

小型绝对式光电轴角编码器动态误差分析

于海^{1,2} 万秋华¹ 王树洁¹ 赵长海¹ 卢新然¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; ² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 光电编码器具有静态特性和动态特性, 目前对光电编码器误差的分析主要局限于静态状态下。为使光电编码器动态特性更加完善, 从轴系晃动、幅频响应、细分延时等方面, 对小型绝对式光电编码器的动态误差进行了研究。通过分析角速度对光电编码器动态误差的影响, 得出了速度影响动态误差的主要规律。分析表明, 对于码盘刻划 h 条精码道的光电编码器, 其动态误差由 1 次正弦分量、 h 次正弦分量和常数分量组成, 并且随着光电编码器转速的变化, 各次误差分量的幅值都发生相应的改变, 影响光电编码器的动态特性。研究结果可以用于光电编码器生产中中对编码器动态特性的分析与控制, 为改善编码器动态特性提供依据。

关键词 光学器件; 光电编码器; 动态特性; 动态误差; 误差检测; 动态误差分析

中图分类号 TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0808004

Dynamic Errors Analysis of Small Absolute Photoelectric Encoder

Yu Hai^{1,2} Wan Qiuhua¹ Wang Shujie¹ Zhao Changhai¹ Lu Xinran¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Photoelectric encoder has static and dynamic characteristics. The analysis of photoelectric encoder's errors is limited in static characteristics. In order to make the photoelectric encoder dynamic characteristics perfection, the dynamic errors of small absolute photoelectric encoder from bearing rocking, range-frequency respond, data handling delay and so on are researched. By analysing the relationship between angle speed and dynamic errors, the regular pattern of dynamic errors and angle speed are obtained. Analysis results show that the dynamic error of an encoder which h code carves are composed by 1, h and constant products. By the changing of speed, the range of these component products also change. Thereby the characteristics of the encoder are affected. The research results can be applied to the analysing and controlling of photoelectric encoder's dynamic characteristics, as well as providing theory for the improvement of photoelectric encoder's dynamic characteristics.

Key words optical devices; photoelectric encoder; dynamic characteristics; dynamic error; error testing; dynamic error analysis

OCIS codes 120.0280; 130.6010; 120.3930

1 引言

光电编码器是一种数字式角度传感器, 它以高精度计量圆光栅为测量元件, 通过光电转换, 将输入的角度位置信息转换成相应的数字代码, 并可与计算机及显示装置相连接, 可实现数字测量与数字控制。与其他同类用途的传感器相比, 它具有精度高、测量

范围广、体积小、重量轻、使用可靠、易于维护等优点, 具有较高的性价比, 因此已普遍应用在雷达、光电经纬仪、地面指挥仪、机器人、数控机床和高精度闭环调速系统等诸多领域, 是自动化设备理想的角度传感器^[1-6]。

随着科技的进步以及航空航天技术的飞速发

收稿日期: 2013-03-08; **收到修改稿日期**: 2013-03-28

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(O70Y32R070)

作者简介: 于海(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事光电位移精密测量及光电编码器的检测等方面的研究。

E-mail: yuhai5158@163.com

导师简介: 万秋华(1962—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电位移精密测量技术及高精度光电轴角编码器等方面的研究。E-mail: wanqh@ciomp.ac.cn(通信联系人)

展,各个研究单位对编码器的精度要求越来越高。由于光电测控设备的跟踪、定位精度对角速度及角加速度的敏感度的增加,不仅要求编码器实时提供角度信息,同时还要求在角速度、角加速度作用下保证精度。

在国外,俄罗斯、日本和德国等国家相继开展了编码器动态特性研究^[7-8]。目前国内对光电编码器误差和精度的分析大多停留在静态误差分析上,对编码器动态误差的分析很少。文献[9]中对光电编码器叠栅条纹信号对编码器误差影响做了细致的研究;文献[10]利用傅里叶分析评估的方法,对光电编码器叠栅条纹动态误差进行了研究,并给出了实验结果;文献[11-14]等提出了对光电编码器动态检测的方法,并设计了编码器误差检测工具。文献[15-16]对由机械、装调等因素引起的编码器误差做了研究。以上研究,都没有细致地对光电编码器动态特性误差因素进行分析。

正确地分析光电编码器动态误差产生原因,可以减小光电编码器动态误差。本文主要分析了轴系误差、幅频响应、数据处理延时等对光电编码器误差的影响,推导了光电编码器动态误差的规律。分析表明,动态误差由多个频段的分量合成,并且随着光电编码器转速的加大,轴系晃动幅度增加,幅频响应和细分延时误差增大,编码器动态误差变大。

