

大型快锻液压机Takagi-Sugeno模糊系统设计

王丽薇[†]

(太原重工股份有限公司 技术中心, 山西 太原 030024)

摘要: 利用ITI-SimulationX软件建立了大型快锻液压机本体和主控系统的精确仿真模型,进行了三维本体与一维系统的集成仿真,结果表明:液压机热态锻造精度达到 ± 1 mm,最高锻造频次达85次/min;针对大型快锻液压机工艺范围广、工况复杂的特点,利用MATLAB/Simulink软件设计了Takagi-Sugeno模糊控制器,以主控系统锻造行程、锻造深度、最大工作压力、工作缸数量和主泵数量作为输入变量,高频响比例阀启闭曲线作为输出变量,依据主控系统仿真结果确定模糊推理规则,通过ITI-SimulationX与MATLAB/Simulink软件协同仿真接口模块实现了对主控系统的智能控制,使液压机在各种工艺参数下,均能达到较高锻造精度和较快响应速度,更好地适应了大型快锻液压机的生产工艺需求。

关键词: 快锻液压机; Takagi-Sugeno模糊系统; 协同仿真

中图分类号: TG315.4 文献标识码: A

Takagi-Sugeno fuzzy system design of large fast forging hydraulic press

WANG Li-wei[†]

(Technology Center, Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030024, China)

Abstract: The exact simulation model of the body and the main control system of a large fast forging hydraulic press is built by using the ITI-SimulationX software. The integrated simulation of the three-dimensional body and the one-dimensional system is performed. The results show that fast forging hydraulic press can attain the forging precision of ± 1 mm and the maximum forging frequency of 85 strokes/min during hot forging. For a large fast forging hydraulic press, which has wide process range and complicated operating conditions, we design the Takagi-Sugeno fuzzy controller which includes the forging stroke, forging penetration, maximum working pressure, working hydraulic cylinder number and the number of main pumps as input variables, and the open-close curve of the high-frequency-response proportional valve as output variable. Fuzzy reasoning rules are deduced from simulation results of the main control system by using MATLAB/Simulink software. The intelligent control for the main control system is realized by using the co-simulation interface modules of ITI-SimulationX and MATLAB/Simulink, providing high forging precision and fast response speed under different technological parameters and accommodating to various process requirements for large fast forging hydraulic press.

Key words: fast forging hydraulic press; Takagi-Sugeno fuzzy system; co-simulation

1 引言(Introduction)

大型快锻液压机工艺范围广、工况复杂,经常工作在高压、大流量,或动作频繁切换等极端工况.应用智能控制方法使液压机达到理想工作状态已成为一种有效手段.

本文利用ITI-SimulationX仿真软件对大型快锻液压机本体和主控系统进行精确建模,并基于MATLAB/Simulink平台设计Takagi-Sugeno模糊控制器^[1-6],通过软件之间协同仿真接口将模糊控制策略引入系统模型,建立大型快锻液压机Takagi-Sugeno模糊系统,并通过协同仿真确定其工作特性.

2 主控系统建模与仿真(Modeling and simulation of main control system)

2.1 系统简介(System brief introduction)

快锻液压机动力系统、主控系统和充液系统是液压系统的重要组成部分.某大型快锻液压机液压系统简图如图1所示,动力系统为压机提供动力油源,其组成包括主油箱、主泵及其控制阀块,主泵控制阀块包括单向阀、溢流阀和卸荷阀;主控系统通过控制主、侧缸和回程缸压力实现活动横梁快下、加压、卸压、回程和停止等动作,主、侧缸和回程缸均为柱塞缸,活动横梁通过柱塞与主、侧缸和回程缸分别连接,主、侧缸

和回程缸压力分别由相应的集成阀块控制;充液系统作用是在活动横梁快速下降时向工作缸提供大量油液,卸压和回程时接收工作缸排出油液,其组成主要包括充液罐组件及充液阀。

大型快锻液压机工作原理:主泵经由供油管道、工作缸进油阀向工作缸供油,回程缸与蓄能器连通,形成保压容腔;压下阶段,高压油进入工作缸,活动横梁下行,回程缸油液进入蓄能器储存能量;当活动横梁行至距下停点某位置,工作缸内高压油液通过开启高频响比例阀排回充液罐,待工作缸油液压力卸至一定值后,活动横梁在蓄能器作用下实现回程。

