

联合收获机 CAN 总线架构设计与试验

蒋建东¹ 孙远方¹ 金 骁¹ 周 倩¹ 毛智琳²

(1. 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014;

2. 星光农机股份有限公司, 湖州 313017)

摘要: 针对国内外农机装备智能化发展及设备物联远程网控需求, 基于 ISO 11783 系列标准, 提出并设计了联合收获机智能 CAN 总线方案及其应用系统。根据联合收获机的作业特点和智能控制需求, 建立了由动力 CAN 总线、设备管理 CAN 总线、专用设备 CAN 总线 1 和专用设备 CAN 总线 2 组成的模块化、可扩展的智能农机 CAN 总线网络结构。基于 ISO 11783 CAN 总线应用层协议标准, 制定了智能化联合收获机远程网控通信协议。最后, 进行了联合收获机 CAN 总线应用系统网络负载和实时性的通信试验及工程应用试验验证。试验结果表明, 在 500 kb/s 波特率下, 所有总线的负载率均小于 30%, 数据在 3 层 CAN 总线之间传输总延时小于 1 ms, 满足联合收获机智能远程网控 CAN 总线系统的设计要求。

关键词: 联合收获机; CAN 总线; 架构设计; 通信试验

中图分类号: S225.3; TP273.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0093-07

CAN Bus Architecture Design and Test of Combine Harvester

JIANG Jiandong¹ SUN Yuanfang¹ JIN Xiao¹ ZHOU Qian¹ MAO Zhilin²

(1. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China

2. Thinker Agricultural Machinery Co., Ltd., Huzhou 313017, China)

Abstract: Aiming at the intelligent development of agricultural machinery and equipment at home and abroad and the remote network control requirements of equipment and materials, based on ISO 11783 agricultural machine CAN bus standard, the intelligent harvesting CAN bus program and its application system were proposed and designed. According to the operation characteristics and intelligent control requirements of the combine harvester, a modular and expandable intelligent agricultural CAN bus network structure, consisting of a power CAN bus, a device management CAN bus, a dedicated device CAN bus 1 and a dedicated device CAN bus 2 was established. Based on the ISO 11783 CAN bus application layer protocol standard, an intelligent remote harvester remote network control communication protocol was developed. Finally, the network load and real-time communication experiment of CAN bus application system of intelligent combine harvester and the engineering application experiment were carried out. The results showed that at the baud rate of 500 kb/s, the load of all buses was less than 30%, and the data transmission delay between the three layers CAN buses was less than 1ms, which fully met the design requirements of the intelligent remote network-controlled CAN bus system of combine harvester. In engineering applications, it also met the automatic navigation communication requirements of harvesters.

Key words: combine harvester; CAN bus; architecture design; communication experiment

0 引言

谷物联合收获机是一种复式农业作业机械,可

以实现收获、脱粒、清选、储粮、卸粮等多种作业功能^[1]。随着电子控制单元的不断引入,为了提高信号利用率,要求大量数据在不同的电子单元中共享,

传统的电气系统大多采用点对点的单一通信方式,造成布线系统庞大^[1-2],而 CAN 总线是一种可靠的实时控制网络,近年来广泛应用于农业机械上。

目前,国内农机 CAN 总线系统的研究主要针对某一特定功能进行开发^[3-4],尚处于起步阶段。魏新华等^[5]将 CAN 总线技术用于收获机的故障检测,实现各个模块的协调工作和信息共享。张美娜等^[6]采用 CAN 总线设计了联合收获机导航数据采集系统,可以获得收获机实时的位置、姿态等导航信息。上述研究大都针对传统收获机,将 CAN 总线作为实现某个功能的工具,并未从本质上优化整个收获机的控制系统。国外对大型作业农机已有成熟的 CAN 总线系统^[7-8]。HOFSTEE 等^[9]提出了一种用于农业喷洒作业装备的 CAN 总线系统解决方案。ISO 11783 系列标准为拖拉机和农业作业设备提供了全面的网络协议,包括牵引拖拉机和挂载作业机具^[10]。然而,对联合收获机的研究稍稍落后,尚未形成行业标准,也没有系统的解决方案。另外,目前农业机械物联网控和附属设施的发展也相对滞后。因此,设计联合收获机 CAN 总线系统时需考虑未来农机的发展趋势,附属设施、信息设备等也要作为系统的一部分。

