

一种集中式智能农机自动导航驾驶控制器的设计与实现

杨俊刚¹, 卢佳祈², 董启甲¹, 岳富占¹, 马波³

(1. 中国空间技术研究院 航天恒星科技有限公司, 北京 100095; 2. 哈尔滨航天恒星数据系统科技有限公司, 哈尔滨 150028; 3. 中国东方红卫星股份有限公司, 北京 100081)

摘要: 智能农机自动导航驾驶技术属于当前精准农业领域的研究热点, 该技术在工程化应用过程中, 需要根据不同的工况频繁升级和更新软件, 传统农机自动导航驾驶系统进行分模块设计, 导致系统升级维护繁杂, 核心技术分散, 限制了该技术的应用推广; 文章提出一种集中式的自动导航驾驶控制 ECU 设计架构, 将自动导航驾驶系统所涉及的核心关键技术, 如组合导航、路径自适应跟踪控制、人机交互等集成融合到 ECU 中进行集中式设计; 经过场地测试, 相比传统采用分立式的自动导航驾驶系统, 在保持作业精度 2.5 cm 的输出约束下, 降低了系统复杂度, 可靠性和集成度得到大幅提升。

关键词: 智能农机; 自动导航驾驶; 电控单元 (ECU); 精准农业

Design and Implementation of an Automatic Navigation Driving Centralized ECU for Intelligent Agricultural Machinery

Yang Jungang¹, Lu Jiaqi², Dong Qijia¹, Yue Fuzhan¹, Ma Bo³

(1. Space Star Technology Co., Ltd., China Academy of Space Technology, Beijing 100095, China; 2. Harbin Space Star Data System Technology Co., Ltd., Harbin 150028, China; 3. China Spicceast Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: The automatic navigation driving technology of intelligent agricultural machinery has become a research hotspot in the current research of precision agriculture. During the course of engineering, the technicians are faced with the dilemma of upgrading software modules frequently. As a result, decentralized design limits the application of this technology. In this paper, a centralized ECU design architecture is proposed to integrate the key technologies involved in the automatic navigation driving system, such as integrated navigation, path adaptive tracking control, and human-computer interaction. The field test shows, compared with the traditional discrete module system, the complexity of the system is reduced, and the reliability and integration are greatly improved under the output constraint of 2.5 cm operation accuracy.

Keywords: intelligent agricultural machinery; automatic navigation driving; electronic control unit (ECU); precision agriculture

0 引言

大型农机的自动驾驶作业是近年来精准农业领域研究的重点, 随着卫星导航技术的发展, 导航定位精度已经达到实时厘米事后毫米级, 采用卫星导航实时感知农机的精确位置, 并通过反馈控制农机的转向机构从而实现对农机的自动化作业。

斯坦福大学 O'Connor 最早建立了拖拉机行走模型用于智能农机领域的研究^[1]。Zhang 采用卫星导航技术结合二轮机模型, 对农机自动导航驾驶技术进行研究^[2]。国内庄卫东等人研究了农机直线行走的差分导航算法, 提出了农机横向位置偏差和前轮转角组合的二维控制规则^[3]。国内西北农林科技大学、中国农业大学较早从自动控制角度研究农机自动导航驾驶技术, 对农机自动导航驾驶控制技术的

发展具有较大的推动作用^[4-5]。华南农业大学进一步将农机运动学模型和拖拉机液压控制模型相结合, 完成了闭环控制系统设计并进行场地测试, 使得这一技术走向实用^[6]。近年来中科院沈阳自动化研究所通过模糊控制方法对农机自动导航驾驶控制模型进行优化, 进一步提升了农机作业的精度和可靠性^[7-9]。

但由于农机作业环境属于一种复杂工况下的作业, 受到土质、气候、降雨、地理环境、信号传输等综合影响, 导致这一技术的可靠性和适应性难以满足农业生产的需求。农机自动导航驾驶技术属于跨学科的符合领域。工程化过程中, 涉及卫星导航及增强、电液驱动、反馈控制、软件工程、信号处理等多学科的融合, 传统设计采用模块化集成的方式, 导致控制模块、农机跟踪模块、高精度组合导航模块、电液驱动之间松耦合设计不能满足实时高精度控制的目的, 进而影响到作业精度的提升, 在复杂的工况下, 分模块频繁升级和运维也难以满足大面积推广应用的需求。

