

第十三届“挑战杯”
全国大学生课外学术科技作品竞赛

作品名称：“神行太保”多用途机器人

作品类别：机械与控制



2013年6月

目录

一、作品研究背景	1
1.1 市场调研	1
1.2 技术背景	1
1.2.1 国内研究水平	1
1.2.2 国外研究水平	4
二、作品总体设计思路	7
2.1 作品特色概述	7
2.2 总体设计目标	7
三、作品机械结构设计	9
3.1 机械结构总体设计框图	9
3.2 轮腿式运动足的设计	9
3.2.1 腿部设计目标	9
3.2.2 设计方案	9
3.2.3 腿部整体结构	10
3.2.4 具体部分介绍	11
3.3 腰部链节结构设计	16
3.3.1 腰部设计目标	16
3.3.2 腰部结构设计思路	17
3.3.3 腰部轴系的设计	18
3.4 模块化连接板的设计	23
3.4.1 主要任务	23
3.4.2 设计细节	23
3.4.3 强度校核	25
四、作品运动仿真及步态设计	29
4.1 准备工作	29
4.2 步态规划	30
4.2.1 步态设计	30
4.2.2 步态分析	31
4.2.3 数据利用	33
五、作品电路控制及程序设计	35
5.1 电路结构总体设计框图	35
5.2 硬件电路设计	35
5.2.1 控制模块	37
5.2.2 电源模块	38
5.2.3 电机驱动模块	40
5.2.4 通讯模块	41
5.2.5 传感器检测模块	43

5.2.6 电机执行模块	45
5.3 程序控制的实现	48
5.3.1 结构分析	48
5.3.2 程序设计	48
5.3.3 控制模式	49
5.3.4 控制重点	53
六、作品设计总结	55
6.1 作品创新点	55
6.2 方案评价	55
6.2.1 项目科学性	55
6.2.2 存在的问题	56
6.2.3 改进建议	57
6.3 应用前景及市场价值	57
6.3.1 军用领域	57
6.3.2 警用领域	57
6.3.3 民用领域	58
6.3.4 市场价值	58
七、参考文献	61

一、作品研究背景

1.1 市场调研

随着科学技术的发展，机器人在人类社会中不断扮演起重要的角色。在各种不同的场合中，机器人以其接近甚至超越人类能力的卓越性能，辅助人甚至代替人进行工作，带给人极大的便利，甚至能完成单凭人本身所无法完成的任务。无论是在狭窄的管道中进行探查维修，或是在有毒、高温环境中监测搜救，人本身都因其高危或是特殊的环境而难以完成任务，但机器人便可实现相应功能。在警用领域中，利用机器人执行防空排爆任务已是常能看到的景象。而在军用领域中，以机器人代替人在特殊的环境中进行侦查，甚至实施打击对于赢得现代化战争具有越来越重要的意义。在空中，高性能的无人机已经越来越多地扮演起高空侦查和远程精确打击的角色。在水中，无人潜艇、深水探测机器人也不断取得技术突破。相比而言，陆地环境以其复杂性、多样性使得至今鲜有性能卓越的、适应能力强的陆地机器人执行侦查探测任务。

经过市场调研，我们发现目前基于模块化可控制的机器人种类并不多。一方面，这要求我们的研发要具有原创性，可参考资料和研究成果不多；另一方面，这也为我们的研发提供了空间。

1.2 技术背景

随着生物学对于人类和其他动物的神经系统及生活方式研究的逐步深入，仿生学技术的研究依靠着科学技术的发展也飞速前进，创造了科学技术和生物学研究之间学科交叉的广阔研究领域。在对生物神经系统的结构和功能进行分析和借鉴的基础上，国内外各研究单位先后研发了一系列的仿生学机械产品，模仿生物、从事生物特点工作，并力求能达到尽可能高的生物相似度水平，以实现流畅自然的动作和神经反射，达到更加完美可靠的运动控制效果。

现今，国内外已有不少高校和科研院所进行关于在地面上行进的、有一定地形适应能力的机器人的研究。一些制作完成的具有相当探索意义和启发意义的机器人样机也各自表现出了相应的特色。例如，在身体结构上，一些蛇形机器人以其身躯结构的灵活变化适应蜿蜒曲折或狭小的环境；而另一类多足式的机器人则以较为复杂的运动足适应不平坦的地形环境。在具体的行进形式上，常见的两类机器人：轮式机器人和腿式机器人也各具特点。轮式机器人在平地上运动速度较快，而腿式机器人拥有较强的跨障能力。

1.2.1 国内研究水平

在国内，对于多足仿生机器人的研究种类比较多，主要有华中科技大学、哈尔滨工程大学、中国科学技术大学、哈尔滨工业大学、南京航空航天大学、北京航空航天大学等高校进行了相关的研究。

华中科技大学陈学东等发明的多足步行机器人及其控制装置，如下图 1 所示，包括前中后足各两条，分两排并列分布在机架左右两侧，各足结构相同，由脚、小腿、大腿、髌部及驱动和传动装置构成，并通过其髌部中心转轴与机架连接。驱动和传动装置包括固定在机架上的髌部伺服电机，它通过齿轮传动副带动髌部旋转；大腿伺服电机依次通过齿轮传动副、钢丝绳线轮传动副带动大腿转动；小腿伺服电机依次通过齿轮传动副、钢丝绳线轮传动副和钢丝绳线轮传动副带动小腿转动。其控制装置包括位于髌部中心转轴、大、小腿关节传动轴上的电位计、位于脚上的接触开关及压力传感器，以及位于机架前端的测距传感器和视觉传感器，由计算机控制机器人操作。

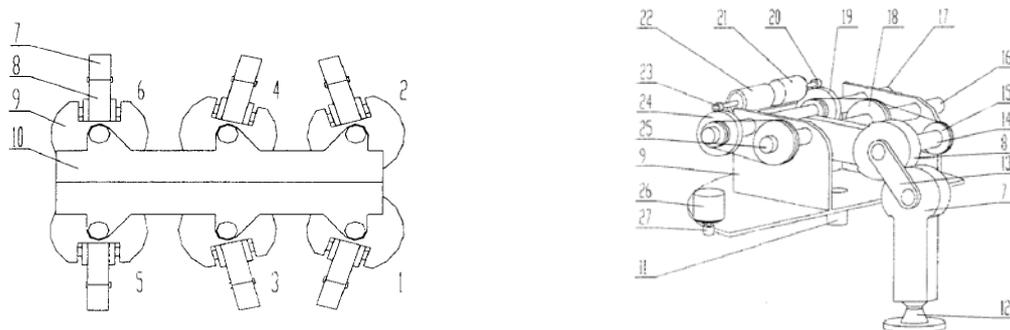


图 1 多足步行机器人及其控制装置

华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室王良文等研究的具有手脚融合功能的多足步行机器人，如下图 2 所示。该机器人至少 1 支腿既可以行走又可以抓取物体，具有手脚融合功能。抓取物体时，利用 3 条腿支撑身体，具有手脚融合功能的腿作为能抓取物体的机械手，行走时该腿就执行脚的功能。机器人由机体模块、行走腿结构模块、手脚融合腿部结构模块、控制模块等组成。各模块之间方便联结与扩展。在物理样机上进行了相关试验，结果表明该机器人能够行走和抓取特定目标物，实现了手脚融合功能。

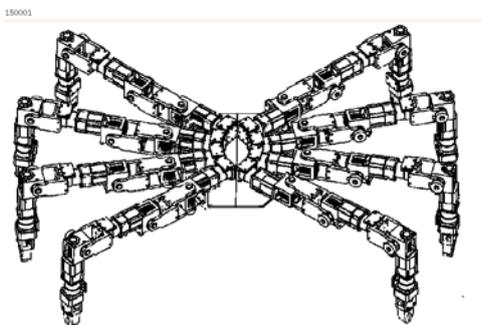


图 2 具有手脚融合功能的多足步行机器人

哈尔滨工程大学王立权等发明的模块化机械螃蟹，如下图 3 所示。它包括躯干和至少一对步行足，躯干上安装有控制器和遥控装置，每条步行足都由三个模块化结构前端、中端和末端串联组成，躯干与步行足通过固定板相连，步行足前端安装有减震模块和三维力传感器，每个

模块化结构都包括直流伺服电机、传动机构和传递关节块，各模块化结构之间通过传递关节块连接，传递关节块连接传动机构，传动机构连接直流伺服电机。

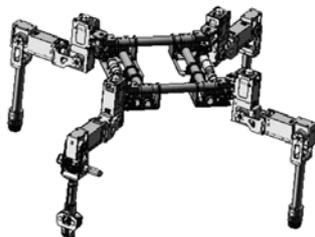


图3 模块化机械螃蟹

中国科学技术大学肖勇等研究的八足蜘蛛仿生机器人，如下图4所示，运用仿生学原理设计制作的八足蜘蛛仿生机器人系统。基于这种机器人功能和结构的特点，设计出了相应的机械结构、电路及控制程序。目前该机器人已经可以在平地上进行爬行，为进一步研究爬壁机器人提供了一个基础测试平台。

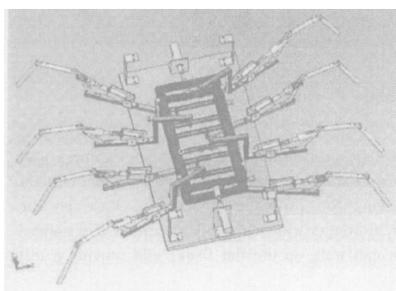


图4 八足蜘蛛仿生机器人

此外，燕山大学、上海大学等还对机器人的腰部关节进行了一些研究。燕山大学发明的一种机器人腰关节，在第一运动支链中，第一伺服电机安装在基座上，曲柄的一端固连在第一伺服电机的转动轴上，曲柄的另一端通过第一球铰与定长杆的一端相连，定长杆的另一端通过第二球铰与运动平台相连；第二运动支链中，第二伺服电机安装在基座上，主动曲杆的一端固连在第二伺服电机的转动轴上，主动曲杆的另一端通过第一转动副铰链与从动曲杆的一端相连，从动曲杆的另一端通过第二转动副铰链与运动平台相连。本发明具有俯仰角度大、结构简单、承载能力强和惯性小等特点，可模拟人类腰部的三维转动运动，特别适合作人形机器人的腰关节和髋关节。上海大学，戴乐寅等通过对仿人机器人腰部机构建模以及运动控制研究，实现腰部机构运动的柔性、稳定性以及快速性，以期解决仿人机器人腰部与上肢轨迹规划与协调、平衡控制策略等相关控制问题。

在控制方面，南京航空航天大学进行了很多研究。南京航空航天大学范甜甜等采用STM32F103VET6为核心的控制芯片构建硬件控制系统，利用芯片的通用定时器产生12路PWM波控制机器人各个关节运动，设计了一款四足仿生机器人；南京航空航天大学马东兴等通过三维建模软件Pro/E和机械系统动力学仿真分析软件Adams建立了四足机器人虚拟样机，规划了四足机器人的步态，并且利用Adams仿真软件对该四足机器人进行了步态仿真。

1.2.2 国外研究水平

在国外，美国大狗BigDog应该算是比较有震撼力的，如下图5和图6所示。BigDog与真狗一般大小，它能够在战场上发挥重要作用:为士兵运送弹药、食物和其他物品。其原理是,由汽油机驱动的液压系统能够带动其有关节的四肢运动。陀螺仪和其他传感器帮助机载计算机规划每一步的运动。机器人依靠感觉来保持身体的平衡，如果有一条腿比预期更早地碰到了地面,计算机就会认为它可能踩到了岩石或是山坡,然后BigDog就会相应地调节自己的步伐。

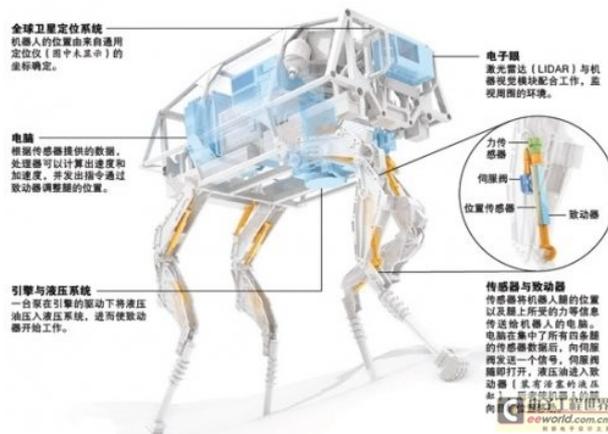


图5 大狗原理图



图 5 大狗实物图

日本伊藤雅人等发明的多关节机器人以及系统，如下图 7 所示。本发明提供一种不改变机械手的设置位置就能扩大主要作业区域并能够保持更高自由度的姿势的机器人机械手以及系统。本发明构成为，机器人机械手(1)由多个关节轴构成，在使机器人机械手(1)相对于在水平面内旋

转的第一关节轴(j1)的旋转中心垂直地延伸的情况下，在水平面内旋转的其他关节轴的旋转中心相对于第一旋转轴(j1)的旋转中心偏置。并且，通过使用这样的机器人机械手(1)，能够将机器人机械手(1)配置在更靠近物品的位置的空间内。

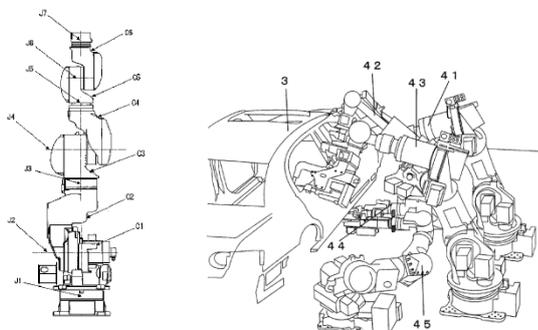


图 7 多关节机器人以及系统

日本千叶理工学院（Chiba Institute of Technology）设计的哈卢克二号（Halluc II）八足机器人，如下图 8 和图 9 所示。它通过八条腿和八个轮子来行动。它可用汽车、动物和昆虫三种姿势行进，来适应不同路况。

机器人通过 56 个电机来驱动——每个关节有 2 个（每条腿有三个关节），每个轮子也有 1 个。这样的八足设计较之以前的机器人更为灵活，它可以用汽车、动物和昆虫三种姿势行进，来适应不同的路况，这样就能够非常轻松的越过障碍适应各种复杂的环境。

在小型陆地行进机器人领域中，哈卢克二号八足机械娱乐产品制作精致，设计巧妙，将轮与腿向组合，实现了一定程度上不同运动形式的组合。但是，此产品只在腿部有较为突出的创新，而在结构上，各运动足使用一块平板连接的设计造成其无法实现摆动、起伏之类的动作，限制了此类轮组式产品的姿态变换。



图 8 哈卢克二号蹲姿



图9 哈卢克二号行走

鉴于目前的仿生机电一体化产品研究在仿生效果、能源消耗、实际用途、科技应用等各方面仍存在很大的研究空间，因此在仿生研究的基础上，保留机器人本身的轮式运动的同时结合生物腿式运动的特点，设计一款拥有轮式快速运动和腿式适应性强的特点的产品是一个有很高研究价值和应用前景的工作。其中日本千叶理工学院设计的哈卢克二号八足机械娱乐产品兼具上述运动特色。但由于此产品只有腿部的创新，各个运动足之间使用一块平板连接的设计不能展现摆动、起伏类动作，限制了此类轮足式产品的姿态变换方式。

增加腰椎结构的设计，对每组运动足实现模块化连接，使每组运动足实现不同角度与方向的姿态变化，从而表现出的可适应性正是多关节模块化的链节式机械产品所研究完成的工作。

综合以上调研成果，我们的目标是在仿生研究的基础上，保留机器人本身轮式运动的同时结合上生物腿式的运动形式，并增加腰椎结构的设计，对每组运动足实现模块化的连接，从而使机器人具有躯体结构姿态可灵活变化、腿部运动形式多样、对环境有较强适应能力的优秀特点。



图10 “神行太保”多用途机器人

二、作品总体设计思路

2.1 作品特色概述

我们的作品“神行太保”多用途机器人是在仿生研究的基础上，保留机器人本身的轮式运动快速的特点并结合生物腿式运动适应性强特点，设计得到的一款动作丰富、可跨越多种障碍的新兴仿生机电一体化产品。

该机器人是一个可随意增减体节、每个体节都具备完备功能的高自由度机电一体化装置。样机目前有四个体节、八只轮腿式运动足，全身由四十六个直流伺服电机驱动。

它的第一代机器人“节肢机器人”是在仿生研究的基础上设计得到的一款结构优化、控制先进、功能多样的机电一体化产品。我们在第一代机器人的基础上进行了设计与改进，得到了这款结构更加优化、控制更加先进、功能更加多样的作品。

在行进方面，它如“神行太保”。由于它采用轮腿式运动足的设计，使其兼具腿式机器人适应能力强与轮式机器人机动速度快的优点；同时，它将柔性腰部的设计理念融合了进去，配合多自由度腿，可使其最大限度的提高越障能力、地形适应力。在现代化战争中，我国幅员广阔、地形复杂。而目前可以适应各种地形的机器人仍没有被研发出来。该机器人由于其超强的地形适应力、丰富的行走步态、运动花式，在这种战争中非结构化的地形中可以尽显优势，由于传统的轮式、腿式、履带式机器人。

在身体适应力上，它又如“百变精灵”。它将模块化设计思想贯穿于整体设计思路，并率先将五自由度腿部与二自由度腰部结合起来，使其成为具有高自由度的可灵活变换提醒的“百变精灵”。在一些狭窄空间，如“L”型、“S”型区域，它不在话下，对于上下凹凸不平的狭窄通道，它毫不畏惧。这种显著的空间适应性，可使其在复杂多变的战场中发挥其他机器人难以发挥的优势。

2.2 总体设计目标

本作品为一种可以实现模块化组合的多关节链节式机电一体化产品。该作品采用模块化的开链结构，每个模块有十二个自由度，每个自由度都由舵机或直流电机驱动完成。它的每个运动足由四个曲臂关节和一个轮足组成，共有五个主动自由度，两个对称布置的运动足组成一个体节，两个体节之间通过链节式腰部关节连接，腰部关节有两个主动自由度，可实现在四个相互垂直方向上的灵活转动。通过模块化组合，该作品可实现轮式和腿式、直行与摆动的运动特性的有机融合，使其既有腿式机器人地形适应能力强、又有轮式机器人机动速度快的优点。同时腰部宽度的设计，使得该作品在前进或后退时的步长和运动能满足不干涉条件。多对运动足之间的协调配合可使它能完成几十种运动步态，并能跨越一定高度的障碍物。

三、作品机械结构设计

3.1 机械结构总体设计框图

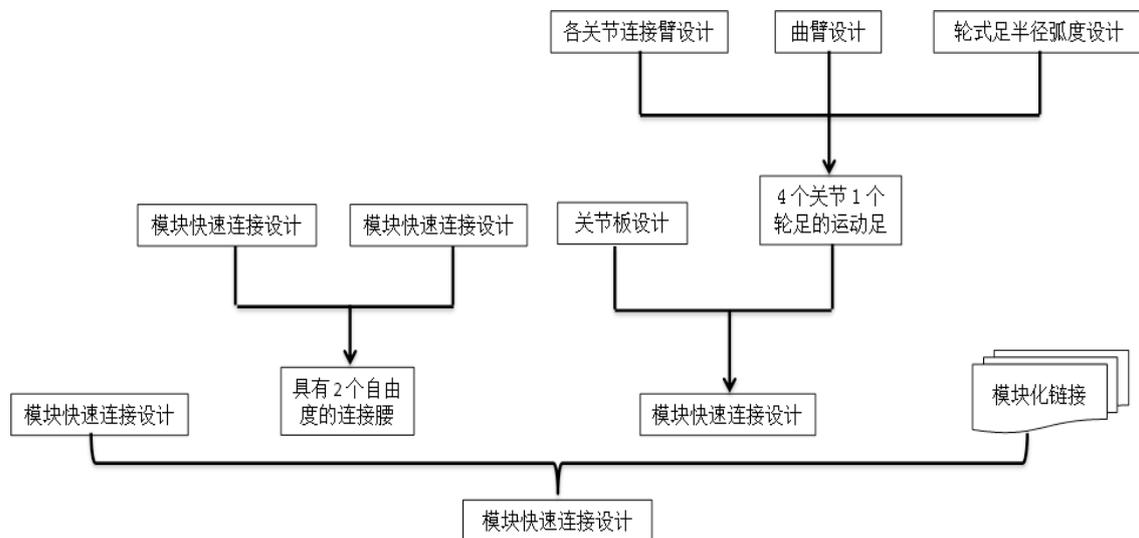


图 11 机械结构总体设计框图

3.2 轮腿式运动足的设计

腿部是该机器人运动的关键环节，是多种步态得以实现的基础。正是由于腿部高自由度的机构设计，使得该机器人能够完成各类行走姿态。为了让该机器人运动得更灵活，实现多种类型的行走方式，我们对其腿部进行了优化设计，以实现运动效果最优。