2 光电编码器动态误差分析

2.1 细分延时动态误差

目前编码器的两大主流细分方法分别是硬件细分和软件细分。

硬件细分主要采用移相电阻链对叠栅条纹信号进行细分。这种方法不存在数据处理延迟,角度信息转换为数字信号几乎是实时的。

软件细分是利用高速模/数(A/D)转换器将叠栅条纹信号的幅值转化为数字信号,进入微处理器中进行计算、查表等工作,达到对编码器叠栅条纹信号的细分。设A/D转换器的转换时间为 $t_{A/D}$,微处理器的数据计算时间为 t_m ,忽略放大器稳定等时间。那么每一次角度数据的转换时间为

$$t_d = t_{A/D} + t_m. \quad (1)$$

设编码器当前角速度为 v ,由于编码器数据处理时间的存在,将使每次数据的输出产生延时误差

$$\mu_1 = t_d v. \quad (2)$$

对于软件细分的编码器,转速越快其误差将越大。对于 n 位的编码器,其分辨率为

$$\delta = \frac{360^\circ}{2^n}. \quad (3)$$

当角速度 v 高于一定值时,使 $\mu_1 > \delta$,那么编码器会出现跳码,此时

$$v > \frac{360^\circ}{2^n t_d}. \quad (4)$$

2.2 元件幅频响应动态误差

幅频响应误差主要是叠栅条纹信号随着速度的变化而偏离理想位置产生的误差。它主要是因为光电编码器中的光电接收管、放大器等元件随着输入信号频率增加,输出信号的幅值和相位发生变化而引起的。一般情况下,放大器增益衰减较小,可以忽略。光电接收管的幅频特性,是造成元件幅频响应误差的主要原因。随着速度的增加,输入信号频率的加快,功率器件输出信号的幅值逐渐衰减,衰减幅度近似于指数函数^[17]。设速度为 v 时,叠栅条纹信号幅度为

$$U = A - a[\exp(kv) - 1]. \quad (5)$$

叠栅条纹信号直流电平为

$$C = C_0 - b[\exp(kv) - 1], \quad (6)$$

式中 A 和 C 是速度为零时叠栅条纹的幅值和直流偏移量, a 、 b 是速度影响系数, k 是幅度衰减系数, v 为编码器当前转速。其中, a 、 b 和 k 的大小与编码器所使用的光电接收管有关,对同一台编码器来说是常数。编码器叠栅条纹信号可以表示为

$$\begin{cases} P_x = \{A - a[\exp(k_1 v) - 1]\} \cos \theta + \\ \quad \{C_0 - b[\exp(k_3 v) - 1]\} \\ P_y = \{A - a[\exp(k_2 v) - 1]\} \sin \theta + \\ \quad \{C_0 - b[\exp(k_4 v) - 1]\} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 θ 为叠栅条纹信号相角,即细分角度,若编码器码盘一周静码码疲乏刻划数为 h ,则 θ 的周期是圆周的 $1/h$ 倍, $k_1 \sim k_4$ 的单位为 $(r/min)^{-1}$ 。

随着转速的加快,编码器叠栅条纹信号的幅值和直流电平都发生偏差,其中幅值变化发生的偏差为

$$\Delta A = a[\exp(k_2 v) - \exp(k_1 v)], \quad (8)$$

直流电平的偏差为

$$\begin{cases} \Delta x = b[\exp(k_3 v) - 1] \\ \Delta y = b[\exp(k_4 v) - 1] \end{cases}. \quad (9)$$

两路叠栅条纹信号的李萨如图形如图1所示。图中虚线圆是速度接近零时的叠栅条纹信号, P 点的坐标分别是两路叠栅条纹信号的幅值; P' 点是由于增益减小,造成叠栅条纹信号变化后 P 点的位置; O' 点是 O 点水平偏移 Δx ,垂直偏移 Δy 后的位

