**开题报告**

《移动机器人四轮协调控制的研究》

摘要：对于四轮独立驱动机器人，其四轮都由独立电机进行驱动与控制，因此四轮运动易出现速度不同步的情况。另外四轮独立驱动机器人是一个强耦合型的复杂非线性系统，轮子易受到外界干扰或复杂负载变化的影响而出现不稳定运行的情况，若某个轮子受到干扰不稳定运行，那么由于四轮的强耦合关系，其余轮子也会对干扰敏感而同样出现不稳定的情况。针对这一问题，首先设计自适应鲁棒控制器对单个电机进行控制，克服电机受扰动而不稳定的问题，提升独立电机的跟踪精度。其次，设计了一种多电机控制系统的解耦控制器，使四个电机可以准确地跟踪各自的控制目标，运动状态不受其余电机状态变化的影响，保证了系统整体的稳定性。

1. 选题依据
2. 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。

四轮独驱式机器人的每个轮子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。

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。由于每个轮子的技术参数不同，安装时也可能出现误差，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。因此对于正处于急速发展中的四轮独立驱动机器人，如何使四轮可以在不同工况下都能协调工作，是四驱机器人的热点研究问题。

1. 电机稳定性控制的研究概况

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]。

（二）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]。

1. 研究内容

本课题的主要研究目标是针对四轮驱动机器人的多电机控制系统的协同问题进行研究，以增强电机抗干扰的能力和提高跟踪给定信号的精度，达到四轮速度协同并降低电机之间互相干扰的敏感度，使电机可以分别跟踪期望信号而不会互相干扰的目的。具体研究内容如下：

（1）独立电机的速度跟踪控制：首先建立电机的一阶动力学模型，因为控制系统的数学模型存在诸多未知扰动、未知参数和未建模动态等部分，所以大多数非线性控制系统的模型使很难精确建立的。课题采用鲁棒自适应方法控制电机的速度，该方法适用于数学模型中存在诸多未知部分的控制系统，可以克服未知扰动和参数摄动带来的不利影响。

（2）四轮独驱机器人的速度跟踪控制：由于机器人机械结构非常复杂，因此机器人整体在跟踪给定速度时容易受到电机堵转、轮子打滑、机械结构间的摩擦以及外界环境变化等各种扰动因素的影响，使得机器人速度跟踪效果不理想。因此设计基于PID的机器人整体速度补偿控制器，为机器人四个电机的速度提供补偿量。

（3）四轮独驱机器人协同控制：机器人四轮之间存在强耦合作用，为了避免四个电机相互干扰，首先建立机器人整体的运动学和动力学模型。对模型进行分析后得到四个电机速度与四个电机输出转矩之间的耦合关系，设计一个基于参考模型解耦原理的补偿控制器，补偿耦合关系带来的干扰，使电机在运行时彼此不受影响，稳定地跟随各自的控制目标，达到四轮协调运动。

1. 研究方案
   1. 独立电机的速度跟踪控制

3.1.1 永磁同步电机数学模型

首先作下列假设：①永磁同步电动机的三相绕组在空间上相互差120。电角度，通入的三相对称电流所产生的气隙磁势按正弦规律分布，并且具有正弦反电动势，②磁路线性且不考虑磁路饱和，③忽略电机中的涡流和磁滞损耗。其电力拖动系统的运动方程为：

(3-1)

其中，是负载转矩，是系统的转动惯量，是转矩阻尼系数，与转速成正比，为永磁同步电机的极对数，为转子电角速度(单位)。

旋转坐标系下的电磁转矩为：

(3-2)

其中分别为直轴电流和交轴电流；为定子相电阻；分别为合成空间磁场在直轴和交轴与定子绕组交链的磁链；是直轴电感，是交轴电感。

结合（3-1）和（3-2）可得：

(3-3)

由（3-3）可以看出作为控制器的被控量，即控制器的输出，驱动电机的转速。将直轴电流、负载转矩的影响看作系统扰动，即。式（3-3）可简化为：

(3-4)

其中。

摩擦现象在伺服系统中广泛存在，传统的控制方法难以补偿这种动态复杂的扰动问题。为了获得系统更为精确的数学模型，这里采用LuGre摩擦模型来描述，电机的摩擦模型，LuGre摩擦模型表述如下:

(3-5)

其中，为电机机械角速度；是通过LuGre摩擦模型建立的摩擦力矩；是摩擦力参数，分别表示两个接触面的刚度系数、阻尼系数和粘滞摩擦系数。状态的物理意义为两个相互作用的表面之间摩擦的平均刚度；是一个非线性函数用来表示不同的摩擦的影响，并且可以参数化Stribeck效应的特征；是库伦摩擦数值；是Stribeck效应力的值；是Stribeck效应的速度值。

