

## 机器鱼运动学 SSPR 建模与自适应迭代学习控制

任光, 戴亚平

(北京理工大学 自动化学院, 北京 100081)

**摘要:** 针对一类多关节机器鱼推进速度的调节, 提出一种运动学建模与控制匹配设计的新方法. 以可控性为目标, 建立了基于能量转化系数的鱼尾摆动规律与推进速度性能参考 (SSPR) 模型, 系统已知参数把能量转化率收敛到一个可控可调节范围. 自适应迭代学习控制策略与之匹配, 能适时辨识并周期性地更新该模型的能量转化系数, 实现机器鱼在陌生水环境中的推进速度自调节. 仿真分析验证了该模型和控制方法的正确性.

**关键词:** 机器鱼; 能量转换系数; 参考模型; 自适应迭代学习控制

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

## Robotic fishes kinematics SSPR modeling and adaptive iterative learning control

REN Guang, DAI Ya-ping

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China. Correspondent: REN Guang, E-mail: 35146627@qq.com)

**Abstract:** A class of modeling and control combination method is proposed to realize the speed adjustment of robotic fish with multi-joint caudal fin. Targeting at controllability, a swing rule and propulsion speed performance reference (SSPR) model is established based on an energy conversion coefficient, and the efficiency is converged to a controllable and adjustable range by system's known parameters. Then, an adaptive iterative learning control policy is designed to match the SSPR model, the control system can identify and update the energy conversion coefficient timely and periodically, and realize the speed self-adjustment of robotic fish in a strange water environment. Simulation analysis verifies the correctness of the model and control method.

**Key words:** robotic fishes; energy conversion coefficient; reference model; adaptive iterative learning control

### 0 引言

多年来, 机器鱼动力学建模和运动控制的理论研究取得了一系列成果. 模型研究方面, 研究人员多从流体力学角度, 采用拉格朗日方程和牛顿定律等方法得到机器鱼动力学方程和运动学模型. Wu<sup>[1]</sup>提出了“二维波动板理论”, 将鱼体视为一块薄板来分析鳐科鱼类的水动力学特性. Lightill<sup>[2]</sup>首次将细长体理论用于鳐科模式鱼类的水动力学分析, 并考虑尾鳍的任意摆幅的运动, 提出了“大摆幅细长体理论”. Chopra 等<sup>[3]</sup>又提出了一种可用于大摆幅、月牙形尾鳍推进的“二维抗力理论”. 童秉纲<sup>[4]</sup>采用半解析/半数值的方法, 提出了“三维波动板理论”. 梁建宏等<sup>[5]</sup>深入开展了仿鱼机器人技术的研究, 提出了波动推进理论及其分析方法, 并模仿鳗鱼的鳗鲡目推进模式, 设计

研制了国内首条能遥控自由游动的机器鳗鱼.

这些动力学模型为研究仿生机器鱼的控制提供了理论基础, 但在利用模型实现和优化仿生机器鱼的运动控制方面却难以应用<sup>[6-7]</sup>. 其主要原因是在复杂水环境中, 鱼体和水的接触存在大量随机因素, 基于水动力学分析得到的动力学模型无法准确描述鱼体的水作用力与运动性能之间的关系. 此外, 模型过于复杂使得控制系统的设计难以实现<sup>[8-9]</sup>.

针对机器海豚长时间、大距离游动的特点, 为实现对其稳定、高精度的速度控制, 本文考虑组合机器海豚动力学模型与控制器设计两方面的因素, 设计一种用能量转换系数将数学模型与自适应控制方法有机结合的机器海豚动力系统. 该方法避免了采用拉格朗日方法建模时造成的模型复杂、失真过多的不

收稿日期: 2013-06-02; 修回日期: 2013-09-29.

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划项目 (IRT1208).

作者简介: 任光(1979-), 男, 博士生, 从事机器人智能控制的研究; 戴亚平(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 从事机器人运动、网络化控制等研究.

