

一种莫尔条纹电细分400等分的电子学系统

周 世 红

摘要：为适应角度和长度高精度检测技术发展需要，研制了此种莫尔条纹细分的电子学系统。此系统采用了载波调制电细分和数字化电路，可将0—250赫莫尔条纹细分成400等分，最大误差为莫尔条纹周期的正负二百分之一，有数字量输出。本文主要叙述此系统的设计基本原理，主要参数选定和整个电路结构安排；介绍有关电路，精度检测方法和此系统的实际应用。

一、前 言

由于对角度和长度高精度检测发展需要，对计量光栅的读数分辨率提出了越来越高的要求。光栅读数系统的固有分辨率提高是受刻划和使用工作条件等许多实际条件限制的，这就提出了利用电子学“插补”方法提高光栅固有分辨率。因此对莫尔条纹细分电路的研究，引起国内外有关方面的重视。电子学细分主要分为幅度细分和相位细分两种。幅度细分就是利用莫尔条纹幅度变化与光栅系统的相对位移存在一定关系的特性，如电阻链细分和内插示波管细分等都属于此种细分。目前在国内外此种方法细分莫尔条纹的最高分数不超过一百等分。这是由于受许多条件限制，如对原始莫尔条纹信号质量和对采用电路元件要求过于苛刻等。

相位细分是利用二莫尔条纹讯号相位变化与光栅系统的位移变化存在着线性的关系。相位细分的实现有许多方案，如锁相倍频和载波调制。本文仅介绍载波调制电细分方面的工作。从一些已发表的资料看，莫尔条纹电细分份数可以达到很高，如在文献^[1]一种高分辨率的莫尔条纹插补器中采用正余弦电位器方式可将静态莫尔条纹信号细分成一千等分。在文献^[2]光栅测角系统中的一千倍电子幅值细分电路中应用载波调制方案对静态莫尔条纹讯号进行一千等分细分。在文献^[3]一种莫尔条纹的动态插补器中利用载波调制方案把频率为五百赫的动态莫尔条纹讯号可细分为一百等分。现代检测技术发展，不但要求进行高精度测量，还要求动态测量和实现数字化。动态测量不仅可以提高工作效率，也可减少和避免由于检测时间慢而带来的许多不利因素，如电路漂移，周围环境变化影响，机械稳定等。要特别指出一点，电细分的使用工作条件很重要，动态测量难度大。数字化仪器具有高精度、快速和显示直观等优点。实现数字化，便于采用数字处理器（如微处理器、计算机等）。因此，要达到在动态测量和数据数字化条件下实现莫尔条纹四百等分电细分目的，我们对电路的设计和实现上做了一些工作，得到了良好的结果。

二、基本工作原理

完成莫尔条纹细分的电子学系统装置叫做莫尔条纹插补器。它包括莫尔条纹的细分和编

码器二部分电路。莫尔条纹怎样被细分和数字化简述如下：

通过光电转换，一个光栅栅距 W 内的位移 X 可转换成电压 V ， $V = E \sin \theta = E \sin \frac{X}{W} 2\pi$ ，

即在一个光栅栅距 W 的任一位置 X 必对应一 θ 值。这样信息由位置转变成电量，是由莫尔条纹插补器以前的莫尔条纹读数系统来完成的，莫尔条纹插补器对莫尔条纹信息的处理，仅是在不同形式的电量之间进行的。可详见图1：

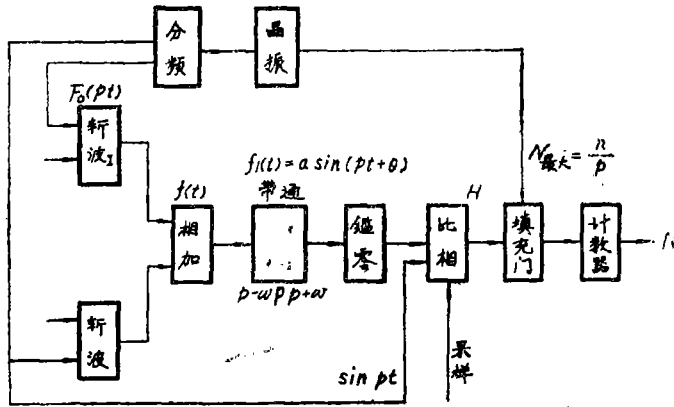


图1 基本工作原理图

一对正交光栅讯号（即莫尔条纹讯号） $E \sin \theta$ 和 $E \cos \theta$ 分别由乘法器 I 和 II 调制（即相乘）、相加。这里采用了一种特殊乘法器——斩波器，斩波器 I 和 II，其调制频率为 p ，比光栅信号频率要高许多倍，调制信号方波分别为 $F_0(p t)$ 和 $F_1(p t)$ ，其展开形式为：

$$F_0(p t) = \frac{4}{\pi} E k (\sin p t + \frac{1}{3} \sin 3 p t + \frac{1}{5} \sin 5 p t + \dots)$$

$$F_1(p t) = \frac{4}{\pi} E k (\cos p t - \frac{1}{3} \cos 3 p t + \frac{1}{5} \cos 5 p t - \dots)$$

