

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.06.001

多模式自适应差动履带机器人

姚燕安 王 硕 成俊霖

(北京交通大学机械与电子控制工程学院,北京,100044)

摘要:为提高履带机器人对复杂地形的通过能力与反应速度,基于差动轮系的原理,提出一种新型欠驱动式履带机器人。分析了机器人在松软、崎岖、平坦等地形下履带式、摇臂腿式、轮式等移动方式。描述了机器人通过台阶的 4 种情况,通过建立动力学模型,计算出 4 种情况下所需的驱动扭矩与障碍物高度、机器人履带模块尺寸之间的关系。利用 ADAMS 进行越障动力学仿真,得到机器人越障过程扭矩变化曲线。制作一台样机,进行攀爬台阶实验,验证了其自适应越障的可行性。理论分析与实验结果表明:该机器人针对地形变化自适应改变移动方式的能力提高了反应速度,多种越障方式有效增强了通过能力。

关键词:履带机器人;差动轮系;多模式;自适应

中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2017)06-0757-09

Multimode Adaptable Differential Tracked Mobile Robot

YAO Yanan, WANG Shuo, CHENG Junlin

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China)

Abstract: To improve the responsive and the obstacle climbing capability of tracked robot, a new under-actuated tracked robot is proposed, which is based on differential gear. Crawler, rocker leg, wheel and other mobile modes are analyzed when robot is in soft, rugged and flat terrain. Four modes of overcoming vertical wall for the robot are described. The relationship between driving torque and vertical wall height, and the relationship between driving torque and size of the robot are calculated by building dynamics model. The kinematics and dynamics simulations in ADAMS are carried out, and torque curve of the obstacle crossing process is obtained. The principle prototype is established to perform the obstacle climbing experiments. Theoretical analysis and experimental results show that the robot can change the mode of movement and increase the responsive, and many ways to overcome obstacles can enhance obstacle climbing capability of the robot.

Key words: tracked robot; differential gear; multimode; adaption

履带式移动机器人的接地比压大,在复杂地形环境中具有强大的通过能力,可以进行运输、侦查、排爆、搜救等繁重或危险的工作^[1-3]。在一些军事、应急救援等特殊环境下,需要进一步提高履带式移动机器人的通过能力及快速反应能力。显然,单一移动模式的传统履带式机器人难以满足需求^[4-5]。

因此,在传统履带机器人基础上研制了更多类型的机器人^[6]。iRobot 公司设计的 Packbot 机器人^[7]在其前端增加两个履带式关节臂,通过传感器识别障碍物并主动控制关节臂的摆动进行越障;Calisi 等^[8]提出的 Aladdin 履带机器人在两侧前后各自添加一个鳍状的关节臂,通过控制 4 个关节臂转动

基金项目:国家自然科学基金(51405013)资助项目;科技部“国家科技支撑计划”(2015BAK04B00)资助项目。

收稿日期:2017-10-29;**修订日期:**2017-11-27

作者简介:姚燕安,男,1972 年出生,教授,博士生导师,教育部新世纪优秀人才,主要研究方向为机构与机器人学。发表学术论文 100 余篇,发明专利 80 余项,获得省部级奖励 3 项。

通信作者:姚燕安, E-mail: yayao@bjtu.edu.cn。

引用格式:姚燕安,王硕,成俊霖.多模式自适应差动履带机器人[J].南京航空航天大学学报,2017,49(6):757-765.
YAO Yanan, WANG Shuo, CHENG Junlin. Multimode adaptable differential tracked mobile robot[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(6): 757-765.

支撑机器人,提高其通过能力;Koh等^[9]设计的一款由8个关节臂组成的履带机器人,通过关节臂之间的变形并利用履带的攀爬能力适应复杂地形;朱岩等^[10]提出一种变形履带机器人,通过控制连杆变形支撑机器人,结合履带式移动特点完成翻转式越障过程;陈长征等^[11]提出了一种复合平行四边形机构的履带机器人,利用平行四边形的变形功能进行腿式越障。综上所述的机器人通过增加履带关节、变形履带、复合连杆机构等改变机器人的移动方式进行越障,提高了机器人的通过能力,其越障方式的改变依靠主动控制或传感器感知。

本文针对机器人的通过能力以及反应速度,提出一种多模式自适应差动履带机器人。通过差动轮系原理的应用,采取欠驱动的方式,实现机构部分对不同环境被动自适应切换多种移动、越障方式,从而避免复杂的控制以及传感器的应用,以减少越障过程控制机器人变形所需的时间,提高了机器人的反应速度。对机器人越障过程进行分析,计算其越障所需最大驱动扭矩,并进行仿真及样机实验的验证。

1 机器人构型原理

多模式自适应差动履带机器人(以下简称机器人或差动履带机器人)总体构型如图1所示。机器人整体前后、左右分别对称。车体由前后两部分构成,前后车体之间通过转动副连接。4个履带模块布置在前后车体的两侧,每个履带模块由一个电机独立驱动。机器人通过控制4个驱动电机的输出转速与方向,实现各种地形下的前后移动及左右转向。

履带模块构型原理如图2所示,包括主动轮、托带轮、行星架、履带,整个模块构成一个差动轮系,主动轮驱动履带转动,托带轮支撑履带并随履带转动。履带模块自由度为2:履带受主动轮驱动而转动的自由度、行星架绕电机输出轴中心转动的自由度。每个模块采用一个电机驱动,即原动件数为1。

车体构型原理如图3所示,车体之间的转动副没有电机驱动,此自由度根据地形变化自适应调整车体间角度。车体与履带模块组合整体共有9个自由度、4个电机驱动,属于欠驱动装置。

