

## 两栖仿生机器人登陆自适应越障机构优化设计\*

殷谦<sup>1,2</sup>, 王何<sup>2</sup>, 宋震<sup>2</sup>, 尚建忠<sup>2</sup>, 罗自荣<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 国防科技大学智能科学学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**两栖仿生机器人是一种能够同时在水下和陆地工作的无人平台,在抢险救灾、环境勘探与资源开发等领域具有广泛应用。本文提出了一种具有自适应登陆越障能力的轮鳍复合式两栖机器人,对其越障过程进行了运动学与力学分析,以其在临界越障时刻转矩为目标函数,应用遗传算法优化设计了结构与运行参数,同时与其他两栖机器人越障能力进行对比。结果表明,优化后越障所需转矩相比优化前降低了718.4 N·mm,轮鳍复合式机器人能够攀越相比自身尺寸更高的垂直障碍。模拟仿真了所设计机器人的越障过程,获得了其在平地行走、越障以及上坡推进过程中的速度、位移与力矩的变化规律,并通过实验进行了验证。

**关键词:**两栖机器人; 自适应; 越障机器人; 优化设计

中图分类号:TH6;TP24 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)01-208-07



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Optimal design of self-adaptive climbing mechanism for landing in the amphibious bionic robot

YIN Qian<sup>1,2</sup>, WANG He<sup>2</sup>, SONG Zhen<sup>2</sup>, SHANG Jianzhong<sup>2</sup>, LUO Zirong<sup>2</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The amphibious bionic robot is an unmanned system which can work both underwater and on land, which has been widely used in the fields of disaster rescue, environmental detection and resource exploration. An amphibious robot compounded with wheel and fin with the ability of self-adaptive climbing was proposed in this paper. The kinematic and dynamic mechanics of the self-adaptive climbing process was analyzed. The torque required of the critical obstacle crossing point was set as the objective function, and the optimized design structural and operational parameters were obtained by applying the genetic algorithm. Meanwhile, the climbing ability of the amphibious robot in this work was compared with others. The results illustrate that the required torque of the amphibious robot was reduced by 718.4 N·mm. The robot compounded with wheel and fin can climb the vertical obstacle of a larger height. The self-adaptive climbing process of the optimized robot was simulated. The simulation results illustrate that the variation of the propulsive velocity, the displacement and the torque in the processes of moving forward and climbing the obstacles. The experiments of the obstacle climbing was investigated for verifying the structural and operational parameters design.

**Keywords:** amphibious robot; self-adaptive; obstacle-climbing robot; optimal design

水陆两栖仿生机器人可在陆地、近海滩涂及其他两栖环境中工作<sup>[1]</sup>,在安全救灾、资源开发、环境勘探等领域具有广阔前景<sup>[2]</sup>。在两栖机器人工作中,机器人登陆需要克服沙滩、岩石等复杂地形环境,对其越障能力提出很高的要求。

根据仿生模本不同,水陆两栖仿生机器人主要包括鳍片多足结构<sup>[3]</sup>、仿青蛙或蝾螈结构<sup>[4-6]</sup>、仿海龟结构<sup>[7-8]</sup>、仿蛇形结构<sup>[9-10]</sup>、仿蟑螂结构<sup>[11-13]</sup>等类型,这些机器人通过模仿某一种两栖生物来实现运动,两栖环境适应程度有限,尤其是在浅滩登陆过程中,攀越复杂障碍能力不足。为

提高机器人的登陆越障能力,一些学者采用水下和陆地两套驱动系统集成方法。德国学者提出了仿蛇机器人 Kairo<sup>[14]</sup>,其采用轮式驱动与多关节来实现陆地行进与水下巡游动作;文献[15]研发的仿蝾螈机器人在水下依靠紧贴身体的关节波动推进,陆地行走通过蜿蜒躯体实现。

一些针对陆地或水下机器人推进机构的研究,为两栖机器人的设计提供参考。一方面,陆地机器人采用轮和履带来实现复杂地形越障,例如:饶伟等<sup>[16]</sup>设计了一种关节履带机器人,其能够对台阶

\* 收稿日期:2021-03-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52105289,52075537)

作者简介:殷谦(1989—),男,湖北荆门人,讲师,博士,E-mail:yqzqiang@mail.sdu.edu.cn;

罗自荣(通信作者),男,湖南邵阳人,教授,博士,博士生导师,E-mail:luozirong@nudt.edu.cn

一点或多点接触实现越障动态稳定;Gong 等<sup>[17]</sup>提出了一种履带式越障平台并实现多机器人协同工作。另一方面,水下机器人采用波动鳍实现推进,例如:Curet 等<sup>[18]</sup>通过 PIV 手段分析了波动鳍的三维流场和涡流;在此基础上,Hu<sup>[19-20]</sup>等对波动长鳍进行动力学建模,通过分析鳍面的水下运动性能优化其结构,实现水下推进效率大幅提高。