本文以谷物联合收获机为研究对象,在现有子系统的基础上,考虑到未来信息化的发展需求,设计联合收获机网络结构和通信协议,并通过试验验证系统的可靠性。

1 CAN 总线系统总体设计

1.1 系统网络结构

为了满足联合收获机的自动导航需求,底层动力传动对通信的实时性要求较高。联合收获机作业系统复杂,需要大量的传感器和执行器来满足作业精细化需求。考虑到未来农机信息化和舒适化的发展方向,还需考虑联合收获机附属设备和远程交互通信需求。

为了满足上述联合收获机通信需求,设计了由 4 条 CAN 总线构成的控制网络,如图 1 所示。联合收获机测控系统由动力 CAN 总线、设备管理 CAN 总线和 2 条专用设备 CAN 总线构成,每一条 CAN 总线上挂接数个控制器节点负责收获机特定子系统的测控功能。其中,动力 CAN 总线负责收获机的底盘、驱动等底层设备通信。设备管理 CAN 总线有收获机控制中心、附属设备和远程交互模块等节点。在联合收获机上,专用设备 CAN 总线被划分为 2 条,分别完成切割输送部分和脱粒卸粮部分的数据采集和控制。不同总线之间通过网关连接^[11-12],

网关有选择地将一条总线上的数据传输到另一条总线。网络系统如图 2 所示。

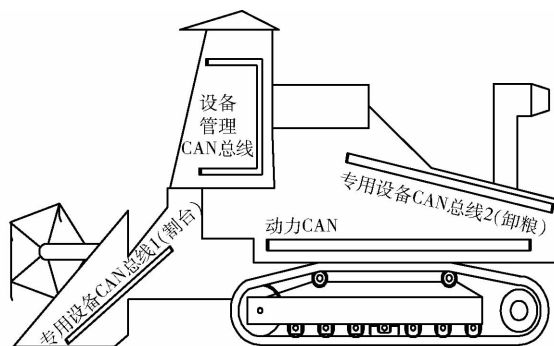


图 1 CAN 总线网络结构示意图

Fig. 1 Network structure diagram of CAN bus

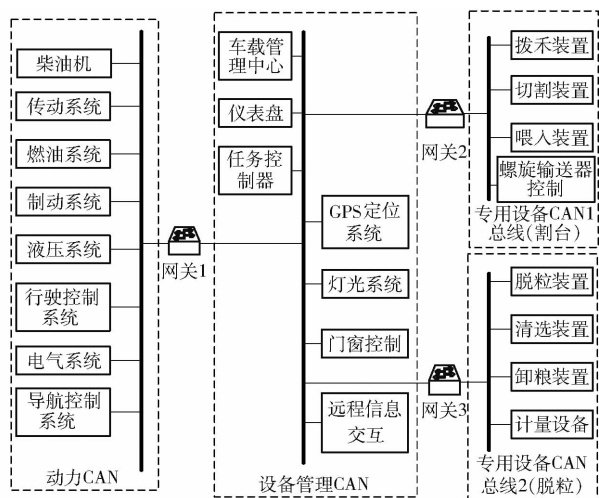


图 2 联合收获机 CAN 总线网络系统

Fig. 2 CAN bus network system of combine harvester

1.2 CAN 总线通信协议设计指标

由于联合收获机工作环境复杂多样,各个子系统之间需要相互协调工作,才能满足农业精细化生产的要求。为了使联合收获机控制系统满足以上要求,CAN 总线的协议设计应达到以下指标^[13]:①遵循 ISO 11783 国际标准中规定的 CAN 总线数据链路层规范,参考该标准针对拖拉机应用层协议的建议,设计符合联合收获机的应用层协议。②应用层协议应覆盖收获机的各个子系统所有部件,为各个子系统的所有部件的信息分配数据帧标识符。通信协议的标识符资源应至少预留 50% 用于扩展定义。③设计要求总线处于高负载时(数据发送周期为 20 ms),总线负载率应小于 50%,且满足通信实时性要求。

