



## 5.3.3 光栅传感器

5.3.3.1 光栅基础

5.3.3.2 光栅传感器的工作原理

5.3.3.3 莫尔条纹细分技术

5.3.3.4 常用光学系统



## 5.3.3.1 光栅基础

### 1) 光栅分类及结构 ■

#### a. 光栅分类 ■

光栅按其原理和用途可分为物理光栅和计量光栅。

物理光栅刻线细密，利用光的衍射现象，主要用于光谱分析和光波长等量的测量；

在几何量计量中使用的光栅称为计量光栅，计量光栅主要利用莫尔现象实现长度、角度、速度、加速度、振动等几何量的测量。 ■

按其透射形式，光栅可分为透射式光栅和反射式光栅。刻划基面采用玻璃材料的为透射式光栅；刻划基面采用金属材料的为反射式光栅。



按其栅线形式，光栅可分为黑白光栅（幅值光栅）和闪耀光栅（相位光栅）。黑白光栅是利用照相复制工艺加工而成，其栅线与缝隙为黑白相间结构；相位光栅的横断面呈锯齿状，常用刻划工艺加工而成。 ■

按其应用类型，光栅可分为长光栅和圆光栅。长光栅又称为光栅尺，用于测量长度或线位移；圆光栅又称盘栅，用于测量角度或角位移。 ■

目前还发展了激光全息光栅和偏振光栅等新型光栅。本章主要介绍透射式的计量光栅。



## b. 光栅结构 ■

所谓光栅，是在刻划基面上等间距（或不等间距）地密集刻划，使刻线处不透光，未刻线处透光，形成透光与不透光相间排列构成的光电器件。

光栅上的刻线称为栅线，栅线的宽度为 $a$ ，缝隙宽度为 $b$ ，一般取 $a=b$ ，而 $w=a+b$ 称为栅距（也称为光栅常数或光栅节距，是光栅的重要参数，用每毫米长度内的栅线数表示栅线密度，如100线 / mm、250线 / mm）。

圆光栅还有一个参数叫栅距角 $\gamma$ 或称节距角，它是指圆光栅上相邻两条栅线的夹角。圆光栅上是等栅距角的向心条纹。

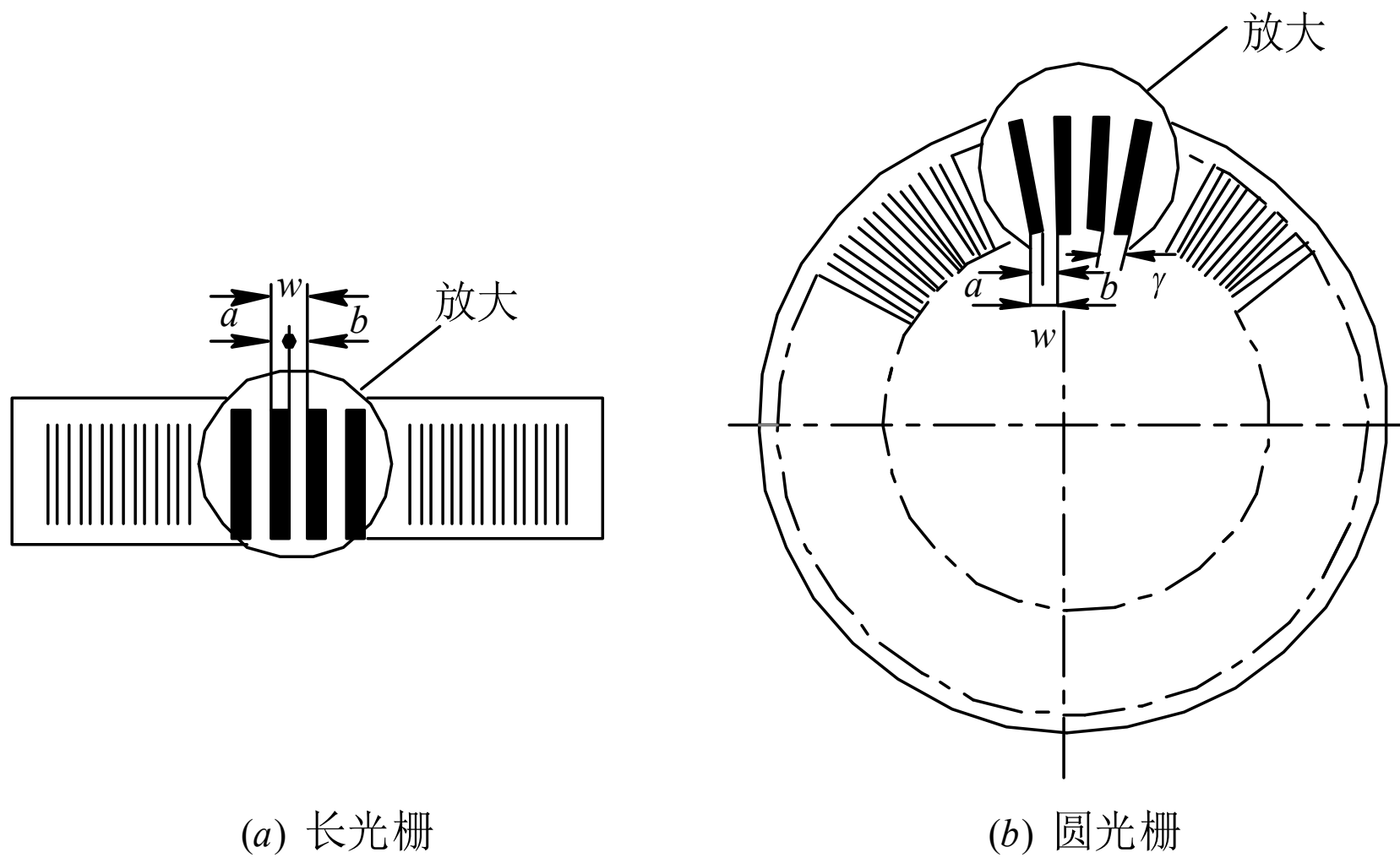


图5-1 光栅结构



圆光栅有三种栅线形式：

一种是**径向光栅**，其栅线的延长线通过圆心；

另一种是**切向光栅**，其栅线的延长线与光栅盘的一个小同心圆相切；

还有一种是其栅线为一簇等间距同心圆组成的**环形光栅**。

圆光栅通常在圆盘上刻有**1080~64800**条线。

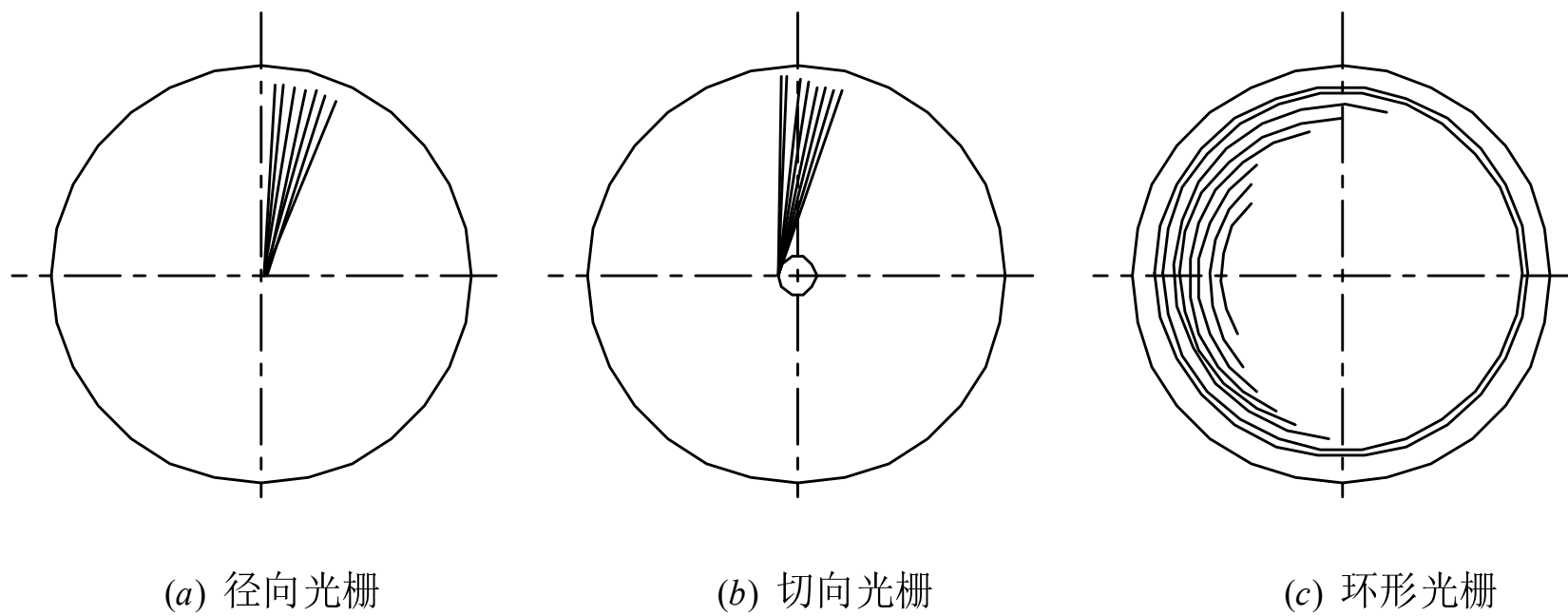


图5-2 圆光栅栅线



## 2) 莫尔条纹原理 ■

计量光栅是利用莫尔现象实现几何量的测量的。

莫尔条纹是十八世纪法国研究人员莫尔先生首先发现的一种光学现象。

1874年英国物理学家瑞利首次将莫尔图案作为一种计测手段，从而开创了莫尔测试技术。

在我们生活中常常见到莫尔现象，当薄的两层丝绸叠加在一起并作相对运动时，形成一种漂动的水波型花样，这就是莫尔条纹（亦称为云纹）。







## 2) 莫尔条纹原理 ■

莫尔条纹的成因是由主光栅和指示光栅的遮光和透光效应形成的（两只光栅参数相同）。

**主光栅**用于满足测量范围及精度，**指示光栅**（通常是从主尺上裁截一段）用于拾取信号。将主光栅与指示光栅的刻划面相向叠合并且使两者栅线有很小的交角 $\theta$ ，这样就可以看到，在 **a-a** 线上两只光栅栅线彼此错开，光线从缝隙中透过形成亮带，其透光部分是由一系列棱形图案构成的；在 **b-b** 线上两只光栅栅线相互交叠，相互遮挡缝隙，光线不能透过形成暗带。**这种亮带和暗带相间的条纹称为莫尔条纹。**

