

数控机床和伺服电机中应用扰动观测器的 精度控制与补偿

康琪, 林军*

(上海师范大学 信息与机电工程学院, 上海 200234)

摘要: 计算机化数控机床 CNC 在制造业中是一种高度集成的机电一体化系统. 然而, 不确定因素却降低了它运动的准确性. 为了估计系数变化和电流测量问题中的不确定性, 针对速度和电流循环, 提出了一种线性状态空间扰动观测器, 通过对数控机床和伺服电机的建模, 不断改变影响准确性的各项参数, 同时应用自动调优程序对电动机多样性系数进行识别, 实验结果表明: 由于线性误差, 外部扰动等不确定因素所造成的对于速度与电流的影响得到显著改善, 并最终实现了对于转矩振动的抑制.

关键词: CNC; 伺服电机; 线性状态空间扰动观测器; 自动调优

中图分类号: TP 237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-5137(2012)05-0475-08

0 引言

在制造业中数控机床广泛使用伺服电机来提高加工产品的精度. 不可避免地, 在电流回路、速度和位置循环中产生的不确定性可能会严重降低电机的精度. 一般而言, 电机驱动器中电流测量误差主要是由噪声所引起的. 同时, 由于机器的老龄化问题, 摩擦也越来越严重. 所有这些不确定因素在不同的循环中相互耦合使得数控机床的准确性降低.

目前的伺服电机和数控机床普遍应用控制技术. 在伺服电机电流回路中, 空间矢量脉冲宽度调制被广泛使用^[1-2], 从而通过降低谐波分量来减少电能的转换. 鉴于电流回路为电动机提供了理想的转矩, 电动机的电流回路和齿槽转矩在工作中将不可避免地产生转矩波动和震荡. 基本上, 大多数先进的运动控制理论集中在速度循环和位置循环上^[4-7]. 为了达到数控机床的精度, 位置、速度、电流回路的设计必须能够有效地降低不确定性影响, 从而提高精度.

在应用中, 如果扰动和不确定因素的来源能够被有效地识别, 就可以采取相应的措施进行补偿. DOB 对于扰动的估量和抵制是非常有效的^[8-9]. Kobayshi 等^[10]基于扰动观测器提出相位补偿来处理在电动机系统中系数变化的问题. Meanwhile, Katsura 等^[11]使用加速器得到宽频的转矩观测器. Lee 和 Blaabjerg 等^[12]应用转动惯量观测器来估计在低速时的转动惯量. She 等^[13]提出一种对于等效输入扰动的估量, 从而降低在伺服电机控制系统中的扰动. 为了抑制在伺服电机电流回路和速度回路中不确定因素的影响, 本文作者采用了具有等效转动惯量和粘滞系数的空间线性 DOB 模型. 结果表明: 在实践中不仅只有 DOB 可以抑制系数变换, 产生补偿, 它的输出也能够通过改变量得到进一步的监测. 此外, 在速度回路中转矩波动也会被观测, 并被有效地抑制.

收稿日期: 2012-07-20

作者简介: 康琪(1987-), 女, 上海师范大学信息与机电工程学院硕士研究生; 林军(1956-), 女, 上海师范大学信息与机电工程学院教授.

* 通信作者

基本上不同形式的 DOB 都是基于建模的设计,它的输出值表明了实际车间生产与建模之间的差异^[14-17].当实际生产中多样性到达一定程度,一种自适应参数估量法被提出,从而被用于升级系统^[18].

1 基于 DOB 技术对不确定性的抑制

描述普遍动态对象的状态方程如下:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi x(k) + \Gamma u(k), \\ y(k) &= Hx(k). \end{aligned} \quad (1)$$

DOB 用于估量判断,并有效地降低系统中外部扰动的影响.通常,扰动 d 可在状态方程中表示为:

$$\begin{aligned} x_d(k+1) &= \Phi_d x_d(k), \\ d(k) &= H_d x_d(k). \end{aligned} \quad (2)$$

由此,扰动模型可以进一步增强系统模型如下:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x(k+1) \\ x_d(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma H_d \\ 0 & \Phi_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x_d(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix} u(k), \\ y[H \quad 0] &= \begin{bmatrix} x(k) \\ x_d(k) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

因此,DOB 表示为:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k+1) \\ \hat{x}_d(k+1) \end{bmatrix} = \Phi \begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{x}_d(k) \end{bmatrix} + \Gamma_w u(k) + \mathbf{L} \left(y - H_w \begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{x}_d(k) \end{bmatrix} \right). \quad (4)$$

增益矩阵 L 用于确定观测器的极点.

