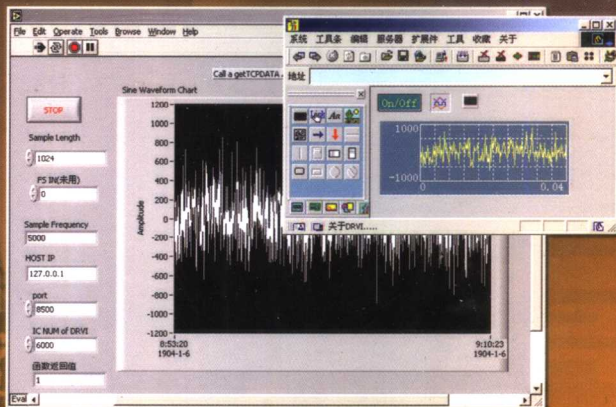
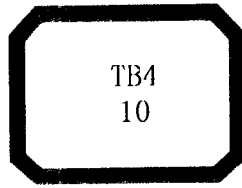


# 现代 测试技术

汉泽西 肖志红 董浩 编著





# 现代测试技术

汉泽西 肖志红 董浩 编著



机械工业出版社

本书是一本电类专业基础课程教材。“现代测试技术”课程的目的是为学生学习和掌握现代测试技术打下完整而扎实的软硬件基础。

全书共分六章，内容包括：数字式传感器、智能传感器、数据采集系统、计算机测试系统、虚拟仪器和测量不确定度。

本书可作为测控技术与仪器、自动化、机械设计制造及其自动化、电子信息科学与技术等专业的教材或教学参考书，亦可供测控领域的工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

现代测试技术/汉泽西, 肖志红, 董浩编著. —北京: 机械工业出版社, 2006.6

ISBN 7-111-19264-8

I. 现... II. ①汉...②肖...③董... III. 测试技术 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 057852 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 于苏华 责任编辑: 闫晓宇 版式设计: 张世琴

责任校对: 李秋荣 封面设计: 鞠 杨 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷

2006 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 12 印张 · 293 千字

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 88379711

封面防伪标均为盗版

# 前 言

我们正处在一个新技术革命的时代，新技术革命的关键是信息技术，信息技术是由测试技术、计算机技术、通信技术 3 部分组成的，显而易见在信息时代的信息“获取-处理-传输”的链条中，测试技术是关键和基础。在工科广义电类专业的本科生、研究生教育课程中，不应忽视关键的、基础性的测试技术内容的讲授。

