



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

面向精准农业应用的农机导航关键技术研究

作者姓名: 高雷

指导教师: 胡静涛 研究员 中国科学院沈阳自动化研究所

学位类别: 工学博士

学科专业: 机械电子工程

培养单位: 中国科学院沈阳自动化研究所

2014 年 4 月

Key Technologies Study of Agricultural Machinery
Navigation in Precision Agriculture Application

By
Lei Gao

A Dissertation Submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Doctor of Engineering

Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences

April, 2014

声 明

本人声明所呈交的学位论文是在导师指导下进行研究工作所取得的成果，相关知识产权属中国科学院沈阳自动化研究所所有，本人保证将不以其它单位的名义发表或使用本论文的研究内容。除已注明部分外，论文中不包含其他人已经发表过的研究成果，也不包含本人为获得其它学位而使用过的内容。对本文的研究工作提供过重要帮助的个人和集体，均已在论文中明确说明并致谢。

作者签名：高雷

日期： 年 月 日

摘 要

进入 21 世纪以来,随着农业生产模式从传统的粗放作业模式向先进的精准作业模式转变,精准农业技术在欧美发达国家已经得到了广泛的推广应用,农作物生产的成本降低了 20%以上,经济效益显著。农机导航技术是实现农业精准作业的核心技术之一,贯穿于种植、喷洒、收获的全过程,是精准农业技术的一种基本应用。

农机导航技术通过位姿传感装置,获取农机的当前位置和姿态信息,将其与目标路径对比,根据结果控制农机的行进方向,使其沿目标路径行驶。由于能够自动控制农机的行驶方向,所以驾驶员可以将注意力集中在作业机具的操作上,显著降低了作业强度、提高了生产效率和农机利用率。

农机导航控制研究中需要解决的共性问题包括:(1)设计开发一个通用的农机导航控制平台及相关装置,可以方便地应用在各种农机上;(2)转向控制方法的研究;(3)农机模型及导航控制方法的研究;(4)在不同的农机上从硬件、软件、网络角度,如何快速集成安装导航控制系统。本文对上述四个问题进行了深入研究,设计了通用导航控制平台,提出了相关模型和控制算法,在联合收割机和拖拉机上成功地进行了平台的集成应用,并完成了路面和田间自动驾驶控制实验。具体的研究内容包括:

首先,设计了分布式导航控制平台。根据农机导航控制系统的功能需求,设计了基于 CAN 总线的导航控制平台总体结构,划分了各装置的功能,给出了整个导航控制平台的工作原理。对系统中的各主要装置:田间计算机、导航控制器、机械式转向执行机构、电液式转向执行机构、连杆式转向角测量机构、直线位移式转向角测量机构和多功能通用智能节点等进行了详细的功能及软硬件设计。针对农机自动驾驶控制中对通信功能的需求,在农林机械串行通信控制网络协议 ISO 11783 的基础上,自行设计了导航通信协议。

第二,进行了转向执行机构的建模与控制方法研究,提出了基于预测控制和 PD 控制的串级转向控制方法。以安装有机械式转向执行机构的农机为研究对象,对转向执行机构采用机理建模的方法,对农机转向系统采用辨识建模的方法,建立了自动转向控制系统模型。研究设计了串级转向控制方法,内环角速度控制器采用动态矩阵控制方法,外环角度控制器采用 PD 控制方法。在 CarSim 与 Simulink 联合仿真环境中,将提出的转向控制方法进行了仿真验证,并在洋马 VP6 插秧机上进行了实车实验,验证了所提转向控制方法具有跟踪速度快、精度高的优点。

第三,提出了农机运动状态预测模型。在农机二轮车运动学模型基础上,

根据几何关系，推导提出了农机运动状态预测模型，并将该模型应用在 PID 控制方法中进行了直线路径追踪仿真。与传统 PID 控制方法比较，引入该模型后，能够在不明显降低追踪速度的前提下，大幅减小超调，且稳态追踪误差更小。

第四，提出了基于模糊自适应比例控制的农机导航控制方法。由于传统比例控制方法中采用恒定的比例系数，则当偏差较大时，追踪速度会比较慢，当偏差较小时依然会进行较为频繁的调节。所以本文提出了基于模糊自适应比例控制的导航控制方法，根据横向偏差和航向偏差的值，采用模糊推理在线调节比例系数，在提高路径追踪速度的同时也降低了追踪误差。

第五，制定了农机导航控制系统集成规范。针对目前国内研究开发的农机导航控制系统结构多样、接口封闭、难以与农机其它车载电子系统互联等缺点，研究提出了农机导航控制系统的集成规范。从硬件系统集成、软件系统集成和网络集成三个方面，对农机导航控制系统的集成技术进行了研究，制定了相关接口规范。

最后，上述研究内容的成果，构成了一套通用的农机导航控制平台和控制方法，并成功地应用在联合收割机和拖拉机上。其中，在雷沃谷神联合收割机上采用机械式转向执行机构进行转向控制，在雷沃欧豹 TA800 拖拉机上采用电液式转向执行机构进行转向控制，并且都成功地完成了路径追踪实验，追踪精度能够满足农业精准作业对自动导航控制精度的要求。

关键词： 农机导航；转向控制；导航控制；ISO 11783 协议；运动预测模型；模糊自适应比例控制

Key Technologies Study of Agricultural Machinery Navigation in Precision Agriculture Application

Lei Gao (Mechatronic Engineering)

Directed by Professor Jingtao Hu

Abstract

In the 21st century, with the agricultural production pattern shifting from the traditional extensive mode to the advanced precise mode, precision agriculture technology has been widely applied in developed countries. The cost of crop production reduced more than 20%, achieved remarkable economic benefits. Agricultural machinery navigation technology is one of the key technologies to achieve precision agriculture, throughout the the entire process of planting, spraying and harvesting. It is the elementary application of precision agricultural technology.

Agricultural machinery navigation technology gets the location and posture information from the position and orientation sensors, then contrasts with the target path, and controls the travel direction of agricultural machine according to the results, in order to make it traveling along the target path. Because the travel direction of agricultural machine can be automatically controlled, the driver can concentrate on the farm implements operating; this decreased the operating strength significantly, and improved agricultural productivity and agricultural machinery utilization.

The common problems that need to be addressed in agricultural machinery navigation control study are: (1) design and develop a universal machinery navigation control platform and related apparatus; (2) steering control method Study; (3) agricultural machinery model and navigation control method study; (4) how to quickly integrate and install the navigation control system from the point of view of hardware, software and network on the different agricultural machines.

This thesis studies the above four problems, designs the universal agricultural machinery navigation control platform, proposes relating model and control algorithm, and applies integration of the navigation control platform on a combine and a tractor successfully. Both of them accomplished the path tracking experiment successfully. Concrete research content including:

First of all, distributed navigation control platform is designed. According to

the functional requirements of the agricultural machinery navigation control system, design the overall structure of the navigation control platform based on CAN bus, specified the function of each unit, and described the working principle of the whole navigation control platform. The detailed design of function, hardware and software were accomplished on the main devices in the system: field computer, navigation controller, mechanical steering actuator, electro-hydraulic steering actuator, connecting rod type steering angle measuring mechanism, linear displacement type steering angle measuring mechanism and multi-function universal intelligent node. In order to satisfy the needs of communication function in the operation of agricultural machinery automatic navigation control, on the basis of ISO 11783, navigation communication protocol is designed.

Second, the modeling and control method of steering actuator are studied, and the cascade control method based on predictive control and PD control method was proposed. Take the agricultural machinery equipped with mechanical steering actuator as the research object, adopt the mechanism modeling method on steering actuator, and adopt the identification modeling method on agricultural machinery steering system, and an automatic steering control system model is established. The cascade control method is designed. The inner angular velocity controller adopts Dynamic Matrix Control method, and the outer angle controller adopts proportional plus derivative control method. Simulation is made for the proposed steering control method in CarSim associated with Simulink simulation environment, and the actual vehicle experiment was carried out on the YANMAR VP6 transplanter. These simulation and experiment verified that the proposed steering control method has the advantage of fast tracking speed and high precision.

Third, the agricultural machinery motion prediction model is proposed. Based on the bicycle model of agricultural machinery, according to the geometric relationship, the agricultural machinery motion prediction model is deduced. The model was applied to the PID control method in a straight path tracking simulation. Compared with traditional PID control method, after introducing this model, the overshoot is sharply reduced; the steady-state tracking error is smaller without remarkably reducing the tracking speed.

Fourth, the agricultural machinery navigation control method based on fuzzy adaptive proportional control is proposed. Because of the traditional proportional control method using constant proportion coefficient, when the deviation is big, tracking speed will be slow, when the deviation is small, adjustment still will be

relatively frequent. So this paper presents a navigation control method based on fuzzy adaptive proportional control. According to the lateral deviation error and the heading error, this method adopts fuzzy reasoning to adjust proportion coefficient on-line, this method improves the path tracking speed as well as reduces the tracking error.

Fifth, an integration specification of agricultural machinery navigation control system is established. Agricultural machinery navigation control systems developed in current researches have a variety of structures, interfaces are closed, and difficult to reconcile with other vehicle electronic systems. Aiming at these shortcomings, an integration specification of agricultural machinery navigation control system is established. From the three aspects, hardware system integration, software system integration and network integration, the integration technologies of agricultural machinery navigation control system are studied, and the relevant interface specification is formulated.

Finally, the research contents above constitute a set of universal agricultural machinery navigation control platform and control methods, and successfully applied in a combine and a tractor. Among them, the Lovol Gushen combine adopts mechanical steering actuator for steering control, and the Lovol Oubao TA800 tractor adopts electro-hydraulic steering actuator for steering control. Both of them accomplished the path tracking experiment successfully, and the automatic navigation control precision has met the requirement of precision agriculture.

Keywords: Agricultural Machinery Navigation; Steering Control; Navigation Control; ISO 11783; Motion Prediction Model; Fuzzy Adaptive Proportional Control

目 录

摘 要	I
Abstract	III
目 录	VII
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 精准农业概论	2
1.3 国内外农机导航技术研究现状	3
1.3.1 典型农机导航控制系统结构	4
1.3.2 基于本地信息的农机导航方法	5
1.3.3 基于预设路径的农机导航方法	8
1.4 问题分析	10
1.5 论文的主要研究内容及结构安排	11
第 2 章 分布式导航控制平台设计	13
2.1 引言	13
2.2 导航控制平台总体结构设计	13
2.2.1 平台设计目标	13
2.2.2 平台总体结构	14
2.2.3 平台工作原理	16
2.3 核心装置设计	16
2.3.1 田间计算机	16
2.3.2 导航控制器	19
2.3.3 转向执行机构	20
2.3.4 转向角测量机构	24
2.3.5 多功能通用智能节点	28
2.4 基于 ISO 11783 的导航通信协议设计	32
2.4.1 ISO 11783 标准简介	32
2.4.2 ISO 11783 协议分析	33
2.4.3 导航通信协议设计	35
2.5 本章小结	36
第 3 章 转向执行机构建模与控制方法研究	37
3.1 引言	37

3.2 农机转向控制系统建模与控制方法概述.....	38
3.3 农机转向控制系统建模方法研究	39
3.3.1 农机转向控制系统	39
3.3.2 转向执行机构建模	40
3.3.3 农机转向系统建模	40
3.4 基于预测控制的农机转向控制方法研究	42
3.4.1 预测控制	43
3.4.2 基于预测控制的农机转向串级控制结构	45
3.4.3 转向角速度 DMC 控制器	46
3.5 仿真验证与实验	48
3.5.1 转向角速度控制仿真	48
3.5.2 转向控制仿真验证	49
3.5.3 转向控制实验	51
3.5.4 实验结果讨论	53
3.6 本章小结	54
第 4 章 农机建模与导航控制方法研究	55
4.1 引言	55
4.2 基于状态预测的农机运动学建模方法研究	55
4.2.1 经典二轮车运动学模型	55
4.2.2 农机运动状态预测模型	56
4.2.3 仿真验证	60
4.3 基于模糊自适应比例控制的农机导航控制方法研究	63
4.3.1 比例控制方法	63
4.3.2 模糊自适应比例控制方法	63
4.3.3 仿真验证	68
4.4 本章小结	70
第 5 章 农机导航控制系统集成技术研究	71
5.1 引言	71
5.2 农机导航控制系统集成规范	71
5.3 硬件系统集成规范	73
5.4 软件系统集成规范	76
5.5 网络集成规范	79
5.6 本章小结	82
第 6 章 导航控制平台在农机上的集成应用	83

6.1 引言	83
6.2 导航控制平台在大型联合收割机上的集成应用	83
6.2.1 雷沃谷神联合收割机	83
6.2.2 集成总体方案	84
6.2.3 系统集成	85
6.2.4 路面实验	88
6.3 导航控制平台在农用拖拉机上的集成应用	89
6.3.1 雷沃欧豹 TA800 拖拉机	89
6.3.2 集成总体方案	91
6.3.3 系统集成	91
6.3.4 田间实验	94
6.4 本章小结	95
结论与展望	96
参考文献	98
攻读博士学位期间发表的学术论文	107
致 谢	109
作者简介	110

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

进入 21 世纪以来,在生物技术、信息技术的带动下,现代农业进入了新的发展时期,农业生产模式正在从传统的粗放作业模式向先进的精准作业模式转变。精准作业的核心目标就是要在准确的时间、准确的地方,用准确的方式、准确的数量实施播种、灌溉、施肥、施药、除草、收获等农田作业,实现农业生产的“高产、高效、高质、高级和低害”。

精准农业(Precision Agriculture)是综合利用多种信息技术来实现农业在时间、空间上的差异化精准作业的生产模式和技术体系。精准农业的研究最早于 20 世纪 80 年代中期出现在美国,并随着全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)、地理信息系统(Geographic Information Systems, GIS)和微型计算机技术的进步而迅速发展成熟^[1,2]。20 世纪 90 年代中后期,美国、加拿大、澳大利亚等农业大国已经开始在农场推广精准农业技术和作业装备,至 2009 年,美国已有超过 70%的农场在农业生产中采用了精准农业技术^[3]。

我国从 1999 年正式开始精准农业的研究实施,中国农业科学院、中国农业大学、中国科学院等多家单位对精准农业技术进行了深入研究^[4],并进行了小规模试验示范。国家也将精准农业作为我国中长期科学和技术发展的优先主题,制定了相关发展规划,并在 863 计划、科技支撑计划中设置了相关研究和开发项目。另外,从 2002 年开始,我国陆续在黑龙江垦区、新疆生产建设兵团等土地条件较好的区域进行了一些精准农业的实验^[5],并取得了良好的效果,但相关的技术和装备基本依靠引进,价格昂贵。

目前,我国农业的机械化水平低,资源利用率低,过量施用化肥、农药等带来了严重的农业环境污染问题。这些问题严重阻碍了我国农业的健康、可持续发展。而欧美国家的实践证明,实施精准农业可以节约 50%的灌水、30%以上的肥料和农药投入,使作物生产成本降低 20%以上。所以,开展农业精准作业技术研究是实现我国农业可持续发展的必然选择,是我国实现农业向现代农业转型的需要。

精准农业技术包括信息收集、数据处理、作业决策生成和决策实施四部分,决策实施部分需要进行播种、施肥、施药、收获等田间作业的农机,能够按照某种路径精确行进,并能够根据当前位置进行差异化作业;后者指的是变量作业,前者即是导航技术。导航技术为精准农业决策的实施,提供精确的定位信息,完成作业决策在空间上的自动化、高效率、高精度覆盖,是整个精准农业

技术体系中最重要的一部分。

开展农机导航技术研究将为我国农机行业提供具有自主知识产权的核心技术，提高我国农机装备的自动化、智能化水平，为我国农机装备占据国内市场并进入国际市场提供技术支持。

1.2 精准农业概论

精准农业是指综合应用地球空间信息技术、计算机辅助决策技术、农业工程技术等现代高新科技，以获得农田“高产、高效、高质、高级和低害”为目标的现代化农业生产模式和技术体系^[6]。其核心指导思想就是要利用现代定位技术及遥感、传感技术获取农田内影响作物生长和产量的各种因素的时空差异，采用针对性的农业作业措施，避免因对农田的盲目投入所造成的资源浪费和过量施肥施药及其它化学物质造成的环境污染，并同时提高作物产量及品质。

目前，精准农业技术主要包括信息采集与存储、数据处理与分析、作业决策生成和决策实施四个部分^[7]，如图 1-1 所示。

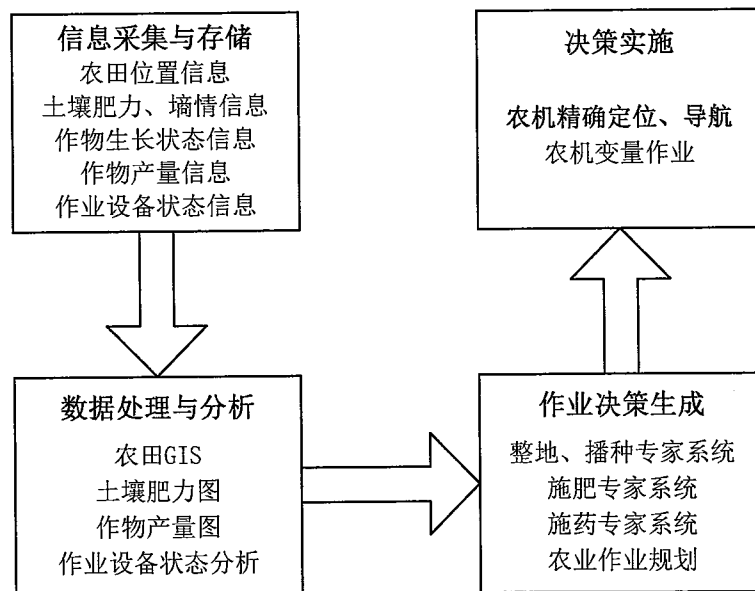


图 1-1 农业精准作业技术体系

Fig.1-1 Precision agriculture technology system

其中，信息采集与存储部分，用于获取田地、作物和作业设备的相关信息，具体包括：农田位置信息、土壤肥力和墒情信息^[8]、作物生长状态信息、作物产量信息和作业设备状态信息等。其中，农田位置信息，是其它所有信息的空间维度，体现了“精准”中的空间差异性。信息采集的方法根据信息类型的不同，又包括手工采集、农机作业时采集、遥感采集等多种形式。农田位置信息、作

物产量信息^[9]和作业设备状态信息通常使用农机作业时采集的方式；土壤肥力和伤情信息、作物生长状态信息，可以手工采集也可以使用遥感采集的方法。

数据处理与分析部分，将采集的农田、作物和作业设备信息进行处理和分析，得到农田、作物和作业设备等的格式化描述数据库，以用于作业决策的生成。

作业决策生成部分，根据各类农田、作物信息的数据库、作物生长模型以及支持精准作业的各类专家系统，分析作物生长状况，预测作物生长趋势，形成诊断图、作业处方和实施计划等。

决策实施部分，包括农机定位导航和变量作业。农机导航的作用是使农机按照优化的作业路径工作，减少重复作业区和遗漏作业区的面积，提高工作效率。同时，为变量作业控制部分提供作业机械当前的位置、速度等信息，使变量作业控制系统可以根据当前的田地位置信息、土壤环境等变量信息，动态地控制播种、施肥、施药等作业中的工作参数。

1.3 国内外农机导航技术研究现状

农机导航技术通过位姿传感装置，获取当前位置信息，将其与目标路径对比，根据结果控制农机的行进方向，使其沿目标路径行驶。由于能够自动控制农机的行驶方向，所以驾驶员可以将注意力集中在作业机具的操作上，显著降低了作业强度、提高了生产效率和农机利用率。

农机导航技术的发展，与全球定位系统（Global Positioning System, GPS）的推动密切相关。GPS 从 20 世纪 70 年代后期开始建立，直到 20 世纪 90 年代初 GPS 可以应用^[10]之前，一直没有可以商用的自动导航系统^[11]。1994 年双频 RTK 的精度达到厘米级^[12, 13]；而且伴随着半导体技术的进步，GPS 定位装置的成本也在迅速下降，采用 GPS 定位系统作为位置传感器，开始在经济效益上变得可行^[14]。所以，进入 21 世纪以来，采用 GPS 定位的农机导航系统进入商用化阶段，并迅速在欧美国家得到大范围的推广应用^[15, 16]。在国内，到目前为止，尚未出现商业化农机导航产品，在黑龙江垦区和新疆生产建设兵团已经得到广泛使用的农机导航产品都引进于美国和加拿大等西方国家。

在研究农机自动导航的文献中，导航通常具有两层含义^[17]。（1）定位，在一个已知坐标系内确定农机的位置、速度等信息；或者确定农机与相关参照物的相对位置。（2）控制，使农机沿着某种路径行驶，或者遵照某些规则行驶。

定位方面，主要包括传感器技术、数据融合技术等。目前用在农机导航中的定位方法有很多种，包括机械式、电缆铺设、信标定位、机器视觉、GPS 定位等，当导航系统中的传感器检测内容有重合时，则可以通过数据融合技术提高传感器信息的可信度和精度。

控制方面，主要包括路径规划、农机建模、导航控制和转向控制等^[18]。路径规划，即定义农机的期望行驶路径。当定位信息具有全局坐标时，通常采用预先规划方式；当定位信息为从当前作业对象获取的特征值时（如距垄沟的距离等），通常采用实时规划方式^[19]。农机建模，为导航控制方法和转向控制方法的设计提供依据。农机导航控制中涉及到多种模型，包括农机本体模型、转向执行机构模型、农具模型、地形校正模型等^[20]。导航控制，根据当前农机状态和目标路径，生成用于控制农机转向角度的转向角指令，从而使农机沿着目标路径行驶^[21]。导航控制算法包括很多种，常见的有比例控制、PID、最优控制、纯跟踪控制、模糊逻辑和人工神经网络等^[22]。转向控制，控制农机的转向系统转动，使转向角跟踪导航控制器给出的指令角度值序列。转向控制算法也有很多种，常见的有PID、自适应PID、模糊逻辑等。

1.3.1 典型农机导航控制系统结构

总结国内外文献中农机导航控制系统的机构，在文献[15]所提结构的基础上，修改后得到典型农机导航控制系统的逻辑结构如图 1-2 所示。

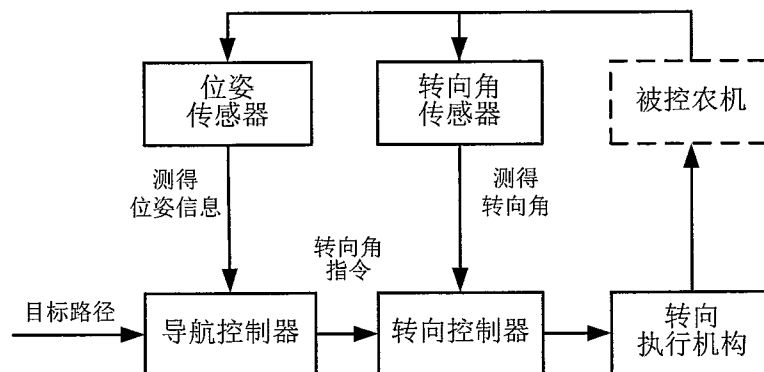


图 1-2 典型农机自动导航控制系统结构图

Fig.1-2 Typical agricultural machinery automatic navigation control system structure

在图 1-2 中，农机导航控制系统分为导航控制器、位姿传感器、转向控制器、转向执行机构和转向角传感器五部分。

其中，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。

位姿传感器，通常包括位置传感器、姿态传感器、速度传感器等，用于测量农机当前的位置、姿态角（包括航向角、俯仰角和横滚角）信息及位置和姿态角的变化速度，即农机运动速度和转动角速度等^[23]。

转向控制器，根据农机的当前转向角和来自导航控制器的转向角指令，按照某种转向控制策略，计算出对转向执行机构的控制量，如频率、电压等等，从而控制转向执行机构的运转，将农机转向轮转动到转向角指令要求的角度。

转向执行机构，通常是整个农机导航控制系统的唯一执行机构，作用是将转向控制器的控制信号转换为对农机转向轮的转向力矩，使转向轮发生转动。

转向角传感器，测量农机当前的转向角度信息，用作转向控制回路的反馈传感器。

导航控制器和转向控制器可以运行于同一硬件平台，也可以各自具有独立的处理器^[24]。无论采用哪种形式，两者之间通常仅通过转向角指令及少量的启停指令等进行耦合。

农机导航控制系统的工作原理为：开始自动导航控制后，导航控制器接收位姿传感器的数据，将其与目标路径对比，根据导航控制算法计算出当前的转向角指令并发送给转向控制器；转向控制器将接收到的转向角传感器的数据与转向角指令对比，根据转向控制算法，生成对转向执行机构的驱动信号，转向执行机构驱动农机的转向轮转动到转向角指令要求的角度；农机在行驶中转动转向轮，其新的位姿状态在下一个控制循环中由位姿传感器进行测量，并发送给导航控制器。这样，就完成了导航控制的一轮迭代过程，如此循环下去，即可实现农机对目标路径的持续追踪。

在图 1-2 中，位置信息的获取方法有很多种，对应的导航控制方法也不尽相同。这里根据位置信息的获取方式进行分类，可以将导航控制模式分为两大类：基于本地信息的导航控制方法和基于预设路径的导航控制方法。在前一种方法中，农机通过传感装置获取作业对象的特征信息，例如垄沟侧边、上次收割的作物边缘、作物杆茎等，并通过机械机构、电子技术等转换得到农机相对于作业对象的某种相对位置信息，从而控制农机的当前走向；作业前并无具体路径，导航控制方法中也不存在全局意义上的位置信息。在后一种方法中，农机按照作业前规划好的路径进行追踪控制，该路径在当前作业田地中具有统一的位置信息描述，例如以信标作为参考点，或者使用 GPS 的全局定位信息进行路径描述等。下面分别对两类农机导航控制方法进行综述。

1.3.2 基于本地信息的农机导航方法

基于本地信息的农机导航方法主要包括机械导航、电磁诱导、视觉导航等。下面分别进行介绍。

1.3.2.1 机械导航

机械导航是通过机械装置获取农机与作物或者犁沟的相对位置信息，从而控制农机的转向。机械导航是农机导航中出现最早的方式，从 20 世纪初就开始出现用于帮助拖拉机作业更均匀的机械导航装置。早期的一个典型例子是 1913 年出现的 Big Four 拖拉机^[11]，该拖拉机具有纯机械式自动转向机构，该转向机构的导向轮沿上次耕作的边缘行走，该轮的行走方向通过机械横向偏移后用于控制拖拉机的行走方向，使拖拉机拖带的农具沿着上次的耕作的边缘作业。

Hilton 等^[25]研制了具有自动驾驶装置的拖拉机，该拖拉机能够平行于前一次作业的犁沟行驶，这样可以避免拖拉机将已经犁过的土壤压硬。使用该自动驾驶功能前，需要驾驶员先手动完成一行作业，后续作业中，拖拉机即可以自动平行于前次作业的犁沟行驶。相对于 Big Four，该拖拉机采用了更为复杂的垄沟跟随传感装置，该装置的触杆一端悬挂固定在拖拉机上，另一端采用弹簧机构与犁沟的侧边紧贴；犁沟侧边的变动，通过一系列机械连接传递到拖拉机的转向液压阀上，转向液压阀控制拖拉机的转向轮转动，使拖拉机平行于犁沟行驶。

Suggs 等^[26]使用安装有弹簧的机械式触杆对烟草的杆茎进行探测，弹簧的受力用于控制电液阀伸缩，该电液阀进一步控制转向油缸的动作，从而实现自动转向控制。触杆安装在拖拉机的前方，所以反馈信息中既包含航向信息也包含位置偏差信息，但是，如果作物行中出现缺株，且缺少的距离大于触杆的长度，则会使控制失效。Kalojev 等^[27]针对该缺点进行了进一步改进，设计的触杆在没探测到杆茎时，进行震动并继续搜寻下一株，与此同时，车辆保持当前航向角度不变继续行驶，直到触杆检测到下一株作物。

上述机械导航方法，使用的传感装置为纯机械式，从传感信息到农机转向控制的转换方式也是纯机械方法，这些导航控制方法通常控制精度较低、适应性较差。随着电子技术的进步，研究人员开始将电子信息技术引入传感器端和控制端。

Yekutieli 等^[28]研制了用于葡萄园的辅助驾驶装置，安装了该装置的拖拉机在行驶时，触杆将探测到的信号发送给控制系统，控制系统根据信号判断拖拉机与两侧葡萄行之间的距离，生成转向角度指示信号，并点亮转向指示光靶上的相应指示灯，由驾驶员根据转向指示光靶手动控制拖拉机进行转向，实现了辅助驾驶。何卿等^[29]针对玉米秸秆行间作业设计了接触式拖拉机导航控制系统，该系统采用接触式传感器对玉米秸秆进行检测，接触式传感器由触杆、转轴、对中杆、对中弹簧、角位移传感器等构成。在对中弹簧的作用下，触杆与玉米秸秆接触时受力会转动一定的角度，该角度通过角位移传感器进行检测，并传

递给导航控制器。导航控制器根据转动角度的大小,获得拖拉机偏离玉米秸秆的距离大小,经过控制算法得到对拖拉机目标转角控制信号,并进一步由转向控制回路实现转向角的调控,最终实现秸秆行间自动导航。

对上述机械式导航方法进行总结,可以发现,无论采用导向轮还是触杆,传感装置的作用就是为了获取农机上一点到跟随目标的横向偏差,通常具有结构简单的特点,但是由于机械式传感机构的感应速度较低,当农机行驶速度提高时,会导致导航精度显著降低^[30]。

1.3.2.2 电磁诱导

电磁诱导方法,是指在目标路径上铺设电缆,电缆中通有高频交流信号,农机通过检测电缆辐射出的电磁信号的强弱,获得与电缆之间的距离偏差,进而对农机行驶方向进行调节。

Tosika 等^[31]研制了果树喷雾机器人,采用埋设在地下的电缆进行诱导,利用模糊逻辑控制方法完成了果树喷雾的自动导航控制。宋健等^[32]研制了电磁诱导式喷雾机器人,机器人目标行走路径,由埋设在田间通、有高频电流的电缆产生,导航系统利用一对电磁感应传感器的信号电压差值判断机器人位置,采用 PID 方法完成机器人的自动行走控制。杨世胜等^[33]针对温室内农药喷洒作业自动化的需求,设计了一种电磁诱导式农用喷雾机器人自动导航系统,该系统通过线圈感应电缆位置,并采用霍尔芯片等设计了磁标志检测传感器用于检测某些特殊位置预先放置的铁磁体,从而在该位置执行某些特殊的操作。

电磁诱导导航的实现原理比较简单,导航精度较高。但是,由于需要预先埋设电缆,所以不适应于大田作业。多用于果园、温室等面积相对较小,而且作物种植较为规律的地方。

1.3.2.3 视觉导航

视觉导航中,根据视觉传感器获取的作物图片或者田地图片,进行作物、田地特征的识别,从得到相对位置和航向信息^[34]。机器视觉在导航中的使用方法有多种,最常见的是根据成行生长的作物、犁地和待收获作物的边界,获取导航基准线^[35,36]。Benson 等^[37,38]设计了一种用于联合收割机的导航系统,该系统通过安装在收割机前端右侧的摄像机获取图像,并根据收割边缘判断收割机的相对位置,进而控制收割机沿着边缘收割。Marchant 等^[39]采用霍夫变换对花椰菜进行作物行识别,达到了 10Hz 的识别速度,而且算法对杂草等干扰信息具有较高的宽容度。

在机器视觉导航中,通常采用门限值方法将作物从图片中识别出来,但是如何在光线不断变化和作物长势各不相同的情况下,找到合适的门限值是一个

难题。另外,如何将作物和杂草区分开,是另一个需要解决的问题。为此,Hague 等^[40]采用带通滤波器来降低图片中杂草和阴影所引入的灰度,Pinto 等^[41]尝试使用主成分分析法从图像中获取作物行特征,都取得了比较好的效果。

