doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.039

静液压传动拖拉机定速巡航控制系统设计与试验

赵春江[1,2]　魏传省[1,2]　付卫强[2]　尚业华[2]　张光强[2]　丛　岳[2]

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 针对现有农机速度调节策略功率匹配度不高、燃油经济性差的问题,以静液压传动拖拉机为平台,基于 CAN 总线设计了拖拉机定速巡航控制系统。该系统由拖拉机工况采集、负载检测、油门控制、变量泵排量调节、作业负载调节、通信等模块组成。设计了油门调节机构和负载调节装置,获取并解析了拖拉机工况数据,建立了静液压传动拖拉机油门开度、变量泵排量与速度对应的数学模型,制定了发动机转速与变量泵排量协同控制策略。分别在水泥路面空载、田间空载和平地作业 3 种工况下进行了协同控制策略试验,在平地作业工况下进行了定油门控制策略、油门排量耦合控制策略和油门排量协同控制策略试验。结果表明,3 种工况下,协同控制策略的速度控制绝对误差分别为 0.005、0.007、0.012 m/s;在达到相同目标速度的前提下油门排量协同控制策略降低了发动机转速。拖拉机定速巡航控制系统能够在保证速度控制精度的前提下,减小燃油消耗。

关键词: 拖拉机; 定速巡航控制系统; 静液压传动; 协同机制策略; 功率匹配

中图分类号: S232.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)04-0359-07　　**OSID**:

Design and Experiment of Cruise Control System for Hydrostatic Transmission Tractor

ZHAO Chunjiang[1,2]　WEI Chuansheng[1,2]　FU Weiqiang[2]　SHANG Yehua[2]　ZHANG Guangqiang[2]　CONG Yue[2]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture*, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of low power matching degree and poor fuel economy of the existing agricultural machinery speed regulation strategy, taking hydrostatic tractor as the platform, the cruise control system of the tractor was designed based on CAN bus. The system was composed of a tractor working condition acquisition module, a throttle control module, a variable pump displacement adjustment module, a work tool lifting control module, and a communication module. Devices of throttle adjustment and load adjustment were developed. Tractor working condition data was analyzed. Mathematical model of throttle opening, variable pump displacement and tractor speed was established. A strategy for cooperative control of engine speed and variable pump displacement was developed. The cooperative control strategy experiments on empty cement roads, empty farmland and flat working conditions were conducted; and the experiment of the fixed throttle control strategy, the throttle displacement coupling control strategy and the throttle displacement cooperative control strategy was carried out under the flat operation conditions. The test results showed that the absolute error of speed control of the cooperative control strategy was 0.005 m/s, 0.007 m/s and 0.012 m/s under the three working conditions of cement pavement, field no-load and flat land operation; the cooperative control strategy reduced the engine speed under the premise of achieving the target speed. The control system can reduce fuel consumption while ensuring the accuracy of speed control.

Key words: tractor; cruise control system; hydrostatic transmission; cooperative control strategy; power matching

收稿日期: 2020-12-21　修回日期: 2021-02-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700400、2017YFD0700402)、现代农业产业技术体系专项资金项目(CARS-02)和北京市农林科学院科研创新平台建设项目(PT2020-22)

作者简介: 赵春江(1964—),男,中国工程院院士,博士生导师,主要从事农业信息技术与精准农业技术研究,E-mail: zhaocj@nercita.org.cn

0 引言

拖拉机定速巡航控制系统能够根据输入的目标行进速度和发动机转速,结合拖拉机工况参数对拖拉机传动系统、油门以及载荷等进行自动调节,从而达到精准的作业速度,这是实现农机无人作业的基础[1-2]。

在国外,FOSTER 等[3]基于 PID 控制,调节变量泵排量实现了自走式割晒机速度控制;COEN 等[4]设计了收获机定速巡航系统,该系统在降低发动机转速的基础上实现了相同的巡航速度,并降低了噪声和燃油消耗。在国内,郭娜等[5]通过控制变速踏板来控制变量泵排量,从而实现定速巡航;王卓等[6]通过固定挡位、调节油门开度实现定速巡航;韩科立等[7]设计了电液自动机械式变速装置,通过换挡和调节油门实现定速巡航控制;何杰等[8]通过机械结构连接变速踏板和油门踏板,二者同时增大或减小,实现了速度控制。

目前,农机速度调节方式多采用定油门变传动比、定传动比变油门、油门传动比耦合控制 3 种控制策略。农机定速巡航控制系统通常控制单一系统输入,即仅控制油门开度或仅控制变速踏板,这导致系统功率匹配度不高,燃油经济性较差。因此,本文以约翰迪尔 4720 型静液压传动拖拉机为平台,开展农机定速巡航控制策略研究,根据拖拉机工况对传动系统、油门等进行协同控制,实现拖拉机定速巡航控制,并提高燃油经济性[9-12]。