2 多模式移动分析

机器人在不同地形下自适应产生4种移动方式:履带式移动、摇臂腿式移动、轮式移动以及异形轮式移动。其整体采用欠驱动机构,前后车体之间转动的自由度及行星架绕电机输出轴转动的自由

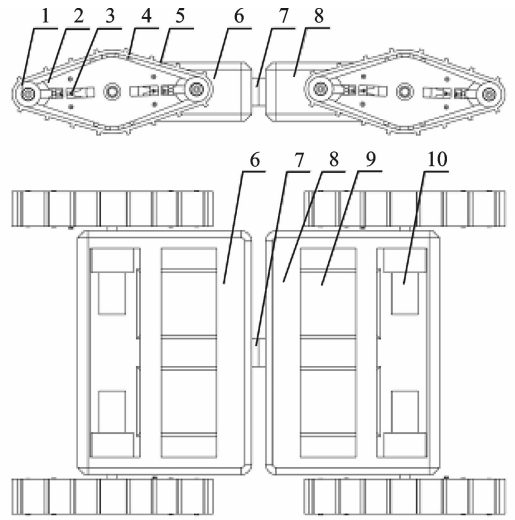


图1 多模式自适应差动履带机器人总体构型
1.托带轮; 2.行星架; 3.张紧螺栓; 4.主动轮; 5.履带; 6.前车体; 7.连接轴; 8.后车体; 9.控制器; 10.驱动电机

图1 多模式自适应差动履带机器人总体构型
Fig. 1 Configuration of multimode adaptable differential tracked mobile robot

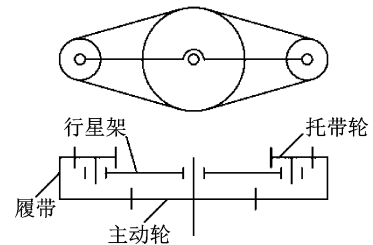


图2 履带模块差动轮系构型原理图
Fig. 2 Configuration of track module

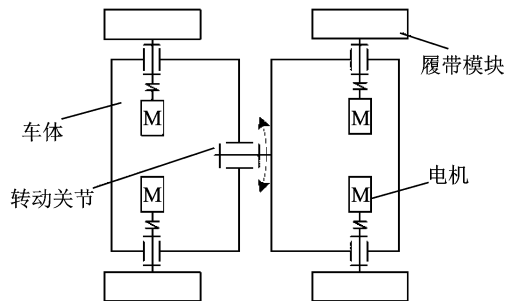


图3 车体构型原理图
Fig. 3 Configuration of vehicle body

度均由地形的变化来驱动。

2.1 履带式移动

2.1.1 松软地形

履带式移动在松软地形下具有接地比压大、牵引力大的优势。如图4所示,机器人在松软路面上移动,会出现下陷现象。电机驱动扭矩主要作用于主动轮,进而驱动履带传动的自由度,行星架转动的自由度则随地形变化而自适应改变。图4(a,b)是机器人在松软路面上移动过程中的两种受力情

况,此时履带与地面接触面积较大,接触部分将车体重量分散,进而减少下陷深度,保证足够的牵引力。因此,机器人在松软地形上自动切换为履带式移动。

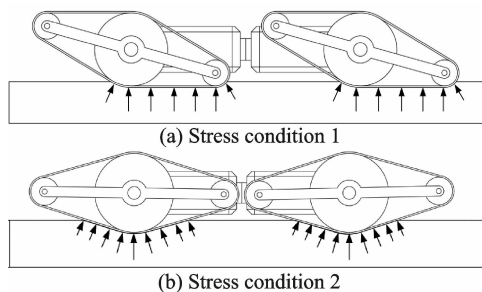


图 4 松软路面上移动
Fig. 4 Moving on soft road

2.1.2 崎岖地形

崎岖的路面上障碍物较多,履带式移动具有较好的通过性,机器人利用履带的攀爬能力可通过较低的障碍物。其履带式移动越障过程如图 5 所示。履带前端触及障碍物(图 5(a));受到障碍物的阻挡,行星架逆时针转动支撑履带模块(图 5(b,c));同时在履带的牵引力作用下,履带模块攀爬上障碍物(图 5(d));后履带模块继续以相同方式攀爬上障碍物上方,机器人将恢复为越障前的状态,机器人整体完成履带式越障(图 5(e,f))。

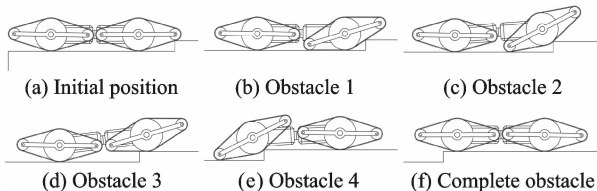


图 5 崎岖路面上履带式移动越障
Fig. 5 Moving on rugged road by crawler

2.2 摇臂腿式移动

机器人在崎岖的路面上会遇到较高障碍,单纯的履带式移动难以越过障碍物,需要利用腿式移动的高跨越性。机器人在障碍物的阻挡下会出现图 6(a)的情况;履带前端触及障碍物不能进行攀爬式越障,此时,机器人自身产生的牵引力转化成行星架绕前端托带轮中心转动的扭矩,带动履带模块绕托带轮中心顺时针转动(图 6(b,c));通过转动翻越至障碍物上方(图 6(d));后履带模块继续翻越至障碍物上方,机器人将恢复为越障前的状态,机器人整体完成摇臂腿式越障(图 6(e,f))。

