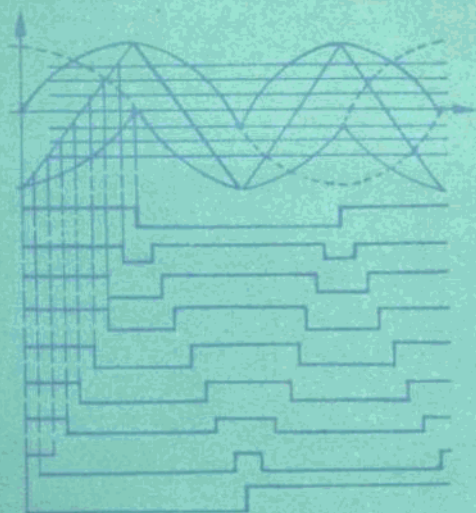


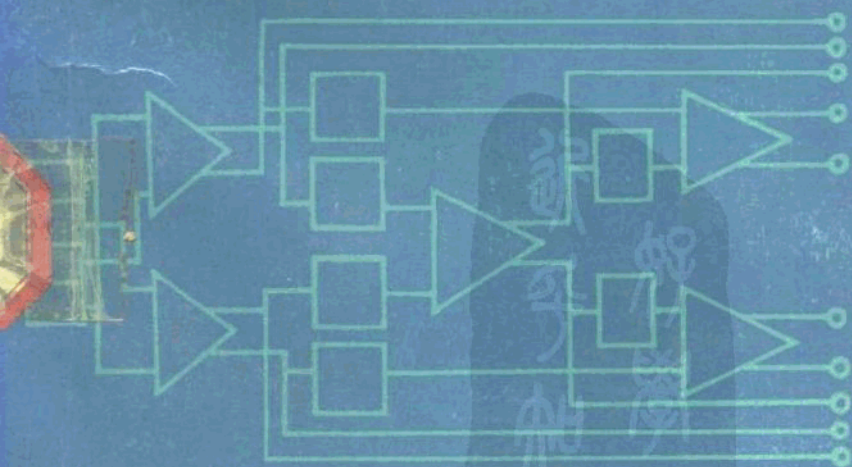


常健生 编著



数字传感器

SHU ZI
CHUANGAN QI



PDG

前 言

本书是作者在多年教学实践和科研成果的基础上，以作者为吉林工业大学硕士研究生撰写的《数字传感器》讲稿为蓝本，并参考了国内外有关文献编写而成的。

本书为工业自动化及有关专业研究生教学用书，亦可供有关高等院校专业教师、高年级学生以及从事自动控制、自动检测、自动计量的工程技术人员和科研工作者参考。

在本书正文绪论中，介绍了有关数字传感器的定义、分类及构成等共性问题。其余内容共分五章：第一章为角度数字编码器，系统讲授了增量式和绝对式角度数字编码器的工作原理及几种常用的编码器，最后介绍了增量式绝对化的措施；第二章较详细地介绍了莫尔条纹的形成、光栅光学系统及光栅的检测原理，并结合光栅系统较详尽地讲授了几种常用的电子细分方法；第三章讲授感应同步器，对其工作原理、安装、调整和运行方式以及组成数字位置测量系统等进行了系统的介绍；第四章介绍磁栅的工作原理、磁栅的刻制、磁头以及由磁栅组成的数字显示检测系统等；第五章讲授石英谐振器的基本性能以及石英谐振传感器、带有电抗牵引特性的石英谐振传感器的工作原理、特性及组成频率-数字传感器的方框图。

全书约18万字，内有插图 222 幅、数表15张，书后还附有参考文献。

本书介绍的几种传感器都具有测量精度高、稳定性好、分辨率高以及易于数字输出等优点。

由于编写时间仓促，水平有限，书中难免有不妥和错误之处，殷切希望广大读者提出宝贵意见。

编 著 者

1988年3月于长春

目 录

绪 论	1
一、传感器在国民经济中的地位	1
二、传感器的发展方向	2
三、数字传感器是时代的产物	3
四、数字传感器的定义、分类及特点	4
五、数字传感器的结构	5
六、本书主要内容	7
第一章 角度数字编码器	8
§1.1 增量式角度数字编码器	9
一、工作原理	9
二、辨向电路	10
三、几种常用的增量式角度数字编码器	11
§1.2 绝对式角度数字编码器	13
一、接触式角度数字编码器	13
二、光电式角度数字编码器	18
三、几种常用的绝对式角度数字编码器	20
§1.3 增量式绝对化的措施	20
一、停电记忆装置的选择	21
二、磁记忆装置的工作原理	22
三、磁记忆装置在数字显示器中的应用	24
第二章 光栅与电子细分	25
§2.1 概述	25