Han 等^[42]基于 k 均值聚类方法开发了作物行分割算法,并将该算法的结果用于拖拉机导航控制,该拖拉机可以实现直线和曲线自动导航控制。Okamoto 等^[43]开发了用于除草的自动导航系统,该系统能够采用 CCD 摄像机获取作物行图像,经过计算机处理后用于获取农机与目标作物行之间的偏差。Tillett 等^[44]设计的用于谷物的机器视觉导航系统,从相邻的三行中,每行提取五个点构成导航基准线。该导航系统在大麦地中进行了实验,在 6km/h 的速度下跟踪误差的标准差为 13mm。Owens 等^[45]开发的 New Holland 2550 型机械在收割作物时,用视觉传感器在作物收割边缘区域切割草料。该机械行驶速度可达 7.2 km/h,而且可以区分阴影和障碍物的干扰、感知路的尽头。

为了获取更多的作物或者田地信息,一些研究者采用双目视觉传感器获取获取三维图像,由于三维图像具有不同视差,所以重构后可以降低模糊光线的影响。Kise 等^[46]开发了基于立体视觉的农机作物行追踪导航系统。该系统以 3m/s 的速度追踪直线作物行或者曲线作物行,其侧向追踪误差的均方根值能够保持在 3-5 厘米之间。

由于机器视觉技术能够获取田间作物的实际生长信息,这可以让农机在自动导航时使轮胎沿着作物行间隙行驶,避免轧苗,这对于中耕、除草、喷药等作业至关重要。虽然采用机械触杆导航的方式也能够识别作物行,但是仅适应于有明显杆茎且生长到中后期的作物,如玉米、甘蔗等,而对于幼苗期作物或者甜菜、花椰菜等无显著杆茎作物则无能为力。而随着计算机、集成电路技术的发展,一些复杂的特征提取算法已经可以以较低的成本做到实时在线运行,视觉导航的实用性增强,所以,直到目前,视觉导航仍是农机导航控制研究的热点之一。

1.3.3 基于预设路径的农机导航方法

在基于预设路径的农机导航控制方法中,农机的目标路径在作业开始前已经完成规划,该路径在当前作业田地中具有统一的位置信息描述方式。符合这个特征的农机导航方法,主要有无线电信标导航和 GPS 导航两种。

1.3.3.1 无线电信标导航

无线电信标定位方法在航空、航海领域应用非常广泛,但是其定位精度通常很低,无法直接应用在农业领域。美国曾有公司专门生产了用于田间的小型

无线导航系统 (AGNAV)^[47], 该系统可用于喷洒和施肥作业, 通过显示信息提示驾驶员进行车辆导航操作。该系统在 0.8km 范围内的定位精度能够达到 $\pm 0.23\text{m}$ 。Searcy 等^[48]采用船用微波距离测量装置进行田间车辆的定位。该装置使用两台或更多台安装在田地之外的发射机应答器, 实现了车辆与发射机应答器之间的定位误差小于 $\pm 1\text{m}$ 的定位精度。

受视距范围的限制, 无线电信标定位系统的有效覆盖范围较小, 而且定位精度无法满足农机导航控制的需求, 不具备实用性。而同样采用无线电定位方法的 GPS, 则由于其覆盖范围广、定位精度高, 在二十世纪九十年代初期实现商用后在农业领域迅速得到了广泛应用。

1.3.3.2 GPS 导航

GPS 是美国国防部研制和维护的中距离圆型轨道卫星导航系统, 它可以为地球表面绝大部分地区 (98%) 提供准确的定位、测速和高精度的时间标准。该系统于 1970 年代开始进行研制并于 1994 年全面建成。GPS 信号分为民用的标准定位服务 (Standard Positioning Service, SPS) 和军规的精确定位服务 (Precise Positioning Service, PPS) 两类, SPS 对全球免费开放使用, 无需付费。

但是, 采用单一 GPS 接收机的定位精度很低, 约 10m 左右, 无法满足农机导航控制的需求。随着二十世纪九十年代中期 RTK-GPS (Real Time Kinematic - Global Positioning System, 实时动态差分 GPS) 实现厘米级定位精度^[49]后, RTK-GPS 已经逐渐成为农业高精度导航的主要设备^[50]。

斯坦福大学 GPS 实验室的 O'Connor 等进行的将高精度 RTK-GPS 应用在农机导航中的研究^[51], 是最早的具有实用价值的探索。他们采用了单一的 RTK-GPS 定位方式, 四天线的 GPS 系统为 John Deere 7800 系列拖拉机在田间行驶速度 3.25km/h 时提供了航向角误差为 0.1 度, 偏移量为 2.5cm 的导航信息。控制算法中利用方向偏差、方向偏差变化率、转向角度、转向角度变化率、跟踪误差等五个状态变量建立了拖拉机运动学方程, 设计了最优操纵控制器进行导航控制实验, 路径追踪误差的标准差为 5.27cm, 平均偏差为 -0.22cm。

由于 GPS 导航定位需要天空开阔无遮挡物, 不受时间限制和几乎不受气候影响, 等特点, 所以本世纪以来, 众多对农机导航开展的研究都采用了 GPS 定位技术。但是, 由于在车辆导航控制中, 必须还要得到农机的姿态信息, 即姿态角, 包括航向角 (yaw)、俯仰角 (pitch) 和横滚角 (roll), 而普通的单天线 GPS 只能提供位置和速度信息, 无法提供姿态信息, 所以, 目前国内外的研究多是针对如何使用传统的光纤陀螺 (Fiber Optical Gyroscope, FOG) 或者低成本的微机械惯性测量装置^[52, 53] (Micro-Electro-Mechanical Systems Inertial Measurement Unit, MEMS IMU)、电子尺等与 RTK-GPS 或 DGPS (码差分 GPS)

进行组合导航,以期同时获得所需要的位置、速度、姿态信息,并利用数据融合技术提高导航的精度^[54, 55]。

日本国家农业研究中心农业机械及系统研究小组使用天宝 2cm 精度的 MS750 GPS 与 Japan Aviation Electronics 生产的 IMU JCS-7401A,对改造后的久保田 SPU650 型水稻收割机进行自动导航控制^[56],实现了插秧精度平均横向偏差小于 3cm,最大横向偏差不大于 4cm。

美国伊利诺伊大学厄巴纳-尚佩恩分校 (University of Illinois at Urbana-Champaign) 农业工程学院张勤等将 RTK-DGPS 和光纤陀螺 (fiber optic gyroscope, FOG) 综合应用于拖拉机作业路线跟踪导航,研究了拖拉机的 2 自由度线性动力学模型,提出了基于预瞄策略的动态路径搜索算法,用于拖拉机直线或者曲线作业路线的自动跟踪导航。田间试验结果表明:拖拉机前进速度为 3.5 m/s 时,最大跟踪误差小于 0.1m,均方根误差小于 0.03m^[57]。

进入二十一世纪以来,国内学者开始对农机 GPS 导航系统进行广泛深入的研究。国内八一农垦大学的庄卫东等对农机直线行走的 DGPS 导航算法进行了研究^[58]。华南农业大学的张智刚等对插秧机和拖拉机的 RTK-GPS 自动导航控制系统^[59, 60]、航向角度估计算法^[61]等进行了比较深入的研究。中国农业大学的周建军和刘兆祥等^[62, 63]采用 Trimble RTK-GPS 4700 作为位置传感器,使用简化的二轮车模型,用模糊控制方法实现了车辆的直线和曲线路径追踪。中国农业机械化科学研究院的伟利国等^[64]在 XDNZ630 型水稻插秧机上安装了天宝 RTK-GPS 接收机 AgGPS332 进行定位,采用模糊控制策略实现了直线路径追踪,在 0.6m/s 的行驶速度下,最大追踪误差小于 10cm。

另外,中国的北斗区域卫星导航系统(也称北斗 2 代 1 期)于 2012 年 12 月 27 日正式开始运行,相关配套芯片的研发已经初步完成,目前在亚太地区已经能够向用户提供与 GPS 精度相似的载波相位差分定位即 RTK 定位服务^[65]。由于国家对北斗导航系统在农业领域应用的大力支持,北斗 RTK 定位装置的价格大幅低于进口的 RTK-GPS 装置,这将对国内农机导航控制系统的研究和开发起到推动作用。

1.4 问题分析

分析国内外对农机导航控制系统的研究,尤其是国内,主要关注的是导航信息检测、导航及转向控制方法研究等,通常以某种具体的农机为应用对象进行电控改造,并采用各不相同的软硬件平台进行检测和控制,没有统一的软硬件和通信接口标准,难以与其它农机车载电子系统,如变量作业系统,进行信息交互,这对于导航控制系统的应用和推广极为不利。

为了解决这个问题,本文研究了分布式导航控制平台及其集成技术,根据

农机导航控制应用的需求,对导航控制系统进行了统一的功能划分,并对核心装置的硬件接口、软件接口和通信接口进行了统一设计。另外,本文还设计了机械式和电液式两种转向执行机构、连杆式和直线位移式两种转向角测量机构,增加了平台的通用性,使本平台可方便快捷地集成应用在大多数常见的农机上。

1.5 论文的主要研究内容及结构安排

本文研究了一种分布式导航控制平台,规划设计了平台的功能和结构,进行了核心装置的功能设计和软硬件设计,并进行了平台的集成技术研究,制定了统一的硬件、软件和网络集成规范。为了建立完善的农机导航控制系统,本文还对导航控制系统中涉及的主要方法:转向控制算法、农机模型和导航控制算法进行了深入研究,提出了基于预测控制的串级转向控制方法、基于状态预测的农机运动学模型和基于模糊自适应比例控制的农机导航控制方法。最后,本文将所研究的导航控制平台、相关模型和控制方法分别在联合收割机和拖拉机上进行了集成应用,成功地实现了高精度自动导航控制。

本人学位论文的组织形式如下:

第1章 绪论。介绍了研究背景及意义,精准农业的概念和发展现状,并重点对农机导航控制技术进行了综述。

第2章 分布式导航控制平台设计。设计了采用CAN总线进行通信的分布式导航控制平台总体结构,划分了各装置的功能,对系统中的核心装置进行了详细的功能及软硬件设计。并在农林机械串行通信控制网络协议ISO11783的基础上,自行设计了导航通信协议。

第3章 转向执行机构建模与控制方法研究。以机械式转向机构为研究对象,采用机理建模和辨识建模相结合的方法,建立了转向控制系统模型。提出了基于预测控制的农机转向控制方法,在CarSim与Simulink联合仿真环境中,将提出的转向控制方法进行了仿真验证,并在洋马VP6插秧机上进行了实车实验。

第4章 农机建模与导航控制方法研究。在农机运动学模型基础上,根据几何关系,推导提出了农机运动状态预测模型,并将该模型应用在PID导航控制方法中进行了直线路径追踪仿真。提出了基于模糊自适应比例控制的导航控制方法,根据横向偏差和航向偏差的值,采用模糊推理在线调节比例系数,在提高路径追踪速度的同时也降低了追踪误差。

第5章 农机导航控制系统集成技术研究。针对目前国内研究开发的农机导航控制系统结构多样、接口封闭、难以与农机其它车载电子系统互联等缺点,研究提出了农机导航控制系统的集成规范。从硬件系统集成、软件系统集成和网络集成三个方面,对农机导航控制系统的集成技术进行了研究,并制定了相关接口规范。

第 6 章 导航控制平台在农机上的集成应用。将上述导航控制平台、相关模型和控制方法集成应用在雷沃谷神联合收割机和雷沃 TA800 拖拉机上，并成功地实现了路面和田间高精度自动导航控制。

第 7 章 结论与展望。总结了论文的主要研究内容及创新点，指出了进一步研究的主要方向，展望了论文研究成果及农机导航技术在我国农业生产方面的巨大应用潜能。

第2章 分布式导航控制平台设计

2.1 引言

在农机导航控制研究中,由于农机的种类繁多,转向系统结构各不相同,因此,本章设计开发了一种具有较好通用性、能够快速集成应用到不同农机上的导航控制平台。完成了平台的总体结构设计、平台核心装置的功能和软硬件设计,并在农林机械串行通信控制网络协议 ISO 11783 的基础上,设计了平台的通信协议。

2.2 导航控制平台总体结构设计

2.2.1 平台设计目标

设计的总目标是实现一个通用的农机导航控制平台,可以快速方便地应用在各种常见农机的导航控制中。该平台需要实现以下目标:

(1) 平台各装置之间的通信符合 ISO 11783 标准,能够与农机上其它车载电子系统实现互联。由于现代农机的车载电子系统,如变量作业控制系统、农机 ECU (Electronic Control Unit, 电子控制单元) 等,通常都采用 ISO 11783 协议进行通信,为了与其在通信上互相兼容,实现信息共享,本平台也要遵守 ISO 11783 协议。同时,借助该协议的自定义报文,可以制定统一的导航通信协议。

(2) 采用分布式控制结构。以前的研究中有的采用集中式控制结构,导航控制器直接输出对转向执行机构的物理控制量,如驱动电机转动的电流、或控制比例阀开度的电压等。这种结构的控制系统具有结构紧凑的优点,但是对不同类型农机的适应性较差^[66]——由于不同农机的转向系统特性各不相同,需要对导航控制算法进行较大的更改。而在分布式控制结构中,将转向控制和导航控制分开,转向控制具有独立的控制回路,转向控制器对回路外部的接口统一为数字控制指令,屏蔽了回路内部执行机构的细节。这样的模块化设计思想,利于导航控制算法的设计,便于导航控制系统的集成。

(3) 能够在农机上快速集成。平台能够提供不同的导航控制装置组合,可以根据农机的特点,选择更容易安装的传感和执行装置。平台的各种核心装置,特别是转向执行机构和转向角检测装置尽可能做到体积紧凑,结构可靠,便于安装。

2.2.2 平台总体结构

(1) 通信方式选择

由于本文设计的导航控制平台通信上需要符合 ISO 11783 协议, 而 ISO 11783 是以 CAN (Controller Area Network, 控制器局域网) 协议为底层协议所设计的应用层协议 (参见 2.4 小节), 同时, 采用 CAN 总线也易于建立分布式的控制结构, 所以导航控制平台的通信方式选用 CAN 总线通信。

CAN 是一种支持实时分布式控制的串行通信网络。20 世纪 90 年代初, Bosch CAN 规范被提交作为国际标准。1993 年国际标准化组织颁布了 CAN 的国际标准 ISO11898, 并先后对该标准做了补充和修改。目前 CAN 总线已在汽车、农林机械、制造业、建筑管理、医疗设备、航空等领域得到了广泛的应用。

CAN 工作于多主方式, 采用的总线竞争机制是一种无冲突的总线竞争方式, 且 CAN 协议废除了站地址编码, 而代之以对通信数据进行编码, 这可使不同的节点同时接收到相同的数据。CAN 支持报文的优先权, 能够保证延迟时间且设置灵活, 支持多主机和错误检测和标定。当有报文被破坏并没有成功重传时只要总线一处于空闲, 就自动将破坏的报文重新传输。CAN 能够将节点的暂时性错误和永久性错误区分开来, 并且可以自动关闭错误的节点。这些特点使得 CAN 总线构成的网络各节点之间的数据通信实时性强, 并且容易构成冗余结构, 提高了系统的可靠性和系统的灵活性^[67]。

(2) 平台结构

根据农机导航控制应用对传感器、控制器、执行器以及人机交互的需求, 本文将导航控制平台从硬件装置上进行了划分。在导航控制过程中, 农机的位置信息是必须检测的; 而若要达到比较好的控制效果, 导航控制方法中通常也需要考虑农机当前的航向信息; 导航控制中通过对转向角的适当调节来改变农机的航向, 从而减小农机路径追踪的偏差, 调节转向角的过程中需要获取转向角的反馈值。所以, 平台包括三种传感器及其配套 CAN 节点。

无论是追踪预设路径还是追踪根据传感器获取的位置偏差信息实时规划的路径, 农机导航控制系统都需要作出调节农机转向角的决策, 并进行转向角的调节控制。与本平台选用分布式控制结构的原因相同, 基于模块化设计思想, 这里将转向角的决策过程划分在导航控制器中完成, 转向角的调节控制划分在转向控制器中完成。

在农机导航应用中, 驾驶员需要了解导航控制系统的工作状态、对其进行控制等, 这需要一个便于使用的人机交互接口, 平台中设计了带有触摸操作界面的田间计算机来实现这些功能。

综合上述分析, 本文将导航控制平台的核心装置划分为田间计算机、导航控制器、转向控制器、转向执行机构和传感器装置五种, 其中, 传感器装置包括位置、姿态、速度三种传感器及各自的配套 CAN 节点。将这些装置使用 CAN 总线互联, 得到导航控制平台的系统结构如图 2-1 所示。

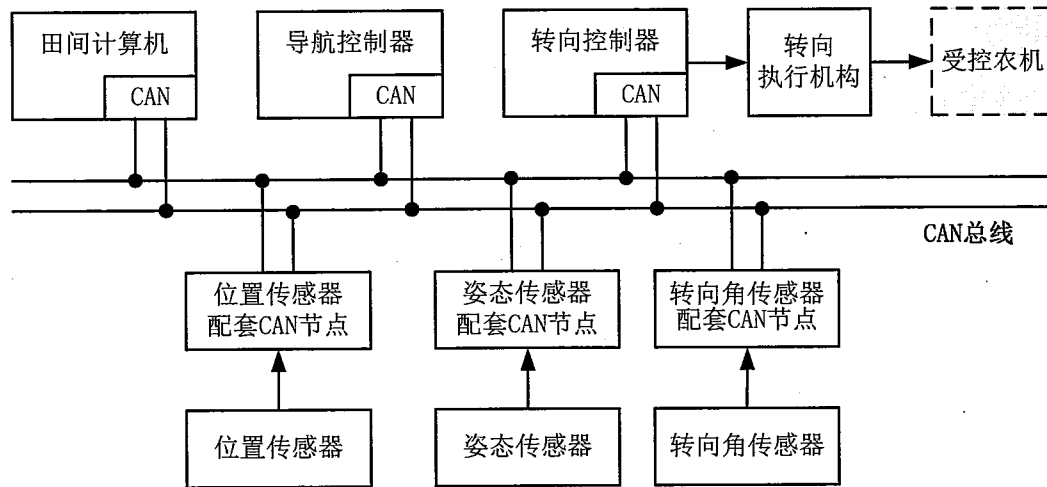


图 2-1 分布式导航控制平台结构

Fig.2-1 Distributed navigation control platform structure

(3) 核心装置功能设计

在图 2-1 所示的导航控制平台结构中, 各装置主要完成的功能如下:

1) **田间计算机** 是自动导航控制系统的人机界面, 负责人机交互, 包括配置各种参数、田间路径规划、导航任务管理、目标路径下载、导航作业实时显示等。使用者通过触摸屏和 SD 卡等方式与导航控制系统进行交互, 是在进行导航作业时, 使用者唯一需要直接进行操作的装置。

2) **导航控制器** 用于运行数据融合、状态估计、路径追踪等多种算法, 其中, 路径追踪算法是必需包含的。数据融合算法, 在系统中含有多多种导航传感器 (如 GPS、惯性导航器件、视觉传感器等) 的情况下, 用于将多种传感器的量测信息互相融合, 获得准确度更高的导航信息。状态估计算法, 根据传感器的量测数据来估算动态系统内部状态, 用于估算通常难以测量到的农机状态, 如侧偏角度等。路径追踪算法, 由目标路径信息和当前农机状态信息, 根据某种控制方法, 生成对转向控制器的控制指令。

3) **CAN 节点** 由于农机自动导航控制系统中用到的传感器种类较多, 各种传感器的硬件接口方式也各不相同, 如 TTL UART、RS232、模拟电压信号、TTL 数字电平信号等, 所以这里设计了一种通用的 CAN 节点电路, 用于完成传感器数据的获取、预处理及与 CAN 总线的互连。

4) **转向执行机构** 用于驱动农机的转向轮实现受控转动。针对不具备液压转向系统的农机, 或不方便进行电控液压转向改造的农机, 本文设计了由电机、齿轮副等构成的机械式转向执行机构; 针对具备液压转向系统且方便进行电控液压转向改造的农机, 本文设计了液压式转向执行机构。

5) **转向控制器** 根据导航控制器输出的转向角指令和测量到的实际转向角反馈值, 按照转向控制算法控制转向执行机构的动作, 从而驱动农机转向轮转动到指定的角度。

2.2.3 平台工作原理

本平台是用于进行农机自动导航控制的通用平台。借助设计的机械式和电液式两种转向执行机构, 能够方便地让各种常见农机具备自动导航控制功能。

整个导航控制平台的工作原理为:

步骤 1: 驾驶员操作田间计算机, 创建导航作业任务(或继续执行已有的任务), 向导航控制器下载目标路径数据; 开启自动导航控制。

步骤 2: 导航控制器根据从位置传感器和姿态传感器获取的农机位置、速度、姿态以及从田间计算机得到的目标路径等信息, 采用导航控制算法生成转向角指令。

步骤 3: 转向控制器接收导航控制器的转向角指令, 根据指令和转向角传感器的反馈值, 采用转向控制算法生成对转向执行机构的控制量, 从而控制转向轮的转动方向、转动速度和转动持续时间。

步骤 4: 重复步骤 2 和 3, 通过对农机行驶方向的控制, 最终达到追踪目标路径的目的。

步骤 5: 当导航作业任务完成时, 导航控制器自动停止导航控制, 并由田间计算机向驾驶员发出提示。另外, 驾驶员也可以通过田间计算机随时手动停止自动导航控制。

2.3 核心装置设计

2.3.1 田间计算机

由于农机导航控制系统工作在车载环境下, 所以作为人机交互界面的田间计算机应具备结构紧凑、显示直观、操作简便的特点。这里以 ARM9 处理器、触摸屏为核心, 采用 Windows CE 操作系统设计了田间计算机的软硬件系统。

(1) 硬件设计

由于田间计算机需要完成动态绘图的工作，对处理器的浮点运算能力要求比较高，所以这里选用 NXP 公司生产的 LPC3250 作为处理器。LPC3250 基于 32 位 ARM926EJ-S 内核设计，内部带有矢量浮点协处理器（VFP），VFP 协处理器在标量模式下能将典型的计算速度提高四到五倍，在优化矢量模式下则提高得更多。

由于田间计算机是用户接口，所以这里设计了一个触摸屏用于人机交互。导航控制器的硬件原理框图如下图所示。

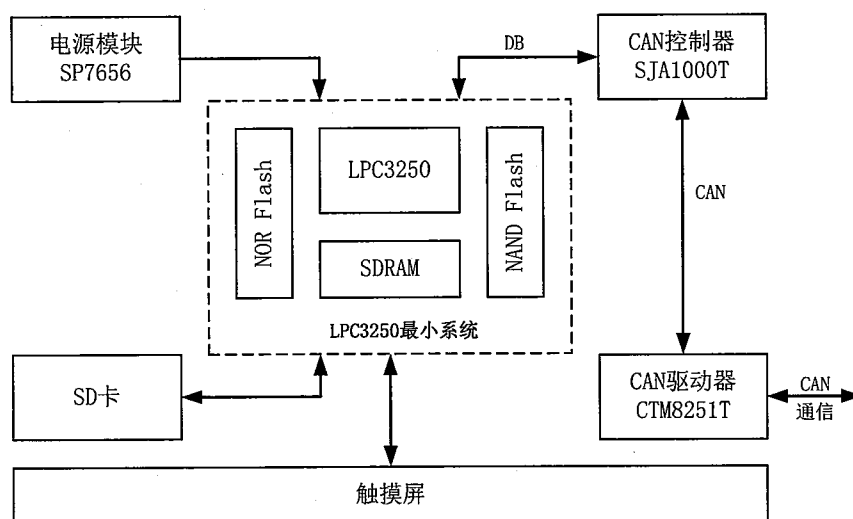


图 2-2 田间计算机硬件原理框图

Fig.2-2 Hardware functional block diagram of field computer

由于目前基于 ARM926EJ-S 内核的 ARM9 芯片内部都没有 CAN 控制器，所以这里需要利用 LPC3250 的数据总线、地址总线和片选信号，外扩一片 CAN 控制器 SJA1000T 和一片 CAN 驱动器 CTM8251T，构成 CAN 通信模块。SJA1000T 是一款独立的 CAN 控制器，它是 NXP 半导体 PCA82C200 CAN 控制器（BasicCAN）的替代产品。而且，它增加了一种新的 PeliCAN 工作模式，这种模式支持具有很多新特性的 CAN 2.0B 协议。

CTM8251T 是一款带隔离的通用 CAN 驱动器芯片，该芯片内部集成了所有必需的 CAN 隔离及 CAN 收、发器件。芯片的主要功能是将 CAN 控制器的逻辑电平转换为 CAN 总线的差分电平并且具有 DC 2500V 的隔离功能。该芯片符合 ISO11898 标准，因此，它可以和其他遵从 ISO11898 标准的 CAN 驱动器产品互操作。该芯片可以连接任何一款 CAN 协议控制器，实现 CAN 节点的收发与隔离功能。在以往的设计方案中需要光耦、DC/DC 隔离、CAN 驱动器等其他元器件才能实现带隔离的 CAN 收发电路，现在只需使用一片 CTM8251T 就可

以实现带隔离的 CAN 收发电路，且隔离电压可以达到 DC 2500V。

SP7656 是 EXAR 半导体推出的一款 PWM 控制模式的异步 DC-DC 降压型稳压器。SP7656 提供的 4.5V~29V 的宽范围输入电压，使其同时能够适用于 12V 和 24V 的应用场合。最大 3A 的持续输出电流也为智能节点器件的全速工作提供了坚实的保证。

在自动导航控制作业中，需要将 PC 生成的目标路径数据传递给田间计算机，并保存作业过程中的相关记录数据^[68]；同时，也为了方便进行田间计算机软件的更新，这里设计了一个 SD 卡接口，用于上述数据的交换。

(2) 软件设计

嵌入式领域中主流的图形操作系统有 Linux、VxWorks、Windows CE 等。Linux 的成本低，但是开发难度较高；VxWorks 多用于航空航天等专业性领域，价格昂贵；Windows CE 是微软公司推出的嵌入式操作系统，开发方法与 Windows 桌面程序相似，容易操作，占用资源少，可以同时执行多个任务。因此，本文选用 Windows CE 作为田间计算机的操作系统。

田间计算机软件主要包括以下五个功能模块：系统设置模块、导航设置模块、车辆设置模块、任务管理模块和地图视图模块。

1) 系统设置模块 主要完成白天/夜间模式设定、触摸屏校准、系统装置检测等功能。其中，白天/夜间模式设定，是通过调节屏幕显示亮度，让屏幕适应周围环境的光线强度；触摸屏校准，用于在 Windows CE 中校准触摸屏的实际感应点；系统装置检测，用于检测各个装置、传感器的工作是否正常。

2) 导航设置模块 主要完成自动导航启停控制、控制算法参数设置等功能。其中，控制算法参数设置功能，根据导航控制器内嵌导航控制算法的不同，可进行多种参数的设置。

3) 车辆设置模块 主要完成车辆参数的设定，如车辆轮距、轴距、作业幅宽、转弯半径等。

4) 任务管理模块 主要完成导航作业任务的创建、保存、导入、导出等操作，并可对各个任务进行标注，记录作业时的温度、湿度、风速、风向、农场 ID、农田 ID、操作员 ID、设备 ID、作物名、操作类型等等。

5) 地图视图模块 用于显示农机的作业路径和作业状态，包括机器视图和农田视图两种，每种视图都能放大或缩小，并显示车辆当前的位置。其中，机器视图用于跟踪机械的作业状态，车辆在地图上保持不动，而地图移动，车辆行驶方向总是朝向地图上方；农田视图是一个鸟瞰视图，视图中车辆移动，地图保持不动，能够看到田间作业的整体情况。

2.3.2 导航控制器

导航控制器是农机导航控制系统的核心，用于完成与导航控制决策相关的各种计算。这里以 ARM9 处理器为核心，采用 uCOS-II 操作系统设计了导航控制器的软硬件系统。

(1) 硬件设计

为了减少导航控制平台中处理器的种类，导航控制器同样采用 LPC3250 处理器。设计的导航控制器硬件原理框图如图 2-3 所示，将该图与图 2-2 比较可知，导航控制器的硬件，与田间计算机相比较，只是去掉了与触摸屏相关的部分，故对其不再重复介绍。

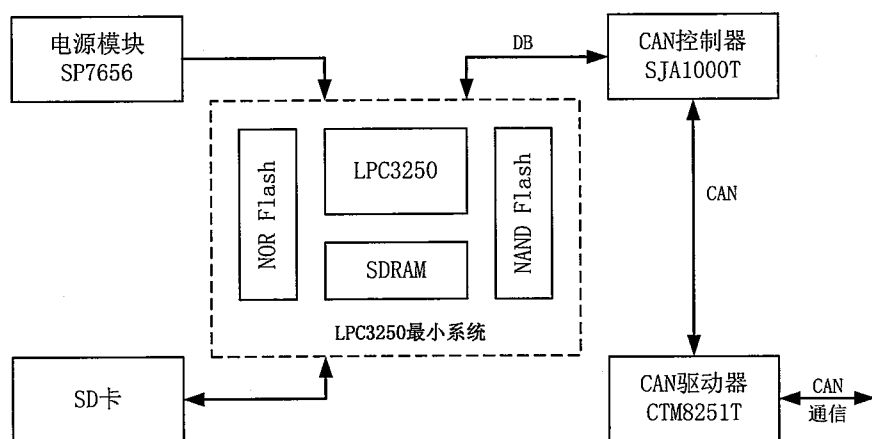


图 2-3 导航控制器硬件原理框图

Fig.2-3 Hardware functional block diagram of navigation controller

(2) 软件设计

uCOS-II 是一个非常小巧的实时操作系统，整个代码分为内核层以及移植层，这样使得它的移植工作很简便。uCOS-II 的 2.51 版本已经通过美国 FAA 认证，具有可靠的消息传递机制和任务调度机制，而且源码开放，可以免费获得，因此导航控制器选用 uCOS-II 作为操作系统。

导航控制器的软件基于多任务结构设计，任务的执行、等待或停止皆由事件触发。这里的事件主要指接收到 CAN 总线上的各种信息，如传感器数据、田间计算机指令等。各个任务的执行由事件触发，所以导航控制器软件的设计，主要就是进行各个任务的设计。

导航控制器至少需要具有如下三个任务：信息获取与解析任务、导航启停控制任务和路径追踪算法任务。另外，根据使用传感器组合的不同，可能有“数据融合任务”；根据所采用导航控制算法的不同，可能有“状态估计任务”等。下

面将对这五种任务分别进行介绍。

1) **信息获取与解析任务** 是整个导航控制器的信息服务任务, 它为其它所有任务提供信息服务。主要完成以下两项工作: 一是完成总线上各种报文的获取与解析; 二是根据报文的解析结果释放相应的信号量, 以触发相应任务或事件的执行。

2) **导航启停控制任务** 是开启或停止导航控制的任务, 该任务通过设置 uCOS-II 任务控制块中的“任务状态参数”, 来启动或者停止“路径追踪算法任务”。

3) **路径追踪算法任务** 是整个导航任务的核心部分, 主要功能是根据“信息获取与解析任务”提供的当前农机的位置和姿态等状态信息, 执行路径追踪算法, 输出转向角指令序列。

4) **数据融合算法任务** 当自动导航控制系统中使用的传感器测量内容有重叠时, 可以在该任务中通过数据融合算法提高测量数据的精度和可信度。当系统采用 GPS 与惯导器件等进行组合导航时, 该组合导航算法也可放在此任务中完成。

5) **状态估计算法任务** 当导航控制算法中使用到的某些状态量, 无法直接使用传感器检测到, 或者有相关传感器但因为成本等因素没有使用时, 可以在该任务中通过相关模型、算法估计出该状态量的值。

