[文章编号] 1003－4684(2025)04-0023-07

基于 AMESim 与 Simulink 的拖拉机三点悬挂姿态调节的联合仿真

湛全帅[1]，王焱清[1,2]，杨光友[1,2]，李　乐[1]，王路玮[1]，汪本福[3]

(1 湖北工业大学农业机械工程研究设计院，湖北 武汉 430068；
2 湖北省农机装备智能化工程技术研究中心，湖北 武汉 430068；
3 农业农村部作物分子育种重点实验室，湖北 武汉 430068)

[摘　要] 针对三点悬挂高程调节与水平调节之间的耦合问题，设计完成了拖拉机三点悬挂的液压系统，根据悬挂装置姿态调节原理，确定以提升臂倾角作为姿态关键参数，分析了悬挂装置各部件之间的几何关系，构建了姿态检测模型。以三点悬挂姿态调节控制系统为研究对象，分别采用 AMESim 与 Simulink 建立了液压系统模型与控制模型，并通过联合仿真分析系统在有无 PID 控制下的效果。仿真结果表明：构建的三点悬挂模型能够精准根据目标高度和倾角进行姿态调节，实现了三点悬挂姿态调节的闭环控制，且在 PID 控制下，响应速度显著提升，超调量大幅度减小，达到稳态时间缩短的目的，为后续的试验研究提供了理论基础。

[关键词] 三点悬挂；耦合；姿态调节；联合仿真；PID 控制
[中图分类号] S222.5　　[文献标识码] A

在旋耕机、平地机、深松机、土壤粉碎机、耕耘机等农机具使用中，拖拉机三点悬挂装置有着不可替代的作用[1]。该装置可使不同种类的农机具快速挂载到拖拉机上，大幅提高装卸效率；同时，为了更好地控制农机具，通过增设左右提升油缸对三点悬挂装置进行姿态调节，进而精准控制农机具作业姿态，使其能够精准响应操作人员的控制指令，实现协同作业。为了提高耕深监测的精准性和稳定性，研究人员不断探索并尝试各种控制策略。杜新武等[2]通过多组田间实验，分析耕深与悬挂装置之间的几何关系，建立了非线性耕深检测模型，并将采集的数据上传云平台，推动了农业现代化的发展。李栋等[3]则结合拖拉机田间姿态，提出了一种基于双倾角检测耕深的方法，分析拖拉机悬挂装置和耕深之间的几何关系，建立了基于双倾角检测耕深的线性模型，田间试验表明该系统耕深检测准确且耕作均匀性达到作业要求。赵国栋等[4]以拖拉机三点悬挂建立运动模型，通过分析电动推杆、提升臂、下拉杆、上拉杆之间的数学模型，获得耕深与油缸伸长之间的数学模型，并对杆件参数进行了初步选择。

近几年研究表明，许多研究人员在对农具姿态调节的问题进行研究时，为了避免机械系统、液压系统、控制系统的耦合问题，一般将农机具的机械、液压与控制系统分开研究。在研究三点悬挂姿态调节的过程中，采用 AMESim 独立仿真液压系统或 Simulink 独立仿真控制系统，难以真实反映复杂农田工况下多系统耦合特性，导致仿真结果存在显著建模误差(误差率约 15％～20％)[5-9]。因此需要进行 AMESim-Simulink 联合仿真研究[10-11]。

针对上述问题，本文以约翰迪尔 6B-1104 拖拉机三点悬挂姿态调节机构为研究对象，基于 AMESim 和 Simulink 软件平台，构建拖拉机三点悬挂机构的机—电—液多领域联合仿真模型，开展三点悬挂机构姿态控制的联合仿真研究。基于 PID 控制算法，三点悬挂左右提升油缸可根据目标高度和倾角指令实现精准姿态调节，构建了三点悬挂姿态调节的闭环控制体系，为农机具姿态控制的试验研究提供了理论支撑。

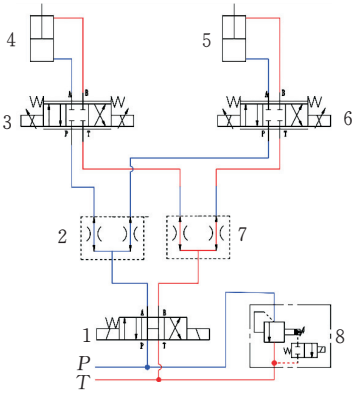
1　液压模型建立

1.1　液压系统的设计

针对三点悬挂高程控制与水平控制的强耦合性问题[12]，设计一种兼具高程调节与水平调节功能的液压油路系统(图 1)。该系统通过并联方式接入拖拉机多路阀回油口。为避免影响原有液压系统独立工作性能，选用中位机能为 H 型的三位四通换向