一、光栅式测量的基本原理	25
二、莫尔条纹的转换特点	29
三、光栅式测量装置、光栅光学系统、光栅读数头	31
四、光栅式测量的特点及应用现状	34
§2.2 莫尔条纹的形成原理	36
一、长光栅莫尔条纹方程	37
二、圆光栅莫尔条纹方程	42
§2.3 光栅光学系统	53
一、直接接收式光学系统	54
二、分光式光学系统	57
三、影像式光学系统	62
四、四细分光学系统	65
五、相位调制型光学系统	67
§2.4 电子细分	73
一、幅度调制信号细分	75
二、相位调制信号细分	115
三、用单片机进行电子细分	130
第三章 感应同步器	139
§3.1 感应同步器的结构、种类和工作原理	139
一、感应同步器的结构和种类	139
二、感应同步器的工作原理	143
三、电气参数	150
四、输出电动势	151
§3.2 感应同步器的安装和调整	154
一、旋转式感应同步器的安装和调整	154
二、直线式感应同步器的安装和调整	162
§3.3 感应同步器的运行方式	175
一、分段绕组激磁	176
二、连续绕组激磁	183

§3.4 数字位置测量系统	192
一、概述	192
二、鉴幅型数字位移测量系统	196
三、鉴相型数字位移测量系统	200
四、三通道测角系统	205
第四章 磁栅	209
§4.1 概述	209
§4.2 磁栅的基本原理	211
一、磁栅的构造	211
二、对磁尺的要求	213
§4.3 磁栅的刻制	214
一、圆型磁栅的刻制	215
二、直线型磁栅的刻制	217
§4.4 磁头	222
一、动态磁头	222
二、静态磁头	223
§4.5 磁栅——数字显示检测装置	225
一、鉴幅型磁尺——数字显示长度检测装置	225
二、鉴相型磁尺——数字显示长度检测装置	228
三、单磁头磁尺——数字显示角度检测装置	234
四、双磁头磁尺——数字显示角度检测装置	236
第五章 石英谐振传感器	240
§5.1 概述	240
一、石英谐振传感器的重要作用	240
二、石英、石英谐振器及石英谐振传感器	241
§5.2 石英晶体的基本知识	241
一、石英晶体的结晶形态和坐标系	242
二、石英的一般性质	233

§5.3 石英晶片的机械振动	246
一、应力与应变	247
二、压电效应和逆压电效应	249
三、石英晶片的切型	251
四、石英晶片的机械振动	253
§5.4 石英谐振器的特性	259
一、石英谐振器的等效电路和等效参数	260
二、石英谐振器的频率温度特性	263
三、石英谐振器的老化特性	266
§5.5 晶体振荡器	267
一、晶体振荡器的基本电路	268
二、普通晶体振荡器	272
三、温度补偿晶体振荡器	274
§5.6 石英谐振传感器	280
一、石英谐振压力传感器	280
二、石英谐振温度传感器	287
三、石英谐振压力温度传感器	289
四、石英谐振厚度传感器	293
§5.7 电抗牵引石英谐振传感器	297
一、石英谐振器的频率牵引	297
二、电抗牵引石英谐振传感器	302
参考文献	309

绪 论

一、传感器在国民经济中的地位

发展科学技术的目的在于提高劳动生产率，其重要手段是用机器代替人类的体力劳动，用仪器装置代替或扩充人类的脑力劳动。

蒸汽机、内燃机以及电动机的发明，曾为人类摆脱繁重的体力劳动做出过巨大的贡献。自动调节器、程序控制器以及计算机等的出现，在某些领域内，局部或全部地代替或扩充了人类的脑力劳动，从而极大地提高了劳动生产率。

科学技术上的这些巨大成功和进步，促使人们进一步思考：能否发明更先进的机器，使劳动生产率进一步提高？回答是肯定的。即采用自动化技术，采用自动化了的生产机械和自动化了的生产过程以及两者结合构成的自动化车间乃至自动化工厂。

采用自动化技术的首要问题是要解决信息的获取。就是说，只有对原材料的性质和数量，乃至订货、销售和库存的情况等信息部分或全部获取后，才能进行自动计量、自动检测、自动控制和自动管理，以达到局部或全部自动化的目的。

