

# 基于 PFC-(PID- $H_\infty$ ) 300 MN 模锻水压机动梁速度跟踪控制

黄长征<sup>1</sup>, 谭建平<sup>2</sup>

- (1. 韶关学院 机电工程系, 广东 韶关, 512005;
2. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙, 410083)

**摘要:** 提出基于 PFC-(PID- $H_\infty$ ) 的双闭环串级速度跟踪控制策略, 内环为基于 PID- $H_\infty$  串级控制的凸轮转角控制环, 外环为基于预测函数控制器的动梁速度控制环。将内控制环及后续水路系统看作 PFC 的广义被控对象, 将广义被控对象简化为一阶加纯滞后对象, 作为 PFC 的预测模型, 设计水压机动梁速度跟踪控制系统, 从模型失配、外加干扰 2 个方面对控制系统进行仿真。仿真和试验结果表明: 该控制系统稳态精度、动态品质、跟踪性能和鲁棒性好, 在不同载荷下, 动梁速度控制精度为 0.26~1.35 mm/s。

**关键词:** 模锻水压机; 动梁; 速度控制; 预测函数控制(PFC)

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2010)03-0966-05

## Speed tracking control of moving beam for 300 MN die forging hydraulic press based on PFC-(PID- $H_\infty$ )

HUANG Chang-zheng<sup>1</sup>, TAN Jian-ping<sup>2</sup>

- (1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Shaoguan University, Shaoguan 512005, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** A double-closed-loop PFC-(PID- $H_\infty$ ) cascade speed tracking control system of moving beam for 300 MN die forging hydraulic press was put forward and designed. The inner control loop is cam rotational angle PID- $H_\infty$  cascade control. The outer control loop is moving beam's speed PFC control. The inner control loop and subsequent waterway system were regarded as a generalized controlled object of PFC; the generalized controlled object was simplified as an one-order system with time delay, and as a prediction model of PFC. Some simulations of the PFC-(PID- $H_\infty$ ) system were made in the mismatched model and the disturbance. The simulation and test results show that the control system has good steady-state accuracy, dynamic characteristic, robustness and traceability, and the speed control accuracy is 0.26~1.35 mm/s under different loads.

**Key words:** die forging hydraulic press; moving beam; speed control; predictive functional control(PFC)

300 MN 模锻水压机是当前亚洲最大的模锻液压机, 是我国国防和基础建设的关键设备。速度控制技术是其关键技术之一, 在等温锻压或模拟等温锻压中必须对动梁速度进行跟踪控制<sup>[1-2]</sup>。300 MN 模锻水压机动梁速度控制系统具有巨大惯性、载荷瞬变和控制

滞后等特性, 这些都影响水压机动梁速度跟踪控制的响应速度、控制精度和鲁棒性<sup>[3]</sup>。所以, 研究其动梁速度跟踪控制具有非常重要的理论意义和工程意义, 可为等温锻压或模拟等温锻压提供技术基础, 为同类控制提供参考。目前, 解决上述问题的方法主要

收稿日期: 2009-05-28; 修回日期: 2009-08-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划("863"计划)项目(2007AA04Z417)

通信作者: 黄长征(1970-), 男, 湖南耒阳人, 博士, 副教授, 从事现代机电液集成控制理论与应用研究; 电话: 15602346575; E-mail: hcchn@163.com

有前馈 PID 串级控制和预测控制。采用第 1 种方法不能取得满意的控制效果,当前大多采用预测控制<sup>[4-5]</sup>。Richalet 等<sup>[6-7]</sup>阐述了建立模型预测启发控制或称模型算法控制产生的动因、机理及在工业过程中的应用。目前,预测控制主要有动态矩阵控制(DMC)<sup>[8]</sup>、扩展时域预测自适应控制<sup>[9]</sup>、扩展时域自适应控制<sup>[10]</sup>、广义预测控制(GPC)<sup>[11]</sup>、广义极点配置预测控制<sup>[12-13]</sup>、连续时域广义预测控制<sup>[14]</sup>和内模控制(IMC)<sup>[15]</sup>等。预测函数控制(PFC)是第 3 代模型预测控制算法,它是由 Richalet 和 Kuntze 等<sup>[16]</sup>在 20 世纪 80 年代提出的,PFC 控制把控制输入的结构视为关键问题,可克服其他模型预测控制可能出现规律不明的控制输入问题,同时具有良好的跟踪能力及较强的鲁棒性,在工业过程中得到广泛应用,如在机器人、雷达的目标跟踪、传热设备和反应炉等到工业过程中取得了一定成果。因此,该水压机动梁速度跟踪控制系统采用 PFC 控制来解决其控制滞后、速度跟踪和鲁棒性问题<sup>[4]</sup>。

