

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2019.04.009

电动拖拉机双电机驱动单元控制系统设计与实验^①

谢 斌¹, 张 楠¹, 李明生², 武仲斌¹, 宋正河¹

1. 中国农业大学 现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083;

2. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 针对电动拖拉机双电机驱动系统的模式管理需求, 设计了一种双电机驱动单元的控制系統及其控制器 DMU(Drive Manage Unit). 基于 ISO 11783 协议制定了整车控制網路结构, 并以此确定了 DMU 子 CAN 总线各节点, 设计各节点传输报文 ID 和 PGN. 在驱动单元中, 通过控制驱动箱齿轮啮合状态和电磁离合器通断电来实现双电机动力分离和耦合, 完成工作模式配置. DMU 采用 MC9S12XEP100 为核心, 完成硬件电路设计和软件编程. 搭建双电机驱动系统实验平台, 进行了犁耕作业、旋耕作业和子 CAN 总线数据分析实验. 实验结果表明, 驱动管理单元可以实现控制电机 1 和电机 2 的转速转矩模式, 电机 1 在 46.5 N·m 恒转矩模式下, 随转速变化的最大偏差为 0.7 N·m, 符合犁耕作业要求; 电机 2 收到 540 r/min 指令后, 随负载变化输出转速范围在 540±62 r/min, 满足 PTO 在恒转速下工作; 总线上传输信息正确.

关键词: 双电机驱动; 电动拖拉机; ISO 11783; CAN 总线

中图分类号: S219.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2019)04-0064-08

农业机械化的快速发展, 使得农机产品被大量应用, 引起的能源消耗也逐渐成为农机发展所面临的关键问题. 当前绿色、节能和环保成为农业机械发展的目标, 所以大力开展电动农业机械研究, 更符合农业现代化发展的需要^[1].

高性能电动拖拉机驱动系统作为电动拖拉机的关键部分, 已经有了一定的研究基础. 高辉松等基于串励直流电动机驱动系统的电动拖拉机, 对电驱动系统驱动特性进行了研究, 并进行了模拟作业实验研究^[2]. 卢毅、李旭光等对温室电动拖拉机进行研究, 确定了一种适用于双电源电动拖拉机的电力驱动系统方案并进行了相关性能测试^[3-4]. 周志立、徐立友等进行了电动拖拉机和串联式混合动力拖拉机驱动系统设计, 以相关拖拉机为研究对象, 设计了驱动系统主要参数^[5-6]. 还有很多学者对电动拖拉机驱动系统及其控制系统进行了研究^[7-9].

综上所述, 针对电动拖拉机双电机驱动系统还需进行更深一步分析研究, 双电机驱动电动拖拉机可以兼顾驱动车轮和动力输出轴运转(Power Take-off, 简称“PTO”), 具有一定的优势. 所以本文针对双电机驱动管理单元(Driver Manage Unit, 简称“DMU”)控制系统进行设计与研究.

1 双电机驱动系统总体方案

1.1 双电机驱动形式

电动车辆驱动控制系统主要分为单动力源驱动和多动力源驱动两种形式, 多动力源驱动又主要分为耦

① 收稿日期: 2018-07-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701001).

作者简介: 谢 斌(1973-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事车辆电子控制及智能化技术研究.

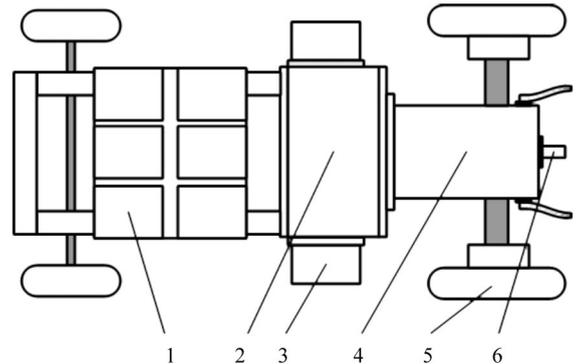
合驱动形式和分布驱动形式^[10-11]。单动力源往往采用驱动电机代替发动机形式,沿用传统传动装置,传动方式简单可靠,但当需求功率较大时,驱动电机的体积质量变大,布置较困难;多动力源驱动系统可以单独输出动力,也可以多动力源协同工作,多动力源在效率最优控制情况下达到更好的节能效果,且便于在整车上布置。

