

DOI: 10.3901/JME.2010.13.076

仿鳄鱼水陆两栖机器人机构优化设计与试验验证*

王田苗¹ 仲启亮¹ 孟 刚¹ 梁建宏¹ 刘永军²

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191;

2. 南京国际关系学院 南京 210039)

摘要: 在分析国内外两栖仿生机器人研究最新进展的基础上,以鳄鱼为生物原型,设计一套两栖机器人爬行与游动复合机构。在对复合仿鳄鱼机构进行的仿真优化过程中,得出使得机器人运动效果最优的一组身长与腿长的比例为 17:13。认为在腰部扭转的角度一定时,机器人的运动性能随着腿长与身长比例的增加而渐优;而在腰部转到极限扭转角的情况下,机器人运动性能随着腿长与身长的比例增加呈现近似抛物线规律。设计制作仿鳄鱼两栖机器人的原理样机,并进行爬行与游动试验。试验结果表明,使得机器人运动效果最佳的运动频率是 2 Hz。

关键词: 两栖仿生机器人 复合机构 仿真 原理样机

中图分类号: TP24

Optimization Design and Experimental Verification of an Amphibious Robotic Mechanism Based on the Alligator

WANG Tianmiao¹ ZHONG Qiliang¹ MENG Gang¹ LIANG Jianhong¹ LIU Yongjun²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191;

2. Nanjing University of International Relations, Nanjing 210039)

Abstract: A complex amphibious robotic mechanism is designed on the basis of analysis of recent advances at home and abroad. The robot is based on the alligator and can both crawl and swim. After simulation and optimization on the complex alligator imitation mechanism, the ratio between body length and leg length for the robot to get optimum movement effect is obtained, i.e. 17:13. It is believed that when the waist turns to a certain angle, the movement performance becomes better and better with the increase of the ratio between leg length and body length, and when the waist turns to the limit torsion angle, it obeys the approximate parabola law. At last, a principle prototype is made. The results of creeping and swimming experiments show that the best frequency for the robot to get optimum movement effect is 2 Hz.

Key words: Amphibious biorobot Complex mechanism Simulation Principle prototype

0 前言

鳄鱼是迄今发现活着的最早和最原始的两栖类爬行动物,经过漫长的进化与发展,它不仅能适应陆地和近海滩涂的多变地形,又能适应比较复杂的水环境,具有很强的环境适应能力,从而为两栖机器人设计提供了很好的生物原型。

近年来对两栖机器人的研究,各国投入了一定的人力和物力,也成功地研制了一些两栖仿生机器人平台。早在 1998 年,美国东北大学海洋科学中心

的 AYERS^[1-2]基于龙虾和小龙虾的神经控制研究成果开发出了机器龙虾,其潜在的应用是,在有海浪和海流的浅水区域进行自主排雷作业和侦查任务,其本体采用 8 条 3 自由度的腿推进,但是它没有水中推进机构,只能在地面和水底运动,不能称为真正意义上的两栖机器人。日本东京工业大学机器人实验室曾研制出机器蛇两栖机器人 HELIX^[3],既可以在陆地上运动,又能在水中游动,但其陆地的运动能力非常有限。2007 年瑞士联邦技术学院物理学家奥克—伊加斯佩特等^[4]以火蜥蜴为原型设计了一款水陆两栖机器人。机器人长约 0.84 m,他们仿制了一根由 9 节黄色的塑料管串成的长长的脊柱,并模仿其脊髓神经元,给每一节脊柱安装电池和微型

* 国家杰出青年科学基金资助项目(60525314)。20100324 收到初稿,20100504 收到修改稿

控制器, 控制它的运动方向和方式。当它在陆地上行走时, 主要依靠下面 4 条可以转动的“腿”和可弯曲成“S”形的脊柱。当它下水后, 脊柱扭动的频率会加快, 尾部提供前进的推动力, 使其像原始的鱼一样自由游动。整体上看其爬行和游动性能比较好。

本文联系最新的两栖机器人研究成果, 结合仿多足爬行机器人和仿鱼游动的研究, 以鳄鱼为生物原型, 设计了一套两栖机器人爬行与游动复合推进机构模型。建立仿鳄鱼的虚拟样机模型, 对其进行仿真优化, 并通过原理样机实体试验验证了该模型的合理性。

