

基于电驱动系统的农业车辆牵引负荷车设计与试验

贾方¹ 侯宇豪² 韩建刚¹ 温昌凯³ 张胜利² 谢斌²

(1. 洛阳西苑车辆与动力检验所有限公司, 洛阳 471000; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;
3. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 针对传统农业车辆牵引负荷车机械结构复杂、存在加载死区导致无法实现全范围加载,采集系统功能单一无法实时评估被试车辆牵引性能的问题,设计了一种基于电驱动系统的农业车辆牵引负荷车。负荷车以最大加载牵引力 150 kN 为设计目标,结合对驱动轮的受力分析,完成了其整机关键部件的选型设计,采用集成发动机-电动桥的电驱动系统为核心单元,使用转向牵引架实现前桥平台的自动跟随转向。在 LabVIEW RIO 架构基础上,通过 FPGA 搭建高算力、高性能的测控系统,实现对电驱动系统电流、电压、被试车辆牵引力、油耗等多种信息的采集、无线传输与存储,并使用模糊自适应 PID 控制算法对牵引力加载进行闭环控制。最后开展整机性能验证试验,负荷车实现了 0~150 kN 范围内的负荷加载,加载系统最大响应时间为 3.6 s,最大超调量为 1.61%,实际加载牵引力与目标牵引力最大误差为 4.5%。整机性能验证试验表明,负荷车具备良好的牵引负荷加载性能,其测控系统可实现被试车辆牵引性能多参数的实时准确监测,能够完成对农业车辆牵引性能的全面评估。

关键词: 农业车辆; 负荷车; 电驱动系统; 全范围加载; 测控系统; 牵引性能

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)08-0394-08 **OSID:** 

Design and Test of Agricultural Vehicle Traction Load Vehicle
Based on Electric Drive System

JIA Fang¹ HOU Yuhao² HAN Jian'gang¹ WEN Changkai³ ZHANG Shengli² XIE Bin²

(1. Luoyang Xiyuan Vehicle and Power Inspection Institute Co., Ltd., Luoyang 471000, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Research Center of Intelligent Equipment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: In response to the problems of complex mechanical structures and dead zones in loading, as well as a single-function collection system that cannot evaluate traction performance in real-time for traditional agricultural vehicles, an electric-driven agricultural vehicle traction load vehicle was developed. Combining the targeted design of a maximum loading traction force of 150 kN with a force analysis of the driving wheel, key components of the load vehicle were selected and designed. An integrated engine – electric bridge electric drive system was used as the core unit, and a steering traction frame was innovatively used to achieve automatic steering of the front platform. Based on the LabVIEW RIO architecture, a high-performance measurement and control system was built using FPGA, enabling the collection, wireless transmission, and storage of multiple information, such as electric current, voltage, traction force, and fuel consumption. The fuzzy adaptive PID control algorithm was used for closed-loop control of traction force loading. Finally, the load vehicle was subjected to performance verification testing, achieving a range of 0~150 kN load loading, with maximum response time of 3.6 s, maximum overshoot of 1.61%, and maximum error of 4.5% between actual and targeted traction forces. The test results showed that the load vehicle had good traction load performance and the measurement and control system can accurately monitor multiple parameters of traction performance in real-time, providing comprehensive evaluation of agricultural vehicle traction performance.

Key words: agricultural vehicle; load vehicle; electric drive system; full range loading; measurement and control system; traction performance

收稿日期: 2023-04-25 修回日期: 2023-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52272444)

作者简介: 贾方(1982—),男,高级工程师,主要从事农业装备智能化及农业机械可靠性研究,E-mail: franc_jia@sina.com

通信作者: 谢斌(1973—),男,教授,主要从事农业装备智能化、电液控制和车辆电控研究,E-mail: xiebincau@126.com

0 引言

牵引负荷车是装载有动力吸收装置、加载控制系统、试验数据采集分析处理系统的车辆道路试验设备^[1-2]。农业车辆牵引负荷车主要满足各种农业和非道路车辆的试验需要,通过模拟被试车辆的各种行驶负荷,进行整车行驶下热平衡、热管理、牵引性能等方面的试验,以全面评价被试车辆的牵引性能和经济性^[3-4]。

国外负荷车研究方面,SZENTE 等^[5]基于无级变速箱,研制了牵引力范围为 0~200 kN 的负荷车,并根据速度与牵引力试验需求设计了力控制和速度控制模块以完成对拖拉机牵引性能的测试。CSATÁR 等^[6]在军用车辆上装配最大功率为 400 kW 的液压制动系统,通过 PLC 控制单元和计算机监测拖拉机牵引试验的相关数据。MAE 公司研发的负荷车主要由控制器模块、多传感器模块以及电涡流功率吸收系统组成,负荷车通过球、夹钳或第五轮与被试拖拉机进行刚性连接^[7]。

我国农业车辆整车性能检测领域常用的负荷车多由重型卡车、大功率拖拉机等改装而成。王宁毅等^[8]将大型拖拉机改装成负荷车,安装直流电机加载装置,最大牵引力达到 128.9 kN。周超军等^[9]改装某越野载货汽车,定制专用的电力测功机,实现被试车辆的加载和牵引,完成牵引试验内容。张亚^[10]结合国内重型汽车的现状,设计了一种重型动力负荷车,周希军^[11]则针对汽车道路试验研制了一种机械结构较为复杂的特种负荷车。以上负荷车主要依托于自身的负荷来进行被试车辆的牵引性能试验,只能针对特定范围内的牵引性能验证,系统检测参数固定,无法对试验数据进行实时监测和显示,可操作性差。此外,负荷车与被试车辆之间通过牵引杆连接,在试验时需要专业驾驶员驾驶,此类连接装置无法保证负荷车与被试车辆同步转动,导致无法准确测量牵引力数据^[12-13]。