对一对正交光栅讯号进行调制相加后：

$$\begin{aligned} f(t) &= F_0(p t) E \cos \theta + F_1(p t) E \sin \theta \\ &= \frac{4}{\pi} E k (\sin p t + \frac{1}{3} \sin 3 p t + \frac{1}{5} \sin 5 p t + \dots) E \cos \theta + \\ &\quad + \frac{4}{\pi} E k (\cos p t - \frac{1}{3} \cos 3 p t + \frac{1}{5} \cos 5 p t - \dots) E \sin \theta \\ &= \frac{4}{\pi} E E k [\sin(p t + \theta) + \frac{1}{3} \sin(3 p t - \theta) + \frac{1}{5} \sin(5 p t + \theta) + \dots] \end{aligned}$$

然后， $f(t)$ 经带通滤波器滤去频率 p 的高次谐波和其他低频分量，仅取出 $\sin(p t + \theta)$ 项，经鉴零器整形， $\sin(p t + \theta)$ 与 $\sin p t$ 进行比相，就可以得到比相输出脉宽为 H 的矩形波。这样的矩形波周期与调制波周期相同，而且是恒定的。 H 与 θ 成线性关系，即 θ 角的数值大小决定了 H 的宽窄。至此完成了把莫尔条纹讯号中的 θ “信息”“插入”到频率域里的载波讯号 $\sin p t$ 中去。插补器要实现数字化，就要把 H 值变成数字量，需要进行量化和编码处理。从图 I 填充门可知，脉宽 H 控制高频脉冲 n 通过填充门的时间， H 越宽，通过脉冲的数目亦愈多。然后由计数器编码、记忆把 N 记录下来。至此完成了“信息”由模拟量变数字量的转换。

在一个调制波周期内，通过脉冲数目的最大数 $N_{最大} = \frac{n}{p}$ 就是称为细分份数。 $N_{最大}$ 愈

大，细分份数越高。在符合要求的前提下， $N_{\text{最大}}$ 的选取要决定于采用器件工作的最高频率限制。例如：若取 $n = 20$ 兆赫 $p = 50$ 千赫则：

$$\text{细分份数 } N_{\text{最大}} = \frac{20 \times 10^6}{50 \times 10^3} = 400$$

如果光栅讯号频率为 W ，通过调制细分，可将一个光栅信号“内插” $\frac{p}{W}$ 个数值。在动态测量进行采样时，当光栅信号变化的最高频率为 $W_{\text{最大}}$ 则最大的动态测量误差可能为 $\frac{W_{\text{最大}}}{p}$ 。

所以原始莫尔条纹信号频率 $W_{\text{最大}}$ 和 p 的选取要根据总体对动态误差要求和采用的具体电路来定。例如当载波频率是光栅信号频率的10倍，晶振频率 n 为载波频率的10倍，则细分份数 $N_{\text{最大}} = 10$ 。详见图2

总之，通过对莫尔条纹讯号的上述处理，经模拟量细分，使 θ 变成 H ，再经量化和编码处理，把模拟量变成数字量，使 H 变成 N ，这样就把空间域里的光栅位置 X 与数据域的数字 N 联系起来。

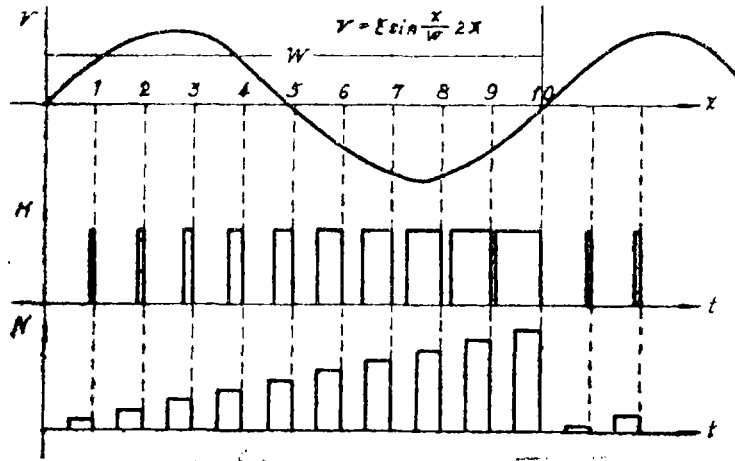


图2 电细分原理图

三、电路主要设计参数选择和结构安排

基于上述基本工作原理可确定电路的主要设计参数和结构。

确定光栅信号工作频率上限为250赫后，要保证二百分之一的动态细分精度，调制频率可选为50千赫。考虑一般计数器有正负一个字的计数误差，可取晶振频率为20兆赫，则细分份数为四百。电路结构方框图详见图3。