1 鳄鱼的运动机构分析与设计

1.1 爬行机构分析与设计

鳄鱼属于爬行动物, 长有粗壮有力的四肢。而近年来对仿生运动学和动力学研究大都集中于腿的功能研究, 而对动物的脊骨或身体对运动的影响没有更多的关注。鳄鱼脊背上任意点都在作复合运动, 即由平行于鳄鱼整体运动方向与垂直于此方向的两个运动的合成, 通过对鳄鱼脊背各点的运动轨迹的分析, 得出其脊背任意部位的横向位移都是周期性的, 与步态的周期相同。

对于鳄鱼脊背横向运动与爬行运动的关系, 将其机构模型进行表述如图 1 所示。以左上脚为例, 图 1 中各关节都为转动副。腿部与身体链接部分有抬腿和收腿的转动关节 B , 实现垂直纸面运动, 而腿部本身有两个转动关节 C 和 D , 实现平面内伸腿运动。其他 3 只脚采用同样的设计。转动副 A 为腰部扭转关节, 爬行过程中只有对角的左脚着地, 而另对角两脚处于悬空前伸状态。

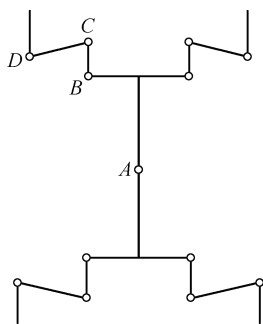


图 1 鳄鱼身体机构模型

鳄鱼在爬行时只有对角的左脚着地, 将其机构表示为图 2 所示。该机构为串联 7 杆机构^[5], 可以算出该机构的自由度数为

$$F_r = 3n - 2p_l - p_h = 3 \times 6 - 2 \times 7 = 4 \quad (1)$$

式中 n ——活动构件数

p_l ——运动低副数

p_h ——运动高副数

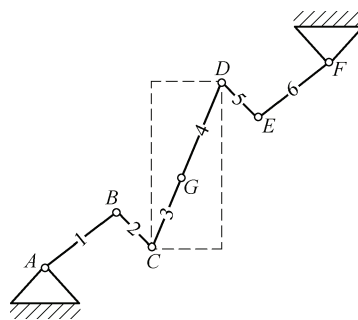


图 2 两脚着地的机构简图

当对角两脚着地时, 其抬腿关节不做运动, 所以在该串联机构中将由两条腿上的 4 个摆动关节作为输入, 显然输入数等于机构自由度数。根据机构的设计原理, 这种状态下机器人的姿态可以根据 4 个输入角度确定, 且各关节之间的转角相对独立, 其运动之间不会发生干涉, 即机器人不存在过约束, 在原理上有效地避免了脚掌打滑现象的发生。

这种鳄鱼的爬行机构是以着地脚的腿部两平面转动机构作为主驱动, 腰部作为柔性从动实现身体的前伸爬行, 它的优点是运动灵活, 机构运动之间不会发生干涉, 但是考虑到水下将会有 4 游动自由度, 再加上这些爬行的自由度, 就会使机构设计变得相当复杂, 同时防水将是一个比较棘手的问题。

综上所述, 必须将机构模型进行简化, 使腰部柔性从动关节 A 作为主驱动关节, 而将腿部的运动简化为只有抬腿运动, 如左上脚只有转动副 B 构成。这样简化后的机器人机构模型如图 3 所示。

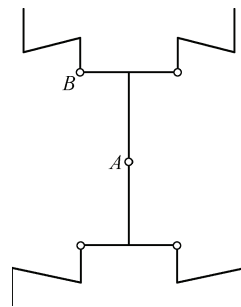


图 3 简化后的鳄鱼身体机构模型

爬行时的步态是对角线端的脚同时着地或者同时处于悬空状态, 当它扭动身体时, 相应着地端的脚不产生前进的作用, 而悬空的脚则随着身体的扭动前进了一段距离。通过往复扭动身体, 并且控制对应脚的着地与悬空, 就能实现前进, 这样就实现了模型的简化, 但在腰部扭动时它的着地两脚存在着相互移动。

