

基于发动机转速的拖拉机机组协同控制研究

颜兴祥, 韩江义, 唐 昊

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212000)

摘 要: 拖拉机进行犁耕作业时受到土壤特性、道路坡度等不确定因素的影响,故针对拖拉机在作业中外部干扰的复杂与多变性,提出一种发动机转速-耕深协同控制的方法。基于 AMESim 与 Simulink 建立了拖拉机纵向动力学模型,考虑犁耕作业时土壤特性变化下农具牵引阻力的变化,通过对档位、油门位置、犁具耕深的控制实现了机组的综合自动化控制,获得了良好的动力性。仿真结果表明:在土壤阻力增加较小时,牵引阻力增加,发动机转速将降低,此时油门位置将增加以避免换挡;土壤阻力增加较大且油门位置为最大时,作业机具将小幅提升以避免转速急剧掉落;极限情况下,拖拉机将降挡以避免发动机熄火。台架试验表明:所提出的控制方法可实现通过减小耕深而保证发动机稳定运转的效果。

关键词: 拖拉机; 发动机; 电控液压悬挂; 耕深; 变速器

中图分类号: S219.031⁺

文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2024)07-0234-07

DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2024.07.040

0 引言

在农业生产中,土壤的深耕作业有助于获取储存在底土中的资源,促进作物的生长^[1-2]。在拖拉机牵引犁具深耕作业中,土壤物理性质变化将引起耕作阻力的大幅变化,进而会引起发动机负荷的波动。当阻力大于发动机最大负载能力时或将导致发动机熄火,虽然降挡可避免这一现象^[3-6],而在犁耕作业中农具产生的牵引阻力较大,对于手动变速器或 AMT 变速器其换挡过程的动力中断将导致车速急剧下降^[7],且往往会造成循环换挡^[8]。因此,如何在设定车速下保证其牵引阻力的稳定性成了研究重点。对犁具的控制包括力控制、位控制、力位综合控制及力-滑转率控制等^[9-15],而上述方法未考虑或较少根据拖拉机组发动机、传动系统综合考虑,且在力控制中目标力的大小设定对拖拉机整体动力性、经济性影响较大,针对拖拉机纵向车速的研究又较少考虑农具的阻力变化因素,未考虑同农具的协同控制。为此,提出一种根据发动机转速-耕深协同控制的方法,通过对油门位置、档位、耕深的控制,在农具阻力较小时通过对油门位置的控制以保持车速,在农具阻力较大时同步增加油门位置和降低耕作深度以保持车辆速度,使发

动机始终工作于高功率区间,同时避免频繁换挡,实现拖拉机机组的高效工作。

1 拖拉机控制系统

1.1 控制结构组成

拖拉机控制系统结构如图 1 所示。拖拉机由发动机提供动力,经过离合器、变速器等传动单元,动力最终作用于车轮处,悬挂作业机构由液压执行装置(液压泵、液压阀、液压缸)、农具(犁具、上拉杆、下拉杆等)及相应的操作及控制单元组成。

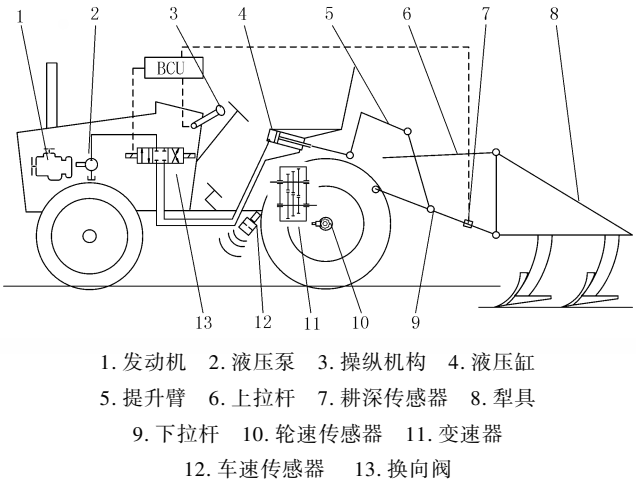


图 1 控制系统图

Fig. 1 Composition diagram of control system

拖拉机牵引悬挂犁具进行耕作作业时,控制单元采集驾驶员设置的车速目标信号、耕深目标信号、发动机转速信号、油门信号、耕深信号,设定车速与实际车速的偏差可用于计算油门位置的控制量,控制油门