足<sup>[10]</sup>,使机器海豚的动力系统在模型与控制器之间建立起相互依存、相互弥补的关系。

从能量转换的角度对机器海豚运动特点进行分析,将尾部摆动舵机的动能转化为鱼体前进动能的转化率提取出来,以此转化率为基础建立摆动规律与推进速度之间的性能参考模型.转化率在模型中可定义为转换系数 $k$ ,也是唯一不确定参数,机器海豚的质量、舵机质量和舵机长度等确定因素将不确定参数约束在一个有限范围。

自适应迭代学习控制方法适合于这一类含不确定参数的数学模型,这也是一类典型的参数自适应迭代学习控制问题<sup>[11]</sup>.在匹配控制系统中, $k$ 值随着机器海豚尾部运动周期不断地辨识和累积更新.鱼体进入稳定状态后,控制器也完成了该水环境中 $k$ 值的精确辨识,并由学习控制器存储下来,据此设计系统的后续输入控制,精确的 $k$ 值可实现推进速度的准确调节.本文进一步分析了自适应迭代学习控制的实现问题<sup>[12]</sup>,证实了模型与控制匹配设计方法的正确性。

## 1 能量转换系数的提出

### 1.1 尾部摆动特征描述

以机器海豚为例,图1(a)展示了舵机的分布状况.机器海豚的尾部有4个舵机,构成鱼体4个关节.第1个关节垂直安装,可左右摆动,控制豚体平面内运动方向.后面3个依次串联的关节平面安装,可上下摆动,通过对摆动幅度的调节可实现豚体速度调节.关节上下摆动时,方向一致,即同时向上或同时向下.图1(b)描绘了尾部摆动情况。

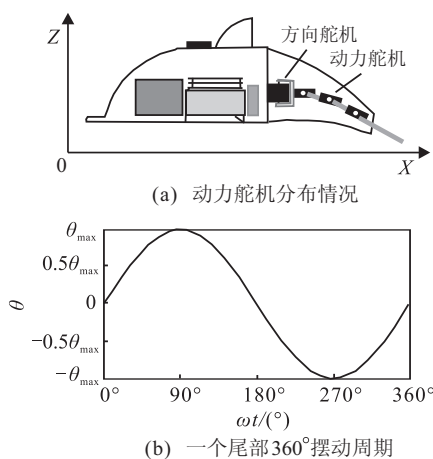


图1 机器海豚动力推进系统

对于多关节动力推进机器鱼系统,主流的动力学建模方法多是参考陆上移动机器人力学和能量特点,采用拉格朗日方程建立其动力学关系方程<sup>[9,11]</sup>,再结合流体力学原理得到运动学模型.这类方法得到的数学模型理论依据充分,但高复杂性和失真使其难于实际控制.对于中大型机器鱼的长距离游动情况,机器

鱼控制的重点在于稳定游动速度,而不是小范围内的机动性能力.因此可以从自适应控制的角度,建立相对简单的性能参考模型,以控制策略的优势弥补模型不确定性的不足,并完成对稳定速度的精确控制.性能参考模型的建立需要包括动力推进系统的输入与输出的所有元素,并把在流体环境中能够影响到控制效果的各种因素都涵盖到模型的某个部分或某个参数中来.本文以此为出发点,提出以能量转换系数为基础的建模方法,并得到多关节机器鱼推进系统运动学性能参考模型。

### 1.2 能量转换原理及系数 $k$ 的定义

对于长时间大距离游动中大型机器海豚,鱼体运动具有如下规律:

鱼体初始状态为静止或某个稳定的速度,即具备确定的初始动能.为了清晰地说明运动情况,将一个目标加速周期分离为若干个尾部摆动动作,并假定初始状态为静止.在输入摆动幅度角和频率控制变量后,鱼体从静止加速到相应的目标稳定游动速度的过程中,机器鱼尾部的3个动力舵机需要若干个上下摆动动作周期,每一个摆动动作周期被视为独立的研究单元,每一个周期都有一定比例的舵机动能转化为鱼体前进的动能.随着摆动周期的递增,鱼体动能持续增加,直到进入目标游动速度.这可通过鱼体运动的分离得到以尾部摆动周期为采样单位的离散化模型。

在图1(b)所示一个尾部 $360^\circ$ 摆动周期内,其能量转换基本原理在于:机器海豚体内电能通过舵机摆动输出功率,一部分能量转化为水环境水体的动能,并随之消失,另一部分能量转化为鱼体前进的动能.以机器海豚尾部的 $360^\circ$ 摆动周期为单位,将转化为鱼体动能的能量与舵机摆动时最大动能的比值定义为能量转换系数 $k$ .只要准确得到系数 $k$ ,即可得到该摆动周期准确的运动学速度模型。

