

基于扰动观测器和重复控制器的 永磁直线同步电动机鲁棒控制

赵希梅, 郭庆鼎

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁省 沈阳市 110870)

Robust Control Based on the Disturbance Observer and Repetitive Controller for Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

ZHAO Xi-mei, GUO Qing-ding

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: For the high precision direct drive permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) servo system, the influences to the servo performance were analyzed, including the load disturbances, parameters changes of the system, end-effect and uncertain factors. A robust repetitive control strategy based on combining the disturbance observer (DOB) and repetitive controller (RC) was proposed. The robust feedback controller based on DOB can overcome the influences of the uncertainties, such as external disturbance, load disturbance, un-modeled dynamics and the parameters perturbation and so on. It can ensure the robust performance of the system. But the influences to velocity quality for periodic disturbance generated by specially existing end effect of PMLSM cannot be entirely restrained by DOB. For it, according to inner model theory, repetitive controller was designed to entirely eliminate the influence of the periodic disturbance. The theory analysis and simulation experiment results show that the control scheme is effective, and the robust performance is improved greatly.

KEY WORDS: permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM); end effect; disturbance observer (DOB); repetitive controller (RC)

摘要: 针对高精度直接驱动的永磁直线同步电动机伺服系统, 研究其负载扰动、系统参数变化及端部效应等不确定性因素对系统伺服性能的影响, 提出一种将扰动观测器 (disturbance observer, DOB) 和重复控制器 (repetitive controller, RC) 相结合的鲁棒控制策略。基于 DOB 的鲁棒反馈控制器补偿了外部扰动、负载扰动、未建模动态、系

统参数变化及不确定性等, 保证了系统的速度鲁棒性能, 但是 DOB 无法彻底抑制端部效应这种周期性扰动对速度品质的影响, 为此, 采用根据内模原理设计专门抑制周期性扰动作用的 RC 来消除端部效应对系统的不良影响。理论分析和仿真实验结果表明所提出的控制方案是有效的, 采用该方案可明显提高系统的鲁棒性能。

关键词: 永磁直线同步电动机; 端部效应; 扰动观测器; 重复控制器

0 引言

直线式直接驱动方式在简化了传动链的同时, 也增加了控制的难度, 负载侧的任何扰动, 包括参数摄动、不确定性以及永磁直线同步电动机(permanent magnet linear synchronous motor, PMLSM)特有的严重非线性所表现出的端部效应引起的推力波动、摩擦力非线性因素等毫无衰减地反映到电机动子及伺服控制器上。对伺服性能, 特别是对低速性能造成不良影响, 破坏数控机床的精加工性能^[1-2]。

通常, 前馈控制器在消除系统伺服滞、确保快速跟踪的同时, 还必须对系统诸多的不确定性及扰动因素具有很强的鲁棒性, 使伺服性能免受这些因素的影响^[3-4]。在 PMLSM 中, 最突出的扰动是端部效应引起的推力波动, 这种推力波动以周期性扰动的形式进入系统。文献[5-6]采用扰动观测器 (disturbance observer, DOB) 来抑制一系列不确定性产生的推力波动, 虽然扰动普遍受到削弱, 但对端部效应引起的周期性扰动的抑制效果并不理想, 在系统输出中依然残留着周期性波动, 妨碍 PMLSM 在高精度场合中的应用。

基金项目: 辽宁省博士科研启动基金资助项目(20091056)。

Project Supported by Scientific Research Foundation for Doctors of Liaoning Province (20091056).

针对系统存在的周期性推力波动、负载扰动，以及各种不确定性，本文提出了将 DOB 和重复控制器(repetitive controller, RC)相结合的鲁棒重复控制策略。DOB 作为反馈控制器补偿了模型的不确定性、摩擦非线性、未建模动态、端部效应等，为系统提供了基础性的鲁棒性能。为了彻底抑制周期性扰动，增设了 RC，获得完全的鲁棒性，为高精度数控加工提供了高性能的伺服驱动。

1 PMLSM 的数学模型

PMLSM 的运动方程为

$$m\ddot{x}(t) = F_e - B_v\dot{x}(t) - d = -B_v\dot{x}(t) + K_F i_q(t) - d \quad (1)$$