收稿日期: 2022-07-05

基金项目: 苏北科技专项-先导性项目 (SZ-YC202165)

作者简介: 颜兴祥 (1997-), 男, 宁夏吴忠人, 硕士研究生, (E-mail) 18850075892@163.com。

通讯作者: 韩江义 (1974-), 男, 河南洛阳人, 副教授, 硕士生导师, (E-mail) hjy0306@ujs.edu.cn。

位置以改变发动机转速且可控制车速;同时,实时计算设定耕深与实时耕深的差值得到偏差信号以用于控制农具,将该信号用作输入,经过控制算法输出控制量;该控制量被发送至换向阀,油缸的伸缩动作实现农具的升降控制。

1.2 发动机模型

发动机的负荷特性指发动机的油门调节机构处于某一位置时,发动机的输出转矩、功率、燃油消耗率同转速的关系。为了实现发动机的转速-耕深协同控制,需要建立发动机转矩、转速、油门位置的负荷特性模型。

选择的拖拉机额定功率 131kW,额定转速为 2200r/min,使用最小二乘法进行拟合,可得到转矩 T 与转速 n 、油门位置 α 的关系,即

$$T = f(\alpha, n) \quad (1)$$

拖拉机进行深耕作业时,发动机处于大油门位置状态,因此制定控制策略时考虑油门位置为 50%~100%的状况。根据图 2 不同油门开度下转矩图,除 50%油门位置外,其余油门位置最大转矩点的转速均为 $n_{Tmax} = 1600\text{r/min}$ 。当负载转矩大于发动机特定油门位置下最大转矩时,发动机转速将急剧下降;掉落至一定转速时,变速器将降挡以保持车辆继续前进。因此,将 n_{Tmax} 设置为农具控制起始转速点,发动机转速低于该转速,犁具将提升,减少牵引阻力以避免转速继续掉落。

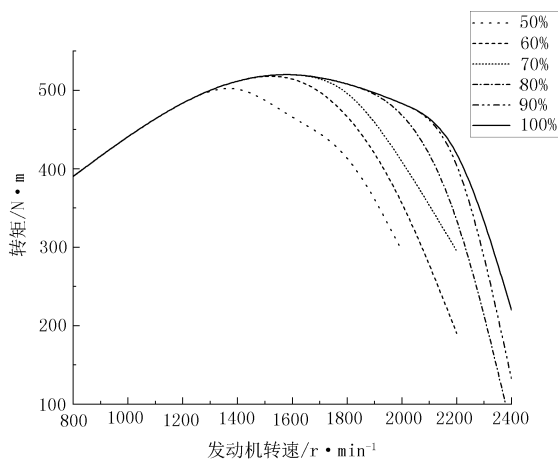


图 2 发动机特性图

Fig. 2 Engine characteristic diagram

1.3 拖拉机耕作系统动力学模型

1.3.1 动力传动系统模型

拖拉机的动力由发动机出发,经由变速箱、驱动桥作用于驱动轮,驱动轮产生力矩驱动车辆前进。拖拉机发动机动力经传动系到驱动轮的转矩平衡方程为

$$\frac{T_d \cdot i_d \cdot \eta_d}{r_0} = m_t \cdot g \cdot f + m_t \frac{dv}{dt} + F_x \quad (2)$$

拖拉机耕作作业速度为

$$v = 2\pi \cdot r_0 \cdot \frac{n_e}{i_d} \cdot (1 - \eta_w) \quad (3)$$

作业速度微分为

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dn_e}{dt} \cdot \frac{2\pi r_0 (1 - \eta_w)}{i_d} \quad (4)$$

其中, T_d 为拖拉机传动系输入转矩(N·m); i_d 为传动系到驱动轮的传动比; η_d 为传动系机械效率; r_0 为驱动轮滚动半径(m); m_t 为拖拉机机组质量(kg); v 为作业速度(km/h); F_x 为耕作阻力(N); n_e 为发动机转速(r/min); η_w 为驱动轮滑转率。

1.3.2 犁具耕作阻力模型

拖拉机在进行田间犁耕作业时,作业机组的受力是复杂的,包括土壤对农具的反作用力等,土壤对农具的作用力还会因土壤特性的变化而实时发生改变^[16]。耕作作业阻力通过犁具、悬挂机构及拖拉机传动系的传递,最终作用在发动机上,成为发动机的负荷。

