DOI: 10.3901/JME.2014.15.012

仿生双足水上行走机器人优化设计及控制方法^{*}

徐林森^{1,2} 魏鲜明³ 曹凯² 梅涛¹ 骆敏舟¹

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院 合肥 230031;

2. 常州先进制造技术研究所 常州 213164;

3. 中国科学技术大学信息科学技术学院 合肥 230026)

摘要: 研究一种新型双足水上行走机器人推进机构及控制方法。借鉴蛇怪蜥蜴双足水上行走功能,分析双足机器人水上行走动力学机理;结合平面四杆机构运动和坐标转换公式,分析 Watt-I 型机构运动方程,用以模拟蛇怪蜥蜴的脚掌轨迹,设计双足水上行走机器人推进机构,建立机器人的虚拟样机模型并进行机构优化设计;设计机器人的中枢模式发生器(Central pattern generator, CPG)控制器和模糊控制器并进行参数分析,提出双足水上行走机器人的 CPG-模糊控制方法,完成机器人控制系统的搭建,进行仿真验证;制作出双足水上行走样机,进行双足机器人水上行走试验,测得推进机构的作用力曲线;在平衡装置不工作和工作情况下分别测量机器人水上行走过程中的实时偏角,并进行比较。试验结果表明推进机构及控制方法满足双足机器人水上行走要求。

关键词: 双足机器人; 水上行走; 优化设计; 控制方法

中图分类号: TP24

Optimization Design and Control Method of Biped Robot Running on Water

XU Linsen^{1,2} WEI Xianming³ CAO Kai² MEI Tao¹ LUO Minzhou¹

(1. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031;

2. Changzhou Institute of Advanced Manufacturing Technology, Changzhou 213164;

3. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract: The propulsion mechanism and the control method of a novel biped running on water are studied. The dynamics mechanism of the biped robot is studied according to the basilisk lizard's function of running on water. The movement trajectories of the Watt-I planar linkages are brought out by combining the movement equations of the four bar mechanism and the coordinate transformation equations, which are used to simulate the foot trajectories of the basilisk lizard, and the propulsion mechanism of the biped robot is carried out. Then the virtual prototype of the biped robot is built, and the mechanism is optimized. A CPG-fuzzy control method is proposed, and the control system of the biped robot is designed with the CPG controller and the fuzzy controller. The simulation of the control system is implemented to test its effect preliminary. The real prototype of the biped robot walking on water is carried out to test the robot's function of walking on water. The force of the propulsion mechanism is measured by a strain gauge mounted on the robot's foot. The real-time body tilting angles of the robot in the case of the balance equipment running or not are measured respectively. The experiment results show that the propulsion system can satisfy the function requirement of biped robot walking on water, and the control method is effective to keep its balance.

Key words: biped robot; running on water; optimization design; control method

0 前言

机器人已经广泛应用于农业、救灾、军事、工

业等领域。农业资源考察与探测(湿地探测、水质检测等)、军事侦察、抗洪救灾等工作都面临着复杂水陆环境下作业的问题,对机器人提出了陆地和水面行走的功能需求。由于足式机器人在陆地行走技术的成熟性和节能性^[1-2],所以研究足式机器人在水、沙等物质表面的实现方法,成为目前的研究热点。

^{*} 国家自然科学基金(50905175)和国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2011CB302106)资助项目。20130809 收到初稿, 20140519 收到修改稿

SONG 等^[3]模拟水鼉制造出了一种能够在水上行走的足式机器人,利用水的表面张力浮于水面上,有效荷为 0.093 N、速度为 3 cm/s。FLOYD 等^[4]研制了一款四足水上行走机器人,通过四个圆盘脚掌拍击水面实现水面行走,有效载荷为 0.5 N。

蛇怪蜥蜴遇到紧急情况时,会跃上水面利用后肢在水上奔跑,速度达到 1.5 m/s。相比轮船而言,该方式减小了设备浸没在水中的体积,降低了水的阻力;相比四足水上行走,双足水上行走有利于节省能量和保持身体的平衡,步态简单,易于控制。

