

基于 GA 优化 PID 算法的液压机械容积调速系统控制仿真分析

刘小娟¹, 夏运东¹, 李 刚², 刘艳军³, 史春娥¹

(1. 黄河交通学院 汽车工程学院, 河南 焦作 454950; 2. 河南理工大学 机械工程学院, 河南 郑州 450000;
3. 奇瑞商用车安徽有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 为了降低液压机械无级变速器使用的容积调速系统进行转速控制的波动性, 设计了遗传算法 (GA) 优化 PID 的控制方法, 并通过 AMESim 与 MATLAB/Simulink 联合软件开展了仿真分析。研究表明: 通过 GA 优化 PID 控制方法进行优化后, 转速达到了 0.35% 的超调量, 经过 0.25 s 达到稳定状态, 与传统 PID 控制方式相比, 超调量降低了 18.5%, 所需调节时间缩短了 0.17 s, 显著降低了转速的波动性。采用 GA 优化 PID 控制方式进行优化, 可以使系统获得更短的调整时间, 达到更高效的响应性能, 大幅减小了转速的超调量, 显著提升了系统调速性与稳定性。使系统获得了更优的动态响应性能与转速控制精度, 为最终满足工程应用提供了有利条件。

关键词: 容积调速系统; 遗传算法; PID 控制; 转速控制; 超调量

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.027

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 03-0164-05

Simulation analysis on volumetric speed regulation system control for hydraulic machinery based on PID algorithm optimized by GA

Liu Xiaojuan¹, Xia Yundong¹, Li Gang², Liu Yanjun³, Shi Chun'e¹

(1. School of Automotive Engineering, Yellow River Transportation Institute, Jiaozuo 454950, China;
2. School of Mechanical Engineering, Henan Polytechnic University, Zhengzhou 450000, China;
3. Chery Commercial Vehicle Anhui Co., Ltd., Wuhu 241000, China)

Abstract: In order to reduce the fluctuation of rotation speed control for volumetric speed regulation system used in hydro-mechanical continuously variable transmission (HMCVT), a control method of PID optimized by genetic algorithm (GA) was designed, and the simulation analysis was carried out by AMESim and MATLAB/Simulink combined software. The results show that after optimization by the control method of PID optimized by GA, the rotation speed reaches overshoot of 0.35% and shows stable state after 0.25 s. Compared with the traditional PID control method, the overshoot is reduced by 18.5%, the required adjustment time is shortened by 0.17 s, and the fluctuation of rotation speed is significantly reduced. Thus, the control method of PID optimized by GA can make the system obtain a shorter adjustment time, achieve more efficient response performance, greatly reduce the overshoot of rotation speed, significantly improve the speed regulation and stability of the system, and obtain better dynamic response performance and rotation speed control precision, which can provide favorable conditions to meet the engineering application.

Key words: volumetric speed regulation system; genetic algorithm; PID control; rotation speed control; overshoot

液压机速度控制技术是保证精度要求和工作效率的关键技术之一。电液比例控制方法可以实现对液体介质的连续、高精度控制, 目前已被广泛应用

到了各个工业领域。现阶段, 容积调速系统已获得了众多学者的研究, 其应用领域也不断得到拓展^[1-3]。在液压机等需要实现大功率输出的大型设备上, 通常都配备了液压机械无级变速器 (HMCVT), 由于液压系统是对 HMCVT 传动效率具有影响的一个关键因素, 因此, 容积调速系统控制性能对实际调速性能发挥了重要作用, 为进一步优化 HMCVT 调速特性, 需对容积调速系统的动态响应过程开展深入分析^[4-5]。

收稿日期: 2021-02-22; 修订日期: 2021-05-26

基金项目: 河南省高等职业学校青年骨干教师培养计划资助项目 (2019GZGG034)