犁耕的阻力与耕作深度、土壤特性、犁具类型、作业宽度和牵引速度等有关,铧式犁的牵引力估算可采用 ASABE STANDERD D497.7^[17] 提出的牵引阻力计算公式,即

$$F_x = F_i \cdot (A + B \cdot v + C \cdot v^2) \cdot W \cdot H \quad (5)$$

其中, F_i 为无量纲土壤性质参数, $F_i = 0.45$ 代表土壤质地较好, $F_i = 0.7$ 为中等, $F_i = 1.0$ 为粗糙复杂土质; A 、 B 、 C 为犁具相关的参数。本研究采用的犁具是液压翻转铧式犁,犁的结构参数为: $A = 625$, $B = 0$, $C = 5.1$; 犁耕宽度 $W = 1.5\text{m}$; H 为耕作深度(cm)。

1.4 控制策略

转速耕深协同控制整体结构如图 3 所示。初始化时,需要设定目标耕深、转速及车速;拖拉机耕作时,土壤特性的变化将作用于犁具,犁具产生的牵引负载将作用于拖拉机作业机组;负载增大时,发动机转速将下降,在同一档位下,车速将随之下降,此时目标车速同实际车速的偏差将增加,利用该偏差信号控制油门位置增加,带动发动机转速增加。在小范围负载波动下,单纯油门控制可实现发动机转速及车速保持稳定,当犁具产生的牵引负载过大时,发动机转速下降较多;当发动机转速低于设定转速时,该偏差信号将作为犁具控制的输入,结合耕深的偏差信号,经控制算法输出控制参数,液压系统执行命令,最终控制犁具产生动作,以上共同组成闭环控制系统。

在极限情况下,即犁具的提升无法保证发动机转速增加,此时将降挡以避免发动机熄火影响生产效率。

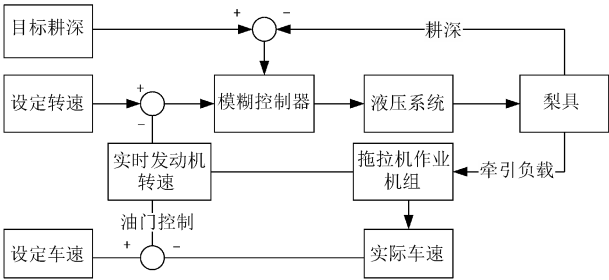


图 3 控制系统流程图
Fig. 3 Control system flow chart

1.5 控制算法

PID 控制算法具有结构简单、稳定性好、工作可靠的特点,广泛应用于控制过程,考虑油门位置控制对可靠性、稳定性要求较高,使用 PID 控制作为其控制方法;同时,使用传动系参数将车速控制量转化为对发动机转速的控制量,以此来保证当发动机转速低于 n_{Tmax} 时,油门已经处于最大位置。

模糊控制不依赖控制系统的数学模型,被广泛应用于非线性系统的控制^[18],本文采用模糊控制作为犁具控制器算法。采用双输入单输出方式,输入为发动机转速偏差与犁具位置偏差,输出为比例阀控制量。

对于转速与耕作深度的控制,需要综合考虑犁具位置与发动机转速:当发动机转速低于 n_{Tmax} 时,无论犁具实际位置低于或高于目标位置,其控制结果均为提升,当发动机转速高于 n_{Tmax} 时,进入高转速控制模式,需要考虑犁具位置;若其低于目标位置,则提升,反之则下降。同时,为避免犁具下降引起的牵引阻力的增加使得发动机转速降低,需要设置一定死区以防止犁具控制方向反复变化,具体控制策略如表 1 所示。

表 1 控制策略表
Table 1 Control strategy table

	低转速		高转速
低于目标位置	提升	死区	提升
高于目标位置	提升		下降

2 基于发动机负荷特性的耕深控制仿真模型

使用 AMESim 搭建车辆发动机、传动系及后悬挂犁具模型,使用 Simulink 搭建具体控制算法模型,如图 4 和图 5 所示。为完整验证所搭建模型的正确性及控制算法的有效性,对车辆起步、加速、降犁过程进行仿真。