正是基于以上的最基本的认识，笔者结合 20 年的教育实践，用易懂的语言把现代测试技术中最应掌握的若干知识点整理出来，以使读者可结合实际，构建一个现代测试系统。

本书中，肖志红编写了第 1、2、3 章；董浩编写了第 6 章；汉泽西编写了第 4、5 章，并统稿。

感谢李丽容教授、张家田教授在我们编写过程中给予指导和支持，感谢张欣副教授给予的具体帮助，感谢机械工业出版社的通力合作。

教材建设是高校工作中最基础的工作之一，我们谨以此书献给西安石油大学 55 周年校庆。

人间正道是苍桑，让我们永远地努力下去。

编 者  
2006 年 6 月

# 目 录

## 前言

## 第1章 数字式传感器 ..... 1

### 1.1 引言 ..... 1

#### 1.1.1 传感器的定义 ..... 1

#### 1.1.2 传感器的分类 ..... 1

#### 1.1.3 数字式传感器 ..... 1

### 1.2 数码输出型数字式传感器 ..... 2

#### 1.2.1 光电码盘型直接编码器的工作 原理 ..... 2

#### 1.2.2 二进制码盘 ..... 2

#### 1.2.3 循环码及二进制码与循环码的 转换 ..... 3

### 1.3 计数脉冲型数字式传感器 ..... 4

#### 1.3.1 光栅传感器 ..... 5

#### 1.3.2 增量编码器 ..... 8

#### 1.3.3 感应同步器 ..... 10

### 1.4 谐振式数字传感器 ..... 14

#### 1.4.1 振弦式传感器 ..... 14

#### 1.4.2 石英晶体谐振式传感器 ..... 17

### 练习题 ..... 18

## 第2章 智能传感器 ..... 19

### 2.1 智能传感器概述 ..... 19

#### 2.1.1 智能传感器的定义 ..... 19

#### 2.1.2 智能传感器的基本功能 ..... 19

#### 2.1.3 智能传感器与传统传感器的 区别 ..... 20

#### 2.1.4 智能传感器的分类 ..... 21

### 2.2 智能传感器系统实现的途径 ..... 21

#### 2.2.1 智能合成手段 ..... 21

#### 2.2.2 应用人工智能材料 ..... 28

### 2.3 应用 MEMS 技术的智能传感器 ..... 30

#### 2.3.1 微机电系统简介 ..... 30

#### 2.3.2 微机械加工技术 ..... 31

### 2.4 智能传感器发展趋势 ..... 39

### 思考题 ..... 41

## 第3章 数据采集系统 ..... 42

### 3.1 信号调理电路 ..... 43

#### 3.1.1 滤波电路 ..... 43

#### 3.1.2 放大电路 ..... 55

#### 3.1.3 调理电路的抗干扰 ..... 61

### 3.2 模拟多路开关 ..... 69

#### 3.2.1 模拟多路开关的结构 ..... 69

#### 3.2.2 模拟多路开关的主要参数 ..... 69

#### 3.2.3 常用集成模拟多路开关 ..... 70

#### 3.2.4 模拟多路开关应用举例 ..... 73

### 3.3 采样/保持器 ..... 74

#### 3.3.1 采样/保持器的工作原理 ..... 74

#### 3.3.2 采样/保持器的主要参数 ..... 75

#### 3.3.3 几种常用的采样/保持器 ..... 76

### 3.4 模/数转换器 ..... 77

#### 3.4.1 A/D 转换器的主要性能指标 ..... 77

#### 3.4.2 A/D 转换器的种类 ..... 78

#### 3.4.3 A/D 转换器应用举例 ..... 82

### 3.5 单片数据采集系统 ..... 87

#### 3.5.1 低功耗 8 通道串行 12 位数据采集 系统 MAX186 ..... 88

#### 3.5.2 低功耗可编程数据采集系统 TC534 ..... 88

#### 3.5.3 AduC824 高精度单片数据采集 系统 ..... 91

### 3.6 数据采集系统的设计 ..... 92

#### 3.6.1 数据采集系统结构形式的确定 ..... 93

#### 3.6.2 系统参数设计和器件选择 ..... 95

#### 3.6.3 高速数据采集系统 ..... 100

### 思考题与习题 ..... 101

## 第4章 计算机与测控网络 ..... 102

### 4.1 现场总线 ..... 102

#### 4.1.1 简介 ..... 102

#### 4.1.2 现场总线的几种类型 ..... 106

#### 4.1.3 结论 ..... 117

#### 4.1.4 互联网技术对现场总线技术发 展的影响 ..... 119

4.2 测控网络 .....	126	<b>第 6 章 测量不确定度</b> .....	166
4.2.1 简介 .....	126	6.1 测量不确定度理论产生的背景 和作用 .....	166
4.2.2 现场总线的网络拓扑结构 .....	127	6.2 测量不确定度理论中的有关术语 及其概念 .....	167
4.2.3 现场总线的通信模式 .....	128	6.2.1 实验标准偏差 (Experimental Standard Deviation, 简称标准差) .....	167
4.2.4 网络扩展与网络互连 .....	129	6.2.2 测量结果的重复性 (Repeatability of Results of Measurements, 简称重 复性) .....	167
4.2.5 测控网络的应用 .....	131	6.2.3 测量结果的复现性 (Reproducibility of Results of Measurement, 简称复 现性) .....	167
<b>第 5 章 虚拟仪器</b> .....	133	6.2.4 自由度 $\nu$ (Degree of Freedom) ...	167
5.1 虚拟仪器概述 .....	133	6.3 经典误差理论及其缺陷 .....	168
5.1.1 仪器与虚拟仪器 .....	133	6.3.1 经典误差理论概述 .....	168
5.1.2 虚拟仪器与传统仪器的比较 .....	135	6.3.2 经典误差理论存在的缺陷 .....	168
5.1.3 虚拟仪器的特点 .....	135	6.4 测量不确定度的概念 .....	169
5.1.4 虚拟仪器技术在国际和国内的发 展现状 .....	136	6.4.1 测量不确定度的定义及其理解 ...	169
5.2 虚拟仪器系统的构成 .....	136	6.4.2 测量不确定度与测量误差的联系 和区别 .....	170
5.2.1 数据采集系统的构成方法 .....	137	6.4.3 测量不确定度较测量误差在评定 测量结果中的优势 .....	171
5.2.2 GPIB 仪器控制系统的构成方法 ...	137	6.5 测量不确定度的分类及表示 .....	172
5.2.3 虚拟仪器控制系统的构成方法 ...	138	6.5.1 测量不确定度的分类 .....	172
5.3 DAQ (Date Acquisition) 数据采 集卡 .....	139	6.5.2 测量不确定度的表示 .....	172
5.4 VXI 总线系统 .....	141	6.5.3 自由度 .....	172
5.4.1 VXI 总线的产生背景 .....	141	6.6 测量不确定度的评定方法 .....	173
5.4.2 VXI 总线系统的总线构成 .....	143	6.6.1 测量不确定度的评定过程 .....	173
5.4.3 VXI 总线系统扩展的总线 .....	145	6.6.2 建立数学模型 .....	173
5.4.4 VXI 总线系统的机械规范 .....	146	6.6.3 分析不确定度来源 .....	174
5.4.5 VXI 总线系统的系统控制和资源 管理 .....	147	6.6.4 标准不确定度的 A 类评定 .....	175
5.4.6 VXI 总线系统的软件 .....	151	6.6.5 标准不确定度的 B 类评定 .....	178
5.4.7 VXI 即插即用 .....	152	6.6.6 标准不确定度 A 类、B 类评定的 区别和联系 .....	179
5.5 软件 .....	153	6.6.7 合成标准不确定度的评定 .....	180
5.5.1 概述 .....	153	6.6.8 扩展 (展伸) 不确定度 .....	181
5.5.2 BASIC 语言 .....	154	6.6.9 不确定度的最后报告 .....	183
5.5.3 面向对象程序设计 (OOP) .....	154	<b>参考文献</b> .....	184
5.5.4 图形编程环境 (GUI) 设计工 具 .....	154		
5.5.5 可视编程方法 Labview .....	156		
5.5.6 可视编程方法 Labview 程序设 计实例 .....	157		
5.6 基于 PC 和 DSP 系统的虚拟仪器 设计实例 .....	159		

# 第 1 章 数字式传感器

## 1.1 引言

现代信息技术的三大基础是信息的采集、传输和处理技术。传感器是信息采集的首要部件，且置于系统的最前端，它对系统的功能起着决定性的作用。

### 1.1.1 传感器的定义

“传感器是能够感受规定的被测量，并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置”这是我国制定的“传感器通用术语”国家标准（GB/T 7665—1987）中对传感器的定义。目前由于电子技术的进步，使电量具有便于传输、转换等特点，因此通常传感器将所感受到的被测信息转换成电量输出。

### 1.1.2 传感器的分类

传感器的分类方法很多，较常用的有以下几种：①按被测量的类型来分，传感器可分为位移、压力、温度、流量、转速、气体成分等类型；②按传感器的作用原理来分，传感器可分为电阻式、电感式、磁电式、压电式、电容式、光电式、热电式、谐振式、力平衡式等类型；③按能量关系来分，传感器可分为能量转换型（无源型）和能量控制型（有源型）；④按输出量类型来分，传感器可分为：模拟式和数字式。