根据电动拖拉机行驶条件及工作形式,本文提出一种双电机驱动系统,两电机采用对称布置形式,该驱动系统主要由两个功率等级相同的永磁同步电机作为动力源,电机动力经过驱动箱分配后再传递至变速器和差速器,最后驱动拖拉机行驶和 PTO 工作,驱动系统布置方案如图 1 所示。

驱动箱中进行双电机模式分配,通过电磁离合器的结合,可实现双电机动力的耦合^[12],由高低挡调整拖拉机行驶速度。双电机可以单独运行,分别驱动拖拉机行驶和 PTO 工作,也可以在犁耕作业或(类)犁耕作业时,两电机同时输出动力。单独启动 PTO 时,电机 1 与电机 2 可以单独启动,也能同时驱动 PTO。

1.2 控制系统网络方案

CAN 总线技术的出现大大减少了整车布线时线束混乱的现象,由于其保证了报文传输的可靠性、准确性和实时性,被广泛应用于工业领域^[13]。CAN 总线技术结合国际标准应用较为广泛,其中 ISO 11783 是适用于农机行业的总线标准,该协议详细定义了拖拉机电子控制单元、动力传动系消息和数据通信通用标准等通信规范^[14]。随着 ISO 11783 协议的不断推广应用,基于该协议构建整车网络节点已逐渐成为规范,根据 ISO 11783 协议设计了一种双电机电动拖拉机 CAN 总线网络结构,如图 2 所示^[15-16]。



1. 动力电池; 2. 驱动箱; 3. 驱动电机; 4. 变速箱与差速器;
5. 驱动轮; 6. 动力输出轴。

图 1 双电机驱动结构

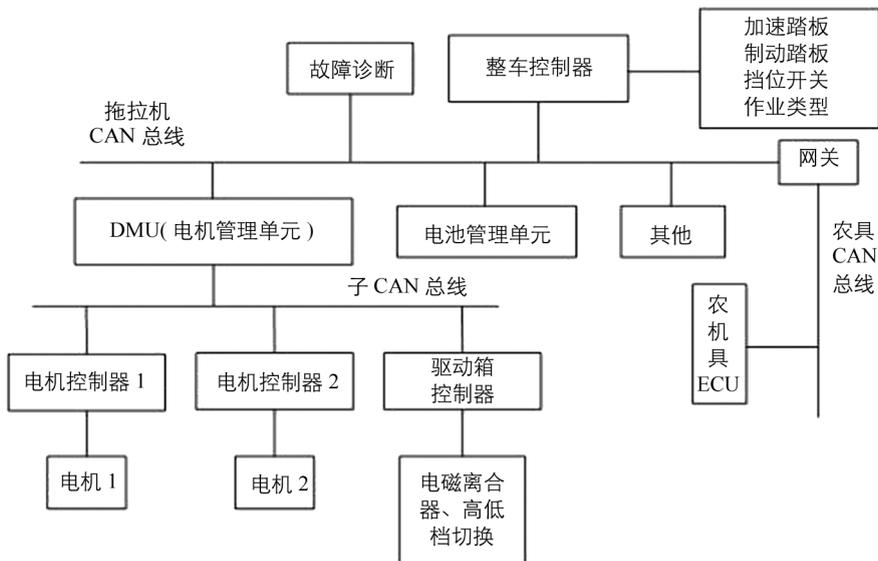


图 2 CAN 总线网络结构

电动拖拉机整车网络结构中,整车控制器负责实现整车协调控制,采集加速踏板信号、制动踏板信号、挡位开关信号和作业类型信号等,并根据工作情况向 DMU 发送控制命令。DMU 挂接到拖拉机 CAN 总线上,接收整车控制器发送指令的同时,还需将子 CAN 总线上各节点状态反馈到拖拉机 CAN 总线。

