

课题组设计的移动机器人要求在结构简单和运动稳定性较高的基础上,具有一定的越障能力和较强的环境适应能力。

## 1 机器人功能要求及技术性能指标

### 1.1 机器人功能要求

课题组研究的机器人应满足以下的功能:

- 1) 较强的负载能力,灵活的运输能力;
- 2) 较强的越障性能,可以通过陡坡、台阶、沟壑和崎岖路段等障碍;
- 3) 结构简单紧凑,易维护保养;
- 4) 较强的执行能力,可以在非结构化环境中执行搬运、夹取等特种作业。

### 1.2 机器人技术性能指标

为实现以上的功能,课题组对移动机器人的外形结构、速度灵活性、运动稳定性、越障能力和载重能力<sup>[4]</sup>等方面提出了具体要求。

- 1) 外形结构:研究的机器人属于小型移动机器

人,其外形尺寸应在期望工作环境所能限制的尺寸范围内,结构要简单可靠。

2) 速度灵活性:机器人在不同的路段需要以不同的速度到达工作现场,因此需要有灵活切换行驶速度的能力,并规定速度安全界限。

3) 运动稳定性:机器人在不同的路段其运动性能不同,特别是在崎岖复杂的路段需要有较高的抓地能力和稳定性。

4) 越障能力:越障性能是评价机器人翻越障碍能力的重要指标之一,需要能越过一定高度的障碍、一定深度的沟壑及一定角度的陡坡等障碍。

5) 载重能力:机器人执行任务时不仅要承载车体及行走装置的负载,还要有足够的额外负载能力以实现一定的运输功能而且还要满足以上运动性能。

6) 作业环境:高温、高压、辐射、污染、真空和高负载等人工无法直接作业的环境。

表1所示为移动机器人各个方面的性能参数要求。

表1 性能参数要求

Table 1 Performance index requirements

行走机构									
移动方式	满载自身质量/kg	最大外形尺寸/(mm × mm × mm)	巡航行驶速度/(m · s <sup>-1</sup> )	越障行驶速度/(m · s <sup>-1</sup> )	转向能力	翻越台阶高度/mm	跨越沟壑宽度/m	最大爬坡角度/(°)	
变形履带式	≥200	2 250 × 1 220 × 800	2.0	0.4	可原地转向	≥500	≥1	≤30	
执行机构(机械臂)									
动作类型	控制轴	动作范围/(°)					工作半径/m	末端负载/kg	自由度
		J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	J <sub>4</sub>	J <sub>5</sub>			
连杆关节型	J <sub>1</sub> , J <sub>2</sub> , J <sub>3</sub> , J <sub>4</sub> , J <sub>5</sub>	0 ~ 360	0 ~ 180	0 ~ 120	0 ~ 120	0 ~ 360	≤1.5	≤50	5

## 2 可变形移动机器人结构

根据移动机器人的功能和技术性能参数要求,基于模块化的结构设计理念<sup>[4]</sup>,移动机器人行走装置主要由移动机构模块、执行机构模块和动力系统模块组成,其中移动机构模块主要是主动轮、从动轮、行星轮、履带和摆臂张紧机构等;执行机构模块主要是机械臂;动力系统模块主要是伺服电机、减速器等<sup>[5]</sup>。

### 2.1 变形机构

为实现移动机器人兼具有腿式移动机构和履带式移动机构的特性,移动机器人可变形履带结构的设计具有重要的意义<sup>[6]</sup>。

按履带运动方式是否变化可以把履带行走机构分为2种:固定履带式和可变形履带式<sup>[7]</sup>。综合国内外履带式移动机器人行走机构构型的特点,各类履带式机器人之间并不是互不相关的,而是存在一定的联系和规律。例如单节双履带式,其结构简单,能满足一般

