

传感器应用技术

王之芳 主编

西

2212

449

出版社

西北工业大学出版社

403310

传感器应用技术

王之芳 主编

王之芳 陈如珍

刘治华 刘崇华

编



西北工业大学出版社

1996年2月 西安

(陕)新登字第 009 号

DV22/2410

【内 容 简 介】 本书是根据航空航天工业部中等专业教材编审委员会批准的教学大纲而编写的大、中专统编教材。

本书从便于学习及使用者对传感器选型、类比等实用性出发,以力学量、运动量、压力、温度、流量及液位等参数测试为主线,按传感器的用途分章讲述各类传感器的工作原理、结构、技术性能指标、使用特点、参数选择以及传感器的一般特性、校验、标定方法、选型依据等。取材实用、结构新颖。

本书可作为大、中专仪器仪表类及工业自动化等专业教材,亦可供有关专业人员选修及工程技术人员参考。



传感器应用技术

主 编 王之芳

责任编辑 郑永安

责任校对 钱伟峰

*

© 1996 西北工业大学出版社出版发行

(710072 西安市友谊西路 127 号 电话 8493844)

陕西省新华书店经销

西安丰华印刷厂印装

ISBN 7-5612-0833-2/TN·47

*

开本:787×1092 毫米 1/16 16.5 印张 401 千字
1991 年 12 月第 1 版 1996 年 2 月第 2 次印刷
印数:5 001—8 000 册 定价:15.00 元

前 言

传感器是 80 年代以来国内外迅速发展起来的一项高技术产品, 是感受或敏感规定的被测物质量并按一定规律转换成可用信号的元器件或装置。传感器与整机或系统结合起来, 发挥其准确、及时获取并发送信息的作用, 从而解决信息处理飞速发展与获取信息大大落后这二方面之间的矛盾。传感器的研究、生产、应用水平直接影响着电子、仪器仪表与自动化技术的发展和运用。可以说, 传感器、通信、计算机技术是作为技术革命基础的信息技术的三大支柱, 缺一不可, 其中最关键的往往是传感测量技术。

鉴于传感器在仪器仪表与控制系统中的重要地位和作用, “传感器应用技术”课程必然是仪器仪表及自动化等专业的主要专业基础课之一。

本教材根据航空航天部大、中专仪器仪表类专业教材会议所拟订、并经部中等专业教材编审委员会批准的教学大纲编写。取材实用、结构新颖。

传感器是一个知识密集和技术密集的行业, 对高新技术非常敏感, 能够最快地吸收微电子技术、计算机技术、激光技术、超声超导技术、核磁技术、生物技术等最新科技成果。开拓出一代又一代新的产品。原理分散、种类繁多。为了使本材料既具有教科书所要求的严密的系统性和一定的理论性, 更具有能解决工程实际问题的实用性, 因此本教材编写贯穿了如下特点:

(1) 目前高等院校的教材大多以设计开发为重点, 按传感器的工作原理来分章, 而国内外多数传感器以功能命名, 因此本教材基本上采取按用途分章的方法, 便于使用者对传感器类比、选型, 突出了教材的实用性。

(2) 内容的选取基本上根据我国当前工业生产及科研应用的实际情况, 论述传感器的技术基础、性能指标及评价手段等, 体现了专科教材既具有必要的理论性但更偏重于工程实践的特色。

(3) 由于传感器多在苛刻条件下使用, 故本教材除了阐述被测量的转换关系外, 还研讨在使用中种种其他因素对输出量的影响及相应的技术措施。使之在工程应用方面具有一定的参考价值。

本教材的主要内容是根据实际应用的需要讲述传感器的工作原理、结构、技术性能指标、特点及使用时的注意事项等。并介绍传感器的一般特性、校验、标定方法及选型依据。

本书由西安航空工业专科学校副教授王之芳主编, 西安航空工业专科学校王之芳编写绪论、第一章; 成都航空工业学校高级讲师刘治华编写第二章、第八章的第一、二节; 高级讲师刘崇华编写第三章; 西安航空工业专科学校讲师陈如珍编写第四、五、六、七章及第八章第三节。

本书可作为大、中专仪器仪表类及工业自动化等专业的教材, 亦可供其他专业作选修教材以及有关专业的工程技术人员参考。

本书由北京航空航天大学教授梁怀璧主审。1989 年 12 月在成都召开了本教材初稿的审稿会。在教材编写过程中高级讲师刘明品、高级讲师华达刚等提出了宝贵意见、在此表示衷

