



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

基于级联式控制策略的农业机械自动导航控制方法研究

作者姓名: 李逃昌

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

**Research on Automatic Navigation Control Method Based
on Cascaded Control Strategy for Agricultural Machinery**

By

Taochang Li

A Dissertation Submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Doctor of Engineering

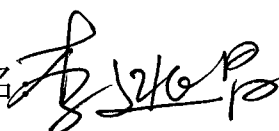
Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences

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



日期： 年 月 日

摘 要

随着农业现代化进程的加快,具有自动导航能力的轮式农业机械(以下简称农机)具有广阔的发展前景。目前,农机的自动导航控制主要是对农机进行横向控制,即控制农机跟踪事先规划好的作业路径,使其与路径之间的横向位置偏差保持在一定的精度范围之内。由于导航控制方法对农机自动导航系统控制性能的优劣起着决定性的作用,因此有必要对农机自动导航控制方法进行深入的研究。

本文以实际应用为导向、以级联式控制策略为方案,深入地研究了农机转向控制方法、基于位姿偏差的路径跟踪控制方法和基于期望横摆角速度的路径跟踪控制方法,并以这些方法为基础,提出了基于级联式控制策略的农机导航控制方法,实现了农机自动导航控制。为了验证所研究方法的有效性和可行性,本文在不同的农机自动导航控制平台上进行了方法的验证实验和应用实验。本文的主要研究工作和贡献如下:

(1) 针对农机转向控制问题提出了一种基于非线性积分滑模面的自适应滑模控制方法。当农机转向控制子系统遭受不确定因素和外部干扰的影响时,该方法能够保证农机的转向轮快速而准确地跟踪期望的转向角指令。在方法的研究中,首先研究了农机转向系统的数学模型,将电控机械式和电控液压式驱动的农机转向系统建模成由一阶惯性和纯积分环节组成的二阶模型。然后根据转向系统的执行能力和控制目标设计期望转向角的暂态过程,并在此基础上提出了一种非线性积分滑模面,进而设计出相应的滑模控制律,保证了系统快速而无超调的响应特性;同时,本文采用模糊控制方法实时估计系统等效干扰,实现了滑模切换增益的在线自适应调整,从而减弱了滑模控制量的抖振现象。

(2) 针对农机路径跟踪控制问题提出了三种基于位姿偏差的农机路径跟踪控制方法,即最优 PD 路径跟踪控制方法、模糊自适应纯追踪路径跟踪控制方法和非线性最优路径跟踪控制方法。在第一种方法的研究中,首先推导出以位置误差及其导数为状态变量的状态方程。然后基于此状态方程利用 LQR 方法确定 PD 控制器的比例和微分参数,得到符合某一性能指标的最优参数,从而保证农机最优地跟踪期望路径行驶。在第二种方法的研究中,首先讨论了农机的纯追踪模型,并详细分析了纯追踪模型中的前视距离参数对路径跟踪控制效果的影响。然后基于该分析结果提出一种模糊控制规则可在线调整的模糊控制器,进而采用这种模糊控制器来在线自适应地确定前视距离参数。该方法克服了最优 PD 方法或者其他传统控制方法设计过程中对农机模型进行小角度近似线性化的缺点,而且也解决了纯追踪模型中前视距离的实时自适应确定问题,增强了

纯追踪路径跟踪方法对不同初始误差状态的适应性和鲁棒性。在第三种方法的研究中,首先建立了基于空间参数(即路径弧长参数)驱动的非线性农机相对运动学模型。然后研究了基于空间参数驱动模型进行控制设计的合理性和基于该模型进行反馈线性化的可行性问题。最后,针对该非线性模型进行内环的反馈线性化设计和外环的最优化设计,得到在某一性能指标下最优的且与行驶速度无关的农机路径跟踪控制律。该方法在设计过程中不需要对非线性模型进行常速假设和小角度线性近似处理,且对农机行驶速度的变化具有鲁棒性。

(3) 针对农机受到大的扰动时横向位置响应的一致性,本文将横摆角速度控制引进到路径跟踪控制中,提出一种基于期望横摆角速度的农机路径跟踪控制方法,重点研究了农机横摆角速度鲁棒自适应控制方法。在方法的研究中,首先建立了农机牵引或者悬挂机具时的农机-机具横摆角速度动力学模型,并分析了农机牵引或悬挂机具时的动力学特性。然后基于所建的动力学模型提出一种鲁棒自适应控制律,并以定理的形式证明了基于所提出的鲁棒自适应控制律的闭环系统的稳定性和鲁棒自适应性。该方法消除了干扰对农机横摆角速度动力学产生的影响,使农机的横摆角速度始终按照期望的横摆角速度变化,保证了在大的机具负载或外部扰动下农机横向位置响应的一致性。

(4) 基于上述研究的成果,本文开展了级联式导航控制方法在农机导航系统中的应用研究,阐述了农机导航系统实现上的相关问题的求解方法,并将级联式导航控制方法应用到农机导航控制平台上进行多条连续路径的自动导航控制实验研究,实验结果进一步验证了本文研究成果的可行性和有效性。

关键词 农机导航; 自适应滑模控制; 鲁棒自适应控制; 非线性最优控制; 模糊自适应纯追踪

Research on Automatic Navigation Control Method Based on Cascaded Control Strategy for Agricultural Machinery

Taochang Li (Mechatronic Engineering)

Directed by Professor Jingtao Hu

Abstract

With the accelerated process of agriculture modernization, wheeled agricultural machinery with automatic navigation capability has broad development prospect. At present, automatic navigation control for agricultural machinery mainly refers to the lateral control that controls agricultural machinery to track predefined paths and keeps the lateral position error between agricultural machinery and the path within a certain range of accuracy. Since navigation control methods play a decisive role in an automatic navigation control system for agricultural machinery, it is necessary to conduct intensive research on agricultural machinery navigation control methods.

Being application-oriented, this dissertation specializes in the agricultural machinery steering control method, the path tracking control methods based on the position and heading deviation as well as the path tracking control method based on the desired yaw rate directed by cascaded control strategy. Subsequently, based on these methods, the dissertation proposes agricultural machinery navigation control methods based on cascaded control strategy and achieves automatic navigation control of agricultural machinery. In order to verify the effectiveness and the feasibility of the proposed methods, the dissertation also carries out the experimental studies of the agricultural machinery automatic navigation control system. The main research works and contributions of the dissertation are summarized as follows:

(1) For agricultural machinery steering control problem, an adaptive sliding mode control method based on a nonlinear integral sliding surface is proposed for agricultural machinery steering control. The steering control method can guarantee that the steering wheels of agricultural machinery track desired steering angle commands promptly and accurately when the agricultural machinery steering subsystem suffers from uncertainty factors and external disturbances. First, the

dissertation researches the model of the agricultural machinery steering system and models it as the second-order dynamical model which consists of the first-order inertial model and the pure integrator. Second, the dissertation designs a transition process of the system control response according to the executing capacity of the steering system and the control objective, and proposes a nonlinear integral sliding surface based on the process. Further, the corresponding sliding mode control law is designed and the prompt and non-overshoot response characteristic of the steering control system is obtained. Meanwhile, the dissertation also adopts the fuzzy control method to estimate the uncertain bounds of system equivalent disturbances and realize the self-adjustment of the switching gain of sliding mode control. Thereby, the control input chattering is weakened.

(2) For agricultural machinery path tracking control problem, the dissertation proposes three kinds of agricultural machinery path tracking control methods based on the position and heading deviation, namely, an optimal PD path tracking method, a path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model and a nonlinear optimal path tracking method.

In the study of the first path tracking method, the dissertation deduces the system's state equation whose state variables are the lateral position error and its derivative, and utilizes the LQR method based on the state equation to determine the proportional parameter and the differential parameter of the PD controller. The optimal parameters which meet a certain performance index are obtained. Consequently, agricultural machinery can optimally track desired paths.

In the study of the second path tracking method, the dissertation discusses the pure pursuit model and analyzes the look-ahead distance parameter's influence on path tracking control accuracy in detail. Then the dissertation proposes a fuzzy controller whose fuzzy control rules can be adjusted in real time and uses the fuzzy controller to determine the real-time look-ahead distance parameter. The path tracking control method based on fuzzy adaptive pure pursuit model overcomes the shortcoming of the small angle proximate linearization of agricultural machinery model in the design process of the optimal PD control method or other traditional control methods; it also solves the real-time adaptive determination problem of the look-ahead distance parameter of the pure pursuit model. Therefore, the robustness of the pure pursuit method for different initial error status gets enhanced.

In the study of the third path tracking method, the dissertation deduces the space parameter-driven nonlinear relative kinematics model between the agricultural

machinery and the tracked path, and proves the rationality and feasibility of designing control method based on the model. Then the dissertation deals with the model by input-state linearization and uses the optimal control method to stabilize the linear model obtained by feedback linearization, and then attains an agricultural machinery path tracking control law which is irrelevant to travel speeds and optimal under a certain performance index. The nonlinear optimal path tracking control method does not need small angle approximate linearization and constant speed hypothesis on nonlinear agricultural machinery model. It is robust to change of travel speed of agricultural machinery.

(3) For the consistency problem of the lateral position error response when agricultural machinery suffers from large disturbances, the dissertation introduces the yaw rate control into the path tracking control and proposes a path tracking control method based on the desired yaw rate. Then the dissertation focuses on the study on the yaw rate robust adaptive control method. The method firstly establishes agricultural machinery-implement yaw rate dynamics model and analyzes agricultural machinery dynamics characteristics with traction or suspension implements. Then a robust adaptive control law is proposed and its stability and robust adaptive property are proved by means of theorem. The robust adaptive control method can guarantee that yaw rate has the desired response performance when the agricultural machinery suffers from the implement load variations and the external disturbances.

(4) Based on the above developed methods, the dissertation carries out the application studies of the cascaded navigation control method in the agricultural machinery automatic navigation system. The dissertation elaborates the solution methods of related realization issues of agricultural machinery navigation systems and focuses on the automatic navigation control experimental research on multiple continuous paths based on the cascaded navigation control method. The feasibility and effectiveness of the proposed navigation control methods in the dissertation are verified by the experimental results.

Keywords Agricultural machinery navigation; Adaptive sliding mode control; Robust adaptive control; Nonlinear optimal control; Fuzzy adaptive pure pursuit

目 录

摘 要	I
Abstract	III
目 录	VII
第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究的背景及意义	1
1.2 国内外农机导航控制系统研究现状	2
1.3 国内外农机导航控制方法研究现状	3
1.3.1 农机模型研究现状	3
1.3.2 农机转向控制方法研究现状	4
1.3.3 农机路径跟踪方法研究现状	5
1.4 问题的提出	9
1.5 论文的研究内容及组织结构	9
1.6 本章小结	11
第 2 章 农机导航控制问题及控制策略研究	12
2.1 引言	12
2.2 农机导航控制问题	12
2.3 农机自动导航控制策略	14
2.3.1 级联式控制策略基本原理	14
2.3.2 基于级联式控制策略的农机导航控制	16
2.4 农机自动导航控制实验平台介绍	20
2.4.1 基于 CAN 总线的农机导航系统的结构原理	20
2.4.2 导航系统与农机集成	21
2.5 本章小结	26
第 3 章 农机转向控制研究	27
3.1 引言	27
3.2 转向系统模型	27
3.2.1 电控液压式转向系统模型	27
3.2.2 电控机械式转向系统模型	29
3.3 基于非线性积分滑模面的自适应滑模控制方法	31
3.3.1 非线性积分滑模面	31
3.3.2 基于非线性积分滑模面的滑模控制律	33
3.3.3 基于模糊控制的切换增益自适应调整	35

3.4 仿真验证	36
3.5 转向控制实验	39
3.5.1 电控液压转向控制实验.....	39
3.5.2 电控机械转向控制实验.....	41
3.6 本章小结	44
第 4 章 基于位姿偏差的路径跟踪控制研究	45
4.1 引言	45
4.2 最优 PD 路径跟踪控制方法.....	45
4.2.1 农机运动学模型研究.....	46
4.2.2 最优 PD 控制方法	47
4.2.3 基于最优 PD 控制方法的闭环系统稳定性.....	49
4.2.4 基于最优 PD 的导航控制实验.....	50
4.3 模糊自适应纯追踪路径跟踪控制方法.....	52
4.3.1 纯追踪模型	53
4.3.2 影响纯追踪模型控制效果的因素分析.....	54
4.3.3 基于模糊自适应控制的前视距离确定方法.....	55
4.3.4 基于模糊自适应纯追踪模型的路径跟踪控制器.....	56
4.3.5 基于模糊自适应纯追踪方法的导航控制实验.....	58
4.4 非线性最优路径跟踪控制方法.....	61
4.4.1 空间参数驱动的非线性农机相对运动学模型.....	61
4.4.2 基于空间参数驱动模型进行控制设计的合理性.....	63
4.4.3 基于空间参数驱动模型进行反馈线性化的可行性.....	64
4.4.4 非线性最优路径跟踪控制器设计.....	65
4.4.5 基于非线性最优控制的导航控制实验.....	67
4.5 本章小结	70
第 5 章 基于期望横摆角速度的路径跟踪控制研究	72
5.1 引言	72
5.2 基于期望横摆角速度的路径跟踪控制方法原理.....	72
5.3 农机横摆角速度动力学模型.....	74
5.3.1 单机横摆角速度动力学模型.....	74
5.3.2 农机-机具横摆角速度动力学模型	75
5.4 横摆角速度鲁棒自适应控制方法.....	78
5.5 仿真验证	82
5.6 基于期望横摆角速度的导航控制实验.....	86
5.7 本章小结	89

第 6 章 级联式导航控制方法在农机自动驾驶系统中的应用研究	91
6.1 引言	91
6.2 农机相对位姿的确定方法	91
6.2.1 GPS 天线倾斜补偿方法	91
6.2.2 农机与路径之间的相对位置确定方法	93
6.2.3 农机与路径之间的相对航向确定方法	94
6.3 转向角检测装置标定方法	94
6.3.1 收割机转向角检测装置标定	94
6.3.2 拖拉机转角检测装置标定	95
6.3.3 插秧机转向角检测装置标定	96
6.4 多条连续路径自动驾驶作业地头转向方法	97
6.4.1 半控地头转向方法	97
6.4.2 全控地头转向方法	100
6.5 多条连续路径自动驾驶控制实验	102
6.5.1 基于半控地头转向的多条路径导航控制实验	103
6.5.2 基于全控地头转向的多条路径导航控制实验	106
6.6 本章小结	109
结论与展望	110
参考文献	114
攻读博士学位期间发表的学术论文	124
致 谢	125
作者简介	126

第1章 绪论

1.1 课题研究的背景及意义

农业是我国的立国之本，是我国国民经济的重要基础。针对我国的基本国情及面临的严峻挑战，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020年）》（以下简称《纲要》）把“农业精准作业与信息化”列为农业领域的优先主题之一，提出要以高新技术带动常规农业技术升级，重点开发精准作业技术装备，实现我国农业的可持续发展。

《“十二五”农业与农村科技发展规划》（以下简称《“十二五”发展规划》）中也提出了要加快推进农业前沿技术研究，突破农机自动驾驶与水、肥、种、药的变量施用控制等核心技术，开发智能化农机技术与装备，抢占现代农业科技制高点。

农机装备的自动化、信息化和智能化，代表了一个国家农业机械现代化的水平，是农业现代化的重要标志之一。随着我国农业现代化进程的加快，对农机装备自动化、信息化和智能化的需求越来越强烈，而农机自动驾驶控制技术是实现农机装备自动化、信息化和智能化的一项核心关键技术，其广泛应用于耕作、播种、施肥、喷药、收获等农业生产过程。为贯彻落实《纲要》和《“十二五”发展规划》中提出的发展目标，解决我国农业机械化的实际需求，提高我国农机装备自动化、信息化和智能化水平，迫切需要开展农机自动驾驶控制技术的研究。该技术具有以下优点：

（1）可使农机在起垄、播种、施肥和喷药等作业时的行走精度达到厘米级，提高农机的作业精度；

（2）可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，提高作业效率与资源利用率；

（3）可使驾驶员有充足的时间去监控和操作机具，从而更关注于播种、施肥、喷药、收获等作业控制，提高作业质量；

（4）可使农机在能见度差的恶劣天气环境或夜间仍能正常作业，提高农机装备利用率，这一优点在播种、收获等农忙季节更为突出；

（5）可使驾驶员摆脱长时间单调、劳累的重复驾驶工作，极大地减轻了驾驶员的劳动强度。

综上所述，农机自动驾驶控制技术是现代农业精准作业体系的一个重要组成部分、是支持现代农业发展的关键技术，有着广阔的发展前景。

1.2 国内外农机导航控制系统研究现状

国外尤其是欧、美、日等发达国家关于农机导航控制系统的研发起步较早^[1-3]。从导航系统定位方式的角度来看,随着传感器技术和信息技术的发展,农机导航控制系统得到了不断的改善。

关于农机自动导航的相关报道可以追溯到 20 世纪中叶,最早的农机导航控制系统需要事先在田地里铺设感应电缆,然后通过农机上装备的电磁感应传感器感知农机与铺设电缆之间的位置关系,从而决策出农机转向轮的偏转大小,实现农机的自动导航^[4-6]。这种铺设电缆的方法虽然精度高,但是其铺设的高成本使依赖这种定位方式的导航系统很难推广。早期另外一种比较常见的农机导航系统的导航方式是通过之前作业的边界或者引导标记,采用机械触觉的方式来获取农机的位置信息,从而实现农机自动导航控制^[7-9]。但是这种导航系统采用的机械触觉方式决定了它只能适用于具有明显田间引导标志或者边界的作业环境,并且当农机速度增加的时候,这种方式的导航效果不佳。

20 世纪 80 年代以来,随着机器视觉和全球卫星定位系统技术的发展与成熟,为现代农机导航系统的发展提供了机遇。图像处理与识别技术的成熟和处理器运算能力的增强,使机器视觉应用于农机导航控制系统成为可能。基于机器视觉的农机导航系统通过实时获取农田的图像信息并提取出导航特征信息,解算出农机与导航参照基准的相对位姿关系,从而决策出农机导航控制的控制量^[10-26]。基于机器视觉的农机导航系统相对于基于卫星定位的导航系统的成本低,并且具有障碍物识别功能,但是该系统受光照和尘土的影响较大,系统的鲁棒性较差。

随着全球卫星定位系统的发展及应用普及,为农机高精度、全天候的定位实现提供了技术保障。目前全球卫星定位系统投入使用的有美国的 GPS (Global Positioning System),俄罗斯的 GLONASS 和中国的北斗系统。在这些系统当中, GPS 应用最为广泛。随着 GPS 应用成本的逐步降低,高精度 GPS 定位传感器在农机导航等精准农业领域的应用已经很广泛,所以基于 GPS 的农机导航系统已成为人们研究的热点^[27, 28]。这种导航系统主要通过 GPS 传感器获取农机的绝对位置信息与预设的路径信息进行比较,确定农机与路径之间的相对位置关系,从而实现农机的自动导航控制^[29-34]。

在这些单纯的基于 GPS 的农机导航系统中关于姿态信息的获取方法有二种:其一是根据农机的运动模型通过位置和速度等信息估计出姿态信息,其二是通过多天线 GPS 接收机获取农机的姿态信息。第一种方法中估计方法的收敛性和稳定性对导航系统的影响很大;第二种方法需要多天线的 GPS 接收机,这

使农机导航控制系统的成本大大提高,不利于推广。此外这种单纯依靠 GPS 的农机导航系统受 GPS 信号的影响很大,当卫星信号由于高大的树木或者建筑物遮挡时,定位精度明显下降甚至定位失败,从而导致导航系统无法完成正常的工作。为此有关学者将 INS(惯性导航系统)引进到 GPS 导航系统中,这样不仅可以通过传感器测量到农机的姿态信息,而且更重要的是 GPS 信号受到遮挡或者干扰时,导航系统可以通过航迹推算的方法继续为农机定位,因此增加了农机导航系统的鲁棒性和可靠性^[35-41]。目前绝大多数基于 GPS 研发的农机导航系统都是结合电子罗盘或者陀螺仪来获取农机的姿态信息。

为了实现农机导航系统更多的硬件冗余,保证导航系统更安全和可靠地工作,随着传感器技术的迅猛发展,人们试图采用低成本的传感器经过多传感器融合技术获得高精度的农机位姿信息,进而提出基于多传感器组合的农机导航控制系统^[42-46]。多种传感器的信息融合技术分为多传感器信息的深度融合和浅融合技术,在农机导航领域普遍使用多传感器信息的浅融合技术,因此导航系统的最高位姿精度受到多传感器系统中的最高精度传感器的精度限制,但是这种系统可以增加系统的传感器冗余,使导航系统的鲁棒性和容错性增强。

从农机自动导航控制系统的发展现状来看,基于机器视觉和 GPS 的农机导航控制系统成为当前发展的主流和热点。针对结构化环境和光照条件较好的作业环境,基于机器视觉的农机导航控制系统具有较好的可行性和有效性。而当作业环境中的视觉识别特征不明显或者光照条件不好的情况下,这种基于相对定位方式的导航系统的鲁棒性变差甚至出现导航失败的后果。而 GPS 为绝对定位方式,并且可以全天候地提供农机的精确位置信息,从而使基于 GPS 导航控制系统得到了广泛的应用。此外,从控制的角度来看,现阶段的农机导航系统主要是对农机进行横向控制,而对农机的纵向运动(即速度)并不进行控制,除非农机变量作业对农机的速度有特殊的要求,否则都认为农机的行驶速度较为恒定。

1.3 国内外农机导航控制方法研究现状

农机导航控制方法是实现农机自动导航控制系统的关键,其在农机自动导航控制系统中处于核心地位,它会对农机自动导航控制系统的性能产生重要的影响。本节主要从农机模型研究现状、农机转向控制方法研究现状及农机路径跟踪控制方法研究现状三方面来阐述农机自动导航控制方法的研究现状。

1.3.1 农机模型研究现状

国内外关于农机整车运动学和动力学模型的研究都有相关的报道。在农机运动学模型方面,大多数研究者都是在无滑动、纯滚动的假设条件下,根据农

机运动学非完整约束条件推导出运动学模型^[47, 48]。从某种意义上说某些农机也是一种轮式移动机器人，所以轮式移动机器人的运动学模型也可以稍加限制的应用到农机上。Wang 和 Low 从控制应用的角度研究了车轮存在滑动时的轮式移动机器人运动学模型，并将不同配置的轮式移动机器人的运动学模型采用统一的结构形式表达，其中 Type (1,1) 型的轮式移动机器人模型就可以完全用来描述农机的运动学规律^[49-51]。周波等推导了野外移动机器人带有滑动参数的运动学和动力学模型，解决了野外移动机器人在滑动效应下的建模和跟踪控制问题^[52]。此外，周波等还采用激光扫描的方法研究了野外移动机器人的实时地形建模问题，解决了野外移动机器人的三维定位问题^[53]。Lenain 等将农机前后轮胎的侧偏角引入到农机的运动学模型中，提出一种扩展的农机运动学模型^[54]。

在农机动力学模型方面，国内外学者主要是在 Wong 二轮车模型的基础上进行研究的。二轮车模型是指分别将农机的前后两个轮子看成一个虚拟的轮子，然后在这个假设的基础上进行农机模型的研究^[55]。Bevly 等人在大量辨识实验的基础上提出了一种新的航向率（横摆角速度）动力学模型，在该模型中引入与轮胎的侧向弹性有关的轮胎松弛长度参数，该模型是通过辨识的手段得到的，它可以精确地阐述当农机行驶速度增加到很高时航向阻尼反而增加的情况^[56]。农机田间作业时大多需要牵引或者悬挂机具，为了研究机具对农机横摆角速度动力学的影响以及机具行驶轨迹问题，许多学者进行了拖拉机-机具动力学模型的理论研究^[57-61]。在上述研究中，农机-机具系统中的机具属于被动机具，即机具不具有自主的转向能力。相反如果机具本身可以实现转向操作，那么这样的机具就称为主动机具。Ryu 等研究了农机牵引主动形式的负载机具时的农机-机具的动力学模型^[62]。除了农机的整车动力学模型外，农机转向系统的动力学特性对农机的动态行为也有很大的影响，所以也有不少学者进行了农机转向系统的模型研究^[63-66]。

从农机模型的研究现状来看，以控制方法设计为目的的模型相对较简单。再者，由于农机动力学模型参数很难准确地获取，所以以控制应用为导向的农机模型大多数为运动学模型，而以仿真研究或者农机-机具系统特性研究为目的的模型相对来说较为复杂。

1.3.2 农机转向控制方法研究现状

农机自动转向控制是实现农机自动导航控制的基础与关键技术之一，其控制性能的好坏直接影响导航控制的精度。

农机自动转向控制系统主要采用两种方式来实现：其一，在农机原有的转向液压系统上并联电控液压回路，进而直接地控制液压转向油路，实现转向轮的偏转^[33, 41, 67, 68]；其二，通过电机控制方向盘间接地改变农机转向轮的偏转角度，从而实现自动转向控制^[38, 69, 70]。鉴于前者的快速响应能力和精确的执行能

力, 在高精度的农机自动导航控制系统中, 倾向于采用前者来实现自动转向控制^[64]。

由于农机转向系统本身的复杂性、参数摄动性及轮胎与地面之间相互作用的不确定性, 导致建立精确的农机转向系统模型非常困难。而对于这样的系统最简单、直接的方法就是采用不依赖数学模型的控制方法进行转向控制系统的设计。

针对采用第一种方式实现的农机转向控制系统, 张勤等基于模糊控制方法进行农机转向控制系统的设计, 并在实际的农机上进行了测试^[71-73]。另外一种被广泛应用的不依赖于模型的方法是 PID 方法, 因此在大多数农机自动转向控制中, 以车轮转角为反馈量, 采用 PID 控制方法进行转向控制设计^[74, 75]。为了提高基于角度反馈的 PID 控制方法的精度, 可以将车轮偏转角速度作为反馈量, 形成一个内环 PID 控制, 从而采用双闭环 PID 控制进行转向控制系统的设计, 在一定程度上提高了转向控制系统的精度, 但车轮偏转角速度反馈很难实现^[76]。

上述模型无关的控制方法虽然可以使控制系统的设计简单, 但是其控制精度并不高, 所以为了实现精确的农机自动转向控制, 需要了解转向执行系统的特性, 获得转向系统在某一条件下的名义模型, 将系统的不确定性建模成等效干扰, 进而采用滑模控制等鲁棒控制方法进行转向控制设计, 其控制性能明显优于 PID 控制^[65]。然而滑模控制的缺点就是控制量存在抖振现象, 目前已有一些自适应滑模控制方法被提出来解决滑模控制的抖振问题^[77-80]。但是关于系统响应时间与超调量之间的矛盾问题还没有很好地解决。

针对采用第二种方式实现的农机转向控制系统, 张智刚和连世江等基于永磁无刷直流电机的驱动机构设计了 PID 转向控制方法, 通过调整 PID 增益可以获得满意的效果, 实践证明在无法精确获得农机转向系参数的情况下, 这种方法是很好的选择^[38, 70]。周俊设计了基于步进电机的农机转向驱动系统, 并且采用开关控制 (Bang-Bang) 策略设计了转向控制器^[24]。高雷等在步进电机和减速齿轮组成的转向驱动系统上设计了 PID 控制方法, 从而实现农机转向轮跟踪期望的转向角^[81]。

从转向控制方法的研究现状来看, 主要是现有成熟方法的应用性研究。如何使农机转向系统快速并且无超调地跟踪期望的转向角, 即解决传统控制上的快速性与超调量之间的矛盾, 在控制方法本身的层面上有待于进一步研究。

1.3.3 农机路径跟踪方法研究现状

关于农机路径跟踪方法可以分为两大类, 即基于模型的农机路径跟踪方法和模型无关的农机路径跟踪方法。前者主要有最优控制方法、鲁棒控制方法和自适应控制方法等; 而后者主要有 PID 方法、纯追踪方法、模糊控制方法和神经网络方法。

1.3.3.1 基于模型的路径跟踪方法

斯坦福大学的研究团队最早将 GPS 引进到农机导航控制系统中,并开展了基于 GPS 农机导航系统中的路径跟踪方法研究。O'Connor 在 Ellis 二轮车模型和 Wong 二轮车模型的基础上,建立了以农机航向误差及其变化率、转向轮偏角及其变化率和位置误差为状态变量的农机运动学模型,并且对该运动学模型进行线性化逼近,然后基于线性化后的模型设计了最优导航控制器,并将其应用到约翰迪尔的 7800 型拖拉机上进行了拖拉机的导航控制实验,取得了很好的路径跟踪控制效果^[31, 32]。Thomas Bell 进一步扩展了 O'Connor 的工作,设计了适合圆弧、螺旋线和任意曲线路径的拖拉机路径跟踪控制的相关算法^[30, 82]。Rekow 等将 EKF(Extended Kalman Filter)和 LMS(Least Mean Square)算法结合起来去实时在线估计 O'Connor 所建模型的参数,并提出了相应的自适应控制方法,实现了提高农机路径跟踪精度的目的^[83]。为了描述农机在高速行驶时的动力学特性,Bevly 等在大量辨识实验的基础上提出了一种新的航向率动力学模型,并基于该模型设计了 LQR 路径跟踪控制方法,解决了农机在高速行驶时的导航控制问题^[56, 84]。

在农机牵引或者悬挂大的机具负载时,机具负载的变化对农机路径跟踪的性能影响较大。针对机具负载对农机导航控制的影响问题,Bevly 及其在奥本大学的研究团队采用级联式 Kalman 滤波器对转向角到航向变化率(横摆角速度)传递函数的稳态增益进行估计,并且针对不同机具及不同作业情况建立一个稳态增益查询表,用于控制器参数在线实时调整^[85-87]。后来 Bevly 等又提出了基于模型参考自适应控制的农机路径跟踪控制方法,很好地解决了机具负载干扰对农机路径跟踪精度的影响,进而保证了在不同机具负载干扰情况下农机位置误差响应的一致性^[59, 74, 88]。

Zhang 和 Qiu 等人提出了一种基于动力学模型的农机动态路径搜索算法,用于拖拉机跟踪直线或者曲线作业路径的自动导航控制,动态路径搜索算法的输出为横向偏差和期望的航向角,基于这两个输出导航控制器确定一个合适的转向角,以此达到路径跟踪的目的^[41, 89]。考虑到机具的运行轨迹,冯雷等将 GPS 技术、传感器技术和农机的模型进行融合,研究了低成本、高精度的导航定位系统,并在此基础上研究了附带牵引式农机具的农机动力学模型参数和运动轨迹的估计问题^[42]。吕安涛等考虑到拖拉机是一个大延时、高度非线性的系统,针对这样的系统控制参数难以调节的特点,研究了基于运动学模型和基于动力学模型的最优控制算法,并将两种算法得到的控制参数的平均值作为最后的控制器参数,提高了控制器参数的整定精度^[90]。

陈军等利用线性化后的农机运动学模型和线性二次型最优控制理论,研究了农机按照规定轨迹行驶的最优路径跟踪控制器^[91, 92]。之后陈军等又在预瞄策

略的基础上,应用二次型最优控制方法设计了农机沿曲线路径行驶的路径跟踪控制器,并在牧草地上进行了圆形路径和正弦形路径的跟踪实验^[93]。朱忠祥等人针对拖拉机的地头转向特点,研究了一种次优参考路径的生成方法,并且基于运动学模型设计了路径跟踪控制器^[48]。

为了消除轮胎侧偏角对农机路径跟踪控制的影响,Lenain 等人将前后轮胎的侧偏角引入到农机的运动学模型中,提出一种扩展的运动学模型,并对该模型进行链式系统变换,基于变换后的线性模型设计了基于位置误差和航向误差的状态反馈控制器,并取得了良好的路径跟踪控制效果^[54, 94]。后来其团队以该扩展运动学模型为基础设计了滑模控制器^[95]和预测控制器^[96, 97]分别解决了横向扰动对农机路径跟踪带来的负面影响和转向操纵控制量饱和的问题。Eaton 等将 Backstepping 控制方法应用到农机路径跟踪控制中,并且在控制方法的设计过程中考虑了转向系动力学特性的影响,取得了较好的实验效果^[65, 98]。

1.3.3.2 模型无关的路径跟踪方法

为了避免建模不准确或者模型参数剧烈变化对农机路径跟踪控制性能所产生的负面影响,有些学者便采用与模型无关的控制方法进行农机路径跟踪控制器的设计。

在过程工业上被广泛应用的 PID 方法是基于误差来生成消除误差的控制策略,由于其设计过程中不依赖于数学模型,对线性或者非线性控制对象都适用,所以在农机导航控制领域 PID 方法也得到了大量的应用^[99-105]。

在移动机器人领域被广泛应用的纯追踪方法,由于其是一种几何方法不涉及到复杂的控制理论知识,只是通过简单的几何推导就能求出农机路径跟踪所需要的控制量,以及由于其具有控制参数少、算法设计模拟人的驾驶行为具有预见性等特点,所以纯追踪方法在农机导航控制领域也得到了应用。黄沛琛等人根据地头转向的特点,利用 BP 神经网络确定前视距离,然后根据纯追踪算法确定农机期望的转向角^[106, 107]。张智刚等利用 Kalman 滤波器对农机的位姿数据进行处理,然后根据纯追踪算法确定期望的转向角,并且基于 ITAE 优化准则,仿真研究了最佳前视距离的确定方法^[108]。

由于模糊控制具有仿人的智能性,不少学者基于模糊控制研究了农机的路径跟踪控制方法。Xue 基于模糊控制方法和 FOV (Field Of View) 机器视觉设计小型移动机器人在玉米田间的路径跟踪控制器,并通过实际田间实验验证了方法的有效性^[109]。连世江等以拖拉机为研究对象,以航向误差和转向角作为控制输入,转向驱动电机的转速为输出量,基于模糊控制技术设计了拖拉机的路径跟踪控制器,实现了拖拉机航向角的跟踪控制^[110]。周建军等研究了模糊控制技术在路径跟踪方法上的应用,并且对设计的结果在 Matlab 上进行了仿真验证,进而在改装的电瓶车上进行试验和分析^[111]。Antonelli 等人针对差分驱动移动机

机器人研究了基于模糊技术的导航控制算法,并且通过实验验证了该方法的可行性^[112]。在农机控制系统存在参数摄动和外部干扰的情况下,采用确定性模糊控制器会使控制品质降低。针对这个问题,刘兆祥等设计了一种自适应模糊控制算法,这种算法基于遗传算法和 RTK-GPS 技术,并且将构造的导航系统在田间进行了试验^[113]。丁幼春等针对联合收割机设计了视觉导航控制系统,提出了基于直方图的导航路径融合算法和模糊 PD 路径跟踪算法,并进行了麦田试验^[20]。张漫等设计了一种模糊自适应农机路径跟踪控制方法,该方法能够有效地减弱控制过程的超调^[114]。Cho 和 Ki 基于模糊逻辑控制和机器视觉设计了果园喷药机的路径跟踪控制器,控制器的输入为机器视觉传感器和超声波传感器提供的信息^[115]。陈军等人将神经网络控制技术应用于农机的自动行驶控制中,大大提高了基于神经网络的农机路径跟踪控制系统的自学习能力^[116]。针对复杂的拖拉机模型,白晓鸽等利用神经网络来映射农机与路径之间的偏差和农机转角之间的关系,设计了一种基于神经网络的拖拉机路径跟踪控制器^[117]。

模糊控制虽然不依赖于农机模型、且具有仿人的智能特点,但是其在设计过程中需要专家的经验来制定模糊控制规则,人为因素影响比较大。神经网络控制虽然对农机运动的非线性特性具有较强的适应能力,但是其在设计过程中需要大量、高质量的训练样本,实现起来困难而且泛化能力也比较弱。相比控制器设计而言,神经网络更被倾向用于农机的建模,但是在采用神经网络建模的过程中同样需要大量的高质量训练样本数据,而且通过其所建的模型泛化能力较差^[118, 119]。

总之,国外对农机路径跟踪控制的研究起步很早,基于运动学模型和基于动力学模型的控制设计均可见到,而且也有文献研究了农机动力学参数的辨识和时变状态的在线估计问题。通过对模型的深入研究和在线估计算法的实时应用,已有文献开展了农机自适应控制算法的研究。但是自适应控制中的状态估计或者参数在线辨识过程降低了控制的实时性。国内对路径跟踪控制的研究大多基于运动学模型来进行的,没有考虑到农机动力学特性的影响。这样做虽然摆脱了复杂、时变的动力学参数的影响、简化了控制器的设计,然而农机在复杂的农田环境下作业,农机的动力学参数往往是变化的,而且这种变化对控制效果也会产生很大的影响。为了避免涉及到复杂的农机模型,虽然有不少诸如模糊控制、神经网络控制等模型无关的农机路径跟踪控制方法研究,但是这些方法要么需要相关的经验知识,要么需要复杂的学习训练过程,导致这些方法实施起来比较困难。

1.4 问题的提出

(1) 由于农机本身的复杂性、土壤等农田环境以及农机具负载的不确定性的存在,使得农机导航控制系统为一个复杂的不确定性系统。对于这样的复杂系统要是通过一个数学模型来描述,势必增加模型的复杂度,使其控制求解困难。为此,可以采用级联式控制策略将复杂的农机导航控制过程分解为一系列级联的控制过程来完成,而每个控制过程可以单独使用各自对应的控制器进行控制。

(2) 从转向控制的研究现状来看,关于转向控制方法的研究总体上停留在一些常用控制方法的应用研究,而在控制方法的创新上没有显著的突破。如何使农机转向系统快速并且无超调地跟踪期望的转向角,即解决传统控制上的快速性与超调量之间的矛盾,在控制方法本身的层面上有待于进一步研究。

(3) 在已有的路径跟踪控制方法中,PID方法应用广泛,但其参数整定困难,需要一定的经验和进行大量的参数整定实验;纯追踪方法中的前视距离参数与农机的误差状态和速度有关系,很难选择一个合适的前视距离固定值来适应不同的误差状态;线性模型方法需要对非线性农机模型进行常速假设和小角度线性近似,导致该类方法只有在模型的线性区域才能得到较好的控制效果。

(4) 目前研究的导航控制方法大多都是单纯的基于位置偏差和航向偏差(位姿偏差)的方法,基于这种方法设计的导航控制系统并没有考虑农机横摆角速度环节的鲁棒自适应控制问题,使农机导航控制系统对横摆角速度动力学参数的变化和外部干扰不具有鲁棒性,也没有考虑到机具负载变化等情况导致的农机动力学特性的变化,从而导致导航控制性能变差,难以取得预期的效果。

1.5 论文的研究内容及组织结构

本文的研究工作是依托国家863计划项目(2010AA101402)——一切纵流智能控制稻麦联合收割机导航控制技术与开发,中国科学院知识创新工程重要方向项目(KGCX2-YW-138)——现代农业精准作业测控技术与核心装置研发和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B06)——田间作业智能控制关键技术与装备研发而开展的。

针对上述1.4节提出的问题,论文将级联式控制策略引进到农机自动导航控制中,提出一种基于级联式控制策略的农机导航控制方法。即把复杂的农机导航控制任务从上至下划分成几个子任务来完成,任务之间是级联式的关系,不同的控制任务起到不同的控制作用。

围绕基于级联式控制策略的农机导航控制中的各个任务环节, 论文进行了农机转向控制方法研究、基于位姿偏差的路径跟踪控制方法研究、基于期望横摆角速度的路径跟踪控制方法研究, 以及将上述方法依据级联式控制策略进行集成并进行农机导航控制方法的实验验证和导航系统的应用研究。论文的主要内容及结构如图 1-1 所示。

