

四轮全向移动机器人运动控制系统 设计

李禄平

院（系）：电气工程及其自动化 专 业：电气工程及其自动化

学 号：1120910328 指导教师：邹继斌

2016 年 7 月

哈爾濱工業大學

毕业设计（论文）

题 目 四轮全向移动机器人运动控制系统
设计

专 业 电气工程及其自动化

学 号 1120910328

学 生 李禄平

指 导 教 师 邹继斌

答 辩 日 期 2016 年 6 月 28 日

摘 要

本文研究了四轮全向移动机器人运动控制系统的设计。

主要从三个方面进行了研究，移动机器人底盘分析，运动定位模块设计及硬件和程序的设计与实现。建立了底盘的运动学和动力学模型，利用 MATLAB 建模仿真，得出 45 度布置的底盘最适合本课题且动力学模型为路径规划提供了理论支持。运动定位模块是该系统的核心和基础，其精度直接决定了该系统的准确性和实用性，因此结合课题特点设计了随动轮系统误差矫正的方法，使其主副方向误差控制在 20mm 以内。同时硬件和程序的设计也是一个系统必不可少的部分，课题中完成了该系统的供电系统、主控制系统及电机驱动器的开发，并且使用 MDK-ARM 编程环境完成了程序设计。

最后，将运动控制系统移植在课题研究的移动机器人上，进行了一些实际的实验，作为一种反馈对系统的个别模块进行了优化，主要针对运动定位模块。课题研究制作的移动机器人参加了第十五届机器人大赛，体现“清洁能源”的主题。

关键词：全向移动机器人；运动定位算法；直流电机控制；

Abstract

In this paper, four omnidirectional mobile robot motion control system is designed.

Mainly from the three aspects of research were conducted, the analysis of mobile robot chassis, the design of motion localization module and the implementation of hardware and procedures. Kinematics and dynamics model of the robot chassis were set up. By means of modeling and simulation using MATLAB, I draw a conclusion that the chassis with 45-degree arrangement is best suited to the subject. In addition, the dynamics model of the robot chassis provides theoretical support for path planning. Movement positioning module is the core and basis of the system. Its accuracy directly determines the accuracy and usefulness of the system. By combining the characteristics of the subject, following wheel system error correcting method is proposed to make the errors of primary and secondary direction less than 20mm. Also, design of hardware and programs is a necessary part of the system. The development of the power supply system, the main control system and the motor drive are completed in the subject. In addition, programs is completed by using the MDK-ARM programming environment.

Finally, the motion control system is migrated on the subject mobile robot. And then some practical experiments are carried out which as a feedback to the individual modules of the system. So the result of that experiments could provide a basis to optimize individual module, for the major motion positioning module. The mobile robot invented in the subject participating the fifteenth session of robot competition whose theme is the "clean energy".

Keywords: omnidirectional mobile robot, motion localization algorithm, DC motor control

目 录

摘 要	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题背景	1
1.1.1 课题来源	1
1.1.2 研究的目的和意义	1
1.2 国内外研究现状及分析	2
1.2.1 移动机器人发展历史和研究现状	2
1.2.2 移动机器人运动控制系统的组成	3
1.2.3 综述分析	4
1.3 研究内容	5
1.3.1 比赛对本课题研究的要求	5
1.3.2 主要研究内容	6
第 2 章 四轮全向移动机器人运动底盘分析	7
2.1 运动学分析	7
2.1.1 运动学模型建立	7
2.1.2 运动学模型 MATLAB 仿真	9
2.2 动力学分析	12
2.2.1 动力学模型	12
2.2.2 动力学模型 MATLAB 仿真	13
2.3 本章小结	16
第 3 章 四轮全向移动机器人运动定位模块研究	17
3.1 机器人姿态描述	17
3.2 定位模块结构设计	18
3.3 随动轮特征角	19
3.4 转换矩阵	20
3.5 机器人坐标解算	21
3.6 随动轮系统误差矫正方法	22

3.7 本章小结	24
第 4 章 运动控制系统硬件及程序设计和实现	25
4.1 硬件设计	25
4.1.1 数字光纤陀螺仪	25
4.1.2 随动轮编码器	27
4.1.3 主控制系统	28
4.1.4 供电系统	29
4.1.5 电机驱动器	30
4.2 程序设计	34
4.2.1 控制策略	34
4.2.2 程序整体设计	37
4.3 本章小结	39
结 论	40
参考文献	41
哈尔滨工业大学本科毕业设计（论文）原创性声明	43
致 谢	44

第1章 绪 论

1.1 课题背景

1.1.1 课题来源

本课题来源于第十五届“亚广联亚太地区大学生机器人大赛”，此次比赛国际赛将在泰国曼谷举行，国内选拔赛在山东省邹城市进行，冠军将代表中国参加国际赛。本届比赛的主题是“清洁能源”。各个参赛队将设计两台机器人参赛，一台是表现自主或半自主的混合型机器人，另一台是象征节约能源的经济型机器人。经济型机器人不能拥有自主的动力，其动力只能间接地来自于混合型机器人。在混合型机器人的推进下，经济型机器人携带风机螺旋桨沿着预定的轨迹行驶，在最后的交接区（风力发电站）经济型机器人将风机螺旋桨交接给混合型机器人，然后混合型机器人进行攀登立柱的动作并且将螺旋桨安装在立柱顶端的风机上。除了在交接区交接螺旋桨外，两台机器人不能有任何的物理接触。

“亚广联亚太地区大学生机器人大赛”，是一项由日本广播协会发起的机器人比赛，中央电视台在 2002 年开始举办“全国大学生机器人电视大赛”，象征着我国高等学校的队伍开始参与该项机器人比赛。参赛队员需要综合运用机械、电气和自动控制等方面的知识，这项比赛的宗旨是培养各国参赛队员参与科技创新的兴趣和爱好，提高大学生的实践能力和创新思维能力。

在 2002 年的第一届“全国大学生机器人电视大赛”中，中国科学技术大学代表队获得国内赛冠军，并且代表中国参加了在日本东京举办的第一届“攀登富士山”亚广联亚太地区机器人大赛。值得骄傲的是哈尔滨工业大学代表队在 2009 年的比赛中获得国内赛冠军并且代表中国在日本东京“敲响胜利之鼓”的主题比赛中过关斩将获得冠军。在此后的国内赛中，哈尔滨工业大学获得了两次国内赛亚军的成绩。

1.1.2 研究的目的和意义

随着科学技术突飞猛进的发展，高新科技产品已经在人类的生活中无处不在，无时不在，比如自动驾驶汽车和智能移动机器人。智能移动机器人在人类的生产生活中发挥着越来越大的作用，在农业、医疗、航天、军事领域都有所设计，特别是

在一些特种环境或者恶劣环境中可以代替人类，在军事勘探、防核化污染、扫雷排险等危险的环境中有广泛的应用。另外美国、日本在一些高精度的场合已经开始使用智能机器人，其高效、快速的优点可以帮助我们更好的完成工作^[1]。

智能机器人是一个集环境感知，动态决策与规划，行为控制与执行等多功能于一体的综合系统。它集中了传感器技术，机械工程，电子工程，计算机工程，自动化控制工程以及人工智能等多学科的研究成果，是目前高科技技术中最活跃的产品之一。并且随着社会的发展分割为多个机器人领域，如工业机器人，农用机器人，军用机器人和礼仪机器人等，各个领域的机器人功能具有偏向性。

智能机器人一般是可以自由移动的，并且可以自动避障，因此要求其响应非常迅速，轮式移动机器人完全满足上述的要求，而且它的能源利用率高，控制简单方便，可以高速稳定的移动的的优点，是移动机器人应用最广泛的。轮式移动机器人的类型非常之多，对于一般的轮式移动机构，都不可能进行任意的定位和定向，而全向移动机构则可以利用车轮所具有的定位和定向功能，实现平面上的自由运动。由于全向轮移动机构具有一般的轮式移动机构无法取代的独特特性，因而成为机器人移动机构的发展趋势^[2]。

本课题所研究的混合型机器人的运动控制，具有四轮全向移动的特点，它为体现节约能源的经济型机器人提供动力，两个机器人通过配合完成风机螺旋桨的安装。因此首先要求混合型机器人精确地定位自己的位姿，这要求设计完成高精度的运动定位模块，然后完成运动控制模块的设计，最后将这两个子模块融合在一起完成运动控制大系统的设计，由运动控制系统控制机器人完成相应的运动。

1.2 国内外研究现状及分析

1.2.1 移动机器人发展历史和研究现状

移动机器人的研究始于 20 世纪 60 年代末期，其中具有里程碑意义的是斯坦福研究所 1972 年开发的第一台智能机器人 SHAKEY，将机器人的研究推进到第三代智能机器人。SHAKEY 可以在复杂的环境下识别目标，自动检测障碍物，自主完成路径规划和实时控制，它作为世界上第一台智能机器人，其运动控制系统由任务规划，目标识别与定位，机器视觉，多传感器融合与信息处理系统等部分组成^[3]。

70 年代末，随着计算机技术的发展和运用，以及传感器技术的发展，移动机器人的研究又出现新的高潮。特别是 80 年代开始，在美国国防部 DARPA 的支持

下，由卡内基·梅隆大学，斯坦福大学和麻省理工大学等相继开展了关于 ALV（地面自主车辆）的研究；日本通产省极限环境机器人计划；欧洲尤里卡中心的机器人计划等。90 年代，移动机器人的研究迈入了实用化、系列化和智能化的年代^[4]。

我国的机器人技术起步较晚，研究水平与国外相比还有较大差距。但是机器人技术在我国的发展确实很迅速，随着国家和各大高校逐渐重视机器人研究，我国在室外移动机器人的一些关键技术上达到了国际领先水平。国内有一定影响力的移动机器人研究成果有：清华大学研制的 THMR—V 自动驾驶车，可以在特定校园环境里自由行走；哈尔滨工业大学研制的迎宾机器人，实现了无缆行走、自动避障、语音识别等功能；香港城市大学智能设计、自动化及制造研究中心的自动导航和服务机器人；中科院沈阳自动化研究所的 AGV 和防爆机器人；中科院北京自动化所研制的我国第一代智能轮椅平台，配备了超声、红外等多种传感器融合的导航系统，并能够实现简单的口令控制。目前我国的移动机器人的研究主要集中在哈尔滨工业大学、清华大学、中国科技大学和上海交通大学等高等院校^[5]。

1.2.2 移动机器人运动控制系统的组成

运动控制系统是机器人的“大脑”，由其控制机器人的运动和机构的动作，完成预期的功能。机器人运动控制系统一般由运动定位模块、运动控制模块组成，运动控制模块又可以细分为导航、路径规划、机器人执行等。运动定位模块则是运动控制系统的基础，定位就是确定机器人在其作业环境中所处位置的过程，具体地说就是利用先验环境地图信息、机器人位姿的当前估计以及传感器的返回值等输入信息，经过控制系统的处理和变换，更加准确的确定机器人当前位姿^[6]。定位是运动控制系统中的核心部分，定位的精度和准确性直接决定机器人的运动控制，因此实时、精确地定位是提高机器人控制性能的关键。导航技术是运动控制模块的关键技术，一般是指机器人通过传感器感知环境信息和自身状态，实现在有障碍环境中面向目标的自主运动。路径规划则是为机器人预先规划好其行驶的路径，然后通过控制机器人执行机构实现机器人自主运动的功能^[7]。

科学家 Leonard 和 Durrant-Whyte 将移动机器人的运动控制问题归纳为“我在哪”、“我要去哪”及“我怎样到那儿”三个问题^[8-9]，也就是对应上述运动控制系统的“运动定位模块”、“导航技术”及“路径规划和机器人执行的控制”^[10]。

1.2.3 综述分析

在绝大多数移动机器人应用场合中，有两种基本的移动机器人位置估计算法，即相对定位和绝对定位，相对定位是机器人在已知初始位置的情况下计算自身的位姿信息，缺点是误差无限累积，影响定位精度，导致定位失败。绝对定位是机器人在未知初始位置的情况下确定其所处环境中的位置，可以称之为全局定位，确定是算法复杂，实现过程繁琐，实用性较低。因此，使用单一的某种定位方法并不能完全高精度的确定机器人的位置信息，现在一般将相对定位和绝对定位结合在一起使用成为一个组合的系统^[11]。常用的定位方法如图 1-1 所示。

