

绝对式光栅尺细分误差补偿方法

乔 栋^{1,2} 续志军¹ 吴宏圣¹ 曾琪峰^{1,2} 刘 阳¹ 孙 强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 为了提高绝对式光栅尺的细分精度,提出了一种细分误差补偿方法。对绝对式光栅尺A、B两路叠栅条纹信号进行傅里叶分析,建立叠栅条纹信号模型;对信号模型中的相位、振幅、谐波、直流分量进行校正,得到理想叠栅条纹信号的模型;对比实际信号模型和理想信号模型的细分位置,得到绝对式光栅尺的细分误差;根据该误差对细分值进行补偿,提高细分精度。通过使用JC09型绝对式光栅尺对该方法进行验证,可使其细分相对误差从2.70%降低到1.05%。实验结果表明,该方法能够有效地提高绝对式光栅尺细分精度,且该方法具有原理简单、易于实现的优点。

关键词 测量;细分误差;傅里叶分析;绝对式光栅尺;叠栅条纹

中图分类号 TH711 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0112008

A Method for Compensating Interpolation Error of Absolute Linear Encoder

Qiao Dong^{1,2} Xu Zhijun¹ Wu Hongsheng¹ Zeng Qifeng^{1,2} Liu Yang¹ Sun Qiang¹

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to improve the interpolation accuracy of the absolute linear encoder, a compensating method for the interpolation error is presented. By using the Fourier theory to analyze the A and B moire fringe signals, the moire fringe signal models for the absolute linear encoder is set up. By correcting the phase, amplitude, harmonics and direct current components of the signal modes, the ideal signal models are obtained. By comparing the interpolation position of the practical and ideal signal models, the interpolation error of the absolute linear encoder is obtained. After that, by compensating the interpolation position according to the obtained error, the interpolation accuracy can be improved remarkably. The JC09 absolute linear encoder is used to test and verify the presented method. The test results show that the interpolation relative error can be decreased from 2.70% to 1.05%. It demonstrates that this method can improve the interpolation accuracy significantly. In addition, due to the simple theory, the method can be easily realized.

Key words measurement; interpolation error; Fourier analysis; absolute linear encoder; moire fringe

OCIS codes 120.4640; 120.3940; 120.3930

1 引 言

绝对式光栅尺作为长度计量元件,广泛应用于现代机床加工行业中。绝对式光栅尺的具有开电后直接得到当前位置信息,系统无需执行参考点回零操作;绝对位置计算在读数头内完成,无需后续细分电路;采用双向串行通信技术,通信可靠等优点^[1]。因此,国内外中高档数控系统中越来越多地采用绝对式光栅尺作

收稿日期: 2014-07-30; 收到修改稿日期: 2014-10-09

基金项目: 国家科技重大专项(2013ZX04007021)

作者简介: 乔 栋(1985—),男,博士研究生,主要从事光栅线位移传感器方面的研究。E-mail: qiaodonglwz@163.com

导师简介: 续志军(1953—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电传感技术方面的研究。E-mail: xuzj538@ciomp.ac.cn
(通信联系人)

为线位移传感器^[2]。

绝对式光栅尺的精度包括两个方面:全长上的位置精度和叠栅条纹信号周期内的细分精度^[3]。在应用中,通过使用高精度设备对光栅尺标定和误差补偿,全长上的位置精度较容易得到提高^[4]。但是叠栅条纹信号周期内的细分误差是由细分信号扫描的质量和信号周期的大小决定的^[5],其误差测量及补偿通常较为困难,国内外大多使用提高叠栅条纹质量的方法来提高细分精度。

国内外通常采用的提高叠栅条纹细分精度的方法有:光学滤波法^[6]、神经网络自适应滤波算法^[7]、有限长冲激响应数字滤波法^[8]、指示光栅移相法^[9]、傅里叶变换时移特性细分法^[10]、光栅栅距动态测量法^[11]、牛顿迭代法^[12]、粒子群算法^[13]等。但上述方法有的只能抑制某几项误差,有的实现起来较为复杂,有的仅适用于编码器。

