

文章编号 1004-924X(2010)08-1738-08

微型光电编码器在电机角速率辨识中的应用

李琳^{1,2}, 厉明^{1,2}, 艾华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 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对电机伺服控制系统利用编码器角位置信息预测角速率的需求,提出并实现了一种基于平稳卡尔曼滤波的编码器信号处理方法。首先,分析了典型电机系统的结构及测量噪声编码器的组成,在此基础上建立了电机系统和编码器的参数化数学模型,并根据电机系统和编码器模型给出了统一的参数化平稳卡尔曼滤波器设计结果。在 Matlab/Simulink 环境下完成了电机、编码器和卡尔曼滤波器的仿真模型,并利用不同参数对参数化平稳卡尔曼滤波器的普适性和滤波效果进行了预测。最后,搭建了实验平台,对仿真结论进行验证并对滤波性能进行了实测。仿真和实验结果表明:参数化滤波模型对典型电机系统具有普适性,自适应平稳卡尔曼滤波器可以利用编码器信号实现角速率的最优估计,误差标准差为 $0.021 (^{\circ})/s$,最大误差可以控制在 $0.06 (^{\circ})/s$ 之内,能够满足一般电机伺服系统对角速率精度的要求。

关键词:平稳卡尔曼滤波;编码器;电机;角速率;Matlab/Simulink

中图分类号:TP212.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101808.1738

Application of miniature optical encoders to angular rate identification of motors

LI Lin^{1,2}, LI Ming^{1,2}, AI Hua¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A signal processing method for encoders based on stationary Kalman filter technology is implemented to satisfy the requirements of angular rate prediction of a servo control system. Firstly, the typical structure of a motor system and the composition of an optical encoder for measuring noises are analyzed, and the parametric mathematical model of the motor system and optical encoder is built for stationary Kalman filter design. Then, the uniform parametric design results of stationary Kalman filter are presented by using the model. Under the Matlab/Simulink environment, the simulation model of the motor system, optical encoder and Kalman filter is completed and the universality and filtering effect of parametric stationary Kalman filter are predicted by different parameters. Finally, an experimental platform is built to verify the simulation conclusion, and the filtering performance is measured. The simulation and experiment results show that the parametric stationary Kalman filter is universal-

收稿日期:2009-07-31;修订日期:2009-11-09.

基金项目:吉林省科技厅自然科学基金资助项目(No. 20030534)

izable for motor systems and the adaptive stationary Kalman filter can estimate the angular-rates by using optical encoders. Obtained data indicate that the standard deviation is 0.021 (°)/s and the maximum error can be controlled under 0.06 (°)/s, which can satisfy the requirements of motor control systems for the angular-rate precision.

Key words: stationary Kalman filter; optical encoder; motor; angular rate; Matlab/Simulink

1 引 言

编码器作为典型的角位置测量元件,具有精度高、抗干扰能力强等一系列优点,目前已经广泛应用于电机伺服控制领域^[1],如应用编码器直接测量的角位置信息进行角速率辨识等。传统的角速率获取方法多采用差分计算,如 M 法、T 法和 M/T 法,但差分获取角速率因其对噪声的放大作用不能满足实际应用需求,典型的后处理方法是利用低通 FIR 数字滤波器抑制高频噪声的影响来提高角速率的精度。不过随着 FIR 滤波器阶次的提高,其造成的延迟将随之增大,虽然可以继续增加后续的多项式拟合预测来减小延迟,但同时也会加大处理器的运算量造成额外的计算延迟^[2],而且该方法在速度拐点很难达到较高的预测精度。

卡尔曼滤波器可以用来提高编码器码盘的使用性能^[3-5],标准卡尔曼滤波和扩展卡尔曼滤波都是按照时间更新和测量更新的顺序循环计算来实现对系统状态的最优估计的,但由于循环过程中要进行矩阵逆运算和滤波增益更新^[6-8],计算量往往很大,而且由于数字计算机有限字长的舍入误差等因素的影响,可能会造成系统不稳定^[9]。本文提出并实现了一种基于平稳卡尔曼滤波的编码器信号处理方法,该方法忽略卡尔曼滤波增益更新的动态过程,认为系统可以很快地进入稳态,直接用平稳卡尔曼滤波增益计算,以保证系统的稳定性并减小计算量。

