

摘 要

足式机器人相较于轮式与履带机器人更能适应复杂的地形结构，在军事运输、抗震救灾、残疾人辅助甚至星际探索等众多领域都有广阔的应用前景。我们利用杆件设计腿部机构，采用齿轮组进行三档变速，并通过凸轮实现基本的运载功能。通过课程，我们了解了足式机器人以及变速箱的基本原理，利用四杆机构得到了较好的足部运动轨迹。

关键字：步行机器人、多足仿生机构、变速机构、运载机器人

目 录

第 1 章 引言.....	1
1.1 工程背景	1
1.2 功能要求及技术指标.....	1
1.3 发展态势	1
第 2 章 机构方案设计.....	?
2.1 方案一设计	?
2.2 方案二设计.....	?
2.3 方案比较及定型	?
第 3 章 机构设计计算.....	?
3.1 执行件运动设计	?
3.2 运动参数设计计算.....	?
3.3 构件参数设计计算	?
第 4 章 改进完善设计.....	?
4.1 制约方案实现的原因	?
4.2 改进完善	?
第 5 章 实验搭建与安装测试.....	?
5.1 机构模型搭建.....	?
5.2 搭建效果及运行结果.....	?
5.3 安装传感器测试	?
第 6 章 实验报告与数据分析.....	?
6.1 实验报告	?
6.2 测试结果	?
6.3 数据分析	?
结束语.....	?
参考文献.....	?
附 录.....	?

第1章 引言

1.1 工程背景

自从1959年第一台工程工业机器人在美国诞生以来，各种用途的机器人便相继问世。多足仿生机器人由于拥有更高的运动灵活性和对特殊环境的适应性，一直是研究的热点，在很多特殊的运用场景中都能看到他们的身影。例如，轮式机器人和履带机器人在较为平稳的环境中速度快，能耗低。但在崎岖的环境中往往会出现抖动严重的情况，所以在某些对平稳性要求较高的场景中难以达到最佳效果。足部机器人利用腿部角度和高度的相互配合，可以很大程度的保持自己的重心位置和平稳性，避免侧翻等危险情况的发生，同时也为路径的最优化选择带来了更多可能性。

但是由于多足机器人腿部自由度高，也对机体的协调控制带来了巨大的挑战。在运行过程中必须时刻考虑机体的平稳性，足部的落脚点等诸多因素，导致它的结构设计和控制算法都尤其复杂。与自然界真实生物的机动性相比，还有很大的差距。在本次实践中，我们从结构设计入手，得到足式机器人最基本的行走机构。抛开复杂的控制算法，利用最基本的机械结构使机器人协调运动。虽然这与最终的仿生机器人还相差甚远，但是却可以为足部构造的研究设计提供重要的参考价值。

1.2 功能要求及指标

六足机器人又叫蜘蛛机器人，顾名思义，其原理借鉴了自然界中昆虫的运动原理，机器人的腿部位于身体的两侧，并类似于蚂蚁，在前胸，中胸，后胸各有一对足。问题的关键，在于两点。一是六条腿之间应该怎样相互配合让整体协调；二是每条腿部应该如何运动以实现足部末端的运动轨迹。

对腿部之间的协调，我们提出了以下要求：

在整个过程中，机器人的运动尽可能的对称，机体在运行时起伏不能太大，

以满足平稳性。

六条腿部的运动效果要尽可能贴近生物的运动姿态。

六条腿之间的配合结构尽可能简洁，以减轻整体的重量。

对每条腿内部的运动，我们提出了以下要求：

腿部在地面支撑的时间应尽可能大于腿部悬空的时间，这有利于整体效率的提升，对人来说：每一步足部在地面支撑的时间大致为周期的 60%，可以作为参考。

希望足部的轨迹曲线中，接触地面的一段跨越的水平宽度尽可能大，以提高行走的速度。

希望足部的轨迹曲线中。悬空时竖直跨越的高度尽可能高，以提高跨越障碍的能力。

除基本的行走之外，我们希望机器人拥有变速和物料运输的能力。

其中：

变速功能：我们采用齿轮组的配合实现，通过改变齿轮的配合关系，得到不同的变速比，在本次实验中，我们对机器人设计了四个档位，其中有三个档位用于速度的调整，另外一个档位用于机器人停下时，物料的装配。

物料运输功能：我们采用基本的凸轮加顶杆的形式实现物料的倾倒动作。只需要调整顶杆运动的高度，便可以调整物料倾倒的角度。

1.3 发展态势

六足机器人相较于其它多足机器人，有自己独特的优势。相较于两足机器人，六足机器人更加稳定，不易翻倒。相较于四足机器人，六足机器人又有更大的承载和工作能力。从国外的情况来看，六足机器人的技术越来越完善，应用场景也越来越多样化。例如波士顿动力的 RHex 越野六足机器人、NASA 开发研制的 ATHLETE 全地形六足地外探测器、西班牙工业化研究自动所设计的用于排雷的 SILO-6 机器人等。我国的六足机器人虽然发展较晚，但已在迎头追赶国外的技

术，例如华中科大设计制造的“4+2”型六足机器人、北京理工大学设计的弓背蚂蚁机器人、上海交大自主研发的六足滑雪机器人等等。六足机器人正朝着智能化、实用化、轻量化的方向蓬勃发展，目前适用于恶劣和特殊环境的六足机器人控制和机械问题还没有得到完全解决，但可以预见未来它们将在人类的生活中和工作中扮演十分重要的角色。

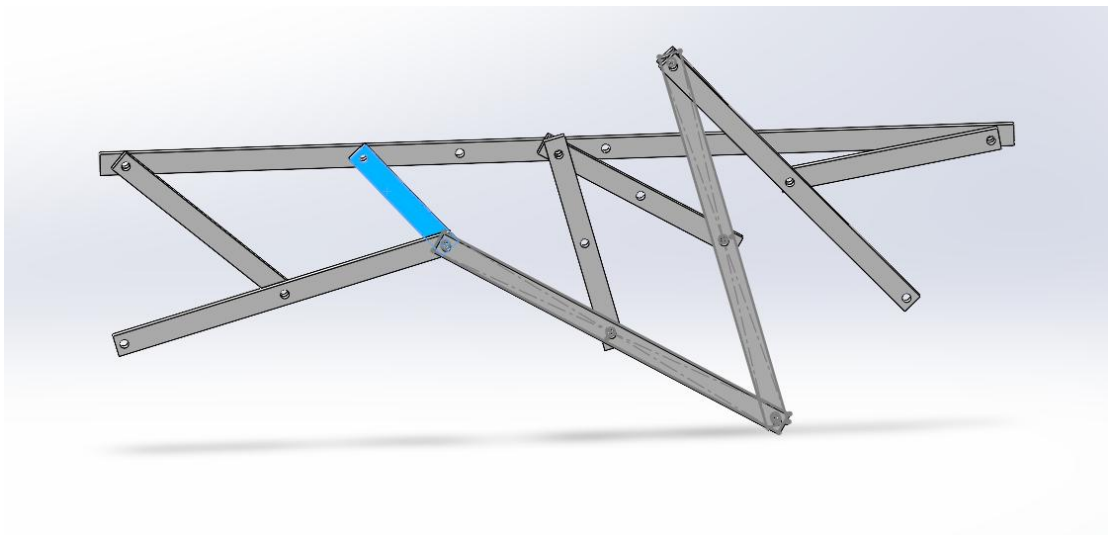
第 2 章 机构方案设计

2.1 方案一设计

功能原理：

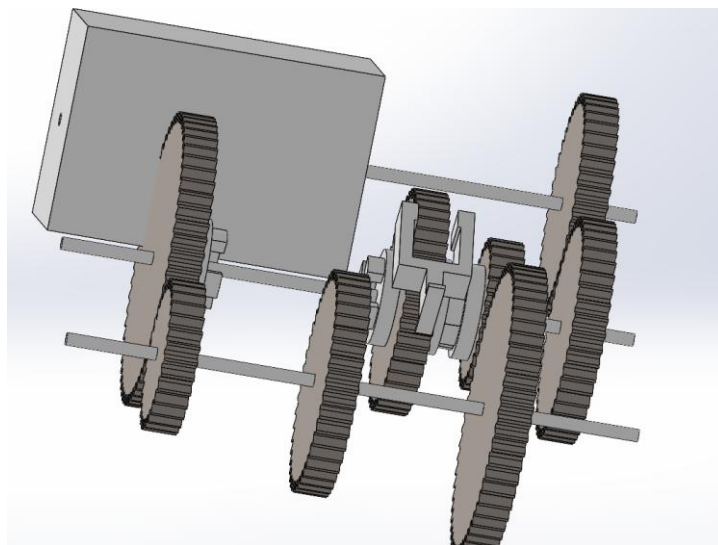
步行机构

分为左右两条机械腿，每条机械腿由前后两个四连杆机构连接而成，当后面的连杆机构被驱动时，其会将运动通过连接处同步不同相地传递至前面的连杆机构，从而实现前后两只脚轮流接触地面。同时中间的连接处也连有一只脚，这种



