

分类号 TP242

密 级

U D C 621.3

编 号 11458

上海电机学院硕士专业学位论文

车式自动导航车轨迹跟踪控制 方法研究

Research on trajectory tracking system of Car-like Automatic Guided Vehicle

硕 士 研 究 生

龙凯

学 号

146001010209

校 内 导 师

王海群副教授

企 业 导 师

单磊高级工程师

工 程 领 域

电气工程

申 请 学 位

工程硕士

所 在 单 位

电气学院

答 辩 日 期

2017 年 1 月 10 日

授 予 学 位 单 位

上海电机学院

上海电机学院

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文《车式自动导航车轨迹跟踪控制方法研究》，是本人在导师的指导下，**独立进行研究工作**所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文**不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果**。对本文的研究做出**重要贡献**的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：T4 凯

日期：2017年 3月30日

车式自动导航车轨迹跟踪控制方法研究

摘 要

移动机器人是研发较早的一类机器人，已悄然在当前生产生活中得到了广泛的应用。自动导航车（Automated Guided Vehicle，AGV），是一种融合了机械、电子、传感器、无线通信、人工智能等先进技术的一类轮式移动机器人。它兼具感知、规划和决策等功能，能够实现按照规定导引线路行驶，具有较强的抗干扰能力和目标识别能力，在制造加工业、自动化港口码头、医药卫生以及特殊行业有着独特的应用优势。在自动化码头装卸系统中，它是一种负责集装箱水平运输的全自动搬运工具，是实现堆场无人化作业的重要组成部分。考虑到码头作业中的人为因素、天气因素和人工成本，发展及开拓AGV应用技术有助于我们提高生产效率和降低意外风险。本文将围绕四轮车式自动导航车的这一对象的轨迹跟踪控制展开研究。

首先，对车式自动导航车建立运动学模型和动力学模型，就反演法控制方法，介绍了一种新的虚拟控制量并在运动学模型的基础上设计轨迹跟踪控制器，然后运用李雅普诺夫稳定性判据对该系统的全局一致稳定性进行理论分析，并进行仿真实验。

其次，对蛙跳算法进行研究，针对蛙跳算法易陷入局部最优的缺点，提出了改进的蛙跳算法（Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm, ISFLA），运用测试函数检验其优化性能，并对该算法进行收敛性分析。然后将ISFLA算法应用于车式自动导航车中，仿真实验结果表明，该导航车对目标轨迹的跟踪精度有所提高。

最后，将自动导航车的运动学模型与动力学模型相结合，在第三章研究内容的基础上，针对AGV的初始时刻误差跳变大的问题，提出结合运动学和动力学模型的串级控制策略，其中，外环控制采用反演

法来设计运动学模型的控制律，内环控制引入滑模变结构控制的方法来设计驱动力控制器。在设计滑模变结构控制的控制律时，采用双曲正切函数替代符号函数，且采用模糊切换增益的方法消除滑模变结构控制引起的系统抖振现象，以保证系统运行状态平滑。仿真实验表明，该控制策略提高了导航车跟踪目标轨迹的精度。

关键词：自动导航车，轨迹跟踪，模糊切换增益，反演法，滑模控制

Research on trajectory tracking system of Car-like Automatic Guided Vehicle

ABSTRACT

Among the robots, mobile robot is the earlier type, which has been gradually applied in various fields. Automated Guided Vehicle (AGV), as one of the wheeled mobile robot, which is a collection based on mechanics, electronics, sensor, telecommunications, artificial intelligence. It consists of the function of perception, trajectory planning and decision making, which can be achieved to drive in accordance with the provisions of the guiding line equipped with the ability of anti-jamming and target recognition. Given these advantages, AGV has an advantage in manufacturing automation, auto-ports and airports, tobacco, medicine, food and kinds of dangerous places and special industries. In the automatic terminal handling system, it is a fully-automatic handling tool for containers' horizontal transportation, and it is an important part of the unmanned operation of the containers yard. Taking into account the human factors, weather and labor costs, the development and application of AGV help us to improve the efficiency and reduce the risk of accidents. This paper will focus on the trajectory tracking control research of car-like four-wheeled AGV.

First of all, Back-stepping method is considered to be adopted based on the kinematics model of AGV. This method designs the trajectory tracking control law through the introduction of a new virtual control objective. According to Lyapunov stability criterion, AGV system has proved globally stable under the control law, then the simulation experiment is carried out.

Secondly, this paper concentrates on Shuffled Frog Leaping Algorithm. Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm (ISFLA) is put

forward aimed at the fact that it tends to be trapped into local optimal. The test function has been used to check on the optimal performance, and the convergence of ISFLA is analyzed. The simulation results show that the tracking precision for the target trajectory is improved.

Finally, the kinematics model and dynamics model of AGV are combined, for the AGV initial position error jump problem, the cascade control is put forward based on the third chapter contents. For outer layer control, Back-stepping method is the strategy to design the outer controller, and the inner layer control is planned to employ the driving force, which takes action by slide mode variable structure controller. The higher control accuracy demand is expected to meet through this method. In the design of sliding mode variable structure control law, hyperbolic tangent function is introduced to replace sign function, and the method of fuzzy switching gain will be recommended to eliminate the chattering caused by the sliding mode variable structure control system. All the measures are expected to ensure the smooth running state of the system.

KEY WORDS: Automated Guided Vehicle, trajectory tracking, fuzzy switching gain, Back-stepping, sliding mode control

目 录

| | |
|-------------------------------|-----|
| 摘 要 | I |
| ABSTRACT | III |
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 引言 | 1 |
| 1.2 课题的来源及研究意义 | 1 |
| 1.3 国内外 AGV 的发展现状 | 2 |
| 1.3.1 国外 AGV 的发展历史和现状 | 2 |
| 1.3.2 国内 AGV 的发展历史和现状 | 3 |
| 1.4 AGV 轨迹跟踪控制方法 | 7 |
| 1.4.1 非线性控制方法 | 7 |
| 1.4.2 智能控制方法 | 8 |
| 1.4.3 鲁棒 控制方法 | 10 |
| 1.4.4 自适应控制方法 | 10 |
| 1.5 本 文的章节安排 | 11 |
| 第二章 车式自动导航车模型的建立及仿真分析 | 13 |
| 2.1 引言 | 13 |
| 2.2 车式自动导航车控制问题划分 | 13 |
| 2.3 车式自动导航车非完整约束系统的分析 | 14 |
| 2.3.1 非完整约束与非完整约束系统的概念 | 15 |
| 2.3.2 车式自动导航车的非完整性分析 | 15 |
| 2.4 车式自动导航车模型仿真分析 | 16 |
| 2.4.1 车式自动导航车运动学模型仿真分析 | 16 |
| 2.4.2 车式自动导航车动力学模型仿真分析 | 22 |
| 2.5 本 章小结 | 28 |
| 第三章 基于反演法的车式自动导航车轨迹跟踪控制 | 29 |
| 3.1 引言 | 29 |
| 3.2 车式自动导航车轨迹跟踪控制问题描述 | 29 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 3.3 基于反演法的轨迹跟踪控制器的设计 | 32 |
| 3.3.1 反演法的原理 | 32 |
| 3.3.2 反演法 AGV 控制律设计 | 33 |
| 3.3.3 控制器性能分析 | 35 |
| 3.4 仿真实验结果与分析 | 40 |
| 3.5 本章小结 | 44 |
| 第四章 基于智能算法的车式自动导航车轨迹跟踪控制 | 45 |
| 4.1 引言 | 45 |
| 4.2 ISFLA 算法 | 45 |
| 4.2.1 基本的蛙跳算法 | 45 |
| 4.2.2 ISFLA 算法及其收敛性分析 | 46 |
| 4.2.3 ISFLA 算法性能检验 | 48 |
| 4.3 基于 ISFLA 算法的控制器参数选取 | 50 |
| 4.4 仿真实验结果与分析 | 52 |
| 4.5 本章小结 | 56 |
| 第五章 基于运动学与动力学模型的串级控制 | 57 |
| 5.1 引言 | 57 |
| 5.2 串级控制结构 | 57 |
| 5.3 基于动力学模型的模糊滑模控制 | 57 |
| 5.4 未知干扰项估计 | 62 |
| 5.5 仿真实验结果与分析 | 63 |
| 5.5.1 基于动力学模型的模糊滑模控制仿真实验 | 63 |
| 5.5.2 自适应干扰估计仿真实验 | 65 |
| 5.6 本章小结 | 67 |
| 第六章 总结与展望 | 68 |
| 6.1 总结 | 68 |
| 6.2 展望 | 68 |
| 参考文献 | 70 |
| 致谢 | 74 |
| 攻读硕士学位期间取得的研究成果 | 75 |

第一章 绪论

1.1 引言

移动机器人的研究是一类研究较早的机器人，按移动机构的划分主要有轮式移动机器人、履带式移动机器人、腿式移动机器人和复合式移动机器人等^[1]。从最早的阿波罗登月中用到的月球车到现在外太空探索中的六轮采样车，再到工业制造中运输机器人，以及新近研制的送餐机器人，都已说明移动机器人正以极其显著的应用优势而成为智能机器人重要发展的方向之一。相比于传统的固定位置机器人手臂而言，移动机器人的工作环境有更多的未知性，因而对机器人的控制性能有着更高的期待，在简单行走的基础上，还需要机器人能完成特定的功能，如 AGV 导航控制、路径或轨迹规划能力与外界通信等，这就需要更多交叉领域研究的成果的出现，如轨迹动态规划、多传感信息融合、图像处理等等。由此可见，移动机器人是一种涉及多门学科的多种交叉领域共同组成的集合体。航空航天领域和军事领域对移动机器人的应用最早，技术也是最成熟的，然而还是有很多智能化需求得不到满足。进行外太空陌生星球表面实地探测时，使用智能移动机器人，可以减少探测的成本，降低风险；在军事中运用其进行侦察、排雷探险甚至是无人作战等，要求其具备更好的灵活性与实用性，以提高作战效率和降低人工成本。移动机器人的应用从军用到民用是一个成熟技术的推广，有助于提高人们生活质量例如家庭以及服务领域，开发出具有较低成本和智能的特定功能自主移动机器人，将会给人们的生活带来极大的便利，目前已有服务机器人、娱乐机器人、军用机器人、搬运机器人以及新兴的性爱机器人，其都已具有展现出巨大的市场价值。

1.2 课题的来源及研究意义

本课题以上海振华重工有限公司“AGV 装卸系统在自动化码头的应用研究”项目为研究背景，主要探讨 AGV 的轨迹跟踪控制方法。

AGV 是智能化的移动机器人中的一类，是现代工业自动化物流系统的运输设备，与物料输送中常用的堆垛机、传送带和固定路径机器人相比，AGV 动作更灵活，不仅不需要地面铺设轨道、机器人支座架等固定装置，可移植性非常好。尤其是在倡导的工业 4.0 的今天，将智能化生产制造引入到设备制造、物流等领域

中，实现工业生产更高层次的信息化、网络化、智能化的生产。

AGV 凭借着它的高智能化和独特的应用优势已展现出巨大研究价值，轨迹跟踪控制是 AGV 控制技术中最基本的控制问题之一，是一切活动前提；而 AGV 系统的非完整约束特性，使得对其轨迹跟踪控制具有挑战性。而且在实际应用中，运动过程中出现的如参数误差、未建模因素、噪声以及不确定干扰等等不确定性因素会降低 AGV 系统的控制精度。随着对 AGV 控制技术的研究不断深入，更高精度的跟踪控制要求也在不断地被提出，对于 AGV 控制技术中的那些不确定因素解决方法的关注度也是越来越大。

1.3 国内外 AGV 的发展现状

1.3.1 国外 AGV 的发展历程和现状

生产效率一直是工业制造生产中极其重要的标准。受限于当时工厂自动化水平的低下，最初的 AGV 基本上就是运输介质，其装备也较为简单粗糙，功能单一，效率也不高。由于当时社会经济的不发达和理论技术不成熟，AGV 技术的应用优势得不到施展。1953 年，美国 Barrett Electric 公司采用地板下埋线，并制造了世界上第一台电磁感应方式导航的自动导向车系统^[2]。1960 年前后，随着计算机技术的发展，其首次应用到自动化生产中，开始有了数字控制，柔性加工系统有了最原始的开端。随其后，美国开始将该技术引入国内并在此基础上进一步开发了 AGV 技术，包括引入计算机技术，开发实时充电技术及更精确的控制技术^[3-4]。在 1973 年，瑞典 VOLVO 公司就应用了 88 台 AGV 在汽车的装备线上，通过工业计算机控制并指导装配流程。19 世纪 90 年代是 AGV 发展的黄金时期，德国生产出的无人叉车，计算机通讯、识别技术也开始应用到 AGV 领域。整个欧洲正在运行的 AGV 系统就有 330 多个，有 3900 多台参与工厂作业。到 20 世纪初，比利时的 Egmin 公司开发出应用激光导引、惯性导航等技术的 AGV 开创 AGV 自由路径作业的新时代。AGV 的四大家族如发那科，ABB，安川和库卡等公司都是国外研发并制造 AGV 的领头羊。

随着工业机器人的智能化水平的提高，机器人应用范围还在不断扩大，已从汽车制造业推广到其他制造业，已有如采矿机器人、医疗机器人以及水电系统维修机器人等机器人的产生。国外 AGV 有以下两种发展：第一是欧美国家的 AGV 技术发展，它追求 AGV 全自动化，期望其不受路径和场所的限制，对 AGV 的外观设计可能就没那么高的要求，能完美地应用于柔性制造系统中就行；第二种是

以日本的 AGV 为代表,同时追求外观与功能,不仅有注重功能如清洁机器人、医疗机器人、救灾机器人以及机器人汽车(一辆由谷歌和斯坦福大学合作开发的能够自主旅游的车)等类型的机器人,对于参加灾难情况下的机器人(救灾机器人、特种环境机器人、野外机器人等等),由于维护和管理的限制,它们便不是第一个加入到之前的核电厂事故现场的,但日本的机器人确实令人钦佩,能完成即使是军事技术和技术老练的西方机器人也无法完成的任务^[5];也有注重外观的如伴侣机器人、机器人玩具等。

1.3.2 国内 AGV 的发展历程和现状

中国的工业发展起步较晚,早期对 AGV 研究和投入也较少,应用面也很狭窄。1976 年,起重运输机械研究所的中国第一台 AGV 的设计开启了中国 AGV 的时代。1988 年,北京邮政科学技术研究所研制了用于邮件投递的 AGV。随后,由中科院沈阳自动化研究所与新松机器人自动化股份有限公司联合研制了用于客车装配的 AGV 系统。吉林大学开发了视觉导航的 AGV,应用于汽车零部件装配生产线中。中国科学院开发的自动导向车及其配套系统广泛应用于汽车生产线,大大提高了装配生产效率。与此同时,天津理工学院就光学导引也研制了用于核电站物料运输的 AGV。还有其他 AGV 应用的如成都烟草集团公司通过 AGV 运输烟草原料,沈阳新鑫有限公司和合力集团股份有限公司专业从事 AGV 研发和制造,年产量高,占据较大市场份额^[6]。

据睿工业 2016 年研究显示,2015 年中国工业机器人市场,其中以六轴多关节机器人为最,占总体销量的 46.2%。2015 年,中国工业机器人市场规模整体增幅比较乐观,销售量达到 82,495 台,同比增长 39.6%,销售额达到 128.2 亿元,同比增长 37.3%。在宏观经济和制造业增速下滑的态势下,中国工业机器人市场继续维持 30% 以上增长速度。鉴于工业机器人替代空间巨大,预计未来几年,中国工业机器人市场仍将维持高速增长态势。2012 年到 2017 年我国 AGV 销售额如图 1-1 所示。

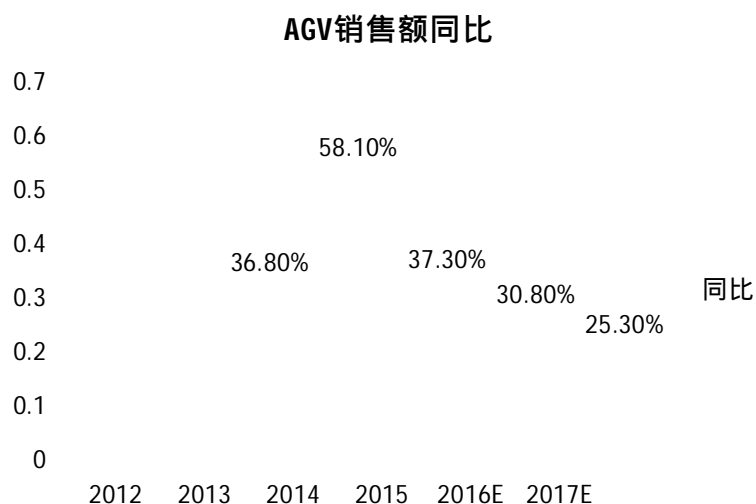


图1-1 2012~2017年我国AGV销售额增长预测

Fig.1-1 the predicted growth sale percent of AGV from 2012 to 2017

国内 AGV 市场从 2010 年开始迅速增长，据物流专业媒体统计，2013 年物流系统及设备的总的市场规模为 360 亿元，其中 AGV 在内的智能搬运类装备的市场总额约 24.7 亿元，2014 年市场规模达到 27.20 亿元，同比增长 10.12%。2014 年 AGV 市场新增量为 3,150 台，同比增长 29%。2015 年新增量为 4,300 台，同比增速超过 36%，新增市场中超过 70% 为国产品牌，我国已成为全球 AGV 机器人最大消费国^[7]。我国 AGV 每年新增装机量及同比增速如图 1-2 所示，我国 AGV 保有量及同比增速如图 1-3 所示。

图1-2 我国AGV每年新增装机量及同比增速

Fig.1-2 Chinese annual new installed capacity of AGV and growth rate per year

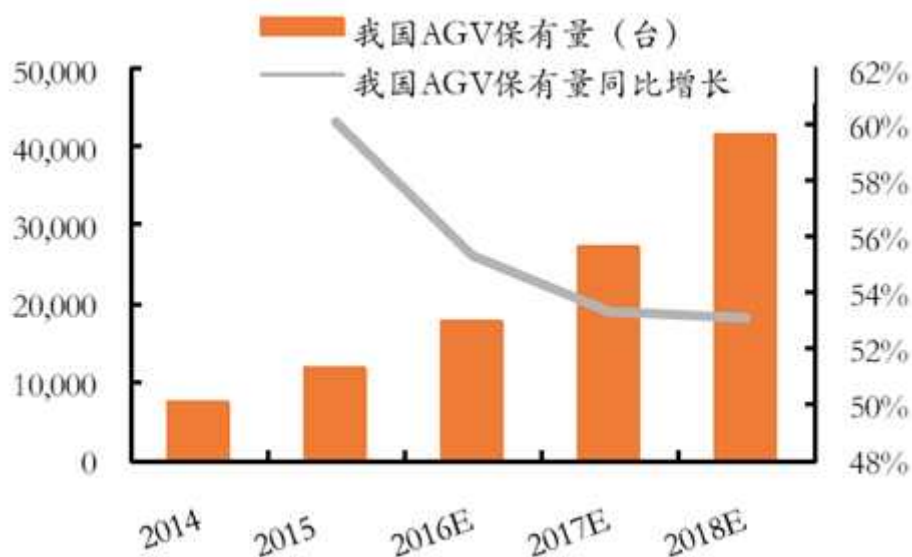


图1-3 我国AGV保有量及同比增速

Fig.1-3 Chinese AGV inventory and growth rate per year

目前微电子技术,无线通信技术和网络控制技术得到了快速发展,为AGV的模块的发展,智能化发展发挥了支撑作用^[8]。在各种场合已经有了实际应用,如生产车间,码头,医疗卫生,餐厅,住宅等。图1-4 各种应用的自动导引车。





图1-4 各种用途的自动导引车
Fig.1-4 AGV application

随着工业机器人向着更深更远的方向发展以及智能化水平的提高,AGV 的应用将从传统制造业推广到其他制造业,进而推广到诸如采矿、建筑、农业等各种非制造行业。据中国 AGV 网统计,Robot 销售量最大的是汽车领域,约占到 41.7%,电子和金属加工约占到 28.8% (见图 1-5)。随着中国各行业的深入发展和科研院所的不断探索,中国 AGV 技术的发展已经有一定程度的市场认可。

不同行业所占比例

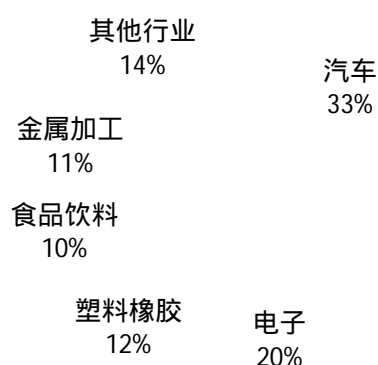


图1-5 2015年我国不同行业AGV市场份额
Fig.1-5 the different industries share of AGV in 2015

按 AGV 的应用领域划分为以下几个方面^[9-10]：

(1) 制造加工业，AGV 作为柔性制造系统的重要组成部分，在电器制造，机械加工，烟草，芯片生产等行业可以有 AGV 的应用。因此，制造业已成为 AGV 最常见的应用领域。

(2) 电子工业，电子工业的发展是趋向于多品种、多型号的中批量生产，传统的传送带方法很达到如此高效率的作业进程，因此电子工业正越来越多地转向使用 AGV。这是因为它们可以提供柔性可编程输送系统以满足这些新的工业要求。如若是对于某些灰尘要求更为严格的净化室里的应用，AGV 的优势将更加明显。

(3) 邮局、医疗卫生、自动化码头、食堂和机场等，在邮局、自动化码头、食堂和机场等单位，货物种类不同，情况也不一样，流动性很强等特点，AGV 所具有的柔性化、智能化、多台协同作业的特点对于完成这类工作则是完美契合，且能达到节省人力和提高工作效率的目的。2013 年，振华重工开始承建中国首个集装箱自动化码头——厦门远海集装箱码头。该码头目前已进入设备调试阶段，年底将具备商业试运行条件。

(4) 特种行业，对于一些特定行业或危险系数较高的行业。军事领域中，其可胜任侦察、拆弹甚至是作战等工作。如在核力发电厂，AGV 的应用同样如此，还有应用于核材料的搬运，用于净化车间，已消除人工带入的灰尘。

1.4 AGV 轨迹跟踪控制方法

轮式移动机器人与一般的工业机器人不同，其需要有移动机构，如果要想实现特定的功能，则最根本的就应该保证对目标的轨迹跟踪准确无误。考虑到轮式移动 AGV 系统是个非约束系统，需要用特定的控制方法如非线性反馈的控制方法，智能控制方法，鲁棒控制方法以及自适应控制方法。

1.4.1 非线性控制方法

非线性控制方法中有反演法控制技术^[11]，滑模变结构控制技术^[12]，以及级联控制技术^[13]等几种在轮式移动机器人领域已成熟应用的方法。

反演法控制技术在处理轮式移动机器人这种非完整约束系统能取得较好的控制效果。例如文献[14]应用反步法控制技术设计轨迹跟踪控制器，还添加了速度和线速度受限策略，并设计物理实验平台进行该算法的验证。文献[15]中进一步将该方法扩展到考虑了无刷直流电机驱动模型的轮式移动机器人的控制中。徐俊艳等