1 系统原理与硬件设计

1.1 静液压传动系统调速原理

约翰迪尔 4720 型拖拉机采用静液压传动系统,主要由发动机、变量泵和定量马达组成的静液压传动以及机械式变速器组成,其速度调节通过调节油门踏板控制发动机转速、调节变速踏板控制变量泵排量两种方式来实现[13-18]。静液压传动拖拉机传动系统的原理如图 1 所示。

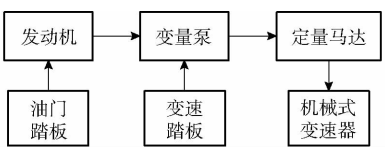


图 1 静液压拖拉机传动系统原理图

Fig. 1 Schematic of hydrostatic tractor transmission system

1.2 总体设计

定速巡航控制器通过 CAN 总线接收车载计算机发送的拖拉机目标速度和发动机目标转速,通过拖拉机电控单元(Electronic control unit, ECU)读取发动机油门开度、转速与转矩百分比,以及拖拉机行进速度等工况参数,结合牵引阻力传感器测量的拖拉机牵引阻力与升降油缸位置传感器测量的平地铲升降液压缸位移,根据定速巡航控制策略,计算控制量,通过控制油门电动调节机构、作业负载调节机构以及拖拉机自有的静液传动装置,对发动机转速、拖拉机速度以及平地铲高度进行调节,实现平地作业工况下拖拉机定速巡航控制[19-21]。系统总体设计如图 2 所示。

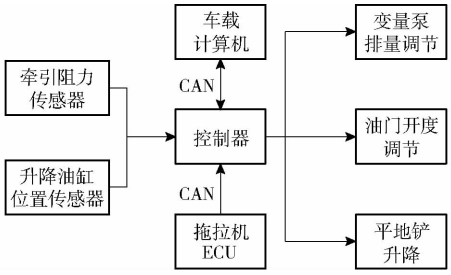


图 2 系统总体设计图

Fig. 2 Architecture design drawing of system

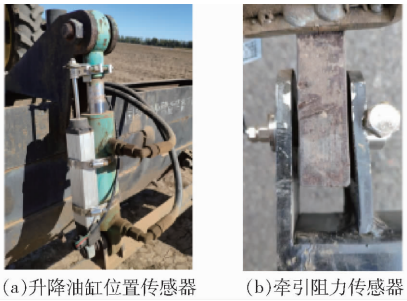
1.3 硬件设计

1.3.1 控制器与传感器选型

控制器采用定制的 C261 控制器。该控制器集成了 2 路标准 CAN 总线接口,可实现与车载计算机的总线通讯,以及拖拉机工况的采集,具有 27 路 I/O 端口,满足系统控制和信号采集需求[22]。编程环境为 CoDeSysV2.3。

牵引阻力传感器为合肥力智传感器有限公司定制的 LZ-ZXD21 型轴销传感器,12 V 供电,量程为 0~20 kN,输出电压为 0~5 V,灵敏度为 2.0 mV/V。

平地铲升降油缸位置传感器采用深圳米朗公司的 KTC1-100mm 型直线位移传感器,5 V 供电,量程 0~100 mm,输出电压 0~5 V。传感器及其安装位置如图 3 所示。



(a)升降油缸位置传感器 (b)牵引阻力传感器

图 3 传感器及其安装位置

Fig. 3 Sensor and installation location

1.3.2 油门自动调节机构

油门自动调节机构由电动油门调节器、油门拉线和油门调节杆组成,如图 4 所示。其工作原理为:电动油门调节器固定在油门支架上,电动油门调节器中电机动力经减速器传递到自动油门拉线,从而

带动油门调节杆绕油门调节杆连接销转动，最终带动油门位置传感器转动。发动机电控单元读取油门位置传感器的输出电信号，对发动机转速进行调节。油门限位装置用来限制油门位置，以免油门开度过大对发动机造成损害。

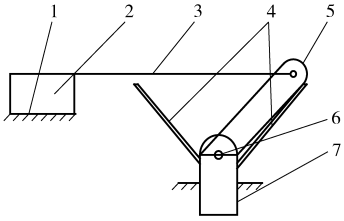


图 4　油门自动调节机构示意图

Fig. 4　Schematic of automatic throttle adjustment mechanism

1. 油门支架　2. 电动油门调节器　3. 自动油门拉线　4. 油门限位装置　5. 油门调节杆　6. 油门调节杆连接销　7. 油门位置传感器

1.3.3　作业负载调节执行机构

作业负载调节执行机构包括牵引式平地铲、平地铲升降油缸、比例换向阀、销轴传感器等，如图 5 所示。其工作原理为：平地铲通过牵引架与三点悬挂下拉杆连接，地轮起到支撑作用，销轴传感器实时检测拖拉机的牵引阻力；通过比例换向阀控制拖拉机后液压输出，从而控制液压油缸的升降，根据电阻式位移传感器测得的活塞杆位移，推算平地铲高度，实现平地铲的精准升降[23-24]。

