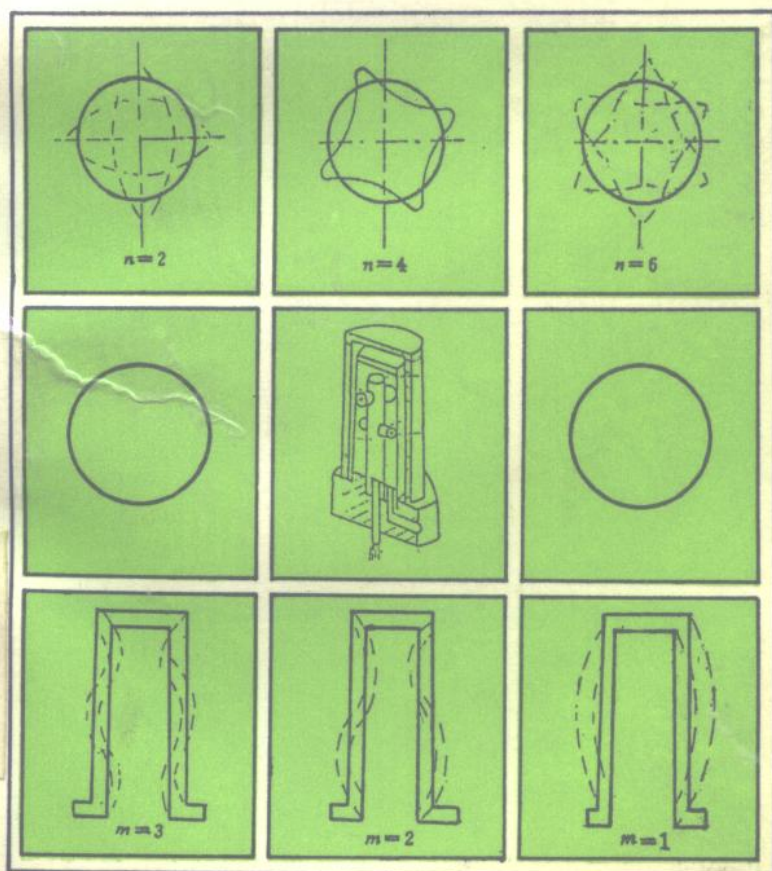


数字式传感器

朱伯申 张 炬 编著



北京理工大学出版社

73.862
212

数字式传感器

朱伯申 张炬 编著

北京理工大学出版社

2057/11
内 容 简 介

本书详细介绍了各种数字式传感器的分类、结构和工作原理,包括各种编码器、光栅、感应同步器、磁栅、各种固态图像传感器和激光式传感器,也介绍了各种模-数和数-模转换器。本书重点介绍光栅式传感器,特别是它的辨向和直接细分理论及莫尔条纹的高倍细分技术。本书把几类激光式传感器纳入数字式传感器的范畴,并从数字式传感器的观点对它们进行分类和理论分析,按类介绍了几个最新的应用例子。

本书适用于传感器、自动控制、仪器仪表、测量、光电技术等专业的本科生和研究生的教材,也可作为有关技术人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

数字式传感器/朱伯申,张炬编著. —北京:北京理工大学出版社, 1996

高等学校教材

ISBN 7-81045-141-3

I. 数… II. ①朱… ②张… III. 数字式传感器-高等学校-教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 11830 号

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区白石桥路 7 号

邮政编码 100081 电话 68422683

各地新华书店经售

北京市汇宇达公司激光照排

北京先锋印刷厂印刷

850×1168 毫米 32 开本 8.875 印张 224 千字

1996 年 8 月第一版 1996 年 8 月第一次印刷

印数:1-3000 册 定价:12.00 元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

前 言

本书主要叙述以数字(或准数字)量形式输出的一些传感器。第一章编码器可以看成是数字式传感器的由来和初步。第二章的直接计数式传感器事实上包括光栅及以后各章的多类传感器,可以看成是在编码器的基础上的自然发展和延伸。本书以光栅为主阐述了数字式传感器的基本物理思想,即进行空间和时间预分来对被测量进行分割式测量。细分技术是决定数字式传感器的分辨率的关键手段,在光栅这一章中将系统、详细地介绍各种硬件细分和软件细分技术的思路和典型实现方法。其它各章主要叙述各类传感器中具有本身特点的那部分内容,一些与光栅系统所共同的或可以借鉴的细分技术,将不再述及或只作简略介绍。