在文献[16]中研究的基于机器人的运动学模型,采用基于积分反步时变状态反馈方法,用双曲正切函数替代符号函数,设计具有全局稳定的机器人轨迹跟踪控制算法。

滑模变结构控制技术对存在未建模动力学部分的系统有很好的控制效果,其应用随着抖震现象影响控制效果。文献[12]中,作者基于移动机器人动力学模型的基础上,在外界干扰项有界条件下的,应用滑动模型控制技术设计出具有鲁棒性的轨迹跟踪控制器,与常用的设计入手角度不同,该控制器的设计都是在极坐标下完成。由于控制输入的计算有积分部分,存在的内在误差必将对控制输入造成干扰;同时文章指出视觉系统在确定位姿信息的过程中也存在扰动,包括时间延迟和测量误差。对于这些现实问题,为设计更高性能的控制提供了实验依据。在文献[17]中,基于运动学模型反步法的思想基础上选取了变结构控制的滑模面函数,并由此构造了具有全局渐近稳定性的滑模跟踪控制器,同时对符号函数进行了连续化,起到了减弱变结构控制器的抖振的作用。而文献[18]考虑非完整约束和外界干扰,通过引入截变函数的思想设计控制器,使得系统不再是一个欠驱动系统,缩减了控制器设计的难度。李世华和田玉平在文献[19]中对运动学模型,基于连续状态反馈的有限时间控制算法,使得对角速度为非零常数的期望轨迹,非完整移动机器人能够实现全局跟踪,能在有限时间内完全跟踪上期望轨迹。文献[20]提出了一种基于模型预测控制的轨迹跟踪算法,考虑 AGV 本身非线性系统的特性,应用非线性运动学模型作为位置解算法,通过离散和连续轨迹函数,使得预测轨迹跟踪上期望轨迹。

为进一步丰富非线性控制方法,文献[13]中提出了级联控制的方法,轮式移动机器人模型被视为由电机的驱动方程和移动机器人的运动学方程所组成的级联系统,将电机驱动方程输出的转速作为运动学方程的输入,在线辨识驱动方程中的时变参数,将辨识结果加入到控制器中,制定出反馈线性化路径跟随控制方案,该方案同时兼顾了车体运动学模型、电机驱动模型的动态特性,使得研究结果与实际相符合。基于李亚普诺夫稳定性的证明和仿真结果证明了该方法的正确性和有效性。文献[21]中将模型转换为两个非线性时变系统,运用串级控制及状态微分反馈控制实现系统全局渐近稳定,还结合了卡尔曼滤波算法能对噪声进行有效估计的优点,提高了 AGV 子定位的精度。

1.4.2 智能控制方法

移动机器人在未知环境中,传统的控制策略针对存在外界扰动和参数不确定

的问题难以实现快速准确跟踪,智能方法因其自身具有学习能力和对环境的自适应能力,使得该控制策略被广泛地应用于机器人轨迹跟踪控制中。目前在移动机器人领域应用较为成熟的智能控制方法有神经网络控制,模糊控制,专家控制等。

文献[22]利用改进的BP神经网络和模糊神经网络对轨迹控制器的设计进行了研究,将改进的BP神经网络应用于移动机器人在未知参数和不确定干扰下的轨迹跟踪控制问题中,提出了一种应用于运动学控制器和动力学控制器相结合的改进的计算力矩控制方法,用后退算法设计运动学控制器,用改进的BP神经网络优化动力学控制器,利用移动机器人位姿误差训练模糊神经网络得到移动机器人的线速度和角速度,控制其跟踪参考轨迹。文献[23]实现了一种对球形移动机器人的滚动速度进行控制的方法,采用径向基函数神经网络建立球形机器人的输入输出映射,采用反馈线性化方法设计了球形机器人的速度控制器,该控制方法有利于对机器人的速度的稳定控制。文献[24]针对机器人控制系统中存在的建模误差和不确定性干扰,提出了基于神经网络补偿的滑模变结构控制。该方法采用双幂次快速终端滑模控制使得系统能在有限时间内快速达到滑模面和平衡点,采用径向基函数神经网络自适应地补偿建模误差和不确定干扰,对两关节机器人的仿真结果也表明了该方法的有效性。文献[25]将神经网络与强化学习相结合,提出了一种新型算法模型,其中应用了基于试错改进机制的强化学习,提高了机器人自主适应环境的能力,是机器人更加智能化,同时在强化学习中引入神经网络,使得该智能系统较其他强化学习系统具有更高的信息处理效率。文献[26]中主要研究的是双轮移动机器人的路径跟踪问题,主要是反演法控制和滑模动力学控制两种方法的结合,采用了RBF神经网络对控制器中不确定参数进行在线自适应学习,提高路径跟踪控制的特性。文献[27]中利用神经网络的良好自适应特性和PID控制策略容易实现的特点,提出神经网络PID来控制四轮智能车循迹。通过MATLAB动态仿真,结果显示该算法可以准确实现循迹控制。

文献[28]中为了增强移动机器人在动态环境中的学习和适应能力,作者提出了一种新的基于改进Elman神经网络的具有学习和记忆功能的机器人行为控制器,利用Elman神经网络特有的联接方式,使得系统不仅对当前输入的信息敏感,并且对历史输入具有敏感性,提高了系统处理动态信息的能力,加强了系统对动态环境的适应性。文献[29]设计了基于反馈增益的反步法控制器,通过控制器参数设计消除了机器人动态误差模型中的部分非线性项,采用神经网络对模型不确定项进行补偿,并利用自适应鲁棒控制器在线补偿神经网络的估计误差,优化了神经网络的学习性能,仿真结果表明:设计的控制器参数易于调节,可实现轮式移动机器人对

任意曲线路径的精确跟踪。文献[30]提出了一种混合神经网络鲁棒自适应轨迹跟踪控制器,该控制器由运动学控制器和动力学控制器两部分组成;其中,采用了参数自适应的径向基神经网络对运动学模型的未知部分进行了建模,并采用权值在线调整的单层神经网络和自适应鲁棒控制项构成了动力学控制器;基于 Lyapunov 方法的设计过程保证了系统的稳定性和收敛性,仿真结果证明了算法的有效性。

1.4.3 鲁棒控制方法

鲁棒控制方法^[31]的优点即是基于对有界的参数的不确定性以及有界建模误差,鲁棒控制仍能保持系统闭环渐近稳定并有较好的动态品质。

在轮式 AGV 轨迹跟踪设计,常常假设外界的扰动项是有界的。文献[32]针对轮式移动机器人的带未知参数的运动学模型的在线辨识、定界和点镇定控制问题展开研究,考虑了移动机器人二维平面运动过程中所存在的滑动效应和自身几何参数未知等不确定性,应用 Backstepping 控制思想和 Lyapunov 分析方法解决移动机器人镇定问题,在存在滑动参数干扰的情况下实现了移动机器人的全局收敛点镇定控制问题。

文献[33]为提高串联机器人的作业精度和效率,考虑机器人的动力学及摩擦特性,并将自适应鲁棒控制的积分型的参数估计修改为比例积分型的参数估计,提出了改进的自适应鲁棒控制算法。文献[34]中提出一种适用于机器人跟踪控制的新型自抗扰控制器,该控制器不需实时计算复杂的机器人动态模型,由两个跟踪微分器(TD)构成:一个用于安排系统的过渡过程;另一个用来估计速度和加速度,TD 的滤波特性使其对量测噪声具有抑制作用,且由被控对象的控制量与所估计加速度的反馈构成的"扩张状态"来自动检测系统模型和外扰的实时作用并实时进行动态补偿,仿真结果表明,该控制器是有效的且具有很强的鲁棒性,而且系统响应快且超调小。文献[35]提出了基于免疫模糊 PID(比例-积分-微分)的智能路径跟踪控制方法,路径跟踪控制被分解为自动直线导航和自动转向控制任务,并分别构建了能够实现自动导航的模糊控制器和基于免疫模糊 PID 控制的自动转向方法,利用 Simulink 仿真平台和插秧机的运动学模型对所设计的路径跟踪控制原理和模糊控制器进行了有效性验证,同时完成了包括直线和曲线的路径跟踪试验。

1.4.4 自适应控制方法

移动机器人的数学模型有运动学模型和动力学模型,一般运动学模型的控制

输入为速度向量；而对于动力学模型,其控制输入为转矩。在动力学模型中，惯量与干扰项的变化使得系统有动态性和不确定性。针对移动机器人控制性能中参数不确定性的影响，通常采用鲁棒控制方法和自适应控制方法来处理轨迹跟踪控制问题。

自适应控制方法^[36]是一种能自我修正规则来适应被控对象以及干扰的动态特性的变化，它通过采样系统的过程状态信息，产生自适应控制律，从而实时地调整系统状态，使之尽可能以较优的状态运行下去。

文献[37] 作者对具有位置动态的电驱动机器人设计了稳定的自适应神经网络控制器，并推到了神经网络权值更新律，设计的自适应神经网络控制器被证明在稳定的跟踪控制过程中实现了电驱动机器人未知闭环系统动态的准确逼近。

1.5 本文的章节安排

本文在简要叙述AGV的发展概况及应用后，将就车式自动导航车的轨迹跟踪控制方法展开研究。首先，就反演法控制的方法，将引入一种新的虚拟控制量来设计相应的轨迹跟踪控制律，并进行仿真实验。随后对蛙跳算法进行研究，并将其应用到导航车的直线和圆形的轨迹跟踪仿真实验中。最后，在第三章中研究内容的基础上，研究基于运动学和动力学模型的串级控制，外层控制采用反演控制方法设计控制器，而内层控制则采用模糊滑模控制的方法设计驱动力控制器，并进行仿真实验分析。

第一章，将在叙述课题来源和课题的研究背景之后，对当前的国内外 AGV 发展现状和应用做一定的介绍，随后对即将展开研究的轨迹跟踪控制方法从非线性控制方法、智能控制方法、鲁棒控制方法以及自适应控制方法等四个层面的研究现状做了一定概括。

第二章，本章将先是对 AGV 系统的非完整性约束进行分析，随后阐述车式自动导航车的运动学模型和动力学模型的建模过程，进行实验分析所建立模型及其动态性能特性，得到对其模型中所含的非完整约束的处理方法，以便进行进一步的轨迹跟踪控制算法的仿真研究。

第三章，将针对提出的运动学模型采用反演法控制，并通过引入一种新的虚拟控制量，来设计相应的轨迹跟踪控制律，通过选取适当的李雅普诺夫函数证明系统在所设计的控制律下是全局一致稳定的，之后，对控制器参数进行分析，最后开展仿真实验，应用到车式自动导航车的跟踪实验中。

第四章，本章是将对蛙跳算法进行研究，针对蛙跳算法易陷入局部最优的缺

点，在种群中引入敏感粒子和蒸发系数对基本蛙跳算法进行改进，进行两点改进，通过对其进行收敛性分析以及采用测试函数检查其性能，进而，将其应用到 AGV 导航小车的直线和圆形的轨迹跟踪仿真实验中。

第五章，将采用串级控制结构的策略，以实现导航车基于运动学与动力学模型的串级控制，外环控制采用反演法来对的运动学模型设计相应的姿态控制器，而内环控制则采用滑模变结构控制来对动力学模型设计相应的驱动控制器，并在设计滑模控制的控制律时采用双曲正切函数替代符号函数，且采用模糊切换增益的方法消除滑模控制引起的系统抖震现象，以保证系统运行状态平滑。最后，通过引入干扰项的自适应律，对控制系统可能遭受到的干扰进行估计，提高自主导航车对较复杂环境中未知干扰的鲁棒性和自适应性。

第六章，总结与展望，在总结本文的研究的内容的基础上，针对本文尚未解决的问题及以后有待研究的重点予以简要的阐述。

第二章 车式自动导航车模型的建立及仿真分析

2.1 引言

智能车的导航可归结于三个问题：(1) 自动导航车当前处于环境中的什么位置；(即定位问题)；(2) 如何根据自动导航车的当前位置和当前信息确定运行策略，规划路径(即路径规划问题)；(3) 采用何种控制方法，输出控制量产生合适的驱动信号使自动导航车运动在规划的轨迹上(即轨迹跟踪控制问题)；轨迹跟踪控制则是为了解决轨迹跟踪控制问题。

本章对轨迹跟踪控制问题进行研究，并建立车式自动导航车的运动学模型和动力学模型，之后，分别对所建立的车式自动导航车运动学模型和动力学模型进行分析。

2.2 车式自动导航车控制问题划分

文献[38]中将自动导航车运动控制问题分为点镇定 (point stabilization) 路径跟随 (path following) 和轨迹跟踪 (trajectory tracking) 等三种。

点镇定 (point stabilization) 即目标是空间的位置坐标，能由初始点到目标点，且稳定在目标点，不发生太大的晃动。

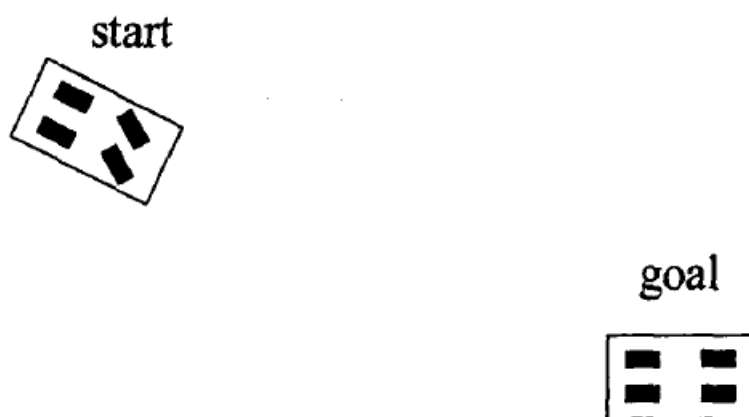


图 2-1 点镇定
Fig.2-1 point stabilization

路径跟随 (path following) 是指能在控制输入的作用下，被控对象能保证在指定的几何位置上，给定的几何路径仅仅是空间中点的汇聚，与时间无关。

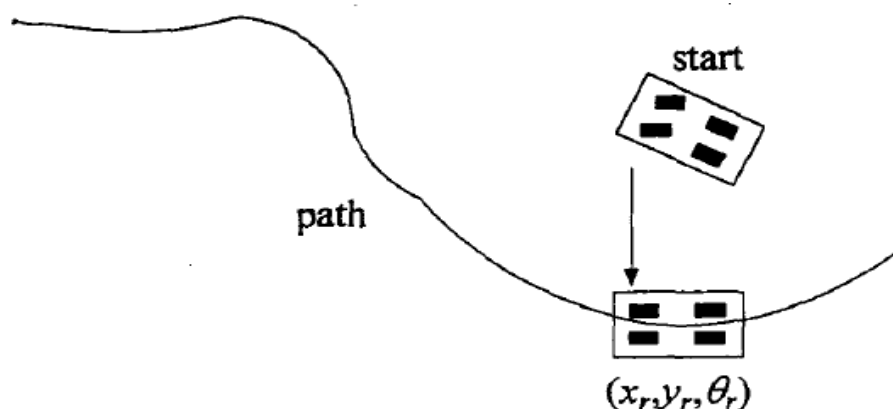


图 2-2 路径跟随
Fig.2-2 path following

轨迹跟踪 (trajectory tracking) 指导航车在控制器作用下,能够渐近跟踪一条与时间相关的路径,且车辆的速度和角速度也与给定值一致。

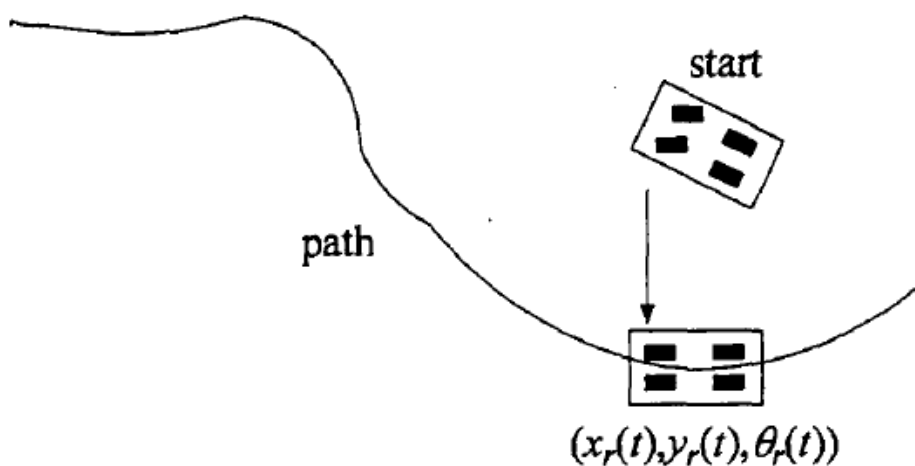


图 2-3 轨迹跟踪
Fig.2-3 trajectory tracking

2.3 车式自动导航车非完整约束系统的分析

移动机器人是一种包含非完整约束的对象^[39],这是与完整约束不尽相同的,且表现出一定的复杂性和不可控性,对非完整约束系统的研究,主要从对非完整约束系统的规划和控制这两方面展开。

2.3.1 非完整约束与非完整约束系统的概念

对于一个机械系统,其所受到约束一般 有两种:在几何位置上的约束关系称为几何约束和在速度,角速度等基础上的约束则称为运动学约束。几何约束对时间的导数一般 是存在的,即运动学约束能得到;但反过来,运动学约束存在,其几何约束却不一定满足。从这个角度入手,将运动学约束分成完整约束和非完整约束。

假设,几何约束条件表述如下:

$$f(q(1), q(2), \dots, q(n), t) = 0 \quad (2-1)$$

相应的运动学约束条件如下:

$$f(q(1), q(2), \dots, q(n), \dot{q}(1), \dot{q}(2), \dots, \dot{q}(n), t) = 0 \quad (2-2)$$

如果系统的微分项 $\dot{q}(k), k = 1, 2, \dots, n$ 是可积的,则该运动学约束方程可积,称这样的约束为完整约束;可积分的运动学约束本质上是几何约束。相反,如果微分项 $\dot{q}(k), k = 1, 2, \dots, n$ 是不可积的,则运动学约束一般 与几何约束不等价,这样的约束不能简化为几何约束。对于一个机械系统,若其不可积的运动学约束不能简化成几何约束,这样的系统即为非完整系统。

2.3.2 车式自动导航车的非完整性分析

由于轮式移动机器人的性质,它是一种非完整约束移动机器人,它可以通过数学模型的转换为以下形式:

$$A(q) \dot{q} = 0 \quad (2-3)$$

式中:

$A(q) \in R^{m \times n}$ — 约束矩阵 ($m < n$);

如图 2-3 所示, $q = (x, y, \theta)$ 表示广义坐标系中质心位姿表示,相对于所述主体角坐标轴的纵轴, θ 即方位角。当轮式移动机器人被当作非滑动纯滚动运动时移动机器人系统的运动满足非完整约束特性,其形式如下:

$$A(q)\dot{q} = \dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = [\sin \theta \quad -\cos \theta \quad 0] \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = 0 \quad (2-4)$$

针对移动机器人系统，可运用反证法证明其是一个非完整约束系统。假设式 (2-4) 是完整约束，式 (2-4) 积分成如下形式：

$$f(x, y, \theta) = C \quad (2-5)$$

式中：

C — 常量；

再对式 (2-5) 求微分得：

$$f_x(x, y, \theta)\dot{x} + f_y(x, y, \theta)\dot{y} + f_\theta(x, y, \theta)\dot{\theta} = 0 \quad (2-6)$$

式中：

$f_x(x, y, \theta)$ ， $f_y(x, y, \theta)$ ， $f_\theta(x, y, \theta)$ — $f(x, y, \theta)$ 对 x, y, θ 的偏导数；

将式 (2-6) 与式 (2-4) 进行对比，则可以看出：

$$f_x(x, y, \theta) = \sin \theta, f_y(x, y, \theta) = -\cos \theta, f_\theta(x, y, \theta) = 0 \quad (2-7)$$

由 $f_\theta(x, y, \theta) = 0$ 可知 $f_\theta(x, y, \theta)$ 是一个与 θ 无关的函数，这与 $f_x(x, y, \theta) = \sin \theta$ ， $f_y(x, y, \theta) = -\cos \theta$ 是相违背的，进而说明式 (2-4) 是不可积的，也就是说，即自动驾驶车系统是一个非完整约束系统。

2.4 车式自动驾驶车模型仿真分析

2.4.1 车式自动驾驶车运动学模型仿真分析

市面上有多种轮式机器人，其被广泛使用和研究有两轮驱动轮式移动机器人和汽车式四轮自动驾驶车。本文研究 AGV 是四轮结构，其中车辆的前轮为自由轮，后轮为驱动轮。两个驱动轮差速转向，AGV 的两个驱动轮分别设有两个独立的驱动电机，通过控制左右轮速比，产生速度差值使车辆转向^[40]。

在二维工作空间中的 AGV，视车体、车轮和地面均为刚体，AGV 的四个轮子和地面相接触，AGV 的运动由滚轮完成，车轮和地面点接触，车辆的车轮侧速度为零分量。两个前轮为方向轮，两个后轮是总是指向车体的正前方，并且与车

体的当前速度方向一致。

车辆的中垂直线上点 C 为导航点，位姿用 $p = (x, y, \theta)$ 来描述，其中 x, y, θ 分别表示参考点的全球坐标和导航车的方向角。AGV 的线速度和角速度控制组成控制输入量。前轮和后轮的两个轴之间的距离为 L ，车辆的前轴和后轴的长度为 W ，并且 r 为车轮的半径。 φ 表示前轮相对于车身的转向角，即车的前轮角度。如果转向角固定，则小车将围绕半径为 R 的圆弧运动， R 的大小可以由前轴和后轴的延长线相交来确定，如图 2-4 所示。

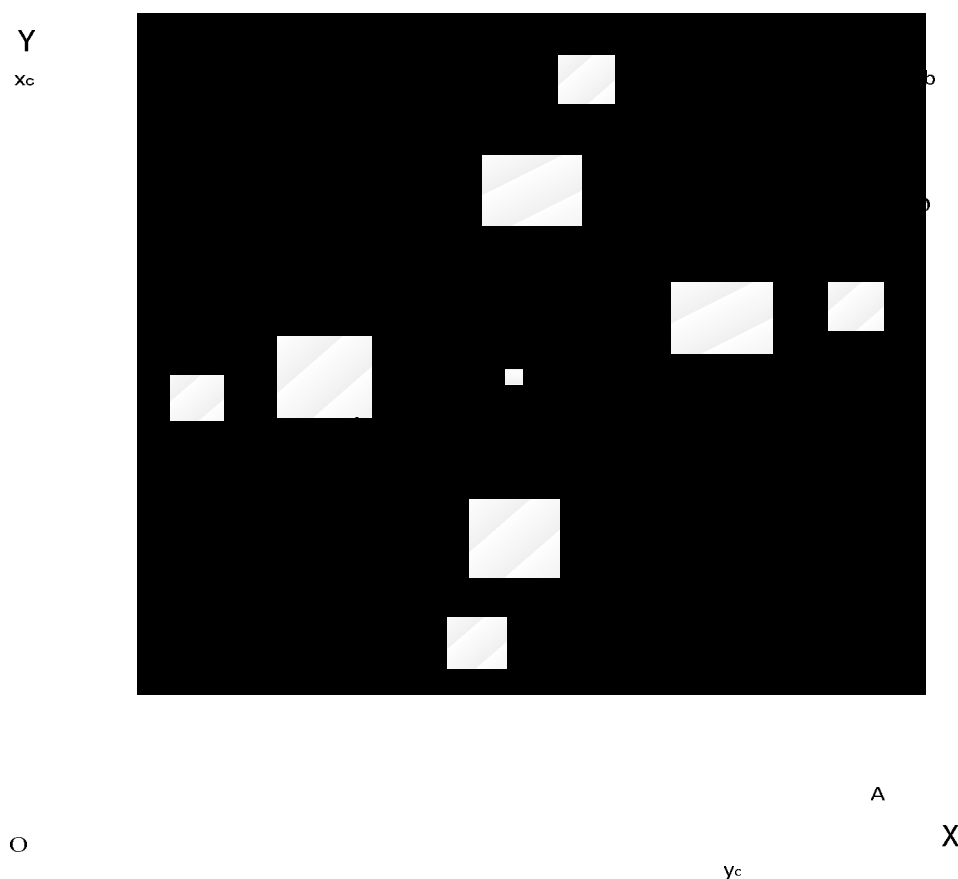


图 2-4 AGV 运动学模型坐标系
Fig. 2-4 AGV Kinematic model coordinate system

对于 AGV 运动学模型是基于以下几点假设^[41]：（1）AGV 车身不会变形；（2）导航车在二维平面上移动；（3）AGV 的两个驱动车轮受力均等，且 AGV 与地面之间不产生相对滑动；

小车在运动时，其对位姿 p 求微分， \dot{p} 中的三个分量 \dot{x} 、 \dot{y} 、 $\dot{\theta}$ 分别记为位姿 p 的三个速度。则约束问题的描述成如下方程：

