

# 基于磁编码器的伺服电机速度及位置观测器设计

吴忠, 吕绪明

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京市 海淀区 100191)

## Design of Angular Velocity and Position Observer for Servo Motors With Magnetic Encoders

WU Zhong, LÜ Xuming

(School of Instrumentation Science and Optoelectronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Haidian District, Beijing 100191, China)

**ABSTRACT:** Magnetic encoder was a kind of rotary sensors based on magnetoresistance effects or Hall effects, and it could output two orthogonal signals which were sine or cosine functions of the rotor angular position. In order to obtain the rotor angular position and velocity information, a state-observer-based algorithm was presented to demodulate output signals of the magnetic encoder. Theoretical analysis showed that both the second-order state observer and the third-order one could make the demodulation error converge to zero asymptotically when the motor rotated under constant speed. Once the motor speed varied uniformly, the demodulation error of the former algorithm would exist bias in principle and the latter still could converge to zero asymptotically. Comparing with the arc-tangent method, this algorithm could obtain angular velocity information without needing differential operator, thus had a strong ability to suppress random disturbances. Comparing with the phase-locked loop tracking method, this algorithm could obtain angular position and velocity with higher precision since the variation of the motor speed was taken into consideration. Experimental results indicated that the demodulation algorithm present above was feasible.

**KEY WORDS:** servo motor; magnetic encoder; state observer; position detection

**摘要:** 磁编码器是一种基于磁阻效应或霍尔效应的轴角传感器, 输出信号是转子角位置的正余弦函数。为获取转子角位置和角速度信息, 设计了一种基于状态观测器的磁编码器解调算法。理论分析表明, 当伺服电机匀速旋转时, 基于二阶和三阶状态观测器的解调算法误差均可渐近收敛至零; 当伺服电机匀加速或匀减速旋转时, 前者存在原理性偏差, 而后者解调误差依然可以渐近收敛至零。与反正切法相比, 该算

法不需通过数值差分即可获得角速度信息, 具有较强的干扰抑制能力。与基于锁相环的角度跟踪法相比, 该算法考虑了电机的转速变化, 角位置和角速度解算精度较高。实验结果表明, 该解调算法是可行的。

**关键词:** 伺服电机; 磁编码器; 状态观测器; 位置检测

## 0 引言

准确、可靠的转子位置及速度检测是实现伺服电机高性能控制的必要条件。为获取转子位置及速度信息, 通常在电机转轴上安装光电码盘、旋转变压器等轴角传感器。然而旋转变压器体积较大, 光电码盘不能耐受较大强度振动, 工作环境受到一定限制<sup>[1]</sup>。磁编码器是一种基于磁阻效应或霍尔效应的新型轴角传感器, 结构简单, 体积小, 抗冲击能力强, 可靠性高, 与光电码盘、旋转变压器相比具有独特的优势<sup>[2-5]</sup>, 在伺服控制领域引起广泛关注。

磁编码器输出的原始信号是转子角位置的正余弦函数, 为获得转子角位置和速度信息, 必须对磁编码器的输出信号进行解调。目前用于磁编码器的解调方法可分为3大类, 分别为反正切方法、标定查表方法和基于锁相环的角度跟踪方法。然而, 反正切方法抗干扰能力差, 且由于反正切运算占用过多计算资源和运算中的奇点问题, 此方法通常采用查表的方式<sup>[6]</sup>。为此, 文献[7]建立了一种二维数据表, 以提高查表精度。文献[8]则利用坐标旋转数字计算方法, 来进行反正切运算。标定查表方法一般通过高精度传感器的标定, 把磁编码器输出信号对应的角度值存储起来, 在电机运行过程中通过查表方式获得角度值<sup>[9-10]</sup>。基于锁相环的角度跟踪方法<sup>[11-13]</sup>, 通过闭环控制回路使角度估计值跟踪真实值。文献[14]将锁相环结构改进成观测器的形式,

基金项目: 国家自然科学基金项目(60775051, 10772011)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60775051, 10772011).