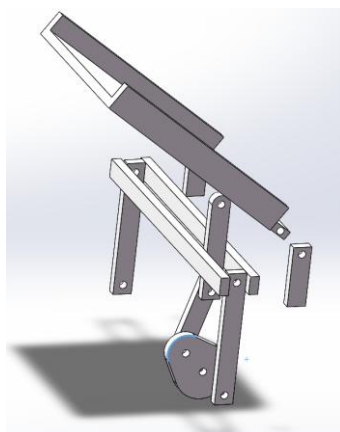
结构所产生的步态称为三足步态^[2]，这样的设计可以使任意时刻都至少有 3 只脚同时接触地面，且每个周期内的行进模式完全一致，因此运动更加平稳连贯。

变速机构



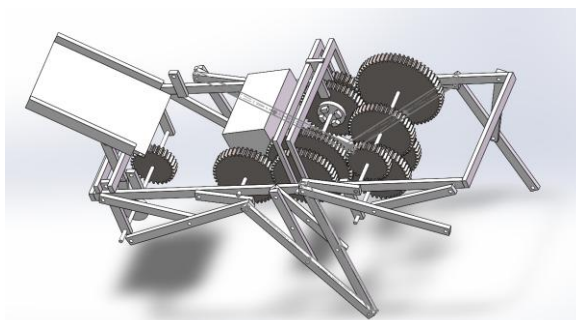
速度档位共有 4 档，分别对应变速比为 1: 2, 1: 1, 2: 1 的三种齿轮组合和空挡，通过移动可动齿轮使之与不同齿数的齿轮啮合来改变变速比。

物料运输机构：



当变速机构位于空挡状态下，可动齿轮与铲斗间接驱动齿轮啮合，并通过齿条将运动传送传递至铲斗直接驱动齿轮，铲斗直接驱动齿轮带动凸轮旋转并通过顶杆实现铲斗的抬升与下降的往复运动。

仿真搭建图：



F 计算:

腿部 $n=10, p_l=13, p_h=0, F_1=3(n-1)-(2p_l+p_h)=27-26-0=1$

变速箱: 以 1: 2 档为例: $n=9, p_l=9, p_h=2, F_1=3(n-1)-(2p_l+p_h)=24-20-2=1$

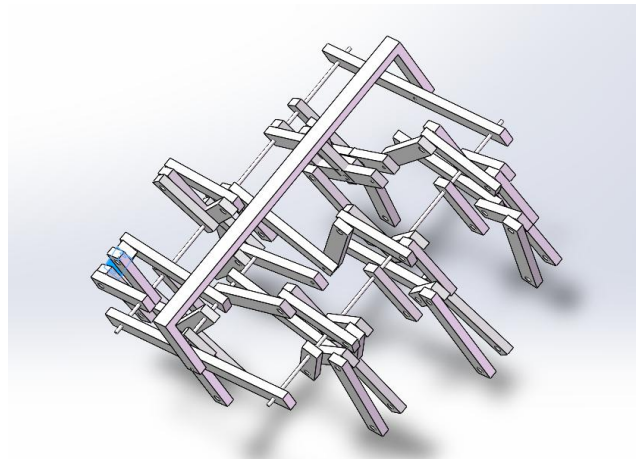
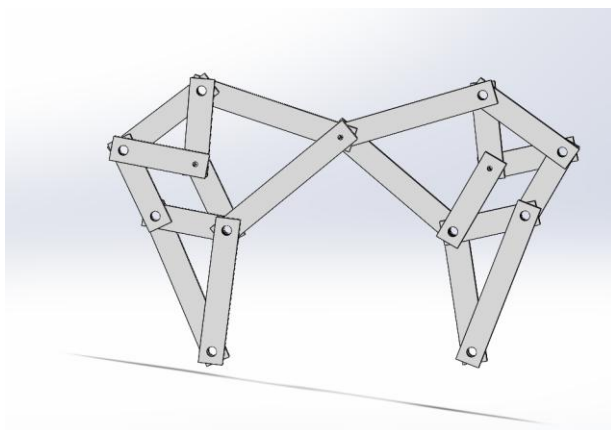
物料运输机构: $n=7, p_l=5, p_h=2, F_1=3(n-1)-(2p_l+p_h)=12-10-3=1$

2.2 方案二设计

功能原理

Strandbeests 是荷兰动感雕塑艺术家泰奥扬森发明的“风力仿生兽”，本方案便是仿照其机构并进行设计。其由多条腿组成，每条腿上又分前腿和后腿，二者通过铰链连接。电机驱动连接处绕轴旋转，运动通过杆件传递至足部。由于存在多个杆件，其运动较为平稳。

机构简图



F 计算（一条腿）

$n=22, p_l=31, p_h=0, F_2=3(n-1)-(2p_l+p_h)=63-62=1$

2.3 方案比较

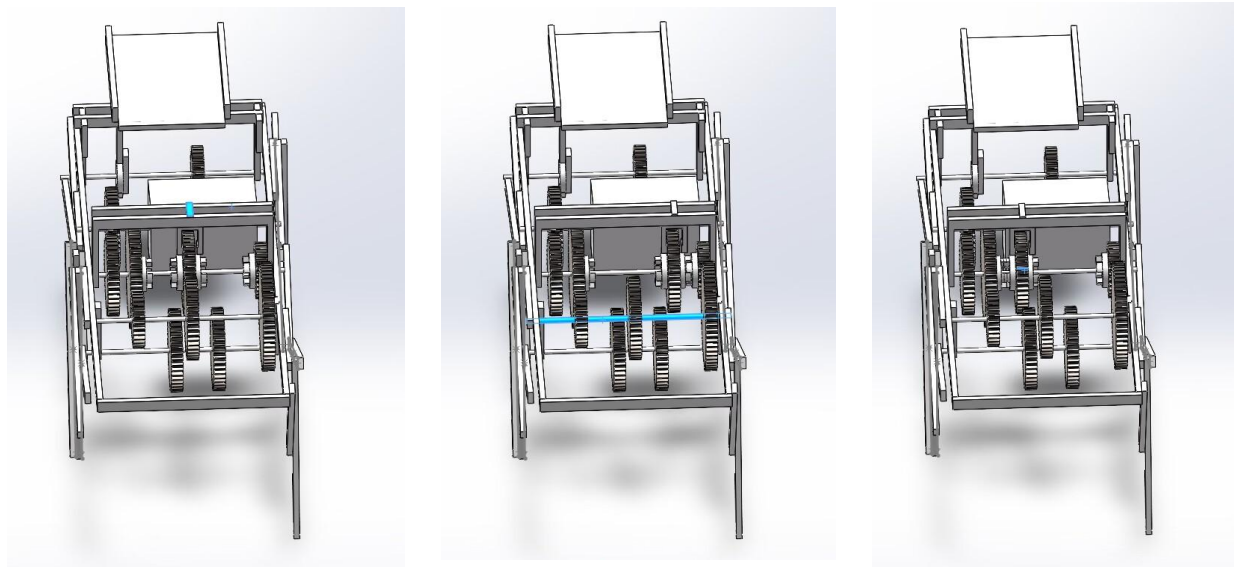
方案一与方案二两者相比，方案二结构更加复杂，具体表现为：①每条腿所用杆件数量更多②腿数更多③腿之间的配合要求十分紧密。而且中空部分狭小，放不下变速箱或铲斗等机构。故选择方案一。