基于上述情况分析,本文设计一款基于电驱动系统的牵引负荷车,以电驱动系统作为核心动力单元,摒弃传统机械结构,提升负荷车传动效率与牵引负荷测试范围;采用转向牵引架连接被试车辆与负荷车,实现负荷车的自动跟随转向。同时,根据牵引试验需求对硬件设备进行选型,在 cRIO 控制器的基础上对测控系统进行设计,通过 LabVIEW 开发配套上位机软件实时监测试验各项参数^[14],并搭建加载控制模块实现对牵引力加载的闭环控制。最后,开展整机性能验证试验,对负荷车最大加载能力、连续加载能力及牵引能力进行试验设计和结果分析,

验证牵引负荷车可行性。

1 整机结构设计与参数计算

1.1 整机主要结构设计

目前,我国大功率拖拉机的实际牵引力一般为 60~100 kN,超载作业时可达到 140 kN。基于此指标现状,本设计选定牵引负荷车的理论最大加载牵引力为 150 kN。在确定最大牵引力的基础上,对牵引负荷车展开结构设计。负荷车以电驱动桥总成作为安装基体,在驱动桥体上方安装车架,将控制器集成盒、电阻器、发电机组等设备固定在车架上。负荷车整体布局如图 1 所示。

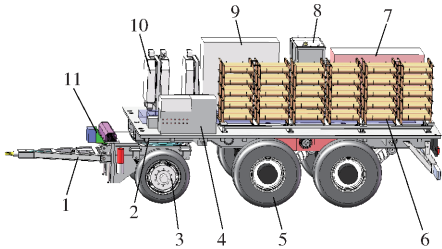


图 1 负荷车整体布局

Fig. 1 Overall layout of load vehicle

1. 转向牵引架 2. 转向轴承 3. 转向桥 4. 控制器集成盒 5. 电驱动桥总成 6. 电阻器 7. 发电机组 8. 油箱焊合总成 9. 强电柜 10. 变频器 11. 调节电机

负荷车采用重型专用底盘,承载能力可达 40 t。转向机构使用半挂车式设计,转向牵引架通过转向轴承与负荷车车架相连。牵引试验时,试验人员首先通过调节电机对转向牵引架进行上下调节以适应不同被试车辆的牵引点高度。被试车辆转弯时带动转向桥转动,转向桥上的转向轴承再带动车架转向,从而实现牵引负荷车的随动转向。

6 台大功率电阻箱并联组成负荷车能耗系统,将负荷车的牵引能量转换为热能散发至空气中。冷却系统分为电机冷却、变频器冷却及电阻器冷却 3 部分。电机及变频器采用集成式水泵散热器进行液冷散热。电阻器则使用三相风扇强制风冷散热,保证试验过程中负荷车整体温度在合理范围内。牵引负荷车整机主要设计指标见表 1。

表 1 负荷车主要设计指标

Tab. 1 Main design indicators of load vehicle

参数	数值/规格
动力类型	4×4 电驱动桥
底盘承载能力/t	≥40
底盘过载余量/%	150
最大牵引力/kN	150
能耗系统额定功率/kW	600
风冷系统总功率/kW	2

1.2 电驱动系统设计

1.2.1 电驱动系统结构分析

电驱动系统是负荷车的核心,主要由发电机组、变频器和电驱动桥组成。其中电驱动桥集成左、右2个驱动电机,电机分别搭配2个减速器驱动两侧车轮转动,其结构如图2所示。

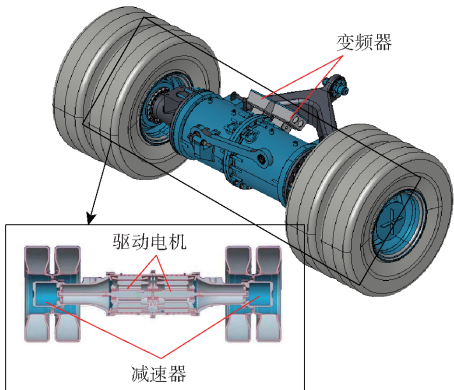


图2 电驱动桥结构图
Fig.2 Electric drive axle structure

当试验人员通过测控系统发出加载指令后,发电机组接收该指令后产生相应大小的交流电传输到变频器。变频器接收发电机组产生的交流电,调节其电压与频率并发送至左、右2个驱动电机,驱动电机将电能转换为转矩,然后通过减速器将转矩增大传递到驱动轮,电驱动系统驱动过程见图3。

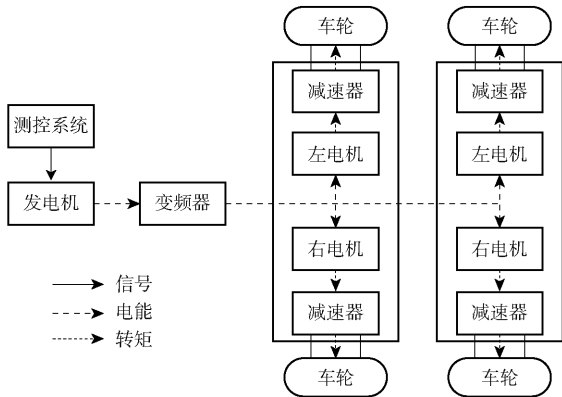


图3 电驱动系统驱动过程
Fig.3 Electric drive system drive process

1.2.2 驱动电机选型

驱动电机作为电驱动系统的动力来源,其输出转矩经减速器传递到驱动轮后,地面会对作用于驱动轮的转矩 T_i 产生一个反作用力 F_i , F_i 称为负荷车的牵引负荷(牵引阻力)。此外,车轮在滚动时和地面接触产生变形,接触区域会产生一对法向(F_y)、切向(F_x)的相互作用力,这对作用力会阻碍驱动轮向前滚动,将这个阻力偶矩迁移至车轮中心 O 处就得到滚动阻力 F_f ^[15]。