各个环节大致完成下面几种职能：

1. 完成模拟量电细分

标准信号转换环节把输入插补器的一对正交原始莫尔条纹讯号 $E \sin \theta$ 和 $E \cos \theta$ 变成二斩波器需要的4种输入讯号： $E \sin \theta$ 、 $-E \sin \theta$ 、 $E \cos \theta$ 和 $-E \cos \theta$ ，而斩波器需要的另外4种50千赫方波驱动讯号： $F_0(pt)$ 、 $-F_0(pt)$ 、 $F_1(pt)$ 和 $-F_1(pt)$ ，由20兆赫晶振产生的振荡讯号经分频移相和斩波驱动二环节供出。

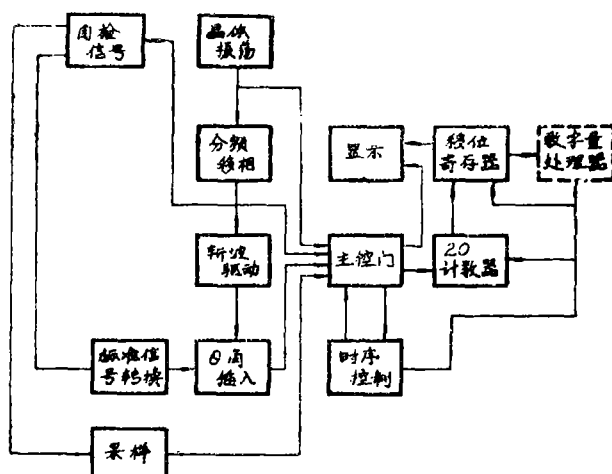


图3 电路结构方框图

θ 角插入环节，它包括斩波器、相加电路、带通滤波器和鉴零器，完成相乘、相加运算以及滤波、整形、把光栅信号中 θ 角信息“插入”到频率讯号($\sin pt$)里去，产生了 $\sin(pt + \theta)$ 讯号。

2. “信息”由模拟量转变成数字量

采样信号与 $\sin pt$, $\sin(pt + \theta)$ 和20兆赫填充脉冲一起输入到主控门环节。经比相，输出脉冲 H ，脉冲宽度 H 控制主计数器填充门通过频率为20兆赫的脉冲个数，由20兆赫计数器记录下来通过的脉冲数目 N 。记数 N 由移位寄存器保存到下一次测量完毕。时序控制环节是一个时间分配器，使整个仪器系统按规定程序工作。

3. 完成数据输出

移位寄存器的保存数据需要进一步处理、记录下来。直接输出的二进制数码供外部数字量处理器。

4. 自检

自检信号环节是模拟实际工作时输入信号，以供本仪器自检和测精度用。

四、有关电路介绍

要达到四百分之一的精度指标，对模拟细分电路和数字脉冲电路及其有关电路环节要有相应的要求。整个模拟量电细分电路相移应与信号频率变化无关，保证整个电路相移小于 0.9° 。由我们自己设计研制的乘法器最大线性误差小于 0.5% ，工作频带宽达10千赫以上，最高工作频率可达十兆赫以上，稳定性好。由此环节引起的误差折合插补器的输出远小于一个最小分辨率。50千赫带通滤波器有效地抑制了调制频率50千赫的高频谐波含量，使其衰减一千倍以上，在50千赫变化正负1千赫区间内相角线性变化在 $+0.1^\circ$ 以内，增益为1。

要求数字脉冲电路逻辑，时间对应关系正确无误。在满足技术指标前提下，尽量使电路简单、可靠、再现性好。

还要指出一点，电路各参数调整好坏很重要，这要影响到系统精度。

五、检 测

所谓测电细分精度，就是当插补器输入一对“理想”的正、余弦光栅信号和一“理想”的采用信号，插补器输出与理论值符合的程度。为了检测，就要选择有关测试方法和制作有关电路。测试分静态和动态二种方法进行。