2 电机和编码器模型

应用编码器作为传感器的电机伺服控制系统一般具有如图 1 所示的典型结构框图。

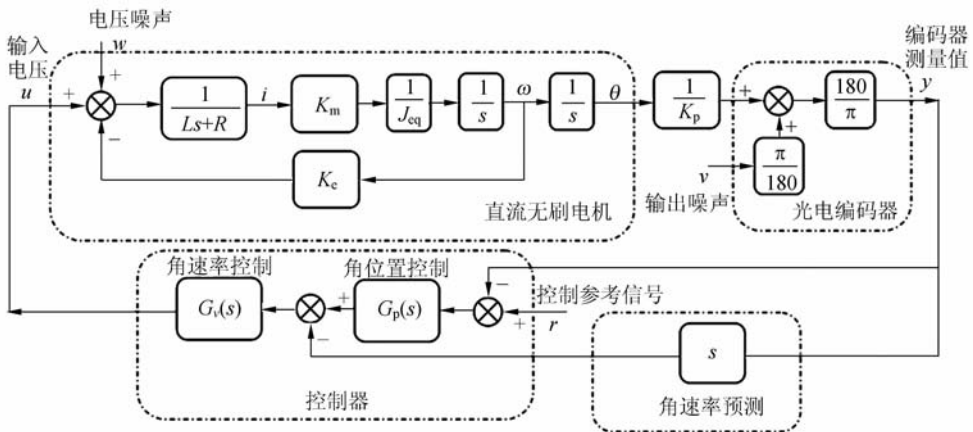


图 1 电机伺服控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of DC motor control system

图中 i 为电机驱动电流; L 为电机电感; K_e 为反电动势常数; ω 为电机转动角速率; R 为电机电阻; K_p 为机械传动机构减速比; θ 为电机转动角位置; K_m 为电机力矩常数; J_{eq} 为电机等效转动

惯量,包括电机转子、机械传动机构及负载在电机输出轴的等效转动惯量的叠加; v 为角位置测量过程中的输出噪声,包括编码器的测量噪声,以及机构传动机构间隙等因素引起的附加噪声。

输出噪声 v 不但会影响角位置的测量精度,也会影响差分法获得的角速率的精度 $\delta^{[10-12]}$:

$$\delta = \frac{\Delta y}{\Delta t} - \frac{180}{\pi} \frac{\omega}{K_p} = \frac{180}{\pi} \frac{\Delta(\theta/K_p + v)}{\Delta t} - \frac{180}{\pi} \frac{\omega}{K_p} = \frac{180}{\pi} \frac{\Delta v}{T}$$

其中 T 为系统采样周期,随着系统采样频率的提高, T 将减小, δ 将增大。输入电压噪声 w 同样会引起电机角位置 θ 的波动而偏离期望值,并耦合到编码器的测量值中。传统的 FIR 滤波器并不能区分输出噪声和输入电压噪声,只是将角速率中的高频分量剔除。卡尔曼滤波则可以根据输出噪声和输入电压噪声的不同统计特性分别对其抑制,而且能够进行滤波增益更新,具有自适应性。

作为卡尔曼滤波器设计的基础,这里建立了电机和编码器的状态空间方程,为了保证方法的普遍适应性,直接用电机和编码器的特征参数进行参数化建模。对如图 1 所示的系统,选取 $x = [i, \omega, \theta]$, 系统的参数化连续状态空间模型为:

$$\dot{x} = A_c x + B_c u + G_c w, \quad (1)$$

$$y_v = C_c x + v, \quad (2)$$

其中:

$$A_c = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_e}{L} & 0 \\ \frac{K_m}{J_{eq}} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B_c = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad G_c = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{180}{\pi} \frac{1}{K_p} \end{bmatrix}$$

