

基于叠栅条纹光电信号的全微分测速方法

王亚洲^{1,2} 万秋华¹ 王树洁¹ 杨守旺¹ 杜颖财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 为了提高光电编码器速度检测精度,设计了一种基于叠栅条纹光电信号的编码器测速方法。结合全微分方程,建立叠栅条纹光电信号测速模型。分析了影响编码器测速精度的主要因素,并对比不同误差对测速精度的影响。结合测速模型设计改进算法,并完成系统实现。实验结果表明:对某21位光电编码器进行测速实验,将测速误差均方根由0.0367 rad/s降低到0.0216 rad/s。此方法测量速度快,测速精度高,适合实时性要求较高的控制场合。

关键词 测量;光电轴角编码器;光电叠栅条纹;高精度测速

中图分类号 TP212 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1108003

Method of Velocity Measurement Based on Moire Fringe and Total Differential Equations

Wang Yazhou^{1,2} Wan Qiuhua¹ Wang Shujie¹ Yang Shouwang¹ Du Yincai¹

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 For the purpose of improving the velocity measurement accuracy of photoelectric encoders, a velocity measurement method based on the signal of moire fringe is proposed. A velocity measurement model based on moire fringe is established using the total differential equations. The main factors affecting velocity measuring accuracy are analyzed and the influence of different factors is compared. An improved algorithm is deduced and the measurement system is established based on the velocity model. Measurement results on some 21-bit photoelectric encoder indicate that the root mean square of measurement error has reduced from 0.0367 rad/s to 0.0216 rad/s. This method can achieve fast and high-accuracy measurement, and be suitable for the control system requiring for high real-time capability.

Key words measurement; photoelectric angle encoder; moire fringe; precise velocity measurement

OCIS codes 120.0280; 130.6010; 120.3930

1 引言

光电编码器是一种利用光栅叠栅条纹为测量基础的光电角位移传感器^[1]。利用光栅和码盘的相对位移从而产生叠栅条纹信号,通过光学细分和电子学细分,将位移转换成数字信号输出。通过与计算机相连可以实现角位移、角速度和角加速度以及其他物理量的测量。光电编码器具有精度高、体积小、抗干扰、使用寿命长等优点,因此广泛用于工业控制、自动化检测及精密测量等领域^[2]。

传统的编码器测速方法主要有M法、T法和M/T法^[3-5]。其中M法、T法是最成熟和应用最为广泛的算法。由于上述算法仅需要在确定的采样频率下做角度差分,或确定的角度变化量下做时间差分,因此具有

收稿日期: 2015-07-03; 收到修改稿日期: 2015-07-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(070Y32R070)

作者简介: 王亚洲(1990-),男,硕士研究生,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: wangyazhou791@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)

算法实现简单,测速延时小等优点。但是由于编码器细分误差和随机误差的引入,使得上述算法的测速稳定性差,因此在实际控制中并不具备很高的实用性。

随着现代控制理论的发展,研究者们提出了改进的M法、T法^[4-5],滤波法^[6-7]以及拟合法^[8-9]等算法。如爱尔兰的Naveen等^[10]就提出利用一种自学习算法来提高M/T法的测速精度。韩国的Lee等^[11]提出一种利用积分器代替微分器求速度和加速度的方法。荷兰的Merry等^[12]通过拟合角度关于时间的高次多项式,用以恢复任意时间点的角度信息,同时对角度关于时间求导,得出编码器的速度。国内中国科学院长春光学精密机械与物理研究所利用非线性跟踪微分器来对编码器输出角度进行跟踪,以达到更好的测速稳定性^[13]。上海交通大学的焦东升等^[14]提出一种改进的M法。上述算法虽然可以提高测速性能,但是都会产生测速延时。并且其测速方法的实现是建立在编码器角度输出之后,无法避免角度细分误差带来的测速误差。本文分析了影响编码器测速精度的主要因素,建立基于光电叠栅条纹的测速模型。利用数字信号处理器(DSP)和直流无刷电机建立测速系统,提高了编码器的测速精度。