鉴于仿生波动鳍和轮分别在水下和陆地具有高效推进能力,本文将二者组合,设计一种轮鳍复合式水陆两栖仿生机器人,其兼具陆地与水下高效运动的优点。针对该机器人从水面至陆地的登陆过程,本文设计了独特的具有自适应攀爬功能的越障机构,优化设计机器人越障过程的结构与运行参数,通过仿真与实验验证了其自适应越障性能,较好解决了复杂两栖环境机器人登陆越障难题。

### 1 自适应攀爬越障轮机构的基本原理

轮鳍复合式水陆两栖机器人的原理结构如图 1 所示,由越障轮机构、波动鳍、螺旋桨、信号天线等部分组成。机器人水下运动由仿生波动鳍提供前进推力,车体前侧安装有两个螺旋桨,用于控制车体在水下的姿态。

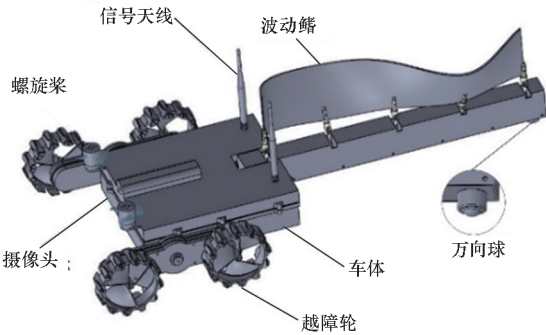


图 1 两栖机器人总体结构示意图  
Fig. 1 Structure of the amphibious robot

机器人地面行走系统采用了独特设计的自适应攀爬越障轮机构,结构如图 2 所示,包括一套两级减速定轴轮系和一套两自由度行星轮系。定轴轮系由

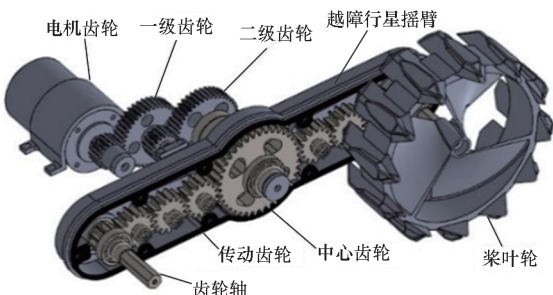


图 2 越障轮内部结构示意图  
Fig. 2 Structure of the obstacle climbing wheel

电机齿轮驱动,经一级齿轮和二级齿轮降低速度提升扭矩,驱动行星轮系的中心齿轮,以适应于桨叶轮翻转越障。行星轮系由越障行星摇臂、中心齿轮、传动齿轮和桨叶轮构成,中心齿轮带动两边的传动齿轮旋转,驱动桨叶轮的齿轮轴带动桨叶轮旋转。

机器人越障原理如图 3 所示:①在平路运动时,如图 3(a)所示,越障行星摇臂不翻转,机器人的传动系统类似定轴轮系,电机驱动桨叶轮带动机器人水平前进;②当机器人桨叶轮碰到障碍时,如图 3(b)所示,由于车轮受到堵转力矩,电机带动越障行星摇臂整体翻转,机器人整体前送;③当越障轮翻转后,桨叶轮搭上前方障碍并继续翻转,抬升躯体整体搭上台阶,如图 3(c)所示;④当躯体前端高度超过了障碍后,越障轮继续翻滚并能同时向前运动,如图 3(d)所示,使整个机器人跨越障碍。