本文提出一种规范化的集中式农机自动导航驾驶控制器架构及工程设计方法, 将模糊控制模型、组合导航算法、

收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2018-11-20。

基金项目: 北京市科委科技计划项目(D15110000915003)。

作者简介: 杨俊刚(1976-), 男, 山西人, 博士, 主要从事北斗导航应用、网络通信等方向的研究。

表 1 系统技术要求

序号	分类	指标项	指标内容
1.	功能要求	设定 AB 线	根据量好的 A,B 点定线,农机从 A 点对准 B 点行驶,软件中生成 AB 线并存储该线的信息
2.		轨迹规划	预先设定农机行驶的轨迹,选择已存储的 AB 线,根据农机的参数信息自动对轨迹进行优化,显示优化后的轨迹。
3.		自动驾驶	实时获取的 GNSS 数据和航向角传感器数据,运用农机转向控制算法实现对农机方向盘的控制从而实现自动驾驶。农机转向时由驾驶员操控方向盘,转向完成后,系统自动将农机引导到规划的轨迹上进行自动驾驶。
4.		自动切换驾驶状态	能通过屏幕点击启动按钮切换到自动驾驶状态,自动驾驶状态下转动方向盘切换回手工驾驶模式
5.	性能要求	导航兼容性	兼容 BDS、GPS、GLONASS 三系统八频点
6.		CORS 设施兼容性	兼容 RTCM2. x、RTCM3. x、CMR、CMR+
7.		系统初始化时间	≤3min
8.		RTK 导航精度	水平方向≤1cm,垂直方向≤2cm
9.		姿态测量精度	航向角≤1°,俯仰/横滚角≤0.5°
10.		数据率	1Hz、5Hz、10Hz
11.		直线作业偏差	≤2.5cm(农机速度≤1.5m/s),≤4.0cm(农机速度≤2.5m/s)
12.		通信方式	3G 通信网络、433MHz 电台
13.		作业范围	≤20km

二轮机运动模型、人机交互采用集中式耦合设计,将核心技术集成在 ECU 中,经过场地准直线度测试,发现在确保 2.5 厘米作业精度输出约束前提下,其成本和可靠性得到大幅度提升。有利于该技术实现大规模推广应用。

1 系统设计

1.1 技术要求

智能农机自动驾驶驾驶控制器包括功能和性能技术要求,功能主要围绕自走式作业的轨迹规划、启停等应用功能,性能主要围绕作业精度进行展开。其中功能要求主要包括作业之前设定作业轨迹,设定 AB 作业基准线,自动驾驶控制的手动启停,状态切换等。性能要求主要为满足 2.5 厘米和 4.0 厘米的作业精度下,差分定位的精度要求至少厘米级。

1.2 系统架构

ECU 属于整个农机自动驾驶驾驶的核心控制单元,如图 1 所示,ECU 通过外接三轴惯性元件获取姿态和加速度信息,通过外接角度传感器获取转向轮偏角,通过外接高精度导航接收机获取高精度定位信息,通过外接平板电脑获取机手下发的各种操作指令,以上述各种接收信息为输入,在 ECU 中进行信息融合处理,实现对农机作业轨迹自适应跟踪控制。

反馈控制量有三个,其中角度传感器的分辨率为 0.05 度,高精度导航差分接收机,可到实时厘米级的导航定位精度,电液比例阀可按照输出控制量成比例地控制执行机构动作。三轴惯性单元用于感知农机的姿态和加速度等信息,便于推算农机侧倾误差,同时用于实现高精度接收机组合导航。

如图 2 所示为整个系统的逻辑架构,人机交互模块运行在 ECU 单元的 ARM 端,采用嵌入式 WEB 开发方式,平板电脑侧为人机交互客户端,通过浏览器即可实现 B/S

