

## 莫尔条纹光电信号的非线性跟踪微分测速方法

黄法军<sup>1,2</sup>, 万秋华<sup>1</sup>, 杨守旺<sup>1</sup>, 赵长海<sup>1</sup>, 于海<sup>1,2</sup>

- (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:** 为了实现在低速情况下系统速度的检测, 提出了一种基于莫尔条纹光电信号和非线性跟踪微分器的测量角速度和角加速度的方法。首先, 分析了莫尔条纹光电信号特性; 然后结合非线性跟踪微分器理论, 对编码器输出的光电信号进行滤波和相位补偿; 最后, 将两级非线性跟踪微分器级联, 同时得到速度和加速度。实验结果表明: 该方法增加了低速时采样频率, 提高了速度测量的平稳性、精度和实时性。将该方法应用于某采用 21 位编码器作为角度传感器的系统中, 成功实现了速度及加速度地检测。当速度降低到  $0.0017(^{\circ})/s$  时, 设置采样时间为 5 ms, 则采样频率为通常方法的 20 倍, 更好的解决了低速系统对测速平稳性、精度和实时性的要求。

**关键词:** 测速; 莫尔条纹光电信号; 跟踪微分器; 相位补偿

**中图分类号:** TP216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1930-06

## Method of velocity measurement based on Moiré fringe and nonlinear tracking differentiator

Huang Fajun<sup>1,2</sup>, Wan Qiuhua<sup>1</sup>, Yang Shouwang<sup>1</sup>, Zhao Changhai<sup>1</sup>, Yu Hai<sup>1,2</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to realize velocity and acceleration measurement at low speed, a new type method of velocity measurement at low speed was designed which is based on the method of Moiré fringe and nonlinear tracking differentiator. First of all, the electric signal of Moiré fringe was analyzed. Then the electric signal from photoelectric encoder was filtered by nonlinear tracking differentiator and the phase delays were compensated. Finally, velocity and acceleration measurement was realized by using cascaded nonlinear tracking differentiators. The test proves that the stationarity and precision of velocity measurement at low speed are improved, as well as the sampling frequency. The method was applied in a system with a 21-bit encoder as the angle sensor, and velocity and acceleration could be measured. When the speed is  $0.0017(^{\circ})/s$  and sampling time is 5 ms, sampling numbers is 20 times than that of ordinary methods. The real-time performance, stationarity and precision of velocity measurement at low

收稿日期: 2013-10-11; 修订日期: 2013-11-08

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目

作者简介: 黄法军(1988-), 男, 硕士生, 主要从事光电位移精密测量技术及光电编码器方面的研究。Email: huangfj1988@126.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光电轴角编码器方面的研究。

Email: wanqh@ciomp.ac.cn

speed can be improved by using the method.

Key words: velocity measurement; electric signal of Moiré fringe; tracking differentiator; phase compensation

## 0 引言

在现代一些精密的控制系统中,诸如鲁棒控制<sup>[1]</sup>,基于模型的误差补偿<sup>[2]</sup>等,需要精确测量系统的速度及加速度,并且对低速情况下测速精度及平稳性有很高的要求。目前,经常使用光电轴角编码器作为角度位移传感器进行速度测量。光电轴角编码器是一种高精度角度传感器<sup>[3]</sup>,广泛应用于各种受零位置偏移、零位噪声制约的控制系统中<sup>[4]</sup>。

目前光电编码器测速主要方法有以下几种:一种是利用位置信息进行一阶后向差分得到角速度<sup>[5]</sup>,但是由于角度数据存在各种噪声,在低速测量时会放大随机误差,造成速度精度下降;一种是在一定时间内对编码器脉冲进行计数,如M法、T法、M/T法和变M/T法<sup>[6]</sup>等,参考文献[7-8]基于上述方法又提出了高速高精度连续测量法、直接测频法、多周期同步测频法。上述方法都需要检测编码器输出脉冲的上升沿和下降沿来同步时间,而且由于光电编码器存在制造和安装误差<sup>[9-10]</sup>使得脉宽不均匀,测速精度会进一步下降。另外,在编码器分辨率一定且系统转速较低时,编码器位置变化较慢,造成检测时间过长,不利于实现快速响应。此外,参考文献[11]提出的利用滑动窗实时数据处理与多项式拟合的办法同样无法有效降低速度检测时间和满足实时性的要求。