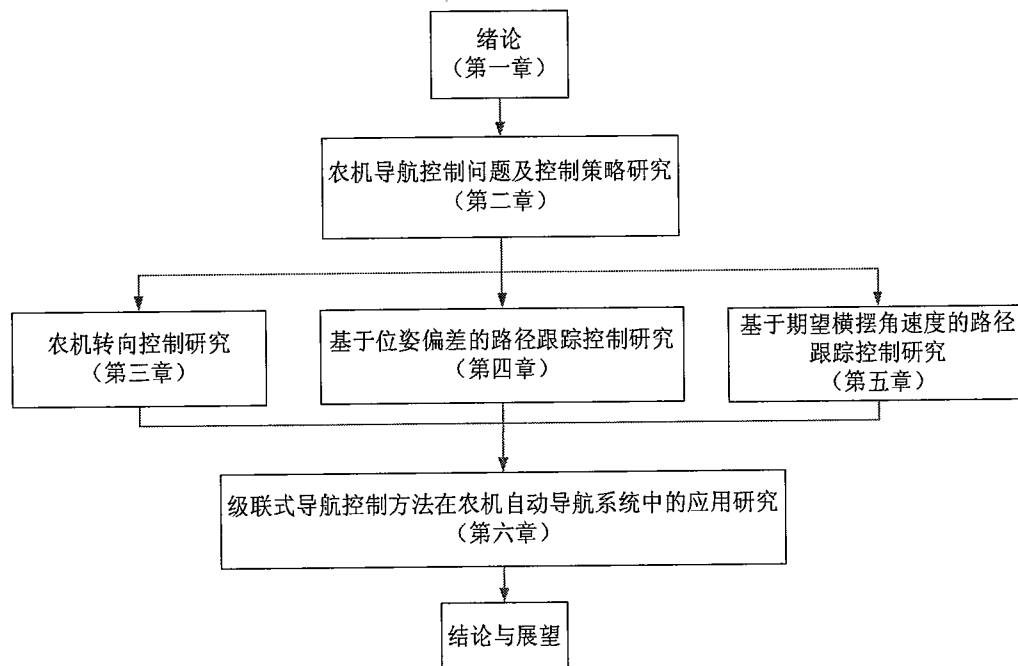


图 1-1 论文章节安排图示

Fig. 1-1 Diagram of the dissertation structure

第 1 章为绪论, 阐述了课题研究的背景及农机自动导航控制研究的意义。介绍了国内外农机自动导航控制系统及农机导航控制方法的研究现状, 分析并提出了农机自动导航控制中存在的问题。最后阐述了论文的研究内容及整体结构。

第 2 章首先对农机自动导航控制问题进行了简要的描述, 并提出了农机自动导航控制效果的评价标准与方法; 然后阐述了基于级联式控制策略的农机自动导航控制的结构原理; 最后介绍了用于本文所研究方法验证的农机自动导航实验平台。

第 3 章进行了农机转向控制方法的研究。首先对电控液压式和电控机械式转向系统进行建模研究, 提出了结构统一的农机转向系统模型。然后基于提出的模型结构进行了转向控制方法的研究, 提出了一种基于非线性积分滑模面的农机转向自适应滑模控制方法, 保证了转向轮快速、无超调地跟踪期望转向角指令。

第 4 章研究了基于位姿偏差的路径跟踪控制方法。首先, 提出了最优 PD

路径跟踪控制方法,研究了PD参数的最优求取方法。然后,提出了模糊自适应纯追踪路径跟踪控制方法,解决了纯追踪模型中前视距离的在线自适应确定问题,提高了纯追踪方法对不同误差状态的鲁棒性和适应性。最后,提出了非线性最优路径跟踪控制方法,该方法可以得到一种与速度无关的非线性最优控制律,打破了以往农机路径跟踪控制方法设计中要求模型小角度近似线性化和速度恒定的假设,更加符合农机田间作业的实际情况。

第5章研究了基于期望横摆角速度的路径跟踪控制方法,该方法将农机的路径跟踪控制任务进一步分解成两个级联的控制任务,即横向位置控制和横摆角速度控制。针对横向位置控制,采用第4章研究的基于位姿偏差的路径跟踪控制方法决策出路径跟踪所需要的期望横摆角速度;针对横摆角速度控制,在对农机牵引或悬挂机具时的横摆角速度动力学分析的基础上,提出了一种前馈自适应控制与鲁棒反馈控制相结合的鲁棒自适应控制律,提高了农机导航控制系统对扰动作用的鲁棒自适应性和保证了在不同机具负载干扰时横向位置误差响应的一致性。

第6章进行了级联式导航控制方法在农机自动驾驶系统中的应用研究,介绍了导航系统实现上相关问题的求解方法,并进行了多条连续路径的农机导航控制实验,导航控制实验的结果验证了本文所提出方法的可行性和有效性。

最后一部分为结论。总结了论文的研究工作和主要创新点。

1.6 本章小结

本章阐述了课题的研究背景及农机自动驾驶控制研究的意义;介绍了国内外农机自动驾驶控制系统及农机导航控制方法的研究现状,分析并提出了农机自动驾驶控制中存在的若干问题;最后针对农机导航控制存在的问题阐述了论文的主要研究内容、整体结构及各个章节的安排。

第2章 农机导航控制问题及控制策略研究

2.1 引言

农业机械可分为动力机械和作业机械（作业机具）两大类，动力机械主要包括拖拉机、内燃机、燃油发电机等，作业机械主要包括耕整地机械、种植施肥机械、田间管理机械、收获机械等。按照作业机械与动力机械的结合方式，可分为自走式农业机械、悬挂式农业机械、牵引式农业机械。自走式农业机械的动力机械与作业机械合二为一，悬挂式农业机械的作业机械利用悬挂装置固定在动力机械（一般指拖拉机）上，牵引式农业机械通过动力机械（一般指拖拉机）的牵引装置拖拽作业机械。

从农业机械自动驾驶控制的角度来看，当作业机械的负载干扰比较小时上述农业机械在导航控制方面没有本质区别。然而当作业机械的负载干扰（尤其是悬挂式或者牵引式作业机械的负载干扰）比较大时，从导航控制的角度就需要考虑负载干扰对农业机械动力学特性的影响。

当驾驶员操作农机进行田间作业时，驾驶员需要同时完成两项任务：其中一项任务是通过手动控制方向盘使农机保持在作业路径上行驶；另一项任务是手动控制作业机具操纵柄或者按钮使作业机具完成各种田间作业动作。

如果仅第一项任务能够通过自动控制的方式来完成，那么称农机具有自动驾驶控制功能；如果仅第二项任务可以通过自动控制的方式来完成，那么称农机具有自动作业控制功能；如果上述两项任务都能通过自动控制的方式来完成，那么称农机具有自主导航作业功能。本文旨在通过研究使农机具有自动驾驶控制的功能，即只研究农机的自动驾驶控制问题。

2.2 农机导航控制问题

农机的自动驾驶控制主要是对农机进行横向位置控制，即控制农机跟踪事先规划好的作业路径，使其与路径之间的横向位置偏差保持在一定的精度范围之内，从而满足农业生产的需要。

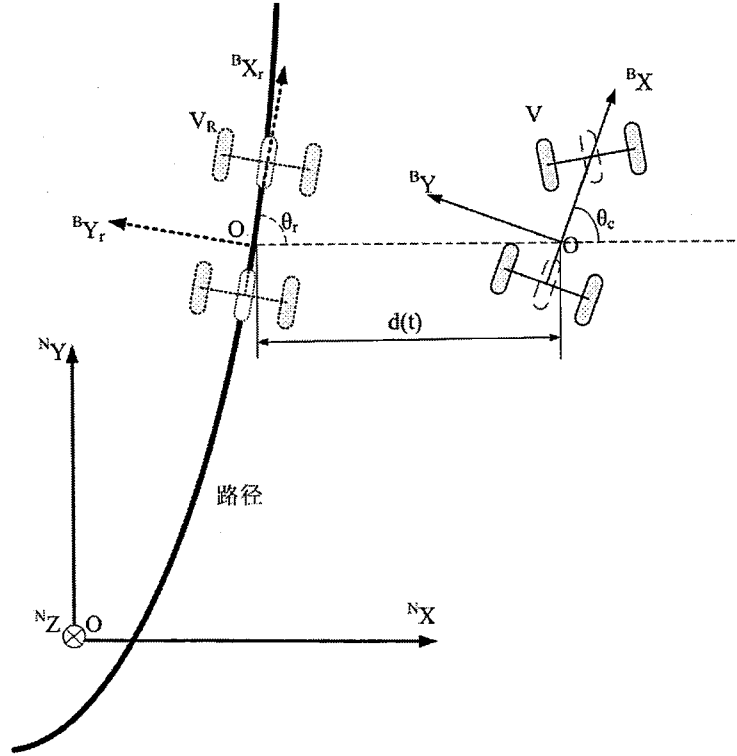


图 2-1 农机自动导航问题示意图

Fig. 2-1 Schematic diagram of agricultural machine automatic navigation

本文中的农机自动导航控制问题描述如图 2-1 所示, 假设有一个虚拟的参考农机 V_R 在路径上运动, 其运动轨迹就是农机 V 的参考轨迹。假设农机 V_R 在路径上的位置为 (x_r, y_r) , 航向角为 θ_r ; 并假设虚拟农机的运动方程为:

$$\dot{X}_r = F_r(X_r) \quad (2-1)$$

其中, $X_r = (x_r, y_r, \theta_r)^T$ 。

同理, 农机 V 的运动方程为

$$\dot{X}_c = F_c(X_c) \quad (2-2)$$

其中, $X_c = (x_c, y_c, \theta_c)^T$;

x_c 为农机在导航坐标系 ($^N X - O - ^N Y$) 中的 x 坐标;

y_c 为农机在导航坐标系 ($^N X - O - ^N Y$) 中的 y 坐标;

θ_c 为农机纵轴与导航坐标系 X 轴的夹角, 即农机的航向角。

农机的导航控制过程就是控制农机 V , 使它的位姿与农机 V_R 的位姿达到一致的过程, 即 $X_c \rightarrow X_r$ 。现定义:

$$|d(t)| = \sqrt{(x_r - x_c)^2 + (y_r - y_c)^2} \quad (2-3)$$

$$\theta_e = \theta_r - \theta_c \quad (2-4)$$

$$e(t) = (d(t) \quad \theta_e)^T \quad (2-5)$$

至此，可以将农机自动导航控制的目标描述为满足以下两个条件：

Q₁：路径跟踪误差衰减，即 $e(t) \rightarrow 0$ ；

Q₂：前向动态搜索路径，即 $v_r > 0$ 。

农机在田间作业时一般只关注农机与作业路径之间的横向位置偏差是否满足一定的精度要求，即将 $d(t)$ 作为导航控制精度的主要评价参数。此时 Q₁ 条件放松为 $d(t) \rightarrow 0$ 。

由于，通常情况下都是在农机前向运动过程中进行自动导航控制的，即不存在倒车情况，因此条件 Q₂ 很容易满足。

综上，导航控制方法的控制效果可以采用 $d(t)$ 的统计指标作为评价标准。定义 $d(t)$ （数据长度为 N ）的如下三项统计指标：

$$\bar{d}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t(1)}^{i=t(N)} |d(t(i))| \quad (2-6)$$

$$d(t)_{\max} = \text{sign}(d(t(i))) \max(|d(t(i))|) \quad (2-7)$$

$$d(t)_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=t(1)}^{i=t(N)} (d(t(i)) - \bar{d}(t))^2}{N}} \quad (2-8)$$

其中（2-6）和（2-7）为农机导航控制横向位置误差的平均值和最大值统计指标，其可以从整体上反映出导航控制的效果。（2-8）为横向位置误差的标准差统计指标，其可以反映农机导航控制的稳态效果。

此外，农机在地头转向控制时，除了采用上述统计指标来评价导航控制效果外，还要引进农机与下一作业行的初始位置偏差作为导航控制效果好坏的评价标准。该指标反映了农机在地头转向后能否以一定的横向位置误差精度进入到下一作业行的自动导航控制。如果这个指标值过大，会对农机下一个作业行的导航控制效果产生负面的影响。

2.3 农机自动导航控制策略

2.3.1 级联式控制策略基本原理

级联式控制系统由于其抑制二次扰动性能优越和控制结构相对简单等特点，成为改善和提高控制品质的一种有效的方法。本文将级联式控制策略应用到农机的自动导航控制设计中，以提高农机自动导航控制系统的控制性能。

级联式控制又称为串级控制，其通过级联式（串联）工作的多个控制器来

改善被控变量的控制效果。关于级联式控制系统的基本结构原理如图 2-2 所示。

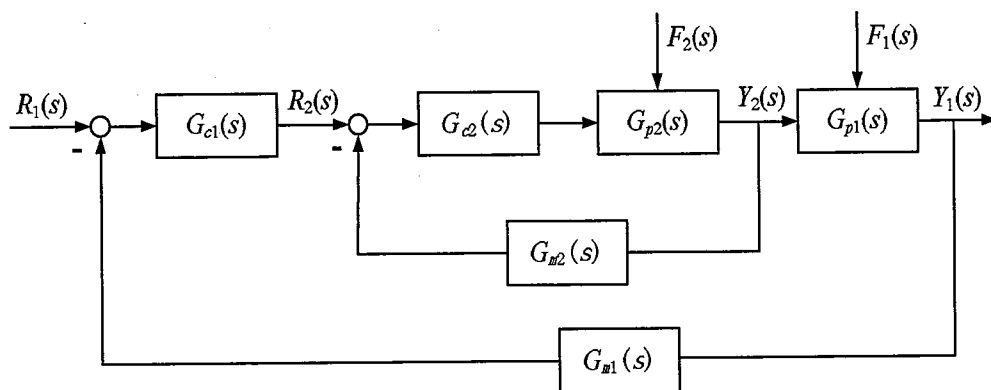


图 2-2 一般级联式控制系统原理框图

Fig. 2-2 Schematic diagram of the general cascaded control strategy

在图 2-2 中， $G_{c1}(s)$ 和 $G_{c2}(s)$ 为控制器传递函数； $R_1(s)$ 和 $R_2(s)$ 为各级控制器的参考输入； $G_{p1}(s)$ 和 $G_{p2}(s)$ 为各级被控对象的传递函数； $Y_1(s)$ 和 $Y_2(s)$ 分别为被控对象 $G_{p1}(s)$ 和 $G_{p2}(s)$ 的控制输出； $F_1(s)$ 和 $F_2(s)$ 为被控对象 $G_{p1}(s)$ 和 $G_{p2}(s)$ 所受的干扰； $G_{m1}(s)$ 和 $G_{m2}(s)$ 为控制系统测量单元的传递函数。

从图 2-2 中可以看出，级联式控制系统与简单控制系统的明显区别是：在控制结构上，级联式控制系统有两个（或者至少两个）闭环。本文从外环至内环依次定义为第一级控制、第二级控制，如果存在多个闭环则依次类推。在这种控制结构中，第一级控制器的输出作为第二级控制器的参考输入，同样如果有多于两个的闭环则依次类推。

那么，关于级联式控制结构的优点有如下三方面：

(1) 级联式控制对进入内环的干扰 $F_2(s)$ 具有很强的抑制能力，从而可以提高控制质量；

(2) 级联式控制可以改善控制系统的动态特性，从而提高控制系统的响应频率；

(3) 级联式控制对系统负载的波动具有较强的适应能力。

此外，从消除各个回路的动态联系方面来看，在级联式控制策略中必须使上一级控制过程的时间常数大于下一级控制过程的时间常数三倍以上，即

$$\frac{T_{i-1}}{T_i} > 3 \quad (2-9)$$

其中， T_{i-1} 为上一级控制过程的时间常数；

T_i 为下一级控制过程的时间常数。

一般情况下，将上式（2-9）中的比值控制在 3~10 的范围内。

2.3.2 基于级联式控制策略的农机导航控制

当田间计算机规划确定农机田间作业的期望路径后，一个典型的农机自动导航控制系统主要包括的功能单元有导航控制器，转向驱动器，转角传感器，位置和姿态传感器等部分，如图 2-3 所示。其中各个传感器和转向驱动器等硬件设备本文不给予重点研究，而本文重点研究处于农机导航控制系统核心地位的导航控制器（在这里主要指导航控制方法），即本文主要进行农机导航控制方法的研究。

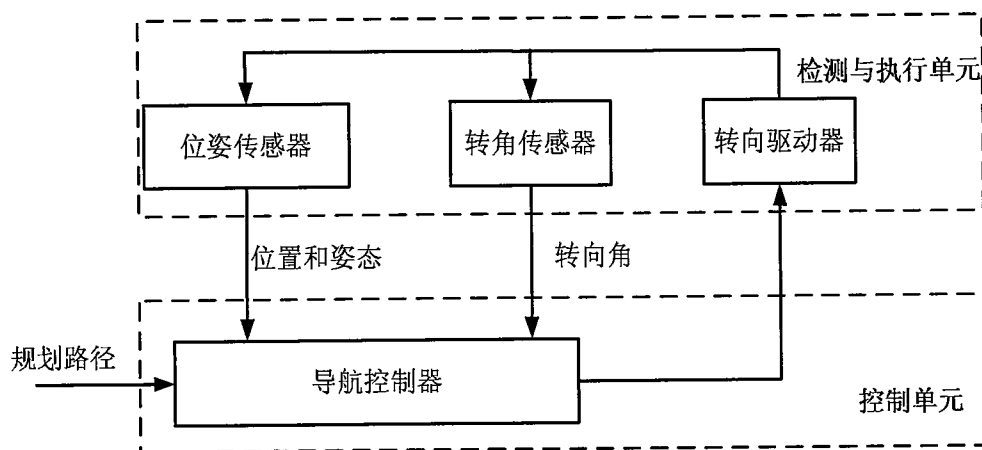


图 2-3 典型农机导航控制系统原理

Fig. 2-3 schematic diagram of classic automatic navigation control system for agricultural machinery

根据图 2-3 所示的典型农机自动导航控制系统的原理可知，导航控制器（导航控制方法）根据农机的规划路径信息和通过传感器检测到的农机当前位姿信息以及农机的当前转向角信息确定农机转向驱动器的控制输入，驱动农机转向轮动作，从而实现农机的自动导航控制。

农机在自动导航控制作业过程中，归结起来有如下几类扰动作用会对农机自动导航控制系统的控制性能产生影响：

（1）全地形路面引起的颠簸、坡地或湿滑地面引起的侧滑、胎压损失等会对农机横摆角速度动力学特性产生较大的扰动；

（2）由于土壤、风力、作物等复杂的农田环境对作业机械（机具）的影响，以及耕整地、播种施肥、喷药等田间作业自身的特点，使机具负载存在较大的不确定性，从而对农机横摆角速度动力学特性产生较大的干扰；

（3）转向系统中存在的间隙、滞后、死区等非线性不确定性及未建模动态和外部干扰（如轮胎与路面之间相互作用的不确定性）会对农机转向控制系统带来干扰。

本文定义上述(1)和(2)中描述的针对农机横摆角速度动力学特性的干扰为 F_{d1} ；定义上述(3)中描述的针对农机转向系统的干扰为 F_{d2} 。

通过上述讨论可知，农业机械自动导航控制系统为一个复杂的不确定性系统。对于这样的复杂系统要是通过单一数学模型来描述，势必增加模型的复杂度，使其控制求解困难，而且将这些干扰都包含在单一的控制回路中会降低干扰抑制的实时性，使农机导航控制系统的性能下降。

为此，本文采用级联式控制策略将一个复杂的农机自动导航控制过程分解为路径跟踪控制过程和转向控制过程来完成，而每个控制过程可以单独使用各自对应的控制器进行相应地控制，从而使农机自动导航控制问题的求解得到简化。

本文依据农机路径跟踪控制的结构原理，提出了基于位姿偏差的二级级联式导航控制策略和基于期望横摆角速度的三级级联式导航控制策略。

2.3.2.1 基于位姿偏差的二级级联式导航控制策略

在干扰 F_{d1} 比较小的情况下，可以将图2-3所描述的典型农机自动导航控制系统中的农机导航控制器进一步分解为路径跟踪控制器和转向控制器，即将导航控制器中的转向执行系统的控制功能从导航控制器中分离出来，采用单独的控制回路（转向控制回路）进行控制。此时这种二级级联式的农机导航控制系统的功能结构如图2-4所示。

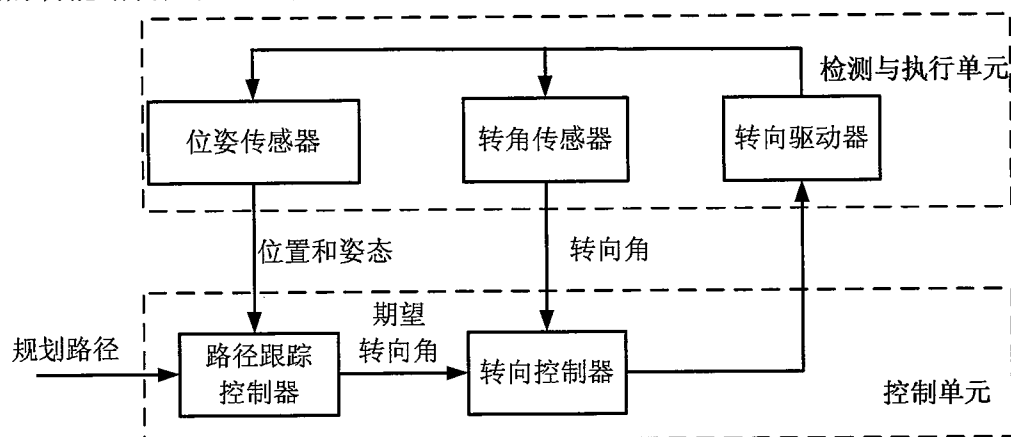


图 2-4 农机二级级联式导航控制系统

Fig. 2-4 Schematic diagram of the two-levels cascaded navigation control system for agricultural machinery

农机二级级联式导航控制系统的工作过程如下：路径跟踪控制器根据农机当前的位姿偏差信息决策出农机跟踪作业路径所需要的期望转向角；然后转向控制器根据路径跟踪控制决策出的期望转向角与农机当前的实际转向角信息，通过转向控制算法计算出相应的控制量去控制转向驱动器，从而实现农机转向轮的动作，确保农机的实际转向角跟踪期望的转向角变化，最终达到农机自动

导航控制的目的。

由于在这种导航控制系统的结构中路径跟踪控制器主要是根据农机的位姿（位置和姿态）偏差信息来决策出农机的期望转向角，所以称路径跟踪控制环节的控制方法为基于位姿偏差的路径跟踪控制方法。相应地，采用基于位姿偏差的路径跟踪控制方法与转向控制方法构建的级联式自动驾驶控制方法称为基于位姿偏差的二级级联式导航控制方法。关于这种自动驾驶控制方法的控制框图如图 2-5 所示。

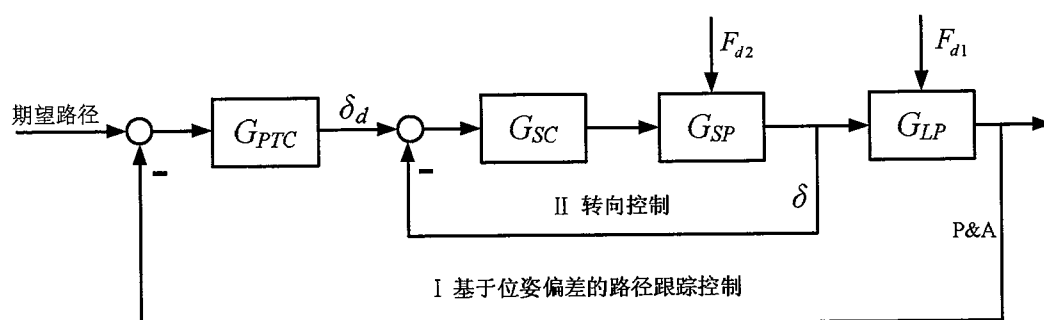


图 2-5 基于位姿偏差的二级级联式导航控制策略原理图

Fig. 2-5 Schematic diagram of the two-levels cascaded navigation control strategy based on the position and heading deviation

在图 2-5 中， G_{PTC} 为基于位姿偏差的路径跟踪控制器传递函数， G_{SC} 为转向控制器的传递函数， G_{SP} 为农机转向系统模型， G_{LP} 为农机整车横向运动模型，P&A 为农机的位置和姿态（位姿）， δ 为农机的当前转向角， δ_d 为上一级基于位姿偏差的路径跟踪控制确定的期望转向角。

在这种二级级联式导航控制策略中，可以将针对农机转向系统的干扰 F_{d2} 包含在转向控制回路 II 中，根据级联式控制系统的优点可知，转向控制回路 II 对进入其中的干扰 F_{d2} 具有及时的抑制作用，从而减小 F_{d2} 对农机位姿控制的影响；将针对农机横摆角速度动力学特性的干扰 F_{d1} 包含在路径跟踪控制回路 I 中，在 F_{d1} 比较小或变化比较缓慢的情况下，路径跟踪控制回路 I 可以有效地抑制其对导航控制系统性能的影响。

2.3.2.2 基于期望横摆角速度的三级级联式导航控制策略

在针对农机横摆角速度动力学特性的干扰 F_{d1} 比较大或变化比较剧烈的情况下，此时基于位姿偏差的二级级联式导航控制方法的控制效果并不理想，不能满足农业生产对导航控制精度和鲁棒性的要求。为了解决这个问题，本文在二级级联式导航控制系统的基础上进一步将路径跟踪控制分解为两个级联的控制过程来完成，即横向位置控制和横摆角速度控制过程。此时，这种三级级联式的农机导航控制系统的功能结构如图 2-6 所示。从图中可以看出，三级级联

式农机导航控制系统比二级级联式农机导航控制系统只多了一个测量单元和一个控制器，而其所能取得的控制效果却可以得到显著的改善。

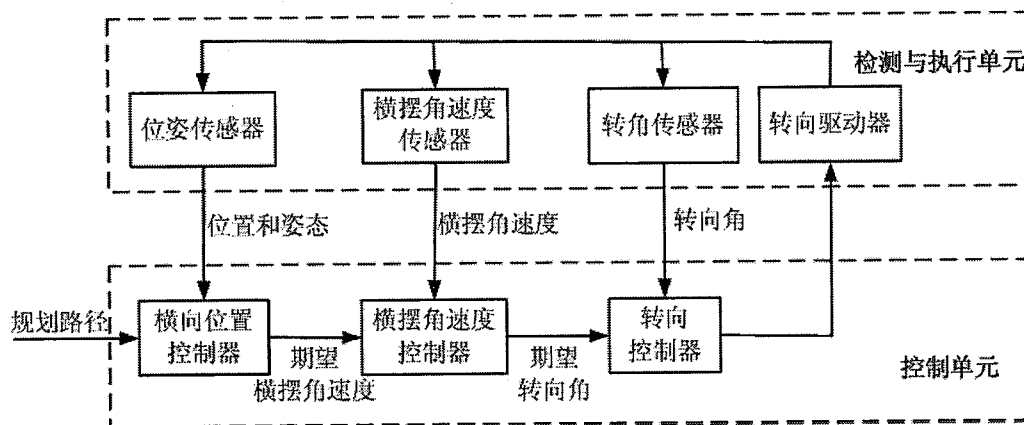


图 2-6 农机三级级联式导航控制系统

Fig. 2-6 Schematic diagram of the three-levels cascaded navigation control system for agricultural machinery

农机三级级联式导航控制系统的工作过程如下：横向位置控制器根据农机的位姿信息和已规划的期望路径信息决策出农机路径跟踪过程中所需要的期望横摆角速度；横摆角速度控制器的目的是，在农机存在参数不确定性、机具负载干扰或者外部干扰的情况下，使横摆角速度按照其上一级横向位置控制确定的期望横摆角速度变化，从而保证农机横向位置响应的一致性；转向控制器根据其上一级横摆角速度控制确定的期望转向角指令和实际检测到的农机转向角信息确定农机转向驱动器的控制输入量，从而使农机的转向轮快速而无超调地跟踪期望转向角变化。最终，通过这三个级联的控制过程的作用，便可使农机精确地跟踪期望的路径行驶，实现农机高精度自动导航控制。

由于在这种导航控制系统的结构中将横摆角速度的控制引进到路径跟踪控制中，从而使农机导航控制系统在受到干扰 F_{d1} 的作用时依然可以保证农机的横摆角速度按照期望的横摆角速度变化，因此本文称由横向位置控制回路和横摆角速度控制回路组成的路径跟踪控制环节的控制方法为基于期望横摆角速度的路径跟踪控制方法。相应地，采用基于期望横摆角速度的路径跟踪控制方法与转向控制方法构建的级联式自动导航控制方法称为基于期望横摆角速度的三级级联式导航控制方法。关于这种自动导航控制方法的控制框图如图 2-7 所示。

在图 2-7 中， G_{LPC} 为横向位置控制器传递函数， $G_{\gamma C}$ 为横摆角速度控制器传

递函数， G_{SC} 为转向控制器的传递函数， G_{SP} 为农机转向系统模型， $G_{\gamma P}$ 为农机横摆角速度动力学模型， G_{LPP} 为农机的横向位置运动学模型， γ 为农机的横摆

角速度，P&A 为农机的位置和姿态（位姿）， δ 为农机的当前转向角， δ_d 为第 II 级横摆角速度控制确定的期望转向角， γ_d 为第 I 级横向位置控制决策的期望横摆角速度。

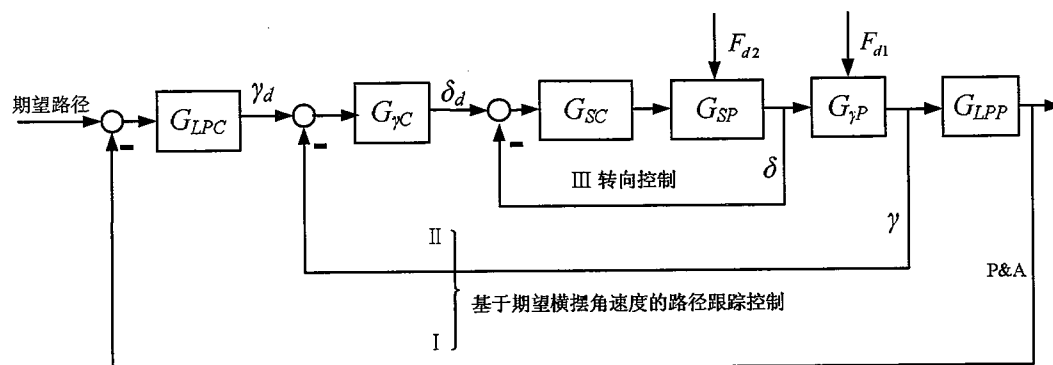


图 2-7 基于期望横摆角速度的三级级联式导航控制策略原理图

Fig. 2-7 Schematic diagram of the three-levels cascaded navigation control strategy based on the desired yaw rate

在这种三级级联式导航控制策略中，可以将针对农机转向系统的干扰 F_{d2} 包含在转向控制回路 III 中，根据级联式控制系统的优点可知，转向控制回路 III 对进入其中的干扰 F_{d2} 具有及时的抑制作用，从而减小 F_{d2} 对农机位姿控制的影响；而将针对农机横摆角速度动力学特性的干扰 F_{d1} 包含在横摆角速度控制回路 II 中，在 F_{d1} 比较大或变化比较剧烈的情况下，横摆角速度控制回路 II 可以及时有效地抑制其对农机位姿控制的影响。通过这三级级联的控制回路的作用从而保证农机自动驾驶控制系统取得较好的控制性能。

2.4 农机自动驾驶控制实验平台介绍

2.4.1 基于 CAN 总线的农机导航系统的结构原理

基于 CAN 总线的农机自动驾驶系统由田间计算机、导航控制器、转向控制器、转向驱动器和各个传感器构成，其结构原理如图 2-8 所示。农机导航系统中的田间计算机、导航控制器和转向控制器的硬件电路自身都带有 CAN 接口，可以直接接入 CAN 总线；而各传感器自身均不带有 CAN 接口，所以本文设计了智能 CAN 节点将传感器和 CAN 总线进行互联，从而实现传感器信息通过 CAN 总线被系统内的其他节点所共享。基于 CAN 总线的农机导航系统可以将导航控制器、转向控制器、田间计算机和各个传感器连接成一个完整的 CAN 网络，从而实现了导航系统内各个设备之间可靠的实时通信，而且还增强了导航系统的可扩展性。

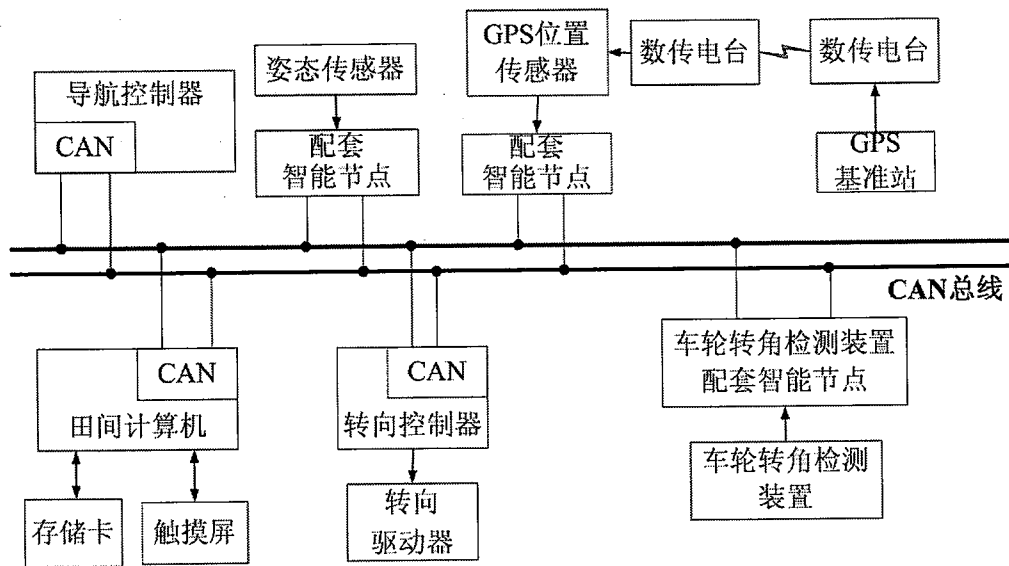


图 2-8 基于 CAN 总线的自动导航系统的结构原理

Fig.2-8 Schematic diagram of automatic navigation system based on CAN bus

农机自动导航系统中的田间计算机是农机自动导航系统的人机交互界面，其主要功能是控制参数配置、导航任务设定、作业路径规划和农机导航状态显示等；导航控制器是农机导航系统的核心，其主要功能包括接收田间计算机的路径规划信息，采集处理位姿和车轮转角传感器信息以及执行导航系统中最重要路径跟踪控制算法；转向控制器通过 CAN 总线接收来自导航控制器的期望转向角指令，执行转向控制算法，进而控制转向驱动器以实现农机转向系动作；转向驱动器是转向控制器与农机转向系的接口，实现转向控制信号到转向控制力的转换；智能 CAN 节点用于实现传感器与 CAN 总线的互连，并可以对传感器采集的原始信号进行预处理；各传感器单元用来获取农机的位置和姿态以及转向角信息。

2.4.2 导航系统与农机集成

基于 CAN 总线的农机导航系统中各个装置的具体物理实现如图 2-9 所示。农机自动导航系统中的定位传感器选择加拿大 NovAtel 公司的 RTK-GPS 接收机 NovAtel ProPak-V3-RT2，其借助于 GPS 基准站提供的实时差分信号，能够获取具有厘米级定位精度的农机实时位置信息；姿态传感器选用荷兰 Xsens 公司的基于 MEMS（微机电系统）技术的 MTi（Motion Track instrument）微型姿态方位参考系统，通过该传感器获取的航向角精度能够达到 0.1 度，可以满足农机导航系统的要求。

导航系统中的田间计算机和导航控制器都是基于带有浮点协处理器的 32 位 ARM 内核开发的嵌入式设备；智能 CAN 节点和转向控制器是基于 Cortex-M3 内核的单片机开发的嵌入式设备。

根据不同农机应用对象的安装需求，导航系统中农机转向轮的转角检测方式有两种，即基于编码器的检测方式和基于电子尺的检测方式。第一种方式需要将车轮的旋转运动与编码器的旋转运动之间采用连杆式的机械结构进行机械连接，从而实现转角检测；第二种方式通过电子尺（直线位移传感器）测量转向油缸中活塞的直线运动位移，从而推算出车轮转角。

导航系统的转向驱动器分为电控机械式转向驱动器和电控液压式转向驱动器：电控机械式转向驱动器采用“步进电机—减速齿轮”结构的装置实现，步进电机通过减速齿轮带动农机的转向柱转动，从而实现农机的转向轮转动。其中步进电机选用 Sanyo 两相混合式步进电机 103H8222-5241，减速齿轮由减速比为 10:1 的一对齿轮构成。电控液压式转向驱动器由三个电磁阀 SV10-34，一个三位四通的电子比例阀 SP08-47C，两个电流放大器，一个减压阀和一个集成阀座组成。其中电子比例阀实现车轮转向速度的控制，电磁阀用于手动转向/自动转向的工作方式切换，减压阀用于调节油路压力，电流放大器用于驱动电子比例阀。

本节将基于 CAN 总线的农机自动驾驶系统分别集成到拖拉机、插秧机和联合收割机等农机对象，作为本文所研究的农机导航控制方法的实验验证平台。

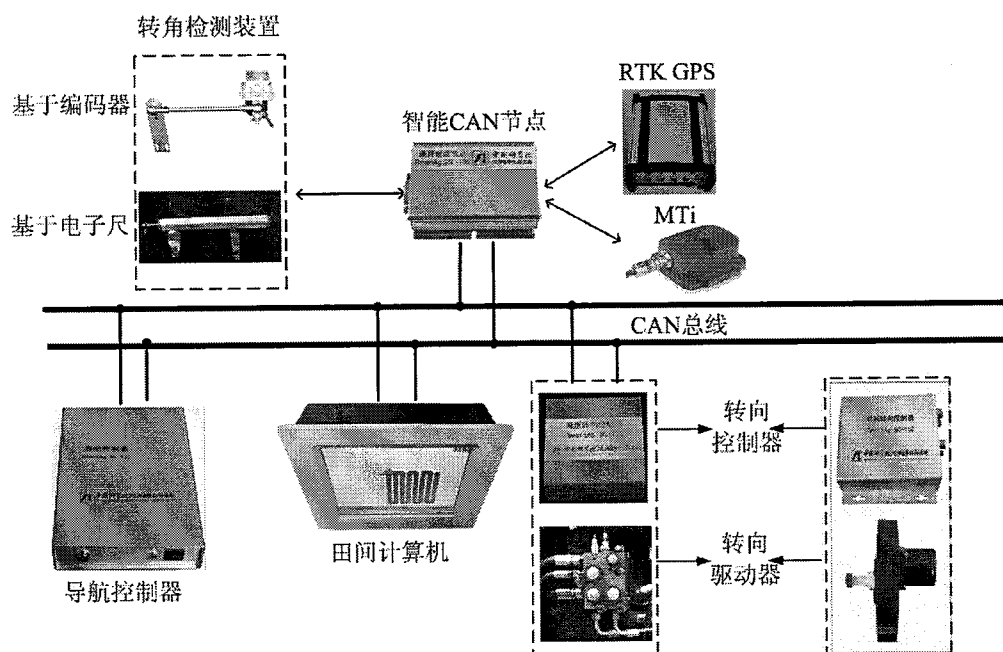


图 2-9 自动驾驶系统的物理实现

Fig.2-9 Physical realization of automatic navigation system

2.4.2.1 拖拉机自动驾驶系统

本文导航控制实验的拖拉机对象选择 80 马力，前轮转向、后轮驱动的拖拉机，其相关的物理参数如表 2-1 所示。

表 2-1 实验用拖拉机参数

Tab. 2-1 The tractor parameters used in the experiment

参数	值
质量	3115kg
轴距	2188mm
转弯半径	3800mm
前轴宽	1600mm
后轴宽	1730mm

拖拉机导航系统中各主要设备在拖拉机上的实物装机情况如图 2-10 所示。由于很容易对拖拉机转向油路进行改造，所以拖拉机导航控制实验系统中的转向控制采用电控液压式转向驱动器实现，即在拖拉机原转向油路上并联安装比例阀和电磁阀等电控液压设备。车轮转角采用基于编码器的转角检测装置进行测量，该装置通过其上架、底架和螺栓固定在拖拉机的前轴上。