### 1.1.3 数字式传感器

输出信号为模拟量的传感器为模拟式传感器。模拟式传感器自身的检测精度和分辨率一般都不太高，加之随着计算机技术迅猛发展，绝大部分检测控制系统都是以微机或微处理器为核心，在这样的数字化系统中，模拟式传感器的输出必须经过 A/D 转换成数字量，这样增加了系统的复杂性，而且 A/D 转换器的转换精度受到位数和参考电压精度的限制，导致了系统的总精度也将受到限制。而采用数字式传感器在很大程度上就可解决上述问题。

所谓数字式传感器是指能把被测量直接转换成数字量输出的传感器。和模拟式传感器相比，数字式传感器具有以下特点。

1) 测量精度和分辨率高，测量范围大。

2) 信号抗干扰能力强、稳定性好，且便于处理、传送和储存。

3) 与微机接口方便。输出信号经过简单处理可直接进入微处理器，不需要在传感器与微处理器之间增加 A/D 转换器，从而提高了系统的可靠性和响应速度，同时又降低了成本。

正是由于具有上述优点，近年来数字式传感器获得迅速发展，成为传感技术的重要发展方向之一。

目前在测控系统中被广泛应用的主要有以下几类数字式传感器。

- 1) 直接以数字量形式输出的数字式传感器。
- 2) 以脉冲形式输出的数字式传感器。
- 3) 以频率形式输出的数字式传感器。

## 1.2 数码输出型数字式传感器

输出为直接与待检测的模拟量相对应的数字量，这样的数字式传感器称为数码输出型数字式传感器。最典型的例子就是直接编码器。直接编码器又称为绝对编码器，它的主要作用是测量直线位移与角位移，是按位移量直接进行编码的转换器，通常输出的是二进制的数字编码。从实现转换的方式上它可分为电刷接触式、感应式、光电式等，其中以光电转换式直接编码器用途最广，它可通过光电转换把位移量变换成“数字代码”形式的电信号。它的优点是没有触点磨损，稳定可靠，坚固耐用，精度高。目前已在数控机床、伺服电动机、机器人、回转机械、传动机械及办公设备、自动控制技术和检测传感技术领域得到广泛的应用，且应用领域不断扩大。

光电转换式直接编码器分为两种，一种为光电标尺型，一种为光电码盘型。光电标尺型用于测量线位移，光电码盘型既可测量角位移又可测量线位移（可先通过齿条和齿轮或螺母和螺杆装置把直线运动转换成旋转运动）。这里重点介绍光电码盘型直接编码器，它是用于角位移测量的非常有效和直接的数字式传感器。它的优点是无触点磨损，每条缝隙宽度可做得很小，所以其精度和分辨率很高。

### 1.2.1 光电码盘型直接编码器的工作原理

光电码盘型直接编码器的原理图如图 1-1 所示（图中数码 1~5 依次分别代表光源、光学系统、码盘、狭缝和光电元件）。码盘是一块光学玻璃，上面刻有许多圈同心码道。每圈码道都按一定规律排列着若干透光和不透光的狭缝，称为亮区和暗区。光源通过光学系统把平行光投射到码盘上，通过亮区的光线经狭缝形成一束很窄的光束照射到光电元件上。对应每一圈码道有一个光电元件，当码盘处于不同位置时，各光电元件根据是否感受到光照的情况输出不同的高低电平，用来代表数码 1 和 0。码盘上的码道数等于光电元件的个数，它决定着二进制数的位数  $n$ 。这样当码盘转过一定的角度时，通过光电转换就会得到与之相对应的  $n$  位二进制码。于是转角就被转换成数字量。根据码盘的不同，得到的此  $n$  位二进制码可分为：二进制码、循环码、十进制码、六十进制码等等。以下分别介绍二进制码盘、循环码盘。

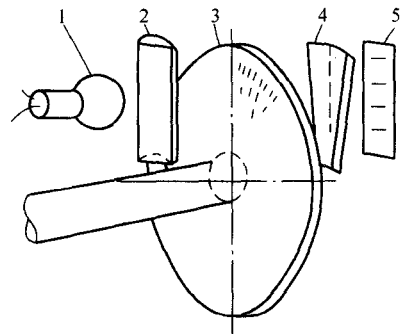


图 1-1 光电码盘型直接编码器

### 1.2.2 二进制码盘

四位二进制码盘如图 1-2 所示，如果用白色代表透光区，用 1 表示，黑色为不透光区，用 0 表示。感光元件根据受到的光照情况输出 4 位二进制码。码盘共分 4 圈，最外圈为第一道码盘，共分  $2^4$  个亮暗间隔，对应二进制码输出的最低位  $A_1$ ，最内圈半圈透光半圈不透



光，对应二进制码输出的最高位  $A_4$ 。当狭缝对准图 1-2 所示的位置 a 区、d 区、h 区、o 区时，输出的二进制码分别为 1111、1100、1000、0001。

对于  $n$  位二进制码盘，最小分辨角度为

$$\theta = 360^\circ/2^n$$

显然，位数  $n$  越大，所能分辨的最小角度  $\theta$  越小，测量精度越高。例如一个 10 码道的绝对编码器可以产生  $2^{10}$  (1024) 个编码，能分辨的最小角度为  $0.35^\circ$ ，目前已可以制作 18 个码道的绝对式编码器，分辨角度为  $\theta = 360^\circ/2^{18} \approx 0.0014^\circ$ 。

如果被测对象最初静止时，传感器输出 0000，那么此被测物体转动后，码盘转角  $\alpha$  与输出的二进制码之间的关系为

$$\alpha = 360^\circ \frac{\sum_{i=1}^4 A_i \times 2^{(i-1)}}{2^n} = N\theta \quad (1-1)$$

式中， $N$  为二进制码所对应的十进制数。

二进制码盘有它的缺点，每个码盘的黑白分界线总有一半与相邻码道的黑白分界线是对齐的。这样一旦由于制作误差和安装误差造成黑白分界线稍有错位，输出就会产生非常严重的误差，称为粗误差。举例说明一下，在图 1-2 中，假设狭缝原来对准 i 区，现在转动码盘使它对准 h 区。部分码盘的放大图如图 1-3 所示。a 为最高位码道黑白分界线的理想位置，它与其他三位码道的黑白分界线正好对齐。当码盘转动，光束由 i 区扫到 h 区时，输出由 0111 变为 1000。如果由于高位码道黑白界限刻画不精确，高位码道分界线偏到  $a'$ ，那么光束由 i 区扫到 h 区时，数字输出就会从 0111 变到 0000 再变到 1000，中间出了一个粗误差 0000；同样的道理，若高位码道分界线偏到  $a''$ ，数字输出就会从 0111 变到 1111 再变到 1000。可见以上情况下出现了  $180^\circ$  左右的粗误差。为了消除这种粗误差现象，可以采用循环码盘。

