

数字式

SHUZISHI
WUWEI JIANCE JISHU

物位检测技术

周义仁 吕青 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

数字式 物位检测技术

周义仁 吕青 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以独特的视角论述了物位检测中的数字化技术,内容包括:绪论、电阻式数字物位检测技术、电容式数字物位检测技术、温度式数字物位检测技术、压力式数字物位检测技术、光电式数字物位检测技术、集成芯片式数字物位检测技术和磁敏式数字物位检测技术。本书内容新颖,资料翔实,条理清晰,结构合理,注重理论与实际的联系。

本书适用于水利、化工、石油、矿业、建材和能源等行业从事物位检测技术的工程技术人员,也可供高等院校电子信息工程、水利信息化工程以及测控与仪器仪表类专业的本科生和研究生使用。

图书在版编目(CIP)数据

数字式物位检测技术 / 周义仁, 吕青编著. — 北京
中国水利水电出版社, 2011. 11
ISBN 978-7-5084-9148-6

I. ①数… II. ①周… ②吕… III. ①数字技术—应用—物位计量 IV. ①TB938. 1-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第229379号

书 名	数字式物位检测技术
作 者	周义仁 吕青 编著
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 (发行部)
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	北京市兴怀印刷厂
规 格	175mm×245mm 16开本 10.75印张 211千字
版 次	2011年11月第1版 2011年11月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	29.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本书是作者在 10 多年从事物位传感器与检测技术的科研实践和教学的基础上,吸收该领域先进资料的精华编著而成的。

物位检测传感器作为一种特殊的测量传感器在工业测控领域中有着非常重要的地位,物位的检测对于促进生产过程的自动化有着非常重要的意义。物位测量的目的在于正确地测量容器或设备中储藏物质的容量或质量,它不仅是物质消耗量或产量计数的参数,也是保证连续生产和设备安全的重要参数。特别是现代化工业生产过程中,生产规模大,反应速度快,常会遇到高温高压、易燃易爆、强腐蚀性或黏性大等多种情况,对物位的自动检测和控制更是至关重要。但目前物位的检测技术几乎全是模拟量物位传感器,如超声波式、电容式、电阻式、重锤式、雷达式等。它们的共同的特点是模拟量检测方式易受温度、大气压强、电磁波等环境条件的影响,使传感器的稳定性、可靠性、抗干扰性等无法适应使用条件的要求,应用范围受到了很大局限。

针对这种情况,作者结合自己 10 多年来的科研成果,提出了数字式物位检测技术,其中热敏式数字物位检测技术和压力式数字物位检测技术两项科研成果已获得国家发明专利,研制的“数字感应水位检测系统及其应用”获得山西省科技进步二等奖,“数字化物位检测传感器的研究”获得教育部技术发明二等奖,专用集成电路芯片 7710 和 7720 获得国家集成电路布图设计登记,由此研发了检索式数字水位传感器。

本书以数字化检测技术为核心,结合传感器技术、微计算机技术和电子信息技术,介绍数字式物位检测技术的内容、方法、机理和应用。全书共包括 8 章内容:绪论、电阻式数字物位检测技术、电容式数字物位检测技术、温度式数字物位检测技术、压力式数字物位检测技术、光电式数字物位检测技术、集成芯片式数字物位检测技术、磁敏式数字物位检测技术。前 4 章由周义仁副教授编写,后 4 章和参考文献由吕青副

教授编写，全书由周义仁副教授进行统稿。

这本书从手稿到最后的成书蕴含了许多人的努力，硕士研究生朱雪庆、陈娟和薛雅婷等都付出了很多辛勤的劳动，吴建华教授、徐利华高级工程师和申红兵高级工程师在编写过程中提出许多宝贵的意见和建议，在此对他们表示衷心的感谢！

由于本书涉及的传感器应用电路较多，加之时间仓促和编者水平有限，难免存在疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