本书是根据作者几年来在北京理工大学应用物理系授课的讲义基础上重写而成。

本书以尽可能清晰的物理概念来阐明各类数字式传感器的基本工作原理,以及各种技术的设计思想和它们的各种应用实例。其中一些必要的数学描述也是尽量简明。编者希望读者不要满足于看懂本书的内容,而应能了解、掌握和使用书中所述的各类传感器,并能追寻数字式传感器发展的思路,从中悟出某种规律,由此类推,从而能以新原理、新思想、新技术和新材料,针对各种特定的要求和环境条件,灵活地进行专用传感器的设计。

本书可作为高等学校应用物理系有关专业、精密仪器专业、仪器仪表和计量测试技术类专业的本科生和研究生的教材,也可供其它有关专业和工程技术人员参考。各章中都撰写有一定数量的习题,有的习题难度较大,读者可酌情选用。

本书可按40课内学时进行讲授。

本书的第一、二、三、四、八章由朱伯申撰写,五、六、七章由张炬撰写。

北京理工大学的李科杰教授审阅了本书的全稿,提出了很多宝贵意见和修改建议,作者在此深表感谢。

由于业务水平和精力所限,本书只能对数字式传感器中的部分传感器的工作原理、结构和应用等进行介绍,祈望同行专家和广大读者对书中存在的不当之处和错误,不吝批评指正。

目 录

绪 论	(1)
第一章 直接编码式传感器	(7)
§ 1.1 增量式编码器	(8)
一、齿形二次传感器	(8)
二、带编码的二次传感元件的传感器	(10)
§ 1.2 绝对式编码器	(13)
一、直接二进制绝对式编码器	(13)
二、格雷码、循环码和 V、U、M 扫描读出法	(16)
§ 1.3 直接编码式传感器的读码技术	(21)
§ 1.4 高精度的角位移和角位置测量	(22)
第二章 直接计数式传感器	(24)
§ 2.1 光栅测量的基本原理	(27)
§ 2.2 长光栅的莫尔条纹方程	(29)
§ 2.3 几种莫尔条纹	(31)
一、横向莫尔条纹	(31)
二、光闸莫尔条纹	(32)
三、游标莫尔条纹	(32)
四、斜向莫尔条纹	(33)
§ 2.4 莫尔条纹和光栅参数与运动间的关系	(33)
§ 2.5 圆光栅的莫尔条纹	(35)
一、径向辐射光栅的莫尔条纹	(35)
二、切向光栅的莫尔条纹	(40)
§ 2.6 柱面光栅	(43)
§ 2.7 环形光栅和它的莫尔条纹	(46)
§ 2.8 莫尔条纹的质量指标	(49)

§ 2.9	光栅光学系统	(52)
一、	计量光栅光学系统对各部分的要求	(53)
二、	光栅光学系统	(59)
§ 2.10	相位调制型光学系统	(68)
一、	光栅光学机械扫描式相位调制	(69)
二、	光电元件自扫描式相位调制	(71)
§ 2.11	零位光栅	(75)
§ 2.12	长光栅测量中的运动辨向和直接四细分	(80)
§ 2.13	光栅测量的高倍细分技术	(87)
一、	细分技术概述	(87)
二、	电路细分技术(硬件细分)	(89)
三、	微控制器细分技术(软件细分)	(117)
第三章	感应同步器	(126)
§ 3.1	概述	(126)
§ 3.2	感应同步器的工作原理	(131)
§ 3.3	感应同步器的结构和分类	(136)
一、	长感应同步器	(136)
二、	圆感应同步器	(139)
§ 3.4	感应同步器的辨向和细分电路	(140)
一、	鉴相细分法	(140)
二、	鉴幅细分法	(144)
第四章	磁栅式传感器	(151)
§ 4.1	概述	(151)
一、	磁栅的工作原理和分类	(152)
二、	磁栅数显的特点	(153)
§ 4.2	磁栅的结构和录磁原理	(153)
一、	磁栅的一般结构	(154)
二、	磁栅的录磁原理	(155)
§ 4.3	磁头与检磁原理	(155)
一、	速度响应式磁头(动态磁头)	(155)