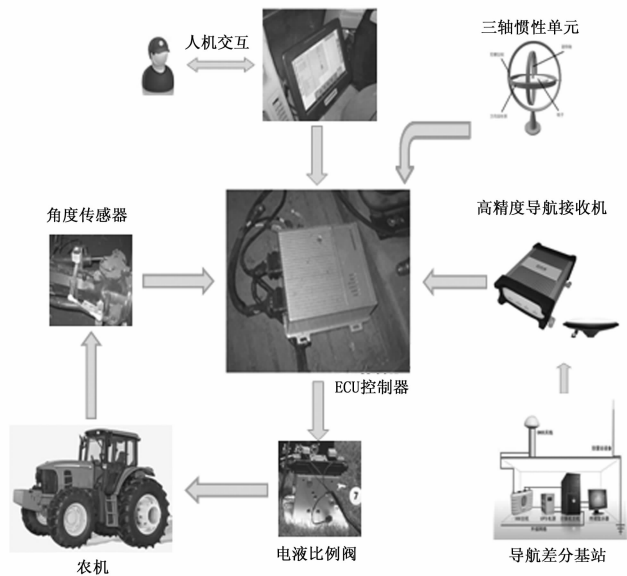


图 1 系统组成图

架构的人机操作。主要核心控制模块运行在 DSP 端,人机交互与 DSP 侧的控制分系统采用 TMS320DM6446 的双核通信机制进行信息传递。

1.3 技术流程

整个系统的技术流程由人机界面进行触发,顺次由地头校准配置、作业轨迹基准 AB 线规划、自动驾驶的启动,自动驾驶的退出等流程组成,各业务流程映射到后端服务,通过 ECU 控制和执行液压机构的联动,最终实现整个农机自动驾驶的应用。

以下为本系统的使用模式:

(1) 用户新建地块或编辑地块后进入自动驾驶作业的设置界面,以 AB 线为例,农机手将拖拉机驾驶到预作业地

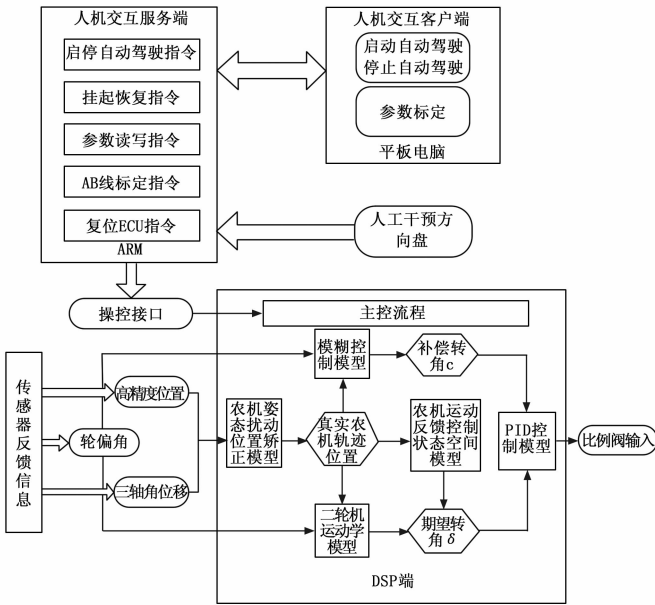


图 2 逻辑架构图

(5) 中央控制器和 DSP 建立两点间直线模型，并根据设置的机具幅宽和偏移量建立平行直线模型；

(6) 农机手通过平板触摸屏点击“启动自走作业”，拖拉机按照之前建立的平行直线模型开始作业；

(7) ECU 实时采集液压控制系统状态参数、角度传感器状态参数，并通过分析计算出实时作业与设定平行直线的偏差，并将偏差值字段传出给平板电脑，平板电脑进行显示，供农机手参考；

