

北京交通大学

硕士学位论文

一种四足步行机器人结构设计与分析

姓名：马彪

申请学位级别：硕士

专业：机械设计及理论

指导教师：方跃法

20061201

中文摘要

摘要：本文在将平面并联五杆机构应用到四足步行机器人腿部机构的基础上，设计了一套四足步行机器人密封装配结构设计方案。

本论文的研究意义在于：将平面并联五杆机构应用做四足步行机构的腿部机构，提高其跨步能力与柔性；将四足步行机器人的整个控制系统密封装配在机体中，采用动态扭矩传感器控制步行，实现步行机器人在诸如雨水、风沙甚至水中步行的环境适应性。

论文的主要工作有：在对传统步行机构总结分析的基础上，提出将平面并联五杆机构应用于四足步行机器人的腿部结构，并对其轨迹特性、正运动学、逆运动学特性做了详细计算分析；依据平面并联五杆机构的模型，建立机器人步行机构的实体模型，对其足端的轨迹做了图谱规划，并利用插值法对并联驱动端的特性曲线作了研究，并在 ADAMS 中进行仿真，将结果与理论值相比较；然后设计了一套四足步行机器人密封装配结构设计方案，建立四足步行机器人单足结构、驱动以及传感器监测的三维实体模型，将机器人的整个控制系统，密封装配在步行机器人的机体中，通过轴传动来驱动步行机构实现步行，采用动态扭矩传感器监测步行机构的驱动关节受到的扭矩变化，从而获得四足步行机器人足端的周围情况，为步行机器人的控制方案奠定了基础；论文的最后在分析步行机器人传统控制传感器的基础上，详细分析了动态扭矩传感器的监测原理，并分几种情况分别分析了其监测原理，并在 Pro/E 的 Mechanism 模块中实现了监测原理的仿真与验证，最后给出了传感器监测信息与系统判断之间的关系。

关键词：并联驱动；五杆机构；密封装配；动态扭矩传感器；监测原理

分类号：TP242

ABSTRACT

ABSTRACT: In this paper, a sealed structure of a Quadruped Walking Robot is proposed basing on parallel drive five-bar mechanism.

The research meaning of this paper is: Parallel drive five-bar mechanism is applied for walking mechanism to increase the walking ability and flexibility of the robot. The whole control system is sealed in the body of a Quadruped Walking Robot to improve the environment flexibility of the walking robot.

The main work of this paper:

Firstly, Basing on the summarization and analysis of the walking mechanism, Parallel drive five-bar mechanism is applied for walking mechanism. And then the characteristic of the trail and positive kinematics as well as reverse kinematics are discussed.

Secondly, the model of walking mechanism is established according to Parallel drive five-bar mechanism, and then a figure planning is designed for the foot-end trail. The characteristics of the parallel drive are emphasized to research in this paragraph by the method of insert value. At last, the simulation is performed in the ADAMS to compare the real result to the theoretical value.

Thirdly, a sealed structure of a Quadruped Walking Robot is designed and established. The whole control system, including motor, sensor and control circuit, is sealed in the robot. Walking is derived in the way of the shaft driving and the dynamic torque sensor is used to the surrounding conditions of the robot's foot-end to be the foundation of the robot's control.

At last, the applying principle of the dynamic torque sensor is researched in detail basing on the traditional sensor of the walking robot. Moreover, the principle is divided into several sorts to discuss. Finally, simulation and verification of the monitor principle are come through in the Mechanism of the Pro/Engineer.

KEYWORDS: Parallel drive; five-bar mechanism; sealed assemble; dynamic torque sensor; principle of monitoring

CLASSNO: TP242

致谢

本论文的工作是在我的导师方跃法教授的悉心指导下完成的，方跃法教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。

导师方跃法教授严谨求实的治学态度、高屋建瓴的思维方法和深入全面的悉心指导，不仅保证了作者的课题顺利完成，而且使作者的专业理论水平和科研能力得以快速的提高，作者所取得的每一点成绩无不倾注了导师巨大的心血。方教授诲人不倦、严谨的治学作风将使作者终生受益，永远激励作者奋发向上、不断进取。值此成文之际，作者特向尊敬的导师方跃法教授致以最衷心的感谢和最崇高的敬意！

在实验室工作及撰写论文期间，房海蓉教授给予了很大的指导与帮助；姚燕安教授对课题的研究给予了热情的指导和极大的关怀，使作者受益匪浅，在此表示诚挚的谢意！

同时，实验室的郭盛师兄、韩书葵师姐对我论文中的机构运动学分析研究工作给予了热情帮助；槐创锋，张克涛，韩彬，王硕，曾强以及温平等实验室低年级同学，与他们在一起工作和讨论，为作者提供了氛围良好的研究环境。在此向他们表达我的感激之情。

另外也感谢家人，他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。

1 绪论

1.1 课题研究背景

1.1.1 引言

随着机器人技术的不断发展, 步行机器人的应用领域越来越广。从实际的观点出发, 步行运动确有轮式机械无法比拟的独到之处。它利用孤立的地面支撑而不是轮式机械所需的连续地面支撑; 可在不平地域以稳定方式步行或以非接触方式规避障碍; 可全方位运动而无损地面; 可用跨步方式跨越粗糙地面或跳跃障碍; 可攀登阶梯, 迈过溪流, 跋涉沼泽等等。

步行机器人集仿生学、机械工程学、控制工程学等多种学科为一体, 它是一个最为理想的研究实体, 是一个典型的多变量、非线性和变结构的复杂动力学系统且与环境交互, 其变姿态结构的不稳定性及产生稳定步行运动所必须解决的动态平衡问题, 对于控制理论及动力学问题的研究都具有很大的挑战。正是因为步行机器人具有其他移动机器人所不具有的优点, 也是目前任何一种机械的运动方式无法与之相比的。正是这个原因, 使得步行机器人的研究一直是机器人研究领域的一个热点。

开发可在实际环境从事实际工作的动态步行机器人不是一件容易的事, 这是因为设计重量轻、输出功率高的自主运动多自由度驱动系统很困难; 它需要高效的触觉和力传感器等多种传感器认知环境以实现智能步行; 此外, 虽然具有较高的控制手段来实现各种各样步行机器人的控制, 但是由于步行机器人的结构本身存在的一些不足, 使得其控制及应用受到了很大局限。目前来说, 步行机器人的发展往往是在实验室的环境中进行的, 真正用于实际工程等应用的步行机器人并不多, 这些主要是因为步行机器人的从实验室到实际的工程应用仍需要较高的工程造价以及较长的开发周期, 在这种环境下, 开发适应多环境的步行机器人显得尤为重要。

本论文在总结已有四足步行机器人结构存在的不足基础上, 将平面并联五杆机构应用做四足步行机器人的步行机构, 来提高四足步行机器人在各种复杂地面上步行的跨步能力与柔性; 将四足步行机器人的整个控制系统, 包括传感器、驱动电机以及控制电路密封装配在步行机器人的机体中, 实现与外界介质的隔离, 通过轴传动来驱动步行机构实现步行, 采用动态扭矩传感器监测步行机构的驱动关节受到的扭矩的突变, 从而获得四足步行机器人足端的周围情况, 增强四足步

行机器人在诸如雨水、风沙甚至水中步行的环境适应性。

1.1.2 步行机器人发展与应用

早期人们对步行机器人的研究源于对步态与节拍的研究, 1870 年英国人 E.J.Marry 发明了一台用来测量动时钟机构的气动记录仪, 记录运动体的移动节拍, 他在运动体的足底安装了传感器, 记录运动体在不同步态时的节拍, 这也许是研究节拍(步态)运动的始祖了。1887 年, 摄影师 E.Muybrudge 与人打赌马奔跑时是否有四足同时离地时刻, 拍摄和收集了大量动物步态的高速照片, 这是人类对动物步态的最早研究^[1]。

但是, 早期的步行机器人由于限于当时的计算机发展水平限制, 其结构方式以及控制远远没有达到应用的程度。在 20 世纪 60 年代之前, 并无真正意义的独立步行机器人。虽然在 1960 年 GE 公司设计了一台“通用步行车”, 该步行车可以在人的控制下可以跨越一定的障碍, 但是他并不是真正的步行机器人; 1969 年 Bucyrus-Eri 公司推出了世界上第一个商业化的步行产品, 名为“Big Mushie”, 它是用于采矿的步行索斗铲(walking dragline)^[2]。

世界上第一台真正意义的步行机器人是由 Frank 和 McGhee 于 1977 年制作, 该机器人的关节由逻辑电路组成的状态机控制, 这使得机器人行为受到限制, 只能呈现固定的运动形式^[3]。

进入 20 世纪 70、80 年代, 人们受昆虫等多足生物步行运动的启发, 研制了静态稳定步行的多足步行机器人^[4]。这些机器人在任何时候都能在支撑腿的支撑下保持静态平衡, 非支撑腿(摆动腿)可移动至新的立足位置, 同时进行支撑腿的交替转换, 达到不断更新的稳定平衡状态, 完成步行运动。因为始终有三条腿支撑, 所以速度很慢。控制器的设计理念是基于传感器反馈控制腿的运动, 以确保腿移动到新的状态。

随着计算机计算能力的提高, 计算机达到可以计算处理机器人在非稳定状态下保持平衡等复杂问题, Matsuoka 等于 1983 先后开始了步行机器人动态步行的研究^[5]。步行机器人的动态步行要求机器人步行运动的某些时刻, 停止和改变速度不会使机器人跌倒。这与人在自然环境中的奔跑行为类似。因此, 动态步行对步行机器人控制器设计的实时性要求很高。然而, 这只是动态稳定步行的必要条件之一。机器人动态步行的控制器设计要求要远远高于静态步行的控制器设计。

真正实现机器人动态稳定步行是在 1980 年由 Kato 及其开发团队实现^[6]。但是由于 Kato 的步行机器人在机器人的足端具有巨大的足底, 机器人足以受控方式从一足跌向另一足。同时, 由于非稳定状态时间短, 从而避开了动态步行控制器的

时间相关问题。

上面提到的这些机器人均是在关节处均采用齿轮和电机驱动，导致步行时能量耗费很大，机器人能够携带的大部分能量实际上并没有为步行运动做功，而是转换为热能损耗了。受人步行运动能量损耗极小这一事实的启发，McGeer 开始致力于步行机构的设计，并分别于 1989 年、1990 年研制了被动步行的动态稳定机器人，名为“两足滑翔者”(biped glider)，该机器人在缓坡上无需任何形式的控制就能缓缓而下，且在理论上可过渡到平整地面和不平地面继续步行^{[7] [8]}。1997 年 Goswami 等开始关注简单步态的被动步行，用主动机构模拟被动控制，扩大被动控制的自然属性，创造了新的步态^[9]。

近年来，随着计算机技术的飞速发展，计算能力的日益提高，步行机器人研究也取得了长足的进步，出现了的生物激励步行机器人、语音识别步行机器人以及跳舞步行机器人等一些智能步行机器人。

此外，在国内，清华大学^{[10] [11]}、上海交通大学^[12]、哈尔滨工业大学^[13]、国防科技大学^[14]等也在步行机器人的研究中取得了一些进展。

1.2 四足步行机器人研究状况

步行机器人具有其他步行机器人不具备的优点，能够在一些特定的场合满足实践应用的需要。为满足一些工程的需要，要使机构尽可能简单，腿应该尽可能少。但从步行机器人步行时，机体的稳定性角度来考虑，三条腿支撑腿或更多的支撑腿才能构成一个稳定的多边形区域，当机器人重心落在该区域时，机器人的机体才是稳定，因此，四条腿是一个合理的折中。四足步行机器人因为应用前景良高，应用价值较高，一直是国内外研究的热点。四足步行机器人的出现最早可追溯到中国三国时代的“木流牛马”的传说。国外有据可查的记载是 1893 年出现的机械马。

1.2.1 几种典型四足步行机器人及其结构分析

早在二十世纪六十年代初，美国的 Shigley (1960) 和 Baldwin (1966) 都使用凸轮连杆机构设计出比轮式车或履带车更为机动的四足步行车^[15]，但由于当时技术水平尤其是控制技术的限制，这些四足步行机的效率较低，而且对地面的适应性较差。

如图 1-1 所示为美国人 Mosher 于 1968 年设计开发的四足步行车“walking Truck”^[16]。准确地说，这是一个有操作人员驾驶的机器，并不是真正意义上的四足

步行机器人。该步行车的四个指令杆跟随驾驶员手臂和脚动作的液压随动系统，并安装在驾驶员手臂和脚上的位置传感器检测他的动作，液压伺服马达驱动四只脚做相同的动作，该机装有力反馈机构，虽然操作费力，但实现了爬越障碍，因而被视为现代步行机器发展史上的一个里程碑。

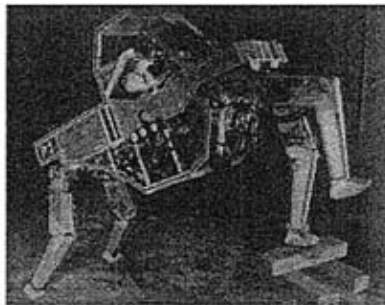


图 1-1 四足车 Walking Truck

Fig 1-1 Four-Leg Walking Truck

如图 1-2 所示为世界上第一台四足步行机器人 KUMO^[17]，它被制造于 1976 年，其特点是：能够实现在不平地面上稳定步行运动，能够越过地面上较小的障碍物而不接触；能够实现全方位的步行运动而不会出现打滑或者损坏地面的结构；该步行机器人能够成为一个稳定的工作平台，利用腿的自由度执行操作任务。

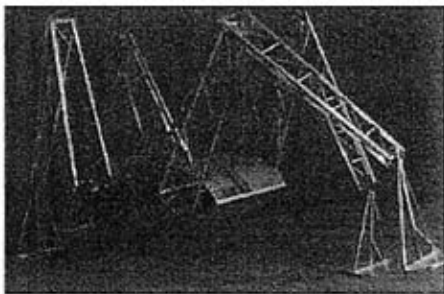


图 1-2 第一台四足步行机器人 KUMO

Fig 1-2 The first Quadruped Walking Robot of the World KUMO

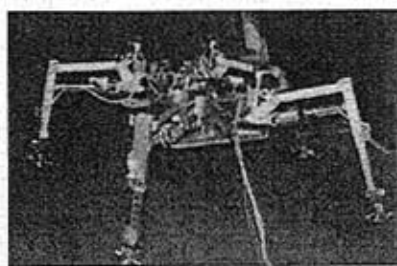
日本的 Shigeo HIROSE 研制了 8 代的 TITAN 系列四足步行机器人。在这 8 代的步行机器人中，以 TITAN-III、TITAN-VII、TITAN-VIII 三类机器人为主要突破点，其他的几种 TITAN 系列机器人均是在一定的基础进行的改进。TITAN-III 的足端装有传感器和信号处理系统，足由形状记忆合金组成，可自动检测与地接触的状态^[18]。TITAN-VII 可作为移动的平台在崎岖和陡峭的地方步行，能够实现避障的功能；同时步行腿也能作为操纵器使用，能够自主超过 15 度的斜坡，机器人可在导线的牵引下爬越 70 度的斜坡，在背负 60 公斤重物时，速度保持在 177 (mm/s)^[19]，值得注意的是：TITAN-VII 与 TITAN-III 机器人（图 1-3 所示）的腿部机构均是采用四杆机构的缩放步行机构，在应用中，在一方面表现良好，在另一方面却

受到一定的限制。

图 1-4 是 TITAN 系列较新的四足步行机器人 TITAN-VIII,它采用开环连杆机构作为其步行机构,具有较高的地面自适应能力,它的腿可作为有力的工作臂,用于探测地雷和进行排雷操作^[20]。



TITAN III



TITAN VII

图 1-3 TITAN III 与 TITAN 四足步行机器人

Fig 1-3 The Quadruped Walking Robot of TITAN III and TITAN VII

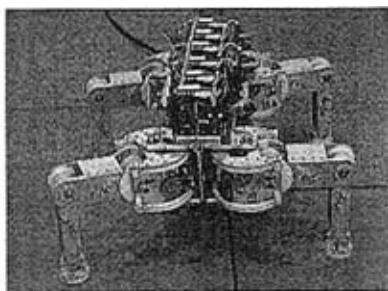
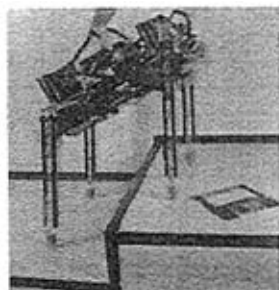


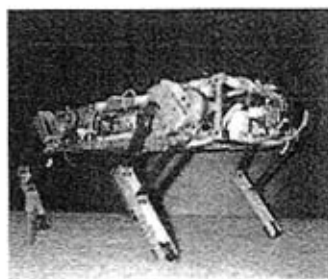
图 1-4 TITAN-VIII四足步行机器人

Fig 1-4 The Quadruped Walking Robot of TITAN VIII

加拿大 McGill 大学的步行机器人实验室(Ambulatory Robotics Laboratory)研制的 Scout 系列步行机器人^[21],如图 1-5 所示。该机器人的一个最大的特点就是其步行机构相当简单,每条腿只有一个自由度,能够实现步行、转弯以及跨越 90mm 的台阶,但可靠性较差,后来对 Scout 机器人做了一些改进,将步行机构的关节改为被动关节,大大提高了其步行可靠性。



Scout I



Scout II

图 1-5 Scout 系列四足步行机器人

Fig 1-5 The Quadruped Walking Robot of Scout series

图 1-6 为美国普渡大学机器人视觉实验室开发的基于视觉的四足步行机器人，称为 BOACH。设计目标是能够感觉、控制以及根据外部环境条件规划自己运动的机器人系统。BOACH 以基于模型的方法，结合认知 3D 阶梯场景的 2D 图像，使用匹配、位姿估计、精炼 refinement procedures 等步骤，试图以认知的结果，指示机器人爬越阶梯^{[22][23]}。