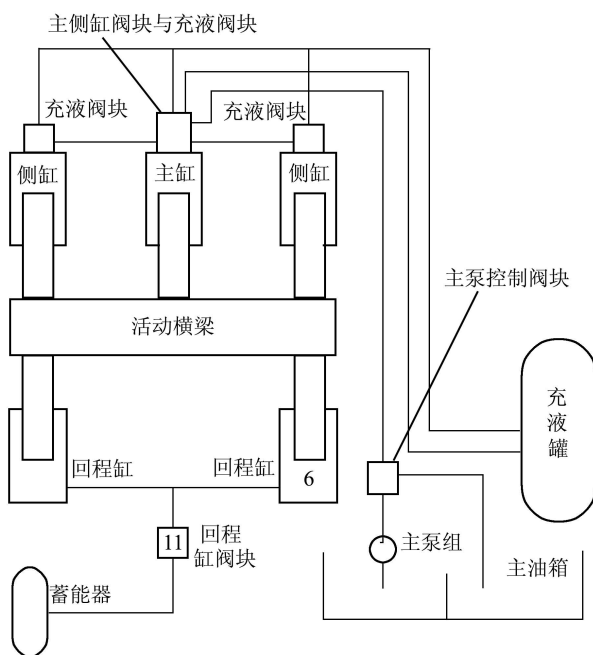


图1 压机液压系统简图

Fig. 1 Hydraulic system schematic drawing of the hydraulic press

2.2 仿真模型(Simulation model)

依据快锻液压机工作原理及管道布置,以及系统各元件参数,利用ITI-SimulationX软件液压库、机械库和控制信号库内单元搭建快锻液压机本体和系统仿真模型,如图2所示,采用SolidWorks软件建立液压机本体模型,包括上横梁、下横梁、活动横梁、基础梁和工作台等主要部件,然后将其导出为STL格式,通过三维库的STL接口将其导入仿真模型,并与一维元件连接,泵、阀、管道、液压缸、油箱和蓄能器等液压元件来源于液压库,泵、阀特性曲线来源于产品样本;锻造力为实测曲线,可以用机械库的力单元建模;按现场工艺编制的控制时序可以结合控制库信号单元实现,如变量泵转角控制、充液阀和比例阀启闭控制等。

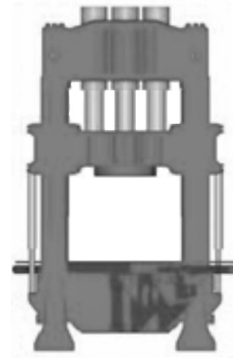


图2 基于ITI-SimulationX软件的液压机本体与系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of the body and system of the hydraulic press based on ITI-SimulationX software

2.3 仿真结果(Simulation results)

设定锻造行程25 mm,锻透深度5 mm,最大工作压力10 MPa,工作缸为主缸,主泵12台等工艺参数,仿真结果如图3所示,活动横梁位置接近理想正弦锻造曲线,锻造精度 ± 1 mm,锻造频次为85次/min,高频响比例阀启闭曲线遵循先卸压后泄流原则,即比例阀卸高压时处于小开口,待压力卸至一定值后处于全开口^[7]。

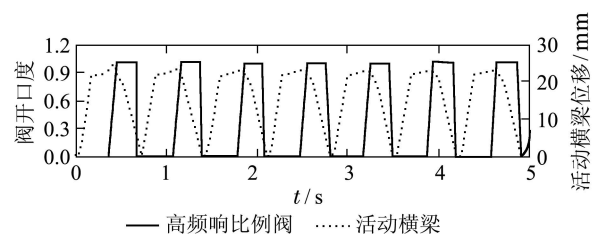


图3 活动横梁与高频响比例阀动态曲线

Fig. 3 Dynamic curves of movable beam and high-frequency-response proportional valve