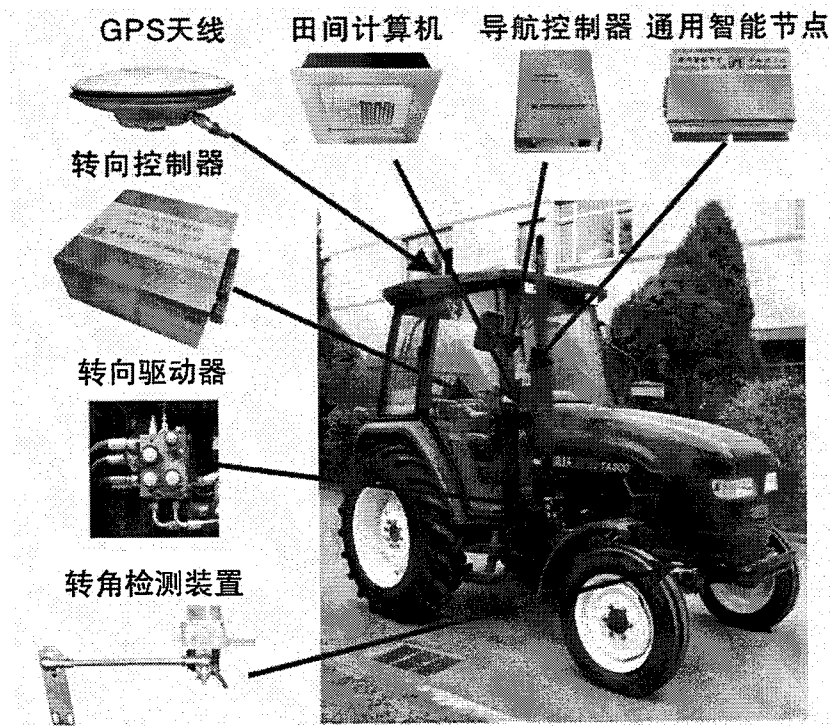


图 2-10 拖拉机自动导航系统

Fig.2-10 Automatic navigation system for the tractor

2.4.2.2 插秧机自动导航系统

本文导航控制实验的插秧机对象选择洋马 VP6 型四轮驱动的高速水稻插秧机，其主要物理参数如表 2-2 所示。

表 2-2 实验用插秧机参数

Tab. 2-2 The rice transplanter parameters used in the experiment

参数	值
质量	563kg
轴距	1100mm
前轴宽	1780mm
后轴宽	1780mm

插秧机导航系统中各个主要设备的实物装机情况,如图 2-11 所示。由于插秧机的转向系是采用机械方式进行传动的,不能像拖拉机那样对其转向系进行液压改造,所以插秧机导航控制实验系统中的转向控制通过电控机械式转向驱动器来实现。具体做法是,在转向柱的花键和方向盘之间,将电控机械式转向驱动器串联在插秧机的转向柱上。与拖拉机转向角的测量方式相同,插秧机的转向角也通过基于编码器的转向角检测装置进行实时测量。

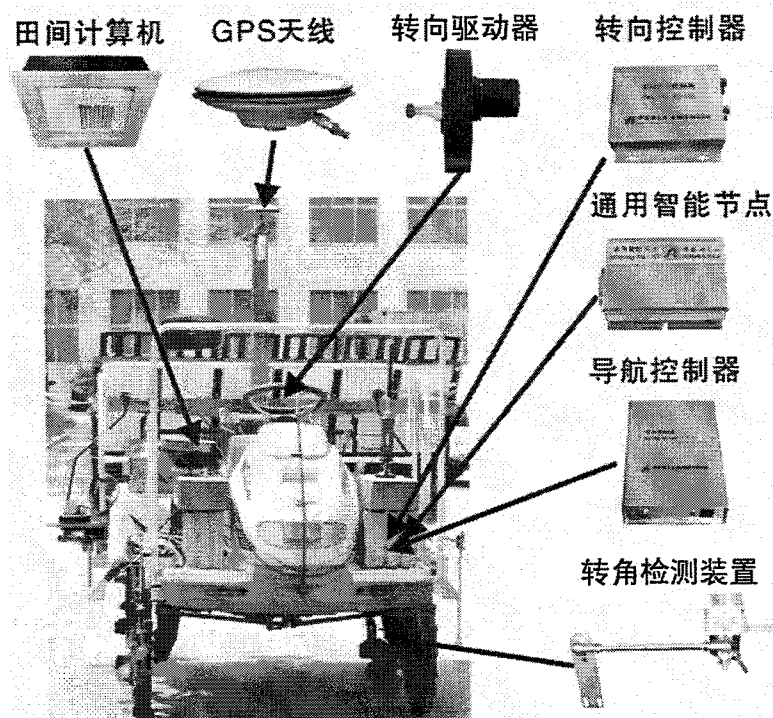


图 2-11 插秧机自动导航系统

Fig.2-11 Automatic navigation system for the rice transplanter

2.4.2.3 收割机自动导航系统

本文自动导航控制实验的收割机对象选择前轮驱动、后轮转向的无级变速稻麦联合收割机,其主要参数如表 2-3 所示。

表 2-3 联合收割机参数

Tab. 2-3 The combine's parameters

参数	值
质量	9910kg
轴距	3750mm
转弯半径	8000mm
前轴长度	2445mm
后轴长度	2230mm

收割机导航系统中主要设备的实物装机情况如图 2-12 所示。由于该机型引进国外先进的无级变速液压底盘，很难对其进行相应的液压转向改造，所以收割机导航系统中的转向控制通过电控机械式转向驱动器来实现，其安装方法同样是将转向驱动器串联在收割机的转向柱上。收割机的转向角通过基于电子尺的转角检测装置进行测量，其中的电子尺选用日本 Seiko 公司的 KTC-0350，其本质上是一个精密电位器，可以通过它测量农机转向油缸的直线运动位移，然后通过几何建模的方法间接计算出农机转向轮的偏转角度。

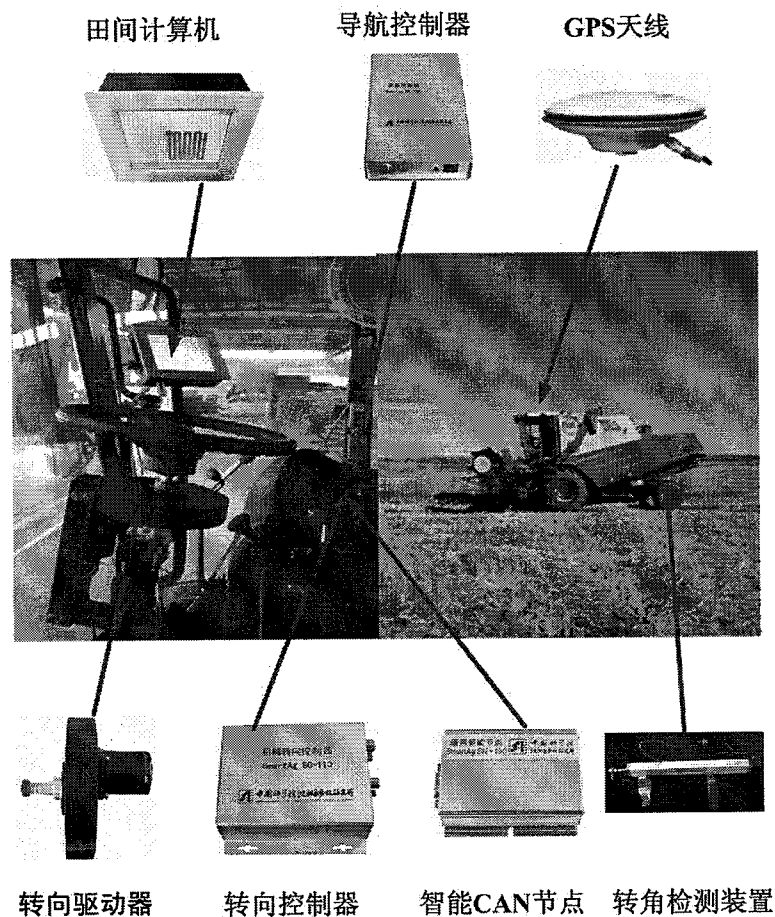


图 2-12 联合收割机自动导航系统

Fig.2-12 Automatic navigation system for the combine

2.5 本章小结

本章首先对农机自动导航控制问题进行了描述，并提出了农机自动导航控制效果的评价标准与方法；然后阐述了农机自动导航控制的级联式控制策略，即基于位姿偏差的二级级联式导航控制策略和基于期望横摆角速度的三级级联式导航控制策略，并详细地阐述了级联式控制策略中各个控制环节的控制任务与作用；最后本章还介绍了基于 CAN 总线的农机自动导航系统，阐述了基于 CAN 总线的农机导航系统的结构原理和物理实现，并将该导航系统分别集成到拖拉机、插秧机和联合收割机等农机对象上，并以此作为本文方法的实验验证平台。

第3章 农机转向控制研究

3.1 引言

转向控制是实现农机自动导航控制的关键技术之一和重要前提,在级联式农机导航控制结构中转向控制的上一级路径跟踪控制确定的期望转向角如果不能被快速、精确地执行,势必会影响农机自动导航控制的精度,甚至会引起农机自动导航控制系统的不稳定。为此,本章针对农机转向控制问题开展深入地研究。

农机自动转向控制的驱动系统主要采用两种方式来实现:其一为电控液压式,即在农机原有的转向液压系统上并联电控液压回路,进而直接地控制液压转向油路,实现转向轮的偏转;其二为电控机械式,即通过电机控制方向盘间接地改变农机转向轮的偏转角度,从而实现自动转向控制。

在系统不确定性因素和外部干扰的影响下,为了保证转向轮能快速而准确地跟踪期望的转向角指令,本章针对农机转向控制问题提出了一种基于非线性积分滑模面的自适应滑模控制方法。首先,分别研究了电控液压式和电控机械式驱动的农机转向系统的数学模型,将农机转向系统统一地建模成由一阶惯性和纯积分环节组成的二阶模型。然后,根据转向系统的执行能力和控制目标设计控制响应的暂态过程,在此基础上提出了一种非线性积分滑模面,进而设计出相应的滑模控制律,保证了系统快速而无超调的响应特性;同时本章采用模糊控制方法实时在线估计系统等效干扰的不确定界,实现了滑模切换增益的在线自适应调整,从而减弱了控制量的抖振现象。

3.2 转向系统模型

3.2.1 电控液压式转向系统模型

电控液压式农机转向系统的自动转向控制是通过改变控制器的输出电流 i 来控制电子比例阀流量 Q 的大小,进而改变转向油缸中活塞的运动速度,实现转向轮偏转角度 δ 的变化。

电控液压式农机转向系统的组成结构如图 3-1 所示。农机转向系主要由转向驱动油缸和转向连杆组成;转向驱动器主要由电流放大器和电子比例阀组成,由于电磁阀只是起到转向油路切换的作用,所以在农机转向驱动器框图中没有考虑电磁阀。

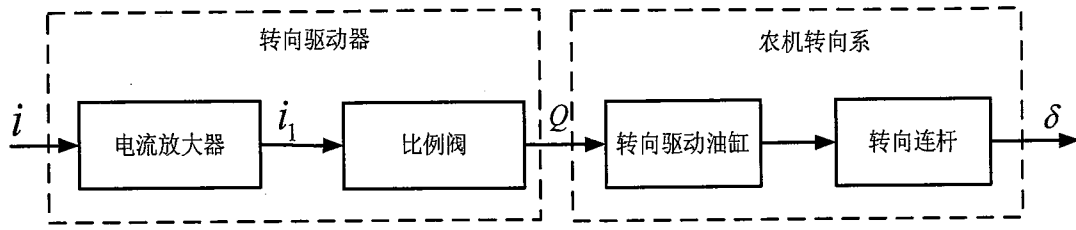


图 3-1 电控液压式农机转向系统

Fig. 3-1 Electronic controlled hydraulic steering system of agricultural machines

在农机自动转向过程中，控制电流的改变导致转向角变化率的改变，而转向角变化速率经过转向系的积分作用便得到车轮转角。本文将控制电流到转向角变化率这个环节建模成一阶惯性模型，将转向角变化率到转向角这个环节建模成纯积分环节^[64,66]。从而可以得到如下的转向系统传递函数模型。

$$\frac{\delta(s)}{u(s)} = \frac{k_g}{s(\tau s + 1)} \quad (3-1)$$

其中， $\delta(s)$ 为转向角；

$u(s)$ 为控制电流；

k_g 和 τ 为待确定的模型参数，通过辨识实验获得。

令 $x_1 = \delta$ ， $x_2 = \dot{\delta}$ ，则上述传递函数的一个标准实现如下所示。

状态方程：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{\tau}x_2 + \frac{k_g}{\tau}u \end{cases} \quad (3-2)$$

输出方程：

$$y = x_1 \quad (3-3)$$

由于转向系中存在间隙，滞后，死区等非线性不确定性及未建模动态和外部干扰（如轮胎与路面之间相互作用的不确定性），导致农机转向系统为一个不确定系统。本文将这些不确定因素看作为满足一定界的干扰 $d(x)$ ，则转向系统可以采用如下形式的状态方程描述。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -ax_2 + ku + d(x) \end{cases} \quad (3-4)$$

其中， $a = \frac{1}{\tau}$ ；

$$k = \frac{k_g}{\tau}。$$

当系统参数存在不确定性时，可以将系统的状态方程表示成如下形式。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -(a_0 + \Delta a)x_2 + (k_0 + \Delta k)u + d(x) \end{cases} \quad (3-5)$$

其中, k_0 , a_0 为系统的名义参数;

Δk , Δa 为系统的参数摄动。

进一步可以写成如下形式

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -a_0 x_2 + k_0 u + D(x) \end{cases} \quad (3-6)$$

其中, $D(x) = d(x) - \Delta a x_2 + \Delta k u$ 为农机转向系统所受的等效干扰, 假设其存在一个上界 Γ , 使 $|D(x)| \leq \Gamma$ 。

3.2.2 电控机械式转向系统模型

虽然电控液压式转向系统具有快速的响应能力和精确的执行能力, 但是并不是所有的农机 (例如插秧机、联合收割机等) 都适合进行相关的液压改造, 而且有的机型进行液压改造比较复杂、成本也比较高。

为了在不进行液压转向改造的农机上也能够实现农机的自动转向控制, 本文采用“步进电机—减速齿轮”结构的装置作为农机转向系的驱动装置, 并将其串联到农机的转向柱上, 从而实现农机转向轮的驱动控制。

转向驱动装置中的步进电机选用两相混合式步进电机, 其可以为转向机构在高速转动时提供足够大的扭矩。减速齿轮由减速比为 $i:1$ 的一对齿轮构成。其中, 主动轮 (小轮) 固定在步进电机转轴上; 从动轮 (大轮) 固定在原先用于安装方向盘的花键上, 从而与转向柱固定。步进电机通过减速齿轮带动农机的转向柱转动, 从而实现转向轮转动。

通过上述分析, 电控机械式转向系统由以下两个环节组成: “步进电机—减速齿轮”环节和农机自身的转向系环节, 其原理框图如图 3-2 所示。图中 f 为步进电机的控制量, n_1 为步进电机的转速 (rad/s), n_2 为农机转向柱的转速 (rad/s), δ 为农机转向轮的偏转角度。

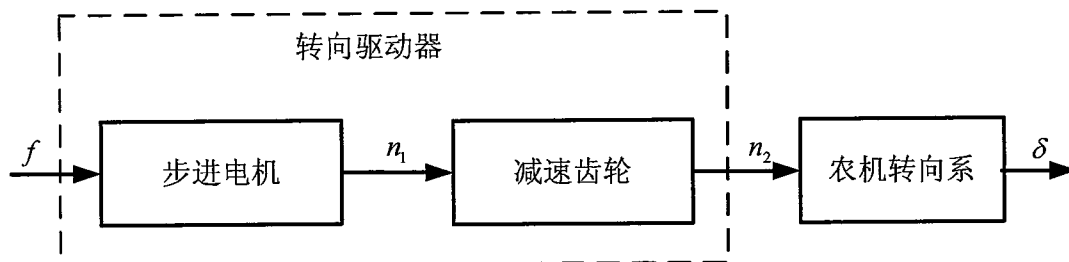


图 3-2 电控机械式农机转向系统

Fig. 3-2 Electronic controlled mechanical steering system of agricultural machines

根据文献[65]报道, 轮式农机的转向机构 (系) 可看成一阶惯性环节与纯积

分环节的组合，即

$$\frac{\delta(s)}{n_2(s)} = \frac{k_m}{s(\tau_m s + 1)} \quad (3-7)$$

其中， k_m 为农机转向系的增益；

τ_m 为农机转向系的时间常数。

上述模型中的参数 τ_m 可以通过辨识实验测定。而 k_m 可以通过农机方向盘到转向角的角度传动比求得，如果角度传动比为 $m:1$ ，则

$$k_m = \frac{1}{m} \quad (3-8)$$

其中， m 可以通过实验测定获取。

转向系统中转向驱动器的模型（即从控制输入 f 到转向柱的转速 n_2 的传递函数）由 f 到 n_1 的传递函数和 n_1 到 n_2 的传递函数的串联组合构成。

根据步进电机理论，可以求得 f 到 n_1 的传递函数为

$$\frac{n_1(s)}{f(s)} = \frac{\theta_s}{\chi} \quad (3-9)$$

其中， θ_s 为步进电机的步距角；

χ 为步进电机驱动器的细分数。

如果转向驱动器中的减速齿轮的减速比为 $i:1$ （根据本文所选的减速齿轮可知 $i=10$ ），则 n_1 到 n_2 的传递函数为

$$\frac{n_2(s)}{n_1(s)} = \frac{1}{i} \quad (3-10)$$

至此可以求取电控机械式转向系统的模型为

$$\frac{\delta(s)}{f(s)} = \frac{n_1(s)}{f(s)} \cdot \frac{n_2(s)}{n_1(s)} \cdot \frac{\delta(s)}{n_2(s)} = \frac{\frac{k_m \theta_s}{i \chi}}{s(\tau_m s + 1)} \quad (3-11)$$

令

$$\frac{k_m \theta_s}{i \chi} = k_a$$

则

$$\frac{\delta(s)}{f(s)} = \frac{k_a}{s(\tau_m s + 1)} \quad (3-12)$$

同样根据现代控制理论可以将上述模型实现成如式 (3-6) 的状态方程形式。

至此，可以发现无论是电控液压式转向系统还是电控机械式转向系统都可以归一地采用统一结构的二阶状态方程（如式 (3-6)）来描述。这样从理论上保证了基于数学模型设计的转向控制器在结构上的一致性，即针对一种驱动方

式的转向系统设计的转向控制方法只要进行相应的参数修改同样也适用于另外一种驱动方式的转向系统。

3.3 基于非线性积分滑模面的自适应滑模控制方法

假设路径跟踪控制器已经决策出期望的转向角指令,即存在一个分段连续的期望转向角指令 δ_d ,在本文的研究范围内,其为分段常值指令,即 $\dot{\delta}_d=0$ 。那么本文的转向控制目的是:在系统存在不确定等效干扰 $D(x)$ 时,寻找一个控制律 $u=f(\bullet)$,使系统的输出快而无超调地跟踪 δ_d 。

本文在滑模控制的理论框架内来求解农机的转向控制问题。一般来说,滑模控制的设计过程分为两步^[120, 121]:第一步,设计一个滑模面,以保证系统在滑模面上的运动轨迹满足期望的性能;第二步,推导出不连续的控制律,以保证系统的轨迹在有限的时间内到达滑模面并保持在上面。

因此,本文关于自适应滑模转向控制方法的理论推导也遵循这个过程。首先研究并设计满足本文控制性能要求的非线性积分滑模面,然后基于设计的滑模面推导出相应的自适应滑模控制律,最后采用模糊控制方法在线自适应地调节滑模控制律中的切换增益。

3.3.1 非线性积分滑模面

本文转向控制的目标是保证转向系统在受到等效干扰时也能够使转向轮快速而无超调地跟踪期望的转向角变化。众所周知,在大多数的控制方案中,控制系统快速的响应性能必须以较大的超调量为代价,即系统的快速性与超调量之间存在矛盾。为了解决这个问题,本文研究并设计了一种非线性积分滑模面,该滑模面不仅具有积分滑模面的优点,而且还可以使转向控制系统在滑模运动的初始阶段具有相对较小的阻尼比,从而加快系统的响应速度;随着输出接近期望设定值而逐渐增大系统的阻尼比,从而保证转向控制系统的稳定性,并使转向控制系统的输出响应不产生超调。

由于转向控制系统的期望转向角为每个路径跟踪控制周期内的常值,所以为了避免转向控制系统设定值的跳跃,本文安排一个合适的暂态过程,将常值期望转向角转化为一个期望的转向角跟踪轨迹。这样做的好处是:可以避免大的初始控制误差所导致的较大的控制力对转向执行系统造成冲击,并且控制器参数的适应范围变广。在设计暂态过程时应满足以下两点要求:

- (1) 满足转向执行系统的执行能力;
- (2) 在暂态过程时间内平滑地到达期望转向角设定值。

基于上述两点要求,本文设计的期望暂态过程如下式(3-13)所示。

$$h(T, t) = \begin{cases} \frac{\delta_d - \delta_p}{2} (1 + \sin(\pi(\frac{t}{T} - \frac{1}{2}))) + \delta_p & t \leq T \\ \delta_d & t > T \end{cases} \quad (3-13)$$

其中, δ_d 为当前路径跟踪控制周期内的期望转向角;

δ_p 为前一个路径跟踪控制周期内的期望转向角;

T 为暂态过程时间。

继而, 可以求取该暂态过程的一阶微分表达式如下:

$$\frac{d^{(1)} h(T, t)}{dt} = \begin{cases} \frac{(\delta_d - \delta_p)\pi}{2T} \cos(\pi(\frac{t}{T} - \frac{1}{2})) & t \leq T \\ 0 & t > T \end{cases} \quad (3-14)$$

同理, 可以求得其更高阶的微分表达式。现定义

$$d^{(i)} h := \frac{d^{(i)} h(T, t)}{dt} \quad (3-15)$$

其中, i (本文 $i=1, 2$) 表示微分的阶次。

至此, 本文提出如下形式的非线性积分滑模面。

$$\begin{aligned} s &= c_1 \int_0^t (x_1 - h(T, t)) dt + (c_2 - g)(x_1 - h(T, t)) + (x_2 - d^{(1)} h) \\ &= c_1 \int_0^t e_1 dt + (c_2 - g)e_1 + e_2 \end{aligned} \quad (3-16)$$

其中, c_1 和 c_2 为大于零的数, 且

$$g = \frac{\lambda}{e^{-1} - 1} (e^{\frac{(\delta_d - \delta_p)^2}{\delta_d - \delta_p} - 1} - e^{-1}) \quad (3-17)$$

其中, λ 为大于零的可调参数, $g \in [-\lambda, 0]$ 。

定理 3-1: 在滑模控制中采用非线性积分滑模面 (3-16), 可以保证闭环系统在滑模运动阶段稳定, 且具有可变的阻尼特性, 即 $\zeta = (c_2 - g)/2\sqrt{c_1}$, 从而使闭环系统在滑模运动阶段的阻尼随着输出趋近稳态值而增大。

证明:

根据非线性积分滑模面 (3-16) 和转向系统模型 (3-6), 可以得到系统在滑模运动阶段的误差模型如下:

$$\ddot{e}_1 + (c_2 - g)\dot{e}_1 + c_1 e_1 = 0 \quad (3-18)$$

则误差系统的特征方程为

$$s^2 + (c_2 - g)s + c_1 = 0 \quad (3-19)$$

由于 $c_1 > 0$, $c_2 > 0$ 且 $g \leq 0$, 所以该特征方程的各项系数为正。根据赫尔维茨 (Hurwitz) 稳定判据可知该系统滑模运动稳定。

根据上述特征方程 (3-19), 可以求出系统在滑模运动阶段的阻尼表达式如下:

$$\zeta = \frac{c_2 - g}{2\sqrt{c_1}} \quad (3-20)$$

由于 g 为系统输出的单调递减函数, 所以很容易根据式 (3-20) 推得: ζ 随着系统输出接近稳态值而逐渐增大。

证毕。

根据定理 3-1, 使用非线性积分滑模面 (3-16) 不但可以保证系统滑模运动稳定, 而且可以得到可变的系统阻尼 $\zeta \in [\zeta_{\min}, \zeta_{\max}]$ 。其好处是: 使闭环系统在输出响应的初始阶段具有较小的阻尼, 从而加快系统的响应速度; 而在系统输出接近稳态值阶段具有较大的阻尼, 避免产生系统输出响应超调, 保证闭环系统的稳定性。

根据非线性函数 g 的取值范围, 可以求得

$$\zeta_{\min} = \frac{c_2}{2\sqrt{c_1}} \quad (3-21)$$

$$\zeta_{\max} = \frac{c_2 + \lambda}{2\sqrt{c_1}} \quad (3-22)$$

根据期望的闭环极点变化区域或者闭环系统期望的阻尼变化范围, 并结合式 (3-21) 和式 (3-22), 便可以确定非线性积分滑模面 (3-16) 中的参数 c_1 , c_2 和 λ 的值。

3.3.2 基于非线性积分滑模面的滑模控制律

根据非线性积分滑模面 (3-16), 可得

$$\begin{aligned} \dot{s} &= c_1 \dot{e}_1 + (c_2 - g)\dot{e}_1 - \dot{g}e_1 + \dot{e}_2 \\ &= c_1 \dot{e}_1 + (c_2 - g)\dot{e}_1 - \dot{g}e_1 - a_0 x_2 + k_0 u + D(x) - d^{(2)}h \end{aligned} \quad (3-23)$$

令

$$\dot{s} = -\eta \operatorname{sgn}(s) \quad (3-24)$$

其中, $\eta > 0$ 。

假设 $D(x) = 0$, 并结合式 (3-23) 和式 (3-24), 可将滑模控制律设计为

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{k_0} (-c_1 e_1 + (g - c_2) \dot{e}_1 + \dot{g} e_1 + a_0 x_2 + d^{(2)} h - \eta \operatorname{sgn}(s)) \\ &= \frac{1}{k_0} (-c_1 (x_1 - h(T, t)) + (g - c_2) (x_2 - d^{(1)} h) + \dot{g} (x_1 - h(T, t)) + a_0 x_2 + d^{(2)} h - \eta \operatorname{sgn}(s)) \\ &= \frac{1}{k_0} ((\dot{g} - c_1) (x_1 - h(T, t)) + (g - c_2) (x_2 - d^{(1)} h) + a_0 x_2 + d^{(2)} h - \eta \operatorname{sgn}(s)) \end{aligned} \quad (3-25)$$

定理 3-2: 如果滑模控制律 (3-25) 中的切换项增益 $\eta \geq \Gamma$, 则闭环系统的运动轨迹能从任意初始位置在有限时间内到达非线性积分滑模面 (3-16), 并保持在滑模面上。

证明:

取闭环系统的 Lyapunov 函数如下

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (3-26)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s \dot{s} \\ &= s(c_1 e_1 + (c_2 - g) \dot{e}_1 - \dot{g} e_1 + \dot{e}_2) \\ &= s(c_1 e_1 + (c_2 - g) \dot{e}_1 - \dot{g} e_1 - a_0 x_2 + k_0 u + D(x) - d^{(2)} h) \\ &= s(-\eta \operatorname{sgn}(s) + D(x)) \\ &= -\eta |s| + s D(x) \end{aligned} \quad (3-27)$$

由于

$$|D(x)| \leq \Gamma$$

所以只要 η 满足如下条件

$$\eta \geq \Gamma \quad (3-28)$$

便可以得到

$$\dot{V} \leq 0 \quad (3-29)$$

至此, 根据滑模控制理论可知^[122], 系统满足滑模到达条件并且可以保证在有限时间内闭环系统轨迹从任何初始位置到达滑模面并保持在滑模面上。

证毕。

3.3.3 基于模糊控制的切换增益自适应调整

在 3.2 节的转向系统模型研究中, 本文假设等效干扰 $D(x)$ 存在一个上界 Γ 。但是由于实际系统的不确定性与很多因素和变量有关系, 所以很难确定系统不确定界 Γ 。纵使可以选择一个保守的不确定界, 那么将会使系统进行不必要的高增益切换, 进而导致系统控制量的抖振加剧。

为了放宽定理 3-2 中的条件 ($\eta \geq \Gamma$), 使系统既满足滑模到达条件又不至于过于保守, 本文采用模糊控制的方法在线实时调整 η , 在保证滑模到达条件满足的情况下, 尽量减小 η , 以减弱系统控制量的抖振。

由于滑模控制的切换项增益 η 的作用是用来保证滑模到达条件满足, 所以可以根据滑模到达条件采用模糊控制系统来确定 η 的变化 $\Delta\eta$ 。

本文选择模糊控制的输入为滑模到达条件 $s\dot{s}$, 输出为切换增益的变化量 $\Delta\eta$ 。模糊系统输入、输出量的词集选为 {NB, NM, ZO, PM, PB}; 其论域选为 {-2, -1, 0, 1, 2}; 模糊系统输入、输出量的隶属度函数选择正态函数, 即

$$\mu_{A_i}(x) = e^{-\frac{(x-x_i)^2}{\sigma_{A_i}^2}} \quad (3-30)$$

其中, $\mu_{A_i}(x)$ 为模糊子集 A_i 的隶属度函数;

x_i 为 A_i 论域的中心值;

σ_{A_i} 为调节隶属度函数形状的参数。

本文设计模糊控制规则的经验为: 当 $s\dot{s}$ 为负时, 减小 η , 使系统不过于保守; 当 $s\dot{s}$ 为零时, 保持 η 不变; 当 $s\dot{s}$ 为正时, 加大 η , 使系统满足滑模到达条件。

根据上述经验可以得到表 3-1 所示的模糊控制规则。

表 3-1 模糊控制规则

Table 3-1 Fuzzy control rules

$s\dot{s}$	NB	NM	ZO	PM	PB
$\Delta\eta$	NB	NM	ZO	PM	PB

采用 Mamdani 方法进行模糊推理和重心法进行清晰化, 可以求出切换增益的变化 $\Delta\eta$ 为

$$\Delta\eta = \frac{\sum_{i=1}^5 z_i \mu_{\Delta\eta}(z_i)}{\sum_{i=1}^5 \mu_{\Delta\eta}(z_i)} \quad (3-31)$$

其中, $\mu_{\Delta\eta}(z_i)$ 为通过模糊推理计算出的隶属度函数;

z_i 为输出量论域的离散值。

至此, 可以通过式 (3-32) 在线实时调整切换增益 η 。

$$\dot{\eta} = k_u \Delta\eta \quad (3-32)$$

其中, k_u 为模糊系统的比例因子。

k_u 的变化将会调节模糊控制输出幅值的大小。在实际应用中根据经验采用试凑法来选择 k_u 的取值。

3.4 仿真验证

选择模型 (3-6) 中的 $k_0=555.56$, 时间常数 $a_0=11.11$ 。仿真实验中, 设定系统的暂态过程时间 $T=0.3s$; 选择系统干扰 $D(x)$ 为高斯函数形式, 即

$D(x) = \Gamma e^{-\frac{(x-\mu_d)^2}{2\sigma_d^2}}$, 其中 $\mu_d=5$, $\sigma_d=0.5$, $\Gamma=20$; 选择模糊控制的量化因子为 $k_e=4$, 比例因子为 $k_u=600$; 选择非线性积分滑模面的参数 $c_1=64$, $c_2=8$, $\lambda=24$ 。根据式 (3-21) 可知, 最小阻尼 $\zeta_{\min}=0.5$, 根据式 (3-22) 可知, 最大阻尼 $\zeta_{\max}=2$ 。

选择转向控制系统的阶跃输入 δ_d 为 0.1rad , 分别采用传统的滑模控制方法和本文提出的方法进行转向控制器设计。在仿真实验中所使用的传统滑模控制律为 $u = \frac{1}{k_0}(-c_1(\delta - \delta_d) - c_2\dot{\delta} + a_0\dot{\delta} - \eta_1 \text{sgn}(s_1))$ 。在这个滑模控制律中, δ 为当前农机转向轮的实际转向角, $\dot{\delta}$ 为转向角变化率; 选择传统的滑模面为 $s_1 = c_1 \int_0^t (\delta - \delta_d) dt + c_2(\delta - \delta_d) + \dot{\delta}$; 选择传统滑模控制律的切换增益为 $\eta_1 \geq \Gamma$ 。

本文研究的基于非线性积分滑模面的自适应滑模控制律如式 (3-25) 所示, 在所提出的滑模控制律中, 滑模切换增益 η 通过使用模糊控制方法在线自适应地调节以减弱滑模控制量抖振现象。

在仿真实验中, 首先使用传统滑模控制方法控制转向系统, 可以得到系统的阶跃响应曲线如图 3-3 所示。为了加快系统的响应速度, 保证转向控制系统的输出在 $0.3s$ 时到达参考输入值, 需要通过传统滑模控制律将系统的阻尼设定为 0.5 。然而众所周知, 在诸如传统滑模控制等大多数的控制框架内, 快速的系

统响应特性是以大的输出超调为代价的，因此正如图 3-3 所示，采用传统的滑模控制方法会使系统的输出产生很大的超调。

如果采用本文提出的方法，不但可以保证系统的输出在 0.3s 时到达参考输入值，而且系统输出并没有产生超调，如图 3-4 所示。这是因为本文提出的非线性积分滑模面具有单调递增的阻尼特性，正是这个特性一方面保证了闭环转向系统在滑模运动的初始阶段具有较小的阻尼，从而加快系统的响应速度；另一方面在系统的输出接近设定值的过程中保证闭环系统具有相对较大的阻尼，从而避免系统输出响应产生超调并增加系统的稳定性。

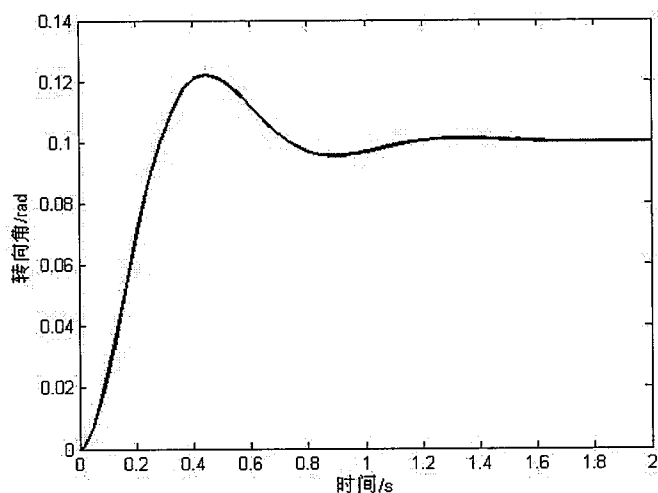


图 3-3 基于传统滑模控制方法的农机转向系统阶跃响应曲线

Fig.3-3 The step response curve of agricultural machinery steering system based on traditional sliding mode control method

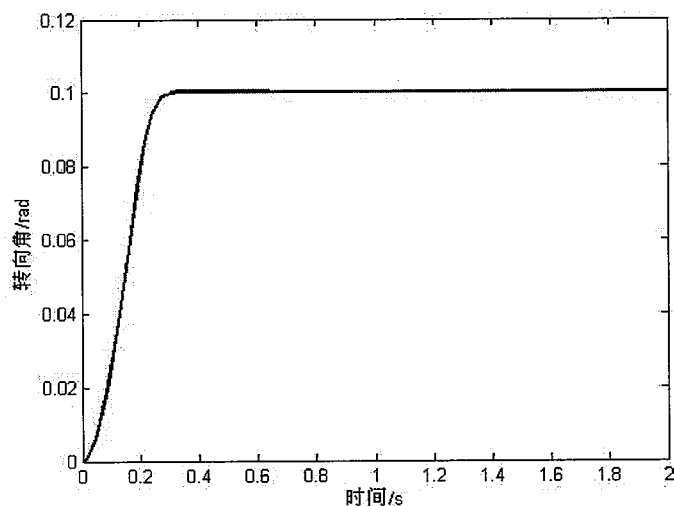


图 3-4 基于本文方法的阶跃响应曲线

Fig.3-4 The step response curve of the proposed method in the paper

此外，当系统受到干扰 $D(x)$ 的影响时，采用模糊系统能够很好的估计出干扰的界，如图 3-5 所示。根据估计的结果，当估计的扰动较大时，实时增大切换增益的取值；当估计的扰动较小时，实时减小切换增益的取值。因此本文提出的方法能在线自适应地调节滑模控制的切换增益以减弱滑模控制量的抖振现象以及滑模控制量的幅值，如图 3-6 所示。

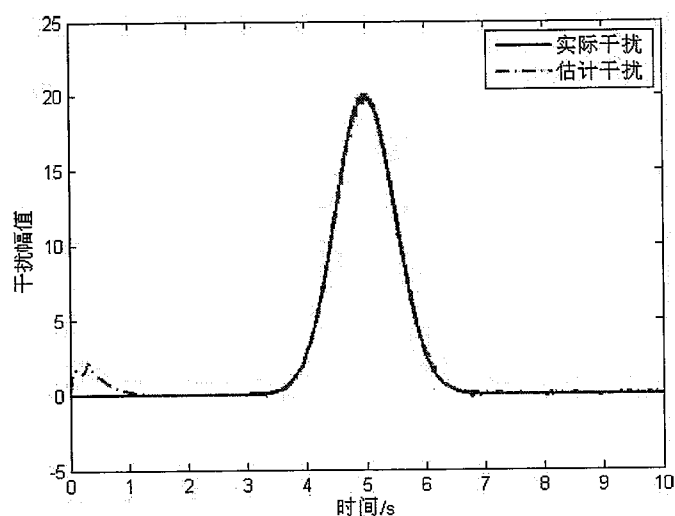


图 3-5 基于模糊控制的干扰估计

Fig.3-5 The disturbance estimation based on fuzzy control

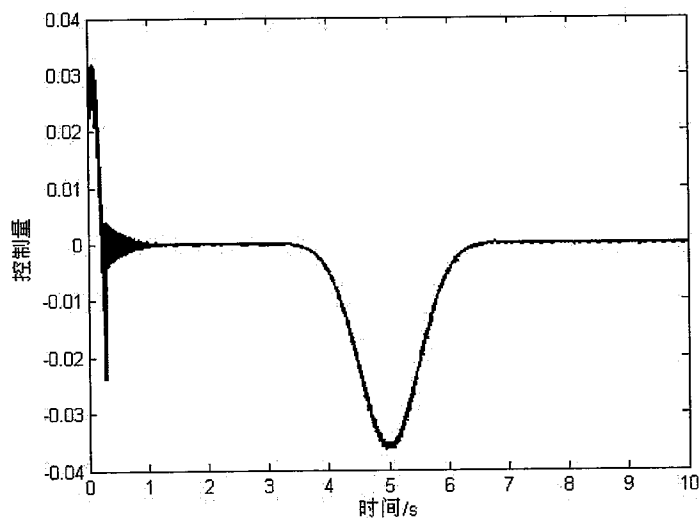


图 3-6 本文方法的控制输入

Fig.3-6 The control input of the proposed method in the paper

如果采用传统的滑模控制方法控制转向系统，必须选择一个充分大的且固定的切换增益值来保证控制系统的稳定性，然而这将导致求取的控制量太大而且控制量的抖振现象也会很严重，如图 3-7 所示。