式中： m 为动子及其所带负载的总质量； $x(t)$ 为动子的位移； F_e 为电磁推力； B_v 为粘滞摩擦系数； K_F 为推力系数； i_q 为动子的 q 轴电流； d 为外部扰动， $d = F_{fric} + F_{rip} + F_L$ ，其中 F_{fric} 为摩擦力， F_{rip} 为端部效应产生的推力波动， F_L 为负载阻力。

摩擦力 F_{fric} 的模型为

$$F_{fric} = [f_c + (f_s - f_c)e^{-(v/v_s)^2}] \text{sgn}(v) \quad (2)$$

式中： f_c 为库仑摩擦力的系数； f_s 为静态摩擦力系数； v 为动子速度； v_s 为临界 Stribeck 速度。

端部效应产生的推力波动 F_{rip} 是与 PMLSM 位移相关的周期性波动函数，其模型^[1]可表示为

$$F_{rip} = F_{ripm} \cos\left(\frac{2\pi x}{\tau} + \varphi_0\right) \quad (3)$$

式中： F_{ripm} 为端部效应推力波动的幅值； τ 为极距； φ_0 为初始相位电角度。PMLSM 系统的数学模型如图 1 所示。

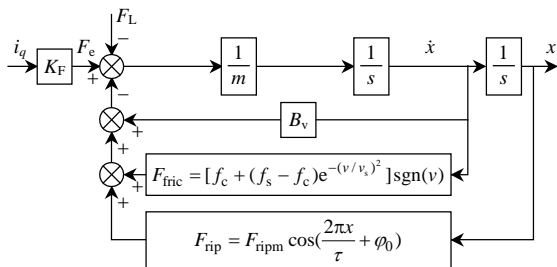


图 1 永磁直线同步电动机数学模型
Fig. 1 Mathematical mode of PMLSM

直线伺服系统的状态方程为

$$\dot{x}(t) = v(t) \quad (4)$$

$$\ddot{x}(t) = -\frac{1}{m}[B_v v(t) - K_F i_q + F_{rip} + F_{fric} + F_L] \quad (5)$$

2 鲁棒重复控制系统的的设计

2.1 控制系统设计原理

PMLSM 系统要求输出速度响应快、运行平稳，

具有较高的动态和稳态控制精度，速度误差尽可能小，这就对电机的速度控制提出了很高的要求^[7]。实际上，破坏速度控制性能的因素很多，由于直接驱动而没有机械变换机构的缓冲作用，负载侧的任何扰动都会直接反映到直线电机的动子和伺服控制器上，其结果是影响了电机速度性能，也就直接降低了机床进给坐标轴的伺服性能。所以，在伺服系统的速度控制环内，首要的任务是消除各种扰动、模型的不确定性等因素给速度控制性能造成的不良影响，保持输出速度的严格鲁棒性^[8]。为了保证系统具有良好的稳定性和鲁棒性，设计了基于 DOB 和 RC 的鲁棒重复控制系统，如图 2 所示。图中， $R(z^{-1})$ 为位置信号； $E(z^{-1})$ 为位置误差信号； $G_c(z^{-1})$ 为控制器； $D(z^{-1})$ 为扰动信号； $G_p(z^{-1})$ 为被控对象； $Y(z^{-1})$ 为系统输出位置信号。

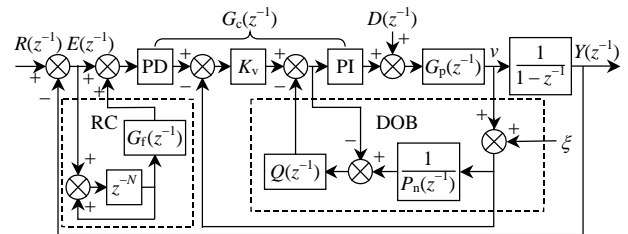


图 2 基于 DOB 和 RC 的鲁棒重复控制框图
Fig. 2 Block diagram of robust repetitive control based on DOB and RC

2.2 扰动观测器的设计

将 DOB 置入速度回路中是要将进入其中的扰动全部消除掉，不影响电机输出速度的品质。消除扰动之后，速度回路中只剩下标称模型和设计的 PI 控制器，这就实现了速度鲁棒控制。

