

光电编码器的应用

——分辨力和精度

王显军, 杨晓霞

(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: 编码器数据的分辨力和测角精度是两码事, 这两项指标同是编码器的关键指标。从应用角度出发, 明确使用要求, 选择合适的产品至关重要, 不同的使用要求对测角精度和数据分辨力的要求不同, 涉及到编码器的基准光栅质量、信号提取质量、产品安装要求等。说明了编码器数据的测角精度和分辨力的基本概念, 分析了影响精度和分辨力的原因, 简单介绍了保证测角精度的处理方法。

关键词: 电编码器; 测角精度; 测角分辨力

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A

DOI: 10.3788/OMEI20112809.0006

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^[1], 增量式、绝对式和准绝对式的区别, 取决于所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”。采用光电信号扫描技术^[2], 实现了从基准光栅盘上获得代表角度数据的光电信号, 光电信号扫描技术是编码器的“核心技术”。信号处理电路中的细分技术^[3]是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。细分技术是编码器的“专业技术”。

编码器产品最终输出代表测量角度的数据代码,

它所能表示的测角精度和分辨力是编码器的重要指标。在我们的产品系列当中, 同是 24 位分辨力的编码器, 小型的产品外径只有 $\Phi 110$ mm, 大型的产品外径达到 $\Phi 450$ mm, 虽然产品具有相同的测角分辨力指标 0.078", 但其精度指标为 5"~ 0.5", 区别较大。另外, 同是测角精度为 5"的产品, 也有测角数据分辨力 20" (16 位) ~ 0.078" (24 位) 的区别。

分辨力 20"的编码器怎么会有 5"的精度? 分辨力 0.078"的编码器怎么只有 5"的精度? 这与产品制造的细节、分辨力和精度的概念, 以及具体使用的要求有关。

关于编码器精度和分辨力的资料有很多, 来自期刊论文的, 注重描述科研成果, 前提是默认读者

已非常了解精度和分辨力的重要性，结论是如何提高了指标。书本上教的是多处适用的理论概念。产品资料介绍里只标明了指标参数，也有精度和分辨力的相关内容介绍，目的是使用户清楚使用注意事项。本文从应用设计角度出发，介绍分辨力和精度。

有关编码器应用开发的项目，对编码器有各种各样的要求，在现有的市场上可能找不到合适的产品，这就需要“定制”，无论是定制还是采用定型产品，都涉及到测角精度和分辨力的选定。明确使用要求，选择合适的产品至关重要。因此，有必要清楚测角精度和测角数据分辨力的相关内容，避免要求过高而加大制造的难度，增加经济成本。

2 测角分辨力和精度的概念

2.1 测角数据分辨力

正常人的眼睛视力为 1.2，观看视力表在 1.5 的图像就模糊不清了，分辨力是固定的。编码器测量的角度用数字代码表示，两个相邻的数字代码之间的小角度量，有的大、有的小，这个量值不是固定的。

作者认为，编码器的测角分辨力可以这样定义：在一周角度内，编码器数据代码的总位置数表示编码器的测角分辨力，用总位置数来表示，或用数据量纲（ $360^\circ/\text{总位置数}$ ）来表示。

例如，16 位的编码器，代表角度的最终数据为 0~65 535，总位置数是 65 536（ 2^{16} ，0 算 1 个），即说明了编码器的测角分辨力是 16 位，或者说测角分辨力是 65 536，这个概念是指一周 360° 被分成了 65 536 份。 $360^\circ/65\ 536=19.77''$ ， $19.77''$ 是数据代码的量纲，也可以说测角分辨力是 $19.77''$ 。需再次强调说明，这并不表示 2 个相邻的数字代码之间的小角度量就是准确的 $19.77''$ ，只表示一周 360° 被分成了 65 536 份，数据量纲是 $19.77''$ 。同理，18 位编码器的总位置数是 262 144，18 位表示的就是位置数总数是 2^{18} ，代码量纲是 $4.94''$ 。

