

上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

THESIS OF BACHELOR



论文题目： 四足步行机器人的设计

学生姓名： 李致渊

学生学号： 5100309689

专 业： 自动化

指导教师： 王贺升

学院(系)： 电子信息与电气工程学院

四足步行机器人的设计

摘要

沙漠的恶劣环境对于机器人来说一直难以克服，作为人类生存的禁区，沙漠中同样存在很多人类需要的资源。近年来对于沙漠机器人的研究开发工作日益蓬勃发展。本文主要介绍一种新型四足蜥蜴沙漠机器人在软件环境下的仿真分析以及机器人实体的制作过程。该种新型仿生机器人能够在沙漠环境中保证较为稳定而且快速的行走，具有较好的适应沙漠环境的能力。机器人腿部采用C型结构，此种腿部结构较好的结合了现有的轮式和多自由度腿式结构的特点，在保证较快行进速度的同时也尽量减小了腿对给沙漠的压强，能够有效减少机器人在行进过程中的沉陷量。项目研究机器人的关键在于机器人的尾部结构，也即项目的创新点。在普通的四足结构中加入灵活的尾部结构不仅可以帮助机器人行进过程中保持身体的平衡，还可以起到在机器人陷入沙子后帮助其更好地脱离危险的作用。最终顺利完成机器人仿真和实体开发任务，并针对机器人新型机构申请专利。

关键词：沙漠，四足，蜥蜴，尾巴

Design Of Quadruped Walking Robot

ABSTRACT

The main content of this subject is simulation analysis and production for the new lizard robot ,which can ensure a stable and fast walking in the desert environment and will be better to adapt to the desert . Robot legs use C-type structure ,it ensures a faster travel speed while also minimizing the pressure to the desert which produced by legs and it makes the robot uneasy to settlement .The key research of this subject is the structure of robot's tail .A flexible structure tail can not only help the process of moving the body to maintain balance ,tail can also help them better into the role of danger. Our team successfully completed the both of the two tasks and apply for a patent for the new type of robot mechanism .Simulation and design tasks be finished successfully and we applied a patent for this new robot mechanical structure.

Key words: Desert, Four-legs, Lizard , Tail

目 录

THESIS OF BACHELOR	1
ABSTRACT.....	3
目 录.....	4
第一章 绪论.....	5
1.1 沙漠机器人国内外研究现状.....	5
1.2 研究的目的与意义.....	9
1.2.1 研究的目的.....	9
1.2.2 研究的意义.....	9
1.3 研究的范围.....	9
第二章 新型四足机器人软件仿真.....	9
2.1 四足机器人仿真研究内容.....	10
2.2 四足机器人仿真研究方法与实施.....	11
2.2.1 四足机器人仿真研究方法.....	11
2.2.2 四足机器人仿真模拟研究.....	11
第三章 新型四足机器人系统设计.....	21
3.1 四足机器人制作内容.....	22
3.2 四足机器人制作研究与实施方法.....	22
3.2.1 四足机器人结构设计研究方法.....	22
3.2.2 四足机器人结构设计方法.....	23
3.3 四足机器人平地步行实验与分析.....	27
第四章 新型四足机器人控制与分析.....	28
4.1 步态控制算法.....	28
4.2 壁障算法及分析改进.....	32
4.2.1 壁障算法介绍.....	32
4.2.2 壁障算法实验与分析.....	35
4.3 加速度传感器算法.....	36
4.3.1 加速度传感器算法介绍.....	36
4.3.2 加速度传感器实验与分析.....	37
4.4 四足机器人腿部受力分析.....	37
第五章 结论.....	39
5.1 总结.....	39
5.2 展望与改进.....	40
5.2.1 课题不足及改进建议.....	40
5.2.2 课题进一步开展的展望.....	41
参考文献.....	42
谢辞.....	45

第一章 绪论

随着人类对赖以生存地球的探索不断深入，对于沙漠环境的研究工作也日趋频繁进行。然而沙漠中恶劣的环境却给人类的探索带来巨大的挑战。所以只有通过开发出能够适合生存于沙漠环境的机器人才能有效进行对沙漠的探索。

首先需要对沙漠环境特点进行考虑，沙漠气候最典型的特点即是干旱高温。对此机器人结构需要具有良好的散热功能，通常沙漠地表温度高达60摄氏度，机器人设计需要做到能够很好的隔绝外部热量且能够高效散出内部模块工作产生的热量。且机器人内部各工作模块需要极高的耐热性，保证其能够在高温环境下正常工作。除此之外，沙漠较为突出的特点即是柔软易陷入且摩擦力小的沙地和漫天的扬尘沙粒。针对此类问题机器人的设计最重要的考虑即是其腿部的结构。需要开发运用一种不易沉陷入柔软沙地中，不易打滑同时也能保证机器人在沙漠中较高效行进的腿部模型。漫天扬尘需要机器人具有极好的密闭性能，防止扬尘和沙粒进入机器人内部导致工作模块的损坏。

不仅仅是沙漠，其他灾害现场也让机器人难以进入工作。2001 年被送入垮塌的美国世贸中心现场的营救机器人，前进的道路完全被杂乱的建筑碎片阻塞。2006 年美国西弗吉尼亚州的一处煤矿坍塌事故中的营救机器人行驶 700 米后便陷入泥潭。因此对于沙漠机器人的研究，不仅仅能够解决于人类对沙漠极端环境的探究，同时也能够对其他种恶劣路面机器人的行走问题带来帮助。^[9]

1.1 沙漠机器人国内外研究现状

一般地，沙漠机器人主要是轮式和多自由度足式两种结构组成。轮式结构主要是通过多轮系统来减少压强使得机器人能够较灵活的在沙子上移动；足式结构主要针对沙漠蜘蛛等生物的仿生，通过多自由度结构控与沙地接触面积较大的机器“脚掌”达到减少压强的目的。

目前，以上两种结构都有一些较为明显的缺点。一方面轮式结构虽然速度较快，但不适合翻越沙漠中一些较为复杂的地形，遇到崎岖的地面便难以通过，且此种结构陷入沙子中难以从中爬出；另一方面，多自由度的足式结构速度相对较慢，且多关节能量消耗相对较大，但多关节可以较好地完成如越过一些复杂地面和从陷入沙子中爬出等动作。

美国佐治亚理工学院在加利福尼亚州莫哈韦沙漠专门建立了一间实验室，研究人员利用仿生学原理模仿沙漠蜥蜴等动物的行走方式研制出了名为“沙上飞”的六足机器人。“沙上飞”属于多足机器人。^[3]

1968 年，美国 MOSHER 设计四足车“Walking Truck”，如图 1-1，其每条腿上安装液压伺服马达系统来实现腿部运动。同时为了实现腿部位置实时监测，在机器人腿部位置安装位姿传感器，该机器人较为笨重，操作费力但实现基本如常规步行的功能。但没有实现自动控制的目的。^{[26][27]}

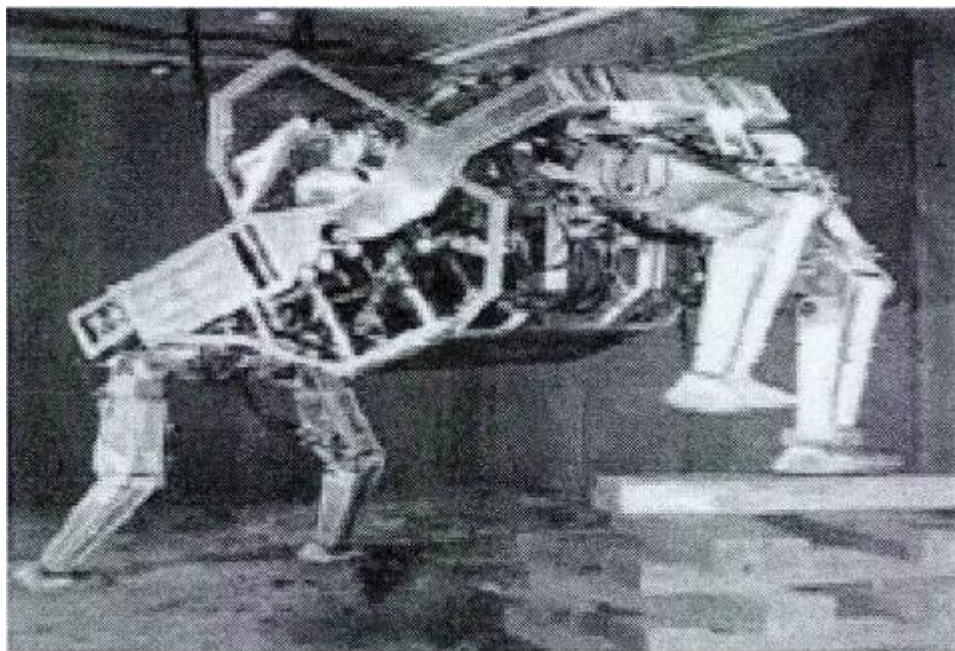


图 1-1 四足机器人 Walking Truck

最早电脑控制的多足机器人由美国南加州大学的罗伯特·麦吉制造，其能够依靠机械肢体蹒跚行走，从此进入多足机器人时代。1976 年，麦吉研制了第一个自动多足机器人。名为 Hexapod，如图 1-2 所示。它不仅能够在室内行走，而且还能绕过前方的障碍物。^[20]

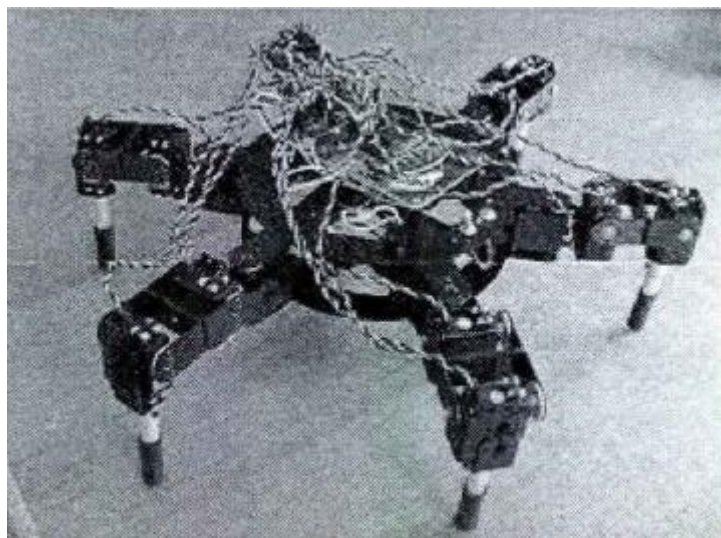


图 1-2 六足机器人 Hexapod

随后，卡内基梅隆大学的马克·雷伯特教授将多足机器人技术带入了一个崭新的阶段。他研制的如图 1-3 的八足步行机器人 DANTE 能够像袋鼠一样跳跃前进，在严格控制的实验室环境下，这种机器人至今仍然保持着 21 千米 / 时的地面行走记录，并完成累对埃里波斯火山的考察工作。^[28]2000 年至 2003 年间，日本成功研发四足步行机器人 Tekken，如图 1-3，该步行机器人控制系统是通过神经反射系统的模式来实现的。^[29]2002 年，印度人研制了六足行走机器人“舞王”，如图 1-4，该机器人底盘为六边形，六边形每个顶点安装一条腿，分别由安装与六角上的 3 个轴控制，运动时活似蜘蛛。^[30]

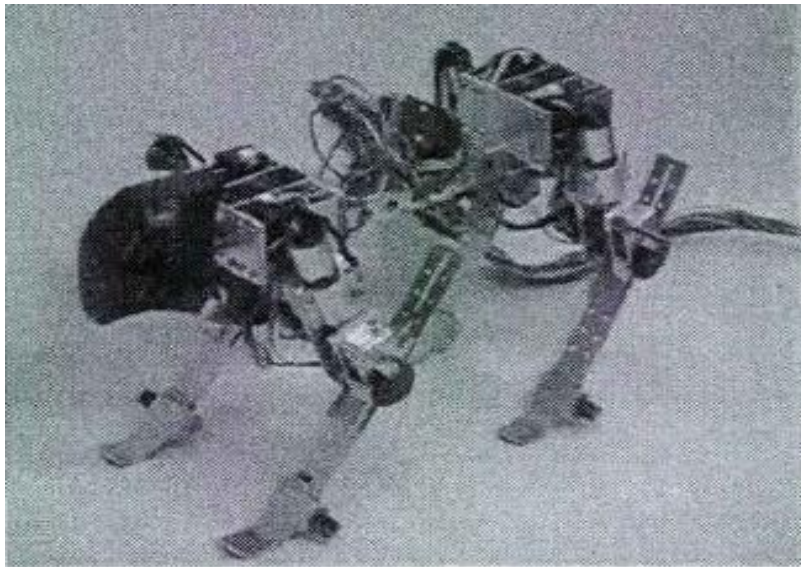


图 1-3 四足步行机器人 Tekken



图 1-4 DANTE 步行机器人

1999 年，功能仿真成为热点，抓住生物运动的本质特点来模拟成为机器人主流设计方案。加拿大麦吉尔大学智能机器中心的机器人专家设计出了六足机器人“里克斯”，如图 1-5 所示。其灵感来自于蟑螂的 6 条腿。^[31]“里克斯”在自然环境下可以行走得很稳，无论是穿越泥潭沼泽，还是爬坡越岭，“克里斯”都可以很好应对。

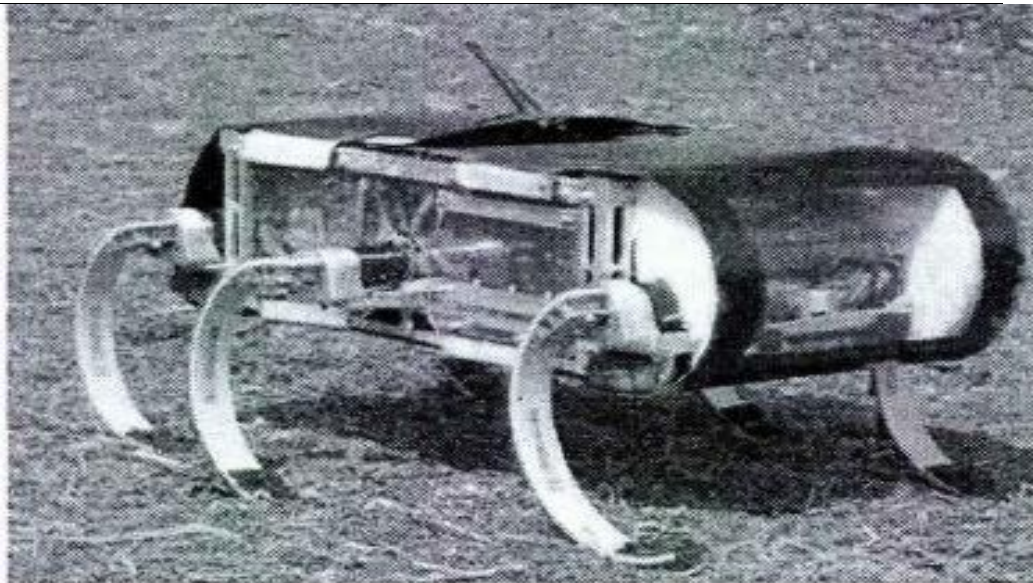


图 1-5 “克里斯”六足机器人

2007 年初，佐治亚理工学院的丹尼尔·戈德曼和宾夕法尼亚大学的霍尔顿·科姆苏奥卢等人以“里克斯”为模型，应用仿生学的研究成果设计出了“沙上飞”。如图 1-6，其能够模仿沙漠动物行走，轻松地穿越沙地等松软的地面。^[16]

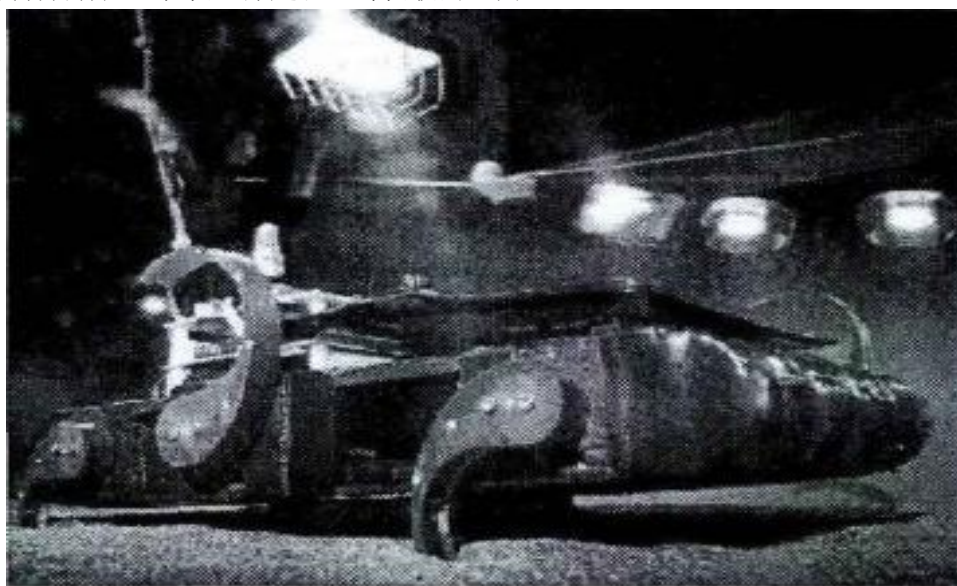


图 1-6 “沙上飞”六足机器人

科学家们经过对沙漠蜥蜴的观察研究，摸索出了一些其运动基本的规律。例如，蜥蜴每迈进一步，其长长的脚趾在与沙地接触的过程中动作非常缓慢，而在四肢腾空至再次触地之前则动作非常迅速。^[32]

通过对生物的研究结合到“沙上飞”的设计中，最后使其行进速度达到 30 厘米 / 秒，是火星探测器的 15 倍。且“沙上飞”的内部由不同的模块组建而成，可以通过实时网络互相通信。如图 1-7 所示，为“沙上飞”内部结构。