周义仁

2011年8月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 数字式物位检测技术	6
第2章 电阻式数字物位检测技术	8
2.1 电位器式传感器	8
2.2 电阻应变式传感器	11
2.3 固态压阻式传感器	26
2.4 电阻式数字物位检测技术	29
第3章 电容式数字物位检测技术	36
3.1 电容传感器的检测原理	36
3.2 电容传感器的电容检测电路	39
3.3 电容物位传感器概况	45
3.4 电容式数字物位检测技术	47
第4章 温度式数字物位检测技术	59
4.1 温度的检测机理	59
4.2 温度式传感器的检测电路	69
4.3 温度式数字物位检测方法	74
4.4 温度式数字物位检测技术的特点	78
4.5 温度式数字物位检测技术的应用	80
第5章 压力式数字物位检测技术	85
5.1 压力传感器概况	85
5.2 压阻式压力传感器	87
5.3 压电式压力传感器	91
5.4 数字式侧压力物位检测技术	95

第 6 章 光电式数字物位检测技术	107
6.1 光电式传感器的检测机理	107
6.2 光电式传感器的检测电路	111
6.3 光电式数字物位检测技术	116
第 7 章 集成芯片式数字物位检测技术	126
7.1 集成芯片的发展及其检测机理	126
7.2 电路集成的可行性实验	127
7.3 集成芯片电路	128
7.4 集成电路的技术参数	133
7.5 集成芯片式数字物位检测的方法和特点	133
7.6 集成式数字物位检测技术的应用	135
第 8 章 磁敏式数字物位检测技术	138
8.1 磁敏式传感器的检测原理	138
8.2 磁敏式传感器测量电路	145
8.3 数字式磁敏物位检测技术	148
参考文献	157
后记	165

第1章 绪 论

1.1 概 述

1.1.1 物位检测的概念

物位是指存放在容器或工业设备中物质的高度或位置。如液体介质液面的高度称为液位，液体—液体或液体—固体的分界面称为界位，固体粉末或颗粒状物质的堆积高度称为料位。液位、界位及料位的检测统称为物位的检测。

1.1.2 物位检测的意义

物位测量传感器作为一种特殊的测量传感器在工业测控领域中有着非常重要的地位，物位的检测对于促进生产过程的自动化有着非常重要的意义。物位测量的目的在于正确地测量容器或设备中储藏物质的容量或质量。它不仅是物质消耗量或产量计数的参数，也是保证连续生产和设备安全的重要参数。特别是现代化工业生产过程中生产规模大、反应速度快，常会遇到高温高压易燃易爆强腐蚀性或黏性大等多种情况，对物位的自动检测和控制更是至关重要。

当今时代，以数字化技术为代表的高新技术突飞猛进，自动化技术、信息技术以及网络技术的结合与应用，孕育了大量的新兴产业，并为传统产业注入新的活力，但在检测技术领域，尤其在物位检测方面进展不大。尽管国内外的各研究机构、各大公司都投入了大量的人力、物力和财力进行研究，使传感器技术方面取得了快速的发展，诸如超声、电容等各种传感器可靠性稳定性有了大的提高，但由于没有在理论上取得突破，仍停留于传统的检测机理之中，导致了国内外在本领域的研发进展比较慢。生产实际中还存在很多尚未解决的技术问题，尤其是一些特定环境下的检测难题，如煤矿、电厂、冶金、化工等行业的料位检测，大多都还是依靠人工监测，不少单位也投了不少资金安装自动化设备，但大多都是设备闲置或拆除，由于这些行业的传感器工作现场条件不稳定，处于高湿度、高温度和高粉尘等恶劣环境中，现有传感器一直没有能很好解决现场适应性、可靠性问题，制约了这些行业工业自动化水平的提高，成为大家公认的技术“瓶颈”，是国际上都在积极解决的自动化难题之一。