2.3.3 转向执行机构

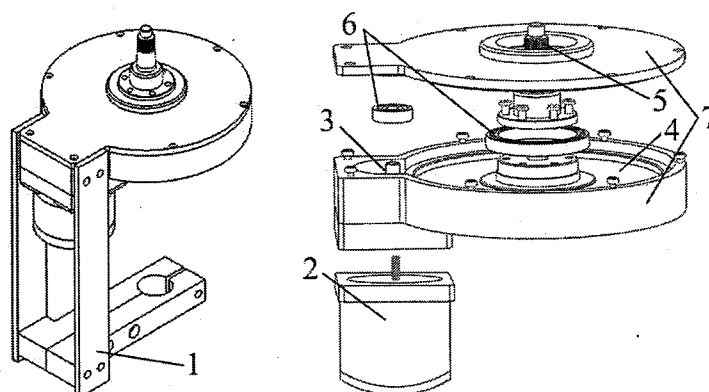
目前常见的农机转向执行机构可以归纳为两大类: 通过电机、齿轮(或链条、摩擦轮等)等驱动农机转向轴转动的机械式和通过控制电液比例换向阀等驱动农机转向油缸动作的电液式。针对不具备液压转向系统的农机, 或不方便进行电控液压转向改造的农机, 本文采用步进电机、齿轮副等设计了机械式转向执行机构, 对于自身具备液压转向系统的农机, 本文采用插装阀等设计了电液式转向执行机构。这里设计的两种转向执行机构, 具有结构紧凑、一体化集成、易于安装的特点。

2.3.3.1 机械式转向执行机构

机械式转向执行机构主要包括齿轮副、步进电机、壳体、安装部件、防转动结构等, 如图 2-4 所示。

从动齿轮通过底部的安装螺纹固定安装在农机转向轴顶端, 延长轴与从动齿轮固定连接, 农机方向盘安装在延长轴顶端; 主动齿轮固定在步进电机转轴上, 步进电机机体固定在壳体上; 滚动轴承外圈固定在壳体上, 内圈分别与从动齿轮、主动齿轮固定连接; 壳体通过防转动结构与驾驶室主体结构固定连接。

当步进电机受控转动时，通过传动比为 10:1 的齿轮副带动转向轴转动，从而驱动农机实现转向操作。



(a) 整体外观图

(b) 主体结构图

1.防转动结构 2.步进电机 3.主动齿轮 4.从动齿轮 5.延长轴 6.滚动轴承 7.壳体

图 2-4 机械式自动转向执行机构

Fig.2-4 Mechanical automatic steering apparatus

本机构中，步进电机选用三洋 86mm 两相混合式步进电机，该系列步进电机体积较对紧凑，输出力矩范围为：2.7~7.4 N·m，经过减速齿轮后的力矩，能够驱动大部分农机的转向轴转动。且在转速达到 1000 转/min 的情况下，该系列步进电机的输出力矩仍可以达到额定值，这有利于提高转向控制的速度。

农机在安装本转向执行机构后，仍需要保留人工转向功能。这里设计的延长轴部件，其上部尺寸外形与农机转向轴顶部相同，所以方向盘可以安装在此延长轴上，从而保留了手动操作方向盘的功能。

当进行手动转向操作时，步进电机转轴随之转动，这将在步进电机驱动回路中产生感应电流，损坏转向驱动器和步进电机。所以，本文在步进电机的两组线圈引线回路中增加了自动转向切换开关，当不进行转向控制时，只需将开关断开，即可以将回路断开，避免了感应电流的形成。

由于采用一体化集成设计，机械式转向执行机构的安装比较简单，只需要进行如下三步操作即可：(1) 将农机方向盘卸下，将转向执行机构底部的安装花键与农机转向轴顶端花键咬合并固定；(2) 将转向执行机构的防转动结构与农机转向轴外壳固定；(3) 将农机方向盘安装在转向执行机构顶端的延长轴上。

机械式转向执行机构的工作原理如下：

步骤 1：手动将自动转向切换开关闭合，切换为自动转向方式。

步骤 2：转向控制器接收到开始转向角指令后，输出力矩保持信号至步进电机，锁定步进电机的转子，使方向盘无法自由转动。

步骤 3: 转向控制器根据接收到的转向角指令、当前转向反馈信息, 通过转向控制算法生成控制量, 经过控制量转换后, 输出对步进电机旋转方向和速度进行控制的电流, 驱动步进电机转动。转动间隙中, 持续输出力矩保持信号。

步骤 4: 转向控制器接收到停止转向角指令后, 切断力矩保持信号的输出, 方向盘恢复自由转动。

步骤 5: 手动将自动转向切换开关断开, 切换为手动转向方式。

本文设计的机械式转向执行机构结构紧凑, 占用驾驶室空间较小, 可以根据方向盘转动扭矩选取不同的步进电机, 能够应用在各种方向盘式农机的自动转向改造上。同时, 因为该机构是串接在原方向盘与转向轴顶端连接花键之间, 不改变原先手动驾驶习惯, 易于安装和推广。

2.3.3.2 电液式转向执行机构

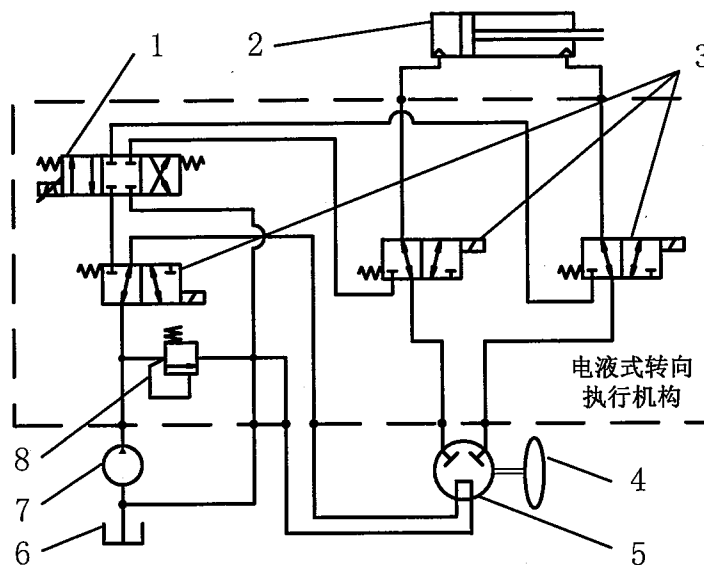
机械式转向执行机构工作时, 是由电机经过减速后驱动农机原转向轴转动, 通过农机原转向系统进行转向操作; 而农机转向系统的角传动比通常较大, 电机的有效扭矩和转速通常较低, 所以导致机械式转向执行机构的转向执行速度相对较慢, 而且由于力矩传递关系复杂, 使得实现机械式转向执行机构精确建模和控制的难度较大。

所以, 对于自身具备液压转向系统的农机, 本文又设计了电液式转向执行机构, 图 2-5 为该转向执行机构的结构原理图及安装示意图。

如图 2-5 所示, 电液式转向执行机构主要由三个电磁开关阀、比例换向阀、溢流阀和集成阀座等构成。其中, 电磁开关阀, 共三个, 用于手动转向/自动转向的工作方式切换; 当默认状态, 即电磁开关阀断开时, 农机原转向液压回路导通, 保持手动转向方式, 此时转向执行机构不工作; 当电磁开关阀导通时, 农机原转向器的液压回路关闭, 自动转向液压回路打开, 农机由手动转向切换为电控自动转向的工作方式。比例换向阀, 三位四通, 配备两个线圈, 通过选择动作的线圈, 决定转向油缸的动作方向, 通过线圈中的电流大小, 决定转向油缸的动作速度。溢流阀, 用于调节液压油路的压力, 保证转向系统在手动转向和自动转向时都能够正常工作。电磁开关阀、比例换向阀、溢流阀都为插式阀, 集成阀座用于集成上述阀体, 并在内部为各插式阀提供连接油路, 在外部留出与农机原液压转向系统进行并联安装的接头。

由于采用一体化集成设计, 电液式转向执行机构的安装比较简单, 只需要进行如下四步操作即可: (1) 将集成阀座通过自身安装螺孔固定在拖拉机前方的合适位置; (2) 将农机连接在液压转向器上的四路油管拆下并安装在转向执行机构对应的液压口上; (3) 将连接转向油缸的两路油管安装在转向执行机构对应的液压口上; (4) 将转向液压泵的压力油管和回油箱油管安装在转向执行

机构对应的液压口上。



1.比例换向阀 2.转向油缸 3.电磁开关阀 4.转向盘 5.农机转向器
6.油箱 7.油泵 8.溢流阀

图 2-5 电液式转向执行机构原理图及安装示意图

Fig.2-5 Principle and installation diagram of the electro-hydraulic steering actuator

电液式转向执行机构的工作原理如下：

步骤 1：转向控制器接收到开始转向角指令后，闭合三个电磁开关阀，油泵的液压油经过电磁开关阀流向比例换向阀，由其驱动转向油缸动作，控制车轮实现转向操作，转向方式切换为自动转向。

步骤 2：转向控制器根据接收到的转向角指令、当前转向反馈信息，通过转向控制算法生成控制量，经过控制量转换后，输出对比例换向阀的导通方向和开度的控制信号，从而控制比例换向阀中液压油的流向和流量。

步骤 3：循环执行步骤 2，实现持续转向控制。

步骤 4：转向控制器接收到停止转向角指令后，闭合三个电磁开关阀，转向方式切换为手动转向。

电液式转向执行机构具有如下优点：比例换向阀的精度较高，因此可以实现较高的转向控制精度；由于在转向控制状态下，由比例换向阀直接控制转向油缸中的液压油流量和方向，所以转向动作的执行速度较快；手动转向和自动转向之间的切换方式为电控切换，使切换操作更加简便可靠；电液式转向执行机构采用一体化集成设计，结构紧凑、可靠性高。

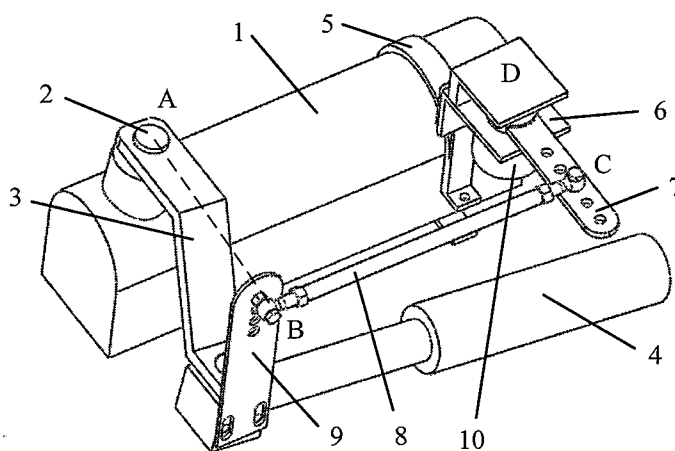
2.3.4 转向角测量机构

在进行转向角控制的过程中，大多以当前转向角作为反馈量，所以需要设计农机转向角测量机构。本文设计了一种连杆式转向角测量机构，该机构通过测量农机转向轮绕转向节主销转动的角度，进行推算后得到农机转向角，该测量机构可用于大多数常见的农机。另外，对于采用液压转向系统的农机，也设计了一种结构和安装较为简单的直线位移式转向角测量机构；该机构通过测量转向油缸伸缩长度，进行推算后得到农机转向角。

2.3.4.1 连杆式转向角测量机构

(1) 机构设计

连杆式转向角测量机构主要包括主安装架、从安装架、角度传感器支架、从动摆杆、主动杆、角度传感器等，如图 2-6 所示。



1. 农机前轴 2. 转向节主销 3. 转向节臂 4. 转向直拉杆或转向油缸 5. 从安装架
6. 角度传感器支架 7. 从动摆杆 8. 主动杆 9. 主安装架 10. 转角传感器

图 2-6 连杆式转向角测量机构

Fig.2-6 Connecting rod type steering angle measuring mechanism

角度传感器是一种精密的仪器，对安装要求很严格，安装不当会使精度降低，甚至损坏传感器。要使传感器有效的工作，需要考虑主销倾角的影响，安装时要保证传感器的转轴和主销轴平行或同轴。但是由于车辆结构的原因，同轴或平行很难达到。为了消除主销倾角影响，减小机构受力，整套机构在连杆连接处采用了球头轴承。即使传感器的转轴和主销轴没有平行或同轴时，球头轴承可以补偿传感器转轴的平移，保证其不会受到较大的力。

连杆机构的从动端通过从安装架固定安装在农机前轴上，主动端通过主安装架与转向油缸相连，并且在农机转向时主动摆杆和从动摆杆在同一个水平面

内运动, 将该平面记为 P 。这里将转向节主销的旋转中心在平面 P 上的投影记为 A 点, 角度传感器的旋转中心在平面 P 上的投影即为 D 点, 主动杆两端的球头轴承的两个铰接点分别记为 B 点和 C 点, 则 $ABCD$ 构成一个各边为定长的平面四边形。

转向角测量原理如下: 当农机转向时, 由转向横拉杆 (机械转向系统中) 或者转向油缸 (液压转向系统中) 推动或拉动转向节臂绕着转向节主销转动, 即线段 AB 绕着 A 点转动, 记该角度为 α , 这里认为主销轴与垂直方向的夹角较小, 所以可以近似认为转向角 $\delta = \alpha$ 。由于四边形 $ABCD$ 的各边长度为定值, 而 B 、 C 、 D 点都可以转动, 所以 AB 绕 A 点的转动通过 BC 的传递使得 CD 绕 D 点转动, 记 CD 绕 D 点转动的角度为 β , 称为传感器转角。通过分析四边形 $ABCD$ 形状改变前后的几何关系, 可以建立模型 $\alpha = f(\beta)$, 而 β 可以通过角度传感器直接测量得到, 所以, 通过该模型可以求出转向角 $\delta = \alpha = f(\beta)$ 。

(2) 转向角计算方法

由上文可知, 采用连杆式转向角测量机构, 从角度传感器获取的角度值 β 需要借助模型 $\delta = f(\beta)$ 才能推算出转向角 δ 。下面给出该模型的推导过程。

图 2-7 是转向前后, 连杆机构的运动示意图。

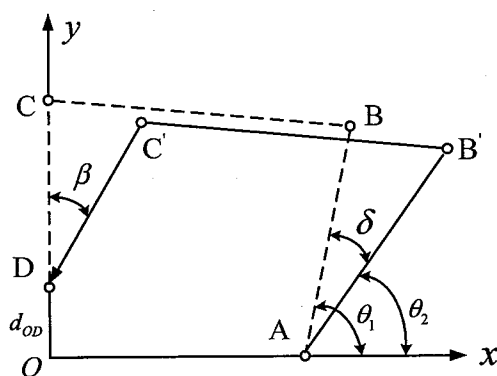


图 2-7 转向时连杆机构的运动示意图

Fig.2-7 Motion diagram when steering

其中, x 轴为农机前轴, 这里取向右为正方向; 定义从动摆杆与前轴垂直时 β 为零度, 此时 α 也为零度, 从动摆杆在 y 轴右侧时 β 为负, 在 y 轴左侧时 β 为正; 原点 O 为 β 为零度时, CD 的延长线与 x 轴的交点, 则 D 点与 O 点的距离 d_{OD} 由农机前轴尺寸和连杆机构的尺寸可以计算出, 为已知量; 四边形 $ABCD$ 表示 β 为零度时的情况, 四边形 $AB'C'D$ 表示 β 为非零值时的情况。根据图 2-7, 由解析几何可以得到如下方程组:

$$\begin{cases}
 \sqrt{(x_B - x_C)^2 + (y_B - y_C)^2} = d_{BC} \\
 \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} = d_{AB} \\
 \sqrt{(x_{B'} - x_{C'})^2 + (y_{B'} - y_{C'})^2} = d_{BC} \\
 \sqrt{(x_{B'} - x_A)^2 + (y_{B'} - y_A)^2} = d_{AB} \\
 x_{C'} = d_{CD} \sin \beta \\
 y_{C'} = d_{CD} \cos \beta + d_{OD} \\
 x_B = d_{AB} \sin(\delta + \theta_2) \\
 x_{B'} = d_{AB} \sin \theta_2
 \end{cases} \quad (2-1)$$

式中 x_i, y_i —— i 分别为 A, C 时, 表示 A, C 各点的横坐标、纵坐标, 都为已知量;

d_{CD} ——边 CD 的长度, 为已知量;

d_{AB} ——边 AB 的长度, 为已知量;

x_i, y_i —— i 分别为 B, B', C' 时, 表示 B, B', C' 各点的横坐标、纵坐标, 都为未知量;

δ ——转向角, 未知量;

θ_2 —— β 为非零值时, 边 AB 与 x 轴的夹角, 未知量。

由式(2-1)即可计算出转向角 δ 的值。

2.3.4.2 直线位移式转向角测量机构

对于采用液压转向系统的农机, 通过测量液压油缸伸缩的长度, 同样可以推算出转向角度。直线位移式转向角测量机构主要由直线位移传感器和安装配件构成, 如图 2-8 所示。考虑到牢固性和安装便利性, 这里选用线性电位器作为直线位移传感器。线性电位器的外壳通过安装配件与转向油缸的缸筒固定, 线性电位器的滑动拉杆经过安装配件与转向油缸的活塞杆顶端固定, 并保持滑动拉杆的伸缩方向与油缸活塞杆的伸缩方向平行, 则线性电位器的伸缩长度与转向油缸的伸缩长度相等。

图 2-9 为转向时液压转向机构的运动示意图, 在图中取直线 OD 垂直于 AO , 则转向角 $\delta = \angle DOC$, 这里定义 $\angle DOC$ 逆时针旋转为正值, 顺时针为负值。以油缸活塞杆伸长到 C_1 点为例, 过 C_1 点做平行于 AO 的直线并与 AB 的延长线交于 E 点, 则 $\angle AEC_1$ 为直角。根据几何关系, 在三角形 BEC_1 中有:

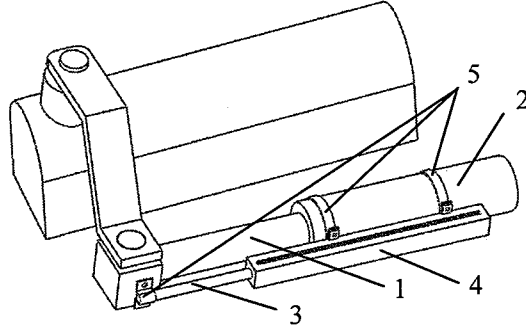
$$d_{BC_1}^2 = (d_{AO} - d_{OC_1} \sin \delta)^2 + (d_{OC_1} \cos \delta - d_{AB})^2 \quad (2-2)$$

式中 d_{BC_1} ——转向角为 δ 时边 BC 边的长度, 可以计算得到;

d_{AO} —— AO 边的长度, 已知量;

d_{OC_1} ——与 d_{OC} 相等，为已知量；

d_{AB} ——AB 边的长度，为已知量。



1.转向油缸的活塞杆 2.转向油缸的缸筒

3.线性电位器的滑动拉杆 4.线性电位器的外壳 5.安装配件

图 2-8 直线位移式转向角测量机构

Fig.2-8 Linear displacement type steering angle measuring mechanism

在式(2-2)中仅有 δ 为未知量，所以根据该式可以直接解得转向角的值。

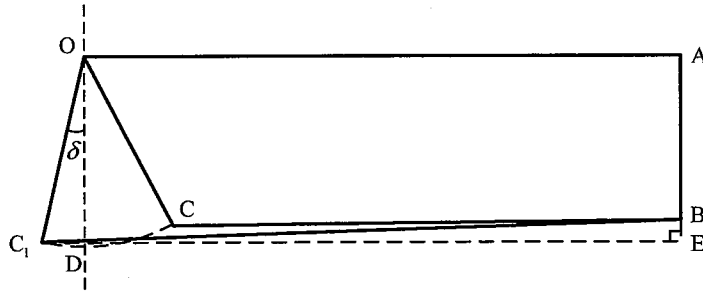


图 2-9 转向时液压转向机构的运动示意图

Fig.2-9 Motion diagram when steering

d_{BC_1} 的计算方法如下：

将线性电位器的两个固定端加入一个恒定的总电压，则由电刷端的电压变化即可以计算出 d_{BC_1} ，计算公式如下：

$$d_{BC_1} = d_{BC0} + d_{pot} \frac{V_w - V_{w0}}{V_{pot}} \quad (2-3)$$

式中 d_{BC_1} ——当前 BC 边的长度；

d_{BC_0} ——转向角为零时 BC 边的长度，已知量，标定时得到；

d_{pot} ——线性电位器的总行程，已知量；

V_w ——当前测得的电刷电压，已知量；

V_{w0} ——转向角为零时的电刷电压，已知量，标定时得到；

V_{pot} ——加到线性电位器两个固定端的总电压，测得。

2.3.5 多功能通用智能节点

为了使不同传感器具有平台接入能力，设计了多功能通用智能节点。硬件上支持多种接口标准的传感器接入 CAN 总线，软件上支持数据处理与格式转换功能。在本平台中，该节点还可支持机械式和电液式转向执行机构的控制。

该智能节点具有模拟电压、数字电压输入接口和 RS232、RS485、CAN 三种数字通信接口，能够按照设定读取多种传感器的输出，并将传感器信息进行初步处理后，按照导航通信协议（参见 2.4 节）规定的格式发送到 CAN 总线上。另外，该智能节点还能够输出频率信号和电平信号，可以用来控制步进电机和比例方向阀，所以这里也将其用作与两种转向执行机构配套的转向控制器。

(1) 硬件设计

多功能通用智能节点的硬件原理框图如图 2-10 所示。

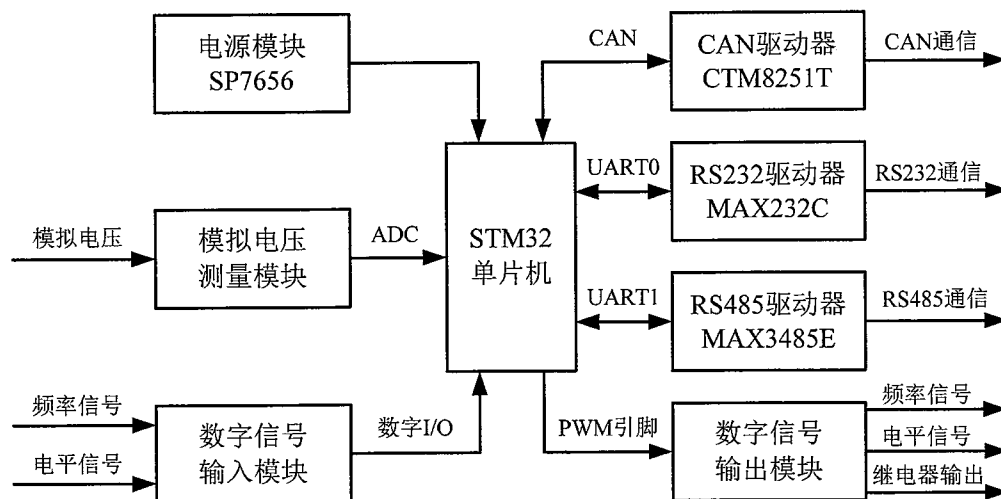


图 2-10 多功能通用智能节点硬件原理框图

Fig.2-10 Hardware principle diagram of multi-function universal intelligent node

如上图所示,这里采用基于 ARM 公司 32 位 Cortex-M3 内核的 STM32 单片机作为处理器,该单片机可以工作在最高 72MHz 的频率下,具有硬件除法和单周期的乘法器,集成的嵌套式的中断控制器(NVIC)可以提供快速、确定性的中断处理,而且该芯片具有丰富的片内外设,可以方便地满足转向控制器的所有采集、计算和通信需求。

STM32 内部集成有完整的 CAN 控制器模块,支持 CAN 2.0A/B 协议。支持包括具有 11 位标识符(标准帧)或 29 位标识符(扩展帧)的数据帧、远程帧、错误帧以及超载帧的报文传输。传输速率可以编程为 1 Mbps。

与田间计算机和导航控制器相同,CAN 节点采用的 CAN 驱动器也是 CTM8251T,这样可以避免采用不同型号驱动器可能会产生的电气特性兼容性问题。

模拟电压测量模块,采用运算放大器 TLV2464 构成电压跟随电路,这样显著增大了输入端口的阻抗,提高了测量精度,而且对单片机的 ADC 输入端口也起到了保护作用。

数字信号输入模块,以保护二极管 BAV99 为核心构成,BAV99 用于对输入的数字电平信号进行限幅,保护单片机的输入端口。

数字信号输出模块,对于频率输出和数字电平输出,采用达林顿驱动器 ULN2003A 增加输出信号的驱动能力,使其能够直接和光耦、小型继电器等相连,以便于直接控制电机驱动器、比例阀放大器等;另外,为了实现对外部回路的“导通-断开”控制,这里还设计了继电器输出模块,可用于控制电磁开关阀的导通和断开。

另外,智能节点也设计了传感器常用的 RS232 和 RS485 通信接口,并对接口线路进行了 ESD 保护。

(2) 软件设计

智能节点的软件,根据其用途不同,也各不相同。下面分别进行介绍。

1) 位置传感器配套 CAN 节点软件 这里以通常使用的 RTK-GPS 为例进行介绍。RTK-GPS 通常按照生产厂家定义的帧格式,通过 RS232 接口输出位置数据。这里将智能节点的 RS232 接口与 RTK-GPS 的 RS232 通信接口相连,并设置 RTK-GPS 为周期性输出。智能节点的软件通过串口中断服务程序触发采集处理程序。

RTK-GPS 的软件主要包括:传感器数据解析、数据滤波和 CAN 总线数据转发三部分。传感器数据解析部分,针对串口中断中接收到的数据,根据厂家定义的输出帧格式,取出数据精度指示标识和 UTM 位置信息,当精度指示标识为双频 RTK 解算结果时,直接使用 UTM 的值,否则不进行位置信息的更新,

只是向 CAN 总线上发出位置精度较低的提示信息。数据滤波部分, 由于 RTK-GPS 的位置解算结果具有较大的随机误差, 所以需要进行随机误差的抑制滤波, 并进行奇异点剔除。奇异点剔除通常采用限副滤波的方法, 随机误差的抑制滤波通常采用滑动平均滤波法或者卡尔曼滤波方法。CAN 总线数据转发部分, 将经过上述步骤得到的位置信息, 按照导航通信协议规定的格式发送到 CAN 总线上, 由导航控制器和田间计算机接收使用。

2) 姿态传感器配套 CAN 节点软件 这里以同常使用的基于微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 的姿态航向测量系统 MTi 为例进行介绍。MTi 通过 RS232 接口输出厂家自定义的测量信息数据帧, 每帧数据中包含三种姿态角: 航向角、俯仰角、横滚角及各自的角速度等数据。这里将智能节点的 RS232 接口与 MTi 的 RS232 通信接口相连, 并设置 MTi 为周期性输出。智能节点的软件通过串口中断服务程序触发采集处理程序。

MTi 的软件主要包括: 传感器数据解析、数据滤波和 CAN 总线数据转发三部分。传感器数据解析部分, 针对串口中断中接收到的数据, 根据厂家定义的输出帧格式, 取出所需的姿态角及角速度信息。数据滤波部分, 由于基于 MEMS 的姿态传感器中所使用的角速度计通常具有较大的噪声误差, 所以也需要进行随机误差的抑制滤波。通常采用滑动平均滤波法或者卡尔曼滤波方法。CAN 总线数据转发部分, 将经过上述步骤得到的姿态角和角速度信息, 按照导航通信协议规定的格式发送到 CAN 总线上, 由转向控制器接收使用。

3) 角度式转向角传感器配套 CAN 节点软件 当采用连杆式转向角测量机构时, 所使用的传感器为角度传感器。能够测量旋转角度的传感器有多种类型, 为了提高测量精度, 可以选用带有数字输出接口的旋转编码器, 这里以 16 位旋转编码器 GAS60 为例进行介绍。GAS60 通过 RS485 接口输出厂家自定义的测量信息数据帧, 每帧数据中只包含当前的角度值。这里将智能节点的 RS485 接口与 GAS60 的 RS485 通信接口相连, 并设置 GAS60 采用“查询-应答”式输出。智能节点通过内部定时器周期性调用查询程序, GAS60 的输出通过与 RS485 对应的串口中断服务程序接收。

GAS60 的软件主要包括: 传感器数据解析、数据滤波、转向角计算和 CAN 总线数据转发三部分。传感器数据解析部分, 针对串口中断中接收到的数据, 根据厂家定义的输出帧格式, 取出角度信息。数据滤波部分, 虽然旋转编码器的技术比较成熟, 误差较小, 但是, 配套机械测量机构会产生随机测量误差, 所以也需要进行随机误差的抑制滤波。通常采用滑动平均滤波法或者卡尔曼滤波方法。转向角计算部分, 针对滤波处理后的编码器角度值, 根据式(2-1)计算出转向角的值。CAN 总线数据转发部分, 将经过上述步骤得到的角度信息, 按照导航通信协议规定的格式发送到 CAN 总线上, 由导航控制器接收使用。

4) 直线位移式转向角传感器配套 CAN 节点软件 当采用直线位移式转向角测量机构时,所使用的传感器为直线位移传感器。能够测量直线位移的传感器有多种类型,这里以直线位移式转向角测量机构中选用的线性电位器为例进行介绍。线性电位器的输出为模拟电压,这里将智能节点的模拟电压测量模块与线性电位器的总电压端和电刷电压端分别相连。

线性电位器的软件主要包括:模拟电压采集、数据滤波、转向角计算和 CAN 总线数据转发三部分。模拟电压采集部分,智能节点通过内部定时器周期性进行模数转换采样,并计算出线性电位器的总电压和电刷电压。数据滤波部分,由于线性电位器的总电压、电刷电压为模拟量,在传输过程中容易串入干扰噪声,所以也需要进行随机误差的抑制滤波。通常采用滑动平均滤波法或者卡尔曼滤波方法。转向角计算部分,针对滤波处理后的总电压、电刷电压值,根据式(2-2)和(2-3)计算出转向角的值。CAN 总线数据转发部分,将经过上述步骤得到的角度信息,按照导航通信协议规定的格式发送到 CAN 总线上,由转向控制器接收使用。

5) 机械式转向控制器软件 由机械式转向控制器的功能可知,其核心程序主要包括:指令角度和实际转向角度更新、转向控制算法执行、及步进电机控制信号输出三部分。其中,整个主程序由处理器内部定时器周期性触发运行。指令角度和实际转向角度在中断服务程序中进行更新,主程序在每个运行周期中直接使用当前数据进行计算。这样可以使得转向控制器主程序的运行频率高于指令角度的发送频率,提高转向控制的精度。

由于步进电机驱动电路模块的控制信号包括脉冲信号、方向信号和扭矩保持信号三种,所以针对转向控制算法生成的带符号控制量,首先根据符号的正负输出电平为高或低的方向控制信号,其次根据控制量的绝对值大小输出对应频率的脉冲波形。另外,在整个转向控制算法循环执行的间隙,持续输出扭矩保持信号,锁定步进电机的转子,使方向盘无法自由转动。

6) 电液式转向控制器软件 由电液式转向控制器的功能可知,其核心程序主要包括:启停指令响应、指令角度和实际转向角度更新、转向控制算法执行、及比例换向阀控制信号输出三部分。其中,整个主程序由处理器内部定时器周期性触发运行。启停指令响应程序,根据接收到的导航控制器发出的转向启停指令,通过继电器输出控制三个电磁开关阀回路的导通和断开。指令角度和实际转向角度在中断服务程序中进行更新,主程序在每个运行周期中直接使用当前数据进行计算。这样可以使得转向控制器主程序的运行频率高于指令角度的发送频率,提高转向控制的精度。

