

拖拉机作业机组分布式控制系统结构模型^{*}

谢 斌 朱忠祥 宋正河 毛恩荣

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 针对拖拉机作业机组自动驾驶控制要求,基于 ISO 11783 提出了一种分布式控制系统结构模型,其主总线完成整机通信和系统监控,子系统分总线完成部件控制。该模型属于多总线互连、分层管理的网络控制系统方式,具有数字化、模块化强的特点。运用 TrueTime 工具仿真该模型,各任务可调度。与单处理器集中控制方式不同,由于子系统采用了分总线,系统的控制性能由网络协议和控制算法综合决定。试验结果表明,系统的网络控制性能与仿真分析一致,可以有效地完成控制任务。

关键词: 拖拉机 分布式控制系统 多总线互连 结构模型

中图分类号: TP273; S232 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)12-0182-04

Structural Model of Distributed Control System for Tractor Implement Combination

Xie Bin Zhu Zhongxiang Song Zhenghe Mao Enrong

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

With the purpose of autonomous control for tractor-implement combination, a structural model based on ISO 11783 for distributed control system was presented. The main-bus of the model organized the whole system communicating and monitoring. The sub-bus took charge of the sub-system control. The model was designed by the interconnection network, multi-layer and multi-bus control method, which was easy to be digitalized and modularized. The control tasks were schedulable according to the model using TrueTime method. Different from single processor concentrative control method, the control performance of system was determined by the network protocol and the control algorithm according to the sub-bus of the sub-system. Consistent with the results of simulation, the test revealed that the distributed control system could be effectively operated to accomplish the control tasks.

Key words Tractor, Distributed control system, Multi-bus interconnection, Structural model

引言

20 世纪 90 年代,基于标准 DIN 9684 和 SAE J1939,美国汽车工程师协会(SAE)和国际标准化组织(ISO)定义了 ISO 11783 标准,即面向农业和林业用拖拉机及机械的串行网络通信协议。随着 ISO 11783 标准的不断完善,总线控制技术和嵌入式技术的深入应用,农业车辆及装备的控制方式向网络化、智能化、分布式以及模块化设计发展。

ISOBUS 是为了更好执行 ISO 11783 标准而提出的,其实质是面向制造工业和市场的技术规范,便于各厂家生产兼容性产品^[1]。目前,农业装备市场上出现了众多符合 ISOBUS 的产品,如 TeeJet 公司的 PowerLink 640 VT 和 LH IC Series ISO Job Computers 产品,Parker 公司、AIS 公司的虚拟终端产品。这些产品的共同特点是互换性、兼容性强,注重“即插即用”。

在构建拖拉机作业机组自动驾驶控制系统时需

要满足: 保证控制性能; 各个智能节点的独立性、模块化和兼容性; 总线通信协议满足各节点的即插即用, 支持 ISOBUS 产品^[2]。

以现场总线 CAN (controller area network) 网络通信为基础, ISO 11783 标准第 4 部分^[3]中提出的网络拓扑结构包括两部分: 拖拉机主体部分, 用以连接发动机、传动系、悬挂系、制动系等, 管理拖拉机的运行; 农机具部分, 用以连接一台或多台农机具, 管理各种农业作业等。这两部分之间至少有一个电控单元充当接口, 负责总线连接和电源供给。针对拖拉机作业机组智能化控制, 本文对该基本结构进行改进, 提出一种分布式控制系统的结构模型, 并从静态性能等方面进行研究。

1 模型建立

1.1 技术分析

Darr M J^[4] 在自动驾驶拖拉机上应用了基于 CAN 总线的分布式控制系统。网络上挂接了 7 个节点, 其中任务处理节点管理整个系统; 位置信息 GPS 节点和无线通信 RF 节点的数据通过总线传送到其他节点; 转向、悬挂和换挡节点分别由各自的传感器和执行器形成子系统单处理器(节点)集中式控制系统。这种拓扑结构强调各节点的软硬件设计。

在 John Deere 公司新型拖拉机上采用了自动转向 iTEC pro 控制技术^[5]。如果要实现地头自动转向, 首先在驾驶室显示器上完成各项设置, 如地块边界、机具动作顺序、最小滑转率等, 然后通过 CAN 总线传输 GPS 数据和车辆速度数据, 悬挂系统、配阀系统、变速系统、转向系统节点接收到数据, 并执行任务, 最后各个子系统配合完成自动转向。这种拓扑结构的重点在于数据共享、任务分工和协作。