1.2 游动机构分析与设计

鱼在水中有很好的机动性, 使得一些水下机器

人将其作为模仿对象,此鳄鱼机器人在水中的运动主要是模仿鱼类的游动。鱼类的脊背游动和鳄鱼脊背运动具有相似性,因此可以比较容易地建立两栖机器人复合仿生机构。

为了适应环境,鱼类进化出各式各样的推进方式,其中一种为波动推进,以脊椎曲线带动它所包络的流体向后喷出,产生推力。其整个身体在水中做波动运动,因而游动的形态类似一列正弦波。而决定鱼类游动的波动方式的最主要参数是鱼类身体中心线的波动方程。研究人员对各种采用身体波和尾鳍推进方式的鱼类进行了研究,发现这些鱼类的身体波曲线可以用一个波动方程来表示,根据 Lighthill^[6-7]在多年的研究基础上提出的鱼类游动时身体波的方程表征如下

$$y_{\text{body}}(x, t) = (c_1 x + c_2 x^2) \sin(kx + \omega t) \quad (2)$$

式中 y_{body} ——鱼身体横向摆动的幅度

x ——沿着鱼体的纵向位置坐标

k —— $2\pi/\lambda$

λ ——身体波的波长

c_1 ——振幅的线性增益

c_2 ——振幅的二次增益

$\omega = 2\pi f = 2\pi/t$

f ——身体波的频率

为了更好地表征身体波动的形式,提高波动方程的表征范围及曲线的柔性,在保留式(2)的特征参数的同时,增加波长倍数相对于 x 的一次增益。对式(2)修改后的表达式如下

$$y_{\text{body}}(x, t) = (c_1 x + c_2 x^2) \sin(((k_1 + k_2 x)x + \omega t)) \quad (3)$$

通过调整 k_1 和 k_2 的值,可以根据 x 的变化得到更多的曲线方程,从而可以实现更多的身体波曲线。如图4所示。

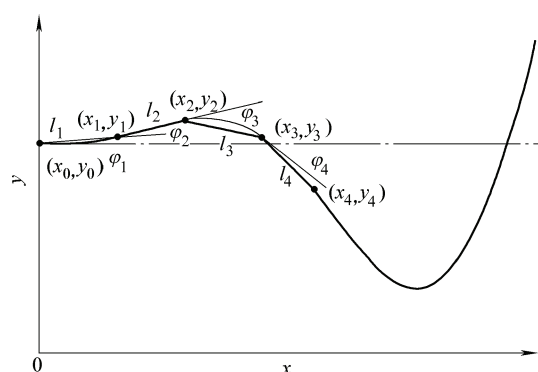


图4 游动的波动曲线

可以看出,可以利用几个相互串联的关节,如图4中的 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 去拟合游动的波动曲线。对于鳄鱼机器人来说,利用其腰部的扭动作为游动的第一个关节,整个鳄鱼的鱼尾由其他的游动关节

构成,从而可以实现鳄鱼整个身体的波动推进。

1.3 鳄鱼爬行与游动机构的一致性

一般的水陆两栖机器人在陆地上和水中分别采用不同的推进机构,导致两栖机器人机构复杂,适应性差,占用空间大,设计成本高,稳定性差。而从爬行运动时的脊椎曲线和游动时的脊椎曲线均为波状运动角度的考虑,这将使得两种仿生机构在同一个机器人上的实现成为可能。鳄鱼机器人在陆地和水中采用复合推进单元,脊椎运动就是复合推进机构的着手点,也就是在陆地上机器人采用简化并改进的爬动机构模型,采用腰部扭动作为主驱动,而抬腿收腿作为从动单元;而腰部的扭动在水中则作为游动的第一个关节,这样它也参与水中游动,这就建立了两栖复合推进机构。如图5所示为鳄鱼两栖机器人复合推进机构简图。图5中 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G 、 H 为8个转动副, l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 为4个连杆,其串联起来组成鳄鱼的尾部。

