

## 摘要

在各种地形方面，相较于履带式移动机器人和轮式一定机器人，足式机器人对复杂的地形有着更好的适应性，并且这种足式设计可以协助甚至代替人类进行复杂、危险的各种工作。为适应更多的地形，六足仿生机器人便需要更为复杂、精妙的机械结构。本次毕业设计着眼于六足仿生机器人的机械结构设计，其中包括机器人的自由度分析，腿部关节设计，机器人材料、电机、传感器选型。本次设计过程借助 SolidWorks 软件进行机械结构的绘制，并使用 ABAQUS 进行有限元分析（FEA），以得出最稳定可靠的六足仿生机器人结构。最终设计出一个可以投入生产并进行编程的六足仿生机器人，从而可以应用到人类生活中短途货物运输等领域，为人类的生活带来更多便捷。

**关键词：**六足仿生机器人；SolidWorks；ABAQUS；有限元分析；机械结构

## **Abstract**

Compared to wheeled robots and tracked robots, hexapod robots can adapt well to more complex terrains, and they can also assist even replace human work which is complex and dangerous. To adapt to more terrain, it is required that hexapod robots should be designed with more complex and sophisticated mechanical structures. The graduation design focuses on the mechanical structure of the hexapod robot, which includes the robot's freedom, joint, material, servo motors and sensors. In the project, I made use of SolidWorks, a solid modeling CAD and CAE computer program, to design the hexapod robot. And I used ABAQUS for Finite Element Analysis (FEA) to get the most stable and reliable structure of hexapod robot. Finally, we made a hexapod robot which can be put into production and programmed, so that it can be applied to human's life when we need to transport goods in a short-distance. And bring more convenience to human life.

**Keywords:** Hexapod Robot; SolidWorks; ABAQUS; FEA; Mechanical

# 目 录

1 绪论	1
1.1 六足机器人研究背景及研究意义	1
1.2 国内外对六足仿生机器人的研究现状	2
1.3 本论文的内容安排	5
2 六足仿生机器人仿生学分析	7
2.1 昆虫腿部结构分析	7
2.2 六足仿生机器人结构分析	7
2.3 方案的可行性分析	8
3 六足仿生机器人设计与建模	9
3.1 SolidWorks 简介	9
3.2 硬件的原理与选型	9
3.2.1 舵机的原理	9
3.2.2 多种舵机的性能参数对比	10
3.2.3 SG90 的确定与建模	13
3.4 腿部结构的设计与建模	16
3.4.1 腿部工作原理	16
3.4.2 腿部建模	18
3.5 框架结构的设计与建模	20
3.5.1 舵机安装板	20
3.5.2 机体底盘	21
3.6 机器人装配图与整体质量计算	22
4 支撑腿的力学分析	24
4.1 ABAQUS 简介	24
4.2 静应力分析	24
4.2.1 静止时所受重力	24
4.2.3 运动时摩擦力下的应力和应变	25
5 结论与展望	28
谢辞	29
参考文献	30
附录	31

# 1 绪论

## 1.1 六足机器人研究背景及研究意义

在这个日新月异的社会中，人类也一直在这个宇宙中探寻着更多的未知。机器人系统已经成为推动这个时代进步的一大重要力量，机器人系统不仅由机器人组成，还需要其他装置和系统的协调配合来实现各种功能，完成多样的任务。并且，机器人也在人们的生活中扮演着越来越重要的角色，遍布于生活中的各种机器人，也极大地方便了我们的生活，提高了我们的生活质量。机器人已经成为多学科、多领域的结合体。自主移动机器人已经成为相关行业研究的焦点，并且被国家列入 863 重大课题 Error! Reference source not found.。

当今机器人的发展迅速，种类也繁多，其中自主式移动机器人作为其中一大类也可分为三个主要类别，其分别为：轮式移动机器人、履带式移动机器人和足式移动机器人。在这三者当中，履带式机器人接触地面时由于履带的接触面较大，对地面的压力较小，并且履带式机器人在柔软地面上工作时，可以更好地贴合地面，有着很好的传递性能。可是，履带式移动机器人也有着很多缺点，比如运动缓慢、工作效率低下，并且由于履带接触面积较大，会产生更大的噪声，一般会运用在户外空旷的地方。

轮式机器人也有着许多优点，它相对于履带式机器人来说重量更轻，只需安装滚轮，结构相对简单，驱动和控制该机器人也会相对简单，尽管滚轮式机器人速度较快，但是由于滚轮的结构设计，它对地面的要求也相对更高，一般只应用在相对平坦的路面。而足式移动机器人便可以更好地适应各种地形，尽管地形复杂，由于足部的多关节、多自由度设计会使得机器人更好地避过障碍。而且在设计足式机器人时可以参考自然界中已有的生物足部结构来进行仿生设计。这样设计出来的仿生机器人不仅能够适应恶劣环境，还能够各种恶劣环境之下执行多样任务，为人类提供极大的帮助。并且得益于足部较高的自由度和精妙的关节设计，使得足式机器人具有高精度、高可靠、高灵活性的优点。

本文研究的是六足仿生移动机器人也称蜘蛛机器人，足式机器人也将是未来移动机器人的研究重点，这类机器人主要有以下几个特点：

第一、足式机器人得益于机器人的足部接触点为一系列离散点，移动时只需要足部末端与地面接触，可以更好地适应外部复杂多变的地形环境，可以轻松跨过各种障碍物，而不是对作业的地形有着类似轮式和履带式移动机器人的严格要求。并且，由于足式机器人都有数对腿组成，因此，但机器人有一两条腿受到损坏或者无法正常工作时，足式机器人依旧可以移动，以保证最大化地减小可能造成的工作损失。

第二、足部机器人的腿部有多个关节，其相对独立地将各个连杆连接在一起，多自

由度显著提高了移动机器人的灵活性，并且可以调节各个关节的摆角使得机器人的重心在合适位置，以保证机器人能够处于最稳定的状态，从而使得工作的顺利进行。

第三、足式机器人的机体和地面是分离的，这使得足式机器人有着更好的减震效果，为机器人的稳定作业提供了良好的平台，同时也在移动程度上延长了机器人的使用寿命，降低了机器人工作的风险。