3 Takagi-Sugeno模糊控制器设计(Design of Takagi-Sugeno fuzzy controller)

3.1 Takagi-Sugeno系统(Takagi-Sugeno system)

Takagi-Sugeno系统于1985年被最早提出.对于Takagi-Sugeno系统,输出变量的隶属度如为线性函数,则称为1阶系统,如输出变量隶属度为常值函数,则称为0阶系统.对于0阶系统,典型的模糊规则具有如下形式: if x is A and y is B then $z = k$,其中 A 和 B 是前项条件的模糊集,而 k 是后项结论中所准确定义的常数.另外,0阶Takagi-Sugeno系统所有规则输出的隶属度函数都是一个单点集,其模糊推理过程的蕴涵算法及输出的合成算法固定,分别为乘积运算法和最大运算法^[8]。

3.2 Takagi-Sugeno模糊控制器设计(Design of Takagi-Sugeno fuzzy controller)

从液压机工作原理可知, 高频响比例阀是系统核心控制元件. 为满足不同锻造工艺需要, 包括锻造行程、锻透深度和最大工作压力等工艺参数需随时调整, 而考虑到节能、锻造速度等因素, 系统工作缸、主泵数量也会相应变化, 为达到较高的锻造精度和较快的响应速度, 高频响比例阀启闭曲线也需要改变. 基于前述模型进行仿真, 可以获取各种工艺参数下的理想高频响比例阀启闭曲线, 即预先给定锻造行程、锻透深度和最大工作压力等工艺参数, 以及系统工作缸和主泵数量, 然后对高频响比例阀启闭曲线进行调整和优化.

对于快锻液压机, 模糊控制策略目标为: 对于各种工艺参数, 液压机均达到较高的锻造精度和较快的响应速度. 以锻造行程、锻透深度、最大工作压力、工作缸和主泵数量作为输入变量, 以理想的高频响比例阀启闭曲线作为输出变量, 分别确定输入、输出变量各论域为: 锻造行程{0, 100}, 锻透深度{5, 25}, 最大工作压力{5, 31.5}, 工作缸数量{1, 3}, 主泵数量{5, 20}, 高频响比例阀启闭曲线{1, 18}. 用模糊语言变量的模糊集分别表示输入、输出变量: 锻造行程 $L_A = \{\text{较短, 短, 中, 长, 较长}\}$, 锻透深度 $L_W = \{\text{小, 中, 大}\}$, 最大工作压力 $P_{\max} = \{\text{较低, 低, 中等, 高, 较高}\}$, 工作缸数量 $N_C = \{\text{壹, 贰, 叁}\}$, 主泵数量 $N_P = \{\text{少, 中, 多, 较多}\}$, 高频响启闭曲线 $N_V = \{1, 2, 3, \dots, 18\}$. 输入、输出变量隶属度函数分别为梯形函数和常值函数.

基于 MATLAB/Simulink 软件平台设计 Takagi-Sugeno 模糊控制器, 图4为模糊控制器组成.

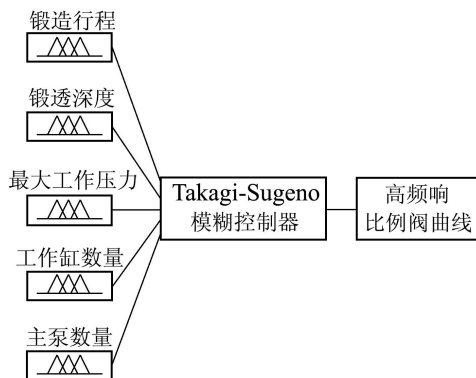


图 4 Takagi-Sugeno模糊控制器
Fig. 4 Takagi-Sugeno fuzzy controller

根据仿真结果, 得出以下模糊规则: If {锻造行程 is 较短} and {锻透深度 is 小} and {最大工作压力 is 较低} and {工作缸数量 is 壹} and {主泵数量 is 少} then {高频响比例阀启闭曲线 is 1}; If {锻造行程 is 短} and {锻透深度 is 小} and {最大工作压

力 is 较低} and {工作缸数量 is 壹} and {主泵数量 is 少} then {高频响比例阀启闭曲线 is 2}; ...