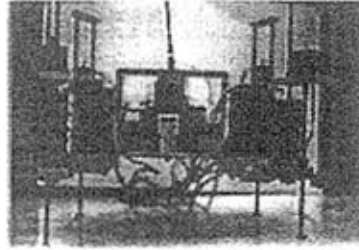


图 1-6 基于视觉的四足步行机器人 BOACH

Fig 1-6 The Quadruped Walking Robot According to Sense sight BOACH



图 1-7 反应轮倒摆四足步行机器人

Fig 1-7 The Quadruped Walking Robot According to flailing of response round

日本东北大学 Emura 的步行机器人运用反应轮倒立摆模型分析四足步行机器人的对角小跑步态，视对角支撑腿为摆，机体和摆动腿为反应轮，得出了四足步行机器人对角支撑腿的控制可使用关节的协调控制是保持四足机器人以二足稳定支撑^{[24][25]}，如图 1-7 所示。

除了世界各地的研究机构和高效率实验室研制的用于科学实验的四足机器人之外，人们还出于商业目的，开发了多种四足步行机器人。最为典型的是 Lynxmotion 公司推出的四足步行机器人，如图 1-8 所示，该机器人每条腿，采用平面四杆缩放机构，具有二个自由度，机器人能前向、后退，左转和右转，并预留有 55% 的记忆体可供客户做进一步的机器人实验和开发利用。索尼公司的 AIBO 机器狗采用开环关节机构作为其步行机构，经过多代的改进与更新，从能执行各种类似翻滚、后腿站立、挥舞前肢等动作一直发展到今天的随音乐跳舞、语音识别等智能技术，如图 1-9 所示。目前，欧洲一些博物馆正在研制步行恐龙。

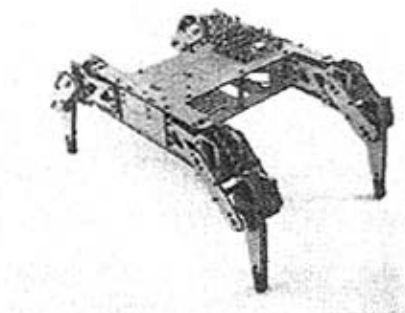


图 1-8 Lynxmotion 的四足步行机器人

Fig 1-8 The Quadruped Walking Robot of the company of Lynxmotion



图 1-9 索尼公司的 AIBO 机器狗

Fig 1-9 The machine Dog AIBO of Sony Company

国内一些大学也在研究四足步行机器人。如图 1-10 所示为上海交通大学所研制的二种四足步行机器人^[26], (a) 所示的四足步行机器人为采用平面四杆机构作为其步行机构, 可以实现跨越障碍, 沟槽, 上下台阶及通过高低不平的地面有一定识别及步态调整能力; (b) 所示的四足步行机器人采用开户环关节连杆机构作为步行机构, 该四足步行机器人在足端被安装了压电薄膜式力传感器来实现机器人反馈控制, 采用对角线动态步行。



(a)



(b)

图 1-10 上海交通大学的二种四足步行机器人

Fig 1-10 Two kinds of Quadruped Walking Robot of Shanghai Jiaotong University

清华大学机器人实验室研制的 QW-1 全方位四足步行机器人, 如图 1-11(a)所示, 它采用平面四杆缩放机构作为其步行机构, 在足端被安装压力传感器, 能够实现全方位步行; 图 1-11(b)所示为清华大学所研制的另一种四足步行机器人, 它采用开环关节连杆机构作为其步行机构, 通过模拟动物的运动机理, 实现比较稳定的节律运动, 可以自主应付复杂的地形条件, 完成上下坡、越障等功能。

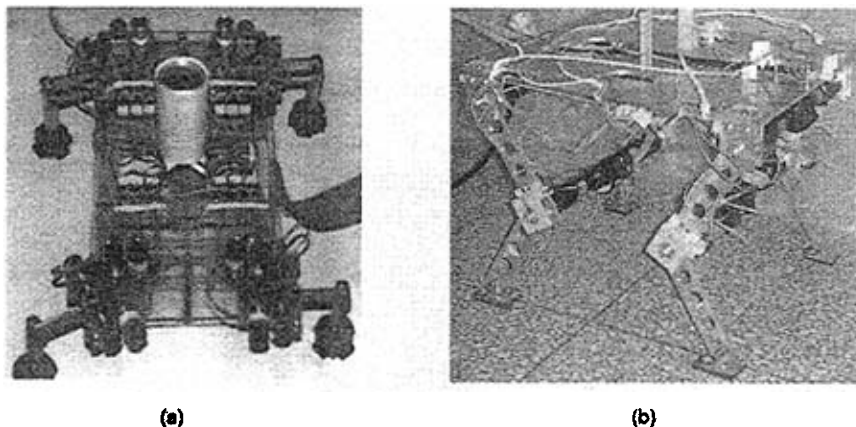


图 1-1 清华大学的二种四足步行机器人

Fig 1-11 Two kinds of Quadruped Walking Robot of Tsinghua University

1.2.2 现有结构存在的问题

虽然步行机器人具有其他机器人所不具备的优点, 但是步行机器人由于受到一定的制约因素, 在实际的工程实践中并没有得到广泛的应用。概括来说, 世界各国所研制的四足步行机器人主要由三种类型的应用: 一是作为实验研究的开发使用, 如各大学机器人实验室研究的步行机器人; 二是: 应用到一些特殊的场合, 如水下步行机器人、火山探测步行机器人^[27]; 三是为了满足一定商业的目的, 如 AIBO 机器狗。

分析这些步行机器人, 它们共同具有一个特点: 由于受到机器人结构或是控制方式的限制, 它们只能在一些特定的场合实现人们期望的目标。具体可以从以下二个方面来说明:

一是, 受到步行机构的研制。传统的步行机构, 如平面四杆机构, 其输出轨迹固定, 且存在一定的死点, 所以步行机器人只能执行固定的跨步轨迹, 跨越特定的障碍; 而对于开环关节步行机构来说, 虽然其输出轨迹较灵活, 但其只能承载较小的负载; 对控制系统的要求较高。在某种程度上, 又不能做到二者很好的综合。

二是，步行机器人的整体结构对其控制系统的限制。控制系统包括驱动电机、传感器以及控制系统电路，其良好运行是步行机器人正常工作的前提。但是传统步行机器人由于受到驱动方式以及传感器的限制，大多将控制系统暴露在工作环境中，当处于诸如雨水、风沙，甚至水中的恶劣环境中时，控制系统将受到一定程度的破坏，不能正常工作。

1.3 课题主要研究内容

基于以上所述当前步行机器人结构上存在的一些问题，本论文设计了一种新型的步行机器人的结构。由于五杆机构的输出轨迹具有可调性，同时又具有承载能力强的特点，将并联驱动平面五杆机构用作四足步行机器人的腿部机构来提高四足步行机器人的步行跨步能力。将四足步行机器人的控制系统与外界介质密封隔离，采用轴传动驱动机器人步行，采用动态扭矩传感器监测步行机器人足端周围情况，来提高步行机器人在雨水、风沙等恶劣环境步行的适应性。

论文主要内容分为五章：

一、步行机构的对比分析

1、对传统的步行机构进行综合分类，将传统步行机构分为三类，分别为开环连杆机构、平面四杆机构以及特殊步行机构；并针对每一种类型的步行机构，建立相应的实体模型，给出它们存在的优缺点，并给出相应的应用实例；

2、通过对平面五杆机构的分析，得出五杆机构的输出轨迹具有可调、柔性的特点，并结合五杆机构承载能力强的特点，分析了将五杆机构用作步行机构存在的优点与可行性。

3、对上述几种类型步行机构做了详细的对比分析，给出其优缺点。

二、平面并联五杆机构研究与应用

1、在引入并联驱动思想的基础上，介绍了并联驱动的优越性，并给出并联驱动机构的研究与应用现状。

2、建立平面并联五杆机构的动力学模型，并进行了相应的运动学正解与反解计算分析，得出在杆长条件不变的情况下，通过给定平面并联五杆机构的输出端轨迹，在某一时间，通过运动学的反解可以得出并联驱动端的并联驱动量，从而为以后的控制系统的输入提供了依据。

3、在结合平面并联五杆机构逆运动学模型的基础上，分析计算了平面并联五杆机构的输出轨迹规划。

三、实现一定足端轨迹的并联驱动研究

1、首先在对杆长进行优化的基础上，建立以平面并联五杆机构为基础的步行

机构模型，并设计了实现某种特定步行方式的足端轨迹规划，给出规划图谱。

2、结合插值算法，给定足端轨迹的若干轨迹点，通过五杆机构的逆运动学计算，可以得出插值点所对应的并联驱动量的函数曲线规律图，并最终在 ADAMS 中完成动画仿真与并联驱动端驱动函数曲线的对比分析。

四、四足步行机器人总体结构设计

1、通过分析传统四足步行机构结构在应用过程中的不足之处，设计了四足步行机构新型结构设计方案。

2、根据整体结构方案，建立四足步行机器人的各零件三维实体模型，并进行整机模型装配。

五、动感扭矩传感器应用监测原理研究

1、对步行机器人常用传感器的工作原理做了对比分析。

2、在介绍动态扭矩传感器工作原理的基础上，着重计算与分析了动态扭矩传感器用于步行机器人监测的原理，即通过驱动关节的扭矩的方向突变为判断足端周围情况，最终在 Pro/E 的 Mechanism 模块中实现了对上述原理的仿真与验证。

2 步行机构对比分析

2.1 步行机构综述

步行机器人的机械部分是机器人所有控制及运动的载体，其结构特点直接决定了机器人的运动学特征。其中，腿部结构形式是步行机器人机械结构中重要组成部分，也是机械设计的关键之一。因此从某种意义上说，四足步行机器人机构的分析主要集中在步行机构的分析上。一般地，从机器人结构设计要求看，步行不能过于复杂，杆件过多的步行机构形式会引起结构和传动的实现困难，对腿部机构的基本要求是：输出一定的轨迹，实现给定的运动要求；具有一定的承载能力；方便控制的要求。目前，国内外学者对步行机器人的步行机构已经作了大量的研究工作，其结构形式多样，主要可以归纳为三类：开环连杆机构；闭环平面四杆缩放式机构；特殊的步行机构^{[28] [29] [30]}。

2.2 传统步行机构优缺点分析

2.2.1 开环关节连杆机构

在早期的步行机器人研究中，一般是模仿动物的腿部结构来设计步行机构。所有这种机构形式一般都是关节式连杆机构。其优点在于结构紧凑，步行机构能够达到的运动空间较大，且运动灵活，由于关节式步行机构是通过关节链接的，因而在步行过程中的失稳状态下具有较强的姿态恢复能力。不足之处是在腿的主动平面内大小腿的运动之间存在耦合，使得运动时的协调控制比较复杂，而且承载能力较小。

如图 2-1 所示为常见的开环关节连杆步行机构的三维模型图形。该机构可分为大、小腿以及髋关节组成。由大小腿组成平面运动机构，髋关节驱动该平面机构从而实现空间运动。可建立如图 2-2 所示的坐标系，第一关节为髋关节，在 O_1 点围绕 Z 轴旋转，髋关节的旋转半径设为 L_1 ；第二个驱动关节为大腿关节，在 A 点围绕着与大小腿运动平面所垂直的轴旋转，大腿杆长为 L_2 ；第三个驱动关节为小腿关节，在 B 点围绕与大小腿运动平面垂直的轴转动，小腿杆长度为 L_3 。同时规定逆时针为正角。

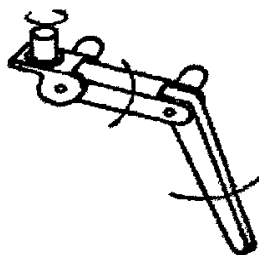


图 2-1 开环连杆步行机构

Fig 2-1 Walking Mechanism in open chain & connecting-rod

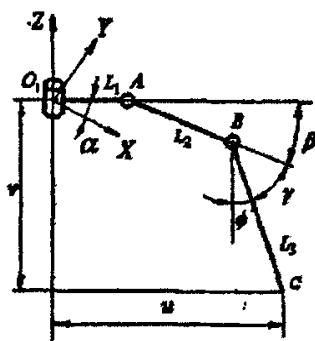


图 2-2 开环连杆机构坐标系模型

Fig 2-2 Coordinate system model of & connecting-rod Mechanism

如图 2-2 所示，当机构运动到某一位置时，设髋关节驱动转动角为 α ，大腿关节驱动转角为 β ，小腿杆驱动转角为 ϕ ，由上图可以建立足端 C 点的运动轨迹方程：

$$\begin{cases} x_c = u \cos \alpha \\ y_c = u \sin \alpha \\ z_c = v \end{cases} \quad (2-1)$$

其中：

$$u = L_1 + L_2 \cos \beta + L_3 \cos(\beta + \gamma)$$

$$v = L_2 \sin \beta + L_3 \sin(\beta + \gamma)$$

$$\beta + \gamma = 90^\circ - \phi$$

由上式以及图形可知，小腿杆可以在转过大臂上部空间运动（类似于人的小臂运动），所以在运动过程中，由于臂的末端 C 点可达区域比较大，当髋关节转动时，机构的运动空间将实现三维椭圆状。但是采用此机构用作步行机构，在机器人行驶时，足端的运动范围并不是覆盖了整个可达运动空间，不可能在转过大腿

杆时仍能够到达所有区域。综上所述的原因，小腿与地面法线的夹角要在一定的范围之内。如图 2-3 所示，就将存在小腿的最大转动角度 ϕ_{\max} 和小腿最大内向（顺时针）驱动角度 ϕ_{\max}^n ，此时小腿的摆动约束可表示为： $\phi_{\max}^n \leq \phi \leq \phi_{\max}$ ，又有 β 角的求解公式为：

$$\sin \beta = \frac{v - L_3 \sin(90^\circ - \phi)}{L_2} \quad (2-2)$$

令小腿杆在二极限位置 ϕ_{\max} 、 ϕ_{\max}^n 对应的 β 值为 β_1 、 β_2 ，所以可求得：

$$\begin{cases} u_{\max} = L_1 + L_2 \cos \beta_1 + L_3 \cos(90^\circ - \phi_{\max}) \\ u_{\min} = L_1 + L_2 \cos \beta_2 + L_3 \cos(90^\circ - \phi_{\max}^n) \end{cases} \quad (2-3)$$

由上式可知，对于不同的高度值，足端的运动空间在 X-Z 平面中产生类似椭圆曲线的轨迹，当髋关节转动时，将形成三维的运动空间，如图 2-4 所示。

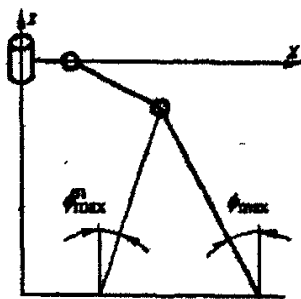


图 2-3 小腿的摆动约束

Fig 2-3 The swinging restriction of the little leg

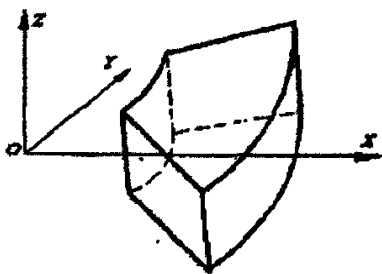


图 2-4 足端运动空间

Fig 2-4 The motion space of the foot's end point

此外，还存在一些由开环关节式连杆机构所演化的开环步行机构，如图 2-5 所示为行星轮/臂结合步行机构。

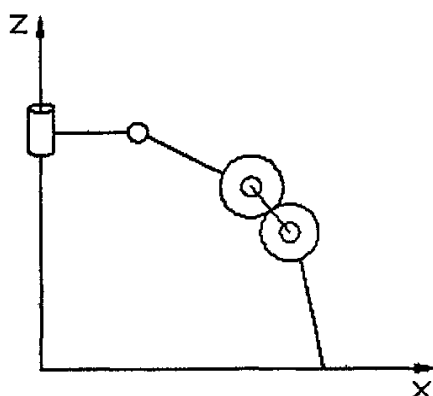


图 2-5 行星轮/臂结合步行机构简图

Fig 2-5 The mechanism schematic of planet wheel/arm walking mechanism

2.2.2 闭环平面四杆机构

此种形式的机构能够克服开链式结构承载能力低的缺点，具有较好的刚性，并且功耗较小，有着较广泛的应用。如图 2-6 所示为一种常见的闭环平面四杆步行机构，其中 Z 轴驱动器用于承担机体的重量或升降机体，而 X 和 Y 轴驱动器用于推动机体前进，简化了协调控制。缩放式腿部结构具有比例特性，可将驱动器的推动距离按比例放大为足端运动距离，其缺点是：无论是圆柱坐标还是直角坐标的缩放机构，都至少需要二个线性驱动关节，使得机械结构较大，质量较重，而且机器人足端的运动范围受驱动距离的限制，难以得到大的运动空间。

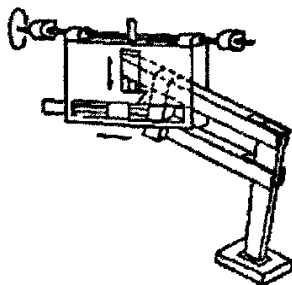


图 2-6 平面四杆步行机构

Fig 2-6 the planar four-bar walking mechanism

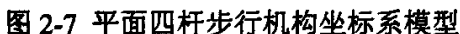


Fig 2-7 the coordinate system model of the planar four-bar walking mechanism

我们建立如图 2-7 所示的坐标系模型。B 点髋关节，绕 Z 轴转动，转角为 α ，悬长为 L_1 ； O_2 点为大腿杆 AO_2 的旋转点，杆长为 L_3 ，其与 BO_1 的延长线的夹角为 β ； O_1 点为大腿杆 O_1O_2 的旋转点，杆长为 L_2 ，其与 BO_1 的延长线的夹角为 ϕ ；由此可推出 A 点的运动轨迹方程为：

$$\begin{cases} x_A = u \cos \alpha \\ y_A = u \sin \alpha \\ z_A = v \end{cases} \quad (2-4)$$

