

二十三位绝对式光电轴角编码器

熊经武 万秋华

摘要: 23位绝对式光电轴角编码器是最新的研制成果,它具有0.15秒的角分辨率,优于 ± 0.6 角秒的标准偏差,稳定可靠。本文介绍它的工作原理。

一、前言

光电轴角编码器是一种数字测角装置,它把轴角信息转换成数字代码,与计算机和显示装置连接后可实现动态测量和实时控制。绝对式光电轴角编码器和增量式光电轴角编码器相比较,具有固定零点,输出代码是轴角的单值函数,抗干扰能力强,断电后再工作不用重新标定等优点,在天文望远镜、数字经纬仪、雷达、转台等数字化测量、跟踪和定位系统中,尤其在一些大型军用设备和高技术装置中得到广泛应用。

以往的大型精密跟踪仪器往往只用轴角编码器实时测量转轴所处的角位置,而控制系统所需要的角速度则由测速发电机提供。由于这类仪器的调速范围较宽,并且几乎都要求在很低的转速下工作,因此,不得不安装笨重而昂贵的测速发电机。省去测速发电机,使编码器在给出准确的角位置信息的同时,提供较宽范围的角速度(包括很低的角速度)信息,以改善整个系统低速平稳性,是研制本编码器的主要目的。

为了提高编码器的角分辨率,测角精度和可靠性,主要采取了以下四项措施。

1. 用单片机细分代替传统的电阻链细分,插补系数提高到512,编码器达到23位0.15角秒的分辨率。从统计的意义讲,具有24位0.077角秒的分辨率。
2. 采用高精度镀铬码盘,对径读数,使其测角精度优于0.6角秒(均方差)。
3. 用比较判别法代替奇偶校正,使精一粗校正范围扩大近一倍,编码器可靠性得到较大提高。
4. 增加粗码道光强补偿,提高了长期使用的稳定性。

实践证明以上措施是有效的。新研制的编码器分辨率和精度都有较大提高,性能稳定可靠,电路结构简单,成本下降。当采样频率为20c/s时,可测量低于1/2转/天的极低速度。四台编码器在海船上已经使用三年,经受了恶劣条件的考验,从未出现故障。

本文着重介绍编码器工作原理,粗码光强补偿,精一粗校正,单片机细分和精度检测结果。

二、编码器工作原理

编码器由数据采集装置和数据处理装置两部份组成。结构原理如图1所示。

数据采集装置包括：照明系统（含光源和光学系统）（1）、码盘（2）、读取狭缝（3）、光敏元件（4）、轴系及固定结构（5）。

数据处理装置包括：放大器（6）、鉴幅器（8）、采样保持电路（7）、模拟开关（10）、A/D转换器（11）、单片机处理系统（12）、以及有关的输入、输出接口电路（9）、（13）。

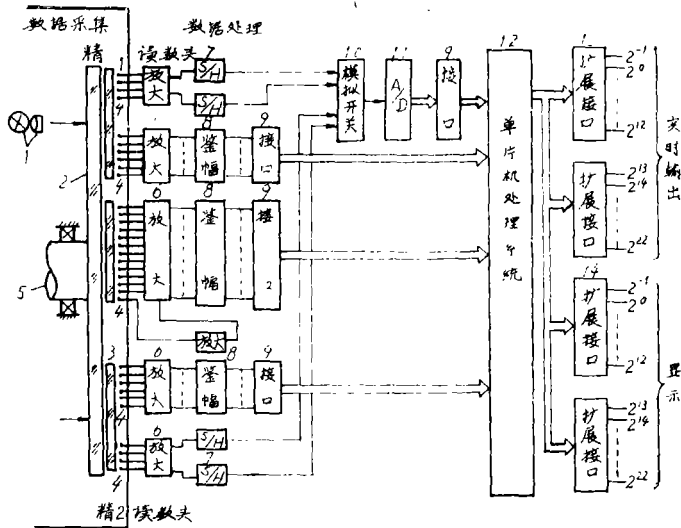


图1 编码器结构原理图

码盘是贮存轴角绝对位置信息的元件，固定在转轴上随轴旋转。它共设置了23条同心圆码道；每条码道都是由等间隔的透光和不透光扇形图案构成，可代表角度代码的一位变量。码盘上各码道的编码图案如图2所示。

C_1-C_4 四条称为精码道，由四条16,384对线/周的光栅码道组成，每条码道相位互差 90° ，每对线对应转角 79.1 角秒，具有16位分辨率。精码道决定了编码器的精度，在结构安