2 光电编码器测速数学模型建立

光电编码器由轴系、光源、码盘、狭缝、光敏元件和处理电路组成,系统结构组成如图1所示^[15]。

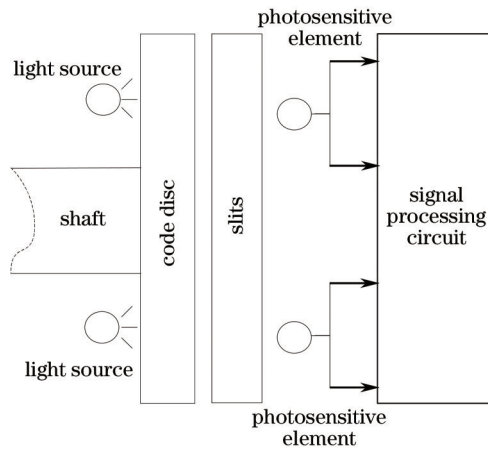


图1 光电编码器组成

Fig.1 Structure of photoelectric encoder

码盘与被测轴连接,光源通过码盘和狭缝射到光敏元件上。当轴系转动时,会带动码盘一起转动,光敏元件可以检测到频率与转速呈正比的叠栅条纹信号。理想状态下得到的四路叠栅条纹光电信号为

$$\begin{cases} U_1 = U_0 + U_a \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \\ U_2 = U_0 + U_a \cdot \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \\ U_1' = U_0 - U_a \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \\ U_2' = U_0 - U_a \cdot \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 U_0 为叠栅条纹光电信号中叠加的直流分量, U_a 为信号幅度, x 为光栅位移, p 为光栅间距。令 $U_s = U_1 - U_1'$, $U_c = U_2 - U_2'$, 可以得到两路标准的正余弦信号:

$$\begin{cases} U_s = 2 \cdot U_a \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \\ U_c = 2 \cdot U_a \cdot \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 U_s 和 U_c 为差分后的叠栅条纹光电信号。通过(2)式可得编码器的光栅位移计算公式为

$$x = \frac{p}{2\pi} \arctan\left(\frac{U_s}{U_c}\right). \quad (3)$$

对(3)式做全微分可得叠栅条纹光电信号的变化对编码器光栅位移的影响的公式为

$$dx = \frac{p}{2\pi} \frac{U_s \cdot dU_c - U_c \cdot dU_s}{U_s^2 + U_c^2}, \quad (4)$$

设编码器精码刻划数为 2^n , 精码道半径为 r , 则 $2^n \cdot p = 2 \cdot r \cdot \pi$ 。则编码器实际的转速为

$$v = d\theta/dt = \frac{dx/r}{dt} = \frac{U_s \cdot dU_c - U_c \cdot dU_s}{2^n \cdot (U_s^2 + U_c^2) \cdot dt}. \quad (5)$$

虽然(5)式的推导过程中用到了中间量 x (由 x 联立粗码信号可以直接计算出角度值), 但是实际的速度运算当中并没有用到光栅位移 x , 所以速度的计算过程中并不涉及角度的计算。设采样间隔为 Δt , 利用 $\Delta U/\Delta t$ 代替 dU/dt 得到(5)式离散化公式

$$v = 2^{-n} \cdot \frac{U_s \cdot \Delta U_c - U_c \cdot \Delta U_s}{U_s^2 + U_c^2} / \Delta t, \quad (6)$$

式中 U_s, U_c 为模数(AD)在 t 时刻采样值, $\Delta U_s, \Delta U_c$ 为 U_s, U_c 的后向差分。由(6)式可以计算出理想情况下编码器的角速度。