3.2.1 腿部设计目标

- 1、运动灵活，能够适宜多种地形，可以在以髋关节为中心的 $\Phi 120$ 球面与 $\Phi 150$ 球面之间的任意区域落地。
- 2、结构紧凑，空间利用率高，便于实现该机器人的小型化。单腿占用空间小于 $150 \times 240 \times 80$ ，单腿质量小于 1KG。
- 3、强度以及动力能够满足各类步态姿势造型的需要，保证正常行走时不会出现强度问题，对于突发情况有一定耐受力。
- 4、运动时前后两节，两腿之间以及腿与板之间不发生干涉。

3.2.2 设计方案

目前常见的运动足机构有四杆机构式、缩放式、伸缩式以及关节式等。就目前已有的各种仿生机器人运动足的设计而言，腿式机器人在具有地形适应性强的优点同时，存在运动速度慢，机体平衡控制困难的不足；轮式机器人机动速度快，但跨越障碍、适应不同地形和机身灵活运动的能力稍有欠缺。

我们保留机器本身的轮式运动的同时结合生物腿式运动的特点，设计了一款拥有轮式快速

运动和腿式适应性强特点的机器人。

3.2.3 腿部整体结构

如下图所示，该机器人的腿部由四个转动关节、一个作为足部的直流电机和具有特定角度的曲臂结构组成。每条腿上有 4 个直流角位移伺服电机和 1 个直流电机，单腿具有 5 个自由度，通过对电机的精确控制可以使该机器人逼真和流畅的展现实现各种预设步态，达到正常行走以及跨越一定障碍的要求。

4 个腿部转动关节可以实现 180 度大范围的转动，用来改变腿部运动结构，实现各种造型。足部的直流有刷电机用来驱动负载小轮，可以使机体以轮式滚动的方式快速移动。

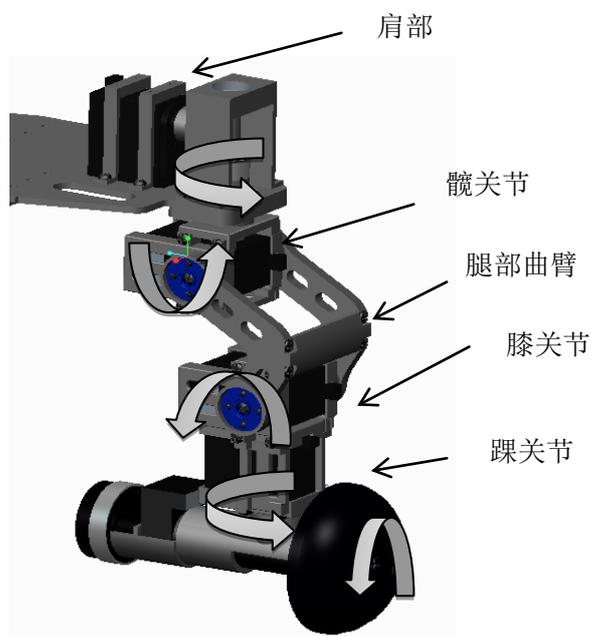


图 12 腿部整体结构图

经简化，单个体节的结构示意图如下：

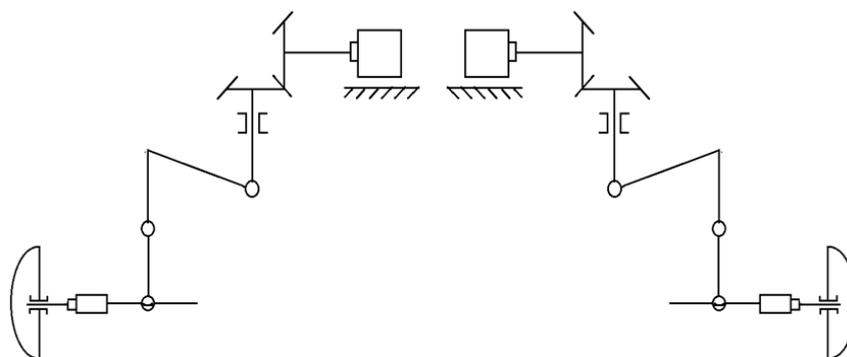


图 13 单个体节结构示意图

我们以竖直方向为 Z 轴，该机器人整体向前的方向为 Y 轴，板的平面上垂直于中轴线的方向为 X 轴建立空间直角坐标系。

该机器人具体运动方式为：

肩部电机 X 轴方向的转动通过锥齿轮转化为 Z 轴方向的转动，带动整条腿绕 Z 轴方向旋转。

髋关节上电机 Y 轴方向的转动通过曲臂结构带动下面部分上下运动。

膝关节上电机 Y 轴方向的转动带动足部实现 YZ 平面的转动。

踝关节上电机 Z 轴方向的转动带动足部实现 XY 水平面的转动。

足部的直流电机 X 轴方向的转动带动轮子实现轮式滚动。

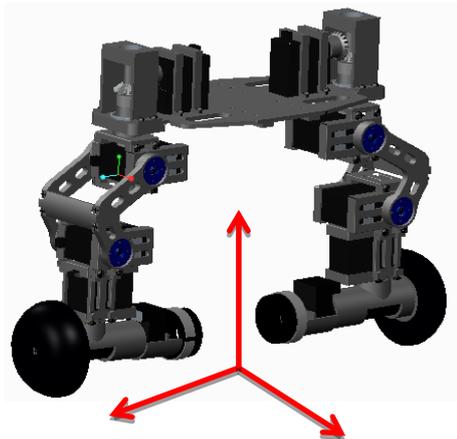


图 14 腿部运动三维方向示意图



图 15 肩部示意图

3.2.4 具体部分介绍

(1) 肩部：

该机器人采用辉盛 MG995 直角度位移伺服电机提供动力，通过两个模数为 1，齿数为 20 的锥齿轮以传动比 1 将 X 轴方向的转动转化到 Z 轴方向。由腿轴带动整条腿进行绕 Z 轴的转动。其活动角度为-90 度到 90 度。

腿轴由上部齿轮箱上的轴承与板上轴承进行固定。通过键固定其上齿轮，腿部通过形状进行周向固定，通过螺母进行轴向固定，如下图。



图 16 腿轴分解图

(2) 髋关节：

髋关节主要用于整条腿的 YZ 平面旋转，考虑干涉情况后，其活动角度为 15 度到 165 度。

我们对伺服电机采用包围结构，根据伺服电机的尺寸大小（ $40.2 \times 20.1 \times 38.8 \text{mm}^3$ ），来确定包围结构

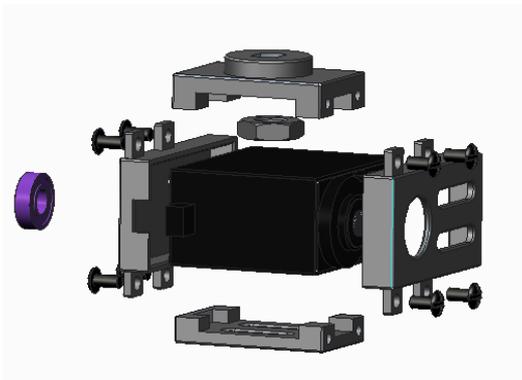


图 17 髋关节分解图

构外壳的尺寸。并通过精细的测量来确定背板上和伺服电机对称位置安装轴的位置，从而保证了对称性。此外，在设计时两侧预留出了 0.1mm 的安装间隙以方便调整。

根据仿真分析计算，此处为腿部受力最大的部位，在某些步态时可达 25kg×cm，故选用 30.8kg×cm 的直流角位移伺服电机 XQ-S4230D 作为动力单元，用于抬升整条腿与支撑身体。

(3) 腿部曲臂：

为了使腿部关节有更大的活动范围，我们需要对连接件进行一定的设计，使干涉情况最少。对运动足动作的设计要求的分析可知，曲臂由两部分组成，并且要求前部>32mm，后部>50mm，两轴之间距离>60mm。通过调整尺寸，使拐角为 90°前部为 35mm，后部为 52mm。

设前部长度为 a，后部长度为 b，两轴距离为 c；

通过勾股定理：

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

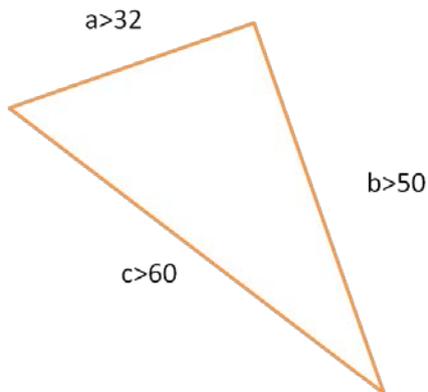


图 18 曲臂尺寸几何关系图

得出 $c=62.3>60$ 。证明设计合理。

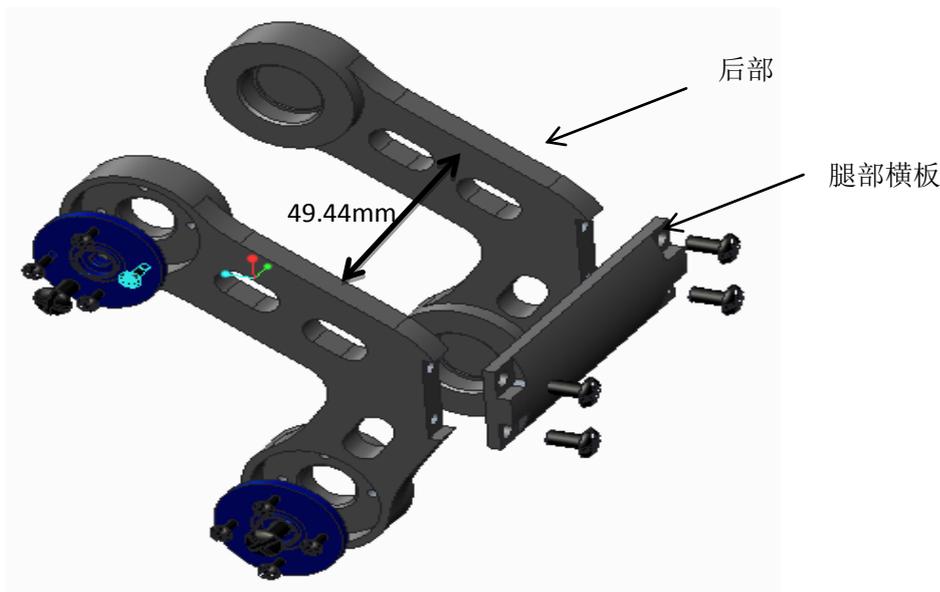


图 19 曲臂结构图

两曲臂之间根据髌关节设计间距为 49.44mm，通过一块横板进行连接，将两曲臂连接为整体,使其共同运动，带动下部结构。

(4)膝关节与踝关节：

为了节省空间，我们将这两个关节设计在一个整体上，上部分与曲臂进行连接，带动下脚及足部在 YZ 平面进行旋转，考虑干涉问题，转动角度为 15 度至 165 度。与髌关节共同作用，可以使得该机器人足部的可达域更加宽广。

下部踝关节主要带动下脚绕 Z 轴进行旋转，转动范围为-90 度至 90 度。可以使足部向前或向后，实现更多步态。

两部分依旧采用包围舵机的结构，通过三层板叠加固定，共用一块分隔板，减少重量。

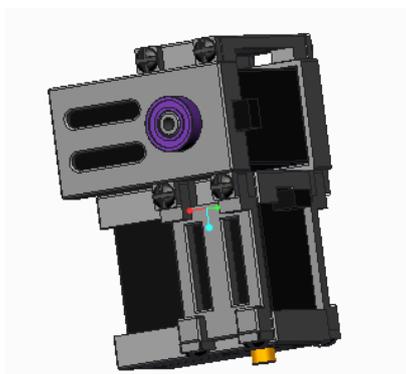


图 20 舵机包围结构图

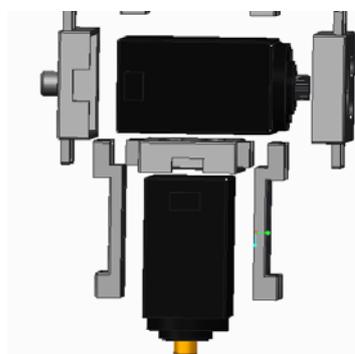


图 21 舵机包围侧视图

(5)足部设计:

该机器人的足部是其运动的基础，是其轮式行走及腿式行走的着地点，我们依据 MAXON 直流电机的形状，采用包覆式的形式设计了一个长柱型的足部。以直流电机作为脚的主体，后部在腿式行走时可以作为脚部，前部装有轮子，可以实现轮式行走。

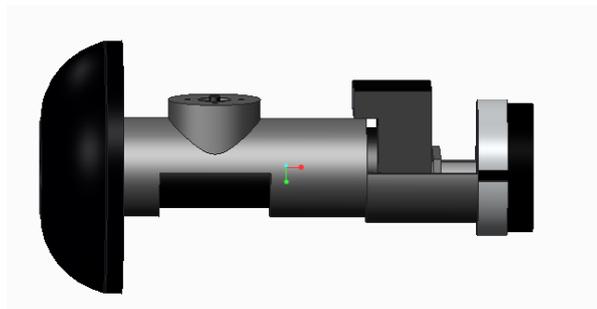


图 22 足部设计图

关于轮子形状的设计，由于足部需要绕图示圆心进行旋转，为了使该机器人平稳接触地面，我们需要保证轮子曲面与过图示圆心的大圆相切，这样才能保证转动平稳。我们以 111mm 为直径，以曲臂与膝关节的连接处为圆心画一个大圆，轮子曲线与这个圆相切，然后以圆弧向中心过渡。由于大多数时间轮子如图示状态转动，为了增大与地面的接触面积，我们在此处设置了一道 4.66mm 的平面，避免轮子因压强太大损坏。

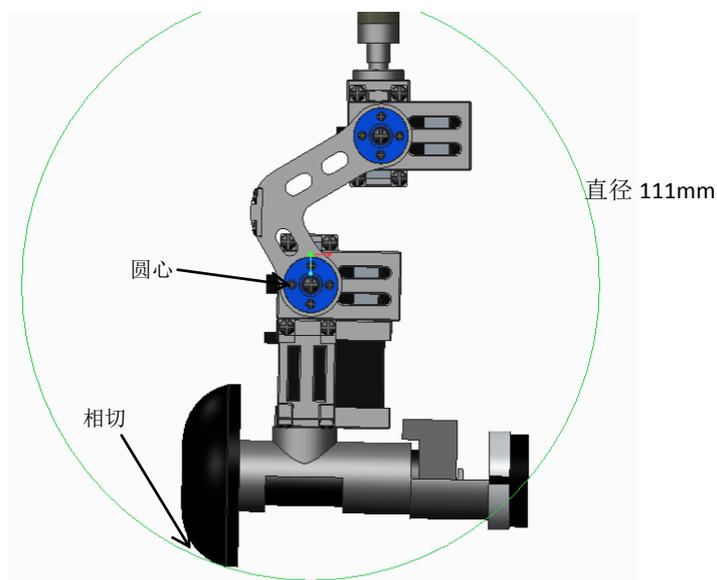


图 23 运动足圆域图

由于轮子最宽处直径为 69mm，则周长为 216.66mm，我们选用的直流电机在 24V 的电压下为 550RPM（转每分），则该机器人的巡航速度可达 2m/s。

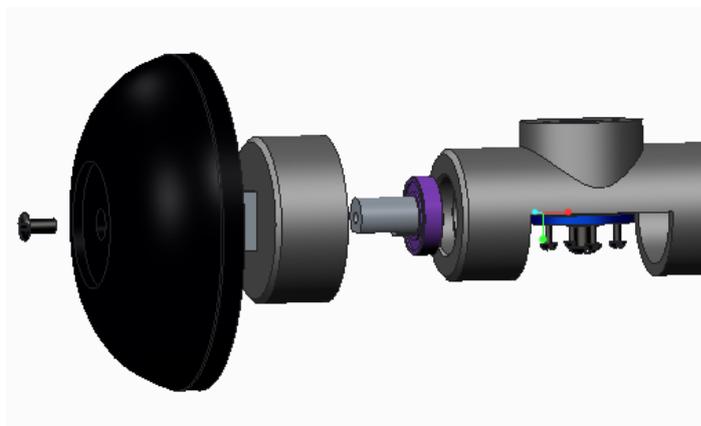


图 24 轮足分解图

在轮子的固定方式上，我们首先将轮子固定在轮芯上，通过长方形的键进行周向固定，通过螺钉进行轴向固定，轮芯通过 D 型孔固定在电机延伸套上，电机延伸套通过轴承进行轴向固定与轴向固定，使得轮子不容易脱落掉出。

