仿生机器鱼尾鳍拍动的控制算法

王田苗 马文凯 梁建宏

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 两关节尾鳍拍动控制是一个在高速、大载荷下的运动控制问题,它要求同时保证速度和位置波形失真都比较小. 论证了尾鳍拍动推进方式与鱼体波动推进方式的一致性,根据尾鳍拍动的运动规律导出了用于拍动控制的数学模型. 基于 SPC-III 机器鱼硬件平台,在主臂控制上,提出了根据摆角位置解算转速,并结合时间与摆角位置关系进行速度补偿的算法;在小臂控制上,提出了根据两关节摆角位置的关系及程序循环周期解算小臂目标位置的跟随算法. 对高频拍动的实现进行了探讨. 在试验中对尾鳍拍动的跟随性进行了验证.

关 键 词: 仿生机器鱼; 运动控制; 尾鳍; 拍动

中图分类号: TP 24

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)10-1157-06

Control of tail fin flaping of robofish

Wang Tianmiao Ma Wenkai Liang Jianhong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Flipping control of the tail fin with two degrees is a problem of motion control in the condition of high speed and heavy load. It demands that there be little distortion of transformation of speed and position synchronously. The sameness between propulsion by tail fin flipping and that by undulation of fish body was verified, and a math model used for flipping control was deduced according to the rule of tail fin flipping. Based on the SPC-III robot fish, in terms of the control of the main joint, the algorithm, which computes the rotational speed according to its angle position and adds compensative speed via combining the relation of its position and the time variable, was put forward. In terms of the control of the assistant joint, the following algorithm, which computes the assistant joint's target position according to the relation of the two joints' position and the cycle period of the program, was put forward. The achievement of high-frequency flipping was discussed. During the experimentation, the following performance of tail fin flipping was validated.

Key words: bionic robot fish; motion control; tail fin; flipping

水中动物的游动方式中,普遍的一类是摆尾式,如海豚和鲨鱼等. 摆动式游动的特点是躯体前部几乎不动,仅摆动躯体尾部和一个大展弦比的尾鳍来获得推力和机动控制力. 这种游动方式的阻力很小、效率很高. 国内外许多研究机构正在开展仿生机器鱼尾鳍的推进作用研究,借以提高水下航行器的效率. 1994 年,美国麻省理工学院 M. Triantafyllou 等人研制出长 1.24 m 的世界上第 1 条仿生机器鱼“Robo Tuna”,后来又研制了长 0.81 m的梭鱼“Robo Pike”,可模拟鱼的加速、转弯功能[1-3]. 2001 年,K A. Morgansen 等人提出了一种根据鲹科鱼类的机器鱼简单模型的非线性控制方法,能够产生前向推力和调节步态[4]. 不过,上述 2 个模型都没有解决尾鳍拍动过程中的运动失真问题.

两关节尾鳍拍动控制是一个在高速、大载荷下的仿生运动控制问题,与传统运动控制系统相比,它不要求速度或位置控制有极高的精度,而是

收稿日期: 2006-05-18

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(373282)

作者简介: 王田苗(1960-), 男, 湖北武汉人, wtm _ itm@263. net.

要求在电机满负载的情况下速度和位置波形失真较小,提高拍动的稳定性,这也是实现高效推进所必需的. 北京航空航天大学自1999年开始对鱼类的推进机理进行研究,研发了SPC系列仿生机器鱼硬件平台,并在工程应用方面进行了试验探索. SPC系列仿生机器鱼采用直流伺服电机驱动的两关节尾鳍推进器,两关节的协调运动通过运动控制实现. 本文将在SPC-III机器鱼硬件平台的基础上,展开对尾鳍拍动控制的研究.

1 拍动算法的基本原理

1.1 波动与拍动方式的一致性

一般认为,鱼体运动时脊椎曲线[3,5]可描述为

$$y = A(x) \cdot \sin(2\pi t/T + 2\pi x/\lambda)$$
$$x \in (0, L) \tag{1}$$

式中,t 为时间;λ 为波长;T 为波动的周期;L 为鱼体摆动部分长度;$A(x)$ 为游动中鱼体的摆幅在 x 方向上的函数,为简单起见,可以取 $A(x) = ax$,其中 a 为常数. 鱼体运动时的脊椎曲线如图1所示.