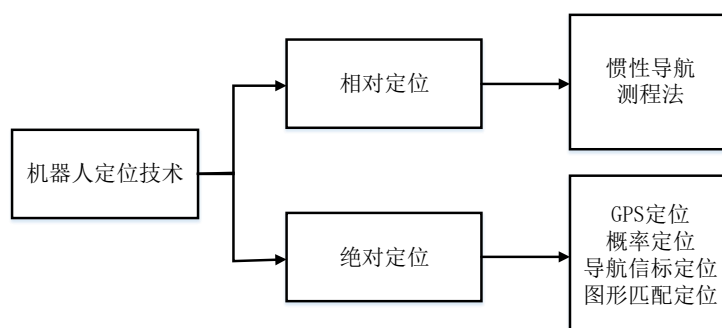


图 1-1 机器人定位方法

（1）相对定位方法

常用的相对定位有两种方法：惯性导航和测程法。惯性导航通常使用加速度计、陀螺仪、电磁罗盘等传感器。但诸多实验结果表明惯性导航定位并不是很理想。为了获得位置信息，加速度计必须积分两次，因此对漂移特别敏感。在一般的操作状态下加速度计的加速度很小，只有 $0.01g$ 左右的数量级；然而只要加速度计相对于水平位置倾斜 0.5° ，比如机器人在不平的地面移动，就会产生对应数量级的波动，因此会带来较大的测量误差。和加速度计相比，陀螺仪能够提供更为精确的航向信息；然而，陀螺仪能够直接提供的只是角速度信息，必须经过一次积分才能获得航向信息，因此静态偏差漂移对陀螺仪的测量值有很大影响。此外，陀螺仪较高的价格也在一定程度上限制了它在机器人领域的使用。电磁罗盘能够直接为机器人提供航向信息，但容易受磁场干扰的影响。

测程法是最广泛使用的定位方法，对测程法的理解有狭义和广义之分，狭义测程法仅仅依靠编码器的信息估计机器人的位置，由于系统误差和非系统误差的影响，导致定位误差随着机器人移动距离的增加而逐步累积，因此需要借助外界传感

器的信息修正编码器的定位误差。广义测程法利用外界传感器扫描机器人导航环境，提取环境特征信息并和环境地图匹配，应用数据融合算法来提高机器人的定位精度。

（2）绝对定位方法

目前常用的绝对定位方法比较多：导航信标、主动或被动标识、图形匹配、基于卫星的 GPS 定位、概率定位。基于信标的绝对定位经常采用三视距法和三视角法。标识定位是一种常见的绝对定位技术。标识是具有明显特征的、能被机器人传感器识别的特殊物体。根据标识的不同，分为基于自然标识定位和基于人工标识定位。其中，人工标识定位技术应用最为成熟。人工标识定位是在移动机器人的工作环境里，人为地设置一些坐标已知的标识，如超声波发射器、激光反射板等，机器人通过对标识的探测来确定自身的位置。地图匹配指移动机器人通过自身的传感器探测周围环境，并利用感知到的局部信息进行局部地图构造，然后将这个局部地图与预先存储的环境地图进行比较，如两地图相互匹配，就能计算出机器人在工作环境中的位置与方向。环境地图可以是 CAD 模型，或者是传感器建立的模型。地图匹配定位的两个关键技术是地图模型的建立和匹配算法。GPS 是一种以空间卫星为基础的导航与定位系统。

分析两种定位方法之后，可以得出测程法具有实用、成本较低、精度可以满足定位需求等优点，并且所需要的硬件仅仅是两个编码器，硬件设计简单；软件算法也只需要进行两次坐标系的转换便可以得出机器人的坐标。因此本课题运动控制系统采用测程法实现其定位模块的设计，在此基础上研究设计运动控制系统。

1.3 研究内容

1.3.1 比赛对本课题研究的要求

2016 届比赛需要设计两台机器人，一台为有自主动力的混合型机器人，另一台为没有任何自主动力的经济型机器人，要求经济型机器人在无自主动力的情况下完成风机螺旋桨从启动区到发电站的运送，在此过程中经济型机器人和混合型机器人不能有任何的物理接触。两台机器人在奋力发电站完成风机螺旋桨的交接工作，然后混合型机器人在发电站抱住立柱并且攀登安装螺旋桨。本课题对混合型机器人运动控制系统的要求非常高，尤其是它的路径运动需要快而准，这就要求处于底层的机器人定位模块精度非常高、稳定性非常好。另外，运动控制系统需要快速的响应进行加速、匀速和减速等动作，考虑前馈结合 PID 的控制方式提高机器

人的速度响应。

1.3.2 主要研究内容

本课题主要以亚广联机器人大赛为背景，设计一种适合本届比赛机器人且多种传感器融合的运动控制系统，该系统包含两个小的模块，即运动定位模块和运动控制模块，研究内容可以分为如下三个部分：

（1）首先利用 **MATLAB** 对运动定位模块和运动控制模块进行建模并且仿真，分析各个模块的实时性和准确性。

（2）算法和控制策略的设计及实现

测程法虽然成本低，实现简单，但是其系统误差会无界的积累，这必然会导致机器人定位的失败，因此必须设计减小甚至消除该项误差的系统误差矫正方法。

运动控制模块主要由移动机器人导航问题，路径规划问题，传感器融合问题及动作执行机构的控制。导航是机器人运动控制模块的核心，也是机器人“观察”外界的眼睛，路径规划可以让机器人“意识”到自己该如何行驶^[12]。

（3）整体硬件系统的设计和开发

运动定位模块硬件系统主要包括两个传感器的选型和相关硬件电路的设计。测程系统用编码器和测角用陀螺仪的选型，编码器要求最高响应频率高、传输距离远，陀螺仪要求测速范围大、精度高。

运动控制模块以运动定位模块为基础，实现对机器人各种动作的控制，即路径运动、执行机构动作等。该模块的硬件则主要为主控制器、预处理器及电机驱动器等硬件的设计，其中电机驱动器由于研发周期长，因此采用机器人队已经相对成熟的电机驱动器，并在此基础上进行较大的改进和优化。

第 2 章 四轮全向移动机器人运动底盘分析

2.1 运动学分析

2.1.1 运动学模型建立

系统的运动学模型一般是通过速度的合成与分解来建立的，这期间将涉及到坐标系之间的相互转化，即运动定位模块提到的全局坐标系和机器人局部坐标系之间的转化。

运动学模型如图 2-1 所示，其中 $V_Q = [V_x, V_y, V_\omega]$ 为机器人在全局坐标系下的速度， $V_R = [V_x, V_y, V_\omega]$ 为机器人在局部坐标系下的速度， $V_L = [V_A, V_B, V_C, V_D]$ 为底盘电机在局部坐标系下的速度，以机器人逆时针旋转为正方向， θ 为机器人的姿态角，即局部坐标系与全局坐标系的夹角，逆时针为正方向， $[\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4]$ 为机器人底盘电机在机器人局部坐标系下的安装角度。

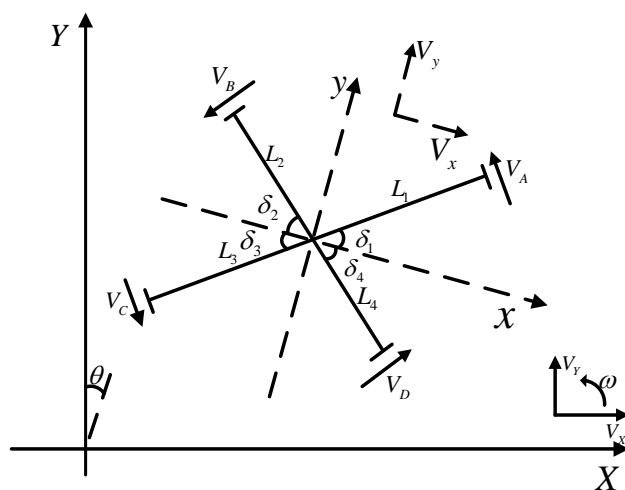


图 2-1 四轮全向底盘运动学模型

根据运动学模型结合物理学的速度合成与分解定律，机器人局部坐标系和全局坐标系的速度关系为：

$$\begin{cases} V_x = V_x \cdot \cos \theta + V_y \cdot \sin \theta \\ V_y = -V_x \cdot \sin \theta + V_y \cdot \cos \theta \\ V_\omega = V_\omega \end{cases} \quad (2-1)$$

且局部坐标系到底盘电机转速的关系式为：

$$\begin{cases} V_A = V_x \cdot \cos \delta_1 - V_y \cdot \sin \delta_1 + V_\omega \cdot L_1 \\ V_B = -V_x \cdot \cos \delta_2 - V_y \cdot \sin \delta_2 + V_\omega \cdot L_2 \\ V_C = -V_x \cdot \cos \delta_3 + V_y \cdot \sin \delta_3 + V_\omega \cdot L_3 \\ V_D = -V_x \cdot \cos \delta_4 + V_y \cdot \sin \delta_4 + V_\omega \cdot L_4 \end{cases} \quad (2-2)$$

由公式（2-1）可以得到机器人局部和全局坐标系之间的转化矩阵为：

$$J = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-3)$$

可以表示为矩阵关系如式（2-4）

$$V_R = J V_Q \quad (2-4)$$

由公式(2-2)可以得到机器人局部坐标系和底盘电机转速之间的转化矩阵为：

$$H = \begin{pmatrix} \cos \delta_1 & -\sin \delta_1 & L_1 \\ -\cos \delta_2 & -\sin \delta_2 & L_2 \\ -\cos \delta_3 & \sin \delta_3 & L_3 \\ \cos \delta_4 & \sin \delta_4 & L_4 \end{pmatrix} \quad (2-5)$$

可以表示为矩阵关系如式（2-6）

$$V_L = H V_R \quad (2-6)$$

综合公式（2-4）和（2-6）可以得到四轮全向底盘的运动学模型方程如式（2-7）

$$V_L = H J V_Q = S V_Q \quad (2-7)$$

其中 S 矩阵是机器人底盘运动学逆雅可比矩阵，即只需要知道机器人在全局坐标系下沿坐标轴的速度就可以计算出其底盘电机相应的转速，这是我们进行机器人运动控制的关键技术，只需规划好机器人的全局路径，结合 PID 和速度规划可以得到底盘电机的转速然后进行相应的输出控制便可以让机器人沿着规划好的路径自主运动。 S 矩阵如式（2-8）所示。

$$S = \begin{pmatrix} -\sin(\theta + \delta_1) & \cos(\theta + \delta_1) & L_1 \\ \sin(\theta - \delta_2) & -\cos(\theta - \delta_2) & L_2 \\ \sin(\theta + \delta_3) & -\cos(\theta + \delta_3) & L_3 \\ -\sin(\theta - \delta_4) & \cos(\theta - \delta_4) & L_4 \end{pmatrix} \quad (2-8)$$

2.1.2 运动学模型 MATLAB 仿真

由式（2-7）在 MATLAB 中建立底盘运动学模型的 m 函数，然后分配不同的 $[\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4]$ ，即对不同角度布置的底盘进行分析，从仿真的结果可以选择最优解进而指导本课题机器人实体的制造。仿真实体是四轮全向移动机器人底盘，且底盘电机轮心到机器人中心的半径相等，保证对称结构，避免不对称造成底盘存在内力，影响整个机器人的运动。

本课题机器人采用全向瑞士轮，它在大轮子周围垂直方向上均匀分布若干小轮子，小轮子可以自由转动，大轮子由电机驱动，使机器人在大轮子垂直方向运动时没有滑动摩擦，只有滚动摩擦。如果将三个或三个以上的这种轮子固连在机器人的底盘，每个轮子就可以提供一个与驱动轴重合的扭矩，这些扭矩的合成可以使机器人具备全向移动的能力。本课题采用常规的四轮瑞士轮底盘，每个轮子由 Maxon 直流电机单独驱动。

然后，根据前面分析的模型做了仿真实验，为机器人分配同样的直线路径，此时的机器人在全局坐标 X、Y 轴的速度 $V_Q = [V_x, V_y, V_\omega]$ 是相同的，由式（2-1）可知，机器人局部坐标系速度 $V_R = [V_x, V_y, V_\omega]$ 是正弦周期变化的，随之由式（2-2）可知，分配到底盘电机的转速是周期性变化的。在 MATLAB 中对不同布置形式，即 $[\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4]$ 不相同的底盘建模分析，不同布置形式的仿真结果如图 2-2 至图 2-4 所示，实线为四个电机中最大转速与姿态角的关系曲线。

（1）45 度布置底盘仿真结果如图 2-2，即 $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = 45^\circ$