1.1 伺服电机的 DOB 建模

在 DOB 的实现中,电机控制的速度回路是建模的目标.电机电流 i_q 产生转矩 T_e ,从而驱动机器运转的方程式为:

$$\begin{aligned} T_e &= K_t \cdot i_q, \\ T_e + T_L &= J \frac{dw}{dt} + B_w. \end{aligned} \quad (5)$$

DOB 的建模以及它在伺服电机中自动调优程序的应用如图 1 所示,这里的 n 是测量噪声, \tilde{d} 是 DOB 的预计输出,它的值被直接传送到命令程序中,从而用于补偿不确定性所造成的影响.

考虑到不良的外部干扰,将伺服电机中电机转矩常数 K_t 进一步标准化为:

$$\bar{J} \frac{dw}{dt} + \bar{B}w = i_q + i_L. \quad (6)$$

这里的标准化转动惯量 \bar{J} 和粘性系数 \bar{B} 是 DOB 模型中的参数,通过应用欧拉定理和采样时间,离散方程(6)转变为:

$$\frac{\bar{J}}{T_s} (w(k+1) - w(k)) + \bar{B}w(k) = i_q(k) + i_L(k). \quad (7)$$

因此,定义 DOB 系统状态中的转速 $w(k)$ 为和外部负载扰动电流 $i_L(k)$ 如下:

$$\begin{bmatrix} \hat{w}(k+1) \\ \hat{i}_L(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \hat{w}(k) \\ \hat{i}_L(k) \end{bmatrix} + \mathbf{B}i_q^*(k) + \mathbf{L} \left(w(k) - \mathbf{C} \begin{bmatrix} \hat{w}(k) \\ \hat{i}_L(k) \end{bmatrix} \right). \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\bar{B}T_s}{J} & \frac{T_s}{J} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{T_s}{J} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = [1 \quad 0] \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} .$$

1.2 参数的变更

由于在实际应用中, 不确定因素是不可避免的. 目前基于 DOB 的设计, 考虑到了不良的扰动, 参数的变更, 建模的误差等从而成为一个能够抑制不确定性的实际应用. 实际上, 当操作改变时, 系统参数也将发生变更. 粘度系数随时间的增加而增加. 此外, 在电机驱动的电枢循环中, 三相电流的偏差和不匹配产生了转矩波动的情况. DOB 的实际输出表明了模型与实际系统中存在偏差. 如果 DOB 中输出较小, 如图 1 所示, 则在一定程度上表明目前模型的参数是比较准确的. 一旦这种不确定性是由外部扰动与内部参数变更同时引起的, 则 DOB 的输出 d 将会增加, 此时, DOB 的预计输出 \hat{d} 将会被直接传送给输入, 从而对不确定因素产生的影响进行补偿.

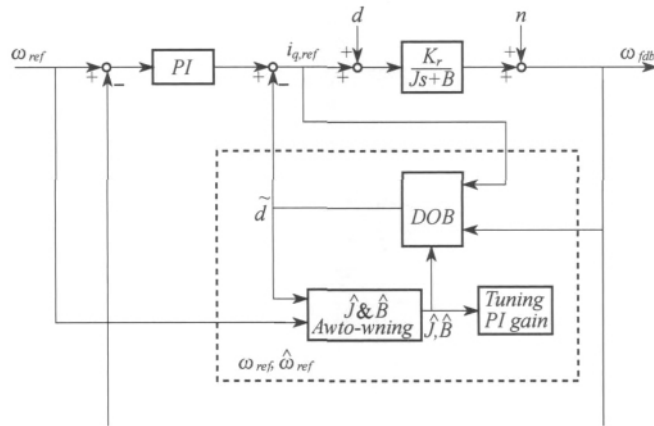


图 1 具有自动调节功能的伺服电机 DOB 实现

(1) 粘性系数: 当电机在一个速度恒定, 没有外部扰动的情况系下运行时, 粘性系数表示为:

$$\bar{B}w(k) = i_q(k) \quad (9)$$

如果预计的粘性系数 \bar{B} 大于它的实际值时, 则可以表示为:

$$\hat{B}w(k) = (\bar{B} + \Delta B)w(k) \quad (10)$$

这里 \hat{B} 是预计粘性, ΔB 是预计与实际值的差值. 比较方程式(9)和(10)在恒定转速 w 下, DOB 的输出电流 i_L 应表示如下:

$$i_L(k) = \Delta Bw \quad (11)$$

(2) 转动惯量: 如果可以正确地估算出 \bar{J} 并且电机是在加减速度恒定的情况运行下, 则:

$$\frac{\bar{J}}{T_s}(w(k+1) - w(k)) + \bar{B}w(k) = i_q(k) \quad (12)$$

当预计的转动惯量 \bar{J} 比实际值大时, 则可以表示为:

$$\begin{aligned} \frac{\hat{J}}{T_s}(w(k+1) - w(k)) + \hat{B}w(k) = \\ \frac{\bar{J} + \Delta J}{T_s}(w(k+1) - w(k)) + \bar{B}w(k) = i_q(k) + i_L(k) \end{aligned} \quad (13)$$

其中 ΔJ 是预计转动惯量 \hat{J} 与实际转动惯量 J 的差值, 比较方程式(12)和(13), DOB 的输出可以表示为:

$$i_L(k) = \frac{\Delta J}{T_s} (w(k+1) - w(k)) \quad (14)$$

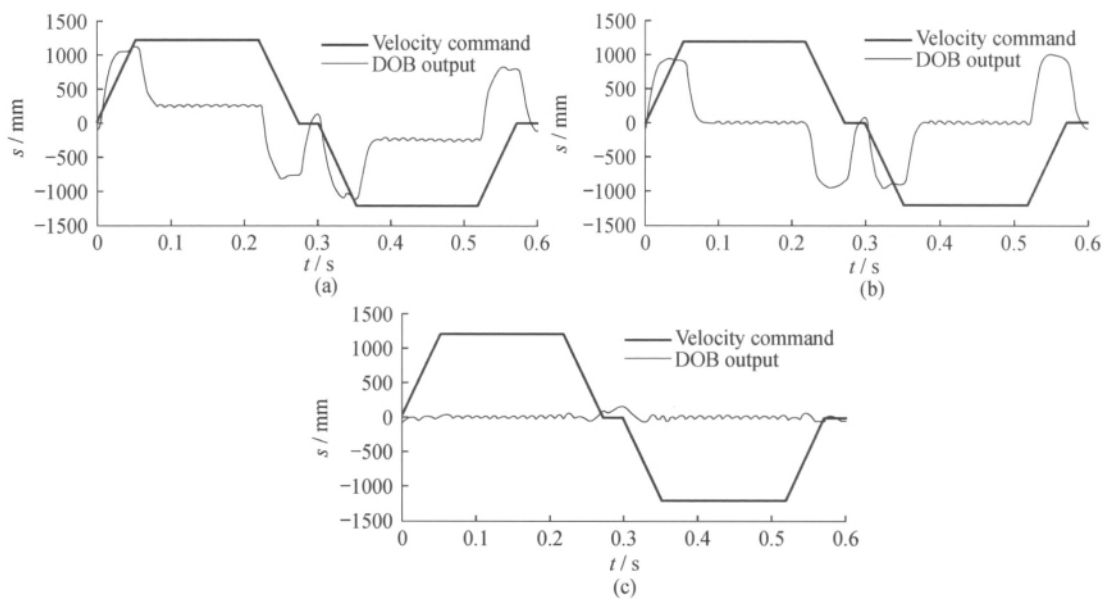
因此在速度恒定或者加减速速度恒定时, DOB 的输出对于模型参数误差而言是成比例的.

1.3 实验设备

为了实现已设计的 DOB 算法, 在 400W Panasonic 的伺服电机上进行实验. 三相电流是通过霍尔传感器得到的, 速度是由具有差分算子的 17-bit 编码器处确定的. 所有的算法均是在适用于伺服电机和数控机床的处理器上实现的.