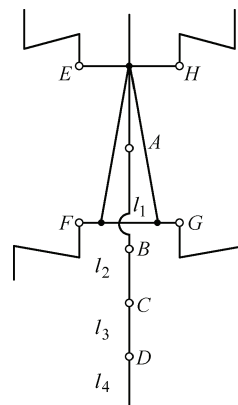


图5 鳄鱼两栖机器人复合推进机构简图

2 鳄鱼机器人的机构优化与实现

2.1 鳄鱼的爬行机构实现

在建立了鳄鱼爬行机构模型的基础上,用最实用有效的机构实现机器人的运动是一个迫切需要解决的问题。图6、7是在ADAMS环境下建立的鳄鱼爬行机构模型图,爬行机构模型是由身体扭转机构和四腿运动机构组成。身体扭转机构是由一个主动驱动电动机带动两个杆件作扭转运动;前后腿的运动机构分别是由曲柄连杆机构和两个平行四杆机构组成的复合运动机构,负责腿运动的有两个驱动电动机。如图6所示,当驱动腿部的电动机转动时,输出的扭矩带动曲柄转动,假设当前电动机顺时针转动,那么曲柄此时向右转动,同时带动两个摆杆运动,然后摆杆带动平行四杆机构运动,这样运动的效果是使机器人的左前腿压紧地面,而右前腿抬起来。同时由图7中腰部驱动电动机的转动,左前

腿与地面之间存在摩擦力的作用, 而右前腿悬空并且由于身体的弯曲向前伸, 同理, 此时右后腿与地面接触, 左后腿悬空向前伸, 此后腿部电动机继续转动, 右前腿与左后腿着地, 同时左前腿与右后腿抬起, 如此反复, 这样就实现了机器人的向前运动。曲柄连杆机构加平行四杆的作用是使脚水平着地, 使机器人运动更加平稳。

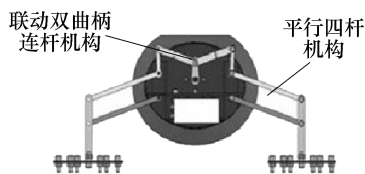


图6 腿部组合结构

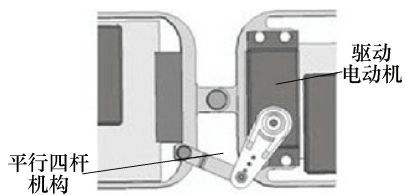


图7 腰部平行四杆结构

机器人身体扭动与腿部运动的时序图如图8所示, 竖轴表示的是电动机相对于中位的旋转角度, 初始状态时身体处于非扭动状态, 躯干往复扭动一次即为一个周期。在躯干扭动的第一个周期的前半周期内, 腿部必须抬到最高位置, 等躯干扭动到最大角位移时, 腿返回到初始位置, 躯干回到初始位置时, 两个悬空的腿到达最高位置。由此可知, 躯干部分的电动机运动规律与腿部分的运动规律相差 $1/4$ 个周期, 从而得出机器人爬行的运动规律。式(4)为运动控制公式, α 、 β 分别为腿部和躯干扭转角, T 为运动周期, A_1 、 A_2 、 B 分别为振幅。

$$\begin{cases} \alpha = \begin{cases} A_1 \sin(2\pi t/T) & 0 \leq t \leq T/4 \\ A_2 \sin(2\pi t/T - \pi/2) & T/4 \leq t \end{cases} \\ \beta = B \sin(2\pi t/T) \end{cases} \quad (4)$$

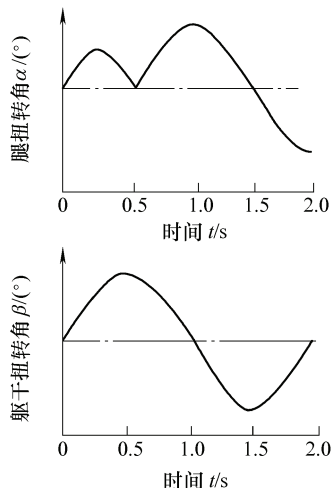


图8 机器人腰部运动与腿部运动时序图

2.2 爬行机构的优化

当鳄鱼机器人扭转躯干时, 为了避免前后腿之间的运动干涉, 躯干有一个最大的扭转角度, 当超越这个最大扭转角度时, 前后腿之间就会发生干涉。如图9所示, 在图9中, 鳄鱼身体上半部分顺时针转过 θ 之后与下半部分右腿产生干涉。