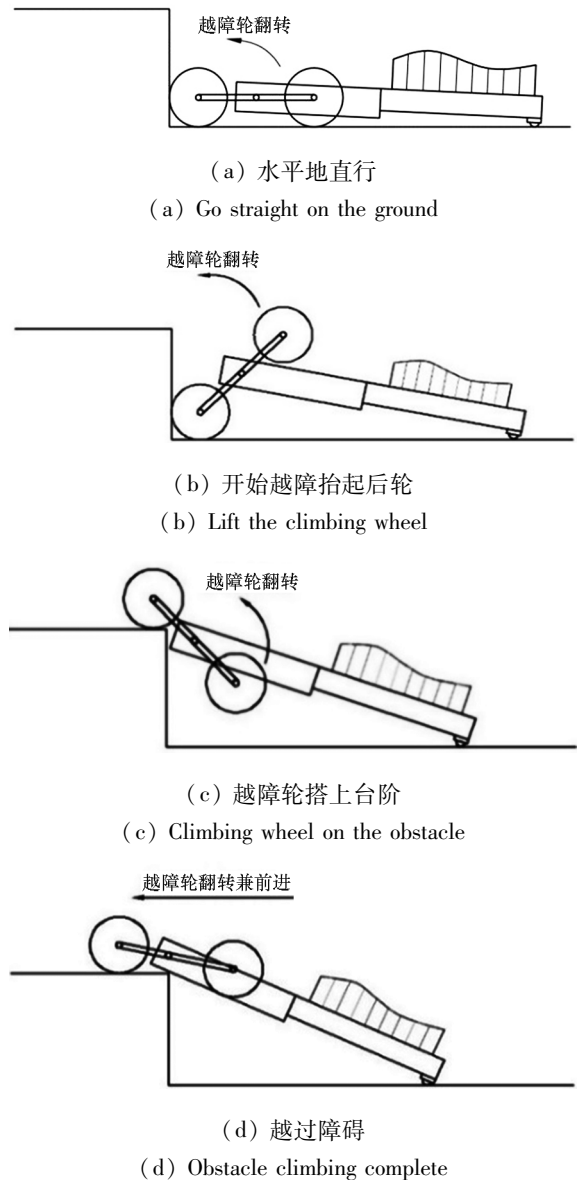


图 3 机器人越障过程示意图  
Fig. 3 Process of the obstacle climbing

## 2 攀爬越障轮机构的越障力学模型

建立机器人质心运动学与力学模型,如图 4 所示:固定坐标系  $x_0O_0y_0$ , 机器人坐标系  $x_1O_1y_1$ , 摇臂坐标系  $x_2O_2y_2$ 。后车体和行星摇臂质量分别为  $m_1$  和  $m_2$ ,  $l_1$ 、 $R$  分别为摇臂中心至机器人车体尾端、越障轮摇臂的长度,  $L_{cl}$  为机器人车体质心与  $O_1$  之间的距离,  $r$  为越障轮半径,  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为机器人的俯仰角和前摇臂摆角。

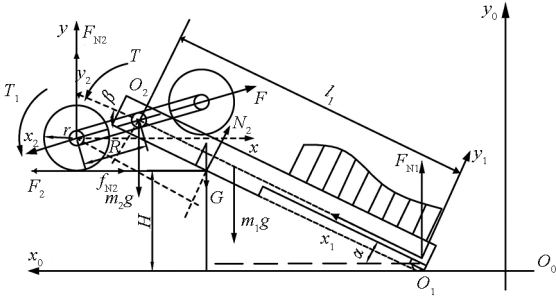


图 4 机器人在越障临界状态下的运动受力情况

Fig.4 The force of the obstacle climbing in the critical state

前摇臂轮坐标系  $x_2O_2y_2$  与机器人坐标系的变换矩阵可写为:

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 & l_1 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由上述分析可知, 机器人质心在坐标系  $x_1O_1y_1$  中的表达式为:

$${}^1P = \frac{m_1 \cdot {}^1p_1 + m_2 \cdot {}^1p_2}{m} \quad (2)$$

其中:  $m$  为机器人总质量;  ${}^1p_1$  和  ${}^1p_2$  分别为车体与前摇臂在坐标系  $x_1O_1y_1$  中的坐标矩阵, 可表示为

$${}^1p_1 = [L_{cl} \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (3)$$

$${}^1p_2 = {}^1T_2 \cdot {}^2p_2 = [l_1 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (4)$$

机器人在越障过程中, 其质心坐标在固定坐标系  $x_0O_0y_0$  中表示为:

$${}^0P = {}^0T_1 \cdot {}^1P = \begin{bmatrix} \frac{\cos\alpha[m_1L_{cl} + m_2l_1]}{m} + P_x \\ \frac{\sin\alpha[m_1L_{cl} + m_2l_1]}{m} + P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  ${}^0T_1$  为前摇臂在坐标系  $x_1O_1y_1$  中与固定坐标系之间的变换矩阵,  $P_x$ 、 $P_y$  和  $P_z$  为机器人坐标系  $x_1O_1y_1$  在固定坐标系中的位置。

对机器人越障临界位置进行质点运动学分析, 令机器人质心坐标为  $(L_x, L_y)$ , 越障高度  $H$  为:

$$H = (L_x - L_y \tan\alpha) \sin\alpha + d_2 \cos\alpha - \frac{d_2}{\cos\alpha} \quad (6)$$

其中,  $L_x = \frac{m_1L_{cl} + m_2l_1}{m}$ ,  $L_y = 0$ ,  $d_2$  为行星摇臂中心至车体下端距离。

针对机器人越障临界状态进行力学分析,  $F_{N1}$ 、 $F_{N2}$  和  $N_2$  分别为地面、障碍台阶和障碍边缘对机器人的支撑力,  $F_2$  为桨叶轮在台阶上转动产生的向前推力,  $f_{N2}$  为地面对桨叶轮的摩擦力。  $T$  为行星摇臂中心齿轮轴的转矩,  $T_1$  为桨叶轮中心轴转矩, 左右侧的  $T_1$  和  $T$  相等, 机器人受力如下:

$$2F_{N2} + F_{N1} + N_2 \cos\alpha = (m_1 + m_2)g \quad (7)$$

$$2(F_2 - \mu F_{N2}) - N_2 \sin\alpha = 0 \quad (8)$$

其中,  $\mu$  为桨叶轮与地面及台阶的动摩擦系数。

以前摇臂轮中心轴为基准, 对机器人进行力矩分析, 可得:

$$2T + N_2 \cdot (L_x - d_2 \tan\alpha) - m_1gL_{cl} \cos\alpha - F'l_1 \sin\beta = 0 \quad (9)$$

$$2(T_1 + T) + N_2[l_1 - (L_x - d_2 \tan\alpha) + R \cos\beta] - 2(F_2 - f_{N2})r - m_2g[(l_1 - L_{cl}) \cos\alpha + R \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha - \beta)] - m_2gR \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha - \beta) = 0 \quad (10)$$

