

普通高等教育“十三五”规划教材

传感器与信号处理电路

(第2版)

主编 高立艾 纪建伟



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十三五”规划教材

传感器与信号处理电路

(第2版)

主编 高立艾 纪建伟



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

全书共 14 章。前 10 章主要讲述传感器原理与应用,包括传感器的基本概念、电阻传感器、电感传感器、电容传感器、光电传感器、压电传感器、磁电传感器、热电式传感器、数字传感器、其他传感器(含霍尔传感器、超声波传感器、光纤传感器);后 4 章主要讲述信号处理电路的基本原理与形式,包括测量电桥、测量放大电路、滤波器、调制与解调。

本书可供高等学校电气信息类本科、专科师生使用,也可供电气工程技术人員及电器爱好者参考和自学。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与信号处理电路 / 高立艾, 纪建伟主编. --
2版. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2017.9
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5170-5594-5

I. ①传… II. ①高… ②纪… III. ①传感器—信号
处理—电路—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第237697号

书 名	普通高等教育“十三五”规划教材 传感器与信号处理电路 (第 2 版) CHUANGANQI YU XINHAO CHULI DIANLU
作 者	主编 高立艾 纪建伟
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市密东印刷有限公司印刷
规 格	184mm×260mm 16 开本 11.75 印张 279 千字
版 次	2008 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月第 1 次印刷 2017 年 9 月第 2 版 2017 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	28.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

第 2 版 前 言

本书是在《传感器与信号处理电路》(2008 年 3 月中国水利水电出版社出版)的基础上修订编写的。经过近几年的教学实践,作者总结和吸收了各院校教学中的宝贵意见,对其进行了修改。在此,作者向老师们表示衷心感谢。

作者在本书的编写过程中,既注重理论知识的系统性,又注重教材的实用性,使其更适合于教师组织教学和学生自学。全书共 14 章。前 10 章主要讲述传感器原理与应用,包括传感器的基本概念、电阻传感器、电感传感器、电容传感器、光电传感器、压电传感器、磁电传感器、热电式传感器、数字传感器、其他传感器(含霍尔传感器、超声波传感器、光纤传感器);后 4 章主要讲述信号处理电路的基本原理与形式,包括测量电桥、测量放大电路、滤波器、调制与解调。本书可供高等学校电气信息类本科、专科师生使用,也可供电气工程技术人員及电器爱好者参考和自学。

本书由河北农业大学高立艾和沈阳农业大学纪建伟任主编。参加本书编写的人员还有沈阳农业大学王立地、邹秋滢、张大鹏及河北农业大学张梦、张素、孙磊。全书由张曙光教授主审。

由于作者水平有限,书中疏漏和不足之处在所难免,敬请广大读者提出宝贵意见。

作 者

2017 年 4 月

第 1 版 前 言

《传感器与信号处理电路》是高等学校“十一五”精品规划教材之一。本书是在《检测技术》(21 世纪电学科高等学校教材之一, 2003 年 1 月中国水利水电出版社出版)的基础上重新修订编写的。经过近几年的教学实践, 各学校对《检测技术》提出了许多宝贵的意见, 作者总结和吸收了各院校教学中的经验和意见, 对其进行了重新编写。

作者在本教材的编写过程中, 既注重理论知识的系统性, 又注重教材的实用性, 使其更适合于教师组织教学和学生自学。全书共 14 章。前 10 章主要讲述传感器原理与应用, 包括: 传感器的基本概念、电阻传感器、电感传感器、电容传感器、光电传感器、压电传感器、磁电传感器、热电式传感器、数字传感器、其他传感器(含霍尔传感器、超声波传感器、光纤传感器); 后 4 章主要讲述信号处理电路的基本原理与形式, 包括: 测量电桥、测量放大电路、滤波器、调制与解调。本书可供高等学校电气信息类本科、专科师生使用, 也可供电气工程技术人员及电器爱好者参考和自学。