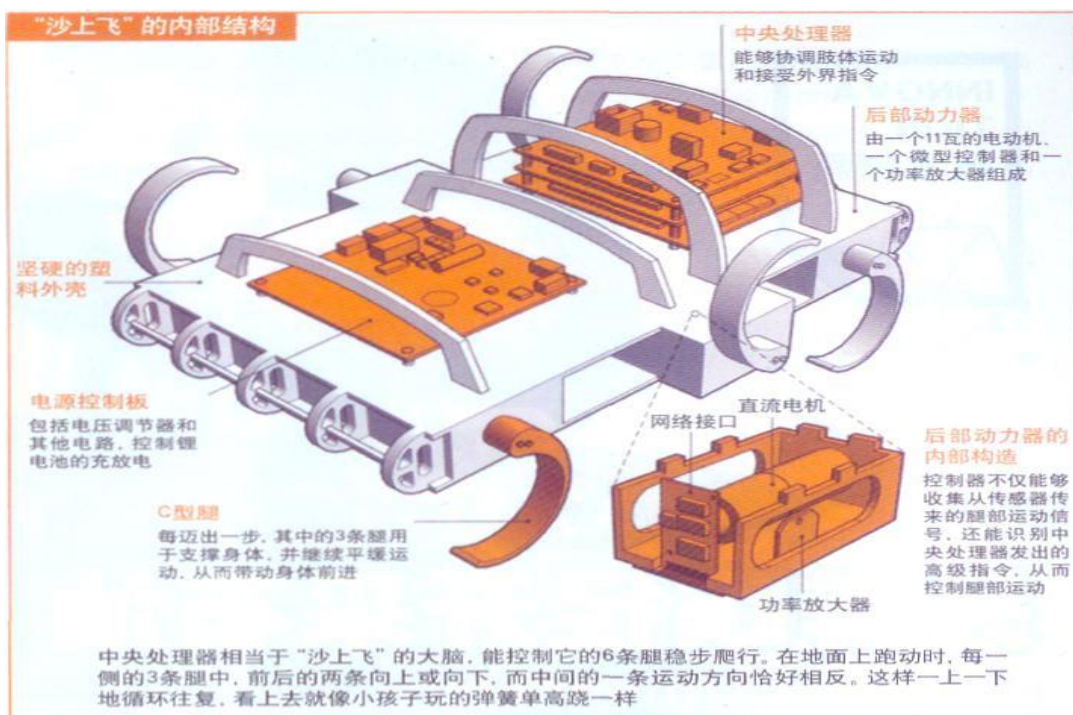


图 1-7 “沙上飞”内部结构

1.2 研究的目的与意义

1.2.1 研究的目的

针对沙漠干旱，高温的特殊环境以及沙地的柔软，摩擦力小的特点，通过对动物仿生学，机器人机械机构等方面的研究最终设计出一种能够较好适应沙漠环境的机器人。给今后机器人在沙漠中快速稳定行进的设计过程提供思路。

1.2.2 研究的意义

通过对该种新型沙漠机器人的研究设计能够解决现在机器人在沙漠中难以生存，行走等问题，同时也能够对其他种恶劣路面机器人的行走问题带来帮助。使得机器人能够更好地适应沙漠的特殊环境以及在各种灾害现场的的工作。

1.3 研究的范围

本文主要针对蜥蜴，沙漠蟑螂等生存于沙漠环境中的动物进行仿生学研究，^[33]从而进行特定软件的模拟仿真分析，其中包括机器人机构仿真，沙漠沙粒模型仿真，机器人受力分析等工作。同时在仿真模拟软件中设计简易的机器人机械结构，运动步态等。其次进一步进行实体机器人的开发制作，工作内容包括对控制芯片的开发，硬件模块的使用，机器人部件的加工制作，实现仿真分析得出的机体并完成基本的行走与壁障等功能。

第二章 新型四足机器人软件仿真

新型四足机器人软件仿真内容主要包括机器人结构与步态的设计，机械结构是机器人各个部件之间配合协作的基础，机械结构设计能从根本上影响机器人的性能，简易可行的机械结构可以保证机器人良好的运行状态；步态设计是针对机器人机械结构特点进行的，合理的设计可以提升机器人运行效率。^[34]

2.1 四足机器人仿真研究内容

软件仿真方面工作内容包括沙漠沙粒特性的模型建立,能够得到较为直观的沙粒的特征理解;机器人机构的设计分析,得出一种相对高效的拥有适应沙漠环境特点的机器人机构;机器人行走步态的运动分析,针对该种新型的机器人机构设计专门的行走步态;机器人受力分析,验证机器人机构和步态设计能否适合于真实环境中的行走等部分。具体的内容如下:

(1) 完成新型四足机器人机构的设计。利用 V-rep 机器人模拟仿真软件分别设计六足机器人与新型四足蜥蜴机器人的仿真机构,并利用软件动态仿真功能对两种模型进行对比研究。^{【17】}

(2) 利用 V-rep 软件完成四足机器人直行转弯步态仿真。通过对沙漠中的蜥蜴的仿生研究,在新型的四足机器人机构基础上设计出合适的运动步态。之后同样在 V-rep 仿真模拟环境下观察测试改进的机器人步态,同样根据现有的仿生六足机沙漠机器人三角步态特点,找到并改进采纳最合适的行走姿态。

(3) 完成四足机器人静力学分析。利用 Solidworks 软件的力学分析功能,运用 Solidworks 软件建立对应的机器人机构模型,再利用其静力学 simulation 与模态 simulation 功能完成对机器人机体受力分析研究达到机器人结构受力情况的分析目的。同时能够判断车体在承重和行走时的变形情况。

(4) 对沙漠沙粒物理力学特性的模型建立。利用 Patran—Nastran 有限元三维分析软件完成沙粒物理特性和力学特性的定义以及模型建立分析等工作。

仿真内容中通过步态设计,沙粒物理力学特性研究以及机器人静力学分析过程验证新型四足机器人机构的可行性。关系如图 2-1 所示:

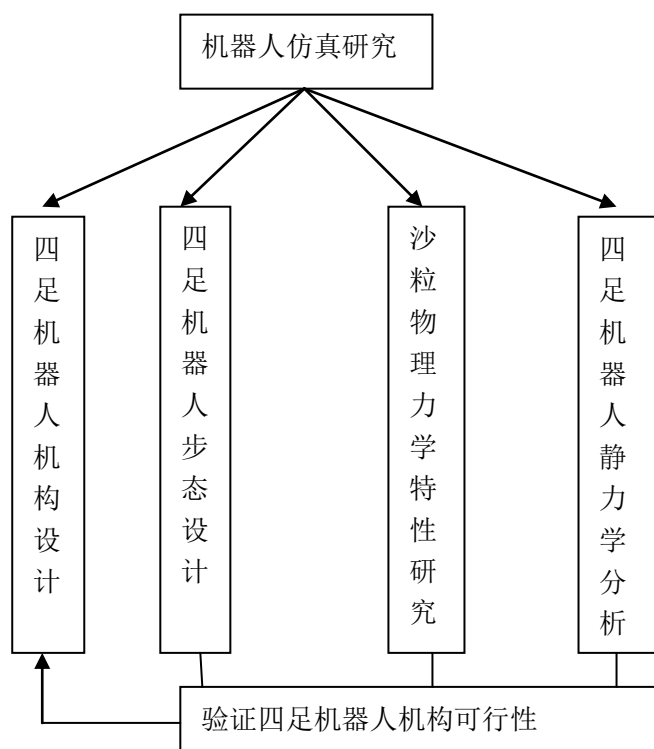


图 2-1 仿真研究整体关联图

2.2 四足机器人仿真研究方法与实施

2.2.1 四足机器人仿真研究方法

通过阅读相关文献,如沙漠仿生学研究,及国内外相关机器人的技术报告,了解课题研究现状情况,初步建立对机器人设计的想法和方案。之后进一步搜集资料研读相关文本,运用文献分析法,比较法,综合分析法等方法处理资料,得出最佳的机器人设计以及控制方案,着手进行控制仿真方面的实验,最后采集仿真数据的结构进行分析,并且结合前人的经验结果,总结并创造出适合本课题的解决方案。

2.2.2 四足机器人仿真模拟研究

根据研究方法中提到,通过对各种文献资料的阅读,总结,结合对沙漠环境以及沙漠中各种生物的特点,获得有关机器人最初步的结构设计想法例如机器人主体的外形,机器人腿部的结构与形状,机器人是否需要尾巴结构等问题。现今已经根据对沙漠蟑螂的研究,确定为了更好地适应柔软易下陷的沙漠地理情况而使用 C 型腿,既能保证在沙漠中能够较为稳定的行走也可以达到对机器人拥有一定行进速度的目的。并根据对沙漠蜥蜴的仿生研究,确定为机器人加上一条尾巴,来协助保持平衡且帮助机器人更好地适应沙漠环境。

根据软件仿真工作的特点和主要问题,可以将仿真工作分为机器人机构设计,沙粒特性模型建立以及受力分析三个主要方面。下面将对上述三个方面运用的软件及其功能进行较为详尽的描述。

(1) 软件选择过程,机器人机构设计选择了 V-rep 仿真软件。V-rep 软件是一套机器人模拟环境的小众化软件。软件让使用者可以仿真模拟整个机器人的系统或如传感器或机械结构之类的子系统。通过 API 应用程序接口与指令代码,可以实现机器人的多种功能。V-REP 可以被使用在机器人教学环境模拟,以及现实生活实际应用中的多个领域。

(2) 沙粒特性模型建立方面,我们选择的是 Patran-Nastran 软件。PATRAN 软件是目前领域中最著名的有限元处理器,它是一种开放式、多功能的软件设计包,其包括工程设计、分析和结果评估三种功能于一体,是一种高效的交互图形界面的 CAE 集成环境。

(3) 受力分析方面,选择 Solidworks2011 系列软件作为开发平台。SolidWorks 软件是第一款在 Windows 系统基础上开发的三维 CAD 系统,本系统软件功能强大。Solidworks 软件在具有有功能强大的同时也保证了技术创新以及易于使用者学习的优势。SolidWorks 不仅提供强大的功能,而且对每个工程师和设计者来说,操作简单方便、。在强大的设计功能和易于使用的操作(包括 Windows 风格的操作执行)的特点下,使用 SolidWorks,整个产品的设计是完全可编辑的,零件的设计、装配体设计和最终工程图之间的是全部相关的。

通过自学熟练 solidworks2011, V-rep 以及 Patran-Nastran 等软件的用法完成下述仿真任务。

2.2.2.1 仿真模型建立及步态设计

V-rep 仿真软件主要运用于完成机器人机构模型在仿真虚拟环境中的建立,及其对应步态等问题的分析研究。之后通过动态运动仿真对比选择最优机器人机构。确定的机器人仿生机构为仿蜥蜴四足机构,此种机构具有更加优秀的灵活性及对地形的适应性。在 V-rep 软件中制作简易四足带尾巴的蜥蜴机器人外形,如图 2-2 所示其为全方位预览。

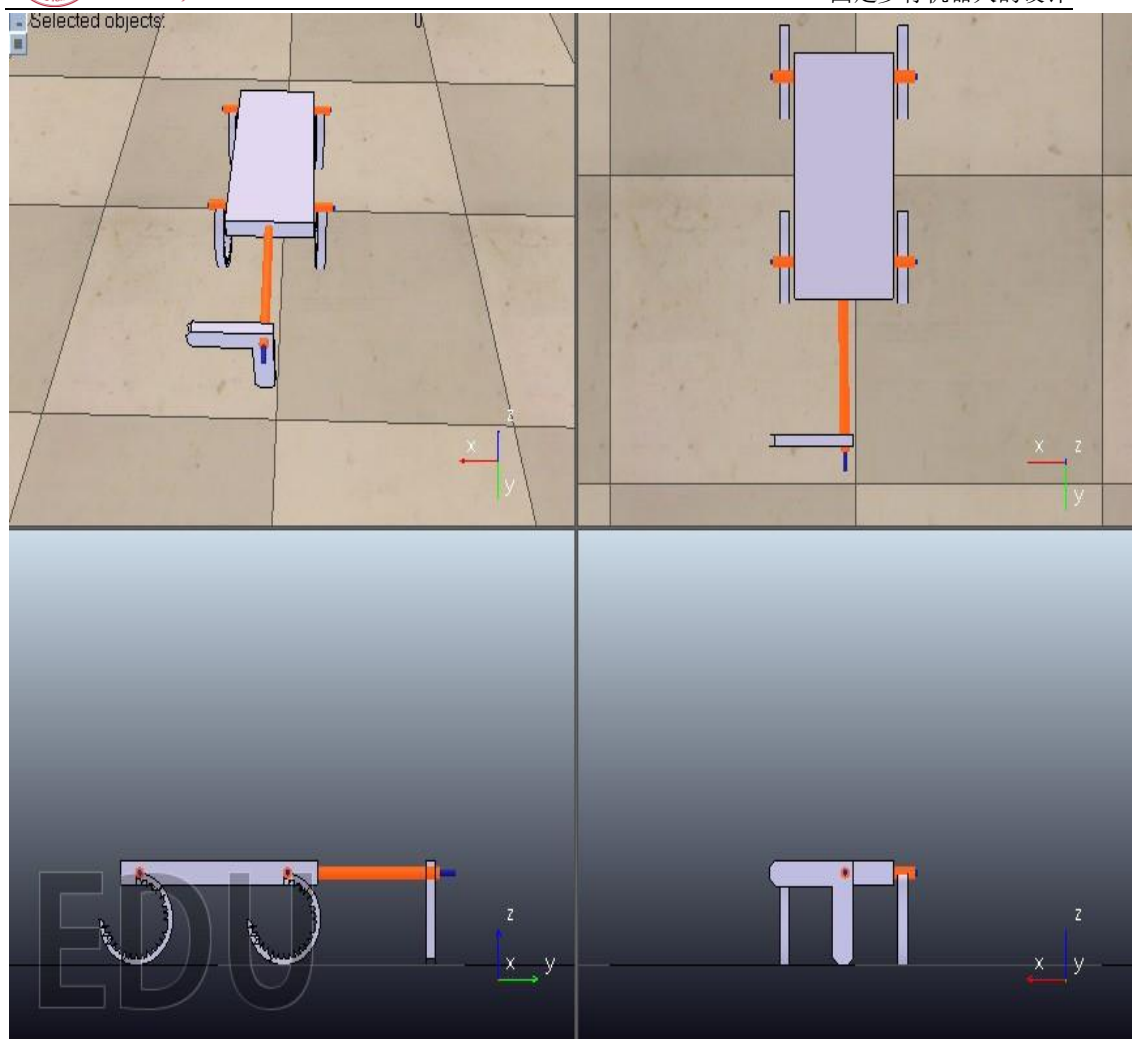


图 2-2 V-rep 环境下机器人预览图

图中四条 C 型腿绕黄色轴进行转动，在模拟软件中无法完全仿真机器人尾部悬空状态及重力特点，因此尾部结构设计接触到地面为了保证机器人行走的身体平衡，更加接近预期设计目标。利用 V-rep 软件自带的运动模拟控制功能，进行编程控制建立的机器人模型运动。

在此过程包括对于机器人步态的设计问题，^[6]根据对六足 C 型腿机器人的研究以及对沙漠中生活的蜥蜴的观察，我们设计出了如下步态，可以较好地适应此种四足新型仿蜥蜴机器人的结构。^[19]

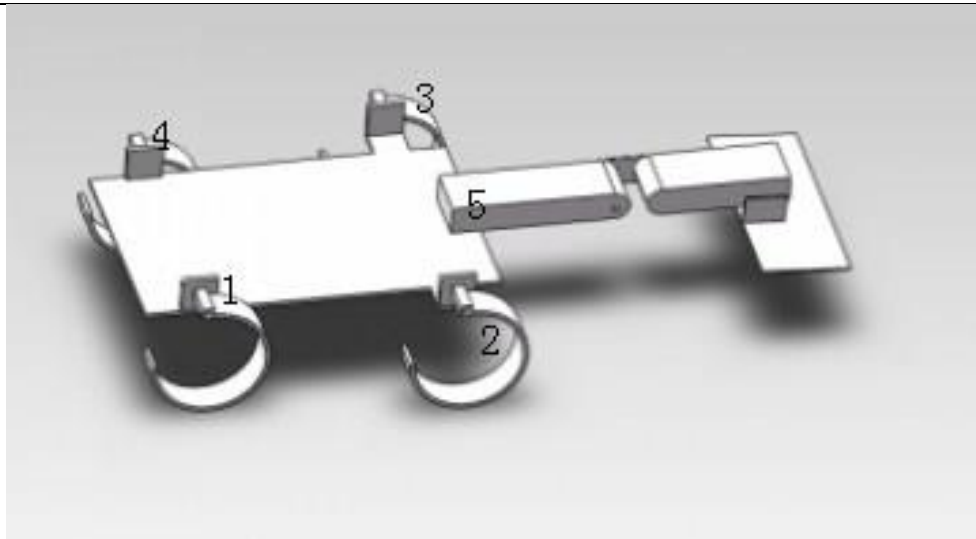


图 2-3 运动仿真情况下机器人外形

如图 2-2 中所示机器人外形,在机器人行进过程中需要 1-4 号腿和 5 号尾巴的协调作用。我们将机器人的步态分为直行和转弯。^[7]

直行步态:运动初始状态如图 2-3 所示,机器人四条腿自然平稳放置于地面,个腿部连接关节上表面与地面平行状态。开始运动时,首先 1,3 号腿同时转动,一圈周期约为 1s,假设机器人内部质量均匀分布,此种状态下车身必然产生不稳定,由杠杆原理可知车身将向 1 号腿即车头向前的左前方倾斜,此时 5 号尾巴向 3 号腿的方向进行摆动,可以达到保持整体机身平衡的目的,再结合腿部转动一圈的时间为 1s,则理想状态下尾巴在 0.5s 的时间内转到最右端,之后 0.5 秒的时间转回中间位置,刚好配合腿部转动完成一个周期的动作。当 1,3 号腿旋转一周触地后,2,4 号为一组的腿抬起,同上为了保持机器人车体的平衡,5 号尾部向 2 号腿方向即左边摆动,重复如上动作,从而完成机器人的直行动作。

转弯步态:初始运动状态同样如图 2-2 所示,之后 3,4 号腿轮流摆动,5 号尾巴保持直行时摆动顺序,因为 3,4 腿摆动过程中机器人始终有三条腿接触地面形成稳定的三角形着力点,可以一直保持机器人的平衡,所以在转弯过程中机器人尾部也可以保持静止不动的姿态。如此同样可以完成机器人左转动作。同理,实现机器人的右转则 1,2 号腿重复上述动作。^[21]

机器人在平整路面直行情况如图 2-2 所示,如下图 2-4 所示为机器人在平整路面直行步态运动仿真模拟结果位移-时间图:

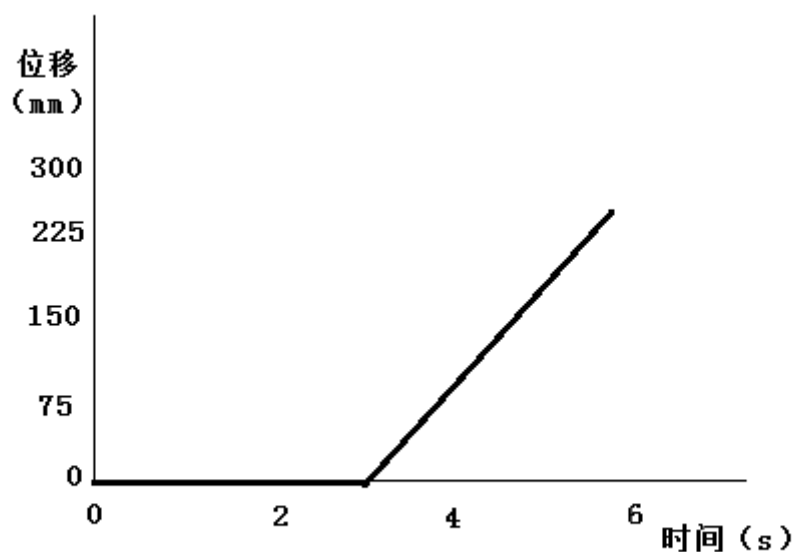


图 2-4 平整地面前进位移-时间关系

图 2-5 为模拟结果速度-时间关系图：

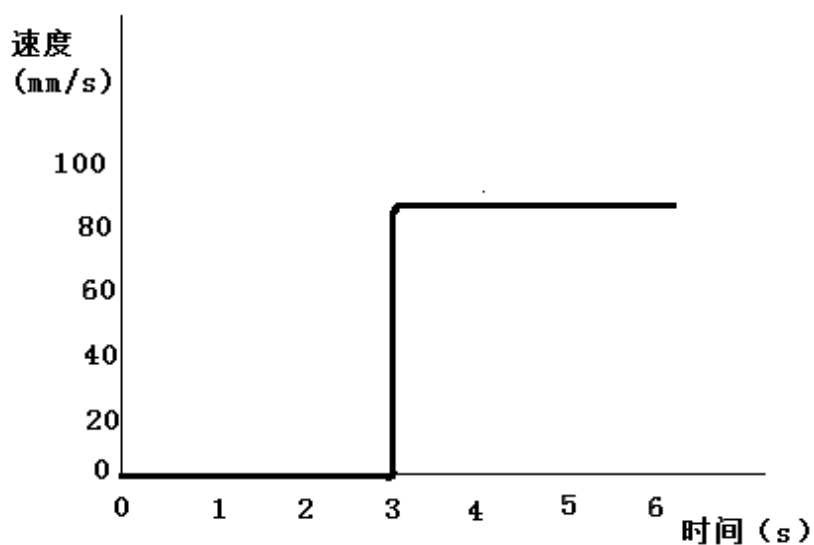


图 2-5 平整地面前进速度-时间关系

由上述两幅图可以看出，因为地面的平整性较好，机器人在运动过程中呈匀速前进的态势，且速度波动几乎为零。

2.2.2.2 沙粒特性分析

沙粒是构成沙漠环境的主要基础成分，通过对沙粒特性进行分析可以间接的了解沙漠地面的部分特征。沙粒特性的仿真研究主要运用 Patran-Nastran 软件来完成。在仿真软件中输入沙粒的物理学以及力学特性进行仿真。

沙粒物理学特性如下：^[1]

- (1) 沙粒粒径分布：平均分布在 200-300um 之间
- (2) 沙粒密度：一般为 2650kg/ m³
- (3) 沙粒孔隙率：孔隙率（Porosity），指散粒状材料的体积中，材料内部的孔隙占总体积的比例。其包括三种：真孔隙率，闭孔隙率和先空孔隙率。对于沙粒孔隙率的计算公式如公式 2-1 所示：^[17]

$$n = 1 - \frac{A_p}{A} \quad (2-1)$$

根据孔隙率的定义不难知晓，公式中参数 A_p 是颗粒总体积，参数 A 是定义区域总体积。

- (4) 沙粒相对密度：

相对密度是指物质的密度与参考物质的密度在各自规定的条件下之比。符号为 d ，无量纲。^[18]沙粒相对密度如公式（2-2）所示：

$$D_R = \frac{(n_{\max} - n)}{(n_{\max} - n_{\min})} * \frac{(r - r_{\max})r_{\max}}{(r_{\max} - r_{\min})r} \quad (2-2)$$

上述公式中变量 r 为沙粒密度，变量 DR 反映沙漠的承压特性，且沙粒密度越大，承压能力越强。

沙粒力学特性如下：^[2]

在沙粒力学特性中，最重要的两个即是能够表示沙地下陷量的沙粒的承压特性以及能够表示沙地抗剪切破坏力的康剪切特性。

- (1) 沙粒的承压特性：

沙粒承压特性可表示机器人腿部作用于沙地上的压力与腿部下陷深度的关系，其表述公式如（2-3）所示：

$$\sigma = \left(\frac{k_c}{b} + K_f\right)Z^n \quad (2-3)$$

上述公式中 σ 是轮下法向应力， b 是腿部宽度， k_c 是沙粒内聚力模量， K_f 是沙粒摩擦力模量， n 是变形指数， z 是腿部下陷深度。

- (2) 沙粒的抗剪切特性：

沙粒的抗剪切特性即表示的是腿部在沙地产生滑行时，沙粒抵抗剪切破坏的能力。也可理解为沙粒能提供给腿部接触面的摩擦力。其表述如公式（2-4）与（2-5）所示：

$$f = f_{\max} (1 - e^{-j/k}) \quad (2-4)$$

$$f_{\max} = c + \sigma \tan \varphi \quad (2-5)$$

公式中 c 是沙粒内聚力， k 是沙粒剪切变形模量， φ 是沙粒内摩擦角， j 是沙粒剪切位移， $f_{\max}$ 是沙粒最大剪切应力。

通过对前人实验和资料的查阅可以得知沙粒内摩擦角 42.6 度，内聚力 2.5KPa，杨氏模量 77.7GPa，内摩擦系数 0.75

通过对沙粒相关物理特性以及力学特性的了解，可以在 Patran-Nastran 软件中输入相应的特性完成沙粒模型建立。^[12]

2.2.2.3 仿真受力分析

合理的机械结构与步态需要可靠的腿部结构作为基础。下面对新型机器人关键的 C 型

腿部分的静力学的分析进行介绍。

下面是仿真受力分析的一部分针对关键的 C 型腿在受力运动过程中的分析。如图 2-6 为 C 型腿在 Solidworks2011 软件中建立的模型,该 C 型腿分为固定端即上部的六边形夹具腿扣和 C 型板。^[10]

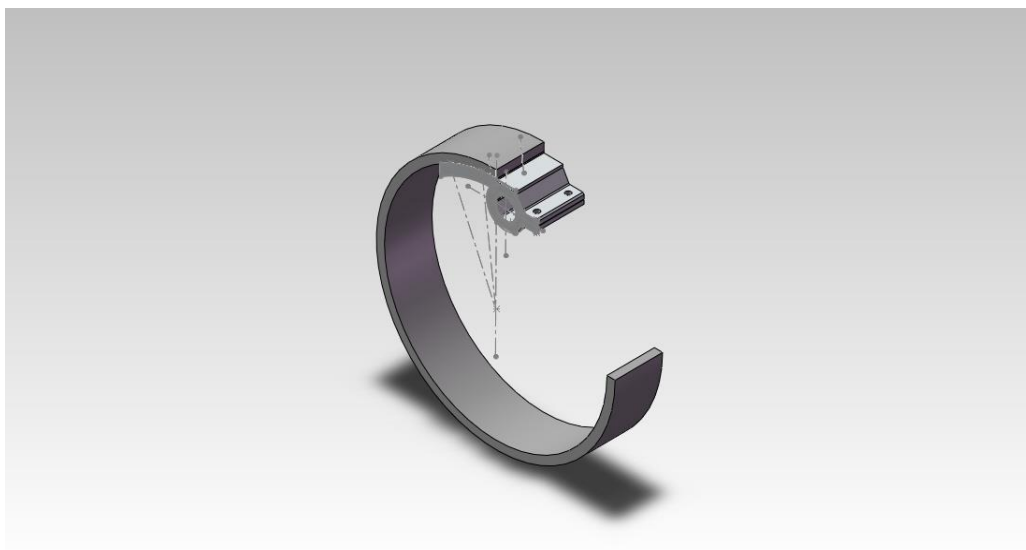


图 2-6 在 Solidworks2011 软件建立的 C 型腿模型

根据设计机器人实体配置机器人材料如图表 2-1。C 型板使用材料为聚甲醛，而夹具腿扣使用 7075-T6 (SN)型号不锈钢。

表2-1 C型腿结构材料

材料属性	C 型腿	腿扣
材料名称	聚甲醛	7075-T6 (SN)
模型类型	线性弹性同向性	线性弹性同向性
屈服强度	5.7e+007 N/m ²	5.05e+008 N/m ²
张力强度	7.15e+007 N/m ²	5.7e+008 N/m ²
弹性模量	2.6e+009 N/m ²	7.2e+010 N/m ²
泊松比	0.3859	0.33
质量密度	1390 kg/m ³	2810 kg/m ³
抗剪模量	9.328e+008 N/m ²	2.69e+010 N/m ²

并根据实际重量加上裕量给予 C 型腿一个 16.7N 竖直向下的作用力利用 simulation 仿真观察腿部受力情况。应力情况如图 2-7，结果数据如表 2-2 所示。

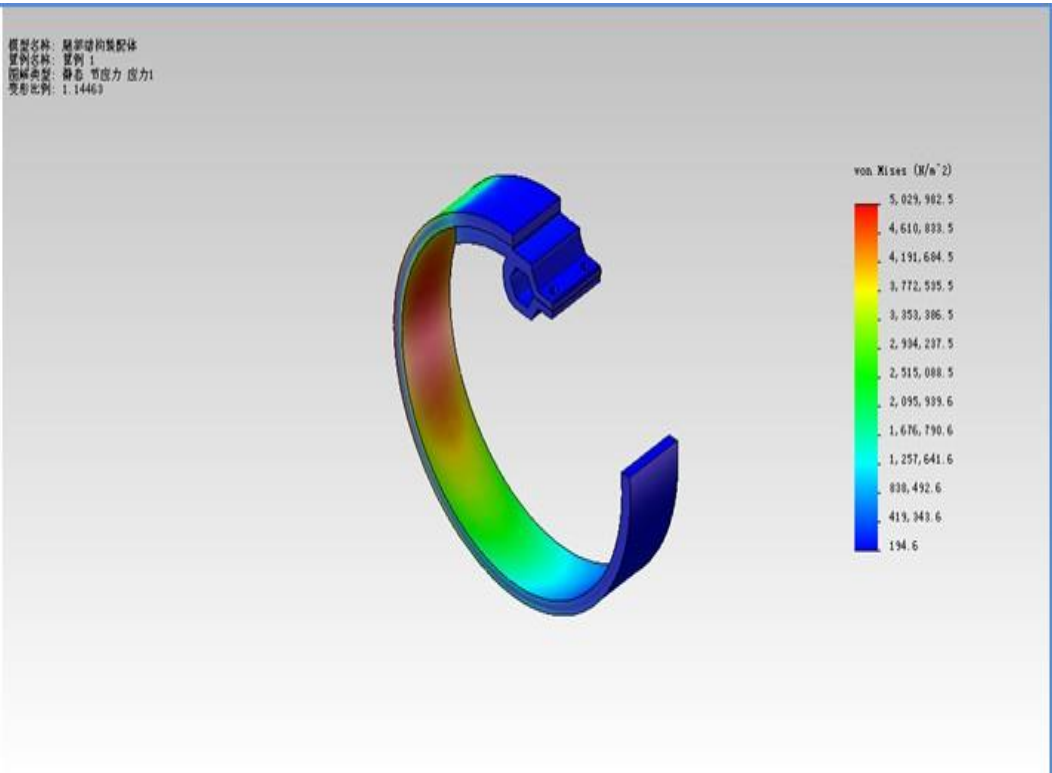


图 2-7 C 腿应力情况

结果数据如表 2-2 所示。

表2-2 C型腿静力应力分析结果

名称	类型	最小	最大
应力 1	VON: von Mises 应力	194.572 N/m^2	5.02998e+006 N/m^2

C 型腿受力位移情况如图 2-8 所示，

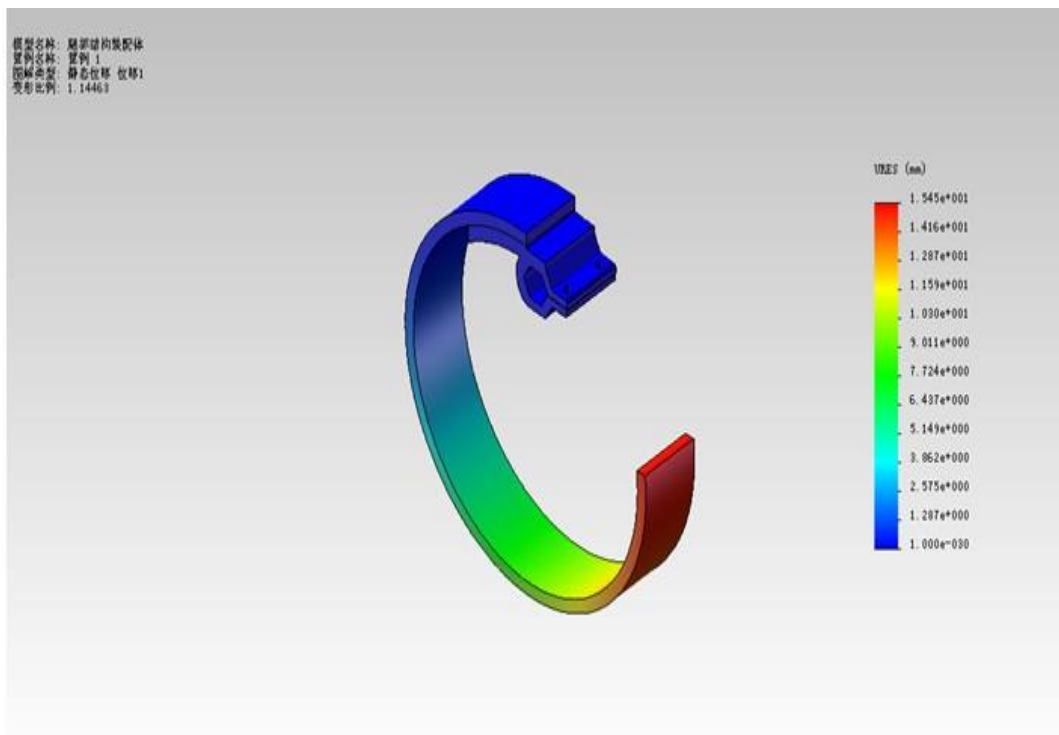


图 2-8 C 腿位移情况

结果数据如表 2-3 所示。

表2-3 C型腿静力位移分析结果

名称	类型	最小	最大
位移	URES:合位移	0 mm	15.448 mm

上述过程是对 C 型腿进行静力学分析的结果示意，由图表可以看出仿真软件中的 C 型腿模型在 16.7N 作用力下产生的形变完全在合理范围之内。由此可以得出，运用此种 C 型腿的材料以及尺寸大小设计上完全可以承受机器人车体以及在行走过程中其他方面带来的压力，且 C 型腿结构的设计能够很好地运用于机器人的实际运动中。

下面是 C 型腿的模态分析范例结果：

模态分析是一种运用于研究结构动力特性的方法，同时也是一种运用于工程振动领域的系统辨别方法。模态的是机械结构的固有振动特性，每个模态都具有其特定的固有频率、模态振型和阻尼比。上述模态参数可以通过计算或者试验分析取得，这样的计算或试验分析过程称为模态分析。通常所说的模态分析都是指试验模态分析。在此分析过程中我们输入四阶振型频率，来观察不同振型情况下 C 型腿的固有频率的状态情况。^[23]

