

液压执行机构电液比例控制算法在农机中的应用

李忠峰

上海博世力士乐液压及自动化有限公司大连分公司, 辽宁 沈阳 116011

DOI: 10.61369/TACS.2026060017

摘 要 : 本文针对农机作业中液压执行机构电液比例控制存在的负载波动、振动干扰、阀体污染和低成本硬件等各方面问题,研究了其在农机上的应用。根据液压执行机构的工作特性以及农机复杂的作业工况,从动态补偿、信号处理、污染识别、分段插值等几个方面提出相应的优化措施,并结合联合收割机、拖拉机等具体的农机场景来设计实践案例,从而达到控制参数和工况精准匹配的目的,提高控制精度和系统稳定性,缓解复杂工况和硬件限制的影响。研究给农机液压控制系统精细化、国产化发展赋予了可行的技术途径,对改进农机作业品质,推进农业机械化智能化升级有着十分重要的实际意义。

关 键 词 : 液压执行机构; 电液比例控制算法; 农机; 应用方法

Application of Electro-hydraulic Proportional Control Algorithm for Hydraulic Actuators in Agricultural Machinery

Li Zhongfeng

Dalian Branch, Bosch Rexroth Hydraulics & Automation (Shanghai) Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 116011

Abstract : Aiming at the problems existing in the electro-hydraulic proportional control of hydraulic actuators during agricultural machinery operation, such as load fluctuation, vibration interference, valve contamination and low-cost hardware constraints, this paper studies its application in agricultural machinery. According to the operating characteristics of hydraulic actuators and the complex working conditions of agricultural machinery, corresponding optimization measures are proposed from the aspects of dynamic compensation, signal processing, pollution identification and piecewise interpolation. Combined with specific agricultural machinery scenarios such as combine harvesters and tractors, practical cases are designed to realize the accurate matching of control parameters and working conditions, improve control accuracy and system stability, and reduce the adverse effects of complex operating conditions and hardware limitations. The research provides a feasible technical approach for the refinement and localization of agricultural machinery hydraulic control systems, and is of great practical significance for improving the operation quality of agricultural machinery and promoting the intelligent upgrading of agricultural mechanization.

Keywords : hydraulic actuator; electro-hydraulic proportional control algorithm; agricultural machinery; application method

目前我国的农业已经进入了机械化主导的时代,农作物耕种收综合机械化率达到75%以上,但是农机作业环境复杂,负载变化大,传统的液压控制方式精度低、响应慢,不能满足犁深均匀性、作业稳定性等精细化的要求。液压执行机构是农机的动力源,其控制精度对作业质量有重大影响,采用电液比例控制算法可达到流量、压力精准调节的效果,适合于复杂作业环境下的应用。目前国产农机液压系统还存在着控制滞后、抗干扰能力差等状况,高端技术仍然依靠进口。在此情况下,研究液压执行机构电液比例控制算法在农机上的应用,对于冲破技术障碍,提升农机的智能化水准,推进现代农业高质量发展有着十分重要的现实意义^[1]。

一、液压执行机构电液比例控制算法在农机中的应用意义

研究液压执行机构电液比例控制算法在农机上的应用,具有很强的技术突破和产业实践意义。从技术角度来说,该算法可以很好地解决农机液压控制精度不够、响应慢等问题,改善液压执

行机构的动态性能,提高农机作业的可控性、稳定性,填补国产农机高端液压控制算法技术空白。从产业角度来说,可以减少对进口控制技术的依赖,促使农机液压系统实现国产化升级,缩减农机制造成本,提升我国农机产业核心竞争力。就农业发展来说,可提高农机作业精度,减少资源消耗,提高农作物产量与品质,给农业机械化向智能化、精准化转变提供技术支持,推进乡

乡村振兴与现代农业产业体系构建。

二、液压执行机构电液比例控制算法在农机中的应用难点

（一）负载变化干扰参数整定

农机作业时作业对象、作业环境存在随机性，造成液压执行机构受力是随机变化的。不同的地块土壤硬度、作物长势存在差别，耕地、播种等各个作业环节的阻力也会出现突变，造成控制算法的核心参数很难做到稳定匹配。参数整定要依靠稳定的负载情况，负载的动态改变会打乱参数同负载的契合状态，致使控制精度降低，响应速度减慢，有时还会引发超调状况。参数整定过于保守不能应对突发的负载冲击，参数偏激进而降低系统的稳定性，很难找到一个既能适应又能稳定的最优参数组合^[2]。

（二）农机振动致信号采集难

农机作业大多在田间露天进行，在作业过程中发动机运转、土壤摩擦碰撞等都会产生持续的振动，这些振动会直接传送到电液比例控制系统信号采集模块上。振动会造成传感器固定松动、接触不良，造成采集到的流量、压力、位移等重要信号失真、有杂波干扰^[3]。失真的信号不能真实地反映液压执行机构实际的运行情况，控制算法接收到错误的信号之后，就会发出不合理控制指令，造成执行机构动作出现偏差，进而影响作业精度。振动还会加快采集模块的损耗，使信号采集更加不稳定、不可靠。