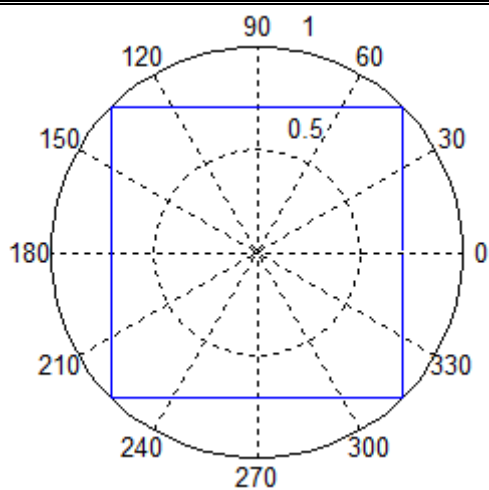


图 2-2 45 度布置底盘电机沿 θ 最大转速分布

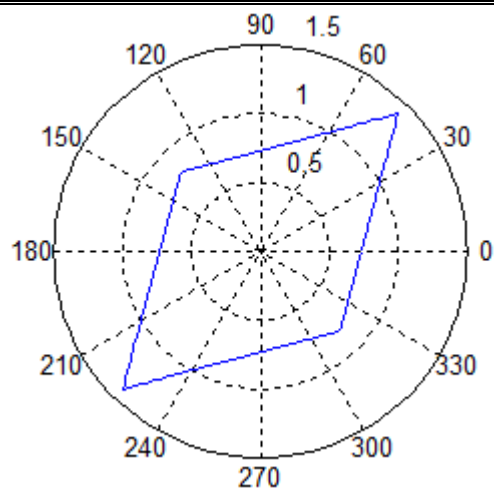
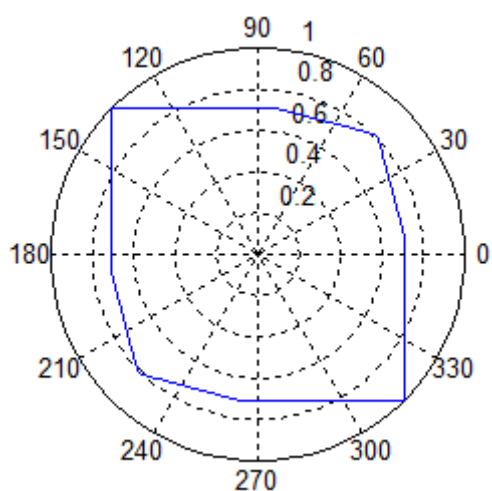


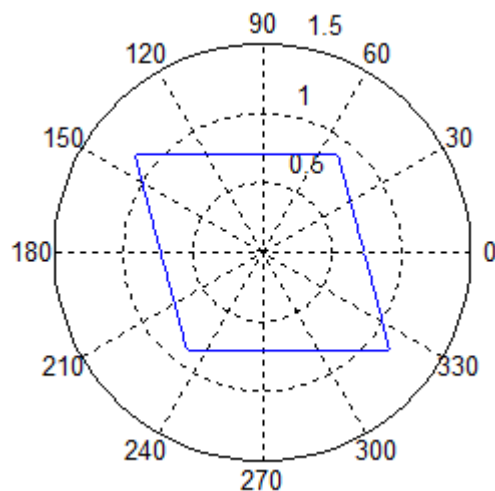
图 2-3 30 度布置底盘电机沿 θ 最大转速分布

(2) 30 度布置底盘仿真结果如图 2-3，即 $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = 30^\circ$

(3) 45 和 60 度混合布置底盘仿真结果如图 2-4，即 $\delta_1 = \delta_4 = 45^\circ, \delta_2 = \delta_3 = 60^\circ$ 或 $\delta_1 = \delta_3 = 45^\circ, \delta_2 = \delta_4 = 60^\circ$



(a) $\delta_2 = \delta_3 = 45^\circ, \delta_1 = \delta_4 = 60^\circ$



(b) $\delta_1 = \delta_3 = 45^\circ, \delta_2 = \delta_4 = 60^\circ$

图 2-4 混合布置四轮底盘电机沿 θ 最大转速分布

通过上述仿真结果可以得出结论，45 度布置即正多边形布置的底盘，其速度性能较好，各个方向电机的最大速度分布较均匀。一般来说底盘的速度性能和力性能是不能够两者兼得的，想要提高一个方向上的最高速度，相对的能够提供的理论

上的最大动力就要减小。另外，比较 45 度和 30 度布置底盘的速度关系曲线，可以发现在 $\theta=45$ 度时，机器人行驶相同的直线电机的最大转速相比其他 θ 角度为最大，也就是电机速度的利用率是最低的；在 $\theta=0$ 度时，电机的最大转速相比其他 θ 角度是最小的，说明这种情况下底盘电机速度的利用率是最高的，而且 30 度布置的要比 45 度布置的利用率高，但是其他方向相比 45 度布置的没有明显的优势，因此排除这种底盘的布置方式。

另外由图 2-4 (a) 可以分析，45 度和 60 度混合布置的底盘速度分布非常不均匀， θ 角稍微发生变化会导致很大的速度变化，而且曲线不是线性变化的，因此控制起来比较困难。所以要根据具体情况权衡选择合适的底盘布置形式，本课题经过研究决定采用 45 度布置的瑞士轮底盘。

为了验证上述瑞士轮组成的四轮全向底盘的仿真结果，进行了如下三个实验，实验所用机器人为哈尔滨工业大学竞技机器人队研制的第五代混合型机器人，该机器人采用前述 45 度底盘布置形式，四个轮子采用瑞士全向轮，每个轮子由 Maxon 直流电机独立驱动。实验方法为控制变量法，每次实验为机器人规划长度为 5m 的直线路径，确保每次实验机器人在全局坐标系下按照路径规划的速度相同。然后分三种类型进行实验，一是路径和车身夹角为 0 度，二是路径与车身夹角为 45 度，三是路径与车身夹角为 30 度。实验中底盘电机实际转速通过 CAN 总线返回到机器人主控制器，然后由主控制器通过无线局域网发射信号，最后在 PC 端通过上位机接收发射的速度信息，上位机的数据以 MATLAB 文件的形式保存，将数据导入 MATLAB 软件进行绘图分析。无线网实时返回数据，速率大约为 1000Kb/s，因此数据是非常庞大的，为了分析起来简单清晰，取数据中有特征点进行绘图，结果如图 2-5 所示。

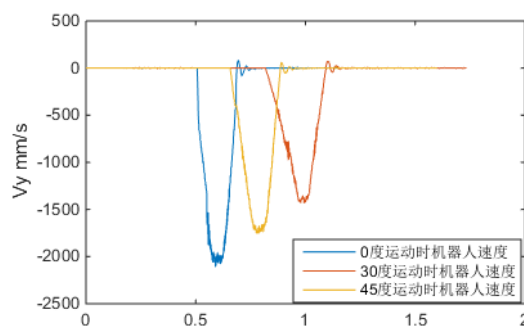


图 2-5 不同夹角时机器人的速度

由图可以得出，45 度布置的底盘，在不同夹角时底盘电机的最大转速是不相同的，相差较大；夹角为 0 度时电机的最大转速最小，45 度时是最大的，30 度时

居中，这和图 2-2 的仿真结果完全相同。

2.2 动力学分析

2.2.1 动力学模型

系统的动力学建模，通用的方法是运用牛顿力学公式，分析系统受力的情况，建立牛顿-欧拉方程求解。但对于复杂的系统，对其进行受力分析是非常困难的，特别是系统内力的求解更加困难，这时这种方法就会很复杂。本课题研究的机器人由四个独立的电机驱动瑞士轮带动，机器人在地面上行驶时，每个轮子所处的地方的摩擦力和凹凸情况不相同，且其中两个轮子是有悬挂的，轮子中心到机器人中心的距离也不尽相同，可能存在轮子之间的内力，对于这样的一个系统采用牛顿力学的方法建模是非常不方便的。但是拉格朗日力学的方法则不必求解系统的内力，适用于复杂系统的动力学建模。

含有耗散函数的拉格朗日方程如式（2-9）所示

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial \phi}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad i=1, 2, 3, n \quad (2-9)$$

式中： q_i 为系统的广义坐标， L 为拉格朗日函数，等于系统总动能减去总势能； Q_i 为系统的广义力， ϕ 为系统的耗散函数。

由于研究中混合型机器人在平面上运动，则系统的势能等于零，忽略全向轮上小辊子的自由旋转，可以得到系统的拉格朗日函数和耗散函数如式（2-10）和式（2-11）

$$L = E_k = \frac{1}{2} m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} J_z \dot{\theta}_z^2 + \frac{1}{2} J_\omega \sum_{i=1}^4 \dot{\theta}_i^2 \quad (2-10)$$

$$\phi = \frac{1}{2} D_\omega \sum_{i=1}^4 \dot{\theta}_i^2 \quad (2-11)$$

式中： m 为底盘的质量； E_k 为底盘的动能； D_ω 为轮子的粘性摩擦系数； J_z 为底盘的转动惯量； J_ω 为轮子的转动惯量。

对于四轮全向底盘，定义广义力为轮子的驱动转矩 T_i ，广义坐标为轮子的角位移 θ_i ，将式（2-10）、（2-11）带入式（2-9）可以得到底盘的拉格朗日动力学方程如式（2-12）

$$M\ddot{\theta} + D_\omega \dot{\theta} = T \quad (2-12)$$

$$M = \begin{bmatrix} G+H+J_{\omega} & -H & G-H & H \\ -H & G+H+J_{\omega} & H & G-H \\ G-H & H & G+H+J_{\omega} & -H \\ H & G-H & -H & G+H+J_{\omega} \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

$$G = \frac{1}{8}mR^2 \quad (2-14)$$

$$H = \frac{1}{64}J_z \frac{R^2}{L^2} \quad (2-15)$$

其中 $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$; $T = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4]^T$; $D_{\omega} = \text{diag}[D_{\omega 1} \ D_{\omega 2} \ D_{\omega 3} \ D_{\omega 4}]$; M 为运动惯量矩阵。

根据公式 (2-12) 得到底盘的动力学状态空间模型为:

$$\ddot{\theta} = -M^{-1}D_{\omega}\dot{\theta} + M^{-1}T \quad (2-16)$$

结合式 (2-4) 的底盘逆运动学方程, 底盘的动力学状态空间模型也可表示为公式 (2-17)

$$J\ddot{X} = -M^{-1}D_{\omega}J\dot{X} + M^{-1}T \quad (2-17)$$

式中 $X = [x \ y \ \theta_z]^T$ 。

2.2.2 动力学模型 MATLAB 仿真

PID 控制是机器人控制领域最简单也是最常用的控制算法, 为方便实验各种 PID 控制算法和快速整定 PID 参数, 应用 MATLAB 的 S 函数和 Simulink 库建立底盘控制的动力学仿真模型, 来验证机器人底盘按照规划的直线和圆弧行驶时的位姿状态, 检测机器人规划路径和实际行驶路径之间的偏差大小和偏差纠正情况。

根据公式 (2-17) 设计系统的 PID 控制模型如式 (2-18) 所示

$$T = MJ\ddot{X} + D_{\omega}J\dot{X} + PID \quad (2-18)$$

据此设计底盘的控制结构框图如图 2-6 所示

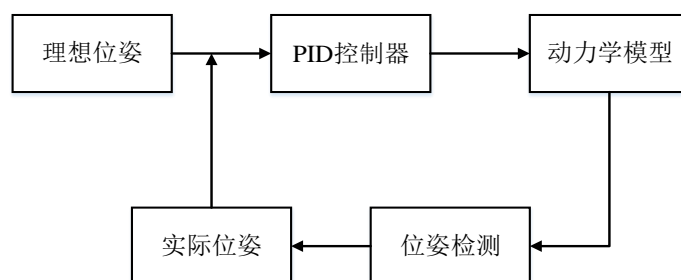


图 2-6 底盘控制结构框图

建立系统控制 Simulink 模型如图 2-7

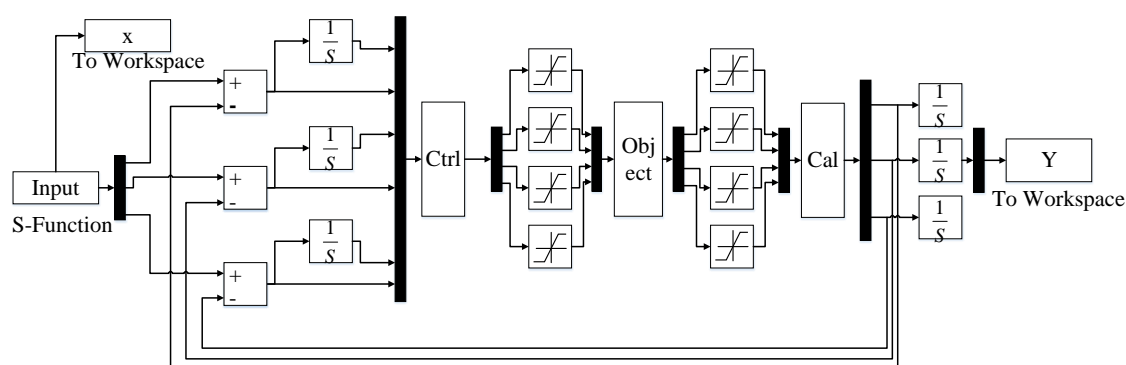


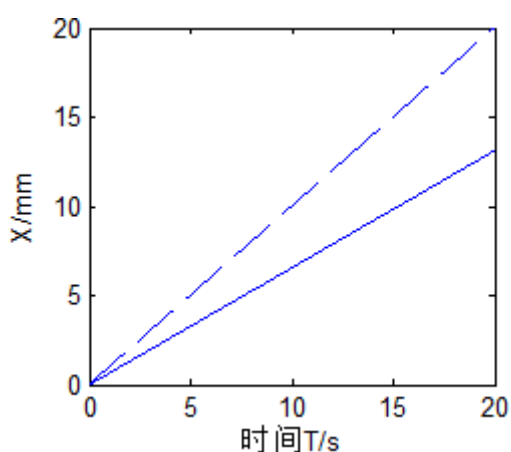
图 2-7 底盘控制 Simulink 仿真模型

其中 Input 模块为模型的接口，输入需要仿真的路径形式，直线或者圆弧；Ctrl 模块为式（2-18）所示的动力学模型，动力学模型的输出为机器人底盘每个电机输出的驱动转矩。Object 模块为对 Ctrl 模块输出的转矩转化为底盘电机的转速，再经由 Cal 模块积分得到机器人的坐标变化，然后由具体的坐标拟合出机器人的实际轨迹返回到理想的轨迹得到偏差，通过 PID 控制实现机器人实际轨迹实时跟踪规划的轨迹。