[收稿日期] 2024－01－17
[第一作者] 湛全帅(1998－)，男，湖北黄梅人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为农业机械设计。

阀。通过两个三位四通电液比例换向阀独立控制左右油缸伸缩以调整三点悬挂姿态，并利用分流集流阀的同步控制特性实现左右油缸位移同步调节，解决传统控制中存在的同步性偏差问题。为避免因液压泵长时间工作造成油温过高、效率低下、磨损加剧等问题[13]，本液压系统采用电磁溢流阀的二位二通电磁阀实现系统卸荷的功能，从而在解决上述问题的同时，保证了系统稳定的工作压强。



1—三位四通换向阀；2—分流集流阀；
3—三位四通电液比例换向阀；4—左侧提升油缸；
5—右侧提升油缸；6—三位四通电液比例换向阀；
7—分流溢流阀；8—电磁溢流阀

图 1 三点悬挂液压系统

1.2 基于 AMESim 搭建液压模型

为了更好地验证该液压系统的特性，使用 AMESim 建立拖拉机三点悬挂姿态调节的液压物理模型(图 2)。为了增加仿真的真实性，设置各液压元件的参数为约翰迪尔 6B-1104 拖拉机液压系统的参数值(表 1)。

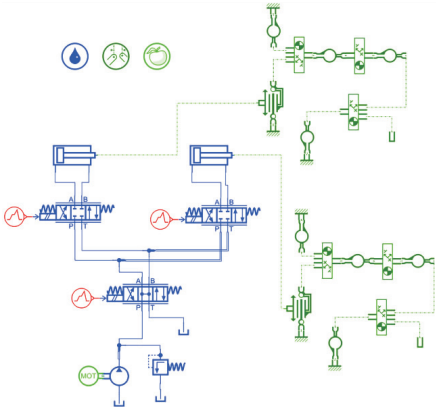


图 2 液压系统仿真模型

表 1 约翰迪尔拖拉机液压系统的参数值

液压泵的转速	2000 r/min
排量	0.025 L/r
溢流阀压强	18 MPa
油缸尺寸	$D=80$ mm，$d=50$ mm
负载	300 kg

为了更好观察三点悬挂机构跟随给定信号的动态变化，通过调用 AMESim 中的 2D Mechanicl 库对三点悬挂机构进行二维建模。通过三点悬挂各杆件的尺寸，计算出三点悬挂各铰接点初始位置坐标，同时设置各 plmbod 实体端点坐标、重心位置(500 mm，200 mm)，设定初始位置为水平，建立如图 3 所示的三点悬挂机构。

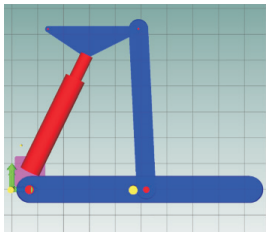
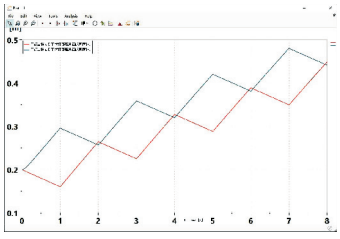


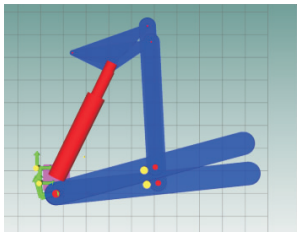
图 3 三点悬挂结构模型

1.3 AMESim 仿真分析

为了便于观察三点悬挂的姿态是否跟随输入的信号进行调节，进行如下仿真：第 1 秒内，设定左侧油缸输入值为 40，电磁阀置于右位，右侧油缸输入值为 −40，电磁阀置于左位；依次交替进行 8 次循环。试验结果显示，三点悬挂的姿态跟随设定的输入信号进行调节，表明设计的液压系统可行。仿真结果如图 4 所示。



(a)悬挂点的高度变化



(b)第 5 秒二维仿真

图 4 AMESim 仿真结果

2 控制模型搭建

2.1 控制系统的设计

将阶跃信号作为目标高度值和目标倾角的给定输入，传递至控制器。控制器通过计算三点悬挂机构的三维空间姿态关系，基于目标倾角与倾角传感器反馈值的偏差，采用 PID 控制算法生成控制信号，并传输至电液比例阀驱动器。驱动器将信号放大后，驱动电液比例换向阀的阀芯位移，通过精准控

