



**北京航空航天大学**  
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

**第二十四届“冯如杯”学生创意大赛**

**轮履复合式四轮菱形越障机器人**

## 摘要

近些年来，机器人开始逐渐应用于灾难救援、反恐排爆、军事侦查等领域代替人类执行危险任务，其工作环境往往复杂多变。基于这些方面，本项目设计了一种新型轮履复合式四轮菱形越障机器人。该机器人的主要特点是：1.本机器人的轮履复合结构与之前的轮履复合结构不同，只是该车轮的内履带展开在此车轮表面包裹一层硬质履带，从而大大减轻了履带的重量；2.本项目建立一种新的越障模型，为适应这种越障模型，本机器人并不是像以往的机器人那样采取平面式的布局，而是采用了倾斜型的布局，并且分别讨论了在几种不同情况下机器人越障的可能性，并进行了理论分析，计算了机器人所能越过障碍的最大高度。3.与以往的履带机器人和轮式机器人不同，本机器人采用四轮菱形式分布结构，将车轮数由六轮减少到了四轮，且并未降低机器人的稳定性，大大减轻了机器人的重量，简化了结构。4.本项目也讨论了机器人翻越沟壑的能力。5.本机器人也应用了电磁原理建立了一套转向传动系统，并设计了一种新型的万向轮安放在机器人的前后两轮上，使机器人能够原地 360 度转向。

关键词：四轮机器人，越障，轮履复合，传动系统

# 目录

摘要 .....	i
目录 .....	ii
图表目录 .....	iv
引言 .....	1
1 机器人简介 .....	1
1.1 基本结构 .....	2
2 原理及功能 .....	3
2.1 越障 .....	3
2.1.1 机器人倾斜布局原因 .....	3
2.1.2 机器人越障模型 .....	4
2.1.3 卡死装置: .....	13
2.1.4 伸缩装置: .....	14
2.2 转向 .....	14
2.3 翻越沟壑 .....	15
2.4 轮履复合结构 .....	16
2.5 沙地行走 .....	17
2.5.1 轮壤相互作用模型 .....	17
2.5.2 车轮表面单位作用力计算 .....	19
2.5.3 轮齿单元作用力计算 .....	20
2.6 条件分析 .....	21
2.7 传动系统 .....	22
3 可行性分析 .....	23
3.1 伸缩装置 .....	23
3.1.1 技术实现思路及相关技术分析 .....	23
3.1.2 预计技术难点 .....	24
3.2 轮履复合结构 .....	24
3.2.1 技术实现思路及相关技术分析 .....	24
3.2.2 预计技术难点 .....	25
4 应用前景 .....	25

4.1 应用场景 .....	25
4.1.1 救援勘探 .....	25
4.1.2 月球车 .....	25
4.2 进一步发展 .....	26
4.2.1 关于倾覆 .....	26
4.2.2 轮履腿复合结构 .....	26
4.2.3 新的运动方式 .....	26
结论 .....	27

## 图表目录

图 1- 1 机器人整体结构图 .....	2
图 1- 2 运动杆绕中心转动图 .....	2
图 2- 1 平面式机器人图 .....	3
图 2- 2 倾斜式机器人图 .....	3
图 2- 3 前中轮越障图 .....	4
图 2- 4 前中轮越障图 .....	7
图 2- 5 中后轮越障图 .....	7
图 2- 6 中后轮越障图 .....	8
图 2- 7 后轮越障图 .....	9
图 2- 8 后轮越障图 .....	9
图 2- 9 伸缩装置初始状态 .....	10
图 2- 10 伸缩装置收缩状态 .....	10
图 2- 11 后轮越障图 .....	11
图 2- 12 中轮越障图 .....	12
图 2- 13 中轮越障图 .....	12
图 2- 14 卡死装置 .....	14
图 2- 15 万向轮 .....	15
图 2- 16 机器人翻越沟壑图 .....	16
图 2- 17 轮履复合结构图 .....	17
图 2- 18 机器人履带行走模式 .....	17
图 2- 19 轮壤接触模型 .....	18
图 2- 20 车轮表面、轮齿与干沙接触力示意图 .....	18
图 2- 21 轮齿与干沙作用 .....	20
图 2- 22 重心对机器人倾覆的影响 .....	22
图 2- 23 中轮传动系统图（通正向电流时） .....	23
图 2- 24 中轮传动系统图（通反向电流时） .....	23
图 2- 25 卡锁开关 .....	23

图 3-1 伸缩装置收缩状态 .....	25
----------------------	----

图 4-1 新的运动方式示意图 .....	26
-----------------------	----

## 引言

近些年来，机器人开始逐渐应用于灾难救援、反恐排爆、军事侦查等领域代替人类执行危险任务，其工作环境往往复杂多变。因此要求机器人的移动机构具有高度的机动灵活性和环境适应性。已经出现的机器人的移动机构主要有轮式、履带式和腿式，其中以轮式的效率最高，但其适应能力相对较差，而腿式的适应能力最强但其效率最低……；履带式移动机构具有良好越障能力，适合在崎岖的地面上行使。但由于沉重的履带和繁多的驱动轮使得整体机构笨重，消耗的功率也相对较大。轮式移动机器人具有运动速度快、能量利用率高、结构简单、控制方便等优点，但其相对适应能力不强。

如今国内外解决这种问题的方法是采用复合技术，用得最多的就是轮履复合技术。该技术将履带与轮的两种行进方式结合。该技术最大的特点在于能够实现可以改变自身周长的履带，同时又能有效传递动力的履带：平坦路面行走变为轮式，提高行进效率；越障时变为履带式，提高攀爬能力。但这样会让机器人在运动过程中携带较多履带，增加机器人的重量，且会令机器人多做许多无用功，能耗比较大。

基于这些原因，本项目设计了一种新型的轮履复合式四轮菱形越障机器人。该机器人具有轮式和履带式机器人的共同优点，在平坦路面上，它具有和轮式机器人一样的较高移动速度；在复杂路面上，它可以转换成履带式机器人，从而适应多种路况。且本机器人的轮履复合技术只是该车轮的内履带展开在此车轮表面包裹一层硬质履带，大大减轻了履带的重量，降低了能耗比，提高了效率。

## 1 机器人简介

本机器人是将轮式机器人与履带机器人结合在一起，综合了二者的优点，实现了最基本的越障、跨沟以及 360°的转向，同时又不像履带机器人一样笨重，最大限度的减轻了质量。另外，机器人不采用对称式的六轮结构也是有原因的。后面我们将讨论到前轮和中轮里将要安放可伸缩的硬质履带，若采用对称的六轮结构将增大机器人的重量，而此四轮菱形结构的稳定性能并不比对称式的六轮结构差，且减轻了重量，性能更优越。此机器人的整体结构图如图 1-1 所示，值得注意的是此机器人为倾斜型布局，而不是以往机器人的平面式布局。

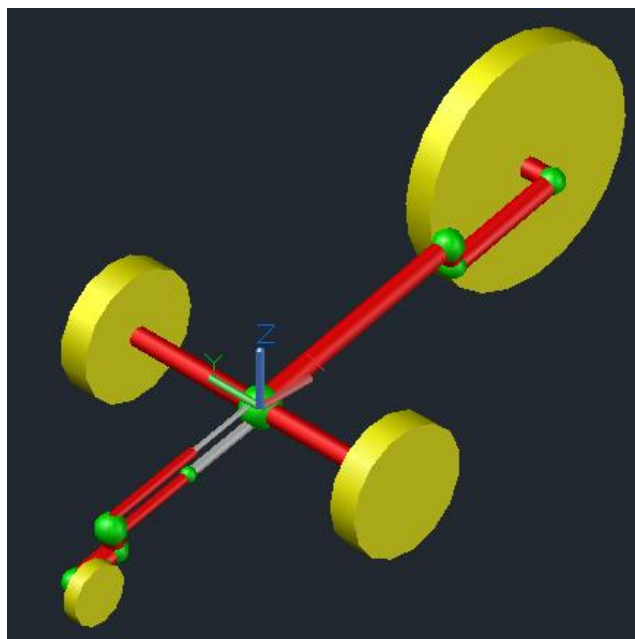


图 1-1 机器人整体结构图

## 1.1 基本结构

本机器人由前轮、中轮、后轮、前中轮运动杆、中后轮运动杆、伸缩装置、电动机等部分组成。其中，前中轮运动杆与中后轮运动杆可以绕机器人中心运动（图 1-2）。前轮与后轮均有万向轮与运动杆相连，万向轮的结构将在 2.2 中介绍。