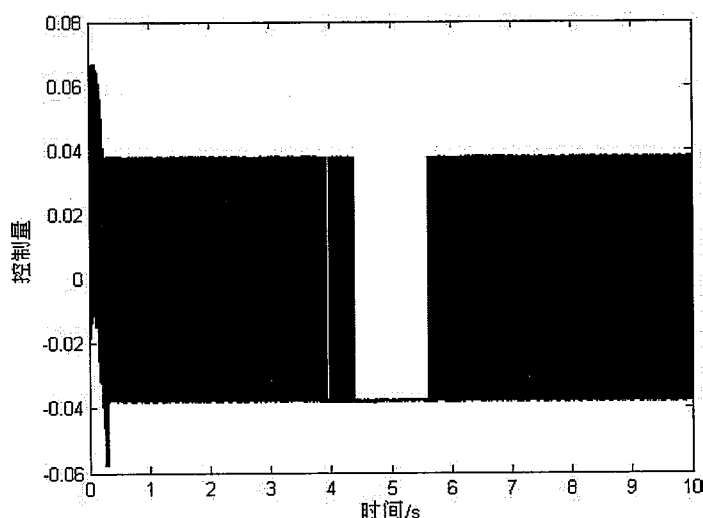


图 3-7 传统滑模控制的控制输入

Fig.3-7 The control input of traditional sliding mode control

通过仿真实验可以得出如下结论：本文方法较之一般的滑模控制方法具有很好的自适应阻尼特性，可以减小系统的调节时间而不增加系统的超调量，并且可以减弱控制量的抖振现象。

3.5 转向控制实验

在上节中已经对所提出的基于非线性积分滑模面的农机转向自适应滑模控制方法进行了仿真验证，为了进一步验证本文方法的有效性及其优越性，本节进行了实际的基于拖拉机的电控液压转向控制实验和基于插秧机的电控机械转向控制实验。本节的电控液压转向控制实验在 2.4 节介绍的拖拉机自动导航控制平台上进行；电控机械转向控制实验在 2.4 节介绍的插秧机自动导航控制平台上进行。

3.5.1 电控液压转向控制实验

采用数学模型的时域测定法^[123]，可以很容易地辨识出拖拉机转向系的模型参数，即模型 (3-1) 的稳态增益 $k_g=50$ ，时间常数 $\tau=0.09$ 。其余参数选择与仿真实验一样。在裸土路面上分别采用本文方法和目前广泛使用的 PID 方法进行农机转向控制实验。由于传统滑模控制方法确定的控制量具有很严重的抖振现象，所以为了避免抖振造成转向执行器的损坏，本文在方法的对比实验中并没有使用传统的滑模控制方法，而是采用普遍使用的 PID 方法。

在实验中，拖拉机速度为 0.8m/s 和 1.5m/s 时，本文方法的控制响应分别如图 3-8 和图 3-9 所示。从图中可以看出，本文方法能够很快地跟踪到系统的期望

输入，而不发生超调。实验数据统计结果表明，本文方法的转向角控制误差的平均值小于 0.26° ，标准差小于 0.45° ，最大误差小于 1.02° ，而且此结论在其他行驶速度（小于等于 3m/s ）时也同样成立。

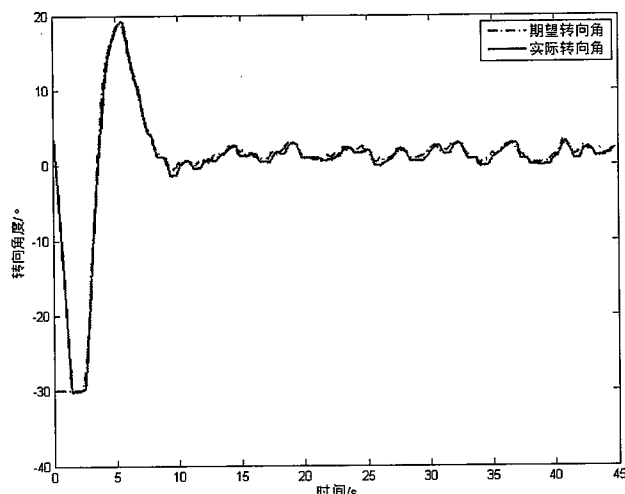


图 3-8 行驶速度为 0.8m/s 时本文方法的转向控制响应曲线

Fig. 3-8 Steering control response curves based on the proposed method at 0.8m/s

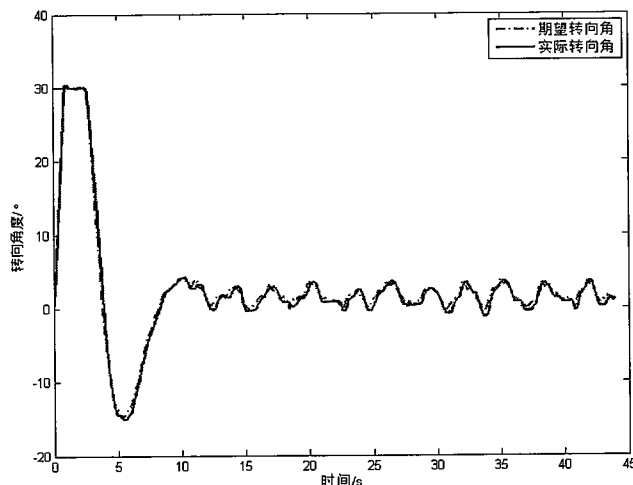


图 3-9 行驶速度为 1.5m/s 时本文方法的转向控制响应曲线

Fig. 3-9 Steering control response curves based on the proposed method at 1.5m/s

图 3-10 和图 3-11 为采用 PID 方法的转向控制系统响应曲线，从图 3-10 可以明显的看出控制系统不能很快地跟踪期望输入，存在一定延迟时间。通过调节 PID 参数，减小系统的阻尼比，从而可以使系统响应速度加快，但这会增加系统输出的超调量，甚至会使系统不稳定，如图 3-11 所示。众所周知，在调节 PID 参数时，要在系统的响应时间和超调量之间折中考虑，而不可以单纯地追求系统的响应速度。从实验数据统计结果来看，基于 PID 方法进行转向控制的各项控制误差统计指标都要大于本文方法的统计值。因此，通过实际的拖拉机

电控液压转向控制实验验证了本文方法的有效性和优越性。

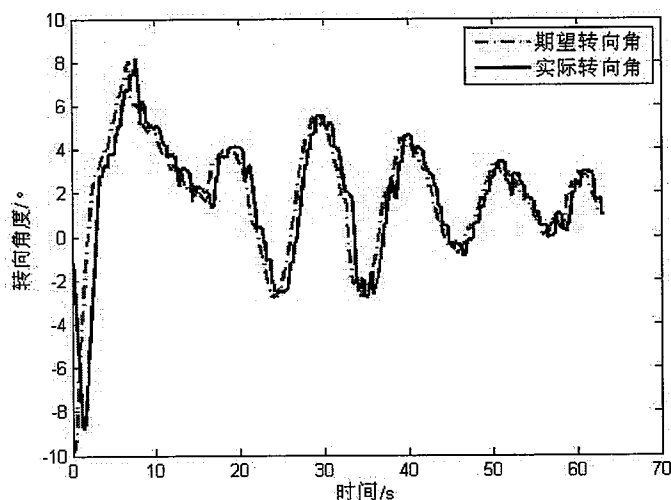


图 3-10 基于 PID 方法的拖拉机转向控制响应曲线

Fig. 3-10 Steering control response curves of the tractor based on PID method

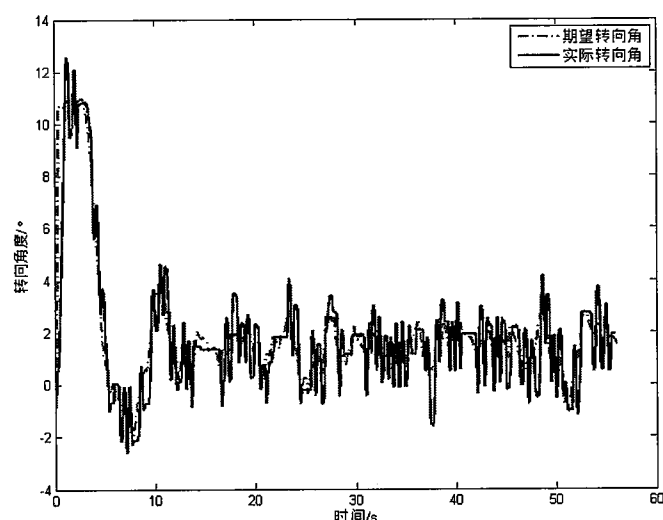


图 3-11 加快响应速度时的基于 PID 方法的拖拉机转向控制响应曲线

Fig. 3-11 Steering control response curves of the tractor based on PID method with fast response speed

3.5.2 电控机械转向控制实验

本节的电控机械转向控制实验在 2.4 节介绍的插秧机自动导航控制平台上进行。转向驱动器中步进电机的步距角 θ_s 为 1.8° ，步进电机驱动器的细分数 χ 为 32；减速齿轮的减速比 ($i:1$) 为 10:1。插秧机方向盘到转向角的角度传动比 ($m:1$) 为 8:1。通过式 (3-8) 和式 (3-11) 可以求出模型 (3-12) 中的转向系统增益 k_a 为 0.0007。同样通过实验辨识可以求取转向机构的时间常数 τ_m 为 0.15s。

在裸土路面上分别采用本文方法和 PID 方法进行插秧机转向控制实验。插秧机速度为 0.6m/s 和 1.2m/s 时, 本文方法的控制响应分别如图 3-12 和图 3-13 所示。从图中可以看出, 本文方法能够保证插秧机的转向轮快速地跟踪到转向系统的输入指令而不发生超调。实验数据统计结果表明, 本文方法的转向角控制误差的平均值小于 0.36° , 标准差小于 0.78° , 最大误差小于 2.05° , 而且此结论在插秧机的其他行驶速度 (小于等于 1.5m/s) 时也同样成立。

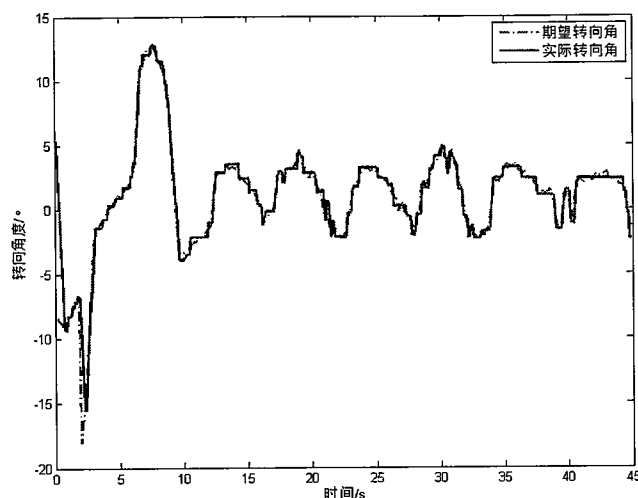


图 3-12 行驶速度为 0.6m/s 时本文方法的转向控制响应曲线

Fig. 3-12 Steering control curve based on the proposed method at speed of 0.6m/s

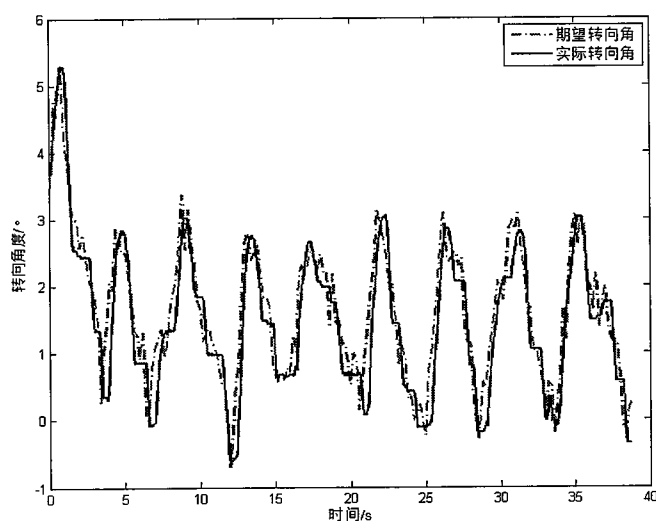


图 3-13 行驶速度为 1.2m/s 时本文方法的转向控制响应曲线

Fig. 3-13 Steering control curve based on the proposed method at speed of 1.2m/s

由于电控机械式农机转向系统的执行能力要弱于电控液压式农机转向系统, 所以电控机械转向控制实验的各项误差统计指标要大于电控液压转向控制实验的误差统计指标。

图 3-14 和图 3-15 为采用 PID 方法的系统响应曲线,从图 3-14 可以明显的看出控制系统不能快速地跟踪期望输入,存在一定的延迟时间。通过调节 PID 参数,减小系统的阻尼比,从而可以使系统响应速度加快,但会增加系统输出的超调量,甚至会使闭环转向系统不稳定,如图 3-15 所示。从实验数据的统计结果来看,采用 PID 方法时各项控制误差统计指标都要大于本文方法的统计值。因此通过实际的插秧机电控机械转向控制实验可以验证本文方法的有效性和优越性。

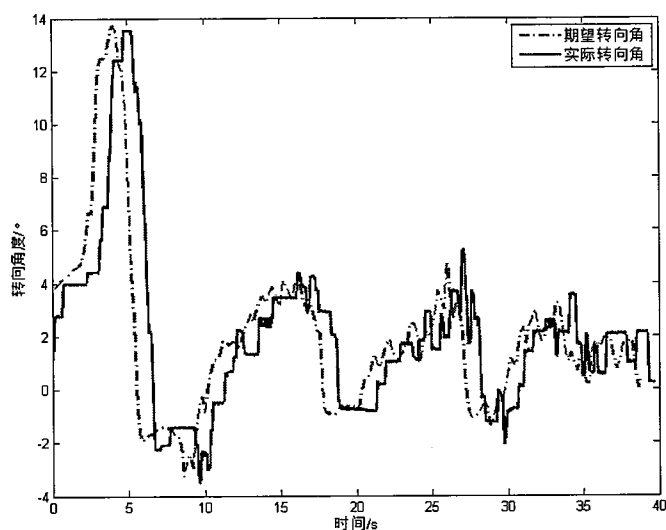


图 3-14 基于 PID 的插秧机转向控制响应曲线

Fig. 3-14 Steering control response curve of the rice transplanter based on PID

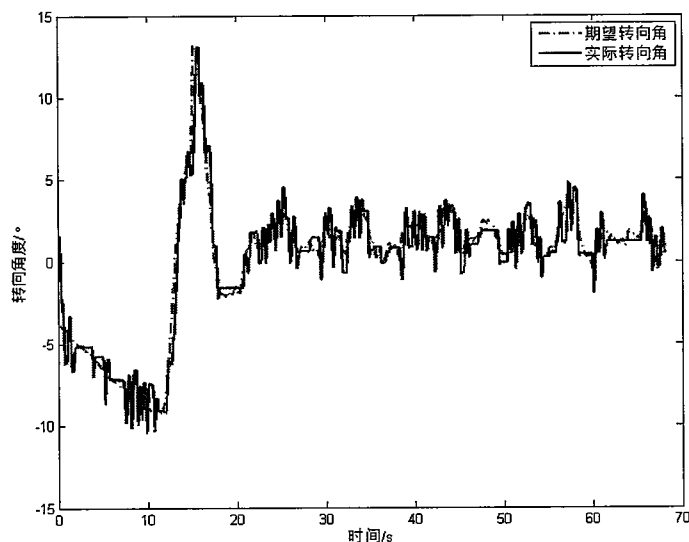


图 3-15 加快响应速度时的基于 PID 的转向控制响应曲线

Fig. 3-15 Steering control response curve based on PID with fast response speed

3.6 本章小结

本章提出一种基于非线性积分滑模面的农机转向自适应滑模控制方法，该方法可以使农机转向系统既快又无超调地跟踪期望的转向角指令。

首先，本章将电控机械式驱动和电控液压式驱动的农机转向系统统一地建模成由一阶惯性环节与纯积分环节组成的二阶动态系统，并将转向控制系统中的不确定性因素及其所受的外部干扰统一地看成系统的等效干扰。

其次，根据转向系统的执行能力和控制目标设计期望转向角的暂态过程，并根据该暂态过程定义转向控制的跟踪误差及其导数；基于定义好的误差及其导数，进而研究并提出了一种非线性积分滑模面，其不但具有普通积分滑模面的优点，而且还可以使闭环系统的滑模运动具有递增的阻尼特性，正是这个特性保证了闭环转向控制系统在滑模运动的初始阶段具有较小的阻尼，加快系统响应速度；而在输出接近稳态值阶段具有较大的阻尼，保证系统的稳定性并避免系统输出产生较大的超调量。另外，本章采用模糊控制方法实时、自适应地调整滑模控制切换项的增益，在保证滑模到达条件满足的情况下，尽量减小切换增益，以减弱控制量的抖振。

最后，通过仿真实验和实际农机的转向控制实验验证了本章方法的有效性和优越性。仿真实验说明了本章方法较之一般的滑模控制方法具有很好的自适应阻尼特性，可以减小系统的调节时间而不增加系统的超调量。实际转向控制实验验证了本章方法比常用的 PID 方法具有更好的控制效果。转向控制实验的数据分析结果显示：采用本章方法进行电控液压式转向系统自动转向控制时，转向角控制误差的平均值小于 0.26° ，标准差小于 0.45° ，最大误差小于 1.02° ；采用本章方法进行电控机械式转向系统自动转向控制时，转向角控制误差的平均值小于 0.36° ，标准差小于 0.78° ，最大误差小于 2.05° 。

第4章 基于位姿偏差的路径跟踪控制研究

4.1 引言

本章研究了基于位姿偏差的二级级联式导航控制结构中的路径跟踪控制方法,并提出了最优PD农机路径跟踪控制方法、模糊自适应纯追踪农机路径跟踪控制方法和非线性最优农机路径跟踪控制方法三种基于位姿偏差的农机路径跟踪控制方法。

在已有的路径跟踪控制方法中,PID控制是基于误差来生成消除误差的控制策略,应用广泛,但是控制参数整定困难,需要一定的经验和大量的参数整定实验。本章针对PID参数的整定问题,提出了最优PD路径跟踪控制方法,通过推导建立以农机与路径之间的横向位置误差及其导数为状态变量的状态方程,将PID参数的最优求解问题转化为LQR最优状态反馈系数的求解问题,得到符合某一性能指标的最优PID参数,从而保证农机最优地跟踪期望路径行驶。

在已有的路径跟踪控制方法中,纯追踪方法是一种几何方法,算法设计模拟人的驾驶行为,具有预见性,但是纯追踪模型中的前视距离的自适应确定很困难,很难选择一个固定的前视距离来适应不同的农机误差状态。为此本章针对纯追踪模型中前视距离参数的自适应确定问题,提出了模糊自适应纯追踪路径跟踪控制方法,解决了纯追踪模型中前视距离的在线自适应确定问题,提高了纯追踪方法对不同初始误差状态的鲁棒性和适应性。

在已有的路径跟踪控制方法中,线性二次型最优控制方法等线性模型控制方法需要基于线性模型来进行设计,因此需要对农机非线性相对运动学模型进行常速假设和小角度线性化近似,导致该类方法只有在模型的线性区域才能得到较好的控制效果。为此本章针对上述问题提出一种非线性最优农机路径跟踪控制方法,建立了基于空间参数(即路径弧长参数)驱动的非线性农机相对运动学模型,并且以此模型为基础进行了农机路径跟踪控制律的设计,该方法可以得到一种与速度无关的非线性最优控制律,打破了以往在农机路径跟踪控制方法设计中需要进行模型小角度近似线性化和行驶速度恒定的假设,更加符合农机田间作业的实际情况。

4.2 最优PD路径跟踪控制方法

本节提出最优PD农机路径跟踪控制方法,在该方法的研究过程中,首先

推导了农机跟踪直线路径时的相对运动学模型，然后基于这个相对运动学模型推导出以横向位置误差及其导数为状态变量的状态方程，提出了基于 LQR 的 PD 控制参数求解方法，最后根据 Hurwitz 稳定判据讨论了基于该方法的闭环控制系统的稳定性问题。

4.2.1 农机运动学模型研究

图 4-1 阐述了农机与路径之间的相对运动关系。图中使用的符号意义如下： V 为农机的纵向行驶速度； R 为农机的瞬时旋转中心； ψ 为农机的纵向中心线相对于导航坐标系 X 轴的夹角，即为农机的航向； C 为农机的控制点； T 为路径上距离农机控制点最近的点； δ 为农机转向轮偏转角； s 为曲线路径弧长参数； L 为农机的轴距； d 为农机相对于路径的横向位置误差，为有符号的数，本文规定农机在期望路径沿前进方向右侧时的横向位置误差为正（ $d > 0$ ），而农机在期望路径左侧时的横向位置误差为负（ $d < 0$ ）； ψ_c 为路径上 T 点处的切线与导航坐标系 X 轴的夹角，即农机的期望航向。

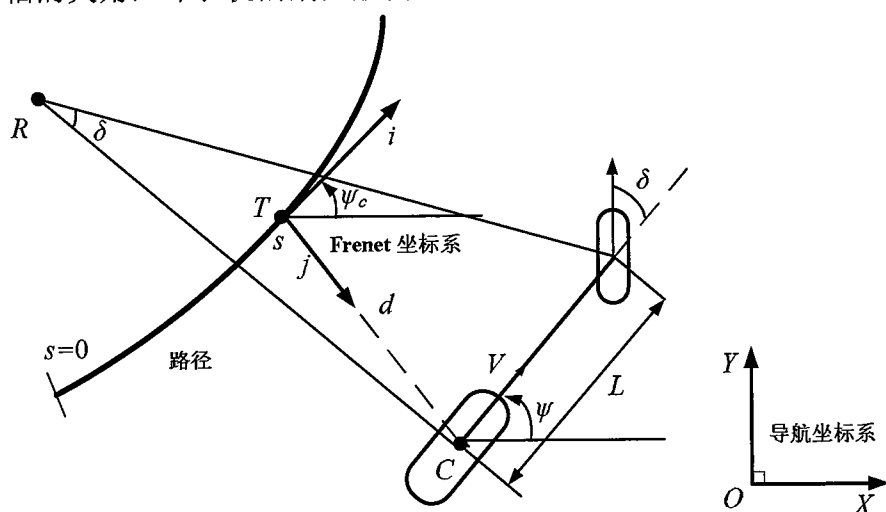


图 4-1 农机与路径间的相对运动关系描述

Fig. 4-1 Relative kinematics relationship description between agricultural machinery and path

如图 4-1 所示，定义导航坐标系和 Frenet 坐标系。假设农机质量中心在农机的后轴，那么可以选择 C 点作为农机的控制点， C 点在路径上的正交投影点为 T 点。在 Frenet 坐标系中，可以推导农机与路径之间的以横向位置误差和航向误差为状态变量的相对运动学模型为：

$$\begin{cases} \dot{d} = V \sin \theta_e \\ \dot{\theta}_e = \frac{V \tan \delta}{L} \end{cases} \quad (4-1)$$

在农机跟踪直线路径时，可以合理地假设 θ_e 和 δ 非常小。那么，状态方程

(4-1) 可以通过一阶 Taylor 展开为如下线性形式:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\delta \\ &= \begin{bmatrix} 0 & V \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V}{L} \end{bmatrix} \delta\end{aligned}\quad (4-2)$$

其中, $\mathbf{x}=[d, \theta_e]^T$ 。

进而可以推导出横向位置误差与转向角之间的传递函数为

$$G(s) = \frac{d(s)}{\delta(s)} = \frac{V^2}{Ls^2} \quad (4-3)$$

4.2.2 最优 PD 控制方法

模型(4-3)为一个二型系统, 根据经典控制理论可知, 采用一个 PD 型的控制器完全可以稳定地控制这样的系统。因此, 本文提出一种基于模型(4-3)的最优 PD 控制器, 最优 PD 控制器的参数通过 LQR 方法获得。从而保证了农机最优地跟踪期望的路径。

基于最优 PD 的农机路径跟踪控制框图如图 4-2 所示。图中, $G_c^*(s)$ 为最优 PD 控制器的传递函数, e 为控制误差, r 为控制系统参考输入, d 为系统输出。

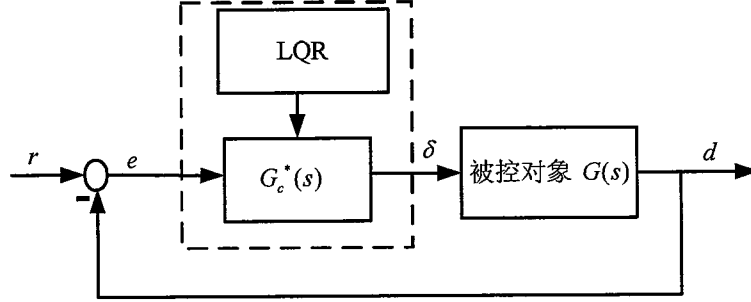


图 4-2 采用最优 PD 控制器的控制框图

Fig. 4-2 The control diagram with the optimal PD controller

本文的控制目的是使农机与路径之间的横向位置误差 $d=0$, 所以控制系统的参考输入 $r=0$ 。进而, 可以通过如下方程组来描述农机路径跟踪子系统。

$$\begin{cases} \delta(s) = G_c^*(s)e(s) \\ G_c^*(s) = k_p^* + k_d^*s \\ e(s) = -d(s) \\ d(s) = G(s)\delta(s) \end{cases} \quad (4-4)$$

为了通过 LQR 求取最优 PD 控制器的参数 k_p^* 和 k_d^* , 引进状态向量

$\mathbf{z}=[e \quad \dot{e}]^T$ 。根据方程组(4-4), 可以推导出

$$\ddot{e} = -\frac{V^2}{L}\delta \quad (4-5)$$

所以关于状态变量 z 的状态方程可以写成如下形式。

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{V^2}{L} \end{bmatrix} \delta \\ &= \mathbf{A}'z + \mathbf{B}'\delta \end{aligned} \quad (4-6)$$

考虑到农机的速度相对较慢和较平稳，可以假设农机的速度为常值，这样状态方程(4-6)所描述的系统为线性时不变系统。根据 LQR 理论，使用性能指标泛函(4-7)可以得到期望的转向角表达式为(4-8)。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (z^T \mathbf{Q}z + \delta^T \mathbf{R}\delta) dt \quad (4-7)$$

其中， $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \geq 0$ 为状态变量的加权矩阵；

$\mathbf{R} = r > 0$ 为控制加权矩阵。

$$\begin{aligned} \delta &= -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}'^T \mathbf{P}z \\ &= \frac{V^2}{rL} [p_{12}, p_{22}]z \end{aligned} \quad (4-8)$$

其中， p_{12} 和 p_{22} 是代数 Riccati 方程 (4-9) 的对称正定解矩阵 $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix}$

的元素。

求解代数 Riccati 方程 (4-9)，可以得到表达式 (4-10)。

$$\mathbf{P}\mathbf{A}' + \mathbf{A}'^T \mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}'^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (4-9)$$

$$\begin{cases} p_{12} = \frac{L}{V^2} \sqrt{ar} \\ p_{22} = \frac{L}{V^2} \sqrt{br + \frac{2Lr\sqrt{ar}}{V^2}} \end{cases} \quad (4-10)$$

根据式 (4-8) 和式 (4-10)，可以将期望的转向角描述为

$$\begin{aligned} \delta &= \left[\frac{\sqrt{ar}}{r}, \frac{\sqrt{br + \frac{2Lr\sqrt{ar}}{V^2}}}{r} \right] z \\ &= \left[\frac{\sqrt{ar}}{r}, \frac{\sqrt{br + \frac{2Lr\sqrt{ar}}{V^2}}}{r} \right] \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4-11)$$

从而可以显式地表达最优 PD 控制器参数 k_p^* 和 k_d^* 为

$$\begin{cases} k_p^* = \frac{\sqrt{ar}}{r} \\ k_d^* = \frac{\sqrt{br + \frac{2Lr\sqrt{ar}}{V^2}}}{r} \end{cases} \quad (4-12)$$

至此得到了满足最优性能指标 (4-7) 的最优 PD 控制器参数, 如式 (4-12) 所示。

4.2.3 基于最优 PD 控制方法的闭环系统稳定性

假设线性系统的特征方程为

$$D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n = 0 \quad (a_0 > 0)$$

则根据 Hurwitz 稳定判据^[123], 线性系统稳定的充分且必要条件是: 系统特征方程各项系数构成的主行列式

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \cdots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{n-2} & a_n \end{vmatrix}$$

及其顺序主子式全部大于零。

为了验证基于最优 PD 控制方法的闭环控制系统的稳定性, 本文推导出基于控制律 (4-11) 的闭环系统的特征方程如(4-13)所示。

$$D(s) = Ls^2 + k_d^* V^2 s + k_p^* V^2 = 0 \quad (4-13)$$

由于 $a_0 = L > 0$ 、 $a_1 = k_d^* V^2 > 0$ 和 $a_2 = k_p^* V^2 > 0$, 所以根据 Hurwitz 稳定判据可知, 闭环系统稳定。

然而, 转向控制系统对期望转向角的响应具有延迟。延迟的存在将会导致路径跟踪子系统不稳定, 所以在实际的应用中农机的速度不能太快。由于在大多数精准农业应用中农机的行驶速度范围为 0.5m/s 到 2m/s, 并不是很快, 因

此可以忽略转向控制延迟的影响。

4.2.4 基于最优 PD 的导航控制实验

本部分进行最优 PD 控制方法的导航控制实验验证。在基于位姿偏差的二级级联式导航控制结构中，第一级的路径跟踪控制器 (G_{PTC}) 采用最优 PD 控制方法决策出农机的期望转向角；第二级的转向控制器 (G_{SC}) 采用第 3 章研究的转向控制方法进行设计。进而构建出基于最优 PD 的二级级联式导航控制算法，其具体实现步骤如下：

步骤 1： 路径跟踪控制器 (G_{PTC}) 根据 GPS 定位传感器获得农机的实时位置信息，并根据事先规划好的路径信息计算出农机当前位置与作业路径之间的位置误差 e 。然后根据最优 PD 控制律(4-11)，即

$$\delta_d = \left[\frac{\sqrt{ar}}{r}, \frac{\sqrt{br + \frac{2Lr\sqrt{ar}}{V^2}}}{r} \right] \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}$$

计算出农机跟踪路径过程中转向轮需要转动的期望转向角。

步骤 2： 转向控制器 (G_{SC}) 根据步骤 1 确定的期望转向角和检测到的实际转向角，利用基于非线性积分滑模面的自适应滑模控制律(3-25)，即

$$u = \frac{1}{k_0} ((\dot{g} - c_1)(x_1 - h(T, t)) + (g - c_2)(x_2 - d^{(1)}h) + a_0 x_2 + d^{(2)}h - \eta \operatorname{sgn}(s))$$

计算出农机转向驱动器的控制输入，从而控制农机转向轮快速且无超调地跟踪期望转向角，最终达到农机自动驾驶控制的目的。

步骤 3： 重复步骤 1~2。

为了验证基于最优 PD 导航控制算法的有效性，选择 2.4 节阐述的拖拉机自动驾驶控制平台，分别在 0.8 m/s 和 1.2m/s 的拖拉机行驶速度下进行直线路径跟踪实验。为了验证方法的优越性本章还与纯追踪模型 (PPM) 方法进行了对比实验。

在实验中，选择参数 $a=0.01$ ， $b=0.2$ 和 $r=1$ ，并根据式 (4-12) 确定最优 PD (OPD) 控制器参数 k_p^* 和 k_d^* 。

为了验证最优 PD 农机路径跟踪控制方法控制性能的一致性，本文进行了两种不同行驶速度的路径跟踪实验。在第一种实验中，设定拖拉机的行驶速度为 0.8m/s，以此验证本文所提出的路径跟踪控制方法在同一速度下控制性能的一致性问题。在这个实验中，拖拉机距离路径大约 0.3m 处开始自动驾驶控制，本文方法 (OPD) 的路径跟踪误差变化如图 4-3 所示。从图中可以明显地看出拖拉机速度为 0.8m/s 时，采用 OPD 方法的自动驾驶控制系统都具有很好的响应速度。同时，控制系统的位置响误差应超调明显减弱，且超调量在 0.08m 以内。使用实验过程的稳态误差数据进行统计分析，实验结果显示：在速度为 0.8m/s 时的

两次自动导航控制实验都可以取得很好的路径跟踪精度，横向位置误差的平均值为 0.02m ，横向位置误差的标准差为 0.04m 。因此可以验证在相同速度下 OPD 方法控制性能的一致性。

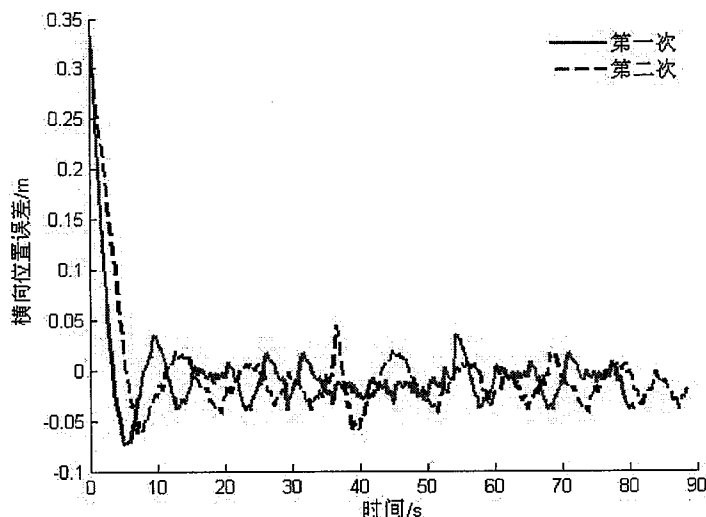


图 4-3 速度为 0.8m/s 时的跟踪误差

Fig. 4-3 The lateral deviation at the speed of 0.8m/s

在第二种实验中，拖拉机的速度分别设定为 1.2m/s 和 0.8m/s ，并采用 OPD 方法进行拖拉机的自动导航控制实验。在拖拉机距离路径大约 0.3m 处开始拖拉机自动导航控制。图 4-4 显示了农机行驶速度为 0.8m/s 和 1.2m/s 时的路径跟踪误差对比情况。稳态误差数据分析结果表明，在不同的速度下 OPD 方法同样也可以得到相同的路径跟踪控制精度。因此可以得出采用 OPD 方法的自动导航控制系统的控制性能具有一致性。

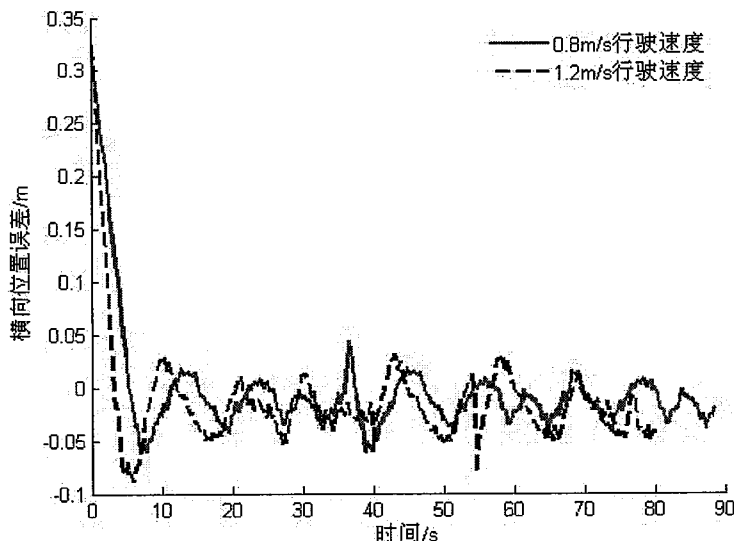


图 4-4 速度为 0.8m/s 和 1.2m/s 时的跟踪误差

Fig. 4-4 The lateral deviation at different speeds of 0.8 m/s and 1.2 m/s

为了进一步验证 OPD 方法的有效性和优越性,本文同样进行了方法的比较实验。在这个实验中,分别采用 OPD 方法和普遍使用的纯追踪模型 (PPM) 方法作为导航控制系统的路径跟踪控制方法。

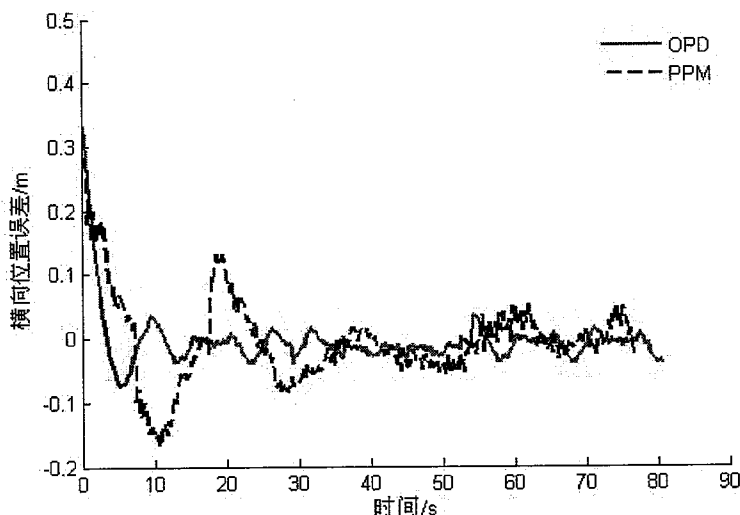


图 4-5 OPD 方法和 PPM 方法的跟踪误差对比

Fig. 4-5 The lateral position deviation of OPD and PPM

图 4-5 描述了采用本文方法 (OPD) 和纯追踪模型 (PPM) 方法进行对比实验时的路径跟踪误差变化曲线。从图中可以看出, OPD 方法明显优于 PPM 方法。在对比实验中,我们发现 PPM 方法的前视距离参数很难调节,其对农机的行驶速度和农机与路径间的初始误差很敏感。然而, OPD 方法的控制参数可以针对某一性能指标唯一地确定。此外农机跟踪到路径后的实验数据统计结果显示了,采用 OPD 方法的自动导航控制系统的平均误差和标准差分别控制在 0.02m 和 0.04m 内。这些指标都要优于 PPM 方法的实验数据统计结果。因此可以通过拖拉机的自动导航控制实验验证 OPD 方法的有效性和优越性。