2.3 轮式移动

平坦地形下,轮式移动具有速度快、能量消耗小的优点。如图 7(a)所示,机器人在平坦地面移

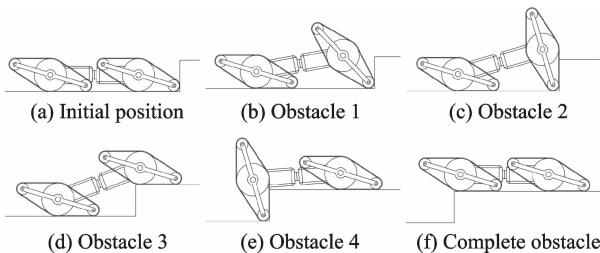


图 6 崎岖路面上摇臂腿式移动越障
Fig. 6 Moving on rugged road by rocker leg

动时,电机驱动主动轮转动,行星架随机器人移动的速度变化而上下摆动:机器人匀速移动时,行星架处于水平位置;机器人加速时,行星架逆时针转动;机器人减速时,行星架顺时针转动。整个过程中,只有主动轮中心正下方的履带与地面始终保持接触,其接触属于线接触,此时,可将履带模块简化为轮子(图 7(b)),机器人以轮式在平坦路面上移动。

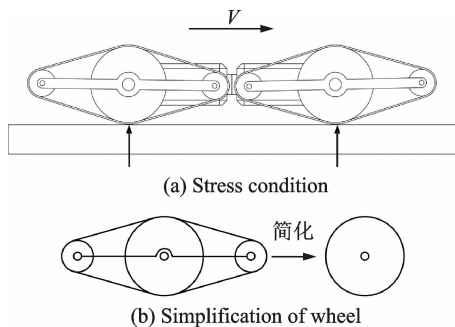


图 7 平坦路面上移动
Fig. 7 Moving on flat road

2.4 异形轮式移动

在复杂的环境中,传统履带式机器人容易被枯枝、杂草或者泥土等杂物卡住主动轮,导致无法驱动履带移动,甚至烧损电机。差动履带机器人遇到这种情况时,可以通过异形轮的方式继续移动^[12]。

如图 8(a)所示,机器人的主动轮被卡住,不能驱动履带传动,此时履带模块的自由度变为 1,即只有行星架绕电机输出轴的转动。图 8(b)为机器人一个主动轮被卡住情况下的移动过程,电机输出扭矩全部作用于行星架,带动履带模块整周转动,以异形轮的方式移动至安全区域。

由于机器人前后车体之间设置了转动关节,在异形轮式移动的过程中,4 个履带模块始终与地面接触,保持牵引力的同时减少了冲击。

3 机器人越障分析

影响机器人越障能力的因素包括机器人的结构构型、几何尺寸以及驱动力矩等。为验证机器人

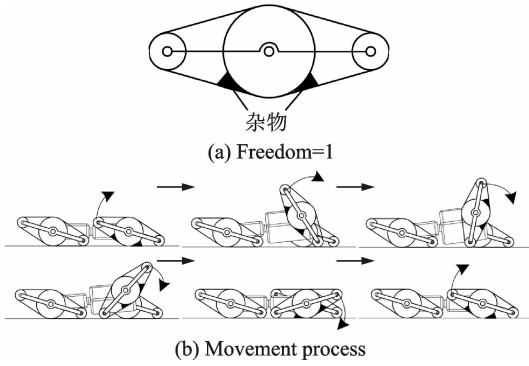


图8 异形轮式移动

Fig. 8 Moving by special-shaped wheel

的越障能力,对其通过不同高度的障碍物进行受力分析,计算通过障碍物的最大高度及电机需提供的最大扭矩。分析过程中用到的部分符号如表1所示。

表1 符号列表

Tab. 1 Symbol list

符号	含义
M	电机输出转矩
G	履带模块承担的重力
R	主动轮半径
r	托带轮半径
L	行星架长度
H	障碍物高度
$F_i (i = 1, 2, 3, 4)$	车体对履带模块的推力
μ_1, μ_2	履带与地面、障碍物间摩擦系数
N_i	主动轮处履带受地支持力
N_i''	拖带轮处履带受地支持力
N_i'	履带受障碍物的支持力
R_i	履带受地面的摩擦力
R_i'	履带受障碍物的摩擦力
F_{β}, F_{β}'	履带对地面的牵引力
J	履带模块的转动惯量
β	行星架与履带夹角
λ	行星架与水平地面夹角
α	N_i' 与水平地面夹角

机器人前端履带模块触及障碍物时,行星架会在障碍物的阻挡下绕电机输出轴转动,根据履带模块位姿以及障碍物的高度不同,出现4种接触方式,如图9所示。其中图9(a,b)为行星架顺时针转动出现的两种位姿,图9(c,d)为行星架逆时针转动出现的两种位姿。4种初始位姿受力情况不同,进而导致越障方式不同,图9(a~d)为履带攀爬式越障,图9(b)为摇臂腿翻转式越障。

图9(a,b)中两种位姿的临界状态为履带受障碍物的支持力方向与行星架重合(图10(a)),此时障碍物高度为 $H_1 = r - r\sin\beta$;图9(c,d)两种位姿