本文利用 Watt-I 型六杆机构模拟蛇怪蜥蜴的双足水上行走功能,设计双足水上行走机器人推进机构;基于中枢模式发生器(Central pattern generator, CPG)提出 CPG-模糊控制方法,完成机器人的控制系统设计,开发出具备水上行走功能的双足机器人,并进行试验,为双足机器人在不同物质的表面行走提供理论依据,拓展双机器人的行动范围。

1 双足机器人水上行走机理

蛇怪蜥蜴在水上行走时,其膝盖、脚踝及脚掌心的轨迹可近似认为在一个平面内(图 1)。

图 1 蛇怪蜥蜴水上行走运动轨迹

根据蜥蜴水上行走过程,将双足机器人水上行走过程分为三个阶段:拍打、冲击和恢复。机器人拍打阶段与恢复阶段所产生的作用力较小,相比较冲击阶段的力可以忽略不计^[5],因此主要考虑冲击阶段所产生的力。

冲击阶段,脚掌向后下方击打水柱,产生向前的驱动力和向上的支撑力,该阶段产生的驱动力为

$$F_{str} = C_D^* [0.5S\rho v^2 + S\rho gh(t)] \quad (1)$$

式中 C_D^* ——阻力系数;

$$C_D^* \approx 0.703;$$

v ——脚掌运动速度;

ρ ——水的密度;

$h(t)$ ——脚掌在水中的深度;

g ——重力加速度;

S ——脚掌与水接触的有效面积。

根据式(1),可得机器人脚掌拍击水面时产生力的曲线(图 2)。

图 2 仿真环境下机器人拍击水面产生的力

2 机器人推进机构设计

2.1 Watt-I 型机构二杆组连杆的运动分析

图 3 所示为 Watt-I 型机构,二杆组 EGF 连接在基础机构即四杆机构 ABCD 的连杆和输出杆上,只需要满足

$$\begin{cases} \max |EF| \leq |EG| + |FG| \\ ||EG| - |FG|| \leq \min |EF| \end{cases} \quad (2)$$

二杆组就不会对四杆机构产生约束作用。

图 3 Watt-I 型机构

四杆机构 ABCD 杆长分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 , 杆 AB、BC、CD 与 x 轴的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 , 杆 AB 是以等角速度 ω 旋转的原动件, $\triangle BCE$ 、 $\triangle DCF$ 的内角分别为 θ_i 和 η_i ($i=1, 2, 3$), 可求得 CD、BC 的角位移分别为^[6]

$$\begin{cases} \varphi_3 = 2 \arctan \frac{N + \sqrt{M^2 + N^2 - Q^2}}{M - Q} \\ \varphi_2 = \arctan \frac{N + l_3 \sin \varphi_3}{M + l_3 \cos \varphi_3} \end{cases} \quad (3)$$

$$M = l_4 - l_1 \cos \varphi_1$$

$$N = -l_1 \sin \varphi_1$$

$$Q = \frac{M^2 + N^2 + l_3^2 - l_2^2}{2l_3}$$

$$\varphi_1 = \omega t$$

则可得点 C 的运动轨迹

$$\begin{pmatrix} x_C \\ y_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 \\ l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

由于 $ABCD$ 为四边形, 所以

$$\angle BCD = \varphi_3 - \varphi_2 \quad (5)$$

令 $\angle ECF = \varphi_5$, 则由式(5)可得

$$\varphi_5 = 2\pi - \theta_2 - \eta_2 - (\varphi_3 - \varphi_2) \quad (6)$$

以 C 点为原点, CF 为 x' 轴建立如图 3 所示的坐标系 $x'Cy'$, x' 轴与 x 轴间的夹角为

$$\delta = \varphi_3 - \eta_3 - \eta_1 \quad (7)$$

$CEGF$ 也是平面四杆机构, 杆长分别为 s_2 、 l_5 、 l_6 和 k_3 , 杆 CE 、 EG 、 FG 与 x' 轴形成的夹角分别为 φ_5 、 φ_7 和 φ_6 , 将 CE 视为原动杆, 则