需要指出的是,能量转换系数本身是一个不确定参数,其值只能表明能量转换率在一个有参考价值的范围,精确的值需要由控制系统适时辨识得到,因此基于能量转换系数所建模型的价值体现需要与合适的控制策略匹配。

## 2 含能量转换系数的机器海豚SSPR模型

### 2.1 机器海豚的能量转化分析

根据鱼类运动学分析结果,鱼尾摆动幅度角 $\theta$ 的运动学方程为

$$\theta = \theta_{\max} \sin(\omega t). \quad (1)$$

如图1(b)所示,正弦曲线描述了鱼尾摆动时幅度角的变化规律.其中: $\theta$ 表示鱼尾摆动角, $\omega$ 表示角速度.在一个 $360^\circ$ 摆动周期内,机器海豚的3个舵机的动能转

化为鱼体的动能, 占全部舵机输出能量的比例为  $k_i$ , 其他动能转化为周边水体的动能并消失. 运动分离后的有限  $n$  个摆动动作, 分别对应  $n$  个转换比例, 可表示为  $k_i, i = 1, 2, \dots, n, k_i$  值随着速度的增加而减小. 设共经过  $n$  个摆动周期鱼体进入目标速度, 相应的  $k_i$  值从  $k_1$  持续下降, 直到鱼体运动进入目标稳定状态, 此时  $k_n = 0$ , 即舵机动能不转化为鱼体动能, 而全部转化为水体动能. 从力学角度而言, 此时鱼体的推进动力与水阻力达到平衡.

对于中大型机器海豚, 动力舵机被柔性大鱼皮包裹, 本身只产生极少量推力, 而弹性尾鳍的摆动是推力的主要来源, 如图1所示. 因此, 机器海豚的3个舵机依次连接, 可设计为3个相同的幅度角, 即  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  相等. 图2所示为机器鱼尾部舵机摆动角状况.

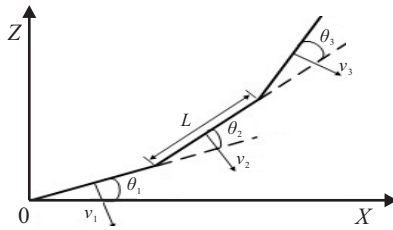


图2 尾部摆动角示意

对运动学方程(1)求导, 得到角速度

$$\dot{\theta} = \omega \theta_{\max} \cos(\omega t). \quad (2)$$

在一个摆动动作周期内, 当舵机运动到与  $X$  轴重合, 即  $\omega t$  为  $180^\circ$  或  $360^\circ$  时, 摆动角速度两次达到最大值  $\omega \theta_{\max}$ , 此时动能达到最大值. 分别计算3个舵机最大动能, 得到

$$\begin{cases} T_1 = \frac{1}{2} m v_1^2 + \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2, \\ T_2 = \frac{1}{2} m v_2^2 + \frac{1}{2} J_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2), \\ T_3 = \frac{1}{2} m v_3^2 + \frac{1}{2} J_3 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_3^2). \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $m$  是舵机的质量;  $v_1, v_2, v_3$  分别是关节的质心速度;  $J = \frac{1}{2} m r^2, J_1, J_2, J_3$  分别是质心转动惯量;  $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3$  分别是质心的角速度. 质心速度、转动惯量和转动半径分别由下式决定:

$$\begin{cases} v_1 = r_1 \times \dot{\theta}_1, \\ v_2 = r_2 \times (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2), \\ v_3 = r_3 \times (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3); \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} J_1 = \frac{1}{12} m r_1^2, \\ J_2 = \frac{1}{12} m r_2^2, \\ J_3 = \frac{1}{12} m r_3^2. \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $r_1 = \frac{1}{2} L, r_2 = \frac{3}{2} L, r_3 = \frac{5}{2} L$ .

由式(2)可知: 当  $\omega t$  为  $180^\circ$  时, 鱼尾向下摆动与  $X$  轴重合,  $\dot{\theta}$  达到负最大值, 此时  $\dot{\theta} = -\omega \theta_{\max}$ ; 当  $\omega t$

为  $360^\circ$  时, 鱼尾向上摆动重合  $X$  轴,  $\dot{\theta}$  达到正最大值, 此时  $\dot{\theta} = \omega \theta_{\max}$ .