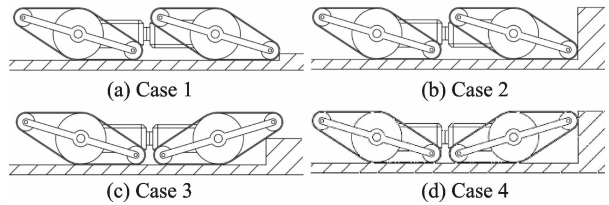


图9 触及障碍物的四种情况

Fig. 9 Four modes of overcoming vertical wall

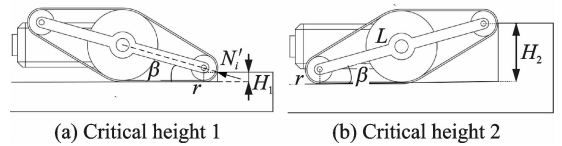


图10 不同越障位姿临界高度

Fig. 10 Critical height of different obstacle

的临界状态为障碍物高度与前端托带轮中心平齐(图10(b)),此时障碍物高度为 $H_2 = r + L\sin\beta$ 。

如图11所示,机器人最大越障高度与履带模块自身尺寸相关,其大小为

$$H_{\max} = r + L/2 \cdot \cos\beta \quad (1)$$

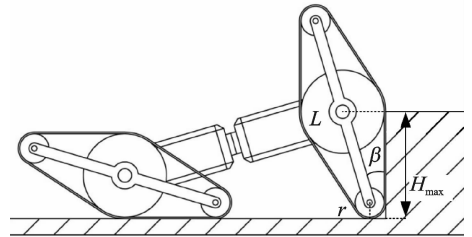


图11 最大越障高度

Fig. 11 Maximum barrier height

以下对4个越障过程履带模块初始位姿进行受力分析。由于前后履带模块越障方式完全相同,机器人前履带模块越障时,后履带模块及车体对前履带模块提供推力及重力;后履带模块越障时,前履带模块及车体对后履带模块提供拉力及重力。因此只针对前履带模块越障过程进行受力分析。

3.1 履带模块前端与地面接触

3.1.1 低障碍通过性分析

如图12所示建立以主动轮圆心为原点的机器人坐标系 oxy 和以障碍物与地面的交点为原点的坐标系 OXY ,障碍物高度满足的几何条件为

$$H \leq r - r\sin\beta \quad (2)$$

对履带模块独立分析,其重心在 oxy 中的坐标为 (x_0, y_0) ,则重心在 OXY 中的坐标 (x_G, y_G) 为

$$\begin{cases} x_G = x_0 - L/2 \cdot \cos\lambda - r\cos\alpha \\ y_G = y_0 + L/2 \cdot \sin\lambda + r\sin\alpha + H \end{cases} \quad (3)$$

对式(3)求二阶导数可得 X 与 Y 轴方向加速

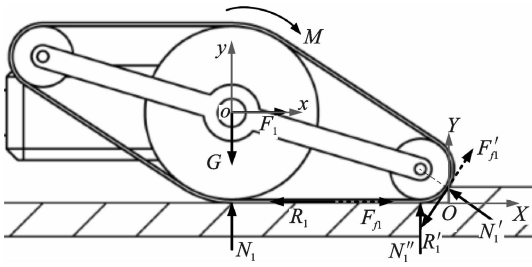


图 12 越障初始位置状态 1 受力分析

Fig. 12 First force analysis of the initial obstacle position

度,表达式为

$$\begin{cases} \ddot{x}_G = (\cos\lambda\dot{\lambda}^2 + \sin\lambda\ddot{\lambda})L/2 + r(\cos\alpha\dot{\alpha}^2 + \sin\alpha\ddot{\alpha}) \\ \ddot{y}_G = (\cos\lambda\ddot{\lambda} - \sin\lambda\dot{\lambda}^2)L/2 + r(\cos\alpha\ddot{\alpha} - \sin\alpha\dot{\alpha}^2) \end{cases} \quad (4)$$

根据矢量力学原理可得到力和力矩平衡方程为

$$\begin{cases} F_1 + (F_{f1} - R_1) + (F'_{f1} - R'_1)\sin\alpha - N'_1\cos\alpha = m\ddot{x}_G \\ N_1 - G + N'_1 + (F'_{f1} - R'_1)\cos\alpha + N'_1\sin\alpha = m\ddot{y}_G \\ N'_1L/2\cos\lambda + N'_1L/2\sin(\alpha - \lambda) + \\ (F_{f1} - R_1)H + F_1(R - H) = J\ddot{\lambda} \end{cases} \quad (5)$$

履带的最大牵引力 $F_{f\max}$ 取决于驱动电机输出扭矩 M , 其大小为

$$F_{f\max} = \frac{M}{R} \geq F_{f1\max} + F'_{f1\max} \quad (6)$$

机器人越障临界条件为托带轮处地面支持力为 0, 即 $N'_1 = 0$ 。顺利通过障碍物还需满足的条件为

$$\begin{cases} F_{f1\max} + F'_{f1\max} \geq R_1 + R'_1 \\ J\ddot{\lambda} \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

由式(5~7)得出

$$\begin{cases} F_1 = N'_1\cos\alpha \\ G = N_1 + N'_1\sin\alpha \\ J\ddot{\lambda} = \sin(\alpha - \lambda)N'_1L/2 \end{cases} \quad (8)$$

代入机器人参数, 分析计算结果可知 $H \leq r - r\sin\beta$ 时, $J\ddot{\lambda} \geq 0$ 始终成立。

由式(7,8)得越障需要的驱动电机输出力矩为

$$M \geq \mu_1 GR(1 - \mu_1 \tan\alpha + \mu_2/\cos\alpha) \quad (9)$$

行星架与地面夹角 λ 初始大小等于行星架与履带夹角 β 。根据几何关系可得 λ 与 α 的关系为

$$R - H - r\sin\alpha = L/2 \cdot \sin\lambda \quad (10)$$

图 13 为障碍物高 20 mm 时, 电机扭矩大小随行星架与地面夹角的变化。越障过程中, 随着行星架与地面夹角的变小, 需要的电机扭矩减小。因此, 越障初始位置需要扭矩最大。