直流电机通过螺钉固定在脚部外壳上，后部通过插板进一步限制其轴向运动，分担一部分步行姿态造成的冲击力。

在脚的后部有一橡胶脚垫，用卡箍固定在足部外壳上，起到缓冲作用，避免冲击过大对该机器人造成影响。

腿部使用零件如下图所示。

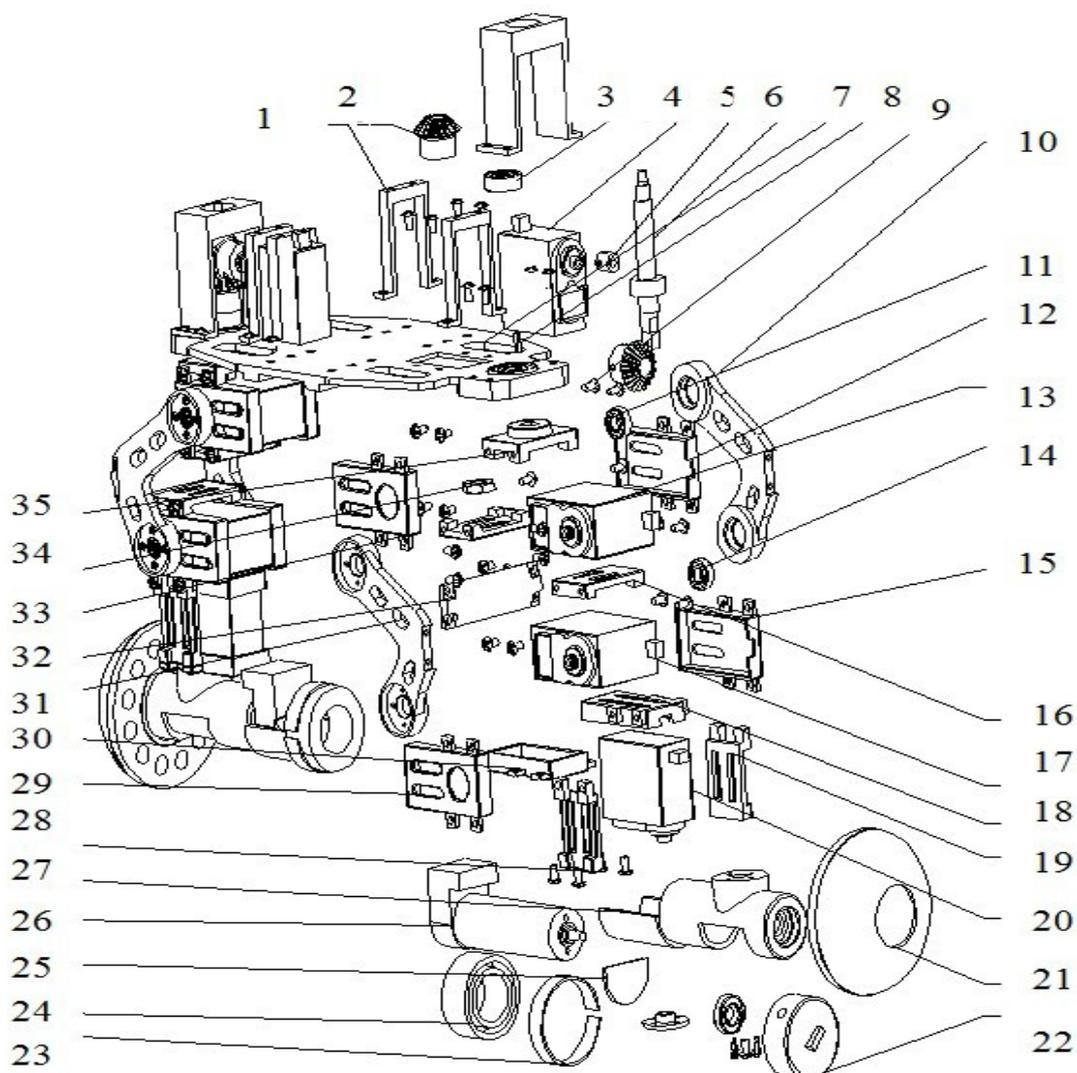


图 25 腿部分解图

图中：1—支架，2—锥齿轮，3—轴承，4—1号舵机，5—套筒，6—1号轴，7—身板，8—键，9—螺钉，10—腿前部曲臂，11—轴承，12—舵机支撑架一，13—2号舵机，14—轴承，15—舵机支撑架一，16—舵机支撑架三，17—3号舵机，18—舵机支撑架五，19—舵机支撑架六，20—4号舵机，21—轮子外套，22—轮芯，23—卡箍，24—缓冲垫，25—插板，26—直流电机，27—电机支架，28—舵机支撑架六，29—舵机支撑架二，30—舵机支撑架七，31—腿后部曲臂，32—横板，33—舵机支撑架二，34—螺母，35—舵机支撑架四。

3.3 腰部链节结构设计

3.3.1 腰部设计目标

腰部高自由度的机构设计使得该机器人具有了多样化的步态，腰部结构的加入使得姿势更加生动灵活，具有更加接近于真实动物的运动特点。

腰部结构以舵机作为原动机，带动相邻两体节作左右及上下方向转动，其中左右方向转动范围不小于 $-30^{\circ}\sim+30^{\circ}$ ，上下方向转动范围不小于 $-30^{\circ}\sim+45^{\circ}$ 。

在完成部分预设姿势时，单一体节重量造成的重量和力矩需要全部由上下方向转动组件承担。根据目前设计的腿部、身板自重估算，上下转动方向转动组件承受的重量需 $> 20N$ ，扭矩需 $> 3N \cdot m$ ，才能完成。

左右方向转动组件在水平运动过程中起辅助作用，具体需要的扭矩很大程度上受腿部的动作的影响。在完成特定动作时，也会收到单一甚至多个体重量造成的重量和力矩，若以2节体节计算，在极限姿态下，组件承受的重量需 $> 40N$ ，扭矩需 $> 3N \cdot m$ 。

由于舵机本身材料强度所限，以上两组件承受的重量由其他机构承担。舵机提供所需力矩。综合考虑功率、输出力矩、响应时间、转动角度范围、价格等因素，我们选择的舵机型号如表1。

表1 腰部舵机型号统计表

使用位置	型号	力矩	转动角度范围	形状			自重	峰值功率
				长	宽	高		
左右方向	XQ-S4230D	$3N \cdot m$	210°	40.2mm	20.1mm	38.8mm	56g	20W
上下方向	HS-7980TH	$4.6N \cdot m$	180°	43.8mm	22.4mm	40.0mm	77g	30W

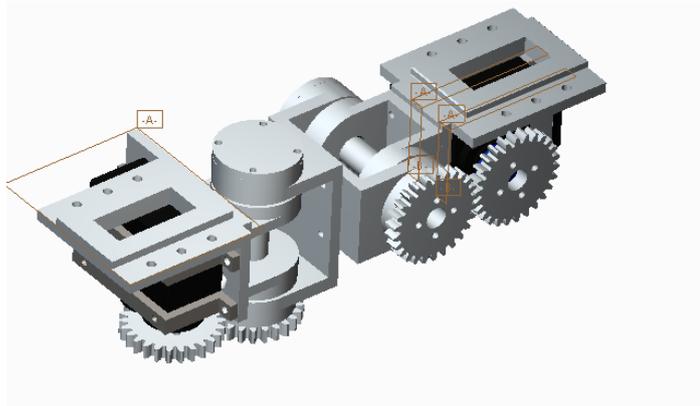


图26 腰部总体结构示意图

3.3.2 腰部结构设计思路

根据设计要求，腰部结构分为两大部分：腰左右方向转动组件和腰上下方向转动组件。腰左右方向转动组件通过其中的腰左右方向连接件与后一体节相连；腰上下方向转动组件通过其中的腰上下方向连接件与前一体节相连；两体节之间通过上下方向腰椎和左右方向腰椎相连，形成类似十字节的结构。

两组件分开有利于设计过程中前后两体节相对位置的调整，也有利于简化工艺。在考虑腰部结构的大小时，参考了强度要求。此外，为使机身重心降低、增加稳定性，并考虑到舵机的大小。

表 2 腰部零件关系图

腰部 组件	左右方向转动组件	腰轴
		腰左右转动件
		腰左右连接件
		腰左右腰椎
		腰轴盖
		舵机
		腰左右舵机固定架
		轴承
		直齿轮
	上下方向转动组件	腰轴
		腰上下转动件
		腰上下连接件
		腰上下腰椎
		腰轴盖
		舵机
		腰上下舵机固定架
		轴承
		直齿轮

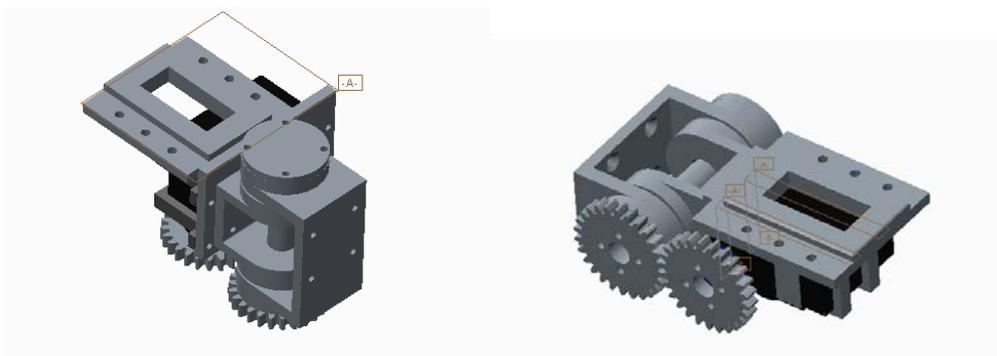


图 27 腰部左右转动结构与上下转动结构示意图

3.3.3 腰部轴系的设计

由于腰左右方向转动组件和腰上下方向转动组件结构相近，为了提高系统的重复利用性，

两组件使用相同的腰轴、轴承、轴承盖、齿轮，相应地，腰上下转动件与腰左右转动件、上下方向腰椎与左右方向腰椎在轴向尺寸上完全一致。



图 28 腰椎结构示意图

受力分析如下：

为确保零件结构强度满足要求，我们在 Creo Simulate 1.0 中对零件进行了受力分析。由于该机器人动作多样，在受力分析中，我们将条件简化，我们假设：条件为在静态、单体节悬空状态，且此体节体节所受重力全部由腰部承担。

通过分析、计算及实物测量，在未加电路、装饰物的情况下，我们得到的单体节的质量为 1.8kg。为保证在安装好附加物之后的强度，并留有一定余量，在这里，我们假设单体节受重力 20N。以下为各个零件分析条件及结果。

(1)腰上下转动件

零件受力情况如下图所示，黄色箭头代表体节对其施加的压力，总和为 20N。我们假设力的分布均匀。蓝色孔代表与相邻零件固定用孔，这里我们将其设定为固定面。

零件材质为铝。

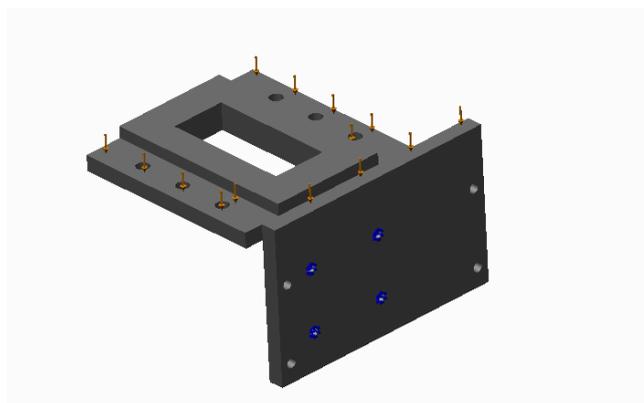


图 29 腰上下转动件受力示意图

结果如下：

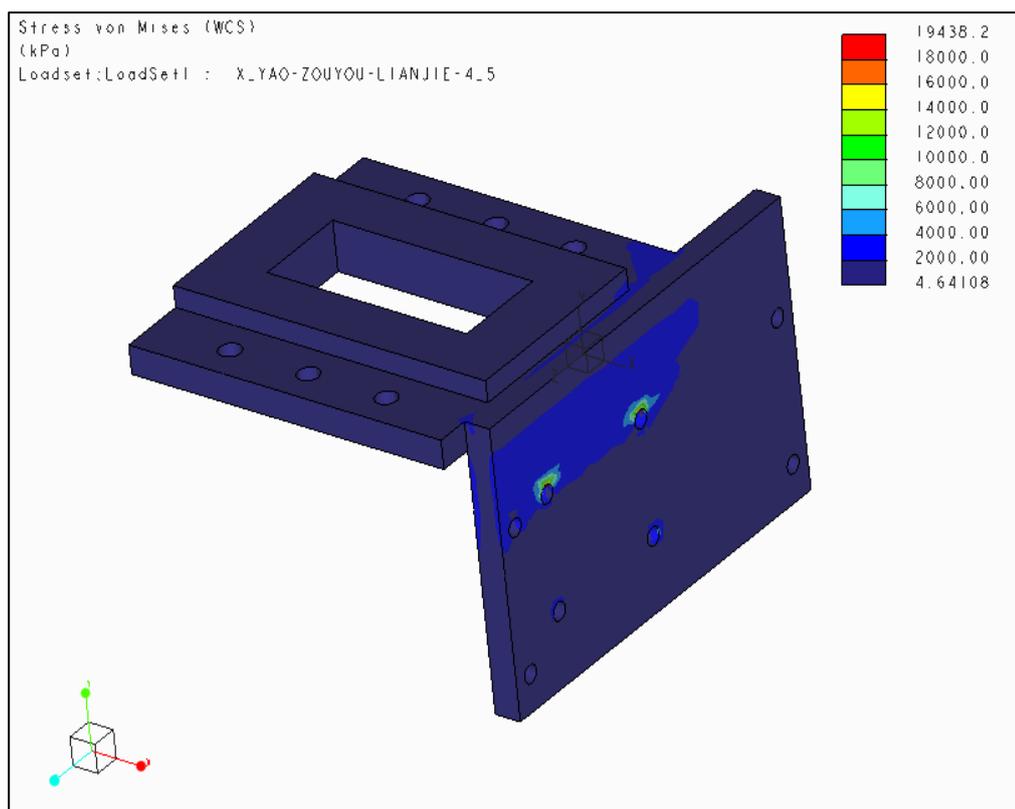


图 30 腰上下转动件受力结果分析图

铝的屈服强度为 15~20MPa，从图中可以看出，除螺纹孔极小区域压强为约 19MPa 外，其余地方都远小于屈服强度，强度符合设计要求。

零件受力情况复杂，从另一个方向研究受力情况如下图所示。同样，黄色箭头代表体节对其施加的压力，总和为 20N。我们假设力的分布均匀。绿色标记出了与相邻零件固定用孔，这里我们将其设定为固定面。

零件材质为铝。

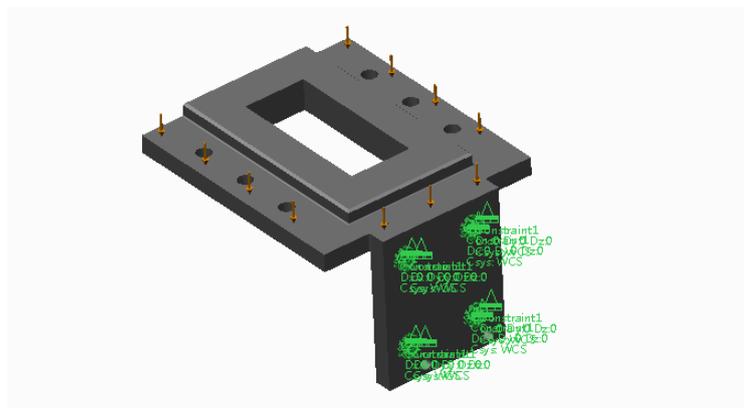


图 31 腰上下转动件二次受力示意图

结果如图 32。

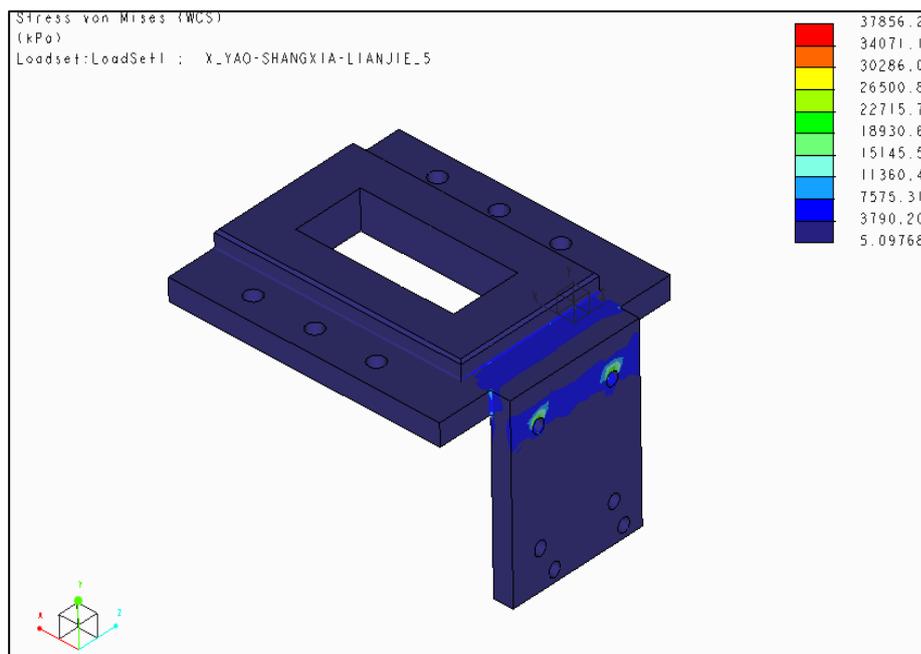


图 32 腰上下转动件二次受力结果分析图

从图中可以看出，固定用孔出现了细微的峰值，其他地方均满足强度要求。

(2) 腰左右转动件及腰轴

此组件中，腰左右转动件材料为铝，腰轴材料为 Fe40。所施加的力分为两组，上边一组方向如图所示，大小为 28.3N，下边一组方向如图，大小为 20N。图上所示 4 孔为与相邻零件固定用孔，这里我们将其设定为固定面，结果如图 33 所示。

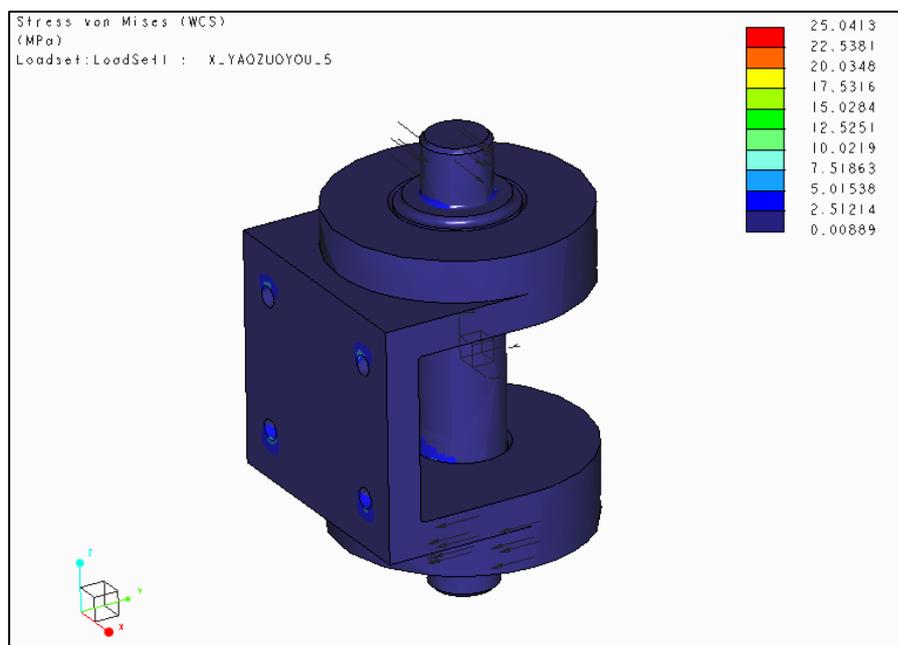


图 33 腰左右转动件受力结果分析图

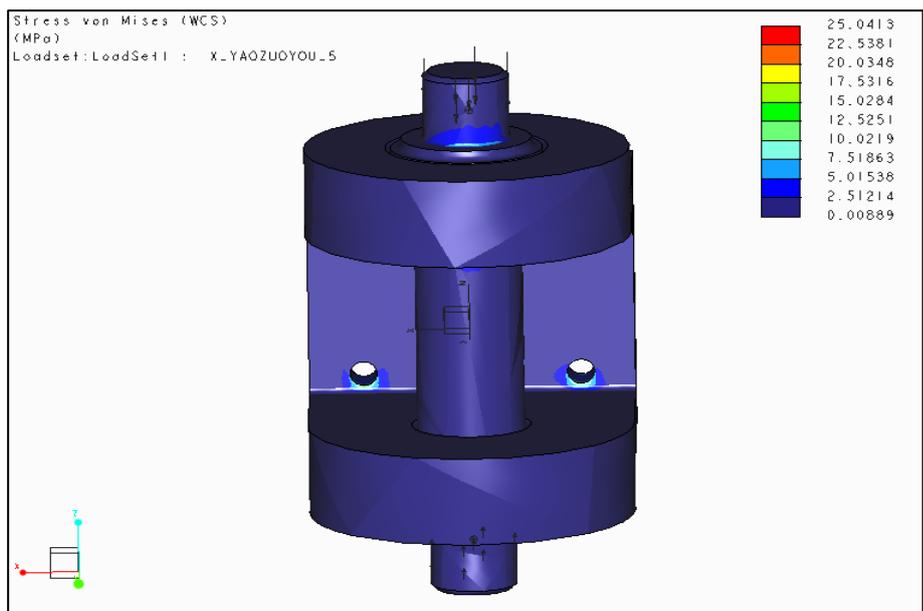


图 34 腰轴受力结果分析图

从图中可以看出，满足强度要求。

(3) 腰椎

腰椎分为两部分，分别连接上下转动部分和左右转动部分。两部分通过螺钉相连。在各个仿真里，我们假设左右方向转动的部分在水平方向固定，上下方向转动的腰椎受向下的 20N 的力，受力面及方向如下图 35 所示。