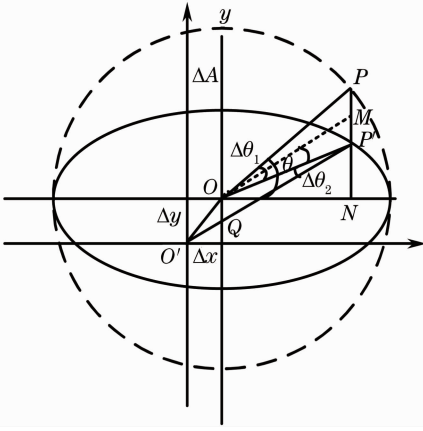


图1 幅频响应动态误差示意图

Fig.1 Schematic diagram of range-frequency respond dynamic errors

置;Q点是O'P'与y轴的交点;直线OM与QP'平行;PN垂直于x轴。图中Δθ₁(∠POP')是两路叠栅条纹幅值不相等时的角度误差,Δθ₂(∠OP'O' =

∠MOP')是两路叠栅条纹信号直流电平变化时产生的角度误差,推导如下:

$$\begin{aligned} \mu_2 &= \angle POM = \Delta\theta_1 - \Delta\theta_2, \\ \overline{OO'} &= \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \\ \angle OO'P' &= \angle OO'x - (\theta - \mu_2), \\ \overline{OO'} \cdot \sin\angle OO'P' &= \overline{OQ} \cdot \sin(\angle OQP') \\ \sin(\angle OQP') &= \sin\left[\frac{\pi}{2} - (\theta - \mu_2)\right] = \\ &= \cos(\theta - \mu_2), \\ \overline{MP'} &= \overline{OQ} = \frac{\overline{OO'} \cdot \sin[\angle OO'x - (\theta - \mu_2)]}{\cos(\theta - \mu_2)}, \end{aligned} \tag{10}$$

同时在三角形POM内有

$$A \cdot \sin \mu_2 = \overline{PM} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta + \mu_2\right);$$

$$\overline{PM} = \Delta A \sin \theta - \overline{MP'}.$$

设φ = ∠OO'x, 计算得出μ₂与θ的关系为

$$\mu_2 = \arctan\left[\frac{\Delta A \sin 2\theta - 2\overline{OO'} \sin(\theta - \varphi)}{2A - \Delta A + \Delta A \cos 2\theta + 2\overline{OO'} \cos(\theta - \varphi)}\right], \tag{11}$$

式中包含θ的1次分量和2次分量,(11)式可以表示为由2θ和φ-θ组成的函数f(2θ, φ-θ)。在θ变化的过程中,当φ+π < θ < φ时,误差为f₁(2θ, θ-φ);当φ < θ < φ+π时,误差为f₁(2θ, 2π-θ+φ)。两式相似。

若直流偏移衰减为零,只存在幅值衰减时,f_{OO'} = 0,那么忽略(11)式中一次分量,变为

$$\Delta\mu_1 = \arctan\left[\frac{\sin 2\theta}{2A/(\Delta A) - 1 + \cos 2\theta}\right]. \tag{12}$$

在实际应用中,由于同一编码器中选用的功率器件型号批次相同,幅度偏差a[exp(k₁v) - 1]和a[exp(k₂v) - 1]的变化趋势相近,ΔA很小,误差Δμ₁很小。因此在动态误差分析中,可以将(12)式中的误差忽略。那么忽略(11)式中二次分量,变为

$$\Delta\mu_2 = \arctan\left\{\frac{-\sin(\theta - \varphi)}{A/\{b\sqrt{[\exp(k_3 v) - 1]^2 + [\exp(k_4 v) - 1]^2}\} + \cos(\theta - \varphi)}\right\}. \tag{13}$$

(13)式就是直流电平动态误差,可以近似为θ的一次正弦分量

$$\Delta\mu_2 \approx \arctan\left\{\frac{b\sqrt{[\exp(k_3 v) - 1]^2 + [\exp(k_4 v) - 1]^2}}{A}\right\} \sin(-\theta + \varphi), \tag{14}$$

误差最大值位置为θ = φ ± π/2,最大值为|Δμ₂|_{max} = arctan{b√[exp(k₃v) - 1]² + [exp(k₄v) - 1]²}/A,最小值位置为θ = φ和θ = π + φ,最小值为|Δμ₂|_{min} = 0。

2.3 轴系晃动动态误差

在编码器的滚动轴承中,主轴是无间隙转动的,但是由于加工尺寸等误差,使轴套、滚珠和主轴之间存在形状误差。随着编码器的转动,使主轴产生径向晃动和轴向窜动。径向晃动会影响编码器码盘偏心,轴向晃动会影响叠栅条纹信号的幅值。一般情况,编码器中采用对径读数头能够抵消幅值变化的影响^[18-19],因此只分析径向晃动误差。