2 基于 ISO 11783 的通信协议设计

2.1 数据帧格式

ISO 11783 以 CAN 2.0B 为基础,通过 CAN 总线进行数据通信。它的数据链路层定义了信息帧的

数据结构、编码规则,包括通信优先权、传输方式、通信要求、总线仲裁、错误检测及处理。它重新分组定

义了 CAN 总线扩展帧的 29 位标识符^[14],报文的标识符可以描述报文的全部特征,如图 3 所示。

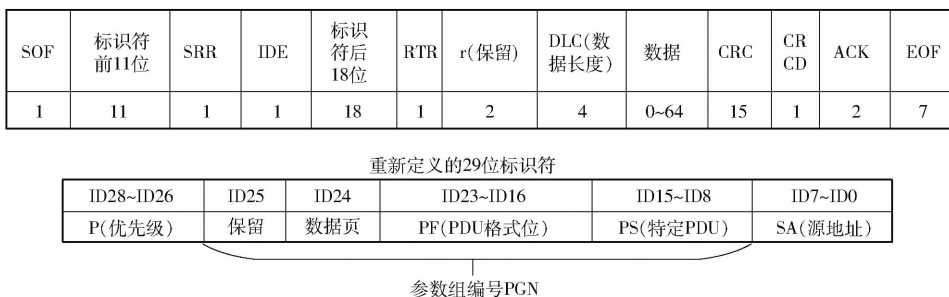


图 3 数据帧报文格式

Fig. 3 Message format of data frame

在 29 位标识符中,优先级位、保留位、数据页位、协议数据单元(Protocol data unit, PDU)格式位和特定 PDU 构成报文的参数组编号(Parameter group numbers, PGN)。PGN 除确定或标识命令、数据、某些请求、确认和否定之外,还可以确定或标识要求多个 CAN 数据帧通信的信息,若消息长度大于 8 字节,必须将消息分组封装发送。PS(PDU specific)的定义取决于 PF(PDU format),若 PF 段的值小于 240,PS 是目标地址;若 PF 段的值在 240 ~ 255 之间,PS 是参数组扩展值。在 ISO 11783 标准中可用参数组的总数目为: $[240 + (16 \times 256)] \times 2 = 8\ 672$ 。

总之,参数组编号 PGN 是 CAN 总线系统中报文的唯一标识。设计 CAN 总线通信协议的一个主要内容是为不同的报文分配其特有的参数组编号。

2.2 参数组编号定义

根据联合收获机的数据需求,将联合收获机上的 CAN 总线数据分为 10 个部分:GPS 位置信息、行驶控制系统、网络信息系统、柴油机引擎、切割输送、脱粒卸粮、环境和灯光、液压系统、电气系统和传动系统。各个数据区的参数组编号(PGN)以及可定义的报文数如表 1 所示^[15]。ISO 11783 标准中规定有 8 672 个参数组可用,在保证每个数据块有充足空间的前提下,仍具有 80% 的扩展定义空间。

2.3 应用层协议

ISO 11783 标准中规定了对每个参数都应该确定它的数据类型。数据类型可以是命令数据或测量数据。命令数据是指发送命令的传输节点将某个参数设为某一个指定的状态。命令数据有发动机刹车启动、割台控制、速度控制等。测量值类型数据表示了传输节点对某个参数测量后得到的当前值,这样可以确定已定义参数的状态。属于测量值类型的数据有位置信息、发动机转速以及当前

行驶速度等。

表 1 CAN 系统参数组编号定义

Tab. 1 PGN definition of CAN system

| 数据块名称 | 起始 PGN | 结束 PGN | 可定义 报文数 |
|----------|------------|------------|------------|
| GPS 位置信息 | F320/62240 | F351/62289 | 50 |
| 行驶、制动系统 | F258/62040 | F31F/62239 | 200 |
| 网络信息系统 | F1F4/61940 | F257/62039 | 100 |
| 柴油机 | F000/61440 | F1F3/61939 | 500 |
| 脱粒卸粮 | F500/62720 | F5FF/62975 | 256 |
| 切割输送 | F600/62976 | F6FF/63231 | 256 |
| 环境、门窗和灯光 | F352/62290 | F383/62339 | 50 |
| 液压系统 | F384/62340 | F3E7/62439 | 100 |
| 电气系统 | F3E8/62240 | F44B/62539 | 100 |
| 传动系统 | F44C/62540 | F4AF/62639 | 100 |
| 总计 | | | 1 712 |

