

文章编号: 1001-0920(2003)02-0250-04

直线伺服双位置环同步进给加速度 H 鲁棒控制器设计

蓝益鹏, 郭庆鼎

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110023)

摘要: 以数控龙门移动式镗铣加工中心龙门柱纵向同步控制为背景, 设计 H 鲁棒控制器, 对加速度进行状态反馈补偿控制, 使其在不平衡负载或不确定性扰动作用下快速恢复到同步状态, 从而实现位置、速度和加速度三重同步。驱动元件采用直线永磁同步伺服电机。仿真结果表明, 该方案鲁棒性强, 动态过程同步误差小。

关键词: 直线伺服; 双位置环; 加速度; H 鲁棒控制器

中图分类号: TP271+.2 **文献标识码:** A

Acceleration H robust controller design for linear servo double position loop synchronized feed

LAN Yi-peng, GUO Qing-ding

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: The gantry synchronous control problem of numerical control gantry moving type milling machining centers is studied. An H robust controller is presented to build up state feedback, which can rapidly restore synchronous state under the condition of unbalanced loads or random disturbances. The result of position, speed and acceleration synchrodrive control is achieved. Linear permanent magnet synchronous servo motors (LPM SM) are used as driving parts. The results of simulation indicate that the proposed scheme has strong robustness, and that the synchronous error is lower during dynamic process.

Key words: Linear servo; Double position loop; Acceleration; H robust controller

1 引言

数控龙门移动式镗铣加工中心在加工过程中, 要求龙门两侧立柱快速反应, 高精度平行移动。尽管龙门两侧立柱采用两套完全相同的传动机构, 但由于横梁及其匹配的刀架、龙门及其配件等所组成的大型移动部件, 其结构与受力不完全对称, 并由于某些制造误差的不一致性以及加工过程中各种不确定性扰动, 最终还是不能保证横梁或龙门框架两边移动高度的一致性。这样, 机械上的强耦合, 将导致移动部件扭斜, 破坏同步进给精度。因此, 高精度同

步进给技术仍然是目前重型机床行业所面临的重大研究课题。

基于 H 控制理论, 以扰动输入到系统输出的传递函数的无穷范数作为目标函数, 设计鲁棒控制器, 使扰动输入, 包括负载扰动和加工时产生的扭矩扰动得到有效抑制。通过 H 鲁棒控制器对加速度进行补偿控制, 使其在不平衡负载或不确定性扰动下快速恢复同步, 以实现位置、速度和加速度三重同步, 从而解决龙门框架两边移动不一致性问题。速度环采用响应速度快且抑制扰动能力强的 IP 控制

收稿日期: 2001-11-27; 修回日期: 2002-02-28。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50075057)。

作者简介: 蓝益鹏(1962—), 男, 陕西华县人, 讲师, 硕士生, 从事交流伺服、鲁棒控制等研究; 郭庆鼎(1939—), 男, 辽宁盖县人, 教授, 博士生导师, 从事交流伺服、数控技术等研究。

回路外部扰动,位置控制用比例调节器,速度控制用IP调节器,设计时二者合一,称为IP控制器。H鲁棒反馈控制器作为同步控制器,抑制扰动保证同步性能。

3.2 H 控制器的设计

广义系统的框图如图2所示。图中 $G(s)$ 为增广被控对象, z 为评价信号。

增广被控对象的状态空间实现为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{D}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{D}{M} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{M} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{M} \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & 0 \\ 0 & \frac{1}{M} \end{bmatrix} u \\ z &= \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & -q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_3 & -q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix} u \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T, \quad \omega = [\dot{\omega}_1 \ \dot{\omega}_2]^T$$

$$u = [u_1 \ u_2]^T, \quad z = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4 \ z_5]^T$$

$q_1 > 0, q_2 > 0, r_1 > 0, r_2 > 0$ 为加权系数。现在,问题归结为如下的H标准设计问题:

设增广被控对象的状态空间实现如下

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1\omega + B_2u \\ z = C_1x + D_{12}u \end{cases} \quad (7)$$

且 D_{12} 列满秩, $(A \ B_2)$ 可稳定。即

$$G(s) = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & O & D_{12} \\ I & O & O \end{bmatrix} \quad (8)$$

对被控对象(7)要求设计状态反馈控制器

$$u = Kx \quad (9)$$

使得闭环系统(8)和(9)内部稳定且

$$T_{zw}(s) < 1 \quad (10)$$

对于上述系统,存在如下定理^[5]:

定理1 对于给定的被控对象(7),存在状态反馈阵 K 使得闭环系统(8)和(9)内部稳定且使式(10)成立的充分必要条件是存在正定阵 X 满足Riccati不等式

$$A^T X + XA + XB_1B_1^T X + C_1^T C_1 - (XB_2 + C_1^T D_{12})(D_{12}^T D_{12})^{-1}(B_2^T X + D_{12}^T C_1) < 0 \quad (11)$$

若上述不等式有正定解 X ,则使闭环系统稳定且式(10)成立的状态反馈阵由

$$K = -(D_{12}^T D_{12})^{-1}(B_2^T X + D_{12}^T C_1) \quad (12)$$

给出。利用MATLAB软件包求解式(11)和式(12)即可求得需要的控制器 K 。

4 仿真实验结果

采用参数相同的两台直线电机对系统进行仿真研究。电机参数: $K_T = 25, P(s) = 1/(11s + 1.2)$ 。求得IP位置控制器的参数为 $K_S = 11.34, K_I = 809.2, K_P = 25.61$ 。在 $q_1 = 1000, q_2 = q_3 = 0.1, r_1 = r_2 = 0.5$ 时,求得H状态反馈控制器为

$$K = \begin{bmatrix} -1.63299 & -538.84 & 538.84 & -88.1 & 88.1 \\ 1.63299 & 538.84 & -538.84 & 88.1 & -88.1 \end{bmatrix}$$

当 $t = 1$ s时1轴突加200N的阶跃扰动,当 $t = 2$ s时2轴突加100N的阶跃扰动,加速度输出响应曲线如图3所示。图中①表示1轴,②表示2轴。图4为速度输出响应曲线,图中①为引入加速度内环后1轴的速度响应曲线,在1.1s时达到同步;②为没有加速度内环时该轴的速度响应曲线,在1.2s时达到同步。图5为位置同步误差曲线,图中①为引入加速度内环后1轴的位置响应曲线,在1.18s时达到同步;②为没有加速度内环时该轴的位置在1.31s时达到同步。由图可见,本文方案具有很好的位置、速度和加速度三重同步性能,而且加速度最早达到同步,以保证后者快速达到同步。以上结果是在理想状态下得到的,与实际情况会有所区别。