图 14 为初始位置时, 电机扭矩大小与障碍物高度的关系。由图 14 可知, 障碍物越高需要的驱动扭矩越大。

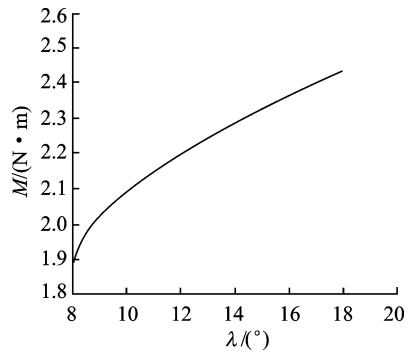


图 13 电机输出转矩与 λ 的关系(状态 1)

Fig. 13 Relationship between motor torque and λ under condition 1

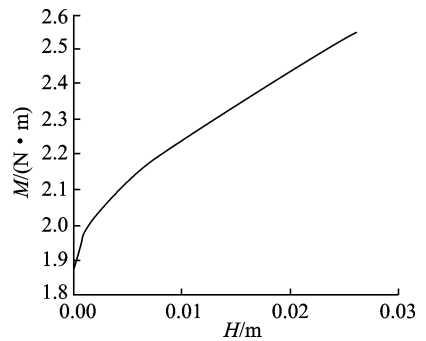


图 14 电机输出转矩与 H 关系(状态 1)

Fig. 14 Relationship between motor torque and H under condition 1

3.1.2 高障碍通过性分析

如图 15 所示, 障碍物高度满足的几何条件为

$$r - r\sin\beta < H \leq r + L/2 \cdot \cos\beta \quad (11)$$

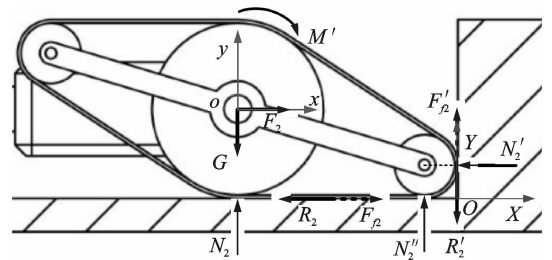


图 15 越障初始位置状态 2 受力分析

Fig. 15 Second force analysis of the initial obstacle position

坐标系建立与图 12 相同, 履带模块此时自行翻转越障, 翻转过程中电机输出扭矩为翻转提供动力, 根据矢量力学原理可得到力和力矩平衡方程

$$\begin{cases} F_2 + (F_{f2} - R_2) - N'_2 = m\ddot{x}_G \\ N_2 - G + N'_2 + F'_{f2} - R'_2 = m\ddot{y}_G \\ GL/2 \cdot \cos\lambda - F_2L/2 \cdot \sin\lambda + \\ (F_{f2} - R_2 + F'_{f2} - R'_2)r - M' = J\ddot{\lambda} \end{cases} \quad (12)$$

式中: M' 为电机扭矩转化到整个履带模块的扭矩。此时履带的最大牵引力 $F_{f\max}$ 为

$$F_{f\max} = \frac{M - M'}{R} \geq F_{f1\max} + F'_{f1\max} \quad (13)$$

履带模块翻转越障的临界状态下,地面对驱动轮处支持力为零,假设前面托带轮处履带与地面、障碍物之间没有相对位移,则临界条件为

$$\begin{cases} N_2 = 0, F_{f2} = R_2, F'_{f2} = R'_2 \\ J\ddot{\lambda} \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

代入式(12)可得所需电机输出扭矩为

$$M \geq (\cos\lambda - \mu_1 \sin\lambda)GL/2 + \mu_1(1 + \mu_2)GR \quad (15)$$

由式(15)可知,初始位置翻转时驱动扭矩的大小与障碍物高度无关。由图 16 可知,随着翻转过程中 λ 值的增大,所需扭矩会相应减小,因此翻越障碍物初始位置所需扭矩最大。

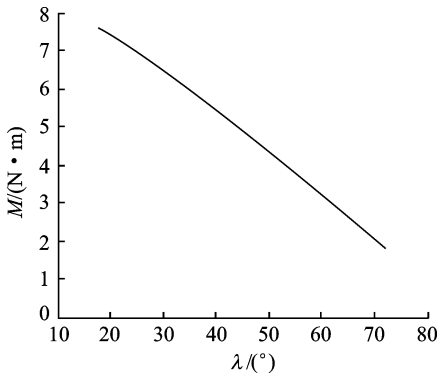


图 16 电机输出扭矩与 λ 关系(状态 2)

Fig. 16 Relationship between motor torque and λ under condition 2

图 17 为初始位置时,电机扭矩大小与行星架长度的关系。行星架越长,履带模块翻转所需扭矩越大。

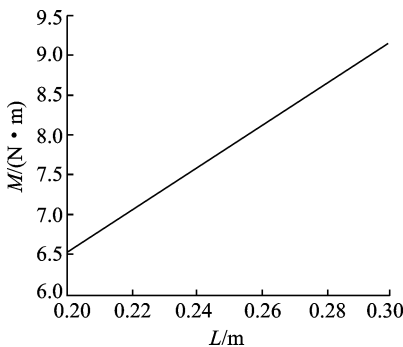


图 17 电机输出扭矩与 L 关系(状态 2)