3 基于叠栅条纹光电信号的高精度测速原理

3.1 传统测速原理

目前的编码器测速方法需要取编码器转过的角位移, 然后再通过一定的算法来求取编码器的转速, 其过程存在细分误差和运算延时, 因而影响测速精度和响应速率。

由于编码器叠栅条纹光电信号存在噪声和误差。因此叠栅条纹光电信号质量会影响测速精度。衡量叠栅条纹光电信号的质量主要通过四个参数来衡量: 正交性偏差, 直流分量, 等幅性偏差和正弦性偏差^[6]。基于理想的正余弦信号, 采用(6)式作为计算公式, 利用 Matlab 做仿真分析。分别引入不同百分比的偏差信号, 计算出速度误差的均方差。偏差大小对误差均方差的影响如图2所示。由图2可得正交性误差是影响测速精度的主要因素。在编码器实际装调过程中, 可以通过调整电路参数和狭缝的相对位置来消除直流分量和等副性偏差。本文主要讨论消除正交性误差的改进算法。

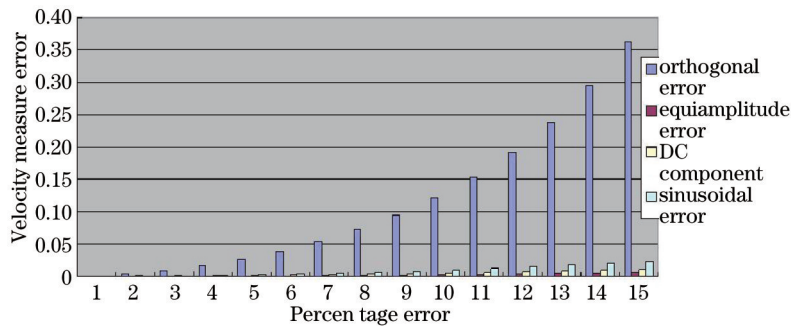


图2 影响测速精度的因素对比

Fig.2 Influence of different error factors for speed measuring precision

3.2 利用最小二乘法拟合的改进测速算法

通过以上分析可以得出叠栅条纹信号的质量直接影响编码器测速精度。因此对叠栅条纹信号进行误差补偿和校正, 可以有效地提高编码器测速精度。

对于正交性误差, 采用如下方法进行校正^[17]。设未经校正的两路叠栅信号为 μ_s, μ_c , 如下式:

$$\begin{cases} \mu_c = \cos \varphi \\ \mu_s = \sin(\varphi - \alpha) = \sin \varphi \cos \alpha - \cos \varphi \sin \alpha \end{cases} \quad (7)$$

式中 α 为正交性误差, 令 $\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{p} = \varphi$, 若 $\alpha = 0$ 则两路信号严格正交。 $\alpha \neq 0$ 则两路信号存在正交性误差。且

由三角函数关系式可知

$$\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1. \quad (8)$$

由(7)、(8)式可得

$$[\mu_c^2 \quad \mu_c \mu_s \quad \mu_s^2] \left[1 + \tan^2 \alpha \quad \frac{2 \sin \alpha}{\cos^2 \alpha} \quad \frac{1}{\cos^2 \alpha} \right]^T = 1. \quad (9)$$

μ_s 、 μ_c 是两路叠栅条纹光电信号,可以通过若干次采样来获得。利用上述 μ_s 、 μ_c ,采用最小二乘法拟合上述(9)式即可以求出正交误差 α 。代入正交性误差 α 完成对信号的校正,设校正后的叠栅信号设为 μ'_c 、 μ'_s 则校正公式如下:

$$\begin{cases} \mu'_c = \mu_c \\ \mu'_s = \frac{\mu_s + \mu_c \sin \alpha}{\cos \alpha} \end{cases} \quad (10)$$

联合(5)、(10)式可得校正后的速度公式为

$$v = \frac{\mu'_c \cdot d\mu'_s - \mu'_s \cdot d\mu'_c}{(\mu_c'^2 + \mu_s'^2) \cdot 2^n \cdot dt} = \frac{(\mu_c \cdot d\mu_s - \mu_s \cdot d\mu_c) \cdot \cos \alpha}{(\mu_c^2 + \mu_s^2 + 2 \cdot \mu_s \cdot \mu_c \cdot \sin \alpha) \cdot 2^n \cdot dt}. \quad (11)$$