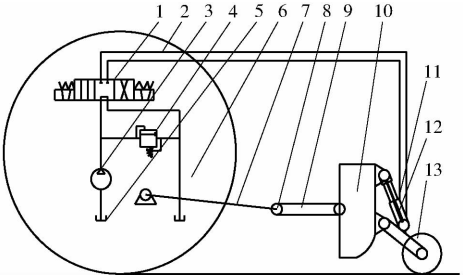


图 5　作业负载调节执行机构示意图

Fig. 5　Schematic of actuator for workload adjustment

1. 比例换向阀　2. 液压油管　3. 液压泵　4. 溢流阀　5. 油箱　6. 拖拉机后轮　7. 三点悬挂下拉杆　8. 销轴传感器　9. 平地铲牵引架　10. 平地铲　11. 液压油缸　12. 电阻式位移传感器　13. 地轮

2　系统软件设计

2.1　静液压传动拖拉机系统

静液压传动拖拉机是一个复杂的双输入系统，发动机转速和变量泵排量都可以控制拖拉机的行驶速度。在北京市昌平区国家精准农业示范基地，选取平整的水泥路面，启动拖拉机自动导航系统，使拖拉机保持直线行驶，通过田间计算机向控制器发送控制指令，改变油门开度和变量泵排量，记录拖拉机速度，探求车速与油门开度、变量泵排量控制信号（PWM 信号）占空比的关系[25-26]。

2.1.1　油门开度与车速关系

固定 PWM 信号占空比为 21%，油门开度在 0% ~70% 之间变化，记录不同油门开度下稳定的车速，得到 PWM 信号占空比为 21% 时车速与油门开度的关系。将 PWM 信号占空比分别固定为 18%、24%、27%、31%、34% 和 37%，重复上述试验，得到各 PWM 信号占空比下油门开度与车速的关系（图 6）。

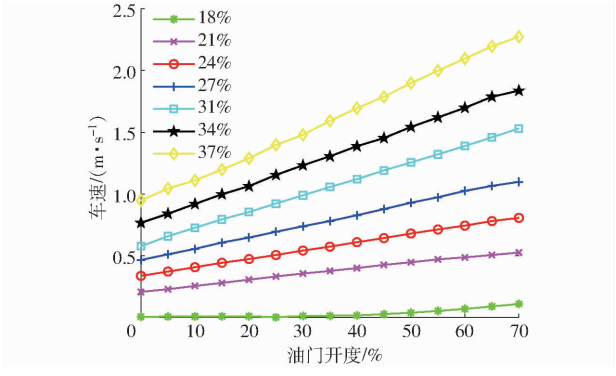


图 6　不同 PWM 信号占空比下油门开度与车速的关系

Fig. 6　Relationship between throttle openings and vehicle speed at different PWM duty cycles

2.1.2　PWM 信号占空比与车速关系

固定油门开度为 5%，PWM 信号占空比在 18% ~37% 之间变化，记录不同占空比下稳定的车速，得到油门开度为 5% 时车速与 PWM 信号占空比的关系。将油门开度分别固定为 10%、20%、30%、40%、50% 和 60%，重复上述试验，得到各油门开度下 PWM 信号占空比与车速的关系（图 7）。

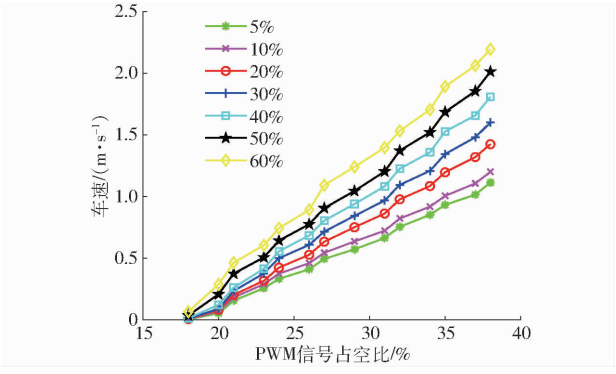


图 7　不同油门开度下 PWM 信号占空比与车速的关系

Fig. 7　Relationship between PWM duty cycles and vehicle speed at different throttle openings