针对上述问题,文中提出了一种基于莫尔条纹的新型角速度和角加速度的检测方法,该方法直接对原始莫尔条纹光电信号进行高速采样,采样频率不受编码器的制约,还避免了编码器后续处理电路产生的误差和时间延迟。应用非线性跟踪微分器(NTD)理论对采样数据进行处理,并采用预报的方法进行相位补偿。该方法可以提高低速情况下速度测量的精度、平稳性和实时性。

## 1 莫尔条纹光电信号测速原理

### 1.1 莫尔条纹光电信号的处理

光电编码器主要由光源、码盘、狭缝、主轴和光

电元件组成,如图1所示。

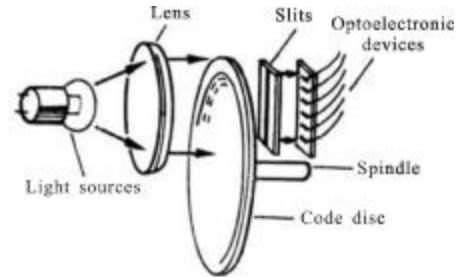


图1 光电编码器组成

Fig.1 Composition of photoelectric encoder

当编码器主轴带动码盘转动时,码盘和狭缝相对运动产生莫尔条纹。光电元件将光信号转变为电信号,通过处理电路放大后形成了莫尔条纹光电信号。理想状态下输出的四路莫尔条纹光电信号为:

$$U_a = U_0 + U_m \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (1)$$

$$U_a' = U_0 - U_m \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (2)$$

$$U_b = U_0 + U_m \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (3)$$

$$U_b' = U_0 - U_m \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (4)$$

式中: $U_a, U_a', U_b, U_b'$ 为编码器输出的4路正余弦信号; $U_0$ 为光电信号叠加的直流电平; $U_m$ 为信号幅值; $x$ 为光栅位移; $p$ 为光栅栅距。经差分后得到:

$$U_1 = U \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (5)$$

$$U_2 = U \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (6)$$

由公式(5)、(6)可知,差分后的两路信号中包含了编码器的位移 $x$ ,也就是编码器当前的位置。

以一路正弦信号为例,通过对其进行连续采样,即可得到其电压 $U_1$ 。但考虑到正余弦函数不是单值函数,同时消去信号幅值 $U$ ,只保留位移 $x$ ,所以将公式(5)、(6)相除,得到 $\frac{U_1}{U_2} = \tan\left(\frac{2\pi x}{p}\right)$ 。当 $\pi/4 \leq x < 3\pi/4$ 和 $5\pi/4 \leq x < 7\pi/4$ 时,正切幅值过大造成溢出,此时令 $\frac{U_2}{U_1} = \cot\left(\frac{2\pi x}{p}\right)$ ,由此得出位移 $x$ 。在实际应

用中,为了简化计算,只计算反正切的数值,位移  $x$  在不同区间内的求解公式见公式(7)。

$$x = \begin{cases} \frac{p}{2\pi} \arctan\left(\frac{U_1}{U_2}\right) & 0 \leq x < \pi/4 \\ \frac{\pi}{2} - \frac{p}{2\pi} \arctan\left(\frac{U_2}{U_1}\right) & \pi/4 \leq x < \pi/2 \\ \frac{\pi}{2} + \frac{p}{2\pi} \arctan\left(-\frac{U_2}{U_1}\right) & \pi/2 \leq x < 3\pi/4 \\ \pi - \frac{p}{2\pi} \arctan\left(-\frac{U_1}{U_2}\right) & 3\pi/4 \leq x < \pi \\ \pi + \frac{p}{2\pi} \arctan\left(\frac{U_1}{U_2}\right) & \pi \leq x < 5\pi/4 \\ \frac{3\pi}{2} - \frac{p}{2\pi} \arctan\left(\frac{U_2}{U_1}\right) & 5\pi/4 \leq x < 3\pi/2 \\ \frac{3\pi}{2} + \frac{p}{2\pi} \arctan\left(-\frac{U_2}{U_1}\right) & 3\pi/2 \leq x < 7\pi/4 \\ 2\pi - \frac{p}{2\pi} \arctan\left(-\frac{U_1}{U_2}\right) & 7\pi/4 \leq x < 2\pi \end{cases} \quad (7)$$

由于编码器莫尔条纹光电信号不可避免地存在各种噪声,所以在用公式(7)计算位移  $x$  前需要将其进行滤波处理。参考不同的滤波方法<sup>[12]</sup>,文中采用非线性跟踪微分器作为滤波和后续处理的理论。