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \varphi = \omega \end{cases} \quad (2-8)$$

转向角 φ 在理论上可以在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 中取值，但在实际系统中，该值不能太大也不可能太大，受限于机械制造方面的限制和防止轮轴与两个前轮之间的碰撞，前轮转角一般都会被设计制造成在一个小范围内取值。假设设计的最大转角为 $\varphi_{\max} < \pi/2$ ，则实际转角 $\varphi \leq 0.95\varphi_{\max}$ ，则车轮的最小转弯半径也就确定下来了，最小转弯半径计算如下：

$$\dot{\theta} \leq \frac{v}{R_{\min}} \quad (2-9)$$

小车运动学方程可以表示成矩阵形式如下：

$$\dot{p} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ \omega \end{Bmatrix} = Qu \quad (2-10)$$

$$x \sin \theta - y \cos \theta = 0 \quad (2-11)$$

则 AGV 系统的运动学方程为：

$$\dot{p} = Q_j(p) \cdot u \quad (2-12)$$

式中：

$u = [v, w]^T$ —— 系统速度控制输入矢量；

$$\text{且 } v = \frac{r(v_l + v_r)}{2}, \quad w = \frac{r(v_r - v_l)}{2R} \quad Q(p) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

小车当前位姿用 $p_c = (x_c, y_c, \theta_c)$ 表示, 目标位姿用 $p_r = (x_r, y_r, \theta_r)$, 位姿误差定义如下:

$$p_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c & 0 \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_c \\ y_r - y_c \\ \theta_r - \theta_c \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

对误差方程 (2) 求微分, 结合式 (1), 可以得到:

$$\dot{p}_e = \begin{bmatrix} \omega y_e - v + \cos \theta_e \\ v_r \sin \theta_e - \omega x_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

$u_r = (v_r, \omega_r)^T$ 为目标输入值, AGV 跟踪控制器的任务就是在控制输入量 $u_c = (v_c, \omega_c)^T$ 的作用下, 使得 p_e 有界且 $\lim_{t \rightarrow \infty} p_e = 0$ 。

接下来的工作即是对车式自动导航车运动学模型的分析, 分别是在直线 $y=x$ 和圆形轨迹 $x^2+y^2=1$ 进行仿真分析。

(1) 在参考直线轨迹 $y=x$ 的情况下, 给定 $v=1 \text{ m/s}$, $\omega=0 \text{ rad/s}$, 则其运动学模型状态方程有:

$$\dot{p} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ x \\ \dot{y} \\ y \\ \dot{\theta} \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{4} & 0 \\ \sin \frac{\pi}{4} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} U \quad (2-15)$$

输出方程有:

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \quad (2-16)$$

在阶跃信号的输入下, 其输出响应如下图 2-5 和 2-6 所示;

导航车状态量阶跃响应

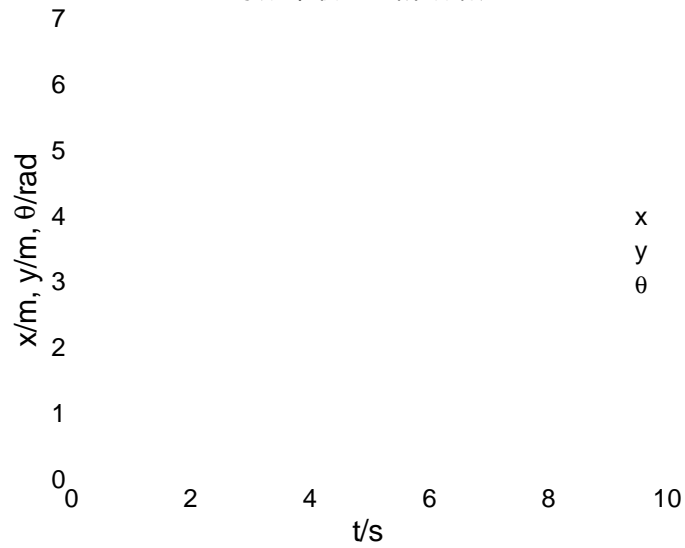


图 2-5 导航车状态量响应曲线
Fig.2-5 the state variable of AGV response curve

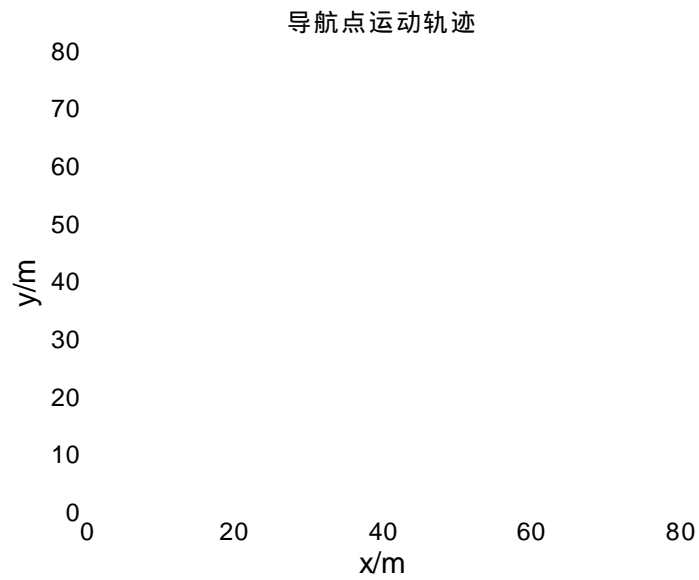


图 2-6 AGV 导航点运动轨迹
Fig.2-6 the trajectory of AGV navigation point

由图 2-5 和图 2-6 所示可得 ,给定参考轨迹为 $y=x$,在阶跃信号下其轨迹也为 $y=x$,导航车方位角也始终保持在 $\theta=45$ 度 ,达到了预期效果。

(2) 给定参考轨迹为 $x^2+y^2=1$,就导航点而言 , 给定 $v=1\text{ m/s}$, $\omega=1\text{ rad/s}$ 则有 :

$${}^g p = \begin{bmatrix} {}^g x \\ {}^g y \\ {}^g \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

则车体在某一时刻的位姿可表现为：

$$\begin{aligned} x(t) &= x(0) + \int_0^t \cos \theta dt \\ y(t) &= y(0) + \int_0^t \sin \theta dt \\ \theta &= \theta_0 + t \end{aligned} \quad (2-18)$$

在阶跃信号输入下，其输出响应如图 2-7 和图 2-8 所示；

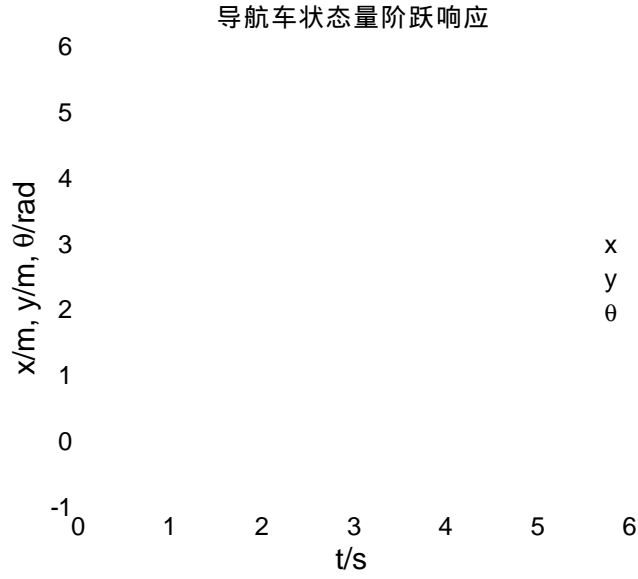


图 2-7 导航车状态量响应曲线

Fig.2-7 the state variable of AGV response curve

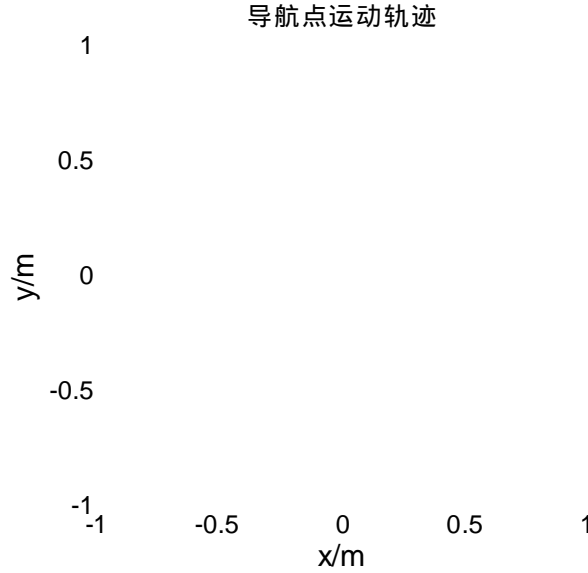


图 2-8 AGV 导航点运动轨迹

Fig.2-8 the trajectory of AGV navigation point

由图 2-5 和图 2-6 所示可得，给定参考轨迹为 $x^2+y^2=1$ ，在阶跃信号下其轨迹也为 $x^2+y^2=1$ ，与参考轨迹是一致的。

2.4.2 车式自动导航车动力学模型仿真分析

从某种意义上讲，动力学模型涵盖的影响因素更多，包含了运动学模型中的位姿关系^[42]，更能反映 AGV 系统的本质特性。

如图 3-2 所示的系统的轨迹跟踪示意图，系统的位姿为 $p_c = (x_c, y_c, \theta)^T$ ，其一

阶导数为 $\dot{p}_c = (\dot{x}_c, \dot{y}_c, \dot{\theta})^T$ 。参考文献[43]拉格朗日函数表述如下：

$$L = D - W \quad (2-19)$$

式中：

D— 系统的动能 (J)；

W— 系统的势能 (J)；

在假设条件下，AGV 系统只能在二维地面上作纯滚动运动，则系统的势能不变。进一步将 Lagrange 函数写成：

$$L = D - W = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \dot{y}^2 + \frac{1}{2} m I_0 \dot{\theta}^2 - W \quad (2-20)$$

式中：

\dot{x}_c —— AGV 中线上导航点 C 在全局坐标下 X 方向的线速度 (m/s) ;

\dot{y}_c —— AGV 中线上导航点 C 在全局坐标下 Y 方向的线速度 (m/s) ;

$\dot{\theta}$ —— 系统的角速度(rad/s) ;

按照拉格朗日函数定义的 , 系统的动力学模型定义为 :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{p}} - \frac{\partial L}{\partial p} = F_p \quad (2-21)$$

式中:

F_q —— 等效力向量;

$$F_q = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_\theta \end{bmatrix} = \frac{1}{2r} \begin{bmatrix} 2\cos\theta & 2\cos\theta \\ 2\sin\theta & 2\sin\theta \\ L-2R & L+2R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_l \\ \tau_r \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

由于 AGV 系统受到的约束方程为 :

$$A(p) \cdot \dot{p} = \dot{x}_c \sin\theta - \dot{y}_c \cos\theta = [\sin\theta \quad -\cos\theta \quad 0] \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = 0 \quad (2-23)$$

则 Lagrange 函数可变为 :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{p}} - \frac{\partial L}{\partial p} = F_p + A^T(p) \cdot \lambda \quad (2-24)$$

式中 :

$A^T(p)$ —— 约束力矩阵 ;

λ —— 附加约束力 ;

不考虑滚动摩擦力和系统受到的不确定干扰 , AGV 的动力学模型可改写为 :

$$\begin{cases} m\ddot{x} = \frac{\tau_l + \tau_r}{r} \cos\theta + \lambda \sin\theta \\ m\ddot{y} = \frac{\tau_l + \tau_r}{r} \sin\theta - \lambda \cos\theta \\ \ddot{\theta} = \frac{(L-2R)\tau_l + (L+2R)\tau_r}{2rI_0} \end{cases} \quad (2-25)$$

将系统受到的摩擦力以及不确定干扰项加上，并且令

$$M(p) = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_0 \end{bmatrix}, \quad C(p, \dot{p}) = \frac{1}{r^2} \begin{bmatrix} 2\cos^2\theta & \sin 2\theta & 2R\cos\theta \\ \sin 2\theta & 2\sin^2\theta & 2R\sin\theta \\ L\cos\theta & L\sin\theta & 2LR \end{bmatrix},$$

$$B(p) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\theta \\ \sin\theta & \sin\theta \\ L/2 - R & L/2 + R \end{bmatrix}$$

综上可以得到非完整约束 AGV 人的动力学模型的另一种表达形式：

$$M(p)\ddot{p} + C(p, \dot{p})\dot{p} + F(p) + G(p) + \tau_d = B(p)\tau + A^T(p)\lambda \quad (2-26)$$

式中：

$M(p)$ —— 对称正定矩阵；

$C(p, \dot{p})$ —— 向心力和哥式力项矩阵；

$F(p)$ —— 摩擦力项部分；

$G(p)$ —— 重力项部分；

AGV 只做水平运动，始终保持 $G(p) = 0$ ； τ_d 表示的是扰动项和其他未建模部分； $B(p)$ 为转换矩阵； $A^T(p)$ 为动力学约束矩阵。

前面已证明 AGV 系统是受非完整约束的系统，则根据方程 $A(p) \cdot \dot{p} = 0$ ，其中的 $A(p) = [\sin\theta \quad -\cos\theta \quad 0]^T$ 为约束矩阵，可求出矩阵 $A(p)$ 零空间的一组基为 $Q_j(p), j=1,2,\dots,m$ (m 为基的个数)，且 $A(p)Q_j(p) = 0$ ，则 AGV 系统的运动学方程为：

$$\dot{p} = Q(p) \cdot u \quad (2-27)$$

式中：

$u = [v, w]^T$ —— 系统速度控制输入矢量；

对式 (2-27) 进行微分得：

$$\ddot{p} = Q(p)\dot{u} + \frac{\partial Q(p)}{\partial p} u \quad (2-28)$$

将式 (2-27) 和式 (2-28) 代到式 (2-26)，等式两边再乘以 $Q^T(p)$ ，可将约束力项 $A(p)\lambda$ 消去得：

$$M(p)Q(p)\dot{u} + [M(p)\frac{\partial Q(p)}{\partial p} + C(p, \dot{p})Q(p)]u + G(p) + F(p, \dot{p}) + \tau_d = B(p)\tau \quad (2-29)$$

可令 $\bar{M}(p) = M(p)Q(p)$, $\bar{C}(p, \dot{p}) = M(p)\frac{\partial Q(p)}{\partial p} + C(p, \dot{p})Q(p)$, 化简可得

$$\text{即: } \bar{M}(p)\dot{u} + \bar{C}(p, \dot{p})u + G(p) + F(p, \dot{p}) + \tau_d = B(p)\tau \quad (2-30)$$

可以将动力学模型重新写成状态空间方程式的形式, 如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q(p) \cdot u \\ -\bar{M}(p)^{-1}\bar{C}(p, \dot{p})u - \bar{M}(p)^{-1}G(p) - \bar{M}(p)^{-1}F(p, \dot{p}) - \bar{M}(p)^{-1}\tau_d + \bar{M}(p)^{-1}B(p)\tau \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

如果不计重力项 $G(p)$, 摩擦力矩项 $F(p, \dot{p})$ 和未知的外加扰动量 τ_d 的影响, 并代

入 $\tilde{M}(p)$ 和 $\tilde{C}(p, \dot{p})$ 化简得:

$$\begin{aligned} \dot{u} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{2R}{mr^2}\dot{\theta} \\ -\frac{2LR}{I_0r^2}\dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -2\cos^4\theta + \sin 2\theta \sin^2\theta + 2\sin^4\theta & -\frac{2R}{mr^2} \\ \frac{mr^2}{-L} & -\frac{2LR}{I_0r^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{mr}{L-2R} & -\frac{mr}{L+2R} \\ \frac{2I_0r}{2I_0r} & -\frac{2I_0r}{2I_0r} \end{bmatrix} \tau \\ &= f(p) + g(p)u + d(p)\tau \end{aligned} \quad (2-32)$$

式中:

$d(p)$ —— 为一种外部干扰项;

很明显非完整约束 AGV 系统的动力学模型涵盖了系统更多因素, 揭露了更多的系统本质信息, 也考虑到了干扰和其他未建模部分, 是 AGV 系统本质特性的反映。

接下来的工作即是对车式自动导航车动力学模型的分析, 分别是在直线 $y=x$ 和圆形轨迹 $x^2+y^2=1$ 进行仿真分析。

(1) 在参考直线轨迹 $y=x$ 的情况下, 其动力学模型的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{g} \\ \dot{x} \\ \dot{g} \\ \dot{y} \\ \dot{g} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

$$\begin{aligned} \dot{u} = \begin{bmatrix} \dot{g} \\ \dot{v} \\ \dot{g} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} &= -\tilde{M}(p)^{-1}\tilde{C}(p, \dot{p})u - \tilde{M}(p)^{-1}Q^T(p)G(p) - \tilde{M}(p)^{-1}Q^T(p)F(p, \dot{p}) - \tilde{M}(p)^{-1}Q^T(p)\tau_d \\ &\quad + \tilde{M}(p)^{-1}Q^T(p)B(p)\tau \end{aligned} \quad (2-34)$$

AGV单机参数如下： $L=0.2005, d=0.05, r=0.17, m=60, I_0=15.965, \theta=\pi/4$, 给定速度向量为 $u=[1,0]'$ ，则有根据式（2-34）可计算得：

$$u = u_0 + \int_0^t u dt \quad (2-35)$$

考虑采样时间为 0.1s 且系统状态在这段时间内稳定不变，经计算 $u=[1.0196, 0.0190]'$ ，在这一控制量的下，进行的直线跟踪效果如下图 2-9 和图 2-10 所示，图 2-9 所示为导航车状态量阶跃响应；图 2-10 为导航点 C 的运动轨迹；

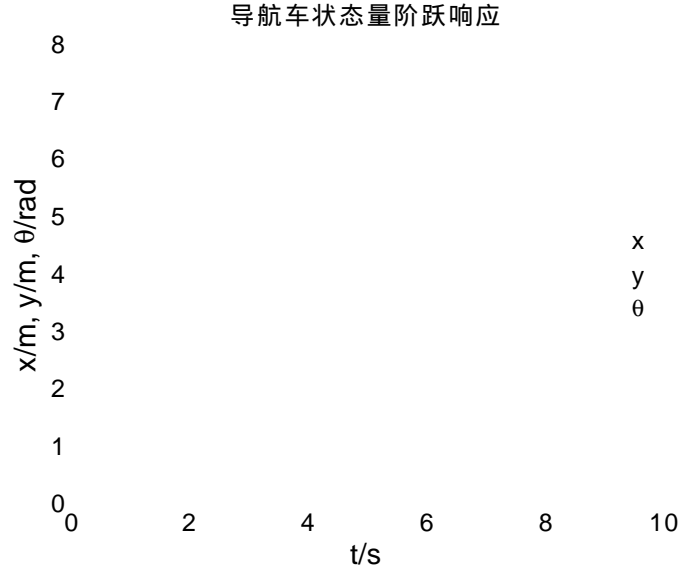


图 2-9 导航车状态量响应曲线
Fig.2-9 the state variable of AGV response curve

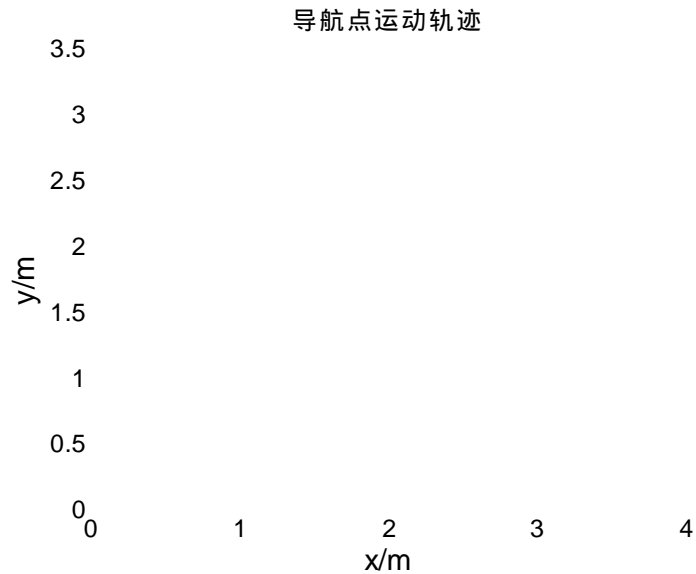


图 2-10 直线轨迹跟踪效果
Fig.2-10 linear trajectory tracking performance

由图 2-9 和图 2-10 可知,由于干扰量的存在,会使得角速度 ω 会存在一个很小值,随着时间的累积,方位角 θ 会增大,导航车的位置坐标自然而然会发生变化;在假设系统在采样时间间隔内,参数保持不变的情况,其导航点的运动轨迹是很接近参考轨迹 $y=x$ 的,仅有少许偏差,在可容许的范围内,这也就验证了该动力学模型的有效性。

(2)给定参考轨迹为 $x^2+y^2=1$,就导航点而言,转弯半径为 $R=1$,给定 $v=1\text{ m/s}$, $\omega=1\text{ rad/s}$,假设系统在采样时间间隔内,不发生变化,考虑控制系统采样时间为 0.1 s ,经计算 $u=[1.0196,1.0190]'$,在这一控制量的下,进行的直线跟踪效果如下图 2-11 和图 2-12 所示,图 2-11 所示为导航车状态量阶跃响应;图 2-12 为导航点 C 的运动轨迹;

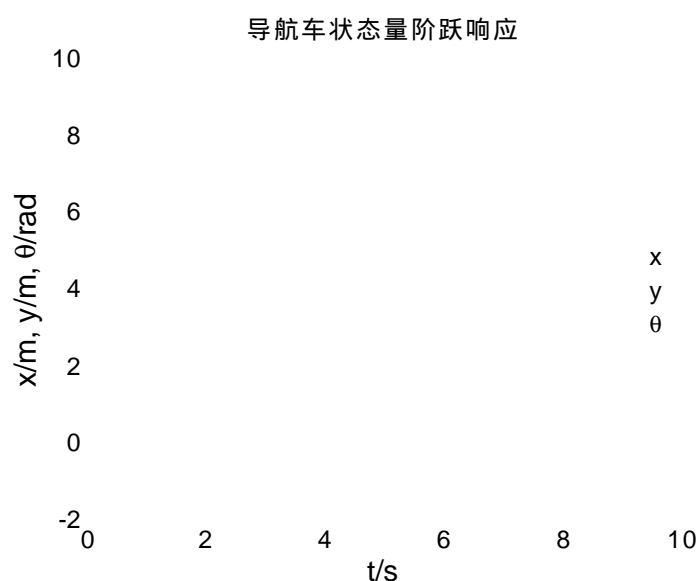


图 2-11 导航车状态量响应曲线

Fig.2-11 the state variable of AGV response curve

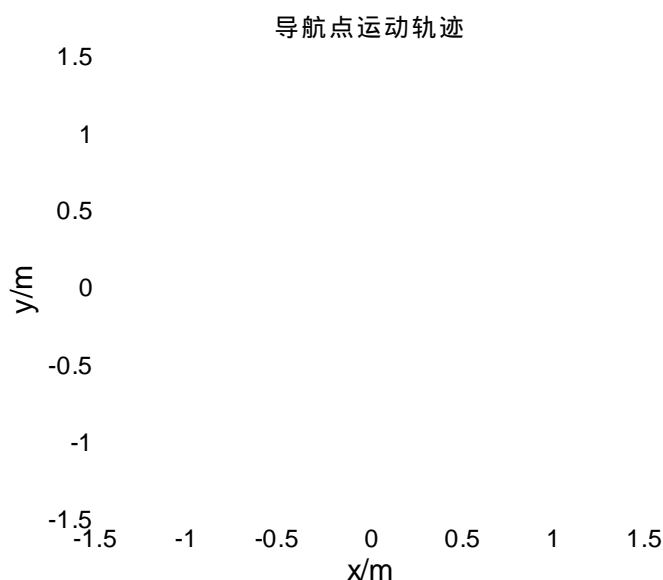


图 2-12 AGV 导航点运动轨迹

Fig.2-12 the trajectory of AGV navigation point

由图 2-11 和图 2-12 可得，虽然导航车在做圆形轨迹跟踪运动时，其方位角会时刻变化，动力学模型下的一个参数矩阵也会随之发生改变，但只要左、右驱动轮力矩输入量一定，其速度控制量 u 就不会变，进而，导航点的运动轨迹也会随之而渐渐稳定下来，最终与参考轨迹一致。