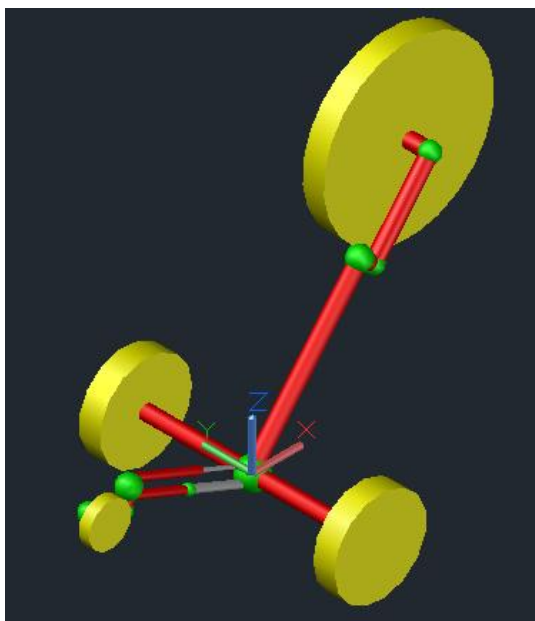


图 1-2 运动杆绕中心转动图



## 2 原理及功能

### 2.1 越障

#### 2.1.1 机器人倾斜布局原因

首先我考虑将四轮的圆心置于同一水平面内（图 2-1），则机器翻越障碍时运动杆要对前轮施加一个大小至少为  $F$  的力。设前中走行轮中心距为  $L$ ，系统对运动杆的力为  $F'$ ，力臂为  $L'$ ，则有：

$$F' L' \geq mgL$$

$$\therefore F' \geq \frac{mgL}{L'}$$

不妨假设  $L = 10L'$ ，则有  $F' \geq 10mg$ ，也就是说需要超过前轮 10 倍重力的力才可能将前轮抬起，从而进一步实现后面的越障行动，较费力。

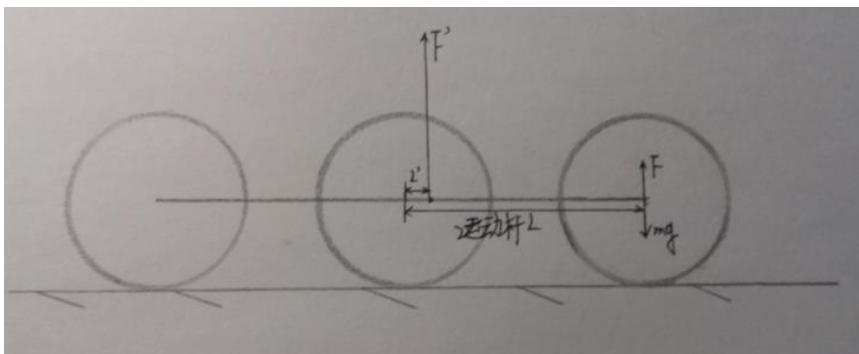


图 2-1 平面式机器人图

因而将机器人改为倾斜型设计（图 2-2）。

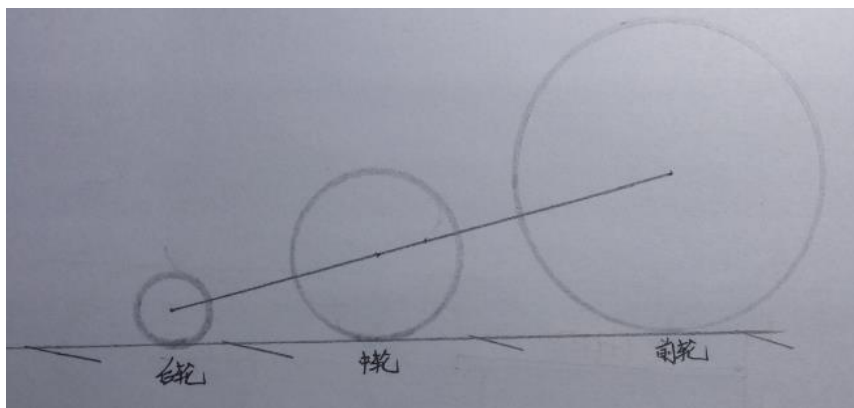


图 2-2 倾斜式机器人图

### 2.1.2 机器人越障模型

既然机器人的整体构型已经确定，下面我们来讨论一下机器人的越障行为，接下来将构建一系列的越障模型。

(1) 若障碍物低于前轮半径  $R$ ，则按如下方式越过障碍：（暂时只考虑前轮和中轮的越障）

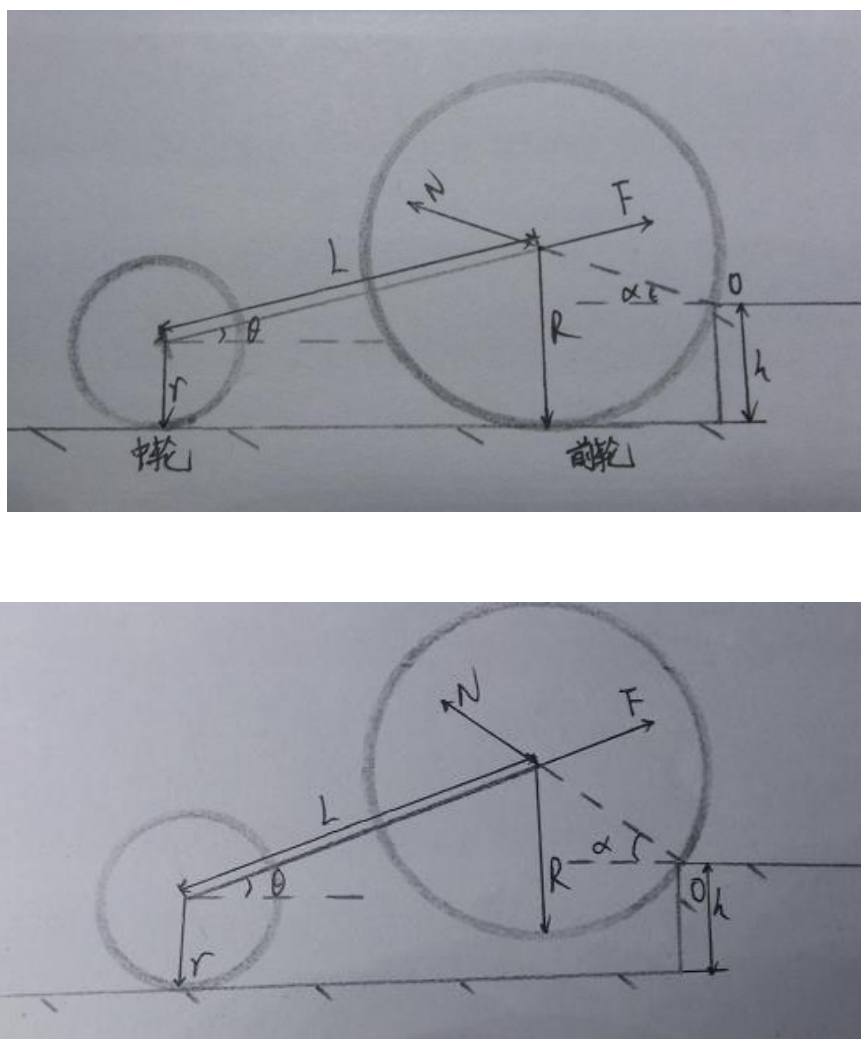


图 2-3 前中轮越障图

机器前轮突然撞击到障碍物，瞬间  $v=0$ ，之后机器则以  $O$  为支点做杠杆运动。对前轮的受力分析如图所示（图 2-3），设此过程中前轮处于平衡状态。

设此过程中前轮所受牵引力为  $F$ （此时前轮自身动力作用不明显，则  $F$  主要是前中轮运动杆的推力），支点  $O$  对前轮的支持力为  $N$ ，前中两轮运动杆与水平面的夹角为  $\theta$ ，前轮圆心与支点  $O$  所连直线与水平面夹角为  $\alpha$ ，前轮质量为  $m$ ，半径为  $R$ ，中轮半径为  $r$ ，前中两轮之间运动杆长度为  $L$ ，障碍高度为  $h$ ，则有如下关系：

$$F \cos \theta = N \sin \alpha \dots\dots\dots 1$$

$$N \sin \alpha + F \sin \theta = mg \dots\dots\dots 2$$

$$\text{由 1 可知, } N = \frac{F \cos \theta}{\sin \alpha} \dots\dots\dots 3$$

将 3 式代入 2 式中, 得:

$$F(\tan \alpha \cos \theta + \sin \theta) = mg$$

$$\text{即 } F(\tan \alpha \cos \theta + \tan \theta \cos \theta) = mg$$

$$\therefore F \cos \theta (\tan \alpha + \tan \theta) = mg$$

$$\therefore F \cos \theta = \frac{mg}{\tan \alpha + \tan \theta}$$

$$\text{由图可知, } \sin \theta = \frac{R \sin \alpha + h - r}{L}$$

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = \sqrt{1 - \left(\frac{R \sin \alpha + h - r}{L}\right)^2}$$

$$F = \frac{mg}{(\tan \theta + \tan \alpha) \cos \theta} = \frac{mgL}{(\tan \alpha + \tan \theta) \sqrt{L^2 - (R \sin \alpha + h - r)^2}}$$

$$\therefore \tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \frac{\frac{R \sin \alpha + h - r}{L}}{\sqrt{1 - \left(\frac{R \sin \alpha + h - r}{L}\right)^2}} = \frac{R \sin \alpha + h - r}{\sqrt{L^2 - (R \sin \alpha + h - r)^2}}$$

$$\therefore F = \frac{mgL}{(\tan \theta + \tan \alpha) \sqrt{L^2 - (R \sin \alpha + h - r)^2}} = \frac{mgL}{\left(\tan \alpha + \frac{R \sin \alpha + h - r}{\sqrt{L^2 - (R \sin \alpha + h - r)^2}}\right) \sqrt{L^2 - (R \sin \alpha + h - r)^2}}$$

$$= \frac{mgL}{R \sin \alpha + h - r + \sin \alpha \sqrt{\frac{L^2 - (R \sin \alpha + h - r)^2}{1 - \sin^2 \alpha}}}$$

$$\therefore R > 0, \sqrt{\frac{L^2 - (R \sin \alpha + h - r)^2}{1 - \sin^2 \alpha}} > 0,$$

$$\text{而 } 0^\circ < \alpha_0 \leq \alpha \leq 90^\circ, \therefore \sin \alpha > 0,$$