3.3 基于叠栅条纹信号半径变化的误差修正算法

由于实际叠栅条纹光电信号具有的各种缺陷,使得叠栅条纹信号所形成的李萨如图形并不是一个标准圆,因此借助(6)式不能准确地计算出编码器的角速度。当李萨如圆半径发生变化时, $d\theta$ 的修正算法示意图如图3所示。

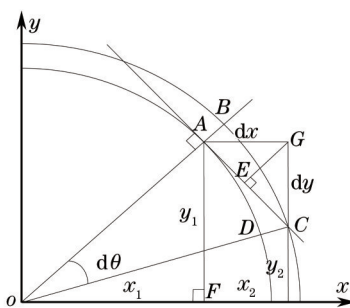


图3 修正算法示意图

Fig.3 Schematic diagram of correction algorithm

设图3中A,C点为第n次,第n+1次采样时,叠栅条纹光电信号处于李萨如圆的位置。由于实际的A,C两点的距离非常近,两点的半径差不多。令 $u_s = x, u_c = y$; 将点A代入(5)式可改写为

$$d\theta = \frac{x_1 \cdot dy}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} - \frac{y_1 \cdot dx}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}, \quad (12)$$

式中 $\sqrt{x_1^2 + y_1^2} = \overline{OA}$, 由三角形关系可得三角形 ΔAOF 相似于 ΔACG ,且 ΔACG 相似于 ΔAGE 和 ΔGCE 。则

$$\frac{x_1 \cdot dy}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} = \overline{EC}, \quad \frac{y_1 \cdot dx}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} = \overline{EA}. \quad (13)$$

因此(5)式可变为 $d\theta = \frac{\overline{AC}}{\overline{OA}}$, 而由图3得 $d\theta$ 严格等于 $\widehat{AD}/\overline{OA}$ 和 $\widehat{BC}/\overline{OC}$, 且 $\widehat{AD} < \overline{AC} < \widehat{BC}$, 因此 $\widehat{AC}/\overline{OC} < d\theta < \widehat{AC}/\overline{OA}$, 所以令

$$d\theta = \frac{2\overline{AC}}{\overline{OA} + \overline{OC}} = \frac{2[x_1 \cdot (y_2 - y_1) - y_1 \cdot (x_2 - x_1)]}{x_1^2 + y_1^2 + x_2^2 + y_2^2} = \frac{2[u_{s1} \cdot (u_{c2} - u_{c1}) - u_{c1} \cdot (u_{s2} - u_{s1})]}{u_{s1}^2 + u_{c1}^2 + u_{s2}^2 + u_{c2}^2}. \quad (14)$$

通过(13)式利用 $\frac{\overline{OA} + \overline{OC}}{2}$ 代替 \overline{OA} 可以达到一定的平滑效果,该平滑效果并没有牺牲测速延时和运算复杂度,因此实用性比较强。在信号半径不变的情况下,即 $x_1^2 + y_1^2 = x_2^2 + y_2^2$, 则(14)式等价于(5)式,并且此时的

条件满足(5)式严格成立的条件。故(14)式的修正方法适用于所有半径变化情况。联立(5)、(10)、(14)式并将序号 1,2 用 $i-1, i$ 代替, 得到基于叠栅条纹光电信号的全微分测速方法的速度计算公式:

$$v = \frac{2 \cdot [\mu_{ci} \cdot (\mu_{si} - \mu_{si-1}) - \mu_{si} \cdot (\mu_{ci} - \mu_{ci-1})] \cdot \cos \alpha / (2^n \cdot \Delta t)}{\mu_{ci}^2 + \mu_{si}^2 + \mu_{ci-1}^2 + \mu_{si-1}^2 + 2 \cdot (\mu_{si-1} \cdot \mu_{ci-1} + \mu_{si} \cdot \mu_{ci}) \cdot \sin \alpha}, \quad (15)$$

式中 i 为采样点序号。(15)式算法复杂度低, 可硬件实现, 并且运算过程简单, 运算延时较小。

4 测速实验

4.1 叠栅条纹高精度测速实验系统

本实验采用中国科学院长春光学精密机械与物理研究所某 21 位绝对式编码器进行测速实验, 通过直流无刷电机带动编码器旋转。通过数字信号处理器(DSP)数据采集处理板将速度数据送到上位机, 原理图如图 4 所示。