其中：

$$u = L_1 + L_2 \cos \beta + L_3 \cos \phi$$

$$v = L_2 \sin \beta - L_3 \sin \phi$$

$$\phi = \gamma - \beta$$

从所周知, 当四杆机构的二杆重合时, 机构将会出现死点, 为了防止四杆机构存在死点位置, 通常的做法是规定一个小腿杆与大腿杆的最小夹角 γ_{\min} 和最大夹角 γ_{\max} , 即在大小腿杆之间的夹角在任何情况下均要满足以下约束条件: $\gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max}$ 。正是由于这种限制, 大小腿的运动受到很大的限制, 组成了平面运动机构。

另外，平面四杆机构有多种演化方式，较典型的有：埃万斯四连杆机构，如图 2-8 所示为机构的简化形式，用连杆曲线的轨迹作为足端轨迹。该步行机构，设计简单、方便。具有运动解耦特性，而且都能产生近似直线的运动。但由于四杆机构本身存在死点问题，容易产生死锁现象，限制了腿部机构的工作空间。同时增加了控制难度。

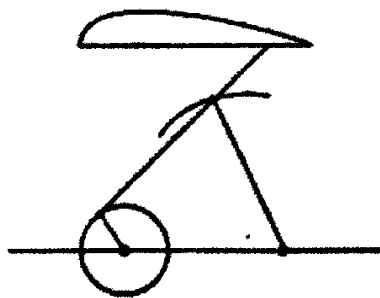


图 2-8 埃万斯四连杆机构

Fig 2-8 The Evans four-bar mechanism

2.3 平面五杆步行机构分析

平面五杆机构一种最简单的并联机构，它的最大的一个特点就是其输出的轨迹是柔性可调的。它同时具有较强的承载能力。在五杆机构的输入端分别输入常速变量和伺服变量的混合驱动输入，常速电机提供运动所需要的主要驱动功率，而伺服电机提供一定的运动调节，这就组成了平面并联五杆机构。平面并联五杆机构具有输出轨迹柔性可调的优点。如图 2-9 所示为平面并联五杆机构在一定的并联驱动下的轨迹输出。a、b 两个图形为在相等时间内，五杆机构杆长及常速电机输入不变的情况下，通过改变伺服输入端的输入量而获得的轨迹输出图。关于平面并联五杆机构的特性将在下一章做详细研究。

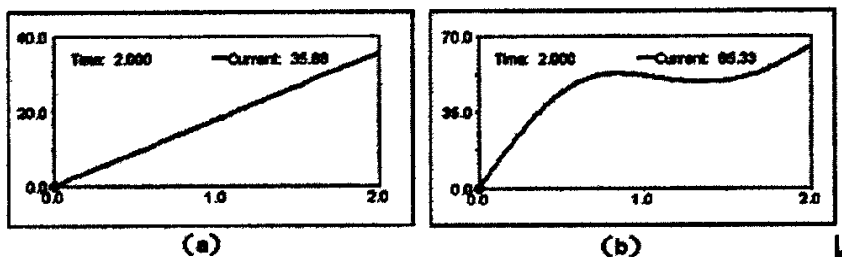


图 2-9 伺服调节下平面并联五杆机构不同的输出轨迹

Fig 2-9 The different output trail of Parallel drive five-bar mechanism under servo-adjusting

经研究证明：其输出端的轨迹具有较大的柔性，可以基本实现任何复杂的函数输出^{[31][32][33]}。如图 2 所示：(a) 为输入端均为常速输入时，足端的输出轨迹；(b) 为同等常速输入以及伺服调节输入时，足端的输出轨迹。由图可知：平面并联五杆机构既可以输出常规的运动轨迹，又可通过增加适当运动调节来改变输出轨迹，且具有较大的柔性。

2.4 机构对比

通过对开环连杆步行机构、平面四杆步行机构以及一些特殊步行机构、五杆机构的详细分析，可以归纳出各机构的不同特点：

1) 开环关节式机构的末端操作点无论是在机体的上部还是下部都有非常大的运动空间，且机构不存在死点的情况，机构比较简单；但是其刚性较差，传动误差较大而且不易控制。

2) 缩放式步行机构的刚性较大，传动误差较小，腿部末端在机体下部的运动空间较大，在机体上部的运动空间较小，机构存在死点。

3) 特殊步行机构^[34]。特殊步行机构的使用范围较小，一般仅仅局限于一些特定的场合；但是，特殊步行机构一般是针对某一特殊需求或是研究而产生，所在一些领域，其具有很大的优势。

4) 由于五杆机构的输出轨迹具有柔性可调的特性，同时又具有四杆机构所具有的承载能力强的特点，所以使用五杆机构作为步行机构可以实现一定承载负荷的同时，又能使机器人的步行具有更大的灵活性，为进一步开发避障等后期开发设计奠定了基础。

2.5 本章总结

本章在总结已有四足步行机器人步行机构的基础上，给出步行机构的分类，并建立开环连杆机构、闭环平面四杆机构模型的基础上，分析各步行机构的输出轨迹。然后总结出各步行机构的优缺点，得出平面五杆机构具有输出轨迹可调的轨迹特性。

3 平面并联五杆机构研究与应用

3.1 平面并联五杆机构研究现状

3.1.1 并联驱动思想

并联驱动是采用常转速电机和伺服电机作为其驱动源。常转速电机提供机械系统所需要的大部分功率，以微机控制的伺服电机作为机械系统的运动调节，调节其输出运动^{[35][36]}。二种形式的电机输入运动经一个多自由度机械系统进行运动合成产生所需要的输出运动。系统的柔性取决于混合机构的形式和尺度。混合机械系统可以是线性运动也可以是非线性传动机构。如连杆机构，凸轮机构。

并联驱动机器具有以常转速电机驱动的传统机械系统的优点，表现为该系统具有承载能力高、快速、效率高，同时伺服电机提供可控、可调的运动输入，使机械系统的输出具有更大的柔性。由于并联驱动机器只是部分采用了伺服电机输入。相对于全伺服输入的系统，其成本相对较低。在一些只需要提供部分柔性或则需要原有的基础上进一步改善运动性能的场所，并联驱动具有很好的应用前景。例如在锻压机械中，常常需要冲头在作直线运动时满足锻压工艺对冲头速度的要求，如做近似等速运动。显然，但自由度的曲柄滑块机构无法满足这一特性的需求。因此，就需要采用带有滑块的多杆机构、非圆齿机构等去近似实现，致使这种机构变得复杂、体积变大、精度降低，成本提高，并且这种复杂的机构只能近似实现某一特定速度曲面，不能随加工工艺的变化输出不同的速度曲线，很难具有通用性。采用并联驱动形式的锻压机械则可以满足锻压工艺的要求，大功率定转速电机提供系统所需要的大部分功率，伺服电机调节冲头速度使其达到工艺的要求，如图 3-1 所示。即是：伺服电机输入不同的运动调节，即可处理不同的工艺要求的工件。此时，机械系统就具有很大的柔性。

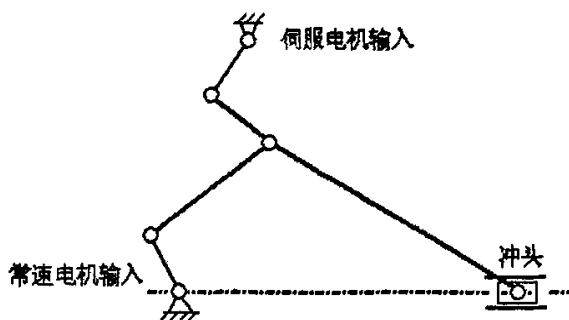


图 3-1 并联驱动用于锻压 机械

Fig 3-1 The parallel drive using for the forging and stamping mechanics

最简单的并联驱动系统是采用一台定转速电机和一台伺服电机的并联驱动机器。这就要用一个二自由度机构将二台电机的运动合成。运动合成机构可以采用差动轮系，也可以采用二自由度连杆机构。最简单的是二自由度平面五杆机构。对五杆机构加上一个定速电机输入和一个伺服电机输入就构成了一个并联驱动机构。如图所示 3-2 为平面并联五杆机构的机构模型。

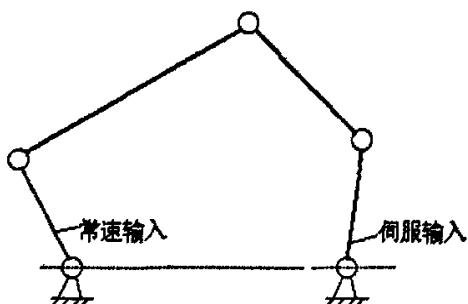


图 3-2 平面并联五杆机构

Fig 3-2 Parallel drive five-bar mechanism

3.1.2 研究现状

平面二自由度并联机械手以及并联驱动微型机电系统都采用二自由度平面五杆机构。与传统的二自由度串联机械手相比，并联机械手具有优良的机械性能。并联驱动型微型机电系统结合了传统机械和全伺服微型机电系统的优点^[37]。五杆机构能够补偿四杆机构的机构误差，实现高精度运动输出，完成复杂的运动规律。近年来，对二自由度平面机构的研究日益受到国内外学者的重视。

3.2 平面并联五杆机构运动学分析

3.2.1 运动学模型建立

本节介绍二自由度平面五杆机构运动学分析和动力学分析的通用方法，它是五杆机构特性分析的基础，也是五杆机构尺寸综合以及轨迹输出的基础。平面并联五杆机构是五杆机构的特殊类型，下面将介绍其运动学和动力学分析。

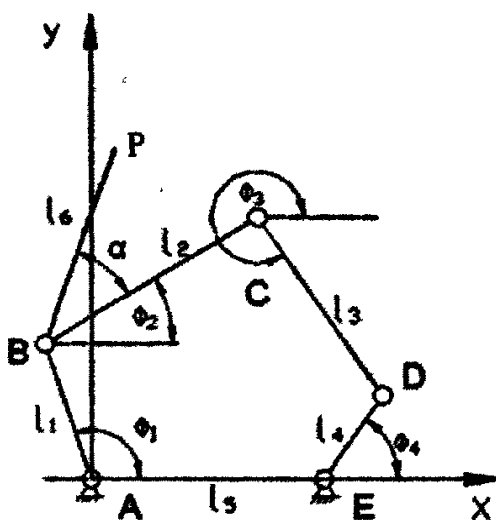


图 3-3 平面并联五杆机构坐标系模型

Fig 3-3 The coordinate system model of Parallel drive five-bar mechanism

如图 3-3 所示，取铰链 A 处为绝对坐标系的原点，且已知构件的尺寸参数： l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 、 l_6 。驱动杆 l_1 、 l_4 的初始相位角为 ϕ_{10} 、 ϕ_{40} ；角速度为 ω_1 、 ω_4 ；角加速度为 ε_1 、 ε_4 。

3.2.2 正运动学分析

1、位置分析

B、D 的位置：

$$\begin{cases} x_b = l_1 \cos(\phi_1 + \phi_{10}) \\ y_b = l_1 \sin(\phi_1 + \phi_{10}) \\ x_d = l_5 + l_4 \cos(\phi_4 + \phi_{10}) \\ y_d = l_4 \sin(\phi_4 + \phi_{10}) \end{cases} \quad (3-1)$$

五杆机构的运动回路矢量方程是：

$$l_1 e^{j(\phi_1 + \phi_{10})} + l_2 e^{j\phi_2} + l_3 e^{j\phi_3} = l_5 + l_4 e^{j(\phi_4 + \phi_{40})} \quad (3-2)$$

将(3-2)分解为沿坐标轴 x、y 方向的标量形式为：

$$\begin{cases} x_B + l_2 \cos \phi_2 + l_3 \cos \phi_3 = x_D \\ y_B + l_2 \sin \phi_2 + l_3 \sin \phi_3 = y_D \end{cases} \quad (3-3)$$

又有 P 点的位置矢量表达式为：

$$r_p = l_1 e^{j(\phi_1 + \phi_{10})} + l_6 e^{j(\phi_2 + \alpha)} \quad (3-4)$$

将上式再写成标量形式：

$$\begin{cases} x_p = l_1 \cos(\phi_1 + \phi_{10}) + l_6 \cos(\phi_2 + \alpha) \\ y_p = l_1 \sin(\phi_1 + \phi_{10}) + l_6 \sin(\phi_2 + \alpha) \end{cases} \quad (3-5)$$

P 点的轨迹在绝对坐标系中的幅值和相角为：

$$|r_p| = \sqrt{l_1^2 + l_6^2 + 2l_1 l_6 \cos(\phi_1 + \phi_{10} - \phi_2 - \alpha)} \quad (3-6)$$

$$\arg(r_p) = \tan^{-1} \frac{l_1 \sin(\phi_1 + \phi_{10}) + l_2 \sin(\phi_2 + \alpha)}{l_1 \cos(\phi_1 + \phi_{10}) + l_2 \cos(\phi_2 + \alpha)} \quad (3-7)$$

各构件质心点位置：

$$\begin{cases} x_{s1} = l_{s1} \cos(\phi_1 + \phi_{10}) \\ y_{s1} = l_{s1} \sin(\phi_1 + \phi_{10}) \\ x_{s4} = l_5 + l_{s4} \cos(\phi_4 + \phi_{40}) \\ y_{s4} = l_{s4} \sin(\phi_4 + \phi_{40}) \\ x_{s3} = x_D + l_{s3} \cos \phi_3 \\ y_{s3} = y_D + l_{s3} \sin \phi_3 \\ x_{s2} = x_B + l_{s2} \cos \phi_2 \\ y_{s2} = y_B + l_{s2} \sin \phi_2 \end{cases} \quad (3-8)$$

将(3-3)中含 ϕ_3 的项移至方程的一侧，然后消去 ϕ_3 求解 ϕ_2 ，可得：

$$\begin{aligned} & 2(y_D - y_B)l_2 \sin \phi_2 + 2(x_D - y_D)l_2 \cos \phi_2 + l_3^2 - l_2^2 - [(x_D - x_D)^2 \\ & + (y_D - y_B)^2] = 0 \end{aligned} \quad (3-9)$$

上式中令：

$$K = 2l_2(y_D - y_B)$$

$$H = 2(x_D - y_D)l_2$$

$$M = l_3^2 - l_2^2 - [(x_D - x_B)^2 + (y_D - y_B)^2]$$

则可得:

$$K \sin \phi_2 + H \cos \phi_2 + M = 0 \quad (3-10)$$

此时, 设 $s = \tan \frac{\phi_2}{2}$, 则有 $\sin \phi_2 = \frac{2s}{1+s^2}$ 、 $\cos \phi_2 = \frac{1-s^2}{1+s^2}$, 代入(3-10)可得到:

$$(M - H)s^2 + 2Ks + M + H = 0 \quad (3-11)$$

解(3-11)方程, 结果有二个解:

$$s = (-K \pm \sqrt{K^2 + H^2 - M^2}) / (M - H) \quad (3-12)$$

最后求得:

$$\phi_2 = 2 \arctan s \quad (3-13)$$

可得:

$$\phi_3 = \arctan \left(\frac{y_D - y_B - l_2 \sin \phi_2}{x_D - x_B - l_2 \cos \phi_2} \right) \quad (3-14)$$

2、速度分析

对 B、D 点的标量方程的二边分别对 t 求导得到:

$$\begin{cases} \dot{x}_B - l_2 \omega_2 \sin \phi_2 - l_3 \omega_3 \sin \phi_3 = \dot{x}_D \\ \dot{y}_B - l_2 \omega_2 \cos \phi_2 - l_3 \omega_3 \cos \phi_3 = \dot{y}_D \end{cases} \quad (3-15)$$

求解上式可得:

$$\omega_2 = -\frac{(\dot{y}_D - \dot{y}_B) \sin \phi_3 + (\dot{x}_D - \dot{x}_B) \cos \phi_3}{l_2 \sin(\phi_2 - \phi_3)} \quad (3-16)$$

$$\omega_3 = -\frac{(\dot{y}_D - \dot{y}_B) \sin \phi_2 + (\dot{x}_D - \dot{x}_B) \cos \phi_2}{l_3 \sin(\phi_3 - \phi_2)} \quad (3-17)$$

由上可求得轨迹点 P 的速度为:

$$\begin{cases} \dot{x}_P = \dot{x}_B - l_6 \omega_2 \sin(\phi_2 + \alpha) \\ \dot{y}_P = \dot{y}_B - l_6 \omega_2 \cos(\phi_2 + \alpha) \end{cases} \quad (3-18)$$

各构件质心的速度为:

$$\begin{cases}
 \dot{x}_{s1} = -l_{s1}\omega_1 \sin(\phi_1 + \phi_{10}) \\
 \dot{y}_{s1} = l_{s1}\omega_1 \cos(\phi_1 + \phi_{10}) \\
 \dot{x}_{s4} = -l_{s4}\omega_4 \sin(\phi_4 + \phi_{40}) \\
 \dot{y}_{s4} = l_{s4}\omega_4 \cos(\phi_4 + \phi_{40}) \\
 \dot{x}_{s2} = \dot{x}_B - l_{s2}\omega_2 \sin \phi_2 \\
 \dot{y}_{s2} = \dot{y}_B + l_{s2}\omega_2 \cos \phi_2 \\
 \dot{x}_{s3} = \dot{x}_D - l_{s3}\omega_3 \sin \phi_3 \\
 \dot{y}_{s3} = \dot{y}_D + l_{s3}\omega_3 \cos \phi_3
 \end{cases} \quad (3-19)$$

3、加速度分析

对上述的速度等式二边再求导可得到:

$$\begin{cases}
 \ddot{x}_B - l_2\varepsilon_2 \sin \phi_2 - l_2\omega_2^2 \cos \phi_2 - l_3\varepsilon_3 \sin \phi_3 - l_3\omega_3^2 \cos \phi_3 = \ddot{x}_D \\
 \ddot{y}_B + l_2\varepsilon_2 \cos \phi_2 - l_2\omega_2^2 \sin \phi_2 + l_3\varepsilon_3 \cos \phi_3 - l_3\omega_3^2 \sin \phi_3 = \ddot{y}_D
 \end{cases} \quad (3-20)$$