且 F 随  $\alpha$  的增大而减小。不妨设

$$f_{(\alpha)} = \frac{mgL}{R \sin \alpha + h - r + \sin \alpha \sqrt{\frac{L^2 - (R \sin \alpha + h - r)^2}{1 - \sin^2 \alpha}}}$$

则有  $f_{(\alpha_0)} \geq F \geq f_{(90^\circ)}$ ,

$$\text{因此杆所承受的最大压力 } F_{\max} = \frac{mgL}{R \sin \alpha_0 + h - r + \sin \alpha_0 \sqrt{\frac{L^2 - (R \sin \alpha + h - r)^2}{1 - \sin^2 \alpha_0}}}.$$

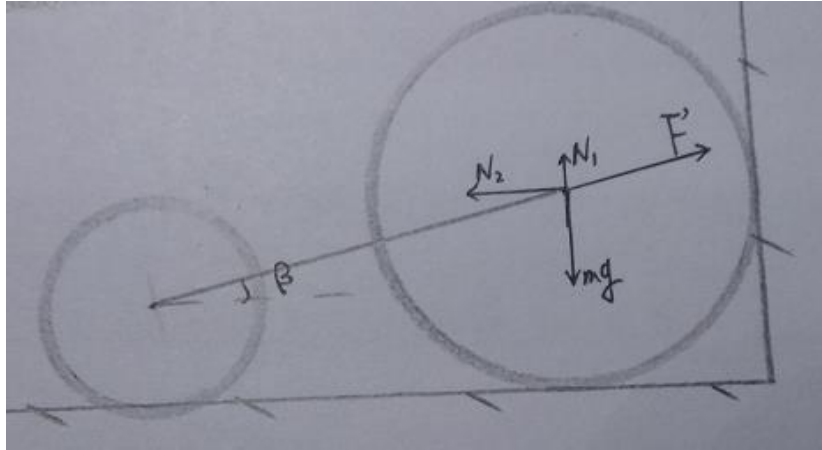
$$\text{只要电机输出的力大于 } F_{\max} = \frac{mgL}{R \sin \alpha_0 + h - r + \sin \alpha_0 \sqrt{\frac{L^2 - (R \sin \alpha + h - r)^2}{1 - \sin^2 \alpha_0}}}$$

即可越障。后轮同理，这里不再另作分析。

(2) 若障碍物高于前轮半径  $R$ ，仍然先只考虑前中轮的运动情况，因前中轮运动杆处于静止状态时与水平面夹角为  $\beta$ ，设前轮所受牵引力为  $F'$ （分析同  $F$ ），则前轮所受

杆的弹力为  $F'' = \frac{F'}{\cos \beta}$ 。受力分析（图 2-4），可知，当  $F'' \sin \beta \geq mg$ ，即  $F' \geq \frac{mg}{\tan \beta}$  时，

前轮将被抬起。之后的过程同上。



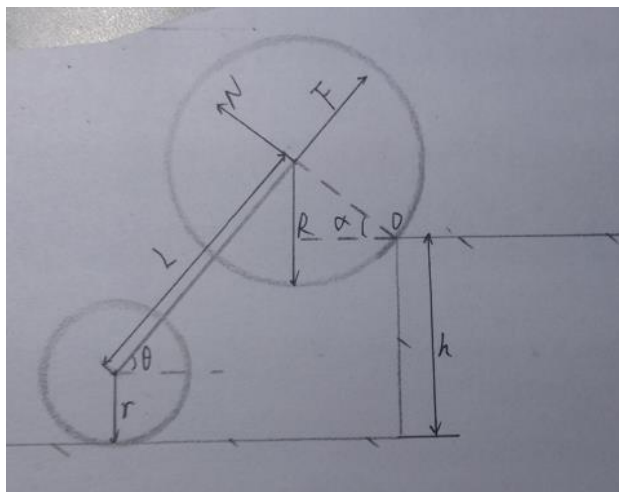


图 2-4 前中轮越障图

(3) 下面我们以中后轮为例计算一下所能越过障碍物的最大高度。(图 2-5)

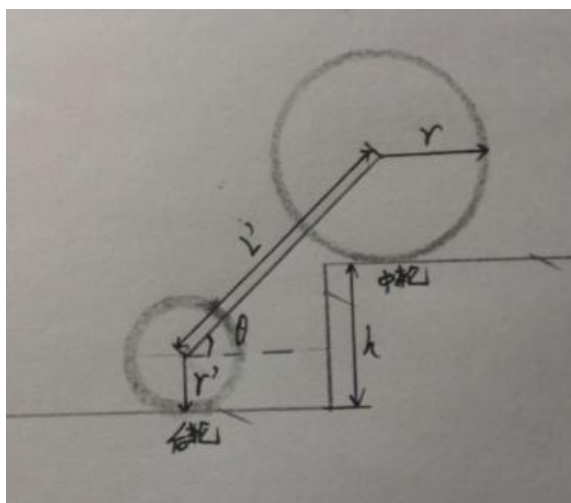


图 2-5 中后轮越障图

设运动杆与水平面的夹角为 $\theta$ ，后轮半径为 $r'$ ，中轮半径为 $r$ ，中后行走轮中心距为 $L'$ ，则

$$\sin \theta = \frac{h+r-r'}{L'}$$

又如图（图 2-6），

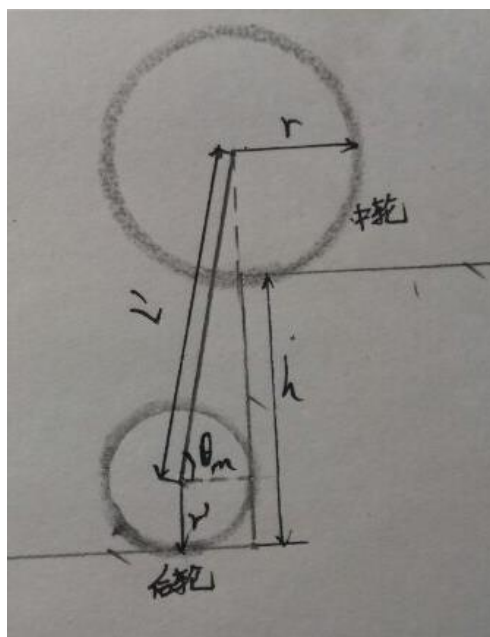


图 2-6 中后轮越障图

设  $\theta_m$  为  $\theta$  的最大值，则

$$\sin \theta_m = \frac{\sqrt{L'^2 - r'^2}}{L'}$$

由  $\sin \theta \leq \sin \theta_m$ ，得  $h \leq \sqrt{L'^2 - r'^2} + r - r'$ 。

∴ 中后轮所能越过障碍物的最大高度  $h_{\max} = \sqrt{L'^2 - r'^2} + r - r'$ 。

(4) 后轮如何越过障碍呢？这里有两种方案。

方案 1：当障碍高度较小能够被拖拽上来时，通过前轮和中轮的动力，直接将后轮拖上来。设中后轮运动杆与水平面的夹角为  $\tau$ ，前中轮与中后轮所称夹角的锐角为  $\vartheta$ ，前中两轮的合拉力为  $F$ ，则由图 2-7 可知，

$F \sin \tau \cos \vartheta \geq mg$ ，（ $\vartheta = \tau - \beta$ ）（ $\beta$  为前中轮运动杆处于静止状态时与水平面夹角，由上可知），由此可计算拖拽后轮所需的最小力。