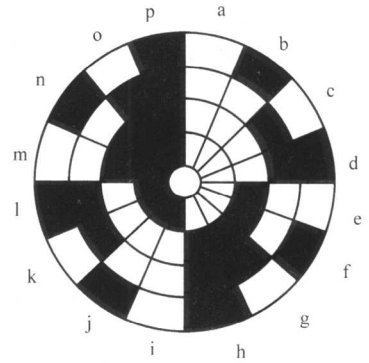


图 1-2 二进制码盘

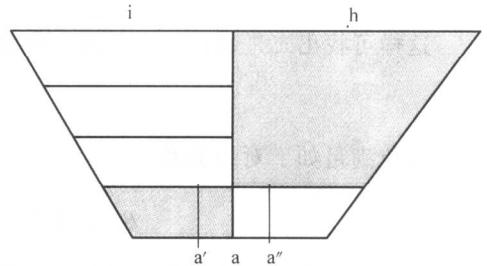


图 1-3 二进制码盘可能出现的粗误差

### 1.2.3 循环码及二进制码与循环码的转换

4 位循环码盘的特点就是相邻码道的黑白分界线都不对齐，这样循环码盘转到相邻位置，不可能出现粗误差，即相邻的两组编码中只有一位发生变化。只要适当限制各码道的误差，就不会产生粗误差。由于这一优点，循环码盘获得了广泛的应用。

表 1-1 是十进制数、二进制数及循环码对照表，由此表可看出，要想直接根据循环码来得到码盘旋转的角度并不容易，它与所对应的旋转角度并不满足式 (1-1) 所示的关系。但是可以找到循环码与二进制码的对应关系和相互转换准则。一旦循环码变成对应的二进制码后就可代入式 (1-1) 确定与之对应的角度。

由二进制码和循环码特点,将二进制码与其本身右移一位后,再舍去末位的数码作不进位加法(异或功能),所得结果就是循环码。二进制码变循环码的过程如下

$$\begin{array}{r} A_n A_{n-1} \cdots A_1 A_0 \\ \oplus \quad A_n \cdots A_2 A_1 \\ \hline B_n B_{n-1} \cdots B_1 B_0 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{二进制码} \\ \text{舍去末位 } A_0, \text{再右移一位} \\ \text{作不进位加法得到循环码} \end{array}$$

表 1-1 十进制数、二进制数及循环码对照表

十进制数 $N$	二进制数 $A_4 A_3 A_2 A_1$	循环码 $B_4 B_3 B_2 B_1$	十进制数 $N$	二进制数 $A_4 A_3 A_2 A_1$	循环码 $B_4 B_3 B_2 B_1$
0	0000	0000	9	1001	1101
1	0001	0001	10	1010	1111
2	0010	0011	11	1011	1110
3	0011	0010	12	1100	1010
4	0100	0110	13	1101	1011
5	0101	0111	14	1110	1001
6	0110	0101	15	1111	1000
7	0111	0100			
8	1000	1100			

这样可找出二进制码与循环码各位之间的关系:二进制码与循环码的最高位相同

$$A_n = B_n \quad (1-2)$$

其余各位满足如下对应关系

$$B_i = A_i \oplus A_{i-1} \text{ 或 } A_i = A_{i-1} \oplus B_i \quad (1-3)$$

由式(1-2)、式(1-3)可得出循环码转换成二进制码的电路,如图1-4所示

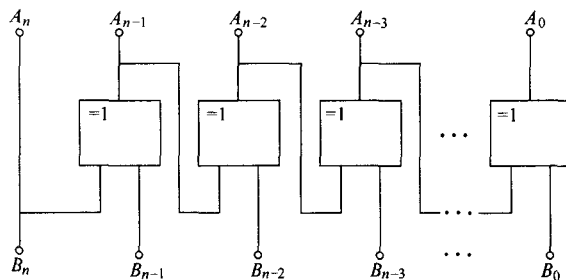


图 1-4 循环码转换成二进制码的电路

### 1.3 计数脉冲型数字式传感器

将待测模拟量转换成一定的数字脉冲信号,对这些数字脉冲进行计数,即可得到待测模拟量。这样的数字式传感器称为计数脉冲型数字式传感器。

光栅、磁栅、容栅传感器、感应同步器、增量编码器都属于此类传感器。

### 1.3.1 光栅传感器

光栅传感器是应用光栅的莫尔效应进行精密测量的传感器，只要是能够转换成位移的物理量，如速度、加速度、振动、变形等，均可测量。它具有许多优点，例如它是脉冲数字输出，而且测量精度很高，具有较强的抗干扰能力，因此被广泛应用于线位移和角位移的自动检测以及精密测量领域中，测量精度可达几微米。一般认为在角位移和圆分度方面，它是测量精度最高的一种传感器。

#### 1. 光栅

光栅是上面有很多均匀排列的等节距刻线的光器件。按工作原理光栅可被分为物理光栅和计量光栅，前者主要用于光谱分析和光波波长的测量，后者主要用于精密测量和精密机械的自动控制中。光栅传感器中使用的就是计量光栅。如图 1-5 所示，密集的共同间隔的细小的黑白条纹就是光栅。它是在光学玻璃板上均匀刻画出来的，没有刻画的白处透光，刻画的黑处不透光。光栅上的刻线称为栅线，栅线的宽度为  $a$ ，缝隙宽度为  $b$ ， $a + b = W$ 。 $W$  称为光栅的栅距或光电常数，它是光栅的重要参数，通常情况下  $a = b = W/2$ ，也可刻成  $a : b = 1.1 : 0.9$ 。