4.3 模糊自适应纯追踪路径跟踪控制方法

本节针对纯追踪模型方法中的前视距离自适应确定问题,提出了模糊自适应纯追踪农机路径跟踪控制方法。首先从几何的角度推导了纯追踪模型,然后在此模型的基础上采用模糊自适应控制对模型中的前视距离进行在线实时整定,考虑到不同的误差条件对模糊控制规则的要求也不同,以及控制算法实现上的方便,采用带有自调整函数的解析式模糊控制器对纯追踪模型中前视距离的大小进行在线自适应调整。本节提出的方法对于不同的初始误差具有一定的鲁棒性和适应性,提高了农机路径跟踪的控制精度。

4.3.1 纯追踪模型

纯追踪模型路径跟踪方法是一种几何方法，它根据农机的当前位置和目标位置确定农机到达目标位置所需要行驶的圆弧。如图 4-6 所示，建立导航坐标系 (${}^N X-O-{}^N Y$) 和车体坐标系 (${}^v X-P-{}^v Y$)。

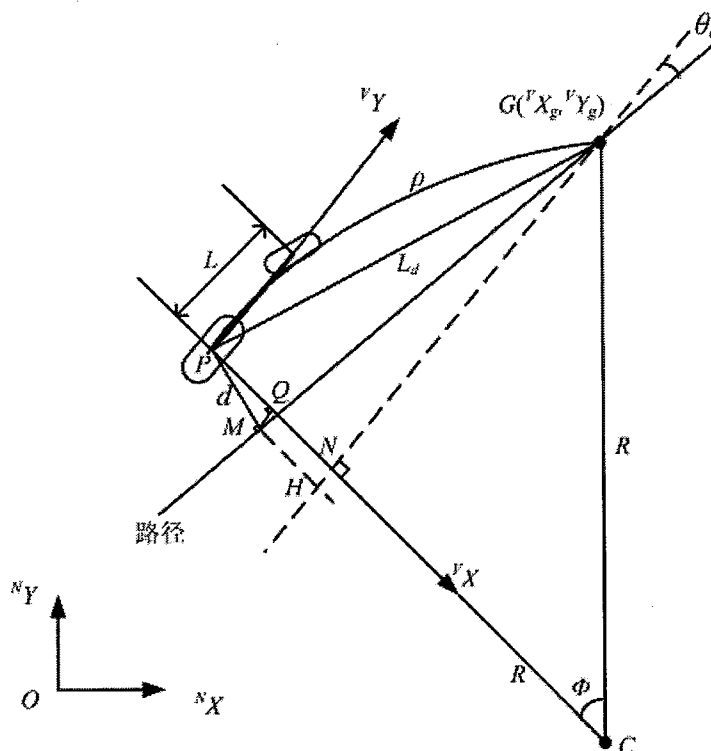


图 4-6 纯追踪模型的几何表达

Fig. 4-6 The geometric expression of pure pursuit model

图中各个符号的定义如下： ${}^v X_g$ 为目标点在车体坐标系中的横坐标； ${}^v Y_g$ 为目标点在车体坐标系中的纵坐标； ρ 为农机即时转弯曲率，为有符号的数。本文规定农机逆时针行驶时的转弯曲率为正 ($\rho > 0$)，顺时针行驶时的转弯曲率为负 ($\rho < 0$)； R 为农机的瞬时转弯半径； d 为农机相对于路径的横向位置误差，为有符号的数，本文规定农机在期望路径沿前进方向右侧时的横向位置误差为正 ($d > 0$)，农机在期望路径左侧时的横向位置误差为负 ($d < 0$)； L_d 为前视距离； θ_e 为农机当前航向和目标点处期望航向之间的误差； Φ 为农机沿着转向弧线到达目标点时的航向变化角度。

根据图 4-6 中的几何关系，可以求得目标点在车体坐标系中的横、纵坐标表达式为

$${}^v X_g = (-1/\rho) - (-1/\rho) \cos \Phi = (\cos \Phi - 1)/\rho \quad (4-14)$$

$${}^vY_g = (-1/\rho)\sin\Phi \quad (4-15)$$

在直角三角形 $\triangle PNG$ 中, 由勾股定理得

$${}^vX_g^2 + {}^vY_g^2 = L_d^2 \quad (4-16)$$

由式 (4-14)、(4-15) 和 (4-16) 可得

$$\rho = -2{}^vX_g / L_d^2 \quad (4-17)$$

由图 4-6 可直接推得

$${}^vX_g = -d\cos\theta_e + \sqrt{L_d^2 - d^2}\sin\theta_e \quad (4-18)$$

结合式 (4-17) 和式 (4-18) 可得纯追踪模型如下

$$\begin{aligned} \rho &= -2{}^vX_g / L_d^2 \\ &= 2(d\cos\theta_e - \sqrt{L_d^2 - d^2}\sin\theta_e) / L_d^2 \end{aligned} \quad (4-19)$$

4.3.2 影响纯追踪模型控制效果的因素分析

在纯追踪模型式 (4-19) 中, 仅有一个未知参数, 即前视距离 L_d , 而这个参数的大小直接影响到农机路径跟踪的控制效果。

从纯追踪模型的表达式可以得知, 当前视距离选择较大时, 农机会沿着较小曲率的行驶路径驶向期望路径, 不会产生大的控制振荡, 但是控制的响应时间会很长, 这相当于二阶系统的过阻尼阶跃响应; 反之当前视距离选择较小时, 农机会沿着较大曲率的行驶路径驶向期望路径, 控制响应时间很短, 但是会产生较大的控制振荡, 这相当于二阶系统的欠阻尼阶跃响应。

通过上述分析可知, 采用较大或者较小的前视距离都不能得到满意的跟踪效果, 另外纵使可以通过仿真或者实验的手段获得一个合适的前视距离, 但是固定的前视距离并不能实时地根据农机的当前误差状态调整, 这种固定的前视距离也并不是最优的选择。因此, 在农机的路径跟踪过程中, 如何在线实时自适应地获取一个合适的前视距离, 是保证纯追踪模型路径跟踪精度的关键问题。

纯追踪模型中的前视距离与农机横向位置误差、航向误差以及农机的速度等因素有关系。由于农机在田间工作时速度较低且速度的变化不是很大, 甚至可以认为是恒速, 所以速度变化对前视距离的影响本文不予考虑。

一般情况下, 动态确定前视距离的基本思想是: 当误差较大时, 减小前视距离的值, 以尽快消除误差, 提高响应速度; 当误差较小时, 增大前视距离的值, 避免系统响应超调。这个前视距离的确定思想与驾驶员驾驶时的经验是一致的, 因此本文采用模糊控制策略进行前视距离的在线自适应确定。

4.3.3 基于模糊自适应控制的前视距离确定方法

选择模糊控制的输入为横向位置误差和航向误差，输出为前视距离。在模糊控制系统中，模糊控制规则的选择对模糊控制器的性能具有很大的影响。不同的误差状态对于模糊控制规则的设计也不尽相同，因此本文采用自调整函数来自适应地调整模糊控制规则，提出一种模糊控制规则可在线调整的模糊控制器，进而采用这种模糊控制器来自适应地确定前视距离。为了实现上的方便，本文对模糊自适应控制器采用解析的形式进行描述。

4.3.3.1 模糊控制的解析表达式

根据上述前视距离的确定思想和模糊控制规则的设计方法，本文提出带有自调整函数的模糊控制器的解析表达式如下：

$$L_D = \langle \alpha(S - |E|) + (1 - \alpha)(S - |E_\psi|) \rangle \quad \alpha \in [0 \ 1] \quad (4-20)$$

式中， $\langle \bullet \rangle$ ——取整运算；

L_D ——前视距离的模糊变量；

E ——横向位置误差的模糊变量；

E_ψ ——航向误差的模糊变量；

S ——模糊控制系统论域调整设定值；

α ——模糊控制规则自调整函数。

这种解析式的模糊自适应控制器具有自调整性，避免了常规模糊控制规则繁琐、推理复杂的缺点，提高了控制的精度。

4.3.3.2 自调整函数的确定

在纯追踪模型中，希望当横向位置误差较大时，在前视距离的决策中增大位置误差的权重以保证农机快速地跟踪到路径；当位置误差较小时，减小位置误差的权重，增大航向误差的权重，以保证农机稳定地跟踪路径。因此将自调整函数选为

$$\alpha = k_1 \left| \frac{d}{M} \right|^p \quad (4-21)$$

式中， k_1 ——比例参数，为了保证 $1 - \alpha \geq 0$ ，取 $k_1 \leq \left(\frac{M}{d_{\max}}\right)^p$ ；

M ——误差的最大设定值，为一个大于 $|d_{\max}|$ 的数；

p ——自调整函数的幂次。

根据 p 的取值不同，自调整函数具有图4-7所示的3种形态。

当 $p < 1$ 时, 自调整函数的值随横向位置误差递增较快, 横向位置误差在控制决策中所占的比重较大; 反之, 当 $p > 1$ 时, 横向位置误差所占的比重较小。由于农机路径跟踪控制的主要目的是使农机与期望路径之间的距离达到一定的容许范围之内, 因此无论什么时候横向误差的权重都要得到重视。综上所述, 本文选择自调整函数的幂次为 $p < 1$ 。

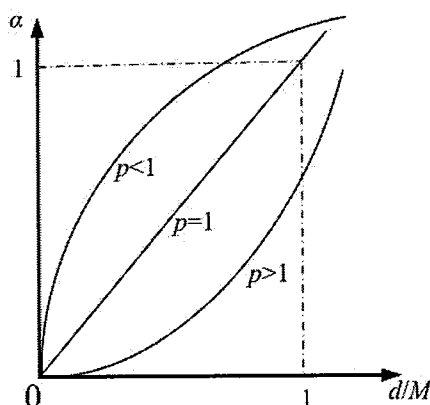


图 4-7 自调整函数曲线

Fig. 4-7 Self-adjustment function curves

4.3.3.3 量化因子和比例因子的选择

模糊自适应控制的输入为横向位置误差和航向误差。横向位置误差和航向误差的基本论域分别为 $[-90\text{cm}, 90\text{cm}]$ 和 $[-90^\circ, 90^\circ]$, 其论域为 $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$, 量化因子选为 $1/15$ 。

模糊自适应控制的输出为前视距离, 输出量的论域根据上述解析模糊控制的结果确定, 模糊自适应控制的结果乘以比例因子即为需要的前视距离。控制量的比例因子选为 $1/4$ 。

4.3.4 基于模糊自适应纯追踪模型的路径跟踪控制器

将纯追踪模型和模糊自适应控制结合起来, 提出一种基于模糊自适应纯追踪模型的农机路径跟踪控制器。

由农机的运动学模型可知

$$\gamma = \rho V = V \frac{\tan \delta}{L} \quad (4-22)$$

式中, L ——农机轴距;

γ ——农机的横摆角速度 (航向变化率);

V ——农机的速度;

δ ——农机的期望转向角。

结合纯追踪模型式 (4-19) 和式 (4-22) 可得控制律, 即期望的转向角为

$$\delta = \arctan(2L(d \cos \theta_e - \sqrt{L_d^2 - d^2} \sin \theta_e) / L_d^2) \quad (4-23)$$

式(4-23)中的前视距离参数采用模糊自适应控制进行在线自适应地确定。至此可以得到基于模糊自适应纯追踪模型的农机路径跟踪控制系统如图 4-8 所示。

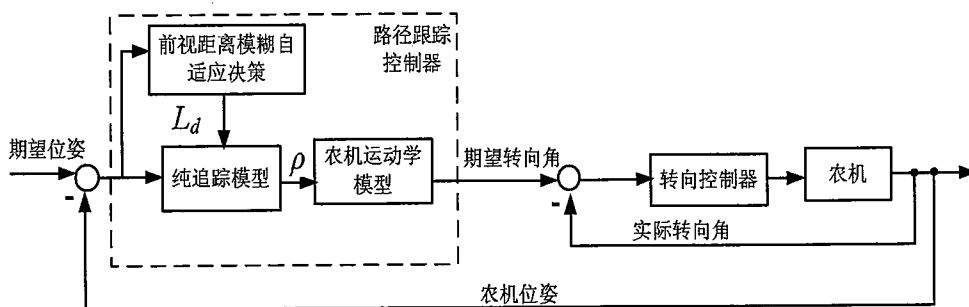


图 4-8 基于模糊自适应纯追踪模型的农机路径跟踪控制框图

Fig. 4-8 Block diagram of agricultural machine path tracking control based on fuzzy adaptive pure pursuit model

路径跟踪控制器由纯追踪模型单元和模糊自适应控制单元组成，它通过位姿传感器获得农机的当前位姿，然后与期望的位姿相比较得到农机与期望路径之间的相对位姿。模糊自适应控制单元利用相对位姿在线实时地确定纯追踪模型中的前视距离参数，纯追踪模型根据该前视距离和当前的相对位姿信息并结合农机的运动学模型决策出农机的期望转向角。最后将期望转向角发送给转向控制器，控制农机转向轮的偏转角度。

由于基于模糊自适应纯追踪模型的路径跟踪控制器的控制参数较多，通过现场试验整定比较麻烦，所以本文先通过仿真试验的方法对控制器参数进行初步的整定。为了整定控制器的控制参数，采用 Matlab 对其进行仿真研究。仿真模型采用农机的运动学模型，模型的状态变量为横向位置误差和航向误差，模型的输入变量为转向轮的偏转角度。

仿真试验的条件设定如下：农机的速度在 $0.8\text{m/s} \pm 0.2\text{ m/s}$ 之间变化，初始位置误差为 $\pm 1\text{m}$ ，初始航向偏差为 $\pm 20^\circ$ ，仿真时间设为 20s 。在试验中经过反复调整模糊控制参数，最终确定误差的最大设定值 M 为 1m ，模糊控制系统论域调整设定值 S 为 10 ，自调整函数的比例参数 k_1 和幂次 p 分别为 1 和 $1/2$ 。具体仿真结果如图 4-9 所示。

在图 4-9 中，(a) 为初始横向位置误差为 1m 、航向误差为 20° 的仿真图；(b) 为初始横向位置误差为 1m 、航向误差为 -20° 的仿真图；(c) 为初始横向位置误差为 -1m 、航向误差为 -20° 的仿真图；(d) 为初始横向位置误差为 -1m 、航向误差为 20° 的仿真图。

从图 4-9 的仿真结果可以看出，无论在何种初始误差条件下，本文提出的

方法都能使控制系统很快的收敛到平衡点，使横向位置误差和航向位置误差都为零，收敛时间不超过 6 秒。

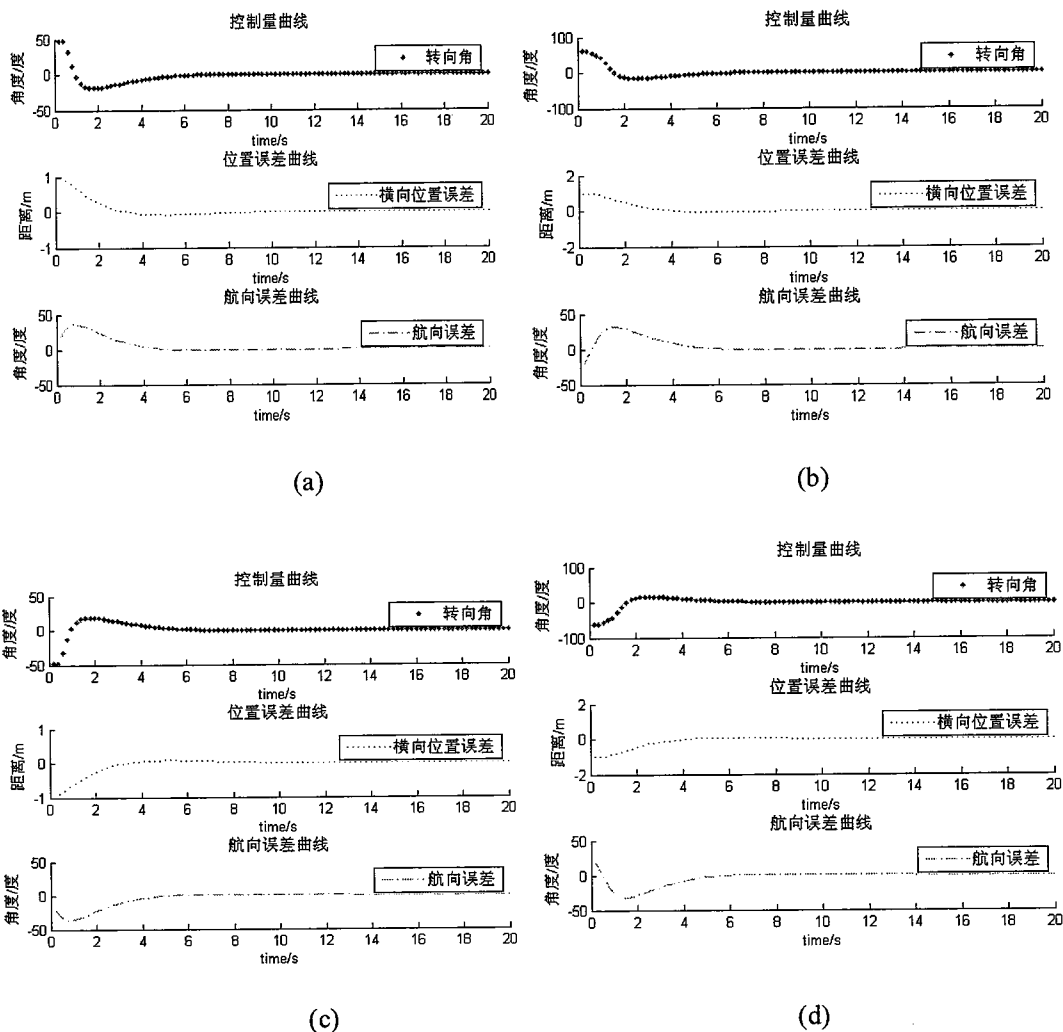


图 4-9 不同初始误差条件下的仿真效果图

Fig. 4-9 Simulation diagram under different initial error conditions

4.3.5 基于模糊自适应纯追踪方法的导航控制实验

本部分进行模糊自适应纯追踪方法的导航控制实验验证。基于模糊自适应纯追踪方法的二级级联式导航控制方法的具体实现步骤如下：

步骤1：路径跟踪控制器 (G_{PTC}) 根据位姿传感器获得的农机位置和姿态信息（主要指航向）和作业路径信息，确定农机与路径之间的位置误差 d 和航向误差 θ_e ，然后根据模糊自适应纯追踪路径跟踪控制律(4-23)，即

$$\delta_d = \arctan(2L(d \cos \theta_e - \sqrt{L_d^2 - d^2} \sin \theta_e) / L_d^2)$$

计算出农机当前的期望转向角。

控制律(4-23)中的前视距离参数采用模糊自适应控制律(4-20)，即

$$L_D = \langle \alpha(S - |E|) + (1 - \alpha)(S - |E_\Psi|) \rangle$$

进行在线自适应确定。

步骤2：转向控制器 (G_{sc}) 根据步骤1确定的期望转向角和检测到的实际转向角，利用基于非线性积分滑模面的自适应滑模控制律(3-25)计算出农机转向驱动器的控制输入，从而控制农机转向轮快速且无超调地跟踪期望转向角，最终达到农机自动导航控制的目的。

步骤3：重复步骤1~2。

在导航控制实验过程中，以2.4节阐述的插秧机自动导航控制平台为实验对象。实验具体情况如下所述。

4.3.5.1 相同初始误差的路径跟踪实验

在相同初始误差条件下，本文对固定前视距离的纯追踪模型方法和本文提出的方法进行对比实验。实验中初始误差设定为30cm左右，固定的前视距离分别设定为1m、1.8m和3m。实验的结果如图4-10所示。

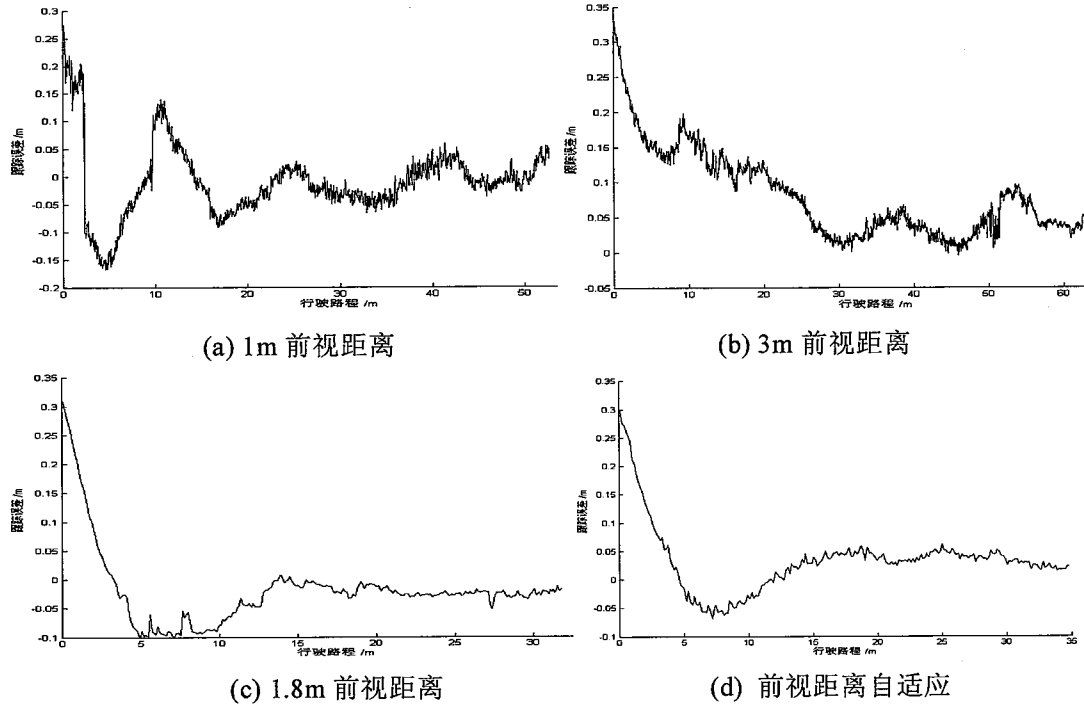


图4-10 不同前视距离时的跟踪误差变化曲线

Fig. 4-10 The tracking error curve for different look-ahead distances

采用较小的前视距离1m进行实验时，路径跟踪误差的变化曲线如图4-10a所示，从图中可以看出，当前视距离选择较小时，虽然可以使系统的响应加快，

但是路径跟踪过程中明显发生了振荡, 最大跟踪误差绝对值超出了 15cm。采用较大的前视距离 3m 进行路径跟踪实验时, 其跟踪过程的误差曲线如图 4-10b 所示, 从图中可以看出此时的路径跟踪响应很慢, 农机跟踪到路径需要行驶近 30m, 而且即使跟踪到路径上也不能取得很好的稳态性能。通过反复调参实验得知, 采用 1.8m 的前视距离进行实验时, 能够获得很好的路径跟踪效果, 其路径跟踪误差曲线如图 4-10c 所示。

在同样的误差条件下, 采用本文提出的方法进行农机路径跟踪实验, 路径跟踪误差的变化曲线如图 4-10d 所示。通过实验测定结果得知, 农机行驶小于 5m 的距离就可以跟踪到路径上, 具有很好的跟踪响应速度; 当跟踪到期望路径后, 路径跟踪误差绝对值平均值小于 5cm, 最大跟踪误差的绝对值小于 8cm, 方差小于 0.0006, 完全满足插秧机作业的要求。

通过对比实验可以得知: 在相同的初始误差条件下, 较大或者较小的前视距离都不能获得满意的路径跟踪效果, 只有选择一个适中的前视距离才能取得满意的效果。而本文提出的方法, 可以在线自适应地调节前视距离参数, 进而获得满意的路径跟踪效果。

4.3.5.2 不同初始误差的路径跟踪实验

在不同的初始误差条件下, 对固定前视距离的纯追踪模型方法和本文提出方法进行对比实验。实验中分别设定初始误差为 30cm 左右和 60cm 左右。

采用上述实验确定的较优的 1.8m 前视距离的纯追踪模型方法分别进行初始误差为 30cm 左右和 60cm 左右的路径跟踪实验, 其路径跟踪误差变化曲线如图 4-11 所示。实验数据分析结果表明: 当初始误差为 30cm 左右时, 1.8m 前视距离的纯追踪模型方法可以得到满意的效果。然而当初始误差为 60cm 左右时, 农机跟踪到路径需要行驶大于 5m 的距离, 跟踪误差平均值达到 7cm, 最大跟踪误差绝对值大于 10cm, 方差为 0.0008, 此时的控制效果明显变差。

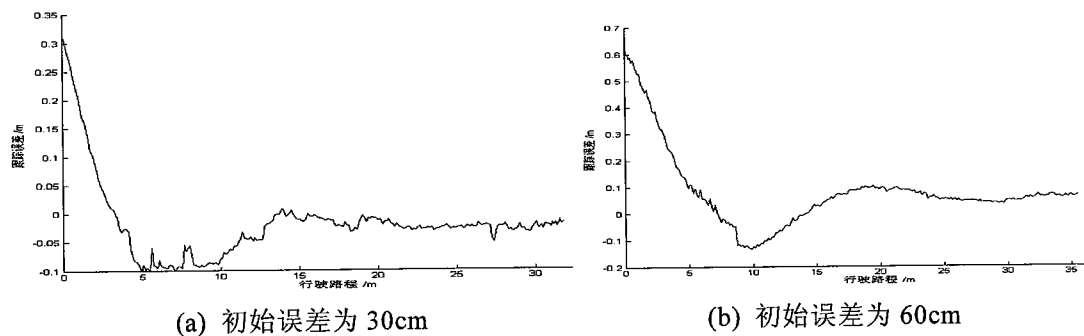


图 4-11 固定前视距离时的跟踪误差变化曲线

Fig. 4-11 The tracking error curve for fixed look-ahead distance

采用本文提出的方法分别进行初始误差为 30cm 左右和 60cm 左右的路径跟踪实验, 其路径跟踪误差变化曲线如图 4-12 所示。

实验数据分析结果表明：即使初始误差大于 30cm，本文提出的方法也能得到小于 5cm 的绝对值平均误差，小于 0.0006 的方差，农机行驶小于 5m 的距离就可以跟踪到路径上，具有很好的跟踪响应速度，而且最大跟踪误差绝对值也能控制在 10cm 之内。

通过对比实验可以得知：在不同的初始误差条件下，采用相同的前视距离不能使农机在任何初始误差条件下都取得好的路径跟踪效果。而本文提出的方法，对不同的初始误差具有一定的鲁棒性和适应性，可以得到满意的路径跟踪效果。

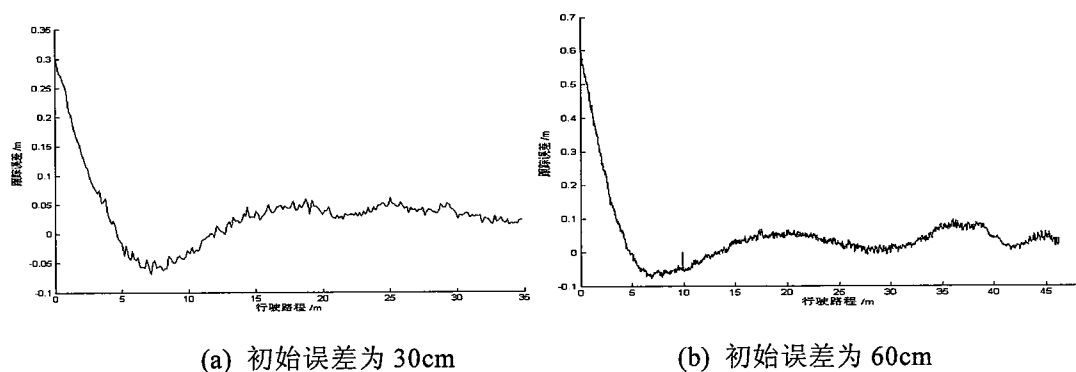


图 4-12 前视距离自适应时的跟踪误差变化曲线

Fig. 4-12 The tracking error curve for adaptive look-ahead distance

综上所述，本文提出的模糊自适应纯追踪路径跟踪控制方法优于前视距离固定的纯追踪模型路径跟踪控制方法，具有很好的控制精度，而且针对农机的不同初始误差状态具有很好的适应性和鲁棒性，进而验证了本文提出方法的可行性和有效性。

4.4 非线性最优路径跟踪控制方法

针对现有方法中的基于运动学模型控制方法的小角度线性化和常速假设的缺点，本节提出一种与行驶速度无关的非线性最优农机路径跟踪控制方法，该方法不需要对模型进行小角度近似线性化和常速假设，消除了小角度线性化逼近带来的误差；而且所推导的控制律与行驶速度无关，对速度的变化具有很好的鲁棒性。

4.4.1 空间参数驱动的非线性农机相对运动学模型

农机路径跟踪的关键就是保证横向位置误差在一定的允许范围之内，因此需要建立一个运动学模型来描述这种横向位置误差的变化情况。本文定义一个导航坐标系和一个路径上的弗雷内坐标系（Frenet 坐标系），然后在这两个坐标系中研究农机与路径间的相对运动学模型。农机与路径之间的相对运动关系如

图 4-1 所示，图中 s 为曲线路径弧长参数，本文称其为空间参数。

首先本文对农机相对运动学模型做如下 A1 和 A2 的假设，然后通过定理 4-1 给出模型的具体形式。

$$A1: 1 - c(s)d \neq 0$$

$$A2: \theta_e \neq k\pi + \frac{\pi}{2} \quad (k=0,1,2,\dots)$$

其中， θ_e ——农机相对于路径的航向误差；

$c(s)$ ——路径曲率。

在农机实际的田间作业中，A1 的意思是农机与路径之间的位置误差不等于路径曲线的半径，由于田间作业时农机与所要跟踪的路径之间的误差不会超过 1m，而田间作业路径的曲线半径普遍很大，即使是地头转向路径其最小值也不会低于 5m，所以该假设很容易满足；A2 的意思是农机的行驶方向与路径的方向不互相垂直，这在田间作业时也很容易满足。总之，所做的这两个假设并不会使本文研究结果失去一般性。

定理 4-1: 如果满足假设 A1 和 A2，那么空间参数 s 驱动的农机非线性相对运动学模型如 (4-24) 所示，该模型以农机与路径间的横向位置误差和航向误差为状态变量，农机的转弯曲率为控制量。

$$\begin{cases} d' = (1 - c(s)d) \tan \theta_e \\ \theta_e' = -c(s) + ((1 - c(s)d) \sec \theta_e) \rho \end{cases} \quad (4-24)$$

式中， ρ ——农机的即时转弯曲率；

d' ——位置误差相对于空间参数 s 的导数；

θ_e' ——航向误差相对于空间参数 s 的导数。

证明:

首先，根据农机的非完整性约束条件很容易得到农机在导航坐标系中的运动学模型，如式(4-25)所示：

$$\begin{cases} \dot{X} = V \cos(\psi) \\ \dot{Y} = V \sin(\psi) \\ \dot{\psi} = V \rho \end{cases} \quad (4-25)$$

式中， X ——农机在导航坐标系中的横坐标；

Y ——农机在导航坐标系中的纵坐标。

然后分别定义导航坐标系和弗雷内坐标系中向量的时间微分为

$$\frac{d}{dt}({}^N r) = \dot{X}I + \dot{Y}J + \dot{Z}K$$

$$\frac{{}^F d}{dt}({}^F \mathbf{r}) = \dot{x}i + \dot{y}j + \dot{z}k$$

将农机在导航坐标系中的全局速度变换到弗雷内坐标系中表达。由于农机的控制点 C (即质点) 在导航坐标系中的坐标 (X, Y) 与 (s, d) 是一一对应的关系, 令 ${}^F \mathbf{r} = {}^F \mathbf{T}_C$, 进而可以推导出如下的关系式:

$$\frac{{}^N d}{dt}({}^F \mathbf{T}_C) = \frac{{}^F d}{dt}({}^F \mathbf{T}_C) + \boldsymbol{\omega}_F \times ({}^F \mathbf{T}_C) \quad (4-26)$$

其中, ${}^F \mathbf{T}_C = [0 \quad d \quad 0]^T$;

$$\boldsymbol{\omega}_F = [0 \quad 0 \quad \dot{s}c(s)]^T。$$

最后根据模型(4-25)和式(4-26)可以得到模型 (4-27)。

$$\begin{cases} \dot{s} = \frac{V \cos \theta_e}{1 - c(s)d} \\ \dot{d} = V \sin \theta_e \\ \dot{\theta}_e = -\dot{s}c(s) + V\rho \end{cases} \quad (4-27)$$

将模型(4-27)对空间参数 s 求导, 便可得到空间参数 s 驱动的相对运动学模型(4-24)。

证毕。

为了便于控制方法设计过程中的讨论, 设 $\boldsymbol{\varsigma} = [d, \theta_e]^T$, 则可将系统模型 (4-24) 改写成 (4-28) 的表达形式。

$$\begin{cases} \varsigma_1' = (1 - \varsigma_1 c(s)) \tan \varsigma_2 \\ \varsigma_2' = -c(s) + ((1 - \varsigma_1 c(s)) \sec \varsigma_2) \rho \end{cases} \quad (4-28)$$

其中, $\boldsymbol{\varsigma}' = d\boldsymbol{\varsigma}/ds$ 。

由于该模型中不存在速度参数, 所以速度的变化不会对模型造成影响。而基于此模型进行路径跟踪方法设计不需要对速度做常速假设, 并且可以得到一个与农机行驶速度无关的控制律。

4.4.2 基于空间参数驱动模型的控制设计的合理性

在针对模型 (4-28) 进行路径跟踪控制方法设计之前, 本文先给出定理 4-2, 以保证基于空间参数 s 驱动模型的控制方法设计的合理性。

定理 4-2: 如果存在一个能够通过某种控制作用使其稳定的时间参数 t 驱动的系统 Σ_t , 并且存在一个时间参数 t 的严格非减函数 q ; 那么, 如果将系统 Σ_t 变换为 q 驱动的系统 Σ_q , 同样可以通过某种控制作用使变换后的系统 Σ_q 稳定。

证明:

如果存在某一控制作用能使系统 Σ_t 稳定, 那么根据李雅普诺夫稳定性的逆定理, 存在一个李雅普诺夫能量函数 $V(\mathbf{x}(t))$, 且

$$\dot{V}(\mathbf{x}(t)) < 0$$

对于 q 驱动的系统 Σ_q ，同样也存在一个闭环李雅普诺夫函数 $V(\mathbf{x}(q))$ ，对其求导得

$$\dot{V}(\mathbf{x}(q)) = \dot{V}(\mathbf{x}(t)) \cdot \frac{dt}{dq}$$

又由于 $\frac{dq}{dt} > 0$ ，即 $\frac{dt}{dq} > 0$ ，进而可以推得

$$\dot{V}(\mathbf{x}(q)) < 0$$

所以根据李雅普诺夫稳定性定理可知，系统 Σ_q 也稳定。

证毕。

由于在农机路径跟踪问题中，空间参数 s 随着时间参数 t 的增加而增加，即 s 为时间 t 的严格非减函数，所以根据定理 4-2 可知，基于空间参数驱动模型进行控制方法设计同样可以得到稳定的闭环系统。

4.4.3 基于空间参数驱动模型进行反馈线性化的可行性

关于系统模型 (4-28) 能否通过输入-状态线性化转化为一个等价的线性动态系统，本文通过定理 4-3 进行论证。

定理 4-3：如果非线性系统 (4-28) 满足假设 A1 和 A2，那么该系统可以通过输入-状态线性化等价地转化为线性动态系统。

证明：

将上述系统模型 (4-28) 改写成如式 (4-29) 的仿射形式。

$$\zeta' = f(\zeta) + g(\zeta)\rho \quad (4-29)$$

其中，

$$f(\zeta) = \begin{pmatrix} (1 - \zeta_1 c(s)) \tan \zeta_2 \\ -c(s) \end{pmatrix}, \quad g(\zeta) = \begin{pmatrix} 0 \\ (1 - \zeta_1 c(s)) \sec \zeta_2 \end{pmatrix}$$

该系统的能控性矩阵为

$$\begin{aligned} F_1 &= (g(\zeta), ad_f g) \\ &= \begin{pmatrix} 0 & -(1 - \zeta_1 c(s))^2 \sec^3 \zeta_2 \\ (1 - \zeta_1 c(s)) \sec \zeta_2 & -2(1 - \zeta_1 c(s)) c(s) \tan \zeta_2 \sec \zeta_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4-30)$$

式中， $ad_f g$ 为 $f(\zeta)$ 和 $g(\zeta)$ 的李括号。

如果系统 (4-28) 满足假设条件 A1 和 A2，即

$$1 - \varsigma_1 c(s) \neq 0, \quad \varsigma_2 \neq k\pi + \frac{\pi}{2}$$

那么 $\det(F_1) \neq 0$

所以很容易验证如下结论:

①向量场集合 $\{g(\varsigma), ad_f g\}$ 为线性无关的;

②单向量场集合 $\{g(\varsigma)\}$ 对合。

在满足上述两个结论时, 根据反馈线性化理论^[124]可知, 非线性系统(4-28)可以通过状态变换和输入变换等价地转换为线性动态系统。

证毕。

通过模型部分的讨论, 显然可知非线性系统(4-28)满足定理 4-3 中给出的条件, 所以系统(4-28)可以进行反馈线性化设计。

4.4.4 非线性最优路径跟踪控制器设计

如图 4-13 所示, 本文采用反馈线性化方法将空间参数驱动的农机非线性相对运动学模型等价地转化为一个线性模型。然后, 采用线性二次型调节器(LQR)镇定变换后的线性动态系统。

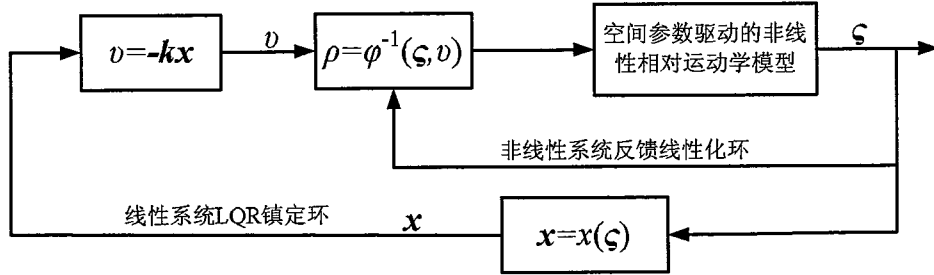


图 4-13 非线性最优路径跟踪控制器设计框图

Fig.4-13 The design diagram of the nonlinear optimal path tracking controller

根据反馈线性化理论, 通过状态变换(4-31)和输入变换(4-32)可以得到线性定常系统(4-33)。

$$\begin{cases} x_1 = \varsigma_1 \\ x_2 = \nabla x_1 f(\varsigma) \\ \quad = (1 - \varsigma_1 c(s)) \tan \varsigma_2 \end{cases} \quad (4-31)$$

$$\begin{aligned} v &= \varphi(\varsigma, \rho) \\ &= \rho L_g L_f x_1 + L_f L_f x_1 \\ &= \sec^3 \varsigma_2 (1 - \varsigma_1 c(s))^2 \rho \\ &\quad + (\varsigma_1 c(s) - 1) c(s) (\tan^2 \varsigma_2 + \sec^2 \varsigma_2) \end{aligned} \quad (4-32)$$

$$\begin{cases} x'_1 = x_2 \\ x'_2 = v \end{cases} \quad (4-33)$$

将线性系统 (4-33) 进一步写成紧缩的矩阵表达形式 (4-34)。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}' &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}v \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v \end{aligned} \quad (4-34)$$

