些接口,以完成测量系统的人机交互、数据的分析、记录和显示。

随着计算机技术在测量系统中的应用,数字信号处理技术得到越来越广泛的使用。数字信号处理和模拟信号处理相比有稳定性、重复性好等优点。例如,数字滤波器在测量数据的信号提取和噪声抑制方面起着十分重要的作用;为了提高检测精度,减少硬件电路的开销,传感器线性化软件在工程实践中具有重要的应用价值。这些都是微机数字化测量技术的强大优势。

第 2 章

实验设计及数据处理

2.1 传感器实验设计

传感器实验设计的目的是通过设计的实验及其获得的数据来分析传感器的各种特性,因此实验的设计都源于对传感器特性的估计。设计全面及科学的实验可以完整地获得传感器的各项特性参数,根据其特性参数我们可以确定传感器的应用领域及应用范围。而传感器实验方法被简化和固化后可应用于实际的医学和工业检测。

实验设计就是根据传感原理和测量对象(物理、化学或生物量)确定需要被评估的传感器静态特性和动态特性的过程。即根据上述的传感器静态特性:线性度、灵敏度、迟滞、重复性、精度、灵敏限、零点漂移、温漂、测量范围,以及动态特性:时间常数 τ 、上升时间 t_r 、响应时间 t_s 、超调量 α 、延迟时间 t_d 、衰减度 ψ ,来设计实验。

传感器实验的过程简单来说就是给传感器一个定量的输入(即测量对象),观测其对应输出量的过程。在这个多次观察的过程中,如何确定和量化观察结果的可信度是实验设计需要解决的问题。为了更好的理解实验设计的方法,我们首先需要了解误差的概念。

2.2 误差和误差的分类

测量过程中,测量设备、测量对象、测量方法和测量者本身都不同程度地受到各种因素的影响;其次,测量过程中必须对测量系统施加作用,才能使测量系统给出测量结果,也就是说,测量过程一般都会改变被测对象原有的状态。因此,测量结果所反映的并不是被测对象的本来面貌,而只是一种近似。故测量不可避免地存在测量误差。测量误差就是测量值与真值之间的差值。所谓真值,是指一定的时间及空间条件下,某被测量所体现的真实数值。测量的目的是为了求得被测量的真值的逼近值。