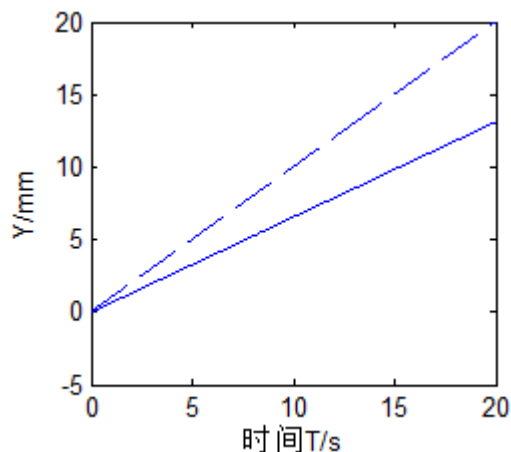
本课题所研究机器人路径规划最常用的路径形式为直线和圆弧路径，直线路径只需要给定起点和终点，主控制器自动规划直线，圆弧路径需要给定起点、终点、圆心以及半径。为此，利用上述建立的动力学模型仿真，进行了两组仿真实验，其中一组仿真圆弧路径，一组仿真直线路径。然后分别检测机器人实际路径的 X，Y 轴坐标跟踪情况。

首先，令输入 $x=t; y=t; \theta=0$ ，仿真跟踪直线 $y=x$ 的情况，结果如图 2-8 所示。图中（a）是 X 坐标的跟踪情况，（b）是 Y 坐标的跟踪情况，（c）是规划直线和实际直线对比关系图，三个图中实线均为实际轨迹的坐标，虚线均为给机器人规

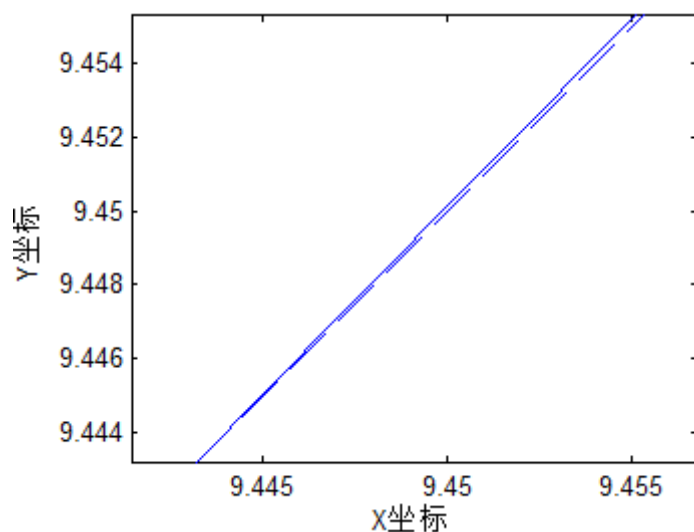
划的轨迹的坐标。由图（a）和（b）可知，机器人的实际轨迹为直线，但是和规划的理想直线之间存在较大的偏差。



（a）仿真直线 X 坐标跟踪



（b）仿真直线 Y 坐标跟踪



（c）直线跟踪情况

图 2-8 仿真直线 X,Y 轴跟踪情况

图 2-8（c）为机器人实际轨迹和理想轨迹的对比局部放大图，图中实线为机器人的实际仿真得到的轨迹，而虚线为给机器人规划的理想轨迹。由图可知，经过 PID 整定之后，此动力学模型可以很好地控制机器人按照给定的直线路径运动。

然后，令 $x = \sin t$; $y = \cos t - 1$; $\theta = 0$ ，仿真模型对于圆弧 $x^2 + (y+1)^2 = 1$ 的跟踪情况，仿真方法和模型和前面所述的直线完全相同。仿真结果如图 2-9 所示。

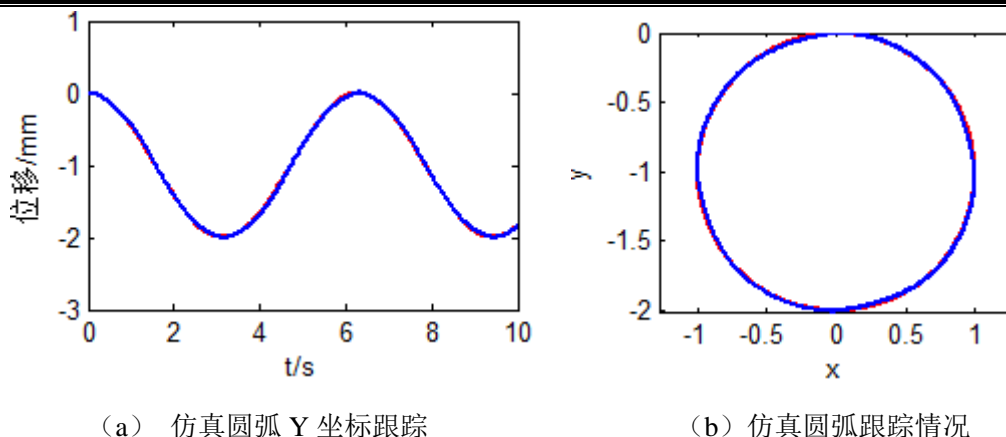

 图 2-9 仿真圆弧 $x^2 + (y+1)^2 = 1$ 跟踪情况

图 2-9 中实线为通过仿真得到的机器人的实际运动轨迹，虚线为给机器人规划的理想轨迹。(a) 图为 Y 坐标跟踪情况对比图，(b) 为机器人圆弧路径跟踪对比图，由图可以看出，运用此动力学模型为机器人规划圆弧可以很好地跟踪理想轨迹，一旦出现偏差，也会经过 PID 整定很快的恢复到理想轨迹的附近。

上述两种路径的 Simulink 仿真结果表明，应用公式 (2-18) 的控制律，本课题中所研究此四轮全向底盘可以比较稳定的跟踪直线和圆弧路径，即使有时会偏出规划的路径，也会很快的纠正到规划路径上。

2.3 本章小结

本章主要对本课题所研究机器人的底盘进行了建模和仿真，主要运用了两种方法，分别为运动学角度的速度合成与分解法，动力学角度的含有耗散函数的拉格朗日方程。首先，通过建立运动学模型和相应的 MATLAB 仿真实验，确定了本课题所要使用的机器人底盘的形式，结果指出使用 45 度布置的正方形底盘具有明显的优势。然后，通过建立机器人动力学模型，及相应的 MATLAB 仿真实验，为本课题所要使用的直线和圆弧两种形式路径的控策略提供理论支持，运用此拉格朗日模型再结合 PID 整定的方法可以非常好的跟踪给机器人规划的直线和圆弧路径。这为之后的机器人运动控制大系统的设计和实现建立了基础。

第 3 章 四轮全向移动机器人运动定位模块研究

上一章分析得出了适合本课题的机器人底盘的最优布置形式，搭建起来了运动控制系统的实体。本章在此基础上分析适合本课题机器人的运动定位方法，并且建立数学模型，作为运动控制系统的核心模块，其精度和重复性是至关重要的，因此设计了随动轮系统误差矫正方法，控制定位模块的偏差在 20mm 以内。

3.1 机器人姿态描述

本课题所研究的混合型竞技机器人为全自动型机器人，要实现对它的运动控制，首先必须实时精确的获得机器人的姿态，计算和确定机器人在全场的姿态过程一般称为机器人的定位。机器人定位一般采用坐标系的方法，因此在场地已知的情况下，需要建立两个坐标系准确的定位机器人并且进行机器人的运动控制，一个是固定的全局坐标系 XOY ，一个是随机器人运动的机器人局部坐标系 xoy ，前者主要用于机器人的定位和导航，后者则用于机器人全局速度到驱动轮速度的分配，要求实现上述两个坐标系的转化。

机器人在全局坐标系下的姿态表示为 $[X, Y, \theta]$ ，即 X 方向坐标， Y 方向坐标，机器人角度与 Y 方向的夹角，逆时针方向为正方向，顺时针方向为负向。此时机器人的全局速度表示为 $V_Q = [V_X, V_Y, V_W]$ ，机器人的局部速度一方面体现在机器人在局部速度 $V_R = [V_X', V_Y', V_W']$ ，另一方面体现为驱动轮电机的速度 $V_L = [V_A, V_B, V_C, V_D]$ 。

由图 4 可以推导出全局坐标系 Q 向局部坐标系 R 的转换矩阵为：

$$Rot(Q \rightarrow R) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3-1)$$

$$\text{即 } V_R = Rot(Q \rightarrow R) \cdot V_Q \quad (3-2)$$

对以上矩阵求逆矩阵即可得出坐标系 R 到坐标系 Q 的转换矩阵：

$$Rot(R \rightarrow Q) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3-3)$$

$$\text{即 } V_Q = Rot(R \rightarrow Q) \cdot V_R \quad (3-4)$$

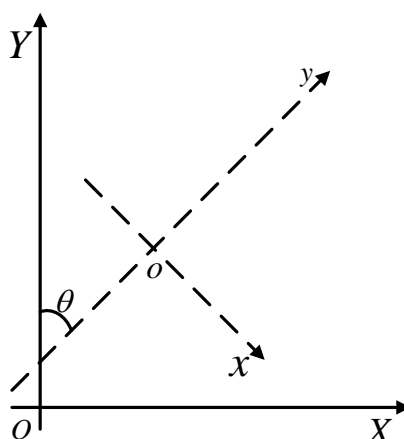


图 3-1 机器人坐标系转换图

3.2 定位模块结构设计

在第一章的定位方法的描述中就确定了本课题采用测程法定位系统，测程系统采用双随动轮组成，机器人角度由陀螺仪测得并且将机器人角速度返回到主控制器中。由双随动轮和数字光纤陀螺组成的机器人运动定位模块总体结构框图如图 3-2 所示，如前所述，确定机器人在坐标系 Q 下的坐标和姿态需要三个变量，即 $[X, Y, \theta]$ 。测程系统可以获得机器人的全局坐标，陀螺仪可以返回机器人当前的姿态角，所以陀螺仪加双随动轮测程系统完全满足机器人的定位需求。

垂直布置的双随动轮没有任何动力，是被动随动的，与其同轴连接的编码器通过采集脉冲记录机器人所走过的路程，由于本课题所研究机器人是全向移动的机器人，需要记录每个方向移动时机器人里程，因此需要互相垂直布置的两个随动轮及其相应的编码器。由此得到的里程再经过主控制器的解算可以得到机器人在全局坐标系下的 X 、 Y 坐标。另外，需要知道机器人在全局坐标系下的姿态角，进行机器人的旋转控制和角度控制，本课题使用数字光纤陀螺仪测量机器人的旋转角速度，在经过控制器的滤波和积分便可以得到机器人的全局姿态角。因此，由双随动轮和陀螺仪组成的运动定位模块可以满足课题中机器人的定位需求。

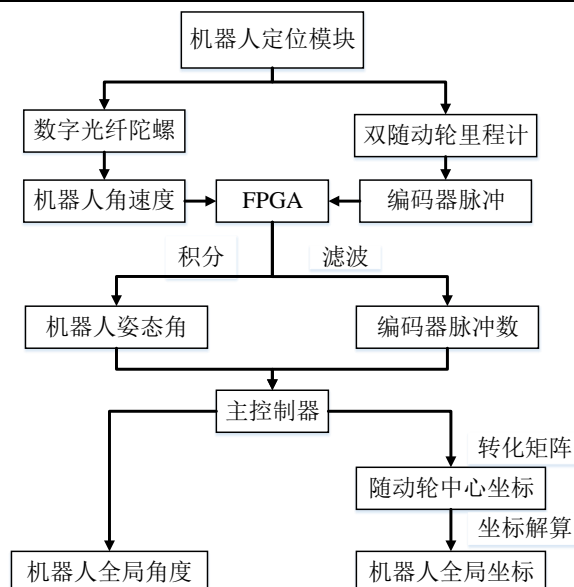


图 3-2 机器人运动定位模块结构

3.3 随动轮特征角

随动轮的特征角是指两个随动轮安装在机器人机体上后，以顺时针为正方向（可以自己定义正方向），随动轮的线切速度与机器人局部坐标系坐标轴的夹角，定义夹角逆时针为正方向，顺时针为负方向。如图 3-3 所示为随动轮系统在机器人局部坐标系中的示意图，其中 α_A, α_B 分别表示随动轮 A、B 的特征角，由图可见 α_A 为正， α_B 为负，且都控制在 90 度以内。