参考标准制定一个表示联合收获机行驶状态的报文^[10],该报文的 8 个字节的数据用于描述联合收获机的运行状态。其中,字节 1、2 表示行驶速度,一个比特代表 1 m/s,解析上限 64 255 m/s。字节 3~6 表示行驶距离,一个比特代表 1 m,可以表示 0 ~ 4 211 081 215 m。字节 8 的前两个比特表示行驶方向,01 表示前进,00 表示后退,其余的值认为错误或无效。剩余未定义的位即为保留,见表 2。

表 2 数据帧示例

Tab. 2 Examples of data frames

| 速度/(m·s ⁻¹) | 里程/m | 方向 |
|-------------------------|-------------------|-------|
| 0 ~ 64 255 | 0 ~ 4 211 081 215 | 前进/后退 |
| 字节 1~2 | 字节 3~6 | 字节 8 |

CAN 总线系统中,命令数据根据联合收获机实际的作业需求,不定期发送。测量数据是各个 ECU 周期性采集的收获机的运行状态和作业状态参数。参考 ISO 11783 标准和文献[9]中对数据采集周期的定义,本文定义了 2 种数据采集周期,50 ms(典型工作状态)和 20 ms(高负载工作状态)。

3 试验

3.1 试验系统

建立了 CAN 总线试验平台,包括动力 CAN 总线、设备管理 CAN 总线和专用设备 CAN 总线,如图 4 所示。由于 2 条专用设备 CAN 总线在网络结构和应用逻辑上有相似性,因此,试验系统只有 1 条专用设备 CAN 总线。该试验平台共有 20 个节点,其中动力 CAN 总线上有 8 个节点,专用设备 CAN 总线上有 4 个节点,设备管理 CAN 总线上有 8 个节点,2 个网关将 3 条 CAN 总线连接起来。模拟网关 1 连接动力 CAN 总线和设备管理 CAN 总线,模拟网关 2 连接专用设备 CAN 总线和设备管理 CAN 总线。

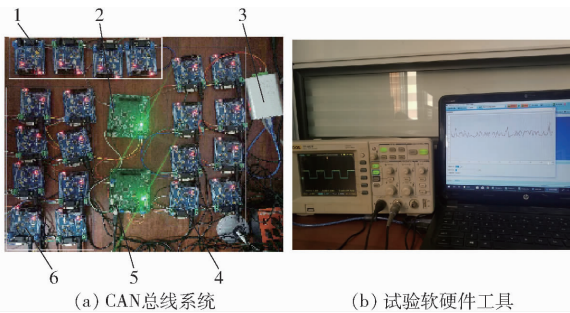


图 4 CAN 总线系统试验平台

Fig. 4 Test platform of CAN bus system

1. 专用设备 CAN 总线
2. 网关 2
3. CAN 总线分析仪
4. 动力 CAN 总线
5. 网关 1
6. 设备管理 CAN 总线

试验平台模拟设备节点在 500 kb/s 的波特率下周期性地收发数据。CAN 总线分析仪将总线上的数据转发到上位机。上位机可以实时获取 CAN 报文以及 CAN 总线负载。通过示波器采集不同节点发送和接收的时差,来观察通信的实时性。

3.2 试验结果

根据制定的协议和收获机参数组设定,为了模拟联合收获机设备节点,对试验平台的节点编程进行收发试验。在不同的周期下进行监测实时负载和通信延时。以 20 ms 和 50 ms 模拟联合收获机最大负载和典型情况。

3.2.1 实时负载分析

50 ms 周期下的各总线负载如图 5a 所示。其中专用设备 CAN 总线和动力 CAN 总线在 100 s 内的平均负载率分别为 2.41% 和 3.94%。设备管理 CAN 总线平均负载率是 11.13%。

