

**硕士学位论文开题**

**文献综述报告**

**报告题目**

学 号 **2120170933**

姓 名 **潘芷纯**

导 师 **沈伟**

研究方向 **机器人运动控制**

二级学科 **检测技术与自动化装置**

一级学科 **控制科学与工程**

学 院 **自动化学院**

**201年 月 日**

**文献综述报告要求与打印格式说明**

1. 文献综述报告应符合硕士研究生所在学科培养方案的要求。
2. 文献综述报告的内容不再在开题报告中重复。
3. 文献综述报告必须对相关领域已取得之成果进行归纳总结，结合学位论文选题对相关领域未来的发展和研究提出自己的观点。
4. 打印用纸：A4；
5. 页眉为“北京理工大学硕士学位论文开题文献综述报告”； 加黑宋体，小3号，居中。页码居右排版；
6. 页面设计：页眉2.5cm，页脚1.5cm，左边距3cm，右边距2.4cm，正文用宋体，小4号，行间距26磅。

硕士研究生文献综述报告评阅表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 研究生简况 | 姓名 | 潘芷纯 | | | 性别 | | 女 | 出生年月 | | 1995年05月 | |
| 学号 | 2120170933 | | | 入学时间 | | 2017年9月 | 身份证号 | | 42011219950511272X | |
| 学科、专业 | | | 控制科学与工程、检测技术与自动化装置 | | | | | | | |
| 本科毕业时间 | | | 2017年6月 | | | 本科毕业学校 | | 北京理工大学 | | |
| 指导小组 | | | 姓名 | | | 职称 | 工作单位 | | | | 签字 |
| 导师 | | | 李静 | | | 副教授 | 北京理工大学 | | | |  |
| 小组成员 | | | 王军政 | | | 教授 | 北京理工大学 | | | |  |
| 汪首坤 | | | 副教授 | 北京理工大学 | | | |  |
| 马立玲 | | | 副教授 | 北京理工大学 | | | |  |
| 赵江波 | | | 副教授 | 北京理工大学 | | | |  |
| 沈伟 | | | 讲师 | 北京理工大学 | | | |  |
| 文献综述报告成绩 | | | | | | □ 优 □ 良 □ 通过 □ 未通过 | | | | | |
| 导师评阅意见 | | | | | | | | | | | |
| 签字：  年 月 日 | | | | | | | | | | | |

**文献综述**

**1.研究背景及意义**

智能移动机器人是一种脱离人的直接控制，采用遥控、自主或半自主等方式在地面运动的物体[1]。它本身集车辆技术、智能控制、信息处理等专业技术于一身，跨越机械、电子、计算机、自动控制等诸多学科，成为当前智能机器人研究的重要领域之一[2]。大部分的轮式移动机器人具有四轮独立驱动的特点，相比于普通两轮驱动的机器人或无人车来说，其具有机动性更强的优势。四轮独立驱动机器人由于可以给机器人的四轮施加不同的驱动力和力矩，使每个轮子都可以按照期望速度进行旋转并按照设定横摆角度进行转向。根据每个轮子期望的力矩和速度不同，四轮独立驱动的机器人有多种运动模式，极大地提高了机器人的灵活性和机动性。因此四轮独立驱动式机器人可以应用在更多的场合中，而且适应性更强。

与此同时，四轮独立驱动式机器人由于四个轮子是分别施以速度和力矩的，每个轮子主要是由该轮的电机控制的，因此就会产生四轮速度不同步的情况，特别是在直线形式过程中，或机器人在坑洼地面运动的情况下。机器人在运动过程中若是发生四轮速度不一致，或者一个轮子受到某些干扰，那么由于机器人本身这个复杂的耦合系统，这个轮子的不稳定可能会影响其他轮子的运动，机器人的四足就可能都会发生剧烈的抖动，使机器人机身不稳定。