系统特性可以用 L, R, K_m, K_e, J_{eq} 和 K_p 描述, w 和 v 一般满足高斯白噪声条件,其统计特性与工作环境有关,实际应用常通过实验法测量其方差 W 和 V 。为了得到适应离散处理器执行的卡尔曼滤波器,可以直接采用离散设计法,由此需要对式(1)、(2)离散化以获得系统的离散状态空间方程。假定系统采样周期为 T ,采用零阶保持法,式(1)、(2)描述的系统所对应的离散模型为:

$$x[n+1] = A_d x[n] + B_d u[n] + G_d w[n], \quad (3)$$

$$y_v[n] = C_d x[n] + v[n], \quad (4)$$

其中:

$$A_d = e^{A_c T} = I + A_c T \Psi$$

$$B_d = \left(\int_0^T e^{A_c \gamma} d\gamma \right) B_c = \Psi T B_c$$

$$G_d = \left(\int_0^T e^{A_c \gamma} d\gamma \right) G_c = \Psi T G_c$$

$$C_d = C_c$$

$$\Psi = I + \frac{A_c T}{2!} + \frac{A_c^2 T^2}{3!} + \dots$$

$$\eta = (n+1)T - \tau$$

3 平稳卡尔曼滤波

平稳卡尔曼滤波器可以在 $n \rightarrow \infty$ 条件下求解离散 Riccati 方程获得^[13]:

$$A_d^T P A_d - G_d^T P G_d - A_d^T P C_d (C_d^T P C_d + V)^{-1} C_d^T P A_d + W = 0, \quad (5)$$

$P = \lim_{n \rightarrow \infty} P[n]$ 为平稳误差协方差矩阵。为了获得当前时刻和下一时刻系统状态的最优估计值,可以将平稳卡尔曼滤波增益分为两部分:状态更新增益矩阵 K_{n+1} 和状态修正增益矩阵 K_n :

$$K_{n+1} = A_d P C_d^T (C_d P C_d^T + V)^{-1}, \quad (6)$$

$$K_n = P C_d^T (C_d P C_d^T + V)^{-1}, \quad (7)$$

平稳卡尔曼滤波模型为:

$$\hat{x}[n+1|n] = A_d \hat{x}[n|n-1] + B_d u[n] + K_{n+1} (y_v[n] - C_d \hat{x}[n|n-1]), \quad (8)$$

$$\hat{x}[n|n] = \hat{x}[n|n-1] + K_n (y_v[n] - C_d \hat{x}[n|n-1]), \quad (9)$$

$$\hat{y}[n|n] = C_d \hat{x}[n|n], \quad (10)$$

其中式(8)为状态更新方程,完成下一时刻系统状态 $\hat{x}[n+1|n]$ 的一步预测,式(9)为状态修正方程,利用传感器测量值完成当前系统状态 $\hat{x}[n|n]$ 的估计,式(10)为输出修正方程,利用当前系统状态完成当前系统输出 $\hat{y}[n|n]$ 的估计。

为了方便系统的实现,可以将平稳卡尔曼滤波模型式(8)~(10)转化为状态空间方程的形式。选取原系统输入 $u[n]$ 和传感器测量值 $y_v[n]$ 作为平稳卡尔曼滤波系统输入 $u_k[n]$, 将当前系统输出估计值 $\hat{y}[n|n]$ 和当前系统状态估计值 $\hat{x}[n|n]$ 作为平稳卡尔曼滤波系统输出 $y_k[n]$, 平稳卡尔曼滤波系统的状态向量 $x_k[n]$ 与原系统一致,平稳卡尔曼滤波系统的状态空间模型为:

$$x_k[n+1] = A_k x_k[n] + B_k u_k[n], \quad (11)$$

$$y_k[n] = C_k x_k[n] + D_k u_k[n], \quad (12)$$

其中:

$$A_k = A_d - K_{n+1} C_d$$

$$B_k = [B_d, K_{n+1}]$$

$$C_k = \begin{bmatrix} C_d (I - K_n C_d) \\ I - K_n C_d \end{bmatrix}$$

$$D_k = \begin{bmatrix} 0, C_d K_n \\ 0, K_n \end{bmatrix}$$

对于给定的用 $L, R, K_m, K_e, J_{eq}, K_p$ 及 W, V 等参数描述的系统,利用式(1)~(4), (5)~(7), (11)~(12)可以获得其对应的平稳卡尔曼滤波器,并且具有统一的状态空间形式,易于系统实现。