作者简介: 刘小娟 (1987-), 女, 学士, 讲师

E-mail: habing62122@126.com

为了获得更优的容积调速控制性能, 需重新调整控制策略, 由此实现高效调速的效果。范宇恒等^[6]通过 STM32 单片机开发出一种泵控马达调速系统, 该系统能够在转速扰动的条件下依然保证输出端获得稳定的转速。李万国等^[7]则根据“变量泵+变量马达”构成的容积调速回路设计了一种建立在静态给定值与前馈补偿-反馈控制基础上的转速控制技术, 使系统获得了更强的阶跃响应能力。曹付义等^[8]针对液压机械无级变速器传动结构受到阶跃扰动时会发生输出速度大幅波动的情况, 利用双子系统前馈补偿模糊 PID 控制方法实现了对速度波动的抑制, 大幅降低了系统转速的波动性。成钊等^[9]为克服泵控马达系统发生输出速度波动的问题, 通过分析系统输出速度的偏差和变化率, 构建得到一种非线性 PID 控制算法, 实现了对系统速度波动过程的有效抑制。赵新等^[10]对采棉机行驶系统的机液复合传动结构进行了控制精度分析, 针对液压行驶系统的运行特性, 开发了一种前馈补偿模糊自适应 PID 算法, 使控制精度获得了显著提升。但到目前为止, 大部分学者均是利用控制算法来调节容积调速系统的转速, 但较少研究参数优化和控制算法结合的内容。

本文重点研究了液压机械无级变速器使用的容积调速系统进行转速控制的波动性的影响因素, 为该系统设计了遗传算法 (GA) 优化 PID 的控制方法, 使系统获得了更优的动态响应性能与转速控制精度, 为最终满足工程应用提供了有利条件。

1 容积调速系统

液压机的速度控制依然是通过改变流量来调节速度的, 目前最常见的是节流调速和容积调速^[11-12]。从图 1 可以看到组成容积调速系统的具体结构, 其中, 容积调速回路属于最核心的部分, 包括变量泵与定量液压马达。液压马达的转速通过设定不同的变量泵排量比来进行控制。首先, 利用指令元件将数据信号传输到系统中并经过比例放大器放大后, 实现电液比例阀流量的调控功能, 使液压缸活塞达到不同的位移量, 实现变量泵斜盘倾角的调节功能, 从而获得不同的变量泵排量比, 最终完成液压马达转速的控制功能。

由于搭载液压机械无级变速器的非道路车辆通常均是运行在具有复杂路况以及重载荷的环境中, 受到外部载荷的显著干扰, 因此, 液压马达输出转速会发生大幅波动, 从而降低了系统整体运行的稳定性, 无法保持良好的动态性能^[13]。针对以上情况, 本文设