制左右油缸的伸缩量，实现三点悬挂机构俯仰角与横滚角的协同调节。同时，左右提升臂的倾角传感器实时采集倾角数据，作为反馈信号传输至控制器，形成“给定输入—控制器调节—执行机构动作—传感器反馈”的闭环控制回路。三点悬挂控制系统原理如图 5 所示。

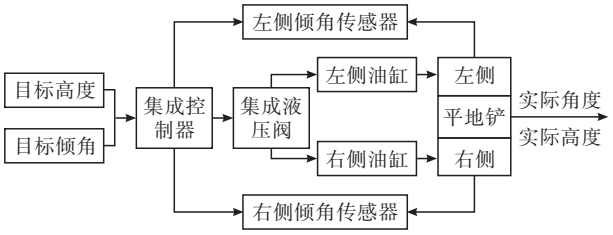


图 5　三点悬挂控制系统

2.2　悬挂装置数学模型的建立

为方便研究，将复式整地机投影于左视平面内，建立如图 6 所示的复式整地机悬挂装置数学模型。

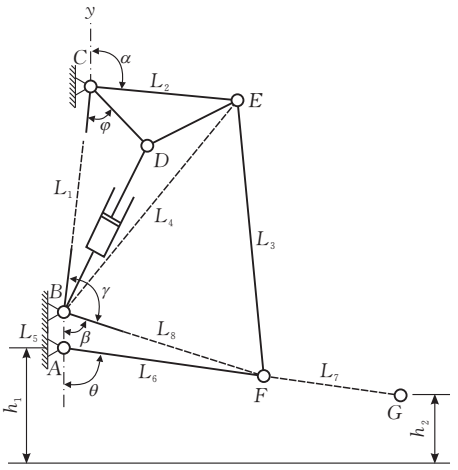


图 6　三点悬挂运动

h_2 与 α 的函数关系式如下：

$$h_2 = h_1 - \cos\left(\begin{array}{c}\angle ABC - \arccos\dfrac{2L_1^2 - 2\cdot L_2\cdot L_1\cos(\angle yCB-\alpha)}{2L_1\sqrt{L_2^2+L_1^2-2\cdot L_2\cdot L_1\cos(\angle yCB-\alpha)}} - \\ \arccos\dfrac{L_8^2+L_2^2+L_1^2-2\cdot L_2\cdot L_1\cos(\angle yCB-\alpha)-L_3^2}{2L_8\sqrt{L_2^2+L_1^2-2\cdot L_2\cdot L_1\cos(\angle yCB-\alpha)}} + \arccos\dfrac{L_8^2+L_6^2-L_5^2}{2L_8\cdot L_6}\end{array}\right)\cdot(L_6+L_7) \tag{1}$$

式中：h_1 为 A 距离地面的高度，mm；h_2 为三点悬挂 G 距离地面高度，mm；θ 为三点悬挂俯仰角，(°)；α 为夹角$\angle yCE$，(°)；γ 为夹角$\angle CBF$，(°)；L_1 为 BC 的长度，mm；L_2 为 CE 的长度，mm；L_3 为 EF 的长度，mm；L_4 为 BE 的长度，mm；L_5 为 AB 的长度，mm；L_6 为 AF 的长度，mm；L_7 为 FG 的长度，mm；L_8 为 BF 的长度，mm。

2.3　基于 simulink 控制系统的建立

对于比例阀驱动器，可将其简化为比例环节[14]，其函数如下：

$$G_1(s) = \frac{I(s)}{U(s)} \tag{2}$$

式中：$U(s)$为控制器输出的模拟电压信号，V；$I(s)$为比例阀驱动器输出电流，A。

对于比例换向阀，根据电路、磁、运动以及流量方程的综合分析，通常将比例换向阀传递函数看作一个二阶环节[15]，其传递函数如下：

$$G_2(s) = \frac{Q(s)}{I(s)} = \frac{K_s}{\dfrac{s^2}{w_s^{\ 2}} + \dfrac{2\varepsilon_s s}{w_s} + 1} \tag{3}$$

式中：K_s为比例换向阀增益；w_s为比例换向阀的固有频率；ε_s为比例换向阀的阻尼比。

以 4WRA6E-50/AG24 型号为例，增益 $K_s = 7.9\times10^{-4}\ \mathrm{m^3/(s\cdot A)}$；固有频率 $w_s = 192$ rad/s；阻尼比 $\varepsilon_s = 0.7$[16]。代入式(3)得：

$$G_2(s) = \frac{Q(s)}{I(s)} = \frac{7.9\times10^{-4}}{\dfrac{s^2}{192^2} + \dfrac{1.4s}{192} + 1} \tag{4}$$