针对机器人运动过程中的协同性问题，首先考虑到，四轮独驱式机器人的每条腿都是由一个电机单独控制的。在机器人运动时，由于机器人受到的干扰不同，比如路面的凹凸起伏、路面的坡度、机器人负载变化、姿态变化等，因此每个电机都会受到不同的来自外界的干扰。如何控制电机克服外界干扰稳定运行，是一个需要解决的问题。当单个电机的稳定性得以保证，便可以考虑四轮协同的问题。主要目的是使当某个电机运行过程中出现不稳定的情况时，也不会因为机器人的强耦合联系而波动其他电机，从而其他电机可以在极短的时间内迅速调整自身的运动状态，不受该不稳定电机的影响，正常运行工作，准确跟踪自身的给定目标。

**2.研究概况**

**2.1电机稳定性控制方法的发展概况**

**2.1.1 电机稳定性控制的方法概述**

在机器人腿部乃至轮胎受到外界干扰的时候，轮胎的负载、所受到的侧向力、横向力会发生变化，这时给予轮胎驱动力的电机也会受到扰动，电机的负载会发生突变或者较大的变化。控制学界有很多控制方法可以在不同程度上解决这一问题，控制电机使其在较大负载或干扰变化下有较强的稳定性和鲁棒性。

最常见的控制方法就是PID控制，该方法应用简单方便。但是它的控制精度低，只适用于具有精确数学模型的控制系统，而且它的抗干扰能力弱，鲁棒性较差，不适用于高精度的控制场合[3]。现在控制对象的模型越来越复杂，模型中有很多不确定项。因此大多数学者采用改进的PID方法进行控制，将PID方法与模糊控制、自适应控制、神经网络相结合[4]。比如学者Choi等人提出了用一种进化算法（EA）来优化和自动调整模糊PID控制参数[5]。与以前的方法不同，进化自动调整算法生成的任何模糊控制参数向量都保证了闭环稳定性，该方法可以实时实施，提高永磁同步电机运行的稳定性。扬州大学的孙小康针对永磁同步电机抗负载干扰的问题，引入先行矩阵不等式（LMI）设计了广义PI反馈控制器，解决了参数不确定和外部干扰情况下的永磁同步电机的多目标控制问题[6]。

对于电机的参数摄动、模型不确定性、未知非线性等问题，模型预测控制（MPC）、滑模控制（SMC）、智能控制、鲁棒控制、自适应控制等多种控制方法都可以应用在电机的控制中并解决这些问题。MPC的原理简单，响应快，并且可以灵活处理多个变量和约束，是电机高性能控制的强大控制方法[7,8]。但是从被控对象来看，MPC控制还限于线性或准线性过程，非线性模型预测控制目前还在大力发展中[9]。滑模控制是一种变结构控制方法，它具有快速响应、对参数变化及扰动不敏感、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点，但是该方法有个缺点即在滑模面两侧来回穿越时会发生抖振，且这一抖振无法完全消除[10]。基于神经网络的深度学习时当今的热门研究内容，神经网络具有自学习的能力，可以以较高的精度逼近某一非线性函数，对非线性对象没有过高的精度要求。神经网络通常都结合PID控制器进行控制，用训练好的神经网络来自适应地调整PID的三个参数，实现电机的高精度速度跟踪控制[11]。或者将神经网络作为前馈控制器，PID作为反馈控制器，共同进行电机的跟踪控制[12]。但是神经网络控制需要大量数据的支撑，数据不充足或者质量的不稳定都会导致神经网络的结果不可靠甚至整套方法不可行[13]。

对于常规的反馈控制系统，系统内部变化或外部的干扰是可以由反馈结构进行一定的抑制。但是当系统内部变化或外部干扰很大时，系统就可能失稳。而自适应控制能够感知系统动态特性的变化，通过自适应率实现参数辨识，实时改变系统的参数，使系统模型不断趋近于真实值，从而使系统适应于当前的扰动，具有较强的鲁棒性[14,15,16]。自适应控制原理简单，辨识精确而且可以使跟踪目标快速收敛。

