

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2018.12.003

拖拉机电液悬挂半物理仿真系统设计及试验^①

李明生^{1,2}, 叶进¹, 宋海兰³, 陈俊杰²

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 西南大学 智能传动与控制技术国家地方联合工程实验室, 重庆 400715;
3. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044

摘要: 为实现拖拉机电液悬挂系统的准确控制, 以福田雷沃欧豹 TG1254 拖拉机为研究平台, 设计了一套拖拉机电液悬挂半物理仿真系统。该系统硬件平台主要包括拖拉机液压回路、传感器、数据采集装置等; 软件平台采用 SIT 模块, 联合 LabVIEW 和 MATLAB 建立控制器模型。设计自适应控制算法, 实现系统的牵引力调节、位置调节和力位综合调节并进行了实车试验。在牵引力调节试验、位置调节试验和力位综合调节试验中, 系统过渡过程时间均低于或等于 6 s, 系统超调量小于或等于 25%, 系统控制过程平稳, 耕深稳定, 实现作业质量提升。

关 键 词: 拖拉机; 悬挂; 半物理仿真

中图分类号: S232.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2018)12-0014-08

拖拉机悬挂提升系统是用于农具提升和控制耕深的专用部件, 其控制性能对拖拉机的作业质量以及作业效率有重要影响^[1]。目前拖拉机上广泛采用的机液式提升系统体积较大、结构复杂、控制精度不高, 难以实现拖拉机的精细作业, 逐步由电—液式悬挂系统取代^[2]。设计满足复杂田间作业工况的拖拉机电液悬挂系统, 对提高田间作业精度、保证拖拉机耕作的通过性与平顺性具有重要意义。

中国农业大学将模糊 PID 自适应控制方法应用到拖拉机电液悬挂系统控制, 设计了模糊 PID 自适应控制器^[3-4]; 青岛大学搭建了拖拉机电控液压悬挂系统 AMESim 仿真模型和 1L-225 型犁具 Adams 仿真模型^[5]; 南京农业大学采用 AMESim 和 Simulink 联合仿真的方法建立电液悬挂系统仿真模型, 验证了力位综合调节方法和模糊控制器的可行性^[6-7]。笔者以福田雷沃欧豹 TG1254 为研究平台, 采用 MATLAB 数学建模与 LabVIEW 相结合的方法, 设计一种拖拉机电液悬挂半物理仿真系统, 实现电液悬挂系统力调节、位调节和力位综合调节的自适应控制, 并通过田间试验进行了验证。

1 电液悬挂半物理仿真系统结构

拖拉机电液悬挂系统是一个具有本质非线性参数变量的大惯性系统, 且不同型号的拖拉机悬挂系统性能有很大差别^[8-10]。因此, 本文构建的半物理仿真系统主要针对快速控制原型功能, 如图 1 所示。实体部分为电液悬挂系统, 包括电磁比例阀、拖拉机液压回路、提升机构及耕深传感器等。软件平台由 MATLAB 和 LabVIEW 组成, LabVIEW 仿真工具包 SIT^[11]为 MATLAB 和 LabVIEW 提供了良好的软件接口, 软件系统与实物之间通过 NI 公司数据采集卡作为通讯连接。

① 收稿日期: 2018-04-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701001); 中央高校基本科研业务费专项资金重点项目(XDKJ2016B007)。

作者简介: 李明生(1987-), 男, 讲师, 博士, 主要从事农业机械化的研究。

通信作者: 叶进, 教授, 硕士研究生导师。

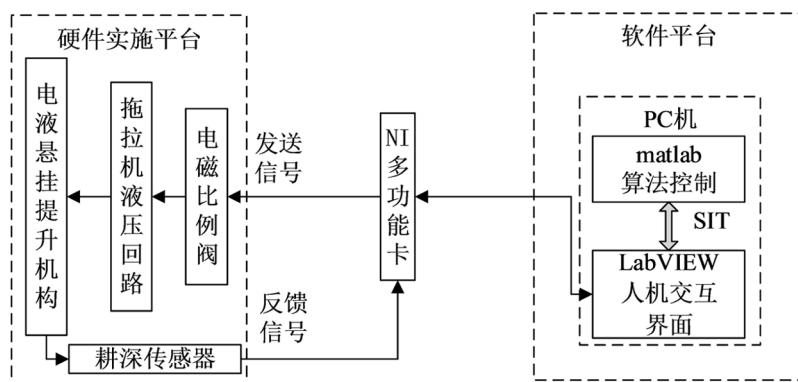


图 1 系统结构原理

在半物理仿真系统中, 在 MATLAB 中建立控制器模型, 设计控制算法, 并将控制参数传递给 LabVIEW, LabVIEW 不仅能够实时显示和记录控制参数, 还能将控制参数通过多功能数据采集卡传递给电液悬挂系统, 多功能数据采集卡接收耕深传感器等发出的实时反馈信号, 使整个控制系统形成闭环实时反馈系统。在控制器仿真软件中可以实时调整控制参数, 优化控制性能, 达到验证控制算法的目的。