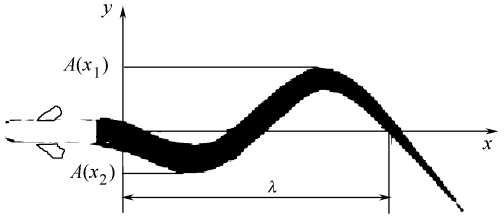


图1 鱼体脊椎曲线坐标定义

但人们在研究海豚、鲨鱼等依靠大展弦比尾鳍拍动实现推进的运动方式时,常使用如下的拍动方程:

$$\left.\begin{aligned} y(t) &= A_y \sin(2\pi f t) \\ \theta(t) &= \theta_0 \sin(2\pi f t - \phi) \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

如图2所示,其中,$y(t)$ 是为尾鳍在 t 时刻沿 y 方向的振荡位移,$\theta(t)$ 是尾鳍在 t 时刻绕 OO' 轴

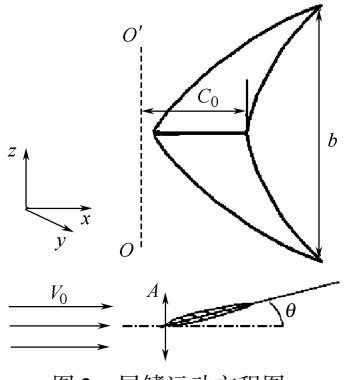


图2 尾鳍运动方程图

的转角. A_y,θ_0 分别是拍动位移幅度和转动的角幅度,f 是尾鳍的拍动频率,Φ 是相位差.

下面证明2种运动方式的一致性.

将式(1)对 x 求导可得

$$\dot{y} = a \cdot \sin(2\pi t/T + 2\pi x/\lambda) + 2a\pi x \cdot \cos(2\pi t/T + 2\pi x/\lambda)/\lambda = \sqrt{a^2 + 4a^2\pi^2 x^2/\lambda^2}\sin(2\pi t/T + 2\pi x/\lambda + \psi) \tag{3}$$

其中

$$\psi = \arctan(2\pi x/\lambda)$$

对式(1)脊椎曲线进行关节离散,如图3所示,图中离散的关节数为6,分别为 L_1,L_2,L_3,L_4,L_5,L_6.

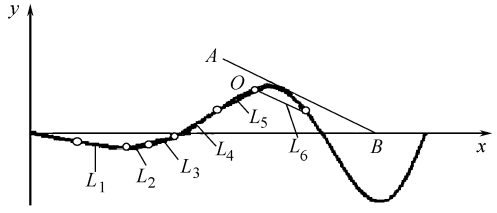


图3 脊椎曲线的关节离散

在研究海豚、鲨鱼等依靠大展弦比尾鳍拍动实现推进的运动方式时,不妨假设最后一个关节 L_6 就是尾鳍,在脊椎曲线比较平缓的情况下,L_6 上 O 点的 x 坐标近似为固定值,设为 x_0,则 O 点的 y 坐标为

$$y_0 = ax_0 \cdot \sin(2\pi t/T + 2\pi x_0/\lambda) \tag{4}$$

而 L_6 必然与 O 点以后的某一点的切线 AB 平行,设该点相对于 x_0 的坐标增量为 Δx,则该切线 AB 的斜率为

$$\theta = \dot{y}(x_0 + \Delta x) = \sqrt{a^2 + 4a^2\pi^2(x_0 + \Delta x)^2/\lambda^2} \times \sin(2\pi t/T + 2\pi(x_0 + \Delta x)/\lambda + \psi) \tag{5}$$

从而尾鳍的拍动方程为

$$\left.\begin{aligned} y(t) &= ax_0 \cdot \sin(2\pi(t + Tx_0/\lambda)/T) \\ \theta(t) &= \sqrt{a^2 + 4a^2\pi^2(x_0 + \Delta x)^2/\lambda^2} \times \\ &\sin(2\pi(t + Tx_0/\lambda)/T + 2\pi \cdot \Delta x/\lambda + \psi) \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

式中,x_0 和 Δx 均为常量,故令

$$A_y = ax_0$$
$$\theta_0 = \sqrt{a^2 + 4a^2\pi^2(x_0 + \Delta x)^2/\lambda^2}$$
$$f = 1/T$$
$$\phi = -(2\pi \cdot \Delta x/\lambda + \psi)$$

并用 t 替换式(6)中的 $(t + Tx_0/\lambda)$,可得

$$\left.\begin{aligned} y(t) &= A_y \sin(2\pi f t) \\ \theta(t) &= \theta_0 \sin(2\pi f t - \phi) \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

以上证明了 2 种运动方式的一致性. 考虑到实际应用中水下航行器对机构及控制的高效性、简易性、灵活性的要求,本文采用式(2)展开对仿鱼推进的研究.