根据线性系统理论可知, 系统 (4-34) 为能控标准型, 显然是可控的。根据 LQR 理论, 该系统存在一个唯一的最优控制律。通过选择系统性能泛函 (4-35), 可得到唯一的最优控制律 (4-36)。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} ([x_1 \ x_2] \mathbf{Q} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + v^T \mathbf{R} v) dt \quad (4-35)$$

其中, $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \geq 0$ 为状态变量的加权阵;

$\mathbf{R} = r > 0$ 为控制量的加权阵。

$$\begin{aligned} v &= -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} [x_1 \ x_2]^T \\ &= -\left[\frac{p_{21}}{r} \quad \frac{p_{22}}{r} \right] [x_1 \ x_2]^T \end{aligned} \quad (4-36)$$

式中, $\mathbf{P}$ 为代数 Riccati 方程 (4-37) 的对称正定解。

$$\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (4-37)$$

通过求解方程 (4-37) 得到式 (4-38)。

$$\begin{cases} p_{12} = \sqrt{ar} \\ p_{22} = \sqrt{2r\sqrt{ar} + br} \end{cases} \quad (4-38)$$

将式 (4-38) 代入式 (4-36) 中, 得到控制律为

$$\begin{aligned} v &= -\left[\frac{\sqrt{ar}}{r} \quad \sqrt{\frac{2\sqrt{ar} + b}{r}} \right] [x_1 \ x_2]^T \\ &= -[k_1 \ k_2] [x_1 \ x_2]^T \end{aligned} \quad (4-39)$$

结合反馈线性化控制律 (4-32) 得到农机的转弯曲率为 (4-40)。

$$\rho = \varphi^{-1}(\bullet, v) \quad (4-40)$$

假设农机能够达到运动学容许的跟踪能力, 进而可以求得农机跟踪路径所需要的转向轮偏转角度为 (4-41)。

$$\delta = \arctan L\rho \quad (4-41)$$

本文推导的控制律有如下优点: 其一, 本文方法不像传统方法对非线性模型进行小角度线性逼近和常速假设, 而是采用反馈线性化技术将非线性系统等价地转化为线性系统, 这样更符合农机的实际运行情况; 其二, 本文采用 LQR 镇定线性系统, 这样可以得到针对某一性能指标最优的镇定效果; 最后, 由于

本文控制律是基于空间参数驱动模型设计的，所以推导的控制律中不含有速度参量，具有速度无关性，即基于该控制律的闭环控制系统对速度的变化具有鲁棒性。

4.4.5 基于非线性最优控制的导航控制实验

本部分进行非线性最优控制方法的导航控制实验验证，基于非线性最优控制的二级级联式导航控制方法的具体实现步骤如下：

步骤 1：第一级的路径跟踪控制器 (G_{PTC}) 根据位姿传感器获得的农机位置和姿态信息（主要指航向）和作业路径信息，确定农机与路径之间的位置误差和航向误差，然后根据非线性最优路径跟踪控制律 (4-41)，即

$$\delta_d = \arctan L\rho$$

其中， ρ 根据式 (4-32)、(4-39) 和 (4-40) 求取。

计算出农机当前的期望转向角。

步骤 2：转向控制器 (G_{SC}) 根据步骤 1 确定的期望转向角和检测到的实际转向角，利用基于非线性积分滑模面的自适应滑模控制律(3-25) 计算出农机转向驱动器的控制输入，从而控制农机转向轮快速且无超调地跟踪期望转向角，最终达到农机自动导航控制的目的。

步骤 3：重复步骤 1~2。

为了对该算法进行实验验证，本部分的实验在 2.4 节介绍的大型联合收割机导航控制平台上进行，实验场地为黑龙江某农场的水稻田地。具体实验过程及实验结果如下：

4.4.5.1 控制器参数的选择

本文路径跟踪控制器参数的选择就是 LQR 性能指标函数中加权阵的选择，一旦加权阵确定，那么控制器参数也就唯一地确定下来。由于控制量加权 r 为大于零的标量，在这里不妨设定 $r=1$ 。那么控制器参数的选择就相当于仅仅选择状态加权阵中的横向位置误差加权系数 a 和航向误差加权系数 b 。本文选择 $a=0.01$ ， $b=0.2$ ，那么可确定控制器参数 $k_1=0.1$ ， $k_2=0.6$ 。此时闭环线性系统的阻尼比大致为 1。

4.4.5.2 基于本文方法的路径跟踪实验

(1) 直线路径跟踪实验

在田间通过高精度的 GPS 定位两点，分别记为 A 点和 B 点，将由其确定的直线作为农机跟踪的目标路径。然后在 AB 线的一端开动农机，并启动自动导航控制系统，进行自动路径跟踪控制，当农机接近 AB 线的另一端时，通过人机界面发送停止导航命令，结束一次直线路径跟踪实验，其路径跟踪效果如图 4-14 所示。重复上述步骤，进行 0.6 m/s、0.8 m/s、1.0 m/s 和 1.2 m/s 四种速度的直线路径跟踪实验各三次。实验数据统计结果如表 4-1 所示。

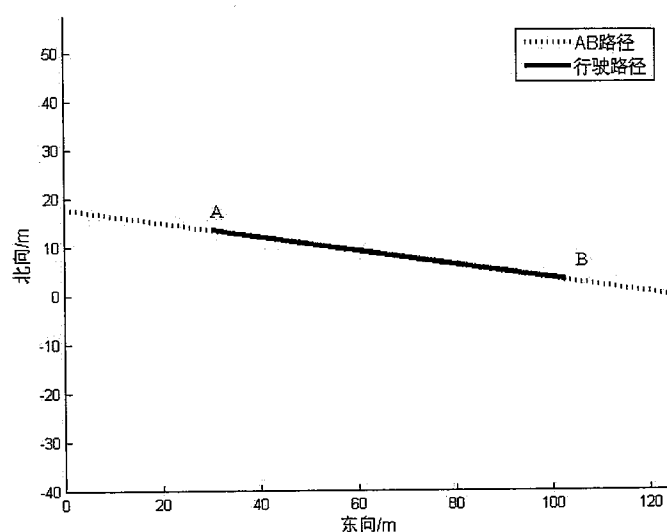


图 4-14 直线路径跟踪效果图

Fig.4-14 Straight-line path tracking effect diagram

表 4-1 直线路径跟踪误差数据统计

Tab. 4-1 Data statistics of the lateral deviation of the straight-line path tracking

速度 (次) (m/s)	初始对齐偏差(m)	最大误差(m)	绝对值平均误差(m)
0.6 (1)	0.23	0.11	0.04
0.6 (2)	0.11	0.10	0.04
0.6 (3)	0.24	0.11	0.04
0.8 (1)	0.08	0.10	0.04
0.8 (2)	0.17	0.11	0.04
0.8 (3)	0.19	0.10	0.03
1.0 (1)	0.20	0.10	0.03
1.0 (2)	0.26	0.10	0.04
1.0 (3)	0.26	0.11	0.04
1.2 (1)	0.30	0.10	0.04
1.2 (2)	0.17	0.11	0.04
1.2 (3)	0.08	0.11	0.04
平均		0.11	0.04

(2) 曲线路径跟踪实验

为了满足农机地头转向的需要, 本文进行了直线-圆弧-直线的曲线路径跟踪实验。在田地上设置基本上相互垂直的两条直线路径, 然后确定农机从一条直线路径行驶到另一条直线路径所需要行驶的圆弧的曲线圆心和曲线半径, 本文将这种由直线-圆弧-直线组成的路径作为农机的曲线跟踪路径, 如图 4-15 所示。

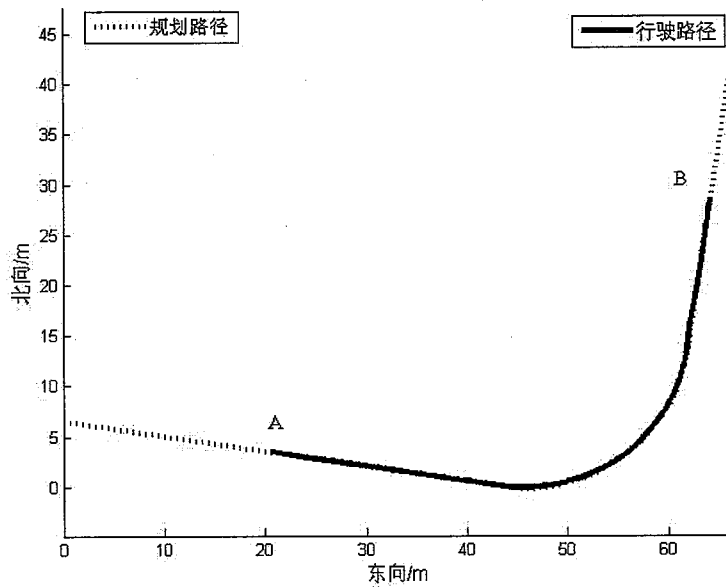


图 4-15 曲线路径跟踪效果图

Fig. 4-15 Curve path tracking effect diagram

在路径的一端（设为 A 点）开动农机，并启动自动导航控制系统，进行自动路径跟踪控制，当农机接近路径的另一端（设为 B 点）时，通过人机界面发送停止导航命令，结束一次曲线路径跟踪实验，其路径跟踪效果如图 4-15 所示。重复上述实验，进行 0.6 m/s 和 0.8 m/s 两种速度的曲线路径跟踪实验各三次。由于本文实验时选用的曲线路径是预先规划好的圆弧曲线和直线组成的，其曲率和圆心是已知的，所以根据农机当前的位置点到曲线圆心的距离与曲线的半径之间的差值就可以知道当前农机的位置与曲线路径之间的偏差，即横向位置跟踪误差。实验数据统计结果如表 4-2 所示。

表 4-2 曲线路径跟踪误差数据统计

Tab. 4-2 Data statistics of the lateral deviation of the curve path tracking

速度（次）(m/s)	初始对齐偏差(m)	最大误差(m)	绝对值平均误差(m)
0.6 (1)	0.03	0.18	0.07
0.6 (2)	0.20	0.18	0.08
0.6 (3)	0.12	0.16	0.07
0.8 (1)	0.12	0.16	0.08
0.8 (2)	0.06	0.15	0.06
0.8 (3)	0.17	0.17	0.07
平均		0.17	0.07

(3) 本文方法的实验结果分析

根据表 4-1 和表 4-2 所示, 本文提出的方法在不同的初始位置偏差(农机开始自动路径跟踪前偏离目标路径的距离)下, 都能够得到较好的直线和曲线路径跟踪精度, 验证了本文方法的有效性。而且在不同的速度条件下, 路径跟踪的各种误差指标基本上没有变化, 因此本文方法的精度与农机行驶速度无关, 验证了本文方法对速度变化具有很好的鲁棒性。

曲线路径的跟踪精度相对于直线路径跟踪精度变差, 这是因为农机跟踪曲率较大的路径时, 相应的车轮角度变化率也变大, 电控机械式转向执行装置的反应速度不能达到这种变化的要求所引起的。另外当路径曲率变的很大时, 由于农机本身的转弯半径的限制也会产生这样的结果。

4.4.5.3 与 PID 方法的性能比较

为了进一步验证本文提出的方法, 将本文方法与常用的 PID 控制方法进行比较。进行 0.6m/s、0.8m/s 和 1.0m/s 三种速度的直线路径跟踪实验, 每个速度进行三次实验, 实验过程如上述描述, 每种速度的误差统计数据为该速度下三次实验数据的平均值。联合收割机导航控制实验中横向位置误差数据统计的对比结果如表 4-3 所示。

表 4-3 本文方法与 PID 方法的误差数据统计对比

Tab. 4-3 Deviation data statistics comparisons between the proposed method and PID method

速度(m/s)	本文方法	PID	本文方法	PID
	最大误差 (m)	最大误差 (m)	绝对值平均误差 (m)	绝对值平均误差 (m)
0.6	0.11	0.15	0.04	0.07
0.8	0.10	0.20	0.04	0.09
1.0	0.10	0.26	0.04	0.12

根据表 4-3 所示, PID 方法的路径跟踪性能与本文方法的性能相比明显变差, 而且当速度增加时, 各项误差统计指标也随之变差, 这是因为在某一速度下调整的 PID 控制参数, 当速度变化(即传统的模型参数发生变化)时便不再适用, 表明 PID 方法对于速度的变化不具有鲁棒性。通过对比实验进一步验证了本文方法对速度变化具有很好的鲁棒性, 并且具有较高的控制精度。

4.5 本章小结

本章研究了三种不同的基于位姿偏差的路径跟踪控制方法, 即最优 PD 农机路径跟踪控制方法, 模糊自适应纯追踪农机路径跟踪控制方法和非线性最优

农机路径跟踪控制方法。

在最优 PD 路径跟踪控制方法研究中, 首先推导出以农机横向位置误差为输出、转向角为输入的传递函数模型, 并将该传递函数模型实现成以位置误差和位置误差的导数为状态变量的状态方程; 然后, 基于此状态方程利用 LQR 方法确定 PD 控制器的比例和微分参数, 得到符合某一性能指标的最优参数, 从而保证农机最优地跟踪期望路径行驶。方法验证实验数据统计结果显示, 采用基于最优 PD 的导航控制方法进行拖拉机自动导航控制实验时, 路径跟踪误差的绝对值平均值为 0.02m, 标准差为 0.04m。

在模糊自适应纯追踪路径跟踪控制方法研究中首先研究了农机的纯追踪模型, 并详细分析了纯追踪模型中的前视距离参数对路径跟踪控制效果的影响; 然后基于该分析结果提出一种模糊控制规则可在线调整的模糊控制器, 进而采用这种模糊控制器来在线自适应地确定前视距离参数; 最后结合农机的运动学模型设计出基于模糊自适应纯追踪模型的路径跟踪控制器, 该路径跟踪控制方法克服了最优 PD 方法或者传统控制方法设计过程中对农机模型进行小角度假设的缺点; 而且也解决了纯追踪模型中前视距离的实时自适应确定问题, 增强了纯追踪路径跟踪方法对不同初始误差状态的适应性和鲁棒性。方法验证实验数据统计结果显示, 采用基于模糊自适应纯追踪模型的导航控制方法进行插秧机自动导航控制实验时, 路径跟踪误差的绝对值平均值小于 0.05m, 最大跟踪误差的绝对值小于 0.08m, 标准差小于 0.03m, 完全满足插秧机作业的要求。

在非线性最优路径跟踪控制方法研究中首先建立了基于空间参数(即路径弧长参数)驱动的非线性农机相对运动学模型; 然后研究了基于空间参数建模的合理性和基于该模型进行控制方法设计的可行性问题; 最后针对该非线性模型进行内环的反馈线性化设计和外环的最优化设计, 得到在某一性能指标下最优的且与行驶速度无关的农机路径跟踪控制律, 该方法在设计过程中不需要对非线性模型进行常速假设和小角度近似处理, 更加适合于农机田间曲线路径作业时的实际情况。方法验证实验数据统计结果显示, 采用基于非线性最优控制的导航控制方法进行大型联合收割机自动导航控制实验时, 直线路径跟踪的绝对值平均误差为 0.04m, 最大误差为 0.11m; 曲线路径跟踪的绝对值平均误差为 0.07m, 最大误差为 0.17m。

第 5 章 基于期望横摆角速度的路径跟踪控制研究

5.1 引言

由于农机本身的复杂性、土壤等农田环境以及农机具负载的不确定性的存在,导致农机导航控制系统为一个复杂的不确定性系统。基于位置偏差和航向偏差(位姿偏差)的方法对农机导航控制系统参数的变化和外部干扰不具有鲁棒性,也没有考虑到机具负载变化等情况导致的农机动力学特性的变化,因此在农机受到大的扰动时采用基于位姿偏差的路径跟踪控制方法难以取得预期的效果。针对这个问题,本章提出一种基于期望横摆角速度的农机路径跟踪控制方法,该方法将农机的路径跟踪控制任务进一步分解成两个级联的控制任务,即横向位置控制和横摆角速度控制。针对横向位置控制,采用第 4 章研究的基于位姿偏差的路径跟踪控制方法决策出农机的期望横摆角速度;针对横摆角速度控制,提出一种自适应前馈控制与鲁棒反馈控制相结合的横摆角速度鲁棒自适应控制方法,消除了机具负载、外部干扰等对横摆角速度动力学产生的影响,使农机的横摆角速度按照期望的横摆角速度变化,从而保证了农机横向位置响应的一致性。与已有的方法相比,本章方法不仅能够提高农机路径跟踪的精度,而且具有很好的鲁棒自适应性。

5.2 基于期望横摆角速度的路径跟踪控制方法原理

由于机具负载和复杂的田间路面环境的变化及机械振动会给农机的横摆角速度动力学带来很大的扰动,单纯采用基于位姿偏差的路径跟踪方法已经不能满足精度和鲁棒性要求,需要加入横摆角速度控制来提高路径跟踪控制的精度和鲁棒性能。采用级联式控制策略可以将一个复杂的农机路径跟踪控制过程分解为一系列级联的控制过程来完成,而每个控制过程可以单独使用各自对应的控制器进行控制。

本章将路径跟踪控制分解为两个级联的控制过程来完成,即横向位置控制和横摆角速度控制过程。横向位置控制的目的是产生路径跟踪所需要的期望横摆角速度;横摆角速度控制的目的是在农机存在参数不确定性或者外部干扰的情况下,使横摆角速度按照期望的横摆角速度变化,最终使农机精确地跟踪期望的路径行驶。基于期望横摆角速度的农机路径跟踪控制框图如图 5-1 所示。

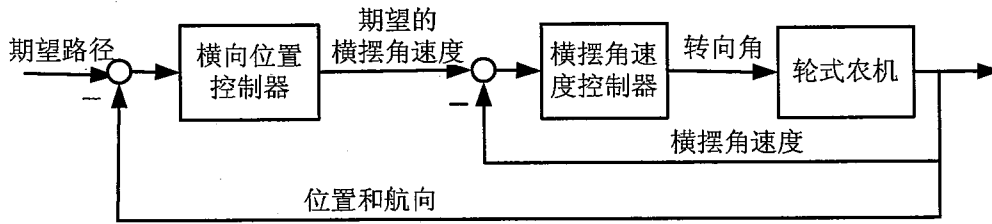


图 5-1 基于期望横摆角速度的农机路径跟踪控制框图

Fig.5-1 The control diagram of the agricultural machine path tracking based on the desired yaw rate

农机横向位置控制的目的是确定使横向位置误差趋于 0 所需要的横摆角速度。为了达到这个目的，横向位置控制器根据农机与路径之间的相对位姿关系，确定农机跟踪到路径所需要的期望横摆角速度。第 4 章研究的路径跟踪控制方法都能够决策出农机的期望转向角，进而可以根据农机横摆角速度运动学模型 (5-1)，确定农机的期望横摆角速度。

$$\gamma_{des} = \frac{V \tan \delta}{L} \quad (5-1)$$

或者，根据 4.3 节和 4.4 节的路径跟踪控制方法可以直接决策出农机跟踪到路径所需的即时转弯曲率 ρ ，然后结合农机的当前速度 V ，根据如下的关系式 (5-2) 确定农机的期望横摆角速度。

$$\gamma_{des} = V \rho \quad (5-2)$$

假设农机转向角 δ 和车体侧偏角 β 都很小，那么可以推导出农机的稳态运动学和动力学转向特性分别为：

(1) 农机运动学容许的跟踪能力

$$\rho = \frac{\tan \delta}{L} \quad (5-3)$$

(2) 农机动力学容许的跟踪能力

$$\rho = \frac{\tan \delta}{L - \frac{mV^2 \Delta}{C_f C_r L}} \quad (5-4)$$

其中， $\Delta = L_f C_f - L_r C_r$ ；

m 为农机的质量；

C_f 和 C_r 分别为农机前后轮胎的侧偏刚度。

值得注意的是，农机的转向行为不是农机的固有属性，它很大程度上依赖

于轮胎与地面之间的附着条件、农机本身的动态特性及农机的行进速度等因素。

当 $\Delta = L_f C_f - L_r C_r$ 为零时，为农机中性转向，即农机的速度不再影响农机的转向行为。此时农机动力学容许的跟踪能力退化为运动学容许的跟踪能力。从这个角度来看，通过 (5-1) 求取的期望横摆角速度是通过 (5-2) 求取的期望横摆角速度的特例。

此外，还可以通过设计一个前馈滤波器的方式来确定农机的期望横摆角速度，这种方法在汽车稳定性控制领域较常用，本文中不采用这种方法。

在确定了农机路径跟踪过程中的期望横摆角速度之后，本章接下来重点研究农机的横摆角速度控制方法。

5.3 农机横摆角速度动力学模型

5.3.1 单机横摆角速度动力学模型

本文以前轮转向、后轮驱动的农机作为被研究的轮式农机对象，研究其横摆角速度动力学模型。本文忽略农机内外侧轮子之间的重力转移，将内外侧轮子分别合二为一处理，虚拟看成为农机中轴上的单个轮子，即采用二轮车模型来描述农机的横摆角速度动力学特性。

根据牛顿第二定律，并且假设 δ ， β 很小，可以得到农机的横向力和力矩平衡方程如下所示。

$$\begin{cases} m(v\dot{\beta} + v\gamma) = F_f + F_r \\ I_z \dot{\gamma} = L_f F_f - L_r F_r \end{cases} \quad (5-5)$$

其中， F_f, F_r 分别为作用在农机前后轮上的横向力；

L_f, L_r 分别为农机前轮和后轮到农机质量中心的距离；

L 为农机的轴距；

m 为农机的质量；

v 为农机的行驶速度；

I_z 为农机的转动惯量；

γ 为农机的横摆角速度；

β 为农机的车体侧偏角。

假设农机前后轮的侧偏角比较小，则车轮的侧向力与侧偏刚度及侧偏角成线性关系，即

$$\begin{cases} F_f = C_f \alpha_f = C_f (\delta - \beta - \frac{L_f}{v} \gamma) \\ F_r = C_r \alpha_r = C_r (-\beta + \frac{L_r}{v} \gamma) \end{cases} \quad (5-6)$$

其中, δ 为农机的转向轮偏转角度;

C_f, C_r 分别为农机前轮胎和后轮胎的侧偏刚度;

α_f, α_r 分别为前轮胎和后轮胎的侧偏角。

通过上述方程可以求得农机的前轮转向角 δ 到横摆角速度 γ 的传递函数为

$$G'_{\gamma\delta} = \frac{\gamma(s)}{\delta(s)} = \frac{b'_1 s + b'_0}{a'_2 s^2 + a'_1 s + a'_0} \quad (5-7)$$

其中, $a'_0 = C_f C_r L^2 + mv^2 [L_r C_r - L_f C_f]$;

$$a'_1 = v [C_f (I_z + mL_f^2) + C_r (I_z + mL_r^2)];$$

$$a'_2 = mv^2 I_z;$$

$$b'_0 = v C_f C_r L;$$

$$b'_1 = mv^2 L_f C_f。$$

5.3.2 农机-机具横摆角速度动力学模型

由于农机（例如拖拉机）很少在田间进行单机作业，所以有必要研究农机带有机具负载时的动力学特征，为此本文进行农机-机具动力学模型的研究。

农机可以牵引地面接触型机具或者悬挂非地面接触型机具进行作业。针对不同的机具为了能够采用统一的模型来描述，本文将机具负载对农机横摆角速度动力学的影响等效成除农机本身的两个轴外的第三个轴对其横摆角速度动力学的影响，并引入一个广义侧偏刚度和广义侧偏角的概念来描述该轴的横向受力情况，即

$$F_i = C_i \alpha_i \quad (5-8)$$

其中, C_i 和 α_i 为广义侧偏刚度和广义侧偏角，用来建模来自机具的等效的力干扰。

带有机具的轮式农机的横摆角速度动力学模型如图 5-2 所示，图中 H 为机具的牵引点或悬挂点。

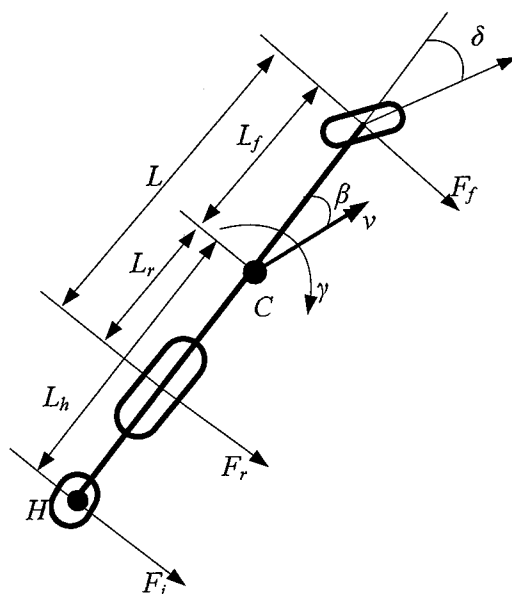


图 5-2 农机二轮车横摆角速度动力学模型示意图

Fig. 5-2 The schematic diagram of yaw rate model of the agricultural machine

根据牛顿第二定律，可以得到农机的横向力和力矩平衡方程如下：

$$\begin{cases} m(v\dot{\beta} + v\gamma) = F_f + F_r + F_i \\ I_z\dot{\gamma} = L_f F_f - L_r F_r - L_h F_i \end{cases} \quad (5-9)$$

其中， F_f, F_r 分别为作用在农机前后轮上的横向力；

L_f, L_r 分别为农机前轴和后轴到农机质量中心 C 的距离；

L_h 为机具等效作用轴到农机质量中心 C 的距离；

m 为农机的质量；

I_z 为农机的转动惯量；

γ 为农机的横摆角速度；

β 为农机的车体侧偏角。

同样根据上节的推导方法，可以求得农机-机具的横摆角速度动力学模型为

$$\begin{cases} \dot{\beta} = -\frac{C_f + C_r + C_i}{mv} \beta + \left(\frac{L_r C_r + L_h C_i - L_f C_f}{mv^2} - 1 \right) \gamma + \frac{C_f}{mv} \delta \\ \dot{\gamma} = \frac{L_r C_r + L_h C_i - L_f C_f}{I_z} \beta - \frac{L_f^2 C_f + L_r^2 C_r + L_h^2 C_i}{I_z v} \gamma + \frac{L_f C_f}{I_z} \delta \end{cases} \quad (5-10)$$

其中， δ 为农机转向轮的偏转角度；

C_f, C_r 分别为农机前轮胎和后轮胎的侧偏刚度。

整理后可以得出如下形式的状态方程：

$$\begin{cases} \dot{\beta} = -\frac{C_f + C_r + C_i}{mv} \beta + \left(\frac{L_r(C_r + \frac{L_h}{L_r} C_i) - L_f C_f}{mv^2} - 1 \right) \gamma + \frac{C_f}{mv} \delta \\ \dot{\gamma} = \frac{L_r(C_r + \frac{L_h}{L_r} C_i) - L_f C_f}{I_z} \beta - \frac{L_f^2 C_f + L_r^2 (C_r + \frac{L_h^2}{L_r^2} C_i)}{I_z v} \gamma + \frac{L_f C_f}{I_z} \delta \end{cases} \quad (5-11)$$

令

$$h = \frac{L_h}{L_r}$$

则根据模型 (5-11) 可以进一步求得农机-机具的横摆角速度动力学模型为

$$\begin{cases} \dot{\beta} = -\frac{C_f + C_r + C_i}{mv} \beta + \left(\frac{L_r(C_r + h C_i) - L_f C_f}{mv^2} - 1 \right) \gamma + \frac{C_f}{mv} \delta \\ \dot{\gamma} = \frac{L_r(C_r + h C_i) - L_f C_f}{I_z} \beta - \frac{L_f^2 C_f + L_r^2 (C_r + h^2 C_i)}{I_z v} \gamma + \frac{L_f C_f}{I_z} \delta \end{cases} \quad (5-12)$$

将上述状态方程 (5-12) 改写成描述转向角 δ 到横摆角速度 γ 关系的传递函数，即

$$G_\gamma = \frac{\gamma(s)}{\delta(s)} = \frac{b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (5-13)$$

其中， $a_0 = C_f C_r L^2 + C_i [C_f (L_f + L_h)^2 + L_r^2 C_r (h-1)^2] + mv^2 [L_r (C_r + h C_i) - L_f C_f]$ ；

$$a_1 = v [C_f (I_z + mL_f^2) + C_r (I_z + mL_r^2) + C_i (I_z + mL_h^2)]；$$

$$a_2 = mv^2 I_z；$$

$$b_0 = v [C_f C_r L + C_f C_i (L_f + L_h)]；$$

$$b_1 = mv^2 L_f C_f。$$

将上述模型与 5.3.1 节中传统的二轮车横摆角速度动力学模型比较，可以得出：机具负载对农机横摆角速度动力学的影响将使横摆角速度模型的参数和稳态增益发生变化，但并不改变模型的结构和阶次，而根据文献[58,74]可知：机

具负载变化对农机动力学模型的暂态性能基本上不产生影响，而主要对其稳态增益产生较大的影响。

另外，未建模动态与机械振动等产生的非结构化不确定性及所受外部干扰力矩产生的不确定性也会对横摆角速度动力学控制产生影响。

为此，本文提出一种鲁棒自适应控制方法来克服这些不确定性对横摆角速度控制造成的负面影响。

5.4 横摆角速度鲁棒自适应控制方法

本文提出一种自适应前馈控制与鲁棒反馈控制相结合的横摆角速度鲁棒自适应控制方法，其控制框图如图 5-3 所示。

图 5-3 中 γ_{des} 和 γ 为期望的横摆角速度和实际的横摆角速度； d_e 为外部干扰； δ_f 和 δ_c 分别为前馈自适应控制量和鲁棒补偿控制量。

根据上节的分析，可将实际受控对象的输入-输出关系表达为如下形式

$$\gamma = G_\gamma(1 + \Delta_m(s))\delta + d_e \quad (5-14)$$

其中， $\Delta_m(s)$ 为未建模动态与机械振动等产生的非结构化不确定性。

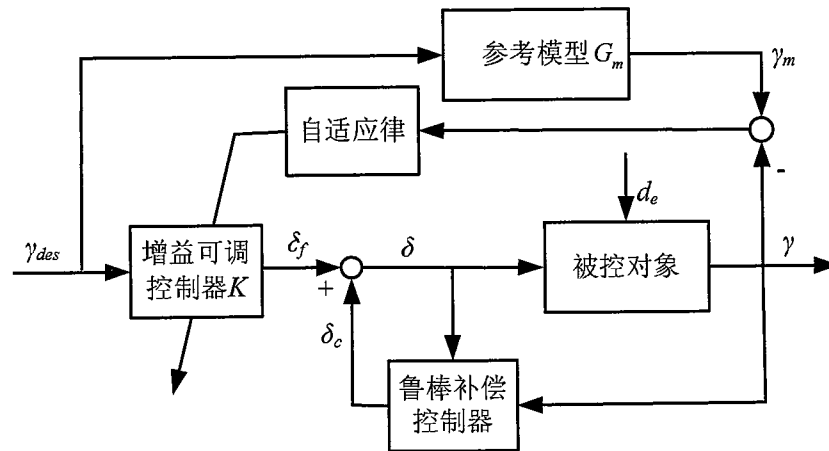


图 5-3 横摆角速度鲁棒自适应控制框图

Fig.5-3 The diagram of yaw rate robust adaptive control

为了使横摆角速度的反应不发生振荡及使推导的控制器具有简单的形式，选择系统的名义模型和参考模型分别为 (5-15) 和 (5-16)。

$$G_n = \frac{K_{ss}}{T_n s + 1} \quad (5-15)$$

其中, $K_{ss} = G_\gamma \Big|_{s=0, C_f=0}$;

T_n 为名义模型时间常数。

$$G_m = \frac{1}{T_m s + 1} \quad (5-16)$$

其中, T_m 为一阶参考模型的时间常数。

进一步, 将上述模型 (5-14) 写成如下形式

$$\gamma = G_n(1 + \Delta_m(s) + \Delta_l(s))\delta + d_e \quad (5-17)$$

其中, $\Delta_l(s)$ 为机具负载变化对系统造成的不确定性, 即由 G_n 代替 G_γ 所产生的模型差。

为了消除 $\Delta_l(s)$, $\Delta_m(s)$ 和 d_e 对横摆角速度控制带来的负面影响, 使横摆角速度控制回路具有期望的鲁棒自适应控制性能, 本文提出如下的鲁棒自适应控制律 (5-18)。

$$\begin{cases} \delta = \frac{1}{1-Q} (K\gamma_{des} - \frac{Q}{G_n}\gamma) \\ \dot{K} = \frac{1}{\lambda T_m K_{ss}} \gamma_{des} e \end{cases} \quad (5-18)$$

其中, $e = \gamma_m - \gamma$;

γ_m 为参考模型 G_m 的输出;

Q 为相对阶为 1 的单位增益低通滤波器, 其截止频率为 w_l 。

为了方便实现, 本文低通滤波器 Q 选择如下形式的低通滤波器:

$$Q = \frac{1}{T_q s + 1} \quad (5-19)$$

其中, T_q 为滤波器时间常数。

关于控制律 (5-18) 的控制性能, 可通过如下 **定理 5-1** 进行论证。在定理阐述之前先介绍一下定理证明中需要用到的引理。

引理 5-1 (Barbalat 定理) ^[125]: 若 $f(t)$ 为一致连续函数, 并且

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t |f(\tau)| d\tau < \infty$$

则有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0$$

推论：如果 $g(t)$ 、 $\dot{g}(t)$ 有界，并且 $g(t)$ 平方可积，则有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 0$$

定理 5-1：如果滤波器满足 $|Q| < |1/\Delta_m(s)|$ ，通过鲁棒自适应控制律 (5-18)

可以使横摆角速度闭环控制系统：

a) 在 Lyapunov 意义下全局渐进稳定，且具有与参考模型 G_m 一致的跟踪性能；

b) 在存在未建模动态和外部干扰时，具有鲁棒稳定性和抗干扰性能；

c) 具有零稳态跟踪误差。

证明：

首先证明 a)：

由于系统 (5-13) 为二阶系统，为了保证闭环稳定性及与参考模型 G_m 一致的跟踪性能，对其进行基于稳定性方法的模型参考自适应控制。理想的模型参考自适应系统需要满足以下条件^[126]：

① 可调系统与参考模型的阶数相同；

② 除输入量外，不存在外部干扰作用于系统。

为此，本文通过鲁棒补偿控制回路将系统 (5-13) 调节成 G_n ，为了达到这个目的，本文选择鲁棒补偿控制量为

$$\delta_c = -\frac{Q}{G_n} \gamma + Q\delta \quad (5-20)$$

进而求得基于鲁棒补偿控制的内环传递函数为

$$\frac{\gamma}{\delta_f} = \frac{G_n G_\gamma}{G_n + (G_\gamma - G_n)Q} \quad (5-21)$$

因为 Q 为单位增益的低通滤波器，则在 $[0, w_l)$ 内， $Q \approx 1$ ，进而可以推得

$$\frac{\gamma}{\delta_f} \approx G_n \quad (5-22)$$

所以可以认为在频带 $[0, w_l)$ 内，通过鲁棒补偿控制的模型调节作用，系统 (5-13) 完全可以采用一阶模型来描述其动态特性，从而保证了条件①的成立。

此外，可以求得干扰到横摆角速度的闭环传递函数模型为：

$$\frac{\gamma}{d_e} = \frac{G_n G_\gamma (1-Q)}{G_n + (G_\gamma - G_n)Q} \quad (5-23)$$

由于干扰 d_e 主要是低频干扰，即其频率在频带 $[0, w_l)$ 内，并且在频带 $[0, w_l)$ 内 $Q \approx 1$ ，所以可得 $\frac{\gamma}{d_e} \approx 0$ ，从而保证条件②的成立。

至此，选择 Lyapunov 函数（如式（5-24））和参数自适应律（5-25）。

$$V = e^2 + \lambda \tilde{K}^2 \quad (5-24)$$

$$\dot{K} = \frac{1}{\lambda T_m K_{ss}} \gamma_{des} e \quad (5-25)$$

其中， $\tilde{K} = 1 - KK_{ss}$ ；

$\lambda > 0$ 决定自适应律的收敛快慢。

进而可推得

$$\dot{V} = -\frac{2}{T_m} e^2 \leq 0 \quad (5-26)$$

所以，采用自适应律（5-25）可保证控制系统在 Lyapunov 意义下全局稳定，且具有与参考模型 G_m 一致的跟踪性能。

至此定理中的结论 a) 得证。

其次证明 b)：

本文的控制结构主要通过内环的鲁棒补偿控制器的控制来保证系统的鲁棒性能，在 a) 的证明过程中，可以得知系统具有抗干扰的作用，下面证明系统对于未建模动态、低阶近似等带来的模型差的鲁棒稳定性问题。

根据小增益定理^[127]和模型（5-17）可知，鲁棒补偿控制回路闭环鲁棒稳定的充分必要条件为：

$$|-Q(\Delta_m(s) + \Delta_l(s))| < 1 \quad (5-27)$$

所以，只要选择满足上述条件的滤波器 Q 就能保证闭环系统的鲁棒稳定性。

由于机具负载变化造成的系统参数摄动 $\Delta_l(s)$ 主要影响系统的稳态增益，其对系统的影响主要是稳态跟踪精度，可以通过前馈控制增益进行自适应调整。而对系统动态鲁棒稳定性的影响主要来自不确定项 $\Delta_m(s)$ ，所以可以进一步将鲁棒稳定性条件放宽为

$$|-Q\Delta_m(s)| < 1 \quad (5-28)$$

因此只要满足上述条件（5-28），鲁棒补偿控制回路就具有很好的抗干扰性能和鲁棒稳定性。

至此定理中的结论 b) 得证。

最后证明 c)：

通过 a) 证明过程中的（5-26）可知：

$$\dot{V} \leq 0$$

进一步可得，

$$\int_0^{\infty} e^2 dt = \frac{T_m}{2} (V(0) - V(\infty)) < \infty \quad (5-29)$$

根据引理 5-1（即 Barbalat 定理）的推论可知，

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\gamma_m - \gamma) = 0 \quad (5-30)$$

所以，当系统存在稳态不确定性时，采用自适应控制律（5-25）可实现横摆角速度控制回路的零稳态误差跟踪性能。

综上，定理中的结论 a)、b)和 c)得证。

证毕。

定理 5-1 的证明是假设转向执行控制是理想的情况下进行的，即转向执行系统能够完全跟踪期望的转向角，不存在稳态误差。然而实际应用时并不能保证转向系统完全跟踪期望的转向角，那么当转向执行系统存在稳态误差时，是否还能得到上述**定理 5-1**中的结论。下面通过**推论 5-1**予以阐述。

推论 5-1：设转向执行系统的传递函数为 G_a ，当转向执行系统存在稳态误差，即转向执行系统的稳态增益 $|G_{ass}| \neq 1$ 时，只要 $|QG_a\Delta_m(s)| < 1$ 成立，仍可以得到**定理 5-1**中的结论。