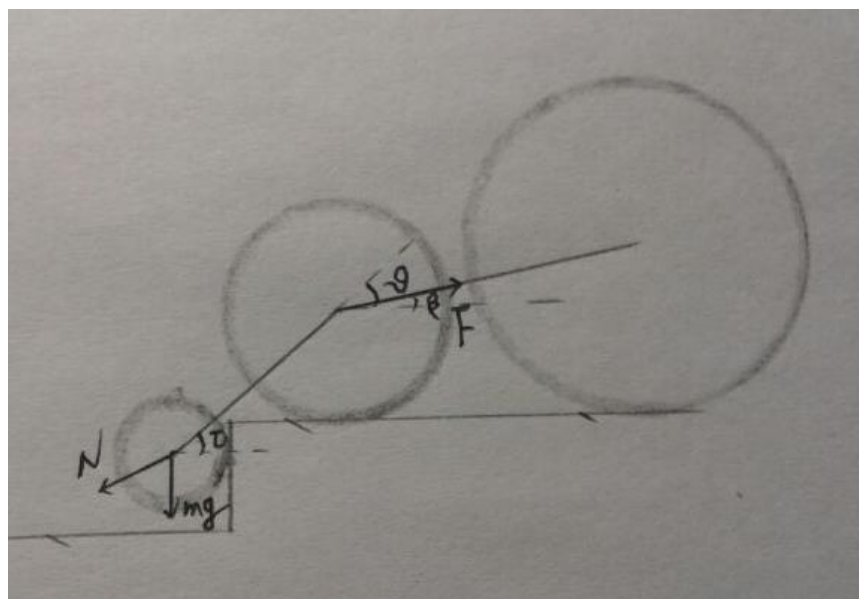


图 2-7 后轮越障图

方案 2: 当障碍高度较大时, 如图 2-8,

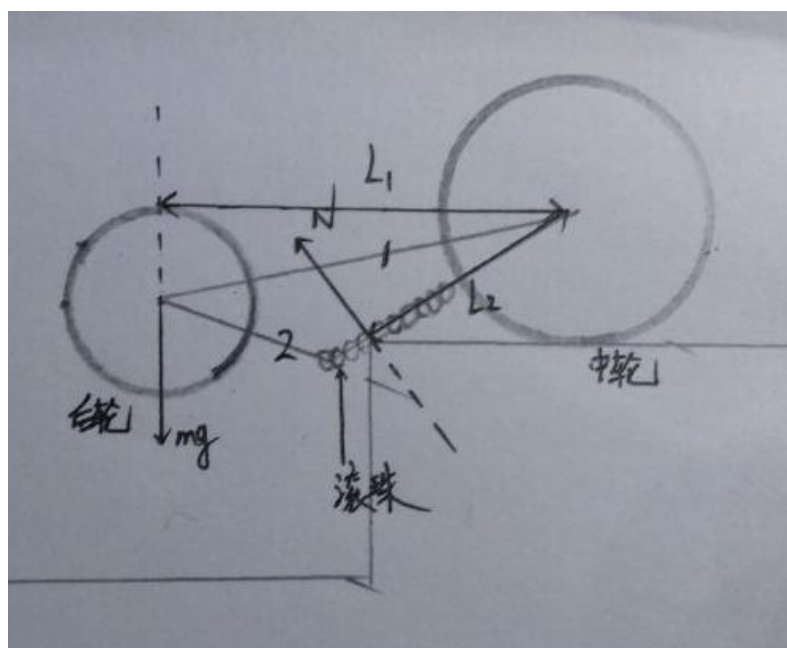


图 2-8 后轮越障图

装置 1 为伸缩装置 (如图 2-9), 它其中下方的部分可以伸缩, 上方的部分可以绕中心点上下转动 (如图 2-10), 这样就可以实现伸缩。

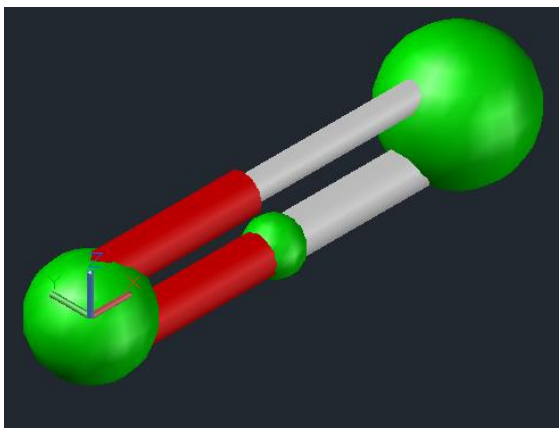


图 2-9 伸缩装置初始状态

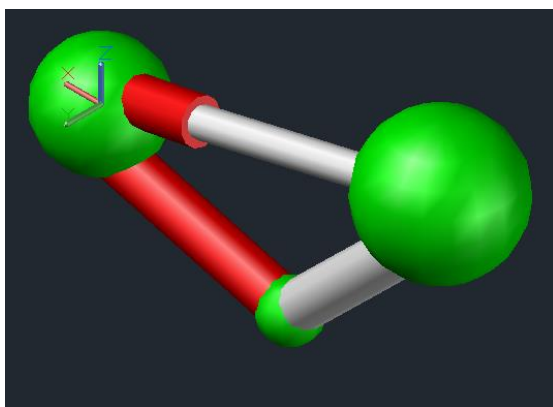


图 2-10 伸缩装置收缩状态

装置 2 的前部装有滚珠起润滑作用。设  $O$  点对装置 2 的支持力为  $F_1$ ，后轮质量为  $m$ ，

由杠杆原理， $mgL_1 = NL_2$ ， $\therefore N = \frac{mgL_1}{L_2}$ 。

再设  $O$  点的动摩擦因数为  $\mu$ ，则装置 2 在  $O$  点所受摩擦力  $f = \mu N = \mu \frac{mgL_1}{L_2}$ 。

又  $\because$  接触面是滚动摩擦， $\therefore f' = \mu_1 f = \mu_1 \mu N = \mu_1 \mu \frac{mgL_1}{L_2}$ ，（ $\mu_1$  是滚动摩擦力与滑动

摩擦力的比值）阻力很小，对杆所产生的危害也较小。（图 2-11）



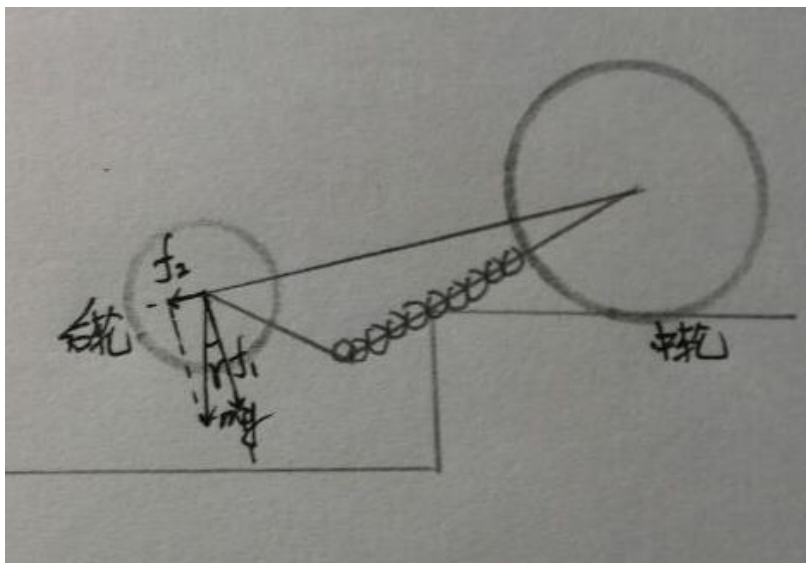


图 2- 11 后轮越障图

$$f_1 = F \cos \gamma$$

$$f_2 = F \sin \gamma$$

$$F = mg$$

( $f_1$  是伸缩杆所受的纵向拉力,  $f_2$  是伸缩杆所受的横向拉力)。

由此可知, 伸缩杆所受的横向拉力  $f_2$  对杆所造成的损伤小于伸缩杆所受的纵向拉力  $f_1$  对杆所造成的损伤, 除此之外,  $O$  点对装置 2 的支持力为  $N$  对装置 2 也有伤害。以上两种方法无论哪一种, 要想优化, 都需要减小后轮质量  $m$ . 在接下来的讨论中将研究减小  $m$  的方法。

(5) 下面补充一下中轮的越障, 首先讨论前中轮的越障过程。

设前轮半径  $R$ , 中轮半径  $r$ , 前中行走轮中心距为  $L$ , 障碍高度为  $h$ , 运动杆与水平面的夹角为  $\theta$ , 当机器人中轮上升距离  $x$  时, 如图 2-12, 有