二、磁通响应式磁头(静态磁头)·····	(156)
三、多气隙磁通响应式磁头·····	(157)
四、多气隙磁头结构举例·····	(160)
五、磁栅信号的检测、处理和显示·····	(162)
第五章 模-数与数-模转换器 ·····	(166)
§ 5.1 概述·····	(166)
§ 5.2 模-数(A-D)和数-模(D-A)转换的基本概念·····	(167)
一、A-D 转换的基本概念·····	(167)
二、A-D 转换器的分类·····	(168)
三、D-A 转换的基本概念·····	(168)
四、D-A 转换器的主要性能指标·····	(169)
§ 5.3 数-模转换器(D-AC)·····	(170)
一、二进制权电阻解码网络的 D-AC·····	(170)
二、T 型电阻解码网络的 D-AC·····	(173)
三、D-AC 的类型与主要特性参数·····	(175)
四、集成 D-AC·····	(176)
§ 5.4 模-数转换器(A-DC)·····	(178)
一、A-DC 的分类·····	(178)
二、采样、保持、量化和编码·····	(179)
三、常用的 A-DC·····	(184)
四、集成的 A-DC 及使用时应注意的问题·····	(192)
§ 5.5 A-DC 的应用实例·····	(193)
第六章 频率式传感器 ·····	(198)
§ 6.1 振弦式传感器的工作原理和激励方式·····	(198)
一、工作原理·····	(198)
二、弦振动的激励方式·····	(200)
§ 6.2 振弦式转换元件的特性分析·····	(203)
一、振弦的相对灵敏度·····	(203)
二、非线性的输出特性·····	(204)
三、频率的稳定性·····	(206)

§ 6.3 振筒式传感器	(206)
一、振筒式传感器的基本结构	(206)
二、振筒式传感器的工作原理	(208)
三、测量方法	(209)
§ 6.4 电压-频率转换式(V-F)频率传感器	(212)
一、电压-频率转换的工作原理	(213)
二、V-F 转换的频率式传感器的应用举例	(215)
§ 6.5 石英晶体频率式传感器	(216)
§ 6.6 热敏电阻温度传感器	(219)
第七章 电荷耦合图像传感器	(222)
§ 7.1 电荷耦合器件的物理基础简介	(222)
一、稳态时半导体表面载流子的积累、耗尽与反型	(222)
二、半导体表面的瞬态特性和表面势阱	(225)
§ 7.2 CCD 的工作过程	(227)
一、CCD 的基本结构及电荷转移原理	(227)
二、线列 CCD 图像传感器	(229)
§ 7.3 CCD 图像传感器的主要性能参数	(234)
一、灵敏度	(234)
二、转移效率	(235)
三、光谱响应特性	(235)
四、调制传递函数	(236)
五、不均匀性	(236)
六、噪声	(236)
§ 7.4 CCD 图像传感器的应用举例	(237)
一、微隙和细丝直径的测量	(237)
二、长度的测量	(239)
第八章 激光式数字传感器	(242)
§ 8.1 激光相位调制式传感器	(243)
一、工作原理	(243)
二、干涉条纹的辨向和细分技术	(247)