图 35 腰椎示意图

仿真结果如图 36。

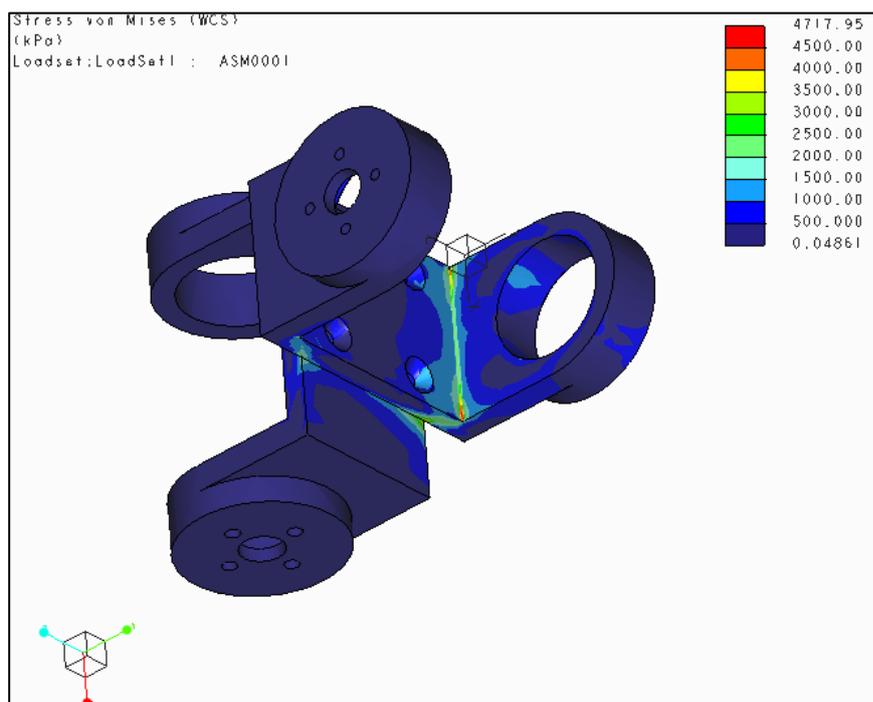


图 36 腰椎受力结果分析图

从图中可以看出强度符合要求。

3.4 模块化连接板的设计

板是腿部与腰部的连接器件，整个该机器人都以它为基础。它的强度，设计连接方式，形状等影响着整个该机器人的整体情况。因此我们需要减轻其重量，保证其强度，使整体得到最佳。

3.4.1 主要任务

- 1、放置肩部，给其提供固定基础，使肩部舵机位置固定。
- 2、支持整个腿部结构，使其能够很好的绕 Z 轴进行旋转。
- 3、与腰部配合相连，实现整体的快速连接。

3.4.2 设计细节

板整体上成对称结构，左右以及前后分别成轴对称，这样的设计更加能够体现模块化的特点，便于加工，使板的适应性更强。

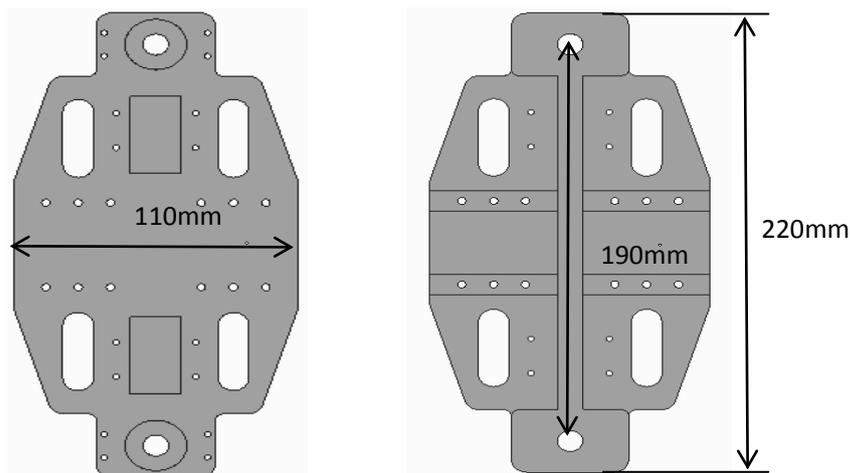


图 37 板尺寸设计图

通过测量可得最底端的伺服电机轴距离足底端橡胶底的距离为 86mm，而通过运动分析可知，运动足要能够绕最底端的伺服电机轴 180° 旋转，所以设伺服电机轴到胶底距离为 l_1 ，两足之间距离为

$$l_2, l_2 \geq 2 \times l_1$$

因此同侧两运动足之间距离设计为 190mm，使两足能够同时旋转而不发生干涉。再根据轴承大小，将板的整体长度设为 220mm。

根据腰的长度以及对板上电路板放置空间的考虑，我们将板的宽度设为 110mm。

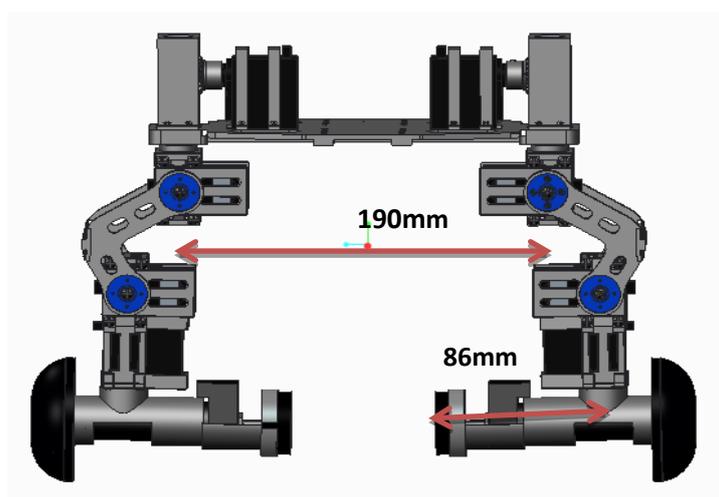


图 38 板宽度设计图

板与腿的连接方面，腿轴通过板上角接触球轴承，限制其向下的运动；通过板上齿轮箱以及其上角接触球轴承限制腿轴向上运动。舵机通过舵机架固定在板上预设的槽中，槽 X 轴方向的长度略长于舵机 X 方向的长度，便于调整锥齿轮中心距。板在齿轮箱处收紧，与齿轮箱同宽，

以减少板的质量。

板与腰的连接方面，为了实现快速连接，我们采用 6 颗 M4 螺钉作为连接方式。为了便于快速对准，我们将加强筋用作导向部分，在腰上设计凸台，使其正好插入板上加强筋构成的空间中，这样既减轻了重量也能保证板的强度。



图 39 快速连接方式图

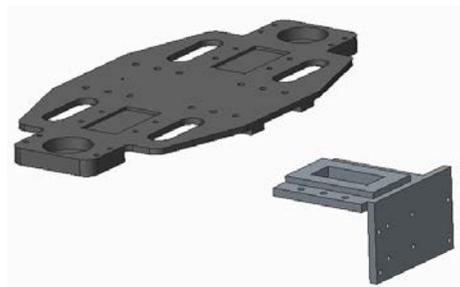


图 40 凸台设计图

3.4.3 强度校核

为了提高该机器人的运动性能，减轻板的重量，我们将板的整体厚度设为 3mm，在两端放置轴承处增厚为 8mm，中间设计一横两竖三道加强筋，并在强度要求不高的地方进行打孔的操作。

在进行以上操作后，我们需要保证板不会因为该机器人的剧烈运动而断裂，于是我们在 Creo Simulate 1.0 中对板进行了受力分析。

为了分析简便，我们将板上的电路及其他装置简化为板的重量，约为 0.3KG，两端轴承处承受腿部向下的力量，四个螺纹孔承受腿部向上的力量，单条腿约为 0.9KG；中部 Y 轴方向的加强筋处受到腰部向上的支持力，螺纹孔受到向下的拉力。以下为各个状况下板的分析情况。

假设该机器人保持静态，腿部抬起时，两端受到向下的压力，中部收到向上的支持力，我们假设中部 Y 轴加强筋为固定端，进行强度分析，结果如图 41。

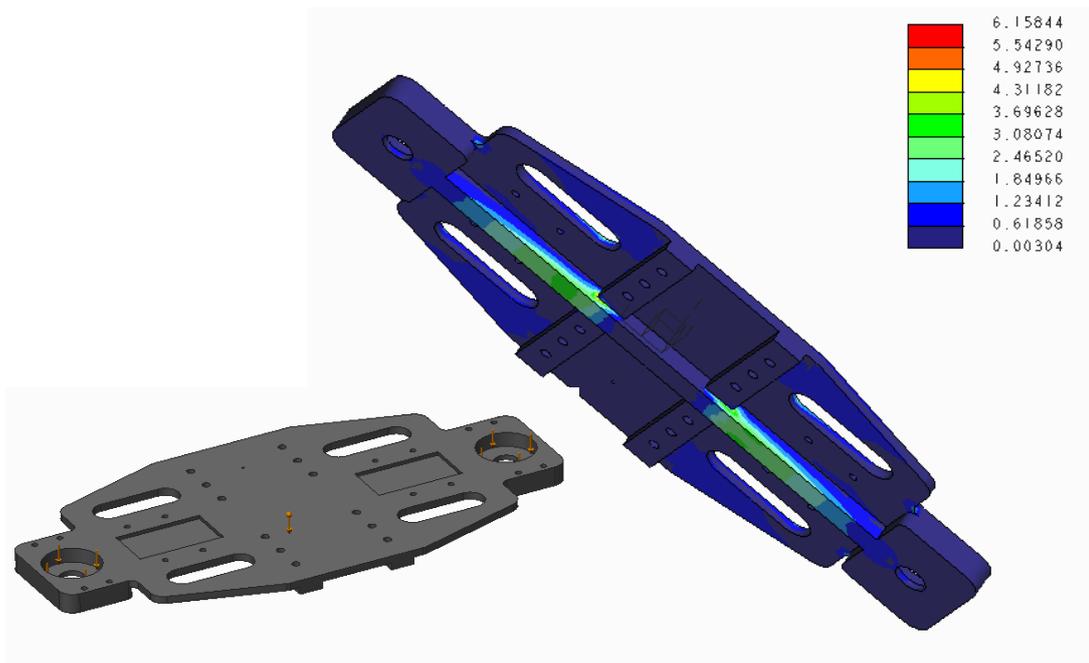


图 41 静态时板强度校核结果图

黄色箭头部分为受力,我们可以看到最大的压强为4Mpa左右,而铝的屈服强度为15~20MPa,因此强度满足要求。

假设该机器人运动,腿部由上向下运动,由于加速度,两端轴承处受到3倍重力,约为27N,中部依然为固定端,由此进行强度分析。

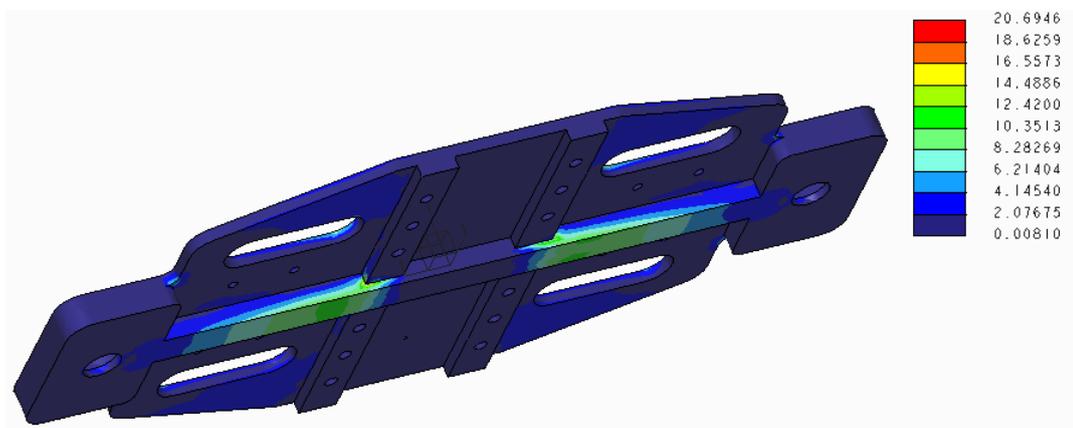


图 42 运动时板强度校核结果图

如图可以看出,最大压强依旧小于铝的屈服强度,因此强度满足要求。

假设该机器人腿部由下向上运动,由于加速度,腿部对板施加2倍重力的拉力,约为18N,拉力通过齿轮箱传递给了板的螺纹孔,板中部依旧固定,由此进行强度分析。

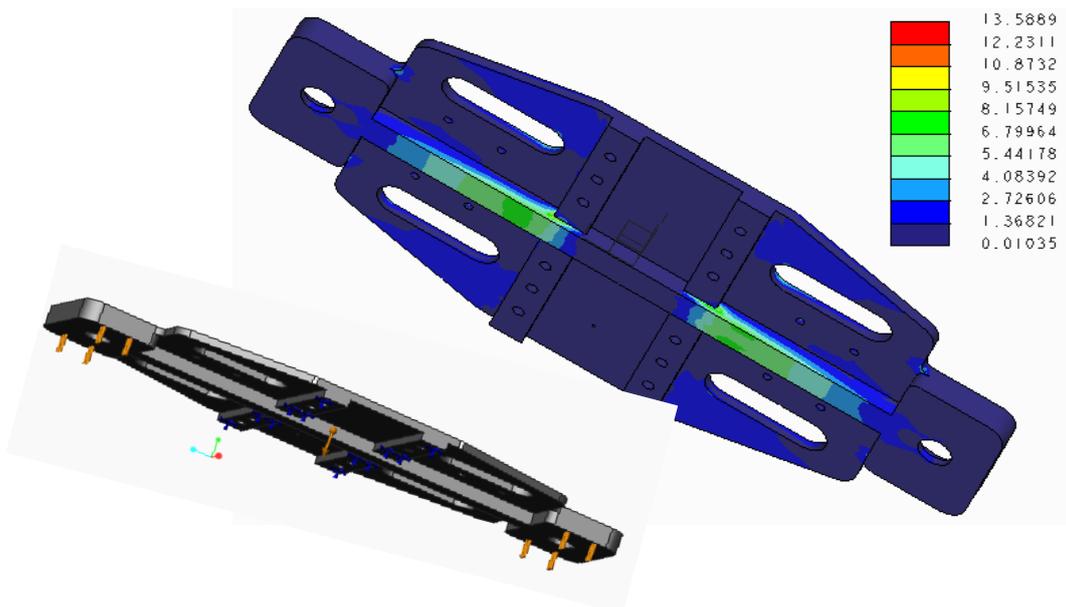


图 43 承受拉力时板强度校核结果图

我们可以看到最大压强小于 10Mpa，强度满足要求。

假设前面一节悬空，则中部螺纹孔受到向下的约为 22N 的力，根据此情况我们进行强度分析有：

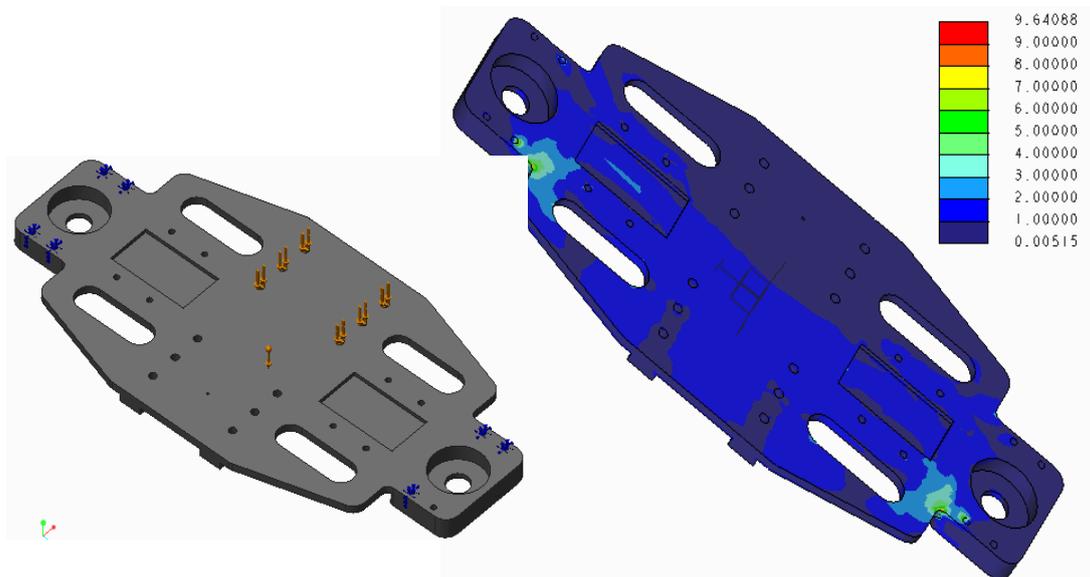


图 44 体节悬空时板强度校核结果图

我们可以看出最大的压强小于 10Mpa，满足强度要求。

至此我们可以看出板的设计基本上满足设计要求。

四、作品运动仿真及步态设计

在上一部分我们已经得到了该机器人完整的机械结构，但单独的结构并不具有吸引力。我们在机械结构的基础上，赋予其新的生命力，让机械结构运动起来，形成有序的移动，这样该机器人才能真正“活”过来。

4.1 准备工作

为了进行运动仿真,我们首先需要对建立的模型进行分析。在八足形式下，该机器人共拥有4个体节，46个自由度。要使46个电机按照预想的动作达到预定的角度，其间保持一致性并不是一件容易的事情。我们需要对每一个自由度进行编号，便于有序的控制。我们将该机器人按规律（如下图）分成了从0到7共八组，将各个直流角位移伺服电机以及脚部的直流有刷电机按次序依次编号，使每一个电机都有一个自己的ID便于仿真以及今后的程序设计。

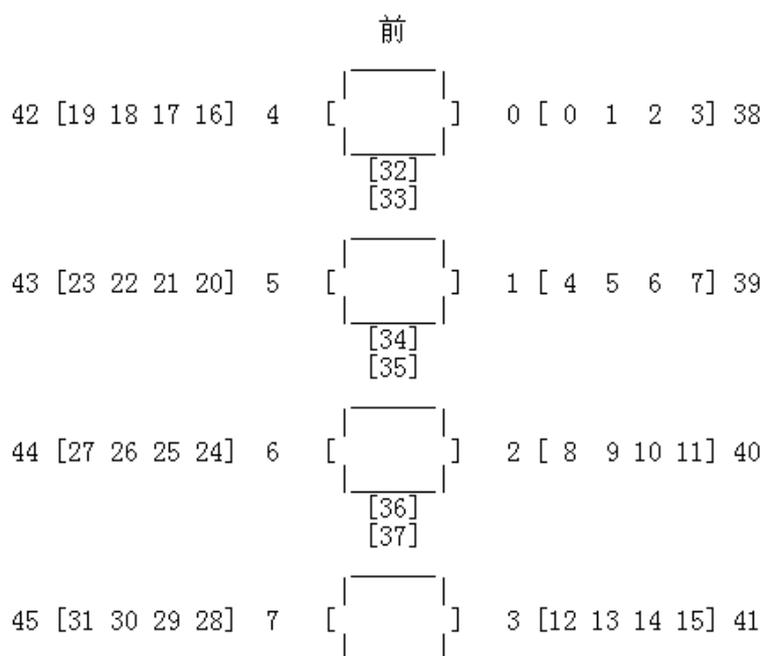


图 45 各自由度编号

在进行完编号之后，我们在 Proe 中按规定顺序依次为该机器人的各自由度添加伺服电机控制量，在腿部锥齿轮传动处添加齿轮连接约束，从而得到仿真模型。

每一个伺服控制量总的来说有三种伺服控制方式，分别是位置伺服，速度伺服以及加速度伺服。针对所用电机的不同，我们将直流角位移伺服电机选为位置伺服控制，通过建立各时刻不同位置处舵机的角位移数据表，对其进行运动仿真。在其运动过程中，我们对表里的数据进行线性插值便能在 Proe 中输出该机器人的仿真结果。对于脚部的直流有刷电机，我们选用速度伺服控制方式，通过设定不同时刻直流有刷电机的运动速度，对其进行控制。