### 1 动梁速度跟踪控制原理

针对 300 MN 模锻水压机动梁速度跟踪控制系统的特点,将 PFC 控制和 PID 控制相结合,采用基于 PFC-(PID-H<sub>∞</sub>)双闭环串级控制策略。其控制原理框图如图 1 所示。应用 PFC 控制为监督层,PID-H<sub>∞</sub>控制为控制层的透明控制结构。控制系统由 2 个闭环系统组成,内控制环为基于 PID-H<sub>∞</sub>串级控制的凸轮转角控制环,外控制环为基于预测函数控制器的动梁速度跟踪控制环。将内控制环及后续水路系统看作 PFC 的广义被控对象,将广义被控对象简化为一阶加纯滞后对象,

作为 PFC 的预测模型。这种控制系统综合了 PFC 控制、H 控制及常规 PID 控制的优点。其控制原理是:基于 PFC 控制原理,由给定的动梁速度根据历史数据和预测模型求得凸轮轴目标转角,转角控制采用 PID-H<sub>∞</sub>串级控制以便保证凸轮转角控制的鲁棒性和控制精度<sup>[11]</sup>;通过控制转角来控制水路系统的流量,从而控制水压机的动梁速度。

### 2 动梁速度预测函数控制器设计

#### 2.1 锻压速度曲线设定

根据生产工艺要求确定 1 条锻压速度曲线。

#### 2.2 预测函数控制器设计

##### 2.2.1 预测模型

将基于 PID-H<sub>∞</sub>串级控制器的凸轮轴转角控制回路看作 PFC 的广义对象,广义对象看作一阶加纯滞后系统。预测控制模型为:

$$G_m(s) = \frac{k_m}{t_m s + 1} e^{-t_d s} \tag{1}$$

式中: $k_m$ 为增益; $t_m$ 为时间常数; $t_d$ 为滞后时间常数。 $k_m = 0.77, t_m = 0.7, t_d = 1.1$ <sup>[17]</sup>。

##### 2.2.2 参考轨迹

对于该稳定系统,PFC 控制器参考轨迹采用一阶指数形式,即

$$y_r(k+i) = c(k+i) - \lambda^i c(k) - y_p(k)$$

式中: $y_r$ 为参考轨迹; $\lambda = e^{-t_s/t_r}$ , $t_s$ 为采样周期; $t_r$ 为 95%的参考轨迹响应时间; $c$ 为工艺设定值; $y_p$ 为系统输出。