（三）田间尘油影响阀体响应

田间作业环境恶劣，土壤粉尘、作物碎屑、液压系统泄漏的油液容易混杂在一起形成尘油混合物，尘油混合物会附着在电液比例阀的阀芯、阀体等重要部件上。尘油颗粒会增大阀芯和阀体之间的摩擦阻力，使阀芯不能灵活地移动，造成阀件响应速度变慢，不能及时执行控制算法的命令^[4]。长期积存的尘油还会造成阀件堵塞、磨损，破坏阀件的密封性能，引起液压泄漏，使控制效果变差，严重时会造成执行机构不能正常工作，增大系统的维护费用和故障发生率。

（四）低成本硬件限制算法精度

农机产业对于成本的控制要求较高，民用农机硬件配置大多采用经济型的配置方式，不能满足高精度控制算法的运行需求。低成本的传感器、控制器等硬件的测量精度、运算速度低，不能迅速、准确地完成信号采集和指令运算，使控制算法的优化效果不能得到充分发挥。另外低成本硬件抗干扰能力差，容易受到田间电磁、温度等环境因素的影响，造成算法运行卡顿、指令超时等问题。由于硬件性能的限制，不能使用复杂的控制算法，造成液压控制精度不高，农机作业质量不能提高^[5]。

三、液压执行机构电液比例控制算法在农机中的应用方法

（一）建立负载自适应的补偿表

根据负载变化引起的参数匹配问题，通过前期试验得到不同

作业工况下负载的数据，结合液压执行机构的运行特性，整理出负载和控制参数的关系，从而完成数据拟合和校准。根据拟合结果建立动态补偿机制，实时获取负载的变化趋势，按照当前负载情况自动选择合适的补偿参数，并且调节控制指令，从而达到控制参数同负载变动精准对接的效果，改善系统应对复杂工况的能力^[6]。

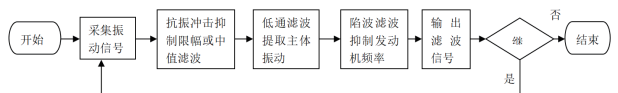
以拖拉机为例，适配悬挂升降、液压转向、旋耕深耕、播种深度控制等，标准负载补偿表程序如下：

```
// 16行6列 农机原厂通用补偿表
unsigned char load_comp_table[1][6][6] =
{
//10% 30% 50% 70% 85% 95%
{0, 0, 0, 0, 0, 0}, //0级 空载离地
{2, 1, 1, 0, 0, 0}, //1级 微轻载
{4, 3, 2, 1, 0, 0}, //2级 浅耕轻负荷
{7, 5, 3, 2, 1, 0}, //3级 平地正常作业
{10, 7, 5, 3, 2, 1}, //4级 普通耕地
{13, 10, 7, 4, 3, 2}, //5级 中等负荷
{16, 12, 9, 6, 4, 3}, //6级 偏硬土质
{19, 15, 11, 8, 6, 4}, //7级 深耕常规
{22, 18, 14, 10, 7, 5}, //8级 重载深耕
{25, 21, 17, 12, 9, 6}, //9级 黏土地重载
{28, 24, 20, 15, 11, 7}, //10级 硬地大负荷
{31, 27, 23, 18, 13, 8}, //11级 陡坡作业
{34, 30, 26, 21, 15, 9}, //12级 极限耕作
{37, 33, 29, 24, 17, 10}, //13级 超负载
{40, 36, 32, 27, 19, 11}, //14级 临近过载
{45, 40, 35, 30, 22, 12} //15级 峰值重载
};
```

（二）开发抗振滤波与陷波模块

根据农机振动的频率特性，可以设计出相应的信号处理方法来消除由于振动造成的信号采集失真。选择适合于农机工况的滤波算法来抑制高频振动，再加设陷波环节，准确抵消振动主频所对应的干扰信号，减小信号失真^[7]。

比如，大型联合收获机整机振动来源主要有割台切割振动、滚筒脱粒冲击振动、风机偏心旋转振动、清选筛往复摆动振动、行走底盘起伏颠簸振动、发动机液压泵高频共振、喂入不均匀引发负载突变冲击振动等。根据具体工况得到振动主频范围和杂波特性，再选择合适滤波算法，在信号处理系统中加入相应的陷波环节。收割作业时，把该机制嵌入到信号采集模块中，对液压执行机构压力、位移信号实施实时预处理，剔除振动造成的杂波干扰，消除振动主频造成的信号失真，保证传输给控制算法的信号可以真实体现执行机构的运行状况，为平稳收割作业提供保证。其控制流程图如下：