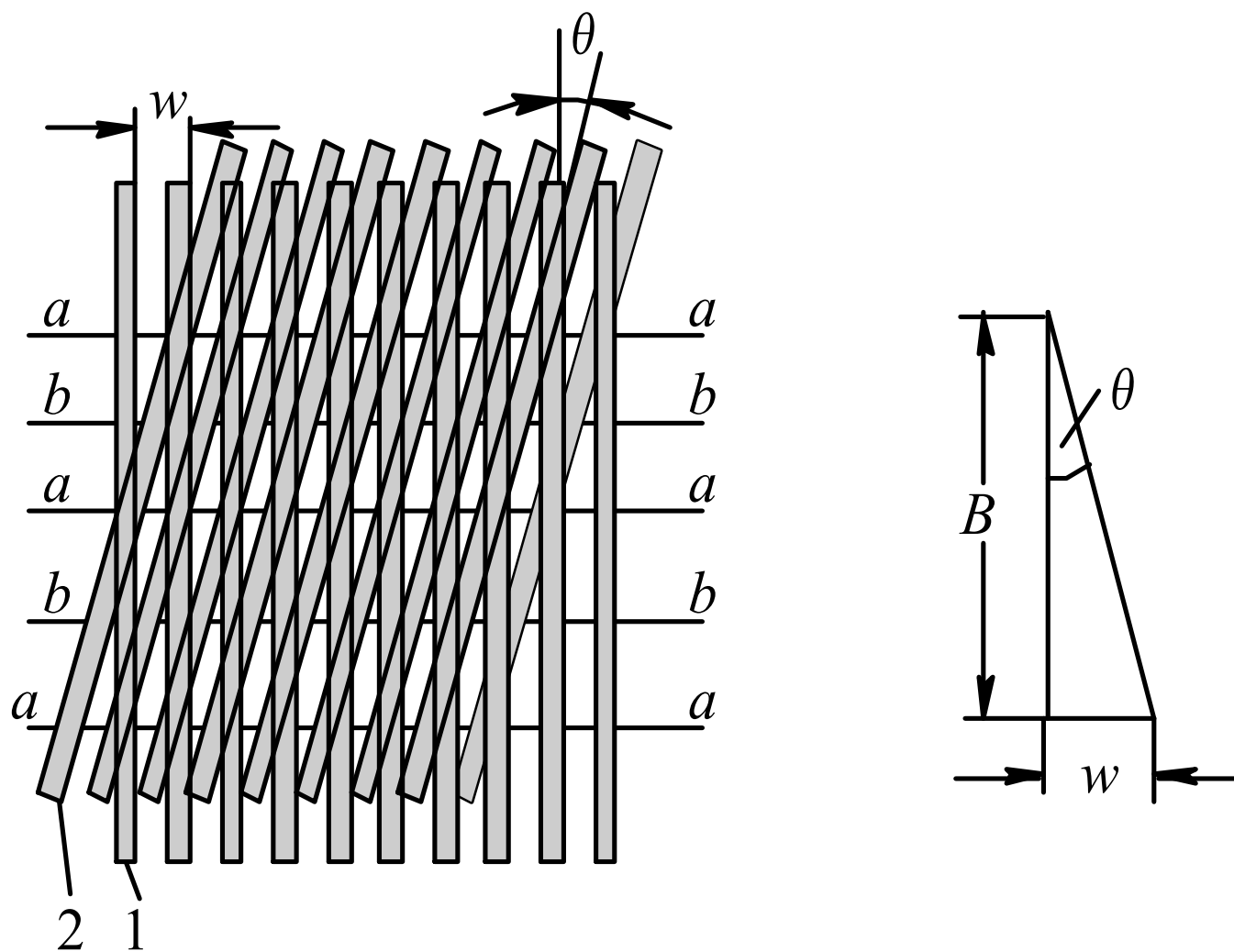
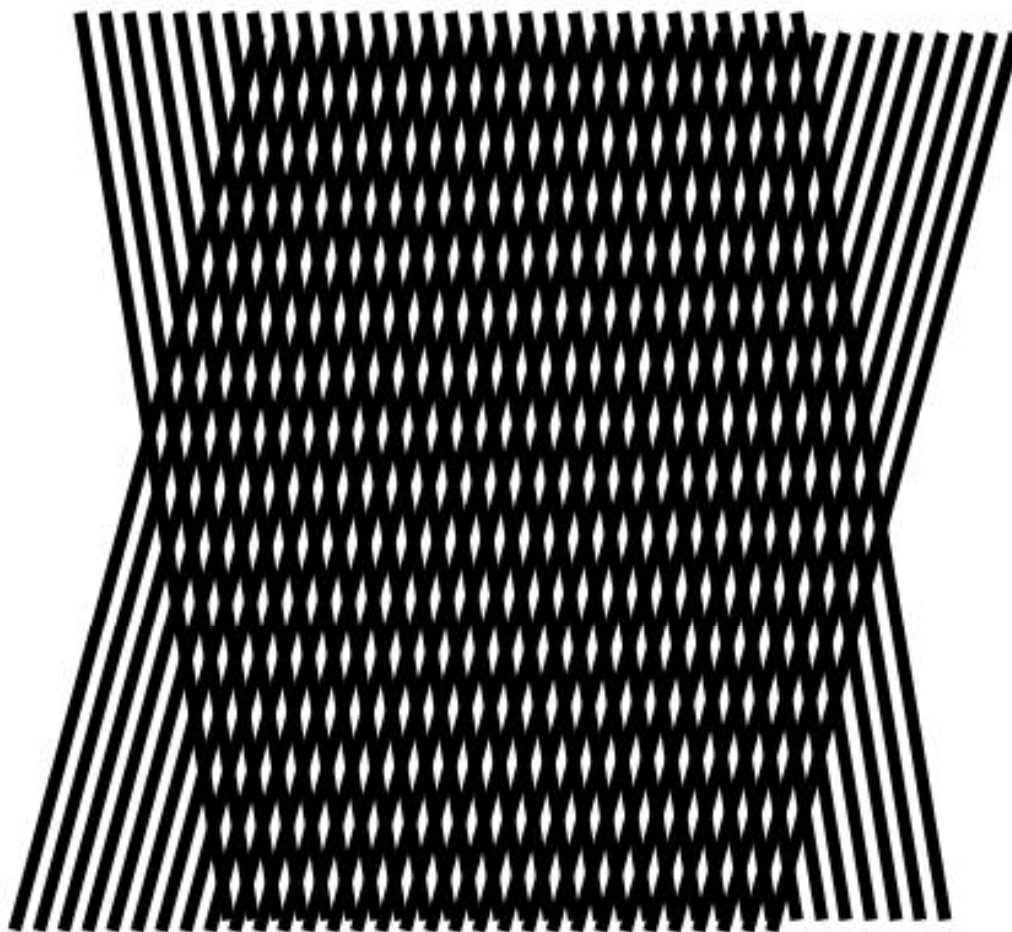