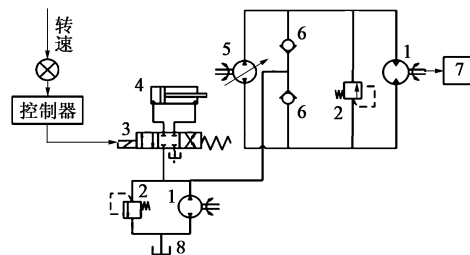


图1 容积调速系统结构图

1. 定量液压马达 2. 溢流阀 3. 电液比例阀 4. 液压缸
5. 变量泵 6. 单向阀 7. 加载块 8. 油箱

Fig. 1 Structure diagram of volumetric speed regulation system

计了一种适合容积调速系统控制要求的 GA 优化 PID 转速复合控制方法, 该系统的具体组成结构见图 2。

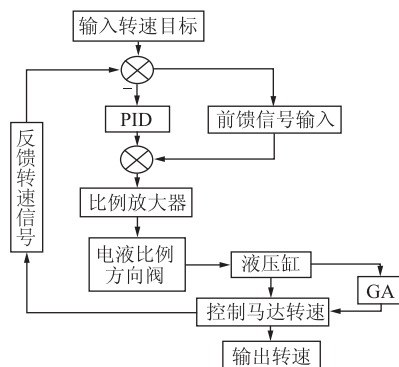


图2 控制系统结构

Fig. 2 Control system structure

组成容积调速系统的转速控制结构共包含 3 部分, 分别为前馈补偿控制系统、转速闭环反馈控制系统和遗传算法优化控制系统。其中, 转速闭环反馈控制系统选择传统 PID 方式进行控制, 能够实现对系统转速的有效调节; 由于传统形式的容积调速回路无法实现快速动态响应, 并且存在溢流能量损失的缺陷, 因此在系统中设置了前馈补偿控制结构。该结构以容积调速系统期望转速作为目标, 计算得到补偿基准值, 显著提升了调速系统的响应速度, 获得了更优的节能效果, 由此实现精确调控马达输出转速的功能, 最终降低了系统的稳态误差, 使调速系统保持稳定的输出转速, 利用遗传算法的优化控制过程来达到优化液压马达参数的目的, 从而显著提升液压系统的控制能力。

2 GA 优化 PID 模型

2.1 GA 原理

遗传算法 (GA) 是根据达尔文进化论与自然选

择理论进行设计的一种算法,能够对生物进化过程与自然界遗传进行模拟,具备良好的自适应与全局概率搜索性能,可以有效避免进行参数优化时受局部最优值的影响而得到错误最优值的缺陷^[14-15]。图 3 显示了 GA 优化流程。

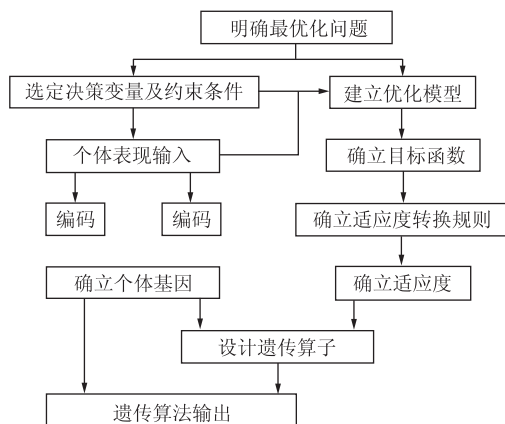


图 3 GA 优化流程

Fig. 3 GA optimization process

2.2 优化目标

图 4 给出了在不同液压马达排量条件下形成的转速曲线。可以明显看到,随着液压马达排量的提高,泵控马达系统达到了更短的响应时间,而随着排量值提高至某一临界值后,响应时间保持基本稳定,同时转速发生了更明显的波动,从而引起系统稳定性的明显降低。根据以上分析,液压马达排量越大,达到目标转速 ($1440 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 的时间越短,因此,确定 $50 \text{ mL} \cdot \text{r}^{-1}$ 的液压马达排量为最优参数。

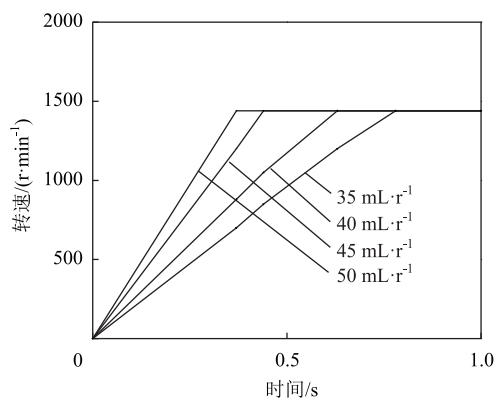


图 4 转速随液压马达排量的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of rotation speed with hydraulic motor displacement

2.3 系统优化分析

将种群规模设定为 60, 最大迭代次数为 100,

遗传概率为 82%, 变异概率为 8%, 定量马达排量范围为 $0 \sim 50 \text{ mL} \cdot \text{r}^{-1}$ 。图 5 给出了最优参数条件下的泵控马达系统响应曲线, 其中, 马达转速响应超调比例为 0.16%, 经过 0.2 s 到达目标转速, 相对于未优化参数时缩短了 0.3 s, 获得了理想的调节效果。