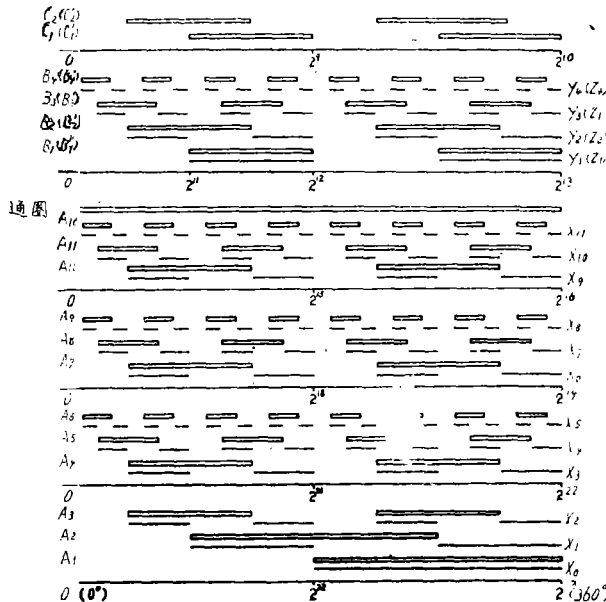


图2 码道关系图

排上给予最优考虑。

B_4 、 b_4 、 B_3 、 b_3 、 B_2 、 B_1 六条称为次精码道。 B_4 、 B_3 、 B_2 和 B_1 构成四位封闭的周期二进制代码，分别具有15、14、13位角分辨率。 b_2 和 b_1 与 B_2 和 B_1 周期相同，相位差 180° ，用来补偿 B_2 和 B_1 光强变化，并改善波形。

A_1 — A_{12} 和通圈共13条称为粗码道。12条粗码道按周期二进制代码排列。通圈码道是均匀透光的同心圆，用来补偿粗码道光强变化。

编码器共设置了三个读数头，它们和码盘可以相对运动，用来读取码盘的瞬时角位置信息。对径安置的精1和精2读数头结构相同，都由精狭缝和与精码道、次精码道相对应的10个光敏元件组成。精狭缝与对应各码道图案周期相同，用多狭缝的方式采集精码道和次精码道的信息，取得积分效果，以减少码盘及狭缝工艺缺陷的影响。粗读数头由粗狭缝和与粗码道对应的13个光敏元件组成。粗狭缝是一条透光的细缝，称为单狭缝，用于采集粗码道的信息。读数头的布置如图3所示。

编码器仅用一只降压使用的白炽灯，通过光学系统分光照码盘和三个读数头。33个光敏元件分别收集透过码盘和读数狭缝的光，并转换成电信号送入各自对应的放大器(6)，粗码道和两路次精码道光电信号被放大后经鉴幅器(8)和接口电路(9)，送入单片机(12)。两路精码道光电信号被放大后由采样保持电路(7)存贮，经模拟开关(10)，分时送入A/D转换器(11)，转换成数字量，经接口电路(9)，送入单片机。

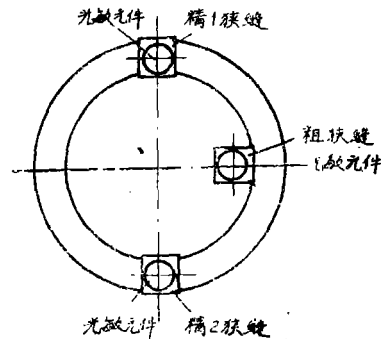


图3 读数头布置图

单片机在采集到上述数据后，首先对精1读数头的精码道数据进行细分运算，把79.1角秒周期的精码道细分512份，使编码器具有0.15角秒的高分辨率。接着，把次精码道的周期二进制代码转换成自然二进制代码，用细分得到的精码根据奇偶判别原理实现对次精码的校正处理。精码对次精码的校正称为精—精校正，本编码器可校正范围接近 ± 20 角秒。精码加上经校正处理的次精码形成精1读数，用 y 表示。重复上述处理，可得精2读数头的读数 z 。

