

# 光电编码器的应用

## ——细分原理

王显军, 吴庆林

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 编码器的光电信号经过电路系统的处理, 最终获得代表测量角度的数据代码。电路处理系统中最为关键的是细分技术, 它是编码器电路处理系统技术中的专业技术。本文详细介绍了一种细分原理和常用的实现方法, 说明了编码器测量基准光栅线数和编码器代码分辨率的关系, 分析了细分误差产生的原因。

**关键词:** 光电编码器; 细分原理; 细分精度

**中图分类号:** TP212      **文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI20112805.0001

### 1 引言

为了在应用方案中选取合适的光电编码器, 需要了解其原理和特点。光电编码器的分类源于角度测量基准<sup>[1]</sup>, 增量式、绝对式和准绝对式的区别取决于采用光栅盘的编码类型。测量基准光栅盘是编码器的“核心元件”, 为编码器实现角度测量提供了基础; 光电信号扫描技术<sup>[2]</sup>是编码器的“核心技术”, 从角度测量基准光栅盘上提取了代表角度位置的光电信号; 信号处理电路系统是编码器的“关键技术”, 实现了光电信号到测角数据代码的转换处理。

编码器的信号处理电路系统中经常用到的电路单元包括电源、模拟放大电路、数字逻辑电路、单片机、接口等, 这些均是通用的技术。电路系统各

单元要完成的功能包括: 信号放大、逻辑处理、译码、细分、校正、判向计数、坐标变换等<sup>[3-4]</sup>。在这些功能当中, “细分”和“判向计数”技术是编码器的专业技术。细分技术经常被应用到较高分辨力的编码器产品中, 属于编码器产品生产方的专业技术。判向计数则经常被应用到编码器增量信号的后续数据处理中, 属于产品的应用技术。目前, 市场上绝大多数的增量式编码器产品, 接口通常只是提供方波 A 相和 B 相的判角增量信号, 如果应用系统采用这种产品做测角元件, 需要采用判向计数的技术, 才能将增量信号转换成为测角数据代码<sup>[5-6]</sup>。

从应用系统角度出发, 对编码器的电路处理系统, 不必了解更多的细节, 但是, 了解细分技术的原

理是必要的。如果编码器的分辨力指标要求比较高,多数情况下,要涉及到细分技术。

## 2 细分原理和实现方法

### 2.1 细分的目的

在文献 [1] 中介绍了编码器的分类,无论绝对式还是增量式,基准光栅盘的最高分辨力码道都是光栅,一黑一白的线纹周期宽度称为光栅常量。目前,德国 HEIDENHAIN 公司的编码器技术水平居世界领先地位,在其产品系列中,光栅常量达到了  $4\mu\text{m}$ 。高于光栅常量的测角数据是由细分技术解决的。

HEIDENHAIN 公司的 RCN829 型角度编码器<sup>[7]</sup>,测角分辨力为 29 bits (536 870 912 位置数/圈),线数为 32 768。这其中的“线数”指的是编码器最高分辨力码道所采用的光栅是 32 768 对线,等于 215,即 15 bits。由此可见,RCN829 编码器细分份数为 214。细分技术提高了编码器的分辨力和测角精度。当然,低分辨力要求的产品无需细分。

德国 HEIDENHAIN 公司、英国 RENISHAW 公司的产品,在其选型指南中,明示了基准光栅的线数。国内的产品,尤其是较高分辨力的绝对式编码器,向用户明示基准光栅线数的情况较少。通常情况下,同等分辨力指标的产品,基准光栅线数越多,最终产品精度越高。

基准光栅线数和编码器代码分辨力的关系是:同样的直径条件下,线数越多,光栅线纹密度越大。基准光栅的编码图案只是理想的图案,将这个图案制作到码盘上的技术水平的高低,表明了在该行业中的技术地位,也决定了在该领域内的产品水平。显然,光栅线纹密度越大越难制作,产品的成本也越高。基准光栅的刻划分辨力和精度越高,产品的分辨力和精度越高。基准光栅包含的高精度测角信息,通过信号扫描技术体现在正弦光电信号中,再通过细分处理,获得了最终的测角数据代码。细分在测量基准光栅分辨率基础上,提高了编码器产品的最终测角分辨力。

