

高精度绝对式光电轴角编码器

叶盛祥

(中国科学院光电技术研究所)

提 要

本文介绍高精度绝对式 19-bit、21-bit 光电轴角编码器的工作原理、具体结构、精度和可靠性等。采用移相电阻链细分和分段多次校正的方法对提高绝对式编码器的分辨率、精度和可靠性是有效的手段之一。检测结果：19-bit 编码器的分辨率准确度 $\sigma = \pm 0.6''$ ，测角准确度 $\sigma = \pm 1.2''$ ；21-bit 编码器的分辨率准确度 $\sigma = \pm 0.2''$ ，测角准确度 $\sigma = \pm 0.62''$ 。其中，19-bit 绝对式编码器早已用于光测设备中。

关键词：莫尔条纹；码盘；光栅；粗、精码道；位；刻线。

一、原 理

1. 工作原理

参看图 1，一个以周期二进制编码型式的码盘，固定在主轴上，由白炽钨丝灯及透镜、棱镜组成的照明系统照明码盘上的某个部位，码盘和狭缝间的相对旋转，在狭缝后面的半径方向上将看到明暗相间的光信号，即莫尔条纹，用光敏元件接收并转换成电信号，经电路处理，输出二进制数字角度代码。

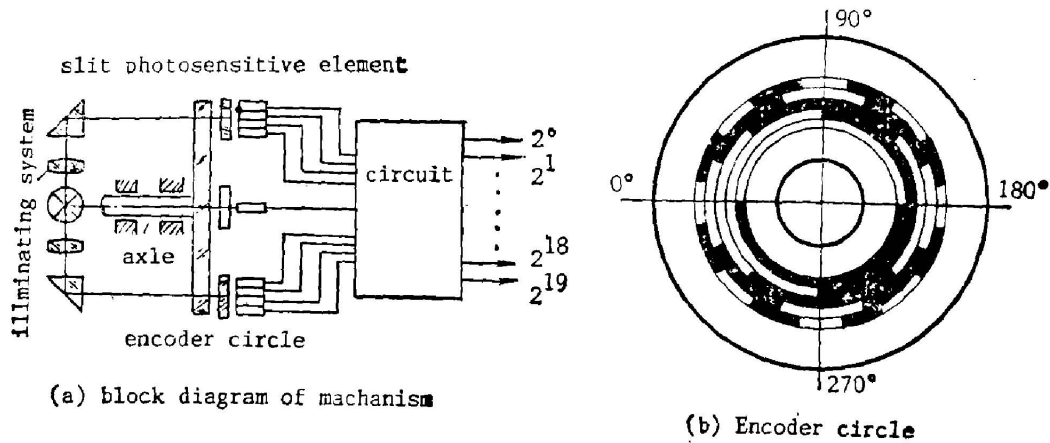


Fig. 1 Schematic for the principle of absolute photoelectric shaft angle encoder

编码器中的位数 N 表示将一个圆分成 2^N 等份，它代表编码器分辨率大小。位数愈高，则分辨率愈高。19-bit 编码器的分辨率约 $2.5''$ ，21-bit 编码器的分辨率约 $0.62''$ 。一般说， N -bit 编码器的码盘上至少有 N 圈码道组成。随着 N 的增加，则码盘上的刻线将变细，直径为 100 mm 的码盘上刻 19-bit 时，最细刻线宽为 $1.2 \mu\text{m}$ ，刻 21-bit 时，线宽为 $0.3 \mu\text{m}$ 。

收稿日期：1987年2月6日；收到修改稿日期：1987年9月23日

根据目前我国制造码盘的工艺水平, 线宽 $< 3 \mu\text{m}$ 时, 刻制码盘较为困难, 既要保证编码器的高分辨率, 又能按工艺条件所允许的线宽制造码盘, 最简单的方法是增大码盘直径。但这将使外形尺寸变大。为解决此矛盾, 可用电子学细分的方法, 实现从低位码道上获得高分辨率的目的。本文所介绍的 19-bit、21-bit 绝对式光电轴角编码器, 就是分别从 16-bit、18-bit 码道上提取的莫尔条纹光电信号, 用移相电阻链细分法, 内插 32 等份, 从而获得 19-bit 和 21-bit 的分辨率。

移相电阻链细分是用得最广的一种简单细分方法。它是将两个相位不同(一般相位差 90°) 的交变电压信号加在电阻链(串联或并联)的两端(图 2), 由于电压合成时的移相作用, 在电阻链的各个结点上, 得到一系列幅度和相位不同而周期相同的交变电压信号, 它将原始两交变电压信号的鉴零间隔被分成了若干等份, 这就是电阻链细分的最基本原理。