三、对光源、接收元件和调整机构的要求	(248)
四、几种干涉仪简介	(249)
五、干涉法测长的应用实例	(255)
§ 8.2 激光频率调制式传感器	(259)
§ 8.3 激光多普勒效应和它的应用	(264)
参考文献	(272)

绪 论

传感器的出现,至少也有几十年的历史了;如果从最原始的机械式传感器算起,则有几百年的历史了。传统的传感器都是采用模拟式的,即将待测的物理量(位移、温度、压力等等)转换成与之成确定关系的电学量(例如电压或电流)。或者说用这些电学量来模拟被测量作为输出,或者进行显示(通过电表)。例如,常见的热敏电阻、应变片、光电管等等。如果需要与微机或各种数字化仪器相联,则再通过模拟-数字转换器(简称模-数转换器,或 A/D 转换器,ADC),把模拟量转换成数字形式的信息。

由于模拟量(电压、电流)易受电磁场的干扰,不利于直接的远距离传输。在信号处理系统中,由于半导体器件本身的非线性失真和随机噪声的逐级加入;模拟电路的电子元器件受温度的影响而造成参数和特性的变化,从而不可避免地会产生信号的失真和信噪比劣化。另一方面,传感器常常必须工作在恶劣的环境下,信号十分微弱,特别在要求高可靠性的场合,模拟式传感器更显得难以给力…凡此种种,常常给模拟式传感器的工作带来极大的困难。

数字式传感器是将待测量(位移、温度、压力、应力等等)直接转换成数字量或准数字量输出。它的信号原则上不受放大器和信号处理系统的温度漂移的影响,具有极高的抗干扰能力,特别适用于远距离传输;同时数字式传感器又有很高的精度与稳定性,功耗小、成本低,最后它又能与数字设备(计算机,计数器,数字显示系统等)直接相联,用微控制器(常称单片机)或计算机进行信号的处理、滤波、压缩。

数字式控制回路由于具有精密、定量、抗干扰能力极高等优点,使这一方法成为执行器进行实时控制的发展趋向。数字化传感

器可直接与数字式控制器相联,这增加了系统的可靠性、降低了成本并提高了它的响应速度。而模拟式传感器则必须通过模-数转换器才能与数字式控制器接口,这既增加了成本,又无法避免性能上的恶化。

数字式传感器正是由于它所具有的上述一系列特点,近年来正在受到越来越多的注意。这一技术开始时只用于宇航和军事技术(例如早期光栅式水听器),目前已扩展到民用科技各部门,成为传感器技术发展的一个热点,引起了巨大的实际应用的兴趣。

从另外一个角度来看,生物学的研究表明,人类以及所有的高级动物,各种感觉器官的神经细胞对外界各种刺激的反应,传输到大脑去的信号就是以脉冲形式进行的;同样,大脑处理后,传送给各执行器官的命令,也是以脉冲形式传递的。我们十分清楚,动物的感觉器官是世界上最好的传感器,无论在灵敏度、精确度、稳定性、可靠性、还是体积、能耗等等,都比人工制造出来的几乎所有传感器,性能上优越得多。人们一直把各种动物包括人类的感觉器官,作为传感器研制的最好模型来进行学习。所以这些研究的结果,也表明了数字式传感器必将成为未来传感器发展的方向。

传感器发展的一个必然方向,是传感器和微控制器相结合。传感器输出的原始信号,直接进入组装在一起的微控制器,就地进行温度、压力、时间、电源电压、电流、各种漂移等修正,输出为标准的数字信号,标准接口。这种带微控制器的传感器,常被称为智能化传感器。这种趋向,可以称为传感器的大众化、“傻瓜化”。

在“智能化传感器”中,其主要部分即获取被测量信息的基本器件,实际上就是一种数字式传感器。对生物的研究同样表明,所有生物的神经细胞附近,都有一个信号处理机构。例如,一受电击,人的手指会立即“本能”地弹回。手指电击的信息,在未传送到大脑前,已经作了就地处理。而智能化传感器的研制和发展,也是须以数字式传感器作为基础的。