参加本书编写的人员有沈阳农业大学纪建伟、王立地及河北农业大学索雪松、赵睿明、邵利敏、张莉、高立艾、陈俊红等。全书由张曙光教授主审并编写了部分内容。

由于作者的水平有限, 书中疏漏和不足之处在所难免, 敬请广大读者提出宝贵意见。

作 者

2008 年 1 月

目 录

第 2 版前言

第 1 版前言

第 1 章 传感器的基本概念	1
1.1 传感器的定义、构成与分类	1
1.2 传感器的特性与性能指标	3
1.3 传感器的发展趋势	10
习题	16
第 2 章 电阻传感器	17
2.1 电阻应变传感器	17
2.2 热电阻	25
2.3 热敏电阻	26
2.4 半导体温度传感器	31
习题	35
第 3 章 电感传感器	36
3.1 自感传感器	36
3.2 互感传感器	39
3.3 涡流传感器	41
3.4 电感传感器的应用	45
习题	46
第 4 章 电容传感器	48
4.1 电容传感器的工作原理	48
4.2 电容传感器的应用	51
习题	54
第 5 章 光电传感器	55
5.1 光电效应	55
5.2 光电元件	56
5.3 光电传感器的类型及应用实例	64
习题	67
第 6 章 压电传感器	68
6.1 压电传感器的工作原理	68
6.2 压电传感器的等效电路	72

6.3	压电传感器介绍	74
6.4	压电声表面波传感器	75
	习题	77
第 7 章	磁电传感器	78
7.1	磁电传感器	78
7.2	磁阻式磁电传感器	80
7.3	磁电检测	81
	习题	84
第 8 章	热电式传感器	85
8.1	热电偶	85
8.2	辐射式温度传感器	93
	习题	97
第 9 章	数字传感器	98
9.1	光栅传感器	98
9.2	电子细分技术	103
	习题	106
第 10 章	其他传感器	107
10.1	霍尔传感器	107
10.2	超声波传感器	112
10.3	光纤传感器	115
	习题	120
第 11 章	测量电桥	121
11.1	直流电桥	121
11.2	交流电桥	126
	习题	135
第 12 章	测量放大电路	136
12.1	放大电路的基本形式	136
12.2	对测量放大电路的要求	142
12.3	常用放大电路	146
12.4	电荷放大器	149
	习题	151
第 13 章	滤波器	152
13.1	滤波器的基本概念	152
13.2	无源滤波器	155
13.3	有源滤波器	158
	习题	160
第 14 章	调制与解调	161
14.1	调幅与解调	162

14.2 调频与解调 167

14.3 调相与解调 171

14.4 脉宽调制与解调 173

14.5 数字调制与解调 174

习题 179

参考文献 180

第 1 章 传感器的基本概念

1.1 传感器的定义、构成与分类

传感器是一种将被测量转换成电信号的装置。传感器通常要完成三大任务，首先是将被测量转换为特定的非电量（如应变、位移等），其次是将特定的非电量转换成电参数（如电阻、电感、电容等）或电量，最后将电参数或电量转换成便于传输和处理的标准电压或电流信号。我们把电量信号和被测量之间的关系称为传感器的输出-输入关系，它是一种可用单调函数来描述的稳定关系。

直接感应被测量，并能输出相应非电量的元件称为敏感元件；将敏感元件输出的非电量转换成电参数或电量的元件称为转换元件；把电参数或电量变成标准电压或电流这种有利于传输、显示、记录和处理的电信号是依靠测量电路完成的。因此，传感器一般由敏感元件与转换元件及部分测量电路构成。

如图 1.1-1 所示，弹性悬臂梁在自由端受到外界力 F 的作用时，发生弯曲变形。悬臂梁作为敏感元件直接感受到了外界作用力（被测量）并转换成自身的形变（非电量），其上表面的延展和下表面的收缩程度与外作用力成正比。粘在悬臂梁上表面的电阻应变片将随着悬臂梁上表面的延展而拉长，被拉长的电阻应变片的电阻值变大，这样就将非电量转换成了电参数。在此例中，电阻应变片是转换元件。如果匹配适当的测量电路来提高灵敏度，并补偿环境温度等外界影响，就构成了一个测量作用力 F 的传感器。在悬臂梁的弹性变形范围及规定环境条件下传感器的输出-输入关系可以用一个单调的数学函数关系表达。