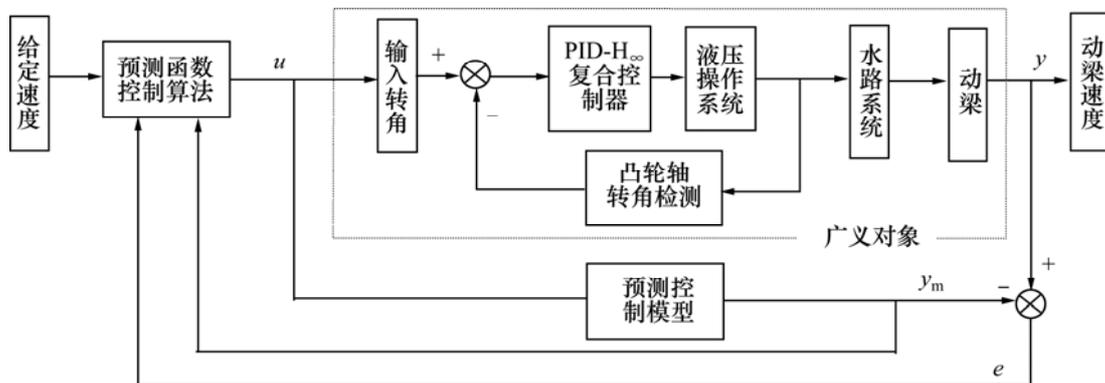


图 1 基于 PFC-(PID-H<sub>∞</sub>)动梁速度跟踪控制原理图

Fig.1 Schematic of speed tracking control for moving beam based on PFC-(PID-H<sub>∞</sub>)

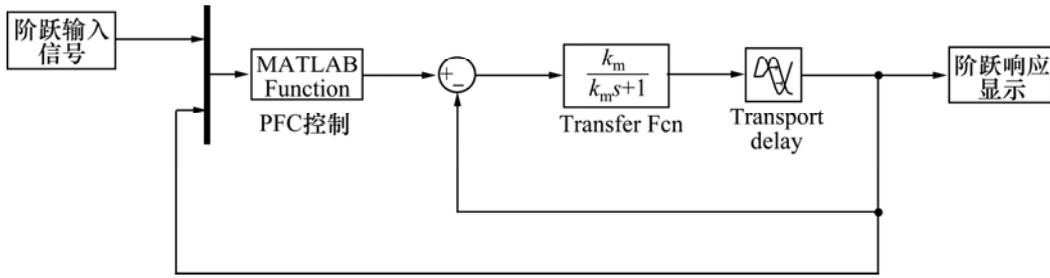


图 2 动梁速度 PFC 动态响应 MATLAB 仿真模型

Fig.2 Simulation model based on MATLAB of PFC dynamic response for moving beam's speed

### 3 基于 PFC-(PID-H<sub>∞</sub>)动梁速度控制仿真

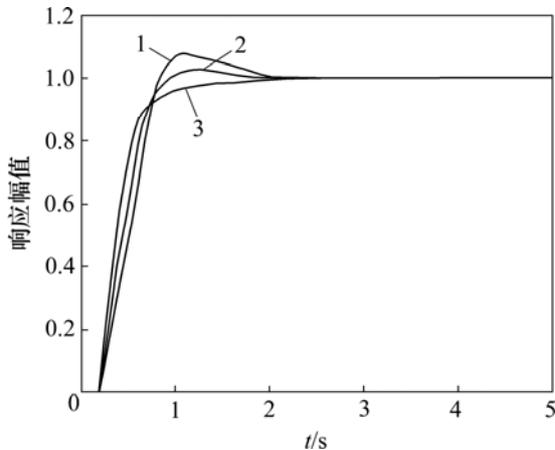
为了解基于 PFC-(PID-H<sub>∞</sub>)双闭环串级动梁速度控制系统的性能,下面从模型失配和外加干扰 2 个方面进行仿真研究。动态响应 MATLAB 仿真模型如图 2 所示。

#### 3.1 模型失配

##### 3.1.1 时间常数失配

广义受控对象模型如式(1)所示。当时间常数  $t_m$  分别为 0.3, 0.7 和 0.8 时,控制系统动态响应仿真曲线如图 3 所示。由图 3 可知:当时间常数增大时,过渡过程时间变长,响应的初始阶段伴有波动,有不稳定趋势;当时间常数减小时,超调量变大,过渡时间变长。