4 仿真分析

平稳卡尔曼滤波仿真原理框图如图 2 所示,将不考虑 ω 和 v 时的编码器输出作为真值,通过比较卡尔曼滤波估计值 θ_e, ω_e 和理论真值 θ_i, ω_i 来评价平稳卡尔曼滤波性能。

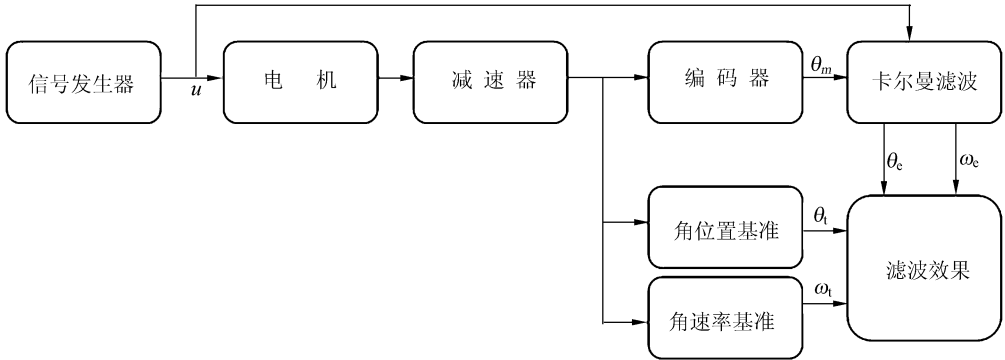


图 2 平稳卡尔曼滤波仿真原理框图

Fig. 2 Block diagram of Kalman filter simulation

图中, u 为电机输入驱动电压, θ_m 为编码器角位置测量值, θ_i 为角位置基准传感器测量值, ω_i 为角速率基准传感器测量值, θ_e 为卡尔曼滤波角位置估计值, ω_e 为卡尔曼滤波角速率估计值。

在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真系统,利用 C 语言 S-Function 完成电机模型,编码器模型和平稳卡尔曼滤波模型,利用 white noise 模块实现编码器高斯白噪声的模拟。Simu-

link 仿真框图如图 3 所示,其中电机及减速器模型利用封装子系统技术提取 $L, R, K_m, K_e, J_{eq}, K_p$ 及 W, T 作为可设置参数;编码器提取 V 作为可设置参数;平稳卡尔曼滤波器可以根据所设置的系统参数,利用式(5)~(7)自动调整平稳卡尔曼滤波参数;平稳卡尔曼滤波性能评估在每次仿真结束所调用的 StopFcn 函数中完成。