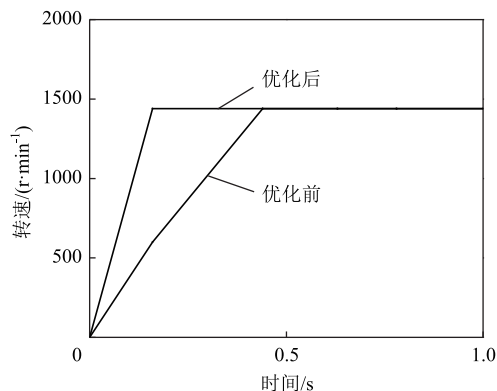


图 5 系统响应特性曲线

Fig. 5 System response characteristic curves

3 仿真结果与分析

利用图 2 所示的控制系统结构并通过 AMESim 与 MATLAB/Simulink 软件为容积调速系统构建仿真模型, 该模型的组成部分包含 PID 控制器、电液比例阀、转速转矩传感器、前馈补偿器、变量泵、液压缸和定量马达。表 1 给出了模型的各项控制参数的值。

表 1 容积调速系统参数

Table 1 Parameters of volumetric speed regulation system

| 元件 | 参数 | 数值 |
|-------|--|------|
| 比例控制阀 | 额定电流/mA | 280 |
| | 固有频率/Hz | 60 |
| 变量泵 | 排量/ $(\text{mL} \cdot \text{r}^{-1})$ | 100 |
| | 转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | 220 |
| 定量马达 | 排量/ $(\text{mL} \cdot \text{r}^{-1})$ | 50 |
| | 排量/ $(\text{mL} \cdot \text{r}^{-1})$ | 20 |
| 补油泵 | 转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | 1440 |
| 负载 | 转动惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | 0.25 |

非道路车辆起步阶段的容积调速转速为 $1440 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。依次通过传统 PID 转速控制方式与 GA 优化 PID 控制方法调控系统的输出转速, 得到

图6所示的结果。未加控制时, 输出转速的超调量为0.56%, 经过0.55 s达到稳定状态, 最终得到的仿真曲线接近 $1440 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的马达期望输出转速。系统选择传统PID控制方式时, 输出转速的超调量为0.42%, 经过0.42 s达到稳定状态, 减少了0.13 s的调节时间, 最终得到的仿真曲线也保持在 $1440 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的期望输出转速附近, 表现出了更快的响应速度。通过GA优化PID控制方法进行优化后, 转速达到了0.35%的超调量, 经过0.25 s达到稳定状态, 与传统PID控制方式相比, 超调量降低了18.5%, 所需调节时间缩短了0.17 s, 最后获得的仿真曲线同样接近 $1440 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的期望输出转速, 显著降低了转速的波动性。

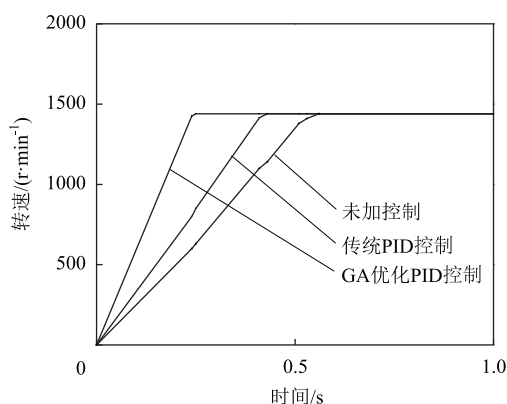


图6 容积调速转速仿真曲线

Fig. 6 Simulation curves of rotation speed by volumetric speed regulation

考虑到负载转矩会对容积调速系统造成冲击作用, 从第5 s开始为系统设置 $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 的负载转矩。受到负载转矩作用后, 采用GA优化PID控制方式进行优化, 可以使系统获得更短的调整时间, 达到更高效的响应性能, 大幅减小了转速的超调量。