由 (3-43) 可得到:

$$\varepsilon_2 = -\frac{(\ddot{y}_D - \ddot{y}_B) \sin \phi_3 + (\ddot{x}_D - \ddot{x}_B) \cos \phi_3 + l_2\omega_2^2 \cos(\phi_2 - \phi_3) + l_3\omega_3^2}{l_2 \sin(\phi_2 - \phi_3)} \quad (3-21)$$

$$\varepsilon_3 = -\frac{(\ddot{y}_D - \ddot{y}_B) \sin \phi_2 + (\ddot{x}_D - \ddot{x}_B) \cos \phi_2 + l_3\omega_3^2 \cos(\phi_3 - \phi_2) + l_2\omega_2^2}{l_3 \sin(\phi_3 - \phi_2)} \quad (3-22)$$

由上可得轨迹点 P 的加速度为:

$$\begin{cases}
 \ddot{x}_P = \ddot{x}_B - l_6\varepsilon_2 \sin(\phi_2 + \alpha) - l_6\omega_2^2 \cos(\phi_2 + \alpha) \\
 \ddot{y}_P = \ddot{y}_B + l_6\varepsilon_2 \cos(\phi_2 + \alpha) - l_6\omega_2^2 \sin(\phi_2 + \alpha)
 \end{cases} \quad (3-23)$$

各构件质心点的加速度为:

$$\begin{cases}
 \ddot{x}_{s1} = -l_{s1}\varepsilon_1 \sin(\phi_1 + \phi_{10}) - l_{s1}\omega_1^2 \cos(\phi_1 + \phi_{10}) \\
 \ddot{y}_{s1} = l_{s1}\varepsilon_1 \cos(\phi_1 + \phi_{10}) - l_{s1}\omega_1^2 \sin(\phi_1 + \phi_{10}) \\
 \ddot{x}_{s4} = -l_{s4}\varepsilon_4 \sin(\phi_4 + \phi_{40}) - l_{s4}\omega_4^2 \cos(\phi_4 + \phi_{40}) \\
 \ddot{y}_{s4} = l_{s4}\varepsilon_4 \cos(\phi_4 + \phi_{40}) - l_{s4}\omega_4^2 \sin(\phi_4 + \phi_{40}) \\
 \ddot{x}_{s2} = \ddot{x}_B - l_{s2}\varepsilon_2 \sin \phi_2 - l_{s2}\omega_2^2 \cos \phi_2 \\
 \ddot{y}_{s2} = \ddot{y}_B + l_{s2}\varepsilon_2 \cos \phi_2 - l_{s2}\omega_2^2 \sin \phi_2 \\
 \ddot{x}_{s3} = \ddot{x}_D - l_{s3}\varepsilon_3 \sin \phi_3 - l_{s3}\omega_3^2 \cos \phi_3 \\
 \ddot{y}_{s3} = \ddot{y}_D + l_{s3}\varepsilon_3 \cos \phi_3 - l_{s3}\omega_3^2 \sin \phi_3
 \end{cases} \quad (3-24)$$

3.2.3 逆运动学分析

平面并联五杆机构的逆运动学分析,是本论文新型应用的重点。所谓的逆运动学即是在已知五杆机构装配构型、机构尺寸以及输出端轨迹的情况下,确定出二个并联驱动端的运动规律。

1、位置分析

已知 P 点的轨迹,设坐标为 $P(x_p, y_p)$, 则可求得 ϕ_2 :

$$\phi_2 = -\alpha + \operatorname{tg}^{-1} \frac{y_p - l_1 \sin(\phi_1 + \phi_{10})}{x_p - l_1 \cos(\phi_1 + \phi_{10})} \quad (3-25)$$

又 (3-3) 的环路方程可得:

$$\begin{cases} x_B + l_2 \cos \phi_2 + l_3 \cos \phi_3 = l_5 + l_4 \cos(\phi_4 + \phi_{40}) \\ y_B + l_2 \sin \phi_2 + l_3 \sin \phi_3 = l_4 \sin(\phi_4 + \phi_{40}) \end{cases} \quad (3-26)$$

由 (3-26) 可求得:

$$2[l_1 \sin(\phi_1 + \phi_{10}) + l_2 \sin \phi_2] l_4 \sin \phi_4 + 2[-l_5 + l_1 \cos(\phi_1 + \phi_{10}) + l_2 \cos \phi_2] l_4 \cos \phi_4 + l_3^2 - l_4^2 - \{[l_5 - l_1 \cos(\phi_1 + \phi_{10})]^2 + [l_2 \sin \phi_{12} - l_1 \sin(\phi_1 + \phi_{10})]^2\} = 0 \quad (3-27)$$

令:

$$K' = 2[l_1 \sin(\phi_1 + \phi_{10}) + l_2 \sin \phi_2] l_4$$

$$H' = 2[-l_5 + l_1 \cos(\phi_1 + \phi_{10}) + l_2 \cos \phi_2] l_4$$

$$M' = l_3^2 - l_4^2 - \{[l_5 - l_1 \cos(\phi_1 + \phi_{10})]^2 + [(l_1 \sin(\phi_1 + \phi_{10}) + l_2 \sin \phi_{12})]^2\}$$

可得:

$$K' \sin \phi_4 + H' \cos \phi_4 + M' = 0 \quad (3-28)$$

设 $s = \tan \frac{\phi_4}{2}$, 则有,:

$$\sin \phi_4 = \frac{2s}{1+s^2}, \cos \phi_4 = \frac{1-s^2}{1+s^2}$$

代入 (3-28) 可到:

$$(M' - H')s^2 + 2K' + M' + H' = 0 \quad (3-29)$$

解 (3-29) 方程结果有两个解:

$$s = (-K' \pm \sqrt{K'^2 + H'^2 - M'^2}) / (M' - N') \quad (3-30)$$

求得:

$$\phi_4 = 2 \arctan s \quad (3-31)$$

同时, 由 (3-26) 可解得:

$$\phi_3 = \arctan \left(\frac{y_D - y_B - l_2 \sin \phi_2}{x_D - x_B - l_2 \cos \phi_2} \right) \quad (3-32)$$

2、速度分析

由已知可知:

$$\begin{cases} \dot{x}_p = \dot{x}_B - l_6 \omega_2 \sin(\phi_2 + \alpha) \\ \dot{y}_p = \dot{y}_B + l_6 \omega_2 \cos(\phi_2 + \alpha) \end{cases} \quad (3-33)$$

由上式可结的 ω_2

由等式 (3-15) 可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_B - l_2 \omega_2 \sin \phi_2 - l_3 \omega_3 \sin \phi_3 = -l_4 \omega_4 \sin(\phi_4 + \phi_{40}) \\ \dot{y}_B - l_2 \omega_2 \cos \phi_2 - l_3 \omega_3 \cos \phi_3 = l_4 \omega_4 \cos(\phi_4 + \phi_{40}) \end{cases} \quad (3-34)$$

求得:

$$\omega_4 = \frac{l_1 \omega_1 \sin(\phi_1 - \phi_3) + l_2 \omega_2 \sin(\phi_2 - \phi_3)}{l_4 \sin(\phi_4 - \phi_3)} \quad (3-35)$$

$$\omega_3 = \frac{l_1 \omega_1 \sin(\phi_1 - \phi_4) + l_2 \omega_2 \sin(\phi_2 - \phi_4)}{l_3 \sin(\phi_3 - \phi_4)} \quad (3-36)$$

3、加速度分析

由已知可得:

$$\begin{cases} \ddot{x}_p = \ddot{x}_B - l_6 \varepsilon_2 \sin(\phi_2 + \alpha) - l_6 \omega_2^2 \cos(\phi_2 + \alpha) \\ \ddot{y}_p = \ddot{y}_B + l_6 \varepsilon_2 \cos(\phi_2 + \alpha) - l_6 \omega_2^2 \sin(\phi_2 + \alpha) \end{cases} \quad (3-37)$$

由上式可解得 ε_2 。

$$\begin{cases} \ddot{x}_B - l_2 \varepsilon_2 \sin \phi_2 - l_2 \omega_2^2 \cos \phi_2 - l_3 \varepsilon_3 \sin \phi_3 - l_3 \omega_3^2 \cos \phi_3 = \\ -l_4 \varepsilon_4 \sin(\phi_1 + \phi_{40}) - l_4 \omega_4^2 \cos(\phi_1 + \phi_{40}) \\ \ddot{y}_B + l_2 \varepsilon_2 \cos \phi_2 - l_2 \omega_2^2 \sin \phi_2 - l_3 \varepsilon_3 \cos \phi_3 - l_3 \omega_3^2 \sin \phi_3 = \\ -l_4 \varepsilon_4 \cos(\phi_1 + \phi_{40}) - l_4 \omega_4^2 \sin(\phi_1 + \phi_{40}) \end{cases} \quad (3-38)$$

由于:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_3 &= \frac{l_1 \varepsilon_1 \sin(\phi_1 - \phi_4) + l_1 \omega_1^2 \cos(\phi_1 - \phi_4) + l_2 \varepsilon_2 \cos(\phi_2 - \phi_4) +}{l_3 \sin(\phi_3 - \phi_4)} \\
 &\quad \frac{l_2 \omega_2^2 \cos(\phi_2 - \phi_4) + l_4 \omega_4^2 - l_3 \omega_3^2 \cos(\phi_4 - \phi_3)}{l_3 \sin(\phi_3 - \phi_4)} \\
 \varepsilon_4 &= \frac{l_1 \varepsilon_1 \sin(\phi_1 - \phi_4) + l_1 \omega_1^2 \cos(\phi_1 - \phi_4) + l_2 \varepsilon_2 \cos(\phi_2 - \phi_4) +}{l_3 \sin(\phi_4 - \phi_3)} \\
 &\quad \frac{l_2 \omega_2^2 \cos(\phi_2 - \phi_3) + l_4 \omega_4^2 - l_3 \omega_3^2 \cos(\phi_4 - \phi_3)}{l_3 \sin(\phi_4 - \phi_3)}
 \end{aligned} \tag{3-39}$$

3.3 平面并联五杆机构输出轨迹规划

轨迹规划是要使执行机构从起始状态移动到某个状态，实际上可以看作是把输出点的坐标系从当前的起始值，转变为目的值。

在实际规划过程中，将一些工作状态称为起始点、中间点与终止点。当只需要二个工作状态时，中间不需要任何的过度环境，直接按照既定的运动轨迹从起始点到终止点，这种轨迹规划我们称为点到点的轨迹规划；另一种是中间存在一些工作状态，最终达到一种终止状态，我们称之为途径多点的轨迹规划。这种轨迹规划可将整个轨迹规划分成若干个点到点的轨迹规划来分析，前一个状态的终止点又是后一个状态的起始点，如此类推下去即可得出途径多点的轨迹规划。下面将对五杆机构的点到点的轨迹规划做详细研究。

如图 3-4 所示，为平面并联五杆机构的二个运动状态点，为实现从 C 到 C' 点的轨迹，驱动杆 AB 由初始相位角 θ_{10} 到达新的位置 AB' ，此时终止角度 θ_{1f} ，同时在驱动杆 AD 由初始角度 θ_{40} 到达新位置 AD' ，此时终止角度 θ_{4f} 。由于相应的起始点 θ_0 的关节角是已经知道的，而终点的关节角 θ_f 可以通过逆运动学的解得到，因此，运动轨迹的描述可以通过起始点的关节角与终止点的关节角的一个平滑的插值函数 $\theta(t)$ 来表示， $\theta(t)$ 在时刻 $t=0$ 是起始关节角，在终端时刻 t_f 的值是终止关节角 θ_f ，显然，有许多的平滑函数可作为关节的插值函数，满足 θ_0 和 θ_f 的约束。

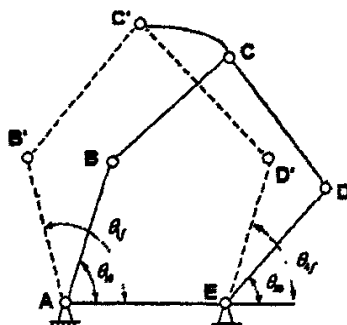


图 3-4 平面并联五杆机构输出轨迹规划

Fig 3-4 The output trail planning of Parallel drive five-bar mechanism

为了实现单个关节的平稳运动, 轨迹函数 $\theta(t)$ 至少需要满足四个约束条件。二个是端点的角度约束, 端点角度约束是指起始点和终止点对应的关节角度。

$$\begin{cases} \theta(0) = \theta_0 \\ \theta(t_f) = \theta_f \end{cases} \quad (3-40)$$

此时为了满足运动速度的连续性要求, 另外还有二个速度的约束条件, 即在起始点和终止点的速度约束, 在当前的情况下, 可以认为:

$$\begin{cases} \dot{\theta}(0) = 0 \\ \dot{\theta}(t_f) = 0 \end{cases} \quad (3-41)$$

由上面四个等式所代表的边界约束可以唯一确定一个三次多项式, 此时, 运动轨迹上的关节速度和加速度则为:

$$\begin{cases} \dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 \\ \ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3t \end{cases} \quad (3-42)$$

把四个边界约束分别带入相应的约束条件关系式中, 可以得到有关的系数 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 的四个线性方程组。

$$\begin{cases} a_0 = \theta_0 \\ \theta_f = a_0 + a_1t_f + a_2t_f^2 + a_3t_f^3 \\ a_1 = 0 \\ a_1 + 2a_2t_f + 3a_3t_f^2 = 0 \end{cases} \quad (3-43)$$

解得:

$$\begin{cases} a_0 = \theta_0 \\ a_1 = 0 \\ a_2 = 3(\theta_f - \theta_0)/t_f^2 \\ a_3 = -2(\theta_f - \theta_0)/t_f^3 \end{cases} \quad (3-44)$$

综上所述, 使用平面并联五杆机构作为步行机器人的腿部结构, 其足端的输出轨迹具有可调节性, 提高了机器人的步行跨步能力, 使其具有更强的适应性; 同时, 通过给定输出端的规划轨迹, 然后通过并联驱动的逆运动学求解运算可以得出并联驱动端的输入量。

3.4 本章总结

本章在引入并联驱动思想的基础上，结合并联驱动的研究现状，建立了并联驱动平面五杆机构的实体模型与数学模型。然后通过分别计算平面并联五杆机构的正、逆运动学得出可通过给定平面并联五杆机构输出端轨迹的情况下，通过运动学反解出并联驱动端的输入量。

4 实现一定足端轨迹的并联驱动特性研究

4.1 足端轨迹规划

4.1.1 步行机构模型建立

步行机构首先要保证其可动性与可解性,对于平面五杆机构的步行机构来说,要保证二方面功能的实现:一是满足连杆机构的双曲柄存在的条件;二是要保证五杆机构的逆运动学解的存在。根据图 3-3 所示的五杆机构坐标系模型,针对步行机构需要满足的条件,选定符合的杆长条件,可建立如图 4-1 所示的步行机构模型。



图 4-1 步行机构模型

Fig 4-1 The model of walking mechanism

4.1.2 足端轨迹规划

四足步行机器人的步行方式取决于步行机构足端的轨迹情况,从一定程度上说,步行机器人的足端轨迹决定着步行机器人采取何种步行方式。从步行机器人的实际步行情况出发,可以简单地将步行机构的足端轨迹与步行方式分为以下二种方式:

首先是常规的大步长、小步高的步行跨步。步长反映的步行机构跨步水平尺寸,这种情况适用于地面状况良好的环境,采用大步长的步行方式,可以在一定程度上提高机器人的步行速度。根据平面并联五杆机构输出轨迹的特点,为了实现大步长的步行跨步,可以设定足端得轨迹为水平椭圆轨迹,如图 4-2 所示为五杆

机构的步行机构在足端为水平椭圆轨迹时的规划状态图。

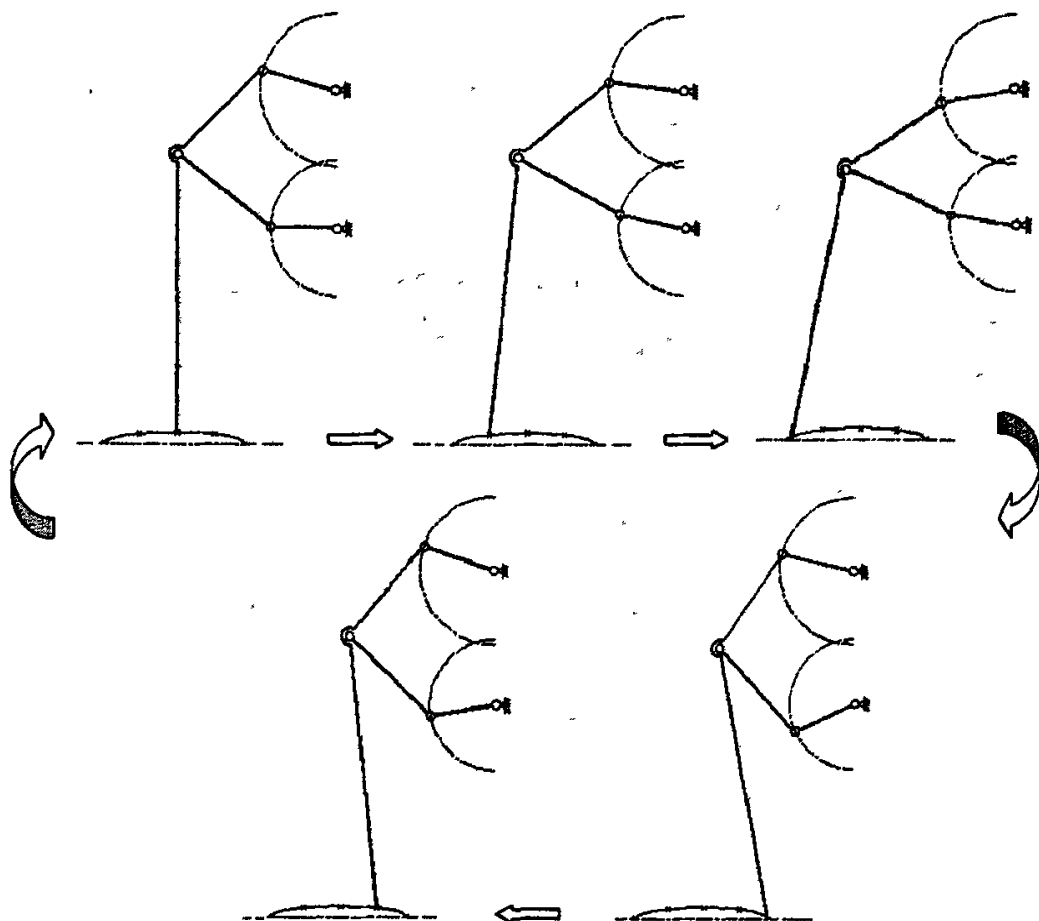


图 4-2 大步长规划状态图

Fig 4-2 The state graph of the long-moving planning

其次是常规的短步长、大步高的步行跨步。步高则反映的步行机构跨步高度尺寸，这种情况适用于地面高低不平的环境。根据平面并联五杆机构输出轨迹的特点，为了实现短步长、大步高的步行跨步，可以设定足端得轨迹为垂直椭圆轨迹，如图 4-3 所示为五杆机构的步行机构在足端为垂直椭圆轨迹时的规划状态图。