为获取上述各种信息，就必须采用各式各样的传感器。可见，传感器在现代科学技术和工业生产中占据何等重要地

位。近年来，一些经济比较发达的国家，将传感器的研制列为高技术、新技术的研究课题的首位。例如日本，1959年有关传感器的专利（以半导体传感器为例）仅有6项，1964年增为300项，1974年上升为1 000项，而到1984年就激增为3 000余项。其他经济比较发达的国家也接近这样的增长速度。

二、传感器的发展方向

近年来，传感器的发展方向有如下趋势：

1. 高准确度 传感器的输出特性存在着分散性或程度不同的非线性，并受温度、电源等外界条件的影响。应考虑如何补偿或消除这些因素的影响，提高其测量准确度。

2. 高分辨率 对极微弱信号的精确检测，往往导致新技术的诞生，这将给科研和生产带来新的飞跃。因此，提高传感器的分辨率，就成为现代传感器发展的又一个方向。

3. 集成化、功能化 集成化的含意有三：一是将多个同一类型的单个传感器，在同一行列或同一平面上排列起来，构成具有新的功能的传感器；二是把几个不同功能的单个传感器组合在一起，构成多功能传感器；三是把传感器与放大器、运算器及补偿器等元件一体化，组装成一个新的传感器。功能化有两个方面的含意：一是由于集成化带来的新功能；二是把两种以上不同功能的传感器和器件组合在一起，构成具有高灵敏度和多功能的器件。由于它们具有体积小、重量轻、功能多（检测和其他功能）和工作可靠性高等特点，因此在现代化仪器中，尤其是便携式仪器中已得到广泛的应用。

4. 开拓新领域 目前在已开发的传感器中，以物理量传感器居多，而化学量和生物量传感器的研制仅是刚刚起

步。科研和生产对添补空白的新型传感器有着强烈的需求。

5. 智能化 当微型计算机以高速度向着高性能、低成本和单片化发展的同时，传感器也向着集成化、功能化方向发展着。这两者结合的结果必将导致智能传感器的诞生。

智能化传感器不但能对外界信号进行测量、转换，同时还有记忆、存储、运算及数据处理的功能。它的出现，将集中型数据处理变为分散型，不仅加快了数据处理的速度、保证了质量，同时也减轻了上一级计算机的负担。

6. 数字传感器 由于在各类自动化系统中绝大多数带有电子计算机或数字显示器，因此，对具有数字输出的传感器有着迫切的需求。它的应用，既可提高测量的稳定性、保证测量的精度，也可使系统的结构得到简化。

三、数字传感器是时代的产物

自世界上出现了第一台电子数字计算机以来，至今它已经历了电子管、晶体管、集成电路和大规模集成电路四代的演变。其明显的趋势是体积越来越小，价格越来越低，耗电量越来越少。以大规模集成电路为基础的微型计算机正因为具备这些特点，才显示出了巨大的生命力，问世后立即得到迅速发展，并逐步地应用于国民经济的各个部门中。近十年来，单片微型计算机的出现又为电子计算机的应用开辟了新的领域。一些智能化的机电产品、仪器和仪表不断涌现。

数字系统可以给出高精确度的检测和计量结果。在自动检测和计量系统中，系统的测量精确度决定于传感器本身的精确度，数字传感器本身正好具备高稳定性和高精度的性能。为了组成带有电子计算机或带有数字显示的数字系统，如数字显示系统、数字处理系统、数字传递系统和数字控制

系统等，为简化系统和提高系统的工作可靠性，迫切需要数字传感器。于是数字传感器便“应运而生”。

四、数字传感器的定义、分类及特点

将被测量直接或间接地转换成数字量的传感器叫做数字传感器(中间不经过模拟量、没有A/D变换)。按其定义可将数字传感器分类，如图0-1所示。

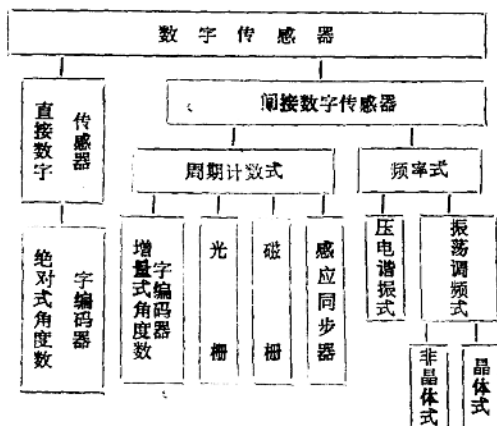


图 0-1

直接数字传感器到目前为止只有一种，那就是绝对式角度数字编码器。

间接数字传感器种类繁多，可分两大类：第一类是周期计数式又称增量式数字传感器。它是把被测量转换成周期函数，然后再把周期函数转换成数字量的传感器，如增量式角度数字编码器、光栅、磁栅和感应同步器等。第二类是频率式数字传感器。它是将被测量转换成频率量后，再将频率量转换成数字量的传感器，如压电谐振传感器和振荡调频式传