在系统设计时，DOB 能将系统不确定性视为系统扰动，并对扰动进行有效地估测和补偿，在一定的误差内可以将实际模型等价为其标称模型。DOB 的控制结构如图 3 所示。图中， u 为速度环的给定输入信号； d 为系统的外部干扰； \hat{d} 为扰动的估计量； ξ 为测量噪声； $P(s)$ 为实际对象的传递函数； $P_n(s)$ 为标称对象的传递函数； $Q(s)$ 为低通滤波器。

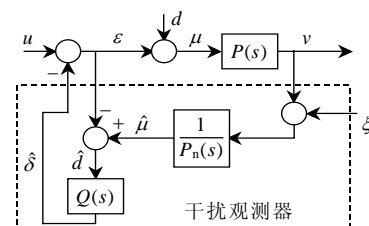


图 3 干扰观测器结构图
Fig. 3 Block diagram of disturbance observer

为了说明 DOB 的作用,先令 $Q(s)=1$ 。当 $Q(s)=1$ 时,可推导出

$$\hat{d} = \hat{d} = (1 - \frac{P_n}{P})u + \frac{1}{P}\xi + d \quad (6)$$

由式(6)可知,当 $P=P_n$ 时,DOB 估计出的 \hat{d} 等于实际的干扰 d 加上测量噪声的影响;当 $P \neq P_n$ 时,DOB 估计出的 \hat{d} 不仅包含真正的干扰 d 和测量噪声的影响,还包含系统不确定性造成的等效干扰。

通过 DOB 补偿后,系统的输出速度可表示为

$$v = P(u - \hat{d} + d) = P_n u - \xi \quad (7)$$

由式(7)可知,若能够消除测量噪声的影响,则输出速度与输入指令间的关系将成为标称对象。

根据图 3, v 可表示为

$$v = G_{uv}(s)u + G_{dv}(s)d + G_{\xi v}(s)\xi \quad (8)$$

$$\text{式中: } G_{uv} = \frac{PP_n}{P_n + (P - P_n)Q}; \quad G_{dv} = \frac{PP_n(1-Q)}{P_n + (P - P_n)Q};$$

$$G_{\xi v} = -\frac{PQ}{P_n + (P - P_n)Q}.$$

如果 $Q(s) \approx 1$, 这 3 个传递函数分别为 $G_{uv} \approx P_n$, $G_{dv} \approx 0$, $G_{\xi v} \approx -1$ 。可见,式(7)近似成立。这表明 DOB 可以使实际对象表现为标称对象,这为控制系统提供了较强的鲁棒性。如果 $Q(s) \approx 0$, 那么 $G_{uv} \approx P$, $G_{dv} \approx P$, $G_{\xi v} \approx 0$, 这样速度环就变为开环。为了抑制模型的不确定性,要合理选择 $Q(s)$, $Q(s)$ 的低频动态要接近于 1, 高频动态必须接近于 0; 因此 $Q(s)$ 的相对阶应等于或大于 $P_n(s)$ 的相对阶, 本文采用 3 阶低通滤波器来满足上述特性:

$$Q(s) = \frac{3\tau s + 1}{(\tau s)^3 + 3(\tau s)^2 + 3\tau s + 1} \quad (9)$$

通过选择不同的 τ 值, 可得到 $Q(s)$ 不同的截止频率。

DOB 的性能很大程度上取决于滤波器 $Q(s)$ 的设计, DOB 设计的要点是确定 $Q(s)$ 的阶次、相对阶和带宽^[6-7]。 $Q(s)$ 的相对阶应不小于名义模型的传递函数的相对阶, 其带宽要考虑鲁棒性和干扰抑制能力的折衷, $Q(s)$ 的频带越宽, 扰动抑制的能力会越强, 但系统的鲁棒性会变差。

2.3 重复控制器的设计

端部效应引起的周期性扰动已通过 DOB 作用得到了减弱, 但在速度和位移输出中, 仍然残留着它的扰动作用, 影响运行速度的平稳性和低速定位的精确性, 通过有针对性地设计 RC 可消除周期性扰动^[9-10]。由于外环是位置回路, 其位置伺服频率远远低于速度回路, 故将 RC 置于位置回路以便有更充足的调节时间产生重复控制命令, 施加于位置