其中,  $F'$  为前摇臂质心沿桨叶轮质心的作用力。

对行星摇臂进行受力分析, 可得:

$$2F_{N2} + F' \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha - \beta) = m_2g \quad (11)$$

$$2(F_2 - f_{N2}) - F' \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha - \beta) = 0 \quad (12)$$

联立式(7)~(12)得单侧转矩  $T$  与机器人结构参数之间的关系, 即:

$$2T \left[ (1 + i_{48}) + \frac{l_1 - (L_x - d_2 \tan\alpha) + R \cos\beta - r \sin\alpha}{\frac{l_1 \sin\alpha \sin\beta}{\sin(\pi/2 + \alpha - \beta)} - L_x + d_2 \tan\alpha} \right] - m_2gR \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha - \beta) - \frac{m_1gL_{cl} \cos\alpha}{\frac{l_1 \sin\alpha \sin\beta}{\sin(\pi/2 + \alpha - \beta)} - L_x + d_2 \tan\alpha} \cdot [l_1 - (L_x - d_2 \tan\alpha) + R \cos\beta - r \sin\alpha] - m_1g[(l_1 - L_{cl}) \cos\alpha + R \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha - \beta)] = 0 \quad (13)$$

其中:  $i_{48}$  表示越障轮内中心齿轮与桨叶轮之间的齿轮组传动比。

## 3 机器人越障机构优化设计与分析

对于前述机器人越障过程中的临界位置, 在给定  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $r$ 、 $H$  和  $d_2$  的条件下, 优化设计机器

人的结构与运行参数  $l_1$ 、 $R$ 、 $\alpha$  以及  $\beta$ ,使机器人在越障临界位置所需转矩  $T$  最小,优化问题的目标函数如下:

$$f(\alpha, \beta, R, l_1) = |T| \quad (14)$$

其中  $T$  由式(13)推导求得。

选取  $H$  为 150 mm,优化问题的约束如下:

$$\begin{cases} g_1 = (L_x - L_y \tan \alpha) \sin \alpha + d_2 \cdot (\cos^2 \alpha - 1) / \cos \alpha - 150 = 0 \\ \frac{\pi}{12} \leq \alpha \leq \frac{2\pi}{9}, \frac{4\pi}{45} \leq \beta \leq \frac{5\pi}{36} \\ 100 \text{ mm} \leq R \leq 200 \text{ mm}, 650 \text{ mm} \leq l_1 \leq 850 \text{ mm} \end{cases} \quad (15)$$

摇臂内的齿轮组为加速齿轮传动,选取  $\mu$  为 0.8,  $1/i_{48}$  为 3.8,轮子半径  $r$  为 60 mm。

采用 MATLAB 遗传算法求解上述问题,表 1 为优化前后结果对比。由表可见,优化后机器人所需  $l_1$  相比优化前减少 91.2 mm,所需中心齿轮轴临界越障转矩  $T$  相比优化前下降 718.4 N·mm,机器人车体长度和所需转矩均减少 11% 左右。

表 1 优化前后机器人越障所需转矩与结构参数

Tab. 1 The optimized structure parameters and required torque for obstacle climbing compared with the values before optimization

类别	$\beta/(^\circ)$	$R/\text{mm}$	$l_1/\text{mm}$	$T/(\text{N} \cdot \text{mm})$
优化前	20	105	770	6 871.8
优化后	25	100	678.8	6 153.4

如表 2 所示为本文提出的轮鳍复合式机器人与其他两栖机器人的越障能力对比。表中列举了机器人高度  $h$  与试验越障高度  $H$ ,其比值  $H/h$  代表机器人越障能力,比值越大,机器人攀越障碍的能力越强。可见,相比于文献中两栖蟹、两栖球及六弧形足两栖机器人,轮鳍复合式机器人能够攀越相比其结构尺寸更高的垂直障碍,说明其结构能较好地适应复杂地形,越障能力较好。

表 2 轮鳍复合式两栖机器人越障能力与其他机器人的比较

Tab. 2 Comparison of the obstacle-climbing ability of the amphibious robot compounded with wheel and fin with other robots

机器人类型	$h/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	$H/h$
轮鳍式	100	150	1.5
两栖蟹 <sup>[21]</sup>	52	20	0.38
两栖球 <sup>[22]</sup>	180	50	0.28
弧形足 <sup>[23]</sup>	228	180	0.79

如图 5 所示为不同  $\beta$  角下的机器人临界越障

转矩的优化值  $T_{\min}$ ,由结果可知,随着前摇臂与车体夹角  $\beta$  的增加,机器人临界越障所需转矩的最小值单调降低。当  $\beta$  为  $25^\circ$  时,所需临界转矩最小,对应表 1 中的优化值。