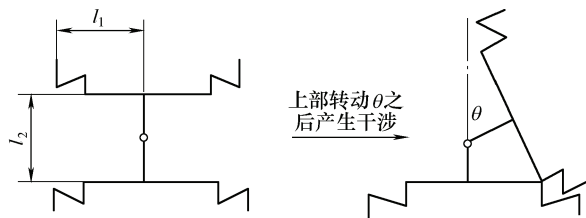


图9 机器人躯干扭转极限角度图

定义鳄鱼每一条腿的长度为 l_1 , 身体的长度为 l_2 , 则为了避免腿部之间的干涉, 极限扭转角度为

$$\theta = 180[1 - \arctan(2l_1/l_2)/\pi] \quad (5)$$

为此建立了4组身長 l_2 相同, 腿长 l_1 不同的鳄鱼模型。利用式(5)求出四组模型的极限角度, 将4组模型的角度输入到模型中可以仿真得到其运动速度, 如表1所示。

表1 极限扭转角度下4组鳄鱼机器人的相关数据

参数	第1组	第2组	第3组	第4组
扭转角度 $\theta/^\circ$	86.72	66.35	53.13	44.07
扭转角度 θ/rad	1.513 5	1.158 0	0.927 2	0.769 1
速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	42	45	40	30

同时在鳄鱼的身体处于相同的扭转角度下, 为了让鳄鱼的爬行速度达到最高, 又利用上面4组模型, 使其身長 l_1 相同, 并增加它们的腿长 l_2 。测得它们的运动速度如表2所示。

表2 相同扭转角度下4组鳄鱼机器人的相关数据

参数	第1组	第2组	第3组	第4组
身長 l_1/mm	170	170	170	170
腿长 l_2/mm	90	130	170	210
速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	30	48	42	20

通过建立更多的数据, 采用描点法, 最后得出它的运动效果大致满足如图10的规律。

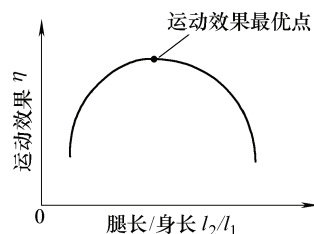


图10 机器人运动效果随腿长/身長变化图

通过建立的虚拟样机模型仿真得到以下结论:

在相同身长, 相同时间内, 随着腿长的增大, 它的极限扭转角度变小, 鳄鱼机器人在运动方向的位移曲线由规则到不规则, 由于运动曲线不规则的影响, 运动速度由增加到减小。由此可知, 腿长与身长之比有一个最优点。如图 10 所示。综合上述的分析与优化, 通过试验得出鳄鱼机器人的身长与腿长之比为 17:13 时其速度和稳定性最好。

2.3 鳄鱼游动机构的实现与优化

前面的波动运动数学模型的特征曲线是平滑曲线, 而本文设计的鳄鱼游动推进机构, 即鳄鱼的尾部以及身体的扭动关节, 是由多个僵硬的连杆铰接组成, 如图 11 所示。这些连杆用由头尾相接的线段表示来拟合波动曲线, 因此保证这一推进机构上的所有点在摆动过程中都落在这条理论曲线上, 这样就要保证每条线段中的关键点(即端点、关节点)落在理论曲线上。

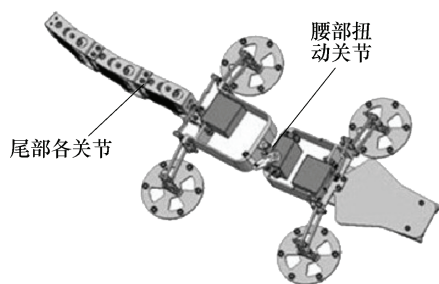


图 11 第一代干式鳄鱼两栖机器人

要实现由理论曲线到实际模型的转化, 必须对推进机构的各个参数按照机电系统的要求对上述设计方案进行调整和优化。需要调整的有: 根据机电系统的最小实现尺寸调整机器人的关节比例 $l_1:l_2:l_3:l_4$; 根据驱动电动机的摆动角度范围限制调节机器人身体波的波形参数 c_1 、 c_2 、 k_1 、 k_2 。