复杂地面的工作要求,但其爬斜坡、越沟壑等的越障能力较差,为改进其越障性能,在车体前端加装一对摆臂构成双节四履带式,使其能够爬越高度较大的障碍,但其越障能力仍然有限。再在机器人上加装两对以上的摆臂构成多节多履带式,其越障能力进一步增强。另一方面,许多可变形履带也是从上述构型中衍生出来的,因此可采用推衍法<sup>[8-10]</sup>对各类履带行走机构构型的设计进行推衍。

课题组研究的移动机器人的可变形行走机构将椭圆形成原理引入机器人行走机构的设计中,可推导出摆臂张紧机构中心对称的可变构型的关节履带复合结构。课题组采用双椭圆机构,如图1所示。 $F_1, F_2$ 分别表示左椭圆的左右焦点,在 $F_1$ 上安装驱动轮, $F_3, F_4$ 分别表示右椭圆的左、右焦点,在 $F_4$ 上安装从动轮, $P_1$ 和 $P_2$ 分别是左右椭圆轨迹上的动点,在此处安装张紧轮,机构原理如图2所示。

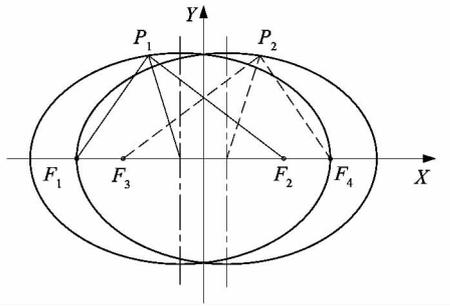


图1 双椭圆机构  
Figure 1 Bielliptical mechanism

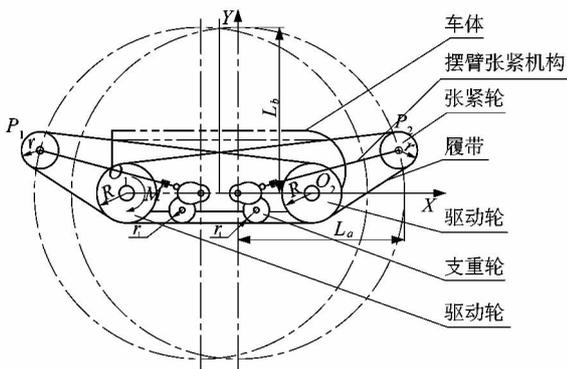


图2 机构原理图  
Figure 2 Mechanism diagram

图2中,  $L_a, L_b$  分别表示椭圆的长半轴和短半轴;  $R, r$  分别表示驱动轮半径和张紧轮半径;  $P_1$  和  $P_2$  分别是左右椭圆轨迹上的动点;  $O_1$  和  $O_2$  分别是左、右椭圆的左、右焦点。基于椭圆的几何关系, 在动点  $P_1, P_2$  上安装张紧轮, 在焦点  $O_1, O_2$  上分别安装驱动轮和从动轮, 通过摆臂张紧机构的运动实现张紧轮的椭圆运动。摆臂张紧机构的作用是提高机器人的越障能力, 两摆动主臂的摆动轨迹虽然均不是整椭圆, 但仍能满足越障要求。该机构越障时的几种构型形态如表2所示。

图3是行走机构构型推衍图。图3中固定履带式行走机构a装备摆臂后形成双节四履带式机构b与三节六履带式机构c; 构型b和c的摆角固定时分别形成三角形机构d与梯形机构e; 将三角履带式机构的摆臂换成具有自张紧能力的摆臂, 形成可变形单摆臂履带式机构f; 将梯形履带式机构的一侧换成自张紧摆臂, 则形成复合摆臂履带式机构g; 综合构型f和构型g各自的特点形成双摆臂机构h; 将构型h中的摆臂改装成对称结构且均有张紧装置的摆动主臂, 则形成可变形履带机构(构型i)。

表2 构型形态分析

Table 2 Configuration analysis

构型状态	特点
	机构质心后置, 地面接触类型为面接触
	机构质心较低且后置, 车体与地面为多处线接触
	机构质心较高且置于车体后部, 地面接触类型为多线接触
	机构质心较低且置于车体前部, 地面接触类型为面接触