有人认为，16 位编码器的分辨力是 $19.77''$ ，就把这个数据认定是两个相邻的数字代码之间准确的

小角度量，依此理解来使用，结果不好，对产品不满意，造成误导。

在具体使用中，分辨力的概念仅需要关注的是“量纲”，保证计算正确就可以了。

2.2 测角数据精度

误差值即测量值与理论真值的差值^[4]。误差可定量地表示为：

$$\text{误差值} = \text{测量值} - \text{理论真值}$$

用符号表示即

$$\Delta i = X_i - X_z \quad [i=1 \sim n \text{ (测量序号)}]$$

Δi 称为真误差，它的大小表示每一次测量值对真值的不符合程度。

精度的高低是用误差来衡量的，误差大，精度低；误差小，精度高。误差按其性质可分为系统误差和随机误差，精度也相应地区分为准确度、精密度、精确度。

图 1 所示为打靶结果的误差示意图，子弹落在靶心周围的 3 种情况。（a）的系统误差小而随机误差大，即准确度高而精密度低；（b）的系统误差大而随机误差小，即准确度低而精密度高；（c）的系统误差和随机误差都小，即精确度高。

编码器测角数据精度是指测角数据对理论真值角位置的不符合程度。测角误差数据如图 2 所示。

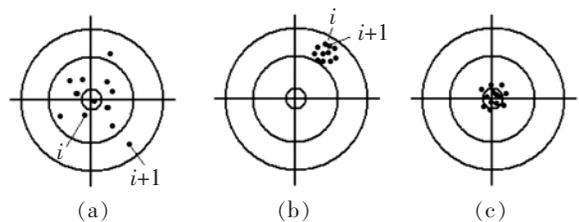


图 1 误差示意图

由图 2 可见，编码器测角数据的误差是由全周系统误差和细分误差组成的。

如图 2（a）所示，系统误差数据限 a 比细分误差数据限 u 大得多，则由误差曲线图可以看出系统误差的分布情况。但是，有时 u 比 a 大得多，系统误差规律会被细分误差数据“淹没”。

全周系统误差变化比较缓慢，属于“低频”分

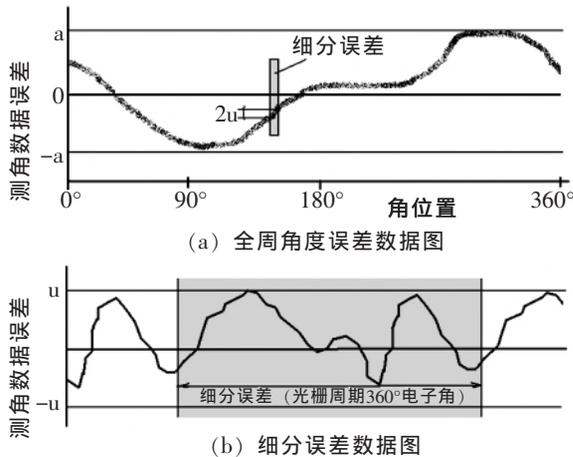


图2 编码器测角误差数据示意图

量, 误差数据变化周期为整周 360° 。细分误差属于“高频”分量, 细分误差变化周期取决于基准光栅, 与光栅刻线周期相同。周期变化的规律是理论上的结果, 实际上, 不同周期内的结果不能完全复制, 影响因素很多, 而且, 细分误差规律比较随机, 难以修正。

细分误差质量主要取决于光电信号扫描质量和信号处理电路质量。

2.3 测角精度表示方法

常见的编码器精度有两种表示方法。

一种是标准偏差: 简称标准差, 也称之为均方根误差 (RMS: root mean square)。产品经标定获得一组测量数据, 用贝塞尔 (Bessel) 公式处理测量结果获得均方根误差值:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}$$

这种表示方法认为测量结果符合正态分布规律, 图3为正态分布误差概率图。测量数据误差在 $\pm\sigma$ 之间的概率为 68.26%; 在 $\pm 2\sigma$ 之间的概率为 95.44%; 测量数据误差在 $\pm 3\sigma$ 之间的概率为 99.73%。