(8) 当拖拉机偏离已设定平行直线时，ECU 将实时纠偏控制信号发送到液压阀控制器，进行农机前进方向的纠正与校准；

(9) 当农机手执行手动操作时，手动优先传感器将手动控制信号发送给 ECU，ECU 取消自动驾驶控制，将手动控制相应字段传输给平板电脑，平板电脑进行显示。

2 自动驾驶驾驶控制关键技术

农机自动驾驶驾驶系统控制单元由导航控制器、自校正控制器和转向控制器组成。导航控制器根据农机的当前位姿信息和目标路径信息，按照某种导航控制策略，计算出转向角度的期望值，即转向角指令。自校正控制器作为辅助控制器，采用模糊控制方法，基于驾驶员经验设计模糊控制规则，校正模型控制器控制量。自动转向器控制的原理是：发动机启动后，转向液压泵开始运转；转向操纵控制器检测拖拉机转向前轮转角信息，根据导航控制器由 CAN 总线发出的转向控制指令，控制液压电磁阀单元（比例阀、换向阀）的开度和方向。转向操纵控制器在转向控制过程中使用 PID 控制算法控制比例阀和换向阀动作，使液压执行机构正确执行转向指令^[8]。

以上系统控制模型属于反馈闭环控制系统，采用理论控制模型执行控制时，由于农机面对复杂的作业工况，很难实现普适精确的模型控制，工程实施过程中，普遍采用模糊量化控制规则对复杂模型进行简化设计，宏观上采用农机运动学模型结合二维自校正轮偏角模糊量化规则进行精确控制，可有效降低导航控制算法的复杂度。

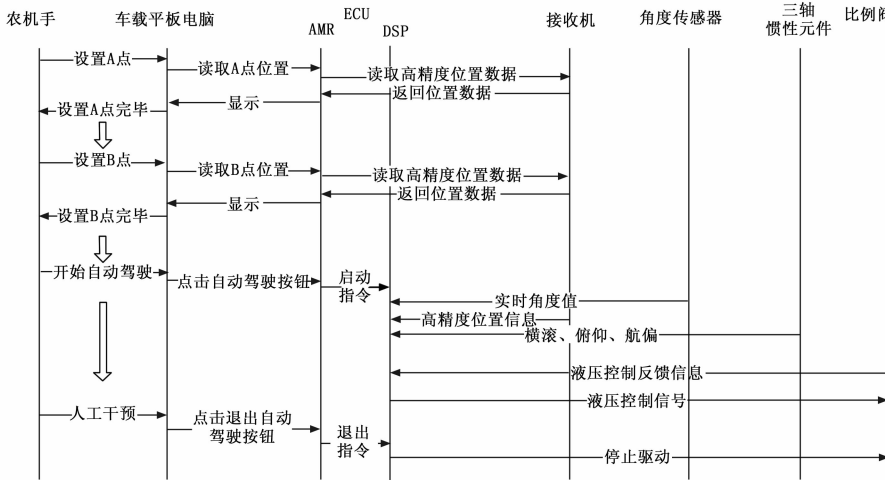


图 3 系统流程图

块，并将车头与地垄平行，点击平板触摸屏“设置 A 点”；

(2) 平板电脑将指令发送给 ARM 中央控制器，中央控制器抓取该点位置数据，并保存；

(3) 农机手将拖拉机驾驶到预作业地块另一地头停车，点击平板触摸屏上的“设置 B 点”；

(4) 平板电脑将指令发送给 ARM 中央控制器，中央控制器抓取该点位置数据，并保存；

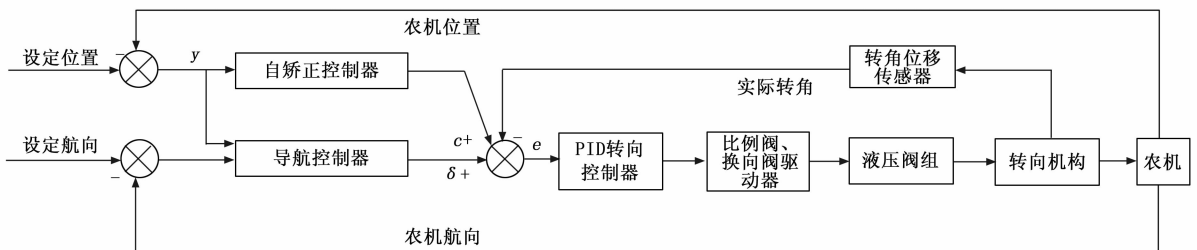


图 4 系统控制模型

3 工程实现

3.1 主控单元设计

主控 ECU 由 TI 双核 6446 为核心的外围电路组成, 双核 CPU 包括 C64x+系列的浮点型 DSP 和 ARM9 核, 其中 ARM 核主要运行嵌入式 Linux, 人机交互软件以嵌入式 WEB 的方式部署于 ARM 核上, DSP 执行导航控制算法, 则用于对转向执行机构进行实时控制。