## 1.2 国内外对六足仿生机器人的研究现状

昆虫仿生学、机器人机构学以及计算机信息控制技术等学科不断的发展与融合，仿生学机器人成为机器人领域中人们关注的热点 Error! Reference source not found.。国外相较于国内在这方面的研究较早，技术沉淀也相对较多，如今随着国家的重视，国内在仿生机器人的研究也加大了投入，国内外也相继研发了多种仿生机器人。



图 1.1 Quadruped 机器人

如图 1.1 所示，1984-1987 年间，Quadruped 由 MIT Leg Lab 设计并制作出来，该机器人长 1.05 公尺，高 0.96 公尺，腿部是长长的柱状结构，每条腿连接身体的关节是由两对液压制动器组成，分别控制着腿的旋转。在控制上，该机器人实现了三种不同速度奔跑的三种步态，最快的奔跑速度可以达到体长的 3.5 倍，并且该机器人有着良好的稳定性。



图 1.2 Attila 机器人



图 1.3 Hannibal 机器人

如图 1.2 和图 1.3 所示, Attila 和 Hannibal 于 1990 年代初期在 Mobot Lab 中建成, 它们是该实验室建造的第一批机器人, 可以作为自主行星探索的实验平台。这两个机器人在结构上是相同的, 只是颜色不同 (Attila 是金色, Hannibal 是红色)。该机器人 35 公分长, 15 公分高、2.8 公斤重, 共有 19 个自由度, 超过 60 个传感器和超过 8 个微处理器可以更好地实时监测周围环境, 以保证机器人稳定工作, 这在当时也被认为是最先进的自主机器人之一。



图 1.4 RHex 六足机器人

如图 1.4 所示, RHex 是一种可以完成许多功能的自主式机器人, 其最高速度可以超过每秒 5 个机身长度, 并且可以上下楼梯, 走 45 度斜坡, 爬越超过自身 2 倍腿长的障碍物。当 RHex 翻到时, 也可以凭借自身结构弹回到原来状态, 且其可以跳跃 30 公分远等等。RHex 每只足仅有一个旋转自由度, 但由于其腿部的半圆形结构, 以及该弹性材料的支持, 使得 RHex 在运动时的动能和弹性势能之间的转换, 并完成各种特殊的动作。并且该平台也作为水下版 AquaRHex 的基础, 将 RHex 是将脚改成鳍状, 可在水中任意移动, 而 Wheel RHex 是把六隻脚改成轮子。



图 1.5 波士顿机械狗（Boston Dynamics BigDog）

如图 1.5 所示，BigDog 是由波士顿动力公司设计生产的四足动力平衡机器人，它可以行走、跑步、跳跃，并承载重物，由于它有着极好的稳定性，即使你使用很大力去踢它，它也可以保持稳定而不倒下。BigDog 项目最开始是由美国国防部出资创建的项目，它可以协助士兵在传统车辆无法行驶的复杂地形上作战。BigDog 体长一米，高 0.7 米，重达 75 千克，可是它在负载两倍自身重量的的情况下依旧可以以时速 5.3 公里的速度在复杂的地形中行走。BigDog 的内部装有一台计算机，在配合身体各处的传感器的情况下，计算机迅速处理这些反馈信息，以调节自身的位姿。并且 BigDog 机器人可以攀越 35 度的斜坡，可以沿着既定的简单路线行进，也具有跟随功能，并进行远程控制等多种功能。

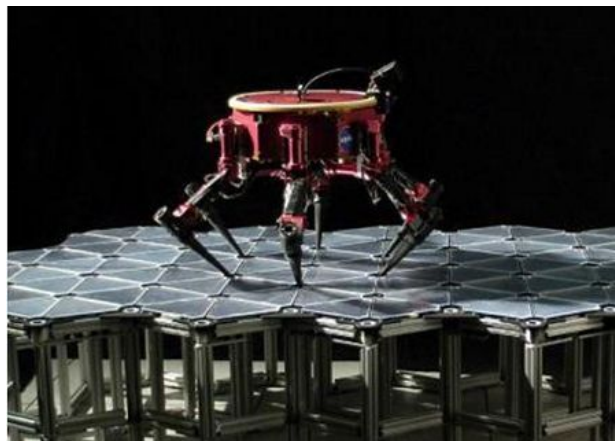


图 1.6 LEMUR 六足机器人

如图 1.6 所示，2005 年时，美国航天部研制的一款六足步行机器人 LEMUR，可在太空中维修、探测及小尺寸安装等太空操作。LEMUR 的结构设计是把章鱼身体和螃蟹腿为原型设计，拥有六条坚硬的机械结构手臂，每个臂包含五个自由度，至今已在原有基



础上进一步开发出两种新型六足机器人，优化版的 LEMUR LIA 可以在太空中协助宇航员建造稍微大型的工程。

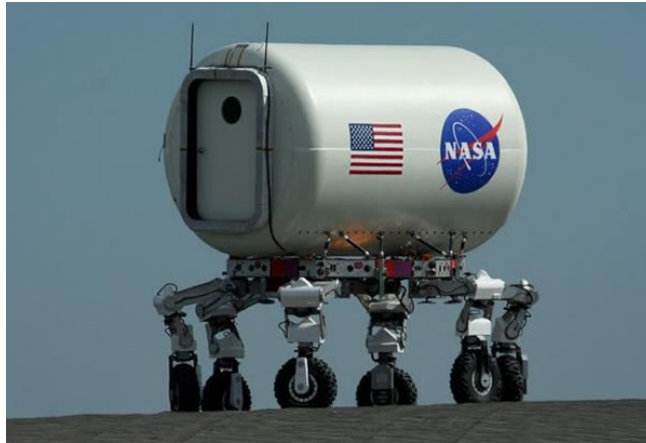


图 1.7 Athlete 航天机器人

如图 1.7 所示，在 2013 年于旧金山举行的游戏开发大会上，美国宇航局代表团展出了一款新型“六英尺机器人”，被命名为 Athlete<sup>Error! Reference source not found.</sup>。它由美国宇航局研发中心研制，它使用远距离遥控系统，来控制机器人的前进、后退、拐弯和跳跃等。来自研发中心的科学家普多·罗德与鲍勃·康夫进行的试验示范。Athlete 是一种可以在其他星球上适应各种地形的天体探险者，它配备了带有 6 个负重轮的 6 条腿，各种灵活精巧的关节也被设计在机器人腿部，并且 Athlete 可以在较大的范围内移动。Athlete 可以在各种复杂的地形中移动，并且腿部在转弯时也非常方便。Athlete 机器人整体长约为 13 英尺，由于腿部配有非常灵活的六个轮子，因此在各种复杂的地形之下都有着很好的适应性，并且 Athlete 可以装载和卸载大型货物，能够爬上 36 度的斜坡。它的六个全方位轮在相互配合之下，可以确保整个机体的稳定性。