文献[6]提出了 ISOBUS 与 FlexRay 总线互连结构形式。ISOBUS 部分采用事件触发方式, 处理非实时任务; FlexRay 部分采用时间触发方式, 处理实时任务, 可满足时间精确性和容错性的高要求。此方案中节点分配和两总线之间的网关设计则是关键。

随着控制任务的多样化, 拖拉机作业机组控制系统呈现出不同的结构, 有以下特点:

(1) 大型拖拉机配套的作业农机具种类繁多, 整个机组具有复杂的作业任务管理和控制要求, 通常按拖拉机控制和农机具控制分开管理, 通过网关互换信息, 并可通过网关挂接多个农机具。

(2) 随着单处理器功能的增强、智能传感器网络化以及驱动器体积的减小, 微型化的节点能够很

容易地安装在拖拉机设备上。

(3) 现场实时控制任务交给子系统高速总线管理, 而通信任务和机组管理采用主 CAN 总线 (Tractor Bus 和 Implement Bus) 进行, 这样既能保证各子系统的控制性能, 又能充分利用总线管理整个机组。同时, 系统分工明确, 开发针对性和模块化很强。

(4) 市场上一些控制总线软硬件和通信协议的成熟化应用可降低开发成本。

1.2 多总线分层结构

基于上述分析, 本文提出多总线分层方式管理控制系统, 如图 1a 所示。其中, 主总线由拖拉机总线和农机具总线组成, 其主要功能是进行各个节点的信息交换和系统监控; 子系统分总线由各个子系统和所挂农机具的传感器和执行器组成, 实现本子系统的自动控制, 设计目的是保证本子系统的实时控制性能。主总线和分总线的网络协议、传输速率可以不同。一般, 拖拉机总线遵循 SAE J1939, 农机具总线遵循 ISO 11783 (ISOBUS), 而分总线可由开发商自行决定, 如 FlexRay、高速 RS-485。共享数据由主总线传输, 如 GPS 数据、指令、车辆速度数据。图 1a 中子系统节点具有管理本系统分总线和网关的双重作用。图 1b 中子系统节点采用单处理器集中控制方式管理传感器和执行器, 控制任务由子系统节点通过嵌入式实时软硬件完成。

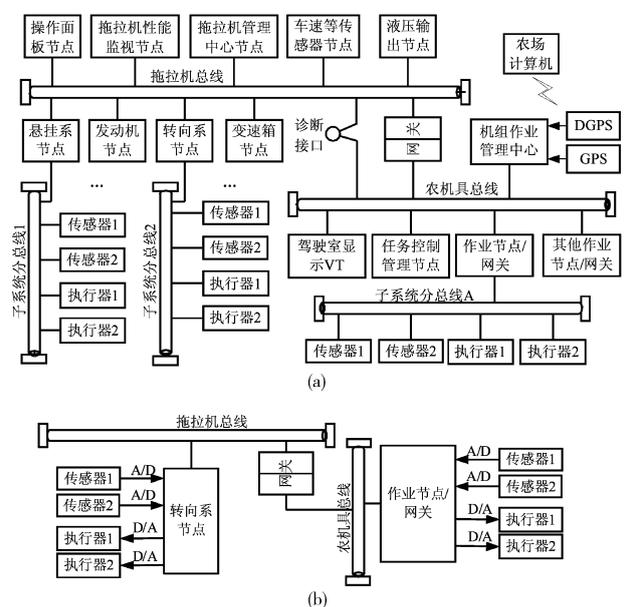


图 1 分布式控制网络结构模型

Fig. 1 Structural models of distributed control system
(a) 子系统分总线结构 (b) 子系统单处理器集中控制结构

被控对象特性与系统采用的控制算法有关, 而且直接受到控制网络协议本身的影响。这主要表现在两个方面: 网络通信服务性能和系统控制性

能^[7]。表 1 给出了两种结构方式的静态服务性能对比。

表 1 静态服务性能对比

Tab.1 Comparison of static quality of service

对比项	方式 1	方式 2
总线层数	多	少
结构复杂程度	较复杂	简单
网关数量	多	少
故障诊断点	多	少
模块化	强	较强
节点体积	小	较大
布线方便性	易	较难
传感器信号传输方式	数字	模拟
执行器信号传输方式	数字	模拟
传输速率(主总线)/Kb·s ⁻¹	250	250
传输速率(分总线)/Kb·s ⁻¹	0 ~ 10 000	
软件开发成本	高	高
硬件开发成本	较低	高