整个主控软件程序分为四个层次, 应用层、服务层、操作系统层、硬件抽象层:

1) HAL 层: 又称为 BSP 层, 提供板级支持, 主要对电路板上的各硬件资源和总线进行驱动, 封装后对上层提供读写控制三种操作;

2) OS 层: 采用嵌入式实时操作系统 uCOSII, 提供对底层硬件资源的隔离封装;

3) 服务层: 使用 uCOSII 所提供的 API 对上层的业务应用提供支撑;

4) 应用层: 根据平板电脑下发的指令, 执行相应的操作, 主要包括 4 大业务应用。

图 5 为硬件组成框图, 以 TMS320DM6446 双核 CPU 为核心, 通过 DA 模块输出模拟控制量对电液比例阀执行控制, AD 转换模块实施采集前轮偏角的价值作为反馈控制系统的参考输入, 三轴惯性单元通过串口以 100Hz 的频次将加速度和姿态等信息输入用于控制模型的组合导航结算。高精度接收机实时输入高精度位置信息, 也可以将原始观测测量输入 CPU, 在 CPU 上执行组合导航控制。电路板其他模块包括常规的晶振、FLASH、SDRAM、供电等外围电路模块。

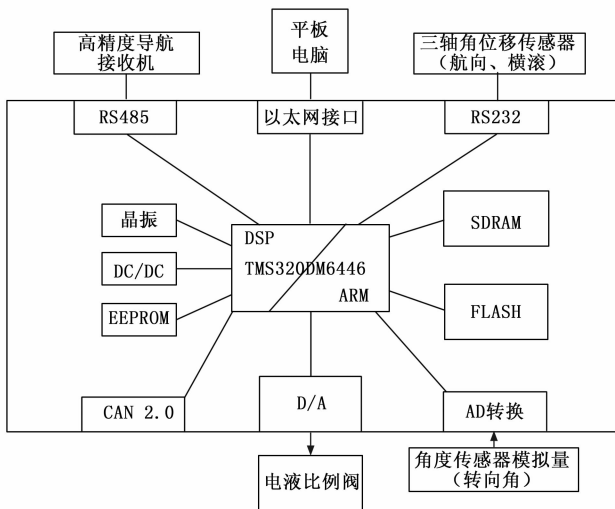


图 5 硬件组成框图

图 6 为嵌入式软件架构图, 该软件执行与 DSP 核, 主要执行控制模型和组合导航等算法, 采用嵌入式实时操作系统 uCOS II, 分四层进行设计。该软件同人机交互软件通过双核通信机制进行交互。

3.2 人机交互

人机交互软件运行于 ARM 核, 通过配置 Linux 嵌入式

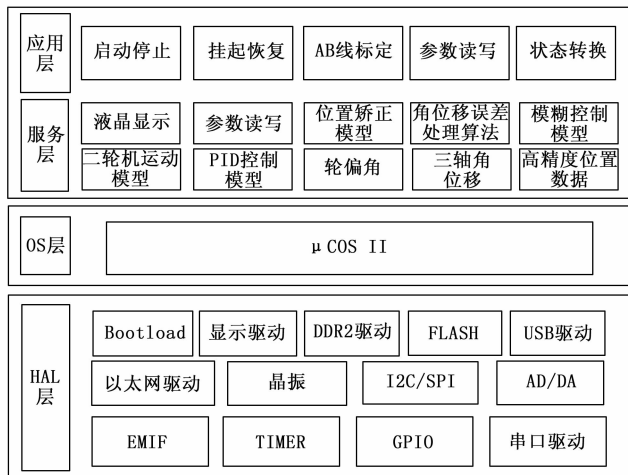


图 6 嵌入式软件架构

操作系统, 采用采用基于 WEB 的嵌入式开发方法, 配置 Apache 引擎, 采用 PHP 编程方式实现人机交互。主要包括参数设置模块、自动驾驶作业触发模块。