2.5 本章小结

本章首先分析了轨迹跟踪控制问题，将自动导航车对目标轨迹的跟踪问题转化为跟踪误差系统的镇定问题，并建立了车式自动导航车的运动学模型和动力学模型，在所建立的运动学模型和动力学模型的基础上，分别就直线轨迹和单位圆形轨迹开展了仿真研究，验证了所建立的两种模型的有效性，为后文的研究打下基础。

第三章 基于反演法的车式自动导航车轨迹跟踪控制

3.1 引言

本章首先介绍车式自动导航车轨迹跟踪控制的关键条件，随后针对车式自动导航车的运动学模型，采取当下应用较广泛的反演法的方法，设计出一种满足 Lyapunov 稳定性判据的控制律，还添加了为防止 AGV 运行过程中可能出现打滑现象的速度/加速度控制策略，在对控制器参数对控制效果分析后，通过设定目标曲线，进行仿真实验。

3.2 车式自动导航车轨迹跟踪控制问题描述

在点镇定、路径跟随及轨迹跟踪这三个问题中，点镇定和轨迹跟踪这两个问题在 AGV 研究领域是热点问题。这两个问题的解决对于 AGV 技术的发展有着举足轻重的影响。这两个问题的对比，对 AGV 轨迹跟踪问题的研究比点镇定的入手更简单且研究价值更高，所以在这方面的成果也比较多^[44]。轨迹跟踪问题可以简略到满足两个最大条件，其一是满足 Brockett 必要条件，即参考轨迹的斜率连续变化，其二是把 AGV 系统的不稳定性考虑进去^[45]。克服了上述两个关键条件，就可以设计出一个良好的控制律来控制 AGV 在工作环境中的稳定和高效地作业，达到我们预期的成效。AGV 自身建模有一定的复杂性，外部干扰会使我们建立模型有缺陷，因此，我们只能寻求一些补偿措施，尽可能减弱干扰对 AGV 控制的影响。只有处理好这两个约束，我们才能确保 AGV 系统在设计控制律时实现有效的跟踪^[46]。

以图 2-4 所示的车式自动导航车为研究对象，假设 AGV 在水平面内做车轮无滑动的纯滚动运动。AGV 的运动学方程：

$$\dot{p} = Q(p) \cdot u \quad (3-1)$$

式中：

$u = [v, w]^T$ —— 系统速度控制输入矢量；

$$\text{且 } Q(p) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

AGV 小车的轨迹跟踪可以描述为在惯性坐标下，小车从初始位置出发，到达并且跟随给定的参数轨迹，其中参考轨迹可表示为：

$$\begin{cases} \dot{x}_r = v_r \cos \theta_r \\ \dot{y}_r = v_r \sin \theta_r \\ \dot{\theta}_r = \omega_r \end{cases} \quad (3-2)$$

其中：

v_r — 参考机器人的参考线速度；

ω_r — 参考机器人的参考角速度；

由式 (3-1) 和式 (3-2) 可得到 AGV 的位姿误差方程：

$$e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_c \\ y_r - y_c \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$e = (e_1, e_2, e_3)^T$ 定义为位姿和导向角跟踪误差；

$$x_e = \cos \theta (x_r - x_c) + \sin \theta (y_r - y_c) \quad (3-4)$$

$$y_e = -\sin \theta (x_r - x_c) + \cos \theta (y_r - y_c) \quad (3-5)$$

$$\theta_e = \theta_r - \theta \quad (3-6)$$

下面我们详细推导 AGV 的误差微分方程。

(1) 对式 (3-4) 求微分得：

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= -\sin \theta \dot{\theta} (x_r - x_c) + \cos \theta (\dot{x}_r - \dot{x}_c) + \cos \theta \dot{\theta} (y_r - y_c) + \sin \theta (\dot{y}_r - \dot{y}_c) \\ &= \dot{\theta} (-\sin \theta (x_r - x_c) + \cos \theta (y_r - y_c)) + \cos \theta (\dot{x}_r - \dot{x}_c) + \sin \theta (\dot{y}_r - \dot{y}_c) \end{aligned} \quad (3-7)$$

代入式 (3-5) 和 $\dot{\theta} = \omega_c$ ，进一步化简得：

$$\dot{x}_e = \omega_c y_e + \cos \theta \dot{x}_r - \cos \theta \dot{x}_c + \sin \theta \dot{y}_r - \sin \theta \dot{y}_c \quad (3-8)$$

代入式 (3-1) 和式 (3-2) 到式 (3-8) 中得：

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= \omega_c y_e - v_c + v_r \cos \theta \cos \theta_r + v_r \sin \theta \sin \theta_r \\ &= \omega_c y_e - v_c + v_r \cos \theta_e \end{aligned} \quad (3-9)$$

(2) 对式 (3-5) 求微分得：

$$\begin{aligned}\dot{y}_e &= -\cos\theta\dot{\theta}(x_r - x_c) - \sin\theta(\dot{x}_r - \dot{x}_c) - \sin\theta\dot{\theta}(y_r - y_c) + \cos\theta(\dot{y}_r - \dot{y}_c) \\ &= -\dot{\theta}(\cos\theta(x_r - x_c) + \sin\theta(y_r - y_c)) - \sin\theta(\dot{x}_r - \dot{x}_c) + \cos\theta(\dot{y}_r - \dot{y}_c)\end{aligned}\quad (3-10)$$

代入式 (3-4) 和 $\dot{\theta} = \omega_c$, 进一步化简得 :

$$\dot{y}_e = -\omega_c x_e - \sin\theta \dot{x}_r + \sin\theta \dot{x}_c + \cos\theta \dot{y}_r - \cos\theta \dot{y}_c \quad (3-11)$$

代入式 (3-1) 和式 (3-2) 到式 (3-11) 中得 :

$$\begin{aligned}\dot{y}_e &= -\omega_c x_e - v_r \sin\theta \cos\theta_r + v_r \cos\theta \sin\theta_r \\ &= -\omega_c x_e + v_r \sin\theta_e\end{aligned}\quad (3-12)$$

(3) 对式 (3-6) 求微分得 :

$$\dot{\theta}_e = \dot{\theta}_r - \dot{\theta} = \omega_r - \omega_c \quad (3-13)$$

由式 (3-9) (3-11) 和 (3-13) 得到 AGV 系统的误差微分方程为 :

$$\dot{p}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_c y_e - v_c + v_r \cos\theta_e \\ -\omega_c x_e + v_r \sin\theta_e \\ \omega_r - \omega_c \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

因此,本文所研究的 AGV 系统的轨迹跟踪控制问题的目标就转变成寻找最佳控制输入 $u = [v, \omega]^T$, 使得系统在该控制输入的作用下, 使系统的位置误差和位置角误差 p_e 渐近收敛, 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} (x_e, y_e, \theta_e)^T = 0$ 。

由于 AGV 硬件限制及 AGV 运动过程的动力学特性, 如果系统误差比较大, 控制律所产生的控制量 (v_c, ω_c) 有可能超出系统的最大速度 $(v_{\max}, \omega_{\max})$ 或系统的加速度超出系统允许范围 $(\dot{v}_{\max}, \dot{\omega}_{\max})$, 并且系统的速度或者加速度太大将会引起 AGV 颤振, 为此, 在控制律中引入如下饱和和控制策略, 从而保证 AGV 运动平滑。

$$\omega_c = \begin{cases} \omega_{pre} + \text{sign}(\omega_c - \omega_{pre}) \dot{\omega}_{\max} dt & \text{if } (\dot{\omega}_c > \dot{\omega}_{\max}) \\ \text{sign}(\omega_c) \omega_{\max} & \text{if } (\omega_c > \omega_{\max}) \\ \omega_c & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-15)$$

$$v_c = \begin{cases} v_{pre} + \text{sign}(v_c - v_{pre}) \dot{v}_{\max} dt & \text{if } (\dot{v}_c > \dot{v}_{\max}) \\ \text{sign}(v_c) v_{\max} & \text{if } (v_c > v_{\max}) \\ v_c & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-16)$$

3.3 基于反演法的轨迹跟踪控制器的设计

3.3.1 反演法的原理

反演法 (Backstepping) 是一种系统化控制设计方法, 这种方法无论对于线性系统还是非线性系统都是适用的。反演法总结起来就是通过每个子系统的渐进稳定一直后退到系统本身, 通过子系统的渐进稳定性条件来最终设计系统的控制^[47-48]。

以如下系统为例, 其表示一个被控对象:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = b(x, t) + \varphi(x, t)u \end{cases} \quad (3-17)$$

其中, $x \in R^2$ 状态变量, u 表示控制输入变量, $\varphi(x, t) \neq 0$ 。

首先, 定义一个位置误差变量:

$$z_1 = x_1 - z_d \quad (3-18)$$

其中:

z_d —— 指令信号;

则有:

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{z}_d = x_2 - \dot{z}_d \quad (3-19)$$

然后, 定义一个对应的虚拟控制量:

$$v_1 = -b_1 z_1 + \dot{z}_d \quad (3-20)$$

其中：

b_1 — 大于零的常量；

再定义第二个误差变量：

$$z_2 = x_2 - v_1 \quad (3-21)$$

选取 Lyapunov 函数为：

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (3-22)$$

对其求微分后得：

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1 \dot{z}_1 = z_1 (\dot{x}_2 - \dot{v}_1) = z_1 (\dot{z}_2 + v_1 + b_1 z_1) \\ &= -b_1 z_1^2 + z_1 z_2 \end{aligned} \quad (3-23)$$

如果 $z_2 = 0$ ，那么 $\dot{V}_1 \leq 0$ 。

第二步，构造如下的 Lyapunov 函数：

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (3-24)$$

由于：

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{v}_1 = b(x, t) + \varphi(x, t)u + b_1 \dot{z}_1 - \ddot{z}_d \quad (3-25)$$

则有：

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = -b_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 (b(x, t) + \varphi(x, t)u + b_1 \dot{z}_1 - \ddot{z}_d) \quad (3-26)$$

为了使 $\dot{V}_2 \leq 0$ ，可以设计控制律为：

$$u = \frac{1}{\varphi(x, t)} (-b(x, t) - b_2 z_2 - z_1 - b_1 \dot{z}_1 + \ddot{z}_d) \quad (3-27)$$

其中

b_2 — 正数；

则有：

$$\dot{V}_2 = -b_1 z_1^2 - b_2 z_2^2 \leq 0 \quad (3-28)$$

因此，所设计的控制律是满足李雅普诺夫稳定性判据的，进而证明了系统的稳定性，保证了 z_1 与 z_2 都是渐进稳定的，而且 z_1 是以指数的形式渐进收敛于零。

3.3.2 反演法 AGV 控制律设计

对于 AGV 系统的非完整性，采用反演法设计轨迹跟踪控制律，参考文献[49]将跟踪实际轮式移动机器人的跟踪问题转化为跟随虚拟参考理想的轮式移动机器人模

型的问题，引入新的虚拟反馈量，设计跟踪控制器实现导航车对预定轨迹的全局渐近跟踪。

由式 (3-14) 有，假如 $\theta_e \rightarrow 0$ ，将 x_e 视为虚拟的控制输入，通过寻找合适的虚拟状态反馈使得 $y_e \rightarrow 0$ ，那么系统的控制目标就变成了通过设计合适的控制输入量 $u = [v, \omega]^T$ 来使得 x_e 趋近于该虚拟状态反馈函数，并且使 $\theta_e \rightarrow 0$ 。因而可以保证整个闭环系统是渐进稳定的。参考文献[50]的想法，定义式 (3-29) 为新的误差变量，并采用反演法的思想来设计 AGV 的轨迹跟踪控制律。

定义新的误差变量为：

$$\bar{x}_e = x_e - a_1 f(k\omega_c) y_e \quad (3-29)$$

其中：

$$f(k\omega_c) \text{ -- 反馈控制函数, } f(k\omega) = \frac{k\omega_c}{1+(k\omega_c)^2};$$

$a_1 f(k\omega_c) y_e$ 为虚拟反馈量，函数 $f(k\omega_c)$ 使得虚拟反馈调节范围平滑在 $[-a_1 y_e, a_1 y_e]$ 之间。如果使得控制量 $x_e \rightarrow a_1 f(k\omega_c) y_e$ ，且 $\theta_e \rightarrow 0$ ，则由式 (3-14) 可知： $\dot{y}_e \rightarrow -\omega_c a_1 f(k\omega_c) y_e$ 。显然 $\omega_c f(k\omega_c) = \frac{k\omega_c^2}{1+(k\omega_c)^2}$ ，所以，当 $t \rightarrow \infty$ ， y_e 应按指数

收敛于零，如果 y_e 收敛于零，由以上分析可知 x_e 也趋近于零。

取 Lyapunov 函数为：

$$V = \frac{1}{2} \bar{x}_e^2 + \frac{1}{2} y_e^2 + \frac{2}{a_2} (1 - \cos \frac{\bar{\theta}_e}{2}) \quad (3-30)$$

之所以在 Lyapunov 函数中选取 $\cos \frac{\bar{\theta}_e}{2}$ 而不是 $\cos \bar{\theta}_e$ ，是因为我们的目标是要将 $\bar{\theta}_e$ 控制到零角度，即在集合 $\{\bar{\theta}_e | \bar{\theta}_e = 2k\pi, k \in \mathbb{Z}\}$ 中；否则将进入平衡点集合 $\{\bar{\theta}_e | \bar{\theta}_e = k\pi, k \in \mathbb{Z}\}$ 中；

而 $a_2 > 0$ ，很明显 $V \geq 0$ ，且当且仅当 $(\bar{x}_e, y_e, \bar{\theta}_e)^T = 0$ 时， $V = 0$ ($\theta_e \in [-\pi, \pi)$)。

由式 (3-14) 和式 (3-29) 可得：

$$\dot{\bar{x}}_e = \dot{x}_e - a_1 k f'(k\omega_c) \dot{\omega}_c y_e - a_1 f(k\omega_c) \dot{y}_e \quad (3-31)$$

同时对 Lyapunov 函数求导，可得：

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= \dot{x}_e \bar{x}_e + \dot{y}_e \bar{y}_e + \frac{1}{a_2} \sin \frac{\theta_e}{2} \dot{\theta}_e \\
 &= \bar{x}_e [\omega_c y_e - v_c + v_r \cos \theta_e - a_1 f(k\omega_c)(-\omega_c x_e + v_r \sin \theta_e) - a_1 k f'(k\omega_c) \dot{\omega}_c y_e] \\
 &\quad + y_e [-\omega_c (\bar{x}_e + a_1 f(k\omega_c) y_e) + v_r \sin \theta_e] + \frac{1}{a_2} \sin \frac{\theta_e}{2} (\omega_r - \omega_c) \\
 &= \bar{x}_e [-v_c + v_r \cos \theta_e - a_1 f(k\omega_c)(-\omega_c x_e + v_r \sin \theta_e) - a_1 k f'(k\omega_c) \dot{\omega}_c y_e] - \\
 &\quad - a_1 \omega_c f(k\omega_c) y_e^2 + \frac{1}{a_2} \sin \frac{\theta_e}{2} [\omega_r - \omega_c + 2a_2 y_e v_r \cos \frac{\theta_e}{2}]
 \end{aligned}$$

设 $\forall t \in [0, +\infty]$, $\dot{v}_r, v_r, \dot{\omega}_r, \omega_r$ 有界且 v_r, ω_r 不同时为零, 取系统的控制律为:

$$\begin{aligned}
 \omega_c &= \omega_r + 2v_r a_2 y_e \cos \frac{\theta_e}{2} + a_3 \sin \frac{\theta_e}{2} \\
 v_c &= v_r \cos \theta_e + a_1 \omega_c f(k\omega_c) x_e - a_1 f(k\omega_c) v_r \sin \theta_e + a_4 x_e \\
 &\quad - a_4 a_1 f(k\omega_c) y_e - a_1 k f'(k\omega_c) \dot{\omega}_c y_e
 \end{aligned} \tag{3-32}$$

其中由于 a_1, a_2, a_3, a_4, k 均为大于零的数, 则

$$\dot{V} = -a_4 \bar{x}_e^2 - a_1 \omega_c f(k\omega_c) y_e^2 - \frac{1}{a_2} a_3 \sin^2 \frac{\theta_e}{2} \tag{3-33}$$

由于 a_1, a_2, a_3, a_4 均为大于零的数, 且 $\omega_c f(k\omega_c) \geq 0$ 所以 $\dot{V} \leq 0$, 又由于 $V \geq 0$ 且为连续可微正定函数, 又因为 \dot{V} 为半负定且一致连续函数。综上所述, 由李雅普诺夫稳定性判据^[51]可知, 在全局范围内, $[x_e, y_e, \theta_e]^T$ 有界且 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_e, y_e, \theta_e^T = 0$ 。

3.3.3 控制器性能分析

式 (3-32) 控制器速度控制的公式可重新写为:

$$v_c = v_r \cos \theta_e - a_1 f(k\omega_c) y_e + a_4 x_e - a_4 a_1 f(k\omega_c) y_e - a_1 k f'(k\omega_c) \dot{\omega}_c y_e \tag{3-34}$$

其中 $v_r \cos \theta_e$ 是参考车速在当前行进方向上的分量, 有 $\dot{y}_e \rightarrow -\omega_c a_1 f(k\omega_c) y_e$, 经分析可知, 当 $t \rightarrow \infty$, y_e 会按指数收敛于零, 且参数 a_1 将决定 y_e 的收敛速度, a_1 越

大, y_e 收敛越快, 反之则越慢; 如果 y_e 收敛于零, 由 $x_e \rightarrow a_1 f(k\omega_c)y_e$ 可知, x_e 也趋近于零; 且线速度控制公式相当于对 x_e 是一个比例控制器, 参数 a_4 是其比例系数, 也就是说参数 a_1, a_4 都对 x_e 的变化产生影响。而角速度公式 $\omega_c = \omega_r + 2v_r a_2 y_e \cos \frac{\theta_e}{2} + a_3 \sin \frac{\theta_e}{2}$, 该公式是为了消除导航车方向角误差, y_e 表示纵轴方向上的误差, 需要车体纵向平移, 而 θ_e 则需要考虑驱动轮的左右两轮的速度控制, 实现车体旋转来消除, 可见, 角速度的控制与 y_e 和 θ_e 两种误差均有关, 影响程度由 a_2 和 a_3 来决定。

为研究参数变化对系统跟踪性能的影响, 经过多次试凑确定了一组性能较好的参数 $a_1=2.04, a_2=25.55, a_3=4.88, a_4=1.67, k=1$; 控制器参数对控制效果的实验如下思路进行: 每一次单独让一个参数变化, 其余三个参数不变。

仿真实验均是在圆形轨迹跟踪情况下进行的, 结果如下图所示, 其中图 3-1 和图 3-2 表示 a_1 的变化对圆形轨迹跟踪中 y_e 的影响, 图 3-3 和图 3-4 表示为参数 a_2 的变化对圆形轨迹跟踪控制的影响, 由于 ω_c 的计算公式中包含 $2a_2 y_e v_r \cos \frac{\theta_e}{2}$ 部分, 则 a_1 不变的情况下, a_2 将会放大 y_e 的收敛对 ω_c 的收敛的影响, a_2 越大, ω_c 收敛速度越快, 反之, 则越慢, a_2 取太大则容易造成系统震荡。图 3-5 和图 3-6 表示为参数 a_3 的变化对圆形轨迹跟踪控制的影响, 由于有 $\dot{y}_e \rightarrow -\omega_c a_1 f(k\omega_c)y_e$, 因而, a_3 的变化也会引起 v_c 的变化。图 3-7 和图 3-8 表示为参数 a_4 的变化对圆形轨迹跟踪控制的影响。

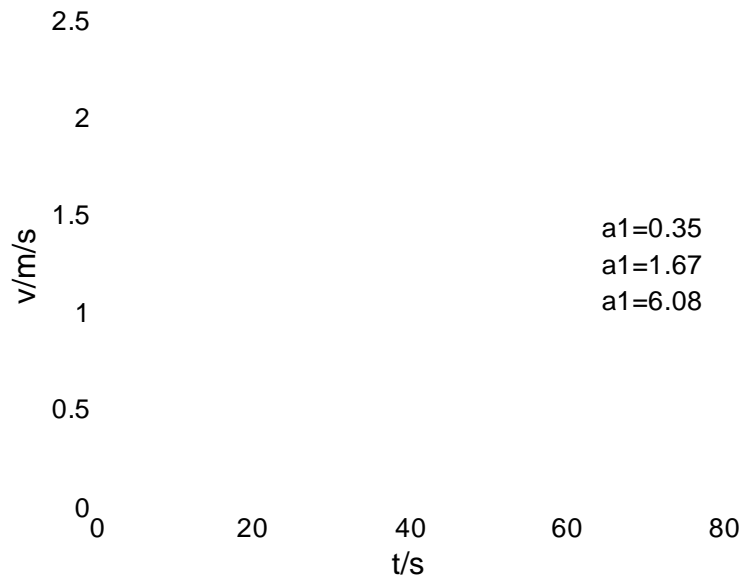


图 3-1 a_1 的变化对 v_c 的影响 ($a_2=25.55, a_3=4.88, a_4=1.67$)

Fig.3-1 the impact of changes in a_1 on v_c ($a_2=25.55, a_3=4.88, a_4=1.67$)

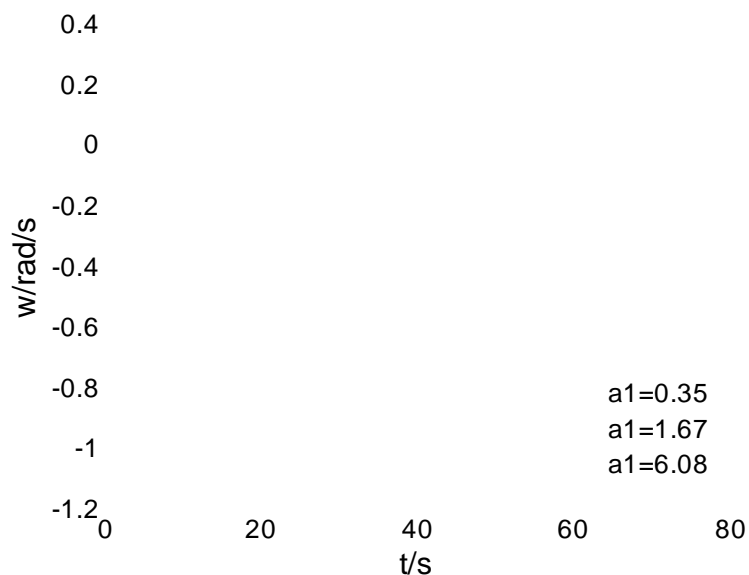


图 3-2 a_1 的变化对 w_c 的影响 ($a_2=25.55, a_3=4.88, a_4=1.67$)

Fig.3-2 the impact of changes in a_1 on w_c ($a_2=25.55, a_3=4.88, a_4=1.67$)

可以看出控制器参数 a_1 对 v_c 的收敛速度有明显的影响, a_1 越大, 其初始值跳跃月越大, a_1 取较大的值有利于 v_c 的收敛, 然而, 过大的值却会引起系统震荡, 反之, 则 v_c 的收敛速度越慢, 且控制器参数 a_1 对 w_c 的影响不明显。