对角度进行估计。传统的锁相环方法具有滤波作用，提高了抗干扰能力，但在系统存在扰动和信号频率快速变化时仍存在一定的估计误差。

综上所述，目前用于磁编码器的解调方法或精度低、抗干扰能力差，或适用性不强。为提高磁编码器信号的解调精度，必须研究新型的解调算法。本文针对正余弦信号输出的磁编码器，设计了一种基于状态观测器的信号解调算法，该方法利用状态观测的方式能同时估计出电机的角位置和速度信息，对模型不确定性及干扰具有较强的适应性。

### 1 磁编码器结构和工作原理

磁编码器主要由永磁磁鼓、磁敏感元件和信号处理电路组成。多极充磁的磁鼓随伺服电机转轴同步旋转，在周围空间产生正弦周期分布的磁场，磁敏感元件感知磁场强度变化后，输出包含角度信息的电压信号。以单极式磁编码器为例，其结构如图 1 所示，其中 A 和 B 为 2 个空间上正交放置的磁敏感元件，安装方向与磁鼓表面垂直。

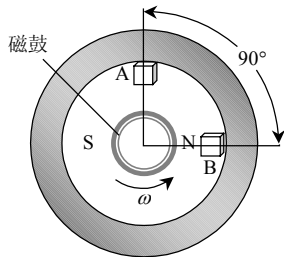


图 1 单对磁极编码器基本结构

Fig. 1 Basic structure of single pair-pole magnetic encoder

磁敏感元件输出的模拟电压  $u_a$  和  $u_b$  的形式分别为角位置的正弦与余弦函数，可以表示为

$$\begin{cases} u_a = \sin p\theta + n_a \\ u_b = \cos p\theta + n_b \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\theta$  为转轴旋转角度； $p$  为磁鼓的磁极对数； $n_a$ 、 $n_b$  为测量噪声。理想信号的输出波形如图 2 所示。

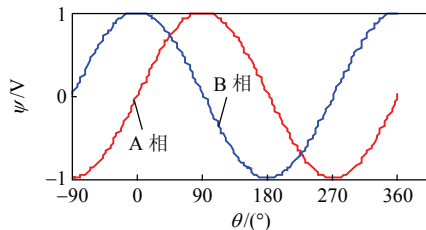


图 2 磁编码器输出信号形式

Fig. 2 Outputs of magnetic encoder

## 2 常规解调方法原理

### 2.1 反正切方法

为提取伺服电机转子位置信息，可采用反正切

法，对磁编码器两路信号相除后直接求反正切。即

$$\theta = \frac{1}{p} \arctan \frac{u_a}{u_b} \quad (2)$$

得到角度信息后，再经差分运算得到各采样时刻的速度值：

$$\omega_j = \frac{\theta_j - \theta_{j-1}}{T_s} \quad (3)$$

式中： $T_s$  为采样周期； $\theta_j$ 、 $\omega_j$  分别为  $t=jT_s$  ( $j=1,2,\dots$ ) 时刻的角度值和角速度值。如果  $u_a$  和  $u_b$  能精确地表示位置信号的正余弦信息，则用此方法可以精确地解算出角度  $\theta$ 。但是，霍尔传感器输出的模拟信号一般包括噪声和高次谐波，此方法精度将受很大影响。同时，通过对角度信息差分运算求取角速度时，误差将被进一步放大。采用滤波的手段虽然可以减小噪声，但同时会引入相位滞后。

### 2.2 标定查表方法

标定查表方法是用高精度轴角传感器对磁编码器输出的电压信号与电机旋转角度进行标定，并把角度数据存储在可擦除可编程存储器中。工作过程中，根据磁编码器输出两相电压信号，分区间查表即可得到电机旋转的角度值。

### 2.3 锁相环方法

基于锁相环的角度跟踪方法原理如图 3 所示。其中， $e = (\sin p\theta \cos p\hat{\theta} - \cos p\theta \sin p\hat{\theta}) / p$ ， $\hat{\theta}$  和  $\hat{\omega}$  是电机转子位置和速度估计值。误差  $e$  经低通滤波器和压控振荡器后输出角度估计值。

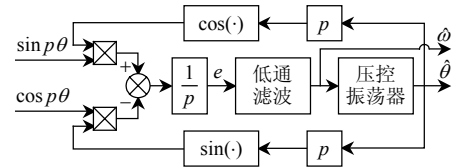


图 3 锁相环角度跟踪方法原理

Fig. 3 Principle of phase-locked loop angle tracking method

在伺服电机转速恒定或慢变时，锁相环方法解调效果较好，而电机转速快速变化时误差较大。

## 3 基于二阶状态观测器的信号解调算法

当伺服电机恒速运转时，转子角位置  $\theta$  及角速度  $\omega$  之间的关系可表示为

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega \\ \dot{\omega} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