计算3个舵机的角速度负最大值

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = -\omega \theta_{1\max}, \\ \dot{\theta}_2 = -\omega \theta_{2\max}, \\ \dot{\theta}_3 = -\omega \theta_{3\max}. \end{cases} \quad (6)$$

同理, 将式(6)取绝对值, 即为3个舵机的角速度正最大值.

在一个  $360^\circ$  摆动动作周期内, 方向向下和向上有同样的推力效果, 都会实现舵机输出功率对鱼体动能的转化. 根据能量转换系数的定义, 在一个鱼尾摆动动作周期内, 可得到如下等式:

$$\frac{1}{2} M V_i^2 = 2k_i(T_1 + T_2 + T_3), \quad (7)$$

其中  $M$  和  $V$  分别是机器海豚的质量和运动速度.

设计  $\theta_{1\max}, \theta_{2\max}, \theta_{3\max}$  相同, 都为  $\theta_{\max}$ , 由式(3)~(7)可计算得到

$$\frac{1}{2} M V_i^2 = k_i \left[ \left( \frac{131}{2} L^2 + \frac{11}{12} L \right) m \omega^2 \theta_{\max}^2 \right]. \quad (8)$$

其中:  $V_i$  是第  $i$  个周期增加的速度;  $k_i$  是第  $i$  个周期的转化系数;  $m$  是一个舵机的质量;  $L$  是舵机的长度;  $\omega = 2\pi f, f$  为鱼尾摆动频率;  $\theta_{\max}$  为最大摆幅角.

## 2.2 含能量转换系数 SSPR 模型

分析式(8)可以得到, 经过  $i = n$  个周期后, 机器海豚进入平稳游动状态, 即不再增加速度. 此时鱼尾摆动所产生的动能全部转化为环境水体的动能,  $k \rightarrow 0$ , 鱼体所承受的推力与阻力达到平衡. 一般而言, 此时鱼体的稳定游动速度由鱼体质量、水环境和动力决定, 在这3个因素稳定的条件下, 存在一个确切的速度值.

$$\frac{1}{2} M \sum_{i=1}^n V_i^2 = \sum_{i=1}^n k_i \left( \frac{131}{2} L^2 + \frac{11}{12} L \right) m \omega^2 \theta_{\max}^2 \quad (9)$$

描述了有  $i$  个摆动周期的能量转换关系. 由于每个周期的  $\omega(t_i)$  和  $\theta_{\max}(t_i)$  可设为输入变量,  $k_i$  为相应周期的能量转化系数, 令  $y_i = V_i^2$ , 鱼尾摆动  $n$  个周期后进入稳定游动状态,  $k_n = 0$ , 故式(9)可展开成矩阵方程

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & k_2 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega^2(t_1) \theta_{\max}^2(t_1) \\ \omega^2(t_2) \theta_{\max}^2(t_2) \\ \vdots \\ \omega^2(t_n) \theta_{\max}^2(t_n) \end{bmatrix}, \\ y = \left( 131L^2 + \frac{11}{6}L \right) \frac{m}{M} (y_1 + y_2 + \cdots + y_n). \end{cases} \quad (10)$$

式(10)描述了进入平稳运动状态后的机器海豚的平均速度, 即为离散运动学数学一般模型. 设定  $\omega(t_i)$  为一个确定的输入值  $\omega$  后, 可得到基于变量  $\theta_{\max}^2(t_i)$  的一个分解方程, 同时令  $x(t_i) = \theta_{\max}^2(t_i)$  可得到基于摆幅控制的 SSPR 模型方程, 即

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & k_2 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_1) \\ x(t_2) \\ \vdots \\ x(t_n) \end{bmatrix}, \\ y = \omega^2 \left( 131L^2 + \frac{11}{6}L \right) \frac{m}{M} (y_1 + y_2 + \cdots + y_n). \end{cases} \quad (11)$$

同样, 设定  $\theta_{\max}(t_i)$  为一个确定的输入值  $\theta_{\max}$  后, 可得到基于变量  $\omega^2(t_i)$  的一个分解方程, 同时令  $x(t_i) = \omega^2(t_i)$  可得到基于频率控制的 SSPR 模型方程, 即

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & k_2 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_1) \\ x(t_2) \\ \vdots \\ x(t_n) \end{bmatrix}, \\ y = \theta_{\max}^2 \left( 131L^2 + \frac{11}{6}L \right) \frac{m}{M} (y_1 + y_2 + \cdots + y_n). \end{cases} \quad (12)$$

转化系数  $k_i$  的值取决于鱼体固有水动力特性和水环境, 其中水环境是不可预测的. 比如, 不同的水流速度下  $k_i$  会不一样, 在静止水体中,  $k_i$  近似为一固定值.