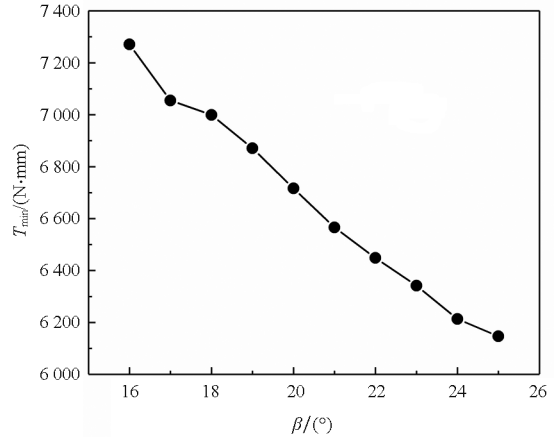


图 5 机器人临界越障转矩随  $\beta$  的变化

Fig. 5 The critical torque of the obstacle climbing versus  $\beta$

如图 6 所示为机器人在越障时前摇臂中心齿轮轴所需转矩  $T$  随俯仰角  $\alpha$  的变化情况。结果表明,当机器人俯仰角  $\alpha$  增加时,其所需越障车体长度增加,机器人越障所需转矩呈先减小后增加的趋势。在不同  $\beta$  角下,机器人越障所需转矩随着  $\beta$  的减小而增大,同时也印证了图 5 中的结果。

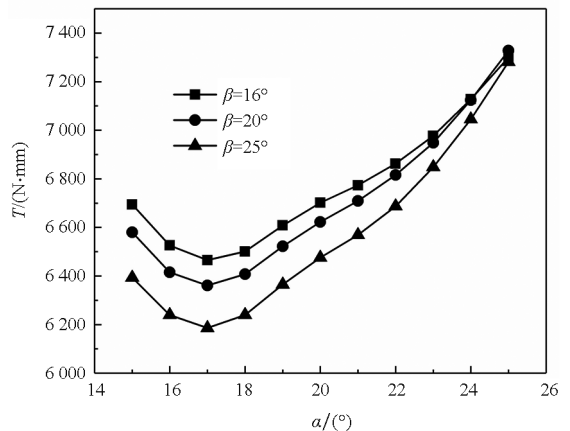


图 6 机器人越障所需转矩随  $\alpha$  的变化情况

Fig. 6 The required torque of the obstacle climbing versus  $\alpha$

如图 7 所示为机器人越障时地面、障碍物边缘对机器人的支撑力  $F_{N1}$  和  $N_2$ ,以及桨叶轮转动时产生的向前推力  $F_2$  随  $\beta$  的变化情况。由结果可知,当  $\beta$  角增大时,障碍物边缘对机器人的支撑力  $N_2$  增加,地面对机器人车体的支撑力  $F_{N1}$  降低,而机器人所受的前向推力  $F_2$  维持在 18 N 左右。

如图 8 所示为  $F_{N1}$ 、 $N_2$  和  $F_2$  随俯仰角  $\alpha$  的变

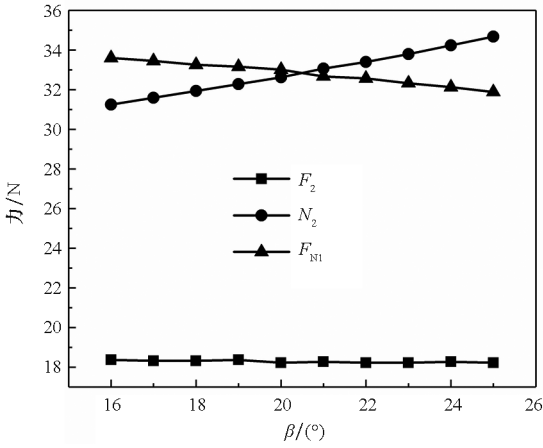


图 7 机器人越障时的  $F_{N1}$ 、 $N_2$  和  $F_2$  随  $\beta$  的变化  
 Fig. 7 The  $F_{N1}$ ,  $N_2$  and  $F_2$  in the obstacle climbing versus  $\beta$

化情况。结果表明,随着俯仰角  $\alpha$  增加,障碍物边缘对机器人的支撑力  $N_2$  由 35 N 减少至 12 N 左右,地面对机器人尾端支撑力  $F_{N1}$  随之增加至 50 N,可知俯仰角  $\alpha$  对机器人越障时受力影响较大。