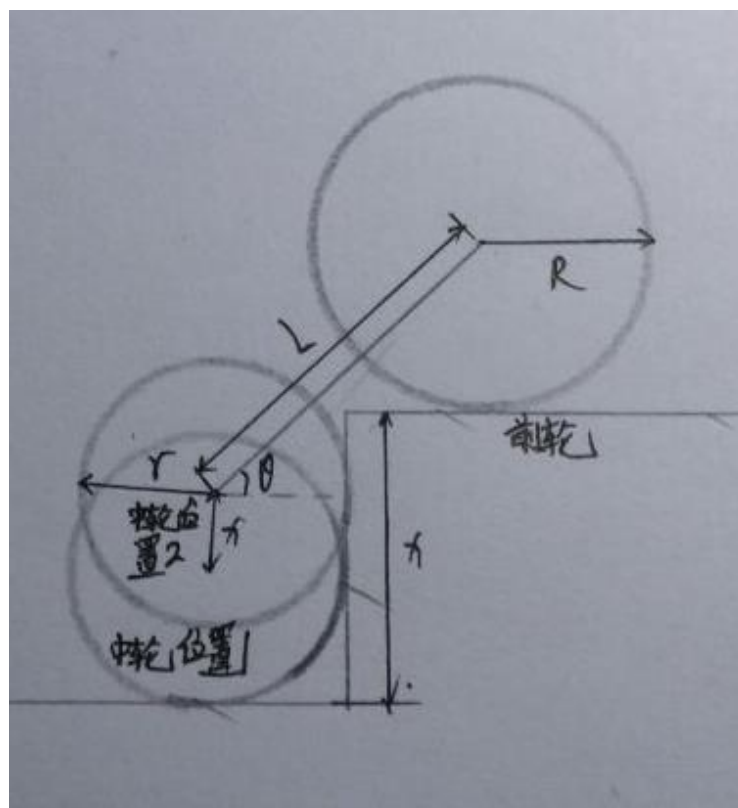


图 2-12 中轮越障图

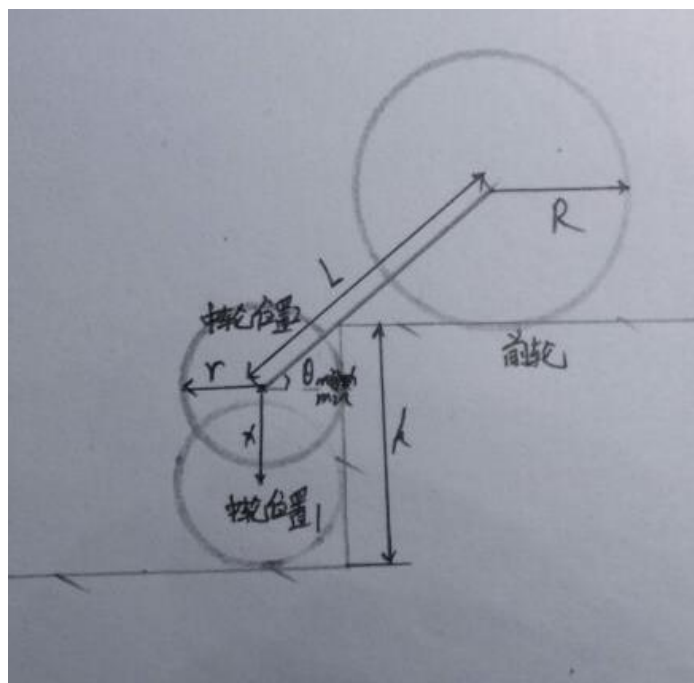


图 2-13 中轮越障图

$$\sin \theta = \frac{h+R-r-x}{L},$$

$$\therefore \cos \theta = \sqrt{1 - \left(\frac{h+R-r-x}{L}\right)^2}.$$

如图 2-13,  $\tan \theta_{\min} = \frac{h-x-r}{r},$

$$\therefore \cos \theta_{\min} = \frac{r}{\sqrt{(h-x-r)^2 - r^2}},$$

由已知,

$$\cos \theta \leq \cos \theta_{\min}, \therefore \sqrt{1 - \left(\frac{h+R-r-x}{L}\right)^2} \leq \frac{r}{\sqrt{(h-x-r)^2 - r^2}}.$$

$$\text{即 } 1 - \left(\frac{h+R-r-x}{L}\right)^2 \leq \frac{r^2}{(h-x-r)^2 - r^2}$$

$$\text{化简, 得 } \frac{L^2}{(h+R-r-x)^2} \leq 1 + \frac{r^2}{(h-r-x)^2 - r^2}.$$

由已知,  $0 \leq x \leq h-2r,$

$$\therefore \frac{L^2}{(h+R-r-x)^2} \leq \frac{L^2}{(R+r)^2},$$

$$1 + \frac{r^2}{(h-x-r)^2 - r^2} \geq 1 + \frac{r^2}{(h-r)^2 - r^2} = \frac{(h-r)^2}{(h-r)^2 - r^2},$$

$$\therefore \text{当 } \frac{L^2}{(R+r)^2} \geq \frac{(h-r)^2}{(h-r)^2 - r^2} \text{ 时, } \frac{L^2}{(h+R-r-x)^2} \geq 1 + \frac{r^2}{(h-x)^2} \text{ 一定成立。}$$

由此能解出中轮能跨越的障碍高度  $h$ . (此解并非中轮所能跨越的最大高度,但具有普遍适用性)

将(3)、(5)中所得高度进行比较,即可得到机器人所能越过的障碍的最大高度。

### 2.1.3 卡死装置:

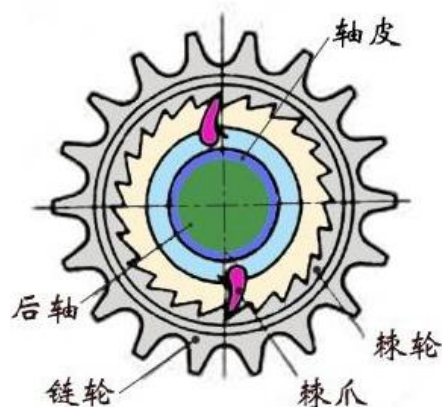


图 2-14 卡死装置

卡死装置是为防止机器在后轮越障过程中机器人被后轮拖下而设计的，如图 2-14，其结构参考了自行车的飞轮结构。卡死装置将固定在前轮和中轮上，由卡死装置的结构图可知，当车轮向前转动时，装置不妨碍其运动；当车轮有向后运动趋势时，中间的棘轮将整个装置卡死，从而阻止车轮的运动，为后轮越障提供一个固定点，使后轮能够顺利越障。

#### 2.1.4 伸缩装置：

刚刚的装置 1 涉及伸缩，现在谈一下伸缩装置，伸缩装置是根据数码相机摄像头的伸缩原理而来的。简而言之，就是机身里面的精密的步进电机精确地控制旋转角度，也可输出较大的扭矩，可以点动，急停，转速和转角不受有无阻力或阻力大小影响，通过这一结构，实现杆的伸缩。

## 2.2 转向

为了实现 360°转向，前后两轮通过万向轮与机器人主体结构相连，而这又不是普通的万向轮，因为普通的万向轮不能满足本机器人的结构需求，因此设计了一种新型的万向轮，此万向轮的转动方式如图 2-15 所示。

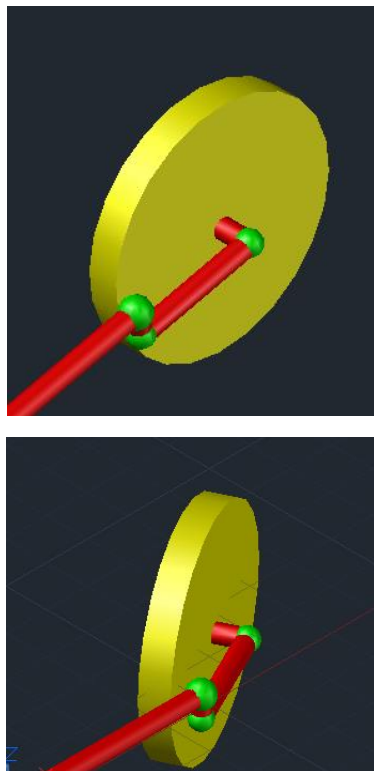


图 2-15 万向轮

因机器是四轮成菱形排布，可通过控制 2,4 轮的转向不同来实现转弯。由此可计算机器所能通过的最小弯道。

设 2,4 轮的速度分别为  $v_2, v_4$ ，且 2,4 轮之间的连接杆的距离为  $2L$ ，设 2, 4 轮转弯时做圆周运动的半径分别为  $r_2, r_4$ ，

∵ 2,4 轮所做圆周运动的角速度相同，

$$\therefore \frac{v_2}{r_2} = \frac{v_4}{r_4}, \quad r_2 + r_4 = 2L$$

$$\therefore r_2 = \frac{2v_2L}{v_2 + v_4}, \quad r_4 = \frac{2v_4L}{v_2 + v_4}$$

由分析可知，当  $r_2 = r_4$  时，转弯时所占空间最小。且用一个电动机即可，具体原因参照 2.7。

### 2.3 翻越沟壑

通过分析可知，只要沟深  $h \leq \sqrt{L^2 - r'^2} + r - r'$ ，机器就可越过沟。

原因：若所越沟的宽度小于机器车轮半径的尺寸，则机器可顺利通过。（图 2-16）  
若所越沟的宽度大于机器的车轮半径的尺寸，则转化为越障模型，具体参考 2.1。

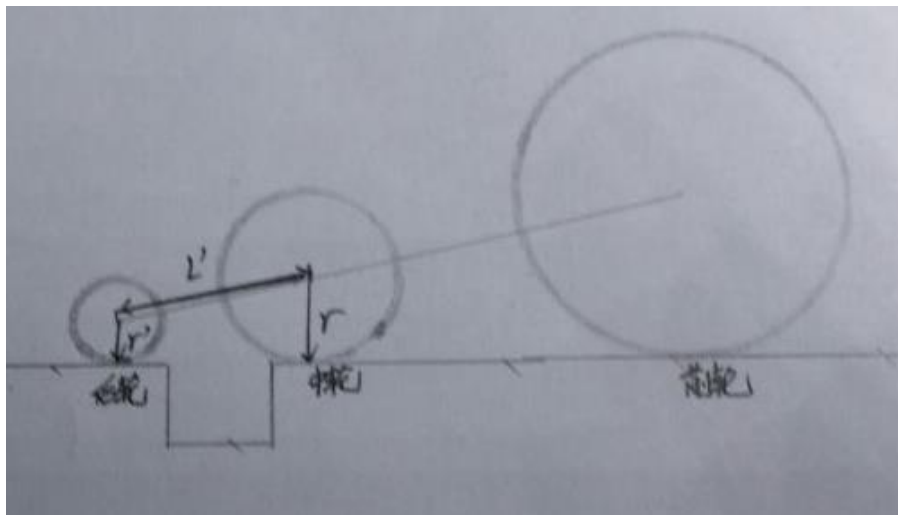
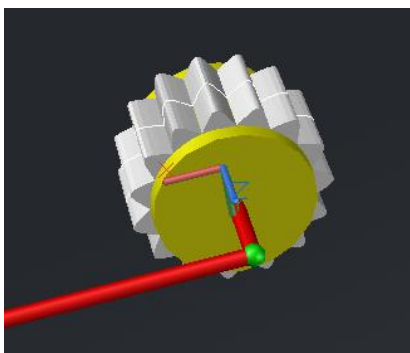