检测技术是自动化技术的前提，传感器的数字化检测技术更是计算机发展对检

测技术提出的迫切要求。

1.1.3 物位检测技术的发展现状

目前,使用的物位传感器主要有超声波式、电容式、重锤式、电接点式、雷达式等几种。它们的工作原理及性能特点分别介绍如下。

1. 超声波式物位仪

超声波式物位仪采用气介式脉冲回波定位方法,是利用超声波在空气中的传播来测量空间距离的新型测量仪器,它以非接触方式测量料位、液位高度。其基本原理是:发射换能器由超声波信号发射机提供的电振荡脉冲所激励,产生机械振动,向空中辐射出超声波,并以一定的速度向前传播,当到达反射面后,一部分声能被反射回来,并作用到接收换能器上,接收换能器受到这种回波的作用后,产生机械振动并在换能器的两极板上激发起微弱的振荡电压。这种回波信号经放大后,送入数据处理器。声波从换能器到反射面的距离为 s , 超声脉冲在气体介质中的传播时间为 t , 传播速度为 c , 则 $s = ct/2$ 。

超声波回波定位方法可以用来测量作业现场的液位或料位。两者测位的基本原理是回波定位,但实际上两者在应用声学原理时并不一样。简单地说,液面可以看作性能单一的镜面,遵循镜面反射原理,其反射波是相干的;而料面情况则非常复杂,物料的粒度分布、散射能力、吸声特性等都是无规则的,因此其反射波是非相干的散射波。一般情况下,声束与料面并不垂直,因此回波信号并不是由料面的反射波而是由料面上杂乱无章的散射波叠加而成,通过对回波信号的处理得到的料位是平均料位。

超声波式测量其优点是非接触式测量,其缺点是存在工作盲区及测量精度受温度和湿度的影响。超声波的频率越低,距离的衰减越小,但反射效率也越小。当应用在多粉尘环境时,随着粘附在超声料位仪辐射面粉尘的增多,探头的灵敏度会显著降低。

2. 电容式物位传感器

电容式物位传感器是近些年出现的新产品、新技术,它是依靠电容原理而制作的。电容是由两极板和介质构成的,改变介质将改变电容量。这种传感器的测量依据是把物料作为电容的介质,利用物料介电常数不同于空气的介电常数,当物料接触传感器时,引起电容式传感器电容量的变化。其基本工作原理是电容式传感器把料位的变化转换为电容量的变化,通过测量电容量的方法就可以求知料位数值,物料淹没传感器越多,介质填充也越多,电容量越大。通过检测电容量的大小,来检测物料位。此传感器具有结构简单、体积小、分辨力高、可非接触测量等优点,但其受温、湿度影响大。

3. 重锤式物位计

重锤式物位计的工作原理是电机通过绳轮提放重锤。初始时重锤静止在料位量程上限位，此时电机不供电。开始探测时，电闸释放，重锤下降，电机被动地由重锤反拖旋转。探测过程中重锤匀速下降，电机轴端的速度传感器实时地将信号反馈到主控板上的速度比较电路。速度过快或过慢，主控板均能发出信号给三相交流模块。三相交流模块通过控制其导通角来控制电机转矩（电机旋转方向与重锤下降时绳轮旋转方向相反），以平衡重锤下降时对绳轮产生的转矩。当重锤下降速度过快时，电机转矩增加，平衡重锤下降时对绳轮产生的转矩，使重锤下降速度减小，反之亦然。当重锤触料时，重锤对绳轮的转矩突然下降，瞬时速度降至零。速度传感器将信号反馈至主控板，主控板通过三相交流模块控制电机使其转矩达到最大，全速提升重锤，同时将料位信号保持下来。提升至料位量程上限位时，电闸吸合，电机断电。此时一个探测过程结束。待延时至一定时间后，又开始下一次探测。与电机轴相连的角位移变送器角开度与料位量程呈对应关系，因此在探测过程中角位移所发出的信号即为锤位信号。其特点是测量比较准确，但其结构和控制较复杂，难于维护。