鲁棒控制与自适应控制的目的是类似的，但是原理不同。自适应控制使以变化控制变化，而鲁棒控制则是以不变应万变。它只需要知道未知函数或变量的上下界，设计一个固定的控制器，稳定地在这个范围内控制系统的动态特性[17]。

**2.1.2鲁棒自适应控制方法的概述**

单纯的自适应控制依靠参数辨识，使被控对象的数学模型逐渐完整，最终使系统适应到一个满意的状态。但是当被控系统越来越复杂，比如出现参数摄动、未知扰动、未建模动态时，单纯的自适应控制可能无法满足控制性能，不能应用到实际中。因此需要设计一种鲁棒控制器，当系统存在一定范围的参数摄动、未知扰动、未建模动态时，使系统也能保持良好的动态性能，达到稳定的控制效果。大多数系统都是这种具有多种不确定性的非线性系统，因此将鲁棒控制和自适应控制结合起来的鲁棒自适应控制已经成为众多学者研究与使用的方法。

浙江大学的姚斌教授将反推自适应控制与确定性鲁棒控制相结合。该方法保留了两种方法的优点，即存在参数不确定性时的自适应控制的渐近稳定性，以及对于参数不确定性和未知非线性函数都具有确定性鲁棒控制预定精度保证的瞬态性能。由此产生的控制器比单独的自适应控制或鲁棒控制更灵活和多功能[18]。陈光荣在反推自适应鲁棒控制的基础上，采用动态面的方法解决了自适应鲁棒控制中反推法导致的“术语爆炸”的问题，并用了一种更快速的自适应参数估计方法，实现快速准确地参数收敛性能[19]。Zhang针对鲁棒自适应控制中的状态约束问题，采用约束变换方法来防止全状态约束的超越。此外，为了获得用于反推设计中的幅度有限的虚拟控制信号，将饱和度并入到控制律中[20]。将鲁棒自适应控制与神经网络或模糊控制结合起来的方法也被众多学者用于不确定非线性系统中，在反推鲁棒自适应的基础上，利用神经网络或模糊控制逼近未知非线性[21,22]。Wang等人在其基础上还设计分散自适应控制克服强互联非线性的困难[23]。

参数估计是自适应控制中重要的一环，传统的参数估计算法譬如梯度估计算法[24]在系统存在干扰时，可能会发生参数漂移的现象。有学者采用光滑投影或者σ-modification等方法抑制参数漂移这一问题[25,26]。为实现自适应参数估计收敛，一般系统递推向量/矩阵必须满足持续激励条件(persistent excitation,PE)，但PE条件的在线测试和验证是一个公认重要但尚未完全解决的问题[27]。为放松PE条件，有学者利用在线记录历史数据并和当前的瞬时数据一起设计自适应律，降低对当前数据激励条件的依赖性[28]。用间隔激励法来放松PE的要求也是一种常见的方法[29]。

**2.2多电机协调控制方法概述与研究**

工业制造中，多电机的机构比较常见。因为单电机有限的驱动能力以及受限的技术条件，使得系统很难满足大功率和高精度的需求。相较于单电机驱动系统，多电机驱动的策略能在很大程度上增强系统的过载能力和整体的驱动能力，极大地降低了对每个驱动电机功率等性能条件的要求，消除了制造成本和技术上的限制[30]。在多电机驱动伺服系统中，由于每台电机的技术参数不同以及负载变化、随机干扰等外界因素的存在，从而会造成多台电机间的位置和速度不同步，影响系统的整体性能能，对多电机驱动伺服系统的精确控制造成了巨大的负面影响，从而限制多电机驱动伺服系统的广泛应用[31]。因此，多电机驱动伺服系统的同步控制具有深远的研究意义。