感器等。振荡调频式数字传感器按储能元件是否包含石英晶体又分为晶体式和非晶体式两种。

数字传感器具有体积小、重量轻、结构紧凑、抗干扰能力强、工作可靠、分辨率高等优点，但也存在着成本高、结构复杂等缺点。因此，它适用于要求高稳定性、高精度的检测系统。

如按被测量的性质进行分类，数字传感器大致可分成两类：一类是测量位移的（直线位移和角位移）数字传感器。属于此类的是绝对角度数字编码器和所有周期计数式数字传感器。如果想提高此类传感器的分辨率，可以采用细分法。另一类是测量除位移量以外的其它各种物理量的数字传感器。属于此类的传感器是频率式数字传感器。欲提高这类传感器的分辨率，可用倍频的方法。

五、数字传感器的结构

数字传感器按结构可分成三种类型。

1. 绝对式角度数字编码器 这种传感器的结构示意图如图0-2所示，其角度分辨率决定于数字编码器（码盘）的位数。目前有14位的产品，如再增加码道和细分电路可制成19位和23位的。

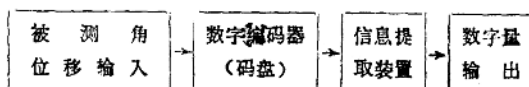


图 0-2

2. 周期计数式数字传感器 它的结构示意图如图0-3所示。此种结构的位移分辨率对低精度的周期计数式数字传感器而言，仅由周期信号发生器的性质决定。例如，光栅

当长1mm有100条刻线时，其分辨率即为0.01mm；对高精

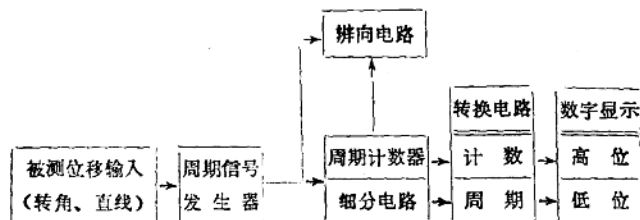


图 0-3

度的周期计数式数字传感器而言，还要考虑到电子细分数。如前例，在100倍电子细分数下，此光栅的分辨率就是0.1 μ m。此种结构属于增量式结构，结构的特点（位移方向的要求）决定它不但备有辨向电路，而且周期计数器还具有可逆性质。

3. 频率式数字传感器 其结构示意图如图0-4所示。按振荡器的形式，可将此种数字传感器分成带有晶体谐

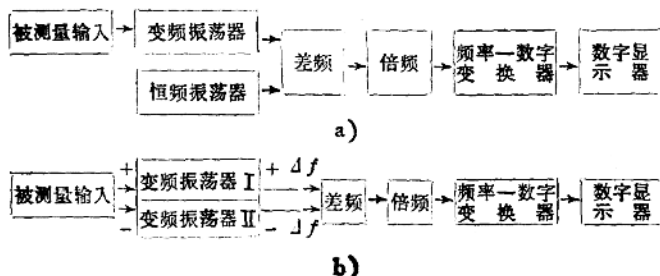


图 0-4

振器的和不带晶体谐振器的两种。前者，按被测量的作用点，又分作用在石英谐振器上的石英晶体谐振式数字传感器和作用在谐振器中储能元件上的带有晶体谐振器的调频式数字传感器。按采用敏感元件的形式，又可分为简单的（图0

-4a)〕和差动的〔图0-4b)〕两种。

图 C-4 中的数字显示器由 频率-数 字转换器和数字显示器组成。为了提高这种结构的分辨率,图中采取了倍频措施。

从上述三种类型数字传感器的结构图可以看出,它们都具有抗干扰能力强以及数字量输出的特点。如考虑到对电源电压的波动、环境温度波动和非线性等因素的补偿(图中没有画出),则精度还可提高。如果采用单片微型计算机去进行信息处理,诸如补偿、频倍(细分)和数字转换等硬件线路可软件化,不仅使线路简化,还可使分辨率、测量精度和工作可靠性进一步提高。

六、本书主要内容

本书向读者介绍几种典型的数字传感器的工作原理、线路、特点和应用,以原理和线路为主。而对它们的共性问题,例如提高分辨率和测量精度等措施将结合具体实例予以介绍。

本书所介绍的典型数字传感器包括:角度数字编码器、光栅、磁栅、感应同步器、石英谐振传感器以及具有频率牵引特性的石英谐振传感器。这些传感器具有工作稳定性好,测量精确度高和数字输出等优点,因此,它们是高精度、高稳定性自动检测系统不可缺少的传感器。