4. 电接点式物位计

电接点式物位计利用被测介质的导电性，根据测量电极间阻值的大小来判断料位的高低。电极间电阻有两种状态，当电极间存在被测介质时，阻值小于 $R_{通}$ ；反之，阻值大于 $R_{断}$ 。不同被测介质，其通断阻质不同，但都满足 $R_{通} < R_{断}$ 。料位仪巡回检测各测量点对地电阻的大小确定各电接点的通断情况，经软件处理计算出待测容器中被测介质料位的高低。这种料位计适于导电性的物料位测量，但同时存在接点容易被腐蚀、寿命短的缺点。

5. 雷达式物位计

雷达式物位计是近几年来在水泥厂使用比较广泛的物位测量仪表，它适用于与测量介质非接触连续测量物料的位置。其测量原理是雷达天线通过很短的脉冲波束的形式发射 6.3GHz 或 26GHz 的雷达信号，雷达脉冲接触到介质后被反射回来，雷达脉冲的运行时间与探头到介质表面的距离成正比：

$$d = ct/2$$

式中 d ——雷达探头到介质表面的距离；

c ——光速；

t ——脉冲波运行的时间。

这种测量方式的优点是测量精度高，受环境和介质影响小，不存在机械磨损和介质腐蚀，使用寿命长。其缺点是价格昂贵，有辐射污染，同时安装的技术性要求高。

以上介绍的几种物位测量技术各有其优缺点，同时适用于液位和料位的检测。还有好多方法是只适用于液位检测的，如浮子式传感器、投入式压阻传感器和磁翻板液位计等。以上介绍的测量方法都是模拟量检测技术，本书提出的几种新型物位检测方法，基于物料的导电特性、介电特性、温度特性、压力特性、光电特性和磁敏性等的全数字化物位检测技术所采用的检测原理及方法，是检测技术领域的一个实质性突破。这些技术的产品化，将解决此技术领域的一个技术难题。迄今为止国际上同类研究领域仍未发现有类似的技术和技术产品出现。

市场对这一技术产品的需求是巨大的，随着粉态系列的物料传感器的进一步开发，它将在矿山、电力冶金，建材、化工等领域的物料检测中发挥很大的作用，占据更广阔的市场。这一创新技术产品研发的扩展性很宽，在该技术产品化、产业化过程可开发出若干系统配套产品，可带动信号传输、二次仪表、集成电路设计等相关技术产业的发展，料位测量传感器作为一种特殊的测量传感器在工业测控领域中有着非常重要的地位。

1.1.4 物位检测技术的发展方向

1. 向微型化发展

为了能够与信息时代信息量激增、要求捕获和处理信息的能力日益增强的技术发展趋势保持一致，对于传感器性能指标（包括精确性、可靠性、灵敏性等）的要求越来越严格；与此同时，传感器系统的操作友好性也被提上了议事日程，因此还要求传感器必须配有标准的输出模式。而传统的大体积弱功能传感器往往很难满足上述要求，所以它们已逐步被各种不同类型的高性能微型传感器所取代。后者主要由硅材料构成，具有体积小、重量轻、反应快、灵敏度高以及成本低等优点。计算机辅助设计（CAD）技术和微机电系统（MEMS）技术使得传感器微型化得以变成现实。

2. 向智能化发展

智能化传感器（Smart Sensor）是20世纪80年代末出现的另外一种涉及多种学科的新型传感器系统。此类传感器系统一问世即受到科研界的普遍重视，尤其在探测器应用领域，如分布式实时探测、网络探测和多信号探测方面一直颇受欢迎，产生的影响较大。

智能化传感器是指那些装有微处理器的，不但能够执行信息处理和信息存储，而且还能够进行逻辑思考和结论判断的传感器系统。这一类传感器相当于微型计算机与传感器的综合体，其主要组成部分包括主传感器、辅助传感器及微型计算机的硬件设备。