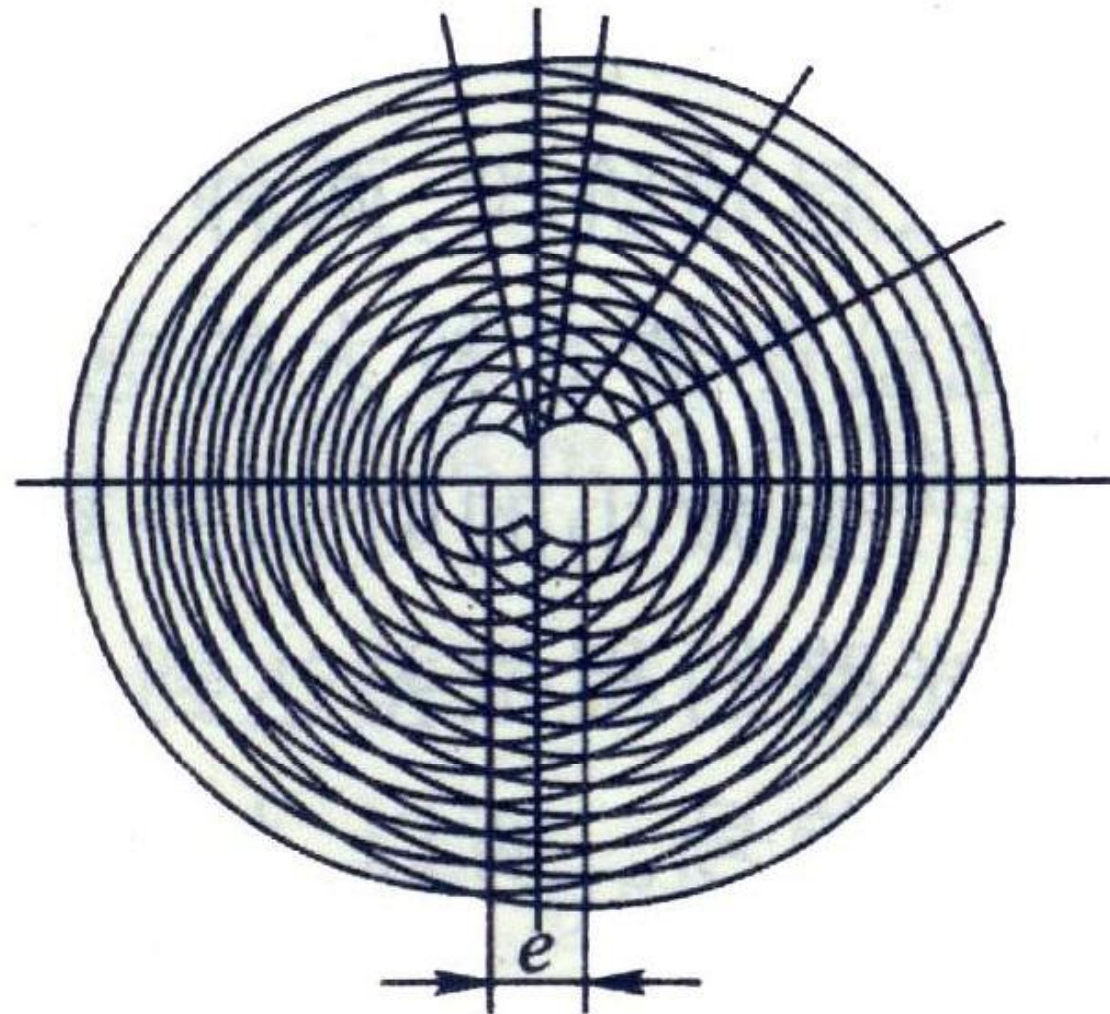
图5-3 莫尔条纹原理



## 莫尔条纹

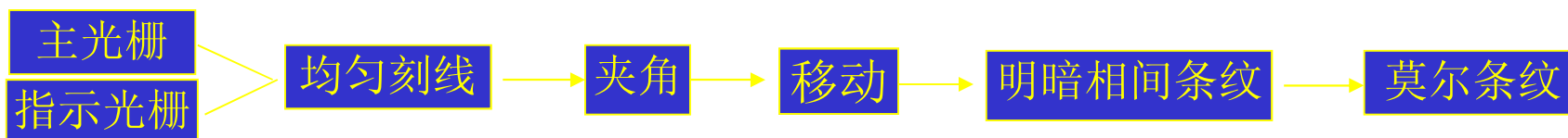
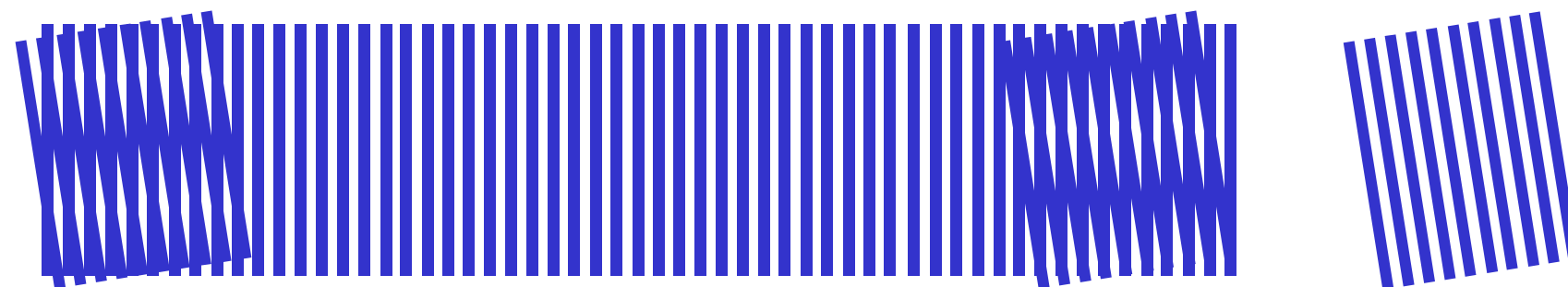


由于莫尔条纹的方向与栅线方向近似垂直，故该莫尔条纹称为横向莫尔条纹。





## 莫尔条纹 (Moire)

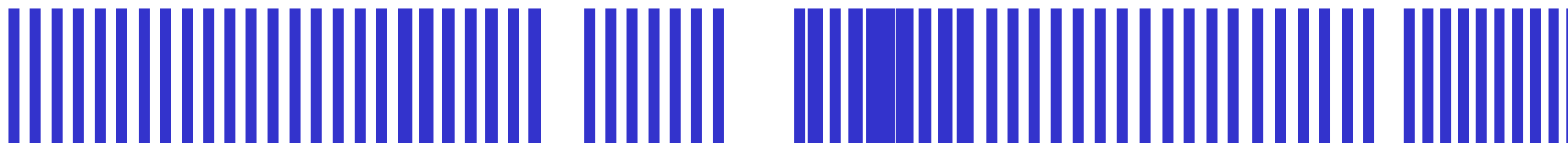
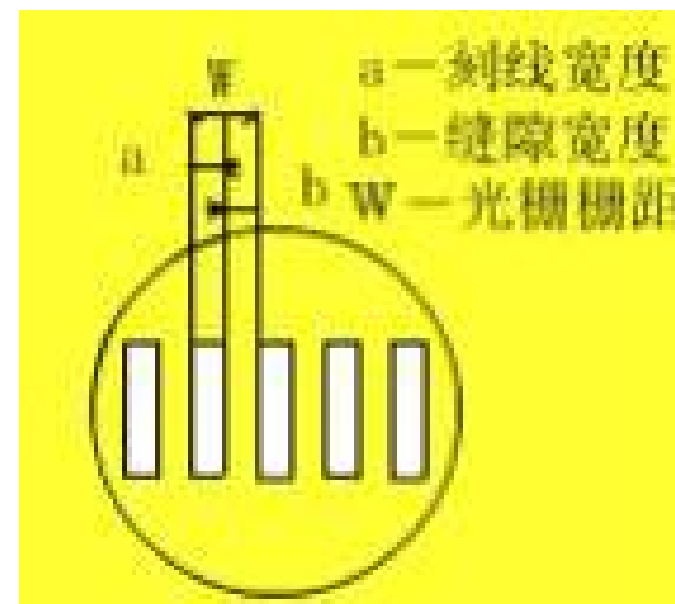


条纹宽度:  $B = \frac{W}{2 \sin(\theta/2)} \approx \frac{W}{\theta}$

$W$ -栅距,  $a$ -线宽,  $b$ -缝宽

$$W = a + b, \quad a = b = W/2$$

特例: 当  $\theta=0, w_1=w_2 \rightarrow B=\infty \rightarrow$  光闸莫尔条纹





### 3)莫尔条纹特点 ■

#### a. 位移放大作用 □ ■

相邻两条莫尔条纹间距 $B$ 与栅距 $w$ 及两光栅夹角 $\theta$ 的关系为

$$B = \frac{w}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \approx \frac{w}{\theta} \quad (5-1)$$

令 $k$ 为放大系数，则

$$k = \frac{B}{w} \approx \frac{1}{\theta} \quad (5-2)$$



一般 $\theta$ 很小，所以放大系数 $k$ 很大。故尽管光栅栅距 $w$ 很小，而通过莫尔条纹的放大作用仍使其清晰可辨。

在安装调节时，通过调整 $\theta$ 角，可以改变莫尔条纹宽度，从而使光电接收元件能正确接收光信号。

对于100线 / mm 的光栅，栅距为0.01mm，当夹角为 $0.06^\circ$  时，莫尔条纹间距 $B$ 可达10 mm，放大了1000倍。 ■



## b. 运动对应的关系 ■

由图5-1知，若光栅栅距为 $w$ ， $i$ 为刻线数， $x$ 为移动距离，  
则  $x = i w$  (5-3)

将式（5-3）代入式（5-2）中，有  $B = \frac{x}{i\theta}$  (5-4)

由式（5-4）知，当 $\theta$ 很小时，光栅副中任一光栅沿垂直于刻线方向移动时，莫尔条纹就会沿近似垂直于光栅移动的方向运动。

当光栅移动一个栅距 $w$ 时，莫尔条纹就移动一个条纹间隔 $B$ ；当光栅改变运动方向时，莫尔条纹也随之改变运动方向，两者具有相互对应的关系。

因此，可以通过测量莫尔条纹的运动来判别光栅的运动方向和距离。





### c. 误差减小作用 ■

光栅在制作过程中必然会引入刻划误差。光电元件获取的莫尔条纹是指示光栅覆盖区域刻线的综合结果，**莫尔条纹是由若干条光栅刻线共同干涉形成的**，所以对刻划误差有平均作用，从而能在很大程度上消除栅距的局部误差及短周期误差的影响。这是光栅传感器精度高的一个重要原因。 ■