以式(4)为状态方程，式(1)为量测方程，可以设计状态观测器对伺服电机转子角位置及角速度进行观测。观测器的基本形式为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}} = \hat{\omega} + \frac{k_{\theta}}{p} \sin p\theta_e \\ \dot{\hat{\omega}} = \frac{k_{\omega}}{p} \sin p\theta_e \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\theta_e = \theta - \hat{\theta}$ ;  $k_{\theta}$ 、 $k_{\omega}$  均为大于零的观测器增益。状态观测器的结构框图如图4所示。

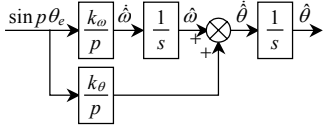


图4 二阶状态观测器结构框图

Fig. 4 Block diagram of second-order state observer

设  $\omega_e = \omega - \hat{\omega}$ , 由式(4)、(5)可得

$$\begin{cases} \dot{\theta}_e = \omega_e - \frac{k_{\theta}}{p} \sin p\theta_e \\ \dot{\omega}_e = -\frac{k_{\omega}}{p} \sin p\theta_e \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)在坐标原点处一次近似, 可得线性化后系统的雅可比系数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -k_{\theta} & 1 \\ -k_{\omega} & 0 \end{bmatrix}$$

矩阵  $A$  的特征方程为

$$\lambda^2 + k_{\theta}\lambda + k_{\omega} = 0 \quad (7)$$

由于  $k_{\theta}$  和  $k_{\omega}$  均大于零, 显然  $A$  的特征值均具有负实部。根据李亚普诺夫第一方法, 误差方程(6)的零解是渐近稳定的, 即二阶状态观测器(5)的输出可以零误差逼近真值。

根据平稳性和快速性的要求, 选取特征方程(7)的两个特征根为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ , 则可确定观器增益系数为  $k_{\theta} = -\lambda_1 - \lambda_2$ ,  $k_{\omega} = \lambda_1\lambda_2$ 。

为便于计算机实现, 以  $T_s$  为采样周期, 可将式(5)离散化为

$$\begin{cases} \hat{\theta}_j = \hat{\theta}_{j-1} + T_s(\hat{\omega}_{j-1} + \frac{k_{\theta}}{p} \sin p\theta_{ej}) \\ \hat{\omega}_j = \hat{\omega}_{j-1} + T_s \frac{k_{\omega}}{p} \sin p\theta_{ej} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\theta_{ej} = \theta_j - \hat{\theta}_j$ ;  $\hat{\theta}_j$ 、 $\hat{\omega}_j$  为  $t = jT_s$  时刻的角度和角速度估计值。

#### 4 基于三阶状态观测器的信号解调算法

当伺服电机非匀速运转, 即  $\hat{\omega} \neq 0$  时, 二阶状态观测器将存在原理性误差而不能准确跟踪真值。为此, 需要对二阶状态观测器进行改进。

当伺服电机匀加速运转时, 加速度为常数, 转

子角位置  $\theta$ 、角速度  $\omega$  和角加速度  $\alpha$  之间的关系可表示为

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega \\ \dot{\omega} = \alpha \\ \dot{\alpha} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

以式(9)为状态方程, 以式(1)为量测方程可以设计三阶状态观测器。观测器的基本形式为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}} = \hat{\omega} + \frac{k'_{\theta}}{p} \sin p\theta_e \\ \dot{\hat{\omega}} = \hat{\alpha} + \frac{k'_{\omega}}{p} \sin p\theta_e \\ \dot{\hat{\alpha}} = \frac{k'_{\alpha}}{p} \sin p\theta_e \end{cases} \quad (10)$$

式中  $k'_{\theta}$ 、 $k'_{\omega}$  和  $k'_{\alpha}$  均为大于零的观测器增益系数, 且满足  $k'_{\theta}k'_{\omega} > k'_{\alpha}$ 。三阶状态观测器的结构如图5所示。