第3章 机构设计计算

3.1 执行件运动设计

足部和铲斗分别作为机构两个执行件，其中足部由四杆机构中的连杆末端构成的主足和四杆机构之间的辅助足组成。主足的运动由四杆机构直接控制，而辅助足则由前后四杆机构的两个曲柄驱动。铲斗则是被连接凸轮的顶杆控制俯仰的角度，完成倾倒的动作。

如下图所示，在机器人行走的过程中，通过变速箱齿轮之间的狗齿结构，将动力输出到与腿部曲柄相连的齿轮上，此时铲斗没有动力来源，故不会产生任何运动。而当机器人到达物料所在地，准备装载物料时，曲柄齿轮将与电动机齿轮断开并保持不动，而驱动铲斗凸轮的齿轮与电动机齿轮啮合，顶杆被驱动，铲斗开始做倾倒物料的动作。腿部运动各档位传动比原理图如下：

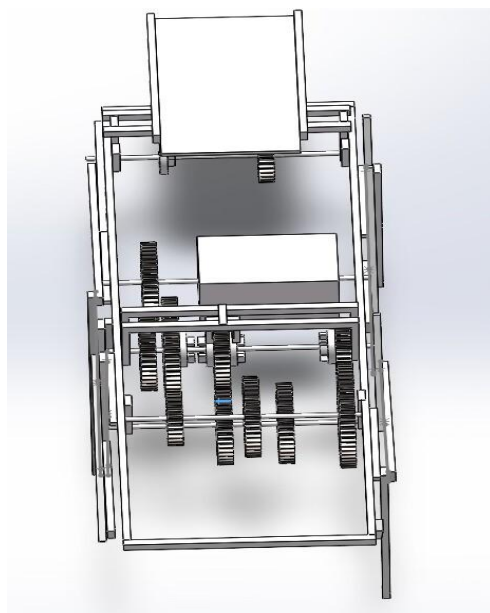


1: 1

2: 1

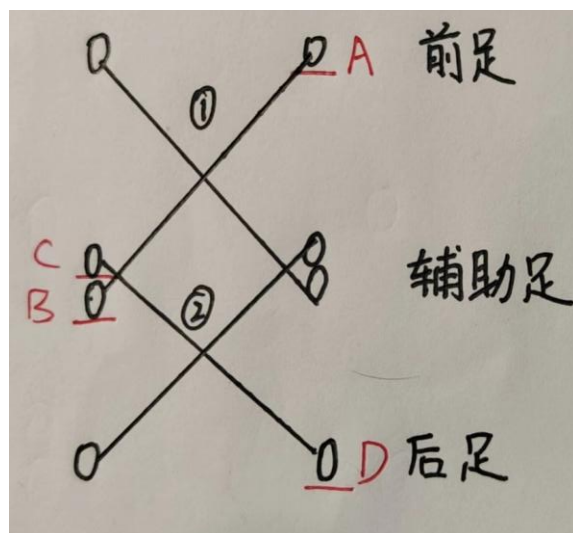
1: 2

铲斗机构传动原理图如下：



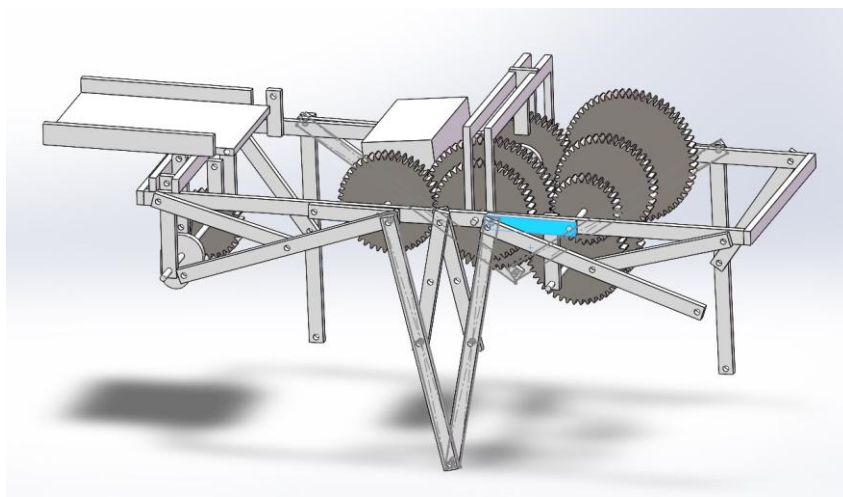
足部的详细运动关系如下：

与马达直接相连的曲柄驱动后腿四杆机构，中间的辅助足由该曲柄直接带动，辅助足的运动带动前腿四杆机构的曲柄转动，从而实现单侧三只脚的运动配合。机器人两侧腿部的结构基本对称，唯一的不同为与原动件直接相连的后腿曲柄初始角度差为 180° ，在运动中该不变的角度差将使得两侧腿部运动在一个周期内互补，即对侧的辅助足将永远和本侧的前后主足保持大致平行，而本侧的主足将与对侧的辅助足保持大致平行，以此得到了三角步态。具体来说：同侧前后曲柄的角度差始终为 180° ，异侧正对的曲柄的角度差也为 180° ，而对角线上的曲柄角度一致。我们将中间的辅助足机构看作是对称的两个四杆机构，则六足机器人可看做是两个四足机器人（①和②）的串联结构，示意图如下：

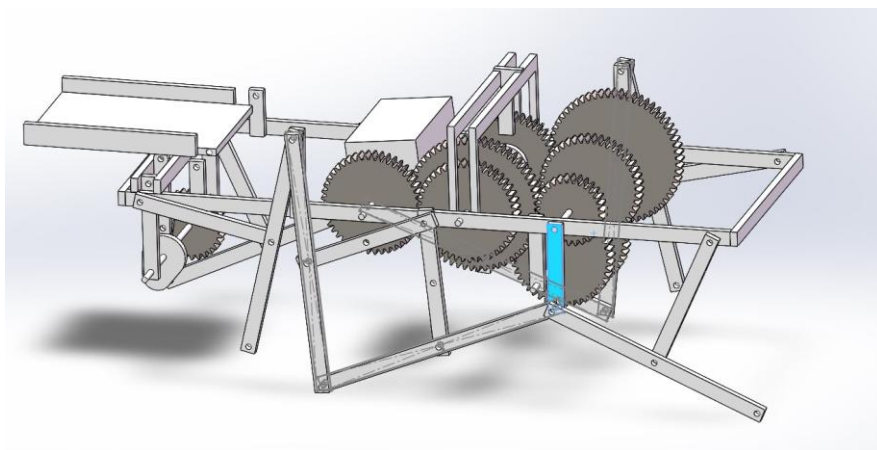


每个四足机器人的运动规律为：若对角线上的前脚 A 先向前迈出，则对角线上的辅助足中的一半 B 同样向前迈出，两者高度大致相等，而辅助足的两部分 B 和 C 高度始终相等，另一半和对角线上的后腿 D 同样角度一致高度近似相等，这样的运动保证了三足步态的稳定性，即呈三角的足部 A、B、C、D 高度始终近似相等。由于四杆机构的运动特性，电动机每转动一次，单个呈三角关系足部会经历一次完整的运动轨迹，即 360 度的周期。由于左右两侧曲柄相位差呈 180 度，故而整个机器人在一个周期内实际上前进了一步。