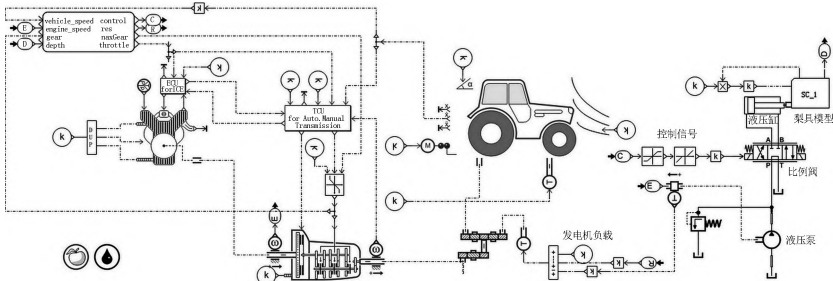


图 4 AMESim 模型
Fig. 4 AMESim model

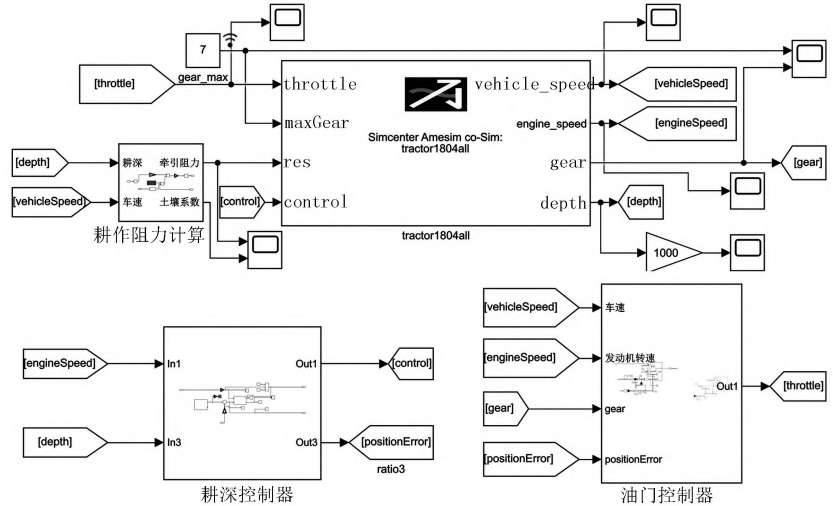


图 5 Simulink 模型
Fig. 5 Simulink model

3 仿真结果分析

以目标车速 7km/h 和耕深 300mm 为控制目标,分别使用发动机转速-耕深协同控制方法与定耕深传统控制方法进行仿真分析,使用土壤参数变化量作为系统的因变量,分析耕深、牵引阻力、发动机转速、车速等变化特性。仿真时长为 50s,初始车速为 0,档位为 1,耕深为 0。

仿真结果如图 6~图 8 所示。仿真开始时,目标耕深为 0,因此牵引阻力计算结果为 0;离合器结合,发动机转速由怠速开始增加,油门踏板位置增加,此后车速不断增加,档位也逐渐增加;第 3s 时刻,车速增加至 7km/h,此时油门踏板位置逐渐降低,发动机转速处于 2000r/min 左右;第 6s 时刻,耕深目标值改变为 300mm,此时犁具开始下降,经过约 4s 到达设定位置;由于耕深增加,此时牵引阻力增加至 18kN,牵引阻力

增加使得发动机转速降低,车速降低为 7.2km/h;第 15s 时刻,土壤参数由 0.45 增加至 0.7,牵引阻力由 18kN 增加至 27kN,发动机转速进一步下降为 1650r/min,车速也同步降低至 6.6km/h,此时油门位置增大至 80%以上以避免发动机转速和车速继续下降;第 25s 时刻,土壤参数由 0.7 增加至 1.0,牵引阻力进一步增加,发动机转速降低,油门位置增加为最大,当转速低于 1600r/min 即最大扭矩点转速时,犁具开始提升,耕深最低减少 25mm,发动机转速由 1528r/min 增加至 1600r/min 以上;第 35s 时刻,土壤参数改变为 0.7,牵引阻力降低,发动机转速逐步增加,犁具最终下降至设定位置,当发动机转速增加至 2000r/min 以上时,油门位置逐渐降低;第 40s 时刻,遇到土壤参数变化,仍可通过增加油门踏板位置的方式使发动机转速不至于过低,从而保证机组可正常行进完成工作,整个过程档位保持恒定 7 挡不变。