对油门开度、PWM 信号占空比和车速进行数据拟合，得到图 8 所示的拟合曲面。

根据试验数据拟合得到车速与油门开度、占空

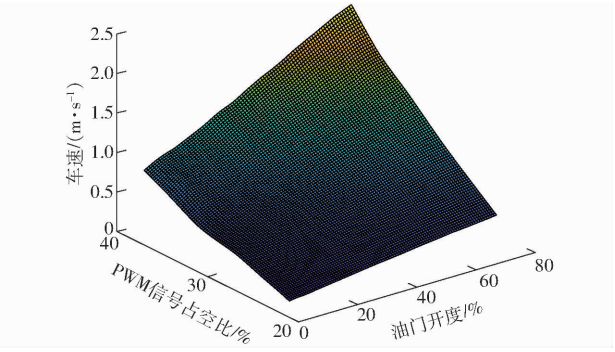


图 8 油门开度、PWM 信号占空比与车速的拟合曲面

Fig. 8 Surface fitting of throttle openings, PWM duty cycle and vehicle speed

比的关系式为

$$v = 0.2045 - 0.01529\alpha - 0.02076\beta + 4.795\times10^{-6}\alpha^2 + 9.066\times10^{-4}\alpha\beta + 1.095\times10^{-3}\beta^2$$

式中 v——拖拉机速度,m/s

α——油门开度,%

β——PWM 信号占空比,%

通过拟合车速与油门开度、PWM 信号占空比的关系,可以判断不同目标车速下油门开度与 PWM 信号占空比的选择范围。

控制器根据接收的目标车速和目标油门开度计算 PWM 信号占空比的初始值并输出,可以提高响应速度,快速达到目标车速。

2.2 拖拉机工况数据获取

根据 ISO 11783 协议解析拖拉机 CAN 总线的工况数据,可以得到发动机实际转矩百分比、发动机转速、油门开度和拖拉机行驶速度等参数[27-30],如表 1 所示。

表 1 拖拉机工况参数

Tab. 1 Tractor working condition parameters

参数	数值	分辨率	更新频率/Hz
发动机转矩百分比/%	-125 ~ 125	1	50
发动机转速/(r·min⁻¹)	0 ~ 8 031.875	0.125	50
油门开度/%	0 ~ 100	0.4	20
车速/(m·s⁻¹)	0 ~ 64.225	0.001	10

2.3 控制策略分析

提出 3 种速度控制策略,分别为定油门控制策略、耦合控制策略和协同控制策略,具体为:油门开度固定,仅调节变量泵排量;发动机转速和变量泵排量同增同减,双输入耦合为单输入;不同工况下选择不同的目标发动机转速,同时实现过载保护。

2.4 软件设计

控制系统软件由自动导航模块、拖拉机工况采集模块、传感器模块、油门控制模块、变量泵排量调节模块、作业负载调节模块、通信模块等组成。

定速巡航控制系统软件流程(图 9)为:系统初始化后,控制器通过信号采集系统获取当前车速、油门开度、发动机转速、平地铲高度和牵引阻力等工况数据,控制器接收车载计算机控制指令,当接收到平地铲控制指令时,读取平地铲目标高度,计算控制量,调节平地铲高度。控制器读取目标巡航车速,根据目标车速、实际车速、牵引阻力与阻力阈值判断当前工况,当阻力小于阈值、车速小于目标车速 80% 时,即为起步工况,采用油门排量耦合控制策略,调节油门开度和变量泵排量使车速上升;当牵引阻力小于阈值、车速大于目标车速 80% 且小于稳态车速时,即为接近目标速度工况,采用变排量降油门控制策略,逐渐减小油门开度使发动机转速保持在油耗较低的经济转速范围内,同时调节变量泵排量达到目标巡航车速;当牵引阻力小于阈值且阻力没有大范围波动、车速误差在 2% 以内时,即为稳态工况,采用变排量定油门控制策略,保持油门开度不变,调节变量泵排量使车速保持目标巡航车速;当牵引阻力小于阈值、牵引阻力有较大的变化时,即为负载扰动工况,采用变排量变油门控制策略,根据牵引阻力判断负载等级,计算与之对应的目标油门开度,同时调节变量泵排量保持巡航车速;当阻力大于阈值时,即