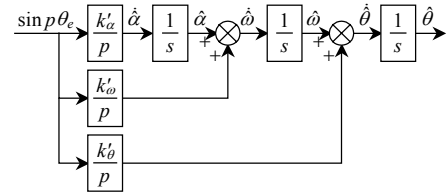


图5 三阶状态观测器结构框图

Fig. 5 Block diagram of third-order state observer

仿照二阶状态观测器的分析, 设  $\alpha_e = \alpha - \hat{\alpha}$ , 由式(9)、(10)可得

$$\begin{cases} \dot{\theta}_e = \omega_e - \frac{k'_{\theta}}{p} \sin p\theta_e \\ \dot{\omega}_e = \alpha_e - \frac{k'_{\omega}}{p} \sin p\theta_e \\ \dot{\alpha}_e = -\frac{k'_{\alpha}}{p} \sin p\theta_e \end{cases} \quad (11)$$

上述方程在坐标原点处一次近似后的雅可比系数矩阵为

$$A' = \begin{bmatrix} -k'_{\theta} & 1 & 0 \\ -k'_{\omega} & 0 & 1 \\ -k'_{\alpha} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

矩阵  $A'$  的特征方程为

$$\lambda^3 + k'_{\theta}\lambda^2 + k'_{\omega}\lambda + k'_{\alpha} = 0 \quad (12)$$

由于  $k'_{\theta}$ 、 $k'_{\omega}$  和  $k'_{\alpha}$  均大于零, 且  $k'_{\theta}k'_{\omega} > k'_{\alpha}$ , 可知  $A'$  的特征值都具有负实部。根据李亚普诺夫第一方法, 误差方程(11)的零解是渐近稳定的, 即三阶状态观测器(10)能零误差地逼近真值。

根据平稳性和快速性的要求, 可先选取特征方程(12)的3个特征根, 然后按照待定系数法确定观

测器增益系数  $k'_\theta$ 、 $k'_\omega$  和  $k'_\alpha$ 。

同样，为便于计算机实现，以  $T_s$  为采样周期，可将式(10)离散化为

$$\begin{cases} \hat{\theta}_j = \hat{\theta}_{j-1} + T_s(\hat{\omega}_{j-1} + \frac{k'_\theta}{p} \sin p\theta_{ej}) \\ \hat{\omega}_j = \hat{\omega}_{j-1} + T_s(\hat{\alpha}_{j-1} + \frac{k'_\omega}{p} \sin p\theta_{ej}) \\ \hat{\alpha}_j = \hat{\alpha}_{j-1} + T_s \frac{k'_\alpha}{p} \sin p\theta_{ej} \end{cases} \quad (13)$$

式中  $\hat{\alpha}_j$  为  $t=jT_s$  时刻的加速度估计值。

### 5 实验结果及分析

为验证本文方法的有效性，采用图 6 所示的半物理仿真实验装置，对基于状态观测器的解调方法和反正切解调方法进行了对比。在此实验装置中，采用一个 TMS320F2812 作为磁编码器模拟器，模拟磁编码器产生两路正余弦信号，经信号调理和滤波后，应用另一个 TMS320F2812 对磁编码器信号进行解调。之所以采用磁编码器模拟器替代真实的磁编码器，主要是为了获取磁编码器输出信号中包含的角度和角速度真值，以便于评估各种解调方法的精度。与单纯的计算机仿真相比，由于解调方法的实现与真实的物理实验基本一致，半物理仿真实验的结果更具说服力。

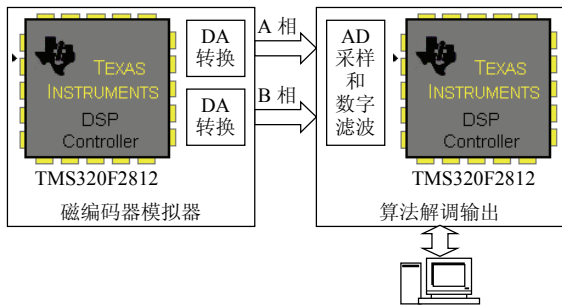


图 6 半物理仿真实验装置结构图

Fig. 6 Block diagram of semi-physical simulation experiment

在半物理仿真实验中，取采样周期  $T_s=1\text{ms}$ ，二阶观测器的增益  $k_\theta=100$ ， $k_\omega=2500$ ，三阶观测器增益为  $k'_\theta=100$ ， $k'_\omega=2500$ ， $k'_\alpha=31250$ 。当伺服电机分别以匀速、匀加速、正弦规律运转时，分别采用反正切法、基于二阶观测器的解调方法、基于三阶观测器的解调方法，可得实验结果如图 7—12 所示。

1) 当  $\omega=12.6\text{rad/s}$  时，3 种解调方法的误差曲线如图 7、8 所示，其中图 7 为角位置误差曲线，图 8 为角速度误差曲线。由图可知，二阶与三阶状