如图 2-9 所示，为在 14.974HZ 的情况下，即 1 阶振型时 C 腿的状态图。

模型名称: 腿部结构装配体
实例名称: 实例 3
图例类型: 频率 位移
模式形状: 1 数值 = 14.974 Hz
变形比例: 0.00345368

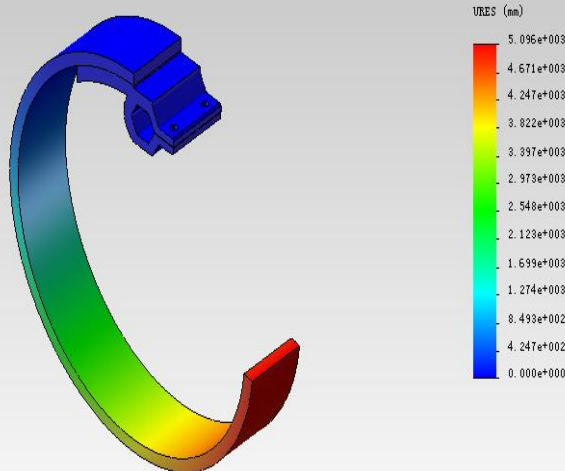


图 2-9 频率为 14.974HZ 的情况下 C 腿的状态图

如表 2-4 所示为在频率 14.974HZ 情况下的 C 型腿位移数据。

表2-4 频率14.974HZ时C型腿模态位移分析结果

名称	类型	最小	最大
位移	URES:合位移 图解 对于模式形状: 1(数值 = 14.9738 Hz)	0 mm	5096 mm

图 2-10 为 C 型腿在频率数为 2，即 2 阶振型时，频率为 19.457HZ 的情况下的状态图。

模型名称: 腿部结构装配体
实例名称: 实例 3
图例类型: 频率 位移
模式形状: 2 数值 = 19.457 Hz
变形比例: 0.00310883

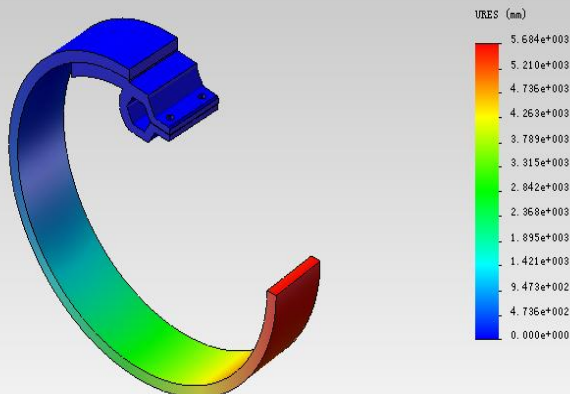


图 2-10 频率为 19.457HZ 的情况下 C 腿的状态图

如表 2-5 所示为在频率 19.457HZ 情况下的 C 型腿位移数据。

表2-5 频率19.457HZ时C型腿模态位移分析结果

名称	类型	最小	最大
位移	URES:合位移 图解 对于模式形状: 2(数值 = 19.457 Hz)	0 mm	5683.69 mm

图 2-11 为 C 型腿在频率数为 3，即 3 阶振型时，频率为 36.71 Hz 的情况下的状态图。

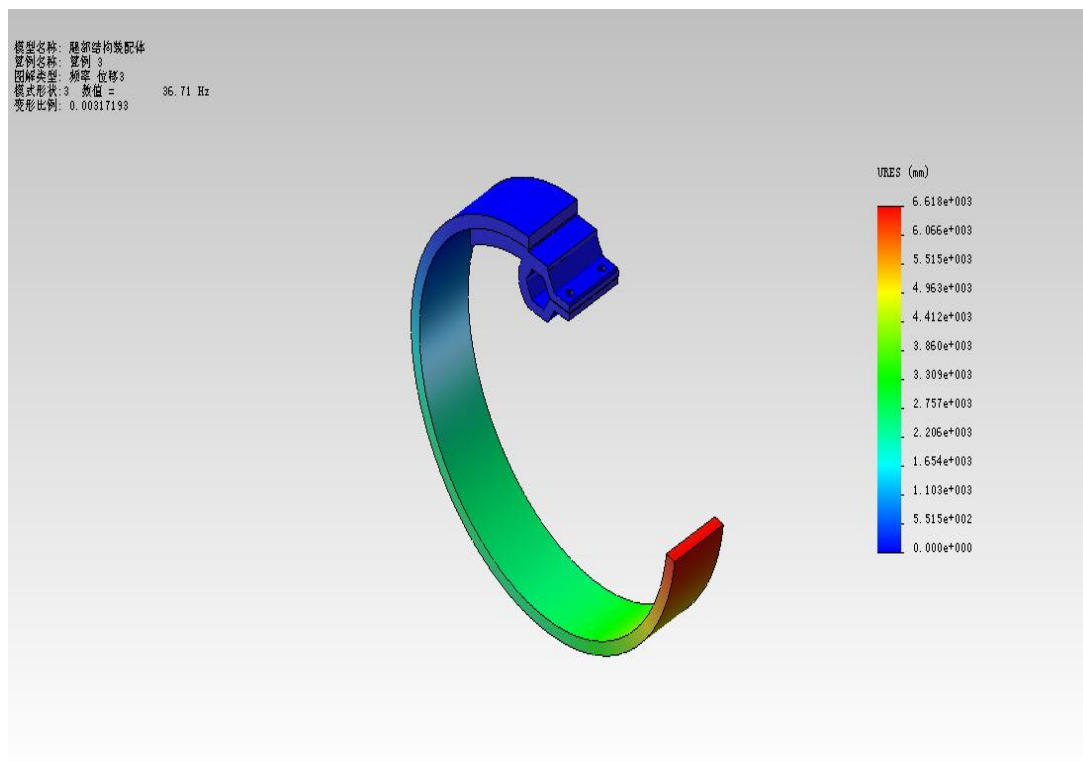


图 2-11 频率为 36.71HZ 的情况下 C 腿的状态图

如表 2-6 所示为在频率 36.71HZ 情况下的 C 型腿位移数据。

表2-6 频率36.71HZ时C型腿模态位移分析结果

名称	类型	最小	最大
位移	URES:合位移 图解 对于模式形状: 3(数值 = 36.71 Hz)	0 mm	6617.77 mm

图 2-12 为 C 型腿在频率数为 4，即 4 阶振型时，频率为 77.224HZ 的情况下的状态图。

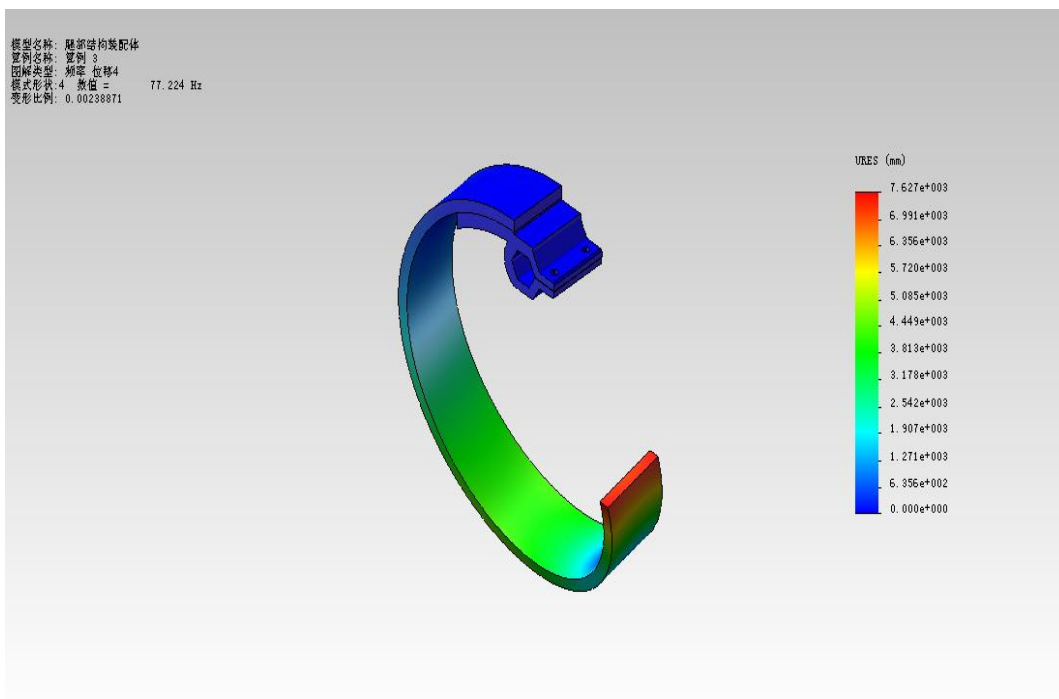


图 2-12 频率为 77.224HZ 的情况下 C 腿的状态图

如表 2-7 所示为在频率 77.224HZ 情况下的 C 型腿位移数据。

表2-7 频率77. 224HZ时C型腿模态位移分析结果

名称	类型	最小	最大
位移	URES:合位移 图解 对于模式形状: 4(数值 = 77.224 Hz)	0 mm	7626.78 mm

根据 solidworks 软件本身的特性，上述模态分析中位移的最大值没有具体意义，只能通过相互比较来表述 N 阶振型状态下的位移量差别。且通过上述模态分析我们可以很清晰的了解到 C 型腿机构在各阶振型中的固有频率，从而在设计实体或者在运用于实际过程中可以考虑尽量避免在接近其固有频率一定范围内的情况下活动。^[25]

第三章 新型四足机器人系统设计

根据第二章对机器人结构以及 C 型腿的实用性分析可知，本文软件仿真中描述的新型四足机器人结构上的实现具有较高的可行性；C 型腿的使用具有一定的合理性及实用性。如图 3-1，本章将按照如下流程顺序对根据仿真分析的结论进行新型四足机器人实体的设计制作实现过程进行详细描述。

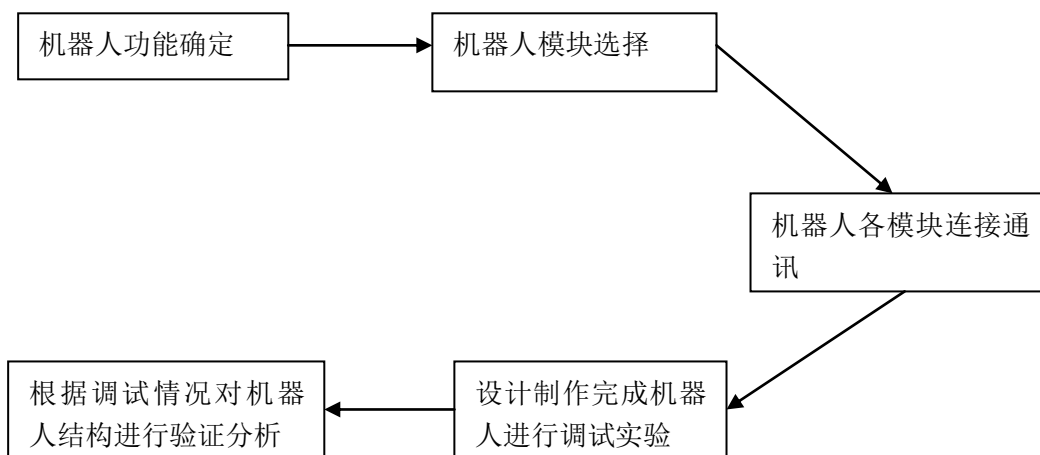


图 3-1 新型四足机器人设计流程图

3.1 四足机器人制作内容

机器人实体设计制作方面内容包括机器人制作,其中最为关键的几点机器人实体模型的制作,根据功能来确定机器人所需的模块,机器人内各模块之间布局,制造出能够初步具有行动能力的机器人初体;调试工作,其中关键有各模块之间通讯的调试,机器人实体配重的调试,根据具体实际情况设计并且对算法的调试等,保证机器人能够更好地应对各种实际中所发生的情况和工作的稳定性;附加功能的添加,计划添加功能为超声波模块避障以及加速度传感器判断倾斜度,使得机器人拥有更多的功能,可以发挥更好地作用。具体如下:

(1) 根据仿真结构制作实体机器人。该项内容包括对机器人机体外形的设计制作,设计一款合适并且相对来说较为简洁的外形对机器人的行走以及其他方面的运动至关重要,在设计的同时也需要考虑如何添加尾部结构,能够使得此特点结构能够发挥出较好的作用;实体各硬件模块的确定,根据机器人具体实现的功能来决定需要购买的模块,例如使用电机和电机驱动模块配合来实现机器人的动力;使用超声波模块并配合相应的通讯端口来完成机器人利用超声波壁障的功能;使用合适的控制器,完成于各模块之间的通讯,来更好的处理机器人动作之间的协调功能等。最后便是机器人一些必要部分的加工任务,对于制作一款合适的机器人,部分零件要求质量较高,无法通过手工完成制作,需通过专业加工厂的帮助完成其全部制作过程。

(2) 进行调试改进实体机器人。完成上述实体机器人制作工作并确保其能够进行正常运动后,需要对机器人的行走步态以及平衡等问题进行调试解决。解决步态问题的思路可以从对步态的控制算法考虑,改变对步态判断的参考物,可以较好地改善步态不稳定等问题的出现,同时也可以从机器人实体结构方面考虑,尝试改变机器人配重等问题也可以达到目的。

(3) 除行走功能之外,给机器人附加超声波传感器模块,添加一些较为精简的控制算法,使其拥有简单的避障功能。如此为了更接近于实际使用,所以在机器人上添加超声波传感器模块,让机器人在行走过程中完成对障碍物的判断,以及实现简单的对遇到障碍物之后行走的决策过程。

3.2 四足机器人制作研究与实施方法

3.2.1 四足机器人结构设计研究方法

通过对仿真研究结果的总结,可以得出一个合适的机器人实体设计制作方案。之后将此

方案运用到实体机器人的研究开发工作中，完成最终的机器人制作。研究过程中要解决的关键问题在于完成仿真后关于机器人实体的调整 and 测试，由理论与实践的差异性可知，理论得出的结论并不一定能够在实践得出较好的效果，所以在完成实体机器人的制作工作之后需要根据实际的情况，比如沙漠环境的特点，在测试的过程中不断进行的对机器人的机构以及步态等问题进行改进和调整。^[14]

3.2.2 四足机器人结构设计方法

制作机器人实体从对实现机器人功能的模块的选择，首先需要选择机器人的核心控制器，希望能够利用最少的资源实现最多的功能以达到资源高效利用的目的；其次是机器人腿部的驱动电机，和给尾巴提供动力的舵机，选择合适的电机十分重要，不仅能够保证腿部在行走过程中有充足的扭力，同时尽量减少电量消耗和其所占的空间大小；舵机的选择同样从最小的体积发挥最大扭矩方面考虑，同时需要保证其具有转动角度可控的功能；最后其他各个必须模块以及机器人机体外形的加工制作，其他功能模块选择主要原则即是能够完成和核心控制器的通讯，机器人外形加工简易合适即可。^[5]

机器人控制器方面我们起初选择了 Basys2 单片机。Basys2 FPGA 开发板是围绕着一块 Spartan-3E FPGA 芯片和 Atmel AT90USB USB 控制器搭建完成的，它提供了完整的、随时可以使用的硬件平台，且其适合于从基本逻辑器件到复杂控制器件等各种主机电路。Basys2 开发板拥有极好的兼容性，其兼容所有版本的 Xilinx ISE 工具，其中也包括免费的 WebPack 版本。^[29]

实体制作过程中作为控制器的 Basys2 单片机出现了引脚不够等问题，于是我们决定使用多块单片机协调控制来完成整体的控制任务。所以接下来选择了 MSP430G2553 单片机作为超声波模块和控制尾巴舵机的控制器。以下为 MSP430 系列单片机的介绍：MSP430 又称为混合信号处理器，是由于其针对实际应用需求，将多个不同功能的模拟电路、数字电路模块和微处理器集成在一个芯片上，以提供“单片机”解决方案。该款单片机拥有处理能力强，运算速度快，超低功耗，片内资源丰富，方便高效的开发环境等突出特点。

机器人腿部的动力我们选择由带编码盘的无刷直流大扭力电机提供。电机选择方面应在保证其拥有足够的扭矩能够支撑起机器人在行走过程中受力的前提下，做到尽量减少其尺寸大小且供电电压不宜过大。经过计算不难得出，单个电机至少需要的扭矩为 12.5 KG/CM，加上对裕量的考虑，则电机扭矩大于 18 KG/CM 最佳。基于上述考虑，所选择电机由 6V 直流电源供电，其拥有最大扭矩可达 19KG/CM，可以满足机器人行走所需要的动力。电机具体参数如表 3-1 所示：

表3-1 机器人电机具体参数表

参数	数值	单位
额定电压	6	V
空转速度	10000	Rpm
空转电流	350	mA
额定速度	8950	Rpm
额定扭矩	19	Kg.cm
额定电流	0.85	A
堵转转矩	19	mNm
堵转电流	3.4	A
最大功率	85	%
齿轮减速比	1/164.6	
电机直径	25	Mm
电机总长度	88	Mm

实体机器人尾部结构的动力由 MG955 式舵机提供，该舵机由 7.5V 直流电源供电，可提供的大扭力为 13KG/CM，转动范围为 180 度，且可以通过上位机软件或连接单片机通讯控制的方式完成舵机固定角度的偏转以做到相对精确的偏转控制，可以满足我们对尾部的控制需要。

其他功能模块包括：

四个电源模块，转换锂电池电源电压后分别提供给电机，舵机以及各控制单片机供电；

一颗容量 9800MAH 的大型锂电池供电，电池尺寸长/13cm 宽/6.7cm 厚/2.3cm，可以完全提供整个机器人所需能量且尺寸适合安装于机器人上；

舵机的运动控制由 Arduino 系列舵机控制板控制，通过 Uart 口可以利用上位机或与其他单片机控制器连接完成对舵机运动的精确控制过程；

两块 Arduino 智能车双路大功率 30A 电机驱动作为四个电机的驱动模块，大功率驱动模块可以保证电机即使出现堵转情况也不会导致电机或其供电线路模块的烧毁现象发生。

RF1100-232 无线串口收发模块，可以完成单片机与电脑的通讯，在上位机客户界面端口完成对机器人运动的控制。

HC-SR04 型超声波传感器模块安放于机器人前部，由一个 MG955 式舵机提供其转动的动力，从而侦测不同方向的障碍物，其有效探测范围为 5M，探测精度优于 2CM；四个安装于电机上的光电传感器，提供腿位置的大概反馈，帮助完成对机器人行进时步态的控制功能。

四个位于电机与 C 型腿连接处的光电传感器，该传感器需要挡光片配合。初始状态下，挡光片挡在光电传感器中间，使得光线不能通过，此时传感器反馈一个低频信号，通过 BASYS 单片机控制器处理完成腿部停止的动作。当腿部转动一周回到光电传感器位置处，光电传感器状态由没有挡光下的高频电压变为低频，则可以控制腿部的及时停止动作。也能较好的减少四个电机之间转动周期微小的不同而带来的误差。

其他模块中最为重要的即是 AHRS MPU6050 型号的加速度传感器模块。其主要功能为帮助光电传感器完善机器人尾部控制算法。对于此部分将在下面算法部分进行详细的讲解。

实体机器人主要控制器与其他模块之间方框图关系如图 3-2 所示：

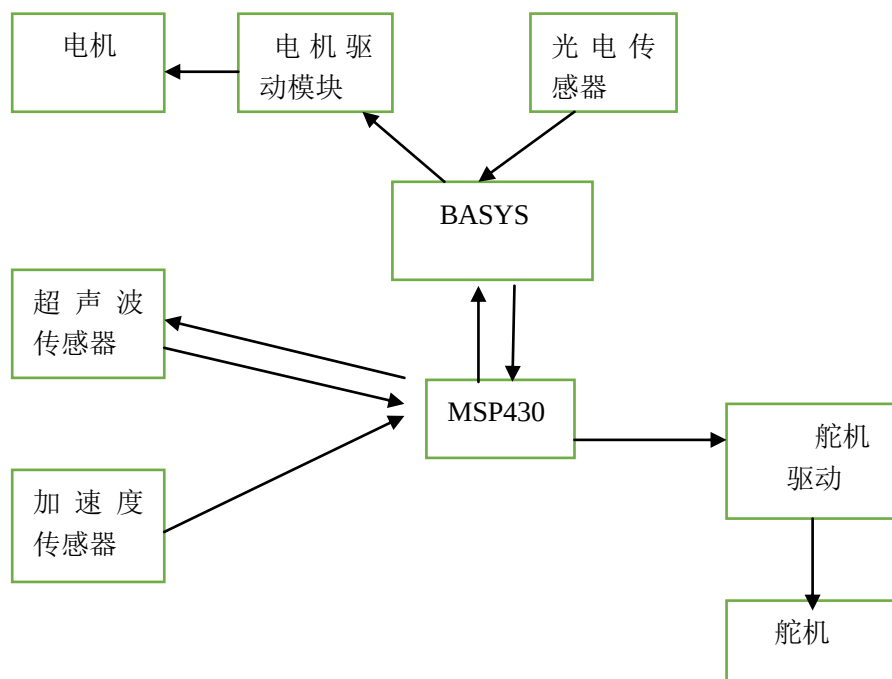


图 3-2 机器人各模块连接关系

机器人内部具体各模块之间关系如下：两种单片机控制机中，利用 Basys2 单片机作为机器人主体控制器，主要控制部分为光电传感器及机器人腿部运动；MSP430G2553 单片机控制器与 AHRS MPU6050 型加速度传感器和 HC-SR04 型超声波传感器模块连接，主要控制部分为避障功能以及机器人尾部平衡控制。