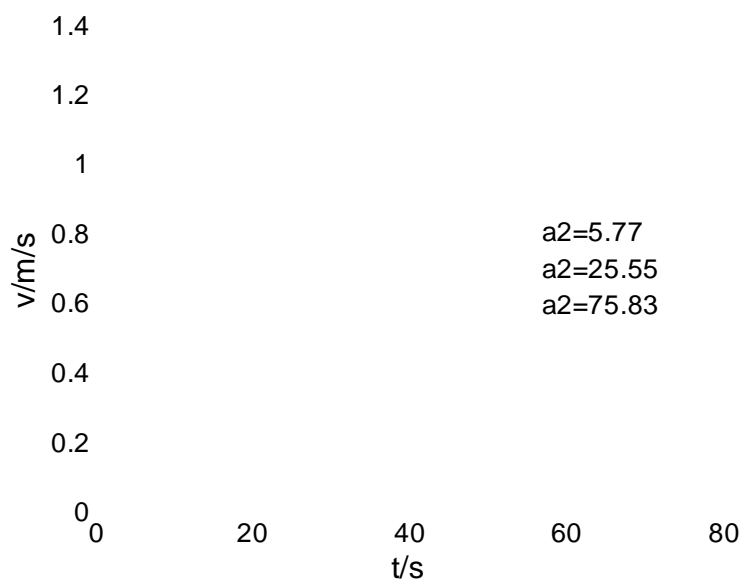


图 3-3 a_2 的变化对 v_c 的影响 ($a_1=2.04, a_3=4.88, a_4=1.67$)

Fig.3-3 the impact of changes in a_2 on v_c ($a_1=2.04, a_3=4.88, a_4=1.67$)

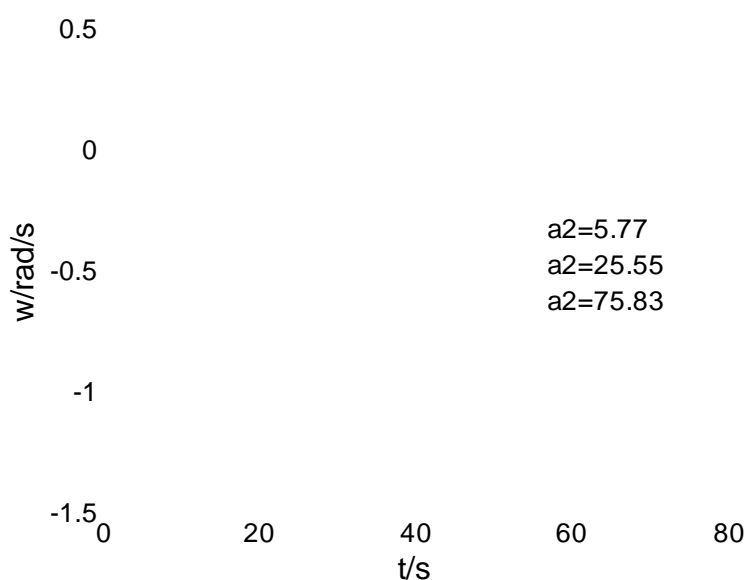


图 3-4 a_2 的变化对 w_c 的影响 ($a_1=2.04, a_3=4.88, a_4=1.67$)
Fig.3-4 the impact of changes in a_2 on w_c ($a_1=2.04, a_3=4.88, a_4=1.67$)

由图 3-3 和图 3-4 可以看出控制器参数 a_2 主要影响着控制量 w_c 的变化，一定范围内对控制量 v_c 的影响不明显， a_2 越大，其收敛速度越快，然后过大的值则会引起系统震荡，反之，则 w_c 的收敛速度越慢。

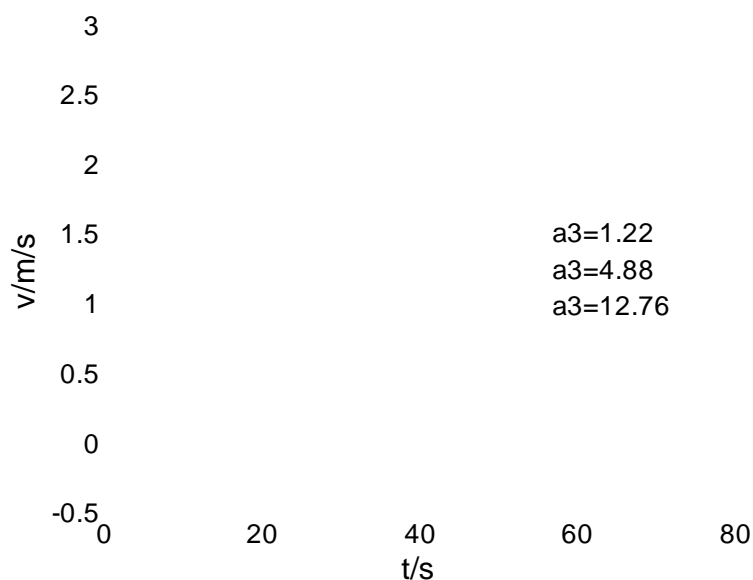


图 3-5 a_3 的变化对 v_c 的影响 ($a_1=2.04, a_2=25.55, a_4=1.67$)
Fig.3-5 the impact of changes in a_3 on v_c ($a_1=2.04, a_2=25.55, a_4=1.67$)

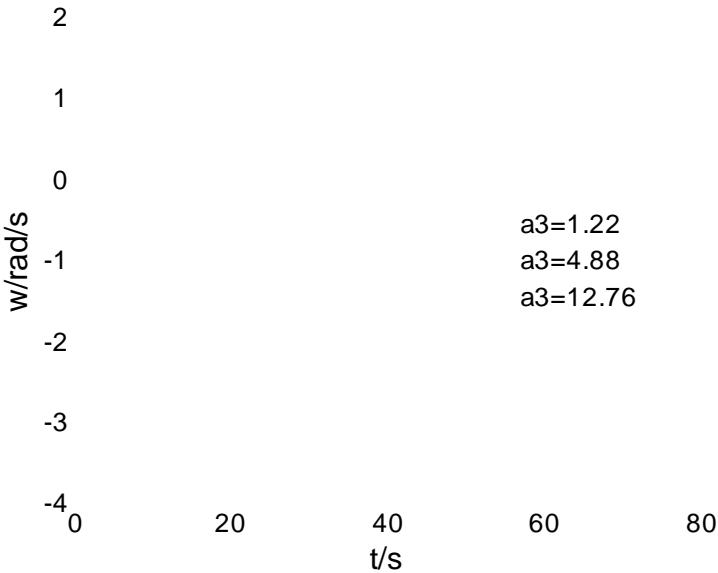


图 3-6 a_3 的变化对 w_c 的影响 ($a_1=2.04, a_2=425.55, a_4=1.67$)

Fig.3-6 the impact of changes in a_3 on w_c ($a_1=2.04, a_2=25.55, a_3=1.67$)

由图 3-5 和图 3-6 可知，控制器参数 a_3 的改变会同时影响速度控制量和角速度控制量，整体表现为 a_3 的值越大，控制量 v 和 w 的收敛速度加快，反之，则会减慢，且该值不能太大，容易造成系统震荡。

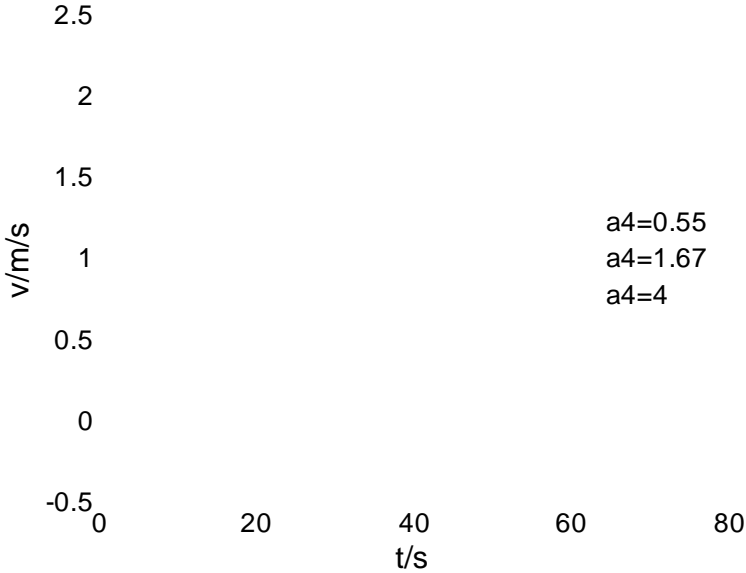
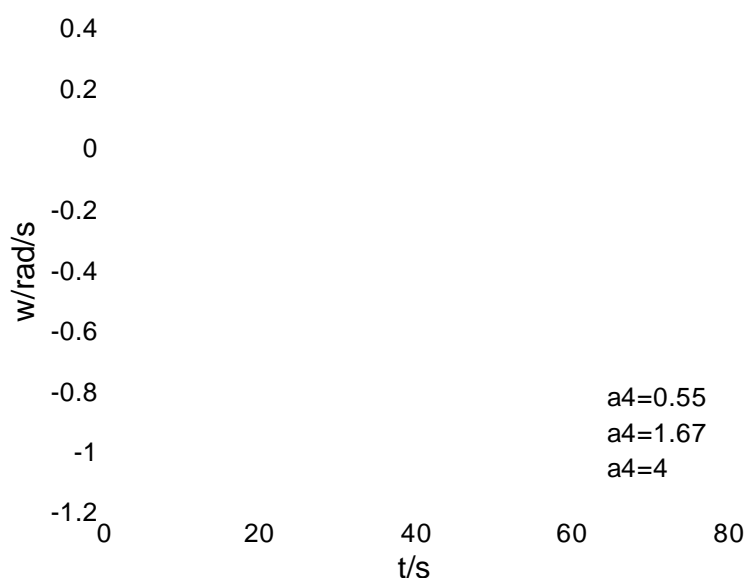


图 3-7 a_4 的变化对 v_c 的影响 ($a_1=2.04, a_2=25.55, a_3=4.88$)

Fig.3-7 the impact of changes in a_4 on v_c ($a_1=2.04, a_2=25.55, a_3=4.88$)

图 3-8 a_4 的变化对 w_c 的影响 ($a_1=2.04, a_2=25.55, a_3=4.88$)Fig.3-8 the impact of changes in a_4 on w_c ($a_1=2.04, a_2=25.55, a_3=4.88$)

由式 (3-34) 可得, 在其他三个参数不变的情况下, a_4 的变化, 只会影响 v_c 的收敛速度, a_4 越大, v_c 收敛得越快, 反之, 则越慢, v_c 的控制相对于 x_e 来说是比例控制, 参数 a_4 便是其比例系数, 这一点在图 3-7 中表现得很明显; a_4 对 w_c 的影响整体表现不是很明显, 如图 3-8 所示, 整体上而言, a_4 的值越大, 越有利于 w_c 的收敛。

3.4 仿真实验结果与分析

前面本文已通过李雅普诺夫函数判据证明了所设控制律的稳定性, 并对控制器对控制效果的影响, 做了一定参数分析工作。下面将通过数值仿真的方法对控制律的有限性进行验证。控制器参数为 $a_1=3.2, a_2=8, a_3=2, a_4=3, k=2.6; (v_r, w_r)=(2 \text{ m/s}, 0.1 \text{ rad/s})$, $(\dot{v}_r, \dot{w}_r)=(0.58 \text{ m/s}^2, 0.55 \text{ rad/s}^2)$ 初始误差为 $(-0.2, 2, -0.5)$, 参考速度控制量为 $v_r=0.2 \text{ m/s}, w_r=0$ 。具体仿真结果如下图所示, 图 3-11 表示跟踪直线运动的自动导航车的结果。

(1) 自动导航车跟踪直线仿真实验

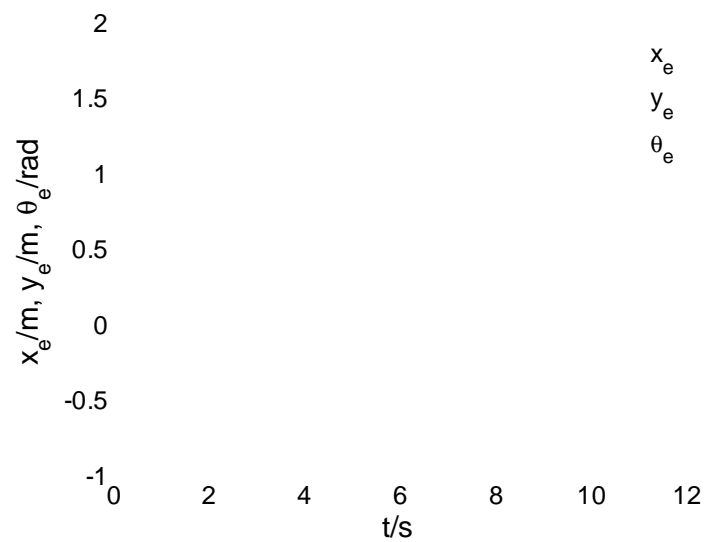


图 3-9 直线轨迹跟踪误差曲线
Fig.3-9 Linear trajectory tracking error curve

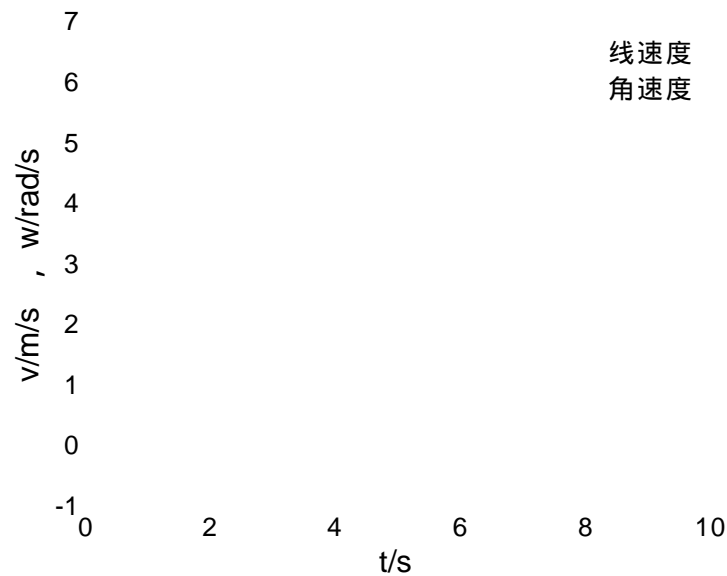


图 3-10 直线跟踪控制量曲线
Fig.3-10 Linear tracking control curve

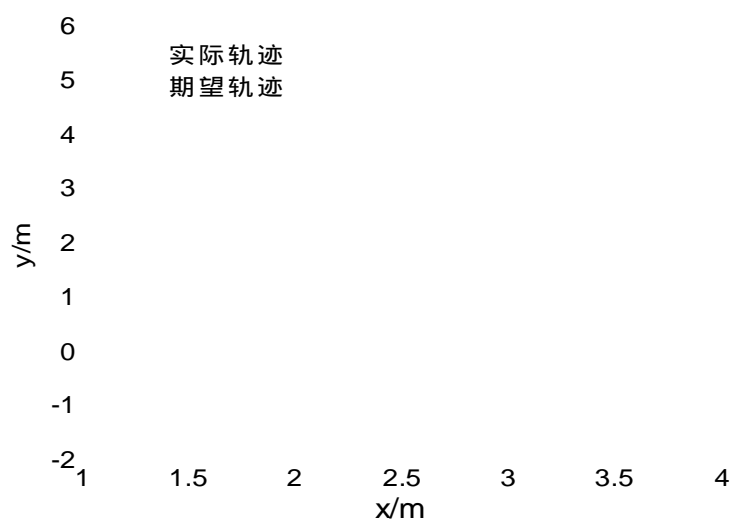


图 3-11 直线轨迹跟踪效果
Fig.3-11 linear trajectory tracking performance

(2) 自动驾驶车跟踪圆形仿真实验

控制器参数为 $a1=2.04, a2=25.55, a3=4.88, a4=1.67, k=1$; 初始误差为 $(-0.2, 2, -0.5)$, 参考速度为 $v_r=0.2\text{m/s}$, $w_r=0.2\text{rad/s}$ 。具体仿真结果如下图所示, 图 3-14 表示跟踪圆形运动的自动驾驶车的结果。

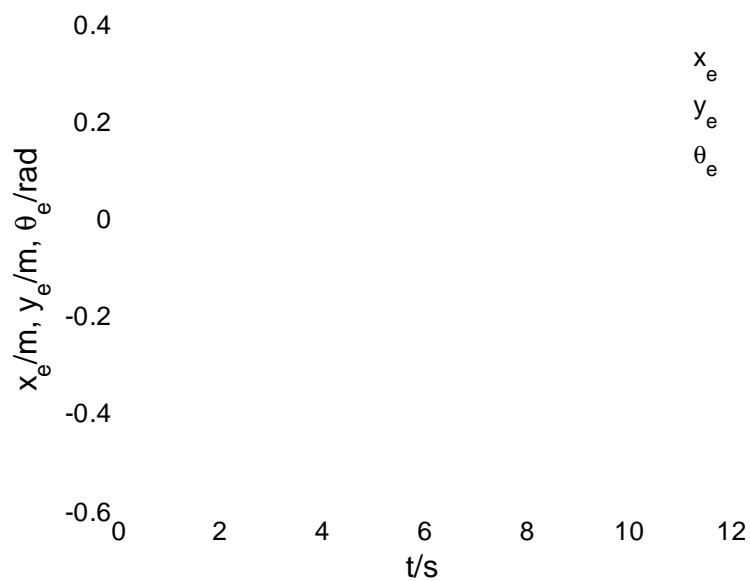


图 3-12 圆形跟踪误差曲线
Fig.3-12 Circular tracking error curve

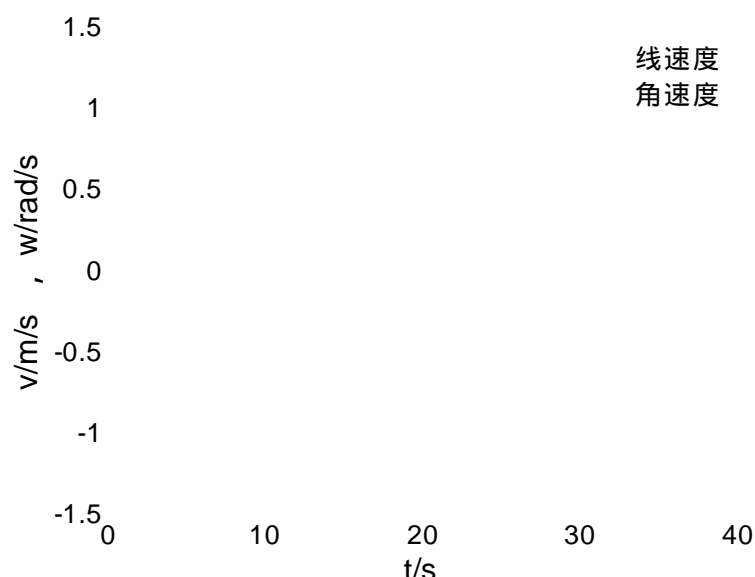


图 3-13 圆形跟踪控制量曲线
Fig.3-13 Circular tracking control curve

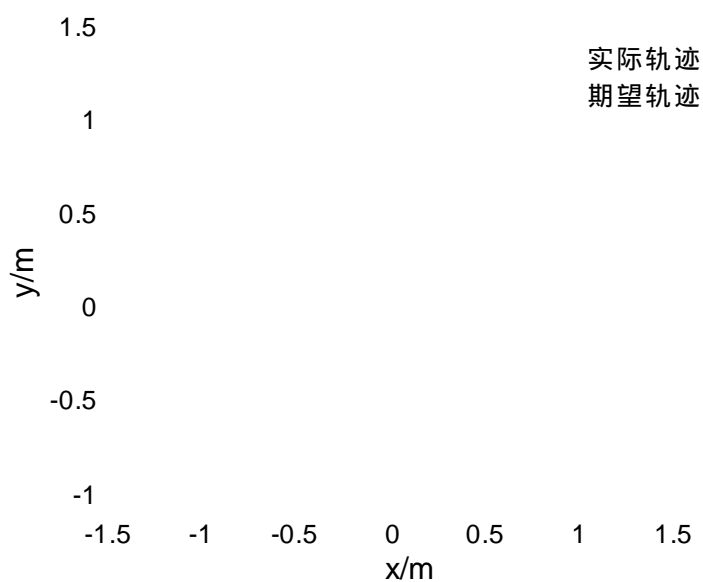


图 3-14 圆形轨迹跟踪效果
Fig.3-14 Circular trajectory tracking performance

仿真结果分析：

从系统的三个方向的误差量的变化这个角度入手，车式自动导航车在基于反演法设计的控制器较好地跟踪了给定轨迹，图 3-11 和图 3-14 可以看出，自动导航车跟踪直线轨迹和圆形轨迹控制效果能达到要求。

3.5 本章小结

本章在反演法控制中引入一种新的虚拟控制量，设计了满足李雅普诺夫稳定性判据的轨迹跟踪控制律，且通过仿真实验分析了控制律中参数对控制效果的影响，并将反演法控制运用到车式自动导航车中，仿真实验结果表明，系统的控制精度和快速性能有所提高，有一定的工程实用价值。

第四章 基于智能算法的车式自动导航车轨迹跟踪控制

4.1 引言

合适的控制器参数能产生良好的控制效果，相反，不合适的参数不能满足工业要求，甚至可能会引起系统震荡。不同的 AGV 应用场合不同（如轨迹不同，转弯半径或车速要求不同等）所需最优控制参数亦不同，因此如何设计合理的控制器参数是系统优良性能的保证。

本章对蛙跳算法进行研究，针对蛙跳算法易陷入局部最优的缺点，在种群中引入敏感粒子和蒸发系数对基本蛙跳算法进行改进，并将改进的蛙跳算法应用于车式自动导航车中。

4.2 ISFLA 算法

由上述分析可知，要想得到良好的控制性能就需要有合适的控制参数。基于种群的进化算法，由于其隐含的并行特征，使得进化算法成为多目标求解的一类重要方法^[52]。目前已有的进化算法如遗传算法、粒子群算法、蜂群算法、文化基因算法（简称 Memtric）^[53]，蛙跳算法^[54]等对控制器权值优化的文献可查。蛙跳算法^[55]（Shuffled Frog Leaping Algorithm, SFLA）是 2003 年新型种群优化算法，它结合了 PSO 算法和 Memtric 算法的优点，有效地增强群体搜索能力，有较快的迭代速度以及较好的全局和局部搜索平衡策略。混合 SFLA 已广泛应用于加工制造行业、旅行商问题、连续优化问题和模糊控制器设计等。然而，SFLA 算法中不同的族群具有不同的文化，分别进行局部搜索，但是由于每个族群都要进行多次迭代，SFLA 具有高计算代价和易陷入局部极值的缺陷。

4.2.1 基本的蛙跳算法

SFLA 是由 Eusuff 和 Lansey 共同提出的一种群体智能优化算法。随机初始化产生 F 只 d 维青蛙群体，构成初始种群 $\Omega = \{X_1, X_2, \dots, X_F\}$ ，第 i 只青蛙表示为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ ，计算每只青蛙的适应值 $fitness(i)$ 。按适应值的大小对所有个体进行升序排列，并记录适应值最小个体位置（最优解）为 gx ；进而将初始种群划分为 m 个模因组，设 M_q 为第 q 个模因组青蛙的集合，其公式表示为：

$$M_q = \{X_{q+m(h-1)} \in \Omega \mid 1 \leq q \leq m; 1 \leq h \leq n\} \quad (4-1)$$

式中：

m — 模因组个数；

n — 模因组中的个体数；

记每组中最好青蛙和最差青蛙分别为 X_b 和 X_w ；进行局部搜索，即对不断更新模因组中 X_w 的位置。

由基本蛙跳规则^[56]知其迭代方式为：

$$st = rand.*(x_b - x_w) \quad (4-2)$$

$$X_w' = X_w + st, \text{ 若 } \|st\| < st_{\max} \quad (4-3)$$

式中：

st_{\max} — 最大移动步长；

st — 移动步长；

通过迭代操作，如果 X_w' 的适应值优于 X_w 的适应值，则取代原来的青蛙；否则用 gx 取代 X_b ，执行 (4-2) 和 (4-3)；若仍没有改进，则随机产生新解代替原有的 X_w 。重复上述局部搜索 N_e （局部更新代数）次，当局部搜索全部完成后，所有个体会再一次混合、排序、分组，继续进行局部搜索，重复上述动作，直到满足终止条件。