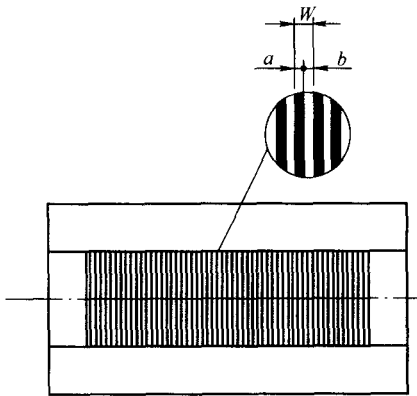


图 1-5 光栅示意图

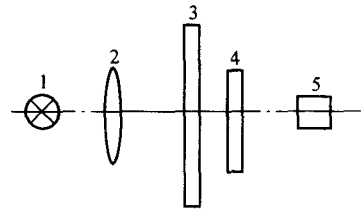


图 1-6 光栅传感器的结构示意图

1—光源 2—透镜 3—主光栅  
4—指示光栅 5—光电元件

光栅的类型按其用途可分为长光栅和圆光栅，长光栅主要测量线位移，圆光栅主要用来测量角位移；按栅线形式的不同，分为黑白光栅（辐射光栅）和闪耀光栅（相位光栅）；按光线的走向又分为透射光栅和反射光栅，透射光栅是将栅线刻制在透明的玻璃上，反射光栅是将栅线刻制在具有反射能力的金属上。以下主要介绍长透射光栅类型的光栅传感器。

#### 2. 光栅传感器的结构及莫尔条纹的形成

如图 1-6 所示，光栅传感器主要由光源、透镜、主光栅、指示光栅和光电元件组成。主光栅比指示光栅要长，它们都是栅距相同的光栅。一般情况下，主光栅装在运动部件上，指示光栅装在固定部件上，两者刻面相对，中间留有间隙。光栅刻度一般为每毫米 10、25、50、100 或 250 条线。当光源发出的光线通过透镜后形成平行光照在主光栅上（主光栅、指示光栅之间有很小的夹角  $\theta$ ），这时在近乎与栅线垂直的方向上出现了明暗相间的条纹，这就是莫尔条纹，如图 1-7 所示，它是一个亮带和暗带交织的条纹。

下面详细介绍莫尔条纹的特点

在  $h-h'$  方向上, 两光栅的不透光线条彼此重合, 光线从缝隙中通过, 透光面积最大, 形成亮带。在  $g-g'$  方向上, 两光栅的不透光线条彼此错开, 挡住光线, 形成暗带。当  $a = b = W/2$  时,  $g-g'$  方向上是全黑的。相邻的两莫尔条纹亮带 (或暗带) 中心线之间的距离  $B$  为莫尔条纹间距。图 1-7b 表示主光栅和指示光栅透光线条中心线相交的情况, 它们交点的连线是亮带的中心线, 可见

$$\alpha = \frac{\theta}{2}$$

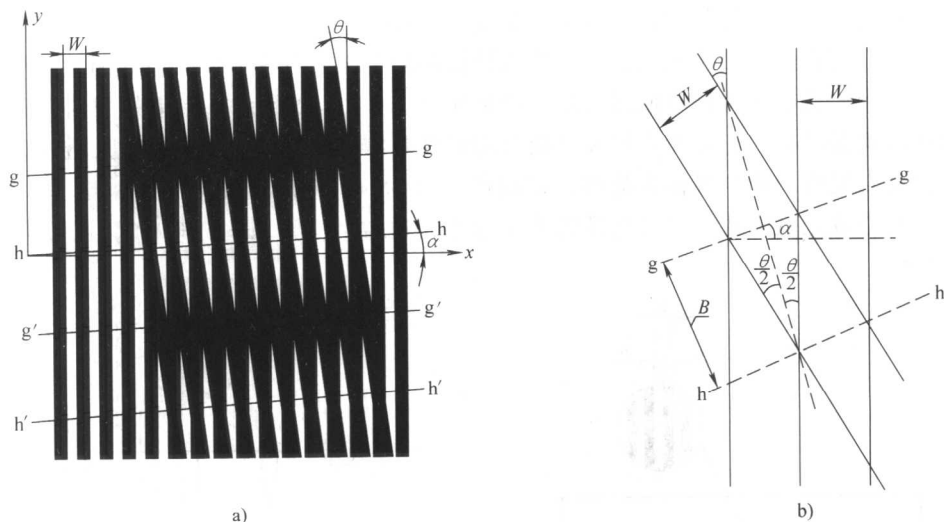


图 1-7 莫尔条纹

由上式可看出, 莫尔条纹的方向与光栅的垂直方向只差  $\frac{\theta}{2}$ , 所以当  $\theta$  很小时, 莫尔条纹与栅线的方向近乎垂直。

光栅的栅距与莫尔条纹间距的对应关系为

$$B = \frac{W}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \approx \frac{W(\text{mm})}{\theta(\text{rad})} \quad (1-4)$$

任一光栅沿垂直于刻线方向运动时, 莫尔条纹就沿着垂直于光栅运动的方向运动。当光栅改变运动方向时, 莫尔条纹也随之改变运动方向。如图 1-7 所示的情况, 即主光栅栅线与  $y$  轴平行, 指示光栅相对于主光栅有一个逆时针夹角  $\theta$ , 这时如果指示光栅不动, 主光栅向左移动, 则莫尔条纹向上移动, 主光栅向右移动, 则莫尔条纹向下移动。如果指示光栅相对于主光栅有一个顺时针夹角  $\theta$ , 情况正好相反。因此可以通过观察莫尔条纹的运动方向来判断主光栅或指示光栅的位移方向。由式 (1-4) 还可看出莫尔条纹具有位移放大作用。放大倍数

$$K = \frac{B}{W} \approx \frac{1}{\theta}$$

由于  $\theta$  很小,  $K$  就会很大, 说明  $B$  远大于  $W$ , 即光栅传感器能把极细微的栅线放大为

很宽的条纹，便于观测。当光栅移动一个栅距时，莫尔条纹就移动一个莫尔间距。用光电元件接收莫尔条纹信号，经电路处理后可得主光栅移动的距离，即可通过测量莫尔条纹的位移量来得到主光栅的微小的位移。莫尔条纹间距可通过调节  $\theta$  来改变， $\theta$  越小，条纹间距越大。例如设  $\theta = 0.1^\circ$ ， $K \approx 573$ ，这时若  $W = 0.01\text{mm}$ ，则  $B = 5.73\text{mm}$ 。