图 2-16 机器人翻越沟壑图

## 2.4 轮履复合结构

该机器人具有履带和轮式两种运动方式，以实现在不同环境中的行走。此轮履复合结构与以往的略有不同，以前机器人的轮履复合结构是将履带撑开，由轮式机器人转变为履带式机器人，而本机器人的履带模式只是在轮子外围覆盖一层硬质履带，如图 2-17。当路面平坦时，履带收进轮内，机器人以轮式行进；当路面复杂，轮式无法通过时，机器就会将履带撑开，切换为履带模式行走。



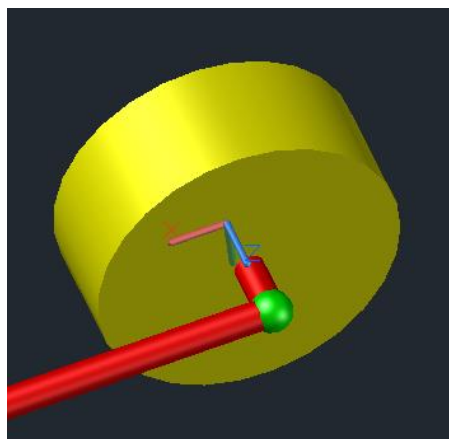


图 2-17 轮履复合结构图

由 2.1 计算可知，机器人需要尽量减小后轮的质量。因此，可将履带安放在前中三个轮上，后轮不安置履带；当需要履带时，将后轮收起置机器人身后（如图 2-18，这里机器人的万向轮与伸缩装置均未画出），通过这种方法即可减小后轮质量。

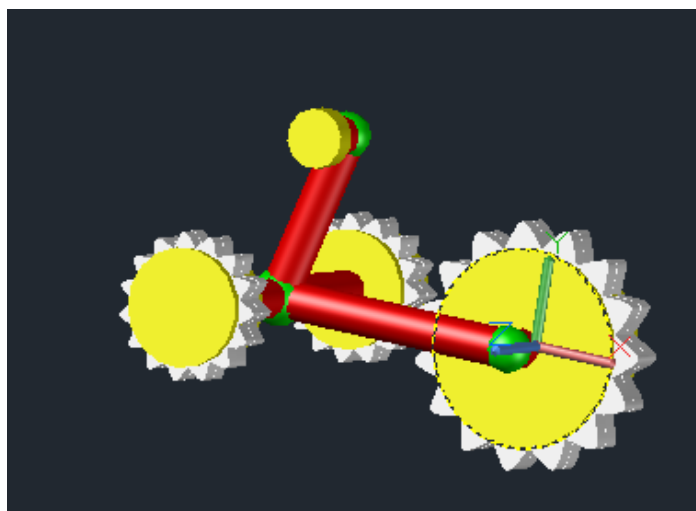


图 2-18 机器人履带行走模式

## 2.5 沙地行走

### 2.5.1 轮壤相互作用模型

当机器将履带张开时，可近似将车轮看作有齿刚性轮。有齿刚性轮在松软干沙表面行走时，不仅要考虑车轮表面的应力分布，还需考虑轮齿的轮刺效应。由于轮齿在车轮行驶的过程中会形成如图 2-19 所示的 3 个区域，即进入区 A、压实区 B 和离开区 C，所以需要对车轮和轮齿与干沙表面的接触情况进行检测。

又因为轮齿的布局是不连续的，因此轮齿与干沙表面之间是间接性接触。此外，轮齿接触时与干沙的相互作用力受到车轮深陷深度、载荷大小以及车轮转动角度的影响，因此实时仿真时很难判断齿轮与干沙的接触状态。为了解决轮齿在运动过程中与干沙表面实时接触的问题，建立了如图 2-20 所示的轮壤相互作用的动力学模型。

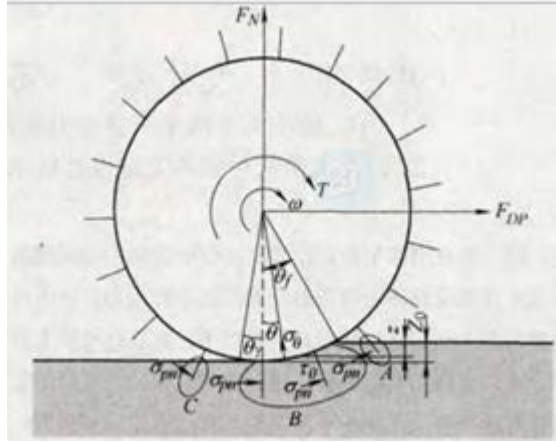


图 2-19 轮壤接触模型

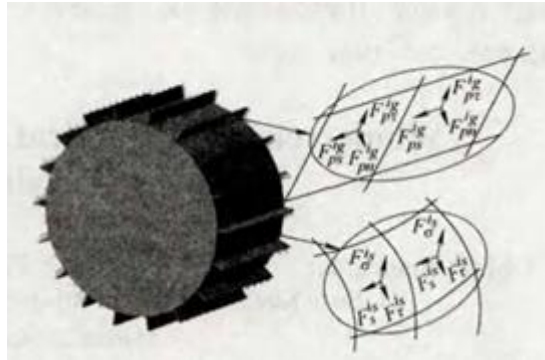


图 2-20 车轮表面、轮齿与干沙接触力示意图

为了能实时地表示轮齿与干沙的接触状态，车轮表面和轮齿被划分为多个单元，每个单元包含有如下几个信息：力的作用位置和单元的形状尺寸（图 2），其中  $F_{\sigma}^{i_s}$ 、 $F_{\tau}^{i_s}$  和  $F_s^{i_s}$  分别表示作用在车轮表面的序号为  $i_s$  的单元受到的法向力、切向力和侧向力； $F_{pn}^{i_g}$ 、 $F_{pr}^{i_g}$  和  $F_{ps}^{i_g}$  分别表示作用在车轮表面的序号为  $i_g$  的单元受到的垂直力、侧向力和摩擦力。

根据上面的分析，对于整个轮壤接触模型来说，轮轴处的受力情况可由以下公式得到

$$F_N = \sum_{i_s=1}^{m_s} (F_{\sigma}^{i_s} \cos \theta + F_{\tau}^{i_s} \sin \theta) + \sum_{i_g=1}^{m_g} (F_{pn}^{i_g} \cos \alpha_b + F_{pr}^{i_g} \sin \alpha_b)$$



$$F_{DP} = \sum_{i_s=1}^{m_s} (F_{\tau}^{i_s} \cos \theta - F_{\sigma}^{i_s} \sin \theta) + \sum_{i_g=1}^{m_g} (F_{pn}^{i_g} \sin \alpha_b - F_{p\tau}^{i_g} \cos \alpha_b)$$

$$T = \sum_{i_s=1}^{m_s} r F_{\tau}^{i_s} + \sum_{i_g=1}^{m_g} r_g F_{p\tau}^{i_g}$$

式中,  $T$  为车轮转矩;  $F_N$  为车轮的垂直载荷;  $F_{DP}$  是车轮的挂钩牵引力;  $r$  是车轮半径;  $r_g$  是轮齿上力的作用点到轮心的距离。

### 2.5.2 车轮表面单位作用力计算

车轮表面单位上的作用力与车轮表面应力与剪切作用力有关, 可用以下公式计算

$$F_{\sigma}^{i_s} = \begin{cases} \sigma(\theta) A_s & \theta_r < \theta < \theta_f \\ 0 & \theta \leq \theta_r \text{ 或 } \theta \geq \theta_f \end{cases}$$

$$F_{\tau}^{i_s} = \begin{cases} \tau(\theta) A_s & \theta_r < \theta < \theta_f \\ 0 & \theta \leq \theta_r \text{ 或 } \theta \geq \theta_f \end{cases}$$

式中,  $A_s$  表示单元的面积;  $\sigma(\theta)$  和  $\tau(\theta)$  分别表示车轮表面的正应力和切应力。因本模型只考虑了车轮前后滚动的情况而忽略了侧向力对车轮的影响, 因此  $F_{\sigma}^{i_s} = 0$ 。