20 ms 周期下的各 CAN 总线负载如图 5b 所示。其中专用设备 CAN 总线和动力 CAN 总线在 100 s 内的平均负载率分别为 6.15% 和 12.49%,设备管理 CAN 总线的平均负载率是 26.58%。

试验结果表明,不论在 50 ms 周期还是 20 ms 的

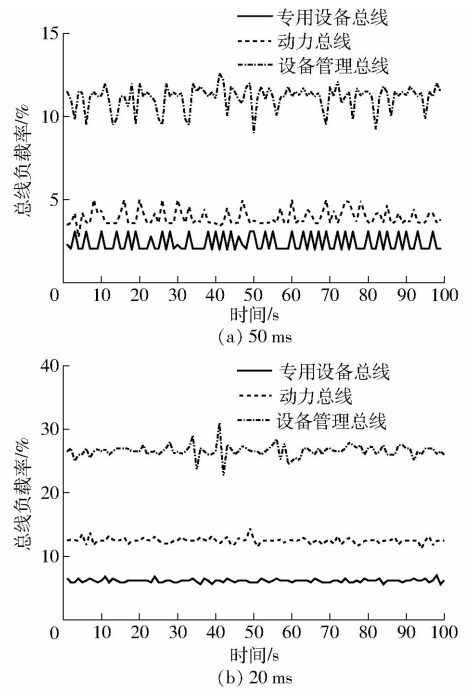


图 5 不同周期下 CAN 总线实时负载

Fig. 5 Real-time load under different cycles of CAN bus

高负载工作周期,3 条 CAN 总线的负载率均低于 30%,完全满足联合收获机控制系统 50% 负载率的设计需求。

3.2.2 通信实时性

运行 CAN 总线系统,使 3 条总线的负载稳定在图 5b 所示的负载。分别选取 3 条 CAN 总线上的任意节点作为发送节点,再分别选取 3 条 CAN 总线上的节点作为接收节点,发送节点发送方波。重复多次试验,示波器读出发送端和接收端的方波延时,结果如表 3 所示。为了验证总线负载对传输延时的影响,增大 CAN 总线通信试验的数据量,将总线负载率逼近 100%,单条 CAN 总线在不同负载下的通信延时如图 6 所示。

表 3 CAN 总线数据传输时间

Tab. 3 Data transmission time of CAN bus μs

| 接收总线 | 发送总线 | | |
|-------------|----------------|--------------|----------------|
| | 专用设备 CAN 总线 | 动力 CAN 总线 | 设备管理 CAN 总线 |
| 专用设备 CAN 总线 | 298.7 | 910.7 | 600.3 |
| 动力 CAN 总线 | 910.7 | 299.3 | 602.8 |
| 设备管理 CAN 总线 | 602.8 | 600.3 | 303.0 |

从表 3 可以看出,3 条 CAN 总线各自在总线内部通信的平均延时在 300 μs 左右。设备管理 CAN 总线与其他 CAN 总线通信需要经过一个网关,所以设备管理 CAN 总线与其他两条 CAN 总线的通信延时明显高于在总线内部通信。延时为两条总线内部延时之和,约为 600 μs 。专用设备 CAN 总线与动力

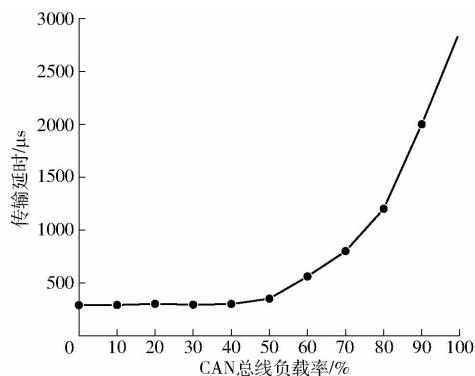


图 6 传输延时与负载关系

Fig. 6 Relationship between transmission delay and CAN bus load

CAN 总线之间通信需通过 2 个网关,所以延时最高,平均延时为 910 μs 左右,最大延时也在 1 ms 以内。对于单条 CAN 总线来说,如图 6 所示,50% 以下负载率的变化对传输延时没有明显的影响;50% ~ 70% 之间负载率的增大会带来相对明显的传输延时;70% 以上负载率的增大会导致传输延时显著增大。

