

# “海胆型”全方位滚动机器人

## 摘要

人类目前已能涉足各种地方，从太空、海底，到火山、洞穴……很多极端地形只能派机器人去到达，这样对于运动方式的要求就越发严格。

目前的运动方式主要是轮式、仿生爬行式。这些运动方式有自己的优点，但也存在不小的局限性、

本项目另辟蹊径，旨在研究一种可以实现全方位运动的滚球式运动。球形的构造既可以避免倾翻的风险，又可以适应各种凹凸不平的地形。用可以伸缩的机械触角作为驱动，不仅构造简单，而且方便、造价低廉，适用作为目前探测、救援的智能机器人以及其他机器的运动方式。

关键词：全方位运动，机器人，气压液压，正多面体

## Abstract

Now human have been able to set foot in various places, from space, seafloor to volcanoes, caves and so on. In some extreme circumstances, only robots can reach the destination, thus calling for more effective mode of motion.

The major modes of motion nowadays are wheel type, biomimetic crawl. These modes of motion do have their advantages, but they are also restricted to some situations.

This passage demonstrates a different path, aiming at providing a mode of motion which rolls like a sphere. It can adapt to various circumstances. Powered by scalable mechanical sticks, it is not only easy but also cheap to achieve and can be used for artificial robots in the areas of discovery and rescue.

Keywords: Omni-directional motion, robots, air-pressure hydraulic pressure, regular polyhedron

## 目录

第一章 绪论 .....	3
1.1 背景 .....	3
1.2 造型构想 .....	3
第二章 主体论证说明 .....	4
2.1 运动原理 .....	4
2.2 动力分析 .....	5
2.3 伸缩动力原理 .....	9
2.3.1 机械螺纹传动 .....	9
2.3.2 液压传动 .....	10
2.3.3 气压传动 .....	10
2.4 控制原理 .....	11
第三章 进一步论述 .....	14
3.1 应用前景 .....	14
3.1.1 装载 .....	14
3.1.2 救援探险 .....	14
3.2 进一步发展 .....	14
3.2.1 爬墙 .....	14
3.2.2 自由滚 .....	14
3.3.3 弹跳 .....	15
第四章 项目总结 .....	15
4.1 总结 .....	15
参考文献 .....	15

## 第一章 绪论

### 1.1 背景

目前人们关于运动方式的想法主要是轮式滚动,但随着人们探索领域的不断扩大,我们也逐渐发现轮式运动有十分明显的局限性,比如无法横向移动、无法适应狭小地方、容易侧翻……在废墟、水管、悬崖陡坡等特殊的情景下基本没有用武之地。而一些采用仿生爬行运动的方式能适应多种复杂的地形,但爬行的方式有着速度慢、转向困难的缺点。

本文设想出一个伸出触角的球体,利用机械触角的伸缩性,来控制球体滚动。这是一种全新的运动方式,可实现全方位运动,球体的外形既能保证一定速度又能适应各种地形。此机械灵活迅速,可用作救援、探险、装载等各类用途……

### 1.2 造型构想

球可以实现全方位滚动,球体伸出的触角能自由伸缩,用于驱动球体滚动。为了使该机械完全的对称,也就是所有的触角要均匀的分布于球体之上,于是我们想到了正多面体当中面数最多的正 20 面体。我用 3ds max 构建了如图所示模型,正 20 面体的 12 个顶点作为我们触角的位置。本来还可以用作触点的位置还有面中心、棱中点,但这里为了我们下一步计算的简便以及便于控制,还有利于说明的需要,所以暂且将触角的个数减少一点。

未来有能力的话可以进一步增加触角的数量,这样该机械的运动将更为流畅。

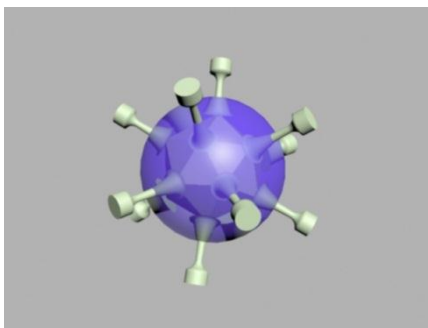


图 1

(注:上图中的正 20 面体只是起示意的作用,本身并不存在)