其他模块的电源驱动模块与其他各个需要用电模块连接，为整个机器人系统提供能源；电机驱动模块与电机连接，负责电机即机器人腿部运动部分的控制工作舵机驱动模块；无线通讯模块可与电脑上位机直接连接，可实现在上位机的用户界面端控制机器人运行的过程；HC-SR04 型超声波传感器模块与 MSP430 控制器连接，实现机器人行走过程中的避障算法；AHRS MPU6050 型加速度传感器同样通过 uart 口与 MSP430 连接建立通讯，完成通过检测机器人身体即时的倾斜情况而进行尾部结构姿态的精确控制；光电传感器与 BASYS 单片机控制器连接，帮助机器人腿部做到精准停止定位。总之，HC-SR04 型加速度传感器，AHRS MPU6050 型超声波传感器模块，光电传感器的反馈和舵机运动由另一块 MSP430G2553 单片机完成控制。同时 MSP430G2553 单片机需要完成与 Basys2 单片机的通讯，通过 Uart 口连接单片机之间的通讯，可以很好地完成配合协调完成机器人的整体控制功能。

在各模块在机器人内部放置过程中，需要考虑各模块质量与尺寸搭配问题，其中必要模块参数如下表 3-2 所示：

表3-2 机器人各模块参数表

模块名称	质量 (g)	尺寸 (mm)	数量
BASYS	150	110*90	1
MSP430	40	70*50	2
电源驱动	30	70*40	4
锂电池	350	130*67*32	1
电机驱动	19	60*45.5	2
无线模块	20	48*20	1
超声波传感器	15	43*20	1
加速度传感器	15	32*25	1
光电传感器	10	26*13*13	4
舵机	55	40*20*36.5	3
舵机驱动模块	40	63.5*43.5	2

机器人实体设计过程中，对各模块位置安排具有一定要求，根据上述参数，可得知如下图 3-3 所示，机器人各模块放置可使机器人内部质量呈最大化均匀分布，同时也有利于机器人行驶的稳定。

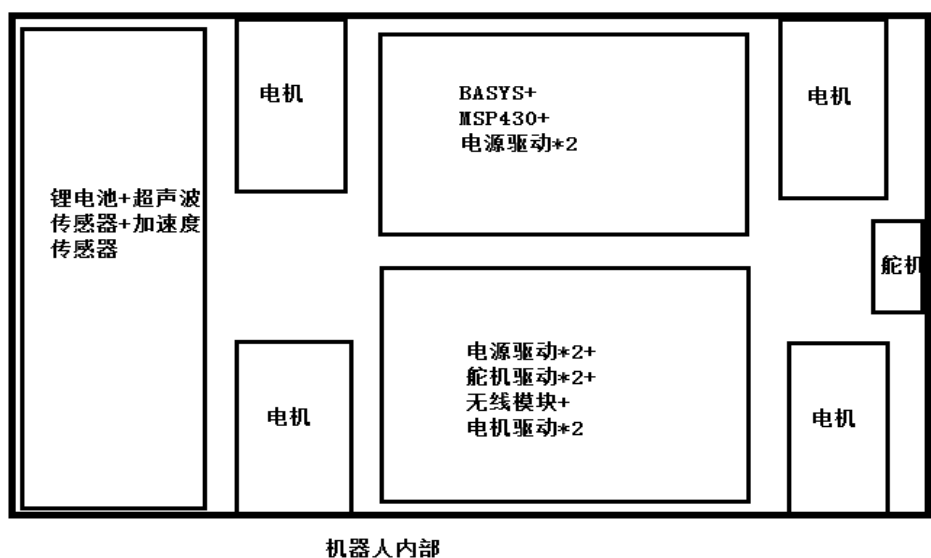


图 3-3 机器人内部模块分布

机器人外形设计，需考虑沙漠环境炎热，因此外壳采用具有一定强度的塑料做成，机器人顶部不封住，粘贴一张纱网抵挡沙粒以及固体颗粒的进入，同时也保证各电子模块的散热。C 型腿部结构由固甲醛材料做成，材质较轻，且既能保持一定的韧性也拥有一定的强度。腿部外圈每隔 30° 切出一个倒钩，使得机器人在沙子里拥有更强的抓地力。如表 3-3 给出机器人基本参数：

表 3-3 机器人结构基本参数

参数	数值	单位
总规格	60*20*20	Cm
身体长度	30	Cm
尾巴长度	30	Cm
身体重量	2.5	Kg
尾巴重量	0.5	Kg
腿部直径	10	Cm
C 型腿弧度	270	Degree

根据上述参数描述制作的新型四足机器人样机如图 3-4 所示：

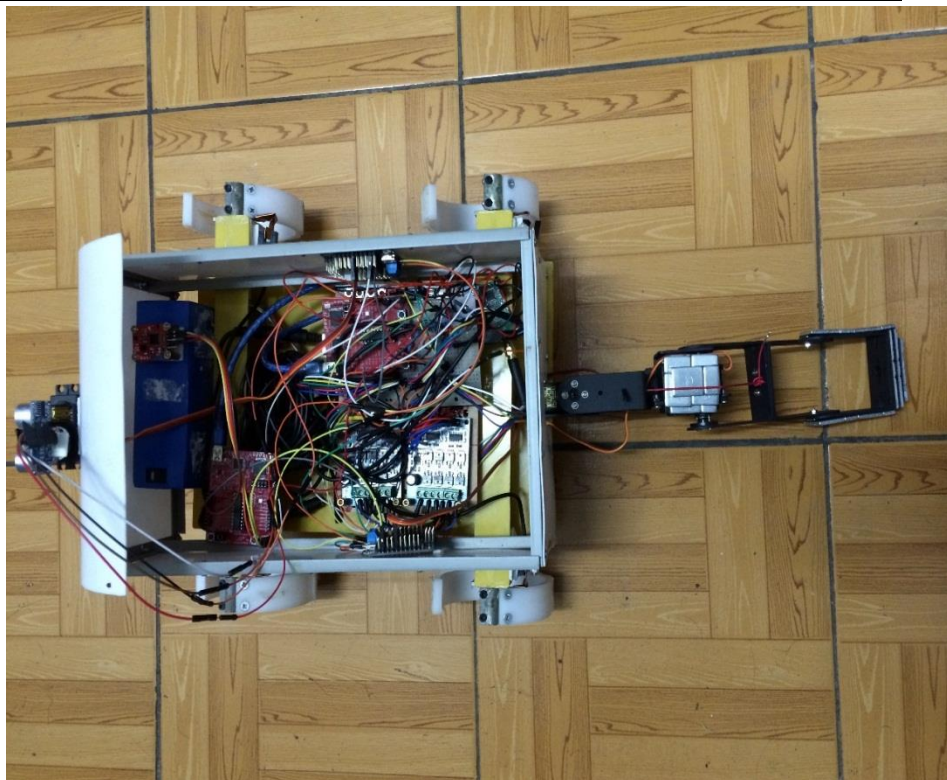


图 3-4 四足机器人式样机

3.3 四足机器人平地步行实验与分析

本节主要通过新型四足机器人于平地上行走的实验和分析验证新型四足机器人运动可行性，并对比仿真结果，比较其差异并分析产生差异的原因。

本文在实体制作实施部分对新型四足机器人行走步态做出了较详尽的描述。平整路面试验过程准备条件：^[28]

- (1) 平整干净的地面，选择实验室的地面作为试验对象；
- (2) 角度测量工具量角器，测量行走方向与正方向的偏差角；
- (3) 计时器，记录机器人在规定距离行走时长。

在进行平地试验的过程中，暂定机器人电机转速为 $\omega=1\text{rad/s}$ ，电机电压 6V，腿部半径为 50mm，实验数据如表 3-4 所示：

表3-4 新型四足机器人平地测试结果

前进距离 (mm)	侧向偏移距 离 (mm)	偏转角度 (°)	运动时间 (s)	移动速度 (mm/s)
1000	42	2.23	12.9	77.5
1500	58	2.21	19.8	75.6

上述实验数据表明当机器人腿转速为 $\omega=1\text{rad/s}$ 情况下，运动速度在 76mm/s 左右，与理论 85mm/s 略有差距，经过分析，产生此现象主要原因可能是在理论仿真分析过程中，机器人设定了严格的纯滚动过程，而在实际测试过程中，机器人行走势必出现打滑现象；在模拟环境下，机器人准确的朝正前方行走，而实际过程中有一定的偏差位移出现，机器人装配中出现的微小偏差以及实际行走地面摩擦力不一致的原因都会导致此种现象发生。从数据中偏

差角 2.2 左右可以得知,机器人在整体行走过程中并没有出现失常,其拥有较强的稳定性能。
[22]

第四章 新型四足机器人控制与分析

本文第三章阐述的新型四足机器人实体的设计制作与运动过程主要由 HC-SR04 型超声波模块, AHRS MPU6050 型加速度传感器模块以及机器人运动步态三个控制算法完成实现。每一个控制算法对于机器人正常行驶都至关重要,因此本章进行算法内容的介绍。如图 4-1,新型四足机器人各控制算法与分析介绍流程与关系。

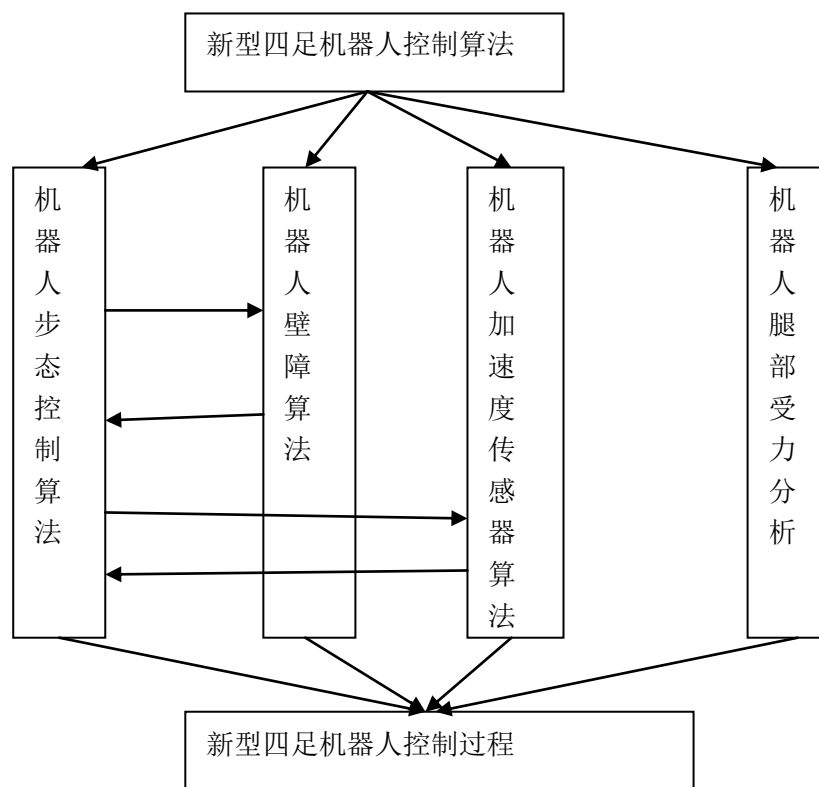


图 4-1 新型四足机器人控制算法与分析过程

4.1 步态控制算法

本文第二章提到仿真模拟机器人运动过程中机器人的步态,步态运行结果在软件仿真过程中较为理想。本节将结合实体机器人简图对机器人步态控制算法进行详细的阐述以及对新步态进行验证。

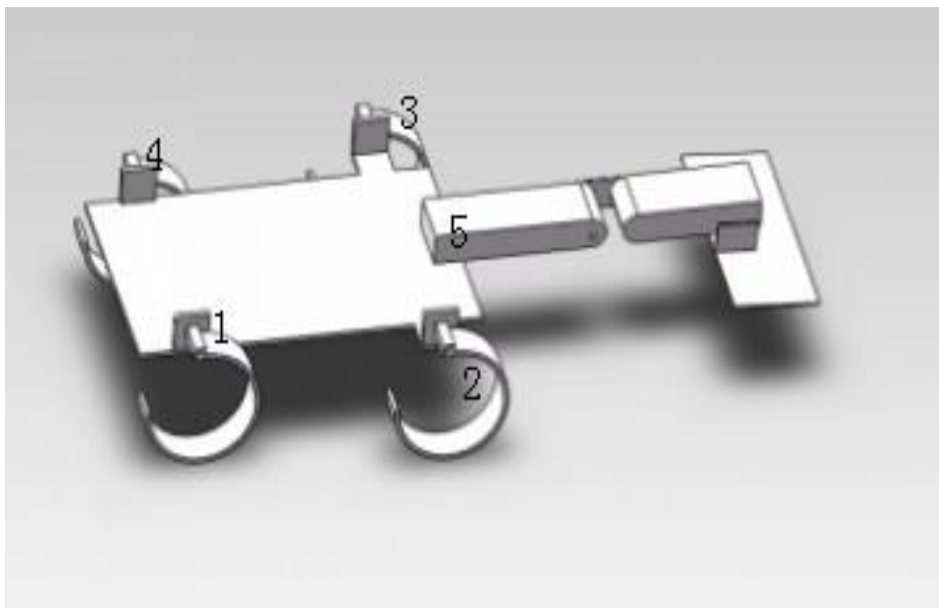


图 4-2 机器人外形简图

机器人运动步态：如图 4-2 中所示机器人外形简略图，在机器人行进过程中需要 1-4 号腿和 5 号尾巴的协调作用。机器人步态分为直行和转弯。^[8]

直行步态：运动初始状态如图 4-1 所示，机器人四条腿自然平稳放置于地面，各腿部连接关节上表面与地面平行状态。开始运动时，首先 1,3 号腿同时转动，一圈周期大概 1s，假设机器人内部质量均匀分布，此种状态下车身必然产生不稳定，由杠杆原理可知车身将向 1 号腿即车头向前的左前方倾斜，此时 5 号尾巴向 3 号腿的方向进行摆动，可以达到保持整体机身平衡的目的，再结合腿部转动一圈的时间为 1s，则理想状态下尾巴在 0.5s 的时间内转到最右端，即舵机 P1800 位置，再过 0.5 秒的时间转回中间位置，恰好配合腿部转动完成一个周期的动作。如图 4-3 所示：

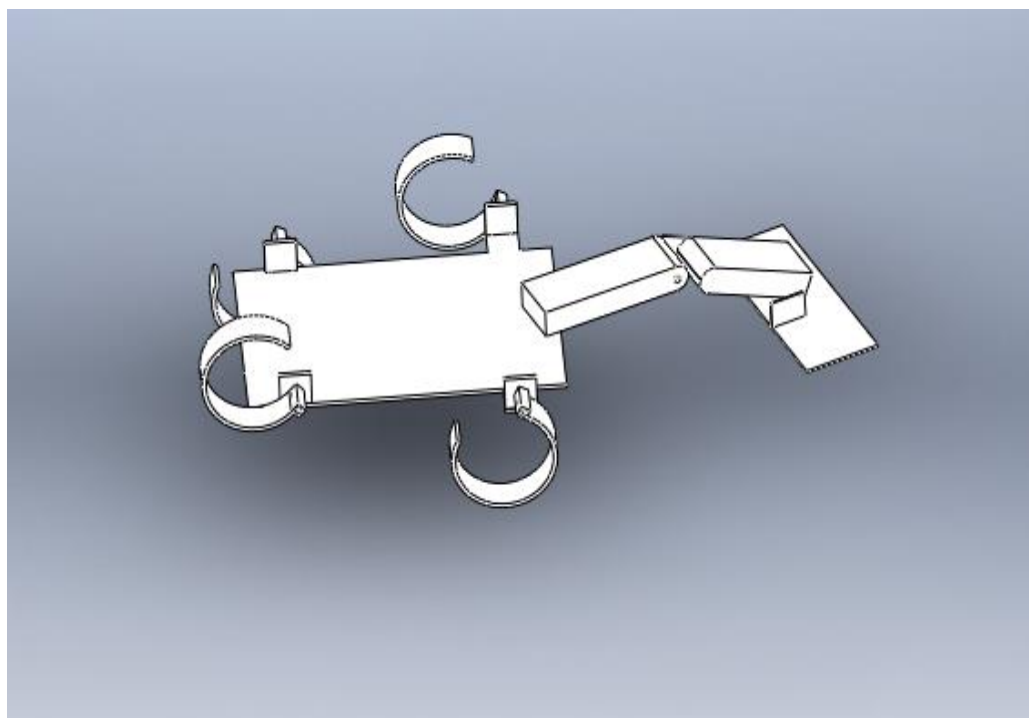


图 4-3 机器人直行步态 1, 3 腿抬起状态

当 1,3 号腿旋转一周触地后, 2,4 号为一组的腿抬起, 同上为了保持机器人车体的平衡, 5 号尾部向 2 号腿方向即左边摆动, 如图 4-4 所示:

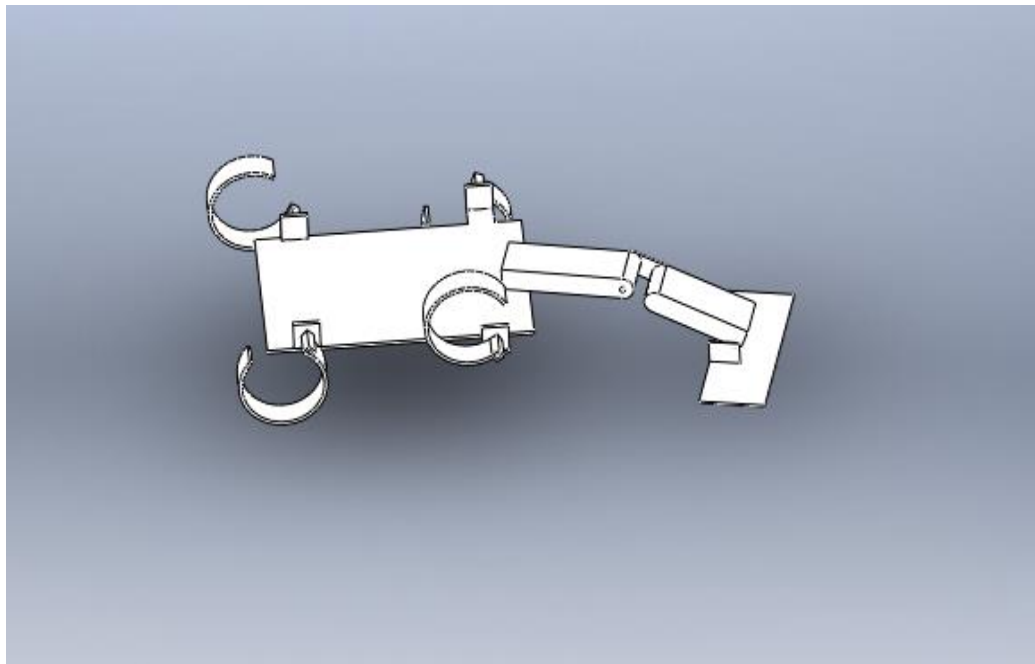


图 4-4 机器人直行步态 2, 4 腿抬起状态

重复如上动作, 从而完成机器人的直行动作。

转弯步态: 初始运动状态同样如图 4-1 所示, 之后 1,2 号腿轮流摆动, 5 号尾巴保持直行时摆动顺序, 因为 3,4 腿摆动过程中机器人始终有三条腿接触地面形成稳定的三角形着力点, 可以一直保持机器人的平衡, 所以在转弯过程中机器人尾部也可以保持静止不动的姿态。如此同样可以完成机器人右转动作。如图 4-5,图 4-6 所示:

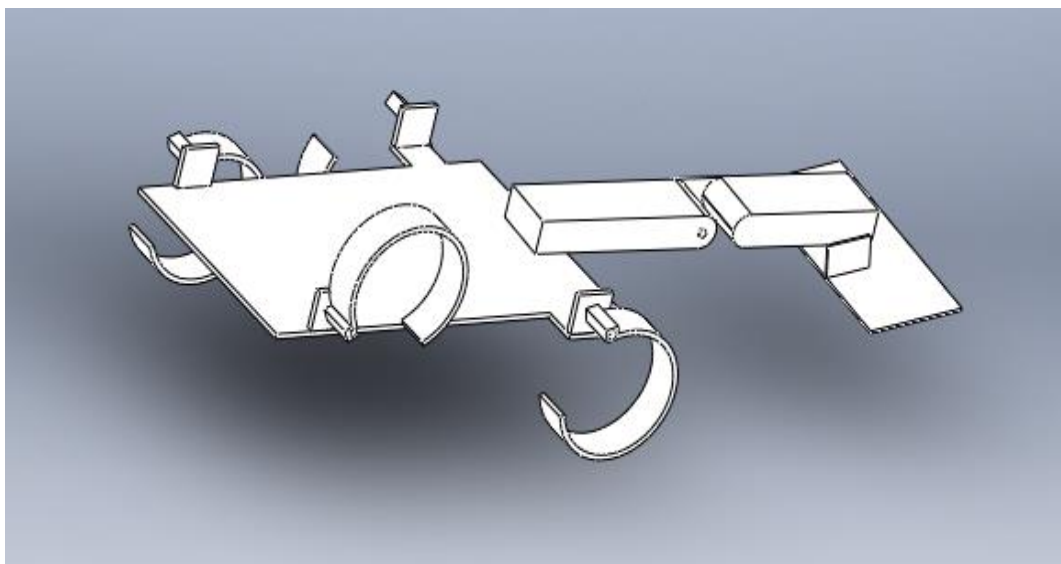


图 4-5 机器人右转 1 号腿抬起

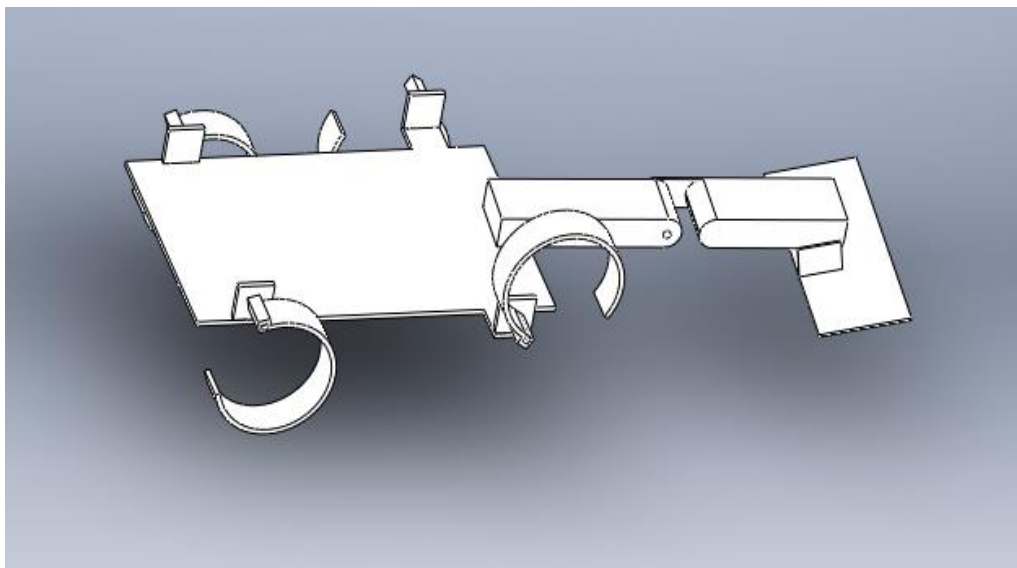


图 4-6 机器人右转 2 号腿抬起

同理，实现机器人的左转则 3,4 号腿重复上述动作。过程如图 4-7，图 4-8 所示：

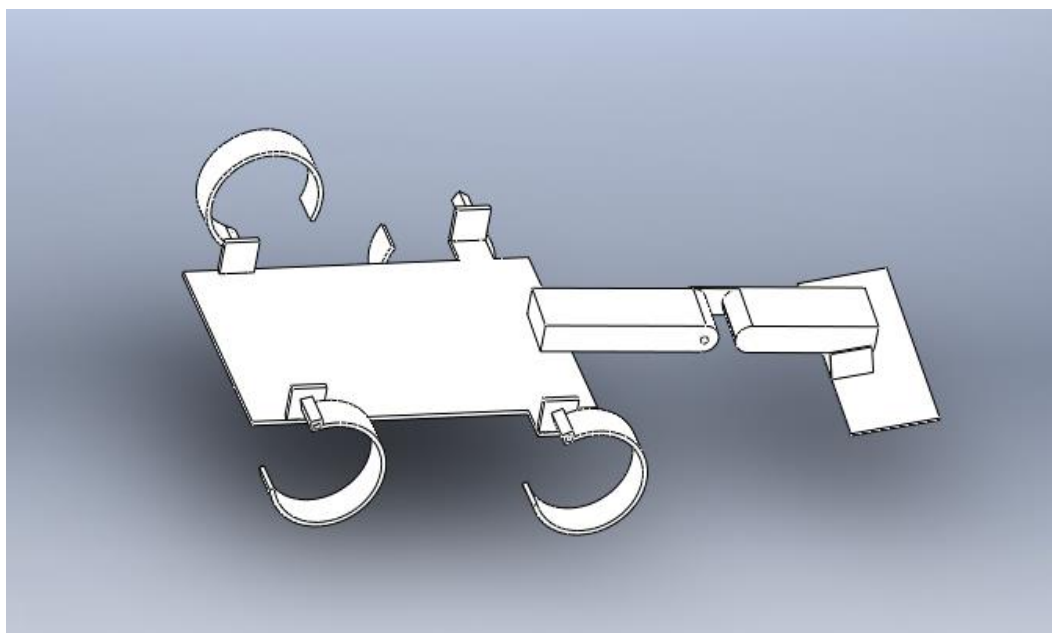


图 4-7 机器人左转 3 号腿抬起

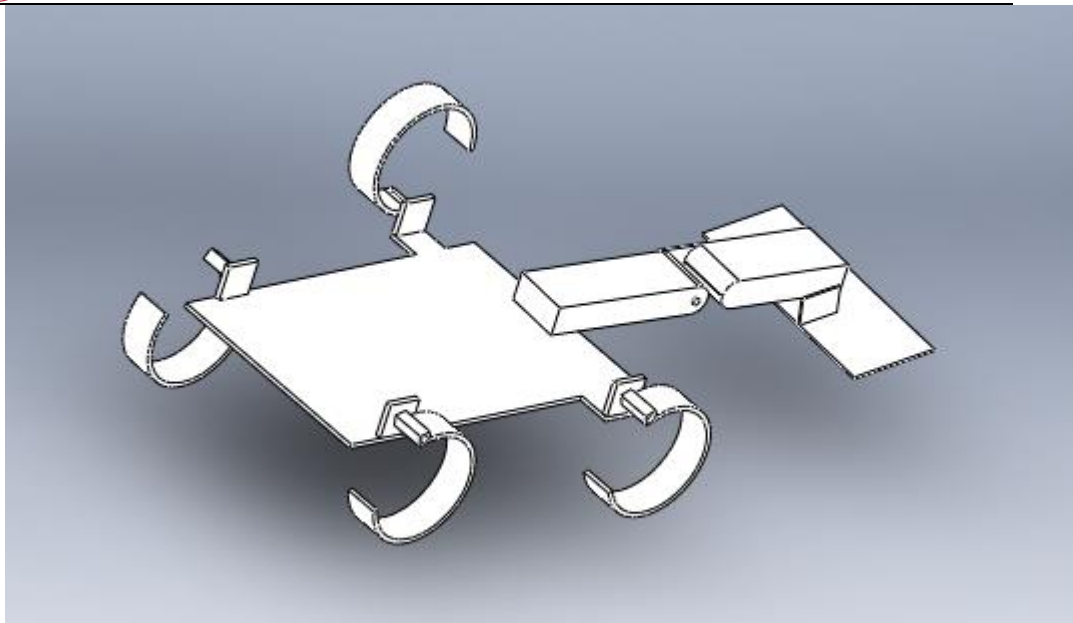


图 4-8 机器人左转 4 号腿抬起

机器人转弯方式算法设计了多种，但最终选择此种步态是出于如下考虑：

- (1) 步态算法最为精简；
- (2) 处于沙漠环境中，沙地上摩擦力极小，不用过于考虑此种步态在转弯过程中机器人车体是拖动过程；
- (3) 此种步态基本能够保证机器人原地转弯的实现。

4.2 壁障算法及分析改进

为了保证新型四足机器人行走过程中的自动化实现，添加超声波传感器，可实现机器人自动壁障过程，加强机器人对实际环境情况的适应能力。

4.2.1 壁障算法介绍

下面进行对超声波壁障控制算法的展示：

如图 4-9 所示，为超声波模块实现机器人壁障功能流程图。超声波模块安全监测范围为超声波传感器正前方 50cm，当机器人检测到此范围内有障碍物，机器人停止运动，继

续开始进行壁障过程的判断。首先超声波模块向右转动，判断右侧是否存在障碍物，如果无障碍存在则机器人认为右边安全可以转弯，则直接做出右转动作，超声波模块转回机器人正对前方作为转弯距离标尺，直到探测安全 50cm 范围内无障碍，则继续直行。反之超声波模块再进行左转判断左边存在障碍物的情况，如左侧也有障碍存在，则机器人判断此路为死路，停止工作；如左侧无障碍存在则机器人做出左转动作，超声波模块转回机器人正对前方作为转弯距离标尺，直到探测安全 50cm 范围内无障碍，则继续直行。

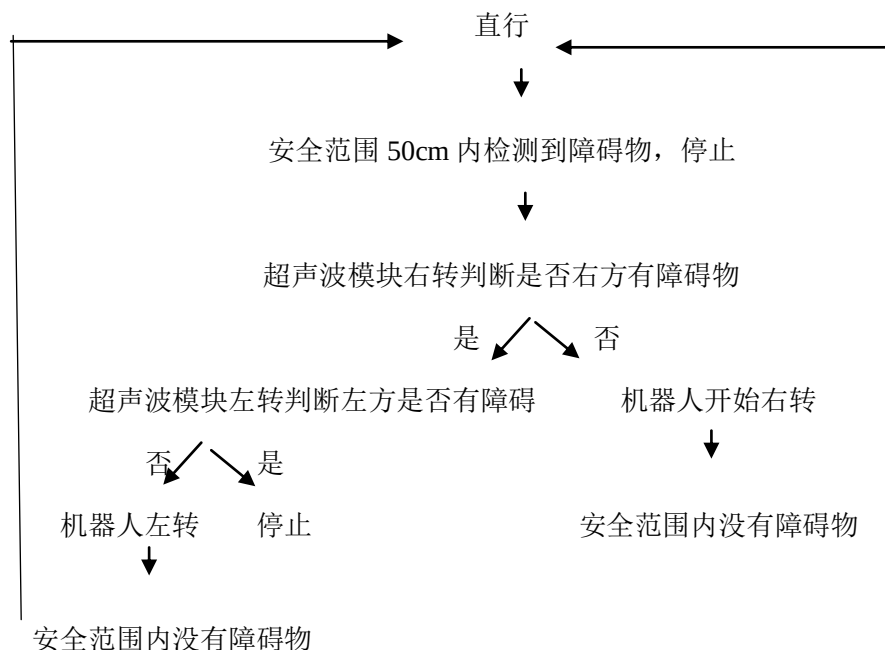


图 4-9 超声波传感器壁障原算法流程图

如上算法在转弯动作执行时的处理直接运用于实际中仍然需要改进，实际调试中如果前方出现较大型障碍物，机器人直接进行转弯会出现转弯不完全的现象，即还是会与障碍物有接触。所以需要对此种算法进行改进来消除这种转弯“死角”现象。^[27]

例如：当执行右转弯动作时，机器人走到检测“死角”位置时，此时机器人身体一定还未与障碍物表面平行，继续前行必然相撞，所以机器人应先停止前进，超声波传感器模块向左偏转约 30 度，经过此动作后超声波模块可以继续检测到障碍物的存在，机器人则能够继续向右转动直到与障碍物不再接触的方位则继续前进。如下给出消除转弯“死角”壁障新算法的过程示意图：

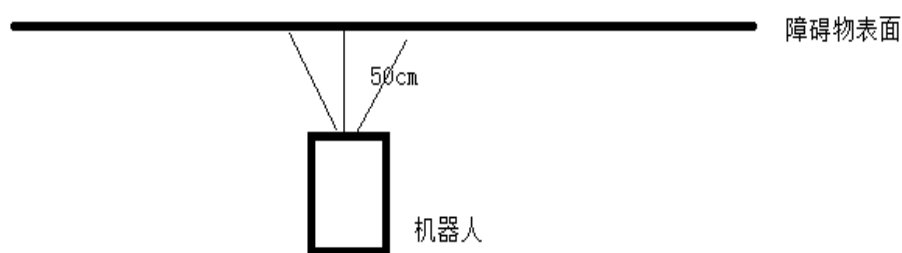


图 4-10 壁障新算法在行进过程中遇到障碍物

如图 4-10 所示为机器人判断前方 50cm 左右出现障碍物，此时机器人停止运动。图中长方形表示机器人车体，长线段表示障碍物表面，机器人指向正前方细线段表示超声波传感器转弯时检测安全距离长度与方向；

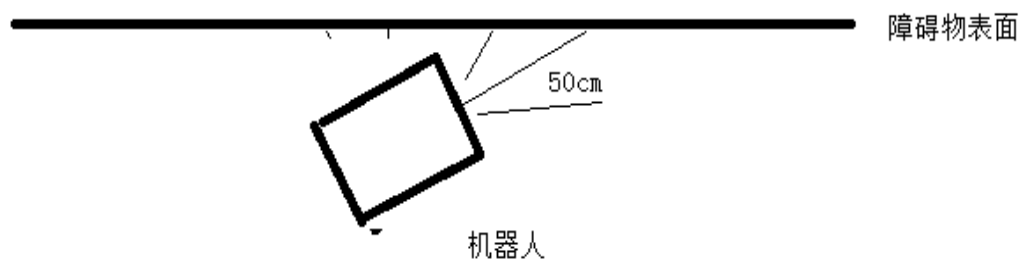


图 4-11 壁障新算法在转弯过程中遇到转弯“死角”情况

如图 4-11 所示，机器人转弯过程中遇到转弯“死角”情况，此时按照安全距离判断机器人可以往前走，但如果机器人往前行进一小段马上就会与障碍物发生碰撞，所以为了避免此种情况，需要超声波传感器帮助，如图 4-12；

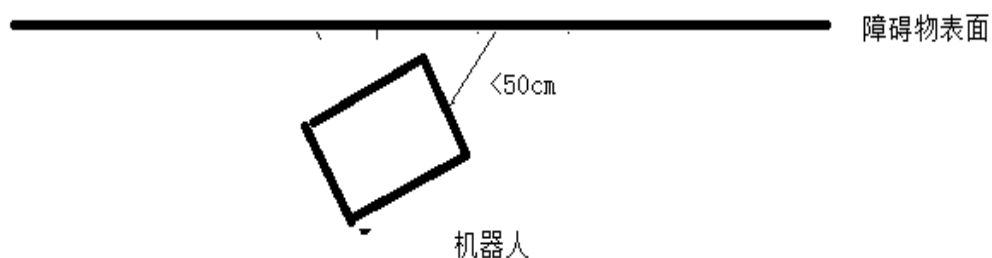


图 4-12 壁障新算法超声波传感器检测方向转动 30 度左右

超声波传感器此时向左即墙壁方向转动 30 度左右，此时其检测距离小于安全范围 50cm，机器人将继续执行向右转弯动作；

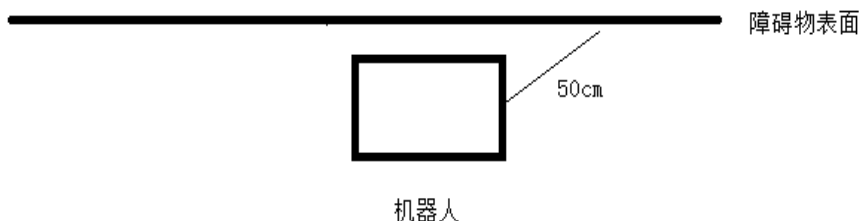


图 4-13 壁障新算法成功完全转弯

最后如图 4-13 所示，机器人转到超声波传感器安全距离即 50cm 左右处时，车体已经几乎与障碍物表面平行，此时执行前进指令则不会出现与障碍物碰撞情况。

4.2.2 壁障算法实验与分析

本小节主要通过新型四足机器人超声波传感器壁障算法改进前后的实验对比和分析验证改进后的壁障算法具有更强的实用性。

本文在上一小节对新型四足机器人超声波传感器算法原理做了较详尽的描述。超声波传感器壁障实验准备条件：

- (1) 平整干净的地面，选择实验室的地面作为试验对象；
- (2) 合理尺寸大小的障碍物，选择实验室墙面作为实验对象；
- (3) 秒表，记录机器人完成壁障过程的时间差别。

在进超声波壁障试验的过程中，暂定机器人电机转速为 $\omega = 1\text{rad/s}$ ，电机电压 6V，腿部半径为 50mm，通过进行多次实验对比机器人成功通过障碍过程的时间与次数，来完成实验的对比。成功壁障的判定方法为机器人在壁障过程中不与障碍物产生任何接触则视为成功。对比实验数据如表 4-1 所示：