试验结果表明,50% 以下的负载率对通信实时性影响不大,本系统通信延时主要在于通信所涉及的不同 CAN 总线的数量,报文经过越多的总线或网关,延时相应越高,最大总延时在 1 ms 以内。由于 CAN 总线在底层出错重发的错误处理机制和帧间隙的存在,CAN 总线很难达到满负荷^[16-17]。虽然会增大 CAN 总线的负载,但在一定程度上预防了丢帧问题,保证了传输的可靠性。所以对于本 CAN 总线系统而言,只要保证负载率在 50% 以下,通信的实时性和可靠性都可以得到保证。

3.3 实例

以联合收获机导航控制为应用实例^[18-19]。表 4 给出了实例的 CAN 节点在 4 条 CAN 总线上的分布情况。表中的 CAN1、CAN2、CAN3 和 CAN4 分别对应系统的动力 CAN 总线、设备管理 CAN 总线、专用设备 CAN 总线 1 和专用设备 CAN 总线 2。在自动导航的一个计算周期里,CAN3 和 CAN4 上的 GPS 和陀螺仪模块首先采集到收获机的位置和姿态信息,然后将数据发给 CAN2 上的车载控制中心。控制中心根据位置信息和预设好的路径,通过导航算法计算出收获机的期望速度和转角,将控制指令分别发送给 CAN1 上的 2 个电机驱动器,配合编码器实现对速度的闭环控制。指示灯的闪烁状态反映导航偏差大小和方向。在一个导航周期中,所有 4 条 CAN 总线均有数据传输,既有单条 CAN 总线内部的数据传输,也有通过网关在不同 CAN 总线之间的数据传输。在车辆行驶过程中不断重复上述过程实现导航。

表 4 导航试验 CAN 节点构成及分布

Tab. 4 Structure and distribution of CAN nodes in navigation test

| CAN1 | CAN2 | CAN3 | CAN4 |
|-----------|--------|--------|------|
| 左侧履带电机驱动器 | 车载控制中心 | | |
| 右侧履带电机驱动器 | 指示灯 1 | GPS 模块 | 陀螺仪 |
| 编码器测速模块 | 指示灯 2 | | |

在保持原有导航算法的基础上^[20],在本文所述的 CAN 总线架构上进行验证测试,试验系统如图 7 所示。小型履带式联合收获机以 0.3 m/s 的速度跟随一条预设的直线,每 0.5 s 采集一个坐标点并记录。取 20 s 内的 40 个坐标点对比预设直线,计算出横向偏差。试验结果如图 8 所示,20 s 内横向偏差的平均值为 2.55 cm,最大值为 5.90 cm。使用传统的单机控制时^[21],横向偏差平均值为 2.45 cm,最大偏差为 5.86 cm,控制效果与本系统保持一致。试验结果表明,本 CAN 总线架构优化了传统的联合收获机控制方式,系统性能满足联合收获机导航控制的需求。

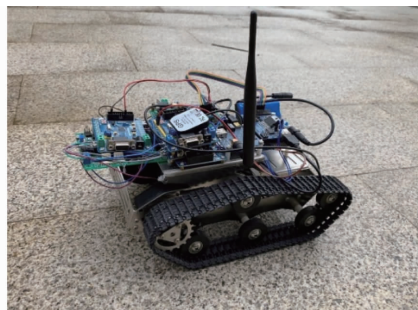


图 7 小型履带式联合收获机导航试验

Fig. 7 Navigation experiment of combine harvester

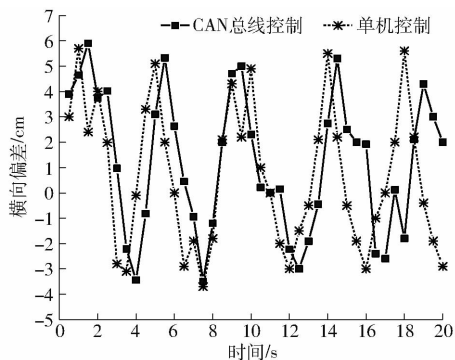


图 8 横向偏差曲线

Fig. 8 Lateral deviation curves

4 结束语

设计了联合收获机 CAN 总线应用解决方案。建立了模块化、可扩展的网络结构,以 ISO 11783 标准为基础,制定了联合收获机 CAN 总线通信协议,协议包括联合收获机的各个子系统,并且在网络结构和通信协议上都具有大量可扩展空