Fig. 17 Relationship between motor torque and L under condition 2

3.2 履带模块后端与地面接触

3.2.1 低障碍通过性分析

如图 18 所示,障碍物高度需满足的几何条件为

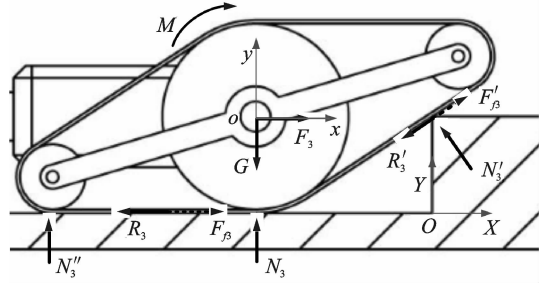


图 18 越障初始位置状态 3 受力分析

Fig. 18 Third force analysis of the initial obstacle position

$$H \leq r + L\sin\beta \quad (16)$$

坐标系建立与图 12 相同,根据矢量力学原理可得到力和力矩平衡方程为

$$\begin{cases} F_3 + (F_{f3} - R_3) - N'_3 \cos\alpha + (F'_{f3} - R'_3) \sin\alpha = m\ddot{x}_G \\ N_3 - G + N''_3 + N'_3 \sin\alpha + (F'_{f3} - R'_3) \cos\alpha = m\ddot{y}_G \\ (N_3 - G)L/2 \cdot \cos\lambda - F_3 L/2 \cdot \sin\lambda + N'_3 s \sin\alpha + \\ (F_{f3} - R_3 + F'_{f3} - R'_3)r = J\ddot{\lambda} \end{cases} \quad (17)$$

式中,后面托带轮中心与障碍物的距离 s 为

$$s = R/\cos\alpha + R\sin(\beta + \lambda) + \cos\lambda L/2 + (H - r)\cot\alpha \quad (18)$$

为使履带模块顺利越过障碍物,临界状态下,地面对驱动轮处支持力 N_3 为零,代入式(17)可得

$$M \geq \mu_1 G(stan\alpha - L/2 \cdot \sin\lambda) - GL/2 \cdot \cos\lambda + \mu_1 GR(1 - \mu_1 \tan\alpha + \mu_2/\cos\alpha) \quad (19)$$

如图 19~21 所示分别为电机扭矩关于行星架与地面夹角 λ 、障碍物高度 H 、行星架长度 L 的变化曲线。由图可知,驱动力矩随行星架与地面夹角的增大而减小,随障碍物高度的增大而增大,行星架越长所需转矩越大。

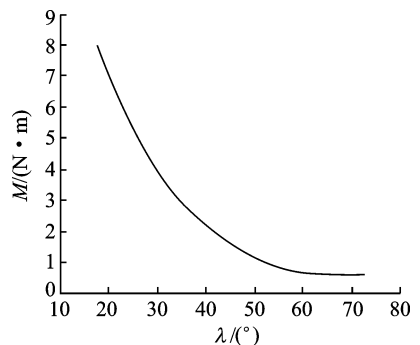


图 19 电机输出扭矩与 λ 关系(状态 3)

Fig. 19 Relationship between motor torque and λ under condition 3

3.2.2 高障碍通过性分析

如图 22 所示,障碍物高度需满足的几何条件为

$$r + L\sin\beta \leq H \leq r + L/2 \cdot \cos\beta \quad (20)$$

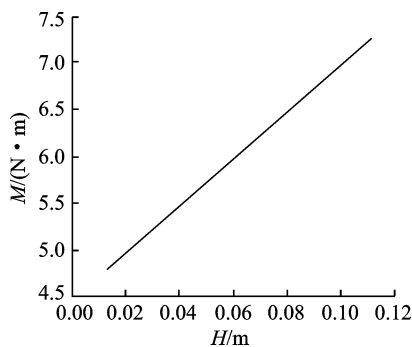


图 20 电机输出转矩与 H 关系(状态 3)

Fig. 20 Relationship between motor torque and H under condition 3

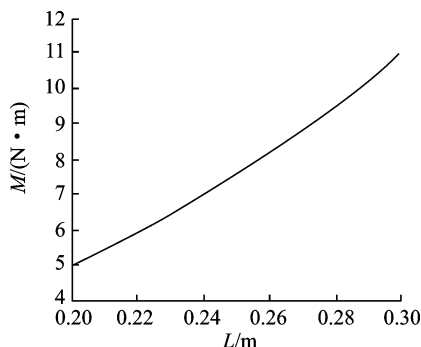


图 21 电机输出转矩与 L 关系(状态 3)

Fig. 21 Relationship between motor torque and L under condition 3

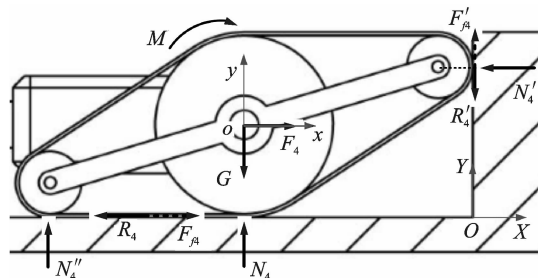


图 22 越障初始位置状态 4 受力分析

Fig. 22 Forth force analysis of the initial obstacle position

坐标系建立与图 12 相同,根据矢量力学原理可得到履带模块力和力矩平衡方程

$$\begin{cases} F_4 + (F_{f4} - R_4) - N'_4 = m\ddot{x}_G \\ N_4 - G + N'_4 + (F'_{f4} - R'_4) = m\ddot{y}_G \\ (G - N_4)L/2 \cdot \cos\lambda - N''_4L\cos\lambda + F_4L/2 \cdot \sin\lambda + \\ (F_{f4} - R_4)(L\sin\lambda + r) + (F'_{f4} - R'_4)r - \\ M' = J\ddot{\lambda} \end{cases} \quad (21)$$