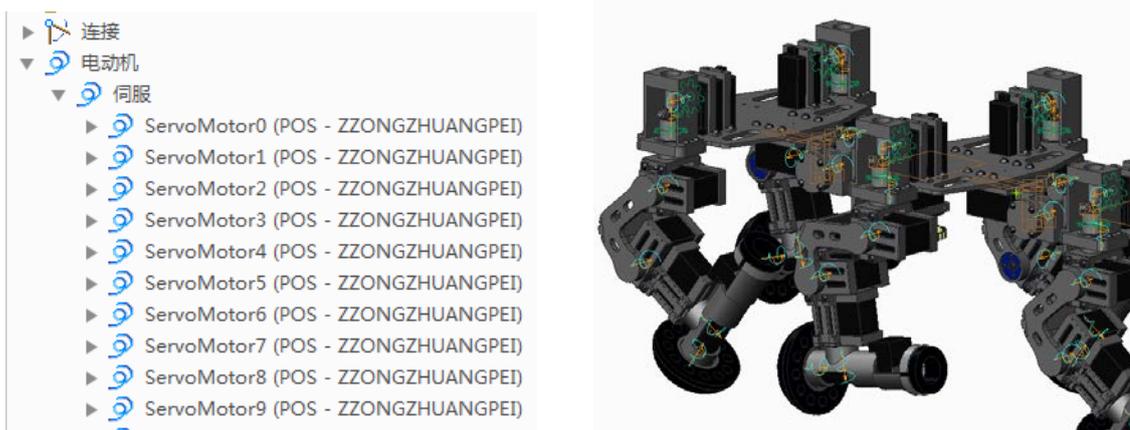


图 46 在 Proe 中添加伺服电机控制量示意图

在进行仿真的过程中我们发现左右两腿舵机，以及同一条腿上上下两个关节的舵机顺时针或逆时针旋转的不同会使得其转动角度或增或减。为了更为清晰的掌握各关节转动方向对其当

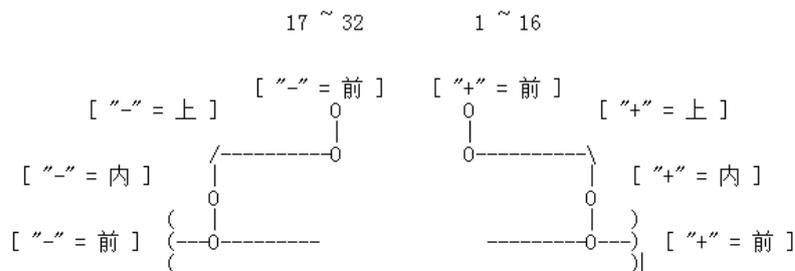


图 47 各关节角度数值分布图

前角度的影响，我们画出如右图各关节角度数值分布图。

4.2 步态规划

4.2.1 步态设计

在进行完准备工作之后，我们进入到了步态设计的环节。针对该机器人的机械结构状况，我们首先从单体节入手，研究该机器人能够摆出的造型。

在充分结合现实中各种生物的运动方式以及合理的想象之后我们设计出了十几种的单腿姿势。

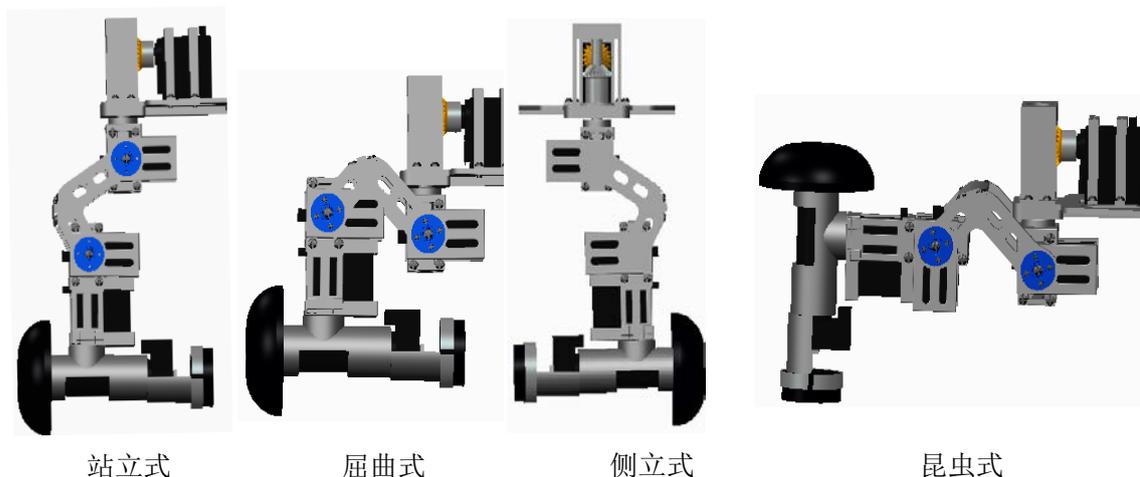


图 48 四种步态设计图

在得到如上各种腿部姿态后，我们记录下达到上述姿势时腿部各舵机当前的数值，作为步态设计时的初始数据。

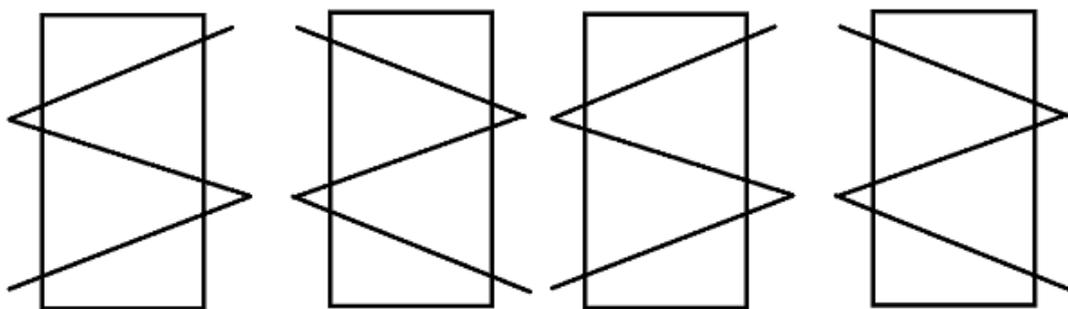


图 49 不同步态的舵机数值示意图

行走步态简单说来就是相同的几个关键帧的重复出现。一般关键帧的数量为 4，我们只需要找到这些关键帧便能构造出一个步态。经过多次实验，我们在 Proe 中得到了多种步态数据，并以一定的数据格式记录在 Excel 文件中。

我们利用 Matlab 将各个电机的数据分别导成以时间为主轴的控制量变化文件，将其输入到各个电机的控制项中，使 46 个电机按照预定的规律进行动作，便可在 Proe 中看到仿真动画。

4.2.2 步态分析

得到仿真动画并不是我们的最终目标，我们需要对得到的仿真数据的真实性，可靠性进行验证才能将其真正的用于实际样机的调试过程中。我们以腿式行走为例进行说明。

对于腿式行走的步态，我们选用三角步态作为其步态的主要体现。在其行走过程中，着地点的变化如下图所示。这样能够保证其运动过程中的稳定性，使其不会发生倾倒、摇晃的状况。

其大致运动过程是：

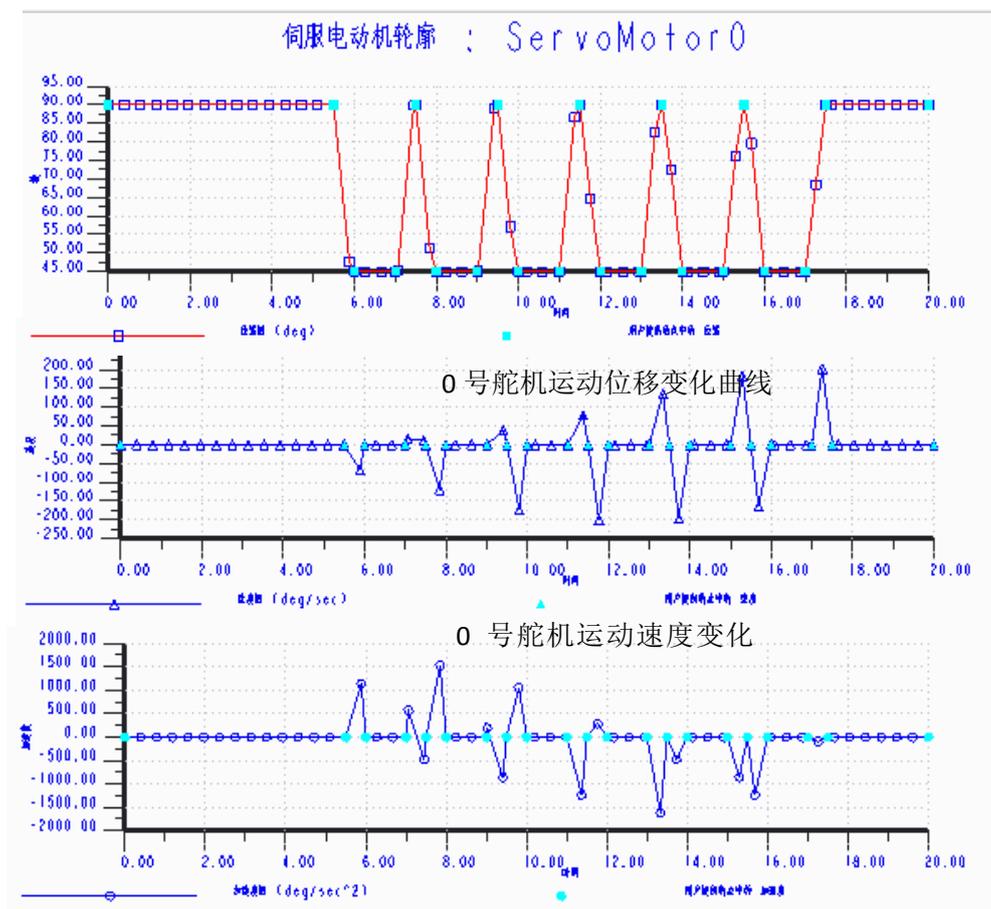
- (1) 该机器人 8 足同时着地，做姿态调整，准备开始运动。
- (2) 该机器人 1, 3, 5, 7 号腿抬起，0, 2, 4, 6 号腿保持着地动作。

(3) 该机器人 1, 3, 5, 7 号腿着地, 0, 2, 4, 6 号腿同时抬起。

(4) 重复 (2)、(3) 步的动作, 机器人一直向前走。

通过运动仿真, 我们证实了该机器人在运动过程中各个构件间不存在运动干涉, 机身保持平稳前进, 行走顺畅, 各足无滑移现象发生。

在 Proe 中我们还能够得到各个伺服电机控制量的变化曲线。下图是 0 号舵机在进行腿式行走步态过程中运动情况的体现。



0 号舵机运动加速度变化曲线

图 50 着地点变化情况图

在考虑到直线插补的影响后, 我们可以看出在该机器人运动的过程中, 0 号自由度处的角度、角速度以及角加速度的变化曲线都较为平滑, 没有出现较大的跃迁现象, 只是在支撑相与摆动相交替时刻该关节处的角加速度波动较大, 但幅度在可以接受的范围内, 仍能够使该机器人平稳运行。

我们再分析提供速度伺服的脚部直流电机的情况。以下图 51 中为 38 号脚部直流电机的角位移及速度在原地回转步态中随时间变化的曲线。

在图 51 中我们可以看出其变化平稳, 运动符合直流电机的变化规律, 满足其运动要求, 实

现起来没有问题。

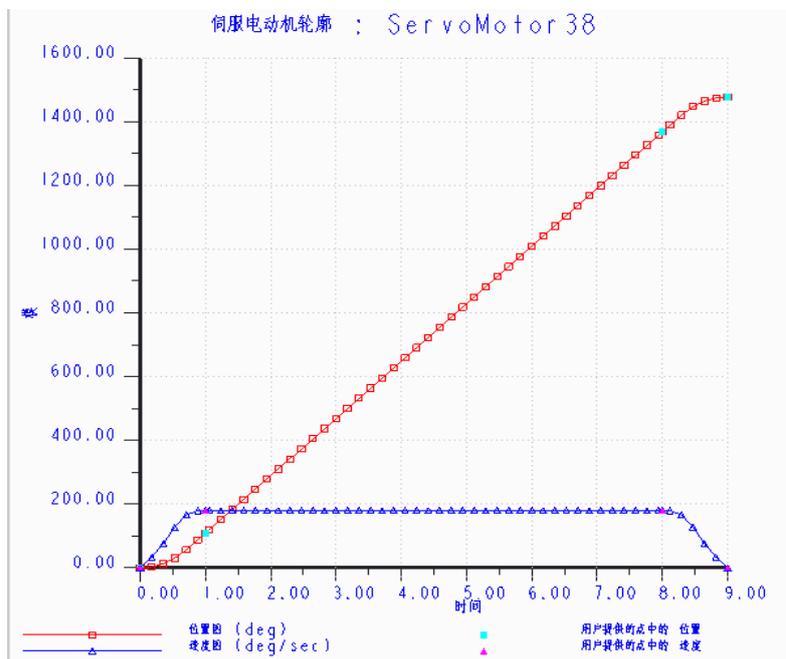


图 51 直流电机运动位移速度图（38 号）

4.2.3 数据利用

在前几步得到个运动动作的步态数据之后，我们需要将其运用在接下来的研究之中。其主要要有两大利用方向：

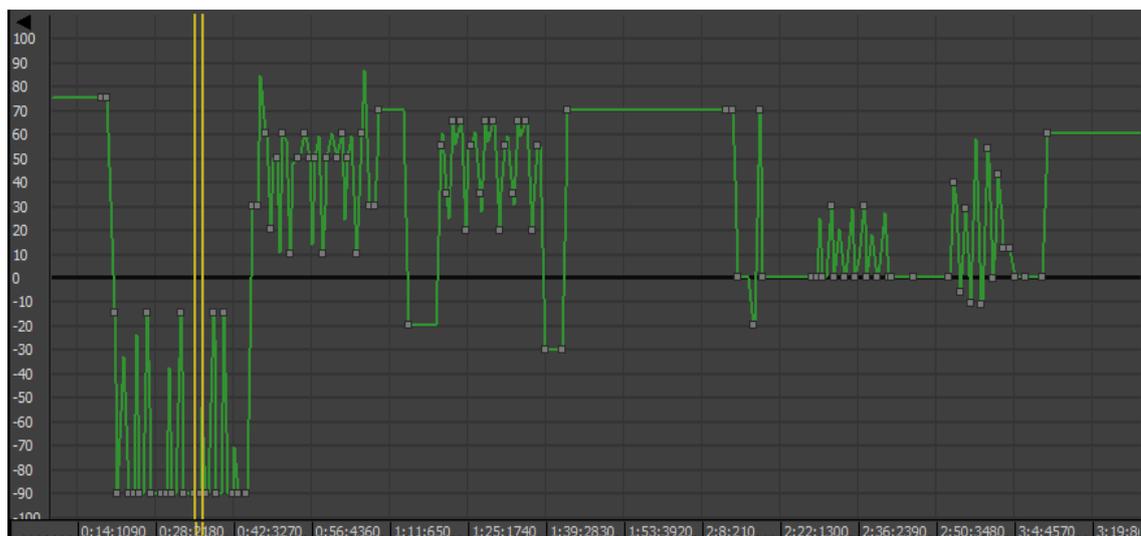


图 5 舵机全套步态运动位移曲线（20 号）

(1) 利用得到的各关节运动曲线，直接导入到 3ds max 中的轨迹视图-曲线编辑器中，变成 3d 模型的关节运动曲线，从而得到更加高质量的 3d 动画。

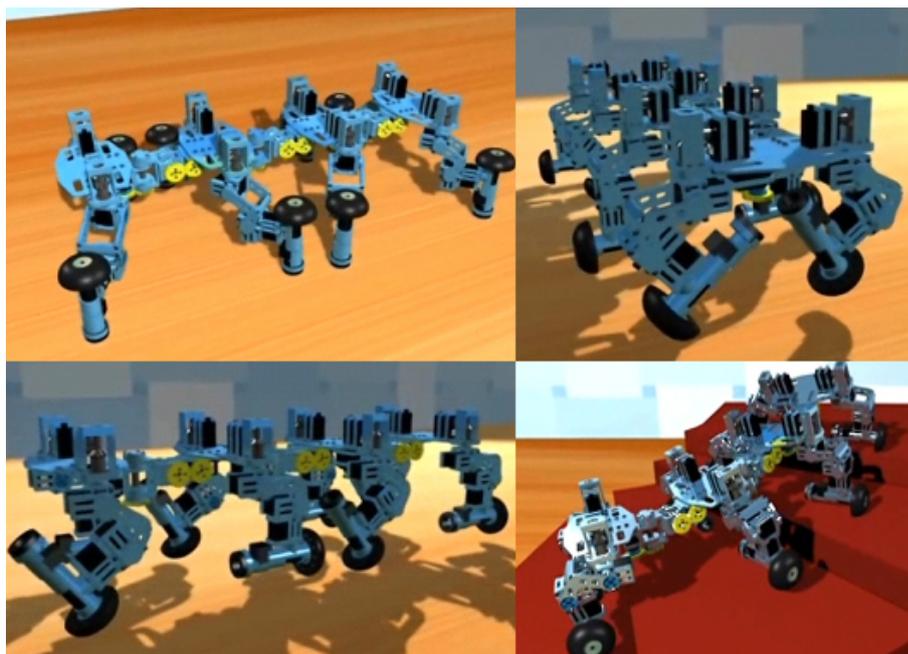


图 53 仿真动画截屏

(2) 将得到的步态数据的具体数值存在 Excel 文件中，作为后期步态函数书写时的数据来源。我们可以将数据稍作变换，便用在程序之中，简化程序的设计过程。

通过虚拟现实中的运动仿真模拟以及步态设计，我们得到了几十种步态的步态数据。这充分说明了该机器人高自由度下运动的复杂程度。其结构设计能够保证在如此多的步态下运动不干涉，且能够较好的完成，充分说明了其精妙程度。它不再仅仅是单一结构对应单一步态的形式，而是一个载体承载了众多的运动形式。仿真模型的运动使得在真正样机行走时有了更加充裕的理论基础，这样为该机器人的运动完成做好了铺垫。