心的感谢。

由于编者水平所限，不当之处，恳请读者批评指出。

编 者

1991年1月22日

目 录

绪论	1
第一章 传感器的一般特性	6
第一节 传感器的静态特性	6
第二节 传感器的动态特性	15
第三节 传感器的误差分析	26
思考题与习题	35
第二章 测力传感器	36
第一节 概述	36
第二节 两种测力原理	38
第三节 典型测力传感器	66
思考题与习题	88
第三章 运动量传感器	91
第一节 概述	91
第二节 电阻式传感器	91
第三节 磁电式传感器	94
第四节 电感式传感器	99
第五节 涡流式传感器	107
第六节 电容式传感器	110
第七节 光电式传感器	114
思考题与习题	123
第四章 压力与差压传感器	125
第一节 概述	125
第二节 基本测量原理	127
第三节 压力与差压传感器	133
思考题与习题	141
第五章 流量及物位传感器	143
第一节 概述	143
第二节 差压式流量传感器	146
第三节 容积式流量传感器	152
第四节 速度式流量传感器	154
第五节 其他流量传感器	157
第六节 物位传感器	167

思考题与习题	181
第六章 温度传感器	182
第一节 概述	182
第二节 热电偶传感器	183
第三节 热电阻传感器	194
第四节 热辐射式测温仪表	203
思考题与习题	215
第七章 其他传感器	217
第一节 光纤传感器	217
第二节 气敏传感器	222
第三节 湿度传感器	229
思考题与习题	235
第八章 传感器的标定	236
第一节 概述	236
第二节 标定方法	236
第三节 提高标定精度的措施	254
第四节 选择传感器的一般依据	255
思考题与习题	256
参考文献	258

绪 论

一、传感器的定义及其地位与作用

(一) 传感器的定义与组成

传感器是一种以一定精度和某些转换功能，将外界信号（即被测量），转换成可以直接测量的信号装置。它有如下几个方面的含意：

①传感器是检测装置，能完成检测任务；②被测量（输入量），可能是物理量，也可能是化学量、生物量等；③它的输出量是某种物理量，这种量要便于传输、转换、处理、显示等等；④输出输入有对应关系，应有一定的精确度。简而言之，传感器的功用是一感二传，即感受被测信号，并以一定的精度和方式传输出去。

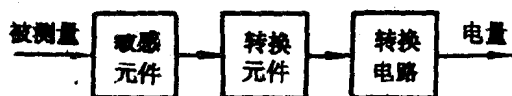


图 0-1 传感器组成框图

传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路等三部分组成，组成框图如 0-1 图所示。

敏感元件，它是感受被测量，并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。图 0-2 是一种气体压力传感器的示意图。膜盒 2 的下半部与壳体、固接，上半部通过联杆与磁芯 4 相连，磁芯 4 置于两个电感线圈 3 中，后者接入转换电路 5。此处的膜盒即敏感元件，其外部与大气压力 p_0 相通，内部感受被测压力 p ，当 p 变化时，引起膜盒变形向上移动，即输出相应的位移量。

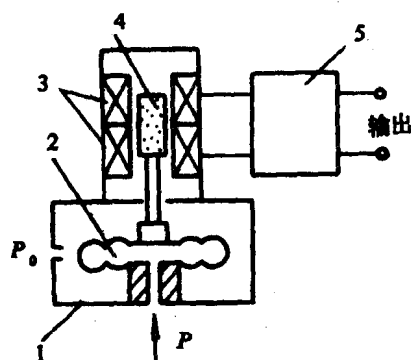


图 0-2 压力传感器

转换元件：敏感元件的输出就是它的输入，它把输入转换成电路参数量。在图 0-2 中，转换元件是可变电感 3，它把输入的位移量转换成电感的变化。

转换电路：上述转换元件电路参数接入转换电路，转换成电量输出。

实际的传感器有简有繁，且多数为开环系统，但也有带负反馈的闭环系统。最简单的传感器由一个敏感元件（兼转换元件）组成，它将感受的被测量直接输出，如热电偶就是一例。有的传感器仅有敏感元件与转换元件，在结构上它们常组装在一起。带转换电路的传感器，其转换电路可以与敏感元件、转换元件组装在一起，也可根据需要将其装在电路箱中，不管它置于何处，只要它是起转换输出信号的作用，仍为传感器的组成部分，但它之后的放大、处理、显示等电路，则不应包括在传感器范围之内。