国内多足仿生机器人的发展较晚，但在国家政策的推动下，各个高校的高度重视，以及当代大学生对机器人学和相关专业的热情与兴趣，国内多足仿生机器人也开始进入了蓬勃发展阶段，也有了较为深厚的技术与经验的沉淀。

上个世纪 80 年代中国科学院研究出八足螃蟹步行机器人，1989 年又联合沈阳自动化学院在此基础上研制了六足的移动机器人。2002 年，上海交通大学研制出体型更小的微型六足爬行机器人，这一机器人实现了更多的功能，体现了更高的仿生移动机器人更高的发展水平。

### 1.3 本论文的内容安排

本篇论文立足于本科阶段学过的各种专业基础学科，其中包含机械制图、机械原理、机械设计基础、工程力学等相关学科知识，并广泛阅读了与仿生机器人结构设计相关的

论文，以便为自己之后的机器人结构设计做很好的准备。

首先，我研究了六足机器人的发展背景并了解了国内外的发展现状，然后开始自己的研究，并希望做出一定的改善。我运用了机械原理以及机械设计等方面的相关知识，对机器人腿部进行自由度分析和机体设计，并使用 SolidWorks 对腿部和机体进行三维建模。在大致确定机体各个参数之后，对本次设计的所需制造材料进行选材，并使用有限元分析软件 ABAQUS 对该机器人的关键部位（足部）进行静力学分析，以探究该设计是否能正常工作，并改善该结构设计，以寻求最优解。

最后，对本次研究成果做出总结，总结优缺点，并提出自己的展望，以及对自己今后的发展做一定的规划。

## 2 六足仿生机器人仿生学分析

### 2.1 昆虫腿部结构分析

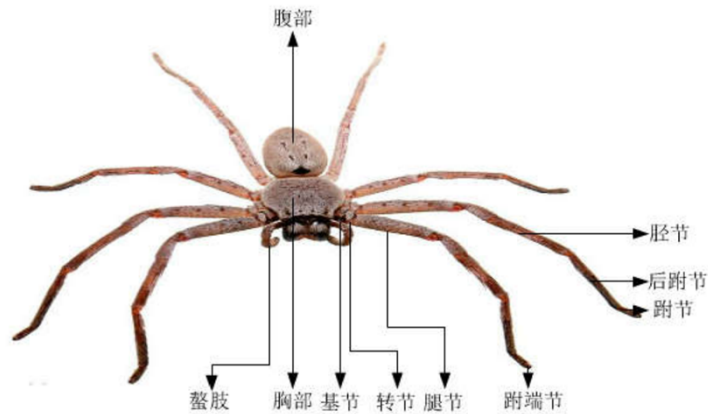


图 2.1 蜘蛛身体结构示意图

如图 2.1 所示，胸部和腹部两大部分组成了蜘蛛的身体，蜘蛛步足共有 4 对，在动物学上分别为基节、转节、腿节、膝节、胫节、后附节、附节和附端节（上具爪）。蜘蛛的膝部长有肌肉，它的功能是使腿得以弯曲，但是不能反方向动作使腿伸直 Error! Reference source not found.。这些肌肉和关节的组成也使得蜘蛛的腿部有着更好的灵活性，使得蜘蛛可以在复杂的环境中行走。

### 2.2 六足仿生机器人结构分析

经过查阅相关昆虫学资料，发现自然界中绝大多数昆虫的腿部是对称分布的，并且其足部一般都落在一个较稳定的椭圆形之内，这有别于我之前所想到的这些腿行走时所落在的区域应该在一个矩形之内。



图 2.2 蜘蛛行走的腿部位置示意图

如图 2.2 所示，经过以上分析，决定将该六足仿生机器人的机体也设置成近似椭圆形，这种设置方法相对于长方形有着极大的优势。为了保证行走的稳定性，多足仿蜘蛛机器人在行走过程中，机体重心的投影必须落在三条支撑足所构成的三角形区域内<sup>Error!</sup>Reference source not found。为做到这一点，在设计机器人腿部结构位置的时候，应当尽可能将三只足支撑时足部尖端的连线形成一个近似的正三角形，并且整个机体结构大致轮廓是该三角形的外接椭圆。

首先，椭圆形的机体设置大大扩大了机器人腿部的活动范围，这使得机器人可以更好地触及到范围内尽可能多的点；其次，椭圆形的机体设置提升了机器人的稳定性、可靠性，使得机器人整体的重心更为集中分布在固定区域，大大减少了计算量，提高工作的效率；最后，椭圆形的机体设置也大大降低了各个腿部之间的碰撞摩擦率，增强了机器人工作的稳定性。

## 2.3 方案的可行性分析

本课题的主要目的是开发一种小型化的拥有各种传感器与相对完善的舵机控制系统的可以在规则化地形上达到稳定、灵活、并拥有一些自主判断能力的六足机器人。在此基础上，对机器人的结构进行了分析，并对其进行受力分析。具体内容如下：

(1) 六足机器人结构设计六足机器人的结构是整体设计最根本甚至最重要的一部分，将直接影响机器人的运动灵活性。本设计以蜘蛛腿部结构为仿生原型，通过多方面考虑，最终设计出质量轻、体积小、可靠性高、传感器集成化、关节模块化、运动平稳灵活的六足机器人。

(2) 六足机器人功能仿真对设计的机器人进行建模与有限元分析，确定其可靠性。

## 3 六足仿生机器人设计与建模

### 3.1 SolidWorks 简介



图 3.1 SolidWork 标志

SolidWorks 是世界上第一个基于 Windows 开发的三维实体设计软件，该软件以参数化特征造型为基础，具有功能强大、易学易用和技术创新等特点使得 SolidWorks 成为领先的、主流的三维 CAD 解决方案 Error! Reference source not found.。