以上结果表明, 采用GA优化PID转速复合控制过程进行优化处理可以获得更优的控制性能, 显著提升系统的调速性与稳定性。

4 结论

(1) 通过GA优化PID控制方法进行优化后, 转速达到了0.35%的超调量, 经过0.25 s达到稳定状态, 与传统PID控制方式相比, 超调量降低了18.5%, 所需调节时间缩短了0.17 s, 显著降低了

转速的波动性。

(2) 采用GA优化PID控制方式进行优化可以使系统获得更短的调整时间, 达到更高效的响应性能, 大幅减小了转速的超调量, 显著提升了系统的调速性与稳定性。

参考文献:

- [1] 强宝民, 刘保杰. 电液比例位置控制系统的新型PID控制算法研究[J]. 液压与气动, 2012, (2): 15-18.
Qiang B M, Liu B J. New PID control algorithm for electro-hydraulic proportional position control system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2012, (2): 15-18.
- [2] 王黎光, 徐海波, 王威威, 等. 容积调速系统特性分析与扰动控制研究[J]. 机械设计与制造, 2018, (7): 147-150.
Wang L G, Xu H B, Wang W W, et al. Study on characteristics analysis and disturbance control of volumetric speed regulating system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018, (7): 147-150.
- [3] 田晴晴, 谷立臣. 变转速变排量复合调速液压系统监控平台设计[J]. 中国机械工程, 2016, 27(16): 2225-2229, 2266.
Tian Q Q, Gu L C. Design of monitoring platform of variable speed and variable displacement compound speed control hydraulic system[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(16): 2225-2229, 2266.
- [4] 罗俊林, 吴维, 苑士华, 等. 液压机械无级变速器速比自抗扰控制研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(3): 374-380, 404.
Luo J L, Wu W, Yuan S H, et al. Study on active disturbance rejection control for speed ratio of hydro-mechanical continuously variable transmission[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(3): 374-380, 404.
- [5] 彭晓睿, 倪向东, 王琦, 等. 液压机械无级变速器实验台的设计与试验[J]. 机械设计与制造, 2019, (5): 125-127, 132.
Peng X R, Ni X D, Wang Q, et al. Design and experiment of hydro-mechanical continuously variable transmission platform[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019, (5): 125-127, 132.
- [6] 范宇恒, 王葳, 杨洁, 等. 基于STM32的泵控马达恒速输出系统的设计[J]. 测控技术, 2017, 36(10): 69-73, 78.
Fan Y H, Wang W, Yang J, et al. Design of constant speed output system of pump control motor based on STM32[J]. Measurement and Control Technology, 2017, 36(10): 69-73, 78.
- [7] 李万国, 付永领, 王岩. 液压容积调速系统静态前馈补偿仿真研究[J]. 液压与气动, 2015, (1): 117-122.
Li W G, Fu Y L, Wang Y. Simulating research on steady-state feedforward compensation for hydraulic volume speed-regulating system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015, (1):