4.2.2 ISFLA 算法及其收敛性分析

基本的蛙跳算法存在着收敛速度慢、不确定性、收敛早熟等问题，本文拟从引入蒸发系数、敏感粒子对基本蛙跳算法进行改进，以增强其全局搜索能力。

(1) 参考引入了蒸发系数的粒子群算法 (Transformative Dynamic Particle Swarm Optimization, TDPSO^[57]) 的寻优特点，拟对蛙跳算法引入蒸发系数，以弱化蛙群对全局最优位置的记忆，增强全局搜索能力以避免陷入局部极值。

基本蛙跳算法局部最优位置更新形式为：

$$X_{i+1}(j) = \begin{cases} X_i(j) & f(X_{i+1}(j)) > f(X_i(j)) \\ X_{i+1}(j) & f(X_{i+1}(j)) \leq f(X_i(j)) \end{cases} \quad (4-4)$$

其中， $X_{i+1}(j)$ 表示第 $i+1$ 次迭代第 j 个模因组的局部最好青蛙的位置； $X_i(j)$ 表示第 i 次迭代第 j 个模因组的局部最好青蛙的位置，即适应值最小对应的青蛙的位置； $f(X_i(j))$ 表示 $X_i(j)$ 对应的适应值，式 (4-5) 表示当前青蛙位置的下一次迭代的适应值优于其局部的最好青蛙位置的适应值时，则以该位置作为局部最优青蛙位置。

引入蒸发系数后的更新形式为：

$$X_{i+1}(j) = \begin{cases} X_i(j) * g & f(X_{i+1}(j)) \geq f(X_i(j)) \\ X_{i+1}(j) & f(X_{i+1}(j)) < f(X_i(j)) \end{cases} \quad (4-5)$$

其中：

g — 蒸发系数，取值范围为[0,1]；

可见引入蒸发系数 g 可以减弱青蛙对群体最优位置的记忆，以增强全局搜索能力，对动态环境有一定的适应能力。

(2) 参考自适应粒子群算法 (记为 APSO) 在环境中随机生成敏感粒子的方法，也在蛙群算法的初始状态时引入敏感粒子，使种群能感知外部环境变化，在探测到外部环境变化后，会以某种响应方式对种群进行更新，以适应动态环境。响应的方式是如果该位置个体的适应值优于原来该位置个体适应值，则以当前位置个体的适宜值为准，如式 (4-5) 一样的另作调整。

接下来将分析改进蛙跳算法的收敛性，为方便分析，假设全局最优解和局部最优解相等，即 $g_x = x_b$ ；将改进蛙跳算法 (Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm, ISFLA) 的局部更新操作进行扩展^[58]：

第 k 次迭代公式：

$$X_w^k = \alpha X_w^{k-1} + \beta (X_b^{k-1} - X_w^{k-1}) \quad (4-6)$$

其中：

α — 随机数，取 $\beta = \frac{n-1}{n} \alpha$ ；

n — 模因组中的个体数；

引入蒸发系数后， $g \in (0,1)$ ，考虑极端情况下，下一次迭代开始， $X_b^k \rightarrow X_w^k$ ， $X_{b1}^k \rightarrow X_b^k$ ；即第 k 次迭代的局部最优青蛙位置变为局部最差青蛙位置，前一次迭代的局部次优位置变为局部最好位置；其中 X_{b1}^k 为第 k 次迭代群体迭代次优位置；

则改进后的 $k+1$ 次迭代公式：

$$X_w^{k+1} = \alpha X_b^k + \beta (X_{b1}^k - X_b^k) \quad (4-7)$$

式(4-7)，式(4-6)相减得： $X_w^{k+1} - X_w^k =$

$$(\alpha - \beta)(X_b^k - X_w^{k-1}) + \beta(X_{b1}^k - X_b^{k-1}) \quad (4-8)$$

化简得： $X_w^{k+1} - X_w^k =$

$$(\alpha - \beta)(X_b^k - X_w^k + X_w^k - X_w^{k-1}) + \beta(X_{b1}^k - X_b^{k-1}) \quad (4-9)$$

记 $VX^{k+1} = X^{k+1} - X^k$

$$\text{于是有: } \frac{VX_w^{k+1}}{VX_w^k} = \frac{\alpha}{n} + \frac{VX_b^k}{VX_w^k} \beta \quad (4-10)$$

记 $\frac{VX_b^k}{VX_w^k}$ 为 t , 则 VX_w^k 是以 $q = (\frac{\alpha}{n} + \beta t)$ 为公比的数列。

定理 1 对于公比为 q 且 $0 < |q| < 1$ 的 VX_w^n 数列而言, VX_w^n 会逐渐收敛于 0. 且最终 X_w^n 会收敛于一个稳定值。

证明: 因为是 VX_w^n 以 $q = (\frac{\alpha}{n} + \beta t)$ 为公比的等比数列, 由等比数列性质可知, 随着 k 的逐渐增加, VX_w^n 会趋于 0, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} VX_w^n = 0$ 。

定理 2 根据数列极限的归并原理, 假设存在数列 $\{\psi(n)\}$ 收敛于值 ψ , 则 $\{\psi(n)\}$ 的任意子数列也能收敛, 且都收敛于 ψ , 则数列 $\{VX_w^n\}$ 的任意子数列都收敛于 0。

证明:

$n=1$ 时, 由式 (4-10) 可得 $X_w^2 = X_w^1 + VX_w^1$, 可明显看出 X_w^2 有界;

假设 $n=k$ 时, $X_w^k = X_w^{k-1} + VX_w^{k-1}$, 有 X_w^k 有界;

则 $n=k+1$ 时, $X_w^{k+1} = X_w^k + VX_w^k$ 有界, 由 $\{VX_w^n\}$ 是收敛的, 知 VX_w^n 有界, 有界数列的有限次相加仍然为有界数列, 则 X_w^{k+1} 是有界的。

由数学归纳法可知, X_w^n 是有界的, 由式 (4-3) 知 X_w^n 是单调函数, 则 X_w^n 是收敛的, 且最终仅收敛到一个稳定值。

考虑到蒸发系数的取值 $g \in (0,1)$ 且比较小, 因此在最好适应值不会发生最大跳变的情况也能保证整个改进算法收敛。

综上所述, 对于改进的蛙跳种群来说, q 的取值满足 $0 < |q| < 1$, 即可保证其具有全局收敛性。

4.2.3 ISFLA 算法性能检验

为了测试改进的蛙跳算法的性能选择典型的测试函数对基本蛙跳算法、PSO 算法、和改进的蛙跳算法进行测试。

(1) Sphere 函数:

$$F_1(x) = \sum_{i=1}^N x_i^2, x_i \in [-5.12, 5.12], N = 3$$

(2) Rosen-brock 函数

$$F_2(x) = \sum_{i=1}^{N-1} [100(x_i^2 - x_{i+1})^2 + (x_i - 1)^2], x_i \in [-5, 5], N = 3$$

(3) Griewank 函数 :

$$F_3(x) = 1 + \sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=0}^N (\cos \frac{x_i}{i}), x_i \in [-600, 600], N = 3$$

(4) Schaffer's f7 函数

$$F_4(x) = \sum_{i=1}^{N-1} (x_i^2 - x_{i+1}^2)^{0.25} [\sin^2(50(x_i^2 + x_{i+1}^2)^{0.1}) + 1], x_i \in [-100, 100], N = 3$$

Sphere 函数和 Rosen-brock 函数是由 K.A.Dejong 提出的。Sphere 函数是单峰函数；Rosen-brock 函数是非凸病态函数，是一个单模态函数，但它是一个经典复杂优化问题，它的全局最优点位于一个平滑、狭长的抛物线形山谷内。由于函数仅仅为优化算法提供了少量信息，使算法很难辨别搜索方向，找到全局最小点的机会微乎其微，尤其是在高维的情况下，因此 Rosen-brock 函数通常用来评价优化算法的执行效率；Griewank 函数是标准的多模态函数，大量的局部极值点使得算法难以搜索到函数最优解。

PSO 参数设置：P=200，Wmax=1.2，Wmin=0.1，Kmax=200，C1=C2=1.0。SFLA 参数设置：F=200，m=20，n=10。改进蛙跳算法的参数设置 M=200，m=10，n=20。各测试函数变量维数为 20，三种算法中的局部迭代次数为 100，全局迭代次数为 500。当精度达到 10^{-7} 时，算法将停止迭代。

表 4-1 中表示的是分别采用三种算法对测试函数进行收敛性的测试

Table 4-1 Test of three kinds of algorithms convergence for test function

| 函数 | 优化算法 | 理论最优解 | 最优解 | 平均最优解 |
|--------------|---------|-------|----------|----------|
| Sphere | PSO | | 0 | 2.7E-4 |
| | 基本 SFLA | 0 | 2.187E-4 | 1.236E-6 |
| | ISFLA | | 0.000 | 0.000 |
| Rosen-brock | PSO | | 1.988 | 2.694 |
| | 基本 SFLA | 0 | 1.885 | 2.549 |
| | ISFLA | | 9.444E-4 | 7.660E-3 |
| Griewank | PSO | | 4.189E-2 | 1.94E-2 |
| | 基本 SFLA | 0 | 8.005E-2 | 2.710E-1 |
| | ISFLA | | 0.000 | 3.774E-3 |
| Schafer's f7 | PSO | | 4.337E-1 | 4.761E-1 |
| | 基本 SFLA | 0 | 5.495E-1 | 4.994E-1 |
| | ISFLA | | 3.267E-2 | 2.55E-1 |

上述表 4-1 中基本蛙跳算法的数据采用文献[59]中的数据, PSO 算法的数据采用文献[60]中的数据。考虑到蛙跳算法也是随机进化算法, 表 4-1 中所有数据是经过 30 次独立实验, 取平均数值得来的。从表 4-1 中可以得出如下结论: 对于单峰函数 Sphere, PSO 算法和基本 SFLA 算法都能较容易地搜索到接近最优解, 有很好的搜索效率和准确度。而对于 Rosen-brock 函数, 基本的蛙跳算法在有限次迭代次数里得到的解不够理想; 对于较复杂的 Griewank 函数和 Schafer's f7 函数, 在有限的迭代次数里, 改进后的蛙跳算法搜索到的最优解, 无论是多次函数运行的最优解还是平均最优解都优于基本 SFLA 和 PSO 算法所取得结果, 因而, 可以说明改进的蛙跳算法有效性。

4.3 基于 ISFLA 算法的控制器参数选取

从上一章的分析可以看出, 控制器性能的关键是选择合适的参数, 需要多次重复测试来确定这些参数, 工作量非常大, 而且对于不同的场景, 参数选取工作量更大, 因此, 本章提出利用智能算法 SFLA 直接离线提出控制器参数。系统原理图如图 4-1 所示。参数产生器则根据反馈回的误差信息进行参数调整, 根据运动学方程很容易得到当前时间的机器人的位置和方位角。

$$q_r = [v_r, \omega_r]^T$$



图 4-1 跟踪控制系统结构图
Fig.4-1 Sketch of trajectory tracking control

ISFLA 算法的实现流程，可以得到以下法流程^[61]：

步骤 1 随机初始化 F 只青蛙种群，使得青蛙维数为 d ，模因组个数为 m ，每个模因组内个体数为 n ，全局混合迭代次数为 $Gmax$ ，局部迭代次数 $Lmax$ ，最大蛙跳步长为 $Smax$ ；

步骤 2 计算全部青蛙的适应度值；

在常用的误差积分函数 $IAE = \int_0^{\infty} e(t) dt$ 的基础上，为防止系统振荡，加入 $IADE = \int_0^{\infty} \dot{e}(t) dt$ 部分，其适应度函数如式（4-11）所示：

$$fitness = \frac{1}{1 + \int_0^{\infty} x^2 + y^2 dt + \int_0^{\infty} \theta dt + \int_0^{\infty} \dot{x} dt + \int_0^{\infty} \dot{y} dt + \int_0^{\infty} \dot{\theta} dt} \quad (4-11)$$

步骤 3 将所有的青蛙按适应值结果升序排序，确定全局最好的个体的适应值及位置 Xg ；

步骤 4 将全部青蛙个体按式（4-1）划分成 m 个模因组；

步骤 5 对每一个模因组，重复执行以下局部搜索 $Lmax$ ：a)更新全局最好个体 Xg 、模因组中最好个体 Xb 、当前最差个体 Xw ；b)按照式（4-2）式（4-3）对 Xw 进行更新操作。

步骤 6 当满足终止条件时，则进化过程结束，输出最优的控制器参数数组；否则，将全部青蛙混合，返回步骤 2 重新计算。

以上算法流程如图 4-2 所示。

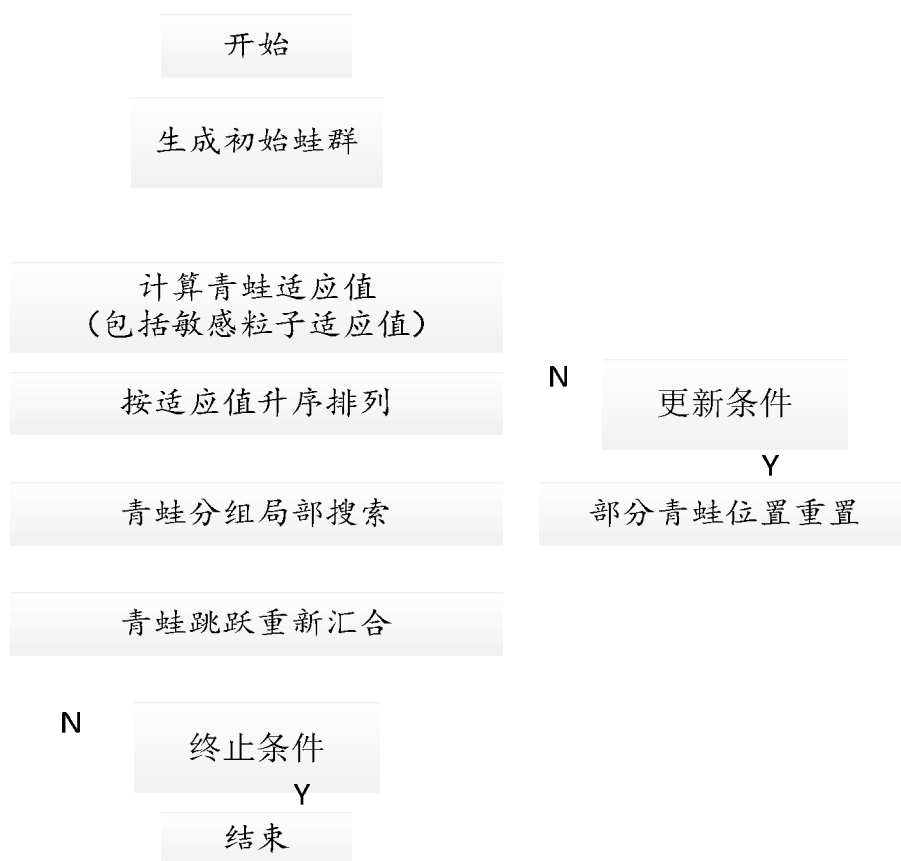


图 4-2 ISFLA 流程图

Fig.4-2 Flow chart of ISFLA

4.4 仿真实验结果与分析

前文先是对改进后算法的收敛性进行了分析，得出算法是可收敛的结论；其后，又引用四个常用函数作为测试函数测试改进后的算法的性能，也说明了改进后的算法对函数的解寻优具有更高精度的优点。利用改进的蛙跳算法进行对适应度函数的寻优，分别在直线和圆形轨迹上进行仿真实验。

(1) 自动驾驶车跟踪直线仿真实验

利用改进蛙跳算法确定的直线轨迹下，最好的控制器参数组为： $a1=2.78$, $a2=10.221$, $a3=3.115$, $a4=2.993$, 作为对比，第三章中人工选取的控制器参数 $a1=3.2$, $a2=8$, $a3=2$, $a4=3$ ；分别在初始误差为 $(-0.2, 2, -0.5)$ ，参考速度为 $vr=0.2$, $wr=0$ 。

具体仿真结果如下图所示，图 4-5 表示跟踪直线运动的自动导航车的结果。图 4-8 表示跟踪圆形运动的自动导航车的结果。

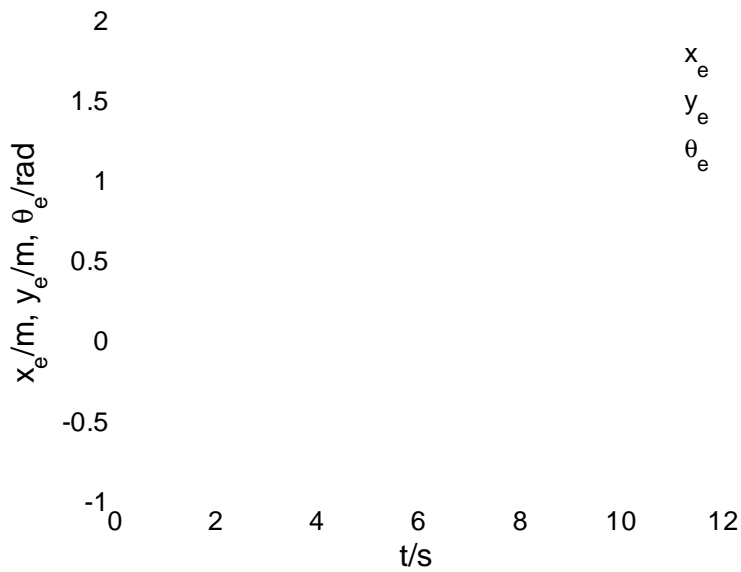


图 4-3 直线轨迹跟踪误差曲线
Fig.4-3 Linear trajectory tracking error curve



图 4-4 直线跟踪控制量曲线
Fig.4-4 Linear tracking control curve

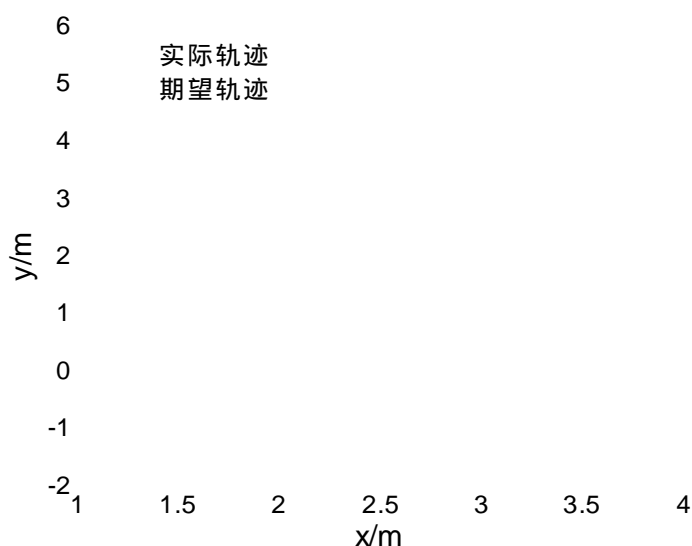


图 4-5 直线轨迹跟踪效果
Fig.4-5 linear trajectory tracking performance

(2) 自动驾驶车跟踪圆形仿真实验

采用改进蛙跳算法确定最好的控制器参数组为： $a1=2.961, a2=25.037, a3=6.295, a4=1.555$, 作为对比，第三章中人工选取的控制器参数为： $a1=2.04, a2=25.55, a3=4.88, a4=1.67$ ，初始误差为 $(-0.2, 2, -0.5)$ ，参考速度为 $v_r=0.2 \text{ m/s}$ ， $w_r=0.2 \text{ rad/s}$ 。具体仿真结果如下图所示，图 4-8 表示跟踪圆形运动的自动驾驶车的结果。

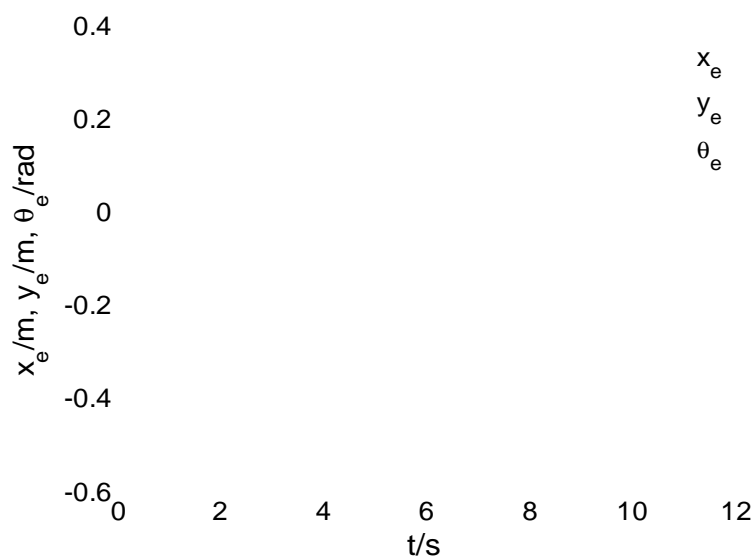


图 4-6 圆形跟踪误差曲线
Fig.4-6 Circular tracking error curve

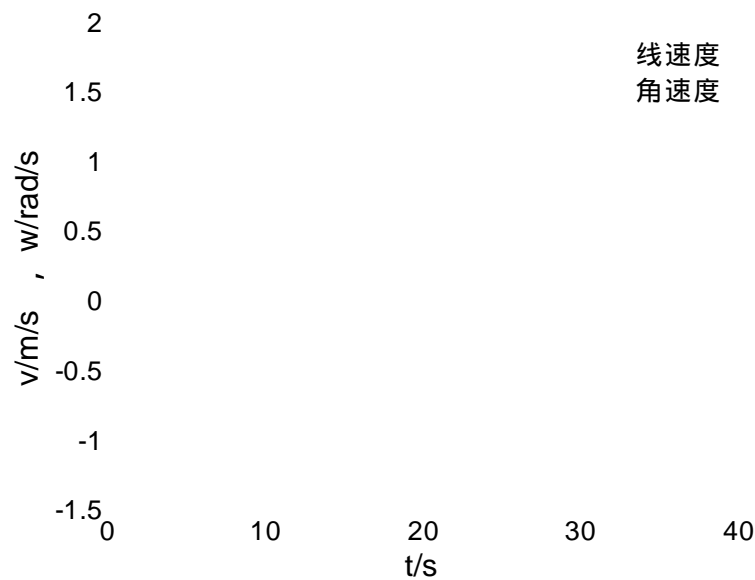


图 4-7 圆形跟踪控制量曲线
Fig.4-7 Circular tracking control curve

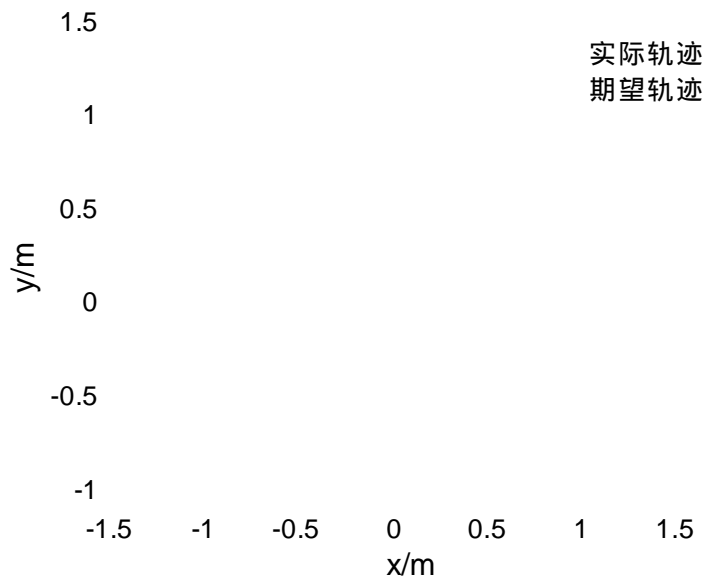


图 4-8 圆形轨迹跟踪效果
Fig.4-8 Circular trajectory tracking performance

仿真结果分析：

在已设计好的轨迹跟踪控制律的基础上，控制器参数的选取就是接下来最为关键的点了，合适的参数能达到工业实况要求。可以使自动驾驶车较好的跟踪参考轨迹。通过图 4-5 和图 4-8 的仿真结果可以看出，利用改进蛙跳算法计算得到的控制器