通常情况下，一个通用的检测仪器只能用来探测一种物理量，其信号调节是由那些与主探测部件相连接着的模拟电路来完成的，但智能化传感器却能够实现所有

的功能，而且其精度更高、价格更便宜、处理质量也更好。

3. 向多功能传感器发展

一般来说，通常情况下一个传感器只能用来探测一种物理量，但在许多应用领域中，为了能够完美而准确地反映客观事物和环境，往往需要同时测量大量的物理量。由若干种敏感元件组成的多功能传感器则是一种体积小巧且多种功能兼备的新一代探测系统，它可以借助于敏感元件中不同的物理结构或化学物质及其各不相同的表征方式，用单独一个传感器系统来同时实现多种传感器的功能。随着传感器技术和微型计算机技术的飞速发展，目前已经可以生产出来将若干种敏感元件封装在同一种材料或单独一块芯片上的一体化多功能传感器。

4. 向无线网络化发展

无线传感器网络的主要组成部分就是一个个小的传感器节点。这些节点可以感受温度的高低、湿度的变化、压力的增减、噪声的升降。更让人感兴趣的是，每一个节点都是一个可以进行快速运算的微型计算机，它们将传感器收集到的信息转化为数字信号，进行编码，然后通过节点与节点之间自行建立的无线网络发送给具有更大处理能力的服务器。

传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等，能够通过各类集成化的微型传感器协作地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息，通过嵌入式系统对信息进行处理，并通过随机自组织无线通信网络以多跳中继方式将所感知信息传送到用户终端，从而真正实现“无处不在的计算”理念。传感器网络的研究采用系统发展模式，因而必须将现代的先进微电子技术、微细加工技术、系统 SOC (System-On-Chip) 芯片设计技术、纳米材料与技术、现代信息通信技术、计算机网络技术等融合，以实现其微型化、集成化、多功能化及系统化、网络化，特别是实现传感器网络特有的超低功耗系统设计。传感器网络具有十分广阔的应用前景，在军事国防、工农业、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、反恐反恐、危险区域远程控制等许多领域都有重要的科研价值和巨大实用价值，已经引起了世界上许多国家的军事界、学术界和工业界的高度重视，并成为公认的新兴前沿热点研究领域，被认为是将对 21 世纪产生巨大影响力的技术之一。

5. 向数字化发展

随着检测手段的提高和检测技术的发展，新的物位检测方式不断涌现。多数应用到环境恶劣、高温高压等情况下的物位检测，如微波物位计、激光物位计、核辐射物位计是这类物位测量的代表。微波物位计（也称雷达物位计）为短量程到长量程连续物位测量提供了可靠的方法，即使在极限温度、极限压力、强腐蚀介质、易挥发介质、带搅拌涡流、结垢挂料及高度飞灰粉尘等工况下也能可靠测量。激光式

物位传感器是一种性能优良的非接触式高精度物位传感器，其工作原理与超声波物位传感器相同，只是把超声波换成光波。激光从照射到接收的时间很短，可用于连续物位测量。同时，还可以应用于狭窄开口容器以及高温、高精度的物位检测。放射性同位素产生的射线能穿透物质，射线强度随着物质厚度变化而变化。通过检测射线强度测量物位的物位计就是核辐射物位计。这类物位计的优点是仪表与被测介质之间无需接触，测量范围宽，可靠性高，可连续工作，因此适合高温高压、低温、高黏度、腐蚀性、易燃易爆等特殊物位测量。缺点是射线对人体有害，要做好防护措施。此外，近年来随着高科技的发展，出现了数字式智能化的物位计，这是一种先进的数字式物位测量系统，将其测量部件技术与微处理器的计算功能结合为一体，使得物位测量仪表至控制仪表成为全数字化系统。数字式智能化物位传感器的综合性能指标和实际测量准确度比传统的模拟式物位传感器提高了很多。