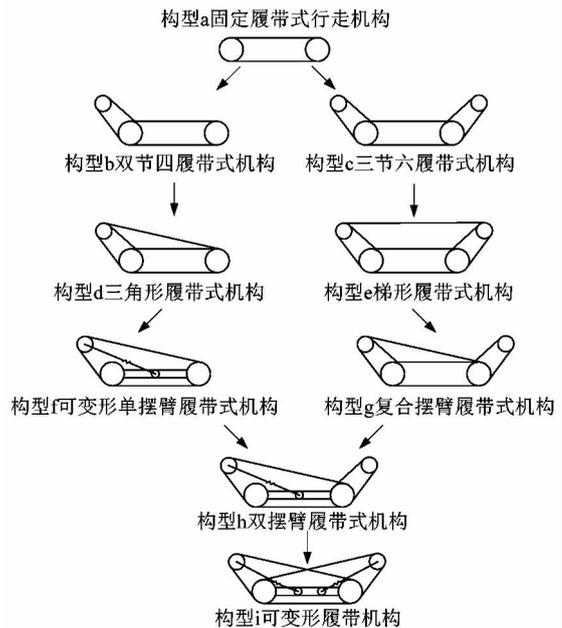


图3 行走机构构型推衍  
Figure 3 Derived of configurations

可采用对比法对已推衍的履带式行走机构构型的特点进行比较, 并根据特殊任务的需要选择合适的机器人行走机构, 构型特点见表3。

### 2.2 驱动方式

机器人的驱动方式常有前驱和后驱, 对于构型e履带机构, 由于左右对称且履带构型不改变, 可用前轮或后轮驱动。构型i的可变形履带机构, 采用驱动轮

表3 构型特点

Table 3 Configurational characteristics

构型	构型特点
a	需1个驱动,结构简单,越障性能较差
b	需2个驱动,引入单摆臂,与构型a相比具有一定的越障能力
c	需3个驱动,引入双摆臂,与构型b相比,越障能力较高
d	需1个驱动,相比于构型c,越障性能降低,地面接触类型为面接触,稳定性较高
e	需1个驱动,相比于构型d,越障性能相近
f	需2个驱动,相比于构型d,引入履带自张紧摆臂机构,越障性能较高
g	需2个驱动,相比于构型e,一端为摆臂,越障性能较高
h	需3个驱动,相比于构型g,增加履带自张紧摆臂,使履带可变形,履带与地面接触面积增大,稳定性提高,但需考虑张紧装置设计的问题。与构型f比较,多了辅助的单摆臂,越障性能较高
i	需3个驱动,与构型h相比,将右侧单摆臂换成与左侧一样的摆动主臂,两个转动主臂分别由两个电机独立驱动,可增加履带与地面接触次数,提高了稳定性

后置方式,减少了导向轮受力,履带上侧的受力也较小,处于微张紧状态的履带承载分支,可提高其运行能力,如图4(a)所示。若采用前驱的方式,履带上侧及导向轮所承受的载荷较大,履带承载段可能出现挤压状态,运行能力降低,如图4(b)所示。因此,移动机器人履带行走机构采用图4(a)所示的后轮驱动的方式。

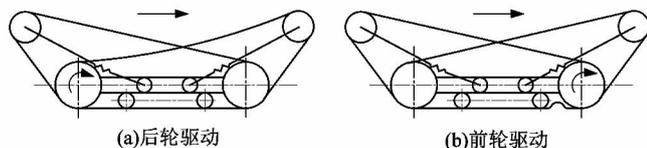


图4 履带行走机构后轮驱动与前轮驱动

Figure 4 Rear wheel drive and front wheel drive of travel mechanism

履带运动时与轮子等装置之间存在磨损现象,为防止出现脱轨与掉链等现象需要安装张紧设备。课题组研究的是可变形履带行走装置,为保证履带变形过程中处于张紧状态,采用具有自动张紧能力的摆臂张紧机构。为增大机器人的负载能力,安装柔性支重轮系统,为减小运行阻力,采用少支点式的支重轮系统,且支承轮与履带梁之间采用半刚性悬挂。