## 1.2 非线性跟踪微分器理论

根据非线性跟踪微分器(NTD)理论,NTD 可以从带随机噪声的信号中提取测量信号及其微分信号<sup>[13]</sup>。并用积分运算代替了微分运算,从而具有较强的抑制噪声的能力,在工程中得到了广泛的应用。输入一个信号  $v(t)$ ,可以得到  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  两个输出信号,前者跟踪输入信号  $v(t)$ ,后者则可作为  $v(t)$  的近似微分信号。设系统如公式(8):

$$\begin{cases} \dot{z}_1(t) = z_2(t) \\ \dot{z}_2(t) = f(z_1(t), z_2(t)) \end{cases} \quad (8)$$

若公式(8)的任意解满足  $z_1(t) \rightarrow 0, z_2(t) \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ ,则对任意有界可积函数  $v(t)$  和任意常数  $T > 0, R \geq 0$  有

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = R^2 f(x_1(t) - v(t), x_2(t)/R) \end{cases} \quad (9)$$

公式(9)的解满足

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \int_0^T |x_1(t) - v(t)| dt = 0 \quad (10)$$

选择适当的非线性函数  $f$ ,使系统渐近稳定,则系统状态  $x_1(t)$  平均收敛于输入信号  $v(t)$ 。由于  $x_2 = \dot{x}_1$ ,则  $x_2(t)$  弱收敛于  $v(t)$  的广义导数  $\dot{v}(t)$ 。

由最速综合函数  $\text{fst}$  的具体表达式推导出了离散形式的非线性跟踪微分器<sup>[14]</sup>。具体形式如下:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + h * x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h * \text{fst}(x_1(k) - v(k), x_2(k), r, h_1) \end{cases} \quad (11)$$

公式(11)中最速综合函数表达式为:

$$\text{fst}(x_1(k) - v(k), x_2(k), r, h_1) = -r * \text{sat}(g(k), \delta) \quad (12)$$

其中各表达式为:

$$\delta = h_1 * r \quad (13)$$

$$\delta_1 = h_1 * \delta \quad (14)$$

$$e(k) = x_1(k) - v(k) \quad (15)$$

$$y(k) = e(k) + h_1 * x_2(k) \quad (16)$$

$$g(k) = \begin{cases} x_2(k) + \text{sign}(y(k)) * \frac{\sqrt{8r|y(k)| + \delta^2} - \delta}{2} & |y(k)| \geq \delta_1 \\ x_2(k) + \frac{y(k)}{h_1} & |y(k)| < \delta_1 \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{sat}(x, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(x) & |x| \geq \delta \\ \frac{x}{\delta} & |x| < \delta \end{cases} \quad (18)$$

式中: $v$  为输入信号; $x_1$  为跟踪信号; $x_2$  为  $x_1$  的导数,近似为  $v$  的导数; $h$  为步长; $r$  为速度参数,影响跟踪速度; $h_1$  为滤波参数,其值越大滤波效果越好,但会相应增大相位延迟。可以看出,适当调节  $h, h_1, r$  3 个参数可以使离散非线性跟踪微分器快速跟踪输入信号,抑制噪声,同时给出良好的微分信号。

由于非线性跟踪微分器存在相位延迟的缺点,文中采取预报的方法进行相位补偿<sup>[15]</sup>。将跟踪信号加上微分信号与预报步长的乘积作为输入的逼近。

$$x = x_1 + r_1 * h * x_2 \quad (19)$$

式中: $x$  为补偿后的逼近信号; $r_1$  为预报步长。

在文中的测速方法中,首先将公式(5)、(6)中的  $U_1$  与  $U_2$  作为输入信号  $v$  带入公式(11)、(19)中进行计算,得到经过相位补偿的滤波信号,将结果带入公式(7)中,计算得出当前位移  $x$ 。再将  $x$  作为输入信号  $v$  带入公式(11)中,此时输出的  $x_2$  即为速度。

## 2 系统的实现

速度检测系统由采样部分和处理部分组成。采样部分采用 16 位高速高精度数模转换器 AD7671,采样速率可达 1 MSPS,采用 5 V 单电源供电,并能提供单极性和双极性两种输入方式,可适用各种不同的输入范围。最大积分非线性误差 (INL) 仅为  $\pm 2.5$  LSB,能够满足该方法的采样要求。

处理部分以 TMS320F28335 为核心,它是 TI 公司的一款 32 位浮点 DSP 控制器。具有精度高、成本低、功耗小、性能高、外设集成度高、数据以及程序存储量大等优点。测速系统的原理如图 2 所示。