$$\begin{cases} \varphi_6 = 2 \arctan \frac{J + \sqrt{H^2 + J^2 - K^2}}{H - K} \\ \varphi_7 = \arctan \frac{J + l_6 \sin \varphi_6}{H + l_6 \cos \varphi_6} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $H = k_3 - s_2 \cos \varphi_5$;

$$J = -s_2 \sin \varphi_5;$$

$$K = \frac{H^2 + J^2 + l_6^2 - l_5^2}{2l_6}。$$

由此可得到点 G 在坐标系 $x'Cy'$ 中的轨迹

$$\begin{pmatrix} x'_G \\ y'_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_2 \cos \varphi_5 + l_5 \cos \varphi_7 \\ s_2 \sin \varphi_5 + l_5 \sin \varphi_7 \end{pmatrix} \quad (9)$$

由坐标变换公式得点 G 在坐标 xAy 中轨迹

$$\begin{pmatrix} x_G \\ y_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_G \cos \delta - y'_G \sin \delta + x_C \\ y'_G \sin \delta + x'_G \cos \delta + y_C \end{pmatrix} \quad (10)$$

点 G 轨迹如图 3 所示。

2.2 机器人虚拟样机模型建立

图 3 中 G 点的轨迹与图 1 中蜥蜴脚掌的轨迹类似, 所以采用改进后的 Watt-I 型机构作为双足水上行走机器人的推进机构。

为了实现推进机构向下扑打水面的功能, G 点作为设定的脚掌中心点, 该处于 x 轴下方; 为减轻机器人本体重量, 用细长杆取代三角形板, 故

$\theta_1 = \pi$, $\eta_1 = 0$, $\theta_2 = \theta_3 = \eta_2 = 0$, $\eta_3 = \pi$, 则

$$\begin{cases} \varphi_5 = 2\pi - \varphi_3 + \varphi_2 \\ \delta = \varphi_3 - \pi \end{cases} \quad (11)$$

另外, 为使机器人脚掌平行水面入水以产生更大的上升力, 将 AD 杆绕 A 点旋转一角度, 形成的推进机构如图 4 所示。

图 4 机器人推进机构简图

根据图 4 所示机构简图, 设计了形状相同的左右推进机构, 由同一电动机驱动, 相位差 π , 主体结构如图 5 所示。机器人驱动系统由电动机和减速器构成, 固定在机器人主体框架上; 传动系统由一对锥齿轮副和一根传动轴组成, 锥齿轮副将垂直于传动轴的驱动运动转化为绕传动轴轴心的转动运动, 并通过该轴传递给推进机构, 这两个推进机构的初始相位差为 π ; 机器人框架尾部安装平衡装置, 由舵机连接尾翼构成, 在机器人水上行走时保持平衡。

图 5 双足水上行走机器人虚拟样机模型

2.3 机器人机构优化设计

为了更好地模仿蛇怪蜥蜴水上行走的功能, G 点的轨迹必须尽可能地贴合蛇怪蜥蜴的脚踝运动轨迹。蛇怪蜥蜴水上行走时脚掌中心的给定轨迹 (x_i, y_i) ($i=1, 2, \dots$) 参数见表 1。

表 1 给定轨迹参数

序号	1	2	3	4	5	6	7
x_i	-66.5	-65.6	-64.1	-61.6	-59.2	-56.0	-52.7
y_i	-34.9	-37.9	-41.1	-44.5	-48.1	-51.9	-55.6
序号	8	9	10	11	12	13	14
x_i	-49.4	-45.2	-40.4	-35.3	-30.4	-26.0	-21.0
y_i	-59.4	-63.0	-66.5	-69.7	-72.5	-74.9	-76.7

按机构所实现的轨迹与预定轨迹的偏差最小值, 建立再现轨迹问题最优化设计的目标函数形式为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_i \left[\left(O_{xi} - \dot{O}_{xi} \right)^2 + \left(O_{yi} - \dot{O}_{yi} \right)^2 \right] \rightarrow \min \quad (12)$$