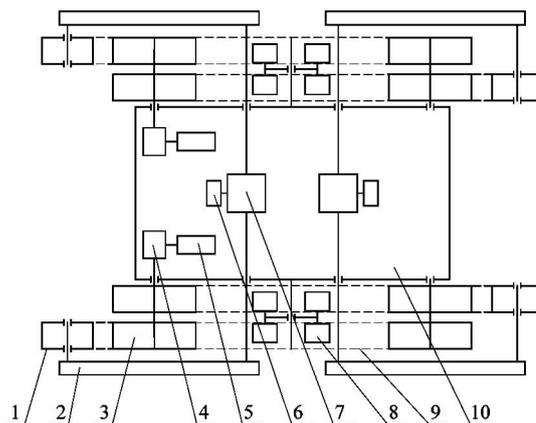
### 2.3 传动系统的确定

传动系统为机器人提供动力,可根据不同的作业要求来更换机器人的运动方式。传动系统决定了机器人的整机运动性能。对于机器人的传动机构的研究:一方面应尽可能提高驱动力使用效率;另一方面,应尽

可能保证使用可靠性和布置紧凑<sup>[11]</sup>。

#### 1) 内部传动系统布局

机器人传动系统布局如图5所示。



1—张紧轮;2—摆臂张紧机构;3—驱动轮;4—驱动轮减速器;5—伺服驱动电机;6—主臂电机;7—双输出减速器;8—悬挂系统;9—链轮履带;10—车体。

图5 机器人传动系统布局

Figure 5 Layout of robot transmission system

传动机构工作原理:由于左右驱动原理相同,以单边履带驱动为例,伺服驱动电机5为驱动轮减速器4提供输入轴转速在一定范围内变化的动力,驱动轮减速器4为驱动轮3提供输出转矩带动驱动轮运动,进而实现机器人整机的运动。直线行驶时,左右驱动轮同速运动;转弯运动时,左右驱动轮通过伺服驱动电机实现差速运动;越障运动时,主臂电机6为双输出减速器7提供动力,带动摆臂张紧机构2实现一定角度范围的摆动,辅助机器人跨越障碍。前后布置的摆臂张紧机构是独立驱动的,左右对称的摆臂张紧机构的运动是同步的,以提高前后摆臂张紧机构角度调节的灵活性。

#### 2) 减速箱的选取

机器人的驱动力主要由伺服电机提供,伺服电机提供原动力,由变速装置实现输出转速在一定范围内连续变化的运动,再通过减速装置将不同转速力矩的动力传递给驱动轮<sup>[12-13]</sup>。

课题组采用直流伺服电机与两级圆锥-圆柱齿轮减速器的组合方式来提供驱动力,如图6所示。采用直流伺服电机与双输出圆弧圆柱蜗杆减速器的组合方式,实现摆臂张紧装置准确的摆动角度和保持位置的要求。双输出圆弧圆柱减速器如图7所示,其具有振动、冲击和噪声小,工作平稳,能以单级传动获得较大的传动比,结构紧凑,可以自锁等特点。