这里应该说明,对“数字式传感器”一词,目前还存在不同的说

法。很多作者使用“数字式”一词来表示周期性的或随机发生的脉冲输出。而另外一些作者使用此词则仅指传感器的输出量为一个二元形式的信号,适合于直接输入到微处理机。

敏感元件是将待测物理量(位移、压力、温度、应力等),化学量、生物量等转换成电阻、电容或电感等电参量,这一过程,通常称为一次传感。而作为传感器,则还常常包括把这些电参量进一步转换成电流或电压(常称二次传感)这样易于传送和处理、显示的电量的过程。从使用者的角度来看,得到以电流或电压形式(为载体)的信息,是最方便的。因此在传感器的叙述、设计和应用中,常常把这两种转换作为一个整体的任务来进行。

一、数字式传感器的特点

①具有高抗干扰能力和高信噪比,有利于在恶劣环境下使用。常能免于噪声和外来信号的干扰。特别适用于远距离传输。

②数据可以高速远距离传输,而不会引入动态迟后。

③能同时做到高测量精度和大测量范围。

④能与计算机直接接口。可以进行大量数据的高速处理,如压缩、调制和解调、显示、存贮和反复阅读及调用。

⑤响应速度受各种因素的制约,有的相对较低(主要是频率式的)。在某些要求高速响应的测控系统中,有时可能会成为一个问题(所以在这一点上 A-D 转换比 V-F 转换好)。但在自动控制系统中,当传感器不但用于信号检测且用于反馈系统中,去控制数字式执行器时,这时数字式传感器就可同时达到很大的控制精度和响应速度。

⑥数字式传感器与数字式执行器配合使用,特别适用于重复性的工作中。

⑦数字式传感器很容易和其它各种数字电路接口,容易实现积木化,从而容易为非专业人员所熟悉和使用,变成一个大众化的传感器。

二、数字式传感器的分类

数字式传感器可分为直接数字式传感器和准数字式传感器两大类。直接数字式传感器是指它的输出为二元形式(0-1)的信号,它包括各种编码器(直接编码器、光栅、磁栅、感应同步器、CCD 或类似的光敏器件以及触发器式的传感器)。准数字式传感器是指以频率形式输出的谐振式传感器。它们输出信号可以为频率脉冲个数、位相或脉冲宽度。它包括机械式的(振弦、振杆、振膜、振筒、振壳等)、声学的(SAW)、光学的(包括激光器)以及电学的(各种 L、C、R 组合形成的振荡器)。

应该指出,除了用电学振荡器的形式把电感、电容和电阻转换成频率量外,近年来又发明了一些新的二次变换技术,可以把上述三个电参量,直接转换成数字量输出,同时它们还具有某些极好的特性,例如开关电容技术,这给传统的模拟量传感器带来了全新的面貌,甚至一场革命。

三、传感器的发展趋向

(1)微型化

为了适应各种特殊场合的需要(例如监测血管内血液的流速、血液的含氧量),传感器的小型化和微型化已成为越来越迫切的要求。目前 0.5mm 直径的各种传感器已屡见报导,有的已商品化。更小型的传感器正在研制中。

(2)集成化

集成化是指将多个传感器集中在一起进行适当的排列或组合,构成一个传感器阵列。目前传感器阵列的集成度正越来越高。同时,为了增大空间分辨率减少体积,反过来对传感器的微型化提出了更高的要求。