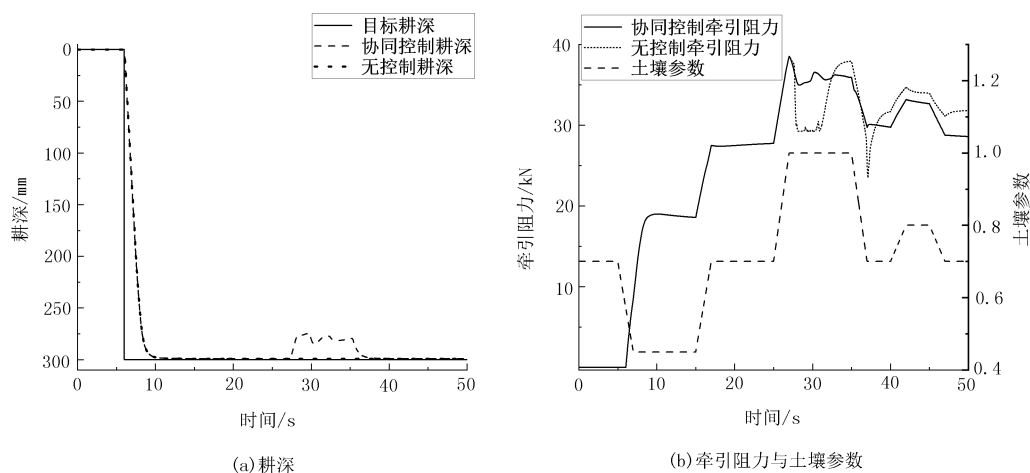


图 6 耕深与牵引阻力仿真结果

Fig. 6 Simulation results of tillage depth and traction resistance

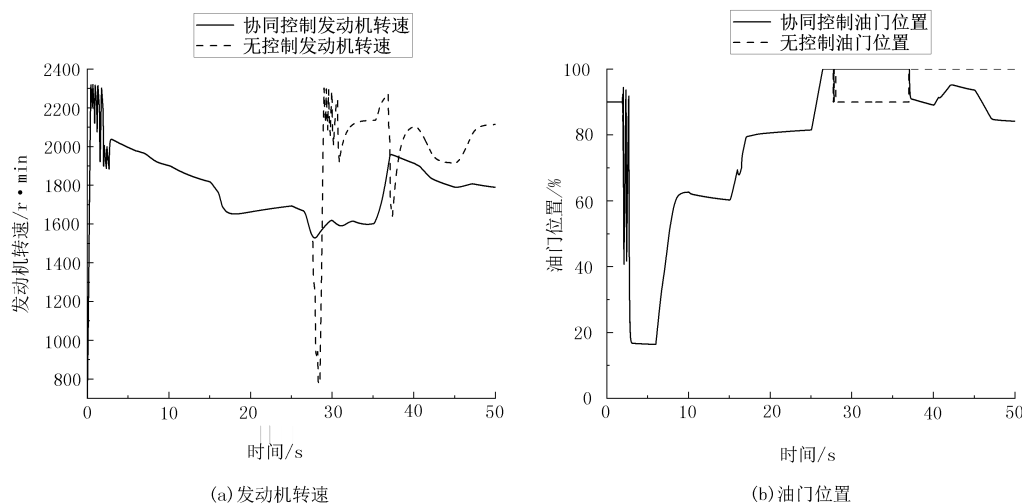


图 7 发动机转速与油门位置仿真结果

Fig. 7 Simulation results of engine speed and accelerator pedal position

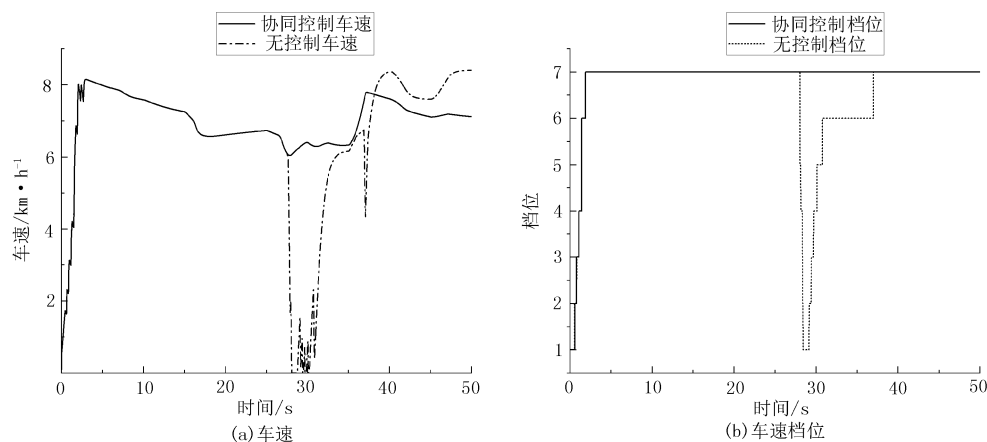


图 8 车速与档位仿真结果

Fig. 8 Simulation results of vehicle speed and gear

在相同输入的无转速-耕深协同控制下的车辆虽然可以通过增加油门位置为最大,但在遇到极大土壤阻力变化时,仍需要降挡;在降挡过程中,由于 AMT 变速器本身特性,存在动力中断,发动机转速掉落较多,档位降至 4 挡仍无法克服阻力继续前进,最终停车,需要从 1 挡起步重新开始加速直至到达目标车速。

由此可见,当土壤条件发生改变时,发动机转速-耕深协同控制的方式可保证车辆有足够动力克服实时牵引阻力,避免降挡再升挡,从而保证作业的效率。

4 台架模拟试验

4.1 台架试验系统搭建

台架试验系统的结构和原理如图 9 所示。台架试验系统包括液压泵、比例换向阀、提升油缸、悬挂机构、犁具机构、MCU (MicroController Unit) 和个人计算机等。