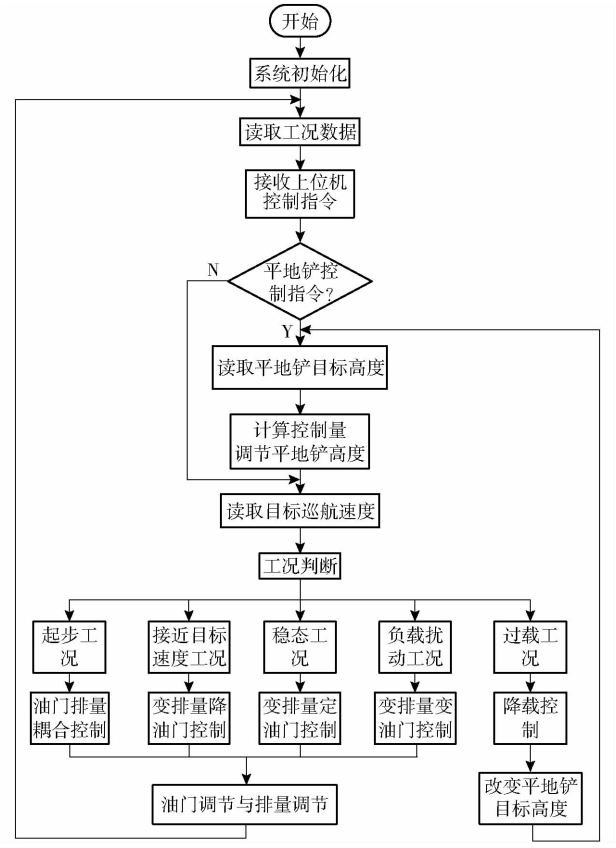


图 9 定速巡航协同控制系统软件流程图

Fig. 9 Software flow chart of cruise control system

为过载工况，采用降载控制策略，抬升平地铲。执行下一个周期。

3　试验

3.1　试验条件

为验证拖拉机速度控制系统的准确性和 3 种控制策略的效果，以约翰迪尔 4720 型拖拉机为平台，集成定速巡航控制系统和自动导航控制系统（图 10），在北京市昌平区国家精准农业示范基地进行水泥路面空载、田间空载和平地作业 3 种工况下的定速巡航控制试验。通过查阅拖拉机使用手册，将拖拉机的经济转速设置为 1 200 r/min。

选择地面平整的地块，进行牵引阻力控制阈值的测量试验。设定平地铲高度为 −2 cm，拖拉机行驶车速为 1.0 m/s，进行田间平地作业，通过销轴传感器测量得到牵引阻力的最大值约为 4 500 N。因此，设定牵引阻力阈值为 5 000 N。

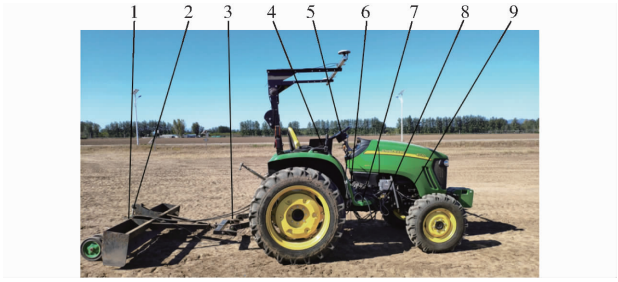


图 10　速度控制系统试验平台

Fig. 10　Test platform for speed control system

1. 升降油缸位置传感器　2. 平地铲升降油缸　3. 销轴传感器　4. 车载计算机　5. 电动方向盘　6. 拖拉机工况采集装置　7. 变量泵排量控制装置　8. 控制器　9. 油门自动调节机构

3.2　试验结果与分析

3.2.1　不同工况下的速度试验

在水泥路面空载、田间空载和平地作业 3 种工况下进行了油门排量协同控制策略试验，目标速度为 1.0 m/s。3 种工况下拖拉机车速如图 11 所示。

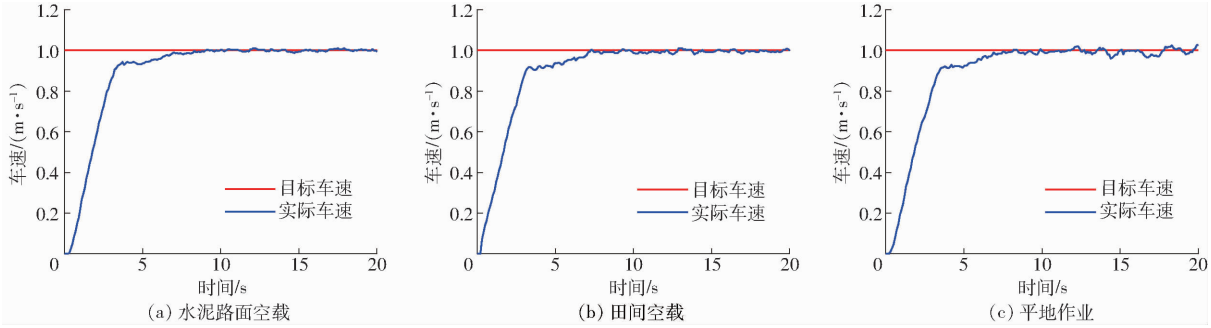


图 11　3 种工况下协同控制策略车速变化曲线

Fig. 11　Vehicle speed in three working conditions under cooperative control strategy