光电转换器件的输出与光栅位移的关系如图 1-8 所示，假设横轴表示主光栅移动的距离  $x$ ，纵轴表示光电元件输出的电压，原点对应莫尔条纹某亮带的中心线即表示光强最大，这时光电元件输出的电压为最大，因此对应于在  $x$  轴距离原点  $\pm nW$  ( $n$  为正整数) 处都会出现输出电压的最大值。同理，对应于在  $x$  轴距离原点  $\pm mW/2$  ( $m$  为奇数) 处为莫尔条纹的暗带，光电元件输出的电压为最小值。所以光电元件的输出信号会随光栅位移成周期性变化，波形近似于正弦波。光电转换器件输出电压  $u_0$  可近似用下式表示：

$$u_0 = U_{av} + U_m \cos\left(\frac{x}{W} 360^\circ\right)$$

式中， $U_{av}$  为直流电压分量； $U_m$  为交流电压分量的幅值； $x$  为主光栅移动的距离。

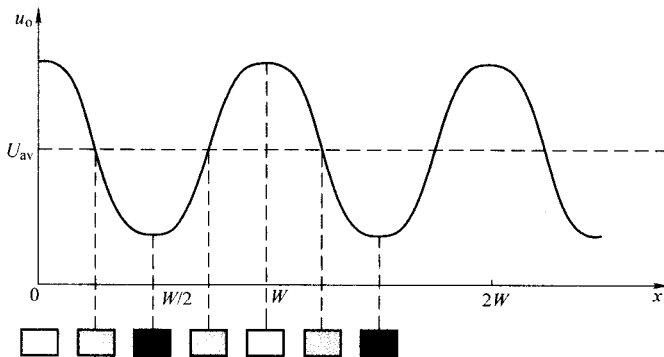


图 1-8 光栅位移与光电元件输出电压的关系

可以看出，只要测量出波形变化的周期数  $N$  (等于莫尔间距移动数) 就可知道光栅移动了几个栅距。通常此正弦信号经过处理后被送入一个计数电路，得到计数脉冲输出。主光栅移动一个栅距，计数器就加一或减一。

莫尔条纹具有平均光栅误差的作用，由于莫尔条纹是由光栅的大量刻线来共同完成的，光电元件接收的光信号是一个所有刻线综合平均的结果，此结果对各栅距起了平均作用，从而能在很大程度上消除栅距的局部误差和短周期误差的影响。个别栅线的栅距或断线及疵病对莫尔条纹的影响很微小。这说明莫尔条纹的位置准确度大大地得到了提高，从而提高了光栅传感器的测量精度。

### 3. 辨向原理与细分技术

#### (1) 辨向原理

实际情况下，大部分被测物体的移动基本上都不是单向的，通常既有正向运动，又有反向运动。如果只在光栅运动垂直方向放置单个光电元件，它只能检测出主光栅移动了多少个栅距，无法判别光栅的正确运动方向。为了解决这个问题，要在条纹运动方向放两个间距为  $\frac{B}{4}$  或  $\left(n + \frac{1}{4}\right)B$  ( $n$  为正整数) 的光电元件，这样就会得到两个相位相差  $90^\circ$  的正弦信号  $u_1$ 、

$u_2$ ，把这两个信号送入图 1-9 所示的辨向电路中去处理，这样光栅正向运动一个栅距时，得到的累计脉冲加一，如果光栅反向移动一个栅距，累计脉冲减一。

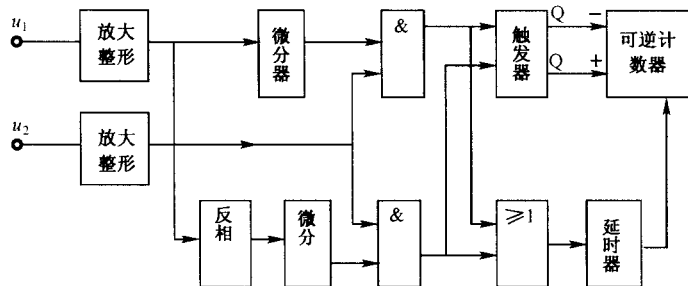


图 1-9 辨向电路原理图

## (2) 细分技术

上述电路的分辨率为一个光栅栅距，要想提高分辨率可采用两种办法：一是减小栅距即增大刻线密度；二是采用细分技术，即在莫尔条纹信号变化的一个周期内输出若干个脉冲，以减小脉冲当量（一个脉冲代表的位移），使光栅每移动一个栅距，电路会输出  $n$  个均匀的脉冲，从而使分辨率提高到  $W/n$ 。第一种方法受工艺制造的限制，因此第二种方法用得较多。细分方法很多，用得最多的是直接细分法、电桥细分法和复合细分法。这里主要介绍直接细分法。

直接细分也称位置细分，常用的细分数为 4。4 细分是在 4 个依次相距  $B/4$  的地方放置四个光电元件，这样可获得依次相差  $90^\circ$  的 4 个正弦信号，用鉴零器分别鉴取这四个信号的零电平，这样莫尔条纹的一个周期内将产生 4 个计数脉冲，这样分辨率提高到  $W/4$ ，从而实现了 4 细分。

4 细分也可在相距  $B/4$  的位置上放两个光电元件来完成。两个光电元件输出两个相位相差  $90^\circ$  的正弦信号  $u_1$ 、 $u_2$ ， $u_1$ 、 $u_2$  分别通过各自的反相电路得到与  $u_1$ 、 $u_2$  相位相反的两个正弦信号  $u_3 = -u_1$ ， $u_4 = -u_2$ 。最后通过逻辑组合电路在一个栅距内获得均匀分布的四个脉冲信号，提高了分辨率。