（三）设计阀体污染在线辨识方法

对油液污染而引起的液压阀响应异常，可以采用阀体运行参数监测的方式，获取阀口污染造成的响应滞后、压力波动等特征信号，从而得到污染程度和运行参数之间的关联模型。根据此模型来设计实时辨识机制，实时分析液压阀的工作状态，准确判断阀口的污染程度，联动控制算法对输出指令进行调整，补偿由于阀体污染引起的响应偏差，减缓阀芯的磨损，保持液压的稳定响应性能^[9]。

比如在玉米播种机中，工作人员要对液压系统运行时的阀芯运动速度、进出口压力差等重要参数加以监控，捕捉到尘油附着引发的响应迟缓、压力起伏这些特性信号，并且依靠阀体污染状况的实测数据来创建污染程度和运行参数之间的模型。根据此模型建立实时辨识系统，在播种作业过程中实时分析液压阀的工作状态，准确判断阀口的污染程度，联动控制算法动态调节输出指令，补偿由于污染引起的响应偏差，防止由于液压阀响应异常造成的播种深度不均、漏播等问题。

（四）构建低成本分段插值算法

因为液压比例阀和执行元件都存在死区、饱和、零漂等问题，负载变化导致响应滞后、超调和冲击，低成本控制器计算能力有限，需要优化算法。根据各个区间参数的特性来设计简单的插值方法，用分段运算来简化算法的复杂程度，可以减小硬件运算的压力，保证各个区间内控制精度满足作业的要求。该机制可以在低成本硬件性能范围之内发挥出控制算法的优化作用，达到精度和成本的平衡^[9]。

比如在小型旋耕机械中，工作人员根据旋耕作业的精度要求，把犁深范围分成若干个作业区间，通过试验找出每个区间内液压执行机构的最佳控制参数，去掉复杂的算法里无用的冗余运算环节，减小硬件的运算负担。之后根据各区间的参数特点来设

计简单的插值方式，在旋耕作业时采用分段运算的方式快速调用对应的区间最优参数，在低成本传感器、控制器性能范围内保证犁深控制符合作业标准^[10]。以 STM32 为例，程序片段如下：

```
// 标定表：电流→压力（5段）
float x[]={0,50,200,350,500}; // mA
float y[]={0,1,10,18,20}; // MPa
// 分段线性插值
float interp(float xin){
    if(xin<=x[0])return y[0];
    if(xin>=x[4])return y[4];
    int k=0;
    while(xin>x[k+1])k++; // 找区间
    float t=(xin-x[k])/(x[k+1]-x[k]);
    return y[k]+t*(y[k+1]-y[k]);
}
```

四、结语

综上所述，本文主要研究了液压执行机构电液比例控制算法在农机上的应用方法，针对农机作业中负载波动、振动干扰、阀体污染、低成本硬件限制等主要问题，提出了相应的解决办法，并且给出了具体的农机作业场景的实践案例。研究用针对性的控制优化设计提高了液压执行机构的控制精度、稳定性、适应性，减轻了农机复杂作业工况带来的不良影响，减少了对高端硬件的依赖，给农机液压控制系统国产化、精细化发展提供了一条可行的技术途径，对提高农机作业质量、促进农业机械化向智能化升级有重要的实践意义。

参考文献

- [1] 王封疆，王梦飞，周杰. 基于群智能的农机视觉导航关键算法研究及应用 [J]. 中国农机化学报, 2025, 46(5): 92-99.
- [2] 黄小毛，王绍帅，石逸泽，等. 稻油轮作无人化农场农机作业路径规划算法与移动端软件研究 [J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 73-82.
- [3] 刘卉，孟志军，王培，等. 基于农机空间轨迹的作业面积的缓冲区算法 [J]. 农业工程学报, 2015(7): 180-184.
- [4] 吴晓伟，骆庭宝. 基于人工智能算法的田间农机作业无人化管理系统设计 [J]. 安徽农学通报, 2024, 30(17): 96-100.
- [5] 赵冉，石晨，谭骥. 农机安全生产信息系统的设计——基于混合遗传资源调度算法 [J]. 农机化研究, 2021, 43(6): 231-234.
- [6] 包建军，李明，袁逸萍. 基于启发式算法的农机混流装配线平衡分析与优化 [J]. 机械设计与制造, 2022, 372(2): 199-202, 208.
- [7] 尤春晓. 五轴数控加工刀具优化算法及在农机零部件中的应用研究 [J]. 河北农机, 2026(3): 34-36.
- [8] 魏新华，邓屹，崔鑫宇，等. 基于模糊算法的农机编队转场多机协同控制方法 [J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 48-60.
- [9] 杨焱，王星飞. 智能化农机装备的法律监管与伦理考量 [J]. 中国农机化学报, 2025, 47(3): 325-334.
- [10] 李响，王庆. 基于混合遗传算法的农机科研人员任务调度优化研究 [J]. 中国农机化, 2008(1): 49-52.