牵引试验过程中,被试车辆牵引负荷车前行,当负荷车速度低于被试车辆时,由于牵引杆的作用,负

荷车对被试车产生牵引力 F 。 F 的方向与牵引外力 F_t 、滚动阻力 F_f 相反,大小等于两者之和。负荷车驱动轮受力分析如图4所示。

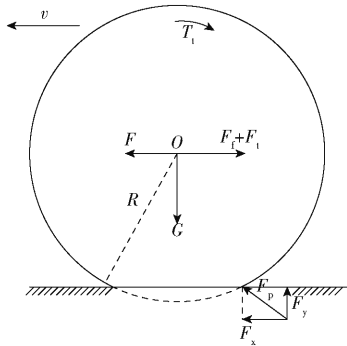


图4 驱动轮受力分析
Fig.4 Drive wheel force analysis

当被试车辆与负荷车在水平路面匀速行驶时, F 、 F_t 和 F_f 存在关系

$$F = F_t + F_f \tag{1}$$

其中牵引外力 F_t 的最大值 F_{tmax} 等于地面所能提供的最大静摩擦力,即

$$F_{tmax} = mg\mu \tag{2}$$

式中 μ ——地面最大附着系数,取 0.75

m ——负荷车质量,kg

g ——重力加速度,取 9.8 m/s²

其值在车轮由滚动向滑动的临界速度时取到,这个临界速度根据设计要求为 15 km/h。

F_f 计算式为

$$F_f = \frac{T_f}{r} = mgf_p \tag{3}$$

式中 T_f ——滚动阻力矩, N·m

f_p ——滚动摩擦因数,牵引试验常在混凝土和碎石路面上进行,取 0.02

r ——车轮滚动半径, m

根据力平衡定理,牵引力 F 的最大值 $F_{max} = F_{tmax} + F_f$,故将式(2)、(3)代入式(1)即可得到负荷车质量 m 与牵引力 F 之间的关系为

$$m \geq \frac{F_{max}}{g(f_p + \mu)} \tag{4}$$

代入数值可计算出负荷车最小质量为 19 878 kg。因此驱动电机所需功率 P 应满足

$$P \geq \frac{F_{tmax} v}{3\,600 \eta_i} = \frac{mg\mu v}{3\,600 \eta_i} \tag{5}$$

式中 η_i ——传动系效率,取 98%

v ——负荷车行驶速度, km/h

将负荷车最小质量 19 878 kg、临界速度 15 km/h 代入式(5)计算出所需驱动电机总功率为 621 kW。

根据电驱动桥布局,单根轮轴上采用 2 个驱动电机输出转矩,则单个电机最大承受扭矩应为

$$T_{\max} = \frac{T_1}{2i\eta_i} = \frac{F_{\max} R}{4i\eta_i} \tag{6}$$

式中 $T_{\max}$ ——单轮轴承受的最大扭矩, N·m
 T_1 ——电机输出的最大扭矩, N·m
 i ——减速器减速比, 初步定为 23
 R ——负荷车车轮半径, 取 675 mm

计算出单个电机最大承受扭矩为 1 123 N·m。
负荷车行驶车速与车轮转速之间的关系为

$$v = 2\pi R \frac{n_i}{60} = \pi R \frac{n_i}{30} \tag{7}$$

式中 n_i ——车轮转速, r/min

其中, 车轮转速和电机转速的关系为

$$n = n_i i \tag{8}$$

式中 n ——电机转速, r/min

将式(7)代入式(8)可得

$$n = \frac{30vi}{\pi R} \tag{9}$$

即负荷车达到峰值车速 45 km/h 时, 计算出此时电机转速为 4 069 r/min。

结合牵引试验需求, 并综合以上计算数据、输出扭矩、功率与转速, 选定 4 台持续功率 160 kW 驱动电机, 匹配速比 23 的单级主减速器, 构成持续总功率 640 kW 的电驱动系统, 峰值功率可达 740 kW。电机额定扭矩 1 299 N·m, 额定转速 1 000 r/min, 峰值转速 4 200 r/min。电机技术参数见表 2。

表 2 驱动电机技术参数

Tab.2 Drive motor technical parameters

参数	数值
额定功率/kW	160
最大功率/kW	185
额定频率/Hz	37.5
额定电压/V	480
额定电流/A	216
额定转矩/(N·m)	1 299
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000
峰值转速/(r·min ⁻¹)	4 200
效率/%	92

2 测控系统设计

综合考虑农业车辆牵引性能试验要求, 进行测控系统的软硬件设计。硬件部分由车载检测仪、传感器模块、无线通讯模块和以太网交换机等组成; 软件部分包括控制器软件与上位机软件, 控制器软件负责各传感器数据的采集, 上位机软件则接收无线传输的数据并实时显示试验测量数据、牵引力加载曲线等, 同时在上位机软件中搭建加载控制模块, 实现对牵引力加载的闭环控制。测控系统结构框图如