4 协同仿真(Co-simulation)

4.1 协同仿真接口(Co-simulation interface)

ITI-SimulationX 软件协同仿真接口模块名称为 Coupling Element, 位于信号库协同仿真子文件夹下, 专门用于包括 MATLAB/Simulink、MSC. Adams 和 SIMPACK 等仿真器进行协同仿真^[9]. 该模块可对 ITI-SimulationX 软件进行主、从站设置, 仿真通讯遵照 TCP/IP 协议; 模块本身提供一个输入和输出端口, 若仿真器之间需要进行多变量交互, 可将其集合为一个向量; 仿真器的仿真时间、计算步长和交互向量维数均需保持一致. Simulink 协同仿真模型内包含与 ITI-SimulationX 软件的接口模块, 该模块实质为 S 函数, Simulink 通过识别该 S 函数读取 ITI-SimulationX 软件接口模块输出变量. 协同仿真原理如图5所示.

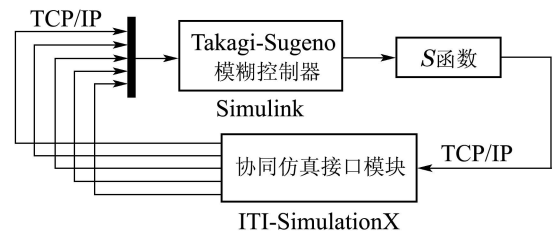


图 5 协同仿真原理

Fig. 5 Co-simulation principle

4.2 协同仿真模型(Co-simulation model)

协同仿真模型如图6所示, ITI-SimulationX 作为主仿真器, Simulink 作为从仿真器. 仿真时间、计算步长由主仿真器设定, 在每个步长主、从仿真器交换一次数据. 协同仿真工作步骤为: 启动 MATLAB 软件, 打开 Simulink 仿真模型, 同时调用协同仿真接口模块 S 函数, 函数名称为 ITIFct2; 在 MATLAB 软件命令窗口输入 “anfisedit”, 导入 Takagi-Sugeno 模糊控制器, 并将其输出至 MATLAB 工作空间, 待 Simulink 模型调用; 将 MATLAB 工作路径指向 ITI-SimulationX 仿真模型所在位置; 启动 ITI-SimulationX 仿真软件后打开仿真模型; 依次运行 Simulink, ITI-SimulationX 仿真模型.

ITI-SimulationX 主仿真器将锻造行程、锻透深度、最大工作压力、工作缸和主泵数量由协同仿真接口模块的输入端口, 输出至 Simulink 从仿真器的模糊控制器输入端口, Takagi-Sugeno 模糊控制器推理确定高频响比例阀启闭曲线, 然后将此曲线编号经模糊控制器输出端口、接口函数 ITIFct2 输入端口输出至主仿真器接口模块的输出端口, 该模块输出经由转换函数后调取高频响比例阀启闭曲线族内曲线, 并将曲线输出至高频响比例阀信号端口.

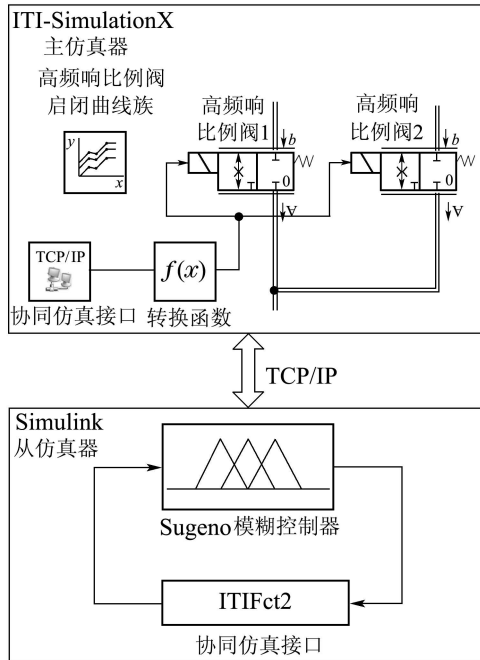


图6 协同仿真模型

Fig. 6 Co-simulation model

5 结论(Conclusions)