另一种是极限误差: 表示测量结果的误差不超过这一极限值。产品经标定获得一组测量数据, 如图2(a)所示, 在 $\pm a$ 之间。

我们经过对许多台产品标定数据的统计, 得出 a

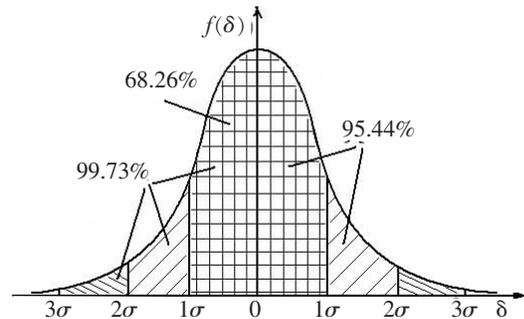


图3 正态分布误差概率图

与 σ 数据关系的经验结果是: $a \approx 2.2\sigma$ 。这只是我们在实际数据处理操作过程中获得的实践经验结果, 只能做 a 与 σ 数据关系转换的估计。按照教科书的误差理论, 单次测量的极限误差为 $\pm 3\sigma$, 虽然理论上单次测量误差超过 $\pm 3\sigma$ 的概率还有 0.27%, 但这种比较低的概率理论上也被认为是几乎不可能出现的事件。

2.4 数据精度和信号精度

有些编码器的电路接口是通过串行或并行接口输出测角数据, 数据经常用二进制码表示, 代码量纲和总位置数就是前面提到的分辨力的概念, 应用系统直接使用这些数据。

多数增量式编码器的电路接口, 通常提供正弦和余弦方波信号, 应用系统再通过处理信号得到测量结果。

数据的误差如图4所示。

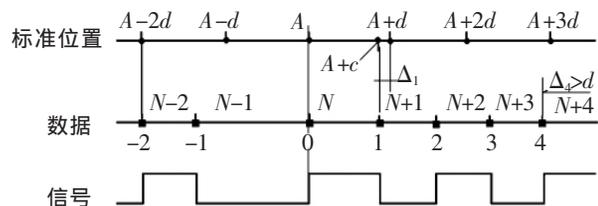


图4 数据与信号误差示意图

0点到1点之间的数据是 N , 1点到2点之间的数据是 $N+1$ 。0点对应位置角度为 A , 1点对应位置角度是 $A+c$ 。位置轴坐标等距递增角度 d 相当于分辨力。数据变化点与标准位置角度差为 Δ 。

数据 $N-1$ 和 $N-2$ 之间的角度差值, 可能趋于 0

(在-1点左右),也可能趋于 $2d$ (在-2点右,0点左)。

假如数据非常准确,则1点应对应位置 $A+d$,2点应对应位置 $A+2d$ 。实际情况是数据 N 表示的角度位置在 $A\sim A+c$ 之间,这就是数据误差。

信号的误差亦如图4所示。

信号的上升沿和下降沿均产生数据变化,0点的信号沿面正好对应角位置 A ,没有误差;1点的信号沿面对应角位置 $A+c$,误差角度为 Δ_1 。数据变化点与对应标准位置的误差可称作“信号误差”,也可称之为“沿面误差”。

如果 d 是 $0.078''$, Δ 为 $5''$,就是分辨力 $0.078''$ 的编码器只有 $5''$ 精度的原因。如果 d 是 $20''$, Δ 为 $5''$,就是分辨力 $20''$ 的编码器会有 $5''$ 精度的原因。

3 测角精度分析

角度测量精度主要取决于光栅质量、光电信号扫描质量、基准光栅的相对偏心量、支撑轴系的误差、编码器与被测轴的连接等^[5]。

3.1 光栅质量

毫无疑问,测角数据是从基准光栅盘上获得的,所以,基准光栅上的图案位置精度是有保证的。

基准光栅的制造要经过许多工艺:精密光刻获得掩模母版,光学加工获得光栅毛坯,毛坯经过镀膜、涂胶、曝光、蚀刻等才制成光栅,各道工序都属于光加工技术,技术水平的高低,代表行业基础水平的国际地位。工艺和设备质量均影响到最终产品的质量。国内的工艺技术与国外先进水平相比均有较大的差距,所以,高精尖的产品无法与之相比。