刻划误差是随机误差。设单个栅距误差为 $\delta$ ，形成莫尔条纹区域内有 $N$ 条刻线，则综合误差 $\Delta$ 为

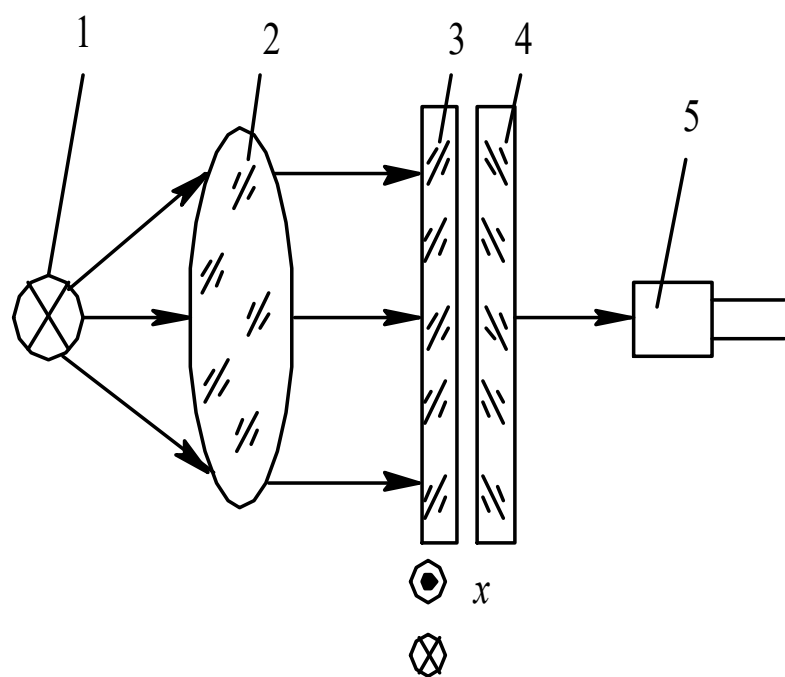
$$\Delta = \pm \frac{\delta}{\sqrt{N}}$$



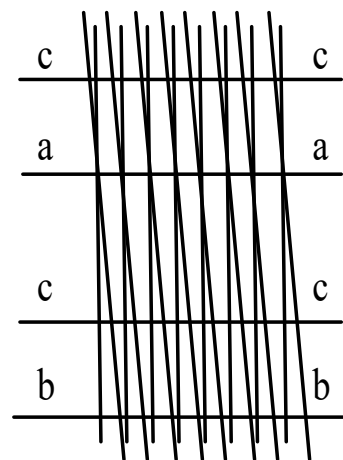
## 5.3.3.2 光栅传感器的工作原理 ■

### 1) 光电转换原理 ■

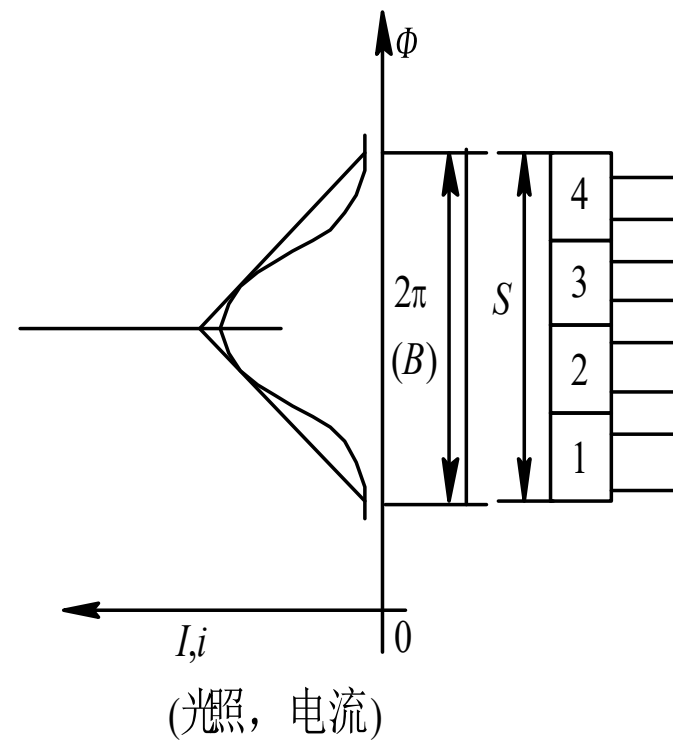
光栅传感器的光电转换系统由光源1、聚光镜2、光栅主尺3、指示光栅4和光敏元件5组成，如图5-4(a)所示。当两块光栅作相对移动时，光敏元件上的光强随莫尔条纹移动而变化，如图5-4(b)所示。在 $a$ 处，两光栅刻线不重叠，透过的光强最大，光电元件输出的电信号也最大；在 $c$ 处，由于光被遮去一半，光强减小；在 $b$ 处，光全被遮去而成全黑，光强为零。若光栅继续移动，透射到光敏元件上的光强又逐渐增大。因而形成图5-4(b)所示的输出波形。



(a) 组成



(b) 莫尔条纹



(c) 光强分布

图5-4 光电转换



在理想情况下，当 $a=b=w$ 时，光强亮度变化曲线呈三角形分布，如图5-4(b)中虚线所示。但实际上因为刻划误差的存在造成亮度不均，使三角波形呈近似正弦波曲线。 ■

当用平行光照射光栅时，透过莫尔条纹的光强度分布的似于正弦函数。



## 2) 莫尔条纹测量位移原理 ■

### 2. 光栅读数头

图4-7是光栅读数头的构成图，它由光源、透镜、指示光栅、光敏元件和驱动线路组成。读数头的光源一般采用白炽灯泡。白炽灯泡发出的辐射光线，经过透镜后变成平行光束，照射在光栅尺上。光敏元件是一种将光强信号转换为电信号的光电转换元件，它接收透过光栅尺的光强信号，并将其转换成与之成比例的电压信号。由于光敏元件产生的电压信号一般比较微弱，在长距离传递时很容易被各种干扰信号所淹没、覆盖，造成传送失真。为了保证光敏元件输出的信号在传送中不失真，应首先将该电压信号进行功率和电压放大，然后再进行传送。驱动线路就是实现对光敏元件输出信号进行功率和电压放大的线路。

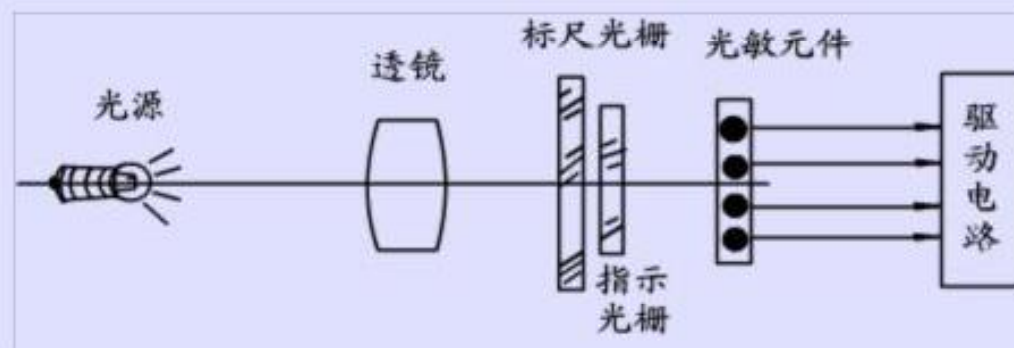


图 4-7 光栅读镜头

根据不同的要求，读数头内常安装2个或4个光敏元件。



## 2) 莫尔条纹测量位移原理 ■

当光电元件5接收到明暗相间的正弦信号时，根据光电转换原理将光信号转换为电信号。**当主光栅移动一个栅距 $w$ 时，电信号则变化了一个周期。**这样，光电信号的输出电压 $U$ 可以用光栅位移 $x$ 的正弦函数来表示，光敏元件输出的波形为

$$U = U_0 + U_m \sin \frac{2\pi x}{w} \quad (5-6)$$

式中：  $U_0$ —输出信号的直流分量； □

$U_m$ —交流信号的幅值； □

$x$  —光栅的相对位移量。 ■



由式（5-6）可知，利用光栅可以测量位移量 $x$ 的值。

当波形重复到原来的相位和幅值时，相当于光栅移动了一个栅距 $w$ ，如果光栅相对位移了 $N$ 个栅距，此时位移  $x=N w$ 。因此，只要能记录移动过的莫尔条纹数 $N$ ，就可以知道光栅的位移量 $x$ 值。这就是利用光栅莫尔条纹测量位移的原理。