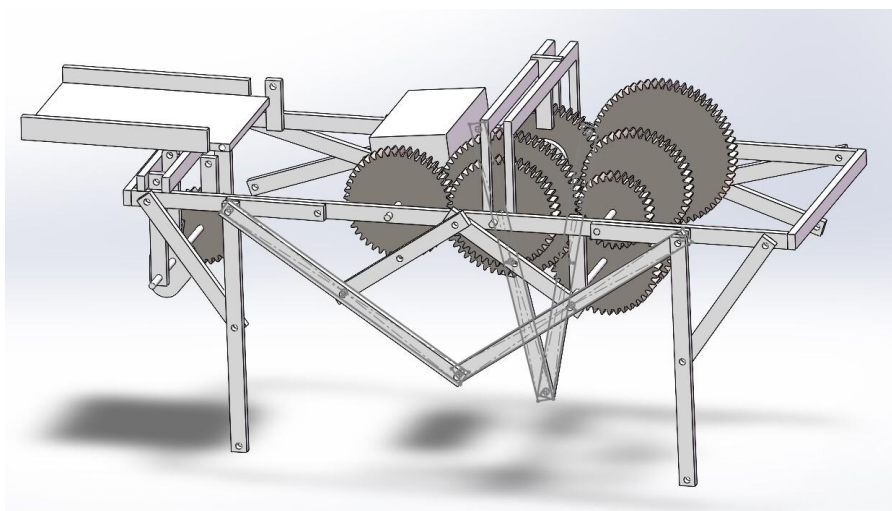
腿部运动一个周期的过程图示例如下：



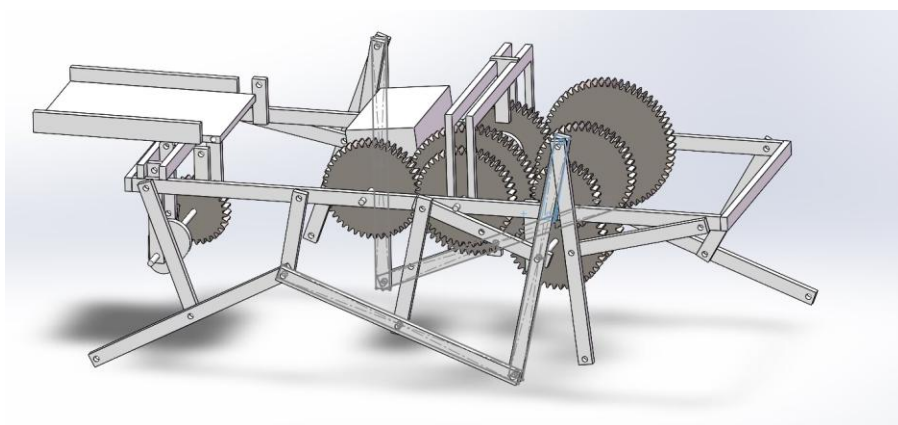
图一



图二



图三

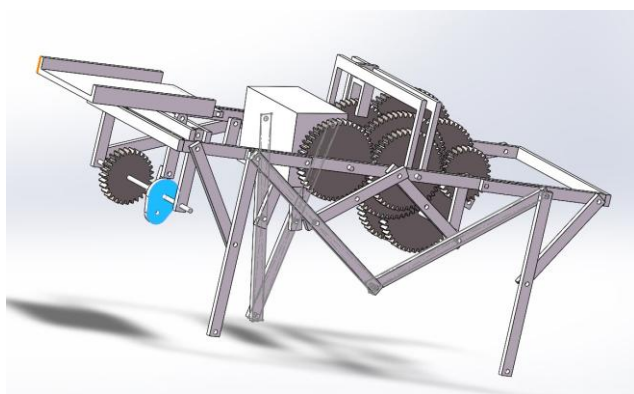


图四

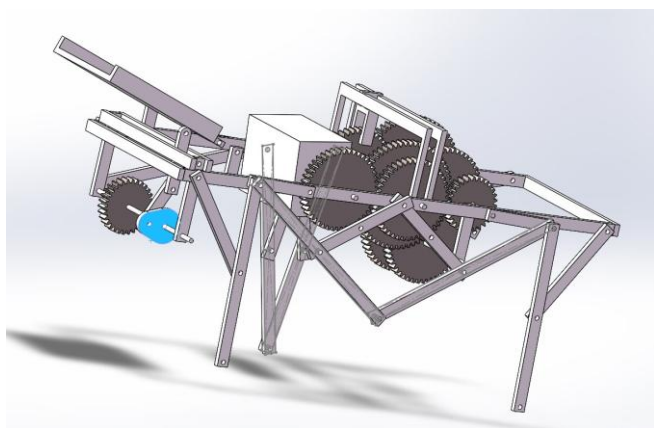
铲斗的详细运动如下：

由于承载物料时，机器人应保持不动，故铲斗的运动关系与腿部相对独立，铲斗底面与顶杆的顶部相切，顶杆与一连杆相连再与凸轮铰接。电动机经由减速齿轮、链条传动驱动凸轮旋转，使顶杆做上下往复运动，以此推动铲斗做俯仰的倾倒动作。