本次选用 SolidWorks 进行六足仿生机器人三维设计，一定程度上使得后期的软件仿真更为便捷，以及其六足仿生机器人关键部位的有限元分析。

### 3.2 硬件的原理与选型

#### 3.2.1 舵机的原理

舵机是一种位置或者说角度伺服的驱动器，适用于那些需要角度不断变化并可以保持的控制系统 Error! Reference source not found.。由于舵机的小巧性、便捷性，其广泛应用于各种小型器械中，其中我们最常见的莫过于身边的儿童玩具。其动力较小，可以尽可能降低对小孩的误伤概率。

在一个机器人机电控制系统中，这之间有多个舵机协同作用，控制着机器人的工作，因此，舵机控制效果对机器人的性能显得尤为重要。在微电机系统（Micro Electromechanical System）和航模中，舵机可以作为被它们控制的输出执行机构，这也需要舵机的结构和控制输出要相对简单，这样使得单片机系统可以更加简单地与其连接，并传输输出与控制命令。

当舵机信号线向舵机内部的信号控制板发出转动信号，然后后者控制舵机按照其接收到的信号命令进行转动，包括正反转、转速和转过的角度。然后舵机在转动的过

程中，由于舵机内部有减速齿轮组，减速齿轮组的作用是放大舵机的转矩，经过舵机减速齿轮组减速放大转矩之后，可获得较大的转矩。舵机是一个闭环系统，在舵机的控制电路接收到控制信号后会通过位置反馈电位计的反馈信号对比舵机输出轴的位置，以此来判断电机的转动方向和速度 Error! Reference source not found.。当输出轴到达信号命令指定目标位置时，位置反馈电位计则同时向控制电路板发送一个反馈电压信号，然后控制电路板根据反馈电压信号判断目标是否实现控制，若从反馈电压信号中舵机的转动方向，角度以实现，则控制电路板将停止内部电动机的转动。

舵机所用的齿轮有金属、塑料和混合齿轮之分。金属齿轮的成本高，相应的它的齿轮强度也高，装配要求也相对较高，若是装配精度较低，那么金属齿轮在传动时会有较大的噪声产生；相反，塑料齿轮的成本低，因为是塑料齿轮，所以其齿轮强度相比于金属齿轮来说非常低，所以塑料齿轮舵机的使用寿命非常短，当然，这是相对于金属齿轮舵机而已。但是塑料齿轮舵机在同样装配条件下，它的传动噪音要比金属齿轮舵机小很多。混合材料齿轮的舵机，其性能介于金属齿轮舵机与塑料齿轮舵机之间。

### 3.2.2 多种舵机的性能参数对比

在选择舵机时，我们首先要了解它的性能指标以及各种参数，本次实验中，我们主要考虑到舵机的尺寸、转矩、转速、重量、电压和材质等。这些参数对舵机的选型非常重要，关系到后面的机械结构设计，因为本次毕业设计遥控六足机器人的机械设计部分的尺寸都是基于舵机开始的，然后在便于安装舵机的情况下设计腿部结构，进而设计出整个机体的结构。在此列出舵机的主要性能参数如表 3.1 所示。

表 3.1 舵机的主要性能参数

舵机的性能参数	舵机性能参数说明
转速	转速由舵机在无负载情况下转过 $60^\circ$ 角所需要的时间来衡量。舵机常用的速度一般在 $0.11s/60^\circ \sim 0.21s/60^\circ$ 之间
转矩	舵机转矩的单位是 $kg \cdot cm$ ，可以理解为在舵盘上距舵机轴中心水平距离 $1cm$ 处，舵机能够带动的物体重量
电压	舵机的工作电压对其性能有着重大的影响。舵机电压的推荐值一般在 $4.8V-6V$ 之间，有的舵机可以在 $7V$ 以上工作。较高的电压可以提供舵机的速度和转矩，选择舵机时还需要看电源模块所能提供的电压值。

常见舵机的图片与主要参数如下：



图 3.2 辉盛 SG90

表 3.2 辉盛 SG90 参数

最大力矩/ ( $\text{kg} \cdot \text{cm}$ )	1.6
速度/ [ $\text{s} \cdot (60^\circ)^{-1}$ ]	0.12(4.8V) 0.10(6.0V) 0.12(4.8V); 0.10 (6.0V) 0.12(4.8V); 0.10 (6.0V) 0.12(4.8V); 0.1 (6.0V)
工作电压/V	3.5~6
尺寸 ( $\text{cm} \times \text{cm} \times \text{cm}$ )	23×12.2×29
质量/g	9
材料	塑料齿
参考价格	10RMB



图 3.3 辉盛 MG90S



表 3.3 辉盛 MG90S 参数

最大力矩/ (kg · cm)	2.0
速度/ [s · (60° ) <sup>-1</sup> ]	0.11(4.8V) 0.10(6.0V) 0.12(4.8V); 0.10 (6.0V) 0.12(4.8V); 0.10 (6.0V) 0.12(4.8V); 0.10 (6.0V)
工作电压/V	4.8~7.2
尺寸 (cm × cm × cm)	22.8×12.2×28.5
质量/g	14
材料	金属齿
参考价格	15RMB



图 3.4 银燕 ES08A II

表 3.4 银燕 ES08A II 参数

最大力矩/ (kg · cm)	1.5/1.8
速度/ [s · (60° ) <sup>-1</sup> ]	0.12(4.8V) 0.10(6.0V) 0.12(4.8V); 0.10 (6.0V) 0.12(4.8V); 0.10 (6.0V) 0.12(4.8V); 0.10 (6.0V)
工作电压/V	4.8~6.0
尺寸 (cm × cm × cm)	32×11.5×24
质量/g	8.5
材料	塑料齿
参考价格	16RMB



图 3.5 银燕 ES08MA II

表 3.5 银燕 ES08MA II 参数

最大力矩/ (kg · cm)	1.6/2.0
速度/ [s · (60° ) <sup>-1</sup> ]	0.12(4.8V) 0.10(6.0V) 0.12(4.8V); 0.10 (6.0V) 0.12(4.8V); 0.10 (6.0V) 0.12(4.8V); 0.10 (6.0V)
工作电压/V	4.8~6.0
尺寸 (cm × cm × cm)	32×11.5×24
质量/g	8.5
材料	金属齿
参考价格	26RMB