由于比例换向阀的两个方向各有一个线圈,所以比例换向阀控制信号有两路,每路各连接到一个放大器。因此,针对转向控制算法生成的带符号控制量,

首先根据符号的正负选择输出电压控制信号到哪个放大器，其次根据控制量的绝对值大小设置该控制电压的大小，进而通过放大器输出对应的电流驱动比例换向阀开闭，控制转向油缸的伸缩长度和速度，实现农机的受控转向。

2.4 基于 ISO 11783 的导航通信协议设计

CAN 协议是建立在 ISO/OSI 7 层开放互连参考模型基础之上的。但 CAN 协议只定义了模型的最下面两层——数据链路层和物理层^[69]，仅保证了节点间无差错的数据传输。CAN 的应用层协议必须由 CAN 用户自行定义，或采用一些国际组织制订的标准协议。这里在农林机械串行通信控制网络协议 ISO 11783 的基础上，自行设计了导航通信协议，完成了导航控制系统中各节点的地址分配及数据类型定义。

2.4.1 ISO 11783 标准简介

ISO 11783 标准参照 SAE J1939 和 DIN9684 标准，以控制局域网总线协议即 CAN 2.0B 作为网络协议，规定了 CAN 总线在农机上应用的高层协议^[70]，为机载电子控制系统提供了一个开放式系统互联方法，可使拖拉机和农机具上的电子控制单元，诸如传感器、控制单元、存储单元、显示终端等，实现传输数据和传输方法的标准^[71]，这不仅使农业信息数据交换与共享成为可能，还给农业机械电子设备的集成组装与维护带来极大便利^[72]。

标准主要包括移动数据通讯一般标准、物理层、数据链路层、网络层、网络管理、虚拟终端、应用层、传动系信息、拖拉机 ECU、任务控制器和管理信息系统数据交换、数据字典等 11 部分内容^[73]。其中第 1、第 10 和第 11 部分的国际标准仍在制定中，其余 8 部分内容已经制定了国际标准。

(1) 物理层

ISO 11783 第二部分定义了 250KB 网络的物理层，其主要作用是建立可靠的物理连接。ISO 11783 规定每个网段最多有 30 个 ECU，四芯电缆作为传输介质，两根作为导线传递 CAN_H 和 CAN_L 信号，另外两根作为终端电阻的电源线。

(2) 数据链路层

ISO 11783 的数据链路层基于 CAN2.0B 的扩展帧格式定义了电子控制单元之间信息传输、储存的方法和格式，以提供必要的同步控制、顺序控制、差错控制和流量控制，在物理层提供的物理连接上建立可信的数据通信链路。ISO 11783 数据链路层共支持 5 种消息：命令、请求、广播/响应、确认、组功能。

(3) 网络层与网络管理

ISO 11783 的网络层主要负责在多个网络之间传输信息（即网络的互联），对网段之间的信息传输进行管理^[74]。网络层定义了 5 种网络互连设备，分别是中继器、网桥、路由器、网关、拖拉机 ECU。网络互连设备的主要功能有：转发、过滤、地址转换、报文重组。

(4) 应用层

应用层指定网络中的信息集并定义在拖拉机和所连农机具之间通讯的信息。主要包括确定拖拉机和所连农机具的节点数据帧个数，每个数据帧的标识符，数据帧具体的数据定义。

(5) 虚拟终端规范

虚拟终端 VT (Virtual Terminal) 是一种人机接口装置^[75]，也是一种 ECU。它为操作者提供拖拉机和农机具 ECU 中数据信息及报警信息的显示，同时操作者也可以通过它向各 ECU 输入作业数据信息和控制信号。

(6) 农机具消息规范

ISO 11783 第 7 部分规定了农机具消息规范，主要说明消息集和定义拖拉机与农机具之间通信所用的消息，包括时间、地速、距离、导航、动力输出参数、三点悬挂装置、一般过程信息、照明功能参数等。

(7) 拖拉机 ECU 规范

拖拉机 ECU 提供了拖拉机总线和农机具总线之间的门路连接器，相当于网关，也可以执行其他功能^[76]。拖拉机 ECU 负责向任一农机具总线和从任一农机具总线转换过程数据和带有参数的拖拉机总线信息，使拖拉机能按适当的方式工作。

(8) 任务控制器与管理信息系统数据交换

任务控制器通常包含在一个 ECU 中，该 ECU 位于农机具总线上。任务控制器可以从控制计算机中下载命令并且在进行田间操作时发送给相应 ECU。任务控制器支持 3 种模式的发送命令：基于时间，基于距离和基于位置。

2.4.2 ISO 11783 协议分析

ISO 11783 可分为应用层、网络层、数据链路层、物理层。它使用 CAN2.0B 的物理层与数据链路层作为底层协议，在 CAN2.0B 的数据链路层之上建立通信和寻址机制。ISO 11783 使用“地址”的概念，并采取此手段作为防止多个控制器

使用相同的 CAN 标识符。ISO 11783 与 CAN 的关系见图 2-11。

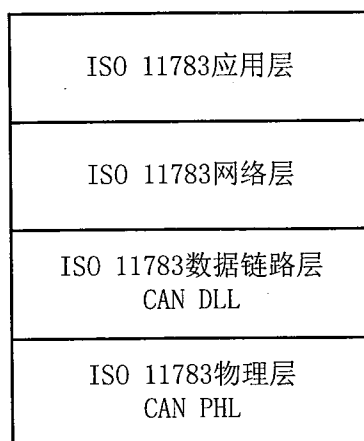


图 2-11 层次结构

Fig.2-11 Hierarchical structure

ISO 11783 协议栈的数据链路层和网络管理部分是协议栈的核心，数据链路层为上层提供服务和接口，把操作系统提供的各种低级操作和机制隐藏起来。图 2-12 是软件各个模块之间的关系。

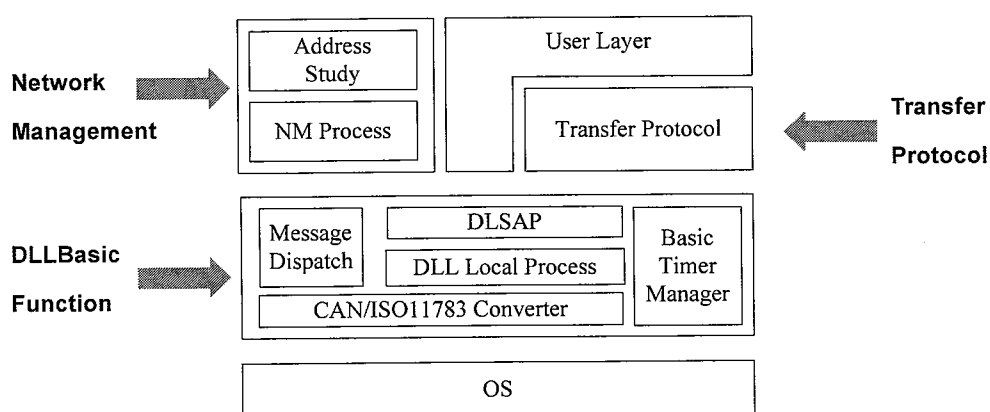


图 2-12 协议栈软件模块图

Fig.2-12 Modules diagram of protocol stack software

操作系统和硬件之间存在硬件抽象层（Hardware abstract layer, HAL），HAL 主要作用是隐藏硬件细节。

数据链路层可划分为消息分发、数据链路层本地处理进程、数据链路层服务访问点和基本定时器管理几个模块。数据链路层使用 CAN 驱动程序进行报文的收发，使用操作系统的中断机制（是操作系统对 HAL 中的中断管理的封装）和系统调用。

网络管理和传输协议作为 DLL 基本通信功能的用户使用其提供的接口和服

Tab.2-2 Packet of navigation communication protocol

[illegible]

为了实现农机导航，本章设计了分布式农机导航控制平台。首先分析了系统的设计目标，根据分析设计了基于 CAN 总线的分布式导航控制平台总体结构，划分了各装置的功能，定义了整个自动导航控制平台的典型工作过程。其次，对系统中的各主要装置：田间计算机、导航控制器、转向执行机构、转向角测量机构和多功能通用智能节点等进行了详细的功能及软硬件设计。最后，针对农机自动导航控制中对通信功能的需求，在农林机械串行通信控制网络协议 ISO 11783 的基础上，自行设计了导航通信协议。

第3章 转向执行机构建模与控制方法研究

3.1 引言

常见的农机自动驾驶控制系统中，都是通过对农机转向角的控制，来改变农机行驶方向，最终达到使农机沿着目标路径行驶的目的。所以，转向控制是农机自动驾驶控制系统的核心组成部分，转向效果直接影响到农机路径追踪的精度。

由于大多数农机不具备自动转向控制接口，所以，对农机转向系统进行电控改造是实现自动驾驶控制的关键一步。为此，前文设计了机械式和电液式两种转向执行机构，用于对农机进行自动转向控制改造。

电液式转向执行机构工作时，由比例换向阀直接控制转向油缸中的液压油流量和流向，所以转向动作的执行速度较快；当采用较高精度的比例换向阀时，也比较容易达到较高的转向控制精度；而且，由于采用比例换向阀实现转向控制的原理比较简单，转向控制系统的特性受速度、“轮胎-地面”条件改变的影响较小，所以转向控制算法的设计比较简单，采用常规的PID并加入死区、饱和补偿即可以达到很高的控制精度和速度^[77]。因此，对于具备液压转向系统的农机，优先使用电液式转向执行机构进行电控改造。

但是，对于不方便进行液压转向油路修改的农机，以及目前还在使用中的部分不具备液压转向系统的农机，只能采用机械式转向执行机构进行自动转向控制改造。

本文设计的机械式转向执行机构，结构紧凑，安装简便，能够应用在各种方向盘式农机的自动转向控制改造上。但是，由于机械式转向执行机构工作时，是由步进电机经过减速后驱动农机原转向轴转动，通过农机原转向系统进行转向操作，所以转向执行速度相对较慢；而且由于力矩传递关系复杂，使得实现机械式转向执行机构精确建模和控制的难度较大。

针对这些问题，本章以安装有机械式转向执行机构的农机为研究对象，进行了建模和转向控制方法研究。首先，采用机理建模和辨识建模相结合的方法，建立了转向控制系统模型。其次，针对机械式转向执行机构的转向速度相对较慢的特点，研究设计了基于预测控制和PD控制的串级转向控制方法。最后，将提出的转向控制方法在CarSim与Simulink联合仿真环境中及洋马VP6插秧机上进行了验证。

3.2 农机转向控制系统建模与控制方法概述

转向控制是农机自动驾驶控制系统的核心组成部分^[78], 转向效果直接影响到农机路径追踪的精度^[60], 国内外学者对农机的转向控制方法已进行了较多的研究。刘刚等^[63, 79]针对加装了电液转向系统的拖拉机, 设计了基于 PLC 的转向操纵控制器, 建立了电液控制转向系统模型, 并采用 PID 控制方法实现了拖拉机前轮的自动转向功能。张智刚等以加装了机械式转向执行机构的日本久保田 SPU-60 型插秧机为对象进行轮式农业机械转向控制研究, 提出了基于速度的自适应 PD 控制方法^[80]、带双阈值死区的 PD 控制算法^[81]。Wu 等^[82]设计了自适应转向控制算法, 采用卡尔曼估计器进行自适应增益调节和自适应非线性补偿, 该算法相对传统的 PID 方法优点在于, 能够在转向角指令控制信号带有噪声及相关液压阀特性产生漂移的情况下, 仍能够实现精确快速地转向。Dong 等^[77]采用 PID 控制算法并对阀进行了非线性补偿, 在迪尔 8200 拖拉机上实现了转向控制。Zhang 提出了一种通用的用于电液转向控制的模糊控制方法^[83]。陈文良^[84]针对电液转向改造后的铁牛 645L 拖拉机转向系统的不对称性, 采用双通道 PD 控制算法, 较好地解决了左转向和右转向不对称的问题。何卿等^[29, 85]针对电液转向控制改造后的铁牛 645L 拖拉机, 采用带非线性补偿的 PID 控制算法, 实现了转向跟踪控制。纪朝凤等^[86]针对加装了机械式转向执行机构的拖拉机, 设计了比例参数随转角偏差的变化而自动进行调节的自适应 PID 控制器。连世江等以加装了机械式转向执行机构的福田欧豹 4040 型拖拉机为研究对象, 采用 PID 算法实现了转向控制^[87], 还提出了以航向角偏差和前轮转角作为输入, 双输入单输出, 根据航向角偏差选择双模糊控制器的一个进行控制^[88]。罗锡文等^[60]在电液控制改造后的东方红 X-804 拖拉机上, 采用了 PID 控制算法进行转向控制。吴晓鹏等在东方红 X-804 拖拉机上, 采用带死区的 PD 控制算法实现了自动转向控制^[89], 还设计了双闭环转向控制算法, 两个闭环控制回路分别以角速度和角度作为反馈, 且都采用 PID 控制算法, 较好地解决了控制超调情况^[90]。伟利国等在 XDNZ630 型水稻插秧机上, 采用 PID 控制方法实现了转向控制^[64]。

总结上述研究发现, 目前常见的转向控制方法可以分为三类: (1) PID 算法, 针对自动转向系统中液压阀的非线性特性, 可带有死区、饱和等非线性补偿; (2) 自适应 PID 算法, 根据行驶速度、转向角、转向角偏差等在线调节 PID 参数, 使用多组参数实现较多工况下的高精度控制; (3) 模糊控制算法, 以转向角、转向角速度、转向角偏差、航向角偏差等的组合作为模糊控制器的输入量, 对自动转向系统模型的非线性、时变等特性具有较好的适应性。

这三类方法中, PID 算法的适应性较差, 当实际工况(如速度、“轮胎-地面”条件等)与标定参数时的工况相差较大时, 转向控制效果会显著下降。自适应

PID 算法, 由于具有多组工况下的控制参数, 所以能够在更多的工况下做到高精度、高速度转向角度跟踪。但是, 多组控制参数的标定会增加较多的工作量, 而且, 由于在标定过程中难以实现对“轮胎-地面”条件变化的模拟, 所以, 当“轮胎-地面”条件发生较大改变时, 自适应 PID 算法也难以实现较好的控制效果。模糊控制算法的鲁棒性较强, 能够适应各种工况, 但其存在着控制品质粗糙和精度不高等弊端。

因此, 本文在转向控制中引入了预测控制方法, 借助预测控制对模型精度要求较低的特点, 降低了由于工况改变引起的农机转向系统模型失配带来的影响, 并针对机械式转向执行机构执行速度相对较慢的特点, 设计了串级转向控制结构, 提高了转向控制的速度。

3.3 农机转向控制系统建模方法研究

3.3.1 农机转向控制系统

图 3-1 为安装了机械式转向执行机构的农机转向系统示意图。转向执行机构串联安装在农机转向轴与方向盘之间; 步进电机的输出扭矩, 经过转向执行机构内部的齿轮副传递给农机转向轴, 由转向轴通过农机原转向系统, 实现转向轮的转动调节。转向控制器以转向角检测机构输出的转向角为反馈量, 根据转向控制算法计算出步进电机旋转方向和速度的控制量, 并转换成用于控制步进电机输出扭矩的电流, 最终实现农机转向的闭环控制。

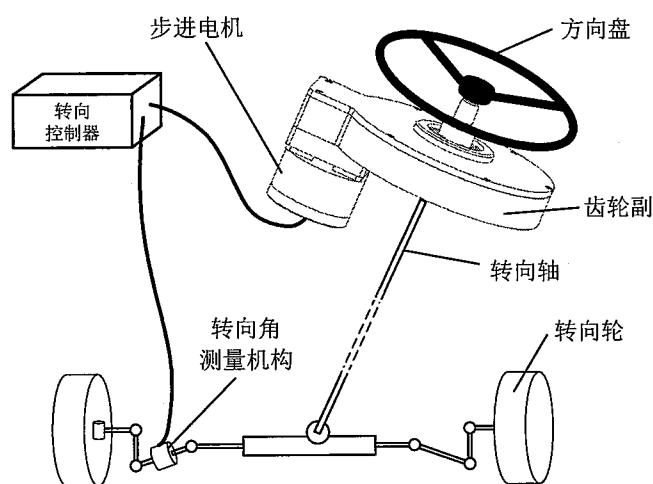


图 3-1 机械式转向机构安装示意图

Fig.3-1 Installation schematic diagram of mechanical steering actuator

由上述机械式转向执行机构的工作原理可知, 转向控制器的控制对象模型包括两部分: 转向执行机构模型和农机转向系统的角传递模型。对于转向执行

机构，我们通常容易获得相关的机械和控制参数，但是通常难以从厂家获取农机转向系统的详细结构参数，所以本文对农机转向执行机构进行机理建模，对农机转向系统采用辨识建模的方法。

3.3.2 转向执行机构建模

将转向执行机构中齿轮副的传动比记为 $a:1$ ，则步进电机转速和方向盘转动角速度之间的传递函数为：

$$\frac{\omega_{sw}(s)}{n(s)} = \frac{1}{a} \quad (3-1)$$

式中 ω_{sw} ——方向盘的转动角速度，度/s；

n ——电机转速，度/s。

步进电机的转速由调速频率信号控制，转动方向由额外的高低电平信号控制。为便于建模，这里将调速频率信号记为带符号量，其正负符号用于控制步进电机的转动方向，为正时逆时针转动，为负时顺时针转动；其绝对值用于控制步进电机的转速，两者成比例关系。记步进电机的步进角为 b° ，可以得到调速频率信号与转速之间的函数关系如下：

$$n = b \cdot u, -1000 \leq u \leq 1000 \quad (3-2)$$

式中 u ——控制量即调速频率信号，Hz。

由于步进电机的输出扭矩会随着转速的升高而降低，所以，为了保证自动转向执行机构具有足够的扭矩，上式中限定调速频率信号的绝对值最大不超过 1000。

根据式(3-2)，可建立调速频率与电机转速的传递函数为：

$$\frac{n(s)}{u(s)} = b \quad (3-3)$$

3.3.3 农机转向系统建模

以采用机械转向系统的轮式农机为例，典型农机转向系统的简化示意图如图 3-2 所示^[91]。转向过程^[92]为：方向盘的转动通过转向轴和转向齿轮箱传递给转向横拉杆，转向横拉杆通过转向节臂带动转向轮绕着转向节主销转动。对于采用液压转向系统的农机，区别在于，是通过液压转向器将转向轴传递过来的方向盘转动转换为转向油缸的伸缩，从而推动或拉动转向节臂、带动转向轮转动。所以，可以通过测试转向角对方向盘输入转角的动态响应曲线，并进行辨识来获取农机转向系统的角传递模型。

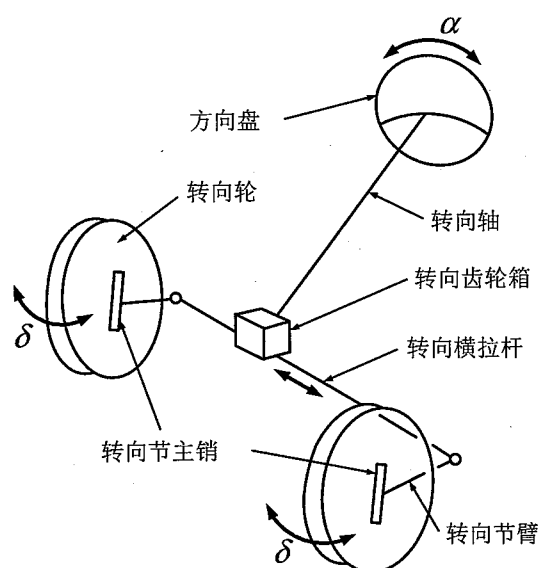


图 3-2 典型农机转向系统简化示意图

Fig.3-2 Simplified diagram of typical Vehicle steering system

考虑到农机在自动导航控制过程中，转向角通常较小，所以这里向转向轴输入 90° 的转动信号，同时记录转向角的变化情况，来完成动态响应测试。由于农机的方向盘无法输入严格意义上的阶跃角度，所以这里借助机械式转向执行机构，以最快的有效转向速度——设置步进电机的调速频率为 1000Hz ，参考式 (3-2)——驱动转向轴以 $180^\circ/\text{s}$ 的角速度转动 0.5 秒完成 90° 方向盘转角的输入。

当从方向盘输入阶跃转角后，随着时间的推移，转向轮一定会停止在某个确定的角度，该过程中，转向角变化趋势的示意图如图 3-3 所示。

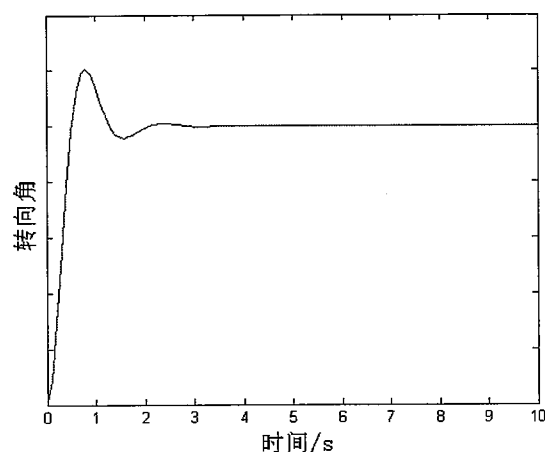


图 3-3 转向角变化趋势示意图

Fig.3-3 Diagram of steering angle change trend

由上图可知，从方向盘转角到转向角的传递过程为自平衡过程，且可用二

阶传递函数模型进行描述^[93]。则农机转向系统的角传递模型可记为二阶传递函数模型，即式(3-4)：

$$\frac{\delta(s)}{\theta(s)} = \frac{e}{s^2 + cs + d} \quad (3-4)$$

式中 δ ——转向角，度；

θ ——方向盘转动角度，度；

c, d, e ——系数，实数。

方向盘的转动角速度 ω_{sw} 与转动角度 θ 的关系为：

$$\theta(s) = \frac{1}{s} \omega_{sw}(s) \quad (3-5)$$

转向轮的转动角速度（以下简称为转向角速度） ω_w 与转向角 δ 的关系为：

$$\delta(s) = \frac{1}{s} \omega_w(s) \quad (3-6)$$

结合式(3-1)~(3-6)，可以得到转向控制系统的传递函数模型如式(3-7)所示，转向角速度与控制量之间的传递函数模型如式(3-8)所示：

$$G_1(s) = \frac{\delta(s)}{u(s)} = \frac{b \cdot e}{a \cdot s(s^2 + c \cdot s + d)} \quad (3-7)$$

$$G_2(s) = \frac{\omega_w(s)}{u(s)} = \frac{b \cdot e}{a(s^2 + c \cdot s + d)} \quad (3-8)$$

3.4 基于预测控制的农机转向控制方法研究

对于采用机械式转向执行机构的农机，上文得到的转向控制模型通常是在某种典型工况下辨识和推导得到的，具有代表性。但是，由于车辆的转向系统具有较强非线性^[92]，在转向角度大小不同、农机行驶速度不同、“轮胎-地面”条件发生改变等情况下，转向系统的特性都会随之发生变化。而在典型工况下标定的控制参数，其控制效果将会变差。

在以前的研究中，多选用具有多组参数的自适应 PID 算法来解决这个问题（参见 3.2 节）。自适应 PID 方法，是预先针对某些典型工况，调试出多组 PID 参数，并在控制过程中根据行驶速度、转向角等在线调节 PID 参数，使用多组参数实现较多工况下的高精度转向控制。这样可以使转向控制算法适应更多的工况，如不同的车速、不同的转向角等。但是，由于在标定过程中难以实现对“轮胎-地面”条件变化的模拟，预先调试参数组时无法将该变化考虑进去，所以，对于由“轮胎-地面”条件变化引起的转向系统特性改变，自适应 PID 无能为力。而且，采用自适应 PID 方法，其预设参数的数量有限，难以在各种工况下都达到很高的精度；另外，调试多组 PID 参数也是一个较为繁重的工作。

因此, 针对因为转向角度大小不同、农机行驶速度不同、“轮胎-地面”条件发生改变等工况变化引起的转向系统特性的改变, 本文在转向控制中引入了预测控制方法, 借助预测控制对模型精度要求较低的特点, 降低了由农机转向系统特性改变带来的影响, 使得在各种工况下都能够达到较高的转向控制精度。另外, 针对机械式转向执行机构执行速度相对较慢的特点, 本章设计了串联转向控制结构, 提高了转向控制的速度。

3.4.1 预测控制

预测控制是一种先进的计算机优化控制方法, 它具有对模型精度要求低、控制综合质量好、鲁棒性强、在线计算方便等特点, 可有效地克服过程的不确定性、非线性和关联性, 并能方便地处理过程被控变量和操纵变量中的各种约束^[94], 已在炼油、化工、冶金和电力等复杂工业过程中得到了广泛的应用^[95-97]。

典型的预测控制器结构如图 3-4 所示, 主要由预测模型、滚动优化、在线校正三部分构成。其中, 预测模型根据被控制对象的历史测量信息和未来输入, 预测对象未来的输出; 滚动优化是一个随着时间的推移反复进行的优化过程, 它通过使某一性能指标达到最优确定未来的控制作用; 在线校正则根据系统的实际输出, 不断对预测输出值做出修正, 使基于模型的滚动优化利用了反馈信息, 构成闭环优化。

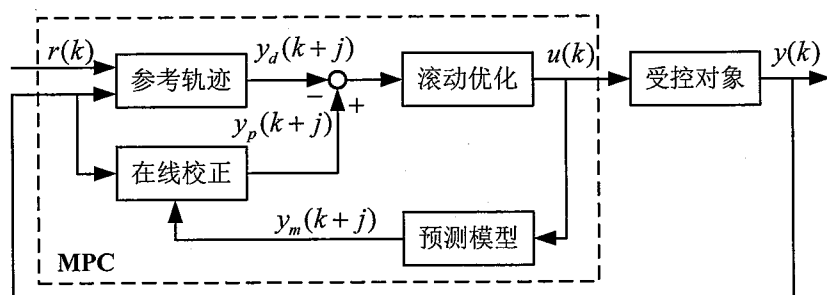


图 3-4 预测控制器结构

Fig.3-4 MPC architecture

在上述预测控制一般性原理的基础上, 采用不同的模型形式、优化策略和校正措施, 可以形成不同的预测控制算法。动态矩阵控制 (DMC)、模型算法控制 (MAC) 和广义预测控制 (GPC) 是三种最典型的预测控制算法。

动态矩阵控制是一种基于对象阶跃响应的预测控制算法, 它适用于渐进稳定的线性对象。DMC 控制包括下述三个部分: (1) 预测模型。使用对象的单位阶跃响应模型: $S(z^{-1}) = s_1 + s_2 z^{-1} + \dots + s_N z^{-N+1}$, N 称为建模时域。对象的动态信

息可以近似用有限集合 $\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ 进行描述, 这个集合的参数构成了 DMC 的模型参数。虽然阶跃响应是一种非参数模型, 但由于线性系统具有比例和叠加性质, 故利用这组模型参数 $\{s_i\}$, 已足以预测对象在未来的输出值。(2) 滚动优化。DMC 是一种以优化确定控制策略的算法。在每一时刻, 要确定从该时刻起的 M 个控制增量, 使被控制对象在其作用下未来 P 个时刻的输出预测值尽可能接近给定的期望值。这里 M 、 P 分别称为控制时域与优化时域, 通常情况下 $M \leq P \leq N$ 。(3) 反馈校正。当 k 时刻把控制加于对象时, 相当于在对象输入端加上了一个幅值为 $\Delta u(k)$ 的阶跃, 利用预测模型可算出在其作用下未来时刻的输出预测值。然而, 由于实际存在模型失配、环境干扰等未知因素, 该预测值有可能偏离实际值, 因此需要利用实时信息进行反馈校正。为此, 在下一采样时刻首先将对象的实际输出与上述预测输出进行比较, 得到输出误差, 对输出误差加权后用于修正对未来的预测。

模型算法控制又称模型预测启发控制, 同样也适用于渐进稳定的线性对象, 但其设计前提不是对象的阶跃响应, 而是其脉冲响应。MAC 控制包括下述三个

部分: (1) 预测模型。使用对象的脉冲响应模型: $H(z^{-1}) = h_1 + h_2 z^{-1} + \dots + h_N z^{-N+1}$,

N 称为建模时域。当 N 足够大时, 模型足够精确。(2) 参考轨迹。在 MAC 中, 控制系统的期望输出是由当前实际输出出发且向设定值光滑过度的一条参考轨迹固定的。参考轨迹的设定对闭环系统的动态特性和鲁棒性都有关键作用。(3) 滚动优化。在 MAC 中 k 时刻的优化准则是要选择未来 P 个控制量, 是在未来 P 个时刻的预测输出尽可能接近由参考轨迹所确定的期望输出。据此可以建立二次型优化性能指标 $\min J(k)$, 求出使该指标达到极小的控制量, 即为最优控制量。

广义预测控制是在自适应控制的研究中发展起来的, 应用的对象是随机离散系统。与 DMC 算法相比, 虽然它们在滚动优化的性能指标方面有非常相似的形式, 但 GPC 的模型辨识与反馈校正策略同 DMC 都有很大差别。MAC 控制包括下述三个部分: (1) 预测模型。采用最小方差控制中所用的受控自回归积分滑动平均 (Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average, CARIMA) 模型来描述受到随机干扰的对象, 利用该模型导出 j 步后输出的预测值。(2) 滚动优化。与 DMC 类似, 优化的指标是使得输出预测值尽可能接近给定的期望值, 另外还要使控制变化量的波动尽量小。(3) 在线辨识与校正。GPC 是从自校正控制发展起来的, 因此保持了自校正的方法原理, 即在控制过程中, 不断通过实际输入输出信息在线估计模型参数, 并以此修正控制律, 是一种广义的反馈校正。

MAC 与 DMC 相比, MAC 将控制量 u 直接作用于对象的输入端, 本质上导

致了比例性质的控制，在通常性能指标下会出现静差；而 DMC 算法是以 Δu 直接作为控制量，在控制中包含了数字积分环节，因此，即使在模型失配的情况下，也能导致无静差的控制，这是 DMC 算法的显著优越之处。GPC 与 DMC 相比，DMC 相当于用一个不变的预测模型，并附加一个误差预测模型共同保证对未来输出作出较准确的预测；而 GPC 则只用一个模型，通过对其在线修正来给出较准确的预测，GPC 的计算量大于 DMC。

由于农机导航控制系统工作在车载环境下，使用的嵌入式处理器计算速度较慢，所以这里不使用 GPC 算法；而 DMC 相对于 MAC 更为优越，所以本文在转向控制中选用动态矩阵控制算法。

3.4.2 基于预测控制的农机转向串级控制结构

串级控制控制系统的典型结构如图 3-5 所示^[98]，系统中有两个控制器 $H_{c1}(s)$ 和 $H_{c2}(s)$ ，包围 $H_{c2}(s)$ 的内环称为副回路，包围 $H_{c1}(s)$ 的外环称为主回路。主控制器的输出控制量 u_1 作为副回路的给定量 $R_2(s)$ ， $D_2(s)$ 为干扰输入。串级控制系统的计算顺序是先主回路，后副回路。

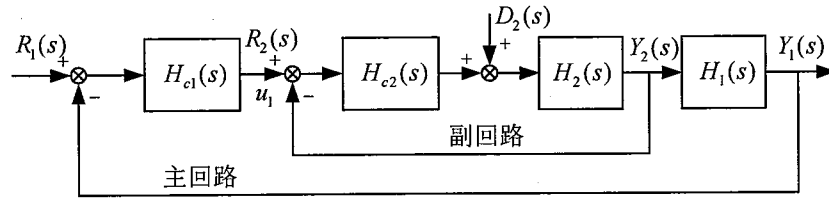


图 3-5 串级控制系统框图

Fig.3-5 Diagram of Cascade control system

串级控制的主要优点为：

- (1) 将干扰加到副回路中，由副回路控制对其进行抑制；
- (2) 副回路中参数的变化，由副回路给予控制，对被控量 G_1 的影响大为减弱；
- (3) 副回路的惯性由副回路给予调节，因而提高了整个系统的响应速度。