(二) 传感器在科技发展中的地位与作用

科学技术的发展目的，无非是用机器代替，改善和扩充人类的体力劳动和脑力劳动，以提高生产力。人类从原始的劳动工具进化到现代的技术设备，为解放人类的繁重体力劳动曾作出过巨大贡献，近代电子计算机的出现，较完善地代替与扩充了人们的脑力劳动，因而大

大地提高了劳动生产率。现在各种机器人的出现尤以智能机器人的出现，必将更加理想的代替与扩充人类的体力劳动和脑力劳动。机器与人的机能对比如图 0-3 所示，人的头脑相当于电子计算机，肌肉相当于执行器，而五种感官（视觉、嗅觉、听觉、味觉和触觉）则相当于传感器。感官对人的重要性尽人皆知，也就不难理解传感器在整个自动控制系统中所占的重要地位了。尤其是在信息化社会的今天，传感器的地位则更为重要，这是因为它能将各种物理量、化学量和状态等变换成各种有用信号加以输出。因此，传感器已成为实现自动控制和自动检测等的首要环节。可以说，没有传感器精确可靠的测量与传递信号，就不可能有精确可靠的自动检测和控制。近代微电子技术和计算机为信息的转换与处理提供了极其完善的手段，同时近代检测与控制系统正在经历着重大的变革，但是，如果没有各种传感器去检测大量原始数据并提供信息，那末，电子计算机也无法发挥其应有的作用。因此，传感器与电子计算机的发展是并驾齐驱的。

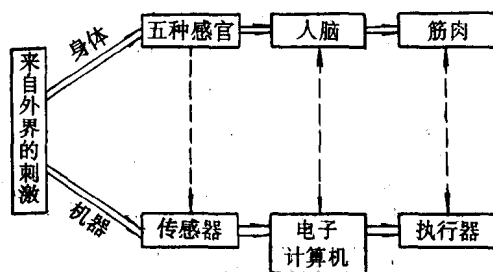


图 0-3 人体与机器的对应关系

在现代飞行器上，装备着许多显示与控制系统，以保证各种飞行任务的完成。在这些系统中，传感器首先对反映飞行器的飞行参数和姿态、发动机工作状况的各种物理参数加以检测，并显示在各类显示器上，供驾驶员和领航员控制和操纵飞机，或提供信息而自动控制飞行。现代化的大型企业也可以通过传感器的各种信息显示于中央控制台，集中加以控制或自动协调控制其运转。

近年来，传感器在生物医学和医疗器械工程方面也显示出了广阔的前景。它将人体内各种生理信息转换成工程上容易测定的量（一般为电量），从而正确的显示出人体生理信息。传感器还广泛地用于人们的日常生活，如家用电器中温度和湿度的测控，煤气泄漏或室内烟气污染的报警与自动通风等等。

总之，传感器在科学研究、工业自动化、非电量电测仪表、医用仪器、家用电器、航空、航天、军事技术等方面都起着极为重要的作用，传感器技术的发展是直接影科学技术进步的重要因素之一。

我国在旧社会，根本谈不上自己的科学研究与工业基础，传感器工业生产水平等于零。解放后在党的正确领导下，科学研究与工业生产在短短的三四十中有了飞速的发展，仅传感器工业，就有了近千家生产厂家（包括专兼营在内），相信我国在实现四个现代化的历程中，传感器技术的科研、生产与应用必将得到进一步的发展，不久将会步入世界先进行列。

二、传感器的分类

传感器是一个知识密集、技术密集的行业，它与许多学科有关，它的种类繁多，有的传感器可以同时测量多种参数，而有时对于一种物理量又可用多种不同类型的传感器测量，因此，传感器的分类方法很多且不统一，但为了很好地掌握与应用它，现将常用的分类方法列于表 0-1 中。

表 0-1 传感器的分类

分类方法	传感器的种类	说 明
按输入量分类	位移传感器、速度传感器、温度传感器、压力传感器等	传感器以被测物理量命名
按工作原理分类	应变式、电容式、电感式、压电式、热电式等	传感器以工作原理命名
按物理现象分类	结构型传感器	传感器依赖其结构参数变化实现信息转换
	物性型传感器	传感器依赖其敏感元件物理特性的变化实现信息转换
按能量关系分类	能量转换型传感器	传感器直接将被测量的能量转换为输出量的能量
	能量控制型传感器	由外部供给传感器能量, 而由被测量来控制输出能量
按输出信号分类	模拟式传感器	输出为模拟量
	数字式传感器	输出为数字量