随动轮的特征角是机器人坐标解算非常重要的一个变量，由于机械安装系统误差的存在，两个随动轮不可能 90 度安装，此系统误差直接决定着运动定位模块的精度，必须设计一种方法消除这个系统误差。也就是通过标定的方法测得实际的机械安装角度，然后补偿该项系统误差。

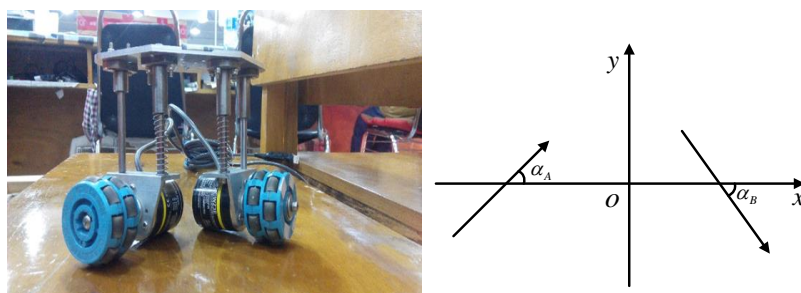


图 3-3 随动轮实物图及其特征角

3.4 转换矩阵

测程系统只能测出在一段时间中随动轮 A, B 运动的相对距离，而我们所需要的是机器人在 Q 坐标系下的坐标，因此必须通过转化矩阵将随动轮测得的距离转化为机器人在该段测距时间内的坐标增量。以 $\Delta A, \Delta B$ 表示随动轮 A, B 在一小段时间内的距离增量， $\Delta X', \Delta Y'$ 表示机器人在该段时间内的随动轮中心（定义为两个轮子轮毂的交点）的坐标增量， θ 表示陀螺仪返回的机器人的当前姿态角。如图 3-4 所示。

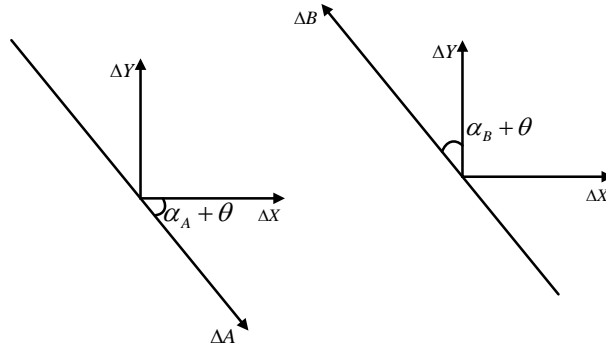


图 3-4 测程系统计算随动轮中心坐标增量示意图

则由图有：

$$\begin{cases} \Delta A = \Delta X' \cdot \cos(\alpha_A + q) + \Delta Y' \cdot \sin(\alpha_A + q) \\ \Delta B = \Delta X' \cdot \cos(\alpha_B + q) + \Delta Y' \cdot \sin(\alpha_B + q) \end{cases} \quad (3-5)$$

由式（13）可以解算出随动轮中心的坐标增量：

$$\begin{cases} \Delta X' = \frac{\Delta A \cdot \sin(\alpha_B + q) - \Delta B \cdot \sin(\alpha_A + q)}{\sin(\alpha_B - \alpha_A)} \\ \Delta Y' = \frac{-\Delta A \cdot \cos(\alpha_B + q) + \Delta B \cdot \cos(\alpha_A + q)}{\sin(\alpha_B - \alpha_A)} \end{cases} \quad (3-6)$$

由式（13）可得随动轮中心坐标增量到随动轮距离增量的转换矩阵为：

$$T = \begin{pmatrix} \cos(\alpha_A + q) & \sin(\alpha_A + q) \\ \cos(\alpha_B + q) & \sin(\alpha_B + q) \end{pmatrix} \quad (3-7)$$

由式（14）可得随动轮距离增量到随动轮中心坐标增量的转换矩阵为：

$$T^{-1} = \frac{1}{K} \begin{pmatrix} \sin(\alpha_B + q) & -\sin(\alpha_A + q) \\ -\cos(\alpha_B + q) & \cos(\alpha_A + q) \end{pmatrix} \quad (3-8)$$

其中：

$$K = \sin(\alpha_B - \alpha_A) \quad (3-9)$$

3.5 机器人坐标解算

上一节得到机器人随动轮里程到随动轮坐标增量的转换矩阵之后，可以解算出机器人中心的坐标，随动轮中心在实际安装时也通常不和机器人的中心重合，用一个向量 \overrightarrow{RW} 表示两者的不重合性，此向量用来补偿两者的不重合，向量与机器人局部坐标系的夹角定义为向量逆时针转到 y 轴的角度。机器人坐标解算图如图 3-5 所示，图中 R 表示机器人中心， W 表示随动轮中心， α 角为向量 \overrightarrow{RW} 与全局坐标系 Y 轴的夹角， L 表示向量 \overrightarrow{RW} 的模， R' 表示经过微小时间段之后的机器人中心， W' 表示经过微小时间段之后的随动轮中心， $\Delta X(X_2 - X_1), \Delta Y(Y_2 - Y_1)$ 表示机器人全局坐标的增量， $\Delta X'(X'_2 - X'_1), \Delta Y'(Y'_2 - Y'_1)$ 为随动轮中心坐标的增量， θ 为机器人的姿态角。可以根据前面求解的随动轮中心坐标增量求解机器人中心坐标增量，通过迭加法便可以获得机器人在全局坐标系下的坐标。

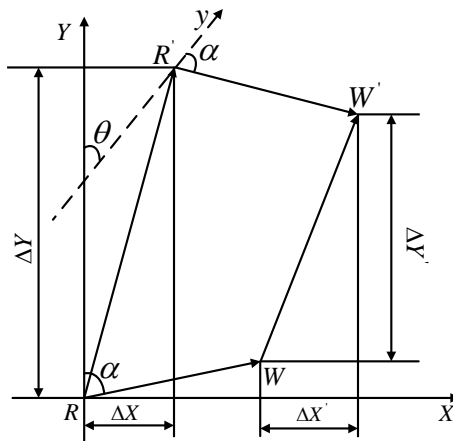


图 3-5 机器人坐标解算图

首先根据向量关系有

$$\overrightarrow{RR'} = \overrightarrow{RW} + \overrightarrow{WW'} + \overrightarrow{W'R'} = \overrightarrow{RW} + \overrightarrow{WW'} - \overrightarrow{R'W'} \quad (3-10)$$

则由图：

$$\begin{cases} \Delta X = L \cdot \sin \alpha - (L \cdot \sin(\theta + \alpha) - \Delta X') = \Delta X' - (-\sin \alpha + \sin(\theta + \alpha)) \cdot L \\ \Delta Y = L \cdot \cos \alpha + (\Delta Y' - L \cdot \cos(\theta + \alpha)) = \Delta Y' + (\cos \alpha - \cos(\theta + \alpha)) \cdot L \end{cases} \quad (3-11)$$

然后通过累加的方法得到了机器人的全局坐标：

$$\begin{cases} X_2 = X_1 + \Delta X \\ Y_2 = Y_1 + \Delta Y \end{cases} \quad (3-12)$$

通过上面的计算和分析，就可以得到由双随动轮和数字光纤陀螺组成的运动定位模块测得的机器人的全局坐标，也就是定位到了机器人在环境中的姿态和位置，然后我们可以根据定位信息实现对机器人的其他控制，比如路径运动、旋转运动及上层机构的动作。

但是前面所述的相对定位方法其精度是有限的，分析前面的测程系统和测角系统，导致误差存在的主要原因是两个随动轮安装角度不是严格的 90 度，随动轮编码器正转和反转脉冲记录的里程不是相等的及陀螺仪在不同的环境条件下返回的角度值是变化的。针对这三个问题结合课题的需求，设计了两种消除或减少误差的方法。一是后面将要具体说明的系统误差的矫正方法，陀螺仪也采用类似的标定方法标定不同的环境条件下实际角度与理想角度的补偿系数。二是结合局部定位实现某些对机器人姿态要求苛刻的情况，本课题中混合型机器人要求其中一段直线运动的精确度非常高，采取了运动定位模块结合视觉巡线的方法，精准的定位控制机器人在白线的正上方行驶。视觉巡线由摄像头返回机器人相对白线的偏差，然后偏差经过树莓派视觉处理器处理，以串口的形式将数据发送到主控制器，主控制器据此偏差经过 PID 整定纠偏使机器人行驶在白线的正上方。

3.6 随动轮系统误差矫正方法

正如前面所说的双随动轮和陀螺仪组成的运动定位模块，双随动轮系统存在非常大的系统误差，因此设计了随动轮系统误差矫正方法。由于里程计随动轮为被动轮且有悬挂保证其垂直于地面上下移动，所以不会因随动轮打滑造成定位误差。分析运动定位模块的误差，主要是由里程计的系统误差造成的。为减小全局定位误差，应该尽可能准确的矫正其系统误差，满足运动控制系统的要求。

随动轮系统的标定原理图可以用图 3-6 表示，在标定时首先保证底盘沿一个方向平移一段距离，然后底盘转过 β 角度，底盘再平移一段距离，标定原理如式（3-13）：

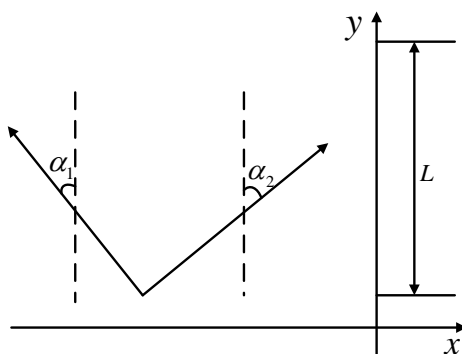


图 17 随动轮标定示意图

$$\begin{cases} L \cos(\alpha_1) = k_1 \cdot n_{A1} \\ L \cos(\alpha_1 + \beta) = k_1 \cdot n_{A2} \\ L \cos(\alpha_2) = k_2 \cdot n_{B1} \\ L \cos(\alpha_2 + \beta) = k_2 \cdot n_{B2} \end{cases} \quad (3-13)$$

式中： L 为走过的距离； K_1 、 K_2 、 α_1 、 α_2 为要标定的系数，其中 K_1 、 K_2 为两个随动轮的脉冲数到距离的转化系数， α_1 、 α_2 为两个随动轮的实际安装角度。对于这种随动轮系统参数标定的关键是保证底盘在两次平移中严格沿直线移动，且随动轮不会出现打滑的现象，为此在设计标定方法中必须保证这一点。

保证底盘沿直线平移的方法有两种：一种是机械的方法，用机械定位卡紧的方法保证点走直线；另一种是使用传感器，利用 PID 控制保证底盘沿直线平移。其中机械锁紧的方法是最方便实现且效果最明显的，而使用传感器则由于其自身误差的存在又引入了其他变量，基于以上两点，本课题中采用机械式卡紧方法。

将设计的随动轮系统误差矫正方法运用在不同的车体及相应的随动轮系统中，采用机械卡紧的方式标定，得出如下结论：

（1）随动轮安装方式的影响非常大，要求机器人在行驶的过程中，随动轮安装轴不出现明显的晃动，且随动轮小轮子不出现卡顿的现象，因此必须保证两个随动轮刚性安装；

（2）标定的过程需要根据机器人平时的运动速度决定标定的速度，机器人运动速度的不同将导致随动轮编码器每分钟返回的脉冲数不相同，这要求编码器具有较高的响应频率且主控制器具有较高的处理速度。运动速度过快，必然导致较大的误差，因此在标定时要为机器人提供较好的标定条件，比如平整的地面和适中的标定速度；

（3）本课题所采用的方法标定结果满足 4m 的长度内主方向偏差控制在了 5mm 内，副方向偏差控制在了 20mm 内。这完全满足机器人的定位需

3.7 本章小结

本章主要介绍了机器人运动控制系统中的运动定位模块，分析了机器人全场定位方式得选取，发现采用全局坐标系和局部坐标系及随动轮辅助坐标系三个坐标系结合的方法比较简单，结合矩阵计算便可以实现，程序也比较简单明了。最后分析了该模块随动轮系统误差，并且设计了相应的矫正方法。至此，经过前两章的分析机器人运动控制系统基本搭建起来了，即机器人底盘采用 45 度布置正方形底盘，运动定位模块也设计完成进行了相应的实验，精度也完全满足机器人定位需求，后面章节主要设计机器人运动控制系统的硬件和程序。

第 4 章 运动控制系统硬件及程序设计和实现

本项目研究的机器人的运动控制系统包括两个较大的模块，即运动定位模块和运动控制模块，前者用来确定机器人在全局坐标系下的位姿，后者用来控制机器人按照规划的路径运动。每个模块有其独立的硬件，结合在一起则形成了机器人运动控制系统的硬件系统。

4.1 硬件设计

前面提到的双随动轮定位模块也就是测程法，它是目前使用最广泛的移动机器人定位方法。它不需要外部传感器信息来实现对机器人位置和方向的估计，能够提供很高的短期定位精度。而且实现起来方便简单，定位原理简单易懂，所需硬件较少，它的缺点在于无界的误差累积，测程法的误差可以分为系统误差和非系统误差。测程法的系统误差主要是由机器人设计的不合理性和测程系统制造精度不够等因素引起的，而非系统误差则主要是机器人所处的外界环境导致的。