### 2.2 细分技术原理

在文献 [2] 中介绍的光电扫描技术原理,说明了从基准光栅获得正弦光电信号的方法。信号如图 1 所示。

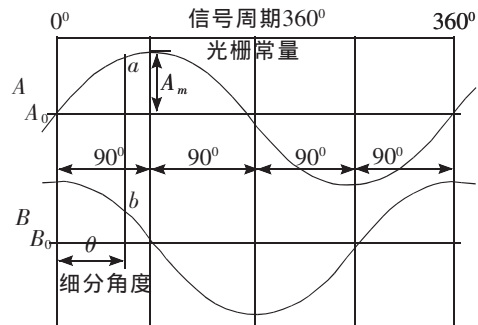


图 1 光栅扫描信号波形图

相位差  $90^\circ$  的两路正弦信号  $A$  和  $B$ , 可以用如下两个函数表示:

$$A = A_0 + A_m \sin(\theta + \varphi) + \sum_{i=2}^{\infty} A_i \sin(i\theta + \varphi_i) + \delta_{ea} \quad (1)$$

$$B = B_0 + B_m \cos(\theta + \varphi_b) + \sum_{i=2}^{\infty} B_i \cos(i\theta + \varphi_{ib}) + \delta_{eb} \quad (2)$$

其中,  $A_0$  和  $B_0$  为直流分量;  $A_m$  和  $B_m$  为基波信号的幅值;  $\varphi - \varphi_b$  为两信号的相位差;  $\sum_{i=2}^{\infty} A_i \sin(i\theta + \varphi_i)$  和  $\sum_{i=2}^{\infty} B_i \cos(i\theta + \varphi_{ib})$  分别为两路信号高次谐波分量的总和;  $\delta_e$  为电噪声。

假设信号中的直流分量  $A_0$  和  $B_0$  相同且等于 0, 基波信号的幅值  $A_m$  和  $B_m$  相同且等于 1, 两路信号的相位差  $90^\circ$ , 高次谐波分量相同且等于 0, 电噪声相同且等于 0。则上述  $A$ 、 $B$  两路信号可以简化为:

$$A = \sin\theta \quad (3)$$

$$B = \cos\theta \quad (4)$$

由式 (3) 和式 (4) 推导得出:

$$\frac{A}{B} = \frac{\sin\theta}{\cos\theta} = \tan\theta \quad (5)$$

$$\theta = \arctg(A/B)$$

由此计算出细分角度  $\theta$ , 这就是“细分原理”。

如图 1 所示, 在式 (5) 中,  $A$  是角度  $\theta$  位置

sin 信号  $a$  点参考直流分量  $A_0$  的幅度值;  $B$  是角度  $\theta$  位置 cos 信号  $b$  点参考直流分量  $B_0$  的幅度值。

基于公式 (5) 原理的细分方法是编码器生产方常用的方法。我们把这种对信号进行采样、然后分析采样数据获得细分角度的方法, 称作“采样细分”。基于公式 (5) 原理的方法是采样细分的一种。

另外, 还有很多细分方法, 如幅值分割细分方法 (也属于采样细分), 电阻链移相细分方法等<sup>[8-9]</sup>, 本文不再赘述。

### 2.3 实现方法

图 2 为细分硬件原理, 细分处理主要分三大部分: 信号放大器、模数转换和数字运算。

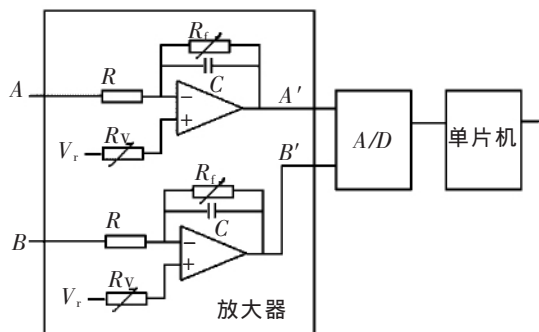


图2 细分硬件原理图

放大器部分的可变电阻  $R_f$  表示对正弦信号幅值的调整, 结果使两路幅值相等。 $R_v$  表示对信号直流流量的调整。电容  $C$  起滤波作用, 用于控制噪声。信号相位和波形谐波的质量主要取决于光电扫描技术;  $A/D$  转换器将模拟信号转换成数字量; 单片机输入数字量, 按细分原理计算细分角度。

依据不同的细分原理, 各自有对应的处理实现方法。具体应用中, 为了满足不同的要求, 会采用更多的处理环节, 也会有某些省略。例如, 相位补偿、幅值自动调整、数字滤波技术等。

总之, 细分技术是高精度编码器的关键技术, 这项技术也体现在产品价值当中, RENISHAW 的一种 1 000 细分的电路模块, 价值四千多元人民币。国内的编码器, 细分单元一般集成到电路系统当中。

RCN829 型角度编码器的细分达到 16 384 份,

为了分得更细、更精, 开发人员一直在努力。我们在细分技术的研究上, 虽然也能做到 16 384 份细分, 但处理速度、精度等方面, 与国际先进水平相比有较大的差距。

### 3 细分精度分析

在两路正弦信号  $A$  和  $B$  的表达式 (1) 和 (2) 中,  $A_0$  和  $B_0$  为直流分量, 是造成直流分量误差的来源;  $A_m$  和  $B_m$  为基波信号的幅值, 是造成信号幅值误差的来源; 两路信号的相位差是造成相位误差的来