对图 11 数据进行分析，得到 3 种工况下协同控制策略的速度控制试验结果，如表 2 所示。

表 2　3 种工况下协同控制策略试验结果

Tab. 2　Test results of cooperative control strategy under three working conditions

参数	水泥路面空载	田间空载	平地作业
最大偏差/(m·s⁻¹)	0.018	0.020	0.036
调节时间/s	6.9	7.2	7.0
绝对误差/(m·s⁻¹)	0.005	0.007	0.012
相对误差/%	0.5	0.7	1.2

3.2.2　平地作业工况下的不同控制策略试验

在平地作业工况下进行了定油门、油门排量耦合、油门排量协同 3 种控制策略的速度控制试验，目标速度为 1.0 m/s。3 种控制策略下拖拉机的车速和发动机转速如图 12、13 所示。

对图 12、13 数据进行分析，得到平地作业工况

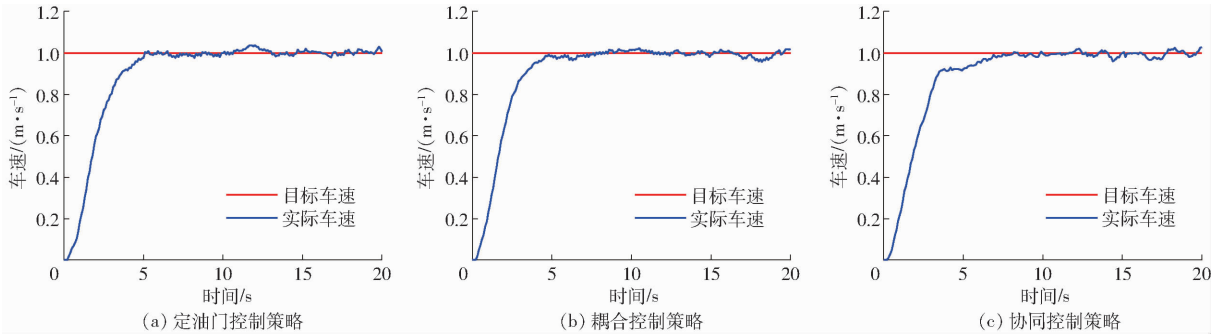


图 12　平地作业工况车速变化曲线

Fig. 12　Speed under flat ground operation

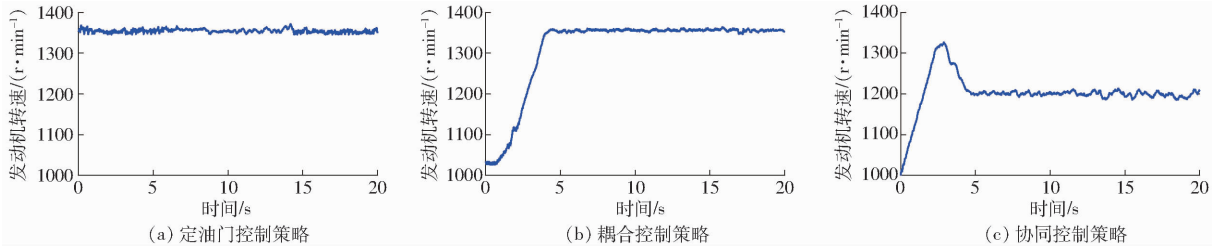


图 13 平地作业工况发动机转速变化曲线

Fig. 13 Engine speed under flat ground operation

下 3 种控制策略的速度控制试验结果,如表 3 所示。

表 3 平地作业工况下 3 种控制策略试验结果

Tab. 3 Test results of three control strategies under flat ground operation

参数	定油门控制	耦合控制	协同控制
最大偏差/(m·s⁻¹)	0.037	0.041	0.036
调节时间/s	5.2	4.7	7.0
绝对误差/(m·s⁻¹)	0.010	0.012	0.012
相对误差/%	1.0	1.2	1.2
发动机转速/(r·min⁻¹)	1 360	1 360	1 200

3.2.3 讨论

采用定油门控制策略时,由于起步时发动机负载较大,所以将目标发动机转速设置为 1 360 r/min,仅通过调节变量泵排量达到目标速度。

采用耦合控制策略时,在 0 ~ 4.7 s,发动机转速随变量泵排量的增加而增加至 1 360 r/min,并稳定在 1 360 r/min 左右。

采用协同控制策略时,在 0 ~ 3 s,发动机转速从 1 000 r/min 增加至 1 350 r/min;在 3 ~ 5 s,发动机转速从 1 350 r/min 降低至 1 200 r/min,随后保持在 1 200 r/min;拖拉机速度在 0 ~ 3 s 快速增加至 0.94 m/s,从第 3 秒开始,发动机转速下降,PWM 信号占空比增大,车速缓慢增加,直至 7.0 s 时达到目标速度。协同控制策略可以实现拖拉机保持巡航速度的同时,降低发动机转速,减少燃油消耗。