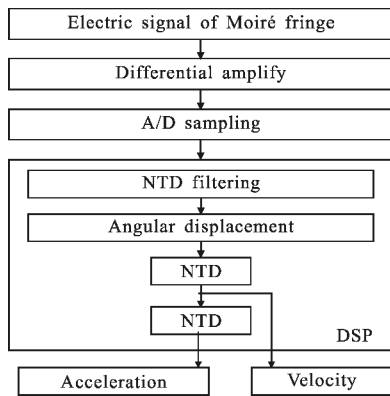


图 2 测速系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of velocity measurement system

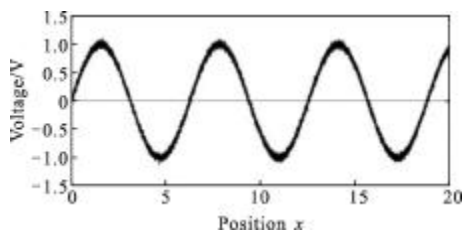
将绝对式编码器输出的光电信号输入到速度检测系统采样部分进行采样。然后将采样得到的数据输入到系统处理部分,采用 NTD 理论进行滤波,计算编码器位移。再利用 NTD 的微分特性,通过两级 NTD 级联分别得到速度与加速度信息。

### 3 数据仿真及实验验证

#### 3.1 数据仿真

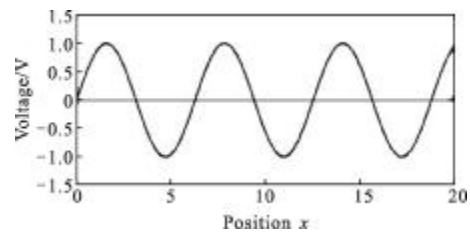
在 SIMULINK 中建立模型,采样步长 0.001,初始状态均为零。假设通过 AD 采集到带噪声的莫尔条纹光电信号为  $\sin(t)+\sigma(t)$ ,  $|\sigma(t)|<0.001$ ,是均匀白噪声。经过多次仿真,取  $h=0.001, r=1000, h_1=8h, r_1=16$ 。原始带噪声的采样信号与输出信号的仿真结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,经过相位补偿的离散微分器可以将莫尔条纹信号中的噪声去除,得到高质量的正弦信号,并且相位延迟得到有效抑制,以便后续处理。



(a) 原始信号

(a) Initial signal



(b) 滤波后信号

(b) Filtered signal

图 3 原始带噪声采样信号与滤波输出信号

Fig.3 Sampling signal with noise and filtered signal

将公式(7)得到的位移  $x$  输入到非线性跟踪微分器(NTD)中即可得到系统速度。如果将两级 NTD 级联,就可以在后级中得到系统加速度。为了研究两级 NTD 级联的效果,建立以下仿真。假设位移函数同样为  $\sin(t)$ ,那么仿真得到的速度和加速度如图 4 所示。

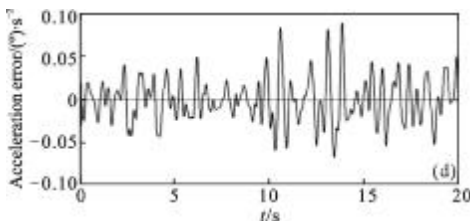
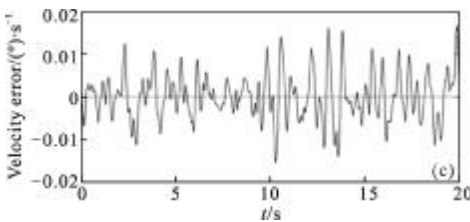
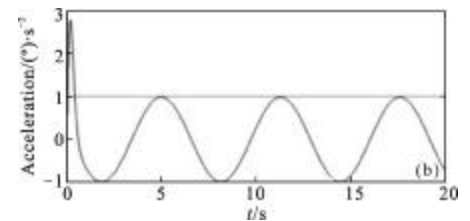
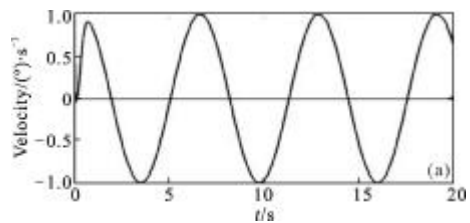