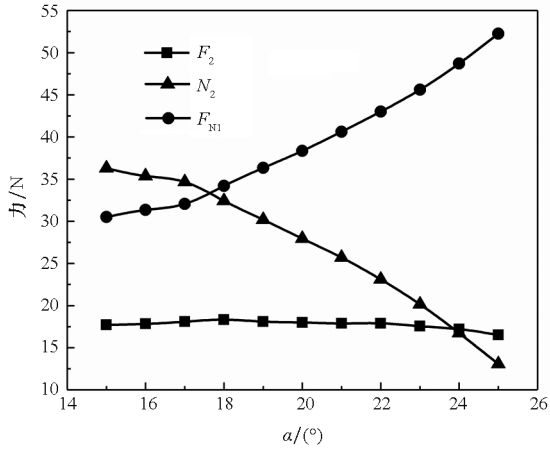


图 8 机器人越障时的  $F_{N1}$ 、 $N_2$  和  $F_2$  随  $\alpha$  的变化  
 Fig. 8 The  $F_{N1}$ ,  $N_2$  and  $F_2$  in the obstacle climbing versus  $\alpha$

## 4 机器人研制与实验验证

### 4.1 机器人地面行进仿真分析

建模并进行 Adams 仿真实验如图 9 所示,障碍高度为 150 mm,斜坡倾角为  $15^\circ$ ,机器人的电机转速  $500 (\text{°})/\text{s}$ 。

图 10 所示为机器人位移和速度变化图,机器人在翻越障碍时,运动速度出现了一定的波动。越障过程存在越障轮翻转和前后轮交替支撑的现象,导致机器人运动速度不稳定,出现打滑。在爬坡过程,机器人克服自身重力,运动速度有所下降,整个过程中没有出现侧翻或者卡顿现象。

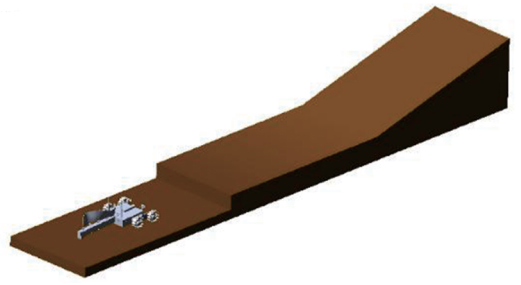


图 9 机器人仿真示意图  
 Fig. 9 Simulation of the amphibious robot

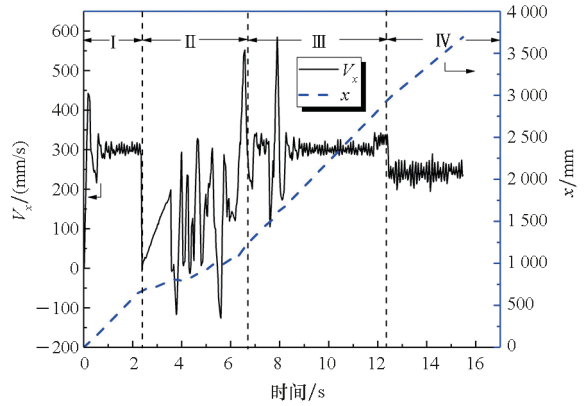


图 10 位移和速度曲线  
 Fig. 10 Velocity and displacement of the robot

如图 11 所示为摇臂中心转矩随摇臂转角  $\theta$  的变化情况,由结果可知,当摇臂转角从  $0^\circ$  增加至  $200^\circ$  的过程中,机器人接触垂直障碍并越过临界位置。在越障初始阶段,左右摇臂中心转矩先迅速增加,然后随着摇臂转角的增大而降低,转角为  $90^\circ$  时转矩最小;当越障轮翻转超过  $90^\circ$  时,后摇臂继续抬升车体,转矩又再次增大。

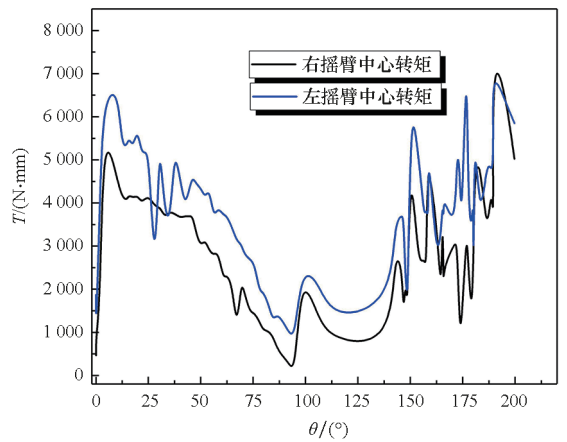


图 11 摇臂中心转矩随运动角度的变化  
 Fig. 11 Torque of the rocker arm versus movement angle

如图 12 所示为越障过程中后轮、尾端万向球受力情况及摇臂中心转角随时间的变化。在 I 阶段,机器人在平地前进加速运动,后轮和万向球的

受力在 10 ~ 20 N 之间。在 II 阶段,后轮被抬起,万向球所受地面支撑力增加,随后摇臂驱动桨叶轮从而带动车体攀越至障碍台阶上,直到尾端万向球与地面脱离接触。在 III 阶段,后轮翻转搭上障碍并抬起尾端万向球,此过程持续 2 s 左右。在 IV 阶段,机器人在障碍台阶上且受力基本稳定。在 V 阶段,机器人爬坡,后轮和万向球受力增加。摇臂转角从 0 增加至 190°,上坡过程维持在 165°。