对于提升油缸，以活塞位移为输出的传递函数[17]：

$$G_2(s) = \frac{Y(s)}{Q(s)} = \frac{\dfrac{1}{A_p}}{s\left(\dfrac{s^2}{w_h^2} + \dfrac{2\varepsilon_h s}{w_h} + 1\right)} \tag{5}$$

式中：A_p为油缸有效工作面积；w_h为液压油缸的固有频率；ε_h为液压油缸的阻尼比。

根据液压缸的尺寸，$D=80$ mm，$d=50$ mm，行程 600 mm，负载总质量 $m=500$ kg。代入式(5)可得：

$$G_3(s) = \frac{Y(s)}{Q(s)} = \frac{\dfrac{1}{9.2\times10^{-4}}}{s\left(\dfrac{s^2}{131^2} + \dfrac{0.72s}{131} + 1\right)} \tag{6}$$

三点悬挂系统传递函数如图 7 所示。框图中 $h(t)$，$r(t)$分别为给定的目标高度和角度，传递给控制器进行换算，其与倾角传感器反馈的左右提升机构的 $\theta(t)$进行对比，通过控制器处理，输出电压控制信号 $U(s)$，电压控制信号经比例阀驱动器放大输出电流 $I(s)$作用于比例换向阀，改变阀芯的开度，进而改变比例阀的流量 $Q(s)$。

比例阀的流量改变提升油缸的伸缩量 $Y(s)$，从而完成三点悬挂的姿态调节，同时利用公式(1)将获取的倾斜角转化 $H(t)$传输给控制器，并作为反馈信号，由此构成系统闭环控制。

2.4　Simulink 仿真策略

为探究双倾角控制在复杂农田环境下的动态响应特性，解决液压系统固有滞后性与机械惯性冲击的耦合影响，基于 PID 控制算法对三点悬挂姿态调

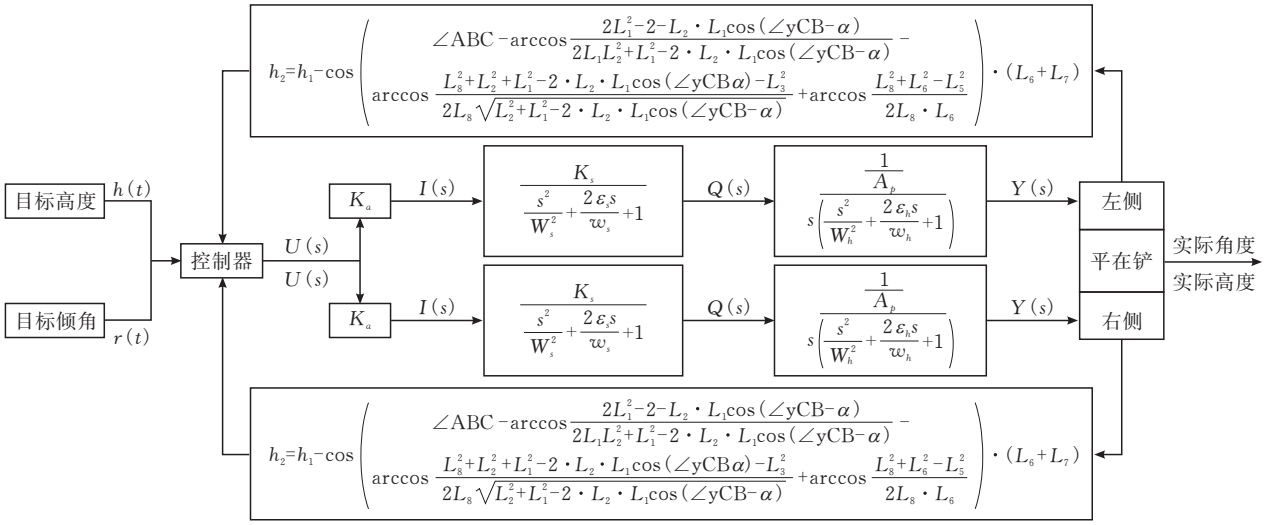


图 7 三点悬挂系统传递函数

节系统的动态性能进行优化。PID 控制策略是一种反馈控制算法，它可以将给定值与实际输出值的偏差进行比例、积分和微分处理，进而提高系统控制效果[18]。其中最主要的 3 个参数，即比例系数 K_p、积分系数 K_i、微分系数 K_d。本仿真使用试凑法通过大量仿真实验，确定 PID 三个参数为：$K_p=0.99$，$K_i=0.02$，$K_d=0.17$。