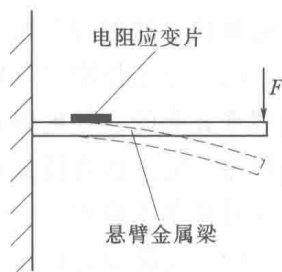


图 1.1-1 弹性悬臂梁

上述测力传感器是电阻式传感器，属于“敏感元件+转换元件+测量电路”的 C 型结构的传感器 [图 1.1-2 (c)]，这种结构的传感器还有电位器传感器、电感式传感器、压磁式传感器。有些传感器的敏感元件和转换元件是同一元件，属于 B 型结构的传感器 [图 1.1-2 (b)]，如热敏电阻式传感器、电容式传感器、感应同步器、角度编码器等。B 型和 C 型都是电参数传感器，其转换元件都是无源元件。属于 A 型结构的传感器 [图 1.1-2 (a)]，称为电量传感器，其转换元件多是有源元件。如热电偶、磁电式传感器、光电池和压电式传感器，这些传感器的敏感元件和转换元件是合一的，把感应到的外界非电量的变化直接转换成电流（电荷）或电压（电势）输出。如果将两个传感器构造成一个测量正增益变化（ $+\Delta x$ ），一个测量负增益变化（ $-\Delta x$ ），它们的输出（ $+\Delta y$ 和 $-\Delta y$ ）经差动电路处理后再输出，这就是 D 型结构的传感器，也称为差动结构型传感器 [图 1.1-2 (d)]。

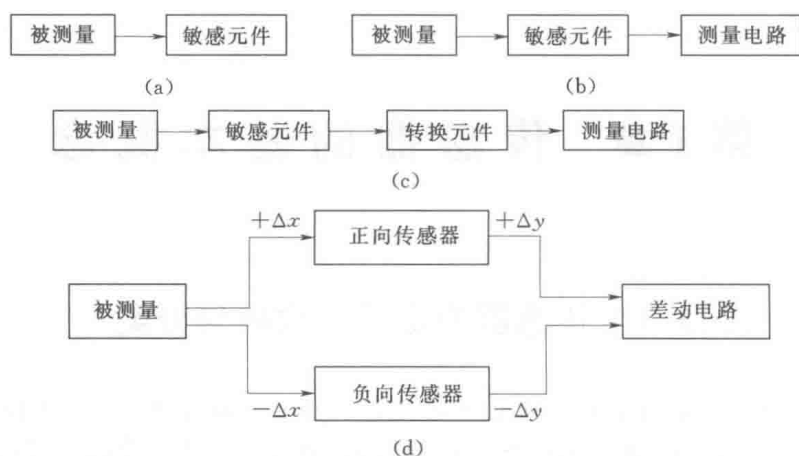


图 1.1-2 传感器的结构类型

(a) A 型; (b) B 型; (c) C 型; (d) D 型

传感器是按照信息转换过程中的特征量或原理来分类的，一般为如下几类：

(1) 按被测物理量（输入量）分类。按照被测量的物理性质（位移、速度、温度、压力、流量……）分类的方法，可直接阐明传感器的用途，如位移传感器、速度传感器、负荷传感器、压力传感器、流量传感器、温度传感器等。使用者可以根据被测量选择相对应的传感器。由于可用多种原理来测量某一物理量（如位移），所以很难归纳传感器在原理上的共性。这种分类法不利于学习和掌握传感器的工作原理和分析方法。

(2) 按工作原理（转换原理）分类。这种分类方法是按照将被测量转换成电量的转换原理来分类的，如电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、磁电式传感器、压电传感器等。此方法直接描述了传感器的工作原理，揭示了传感器内部的本质问题，有助于研究人员从基本原理上归纳传感器的共性和特性。

(3) 按能量的传递方式分类。将非电量转换成电量的转换元件均可分为两类：有源元件和无源元件。

有源元件是一种能量转换器，可将非电能量转换成电能量。如热电偶可将热能转换成热电势，光电池可将光能转换成光电势等。这类传感器有些是可逆的，如压电材料组成的传感器，受压力（或拉力）时，由于压电材料形体的变化将有电荷产生；当给压电材料通上变化的电流时，其形体将随电流的变化而发生形变。所以这样的传感器，当输入机械能时，通过它可转换成电能；反之，当输入电能时，通过它可转换成机械能。这样具有可逆特性的传感器还有磁电式传感器等。

无源元件本身不是一个换能器。被测量直接或间接的作用引起该元件的某一电参数（电阻、电容、电感、电阻率、介电常数……）的变化，要想获得电压和电流的变化值，必须匹配测量电路和辅助电源。由于它不进行能量转换，因此一般是不可逆的。

本书将按传感器的工作原理，分类讲解和分析其转换原理。学完之后，读者可按被测物理量和能量的传递方式自己归类，以此考核掌握的知识，加深印象，增强灵活应用的能力。

1.2 传感器的特性与性能指标

1.2.1 传感器的一般特性与性能指标

传感器的输出-输入关系特性是传感器最基本的特性。分析这些特性,是为了掌握一种揭示传感器性能指标的方法,从而全面地去衡量传感器的性能差异及优劣。

传感器的特性一般分为静态特性和动态特性两部分。

1.2.1.1 传感器的静态特性与性能指标

静态特性是指被测量和输出量均处于稳定状态时的输出-输入关系,衡量静态特性的重要性能指标是精确度、灵敏度、线性度、重复性、迟滞(滞环)、分辨率与分辨力等。

1. 误差与精确度

严格地讲,无论何种方法,使用何种检测装置,测量得到的结果都与真实的被测量之间存在着一定的偏差。测量值与真值之偏差称为绝对误差 Δx ,表示为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1.2-1)$$