控制器入口处。位置控制器采用 PD 控制, 这样可以提高系统稳定性, 增加系统的阻尼作用, 允许有更大的比例增益, 有利于改善稳态精度^[11]。对重复控制作用来讲, 它也等效于位置误差的作用, 更容易发挥出控制效果, 增强了抑制周期性扰动的能力。

根据 RC 的设计思想, 在位置回路中需要产生一个重复控制命令, 这个命令包括 2 部分: 该周期所产生的控制命令和系统在前一个周期所产生的轨迹跟踪误差。为了消除这个周期性扰动所造成的跟踪误差, 在重复控制回路中加入一个适当的滤波器 $G_f(z^{-1})$, 如图 4 所示。

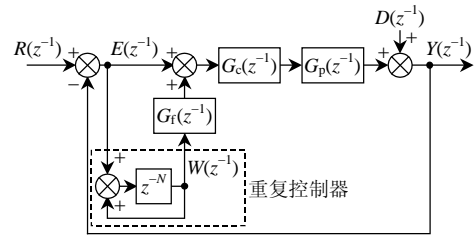


图 4 加入滤波器 $G_f(z^{-1})$ 后的重复控制器
Fig. 4 Repetitive controller with filter $G_f(z^{-1})$

由图 4 可以得到

$$E(z^{-1}) = R(z^{-1}) - Y(z^{-1}) \quad (10)$$

$$W(z^{-1}) = E(z^{-1}) \frac{z^{-N}}{1 - z^{-N}} \quad (11)$$

则此时系统的输出为

$$Y(z^{-1}) = [R(z^{-1}) + W(z^{-1})G_f(z^{-1})]G_{\text{closed}}(z^{-1}) \quad (12)$$

式中 $G_{\text{closed}}(z^{-1})$ 为未增设 RC 时的系统闭环传递函数。系统的参考输入与轨迹的跟踪误差之间的关系为

$$E(z^{-1}) = z^{-N}[1 - G_{\text{closed}}(z^{-1})G_f(z^{-1})]E(z^{-1}) + (1 - z^{-N})[1 - G_{\text{closed}}(z^{-1})]R(z^{-1}) \quad (13)$$

由图 4 可知, 扰动信号 $D(z^{-1})$ 到轨迹输出跟踪误差信号 $E(z^{-1})$ 之间的传递函数为

$$G_{\text{DE}}(z^{-1}) = \frac{E(z^{-1})}{D(z^{-1})} = \frac{1}{1 + \frac{z^{-N}}{1 - z^{-N}}G_f(z^{-1})G_{\text{closed}}(z^{-1})} \quad (14)$$

良好的重复控制器应满足: 当 $z = e^{j\omega}$, $\omega = 2n\pi/N$, $n = 0, 1, \dots, N-1$ 时, 有

$$|G_{\text{DE}}(z^{-1})| = 0 \quad (15)$$

由式(15)可知, 此时扰动信号对输出的跟踪误差没有影响, 也就是说, 若外界进入系统的扰动的周期为 N 时, 即 $D(k) = D(k+N)$, 则其对于系统所造成的影响将在一个周期后被完全消除。实际上, 在式(14)中, $G_{\text{closed}}(z^{-1})$ 已经确定, 只有通过选择 $G_f(z^{-1})$ 使 $|G_{\text{DE}}(z^{-1})| = 0$ 。

可求出 RC 的传递函数 $G_{\text{rep}}(z^{-1})$ 为

$$G_{\text{rep}}(z^{-1}) = \frac{P(z^{-1})z^{-N}}{S(z^{-1})(1-z^{-N})} \quad (16)$$

式中： $P(z^{-1})/S(z^{-1})$ 为 RC 后面施加的滤波器多项式； $z^{-N}/(1-z^{-N})$ 为基本 RC 的闭环传递函数。

具有 $G_{\text{rep}}(z^{-1})$ 的闭环反馈系统的特征多项式为

$$D_1(z^{-1}) = S(z^{-1})A(z^{-1})(1-z^{-N}) + z^{-d}z^{-N}B(z^{-1})P(z^{-1}) = 0 \quad (17)$$