目前，常用的同步控制策略包括主从同步策略[32,33]、并联策略[34]、交叉耦合策略、偏差偶合策略、环形耦合策略等。主从同步控制是将电机分为主电机和从电机，以主电机的运动状态为参考，设计控制器使从电机跟随主电机运动，其控制效果只能从从电机跟随主电机的效果看出，但是当主电机受到干扰，那么从电机也会不稳定，极大地影响了同步控制的精度。并联控制则是将同一给定信号输入到不同电机控制器，使电机分别跟随同一给定信号，电机的控制不受其他电机的影响，但是当某一电机受到干扰，由于并联控制的开环结构，其他电机不会做出补偿措施，系统可能会出现失步现象。因此这两种控制方法都不适用于同步控制精度高的场合。

相邻交叉耦合控制[35,36,37]是双电机同步控制的常用方法，其将同步问题分为跟踪误差与同步误差两种误差。跟踪误差表示电机与期望信号的误差，同步误差表示不同电机之间的误差。将两个差值分别送入对应的电机的输入端，每个电机的控制回路中都有一个跟踪误差控制器和同步误差控制器，分别设计这两个控制器使电机输出信号不断逼近期望信号。陈炜等人将广义预测算法应用于双轴联动控制中用来提高双轴控制性能,然后采用交叉耦合结构将轮廓误差作为反馈量来修正广义预测控制的给定轨迹。但是相邻交叉耦合仅适用于两台电机同步控制的情况下，将其扩展到三台电机同步控制下是存在很大困难的，因此为了控制多台电机的同步运动，人们在交叉耦合的基础上进行改进并提出了偏差耦合控制[38]。偏差耦合方法[39]是将一台电机的状态反馈同其余电机的相应信号进行比较然后做差，并将所得差值进行累计作为电机的补偿信号，从而实现电机间的同步。张羽等人采用偏差耦合策略对永磁同步电机多电机同步控制进行研究，引入自抗扰控制器输出各电机的补偿负载转矩[40]。环形耦合策略[41]是在以上两种耦合策略的基础上提出来的，它不仅可以像偏差耦合策略一样对三个及三个以上的电机进行同步控制，更重要的是环形耦合控制策略的整体框架中，所需要的控制器比偏差耦合策略少。偏差耦合策略需要设计2\*n个控制器（n为被控电机数量），而环形耦合策略只需要设计n个控制器，极大减小了控制系统的复杂度。

对于以上耦合控制回路中的控制器的设计，大部分常见的控制方法都可以应用其中。比如PID控制器、变结构控制器、自适应鲁棒控制器、自抗扰控制器、智能控制器等等。除了结合常用的PID控制器外[42,43]，许多学者将耦合策略与滑模控制器结合在一起使用来控制多电机的协同，Li等人通过将自适应滑模控制（ASMC）技术结合到环形耦合同步控制结构中，开发了一种用于多个电动机的速度跟踪和同步的新控制方法。这种控制方法可以稳定每个电机的速度跟踪，并使其运动与其他电机的运动同步，从而使速度跟踪误差和同步误差收敛到零[44]。曹玲芝同样使用滑模控制器，基于转子磁场定向下的感应电机数学模型，结合相邻交叉耦合控制结构设计了一种多感应电机同步控制策略[45]。张宇等人通过李雅普诺夫函数设计了同步控制器并保证了系统的稳定性，完成对期望信号的同步性补偿[46]。唐元恒等人提出一种基于遗传算法的交叉耦合控制器优化设计方法，分析优化问题，确定优化目标函数，然后使用遗传算法求解优化问题，确定最优耦合控制器参数[47]。赵坤等人以模糊PID控制为基础，设计了环形耦合策略进行同步控制[48]。刘桂秋等人在偏差耦合控制结构中，设计了模糊PID控制器代替增益速度补偿以消除不同电机之间的速度同步误差，然后设计自适应反推控制器设计了跟随控制器使该电机尽快跟踪给定信号，消除跟随误差[49]。

**参考文献**

[1]章小兵, 宋爱国. 地面移动机器人研究现状及发展趋势[J]. 机器人技术与应用, 2005(02):21-25.