在串级控制系统结构中，副回路等效被控对象的时间常数通常比副对象的时间常数小很多，因而使对象的动态特性有了很大的改善，提高了控制系统的整体响应速度和控制精度^[99]。所以，在保证精度的前提下，为了加快对转向角指令的响应速度，本文采用串级控制结构进行转向控制器的设计。

式(3-7)所示的转向控制系统传递函数模型可以改写为：

$$G_1(s) = \frac{b \cdot e}{a \cdot s(s^2 + c \cdot s + d)} = \frac{1}{s} \cdot \frac{b \cdot e}{a \cdot (s^2 + c \cdot s + d)} = \frac{1}{s} \cdot G_2(s) \quad (3-9)$$

上式中, $G_2(s)$ 为转向角速度与控制量之间的传递函数模型, 即式(3-8)。根据式(3-9), 这里选取 $G_2(s)$ 为串级控制系统副回路的控制对象, 即内环控制转向角速度, 外环控制转向角度。内环采用 DMC 控制器, 外环使用常规的 PD 控制器, 设计的串级控制器结构如图 3-6 所示。

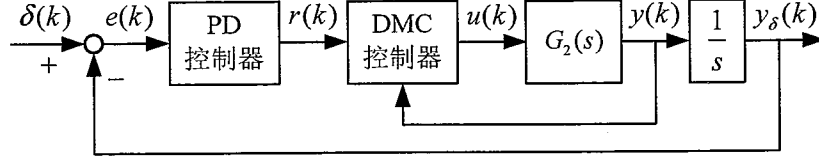


图 3-6 DMC-PD 串级控制器结构

Fig.3-6 Diagram of DMC-PD cascade control

3.4.3 转向角速度 DMC 控制器

转向角速度的 DMC 控制回路如图 3-7 所示, 控制对象的传递函数为 $G_2(s)$, 控制器输入量为角速度设定值序列 $r(k)$, 输出控制量为频率信号序列 $u(k)$, 反馈量为检测到的实际角速度值 $y(k)$ 。

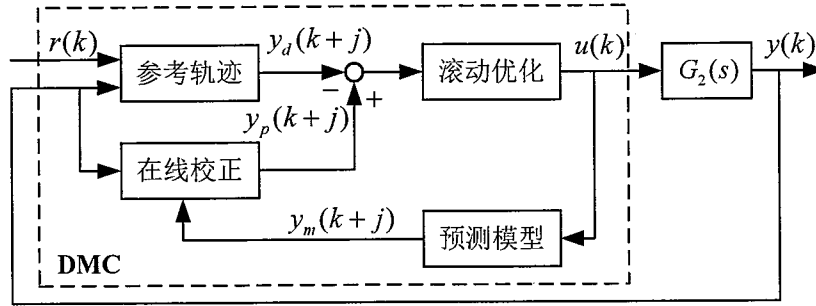


图 3-7 转向角速度控制框图

Fig.3-7 Diagram of steering angular velocity control

记 $G_2(s)$ 的阶跃响应模型为 $S(z^{-1})$, 则

$$S(z^{-1}) = s_1 + s_2 z^{-1} + \dots + s_N z^{-N+1} \quad (3-10)$$

式中 z^{-1} ——向后一步平移算子;

N ——模型取的长度。

k 时刻对未来 $k+j$ 时刻的预测输出为

$$y_m(k+j) = y_m(k+j-1) + S(z^{-1}) \Delta^2 u(k+j-q) \quad (3-11)$$

式中 $y_m(i)$ —— i 时刻的预测输出;

Δ ——差分算子, $\Delta = 1 - z^{-1}$;

$u(k)$ —— k 时刻的控制量;

q ——系统延迟步数。

$y_m(k+j)$ 经在线校正后为

$$\begin{cases} y_p(k+j) = y_m(k+j) + y_e(k+j) \\ y_e(k+j) = \xi_{k+1} + \xi_{k+2} + \dots + \xi_{k+j} \end{cases} \quad (3-12)$$

式中 $y_p(i)$ —— i 时刻校正后的预测输出;

$y_e(i)$ ——对 i 时刻的预测误差;

ξ_i —— i 时刻的平稳扰动输入信号。

这里将参考轨迹规划成一阶指数曲线的形式,从而得到柔化设定值序列(即期望输出值序列)。柔化轨迹的形成式如(3-13)所示:

$$\begin{aligned} y_d(k+q+i) &= \alpha y_d(k+q+i-1) + (1-\alpha)r(k) \\ &= \alpha^2 y_d(k+q+i-2) + (1-\alpha^2)r(k) \\ &= \alpha^i y_d(k+q) + (1-\alpha^i)r(k) \end{aligned} \quad (3-13)$$

式中 $y_d(k+j)$ ——未来 j 时刻的柔化设定值;

$r(k+j)$ ——未来 j 时刻的设定值;

α ——柔化因子。

进行预测控制的目标是使实际输出值与期望输出值方差最小,并且控制量的波动尽量小,则目标函数如式(3-14)所示。

$$\begin{aligned} \min_{\Delta U} J &= \min_{\Delta U} E \left\{ \sum_{i=0}^{p-1} [(y_p(k+q+i) - y_d(k+q+i))^2 + \lambda (\Delta u(k+i))^2] \right\} \\ &= \min_{\Delta U} E[(Y_p - Y_d)^T (Y_p - Y_d) + \lambda \Delta U^T \Delta U] \end{aligned} \quad (3-14)$$

式中 λ ——控制量变化量的权重;

Y_p ——校正后预测输出向量;

Y_d ——期望输出值向量;

ΔU ——控制量增量向量。

式(3-14)在数学上等价于:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta U} J &= \min_{\Delta U} [(Y_m - Y_d)^T (Y_m - Y_d) + \lambda \Delta U^T \Delta U] \\ &= \min_{\Delta U} [(Y' + A \Delta U - Y_d)^T (Y' + A \Delta U - Y_d) + \lambda \Delta U^T \Delta U] \end{aligned} \quad (3-15)$$

式中 Y_m ——预测输出向量, $Y_m = Y' + A\Delta U$;

Y' ——至当前时刻的初始值序列向量;

A ——由式(3-10)中系数构成的 $p \times t$ 维矩阵, 具体为:

$$A = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \cdots & 0 \\ s_2 & s_1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ s_t & s_{t-1} & \cdots & s_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_p & s_{p-1} & \cdots & s_{p-t+1} \end{bmatrix}$$

上式中 p 为预测前景, t 为控制前景。极小化目标函数式(3-15), 令 $\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 0$,

得到控制率:

$$\Delta U = (A^T A + \lambda I)^{-1} A^T (Y_d - Y') \quad (3-16)$$

式中 I ——单位矩阵。

3.5 仿真验证与实验

3.5.1 转向角速度控制仿真

这里设定机械式转向执行机构的参数为: 齿轮副的传动比为 10:1, 所用步进电机的步进角为 1.8° 。转向控制的对象具体为洋马 VP6 插秧机, 测试得到转向系统的动态响应特性如图 3-8 所示, 进行时域辨识可得到传递函数如式(3-17)所示。

$$\frac{\delta(s)}{\theta(s)} = \frac{2.76}{s^2 + 5.19s + 26.32} \quad (3-17)$$

根据上述条件, 可以得到 DMC 控制对象的传递函数为

$$G_2(s) = \frac{0.5}{s^2 + 5.19s + 26.32} \quad (3-18)$$

利用 Matlab 中的 MPC 设计工具, 进行转向角速度控制仿真。首先, 向 MPC 设计工具导入控制对象 $G_2(s)$; 然后进行仿真参数的确定, 原则及数值如下: 采样控制周期, 这里根据控制系统实际情况, 设为 0.05s; 预测前景 p , 应使预测时域包含式(3-10)的主要动态部分, 这里取为 20; 控制前景 t , 对应于矩阵 A 的列数, 由于在控制过程中需要计算逆矩阵 $(A^T A + \lambda I)^{-1}$, 考虑到本文算法的运算平台是嵌入式处理器, 且控制对象相对简单, 所以 t 取 1; 控制量变化量的权重

λ ，这里取一个较小值 0.05 即可使得控制量的变化相对平缓；根据式(3-2)，将控制量限定在-1000 与 1000 之间，且控制量变化速率限定在-1000 与 1000 之间；另外，为了提高转向控制的响应速度，这里柔化因子 α 取较大的值 0.9。

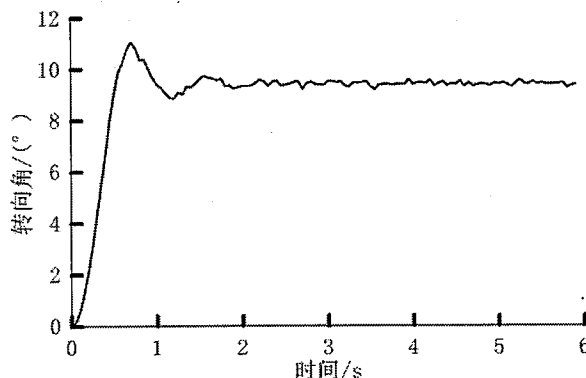


图 3-8 插秧机转向系统动态响应曲线

Fig.3-8 Dynamic response curve of rice transplanter steering system

图 3-9(a)和图 3-9(b)分别是上述参数下，在单位阶跃转向角速度给定情况下，MPC 控制器的控制量变化情况和转向角速度跟踪效果。

由仿真结果可知，上升时间约 0.35s，超调量约 10%，响应速度较快，超调量在可接受范围内。

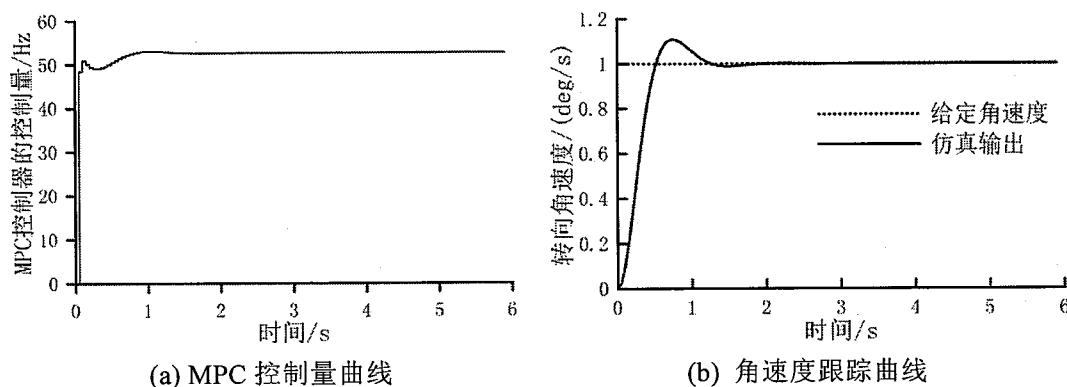


图 3-9 转向角速度为单位阶跃给定时的控制仿真

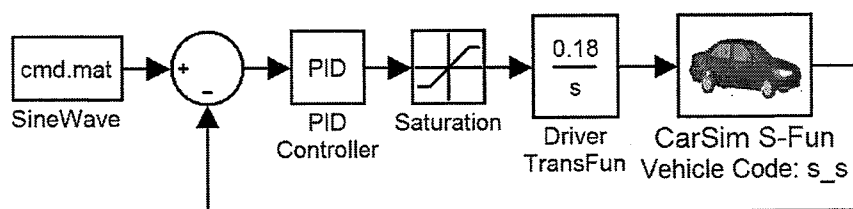
Fig.3-9 Control simulation at the steering angular velocity set value of 1 deg/s

3.5.2 转向控制仿真验证

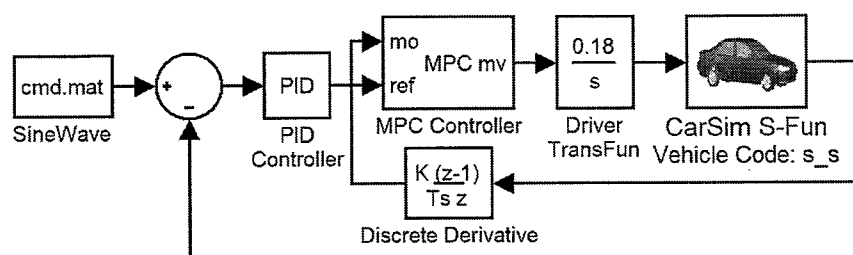
CarSim 是在车辆动力学领域使用非常广泛的仿真软件，内建的车辆模型多达 21 个自由度，能够对车辆动力学特性进行高精度的仿真，已被众多研究者应用在自主车辆的自动行驶控制算法验证中^[18,24]。本文也采用 CarSim 与 Simulink 联合仿真进行转向控制算法的仿真验证和对比。

图 3-10 所示为农机转向控制仿真原理框图，其中图 3-10(a)中使用经典的

PD 控制方法，图 3-10(b)中使用本文提出的 DMC-PD 串级控制方法。CarSim S-Fun 模块为 CarSim 通过 S 函数提供的农机动力学模型，这里使用其转向系统作为被控对象，模块的输入为方向盘转角 Steer_SW，输出为转向角 Steer_L1；Driver TransFun 模块为机械式转向执行机构的传递函数。



(a) PD 转向控制仿真



(b) DMC-PD 转向控制仿真

图 3-10 仿真原理框图

Fig.3-10 Functional block diagrams of simulation

验证和对比的过程如下：第一步，输入幅度为 5 的阶跃信号，分别进行 PD 控制器、DMC-PD 控制中外环 PD 控制器的参数整定（内环 DMC 控制器使用前文所确定的参数），所确定的参数后续不再改变。第二步，依次将输入更改为幅度为 10 的阶跃信号、以 5Hz 采样后的 1rad/s 幅值为 5 的正弦信号和以 5Hz 采样后的 1rad/s 幅值为 10°的正弦信号，记录各自的输出结果。结果比较如图 3-11 所示，其中，所有的图例都相同。

图 3-11(a)所示为参数整定时的控制输出，由图中可知，PD 控制器和 DMC-PD 控制器已被调节到相似的控制效果。当输入阶跃信号的幅度由 5°增大到 10°时，对应的仿真输出效果依然相似，如图 3-11(b)所示。但是，当输入分别更改为 1rad/s 幅值为 5°的正弦信号和 1rad/s 幅值为 10°的正弦信号时，即转向角指令不断变化时，两种控制器的仿真输出差别较大，DMC-PD 控制器的转向角度跟踪速度明显快于 PD 控制器，如图 3-11(c)和图 3-11(d)所示。由两图对应的数据可知，PD 转向控制的时延约为 0.42s，DMC-PD 转向控制的时延约为 0.25s；PD 控制方法的精度，随着工况不同而变化，而 DMC-PD 控制方法的精度在不同工况下基本保持不变。

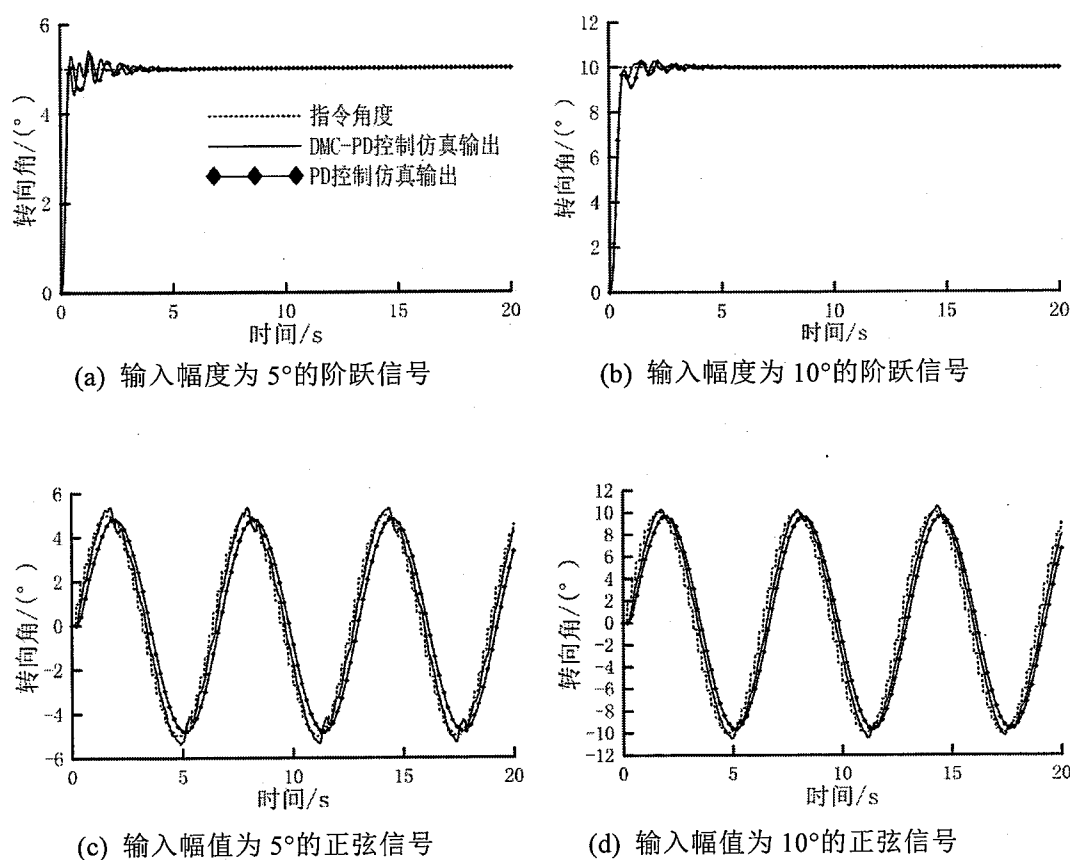


图 3-11 仿真结果对比

Fig.3-11 Comparison of simulation results

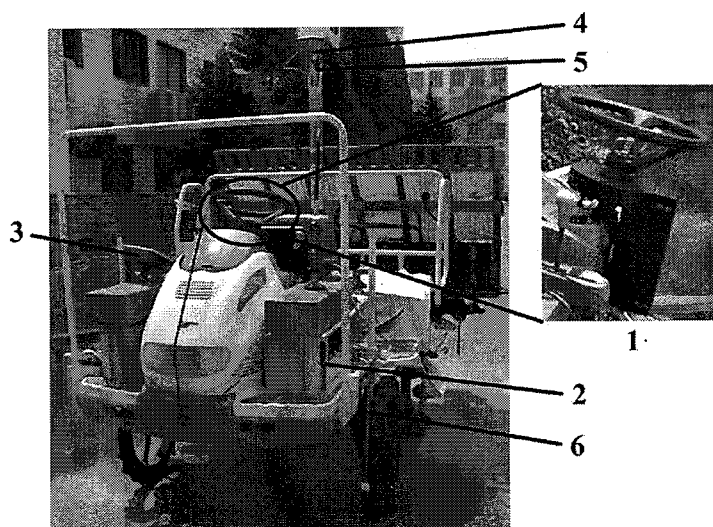
分析上述仿真结果可知, 本文提出的 DMC-PD 串级转向控制方法, 在跟踪速度上明显优于传统 PD 控制方法, 且随工况的不同能够一直保持较高的跟踪精度。

3.5.3 转向控制实验

图 3-12 所示为加装了自主设计开发的自动导航控制系统的洋马 VP6 插秧机。其中, 机械式转向执行机构串连安装在插秧机转向轴与方向盘之间, 导航控制器、转向控制器、GPS 定位模块等统一安装在集成控制箱内。转向角度和转向角速度通过安装在前轮内侧的连杆式转向角测量机构测算得到, 航向角通过电子罗盘获得, 田间计算机用于提供人机交互界面。

以图 3-12 所示的插秧机自动导航系统为实验平台, 在 1.5m/s 的行驶速度下, 以 5Hz 采样后的 1rad/s 、幅值为 5° 的正弦函数作为转向角的给定序列, 转向控制器工作频率 20Hz 。在确定了 MPC 控制器的基础上, 调节 PD 参数, 使转向角控制达到较好效果。转向角跟踪曲线如图 3-13 所示, 跟踪时延约为 0.25s 。对应

的转向角跟踪误差曲线如图 3-14 所示, 其中最大误差 1.36° , 误差的绝对值平均值为 0.5° 。



1.自动转向执行机构 2.集成控制箱（含导航控制器、转向控制器、GPS 定位模块等）
3.田间计算机 4.GPS 天线 5.电子罗盘 6.转角编码器

图 3-12 插秧机自动导航系统

Fig.3-12 Auto-Guidance system of rice transplanter

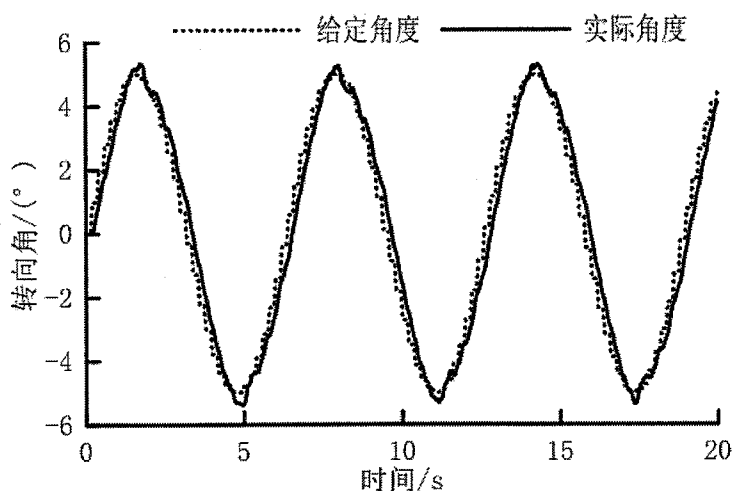


图 3-13 转向角为正弦给定时的跟踪曲线

Fig.3-13 Tracking curve at the steering angle set value of sine-wave

另外, 本文提出的方法已应用在插秧机直线路径追踪控制实验中。实验在图 3-12 中所示的水泥路面上进行, 行驶速度为 1.5m/s 。图 3-15 是实验过程中的一段转向角指令跟踪效果曲线。由于插秧机的实心橡胶车轮抗震性较差, 在水泥路面上以较快速度行驶时, 车体震动幅度较大, 导致 GPS 定位误差增大, 所

以该段路径追踪过程中, 转向角指令的变化比较频繁。而本文提出的基于 DMC-PD 控制的转向控制方法, 能够快速、准确地实现该转向角指令序列的跟踪。

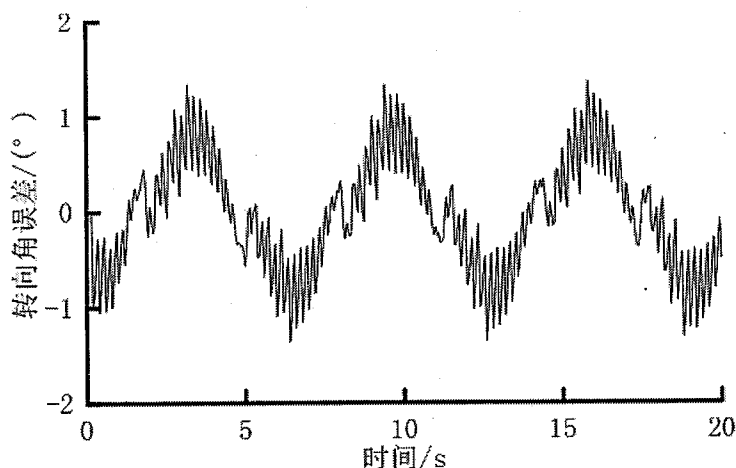


图 3-14 转向角为正弦给定时的跟踪误差

Fig.3-14 Tracking error at the steering angle set value of sine-wave

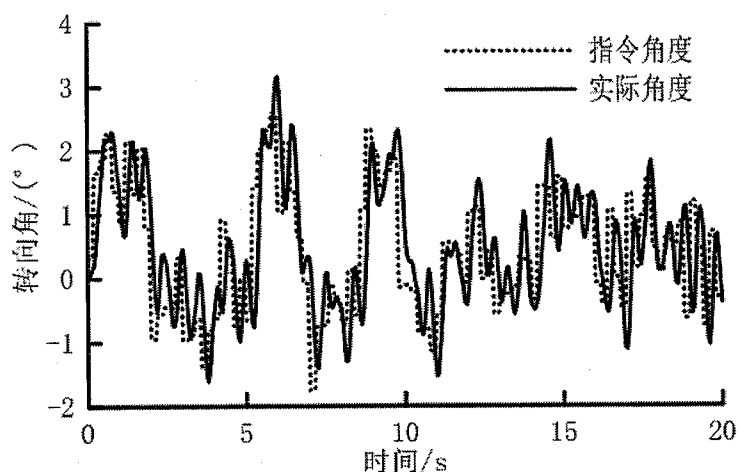


图 3-15 直线路径追踪过程中转向角指令跟踪曲线

Fig.3-15 Steering angle tracking curve in line tracking control

3.5.4 实验结果讨论

由上述仿真和实验可知, 本文提出的 DMC-PD 串级转向控制方法, 性能优于传统 PD 控制方法; 转向角跟踪误差的绝对值平均值为 0.5° , 跟踪时延约为 0.25s , 且能够在实际自动导航控制过程中迅速、准确地跟踪转向角指令。

本文提出的自动转向系统的 DMC-PD 串级控制方法, 虽然多引入了一个控制器, 但可以对转向角速度进行优化调节, 在转向角调节精度较高的同时, 能

够具有较快的响应速度，使得转向控制系统的整体性能更佳。且由于采用了预测控制技术，本控制方案对复杂田间环境的适应性较强。

3.6 本章小结

本章以安装有机械式转向执行机构的农机为研究对象，进行了转向控制系统建模和转向控制方法研究。首先对机械式转向执行机构采用机理建模的方法，对农机转向系统采用辨识建模的方法，建立了转向控制系统模型。其次，研究设计了串级转向控制方法，内环角速度控制器采用动态矩阵控制方法，外环角度控制器采用 PD 控制方法。最后，在 CarSim 与 Simulink 联合仿真环境中，将提出的转向控制方法进行了仿真验证，并在洋马 VP6 插秧机上进行了实车实验，验证了本章所提的基于预测控制和 PD 控制的农机转向串级控制方法具有跟踪速度快、精度高的优点。

第4章 农机建模与导航控制方法研究

4.1 引言

农机建模与导航控制方法是农机自动导航控制的核心研究内容。农机模型是对农机运动规律的抽象描述,是进行农机运动状态分析、自动导航控制算法设计的基础。本文基于农机导航中常用的二轮车模型,根据运动学原理推导提出了农机运动状态预测模型。

农机导航控制算法的性能直接决定着农机目标路径追踪的精度,是导航控制系统的核心。本文以比例控制方法为基础,针对采用恒定比例系数时难以对不同范围的偏差都做到较优调节的问题,采用模糊推理在线调节比例系数,设计了模糊自适应比例导航控制方法。

4.2 基于状态预测的农机运动学建模方法研究

在导航控制研究中,通常将农机简化为自由度较少的刚体进行建模分析^[100, 101],完整的农机运动状态应包括位置、速度和姿态。但是在很多导航控制算法中,如PID^[60]、比例控制^[56, 102]、纯追踪方法^[103, 104]等,只是使用从传感器获取的位置和姿态数据进行控制量(转向角指令)的计算,这些导航控制方法中没有考虑到速度因素带来的影响,其缺点分析如下:

将传感器测量位置信息 P 的时刻记为 t_1 ,测量姿态信息 A 的时刻记为 t_2 ,转向执行机构开始执行根据 P 和 A 计算得出的转向控制指令的时刻记为 t_3 ,受通信传输延迟、控制程序的运算周期等待及控制算法计算耗时等因素的影响, t_3 相对于 t_1 和 t_2 必然有一定的延时,分别记为 Δt_1 和 Δt_2 。则在 Δt_1 、 Δt_2 时间段内,由于农机一直在行驶中,受行驶速度大小和方向的影响,农机的实际位置、姿态已经发生了改变,将这个改变量记为向量 $\Delta \Gamma$ 。则对于 t_3 时刻执行的导航控制来说,相当于所使用的位置、姿态数据比 t_3 时刻的实际数据增加了 $\Delta \Gamma$ 的传感器测量误差,这将直接影响到导航控制的精度和速度。

为了弥补这个缺点,本文以二轮车运动学模型为基础,提出了农机位置和姿态的时间预测模型对 $\Delta \Gamma$ 进行估算,并通过CarSim与Simulink联合仿真验证了模型的有效性。

4.2.1 经典二轮车运动学模型

二轮车模型最早由Ellis于1969年提出^[105],在假定轮胎不发生侧滑,无俯

仰、侧倾运动，后轮速度的纵向分量恒定，且不考虑转向执行机构的动力学特性的情况下，可以用简化的二轮车模型来描述车辆的横向动力学特性，如图 4-1 所示。

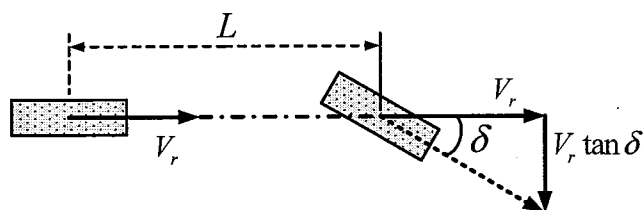


图 4-1 二轮车模型示意图

Fig.4-1 Diagram of bicycle model

由于假定轮胎不发生侧滑，所以前轮的横向速度为

$$V_y = V_r \tan \delta$$

式中 δ ——前轮的转向角度；

V_r ——后轮的纵向速度。

由于后轮被限制为不能够进行转动，只能向前滚动，所以能够得到航向角速度为

$$\dot{\psi} = \frac{V_y}{L} = \frac{V_r \tan \delta}{L} \quad (4-1)$$

式中 L ——轴距。

在全局坐标系中，根据速度与位置的关系有

$$\dot{x} = V_r \cos \psi \quad (4-2)$$

$$\dot{y} = V_r \sin \psi \quad (4-3)$$

式(4-1)~(4-3)即为通常使用的二轮车运动学模型表达式^[106]。

4.2.2 农机运动状态预测模型

如图 4-2 所示，首先定义农机的行驶平面为二维全局坐标系 $X_I O_I Y_I$ ， X_I 指向东， Y_I 指向北。农机的载体坐标系为 $X_R Y_R Z_R$ ，原点 O_R 为农机的后轴中心，也为控制点， X_R 沿农机纵轴指向正前方， Y_R 指向农机的正左方， Z_R 指向正上方，与 X_R 、 Y_R 构成右手坐标系。由于农田的地势通常比较平缓，所以这里暂不考虑

农机在垂直方向上的运动，仅对其在二维坐标系 $X_R O_R Y_R$ 内的运动进行分析建模。

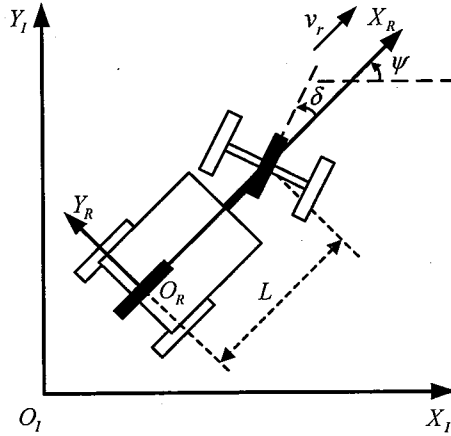


图 4-2 农机及其行驶平面的坐标系定义

Fig.4-2 Coordinate system definition

可认为农机在转向时不发生横向滑移，则农机的行驶速度大小与后轮速率相等，记为 v_r （单位：m/s），方向沿 X_R 轴正方向。农机的转向轮与 X_R 的夹角记为转向角 δ （单位：弧度），从零度顺时针偏转时值为负，从零度逆时针偏转时值为正。从 X_I 轴逆时针旋转到 X_R 轴，所旋转的角度记为航向角 ψ （单位：弧度）。载体坐标系的原点 O_R 在全局坐标系 $X_I O_I Y_I$ 中的坐标记为 (x_{OR}, y_{OR}) ，则同一个点在平面坐标系 $X_R O_R Y_R$ 中的坐标 (x_R, y_R) 与在平面坐标系 $X_I O_I Y_I$ 中的坐标 (x_I, y_I) 之间的转换关系为^[107]：

$$\begin{bmatrix} x_I \\ y_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{OR} \\ y_{OR} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