## 第二章 主体论证说明

### 2.1 运动原理

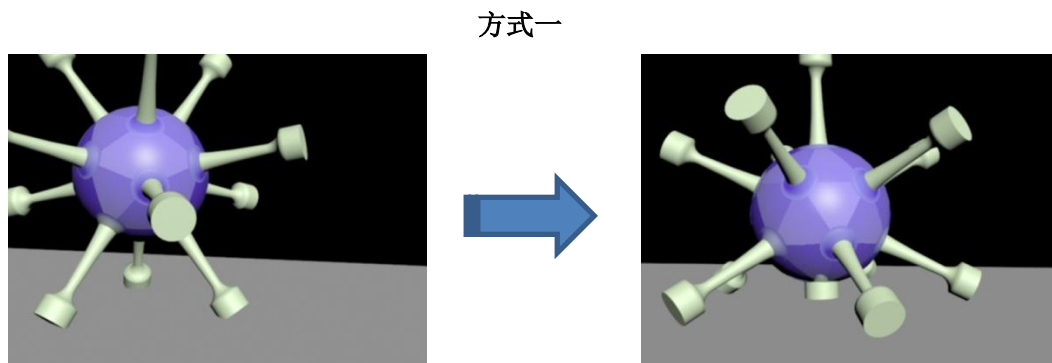


图 2- 1  
方式二

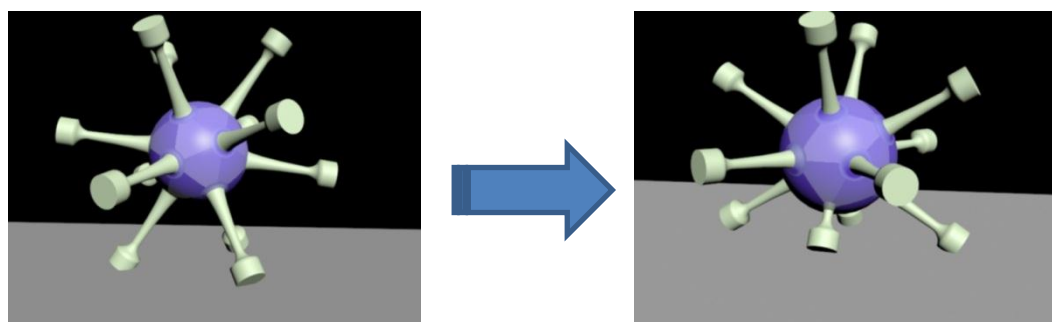


图 2- 2

如上面系列的图表示，静止状态下机械会有 3 个触角着地，呈一个正三角形。为了使我们的模型简单明了化，下面仅讨论正三角形三个轴向上的运动情况，实际运动中可以将三个轴向上的运动进行合成来实现全方位运动。

运动时，控制触角伸缩改变机器与地面的支点位置，利用机器本身的重力力矩来使其倾倒，从而实现球体的滚动运动。通过控制着地触角伸缩的次序和伸缩长度来控制机器的运动方向。

启动时，有两种启动方式，如图所示。方式一是缩一只脚，直到形成 5 脚着地的情况，之后缩进脚恢复，下一周期内的两只脚缩进。方式二是缩两只脚，直到形成 4 脚着地的情况，之后缩进脚恢复，下一周期内的一只脚缩进。在之后的持续运动中，方式一和方式二是交替出现的。

## 2.2 动力分析

由于本机械的源动力室是来自机械自身的重力,可能会存在关于动力不足的质疑,下面我们来通过具体的计算来看看该机械的动力能力。

做如下假定使计算能简单一些:假设整个机械的质心集中在几何中心,就是球心。假设触角构成的正 20 面体的棱长,就是触角之间的距离为 1m (下面出现关于距离的单位全是 m)。经查得:

$$\text{正 20 面体的外接球半径为 } r = \frac{\sqrt{10 + 2\sqrt{5}}}{4} = 0.951$$

$$\text{二面角大小为 } \alpha = \arccos \frac{\sqrt{5}}{5} = 63.635^\circ$$

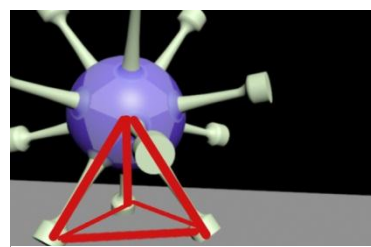


图 2-3

提取右图图 2-3 中的红色立体来进行分析:先将 3 脚编号①②③如图 2-4, 存在的 2 种启动方式。

方式一:收缩①号脚,直到五点着地时停止收缩。如图 2-5 所示 B 点移动到 C 点。

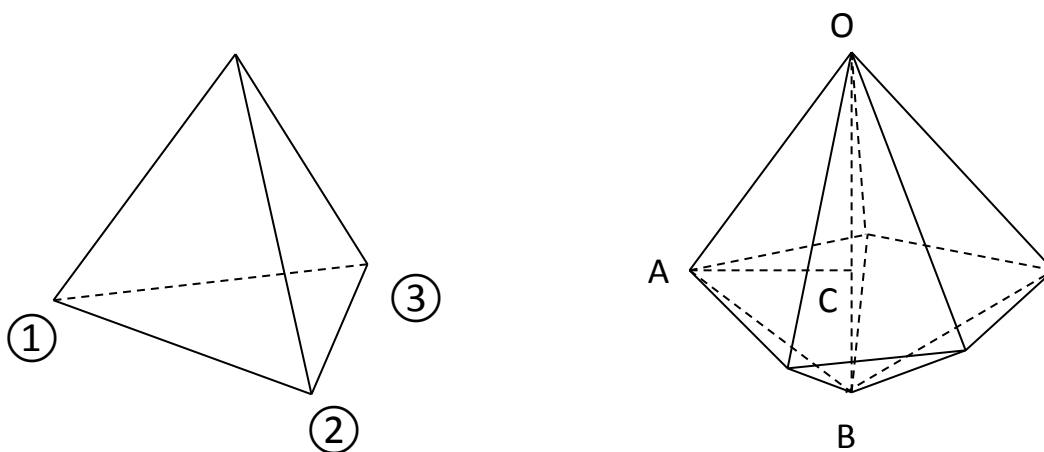


图 2-4

提出 $\triangle AOB$ , 其中 AC 为正五边形外接球半径  $R = \frac{\sin 54^\circ}{\sin 72^\circ}$ , 收缩长度  $|BC| = \sqrt{1 - |AC|^2} \approx 0.526$  占总长的 55.3%。(这样的收缩难度不少,因为触角数

量太少，若增加数量情况会改善不少)

现提取右图 3 只脚之间的几何图形，研究速度问题。触角 AO 收缩成 NO，如果收缩的足够快，在重力的作用下该机械会绕 BC 轴转动，如图 2-7。根据刚体转动定律：

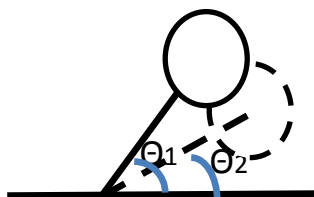


图 2-6

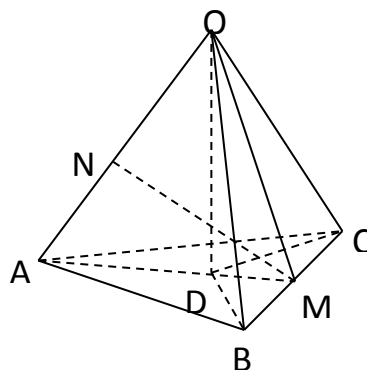


图 2-7

如图 2-6 所示  $\int_{\theta_2}^{\theta_1} mgL \cos \theta d\theta = mL^2 \cdot \vec{\beta}$  得  $\vec{\beta} = \frac{g(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)}{L}$ ,

这之中  $\theta_1$  为  $\angle OMA$ ， $\theta_2$  为  $\angle OMN$ ，可得  $|\vec{\beta}| = 5.04 \text{ rad} / \text{s}^2$  设  $|\vec{\beta}_0|$  为球体自转加

速度，有  $\frac{1}{2} |\vec{\beta}| \cdot t^2 = \Delta \theta$ ， $\frac{1}{2} |\vec{\beta}_0| \cdot t^2 = \Delta \theta_0$  用时  $t=0.509\text{s}$ ，故  $|\vec{\beta}_0| = \frac{\Delta \theta_0}{\Delta \theta} \cdot |\vec{\beta}|$ ，