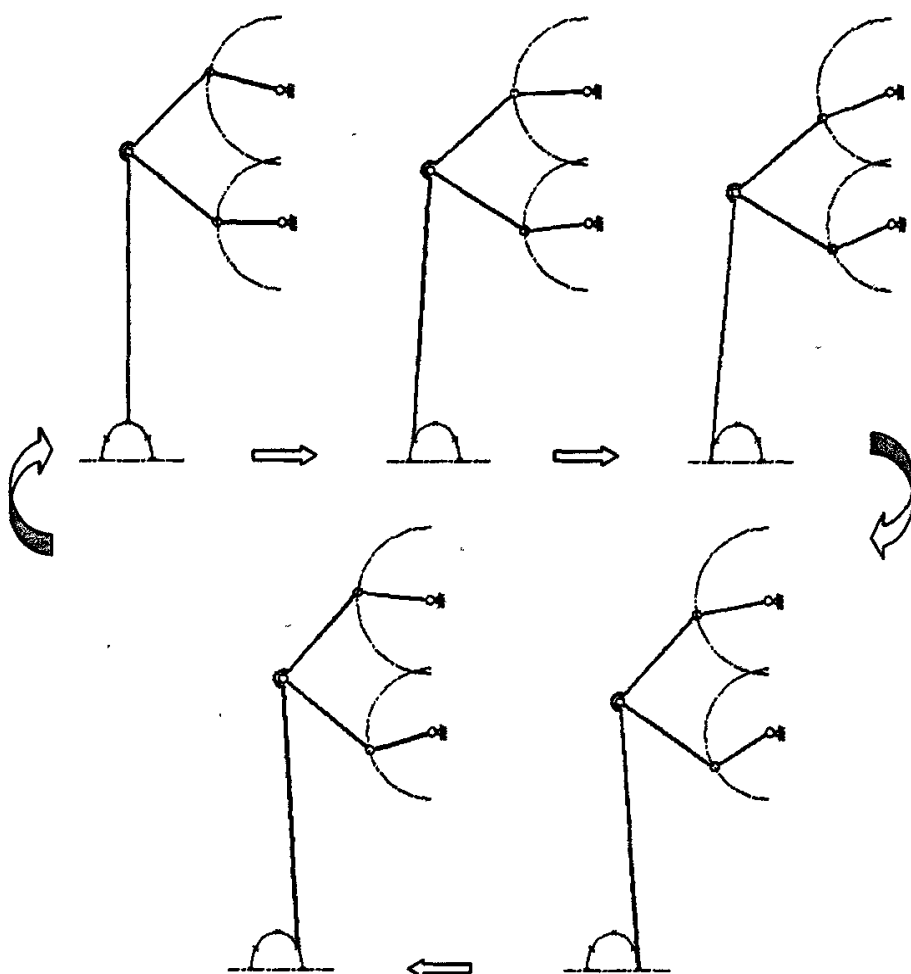


图 4-3 大步高规划状态图

Fig 4-3 The state graph of the high-moving planning

4.2 实现一定足端轨迹的并联驱动研究

4.2.1 足端轨迹点到点的轨迹规划分析

如图 4-4 所示, 为步行机构的二个运动状态, 为实现足端轨迹从 O 到 O' 点的移动, 相应的关节 B 、 C 、 D 移动到一个新的位置, 此时并联驱动端的驱动杆均绕各自的固定驱动关节 A 、 E 旋转, 相对初始的角度 (设定为零点), 驱动杆的转角分别为 θ_1 、 θ_2 。在一定的时间内, 常速转动的关节角 θ_1 位已知, 而终点的关节角 θ_2 可以通过参照平面并联五杆机构的逆运动学的解而求得, 因此, 运动轨迹的

描述可以通过状态的关节角与起始关节角的一个平滑的插值函数 $\theta(t)$ 来表示。具体的插值函数的求解与优化过程可参照 3.3 节平面并联五杆机构的轨迹规划来获得。

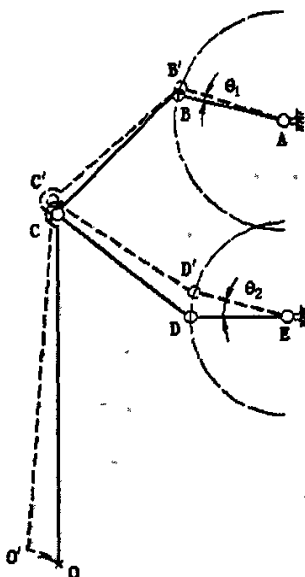


图 4-4 步行机构足端点到点轨迹规划

Fig 4-4 The PTP trail planning of the walking mechanism

4.2.2 系统建模

如上节所述，运动轨迹的描述可以通过状态的关节角与起始关节角的一个平滑的插值函数 $\theta(t)$ 来表示；反过来，对于运动轨迹曲线中的二个状态点，通过逆运动学运算就可以得到驱动杆，相对于初始的角度变化量来表示，当对运动轨迹进行近似插值运算时，逆运动学运算亦可得到驱动杆的角度变化的插值量，然后对所插值进行曲线拟合即可得到并联驱动端的驱动函数曲线。

如图 4-5 所示，建立步行机构与足端轨迹的模型图。在足端轨迹椭圆曲线上对称地选择 8 个点作为插值点，设定步行机构足端所在的连杆垂直时为初始点（零点），对应于每一个足端轨迹的插值点，通过平面并联五杆机构逆运动学的反解运算，均可以得出并联驱动段的的角度变化量。如表 4-1 所示。

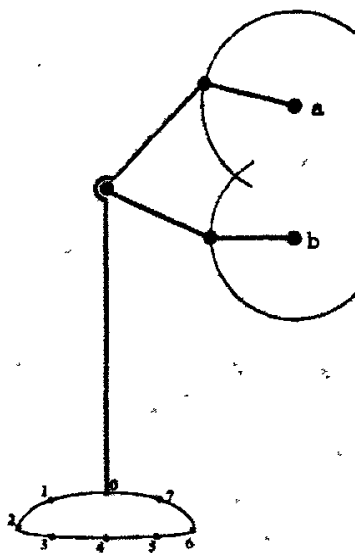


图 4-5 模型图

Fig 4-5 The model figure

表 4-1 插值模型表

Table 4-1 model table of the insert value

轨迹插值点	关节 1 角度变化	关节 2 角度变化
0 点	0	0
1 点	θ_{1a}	θ_{1b}
2 点	θ_{2a}	θ_{2b}
3 点	θ_{3a}	θ_{3b}
4 点	θ_{4a}	θ_{4b}
5 点	θ_{5a}	θ_{5b}
6 点	θ_{6a}	θ_{6b}
7 点	θ_{7a}	θ_{7b}

4.2.3 仿真分析

在 ADAMS 中建立如图 4-5 所示的模型，并建立各关约束与驱动约束，将足端轨迹曲线以及插值点导入 ADAMS 数据库中，建立足端点与对应插值点的状态图，如图 4-6 所示。

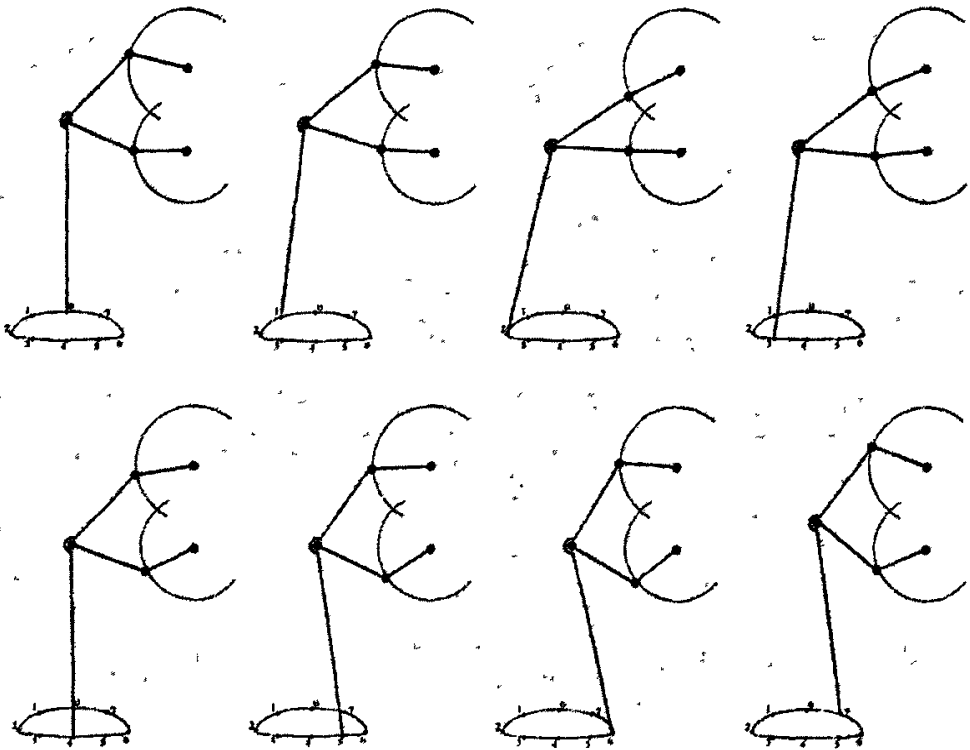


图 4-6 ADAMS 插值状态图

Fig 4-6 The state graph of insert value in ADAMS

在 ADAMS 中每个插值状态点中直接读取并联驱动端的角度变化量，然后将各插值角度变化量进行曲线拟合，即可得出并联驱动端的驱动函数，驱动函数如图 4-7、4-8 所示。

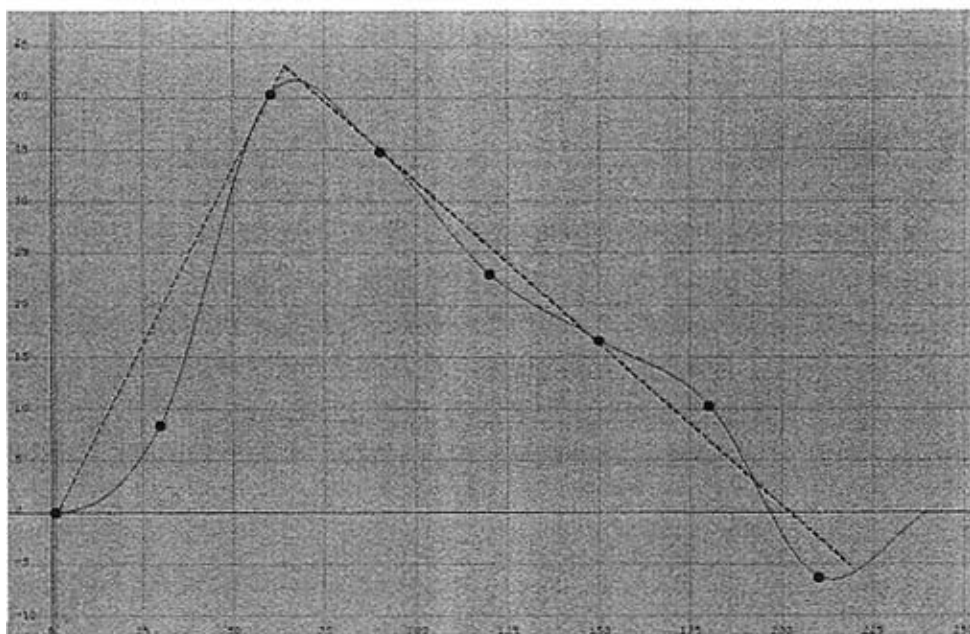


图 4-7 上关节 a 驱动函数拟合曲线

Fig 4-7 The drafting curve of the top joint's driving function

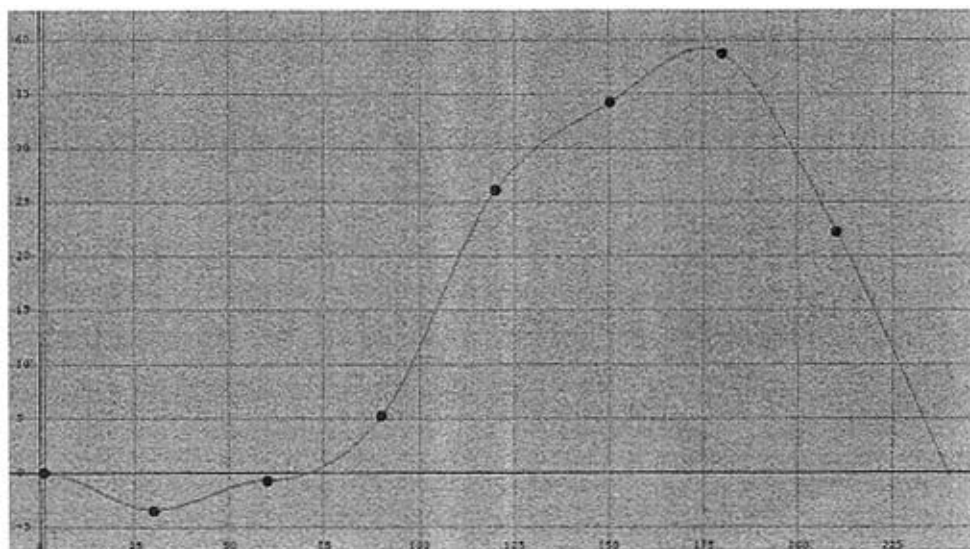


图 4-8 下关节 b 驱动函数拟合曲线

Fig 4-8 The drafting curve of the down joint's driving function

图 4-5 所建立的模型是基于平面并联五杆机构的基础上, 从足端插值点反解到并联驱动段时, 其反解运算中是设定上关节为匀速转动, 即上关节的驱动函数理论上应该是一个绝对值直线函数。而对于图 4-7 得出的仿真图形, 得出近似正/余弦的函数, 但是从图中不难看出, 驱动函数的插值点分别位于某一绝对值函数直线的二侧, 如图 4-7 中虚线所示。

对于图 4-8 所示的下关节驱动函数曲线的仿真结果表明: 下关节的驱动函数拟

合曲线与下关节为伺服输入端的定义相吻合。

4.3 本章总结

本章在依据平面并联五杆机构的基础上，建立了步行机构的实体模型。然后针对实体模型的简化方式对步行机构的足端轨迹做了大步长和大步高二种轨迹的规划，并给出规划的状态图谱。在参照平面并联五杆机构点到点轨迹规划的基础上，引入了步行机构足端轨迹的点到点规划，然后重点分析了利用轨迹插值法获得并联驱动端驱动函数的拟合曲线的系统建模，最终在 ADAMS 中使用上述插值的方法完成了实现一定足端轨迹的并联驱动曲线的仿真，并与理论结果作了对比分析。

5 四足步行机器人整体结构设计

5.1 方案设计

本课题所设计的步行机器人，是针对现有步行机器人在实际研究和应用中存在的一些问题或不足，将平面并联五杆机构应用在步行机器人的腿部结构来提高步行机器人的跨步能力与柔性，然后将步行机器人的整个控制系统密封装配在机器人的机体中，通过轴传动来驱动步行机构跨步步行，以提高步行机器人的环境适应性，同时，针对密封装配的特点，采用动态扭矩传感器实时监测步行机器人驱动关节的动态扭矩，通过一定的判别方法，得出足端周围情况，从而为步行机器人的避障、跨越障碍提供控制信息。

5.1.1 传统结构存在的不足

从现有所研究的步行机器人来说，针对其研究目的和应用领域的不同，步行机器人的结构也存在一定的不同，基于对步行机器人结构对机器人各性能的影响，将从以下几个方面来说明传统步行机器人结构存在的不足：

1、首先是步行机构的影响。

步行机构是步行机器人机械结构中比较重要的单元，步行机构直接影响到机器人的步行方式、控制策略以及应用领域等。传统步行机器人的步行机构主要采用开环关节连杆机构、四杆机构或其他一些特殊机构，如第二章所述，上述几种步行机构或多或少均存在一些缺点，如：四杆机构的输出轨迹比较固定，这将直接影响到步行机器人的跨越障碍能力；开环关节连杆机构由于是串联机构，连杆输出轨迹的误差较大，精确控制比较困难，同时因为存在活动关节，所以其承载能力较小。

2、监测传感器安装方式对结构的影响。

步行机器人一个很重要的功能就是跨越障碍与避障功能。这就需要安装一定的传感器来实时监测步行机器人所遇到的状态。安装在步行机器人上常见的传感器有力传感器与视觉传感器。力传感器一般安装在机器人的足端，通过足端与地面接触力的分布变化为获取足端周围的情况，给出相应信号；视觉传感器一般安装在机器人前端或是步行机构的某一位置来实时获取机器人足端所遇到视觉图像信号，达到避障或跨越的目的。但是受到这些传感器本身性能与安装方式的影响，