由很多个光电二极管组成的电荷耦合器件(CCD)是传感器集成化的一个代表。目前,为高清晰度电视用的新一代面型 CCD 就

集成了大约一百万个光电器件。

集成化的另一个特点是传感器和信号的处理系统安装在同一块芯片上,实现就地响应,就地修正。这一趋向,目前已非常强劲。

(3) 多功能化,分布式,分散式

用同一传感器来测量二个或二个以上的参量,如同时测量温度和压力或同时测量温度和流速等。

分布式是指用一个传感器测量空间很多处的参量。例如把一条光纤埋在水泥桥梁中,用时域分割方法可以测量桥梁各点的受力情况,一条光纤就代替了很多个压力传感器。

分散式是指在测量现场就对信号进行了初步处理并作出一定水平的反应。这种传感器常带有单片机,并由它就近驱动执行机构。

(4) 追求拓展检测上下限

提高物理量的测量精度,延伸它的测量极限,一直是科学界的共同奋斗目标。我们清楚地看到,测量极限和精度的每次数量级的进步,常带来新学科的诞生和社会生产力的大的飞跃。迈克尔逊干涉仪的出现,使光速测量精度有大的飞跃,这导致了以太理论的死亡,为相对论的出现建立了最重要的实验根据。而电子隧道显微镜的发明使人类能直接观察到原子世界的结构,使固体物理学、原子学、生物学、化学、医学等学科获得了连锁性的巨大进步。

(5) 光、机、电、算多种技术的结合

光、机、电、算等多种技术的结合,使传感器更新换代的步伐越来越快,传感器的发展也因此获得强劲发展的基础。

传感器与计算机结合构成了智能化产品,使传感器能自己作出判断、反应甚至学习、理解、思考和创造,这是传感器与计算机发展的共同需要,目前已成为人所共知的趋向。

(6) 向化学和生物型传感器方向发展

目前的所有传感器都有体积大,缺乏专一性的缺点。例如市售的煤气传感器,除了对煤气敏感外,还对酒精、乙醚等多种气体敏

感,这常常引起误报。生物传感器可以做到只对某种特定的量敏感。例如某种酶传感器就只对葡萄糖敏感。它响应快,分辨率高,对医疗化验特别有用。

从传感器的尺寸来看,这种发展也是自然的:普通传感器的几何尺寸量级是 cm 级,集成传感器是 $10\sim 100\mu\text{m}$,化学传感器是分子集团($\sim$ 千埃),生物传感器是分子大小(几十 $\sim$ 几百埃)。

(7)传感器与科学前沿的联系越来越紧

新效应、新现象的发现到它被用于新传感器的周期越来越短;同时新效应,新现象的研究也对新一代传感器的研制提出了更高、更迫切的要求。

第一章 直接编码式传感器

编码式传感器主要由两部分所组成:编码部分和读码部分。本章着重于编码技术的介绍:编码的原理、方案,错码的原因以及它的解决办法。在最后部分对读码技术略作介绍。

直接编码式传感器是一种机、光、电三种技术结合的产物。由于它结构简单,具有高的测量精度、分辨率和可靠性,因而它在火箭和飞机制导、现代数控技术、数显技术、机械设备的位移、角位移、角位置的测量和控制、机器人运转关节控制、自动检测技术等方面获得了广泛的应用。

直接编码式传感器大致可分为两大类:绝对式编码器和增量式编码器。按被测量的不同,又可分为圆盘式和长条式两类,通常称为轴角式编码器和码条式编码器(见图 1-1),分别用来测量角位移或线位移。从结构上看,每一个编码器常有很多在形式上相似的码道,每一个码道又由严格的、周期性配置的、黑白相间或透明不透明的部分(常称为码块)所组成。对应每一个码道固定安装着一个读出装置。当编码器随着被测物体运动时,每一码道穿过对应的读出装置,产生一串脉冲信号输出。根据输出脉冲的个数和不同读出装置输出的脉冲信号间的相位关系,就可测定被测物体(与编码器连接在一起)的位置或位移、速度、加速度。

增量式编码器一般只有两个码道。以轴角式编码器为例,随着码盘旋转,输出一系列计数脉冲。增量式编码器需要预先指定一个基数——零位。输出脉冲相对于该基数进行加减,从而测量或读出了码盘的位置或位移量。绝对式编码器则不需要预先指定一个基数,它可确定码盘在任意时刻的空间位置。

绝对式编码器由于所用的码道多、结构较复杂,所以响应速度