轴系的晃动与主轴转动速度具有很复杂的关系。在编码器高速转动或由低速转动向高速转动过渡的过程中,由于轴系晃动,会产生相对严重的码盘偏心情况,偏心的程度及两码盘圆心连线的方向是随震动情况或装调情况随机产生的^[20]。其晃动幅度变化过程近似于指数函数。对轴系晃动的分析可以利用指数函数近似模拟振幅与速度的关系,轴系晃动的幅值为

$$\alpha = \sigma + G \exp(pv), \quad (15)$$

式中 σ 是静态时轴系晃动幅值, G 是轴系晃动变化系数, $\exp(pv)$ 是幅度增加趋势函数, p 为轴系晃动幅度增加系数。设轴系晃动引起的码盘偏移在 $\overrightarrow{OO'}$ 方向达到最大值 α , θ_1 为轴系晃动方向与编码器测角位置夹角,如图2所示。

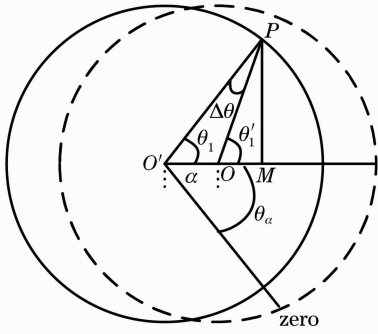


图2 偏心动态误差示意图

Fig.2 Schematic diagram of eccentricity dynamic error

图2中虚线圆为理想的码盘位置,实线圆为由于轴系晃动造成光栅的实际位置, P 点为测量的角度位置,圆的半径为 r 。设编码器所测得当前角度值为 θ_2 , $\overrightarrow{OO'}$ 方向与编码器零点方向夹角为 θ_α , θ_α 的大小是随机的,则有 $\theta_2 = \theta_1 + \theta_\alpha$; $\Delta\theta = \angle O'PO = \theta_1 - \theta_1'$; $r \cdot \sin\Delta\theta = \overrightarrow{OO'} \cdot \sin(\theta_1 + \Delta\theta)$ 。

推导后得到

$$\Delta\theta = \arctan\left(\frac{\overrightarrow{OO'} \sin \theta_1}{r - \overrightarrow{OO'} \cos \theta_1}\right). \quad (16)$$

将(15)式代入(16)式,得到轴系晃动动态误差

$$\mu_3 = \Delta\varphi = \arctan\left\{\frac{\sin \theta_1}{r/[\sigma + G \exp(pv)] - \cos \theta_1}\right\}. \quad (17)$$

(17)式可以近似为

$$\mu_3 \approx \arctan\left[\frac{\sigma + G \exp(pv)}{r}\right] \sin \theta_1, \quad (18)$$

误差最大值为 $|\mu_3|_{\max} = \arctan\left[\frac{\sigma + G \exp(pv)}{r}\right]$;

误差最小值为 $|\mu_3|_{\min} = 0$ 。

由(18)式可以看出,轴系晃动误差 μ_3 是 θ_1 的1次正弦分量,其最大值最小值已经给出。在动态情况下,编码器轴系晃动位置是随机的,晃动影响误差由(17)式给出。

3 动态误差合成

经过上面分析可知,误差 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 是影响编码器动态特性的主要误差,且相互独立。所以合成后的误差为

$$\mu = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2}. \quad (19)$$

按照上面分析可知,在同一速度下,全周期误差中共包含了1次正弦分量、 h 次正弦分量和常数分量。根据前面的分析,忽略(12)式中误差,将(2)、(14)、(17)式代入(19)式,得到合成后的误差。合成时,编码器转动角度为 θ_2 ,编码器精码码道刻划数为 h ,那么元件的幅频响应误差的周期是圆周的 $1/h$ 倍。图1中 θ 角的一个圆周相当于 $360^\circ/h$,将 θ 角映射到 θ_2 角时,得到 $\Delta\mu_2 \approx a_2 \sin[h(-\theta_2 + \varphi)]/h$;将 θ_1 角映射到 θ_2 角时 $\mu_3 \approx a_3 \sin(\theta_2 - \theta_\alpha)$, θ_α 大小是随着轴系晃动随机产生的。因此合成误差可以近似表示为

$$\mu \approx \sqrt{a_1^2 + \frac{a_2^2 \sin^2[h(-\theta_2 + \varphi)]}{h^2} + a_3^2 \sin^2(\theta_2 - \theta_\alpha)}, \quad (20)$$

式中的 $a_1 \sim a_3$ 为各次分量系数, $a_1 = t_d v$; $a_2 = \arctan\left\{\frac{b \sqrt{[\exp(k_3 v) - 1]^2 + [\exp(k_4 v) - 1]^2}}{A}\right\}$;

$$a_3 = \arctan\left[\frac{\sigma + G \exp(pv)}{r}\right].$$

4 实 验

4.1 误差计算

选取某外径为40 mm的15位小型绝对式光电编码器进行实验。编码器码盘半径为15 mm,码盘一周刻划精码码道为256线,即 $h = 256$;光电接收管采用Honeywell公司生产的SD2440,内部放大器件采用LM124芯片;编码器细分处理延时为 $t_d = 0.0001$ s。