机器人必须在不影响传感器工作的前提下工作，或者说是比较好的环境下工作。当处于雨水、风沙甚至水下等环境工作时，视觉传感器将使其意义；力传感器也势必受到较大的影响。

3、机体结构的影响。

步行机器人的控制系统是机器人的大脑和心脏，控制系统的正常运行是保证步行机器人功能与任务实现的前提与基础。但是步行机器人的工作环境是多种多样的，可能是风和日丽的晴朗天气，也可能是雨水、风沙天气；可能是水下探测的水下作业，也可能是火山口的硫烟弥漫，此时一个重要的任务就是把机器人的控制系统比外界介质隔离，但是传统步行机器人由于受到传感器安装以及控制方案的影响，并没有将控制系统与外界介质隔离，所以其不具有恶劣环境工作的环境适应性。

5.1.2 设计要求

针对传统步行机器人结构对其应用与研究产生的影响，对所设计的步行机器人结构提出了以下要求：

- 1、选择合适的步行机构，使步行机构能够具有更大的灵活性与柔性，能够具有更大的跨越障碍的能力。
- 2、选择合适的监测传感器，能够获得足端的周围情况的同时，又能够与控制系统仪器密封安装在机体内部，实现与外界介质的隔离。
- 3、采取一定的机体结构，能够实现步行驱动，传感器监测等功能实现的同时，又能实现与外界介质的隔离，增加步行机器人的环境适应性。

5.1.3 整体方案设计

针对传统步行机器人结构中的一些不足，结合设计要求，给出了以下机器人总体设计方案。

- 1、将平面并联五杆机构用作步行机构；
 - 2、通过传动轴驱动作为混合驱动的输入源；
 - 3、通过与传动轴同轴安装动态扭矩传感器，实时监测步行机构驱动关节的驱动扭矩；
 - 4、将整体控制系统，包括驱动电机，扭矩传感器以及控制电路，密封装配在步行机器人的机体中，实现控制系统与外界介质的隔离，通过轴传动来驱动步行。
- 如图 5-1 所示为步行机器人单足结构的示意图。

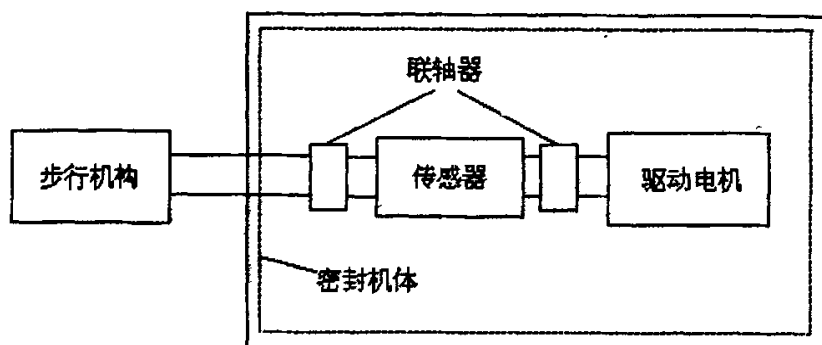


图 5-1 单足结构示意图

Fig 5-1 The structure sketch map of single foot

5.2 结构设计

5.2.1 零件模型的建立

本论文所研究的步行机器人是对称结构，所在结构分析与建模时只需要对一条腿的结构及其驱动方式等做相应分析，即可获得步行机器人整体的结构。下面将分别介绍单足结构各模型的建立。

1、步行机构模型建立

步行机构是由并联驱动平面五杆机构组成，在满足五杆机构可动性的基础上，给出五杆机构杆长优化。并结合步行机器人整体步行的特点，建立如图 5-2 所示的步行机构三维模型。

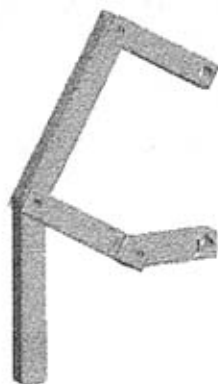


图 5-2 步行机构

Fig 5-2 Walking mechanism

2、传动轴的设计。

传动轴首先要与步行机构的驱动关节相连，采用键槽式周向固定和轴肩、螺纹旋紧式轴向固定；再有具有至少一个轴承座，然后通过轴承座与动态扭矩传感器轴向连接。如图 5-3 所示为传动轴的三维模型图。



图 5-3 传动轴

Fig 5-3 The propeller shaft

3、密封轴套设计。

当采用传动轴驱动步行机构时，为保证传动的效率，在旋转轴与机壳之间必须存在一定的间隙，正是这种间隙可能会导致外界介质的渗入。密封轴套的设计就是为了防止外界介质从旋转轴与机壳之间渗入而专门设计的密封装置^[38]。轴套与传动轴同轴安装，在轴套的内圈存在一个密封圈的轨道，密封圈在轨道内包围旋转轴的圆周，并与其适当紧密接触，从而防止外界介质从间隙中渗入，如图 5-4 和 5-5 分别为密封轴套的三位模型图与原理示意图。

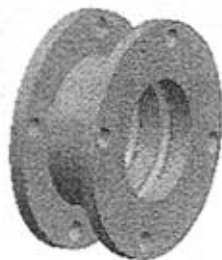


图 5.4 密封轴套

Fig 5-4 The airproof shaft liner

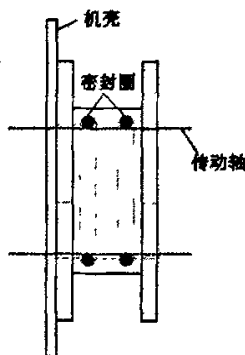


图 5.5 原理示意

Fig 5-5 The structure sketch of principle

5.2.2 模型装配

建立选购的控制元器件，动态扭矩传感器、联轴器以及驱动电机的三维模型后，将所有元件进行装配，对于单足装配，其装配模型和示意图如图 5-6、5-7 所示。

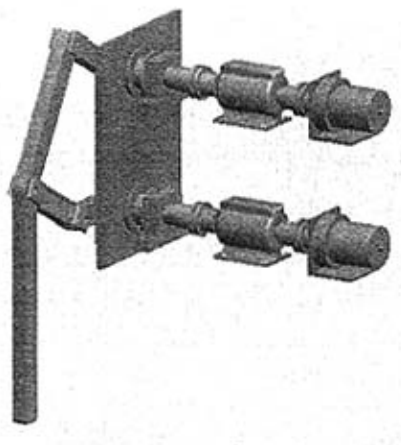


图 5-6 单足装配模型

Fig 5-6 The assemble model of single foot

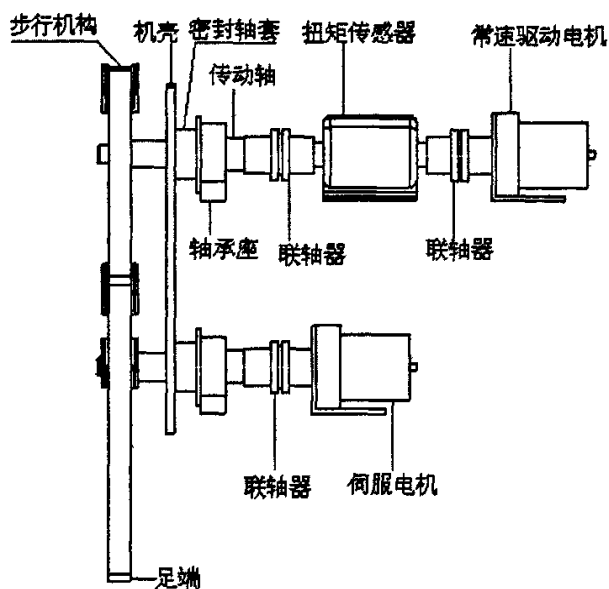


图 5-7 单足装配模型示意图

Fig 5-7 The structure sketch of assemble model

装配时值得注意的二点：

在装配时最重要的一点就是同轴安装。同轴安装的好坏是衡量本步行机器人结构设计的一个标准。主要体现在以下三个方面：

1、同轴安装决定着传动轴的传动效率。

机器人比较重要的一个衡量参数既是执行效率，当控制系统发出某一指令后，是否能够实时实现控制的目标。与以往步行机器人不同的是，本课题所研究的步

行机器人采用传动轴来驱动步行，同轴度的好坏直接影响到传动执行的效率。

2、同轴安装决定密封性能。

密封轴套是利用密封圈与旋转轴之间的紧密接触达到密封的效果，所以如果同轴度不好，势必会造成密封的不均匀，影响密封的性能。

3、同轴度影响传感器的数据采集

本课题采用动态扭矩传感器实时监测步行机构的驱动关节所受到的驱动扭矩来获取足端周围情况，当同轴度不好时，会造成驱动扭矩的波动，进而影响传感器的性能。

5.3 传感器的安装

在结构设计中，将动态扭矩传感器安装在驱动电机和轴承座之间，并通过刚性联轴器分别与传动轴和电机输出轴向连接，连接示意如图 5-6 所示，传感器尺寸图如图 5-7 所示

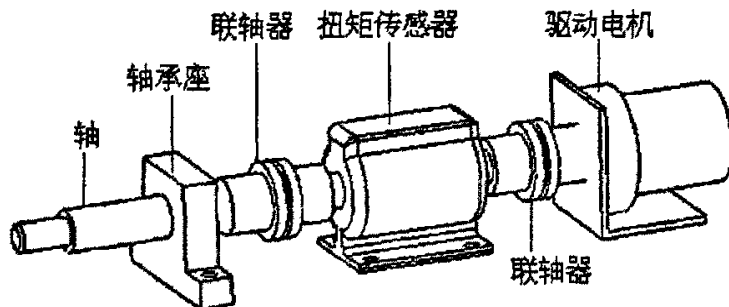


图 5-6 动态扭矩传感器安装示意图

Fig 5-6 The installation sketch figure of the Dynamic torque sensor

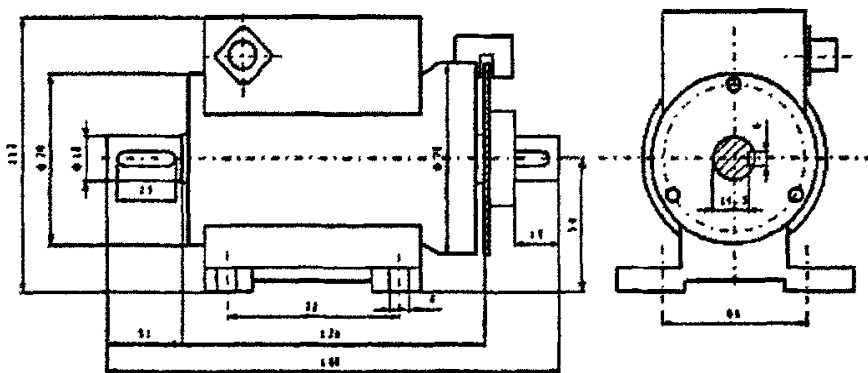


图 5-7 传感器尺寸图

Fig 5-7 The size figure of the Dynamic torque sensor

安装时一个重要的问题就是安装同轴度的问题，其同轴度的好坏直接影响到传感器功能实现的与否以及测量的准确性。可根据轴的连接形式和扭矩传感器的长度，可以确定驱动电机和负载之间的距离，调节原动机和负载的轴线相对于基准面的距离，使它们的轴线的同轴度小于 $\phi 0.03\text{mm}$ ，固定原动机和负载在基准面上。另外，扭矩传感器应安装在环境温度为 $0^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度小于90%，无易燃、易爆品的环境里，不宜安装在强电磁干扰的环境中。

5.4 本章总结

本章在针对传统四足步行机器人结构存在不足的基础上，结合实际应用以及研究的需要，设计了一套新型步行机器人结构。将平面并联五杆机构应用四足步行机器人的步行机构，然后将步行机器人的整个控制系统密封装配在机体中，通过轴传动来驱动步行机构步行，通过动态扭矩传感器来监测步行机构驱动关节的扭矩，从而获得足端周围情况，达到步行控制的目的。在结构设计中，分别设计并建立了步行机构、传动轴以及密封轴套的三维模型，然后在建立其他标准元件的基础，给出了四足步行机器人单足装配模型。

6 动态扭矩传感器与步行控制协调规划

6.1 步行机器人与传感器

6.1.1 机器人传感器介绍

机器人是一个复杂的系统，它涵盖了机械工程、电子工程以及人工智能等多学科的知识体系。对于一个完整的机器人来说，控制系统是决定机器人步行性能好坏的重要因素。步行机器人通过一定的传感器获得步行足端情况，从而达到控制的目的。

传感器可被狭义地定义为能把外界非电信息转换成电信号输出的电器，传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路三部分组成，其结构框图如图 6-1 所示。

框图中敏感元件即是直接感受被测量，并输出与被测量成某一确定关系的某一物理量的元件，对于步行机器人来说，既是获得足端周围情况。转换元件将敏感元件的输出作为它的输入，然后把输入转换成电路的参数量，再经过转换电路便可转换成电量输出传送给机器人控制系统，进行控制方案的选择。实际上，有些传感器很简单，有些则复杂。大多数传感器是一个开环系统，也有些是带反馈的闭环系统。

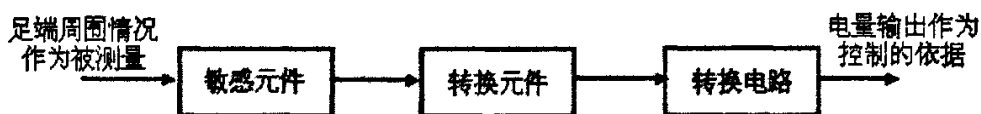


图 6-1 步行机器人传感器框图

Fig 6-1 The frame figure of the sensor of the walking robot

6.1.2 传统步行机器人传感器介绍

在步行机器人中，传感器是实现步行控制最基本的一步。通过传感器实时获得步行机器人足端、前方等周围情况，才能使得机器人能够正稳态步行。如果没有传感器，步行机器人便无法获取与外界环境之间的信息，从而难以完成机器人在环境约束下的各种作业，因此传感器是步行机器人步行控制中不可缺少的一种重要感觉元件。传感器、步行控制以及步行机器人之间的关系如图 6-2 所示。

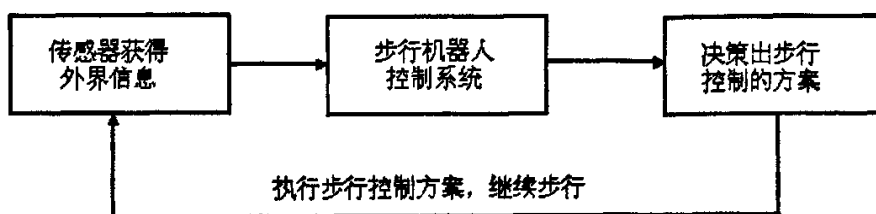


图 6-2 步行控制与传感器关系

Fig 6-2 The relationship of walking controlling and the sensor

步行机器人常用传感器有二种：

1、力传感器

在步行机器人的步行足端安装了力传感器，利用它检测足端与物体（或地面）的接触力大小，来判断步行足是与外界物体发生碰撞还是接触地面^[39]。通过设置碰撞力信号的阈值来判断步行足是可以克服阻力按规划路径继续运动，还是改变运动方式避开障碍，或从摆动相转入支撑相。FSR (Force Sensing Resistors) 是一种聚合体薄膜装置，其电阻值大小与其活性表面所受正压力大小成正比，这种力传感器对力的敏感程度非常高^[40]。

用于步行机器人中，力传感器的控制原理框图如图 6-3 所示。

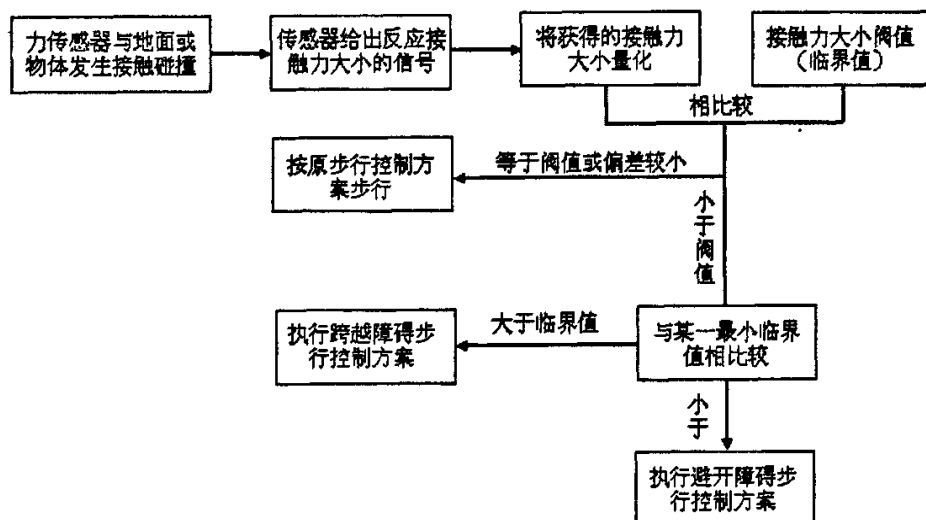


图 6-3 力传感器步行控制规划

Fig 6-3 The walking controlling planning of the force sensor

在步行机器人中，目前常见的力传感器有十字交叉梁结构的力传感器与四垂直筋式力矩传感器。

十字交叉梁结构力矩传感器是现在力传感器中使用最广泛、技术最成熟的一

种传感器。连接于中心毂和支撑片之间的四个臂是其变形元件。其测量原理是基于变形元件在力的作用下产生的弯曲变形，因此其四个变形元件可分别建模为自由端带有运动约束的悬臂梁结构。如图 6-4 所示。这种结构的缺点是由于十字梁外端由薄片支撑，因此承载能力不强，是以牺牲刚度而提高 Z 向灵敏度的结构。