2 电液悬挂半物理仿真系统硬件平台

2.1 液压回路设计

结合 TG1254 大功率拖拉机的实际情况, 设计液压回路如图 2 所示。液压回路由定量泵、安全阀、负载反馈阀块、电液提升控制回路等组成。在工作过程中, 定量泵为系统供油, 经由负载反馈阀块进入电液提升控制回路, 系统负载压力通过梭阀反馈至负载反馈阀块的液控换向阀并与定量泵输出油压进行比较, 当定量泵输出油压高于系统负载压力与换向阀弹簧力之和时, 液控换向阀处于左位, 定量泵输出油液进入回油箱; 当定量泵输出油压低于系统负载压力与换向阀弹簧力之和时, 液控换向阀处于右位, 定量泵输出油液电液提升控制回路为系统供油。本液压回路中, 定量泵与负载反馈阀块相结合以实现流量调节功能, 通过液控换向阀的调整来实现系统油液输出与工作负载的功率匹配, 多余的油液直接接回油箱, 避免过高系统压力造成的功率损失。

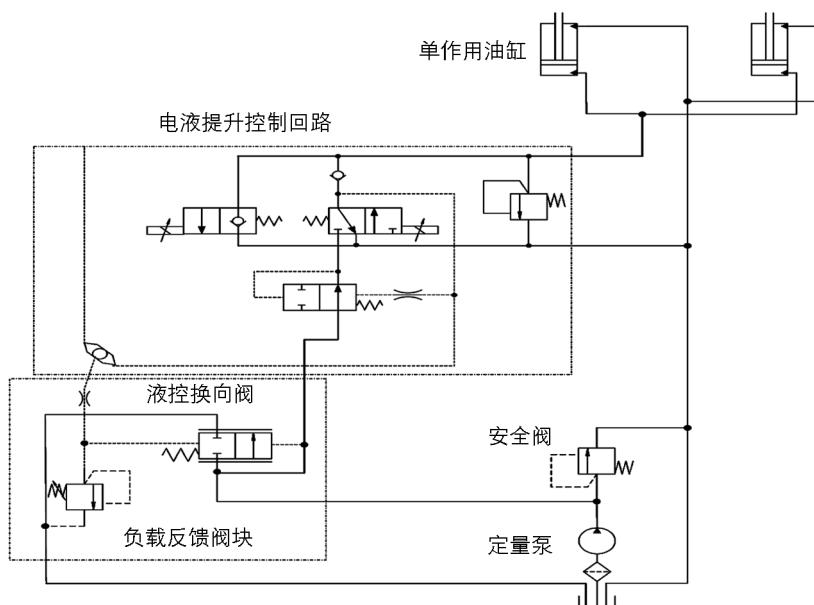


图 2 系统液压回路

2.2 油液压力传感器

油液压力信号的采集使用 AK-4 型油液压力传感器, 传感器量程为 0~30 MPa, 输出电压为 0~5 V, 误差为 $\pm 0.2\%$. 传感器安装在比例提升阀与提升液压缸之间.

2.3 牵引力传感器

牵引力传感器为一根承受剪力作用的空心截面圆轴, 双剪型电阻应变计粘贴在中心孔内凹槽中心的位置. 为了合理利用空间及增加信号数量, 选择单根传感器上分布两组独立惠斯通电桥的方式, 能同时测量水平和垂直方向的牵引力. 轴销式牵引力传感器安装于拖拉机左右两个下拉杆上, 牵引力为两个传感器水平力之和.

2.4 耕深传感器

耕深传感器采用非接触式倾角传感器 SCA60C-PWB 模组, 该倾角传感器通过在内部增加阻尼来消除振动的影响, 能承受高达 20 kg 的机械冲击力, 具有抗冲击能力强、能耗低等优点, 适用于田间试验.