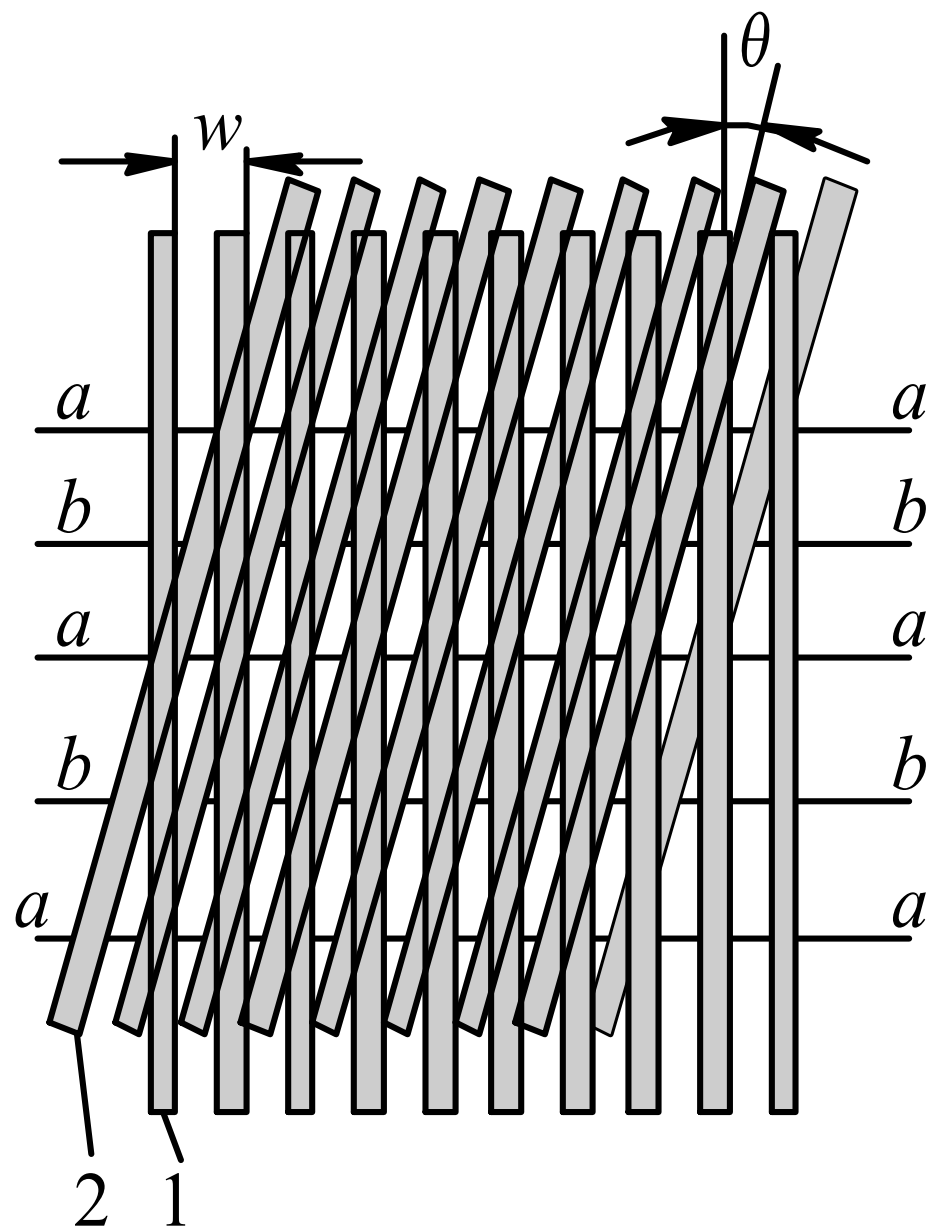




### 3) 辨向原理 ■

为辨别主光栅的移动方向，需要有两个具有相差的莫尔条纹信号同时输入来辨别移动方向，且两个莫尔条纹信号相差 $90^\circ$  相位。

实现的方法是在相隔 $B / 4$ 条纹间隔的位置上安装两只光敏元件，当莫尔条纹移动时两个狭缝的亮度变化规律完全一样，相位相差 $\pi / 2$ 。滞后还是超前完全取决于光栅的运动方向。这种区别运动方向的方法称为位置细分辨向原理。



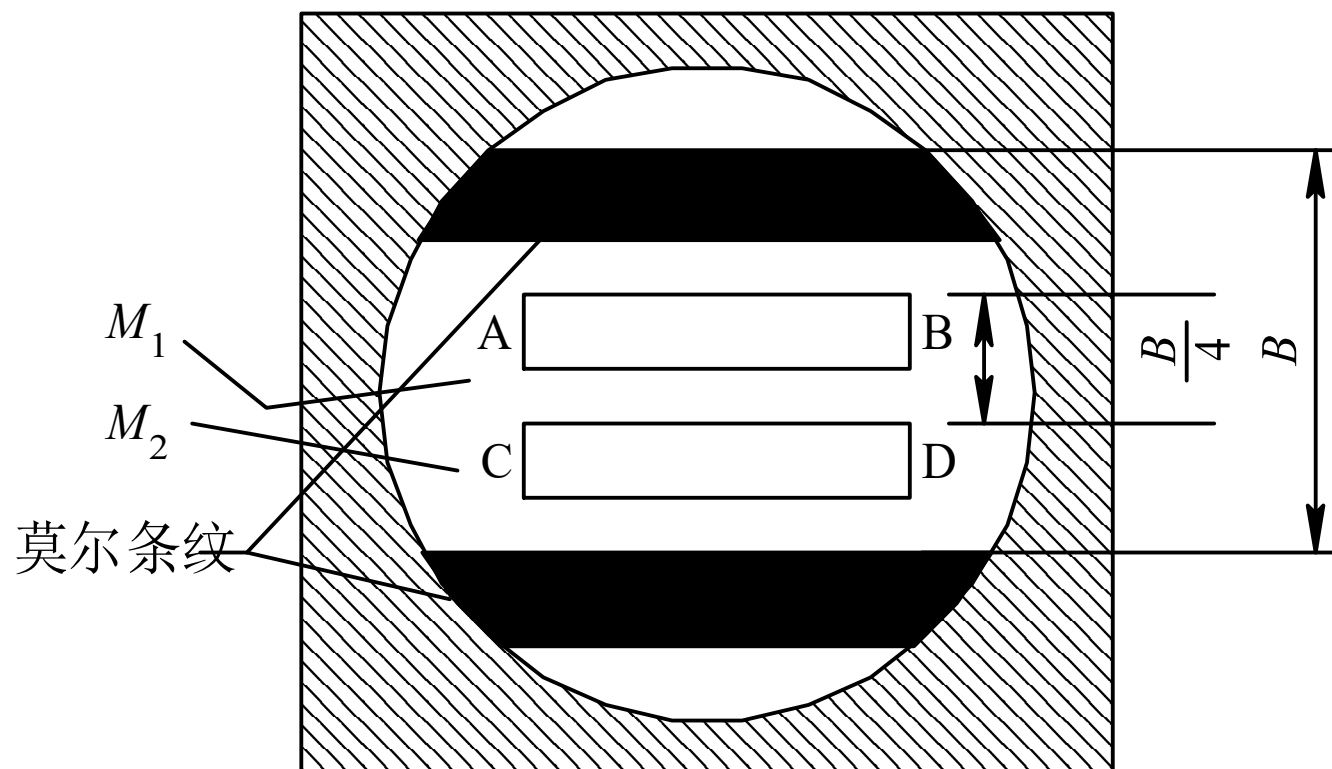


图5-5 辨向原理



AB与CD两个狭缝在结构上相差 $\pi / 2$ ，所以它们在光电元件上取得的信号必是相差 $\pi / 2$ 。AB为主信号，CD为门控信号。当主光栅作正向运动时，CD产生的信号只允许AB产生的正脉冲通过，门电路在可逆计数器中作加法运算；当主光栅作反方向移动时，则CD产生的负值信号只让AB产生的负脉冲通过，门电路在可逆计数器中作减法运算。这样就完成了辨向过程。图5-6为辨向原理电路框图。 ■