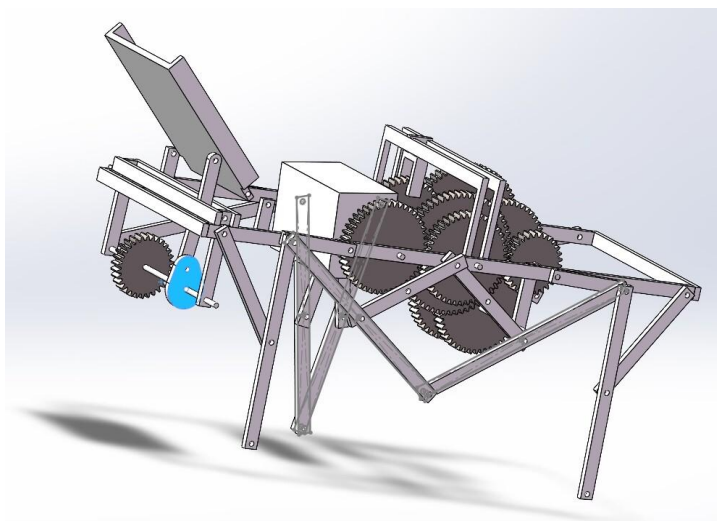
铲斗运动一个周期的过程图示例如下：



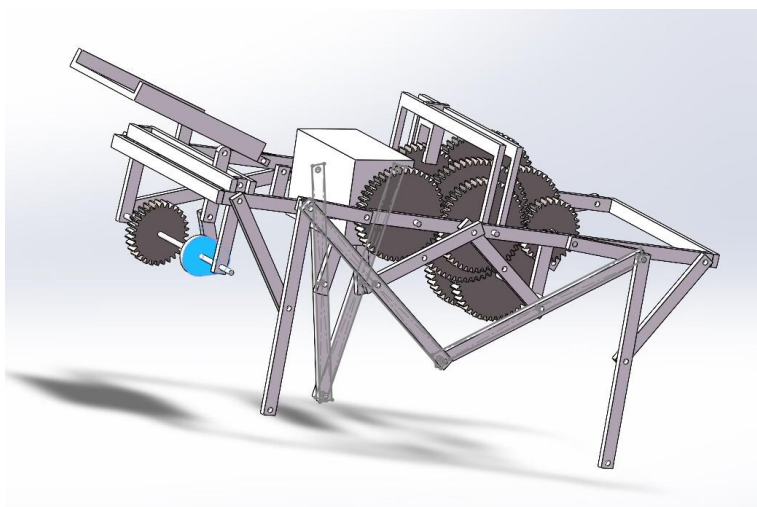
图一



图二



图三

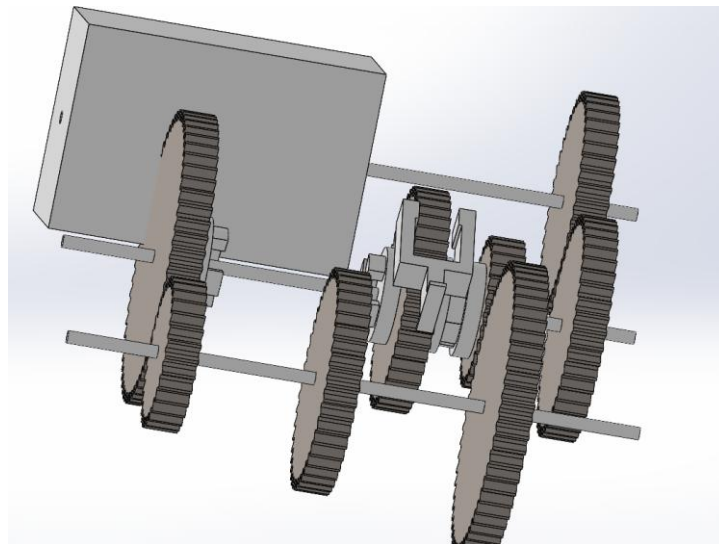


图四

变速功能设计原理如下：

通过查阅大量的变速箱相关资料，我们最终从摩托车的序列变速箱上找

到了设计的灵感。我们的变速机构主要由两根轴组成，其中主动轴的末端有一个齿轮（如下图中间轴最右侧）和电动机驱动的齿轮啮合，该齿轮和主动轴固定在一起，并且直接带动主动轴旋转。主动轴上还有用于调速的三个齿轮，左右两边的齿轮和轴之间可以发生相对转动，但是无法沿轴平动。中间的齿轮可以沿轴左右平动，但是通过键和轴连接，故无法相对轴发生转动。从动轴上的三个齿轮均和轴固定相连，既无法和轴相对转动，也无法在轴上左右平动。当主动轴上中间齿轮和从动轴的中间齿轮啮合时，此时传动的顺序为：动力由主动轴中间齿轮直接到从动轴中间齿轮，为二档速度。当主动轮上中间齿轮向左平动，通过狗齿和左边齿轮固定时，此时左边齿轮和轴一起转动，并将动力传递给从动轴上的左边齿轮，此时传动的顺序为：动力由主动轴中间齿轮传递给主动轴左边齿轮再传递给从动轴左边齿轮，为三档速度。同理，当主动轮上中间齿轮向右平动，通过狗齿和右边齿轮固定时，此时传动的顺序为：动力由主动轴中间齿轮传递给主动轴右边齿轮再传递给从动轴右边齿轮，得到一档速度。在设计中我们单独安装了一根轴在主动轴和从动轴下方，并在轴上固定了一个齿轮，当主动轴中间齿轮和该轴上齿轮啮合时，可进一步通过皮带装置带动物料装置运动。



3.2 机构运动参数设计计算

将实际组合机构通过 solidworks 运动仿真，根据已有电动机仿真得到的腿部运动周期时长如表格所示：

电机转速 rpm	完整一步所用时间/s	每步中接触地面所用时间 s
10	4.3	1
15	3.4	1.1
30	2	0.6

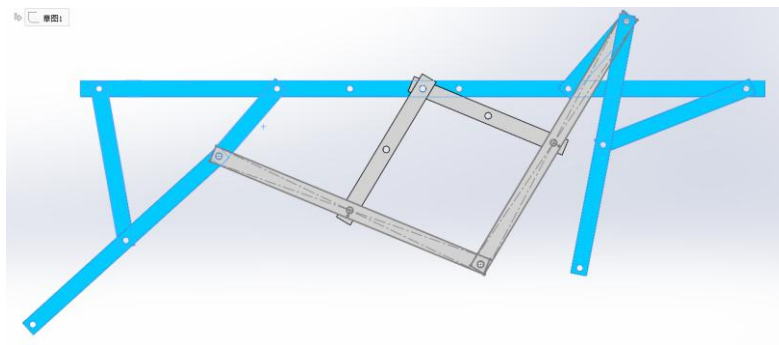
经过对比我们最终选择了转速为 30rpm 的电机，我们将步长定义为一只脚接触地面到它离开地面的过程中，机架向前移动的距离。则此时测出机器人步长为 146mm，腿部每次抬起的最大高度为 113mm 左右，此时运动速度分为三档各为：7.3cm/s、14.6cm/s 和 29.2cm/s。

对于铲斗机构：铲斗一次倾倒物料的时间为 4s，仰起的角度为 60 度，完全放下时的角度为 0 度。

3.3 构件参数设计计算

腿部杆长条件：

腿部为两个四杆机构(曲柄-摇杆)组成，如下图所示

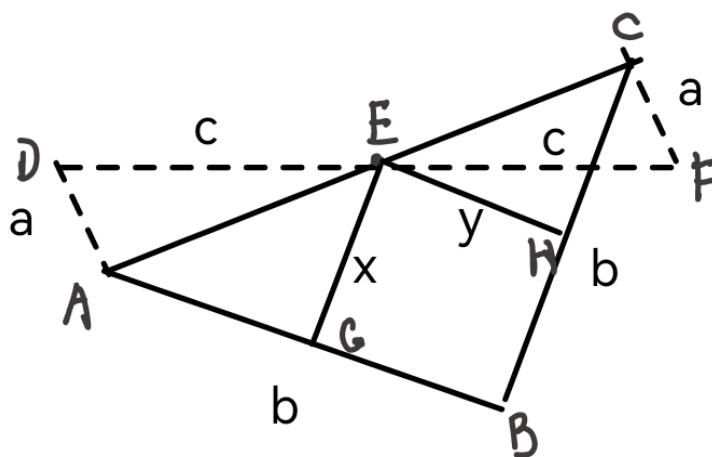
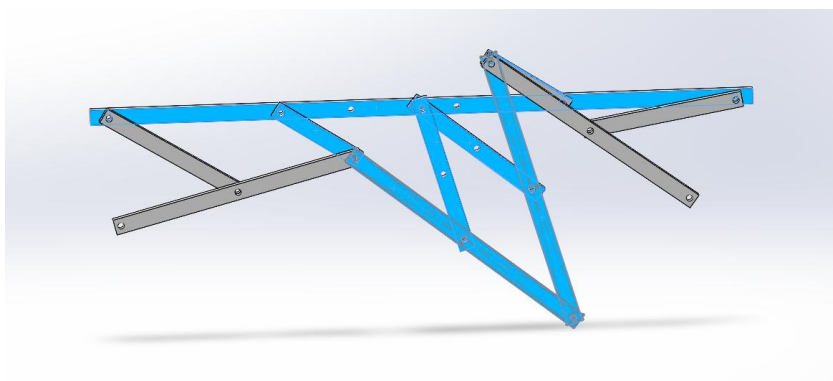
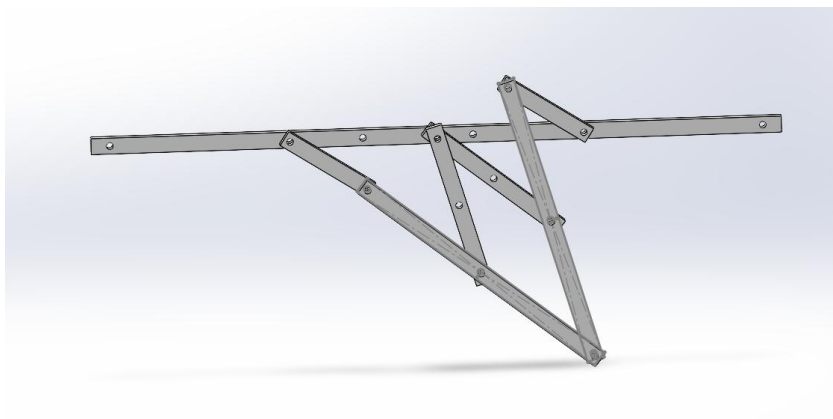


而四杆机构存在杆长条件、死点，其中杆长条件为

$$l_{min} + l_{max} \leq l_1 + l_2 \quad (1)$$

我们四个杆的长度分别是 56，110，95，77,而 $56+110 < 95+77$ ，符合杆长条件。

辅助足构件计算如下：



已知两个曲柄呈 180° ，AD 平行且等于 CF、 $AB=BC=b$ 、 $AB \parallel EH$ 且 $EG \parallel BC$ ，我们需要求 H、G 的位置和 EH、EG 的长度。

那么此时 $\triangle AED \cong \triangle CEF$ ，E 为 AC 中点，所以 EH、EG 为中位线，即 H、G 分别为 BC、AB 中点， $EH=EG=1/2b$ 。