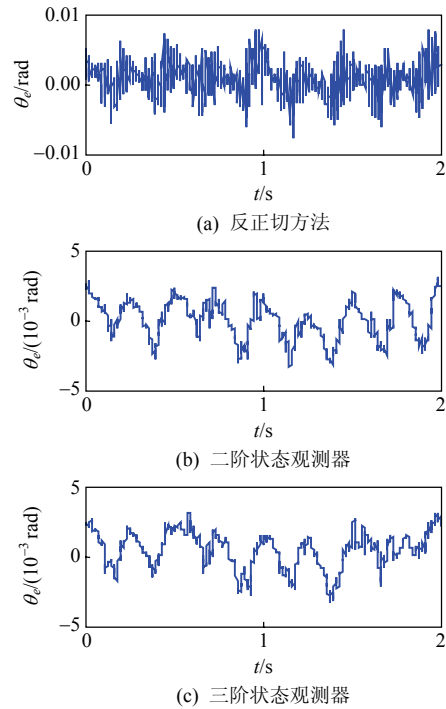


图 7 电机匀速运转时 3 种解调方法的位置误差曲线  
Fig. 7 Position error of three demodulation methods under constant speed

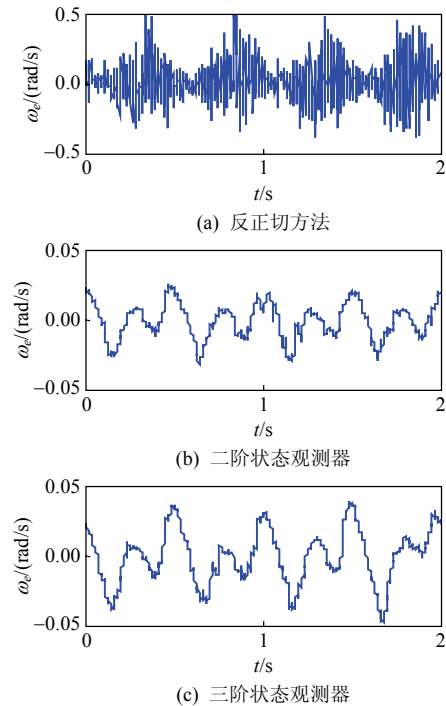


图 8 电机匀速运转时 3 种解调方法的速度误差曲线  
Fig. 8 Speed error of three demodulation methods under constant speed