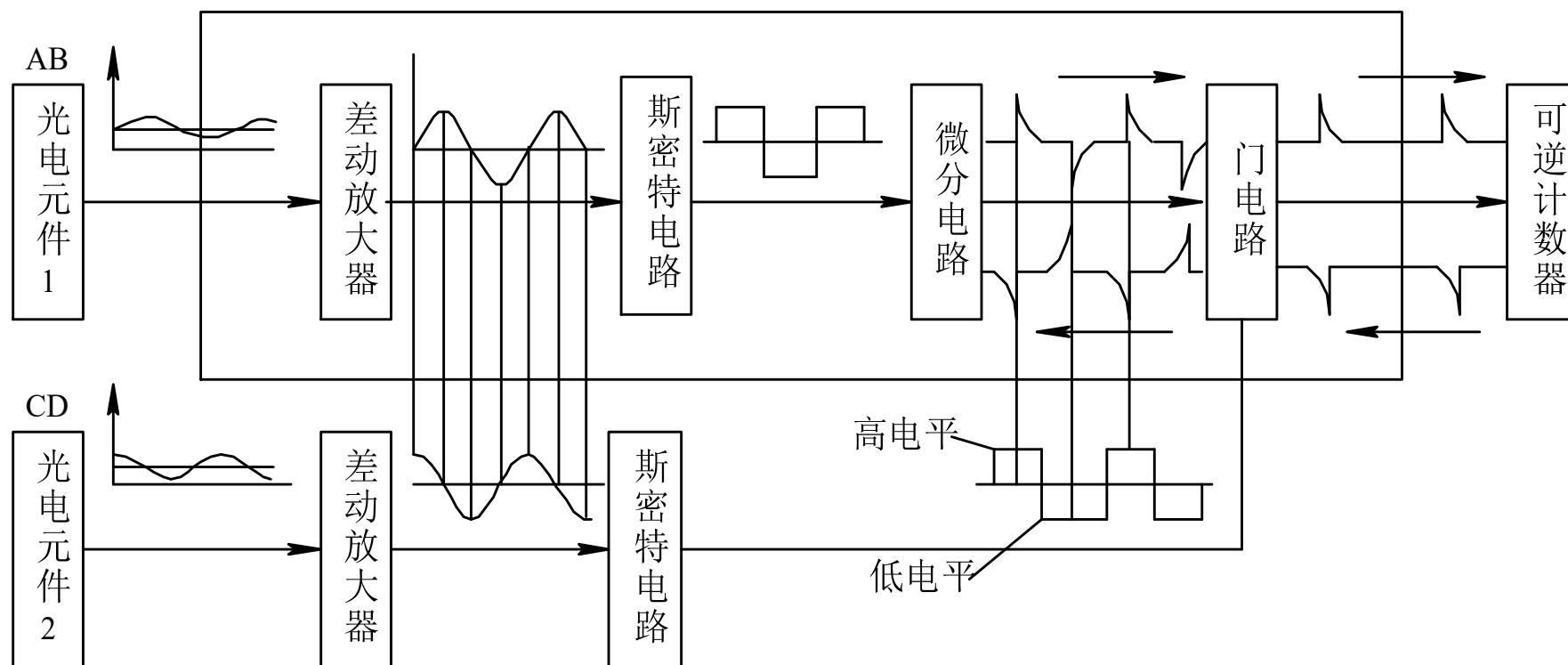


图5-6 辨向原理电路框图





### 5.3.3.3 莫尔条纹细分技术 ■

#### 1) 细分方法 ■

目前使用的细分方法有： ■

(1) 增加光栅刻线密度。 ■

(2) 对电信号进行电子插值，把一个周期变化的莫尔条纹信号再细分，即增大一个周期的脉冲数，称为倍频法。在电子细分中又可分为直接细分、电桥细分、示波管细分和锁相细分等。

(3) 机械和光学细分。 ■

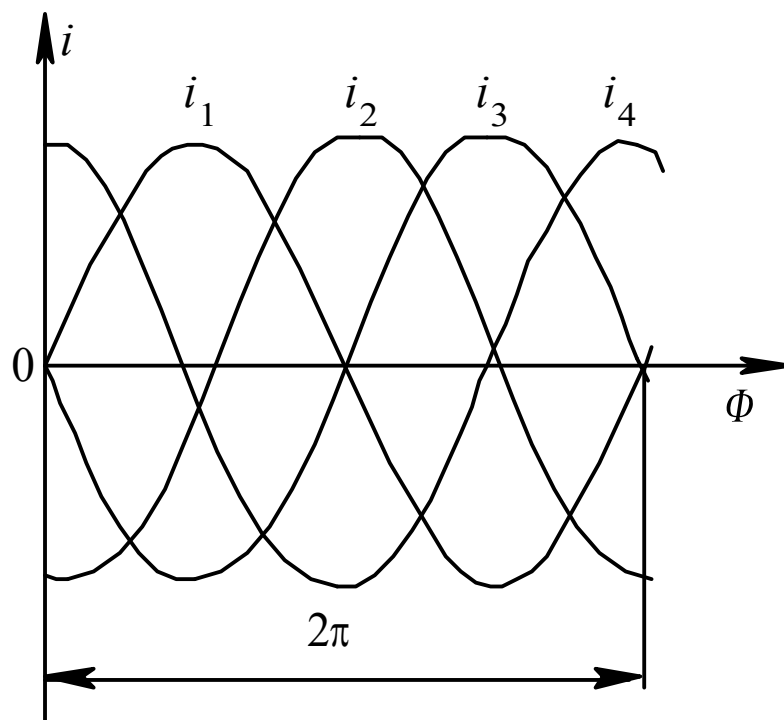


图5-7 四路电信号波形

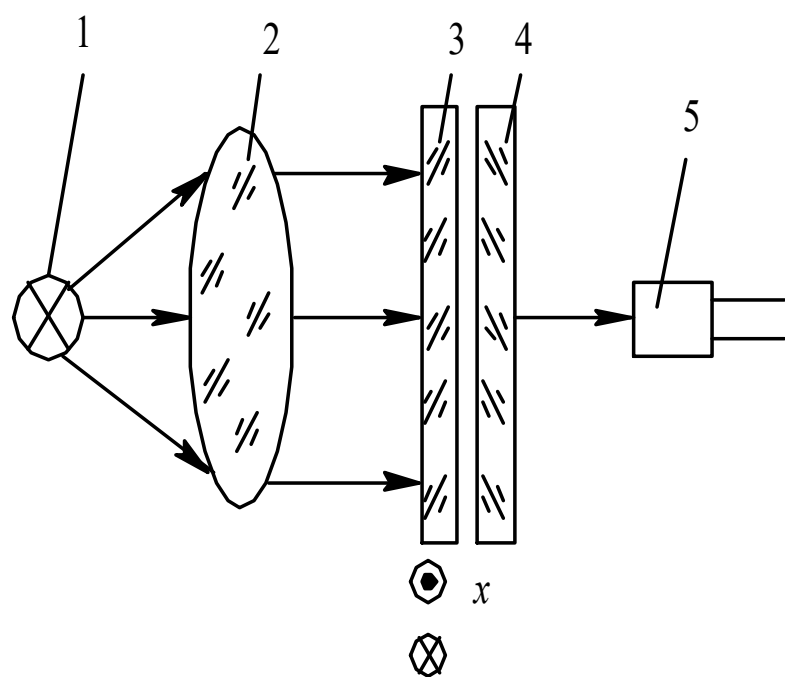


## 2) 光电元件直接细分 ■

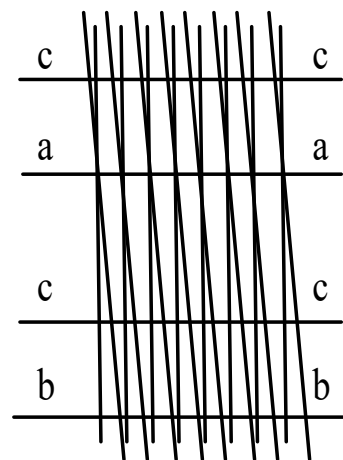
在一个莫尔条纹宽度上并列放置四个光电元件（如图5-4(c)所示），得到相位分别相差 $\pi / 2$ 的四个正弦周期信号（如图5-7所示）。用适当的电路处理这一列信号，由图5-8(a)可知，AB和CD 两光电元件输出的 $U_1$ 和 $U_2$ 经方波发生器后变成方波，并相差 $\pi / 2$ 。在1、3点的方波经倒相器倒相一次，便得到2、4点两个方波倒相电压。将它们分别微分后获得5、6、7、8四点的正脉冲，同时送到与非门得到9点的12个输出脉冲为原来任意一路的四倍，实现了四倍频细分，如图5-8(b)所示。 ■