### 1.3.2 增量编码器

增量编码器同绝对编码器一样，包括长条形和圆盘形两种，从实现转换的方式上它可分为电刷接触式、感应式、光电式等增量编码器。用得最多的是圆盘形增量编码器，它又称为脉冲盘式数字传感器。虽然绝对式编码器的精度很高，但由于所用的码道多，结构较复杂，只能用于角位置或低速的角速度测量，而增量式编码器由于码道少，结构简单，所以响应速度快，除了角位移，还可用于较高速度的角速度测量。近年来一些新型的增量编码器相继问世，如 IEM（运动增量编码器，Incremental Motion Encoder），其测量灵敏度已达到了微米级，而且抗干扰能力非常强。

下面以光电式增量编码器为例作一简要介绍

#### 1. 光电式增量编码器的基本工作原理

光电式增量编码器的基本组成如图 1-10 所示。它的码盘比直接编码器的码盘简单得多，

一般只需三条码道，这里的码道已不具有绝对码盘中码道的意义，不能直接给出与被测物体位置相对应的  $n$  位编码输出。增量编码器的光电元件也只有 3 个。码盘上最外圈码道上只有一条透光的缝，它作为码盘的基准位置，它所产生的脉冲将给计数系统提供一个初始的零位（或定位）信号。中间一圈称为增量

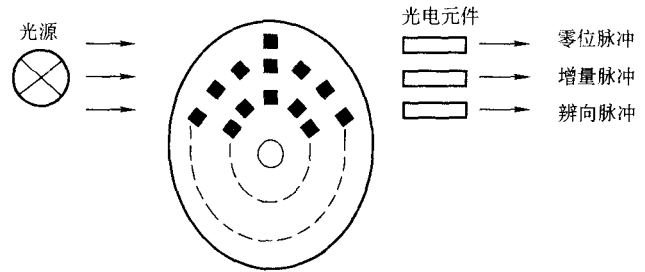


图 1-10 增量编码器示意图

码道，可用来产生计数脉冲。最内一圈码道称为辨向码道。这两圈码道等角距地分布着  $m$  个透光与不透光的扇形区，但彼此错开半个扇形区，扇形区的多少决定了增量编码器的分辨率，扇形区越多，分辨率越高。当码盘转动时，检测光路时通时断，形成光电脉冲，码盘每转一周，与这两圈码道相对应的两个光电元件将产生  $m$  个增量脉冲和  $m$  个辨向脉冲。增量脉冲和辨向脉冲在时间上相差四分之一周期。所以，如果在编码器正转时，增量计数脉冲超前辨向脉冲  $\pi/2$ ，那么在编码器反转时，增量计数脉冲滞后辨向脉冲  $\pi/2$ 。这两个脉冲信号与零位信号一起通过信号处理电路的整形、放大、细分、辨向、计算后即可得到角位移。

## 2. 光电增量编码器的应用

光电增量编码器除直接用于测量相对角位移之外，还常用来在某些场合测量线位移以及转轴的转速。

测量线位移必须用一套机械装置（如齿条、齿轮、螺母、螺杆、传送带等装置）把直线运动转换成旋转运动，测量系统的精度主要取决于机械装置的精度。

增量编码器测量转轴转速的方法通常有两种，一种是在给定的时间间隔内对编码器的输出进行计数（如图 1-11 所示），根据得到的结果就可求出转轴的平均转速（单位为  $r/min$ ）。

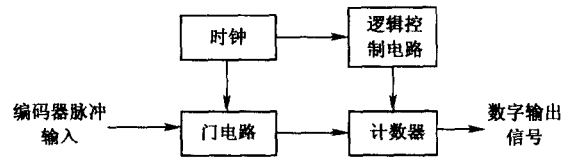


图 1-11 用增量编码器测转轴的平均速度

$$v = \frac{60n}{NT} \quad (1-5)$$

式中， $N$  为编码器每转一圈产生的脉冲个数； $T$  为计数时间间隔（单位为秒）； $n$  为时间  $T$  内总共计得的脉冲数。

这种测量方法的分辨率随被测速度而变，其测量精度取决于计数时间间隔，测量低转速时精度很低。例如，一个编码器每转产生 720 个脉冲，当转速为  $60r/min$ ，若计数时间间隔为 1s 时，则分辨率达  $1/720$ ；若转速为  $6000r/min$ ，则分辨率可达  $1/72000$ 。可见这种测量转速方法的分辨率随被测速度而变化，被测量转速越高，达到的测量分辨率越高，同时若计数时间间隔取值太小，以致于在计数时间间隔内得到的脉冲较少，会引起测量精度降低。

增量编码器测量转轴的转速的另一种方法是测量增量编码脉冲的周期。如图 1-12 所示，计数器的计数脉冲来自时钟，通常时钟的频率较高；而计数器的选通信号是编码器输出脉冲。这时候可测得转轴的瞬时速率（单位为  $r/min$ ）为

$$v = \frac{60f_c}{Nn} \quad (1-6)$$

式中,  $N$  为编码器每转一圈产生的脉冲个数;  $f_c$  为时钟的频率;  $n$  为在码盘输出一个脉冲周期内总共计得的脉冲数。

从式 (1-6) 中可以看出, 这种测速方法适合于转速较慢的场合。例如, 一个编码器每转产生 100 个脉冲, 时钟频率为 1MHz, 当转速为 100r/min 时码盘每个脉冲周期为 0.006s, 这时一个码盘脉冲周期可得到 6000 个时钟脉冲的计数, 即分辨率为 1/6000; 若转速为 6000r/min, 则分辨率降至 1/100。可见, 转速较高时分辨率低, 同时在转速不变, 时钟频率足够高的情况下, 码盘上的扇区数目越多, 反映的瞬时变化就越准确。