注:方式 1 采用子系统分总线网络控制系统,方式 2 采用子系统单处理器集中控制系统,两者拖拉机总线和农机具总线相同。

2 仿真

2.1 仿真模型

运用基于 Matlab/Simulink 的 TrueTime 联合仿真工具^[8]对图 1 所示的控制系统进行建模。图 2a 所示为系统 3 条总线,其中拖拉机总线上挂 9 个节点,农机具总线上挂 5 个节点,基本参数是:CAN 总线,传输速率为 250 Kb/s,信息帧最小传输位是 128 bits。子系统分总线(以转向系统为例)上挂 3 个节点,为方便对比,同样采用 CAN 总线,传输速率为 10 ~ 5 000 Kb/s,最小传输位是 80 bits。图 2b 为转向系统 3 个节点组成的网络控制系统仿真模型。图 2c 中 SteerECU(Node6)节点采用单处理器集中控制方式,传感器和执行器均与节点直接相连,按嵌入式实时模块建模,单处理器下多任务工作。整个仿真模型的调度算法采用固定优先级和单调速率两种。

机组的操作信号由拖拉机总线上的操作面板节点发出,仿真时采用正弦、方波和脉冲为信号源,该任务设为高优先级。

2.2 可调度分析

在控制总线中,对一组控制任务的时间特性的描述包括:节点任务、网络通信任务、网关任务,其相应的时延为节点内任务处理的时延 R_i^u 、网络通信的时延 R_i^m 、网关转换的时延 R_i^G 。考虑高优先级任务的抢先执行时间、低优先级任务的阻塞时间,一组任务最坏传送时延 R_i 为: $R_i = R_i^{u1} + R_i^m + R_i^{u2} + R_i^G = C_i + I_i + B_i$ 。其中 $i \in [1, n]$, n 为任务数, C_i 为相应第 i 个任务的执行时间, I_i 是所有比任务 i 优先级高

的任务的执行时间, B_i 是低优先级任务对高优先级任务的阻塞时间。

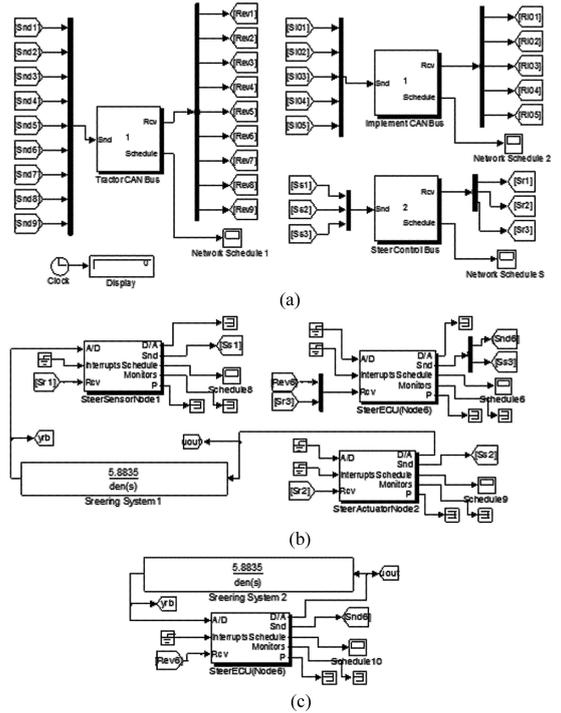


图 2 系统 TrueTime 仿真模型

Fig.2 TrueTime simulation model of control system
(a) 系统 3 条总线模型 (b) 子系统分总线网络控制模型
(c) 子系统单处理器集中控制模型

只要满足 R_i 小于该任务的截止时间 d_i , 则称这组控制任务是可调度的。方式 1 仿真结果表明,当操作面板节点的周期为 10 ~ 50 ms,拖拉机总线上其他节点更新数据周期在 100 ~ 500 ms 范围内各任务都是可调度的。传送时延(等待状态)随着周期变小而出现的几率加大,时延也越长,如图 3 所示。图中波形高表示执行,波形低表示空闲,波形中表示等待。

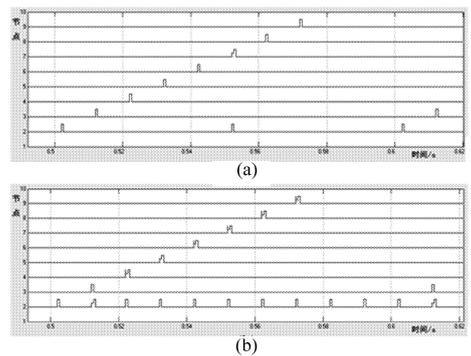


图 3 系统调度时刻表

Fig.3 Schedule plot of control system

(a) 周期为 50 ms (b) 周期为 10 ms

对于一项任务,从操作指令传送到子系统去运行控制,子系统分总线方式比集中控制方式多了一层网关,时延相应变大。

2.3 子系统动态性能

各子系统控制任务的实时性要求往往高于拖拉机运行和农机具作业管理任务。集中控制方式的子系统控制属于多任务嵌入式实时控制系统,对嵌入式软硬件要求比较高,性能取决于主控芯片。在分总线中,子系统采用网络控制系统,对网络配置和协议要求较高,这时由于网络传输时延的不确定将影响系统的稳定性,控制性能由网络参数和 PID 控制