其中  $\Delta \theta_0 = \angle AMN$ ， $\Delta \theta = \angle AOD$ 。得  $|\vec{\beta}_0| = 5.04 \text{ rad} / \text{s}^2$  此时球体的线加速度为  $|\vec{\beta}| \cdot R = 2.145 \text{ m} / \text{s}^2$ ，其中  $R$  为  $NO=0.425$

可见如此球体滚动的线加速度可达  $2.145 \text{ m} / \text{s}^2$  !! 这对于一个半径  $R$  只有  $0.425\text{m}$  的球体已经够了。

接下来的问题是球体不可能一直加速，由于伸缩杆的收缩速度有限，故球体会存在最大滚动速度。提取上图中的  $\triangle AOM$  (如图 2-7 (2))。P 点为触脚与地面的接触点。P 点在 A 点~N 点之间运动。设  $OP=X$ ， $OM=0.809$ 。在  $\triangle OPM$  中满足

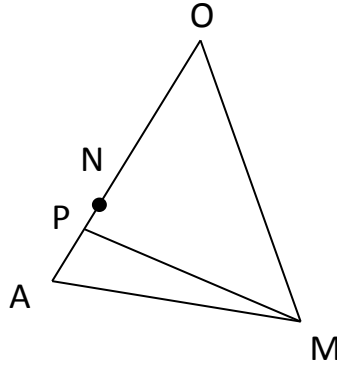


图 2- 7 (2)

$$\frac{|OM|}{\sin \angle OPM} = \frac{|OP|}{\sin \angle OMP}, \quad \angle OPM = \angle OAM - \angle PMA, \quad \angle OMP = \angle OMA - \angle PMA$$

$$\angle PMA = \frac{|\vec{\beta}| \cdot t^2}{2}$$

$$|\vec{\beta}| = 288.77^\circ / s^2$$

其中  $\angle OAM$ ,  $\angle OMA$  都已知, 分别设为  $a$ ,  $b$ , 则  $|\vec{X}| = \frac{\sin(a + \frac{|\vec{\beta}| \cdot t^2}{2})}{\sin(b - \frac{|\vec{\beta}| \cdot t^2}{2})} \cdot r$

则 伸 缩 速 度  $|\vec{v}| = \left| \frac{d\vec{X}}{dt} \right| = \frac{|\vec{\beta}| \cdot tr \cdot \sin(a + b)}{\sin^2(b - \frac{|\vec{\beta}| \cdot t^2}{2})}$ , 代 入 数 据 得

$$|\vec{v}| = \frac{3.469t}{\sin^2(69.095 - 144.39t)},$$

这里求得的速度是球体在重力作用下自由滚动加

速伸缩杆的收缩速度至少需满足的方程。用此来计算我们伸缩管需要达到的速度, 代入刚才求得的时间  $t=0.509s$ , 得到伸缩的大致速度为  $|\vec{v}| = 1.8m / s$ , 这样看来对伸缩速度的要求还是挺高的。

从另一个角度看, 当伸缩杆的速度达到一定时, 则会限制球体滚动的速度。

当  $|\vec{v}|$  一定时, 设  $\angle PMA$  为  $\theta_0$ ,  $|\vec{AM}| = \frac{\sqrt{3}}{2}$ , 则在  $\triangle PMA$  中有  $\frac{|PA|}{\sin \theta_0} = \frac{|AM|}{\sin(\theta_0 + a)}$ ,

化 简 得  $|\vec{PA}| = |\vec{v}| \cdot t \Rightarrow vt(\cos a + \cot \theta \cdot \sin a) = |\vec{AM}|$ , 故



$$\cot \theta = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2|\vec{v}|t} - 0.607}{0.795}, \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{\operatorname{darc} \cot \left( \frac{\frac{\sqrt{3}}{2|\vec{v}|t} - 0.607}{0.795} \right)}{dt}, \quad \text{最终球体的线速度}$$

$$V_0 = r \frac{d\theta}{dt} = \frac{\sqrt{3}}{7.446vt^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{3}{4v^2t^2} - \frac{1}{vt}}。 \text{如果说伸缩的速度只有 } 1\text{m/s}, \text{ 在}$$