1.2　两关节尾鳍机构及控制方程

图 4 所示为本文所采用的尾鳍推进机构,在这个机构中尾鳍的摆幅就是图 4 中节点 A 在 y 方向的位移 $y(t)$,但在运动控制中,需要给出的是主臂的摆角 θ_1,因此需要一个转换计算. 设 L_b 表示主臂的长度,于是有

$$y(t) = L_b \sin\theta_1(t) \tag{8}$$

结合式(7),可得

$$\theta_1(t) = \arcsin\left(\frac{A_y}{L_b}\sin(2\pi ft)\right) \tag{9}$$

在主臂摆动幅度较小时,式(9)可简化为

$$\theta_1(t) = \arcsin\left(\frac{A_y}{L_b}\right)\sin(2\pi ft) \tag{10}$$

$$A_1 = \arcsin\left(\frac{A_y}{L_b}\right)$$

则

$$\theta_1(t) = A_1 \sin(2\pi ft) \tag{11}$$

由图 4 可以看出,小臂的角位移 $\theta_2(t)$ 与尾鳍的攻角 $\theta(t)$ 相等,因此主臂及小臂的摆角位置变化规律为

$$\theta_1(t) = A_1 \sin 2\pi ft \tag{12}$$

$$\theta_2(t) = A_2 \sin(2\pi ft - \varphi) \tag{13}$$

式中,f 是拍动频率;t 为时间变量;A_1 是在特定频率 f 下主臂摆幅;A_2 是在特定频率 f 下小臂摆幅;φ 为主臂和小臂间的相位差 .

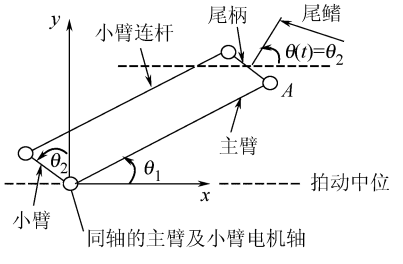


图 4　尾鳍推进机构

对控制系统的要求是:

1) 保证主臂和小臂各自的运动波形失真较小;

2) 保证主臂和小臂间的相位差,使尾鳍对来流产生合适的攻角.

由于双环控制的需要,必须首先完成速度闭环,因此式(12)和式(13)不能直接用于控制算法中.

将式(12)和式(13)对时间 t 求导可导出主臂和小臂转速与时间变量 t 关系式:

$$n_1(t) = \theta_1(t)' = A_1 2\pi f\cos(2\pi ft) \tag{14}$$

$$n_2(t) = \theta_2(t)' = A_2 2\pi f\cos(2\pi ft - \varphi) \tag{15}$$

由式(13)可得

$$\theta_2 = A_2(\sin(2\pi ft)\cos\varphi - \cos(2\pi ft)\sin\varphi) \tag{16}$$

将式(12)和式(14)代入式(16),得

$$\theta_2 = \frac{A_2}{A_1}\left(\theta_1\cos\varphi - \frac{n_1}{2\pi f}\sin\varphi\right) \tag{17}$$

同时由式(12) ~式(15)可导出 n_1 与 θ_1,n_2 与 θ_2 的关系:

$$n_1 = 2\pi f\sqrt{A_1^2 - \theta_1^2} \tag{18}$$

$$n_2 = 2\pi f\sqrt{A_2^2 - \theta_2^2} \tag{19}$$

式(18)建立了主臂转速和摆角的关系,可使用该式实现大臂的往复拍动;为了保证尾鳍拍动时对水流的攻角,小臂摆动与大臂摆动的相位关系的稳定就显得至关重要,通过式(17)正是建立了小臂与主臂间的摆角位置关系,在算法上使小臂处于位置闭环的状态将有效保证攻角的正确存在,这是提高推进效率的关键之一[3].