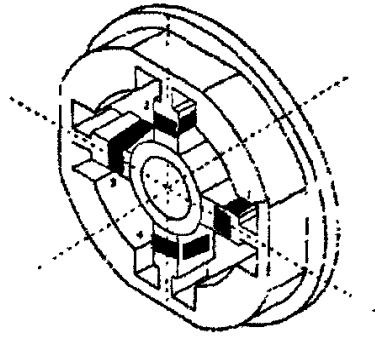


图 6-4 十字交叉梁结构力矩传感器
Fig 6-4 The Maltess Cross force sensor

四垂直筋式力传感器由于其结构简单、制造性能好，倍受研究者和制造厂家的重视。其变形元件即为四个垂直筋，如图 6-5 所示。该结构是利用变形元件产生的拉压变形和剪切变形，解决了灵敏度和刚度的矛盾，但 Z 方向的灵敏度较低，而且该结构承载能力不强。

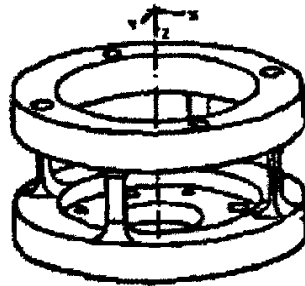


图 6-5 四垂直筋式力传感器

Fig 6-5 The 3 force sensor with four vertical deformation component

2、视觉传感器

视觉传感器又称为“机器视觉”，即采用机器代替人眼来做测量和判断；可以简单称之为机器眼。机器视觉系统是指通过机器视觉产品（即图像摄取装置，分 CMOS 和 CCD 两种）把图像抓取到，然后将该图像传送至处理单元，通过数字化处理，根据像素分布和亮度、颜色等信息，来进行尺寸、形状、颜色等的判别。进而根据判别的结果来控制现场的设备动作^[41]。

视觉传感器具有从一整幅图像捕获光线的数以千计像素的能力，图像的清晰和细腻程度通常用分辨率来衡量，以像素数量表示。在捕获图像之后，可以将图

像分割然后重组得到实物情况，进而作为相应的判断；也可以将其与内存中存储的基准图像进行比较，以做出判断分析。

用于步行机器人中，力传感器的控制原理框图如图 6-6 所示

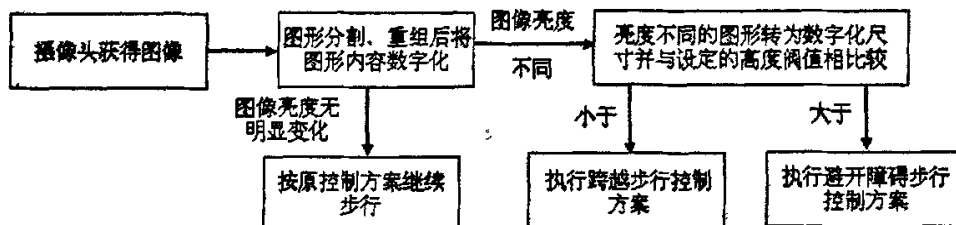


图 6-6 视觉传感器步行控制规划

Fig 6-6 The walking controlling planning of the sight sensor

6.2 动态扭矩传感器应用分析

6.2.1 工作原理

扭矩传感器是通过与所测量的原件同轴安装，采用应变片电测量技术，在弹性轴上组成应变桥，向应变桥提供电源即可测得该弹性轴受扭的电信号^{[42][43]}。将该应变信号放大后，经过压/频转换，变成与扭应变成正比的频率信号，如图 6-7 所示：

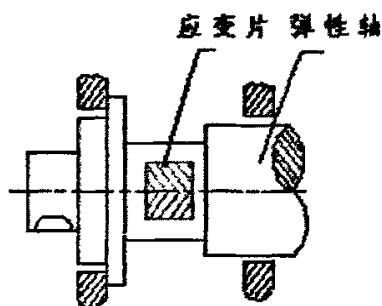


图 6-7 测量原理图

Fig 6-7 The principle figure of measurement

扭矩传感器的信号输出基本形式可以为方波信号、脉冲信号，也可以根据用户需要制成电压模拟信号输出或电流模拟信号输出（单向、静止扭矩测量）。扭矩信号的处理方式可以分为三种：一是扭矩传感器输出的频率信号送到频率计或数字表，直接读取与扭矩成正比的频率信号或电压、电流信号；二是扭矩传感器的扭矩与频率信号送给单片机二次仪表，直接显示实时扭矩值、转速及输出功率值

及 RS232 通讯信号；三是可以直接将扭矩与转速的频率信号送给计算机或 PLD 进行处理。

6.2.2 扭矩传感器监测原理

将动态扭矩传感器应用到步行机器人的控制系统中，通过监测步行机构驱动关节扭矩的突变来获取步行机器人足端周围情况是本课题所研究步行机器人的一个亮点。从驱动关节扭矩的变化是如何获取足端周围情况的，这将是下面将要讨论的内容。

总的来说，其监测原理是：当步行机器人的足端处于悬空状态时，不用其他物体或地面相接触时，驱动关节的扭矩基本稳定在某一恒定值，无明显变化；

当足端与物体（或地面）发生接触时，物体（或地面）对足端的反力（或反力的分力）将对驱动关节产生一定的突变力矩，传感器通过判定此突变力矩的大小、方向以及涨幅的多少来判定与地面接触以及遇到障碍物的情况。

如图 6-8 所示为步行机器人步行机构足端与外界接触的示意图^[44]。图中 a、b 分别表示混合驱动的上、下关节，足端与外界接触点为 O。接触点 O 点受到的接触反力在水平方向与垂直方向的分量分别为： F_{ax} 、 F_{ay} ，其对应在上、下关节 a、b 产生的扭矩分别为： T_{ax} 、 T_{ay} ； T_{bx} 、 T_{by} 。

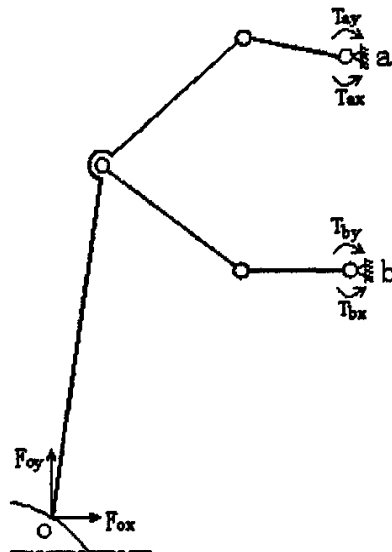


图 6-8 足端受力分析

Fig 6-8 analysis of the suffering force of the foot-end

下面将分四种情况分析：

1、当 $F_{ax}=0$ 、 $F_{ay}=0$ 时，对应的 $T_{ax}=0$ 、 $T_{ay}=0$ ； $T_{bx}=0$ 、 $T_{by}=0$ ，此时在驱动关节点 a、b 处的扭矩值在恒定值左右波动，无明显变化，表明足端处于悬空状态，继续执行步行命令，直至足端与物体或地面接触，如图 6-9 所示。

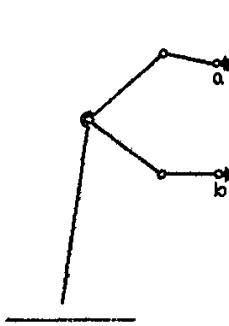


图6-9 足端悬空状态

Fig 6-9 The state of dangling

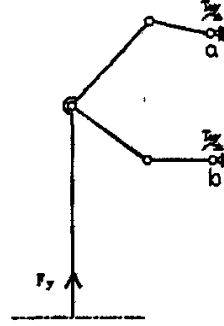


图6-10 足端着地状态

Fig 6-10 The state of touchdown

2、当 $F_{ax} \approx 0$ ， $F_{ay} = F_y$ （某一稳定值）时，对应的 $T_{ax} \approx 0$ 、 $T_{ay} = T_a$ ； $T_{bx} \approx 0$ 、 $T_{by} = T_b$ 。此时相对于之前的某一稳定值，驱动关节的扭矩值在顺时针方向具有比较明显的突变，而在逆时针方向变化不明显，此时表明：足端正常着地，如图 6-10 所示。

3、当 $F_{ax} = F_x$ ， $F_{ay} = F_y$ 时，对应的。表明：机器人的足端与障碍物发生碰撞。这种情况可以分为三种情况来讨论：

1): 虽然存在 $T_{ax} = T_{ax}$ 、 $T_{ay} = T_{ay}$ ； $T_{bx} = T_{bx}$ 、 $T_{by} = T_{by}$ ，但是继续执行跨步操作， T_{ax} 、 T_{ay} 、 T_{bx} 、 T_{by} 在不断变化，在一次跨步的极限范围之内， $T_{ax} \approx 0$ 、 $T_{bx} \approx 0$ ， T_{ay} 、 T_{by} 到达某一较大稳定值，表明：步行已顺利跨越障碍或迈上台阶，此时继续步行，如图 6-11 (a) 所示。

2): 存在 $T_{ax} = T_{ax}$ 、 $T_{ay} = T_{ay}$ ； $T_{bx} = T_{bx}$ 、 $T_{by} = T_{by}$ ，在一次跨步的极限范围之内，继续步行， T_{ax} 、 T_{bx} 在顺时针方向出现突变，然后趋于稳定，此时表明：步行遇到不可跨越的障碍物，如图 6-11 (b) 所示。

3): 存在 $T_{ax} = T_{ax}$ 、 $T_{ay} = T_{ay}$ ； $T_{bx} = T_{bx}$ 、 $T_{by} = T_{by}$ ，在一次跨步的极限范围到达时， T_{ax} 、 T_{ay} 、 T_{bx} 、 T_{by} 仍处于某一较大值，此时表明：步行遇到不可跨越的障碍物，如图 6-11 (c) 所示。

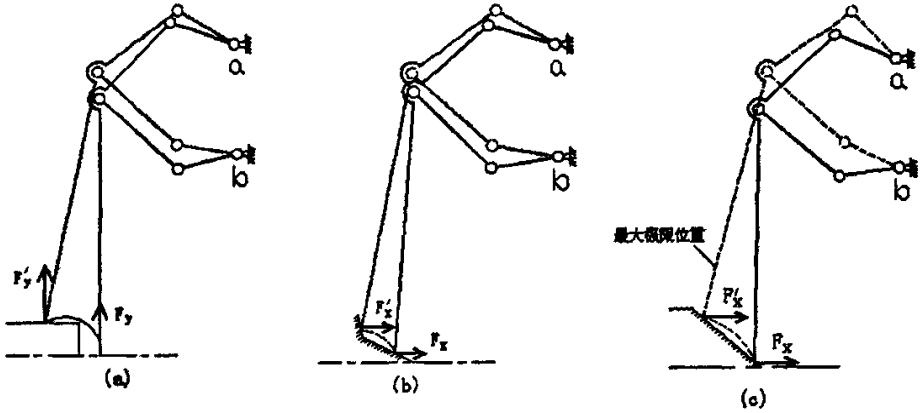


图6-11遇到障碍物状态

Fig 6-11 The state of encountering stumbling block

4、在步行机构到达零点位置（初始位置），仍有 $T_{ax}=0$ 、 $T_{ay}=0$ ； $T_{bx}=0$ 、 $T_{by}=0$ ，对应的 $F_{ax}=0$ 、 $F_{ay}=0$ ，此时表明：机器人遇到沟壑。

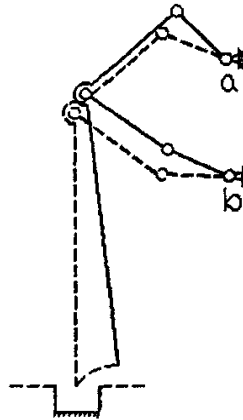


图6-12 遇到沟壑状态

Fig 6-12 The state of encountering gutters

6.2.3 仿真分析

当足端与物体或地面接触时，物体或地面会对足端产生突变的约束反力，相应的在驱动关节处将产生一定方向扭矩的突变或是一定规律的突变，此时通过动态扭矩传感器测得突变信息，进而进行控制方案的选择。为验证接触反力与驱动关节扭矩的变化规律，建立步行机构的三维模型，并建立相应的关系约束，通过一定的并联驱动控制，动态模拟步行机构可能与地面或是障碍物接触的环境，并测得不同接触类型中接触反力与驱动关节的扭矩变化的曲线对应关系，从而验证本论文动态扭矩传感器监测的可行性。

仿真的流程图如图 6-13 所示：

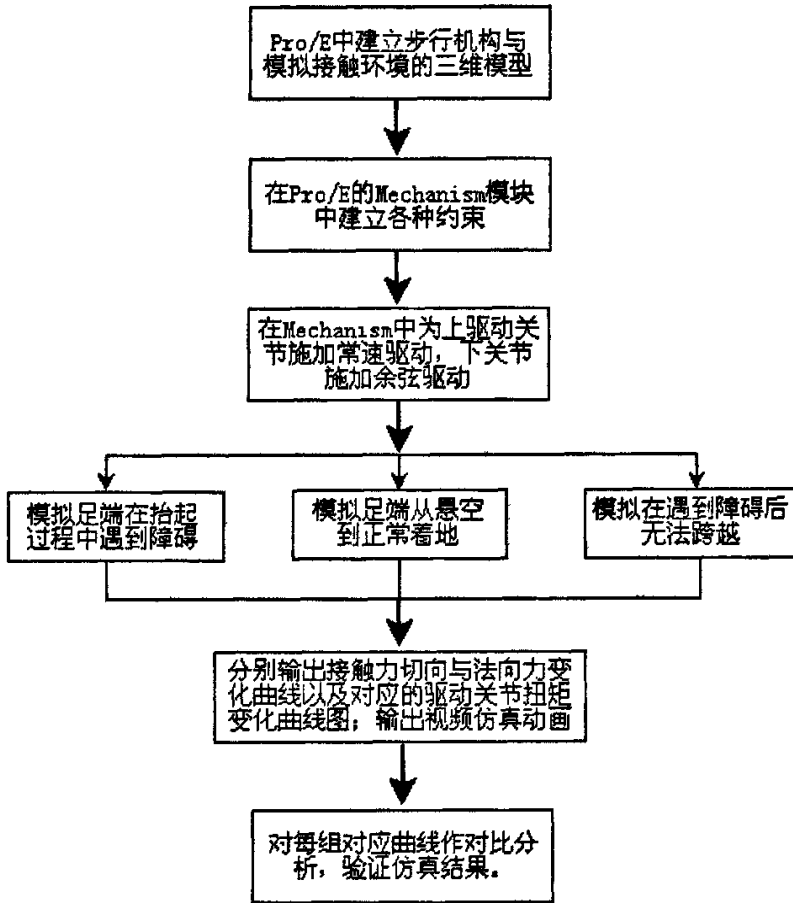


图6-13 仿真流程图

Fig 6-13 The flow sheet of simulation

在 Pro/E 中建立不同接触环境的步行机构模型以及模拟接触环境的实体模型，如图 6-14 所示。(a) 为着地环境；(b) 为足端遇到障碍；(c) 为不能跨越障碍；添加各种约束以及混合驱动输入后，分别针对不同的接触环境作仿真分析，输出接触力切向与法向的变化曲线图以及对应的驱动关节扭矩变化图，对曲线作对比分析；输出演示动画视频。

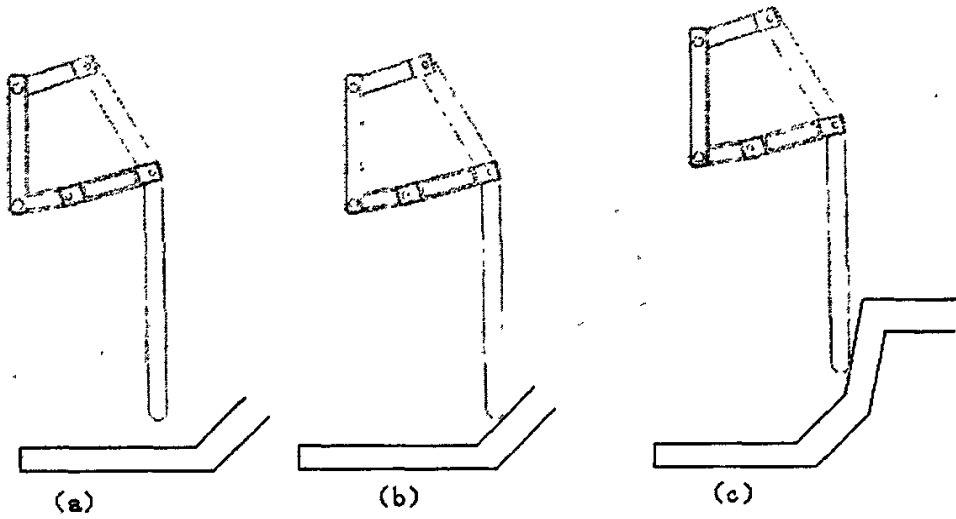


图6-14 仿真模型

Fig 6-14 model of simulation

仿真的结果分析:

1、着地情况: 曲线对照图如图 6-15 所示。上端曲线图为足端法向约束反力, 下面分别为驱动关节的扭矩值。从图中可以看出, 在足端未接触地面时, 约束反力为零, 驱动关节扭矩均匀波动变化; 在足端接触地面的瞬间, 接触反力产生突变, 同时驱动关节扭矩亦发生单方向突变。