除了拖拉机 CAN 总线和农具 CAN 总线外,为了准确控制双电机,建立总线网络结构中子 CAN 总线

网络, 子 CAN 总线由两个电机控制器和驱动箱控制器 3 个节点组成, DMU 直接与电机控制器和驱动箱控制器通信。

2 控制系统软硬件设计

双电机驱动系统作为拖拉机 CAN 总线上一个节点, 要求其可以接收整车控制器发送的指令, 还能实时向总线上传输信息^[17]。在子 CAN 总线上, 驱动系统要向电机控制器和驱动箱控制器发送指令, 接收电机状态、控制器状态和驱动箱状态等数据。

2.1 硬件设计

双电机驱动管理单元要满足拖拉机 CAN 总线、子 CAN 总线和调试监测要求, 至少需要 3 路 CAN 模块。控制器核心采用飞思卡尔 MC9S12XEP100 单片机, 该单片机有 5 个可以独立配置 CAN 模块, 通过电路设计配置完成 CAN 模块和电源模块等基本部分。其中 CAN 模块采用 TJA1050T 作为收发器, 加入 ZJYS81R5 共模扼流圈消除外界电磁干扰, CAN 模块电路如图 3 所示, 制作的 DMU 实物如图 4 所示。

换挡电机选用伺服类步进电机, 该电机可在开环和闭环两种工作模式下运行, 在闭环控制模式下, 最大输出功率为 300 W, 对应转速范围 500~1 000 r/min; 开环模式下, 电机只能输出功率的 50% 左右, 约为 170 W。