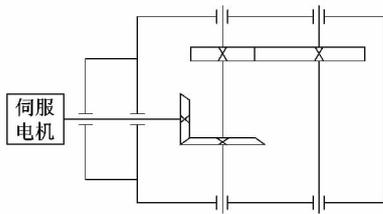


图6 两级圆锥-圆柱齿轮减速器

Figure 6 Two-stage cone-cylindrical gear reducer

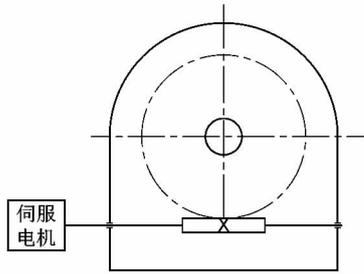


图7 双输出圆弧圆柱蜗杆减速器

Figure 7 Double output circular cylindrical worm reducer

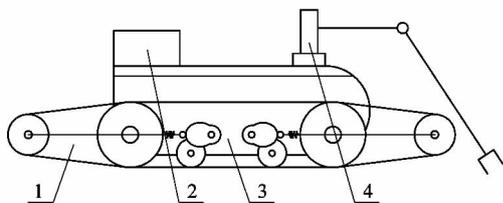
### 2.4 执行机构的确定

课题组研究设计的可变形履带式移动机器人主要应用于物流运输等特种作业领域,选择机械臂作为其执行机构。机器人的机械臂主要作用是搬运物品、清理障碍等特种作业,机械臂末端可安装有摄像头以准确灵活定位物品位置。因此,机械臂需要有足够的自由度,课题组选定机构自由度为5,以简化机械臂复杂的结构。

### 2.5 整体方案

综上所述,机器人左右两条履带对称布置,各自配置一个摆臂张紧机构,构型采用双节四履带式结构;且单边的两个摆臂独立驱动,对称的两个摆臂同步驱动,以实现各自前后摆臂的功能。

总体设计方案如图8所示。



1—可变形履带装置;2—控制柜;3—车体;4—机械臂。

图8 可变形移动机器人总体设计方案

Figure 8 Overall design scheme of reconfigurable mobile robot

### 3 结论

1) 针对可变形机器人在非结构化地形环境中作业能力低、环境适应性差等问题,根据机器人的工作环境,确定了机器人的功能要求及技术性能指标,设计了一种移动机器人行走机构。

2) 综合分析了可变形机器人的结构类型、履带条数等机器人的各个模块的设计方案,基于椭圆轨迹运动原理,采用双椭圆对称分布的摆臂张紧机构,确定了机器人的变形方案。

3) 通过对变形机构、驱动方式、传动系统和执行机构等模块的分析研究,最终确定了可变形机器人的总体设计方案。

### 参考文献:

[1] 张明路,彭平,张小俊.特殊环境下服役机器人发展现状及其关键技术研究[J].河北工业大学学报,2013,42(1):70-75.

[2] 李云江.机器人概论[M].北京:机械工业出版社,2011:23-25.

[3] ZHANG Guowei, LI Bin, LI Zhiqiang, et al. Development of robotic spreader for earthquake rescue [C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). Hokkaido, Japan: IEEE, 2014:3.

[4] 丁贵彬.受环境约束可重构机器人模块化协同力/位置控制研究[D].吉林:吉林大学,2016:33.

[5] 王南丁.消防机器人履带行走装置设计及运动学仿真研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2015:47.

[6] 黄思姬.地面武装机器人机械系统设计与实验研究[D].南京:南京理工大学,2011:27-34.

[7] 阴贺生,张秋菊,宁萌.基于驱动轮同步转向机构的全向移动机器人[J].轻工机械,2018,36(1):24-28.

[8] HUANG Huang, WU Qinghe, YU Di. Robust distributed control of robot formations with parameter uncertainty [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2011, 9(4): 513-520.

[9] 李松,朱建柳,金晓怡,等.可变形履带式机器人行走机构设计及运动仿真[J].轻工机械,2018,36(1):29-34.

[10] 王靖.链式可变形模块化机器人控制系统研究[D].沈阳:中国科学院沈阳自动化研究所,2006:31.

[11] 岳龙旺,朱敬花.基于轮式移动平台的新型湿式清洁机器人系统[J].轻工机械,2013,31(6):40-45.

[12] 郭云东.轮履复合式巡检机器人机械系统研究[D].青岛:山东科技大学,2015:37-50.

[13] 彭宽栋,张学良,郑龙,等.自适应履带机器人的研究与测试[J].机电工程,2017,34(12):1485-1490.