

永磁同步电机的参数及状态估计*

高波 沈靖 王炎

(机器人研究所)

摘 要 永磁同步电机的参数及状态估计是提高控制性能的基础。扩展卡尔曼滤波器是永磁同步电机参数和状态估计的一种有效方法;本文给出了滤波器的设计方法、工作原理及实现;仿真结果表明该方法具有良好的参数估计和辨识能力,能够逼近电机的实际状态。

关键词 扩展卡尔曼滤波器; 永磁同步电机; 参数及状态估计

分类号 TM301.2

永磁同步电机(PMSM)具有非线性模型,其状态估计是个必须解决的问题。另外,对PMSM的控制往往用到电机轴系变换,这就需要有对转子角位移的准确量测,为减小量测噪声,应采取实时在线滤波估计算法;伺服系统运行中,负载的变化不仅使负载转矩 T_L 发生变化,而且使系统转动惯量 J 、粘滞摩擦系数 D 发生变动,这些量均影响电机的控制性能,又因它们不易直接测量,故需进行在线估计,以便实现自适应控制。扩展卡尔曼滤波器(EKF)是卡尔曼滤波器的推广,故又称推广的卡尔曼滤波器,它可以用于非线性系统的状态和参数估计。本文介绍了把EKF用于PMSM的参数和状态估计的方法,并做了计算机仿真。

1 PMSM的状态空间描述

经Park变换,并采用矢量定向控制,即控制 $i_d=0$,可得PMSM基于转子参考坐标 d, q 轴系的数学模型为:

$$v_d = Ri_d + p\lambda_d - \omega\lambda_q = Ri_d + p(L_d i_d + \lambda_f) - \omega L_q i_q = p\lambda_f - \omega L_q i_q \quad (1)$$

$$v_q = Ri_q + p\lambda_q + \omega\lambda_d = Ri_q + pL_q i_q + \omega(L_d i_d + \lambda_f) = Ri_q + pL_q i_q + \omega\lambda_f \quad (2)$$

$$T_e = \frac{2}{3} n_p [\lambda_f - (L_q - L_d) i_d] i_q = \frac{2}{3} n_p \lambda_f i_q = k i_q \quad (3)$$

$$\frac{J}{n_p} p\omega = T_e - T_L - \frac{D}{n_p} \omega = k i_q - T_L - \frac{D}{n_p} \omega \quad (4)$$

$$p\theta = \omega \quad (5)$$

其中: p —微分算子

为实现数字滤波估计,把式(4)和(5)离散化,得下列差分方程(h 是时间间隔):

$$\omega(n+1) = \omega(n) + [k i_q(n) - T_L(n) - \frac{D}{n_p} \omega(n)] \frac{n_p h}{J(n)} \quad (6)$$

$$\theta(n+1) = \theta(n) + \omega(n)h + [k i_q(n) - T_L(n) - \frac{D}{n_p} \omega(n)] \frac{n_p h^2}{J(n)} \quad (7)$$

为了同时实现对 J, T_L, D 等参数的估计,把它们看作是新的状态变量,考虑到它们在一定时间内基本不变,有:

$$J(n+1) = J(n) + \varepsilon_J(n) \quad (8)$$

$$T_L(n+1) = T_L(n) + \varepsilon_{T_L}(n) \quad (9)$$

$$D(n+1) = D(n) + \varepsilon_D(n) \quad (10)$$

将易于测量的两个变量 ω 和 θ 作为观测量,并考虑到系统的随机扰动和量测噪声,根据式(6)~式(10)对PMSM进行如下的状态空间描述:

$$X(n+1) = f(x(n), n) + \varepsilon(n) \quad (11)$$

$$Y(n) = Hx(n) + \eta(n) \quad (12)$$

其中: $X(n) = [\omega(n), \theta(n), J(n), T_L(n), D(n)]^T$ 是状态向量

收稿日期: 1996-03-05 联系人:高波,讲师/机器人研究所

*国家自然科学基金资助项目, (基金号:69474020)。

$Y(n)=[\omega_o(n), \theta_o(n)]^T$ 是观测向量

$\varepsilon(n)=[\varepsilon_\omega(n), \varepsilon_\theta(n), \varepsilon_f(n), \varepsilon_T(n), \varepsilon_D(n)]^T$ 是系统随机扰动

$\eta(n)=[\eta_\omega(n), \eta_\theta(n)]^T$ 是观测噪声

$H=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 是观测矩阵

2 EKF 的设计及工作原理

首先将式(11)线性化, 具体做法是将 $f(x(n), n)$ 沿条件均值 $X(n/n)$, 即 $X(n)$ 的滤波估计向量, 泰勒展开:

$$f[X(n), n] = f[\hat{X}(n/n), n] + \Phi(n)[X(n) - \hat{X}(n/n)] + \dots \quad (13)$$