源; 由  $\sum_{i=2}^{\infty} \dots$  表示的谐波分量总和是造成谐波分量误差的来源;  $\delta_e$  为电噪声, 是噪声误差的来源; 另外, 由于编码器角度数据由数字代码表示, 是量化误差的来源。

源自公式  $\theta_r = \arctg(A/B)$  的细分原理,  $\theta_r$  为细分角度的理论值, 由于误差必然存在, 实际的细分角度用  $\theta_i = \theta_r + d\theta$  表示,  $d\theta$  是误差。以下仅介绍误差产生的原因, 详细的定量分析请参阅文献 [10]。

#### 3.1 直流分量误差

直流分量即信号波形表达式 (1) 和 (2) 中的  $A_0$  和  $B_0$ , 由于信号相差  $90^\circ$ , 采用李沙育图形分析信号比较方便。 $A_0$  和  $B_0$  体现在李沙育图形中即是“圆心”的  $X$  轴和  $Y$  轴坐标。忽略其他分量的影响, 标准的正、余弦信号李沙育图形为圆, 如图 3 直流分量误差示意图所示。

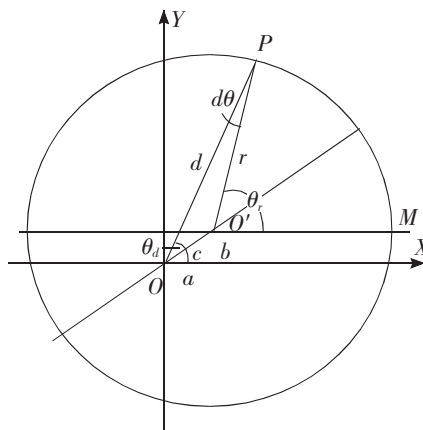


图3 直流分量误差示意图

半径  $r$  即基波信号幅值  $A_m$ ,  $O'$  点为理论信号的圆心。由于误差的存在, 采样计算参考点  $O$  与  $O'$  点不相符。当位置在  $P$  点时, 真值位置角度为  $\angle PO'M = \theta_r$ , 采样细分计算的角度  $\angle POX = \theta_d$ , 因此, 产生直流分量误差角度  $d\theta$ 。

### 3.2 幅值误差

幅值分量即信号波形表达式中的  $A_m$  和  $B_m$ , 体现在李沙育图形中即为圆的  $X$  轴和  $Y$  轴振幅。忽略其他分量的影响, 由于信号幅值不相等, 正、余弦信号李沙育图形为扁圆, 如图 4 所示。

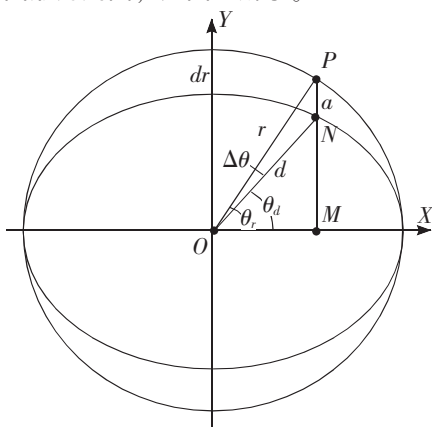


图 4 幅值误差示意图

设余弦幅值  $r$ , 正弦幅值为  $r-dr$ , 正弦幅值  $Y$  方向幅值偏差量  $a$ 。由于误差的存在, 当位置在  $N$  点时, 真值位置角度  $\angle POM = \theta_r$ , 采样细分计算的角度  $\angle NOX = \theta_d$ , 因此, 产生了幅值分量误差角度。

### 3.3 正交相位误差

当两路细分信号只有相位差时, 忽略其他分量的影响, 如图 5 所示。

原理算法默认  $A$  和  $B$  信号正交相差  $90^\circ$ ,  $B$  信号

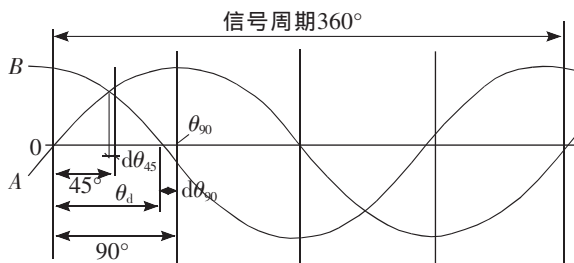


图 5 正交相位误差示意图

应当与图示横轴交于  $\theta_{90}$  点。实际上, 误差使  $B$  信号与横轴交点偏离  $\theta_{90}$  点, 如图所示,  $B$  信号与横轴交点提前到  $\theta_d$  点。在  $\theta_d$  点  $B$  信号等于 0, 按公式 (5) 计算细分角度  $\theta_d = 90^\circ$ 。显然有误差  $d\theta_{90}$ , 因此, 产生正交相位误差。