图 5 所示。

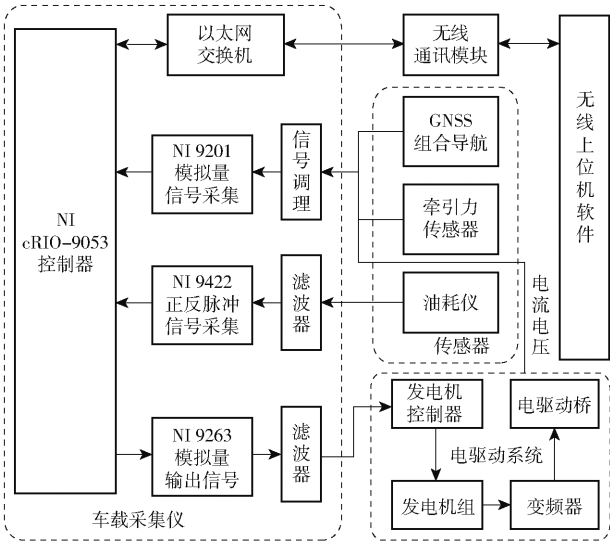


图 5 测控系统结构框图

Fig.5 Measurement and control system structure diagram

2.1 测控系统硬件设计

车载采集仪选用 NI 公司的 cRIO-9053 作为控制器, 其具有 16 路模拟量输入输出、8 路脉冲信号量输入以及多路串口、总线通讯等通道^[16]。cRIO-9053 控制器搭配 NI 9201 模拟量输入模块、NI 9263 模拟量输出模块和 NI 9422 脉冲模块实现牵引力传感器、GNSS 组合导航、电驱动系统电流电压等模拟信号的采集、油耗仪脉冲计数与频率测量、电驱动系统控制等。

车载采集仪控制器将采集的传感器数据发送至以太网交换机。以太网是一种专用于车辆的局域网技术, 其具有高速传输、稳定可靠、灵活性强、易于拓展的优点, 因此负荷车通过以太网协议实现控制器与无线传输模块之间的互联互通^[17]。无线通讯模块接收以太网交换机的数据信息然后传输到上位机软件, 同时, 控制器也接收试验人员通过上位机软件发送的控制指令。考虑到牵引试验一般在试验场进行, 传输距离较远, 无线通讯模块使用 Lora 通讯技术。Lora 是一种低功耗的局域网无线标准, 最大特点是在同样的功耗条件下可比其他无线射频通信距离扩大 3~5 倍, 实现了低功耗和远距离的统一。使用 Lora 通讯模块大大节省了功耗和布线成本, 同时其传输距离可达到 10 km, 充分满足试验需求^[18-19]。

通过 GNSS 高精度导航, 使用非接触式测量方案对被试车进行速度信息测量, GNSS 测量速度精度 0.1 m/s, 脉冲基准 90 个/m, 频率设置为 10 Hz。在进行牵引试验前, 被试车辆牵引的负荷车先在零加载车况下测得每 20 m 的脉冲数 n_1 , 然后记录试验中每 20 m 的实际脉冲数 n_2 , 得到被试车辆滑转率 S_r , 计算式为

$$S_r = \frac{n_2 - n_1}{n_2} \times 100\%$$

(10)

牵引力的闭环控制需要实时准确的牵引力作为控制系统的反馈量,因此选用柱型高精度牵引力传感器对被试车辆牵引力进行实时测量。根据负荷车牵引力、行驶速度、滑转率、油耗等参数进行传感器选择,主要传感器型号及参数如表 3 所示。

表 3 传感器型号及参数

Tab.3 Sensor model and parameters

传感器	型号	主要特性
牵引力传感器	CYB-601S	量程:0~300 kN
		输入电压:12~24 V DC
		输出信号:0~10 V
		精度:±0.25% F.S
GNSS 高精度导航	VBSS05	工作电压:6.5~30 V
		输出信号:0~5 V
		精度:0.1 km/h
		通讯方式:CAN/RS232
油耗仪	AIC-5004	输入电压:24 V DC
		输出信号:矩形脉冲
		测量范围:1~200 L/h
Lora	E90-DTU	工作频率:433 MHz
		发射功率:5 W
		通讯距离:10 km

2.2 测控系统软件设计

2.2.1 控制器软件

使用 FPGA LabVIEWReal-Time 模块设计部署硬件控制器软件,对各传感器数据进行实时读取、传输、储存,软件利用 cRIO 的多线程工作优势,分别通过独立的 While 循环实现各传感器信息的数据采集。由于在拖拉机牵引试验中,GNSS 导航、牵引力等传感器数据量比较大,FPGA 程序中的数据接收和数据解析通过 FIFO 进行传递,防止数据丢包,如图 6 所示。

2.2.2 上位机软件

上位机软件基于 NI LabVIEW 开发,利用其虚拟化、图形化、模块化、通用性等特点,对试验数据进行无线传输、解析计算与存储^[20-21],实时显示测量数据、牵引力加载曲线以提高牵引试验的可操作性,并通过加载控制器实现对电机加载的闭环控制。上位机软件主要包括 4 部分功能:软件设置模块、无线传输模块、加载控制模块、数据处理模块。上位机软件功能框图如图 7 所示。

试验过程中,上位机软件通过无线通讯模块与测控系统控制器进行通讯,接收控制器发送的传感器数据并进行处理,根据 FPGA 时间同步各传感器数据,将得到的电驱动系统电流电压、被试车辆滑转