3 电液悬挂半物理仿真系统软件系统

3.1 LabVIEW 人机交互界面

通过 LabVIEW 前面板的图形化编程, 可以为用户提供一种方便、快捷的系统仿真结果界面. 本研究所建立的拖拉机电液悬挂控制系统人机交互界面包括四部分, 分别是 PID 参数控制、硬件控制信号显示、MATLAB 仿真结果显示和数据存储, 如图 3 所示.

PID 参数控制部分用于修改 PID 算法的初始控制参数 K_P 、 K_I 、 K_D , 设定目标耕深以及耕深调节死区. 硬件控制信号显示部分用于显示对拖拉机电液悬挂系统电液比例阀的控制信号, 控制信号的形式为 PWM 信号. MATLAB 仿真控制部分用于控制 MATLAB 仿真程序的开始和停止, 并以指针的形式将 MATLAB 仿真结果进行显示. 数据存储部分用来设置采样频率, 并将仿真结果保存在指定的路径上.

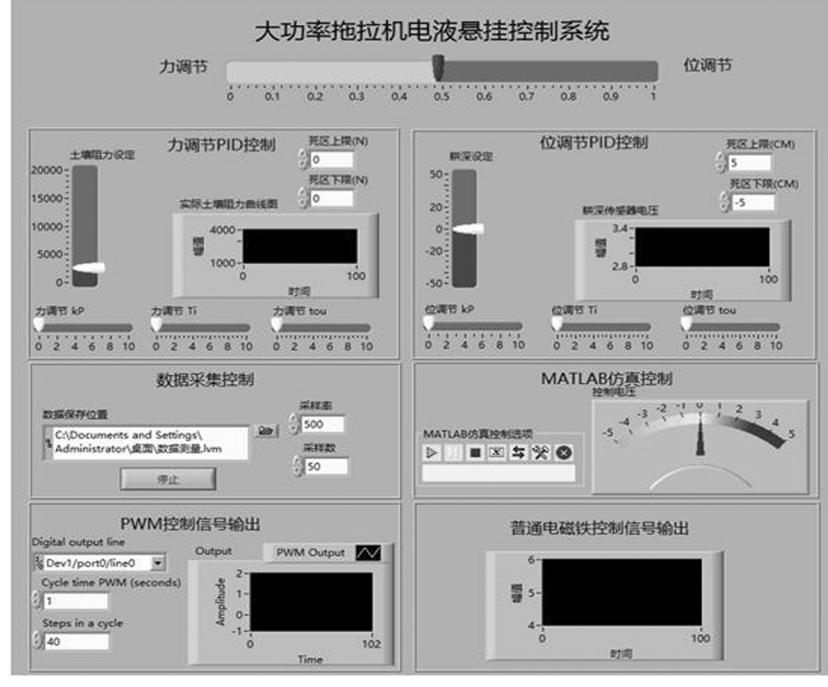


图 3 LabVIEW 人机交互界面

3.2 自适应控制算法

本文所设计的模糊 PID 自适应控制器由常规 PID 控制和模糊推理两部分组成, 模糊推理部分实质就是一个模糊控制器, 其输入是偏差和偏差变化率^[12]. PID 参数模糊自整定的原理在于事先确定 PID 3 个参数同偏差和偏差变化率之间的模糊关系, 在系统的运行控制过程中通过不断查询模糊控制规则进行 PID 参数

的实时修改,从而获得更好的动态与静态性能。针对牵引力控制,设计拖拉机电液悬挂半物理系统模糊 PID 自适应控制框图如图 4 所示。牵引力控制中模糊 PID 控制器输入变量为牵引力的偏差以及牵引力偏差的变化率,输出量为比例控制阀控制电压。

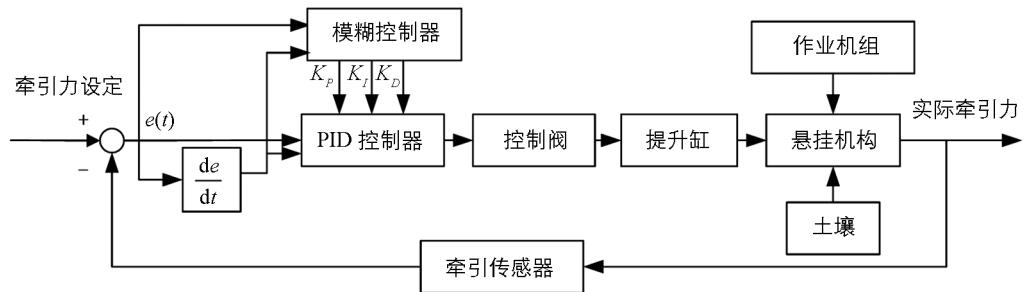


图 4 模糊 PID 自适应控制框图

在 MATLAB 中建立系统 PID 控制模型如图 5 所示,模糊 PID 自适应牵引力控制器模型,如图 6 所示。模型输入牵引力偏差,模糊推理器根据经过量化的偏差信号及偏差信号变化率对 PID 参数进行修正,输出控制电压信号。