图 4 速度、加速度及其误差

Fig.4 Value and errors of velocity and acceleration

由图 4 可以看出,采用两级 NTD 串联的方式,可以在系统速度不断变化的情况下由位置信息经过计算得到速度与加速度。通过数据仿真,验证了文中测速方法理论的正确性。速度测量误差小于 $\pm 0.017(^{\circ})/s$ ,加速度测量误差小于 $\pm 0.08(^{\circ})/s^2$ 。此外,NTD 输出的微分信号也存在相位延迟。可以同样采取预报的方法对微分信号进行适度的相位补偿,以提高测速系统的实时性。

### 3.2 实验验证

为了验证文中测量速度和加速度的实际效果,将测速系统安装在某应用 21 位绝对式编码器的系统中,系统由机械平台、无刷直流电机、21 位绝对式编码器和速度检测系统等构成。利用电机带动编码器同轴转动,采用该方法进行实验。21 位绝对式编码器一周共刻有 4096 条刻划线,分辨率为  $0.6''$ ,测角精度为  $\sigma$  小于  $2''$ ,光栅栅距  $p$  为  $0.0943\text{ mm}$ 。当莫尔条纹光电信号出现一个完整周期,编码器转过  $(360/4096)^{\circ}$ 。通过记录正弦周期的个数即可确定当前编码器位移,进而得到速度和加速度。图 5 所示为当转台以  $0.01(^{\circ})/s$  的速度转动时转台的位置、速度和加速度。

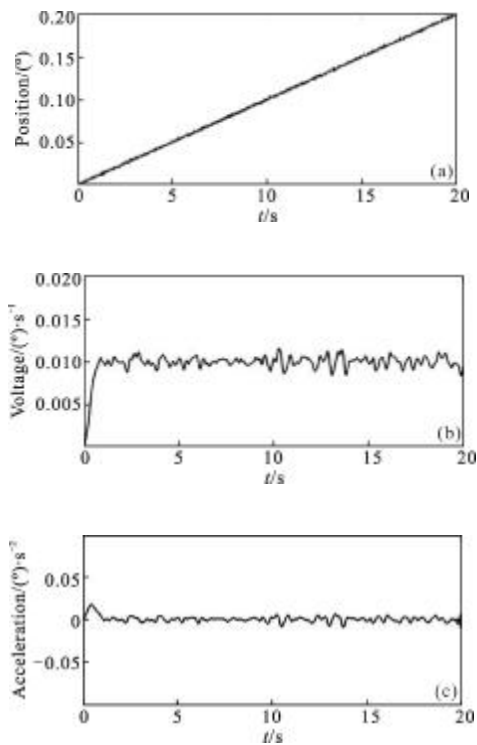


图 5 速度为  $0.01(^{\circ})/s$  时得到的位置、速度和加速度

Fig.5 Results of position, velocity and acceleration when speed is  $0.01(^{\circ})/s$

由图 5 可以看出,实验主要测试了系统在较低速度情况下速度及加速度测量的结果。分析上述测量结果可知,系统能够较好地得到速度与加速度,两条曲线均存在一段跟踪时间,当速度平稳后,速度误差小于 $\pm 0.002(^{\circ})/s$ ,加速度误差小于 $\pm 0.01(^{\circ})/s^2$ 。

某些场合需要在低速情况下提供稳定、准确的速度估计。通常采用记录单位时间编码器脉冲测速的方法:在速度降低到一定时,编码器在一个位置保持的时间较长,此时间内只能给出一个速度值。文中的方法可以在此情况下显示出明显的优势。以 21 位编码器为例:当系统速度降低到  $0.0017(^{\circ})/s$  时,每个位置脉冲持续时间达到  $0.1\text{ s}$ 。通常测速方法最快  $0.1\text{ s}$  得到一个速度值。采用文中的方法,设置采样时间为  $5\text{ ms}$ ,则可以在同样的时间内连续采样 20 次。最快  $0.005\text{ s}$  给出速度估计,时间缩短到原来的  $1/20$ 。实验中将速度设置为  $0.002(^{\circ})/s$  时,利用编码器输出位置信号差分测速与文中测速方法的速度曲线如图 6 所示。