为使履带模块顺利越过障碍物,临界状态下,地面对驱动轮处支持力 N_4 为零,代入式(21)可得

$$M \geq (\cos\lambda - \mu_1\sin\lambda)GL/2 + \mu_1(1 + \mu_2)GR \quad (22)$$

如图 23,24 所示分别为驱动力矩关于行星架与地面夹角 λ 、行星架长度 L 的变化曲线。由图可知,驱动力矩的大小随着行星架与地面夹角 λ 的增大而减小,行星架越长所需转矩越大,驱动力矩大小与障碍物高度无关。

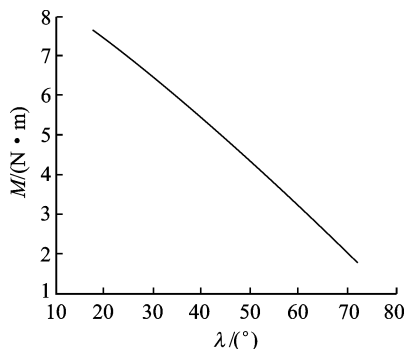


图 23 电机输出转矩与 λ 关系(状态 4)

Fig. 23 Relationship between motor torque and λ under condition 4

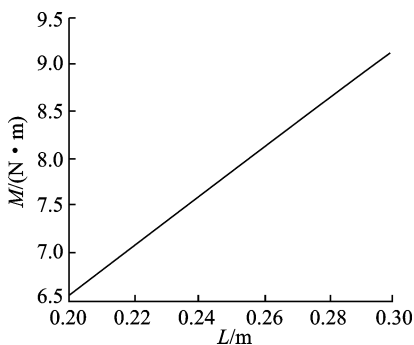


图 24 电机输出转矩与 L 关系(状态 4)

Fig. 24 Relationship between motor torque and L under condition 4

3.3 越障能力分析总结

通过对比 4 种情况下驱动力矩的计算结果,可以得出以下结论:

(1) 越障高度越大,所需行星架越长;而行星架越长,越障所需的扭矩也越大。因此,为减小越障所需扭矩,在满足越障高度情况下,行星架长度应尽量小。本文设置越障最大高度为 150 mm,由式(1)计算行星架长度得 $L=240$ mm。

(2) 4 种情况下,需要的最大扭矩均出现在越障初始位置处,采用翻转式越障过程需要的扭矩最大,最大不超过 $8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。选取安全系数为 1.3,计算得所需电机扭矩为 $10.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

4 仿真与样机验证

4.1 仿真实验

为验证履带式越障与摇臂腿式越障的可行性及驱动扭矩计算的准确性,在 Adams 软件中对机

机器人两种情况下的越障过程进行仿真,并测量电机输出扭矩变化。

设置障碍物高度为 30 mm 进行仿真,其越障过程为履带式越障(图 25);设置障碍物高度为 120 mm 进行仿真,其越障过程为摇臂腿式越障(图 26)。通过对比仿真结果,发现其越障过程与理论分析相同。

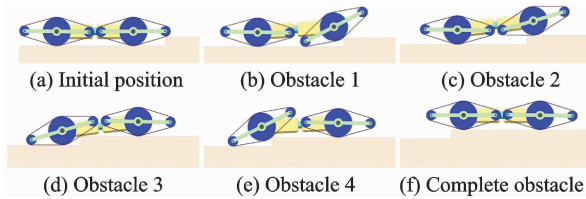


图 25 履带式越障仿真过程

Fig. 25 Simulation process of crawler obstacle

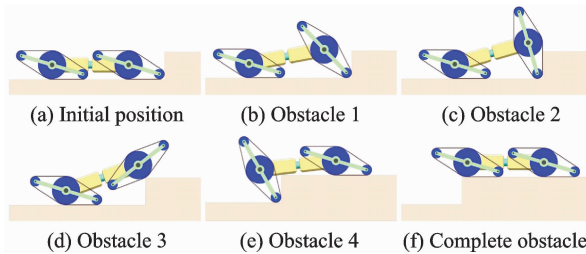


图 26 摇臂腿式越障仿真过程

Fig. 26 Simulation process of rocker leg obstacle

测量摇臂腿式越障仿真过程中机器人前端电机的输出扭矩(图 27),越障初始位置需要扭矩最大,仿真数据与第 3 节中计算数据相符,采用输出扭矩 $10.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的电机满足越障需求。

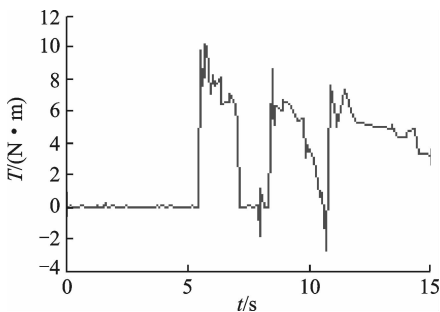


图 27 翻越障碍物驱动力矩

Fig. 27 Curve of driving torque

4.2 样机验证

为进一步验证机器人的越障性能,制作了样机并进行实验,样机参数如表 2 所示。

实验过程中,履带模块先触及障碍物,根据障碍物的高低、履带模块的姿态,机器人自行选择移动及越障方式。如图 28 所示为机器人履带式攀爬台阶的过程,台阶高度为 30 mm;如图 29 所示为机器人摇臂腿式翻越台阶的过程,台阶高度为