4 结论

(1)研究了一套拖拉机平地作业定速巡航控制系统,设计了速度调节和负载调节装置,建立了静液压传动拖拉机油门开度、变量泵排量与速度对应的数学模型。

(2)提出了一种降低发动机转速的定速巡航控制策略,在起步后降低发动机转速,使拖拉机在较低的发动机转速下达到目标巡航速度,可以节省燃油。

(3)在水泥路面空载、田间空载和平地作业 3 种工况下进行了协同控制策略试验,结果表明,协同控制策略的速度绝对误差分别为 0.005、0.007、0.012 m/s,速度相对误差分别为 0.5%、0.7%、1.2%,速度控制精度较好。

参 考 文 献

[1] 董胜,袁朝辉,谷超,等. 基于多学科技术融合的智能农机控制平台研究综述[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 1 - 11.
DONG Sheng, YUAN Zhaohui, GU Chao, et al. Research on intelligent agricultural machinery control platform based on multi-discipline technology integration[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 1 - 11. (in Chinese)

[2] 韩树丰,何勇,方慧. 农机自动导航及无人驾驶车辆的发展综述[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(4): 381 - 391.
HAN Shufeng, HE Yong, FANG Hui. Recent development in automatic guidance and autonomous vehicle for agriculture: a review[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2018, 44(4): 381 - 391. (in Chinese)

[3] FOSTER C A, STROSSER R P, PETERS J, et al. Automatic velocity control of a self-propelled windrower[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 47(1): 41 - 58.

[4] COEN T, SAEYS W, MISSOTTEN B, et al. Cruise control on a combine harvester using model-based predictive control[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(1): 47 - 55.

[5] 郭娜,胡静涛. 插秧机行驶速度变论域自适应模糊 PID 控制[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 245 - 251.
GUO Na, HU Jingtao. Variable universe adaptive fuzzy-PID control of traveling speed for rice transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 245 - 251. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20131241&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.041. (in Chinese)

[6] 王卓,刘知祥,白晓平,等. 拖拉机定速巡航系统纵向加速度跟踪控制[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 21 - 28.
WANG Zhuo, LIU Zhixiang, BAI Xiaoping, et al. Longitudinal acceleration tracking control of tractor cruise system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 21 - 28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180102&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.002. (in Chinese)

[7] 韩科立,朱忠祥,毛恩荣,等. 基于自动机械式变速的拖拉机定速巡航系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 21 - 26.
HAN Keli, ZHU Zhongxiang, MAO Enrong, et al. Cruise control system of tractor based on automated mechanical transmission [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 21 - 26. (in Chinese)

[8] 何杰,朱金光,张智刚,等. 水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 17 - 24.
HE Jie, ZHU Jinguang, ZHANG Zhigang, et al. Design and experiment of automatic operation system for rice transplanter[J/

OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 17 – 24. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190302&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.002. (in Chinese)

[9] LI B, SUN D, HU M, et al. Research on economic comprehensive control strategies of tractor-planter combinations in planting, including gear-shift and cruise control[J]. Energies, 2018, 11(3): 686.

[10] 臧政,霍炜,王玉海,等. 定速巡航分层控制策略硬件在环研究[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(7): 1100 – 1106.
ZANG Zheng, HUO Wei, WANG Yuhai, et al. Research on hardware-in-loop of constant speed cruise stratification control strategy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(7): 1100 – 1106. (in Chinese)

[11] 武仲斌,谢斌,迟瑞娟,等. 电动拖拉机田间巡航作业驱动转矩管理模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 88 – 98.
WU Zhongbin, XIE Bin, CHI Ruijuan, et al. Driving torque management model for electric tractor in field cruise condition [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 88 – 98. (in Chinese)

[12] 付锐,秦加合,王党青,等. 汽车巡航控制系统的定速控制方法的仿真研究[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(6): 2098 – 2103.
FU Rui, QIN Jiahe, WANG Dangqing, et al. Simulation study of cruise control methods of automobile cruise control system [J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(6): 2098 – 2103. (in Chinese)

[13] 朱从民. 静液压传动车辆的复合控制[J]. 农业机械学报, 2005, 36(4): 26 – 29.
ZHU Congmin. Complex control of hydrostatic transmission vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(4): 26 – 29. (in Chinese)

[14] ROHRER R A, PITLA S K, LUCK J D. Tractor CAN bus interface tools and application development for real-time data analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163: 104847.