变速结构我们采用的变速比分别为 0.5、1、2，根据齿轮的变速比公式：

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2)$$

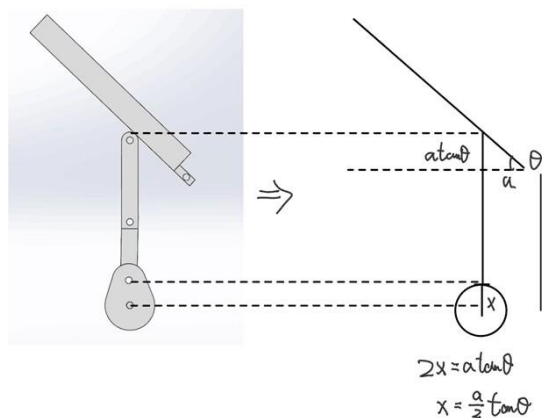
设第一级齿轮的齿数为 n ，则还需要 $2n$ ， n 和 $0.5n$ 的齿轮，由于实验室中的齿轮齿数为 25~70 并按 5 递增，我们只有唯一一种方案可以选择即为齿数分别为 30、45、60 的齿轮。由于变速箱的结构主要由平行的两根轴以及轴上的齿轮组成，为了让齿轮组都能够正常啮合到一起，除模数相等外，我们还需要让两两齿轮的分度圆半径之和相等。由齿轮模数与分度圆直径公式：

$$M = \frac{D}{Z} \quad (3)$$

可得 $D_1 = M_1 * Z_1 = 1.5 * 30 = 45$ ，同理 $D_2 = 67.5$ ， $D_3 = 90$ 。

满足 $D_2 + D_2 = D_1 + D_3 = D_3 + D_1$ ，故可以正常啮合。

凸轮尺寸计算已知铲斗的相对凸轮轴的位置如图所示：

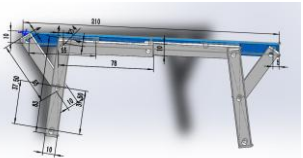
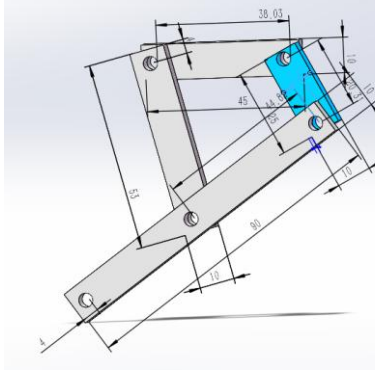
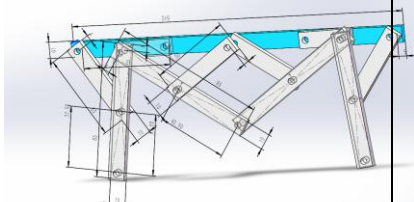
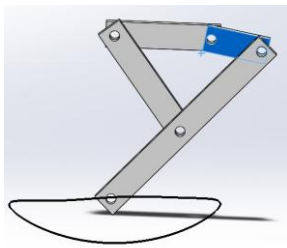
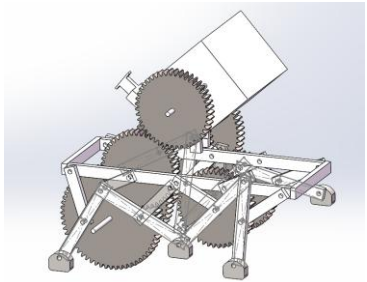


由几何关系可得：凸轮半径约为 $a/2 \tan \Theta$ 。

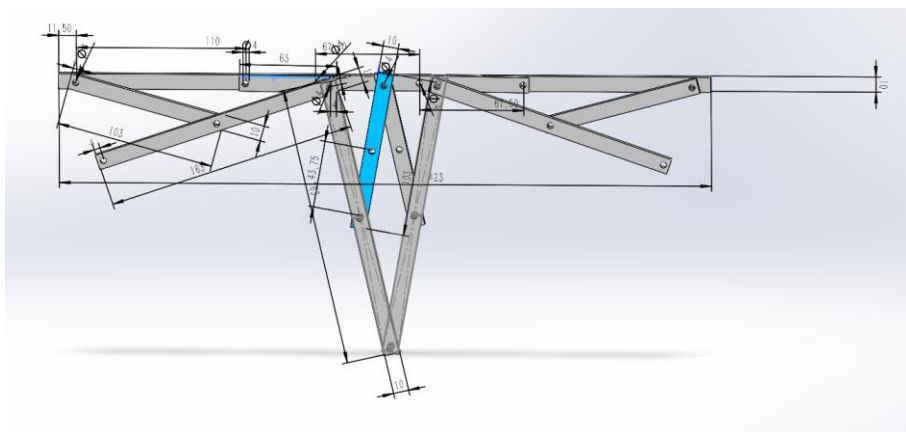
根据实验室已有的杆件尺寸，我们进行了一系列试验，试验流程如下：

为了实现我们的技术指标，经过多次尝试最终得到了最优机构，以下列举出部分试错机构：

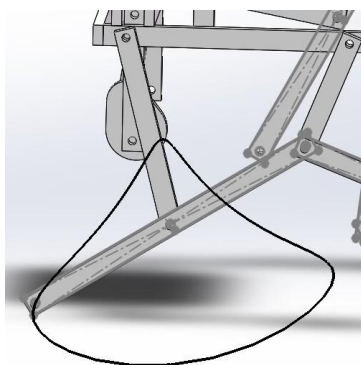
	不能动组合	新的组合	可动组合
错			

机构名称			
片及尺寸参数			
题	该机构无法运动	可以达到 60%，但跨障碍能力弱	该机构留给齿轮和电机的安装空间较小
题图片	\	 <p>黑色线为足部轨迹，可见轨迹顶端与底端高度差较小</p>	 <p>实际装配体，可见齿轮较拥挤且没有空间放置电机</p>

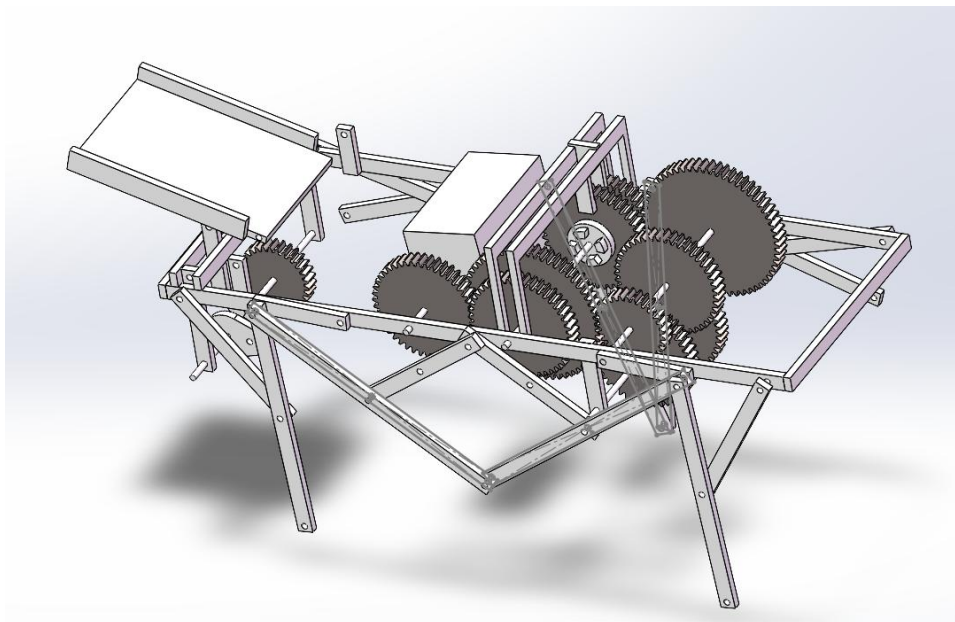
最终我们选择了这一版方案
尺寸：



足部轨迹合理:



实际装配空间足够:



第 4 章 改进完善设计

4.1 制约方案实现的原因

①杆件缺少限位

画图时每个杆件只有 2-3 个孔，杆件之间计划直接通过螺钉连接；实际杆件中间为直槽口，需通过活动铰链连接，若不加限位铰链会在杆件的直槽口中移动。

②关节处冗余空间少

由于装配存在误差，若严格按照计划图纸安装并严格限位则机器人会卡死

③地面行走阻力过大

原本计划在桌面或地面安装机器人便于观察其行走姿态，实际发现行走时阻力大、不稳定且难以安装

④固定铰链层数高

⑤缺少安装齿轮的长轴、曲柄的尺寸不合适、缺少狗齿、狗齿无法安装在小齿轮上

⑥电机接触不良

4.2 改进完善

对于①需要螺栓螺母进行限位

对于②限位时需留出冗余空间

对于③选择在桌面上搭建机架以便于安装

对于④垫上 2 层杆件

对于⑤自己设计并 3D 打印出了想要的轴、曲柄、狗齿、小齿轮，再用锉刀调整尺寸

对于⑥通过焊接修复导线与电机的连接

机构简图无变化

第 5 章 实验搭建与安装测试

5.1 机构模型搭建

①杆件缺少限位

画图时每个杆件只有 2-3 个孔，杆件之间计划直接通过螺钉连接；实际杆件中间为直槽口，需通过活动铰链连接，若不加限位铰链会在杆件的直槽口中移动，需要螺栓螺母进行限位。

②关节处冗余空间少

由于装配存在误差，若严格按照计划图纸安装并严格限位则机器人会卡死，限位时需留出冗余空间。

③地面行走阻力过大

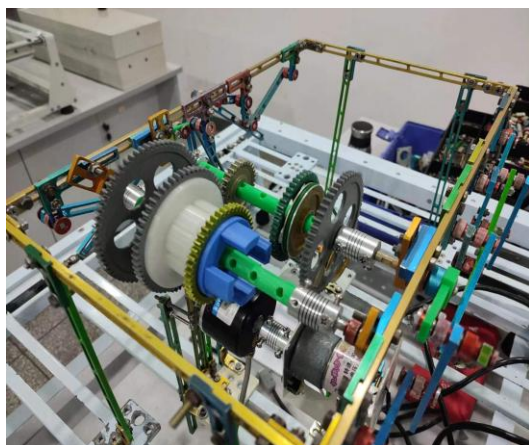
原本计划在桌面或地面安装机器人便于观察其行走姿态，实际发现行走时阻力大、不稳定且难以安装，于是我们选择在桌面上搭建机架以便于安装。

④固定铰链层数高

垫上 2 层杆件以便于固定。

5.2 搭建效果及运行结果

搭建效果：基本按照计划中的杆长搭建，如图



运行结果：按照预期的轨迹运动，但运行不够流畅

5.3 传感器安装测试

待测物理量：主动轴的旋转速度和电机输入的旋转速度

传感器选择：角位移传感器

传感器安装方式：由于主动轴两端无法伸出机架，需通过同步带将主动轴的角位移引出到外部的同步轮上。电动机一端直接接入传感器。

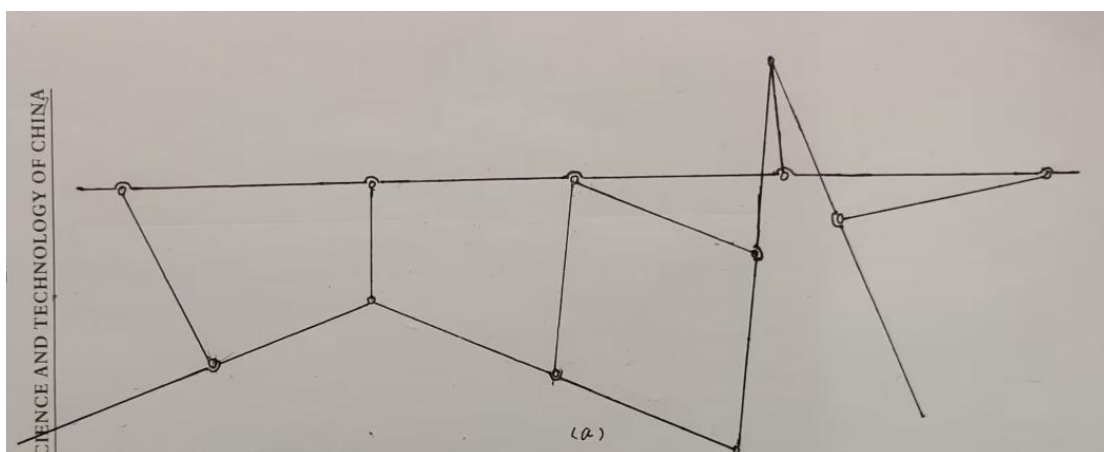
测试方式：用角位移传感器直接测外部同步轮的速度

第 6 章 实验报告及数据分析

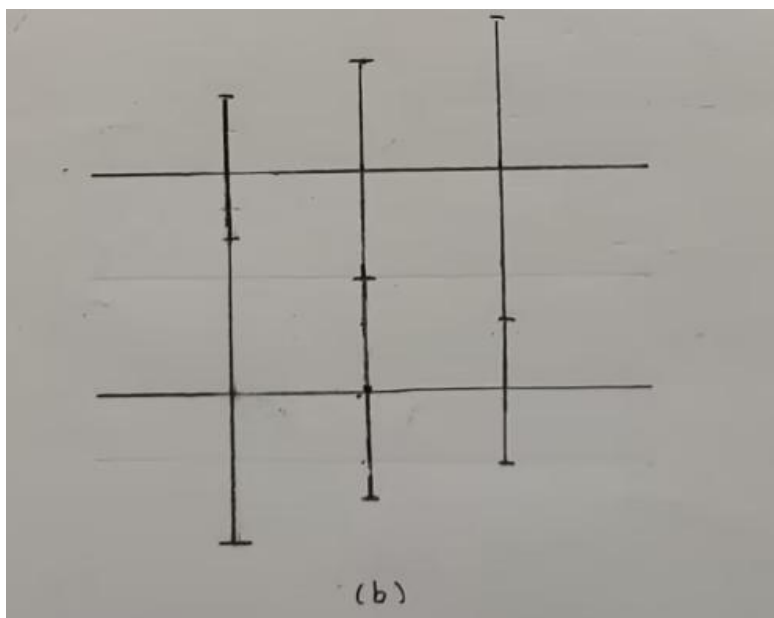
6.1 实验报告

1. 机构简图（比例：1:4）

腿部机构简图如（a）所示：



变速机构简图如（b）所示：



2. 机构工作原理

腿部机构由前后两个四杆机构和中间的辅助脚机构构成，左右两侧腿部运动时为三足步态以保持平稳。通过仿真得到了较好的杆件末端的足部轨迹，使得机器人拥有较大的前进速度和抬脚高度。

变速机构采用了序列变速箱的基本原理，利用不同齿轮的狗齿配合，以达到齿轮的不同啮合效果，由此获得三档速度。

详细原理描述见 3.1。

3. 实物模型参数

构件名称	参数	构件名称	参数	构件名称	参数
机架长杆	423mm	四杆腿部	173mm	辅助足摇杆	103mm
机架宽杆	253mm	四杆摇杆	103mm	辅助足腿部	183mm
四杆机架	223mm	四杆曲柄	63mm	轴长	165mm
齿轮 1	45 齿	齿轮 2	30 齿	齿轮 3	60 齿
电动机	30rpm				

4. 机构自由度计算： $F=3n-2P_l-P_h$

机构共有 20 个活动构件，28 个低副，3 个高副

$$F=3*20-2*28-3=1$$

运动结论：

5.运动模拟：在腿部轴处用电动机驱动，模拟蚂蚁行走的过程。

6.传感器安装测试：在电动机处安装角速度传感器，保证传感器外壳固定，测试电动机输入轴的转速；在腿部轴处安装带轮然后通过带传出到外部角速度传感器，保证传动过程的平稳，测试输出轴的角速度；

