

# 高速履带车辆静液传动模糊自适应PID同步控制\*

李和言<sup>1</sup> 陈宝瑞<sup>2</sup> 马彪<sup>1</sup> 张海岭<sup>1</sup>

(1.北京理工大学机械与车辆学院,北京 100081; 2.上海汽车集团技术中心,上海 201804)

**【摘要】** 以某轻型高速履带车辆的静液传动系统为研究对象,结合模糊控制与PID控制方法,设计了模糊自适应PID同步控制器,仿真及试验表明:直驶工况下,采用该控制器的双泵双马达静液传动系统在经受突变载荷干扰时能有效抑制两侧马达转速误差值,快速同步到设定速度,具有较好的鲁棒性,所设计的控制系统优于常规的PID控制方法,适用于轻型高速履带车辆静液传动系统的同步控制。

**关键词:** 履带车辆 静液传动 模糊自适应PID控制 同步控制

**中图分类号:** U463.22<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0016-04

## Speed Synchronization Control of Hydrostatic Transmission Based on Fuzzy Self-tuning PID

Li Heyan<sup>1</sup> Chen Baorui<sup>2</sup> Ma Biao<sup>1</sup> Zhang Hailing<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. SAIC Motor Technical Center, Shanghai 201804, China)

### Abstract

Based on fuzzy control and PID control, a new type of fuzzy self-tuning PID controller was designed. The controller worked for synchronization control of hydrostatic transmission with dual pump and dual motor, which was used to drive a high speed light duty tracked vehicle. The results of simulation and tests showed that during straight running, the controller could restrain the motor speed error effectively when suffering different load disturbances, meanwhile it could get good synchronization results and the synchronization control was quite robust. The new control system is better than common PID control and is suitable for high speed tracked vehicle hydrostatic transmission.

**Key words** Tracked vehicle, Hydrostatic transmission, Fuzzy self-tuning PID control, Synchronization control

### 引言

静液传动具有无级变速的精细速度调节,重量轻、体积小,容易实现正反转,能防止发动机超负荷以及具有良好的控制性能等一系列优点,在农林及工程机械的车辆行驶系统中得到了大量的应用。尤其是在低速带有作业装置的履带式工程车辆中,静液传动技术越来越多地被广泛采用。

随着静液传动技术的应用,大型设备负载能力

增加或因布局的关系需要多个执行元件同时驱动一个工作部件时,同步运动显得更为突出<sup>[1]</sup>。由于液压系统的泄漏,马达结构参数的差异及非线性摩擦阻力,排量控制元件的性能差异,两侧马达所受负载的差异等最终将造成马达的同步误差,对于采用两侧独立驱动的高速履带车辆而言,将产生直驶跑偏问题,甚至在车辆高速行驶中,由于一侧阻力突然增大致使该侧马达转速急剧下降,出现急转向的情况,从而导致意外发生。

针对静液传动同步问题,已有学者开展了相关研究,文献[2]针对单泵双马达驱动系统提出一种改进 Narandra 模型参考自适应控制方案,文献[3]建立了负载变形敏感双马达同步驱动系统模型,提出了相应的控制策略。由于静液传动系统受时变负载的影响,采用传统的 PID 控制难以有效解决时变负载干扰时马达转速的同步控制问题,本文提出一种基于模糊自适应 PID 的同步控制器,解决由于 PID 参数固定而造成的控制性能不足,为此,将模糊控制与 PID 控制方法相结合,设计模糊自适应 PID 同步控制器。