参数多方面决定。分总线的传输速率越高,越能保证动态性能;采样频率越大,控制周期越小,比例系数变大。以转向系统为例,传感器节点由时间驱动,执行器(控制器)由事件驱动,仿真曲线如图 4 所示。满足相似的脉冲响应性能条件下,图中的采样周期从 10 ms 增大到 50 ms 时比例系数 K_p 则从 5.0 减小为 3.6,微分系数 K_d 从 0.01 减小为 0.001。

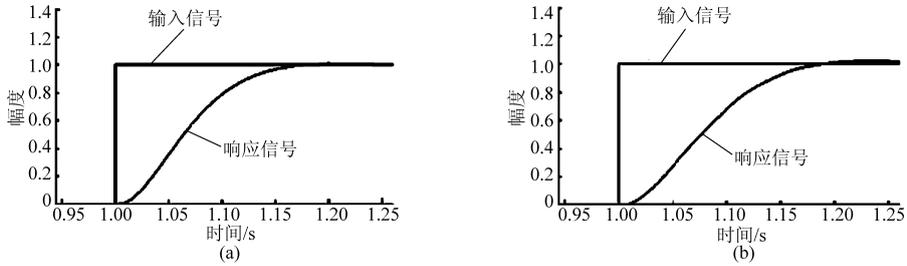


图 4 转向系网络控制系统仿真结果

Fig. 4 Simulating results of steering system

(a) 采样周期 10 ms, $K_p = 5.0, K_d = 0.01$ (b) 采样周期 50 ms, $K_p = 3.6, K_d = 0.001$

3 试验

进行通信试验时各个节点都采用 32 位 ARM7 内核芯片,集成 CAN 总线通信模块^[9],通信协议按 ISO 11783 适当简化后设计,按图 1a 组网。拖拉机总线和农机具总线节点传送周期为 100 ms,转向系统分总线上的控制周期为 10 ms,测得模拟数据下各节点任务的时延如图 5 所示。在负载率为 10% 时,最大时延小于 5 ms。

驾驶,行驶速度为 1.5 km/h。图 6 所示是实测转向角与输入信号曲线。从图 6 中看出,为提高系统的实时性,可增加分总线的传输速率,这时出现一定的超调,可通过修改控制参数来调节。