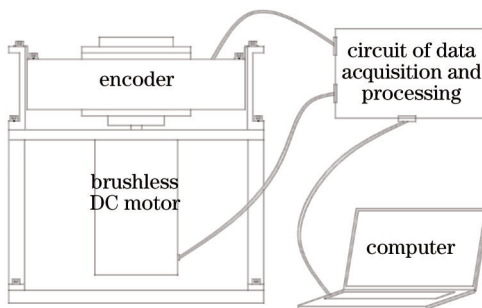


图 4 叠栅条纹高精度测速实验系统

Fig.4 Velocity measurement experimental system

4.2 系统软硬件实现

系统硬件实现简单, 仅需要将经过差分放大后的正余弦信号送入 DSP 最小系统, 并实现编码器与最小系统的共地即可。选取 DSP28335 作为主控芯片, 采用芯片内部自带 AD 进行采样系统硬件框图如图 5 所示。

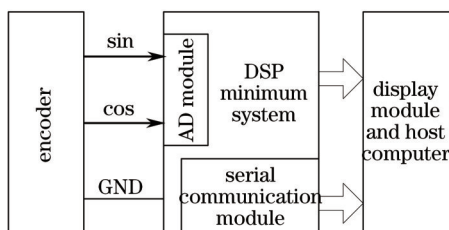


图 5 系统硬件框图

Fig.5 Block diagram of hardware

DSP28335 具有 16 个 12 位带流水线的模数转换模块, 可以支持最高 12.5 MHz 的采样频率, 由于较高的采样频率会带来很大的测速不稳定性, 所以一般的测速系统采样频率不会超过 1 MHz, 所以芯片完全符合系统要求。AD 采样模块的输入电压为 0~3 V, 因此通过调节编码器中的电位计将输入信号控制在 0~3 V 范围。并在程序中去掉其直流分量。系统经过计算得到速度值, 并传到上位机。

系统软件流程图如图 6 所示。通过用户操作来确定是否要更新正交误差值 α 。如若需要更新, 则多次采集叠栅条纹光电信号正余弦信号值, 并通过最小二乘法拟合新的 α 值, 并更新存在 ROM 中的 α 值。在大部分时间内并不需要实时更新 α , 因此在速度计算时直接读取 ROM 中的 α 值, 并实时计算编码器速度, 并传到上位机。

4.3 实验结果及分析

为了获得较好的稳速效果, 实验截取 0.15 s 内的数据, 由于测量时间段非常短, 故认为编码器在测量时间段内是稳速的。为了验证本方法测速的精度, 同时选取 2 kHz 的采样频率, 利用编码器输出角度, 采用 M 法测速的结果作为对比数据。为了获得较好的对比效果, 并在 DSP 运算资源充足的条件下, 本文利用采集到的叠栅条纹信号恢复出编码器的实际角度, 并利用差分算法获取 M 法测速结果。同时为了获取较好的实时性, 利用 DSP 得到的速度值实时存储于 DSP 的内存中, 测量结束后, 利用 CCS 软件直接读取内存中的速度值。