本文提出一种绝对式光栅尺细分误差补偿方法,通过对叠栅条纹信号进行匀速采样,对采样结果进行离散时间傅里叶分析,建立叠栅条纹信号模型;然后对信号模型中的相位、振幅、谐波、直流分量进行校正,得到理想叠栅条纹信号的模型,通过对比实际和理想叠栅条纹信号的细分位置值,可以得到绝对式光栅尺在各个采样点的细分误差,对细分误差进行分段线性插值,得到整个细分周期内的细分误差,根据细分误差对细分位置进行补偿,从而提高细分精度。

2 信号质量对细分精度影响的分析

绝对式光栅尺通过对叠栅条纹进行细分得到高分辨率位置信息,理想情况下,其叠栅条纹信号是两路正交、等幅、共模信号为零的余弦信号,信号周期为增量码道栅距,理想信号模型如(1)、(2)式所示:

$$S_A = \alpha \times \cos\left(\frac{2\pi}{D} \times P - \frac{\pi}{2}\right), \quad (1)$$

$$S_B = \alpha \times \cos\left(\frac{2\pi}{D} \times P\right), \quad (2)$$

式中 S_A 、 S_B 分别代表绝对式光栅尺 A、B 两路叠栅条纹信号, P 为细分位置, D 代表绝对式光栅尺增量码道栅距, α 代表信号振幅。因此细分位置 P 可描述为

$$P = \begin{cases} \frac{D}{2\pi} \times \arctan\left(\frac{S_A}{S_B}\right), & S_A > 0, S_B > 0 \\ \frac{D}{2} - \frac{D}{2\pi} \times \arctan\left(\frac{S_A}{S_B}\right), & S_A \geq 0, S_B \leq 0 \\ \frac{D}{2} + \frac{D}{2\pi} \times \arctan\left(\frac{S_A}{S_B}\right), & S_A < 0, S_B < 0 \\ D - \frac{D}{2\pi} \times \arctan\left(\frac{S_A}{S_B}\right), & S_A < 0, S_B > 0 \end{cases} \quad (3)$$

但是在实际情况中,由于光栅制造误差、光源的准直性、驱动部分(直线导轨或回转轴系)部分等的误差^[14],会对 A、B 两路叠栅条纹信号的正弦性、正交性、等幅性及直流量产生影响,此时 A、B 两路信号的模型会与(1)、(2)式有所区别。由于此时叠栅信号依然是连续的周期实信号,因此其可表示为一系列余弦信号的组合^[15],其实际模型可由(4)、(5)式表示:

$$S_A^* = \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k \times \cos\left(\frac{2\pi}{D} \times P \times k - \rho_k\right), \quad (4)$$

$$S_B^* = \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k \times \cos\left(\frac{2\pi}{D} \times P \times k - \omega_k\right), \quad (5)$$

式中 S_A^* 、 S_B^* 分别代表 A、B 两路叠栅信号的实际模型, α_k 、 β_k 和 ρ_k 、 ω_k 分别代表 A、B 两路叠栅信号中各次余弦信号的振幅和相位。通过观察(4)、(5)式和(1)、(2)式的区别,可知在实际情况下使用(3)式进行细分位置计算,由于计算模型不完全符合,细分位置的计算会因此引入误差。

图 1 画出了对于理想 A、B 信号,仅引入三次谐波,其中三次谐波振幅等于基波振幅 2%、使振幅相差 10%、使相位相差 87°、使 B 信号引入基波振幅 10% 的直流(DC)偏移以及包含以上所有因素时,通过(3)式计算

所得的细分位置与(1)、(2)式表示的理想 A、B 信号通过(3)式计算所得的细分位置之差。为了方便观察,令(3)式中增量码道栅距 $D = 20 \mu\text{m}$ 。