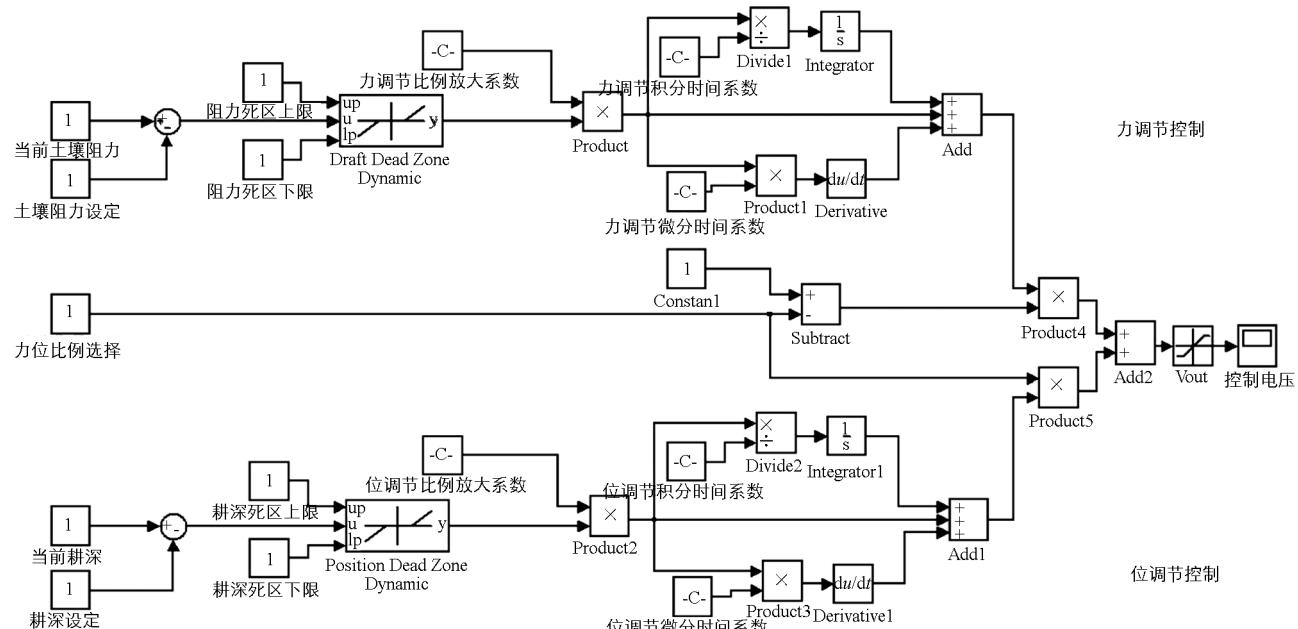


图 5 PID 控制模型

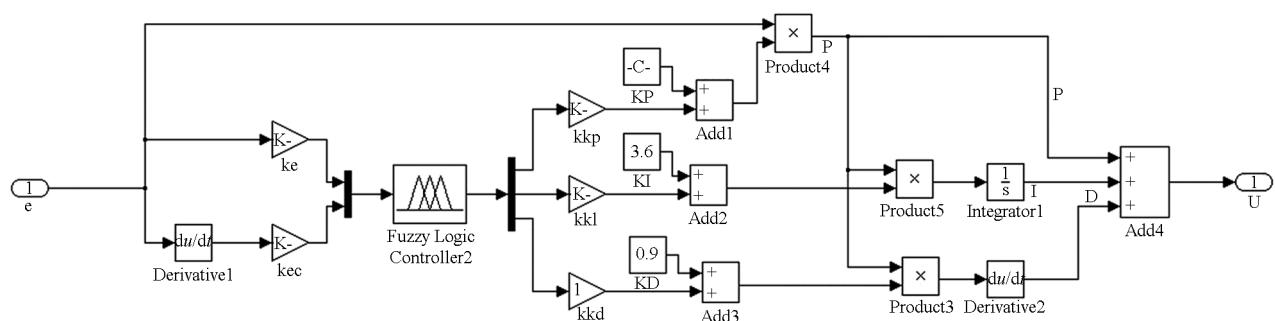


图 6 模糊 PID 自适应控制模型

4 电液悬挂半物理仿真系统软硬件接口

本文采用的是 LabVIEW 与 MATLAB 混合编程接口技术, 使用 LabVIEW 仿真接口工具包 SIT 链接 MATLAB, 快速创建自定义 LabVIEW 用户界面, 交互式验证 MATLAB 模型.