永磁同步电机的数学模型最终表示为：

(3-6)

其中和均是不可测量的物理量，是未知干扰，该系统为一阶控制系统。

3.1.2 鲁棒自适应控制方法

由上节的分析可知，模型存在未知参数和干扰。在复杂负载下，负载的干扰会对电机的稳定性造成不利的影响。自适应控制可以利用自适应率不断逼近未知参数，使模型更为准确，鲁棒控制则可以使系统对未知扰动不敏感。因此鲁棒自适应方法可以在很大程度上解决模型不精确系统的控制问题。

假设有一个一阶非线性系统：

(3-6)

其中为未知参数，为外界干扰。期望信号为，目的是设计控制率，使精确跟踪上期望信号。的估计值为，由自适应率估计，估计误差，跟踪误差。设李雅普诺夫函数为：

（3-7）

对上式求导可得：

(3-8)

为反馈常数，满足，为李雅普诺夫系数，也为正值。为了使系统稳定，那么就要令。由此可得：

（3-9）

其中=为自适应项，通过参数在线调整解决参数不确定性问题，为鲁棒控制项中的比例项，为针对干扰设计的鲁棒控制函数。

(3-10)

式(3-10)为自适应率，未知干扰是由鲁棒项控制，对于不同系统，可以设计不同的形式的鲁棒项，但是必须知道的上下界。以上为最基础的自适应控制模式，系统越复杂，控制率也越复杂，控制器可以在此基础上做改进与优化。

* 1. 四轮独驱机器人的速度跟踪控制

在不改变机器人内部四个电机控制结构的情况下，设计结构简单的PID控制器矫正机器人机身的速度，构成外围的速度闭环，给四个电机提供期望的角速度。四轮独驱机器人的模型示意如图3.1所示：



图3.1 四轮独驱机器人模型示意图

图中，为惯性坐标系， 是以机器人质心为原点建立的局部坐标系，在全局坐标系下的坐标为。为机器人横轴与惯性坐标系之间的夹角，表示机器人的位姿角，为机器人的纵向速度，为机器人的横摆角速度，和分别表示车轮的沿方向的纵向力和沿方向的横向力（）。为左右轮间距和前后轮间距的一半（该机器人四轮中心之间的距离相等）。另外设定其他物理量：为车轮半径，为机器人总质量，是各车轮的线速度，为相应车轮的角速度。这里假设机器人的运动满足纯滚动、无滑动的条件，由刚体力学易得其各个轮子与其质心之间的运动关系：

(3.11)

式中为电机转速与机器人机身速度之间的转换矩阵，设定机器人期望的速度为和，机器人速度跟踪的控制框图如下所示：



图3.2 机器人整体速度控制结构框图

速度误差输入到PID控制器进行矫正，再将结果通过速度转换矩阵转换为四个电机各自的期望角速度，该结构不影响四个电机之间的控制系统。

* 1. 四轮速度协同控制

四轮独驱机器人是一个强耦合的非线性系统，正常运行时，四轮应该按照各自设定的期望速度运行，比如直线时四轮速度应该相同，做同步运动。但是在实际实验中，环境和路面的复杂性使得机器人控制电机会受到较多干扰而导致不稳定。当一个轮子的控制电机不稳定运行时，通过机器人内部复杂的耦合关系，其他电机会对此干扰敏感而导致四条腿都发生抖动，机身也会不稳定。因此基于机器人的耦合系统，设计一个耦合补偿控制器，使四轮电机之间的干扰作用尽量减小，同时不稳定的电机可以由第一小节所介绍的控制器来控制其稳定性。首先需要对机器人建立广义运动学与动力学方程，并推导出各驱动电机输入量与输出量的状态方程。然后依据基于参考模型的解耦原理实现解耦功能。

* + 1. 基于四轮独驱机器人动力学模型的多电机状态方程

假设轮子为无变形的刚体，且满足纯滚动和无滑动条件，根据刚体运动学原理，可得机器人的运动学方程：

(3-12)

其中为机器人在任意时刻其质心相对于惯性坐标系的位姿，分别为四个轮子的角位移，即。假设机器人的广义位姿为，可以得到机器人的广义运动学方程为：

(3-13)

其中。

为了简化机器人的动力学模型，假设左侧两轮沿方向的纵向力合力为，右侧两轮沿方向的纵向力合力为，四轮沿方向的横向力合力为。根据力学原理，机器人系统满足和方向的力的平衡，可以得到如下动力学约束方程：

(3-14)

式中，为整个机器人绕垂直质心轴的转动惯量，、、、分别为四个电机输出轴的惯量，、、、分别为四个电机的输出力矩。式（3-14）可以整理成拉格朗日形式：

(3-15)