精1和精2读数相加被2除，消除了轴的晃动和码盘偏心影响，称为精读数。它构成编码器角度代码的低12位(2^{-1} ， 2^0 ，…… 2^{10})，直接决定了编码器的精度和分辨率。单片机把粗码由周期二进制译成自然二进制代码，称为粗读数，用 x 表示。采用以精1读数为基准的比较判别法对粗码实现精—粗校正，校正范围由传统的 ± 80 角秒扩大到以精1读数为参考的 ± 160 角秒。校正处理后的读数加上精读数，构成23位绝对式光电轴角编码器的总角度代码 2^{-1} ， 2^0 ，…… 2^{21} ， 2^{22} 。单片机通过输出扩展口(13)和(14)分别实时输出和显示。最低有效位 2^{-1} 代码相当24位编码器的角分辨率0.077角秒。

三、粗码光强补偿

维持光源发光强度长期稳定，是解决编码器经久耐用的重要环节。过去这类编码器在使用一段时间之后，要采用人工的方法重新调整粗码道的光电信号幅值，以适应光强衰减的变化。调整工作麻烦费时。

采用光强自动补偿可起到与稳定发光强度同样的效果。精码和次精码通过设置两个相位相差 180° 的码道，利用差分放大自动补偿光强的变化。粗码道多，不能采用上述方法。试验表明，采用浮动比较电平方法进行光强补偿简单易行，效果较好。原理如图4所示。

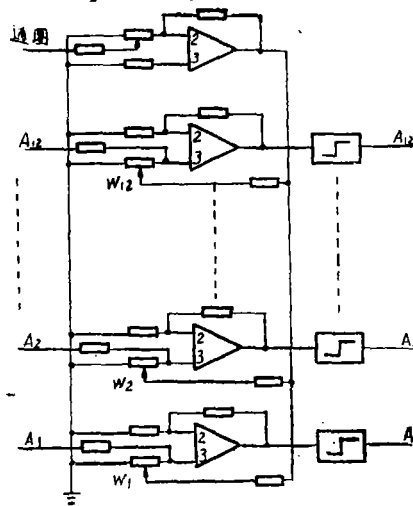


图4 粗码道光强补偿原理图

把通圈码道的光电信号放大后做为与各路粗码道光电信号比较的基准，当光强发生变化时，通圈码道和粗码道光电信号变化比例相同，基准电平按照与码道电平相同的变化比例浮动，使码道转换点（码道“0”“1”状态变化处）不变，实现了光强自动补偿。

实际上灯泡使用一段时间后，表面发黑的程度并不完全均匀，因此不可能全部补偿光强的衰减。但变化趋势一致，仍可消除大部分误差。该方法对因点灯电源波动所引起的光强变化补偿效果特别明显。

随着工作温度的变化，光敏元件的灵敏度也发生改变，由于变化趋势相同，也能得到有效的补偿。

四、精——粗校正

传统的精—粗校正，为了避免在精1读数头和精2读数头对径相加时，头尾衔接处出现不定状态，处理时不得不舍去最高位代码，使精码有效读数周期缩短一倍。精—粗校正范围仅是精码读数周期的 $\pm \frac{1}{8}$ （还要多设置一条与读数无关的校正控制码道）。本编码器精读数周期有13位分辨率，校正范围近似等于 ± 80 角秒。采用比较判别法进行精—粗校正，不用增加次精码道就可扩大校正范围，且省去校正控制码道，简化了结构，简少了电路。

在新校正方法中，三个读数头的读取狭缝的准确位置安排如图5所示。当粗读取狭缝位于码盘零位时， A_1 码道处于转换点，其它粗码道处于暗区的中心。精1读取狭缝被安置在 B_1 码道的前 $\frac{1}{4}$ 周期处，而精2读取狭缝被安置在 B_1 码道的后 $\frac{1}{4}$ 周期处。

由于精1和精2读数相互错开 $\frac{1}{2}$ 周期，当两读数头各自变化不超过 $\pm \frac{1}{4}$ 周期，也就是互差不超过 $\pm \frac{1}{2}$ 周期时，对径相加不会出现不定状态，所以不用舍去读数代码的最高位，校正

范围可比前扩大近一倍。

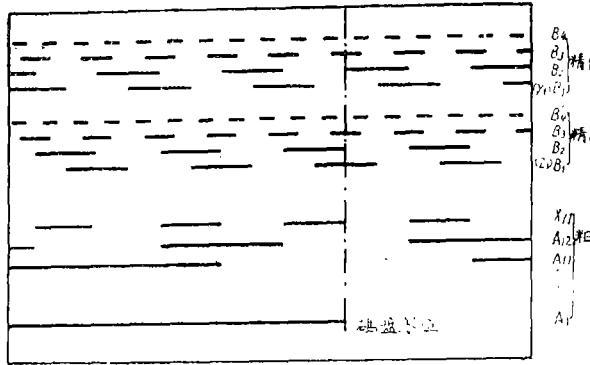


图5 读取狭缝关系图

两精读数相加除2后，函数 $(\frac{y}{2} + \frac{z}{2})$ 在精码周期内不是线性递增。为此，必须加一校正因子 N 。 N 是由精1和精2读数比较时决定的。当 $y > z$ 时， $N = 1$ （相当精读数周期的一半），否则， $N = 0$ 。