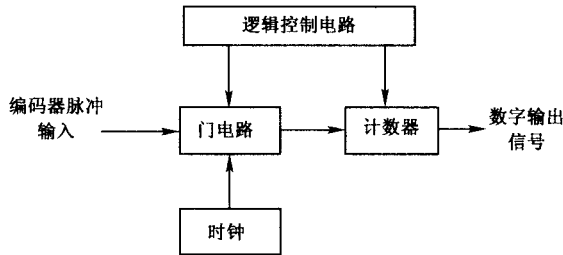


图 1-12 用增量编码器测转轴的瞬时速度

### 1.3.3 感应同步器

感应同步器是应用电磁感应原理把位移量 (以及与此相关的物理量如转速和振动等) 转换为数字电量的一种精密传感器。位移量既可以是直线位移量, 也可以是角位移量。测量直线位移的称为直线式感应同步器 (长形感应同步器), 测量角位移的称为圆感应同步器。它们的优点是测量精度高、抗干扰能力强、使用寿命长和便于成批生产等。目前, 感应同步器广泛应用于程控机床、雷达天线定位跟踪以及一些加工测量装置中。

#### 1. 感应同步器的结构特点

感应同步器具有两个平面形的印制电路绕组, 相当于变压器的一次及二次绕组。并且它的极对数很多, 一般为几百对或上千对 (这里应注意, 绕组的感抗远小于其电阻值)。这两组绕组一部分是固定的, 另一部分是可运动的, 它们对于直线式感应同步器称为定尺和滑尺, 对于圆感应同步器称为转子和定子。直线式感应同步器可分为标准型和窄形两种, 图 1-13 为标准型直线式感应同步器的结构示意图, 它的精度很高, 应用广。窄形直线感应同步器中定尺、滑尺长度与标准型相同, 仅是宽度较窄。

直线式感应同步器安装时, 定尺和滑尺的平面绕组对面放置。由于其间隙的变化会影响到电磁耦合度的变化, 因此气隙一般保持在  $0.25\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$  的范围内。如果测量长度超过 175mm 时, 可将几根定尺接起来使用, 甚至可连接长达十几米, 但必须保持安装平整。

定尺和滑尺绕组分布示意图如图 1-14 所示, 定尺为连续绕组, 如图 a 所示, 导电片的片宽为  $a_2$ , 片间的间隔为  $b_2$ , 节距  $W_2 = 2(a_2 + b_2)$ 。滑尺绕组有两种形式, 一种为 W 形如图 c 所示, 一种 U 形如图 b 所示。滑尺绕组都为断续绕组, 它包括两部分, 一部分为正弦绕组又称为 S 绕组。另一部分为余弦绕组又称 C 绕组。S 绕组和 C 绕组中心线的距离为



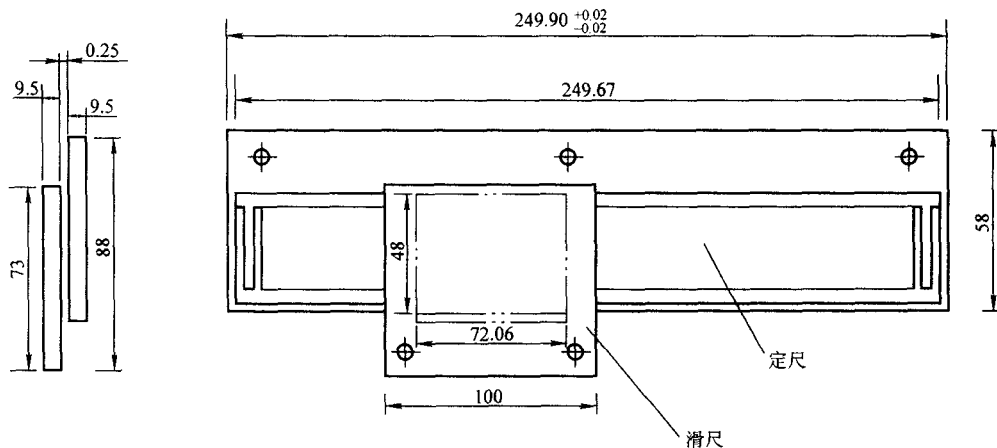


图 1-13 直线式感应同步器示意图

$$l_1 = \left( \frac{n}{2} + \frac{1}{4} \right) W_1$$

滑尺的节距  $W_1$  与定尺的节距  $W_2$  相等，即

$$W = W_1 = W_2$$

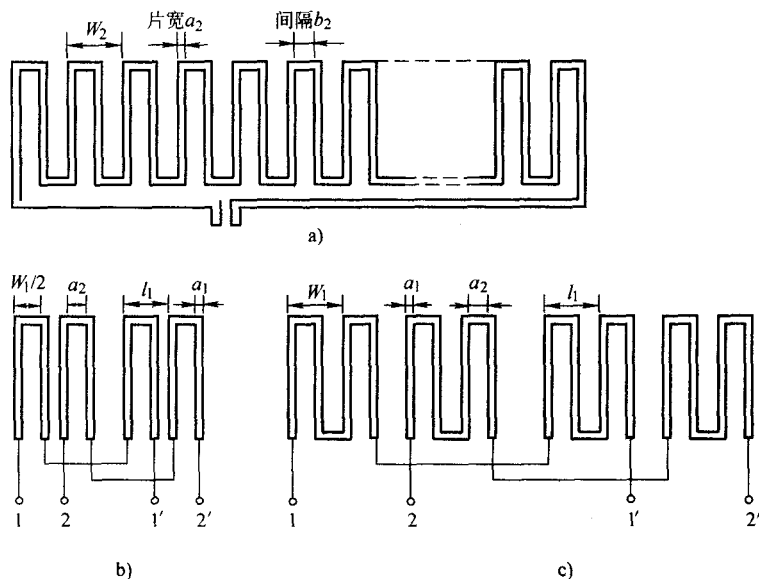


图 1-14 定尺和滑尺绕组分布图

## 2. 感应同步器的工作原理

感应同步器可以看作一个耦合系数随位移变化的变压器，其输出的电动势与位移有正弦或余弦函数的关系。利用电路对感应电动势进行适当的处理，可把位移转换成数字信号。下面以直线式感应同步器为例进行讨论。