式中 x ——实际值,测量得到的结果;

A_0 ——真值,被测量本身所具有的真正值。

由于存在测量误差,根本不可能测量得到真值 A_0 ,所以,通常只能用误差非常小的高档标准测量装置所测值 A 看作真值,或将无限次测量结果的算术平均值 A 近似地看做真值。

式(1.2-1)改写成

$$\Delta x = x - A \quad (1.2-2)$$

则称 Δx 为示值误差。

误差描述了测量出来的实际值与真值之间的偏差程度。误差值相同,测量质量谁优谁劣?如测量 10mm 长度时误差是 0.1mm;而测量 100mm 时,误差也是 0.1mm。如果用误差 Δx 与被测量的平均值 A 之比来表示

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1.2-3)$$

γ_A 称为实际相对误差。结果测量 10mm 长度的实际相对误差为 1%;测量 100mm 长度的实际相对误差为 0.1%。所以相对误差比绝对误差更能确切地说明测量的质量。

误差 Δx 与测量装置读出的实际值 x 之比,称为示值相对误差。记为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.2-4)$$

误差 Δx 与测量装置的满量程 x_m 之比,称为满度(或引用)相对误差。记为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1.2-5)$$

满度相对误差 γ_m 通常用来说明该测量装置的测量质量。

仪表的精度等级是根据满度相对误差 γ_m 来确定的。我国电工仪表的精度等级按 γ_m 的大小分为七级:0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0。例如,0.5 级仪表的引用误差的最大值不超过 $\pm 0.5\%$,1.0 级仪表的引用误差的最大值不超过 $\pm 1\%$ 。工业自动化仪表的精度等级一般在 0.2~5.0 级。

在测量过程中由于传感器设计与制造引起的本身性能的不完善，因为使用方法和安装、调试的不规范，以及使用环境的恶劣等已知因素造成的误差，称为系统误差。产生原因不明确，但服从大多数统计规律的误差，称为随机误差。

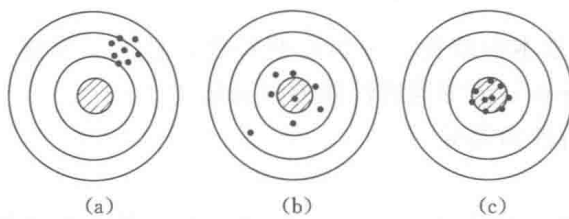


图 1.2-1 精密度、准确度与精确度

如图 1.2-1 所示，被射的靶心表示被测量的真值，而射击的弹孔看作传感器的测量输出实际值。由图 1.2-1 (a) 可以看出，每次测量的实际值（弹孔）之间偏差是微小的，这种多次测量的一致性用精密度来表示。在图 1.2-1 (a) 所示测量中精密度很高，但总体偏离真值（靶心）较大。

多次测量的平均值与真值的偏差，多是由系统误差引起的，可以通过补偿等方法予以抵消。传感器生产厂家一般给出其修正公式或参数表。图 1.2-1 (b) 所示，多次测量中，大部分距真值非常接近，但多次测量的一致性较差，这种测量值与真值的接近程度用准确度表示，在图 1.2-1 (b) 中说明其测量有一定的准确度，但精密度不够好。其较大的偏离值，多是由随机误差引起的，很难预知它的出现，但可以经多次测量后用滤除法加以消除。如果能够像图 1.2-1 (c) 那样，多次测量的精密度高，准确度也高，将这种既精密又准确的性能称为精确度（简称精度）。在工程上，往往引用精确度等级（简称精度等级）来说明测量结果的可信程度。该性能指标也适用于动态特性中。

2. 灵敏度和线性度

通常用传感器在静态特性情况下输出的增量与输入（被测量）的增量之比来描述传感器对被测量的敏感程度，称为灵敏度，用 k 表示

$$k = \frac{\text{输出量的变化}}{\text{输入量的变化}} = \frac{dy}{dx}$$

如果传感器的灵敏度 k 为常数，说明输出-输入关系是一条直线，即

$$y = a_0 + kx \tag{1.2-6}$$

- 式中 y ——输出量；
 x ——输入量（被测量）；
 a_0 ——零位输出；
 k ——灵敏度。

k 为常数，可大大简化传感器的理论分析和计算，同时为标定传感器和数据处理带来了方便，这样有利于安装调试，确保测量精度。这就是为什么要将传感器的输出-输入关系作成线性的原因。