其中: $\Phi(n) = \frac{\partial f(X, n)}{\partial X} \Big|_{X=\hat{X}(n/n)}$

$\Phi = \{\varphi_{ij}\}$, φ_{ij} 是 $f(X, n)$ 的第 i 个元素对状态向量 X 的第 j 个元素的偏导数

忽略式(13)中 $[X(n) - \hat{X}(n/n)]$ 的高次项, 则式(11)和(12)可化简为以下线性状态方程和观测方程:

$$\dot{X}(n+1) = \Phi(n)X(n) + \varepsilon(n) \quad (14)$$

$$Y(n) = HX(n) + \eta(n) \quad (15)$$

这里认为 $\{\varepsilon(n)\}, \{\eta(n)\}$ 是平稳的零均值高斯白噪声序列, 并与 $X(0)$ 独立, 则有:

$E\{\varepsilon(n)\varepsilon^T(n)\} = Q$ 随机扰动协方差阵;

$E\{\eta(n)\eta^T(n)\} = R$ 量测噪声协方差阵;

$E\{X(0)\} = \bar{X}(0)$ $X(0)$ 的均值。

对式(14)和式(15)应用一般卡尔曼滤波公式, 便得到下列扩展卡尔曼滤波器递推公式:

$$\hat{X}(n/n) = \hat{X}(n/n-1) + K(n)\{Y(n) - H\hat{X}(n/n-1)\} \quad (16)$$

$$\hat{X}(n+1/n) = f[\hat{X}(n/n), n] \quad (17)$$

$$K(n) = P(n/n-1)H^T[HP(n/n-1)H^T + R]^{-1} \quad (18)$$

$$P(n/n) = [I - K(n)H]P(n/n-1) \quad (19)$$

$$P(n+1/n) = \Phi(n)P(n/n)\Phi^T(n) + Q \quad (20)$$

其中: $\hat{X}(n/n)$ 是 n 时刻的滤波估计向量;

$\hat{X}(n/n-1)$ 是 n 时刻的预报向量;

$P(n/n)$ 是 n 时刻状态变量估计误差协方差阵;

$P(n/n-1)$ 是 n 时刻状态变量预报误差协方差阵;

可见上述 EKF 实际可看成一个简单的自适应系统, 用框图表示为:

应系统, 用框图表示为:

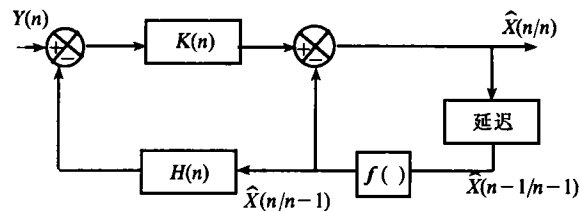


图1 EKF 自适应系统结构框图

Fig.1 Block diagram of EKF adaptive system

3 EKF 的实现及仿真

理论上, EKF 是渐近稳定的, 但通常理论上的稳定性并不能保证滤波算法在实际上具有收敛性, 发散的重要原因是: 验前数据误差 (如对噪声统计特性描述不准确) 和数字计算机的计算误差。为防止发散, 采用一种对协方差矩阵 $P(n/n-1)$ 直接加权的“不发散”算法, 即将(20)式改写为:

$$P(n+1/n) = S\Phi(n)P(n/n)\Phi^T(n) + Q \quad (21)$$

其中: S 是标量乘数, $S > 1$, 由经验而定。

根据式(16)~(19)和(21), 按以下流程图编程序来实现 EKF。

为进一步说明利用 EKF 对 PMSM 进行在线的状态和参数估计的可行性, 进行了计算机仿真。由于 PMSM 在矢量定向控制条件下, 将等效于一直流机, 当用 EKF 对其状态和参数进行滤波估计时, 可采用如图 2 所示的结构。采用图 3 所示

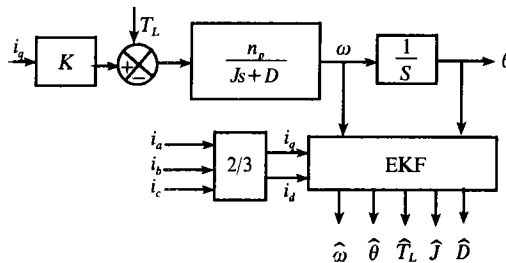


图2 PMSM 状态和参数滤波估计的结构图

Fig2 Constructure of the PMSM with state and parameter estimation
的算法流程, 用计算机仿真, 可得结果如图 4 所示。图 4(a) 是转子旋转角速度的仿真曲线, 其中实线代表了无噪声干扰的速度真值 ω , 虚线代表了有噪声干扰的实际值经 EKF 后的滤波估计 $\hat{\omega}$, 可见, $\hat{\omega}$ 是能够较好地反映其真值 ω 的。图 4(b)、(c)、(d) 分别是前述模型中状态变量 D (粘滞摩擦系数)、 J (转动惯量) 和 T_L (负载转矩) 的估计值