三、传感器技术的现状与发展

人类利用传感器来代替或补充感觉器官功能的技术先于近代科学的出来, 但随着近代科学的发展它又得到了进一步的提高和发展, 并占有着重要地位。

由于新工艺、新材料、新原理的出现, 机械结构型传感器在精度、稳定性等方面有了极大的提高, 如最近出现的谐振式、石英电容式等一些稳定可靠的高精度传感器。迄今为止, 结构型传感器在国防、工业自动化、自动检测等许多领域中仍占有较大的比重。由于近代材料科学的发展, 如大量的半导体材料、功能陶瓷和功能有机聚合物, 为物性传感器的发展, 提供了坚实的物质基础, 更由于宽广的市场需求, 刺激了各类廉价物性传感器的发展, 促进了传感器的小型化, 但因物性敏感元件的基础工艺要求高 (如半导体的大规模集成技术、超净与细微工艺等), 稳定性较差, 在一些要求高可靠、高稳定的使用场合以及恶劣环境条件下, 目前应用尚受到一定限制, 然而, 物性传感器必将在其不断提高性能的进程中得到发展。

近年来, 微电子技术及微处理机技术进入传感器领域之后, 传感器出现了新的突破。传感器与微电脑的有机结合, 可以将获得的信息进行存储、数据处理、控制及打印, 从而扩展了功能, 提高了精度, 而且在对环境条件的自适应性, 对信息的识别等方面, 大大优于传统的单功能传感器, 此类传感器称之为智能传感器。目前, 人们对传感器的智能化极为关注, 正广泛开展研究。

此外, 还有许多利用新原理创制的各种新型传感器, 也在不断地涌现出现, 如一种响应速度极快的红外探测器, 就是根据超导体量子力学的隧道效应, 即约瑟夫逊效应制成的传感器, 它对光通信的贡献非常大。以及目前十分引人注目的一种采用新材料与新工艺制成的能把光学图像信号, 转换成电信号的一种功能型传感器等等。总之, 目前传感器发展迅速, 不

断涌现新型产品,其发展的超势是小型化、集成化、智能化等等,现简述如下:

(一) 集成化、功能化

集成化的含意有二:一是将同一类型的单个传感器,在同一平面上排列起来,排成一行者为线型传感器,排列成二维阵列者为面型传感器,而且将会向三维空间以及包括时间在内的四维空间发展。集成化的第二个含意,是把传感器与放大、运算及温度补偿等环节一体化,从而组装成一个器件,构成组合传感器。

所谓功能化,是当其除具有信号转换功能外,还具有温度补偿、信号处理等功能,称为功能化。功能化的另一含意,是将一种传感器与其他功能复合,从而导出新的功能。例如,把温度传感器与开关电路集成为一体的“热敏可控硅器件”,就兼有测温及开关电路两种功能。同时具有两种以上功能的传感器,称为多功能传感器。

(二) 追求检测下限

借助量子力学诸效应,追求逼近检测下限,是现代传感器技术发展的又一趋势。例如,利用核磁共振吸收效应的磁敏感元件,可将检测下限扩展到地磁场强度的 10^{-7} ;利用约瑟夫逊效应的热噪声温度传感器可测量 10^{-6} K的超低温温度。极微弱信号的正确检测,往往导致新技术的萌芽,从而给生产带来巨大效益,甚至使一些新学科诞生。

(三) 开拓新领域

现在开发的传感器以物理型传感器居多。化学型和生物型传感器还应积极开发与研究。另外未开发的领域还很多,例如气敏传感器等。

(四) 智能化

随着微型计算机向着高速、高性能、低成本方向的发展,传感器也向着集成化、功能化方向发展。这两种相互吻合的趋势,促使“智能传感器”诞生。因此,智能传感器是传感器与微型计算机两者相互结合的产物。

智能传感器不仅能进行外界信号的测量、转换,同时还具有记忆、存储、解析以及统计处理等功能。智能传感器的出现,将庞杂的数字处理由集中型处理变为分散型处理。这样一方面可以保证数据处理的质量,同时也可以减低所用计算机的成本。但开发智能传感器的首要任务是研制与微机相匹配的传感器。

智能传感器可分为三种:具有判断能力的传感器,现在所说的智能传感器多指此种;具有学习能力的传感器;具有创造能力的传感器,即具有理解与思考的能力。后两种传感器的研究工作尚有不少困难,还须大力开展研究工作。