实际上许多传感器的输出-输入关系都是非线性的，在不考虑迟滞和蠕变效应的情况下，可用下式表示

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots + a_nx^n \tag{1.2-7}$$

式中 $a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——非线性项的待定系数。

由于传感器的输出-输入特性是非线性的，所以，经常用一条直线来近似地表示实际的曲线。这种方法称为非线性特性的线性化，被采用的直线称为拟合直线。传感器的实际

输出-输入特性曲线，是在静态标准条件下标定的。静态标准条件是：没有加速度、振动、冲击（除非这些参数本身是被测量）、环境温度一般为室温（ 20 ± 5 ）℃；相对湿度不大于85%；大气压力为（ 101327 ± 7800 ）Pa [（ 760 ± 60 ）mmHg] 的情况。在这种标准工作状态下，利用一定等级的校准设备，对传感器进行反复循环测试，得到的输出-输入数据一般用表列出或画成曲线。实际曲线与拟合直线之间的偏差为传感器的非线性误差，非线性误差的最大值与传感器满量程（FS）输出之比（%）称为线性度（或称非线性），即

$$e_l = \frac{\Delta_m}{\bar{y}_{FS}} \times 100\% \tag{1.2-8}$$

式中 Δ_m ——最大非线性误差；
 $\bar{y}_{FS}$ ——传感器的满量程输出平均值。

由图 1.2-2 可看出，线性度是以拟合直线为基准计算出来的，不同的拟合方法所得到的线性度不同。

下面介绍几种不同线性度的定义和表示方法：

（1）理论线性度（绝对线性度）。通常取零点（0%）为起始点，满量程输出（100%）为终止点，连接这两点的直线（ $y=kx$ ）即为理论直线。理论线性度表示了标定出的实际曲线与理论直线之间的偏差程度 [图 1.2-2（a）]。此方法使用简便，但线性度大，较为粗糙。

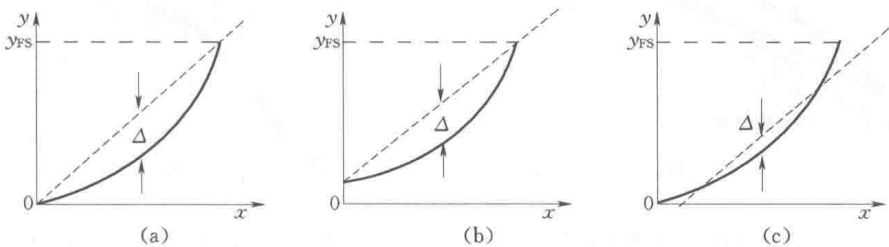


图 1.2-2 不同拟合方法下的线性度

（a）理论线性度；（b）端基线性度；（c）平均选点线性度

（2）端基线性度。取传感器标定出的零点输出平均值为起始点，满量程输出平均值为终止点，连接这两点的直线（ $y=a_0+kx$ ）为端基拟合直线。以此直线为基准可计算出实际曲线与拟合曲线的偏差程度，称为端基线性度 [图 1.2-2（b）]。

（3）平均选点线性度。（1）与（2）两方法的拟合精度不高。为此，将标定出的全部数据分成近似相等的两组，并求出两组的点系中心坐标（ $\bar{x}_1, \bar{y}_1$ ）和（ $\bar{x}_2, \bar{y}_2$ ），连接两点得到拟合直线，称为平均选点法。该直线为

$$y = a_0 + kx \tag{1.2-9}$$

$$k = \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}; \quad a_0 = \bar{y}_1 - k\bar{x}_1 = \bar{y}_2 - k\bar{x}_2$$

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i; \quad \bar{y}_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i; \quad \bar{x}_2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} x_i; \quad \bar{y}_2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} y_i$$

式中 n ——所有数据个数；
 m ——（ $\bar{x}_1, \bar{y}_1$ ）所在点系的数据个数。

以此直线为基准计算的线性度为平均选点线性度 [图 1.2-2（c）]。该方法提高了拟合精

度，计算也比较简便。

(4) 独立线性度。选择拟合直线的另一种简单有效的方法是独立直线（端基平移直线）。作两条与端基直线平行的直线，使之恰好包围所有的标定数据点，然后在这一对平行线之间作一条等距直线，使实际输出特性相对于所选拟合直线的最大正偏差值和最小负偏差值相等，见图 1.2-3。以独立直线为基准计算线性度时，应将式 (1.2-8) 改写为

$$e_f = \frac{|+\Delta_{\max}| + |-\Delta_{\max}|}{2y_{FS}} \times 100\% \quad (1.2-10)$$