利用直流电机带动编码器转动,当编码器转速为10~70 r/min,每增加20 r/min时,用示波器对叠栅条纹信号直流电平的变化进行测量。编码器原始信号幅度为 $A = 4.6$ V,直流电平 $C = 2.5$ V。转速为10~70 r/min时两路信号直流电平的变化分别为0.0017 V和0.0015 V、0.006 V和0.005 V、0.013 V和0.012 V、0.024 V和0.021 V。结合接收管SD2440和放大器LM124的数据手册和以上数据,设定 $b = 0.0074$ A, $k_3 = 0.021$ (r/min)⁻¹, $k_4 = 0.019$ (r/min)⁻¹。

利用千分尺对该编码器主轴轴系晃动幅度进行测量,轴系晃动静态误差幅值最大为0.0001 mm。直流电机带动编码器在转速10~70 r/min转动时,测得各个速度下轴系晃动幅值。经过计算轴晃引起的码盘偏心分别为0.1、0.2、0.4、0.7 μ m。根据以上数据,设定 $\sigma = 0.1$ μ m, $G = 0.025$ μ m, $p = 0.045$ (r/min)⁻¹。

将上述参数代入(2)、(14)、(17)式,经过仿真计算,得到10~70 r/min时编码器幅频响应动态误差幅值分别为1.87"、6.95"、14.56"、25.95";细分延时误差分别为21.6"、64.8"、108"、151.2";轴系晃动误差幅值为1.91"、2.7"、4.64"、9.4"。

4.2 检测实验

采用小型绝对式编码器动态特性检测装置对某编码器进行全周动态误差检测。小型绝对式编码器动态特性检测装置主要由角度基准源、被测编码器、数据采集系统、联轴节、系统支架、伺服控制系统组成一无位置传感器无刷直流电机,如图3所示。

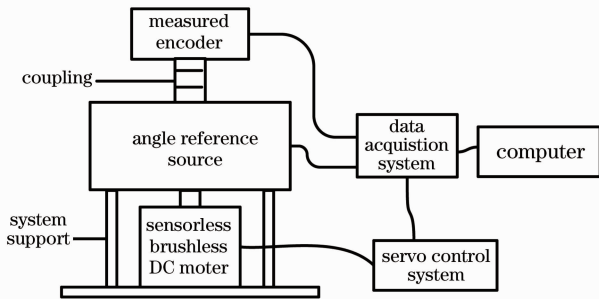


图3 编码器动态特性检测装置

Fig.3 Detection devices of encoders' dynamic characteristics

检测装置采用比较法完成对被检编码器误差的评定。小型绝对式编码器动态特性检测装置采用21位绝对式光电编码器作为角度基准,其精度为2";被检编码器位数不高于16位。基准编码器的分

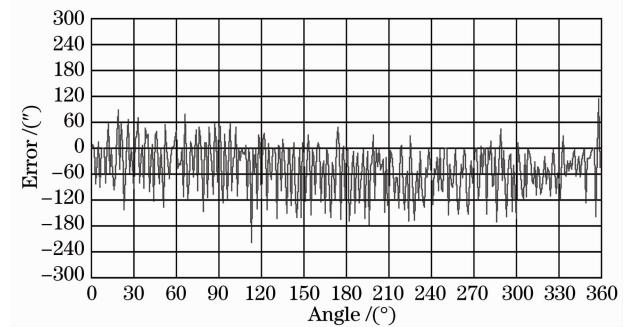
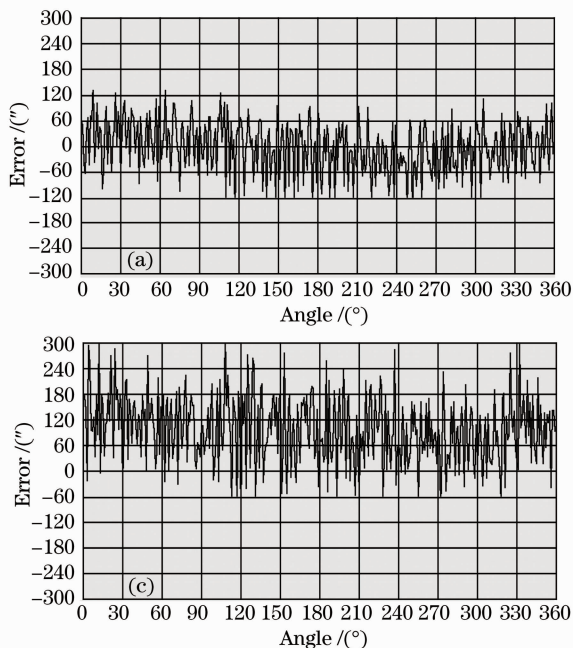