LabVIEW 仿真工具包 SIT 为 MATLAB 和 LabVIEW 提供了良好的软件接口, 设计本系统 SIT 结构如图 7 所示. 通过 LabVIEW 设计用户图形界面, 负责数据采集和网络通信, MATLAB 在后台提供大型算法, 大量的控制系统模型库供 LabVIEW 调用. 另外, 通过 SIT 还可以在 LabVIEW 中实时修改 MATLAB 控制参数, 实现动态系统建模和仿真.

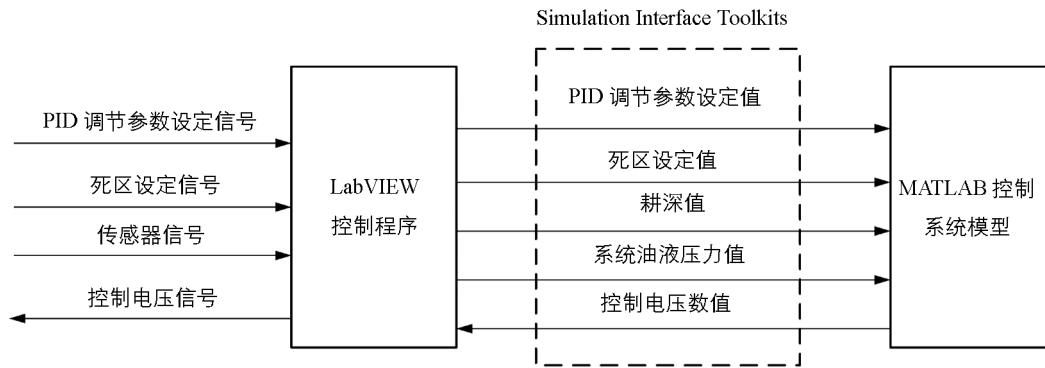


图 7 SIT 结构图

SIT 主要用于创建 Host VI 和 model 之间的映射, 它的设置是整个在线仿真的核心. SIT 的设置包括 5 个部分, 分别是 Model and Host、Mappings、Data Logging、File Playback 和 Hardware I/O 选项卡. 其中 Mappings 用于设定 Host VI Controls 和 model parameter 之间的映射. 根据控制需要, 本文中设定的参数值有 PID 参数 K_P 、 K_I 、 K_D 、耕深设定、实际耕深以及死区上下限, 如图 8 所示.