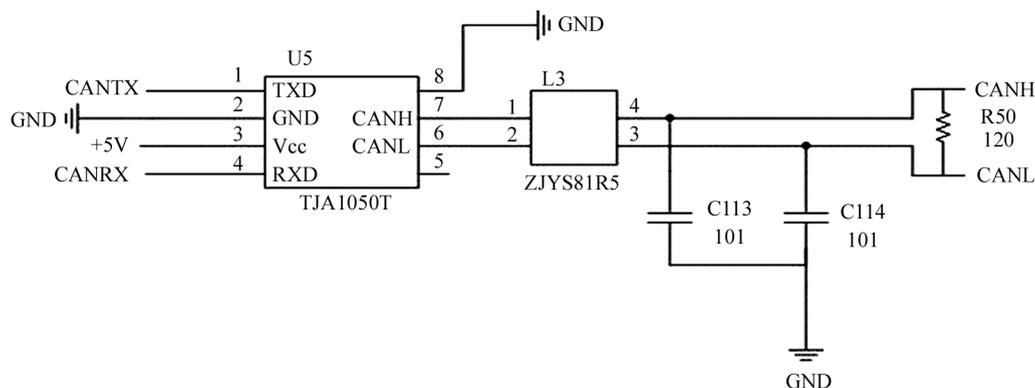


图 3 CAN 模块电路

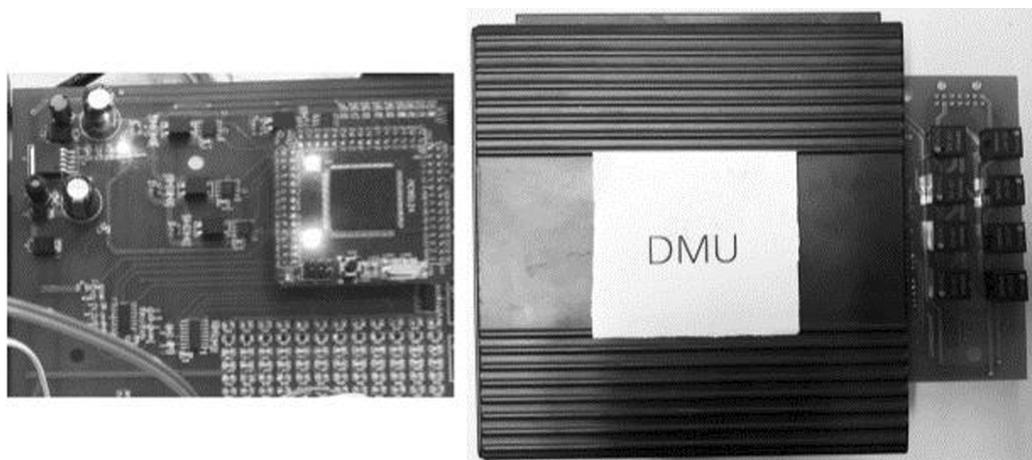


图 4 DMU 实物图

电机控制器与永磁同步电机配套使用, 控制器外部有两路 CAN 模块接口, 一路可以与 DMU 通讯, 一路可以作为控制器诊断接口。电机控制器基本参数为额定输入电压 338 V, 额定电流 140 A。电机的主要参数如表 1 所示。

表 1 电机主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
电机类型	永磁同步电机	最大扭矩/(N·m)	265
额定电压/V	235	额定扭矩/(N·m)	80
额定电流/A	70	最高转速/(r·min ⁻¹)	6 000
峰值功率/kW	50	额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
额定功率/kW	25	峰值电流/A	280

2.2 软件设计

2.2.1 节点信息

拖拉机网络结构中,驱动管理单元控制系统接收整车控制器信息后,需要向子 CAN 总线发送数据,实现对电机和驱动箱的控制,根据需求共向子 CAN 总线发送 3 组数据.电机控制器要能实时向子 CAN 总线发送两电机和控制器的当前状态,每个电机控制器共发送 3 组数据;驱动箱控制器要能发送电磁离合器和高低挡状态信息,需要发送一组数据. DMU 管理的子 CAN 总线共有 3 个节点,每个节点均要向子 CAN 线发送数据,并接受传输的数据.设计 4 个控制器的 ID,确定优先级及 PDU 格式.报文 ID 设计如表 2 所示.

表 2 各节点信息

节点	节点 ID	节点信息
DMU	0x0CF102/03/04A7	电机目标转速、转矩;工作模式
电机控制器 1	0x18F11F/20/21F0	控制器母线电压、电流;当前转速;电机及控制器温度
电机控制器 2	0x18F222/23/24F1	控制器母线电压、电流;当前转速;电机及控制器温度
驱动箱控制器	0x18F125F2	高低挡位置和电磁离合器状态等

2.2.2 Code warrior 环境编程

MC9S12XEP100 单片机在 Code warrior 环境下选择 C 语言编写程序.控制函数包括 CAN 总线初始化用于设置总线波特率, CAN_Send() 用于发送数据, interrupt CAN_Receive() 用于总线中断接收. CAN 初始化函数在主函数中执行,主函数中加入 for() 循环函数,用于不断采集子 CAN 总线上各节点发送的状态信息,控制程序结构如图 5 所示.

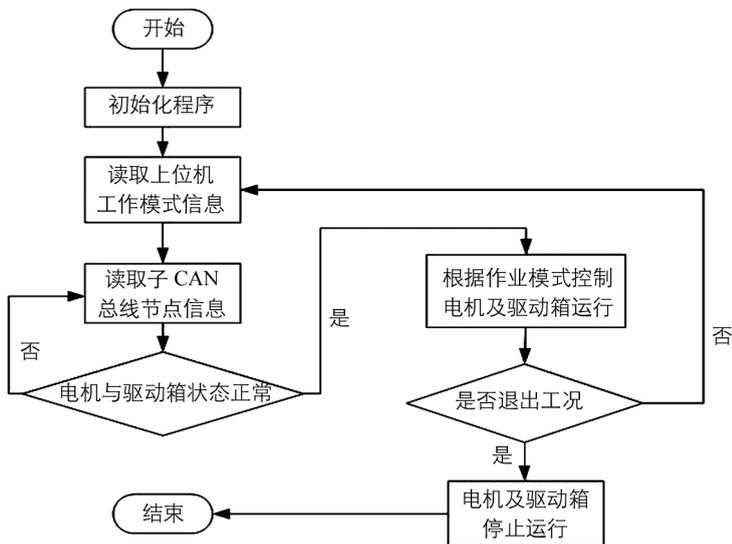


图 5 控制程序结构

3 作业模式控制流程

不同作业模式下,双电机和驱动

箱的工作状态不同.根据作业模式将双电机驱动系统主要分为启动、运输、旋耕作业、犁耕作业和原地作业 5 种模式,限于篇幅,本文主要分析其中两种作业模式.