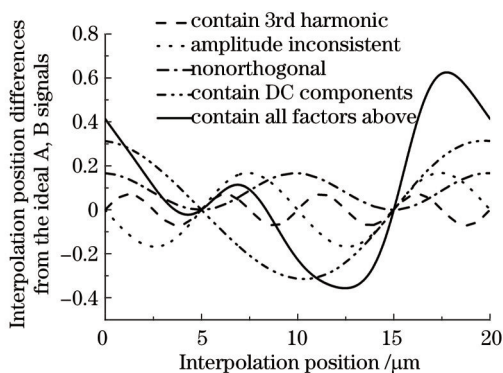


图1 非理想叠栅条纹的细分误差曲线

Fig.1 Interpolation error curve of the non-ideal moire fringes

从图1中可以看出,由于实际 A、B 信号的模型与(1)、(2)式不同,在采用(3)式进行细分位置计算时,就会引入误差。如果能够获得实际 A、B 信号的表达式,即(4)、(5)式中各项系数,那么就可以计算出实际 A、B 信号的细分位置和理想 A、B 信号的细分位置之差,即细分误差,对细分位置进行补偿可以提高细分精度。

3 误差补偿模型的建立

绝对式光栅尺的 A、B 两路叠栅信号是其细分位置的周期性函数,函数周期为增量码道的栅距,由傅里叶分析可知,连续实周期信号可以表示为余弦函数的集合。由于连续叠栅信号的表达式不易得出,其各次谐波的系数、相位无从获得,因此本文通过采样将连续叠栅信号转化为离散叠栅信号,对离散叠栅信号进行傅里叶分析,从而得到各次谐波的系数与相位。

在高速情况下,光栅尺的运动速度及运动稳定性会对叠栅条纹的幅值及相位等特性产生影响,但在实际应用中,低速状态下的细分精度才有意义,而在低速情况下,由于光栅尺运动机构稳定性较高,叠栅条纹具有比较高的稳定性。

本文采用中国科学院长春光学精密机械与物理研究所生产的 JC09 型绝对式光栅尺作为实验对象,其增量码道栅距为 $20 \mu\text{m}$,保持读数头相对于标尺光栅以 0.08m/s 匀速运动,以 $1 \mu\text{s}$ 采样周期采集叠栅信号,所得到的离散叠栅信号如图2所示。

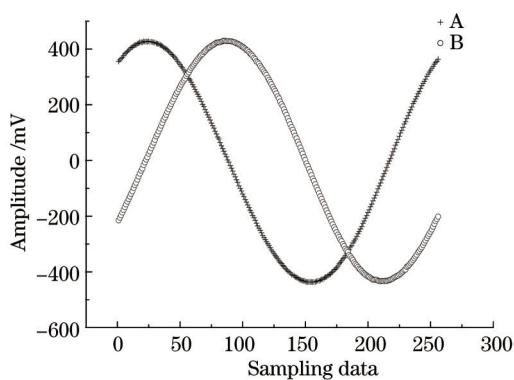


图2 离散叠栅信号

Fig.2 Discrete moire signal

将两路信号按照离散傅里叶级数展开,整理后可得

$$y_A = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \times \cos\left(\frac{2\pi}{N} \times k \times n - \varphi_k\right), \quad (6)$$

$$y_B = \sum_{k=0}^{N-1} b_k \times \cos\left(\frac{2\pi}{N} \times k \times n - \phi_k\right), \quad (7)$$

(6)、(7)式分别是绝对式光栅尺 A、B 信号的采样信号傅里叶级数表达式, y_A 、 y_B 分别对应 A、B 信号的采样信号, N 为周期, 图 2 中的离散信号周期 $N=253$, k 代表第 k 次谐波, a_k 、 b_k 和 φ_k 、 ϕ_k 分别代表 A、B 信号的第 k 次谐波振幅和相位。