在精粗读数组相加时，用精码对粗码进行校正，为了使编码器输出的角度代码与轴角线性变化，还必须加一校正因子 M 。 M 是由精1码 y_1 和粗码 x_{11} 决定。当 $y_1 = 0$ ， $x_{11} = 1$ 时； $M = 1$ （相当精读数一个周期）。关系如表1所示。 y_1 是精1读数的自然二进制代码的最高位。 x_{11} 是粗读数的自然二进制代码的最低位，由12条粗码道代码（ $A_1 - A_{12}$ ）经过译码产生的，它的转换点包含了粗码道的所有转换点，对它的校正，就是对所有粗码道的校正。

对径相加和精一粗校正处理后，编码器的输出 u 按下式计算

$$u = x + \frac{y}{2} + \frac{z}{2} + M + N \quad (1)$$

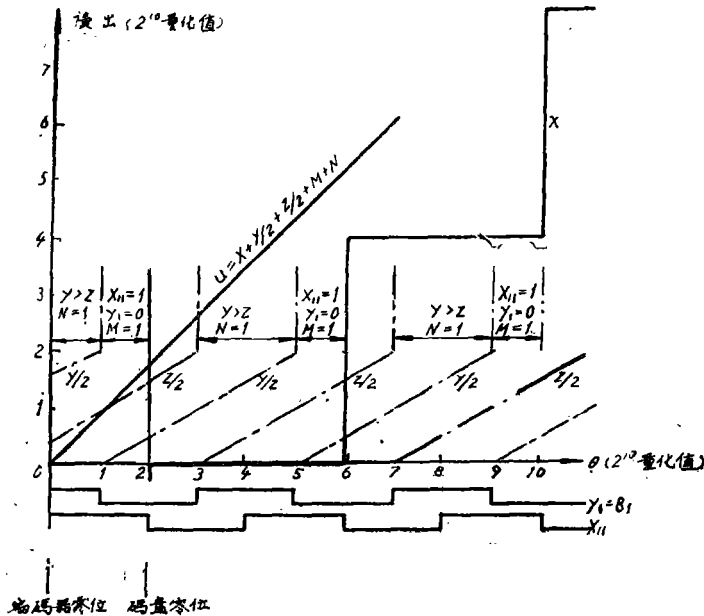


图6 数据读出关系

表 1 M 真 值 表

y_1	0	1	0	1
x_{11}	1	1	0	0
M	1	0	0	0

精读数周期为 2^{12} 量化值, 所以 $N = 1$ 时, 相当在读数中加 2^{11} 量化值。当 $M = 1$ 时, 相当加 2^{12} 量化值。读数关系如图 6 所示。可以看出, 经过处理后, 编码器的轴角代码零位已不是码盘原来的零位, 读数比码盘超前了 2^{11} 量化值。

五、单片机细分

为了提高编码器的分辨率, 我们采用单片机实现插补系数为 512 的细分处理。

1. “计算法”细分原理

单片机细分是根据两路正交莫尔条纹信号的幅度和相位的确定关系, 通过对幅度变化的判定来计算位移。在精密位移测量装置中, 一般采用四只光敏元件同时接收同一周期内的莫尔条纹位移信息, 以取得相位互差 $\frac{1}{4}$ 周期的一组四相光电信号系统。

$$\begin{cases} u_1 = \sin\theta \\ u_2 = \cos\theta \\ u_3 = -\sin\theta \\ u_4 = -\cos\theta \end{cases} \quad (2)$$

这是一组理想的四相交流信号系统, 单片机“计算法”细分电路的设计和参数计算都是以此为依据。

由(2)式可得 $u_A = u_1 - u_3 = A\sin\theta$ 、 $u_B = u_2 - u_4 = B\cos\theta$ 、假定 $A = B$, 则:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{A\sin\theta}{B\cos\theta} = \frac{A\sin\theta}{A\cos\theta} \quad (3)$$