## 1 静液传动系统

### 1.1 静液传动系统

本文研究的轻型高速履带车辆采用双泵双马达独立驱动形式,图1是轻型高速履带车辆动力传动系统原理图。



图1 动力传动系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of powertrain

发动机输出动力经增速箱后,分别驱动两侧静液传动系统,静液传动采用变量泵变量马达,通过改变泵或马达的排量调整传动系统输出转速,实现车辆变速,为简化控制,分段控制泵和马达的排量,即某一时刻只调节泵或马达二者之一的排量,譬如车辆起步、加速直至最高车速这一过程,相应的泵和马达控制策略为:泵排量由零增大,此时马达保持最大排量,泵到最大排量后,开始减小马达排量,考虑到液压系统的效率,马达最小排量不能取得太小,通常取最大排量的1/3。调节液压元件排量使得两侧马达转速相同,实现车辆直驶;转向时,减小内侧泵排量或增大内侧马达排量,从而降低内侧马达转速,实现独立式转向。由于泵和马达皆采用电液比例控制,控制原理相同,只需对排量控制器的控制参数进行调整,变量泵排量控制技术即可应用于变量马达的排量控制,本文仅对调整泵排量区段的同步控制技术进行研究。

### 1.2 静液传动系统数学模型

为突出主要因素以及便于建模,对系统作如下假设:忽略油液惯量对系统动态特性影响,认为工作油为牛顿流体;液压泵和液压马达腔的容积为常数;液压泵和液压马达的泄漏为层流泄漏;各腔内的压力均相等;油液温度和密度不变;低压回路压力不变,等于补油压力<sup>[4-5]</sup>。

变量泵高压腔的流量连续性方程为

$$Q_p = D_p \omega_p - C_{ip} \Delta p - C_{ep} p_H \quad (1)$$

变量马达高压腔流量连续性方程为

$$Q_p = C_{im} \Delta p - C_{em} p_H + D_M \omega_M + \frac{V_0}{\beta_c} \frac{dp_H}{dt} \quad (2)$$

式中  $Q_p$ ——泵理论输出流量, mL/s

$D_p, D_M$ ——泵、马达排量, mL/rad

$\omega_p, \omega_M$ ——泵、马达转速, rad/s

$C_{ip}, C_{im}$ ——泵、马达内泄漏系数

$\Delta p$ ——系统高低管路压差, MPa

$C_{ep}, C_{em}$ ——泵、马达外泄漏系数

$p_H$ ——高压腔压力, MPa

$V_0$ ——液压回路高压侧总容积, mL

$\beta_c$ ——油液的体积弹性模量, MPa

马达力矩平衡方程为

$$D_M \Delta p = J_i \frac{d\omega_M}{dt} + B_M \omega_M + T_L \quad (3)$$

式中  $J_i$ ——马达轴上总等效转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

$B_M$ ——马达阻尼系数,  $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$

$T_L$ ——马达负载转矩,  $\text{N} \cdot \text{m}$

对式(1)和式(2)进行拉氏变换可得

$$D_p \omega_p = \frac{V_0}{\beta_c} s p_H + C_i p_H + D_M \omega_M \quad (4)$$

式中  $C_i$ ——泵、马达的总泄漏系数

对式(3)进行拉氏变换可得

$$D_M p_H = J_i s \omega_M + B_M \omega_M + T_L \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可得系统框图如图2所示。

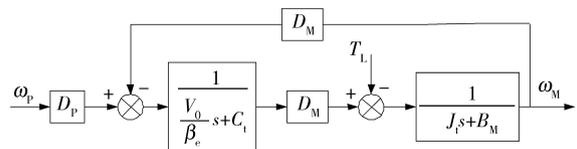


图2 单侧回路静液传动系统框图

Fig.2 Block diagram of single circuit hydrostatic transmission

## 2 双马达同步控制技术

通常有两种方式可以实现静液传动的同步控制,即开环控制和闭环控制。由于液压系统的泄漏、执行元件等存在的非线性摩擦阻力、控制元件间的性能差异、外界负载和系统组成部分的制造误差等因素的影响,使得液压同步的低速高精度、高速高精度控制问题还未完全得到解决,尤其是采用开环控制的液压同步传动技术,由于完全靠液压控制元件本身的精度来控制执行元件的同步驱动,而不对执行机构的输出参数进行检测并实现反馈闭环控制,因而难以保证同步控制的精度,极大限制了该控制方式的应用范围。