表 1 各次谐波系数及其平均功率占比

Table 1 Coefficients and average power proportion of each harmonic

Order	Parameter					
	a	$\varphi /(^{\circ})$	$p_A /\%$	b	$\phi /(^{\circ})$	$p_B /\%$
0	9.16	180.00	0.089	1.17	0	0.015
1	433.10	37.37	99.856	431.65	122.94	99.969
2	9.93	11.88	0.053	7.09	9.89	0.027
3	1.03	-38.10	< 0.001	0.89	-84.12	< 0.001

表 1 中 p 是根据帕斯瓦儿定理计算的谐波分量的平均功率占信号平均功率的比例。从表 1 中得到 A、B 两路信号的相位、基波振幅一致性、直流分量、各次谐波分量等参数, 对于 A、B 两路信号, 直流分量、基波平均功率之和占信号平均功率的 99.95% 以上, 因此可以忽略二次及以上的谐波分量。将表 1 中的直流分量参数和基波参数代入(6)、(7)式中, 并令其他谐波系数为 0, 可得

$$y_A = -9.16 + 433.10 \times \cos\left(\frac{2\pi}{253} \times n - 37.37^{\circ}\right), \quad (8)$$

$$y_B = 1.17 + 431.65 \times \cos\left(\frac{2\pi}{253} \times n - 122.94^{\circ}\right), \quad (9)$$

理想情况下, A、B 信号应该为直流偏量为零、仅包含基波分量、基波振幅相等、基波正交的信号, 如(10)、(11)式可描述为

$$y'_A = 433.10 \times \cos\left(\frac{2\pi}{253} \times n - 37.37^{\circ}\right), \quad (10)$$

$$y'_B = 433.10 \times \cos\left(\frac{2\pi}{253} \times n - 37.37^{\circ} - 90^{\circ}\right), \quad (11)$$

式中 y'_A 、 y'_B 分别代表理想的 A、B 信号。

根据(8)~(11)式, 分别画出实际信号和理想信号的李萨如图形, 并将(8)~(11)式分别代入(3)式, 即可得到绝对式光栅尺的细分误差曲线。

从图 3 中可见, 实际叠栅信号的李萨如图形和理想李萨如图形的区别, 其细分误差如图 4 所示。通过图 4 得到了 $20 \mu\text{m}$ 栅距周期内 253 个采样点的细分误差, 通过线性插值, 即可得到一个栅距周期内的误差补偿公式:

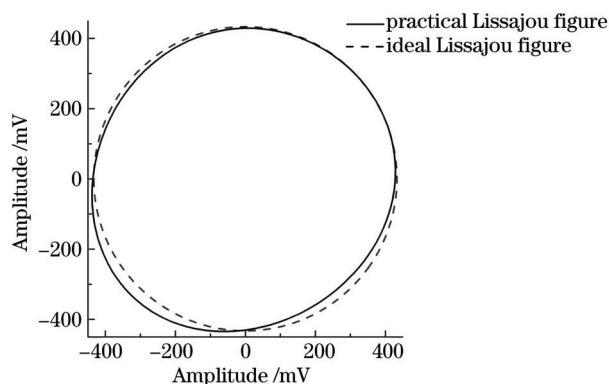


图 3 实际、理想李萨如图形

Fig.3 Practical and ideal Lissajou figure

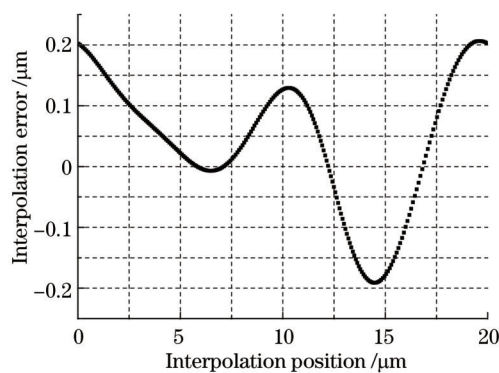


图 4 采样点的细分误差

Fig.4 Interpolation error of the sampled data

$$p^* = p - \left(\frac{p - s_{i+1}}{s_i - s_{i+1}} \times e_i + \frac{p - s_i}{s_{i+1} - s_i} \times e_{i+1} \right), \quad (s_i < p < s_{i+1}), \quad (12)$$