在式(17)中，必须选择适当的 $S(z^{-1})$ 与 $P(z^{-1})$ ，以使得特征多项式实现渐近稳定。若 $z^{-d}z^{-N}B(z^{-1})$ 与 $(1-z^{-N})A(z^{-1})$ 为 2 个互质多项式，那么就可以确定特征多项式 $D_1(z^{-1})$ 的解 $S(z^{-1})$ 与 $P(z^{-1})$ 必然存在。将 $G_{\text{rep}}(z^{-1})$ 分解为 2 个多项式之积：

$$G_{\text{rep}}(z^{-1}) = G_f(z^{-1})G_r(z^{-1}) \quad (18)$$

$$G_f(z^{-1}) = \frac{P(z^{-1})}{S(z^{-1})} \quad (19)$$

$$G_r(z^{-1}) = \frac{z^{-N}}{1-z^{-N}} \quad (20)$$

如图 5 所示，将重复控制命令信号 $W(z^{-1})$ 视为误差信号 $E(z^{-1})$ 的函数 $f[E(z^{-1})]$ ，它就是系统的一个输入信号，系统亦受到自外界进入系统的扰动信号 $D(z^{-1})$ 的影响。那么此时，在一闭合回路反馈控制系统中，当外界的扰动信号进入系统的瞬间，受控对象 $G_p(z^{-1})$ 处于失控状态下， $f[E(z^{-1})]$ 与 $D(z^{-1})$ 2 个信号均未对 $G_p(z^{-1})$ 发生作用。直到扰动信号 $D(z^{-1})$ 经由闭环反馈回路而出现于系统输出时，才可以消除它对系统所造成的影响。因此，若系统本身的响应时间具有很大的延迟，单纯利用闭环反馈控制无法得到令人满意的控制效果^[12-14]。要借由重复控制来消除周期性的误差及扰动，就必须使系统于前一个周期误差现象产生时，预先反应至系统的输出。由图 5 可以看出， $W(z^{-1})$ 至系统输出 $Y(z^{-1})$ 的传递函数为

$$G_{\text{WY}}(z^{-1}) = \frac{Y(z^{-1})}{W(z^{-1})} = \frac{G_c(z^{-1})G_p(z^{-1})}{1 + G_c(z^{-1})G_p(z^{-1})} \quad (21)$$

而 $W(z^{-1})$ 至系统输出 $Y(z^{-1})$ 的传递函数 $G_{\text{WY}}(z^{-1})$ 与

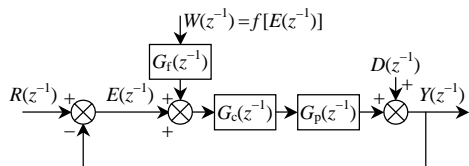


图 5 重复控制命令对系统作用图

Fig. 5 Block diagram of repetitive control command to the system

$G_{\text{closed}}(z^{-1})$ 相同，即 RC 的效能需经过 $G_{\text{closed}}(z^{-1})$ 所造成的延迟后才能反应至系统的输出。

为避免这种延迟而造成系统补偿上可能产生的失当，并使 $W(z^{-1})$ 反应至系统的输出能够达到零相位误差跟踪的效果，在 $W(z^{-1})$ 进入系统前，要先经过 $G_f(z^{-1})$ 作用，以补偿 $W(z^{-1})$ 对系统 $G_{\text{closed}}(z^{-1})$ 相位滞后。因此， $G_f(z^{-1})$ 可直接设计成 $G_{\text{closed}}^{-1}(z^{-1})$ ，使得 $W(z^{-1})$ 可以完整地反应至系统的输出上。关于 $G_f(z^{-1})$ 中 $S(z^{-1})$ 与 $P(z^{-1})$ 的解，文献[15]提出一个典型的 RC 设计方法：

$$P(z^{-1}) = K_r z^d A(z^{-1}) B^{*-}(z^{-1}) \quad (22)$$

$$S(z^{-1}) = B^+(z^{-1}) [B^{*-}(1)]^2 \quad (23)$$

式中： K_r 为 RC 增益； $B^+(z^{-1})$ 为可接受的零点； $B^{*-}(z^{-1})$ 为不可接受的零点；上标 d 为对象滞后的拍数。这样，由式(22)、(23)就得到一组解，由该组解可知，它会加快重复控制命令的作用时间，提前 d 拍作用于控制对象。