$$G_m(s) = \frac{0.77}{0.7s+1} e^{-1.1s} \quad (1)$$



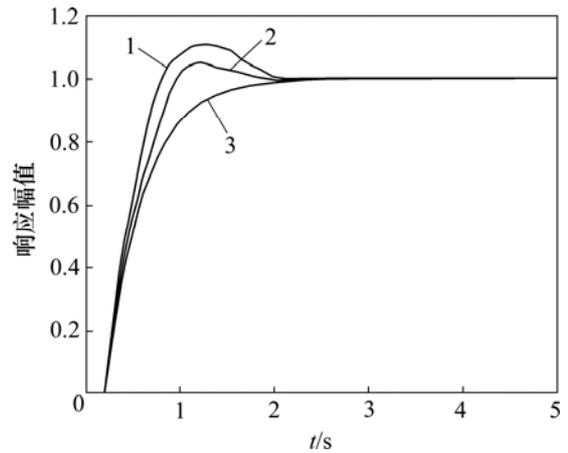
时间常数  $t_m$ : 1—0.3; 2—0.7; 3—0.8

图 3 时间常数失配时系统动态响应仿真曲线

Fig.3 Dynamic response simulation curve when time constant is mismatched

##### 3.1.2 增益失配

广义受控对象模型如式(1)所示。当增益  $k_m$  分别为 0.50, 0.77 和 1.00 时,控制系统动态响应仿真曲线如图 4 所示。可见:当增益失配时,虽然系统保持稳定,但存在较大的余差;当比例系数增大时,过渡过程时间变长;当比例系数减小时,响应加快,超调量增大。



增益  $k_m$ : 1—0.50; 2—0.77; 3—1.00

图 4 增益失配时系统动态响应仿真曲线

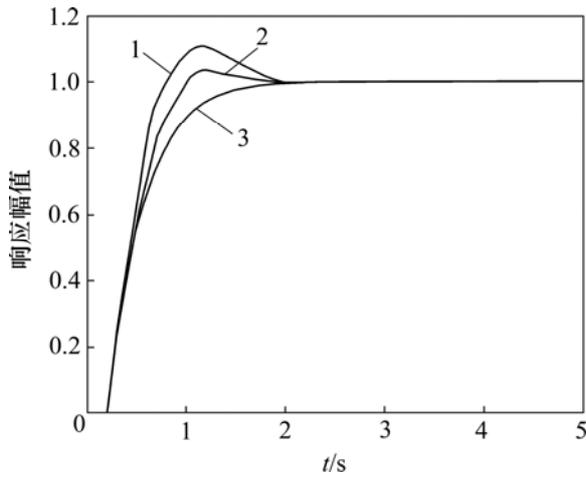
Fig.4 Dynamic response simulation curve when gain is mismatched

##### 3.1.3 滞后失配

广义受控对象模型如式(1)所示。当滞后时间常数  $t_d$  分别为 0.8, 1.1 和 1.2 时,控制系统动态响应仿真曲线如图 5 所示。由图 5 可见:因滞后失配,当延迟时间增大时,响应速度变慢,而且在接近稳态时有小的波动;当延迟时间减小时,响应速度加快,但超调量增大,过渡过程时间变长。