式中 p^* 代表补偿后的细分位置, p 代表实际细分位置, s_i 表示图 4 中采样点的细分位置, e_i 代表图 4 中采样点的细分误差。

4 实验结果

使用 Renishaw XL80 激光干涉仪(稳频精度 $\pm 0.05 \times 10^{-6}$, 分辨率 1 nm) 作为测量基准, 使用 NPM SLP25 作为位移平台, 在 JC09 型绝对式光栅尺上任取 2 段间隔约 100 mm 的测试区间, 利用(12)式进行细分误差补偿, 补偿前后的细分误差如图 5~6 所示。

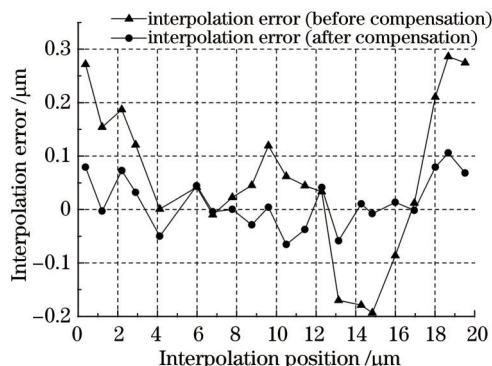


图5 位置 1 补偿前后的细分误差

Fig.5 Interpolation error before and after compensation of position 1

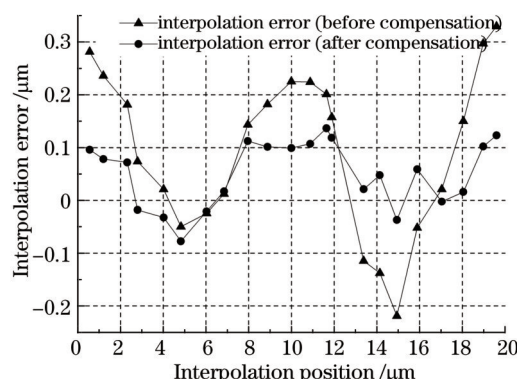


图6 位置 2 补偿前后的细分误差

Fig.6 Interpolation error before and after compensation of position 2

可见, 经过修正, JC09 型绝对式光栅尺的细分误差从 $-0.22 \sim 0.32 \mu\text{m}$ 降低到 $-0.08 \sim 0.13 \mu\text{m}$, 相对误差从 2.70% 降低到 1.05%, 细分精度得到大幅度提高。

5 结 论

本文提出了使用离散傅里叶分析建立细分误差补偿模型, 从而提高绝对式光栅尺细分精度的方法。对叠栅信号采样结果进行傅里叶分析, 得到实际叠栅信号的模型, 通过去除模型中影响叠栅信号质量的因素, 得到理想叠栅信号的模型。利用两个模型进行细分位置计算, 做差后即可得到采样点的细分误差, 随后使用分段线性插值补偿细分误差, 提高细分精度。

采用提出的方法对 JC09 型绝对式光栅尺进行误差修正实验, 实验结果证明: 该方法将 JC09 的细分误差从 $-0.22 \sim 0.32 \mu\text{m}$ 降低到 $-0.08 \sim 0.13 \mu\text{m}$, 相对误差从 2.70% 降低到 1.05%。该方法无需使用精密设备对绝对式光栅尺细分误差进行检测, 具有原理简单、易于实现的优点, 目前在 JC09 型绝对式光栅尺出厂细分精度补偿上已经应用了该方法。