车轮表面与干沙的接触是连续的, 正应力和切应力也是连续分布的, 分别利用 REECE 正应力分布模型和 JANOSI 剪切模型计算

$$\sigma(\theta) = \begin{cases} (\frac{k_c}{b} + k_{\varnothing})(r \cos \theta - r \cos \theta_f)^n & \theta_m < \theta < \theta_f \\ (\frac{k_c}{b} + k_{\varnothing})[(r \cos(\theta_f - \frac{\theta_m}{\theta}(\theta_f - \theta_m)) - r \cos \theta_f)]^n & \theta_r \leq \theta < \theta_m \end{cases}$$

式中,  $b$  是车轮的宽度;  $k_c$  是沙土变形模量;  $k_{\varnothing}$  是摩擦模量;  $\theta_f$  是进入角;  $\theta_r$  是离去角;  $\theta_m$  是最大应力角, 可通过下式计算

$$\theta_m = (c_1 + c_2 i) \theta_f$$

式中,  $c_1$ 、 $c_2$  是土壤参数,  $i$  表示车轮滑移率, 可由车轮实际的线速度和理论线速度计算

$$i = 1 - \frac{v}{\omega r}$$

式中， $\omega$  表示车轮角速度； $v$  表示车轮实际线速度。

根据 JANOSI 剪切公式，车轮表面的切应力通过下式计算

$$\tau(\theta) = [c + \sigma(\theta) \tan \varnothing][1 - \exp(-\frac{j}{K})]$$

式中， $c$  表示干沙粘聚力； $\varnothing$  表示内摩擦角； $K$  表示干沙的切变模量； $j$  表示车轮行驶过程中的滑移距离且可通过下式计算

$$j(\theta) = r[(\theta_f - \theta) - (1-i)(\sin \theta_f - \sin \theta)]$$

式中， $i$  表示车轮行驶过程中的滑移率。

### 2.5.3 轮齿单元作用力计算

轮齿与干沙接触力的计算要考虑轮刺作用对车轮牵引力的影响（图 2-21）。车轮轮齿与干沙作用力大小受轮齿的嵌入角度、轮齿周围的沙土压力和沙土的摩擦因数的影响，计算相对复杂。

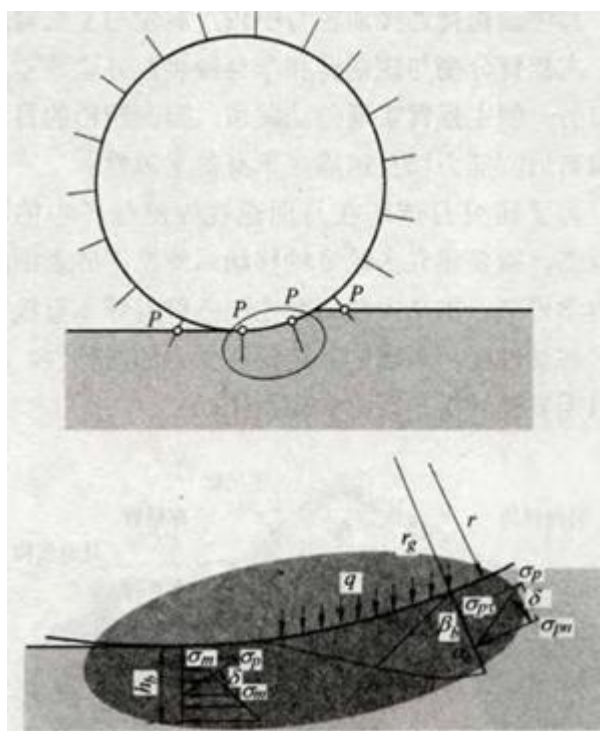


图 2-21 轮齿与干沙作用

轮齿表面单元收到的作用力通过下式计算

$$F_{p\sigma}^{i_g} = \begin{cases} \sigma_{pn} A_g & z \geq 0 \\ 0 & z < 0 \end{cases}$$

$$F_{p\sigma}^{i_g} = \begin{cases} \sigma_{pr} A_g & z \geq 0 \\ 0 & z < 0 \end{cases}$$

式中， $A_g$  表示轮齿表面单元的面积； $i_g$  表示轮齿表面单元序号； $\sigma_{pn}$  和  $\sigma_{pr}$  分别表示轮齿表面正应力和摩擦力。因为对轮齿的受力只考虑了车轮前后滚动的情况而忽略了侧向位移，因此  $F_{ps}^{i_g} = 0$ 。

轮齿表面的正应力分布为轮齿推动沙土的作用力，与轮齿嵌入深度有关。根据土压理论，其大小可通过下式计算

$$\sigma_{pn} = \frac{1}{\sin \alpha_b} (\gamma_s z K_{p\gamma} + q K_{pq} + c K_{pc})$$

$$\sigma_{pr} = \sigma_{pn} \tan \delta$$

式中， $q$  表示轮齿周围土壤的表面压力； $K_{p\gamma}$ 、 $K_{pq}$  和  $K_{pc}$  表示量纲——承载力系数，仅与干沙的内摩擦角度有关； $\delta$  是轮齿与干沙的摩擦角； $\gamma_s$  表示干沙密度<sup>[1]</sup>。

## 2.6 条件分析

机器人重心对其倾覆的影响

机器人在越障过程中，重心对其翻越能力有很大的影响。如果重心超出通过两轮心纵向直线距离时，机器人将发生倾覆现象。（图 2-22） $G$  为机器人的重心， $h$  为重心距轮心连线的垂直高度， $e$  为重心偏离轮心连线垂直中心面的距离， $\theta$  为机器人俯仰角。则机器人不发生倾覆的条件为

$$h \sin \theta + e \cos \theta < \frac{L}{2} \cos \theta ,$$

$$\text{得 } \tan \theta < \frac{L - 2e}{2h} ,$$

可见  $h$  与  $e$  的减小和  $L$  的增大，有利于机器人的越障能力<sup>[2]</sup>。

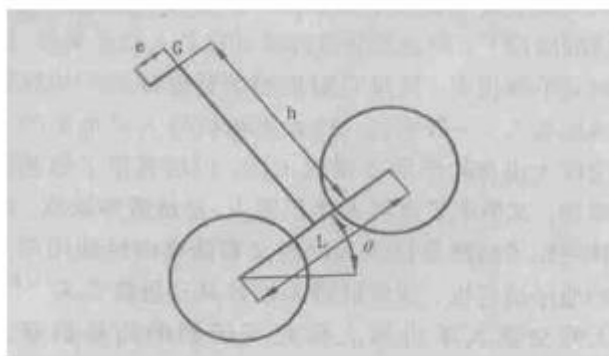


图 2-22 重心对机器人倾覆的影响

## 2.7 传动系统

机器人的动力是依靠电动机提供的，那应该如何解决机器人的传动系统呢？事实上，该机器人的动力系统分为三个部分：前轮动力系统、中间两轮的动力系统以及后轮动力系统。其中，前后两轮的动力系统原理相同，即在前后轮上分别固定适宜的电动机，通过齿轮结构直接与车轮相连，通过电动机的转动带动车轮的转动以实现机器人的行进。为了减少质量，中间两轮通过一个电动机相连，其具体原理是：两中轮与电动机的连接情况如下图所示：其中 1,2,3,4,5,6,7,8,都是齿轮，且 4 为永磁性材料制作，其余均为非金属，9 为电磁铁，10 为传动轴。当电磁铁 9 通正向电流时，4 被吸引，传动轴 10 处于如图 2-23 所示状态，由分析可知，此时两中轮转动方向相同；当电磁铁 9 通反向电流时，4 被排斥，传动轴 10 处于如图 2-24 所示状态，由分析可知，此时两中轮转动方向相反，且两轮的角速度相同，能够实现原地 360°转向。且在万向轮的连接点上有电磁继电器的卡锁（图 2-25），当转向时断电，卡锁打开万向轮才能自由转动，正常行驶时开关关闭万向轮无法转向。