### 3.4 谐波误差和噪声误差

由于谐波的作用使信号正弦度不够纯, 使实际采样信号偏离信号基波理论值。同样, 噪声也使实际采样信号偏离信号基波理论值。

显而易见, 用公式 (5) 计算细分角度理论值:  $\theta_r = \arctg(A/B)$ , 由于谐波和噪声的共同作用产生误差, 设  $A$  信号偏移量为  $\delta_a$ ,  $B$  信号偏移量为  $\delta_b$ , 采样细分计算的角度:

$$\theta_d = \arctg[(A + \delta_a)/(B + \delta_b)]$$

实际细分角度  $\theta_d$  与理论值  $\theta_r$  不符, 因此, 产生谐波分量和噪声分量的误差。

### 3.5 量化误差

轴角位移是连续的模拟量, 角度数据数字代码是量化的, 如图 6 所示。

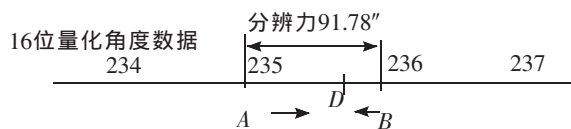


图 6 量化误差示意图

$A$  点的角位置为  $235 \times 360^\circ / 2^{16}$ , 从  $A$  点到  $B$  点之间, 数字代码无变化, 都是 235, 因此, 产生量化误差。同样是  $D$  点, 从  $A$  点到  $D$  点, 数据是 235; 可是, 从  $B$  点退到  $D$  点, 数据是 236。量化误差最大为一个代码的分辨率。

当角度数据代码分辨力为 16 位 ( $360^\circ / 2^{16}$ ) 时, 按照概率论理论, 量化误差均方根值:

$$\sigma_x = 19.78'' / 3.46 = 5.7'' \quad (7)$$

测角分辨力越低, 量化误差比重越大。

### 3.6 误差合成

设直流分量误差  $a = b = 5\% A_m$ , 信号幅值误差  $d_r = 5\% A_m$ , 相位误差  $3^\circ$ , 谐波分量误差  $0.2\%$ , 噪声  $\delta_c = 1\%$ , 细分 100 份的量化误差为  $0.29\%$ 。误差合成

得到总的测量不确定度,均方根值为光栅常量的1.52%。

影响精度的因素很多,误差源数值的变化是随机的,减小和控制误差是件非常麻烦的事。

#### 4 总 结

为了在应用方案中选取合适的光电编码器,需要了解其原理和特点。分类源于角度测量基准说明了增量式、绝对式和准绝对式的特点。光电扫描技

术介绍了编码器光电信号获取原理和结构特点。采用较高分辨力的编码器产品,则要涉及到细分技术,高分辨力和高精度一定要高的细分技术来保障。当然,这只是必要条件之一,虽然高精度和高分辨力涉及到的内容很多,但其中主要的内容是基准光栅、信号扫描技术和细分技术。

有关数据代码分辨力和精度的关系,以及编码器在控制系统中的应用问题,将在今后的文章中加以介绍。

#### 参考文献

- [1] 王显军. 光电编码器应用-分类源于角度测量基准[J]. 光机电信息, 2010, 27(10): 22-27.
- [2] 王显军. 光电编码器应用-光电扫描技术和测角系统组成[J]. 光机电信息, 2010, 27(12): 1-7.
- [3] 叶盛祥. 光电位移精密测量技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.
- [4] 慕向勇, 陈辅锋. 增量式光电编码器精粗码校正的实现[J]. 工程技术, 2008(4): 48-50.
- [5] 王雁平. 基于 F330D 单片机的光电编码器的设计与制作[J]. 传感器世界, 2008(4): 42-44.
- [6] 应卓瑜, 梁坚, 邵亮, 等. 基于 CPLD 的辨向细分电路设计[J]. 传感技术学报, 2005, 18(1): 143-145.
- [7] HEIDENHAIN. 技术资料[EB/OL]. [2010-12]. www.heidenhain.com.cn
- [8] 罗华, 高山, 李翔龙. 粗光栅信号全数字化处理法实现高倍数细分[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(2): 283-288.
- [9] 袁小滨, 李怀琼. 光栅莫尔条纹数字细分技术及其误差分析 [J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(1): 113-115.
- [10] 吕孟军, 张纯良, 郭琪. 莫尔条纹信号正切法细分精度分析[J]. 电子测量技术, 2010, 33(1): 107-110.

作者简介: 王显军 (1965-), 男, 汉族, 吉林长春人, 学士, 研究员, 1988年于天津大学获得学士学位, 主要从事光电传感技术和电子技术方面的研究。E-mail: yh8875@yahoo.com.cn