四、课程简介

本课程是仪器仪表与测试技术专业的一门应用性较强的专业基础课。也可以作为工业电气自动化与计算机应用专业的基础课。

本课程的任务在于使学生重点掌握常用传感器的工作原理、结构、用途、输出特性、误差分析及补偿方法、性能指标及优缺点等。初步具有合理选用传感器的能力,应熟悉常用传感器在仪器仪表及测试系统中应用时应注意的问题等等。大专学生与中专生除了在各部分内容上有深度的区别外,大专学生尚应较深入的掌握性能指标、精度及可靠性分析等。本课程以结构型传感器为主,对新型传感器的内容作一般介绍(智能传感器编入智能仪表课程),讲授时可根据情况取舍,但均应了解其基本原理、特性及适用范围等。

由于传感器属交叉学科,涉及的知识面较广,其原理主要基于各种物理、化学现象和物理化学效应,在转换过程中又多以电与磁为基础,而测量电路又常以模拟数字电路为基础,智能传感器还需要微机和汇编程序设计等方面的知识。因此,在学习传感器前还应较好地掌握包括数学、力学在内的基础知识。但本课程是一专业基础课,是为测试技术及仪器仪表等专业课服务的,因此,对传感器知识的掌握与学习专业课是直接相关的。

尽管目前传感器技术尚不能完全满足科学技术发展的要求,但传感器已是种类繁多的产品,具有交叉学科的分散型技术,这就要求读者知识广泛。此外传感器多数是在比较苛刻的条件下使用,为保证其可靠工作,必须采用各种相应的技术,故而传感器又是一种知识密集型技术。因此,要成为优秀的传感器工程技术人员,不但要具有扎实的理论基础和多学科的综合知识;还要有传感器应用技术的系统的理论与实际知识。

思考题与习题

1. 何谓传感器与转换装置,两者有何区别?
2. 一般传感器由哪些部分组成,是否所有传感器都具有这些组成部分,为什么?
3. 传感器与现代科技和生产发展有何联系?

第一章 传感器的一般特性

为了更好地掌握和使用传感器, 必须事先充分地了解传感器的特性。传感器的特性就是对输入与输出对应关系的记述。

人们希望传感器无论在什么情况下其输入和输出都具有——对应的关系, 这是最理想的传感器特性, 实际上这样的特性是难于得到的。如果我们把传感器看成是输入信号 x 和输出信号 y 的变换器, 则信号 y 是信号 x 的函数。当输入信号不随时间而变化时其特性称静态特性, 当输入信号随时间而变化的特性为动态特性。故在分析传感器特性时, 常以静态特性或动态特性来加以分析考察。

信号随时间变化很缓慢的过程称为拟静态过程, 这种信号变换的规律, 基本上可以用静态特性来代替。

第一节 传感器的静态特性

静态特性可用输入信号 x 与输出信号 y 之间的函数关系

$$y = f(x)$$

表示。也可将其对应数据制成表格与画成曲线表示。传感器的静态特性是在静态标准条件下进行校准的。静态标准条件一般是指没有加速度、振动和冲击(这些物理量本身为被测参数时除外); 环境温度一般为室温 $20^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$; 相对湿度不大于 85%; 大气压力为 0.1MPa 的情况。在这样的标准工作状态下, 利用一定等级的校准设备, 对传感器静特性进行反复测试而取得。静特性可如图 1-1 所示。