基准直线还有最小二乘法拟合直线、平均斜率拟合直线等，可参阅相关文献。当标定出的实际曲线比较弯曲时，由上述拟合直线为基准计算出的线性度大，测量精度就会降低。通常可采取将实际曲线分割成段，然后用上述某一种方法分段选取拟合直线（图 1.2-3），用分段后的最大线性度代表整体线性度。这种方法称为折线逼近法，通常用精密折点电路实现，在具有 CPU 的测量装置中可非常方便地用软件实现。图 1.2-4 所示以端基线为拟合直线的分段线性化方法，不同段的直线表达式 $y=a_0+kx$ 中的 a_0 和灵敏度 k 是不一样的，可列表编制在计算程序中。

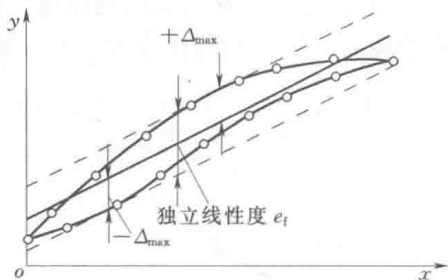


图 1.2-3 独立线性度的拟合直线

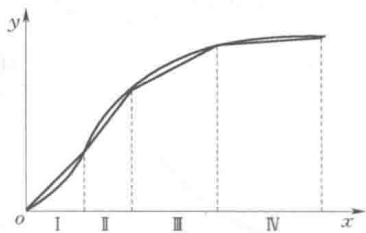


图 1.2-4 以端基线为拟合直线的分段线性化方法

3. 迟滞（滞环）

传感器在正向（被测量增大）和反向（被测量减小）时，输出特性曲线不重合的程度，称为迟滞，或称滞环。如图 1.2-5 所示，对应同一大小的被测量，由于被测量变化到这一值时的正反方向不相同，使得传感器的输出信号值不同。产生迟滞现象的主要原因有传感器机械部分存在不可避免的缺陷，如轴承摩擦、间隙、紧固件松动、材料的内摩擦、积尘等，以及磁滞和电元件的单向特性等。

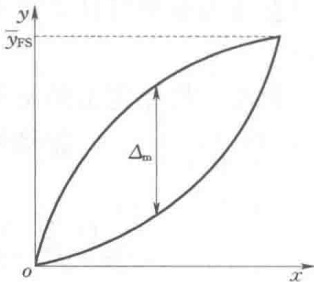


图 1.2-5 迟滞特性

迟滞的值通常用多次实验得到正向和反向输出量之间的最大偏差 Δ_m 与满量程输出平均值 $\bar{y}_{FS}$ 的百分比来表示，记为

$$e_1 = \frac{\Delta_m}{\bar{y}_{FS}} \times 100\% \quad (1.2-11)$$

4. 重复性

传感器在被测量按同一方向作多次全量程实验时，所得到的输出特性曲线的不一致程度，用重复性来表示（图 1.2-6）。重复性的计算是用多次实验中输出最大不重复误差 Δ_m

与满量程输出平均值的百分比来表示，记为

$$\sigma = \pm \frac{\Delta_m}{\bar{y}_{FS}} \times 100\% \tag{1.2-12}$$

重复性误差属于随机性的，由于特定的次数不同，其最大偏差值 Δ_m 也不同，所以用标准偏差 σ 来计算重复性指标比较合理，即

$$e_z = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{\bar{y}_{FS}} \times 100\% \tag{1.2-13}$$