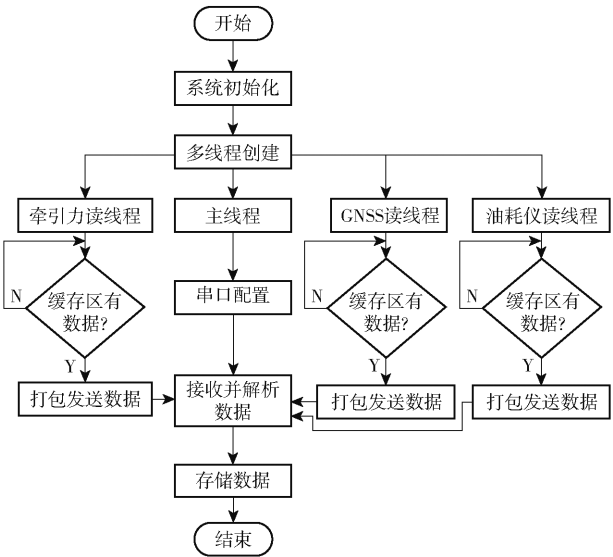


图 6 多线程采集流程图

Fig.6 Multi-threaded acquisition flow diagram

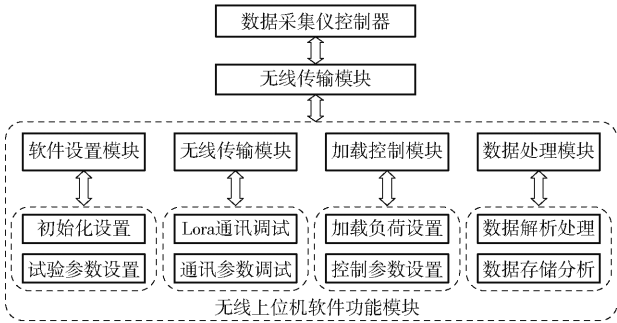


图 7 上位机软件功能框图

Fig.7 Upper computer software function block diagram

率、行驶速度与生成的牵引力功率曲线等信息实时显示在软件界面上,同时,上位机软件程序逻辑中设置人工、自动等多种触发方式实现数据记录,将试验数据保存为 .xlsx 格式,可借助 Excel 直接打开。

图 8 为无线上位机软件主界面,控制命令输入通过菜单栏和快捷键方式,界面简洁、控制简单,并可以实时监测电驱动系统工作状态、被试车牵引力、滑转率等数据信息。



图 8 上位机软件主界面

Fig.8 Main interface of upper computer software

2.2.3 加载控制模块

上位机软件中包含了加载控制模块,该模块主要实现负荷车牵引力加载的闭环控制。试验人员通过上位机软件发出牵引力控制指令,指令经无线传

输模块发送至控制器,控制器调节电驱动系统加载输出牵引负荷。牵引力传感器将被试车辆实际输出的牵引力输入到上位机软件中的加载控制模块,形成闭环控制。

综上所述,在闭环控制中以牵引力加载为控制目标,通过高精度牵引力传感器得到实际工况下的牵引力并作为负荷车加载控制系统的输入量,通过模糊自适应 PID 控制器实现对系统的控制,建立控制模型^[22](图 9),从而实现更稳定的控制加载和更快的加载响应速度。

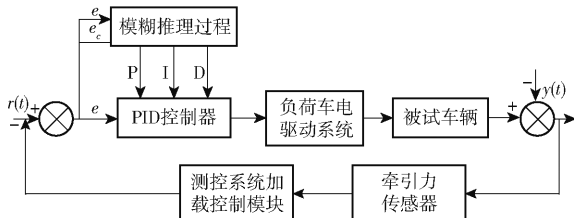


图 9 牵引力模糊自适应 PID 系统控制模型框图
Fig. 9 Block diagram of constant traction control model for load vehicle

通常, PID 控制器的控制算式为

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

式中 $u(t)$ ——控制器调节信号

K_p ——比例系数

K_I ——积分系数

K_D ——微分系数

$e(t)$ ——控制器偏差信号

参数自适应模糊 PID 控制器是在传统 PID 控制算式的基础上,由参数可调 PID 和模糊控制系统两部分组成。其中,模糊推理系统以设定的目标牵引力与传感器返回的实际牵引力误差 e 、误差变化率 e_c 作为输入,通过模糊推理方法对 PID 参数 K_p 、 K_I 、 K_D 进行在线修订,确定相对初始化时的 PID 参数的变化量 Δk_p 、 Δk_I 、 Δk_D ,以满足不同的牵引力误差 e 和误差变化率 e_c 对加载控制系统参数的不同要求,而使负荷车牵引力加载系统具有良好的动态、静态性能^[23-24]。

模糊控制器采用二输入三输出的形式,针对实际牵引试验中不同的 e 和 e_c ,将 e 和 e_c 导入模糊控制器实时调整参数 K_p 、 K_I 、 K_D ,以提高加载控制系统的跟随能力,缩短响应时间^[25-26]。

根据以上规则,确定输入语言变量 $|e|$ 和 $|e_c|$ 的论域均为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$;输出语言变量 Δk_p 、 Δk_I 、 Δk_D 的论域分别为 $\{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$ 、 $\{-0.06, -0.04, -0.02, 0, 0.02, 0.04, 0.06\}$ 、 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。模糊子集均为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{O}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$ 。应用模糊合成

推理设计 PID 参数的修正值,完成对负荷车牵引力加载的修正。

3 整机性能试验与结果分析

整机性能试验目的是验证负荷车结构性能和拖拉机牵引功率评价性能。主要验证项目有:最大负荷加载试验、连续加载试验和拖拉机牵引功率试验^[27]。验证试验在某试车场高速环道上进行,其道路附着系数为 0.75,如图 10 所示。被试车辆为东方红 LX2204 型拖拉机,其发动机标定功率为 162 kW,最大牵引力大于等于 80 kN。试验过程参照 GB/T 3871.9—2006《农业拖拉机试验规程第 9 部分:牵引功率试验》进行^[28]。