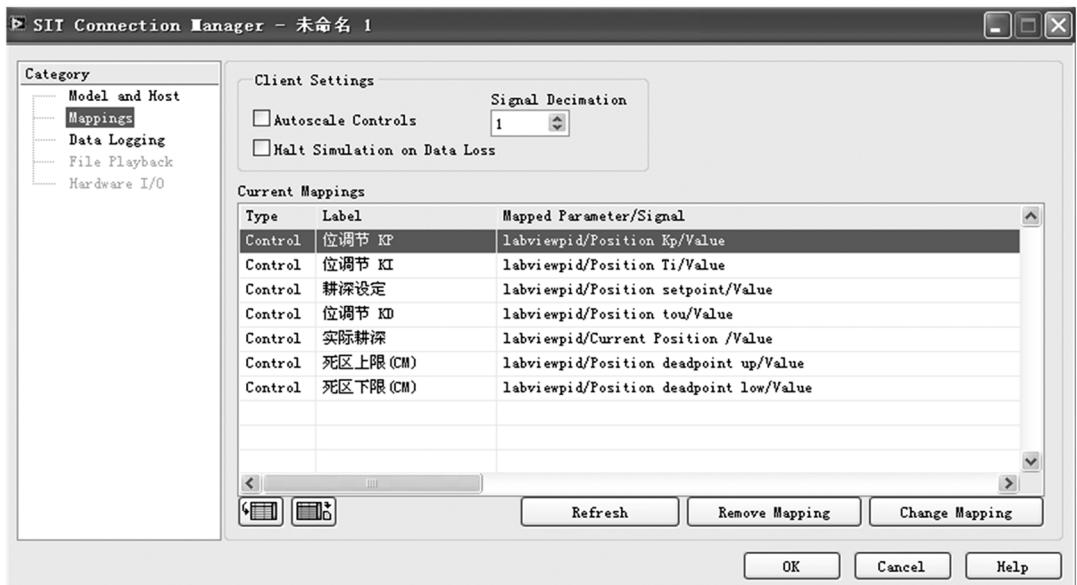
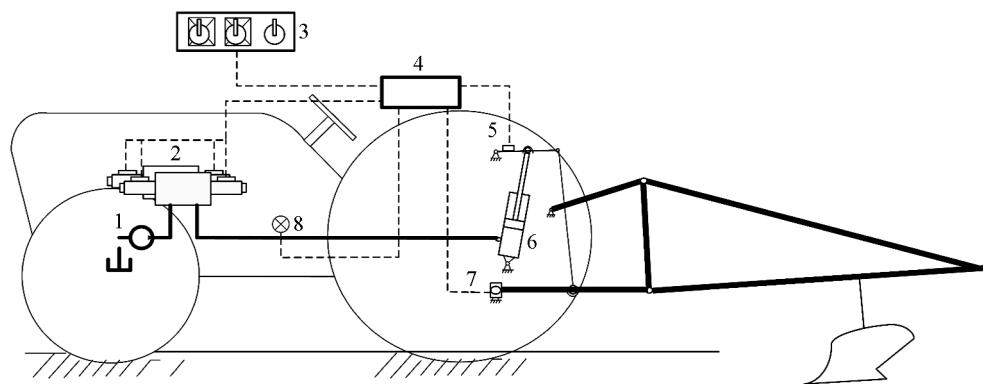


图 8 SIT 参数配置

5 电液悬挂半物理仿真系统田间试验

试验平台为福田雷沃欧豹 TG1254 拖拉机, 如图 9 所示. 试验地点位于上庄试验站旱地, 田间试验用来测试验证电液悬挂半物理仿真系统力调节、位调节和力位综合调节性能.



1. 液压泵；2. 控制阀组；3. 控制面板；4. 软件平台；5. 耕深传感器；6. 液压缸；7. 力传感器；8. 油压传感器。

图 9 电液悬挂半物理仿真系统试验平台

5.1 牵引力调节试验

系统初始牵引力为 3 kN，先阶跃上升至 7 kN，稳定后阶跃下降至 2 kN，记录实际牵引力的变化，由此进行牵引力控制性能分析。为防止电液比例阀频繁启闭造成的系统过热等现象，设置牵引力控制死区为 ± 500 N，得到牵引力变化曲线如图 10 所示。试验结果显示：设定牵引力由 3 kN 阶跃至 7 kN，系统过渡过程时间为 5 s，系统超调量为 25%；设定牵引力由 7 kN 阶跃至 2 kN，系统过渡过程时间为 6 s，系统超调量为 20%。

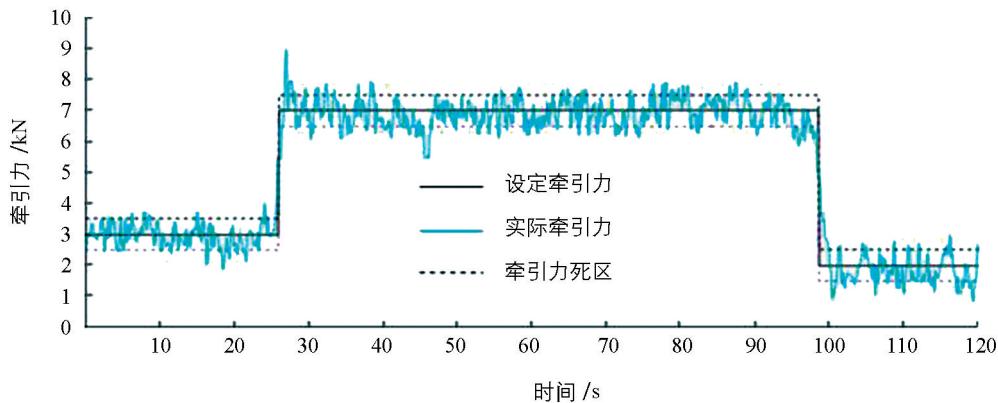


图 10 牵引力调节试验曲线

5.2 位置调节试验

设定耕深为 20 cm，死区为 ± 1 cm，然后将耕深设定阶跃至 10 cm，待系统稳定后将耕深设定阶跃至 25 cm，测得耕深变化曲线如图 11 所示。试验结果显示：设定耕深由 20 cm 阶跃至 10 cm 时，系统过渡过程时间为 5 s，超调量为 30%；设定耕深由 10 cm 阶跃至 30 cm 时，系统过渡过程时间为 4 s，无超调量。