式中: $\dot{O}_{xi}$ 、 $\dot{O}_{yi}$ ($i=1, 2, \dots, n$) 为理想轨迹上点的坐标; O_{xi} 、 O_{yi} ($i=1, 2, \dots, n$) 为实际轨迹上点的坐标; w_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为预先选定的权因子, 表示该点轨迹偏差的重要程度。

图 4 所示的 $ABCD$ 平面曲柄四杆机构受两方面的约束: ① 四杆机构中存在曲柄的约束条件; ② 传动角 $[\zeta]$ 的约束条件, 设定 $[\zeta_{\min}] \geq 25^\circ$, $[\zeta_{\max}] = 180^\circ - [\zeta_{\min}]$ 。

由此可得约束条件为

$$\begin{cases} g_1(x) = |AB| > 0 \\ g_2(x) = |AD| + |CD| - |BC| - |AB| \geq 0 \\ g_3(x) = |AD| + |BC| - |CD| - |AB| \geq 0 \\ g_4(x) = |BC| + |CD| - |AD| - |AB| \geq 0 \\ g_5(x) = \cos \zeta_{\max} - \cos |\zeta_{\max}| \geq 0 \\ g_6(x) = \cos \zeta_{\min} - \cos |\zeta_{\min}| \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \cos \zeta_{\max} = \frac{|BC|^2 + |CD|^2 - (|AB| + |AD|)^2}{2|BC| \cdot |CD|} \\ \cos \zeta_{\min} = \frac{|BC|^2 + |CD|^2 - (|AB| - |AD|)^2}{2|BC| \cdot |CD|} \end{cases}$$

另外, 要使机构能够稳定运行, 二杆组 EGF 必须满足以下约束条件。

(1) 根据工程上的要求, 需离奇异位置有一定的稳定裕度, 稳定裕度越大, 稳定性越好。因此, 可设定稳定裕度为 20° , 则可得

$$\max(\varphi_7 + \delta - \varphi_2) \leq 160^\circ \quad (14)$$

为了保证在拍击、扑打阶段脚掌 GE 能够有效地拍击水面, 形成上浮和前进驱动力, 要求

$$\varphi_7 + \delta > 90^\circ \quad (15)$$

以式(12)为目标函数, 式(3)、(8)、(10)为变量函数, 式(13)~(15)为约束条件, 通过惩罚函数法可得设计变量最优值: $|AB|=24.53$ mm, $|CF|=12.69$ mm, $|DF|=35.58$ mm, $|BC|=38.64$ mm, $|BE|=39.31$ mm, $|FG|=114.64$ mm, $|EG|=54.06$ mm, $|AD|=49.76$ mm, $\delta=42.83^\circ$ 。根据所得到的优化结果与给定理想轨迹相对比如图 6 所示。

图 6 优化后的轨迹与给定轨迹的对比

3 双足水上行走机器人控制方法

双足机器人地面行走平衡控制多采用 ZMP 判断^[7-8], 但水面行走时, 会产生气穴, 同时水流冲击、溅起水花等扰动远超地面, ZMP 及其鲁棒性难适用。

受倒立摆等平衡系统的启发, 在机器人结构中加入图 5 所示的平衡装置, 把平衡问题转化成了力矩补偿问题。

3.1 双足水上行走机器人 CPG 控制器模型

基于 CPG 的控制是一种模拟生物低级神经中枢的控制方法^[9], 本文利用改进的 Hopf 模型构建双足水上行走机器人的 CPG 控制器, 选用两个 Hopf 振荡器连接成机器人 CPG 控制器

$$\begin{cases} x'_i = (\mu_i - \gamma_i^2)x_i + \omega y_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n a_j x_j \\ y'_i = (\mu_i - \gamma_i^2)y_i - \omega x_i \end{cases} \quad (16)$$

式中 $\gamma_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$, $i=1, 2$;

x_i ——CPG 控制器的输出信号;

y_i ——CPG 控制器的中间变量;

$\sum_{j=1, j \neq i}^n a_j x_j$ ——其余振荡器的连接信号;