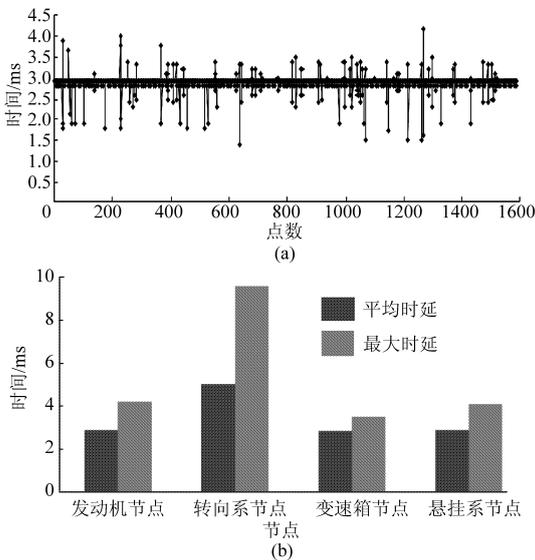


图 5 系统的传送时延

Fig. 5 Transfer delay of system

(a) 发动机节点的时延 (b) 各节点的时延

室外试验对象是改装后的铁牛-654 型拖拉机,试验道路为混凝土地面,按给定 1 Hz 正弦曲线自动

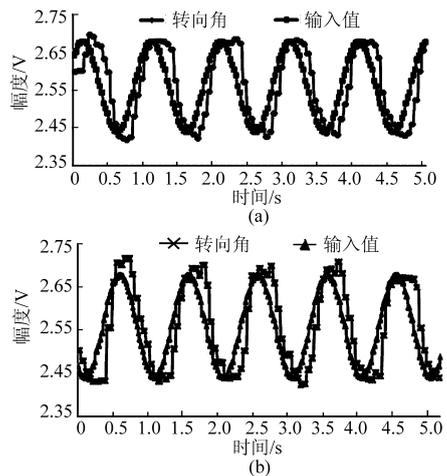


图 6 试验实测转向角曲线

Fig. 6 Steering angle curves according to tractor test

(a) 传输速率为 19 200 b/s (b) 传输速率为 38 400 b/s

4 结束语

在实现拖拉机作业机组自动驾驶时,按图 1a 所示的多总线分层结构方式搭建了一个分布式控制平台,该平台符合 ISO 11783 标准,并增加了子系统分总线,其特点是实现了完全意义上的数字化网络通信,接口更容易,模块化更强。试验证明,为了保证系统控制性能,分总线应采用高速和可靠的通信协议。

(下转第 196 页)

- [J]. Transactions of the Control & Automation, 2007, 23(34):224~225, 314. (in Chinese)
- 7 尹建军,王新忠,毛罕平,等. RGB与HSI颜色空间下番茄图像分割的对比研究[J]. 农机化研究, 2006(11):171~174.
Yin Jianjun, Wang Xinzong, Mao Hanping, et al. Contrastive research on tomato image segmentation under RGB and HSI color space[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(11):171~174. (in Chinese)
- 8 尚振宏,刘明业. 二值图像中拐点的实时检测算法[J]. 中国图象图形学报, 2005,10(3):295~298.
Shang Zhenhong, Liu Mingye. Real time corner detection in binary image[J]. Journal of Image and Graphics, 2005,10(3):295~298. (in Chinese)
- 9 谢忠红,姬长英,郭小清,等. 一种基于改进 Hough 变换的类圆果实目标检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7):157~162.
Xie Zhonghong, Ji Changying, Guo Xiaoqing, et al. An object detection method for quasi-circular fruits based on improved Hough transform[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7):157~162. (in Chinese)
- 10 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京:电子工业出版社, 2003:204~210.
- 11 朱煜,江林佳,肖玉玲. 材料图像目标粘连点定位与分割方法研究[J]. 南京理工大学学报, 2008,32(1):110~113.
Zhu Yu, Jiang Linjia, Xiao Yuling. Concave spots localization and region segmentation in fibrous material image based on chain codes[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2008,32(1):110~113. (in Chinese)
- 12 王小华,谢君廷,李本伍. 一种新的基于梯度方向角的圆检测算法[J]. 机电工程, 2008,25(3):30~32.
Wang Xiaohua, Xie Junting, Li Benwu. A new algorithm for detecting circles based on gradient angles[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2008,25(3):30~32. (in Chinese)

(上接第 185 页)

参 考 文 献

- 1 Benneweis R K. Status of the ISO 11783 serial control and communications data network standard [C]. 2005 ASABE Annual Meeting, Paper No. 051167, Tampa, MI, USA, 2005.
- 2 周建军,郑文刚,李素,等. 基于 ISO 11783 的拖拉机系统导航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4):184~188.
Zhou Jianjun, Zheng Wengang, Li Su, et al. Automatic navigation control system for tractor based on ISO 11783 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):184~188. (in Chinese)
- 3 ISO 11783—4:2001 (E) Tractors and machinery for agriculture and forestry—serial control and communications data network—part 4: network layer[S]. Geneva, Switzerland:ISO, 2001.
- 4 Darr M J. Controller area network based distributed control for autonomous vehicles[J]. Transactions of the ASABE, 2005, 48(2):479~490.
- 5 Deere & Company. iTEC pro operator's manual, OMPC21754[M]. Moline, Ill, US, 2008.
- 6 Fantuzzi C, Marzani S, Secchi C, et al. A distributed embedded control system for agricultural machines[C]//2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics. Singapore:IEEE Press, 2006:898~903.
- 7 彭可. 控制网络系统性能分析、系统设计和网络互连的研究与应用[D]. 长沙:中南大学, 2004.
Peng Ke. Research and application of performance analysis, system design and network interconnection in control network system[D]. Changsha: Central South University, 2004. (in Chinese)
- 8 Anton Cervin, Martin Ohlin, Dan Henriksson. Simulation of networked control systems using TrueTime[C]//3rd International Workshop on Networked Control Systems: Tolerant to Faults. Nancy, France, 2007.
- 9 谢斌,毛恩荣. 拖拉机电液悬挂系统中 CAN 总线智能节点研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(12):1~3.
Xie Bin, Mao Enrong. Development of CAN intelligent nodes of tractor electronic hydraulic hitch system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12):1~3. (in Chinese)