3 联合仿真

3.1 设置前准备

在建立联合仿真之前，首先要完成软件安装、环境配置、软件配置等相关设置，以确保联合仿真能够顺利完成[19-20]。仿真接口配置如图 8 所示[21-22]。

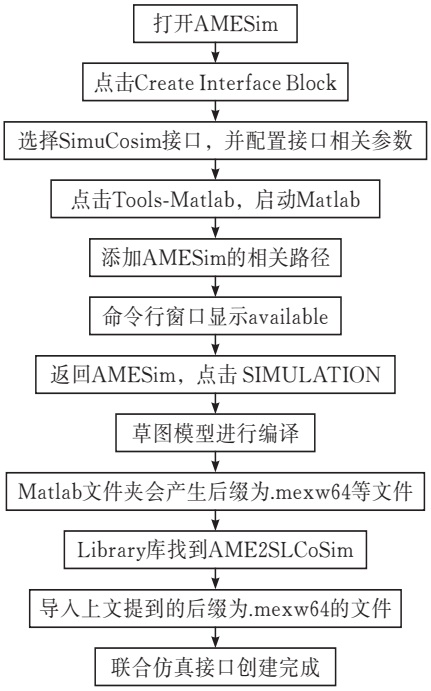
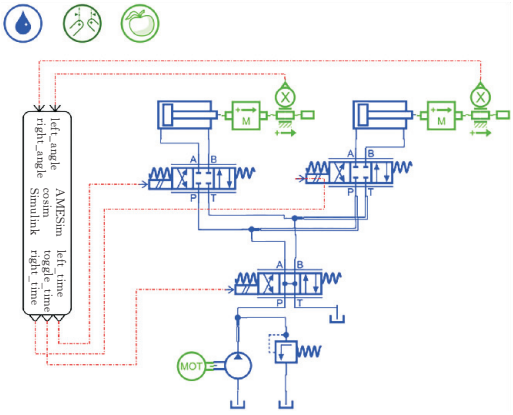


图 8 仿真接口配置流程

3.2 联合仿真模型

将设置好的联合仿真接口与 AMESim 电液控制系统模型和 Simulink 控制系统模型进行连接，即可构建好三点悬挂机一电一液控制系统联合仿真模型。如图 9、图 10 所示为三点悬挂的液压系统模型与控制系统模型进行有无 PID 控制的联合仿真。



(a)整体模型

(b)接口模型

图 9 AMESim 液压系统仿真模型

AMESim 中通过倾角传感器获取左右提升臂的倾斜角，将角度信息作为反馈信号通过 SimuCosim 接口传递给 Matlab 控制系统；利用 step 模块产生阶跃信号代替目标高度和目标倾角，通过 fcn 模块将目标高度和目标倾角通过数学几何关系转化为左右提升臂所需要达到的目标倾角，与 AMESim 传递的倾角反馈信号进行融合，获得左右提升臂需要调节的倾角度数；然后通过 fcn 模块将倾角值通过数学几何关系转化为控制左右油缸的电信号 I