μ_i , ω ——CPG 控制器的状态变量。

根据式(16), 输入不同的参数(表 2), 获取 CPG 控制器的输出波形图。

表 2 不同变量与对应的输出波形图

状态变量					波形图
μ_1	μ_2	ω	a_1	a_2	
1	5	1.0	0.1	-0.1	图 7a
1	1	0.2	0.1	-0.1	图 7b
1	1	0.4	0.3	-0.3	图 7c
1	1	0.4	-0.3	0.3	图 7d

图 7 Hopf 控制器输出波形

由图 7 可以看出,通过调整 Hopf 模型中的参数,可以获得具有 0 、 π 、 $\pi/2$ 以及多种其他相位关系的输出信号。图 8 为双足水上行走机器人 CPG 控制器控制步态示意图,图中阈值为控制 CPG 控制器的占空比的变量

图 8 CPG 控制器的机器人步态

图 8 中,通过调节阈值,可调节机器人脚掌向

下运动和向上运动的时间比例。当输出波形大于阈值时,机器人脚掌处于水面以下,当输出波形小于阈值时,机器人的脚掌处于水面以上。当水面环境较为复杂、机器人水上行走稳定性降低时,可调节阈值,适当减小机器人脚掌拍击水面的频率,增加水上行走的稳定性。该 CPG 控制器有效控制机器人的步态。

3.2 水上行走机器人的模糊控制规则

由于无须知道被控对象的精确数学模型,具有很强的鲁棒性^[9-11],因此,用模糊控制器对双足水上行走机器人进行控制。

选取机器人身体对称平面与竖直平面的夹角 δ (图 9)及其绝对值随时间的变化率 $d|\delta|/dt$ 为输入语言变量,平衡装置产生的力矩 τ 为输出语言变量,采用并行模糊推理方法中的 Mamdani 推理算法和去模糊化中的重心法构建机器人模糊控制系统。模糊控制器中输入语言变量与基本论域至离散模糊集论域的量化关系如表 3 所示。

图 9 机器人水上行走的身体倾角

表 3 输入语言变量基本论域至离散论域的转换

δ 取值/(°)	量化	$d \delta /dt$ 取值/[(°)/s]	量化
≥ 30	-6	≤ -60	-6
25	-5	-50	-5
20	-4	-40	-4
15	-3	-30	-3
10	-2	-20	-2
5	-1	-10	-1
0	0	0	0
-5	1	10	1
-10	2	20	2
-15	3	30	3
-20	4	40	4
-25	5	50	5
≤ 30	6	≥ 60	6

输入语言变量 δ 和 $d|\delta|/dt$ 均有 NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB 七个语言值,因此机器人模糊控制器共有 49 条控制规则,如表 4 所示。

表 4 双足水上行走机器人模糊控制规则

$d \delta /dt$	夹角 δ						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
力矩 τ							
NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z
NM	NB	NB	NM	NM	NS	Z	PS
NS	NB	NM	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PM	PB
PM	NS	Z	PS	PM	PM	PB	PB
PB	Z	PS	PM	PM	PB	PB	PB

表 4 中，若 δ 取 NB 且 $d|\delta|/dt$ 取 NB，则输出语言变量 τ 取 NB，其余模糊推理规则类推。

3.3 双足水上行走机器人 CPG-模糊控制系统

利用 CPG 控制器和模糊控制规则，设计机器人的 CPG-模糊控制系统(图 10)。

图 10 双足机器人 CPG-模糊控制系统

由此可得水上行走机器人 CPG-模糊控制系统的仿真结果(图 11)。

图 11 CPG-模糊控制仿真结果

图 11 中， δ 最大为 22° 。0~0.75 s，倾斜角不断加大，系统振荡加剧；0.75~1.25 s，倾斜角开始收敛；1.25 s 之后，系统在 0 附近振荡。仿真结果表明机器人能在 0 附近保持平衡。

4 试验

图 12 所示为双足水上行走机器人样机。

图 12 双足水上行走机器人样机

机器人总重量 3.2 N，左轻质泡沫 91.6 cm^3 ，右轻质泡沫 97.7 cm^3 ，当泡沫完全入水时产生的浮力为 1.8 N，故推进机构不工作时机器人会下沉。在推进机构产生的驱动力和支撑力的作用下，机器人能够保持在水面上(图 13)， t 在 0~4 s 内，推进机构动作形成支撑力和前进力，机器人能在水面行走； $t=4$ s 时，停止供电， $t=5$ s 时机器人开始沉入水底。