表 2 机器人样机参数

Tab. 2 Robot prototype parameters

项目	数值
机器人总质量/kg	20
车体模块质量(含电机)/kg	12
单一履带模块质量/kg	2
机器人长×宽×高/mm	700×460×150
前后驱动电机输出轴中心距/mm	420
主动轮半径/mm	75
托带轮半径/mm	35
驱动力矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	10.5
行驶速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0~2
车身最小离地高度/mm	40

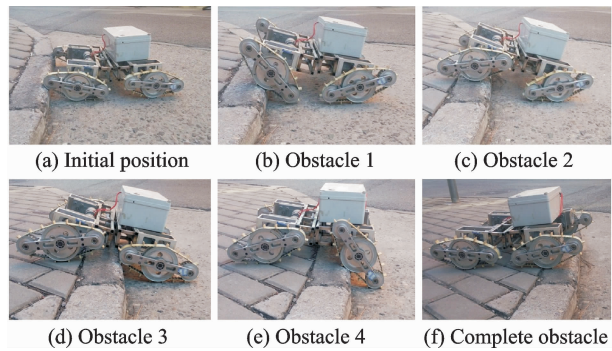


图 28 履带式越障实验

Fig. 28 Experiment of crawler obstacle

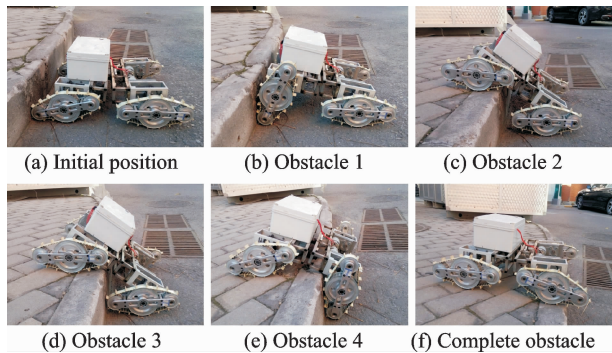


图 29 摇臂腿式越障实验

Fig. 29 Experiment of rocker leg obstacle

150 mm。

在以上两个实验中,均只需控制驱动电机正转即可完成翻越障碍物的整个运动过程:图 28,29(a~c)是前履带模块越障阶段,图 28,29(d~f)是后履带模块越障阶段。通过对比,发现其越障过程与理论分析、仿真相同。

5 结束语

通过对多模式自适应差动履带机器人的理论分析及实验验证可以得出以下结论:

(1) 基于差动轮系的原理,采用欠驱动的方式,设计了一种可以自适应切换移动方式的履带机

机器人,避免了越障过程控制机器人变形所需时间,提高了反应速度。

(2) 欠驱动装置的应用使机器人在复杂地形的驱动下实现了多种移动方式:履带式移动为主,摇臂腿式、轮式与异形轮式移动为辅,提高了机器人对各种地形的通过能力。

(3) 移动、越障方式的切换依靠机构自适应地形变化,不需要复杂的控制及传感器,有效增强了机器人的稳定性与可靠性,同时降低了成本。

参考文献

- [1] LI I H, WANG W Y, TSENG C K. A kinect-sensor-based tracked robot for exploring and climbing stairs[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014, 11(1):1-11.
- [2] JAHANIAN O, KARIMI G. Locomotion systems in robotic application[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. [S. l.]: IEEE, 2006:689-696.
- [3] ZONG C, JIANG S, GUO W, et al. Obstacle-surmounting capability analysis of a joint double-tracked robot [C]// *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. [S. l.]: IEEE, 2014: 723-728.
- [4] QUAN Qiquan, MA Shugen. Development of a modular crawler for tracked robots[J]. *Advanced Robotics*, 2011,25(13/14):1839-1849.
- [5] YAMAUCHI B M. Packbot: A versatile platform for military robotics[C]// *Proceedings of the SPIE*, Bellingham, USA: SPIE, 2004:228-237.
- [6] TSENG C K, LI I H, CHIEN Y H, et al. Autonomous stair detection and climbing systems for a tracked robot[C]// *International Conference on System Science and Engineering*. [S. l.]: IEEE, 2013: 201-204.
- [7] HE B, HOU S, DENG Z, et al. Workspace analysis of a novel under actuated robot wrist based on virtual prototyping[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 72 (1/2/3/4): 531-541.
- [8] CALISI D, NARDI D, OHNO K, et al. A semi-autonomous tracked robot system for rescue missions [C]// *SICE Conference*. [S. l.]: IEEE, 2015:2066-2069.
- [9] KOH D, HYUN K, KIM S. Design of multi-joint tracked robot for adaptive uneven terrain driving [C]// *International Conference on Autonomous Robots and Agents*. [S. l.]: IEEE, 2009:464-469.
- [10] 朱岩,王明辉,李斌,等. 履带可变形机器人越障性能研究[J]. *机器人*, 2015,37(6):693-701.
ZHU Yan, WANG Minghui, LI Bin, et al. On obstacle surmounting performance for a transformable tracked robot[J]. *Robot*, 2015,37(6):693-701.
- [11] 陈长征,项宏伟,杨孔硕,等. 可变形履带机器人跨越台阶的动力学分析[J]. *沈阳工业大学学报*, 2015,37(2):165-170.
CHEN Changzheng, XIANG Hongwei, YANG Kongshuo, et al. Dynamic analysis for variable tracked robot in process of climbing steps[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2015,37(2):165-170.
- [12] BOXERBAUM A S, WERK P, QUINN R D, et al. Design of an autonomous amphibious robot for surf zone operation, part I: Mechanical design for multi-mode mobility[C]// *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. [S. l.]: IEEE, 2005:1459-1464.