图4 静态误差

Fig.4 Static error

图4为该编码器的静态误差曲线。图5中分别为 $v=10$ 、30、50和70 r/min时 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 的全周误差曲线图。将图5中的检测结果分别与图4中的静态误差作差,得到编码器转速影响造成的动态误差,如图6所示。

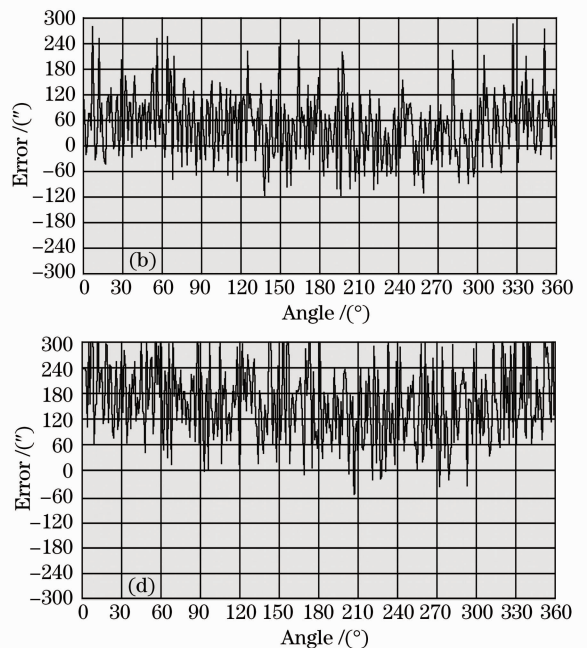


图5 编码器误差。(a) $v=10$ r/min; (b) $v=30$ r/min; (c) $v=50$ r/min; (d) $v=70$ r/min

Fig.5 Error of encoder. (a) $v=10$ r/min; (b) $v=30$ r/min; (c) $v=50$ r/min; (d) $v=70$ r/min

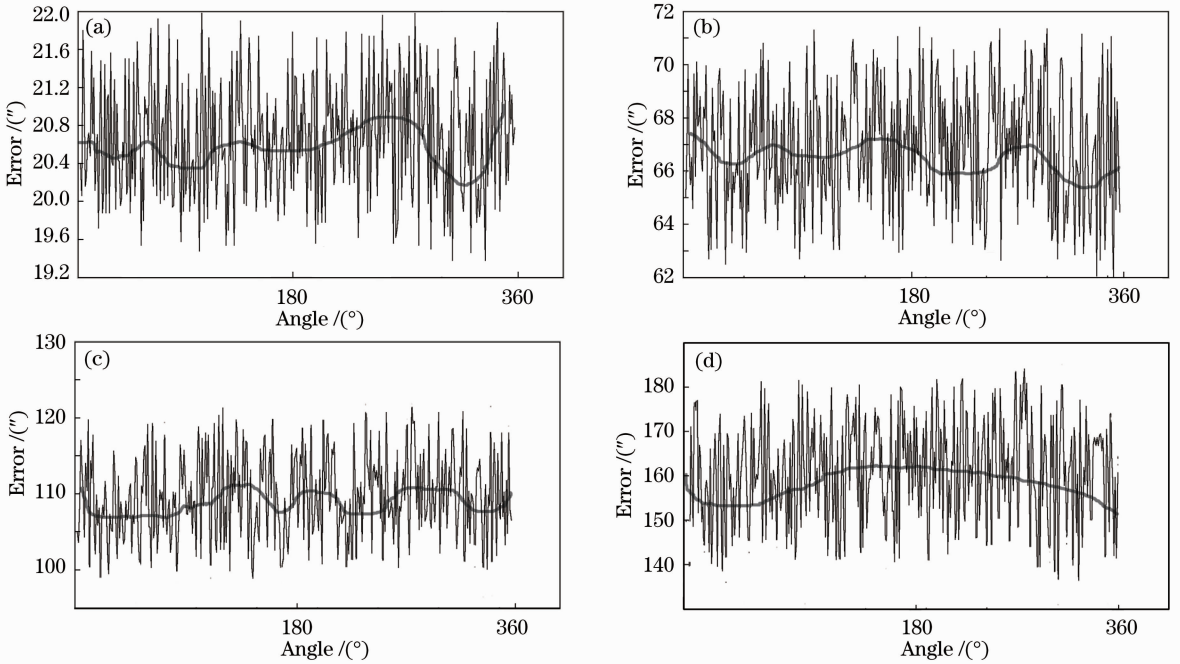


图 6 某软件细分小型光电编码器动态误差。(a) $v=10$ r/min; (b) $v=30$ r/min; (c) $v=50$ r/min; (d) $v=70$ r/min