3.1 旋耕作业

旋耕工作模式下,拖拉机行驶且 PTO 工作.两电机主要分 3 种情况运行,电机 1 单独驱动拖拉机完成旋耕工作,电磁离合器结合,电机 1 动力经驱动箱传至驱动轮和 PTO;电机 1 和电机 2 同时启动,电磁离

合器不结合, 电机 1 单独驱动拖拉机行驶, 电机 2 驱动 PTO 运转; 电机 1 与电机 2 耦合工作, 电磁离合器结合, 动力经驱动箱耦合后, 驱动拖拉机行驶和 PTO 工作, 工作状态如表 3 所示.

表 3 旋耕作业下各部件状态

状态	电机 1	电机 2	电磁离合器
电机 1 单独运行	●	○	●
电机 1, 2 单独运行	●	●	○
电机 1, 2 耦合运行	●	●	●

注: ● 表示启动或结合, ○ 表示未启动或结合.

3.2 犁耕作业

犁耕模式下, PTO 不参与工作, 电机 2 不启动, 电磁离合器不结合, 由电机 1 单独驱动拖拉机作业行驶. 单电机单独运行驱动拖拉机作业时, 为了防止电机 1 出现故障导致拖拉机无法行驶^[18], 要求驱动单元收到电机 1 故障指令后, 启动电机 2, 由电机 2 在一定时间内驱动拖拉机继续行驶, 此时电机 2 启动, 电磁离合器结合, 动力在传递到驱动轮的同时, PTO 也处于工作状态. 犁耕作业下控制流程如图 6 所示.

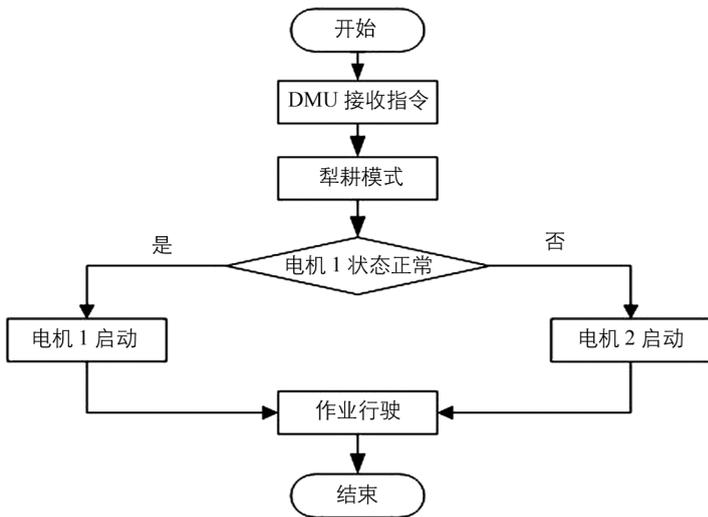


图 6 犁耕作业控制流程

4 搭建实验台

驱动管理单元设计完成后, 搭建调试实验台, 实验方案如图 7 所示. 实验台搭建用于对驱动管理单元进行初步测试, 验证其控制性能. 实验台主要由电控系统和机械系统组成^[19], 其中虚线表示信号连接, 粗实线表示机械连接, 实验台的搭建要保证电机输出轴的同轴度, 所以机械部分主要放置在调平好了的基座上, 放置有永磁同步电机、转矩传感器和鼓式制动器; 电控系统主要有 NI 采集卡、CAN 卡. 转矩转速传感器数据采集程序基于 LabVIEW 实现, 电机、电机控制器和驱动箱控制器数据通过上位机软件采集, 各实物如图 8 所示.