参数，与第三章相比，自动驾驶车跟踪直线轨迹和圆形轨迹都得到了更好的控制效果，进一步验证了改进算法的有效性。

4.5 本章小结

为防止蛙跳算法陷入局部极值，改进蛙跳算法引入蒸发系数，弱化蛙群算法对局部最优位置的记忆，增强全局搜索能力；同时引入敏感粒子，使种群获得感知外部环境变化的能力，在探测到外部环境变化后，采用初始化的响应方式对种群进行更新，增强蛙群算法的自适应能力；对测试函数的优化结果表明，改进的蛙跳算法精度更高，收敛速度也有所加快。然后，将 ISFLA 算法用于车式自动驾驶车的控制器参数优化中，仿真实验结果表明 ISFLA 的优化性能更好，控制精度更高。

第五章 基于运动学与动力学模型的串级控制

5.1 引言

本章将车式自动导航车运动学和动力学模型相组合,采用串级控制结构,并分别采用反演法和模糊滑模控制的控制方法分别设计各级的控制器,在此基础上,也对其在干扰下的自适应控制进行研究,并进行仿真实验分析。

5.2 串级控制结构

为了更好地研究基于车辆自主导航车辆的运动学和动力学模型的组合控制，提出了一种串级控制结构，如图 5-1 所示。与自主导航车辆的位置和姿态相关的外循环可以由反演法设计的控制器控制。内循环的驱动力控制器将采用模糊滑模变量结构控制，结合自适应控制算法^[62]估计未知扰动，期望提高 AGV 系统的控制精度。



图 5-1 串级控制结构
Fig.5-1 Concatenate Control Structure

从图 5-1 可知，外环的输出值是内环的参考值，内外循环组合控制，因此，虚拟速度向量是系统运动学和动力学之间控制的纽带。于基于动力学模型的控制而言，力矩是输入量。

5.3 基于动力学模型的模糊滑模控制

采用滑模变结构控制技术设计驱动力控制器，它可以使自主导航车的速度快速

的收敛于由位姿控制器输出的控制速度^[63-64]。令 $u_c = [v_c \ \omega_c]^T$ 为位姿控制器所输出的控制量即内环驱动力控制器的期望输入值； $u = [v \ \omega]^T$ 表示装载在自主导航车传感器测量的瞬时速度控制量。

为了设计转矩输入，引入辅助输入量则速度跟踪误差向量 e_u 就能够被定义为：

$$e_u = u - u_c \quad (5-1)$$

其中：

u_c — 速度控制量， $u_c = [v_c, \omega_c]^T$ ；

由式(2-25)可得：

$$\tau = B(p)^{-1}[\bar{M}(p)\dot{u} + \bar{C}(p, \dot{p})u + G(p) + F(p, \dot{p}) + \tau_d] \quad (5-2)$$

考虑到导航车常用工作在平面环境中，忽略重力项的影响，可进一步表示为：

$$\tau = B(p)^{-1}[\bar{M}(p)\dot{u} + \bar{C}(p, \dot{p})u + F(p, \dot{p}) + \tau_d] \quad (5-3)$$

为了达到输入转化，假设动力学系统中所有的参数矩阵（如 $\bar{M}(p), \bar{C}(p, \dot{p}), F(p, \dot{p})$ ）已知。如果要考虑未知干扰对模型的影响，可选用自适应的方法或者智能控制技术，可让模型更有实际的参考价值。

自主导航车的动力学模型是一阶非线性函数，选取的滑模函数为：

$$s(t) = e_u + K \int_0^t e_u dt \quad (5-4)$$

其中：

K — 正定对角矩阵， $K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$ ， $k_1 > 0, k_2 > 0$ ；

对所取滑模面 S 求导得：

$$\dot{s} = \dot{e}_u + K e_u \quad (5-5)$$

假设等式（5-2）中干扰为 $\tau_d = [\tau_{dl}, \tau_{dr}]^T$ 已知，那么他能直接被应用在控制器中，在这种情况下，输入向量定义为：

$$\dot{s} = \dot{e}_u + K e_u = -c_1 \tanh(h_1 s) - c_2 s \quad (5-6)$$

将式 (5-6) 代入到式 (5-2) 中可得：

$$B(p)\tau = \bar{M}(p)(\overset{g}{u}_c - Ke_u) + \bar{C}(p, \overset{g}{p})u + \tau_d - \bar{M}(p)[c_1 \tanh(h_1 s) + c_2 s] + F(p, \overset{g}{p}) \quad (5-7)$$

进一步简化方程为：

$$B(p)\tau = \bar{M}(p)(\overset{g}{u}_c - Ke_u) + C(p, \overset{g}{p})u - \bar{M}(p)[c_1 \tanh(h_1 s) + c_2 s] + \tau_d \quad (5-8)$$

在运动学模型层次上，基于反演法控制方法设计的控制器，误差系统的稳定性能得以保证。依据李雅普诺夫系统稳定性判据，对于一个全局一致稳定的系统，存在一个非负的李雅普诺夫函数 $V(t, x_e, y_e, \theta_e)$ ，其满足 $V(t, x_e, y_e, \theta_e) \geq 0$ ， $\dot{V}(t, x_e, y_e, \theta_e) \leq 0$ ， $V(t, x_e, y_e, \theta_e) = 0$ 当且仅当 $x_e = 0, y_e = 0, \theta_e = 0$ ，并且随着 $x_e \rightarrow 0, y_e \rightarrow 0, \theta_e \rightarrow 0, \dot{V}(t, x_e, y_e, \theta_e) \rightarrow 0$ 。

假设下列条件成立：

条件 1：参考线速度角速度均有界，非零，且在任意时刻，都有 $v_r > 0$ ；

条件 2： k_1, k_2 均是足够大的正常数；

定义辅助速度误差：

$$u_e = u - u_c = \begin{pmatrix} v_e \\ \omega_e \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} v - v_c \\ \omega - \omega_c \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

其中的 v_c, ω_c 可由式 (3-32) 可得；

定理 1 在假设条件 2 下，辅助速度误差会按指数收敛到零，自主导航小车的速度也最终将趋向于期望速度。

选取如下李雅普诺夫函数：

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (5-10)$$

当且仅当 $x_e = 0, y_e = 0, \theta_e = 0$ 时， $u_e = 0$ 。

对式 (5-10) 求导可得：

$$\overset{g}{V} = s \overset{g}{s} = s [\overset{-}{M} (B(p)\tau - C(p, \overset{g}{p})u - \tau_d + F(p, \overset{g}{p})) - \overset{g}{u}_c + Ke_u] \quad (5-11)$$

将式 (5-6) 代入到上式可得：

$$\overset{g}{V} = -c_1 s \tanh(h_1 s) - c_2 s^2 \quad (5-12)$$

其中的 $\tanh(h_1 s) = \frac{e^{h_1 s} - e^{-h_1 s}}{e^{h_1 s} + e^{-h_1 s}} \in (-1, 1)$ ，且 c_1, c_2 均为正定对角矩阵；又有

$s \tanh(h_1 s) \geq 0$, 故 $\dot{V} \leq 0$, 误差 $E = [e \quad u_e]^T$ 有界 , 根据假设条件 2 , 可导出 E, \dot{E}

是有界的 , 所以 $\dot{V} < \infty$, 即 \dot{V} 为一致连续函数。因为 V 并不增加 , 收敛到常数值 ,

按 LaSalle 引理可知 , 随着时间 $t \rightarrow \infty$, $\dot{V} \rightarrow 0$ 成立 , 当 $t \rightarrow \infty$, $\dot{V}_K(t, x_e, y_e, \theta_e) \rightarrow 0$ 和 $u_e \rightarrow 0$ 成立 , 根据式(5-6)可知 , 在全局范围内 , $[x_e, y_e, \theta_e]^T$ 有界且 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_e, y_e, \theta_e^T = 0$ 。

为进一步优化控制效果 , 将切换增益 c_1 设计为模糊参数。在滑模控制律式(5-8)中 , 虽说只要确保 c_1, c_2 均为正定对角矩阵 , 则整个滑模控制就能保证该控制系统收敛 , 而切换增益 c_1 的值是造成抖震的原因。然而 , 控制增益取值很难确定 , 一方面 , 较大的取值能加快收敛速度 , 却容易造成系统 ; 较小的取值却不利于系统在实时性方面的要求。 c_1 用于补偿不确定项干扰 , 以保证滑模控制存在性条件得到满足。考虑到干扰项的时变性 , 通过设计出时变的切换增益 , 有助于降低抖震 , 该想法可采用模糊规则来设计并实现。

将切换增益 c_1 设计成模糊参数 , 则模糊滑模控制器的结构设计如图 5-2 所示。



图 5-2 模糊滑模控制器结构

Fig.5-2 Fuzzy slide Controller Structure

滑模满足条件 $s^g s < 0$ 后 , 一旦系统到达滑模面 , 系统将会稳定在滑模面上。切换增益 c_1 的设计规则必须足以消除不确定项的影响 , 才能保证存在条件 $s^g s < 0$ 成立。

模糊规则有以下两条 :

$$\text{If } s^g s > 0 , \text{ 则 } c_1 \text{ 应增大 ;} \quad (5-13)$$

If $s_s^g < 0$, 则 c_1 应减少 ; (5-14)

由式 (5-13) 和式 (5-14) 可将 s_s^g 和 Δc_1 设计成模糊系统 , 在该系统中 , s_s^g 为输入 , Δc_1 为输出。系统输入输出的模糊集可定义为 :

$s_s^g = \{NB \quad NM \quad ZO \quad PM \quad PB\}$;

$\Delta c_1 = \{NB \quad NM \quad ZO \quad PM \quad PB\}$;

NB 表示为负大 , NM 表示为负中 , ZO 为零 , PM 表示为正中 , PB 表示为正大。

设计的输入量 s_s^g 和输出量 Δc_1 的隶属度函数如图 5-3、图 5-4 所示。

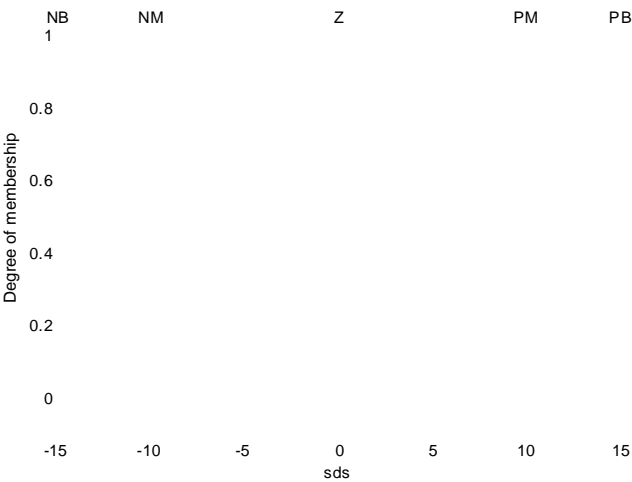


图 5-3 s_s^g 的隶属度函数
Fig.5-3 Membership function of fuzzy input

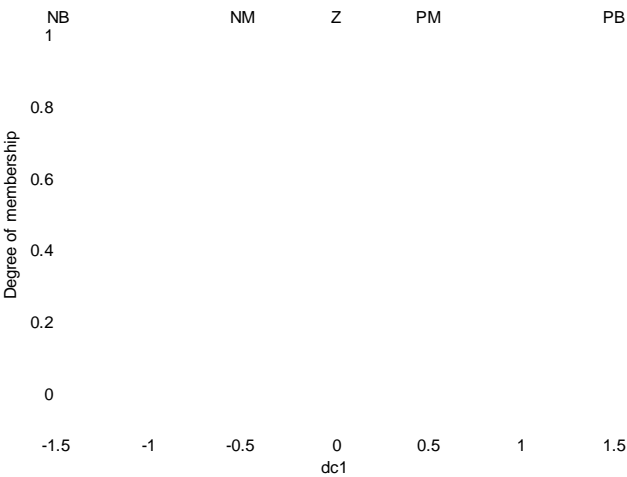


图 5-4 Δc_1 的隶属度函数
Fig.5-4 Membership function of fuzzy output

参数 c_1 的上界由积分的方法进行确定：

$$\hat{c}_1 = G \int_0^t \Delta c_1 dt \quad (5-15)$$

其中：

G — 比例系数；

5.4 未知干扰项估计

在复杂的非结构环境中，干扰很难用数据来量化，但它又真是存在，因此，所设计的控制器（5-8）在实际的 AGV 系统的应用中效果难以满足工业要求。工业现场应用中，外界环境干扰是不确定的，但是干扰的变化率相对于计算机的处理速度来说足够小，鉴于此，考虑引入自适应控制设计，以估算外部干扰。

令 $\hat{\tau}_d = [\hat{\tau}_{dl}, \hat{\tau}_{dr}]$ ，其表示估计的左、右轮上干扰量，即估计误差为 $\tilde{\tau}_d = \hat{\tau}_d - \tau$ ；

当干扰缓慢变化时，估计值和误差值之间的关系可表示为 $\tilde{\tau}_d = \hat{\tau}_d$ 。因此，初始控制律中的误差项用估计误差替代：

$$\tau = B^{-1}(p) \{ M(p)(u_c - Ke_u) + C(p, \dot{p})u - \bar{M}(p)[c_1 \tanh(h_1 s) + c_2 s] + \hat{\tau}_d \} \quad (5-16)$$

同时， $\hat{\tau}_d$ 的自适应控制律设计为^[65]：

$$\dot{\hat{\tau}}_d = -\eta \bar{M}^{-1} s \quad (5-17)$$

式（5-16）中的干扰估计项是由式（5-17）自动估算的。参数 η 直接与收敛时间相关， η 的值愈大，收敛的速度也就愈快。

定理 2 对于如式（2-10）所示的车式自主导航车系统，能在式（5-16）所示的控制律的作用下，能达到渐进稳定轨迹跟踪的效果。

证明：选取的李雅普诺夫函数为：

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2\eta} \tilde{\tau}_d^2 \quad (5-18)$$

将上式求微分可得：

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{V}} &= s \tilde{V} + \frac{1}{2\eta} \tilde{\tau}_d^* \tilde{\tau}_d \\ &= -c_1 s \tanh(h_1 s) - c_2 s^2 + \bar{M}(p)^{-1} \tilde{\tau}_d s + \frac{1}{\eta} \tilde{\tau}_d^* \tilde{\tau}_d\end{aligned}\quad (5-19)$$

将式 (5-17) 代入到上式中得：

$$\dot{\tilde{V}} = -c_1 s \tanh(h_1 s) - c_2 s^2 \quad (5-20)$$

很明显， $\dot{\tilde{V}} \leq 0$ 。由 LaSalle 理论可知，该系统跟踪误差全局能收敛于零，故此定理得证。

5.5 仿真实验结果与分析

在移动机器人运动学模型下，考虑期望轨迹是单位圆 $x^2 + y^2 = 1$ 的情况，假设期望线速度 $v_r = 0.2 \text{ m/s}$ 和角速 $\omega_r = 0.2 \text{ rad/s}$ ，初始误差 $(x_e(0), y_e(0), \theta_e(0)) = (0.4, -0.2, -\frac{\pi}{6})$ ，运动学控制器 (3-18) 中的参数为 $a1=1.5, a2=24, a3=4, a4=2$ ， $k=2.6$ ；速度控

制的参数为： $(v_r, \omega_r) = (2 \text{ m/s}, 0.1 \text{ rad/s})$ ， $(\dot{v}_r, \dot{\omega}_r) = (0.58 \text{ m/s}^2, 0.55 \text{ rad/s}^2)$ ；

AGV 单机的基本技术规格如下表 5-1 所示。

表 5-1 中表示的是 AGV 单机的基本规格

Table 5-1 Basic specifications for single machine AGV

| 规格项目 | 车长 (m) | 车宽 (m) | 轴距 (m) | 重量 (t) | 车轮半径 (m) |
|------|----------------|------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------|
| 数值 | 15 | 3 | 8.8 | 1 | 0.0875 |
| 规格项目 | 线速度上限 (m/s) | 角速度上限 (rad/s) | 线加速度上限 (m/s ²) | 角加速度上限 (rad/s ²) | 最大角度 deg |
| 数值 | 3.5 | 10 | 0.58 | 0.4 | 30 |

5.5.1 基于动力学模型的模糊滑模控制仿真实验

该仿真实验主要为了对比在引入滑模控制后，针对滑模控制的自然抖震现象，做出的两点改进方法与一般滑模控制进行对比分析；分别进行了直线和圆形轨迹的仿真实验。直线轨迹和圆弧轨迹的控制器参数采用第四章中优化选取的数据。

(1) 车式自动导航车跟踪圆形仿真实验

控制器组的参数为 $a1=1.441, a2=22.750, a3=4.221, a4=1.339$, 滑模面结构参数 $k1=k2=0.05$; 滑模控制器参数 $c2=[0.2, 0; 0, 1.54]$, $c1$ 的参数由模糊规则在线整定; 初始误差为 $(-0.2, 2, -0.5)$, 参考速度为 $vr=0.2, wr=0.2$ 。具体圆形轨迹仿真结果如下图所示, 图 5-5 和图 5-6 为圆形轨迹跟踪滑模控制仿真结果; 图 5-7 和 5-8 为加上模糊切换增益滑模控制仿真实验结果图;

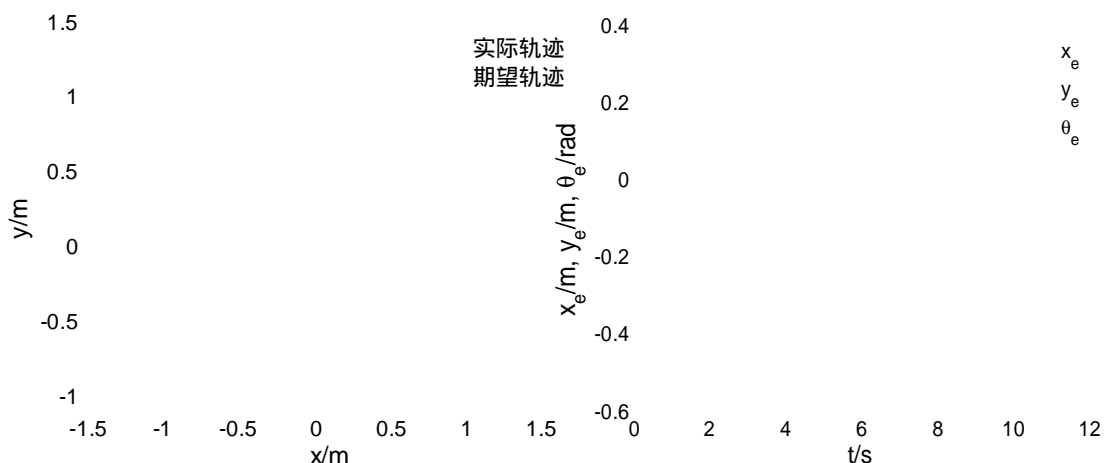


图 5-5 圆形轨迹跟踪效果
Fig.5-5 Circular trajectory tracking performance

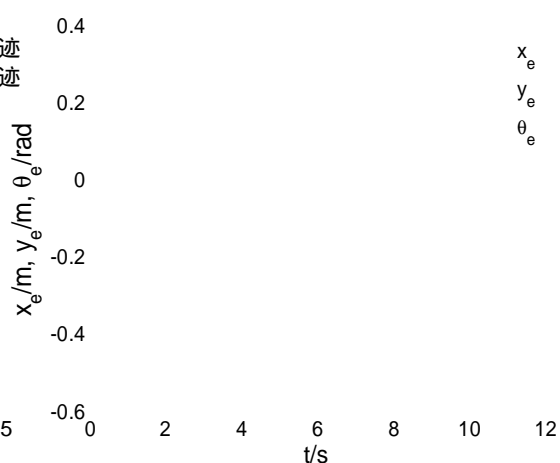


图 5-6 圆形跟踪误差曲线
Fig.5-6 Circular tracking error curve

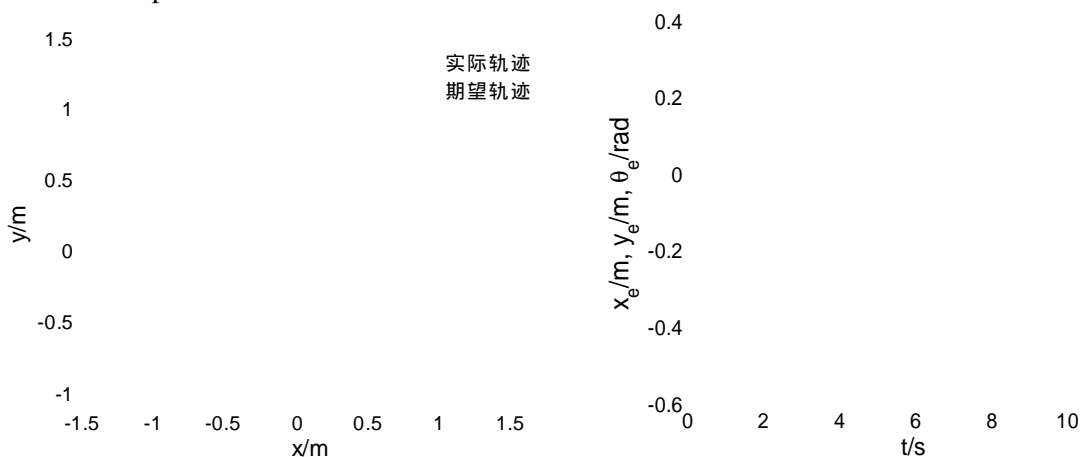


图 5-7 圆形轨迹跟踪效果
Fig.5-7 Circular trajectory tracking performance

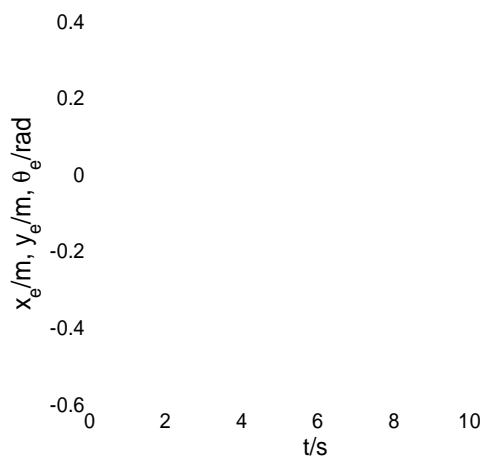


图 5-8 圆形跟踪误差曲线
Fig.5-8 Circular tracking error curve

(2) 导航车跟踪直线仿真实验

控制器组的参数为: $a1=2.78, a2=10.221, a3=3.115, a4=2.993$; 滑模面结构参数 $k1=k2=0.05$; 滑模控制器参数 $c2=[0.2, 0; 0, 2.08]$, $c1$ 的参数由模糊规则在线整定; 分别在初始误差为 $(-0.2, 2, -0.5)$, 参考速度为 $vr=0.2, wr=0$; 具体直线轨迹仿真结果如下图所示

示,图 5-9 和图 5-10 为直线轨迹跟踪滑模控制仿真结果;图 5-11 和 5-12 为加上模糊切换增益滑模控制仿真实验结果图;