图 10 负荷车牵引试验
Fig. 10 Load vehicle traction power test

3.1 最大负荷加载试验

为提供足够的牵引力,最大负荷加载试验采用 2 辆 LX2204 型拖拉机作为试验车辆,拖拉机之间用连接链进行连接,由 2 位经验丰富的驾驶员操作拖拉机共同牵引负荷车匀速行驶,如图 11 所示。



图 11 最大负荷加载试验
Fig. 11 Maximum load loading test

试验采用逐级加载的方式,通过自动加载控制以验证负荷车加载负荷的准确性和响应速度,并对负荷车输出负荷范围进行验证。以负荷车加载的牵引负荷作为输入对象,将其设置 8 个等级,分别为 12.5%、25%、37.5%、50%、62.5%、75%、87.5%、100%,对应被试拖拉机牵引力分别为 18.75、37.5、56.25、75、93.75、112.5、131.25、150 kN;每次加载时间为 60 s。

试验结果如图 12 所示,试验拖拉机的滑转率在加载负荷 150 kN 时达到最大值 14.92%,低于牵引试验要求的 15%,最大负荷加载试验满足拖拉机牵引试验要求,试验结果有效。

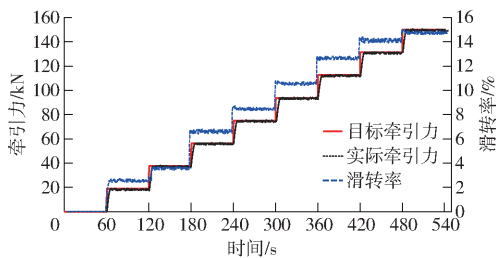


图 12 逐级加载试验结果

Fig. 12 Results of step-by-step loading test

根据图 12 可以看出,负荷车在牵引负荷加载过程中不存在加载死区,最大加载负荷可以稳定保持 150 kN。试验过程中,目标牵引力越大,实际加载的牵引力达到目标值所需要的响应时间越长,当目标牵引力为 150 kN 时,实际加载牵引力的最大响应时间为 3.6 s,在 7.7 s 后达到稳定,最大超调量为 1.61%,最大稳态误差为 1.66%。加载过程中实际加载牵引力与目标牵引力相关系数为 0.995 1。以上结果表明负荷车能够输出最大 150 kN 的牵引负荷,其加载输出的响应速度和准确性可满足拖拉机牵引试验需求。

3.2 连续加载试验

连续加载试验以 LX2204 型拖拉机为牵引车,考察负荷车不同车速下的连续加载性能。试验过程中,全车各差速锁处于非锁止状态,采用恒定牵引力闭环加载方式。试验人员控制负荷车输出从 80 kN 递减的负荷,驾驶员切换挡位保证被试车提供足够的牵引力,使得被试车以尽可能快的车速进行匀速行驶,每个车速段持续 10 min,记录牵引力和车速。

图 13 为被试拖拉机速度-牵引力特性曲线,从图 13 可以看出负荷车能稳定输出从 80 kN 阶梯递减到 30 kN 的负荷。试验过程负荷车整体加载过程保持平稳,加载牵引力与目标值的最大误差为 4.5%,试验连续、完整地测出了负荷车的连续加载性能,表明其能够满足拖拉机连续牵引测试试验。

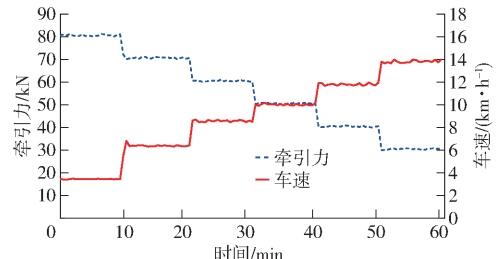


图 13 速度-牵引力特性曲线

Fig. 13 Speed-traction characteristics

3.3 牵引功率试验

牵引功率试验过程中,驾驶员操纵被试拖拉机依次挂 L3 ~ H1 7 个不同挡位,并保持发动机转速稳

定在 2 000 ~ 2 200 r/min 之间,表示拖拉机田间作业时的正常工作状态。试验人员控制负荷车加载输出该挡位在发动机标定转速下最大牵引功率时所对应的牵引力的 75%,记录不同挡位的牵引功率和瞬时燃油消耗率,如图 14 所示。

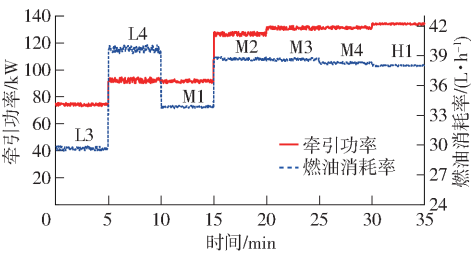


图 14 牵引功率试验结果

Fig. 14 Traction power test results

从图 14 可以看出,被试拖拉机挡位从 L3 ~ H1 变换过程中,其牵引功率从 75 kW 升至 138 kW;其中在 L4 挡输出 90 kW 牵引功率时,被试拖拉机瞬时油耗从 31 L/h 升至 40 L/h,工作效率明显降低,此时,输出功率不变,换至 M1 挡,瞬时油耗降至 34 L/h,效率大幅上升。M2 ~ H1 挡位,拖拉机牵引功率保持在 130 kW,但随着挡位从 M2 换至 H1,燃油消耗率从 39 L/h 降至 38 L/h,表明拖拉机在牵引功率较高时,其高档位下的燃油消耗率更低,燃油经济性更好。