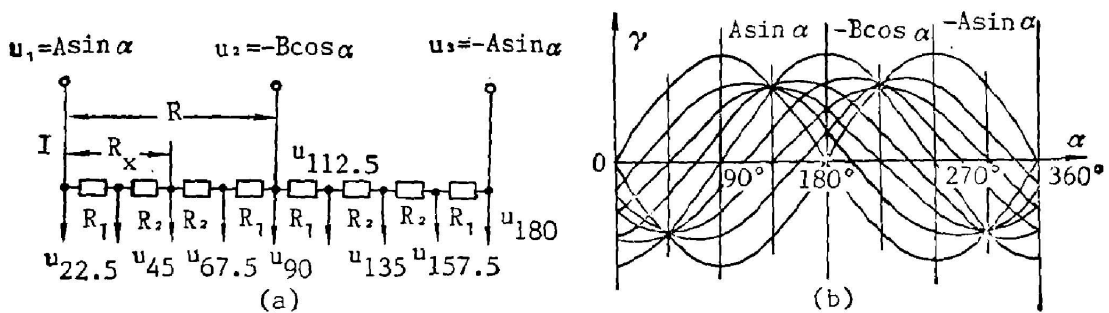


Fig. 2 Schematic for interpolation of phase-shift resistance

移相串联电阻链阻值计算如下

$$\begin{aligned} \text{电流} \quad I &= (u_1 + u_2) / R = (A \sin \alpha + B \cos \alpha) / R \\ \text{细分电压} \quad u_{45} &= u_1 - I R_x = A \sin \alpha - R_x (A \sin \alpha + B \cos \alpha) / R \\ &= (1 - R_x / R) A \sin \alpha - R_x / R \cdot B \cos \alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{在鉴零点时} \quad u_{45} &= 0 \\ \text{则} \quad A \sin \alpha, B \cos \alpha &= R_x / (R - R_x) \end{aligned}$$

$$\text{令} \quad K = \frac{B}{A} = 1$$

$$\text{tg } \alpha = R_x / (R - R_x)$$

$$\text{即} \quad R_x = \left(\frac{\text{tg } \alpha}{1 - \text{tg } \alpha} \right) \cdot R$$

由上式可知, 只要知道 R 和 α 的大小, R_x 即可求到。 R 的大小要考虑到与放大器, 鉴零器的输入阻抗相匹配, 是可以预先给定的。 $\alpha = \frac{T}{N}$, T 为基准信号的周期(即 360°), N 是细分份数, 是已知的, 因此在电路中最小鉴别角 α 也是已知的, 所以 R_x 的大小也就可以确定了。不同的细分信号鉴零点, 对应着相应的 α 角度大小, 将求得相应的 R_x 的大小, 完成串联电阻链中所有电阻阻值的计算。

2. 校正原理

由于制造码盘时存在分划误差, 加上安装偏心及轴系晃动, 所以输出的数字代码间隔是

不等的,也就是通常所说的分辨率有误差。数字代码间隔不等表现在电平图中是转换点不在理论位置上。如偏离量超出一定数量时,则读数会出现粗大误差,应予以校正。

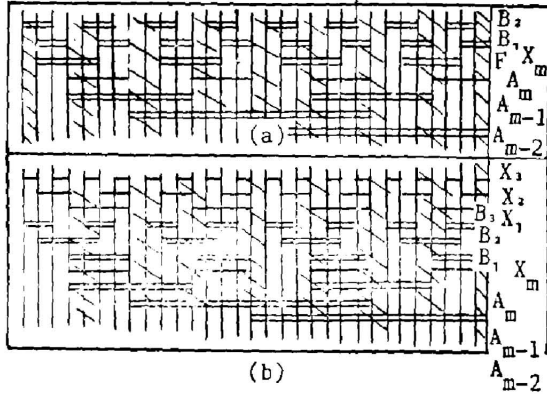


Fig. 3 Schematic for principle of correct

无误差,不需要校正;若相加后为奇数,且 \bar{B}_2 (B_2 的反码) = 1,则表示粗码有误差,当 $B_1 = 1$,需在 x_m -bit 上减去“ x_m 的当量值”,当 $B_1 = 0$,需在 x_m -bit 上加上“ x_m 的当量值”。

(2) 精码对径相加读数平均值对粗码的校正

此校正逻辑与(1)大致相同,不同的是精码并非直接取码盘上精码刻划位置所决定的状态,而是将对径两个位置上的精码读数相加平均后的状态,用它去校正单边读数的粗码。图3(b)表示校正逻辑的原理示意图。图中 x_1, x_2, x_3 为精码对径读数相加后自然二进制码的平均值,其中最高位 x_1 有可能产生粗大误差,所以将 x_1 舍去,用 x_2 作精码最高位对 x_m 作校正, B_2 为正校码,校正方法与(1)相同。