为此这里确定优化的目标为使实际中心线与理论中心线之间的误差尽可能小, 即连杆与理论曲线之间所夹的面积最小^[8]

$$\min f(X) = \sum_{i=0}^M S_i \quad (6)$$

式中 $X = (l_1 \ l_2 \ \dots \ l_N)^T$

S_i ——理论曲线与近似实际曲线所形成的包络区域的面积

M ——鱼体波分辨率

设计约束如下。

等式约束: $h_v(x) = 0$, $v=1$, 保证所有的关节长度总和为一常数。

不等式约束: $g_u(x) \leq 0$, $u=1, 2, \dots, N$, 保证每关节的长度 l_i 大于等于关节驱动电动机所要求的最小关节尺寸 $l_{i-\min}$, N 为关节数。

根据本问题的约束情况, 存在等式约束与不等式约束, 选择混合罚函数法来进行参数优化。构造惩罚函数

$$\Phi(X, r^{(k)}) = f(X) + r^{(k)} \left\{ \sum_{u=1}^N [\max(0, g_u(X))]^2 + [h_v(X)]^2 \right\} \quad (7)$$

式中 $r^{(k)}$ ——惩罚因子

$\{r^{(k)}\}$ ——递增序列

惩罚函数法通过构造惩罚函数 $\Phi(X, r^{(k)})$ 将有约束优化问题转换为无约束优化问题, 采用坐标轮换等方法实现对无约束优化问题的求解, 从而实现对有约束问题的参数优化。

通过对关节结构尺寸的优化, 可得到按照鱼体波曲线方程 $y_{\text{body}}(x, t)$ 进行游动的鳄鱼机器人相对较优的一组结构尺寸参数。根据优化后的关节比例 $l_1:l_2:\dots:l_N$, 重新进行鱼体波拟合计算, 进而可确定机器人的控制参数集 $\{\phi_{i1}, \phi_{i2}, \dots, \phi_{iN}, f\}$, 实现机器人的优化设计。

经过考虑防水、尺寸限制等具体问题, 确定机器人其中一组的静态参数如下: 游动关节数是 4, 波长倍数为 0.6, $l_1=200$, $l_2=l_3=l_4=70$ 。动态参数如下: $c_1=0.06$ 、 $c_2=0.07$ 、 $k_1=0.5$ 、 $k_2=0.1$ 。通过仿真可以观察到, 曲线拟合情况良好, 尾部三关节与波形曲线几乎完全拟合, 误差较小, 第一关节由于长度的限制, 存在一定的波形拟合误差。

3 鳄鱼机器人的试验研究

3.1 试验平台

鳄鱼机器人的最终样机如图 12 所示, 机器人的结构就是前面所述的水陆两栖机器人的结构。外部可以看到爬行机构和由橡胶套包住的尾部摆动机构, 内部集成了运动控制板模块、三态开关模块、控制及动力电池组模块、无线通信模块、动密封及静密封模块。整体占用空间较小, 结构紧凑。

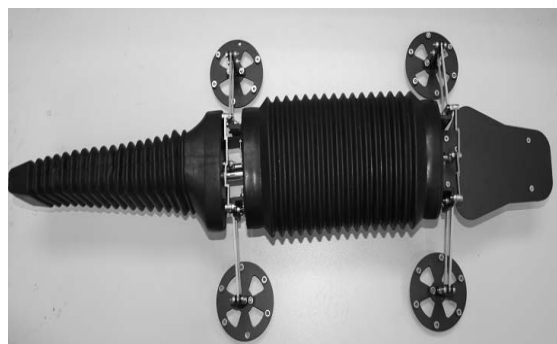


图 12 仿鳄鱼两栖机器人实物图

3.2 爬行控制试验

3.2.1 运动频率控制试验

对装配好的鳄鱼机器人做实际的运动频率与速度之间的关系试验。得出相关的位移、时间、频率等数据, 并计算得出各个频率下的速度。设定机器人的腰部扭转角为 64° 。得到机器人爬行速度与运动频率关系曲线图见图 13。