### 3.2.3 SG90 的确定与建模

由于该六足仿生机器人项目中所需要的舵机数目较多，经过多种舵机性能参数对比，在舵机的价格方面，塑料齿舵机相对于金属齿的舵机价格较为便宜，自重更轻，而性能方面，塑料齿的舵机也达到了改项目要求。在筛选掉金属齿轮的舵机之后，再进行塑料齿轮的辉盛 SG90 舵机与银燕 ES08A II 之间的性能与参数对比，辉盛 SG90 相对于银燕 ES08A II 只重了 0.5 克，这两者在重量方面对该项目影响极小。并且在输出转矩方面，两者的输出转矩参数一样。最后在相比较两者舵机的尺寸大小之后，辉盛 SG90 的尺寸要小于银燕 ES08A

，又因为该仿生六足机器人的设计之初就考虑到舵机的尺寸，所以最后便决定选择更为轻便、经济的辉盛 SG90 舵机作为该项目的驱动舵机，来接收控制系统传输的控制信号，并对控制信号进行输出执行，控制着腿部各个关节的运动，以保证该六足仿生机器人的稳定工作。

在确定该项目使用辉盛 SG90 之后，便着手于辉盛 SG90 的建模，关于 SG90 的尺寸数据如图 3.6 所示，以及辉盛 SG90 的实物参照图如图 3.7 所示。