图 13 仿生双足水上行走机器人运动序列图

为了获得机器人拍击水面产生的力，将应变片安装在脚掌上，测得驱动机构产生的作用力(图 14)。

图 14 应变片测得的力的曲线

图 14 中所示实际情况下脚掌受力曲线与图 2 中仿真环境下脚掌受力曲线类似。但其正向受力峰值约为 2.6 N，小于仿真环境下的峰值 4 N；反向受力最大值为 0.8 N，也小于仿真环境下的 1.3 N。这是由于在仿真环境忽略了传动效率、大气压、脚掌变形等因素，故仿真所得值比实际值要高。

当机器人舵机不工作时，可测得机器人水上行走的实时偏角曲线(图 15)，可以看出，机器人身体倾斜角较大，最大偏角为 13° 左右。

图 15 平衡舵机不工作时实时偏角曲线

当机器人舵机在 CPG-模糊方法的作用下工作时, 水上行走的实时偏角如图 16 所示, 可以看出, 倾斜角较小, 最大值为 5° 左右。

图 16 平衡舵机工作时实时偏角曲线

5 结论

(1) 机器人水上行走时, 驱动机构产生的平均作用力大约为 1.4 N, 是机器人能够维持在水面上的重要原因。

(2) 驱动机构实际作用力曲线与仿真环境下机器人拍击水面产生力的曲线形状类似, 表明机器人能够满足双足水上行走的要求。

(3) 用 CPG-模糊控制方法控制平衡舵机, 机器人水上行走过程稳定性明显加强, 验证了该控制算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] 高峰. 机构学研究现状与发展趋势的思考[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 3-17.
GAO Feng. Reflection on the current status and development strategy of mechanism research[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 3-17.
- [2] 董晓坡, 王绪本. 救援机器人的发展及其在灾害救援中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(1): 112-117.
DONG Xiaopo, WANG Xuben. Development of rescue robot technology and its application in disaster[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(1): 112-117.
- [3] SEONG S Y, METIN S. Surface-tension-driven biologically inspired water strider robots: Theory and experiments [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(3): 578-589.
- [4] STEVEN F., METIN S. Design and development of the lifting and propulsion mechanism for a biologically inspired water runner robot[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(3): 698-709.
- [5] HSIEH T, LAUDER G. Running on water: Three-dimensional force generation by basilisk lizards [J]. PNAS, 2004, 101: 16784-16788.
- [6] 郑文伟, 吴克坚. 机械原理[M]. 7 版. 北京: 高等教育出版社, 1997.
ZHENG Wenwei, WU Kejian. Mechanisms and machine theory[M]. 7th ed. Beijing: Higher Education Press, 1997.
- [7] SUGIHARA T, NAKAMURA Y, INOUE H. Realtime humanoid motion generation through ZMP manipulation based on inverted pendulum control[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 11-15, 2002: 1404-1409.
- [8] OR J. A hybrid CPG-ZMP control system for stable walking of a simulated flexible spine humanoid robot[J]. Neural Networks, 2010, 23: 452-460.
- [9] 黄博. 四足机器人行走步态及 CPG 控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
UANG Bo. Study on walking gait and CPG control of a quadruped robot[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2007.
- [10] XU Linsen, LI Bing, XU Feng, et al. Optimization synthesis on water running mechanism of biped robot [J]. Advanced Materials Research, 2011, 211-212: 454-459.
- [11] MIRTH J A, CHASE T R. Circuits and branches of single-degree-of freedom planar linkages[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1993, 115: 223-230.
- [12] XU Linsen, CAO Kai, WEI Xianming, et al. Dynamic analysis of fluid-structure interaction for the biped robot running on water[C]// The 12th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV, December 5-7, 2012, Guangzhou, 2012: 1546-1550.

作者简介: 徐林森(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为机构学、机器人技术。

E-mail: lsxu@iamt.ac.cn