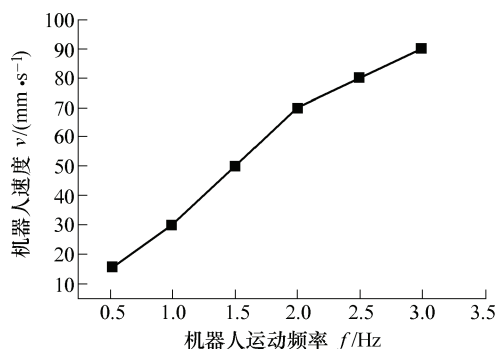


图 13 机器人爬行速度与运动频率关系曲线图

观察图 13, 可以得出鳄鱼机器人运动速度与频率之间有如下关系。

(1) 机器人的运动速度随着运动频率的增大而增加。理论上机器人的速度会随着频率的增大而增加。

(2) 随着运动频率的增加, 机器人的运动速度增加趋势变缓, 这是因为当机器人的运动频率超过机器人的电动机响应速度时, 电动机总是运动不到实际所设定的位置, 机器人的运动速度增加趋势就会变缓, 当频率超过一定限度时, 机器人的运动速度反而变小。

3.2.2 扭转角控制试验

当鳄鱼机器人的腰部扭转角发生变化时, 它的速度将发生变化, 不断变化机器人腰部往复扭转的角度, 得出不同扭转角度下机器人的爬行速度。得到机器人爬行速度与腰部扭转角关系曲线, 见图 14。此时机器人运动的频率为 2 Hz。

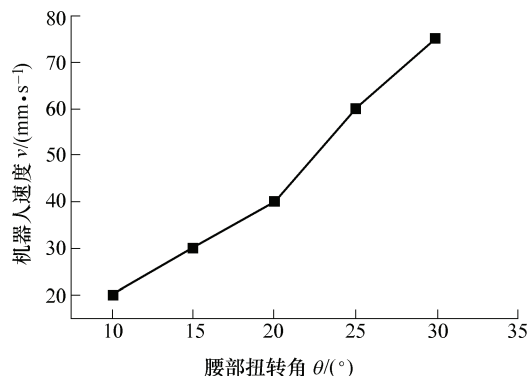


图 14 机器人爬行速度与腰部扭转角关系曲线图

观察图 14, 得出机器人爬行速度和腰部扭转角

的关系如下。

(1) 随着两栖机器人的腰部扭转角的增加, 它的速度也随着增加。

(2) 由于机器人本身结构的限制, 它的往复扭转角度有一个上限值, 而同时机器人本身腰部扭转角度超过一定值时, 就会使同侧前后脚发生接触, 对机器人运动产生影响。

3.3 水中运动试验

3.3.1 频率—速度关系试验

图 15 显示了直行游动速度随摆动频率的变化关系。从速度控制测试结果可以看出, 在摆动频率为 2 Hz 时, 机器人游动速度最大。当摆动频率在 2 Hz 以下时, 机器人的游动速度随着频率的增加而增加; 当频率为 2 Hz 左右时具有最高的游动速度, 此时称为机器人的转折频率; 当摆动频率大于 2 Hz 时, 游动速度随着频率增加开始下降, 此时可以看出机器人的尾部由于频率较快导致电动机摆动不到位, 尾部摆幅下降, 身体出现抖动。