1.4 通过自动调优程序确定系数

基于 DOB 的建模不仅可以抑制模型的不确定因素, 同时还可以实现对抗动的估算和剔除. 在方程式(11)和(14)中, 当速度恒定时, 粘性系数将主要影响电机运转, 而转动惯量将主要在恒定加减速速度时作为 DOB 的输出. 因此 2 个参数应该在不同操作指令中被分开识别. 当 B 和 J 发生错误时, 则 DOB 输出的实验结果如图 2(a). 图 2(b) 则表明如果取合适的粘性系数则在速度恒定时, DOB 的输出干扰将被消除. 此外, 图 2(c) 表明如果选用适当的转动惯量, 在加、减速度恒定时, DOB 的输出值接近 0. 实验结果与方程式(11)和(14)所分析的结果相一致.



(a) 当 $\hat{B} > B$ 和 $\hat{J} > J$ 时; (b) 当 $\hat{B} = B$ 和 $\hat{J} > J$ 时; (c) 当 $\hat{B} = B$ 和 $\hat{J} = J$ 时

图 2 DOB 的预计输出实验结果

为进一步在自动化过程中实现上述结果, 在基于 DOB 输出扰动、粘性系数 B 、转动惯量 J 理论值的基础上, 根据整体自适应算法方程(15), K_1 、 K_2 为给定常数, 则能得到自动调优程序.

$$\begin{cases} \hat{B}(k+1) = \hat{B}(k) - K_1 \tilde{d}(k+1) \\ \hat{J}(k+1) = \hat{J}(k) - K_2 \tilde{d}(k+1) \end{cases} \quad (15)$$

实时优化结果如图 3 所示, 对 2.6 倍和 4.8 倍转动惯量的电机转子进行了测试, 如图 3(a). 经过 6 s 的循环测试后, 在两种情况下, 算法在应用了方程式(15)后, 均获得了满意的实验结果, 如图 3(b) 所示.

图 4 (a) 表示在添加附加载荷后 , 反应变得迟缓. 当应用了实时自动调优程序后 , 一个良好设计的控制性能将会被修复 如图 4 (b) 所示.

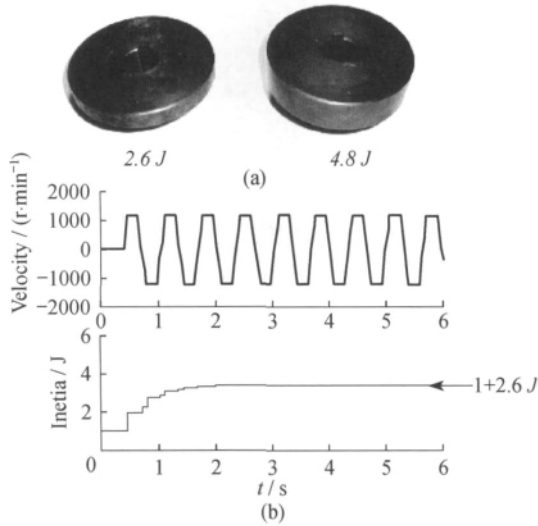


图 3 (a) 额外负载和 (b) 当额外负载为 2.6 J 时 , 自动调优实验结果

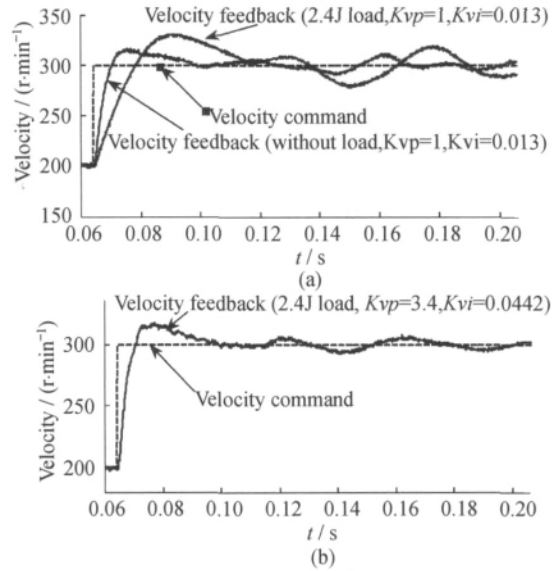


图 4 (a) 负载为 2.6 J 时的反应图和 (b) 应用自动调优程序后性能恢复图

2 抑制转矩震动

2.1 电机电流测量误差

为了实现对永磁同步交流伺服电机的控制 , 只有三分之二的定子电流需要通过霍尔电流传感器被测量 , 而三相电流则通过假定电流平衡直接计算产生. 三相电机模型 $(i_a - i_b - i_c)$ 可以通过 Clark-Park 转换定律 转变成为一个同步电机模型:

$$\begin{cases} i_a = i_a \\ i_\beta = (2i_b + i_a) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$\begin{cases} i_d = i_a \cos\theta + i_\beta \sin\theta \\ i_q = -i_a \sin\theta + i_\beta \cos\theta \end{cases} \quad (17)$$

电机转矩 T_e 可以由方程式 (5) 中的电流 i_q 产生.

(1) 电流偏差: 事实上 , 当 2 个三相定子电流和产生的偏差分别表示为 ΔB 和 ΔC , 则第三个定子电流可以根据平衡关系直接计算出来:

$$\begin{cases} i_a = A \sin w_e t + \Delta B \\ i_b = A \sin(w_e t + 2\pi/3) + \Delta C \\ i_c = A \sin(w_e t - 2\pi/3) - \Delta B - \Delta C \end{cases} \quad (18)$$

其中 $w_e = (P/2) \omega$ P 为电机的极数 , 因此 ,

$$\begin{cases} i_d = 0 + \sqrt{\Delta B^2 + \Delta C^2} \sin(w_e t + \varphi) \\ i_q = A + \sqrt{\Delta B^2 + \Delta C^2} \cos(w_e t + \varphi) \end{cases} \quad (19)$$

其中 $\Delta D = (\Delta B + 2\Delta C) / \sqrt{3}$, 并且 $\varphi = \tan^{-1}(\Delta B / \Delta C)$. 因此可以得到组件的转动频率并且产生转矩波动.

(2) 不匹配振动: 测量电流在不同收益和幅值时 i_a 和 i_b 表示为:

$$\begin{cases} i_a = \tilde{A} \sin w_e t \\ i_b = \tilde{B} \sin(w_e t + 2\pi/3) \\ i_c = -\tilde{A} \sin w_e t - \tilde{B} \sin(w_e t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (20)$$

其中 \tilde{A} 和 \tilde{B} 是与 A 和 B 相对应的非单元幅值. 通过替代方程式(20) ,应用 Clarke-Park 转换 ,两相电流 i_d 和 i_q 表示为:

$$\begin{cases} i_d = -\tilde{E} + \sqrt{\tilde{D}^2 + \tilde{E}^2} \sin(2w_e t + \varphi) \\ i_q = -\frac{\tilde{A}}{2} + \frac{\tilde{B}}{2} + \sqrt{\tilde{D}^2 + \tilde{E}^2} \cos(2w_e t + \varphi) \end{cases} \quad (21)$$

其中

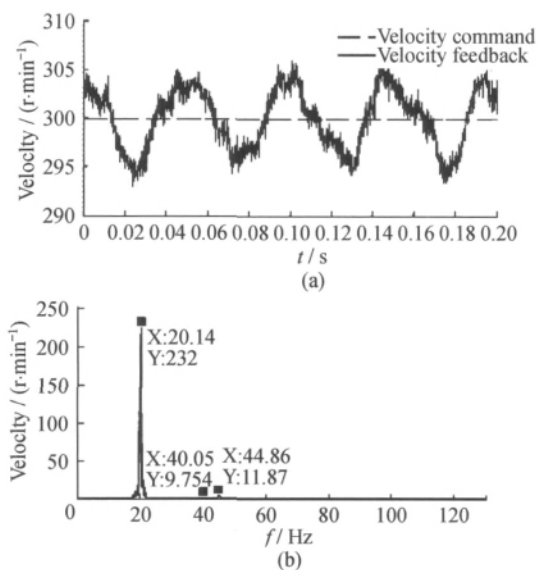
$$\tilde{D} = (\tilde{A} + \tilde{B}) / 2, \tilde{E} = -\tilde{C} / 2, \tilde{\varphi} = \tan^{-1}(\tilde{E} / \tilde{D}) / 2 .$$