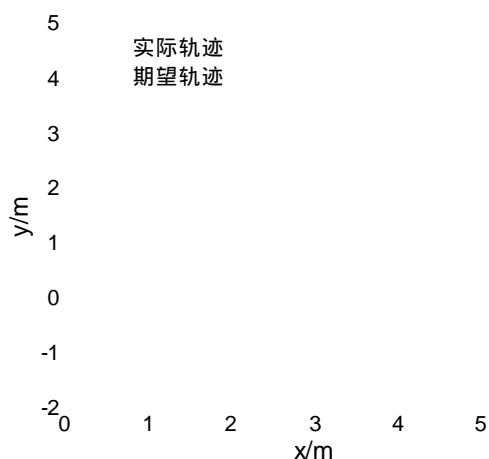


图 5-9 直线轨迹跟踪效果
Fig.5-9 linear trajectory tracking performance

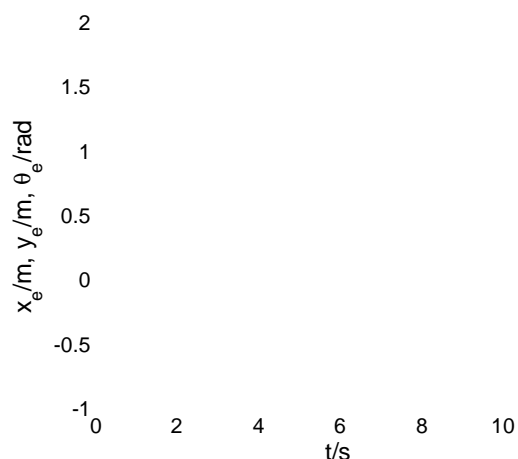


图 5-10 直线轨迹跟踪误差曲线
Fig.5-10 Linear trajectory tracking error curve

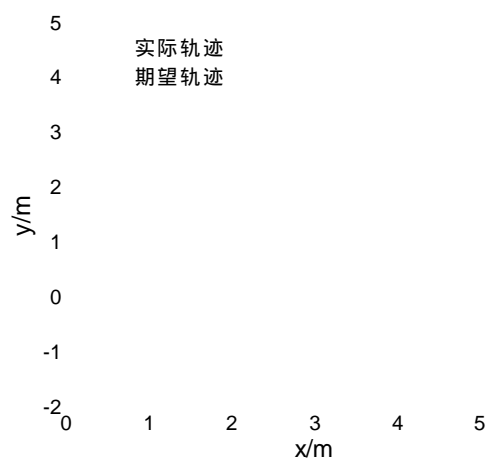


图 5-11 直线轨迹跟踪效果
Fig.5-11 linear trajectory tracking performance

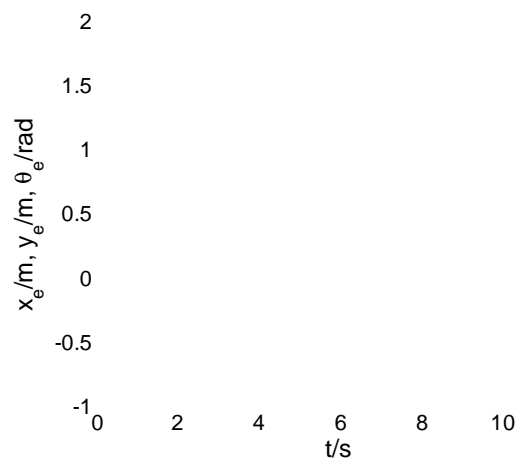


图 5-12 直线轨迹跟踪误差曲线
Fig.5-12 Linear trajectory tracking error curve

5.5.2 自适应干扰估计仿真实验

在采用增加了模糊切换增益的滑模控制的基础,本小节采用式(5-17)中的自适应方法,进行了对位姿与力串级控制在自适应干扰估计这方面的仿真实验,拟进一步比较改进的控制策略的效果。控制器组的相关参数为 $a1=1.441, a2=22.750, a3=4.221, a4=1.339, \eta=10000$;滑模面结构参数 $k1=k2=0.05$;滑模

控制器参数 $c_2=[0.2,0;0,1.54]$, c_1 的参数由模糊规则在线整定；初始误差为 $(-0.2,2,-0.5)$ ，参考速度为 $v_r=0.2, w_r=0.2$ 。

仿真结果如图 5-13 描述了圆形轨迹跟踪效果图，如图 5-14 给出了其控制量响应曲线；如图 5-15 表示的是圆形轨迹跟踪误差；

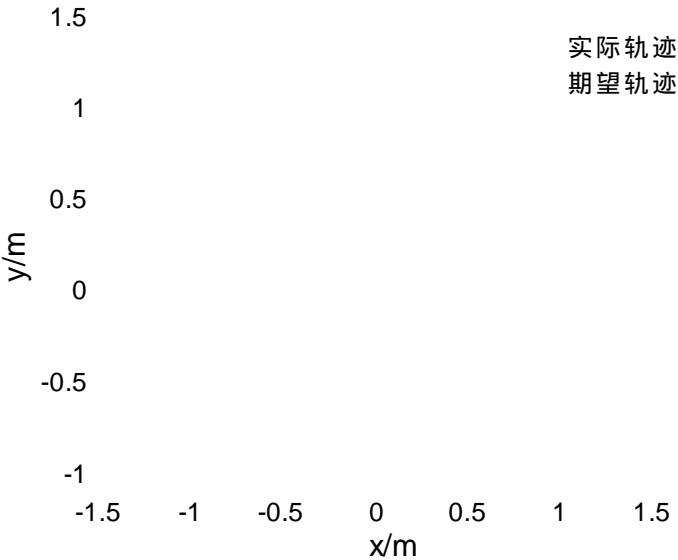


图 5-13 圆形轨迹跟踪效果
Fig.5-13 Circular trajectory tracking performance

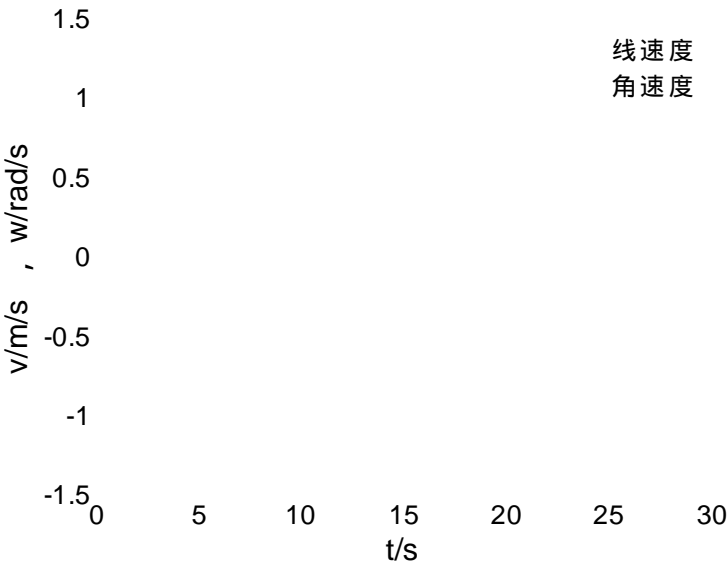


图 5-14 圆形跟踪控制量曲线
Fig.5-14 Circular tracking control curve

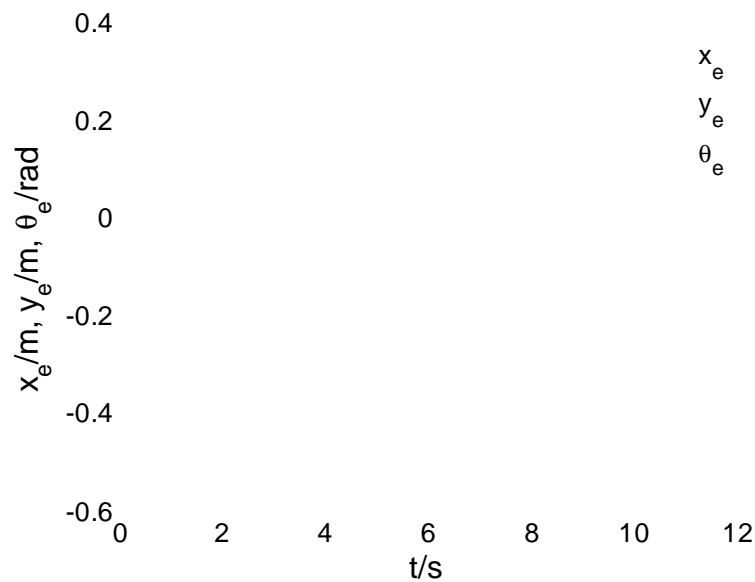


图 5-15 圆形跟踪误差曲线
Fig.5-15 Circular tracking error curve

仿真结果分析：

通过与第四章中的基于运动学模型的仿真实验对比可以看出，本小节基于运动学模型与动力学模型串级控制策略的滑模变结构控制能在保证自动驾驶车较好地跟踪参考轨迹的基础上，对控制量的初始值的跳变抑制和平滑程度，系统的收敛性以及调节时间上有提高，从而验证了改进的控制器算法的有效性。

5.6 本章小结

本章采用了基于车式自动驾驶车运动学与动力学模型的串级控制策略，应用李亚普诺夫稳定性判据证明了整个系统的稳定性。第一级控制是采用本文第三章中的反演法的控制方法，第二级控制是采用滑模变结构的控制方法，并引入了双曲线函数和模糊切换增益的方法，消除滑模变结构控制方法的抖震缺点。在串级控制策略的作用下，自动驾驶车能够实现对期望轨迹的稳定跟踪。最后，引入对干扰项的自适应律，对控制系统可能遭受到的干扰进行了估计，仿真实验表明，该方法提高了AGV系统的控制精度和抗干扰能力。

第六章 总结与展望

6.1 总结

随着非完整约束技术的飞速发展，各国的研究学者开始更加关注受非完整约束的机器人的轨迹跟踪问题，本文在车式自动导航车的运动学模型和动力学模型的基础上，就非完整约束系统的控制方法展开了研究。

本文的主要工作和取得的研究成果如下：

(1) 首先利用了反证法论证了车式自动导航车系统的非完整性，利用李雅普诺夫代数判据法验证了轮式移动机器人系统的稳定性。然后分别运用几何数学推导和拉格朗日方法推导出系统的运动学模型和动力学模型，并对建立的模型进行了简要的分析。

(2) 采用反演法的控制方法，就车式自动导航车的运动学模型进行研究，引入一种新的虚拟控制量，设计了满足李雅普诺夫稳定性判据的跟踪控制律，并对设计的控制律中的参数进行了理论分析和仿真验证，最后，将反演法控制运用到车式自动导航车中，仿真实验结果表明，系统的控制精度和快速性有所提高。

(3) 对蛙跳算法进行了研究，为克服其易陷入局部极值的缺点，对其实现了两点改进，引入蒸发系数和敏感粒子，一方面是为了增强其全局搜索能力，另一方面是为了提高蛙跳算法的自适应性，通过对其进行收敛性分析以及采用测试函数检查其性能，改进蛙跳算法的精度更高，收敛速度也有所提高。将 ISFLA 算法用于车式自动导航车的控制器参数优化中，仿真实验结果表明 ISFLA 的控制精度更高。

(4) 结合车式自动导航车的运动学模型和动力学模型，提出串级控制的策略，应用李亚普诺夫稳定性判据证明了整个系统的稳定性。第一级控制采用反演法的控制方法，第二级选用滑模变结构的控制方法，并引入了双曲线函数和模糊切换增益的方法，基本消除滑模变结构控制抖震的缺点。最后，通过自适应算法自动估算干扰项，提升 AGV 系统的抗干扰的能力。

6.2 展望

通过对所学所做进行学习和总结，结合自己的理论知识提出了两种控制律的设计方法，也取得了一些成就。但是，本文的研究工作还存在着以下几点问题：

(1) 本文的第四章中是采用智能算法离线提取控制器参数，考虑到 AGV 的非

线性，固定参数的控制和可变参数的控制效果有待研究，同时，在线提取参数更有利于提高系统的实时性。

(2) 本文在第五章中提出的串级控制方法，但并未考虑 AGV 是强耦合及非线性的多变量系统的复杂特性，针对两种控制之间解耦控制有待研究。

(3) 本文中的仿真都是在软件下完成的，理论阶段的仿真效果与实际的应用效果尚需进一步实验研究，这方面的实验研究，更有利于使得该研究成果能够尽快的实现经济效益。在实际应用中必然会遇到各种实际问题，希望能够进一步的深入研究。

参考文献

- [1] 陈黄祥. 智能机器人[M],北京:化学工业出版社,2012.
- [2] 张智勇. AGV 地面系统设计及开发[D].西北工业大学硕士论文,2002: 2-4.
- [3] 魏晓涛. AGV 移动机构控制研究[D].哈尔滨工程大学硕士论文,2004:2-6,42.
- [4] 白井良明,王棣棠译. 机器人工程[M].科学出版社,2001:97-99.
- [5] 中国机器人网[OL].<http://www.robot-china.com/news/201411/03/15331.html>[2014-11-03].
- [6] 孙瑜,张倩,姜一丁. AGV 控制系统在烟草物流过程中的应用[J]. 自动化与仪表,2012,05:39-41+45.
- [7] 中国产业信息网[OL]. <http://www.chyxx.com/industry/201602/385741.html>[2016-2-04].
- [8] 中国 AGV 网[OL]. <http://www.chinaagv.com/news/detail/201609/1340.html>[2016-9-12].
- [9] 章植栋. AGV 视觉导航技术与路径规划[D].长安大学,2013.
- [10] 郭克友,王荣本,储江伟. 智能车辆在物流领域的应用[J]. 天津汽车,2005(3): 24-27.
- [11] 王建彬. 四轮全向移动机器人的运动控制与运动规划研究[D].广东工业大学,2014.
- [12] 杨涛. 移动机器人轨迹跟踪控制[D].西安电子科技大学,2014.
- [13] 刘子龙,胡少凯,刘洁,王亚刚. 非完整移动机器人在线辨识级联路径跟随控制[J]. 系统仿真学报,2015,11:2748-2755.
- [14] 叶锦华. 不确定非完整轮式移动机器人的运动控制研究[D].华南理工大学,2013.
- [15] Chang C,Huang C,Fu L. Nonlinear Control of a Wheeled Mobile Robot with Nonholonomic Constraints[C]. IEEE International Conference on Systems,Man and Cybernetics,2004,5404-5410.
- [16] 徐俊艳,张培仁. 非完整轮式移动机器人轨迹跟踪控制研究[J]. 中国科学技术大学学报,2004,34(3):376-380.
- [17] 叶锦华,李迪,叶峰,等. 不确定非完整 AGV 的自适应反演滑模控制[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2011,12:32-37+43.
- [18] 陈昱,高婷婷,贾庆伟,等. 带有未知参数和有界干扰的移动机器人轨迹跟踪控制[J].

- 控制理论与应用,2015,04:491-496.
- [19]李世华,田玉平. 非完整移动机器人的有限时间跟踪控制算法研究[J]. 控制与决策,2005,20(7):750-754.
- [20]刘卉,张广明,欧阳慧珉. 基于模型预测控制的轨迹跟踪算法研究[J]. 控制工程,2016,S1:61-65.
- [21]尹晓红,赵韩,吴焱明,等. 基于卡尔曼滤波的自动引导车串级轨迹跟踪控制[J]. 农业机械学报,2010,02:180-184.
- [22]张燕. 基于神经网络的移动机器人轨迹跟踪控制[D].燕山大学,2010.
- [23]郑一力,孙汉旭,刘晋浩. 球形移动机器人基于神经网络的反馈线性化运动控制研究与实验[J]. 机器人,2012,04:455-459.
- [24]李文波,王耀南. 基于神经网络补偿的机器人滑模变结构控制[J]. 计算机工程与应用,2014,23:251-255+260.
- [25]钟宇平,王丽丹,段书凯,张凤运,李波. 基于神经网络及强化学习的智能控制系统[J]. 西南大学学报(自然科学版),2013,11:172-179.
- [26]杨兴明,李文静,朱建. 基于 RBF 神经网络的机器人的路径跟踪控制[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2015,11(11):1477-1483.
- [27]朱赢鹏,潘聪华,等. 基于 BP 神经网络 PID 的四轮智能车循迹控制仿真研究[J]. 汽车零部件,2016,02:60-61.
- [28]周红莉. 基于神经网络的移动机器人控制研究[D].兰州理工大学,2006.
- [29]贾鹤鸣,宋文龙,陈子印,等. 基于神经网络反步法的移动机器人路径跟踪控制[J]. 南京理工大学学报,2014,2(1):27-33.
- [30]李艳东,王宗义,朱玲,等. 非完整移动机器人的神经网络鲁棒自适应控制[J]. 计算机工程与应用,2010,46(29):211-214+241.
- [31]柳向斌. 非线性系统控制的鲁棒与自适应设计方法[D].浙江大学,2009.
- [32]周波,钱堃,马旭东,等. 移动机器人滑动参数定界及鲁棒镇定控制[J]. 控制理论与应用,2013,5(5):611-617.
- [33]朱龙英,赫建立,苏磊,等. 基于动力学特性的机器人自适应鲁棒控制算法研究[J]. 中国农机化学报,2016,4(4):190-195.
- [34]李殿起,段勇. 用跟踪微分器实现机器人自抗扰控制器[J]. 兵工学报,2016,9(9):1721-1729.
- [35]熊中刚,叶振环,贺娟,陈连贵,令狐金卿. 基于免疫模糊PID的小型农业机械路径智能跟踪控制[J]. 机器人,2015,02:212-223.

- [36]刘幸,刘潇. 自适应系统的发展与应用[J]. 物联网技术.2011,09(39):61-63.
- [37]吴玉香,王聪. 不确定机器人的自适应神经网络控制与学习[J]. 控制理论与应用 2013,8(8):990-997.
- [38]Jean-Paul Laumond.Robot Motion Planning and Control[J]. Control Theory And Applications,1997,20(5):307-312.
- [39]刘磊,向平,王永骥等. 非完整约束下的轮式移动机器人轨迹跟踪[J]. 清华大学学报 ,2007,47(S2):1884~1889.
- [40]张立明,王振宇,王羽,等. 基于视觉的 AGV 两轮差速转向模糊控制[J]. 昆明理工大学学报 : 理工版 ,2007,32(4):28 - 32.
- [41]Sharma K D,Chatterjee A,Rakshit A.A PSO – Lyapunov Hybrid Stable Adaptive Fuzzy Tracking Control Approach for Vision - Based Robot Navigation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2012,61(7) : 1908 – 1914.
- [42]李团结. 机器人技术[M]. 北 京 : 电子工业出版 社.2009.
- [43]Park B S,Yoo S J,Park J B. Adaptive neural sliding mode control of nonholonomic wheeled mobile robots with model uncertainty[J]. IEEE Transactions on control Systems Technology,2009,17(1):207-214.
- [44]刘学明,梁春兰,王学东. 两轮驱动非完整约束机器人轨迹跟踪研究[J]. 制造业自动化,2013,35(16):84~87.
- [45]V. Padois,Jean-Yves Fourquet,Pascale Chiron. Kinematic and dynamic model-based control of wheeled mobile manipulators: a unified framework for reactive approaches[J]. Robotica,2007,25:
- [46]Brockett R W.Asymptotic stability and feedback stabilization.In:Differential Geometric Control Theory[C]. Birkhauser,Boston:1982,181~191.
- [47]Ma S J.Chung T L,Kim Y B,et al.Tracking control of a welding mobile robot based on adaptive backstepping method[C]. Int.Symposium on Electriacal and Electronics Enginerring.2005:11~21.
- [48]王川,怀宇,王芬等. 基于 Backstepping 的移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 现代电子技术,2008,31(24):113~115.
- [49]陈罡,孟静,高晓丁,刘俊杰. 基于 Backstepping 方法的移动机器人路径跟踪问题研究[J]. 测控技术,2016,08:52-56+61.
- [50]徐俊艳,张培仁. 非完整轮式移动机器人轨迹跟踪控制研究[J]. 中国科学技术大学学报 .2004,34(3):376~377.
- [51]苏玉鑫. 非线性机器人控制[M].北 京 : 科学出版 社 , 2008.
- [52]王辉,钱锋. 基于拥挤度与变异的动态微粒群多目标优化算法[J]. 控制与决

- 策,2008,11:1238-1242+1248.
- [53] 刘漫丹. 文化基因算法(Memetic Algorithm)研究进展[J]. 自动化技术与应用,2007,11:1-4+18.
- [54] Eusuff M M, Lansey K E. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm[J]. Journal of water resources planning and management,2003,129(3): 210-225.
- [55] 彭勇,陈俞强. 改进蛙跳算法的 LQR 控制器的优化设计[J]. 智能系统学报,2014,4: 480-484.
- [56] 马鲁,陈国初,王海群. 蛙跳算法及其在函数优化中的应用[J]. 上海电机学院学报,2014,02:68-75.
- [57] 崔志华. 微粒群算法的性能分析与优化[D]. 西安交通大学,2008.
- [58] 肖莹莹,柴旭东,李伯虎,等. 混合蛙跳算法的收敛性分析及其改进[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2012,40(7):15-18.
- [59] 李英海,周建中,杨俊杰,刘力. 一种基于阈值选择策略的改进混合蛙跳算法[J]. 计算机工程与应用,2007,35:19-21.
- [60] 栾垚琛,盛建伦. 基于粒子群算法的混洗蛙跳算法[J]. 计算机与现代化,2009,11:39-42.
- [61] 邹采荣,张潇丹,赵力. 混合蛙跳算法综述[J]. 信息化研究,2012,05:1-5.
- [62] M.Yue,Y.Zhang,F.Y.Tang.Path following control of a two-wheeled surveillance vehicle based on sliding mode technology[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control,2012.
- [63] 王其东,章贵华,等. 基于滑模变结构控制的车辆动力学稳定性控制研究[J]. 中国机械工程,2009,05:622-626.
- [64] M.Yue,W. Sun,P.Hu.Sliding Mode Robust Control for Two-wheeled Mobile Robot With Lower Center of Gravity[J]. International Journal of a Innovative Computing,Information and Control,2011,7(2):637-646.
- [65] 唐飞云. 自主导航车轨迹跟踪控制方法研究[D]. 大连理工大学,2012.

致谢

时间如白驹过隙，一转眼，我的研究生生涯已接近尾声。在学校与老师和同学们度过的欢乐时光总是显得那么短暂而匆匆。纵然如此，我依然希望能将这段经历长留心中。在我研究生学习生活即将要结束和论文完成之际，我要衷心地感谢电气学院，感谢我的导师王海群副教授，以及上海振华重工集团电气公司的刘洪源博士、刘春明博士以及单磊主任！在我的研究生学习生涯中，我的老师王海群副教授在生活和学习上给予了我很大的帮助，尤其是在我的毕业论文写作过程中，老师孜孜不倦的工作热情感染了我，教导我应养成谦虚和勤恳的生活态度，并给予我极大的帮助和深刻指导，才使得我能够顺利地完成毕业论文的撰写。老师宽阔的胸怀和严谨的学风使我在硕士阶段受益匪浅，这些必将是我以后人生的宝贵财富。

在此，特别要感谢电气学院陈国初教授，在平时科研探究中，教会了我养成多查阅和正规撰写论文的良好习惯，在为人处事和生活方面中教会了我与人为善和多沟通的良好品性，让我受益匪浅！

感谢我们课题组的同学们：马鲁师姐、张鑫学姐、吴尚学长和王永翔学长、陈雷、盛楠、肖峰、林凯师弟、刘周群师弟、吕辉学妹。在本文写作过程中，在一些理论知识及仿真过程中遇到困难时，他们都会细心地给予我帮助，并且在我的论文写作过程中提出了宝贵的建议。与他们在一起学习和成长的经历将会是我一生中宝贵的财富。

感谢上海电机学院的各位老师，为我们在学校做科研学习提供了宽裕的生活学习环境。感谢王致杰教授、刘天羽教授、刘续腾老师、冯雯雯老师及研究生处的王存存老师、马慧民老师等。

感谢父母，他们在背后默默的支持我，给予我无私的亲情。

感谢所有帮助、支持和关心过我的人。

攻读硕士学位期间取得的研究成果

A 发表论文

[1] Kai Long,Guochu Chen,Haiqun Wang.A Mechanical Fault Feature Extraction Method Based on Volterra Series Model for EEMD Decomposition[C]. Proceedings of the 2015 3rd International Conference on Advances in Energy and Environmental Science, 2015(10):196-201.

[2] 龙凯,陈国初,王海群. 基于反演法的车式自动导航车轨迹跟踪控制[J]. 信息与电脑(理论版),2016,11:49-50.

B 参与项目

[1]企业课题 AGV 装卸系统在智能化集装箱码头的应用研究”(13111104700)

C 获得奖励

[1]2014 年获上海电机学院学业三等奖学金

[2]2015 年获上海电机学院学业二等奖学金

[3]2016 年获上海电机学院学业三等奖学金