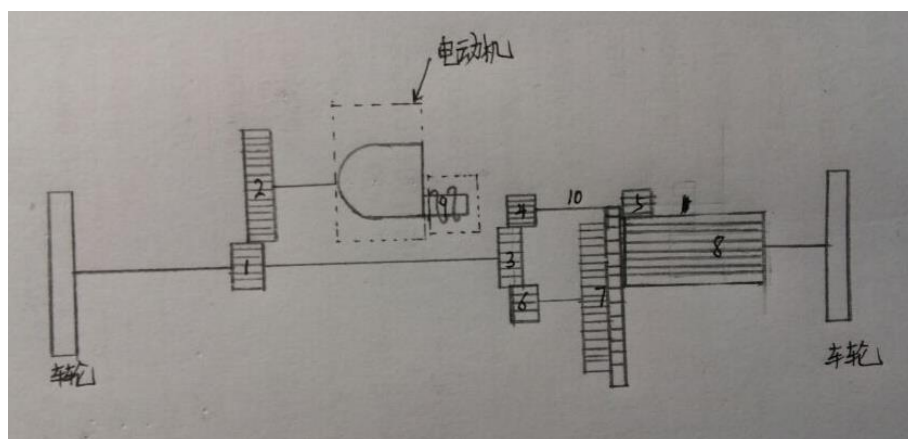


图 2-23 中轮传动系统图（通正向电流时）

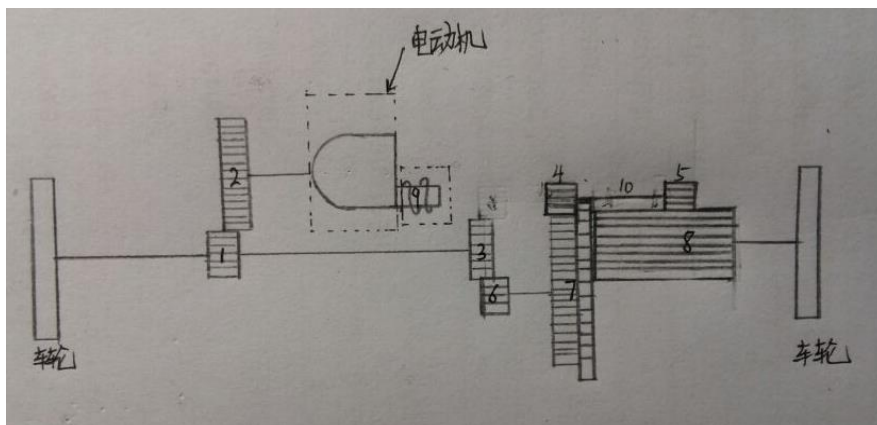


图 2-24 中轮传动系统图（通反向电流时）

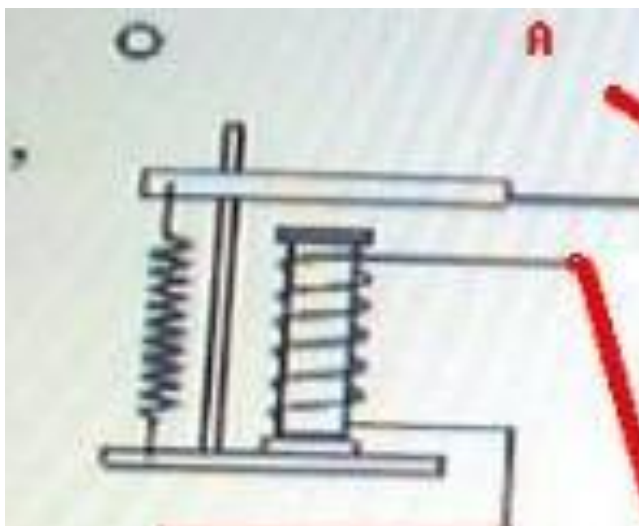


图 2-25 卡锁开关

## 3 可行性分析

### 3.1 伸缩装置

#### 3.1.1 技术实现思路及相关技术分析

现在我们所熟知的传动方式有：气动传动、液压传动以及机械电力传动。而气动传动与液压传动优势更为明显，下面主要讨论这两种传动方式。

液压传动：由两个大小不同的液缸组成的，在液缸里充满水或油。充水的叫“水压机”；充油的称“油压机”。两个液缸里各有一个可以滑动的活塞，如果在小活塞上加一定值的压力，根据帕斯卡定律，小活塞将这一压力通过液体的压力传递给大活塞，将大活塞顶上去。该传动方式具有传动平稳、质量轻体积小、机构简化等优点，但其元件制造精度要求高，且油液容易污染，发生故障后不易检查和排除。

气动传动：利用撞击作用或转动作用产生的空气压力使其运动或做功，气动就是以压缩空气为动力源，带动机械完成伸缩或旋转动作。因为是利用空气具有压缩性的特点，吸入空气压缩储存，空气便像弹簧一样具有了弹力，然后用控制元件控制其方向，带动执行元件的旋转与伸缩。它的优点是装置结构简单、轻便、安装维护简单，具有防火、防爆、防潮的能力等，但该传动方式电能消耗较大，能源转换率很低，初期成本较低，但使用成本较高。

通过以上分析，机器人的伸缩装置决定采用气液联动方式。这既集中了两种传动方式的优点，又可减弱两种传动方式各自的缺点。

### 3.1.2 预计技术难点

由于机器人的伸缩装置决定采用气液联动方式，因此就要同时解决气动传动与液压传动两种传动方式的技术难点。如：液压传动的元件的技术要求高和装配比较困难，使用维护比较严格；且油液中混入空气后，容易引起爬行、振动和噪声，使系统的工作性能受到影响。气动传动压缩空气需要良好处理，不能有灰尘及湿气；且由于空气的可压缩性，执行机构不易获得均匀恒定的运动速度。

## 3.2 轮履复合结构

### 3.2.1 技术实现思路及相关技术分析

本项目的轮履复合结构由于需要将履带收进车轮内，因此同样需要伸缩装置，关于这点在上一节中已经具体论证过，这里不再重复，只讨论一下伸缩装置的布局。因为要将履带收进轮内，因此该伸缩装置一定是以轮心为圆心，外端连接在履带上。又由于履带的周长一定，因此伸缩装置收缩后应成长短交错分布（如图），这样才能将履带收进轮内。



图 3-1 伸缩装置收缩状态

### 3.2.2 预计技术难点

本技术的难点除了上一节中提到的气液联动方式的技术难点，还要将多个伸缩装置同步，这样才能保证机器人在车轮模式与履带模式的自由转换。

## 4 应用前景

### 4.1 应用场景

#### 4.1.1 救援勘探

本机器预留空间较大，可在上面装载一些现代设备，比如传感器、电子摄像头，从而实现救援勘探的工作。

#### 4.1.2 月球车

本机器人能够适应像月球表面那样的复杂沙壤结构，如将其进行改造，则可成为探测具有像月球一样表面的太空车，帮助完成一些科学实验。

## 4.2 进一步发展

### 4.2.1 关于倾覆

机器人在越障过程中不可避免地会遇到倾覆的问题，在之前的讨论中我们也讨论了机器人不发生倾覆的条件，而如果能够将机器人设计成上下对称的结构，即使发生了倾覆，机器人也能正常工作。

### 4.2.2 轮履腿复合结构

现在机器人只是不完全的轮履复合结构，在之后的改进里，可以融入腿式结构，构成轮履腿复合结构，以适应更复杂的环境。

### 4.2.3 新的运动方式

机器人的基本运动原理即是依靠四轮驱动，在设计它时，我还考虑了另外一种运动形式（图 3-1）：

通过前中轮运动杆和中后轮运动杆通过以中轮为圆心的杠杆运动，同时收缩，又同时张开，且在后轮张开的过程中，卡死装置（同 2.1.1）阻碍后轮的转动，以实现机器向前运动。这种运动方式应该在沙地上更具优势。

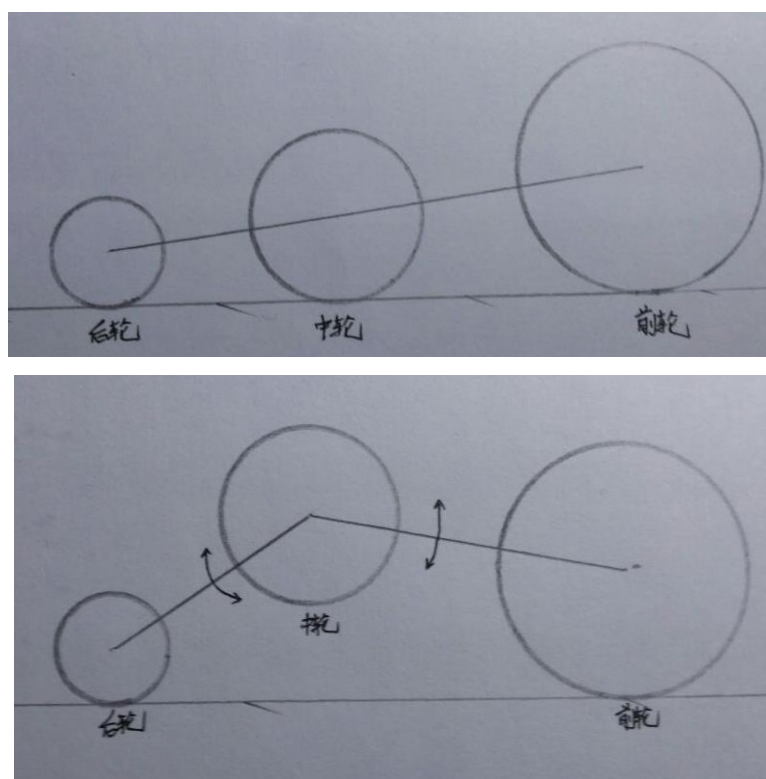


图 4-1 新的运动方式示意图



## 结论

通过以上分析，我们可以了解到本机器人具有越障、翻越沟壑以及适应复杂路面等功能，同时也具有原地 360 度转向的功能，并且本机器人为上下对称式结构，因此不存在倾覆的情况。如果加以改造，则可应用于救援勘探，甚至是太空活动。并且本机器人还具有一定的提升空间，如果将其改造为轮履腿复合结构，则能适应更复杂的环境。

## 参考文献

- [1]马传帅等, 月球车沙地行驶动力学建模与仿真[J], 机械工程学报, 2011-12 (23)
- [2]乔凤斌等, 六轮移动机器人爬楼梯能力分析[J], 机器人, 2004-7 (4)