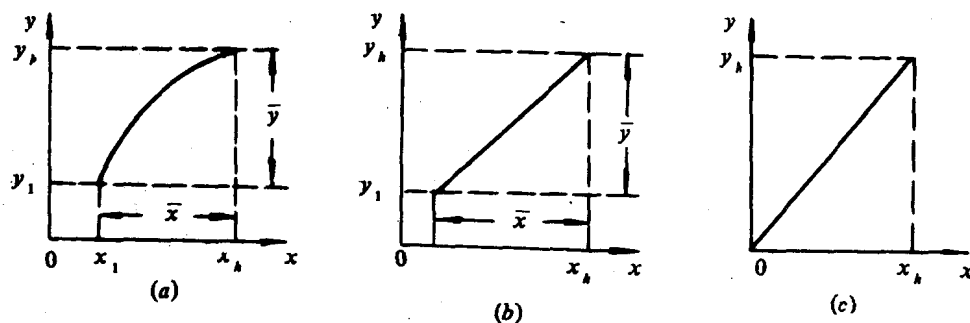


图 1-1 静态特性图

(a) 是经过坐标原点的非线性特性; (b) 是不经过坐标原点的线性特性; (c) 是不经过坐标原点的非线性特性, 此外还有经过或不经过原点的各种曲线等。

信号 x 和信号 y 的最小值 x_1 和 y_1 叫作测量下界限值, 其最大值 x_h 和 y_h 叫作测量的上界限值。

测量上界限值与测量下界限值的差值, 就是传感器的测量范围。

对输入信号 $\bar{x} = x_h - x_l$

对输出信号 $\bar{y} = y_h - y_l$

$\bar{x}$ 与 $\bar{y}$ 即表示测量范围。任何传感器, 由于结构等原因, 工作范围不可能是无穷的, 一般都选最佳特性区作为测量范围。

静态特性 $y = f(x)$ 函数, 若忽略其迟滞等因素, 其完整方程式可用下列多项式来表示

$$\begin{aligned} y &= a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots + a_n x^n \\ &= a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x^i \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 x ——输入量;

y ——输出量;

$i = 1, 2, \cdots, n$;

a_0 ——零位输出;

a_1 ——传感器的灵敏度, 常用: $a_1 = k = \frac{y}{x} = \text{常数}$ 来表示;

$a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——非线性项的待定常数, 在理想线性时, $a_0 = a_2 = a_3 \cdots = a_n = 0$
因此 (1-1) 式变为

$$y = a_1 x$$

显然上式为一通过原点的理想直线, 其中 $a_1 = k = \frac{y}{x}$, 等于常数。

(1-1) 式的其余解, 为各种形式的曲线, 但计算过程较复杂。在误差允许范围内, 可具体决定取几阶函数方程的解来处理。

在实现传感器中, 其输入与输出特性关系常常不完全符合所要求的线性和非线性的关系。因此, 常以其主要指标如灵敏度、线性度、迟滞和重复度等来衡量传感器的静态特性, 现分析如下。

一、灵敏度

输出信号的增量 Δy 与输入信号增量 Δx 比值的极限值, 表示传感器的灵敏度 k , 其含意是有一小的输入信号, 而能获得大的输出信号的传感器具有高的灵敏度, 其表达式为

$$k = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{\text{输出量的变化量 } \Delta y}{\text{输入量的变化量 } \Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (1-2)$$

式中 k 表示传感器的灵敏度。

对于线性传感器, 它的灵敏度就是它的静态特性的斜率, 亦即 $k = \frac{y}{x}$ 为一常数, 而非线性传感器的灵敏度为一变量, 如图 1-2(b) 所示, 其灵敏度为 $k = dy/dx$ 。 k 的量纲是输出量与输入量的量纲之比。一般希望传感器的灵敏度高, 在满量程范围内是恒定的, 即传感器的输出与输入特性为直线的。在允许的情况下, 非线性传感器的灵敏度, 可用输出与输入信号测量范围 $\bar{y}$ 与 $\bar{x}$ 的比值表示, 叫作传感器的平均灵敏度 $\bar{k}$, 其表达式为

$$k = \frac{y}{x}$$

(1-3)

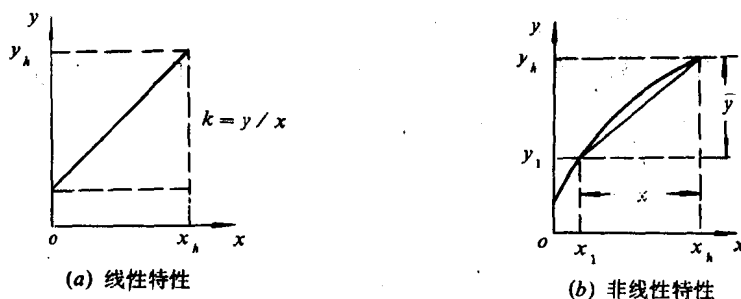


图 1-2 灵敏度特性

二、线性度

对于实际的传感器，测出的输出与输入校准曲线与某一规定（理论）直线的偏离程度，在线性传感器中就称为该传感器的“非线性误差”，或称“线性度”。常用相对误差表示其大小，即传感器的正行程平均校准曲线与线性理论直线之间最大的偏差绝对值和被输出测量范围之比，并用百分数表示

$$\xi_L = \frac{|\Delta y|_{\max}}{\bar{y}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 ξ_L ——非线性误差(线性度)；