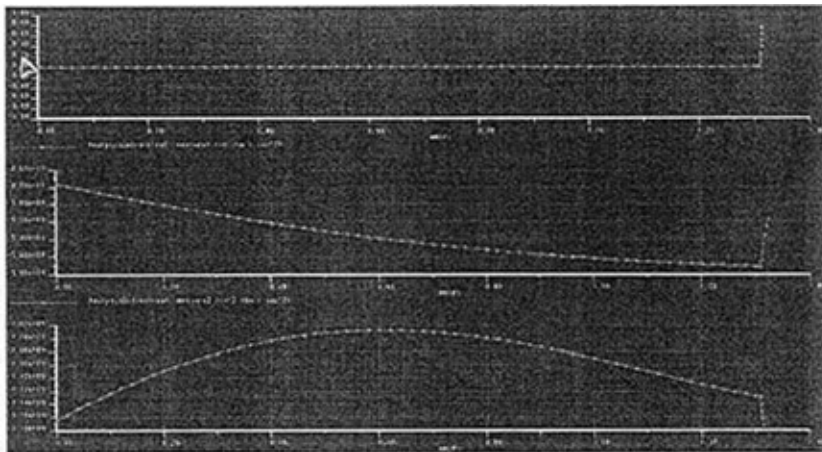


图6-15 着地状态曲线对应图

Fig 6-15 curve mapping of the state of touchdown

2、遇到障碍: 曲线对照图如图 6-16 所示。上端 2 条曲线图为足端法向与切向约束反力, 下面 2 条分别为驱动关节的扭矩值。从图中可以看出, 在足端遇到障

碍物斜坡时，接触反力于驱动关节扭矩均趋于平稳，当遇到障碍物时，接触力发生突变，且切向反力有趋近于零的走势；对应的扭矩也发生突变，然后趋近或稳定于一个较大值，此时表明：足端遇到障碍，且切向力与法向力分别对驱动关节的转矩产生方向相反的突变力矩；

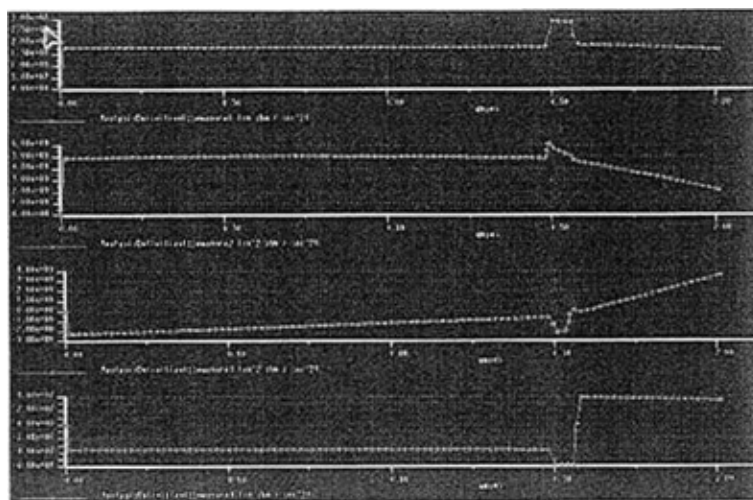


图6-16 遇到障碍曲线对应图

Fig 6-16 curve mapping of encountering stumbling block

3、无法跨越的障碍：曲线对照图如图 6-17 所示。上端为接触点的切向力曲线图，下端 2 个分别为驱动关节的扭矩曲线图。由图中可以看出：接触力一直稳定存在，直至发生一定的突变；驱动关节的扭矩一直趋于一个较大值，直至遇到一个较大的突变。此时表明：之前足端存在切向力所名已经与物体接触，随着步行的继续进行，遇到无法跨越的障碍物，产生大的扭矩突变。

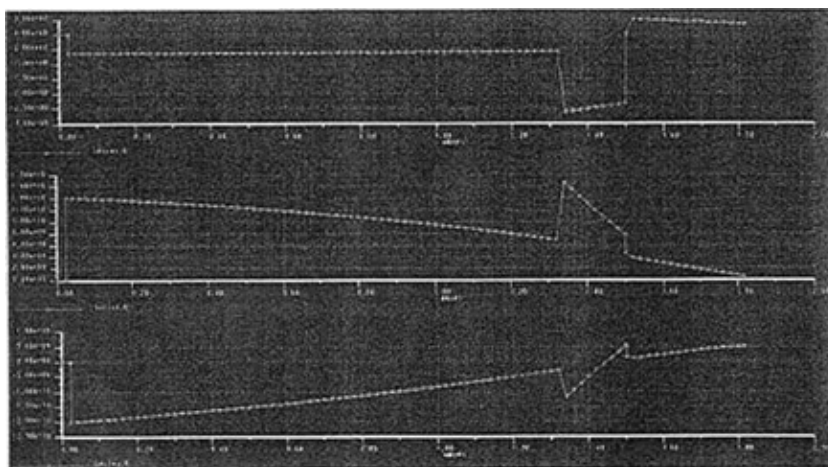


图6-17 遇到无法跨越障碍曲线对应图

Fig 6-17 curve mapping of encountering unable stumbling block

6.3 传感器监测信息与系统判断

采用动态扭矩传感器实时监测步行机构的驱动关节受到的突变扭矩，根据突变扭矩的大小与方向等特性来判断足端与物体或是地面接触的情况，将信息输送到控制系统中，由控制系统判断该采用何种控制方式。

针对上一节所归纳的四种足端接触方式，当传感器获取一定的信息时，机器人将处理这些信息给出步行控制的方案。如图 6-18 所示为传感器监测信息与步行控制规划的流程框图，为简化过程及方便理解：将步行机构与物体发生碰撞的过程分为抬起与落下二个过程；规定步行机构的初始位置为零位置；规定将与步行运动方向相同的扭矩突变为正方向；反之为负方向。

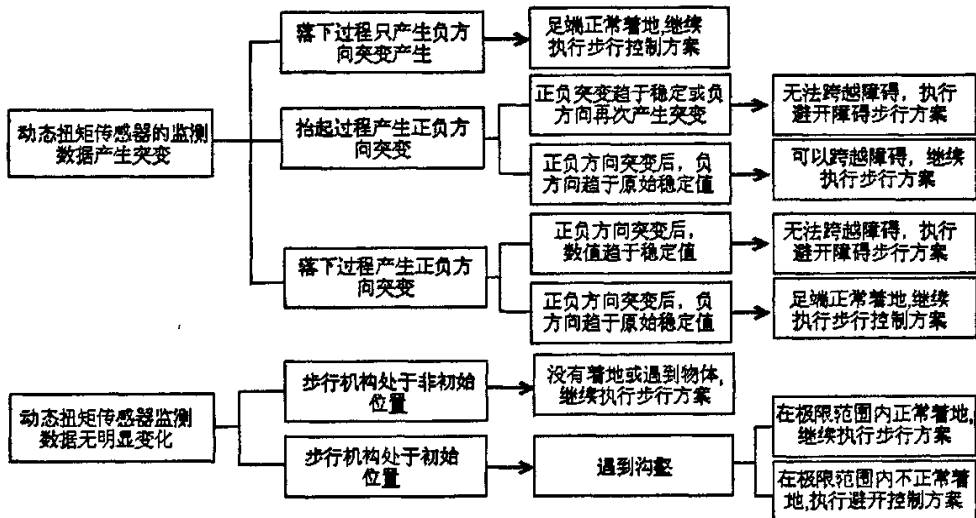


图6-18 传感器信息与系统判断流程图

Fig 6-18 The flow sheet of the system judgement and sensor's information

6.4 本章总结

本章在对已有步行机器人常用传感器工作原理及控制使用原理总结分析的基础上，引入了本课题所使用的动态扭矩传感器，在对其工作原理做简要说明之后，重点分析了足端受到的接触力对应于驱动关节扭矩的变化，从而得出四种不同情况下动态扭矩传感器的监测原理，然后建立步行机构的运动仿真模型，在三种不同的接触环境中对其监测原理作了仿真分析，从而验证了本课题采用动态扭矩传

传感器的可行性；本章的最后给出了传感器监测信息与系统判断之间的协调关系。

7 总结与展望

7.1 工作总结

本课题的性质是理论化设计,在综合分析传统步行机器人结构的基础上,结合实际应用和研究需要,设计了一种新型的步行机器人结构。课题工作的三分之一是源于对已有理论和研究现状的新型应用,另外三分之二则是针对实际应用的需要,设计了一套新型步行机器人机构设计方案,并重点仿真与验证步行机构混合驱动以及动态扭矩传感器的监测原理。总之,所完成的工作是新型应用和创新设计一个结合过程,其内容主要包括以下几个方面:

1、在对传统步行机器人步行机构对比分析的基础上,利用平面并联五杆机构输出轨迹柔性可调的特性,将平面并联五杆机构用作四足步行机器人的步行机构,提高步行机构的跨步能力与柔性。并建立平面并联五杆机构动力学模型与三维实体模型,对其动力学性能做了详细分析,并在结合其输出轨迹研究的基础上,给出了平面并联五杆机构点到点的轨迹规划。

2、建立以平面并联五杆机构为基础的步行机构模型,并设计了实现某种特定步行方式的足端轨迹规划,给出规划图谱;结合插值算法,给定足端轨迹的若干轨迹点,通过五杆机构的逆运动学计算,可以得出插值点所对应的并联驱动量的函数曲线规律图,并最终在 ADAMS 中完成动画仿真与并联驱动端驱动函数曲线的对比分析。

3、在针对步行机器人结构对其应用影响的基础上,给出传统机构存在的不足,设计了一套将四足步行机器人的整个控制密封装配在机体,通过轴传动驱动步行机构步行,通过动态扭矩传感器实时监测足端周围情况,为步行控制提供信号来源。此种机构可以提高步行机器人在诸如雨水、风沙,甚至水中步行的环境适应性。

4、对步行机器人常用传感器的工作原理做了对比分析的基础上,重点分析了动态扭矩传感器的工作原理,着重计算与分析了动态扭矩传感器用于步行机器人监测的原理,即通过驱动关节的扭矩的方向突变为判断足端周围情况,最终在 Pro/E 的 Mechanism 模块中实现了对上述原理的仿真与验证。

7.2 研究展望

本课题所研究的主要是四足步行机器人的机构设计。将平面并联五杆机构应用作四足步行机器人的步行机构，然后将步行机器人的整个控制系统密封装配在机体，通过轴传动驱动步行机构步行，通过动态扭矩传感器实时监测足端周围情况，对于本设计方案的实际应用效果，需要添加完整的控制系统才能检验。

在四足步行机器人结构设计中，平面并联五杆机构的研究相对比较成熟，在新型应用的同时，对平面并联五杆机构的控制系统提出了更高的要求。同时，将动态扭矩传感器引入到步行机器人的控制中，通过驱动关节扭矩的突变来获取足端周围情况，这一结论在一定的仿真环境中得到了验证，但仍需实际应用的检验。综上所述，本课题所研究的四足步行机器人在结构仍需要实践去证明去可靠性，同时对步行机器人的控制系统提出了更高的要求。

参考文献

- [1] R. Reeve. Generating walking behavior in legged robot. PhD Dissertation. University of Edinburgh. 1999.
- [2] Gurfinkel. V, Gurfinkel. E, Schneider, A. et al. Walking robot with supervisory control. Mechanism and machine theory. 1981.16.31-36.
- [3] McGhee. R. B. Robot locomotion. In R. Herman, S. Grillner, P. Stein, and D. Stuart, editors, Neural control of locomotion. Plenum Press. 1976.237-264.
- [4] Hirose. S and Umetain. Y. The basic motion regulation system for a quadruped walking vehicle. In ASME Conf. On Mechanism.1980.
- [5] Matsuoka, K. A model of repetitive hopping movements in man. In proceeding of fifth world congress in theory of machines and mechanisms. International federation for information processing.
- [6] Ogo. K, kanse. A and Kato. I. Dynamic walking of biped walking machine aiming at completion of steady walking. In A. Morecki, G Bianchi, and K. Keszior, editors, Third symposium on theory and practice of robots and manipulators. Elsevier Scientific Publishing Co. 1980.
- [7] McGeer. T. Powered flight, child's play, and silly wheel and walking machines. In proceeding of the 1989 IEEE international conference on robotics and automation. 1989.1592-1597.
- [8] McGeer. T. Passive dynamic walking. Int. J. Rob. Res. 1990.9(2).62-82.
- [9] Goswami. A, Espian. B and Keramane. A. (1997). Limit cycles in a passive compass gait biped and passivity-mimicking control laws. Autonomous Robots.1997.4. 273-286.
- [10] 汪劲松, 荣松年, 张伯鹏. 全方位双三足步行机器人 (I) --步行原理、机构及其控制系统. 清华大学学报 (自然科学版). 1994(2).102-107.
- [11] 汪劲松、张伯鹏. 全方位双三足步行机器人 (II) --步行模式规划. 清华大学学报 (自然科学版). 1994(5).63-71.
- [12] 陈佳品. 四足机器人动态步行控制和学习辅助. 上海交通大学博士学位论文. 2001.
- [13] 刘志远. 二足机器人动态行走研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 1992.
- [14] 马宏绪. 二足步行机器人动态行走研究. 国防科技大学博士学位论文. 1995.
- [15] D. J. Todd. Walking Machines: An Introduction to Legged Robots. Kogan Page Ltd, London. 1985.
- [16] R. S. Mosher. Test and Evaluation of a Versatile Walking Truck. Procs. Off-Road Mobility Research Symp.1968.359-379.
- [17] Shigeo Hirose, Yoji Umetani. Some consideration on a feasible walking mechanism as terrain vehicle. Proc. 3rd RoManSy Symp, Udine, Italy. 1978.357-375.
- [18] S. Hirose, Tomoyuki Masui and Hidekazu Kikuchi. TITAN-III: A quadruped walking vehicle---Its structure and basic characteristic. Bobotic Research(2nd Int.Symp.), The MIT Press.1985.325-728.
- [19] S. Hirose, Kan Yoneda, Hideyuki Tsukagoshi. TITAN-VII: Quadruped walking and

- manipulating robot on a steep slope. Proc. Int. Conf. on robotics and automation, Albuquerque, New Mexico. 1997.494-500.
- [20] Keisuke Arikawa, Shigeo Hirose. Development of quadruped walking robot TITAN-VIII. Proc.IROS96.1996.208-214.
- [21] M. Buehler, R. Bayyaglia, A. Cocosco, G. Hawker, J. Sarkis, and K. Yamazaki. SCOUT: A simple quadruped that walks, climb, and run. IEEE Int. Conf. Robotics and automation, Leuven, Belgium. May 1998.1701-1712.
- [22] D. J. Pack and A. C. Kak. A Simplified Forward Gait Control for a Quadruped Walking Robot. The 1994 IEEE/RSJ international Conference on Intelligent Robots and Systems. Munich, Germany. 1994.2.1011-1018.
- [23] D. J. Pack and H. Kang. An Omni directional Gait Control Using a Graph Search Method fro a Quadruped Walking Robot. The 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya, Japan.1995.
- [24] Takashi Emura and Akira. Arakawa, Attitude control of a quadruped robot during two legs supporting. Proc.91.Int.Conf.of Advanced Robotics.1991.711-716.
- [25] Arakawa. T, Emura. M, Hiraki and L. Wang. Control of a quadruped Robot using Double Crank-Slider Mechanism. IEEE Int. conf. on SMC.1993 (4).157.
- [26] 陈佳品. 四足机器人动态步行控制和学习辅助.上海交通大学博士学位论文.2002.5-16.
- [27] 王建达编译.火山探险机器人——丹蒂.机器人技术与应用.1995.(5).17-19.
- [28] 钱涛, 张融甫.可用作步行机腿的机构研究.机器人.1989(3).47 -51.
- [29] 郭鸿勋.多足步行机器人机械系统模型的研究与设计.华中科技大学硕士学位论文.2003.13-24.
- [30] 徐轶群.四足步行机器人腿部机构及其稳定性步态控制.机械科学与技术.2003.22(1) .86-87.
- [31] 周双林, 邹慧君, 姚燕安, 郭为忠. 实现变椭圆轨迹平面并联五杆机构的设计. 上海交通大学学报.2000.16(4).39-41.
- [32] 周双林, 邹慧君, 姚燕安, 郭为忠.并联驱动型五杆机构运动性能的分析. 上海交通大学学报.2001.17(1). 31-33.
- [33] 李团结, 文群燕, 刘向阳. 实现任意复杂函数关系的并联驱动可控五杆机构的设计. 西安电子科技大学学报.2003.30 (4) .542-545.
- [34] 邓孔书, 姚燕安, 查建中 一种空间四杆两足步行机构的研究. 工程设计学报.2005.12(6).363-365.
- [35] Tokuz L.C and Jone J.R. Programmable Modulation of Motion Using Hybrid Machine [C]. Proceedings of IMECHE, U.K, C414/071, 1991, 85-91.
- [36] Tokuz L.C. Hybrid Machine Modeling and Control [D]. PhD Dissertation, Liverpool Polytechnic University, 1992.
- [37] 马承文. 混合驱动五杆机构动力学若干问题及其实验研究.上海交通大学博士学位论文.2002.54-58.
- [38] 于滨.重复利用外装式密封轴套.工程机械与维修.2004(4).117-117.
- [39] 刘莉, 汪劲松等.基于六维力 / 力矩传感器的拟人机器人实际 ZMP 检测.机器人.2001.23(5). 459-462.

- [40] 胡昶.基于形状记忆合金的四足步行机器人.机器人技术与应用.2001(1).29-31.
- [41] 崔巍.双足步行机器人立体视觉系统.哈尔滨工业大学博士学位论文.2003.10-12.100-114.
- [42] 文西芹,张永忠.扭矩传感器的现状与发展趋势.仪表技术与传感器.2001(12).1-3,11.
- [43] 王晓宇.步行机器人足端力/力矩传感器的研制.哈尔滨工业大学硕士学位论文.2002.4-8.
- [44] 王新杰,李培根,陈学东,陈宏娟.四足步行机器人动力学模型及脚力分配的研究.中国机械工程.2005.16(17).1561-1566.

附录 A

发表的论文

- 1、《一种步行机器人结构分析》以第一作者发表于机械杂志 2006 年第 12 期，已见刊。

作者简历

2004 年 9 月——至今：北京交通大学机电工程学院攻读机械设计及理论硕士学位，发表论文《一种步行机器人结构分析》。

2000 年 9 月——2004 年 7 月：北京交通大学机电学院攻读机械工程及自动化学士学位；认真完成课程学习，并顺利取得学士学位。

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京交通大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：马虎

签字日期：2006年12月20日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解北京交通大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权北京交通大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：马静

签字日期：2006年12月20日

导师签名：方跃浩

签字日期：06年12月21日

一种四足步行机器人结构设计与分析

作者:

马彪

学位授予单位:

北京交通大学

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1080980.aspx