[2]费晓曦. 多轮独立驱动轮式移动机器人驱动控制研究[D]. 国防科学技术大学, 2011.

[3]杨洪坤, 任德均, 孙勇威,等. 基于改进的遗传算法的伺服电机模糊PID控制器设计[J]. 精密制造与自动化, 2016(4):38-41.

[4]Hua S, Dai Y. Fuzzy PID Control and Simulation Experiment on Permanent Magnet Linear Synchronous Motors[J]. Advanced Materials Research, 2012, 383-390(6):2608-2611.

[5]Han H C, Hong M Y, Yong K. Implementation of Evolutionary Fuzzy PID Speed Controller for PM Synchronous Motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 11(2):540-547.

[6]孙小康. 基于凸优化算法的永磁同步电机鲁棒控制问题研究[D]. 扬州大学, 2015.

[7]Zhang Y, Xu D, Liu J, et al. Performance Improvement of Model Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, PP(99):1-1.

[8]Errouissi R, Al-Durra A, Muyeen S M, et al. Continuous-time model predictive control of a permanent magnet synchronous motor drive with disturbance decoupling[J]. Iet Electric Power Applications, 2017, 11(5):697-706.

[9]席裕庚,李德伟,林姝.模型预测控制——现状与挑战[J].自动化学报,2013,39(03):222-236.

[10]刘金琨. 滑模变结构控制MATLAB仿真[M]. 清华大学出版社, 2015.

[11]丁时云. 永磁同步电机神经网络自校正速度控制系统[D]. 湖南大学, 2015.

[12]Tian Z, Guo H, Ding X, et al. A PID Neural Network Control for Position Servo System with Gear Box at Variable Load[C]// Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEE, 2016:1-5.

[13]赵立鑫, 谢卫, 黄泽森. 永磁同步电机神经网络调速系统的研究[J]. 测控技术, 2018(5).

[14]刘国海,戴先中.具有不确定负载的交流电机自适应后推控制方法[J].控制与决策,2001,(6):947-949，953. DOI:10.3321/j.issn:1001-0920.2001.06.025.

[15]汪琦, 王爽, 付俊永,等. 基于模型参考自适应参数辨识的永磁同步电机电流预测控制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(7):48-53.

[16]Wei D Q, Luo X S, Wang B H, et al. Robust adaptive dynamic surface control of chaos in permanent magnet synchronous motor[J]. Physics Letters A, 2007, 363(1):71-77.

[17]梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 清华大学出版社, 2003.

[18]Yao B, Tomizuka M. Adaptive robust control of SISO nonlinear systems in a semi-strict feedback form ☆[J]. Automatica, 1997, 33(5):893-900.

[19]Chen G, Wang J, Wang S, et al. Indirect adaptive robust dynamic surface control in separate meter-in and separate meter-out control system[J]. Nonlinear Dynamics, 2017, 90(2):951-970.

[20]Zhang Z, Duan G, Hu Y. Robust adaptive control for a class of semi-strict feedback systems with state and input constraints[J]. Int J Robust Nonlinear Control, 2018, 28(9): 3189-3211.

[21]Shaocheng Tong, Yongming Li, Shuai Sui. Adaptive Fuzzy Tracking Control Design for Uncertain Non-Strict Feedback Nonlinear Systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2016, PP(99):1-1.

[22]Zhao Z, He W, Ge S S. Adaptive Neural Network Control of a Fully Actuated Marine Surface Vessel With Multiple Output Constraints[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(4):1536-1543.

[23]Wang H, Liu X, Liu K. Robust Adaptive Neural Tracking Control for a Class of Stochastic Nonlinear Interconnected Systems.[J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems, 2016, 27(3):510-523.