图 4-3 为对农机运动状态进行预测的示意图，图中将农机简化为二轮车模型，并将 O_R 视作整个农机的观测点。推导运动状态预测模型的过程中采用当前时刻的载体坐标系。 O_R 点经过预测时间长度 T_p （单位：s）后运动到的位置记为 O'_R ， B 为 O'_R 在 Y_R 轴上的垂足， C 为农机的瞬时转向中心。

由于农机的行驶速度较低，在不考虑轮胎侧偏的情况下，根据车辆运动学可知：

$$R = L / \tan \delta \quad (4-5)$$

式中 R ——车辆转弯半径， $R = CO_R = CO'_R$ ，m；

L ——为车辆轴距，m。

在只考虑农机的平面运动情况下，转向时农机的转向角速度为^[108]：

$$\omega = \frac{v_r}{L} \tan \delta \quad (4-6)$$

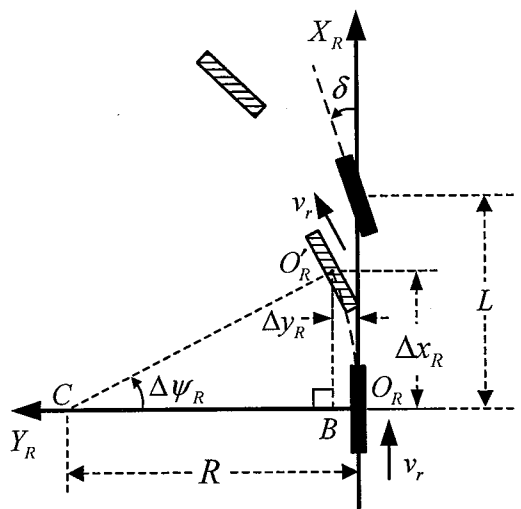


Fig.4-3 Diagram of agricultural machinery motion prediction model

令 T_p 时间段内农机的行驶速度 v_r 为定值, 且转向角度 δ 为正值并保持不变, 则 T_p 时间段内, 农机的瞬时转向中心 C 不变, 且由式(4-6)可知, 农机的转向角速度 ω 恒定, 则根据运动学原理, 农机在 T_p 时间段内的转向角度的变化量为:

$$\Delta\psi_R = \omega T_P = \frac{v_r T_P}{L} \tan \delta \quad (4-7)$$

由图 4-3 根据几何关系可以推导出:

$$\Delta x_R = R \sin(\Delta \psi_R) = \frac{L}{\tan \delta} \sin(\Delta \psi_R) \quad (4-8)$$

$$\Delta y_R = R - R \cos(\Delta \psi_R) = \frac{L}{\tan \delta} [1 - \cos(\Delta \psi_R)] \quad (4-9)$$

在式(4-7)、(4-8)、(4-9)中, $\Delta\psi_R$ 、 Δx_R 、 Δy_R 分别为农机的航向角和位置预测变化量。为便于叙述, 这里将式(4-7)、(4-8)、(4-9)记为方程组

$$\begin{cases} \Delta x_R = \frac{L}{\tan \delta} \sin(\Delta \psi_R) \\ \Delta y_R = \frac{L}{\tan \delta} [1 - \cos(\Delta \psi_R)] \\ \Delta \psi_R = \frac{v_r T_P}{L} \tan \delta \end{cases} \quad (4-10)$$

在 T_p 时间段内,当转向角度 δ 为负值且保持不变时,通过类似推导过程可得到与式(4-10)相同的表达式。

在 T_p 时间段内, 当转向角度 δ 为零且保持不变时有

$$\begin{cases} \Delta x_R = v_r T_p \\ \Delta y_R = 0 \\ \Delta \psi_R = 0 \end{cases} \quad (4-11)$$

经过 T_p 后, 农机在当前载体坐标系中的位置变化向量可记为 $[\Delta x_R, \Delta y_R]^T$, 由式(4-4)可得到在 $X_I O_I Y_I$ 坐标系中对应的位置变化向量为

$$\begin{bmatrix} \Delta x_I \\ \Delta y_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_0 & -\sin \psi_0 \\ \sin \psi_0 & \cos \psi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

式中 ψ_0 ——农机当前时刻在坐标系 $X_I O_I Y_I$ 中的航向角。

农机在坐标系 $X_I O_I Y_I$ 和坐标系 $X_R O_R Y_R$ 中的角度变化量相同, 即

$$\Delta \psi_I = \Delta \psi_R = \frac{v_r T_p}{L} \tan \delta \quad (4-13)$$

所以, 经过预测时间长度 T_p 后, 农机在二维全局坐标系 $X_I O_I Y_I$ 中的位置和航向角为:

$$\begin{cases} \hat{x}_I = x_0 + \Delta x_I \\ \hat{y}_I = y_0 + \Delta y_I \\ \hat{\psi}_I = \psi_0 + \Delta \psi_I \end{cases} \quad (4-14)$$

式中 x_0 ——农机后轴中心点当前时刻在坐标系 $X_I O_I Y_I$ 中的横坐标;

y_0 ——农机后轴中心点当前时刻在坐标系 $X_I O_I Y_I$ 中的纵坐标。

联立式(4-10)~(4-14), 可解得农机运动状态预测模型为

$$\begin{cases} \hat{x}_I = x_0 + \frac{L \cos \psi_0}{\tan \delta} \sin\left(\frac{v_r T_p \tan \delta}{L}\right) - \frac{L \sin \psi_0}{\tan \delta} [1 - \cos\left(\frac{v_r T_p \tan \delta}{L}\right)] \\ \hat{y}_I = y_0 + \frac{L \sin \psi_0}{\tan \delta} \sin\left(\frac{v_r T_p \tan \delta}{L}\right) + \frac{L \cos \psi_0}{\tan \delta} [1 - \cos\left(\frac{v_r T_p \tan \delta}{L}\right)] \\ \hat{\psi}_I = \psi_0 + \frac{v_r T_p \tan \delta}{L} \end{cases}, \delta \neq 0 \quad (4-15)$$

及

$$\begin{cases} \hat{x}_I = x_0 + v_r T_p \cos \psi_0 \\ \hat{y}_I = y_0 + v_r T_p \sin \psi_0 \\ \hat{\psi}_I = \psi_0 \end{cases}, \delta = 0 \quad (4-16)$$

为保证路径追踪的有效性, T_p 时间段农机转动的角度 $\Delta \psi_R$ 应小于 π , 即不允许农机转动到航向与现在相反的角度, 则由式(4-7)可知 T_p 的取值范围为:

$$T_p < \frac{L\pi}{v_r \tan \delta} \quad (4-17)$$

另外, 由式(4-15)及式(4-16)可知, 当 $T_p = 0$ 时有

$$\begin{cases} \hat{x}_I = x_0 \\ \hat{y}_I = y_0 \\ \hat{\psi}_I = \psi_0 \end{cases}$$

即预测模型失效, 相当于直接使用原农机状态数据。

4.2.3 仿真验证

PID 控制是一种应用非常广泛的控制方法, 在农机导航控制中也经常被采用。本节在 PID 导航控制算法中应用了上文提出的运动状态预测模型, 对直线路径进行追踪控制仿真, 并与不使用该模型的 PID 导航控制效果进行了对比。

4.2.3.1 仿真实验原理

图 4-4 为采用 PID 控制方法的农机导航控制仿真原理框图。CarSim S-Fun 模块为 CarSim 通过 S 函数提供的农机动力学模型, 这里用其作为被控对象, 模块的输入为方向盘转角 Steer_SW, 输出为航向角 Yaw、纵向速度 Vx、车轮转角 Steer_L1、全局坐标系 x 轴坐标 Xo、y 轴坐标 Yo。Driver TransFun 模块为转向执行机构的传递函数, 这里使用第 3 章中辨识得到的机械式转向执行机构的模型。转向控制回路采用第 3 章中提出的基于预测控制和 PD 控制的串级转向控制器及参数。模块 distance_e 用于计算农机当前位置与目标直线路径的横向偏差。PID1 模块用于导航控制, 其输入为横向偏差, 输出为转向角指令。

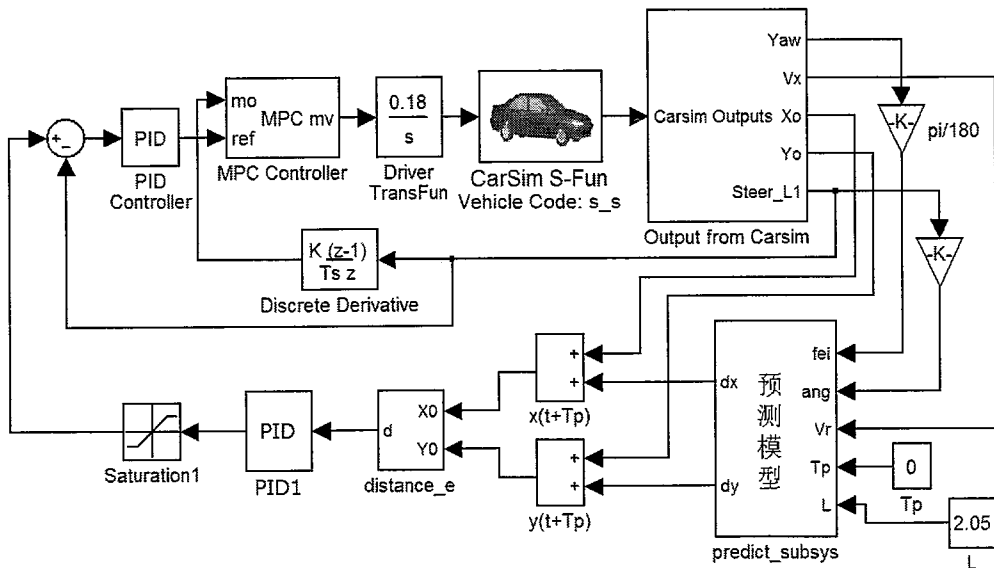


图 4-4 PID 控制仿真原理框图

Fig.4-4 Block diagram of PID control simulation principle

本文提出的农机运动状态预测模型，在仿真原理框图中主要由子系统模块 predict_subsys 实现，其内部构成如图 4-5 所示。其中，式(4-15)和式(4-16)的使用，由 switch 模块根据转向角的值进行选择，当转向角为零时使用式(4-16)，否则使用式(4-15)。

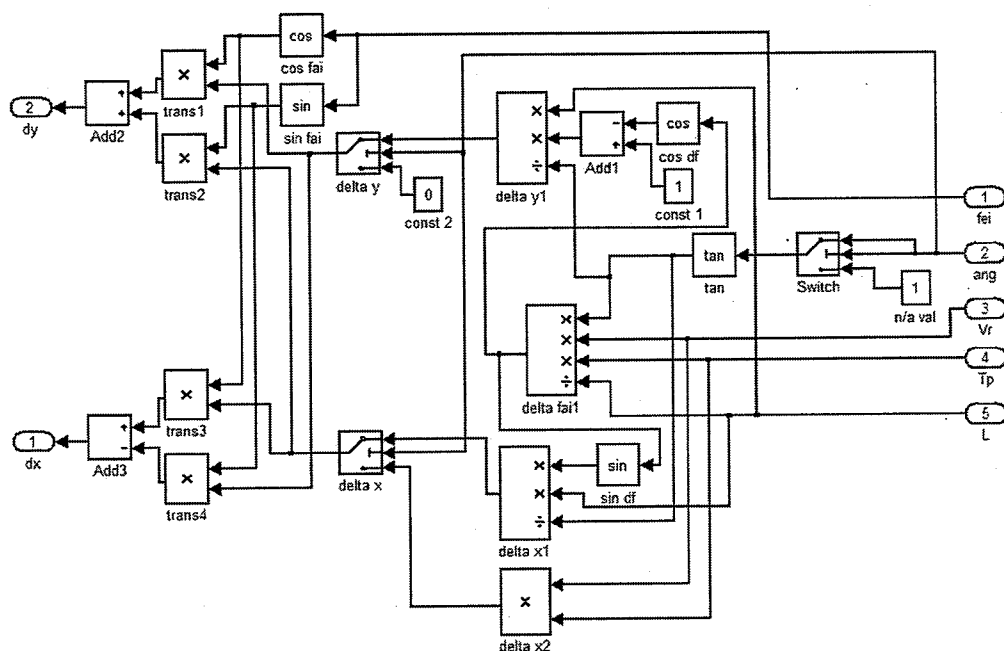


图 4-5 运动状态预测模型 simulink 仿真模块

Fig.4-5 Simulink model of agricultural machinery motion prediction model

4.2.3.2 模型对比

在 PID 导航控制方法中，通常直接根据当前时刻的位置信息 x_0 、 y_0 ，求取横向偏差 d_0 ，作为控制器的输入。这里使用预测值 $\hat{x}_t$ 、 $\hat{y}_t$ 和 $\hat{\psi}_t$ ，求取横向偏差预测值 $\hat{d}$ ，并将 $\hat{d}$ 应用在 PID 控制方法中。仿真过程如下：

通过 CarSim 将车速设为定值 1.2m/s，设置初始对准存在 0.5m 横向偏差；在图 4-4 所示的仿真原理框图中，调节 T_p 的值，使其从零逐渐增大至 0.4，对应仿真结果如图 4-6 所示。其中， $T_p = 0$ 时的曲线，即为不进行预测、直接使用农机位置数据进行导航控制的误差曲线。

各曲线对应数据的分析结果详见表 4-1。其中，第四列的跟踪时间，这里定义为误差值从初始最大值 0.5m 下降 90%，即误差值第一次下降到 0.05m 的时间。由表中数据可知，当 $T_p = 0.25$ 时，最小横向偏差较小且跟踪时间的取值相对较小。

对比表 4-1 的行 1 和行 7，可得到如下结论：本文提出的农机运动状态预测模型，在采用 PID 控制方法的直线路径追踪中，选用合适的预测时间参数（这

里的 0.25s), 能够在不明显降低追踪速度的前提下, 大幅减小超调, 且稳态追踪误差更小。

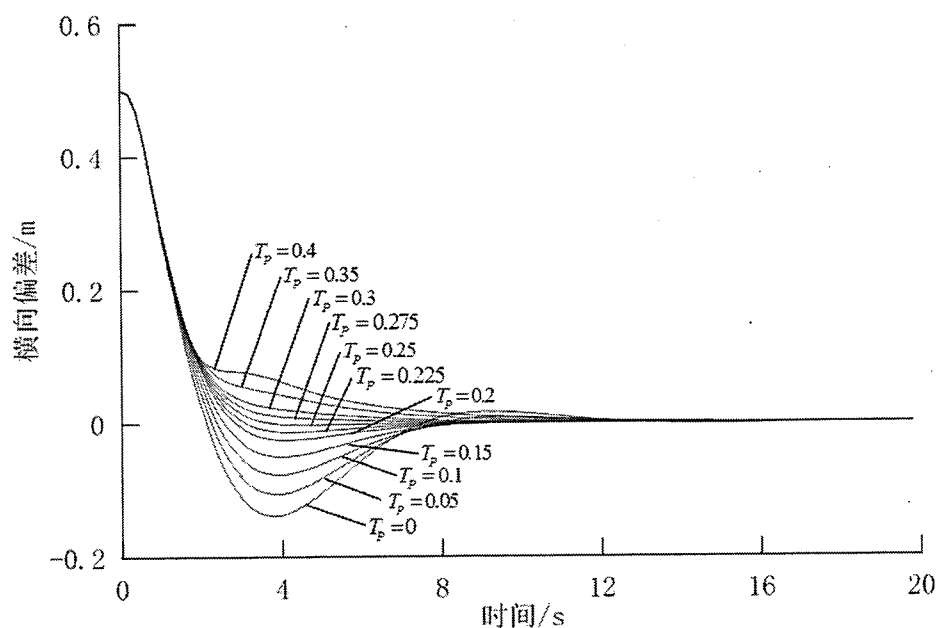


图 4-6 直线路径追踪仿真横向偏差曲线

Fig.4-6 Deviation curve of straight path tracking simulation

表 4-1 直线路径追踪仿真横向偏差统计

Tab.4-1 Statistics of straight path tracking simulation

序号	Tp 取值 (s)	最大横向偏差 (m)	最小横向偏差 (m)	跟踪时间 (s)	稳态偏差绝对值均值 (m)	稳态均方差
1	0	0.5	-0.13873	1.85	2.94E-05	3.84E-09
2	0.05	0.5	-0.10622	1.9	8.27E-06	2.47E-10
3	0.1	0.5	-0.077311	2.0	2.10E-06	6.90E-12
4	0.15	0.5	-0.050531	2.1	7.68E-07	1.13E-12
5	0.2	0.5	-0.025434	2.2	4.65E-07	1.00E-15
6	0.225	0.5	-0.013613	2.2	9.68E-07	3.73E-16
7	0.25	0.5	-0.0029344	2.3	3.74E-07	2.57E-15
8	0.275	0.5	-8.53E-07	2.4	7.64E-07	2.91E-13
9	0.3	0.5	-1.38E-06	2.5	1.79E-06	6.79E-12
10	0.35	0.5	-2.20E-07	3.3	8.22E-06	2.17E-10
11	0.4	0.5	-9.45E-07	4.6	2.74E-05	2.09E-09

4.3 基于模糊自适应比例控制的农机导航控制方法研究

4.3.1 比例控制方法

理想的路径追踪控制是实际农机行驶路径与目标路径完全重合,即横向偏差和航向偏差都为零。但在实际应用中,由于传感器和执行机构的误差,两者在大多情况下并不为零。基于反馈控制思想,以与两种偏差成比例的控制量来进行农机转向角度的调节,即为比例控制。

比例控制的控制率为:

$$u = k_1 d + k_2 \theta \quad (4-18)$$

式中 u ——控制量,在这里为转向角度;

d ——农机控制点到目标路径的横向偏差, m;

θ ——农机航向与路径方向的偏差, 弧度;

k_1 ——横向偏差比例系数;

k_2 ——航向偏差比例系数。

另外,通过其它控制原理和方法也可以推导出比例控制的表达式。刘沛等^[102]采用二轮车模型,根据“车辆在行驶中,驾驶员往往根据前方某一点与目标路径的偏差来操纵方向盘来控制车辆行驶方向”的经验,推导出与式(4-18)相同的控制率表达式。吕安涛等^[102]采用基于二轮车的运动学和动力学模型分别建立了拖拉机自动驾驶的全状态反馈的最优控制器,在对所得控制器进行分析后得出结论:“设计一个只取决于输出的最优控制往往也能取得满意的控制效果”,并在实际控制器的开发时使用了与式(4-18)相同的控制率。

比例控制方法是一种简单有效的导航控制方法,在农机导航控制系统研究中有广泛的应用^[56, 109],相对于通常只考虑横向位置偏差的PID,由于在输入中增加了航向角偏差,所以降低了路径追踪的超调,加快了追踪速度。但是在仿真和实际导航控制实验中发现,如果采用恒定的比例系数,则当偏差较大时,追踪速度会比较慢,当偏差较小时依然会进行较为频繁的调节。所以本节研究了基于模糊自适应比例控制的导航控制方法,根据横向偏差和航向偏差的值,采用模糊推理在线调节比例系数,在提高路径追踪速度的同时也降低了追踪误差。

4.3.2 模糊自适应比例控制方法

模糊控制是智能控制理论的一个分支,与传统的PID控制方式相比,它具

有特别适合于那些难以建立精确数学模型、非线性和大滞后的过程等特点。因此,本文将模糊控制和比例控制相结合,通过模糊控制实现比例控制参数自适应调节的方法来实现导航控制。这种“模糊-比例”控制策略,模糊控制的采用不是代替比例控制,而是对比例控制方式的改进和扩展,它既保持了常规比例控制系统结构简单、使用方便、控制精度高的优点,又采用模糊推理的方法实现了比例参数的在线自整定,兼具了模糊控制灵活性、适应性强的特点,相比单纯的任一种控制效果都要好^[110-112]。

针对式(4-18)所示的比例控制方法,这里采用模糊控制器进行比例系数的在线调节,从而提高导航控制系统的动态和静态性能。由于模糊控制器需要根据横向偏差和航向偏差两个数值来调节比例系数,所以模糊控制器的输入为两个。由于比例控制方法中,比例系数有两个,模糊控制器可以设计为两个输出,但是,这将增加模糊规则制定的难度,无法保证控制效果。所以,这里限定 $k_1 + k_2 = 1$,模糊控制器的输出只有一个 k_1 。则比例控制方法改写为

$$u = k_u(k_1 d + k_2 \theta) \quad (4-19)$$

式中 k_u ——控制增益,用于将比例控制的输出转换为转向角指令。

则设计的导航控制器结构如图 4-7 所示。

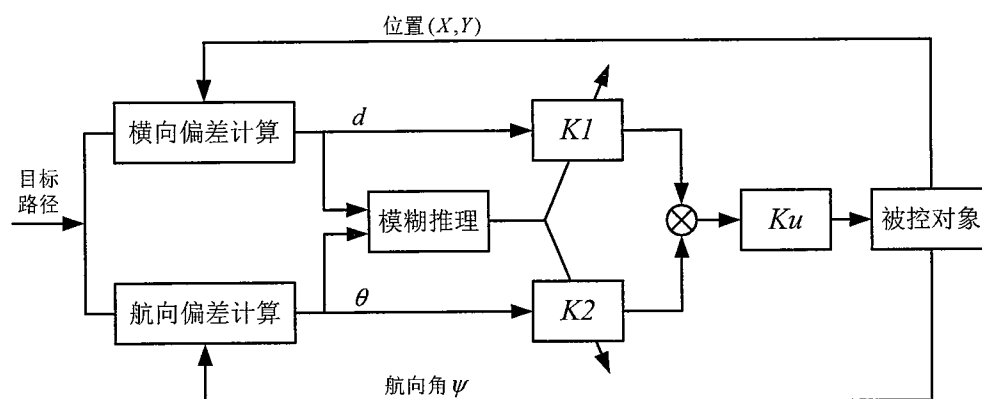


图 4-7 基于模糊自适应比例控制的导航控制器结构

Fig.4-7 Navigation controller structure based on fuzzy adaptive proportional control

其中,被控对象,指的是由转向控制器、转向执行机构、农机、转向角传感器等构成的转向角控制回路的等效被控对象。

导航控制器设计的核心内容是模糊控制器的设计,其详细过程如下。

(1) 确定模糊控制器的结构及输入、输出变量

上文已确定,模糊控制器采用二输入一输出结构,输入为横向偏差 d 和航

向偏差 θ ，输出为 d 的比例控制系数 k_1 。 θ 的比例控制系数 $k_2 = 1 - k_1$ 。

(2) 变量论域及语言变量的确定

输入 d 、 θ 和输出变量 k_1 的实际变化范围即为这些变量的基本论域。由于变量的基本论域各不相同，这里首先确定各个变量的基本论域，然后对输入、输出变量选取适当的量化因子，将基本论域变换为统一的模糊集论域。

1) 基本论域的确定

横向偏差 d 是指农机控制点到目标路径的横向偏差，单位为m。由于农机自动驾驶控制的精度通常要求在10cm以内，而通常在开始自动驾驶控制之前，首先需要进行人工的初始对准操作，所以偏差的范围不会特别大。这里重点考虑 $-0.5 \leq d \leq 0.5$ 区间内的导航控制，所以变量 d 的基本论域选取为 $[-0.5, 0.5]$ 。

航向偏差 θ 是指农机航向与路径方向的偏差，单位为弧度。在农机自动驾驶控制中，农机航向通常不应该偏离路径方向 90° 以上，所以变量 θ 的基本论域选取为 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ 。

在比例控制律表达式 $u = k_u(k_1 d + k_2 \theta)$ 中，由于 d 和 θ 均为带符号量，所以当限定 k_1 、 k_2 为非负数时，根据农机运动学原理，由 u 确定的转向角正好可以使农机向正确的方向运动（左转、右转或直行），所以 k_1 的基本论域为 $[0, 1]$ 。

2) 基本论域到模糊集论域的转换

为了便于进行模糊化处理，模糊集论域的定义如下：

d 和 θ 为： $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ ；

k_1 为： $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

将输入、输出变量从基本论域转换到模糊集论域的量化因子分别为：

$$\begin{cases} K_d = \frac{4 - (-4)}{0.5 - (-0.5)} = 8 \\ K_\theta = \frac{4 - (-4)}{\frac{\pi}{2} - (-\frac{\pi}{2})} = \frac{8}{\pi} \\ K_{k1} = \frac{1 - 0}{6 - 0} = \frac{1}{6} \end{cases} \quad (4-20)$$

式中 K_d ——输入变量 d 的量化因子；

K_θ ——输入变量 θ 的量化因子；

K_{k1} ——输出变量 k_1 的量化因子；

3) 语言变量的确定

与模糊集论域对应的语言变量选取如下：

d 和 θ 为：{NB, NS, ZO, PS, PB}；

k_1 为：{ZO, PS, PM, PB}。

其中，NB 表示“负大”，NS 表示“负小”，ZO 表示“零”，PS 表示“正小”，PM 表示“正中”，PB 表示“正大”。

(3) 隶属度函数确定

所有输入输出变量都采用三角形隶属度函数，具体表 4-2 和表 4-3 所示。

表 4-2 d 和 θ 的隶属度函数表

Tab.4-2 Membership functions of d and θ

论域 语言值	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
NB	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0
ZO	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0
PS	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0
PB	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1

表 4-3 k_1 的隶属度函数表

Tab.4-3 Membership functions of k_1

论域 语言值	0	1	2	3	4	5	6
ZO	1	0.5	0	0	0	0	0
PS	0	0.5	1	0.5	0	0	0
PM	0	0	0	0.5	1	0.5	0
PB	0	0	0	0	0	0.5	1

(4) 模糊规则建立

根据驾驶员人工驾驶农机进行路径追踪时的经验，针对不同横向偏差、航向偏差时的转向操作方法，总结得到模糊规则如表 4-4 所示，模糊控制器的输出三维图如图 4-8 所示。

分别以 d 和 θ 的值都为 PB、 d 和 θ 的值都为 NB 时为例，来进行模糊规则的

说明。当 d 为PB时,根据农机运动学原理,需要将转向角转动到正的较大的角度,而此时 θ 的值也为PB与 d 同符号,所以系数 k_1 取较大的值即PB。当 d 为NB时,根据农机运动学原理,需要将转向角转动到负的较大的角度,而此时 θ 的值也为NB与 d 同符号,所以系数 k_1 取较大的值即PB。

表 4-4 k_1 的模糊规则表Tab.4-4 Fuzzy rules of k_1

k_1		d				
		NB	NS	ZO	PS	PB
θ	NB	PB	PM	PS	PM	PS
	NS	PB	PM	PS	PS	PS
	ZO	PM	PS	ZO	PS	PM
	PS	PS	PS	PS	PM	PB
	PB	PS	PM	PS	PM	PB

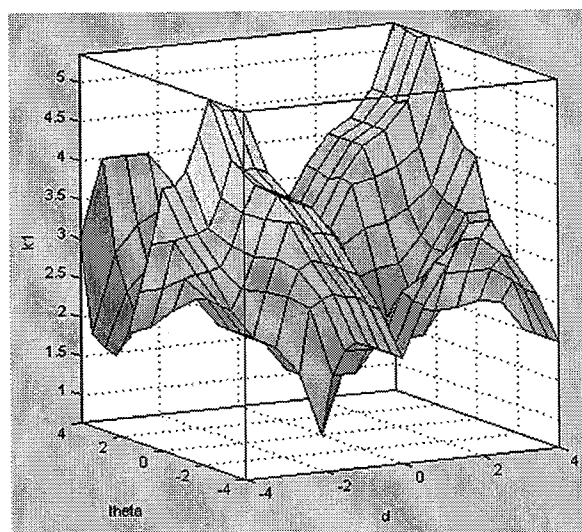


图 4-8 模糊控制器输出三维图

Fig.4-8 Three-dimensional figure of fuzzy controller output

(5) 模糊推理及解模糊方法确定

模糊推理方法采用 MIN-MAX 方法,即 Mamdani 推理法^[113, 114]。

解模糊采用加权平均法,即重心法。该方法的输出量 u^* 的值由下式来决定:

$$u^* = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_C(u_j) \times u_j}{\sum_{j=1}^n \mu_C(u_j)}$$

4.3.3 仿真验证

本文在 CarSim 与 Simulink 联合仿真环境中进行了上述模糊自适应比例控制方法的直线路径追踪控制仿真，并与采用固定系数的比例控制方法进行了仿真效果对比。

4.3.3.1 仿真实验原理

图 4-9 为采用比例控制方法的农机导航控制仿真原理框图。CarSim S-Fun 模块为 CarSim 通过 S 函数提供的农机动力学模型，这里用其作为被控对象，模块的输入为方向盘转角 Steer_SW ，输出为航向角 Yaw 、车轮转角 Steer_L1 、全局坐标系 x 轴坐标 Xo 、 y 轴坐标 Yo 。Driver TransFun 模块为转向执行机构的传递函数，这里使用第 3 章中辨识得到的机械式转向执行机构的模型。转向控制回路采用第 3 章中提出的基于预测控制和 PD 控制的串级转向控制器及参数。模块 distance_e 用于计算农机当前位置与目标直线路径的横向偏差。模块 yaw_e 用于计算农机当前航向角与目标直线路径的航向偏差。这里的比例控制系数分别由常量模块 k_1 和 k_2 设定，经仿真调试，当 $k_1=0.8$, $k_2=0.2$ 时，得到的控制效果比较好。

在图 4-9 的基础上，将比例控制系数更改为采用模糊推理在线调整的方式，得到模糊自适应比例控制方法的农机导航控制仿真原理框图如图 4-10 所示^[115]。其中， k_d 、 k_{θ} 和 k_{k1} 模块的作用分别为使用量化因子 k_d 、 k_{θ} 、 k_{k1} 进行基本论域与模糊集论域的转换。