将式(19)和(20)改写为

$$G_f(z^{-1}) = \frac{A(z^{-1})B^{*-}(z^{-1})}{B^+(z^{-1})[B^{*-}(1)]^2} \quad (24)$$

$$G_r(z^{-1}) = \frac{K_r z^{-N}}{1-z^{-N}} \quad (25)$$

由于 $W(z^{-1})$ 是叠加在给定信号 $R(z^{-1})$ 上的，从输出 $Y(z^{-1})$ 对给定的响应上看，也需要将给定作用超前 d 拍给出。两信号的共同作用，保证了克服被控对象的滞后作用。

3 实验结果及其分析

参数选择为 $m = 16 \text{ kg}$, $B_v = 8.0 \text{ (N}\cdot\text{s)/m}$, $K_v = 0.1$, $v = 0.5 \text{ m/s}$, $P_n(z^{-1}) = 1/(16s)$ ，选取低通滤波器为

$$Q(s) = \frac{3(\tau_q s) + 1}{(\tau_q s)^3 + 3(\tau_q s)^2 + 3(\tau_q s) + 1} \quad (26)$$

式中 τ_q 为 $Q(s)$ 的时间常数，决定了 $Q(s)$ 的截止频率。用上述给出的仿真参数，来验证速度回路的比例控制器 K_v 以及 DOB 中的 $Q(s)$ 频宽对系统性能与抗扰能力的影响。

当 $\tau_q = 0.004$, $K_v = 0.1$ 时，输入命令 v 为 0.5 m/s 时，在未增设 RC 时系统阶跃响应曲线如图 6 所示；当 $\tau_q = 0.005$, $K_v = 2.5$ 时，输入命令 v 为 0.5 m/s 时，在未增设 RC 时系统阶跃响应曲线如图 7 所示。由图 6 可以看出，大部分周期性扰动被 DOB 抑制了，且起始时因静摩擦力等所产生的时间延迟也缩短了，由仿真结果可知，增加 $Q(s)$ 的频宽，可以提升

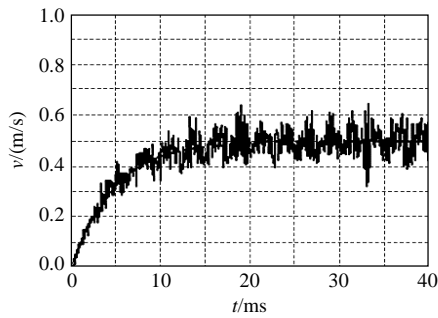


图6 无RC, $\tau_q=0.004$, $K_v=0.1$, 输入指令为0.5 m/s时系统的阶跃响应曲线

Fig. 6 Step response curve of velocity without RC when input order is 0.5 m/s ($\tau_q=0.004$, $K_v=0.1$)

系统抑制外在扰动的能力。图7利用增加比例控制器的增益,来提升系统的响应速度。由图7可知,速度回路的响应符合比例控制器增大的调整的结果,但是由于 $Q(s)$ 采用不高的频宽,使系统产生颤震现象。由此可知,DOB仍无法将电机的端部效应高频部分全部予以消除,高频部分的扰动继续残留在系统的回路中,使得系统产生颤震现象。为此,采用RC,以消除无法经DOB完全抑制的端部效应而造成的系统颤震现象。增设RC后,系统的速度响应如图8所示。

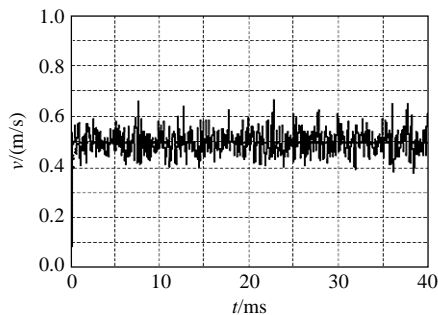


图7 无RC, $\tau_q=0.005$, $K_v=2.5$, 输入指令为0.5 m/s时系统的阶跃响应曲线

Fig. 7 Step response curve of velocity without RC when input order is 0.5 m/s ($\tau_q=0.005$, $K_v=2.5$)