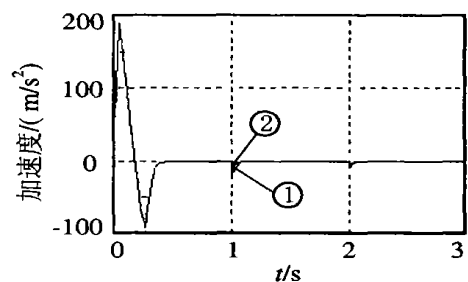


图3 加速度响应曲线

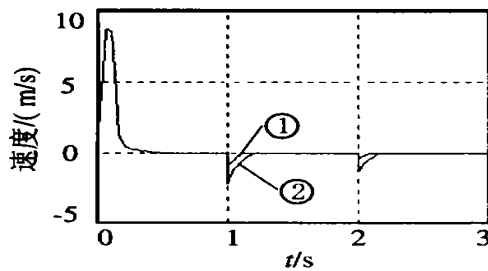


图 4 速度响应曲线

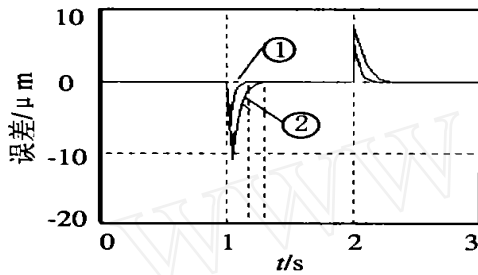


图 5 位置同步误差曲线

5 结 论

本文在分析直线伺服双位置环不同步的主要原因基础上,提出了位置、速度和加速度三重同步方

案。设计的 H 鲁棒控制器,提高了系统的同步性能。仿真实验结果表明,三重同步控制系统性能很好,优于只有位置、速度控制的系统。

参考文献 (References):

- [1] 郭庆鼎,王成元,周美文,等. 直线交流伺服系统的精密控制[M]. 北京:机械工业出版社,2000
- [2] Lee H S. Robust motion controller design for high-accuracy positioning system [J]. *IEEE Trans Industrial Electron*, 1996, 43(1): 48-55
- [3] 郭庆鼎,迟林春,王成元. 基于神经网络给定补偿的永磁同步直线伺服系统 H 控制[J]. 控制与决策, 2000, 15(1): 75-78
(Guo Qingding, Chi Linchun, Wang Chengyuan. H control for linear permanent magnet synchronous AC servo system with a command-compensator based on artificial neural network [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(1): 75-78)
- [4] Mitsuhashi O. Linear motors drive motion control [J]. *Design Engineering*, 1998, 44(10): 17-19
- [5] 申铁龙. H 控制理论及应用[M]. 北京:清华大学出版社,1996

(上接第 249 页)

5 结 论

基于 HM 模型解决了一类非线性系统跟踪控制问题。控制器的设计只要求不确定性满足匹配条件,而无需知道不确定性的界,且能够处理不确定参数变化范围更广的情况,减少了系统设计中的保守性。采用自适应鲁棒跟踪控制器确保了系统的稳定性和鲁棒性。倒立摆实验验证了该方案的有效性。

参考文献 (References):

- [1] Tanaka K, Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control system [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 45(2): 185-199
- [2] Tanaka K, Sano M. Fuzzy stability criterion of a class of nonlinear systems [J]. *Information Science*, 1993, 70(1): 1-26
- [3] Cao S G, Feng G. Modelling of complex control systems [A]. *Proc of the IFAC Symposium of Nonlinear Control System Design* [C]. California, 1995: 934-939
- [4] Cao S G, Rees N W, Fend G. Stability analysis and design for a class of continuous time fuzzy control systems [J]. *Int J of Control*, 1996, 64(6): 1069-1087.
- [5] Tian H Q. *Sliding Mode Control Theory and Application* [M]. Wuhan: Wuhan Publishing Company, 1995: 40-50
- [6] 刘粉林,刘缓,黎阳生,等. 含时变不确定线性系统的自适应鲁棒跟踪控制[J]. 控制与决策, 2001, 16(3): 322-325
(Liu F L, Liu Y, Li Y S, et al. Adaptive robust tracking control for a class of linear systems with time-varying uncertainties [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(3): 322-325)

本刊荣获“百种中国杰出学术期刊”称号

本刊讯 2002 年 12 月 10 日,中国科学技术信息研究所 在京召开新闻发布会,公布了 2001 年度中国科技论文统计结果,表奖了部分科技期刊。按照该所出版的《2002 年版中国科技期刊引证报告》,《控制与决策》的总被引频次、他引率、影响因子、即年指标、基金论文比等项指标,在信息科学与系统科学类期刊中都是较高的,并被评为“百种中国杰出学术

期刊”。

这一成绩的取得,是与各方面的大力支持密不可分的。在此,本刊编委会和编辑部谨向所有关心和支持本刊工作的各方面专家学者和广大读者表示衷心的感谢!我们将再接再厉,开拓进取,与时俱进,再创佳绩,为进一步办好《控制与决策》而做出自己的努力。