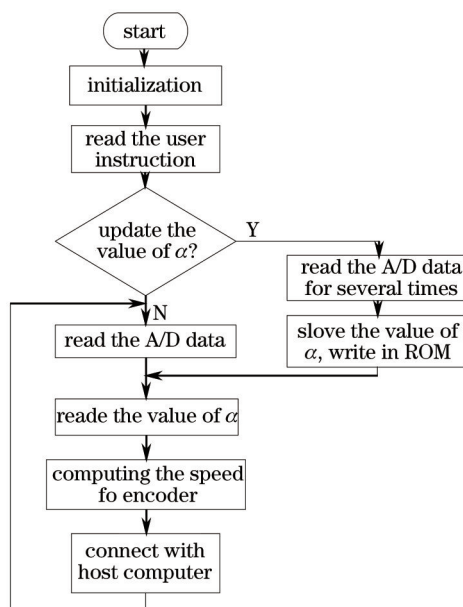


图 6 系统软件流程图

Fig.6 Flow chart of system software

由图 7 数据可得利用 M 法测速所得的测速误差均方差为 0.0367 rad/s, 利用未加正交误差校正叠栅条纹测速法所得的测速误差均方差为 0.0349 rad/s。实验结果说明了在相同的编码器信号条件下, 即使不加正交性误差校正, 该方法依然可以提高编码器的测速精度。由图 8 和图 7 的相位对比发现叠栅条纹测速法同 M 法一样, 都不存在相位延时。通过图 9 数据得到基于叠栅条纹光电信号的全微分测速方法测速误差均方差为 0.0216 rad/s, 测速稳定性得到了大幅提升。这是由于正交误差修正因子的引入, 大大改善信号质量, 提高了测速精度。

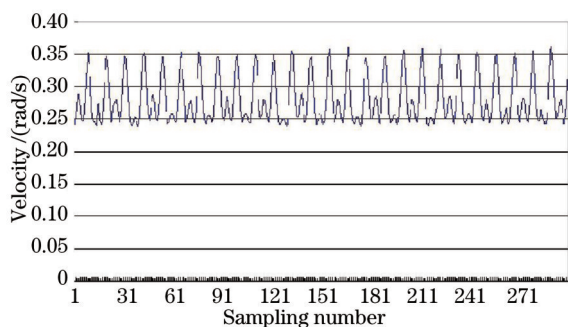


图 7 M 法测速结果

Fig.7 Velocity measuring results of M method

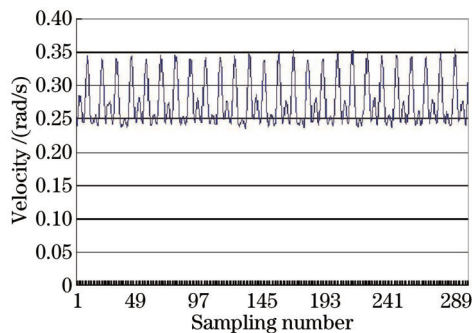


图 8 未加正交校正的叠栅条纹测速方法测速结果

Fig.8 Velocity measuring results of total differential method without orthogonal correction

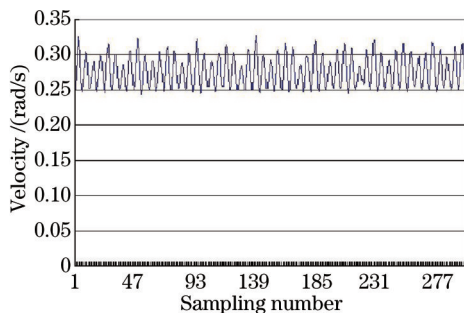


图 9 全微分测速方法速度结果

Fig.9 Velocity measuring results of total differential method

5 结 论

本文针对目前已有的编码器测速方法的缺点,提出了一种基于叠栅条纹光电信号的速度计算方法。该方法避免了编码器细分误差和角度计算延时的影响,提高了编码器的测速精度和响应速率。同时本文采用了正交误差修正方法,进一步提高了编码器的测速精度。通过 DSP 片上实验,将测速误差均方根由 0.0367 rad/s 降低到 0.0216 rad/s。验证了改进后的叠栅条纹测速法可以达到很好的测速稳性,提高了编码器的测速精度。