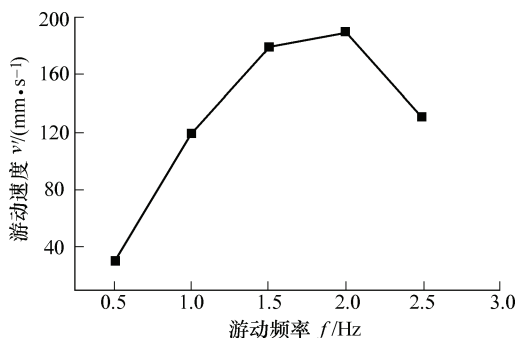


图 15 机器人游动速度与游动频率关系曲线图

3.3.2 摆幅—速度关系试验

对机器人摆幅进行调节相关的速度—频率控制试验。机器人摆动数据由波动方程计算并写入控制系统的数据存储区。处理器通过读取三组不同的摆动数据实现对机器人速度的控制。

由图 16、17 可以看出, 采用摆幅调节实现机器人的速度控制是有效的, 当摆幅在一定范围内,

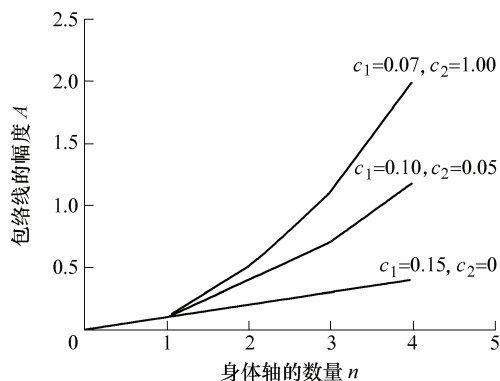


图 16 不同 c_1 和 c_2 控制下的鱼体波包络线

速度随着摆幅的增加而增加,在一定的摆动频率下,摆幅大则速度较快,而两栖机器人在摆动幅度过大时可能导致速度的降低。由于摆幅的增加,造成了机器人头部侧摆角度的增大,这势必造成机器人的在游动过程中的左右晃动。

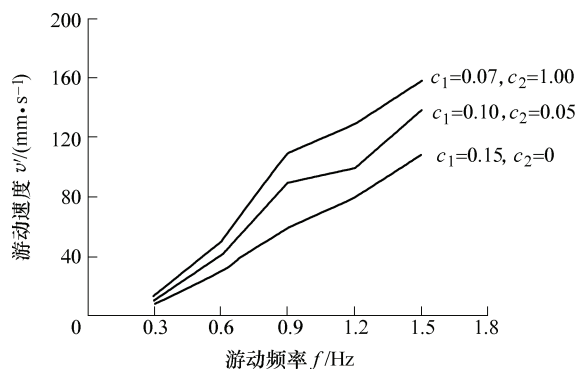


图 17 速度—频率—摆幅曲线

4 结论

(1) 本文以鳄鱼为原型设计的爬行与游动的两栖复合推进机构模型,结构紧凑,适应性较好,占用空间小。

(2) 通过对机器人在不同身长比例模型下爬行与游动的分析可以得出,机器人的运行性能是与其腿长与身长比例相关的,并呈现出一定的规律性。

(3) 在对试制好的鳄鱼机器人原理样机分别进行爬行与游动试验,总结出机器人的运动频率为 2 Hz 时机器人运动效果最优,且通过试验也验证了仿真优化结果的合理性。

参 考 文 献

[1] AYERS J. Underwater walking[J]. Arthropod Structure &

Development, 2004, 33(3): 347-360.

- [2] CHALMERS P. Lobster special[J]. Mechanical Engineering, 2000, 122(9): 1-6.
- [3] TAKAYAMA T, HIROSE S. Amphibious 3D active cord mechanism “HELIX” with Helical swimming motion[C] //RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, Switzerland, October, 2002, Piscataway. NJ, USA: IEEE, 2002: 775-780.
- [4] IJSPEERT A J, CRESPI A, RYCZKO D, et al. From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model[J]. Science, 2007, 315(5 817): 1 416-1 420.
- [5] 王田苗, 孟偲, 官胜国, 等. 柔性杆连接的仿壁虎机器人结构设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 1-4.
WANG Tianmiao, MENG Cai, GUAN Shengguo, et al. Structure design of Gecko robot with compliant shank[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 1-4.
- [6] LIGHTHILL M J. Aquatic animal propulsion of high hydromechanical efficiency[J]. Journal of Fluids Mechanics, 1970, 44: 265-301.
- [7] LIGHTHILL M J. Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion[J]. Great British, 1971: 1 763-1 770.
- [8] YU J, WANG L. Parameter optimization of simplified propulsive model for biomimetic robot fish[C]// In Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, April 2005, Barcelona. 2005: 3 317-3 322.

作者简介: 王田苗, 男, 1960 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为微小型机器人、医疗机器人和嵌入式机电控制。

E-mail: itm@buaa.edu.cn

仲启亮(通信作者), 男, 1987 年出生。主要研究方向为微小型机器人。

E-mail: zhongqiliang_2007@126.com