式中；

；

；

为与约束相关的矩阵；

表示约束力向量。

可以得出矩阵是约束矩阵零空间的一组基，即在拉格朗日方程（3-15）左右两端同乘可消去约束力向量，得到：

（3-16）

对方程（3-13）求导，并带入（3-16）中得到：

(3-17)

上式为该机器人动力学模型的一般形式，表示了各电机转速和驱动力矩之间的关系。令，，上式可表示为状态方程形式：

(3-18)

其中为单位矩阵。由该状态方程可知，每台电机的加速度不仅受该电机的输出力矩影响，还受到其他电机输出力矩的影响。该机器人电机控制系统为一个四输入四输出耦合系统，由（3-18）可得该系统传递函数为：

(3-19)

式中表示第个电机的系统模型，表示第个电机对第个电机的耦合作用。

* + 1. 基于参考模型的解耦控制

利用参考模型控制解耦的原理是通过设计合适的补偿控制器，弥补系统的实际输出与事先确定的参考模型的输出的差距，以使实际输出不断逼近理想输出，即两者之差趋于零，从而抵消系统受到的耦合作用的影响。原理框图如图3.3所示：



图3.3 基于参考模型的解耦控制框图

图3.3中，主回路控制器，，，是在不考虑耦合作用的条件下，根据要求的控制性能指标针对单独被控对象设计得到（3.1.2节）。在主回路控制器设计好后，参考模型控制回路与实际系统控制回路均采用该主回路控制器，那么参考模型回路的输出即为理想输出，下方的回路由于与其他电机系统存在耦合作用，因此输出为实际输出。该策略目的是设计耦合补偿控制器，实现对电机之间耦合作用的补偿，令系统实际输出逼近参考模型输出，这样就实现了电机之间的解耦，显而易见的是补偿控制器是独立于主回路控制器设计的。

补偿控制器的功能可由变结构控制——滑模控制方法实现，控制器输出的补偿力矩与实际系统主回路控制器输出的力矩之和作为实际系统中电机1的控制输入。滑模控制方法是一种适用于非线性系统的控制方法，由于滑动模态可以自行设计且与对象参数及扰动无关，这就使得变结构控制具有快速响应、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。

1. 可行性分析
2. 理论上可行

机器人控制技术方面的研究是发展快速，处于比较成熟的阶段。鲁棒自适应技术是非线性控制方法中应用非常广泛且优良的方法，该方法运用于感应电机的控制在理论上是完全可行的。对于复杂多变量耦合系统，解耦控制是常用的方法之一，经过对系统建模和推导论证，其理论上也是可行的。

1. 技术上可行

本课题组致力于机器人的研究，具有丰富的四轮独立驱动机器人的研究经验，也获得了很多成果。目前课题组有许多效果突出的方法和策略可以参考，并且四足轮式机器人已经搭建完毕，设备良好，可以保证课题的顺利进展。本人熟练掌握MATLAB软件的使用，可以独立完成课题的研究。

**五 研究工作进度安排**

理论研究：应包括文献调研，理论推导，数值计算，理论分析，撰写论文等；

实验研究和工程技术研究：应包括文献调研，理论分析，实验设计，仪器设备的研制和调试，实验操作，实验数据的分析处理，撰写论文等。

2018.07-2018.11

完成文献调研，对现有成果进行研究，选定课题的设计方案。

2018.12-2019.03

完成机器人数学模型的推导，对单独电机系统进行鲁棒自适应控制的研究、仿真，并在电机上进行实验。

2019.04-2019.07

深入研究机器人四轮协同控制，改进控制算法，完成仿真

2019.08-2019.11

进行模型的联合仿真实验，并改进和优化控制算法。

2019.11-2020.01

在机器人实体上进行实验，针对实验效果改进控制算法。

2020.02-2020.03

改进缺陷之处，对课题工作进行收尾和总结。

2020.04-2020.06

撰写论文。

**五 预期研究成果**

本课题的预期成果包括以下几个方面：

（1）对单个电机的稳定性进行控制，提高电机在复杂负载和干扰下的跟踪精度，提升其工作稳定性，为四电机的协同控制建立基础。

（2）对四轮独立驱动机器人的四轮进行协同控制，使各个电机可以独立跟踪其给定信号，降低彼此之间的干扰敏感度，提高机器人整体的稳定性。

**六 本课题创新之处**

本课题的创新之处包括：

（1）本课题从动力学的角度控制机器人的四轮协同运动稳定性，降低机器人系统对干扰的敏感度。并在此之前，完成了独立电机的稳定性控制，这是四轮协同运动保持稳定的基础。

（2）对控制算法进行改进与创新，使算法更适和解决本课题所需解决的问题。