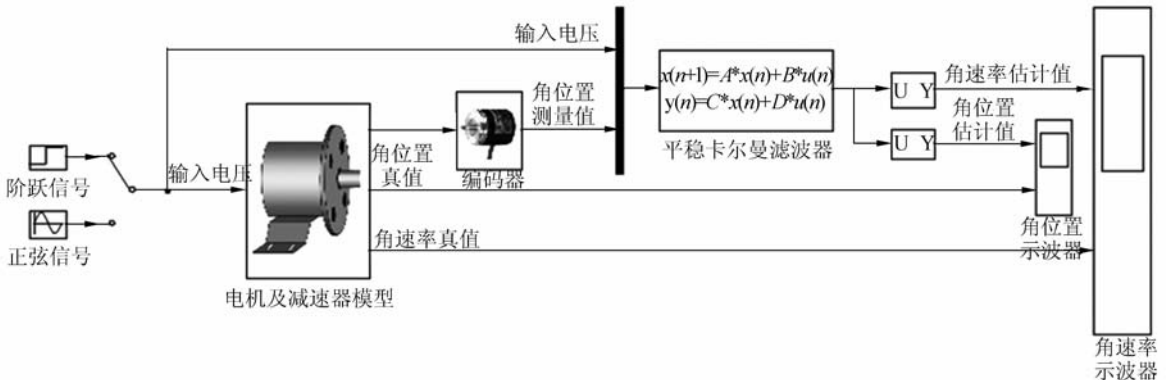


图 3 平稳卡尔曼滤波 simulink 仿真框图

Fig. 3 Simulink diagram of Kalman filter

预测平稳卡尔曼滤波效果在常值和正弦两种典型电压输入情况下进行,为了便于比较,给出了

采用 30 阶 Hamming 窗 FIR 滤波器进行后处理的差分法角速率结果。为了验证方法的适用性,

采用不同的系统参数进行仿真,仿真结果以表格的形式给出以便对比。如表 1 所示, P_{\max} 表示平稳误差协方差矩阵元素中的最大值, σ_{diff} 表示差分法角速率误差标准差(对 FIR 滤波器引起的延迟进行了补偿), σ_{Kalman} 表示平稳卡尔曼滤波角速率

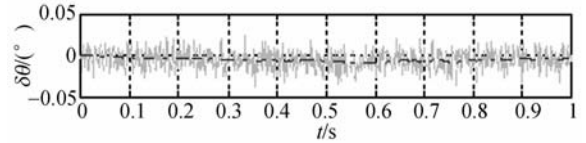
误差标准差。这里只给出与实验电机系统和编码器参数一致(对应于表 1, No. 1)的仿真曲线以便与下面的实验结果比较,其中阶跃信号和正弦信号的平稳卡尔曼滤波仿真曲线分别如图 4、图 5 所示。

表 1 平稳卡尔曼滤波仿真结果

Tab.1 Results of Kalman filter simulation

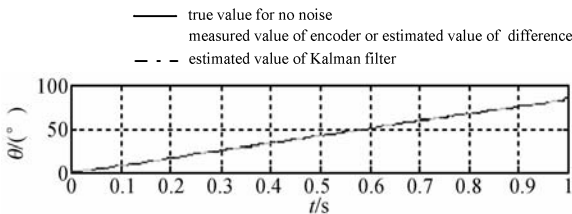
No	1	2	3	4	5	
L/mH	0.31	0.36	0.22	0.28	0.18	
R/Ω	3.65	7.28	4.27	1.61	0.97	
$K_m(\text{N} \cdot \text{m}/\text{amp})$	0.024 3	0.006 2	0.006 6	0.007 6	0.007 9	
$K_e(\text{V}/(\text{kr}/\text{min}))$	2.544 7	0.65	0.68	0.81	0.83	
$J_{\text{eq}}/\text{kg} \cdot \text{mm}^2$	1.279 4	1.353	1.494	0.212	0.82	
$K_p(1)$	139.5	145	120	85	98	
$W^{1/2}/\text{V}$	0.013 2	0.001	0.002	0.005	0.001	
$V^{1/2}/(^{\circ})$	0.010 7	0.02	0.03	0.03	0.012	
T/ms	1	1	1	1	1	
P_{\max}	0.027 6	$7.2\text{e} \times 10^{-5}$	$4.5\text{e} \times 10^{-4}$	0.0529	$9.3\text{e} \times 10^{-4}$	
$\sigma_{\text{diff}}/((^{\circ})/\text{s})$	step	0.849 6	1.050 8	1.588 1	4.383 9	2.056 0
	sine	2.009 4	1.077 8	1.748 0	10.735 9	7.607 2
$\sigma_{\text{Kalman}}/((^{\circ})/\text{s})$	step	0.003 8	0.000 48	0.001 4	0.004 9	0.000 48
	sine	0.003 9	0.000 52	0.001 3	0.005 0	0.000 47