间。试验结果表明,系统各条 CAN 总线负载率均小于 30%,数据通过网关在不同 CAN 总线间的传输总延时小于 1 ms。在小型履带式联合收获机底盘自动导航中,对比了传统单机控制方式,导航偏差基本保持一致,满足联合收获机导航控制需求。

参 考 文 献

- [1] 蒋瑞锋. 电驱动联合收获机智能控制系统的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
JIANG Ruifeng. The research on intelligent control system of the combine driven by electricity[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [2] 王帅. 基于 CAN 总线的谷物联合收获机模块化智能监测系统研究[D]. 济南:济南大学,2017.
WANG Shuai. Research on modular intelligent monitoring system for grain combine harvester based on CAN bus[D]. Ji'nan: University of Jinan, 2017. (in Chinese)
- [3] 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 performance 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)
- [4] 苗中华,褚剑钢,刘成良,等. 采棉机智能监控系统 CAN 应用层协议设计[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(1):180-184.
MIAO Zhonghua, CHU Jian'gang, LIU Chengliang, et al. CAN application-layer protocol design of intelligent monitoring system for cotton-picking machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 180-184. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120132&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.032. (in Chinese)
- [5] 魏新华,李耀明,陈进,等. 联合收获机工作过程智能监控装置的系统集成[J]. 农业工程学报,2009,25(增刊2):56-60.
WEI Xinhua, LI Yaoming, CHEN Jin, et al. System integration of working process intelligent monitoring and controlling devices for combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(Supp.2):56-60. (in Chinese)
- [6] 张美娜,尹文庆,钱燕,等. 联合收获机导航数据采集系统设计[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):117-121.
ZHANG Meina, YIN Wenqing, QIAN Yan, et al. Design of navigation data collecting system for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(Supp.):117-121. (in Chinese)
- [7] PITLA S K, LIN N, SHEARER S A, et al. Use of controller area network (CAN) data to determine field efficiencies of agricultural machinery[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014, 30(6): 829-839.
- [8] CHEN J, ZHENG Y, LI Y, et al. Study on integration of measurement and control system for combine harvester[C] // International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010: 607-614.
- [9] HOFSTEE J W, GOENSE D. Simulation of a controller area network-based tractor-implement data bus according to ISO 11783[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 73(4): 383-394.
- [10] ISO 11783—2015 Tractors and machinery for agriculture and forestry—serial control and communications data network—part 7: implement messages application layer[S].2015.
- [11] 宋岩,徐皓冬,石刚. 基于 CAN 的农业森林机械控制网络研究及实现[J]. 仪器仪表学报,2006,27(增刊):547-549.
SONG Yan, XU Aidong, SHI Gang. Research and realization of control network for agriculture and forestry machinery based on CAN[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006,27(Supp.):547-549. (in Chinese)
- [12] 张真,迟瑞娟,杜岳峰,等. 基于 CAN 总线的玉米收获智能控制系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):275-281.
ZHANG Zhen, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Investigation on CAN-bus-based corn harvester intelligent control system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(Supp.):275-281. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s036&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.036. (in Chinese)
- [13] 周旭. CAN 总线通信实时性研究与实现[D]. 上海:复旦大学,2007.
ZHOU Xu. Real time communication research and implementation based on CAN bus[D]. Shanghai: Fudan University, 2007. (in Chinese)
- [14] ISO 11783—2015 Tractors and machinery for agriculture and forestry—serial control and communications data network—part3: data link layer[S].2015.
- [15] 章磊,祝明,武哲. 无人直升机系统 CAN 总线应用层协议设计[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(10):1264-1270.
ZHANG Lei, ZHU Ming, WU Zhe. CAN bus application layer protocol design for unmanned helicopter system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(10): 1264-1270. (in Chinese)
- [16] 陈曦. CAN 总线实时性和可靠性若干问题的研究[D]. 天津:天津大学,2010.
CHEN Xi. Research on real-time performance and reliability of CAN bus[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in