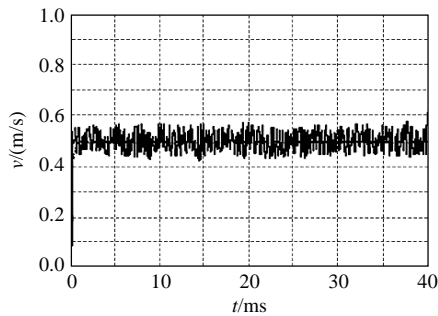


图8 有RC, $\tau_q=0.005$, $K_v=2.5$, 输入指令为0.5 m/s时系统的阶跃响应曲线

Fig. 8 Step response curve when input order is 0.5 m/s with RC ($\tau_q=0.005$, $K_v=2.5$)

由图6~8可以看出:DOB对不确定性、低频扰动,有很好的补偿效果,速度输出波形的低频部分大体上平滑;DOB对高频扰动的补偿效果较差,输出速度波形中有高频干扰存在,当增大频宽时,高频滤除效果较好;DOB能消除端部效应的大部分干扰影响,但还存在残余作用,导致输出速度波形存在正弦波动;增设RC后,速度的阶跃响应波动幅值明显减小,这表明RC很好地抑制了周期性扰动。

利用DSP TMS320 LF2407A对基于DOB和RC的PMLSM系统进行实验研究,基于DSP控制的PMLSM伺服系统主要由PMLSM、PC+DSP运算控制单元、IPM主回路功率变换单元、动子电流检测单元和直线光栅尺速度检测单元等组成,其硬件结构如图9所示。基于DSP控制的PMLSM伺服系统实验装置如图10所示。

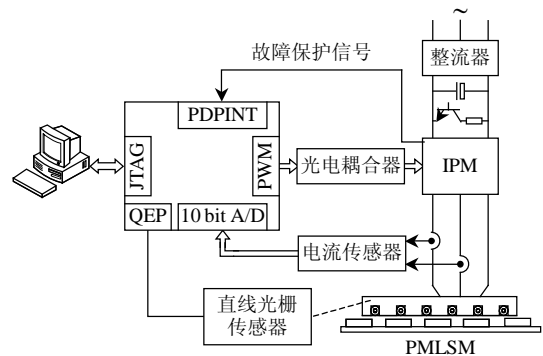


图9 基于DSP的PMLSM控制系统的硬件结构图

Fig. 9 Hardware frame map of PMLSM control system based on DSP

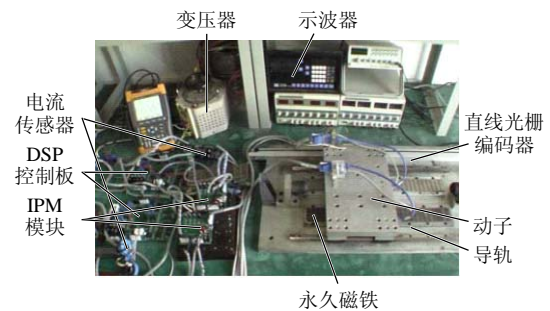


图10 基于DSP的PMLSM控制系统实验装置

Fig. 10 Photograph of PMLSM servo system experiment set based on DSP

为了验证本系统对扰动的抑制能力,在速度调节器前加入阶跃给定信号,观察动子响应的输出速度信号,在 $t=18\text{ms}$,突加负载 $F_f=25\text{N}$ 时,系统输出速度恢复情况如图11所示。由图11可以看出,PMLSM伺服系统立即做出快速响应,经过2~3ms,输出的响应速度恢复到原来的稳态值0.5 m/s。

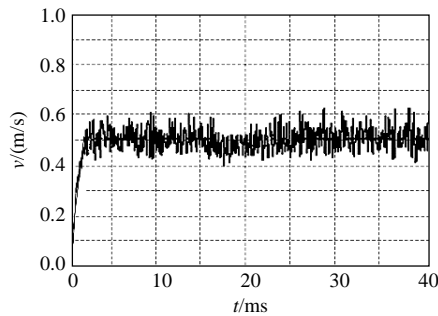


图 11 突加负载时系统输出速度响应曲线
Fig. 11 Velocity response curve of system output with sudden change load