t=0.509s 时求得机器滚动的最大速度

$$V_0 = 0.465\text{m/s}。$$

如此的速度已经可以满足各种运动的需求，而且如果触角的数量增加以后，不仅收缩的长度会减短，滚动的最大速度也会提高，而且对于收缩的速度要求也不会那么高了。

方式二：收缩②③号脚直至四点着地，停止收缩如图所示 DF 收缩至 BC。

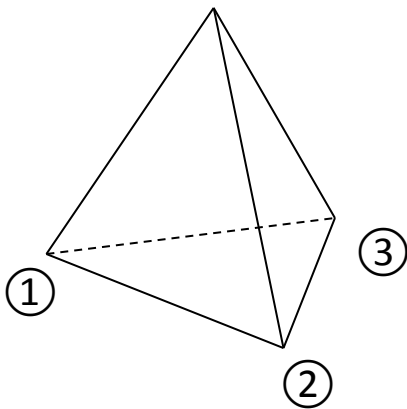


图 2-8

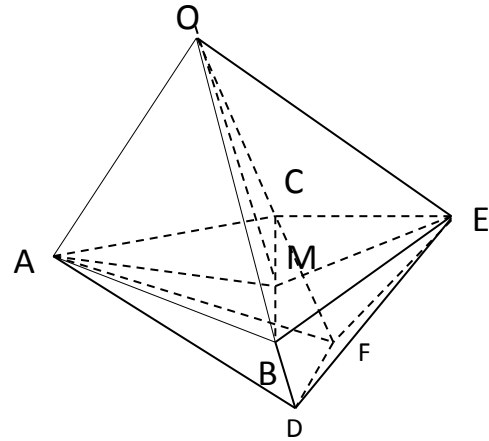


图 2-9

这里不再详细的列出计算过程，方法与方式一中的类似。可得：收缩长度为 0.364，占总长的 38.24%。球体绕 BC 轴旋转的角加速度为  $8.354\text{rad/s}^2$  用时 0.172s，球体自转滚动的角加速度为  $23.296\text{rad/s}^2$ ，线加速度（即滚动加速度为  $9.917\text{m/s}^2$ 。分析上诉结果，方式二的力矩更大，收缩长度也短，比较适合启动。

所以采取方式二作为启动方式。

## 2.3 伸缩动力原理

### 2.3.1 机械螺纹传动

由于刚计算过的伸缩率超过了 50%，所以我们不得不使用多级伸缩。右图是我们构想出的多级螺纹传动装置，由电机带动电机转轴驱动二级螺纹转动引起螺纹向上运动（伸出），二级螺纹转至顶后被一级螺纹上方的卡槽卡住，此时电机就会带动一级螺纹和二级螺纹一起向上运动。收缩时电机反向转动即可。

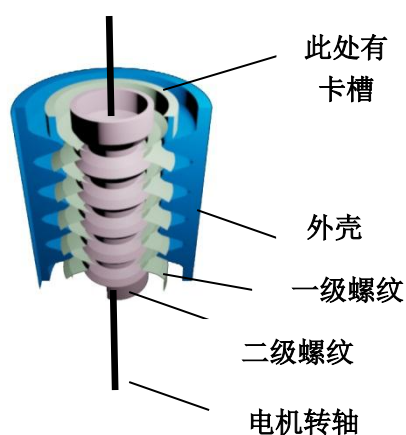
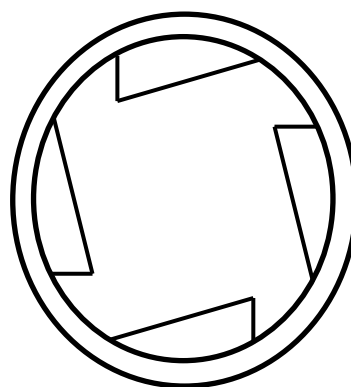