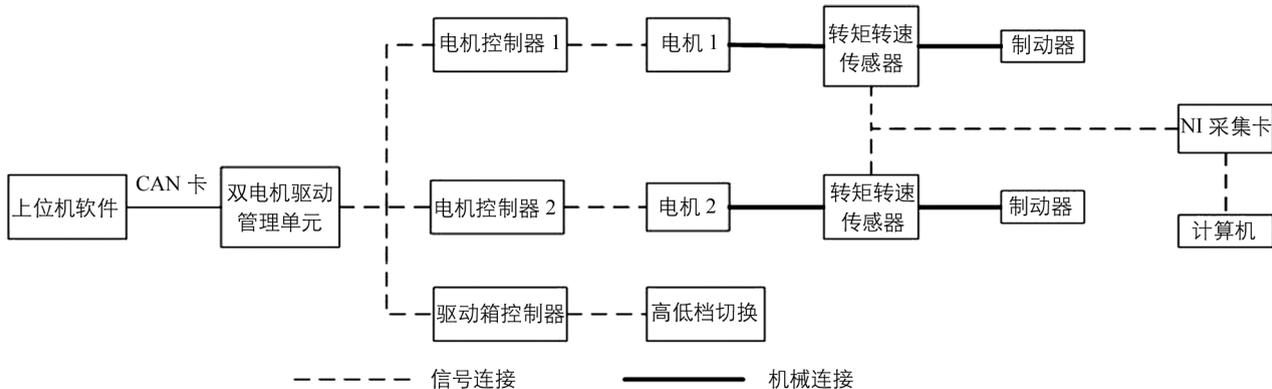


图 7 调试实验方案

5 实验结果与分析

5.1 犁耕作业

上位机模拟整车控制器发送犁耕模式指令, 驱动管理单元向电机 1 发送数据, 主要包括电机目标转矩、目标转速、当前作业模式和高压上电指令. 电机 1 开始运行, 通过制动器模拟犁耕工况下加载, 通过 NI 采集卡采集转矩转速传感器数据, 电机 1 运行情况如图 9 所示. 随着电机 1 转速的变化, 电机保持输出转矩 $46.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 并在小范围内波动, 转矩最大偏差 $0.7 \text{ N} \cdot \text{m}$, 可以实现驱动系统平稳运行.

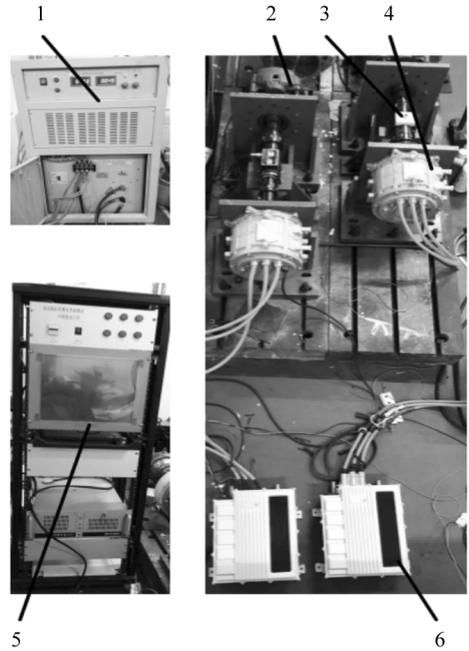
5.2 旋耕作业

驱动管理单元接收整车控制器旋耕作业模式指令后, 向电机 2 发送目标转速命令. 驱动管理单元发送目标转速 540 r/min , 通过制动器模拟旋耕作业加载情况, 电机 2 转速随转矩变化曲线如图 10 所示. 转矩在 $17.4 \sim 52.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 变化, 电机 2 在 540 r/min 上下变化, 存在最大负偏差为 62 r/min , 符合驱动管理单元控制要求.

5.3 子 CAN 总线数据分析

实验台数据采集分为两类, 一类是通过传感器采集两电机实时转矩转速, 一类是 CAN 总线上传的各节点数据, 通过在子 CAN 总线中加入监测点, 分析总线上传的数据. 电机 1 转速输出情况下, 总线上采集到电机 1 和其控制器温度变化曲线如图 11 所示.