参 考 文 献

- 1 Ye Shengxiang. Accurate Measurement about Photoelectric Shift[M]. Chengdu: Science and Technology Press, 2003: 4-7.
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: 4-7.
- 2 Yu Hai, Wan Qiuhua, Wang Shujie, *et al.*. Dynamic errors analysis of small absolute photoelectric encoder[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0808004.
于海, 万秋华, 王树洁, 等. 小型绝对式光电轴角编码器动态误差分析[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0808004.
- 3 Zhao Yan. The Research of Velocity Measurement With Encoder[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003.
赵岩. 编码器测速方法的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
- 4 Song Gang, Qin Yuexia, Zhang Kai, *et al.*. Approach and realization to improve the measuring accuracy with resolution encoder[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(8): 1169-1172.
宋刚, 秦月霞, 张凯, 等. 基于普通编码器的高精度测速方法[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(8): 1169-1172.
- 5 Wen Xiaoyan, Zheng Qionglin, Wei Kekang, *et al.*. Typical issue analysis and corresponding strategy for incremental encoder speed measurement[J]. Trans China Electro-Technical Society, 2010, 27(2): 185-189.
文晓燕, 郑琼林, 韦克康, 等. 增量式编码器测速的典型问题分析及应对策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 185-189.
- 6 Li Yongjun, Fan Yongkun, Yang Hui. Study on filtering technology for photoelectric encoder[J]. Process Automation Instrumentation, 2008, 29(7): 21-23.
李拥军, 范永坤, 杨辉. 光电编码器滤波技术研究[J]. 自动化仪表, 2008, 29(7): 21-23.
- 7 Wang Shuai, Wang Jianli, Chen Tao, *et al.*. Application of the nonlinear tracking-differentiator in velocity estimation on optical encoder[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(5): 849-853.
王帅, 王建立, 陈涛, 等. 非线性跟踪微分器在光电编码器测速中的应用[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 849-853.
- 8 Wang Hui, Hu Jianhua, Wang Shenhong. Angular position fitting velocity detection of incremental optical encoder[J]. Instrument Technique and Sensor, 2014, (10): 99-101.
王辉, 胡建华, 王慎航. 增量式光电编码器角位移拟合测速算法[J]. 仪表技术与传感器, 2014, (10): 99-101.
- 9 Jiang Qingming, Yang Xu, Gan Yongmei, *et al.*. A new way of measuring velocity and acceleration based on photoelectric encoder[J]. Microcomputer Information, 2004, 20(6): 48-50.
姜庆明, 杨旭, 甘永梅, 等. 一种基于光电编码器的高精度测速和测加速度方法[J]. 微计算机信息, 2004, 20(6): 48-50.
- 10 Naveen K B, Richard C K. New learning algorithm for high-quality velocity measurement from low-cost optical encoders[C]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008.
- 11 Se-Han Lee, Jae-Bok Song. Acceleration estimator for low-velocity and low-acceleration regions based on encoder position data[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2001, 6(1): 58-64.
- 12 R J E Merry, M J G Van, D E Molengraft, *et al.*. Velocity and acceleration estimation for optical incremental encoders[J]. Mechatronics, 2010, 20(1): 20-26.
- 13 Huang Fajun, Wan Qiuhua, Yang Shouwang. Method of velocity measurement based on moire fringe and nonlinear tracking differentiator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1930-1935.
黄法军, 万秋华, 杨守旺. 莫尔条纹光电信号的非线性跟踪微分测速方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1930-1935.
- 14 Jiao Dongsheng, Zhang Xiubin, Ying Junhao, *et al.*. The research of velocity measurement based on orthogonal photoelectric encoder[J]. Microcomputer Application, 2010, 26(10): 13-15.
焦东升, 张秀彬, 应俊豪, 等. 基于正交编码器高精度测速方法的研究[J]. 微型电脑应用, 2010, 26(10): 13-15.
- 15 Zuo Yang, Long Kehui, Zhou Lei, *et al.*. Design for spaceborne multi-turn photoelectric encoder of dual numerical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 022801.

- 左 洋, 龙科慧, 周 磊, 等. 航天级双读数多圈绝对式光电编码器设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 022801.
- 16 Zuo Yang, Long Kehui, Liu Jinguo, *et al.*. Analysis and processing of morie fringe signals based on non-uniform sampling[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(4): 1146-1152.
- 左 洋, 龙科慧, 刘金国, 等. 非均匀采样莫尔条纹信号的分析与处理[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(4): 1146-1152.
- 17 Feng Yingqiao, Wan Qihua. Interpolation error calibration method of small photoelectric encoders[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6): 1374-1379.
- 冯英翘, 万秋华. 小型光电编码器细分误差校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1374-1379.

栏目编辑: 何卓铭