1) 利用ITI-SimulationX软件建立了兼顾大型快锻液压机本体和系统的精确仿真模型, 获取了液压机在不同锻造行程、锻透深度和最大工作压力等工艺参数下的仿真结果, 确定了锻造精度和锻造频次等工作特性, 以及优化后的高频响比例阀曲线。

2) 基于MATLAB/Simulink软件设计了Takagi-Sugeno系统为核心的模糊控制器, 并通过ITI-SimulationX与Simulink协同仿真接口模块建立了快锻液压机Takagi-Sugeno模糊系统, 通过协同仿真, 验证了Takagi-Sugeno模糊控制器可以根据不同工艺参数调用优化后的高频响比例阀曲线, 使液压机满足较高锻造精度和较快响应速度, 控制策略具有可行性。

参考文献(References):

[1] TAKAGI T, SUGENO M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control [J]. *IEEE Transactions on Systems,*

Man, and Cybernetics, 1985, 15(1): 116 – 132.

- [2] 郑科, 徐建明, 俞立. 基于T-S模型的倒立摆最优保性能模糊控制 [J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(5): 703 – 708.
(ZHENG Ke, XU Jianming, YU Li. Takagi-Sugeno model-based optimal guaranteed cost fuzzy control for inverted pendulums [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(5): 703 – 708.)
- [3] 侯涛, 董海鹰. 基于T-S模型的倒立摆双闭环串级模糊控制设计与仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(11): 2477 – 2481.
(HOU Tao, DONG Haiying. Designs and simulations of double closed-loop cascade fuzzy control for inverted pendulum base on T-S model [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(11): 2477 – 2481.)
- [4] 刘博, 贾新春, 高一博. 带有饱和和执行器的T-S离散模糊系统的LQ模糊控制 [J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(4): 513 – 518.
(LIU Bo, JIA Xinchun, GAO Yibo. LQ fuzzy control of T-S discrete fuzzy systems with actuator saturation [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(4): 513 – 518.)
- [5] 朱伟, 董湘怀, 张质良. 板料拉深成形液压系统模糊控制建模 [J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(1): 122 – 126.
(ZHU Wei, DONG Xianghuai, ZHANG Zhiliang. Modeling of fuzzy control in sheet deep drawing [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(1): 122 – 126.)
- [6] 于龙, 肖建, 刘陆洲. 基于简约集向量的Takagi-Sugeno模糊模型 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(5): 555 – 557.
(YU Long, XIAO Jian, LIU Luzhou. A Takagi-Sugeno fuzzy model based on the reduced set-vector [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(5): 555 – 557.)
- [7] 王丽薇, 杨文一, 高殿荣. 大型快锻液压机卸压管道振动分析与消振措施 [J]. *液压与气动*, 2010, 33(10): 67 – 68.
(WANG Liwei, YANG Wenyi, GAO Dianrong. Vibration analysis and anti-vibration measures of depressurized pipe for large fast forging hydraulic press [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2010, 33(10): 67 – 68.)
- [8] 吴晓莉, 林哲辉. MATLAB辅助模糊系统设计 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 125 – 130.
(WU Xiaoli, LIN Zhehui. *MATLAB Aided Fuzzy System Design* [M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 2002: 125 – 130.)
- [9] 刘艳芳. SimulationX精解与实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 58 – 72.
(LIU Yanfang. *SimulationX Explain and Examples* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010: 58 – 72.)

作者简介:

王丽薇 (1980-), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为流体传输与控制、液压仿真与应用、锻压设备与工艺, E-mail: wangliwei_80@aliyun.com.