7. 指出在机构中自己的创新之处。

机器人的六足结构采用了不同于传统的全新方式，使用四杆机构为基础，使得结构更加简洁。变速箱借鉴了摩托车序列变速箱的原理，可实现三档变速。

8. 指出机构的不足之处

由于采用杆件连接很难精准把握每一个杆的尺寸，并且铰链的配合不稳，

经常出现脱落的现象，导致机器人在运动过程中出现了行走不稳和抖动的问题。同时由于 3d 打印件轴存在较大的尺寸误差，齿轮的啮合不紧密，需要外部力量压紧。

9. 进一步改进的设想

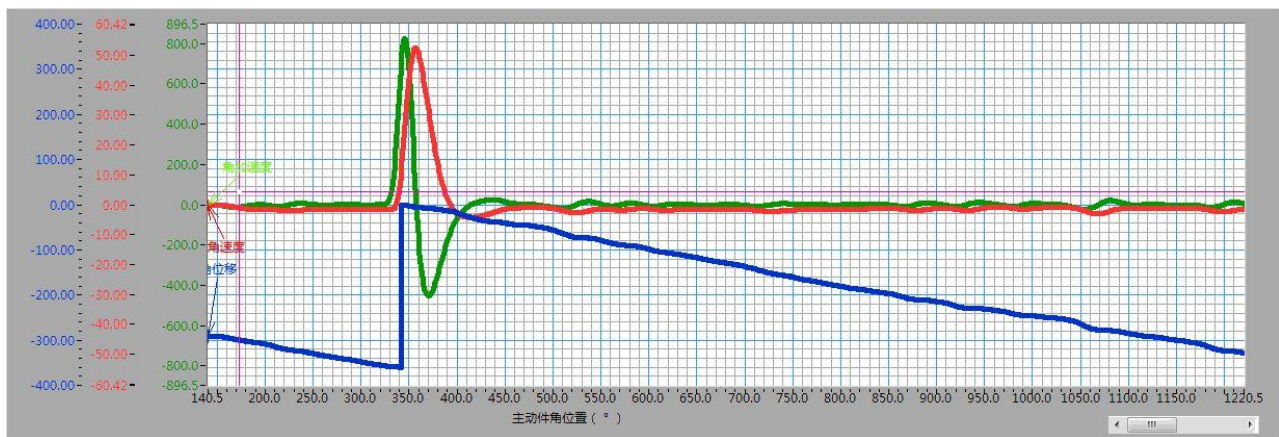
由于机构狗齿过长，导致最终轴上只能容纳两个齿轮，实现了两档变速，可以将狗齿尺寸进一步缩短调整，以实现预期功能。同时可以将变速机构做进一步优化，做出机架或者容器，使用操纵杆移动齿轮，避免人手和齿轮的接触。可以采用离合装置，以实现运动过程中的变速功能。对机架和腿部可以采用 PLA 打印件以减轻整体的重量，并减小尺寸误差，使运行更加流畅。对于轴这样加大难度大的零件，可以使用更加精确的打印器材。

6.2 测试数据

一档运动测试分析仪实验报告

主动件角位置 (°)	从动件角位置 (°)	从动件角速 度 (rad/s)	从动件角加速 度 (rad/s ²)
140.500000	-291.000000	-0.000319	-0.004301
261.500000	-334.500000	-1.583039	-1.106804
381.000000	-10.500000	12.561680	-337.968981
498.500000	-55.000000	-1.214529	-11.994658
620.000000	-107.000000	-1.826635	1.500102
739.000000	-156.000000	-2.022114	5.698058
858.000000	-200.000000	-1.303155	-4.725825
977.500000	-240.500000	-1.111317	-8.727698

1096.000000	-283.500000	-1.216962	4.439824
1214.000000	-326.000000	-1.667803	11.314908
1336.000000	-12.000000	18.065426	-394.309853
1454.500000	-53.500000	-1.114686	3.631922
1572.500000	-98.500000	-1.483755	1.915476
1692.500000	-141.000000	-1.438855	-2.974068
1812.000000	-190.500000	-1.783155	0.239640
1930.000000	-233.000000	-1.605825	-8.994381
2048.000000	-261.000000	-0.707923	-3.577622
2167.500000	-303.500000	-1.344875	-0.506047
2286.000000	-351.500000	-1.789305	4.837253
2406.500000	-27.500000	-1.608325	17.088664
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000



二档运动测试分析仪实验报告

主动件角位置 (°)	从动件角位置 (°)	从动件角速 度 (rad/s)	从动件角加速 度 (rad/s ²)
281.500000	-317.500000	-0.002835	-0.044324
404.000000	-51.500000	-5.462295	-70.451795
522.000000	-124.500000	-4.402728	11.869728
636.000000	-176.000000	-2.237097	-65.223016
760.500000	-296.500000	-1.730729	8.890794
881.000000	-35.000000	16.618343	-381.710770
1002.500000	-108.500000	-2.278690	-42.705569
1123.500000	-221.000000	-7.054229	33.990897
1243.500000	-302.000000	-2.007001	7.472740
1365.000000	-32.500000	20.414758	-422.844767
1465.000000	-94.000000	-0.297866	3.090893
1570.500000	-153.500000	-1.637287	2.389527
1694.500000	-263.000000	-2.923498	-16.160474
1818.000000	-359.000000	4.057158	593.781428
1939.000000	-98.500000	-1.997066	32.150135

2058.000000	-172.500000	-1.645832	-9.611120
2184.000000	-296.000000	-2.491402	-0.766049
2305.500000	-31.500000	34.898345	-447.289223
2429.000000	-107.000000	-1.417731	16.095863
2548.500000	-177.500000	-1.670719	-6.564856
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

(图像数据丢失)

6.3 测试数据分析

表一、表二分别为机器人在一档、二档速度下的测试数据，主动件为电机，从动件为驱动轴。首先是数据的平稳性：由图像可以看出整体较稳，某些位置波动较大，由数据分析可以得到一档数据有 3 个离群值，二档有 5 个，二档较一档更不平稳；其次是数据的大小分析，对这两组数据分别剔除正值，再根据 3σ 原则剔除离群值并对剩余数据取均值，得到一档、二档的驱动轴的角速度的均值分别为-1.379032、-2.453562，相差约 1.8 倍，接近 2 倍，符合实验预期。

python 代码如下：

```
import pandas as pd
import numpy as np

data1=np.array([-0.000319,-1.583039,12.561680,-1.214529,-1.826635,-2.022114
,-1.303155,-1.111317,-1.216962,-1.667803,18.065426,-1.114686,-1.483755,-1.43885
5,-1.783155,-1.605825,-0.707923,-1.344875,-1.789305,-1.608325,0.000000])

data2=np.array([-0.002835,-5.462295,-4.402728,-2.237097,-1.730729,16.61834
3,-2.278690,-7.054229,-2.007001,20.414758,-0.297866,-1.637287,-2.923498,4.05715
8,-1.997066,-1.645832,-2.491402,34.898345,-1.417731,-1.670719,0.000000])

df1 = pd.DataFrame(data1,columns=["value"])
```

```
df2 = pd.DataFrame(data2,columns=["value"])
pro_df1 = df1[df1['value']<0]
pro_df2 = df2[df2['value']<0]
mean1 = pro_df1['value'].mean()
mean2 = pro_df2['value'].mean()
sigma1 = pro_df1['value'].std()
sigma2 = pro_df2['value'].std()
final_mean1=pro_df1[(pro_df1['value']<(mean1+3*sigma1))&(pro_df1['value']>
(mean1-3*sigma1))].mean()
final_mean2=pro_df2[(pro_df2['value']<(mean2+3*sigma2))&(pro_df2['value']>
(mean2-3*sigma2))].mean()
print("  一  档  数  据  的  离  群  值  有  {}  个
".format(df1.count().value-pro_df1.count().value))
print("  二  档  数  据  的  离  群  值  有  {}  个
".format(df2.count().value-pro_df2.count().value))
print("二者均值分别为{},{}".format(final_mean1.value,final_mean2.value))
print("相差{}倍".format(final_mean2.value/final_mean1.value))运行结果如图:
```

```
一档数据的离群值有3个
二档数据的离群值有5个
二者均值分别为-1.3790320555555557, -2.4535628125
相差1.779192008347884倍
```

结束语

通过本次实验，我们基本上实现了六足机器人的设计和搭建，虽然在方案实施的过程中我们遭遇了很多问题，在最终都一一进行了解决。尽管过程是非常艰辛的，但是我们锻炼了多方面的能力，例如：仿真软件的使用能力，专业知识的应用能力，随机应变的思维能力，动手能力，合作能力等都得到了巨大的提升。在未来，随着专业知识的进一步加深，我们可以将课程中设计的六足机器人进一步的改进。并将它的功能和实际应用场景相结合，做出真正有用的机器人。