3.2 光电信号扫描质量

光栅测量技术的基础是光栅莫尔条纹技术,基于这种技术,实现了从基准光栅上获得光电信号。通常情况下,读出的光电信号是和基准光栅刻线周期对应的正弦波,这个正弦波含有比基准刻线分辨率更高的角位置信息,通过“细分”获得高于光栅常量的测角数据。因此,正弦波的质

量决定了光栅刻线周期内的精度。

3.3 基准光栅的偏心

基准光栅理论圆心 O' 与实际测量轴旋转中心 O 存在偏心,造成读数误差。图5为偏心误差示意图。

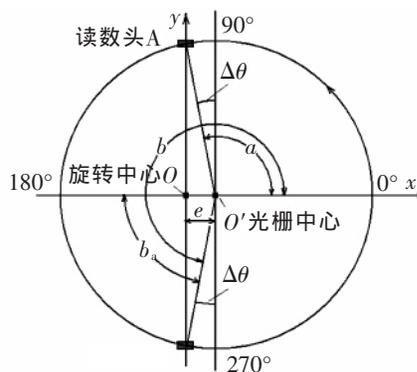


图5 偏心误差示意图

读数头A初始位置在 x 轴 0° 点处,角度变化以旋转中心 O 点为准转动角度 90° ,读数头A相对转动到 y 轴图示位置处,读数角度为 a 。由图可见,实际转动角度 $\angle xOy=90^\circ$,A读数头测量角度 $a=90^\circ+\Delta\theta$,由此产生偏心误差 $\Delta\theta$ 。

对径读数头B初始位置在 $-x$ 轴 180° 点处,角度变化以旋转中心 O 点为准转动角度 90° ,读数头B相对转动到图示位置处,读数角度 $b=270^\circ-\Delta\theta$,因为B头初始位置是 180° ,所以B头的增量角度 $b_a=90^\circ-\Delta\theta$ 。显然, $+\Delta\theta$ 与 $-\Delta\theta$ 相互抵消,可见,对径读数消除了偏心误差。

通常采用两种办法减小偏心误差:一是精调,二是对径读数。在产品的使用过程中,某种原因会产生结构的微变形,也造成偏心变化。所以,对径读数效果比较好。

3.4 轴系误差

无论是编码器的内置轴承还是被测量轴系,都存在误差,这使得设备转动角度不能真实地传递到测量基准光栅,造成测量结果的误差。

为了减小轴系误差,首先,要提高轴的加工装调精度;其次,采用散状结构(取消联轴器和编码器内置轴承)将光栅直接安装在被测量轴

上；再次，采用对径读数消除直径误差；最后，采用修正技术补偿系统误差。

3.5 编码器与被测轴的连接

这里主要指的是联轴器，如图6所示。弹性联轴器或弹簧片连接方法存在带动误差，影响测量结果。

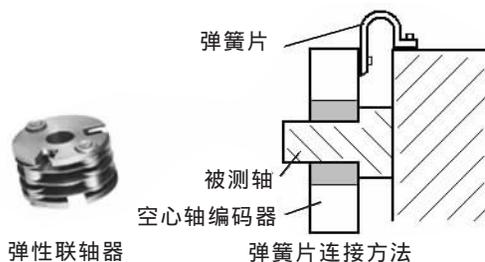


图6 编码器与被测轴的连接示意图

3.6 小结

采用整装结构的编码器，经多年的实践经验，我们的体会是：用户应当充分考虑编码器与被测量轴的连接，这是影响应用效果的主要因素。采用散装结构的编码器，影响应用效果的主要因素是安装偏心和读数头与光栅的相对位置，读数头与光栅的相对位置影响到光电信号的扫描质量。