Fig. 6 Dynamic errors of software subdivision encoder. (a) $v=10$ r/min; (b) $v=30$ r/min; (c) $v=50$ r/min;

(d) $v=70$ r/min

图 6 中可以看出,编码器动态误差曲线近似于 h 次正弦曲线,且在不同位置正弦曲线的幅度中心是不同的。将 h 次正弦曲线的幅度中心点连接画线,得到误差带的中心曲线。图 6 中粗线标示出了动态误差带的中心曲线。误差带的中心曲线并不平稳,而是上下波动的,且波动峰顶位置是随机的。根

据分析,这是由于编码器轴系晃动引起的,中心曲线波动范围分别为 $0.9''$ 、 $3''$ 、 $5''$ 、 $10''$ 。同时,可以看出误差 h 次分量幅值分别为 $1.5''$ 、 $6''$ 、 $15''$ 、 $25''$;误差带宽中心平均高度约为 $20.5''$ 、 $67''$ 、 $109''$ 、 $155''$ 。检测结果与仿真计算的结果对比如表 1 所示。

表 1 实验结果对比

Table 1 Comparison of results

	Speed /(r/min)	10	30	50	70
Simulation results	Delay error /($''$)	21.6	64.8	108	151.2
	Range-frequency error /($''$)	1.87	6.95	14.56	25.95
	Axis sway error /($''$)	1.91	2.7	4.64	9.4
Dectection results	Delay error /($''$)	20.5	67	109	155
	Range-frequency error /($''$)	1.5	6	15	25
	Axis sway error /($''$)	0.9	3	5	10

表 1 中可以看出,图 6 实验结果中的延时误差和幅频误差的幅值与仿真计算的幅值基本相同,轴系晃动误差与实验结果中的中心曲线波动范围有所差别,这与检测时编码器的装配、被测编码器与基准编码器同轴度等因素有关,由于误差影响小于 $1''$,将其忽略。因此上述分析结果正确。

件细分方式,细分处理延迟时间严重影响编码器的动态精度。由于其码盘尺寸小,精码细分刻划精度不高,除受细分精度限制外,编码器的机械装调同样严重影响小型光电编码器的精度。因而小型光电编码器在转速下,其动态测角精度往往严重偏离理想范围。

通过对影响编码器动态误差和精度因素的分析得出以下结论:

1) 全周期的动态误差主要包含 1 次正弦分量、 h 次正弦分量和常数分量,不同的分量在速度改变

5 结 论

通常小型绝对式光电编码器位数不高于 16 位,精度要求一般为 $30'' \sim 40''$ 。小型编码器一般采用软

时其幅值也在改变。

2) 在低速下, 细分延时误差是影响动态误差的主要因素, 全周期误差主要受常数分量影响。

3) 在高速下, 细分延时误差和幅频响应误差是影响动态误差的主要因素; 全周期误差主要受 h 次正弦分量和常数分量影响。

通过以上结论, 为减小编码器动态误差, 提高编码器的动态特性, 可以采用以下措施:

1) 尽可能地减小细分延时, 对于细分处理时间已知的编码器可以采用误差补偿的方法减小细分延时误差; 或采用硬件细分;

2) 采用频率特性好的光电接收管制作细分电路; 或尽量保证所有接收管的幅频特性相同, 并进行误差补偿;