(mA)，利用 AME2SLCoSim 接口传递给 AMESim 的液压系统，进而控制电磁阀的阀芯换向与开度大小，实现了三点悬挂姿态调节的闭环控制。

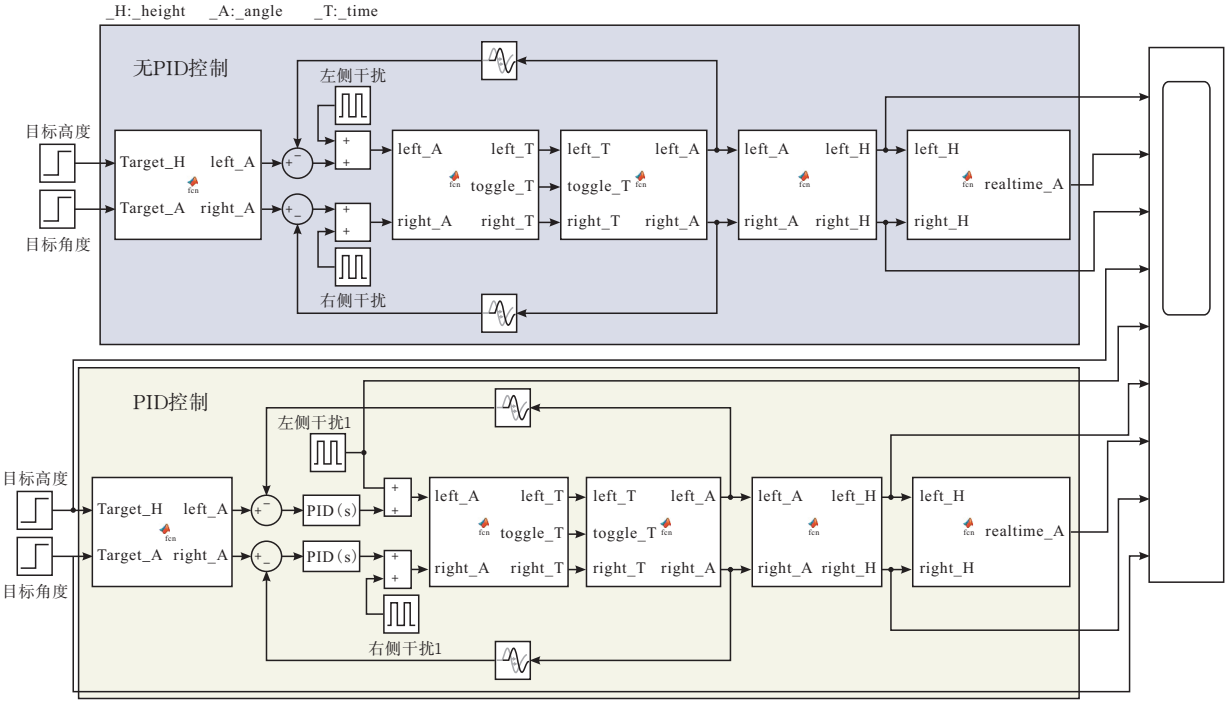
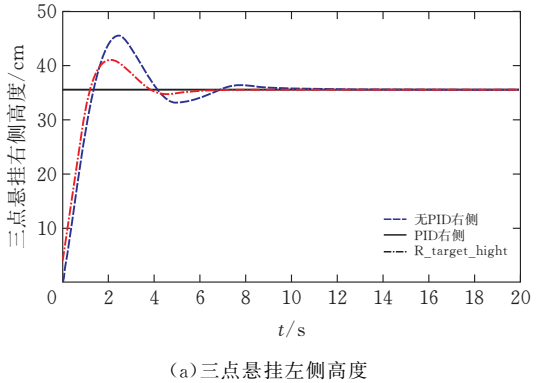


图 10　AMESim-Simulink 联合仿真模型

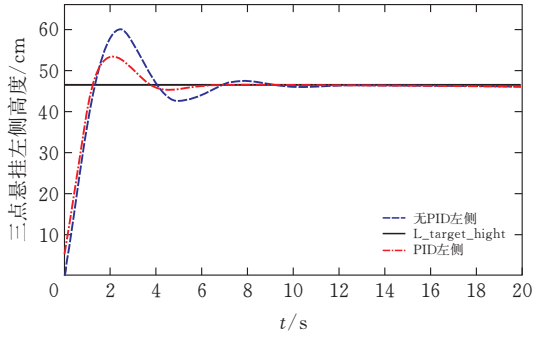
3.3　联合仿真结果分析

3.3.1　阶跃信号下的仿真分析　以阶跃信号模拟输入目标高度和目标角度，设定为 400 mm 与 5°，仿真时间 20 s，模拟三点悬挂达到目标指定位置的动态特性。

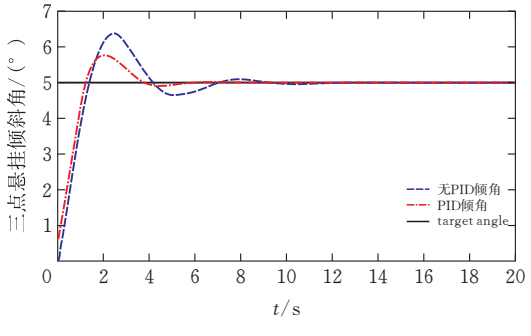
由图 11 可得两种控制情况下的稳定时间、响应时间、超调量(表 2)。



(a)三点悬挂左侧高度



(b)三点悬挂右侧高度



(c) 三点悬挂倾斜角

图 11　三点悬挂仿真曲线对比

对比两种控制仿真曲线，可以看出两条曲线均在 1.5 s 内到达指定位置，满足姿态调节的响应要求。系统在 PID 控制下稳态时间由 12 s 降低到 6 s，超调量从 30%减少到 15%。相对于不带控制算法的系统，其具有响应速度快、达到稳态时间短、超调小的优势，系统性能得到明显改善。

表 2　不同控制策略试验数据分析

控制方法	稳态时间/s	响应时间/s	超调量/%
左侧无 PID	12.31	1.469	30
左侧 PID	6.63	1.354	16
右侧无 PID	12.77	1.379	28
右侧 PID	6.285	1.244	15.8
PID 倾角	6.13	1.369	15
无 PID 倾角	12.09	1.249	27.3