用计数器对这一列脉冲信号计数，就可以得到 $1/4$ 个莫尔条纹宽度的位移量（即光栅固有分辨率的四倍）。此种细分方法被称为四倍频细分法。

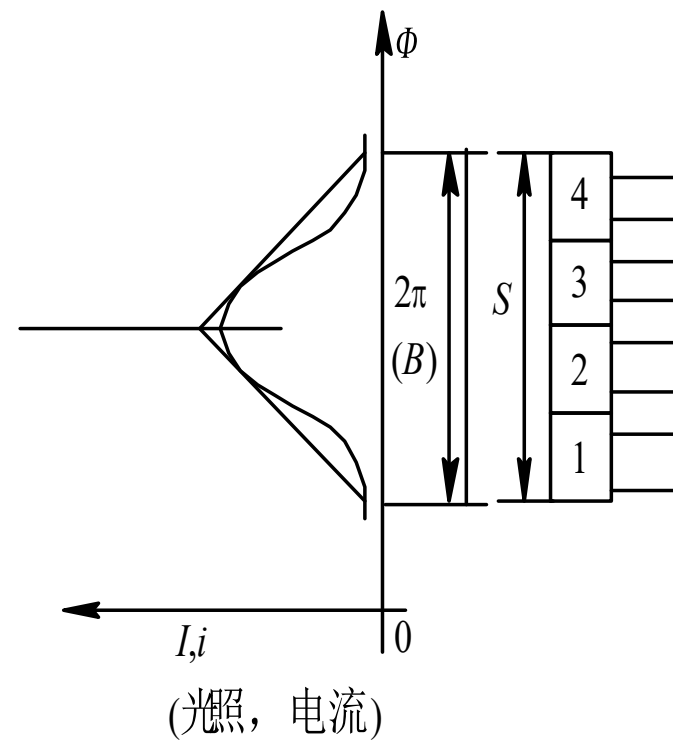




(a) 组成

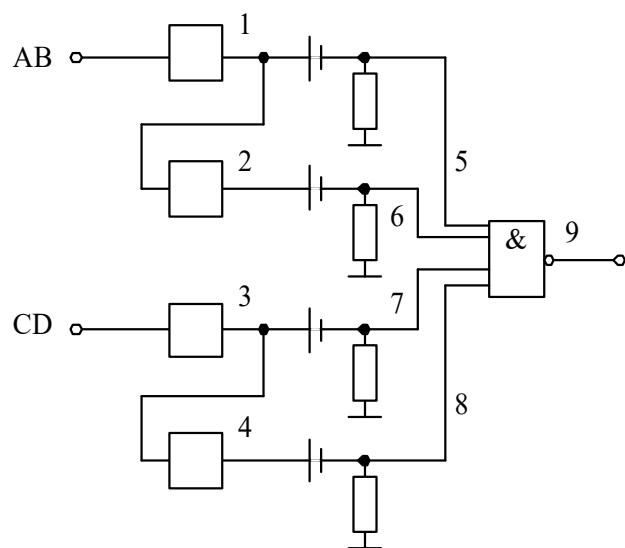


(b) 莫尔条纹

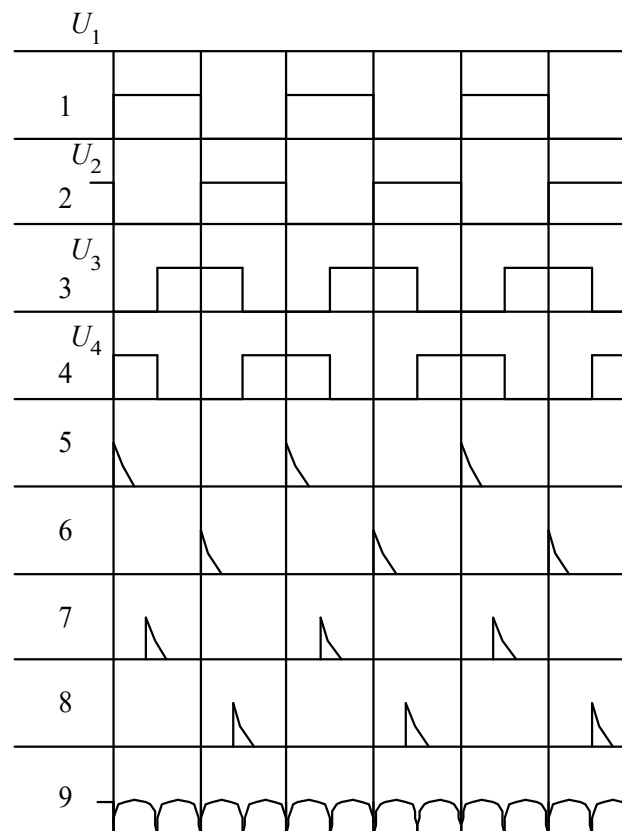


(c) 光强分布

图7.4 光电转换



(a)



(b)

图5-8 四倍频细分

□(a) 四倍逻辑； (b) 波形图



### 3) CCD 直接细分 ■

#### a. 细分原理 ■

CCD直接细分的原理是，利用线阵CCD上数千个等间距的像素所构成的“感光尺”对整栅距的位移信号，即周期性的交点移动信号进行细分，使测量信号能够反映一个栅距内的精确位移。细分的具体方法如下。在均匀的背景光照明下，光栅刻线在CCD像素位置上形成明暗相间的像，如图5-9(a)所示。CCD在扫描驱动脉冲的控制下对一维视场进行扫描，输出一个周期性的脉冲序列。周期内的脉冲数等于像素数，脉冲幅值反映了像点的亮度，从脉冲序列中可以明显地辨认出交点的位置（暗点）（如图5-9（b）所示）。对脉冲进行限幅比较，并配以简单的逻辑电路即可筛选出从扫描原点到第一个交点之间的脉冲，如图5-9(c)所示。

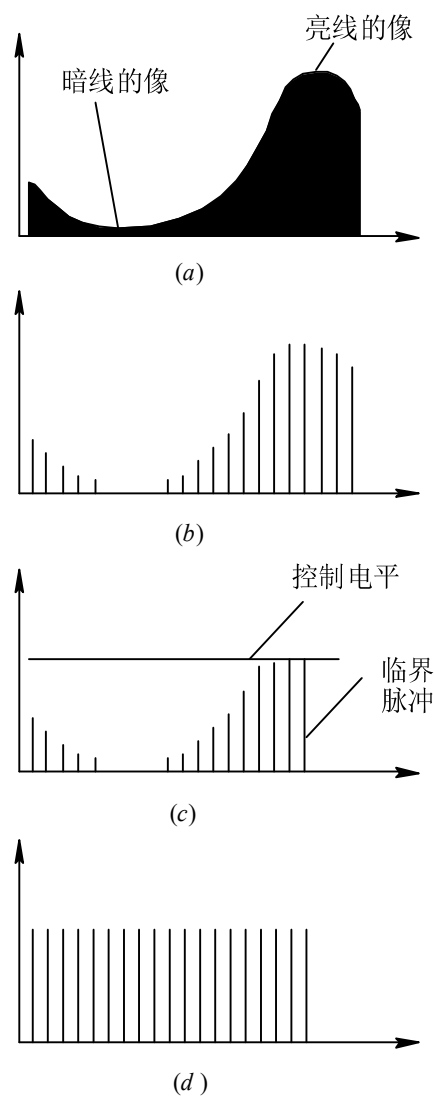


图5-9 CCD直接细分



当刻线与CCD像场的交点移动时，亮点临界脉冲的位置也相应地改变。用计数器记下从扫描原点到临界脉冲间的脉冲数，即可确定光栅在一个栅距间的位移。



## b. 细分精度 ■

这种细分方法的分辨率取决于两交点像之间所包含的像素数，精度取决于像素的尺寸精度以及各像素光电特性的一致性。由于CCD是采用蚀刻方法制作的集成电路，各像素尺寸和光电特性都较均一，所以采用CCD直接细分法时精度可以做到与其分辨率同一个数量级。如果采用软件拟合方法，精度还可以进一步提高。

由于线阵CCD与标尺光栅刻线也有一个 $\theta$ 角，投影在CCD视场中的交点数就等于以前的莫尔条纹数。改变 $\theta$ 角的大小就可以改变视场中交点的个数，从而改变直接细分的分辨率。

CCD直接细分光栅的分辨率 $\delta$ 由下式决定：

$$\delta = \frac{L \sin \theta}{P} = \frac{qw}{P} \quad (5-7)$$



$$\delta = \frac{L \sin \theta}{P} = \frac{qw}{P}$$

式中： $L$ 为CCD的像场长度； $P$ 为有效像素数； $q$ 为像场中的交点数。 ■

计量光栅的栅距为 $w=0.01\text{mm}$ ，线阵CCD像素数可以做到 $P=5000$ 个。设在视场中有两个交点的像，此时 $q=2$ ，由公式（7.7）可知分辨率 $\delta$ 可达到 $4\text{nm}$ 。当采用CCD光栅栅距直接细分法时，**CCD输出的图像信号经处理后为一系列代表光栅栅线相对位置的周期性脉冲序列**（如图5-9(d)）。设每一个周期内的脉冲数为 $n$ ，则位移 $x$ 与输出信号 $n$ 的关系为



$$x = NN'M'S = nS$$



式中：N—扫过CCD视场的刻线数；□

N'—光栅相邻两刻线间对应的线阵CCD像素数；

M'—后续电路或计算机软件对信号进行的插值细分数；

S——位移脉冲当量，即单位脉冲信号代表的光栅相对位移量。

#### 4) 光栅传感器的误差□■

单件光栅的误差是由刻划工艺和刻划设备决定的。计量光栅大多数是在构成莫尔条纹的情况下使用。由于莫尔条纹的平均误差作用，使局部刻划误差的影响大大减小。■

设光电接收元件所覆盖的光栅刻线总数为N，单个栅距误差为 $\delta$ ，则可利用式(5-3)粗略地描述平均误差与单个栅距误差之间的关系。■





因为常用栅距 $w$ 为 $0.05 \sim 0.01 \text{ mm}$ ，若取光电池尺寸为 $10 \text{ mm}$ ，则

♡♡♡

$$N = \frac{10}{w} = 200 \sim 1000$$

平均误差 $\Delta$ 为

♡♡

$$\Delta = \pm \frac{\delta}{\sqrt{N}} = \pm \left( \frac{1}{14} \sim \frac{1}{32} \right) \delta$$

因此，其平均误差 $\Delta$ 很小。实际上莫尔条纹变化一周，只移动一个栅距，也就是在 $200 \sim 1000$ 条刻线中只改变了一条刻线，因此单个栅距误差的影响实际上比式（7.3）的还小。 ■

长光栅栅距误差一般水平为微米（ $\mu\text{m}$ ）数量级，圆光栅为秒（"）数量级。 ■



### 5.3.3.4 常用光学系统 ■

#### 1)透射直读式光路 ■

将图5-4中光电元件5采用四极硅光电池作为光电转换元件，就构成四细分直读式分光系统。

把形成的横向莫尔条纹宽度 $B$ 调整到等于四极硅光电池的宽度 $S$ （见图5-4(c)），这样莫尔条纹变化一个条纹宽度 $B$ ，四极硅光电池依次就输出四路相位依次相差 $\pi/2$ 的电信号（如图5-7所示波形），四路电信号相当于对莫尔条纹信号进行四细分。这种光路的结构简单，位置紧凑，调整使用方便，目前广泛应用于粗栅距的黑白透射光栅传感器中。 ■