根据设计的报文 ID 和节点信息, 得到一帧报文所需最大位数为 128 bit , CAN 总线波特率为 $250\,000 \text{ bit/s}$, 计算得出在 1 s 内总线支持发送的最大报文数为 $1\,953$ 条, 根据报文发送周期计算子 CAN 总线 1 s 内实际发送的报文数为 490 条, 可得出子 CAN 总线的负载率为 25.1% .



1. 电源柜; 2. 制动器; 3. 转矩转速传感器; 4. 永磁同步电机; 5. 测控柜; 6. 电机控制器.

图 8 实物组成

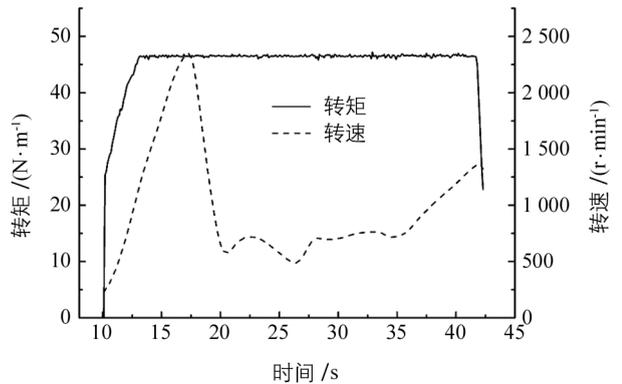


图 9 电机 1 运行情况

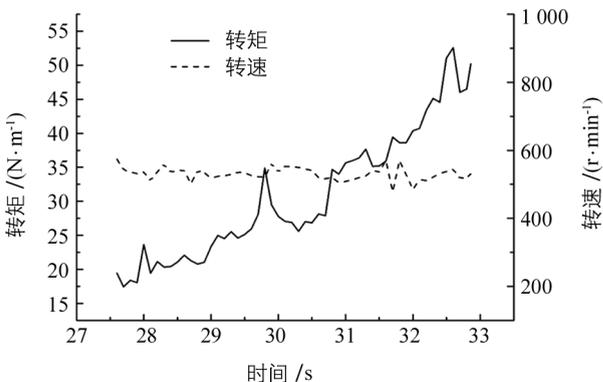


图 10 电机 2 随转矩变化输出转速曲线

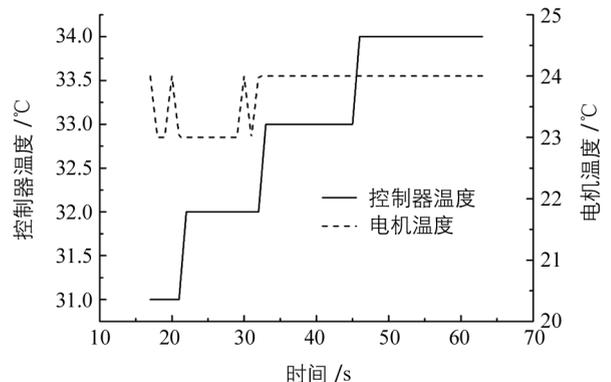


图 11 电机 1 和其控制器温度曲线

6 结 论

基于双电机驱动电动拖拉机提出驱动管理单元网络结构总体方案,设计各个节点 ID 及 PGN,制定拖拉机启动、运输、旋耕、犁耕和原地作业 5 种模式,提出两电机和驱动箱控制器运行控制流程,搭建驱动管理单元实验平台进行实验测试.通过监测总线上温度等数据变化,验证了总线通信正常;犁耕工况下,电机 1 稳定工作在恒转矩状态,输出 $46.5 \text{ N} \cdot \text{m}$,符合作业需求;旋耕作业工况,电机 2 转速保持在 540 r/min 上下波动,满足 PTO 要求.本文提出的控制系统方案还需进行实车验证,并结合电动拖拉机整车能量管理优化控制策略.