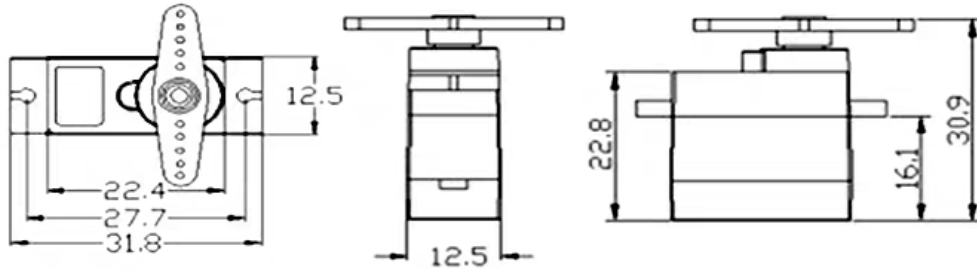


图 3.6 辉盛 SG90 的尺寸参数

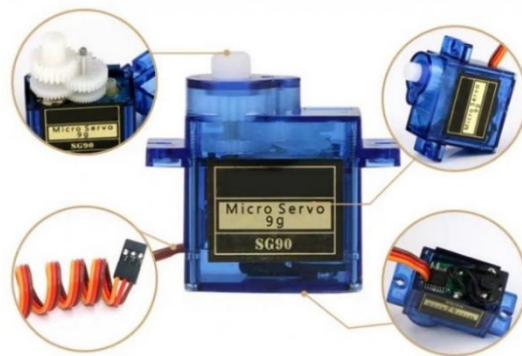


图 3.7 辉盛 SG90 实物

以下开始对辉盛 SG90 进行三维建模：

先对舵机辉盛 SG90 的整体外壳尺寸的绘制，其包括上盖（图 3.8），中盖（图 3.9），底盖（图 3.10），并在最后进行抽壳，倒角以及螺纹挖孔。

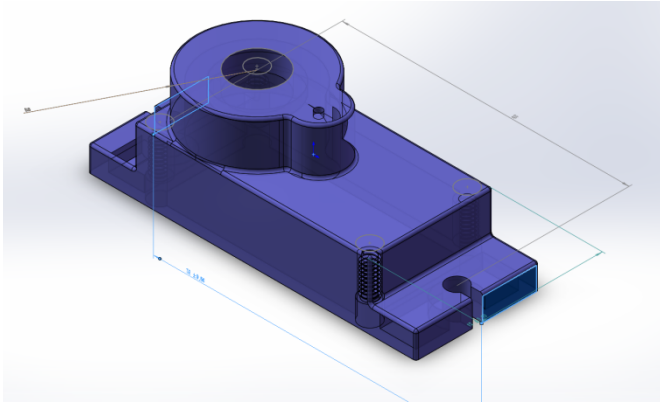


图 3.8 辉盛 SG90 上盖

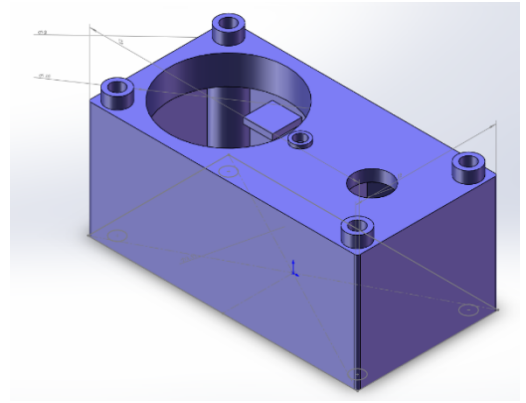


图 3.9 辉盛 SG90 中盖

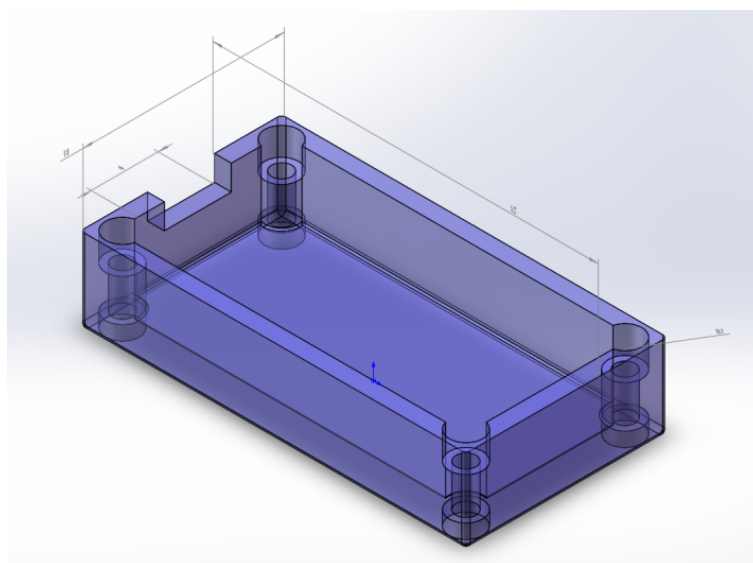


图 3.10 辉盛 SG90 底盖

再对辉盛 SG90 的摆臂进行绘制，如图 3.11 所示。

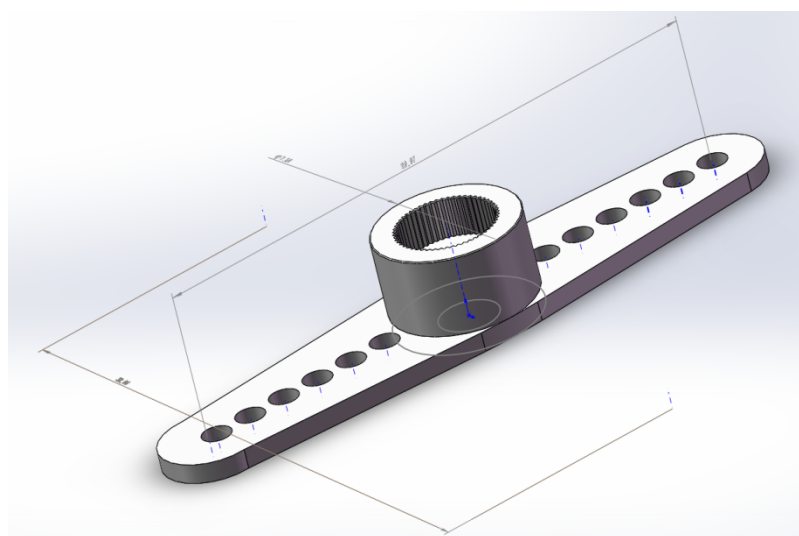


图 3.11 辉盛 SG90 摆臂

最后考虑到会对六足仿生机器人进行仿真，便对 SG90 的内部齿轮及其他部分零件进行绘制，其部分零件如图 3.12 所示，以及 SG90 的整体装配图如图 3.13 所示。

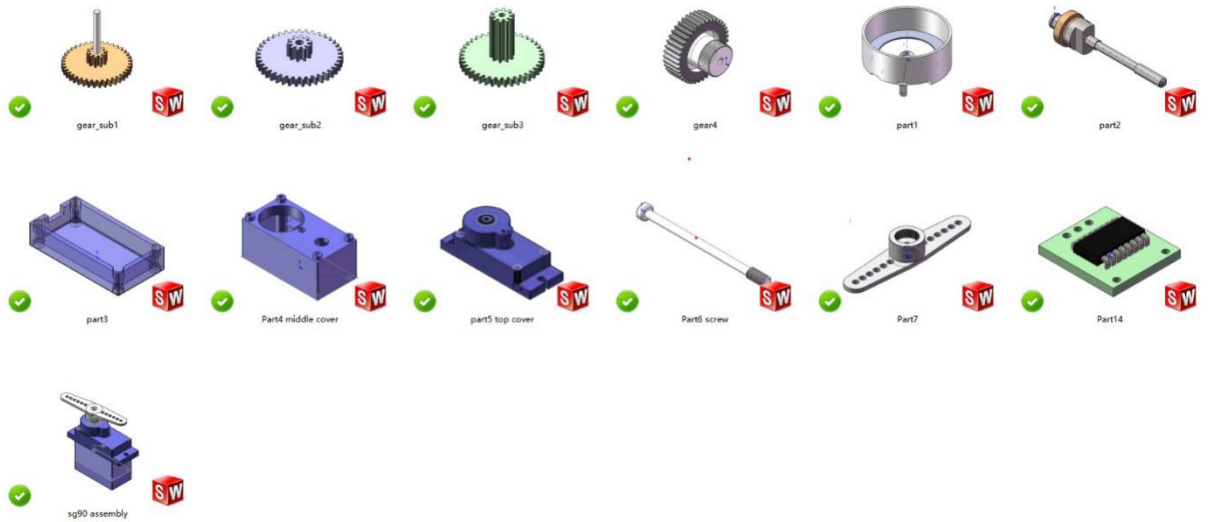


图 3.12 SG90 的部分零件

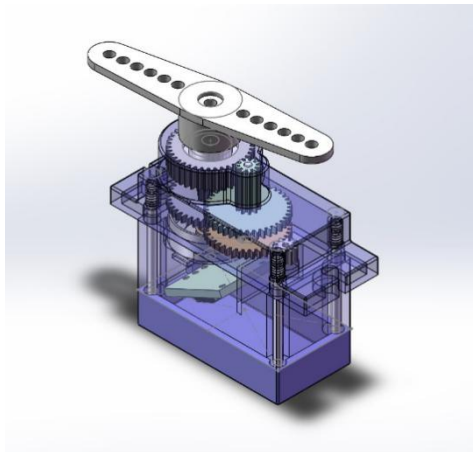


图 3.14 SG90 整体装配图

## 3.4 腿部结构的设计与建模

### 3.4.1 腿部工作原理

机构是用来传递运动和力的，我们把机构所具有的独立运动的数目（或确定构件位置的独立参变量的数目）称为自由度机构的自由度 Error! Reference source not found.。机构的自由度（ $F$ ）数目与该机构的运动状况密切相关，在判断一个机构是否正常运行时，我们要先计算该机构的自由度（ $F$ ）数。当该机构自由度数  $F \leq 0$  时，该机构的各个构件之间就无法产生相对运动，并蜕化为几何形状无法改变的结构物。当该机构自由度数  $F >$

0 时，我们会发现

该机构原始定义为可动构件的数目要大于该机构的自由度数，此时若强行驱动该机构，很可能会造成该机构的破坏。只有当机构的自由度数与原动件数目相等时才能组成一个稳定、可行的机构。

在设计该六足仿生机器人的整体结构时，笔者参照了蜘蛛的身体结构，特别是详细研究了蜘蛛的腿部结构，蜘蛛的每条腿在动物学中更别称为基节、转节、腿节、膝节、胫节、后附节和附端节。在此可以将蜘蛛的腿部结构简化为三杆结构，这三个关节都为转动副。