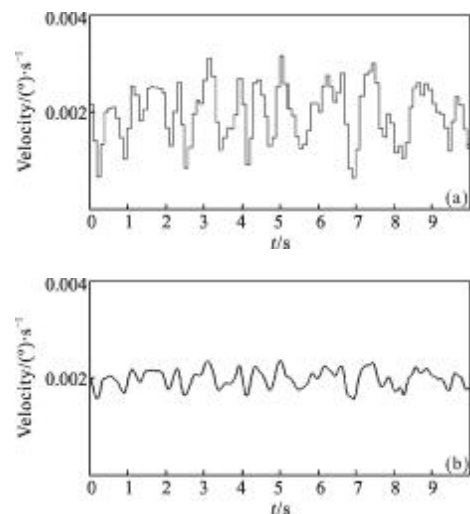


图 6  $0.002(^{\circ})/s$  速度时的速度曲线

Fig.6 Curves of velocity when speed is  $0.002(^{\circ})/s$

图 6 中截取了实验平台速度平稳后一段时间内测速结果的对比,图(a)为利用编码器输出位置信号差分测速曲线,图(b)为文中测速方法的速度曲线。可以看出,文中方法得到的速度曲线相对平滑,波动较小,速度响应更快。通过统计分析得出,测速误差的标准差从  $5.74 \times 10^{-4} (^{\circ})/s$  (图(a))减小到  $3.89 \times 10^{-4} (^{\circ})/s$  (图(b))。说明利用莫尔条纹光电信号进行速度测量的方法明显提高了速度测量的实时性,并且在测速

精度上也有很大优势。

## 4 结论

文中分析了莫尔条纹光电信号特性和现有测速方法的不足,提出了一种基于莫尔条纹,并结合跟踪微分器的测量速度和加速度的方法。直接对莫尔条纹光电信号进行采样,提高了低速时采样频率。结合跟踪微分器理论,对编码器输出的光电信号进行滤波和后续处理,进而得到位置和其微分信号。当速度降低到  $0.0017 (^{\circ})/s$  时,设置采样时间为  $5\text{ ms}$ ,则采样频率为  $200\text{ Hz}$ ,是通常方法的 20 倍。此外,该方法硬件条件容易满足。在上述条件下,每次采样莫尔条纹光电信号的电压差为  $0.012\text{ V}$ ,只需要 8 位以上的高速 AD 即可满足要求。仿真及实验表明:该方法可以快速得到系统速度和加速度,提高了低速状态下速度检测的准确性与稳定性,较好地解决了光电编码器低速测速的问题。

### 参考文献:

- [1] Ohnishi K, Shibata M, Murakami T. Motion control for advanced mechatronics[J]. IEEE/ASME Trans Mechatronics, 1996, 1(1): 56-97.
- [2] Bernstein N L, Lawrence D A, Pao L Y. Friction modeling and compensation for haptic interfaces [C]//Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005: 290-295.
- [3] Yu Hai, Wan Qiuhua, Yang Shouwang, et al. Dynamic error acquisition system of absolute optical encoder [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1809-1814. (in Chinese)
- [4] Zhao Yan. The research of velocity measurement with encoder [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2003: 1-6. (in Chinese)
- [5] Brown R H, Schneider S C, Mulligan M G. Analysis of algorithms for velocity estimation from discrete position versus time data [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 1992, 39(1): 11-19.
- [6] Qin Jirong, Shen Anjun. Contemporary DC Servo Controls Technology and Its System Design [M]. Beijing: China Machine Press, 1991. (in Chinese)
- [7] Simon E. Implementation of a speed field oriented control of 3-phase PWSM motor using TMS320F240 [J]. Texas Instrument, 1999: 6-40.
- [8] Liu Yili, Liu Haixia. A new method of high speed and continuous measurement of frequency [J]. Electronic Measurement Technology, 1999, 5: 19-24. (in Chinese)
- [9] 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): 2479-2484. (in Chinese)
- [10] Wang Xianjun. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoder [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2479-2484. (in Chinese)
- [11] Meng Zhong, Zhang Tao, Zheng Xiujun. Application of real time polynomial fitting based on orthogonal basis function algorithm to encoder rate measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(2): 303-307. (in Chinese)
- [12] Wu Hongsheng, Zeng Qifeng, Qiao Dong, et al. Filtering method of improving quality of grating Moiré fringe [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1944-1949. (in Chinese)
- [13] Han Jingqing. Nonlinear tracking-differentiator [J]. J Sys Sci and Math Scis, 1994, 14(2): 176-183. (in Chinese)
- [14] Han Jingqing, Yuan Lulin. The discrete form of tracking-differentiator[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 1997, 19(3): 268-173. (in Chinese)
- [15] Wu Liqiang, Lin hao, Han Jingqing. Study of tracking differentiator on filtering [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(4): 651-652. (in Chinese)