[15] 陈月春,曾育平,李耀. 静压传动车辆的功率匹配节能控制研究[J]. 液压与气动, 2010(3): 4 – 5.
CHEN Yuechun, ZENG Yuping, LI Yao. The research on power-matching control strategy of energy saving for hydrostatic transmission vehicle[J]. Chinese Hydraulics & Pmeumatics, 2010(3): 4 – 5. (in Chinese)

[16] 姜皓. 静液压传动式车辆驱动系统的研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
JIANG Hao, Research on drive system of hydrostatic transmission vehicle [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)

[17] 王松林,刘琦,马文星,等. 装载机行走静液压传动系统特性仿真与试验研究[J]. 液压气动与密封, 2019, 39(3): 34 – 39,43.
WANG Songlin, LIU Qi, MA Wenxing, et al. Simulation analysis and experimental study on characteristics for loader traveling hydrostatic transmission system[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2019, 39(3): 34 – 39, 43. (in Chinese)

[18] DIEGO A T B, CARLOS E D O. Control fuzzy de velocidad para una transmisión hidrostática[J]. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 2008,44: 137 – 143.

[19] 孟志军,刘卉,付卫强,等. 农田作业机械测速方法试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 141 – 145.
MENG Zhijun, LIU Hui, FU Weiqiang, et al. Evaluation of ground speed measurements for agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 141 – 145. (in Chinese)

[20] 赵立军,魏玉莹,刘清河,等. 发动机-变量泵-变量马达驱动系统分层控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(8): 1416 – 1421.
ZHAO Lijun, WEI Yuying, LIU Qinghe, et al. Hierarchical control of engine-variable pump-variable motor drive system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(8): 1416 – 1421. (in Chinese)

[21] LEE J W, KIM S C, OH J, et al. Engine speed control system for improving the fuel efficiency of agricultural tractors for plowing operations[J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 3898.

[22] 管观洋,陈广锋,席伟. 基于 Codesys 的两轮机器人控制研究[J]. 自动化与仪表, 2018, 33(4): 16 – 19.
GUAN Guanyang, CHEN Guangfeng, XI Wei. Two-wheel robot control based on Codesys[J]. Automation & Instrumentation, 2018, 33(4): 16 – 19. (in Chinese)

[23] 胡炼,罗锡文,林潮兴,等. 1PJ – 4.0 型水田激光平地机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 146 – 151.
HU Lian, LUO Xiwen, LIN Chaoxing, et al. Development of 1PJ – 4.0 laser leveler installed on a wheeled tractor for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 146 – 151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140423&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.023. (in Chinese)

[24] 孟志军,付卫强,武广伟,等. 激光接收器自动升降式平地机的研制与试验分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 418 – 424.
MENG Zhijun, FU Weiqiang, WU Guangwei, et al. Development and evaluation of laser land leveling machine with automatic lifting laser receiver[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2015, 36(4): 418 – 424. (in Chinese)

[25] 黄智. 静液传动车辆建模与控制策略仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(3): 661 – 664.
HUANG Zhi. Modeling and control strategy simulation of vehicle driven by hydrostatic transmission[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(3): 661 – 664. (in Chinese)

[26] KONDAKOV S V, GORELY E A, SAVINOVSKICH A G. Mathematic modeling of self-propelled unmanned tracked platform with hydrostatic transmission[J]. Procedia Engineering, 2017, 206: 1546 – 1551.

[27] 刘洪利,王熙. 基于 CAN 总线的拖拉机机组作业性能分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 30 – 34.
LIU Hongli, WANG Xi. Analysis of tractor working performace based on CAN bus[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 30 – 34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2016s005&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.005. (in Chinese)

[28] HEIB A, PARAFOROS D, GRIEPENTROG H. Determination of cultivated area, field boundary and overlapping for a plowing operation using ISO 11783 communication and D – GNSS position data[J]. Agriculture, 2019, 9(2): 38.

[29] BACKMAN J, OKSANEN T, VISALA A. Applicability of the ISO 11783 network in a distributed combined guidance system for agricultural machines[J]. Biosystems Engineering, 2013, 114(3): 306 – 317.

[30] 王玉海,董瑞先,王松,等. 基于 SAEJ1939 协议的重型车辆坡道识别实时算法[J]. 汽车工程, 2010, 32(7): 640 – 642, 647.
WANG Yuhai, DONG Ruixian, WANG Song, et al. Real-time road slope recognition algorithm for heavy truck based on SAEJ1939 protocol[J]. Automotive Engineering, 2010, 32(7): 640 – 642, 647. (in Chinese)