总之，随着传感器技术的发展，物位测量仪表的形式将会多种多样，应以非接触式为研制重点，向着小型化、智能化、多功能化和数字化的方向发展。

1.2 数字式物位检测技术

1.2.1 数字式物位检测的概念

检测技术就是人们为了对被测对象所包含的信息进行定性的了解和定量的掌握所采取的一系列技术措施，是研究自动检测系统中的信息提取、信息转换及信息处理的理论和技术，是自动化技术四个支柱之一。从信息科学角度考察，检测技术任务有：寻找与自然信息具有对应关系的种种表现形式的信号，以及确定两者间的定性或定量关系；从反映某一信息的多种信号表现中挑选出在所处条件下最为合适的表现形式，以及寻求最佳的采集、变换、处理、传输、存储、显示等的方法和相应的设备。

数字式物位检测技术就是运用数字化的信号取样方式对物位进行检测的技术。从信号的取样、信息的转换、信息的处理到信息的传输，整个过程全是数字信号，因此也可以称为全数字化物位检测技术。

1.2.2 数字式物位检测的基本原理

数字式物位检测的基本原理是将“物位”这个直线长度的物理量通过多个其他物理量的数字化取样，并将取样结果按照一定的规则进行统计，计算出相应的物位高度。具体来讲，就是对物位检测的直线进行多点的均匀分割，在每个分割点设置一信号感应元，每个信号感应元对物位进行数字化取样，即“0”与“1”的信号取样，分别对应于物料的“有”与“无”。至于物料的“有”、“无”如何感应为数字

信号的“0”与“1”，可以通过多种物理量进行转换，如电阻、温度、压力、电容、光电信号和磁敏信号等。详细检测方式见后面的相关章节。

1.2.3 数字式物位检测的特点

数字式物位检测的特点如下：

- (1) 测量数据准确、可靠、不失真。
- (2) 不受粉尘杂物的影响，可在水泥、煤粉料仓中使用。
- (3) 该传感器不需要进行零度和满度的调试，为现场的安装使用带来了极大的便利，属于智能型傻瓜式物位测量装置。
- (4) 安装简单、维护方便，它可以在料仓中贴壁安装，不怕重物挤压。
- (5) 生产工艺变得简单，便于规模化产业化生产。

1.2.4 应用领域及发展前景

目前，能够检测物料的传感器技术也不少，但是由于这些现有技术受使用条件等方面的限制，或者是价格过于昂贵，使它们的使用范围受到了很大局限。比如超声波传感器只能在宽敞无粉尘的条件下使用（因为粉尘也产生反射波）；压力式物料传感器只能在具备称重的条件下才能使用，而且它们的共同的特点是模拟量检测方式易受温度、大气压强、电磁波等环境条件的影响，使传感器的稳定性、可靠性、抗干扰性能无法适应使用条件的要求，应用范围受到了很大局限。建材、化工、矿山、冶金、水利、电力等多方面的工业自动化都迫切需要准确、可靠的物位自动化检测技术，如煤矿的井下煤仓，水泥厂的生熟料库，发电厂的人炉煤仓等料位检测问题，都亟待解决。

数字式物位检测技术的最大优势在于，脱开了传统的模拟量检测方式（模拟量自身带有模糊量的成分，量与量之间没有质的区分，而且易受温度、空气压强、电场、磁场等多种环境分布参数的影响），采用数字式测量，每个量之间有质的区别，有是与非的区别，具体讲是“0”与“1”的区别，不存在模糊数据，也不受环境和其他分布参数的影响，大大地提高了检测的准确性、可靠性。同时，它更便于同现代数据处理技术和数据传送技术接轨，有利于促进自动化事业发展的进程，为物位自动检测与控制提供了一套方便、实用并且先进的装置。该项研究成果已在煤矿的井下煤仓、水泥厂的生熟料库、发电厂的人炉煤仓等料位检测控制中作了大量的工程试验，并在生产中长期应用。实践证明，“数字式物料位传感器”解决了物料位检测中的一些尚未解决的难题，增添了一项物料位检测的新技术。它可在建材、化工、矿山、冶金、水利、电力等多个领域的工业自动化建设中广泛应用，必将有力地推动这些行业的自动化进程，并产生巨大的经济效益和社会效益。