- 117-122.
- [8] 曹付义, 李豪迪, 闫祥海, 等. 液压机械复合传动阶跃输入恒转速输出双前馈模糊 PID 控制 [J]. 农业工程学报, 2019, 35 (1): 72-82.
- Cao F Y, Li H D, Yan X H, et al. Hydromechanical compound transmission constant rotational speed output control method under stepinput based on double feed forward and fuzzy pid [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (1): 72-82.
- [9] 成钊, 王和明, 张勇, 等. 泵控马达系统恒转速控制器设计与 FPGA 实现 [J]. 火力与指挥控制, 2019, 44 (1): 119-124.
- Cheng Z, Wang H M, Zhang Y, et al. The design for constant output speed controller of pump-controlled motor system and FPGA accomplishment [J]. Fire Control and Command Control, 2019, 44 (1): 119-124.
- [10] Zhao X, Ni X D, Wang Q, et al. Research on adaptive control strategy of hydraulic mechanical continuously variable transmission of a cotton picker [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, (4): 203-210.
- [11] 王金鹏, 王才才, 赵梅香, 等. 封头压机移动工作台在不同负载下启动速度波动问题的研究 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (9): 162-165.
- Wang J P, Wang C C, Zhao M X, et al. Research on starting speed fluctuation of moving worktable of head press under different loading [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (9): 162-165.
- [12] 关锋, 张方东, 马超, 等. 变转速混合动力液压机能效特性仿真分析及实验 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 216-221.
- Guan F, Zhang F D, Ma C, et al. Simulation analysis and experiment of energy efficiency characteristics for variable revolving speed hybrid power hydraulic press [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 216-221.
- [13] 张德, 谷立臣, 耿宝龙, 等. 非平稳工况下闭式泵控马达液压系统的稳定性分析 [J]. 机电工程, 2021, 38 (3): 300-305.
- Zhang D, Gu L C, Geng B L, et al. Stability analysis of closed loop pump control motor hydraulic system under non-stationary condition [J]. Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38 (3): 300-305.
- [14] 冯智莉, 易国洪, 李普山, 等. 并行化遗传算法研究综述 [J]. 计算机应用与软件, 2018, 35 (11): 1-7, 80.
- Feng Z L, Yi G H, Li P S, et al. Review of parallel genetic algorithm [J]. Journal of Computer Applications and Software, 2018, 35 (11): 1-7, 80.
- [15] 王小梅, 任伟娜, 吴琮宇. 基于遗传算法的柔性冲压车间生产调度多目标优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 203-209.
- Wang X M, Ren W N, Wu Q Y. Multi-object optimization on flexible stamping workshop production scheduling based on genetic algorithm [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 203-209.

(上接第 145 页)

- Liu Y M, Wang L, Li B. An Intelligent synchronous control system for double cylinder lifting with large load [J]. Aerospace Control, 2020, 38 (1): 17-22.
- [6] 刘忠伟, 汤迎红, 邓英剑. 巨型模锻液压机驱动与同步过程联合控制的研究 [J]. 机械科学与技术, 2016, 35 (4): 514-522.
- Liu Z W, Tang Y H, Deng Y J. Research on joint control of combined drivers with synchronization for giant forging hydraulic press [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35 (4): 514-522.
- [7] 窦海斌. 两非对称液压缸同步举升系统的自适应跟踪控制 [J]. 液压与气动, 2017, (12): 82-89.
- Dou H B. Adaptive tracking control of two asymmetric hydraulic cylinder synchronous lifting system [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017, (12): 82-89.
- [8] 张兵, 蒋子良, 黄华, 等. 电液双缸系统同步控制 [J]. 液压与气动, 2021, (2): 30-35.
- Zhang B, Jiang Z L, Huang H, et al. Synchronous control of electro-hydraulic double cylinder system [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, (2): 30-35.
- [9] 李胜永. 液压机双缸液压系统同步控制系统研究 [J]. 液压与气动, 2020, (7): 99-105.
- Li S Y. Research on synchronous control system of hydraulic press double cylinder hydraulic system [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (7): 99-105.
- [10] 赵晓冬, 马丽楠, 杨小星, 等. 抗偏载静压卧式伺服缸同步控制系统仿真研究 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (7): 125-130.
- Zhao X D, Ma L N, Yang X X, et al. Simulation study on synchronous control system of horizontal servo cylinder with static pressure against bias load [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48 (7): 125-130.
- [11] 宋昭, 刘震洲, 石明礼, 等. 基于积分分离 PID 神经网络的电液位置同步控制算法 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (5): 167-170.
- Song Z, Liu Z Z, Shi M L, et al. Electro-hydraulic position synchronous control algorithm based on integral separation PID neural network [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (5): 167-170.