$|\Delta y|_{\max}$ ——输出平均值与理论值的最大偏差绝对值；

$\bar{y}$ ——输出的测量范围，此处亦取绝对值，即 $\bar{y} = |y_h - y_L|$ 。

由此可见，非线性误差的大小是以规定的直线即理论直线作为基准直线而算出来的。因此基准直线不同，得出的线性精度也不一样，如图 1-3 所示。

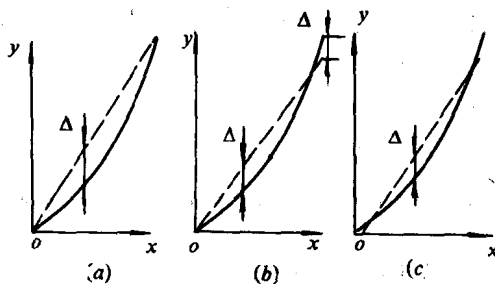


图 1-3 不同拟合方法的理论直线

传感器校准时所得的数据总是包括有各种误差，所以，一般并不要求规定直线必须通过

所有的测试点，而只要找到一条能反映校准数据的一般趋势，同时又使误差绝对值为最小的直线就行。但是，采用的规定直线即理论直线不同时，线性度即有差异。因此，在相同条件下对同一传感器作校准试验时，得出的线性度大小就不一样，因而不能笼统地提线性度大小，必须同时要说明其所依据的规定直线。由上述可知，会有许多不同的线性度的计算与表示方法，现介绍几种常用方法。

(一)理论线性度(绝对线性度)

任一传感器的实际输出校准曲线与具有某斜率的理论直线的线性度称为理论线性度或绝对线性度。理论直线与实际测试值无关。通常取零点(0%)作为理论直线的起始点，满量程输出(100%)为终止点，这两点的连线即为理论直线如图1-4所示。(此图误差画大为了讲清原理，实际值要小得多。)

(二)独立线性度

选择理论直线的一个简便方法是：在校准曲线中找出一条最佳平均直线，并使实际输出特性相对于所选理论直线的最大正偏差等于最大负偏差，如图1-5所示。可以看出在考虑独立线性度的情况下，非线性误差计算公式应写为

$$\xi_L = \frac{|+(\Delta y)_{\max}| + |-(\Delta y)_{\max}|}{2y_h} \times 100\% \quad (1-5)$$

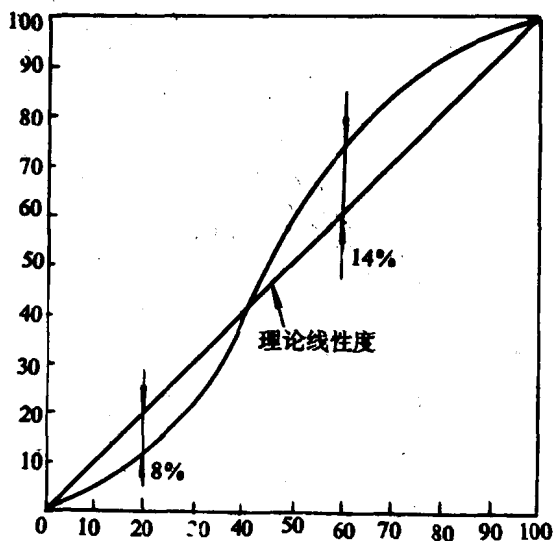


图 1-4 理论线性度的理论直线

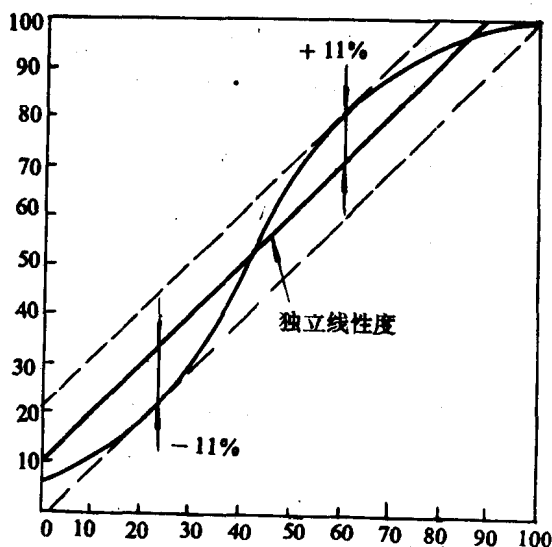


图 1-5 独立线性度的理论曲线

(三)端点线性度

将传感器的实际零点和满量程端点连线作为理论直线，传感器特性线与上述直线的最大偏差称为端点线性度。所以，要求出端点非线性误差，则必须测出实际零点和满量程端点。

端点连线的斜率为

$$k = \frac{y_h - y_l}{x_h - x_l}$$

式中 x_l —— 传感器测量下限;