图 4、图 5 中 $\theta, \omega, \delta\theta$ 和 $\delta\omega$ 分别表示角位置, 角速率, 角位置误差和角速率误差。仿真结果表明: 平稳卡尔曼滤波器对编码器噪声和电压噪声都有良好的抑制作用, 角速率精度比差分法有显著提高; 参数化模型对不同系统具有普遍适用性,



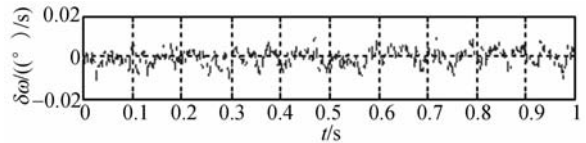
(c) 电机减速器输出轴角位置误差曲线

(c) Curves of angle position errors from decelerator in motor



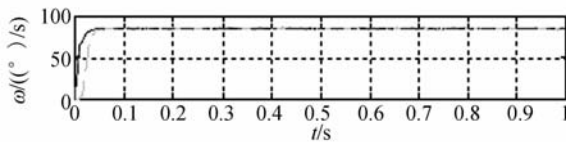
(a) 电机减速器输出轴角位置曲线

(a) Curves of angle positions from decelerator in motor



(d) 电机减速器输出轴角速率误差曲线

(d) Curve of angle rate error from decelerator in motor

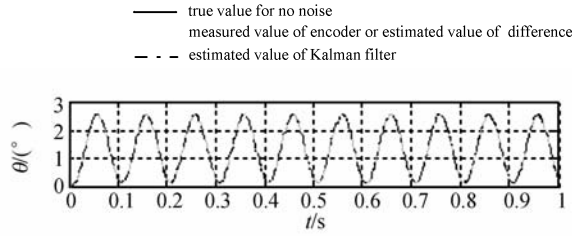


(b) 电机减速器输出轴角速率曲线

(b) Curves of angle rates from decelerator in motor

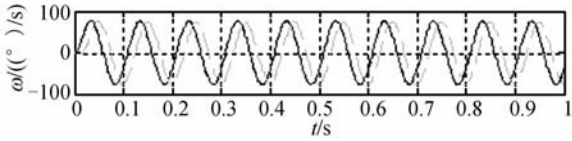
图 4 阶跃信号平稳卡尔曼滤波 simulink 仿真曲线
Fig.4 Curves of Kalman filter simulation for step signals

误差标准差可以控制在 $0.005^{\circ}/\text{s}$ 之内。平稳卡尔曼滤波可以避免 FIR 滤波过程中引起的延迟, 不会产生周期性正弦误差。



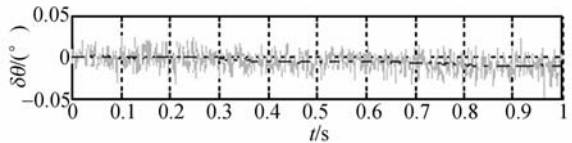
(a)电机减速器输出轴角位置曲线

(a)Curves of angle positions from decelerator in motor



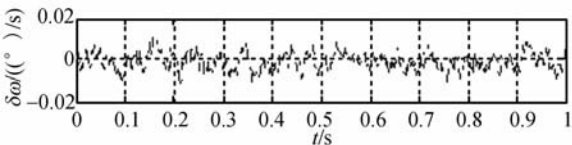
(b)电机减速器输出轴角速率曲线

(b)Curves of angle rates from decelerator in motor



(c)电机减速器输出轴角位置误差曲线

(c)Curves of angle position errors from decelerator in motor



(d)电机减速器输出轴角速率误差曲线

(d)Curve of angle rate error from decelerator in motor

图 5 正弦信号平稳卡尔曼滤波 simulink 仿真曲线

Fig. 5 Curves of Kalman filter simulation for sine signals

5 实验验证

平稳卡尔曼滤波实验测试系统如图 6 所示,实验采用了瑞士 MAXON 电机,自研 16 位距离码准绝对式编码器,齿轮丝杠减速器,具体参数见表 1. No. 1. 平稳卡尔曼滤波算法在 DSP 处理器 TMS320F2812 上实现, MEMS 单轴速率陀螺提供角速率基准,实验曲线如图 7 所示. 实验结果表明:平稳卡尔曼滤波器可以对角速率信号进行有效预测,误差标准差为 $0.021^{\circ}/s$,最大误差可以控制在 $0.06^{\circ}/s$ 之内.