(3) 式既消除了两路信号幅度同时波动的影响, 又隐含了确定位移的信息。

单片机通过 A/D 转换电路采集 u_A 、 u_B 的数值计算出相角 $\theta = \operatorname{arc}\operatorname{tg}\theta = \operatorname{arc}\operatorname{tg}\left(\frac{A\sin\theta}{B\cos\theta}\right)$, 从而确定位移。令 n 代表细分份数, T_n 代表某一相角 θ 所对应的细分值,

$$\text{则: } T_n = \frac{n}{2\pi} \operatorname{arc}\operatorname{tg}\left(\frac{A\sin\theta}{B\cos\theta}\right) \quad (4)$$

$$0 \leq \theta \leq 2\pi$$

由于 $\operatorname{arc}\operatorname{tg}\left(\frac{A\sin\theta}{B\cos\theta}\right)$ 在 $0 \sim 2\pi$ 范围内为多值函数, 所以要把 T_n 处理成单值函数。

$A\sin\theta$ 、 $B\cos\theta$ 的正负号与各象限的对应关系如表 2 所示。

单片机根据 $A\sin\theta$ 和 $B\cos\theta$ 的正负号判断 θ 所在象限, 确定象限细分常数。每个象限都

表 2

象限 \ 函数	I	II	III	IV
$A \sin \theta$	+	+	-	-
$B \cos \theta$	+	-	-	+

按 I 象限的方法处理，求出第 I 象限细分值，然后加上该象限的细分常数，便可求出该角的细分值。

若 T_{n1} 代表第 I 象限细分值， D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 分别代表 I、II、III、IV 象限细分常数，则有下列表达式：

$$T_{n1} = \frac{n}{2\pi} \arctan \left| \frac{A \sin \theta}{B \cos \theta} \right| \quad (5)$$

$$T_n = T_{n1} + D_k \quad (6)$$

$$D_k = \begin{cases} 0 & (k = 1) \\ \frac{n}{4} & (k = 2) \\ \frac{n}{2} & (k = 3) \\ \frac{3n}{4} & (k = 4) \end{cases} \quad (7)$$

由于 $\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}$ ， $\operatorname{tg} \theta \rightarrow \infty$ ，单片机不能正确运算（如图 7），为此把 I 象限分成 $0 \sim \frac{\pi}{4}$ ， $\frac{\pi}{4} \sim \frac{\pi}{2}$ 两个区间，分三种情况：

$$\frac{n}{2\pi} \arctan \left| \frac{A \sin \theta}{B \cos \theta} \right| \quad \left(0 \leq \theta < \frac{\pi}{4} \right)$$

$$T_{n1} = \frac{n}{8} \quad \left(\theta = \frac{\pi}{4} \right)$$

$$\frac{n}{4} - \frac{n}{2\pi} \arctan \left| \frac{B \cos \theta}{A \sin \theta} \right| \quad \left(\frac{\pi}{4} < \theta \leq \frac{\pi}{2} \right)$$

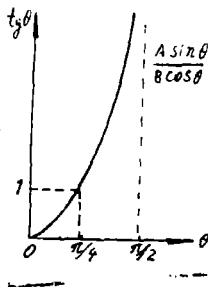


图 7

2. 单片机细分硬件及软件

根据细分原理，设计出单片机细分电路如图 8 所示。

从精 1 码道和精 2 码道对应的光敏元件送出的四相信号 $C_1 \sim C_4$ 、 $C_1' \sim C_4'$ 经差分放大抑制了偶次谐波和共模量的影响，放大后送出的四路信号 $A \sin \theta$ 、 $B \cos \theta$ 、 $A \sin' \theta$ 、 $B \cos' \theta$ 送入采样保持电路。单片机控制发出采样脉冲，四路采样保持电路 (S/H) 同时进行采样，并保持所采集的 $A \sin \theta$ 、 $B \cos \theta$ 、 $A \sin' \theta$ 、 $B \cos' \theta$ 的瞬时值，