MCU 主核心为飞思卡尔 MC9S12XS128MAL, 比例换向阀采用丹佛斯公司生产的 PVED-CC 电控液压阀, 液压阀支持 CAN (Controller Area Network) 通信, 耕深传感器采用维特智能深松传感器, 传感器使用串口同 MCU 通信, 同时利用 LabVIEW 软件编制电控液压数据采集系统, 使用串口进行连接。

4.2 台架试验结果

为探究具体耕深、发动机转速及牵引阻力之间关系,在台架试验中仅考虑固定档位为 7 挡,最大油门位置下耕深、发动机转速及牵引阻力的变化情况。输入自变量为土壤参数,测试土壤参数分别由 0.45 变化至 0.7 与 1.0 后,即小阻力与大阻力波动情况下上述 3 种参数变化情况。考虑到该液压阀的执行动作延迟情况,设置犁具提升时阈值转速为 $n_{T_{max}} + 50$,试验结果如图 10 所示。

起始耕深设置为 300mm, 此时牵引阻力约为 18kN, 第 6s 时刻突然阻力开始增加,此时牵引阻力同

步增加,在小阻力情况下牵引阻力最大约为 30kN, 发动机转速为 2250r/min, 远远高于设定阈值 1650r/min; 在大阻力情况下土壤参数最大增加至 1.0, 土壤阻力最大增加至 37kN。第 15s 时刻, 发动机转速低于设定阈值 1650r/min, 此时犁具开始提升, 犁具提升后由于土壤参数仍在持续增加, 故牵引阻力持续增加, 发动机转速持续下降。第 17s 时刻, 牵引阻力为最大, 此时发动机转速为 1480r/min, 犁具持续提升, 最终发动机转速稳定于 1650r/min 附近, 耕深减少约 11%。当土壤参数减小后, 牵引阻力降低, 发动机转速增加, 犁具缓慢下降, 最终到达设定位置 300mm。