测程法工作原理是：在间隔很短的时间内对编码器输出的 A、B 相脉冲进行采样，主控制器的预处理器 FPGA 首先对脉冲进行采样和滤波，将脉冲数转换为计数值输出给主控制器 Arm 芯片，在主控制器中将此计数值乘以补偿系数转化成该时间段内机器人的位移增量，然后累加到上一次机器人的坐标上，便可以得到机器人的当前坐标。由于本课题研究的机器人是全方位移动的，因此至少需要安装两个随动轮及相应的编码器，两随动轮一般采用 90 度安装，其交点尽可能与机器人中心重合，由此可以组成双随动轮测程系统，实物安装图及模型设计图如图 3-3 所示。

综合起来，本课题所研究全方位移动机器人运动定位模块硬件设计主要是随动轮编码器及测角系统数字光纤陀螺仪的选型及其综合系统的设计。

4.1.1 数字光纤陀螺仪

要实现机器人的自主运动控制，必须实时的反馈机器人在全局坐标系中的姿态角，这个过程是通过数字光纤陀螺仪实现的，数字光纤陀螺仪可以测得机器人的旋转角速度，角速度信号通过串口发送到主控制器的预处理器 FPGA，预处理器对该信号滤波、积分得到机器人的角度信息，机器人主控制器根据获得的角度信息可

以调整自己的姿态，实现各种各样的旋转运动，又可以实现姿态角的闭环控制。本项目中所使用光纤陀螺型号为 VG949PD，如图 18 所示，其主要的技术数据如表 1 所示。数字光纤陀螺仪由于价格比较高且要求输入速度范围大，精度高，因此使用哈工大竞技机器人队已有的俄罗斯 Fizoptika 公司生产的 VG949PD 数字光纤陀螺。该型号陀螺仪实物图及其具体技术参数如图（4-1）和表（4-1）所示。其输入角速度最大为 200r/min，本课题机器人的最大旋转速度为 123r/min，且其偏差稳定性为 2°/h，即陀螺仪在常温静止的情况下每小时返回的角度值大概为 2 度，这两项指标满足本课题机器人运动控制系统的需求。



图 4-1 数字光纤陀螺

表 4-1 VG949PD 数字光纤陀螺技术参数

性能指标	具体参数
电压	+5V±5%
启动时间	<0.5 s
功耗	<1.5W
偏差稳定性(deg/hr)	2
预热	<0.01°/s
偏差	<0.4°/s
比例因子变化	<0.4(mV/°/s)
比例因子	6±15%(mV/°/s)
比例因子线性度	0.1%（满量程）
比例因子稳定性	0.03%
输入范围	±200°/s

4.1.2 随动轮编码器

前面提到双随动轮测程系统是通过与其同轴连接的编码器测量里程实现的，编码器的精度和响应速度决定着该测程系统的精度和准确度，进而影响运动定位模块的精度，从而决定着机器人运动控制系统的控制精度和实时性。

常见的编码器有光电式和电磁式两种，按照机械结构的不同，可以分为有轴型和轴套型，按照码盘的刻孔方式，可以分为增量型和绝对型，增量型每转过一个角度就输出一个脉冲信号，绝对型是在码盘的一圈对应的位置会输出一个唯一的与该角度对应的二进制数，按照输出方式的不同可以分为电压输出型，集电极开路输出型和推拉互补输出型。电压输出型是在集电极开路输出的基础上加上拉电阻，适合远距离传输，课题中机器人所需要的输出线的长度大约为 1m，实际测试发现，在 3m 时，电压输出型的输出信号的上升沿和下降沿受线的长度的影响不大。因此选择电压输出型光电式编码器。

编码器的最高响应频率是我们选型最看重的参数，码盘的蚀刻线数越多，响应频率也就越高，该编码器所能承受的最高转速也就越高。本课题机器人底盘所用 Maxon 直流电机的最大转速为 $V_A = 500 \text{ r/min}$ ，四个轮子的直径为 $D = 150 \text{ mm}$ ，双随动轮的直径为 $d = 50 \text{ mm}$ 。

根据第二章机器人底盘运动学模型，机器人车体的最大移动速度为

$$v = V_A \cdot \frac{D}{2} \cdot \sqrt{2} \times \frac{\pi}{30} = 500 \times \frac{150}{2} \times \sqrt{2} \times \frac{\pi}{30} \div 1000 = 5.554 \text{ m/s} \quad (4-1)$$

随动轮和机器人车体连接，因此随动轮的最大线速度为式 (4-1) 的计算结果，据此逆计算出随动轮的最大转速为

$$V_s = v / d \times 2 \times \frac{30}{\pi} \times 1000 = 5.554 \div 50 \times 2 \times \frac{30}{\pi} \times 1000 = 2121 \text{ r/min} \quad (4-2)$$

由式 (4-2) 可知，机器人的随动轮的最大转速为 2121/min 左右，这就要求与机器人随动轮同轴连接的编码器的最高转速不低于 2500r/min。另外，对机器人的定位精度要求比较高，要求编码器的蚀刻线数不能太低，一般选用 1000 线左右的编码器，本课题随动轮输出孔径为 6mm，因此要求编码器的轴径不能小于 6mm，综合以上三点，选用日本欧姆龙公司的 E6B2-CWZ3E 1000 线编码器，该编码器的蚀刻线数为 1000 线，最高转速为 6000r/min，轴径为 6mm，满足以上三点需求，其具体的技术参数如表 4-2 所示。

表 4-2 E6B2-CWZ3E 增量型旋转编码器技术参数

性能指标	具体参数
电源电压	DC5~12V
输出状态	电压输出
最高响应频率	100KHz
输出极位差	A 相、B 相位差 90°
启动扭矩	<0.98mN·m
最高转速	6000r/min

4.1.3 主控制系统

本课题中机器人主控制系统任务量大，包含大量的浮点数和三角函数运算，且需要处理信息的外设非常多，有键盘，数字光纤陀螺，液晶，编码器，手柄及各种传感器。采集外部设备的信息一般是在 FPGA 中进行的，FPGA 将处理完的有序简单的信息通过总线通讯给 Arm 控制器，然后控制机器人完成各种规划好的动作。因此可以知道，本课题机器人的主控制系统由 Arm 控制器和预处理器 FPGA 组成。目前浮点运算能力较高的芯片主要是 Arm，本人也在之前的项目中学习和使用过 ST 公司生产的系列芯片，并且可以熟练的进行各种实验，因此 Arm 芯片选择 ST 公司生产的 STM32F407ZET6，作为控制器。目前市场上常见的 FPGA 芯片是 ALTERA 公司生产的 Cyclone 芯片，且信息的处理量也不是特别大，因此选择 CycloneIII 代 FPGA 芯片 EP3C25Q240。

主控制器 STM32F407ZET6 与预处理器 EP3C25Q240 之间的通讯是通过 16 位数据总线和 10 位地址总线实现的，STM32F407ZET6 通过读写芯片内部的自身外设寄存器和扩展总线上预处理器 EP3C25Q240 中寄存器实现与外设和的数据之间的交互，这就大大提高了主控制系统连接外部设备及各种传感器模块的能力，同时各个传感器传回的数据又可以用来控制其他的模块，增强了系统内部的互联互通能力，为运动控制系统的融合设计提供了基础。同时，主控系统以其强大的数据处理能力完成机器人的信息采集与决策执行。主控系统采集外部信息之后给执行层发送指令，控制伺服电机以及其他驱动元件按照规划动作。根据本课题的需求，设计的机器人主控制器和外部传感器的接口框图如图 4-2 所示，为了提高系统的实时

性，在系统中嵌入了实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 。

由图可知，主控系统的大部分外设是接在了预处理器 FPGA 上，其具有强大的数据预处理能力。还有一部分外设接在了 Arm 芯片上，这些外设的特点是数据不需要进行复杂的预处理算法，只需要进行简单的数据或指令接收和发送即可，其接口形式有 SPI、串口和 CAN 总线，其中 SPI 和串口负责和传感器的通讯，CAN 总线负责电机驱动器的控制和返回数据的读取。

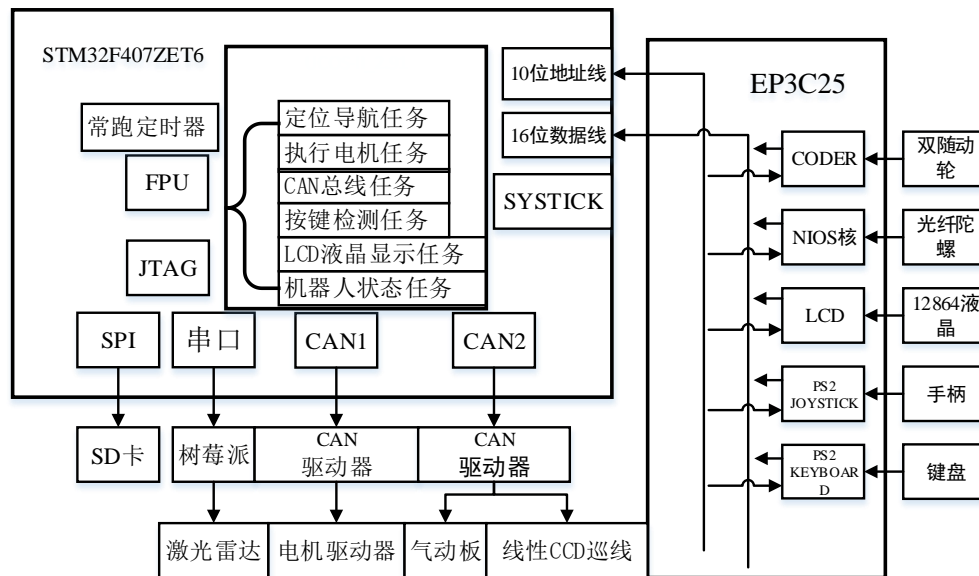


图 4-2 机器人主控系统外设及接口

4.1.4 供电系统

本课题所研究的机器人采用 24V 锂电池供电，其各个模块的电压需求如表 4-3 所示，因此需要设计供电系统，其原则是体积小型化，能量最大利用，成本最小。

表 4-3 机器人各模块电压需求

模块	电压需求
主控制系统	5V
电机驱动器	24V
气动系统	24V
激光雷达	12V
视觉处理器	12V

24V 电源输出设计如图 4-3，采用了 4 个 P 型 MOSFET IRF4905 进行高电压 24V 的控制，回路串联 LED 指示灯，锂电池输入端加入 4 个 15A 保险丝并联保护，最高可以承受 60A 的电流。

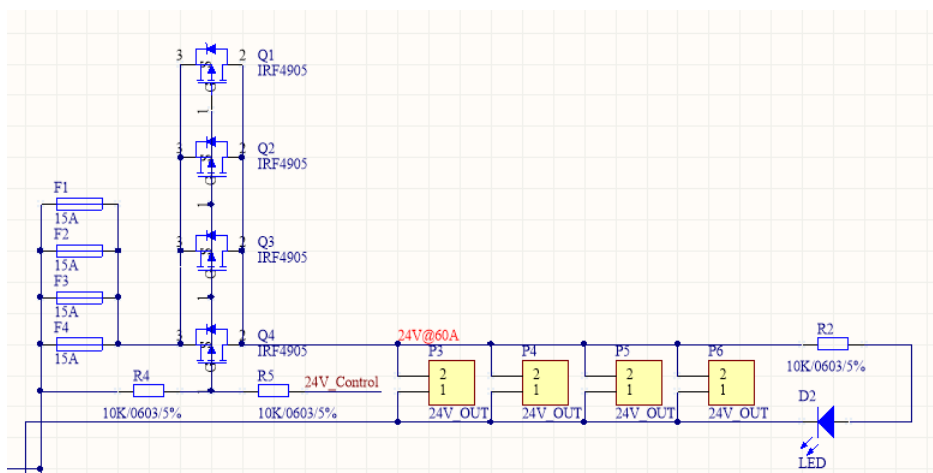


图 4-3 24V 电源输出原理图

5V 电源模块输出设计如图 4-4 所示，采用隔离稳压 DC-DC 模块 VRB2405LD_30W，输入电压范围为 18-36V，输出电压 5V，额定电流为 6A。在输出回路增加 LED 指示灯，并且有滤波电容保证去除干扰，同时有 5A 的保险丝保护。