实验结果有效地验证了仿真结论的正确性.

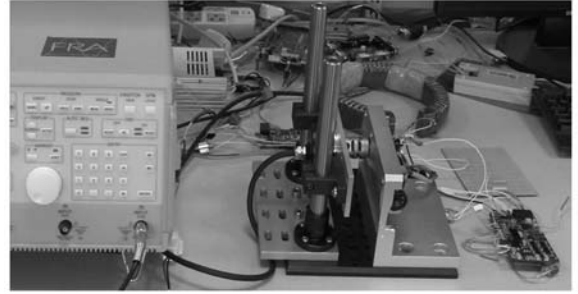
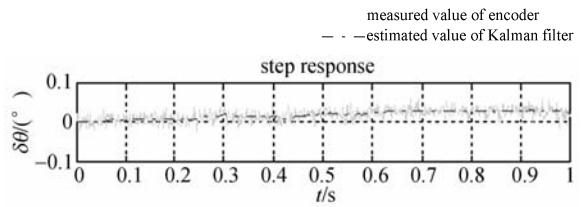


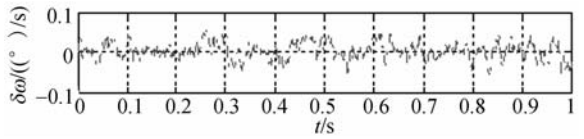
图 6 平稳卡尔曼滤波实验实物图

Fig. 6 Photo of Kalman filter experiment



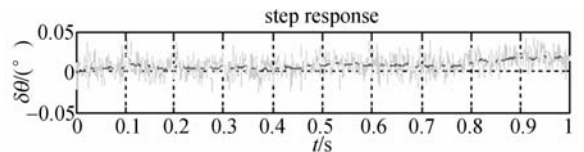
(a)阶跃信号电机减速器输出轴角位置误差曲线

(a)Curves of angle position errors from decelerator in motor(step signals)



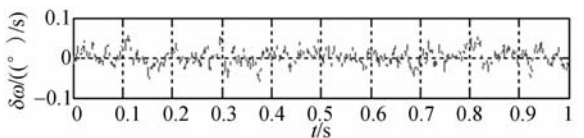
(b)阶跃信号电机减速器输出轴角速率误差曲线

(b)Curve of angle rate error from decelerator in motor (step signal)



(c)正弦信号电机减速器输出轴角位置误差曲线

(c)Curves of angle position errors from decelerator in motor(sine signals)



(d)正弦信号电机减速器输出轴角速率误差曲线

(d)Curve of angle rate error from decelerator in motor (sine signal)

图 7 平稳卡尔曼滤波实验曲线

Fig. 7 Curves of Kalman filter experiment

与仿真相比,实验中平稳卡尔曼滤波的性能有所下降,这主要是因为电机系统性能受环境参数影响,有时还包含一些非线性环节,如间隙、摩擦等,应用系统参数辨识技术建立的系统模型也会与实际系统存在一定差异,同时还有噪声特性描述不准确的影响。应用最优化技术的卡尔曼滤波,对噪声 W 和 V 具有较强的自适应性,但对模型参数较为敏感,为了减小建模误差的影响,可以引入人为噪声,使用于设计卡尔曼滤波器的 W 和 V 略大于真实值。