### 2.3 基于转化系数之和的模型简化

对于长距离航游的中大型机器海豚而言, 在机器海豚开始游动后一直到进入稳定平均游速  $V_i$  前,  $\theta_{\max}(t_i)$  和  $\omega(t_i)$  保持不变, 此后可调节为  $\theta_{\max}(t_{i+1})$  和  $\omega(t_{i+1})$ , 直到进入另外一个稳定游速  $V_{i+1}$ . 依次类推, 每一次接收新的指令改变游动, 到进入新的稳定速度之时, 即到  $k_n$  趋近于 0 时, 尾部任意摆动周期都有确切的值  $\theta$  和  $\omega$ . 则由式 (10) 可推导出

$$k = \sum_{i=1}^n k_i, \quad (13)$$

$$V = \sqrt{\theta_{\max}^2(t_i) \omega^2(t_i) \left( 131L^2 + \frac{11}{6}L \right) \frac{m}{M} k}. \quad (14)$$

式 (14) 是模型 (10)~(12) 的简化, 避免了对  $k_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 共  $n$  个不确定参数的复杂确定过程, 只需确定他们的总转化率  $k$ .  $k$  是一个完整目标加速周期的总能量转化比例. 例如, 假定尾部摆动 6 次后达到稳定游速, 则总转化率  $k$  即为机器海豚累积获得的总动能与尾部一次摆动时最大动能的比值. 理论上讲, 简化模型的  $k$  值范围在  $[0, 6]$  之间, 这样参数大大减少, 模型得到了简化, 更易于控制.

## 3 自适应迭代学习控制系统

为了说明所建模型的可控性和实用性, 下面定性地分析匹配于模型的自适应迭代学习系统实现过程.

式 (14) 描述了机器海豚输入变量  $\omega(t_i)$ 、 $\theta_{\max}(t_i)$  与输出变量  $V$  之间的数学关系. 自适应迭代学习控制可实现对其参数  $k$  的自适应辨识, 并依据  $k$  值得到控制输入规律. 现以  $\omega(t_i)$  为变量,  $\theta_{\max}(t_i)$  为确定量来探讨 SISO 离散系统的控制实现问题.

### 3.1 控制器设计

系统实现按如下步骤执行.

**Step 1:** 机器海豚放入新水体环境后, 输入任意  $\omega(t_0)$  达到稳定速度后辨识出初始值  $k(0)$ ;

**Step 2:** 以初始值  $k(0)$  为参考, 依据数学模型和目标输出, 计算输入初始值  $\omega(t_1)$ , 进行目标速度跟踪;

**Step 3:** 达到稳定速度后, 根据实测速度和跟踪误差, 依据参数  $k$  自适应律调节并存储当前的  $k(1)$  值, 并作为新的参考值, 同时依据学习控制律调节出新的输入  $\omega(t_2)$ ;

**Step 4:** 依据调节后的输入  $\omega(t_2)$  值, 进行目标速度再跟踪, 比较得到跟踪误差, 依据参数自适应律调节当前  $k(2)$ , 依据学习律调节新的输入  $\omega(t_3)$ ;

**Step 5:** 如此循环, 直到速度跟踪误差趋近于 0, 完成准确辨识和控制.

以式 (14) 描述的基于摆动频率控制的模型方程为例, 其迭代域可表示为

$$\begin{cases} V^2(n) = \theta_{\max}^2 \omega^2(n) \left( 131L^2 + \frac{11}{6}L \right) \frac{m}{M} k(n), \\ V(n) \geq 0. \end{cases} \quad (15)$$

式 (15) 可简化为如下形式:

$$y(n) = \theta_{\max} A \sqrt{k(n)} u(n). \quad (16)$$

其中

$$\begin{cases} y(n) = V(n), \\ A = \sqrt{\left( 131L^2 + \frac{11}{6}L \right) \frac{m}{M}}, \\ u(n) = \omega(n). \end{cases} \quad (17)$$

在一个迭代周期内, 输入信号始终保持不变, 所以只在迭代域内讨论迭代性能变化, 而不在时间域内对一个迭代周期内的某一个离散时刻进行讨论.

对于该模型, 设计控制系统如图 3 所示.