在参数设置界面, 总共有 5 种参数设置的页面, 每个参数设置页面有着对应的多个设置项, 5 种参数设置分别是差分方式、车辆设置、农具设置、自动校准和软件升级。差分方式设置主要包括电台设置、3G 设置等多个设置项。车辆设置主要包括车辆的增、删、改、查、天线高度、天线偏移、ECU 距天线距离、天线与前轮中心距离、天线与后轮中心距离、转向调整和灵敏度调整等多种车辆设置项。农具设置包括农具的增删改查、农具类型等多种农具设置项。自动校准包括水平校准和转向死区校准。软件升级包括本地升级和远程升级。在参数设置界面还增加了设置向导, 在用户第一次使用时会帮助对每项进行参数设置。

进入自动驾驶界面后, 可以进行 A、B 点的选取, 生成 AB 线并保存, 也可以对直线规划过的 AB 线进行查询、修改和删除。

AB 线设置好后可开始自动驾驶, 并可进入监控页面, 在规划的轨迹线路下跟踪农机位置, 发生偏转后可在地图上显示出距离最近的规划路径的偏转距离。

4 场地测试

通过搭建闭环测试系统执行田间测试, 分别执行交接行测试和准直线度测试, 分比如下。

4.1 交接行测试

1) 在使用自动驾驶前需在空地上准确测量农具宽幅 (66 厘米/陇), 在该数值上再加交接行数据 66 厘米输入到自动驾驶系统中, 开启自动驾驶作业, 通过测量两个交接行计算农具偏移并输入到自动驾驶系统中;

2) 在农具宽幅和农具偏移值都输入正确的情况下, 放下农具, 使农机在自动驾驶状态下完成至少 5 条交接行;

3) 测量蓝色第 4 号垄沟与红色第 4 号垄沟之间的距离, 如图所示, 以此类推。每隔 2m 设为一点立下标杆并记录两条中间垄沟之间的距离;

4) 每两条相邻不同方向的中间垄沟对应的点所记录的数据不小于 40 组;

5) 重复步骤 5、6, 完成至少 5 条不同交接行的测试。

4.2 准直度场地测试

1) 完成自动驾驶系统的搭建工作, 确认系统能够正常进行工作;

2) 完成旋耕整地机安装与校准工作;

3) 开启自动驾驶作业, 使农机在自动驾驶状态下完成至少 5 个交接行;

4) 自地头 10 米处每隔 2 m 设立一个测量点位, 并在该处打下杆子;

5) 以 A 点为前视点, B 点为后视点建立测量直线, 使用全站仪在 A 点处对每个杆子进行观察, 测量并记录每个杆子所对应点位的误差值;

6) 分别对每幅进行测量, 记录测量误差值;

表 2 场地测试结果

类别	准直度 (田间旋耕)		交接行 (田间旋耕)		平地测试 (准直度)
	2.5cm	4 cm	2.5 cm	4 cm	2.5cm
落点概率	70%	98%	68%	96%	97%

通过起垄后插签法进行实地量测。发现平地作业精度可以达到 2.5 厘米 (2σ), 田间场地测试有一定地面阻力带来一定误差, 准直线度和交接行接近 70% 的点位作业精度 2.5 cm, 大约 96% 以上的作业点位精度 4 cm。均满足农机化作业使用要求。

5 结束语

本文提出的智能农机自动驾驶控制器的设计, 采

(上接第 115 页)

实时数据同步采集的控制理论方面具有一定意义, 可大大提高网络数据同步采集的能力。以分布式网络为平台, 结合实际需求, 利用四层网络体系结构, 分析不同层次实际应用情况, 消除网络时延的不确定性, 利用 ARM 静态存储控制机制, 保证系统在无时延影响下实现数据采集的智能控制。