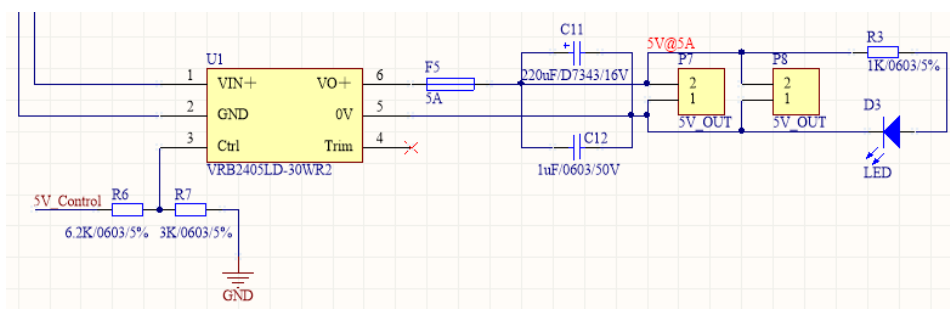


图 4-4 5V 电源输出原理图

对于其他采用 12V 供电的模块，课题中直接用 12V 的锂电池供电，其对稳压要求不是很高。

4.1.5 电机驱动器

本课题机器人底盘四个轮子采用 Maxon 直流电机独立驱动，每个直流电机需

要独立的直流电机驱动器，因此本课题需要为机器人设计制作电机驱动器，直流电机的驱动一般采用 H 桥的结构，每个桥臂由两个驱动芯片组成，驱动芯片按照一定的顺序导通和关断，且导通的占空比可调，进而可以控制电机正转和反转及加速和减速。由于电机驱动器的从设计到投入使用需要大量的时间，本次研究采用哈工大竞技机器人队已经非常成熟的驱动器，但是进行了一些优化，主要为：H 桥驱动芯片更新换代，电机绕组电流采样电路优化，CAN 通讯防干扰设计。

（1）H 桥驱动模式及芯片的选取

直流电动机的驱动一般采用 H 型逆变桥结构，如图 4-5，H 桥的驱动模式有单极性 PWM 和双极性 PWM 两种模式。双极性 PWM 指的是一个控制周期内，对角的 MOSFET 的 PWM 驱动波形一样，即图中 V1 和 V4 同时导通同时关断，V2 和 V3 同时导通同时关断，同一桥臂的 V1 和 V2，V3 和 V4 互补导通和关断，为了防止同一个桥臂上下两个驱动芯片同时导通，需要为上下两个芯片的控制信号加入死区，在 V1 或 V3 导通时，V2 或 V4 必须处于关断的状态，互补死区信号如图 4-6 所示。双极性驱动电路可以达到在一个控制周期内电流正反向流过电机绕组，有利于消除机械摩擦，起到润滑的作用，同时使电机的低速运行性能良好，增加了电机的调速范围。但是在低速时电机绕组发热严重，功率损耗增大。

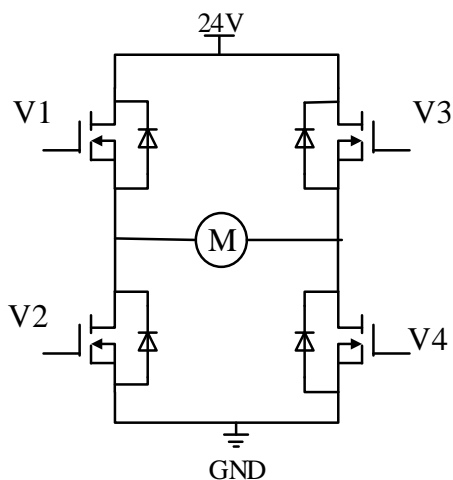


图 4-5 H 型逆变桥结构

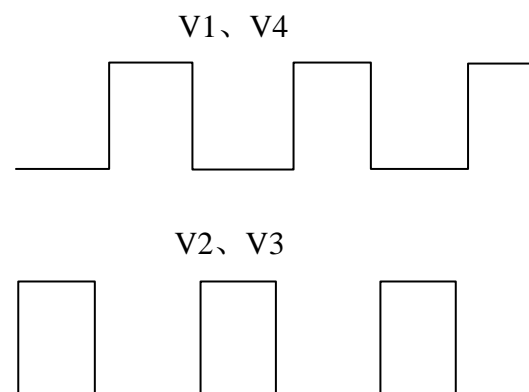


图 4-6 双极性模式互补带死区驱动信号

单极性 PWM 是指在一个控制周期内同一端的 PWM 波形反向，另一端的上桥臂一直关闭，下桥臂一直导通的控制模式。本课题中机器人的实际行驶时电机转速一般在 400r/min 左右，很少低速运行，因此采用单极性 PWM 模式。

采用 4 个独立的 N 沟道增强型 MOSFET 作为驱动芯片，考虑到课题中采用 24V 锂电池供电，功率和电压有限，因此要求驱动芯片的功耗非常低。MOSFET 的

漏源导通电阻造成的热损耗是芯片功率损耗的主要部分，选择小的漏源导通电阻可以降低该项损耗。选择 IRF1010 N 沟道场效应管，该芯片静态漏源导通电阻为 14 毫欧，测试 100 摄氏度时持续漏极电流为 53A。

（2）电机绕组电流采样电路设计

本课题所研究的移动机器人，底盘驱动电机通常需要正反两个方向以及加减速运行，因此电机绕组电流也必定是正反两个方向，采样电阻两端电压也是可正可负。在不增加负电源的情况下，最终选择单电源供电双向运放 AD8210，该芯片由亚德诺半导体公司开发，其供电电压为 5V，固定增益 $G=20$ ，当输入电压 0V 时，输出电压为 $V_{out0}=2.5V$ （不考虑零漂）。当电压为正时输出电压在 2.5V 基础上增加；输入电压方向改变时，其输出方向递减。

由于 ARM 芯片采用 3.3V 供电，为了保证主控制器可以正常读取模拟输入电压，需要对 AD8210 的输出电压进行分压后再给到主控制器模拟输入端。为了使硬件电路达到更好的滤波效果，采样电阻两端电压同样经过阻容滤波电路再输入 AD8210 输入端。采样电路原理图如图 4-7 所示。

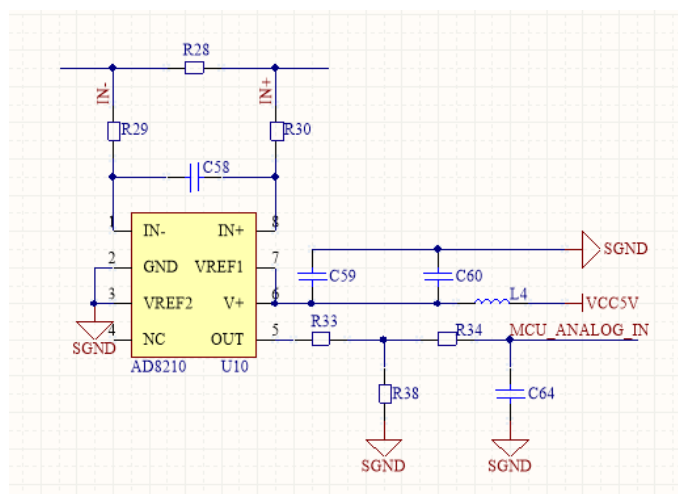


图 4-7 电机绕组电流采样电路

其中 R28 为电机绕组电流采样电阻，本课题机器人底盘 Maxon 电机最大要求高达 20A 的电流控制。按照 25% 的电流裕量标准进行设计，电路最大检测电流 I_{max} 应为 $\pm 25A$ 。R28 的大小可以通过下式进行计算。

$$R = \frac{V_{out0}}{I_{max} G} = \frac{2.5}{25 \times 20} \Omega = 0.005 \Omega \quad (4-3)$$

对于输入端滤波电容电阻值的选取，通过分析从采样电阻两端电压到采样芯片输入端的传递函数给出，传递函数可以表示为式（4-4）：

$$F_1 = \frac{1}{1 + 2sCR} \quad (4-4)$$

从上述传递函数求解输入端的截止频率表达式：

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \cdot 2RC} \quad (4-5)$$

电流中噪声主要为 PWM 所产生的 40KHz 电流波动，因此需要 $f_1 < 40 \text{ KHz}$ ，为了保证对称性，选取 $R29 = R30 = 5.1 \Omega$ ， $C58$ 为 $1\mu\text{F}$ ，此时对应 $f_1 = 15.9 \text{ KHz}$ ，满足输入端截止频率要求。

如前所知， $R33$ 与 $R38$ 公共点电压应该保证小于 3.3V ，于是有如下关系式成立：

$$\frac{R38}{R38 + R33} \leq \frac{3.3}{5.0} \quad (4-6)$$

选取 $R33 = 2\text{K}$ ， $R38 = 4.3\text{K}$ ，此时，当输出端在 $0-5\text{V}$ 变化时，输入到 ARM 芯片的电压范围是 $0.79-4.21\text{V}$ ，符合主控制器模拟端输入电压范围，不会损坏主控制器。对输出端的滤波同样先求解传递函数，如下所示：

$$F = \frac{1}{1 + sCR} \quad (4-7)$$

其截至频率为：

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \cdot RC} \quad (4-8)$$

为了达到更好的效果，将输出端截至频率设计的要小于输入端截至频率，但为了不影响电流采样的准确性，不能将其设置的远低于电流采样控制频率 2KHz ，为了达到滤波的效果，设置

$$f_2 = \frac{f_1}{10} = 1.59 \text{ KHz} \quad (4-9)$$

此时对应的选取电阻 $R34$ 为 $1\text{K}\Omega$ ，电容 $C64$ 为 100nF 满足上述频率要求。

同时，为了保证采样芯片电源端的稳定性，对其供电端采用磁珠和去耦电容两种保护措施。

（3）CAN 通讯防干扰设计

关于 CAN 总线通信防干扰的设计，CAN 总线不稳定一方面是供电电源的不稳定，另一方面是 PCB 本身电磁兼容性问题，当电机出现过大冲击电流时易引起

CAN 总线数据丢失的问题，通过下面几个方面进行改进。

- I. 对电源电路部分进行优化，用更高精度的电源芯片取代原有开关电源芯片。
- II. 数字地与模拟地采用单点并联方式相连接；
- III. PCB 由原来的两层板变为四层板，由双面布件变为单面布件。
- IV. 保证中间地平面信号完整性，同时 CAN 总线从背面走线与功率电路部分依靠该层隔开；

4.2 程序设计

4.2.1 控制策略

结合第二章所研究的机器人底盘动力学模型，采用全局路径规划、梯形速度规划、PID 控制及视觉巡线的方法完成路径运动控制，即根据路径的起点和终点及其他要求规划出直线轨迹的参数，获得相应的参数输入主控制器驱动机器人按需求的轨迹运动，如图 4-8 所示。路径主方向采取梯形速度规划，辅方向采用 PID 控制器纠偏。

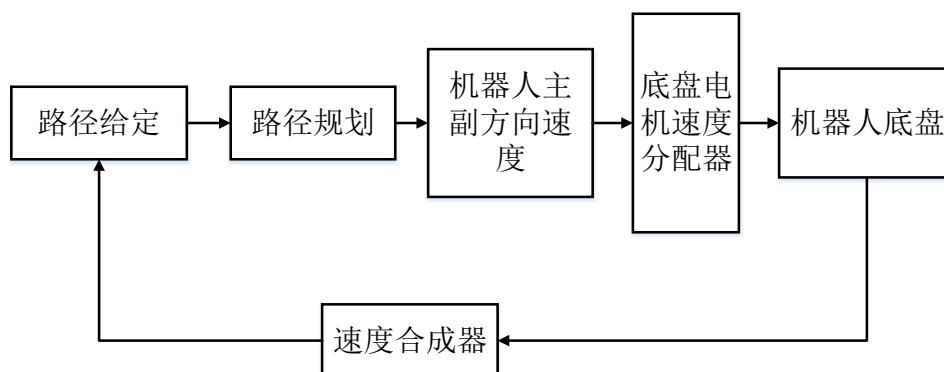


图 4-8 路径运动控制策略

直线运动需要保持机器人中心沿着规划的直线移动，可以知道，只要控制机器人不偏离直线即可，而其沿着直线的运动速度是可以由梯形速度规划来控制的，如图 4-9 所示。图中 S 代表规划路径的起点，E 代表规划路径的终点，某时刻机器人偏离规划的路径，处于点 P，在直线上的投影为点 D。

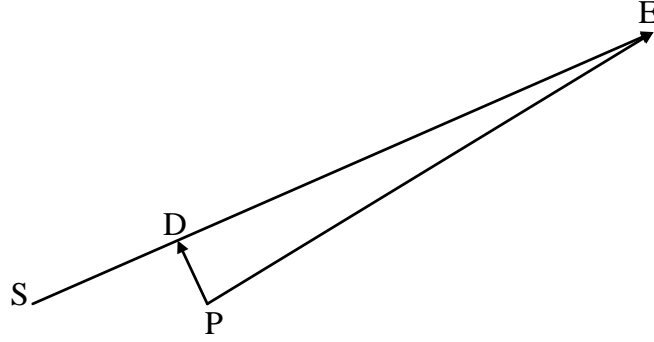


图 4-9 直线运动向量控制

则此时机器人在直线路径两个方向上的偏差分别为

$$e_0 = \overrightarrow{PE} \quad (4-10)$$

$$e_1 = \overrightarrow{PD} \quad (4-11)$$

由于辅方向采用了增量型 PID 算法，则机器人偏离路径之后在辅方向上获得速度为

$$v_1 = v_{1pre} + P \cdot (e_{1cur} - e_{1pre}) + I \cdot e_{1cur} + D \cdot (e_{1cur} - 2 \times e_{1pre} + e_{1prepre}) \quad (4-12)$$