6 结 论

本文针对电机伺服控制系统利用编码器角位

置信息预测角速率的需求,提出并实现了一种基于平稳卡尔曼滤波的编码器信号处理方法。首先建立了电机系统和编码器的参数化数学模型,在此基础上给出了采用状态空间方程描述的平稳卡尔曼滤波器设计结果;然后在 Matlab/Simulink 环境下利用不同参数对参数化平稳卡尔曼滤波器的普适性和滤波效果进行了预测;最后利用搭建的实验平台对仿真结论进行了验证并对滤波性能进行了实测。仿真和实验结果表明:参数化滤波模型对典型电机系统具有普适性,自适应平稳卡尔曼滤波器可以利用编码器信号实现角速率的最优估计,误差标准差为 $0.021 (^{\circ})/s$,最大误差可以控制在 $0.06 (^{\circ})/s$ 之内,能够满足一般电机伺服控制系统对角速率精度的要求。

参考文献:

- [1] 董莉莉,熊经武,万秋华. 光电轴角编码器的发展动态[J]. 光学精密工程, 2000,8(2):198-202.
DONG L L, XIONG J W, WAN Q H. Development of photoelectric rotary encoders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(2):198-202. (in Chinese)
- [2] OVASKA S J. Improving the velocity sensing resolution of pulse encoders by FIR prediction [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1991,40(3):657-658.
- [3] YANG Y G, REES N, CHUTER T. Reduction of encoder measurement errors in UKIRT telescope control system using a kalman filter [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002,10(1):149-157.
- [4] KWEON T J, HYUN D S. High-performance speed control of electric machine using low-precision shaft encoder [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1999,14(5):838-849.
- [5] 郑泽东,李永东, Maurice Fadel, 等. 基于扩展 Kalman 滤波器的 PMSM 高性能控制系统[J]. 电工技术学报, 2007,22(10):18-23.
ZHENG Z D, LI Y D, FADEL M, et al.. High performance PMSM control system based on extended kalman filter [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007,22(10):18-23. (in Chinese)
- [6] KAIMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems [J]. *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering*, 1960,82:35-45.
- [7] KAIMAN R E, BUCY R S. New results in linear filtering and prediction theory [J]. *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering*, 1961,83:95-108.
- [8] ZARCHAN P, MUSOFF H. *Fundamentals of Kalman Filtering : A Practical Approach (second edition)* [M]. Virginia : American Institute of Aeronautics and Astronautics Press, 2005.
- [9] GREWAL M S, ANDREWS A P. *Kalman Filtering : Theory and Practice Using MATLAB (second edition)* [M]. New York : John Wiley & Sons Press, 2001.
- [10] 黄宗升,秦石乔,王省书,等. 光栅角编码器误差分析及用激光陀螺标校的研究[J]. 仪器仪表学报, 2007,28(10):1866-1869.
HUANG Z SH, QIN SH Q, WANG X SH, et

- al.. Error analysis of optical angular encoder and its calibration with ring laser gyro[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(10): 1866-1869. (in Chinese)
- [11] 熊文卓,孔智勇,张炜. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1745-1748.
- XIONG W ZH, KONG ZH Y, ZHANG W. Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1745-1748. (in Chinese)
- [12] 洪喜,续志军,杨宁. 基于径向基函数网络的光电编码器误差补偿法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(4): 598-604.
- HONG X, XU ZH J, YANG N. Error compensation of optical encoder based on RBF network[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 598-604. (in Chinese)
- [13] FRANKLIN G F, POWELL J D, WORKMAN M L. *Digital Control of Dynamic Systems (Second Edition)* [M]. California: Addison-Wesley Press, 1998.

作者简介:



李琳(1981—),女,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2004年于浙江大学获得学士学位,主要从事编码器设计和应用的研究。E-mail: lucine@163.com



厉明(1982—),男,山东日照人,博士研究生,2005年于山东大学获得学士学位,主要从事计算机仿真和电子技术应用的研究。E-mail: liming301128@163.com

通讯作者:



艾华(1961—),男,河北乐亭人,研究员,1984年于长春光机学院获得学士学位,主要从事微纳量位移测量和半导体激光器在光学仪器中应用的研究。E-mail: aih@ciomp.ac.cn