3.2 未来工作研究

针对分布式网络数据采集的时延问题进行了简单描述, 但并没有对其它问题进行深层次的研究, 对于网络接口问题并没有进行全面分析, 也就无法确定时延出现的概率, 针对未知参数求解还需利用很多方法来解决。

在较为复杂分布式网络环境下, 为了满足数据采集智能控制的灵活性和可靠性需求, 需利用较为先进的控制设备对分布式网络数据采集进行控制, 保证智能控制技术研究可靠性, 进而实现信息数据在整个网络中的有效传输。

参考文献:

[1] 鞠登峰, 张伟政, 李 宁, 等. 采用 GPS/北斗双星同步采集技术的分布式无线高压绝缘带电测试的研究 [J]. 高压电器, 2017, 20 (10): 61-67.

用 DSP+ARM 双核集中式架构, 实现了农机自动驾驶作业的控制, 通过田间实测, 达到 2.5 厘米作业精度。整个系统的核心控制算法和人机交互软件均置于控制器内, 利于采用紧耦合组合导航算法提升可靠性。同步降低了设备复杂度, 便于系统的推广。批量化的工程设计可采用 SOC 设计进一步缩小体积。

参考文献:

[1] O'Connor M. Carrier-phase Differential GPS for automatic control of land vehicles [D]. CA: Stanford University, 1997.

[2] Zhang Q, Qiu H C. A dynamic path search algorithm for tractor automatic navigation [J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47 (2): 639-646.

[3] 庄卫东, 汪 春. 农机直线行走作业 DGPS 导航算法研究 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2006, 18 (6): 50-53.

[4] 陈 军, 鸟巢京, 朱忠祥. 拖拉机在牧草地上自动引导行走的控制 [J]. 农业机械学报, 2005, 36 (7): 104-107.

[5] 周建军, 张 曼, 汪懋华, 等. 基于模糊控制的农用车辆路线跟踪 [J]. 农业机械学报, 2009, 40 (4): 151-156.

[6] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统 [J]. 农业工程学报, 2009, 25 (11): 139-145.

[7] 李逃昌, 胡静涛, 高 雷, 等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法 [J]. 农业机械学报, 2013, 44 (1): 205-210.

[8] 白晓平, 胡静涛, 高 雷, 等. 农机导航自校正模型控制方法研究 [J]. 农业机械学报, 2015, 46 (2): 2-7.

[9] 王 鹤, 胡静涛, 高 雷. 农业机械自动导航车轮转角测量误差补偿模型 [J]. 农业机械学报, 2014, 45 (8): 33-37.

[2] 程 虹, 王 伟, 朱文广, 等. 大型分布式光伏发电消纳数据的智能调度方法研究 [J]. 现代电子技术, 2017, 40 (9): 152-155.

[3] 吕 瑞, 孙林夫. 面向产业链云服务平台的分布式备件库存协同控制方法与软件工具研究 [J]. 计算机工程与科学, 2017, 39 (10): 1812-1818.

[4] 苏学能, 刘天琪, 曹鸿谦, 等. 基于 Hadoop 架构的多重分布式 BP 神经网络的短期负荷预测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (17): 4966-4973.

[5] 王 健, 陈 威, 汤卫东, 等. 分布式并行网络拓扑计算关键技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45 (2): 117-122.

[6] 刘 杰, 张耀中, 等. 基于黑板模型的分布式协同任务决策方法研究 [J]. 火力与指挥控制, 2017, 18 (11): 43-48.

[7] 邓 丰, 曾祥君, 马士聪, 等. 基于分布式行波检测的广域网络故障定位方法 [J]. 电网技术, 2017, 41 (4): 1300-1307.

[8] 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.

[9] 刘 迪, 黄天河, 陈 希, 等. 基于 NDN 的多层卫星网络分布式动态路由方法 [J]. 电子学报, 2017, 45 (11): 2769-2778.

[10] 李 昂. 医院通信网络的异常数据监测技术改进研究 [J]. 电子设计工程, 2018, 26 (5): 165-168.