上式中 v_{1pre} 为上一个时刻机器人的速度， e_{1cur} 为当前的辅方向偏差， e_{1pre} 为上一个时刻辅方向偏差， $e_{1prepre}$ 为上上时刻的辅方向偏差。 P 为比例系数， I 为积分系数， D 为微分系数。根据经验和比赛场地的摩擦力选取合适的参数，本课题选取 $P=15$ ， $I=0.01$ ， $D=0$ 。

主方向上采用梯形速度规划算法控制机器人在此路径上的速度，设定机器人的起始速度为 V_S ，终止速度为 V_E ，最大速度为 V_{max} ，加加速度为 a_{up} ，减加速度为 a_{down} ，如果设定的最大速度在给定的路径长度 L 内无法实现，则需要根据式(4-13)重新规划最大速度

$$V_{max}' = \sqrt{\frac{2 \cdot a_{up} \cdot a_{down} \cdot L + V_S^2 \cdot a_{down} + V_E^2 \cdot a_{up}}{a_{up} + a_{down}}} \quad (4-13)$$

可以计算出机器人的加速距离和减速距离

$$L_{up} = \frac{V_{max}^2 - V_S^2}{2 \cdot a_{up}} \quad (4-14)$$

$$L_{down} = \frac{V_{\max}^2 - V_E^2}{2 \cdot a_{down}} \quad (4-15)$$

据此可以判断机器人处于加速阶段或是减速阶段，如果

$$|\overrightarrow{DE}| > (L - L_{up}) \quad (4-16)$$

则机器人处于加速阶段，此时机器人的速度

$$v = \sqrt{2 \cdot a_{up} \cdot (L - |\overrightarrow{DE}|) + V_s^2} \quad (4-17)$$

若满足

$$(L - L_{down}) < |\overrightarrow{DE}| < (L - L_{up}) \quad (4-18)$$

则机器人处于匀速运行阶段，此时机器人的速度

$$v = V_{\max} \quad (4-19)$$

若满足

$$|\overrightarrow{DE}| < L_{down} \quad (4-20)$$

则机器人处于减速阶段，此时机器人的速度

$$v = \sqrt{2 \cdot a_{down} \cdot |\overrightarrow{DE}| + V_E^2} \quad (4-21)$$

旋转运动采用角速度梯形规划、PID 加前馈的控制策略，实现两种方式旋转，即基于路径和加减速旋转，实质则都是如何分配角速度给机器人。基于路径旋转角速度拟采用以相应的路径为基础并且进行梯形规划和 PID 及前馈的控制得到，如图 4-10 所示，而加减速则用速度规划和角度闭环的方法实现，如图 4-9 所示。前者旋转比较柔和，超调很小，后者旋转快速，但超调会比较大。本课题机器人采用加减速旋转的方式。

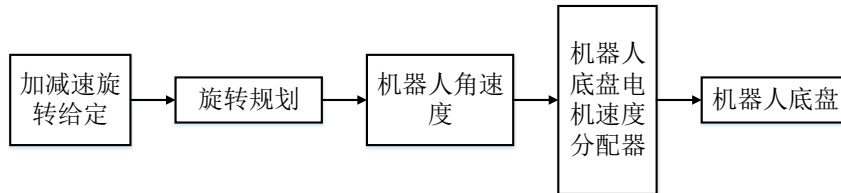


图 4-9 加减速旋转控制策略

设定机器人旋转角加速度为 a_{ω} ，控制时间为 5ms 一次，当前时刻机器人的角度为 Q_{cur} ，目标角度为 Q_{des} ，则机器人的角度偏差为

$$e_q = Q_{des} - Q_{cur} \quad (4-22)$$

据此可以判断机器人处于旋转的加速或减速阶段， ω 为机器人当前角速度，若满足

$$\frac{\omega^2}{2 \cdot a_{\omega}} > e_q \quad (4-23)$$

则机器人处于旋转减速阶段，此时机器人的角速度 ω_{cur} 为

$$\omega_{cur} = \omega_{pre} - 0.005 \cdot a_{\omega} \quad (4-24)$$

ω_{pre} 为上一时刻机器人的旋转角速度。

否则，机器人则处于旋转加速度阶段，此时机器人的角速度 ω_{cur} 为

$$\omega_{cur} = \omega_{pre} + 0.005 \cdot a_{\omega} \quad (4-25)$$

4.2.2 程序整体设计

在 MDK-ARM 编程环境中，按照设计的控制策略编写相应的程序，程序主要分为三个模块，即运动定位模块，路径运动和旋转运动的控制策略和程序设计。另外，以 MATLAB 为辅助计算和绘图工具，根据比赛的需求合理规划机器人的行驶路径，并且控制机器人执行预定的动作。机器人运动控制系统的整体程序设计框图如图 4-8 所示。

机器人整体程序中嵌入了实时操作系统 $\mu C/OS-II$ ，它是一种基于优先级的抢占式多任务实时操作系统，包含了实时内核、任务管理、时间管理、任务间通信同步和内存管理等功能。它可以使各个任务独立工作，互不干涉，很容易实现准时而且无误执行，使实时应用程序的设计和扩展变得容易，使应用程序的设计过程大为减化。因此机器人每个相应的控制都会建立一个相应的任务，这些任务按照其重要性和先后顺序分配不同的优先级，主控制器优先执行优先级较高的任务，整体程序设计的任务大约为 9 个，每个任务独立的控制机器人动作，每个任务的具体参数表 4-4 所示。

表 4-4 机器人主控任务功能及优先级分配

任务名称	任务功能	优先级级
CanTask	处理 CAN 总线接收和发送信息	4
NavLocationTask	机器人定位及路径自动导航任务	6
ActionTask	机器人执行机构控制任务	8
Distribute_Task	机器人路径及变量自动更新任务	9
Motor_WatchTas	机器人底盘和执行电机检测任务	11
PC_ARMTask	机器人局域网调试检测任务	12
ReadKeyTask	机器人手柄及键盘外设数据处理	13
LCDDispTask	液晶显示任务	14
USARTTask	串行总线接收和发送处理任务	15

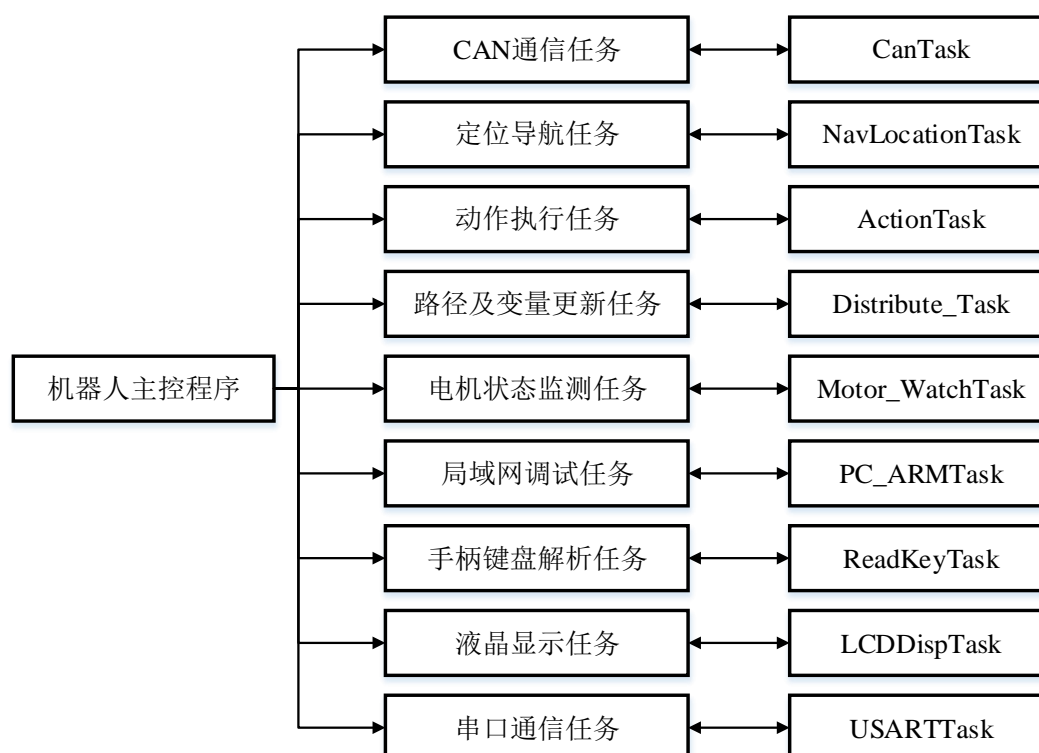


图 4-8 机器人主控程序框图

4.3 本章小结

本章介绍了四轮全向移动机器人运动控制系统硬件及程序的设计，硬件主要是编码器和陀螺仪的选型，主控制系统，供电系统及电机驱动器的优化，程序设计包含了直线运动和旋转运动的控制策略，在 MDA-ARM 编程环境中实现。

结 论

在本课题的研究过程中，主要研究了适用于本次比赛混合型机器人的运动控制系统，通过底盘的设计，运动定位模块的设计及硬件程序设计三个方面进行了研究，得出的结论为：

（1）通过 MATLAB 建模仿真，机器人底盘采用 45 度布置的正方形底盘其速度性能为最优，机器人可达到的最大速度也比较高。且通过拉格朗日方程建立的动力学模型可以很好地跟踪规划的轨迹。

（2）运动定位模块可以比较精确地确定机器人的在全局坐标系下的坐标，设计了随动轮系统误差相应的矫正方法，误差可以控制在 10mm 以内。

（3）机器人三种运动的控制策略主要为 PID 结合梯形速度规划和前馈，可以实现较好的控制效果，机器人在场地摩擦力理想的情况下不会偏离轨迹。

参考文献

- [1] 王亮. 智能移动机器人定位技术研究. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2012: 54-58.
- [2] 王卫华. 移动机器人定位技术研究 湖北: 华中科技大学控制科学与工程学科博士学位论文, 2008: 67-80.
- [3] 谭民, 王硕. 机器人技术研究进展. 自动化学报, 2013: 33-43
- [4] 徐保国, 尹怡欣, 周美娟. 智能移动机器人技术现状与展望. 机器人技术与应用, 2007: 55-64.
- [5] Komoriya, K. and Oyama, E., “Position Estimation of a mobile Robot Using Optical Fiber Gyroscope (OFG).” International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS'94). Mu-nich, Germany, September 12-16, pp. 143-149, 1994.
- [6] Y. Maddahi,N. Sepehri,A. Maddahi,M. Abdolmohammadi Calibration of wheeled mobile robots with differential drive mechanisms: an experimental approach.Robotica,2012,Vol.30 (6), pp.1029-1039
- [7] 王玲. 未知环境中基于相对观测量的多机器人合作定位研究. 国防科技大学博士学位论文, 2012: 23-35.
- [8] 王卫华, 熊有伦, 孙容磊. 测程法系统误差的测量与校核. 机器人第 26 卷第 5 期, 2004: 69-89.
- [9] 张本法, 孟祥萍, 岳华. 移动机器人定位方法概述. 山东工业技术期刊, 2014: 100-112.
- [10] 龚云隆. 基于嵌入式的室内机器人视觉导航与定位研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012: 75-86.
- [11] 路丹晖. 融合视觉与惯性导航的机器人自主定位[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 88-

90.

- [12]陈旭东,孔令成,刘尊朋.基于全向轮的机器人移动机构运动分析和控制设计[J].
测控技术, 2012: 100-113.

哈尔滨工业大学本科毕业设计（论文）原创性声明

本人郑重声明：在哈尔滨工业大学攻读学士学位期间，所提交的毕业设计（论文）《四轮全向移动机器人运动控制系统设计》，是本人在导师指导下独立进行研究工作所取得的成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明，其它未注明部分不包含他人已发表或撰写过的研究成果，不存在购买、由他人代写、剽窃和伪造数据等作假行为。

本人愿为此声明承担法律责任。

作者签名：

日期： 年 月 日

致 谢

大学四年的时光匆匆而过，初次踏入大学校门的场景还历历在目，现在已经在为毕业做准备，在哈尔滨工业大学的四年时间是我人生中很有意义的一段经历。在比论文完成之际，借此机会由衷的向帮助过我的人表示感谢。

首先，我要感谢一直以来给予我无私帮助和关爱的老师们，特别是我的导师邹继斌老师。本课题是在邹继斌老师的亲切关怀和悉心指导下完成的，导师严谨认真又不乏幽默风趣的治学态度给我留下了极其深刻的印象。

感谢哈工大竞技机器人队的队友们，在一年的机器人竞赛生活中，我收获的不仅仅是个人能力的进步更多的是探索的精神以及团队合作的意义。感谢我在机器人队所认识的每一位科技爱好者，也祝愿今年比赛取得好成绩。

最后，我要感谢我的家人。在求学期间，我的父母与亲人对我给予了无微不至的关怀，让我深刻体会到亲情的温暖。你们是我不断努力进步的动力之源。