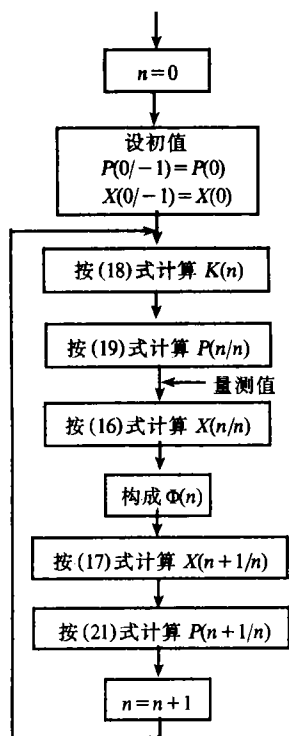
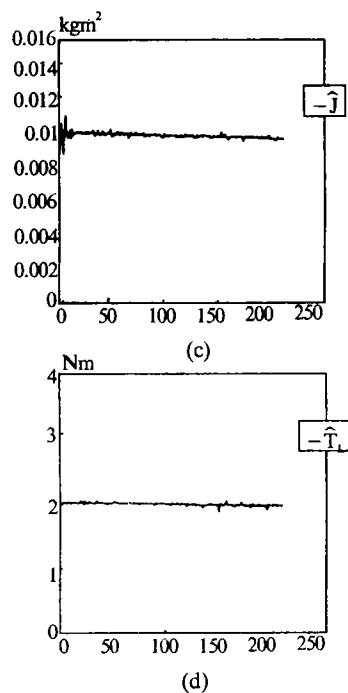
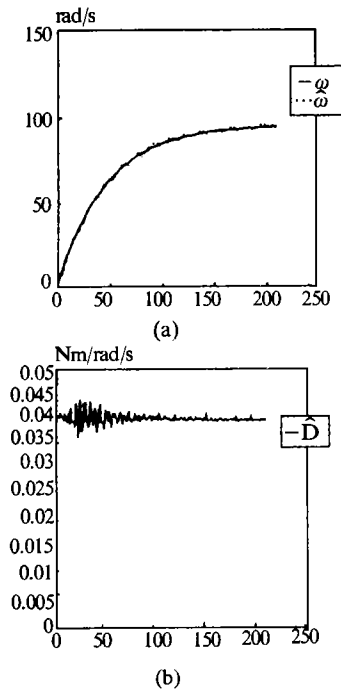


图 3 采用 EKF 的状态和参数估计算法

Fig3 Algorithm flowchart of state and parameter estimation by EKF
仿真曲线,能看出,用 EKF 估计出的系统参数 \hat{D} 、 \hat{J} 、 \hat{T}_L 能很好地逼近其真值。可见,EKF 具有良好的滤波估计和参数辨识能力。



实验所设真值: $J=0.01\text{kgm}^2$, $T_L=2\text{Nm}$, $D=0.04\text{Nm/rad/s}$

图 4 仿真结果

Fig.4 Computer simulation result

4 结论

EKF 是现代控制理论的重要组成部分,它是用于非线性系统状态和参数估计的一种有效方法,本文对 EKF 在 PMSM 状态及参数在线估计中的应用进行了说明,通过仿真可以看出,经 EKF 滤波估计的状态及参数能很好地逼近真实值;加之 DSP(数字信号处理器)的高速运算功能,故 EKF 是完全可以用于 PMSM 的控制系统中,为控制器提供参数,实现 PMSM 的自适应控制,提高伺服系统的运行性能。

参考文献

- 1 Salvatore L, Stasi S. Application of EKF to parameter and state estimation of PMSM drive. IEE PROC-B, 1992, 139(3): 155 ~ 163
- 2 韩曾晋编. 自适应控制系统. 北京: 机械工业出版社, 1983
- 3 [苏]H.T. 库索夫可夫等著. 章燕申译. 控制系统的最优滤波和辨识方法. 北京: 国防工业出版社, 1984.

(下转第 36 页)

1992, 3(1): 54-74

tetrahedron-tetrahedron truss. ASME Journal of Mechanical

4 Jain S, Kramer S N. Forward and inverse kinematic solution

Design. 1990, 112(1): 12-21

of the variable geometry truss robot based on an N-celled

Deployment Kinematics and Dynamics of Variable Geometry Truss

Nie Runtu Wang Xuexiao Zou Zhenzhu Shao Chengxun

(Dept. of Astronautics and Mechanics)

Abstract Deployment kinematics and dynamics of Variable Geometry Truss(VGT) structures are analyzed systematically. The recursive formulae of kinematic analysis are presented by using constraint equations. Employing the D'Alembert's principle in virtual work, the dynamic equations of deployable VGT are derived. All of these formulae and equations are of a computer-oriented form. A numerical example is given to show the validation of the analysis method.

Key words Variable geometry truss; deployment kinematics; deployment dynamics

~~~~~  
(上接第 32 页)

## Parameter and State Estimation of PMSM

Gao Bo    Shen Jing    Wang Yan

(Robots Research Institute)

**Abstract** Parameter and state estimation is the basis of improving the performance of a permanent magnet synchronous motor (PMSM). The Extended Kalman Filter(EKF) is an effective on-line method of parameter and state estimation of permanent magnet synchronous motor. The design principle and implementation of EKF, as well as the result of computer simulation are given in detail. It is shown that this method provides good estimation and identification of the parameters of PMSM, and can track the real state of PMSM very well.

**Key words** EKF; PMSM; parameter and state estimation