第 2 章 电阻式数字物位检测技术

将被测非电量（如位移、应变、振动、温度、湿度、气体浓度等）的变化转换成导电材料的电阻变化的装置，称为电阻式传感器。它是将非电量的变化量，利用电阻元件，变换成有一定关系的电阻值的变化，再通过电子测量技术对电阻值进行测量，从而达到对上述非电量测量的目的。

电阻式传感器具有结构简单、输出精度高、线性和稳定性好等优点，因此它在非电量检测中应用十分广泛。本章先介绍几种电阻式传感器，在此基础上介绍基于电阻这个物理量的数字式物位检测技术。

2.1 电位器式传感器

2.1.1 概述

被测量的变化导致电位器阻值变化的敏感元件称为电位器传感器。由于它的结构简单，价格便宜，且有一定的可靠性，输出功率大，所以至今在某些场合下还在使用。它由电阻元件和电刷（活动触头）两个基本部分组成，按结构形式可分为线绕式和非线绕式电位器，其工作原理如图 2-1 所示。

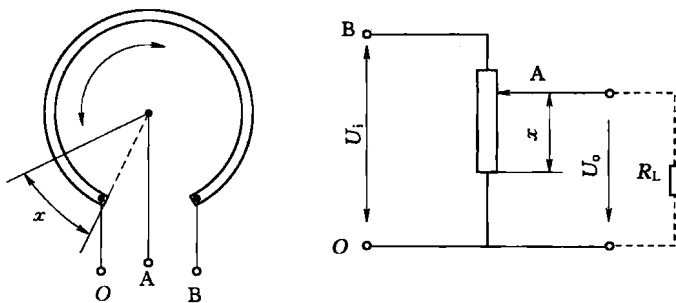


图 2-1 电位器式传感器工作原理图

图 2-1 中，当电刷在电阻元件上滑动时，引起 R_{OA} 变化，则

$$U_o = \frac{R_{OA}}{R_{OB}} U_i$$

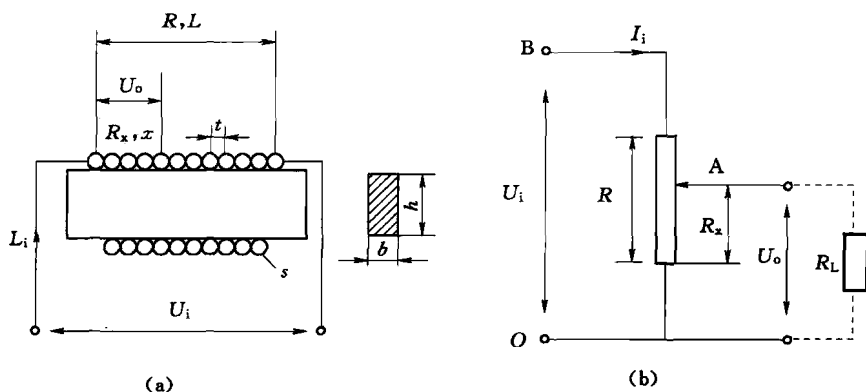


图 2-2 线性线绕电位器工作原理图

(a) 结构示意图；(b) 原理电路图

2.1.2 线性线绕电位器的空载特性

图 2-2 为线性线绕电位器工作原理图。若电位器为空载 ($R_L = \infty$) 时，即空载特性为：

$$R_x = \frac{R}{L}x = K_R x$$

$$U_o = \frac{U_i}{R} R_x = \frac{U_i}{L} x = K_u x$$

$$K_R = \frac{2(b+h)}{st} \rho = R/L; \quad K_u = \frac{U_i}{L}$$

K_R 、 K_u 分别为线性电位器的电阻和电压灵敏度，它们分别表明了电刷单位位移所能引起的输出电阻和输出电压的变化量。电位器空载时，其电阻值 $R_x \sim x$ 和输出电压 $U_o \sim x$ 的关系特性为线性特性（见图 2-3 中的“理论特性”）。