由图可知,校正范围(阴影部分)被限定在某个区域内,其数值为精码刻划周期的正负四分之一。若精码周期为 $80 \text{ angle} \cdot \text{sec}$,则它对粗码的校正范围为 $\pm 20 \text{ angle} \cdot \text{sec}$ 。

通常,粗码被布置在靠近码盘中心的区域,所以相同的线量误差表示的角度误差将变大。误差超出校正范围的现象有时也会发生的,为此,有必要采取分段多次校正的方法,即用精码校正次精码,再用次精码校正粗码。随着校正次数的增加,则粗码被校正的范围也随之增大,从而提高了整机的可靠性。本文论述的 21-bit 编码器,由于精码的 bit 数较高,刻线周期小,所以校正粗码的范围小。为提高可靠性,采用了两次校正,详情将在“结构”节中介绍。

二、结 构

光电轴角编码器由精密轴系、码盘与狭缝、读数头和电路等主要部分组成。在绝对式编码器中,由于码道圈数较多,所以人为地分成精码和粗码两部分。本文论述的编码器,精码部分用多狭缝接收十圈码道的信号,并用对径两读数头数字量相加的读数形式;粗码部分用一个单缝接收十三圈码道的信号。下面将分别叙述有关问题。

1. 码盘和狭缝

19-bit 和 21-bit 编码器的码盘大小相同,最细刻线码道圈的直径为 300 mm,码盘上共刻 23 圈码道。19-bit 码盘的精码是:四圈 16-bit,记为 C_1, C_2, C_3, C_4 ,相位互差 90° ,

差放后将得到相位差 90° 的两路基准信号, 供细分和校正用; 15-bit、14-bit 各一圈; 13-bit 四圈, 记为 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 , 相位互差 90° , 它们是为消除直流分量并形成 13-bit 的一个封闭周期而设置的。精码为 A_1 、 A_2 、 \dots 、 A_{13} 共十三圈。按上节讲过的校正原理可知。精码单边的校正范围为 $\pm 20 \text{ angle} \cdot \text{sec}$, 精码对径相加对粗码的校正范围为 $\pm 80 \text{ angle} \cdot \text{sec}$ 。

21-bit 码盘的十圈精码是: 四圈 18-bit, 四圈 15-bit 和两圈 13-bit。分三次细分和两次校正, 它们是: 18-bit 的信号细分 3-bit 到 21-bit, 15-bit 的信号细分 2-bit 到 17-bit, 13-bit 的信号细分 1-bit 到 14-bit; 18-bit 精码校正 15、16-bit, 校正范围为 $\pm 5 \text{ angle} \cdot \text{sec}$, 15-bit 次精码校正 13-bit, 校正范围为 $\pm 40 \text{ angle} \cdot \text{sec}$ 。十三圈粗码及校正与 19-bit 码盘相同。

在设计各码道的相位关系时要注意如下问题。19-bit 编码器中码盘与狭缝之间隙 t 取非涅尔焦面 $N=0$ 位置附近, 所以码盘上各码道的相位与狭缝上各对应码道为同相位瞬时位置时, 则可以接收到光电信号。但在 21-bit 编码器中, 由于 18-bit 的刻线较细, 所以将狭缝放置在 $N=1$ 的非涅尔焦面位置上。因此在设计四圈 18-bit 码道的相位时, 应使码盘上 18-bit 码道与狭缝上 18-bit 码道的相位关系互为反相, 才有光信号输出。这与 19-bit 编码器中最细圈 16-bit 码道的相位设计恰好是相反的。

2. 读数头

编码器中, 读数头由照明系统、光栅副、接收元件组成。照明系统包括白炽灯、聚光镜和折光棱镜。直读型读数头(即用双光栅重叠法取信号)要求照明系统发出平行光照亮光栅副。本编码器中, 光源为 6V 15W 的钨丝白炽灯, 通过聚光镜和棱镜同时照明两个精码读数头和一个粗码读数头。降低光源的点灯电压, 可延长灯泡的使用寿命, 在 21-bit 编码器中, 插入点灯电压的负反馈电路, 可保证恒定的发光强度。

光栅, 即码盘和狭缝, 两者之间隙应符合非涅尔焦面位置, 并选择一个可靠的工作间隙, 既能取出满意的光电信号, 又可防止码盘或狭缝的工作面被划坏。

接收元件用硅光敏二极管。硅光照面积为 $1 \times 3.5 \text{ mm}^2$, 可接收 70 余对(16-bit)及 280 余对(18-bit)刻线的光信号, 对刻线的短周期误差、分划误差有较好的平均效益。将接收元件制成密封组合件, 提高了抗潮解能力。