参考文献:

- [1] 张铁民,闫国琦,温利利,等.我国电动力农业机械发展现状与趋势[J].农机化研究,2012,34(4):236-240.
- [2] 高辉松.电动拖拉机驱动系统研究[D].南京:南京农业大学,2008.
- [3] 卢毅.温室电动拖拉机主要部件的研究与设计[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [4] 李旭光.温室双电源电动拖拉机的研制与试验[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [5] 周志立,夏先文,徐立友.电动拖拉机驱动系统设计[J].河南科技大学学报(自然科学版),2015,36(5):78-81.
- [6] 徐立友,刘孟楠,周志立.串联式混合动力拖拉机驱动系统设计[J].农业工程学报,2014,30(9):11-18.
- [7] 邓晓亭.混合动力拖拉机动力特性的研究[D].南京:南京农业大学,2012.
- [8] 毛鹏军,殷珊珊,闵俊杰,等.电动拖拉机控制器研究进展[J].农业工程,2017,7(1):11-14.
- [9] 商高高,张建舟,张家俊.履带式电动拖拉机驱动系统控制策略的研究[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2017,31(11):32-38.
- [10] 邱斌斌,朱绍鹏,马浩军,等.电动车辆驱动控制系统仿真测试平台设计[J].浙江大学学报(工学版),2015,49(6):1154-1159.
- [11] ZHANG S, XIONG R, ZHANG C N. Pontryagin's Minimum Principle-Based Power Management of a Dual-Motor-Driven Electric bus [J]. Applied Energy, 2015, 159: 370-380.
- [12] WU X H, ZHANG C N, WANG Z F, et al. System Matching and Simulation of Dual-Motor Drive Coupling for Electric Vehicles [C]. International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. IEEE, 2011: 2699-2702.
- [13] 韩成浩,高晓红.CAN总线技术及其应用[J].制造业自动化,2010,32(2):146-149.
- [14] 闫祥海,周志立,徐立友,等.拖拉机CAN通信技术研究与试验[J].河南科技大学学报(自然科学版),2016,37(4):71-75.
- [15] CAO Q, ZHOU Z, ZHANG M. The Design of Communication Nodes in the Tractor Control Network Based on ISO11783 Protocol [C]. 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2010: 772-775.
- [16] 张里,张劼.面向电动汽车充电站的智能主动型均衡控制研究[J].西南大学学报(自然科学版),2016,38(4):150-157.
- [17] 周建军,郑文刚,李素,等.基于ISO 11783的拖拉机导航控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(4):184-188.
- [18] 蒋盛飞,王哲,孙晨乐,等.电动公交客车双电机驱动系统设计匹配及仿真研究[J].汽车技术,2016(6):28-31,44.
- [19] 谢斌,张超,陈硕,等.双轮驱动电动拖拉机传动性能研究[J].农业机械学报,2015,46(6):8-13.

Design and Experiment of an Electric Tractor Dual Motor Drive Unit Control System

XIE Bin¹, ZHANG Nan¹, LI Ming-sheng²,
WU Zhong-bin¹, SONG Zheng-he¹

1. *Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment,*

China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. *School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China*

Abstract: In view of the mode management requirements for the dual motor electric tractor drive system, a dual motor drive unit control system and its controller DMU (Drive Manage Unit) are designed in this paper. Based on the ISO 11783 protocol, the vehicle control network structure is established; in addition, the nodes of the DMU sub CAN bus are determined. The transmission messages ID and PGN are designed at each node. The two-motor power separation and coupling are realized by controlling the drive box, and the working mode configuration is completed. DMU uses MC9S12XEP100 as the core to complete the hardware circuit design and software programming. An experimental platform of the dual motor drive system is built, and the plowing, rotary tillage and sub CAN bus data analysis experiments are carried out. The experimental results show that the drive management unit can control the speed and torque mode of motor A and motor B. In the constant torque mode of $46.5 \text{ N} \cdot \text{m}$, the maximum deviation of motor A with the speed change is $0.7 \text{ N} \cdot \text{m}$, which meets the requirements of plowing operation. Motor B receives the 540 r/min command, and it fluctuates in the range of $540 \pm 62 \text{ r/min}$ with the load change, which satisfies the PTO working at constant speed. Transmission of information on the bus is correct.

Key words: dual motor drive; electric tractor; ISO 11783; CAN bus

责任编辑 汤振全