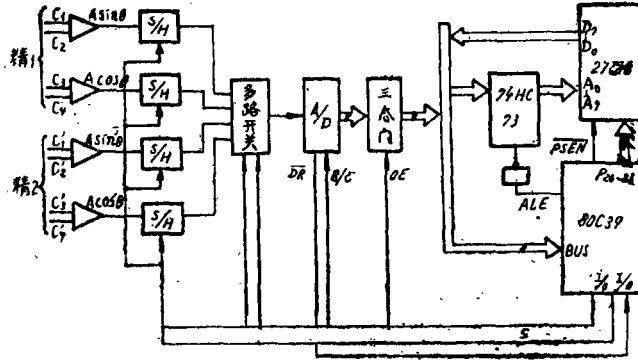


图 8 单片机细分电路原理图

由软件控制多路开关选择一路进行 A/D 转换。 A/D 转换结束后，转换器发出“转换结束”信号，通知单片机读取此路数据，然后进行另一路信号的转换。经过四次 A/D 转换，就把 $A \sin \theta$ 、 $B \cos \theta$ 、 $A \sin' \theta$ 、 $B \cos' \theta$ 信号在采样时刻的瞬时值变为数字量输入给单片机 80C39。

令 $n = 512$ ，单片机就可根据 (5) 分别求出精 1、精 2 采样时刻的细分值。

细分程序是用单片机汇编语言编写的，其流程图如图 9 所示。

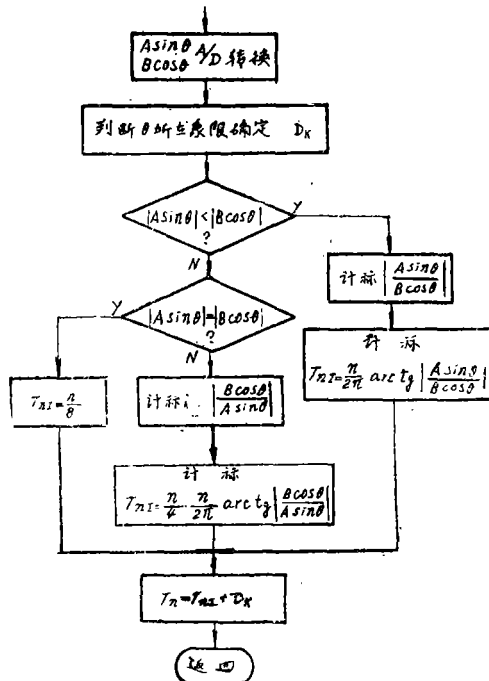


图 9 细分程序流程图

3. 细分误差

在精码系统中, 由于光栅透光不均匀, 黑白比不相等, 码盘与精狭缝间隙变化; 光敏元件的非线性及灵敏度、温度特性、暗电流不一致; 线性电路漂移和失真; 以及装调误差等等原因, 都会使波形偏离(2)式的要求, 造成信号不纯, 这将引起细分误差。误差的分析与计算在文献^[3]中已详细列出。

信号通过采样保持电路时, 由于存在孔径时间的不定性, 保持电压下垂、馈送、漂移等因素而引起波形失真。多路模拟开关的各信道接通电阻的差异、温度漂移以及漏电流也会造成波形失真。A/D 转换电路存在非线性失真、温度漂移、量化误差等, 对细分精度有一定影响。这些元件应选择合理。

分析和试验表明, 诸误差中, 信号不正交影响最大, 但只要精心装调, 这些误差都可控制在一定范围内, 单片机高插补系数细分可以满足使用要求。

六、精度检测

1. 角分辨率的检测

将平面反射镜固定在编码器转轴上随码盘转动, 用自准平行光管瞄准测量, 每四个分辨率测一次, 一个莫尔条纹周期共有512个分辨率, 测量128个点。在编码器 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个位置各测量一个莫尔条纹整周期, 共测量512点, 最大累计误差小于 ± 0.4 角秒。

2. 精度检测

将24面棱体固定在编码器转轴上, 随码盘转动。用自准平行光管瞄准, 采用全组合法测量, 鉴定时实测标准偏差 $\pm 0.51''$ 。

参 考 文 献

- [1] Analog to Digital Encoder, U.S. Patent 2,986,726 May. 30. 1961.
- [2] Interpolation Apparatus for Digital Electronic Position Measuring Instrument, U. S. Patent 4,225, 931 Sep. 30.1980.
- [3] 熊经武、王永臣; 仪器仪表学报, 第5卷, 第二期, 1984年

A 23-bit Absolute Photo-electric Rotary Encoder

Xiong Jingwu Wan Qiuhua

Abstract

The 23-bit absolute photo-electric rotary encoder developed is an up-to-date product with an angular resolution of 0.15 seconds of arc, an accuracy of better than ± 0.6 seconds of arc, great reliability and stability. This paper describes its operation principle.