5.3 力位综合调节试验

设定耕深为 20 cm，死区为 ± 1 cm，设定土壤阻力为 4 kN，死区为 ± 500 N，力控制权重设定为 70%，测得系统耕深、牵引力变化曲线如图 12 所示。试验结果显示：系统过渡过程时间为 25 s，耕深最大控制偏差为 $+7$ cm，牵引力最大控制偏差为 -2 kN，系统耕深变化大，作业质量较差。

采用自适应力位综合调节方法，设定耕深为 20 cm，死区为 ± 1 cm，设定土壤阻力为 4 000 N，死区为 ± 500 N，测得系统耕深、牵引力变化试验曲线如图 15 所示。试验结果显示：系统过渡过程时间为 6 s，耕深最大控制偏差为 $+4$ cm，牵引力最大控制偏差为 -2.3 kN。系统控制过程平稳，耕深偏差小，耕作深度稳定，作业质量好。

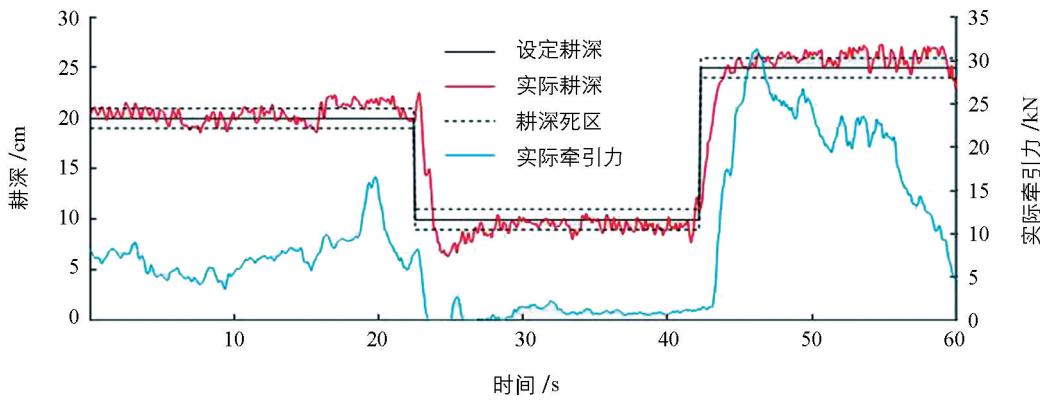


图 11 位置调节试验曲线

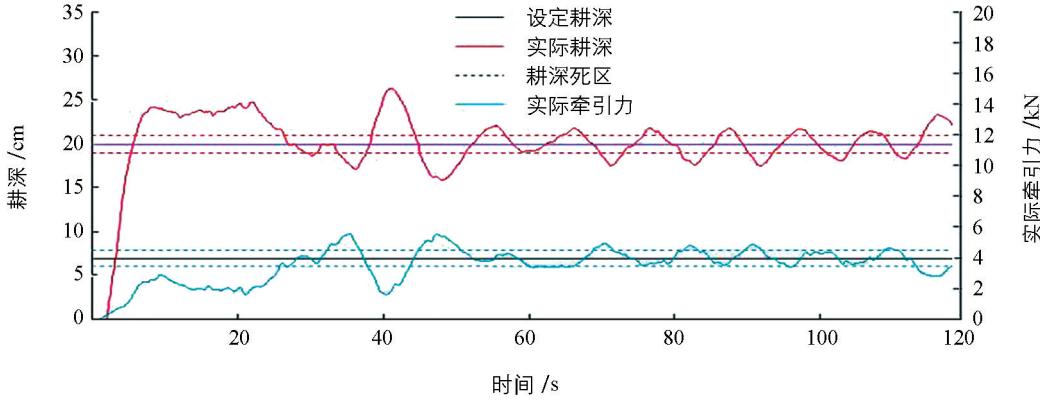


图 12 定权值 70% 力位综合调节试验曲线

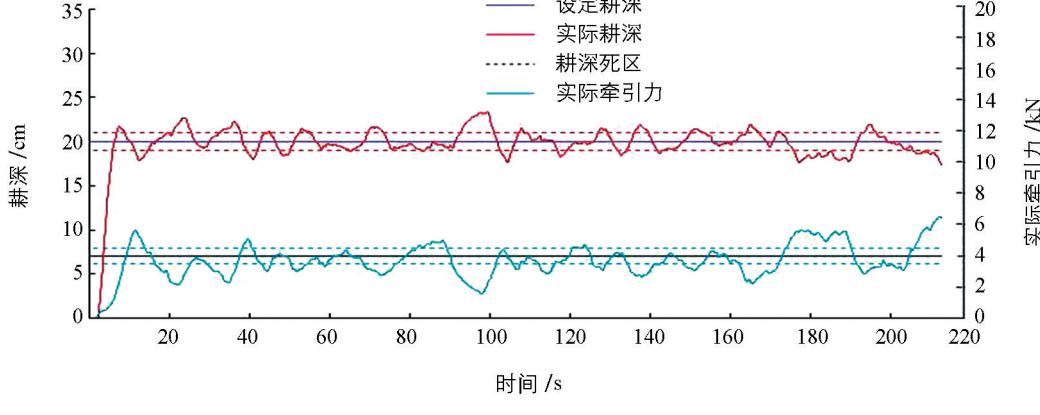


图 13 变权值力位综合控制试验曲线

6 结 论

本文设计了一种拖拉机电液悬挂半物理仿真系统。选择传感器，设计液压回路，构建硬件平台；基于 MATLAB 和 LabVIEW 开发人机交互界面和自适应控制算法，构建软件系统；定义 SIT 接口，实现系统数据交换。最后进行了田间试验，结果表明：本系统可以实现大功率拖拉机的牵引力调节、位置调节和力位综合调节。

参考文献：

- [1] 承 鉴, 迟瑞娟, 毛恩荣. 悬挂农具对电液悬挂系统拖拉机振动的影响 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 24—32.
- [2] SHEKH M I, RAHEMAN H, SHIRVAIKAR R, et al. An Electromechanical Implement Lift System with Position

- Control for Low Horse Power Tractor [J]. Agricultural Engineering International; CIGR Journal, 2014, 16(4): 112—121.
- [3] 李明生, 赵建军, 朱忠祥, 等. 拖拉机电液悬挂系统模糊 PID 自适应控制方法 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(S2): 295—300.
- [4] 赵建军, 朱忠祥, 宋正河, 等. 重型拖拉机电液悬挂比例控制器设计 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(S1): 10—16.
- [5] 郝希阳, 王玉林, 徐统伟, 等. 基于 AMESim 的拖拉机电控液压悬挂系统建模与仿真 [J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2018, 33(1): 125—129.
- [6] 徐煌, 鲁植雄, 宋延东. 拖拉机电液悬挂系统力位综合控制策略研究 [J]. 浙江农业学报, 2013, 25(4): 879—883.
- [7] 郭兵. 拖拉机电控液压悬挂系统力位综合控制技术研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [8] 李国栋. 拖拉机悬挂电液提升控制系统的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [9] 承鉴, 迟瑞娟, 赖青青, 等. 基于电液悬挂系统的拖拉机主动减振控制 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 82—90.