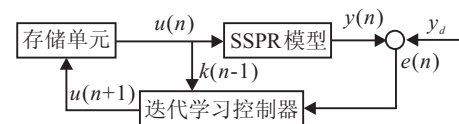


图 3 迭代学习控制系统

误差方程如下:

$$e(n) = y(n) - y_d. \quad (18)$$

其中:  $y(n)$  为实际输出量,  $y_d$  为目标量.

设计控制律和参数迭代学习律分别如下:

$$u(n+1) = y_d / (\theta_{\max} A \sqrt{k(n)}), \quad (19)$$

$$k(n) = k(n-1) + Qe(n), \quad (20)$$

其中  $Q$  为参数学习增益.

### 3.2 初值问题

1) 选定  $\omega(n)$  为输入变量、 $\theta_{\max}$  为确定量进行探讨, 对于三关节推进系统,  $\theta_{\max}$  值可以在  $0^\circ \sim 30^\circ$  之

间任意选定.

2) 式(16)中  $k(n)$  和式(13)中  $k_i$  代表不同的运动情形中对应的转换系数, 前者描述的是一个完整加速周期的总转化率, 后者描述的是在这个完整加速周期内第  $i$  次摆动动作的转化率. 在同一个水体环境中,  $k(0)$  只需给定一次, 其值可以自测试获得, 也可任意给定. 所不同的是, 初值误差越小, 系统的学习速度越快.

3) 初始值  $u(n)$  依据  $k(0)$  和控制目标来确定.

### 3.3 收敛性分析

**定理 1** 在系统(16)、控制律(19)和参数学习律(20)组成的闭环系统中, 具有如下特性:

- 1) 系统中所有参数和信号有界;
- 2) 在迭代域中, 当迭代次数趋近于无穷大时, 系统误差趋近于零, 即

$$\lim_{k \rightarrow \infty} e(n) = 0, n = 1, 2, \dots \quad (21)$$

**证明** 1) 因为输入任意  $u(0)$  和其对应输出  $y(0)$  都为确定值, 所以初始值  $k(0)$  为一个有界参考值. 根据系统定义,  $k(n)$  为运动周期总转化率, 其值只能为单次摆动转化率的若干倍数, 单次转化率在  $[0, 1]$  之间, 故  $k(n)$  有界.

输入控制信号  $u(1) = y_d/k(0)$  为参考初值, 对于控制律  $u(n+1) = y_d/k(n)$ , 因增益  $Q$  可设计学习, 使得  $u(n+1)$  单向趋近于真实值, 故其界在于初值与真实值之间. 同理, 由输入输出的对应关系, 可得出输出信号有界.

2) 令迭代学习  $k(n)$  值调整比例函数为

$$L(n) = \frac{k(n)}{k(n-1)}, n = 1, 2, \dots \quad (22)$$

当  $e(n) > 0$  时, 输出值  $y(n)$  偏大, 反推出控制输入  $u(n)$  偏大, 故  $k(n-1)$  偏小. 令  $k_0$  为转化率真值, 分别给出  $n$  和  $n+1$  次迭代误差方程

$$e(n) = y(n) - y_d, \quad (23)$$

$$e(n+1) = y(n+1) - y_d. \quad (24)$$

第  $n$  和  $n+1$  次实际输出为

$$y(n) = \frac{y_d \sqrt{k_0}}{\sqrt{k(n-1)}}, \quad (25)$$

$$y(n+1) = \frac{y_d \sqrt{k_0}}{\sqrt{k(n)}}. \quad (26)$$

所以有

$$e(n) = \frac{\sqrt{k_0} y_d}{\sqrt{k(n-1)}} - y_d, \quad (27)$$

$$e(n+1) = \frac{\sqrt{k_0} y_d}{\sqrt{k(n)}} - y_d, \quad (28)$$

$$e(n+1) - e(n) = \frac{\sqrt{k_0} y_d}{\sqrt{k(n)}} - \frac{\sqrt{k_0} y_d}{\sqrt{k(n-1)}}. \quad (29)$$

将式(22)代入(29), 可得到

$$e(n+1) - e(n) = \frac{1 - \sqrt{L(n)}}{\sqrt{k(n)}} \sqrt{k_0} y_d. \quad (30)$$