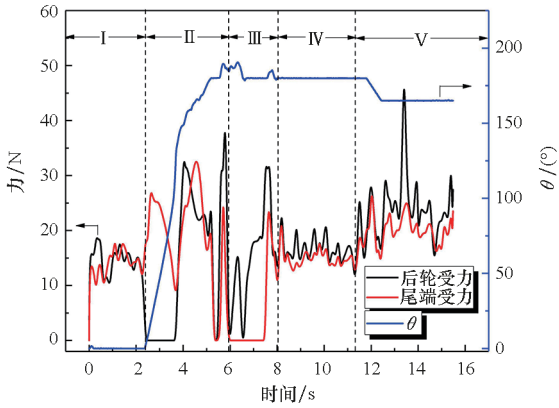


图 12 机器人与地面接触压力曲线

Fig. 12 Contact force between the robot and land

### 4.2 样机试验

根据前文设计分析,选取最大扭矩为 5 N · m、持续扭矩为 2.8 N · m (500 r/min) 的减速电机为动力源,研制了原理样机并开展越障试验,试验结果如图 13 和图 14 所示。由图可见,机器人行进过程中遇到垂直障碍或楼梯时,越障机构后轮翻转搭上障碍边缘,驱动机器人质心通过攀越,从而使整体攀越垂直障碍和楼梯,验证了前述设计。

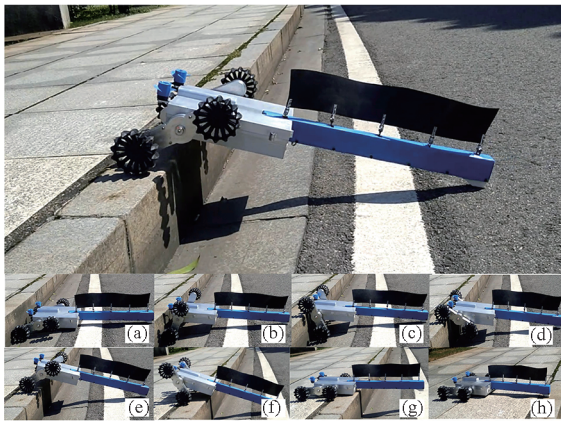


图 13 越障试验

Fig. 13 Obstacle climbing experiment

为验证两栖机器人水下运动性能,根据波动鳍的结构尺寸研制了波动鳍实验平台,其水下运动平台的试验结果如图 15 所示,可见,机器人水

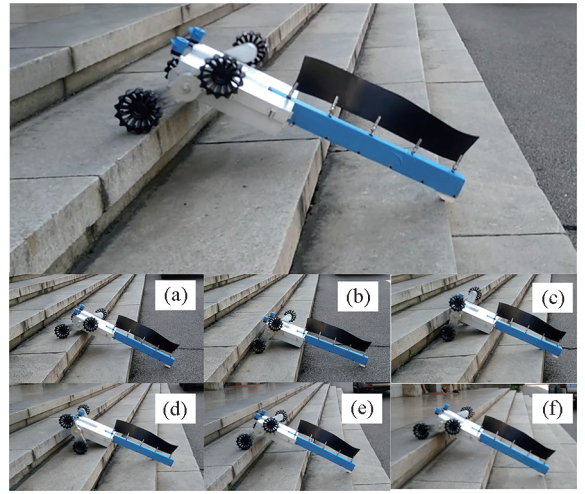


图 14 爬越楼梯试验

Fig. 14 Experiment of climbing stairs for the robot

下运动速度随波动鳍频率呈线性增加的关系,当波动频率达到 2 Hz 时,水下推进速度达到 300 mm/s。

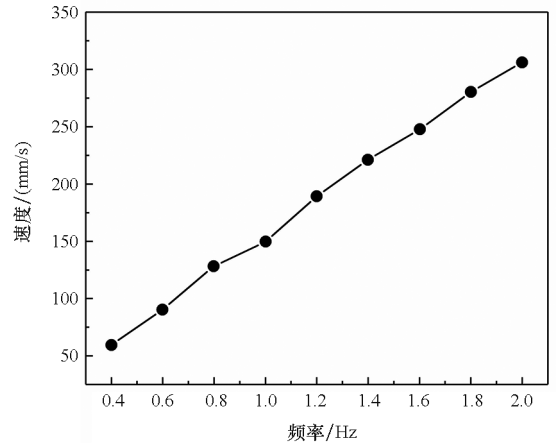


图 15 水下运动试验结果

Fig. 15 Experimental measurements of the underwater propulsion

### 5 结论

1) 通过将轮式运动和波动鳍波动两种运动型式进行组合,设计了轮鳍复合式两栖机器人的结构,并重点对越障机构的运动机理进行了分析,为机器人的设计提供了理论支撑。

2) 基于质心运动学与机构力学分析,给出了机器人越障性能的优化设计方法,以机器人临界越障时所需转矩为优化目标,优化设计了机器人的结构与运行参数,结果表明,优化后机器人越障所需临界转矩相比优化前减少了 11% 左右。