在对双马达同步控制系统进行控制方案设计时,不但要考虑两侧每个子系统的控制策略,还要综合考虑子系统之间的协调关系。因而,双马达的同步控制应以两个液压马达输出转速的一致作为控制目标,一般有两种控制形式:同等方式和主从方式。同等方式是指需同步的两个执行元件都同时跟踪理想输出而同时受到控制并达到同步驱动的控制形式;主从方式是指需同步的两个执行元件以其中一个执行元件作为另一个执行元件的跟踪对象而进行控制并达到同步驱动的控制形式。两者相比,为获得高精度的同步输出,按同等方式工作的液压同步闭环控制系统中各执行元件、反馈、检测元件及控制元件的性能之间应有严格的匹配,这为工程应用增加了难度。

图3是基于主从方式的同步控制原理图,图中 $\omega_{Md}$ 为马达目标转速, $\omega_{M1}$ 和 $\omega_{M2}$ 分别为两侧马达实际转速,为便于分析, $\omega_{M1}$ 所对应马达称为马达1, $\omega_{M2}$ 所对应马达称为马达2。

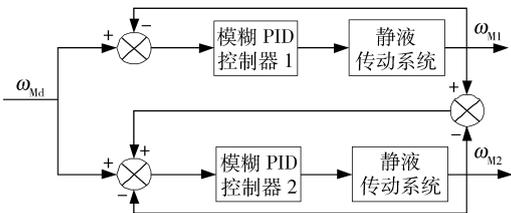


图3 静液传动同步控制原理图

Fig.3 Schematic diagram of synchronization control of hydrostatic transmission

### 3 模糊自适应PID控制器设计

模糊自适应PID控制器<sup>[6-8]</sup>中模糊推理机采用双输入三输出的模糊控制系统。以偏差 $e$ 和偏差变化率 $e_c$ 作为输入量,可以满足不同时刻的 $e$ 和 $e_c$ 对PID参数自整定的要求,利用模糊控制规则在线对PID参数进行调整,便构成模糊自适应PID控制器,其结构如图4所示。图中模糊控制器输入为马达转速偏差及偏差变化率,输出量为比例系数、积分系数和微分系数的补偿量 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ ,从而完成对PID控制器3个参数的整定,即

$$K_f = K_{f0} + \Delta K_f \quad (6)$$

式中  $K_f$ ——PID最终整定参数

$K_{f0}$ ——PID初始整定参数, $f=p,i,d$

#### 3.1 模糊控制数据库

定义马达转速的偏差 $e$ 及偏差变化率 $e_c$ 的变化范围分别为: $\{-50,50\}$ 、 $\{-5,5\}$ ,论域为: $E = E_c = \{-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6\}$ ,模糊子集均为: $\{NB,NM,NS,ZE,PS,PM,PB\}$ ,

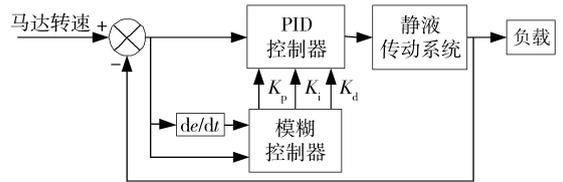


图4 模糊自适应PID马达转速控制

Fig.4 Motor speed control of fuzzy self-tuning PID

其含义依次为:负大,负中,负小,零,正小,正中,正大。模糊控制器的3个输出量 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 的变化范围分别为: $\{-0.05,0.05\}$ 、 $\{-0.1,0.1\}$ 、 $\{-0.005,0.005\}$ ,论域及模糊子集的定义同输入量。为简化计算,模糊化时输入和输出均选择三角形隶属函数。

#### 3.2 模糊控制规则库

模糊自适应PID的控制原理是确定PID控制器的比例、微分和积分系数相对于偏差 $e$ 及偏差变化率 $e_c$ 的关系,在系统运行过程中,根据检测的 $e$ 及 $e_c$ 通过模糊运算得出适宜的PID控制器参数。通常PID控制器参数与误差及误差变化率的关系可归纳为:

- (1)  $e$ 较大时,取较大的 $K_p$ 以提高响应速度, $K_i$ 为零,防止积分饱和, $K_d$ 取值适当,以减小超调。
- (2)  $e$ 和 $e_c$ 中等大时,取较小的 $K_p$ 及适当的 $K_i$ 和 $K_d$ 以保证一定响应速度,且避免超调。
- (3)  $e$ 较小时,增大 $K_p$ 和 $K_i$ 以减小静差,提高稳定性。适当减小 $K_d$ ,防止产生振荡。

根据上述PID参数的整定原则,结合静液传动系统控制经验,最终可以建立针对PID控制参数的模糊控制规则表。

### 4 系统仿真及试验分析

泵马达主要参数如下:泵为SAUER公司的90系列55 mL/r变量泵,马达为SAUER公司51 v系列160 mL/r变量马达,基于Matlab/Simulink软件建立系统的仿真模型。

仿真时马达转速为

800 r/min,对马达2一侧施加脉冲负载转矩,如图5所示。

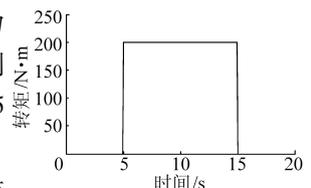


图5 脉冲负载转矩

Fig.5 Impulse load torque

图6和图7分别为施加脉冲转矩时常规PID控制和模糊自适应PID控制的马达转速误差曲线。

由仿真结果可知,采用常规PID同步控制器时两侧马达转速误差为25 r/min左右,采用模糊自适应PID同步控制器时两侧马达转速误差为17 r/min

左右。采用模糊自适应PID控制能有效抑制因负载突变而导致的两侧马达转速误差。

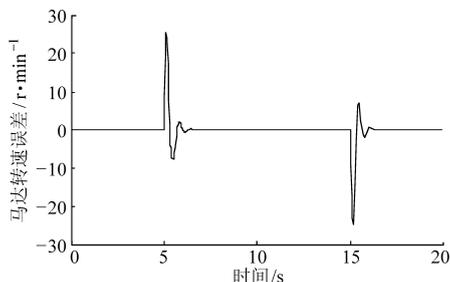


图6 仿真时PID控制马达转速误差

Fig. 6 Motor speed error under PID control of simulation

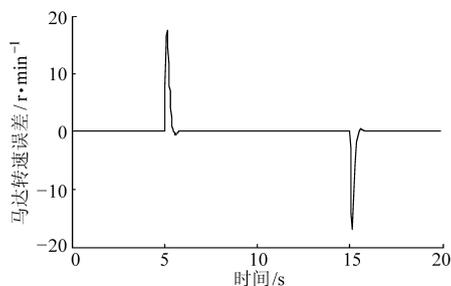


图7 仿真时模糊自适应PID控制马达转速误差

Fig. 7 Motor speed error under fuzzy self-tuning PID control of simulation

图8为静液传动系统同步控制试验台,试验系统由电动机提供动力,采用液压泵为两侧马达加载。试验中通过调节泵马达排量使两侧马达输出转速稳定在800 r/min左右。在某一时刻改变马达2输出端加载泵的排量,施加一幅值为200 N·m的额外负载转矩,10 s撤销。图9和图10分别为PID控制和模糊自适应PID控制时马达转速误差试验曲线。

受实际转动惯量及油液粘度的影响,PID控制和模糊自适应PID控制时,马达转速误差峰值均较仿真结果有所增加。就控制性能而言,比较PID控制和模糊自适应PID控制结果可知,模糊自适应PID控制在抑制马达转速误差方面有突出效果,适用于本文研究的轻型高速履带车辆静液传动系统的同步控制。

### 5 结束语

针对某轻型高速履带车辆双泵双马达静液传动系统,设计了相应的模糊自适应PID控制器对两侧马达输出转速进行同步控制,仿真及试验结果表明:

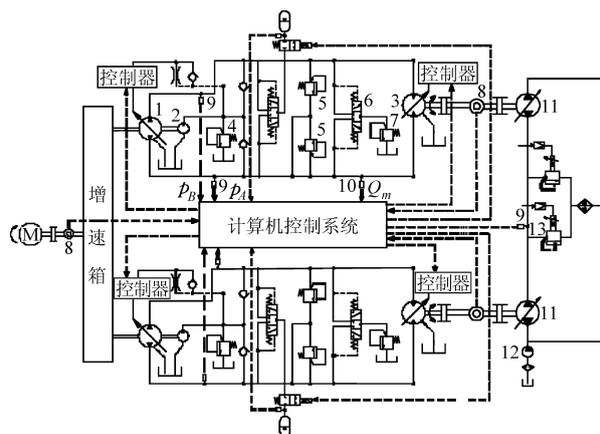


图8 静液传动同步控制试验台结构图

Fig. 8 Schematic diagram of test bench of hydrostatic transmission

- 1. 55 mL/r 变量轴向柱塞泵 2. 补油泵 3. 160 mL/r 变量轴向柱塞马达 4. 补油溢流阀 5. 多功能阀 6. 回路冲洗阀 7. 冲洗溢流阀 8. 转速转矩传感器 9. 压力传感器 10. 流量传感器 11. 180 mL/r 加载泵 12. 加载补油泵 13. 加载调压电液比例溢流阀

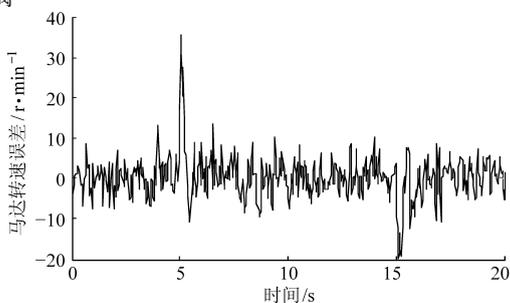


图9 试验时PID控制马达转速误差

Fig. 9 Motor speed error under PID control of test

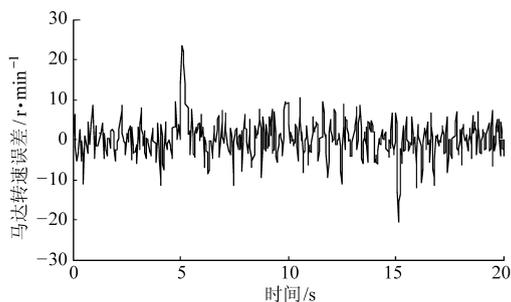


图10 试验时模糊自适应PID控制马达转速误差

Fig. 10 Motor speed error under fuzzy self-tuning PID control of test

采用模糊自适应PID同步控制器能有效减小马达转速误差,提高系统同步性能,且具有较强的鲁棒性。该控制方法适用于非线性、时变性及具有时变负载的轻型高速履带车辆静液传动系统的同步控制。

### 参 考 文 献

1 李军伟,赵克定,吴盛林. 双电液伺服马达同步模糊控制系统的研究[J]. 机床与液压,2003(1):115~116.  
 Li Junwei, Zhao Keding, Wu Shenglin. Research on dual electrohydraulic motors synchronization via fuzzy control [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2003(1):115~116. (in Chinese) (下转第45页)