3.3.2　抗干扰仿真分析　以 $n(t)$ 周期方波信号作为系统的扰动信号[23]，如图 12 所示，仿真时间为

30 s。延时 10 s 后，三点悬挂左侧受到－5 cm 的扰动信号，右侧受到＋5 cm 的扰动信号，周期 6 s，干扰持续时间 0.3 s。由仿真可知，在干扰信号下，该控制系统可以快速恢复到稳定状态。

仿真实验结果表明：使用 PID 控制算法可以更加快速地实现三点悬挂系统稳定控制，且具有更小的超调量、更强的抗干扰能力，同时也具有更好的稳定性。

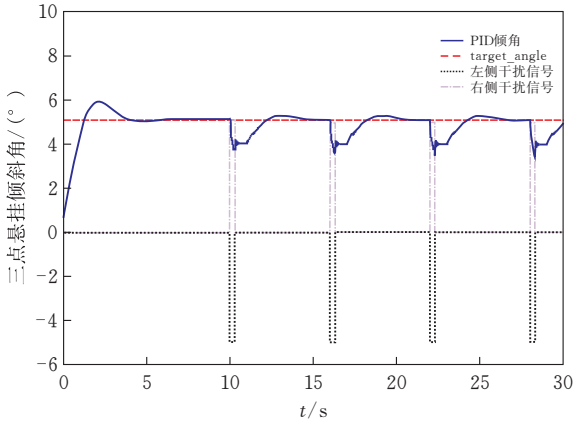


图 12 干扰仿真实验

4 结论

本文围绕三点悬挂姿态控制系统，开展动态特性分析与液压系统设计，从数学模型的角度对三点悬挂进行建模。利用 AMESim 构建液压系统仿真模型，基于 Simulink 开发控制系统算法模型，并通过 AMESim-Simulink 联合仿真对比分析 PID 控制前后的系统动态响应特性。仿真结果表明，PID 控制可以使得系统获得更快的响应速度、更小的超调量，到达稳态时间更短，并且三点悬挂的左右提升油缸可以准确地完成目标高度与目标倾角的姿态调节，实现了三点悬挂姿态调节的闭环控制，证明了建立联合仿真模型的正确性。

[参 考 文 献]

[1] 赵一荣.三点悬挂系统早期在拖拉机上的应用[J].拖拉机与农用运输车，2019，46(06)：5-7.

[2] 赵国栋.电动拖拉机电动悬挂装置设计与试验研究[D].北京：中国农业科学院，2019.

[3] 杜新武，杨绪龙，庞靖，等.悬挂式旋耕机耕深监测系统设计与试验[J].农业机械学报，2019，50(08)：43-51.

[4] 李栋.基于角度检测的悬挂耕深电液监控系统设计与试验[D].武汉：华中农业大学，2021.

[5] 董剑豪，于爱婧，李文春，等.基于 AMESim 采棉机采摘头高度调节装置的仿真分析[J].江苏大学学报(自然科学版)，2023，44(03)：302-308.

[6] 徐学政，杨俊茹，李瑞川，等.基于 AMESim 的丘陵山地拖拉机电液提升系统研究[J].农机化研究，2023，45(08)：253-258.

[7] 田延豹.基于 AMESim 的插秧机液压转向系统设计与仿真[J]. 农业技术与装备，2023(03)：30-32，44.

[8] 关畅，刘晋浩，黄青青.基于 Simulink 林业装备作业平台调平控制系统仿真与分析[J].林业机械与木工设备，2018，46(02)：41-45.

[9] 王永振，安军鹏，樊桂菊，等.基于 Matlab/Simulink 的调平系统动力学建模与仿真[J].中国农机化学报，2017，38(10)：93-96.

[10] 张丽萍，刘志刚，刘猛，等.主动悬架在 AMESim 与 Simulink 联合仿真技术中的研究[J].机械设计与制造，2022，371(01)：141-144.

[11] 张宏鹏，李国平，杨双旺，等.基于 AMESim 与 Simulink 联合仿真的运梁机双液压系统同步控制方法研究[J].液压气动与密封，2022，42(12)：7-13.

[12] 周浩.激光控制水田精准平地打浆关键技术研究[D].广州：华南农业大学，2019.

[13] 毛恩荣，任显云.激光平地机液压卸载回路及阀的研制[J]. 液压与气动，2005(06)：57-59.

[14] 方桂花，常福.基于 AMESim 与 Simulink 的线控液压转向系统控制策略研究[J].液压与气动，2015(04)：35-38，112.