3) 针对机器人的行走与越障性能,通过 Adams 进行了仿真计算,获得了越障过程中运动速度与受力情况随时间变化的趋势,指导了越障

机构的设计。

4) 基于前述优化结构研制了实验样机, 通过地面与水下试验验证了设计思路和方法。

## 参考文献 (References)

- [1] GUO Z Y, LI T, WANG M L. A survey on amphibious robots[C]//Proceedings of 37th Chinese Control Conference, 2018: 5299 - 5304.
- [2] 宋红生, 王东署. 仿生机器人研究进展综述[J]. 机床与液压, 2012, 40(13): 179 - 183, 139.  
SONG H S, WANG D S. Research development of bio-robots: a review[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(13): 179 - 183, 139. (in Chinese)
- [3] ZHANG S W, LIANG X, XU L C, et al. Initial development of a novel amphibious robot with transformable fin-leg composite propulsion mechanisms[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(4): 434 - 445.
- [4] CHO Y, MANZOOR S, CHOI Y. Adaptation to environmental change using reinforcement learning for robotic salamander[J]. Intelligent Service Robotics, 2019, 12(3): 209 - 218.
- [5] FAN J Z, DU Q L, YU Q G, et al. Biologically inspired swimming robotic frog based on pneumatic soft actuators[J]. Bioinspire and Biomimetics, 2020, 15(4): 046006.
- [6] FAN J Z, ZHANG W, KONG P C, et al. Design and dynamic model of a frog-inspired swimming robot powered by pneumatic muscles[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(5): 1123 - 1132.
- [7] XING H M, SHI L W, TANG K, et al. Robust RGB-D camera and IMU fusion-based cooperative and relative close-range localization for multiple turtle-inspired amphibious spherical robots[J]. Journal of Bionic Engineering, 2019, 16(3): 442 - 454.
- [8] SUN Q M, HAN J Z, LI H, et al. A miniature robotic turtle with target tracking and wireless charging systems based on IPMCs[J]. IEEE Access, 2020, 8: 187156 - 187164.
- [9] ZHANG D, YUAN H, CAO Z C. Environmental adaptive control of a snake-like robot with variable stiffness actuators[J]. CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(3): 745 - 751.
- [10] WANG T Y, LIN B, CHONG B X, et al. Reconstruction of backbone curves for snake robots[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 3264 - 3270.
- [11] SPEERS A, TOPOL A, ZACHER J, et al. Monitoring underwater sensors with an amphibious robot[C]//Proceedings of 2011 Canadian Conference on Computer and Robot Vision, 2011: 153 - 159.
- [12] XUAN Q H, LI C. Coordinated appendages accumulate more energy to self-right on the ground[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 6137 - 6144.
- [13] YUN D, FEARING R S. Cockroach milli-robot with improved load capacity[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(3): 035001.
- [14] KARAKASILIOTIS K, THANDIACKAL R, MELO K, et al. From cineradiography to biorobots: an approach for designing robots to emulate and study animal locomotion[J]. Journal of the Royal Society, Interface, 2016, 13(119): 20151089.
- [15] PFOTZER L, KLEMM S, ROENNAU A, et al. Autonomous navigation for reconfigurable snake-like robots in challenging, unknown environments[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 89: 123 - 135.
- [16] 饶伟, 施家栋, 王建中. 关节式履带机器人爬楼梯动态稳定性分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(15): 60 - 67.  
RAO W, SHI J D, WANG J Z. Analysis of dynamic stability for articulated-tracked robot climbing stairs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15): 60 - 67. (in Chinese)
- [17] GONG Z, XIE F G, LIU X J, et al. Obstacle-crossing strategy and formation parameters optimization of a multi-tracked-mobile-robot system with a parallel manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 152: 103919.
- [18] LIU H L, CURET O. Swimming performance of a bio-inspired robotic vessel with undulating fin propulsion[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2018, 13(5): 056006.
- [19] HU T J, SHEN L C, LIN L X, et al. Biological inspirations, kinematics modeling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus*[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(3): 633 - 645.
- [20] ZHOU H, HU T J, XIE H B, et al. Computational and experimental study on dynamic behavior of underwater robots propelled by bionic undulating fins[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(11): 2966 - 2971.
- [21] 邹斯雨. 仿生两栖机械蟹运动学和动力学分析、仿真及实验研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2019.  
ZOU S Y. Kinematics and dynamics analysis, simulation and experiment of bionic amphibious mechanical crab[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019. (in Chinese)
- [22] 梁海超. 可变形两栖球形机器人研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.  
LIANG H C. Research of the deformable amphibious spherical robot[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016. (in Chinese)
- [23] 梁旭. 松软介质中弧形足运动特性分析及足-蹼复合推进两栖机器人研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.  
LIANG X. Research on motion characteristics of arched foot in soft substrates and amphibious robot with foot-flipper composite propulsion mechanism[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)