- [10] 潘公宇, 候观远青. 基于车身高度控制的主动液压悬架建模与仿真 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2016, 30(11): 1—6.
- [11] 何慧, 田卫华. 基于 LabVIEW 和 Matlab 的电力电子技术虚拟实验平台的设计开发 [J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2018, 14(1): 35—40.
- [12] 吴廷强, 阎昌国, 罗德莲. 基于积分分离模糊 PID 的温度控制系统设计 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(5): 185—189.

Design and Test of a Semi-Physical Simulation System for the Tractor Electro-Hydraulic Hitch

LI Ming-sheng^{1,2}, YE Jin¹, SONG Hai-lan³, CHEN Jun-jie²

1. School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. National & Local Joint Engineering Laboratory of Intelligent Transmission and Control Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;
3. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract: A tractor electro-hydraulic suspension semi-physical simulation system was designed with the tractor LOVOL TG1254 as the research platform. The hardware platform of the system mainly included a tractor hydraulic circuit, a sensor and a data acquisition device. The software platform used SIT module, combined with LabVIEW and MATLAB to establish a controller model. An adaptive control algorithm was designed to realize the force control, position control and force-position comprehensive control of the system. A field experiment showed that the transition time of the system was less than or equal to 6s, and its overshoot was less than or equal to 25%. The control process was stable, the ploughing depth was stable and the operation quality was promoted.

Key words: tractor; hitch; semi-physical simulation

责任编辑 汤振金