图 2-10



螺纹卡槽顶视图

图 2-11

卡槽是一个与螺纹旋转方向相反的棘齿结构。电机转轴直接与电机转轴相连，本身是一个可以自由伸缩的刚性杆，类似于我们日常生活中的雨伞柄，也是个可以多级伸缩的结构。

优点：构造简单，实现容易

缺点：经查的螺纹滑动传动的效率低下，摩擦阻力大。而且移动的速度很慢，如果追求速度的话就需要很大的扭矩。

针对我们的机械来说，此方案需要每一个触角中装一个电机，控制起来将会非常复杂。

### 2.3.2 液压传动

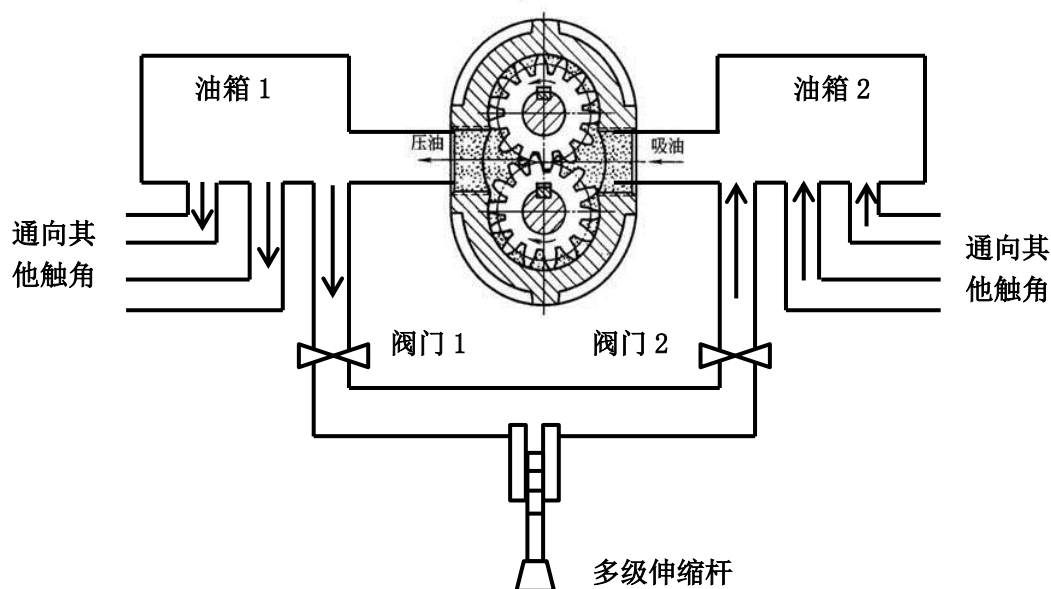


图 2- 12

液压是一个比较稳定的传动方式，用液压我们可以用一个泵连通所有的触角，只用控制每个触角当中的进、出阀门即可控制触角的伸缩。原理图如下：

过程：油箱 1 是高压油箱，油箱 2 是低压油箱，之间由齿轮泵提供压力。正常情况下，阀门 1、2 皆为关闭状态，当伸缩脚需要伸出时，阀门 1 打开，液压油进入杆内空腔，将伸缩杆挤出。收缩时阀门 2 打开，阀门 1 关闭，这时伸缩杆内的液压高于低压油箱，于是伸缩杆收缩。

优点：控制简单，每个触角只需安装阀门即可，传动有力。

缺点：液压传动的反应速度没法保证，而且如果要在机器中装入油箱和泵机的话，会大大增加机器的重量，不利于行动。

### 2.3.3 气压传动

气压速度快。能够满足我们的需要。而且气体重量轻，易于压缩，充入触角内同时还能起到不错的减震作用。本文设计的球体内无需空气压缩机，只用一个可以储存高压气体的气囊作为气源。关于推动伸缩触角的具体实现原理图如下：

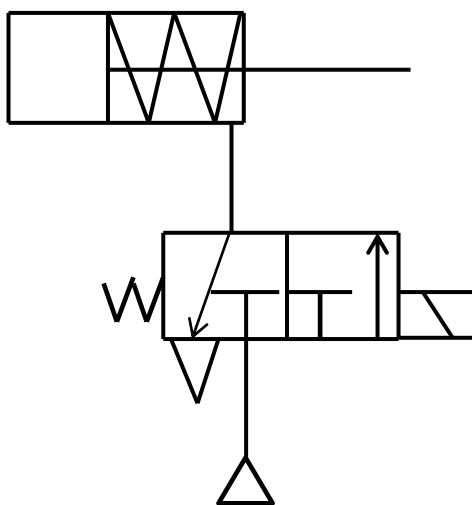


图 2- 13

过程：回路为单作用气缸换向回路，采用二位三通电磁阀控制单作用气缸实现换向。一般情况弹簧原长，触角伸出。电磁铁通电切换至右位后，气缸的右腔进气。弹簧被拉伸，活塞克服弹簧和负载力左行。当电磁铁断电后，气缸又伸出。此处的气缸就是我们的多级伸缩杆。