#### 3.2 外加干扰

系统在第 4 s 加入 20%负荷阶跃干扰时,控制系统动态响应仿真曲线见图 6。由图 6 可知:基于 PFC-H<sub>∞</sub>



$t_d$ : 1—0.8; 2—1.1; 3—1.2

图 5 延迟时间常数失配时动态响应仿真曲线

Fig.5 Dynamic response simulation curve when lag time constant is mismatched

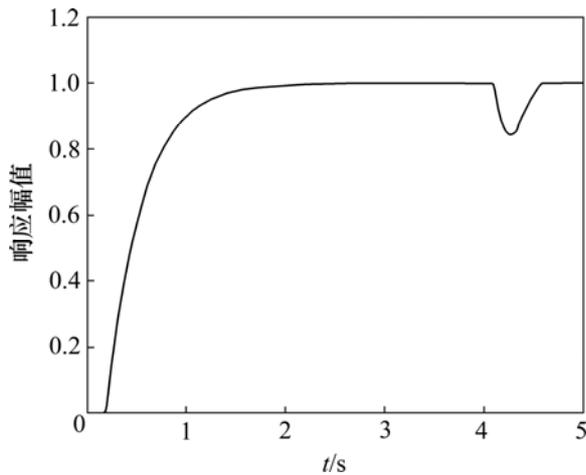


图 6 阶跃干扰下系统动态响应仿真曲线

Fig.6 Dynamic response simulation curve under disturbance

双闭环串级控制系统具有很强的外加抗干扰能力, 外加干扰基本不会对控制系统品质造成不良影响, 能较好地满足工程要求。可见: 基于 PFC-(PID-H<sub>∞</sub>) 的 300 MN 模锻水压机速度控制系统在预测模型失配时, 控制系统仍具有良好的控制品质, 只是在模型失配过大, 特别是模型延迟时间失配过大时, 系统性能变差; 当系统受到外加干扰时, 系统具有很强的外加抗干扰能力。所以, PFC 具有较强的抗干扰能力和鲁棒性, 具有较大的稳态精度、良好的动态品质和跟踪性能。同时, 控制算法简单, 对预测模型准确度要求低, 易于工程实现, 能满足工程要求。

### 4 试验

对 300 MN 模锻水压机动梁速度控制系统, 在不同速度、不同工艺条件下, 使水压机自动沿着某一速度曲线运行, 其中 1 种工艺条件下的速度实测曲线如图 7 所示; 在一种给定速度曲线条件下, 实测动梁速度跟踪曲线如图 8 所示。

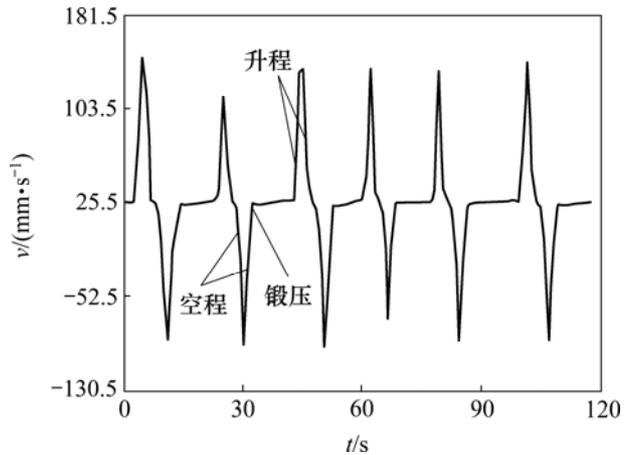


图 7 1 种工艺条件下实测速度曲线

Fig.7 Speed test curve under a process conditions

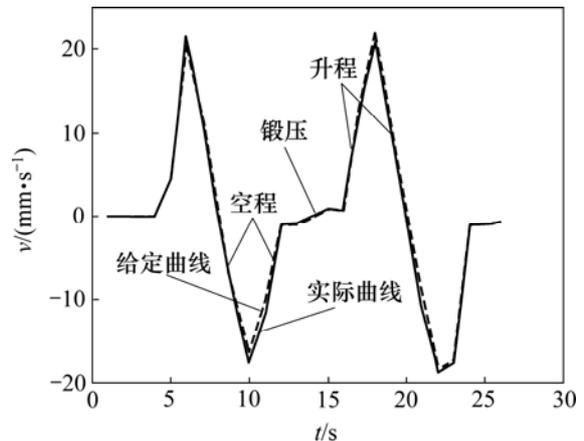


图 8 速度跟踪试验曲线

Fig.8 Speed tracking test curves

试验结果表明:

(1) 在空程、升程和锻压这 3 个阶段中锻压阶段动梁速度控制效果最好, 重复性最好, 空程次之。但在水压机动梁速度控制中, 主要对锻压速度的控制要求最高; 在空程、升程 2 个阶段, 对速度控制要求较低, 所以, 能满足生产要求。

(2) 在水压机低速锻压阶段比高速锻压阶段的动

梁速度控制效果好。这主要是因为低速阶段动梁速度慢,速度容易控制。

(3) 水压机锻压速度变化慢阶段比速度变化快阶段的速度控制效果好。这主要是因为水压机控制系统的惯性大,在速度变化快的阶段,锻压速度控制较难。

(4) 速度跟踪控制效果良好,在锻压阶段效果优于其他阶段效果,能满足实际要求。

综上所述,动梁速度控制系统的测试结果与仿真结果相互吻合,证实了控制理论、控制模型、控制策略的正确性、可靠性和实用性<sup>[17]</sup>。

## 5 结论

(1) 基于 PFC-(PID- $H_\infty$ )的 300 MN 模锻水压机速度控制系统具有较强的抗干扰能力和鲁棒性、较大的稳态精度、良好的动态品质和跟踪性能。