推论 5-1 的证明过程类似**定理 5-1**，不再赘述。

5.5 仿真验证

本节通过仿真实验，验证本文所研究并提出的鲁棒自适应控制方法的理论推导结果以及验证本文方法较其他方法的有效性和优越性。

在仿真实验中使用的农机模型参数^[59]如表 5-1 所示。仿真中鲁棒自适应控制器参数取值如下： $K_{ss}=0.1854$ ， $T_m=0.3$ ， $T_n=0.2$ ， $T_q=0.02$ ， $\lambda=0.2$ 。本文主要进行以下几种仿真实验，即横摆角速度的阶跃响应仿真实验，存在常值干扰时的横摆角速度控制响应仿真实验，存在低频干扰时的横摆角速度控制响应仿真实验，转向执行系统存在稳态误差时的横摆角速度控制响应仿真实验以及跟踪正弦信号时横摆角速度控制响应仿真实验。

表 5-1 横摆角速度动力学模型参数

Tab.5-1 The parameters of the yaw rate dynamics model

参数	值
I_z	18500kg/m^2
m	11340kg
L_f	1m
L_r	2m
L_h	4m
C_f	2400N/deg
C_r	5000 N/deg
C_l	4000 N/deg
v	1 m/s

(1) 横摆角速度的阶跃响应

设置期望横摆角速度输入为 $\gamma_{des}=5\text{deg/s}$, 当无外部干扰存在时, 分别采用本文方法、自适应方法和 PID 方法对横摆角速度进行控制, 其结果如图 5-4 所示。从图中可以看出: 本文方法具有最好的动态和稳态跟踪性能。

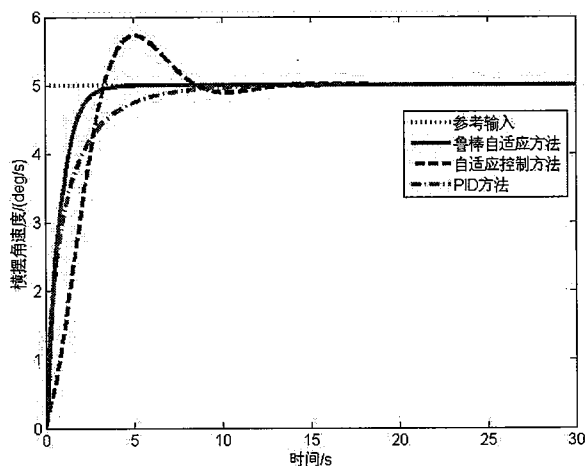


图 5-4 横摆角速度的阶跃响应曲线

Fig.5-4 Yaw rate step response curves

(2) 存在常值干扰时的横摆角速度控制响应

当系统存在常值外部干扰时(假设有 5deg/s 的常值干扰在 10s 处加到系统上), 同样采用上述三种方法对横摆角速度进行控制, 其结果如图 5-5 所示。从仿真结果可知: 所采用的控制方法都能使系统稳定, 但是从 10s 处的局部放大图(图 5-6)中可以看出, 对常值干扰抑制的动态性能本文的方法明显优于其余两种方法。

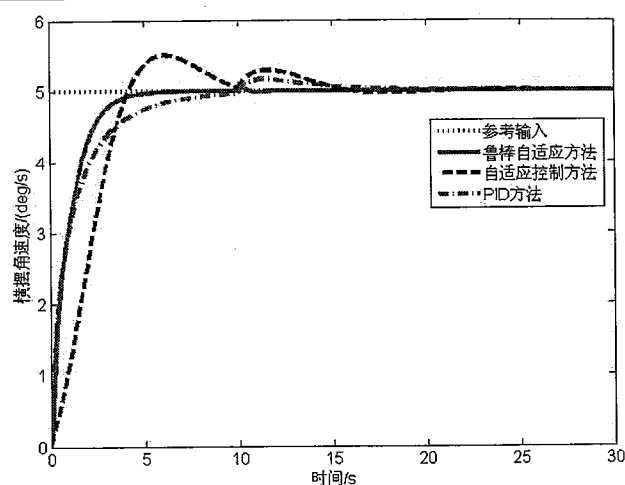


图 5-5 存在常值干扰时的横摆角速度控制响应曲线

Fig.5-5 Yaw rate control response curves with constant disturbances

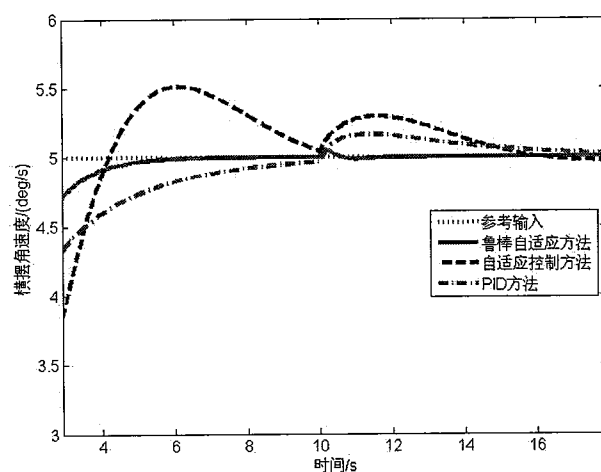


图 5-6 横摆角速度响应的局部放大图

Fig.5-6 Partial enlarged curves of yaw rate control response

(3) 存在低频干扰时的横摆角速度控制响应

当系统存在低频外部干扰时（假设存在幅值为 5deg/s，频率为 0.1Hz 的低频外部干扰），同样采用上述三种方法对横摆角速度进行控制，其结果如图 5-7 所示。从仿真结果可以得知：本文方法同样可以取得较好的稳态和动态跟踪性能，而其余两种方法具有不稳定的稳态跟踪性能。

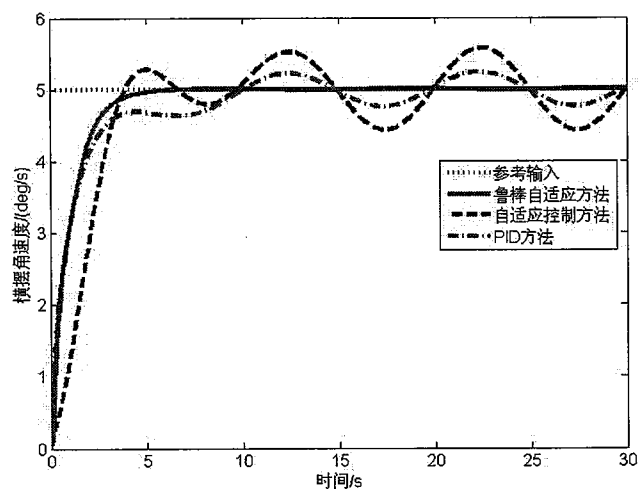


图 5-7 存在低频干扰时的横摆角速度控制响应曲线

Fig.5-7 Yaw rate control response curves with low frequency disturbances

(4) 转向执行系统存在稳态误差时的横摆角速度控制响应

当转向执行系统存在稳态误差 (如 $|G_a| = 0.9$) 时, 如图 5-8 所示, 本文方法、自适应方法和 PID 方法都能达到零稳态误差的跟踪性能, 但是本文方法具有更好的动态跟踪性能。为了说明本文方法中可调增益控制器 (前馈自适应控制器) 的性能, 同样进行了固定增益控制器仿真实验。选择在转向执行系统没有稳态误差时能取得很好跟踪效果的 K 值作为控制器的固定增益, 然而, 如图 5-8 所示, 在转向执行系统存在稳态误差时, 横摆角速度的控制响应存在稳态误差。

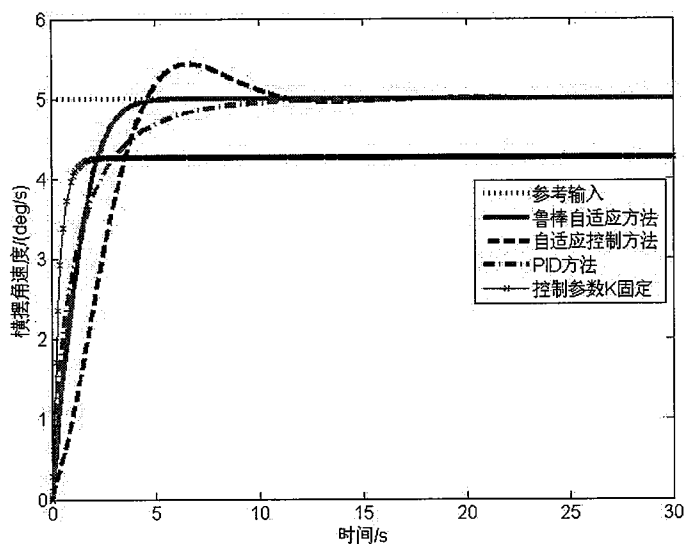


图 5-8 转向执行系统存在稳态误差时的横摆角速度控制响应曲线

Fig.5-8 Yaw rate control response curves with steering system steady state error

(5) 跟踪正弦信号时横摆角速度控制响应

为了进一步验证本文方法的跟踪性能，设置期望横摆角速度输入的幅值为 5deg/s、频率为 0.5Hz 的正弦信号，同样采用本文方法、自适应方法和 PID 方法进行仿真实验，实验结果同样表明本文方法较其他两种方法具有更为优越的跟踪性能，如图 5-9 所示。

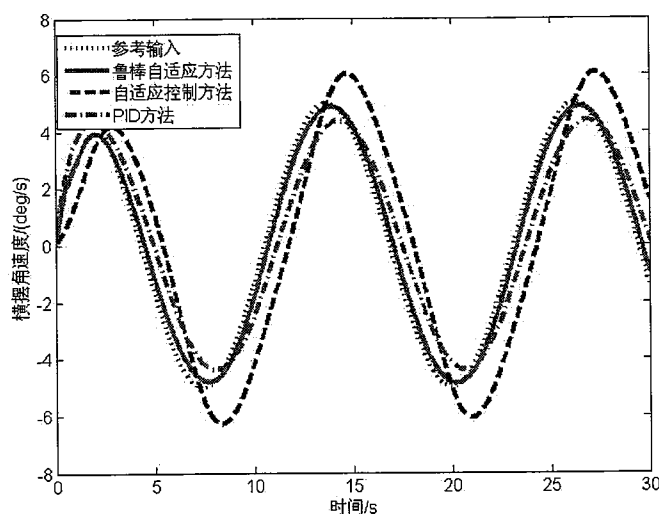


图 5-9 跟踪正弦信号时的横摆角速度控制响应曲线

Fig.5-9 Yaw rate control response curves when tracking sinusoidal signal

5.6 基于期望横摆角速度的导航控制实验

本节选择 4.3 节研究的路径跟踪控制方法设计横向位置控制器 (G_{LPC})，决策出期望横摆角速度；而横摆角速度鲁棒自适应控制器 ($G_{\gamma C}$) 和转向控制器 (G_{SC}) 分别采用本章和第 3 章研究的方法进行设计，进而得到基于期望横摆角速度的三级级联式导航控制器，并应用于本节的方法验证实验。算法具体实现步骤如下：

步骤 1：第一级的横向位置控制器 (G_{LPC}) 根据位姿传感器获得的农机位置和姿态信息（主要指航向）以及作业路径信息，确定农机与路径之间的位置误差和航向误差。然后根据纯追踪模型 (4-19)，即

$$\rho = 2(d \cos \theta_e - \sqrt{L_d^2 - d^2} \sin \theta_e) / L_d^2$$

确定农机期望行驶轨迹的即时曲率 ρ 。纯追踪模型中的前视距离参数采用模糊自适应控制律 (4-20) 在线自适应地确定。

最后，根据速度传感器获取的农机当前速度，并结合式 (5-2) 决策出农机

当前期望的横摆角速度。

步骤 2: 第二级的横摆角速度鲁棒自适应控制器 ($G_{\gamma c}$) 将步骤 1 决策的期望横摆角速度作为参考输入, 并实时检测农机的当前横摆角速度, 然后根据鲁棒自适应控制律 (5-18), 即

$$\begin{cases} \delta = \frac{1}{1-Q} (K\gamma_{des} - \frac{Q}{G_n} \gamma) \\ \dot{K} = \frac{1}{\lambda T_m K_{ss}} \gamma_{des} e \end{cases}$$

确定农机的期望转向角, 从而使农机的横摆角速度按照期望的横摆角速度变化。

步骤 3: 第三级的转向控制器 (G_{sc}) 根据步骤 2 确定的期望转向角和检测到的实际转向角, 利用控制律(3-25) 计算出农机转向驱动器的控制输入, 从而控制农机转向轮快速且无超调地跟踪期望转向角, 最终达到农机自动驾驶控制的目的。

步骤 4: 重复步骤 1~3。

本节以 2.4 节所描述的拖拉机导航控制系统为实验平台, 进行直线路径导航控制实验, 所使用的农机具为喷药机。实验中本文所提出的鲁棒自适应控制律的参数与仿真实验中所使用的参数相同。实验田地收获完的农田, 属于旱田。由于田间地埂或者田面坑洼起伏将不可避免地使农机发生倾斜, 这会对农机定位带来误差。为此, 实验过程中通过姿态传感器测得的姿态角对定位传感器的定位数据进行倾斜补偿, 以此来消除定位误差。

(1) 阶跃响应实验

这部分实验主要比较本文方法在有机具和无机具时的性能。在距离期望路径大约 70cm 的地方启动农机的自动驾驶控制系统。图 5-10 是农机的行驶速度为 0.8m/s 时, 在有机具与无机具情况下的路径跟踪误差变化曲线; 图 5-11 是农机的行驶速度为 1.2m/s 时, 在有机具与无机具情况下的路径跟踪误差变化曲线。从这两个图中可以得知: 在同一速度下, 农机有机具和无机具时的路径跟踪误差曲线基本保持一致。这说明当机具负载变化时, 本文方法可以得到一致的横向位置响应性能。另外, 农机跟踪到路径后的误差数据统计结果也显示了, 本文方法在有无机具的情况下, 跟踪误差的平均值都为 0.01m, 标准差都为 0.02m。

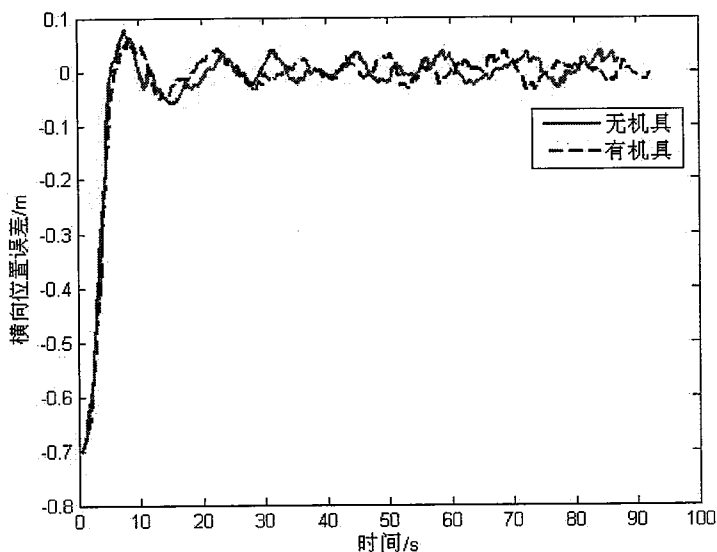


图 5-10 速度为 0.8m/s 时的路径跟踪误差曲线

Fig.5-10 The path tracking error curves at the speed of 0.8 m/s

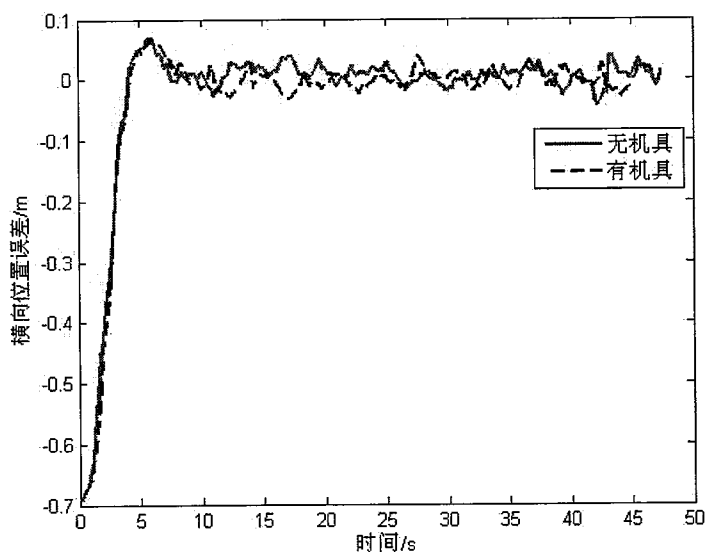


图 5-11 速度为 1.2m/s 时的路径跟踪误差曲线

Fig.5-11 The path tracking error curves at the speed of 1.2 m/s

(2) 与其他控制方法的比较实验

为了进一步验证本文方法的优越性,这部分实验主要将目前普遍采用的路径跟踪控制方法与本文研究的基于期望横摆角速度的路径跟踪控制方法进行比较。图 5-12 显示了农机行驶速度为 1.0m/s 时,本文方法与纯追踪方法、LQR 方法的误差变化曲线。从图中可以定性地看出,本文方法的性能优于其他两种方法。

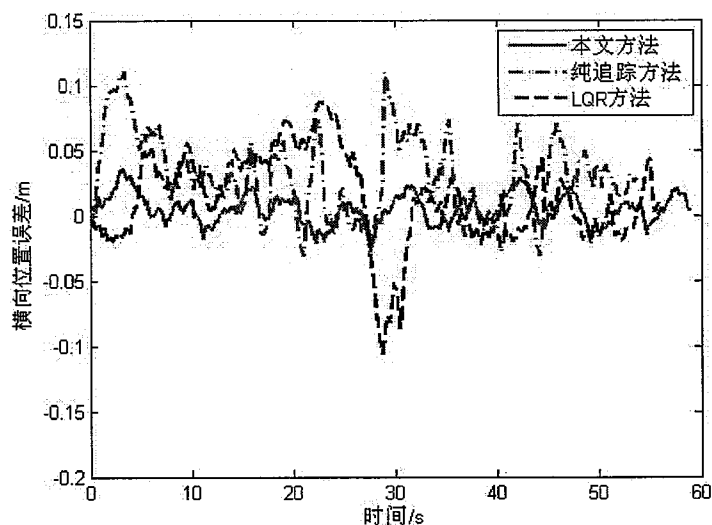


图 5-12 速度为 1m/s 时的路径跟踪误差比较

Fig.5-12 Path tracking error comparison at the speed of 1m/s

为了定量的描述这几种方法的性能指标,本文进行了多次不同速度的路径跟踪实验,并采用农机跟踪到路径后的稳态误差数据进行数据统计分析,实验数据统计结果如表 5-2 所示,表中数据为多次实验数据统计结果的平均值。误差统计结果进一步定量地说明了本文方法的优越性。

表 5-2 不同方法的误差数据统计

Tab. 5-2 Error statistics of different methods

方法	误差绝对值平均值(m)	标准差(m)	最大误差(m)
本文方法	0.01	0.02	0.05
纯追踪方法	0.04	0.05	0.11
LQR 方法	0.05	0.04	0.10

5.7 本章小结

在机具负载和外部干扰的影响下,农机的横摆角速度动力学特性会发生变化,从而导致基于位姿偏差的路径跟踪控制方法的导航控制性能变差。为了解决这个问题,本章提出一种基于期望横摆角速度的路径跟踪控制方法。该方法将基于位姿偏差的路径跟踪控制进一步分解为横向位置控制和横摆角速度控制。由于在横向位置控制中可以采用第 4 章介绍的方法确定农机的期望横摆角速度,因此本章在介绍基于期望横摆角速度的路径跟踪控制方法的原理后重点研究了农机的横摆角速度鲁棒自适应控制方法。首先建立了农机单机横摆角速

度动力学模型和农机-机具横摆角速度动力学模型，分析了农机牵引或者悬挂机具负载时的动力学特性。然后，基于所建的农机-机具横摆角速度动力学模型提出了一种鲁棒自适应控制方法，并通过定理证明了所提出的鲁棒自适应控制方法能够使农机的横摆角速度控制回路具有以下控制性能：在 Lyapunov 意义下全局渐进稳定，且具有与参考模型一致的跟踪性能；在存在未建模动态和外部干扰时，具有鲁棒稳定性和抗干扰性能；具有零稳态跟踪误差。最后，通过仿真实验验证了横摆角速度鲁棒自适应控制方法的理论推导结果和较其他方法的优越性；通过拖拉机自动驾驶控制实验验证了基于期望横摆角速度的路径跟踪控制方法可以消除机具负载、外部干扰等对横摆角速度动力学产生的影响，使农机的横摆角速度按照期望的横摆角速度变化，保证了农机横向位置响应的一致性，实验数据统计结果显示，本文方法在有无机具的情况下，跟踪误差的平均值都为 0.01m，标准差都为 0.02m，并且优于其他常用的路径跟踪控制方法。

第6章 级联式导航控制方法在农机自动导航系统中的应用研究

6.1 引言

本章首先研究了农机自动导航控制系统应用实现上的相关问题，即转向角度检测装置的标定方法、农机与路径之间相对位姿的获取方法和多条连续路径自动导航控制作业时的地头转向方法。然后本章采用所研究的级联式导航控制方法在拖拉机导航控制平台上进行了多条连续路径的自动导航控制应用实验，并对导航控制实验的结果进行了分析与讨论。最后通过多条连续路径自动导航控制实验的结果进一步验证了本文所提出方法的有效性和优越性以及基于本文方法的农机自动导航控制系统应用的可行性。

6.2 农机相对位姿的确定方法

在本文阐述的农机导航控制系统中，农机的绝对位置信息通过 RTK-GPS 获取；姿态信息（主要指航向信息）通过 MTi 获取。如何精确地获取农机的相对位姿信息是实现农机自动导航控制的关键环节，因此本节对农机相对位姿确定过程中的相关方法和细节问题进行研究。

6.2.1 GPS 天线倾斜补偿方法

农机在田间行驶过程中，由于路面的坑洼不平或田间地面本身具有的坡度角将会造成 GPS 天线倾斜，这样便会导致 GPS 定位不准确。因此有必要对 GPS 天线倾斜进行定位补偿（也有文献称之为地形补偿）。GPS 天线倾斜主要有两种方式，一种是由于农机的横滚角而产生的倾斜；另一种是由于农机的俯仰角而产生的倾斜。前种方式造成的 GPS 天线的倾斜如图 6-1 所示，其主要导致农机与路径之间的横向定位偏差；而后种方式造成的 GPS 天线的倾斜如图 6-2 所示，其主要导致农机与路径之间的纵向定位偏差。

定义 GPS 天线的安装位置距离农机控制中心的高度为 H (单位为 m)，农机的横滚角为 φ 、俯仰角为 θ ，那么由横滚角导致的 GPS 天线倾斜所产生的横向定位误差为

$$e_y = H \sin(\varphi)$$

其中， e_y 为横向定位误差。

由俯仰角导致的 GPS 天线倾斜所产生的纵向定位误差为

$$e_x = H \sin(\theta)$$

其中， e_x 为纵向定位误差。

将误差 e_x ， e_y 变换到导航坐标系中，得到导航坐标系中的东向 (X) 和北向 (Y) 的误差 E_x ， E_y 如下：

$$\begin{cases} E_x = e_x \cos \psi - e_y \sin \psi \\ E_y = e_x \sin \psi + e_y \cos \psi \end{cases} \quad (6-1)$$

其中： E_x 为 GPS 的东向定位误差；

E_y 为 GPS 的北向定位误差；

ψ 为农机的航向角。

最后，通过误差 E_x ， E_y 就可以对 GPS 的原始定位数据进行校正。

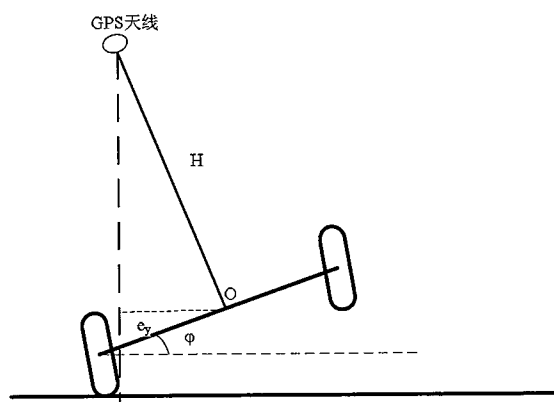


图 6-1 横滚角产生的 GPS 定位误差

Fig. 6-1 GPS positioning error due to roll angle

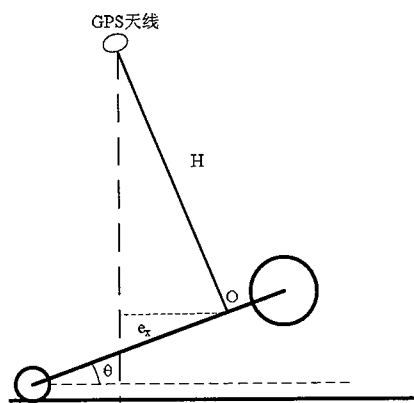


图 6-2 俯仰角产生的 GPS 定位误差

Fig.6-2 GPS positioning error due to pitch angle

6.2.2 农机与路径之间的相对位置确定方法

通过 RTK-GPS 可以直接得到农机在 UTM (Universal Transverse Mercator) 坐标系中的直角坐标, 然后通过坐标变换可以将农机在 UTM 坐标系中的坐标变换到农机在导航坐标系中的坐标。

假设 RTK-GPS 获取的二维农机位置坐标为 (x^{UTM}, y^{UTM}) , 农机在本地导航坐标系中的坐标为 (x^N, y^N) , 本地导航坐标系的坐标原点在 UTM 坐标系中的坐标为 (x^O, y^O) , 则通过运动学变换可以得到如下的关系式 (6-2)。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x^N \\ y^N \end{bmatrix} &= {}^N R_U \cdot \begin{bmatrix} x^{UTM} \\ y^{UTM} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^O \\ y^O \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x^{UTM} \\ y^{UTM} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^O \\ y^O \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6-2)$$

在本文中, 本地导航坐标系 X 轴与 Y 轴的选择与 UTM 坐标系的 X 轴与 Y 轴的选择相同, 因此坐标变换矩阵 ${}^N R_U$ 中的坐标系旋转角度 $\phi=0$ 。

在农机路径跟踪时, 农机与路径之间的位置误差是个具有符号的量。当农机在期望路径的右侧时, 相对位置误差为正; 当农机在期望路径左侧时, 相对位置误差为负。在不考虑航向误差的情况下, 当农机与路径间的相对位置误差为正时, 农机应向左转向; 当农机与路径之间的横向位置误差为负时, 农机应向右转向; 农机与路径之间的位置误差为零时, 表明农机在路径上。

下面分别讨论农机跟踪直线路径和曲线路径时的相对位置误差计算方法:

(1) 农机跟踪直线路径时的相对位置误差计算

设农机当前点 P 在导航坐标系中的坐标为 (x_p^N, y_p^N) , 直线路径的 A 点坐标为 (x_A^N, y_A^N) , B 点坐标为 (x_B^N, y_B^N) 。通过 A 、 B 两点可以求出直线路径的直线方程为 $ax+by+c=0$ 。

农机与路径之间横向位置误差的正负号可以通过式 (6-3) 进行判别, 进而可以通过式 (6-4) 计算确定农机与直线路径之间的代数距离 (有符号的数)。

$$SignD = \text{sign}(\overline{AP} \times \overline{PB}) \quad (6-3)$$

$$d = SignD \cdot \frac{|ax_p^N + by_p^N + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (6-4)$$

(2) 农机跟踪曲线路径时的相对位置误差计算

设曲线曲率为 $c(s)$, 以农机行驶方向为方向的单位向量为 $\overline{PV}$, 农机当前点到曲线瞬时圆心的向量为 $\overline{PC}$, 则此时农机与路径间的代数距离通过式 (6-5) 确定。

$$d = \text{sign}(\overline{PV} \times \overline{PC}) \cdot \left| \overline{PC} \right| - \frac{1}{c(s)} \quad (6-5)$$

6.2.3 农机与路径之间的相对航向确定方法

由于通过 MTi 获取的农机航向角是以磁北方向为参考轴，且逆时针方向旋转为正，所以要将该航向角转换为东向为参考轴，且逆时针方向旋转为正的航向角。

假设通过 MTi 获取的农机当前航向角为 θ^M ，农机在导航坐标系中相对于东向（导航坐标系的 X 轴）的航向角为 θ^N 。

则农机在导航坐标系中的航向角可以通过式（6-6）进行计算。

$$\theta^N = \begin{cases} \theta^M + \eta + \frac{\pi}{2} & (0 \leq \theta^M < \pi) \\ \theta^M + \eta + \frac{5\pi}{2} & (-\pi \leq \theta^M < 0) \end{cases} \quad (6-6)$$

其中， η 为 MTi 安装误差和磁偏角的和，其大小需要通过现场校正实验进行确定。

至此，可以通过式（6-7）确定农机的航向误差。

$$\theta_e = \theta^N - \theta^D \quad (6-7)$$

其中， θ^D 为期望航向角，即路径参考点处的切线与导航坐标系 X 轴之间的夹角。

6.3 转向角检测装置标定方法

农机转向角检测装置在使用时需要对其进行标定，即建立转向角检测装置中编码器或电子尺的测量数值与车轮实际转向角之间的对应关系。

农机转向角检测装置的标定有两种方法：其一是采用建模的方法进行标定，这种方法的好处是不需要采用转向角检测仪测量农机的实际转向角；其二是通过曲线拟合的方法进行标定，即将采集到的编码器或者电子尺的测量值和车轮转向角的实际值进行曲线拟合，建立车轮实际偏转值与转向角检测装置读数之间的函数对应关系。

本文对联合收割机的车轮转向角检测装置采用建模的方法进行标定，而对拖拉机和插秧机的转向角检测装置采用曲线拟合的方法进行标定。下面分别加以介绍：

6.3.1 收割机转向角检测装置标定

联合收割机转向角检测装置中的电子尺可以测量收割机转向油缸的直线运动位移，然后间接计算出农机转向轮的偏转角度，其计算过程如下^[81]：

联合收割机的液压转向连杆机构可以通过如图 6-3 所示的四边形 $ABCO$ 来描述。图中, θ 为农机转向角; 边 BC 代表转向油缸, 所以当转向油缸中活塞的位置变化时, 相应地边 BC 的长度 l_{BC} 也将产生改变, 进而形成新的四边形 ABC_1O 。另外, 除了边 BC 外四边形其余边均为固定长度。

从图 6-3 所示的几何关系中, 可以推导出农机转向角 θ 和 l_{AO} 、 l_{AB} 、 l_{OC} 、 l_{BC} 之间满足如下关系

$$l_{BC}^2 = (l_{OC} \sin \theta + l_{AO})^2 + (l_{OC} \cos \theta - l_{AB})^2 \quad (6-8)$$

由于转向油缸的行程限制, l_{BC} 需要满足如下关系式

$$l_{BC\min} \leq l_{BC} \leq l_{BC\max} \quad (6-9)$$

由于 l_{OC} 、 l_{AO} 、 l_{AB} 均为固定值, 且 l_{BC} 能够通过电子尺检测到的电压值求取, 所以结合式(6-8)和式(6-9)便可求出农机的转向角 θ 。

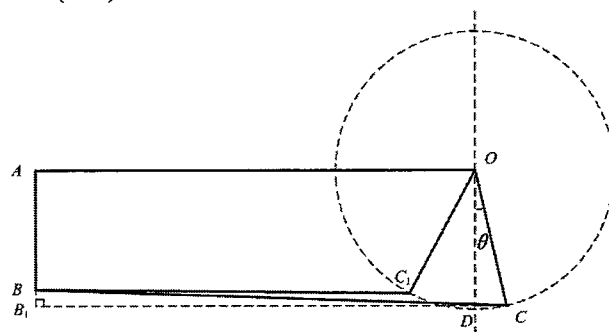


图 6-3 联合收割机转向连杆机构几何描述

Fig. 6-3 Geometry description of the steering linkage of the combine

6.3.2 拖拉机转角检测装置标定

在拖拉机转向角检测装置的标定过程中, 车轮实际转向角的检测采用苏州太平洋汽车保修设备有限公司的 SPZJ-1 型汽车转向角检测仪, 如图 6-4 所示, 其参数指标如表 6-1 所示。

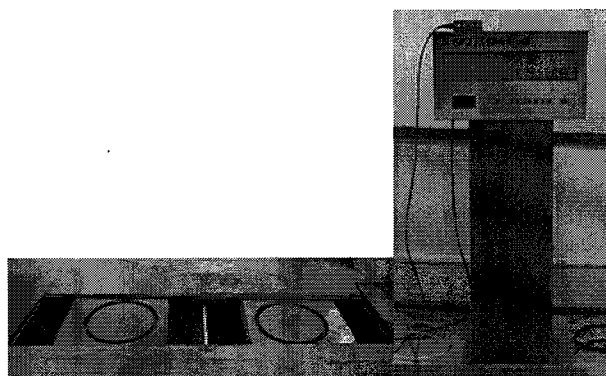


图 6-4 车轮转向角检测仪

Fig.6-4 The wheel angle measuring instrument

表 6-1 车轮转角检测仪参数

Tab. 6-1 The wheel angle measuring instrument parameters

参数	值
最大轴重	6000kg
检测范围	0-50°
检测精度	0.1°
轮距可调范围	±500mm
电源	AC 220/380V, 50HZ, 4000W

SPZJ-1 型汽车转向角检测仪可用于汽车（本文用于轮式农机）左、右转向轮的左、右两方向的转向角度检测。该设备的检测底盘除了可以自由旋转外，还可以沿左、右、前、后四个方向移动，以及具有自动回零机构。另外，检测底盘还具有自动锁紧装置，在检测时锁紧销松开，检测结束后锁紧销锁紧，以方便农机驶离。同时该检测仪可用减速电机来调整两个检测盘的间距，以适用于任意轮距的农机转向角的检测。

在转向角检测装置标定时，首先通过串口分别采集编码器和车轮转向角检测仪的数据，然后采用二次多项式曲线拟合的方法对所采集到的数据集进行二次曲线拟合，曲线拟合结果如图 6-5 所示，继而得到拖拉机车轮转向角检测装置中的编码器读数和实际车轮转向角之间的对应函数关系式如下：

$$y = f(x) = 0.002x^2 + 0.888x + 0.377 \quad (6-10)$$

其中， y 为拖拉机转向轮的实际偏转角度；

x 为编码器的测量数值。

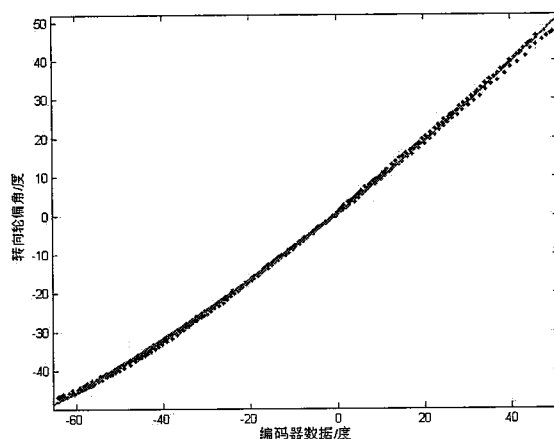


图 6-5 拖拉机转向角检测装置标定结果

Fig.6-5 The calibration result of the tractor steering angle measuring device

6.3.3 插秧机转向角检测装置标定

采用与拖拉机转向角检测装置相同的标定过程，可以得到插秧机车轮转向角检测装置中的编码器读数和车轮实际转向角之间的对应函数关系。

插秧机转向角检测装置标定的曲线拟合结果如图 6-6 所示, 转向角检测装置的标定函数如式 (6-11)。

$$y = f(x) = 0.0012x^2 + 0.518x - 0.301 \quad (6-11)$$

其中, y 为插秧机转向轮实际角度;

x 为编码器的测量数值。

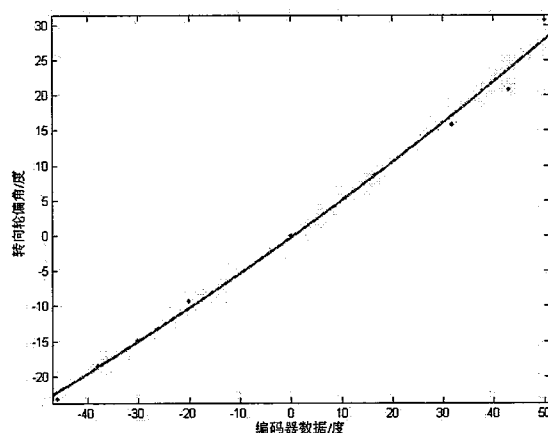


图 6-6 插秧机转向角检测装置标定结果

Fig.6-6 The calibration result of rice-transplanter steering angle measuring device

6.4 多条连续路径自动驾驶作业地头转向方法

地头转向控制是农机实现整个田块自动驾驶控制作业的必要环节, 因此在进行级联式导航控制方法在农机自动驾驶系统中的应用实验前先讨论一下农机电头转向的实现方法。本文讨论两种地头转向方法:

其一, 半控地头转向, 即农机到达地头时, 以固定的转向角进行地头转向动作;

其二, 全控地头转向, 即农机到达地头时, 根据规划好的地头曲线转向路径进行地头转向路径跟踪控制, 以实现农机的地头转向动作。

6.4.1 半控地头转向方法

如图 6-7 和图 6-8 所示, 规定基准作业路径为 AB 和 CD, 地头路径为 BC 和 DA; 农机机具的作业宽度为 W_g , 作业路径条数为 C_r (其初始值为 1), 地头转向起始条件判定的距离阈值为 d_m , 地头转向终止条件判定的航向误差角度阈值为 θ_m , 其中 d_m 和 θ_m 根据现场实验确定。

当农机跟踪作业路径并且距离地头路径的位置误差小于距离阈值 d_m 时, 农机以固定的转向角进行地头转向动作, 直到农机的航向与地头路径的航向误差

小于角度阈值 θ_m 时, 农机停止地头转向动作并开始跟踪地头路径; 当农机跟踪地头路径并且距离下一条作业路径的位置误差小于距离阈值 d_m 时, 农机以固定的转向角进行地头转向动作, 直到农机的航向与下一条作业路径的航向误差小于角度阈值 θ_m 时, 农机停止地头转向动作并开始跟踪下一条作业路径, 与此同时 C_r 递增 1。以此类推, 便可完成整个地块的自动驾驶作业。