优点：负重减少，反应迅速。也易于控制。

缺点：机器储存的压缩空气有限，要长时间持续运转的话需要时不时加气。

比较上述三个方案，气压传动相对更合理一些，虽然它需要时不时加气，但这样减少了电能的消耗。如果是机械螺纹或是液压传动也需要时不时充电。

## 2.4 控制原理

鉴于我们的运动方式是  $360^\circ$  全方位滚动，所以对其的控制难度非常之大。主要困难如下：

1. 由于是滚动，机械自身方向定位是不断变化的，如何能保证机械内的方向坐标定位与操控者的保持一致？

答：在机械内部配置陀螺仪。这样运动中机器的坐标轴将不会轻易改变，可以始终保持和操控者的方向一致。

再将机械的 12 个触角进行编号，由于是正 20 面体的模型，故静止状态总共

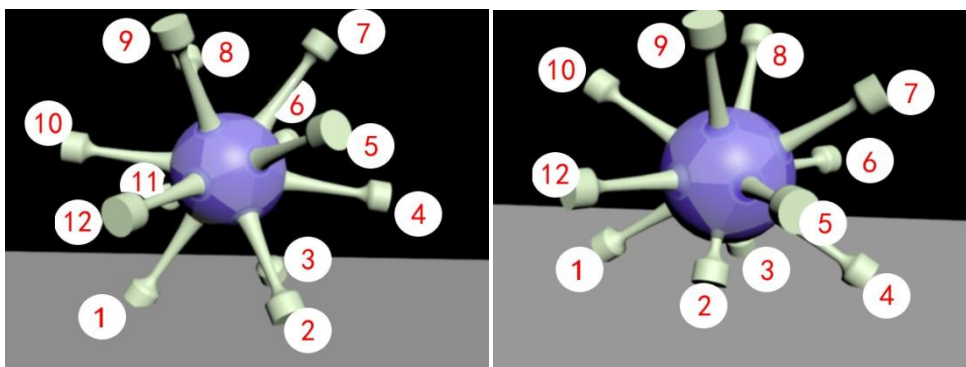


图 2- 14

只有 20 种，可以采集所有 20 种状态下的启动控制数据（包括不同触角间的相对位置），将之存入数据库。如下图所示的启动方式，则依次需伸缩的触角是(2)(3)、(4)、(5)(6)、(7)、(8)(9)、(10)、(11)(12)(1)、(2)(3)……依次类推。

运动时，通过传感器得知此时与地面接触的触角序号，查找数据库来得知各个方向上的不同编号的触角的相对位置。例如，如图 2-14 中 2 号脚的周围相邻的只有 1、3、4、5、12 号脚，2 号脚与地面接触时的状态只有：4 种 4 只脚着地的情况和 5 种 3 只脚着地的情况。中央处理器得知了接触地面的触角的序号便可将所有的触角相对于地面的位置找到。再通过陀螺仪判断出操做者定义的前后左右各个方向，对应地将方向与触角的序号进行匹配。在图 2-14 所示的运动情景中，假如定义纸张方向右为实际的向前，向左为实际向后，沿纸面垂直向里为实际向左，垂直向外为实际向右。这样机器便可以在行进过程中判断出触角 6 号在自己的左前方，而触角 12 号在自己的右后方。