参 考 文 献

- 1 Sun Qiang. Progress and technical features of absolute grating with high precision [J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2012, (5): 72-73.
孙 强. 高精度绝对式光栅尺研究进展及技术难点[J]. 世界制造技术与装备市场, 2012, (5): 72-73.
- 2 Lu Guogang. Absolute linear and rotary encoder is the mainstream of contemporary displacement sensor [J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2011, (4): 56-60.
卢国刚. 绝对式光栅尺和编码器是当代位移传感器发展主流[J]. 世界制造技术与装备市场, 2011, (4): 56-60.
- 3 National Measuring Instrument Standardization Technical Committee. Grating Linear Displacement Transducer - Part 2: Linear Grating Transducer [S]. Jb/T10080.1-2011.
- 4 Dong Shanshan. Grating Data Acquisition and Error Correction Technology [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014. 59-63.

- 董珊珊. 光栅数据采集与误差修正技术[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014. 59-63.
- 5 Xu Zhitao, Liu Jinguo, Long Kehui, *et al.*. Accuracy analysis of focusing mechanism of high resolution space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0728001.
- 许志涛, 刘金国, 龙科慧, 等. 高分辨率空间相机调焦机构精度分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0728001.
- 6 Wu Hongsheng, Zeng Qifeng, Qiao Dong, *et al.*. Filtering method of improving quality of grating moire fringe[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1944-1949.
- 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.
- 7 Lü Mengjun. Study on Electronic Subdivision of Grating Moire Fringe[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- 吕孟军. 光栅莫尔条纹电子学细分技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- 8 Yu Honglin, Huang Liangming, Wang Yuangan. Study on DSP filter and subdivision of moire fringes signal [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(9): 61-65.
- 喻洪麟, 黄良明, 王远干. 莫尔条纹信号的DSP滤波及细分技术研究[J]. *光电工程*, 2004, 31(9): 61-65.
- 9 Ju Ho Song, Kyung Chan Kim, Soo Hyun Kim, *et al.*. A new error compensation method in linear encoder using phase shifted grating [C]. *SPIE*, 1999, 3470: 124-127.
- 10 Chu Xingchun, Lü Haibao, Zhao Shanghong. Investigation of high precision subdivision method for fringes based on fast Fourier transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(12): 2179-2183.
- 楚兴春, 吕海宝, 赵尚弘. 基于傅里叶变换的高精度条纹细分方法[J]. *光学学报*, 2007, 27(12): 2179-2183.
- 11 Chang Li, Xu Hui, Xiu Guoyi. Dynamic measurement method of grating pitch based on correlation and least square principle [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(5): 1001-1007.
- 常 丽, 许 会, 修国一. 基于相关和最小二乘原理的光栅栅距动态测量[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(5): 1001-1007.
- 12 Feng Yingqiao, Wan Qiuhua, Sun Ying, *et al.*. Interpolation error correction of moire fringe photoelectric signals in the approximate form of triangle wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0812001.
- 冯英翘, 万秋华, 孙 英, 等. 近似三角波莫尔条纹光电信号的细分误差修正 [J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0812001.
- 13 Gao Xu, Wan Qiuhua, Lu Xinran, *et al.*. Automatic compensation of sine deviation for grating fringe photoelectric signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0712001.
- 高 旭, 万秋华, 卢新然, 等. 光栅条纹光电信号正弦性偏差的自动补偿[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0712001.
- 14 Ye Shengxiang. Precise Photoelectric Displacement Measurement Technology [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003. 79-81.
- 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. 79-81.
- 15 Alan V Oppenheim, Alan S Willsky, S Hamid Nawab. Signals and Systems [M]. Liu Shutong Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. 116-123.
- 奥本海姆, 威尔斯基, 纳瓦卜. 信号与系统[M]. 刘树棠译. 北京: 电子工业出版社, 2013. 116-123.

栏目编辑: 何卓铭