[15] 张兵，邓子龙.基于 Simulink 的比例阀控液压缸的建模与仿真[J].机械制造与自动化，2016(03)：105-108.

[16] 王耀羲.智能水田旋耕平地一体机设计[D].南京：南京农业大学，2019.

[17] 陈佳，邢继峰，彭利坤.基于传递函数的数字液压缸建模与分析[J].中国机械工程，2014，25(01)：65-70.

[18] 吴宏鑫，沈少萍.PID 控制的应用与理论依据[J].控制工程，2003，10(01)：37-42.

[19] 张鑫.基于 AMESim 和 Simulink 的飞机液压刹车系统的联合仿真[J].舰船电子工程，2019，39(11)：104-107.

[20] 周宇，刘凯磊，李兴成，等.基于 ADAMS 和 AMESim 的挖掘机挖掘运动轨迹控制联合仿真[J].机床与液压，2021，49(04)：146-150.

[21] 江玲玲，张俊俊.基于 AMESim 与 Matlab/Simulink 联合仿真技术的接口与应用研究[J].机床与液压，2008，36(01)：148-149.

[22] 李谨，邓卫华.AMESim 与 MATLAB/Simulink 联合仿真技术及应用[J].情报指挥控制系统与仿真技术，2004，26(05)：61-64.

[23] 王文标，葛占元，汪思源，等.智能轨迹导引控制算法在电加热炉温度控制中的应用[J].科学技术与工程，2015，15(02)：250-253.

Co-simulation of Three-point Suspension Attitude Adjustment of Tractor Based on AMESim and Simulink

ZHAN Quanshuai[1], WANG Yanqing[1,2], YANG Guangyou[1,2], LI Le[1], WANG Luwei[1], WANG Benfu[3]

(1 *Research Institute of Agricultural Machinery Engin. Design, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*;
2 *Hubei Agricultural Machinery Equipment Intelligent Engin. Tech. Research Center, Wuhan* 430068, *China*;
3 *Key Laboratory of Crop Molecular Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: To address the issue of the coupling problem between the three-point suspension elevation adjustment and the horizontal adjustment, the hydraulic system of the tractor three-point suspension was designed, the attitude adjustment principle of the suspension device was analyzed, the inclination angle of the lifting arm was determined as the key parameter of attitude, the geometric relationship between the various parts of the suspension device was analyzed, and the attitude detection model was constructed. Taking the three-point suspension attitude adjustment control system as the research object, the hydraulic system model and control model were established by using AMESim and Simulink respectively, and the effect of the system with or without PID control was analyzed through co-simulation. The simulation results show that the constructed three-point suspension model can accurately adjust the attitude according to the target height and inclination angle, realize the closed-loop control of the three-point suspension attitude adjustment, and under the PID control, the response speed is significantly improved, the overshoot is greatly reduced, and the steady state time is shortened, which provides a theoretical basis for the subsequent experimental research.

Keywords: three-point suspension; coupling; attitude adjustment; co-simulation; PID control

[责任编校: 张　众]

(上接第 4 页)

Fast Measurement Method of Refractive Index of Optical Waveguides Based on Quadriwave Lateral Shearing Interferometry

DONG Zhengqiong[1,2], HUANG Xianwen[1,2], XIE Yijun[1,2], ZHOU Xiangdong[1,2], NIE Lei[1,2]

(1 *School of Mechanical Engin., Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*;
2 *Key Lab of Modern Manufacture Quality Engin. Hubei Province, Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: Aiming at the lack real-time capabilities and the poor stability of common optical waveguide refractive index distribution measurement methods, a fast optical waveguide refractive index measurement method is proposed, which is based on quadriwave lateral shearing interferometry as the principle, and obtains high quality interferometric fringe pattern through the diffraction characteristics of MHM, the optical path difference distribution of the sample is then quickly reconstructed from the interferometric fringe pattern by combining the Fourier transform method, and finally the refractive index distribution of the sample is obtained from the optical path difference distribution. The experimental results show that compared with the white light interferometry, the average measurement time of this method is about 0.62 ± 0.02s, which saves nearly 98% of the test time and is suitable for the transient measurement of the refractive index of optical waveguide. Meanwhile, at a wavelength of 532 nm, the method measures the refractive index of the optical waveguide whose material is silicon nitride as 2.019, which is basically consistent with the theoretical refractive index of silicon nitride of 2.027 and the white light interferometry measurement of 2.031, with a relative error of less than 0.5%.

Keywords: optical waveguide; refractive index; quadriwave lateral shearing interferometry; optical path difference distribution

[责任编校: 张　众]