## 2. 如何在运动过程中控制触角收缩的时机？

答：虽说触角与地面接触的时机与球体的运动速度满足一定的函数关系。但在球

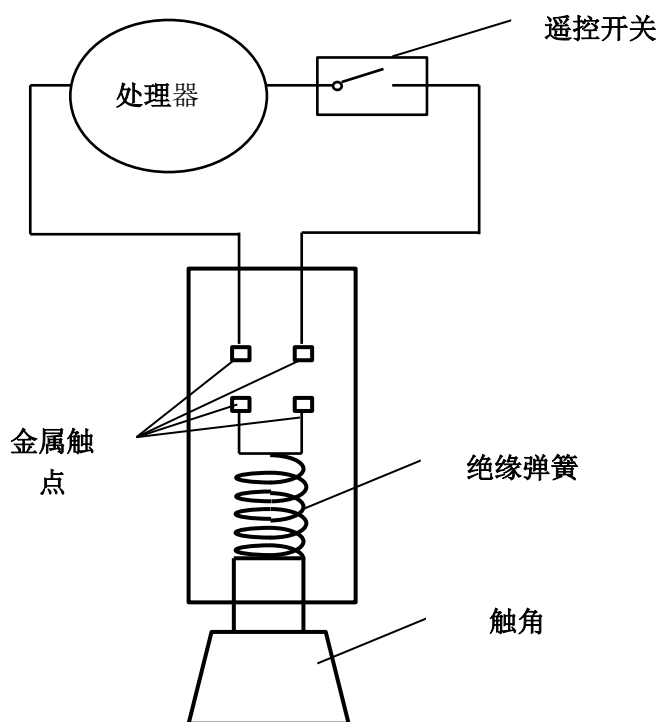


图 2- 15

体中装入速度传感器和编入控制程序未免会让我们的机械更加复杂。这里设想用一个简单的电路来实现我们的目的。在机械的每一个触角上面安装一个简易的触控开关，原理如下图：

当准备启动时，遥控开关打开后，只要触角接触到了地面，金属触点就会接触一起，这时处理器开始处理如下事项：打开此触角的电磁阀，使此触角收缩。当在行进的过程中，处理：1. 打开此触角的电磁阀，使此触角收缩；2. 关闭上次收缩的触角的电磁阀，使其伸出复原。

## 第三章 进一步论述

### 3.1 应用前景

#### 3.1.1 装载

本机械的球体部分中会留有一定空间，可以存放一些东西。当机械运动到指定位置时球体遥控打开将里面的物体释放出来。为了使东西不会随着球体的滚动而被摇坏，我们设想在球体内安装一个乘有液体的空腔，让东西漂浮在液体之上保持稳定。

#### 3.1.2 救援探险

这种运动方式能适应多种复杂的地形，比如废墟缝中、石缝中、水管道……再配合其他的设备，可以发挥巨大的作用。

### 3.2 进一步发展

现在我们设想模型中的触角数量和伸缩杆的能力还比较保守。当增加触角和增强伸缩杆的伸缩比例、伸缩力度后，该机械的运动能力将进一步增强。

#### 3.2.1 爬墙

由于在受到前进阻力时，本机械可以通过后方触地触角的强力伸长来获得前滚动力，所以理论上说本身就具备爬一定楼梯的能力，如果能在触角上安装具有吸力的物质，比如说吸盘，在触角足够多、动力足够强的情况下，应该可以爬垂直于地面的坡面。

#### 3.2.2 自由滚

将所有的触角收起，成为一个球体，便可自由滚动。这用在下坡时可节省动力。如果遇到颠簸的下坡，可以先将球体套一层保护套，待稳定后再自身行驶。

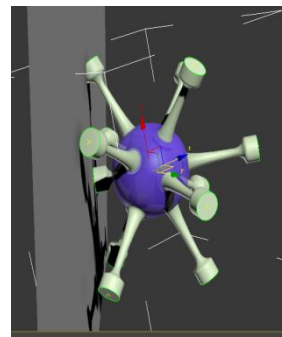


图 3- 1

### 3.3.3 弹跳

触角先收起，然后猛然伸出，像弹簧一样弹起。

## 第四章 项目总结

### 4.1 总结

“海胆”型运动机器的大概情况就是如此，构思的出发点就是想寻找一种全新的运动方式。以球体滚动的运动方式可以实现全方位运动而且转向容易，相比轮式驱动的方式不会有倾翻的危险，能适应多种复杂的地形。

虽然在实现方式上的设想有些单薄，但我尽量在自己的能力范围内寻找解决问题的办法。在这过程中，我遇到了很多困难，有时也想过要放弃，但我始终把这当作锻炼自己的机会。从中我尝到了运用所学知识解决实际问题的乐果。

由于我们知识水平的有限，在伸缩杆和控制方面的设计有些不尽如人意。但我们觉得这种运动方式还是值得我们好好研究的。

### 参考文献

- [1] 崔培雪，冯宪琴. 典型液压气压回路 600 例. 北京：化学工业出版社. 2011.
- [2] 万会雄，明仁雄. 液压与气压传动（第二版）. 北京：国防工业出版社. 2008.
- [3] 程友联，杨文堤. 机械设计. 武汉：华中科技大学出版社. 2011.