粗码读数头将同时接收从 A_1 至 A_{13} 的码道信号, 由于码道刻线较宽, 用单缝就可以接收到较大的信号。单缝密度不能超过粗码最细圈的透光亮线的宽度, 并考虑到安装偏心引起的误差不能太大, 所以粗码读数头中的单缝宽度取 0.045 mm 为宜。

3. 轴系

本编码器采用双球面向心滚动轴系。此轴系能自动归心, 置中精度高; 摩擦力矩小, 转动灵活; 对间隙和温度变化不敏感; 寿命高等优点。但加工调整较困难。控制一定的另件精度, 该轴系精度可达 0.0005 mm 以内。

轴系误差将影响精、粗狭缝间的关系及各码道间的相位关系误差。设主轴偏心 $0.5 \mu\text{m}$, 码道半径 103 mm , 则精、粗间的误差为 $1 \text{ angle} \cdot \text{sec}$ 。如果没有采用精对粗的校正手段时, 此误差已超出 21-bit 编码器的一个分辨率了, 这是不允许的。轴系误差又使精码读数头中各码道在同一瞬时而转过的角度不一样, 造成精码道中, 各圈码道间的相位关系发生了变化, 影响了分辨率的准确性。若误差超过编码器的分辨率时, 将出现错码现象。所以, 随着编码

器分辨率的提高,虽采取对径相加和校正等有效的措施,但对轴系精度也必须有相应的提高。

三、精 度

绝对式 19-bit、21-bit 光电轴角编码器经装配调试后,用自准平行光管和多面反射棱体对分辨率和测角精度进行检测,结果如下:

编码器 19-bit 和 21-bit,其分辨率分别为 $2.5''$ 和 $0.62''$;分辨率准确度为 $\sigma \pm 0.6''$ 和 $\sigma = \pm 0.2''$;测角准确度为 $\sigma = \pm 1.2''$ 和 $\sigma = \pm 0.62''$ 。21-bit 编码器的准确度达到西德和瑞士同类仪器(如 OPTON 的 PAD-05, Contraves 的 K-450)的水平。

四、可 靠 性

编码器在各种允许的环境条件下,能正常工作。其中不产生错码是最基本的要求。对 19-bit 编码器做了高低温、振动、冲击、颠波、激光干涉、大磁场干扰等方面的例行试验。有关试验的详细情况将另文发表。试验结果表明:编码器在 $-40^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 范围内;振动频率 1500 Hz/min,振幅 0.2 mm,加速度 1.5 g,时间 1 hr;冲击加速度 7 g,频率 76 Hz/min,时间 1 hr;颠波频率 240 Hz/min,振幅 15~20 mm,加速度 5 g,时间 10 min;90 kgm 的力矩电机,瞬时电流大于 30 A;功率为 10 MW 的激光反射情况下,编码器不错码,都能正常地工作。

研制的绝对式 19-bit、21-bit 光电轴角编码器中,采用了移相电阻链多次细分和分段多次校正误差的方法,使绝对式编码器向高分辨率、高精度、高可靠性方面迈出了一大步,并第一次作了较全面的多项目的环境条件试验,证明了光电轴角编码器既高精度又可靠的特点。但在体积和重量方面有待于进一步改进。

本编码器是作者在长春光机所工作期间的研制成果。熊经武同志负责电路部分的研制工作。另外,在研制中得到了李赫钟、田瑜、张春藻等同志的帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] *Instrument Review*, 1966, 13, No. 174 (Jun), 234~237.
- [2] G. A. Woolvet; *Transducers in digital systems*. (Reber Peregrinus Ltd. 1977), 14~14.
- [3] *Patent specification*, 133095.
- [4] 张善钟等;《计量光栅技术》, (机械工业出版社,北京,1985年),130~229.

Absolute photoelectric shaft angle encoder with high accuracy

YE SHENGXIANG

(*Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica, Chengdu*)

(Received 6 February 1987; revised 23 September 1987)

Abstract

The principle, mechanism, accuracy and reliability of 19-bit and 21-bit absolute photoelectric shaft angle encoder with high accuracy are described. The accuracy and reliability of the absolute encoder is enhanced significantly by means of interpolation of phase-shift resistance and sectionally and repeatedly correcting. The results measured are as follows: resolution accuracy $\sigma_1 = \pm 0.6$ angle second, angle measurement accuracy $\sigma_2 = \pm 1.2$ angle second for the encoder of 19-bit; and $\sigma_1 = \pm 0.2$, $\sigma_2 = \pm 0.62$ respectively, for the encoder of 21-bit. The 19-bit encoder have been used successfully in the optical measuring equipments.

Key words: Moire fring; encoder circle; grating; coarse fine encoder track; bit; grating line.