基准光栅刻线密、直径大，通常表示基准本身精度高；直径大时，沿圆弧“线量”的误差转换“角量”的误差相对小，所以，大型产品才有可靠的高精度和高分辨力。

误差有原理误差、制造误差和使用误差之分。在制造过程中，设计技术、元件、材料、工艺、设备、检测等，均影响产品的质量。在使用过程中，产品老化造成信号质量下降；不同温度使材料之间变形不一致造成微变形；使用环境产生污染等，最终都影响精度，所以，设计选择要留有余量。

4 细分决定分辨力

当用户对编码器产品的分辨力和精度比较关心时，往往是需要比较高档的产品，产品的分辨力和精度要求均较高，这种产品通常都是采用了细分技术。产品的最终分辨力和精度指标受到细分技术的影响较大。

如果基准光栅精度高，信号提取质量高，就可以经过细分获得较好的分辨力和精度指标。细分基准信号好，才能分得更细、更准，否则，就会分不开、误差大。尽量选择基准光栅刻线密度高的产品，避免依赖细分的结果。

光栅质量确定后，光电信号质量即已确定，细分份数越多，分辨力越高，但是，这提高不了信号精度。所以，可以说是细分决定了分辨力。采用高份数细分处理，获得高分辨力，是否必要，视应用系统具体要求而定。

5 结束语

有些用途需要编码器的信号精度高，分辨力要求一般，例如激光照排机，某种CCD相机的行曝光同步控制等，这些情况是利用编码器的脉冲信号做“位置同步触发信号”，来启动一种在确定位置开始的工作。

要求精度较高的产品，通常是做某种标定测量的基准，用来测量被测量的精确位置。

对于精度要求不高、但对分辨力要求较高的产品，有一种情况是利用这种编码器相邻位置分辨能力较高的特点，解决小范围测量的某种需求，如同伺服控制系统的低速测速。

光电编码器作为一种常用的测角传感器，其用途广泛。应用选型无疑是较麻烦的事，需要仔细研究。高精度的编码器首先要有高精度的基准光栅，有关光栅制造方面的内容将在以后的文章中介绍。

参考文献

- [1] 王显军. 光电编码器的应用——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. 光电编码器的应用——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] 王显军, 吴庆林. 光电编码器的应用——细分原理[J]. 光机电信息, 2011, 28(5): 1-5.
- [4] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [5] HEIDENHAIN. 技术资料[EB/OL]. [2010-12]. www.heidenhain.com.cn

作者简介: 王显军 (1965-), 男, 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

《光学 精密工程》 (月刊)

《光学 精密工程》是中国仪器仪表学会一级学术期刊, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办, 科学出版社出版。由国内外著名科学家任顾问, 陈星旦院士任编委会主任, 国家科技部副部长曹健林博士担任主编。

《光学 精密工程》坚持学术品位, 集中报道国内外现代应用光学、光学工程技术、光电工程和精密机械、光学材料、微纳科学与技术、医用光学、先进加工制造技术、信息与控制、计算机应用以及有关交叉学科等方面的最新理论研究、科研成果和创新技术。本刊自2007年起只刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省、部委基金项目资助的论文。《光学 精密工程》竭诚欢迎广大作者踊跃投稿。

本刊获奖:

中国精品科技期刊
中国科学技术协会择优支持期刊
中国百种杰出学术期刊
第一届北方优秀期刊
吉林省双十佳期刊

国际检索源:

《美国工程索引》(EI Compendex)
《美国化学文摘》(CA)
《英国INSPEC》(SA)
《俄罗斯文摘杂志》(PK)
《美国剑桥科学文摘》(CSA)

国内检索源:

中国科技论文统计源期刊
中国学术期刊(光盘版)
万方数据系统数字化期刊
台湾华艺中文电子期刊网
中国科学引文数据库
中国物理文献数据库
中国期刊网

中文核心期刊要目总览(北大)
中国学术期刊综合评价数据库
中国光学与应用光学文摘
中国科学期刊全文数据库
中国光学文献数据库
中国学术期刊文摘
中国物理文摘

电 话: (0431) 86176855
传 真: (0431) 84613409

E-mail: gxjmgc@ciomp.ac.cn gxjmgc@sina.com
http://www.eope.net