机构的自由度与构件的总数、运动副的类型及运动副的数量有关。机构之间的运动副可分为平面运动副和空间运动副。平面运动副又分为低副和高副，其中低副是构件之间通过面接触，主要类型有转动副（两个构件间作旋转运动的运动副）和移动副（两个构件之间作移动运动的运动副）；高副是构件之间通过点或线接触，主要类型有齿轮副（齿轮啮合时轮齿与轮齿之间的联结）和凸轮副（轮子与凸轮轮廓之间的联结）。在平面运动副中，低副限制了 2 个独立运动，有 1 个自由度；高副限制了 1 个独立运动，有 2 个自由度。

根据平面机构自由度的计算公式，一个机构的自由度数（F）为可以活动的构件的总数减去所有运动副引入的约束总数的差。因此计算该构件（如图 3.15 所示）的自由度  $F=3 \times 3-3 \times 2=3$  个[三个活动构件提供 9 个自由度，三个转动副（低副）具有 6 个约束]。

以下分析该腿部机构简图（如图 3.15 所示）的运动原理。构件 2 和 3 分别绕着转动副 b、c 转动，使得机器人的腿抬起离地，当机器人的腿悬空时，机构 1 在舵机的驱动下绕着转动副 a 平行于地面旋转，使得机器人的腿能够前进或者后退一定的位移；当机构 1 转到适当的位置时，驱动转动副 a 的舵机停止转动，此时驱动转动副 b、c 旋转的舵机运动，使得机构 2、3 在红外传感器的检测下触及地面，然后舵机停止工作，以稳定机体；进而执行下一组腿部的运行。

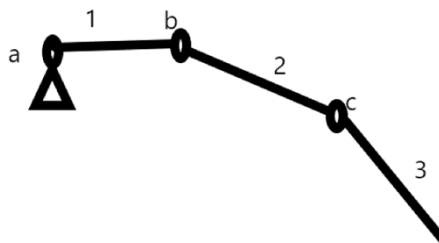


图 3.15 腿部机构简图



### 3.4.2 腿部建模

这里先对机构 3（如图 3.15 所示，以下机构 1、2、3 以及转动副 a、b、c 均见图 3.15）进行建模，该模型作为机器人腿部的末端结构（如图 3.16 所示，使用材料为铝合金 7075-T6），将于地面接触。为此，在设计之初考虑到足部尖端可能存在打滑现象，便在足部尖端加上一个防滑胶，以保证机器人的正常运作。

该机构的上部挖槽设计，是为了放置 SG90 舵机，这样设计减少了一个舵机安装板的使用，也减轻了机器人的整体质量，降低了舵机的载荷，提高了舵机的工作效率。挖槽的两端设置了两个挖孔，是为了固定舵机 SG90。一开始，机构上端的最初设计是比较长，可是在最终考虑到会与底板以及上面的舵机产生干涉，便将上部结构设置的比较短，且较为平滑，这样不仅降低了干涉的风险，且由于上部结构较宽，从而进一步保证了结构的稳定性。

当腿部抬起后再放下时，足部无法知道时候触地，便在足部附近设置一个超声波传感器装置，以探测足部底端与地面的实际距离。当传感器探测到足部触地时便可以反馈给控制板，进而控制板控制该舵机停止运行，并调节到适当角度，保障机体的稳定，为下一次的运动做好准备。

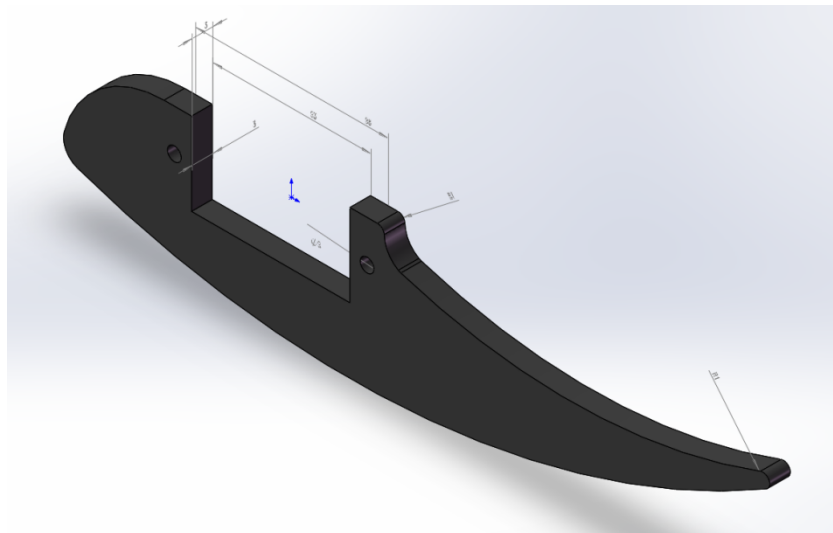


图 3.16 腿部机构 3

对于机构 2（如图 3.17 所示），其作用是连接机构 1 和机构 3，并给机器人的腿增加一个自由度，这样设计相对于只有 2 自由度的腿部结构，给机器人的腿部运动增加了更多的可能，实现了更为丰富的步态动作，使腿部结构更加灵活。