2.2 仿真结果

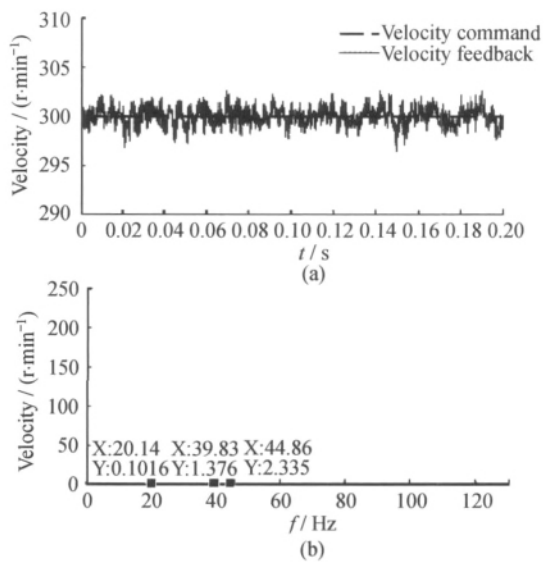
在电流测量中 ,偏差和不匹配幅值与它的转动频率也有关系. 例如 ,如果 1 个八极电机 ,它的转速是 5 r/s(300 r/m) ,将会产生 4(极对) \times 5(r/s) = 20 Hz 的频率. 这个例子里 ,偏差是存在的. 偏差和不匹配幅值的产生 A (极对) \times 2 \times 5(r/s) = 40 Hz 和 20 Hz. 仿真的结果与分析结果是相一致的 ,可以通过方程式(19) 和(21) 得到.

2.3 转矩振动的抑制

正如前面所讨论的 ,在三相电流测量中存在偏差和不匹配的收益 ,转矩波动的影响将表现为电机以一定的速度转动. 因此 ,具有标准频率带的陷波滤波器不能消除在不同速度下伺服电机的转矩波动. 除了原始 PI 控制 ,状态空间 DOB 在对电机控制不清楚之外 ,已经成功实现了对于转矩的抑制. 电机在 300 r/min 时运转的实验结果如图 5 所示. 它的快速傅里叶变换(FFT) 表明 2 个频率的波峰是在 20 Hz 和 40 Hz. 目前的实验结果与之前得到的仿真和分析结果是相吻合的. 在急速 1000 rad/s 下 ,实现 DOB ,则基于 DOB 的设计显示了通过抑制不良因素获得理想速度的响应 ,如图 6 所示.



(a) 稳态响应; (b) 快速傅里叶变换(FFT)
图 5 转速为 300 r/min 伺服电机运转结果



(a) 稳态响应; (b) 快速傅里叶变换(FFT)
图 6 应用 DOB 后伺服电机的运转结果

3 结 论

在加工制造过程中,由于机器本身及外在不确定因素的影响,降低了伺服电机、数控机床的加工精度.本文作者提出扰动观测器这一概念,应用 DOB,使得由于参数变化、测量误差、外部扰动等不确定因素对于伺服电机电流循环和速度循环的影响得到显著改善,同时对于转矩振动的抑制也得到增强.此外,由于转动惯量和粘滞摩擦系数所引起的变化也可以通过 DOB 的输出被观测到.自动调优程序也得到了相应的发展.这些都证明了作者所提出的基于扰动观测器对于数控机床和伺服电机精度的控制与补偿在现实应用中的可行性.

参考文献:

- [1] NOVOTNY D W ,LIPO T A. Vector Control and Dynamics of AC Drives [M]. Oxford: Clarendon ,1996.
- [2] BOSE B K. Modern Power Electronics and AC Drives. Englewood Cliffs [M]. New Jersey: Prentice-Hall 2002.
- [3] 郝双晖,刘杰,蔡一,等.空间矢量脉宽调制中电压矢量最优化算法研究[J].南京理工大学学报:自然科学版,2010(2):213-216
- [4] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer for manufacturing systems [J]. Trans ASME J Dyn Syst Meas Control ,1980 , 102(4) :265-272.
- [5] TOMIZUKA M. Zero phase error tracking algorithm for digital control [J]. Trans ASME J Dyn Syst Meas Control ,1987 , 109(1) :65-68.
- [6] YE H S S ,HSU P L. Theory and applications of the robust crosscoupled control design [J]. Trans ASME J Dyn Syst Meas Control ,1999 ,121(3) :524-530.
- [7] YE H S S ,HSU P L. Estimation of the contouring error vector for the cross-coupled control design [J]. Trans IEEE/ASME Trans Mechatronics 2002 7(1) :44-51.
- [8] FRANKLIN G F ,POWELL J D ,WORKMAN M. Digital Control of Dynamic Systems [M]. 3rd ed. Reading ,MA: Addison-Wesley ,1998.
- [9] 周虎,陈勇,黄琦,等.基于转动惯量辨识的交流伺服速度调节器自整定研究[J].电机与控制应用,2011,38(12):32-36.
- [10] KOBAYASHI H ,KATSURA S ,OHNISHI K. An analysis of parameter variations of disturbance observer for motion control [J]. IEEE Trans Ind Electron 2007 54(6) :3413-3421.
- [11] KATSURA S ,RIE K ,OHISHI K. Wideband force control by positionacceleration integrated disturbance observer [J]. IEEE Trans Ind Electron 2008 55(4) :1699-1706.
- [12] LEE K B ,BLAABJERG F. Robust and stable disturbance observer of servo system for low-speed operation [J]. IEEE Trans Ind Appl 2007 43(3) :627-635.
- [13] SHE J H ,FANG M ,OHYAMA Y , et al. Improving disturbance-rejection performance based on an equivalent-inputdisturbance approach [J]. IEEE Trans Ind Electron 2008 55(1) :380-389.
- [14] YANG K J ,CHOI Y J ,CHUNG W K. On the tracking performance improvement of optical disk drive servo systems using error-based disturbance observer [J]. IEEE Trans Ind Electron 2005 52(1) :270-279.
- [15] OHISHI K ,MIYAZAKI T ,INOMATA K , et al. Robust tracking servo system considering force disturbance for the optical disk recording system [J]. IEEE Trans Ind Electron 2006 53(3) :838-847.
- [16] O' SULLIVAN T M ,BINGHAM C M ,SCHOFIELD N. Observer-based tuning of two-inertia servo-drive systems with integrated SAW torque transducers [J]. IEEE Trans Ind Electron 2007 54(2) :1080-1091.
- [17] KAMALZADEH A ,ERKORKMAZ K. Accurate tracking controller design for high-speed drives [J]. Int J Mach Tools Manuf 2007 47(9) :1393-1400.
- [18] CARDENAS R ,PENA R ,ASHER G M , et al. Control strategies for power smoothing using a flywheel driven by a

- sensorless vector-controlled induction machine operating in a wide speed range [J]. IEEE Trans Ind Electron 2004 51 (3): 603 – 614.
- [19] 方强, 马杰, 毕运波 等. 基于扰动观测器的电动负载模拟器控制系统设计 [J]. 浙江大学学报: 工学版 2009 43 (11): 1958 – 1964.
- [20] 王蕊. 交流伺服系统的鲁棒性研究 [J]. 机械研究与应用 2011(2): 13 – 16.
- [21] 宋玉, 陈国鼎, 马术文. 交流伺服进给系统数学模型研究及其仿真 [J]. 机械设计与研究 2010(7): 9 – 12.

Precision control and compensation of machine tools and servomotor via disturbance observer

KANG Qi, LIN Jun*

(College of Information ,Mechanical and Electrical Engineering ,
Shanghai Normal University ,Shanghai 200234 ,China)

Abstract: The computerized numerically – controlled machine tool CNC is a highly integrated mechatronic system in manufacturing. However , uncertainties degrade its motion accuracy. In order to estimate the uncertainties of the parameter variation and current measurement , in this paper , a state – space disturbance observer is successfully applied to servomotors in the velocity and the current loops. Via the modeling of CNC machine tool and servo motor , the parameters affecting the accuracy are continuously varied and an auto tuning procedure is applied to identify the varied parameters of the motor. The experimental results show that the influences on the velocity and current caused by the linear errors , external disturbance and etc have improved significantly , and eventually the effect of suppressing the torque ripple is achieved .

Key words: CNC; servomotor; state-space disturbance observer; autotuning

(责任编辑: 包震宇)