试验测量了大功率拖拉机不同挡位下的牵引功率与瞬时燃油消耗率的变化,结果表明负荷车能够充分测量车辆牵引功率,并对其性能和效率进行评估。

4 结论

(1)针对当前农业车辆牵引性能领域的传统测试设备机械结构复杂、存在加载死区导致牵引力加载范围小,采集系统功能单一无法实时监测试验信息的问题,设计了一套基于电驱动系统的牵引负荷车。以最大加载牵引力 150 kN 为设计目标,对整机结构展开选型设计,采用半挂车式转向牵引架,使负荷车能随被试车辆同步转动;结合驱动轮受力分析对电驱动系统主要部件进行选型,采用 2 个重型一体式电驱动桥作为动力传输单元。

(2)在负荷车整机结构设计的基础上,进行测控系统的软硬件设计。测控系统硬件部分由车载采集仪、传感器模块、无线通讯模块等组成。软件部分则在 LabVIEW RIO 架构基础上,结合 FPGA 搭建硬件控制器软件与上位机软件。实现对牵引功率试验信息的实时监测、分析、存储与牵引力加载的闭环控制等功能。

(3)开展整机性能验证试验,试验结果表明负荷车可以实现 0 ~ 150 kN 范围内的牵引负荷无级加

载,加载系统最大响应时间约为 3.6 s,7.7 s 后达到稳定,最大超调量为 1.61%,实际加载牵引力与目标牵引力最大误差为 4.5%。负荷车具备良好、快速、准确的加载响应性能和连续稳定的加载性能,能够对被试车辆牵引性能进行实时监测,完成对农业车辆牵引性能的全面评估。

参 考 文 献

[1] 谢斌,武仲斌,毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 1 – 17.
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Current status and outlook of key technology development of agricultural tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1 – 17. (in Chinese)

[2] 朴奇镭,宋元萍,路志伟. 拖拉机牵引试验时对负荷车的选择[J]. 农机使用与维修,2005(5):10 – 11.

[3] BALBACH F, NACKE E, BOTTINGER S, et al. Method for load-based evaluation of machines using the example of a tractor [C]//75th Conference of LAND, TECHNIK-AgEng, 2017:521 – 528.

[4] ABBASPOUR-GILANDEH Y, RASHIDI-MOHAMMADABAD F. Evaluation of dynamic load equations through continuous measurement of some tractor tractive performance parameters[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2013, 20(3): 222 – 235.

[5] SZENTE M, SZABO I. A dynamometer-vehicle for testing off-road vehicles[C]//Proceedings of the 6th Research and Development Conference of Central and Eastern European Institutes of Agricultural Engineering (CEE AGENG),2009:224 – 230.

[6] CSATÁR A, FENYVESI L, SZENTE M. A device for testing tractors on fields[J]. Power Transmission World, 2014:26 – 30.

[7] Mustang Advanced Engineering. Tractor off road tow dyno[EB/OL]. [2023 – 06 – 02]. <https://www.mustangae.com/products/dynamometers-and-test-stands/tow-dynamometers/tractor-offroad-tow-dyno/>.

[8] 王宁毅,苑伟,陈俊杰,等. FHC – 200 拖拉机负荷车研制[J]. 拖拉机与农用运输车,2017,44(2):52 – 54.
WANG Ningyi, YUAN Wei, CHEN Junjie, et al. Development of FHC – 200 power wagon for tractor[J]. Tractor & Farm Transporter,2017,44(2):52 – 54. (in Chinese)

[9] 周超军,肖成诚,甘瑞,等. 基于交流电力测功机的负荷车结构设计[J]. 专用汽车,2018(3):85 – 89.
ZHOU Chaojun, XIAO Chengcheng, GAN Rui, et al. Mobile dynamometer vehicle structure design based on AC electrical dynamometer[J]. Special Purpose Vehicle,2018(3):85 – 89. (in Chinese)

[10] 张亚. 重型动力负荷车的总体设计[J]. 中国设备工程,2018(6):156 – 159.

[11] 周希军. 汽车试验负荷拖车的研制[D]. 南京:南京理工大学,2009.
ZHOU Xijun. The development of automotive test load trailer[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)

[12] 雷飞东,王天颖,赵云峰. 负荷拖车的新型测功系统[J]. 天津汽车,2005(2):18 – 20.
LEI Feidong, WANG Tianying, ZHAO Yunfeng. New power-measuring system of mobile dynamometer[J]. Tianjin Automotive, 2005(2):18 – 20. (in Chinese)

[13] 赵贵华. 负荷车自动跟踪转向机构的分析与设计[J]. 农业机械学报,1990,21(4):80 – 86.
ZHAO Guihua. The analysis and design of automatic track steering mechanism for F6 power wagon[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1990,21(4):80 – 86. (in Chinese)

[14] 王禹,王玲,宗建华,等. 拖拉机动态载荷加载平台设计与试验[J]. 中国农业科技导报,2022,24(1):91 – 97.
WANG Yu, WANG Ling, ZONG Jianhua, et al. Design and experiment of dynamic loading bench for tractors[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2022,24(1):91 – 97. (in Chinese)

[15] 杜建刚,韩兴昌. 拖拉机、工程机械车辆牵引负荷车工作机理的研究[J]. 农业装备与车辆工程,2020,58(7):57 – 60.
DU Jian'gang, HAN Xingchang. Research on working mechanism of tractor and construction machinery vehicle traction load vehicle[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering,2020,58(7):57 – 60. (in Chinese)