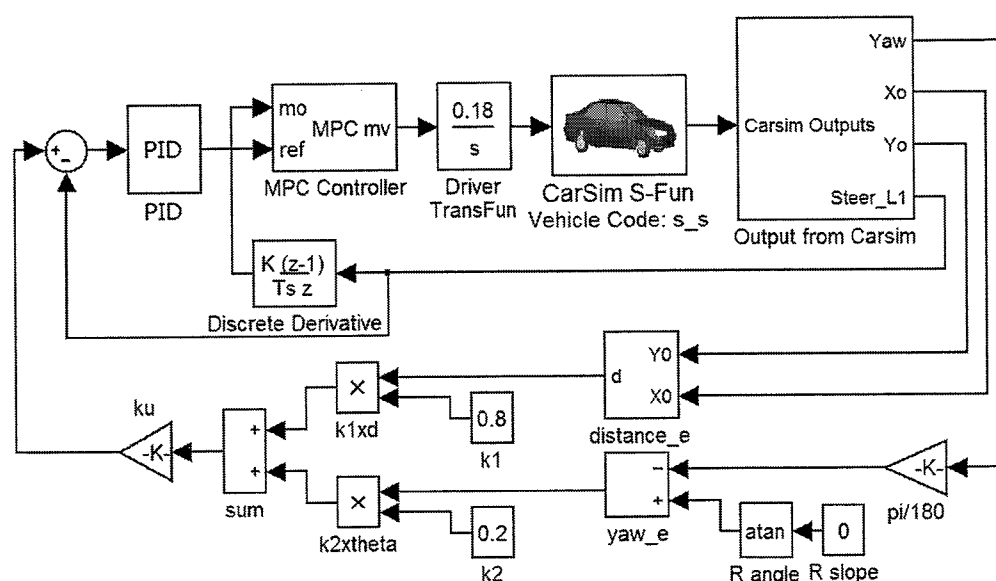


图 4-9 比例控制仿真原理框图

Fig.4-9 Principle block diagram of proportional control simulation

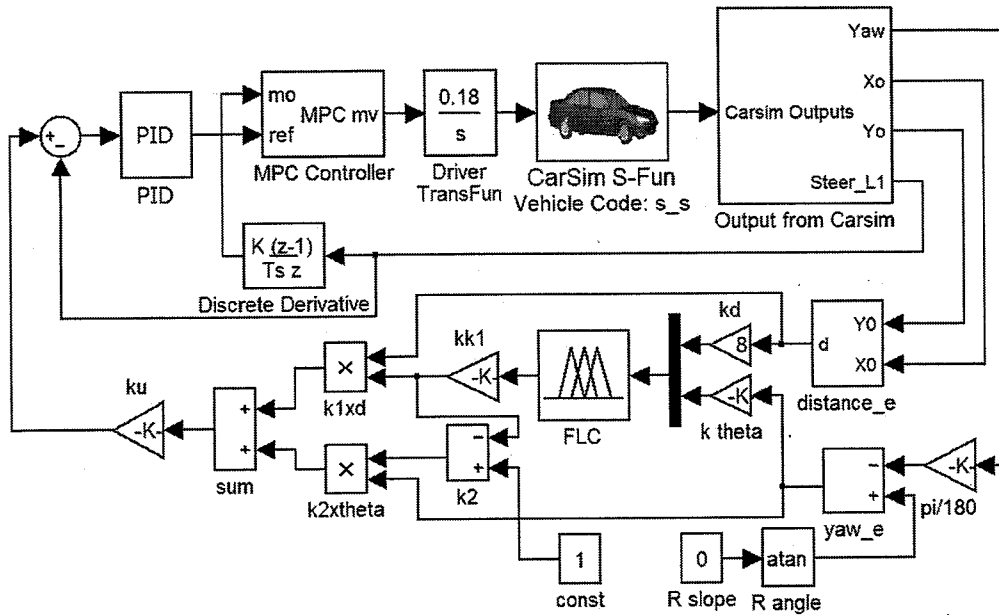


图 4-10 模糊比例自适应控制仿真原理框图

Fig.4-10 Principle block diagram of fuzzy adaptive proportional control simulation

4.3.3.2 控制方法对比

仿真验证的过程为：通过 CarSim 将车速设为定值 1.2m/s，设置初始对准时刻存在 0.5m 横向偏差；分别根据图 4-9 用比例控制方法、根据图 4-10 用模糊自适应比例控制方法进行路径追踪控制仿真，得到的农机行驶轨迹曲线如图 4-11 所示。由该图可知，本文提出的模糊自适应比例控制方法相对于传统比例控制方法，在不降低跟踪速度的情况下，能够显著降低超调和跟踪误差。

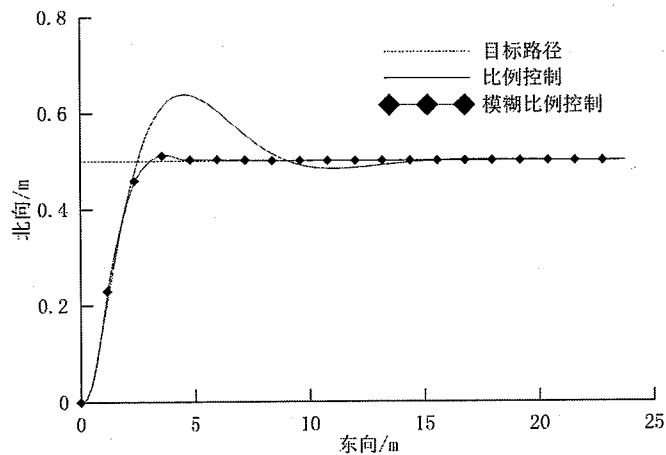


图 4-11 传统比例控制与模糊比例自适应控制导航效果对比

Fig.4-11 Comparison of navigation effect

4.4 本章小结

本章对农机导航系统中的农机建模与自动导航控制方法进行了研究。在农机二轮车运动学模型的基础上，提出了农机运动状态预测模型，并将该模型应用在PID导航控制方法中进行了直线路径追踪仿真。与传统PID控制方法比较，引入该模型后，能够在不明显降低追踪速度的前提下，大幅减小超调，且稳态追踪误差更小。另外，针对传统比例控制方法中，采用恒定的比例系数时无法对不同范围的偏差都做到较优调节的问题，本章还研究了基于模糊自适应比例的导航控制方法，根据横向偏差和航向偏差的值，采用模糊推理在线调节比例系数，在提高路径追踪速度的同时也降低了追踪误差。

第5章 农机导航控制系统集成技术研究

5.1 引言

针对目前国内研究开发的农机导航控制系统结构多样、接口封闭、难以与农机其它车载电子系统互联等缺点,本章研究提出了农机导航控制系统的集成规范。从硬件系统集成、软件系统集成和网络集成三个方面,对农机导航控制系统的集成技术进行了研究,制定了相关接口规范。

5.2 农机导航控制系统集成规范

在现代农业的耕种、灌溉、田间勘测、产量图绘制等生产过程中,网络化技术和软件系统的使用越来越广泛。特别是随着近年来机械设计、电子和嵌入式技术的进步,即使简单的作业机具,如犁地机、播种机、喷洒机等也进行了大幅的电子化改进^[116]。农机自身的发动机监视系统、发动机电子控制系统、电液控制悬挂系统等车载电子系统也越来越复杂,不同机具、车载电子系统之间的通信互联需要具有统一接口标准。

目前国际上已经有三种总线标准在农机上应用的比较广泛^[117],分别为:欧洲农机总线标准 DIN9684、美国的汽车电子技术标准 SAE J1939 协议和参照前两者制定的农林机械串行通信控制网络协议 ISO 11783 协议。ISO 11783 标准是免费开放的,且更具有针对性,已经在国外农机行业得到了较为广泛的应用。在国内进行的农机导航控制研究中,也已经基于 ISO 11783 开发了一些导航控制系统^[118, 119],但是尚无统一的导航控制系统集成规范。

因此,本章在第2章设计开发的农机导航控制系统整体结构及关键装置的基础上,重点针对导航控制系统中的硬件接口、软件接口及网络接口进行了研究,设计制定了软硬件系统集成规范和网络集成规范,为本文设计开发的农机导航控制通用平台的集成应用提供了指导标准。

农机导航控制系统集成技术包括三个层次,如图5-1所示。

(1) 硬件系统集成

集成目标 提供能够完成农机导航控制功能的硬件系统平台。

指导思想 采用基于 CAN 总线的分布式控制体系结构。

主要内容 从农机导航控制所需的硬件装置角度考虑集成问题,根据导航控制系统的功能需求,将分布式农机导航控制系统硬件划分为田间计算机、导航控制器、转向控制器和传感器测量节点四部分,用于为人机交互、导航控制算

法运行、转向控制算法运行和传感器接入等功能提供硬件平台。

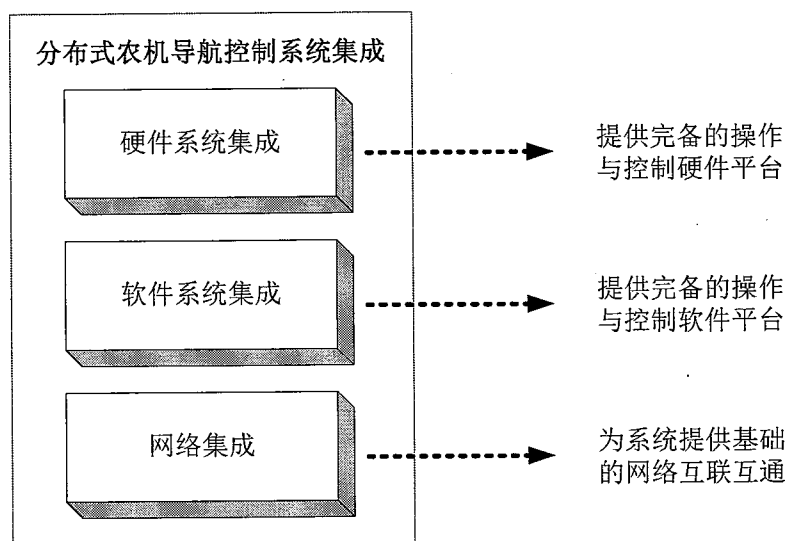


图 5-1 分布式农机导航控制系统集成技术总体框架图

Fig.5-1 Diagram of integration technologies of agricultural machinery navigation control system

（2）软件系统集成

集成目标 提供能够完成农机导航控制功能的软件系统平台。

指导思想 基于分工协作思想，对软件模块进行功能划分和接口定义。遵循模块化设计原则，除了传感器数据以外，减少软件模块之间的数据交互；尽量做到模块间低耦合性，模块内高内聚性。

主要内容 从农机导航控制所需的软件角度考虑集成问题，根据导航控制系统的功能需求，将分布式农机导航控制系统软件划分为田间计算机软件、导航控制器软件、转向控制器软件和传感器测量节点软件四部分。用于实现人机交互、导航控制算法、转向控制算法和传感器接入等功能。

（3）网络集成

集成目标 为农机导航控制系统提供统一的网络接口。

指导思想 应遵从 ISO 11783 协议，在与其相兼容的前提下，制定统一的农机导航控制系统网络协议规范。

主要内容 从农机导航控制所需的通信功能角度考虑集成问题，为实现农机导航控制系统中各装置之间的通信功能，并保证系统的可扩展性，以 ISO 11783 协议为基础，统一规定系统中各节点的物理层、数据链路层和应用层协议，重点针对农机导航控制应用，采用 ISO 11783 的扩展帧设计统一的导航通信协议，并进行常用装置的地址分配和常用数据的信息类型标识定义。另外，对于硬件

装置的 CAN 接口规范也进行了详细定义。

5.3 硬件系统集成规范

(1) 农机导航控制系统硬件总体结构

分布式农机导航控制系统采用基于 CAN 网络的总线式结构, 硬件总体结构如图 5-2 所示。

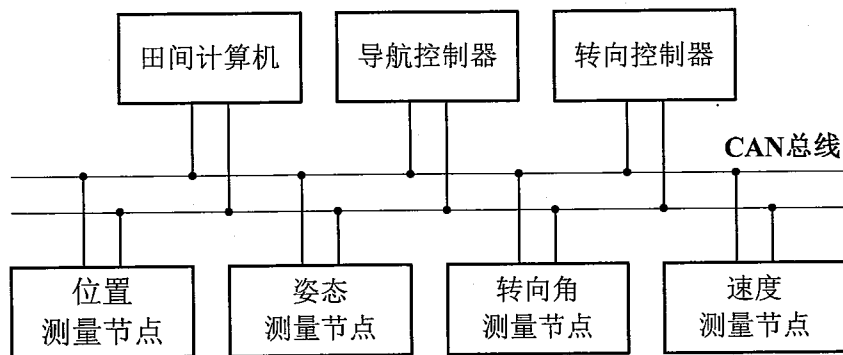


图 5-2 农机导航控制系统硬件总体结构

Fig.5-2 Hardware architecture of agricultural machinery navigation control system

硬件设备包括田间计算机、导航控制器、转向控制器和传感器测量节点四种：

- 1) 田间计算机用于提供整个农机导航控制系统的人机操作界面；
- 2) 导航控制器用于执行导航控制算法并进行农机位置与姿态信息的融合解算；
- 3) 转向控制器用于执行导航控制器发出的转向控制指令，控制农机转向系统自动转动到指令所要求的角度；
- 4) 传感器测量节点用于将传感器信息接入 CAN 总线，通常包括位置测量节点、姿态测量节点、转向角测量节点和速度测量节点等。

(2) 田间计算机集成规范

田间计算机作为整个分布式农机导航控制系统的人机操作界面，需要具备显示功能、方便的输入功能以及数据导入导出功能。典型的田间计算机硬件模块如图 5-3 所示。

田间计算机需要提供图形显示界面，通常还要能够进行农机实时行驶路径的显示、进行较复杂的绘图计算，所以通常要选择高性能的嵌入式硬件平台，可以使用带有硬件浮点运算单元的 ARM9 系列处理器平台。

触摸屏可以显示信息，并同时能够方便地接受用户输入；采用触摸屏作为

显示设备，能够在无需增加额外设备的情况下解决输入问题；触摸屏的尺寸应在 7 英寸到 10 英寸之间，分辨率应在 800X600 到 1024X768 之间；基于稳定性考虑，采用电阻式触摸屏。

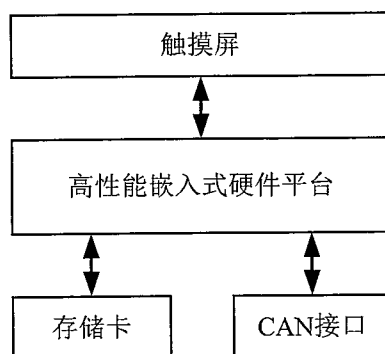


图 5-3 田间计算机硬件结构

Fig.5-3 Hardware structure of field computer

田间计算机需要具备导出作业记录数据、导入变量作业处方图等功能，通常采用存储卡完成此功能；存储卡安装时应该被锁定，能够在农机振动时与田间计算机保持稳定接触；可以选用 SD 卡，并且使用自弹式 SD 卡座。

CAN 接口，是田间计算机接入整个分布式农机导航控制系统的硬件基础，其硬件需要符合本章“网络集成规范”部分的相关规定。

(3) 导航控制器集成规范

导航控制器用于执行导航控制算法和位姿融合算法，需要较强的计算能力，其硬件通常如图 5-4 所示。

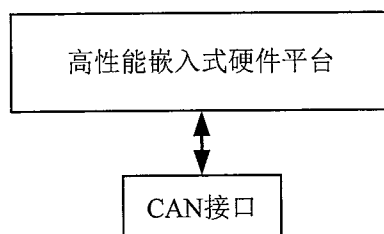


图 5-4 导航控制器硬件结构

Fig.5-4 Hardware structure of navigation controller

由于涉及大量复杂计算，所以导航控制器采用高性能嵌入式硬件平台，可以使用带有硬件浮点运算单元的 ARM9 系列处理器平台。

CAN 接口，是导航控制器接入整个分布式农机导航控制系统的硬件基础，其硬件需要符合本章“网络集成规范”部分的相关规定。

(4) 转向控制器集成规范

在分布式农机导航控制系统中，转向控制功能由独立的转向控制器完成。转向控制器接收导航控制的转向角指令，并自动控制转向执行器的运行，将转向轮转动到要求的角度，其硬件结构如图 5-5 所示。

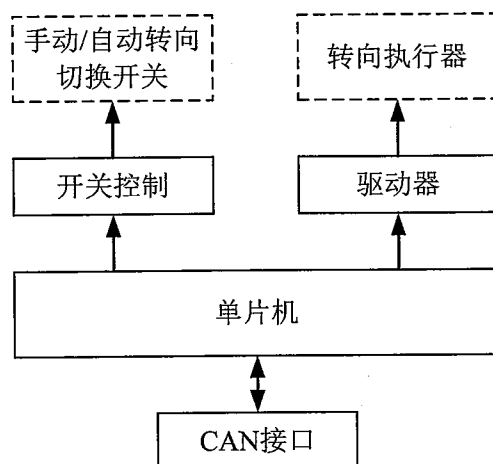


图 5-5 转向控制器硬件结构

Fig.5-5 Hardware structure of steering controller

转向控制器对处理器的计算能力要外部接口要求不高，可以选用单片机作为硬件平台。

农机的电控转向执行器通常有机械式和液压式两种，对于两种转向机构，驱动器电路都可以为桥式驱动芯片，能够为电机提供较大的工作电流。

在农机自动转向系统中，都需要进行手动转向和自动转向的切换操作，在机械式转向系统中为离合操作、在电液式转向系统中为油路切换操作，这两种操作的手动/电控切换都可以使用开关控制电路中的继电器完成。

CAN 接口，是转向控制器接入整个分布式农机导航控制系统的硬件基础，其硬件需要符合本章“网络集成规范”部分的相关规定。

(5) 传感器测量节点集成规范

在分布式农机导航控制系统中，会用到多种传感器，如位置传感器、姿态传感器、转向角传感器、速度传感器等，传感器的接口形式有多种，如 RS232、RS485、脉冲、模拟电压、模拟电流等等。需要通过测量节点电路将这些传感器信息进行预处理后接入 CAN 总线网络，典型传感器测量节点硬件结构如图 5-6 所示。

在分布式农机导航控制系统中，常用的传感器接口通常有 RS232（如 GPS 接收机）、RS485（如编码器）、脉冲信号（如地速仪）、模拟电压量（如电位器）

等,所以传感器测量节点通常具有如下电路中的一种或多种:RS232 接口电路、RS485 接口电路,及进行其它类型信号处理的检测电路。其中,检测电路可以将不同范围的电压信号调理成处理器 ADC 能够接受的电压范围、或将电流型信号转换成合适范围的电压信号、或将脉冲电压信号幅度降低至处理器计数引脚能够接受的范围等。

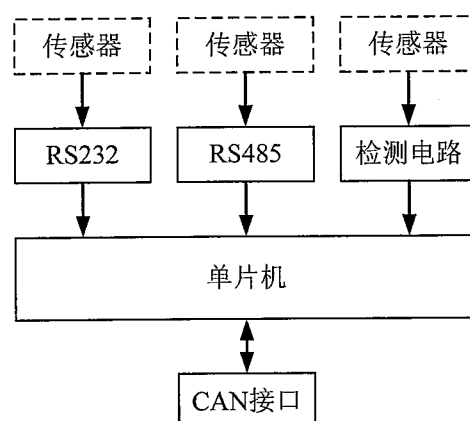


图 5-6 传感器测量节点硬件结构

Fig.5-6 Hardware structure of sensor node

5.4 软件系统集成规范

(1) 农机导航控制系统软件总体结构

分布式农机导航控制系统软件从总体上划分为四部分,如图 5-7 所示。

传感器测量节点的数据发送到 CAN 总线上,作业状态显示程序、导航控制算法、转向控制算法等程序中使用到的传感器数据,均可以同步从 CAN 总线上获取,方便地实现了传感器数据的共享。

田间计算机软件与导航控制器软件之间仅通过导航任务指令耦合。导航控制器从导航任务指令中获取目标路径数据、导航控制算法的参数等,并根据指令要求开始、停止导航控制操作。

导航控制器软件和转向控制器软件之间仅通过转向角指令耦合。转向控制器软件从转向角指令中获取转向角设定值,并根据指令要求开始、停止转向控制操作。转向控制器软件与田间计算机软件之间不进行直接的数据交互。

各部分软件的内部功能可以根据具体构建的农机导航控制系统,方便地进行增减,实现了软件高度模块化。

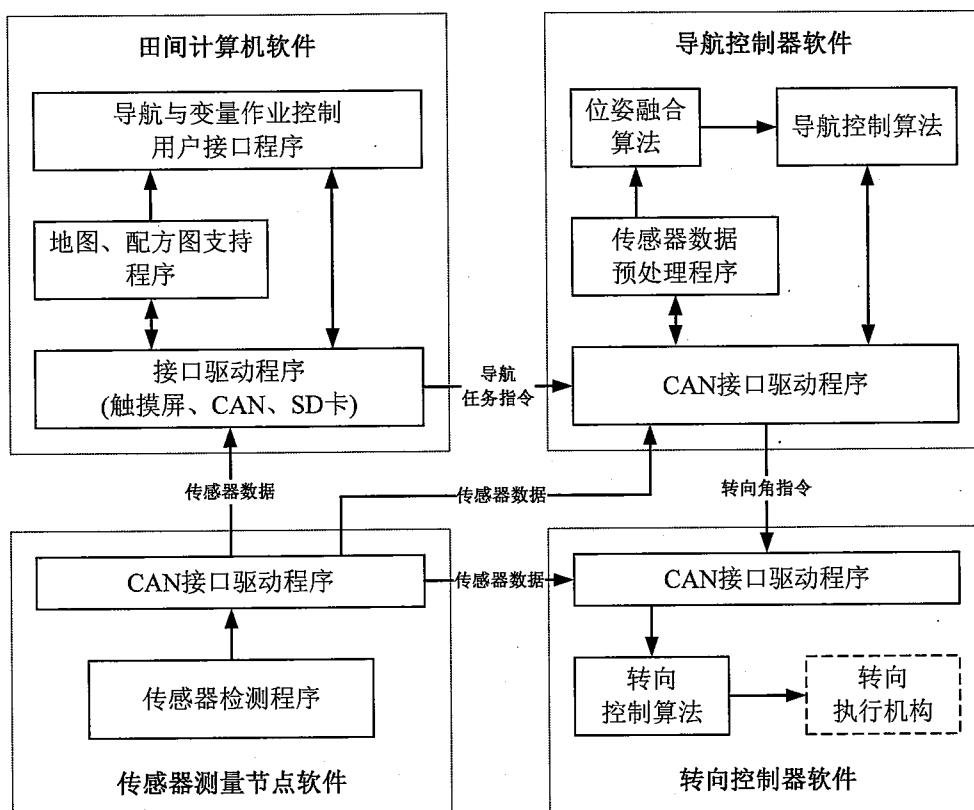


图 5-7 农机导航控制系统软件总体结构

Fig.5-7 Software architecture of agricultural machinery navigation control system

(2) 田间计算机软件集成规范

田间计算机软件结构如图 5-8 所示, 该软件主要包括以下五个模块: 系统配置模块、农机参数设置、任务管理、导航管理和变量作业管理。该软件的突出特点是: 操作简单, 层次结构清晰, 方便各类人员使用, 同时支持多视图显示, 可以从多个角度监测农机导航控制的作业状态。

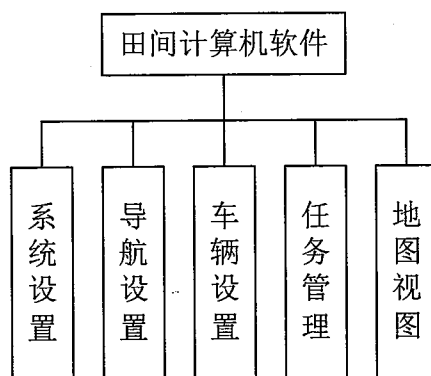


图 5-8 田间计算机软件结构图

Fig.5-8 Software architecture of filed computer

田间计算机软件具有以下功能：系统设置，包括白天/夜间模式设定、触摸屏校准、系统装置检测；导航设置，包括自动导航启停控制、控制算法参数设置；车辆设置，设置车辆参数，包括车辆轮距、轴距、作业幅宽、转弯半径等；任务管理，包括新建任务、保存任务、暂停任务、加载任务、删除任务；地图视图，以图形形式显示农机作业时的状态，包括机器视图和田间视图两种。

上述田间计算机软件具有 CAN 通信功能，通过 CAN 通信模块接收和发送信息。田间计算机软件通过 CAN 通信接口接收 GPS 的定位信息以及农机导航控制的状态信息，实时监控农机的行驶轨迹。田间计算机软件能够完成农机路径的规划并通过 CAN 通信接口发送农机导航控制命令以及农机的作业路径。

(3) 导航控制软件集成规范

导航控制软件主要用来决策农机导航控制过程中执行器的期望控制量。如图 5-9 所示，导航控制器的输入数据包括：农机的位置、姿态、速度、转向角等传感器数据和路径、控制参数等来自田间计算机数据，导航控制器的输出为农机转向执行器的期望控制量，通常为转向角指令。

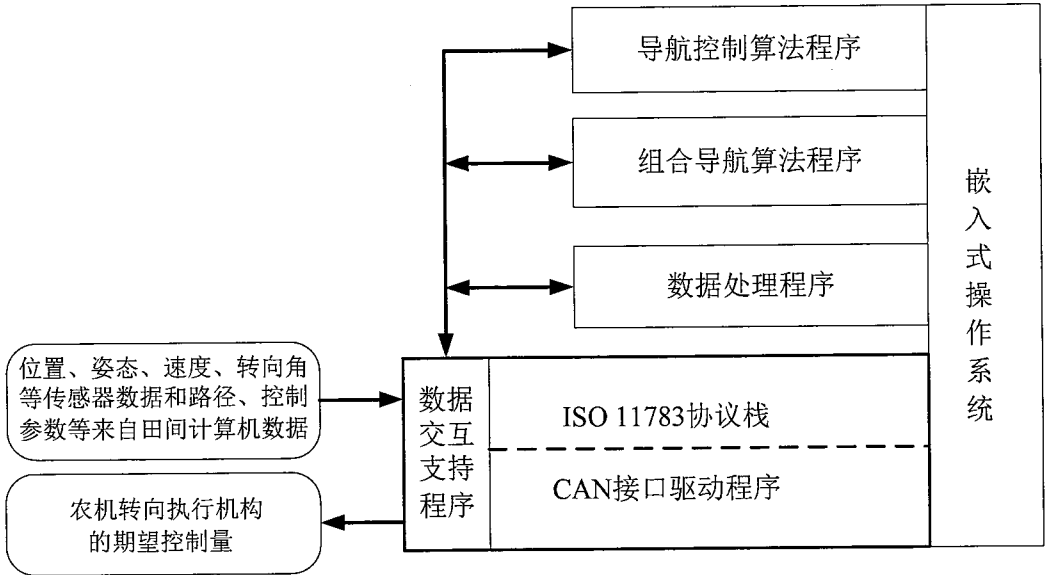


Fig.5-9 Frame diagram of navigation control software integration specification

导航控制器软件主要由嵌入式操作系统模块、数据交互支持程序模块、数据处理程序模块、组合导航算法程序模块和导航控制算法程序模块组成。

操作系统模块主要进行导航控制软件各个模块中任务的管理、任务间的同步和通信、存储器优化管理、实时时钟服务及中断管理服务。

数据交互支持程序模块主要包括 CAN 接口驱动程序和 ISO 11783 协议栈，主要用来支持导航控制器与外界的数据交互。

数据处理程序模块根据导航控制器应用层协议对导航控制器获取的信息进行数据解析和预处理，并负责将导航控制器需要发出的控制量打包成符合 ISO 11783 协议的数据帧。

组合导航算法程序模块主要对导航控制器获得的传感器数据进行多传感器融合处理，得到更为准确的位姿数据。

导航控制算法程序模块是导航控制器软件的核心，其通过导航控制算法决策出农机导航控制执行器所需要的期望控制量。

5.5 网络集成规范

本节规定了基于 CAN 总线和 ISO 11783 标准的分布式农机导航控制系统的网络集成框架和范围，给出了底层 CAN 总线接口规范和应用层 ISO 11783 协议接口规范。

(1) 网络结构

分布式农机导航控制系统采用 CAN 网络作为通信网络，整个网络由物理层、数据链路层和应用层 3 层组成，如图 5-10 所示。

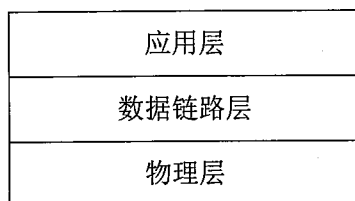


图 5-10 网络结构图

Fig.5-10 Network structure

1) 物理层

物理层主要作用是建立可靠的物理连接，在同一网络内，物理层对于所有的节点必须是相同的。

2) 数据链路层

数据链路层基于 CAN2.0B 的扩展帧格式定义了电子控制单元之间信息传输、储存的方法和格式，提供必要的同步控制、顺序控制、差错控制和流量控制，在物理层提供的物理连接上建立可信的数据通信链路。

3) 应用层

应用层指定网络中的信息集并定义在拖拉机和所连农机具之间通讯的信息。主要包括确定拖拉机和所连农机具的节点数据帧个数，每个数据帧的标识符，

-80-

表 5-3 地址分配表

Tab.5-3 Address allocation table

			Pri			R	D	PF	GE								SA
GPS SA=0x00	同组	经度	0	1	1	0	0	0xFF	0	0	0	0	0	0	0	-	0x00
		纬度	0	1	1	0	0	0xFF	0	0	0	0	0	1	0	-	0x00
	同组	UTM 东	0	1	0	0	0	0xFF	0	0	0	0	1	0	0	-	0x00
		UTM 北	0	1	0	0	0	0xFF	0	0	0	0	1	1	0	-	0x00
	同组	速度	1	0	0	0	0	0xFF	0	0	0	1	0	0	0	-	0x00
		航向	1	0	0	0	0	0xFF	0	0	0	1	0	1	0	-	0x00
姿态传感器 SA=0x03	同组	航向角	0	1	0	0	0	0xFF	0	0	0	0	0	0	0	-	0x03
		横滚角	0	1	0	0	0	0xFF	0	0	0	0	0	1	0	-	0x03
		俯仰角	0	1	0	0	0	0xFF	0	0	0	0	1	0	0	-	0x03
	速度		1	1	1	0	0	0xFF	0	0	0	0	1	1	0	-	0x03
转角编码器 SA=0x01	角度		0	1	0	0	0	0xFF	0	0	0	0	0	0	0	-	0x01
角速度计 SA=0x06	角速度		0	1	0	0	0	0xFF	0	0	0	0	0	0	0	-	0x06
转向控制器 SA=0x02	错误指示		0	0	0	0	0	0xFF	0	0	0	0	0	0	0	-	0x02
导航控制器 SA=0x04	开始		0	0	1	0	0	0xFF	0	0	0	0	0	0	0	-	0x04
	停止		0	0	1	0	0	0xFF	0	0	0	0	0	1	0	-	0x04
	角度		0	0	1	0	0	0xFF	0	0	0	0	1	0	0	-	0x04
	航向偏差		0	0	0	0	0	0xFF	0	0	0	0	1	1	0	-	0x04
	横向偏差		0	0	0	0	0	0xFF	0	0	0	1	0	0	0	-	0x04
田间计算机 SA=0x05	开启		0	0	0	0	0	0xFF	0	0	0	0	0	0	0	-	0x05
	同组	路径东	0	0	0	0	0	0xFF	0	0	0	0	0	1	0	-	0x05
		路径北	0	0	0	0	0	0xFF	0	0	0	0	1	0	-	-	0x05
	停止		0	0	0	0	0	0xFF	0	0	0	0	1	1	0	-	0x05
	路径类型		0	0	0	0	0	0xFF	0	0	0	1	0	0	0	-	0x05
	圆半径		0	0	0	0	0	0xFF	0	0	0	1	0	1	0	-	0x05
	圆路径方向		0	0	0	0	0	0xFF	0	0	0	1	1	0	0	-	0x05

备注：为“-”时表示该位根据不同情况可取 0 或 1。

(3) 硬件装置联网接口规范

为了便于进行农机自动导航控制系统的集成,并易于与其它基于 ISO 11783 协议的车载电子系统实现互联,系统中接入 CAN 总线的所有装置均需遵从如下硬件接口规范:

- 1) CAN 控制器必须满足 ISO11898:2003 标准和 BOSCH CAN2.0 标准。
- 2) 传输线缆使用屏蔽双绞线,且金属屏蔽网仅可以单点与车体相连。
- 3) 位时间设定需满足以下要求:
 - a) 波特率为 $500 \pm 0.2\%$ kbps;
 - b) 75%~82%采样点位置;
 - c) 需满足 1~4 时间段长度的同步跳转;
 - d) 信号采用单次采样。
- 4) CAN 驱动器必须满足 ISO11898-2/5 标准。