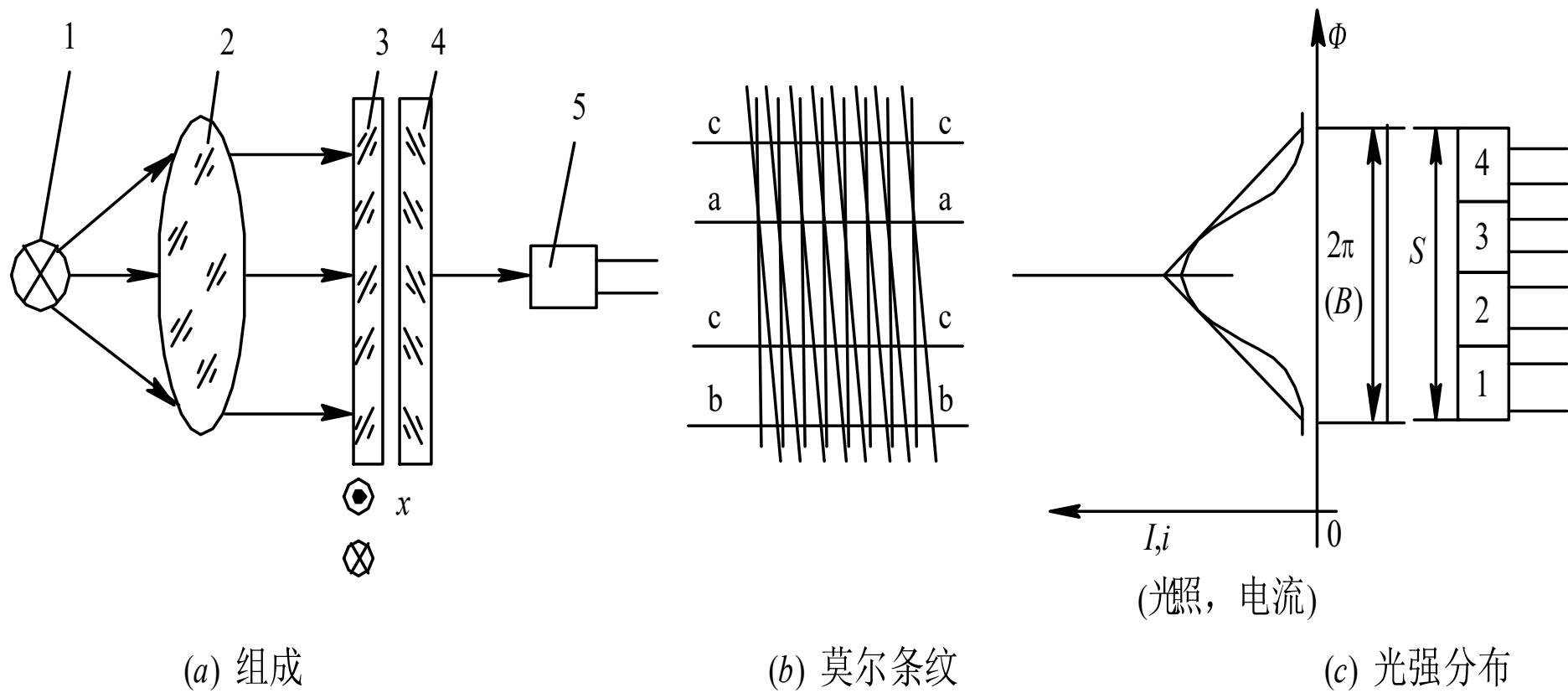


图5-4 光电转换



## 2) 反射直读式光路□

反射直读式光路如图5-10所示。光源1经聚光镜2成平行光束并以一定角度通过场镜3射向指示光栅4，莫尔条纹是金属制成的标尺光栅5反射回来的光线与指示光栅4相互作用形成的，由光电元件6接收莫尔条纹并将其转换成电信号。这种光路常用于黑白反射光栅传感器中。

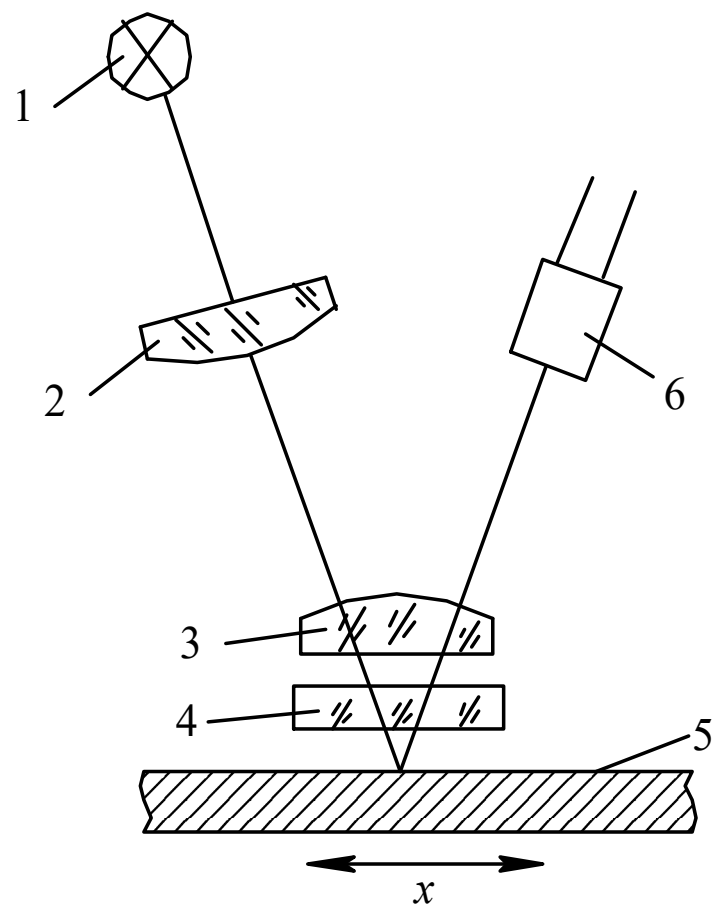


图5-10 反射直读式光路



### 3) 反射积分式光路□

反射积分式光路如图5-11所示。只用一只闪耀光栅作主光栅，没有指示光栅。光源1发出的光经准直透镜2变成平行光束垂直入射到分光镜3上，经过半透分光面时被分成

CD、CE两束光并垂直射到具有等腰三角形栅线的闪耀光栅4上A、B两点的线槽面时，最大强度的衍射光将沿原路反射回分光镜3，在分光面处相遇产生干涉现象，其干涉条纹经透镜5由光电元件6接收并转换成电信号。这种光学系统具有光学四细分的作用，分辨力较高。例如，栅线密度为600线 / mm时，干涉条纹变化一个周期就相当于光栅移动量为 $\Delta w = 1 / 4 \times 1 / 600 = 0.42 \mu\text{m}$ 。这种光路只用于细栅距的反射式闪耀光栅传感器中。

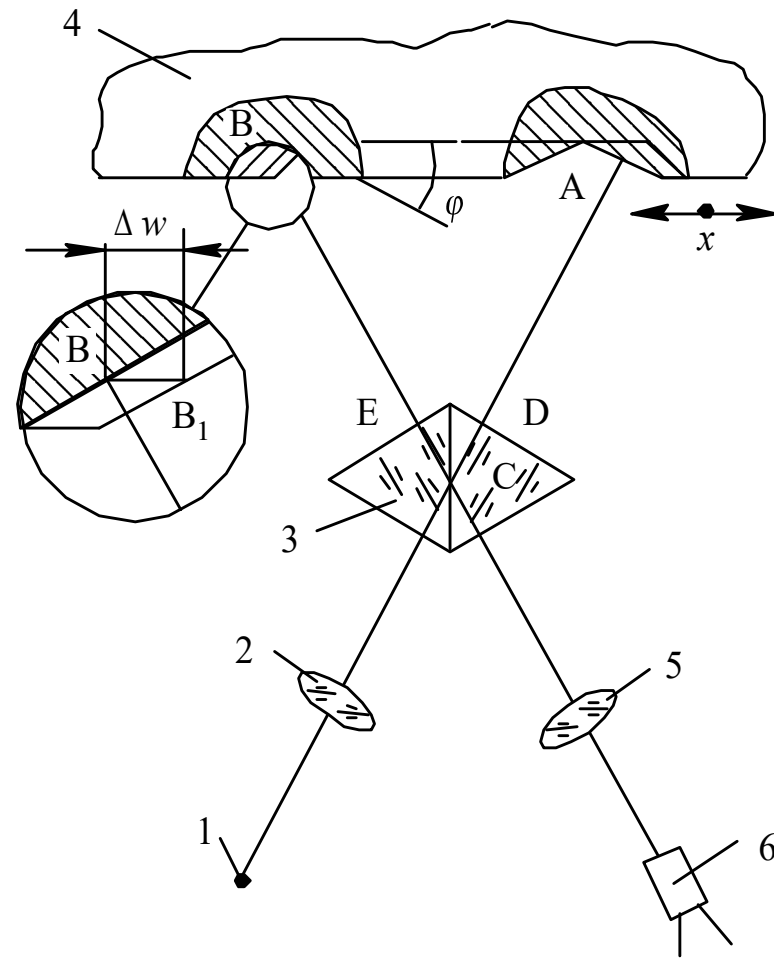


图5-11 反射积分式光路