态观测器误差大小基本相同，均比反正切方法解调出的角度误差小 1 倍，速度误差小一个数量级。

2) 当  $\omega=10t\text{rad/s}$  时，3 种解调方法的误差曲线如图 9、10 所示，其中图 9 为角位置误差曲线，

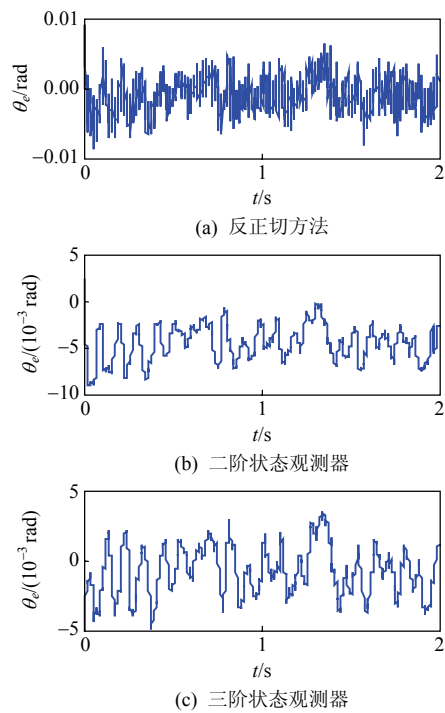


图9 电机匀加速运转时3种解调方法的位置误差曲线

Fig. 9 Position error of three demodulation methods under constant acceleration

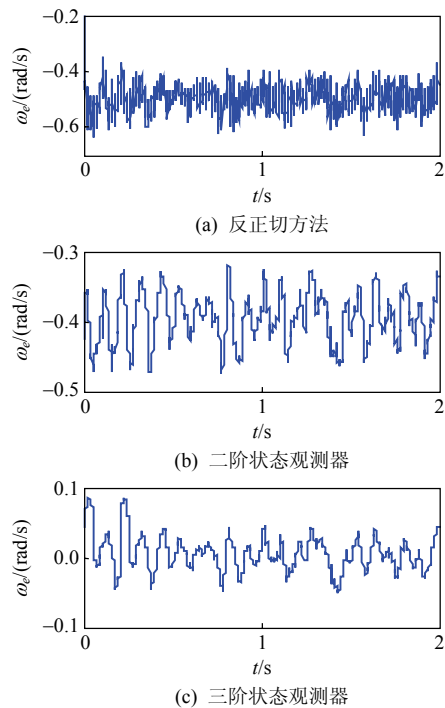


图10 电机匀加速运转时3种解调方法的速度误差曲线

Fig. 10 Speed error of three demodulation methods under constant acceleration

图10为角速度误差曲线。由图可知，与论文的理论分析相同，当电机匀加速旋转时，二阶状态观测器的解调结果存在原理性恒值偏差，而三阶状态观测器能准确解调出电机转子的角位置和角速度。

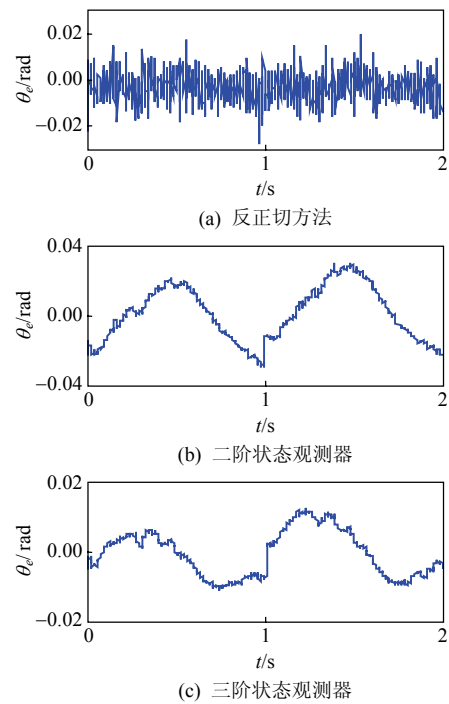


图11 电机转速按正弦规律变化时3种解调方法的位置误差曲线

Fig. 11 Position error of three demodulation methods under sine speed

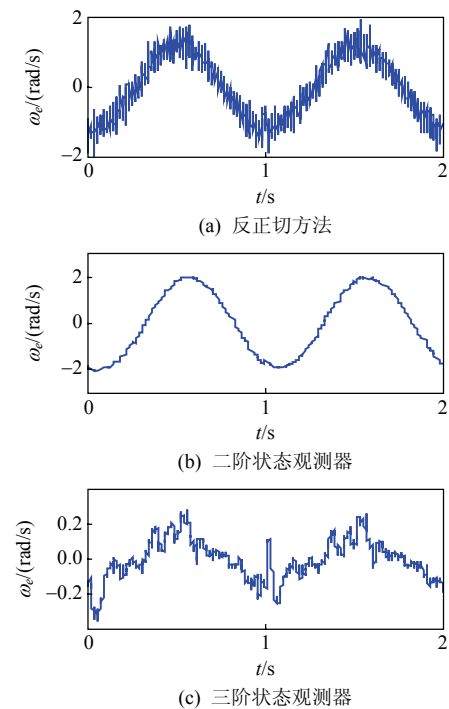


图12 电机转速按正弦规律变化时3种解调方法的速度误差曲线

Fig. 12 Speed error of three demodulation methods under sine speed

3) 当  $\omega = [12.6 + 8\sin(6.28t)] \text{ rad/s}$  时，3种解调方法的误差曲线如图11、12所示，其中图11为角位置误差曲线，图12为角速度误差曲线。由图可

知, 由于速度按正弦变化, 状态观测器都存在一定相位滞后而使得解调误差有所增大, 但解调性能仍优于反正切方法。

总结伺服电机 3 种典型工作状态下的实验结果, 基于状态观测器的解调方法因具有滤波功能, 且不需通过数值差分即可获得角速度信息, 精度优于反正切方法。同时, 由于三阶状态观测器考虑了电机转速的变化, 性能优于二阶状态观测器。

## 6 结论

本文针对输出正余弦信号的磁编码器, 设计了一种基于状态观测器的解调方法, 用于对伺服电机转子位置及速度进行检测, 得出以下结论:

1) 由于基于状态观测器的解调方法不需通过数值差分即可获得角速度信息, 避免了差分运算对噪声的放大的作用。

2) 在三阶状态观测器中, 考虑了电机的转速变化, 由于引入加速度信息, 明显减小了二阶观测器在转速变化时输出信号的相位滞后。

3) 实验结果表明, 本文所设计的基于状态观测器的磁编码器解调算法, 精度优于常规反正切算法和锁相环算法, 具有较强的抗干扰能力和实用价值。

## 参考文献

- [1] Sawada R, Tanaka H, Ohguch O, et al. Fabrication of active integrated optical micro-encoder[C]//Proceedings of IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Japan: IEEE, 1991: 233-238.
- [2] 田跃, 和文国, 李彦林. 零脉冲高分辨率磁编码器的研制[J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(3): 256-258.  
Tian Yue, He Wenguo, Li yanlin. Magnetic encoder investigation with zero pulse signal[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2000, 22(3): 256-258(in Chinese).
- [3] 王力, 杜坤梅, 胡博, 等. 基于磁编码器永磁同步电动机转速及位置的检测[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2007, 12(6): 80-82.  
Wang Li, Du Kunmei, Hu Bo, et al. Measuring velocity and rotor position of PMSM based on magnetic encoder[J]. Journal Harbin University, 2007, 12(6): 80-82(in Chinese).
- [4] 季学武, 何正义, 张雪峰. 磁旋转编码器在永磁同步电机位置测量中的应用[J]. 电气传动, 2008, 38(2): 6-8.  
Ji Xuewu, He Zhengyi, Zhang Xuefeng. Magnetic rotary encoder and its application in PMSM[J]. Electric Drive, 2008, 38(2): 6-8(in Chinese).
- [5] Tan K K, Tang K Z. Adaptive online correction and interpolation of quadrature encoder signals using radial basis functions[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 5(3): 370-377.
- [6] Sarma S, Agrawal V K, Udupa S. Software-based resolver-to-digital conversion using a DSP[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(5): 371 - 379.
- [7] Hagiwara N, Suzuki Y, Murase H. A method of improving the resolution and accuracy of rotary encoders using a code compensation technique[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1992, 41(1): 98-101.
- [8] 王爽, 李铁才, 王治国. 基于CORDIC算法的高分辨率磁编码器设计[J]. 微电机, 2009, 42(8): 1-5.  
Wang Shuang, Li Tiecai, Wang Zhiguo. Design of high resolution magnetic encoder based on CORDIC algorithm[J]. Micro Motors, 2009, 42(8): 1-5(in Chinese).
- [9] 郝双晖, 刘勇, 刘杰, 等. 基于查表原理的单对磁极编码器研制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 165-168.  
Hao Shuanghui, Liu Yong, Liu Jie, et al. Design of single pair-pole magnetic encoder based on looking-up table[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 165-168(in Chinese).
- [10] 叶平, 孙汉旭, 贾庆轩, 等. 磁编码器在直流无刷电机换相与控制中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2007(1): 37-41.  
Ye Ping, Sun Hanxu, Jia Qingxuan, et al. Application of magnetic encoder in phase commutation control of BLDCM[J]. Instrument Technique and Sensor, 2007(1): 37-41(in Chinese).
- [11] Yim C H, Ha I J, Ko M S. A resolver-to-digital conversion method for fast tracking[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1992, 39(5): 369-378(in Chinese).
- [12] 王峰, 张波, 丘东元. 交流电机的虚拟光电编码器测速技术[J]. 中国电机工程学报, 2005, 5(6): 99-103.  
Wang Feng, Zhang Bo, Qiu Dongyuan. The virtual optical encoder technique in ac motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 5(6): 99-103(in Chinese).
- [13] Van H H, Jeon J W. Signal compensation and extraction of high resolution position for sinusoidal magnetic encoders[C]//International Conference on Control, Automation and Systems. Korea: ICROS, 2007: 1368-1373.
- [14] Harnefors L, Nee H P. A general algorithm for speed and position estimation of AC motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(1): 77-83.



吴忠

收稿日期: 2010-12-08。

作者简介:

吴忠(1970), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事现代伺服控制技术、航天器控制技术等方面的教学和研究工作, wuzhong@buaa.edu.cn;

吕绪明(1985), 男, 硕士研究生, 主要从事伺服电机及控制等方面的研究工作, victory200506@163.com。

(责任编辑 王剑乔)