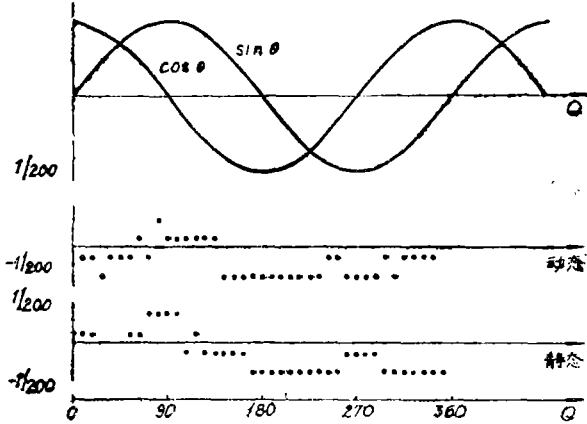


图4 精度测量误差曲线

讯号和一个可调的采样讯号输入插补器，然后，插补器的输出与理论值比较。这三个信号是由自检环节产生的。50千赫的斩波讯号经200分频得出250赫方波，以此再产生模拟的一对正交光栅信号和采样信号。电路见图5。

参考文献〔Ⅲ〕模拟的一对正交光栅讯号应符合：

1. 1.1%的讯号总畸变。
2. 幅值为斩波讯号1.5%的杂散低频或直流信号。
3. 二讯号幅值比变化3%。
4. 二讯号的正交误差1.8度。

其中有一项超过，就要导致四百分之一的插补误差。

在产生模拟莫尔条纹讯号电路中，方波通过三角波形变换和带通滤波（中心频率为250赫，带宽为125赫，增益为1）滤去谐波，提高信号纯度。采用RC移相可保证两正交讯号90°相位差的准确性。最后，由两个反相器输出，以便阻抗匹配和保证幅值相等。从模拟采样讯号电路看出，其原理是通过电压比较器的一端输入直流电压与其另一端锯齿波形比较，输出脉冲。通过调节直流电压电平，可使输出脉冲对输入方波产生相移，把采样讯号和输入的250赫方波同输入到一个双稳触发器进行比相，这个相位差就是采样时间，并且可用频率计测时间挡测量出来。动态测试时，每次按9度即采样时间变化0.1毫秒，每次可取40个数据，然后返测一次。来回两次测量时间约50分钟。图4动态曲线就是测试的处理数据。

1. 静态测试

按一固定角度9度等间隔选取对应 $E\sin\theta$ 和 $E\cos\theta$ 值，采用一固定采样信号采样，把移位寄存器读数与理论值比较，求出误差。采样信号是由50千赫经200分频产生的，周期为4毫秒。

测试数据处理结果见图4。每次往返测重复性很好，个别最大差一个字，即四百分之一。

2. 动态测量

把一对250赫的“理想”正余弦

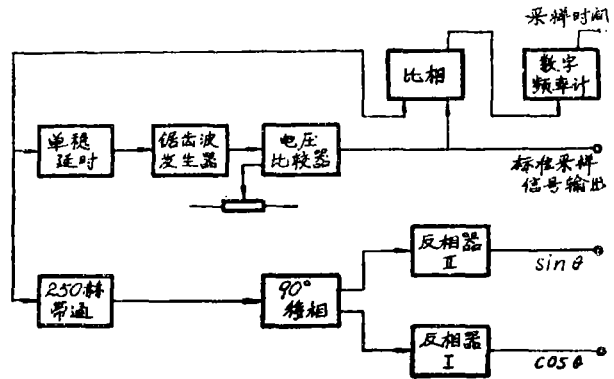


图5 自检信号电路方框图

从图4可以看出,当输入莫尔条纹讯号为直流或频率为250赫时,此插补器检测最大误差小于正负二百分之一,即小于插补器输出数字量的二个字。

六、结 束 语

此插补器在莫尔条纹讯号频率由0—250赫变化时,可将一个莫尔条纹讯号电细分400等分,精度为 $\pm \frac{1}{200}$ 。

这个插补器电路在一台光栅度盘检验仪上获得了实际应用。将64800条刻线,固有分辨率为20角秒的圆光栅莫尔条纹讯号,通过上述细分,其分辨率为0.05角秒。此电路与此检验仪的其他部分配合,解决了圆检验仪以前不能检低位数光栅盘(或码盘),以及动态检验度盘问题。测一次盘子(光栅盘、码盘、度盘)仅用4分钟,就可给出检测数据曲线。既可检盘子的每条刻线,也可检间隔130条线以内的任意一整数条刻线。

本工作中50千赫带通滤波器电路是由杨进堂同志设计试验的。孙承浦同志付出了大量的劳动。

参 考 文 献

- [1] A. H. MCILRAITH, J. Sci. Instrum., 1964, 41, No. 1, 34.
- [2] 沈正亚, 科技与情报, 1978, 1.
- [3] A. H. MCILRAITH, A. D. I. SCOTT, J. Sci. Instrum., 1966, 43, 585.