当  $L(n) > 1$  时, 有  $e(n+1) < e(n)$ . 只要设计合适的参数自适应学习律  $Q$ , 保证  $k(n)$  单调递增, 即  $L(n) > 1$ , 便可保证误差单调递减. 同时, 合适的  $Q$  可控制误差收敛速度. 又因为  $e(n) > 0$  且有界, 故根据区间套定理, 有下式成立:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} e(n) = 0, n = 1, 2, \dots \quad (31)$$

同理, 当  $e(n) < 0$  时, 可推出相同结论. 所以, 只要设计相应的参数自适应学习律, 保证  $L(n) > 1$ , 即可保证系统的收敛性.  $\square$

## 4 SSPR 模型与控制系统仿真分析

### 4.1 参数 $k$ 和模型的验证

根据机器海豚的固有物理特点, 将简化模型(15)中参数设定为:  $m = 1 \text{ kg}$ ,  $M = 10 \text{ kg}$ ,  $L = 0.1 \text{ m}$ . 设  $\theta_{\max} = 18^\circ$ , 得到  $k = 1.5$  时  $\omega(t_i)$  与  $V$  的关系曲线(见图4).

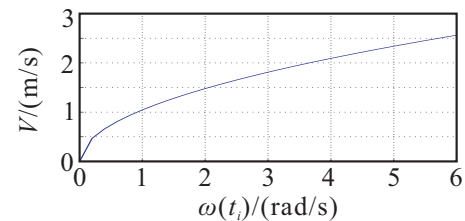


图4  $\omega(t_i)$  和  $V$  的变化曲线

从图4可看出, 当  $k = 1.5$ , 即在多次摆动累积 1.5 倍的单周期舵机动能转化为鱼体动能情况下, 鱼尾舵机摆动角速度从 0 上升到  $6\pi \text{ rad/s}$ , 即摆动频率上升到 3 次/s 时, 机器海豚总体推进速度从 0 上升至约 2.6 m/s 左右, 符合鱼体游动状况. 选择合适的  $k$  值, 可得到相应的推进速度, 当鱼体固有特点和水环境基本确定后,  $k$  值基本限定在一个较小的范围内.

### 4.2 控制系统分析

对于由式(16)、(19)和(20)组成的系统, 指定参数  $m = 1 \text{ kg}$ ,  $M = 10 \text{ kg}$ ,  $L = 0.1 \text{ m}$ ,  $k = 2.25$ ,  $k(0) = 1.69$ ,  $y_d = 1 \text{ m/s}$ , 其中  $k$  为机器海豚在该水环境中的实际总转化率. 设计参数学习增益函数为

$$Q = \frac{4k(n-1)}{5y_d}. \quad (32)$$

如图5所示, 当  $n = 10$  且总转化率  $k$  值从 1.69 逐次迭代增加到 2.25 时, 相应的输入信号  $u(n)$  从最大值 6.34 rad/s 逐步下降到 5.49 rad/s, 这是一个稳定状态下的输入值. 输出误差  $e(n)$  从开始的约 0.1545 m/s 逐次下降, 其初始误差约占目标值的 15.45%, 直到第 10 次迭代完成, 误差基本收敛于 0. 仿真结果表明, SSPR 参考模型可被有效控制, 相应的控制系统可完成对机器海豚的速度调节. 合适的参数自适应学习律和控制