若该机器人腿缺少这一机构，便少了一个自由度，当机构 3 抬起时，有时会遇到一些阻力，使得该机器人无法正常运行。这一机构的加入，可以尽可能减少腿部提起

时遇到的阻力，使得腿部结构可以更好地提起，降低舵机的负担，提高舵机的工作效

率。当机器人腿部结构放下时，也可以更好地调节下落角度，以便找到更为适当的位置，为机器人工作提供一个稳定的平台。

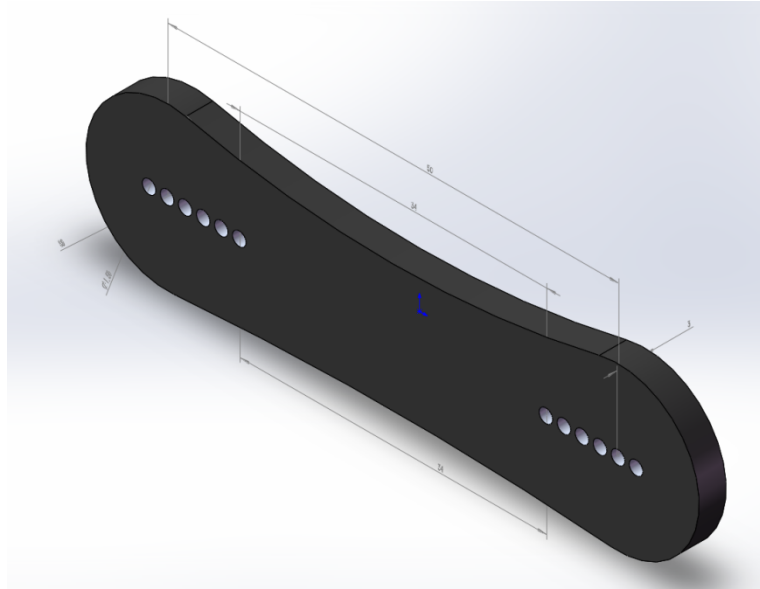


图 3.17 腿部机构 2

以下为腿部结构的总体装配图，该腿部结构除了以上两个结构，主要还有三个 SG90 舵机和两个舵机安装板（该结构的三维建模将在 3.5.1 中介绍）组成。其中，接近机器人平台底板的两个舵机通过舵机安装板连接（如图 3.18 所示），由于转动副 a 处的舵机在机器人足部悬空时才开始工作，该处的运动较为简单。该处设计为两个舵机安装架通过四个螺钉直接相连，这样使得传递效率大大增加。该处结构设计紧凑，提高了工作的精度，并提高了舵机动能传递的效率，此处能更好地带动此处以下腿部结构的运动。

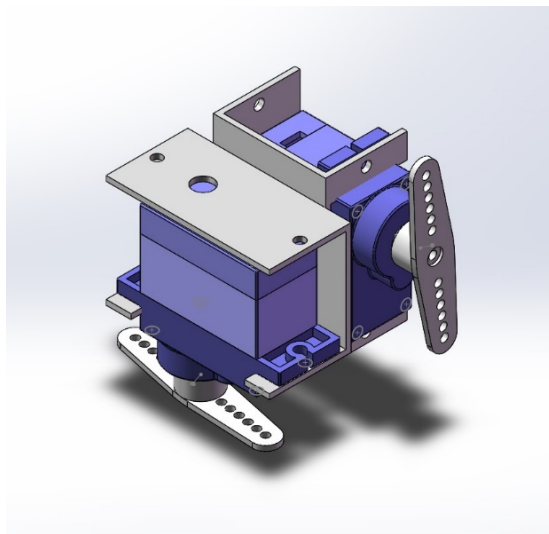


图 3.18 两舵机通过舵机安装板直接相连

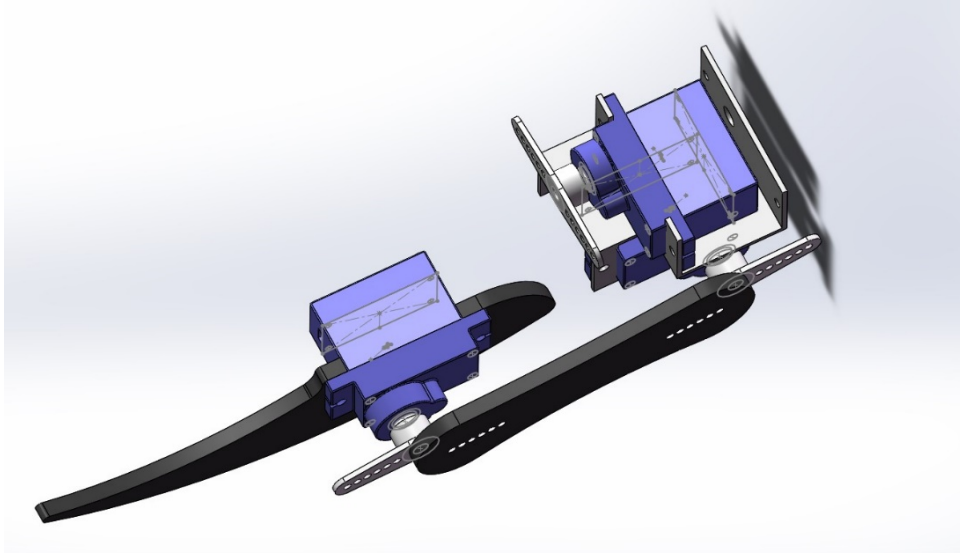


图 3.19 腿部整体装配图

## 3.5 框架结构的设计与建模

### 3.5.1 舵机安装板

此构件为舵机安装板（如图 3.20 所示），此构件双臂上的两个挖孔与舵机肩上的双孔配合以固定舵机，底部一个较大圆孔是用来固定于机体上盖板，以确保机器人的稳定，并配合转动副 a 处舵机的旋转。在安装板的侧面有四个对称的挖孔，该处设计是为了使两个安装板连接，从而将两个舵机直接连接在一起。两个舵机安装板在这四个挖孔之间通过四个螺钉接合，这也保证了两个舵机的稳定接合（如图 3.18 所示）。

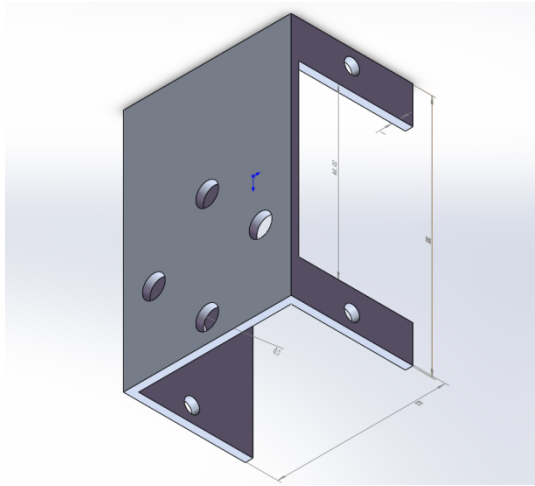


图 3.20 舵机安装板

以上内容仅为本文档的试  
下载部分，为可阅读页数  
的一半内容。如要下载或  
阅读全文，请访问：

[https://d.book118.com/  
167043043041006056](https://d.book118.com/167043043041006056)