- 1985, 16(1): 12 ~ 22. (in Chinese)
- 15 Gotteland P h, Benoit O. Sinkage tests for mobility study, modelling and experimental validation [J]. Journal of Terramechanics, 2006, 43(4): 451 ~ 467.
- 16 Yoshiyuki Kawase, Hiroshi Nakashima, Akira Oida. An indoor traction measurement system for agricultural tires [J]. Journal of Terramechanics, 2006, 43(3): 317 ~ 327.
- 17 庄继德. 计算汽车地面力学[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- 18 沈杰,余群. 湿软土壤压力-下陷-时间关系的建立[J]. 农业机械学报,1989,20(4):15 ~ 19.  
Shen Jie, Yu Qun. Pressure-sinkage-time equation for wet soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1989, 20(4): 15 ~ 19. (in Chinese)
- 19 Earl R, Alexandrou A. Deformation processes below a plate sinkage test on sandy loam soil: experimental approach [J]. Journal of Terramechanics, 2001, 38(3): 153 ~ 162.
- 20 Leroy O Garciano, Shrinivasa K Upadhyaya, Randolph A Jones, et al. Determination of the soil pressure distribution around a cone penetrometer [J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44(3): 265 ~ 273.
- 21 苏显添,王前健,贺杰. 珠江三角洲水田土壤承压特性探讨[J]. 华南农学院学报,1984,5(2):45 ~ 54.  
Su Xiantian, Wang Qianjian, He Jie. Analysis of the soil pressure-sinkage characteristics of the paddy field in the Pearl River Delta [J]. Journal of South China Agricultural College, 1984, 5(2): 45 ~ 54. (in Chinese)
- 22 Henderson J J, Crum J R, Wolff T F, et al. Effects of particle size distribution and water content at compaction on saturated hydraulic conductivity and strength of high sand content root zone materials [J]. Soil Science, 2005, 170(5): 315 ~ 324.
- 23 Frost J D, Park F. A critical assessment of the moist tamping technique [J]. Geotechnical Testing Journal, 2003, 26(1): 57 ~ 70.
- 24 孙忠英,李宝筏. 农业机器行走装置对土壤压实作用的研究[J]. 农业机械学报,1998,29(3):172 ~ 174.  
Sun Zhongying, Li Baofa. Approach for the compaction effect by the agricultural tracked vehicles to the soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(3): 172 ~ 174. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 19 页)

- 2 吴保林,裘丽华,祁晓野,等. 单泵驱动双马达速度同步控制技术[J]. 系统仿真学报,2006,18(6):1 585 ~ 1 588.  
Wu Baolin, Qiu Lihua, Qi Xiaoye, et al. Research on rotational speed synchronization control of one pump driving two motors [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(6): 1 585 ~ 1 588. (in Chinese)
- 3 陶建峰,王旭永,刘成良,等. 负载变形敏感双马达同步驱动系统建模与仿真[J]. 系统仿真学报,2007,19(7):1 574 ~ 1 578.  
Tao Jianfeng, Wang Xuyong, Liu Chengliang, et al. Modeling and simulation of load deformation sensitive dual hydraulic motor synchronizing driving system [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(7): 1 574 ~ 1 578. (in Chinese)
- 4 Kugi A, Schlacher K, Aitzetmüller H, et al. Modeling and simulation of a hydrostatic transmission with variable-displacement pump [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2000, 53(2): 409 ~ 414.
- 5 万丽荣,赵胜刚,沈潇,等. 基于 Matlab/Simulink 的变量泵变量马达调速系统动态仿真[J]. 煤矿机械,2007,28(2): 26 ~ 28.  
Wan Lirong, Zhao Shenggang, Shen Xiao, et al. Dynamic simulation of variable displacement pump variable displacement motor volume speed-modulating system based on Matlab/Simulink [J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(2): 26 ~ 28. (in Chinese)
- 6 Jinwei X. Fuzzy PID control through optimization: a new method for PID control [D]. Milwaukee: Marquette University, 2006.
- 7 Yasin S. Systematic methods for the design of a class fuzzy logic controllers [D]. Michigan: Western Michigan University, 2003.
- 8 金立生,赵丁选,丁德胜,等. 液压挖掘机节能参数自适应模糊 PID 控制器研究[J]. 农业工程学报,2003,19(6): 87 ~ 90.  
Jin Lisheng, Zhao Dingxuan, Ding Desheng, et al. Energy-saving PID fuzzy controller with self-tuning parameters of hydraulic excavator [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6): 87 ~ 90. (in Chinese)
- 9 陈宝瑞,马彪,李和言,等. 高速履带车辆静液传动改进模糊控制[J]. 农业机械学报,2009,40(11):18 ~ 21.  
Chen Baorui, Ma Biao, Li Heyan, et al. Improved fuzzy control of high speed tracked vehicle hydrostatic transmission [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 18 ~ 21. (in Chinese)