[24] Sastry S, Bodson M, Bartram J F. Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 88(1):588-589.

[25]陈刚. 不确定非线性系统的鲁棒自适应控制研究[D]. 浙江大学, 2006.

[26]Annaswamy A M. Robust Adaptive Control[M]// Robust adaptive control. Prentice-Hall, Inc. 1995:333 - 335.

[27]那靖, 杨光宇, 高贯斌,等. 基于参数估计误差的鲁棒自适应律设计及验证[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(7):956-964.

[28]Chowdhary G, Mühlegg M, Johnson E. Exponential parameter and tracking error convergence guarantees for adaptive controllers without persistency of excitation[J]. International Journal of Control, 2014, 87(8):1583-1603.

[29]Yang C, Jiang Y, He W, et al. Adaptive Parameter Estimation and Control Design for Robot Manipulators with Finite-Time Convergence[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, PP(99):1-1.

[30] 王康. 多电机驱动伺服系统的控制算法研究[D]. 北京理工大学,2018.

[31] 赵威, 任雪梅. 含摩擦的双电机伺服系统快速终端滑模控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(3):119-123.

[32]Tomizuka M , Kamano T , Suzuki T . Design and Implementation of the Adaptive Synchronizing Feedforward Controller for Two Axes Motion Control Systems[J]. 1991.

[33]王得刚. 双机传动机械系统同步控制的研究[D]. 东北大学, 2006.

[34]赵春雨, 朱洪涛, 闻邦椿. 多机传动机械系统的同步控制[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(2):179-183.

[35]Shih Y T , Chen C S , Lee A C . A novel cross-coupling control design for Bi-axis motion[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(14):1539-1548.

[36]Sun D . Position synchronization of multiple motion axes with adaptive coupling control[J]. Automatica, 2003, 39(6):997-1005.

[37]陈炜, 刘旭, 史婷娜. 双轴联动系统广义预测交叉耦合位置控制[J]. 控制理论与应用, 2018(3).

[38] Perez-Pinal F, Ciro Nunez, Ricardo Alyarez. Comparison of multi-motor synchronization techniques[A]. The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Busan, Korea. 2004, (10):2-6.

[39]彭晓燕, 刘威, 张强. 基于改进型偏差耦合结构的多电机同步控制[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(11):77-83.

[40]张羽, 关振宏, 王涛, et al. 基于自抗扰控制技术的多电机同步控制[J]. 电气自动化, 2017, 39(2):9-11.

[41]刘然, 孙建忠, 罗亚琴, et al. 基于环形耦合策略的多电机同步控制研究[J]. 控制与决策, 2011, 26(6):957-960.

[42]刘克平, 秦悦, 杨宏韬, et al. 多轴工业机器人非线性环形耦合补偿同步控制[J]. 机械科学与技术, 2018(6).

[43]王刚伟, 王隽, 张金国, et al. 四液压缸同步举升系统环形耦合控制策略[J]. 机电设备, 2017, 34(4):14-17.

[44]Li L B , Sun L L , Zhang S Z , et al. Speed tracking and synchronization of multiple motors using ring coupling control and adaptive sliding mode control[J]. ISA Transactions, 2015, 58:S0019057815001780.

[45]曹玲芝, 李春文, 牛超, et al. 基于相邻交叉耦合的多感应电机滑模同步控制[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5):586-592..

[46]张宇. 多电机伺服系统摩擦补偿与同步控制[D]. 北京理工大学, 2015.

[47]唐元恒, 梁佐堂, 徐成. 基于遗传算法的交叉耦合控制器优化设计[J]. 机械设计与制造, 2018(a01).

[48]赵坤, 王栋. 基于环形耦合与模糊控制策略的多电机同步控制[J]. 计算机与数字工程, 2018(7).

[49]刘桂秋, 许万涛, 孙晶. 基于改进型偏差耦合的PMSM自适应反推同步控制[J]. 微特电机, 2016, 44(2):45-49.