下面分别以农机逆时针和顺时针转向进行多条路径作业的情况进行讨论。

(1) 农机逆时针地头转向作业

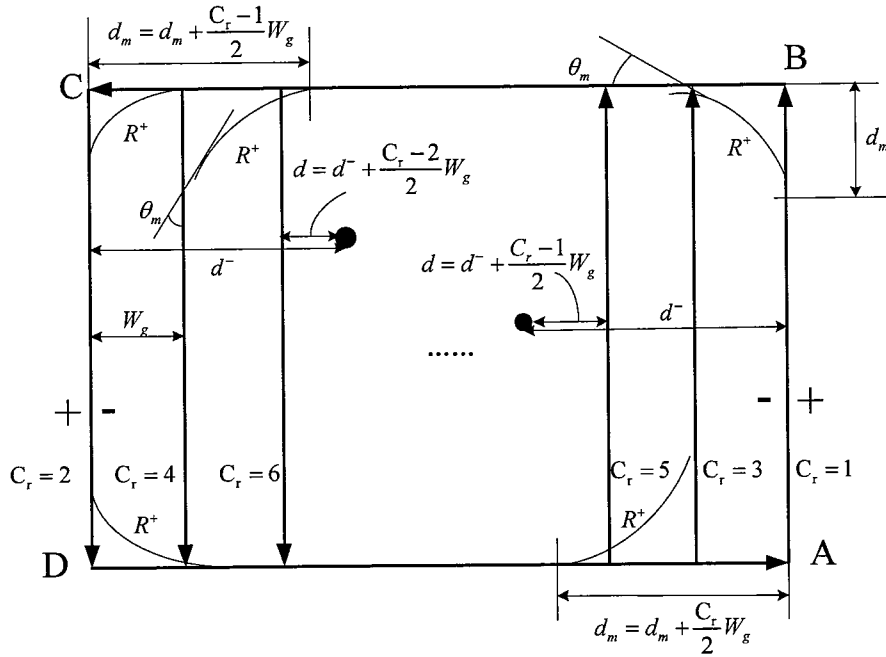


图 6-7 逆时针行驶作业时的示意图

Fig. 6-7 Schematic diagram of counterclockwise driving operation

当农机逆时针转向作业时, 如图 6-7 所示。此时, 在作业区域内的农机距基准作业路径 AB 和 CD 的距离均为负值, 记为 d^- ; 而地头转弯半径为正, 记为 R^+ , 根据农机的横摆角速度运动学模型可知, 农机的固定地头转向角为

$$\delta_{fs} = a \tan \frac{L}{R^+}$$

当 $C_r \% 2 = 1$ (作业路径个数为奇数) 时, 可判断农机跟踪 AB 和 AB 侧的作业路径及地头路径 BC。

在这种情况下, 农机由作业路径转向地头路径的距离阈值为 d_m , 而由地头路径转向作业路径的距离阈值为

$$d_m = d_m + \frac{C_r-1}{2}W_g$$

此外, 农机与作业路径的位置误差可通过下式进行计算。

当 $C_r \% 2 = 0$ (作业路径个数为偶数) 时, 可判断农机跟踪 CD 和 CD 侧的作业路径及地头路径 DA。

$$d_m = d_m + \frac{C_r}{2} W_g$$
$$d = d^- + \frac{C_r - 2}{2} W_g$$

Fig.6-8 Schematic diagram of clockwise driving operation

$$\delta_{fs} = a \tan \frac{L}{R^-}$$

- 99 -

在这种情况下，农机由作业路径转向地头路径的距离阈值为 d_m ，而由地头路径转向作业路径的距离阈值为

$$d_m = d_m + \frac{C_r - 1}{2} W_g$$

此外，农机与作业路径的位置误差可通过下式进行计算。

$$d = d^+ - \frac{C_r - 1}{2} W_g$$

当 $C_r \% 2 = 0$ （作业路径个数为偶数）时，可判断农机跟踪 CD 和 CD 侧的作业路径及地头路径 DA。

在这种情况下，农机由作业路径转向地头路径的距离阈值为 d_m ，而由地头路径转向作业路径的距离阈值为

$$d_m = d_m + \frac{C_r - 1}{2} W_g$$

此外，农机与作业路径的位置误差可通过下式进行计算。

$$d = d^+ - \frac{C_r - 2}{2} W_g$$

6.4.2 全控地头转向方法

如果农机在地头转向过程中受到的干扰比较大，那么将使转向角与农机行驶轨迹之间不符合农机运动学运动规律。在这种情况下，如果还采用半控地头转向方法进行地头转向，可能会导致转向后的作业路径跟踪产生较大的初始对齐位置误差和航向误差。为了解决这个问题本节研究另一种地头转向方法——全控地头转向方法。

上节研究的半控地头转向方法只需知道地块的四个边界点 A、B、C、D 即可，而要想实现全控地头转向需要设定地块边界的 8 个点，即 A、B、C、D、E、F、G、H，如图 6-9 所示。

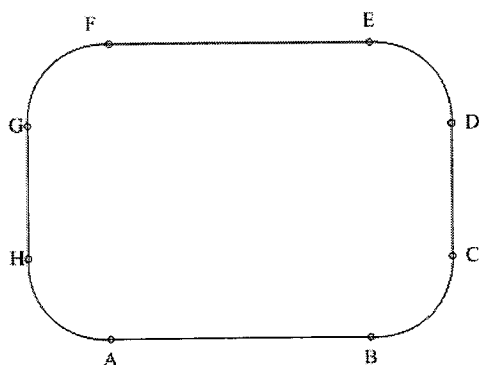


图 6-9 全控地头转向作业设定点示意图

Fig.6-9 The setting points for controlled headland turning operation

根据这八个点确定农机的基准作业路径 AB 和 EF、地头路径 CD 和 GH, 以及求出地头转向的曲线路径 (圆弧) 作为农机的地头转向跟踪路径。为了使农机能够进行平稳地转向, 必须保证地头转向的圆弧路径与作业路径和地头路径相切。

设 A、B、C、D 点的坐标分别为 (x_A, y_A) 、 (x_B, y_B) 、 (x_C, y_C) 、 (x_D, y_D) , 如图 6-10 所示。

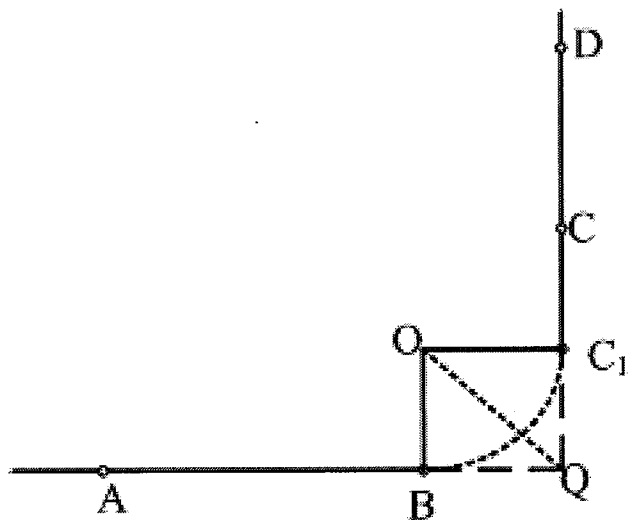


图 6-10 地头转向路径求解示意图

Fig.6-10 Schematic diagram for solving headland turning paths

由 A、B、C、D 点的坐标可以求出农机基准作业路径 AB 和地头路径 CD 的直线方程分别为

$$\begin{aligned} AB: A_1X + B_1Y + C_1 &= 0 \\ CD: A_2X + B_2Y + C_2 &= 0 \end{aligned} \quad (6-12)$$

通过上述方程组 (6-12) 可以求得 AB 和 CD 的交点 Q 的坐标为

$$\begin{cases} x_Q = \frac{C_2B_1 - C_1B_2}{A_1B_2 - A_2B_1} \\ y_Q = \frac{C_1A_2 - C_2A_1}{A_1B_2 - A_2B_1} \end{cases} \quad (6-13)$$

令地头转向圆弧路径与 B 点和 C_1 点相切, 则 $|BQ| = |QC_1|$, 由 B、Q 两点坐标可得

$$|BQ| = |QC_1| = \sqrt{(x_B - x_Q)^2 + (y_B - y_Q)^2} \quad (6-14)$$

由地头路径 CD 的直线方程很容易得到路径 CD 的航向角为 θ_{CD} , 由式 (6-13) 和式 (6-14) 便可推出切点 C_1 的坐标为

$$\begin{cases} x_{C_1} = x_Q + |QC_1| \cos \theta_{CD} \\ y_{C_1} = y_Q + |QC_1| \sin \theta_{CD} \end{cases} \quad (6-15)$$

根据切线的性质以及直线垂线性质,可分别求出 OB 直线和 OC₁ 直线方程为

$$\begin{aligned} \text{OB: } -B_1X + A_1Y + (B_1x_B - A_1y_B) &= 0 \\ \text{OC}_1: -B_2X + A_2Y + (B_2x_{C_1} - A_2y_{C_1}) &= 0 \end{aligned} \quad (6-16)$$

由方程组 (6-16) 可求解出地头转向圆弧路径的圆心 O 的坐标 (x_O, y_O) 和半径 R 分别为

$$\begin{cases} x_O = \frac{A_1(B_2x_{C_1} - A_2y_{C_1}) - A_2(B_1x_B - A_1y_B)}{A_1B_2 - A_2B_1} \\ y_O = \frac{B_1(B_2x_{C_1} - A_2y_{C_1}) - B_2(B_1x_B - A_1y_B)}{A_1B_2 - A_2B_1} \end{cases} \quad (6-17)$$

$$R = \sqrt{(x_O - x_B)^2 + (y_O - y_B)^2} \quad (6-18)$$

以此类推,其余的地头转向圆弧路径都可以求出来,不再赘述。

在知道地头转向圆弧路径和切点 B 和 C₁ 的信息后,就可以实现农机的全控地头转向控制,具体方法如下:

设农机地头转向开始和结束的距离判定阈值为 d_m 。当农机正在跟踪作业路径,并且农机距离作业路径上的圆弧切点的距离小于阈值 d_m 时,农机切换到地头转向圆弧路径的跟踪模式;

当农机距离地头路径上的圆弧切点的距离小于阈值 d_m 时,农机切换到地头路径的跟踪模式;

当农机正在跟踪地头路径并且距离地头路径上另一个圆弧切点的距离小于阈值 d_m 时,农机切换到地头转向圆弧路径的跟踪模式;

当农机距离作业路径上的圆弧切点的距离小于阈值 d_m 时,农机切换到下一条作业路径的跟踪模式。

以此类推,便可完成整个多条路径的自动导航控制作业。

根据 6.2 节介绍的方法可以求出农机与地头转向圆弧路径之间的相对位姿误差和农机与地头直线路径之间的相对位姿误差。农机与作业路径的相对位置误差的求法与半控地头转向方式时的求法相同,不再赘述。

6.5 多条连续路径自动导航控制实验

农机要实现整个地块的自动导航作业,需要进行多条连续路径的自动导航控制。为了进一步验证本文提出的级联式导航控制方法进行多条连续路径自动

导航控制的有效性。级联式导航控制方法在农机自动驾驶系统中应用的可行性，本节将本文提出的基于期望横摆角速度的三级级联式导航控制方法应用到带有喷药机具负载的拖拉机自动驾驶控制系统中并且在空旷的田地上进行多条连续路径的导航控制实验。

关于基于期望横摆角速度的三级级联式导航控制方法，本节选择4.4节研究的路径跟踪控制方法设计横向位置控制器（ G_{LPC} ），决策出农机的期望横摆角速度；而横摆角速度鲁棒自适应控制器（ $G_{\gamma C}$ ）和转向控制器（ G_{SC} ）分别采用第5章和第3章的方法进行设计，进而得到基于期望横摆角速度的三级级联式导航控制器，其算法的具体实现步骤如下：

步骤1：第一级的横向位置控制器（ G_{LPC} ）根据位姿传感器获得的农机位置和姿态信息（主要指航向）以及作业路径信息，确定农机与路径之间的位置误差和航向误差。然后根据非线性最优控制律（4-40），即

$$\rho = \varphi^{-1}(\cdot, v)$$

确定农机期望行驶轨迹的即时曲率 ρ 。

最后，根据速度传感器获取的农机当前速度，并结合式（5-2）决策出农机当前期望的横摆角速度。

步骤2：第二级的横摆角速度鲁棒自适应控制器（ $G_{\gamma C}$ ）将步骤1决策的期望横摆角速度作为参考输入，并实时检测农机的当前横摆角速度，然后根据鲁棒自适应控制律（5-18）确定农机的期望转向角，从而使农机的横摆角速度按照期望的横摆角速度变化。

步骤3：第三级的转向控制器（ G_{SC} ）根据步骤2确定的期望转向角和检测到的实际转向角，利用控制律（3-25）计算出农机转向驱动器的控制输入，从而控制农机转向轮快速且无超调地跟踪期望转向角，最终达到农机自动驾驶控制的目的。

步骤4：重复步骤1~3。

6.5.1 基于半控地头转向的多条路径导航控制实验

在空旷的地上选择四个地块边界点分别为A、B、C、D并尽量保证该四个点构成的多边形为矩形。拖拉机在A点附近开启自动驾驶控制系统，进行自动驾驶控制。

当拖拉机的行驶速度为1.0m/s时，拖拉机进行多条连续路径自动驾驶控制时的行驶路径轨迹如图6-11所示，路径跟踪误差曲线如图6-12所示，路径跟踪误差统计如表6-2所示。

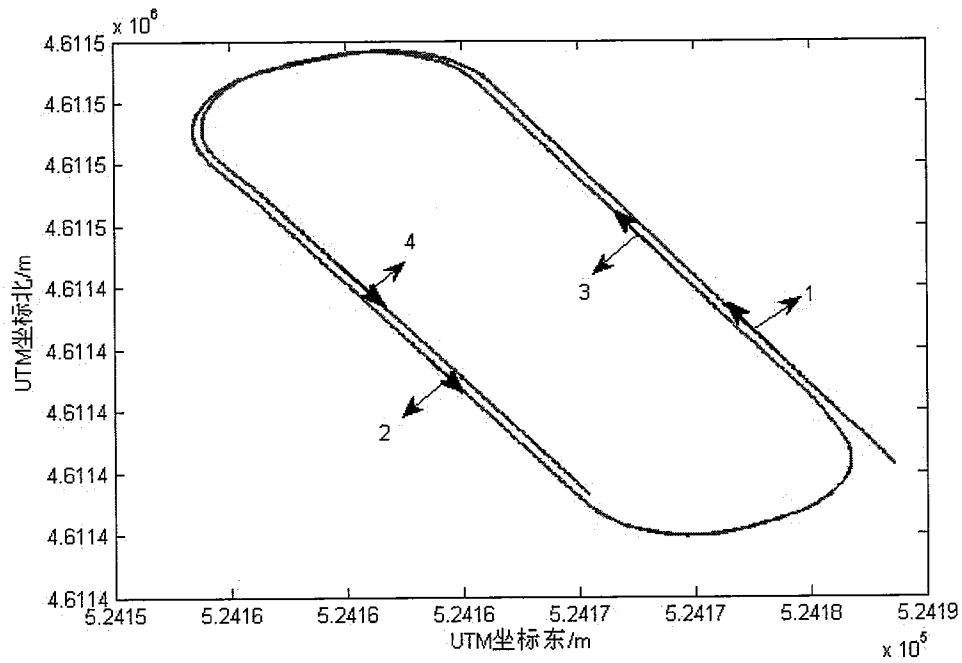


图 6-11 速度为 1.0m/s 时多条路径作业时的农机行驶轨迹

Fig.6-11 Agricultural machine running track during multi-path operation at the speed of 1.0m/s

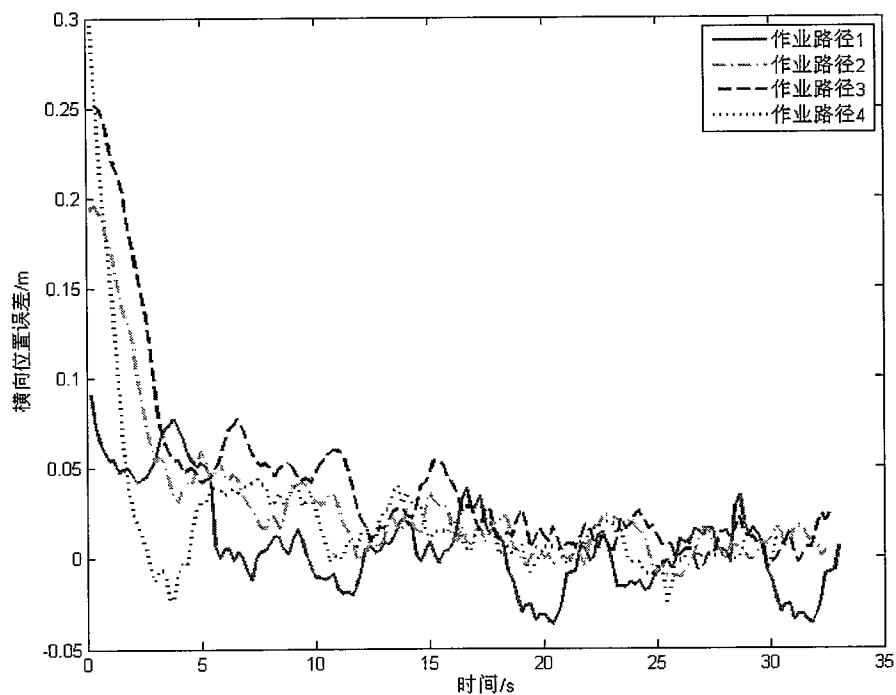


图 6-12 速度为 1.0m/s 时作业路径跟踪误差变化曲线

Fig.6-12 Operation path tracking error curves at the speed of 1.0m/s

表 6-2 速度为 1.0m/s 时作业路径跟踪误差统计

Tab.6-2 Data statistics of the lateral deviation of the operation path tracking at the speed of 1.0m/s

作业路径	误差绝对值平均值(m)	标准差(m)	初始对行误差(m)
路径 1	0.02	0.02	0.09
路径 2	0.02	0.04	0.19
路径 3	0.03	0.04	0.25
路径 4	0.02	0.04	0.29
平均值	0.02	0.04	0.21

当拖拉机的行驶速度为 1.2m/s 时，拖拉机进行多条连续路径自动驾驶控制时的行驶路径轨迹如图 6-13 所示，路径跟踪误差曲线如图 6-14 所示，路径跟踪误差统计如表 6-3 所示。

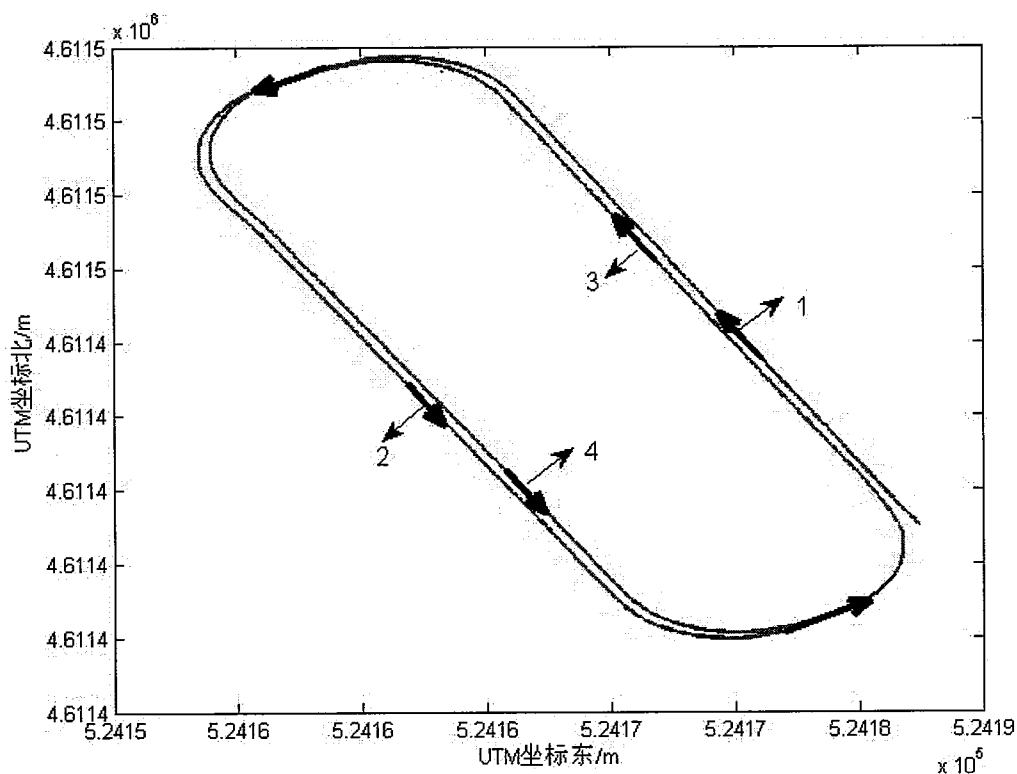


图 6-13 速度为 1.2m/s 时多条路径作业农机行驶轨迹

Fig.6-13 Agricultural machine running track during multi-path operation at the speed of 1.2m/s

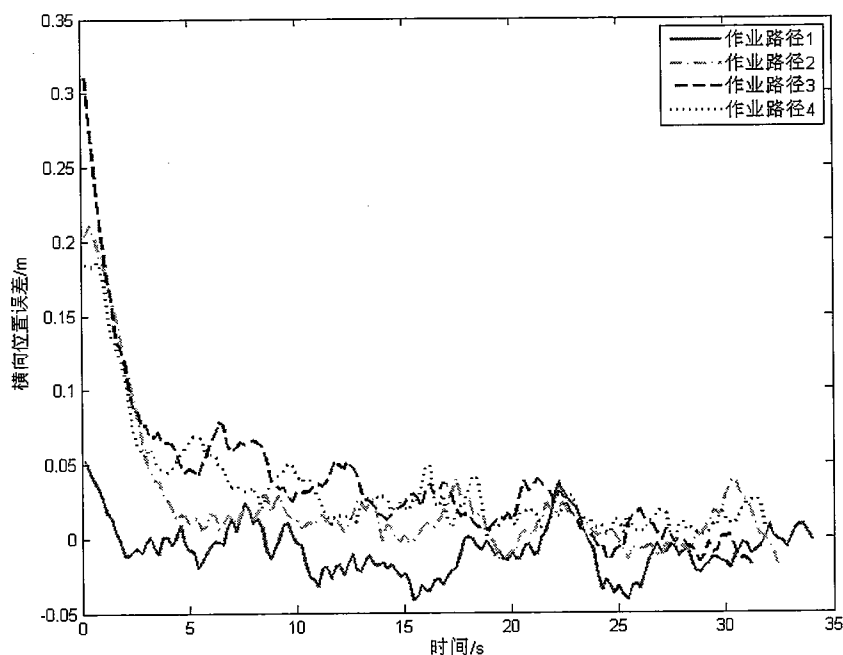


图 6-14 速度为 1.2m/s 时作业路径跟踪误差变化曲线

Fig.6-14 Operation path tracking error curves at the speed of 1.2m/s

表 6-3 速度为 1.2m/s 时作业路径跟踪误差数据统计

Tab.6-3 Data statistics of the lateral deviation of the operation path tracking at the speed of 1.2m/s

作业路径	误差绝对值平均值(m)	标准差(m)	初始对行误差(m)
路径 1	0.01	0.01	0.05
路径 2	0.02	0.04	0.21
路径 3	0.03	0.04	0.31
路径 4	0.03	0.03	0.18
平均值	0.02	0.03	0.19

6.5.2 基于全控地头转向的多条路径导航控制实验

在空旷的地上设定地块边界的 8 个点 A、B、C、D、E、F、G、H，并尽量保证该 8 个点构成的四边形为矩形。根据这 8 个点确定农机多条连续路径自动导航作业的基准作业路径 AB 和 EF，地头路径 CD 和 GH，以及根据这 8 个点求出地头转向的曲线路径（圆弧）作为农机的地头转向跟踪路径。

拖拉机进行多条连续路径自动导航控制时的行驶路径轨迹如图 6-15 所示，直线路径跟踪误差曲线和曲线路径跟踪误差曲线分别如图 6-16 和图 6-17 所示，直线和曲线路径跟踪误差数据统计结果如表 6-4 所示。

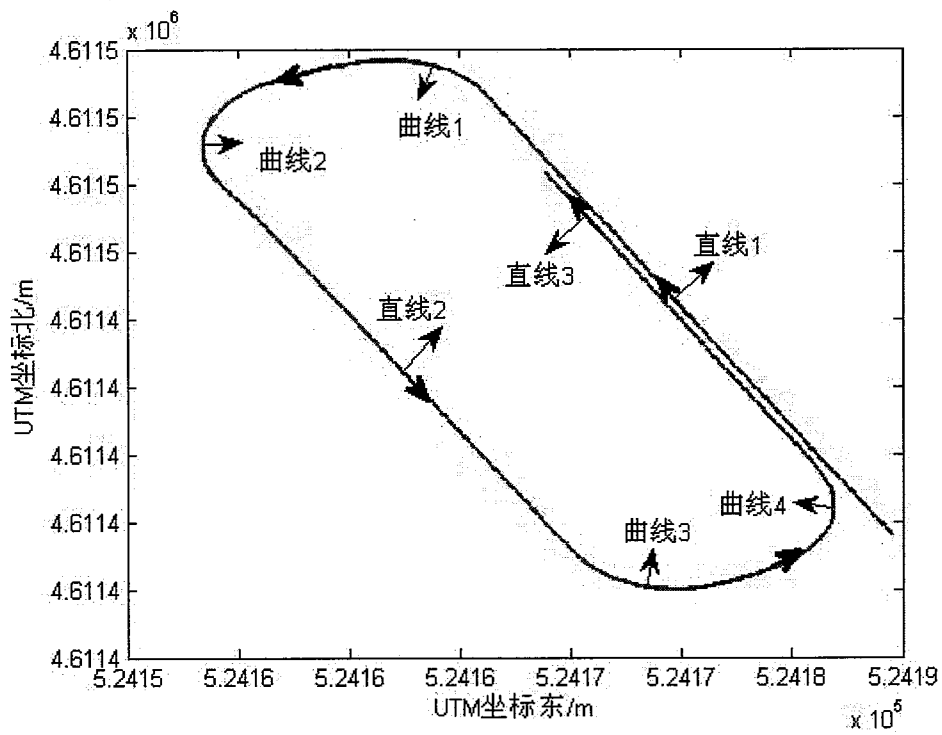


图 6-15 多条路径作业农机行驶轨迹

Fig.6-15 Agricultural machine running track during multi-path operation

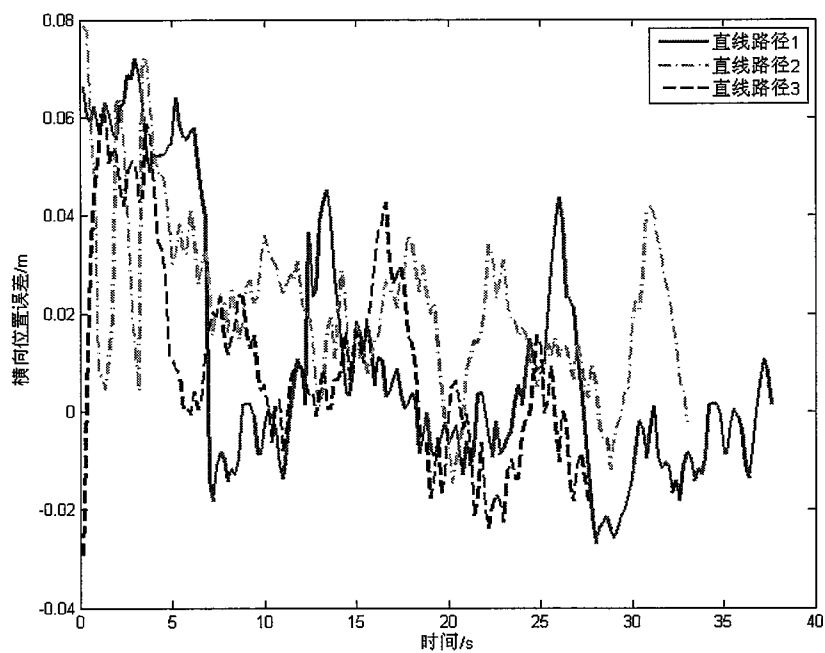


图 6-16 直线作业路径跟踪误差变化曲线

Fig.6-16 Straight-line operation path tracking error curves

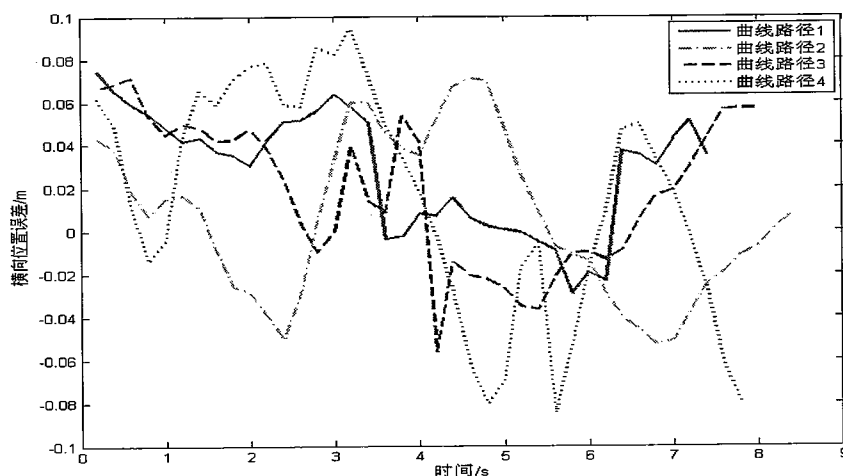


图 6-17 曲线转向路径跟踪误差变化曲线

Fig.6-17 Curve turning path tracking error curves

表 6-4 路径跟踪误差数据统计

Tab.6-4 Data statistics of the path tracking lateral deviation

作业路径	误差绝对值平均值(m)	标准差(m)	初始对行误差(m)
直线路径 1	0.02	0.02	0.06
直线路径 2	0.02	0.01	0.07
直线路径 3	0.01	0.02	-0.03
平均值	0.02	0.02	0.03
曲线路径 1	0.03	0.03	0.07
曲线路径 2	0.03	0.04	0.04
曲线路径 3	0.03	0.03	0.07
曲线路径 4	0.05	0.05	0.06
平均值	0.04	0.04	0.06

通过多条连续路径自动驾驶控制实验，进一步验证了本文提出的基于级联式控制策略的导航控制方法的有效性和优越性及基于该方法的自动驾驶控制系统应用的可行性。从半控地头转向方式和全控地头转向方式的多条路径导航控制实验对比情况来看，由于全控地头转向方式在地头转向过程中进行了实时的曲线路径跟踪控制，所以它的初始对行误差比半控地头转向方式时小，从这个角度来看，全控地头转向方式优于半控地头转向方式。无论采用哪种地头转向控制方式，从实验数据的统计结果可以得知：本文提出的方法具有较高的导航控制精度，而且各行路径跟踪精度基本保持一致，完全可以满足农机田间自动驾驶作业时的精度要求。

6.6 本章小结

本章研究了农机与路径之间相对位姿的获取方法、转角检测装置的标定方法和多条连续路径导航控制时的地头转向方法。然后采用基于期望横摆角速度的三级级联式导航控制方法在拖拉机导航控制平台上进行多条连续路径的自动导航控制实验，实验数据分析结果表明：当拖拉机带机具、并且导航路面条件变差时，直线路径跟踪的绝对值平均误差保持在 0.02m 以内，标准差保持在 0.04m 内；曲线路径跟踪误差的绝对值平均值和标准差都能够保持在 0.04m 以内；进行多条连续路径导航控制时，下一条路径的初始对准误差都可以满足要求，并且基于全控地头转向方式的多条连续路径导航控制的初始对准误差更小。总之，通过本章多条连续路径的农机自动导航控制实验，可以进一步验证本文所提出的基于级联式控制策略的农机导航控制方法的有效性及级联式导航控制方法在农机自动导航系统中应用的可行性。

结论与展望

1. 结论

本文的研究工作是依托国家 863 计划项目 (2010AA101402), 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KGCX2-YW-138) 和 “十二五” 国家科技支撑计划资助项目 (2011BAD20B06) 而开展的。在分析总结已有研究中存在问题的基础上, 结合课题的实际需求, 立足于实用性, 本论文重点研究了在农机自动导航控制系统中处于核心地位的导航控制方法, 并进行了农机自动导航控制的实验研究。

本论文的主要研究内容与成果:

(1) 农机导航控制问题及农机级联式导航控制策略研究

本文首先对农机自动导航控制问题进行了描述, 并提出了农机自动导航控制效果的评价标准与方法; 然后阐述了基于位姿偏差的二级级联式农机导航控制策略和基于期望横摆角速度的三级级联式农机导航控制策略, 并详细地阐述了级联式控制策略中各个控制环节的控制任务与作用; 最后本文还介绍了基于 CAN 总线的农机自动导航系统, 阐述了基于 CAN 总线的农机导航系统的结构原理和物理实现, 并将该导航系统分别集成到拖拉机、插秧机和联合收割机对象上, 并以此作为本文所研究方法的实验验证平台。

(2) 基于非线性积分滑模面的农机转向自适应滑模控制方法

本文在对电控液压式和电控机械式两种主要的农机转向驱动方式分析的基础上, 对基于这两种方式的农机转向系统统一地建模成由一阶惯性环节与纯积分环节组成的二阶系统, 并将转向控制系统中的不确定性因素及其所受的外部干扰统一地看成系统的等效干扰。为了避免转向控制系统参考输入值的跳跃对转向执行装置带来的初始冲击, 本文根据转向系统的执行能力和控制目标设计期望转向角的暂态过程, 并根据该暂态过程定义转向控制的跟踪误差及其导数。基于定义好的误差及其导数, 进而提出一种非线性积分滑模面, 其不但具有普通积分滑模面的优点, 而且还可以使系统的滑模运动具有递增的阻尼特性, 正是这个特性保证了系统在滑模运动的初始阶段具有较小的阻尼, 加快系统响应速度; 而在输出接近稳态值阶段具有较大的阻尼, 避免系统输出产生较大的超调量, 保证稳定性。进而, 基于所提出的非线性积分滑模面采用等速趋近律的方法求解出自适应滑模控制律。在滑模控制量的抖振消除方面, 本文采用模糊控制方法在线实时自适应地调整滑模控制的切换项增益, 以减弱控制量的抖振现象。仿真和实际的转向控制实验验证了该方法的有效性和优越性。

(3) 最优 PD 农机路径跟踪控制方法

在最优 PD 路径跟踪控制方法研究中首先推导出以农机横向位置误差为输出、转向角为输入的传递函数模型；并将该传递函数模型实现成以位置误差和位置误差的导数为状态变量的状态方程，然后基于此状态方程利用 LQR 方法确定 PD 控制器的比例和微分增益，得到符合某一性能指标的最优值，从而保证农机最优地跟踪期望路径行驶；并通过 Hurwitz 稳定性判据验证了闭环系统的稳定性。实际的拖拉机导航控制实验验证了该方法的有效性。

(4) 模糊自适应纯追踪农机路径跟踪控制方法

针对纯追踪模型中前视距离对路径跟踪控制性能的影响问题，提出了模糊自适应纯追踪农机路径跟踪控制方法。首先从几何的角度推导了纯追踪模型；并分析了纯追踪模型中前视距离参数对控制效果的影响；然后在此模型的基础上采用模糊自适应控制对模型中的前视距离进行在线实时整定，考虑到不同的误差条件对模糊控制规则的要求也不同，以及控制算法实现上的方便，采用带有自调整函数的解析式模糊控制器对前视距离的大小进行在线自适应调整；最后设计出基于模糊自适应纯追踪模型的农机路径跟踪控制器。该方法对于不同的初始误差具有一定的鲁棒性和适应性，提高了农机路径跟踪的控制精度。插秧机的导航控制实验验证了该方法的有效性。

(5) 非线性最优农机路径跟踪控制方法

针对已有农机路径跟踪控制方法需要对农机模型进行常速假设和小角度线性近似的缺点，本文提出一种与行驶速度无关的非线性最优农机路径跟踪控制方法。首先研究了空间参数驱动的农机非线性相对运动学模型，该模型中不存在速度参数，所以速度的变化不会对模型造成影响；然后论证了基于该模型进行控制方法设计的合理性和可行性问题；最后对该模型进行输入-状态线性化和 LQR 镇定设计，得到一种与速度无关的非线性最优农机路径跟踪控制律。该方法对速度的变化具有一定的鲁棒性，而且在方法的设计过程中没有对非线性模型进行小角度线性逼近，能够准确地反应农机实际的运动特性；另外，由于本文推导的空间参数驱动模型中不含有速度参数，所以在控制方法的设计过程中也没有要求农机速度恒定，因此本文研究的非线性最优路径跟踪方法更加符合实际应用情况。联合收割机的导航控制实验验证了该方法的有效性。

(6) 农机横摆角速度鲁棒自适应控制方法

在横摆角速度控制中，本文提出一种自适应前馈控制与鲁棒反馈控制相结合的横摆角速度鲁棒自适应控制方法，消除了机具负载、外部干扰等对横摆角速度动力学产生的影响，使农机的横摆角速度按照期望的横摆角速度变化，保证了农机横向位置响应的一致性。首先，本文针对农机牵引地面接触型机具或者悬挂非地面接触型机具进行作业的情况，进行农机-机具的动力学建模研究；

并在此基础上研究提出一种自适应前馈控制与鲁棒反馈控制相结合的鲁棒自适应控制律，同时对闭环控制系统的稳定性和鲁棒自适应性进行了理论证明。仿真和拖拉机导航控制实验验证了该方法的有效性。

(7) 级联式导航控制方法在农机自动驾驶系统中的应用研究

本文进行了级联式导航控制方法在农机导航系统中的应用研究，详细介绍了农机导航系统中相对位姿的确定方法、转向角检测装置标定方法以及进行多条连续路径导航控制时的地头转向方法。最后本文进行了多条连续路径的导航控制实验，通过实际的导航控制实验证明了本文研究方法的控制精度完全可以满足农机作业的要求，达到了实际应用的目的。

本文的创新点如下：

(1) 提出了基于期望横摆角速度的三级级联式农机导航控制策略，消除了作用于横摆角速度动态过程的干扰对农机横向位置控制带来的影响，保证了农机横向位置响应的一致性。

(2) 提出了基于非线性积分滑模面的农机转向自适应滑模控制方法，在保证农机转向控制子系统鲁棒性和减弱控制量抖振的同时，还使转向控制系统具有可变的阻尼比，从而保证了转向控制系统既快又无超调的响应特性。

(3) 提出了最优 PD 路径跟踪控制方法，解决了 PD 控制器比例和微分系数的最优确定问题，从而保证农机最优地跟踪期望路径行驶。

(4) 提出了模糊自适应纯追踪路径跟踪控制方法，解决了纯追踪模型中前视距离的在线自适应确定问题，保证了纯追踪方法对于不同的初始误差具有一定的鲁棒性和适应性，提高了农机路径跟踪的控制精度。

(5) 提出了非线性最优路径跟踪控制方法，推导出一种与速度无关的非线性最优路径跟踪控制律，解决了导航控制系统应对农机速度变化的鲁棒性问题；打破了以往农机路径跟踪控制方法设计中要求农机行驶速度恒定和小角度线性逼近的假设，更加符合农机田间作业的实际情况。

(6) 提出一种自适应前馈控制与鲁棒反馈控制相结合的横摆角速度鲁棒自适应控制方法，使农机在机具负载变化或者受到外部干扰时仍然保证横摆角速度具有期望的响应性能。

2. 展望

(1) 需要进行容错控制相关的研究，虽然农机自动驾驶控制出现故障时不像航天航空控制中发生故障那么致命，但是也会造成很大的经济损失，例如压坏庄稼，喷施剂量大，播种、施肥等漏行或者重叠，其导致的结果轻者资源浪费，重者作物减产或者绝产。

(2) 需要进行任意形状曲线路径自动驾驶控制的实现研究，虽然说本文的

导航控制方法可以进行任意曲线路径的跟踪控制，但是如何获取任意曲线路径的相对位姿信息等实现上的细节问题还需要进一步的研究。

(3) 进行农机导航控制系统多传感器组合定位方法的研究，从而降低导航控制系统定位传感器的成本。