3) 提高轴系和装配精度, 减小编码器的轴系晃动等。

本文通过对小型光电编码器动态误差和精度进行分析, 并进行实验验证, 有利于在编码器产品出厂前对编码器动态特性进行评估, 为未来设计制作编码器提供参考依据。

参 考 文 献

- Zhao Yong, Shu Xianyu, Zhang Qichan. Phase subdivision of absolute coding grating and application in displacement measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0812005.
赵勇, 苏显渝, 张启灿. 绝对编码光栅的相位细分及其在位移测量中的应用[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0812005.
- Wang Xianjun. Circuit design for high nitrated photoelectric encoder base on SOC single chip [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(5): 1083-1087.
王显军. 基于SOC单片机的高集成度光电编码器电路设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1083-1087.
- Wang Qiuhua, Shun Ying, Wang Shujie, *et al.*. Design for space borne absolute photoelectric encoder of dual numerical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(1): 52-57.
万秋华, 孙莹, 王树洁, 等. 双读数系统的航天级绝对式光电编码器设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 52-57.
- Wu Hongsheng, Zheng Qifeng, Qiao Dong, *et al.*. Filtering method of improving quality of grating moire fringe [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1844-1849.
吴宏圣, 曾琪峰, 乔栋, 等. 提高光栅莫尔条纹信号质量的滤波方法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1944-1949.
- Bao Yan, Yang Dexing, Li Bingshi, *et al.*. Precision analysis and process implementation of angular displacement sensor based on flexible varied line-space grating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1859-1866.
包艳, 杨德兴, 李秉实, 等. 柔性变栅距光栅角位移传感器的精度分析与工艺实现[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1859-1866.
- D B Eviton, J Kirk, I Lobsinger. Ultra-high resolution Cartesian absolute optical encoder[C]. *SPIE*, 2003, 5190: 111-121.
- Y V Filator, M Y Agapov, M N Bournachev. Laser goniometer systems for dynamic calibration of optical encoders[C]. *SPIE*, 2003, 5144: 381-390.
- T Watanabe, H Fujimoto. Automatic high precision calibration system for angle encoder[C]. *SPIE*, 2001, 4401: 267-274.
- Wang Xianjun. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 379-386.
王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 379-386.
- Wan Qiuhua. Fourier analysis assessment method for dynamic interpolation error of moire fringe [J]. *J Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 26(6): 548-552.
万秋华. 莫尔条纹动态细分误差的傅里叶分析评估方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2012, 26(6): 548-552.
- Yang Jintang, Yang Qinghui. The detection of dynamic interpolation error of Moiré fringe [J]. *Measure Technique*, 1998, (7): 14-16.
杨进堂, 杨庆辉. 莫尔条纹动态细分误差的测量[J]. *计量技术*, 1998, (7): 14-16.
- Li Hong, Feng Changyou, Ding Linhui. Dynamic evaluation method for interpolation errors in photoelectric encoder [J]. *Chinese J Sensors and Actuators*, 2005, 18(4): 927-930.
李洪, 冯长有, 丁林辉. 光电轴角编码器细分误差动态评估方法[J]. *传感技术学报*, 2005, 18(4): 927-930.
- Zhao Zhu, Xu Zhijun, Wang Xianjun. An automatic detection system of encoder error based on motion control technology[J]. *Chinese J Optics and Applied Optic*, 2009, 2(2): 134-138.
赵柱, 续志军, 王显军. 基于运动控制技术的编码器自动检测系统[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(2): 134-138.
- Yang Wei. Research of Auto-Detection System of Photoelectric Encoder Based on DSP[D]. *University of Chinese Academy of Sciences*, 2010. 1-10.
杨巍. 基于DSP的光电编码器自动检测系统研究[D]. *中国科学院研究生院*, 2010. 1-10.
- Zhao Jianke, Zhang Zhoufeng. Error analysis for measurement of encoder with shaft eccentricity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(s): 249-252.
赵建科, 张周峰. 轴角编码器测量中偏心带来的误差分析[J]. *光学学报*, 2007, 36(s): 249-252.
- Cheng Jun, Li Xinzhi. The design and measurement of the shafting precision for the high resolution photoelectric shaft encoder[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2000, 88(6): 15-20.
程钧, 李信之. 高精度光电轴角编码器轴系精度设计与测量[J]. *电子机械工程*, 2000, 88(6): 15-20.
- Kang Huaguang, Chen Daqin. *Electronic Technology Base (Fourth Edition)*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
康华光, 陈大钦. *电子技术基础模拟部分(第四版)*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- Ai Chenguang, Chu Ming, Sun Hanxu, *et al.*. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2079-2084.
艾晨光, 褚明, 孙汉旭, 等. 基准圆光栅偏心检测及测角误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2079-2084.
- Zhu Fan, Wu Yiming, Liu Changchun. Elimination influence of grating encoder's eccentricity and vibration to moire fringes signal by four reading heads [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0412008.
朱帆, 吴易明, 刘长春. 四读头法消除码盘偏心 and 振动对叠栅条纹相位测量的影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0412008.
- Xiao Songshan, Lan Zimu, Zhao Youquan. Effect of shaft eccentricity on measurement signal of optical encoder[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(10): 66-68.
肖松山, 兰子穆, 赵友全. 码盘偏心对编码器测量的影响[J]. *光电工程*, 2007, 34(10): 66-68.