4 结论

本文针对高精度数控机床对直线伺服系统的要求, 提出了基于 DOB 的鲁棒速度反馈控制器。采用这种控制结构的伺服系统能很好地克服系统的内外部扰动和模型的不确定性, 但是无法彻底消除 PMLSM 的端部效应, 故设计了重复控制器。通过采用结合 DOB 和 RC 的控制策略, 提高了 PMLSM 进给系统的性能, 增强了系统的鲁棒性, 减小了系统的跟踪误差, 对提高零件的加工精度具有重要意义。

参考文献

- [1] 郭庆鼎, 孙宜标, 王丽梅. 现代永磁电动机交流伺服系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 138-146.
Guo Qingding, Sun Yibiao, Wang Limei. Modern PMSM and AC-servo system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006: 138-146 (in Chinese).
- [2] 林家春, 李伟, 赵彤, 等. 永磁直线同步电动机推力波动抑制策略[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 449-452.
Lin Jiachun, Li Wei, Zhao Tong, et al. Force ripple suppression strategy in permanent magnet linear synchronous motor[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(3): 449-452(in Chinese).
- [3] Li Xu, Bin Yao. Adaptive robust precision motion control of linear motors with ripple force compensations: theory and experiments[C]. 2000 IEEE International Conference on Control Applications, USA, 2000.
- [4] Tan K K, Lee T H, Dou H, et al. Force ripple suppression in iron-core permanent magnet linear motors using an adaptive dither[J]. Journal of the Franklin Institute-Engineering and Applied Mathematics, 2004, 341(4): 375-390.
- [5] 赵希梅, 郭庆鼎. 为提高轮廓加工精度采用 DOB 和 ZPETC 的直线伺服鲁棒跟踪控制[J]. 电工技术学报, 2006, 21(6): 111-114.
Zhao Ximei, Guo Qingding. Linear servo robust tracking control based on DOB and ZPETC to improve the contour machining precision[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(6): 111-114(in Chinese).
- [6] Mizuochi M, Tsuji T, Ohnishi K. Improvement of disturbance suppression based on disturbance observer[J]. International Workshop on Advanced Motion Control, 2006, 229-234.
- [7] Wang C C, Tomizuka M. Design of robustly stable disturbance observers based on closed loop consideration using H_∞ infinity optimization and its applications to motion control systems[C]. 2004 American Control Conference (AAC), Berkeley, CA, 2004.
- [8] Wang Y, Zhen H X, Han D. Robust internal model control with feedforward controller for a high-speed motion platform[C]. 2005 IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems, Shanghai, China, 2005.
- [9] Xu J X, Yan R. On repetitive learning control for periodic tracking tasks[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 2006, 51(11): 1842-1847.
- [10] 赵希梅, 郭庆鼎. 活塞加工中的周期性参考与干扰信号的鲁棒二自由度控制[J]. 电工技术学报, 2006, 21(3): 123-126.
Zhao Ximei, Guo Qingding. Robust 2DOF control for periodic reference signal and disturbance signal in piston machining[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(3): 123-126(in Chinese).
- [11] 赵希梅, 郭庆鼎. 基于学习前馈补偿的直线伺服系统 H_∞ 鲁棒跟踪控制[J]. 电工技术学报, 2005, 20(4): 78-82.
Zhao Ximei, Guo Qingding. H_∞ robust tracking control for the linear servo system based on the learning feedforward compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(4): 78-82(in Chinese).
- [12] Güvenc L. Stability and performance robustness analysis of repetitive control systems using structured singular values[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1996, 118(3): 593-597.
- [13] Kim B S, Tsao T C. An integrated feed-forward robust repetitive control design for tracking near periodic time varying signals[C]. Japan-USA on Flexible Automation, Japan, 2002.
- [14] Krishnamoorthy K, Lin C Y, Tsao T C. Design and control of a dual stage fast tool servo for precision machining[C]. 2004 IEEE International Conference on Control Applications, Taiwan, China, 2004.
- [15] Cao Runzi, Low K S. Repetitive model predictive control of a precision linear motor drive[C]. The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Taiwan, China, 2007.



赵希梅

收稿日期: 2009-12-09。

作者简介:

赵希梅(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要研究直线伺服、数控、鲁棒控制等, zhaoximei79@yahoo.com.cn;

郭庆鼎(1939—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究数控、交流伺服、智能控制等。

(编辑 李婧妍)