第一章 角度数字编码器

角度数字编码器是器件化、数字化了的角度自动读数装置。它具有精密度高、结构简单紧凑、工作可靠和性能好等优点，因而成为近代光学技术和电子技术领域中的一个重要方面。在精密数字控制系统和随动系统中，作为角度-数字转换装置，它是不可缺少的重要部件。

角度数字编码器又称码盘。它是直接测量转轴角位置最有效的方法之一。它具有很高的分辨率和测量精度。角度数字编码器有两种类型：增量式和绝对式。增量式编码器需要一个计数系统和一个辨向系统。旋转的码盘通过敏感元件给出一系列脉冲，在计数中对每个基数进行加或减，从而记录了旋转的方向和角位移量。绝对式编码器不需要基数，它在任意位置都能给出与其对应的一个固定的数字码输出。它们的敏感元件可以是光电式的、磁电式的，也可以是接触式的。

角度数字编码器输出的数字码通常是二进制的，因为二进制码最适合表达数字形式的电信号。然而，人们习惯应用的数字是十进制的，而在表达角度时又习惯采用六十进制。它们之间还有一个转换关系和编码技术问题。

下面分别介绍增量式和绝对式角度数字编码器。

§ 1.1 增量式角度数字编码器

增量式角度数字编码器的结构最为简单，广泛用于机器人、雷达、数控机床和试验机械等系统中。直接应用增量式角度数字编码器进行测量，其转换精度并不高，通常可采用细分法来提高它的分辨率。

一、工作原理

增量式角度数字编码器的结构示意图，如图 1-1 所

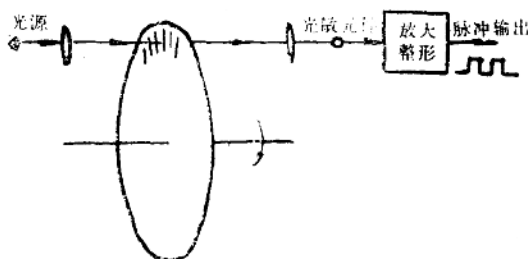


图 1-1

示。在一个码盘的边缘上开有相等角度的缝隙（分为透明和不透明部分），在开缝码盘两边分别安装光源及光敏元件。当码盘随工作轴一起转动时，每转过一个缝隙就产生一次光线的明暗变化，再经整形放大，可以得到一定幅值和功率的电脉冲输出信号。脉冲数就等于转过的缝隙数。如将上述脉冲信号送到计数器中去进行计数，从测得的数码数就能知道码盘转过的角度。

二、辨向电路

为了判断旋转方向，可以采用两套光电转换装置。令它们在空间的相对位置有一定的关系，从而保证它们产生的信号在相位上相差 $1/4$ 周期。图 1-2 所示为辨向电路的方框图。图 1-3 是它的波形图。

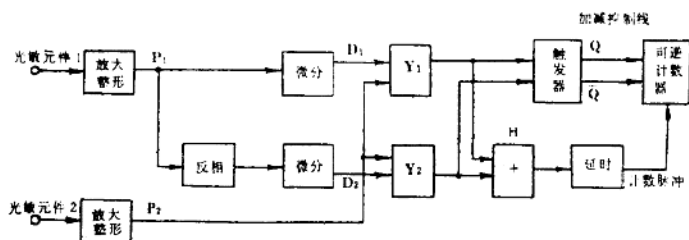


图 1-2

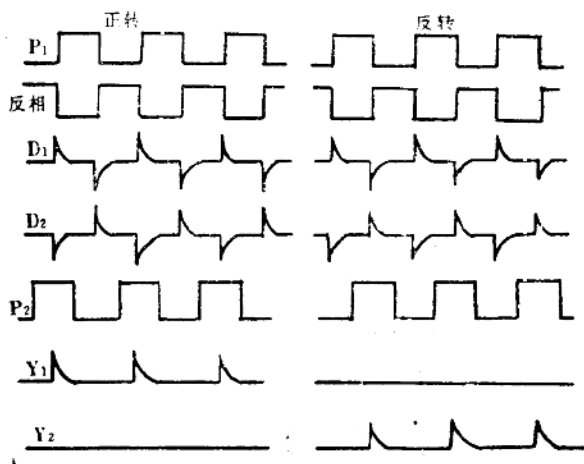


图 1-3