x_h —— 传感器测量上限;

y_l —— 传感器测量下限的输出值;

y_h —— 传感器测量上限的输出值。

端点连线的截距 b 为:

$$b = \frac{y_l x_h - y_h x_l}{x_h - x_l}$$

端点连线方程式为

$$y = \frac{y_l x_h - y_h x_l}{x_h - x_l} + \frac{y_h - y_l}{x_h - x_l} x \quad (1-6)$$

当测量下限 $x_l = x_1 = 0$ 时, 则端点连线方程为

$$y = y_l + \frac{y_h - y_l}{x_h} x \quad (1-7)$$

若传感器在满量程的 70~80% 间使用时, 可不必用零点与满量程端点连线作理论直线, 而用实际零点与 70~80% 量程处的端点连线作理论直线, 由此而得的线性度称定点线性度。

端点连线的计算比较简单, 但以端点连线作为理论直线时, 在整个测量范围内的误差分配常是不均匀的, 而最大误差值总是较大。

为了克服上述缺点, 可用端点连线平行移动法, 使整个测量范围内最大正误差与最大负误差的绝对值相等位置的那根直线, 如图 1-7 所示的 CD 线。

由图 1-7 知 CD 线的截距应为

$$b = \frac{y_l x_h - y_h x_l}{x_h - x_l} + \frac{|(\Delta y)'_{\max}| - |(\Delta y)''_{\max}|}{2} \quad (1-8)$$

式中 $(\Delta y)'_{\max}$ —— AB 线 (端点连线) 的最大负偏差;

$(\Delta y)''_{\max}$ —— AB 线的最大正偏差。

斜率仍为

$$K = \frac{y_h - y_l}{x_h - x_l}$$

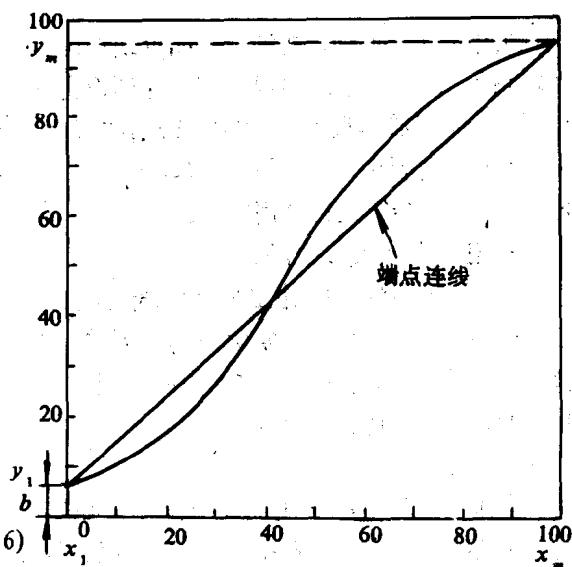


图 1-6 端点连线

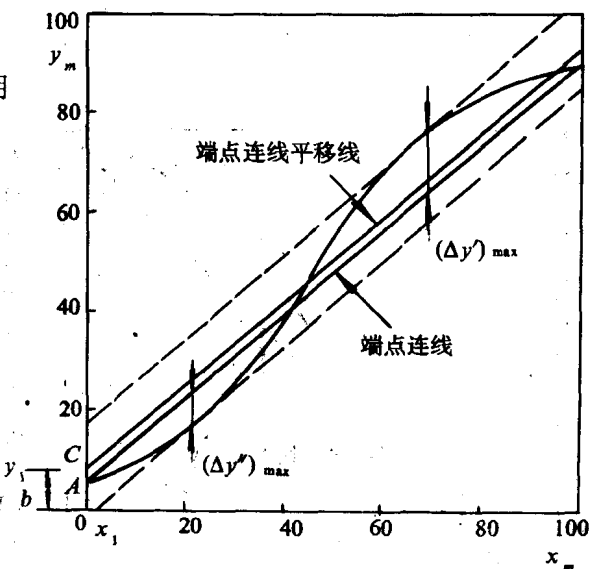


图 1-7 端点连线平移线