五、作品电路控制及程序设计

5.1 电路结构总体设计框图

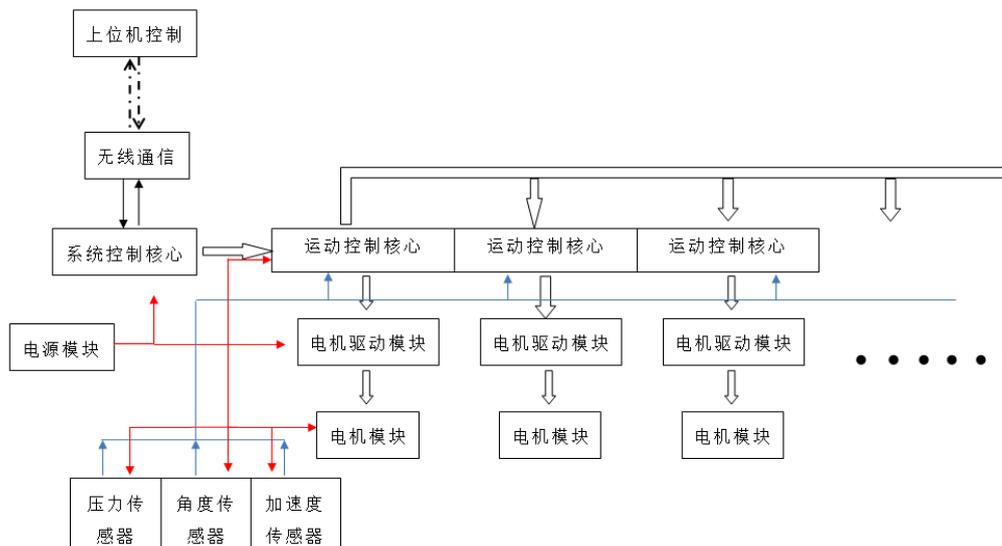


图 54 电路结构总体设计框图

5.2 硬件电路设计

由于该机器人机械部分采用模块化设计，可以自由增减肢节。这就要求我们在电路设计方面适应这一特点，实现电路的可增减性。经过研究分析之后，该机器人电路采用总分模式（如图 55），有一块主电路板，用于高层控制控制，对外通讯以及摄像头，无线模块等外设的控制。主电路可以同时所有的电路进行控制，处理分析各个分电路传回来的信息。各个分电路功能相似，也可采用模块化设计，分别控制各个肢节实现各种步态动作，可以随机械结构一同增减。并且各个分电路之间可以依次向后传递数据，用以实现步态数据的依次传递。

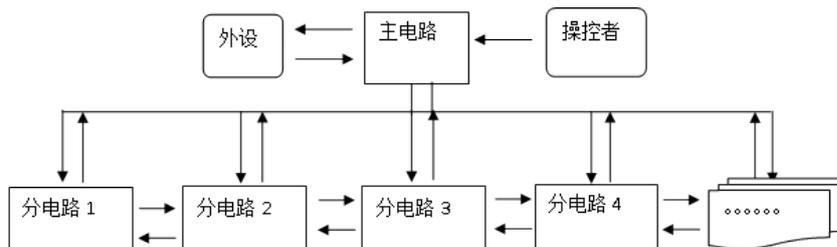


图 55 硬件电路设计思路图

在标准的 8 足形式下，该机器人具有 46 个自由度。也就是说电路需要稳定控制这 46 个电机，实现多种运动模式、多种运动姿态的完美结合，所以在设计方面，要充分考虑到需控制量众多的情况。经过研究，该机器人的控制系统采用遥控与自主控制相结合的形式，可根据执行任务的复杂程度采用不同的控制方式，保证该机器人具有超强的运动功能和众多的动作方式。

针对控制系统的特点,控制系统采用美国 ARM 公司生产的 32 位 STM32 为核心微处理器,实现对多伺服器的高速控制,使其能高效流畅展现出多达几十种的运行步态,保证该机器人具有突出的运动性能。

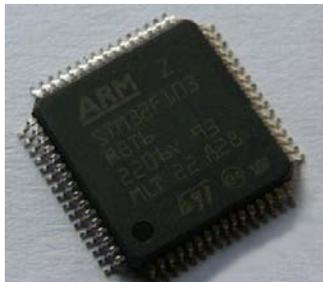


图 56 机器人所用芯片

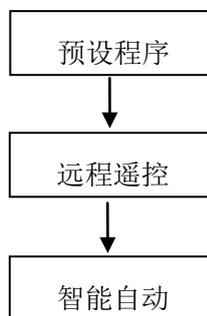


图 57 控制层次

该机器人控制系统主要包括控制模块、电源管理模块、电机驱动模块、通信模块、传感器检测模块以及电机执行模块。

按照预想,硬件电路实现的主要功能分为以下几个阶段:

- 1、可以较好地驱动控制多个电机(八足形式下为 46 个);
- 2、使其能按照预定程序设定实现多种行为步态;
- 3、该机器人能够与外部进行通讯,接受外部人员指令,依据远程遥控对其进行操作增强其应对环境的能力,提高娱乐程度;
- 4、该机器人能够依据自身传感器获得的数据,自我分析周围的环境,与使用者形成一的互动,实现智能化的目标。

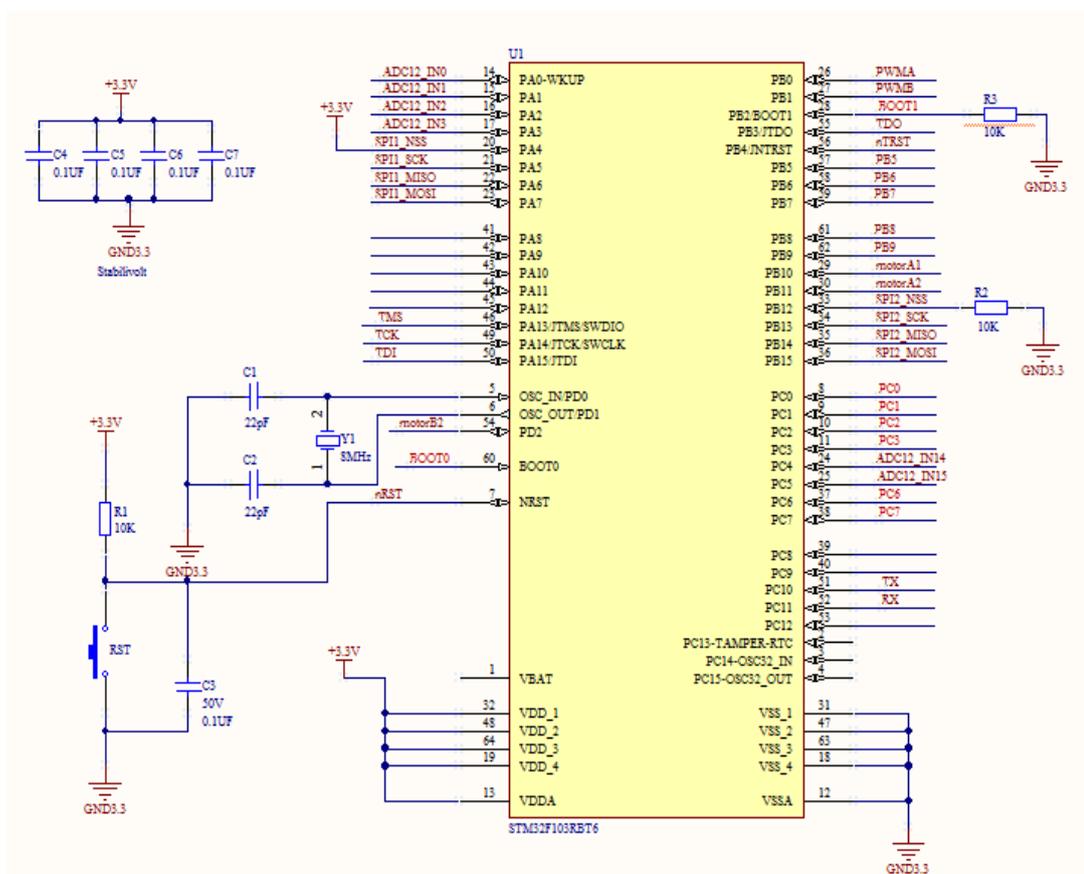


图 58 控制电路图

5.2.1 控制模块

经过反复比较，我们选用 STM32F103 芯片作为我们的控制芯片。

选用原因：

- 1、其内核为 32 位的 Cortex™-M3 CPU。具有最高 72MHz 工作频率，能够满足控制的时间要求。
- 2、拥有 3 个通用定时器，一个高级控制定时器（PWM 定时器）能够输出 12 路 PWM 波，便于精确控制电机。
- 3、具有 2 个 SPI，2 个 I2C，3 个串口，51 个 GPIO 端口以及 2 个 12 位 ADC 模块，电路可扩展性强。

与其他模块接口参数：

- 1、需要提供 2.0~3.6V 的工作电压，用于维持芯片正常工作；
- 2、I/O 口最大承受电压为 5V，故输入信号电压应在 5V 以下；
- 3、输出电压约在 3V 左右。输出电流可达 8mA。

电路图如图 58 所示。

5.2.2 电源模块

由于机载设备较为复杂，无法将各供电电压统一，所以我们需要对设备供电系统进行较为复杂的设计。

首先分析各模块电压要求。

我们使用的 STM32F103 芯片需要 2.0V—3.6V 电压供电，无线模块 NRF24L01 供电电压需求为 1.9V—3.6V，加速度传感器模块供电电压为 2.4V—3.6V。故我们采用 3.3V 电压对上述部分供电。

L298N 电机驱动芯片需求电压为 4.5V—7V，摄像头供电为 5V，MAX485 芯片供电为 5V，故我们采用 5V 电压对上述部分进行供电。

腰部上下运动，及腿部 Z 轴方向旋转所需的直流角位移伺服电机 Hitec HS-7980TH 与辉盛 MG995 供电电压为 7.4V，所以我们需要 7.4V 电压供电。

腰部左右运动以及腿部 Y 轴方向旋转所需的直流角位移伺服电机 XQ-S4230D 供电电压为 12V，所以我们需要 12V 电压。

脚部 maxon 直流空心杯电机供电电压为 24V，所以我们还需要 24V 的电压。

综上所述，我们需要提供的电压有 3.3V，5V，7.4V，12V，24V。

由于 3.3V、5V 主要是芯片供电，不需要太大的功率，可以通过降压获得，而直流角位移伺服电机消耗功率较直流空心杯电机更多，所以我们决定采用 7.4V 与 12V 双电池供电。通过升压、降压获得其他电压值。

我们选用电池参数如下：

表 3 电池参数比较

	容量	电压值	放电倍率	极限放电电流
电池一	2600mAh	7.4V	30C	78A
电池二	2800mAh	11.1V	35C	98A

为了实现电压变化，我们采用升压及降压电路来实现电压升降。

(1) 7.4V—5V：采用 LM2596 降压电路

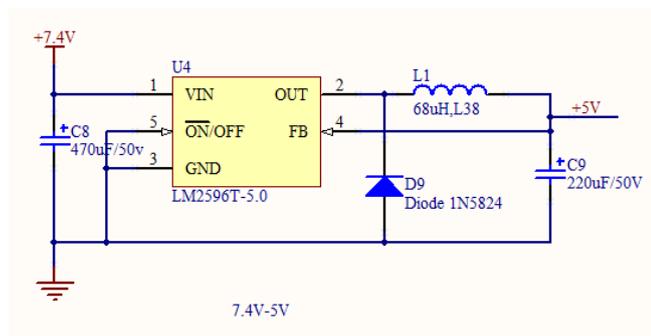


图 59 降压电路(7.4V—5V)

LM2596T-5.0 芯片: 输入电压要求是 7V—40V; 输出电压为 5V; 输出负载电流为 0.2A—3A。

(2) 11.1V—3.3V: 采用 LM1117 降压电路

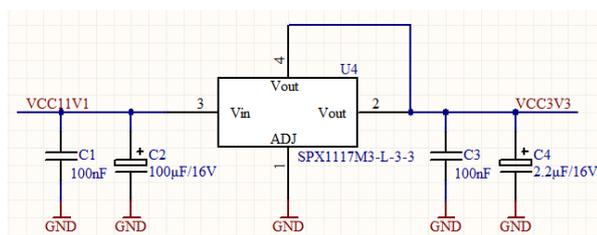


图 60 降压电路(11.1V—3.3V)

SPX1117M3-3.3 芯片: 输入电压为 11.1V; 输出电压为 3.3V; 输出电流为 0mA—800mA。

(3) 11.1V—24V: 采用 LM2577 升压模块

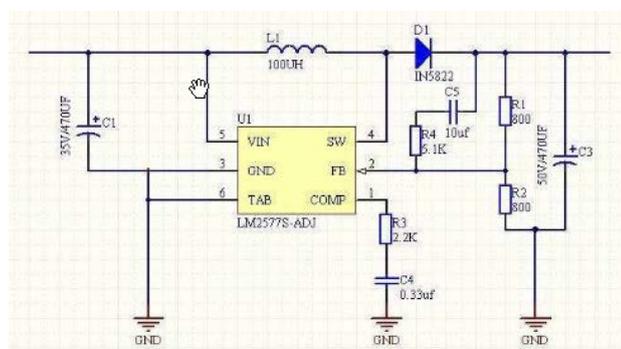


图 61 升压电路(11.1V—24V)

LM2577S—ADJ 芯片: 输入电压为 3V—30V; 输出电压为 4V—35V。

总结起来可以用下图表示:

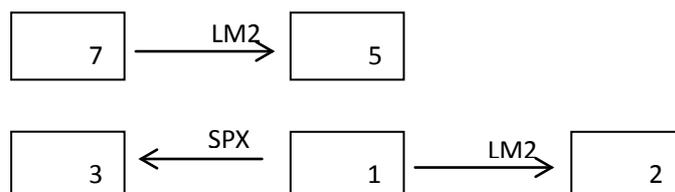


图 62 电压转化图

5.2.3 电机驱动模块

为了实现对脚部直流空心杯电机驱动，我们采用 L298N 电机驱动芯片。L298N 是 SGS 公司的产品，内部包含 4 通道逻辑驱动电路，是一种二相和四相电机的专用驱动器，接收标准 TTL 逻辑电平信号，可驱动 46V，2A 以下的电机。同一芯片上集成有 CMOS 控制电路和 DMOS 功率器件，利用它可以与主处理器、电机和增量型编码器构成一个完整的运动控制系统。

我们将其放置于分电路板上，正好驱动同一肢节脚部的两个电机，其电路图如图 63。

为了实现更为精确的控制，减少电机运转对控制芯片的影响。我们需要实现主控制芯片 STM32 和 L298N 物理隔离，使电机的运转不至于影响到控制芯片，我们在两者之间加入了光耦隔离。经过比较，我们选择 TLP521 作为隔离光耦。

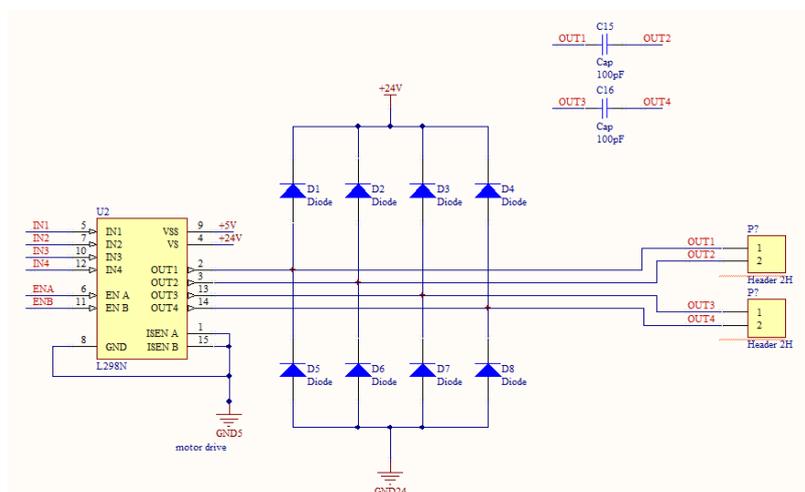


图 63 电机驱动电路

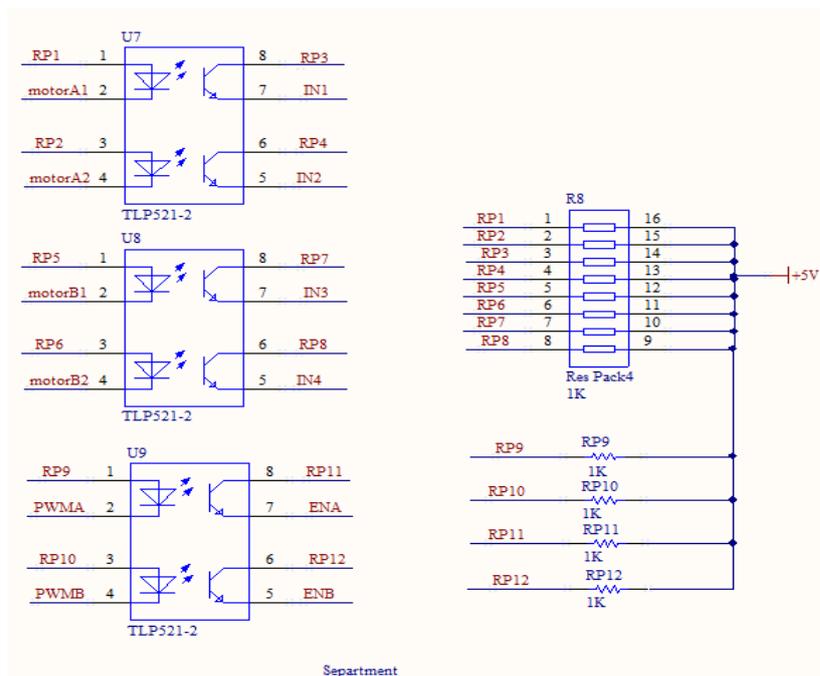


图 64 光耦隔离电路图

5.2.4 通讯模块

通讯模块主体分为两大部分，一部分是该机器人自身的通讯，另一部分是人机通讯。我们也将从这两方面进行介绍。

(1) 自身通讯

该机器人自身内部通讯也主要由两部分构成，一部分是主电路板与分电路板之间的通讯，主要实现主控制片对分控制片的同步操控。另一部分是分电路之间前后相互通讯，主要用来依次向后传递步态数据。

首先让我们分析一下主芯片 STM32 提供的通讯方式

A. I2C 总线通信。

STM32 提供了两个 I2C 总线接口，能够工作于多主模式或从模式，支持标准和快速模式。其支持 7 位或 10 位寻址，7 位从模式时支持双从地址寻址。内置了硬件 CRC 发生器/校验器。它们可以使用 DMA 操作并支持 SMBus 总线 2.0 版/PMBus 总线。

在速度方面，串行的 8 位双向数据传输位速率在标准模式下可达 100kbit/s，快速模式下可达 400kbit/s，高速模式下可达 3.4Mbit/s。

B. 通用同步/异步收发器 (USART)

STM32 提供了 3 个串口接口。接口通信速率可达 4.5 兆位/秒，其他接口的通信速率可达 2.25 兆位/秒。USART 接口具有硬件的 CTS 和 RTS 信号管理、支持 IrDASIRENDEC 传输编解码、兼容 ISO7816 的智能卡并提供 LIN 主/从功能。且所有 USART 接口都可以使用 DMA 操作。

C. 串行外设接口 (SPI)

STM32 提供了 2 个 SPI 接口，在从或主模式下，全双工和半双工的通信速率可达 18 兆位/秒。3 位的预分频器可产生 8 种主模式频率，可配置成每帧 8 位或 16 位。硬件的 CRC 产生/校验支持基本的 SD 卡和 MMC 模式。所有的 SPI 接口都可以使用 DMA 操作。

D. 其他

STM32 还提供了一个 USB2.0 全速接口，一个 CAN2.0B 主动接口。可以实现多种通信。

在比较了各总线的速度，实用性，以及管脚分布后。我们决定采用速度最快的 SPI 总线负责前后两肢节间的快速通讯。采用 USART 接口实现主控制板一对多的同时控制。即采用如下图 65 的通讯方式。