(2) 在空程、升程和锻压这 3 个阶段中,锻压阶段的动梁速度控制效果最好,重复性最好,空程次之。

(3) 在水压机低速锻压阶段比高速锻压阶段的动梁速度控制效果好。水压机锻压速度变化慢阶段比速度变化快阶段的速度控制效果好。在锻压阶段效果的速度跟踪控制效果优于其他阶段的控制效果,能满足实际要求。

(4) 仿真结果和试验结果相吻合,证实了研究方法和模型建立的正确性,为同类系统研究提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 谭建平,黄长征,刘彬,等. 瞬变载荷下巨型模锻水压机液压操作控制策略研究[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 272-276.  
TAN Jian-ping, HUANG Chang-zheng, LIU Bin, et al. Control strategy of hydraulic operation control system under the transient load in giant hydraulic press[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 272-276.
- [2] 黄长征,谭建平. 液压机分配阀芯驱动凸轮升程曲线优化设计[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(2): 303-308.  
HUANG Chang-zheng, TAN Jian-ping. Optimization design for cam lifting curve used to drive spool of distributor in hydraulic press[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(2): 303-308.
- [3] 黄长征,谭建平. 300 MN 水压机动梁驱动系统锻压速度动态响应特性[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(5): 1023-1028.  
HUANG Chang-zheng, TAN Jian-ping. Forging speed's response characteristic of moving beam drive system for 300 MN die forging hydraulic press[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2008, 39(5): 1023-1028.
- [4] Anwar S. Generalized predictive control of yaw dynamics of a hybrid brake-by-wire equipped vehicle[J]. Mechatronics, 2005, 15(9): 1089-1108.
- [5] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 10-13.  
XI Yu-geng. Predictive control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993: 10-13.
- [6] Richalet J, Rault A, Testud J L, et al. Model predictive heuristic control: Application to industrial processes[J]. Automatica, 1978, 14(5): 413-428.
- [7] Rouhani R, Mehra R. K. Model algorithmic control (MAC), basic theoretical properties[J]. Automatica, 1982, 18(4): 401-414.
- [8] Culter C R, Ramaker B L. Dynamic matrix control: A computer control algorithm[C]//Proc JACC. SanFrancisco, 1980: 5-8.
- [9] De Keyser R M C, Van Cauwenberghe A R. A self-tuning multistep predictor application[J]. Automatica, 1981, 17(1): 167-174.
- [10] Ydstie P S. Extended horizon adaptive control[C]//Proceedings of IFAC 9th World Congress. Budapest, Hungary: Pergamon Press Ltd, 1984: 133-137.
- [11] Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control (Part 1): The basic algorithm; Part 2: Extensions and interpretations[J]. Automatica, 1987, 23(2): 137-160.
- [12] Lelic M A, Zarrop M B. Generalized pole-placement self-tuning controller (Part 1): Basic algorithm[J]. Intl J Control, 1987, 46(2): 547-568.
- [13] Lelic M A, Zarrop M B. Generalized pole-placement self-tuning controller[J]. Intl J Control, 1987, 46(2): 569-601.
- [14] Demircioglu H, Gawthrop P J. Continuous-time generalized predictive control (CGPC)[J]. Automatica, 1991, 27(1): 55-74.
- [15] Garcia C E, Morari M. Internal model control 1. A unifying review and some new results[C]//I&EC Process Des Dev. 1982: 308-323.
- [16] Kuntze H B, et al. On the predictive functional control of an elastic industrial robot[C]//Proc 25th CDC. Athens, Greece, 1986: 1877-1881.
- [17] 郑征,田书. 基于 MATLAB 的辅助变量法参数辨识与仿真[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(7): 127-129.  
ZHENG Zheng, TIAN Shu. Supplementary variable parameter identification and emulate based on MATLAB[J]. Computer Applications and Software, 2004, 21(7): 127-129.

(编辑 陈爱华)