5) 根据 ISO11898 标准要求, CAN 总线终端电阻为 60Ω 。在一条 CAN 网络终端的两个节点必须有网络终端电阻,电阻精度为: $\pm 1\%$ (额定功率 1/3W 时)。

6) 所有装置的 CAN 接口必须具备过电压保护 (ESD) 功能, ESD 保护元件最大容值为 30pF。

7) ESD 测试需根据 GB/T 19951-2005 执行,人体模块需使用。要求测试模块在允许的试验误差内试验时需满足以下特性:

- a) 测试模块无错误帧发出;
- b) 如果测试模块有诊断功能,在测试过程中无错误代码记录。

5.6 本章小结

为实现农机导航控制系统在农机上的快速集成应用,并保持与农林机械串行通信控制网络协议 ISO 11783 的兼容,本章从硬件系统集成、软件系统集成和网络集成三个方面,对农机导航控制系统的集成技术进行了研究。硬件系统集成方面,将分布式农机导航控制系统硬件划分为田间计算机、导航控制器、转向控制器和传感器测量节点四部分,用于为人机交互、导航控制算法运行、转向控制算法运行和传感器接入等功能提供硬件平台。软件系统集成方面,将分布式农机导航控制系统软件划分为田间计算机软件、导航控制器软件、转向控制器软件和传感器测量节点软件四部分,并重点定义了各软件模块之间的数据接口。网络集成方面,针对农机导航控制应用,采用 ISO 11783 的扩展帧设计了统一的导航通信协议,并进行了常用装置的地址分配和常用数据的信息类型标识定义。另外,对于硬件装置的 CAN 接口规范也进行了详细定义。

第6章 导航控制平台在农机上的集成应用

6.1 引言

本文研究设计的农机导航控制平台及转向控制方法、农机状态预测模型和导航控制方法，成功地应用在相关课题中。本章分别以采用机械式转向执行机构进行转向系统电控改装的大型联合收割机，和采用电液式转向执行机构进行转向系统电控改装的农用拖拉机为例，具体介绍了农机导航控制系统的集成方法和相关的自动驾驶控制实验结果。

6.2 导航控制平台在大型联合收割机上的集成应用

导航控制平台的集成应用对象之一是“雷沃谷神联合收割机”，该联合收割机为新研发的大喂入量实验机型，本文使用机械式转向执行机构对其进行了电控转向改造，并集成安装了整套自动驾驶控制系统，成功完成了导航控制实验。

6.2.1 雷沃谷神联合收割机

雷沃谷神联合收割机是福田雷沃国际重工股份有限公司新研发的 10kg/s 喂入量的大型联合收割机，外观如图 6-1 所示，其主要参数如表 6-1 所示。



图 6-1 雷沃谷神联合收割机

Fig.6-1 Lovol Gushen combine

表 6-1 联合收割机的主要参数

Tab.6-1 Main parameters of combine

序号	项目	单位	规格
1	型号规格	/	4LZ-6N
2	结构型式	/	自走式全喂入
3	发动机功率	kW	128
4	发动机额定转速	r/min	2400
5	外形尺寸 (长×宽×高)	mm	8800×4970×4100
6	整机使用质量	kg	9910
7	割台宽度	mm	4570
8	喂入量	kg/s	10
9	最小离地间隙	mm	440
10	理论作业速度	km/h	1.05~8.0
11	作业小时生产率	hm ² /h	0.60~1.2
12	单位面积燃油消耗量	kg/hm ²	25~35
13	割刀型式	/	标准 II 型
14	割台搅龙型式	/	螺旋输送
15	拨禾轮直径	mm	1075
16	脱粒主滚筒(外径×长度)	mm	φ612×1020
17	轴距	mm	3720
18	前轮轮距	mm	2445
19	后轮轮距	mm	2230
20	转弯半径	mm	8000

6.2.2 集成总体方案

以本文第 2 章设计的分布式导航控制平台和第 5 章制定的农机导航控制系统集成规范为基础,制定了在大型联合收割机上集成导航控制系统的方案,并进行了转向执行机构和传感器的选型。

(1) 总体结构

安装在大型联合收割机上的导航控制系统的总体结构,采用如图 2-1 所示的分布式导航控制平台结构。系统包括:田间计算机、导航控制器、转向控制器及转向执行机构、位置传感器及其配套 CAN 节点、姿态传感器及其配套 CAN 节点、转向角传感器及其配套 CAN 节点等。

(2) 转向执行机构选择

由于本集成应用的对象——雷沃谷神联合收割机为新研发的实验机型，虽然具备液压转向系统，但是因为修改油路不方便，所以这里选用机械式转向执行机构对其进行电控转向改造。

(3) 传感器的选型

位置传感器 由于农机自动导航控制的精度要求较高，通常要求跟踪误差在 10 cm 以内。能够满足该精度，且成本可以在农业应用领域中被接受的位置传感器，只有 RTK-GPS。RTK-GPS 具有定位精度高、无累计定位误差、价格合理等优点，虽然使用时要求天空尽可能无遮挡，但农业的应用环境正符合这个要求。所以，这里选用加拿大 NovAtel 公司的 RTK-GPS 接收机 NovAtel ProPak-V3-RT2，借助 RTK 基准站获取厘米级精度的位置信息。

姿态传感器 姿态信息即姿态角，包括航向角 (yaw)、俯仰角 (pitch) 和横滚角 (roll)，这里选用基于微机电系统技术的荷兰 Xsens 公司的 MTi 微型姿态方位参考系统 (AHRS)，该传感器的姿态角精度能够达到 0.5 度，可以满足本导航控制系统的要求。

转向角传感器 雷沃谷神联合收割机采用液压转向方式，这里选用直线位移式转向角测量机构，采用线性电位器测量转向油缸的直线位移，从而推算出转向角。

6.2.3 系统集成

针对上面选择的各种装置，采用合适的方式进行安装集成。下面分别进行介绍。

(1) 集成控制箱

由于联合收割机的驾驶室空间比较小，所以导航控制系的大部分硬件电路都集成在一个控制箱内，如图 6-2 所示。控制箱内具体包括如下 6 种硬件装置：

- 1) 导航控制器电路；
- 2) 机械式转向控制器电路；
- 3) RTK-GPS 配套 CAN 节点；
- 4) MTi 配套 CAN 节点；
- 5) 线性电位器配套 CAN 节点。

除步进电机驱动器的供电电源为 DC 24V 以外，控制箱内其它电路的供电电源皆为 DC 12V。装置内部所有的 12V 电源并联在一起，由控制箱面板上的电源开关控制。同时，为了安全考虑，在电源开关之后串接了一个 10A 的保险

丝。

导航控制箱内部各节点的 CAN 信号，都接在同一根双绞线上，并且在控制箱面板上留出外接 CAN 信号的接口。同时，控制箱面板上还留出了线性电位器的模拟电压接口、RTK-GPS 接收机的 RS232 接口、MTi 的 RS232 接口、CAN 总线监测接口（即为 CAN 接口）、步进电机驱动接口和导航控制器程序调试接口（即为 ARM9 的 JTAG 调试端口）。所有接口均使用航空插头，这保证了以上接口在车载环境中也可以可靠地连接。

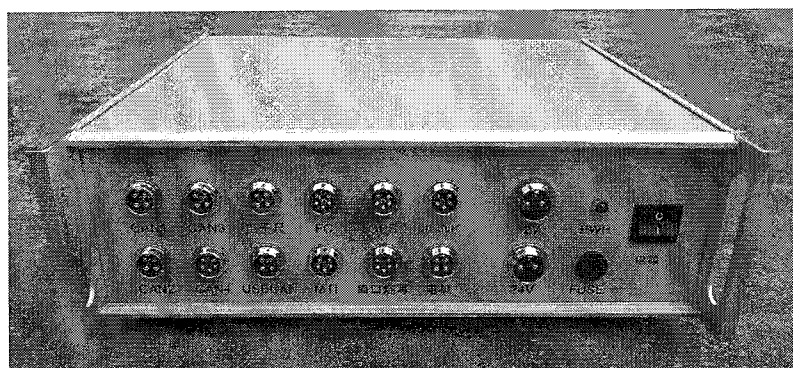


图 6-2 导航控制箱

Fig.6-2 Navigation control box

(2) 田间计算机

田间计算机安装在联合收割机驾驶室内、驾驶员座位的右前方，距离驾驶员的距离适中，能够既便于驾驶员通过触摸屏操作田间计算机，同时又不妨碍其它操作的进行。安装后的田间计算机如图 6-3 所示。

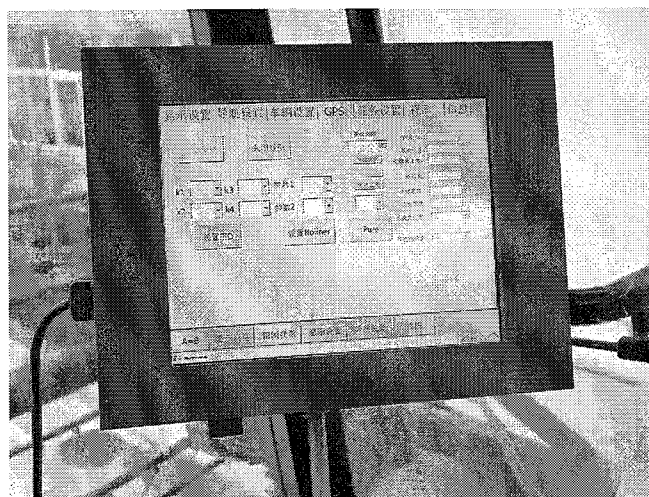


图 6-3 安装在联合收割机上的田间计算机

Fig.6-3 Field computer installed on combine

(3) 转向执行机构

机械式转向机构安装在联合收割机转向轴的花键和方向盘之间。安装后的转向机构如图 6-4 所示。

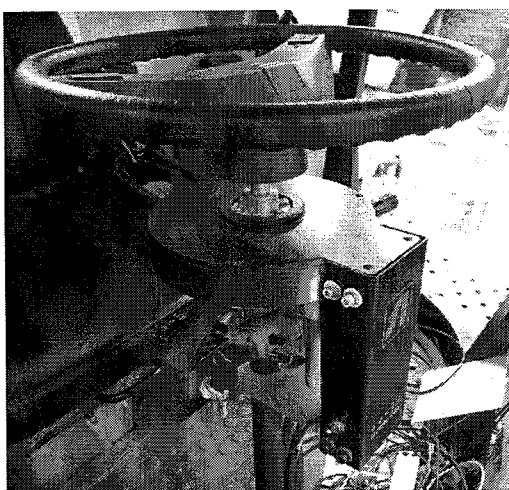


图 6-4 安装后的机械式转向执行机构

Fig.6-4 Mechanical steering actuator installed on combine

(4) 传感器

位置传感器 RTK-GPS 由于联合收割机为后轮转向，所以控制点选取为前轴中心位置，则 RTK-GPS 接收机的天线就安装在前轴中心的上方，也就是驾驶室棚顶中心位置附近。接收机放置在驾驶室内座椅的后方。

姿态传感器 MTi 由于 MTi 用于测量车体的姿态角，所以需要与车体固连，并且 x 轴方向沿着车辆的前进方向水平放置。这里将 MTi 固定在联合收割机驾驶室棚顶中前方的位置，这样可以减小硬铁磁场对其航向解算的影响。

转向角传感器 线性电位器按照 2.3.4 节的方式安装在联合收割机的转向油缸上，安装后的电子尺如图 6-5 所示：

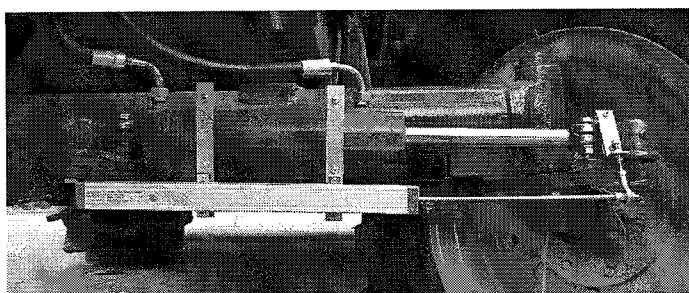


图 6-5 线性电位器安装图

Fig.6-5 Linear potentiometer installation diagram

6.2.4 路面实验

在雷沃谷神联合收割机上集成安装了本文研制的导航控制系统，并采用本文提出的转向控制方法和导航控制方法，在普通水泥路面上进行了直线路径追踪实验。实验方法如下：

- 1) 打开实验相关的 RTK-GPS 基准站系统、实验数据检测记录系统，并进行航向传感器的磁场校正和磁偏角补偿。
- 2) 选择一处长度 150 米左右直线水泥路面，将目标路径设定为该路面，记路径两个端点分别为 A 点、B 点，该目标路径为 AB 线。
- 3) 将车辆停靠在 AB 线的 A 端内侧，并使车辆尽量停靠在 AB 线上。
- 4) 开动车辆，并启动导航控制系统，然后手动将车辆速度调整到某个要求的大小 V 并固定后，驾驶员完全脱离对驾驶的控制，进行路径追踪。
- 5) 当驾驶员发现接近 B 点时，通过人机界面停止路径追踪，恢复人工驾驶，结束一次直线路径追踪实验。
- 6) 重复步骤三~五，对每个速度 V 重复实验三次，行驶速度 V 取 0.8 m/s、1.0 m/s 和 1.2 m/s 三种，合计进行九次直线路径追踪实验。
- 7) 以架设在联合收割机上的高精度 RTK-GPS（定位精度为 1cm+1ppm）的定位数据作为收获机的实际行驶轨迹，对路径追踪实验时记录下的行驶轨迹与目标路径进行误差分析，计算出实验时的跟踪误差。跟踪误差包括平均误差、误差绝对值的平均值两种。

实验结果如图 6-6、图 6-7 和表 6-2 所示。图 6-6 为其中一次直线路径的跟踪效果图，其中，直线为目标路径，圆点轨迹为联合收割机实际行驶的轨迹。图 6-7 为其中一次直线路径的横向跟踪误差图，其中，横坐标为当前行驶的路程，纵坐标为横向跟踪误差。

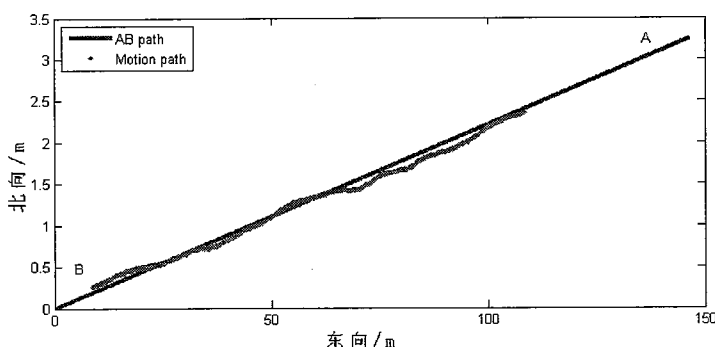


图 6-6 直线路径追踪效果图

Fig.6-6 Straight path tracking effect

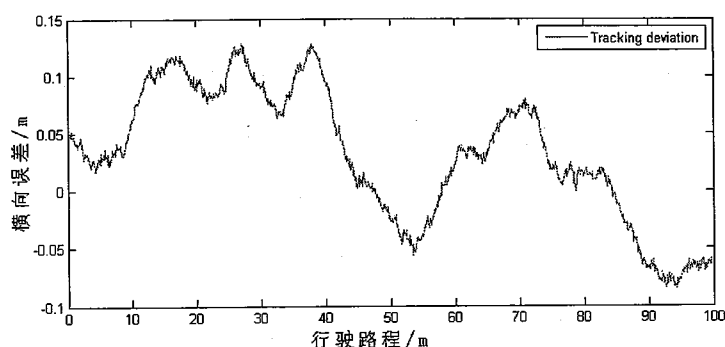


图 6-7 直线路径追踪横向误差图

Fig.6-7 Deviation figure of straight path tracking

多次实验结果如表 6-2 所示, 由表中数据可知, 在所选的三种速度下, 直线路径追踪的平均误差和误差绝对值的平均值均可以达到小于 10 cm 的精度, 能够满足播种、收割等田间作业对自动驾驶控制精度的要求。

表 6-2 直线路径追踪实验数据记录表

Tab.6-2 Experimental data of straight path tracking

行驶速度	次数	平均误差 (cm)	误差绝对值的平均值 (cm)
0.8 m/s	1	4.58	6.89
	2	3.27	5.43
	3	3.52	5.92
1.0 m/s	1	5.38	7.45
	2	4.97	6.14
	3	6.13	7.87
1.2 m/s	1	6.22	8.76
	2	5.78	8.34
	3	7.26	9.09

6.3 导航控制平台在农用拖拉机上的集成应用

6.3.1 雷沃欧豹 TA800 拖拉机

雷沃欧豹 TA800 拖拉机是福田雷沃国际重工股份有限公司生产的 80 马力拖拉机, 外观如图 6-8 所示, 其主要参数如表 6-3 所示。



图 6-8 雷沃欧豹 TA800 拖拉机

Fig.6-8 Lovol Oubao TA800 tractor

表 6-3 拖拉机主要参数

Tab.6-3 Main parameters of tractor

参数项	参数值
型式	4×2 轮式
标定牵引力 (千牛)	15.5
长 (毫米)	4200
宽 (毫米)	1910
高 (毫米)	2625
轴距 (毫米)	2188
前轮轮距 (毫米)	1500
后轮轮距 (毫米)	1530
发动机功率 (千瓦)	59
动力输出轴 (转/分)	540/760
档位	8+2
前进速度范围 (千米/小时)	3.06~31.49
倒退速度范围 (千米/小时)	3.47~12.48

6.3.2 集成总体方案

以本文第2章设计的分布式导航控制平台和第5章制定的农机导航控制系统集成规范为基础,制定了在拖拉机上集成导航控制系统的方案,并进行了转向执行机构和传感器的选型。

(1) 总体结构

安装在拖拉机上的导航控制系统的总体结构,同样采用如图2-1所示的分布式导航控制平台结构。系统包括:田间计算机、导航控制器、转向控制器及转向执行机构、位置传感器及其配套CAN节点、姿态传感器及其配套CAN节点、转向角传感器及其配套CAN节点等。

(2) 转向执行机构选择

由于本集成应用的对象——雷沃欧豹TA800拖拉机采用液压转向系统,且修改油路比较方便,所以这里选用电液式转向执行机构对其进行电控转向改造。

(3) 传感器的选型

位置传感器 与在联合收割机上集成应用的情况相同,选用RTK-GPS来获取厘米级精度的位置信息。

姿态传感器 与在联合收割机上集成应用的情况相同,选用荷兰Xsens公司的MTi来获取拖拉机姿态信息。

转向角传感器 TA800 拖拉机的前轴横截面积较小,便于固定支架的安装,所以这里选用连杆式转向角测量机构,采用转角编码器测量连杆的转动,从而推算出转向角。

6.3.3 系统集成

针对上面选择的各种装置,采用合适的方式进行安装集成。下面分别进行介绍。

(1) 集成控制箱

由于拖拉机的驾驶室空间比较小,所以导航控制器的大部分硬件电路都集成在一个导航控制箱内,如图6-9所示。控制箱内具体包括如下6种硬件装置:

- 1) 导航控制器电路;
- 2) 液压式转向控制器电路;
- 3) RTK-GPS 配套CAN节点;
- 4) MTi 配套CAN节点;

5) 转角编码器配套 CAN 节点。

控制箱内电路的供电电源为 DC 12V。装置内部所有的 12V 电源并联在一起，并受控制箱面板上的电源开关控制。同时，为了防止出现短路，在电源开关之后串接了一个 10A 的保险丝。

导航控制箱内部各节点的 CAN 信号，都接在同一根双绞线上，并且在控制箱面板上留出外接 CAN 信号的接口。同时，控制箱面板上还留出了转角编码器的 RS485 接口、RTK-GPS 接收机的 RS232 接口、MTi 的 RS232 接口、CAN 总线监测接口、比例换向阀驱动接口和导航控制器程序调试接口（即为 ARM9 的 JTAG 调试端口）。所有接口均使用航空插头，这保证了以上接口在车载环境中也可以可靠地连接。



图 6-9 导航控制箱

Fig.6-9 Navigation control box

(2) 田间计算机

田间计算机安装在拖拉机驾驶室内、驾驶员座位的右前方，距离驾驶员的距离适中，能够既便于驾驶员通过触摸屏操作田间计算机，同时又不妨碍其它操作的进行。考虑到拖拉机驾驶室内振动问题，这里设计了刚性好的三角形支架。安装后的田间计算机如图 6-10 所示。

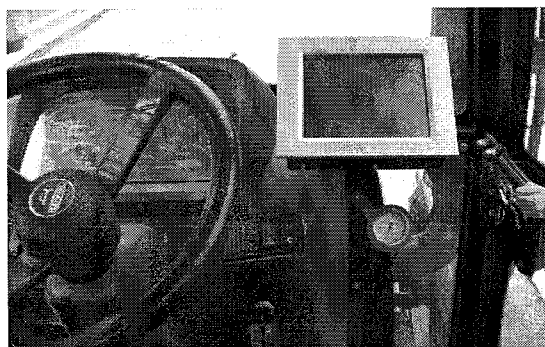
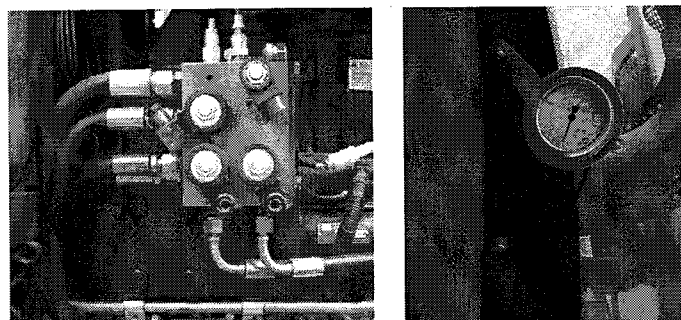


图 6-10 田间计算机安装效果

Fig.6-10 Field computer installed on tractor

(3) 转向执行机构

电液式转向机构与拖拉机原液压转向器并联，阀体固定安装在拖拉机侧前方，拖拉机原转向器上的四路油管、连接转向油缸的两路油管和转向液压泵的压力油管及回油箱油管共八根油管都统一接入到本文设计的一体化电液式转向阀块上。安装后的液压式转向执行机构如图 6-11(a)所示。为方便监测转向油路中的压力，压力表被安装在驾驶室里，如图 6-11(b)所示。



(a) 执行机构安装图

(b) 压力显示

图 6-11 安装后的电液式转向执行机构

Fig.6-11 Electro-hydraulic steering actuator installed on tractor

(4) 传感器

位置传感器 RTK-GPS 由于拖拉机为前轮转向，所以控制点选取为后轴中心位置，则 RTK-GPS 接收机的天线就安装在后轴中心的上方，也就是驾驶室棚顶靠后位置附近。接收机放置在驾驶室内座椅的后方。

姿态传感器 MTi 由于 MTi 用于测量车体的姿态角，所以需要与车体固连，并且 x 轴方向沿着车辆的前进方向水平放置。这里将 MTi 固定在拖拉机驾驶室棚顶中前方的位置，这样可以减小硬铁磁场对其航向解算的影响。

转向角传感器 转角编码器及相关连杆机构按照 2.3.4 节的方式安装在拖拉机前轴的右侧，测量右转向轮的转向角度，作为整个拖拉机的转向角。安装后的连杆式转向角测量机构如图 6-12 所示：

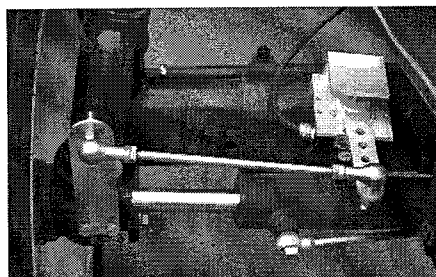


图 6-12 连杆式转向角测量机构安装图

Fig.6-12 Installed connecting rod type steering angle measuring mechanism

6.3.4 田间实验

在雷沃欧豹 TA800 拖拉机上集成安装了本文研制的导航控制系统, 并采用本文提出的转向控制方法和导航控制方法, 在黑龙江省建三江市进行了田间导航控制实验, 如图 6-13 所示。图 6-14 是其中四组直线路径追踪的误差曲线图。



图 6-13 拖拉机田间实验

Fig.6-13 Field experiment of tractor

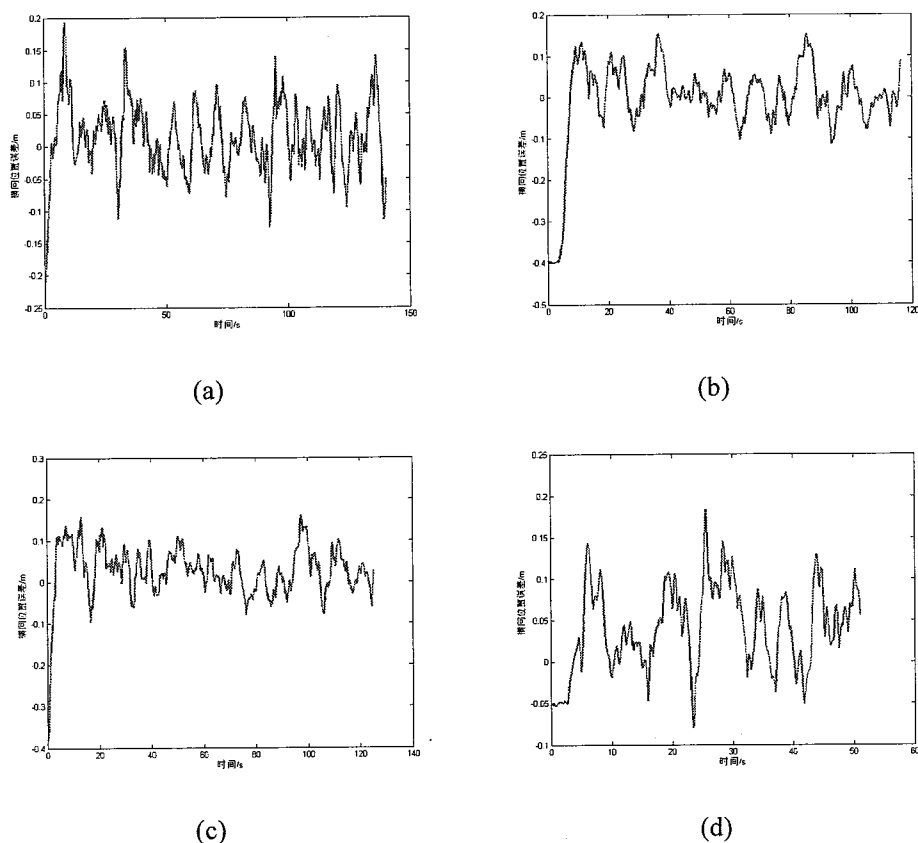


图 6-14 直线路径追踪横向误差图

Fig.6-14 Deviation figure of straight path tracking

图 6-14 对应的实验数据如表 6-4 所示, 由该表可知, 直线路径追踪误差的平均值约为 3.2cm, 绝对值平均值约为 4.66cm, 能够满足大部分田间作业对自动驾驶控制精度的要求。

表 6-4 直线路径追踪实验数据记录表

Tab.6-4 Experimental data of straight path tracking

实验次数	平均误差 (cm)	误差绝对值的 平均值 (cm)
1	2.45	4.15
2	3.31	4.49
3	3.01	4.70
4	4.02	5.28
总平均值	3.20	4.66

6.4 本章小结

本章分别以采用机械式转向执行机构进行转向系统电控改装的联合收割机, 和采用电液式转向执行机构进行转向系统电控改装的拖拉机为例, 具体介绍了导航控制平台在两种农机上的集成方法, 特别针对各机型的特点, 给出了转向执行机构、位置传感器、姿态传感器和转向角传感器的选型和安装方法。并在联合收割机和拖拉机上成功地进行了直线路径追踪控制实验, 追踪精度能够满足大部分田间作业对自动驾驶控制精度的要求。

本章针对大型联合收割机、中型拖拉机两种差别很大的农机, 采用本文设计的导航控制平台和集成规范, 各自快速构建了完整的导航控制硬件系统; 根据软件和网络集成规范, 所设计的导航控制软件系统在两台农机上也做到了极高的重复利用率。这些都提现了导航控制平台所具有的通用性和快速集成的优势。

结论与展望

农机导航技术为精准农业决策的实施,提供精确的定位信息,完成作业决策在空间上的自动化、高效率、高精度覆盖,是整个精准农业技术体系中最重要的一部分。开展农机导航技术研究将为我国农机行业提供具有自主知识产权的核心技术,提高我国农机装备的自动化、智能化水平,为我国农机装备占据国内市场并进入国际市场提供技术支持。本文以建立一个农机通用导航控制平台为目标,根据农机导航控制应用的功能需求,对平台结构设计开发、转向控制算法、农机建模及导航控制方法等方面进行了深入研究。取得的主要研究成果有:

(1) 设计了农机通用导航控制平台。采用分布式体系结构,设计了基于 CAN 总线的导航控制平台总体结构,将导航控制系统功能进行划分,定义了田间计算机、导航控制器、转向执行机构、转向角测量机构和多功能通用智能节点等核心装置的功能,并进行了软硬件的设计。另外,为了完成各装置之间的通信,并与其它车载电子系统进行互联,在农林机械串行通信控制网络协议 ISO 11783 的基础上,自行设计了导航通信协议。

(2) 针对机械式转向执行机构的转向速度相对较慢的缺点,进行了建模分析和转向控制方法研究。通过采用串级控制结构,改善了机械式转向执行机构的动态特性;内环控制算法采用动态矩阵控制,借助预测控制对模型精度要求较低的特点,降低了在田间作业时由于工况发生变化导致农机转向系统特性改变而带来的影响,提高了转向控制的整体响应速度和控制精度。

(3) 针对 PID 控制、比例控制和纯跟踪控制等农机导航控制方法中没有考虑速度因素影响的缺点,提出了农机运动状态预测模型。该模型基于二轮车模型,根据农机当前时刻的行驶速度大小和方向、农机的航向及轴距等信息推算出农机位置和姿态的时间预测增量。与传统 PID 控制方法比较,引入该模型后,能够在不明显降低跟踪速度的前提下,大幅减小超调,且稳态跟踪误差更小。

(4) 针对在农机导航控制中,传统比例控制方法难以在跟踪速度和精度上同时做到较优的缺点,提出了基于模糊自适应比例控制的导航控制方法。该方法根据横向偏差和航向偏差的值,采用模糊推理在线调节比例系数,在提高路径追踪速度的同时也降低了追踪误差。

(5) 针对目前国内研究开发的农机导航控制系统结构多样、接口封闭、难以与农机其它车载电子系统互联等缺点,制定了农机导航控制系统集成规范。集成规范从硬件系统集成、软件系统集成和网络集成三个方面,对农机导航控制系统的集成方法进行了详细规定。定义了农机导航控制系统中各装置之间的

硬件接口、数据接口和基于 ISO 11783 的网络通信协议。

(6) 综合上面的研究内容, 形成了一套通用的农机自动导航控制系统平台和控制方法, 并成功在雷沃谷神联合收割机和雷沃欧豹 TA800 中型拖拉机上进行了集成应用, 完成了路面和田间路径追踪实验, 追踪精度能够满足农业精准作业对自动导航控制精度的要求。

下一步的工作展望:

(1) 本研究中一直采用 RTK-GPS 作为位置传感器, 而随着半导体技术的进步, 嵌入式处理器的计算能力越来越强, 这使得提取图像内作物信息的时延大幅降低, 图像传感器的实时性增强。下一步可以将机器视觉技术引入导航控制系统, 与 GPS 导航结合, 提高系统的可靠性和灵活性。

(2) 在小麦、水稻等的收获作业时, 经常出现多台收割机同时作业的情况, 收割机之间如何协同作业、运粮车怎样调度等, 都是下一步需要研究的问题。