Chinese)

- [17] AN X F, MENG Z J, WU G W. Development of grain yield monitoring system based on CAN bus technology[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.2):262-266.
- [18] 黎永键,赵祚喜,黄培奎,等. 基于CAN总线的拖拉机导航控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 35-42.
LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Design and experiment of navigation control system for tractor based on CAN bus[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 35-42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s006&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.006. (in Chinese)
- [19] 白晓平,王卓,胡静涛,等. 基于领航-跟随结构的联合收获机群协同导航控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 14-21.
BAI Xiaoping, WANG Zhuo, HU Jingtao, et al. Harvester group corporative navigation method based on leader-follower structure[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):14-21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170702&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.002. (in Chinese)
- [20] 蒋建东,张钧,李聪聪,等. 履带式移动机器人自主跟随算法研究[J]. 浙江工业大学学报, 2017, 45(4): 355-360.
JIANG Jiandong, ZHANG Jun, LI Congcong, et al. Study on autonomous following algorithm of crawler-type mobile robot[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2017, 45(4): 355-360. (in Chinese)
- [21] 张钧. 履带式农业移动机器人自主跟随控制系统研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2017.
ZHANG Jun. Research on autonomous follow-up control system of crawler-type agricultural mobile robot [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017. (in Chinese)

(上接第84页)

- [23] 田立权,唐汉,王金武,等. 弹射式耳勺型水稻精量穴直播排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 65-71.
TIAN Liqun, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Design and experiment of rebound dipper hill-drop precision direct seeding device for rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4):65-71. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170408&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.008. (in Chinese)
- [24] WANG Jinwu, LI Shuwei, ZHANG Zhao, et al. Design and experiment of electrical drive side deep hill-drop fertilization system for precision rice hill-direct-seeding machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(8): 43-54.
- [25] 田立权. 弹射式耳勺型水稻芽种播种装置机理分析与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2017.
- [26] 具典淑,周智,欧进萍. PVDF压电薄膜的应变传感特性研究[J]. 功能材料, 2004, 35(4):450-453.
JU Dianshu, ZHOU Zhi, OU Jinping. Study on strain-sensing of PVDF films[J]. Journal of Functional Materials, 2004, 35(4): 450-453. (in Chinese)
- [27] 张霖,赵祚喜,可欣荣,等. 压电式种子计数系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8):41-45.
ZHANG Lin, ZHAO Zuoxi, KE Xinrong, et al. Seed-counting system design using piezoelectric sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8):41-45. (in Chinese)
- [28] 张安跃,唐志平,郑航. PVDF压力传感器的冲击压电特性研究[J]. 实验力学, 2009, 24(3):244-250.
ZHANG Anyue, TANG Zhiping, ZHENG Hang. A study of impact piezoelectric property of PVDF stress gauges[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(3):244-250. (in Chinese)
- [29] 田立权,王金武,唐汉,等. 螺旋槽式水稻穴直播排种器设计与性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5):46-52.
TIAN Liqun, WANG Jinwu, TANG Han, et al. Design and performance experiment of helix grooved rice seeding device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 47(5):46-52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160507&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.007. (in Chinese)
- [30] 徐宏伟,周润景,陈萌. 常用传感器技术及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2017.
- [31] WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, TIAN Liqun, et al. Virtual simulation analysis and verification of seed-filling mechanism for dipper hill-drop precision direct rice seeder[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(6): 77-85.
- [32] 朱鹏. ARDUINIO开发板与ANDROID手机蓝牙通信的设计与实现[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(21):65-66.
ZHU Peng. Design and implementation of Bluetooth communication between ARDUINIO development board and ANDROID mobile phone[J]. Computer Knowledge and Technology, 2016, 12(21):65-66. (in Chinese)