表4-1 新型四足机器人加速度传感器测试结果

超声波避障算法	试验次数	成功避障次数	避障过程时间(s)
改进	10	9	16
原算法	10	0	31

上述实验数据表明当机器人腿转速为 $\omega = 1\text{rad/s}$ 情况下，改进的避障算法成功率远远高于普通壁障算法，对本新型机器人机构具有极好的适应性；相比于普通壁障算法，改进避障算法效率方面也有极大提高。原算法中避障过程时间是指机器人第一次与障碍物墙壁接触的时间。由上述数据可知改进避障算法更加适应新型四组机器人机构，原算法耗时过程原因可能为机器人在检测障碍物之后，转动到一定角度发现可以行走继续前进，但走过微小一段距离后再次检测出障碍物存在，需要继续转换为转弯步态。直至遇到上述检测“死角”，机器人则直行与障碍物接触。运动过程中大部分的时间都浪费在障碍物检测与不断地步态切换的步骤。

4.3 加速度传感器算法

AHRS MPU6050 型加速度传感器模块功能主要检测出车体实时倾斜度反馈给 MSP430 单片机，通过单片机通讯来控制机器人尾巴结构做出相应的动作。在第二章步态仿真设计的内容里提出，尾部结构运动是新型四足机器人运动步态的关键因素。仿真环境中机器人在理想状态下行驶稳定，车体未发生倾斜。实体机器人安装加速度传感器实时控制尾部保持机器人平衡行走，方便之后的机器人平地试验测试情况与仿真结果有更好地对比性。

4.3.1 加速度传感器算法介绍

下面根据流程图对加速度传感器算法进行解释。

单片机控制程序在 CCS5.3 (Code Composer Studio5.3) 环境下完成，Code Composer Studio 包含一整套用于开发和调试嵌入式应用的工具。

尾部控制算法主要针对 MSP430 控制器编程，通过其 Uart 口输入端与加速度传感器建立通讯，读取加速度传感器反馈的经过换算后得出的加速度信号；之后再通过 Uart 口输出端与控制尾巴舵机驱动模块完成通讯，输入特定信号控制尾部做出相应运动。

基本算法思路如图 4-14 所示变量 a , b 分别是加速度传感器解算之后得出的前后方向与左右方向的倾斜角度。 A 变量的取值范围是 $0-3600$ ，即对应 $0-360$ 度； b 变量的取值范围是 $-1800-+1800$ ，对应左右各 180 度范围内的倾斜。利用算法限定变量 b 范围是 $-300-+300$ ，即在 -30 度到 30 度之间控制。后根据机器人运行实际情况得出机器人一般倾斜角为左右各 10 左右，所以再次将控制范围缩小到左右 10 度。经过 MSP430 单片机处理后的角度通过 UART 传入舵机驱动模块中完成尾部调整过程。经过实体测试，尾部在舵机转动 $900-1600$ 范围之内即左右各 30 度摆动对机器人平衡控制效果最佳。即控制内容为机器人在行走过程中左右 10 度倾斜范围之内 MSP430 单片机对机器人尾巴结构在左右 30 度范围内呈连续摆动过程。

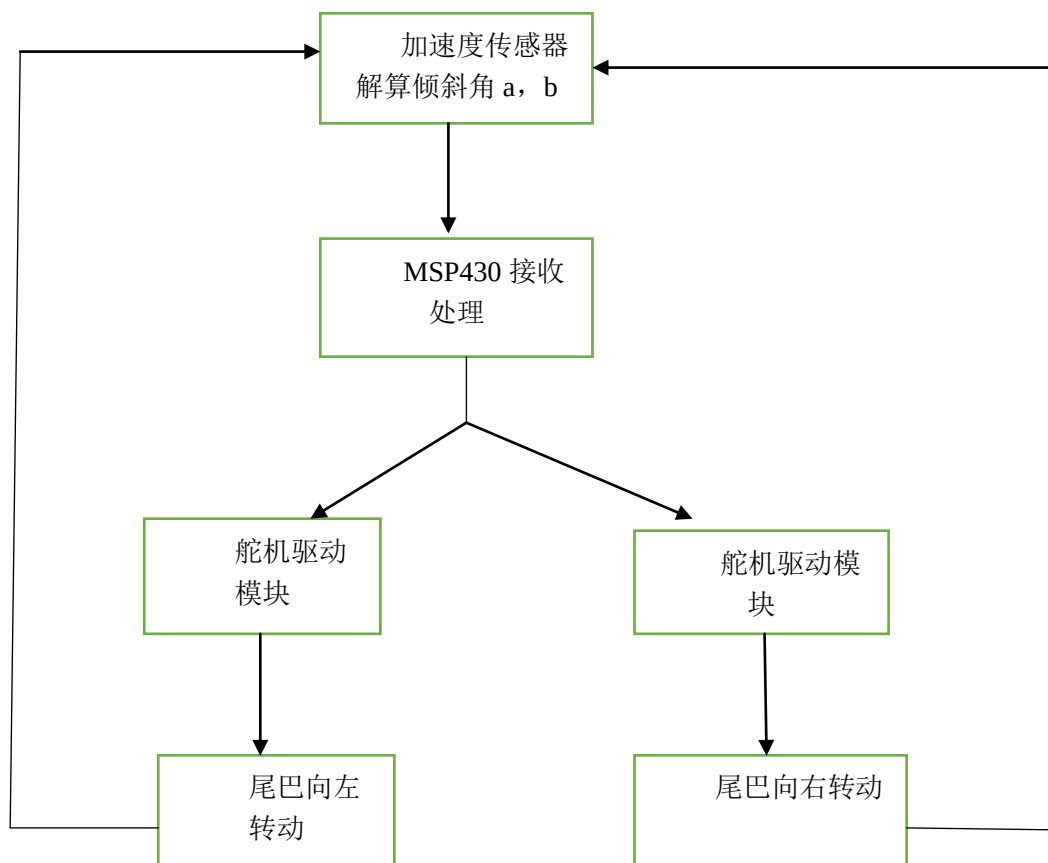


图 4-14 加速度传感器工作流程图

4.3.2 加速度传感器实验与分析

本小节主要通过新型四足机器人添加加速度传感器的实验对比和分析验证加速度传感器对于机器人行走稳定性的帮助。

本文在上一小节对新型四足机器人加速度传感器算法原理做了较详尽的描述。加速度传感器行走实验准备条件：

- (1) 平整干净的地面，选择实验室的地面作为试验对象；
- (2) 拍摄工具，记录实验机器人行走过程，并根据拍摄结果进行实验分析；
- (3) 角度测量工具量角器，测量行走过程中机器人倾斜角；
- (4) 秒表，记录机器人完成相同距离行走的时间差别。

在进行加速度试验的过程中，暂定机器人电机转速为 $\omega=1\text{rad/s}$ ，电机电压 6V，腿部半径为 50mm，机器人未添加加速度传感器尾部算法根据机器人实际重力情况调整尾部配重与角度使作用于机器人上作用力达到平衡，实际试验中得出尾巴置于 60 度左右可以保证机器人重力的平衡，对比实验数据如表 4-2 所示：

表4-2 新型四足机器人加速度传感器测试结果

加速度传感器	行走距离 (mm)	机体最大 偏转角度 (°)	尾巴最大摆 动角度 (°)	运动时间 (s)
有	1000	8.6	26.4	13.4
无	1000	35.5	60.5	16.5

上述实验数据表明当机器人腿转速为 $\omega=1\text{rad/s}$ 情况下，添加加速度传感器倾斜角度最大为 8.6，相比于未添加加速度传感器的 35.5 度有了极大的改善，更加趋近于仿真过程中机器人平稳的行进过程；且添加加速度传感器尾部通过较小幅度的改变即可保证机器人行走的平衡，提高了机器人运行效率；经过相同距离，机器人添加加速度传感器稳定的状态行走速度效率更高。经过分析，产生此现象主要原因是添加加速度传感器之后对机器人车体稳定性控制更加实时化，能够及时对车体姿态进行调整故而极大减小倾斜角度；机器人行走的稳定提高，行走过程中偏离正前轨迹的角度减小，且车体颠簸浪费的时间更加减少，因此机器人行走效率有显著提升。

4.4 四足机器人腿部受力分析

在本文第二章里对机器人 C 型腿进行过仿真受力的分析。得出结果验证了 C 型腿以及固甲醛材料对于机器人设计制作的可行性。本节内容考虑在机器人实体运动过程中，腿部的受力分析，需要结合机器人与环境的实际情况来分析 C 型腿的实践效果。下面我们给出 C 型腿行进速度以及受力的分析。^[26]

(1) C 型腿速度分析：

当 C 形腿卷在地面上，坐标轴按照如图 4-15 的摆线移动。其中摆线的参数方程是式(4-1)。

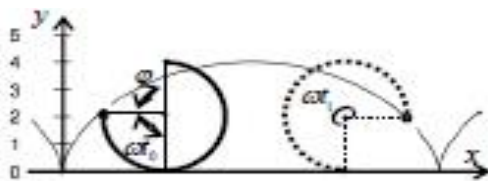


图 4-15 C 型腿的坐标轴运动

$$x = R(\omega t - \sin \omega t)$$

$$y = R(1 - \cos \omega t) \quad (4-1)$$

在此方程中，参数 x 表示机器人水平运动距离，参数 y 表示其竖直方向运动距离。

在运动控制的过程中，为了使两组的三个三角步态交替稳定性切换，需要控制两个 C 形腿的运动角速度，使其满足一定的关系。当 C 型腿的角 φ 不一样时，输出轴角速度和机器人运动速度的关系也不同。如果以 C 形腿的中心作为参考点，角 φ 假定为 120 度，那么该角度对应的地面部分 C 形的脚接触角度也为 120 度且对应悬挂部分角度同样也是 120 度。如果以轴作为参考点，角 φ 假定为 120 度，则该角度对应的地面部分 C 形的脚接触角度是 60 度且对应悬挂部分角度则是 300 度。^[13]

众所周知形成上述机器人的步态，两组 C 型腿通过交替接触地面前进，暂停摆动，则可以达到实现机器人移动的目的。

现在假设 C 型腿接触地面的角速度为 ω_1 ，C 型腿没有接触地面的角速度为 ω_2 ，C 型腿接触地面和悬空的角速度比例为 $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{60^\circ}{300^\circ} = \frac{1}{5}$ 。则在 C 型腿一个旋转周期中，实际行驶距

离只有 400。定时关系如图 4-16 所示。令周期为 T ，速度 $\omega_1 = \frac{60^\circ}{T/2}$ ， $\omega_2 = \frac{300^\circ}{T/2}$ 。现在令 C 型

腿半径是 R 为 100mm，转动周期为 1，轴最小离地距离是 99.8mm。最大距离为半径的两倍，接近 200mm。机器人前进的速度可以由公式（4-1）决定。

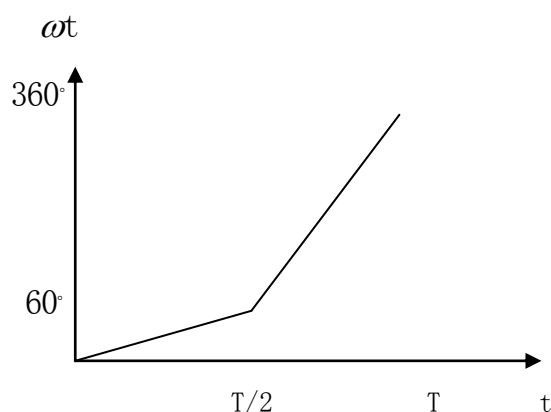


图 4-16 C 型腿速度校时

(2) C 型腿受力分析：

由机器人步态的分析可以了解，只有两只脚着地时的机器人可以在坚硬湿滑的路面实现较为完美的滚动。当 1 和 3 脚的机器人的接触地面，1 和 3 脚各承担一半的重量。当 2 和 4 脚的机器人的接触地面，2 和 4 脚各承担一半的重量。以 4 脚为例，来强调图 4-17 所示的分析，瞬时中心接触 A，瞬时轴为 L，点的轨迹为摆线。

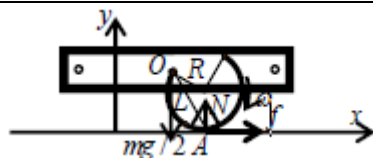


图 4-17 C 型腿在不打滑的硬质路面受力

通过运动弹道方程 (4-1)，加速度的方向如 (4-2) (4-3) 公式。

$$\alpha_x = \frac{d^2 y}{dt^2} = R(2 \frac{d\omega}{dt} + t \frac{d^2 \omega}{dt^2}) (1 - \cos \omega t) + R(\omega + t \frac{d\omega}{dt})^2 \sin \omega t \quad (4-2)$$

$$\alpha_y = \frac{d^2 x}{dt^2} = R(2 \frac{d\omega}{dt} + t \frac{d^2 \omega}{dt^2}) \sin \omega t + R(\omega + t \frac{d\omega}{dt})^2 \cos \omega t \quad (4-3)$$

在 x, y 轴方向上的力如下：

$$f = \frac{m}{2} \alpha_x \quad (4-4)$$

$$N = \frac{m}{2} (g + \alpha_y) \quad (4-5)$$

所以可知 C 型腿的磁阻转矩如下：

$$T_L = N \cdot R \cdot \sin \omega t + f \cdot R \cdot (1 - \cos \omega t) \quad (4-6)$$

所以通过计算分析可以得出结论：当机器人在柔软的沙地运行，它可能会滑倒进沙，并进入游泳状态。这时，旋转的 C 形腿的瞬时中心将上移，瞬时轴小于在硬路上的纯滚动情况，磁阻转矩小于无滑移硬质地表，阻力扭矩变小，机器人会更容易行进。

第五章 结论

5.1 总结

总体上述文章从仿真与实体硬件制作两个方面阐述了本课题主要研究内容以及较为详细的实现方法。下面，我们将同样从上述两个方面入手对本次课题的实验结果分析进行讨论与总结。

软件仿真工作方面：

(1) 成功的在 V-rep 仿真软件环境下建立了机器人模型，并较好的实现了机器人在 V-rep 仿真软件环境下的设计以及运动研究，并通过对比测试选择出最优的新型机器人结构；完成了确定后的新型四足蜥蜴机器人在仿真中的步态设计工作。

(2) 利用有限元 Patran-Nastran 软件较好的建立并分析了沙粒的物理学以及力学特性。并根据相关文献中内容建立如下沙粒模型，如图 4-1 所示：

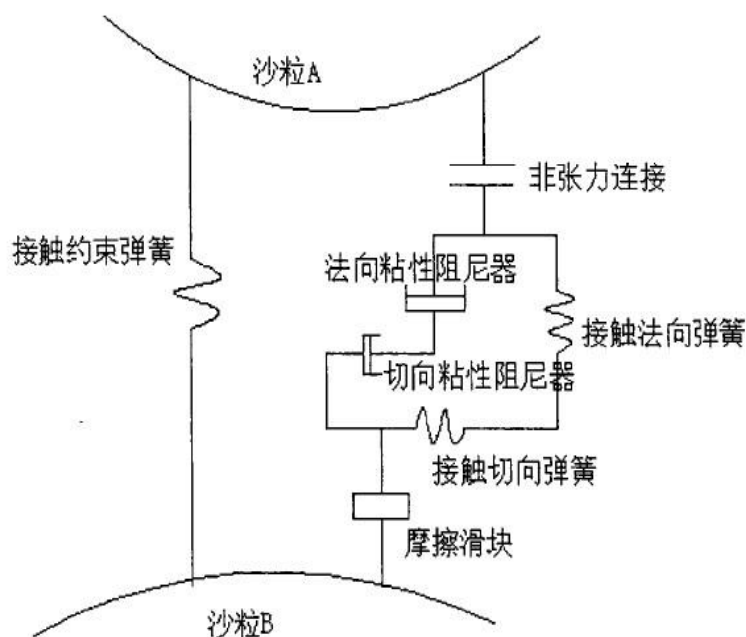


图 5-1 沙粒间理论模型

(3) 使用 solidworks 软件的力学分析功能, 验证了机器人实体运动时腿部的受力情况, 从受力分析结果得知用于制作实体机器人的材料在支撑机器人运动时产生的形变在能够的保证平台的正常运行的范围内。数据分析结果得出, 仿真环境中设计的机器人机构运用此种 C 型腿的材料以及尺寸大小设计上完全可以承受机器人车体以及在行走过程中其他方面带来的压力, 且 C 型腿结构的设计能够很好地运用于机器人的实际运动中。

实体机器人制作方面:

- (1) 根据仿真的结果, 成功的利用各个电子模块以及对车体其他部分的加工完成实体平台的搭建工作。并且各个模块之间能够较好配合协调工作的实现机器人平台正常的运动操作。
- (2) 机器人步态算法根据实际情况作出细微的调整之后对现实环境具有更好地适应能力。
- (3) 机器人超声波传感器的正常工作以及壁障算法的改进使得机器人对障碍物的检测和壁障能力有了提升。
- (4) 机器人加速度传感器的正常工作使得机器人在行进过程中对身体平衡的控制调整性能有了较大的提高。
- (5) 机器人 C 型腿根据实际情况采取的受力分析计算更加确定了 C 型腿运用于沙地行走的可靠性。

5.2 展望与改进

5.2.1 课题不足及改进建议

本课题在进行过程中也存在一些问题需要解决, 依然从软件仿真方面与机器人实体制作方面进行阐述:

软件仿真方面: 由于计算量过大以及精简模型算法未能成功搭建, 因此未能如计划中完全模拟出整个沙漠的环境并将建立的机器人仿真模型置于模拟出来的沙漠环境中测试。

针对软件仿真中出现的问题有如下解决建议:

(1) 沙漠仿真模型的建立过程目前属于较大的难题,可以通过对其他相关研究领域的研究借鉴建立一个有效的简化模型,在模拟沙漠特性的同时也可以大量减少计算量;

(2) 利用能够完成巨大计算量的超级计算机来进行沙漠模型建立和运算。

机器人实体制作方面:由于选择作为控制器的 BASYS 和 MSP430 系列单片机功能的局限性,未能很精简的建立机器人各模块之间的联系,机器人内部线路连接较为复杂繁乱;机器人附加的各类如超声波,加速度等传感器模块精确度未能很好满足要求,导致机器人运动控制相对粗糙,且尾部的摆动过程仍然有误差的存在。

对于实体机器人制作方面存在的问题有如下建议解决:

(1) 更换相对高端的 CPU 控制器,保证其上各端口充足。相对减少机器人内部连接线路的复杂度;

(2) 更换更加精确的传感器,重新设计其控制算法,从机器人配重考虑,恰当分配机器人内部各模块位置,越接近质量的均匀分布情况对于机器人平衡控制方面越有效。

(3) 重新制作改良机器人的外形和散热设备,保证其具有出色的密闭性和散热功能。

5.2.2 课题进一步开展的展望

本文内容可能接下来进行的过程中,可根据仿生研究的结果对机器人的关键部分尾巴结构进行进一步的研究。课题也针对机器人尾巴能够给机器人运动带来帮助的问题进行过一些研究:

在一些研究带尾巴结构机器人的论文中,例如由加州伯克利大学 MSC 实验室在 IEEE 协会论坛上发表的关于机器人积极尾部控制研究论文。文中提到尾巴控制对于机器人行动执行具有十分重要的影响,我们对此些文章研究之后针对我们的四足蜥蜴机器人总结出如下观点:

(1) 对于足式机器人以及轮式机器人而言,增加一个尾部结构对其身体平衡性的保持都具有重要意义。例如轮式结构的机器人在高速运行情况下,车轮碾过体型较小的障碍物会导致车体出现不平衡倾斜甚至翻倒现象。通过尾部即时调节可以有效改善不平衡问题;

(2) 假设机器人高速运行过程中,需要完成在空中滑翔的过程,通过尾部结构的即时反馈作用可以有效调节机器人的空中姿态,减小落地时因冲击对机器人造成的损伤;

(3) 对于此种新型机器人结构来说,尾部在机器人运行过程中不仅仅起到保持平衡的作用。同样尾部也可以起到支撑作用,可以有效帮助机器人翻越一些复杂崎岖的地形。

参考文献

- [1] 武生智,魏春玲.沙粒粗糙度和粒径分布的分形特性[J].兰州大学学报:自然科学版,1999,35(1):53-56.
- [2] 程旭,祁海鹰,由长福,等.沙漠的沙粒物理特性分析[J].工程热物理学报,2003,24(3):437-440.
- [3] 锋格.美国科学家研制出可在沙地上行走的机器人[J].今日科苑,2009 (3):53-53.
- [4] 杨立辉,罗庆生,王秋丽,等 新型仿生六足机器人步行足运动学分析与研究[J].机械设计与制造,2006,9:119-121.
- [5] 韩建海,赵书尚,张国跃,等.基于 PIC 单片机的六足机器人制作[J].机器人技术与应用,2004(6):29-32.
- [6] 韩建海,赵书尚,李济顺.六足机器人行走步态的协调控制[J].机电工程,2004,21(4): 8-10.
- [7] 苏军,陈学东,田文里.六足步行机器人全方位步态的研究[J].机械与电子,2004(3):48-52.
- [8] 叶献伟,陈樊,高建华.六足仿生机器人越障步态方法研究[J].浙江理工大学学报,2008,25(5):611-614.
- [9] 吴雄英,胡国清,黄玉程,林玲玲,刘文艳.自助移动机器人体系结构状况与发展研究[J].自动化博览,2005 (3): 21-14.
- [10] 谷德桥.Solidworks2011 机械设计入门到精通,2010.机械工业出版社.
- [11] 刘长胜. 仿生六足机器人复杂地面力学分析与控制系统研究[D]. 吉林大学, 2012.
- [12] 龙凯.Patran 与 Nastran 有限元分析从入门到精通,2012,机械工业出版社.
- [13] Chang-Siu E, Libby T, Tomizuka M, et al. A lizard-inspired active tail enables rapid maneuvers and dynamic stabilization in a terrestrial robot[C]//Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2011: 1887-1894.
- [14] Waldron K, McGhee R, The adaptive suspension vehicle[J].Control system Magazine, IEEE, 1986, 6(6): 7-12.
- [15] D.J.Todd.Walking Machines: An Introduction to Legged Robots[M].London, Chapman & Hall Advanced Industrial Technology Series, 1985.
- [16] 印度最大的行走式机器人——“舞王”[J].中国民营科技与经济, 2002 (9): 68.
- [17] Edward Z. Moore. Leg Design and Stair Climbing Control for the RHex Robotic Hexapod[D]. Montreal, McGill University, 2002.
- [18] Bekker M (1956), Theory of Land Locomotion (Univ of Michigan Press, Ann Arbor, MI), p 520.
- [19] 苏军, 陈学东, 田文里.六足步行机器人全方位步态的研究[J].机械与电子.2004(3):48-52.
- [20] 郭宇光等.机器人发展的历史, 现状, 趋势[M].哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989
- [21] 马培荪, 马烈.全方位四足步行机器人 JTUWM-II 转弯步态控制的研究[J].上海交通大学学报, 1995, 29 (5): 87-92
- [22] M.G Bekker. Introduction to Terrain-Vehicle System[M]. The University of Michigan. 1969: 30-35.
- [23] Zhang C, Song S-M. stability analysis of wave-crab gaits of quadruped[J]. J Robot Sys. 1990. 7(2): 243-276.
- [24] S. Hirose and A. Rattipat. Design of a stair-climbing vehicle. in Proc. Of the 13th Ann[J]. Conf. RSJ. 1995. pp. 153-154.
- [25] SHI Lin. LUO Qing-sheng. HAN Bao-ling. HUANG Lin. Research on Biomimetic Experiment

- of Stability of Hexapod Robot[J].Robotics and Automation.2001.4:3642-3649.
- [26]H.Tanaka,M.Momozu,A.Oida. Simulation of soil and resistance at bar penetration by the Distinct Element Method[J].Journal of Terramechanics,2003.37:41-56.
- [27] M.Momozu,A.Oida,M.Yamazaki,A.J.Koolen. Simulation of a soil loosening process by means of the modified distinct element method[J]. Journal of Terramechanics .2003,39:207-220.
- [28]Han S Kim , Young J Chol . The Kinematics Error Bound Analysis of the Stewart Platform[J]. Journal of robotics Systems,2000.17(1):63-73.
- [29]Behi F.Kinematic analysis for a six-degree-freedom 3-PRPS parallel mechanism[J].IEEE Journal of Robotics and Automations,1988,4(5):561-565.
- [30]HunagLin,Study on hexapod biomimetic robot's gait planning[J].Journal of Huazhong University Of Science and Technology,2007,35(12):72-75.
- [31] A.Rattipat.Design of a stair-climbing vehicle.in Proc. Of the 13th Ann[J].Conf.RSJ.1995.pp.159-161.
- [32]K,McGhee The adaptive suspension vehicle[J].Control system Magazine,IEEE,1986,6(6):17-22.
- [33] Edward Z.Moore.Leg Design and Stair Climbing Control for the RHex Robotic Hexapod[D].Montreal,McGill University,2002.
- [34] Young J Chol . The Kinematics Error Bound Analysis of the Stewart Platform[J]. Journal of robotics Systems,2000.17(1):67-71.
- [35]LUO Qing-sheng,HAN Bao-ling,HUANG Lin.Research on Biomimetic Experiment of Stability of Hexapod Robot[J].Robotics and Automation.2001.4:3645-3649
- [36]Collins S H, Wisse M, Ruina A. A three-dimensional passive-dynamic walking robot with two legs and knees[J]. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20(7): 607-615.
- [37] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, et al. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot[C]//Proceedings of the 17th World Congress. 2008: 10823-10825.
- [38] Grieco J C, Prieto M, Armada M, et al. A six-legged climbing robot for high payloads[C]//Control Applications, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on. IEEE, 1998, 1: 446-450.
- [39] M.Momozu,A.Oida. Simulation of soil and resistance at bar penetration by the Distinct Element Method[J].Journal of Terramechanics,2003.37:41-56.
- [40]陈佳耳, 程君实. 四足机器人对角小跑步态研究[J]. 上海交通大学学报, 1997,31 (6): 18-23.
- [41] 黄真,高峰. 从并联机器人看知识创新与技术创新【J】. 万方数据 30 机械工程学报第 47 卷第 15 期
- [42] 赵杰, 郭亮, 臧希抬, 等. 应用于六足机器人平台的舵机控制器设计[J]. 机械与电子, 2005(9): 48~51.
- [43] 罗庆生, 韩宝玲, 毛新, 黄麟. 新型仿生六足机器人运动控制技术的研究与探索【J】. 机械设计与研究.
- [44] 朱淼良, 杨建刚, 吴春明. 自主式智能系统. 杭州: 浙江大学出版社, 200036
- [45] 唐晶晶. 六足减灾救援仿生机器人虚拟样机研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [46] 伍科布拉托维奇著, 马培孙, 沈乃熏译. 步行机器人和动力学假肢 [M]. 北京: 科学出版, 1983
- [47] 苏军. 陈学东. 六足步行机器人分级控制及通信[J]. 机械与电子 2004(3):56-58.

- [48] 陈学东, 郭鸿勋, 渡边桂吾. 四足机器人爬行步态的正运动学分析. 机械与电子 2003(5):53-55.
- [49] 肖勇, 王建平, 蒋晓魁, 等. 八足蜘蛛仿生机器人的设计与实现[J]. 机电一体化, 华中科技大学硕士学位论文.
- [50] Wettergeen D, Bapna D, Matmonem, et al. Developing nomad for robotic exploration of the Atacama desert[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1999, 26(2-3):127-148.

谢辞

首先要感谢我的导师王贺升老师和实验室的葛天乐学长对我毕业设计的指导和帮助，在我做毕业设计期间他们给了我巨大的学术指导和精神鼓励，同时他们严谨的治学科研之道和亲和的待人接物之风给了我很多的正能量。真心感谢王贺升导师在我毕业设计方向上的耐心指导和精确把握，让我避免了犯很多的错误，也真心感谢葛天乐学长在我毕业设计过程中细节上的耐心指正和悉心帮助，让我学到了很多東西。

感谢自动化系的席裕庚、李少远、赵霞、王林、马殿光、施亮等老师，你们活跃在讲台上的身影我会永远记得，特别席裕庚老师每次徒手写满的一面面板书和从控制理论讲到人生道路的那一句句话我都会深深记得。

感谢大学里给我上过课的每一位老师，大学四年的印象中只有很少选修课是自己真的喜欢而去选择。不得不说这是遗憾，但其中中国文化史八讲和海底世界探秘这两门课却让我印象深刻。文化八讲不仅仅让我了解中国传统文化的美，同时也有机会去了解法国的风土人情；海底世界探秘让我真正了解了很多一直很向往的那神秘大海。

感谢自动化里的好同学好哥们——张高志、吴高明、江海洋、赵翔、顾海川等同学，大学四年有你们一起上课、下课、做实验、写作业，在一起讨论问题、沟通思路，玩游戏，这是我大学期间难以忘怀的一段时光。

感谢我大学四年和我朝夕相伴的舍友——周凯峰、赵嘉明和徐晓奕，作为宿舍年龄最小的成员，这四年的大学生活有各位的陪伴和照顾让我很感动，就算将来天各一方，我们517依然是打不垮拆不散的团结，几十年后相见还是好兄弟。

感谢我大学四年遇到的每一个给了我影响的人，有些我甚至叫不出名字，但是正是在这交错的四年里，我们成了彼此的印记，也未尝不是一件好事。

感谢大学生涯过程中一次难忘的全国大学生创新实践项目，很荣幸学校能给我这次机会让我去动手实现自己的想法。在这个过程中极大的培养了我的科研能力，以及耐心和恒心。让我知道如何从零做起去完成一项科研项目。其中的快乐，付出，纠结，收获将是我以后工作的一大笔财富。这段经历很难忘，很受益，谢谢！

感谢大学陪伴我的女朋友黄一，她的温柔理解让我在遇到困难的时候依然能够勇往直前；虽然她年纪比我小三岁，但很多时候她的却比我更加懂事冷静，让我学到很多对人对事的处理方式；她的对生活的热爱深深感触到我，让我也改变了很多对生活的看法，让我看到了生活的美。虽然有时候也会有矛盾，也会有不快的时候，但这才是最真实的生活，希望毕业之后也能够一直走下去，等我回国！

最后，感谢我的爸妈，父母的养育之情难以言表、无法报答，老爸老妈身体健康、平平安安、快快乐乐一辈子是我最大的愿望。

感谢大学四年给过我关怀和帮助的每一位老师和同学，希望以后的人生路上依然有你！

Design Of Quadruped Walking Robot

With the survival of the human exploration of the planet on which the deepening of research work for the desert environment are becoming increasingly frequent. However, the harsh desert environment of human exploration gave a huge challenge. Therefore, only able to fit through the development of a robot to survive in the desert environment in order to effectively carry out the exploration of the desert.

First need to consider the characteristics of the desert environment, the most typical features of arid desert climate that is high temperature. This robot structure needs to have a good heat dissipation, usually desert surface temperatures up to 60 degrees Celsius, the robot needs to be able to design a good and able to efficiently isolate external heat dissipated heat generated inside the module. And the interior of the working robot module requires high heat resistance, which can guarantee the normal operation in a high temperature environment. In addition, the more prominent features of the desert that is easy to fall into the soft sand and small friction and dust filled the sand. The most important design considerations for such a robot that is the problem of the leg structure. Need to develop the use of one kind of difficult to sink into the soft sand, and easy to slip but also to ensure the more efficient robot travels in the desert leg model. Dust filled the need for the robot has excellent performance sealed to prevent dust and sand into the robot cause damage to the internal operation of the module.

Not just desert. Other disaster site is also difficult to enter the robot work. For example. In 2001, rescue robots were sent to the collapse of the World Trade Center site. The way forward is completely messy construction debris blocked. In 2006, a West Virginia coal mine collapse in the state's rescue robot travel 700 meters after the quagmire. Therefore, the study of desert robot, not only to solve the human exploration of the extreme desert environment, but also to help bring the problem to other kinds of bad road walking robot.

In general, the robot is mainly desert and multi-degree of freedom wheeled foot-two structures. Wheel structure mainly through multi-wheel system to reduce pressure enables the robot to move more flexible in the sand; foot structure mainly for desert spiders and other creatures bionic, large multi-degree of freedom structure by controlling the contact area with sand machine "sole" purpose to reduce the pressure.

Currently, these two structures has some obvious drawbacks. Hand wheel structure although faster, but not for some of the more complex over the desert terrain, it is difficult to encounter rough ground by this structure into the sand and find it hard to climb out; on the other hand, multi-degree of freedom the foot structure is relatively slow, and the multi-joint energy consumption is relatively large, but it can be better to complete the multi-joint complex as crossed into the sand from the ground and climb out of such action.

Special environment and softness against the desert sand drought, high temperatures, low friction characteristics, through the animal bionics, research institutions and other aspects of robot design ultimately better able to adapt to the desert environment of a robot. To the future stability of the robot travels fast in the desert of the design process to provide ideas.

By studying the design of the new types of robots can solve desert robot now difficult to

survive in the desert, walking and other issues, but also to help bring the problem to other kinds of bad road walking robot. Enables the robot to better adapt to the special environment of the desert and work in a variety of disaster site.

This paper mainly for lizards, desert cockroach survival conducted in desert environments animal bionics research to simulate specific software simulation analysis, including robotic mechanism simulation, desert sand model simulation, robotics stress analysis work. Also designed a simple robot mechanical structure, such as in gait simulation software. Followed by further development of production entities robot work includes the development of the control chip, the use of hardware modules, robot parts manufacture to achieve the simulation analysis based on the body and complete the basic walking and barrier function.

Describes the main research topics as well as a more detailed implementation methods generally produce both the above article from the simulation and the real hardware. Below, we will also start from these two aspects of the experimental results of this analysis are discussed topic and summarized.

Software simulation work: Successful in V-rep simulation software environment to establish a robot model and achieve a better design and motion studies in the V-rep robot simulation software environment, and by comparing the test to select the optimal the new robot structure; completion of a new four-legged lizard robot to determine the gait designed to work in simulation.

Patran-Nastran finite element software and analyzed to establish better physics and mechanical properties of sand. And to establish the following model according to the relevant literature sand content.

Mechanics analysis solidworks software, verified by physical movement of the robot when circumstances force the leg, that deformation of the material used for the production of normal physical robot when the robot motion generated in support of assurance platform can result from stress analysis operating range. Data analysis results obtained, the robot simulation environment designed for organizations using such materials as well as C-leg robot body can withstand the size of the design as well as other during walking Aspects brought pressure, and the C-leg design of the structure can be well used in the actual movement of the robot.

Robot productions entity: According to the simulation results, the successful use of the electronic module and the respective other part of the body to complete the processing of construction work platform entity. And better able to coordinate work with the robot platform normal motion operation between the various modules. After the robot gait algorithms make minor adjustments based on the actual situation of the real environment with better adaptability. Normal working robot ultrasonic sensors and improved barrier algorithm enables the robot to detect obstacles and barrier capability has been improved. Normal working robot acceleration sensor enables the robot in the process of moving the body control to adjust the balance performance has been greatly improved. Robot C-leg calculations are more used to determine the C-leg walking reliability sandy taken stress analysis of the actual situation.

During the course of this project, there are some problems to be solved, still elaborated from software simulation and robot physical aspects of the production areas:

Software simulation aspects: Due excessive and failed to build a streamlined model algorithm therefore not entirely as planned robot simulation model to simulate the entire environment of the

desert and built into simulated desert environment testing.

There are suggestions for solving the problems in the software simulation: simulation model building process currently belong to desert the larger problem, through the study of other related research areas learn to create an effective simplified model, simulate desert characteristics but can also a significant reduction in computation; huge amount of calculation can be completed using supercomputers to model and computing desert.

Productions robot entities: As selected as BASYS MSP430 MCU features and limitations of the controller failed to establish a link between very streamlined robot modules, the robot is more complex internal wiring connections tempests; additional kinds of robots such as ultrasonic and acceleration sensor module not well satisfy the requirements of precision, resulting in a relatively coarse robot motion control, and the end of the process is still swinging error exists.

For the physical aspects of the production of robots exist following proposed solution: Replace the relatively high-end CPU controller, ensure adequate port on each. Relative reduction of internal connecting lines robot complexity; replace more accurate sensors, redesigned its control algorithm, the robot counterweight from consideration and appropriate allocation of each module position inside the robot, the closer a uniform distribution of mass balance for more effective control of the robot . Re-create the shape of the robot and improved cooling equipment to ensure the tightness and excellent heat dissipation.

The next course of this article may be conducted, further research can be carried on a key part of the tail structure biomimetic robot based on the results of the study. Issue also for the robot to robot motion tail can help bring some research problems:

In some studies with a tail structure robot paper, for example, by the University of California at Berkeley Lab MSC Association Forum on the IEEE Control Research published papers on robotics positive tail. The article mentions the tail control action for the robot to perform has a very important influence, which we then study some articles for our four-legged lizard robot summed up the view: For legged robots and wheeled robot, the addition of a tail structure maintain their body balance are of great significance. For example wheeled robot structure under high-speed operation, the wheels run over smaller and obstacles can cause an imbalance in the body tilt even tipping phenomenon. By the tail immediate regulation can effectively improve the imbalance; assume that the robot process high-speed operation, it is necessary to complete the process of gliding through instant feedback tail structure robot can effectively regulate air posture, reduced due to the impact caused by the landing of the robot injury; For this new robot structure, the tail not only play role in maintaining the balance of the robot running. The same can also play a supporting role in the tail that can effectively help the robot to climb some of the complex rugged terrain.