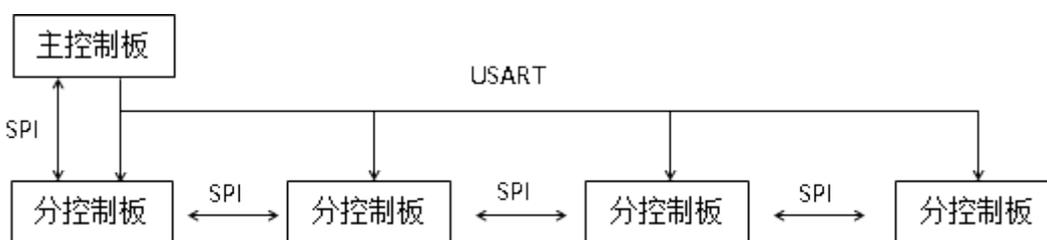


图 65 通讯方式图

由于串口通讯距离较长，未避免信号损耗，我们采用 MAX485 芯片作为串口通讯处理芯片。MAX485 接口芯片是 Maxim 公司的一种 RS-485 芯片。MAX485 的驱动器摆率不受限制，可以实现最高 2.5Mbps 的传输速率。这些收发器在驱动器禁用的空载或满载状态下，吸取的电源电流在 120 μ A 至 500 μ A 之间。所有器件都工作在 5V 单电源下。驱动器具有短路电流限制，并可以通过热关断电路将驱动器输出置为高阻状态。接收器输入具有失效保护特性，当输入开路时，可以确保逻辑高电平输出。具有较高的抗干扰性能。其电路如下：

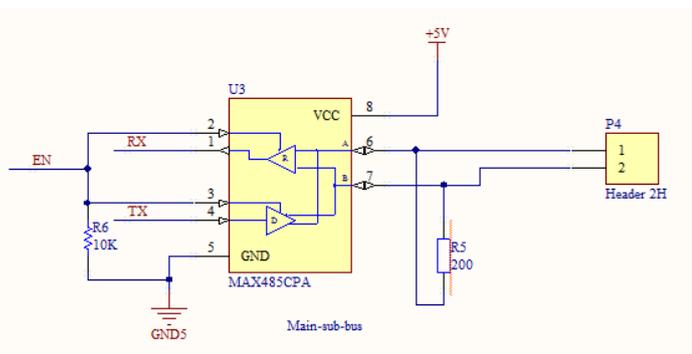


图 66 串口通信图

(2) 人机通讯

人机通讯主要用来实现操控者对该机器人的远程遥控。其主要是遥控器与主芯片之间的通讯。为了实现这一功能。我们采用 NRF24L01 无线芯片。NRF24L01 是一款工作在 2.4~2.5GHz

其电路图如下图 68。

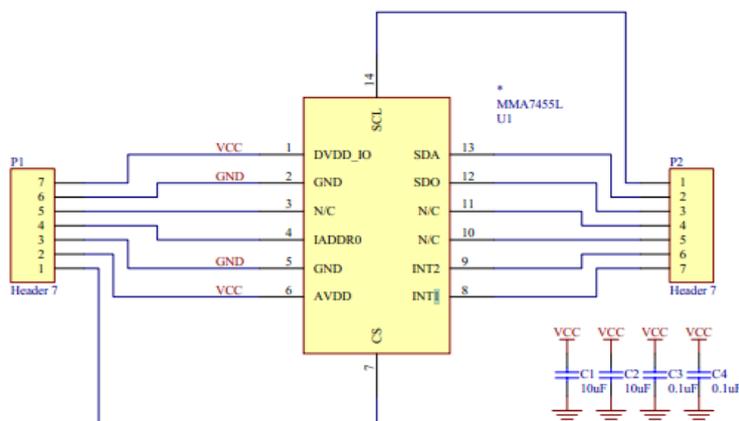


图 68 传感器电路图

加速度传感器是根据压电效应的原理来工作的。我们计算出产生电压和所施加的加速度之间的关系，就可以将加速度转化成电压输出。从而获得加速度数值。

(2)超声波传感器

我们选用 HC—SR04 作为我们的超声波测距工具。其可提供 2cm—400cm 的非接触式距离感测功能，测距精度可达 3mm；模块包括超声波发射器、接收器与控制电路。其通过 I2C 接口与主控制芯片相连。

其基本工作原理是：

- 1、采用 IO 口 TRIG 触发测距，给至少 10us 的高电平信号；
- 2、模块自动发送 8 个 40khz 的方波，自动检测是否有信号返回；
- 3、有信号返回，通过 IO 口 ECHO 输出一个高电平，高电平持续的时间就是超声波从发射到返回的时间。测试距离=（高电平时间×声速（340m/s））/2。



图 69 超声波传感器

我们利用超声波传感器主要是为了测量该机器人与家里物品的距离，预防其撞到墙或者其他家中物品，实现避障功能。

(3) 摄像头模块：

为了获取外界图像信息，增强该机器人的互动性。我们在该机器人上加装摄像头模块。其主要工作原理是：按一定的分辨率，以隔行扫描的方式采样图像上的点，当扫描到某点时，就通过图像传感芯片将该点处图像的灰度转换成与灰度成一一对应关系的电压值，然后将此电压值通过视频信号端输出。



图 70 摄像头模块

5.2.6 电机执行模块

该机器人采用多关节多驱动器驱动，其每一肢节（包括腰）上有 12 个驱动器，其中包括角位移伺服电机 10 个和直流空心杯电机 2 个。若构成 8 足形式时，共有 38 个角位移伺服电机和 8 个直流空心杯电机。

为了提高电机使用率，保证该机器人正常运行。我们依据不同关节处力矩大小对电机进行了合理选型。根据需要情况，使用不同扭矩的电机。



图 71 电机安放示意图

在腿部 Z 轴方向转动部分，由于所需力矩不大，若动作合理最大力矩小于 10KG·cm。所以我们采用辉盛 MG995 金属齿轮舵机伺服器提供动力。

表 4 辉盛 MG995 金属齿轮舵机伺服器参数表

工作电压	3.0V-7.2V
工作扭矩	13KG·cm
使用温度	-30~+60 ⁰ C
重量	55g
工作死区	4 微秒
结构材质	金属铜齿, 空心杯电机, 双滚珠轴承
反应转速	无负载速度 0.17 秒/60 度(4.8V); 0.13 秒/60 度(6.0V)
尺寸	40.7×19.7×42.9mm
连接线长度	30cm, 信号线(黄) 电源线(红线) 地线(暗红)

在腿部 Y 轴方向转动部分, 这是主要承受该机器人重力的部位。在某些步态过程中, 会承受高达 25KG·cm 的扭矩。MG995 的 13KG·cm 的扭矩不足以提供动力。于是我们选用 XQ-power 公司的 XQ-S4230D 金属齿轮舵机伺服器提供动力。在腰部水平方向转动部分, 我们也采用了此款舵机。

表 5 XQ-S4230D 金属齿轮舵机伺服器参数表

工作电压	9.6V-11.1V
工作扭矩	9.6V:24.5kg·cm 12V:30.8kg·cm
使用温度	-30~+60 ⁰ C
重量	56g
工作死区	4 微秒
结构材质	金属铜齿, 空心杯电机, 双滚珠轴承
反应转速	无负载速度 0.15 秒/60 度(9.6V); 0.13 秒/60 度(12V)
尺寸	40.2×20.1×38.8
连接线长度	30cm, 信号线(黄) 电源线(红线) 地线(暗红)

在腰部上下方向转动部分, 由于要提起整个肢节, 所需扭矩最大。故我们选用扭矩更大的 HITEC HS-7980TH 舵机提供动力, 其参数如下。

表 6 金属齿轮舵机 HS-7980TH 伺服器参数表

工作电压	9.6V-11.1V
工作扭矩	6V:38kg·cm 7.4V:46kg·cm
使用温度	-30~+600C
重量	76.54g
工作死区	4 微秒
结构材质	金属铜齿, 空心杯电机,双滚珠轴承
反应转速	无负载速度 0.20 秒/60 度(6V); 0.17 秒/60 度(7.4V)
尺寸	43.69 × 22.35 × 39.88
连接线长度	30cm, 信号线 (黄) 电源线 (红线) 地线(暗红)

表 7 型号为 MAXON 022-00.19-31 器件参数

额定电压	24V
转速	550RPM;
减速比	1:256
堵转扭矩	4.5Kg·cm (0.45N·m)
连续扭矩	1Kg·cm (0.1N·m)
尺寸	机身直径 22mm, 长 78mm, 轴径 4mm

在足部轮式转动部分, 我们选用 MAXON 直流有刷电机。其主要特点是: 体积小、重量轻、线性度好 (无齿槽效应)、转动惯量小、反应迅速、过载能力强、效率高、以及良好的抗电磁干扰能力等。

由于该机器人对直流电机的输出力矩有一定的要求, 选择瑞士 MANON 22mm 空心杯伺服减速电机, 带有电机集成编码器, 可以直接检测返回速度信息。



图 72 直流有刷电机 MAXON

5.3 程序控制的实现

5.3.1 结构分析

该机器人为多体节重复串联的结构。单体节包括一对足、一个腰，其中单个足具有 5 个自由度，单个腰具有 2 个自由度。有若串联 4 组体节，其中一节去除腰部结构，则需控制的关节数量达 46 个。其中在单个足部结构中，安装有 4 台舵机，一台 Maxon 直流有刷电机；在单个腰部结构中，安装有两台舵机。

在这种情况下，为有效地完成控制任务，控制系统需要具有以下特点：

- 1、具有良好的多组脉宽调制控制能力；
- 2、多组脉宽调制之间解耦；
- 3、具有良好的实时性，以保证运动的协调性；

5.3.2 程序设计

为达到控制的目的，并保证运动的效果，我们设计了三总线分层控制的方案。

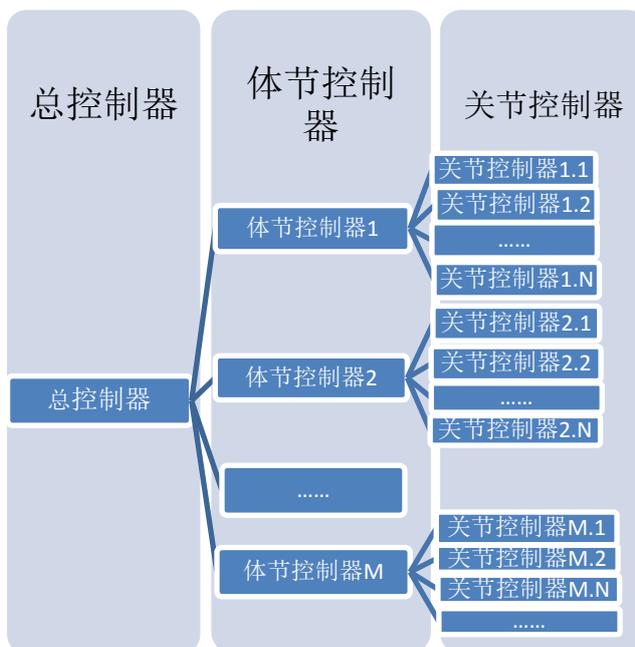


图 73 三层总线控制图

第一层为总控制器。控制下级体节控制器，并与外界通讯。在人机交互时对人指令进行识别、分析，确定行动方向及步态。

第二层为体节控制器。任务是：

- 1、根据指令，计算所在体节的各个关节每个时刻的具体运动角度；
- 2、对反馈的信息进行预处理，完成基本的反射行为，将有价值的信息向上级传递。

第三层是各个关节的驱动电路及直接控制器。三条总线分别为脊神经总线、相邻神经总线、心率总线。其中：脊神经总线与总控制器和体节控制器相连，用于总控制器发布命令，获得反馈数据。

相邻神经总线存在与相邻两体节之间，负责相邻两体节控制器的之间的数据通信。

心率总线与总控制器和体节控制器相连，总控制器通过心率总线控制整体的运动节奏，保证多个体节控制器的协调统一。

5.3.3 控制模式

我们选用 ST 公司的 STM32F103RB 微控制器作为主控制器与体节控制器。

ST 公司的 STM32 系列基于专为要求高性能、低成本、低功耗的嵌入式应用专门设计的 ARM Cortex-M3 内核。其外设包括：1 μ s 的双 12 位 ADC，4 兆位/秒的 UART，18 兆位/秒的 SPI，18MHz 的 I/O 翻转速度，集成了复位电路、低电压检测、调压器、精确的 RC 振荡器等。

ARM STM32 的硬件有如下特点：

- 供电电压：2V-3.6V
- 容忍 5V 的 I/O 管脚
- 优异的安全时钟模式
- 带唤醒功能的低功耗模式
- 内部 RC 振荡器
- 内嵌复位电路
- 工作温度范围：-40 ^\circ C +85 ^\circ C 或 105 ^\circ C

总控制器中,我们选用 USART3 作为脊神经总线接口, SPI2 作为相邻神经总线的主器件接口, RB6 为心率总线控制端。

体节控制器中, 我们依然选用 USART3 作为脊神经总线接口, SPI2 作为相邻神经总线的主器件。不同的是增加 SPI3 作为相邻神经总线的从器件接口, RB6 为心率总线接收端。所控制的自由度中, 有 10 个通过舵机提供动力, 由 2 个通过直流电机提供动力。舵机的控制信号为脉宽调制信号, 其周期固定, 由高电平所占时间长短来决定舵机输出的角度。直流电机通过驱动芯片驱动, 所需信号同样为脉宽调制信号, 不同的是由占空比来控制电机的转速, 以及两路电平

信号控制正反转。

通过以上分析，我们可以发现对于体节控制器而言，需要发出 12 路脉宽调制信号。通过查阅 STM10 开发手册，我们了解到 STM32F103RB 拥有 4 个时钟，其中时钟 1 为高级定时器时钟，可生成 6 路带死区的两两互补的脉宽调制信号，适合控制电机；时钟 2~4 为普通定时器时钟，每个时钟可生成 4 路周期相同的脉宽调制信号。在这里，我们选用时钟 2~4 生成 12 路周期相同的脉宽调制信号，分别作为 12 个自由度的控制信号。由于使用了 LN298 电机驱动芯片，所以在控制直流电机时可以不使用高级定时器 1，而将其留作它用。

脊神经总线同时与多个微控制器相连，进行通讯时，需区分不同的微控制器。STM32F103 的 USART 功能带有多处理器通讯模式，在此模式下，单帧传送的字节长度为 9b，其中最高位为 1 时为地址帧，最高位为 0 时为数据帧。当 STM32F103 收到自己的地址帧时，进入接收状态，当收到其他的地址帧时，进入静默状态，不接收此 USART 口的任何数据。

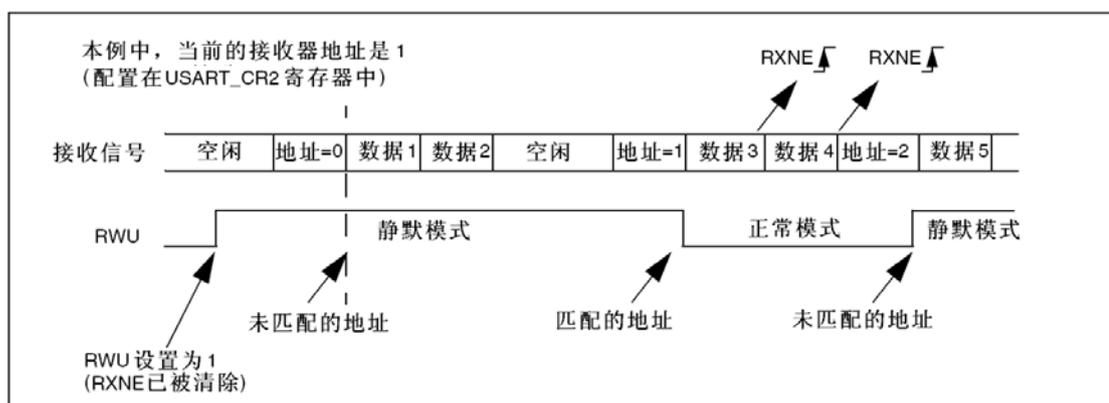


图 74 信号接收模式

至此，我们设计出以下两种控制程序模式及编写的思路：

1、直接命令模式

在总控制器中设置 systick 中断，在进入 systick 中断后，通过心率总线发布时钟信号，并检查是否需要发送指令。在需要发送指令时，将各个体节的关节的角度、速度值通过脊神经总线发给各个体节控制器。体节控制器在检测到自己的地址后，通过中断接收命令，存入指令队列。在收到心率总线发来的时钟信号后，进入外部中断，通过插值将现阶段的各个关节的角度计算出来，控制脉宽调制信号，并判断是否需要读取下一个指令。

2、传递指令模式

在总控制器中设置 systick 中断，在进入 systick 中断后，通过心率总线发布时钟信号，通过插值将下一组各个关节角度计算出来，通过相邻神经总线传递给下一个体节控制器，体节控制器通过 DMA 将指令存入队列。当体节控制器在收到心率总线发来的时钟信号后，进入外部中断，根据队列中的指令控制控制脉宽调制信号。