[16] 代冬,陈度,张宾,等. 拖拉机田间作业参数无线检测系统研究[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):568 – 575.
DAI Dong, CHEN Du, ZHANG Bin, et al. Wireless data acquisition system for tractor field operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp. 1):568 – 575. (in Chinese)

[17] 汪珍珍,周俊,杨杭旭,等. 电动拖拉机快速原型平台测控系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):412 – 420.
WANG Zhenzhen, ZHOU Jun, YANG Hangxu, et al. Design and test of measurement and control system for rapid prototype platform used in electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):412 – 420. (in Chinese)

[18] 李忠利,闫祥海,周志立. 无线通信技术在拖拉机牵引性能测试中的应用[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2019, 40(1):78 – 83,9.
LI Zhongli, YAN Xianghai, ZHOU Zhili. Application of wireless communication technology to tractor traction performance testing[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2019,40(1):78 – 83,9. (in Chinese)

[19] 金诚谦,蔡泽宇,杨腾祥. 基于占空比测量的谷物联合收获机产量监测系统研究[J]. 农业机械学报,2022,53(5):125 – 135.
JIN Chengqian, CAI Zeyu, YANG Tengxiang, et al. Design and experiment of yield monitoring system for grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(5):125 – 135. (in Chinese)

- completely decoupled actuated limb[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(19):45–56. (in Chinese)
- [21] ZENG D X, HUANG Z. Type synthesis of the rotational decoupled parallel mechanism based on screw theory[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(4):998–1004.
- [22] 曾达幸,王华明,樊明洲,等. 3 自由度转动广义解耦并联机构构型综合[J]. 机械工程学报,2017,53(3):17–24.
ZENG Daxing, WANG Huaming, FAN Mingzhou, et al. Type synthesis of three degrees of freedom rotational generalized decoupling parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(3):17–24. (in Chinese)
- [23] 朱小蓉,李世杰,周宇东,等. 含双驱动五杆回路的弱耦合并联机构型综合[J]. 农业机械学报,2021,52(10):434–442.
ZHU Xiaorong, LI Shijie, ZHOU Yudong, et al. Structural synthesis of parallel mechanisms containing dual drive five-bar loop [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10):434–442. (in Chinese)
- [24] 朱伟,戴志明,刘晓飞,等. 一种新型弱耦合三平移并联机器人机构及其运动学分析[J]. 中国机械工程,2017,28(13):1561–1566.
ZHU Wei, DAI Zhiming, LIU Xiaofei, et al. A novel weak-coupling three-translation parallel robot mechanisms and its kinematics analysis[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(13):1561–1566. (in Chinese)
- [25] TIAN C, FANG Y, GE Q J. Design and analysis of a partially decoupled generalized parallel mechanism for 3T1R motion[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 140:211–232.
- [26] SHEN H, ZHAO Y, LI J, et al. A novel partially-decoupled translational parallel manipulator with symbolic kinematics, singularity identification and workspace determination[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 164:104388.
- [27] JOSHI S A, TSAI L W. Jacobian analysis of limited-DOF parallel manipulators[J]. Journal of Mechanical Design, 2002, 124(2):254–258.
-

(上接第 401 页)

- [20] 谯建春,刘宇,李明生. 拖拉机牵引阻力传感器设计与试验[J]. 农机化研究,2020,42(2):250–255.
QIAO Jianchun, LIU Yu, LI Mingsheng. Design and test of tractor traction resistance sensor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(2):250–255. (in Chinese)
- [21] 白学峰,纪鸿波,李林,等. 拖拉机牵引性能综合测试系统发展研究[J]. 江苏农机化,2020(2):22–25.
- [22] 熊祖品,张亚,谢亚玲. 交流电力测功机在负荷拖车上的应用[J]. 专用汽车,2014(2):72–73,77.
XIONG Zupin, ZHANG Ya, XIE Yaling. Application of AC power dynamometer on load trailer[J]. Special Purpose Vehicle, 2014(2):72–73,77. (in Chinese)
- [23] 李忠利,闫祥海,周志立. 负荷车电涡流缓速器加载控制系统研究[J]. 西安交通大学学报,2018,52(3):126–131.
LI Zhongli, YAN Xianghai, ZHOU Zhili. Study on the eddy current retarder loading control system of loading vehicle[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2018,52(3):126–131. (in Chinese)
- [24] 王天颖,项昌乐,李明喜,等. 负荷车试验系统的模糊自适应 PID 控制[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007(6):997–1000.
WANG Tianying, XIANG Changle, LI Mingxi, et al. Fuzzy auto tuning PID control strategy for the test system of the mobile dynamometer vehicle[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2007(6):997–1000. (in Chinese)
- [25] 张锦辉,李彦明,齐文超,等. 基于神经网络 PID 的丘陵山地拖拉机姿态同步控制系统[J]. 农业机械学报,2020, 51(12):356–366.
ZHANG Jinhui, LI Yanming, QI Wenchao, et al. Synchronous control system of tractor attitude in hills and mountains based on neural network PID [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12):356–366. (in Chinese)
- [26] 魏宏飞,石新龙. 基于模糊 PID 的农用电动汽车直线开关磁阻电机控制[J]. 农机化研究,2022,44(10):244–247,252.
WEI Hongfei, SHI Xinlong. Control of linear switched reluctance motor for agricultural electric vehicle based on fuzzy PID[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2022,44(10):244–247,252. (in Chinese)
- [27] 李涛,安长江,康璟. 轮式拖拉机牵引试验方法研究[J]. 农机质量与监督,2018(3):26–28.
- [28] 农业拖拉机试验规程第 9 部分:牵引功率试验:GB/T 3871.9—2006[S]. 2006.