式中 σ ——标准偏差， $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}$ ；

n ——实验次数；

y_i ——第 i 次实验值；

$\bar{y}$ ——实验值的算术平均值。

σ 前的系数取 2 时，误差完全依从正态分布，置信概率 95%；取 3 时，置信概率为 99.73%。重复性的好坏与许多因素有关，其产生的原因与迟滞相近。

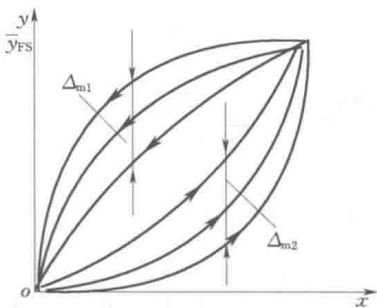


图 1.2-6 重复性

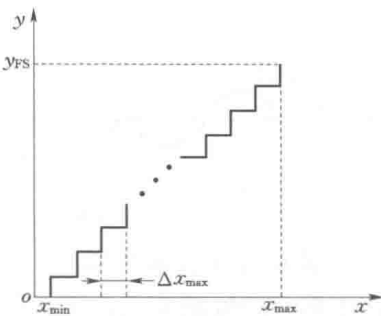


图 1.2-7 线绕电位计式传感器的输出

5. 分辨率与分辨力

线绕电位计式传感器，当输入量连续变化时，输出量却是阶梯变化的（图 1.2-7）。无论输出量是阶梯变化还是离散的数字量或频率量，传感器能够测量到的最小输入变化值 Δx ，称为分辨力。它代表了传感器的最小量程，与输入量同量纲。用分辨率表示传感器的分辨质量，通常有平均分辨率和最大分辨率两种表示方法。

平均分辨率为

$$R = \frac{1}{n} \times 100\% \quad (\text{满量程}) \tag{1.2-14}$$

式中 n ——传感器在满量程内，输出的阶梯个数。

最大分辨率为

$$R = \frac{(\Delta x)_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \quad (\text{满量程}) \tag{1.2-15}$$

式中 $(\Delta x)_{\max}$ ——输出的最大阶梯所对应的输入量增量；

$x_{\max}$ ——输出满量程时对应的输入最大值；

$x_{\min}$ ——输出量从零开始变化时对应的输入量最小值。

分辨率是一个无量纲的百分数，有的输出连续变化的传感器也给出分辨率。

随着微处理器的发展和应用，V/F 和 A/D 等电路被更多地集成到传感器的测量电路中，输出量是离散的数字量（或频率量）的传感器越来越多，因此，分辨率和分辨力是这些传感器不可缺少的主要性能指标之一。

1.2.1.2 传感器的动态特性与性能指标

在被测量随时间变化的情况下，传感器的输出量跟随输入量变化的能力，用动态性能指标来描述。有些传感器的静态性能指标非常好，但响应时间长，测量变化较快的被测量时，会产生非常严重的动态误差，往往动态误差会比静态误差高几倍，甚至几百倍。

用控制理论中的传递函数 $\Phi(S)$ 来表达传感器的输出-输入关系（图 1.2-8），即

$$\Phi(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n} \quad (1.2-16)$$

$\Phi(S)$ 的分母 $X(S) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n = 0$ 在控制理论中称为系统的特征方程，与输入量 $X(S)$ 和输出量 $Y(S)$ 无关，它决定了传递函数 $\Phi(S)$ 的固有特征，也就是传感器的动态特性和静态特性。传递函数可以用建立传感器的动态数学模型或频域的实验方法来确定。

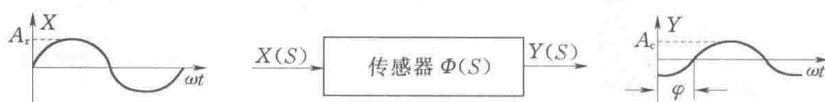


图 1.2-8 传感器的复域输出-输入关系

1. 传感器的时域性能指标

通常用典型的阶跃变化作用于传感器的输入，可得图 1.2-9 中所示的一条传感器输出的阶跃响应特性曲线。图中曲线 1 是一阶系统或过阻尼阶跃响应曲线，曲线 2 为具有振荡特性的阶跃响应曲线， y_0 对应的直线为输出 y 的稳态值。

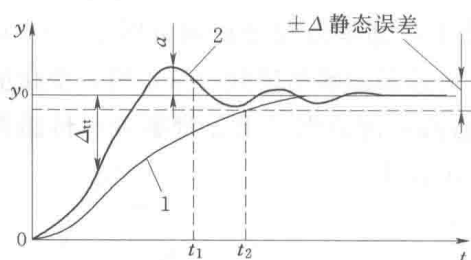


图 1.2-9 阶跃响应与时域性能指标

(1) 响应时间 t_s ：也称建立时间、调节时间，是指响应曲线开始进入静态误差带，并且不再超越静态误差带的时间（见图 1.2-9 中的 t_1 或 t_2 ）。在 t_s 时间段内，响应曲线与稳态值的偏差称为动态误差 Δ_n 。动态误差是随时间变化的量；在 t_s 时间之后，响应曲线进入静态误差带，动态误差小于静态误差指标，此时的动态特性近似于静态特性。可用静态的拟合直线确定输出-输入关系。响应时间 t_s 反映了传感器响应过程的长短，体现了将被测量转换成电量的快速性。