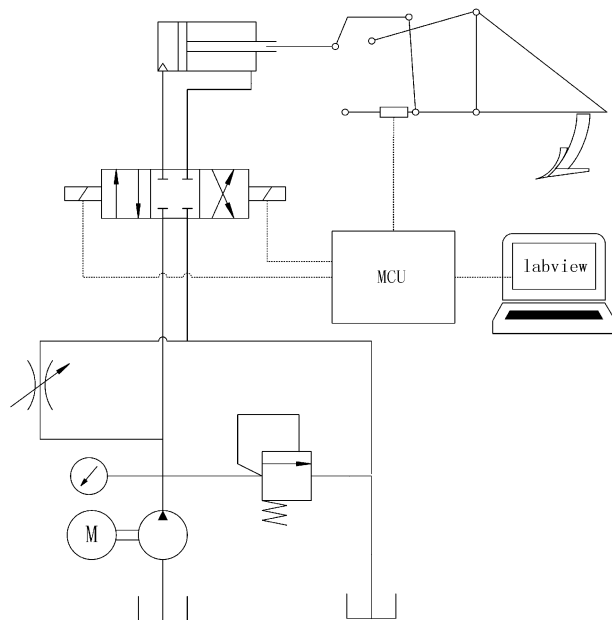


图 9 台架试验硬件结构图

Fig. 9 Structure diagram of bench test

对比仿真与试验结果可知: 基于发动机转速-耕深协同控制的方法可在牵引阻力增加引起发动机转速掉落时, 通过小幅提升犁具以减小犁具引起的牵引阻力, 从而保证发动机转速运行于高转速区域, 防止转速过低需要降挡, 甚至因阻力过大换挡过程动力中

断而影响生产效率。

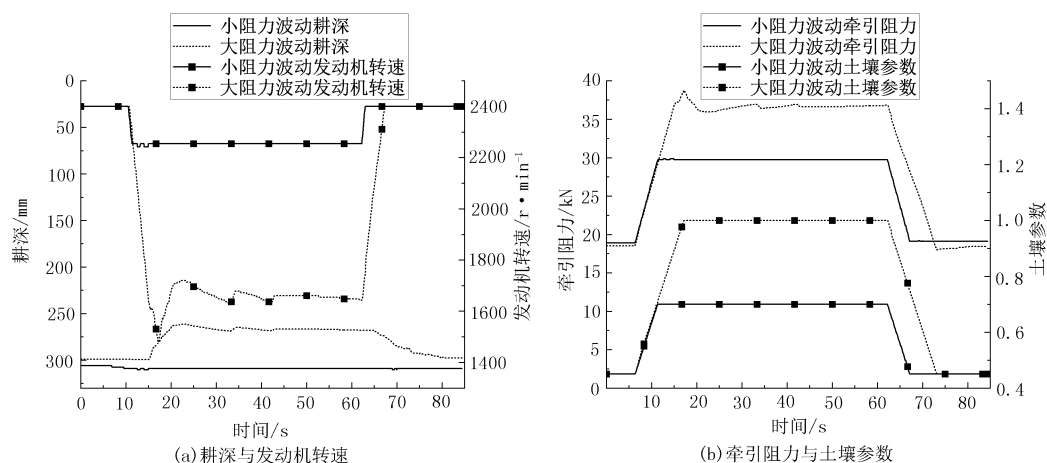


图 10 台架试验结果

Fig. 10 Bench test results

5 结论

针对犁耕等大负荷工况提出一种发动机转速-耕深协同控制方法。首先,分析拖拉机犁耕作业的工作机理,根据其特点提出拖拉机组协同控制方法;为证明该方法的可行性,建立了车辆发动机、传动系模型、农机具液压、犁具模型及土壤阻力模型,使用 Simulink 搭建油门的 PD 控制器与犁具的模糊控制器。仿真及台架对比结果表明:当农具阻力变化较小时,最大油门位置下发动机所输出转矩可克服实时牵引阻力的变化,发动机运行于稳定工况;在农具阻力变化较大时,减小耕作深度可降低农具阻力,从而使发动机始终工作于高功率区间,最终实现发动机稳定运转的目标,有效避免了在土壤阻力变化工况下的频繁换挡现象。

参考文献:

- [1] SCHNEIER F, DON A, HENNINGS I, et al. The effect of deep tillage on crop yield -what do we really know[J]. Soil and tillage research, 2017, 174: 193-204.
- [2] 高中超,宋柏权,王翠玲,等. 不同机械深耕的改土及促进作物生长和增产效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 79-86.
- [3] 岳榴, M D SCHROCK. 农业拖拉机发动机变速器控制系统的计算机模拟[J]. 农业工程学报, 1994(2): 41-46.
- [4] LI B, SUN D, HU M, et al. Automatic gear-shifting strategy for fuel saving by tractors based on real-time identification of draught force characteristics [J]. Biosystems engineering, 2020, 193: 46-61.
- [5] 周志立, 方在华. 拖拉机机组牵引动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] 庞昌乐, 宗伯华, 鄂卓茂. 拖拉机作业机组模糊综合控制模型及仿真试验[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 111-113.
- [7] 钟再敏, 孔国玲, 余卓平, 等. 机械式自动变速器动力中断研究进展及解决方案[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(12): 1850-1855.
- [8] 孙冬野, 杨彪, 陈旭东. 拖拉机田间作业工况自适应换挡控制策略[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(2): 32-41.
- [9] WEATHERLY E T, BOWERS JR C G. Automatic depth control of a seed planter based on soil drying front sensing [J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(2): 295-305.
- [10] AYERS P D, VANNA K V, KARIM M N. Design and analysis of electro-hydraulic draft control system [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(6): 1853-1855.
- [11] 杜巧连, 熊熙程, 魏建华. 拖拉机液压悬挂耕深电液控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008(8): 62-65.
- [12] 鲁植雄, 郭兵, 高强. 拖拉机耕深模糊自动控制方法与试验研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 23-29.
- [13] 杨俊茹, 李宁, 李瑞川, 等. 基于滑模变结构的拖拉机耕深控制方法与试验研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(8): 238-243.
- [14] 王素玉, 刘站, 李瑞川, 等. 基于土壤比阻的大功率拖拉机变权重力位综合控制研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 351-357.
- [15] 张硕, 武仲斌, 陈军, 等. 犁耕作业大马力拖拉机驱动轮滑转率控制方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 47-55.
- [16] 董秀林, 董国辉, 周福章, 等. 拖拉机阻力控制系统的室内模拟实验装置[J]. 农业机械学报, 1996(4): 158-161.
- [17] American society of agricultural and biological engineering, St. Joseph, ASABE (2011) Standard ASAE D497. 7

MAR2011 (R2015) [S].
[18] 高翔,孙昌旺,史金钟,等. 拖拉机电控液压悬挂系统的

耕深模糊控制策略[J]. 拖拉机与农用运输车, 2008
(4): 12-14.

Research on Cooperative Control of Tractor Based on Engine Speed

Yan Xingxiang, Han Jiangyi, Tang Hao

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: Due to the influence of uncertain factors such as soil characteristics and road slope, a collaborative control method of engine speed and tillage depth is proposed to deal with the complexity and variability of external interference during tractor plowing. Based on AMESim and Simulink, the longitudinal dynamic model of tractor is established. Considering the change of traction resistance of farm implements under the change of soil characteristics during ploughing, the comprehensive automatic control of the unit is realized through the control of gear, throttle position and plough depth, and good dynamic performance is obtained. The simulation results show that when the soil resistance increases, the traction resistance increases, the engine speed decreases, and the throttle position increases to avoid gear shifting; When the soil resistance increases greatly and the throttle position is the maximum, the work tool will be lifted slightly to prevent the speed from falling sharply; In extreme cases, the tractor will downshift to avoid engine stalling. The bench test shows that the proposed control method can ensure the stable operation of the engine by reducing the tillage depth.

Key words: tractor; engine; electric hydraulic hitch; tillage depth; transmission

(上接第 226 页)

Abstract ID:1003-188X(2024)07-0224-EA

Design of Automatic Row Alignment Control System for Grain Combine Harvester

Tang Xianguang¹, Tang Yufeng²

(1. Urban Vocational College of Sichuan, Chengdu 610101, China; 2. Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, China)

Abstract: In order to improve the row alignment quality of grain combine harvester, this study designs a set of automatic row alignment control system for grain combine harvester, which mainly includes automatic row alignment sensing system and path tracking control system. The automatic row alignment sensing system is based on various sensors, including camera, LIDAR and inertial measurement unit, to realize real-time sensing of farmland and measurement of row spacing; the path tracking control system realizes the automatic adjustment of driving direction and speed of the machine to stay in the center of the row by calculating the deviation of the machine relative to the ideal path and combining with speed and steering control. The test results show that the system can steadily and accurately control the alignment of the machine, significantly improving harvesting efficiency and crop quality, while reducing the labor intensity of the driver.

Key words: grain harvester; automatic row alignment system; sensing system; path tracking control