律可实现运动速度的高精度调节与控制。

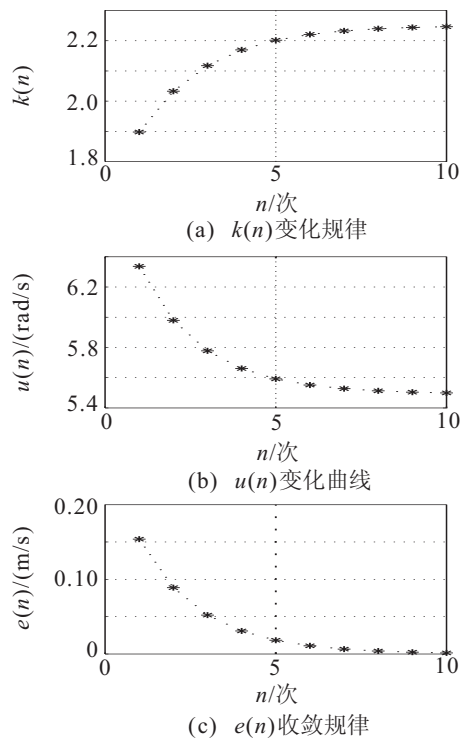


图5 控制系统性能变化情况

## 5 结论

针对中大型机器海豚大距离长时间游动的应用需要, 本文从机器海豚推进速度的角度提出并建立了基于能量转换系数的含不确定参数运动学SSPR模型. 该模型避免了从水动力学角度分析推导动力模型的复杂过程和复杂的模型方程, 并解决了模型失真过大的问题. 基于能量转换系数的推进模型能准确地描述机器海豚大距离游动时的运动特性. SSPR模型中能量转换系数的引入, 使得机器鱼推进系统控制成为典型的自适应迭代学习控制问题, 也是一类参数自适应技术问题. 模型中的已知参数将 $k(n)$ 约束到一个接近真实值的有限范围, 在控制系统中不断修正和更新使得控制系统误差趋近于0, 便完成了机器鱼对新环境的识别和自适应.

该模型与控制匹配设计的方法开辟了中大型机器鱼长距离运动及控制的一条新途径, 控制问题的具体实现将是下一步详细探讨的任务.

## 参考文献(References)

[1] Wu T Y T. Swimming of a waving plate[J]. J of Fluid Mechanics, 1961, 10(3): 321-344.  
 [2] Lighthill M J. Aquatic animal propulsion of high hydromechanical efficiency[J]. J of Fluid Mechanics, 1970, 44(2): 265-301.  
 [3] Chopra M G, Kambe T. Hydromechanics of lunate-tail swimming propulsion, Part 2[J]. J of Fluid Mechanics, 1977, 79(1): 49-69.

[4] 童秉纲. 鱼类波状游动的推进机制[J]. 力学与实践, 2000(3): 69-73.  
 (Tong B G. Propulsion mechanism of fish wave swimming[J]. Mechanics in Engineering, 2000(3): 69-73.)  
 [5] 梁建宏, 王田苗, 魏洪兴. 水下仿生机器鱼的研究进展 I——鱼类推进机理[J]. 机器人, 2002, 24(2): 107-111.  
 (Liang J H, Wang T M, Wei H X. Research and development of underwater robofish I—Development of a small experimental robofish[J]. Robot, 2002, 24(2): 107-111.)  
 [6] Fish F E, Rohr J J. Review of dolphin hydrodynamics and swimming performance[R]. Navy: United State Navy, 1999.  
 [7] 沈飞, 曹志强. 基于 Kane 方法的机器海豚动力学建模及速度优化方法[J]. 自动化学报, 2012, 38(8): 1247-1256.  
 (Shen F, Cao Z Q. A dynamic model of robotic dolphin based on kane method and its speed optimization method[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(8): 1247-1256.)  
 [8] 王飞, 王庆林, 王震宇, 等. 仿生机器鱼巡游性能分析与实验[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(1): 75-79.  
 (Wang F, Wang Q L, Wang Z Y, et al. Cruising performance analysis and experiments of biomimetic robotic fish[J]. J of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(1): 75-79.)  
 [9] 李志成. 仿生机器鱼建模与软硬件实现的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学航天学院, 2009: 22-39.  
 (Li Z C. The software and hardware design and dynamic research on the robot fish[J]. Harbin: School of Astronautics of Harbin Institute of Technology, 2009: 22-39.)  
 [10] 张毅, 付文勇, 刘洪昌, 等. 三关节机器鱼的尾部动力学建模与仿真[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2008, 20(5): 603-609.  
 (Zhang Y, Fu W Y, Liu H C, et al. Tail fin dynamic mode building and simulation of three-joint robotic fish[J]. J of Chongqing University of Post and Telecommunications: Natural Science Edition, 2008, 20(5): 603-609.)  
 [11] 何熊熊, 秦贞华, 张端. 存在环境约束的机器人自适应迭代学习控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(8): 1038-1042.  
 (He X X, Qin Z H, Zhang D. Adaptive iterative learning control of robot manipulators in the presence of environmental constraint[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(8): 1038-1042.)  
 [12] 吴玉香, 杨梅, 王聪. 从机器人输出反馈自适应神经网络控制中学习[J]. 控制与决策, 2012, 27(11): 1740-1745.  
 (Wu Y X, Yang M, Wang C. Learning from output feedback adaptive neural control of robot[J]. Control and Decision, 2012, 27(11): 1740-1745.)

(责任编辑: 孙艺红)