(2) 过冲量（超调量） σ ：响应曲线第一次超过稳态值时的峰值是传感器输出量与稳态值偏差最大的值 a （图 1.2-9）。过冲量 σ 用下式计算

$$\sigma = \frac{a}{y_0} \times 100\% \quad (1.2-17)$$

过冲量表达了传感器在响应过程中超出稳态值的最大正偏差与稳态值的百分比。过冲

越小，响应过程中的正偏差越小，响应的平稳性越好。

2. 传感器的频域特性与性能指标

传感器的输入量为一频率变化的正弦 $x(t) = A_r \sin \omega t$ 作用时，输出响应也为同频率的正弦 $y(t) = A_e \sin(\omega + \varphi)$ 曲线。但由于传感器有一定的响应时间，所以表现为输出曲线迟后于输入曲线相角 φ (图 1.2-10)；同时传感器的输出曲线的幅值 A_e 与输入幅值 A_r 的比值，也与响应时间有关。用 $s = j\omega$ 代入式 (1.2-16) 可得到频率响应函数 $\varphi(j\omega)$ ，即

$$\varphi(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = P(\omega) + jQ(\omega) \tag{1.2-18}$$

式中 $P(\omega)$ ——复数 $\varphi(j\omega)$ 的实部；

$Q(\omega)$ ——复数 $\varphi(j\omega)$ 的虚部。

用 $A(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 表示传感器的幅值和相位随频率 ω 变化的关系，可得

$$A(\omega) = \frac{A_e(\omega)}{A_r(\omega)} = |H(j\omega)| = \sqrt{[P(\omega)]^2 + [Q(\omega)]^2} \tag{1.2-19}$$

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \tag{1.2-20}$$

对于具有低通特性的传感器，当 $\omega=0$ 时（输入量不变化），传感器的输出-输入关系遵循静态特性关系，此时输出量与输入量之比为 k （灵敏度），即 $A(\omega=0) = k$ ，则 $20\lg \frac{A(\omega=0)}{k} = 0\text{dB}$ ，将图 1.2-10 中的 0dB 水平线视为理想的幅频特性曲线。

有些具有带通特性的传感器，随着输入作用的频率 ω 的增大，幅频特性 $A(\omega)$ 也要变化，见图 1.2-10 中，在 $\omega_L \sim \omega_H$ 段，特性曲线近似平直，说明 $A(\omega)$ 是不随 ω 变化的稳态值。在这段对应的频率范围内传感器的输出不会超越允许的误差带。而在 $0 \sim \omega_L$ 及 $\omega_H \sim \infty$ 范围内， $A(\omega)$ 随着 ω 的增大而变化，说明传感器的输出-输入幅值比是变化的，灵敏度随 ω 变化，输出量中有很大的动态误差，且大大超过了允许的误差带。将 ω_L 称为下截止频率， ω_H 称为上截止频率， $\omega_L \sim \omega_H$ 频率区间则称为传感器的通频带（或频响范围）。通常表示为

通频带： $\times\times\times \text{ Hz} \sim \times\times\times \text{ Hz} \quad (\pm \times\times\times \text{ dB})$

或 $\text{DC} \sim \times\times\times \text{ Hz} \quad (\pm \times\times\times \text{ dB})$

只有被测量的变化频率（包括有用谐波频率）在传感器的通频带之内，传感器才能真实地将被测量测量出来。

1.2.2 传感器的其他性能指标

由于使用传感器的条件和环境等的差异，对传感器其他性能指标的要求也不同，通常还应考虑的性能指标有以下几项。

1.2.2.1 稳定性

稳定性表示传感器维持其性能参数（如灵敏度、线性度等）长时间不变化的能力。如

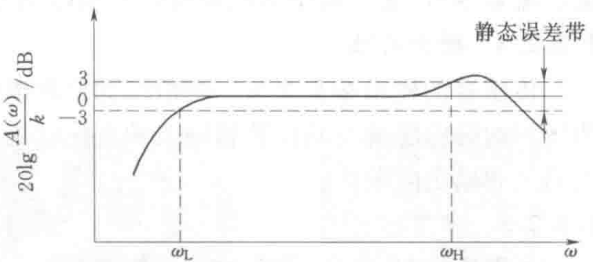


图 1.2-10 传感器的对数幅频特性曲线