直接命令模式的优势在于可以将各个关节分别控制，但脊神经总线占用带宽大，尤其是体节数量增长时，对带宽的要求将会严重制约体节的数量。

传递指令模式的优势在于可以将指令逐级后传，体节数量的增加不会影响总控制器的负荷。

在实际编写控制程序中，我们综合了两种思路，对于试试性强的指令，我们采用直接命令模式，对于周期性的指令，我们采用传递指令模式。

程序流程图如下：

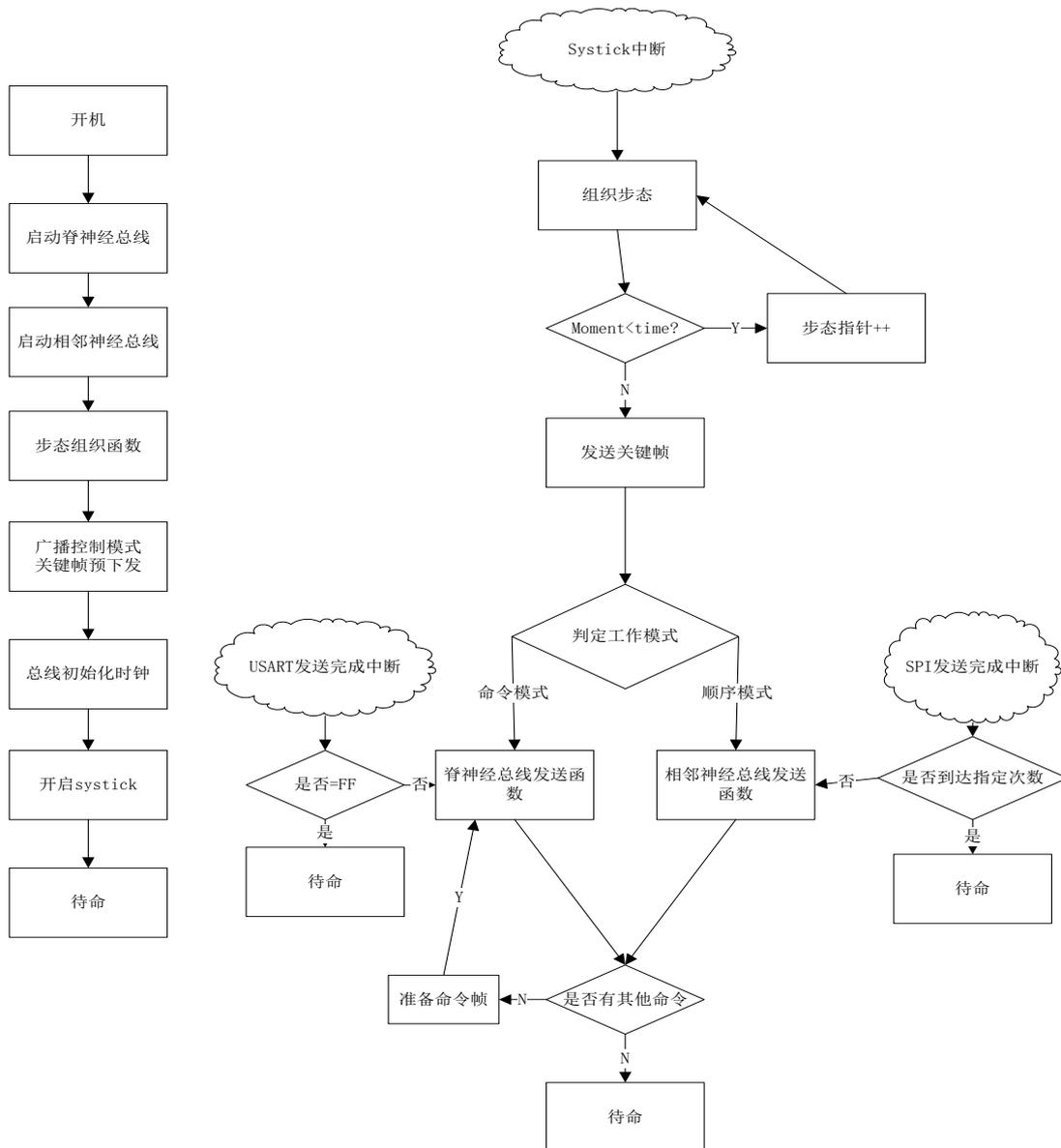


图 75 总控制器流程图

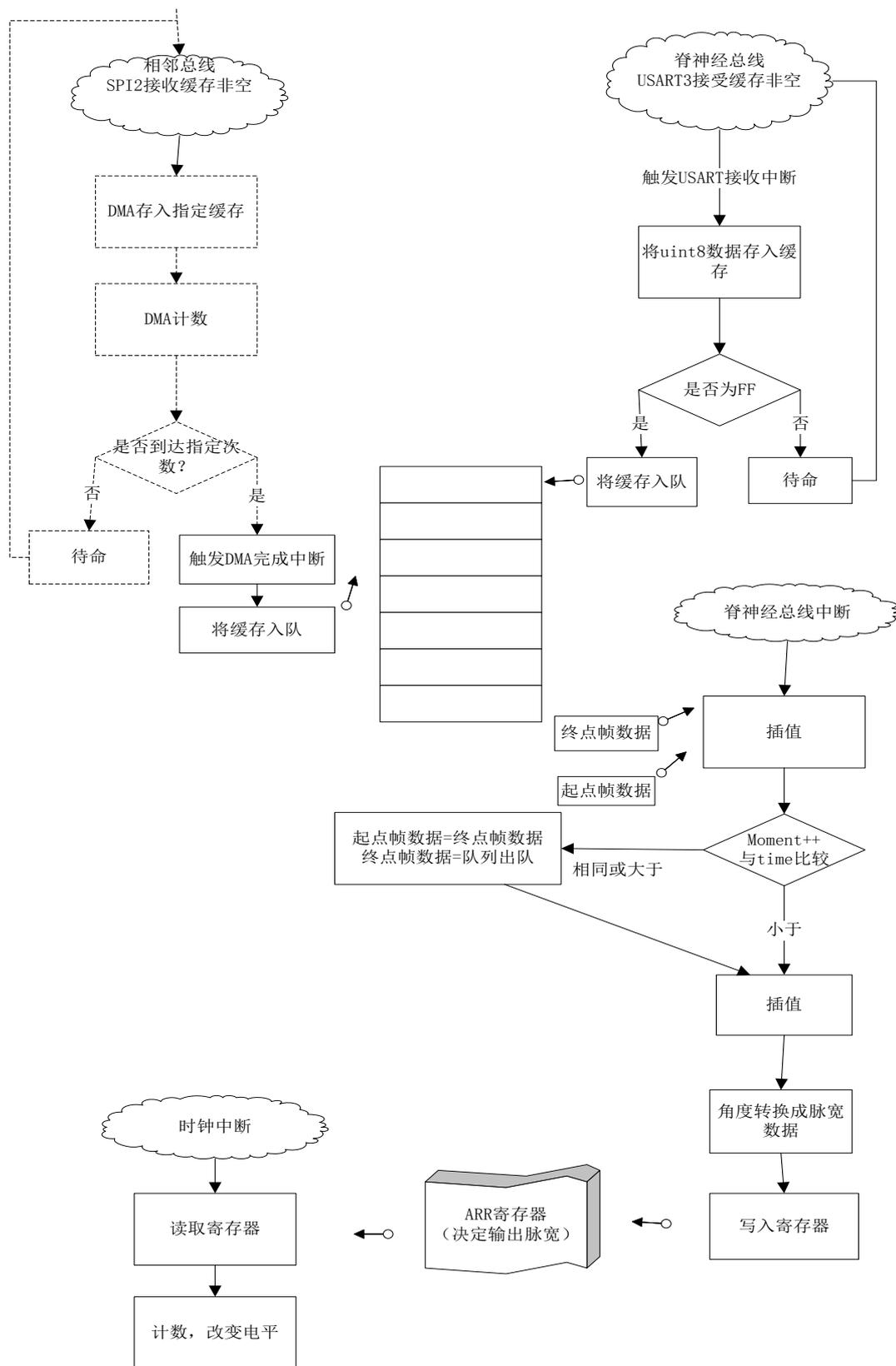


图 76 体节控制器流程图

5.3.4 控制重点

脉宽调制信号的产生：

STM32F103 中的定时器有六种模式，分别是输入捕获模式、PWM 输入模式、强制输出模式、输出比较模式、PWM 模式、单脉冲模式。这里，我们选用 PWM 模式，通过设置周期与高电平时间，我们可以将指令准确地以脉宽调制的形式表达出来，且无需占用核心资源，利用时钟本身即可控制引脚电平。

当需要通过遥控或其他方式控制时，只需将 Gait_Prepate 函数中 Act 的值交由所对应程序控制即可。

目前，通过实验，我们已经可以得到比较好的效果，控制多个体节协调运动。

六、作品设计总结

6.1 作品创新点

(1) 本作品在单运动足设计上的创新点有：系统构成上，每个运动足与机械本体构成开链结构关系，共有五个主动自由度；结构设计上，该运动足采用曲臂结构形式，使各个关节受力均匀；运动形式上，运动足的上部由四个关节组成，由直流角位移伺服电机驱动，可使该机器人实现腿式运动，运动足底部为一直流伺服电机，用来驱动负载小轮，可使该机器人实现轮式运动。依靠运动足的腿式曲臂设计和轮式设计，使其既有腿式该机器人地形适应性好的优点，又有轮式该机器人机动能力强的优点。

(2) 本作品在链接方式上的创新点有：该机器人每两个运动足与中间板连接成一个模块，可以通过腰部链接结构可将整体连接为 6 足到多足。通过链接式的模块化组合，使该机器人实现模块的自由增减，从而增强了该机器人运动步态和身体姿态的可塑性，具有很强的娱乐性。

(3) 本作品在运动方式上的创新点有：该机器人同时具备腿式与轮式机器人的运动特点，通过对电机的精确控制可以使该机器人逼真和流畅的展现实现几十种步态，腰部链接使该机器人可实现在起伏路面的行走，运动足与腰部链接模块的配合可使该机器人变换身体姿态，实现与人互动。

(4) 本作品在控制方式上的创新点有：控制系统采用分层递阶分布式的体系结构，遥控与自主控制相结合，协调控制几十甚至上百个电机。采用多轴伺服运动控制技术，实现控制方式的多层次模块化管理。

(5) 本作品在应用领域上的创新点有：首次将模块化设计应用于军事机器人，以适应不同的任务需要；将多自由度的轮腿式设计设计与二自由度腰部设计相结合，最大限度的提升地形适应力以及空间适应力；针对模块化的机械结构，率先采用分层递阶分布式的控制体系，为模块化多自由度腿式机器人提供了有效的控制理念。

6.2 方案评价

6.2.1 项目科学性

本作品设计到加工制作，到最后的组装调试，都依照现代工程师的标准，注重设计的巧妙、制作的精良、调试的可靠性等，从而使得最终的作品相对于其他类似的机器人具有无法比拟的优点。

在国内外，高自由度机器人设计上主要体现在手/腿和腰部结构的改进上，腿部通常采用 3 个自由度，也有多达 6-7 个，有 2 足的，也有多足的，有的单个模块甚至达 20 多个。腿部设计采用 3 个自由度使得运动的准确度不能够得到精确控制，采用过多的自由度又使得结构复杂，控制困难，可靠性难以保证。我们的机器人的腿部设计采用 5 个自由度，提高了运动精度，同

时用简化了结构设计，较容易制造安装，使得控制更加容易，可靠性得到保证。同时，我们的腿部结构设计中融合了一个直流伺服电机，使得机器人在良好的路面上具有更好的机动性。此外，在身体结构方面，为了克服现有的各类轮式、腿式机器人由于固连方式造成运动受到一定的限制，我们加入了拥有两个自由度的腰部结构。这样机器人本身可以实现姿态变形，能够越过更高的障碍，以及实现狭小 L 型、S 型通道的通行。虽然说国内也有一些人研究了三自由度腰部机构，但是只是在理论层面上进行设计和仿真，我们自行设计的二自由度腰部结构无论是在理论设计还是在实际测试中，可靠性和功能性都能够得到保证。由于腰部结构的灵活设计，不仅使机器人能够很容易地增减体节，也使得机器人的姿态数量大大增加。从样机的整体上来看，我们的机器人使用电机总数多达 46 个，步态多达 48 种，在国内外机器人中处于先进水平。

在国外具有代表性的是日本千叶大学曾研发的一款 Halluc II，与我们的机器人比较类似。由于技术封锁，我们无法了解相关的详细资料。但是，从实现的功能来看，我们的机器人不仅能够完成 Halluc II 所能完成的任务，由于我们添加了腰部结构设计，可以完成 Halluc II 无法完成的越障、攀爬等功能。由于我们的巧妙设计，与 Halluc II 的整机重量 20kg 相比，我们的机器人减轻为 12kg，减小了 67%。

此外，从整体上来看，我们的机器人还具有以下两个明显特点：

(1) 在整机构架方面，我们采用开放性较强的模块化设计，以达到节省产品开发成本、缩短开发周期的目的，也方便正式投入市场后的更新与升级；

(2) 在控制技术方面，我们选用 ST 公司的 STM32F103RB 微控制器作为主控制器与体节控制器。通过分层递阶分布式的体系结构，遥控与自主控制相结合，能够协调控制近百个电机。采用多轴伺服运动控制技术，实现了控制方式的多层次模块化管理，为脊椎式多节机器人的控制提供了一套比较系统、切实可行的控制方案。

6.2.2 存在的问题

虽然我们投入了大量的精力在该机器人的研发中，但由于技术水平以及研究经费的限制，该机器人仍然存在一些可以改进的地方。

1、腰部现在已经实现了绕 Z 轴与绕 X 轴方向的旋转，但缺少绕 Y 轴方向的旋转，如果能够加上这个方向的运动，该机器人的运动能够更加的灵活。

2、由于采用铝作为机械结构的主要材质，该机器人整体约为 10KG 左右，对于玩具来说还是重量偏大，移动不是特别方便。

3、8 足形式下需要 46 个电机，电机使用数量较多，使得该机器人整体稳定性不是特别高，控制难度较大。

4、由于电路线较多，而且直接暴露在外面，容易造成刮擦扯拽，影响美观。

6.2.3 改进建议

针对上述提出的问题，我们想到了一些改进的方案。如果以后投入市场或者有机会造下一代该机器人时，我们会将其融入到新的设计中。

1、重设腰部结构，增加 Y 轴方向的旋转，增加前后两节上下滑移的装置，使得该机器人能够保持较好的形态。

2、采用塑料或是其他的较轻的材料作为机械结构的材料，对受力不是特别大的地方再次进行减重处理。

3、制作一整套较为完备的控制系统，由于该机器人确实存在这么多需要控制的自由度，我们只能在电路以及控制方面提高稳定性。

4、在机械结构上预设埋线的沟道，将连接线藏在其中。使的外观更为漂亮，且整体性更强。

6.3 应用前景及市场价值

该机器人将轮式运动与腿式运动相结合，在不同类型的地面上均能较为有效地行进。腰部关节的设计又极大地增强了其身躯姿态在多个维度上的主动变化。具体地讲，基本姿态下的轮式运动形式，可使机器人在平坦地面上快速灵活行进。腰部与腿部协调配合，则可令机器人在坑洼、乱石地面上有效行走，并完成攀爬楼梯甚至翻越路障的任务。

因此此款机器人卓越的运动性能为其多样全面的实用性做好了支撑。

6.3.1 军用领域

在现今愈发现代化的战场环境中，在对战场环境侦查和复杂地形中目标的精确打击等任务越来越高的要求下，对地面环境适应能力强的机器人成为了十分重要的需求。

此款机器人在较为平坦的人工地面上行进速度快，运动反应迅速；在复杂的自然地形中，如高低不平，坑洼遍布的森林环境中，亦或是乱石及较为泥泞的地面上，即在轮式运动已不现实的环境中，机器人可以采用越障能力较强的腿式行进方式，并结合腰部在竖直方向上的配合辅助，实现有效行进。另外，在狭小扭曲的管道式或倒塌建筑环境中，机器人精心设计的具有驱动力的腰部则能使其灵活扭转，可钻可翻。

当机器人携带小型探测设备，如摄像照相装置等进入敌区复杂地形环境中，便可实施侦察任务。另一方面，若以增加体节数量的方式增强机器人的负载能力，使其背负爆炸装置等具有打击功能的组件，亦可使其执行复杂环境中精确打击的任务。

6.3.2 警用领域

在打击犯罪分子、捣毁犯罪窝点，以及解救人质等任务中，同样对环境侦查具有很高的要求。而且，在警用领域，待测环境中的人工设施所占比例更大，而对侦查隐蔽性的要求同样严格。因而此款机器人同样大有用武之地。其对复杂地形良好的适应能力、小巧隐蔽的形态相信

能够很好地配合武装特警在重要而艰难的任务中取得成果。

6.3.3 民用领域

(1)该机器人姿态灵活，运动形式多样，协调组织规划可使其运动极具美感，具有很好的展示表演特性，配合其人性的智能系统实现新颖的人机互动，能使其在电子娱乐产品中大有发展前途。

(2)该机器人综合应用了多方面的电子机械技术，可方便地编程控制，且为大学生自己创作的科技创新作品，具有示范意义，因此作为大学科研教具也具有深刻的教育意义。

6.3.4 市场价值

当然，为实现这些功能，今后我们还要在现在的基础上加装视觉传感系统、远程遥控系统以及更为丰富的运动传感器。进一步展望，将卫星导航技术或无线传感器网络技术应用其上，可使其更能满足军用警用的需求。另一方面，若专门向电子宠物方向发展，可以通过采用轻巧材料、缩小体积等方法削减制造成本，使其产品化。相信丰富的步态与智能的人机互动功能也会使其在电子玩具市场大放光彩。

首先，由于我们采用模块化设计，在电源组体节，主控芯片体节兼有的情况下，可以由使用者自由增添体节，组装成任意长度进行运动。这种功能可使该机器人对不同的用途产生更好的适应性，比如作为侦查机器人时可仅留下两个体节，带给使用者极大的自由。而作为电子宠物，自由增添体节能够提升使用者的兴趣，对儿童使用者起到锻炼智力的作用。

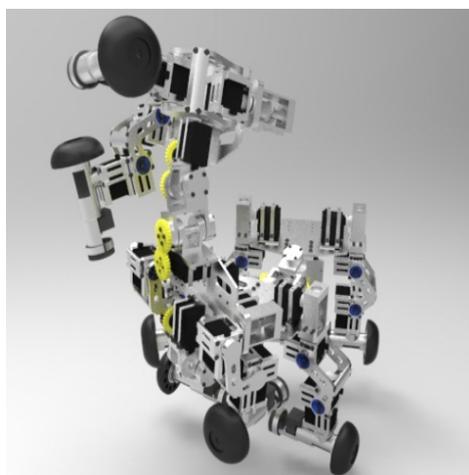


图 77 机器人姿态变形图

其次，我们的“神行太保”多用途机器人既可以如同索尼的机械狗一样，展现各种步态舞蹈，与人进行互动，还能如同变形金刚一样改变自己的身体形状，呈现各种造型，具有极大的自由度，可以由操作者进行控制。人机交流充分，能够吸引操作者的目光。

再次，倘若投入市场生产，全机骨架可以用塑压成型的方式制作，不仅可以大大减少成本，而且由于材料换成塑料，整体动作需要的动力也将减少，我们能选用更便宜的电机，加之模块

化设计，整机成本可以控制在 500 块左右，价格上有一定竞争力。且整体质量大为减少，更加适宜走入寻常百姓家。

七、参考文献

- [1] 张杨,韩宝玲,罗庆生等.基于虚拟样机技术的仿生六足机器人的动力学研究[J].机械设计与制造,2008,(3):145-147.
- [2] 罗庆生, 韩宝玲, 毛新等.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, 2006, 22(2): 17-21.
- [3] 赵小川、罗庆生、韩宝玲、徐嘉、潘登.仿生六足机器人实时避障控制技术[J].机械与电子.2007年2月.第2期.P57-P59
- [4] 黄麟, 韩宝玲, 罗庆生等.仿生六足机器人步态规划策略实验研究[J].华中科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(12): 72-75.
- [5] 毛新, 罗庆生, 韩宝玲等.仿生六足爬行机器人运动控制技术研究[J].计算机测量与控制, 2006, 14(3): 348-350.
- [6] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京: 清华大学出版社.2000.
- [7] 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[J].机械工程学报.2003, 39(2): 8-12.
- [8] 王新杰.多足步行机器人运动及力规划研究[D].华中科技大学.20051020.
- [9] 苏军.多足步行机器人步态规划及控制的研究[D].华中科技大学.20040430.
- [10] 陈学东, 周明浩, 孙翊等.模块化多足步行机器人的运动控制系统研究[J].中国机械工程, 2006, 17(10): 1071-1074.
- [11] 陈殿生,黄宇,王田苗等.轮式腿型机器人的越障分析与仿真[J].北京航空航天大学学报,2009,35(3):371-375.
- [12] R.S. Mosher, Test and Evaluation of aVersatile Walking Truck, in: Procs. Off-Road Mobility Research Symp.,1968, pp. 359-379.
- [13] H. Kimura and Y,Fukuoka. Adaptive Dynamic Walking of the Quadruped on IrregularTerrain: autonomous adaptation using neural system model, Procs. of the 2000 IEEEInt . Conf. onRobotics&Automation,2000,PP.436-443
- [14] Bo-HeeLee,In-Ku Lee.The implementation of the gait and body structure forhexapod robot[J], Industrial Electronic, ISIS 2001, IEEE International Symposium on, 2001. Vol 3: 1959-1964
- [15] X.D. Chen, Novel Formulation of Static Stability for a Walking Quadruped Robot[J]. ofMechanical Engineering, 2003, 16(2): 120-122
- [16] J. Furusho, Evolution of Research on Legged Locomotion[J] of the Robotic Society of

- Japan,1993, 11(3), pp. 306-313.
- [17] Ijspeert, AJ, Crespi, A,Ryczko, Detal. From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model[J].Science, 2007, 315(5817): 1416-1420.DOI: 10.1126/science.1138353.
- [18] Grillner S. Neurobiological bases of rhythmic motor acts in vertebrates[J]. Science, 1985, 228:143-149.DOI:10.1126/science.3975635.
- [19] Aoi, S.; Sasaki, H.; Tsuchiya, K. Turning maneuvers of a multi-legged modular robot using its inherent dynamic characteristics. 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IEEE Cat. No. 06CH37780D): 1 4244 0258 1, p 180-5, 2006
- [20]Inagaki, S.; Niwa, T.; Suzuki, T.Follow-the-Contact-Point gait control of centipede-like multi-legged robot to navigate and walk on uneven terrain.Intelligent Robots and Systems (IROS)[J], 2010 IEEE/RSJ International Conference on Digital Object Identifier: 10.1109/IROS.2010.5651324 , 2010 , Page(s): 5341 - 5346