但是，由于制造工艺等各种因素的限制，线性电位器的实际特性并非线性，而是带有一定的非线性。非线性误差为：

$$\gamma_L = \frac{\pm \left(\frac{1}{2} \frac{U_{om}}{n} \right)}{U_{om}} \times 100\% = \pm \frac{1}{2n} \times 100\%$$

增加电位器的线圈匝数，可以使 L 减

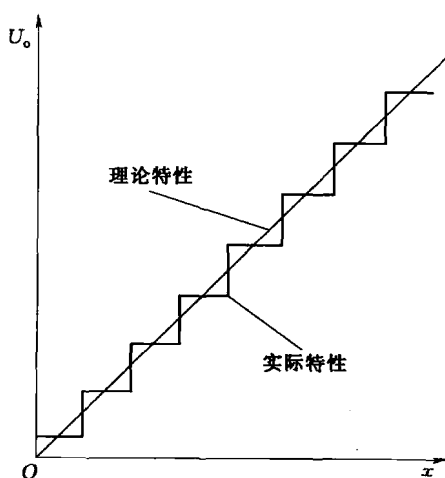


图 2-3 线绕电位器特性曲线

小。 L 越小，表示实际特性与理论特性越吻合，即电位器的线性度越高。

2.1.3 电位器的负载特性

电位器负载运行的特性称为电位器的负载特性。由图 2-2 (b) 可知，当电位器的负载电阻 $R_L \neq \infty$ (带负载时)，则输出电压 U_o 应为：

$$U_o = \frac{U_i}{\frac{R_x R_L}{R_x + R_L} + (R - R_x)} \cdot \frac{R_x R_L}{R_x + R_L} = \frac{U_i R_x R_L}{R_L R - R_x R - R_x^2}$$

$$\text{令} \quad n_x = \frac{R_x}{R}; \quad m = \frac{R}{R_L}; \quad A = \frac{U_o}{U_i}$$

$$\text{则} \quad A = \frac{n_x}{1 + m n_x (1 - n_x)}$$

式中 m ——电位器的负载系数；
 n_x ——电阻的相对变化；
 A ——电位器相对输出电压。

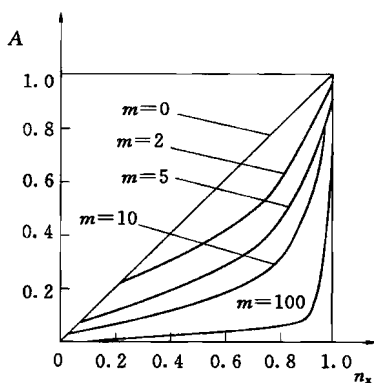


图 2-4 电位器的负载特性曲线

图 2-4 给出了电位器的负载特性曲线。由图 2-4 可知，电位器负载越重 (R_L 越小)，负载系数 m 越大，相对输出电压 A 越小，输出电压 U_o 越低，则非线性误差越大；反之， U_o 越高，非线性误差越小。

2.1.4 非线性线绕电位器

非线性线绕电位器是指其输出电压 (或电阻) 与电刷行程 X 之间具有非线性关系的电位器。理论上讲，这种电位器可以实现任何函数关系，故又称为函数电位器。

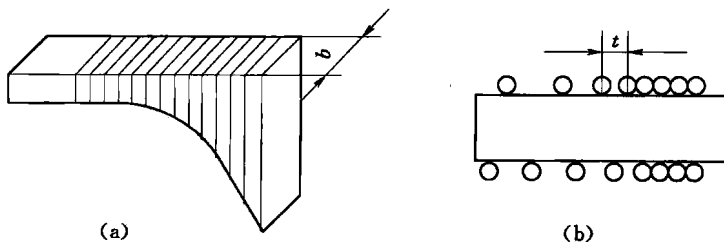


图 2-5 非线性线绕电位器结构示意图

(a) 变骨架式；(b) 变节距式