2　控制算法实现

所研究的仿生机器鱼推进系统是一个两轴直流伺服电机系统,它的控制对象分别是主臂电机和小臂电机的摆角位置及速度. 摆动推进系统是以主臂和小臂两者的协调运动产生两关节的相对运动,从而使尾鳍拍动时对来流产生合适的攻角,并通过两关节相对运动相位差的调整实现有效的推进. 控制算法主要分为 2 部分:主臂拍动算法和小臂跟随拍动算法.

2.1　主臂拍动算法

1) 时间-速度算法

直接利用式(14)主臂电机转速与时间的关系可以保证拍动频率的稳定及速度曲线的光顺,但缺点是位置环没有保证,受外界负载变化及电机本身特性的影响会使位置曲线失真,产生摆角不对称的拍动.

2) 位置-速度算法

读取主臂所处的摆角位置,根据式(18)实时解算设定电机转速值. 采用这种控制方法可以保证位相的正确,但在试验中发现,机器鱼在陆地空载时的拍动频率与在水中游动时拍动频率相比有明显不同,受负载变化的影响很大. 由于没有直接建立主臂电机转速与时间的关系,而是利用了主臂转速与摆角间的关系,使得尾鳍有较大负载时,拍动速度会受到影响,摆角出现滞后,导致拍动频

率产生变化. 调整 PID 参数,可以起到一定的调节作用,但并不能解决上述问题.

3) 速度补偿算法

显然,孤立地利用主臂转速与摆角或主臂转速与时间的关系都不能取得满意的效果,采用一种新的将主臂转速与摆角的关系、主臂位置与时间的关系融合在一起的算法将是一个可行的选择. 具体来说,首先依据主臂当前的位置 θ_{1c} 解算应设定的电机转速:

$$n_{1s} = 2\pi f\sqrt{A_1^2 - \theta_{1c}^2} \tag{20}$$

同时根据主臂位置与时间的关系解算该时刻主臂应处位置

$$\theta_{1s} = A_1 \sin 2\pi ft \tag{21}$$

则主臂当前的位置到主臂应处位置的摆角位移为

$$\Delta\theta_1 = \theta_{1s} - \theta_{1c} = A_1 \sin 2\pi ft - \theta_{1c} \tag{22}$$

设程序的循环周期为 T,则主臂转速增量为

$$\Delta n_1 = \Delta\theta_1 / T = (A_1 \sin 2\pi ft - \theta_{1c})/T \tag{23}$$

综合时间和摆角的因素,应设定的主臂电机转速为

$$n_{1_set} = n_{1s} + \Delta n_1 = 2\pi f\sqrt{A_1^2 - \theta_{1c}^2} + (A_1 \sin 2\pi ft - \theta_{1c})/T \tag{24}$$

所构成控制框架如图 5 所示.

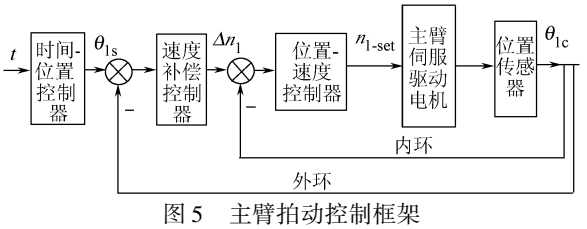


图 5 主臂拍动控制框架

2.2 小臂跟随拍动算法

较简单的一种控制算法是根据主臂当前的位置利用式(17)直接解算小臂当前应到达位置,实验证明该算法在低频拍动时效果较好,但随着拍频的增大,主臂与小臂间的相位差也会变大. 导致这种现象的原因可以说是算法使然:由于是依据主臂当前位置解算,小臂相对于大臂的位置始终滞后,落后一个程序循环周期.

采用一种超前算法可以解决上述问题:设程序运行周期为 T,读取主臂当前摆角位置,存在变量 θ_{1c} 中,解算出此时应设转速值 n_{1_set},由此可推算出大臂经过时间 T 后大臂所处摆角位置 θ_{1d}:

$$\theta_{1d} = \theta_{1c} + n_{1_set} \times T \tag{25}$$

式(25)实际上没有考虑电机的加速减速过程,在此使用该简化式.

根据 θ_2 与 θ_1 的关系式(17)可算出经过时间 T 后小臂所处摆角位置 θ_{2d}:

$$\theta_{2d} = \frac{A_2}{A_1}\left(\theta_{1d} \times \cos\varphi - \frac{n_{1_set}}{2\pi f} \times \sin\varphi\right) \tag{26}$$

读取小臂当前摆角位置,存在 θ_{2c} 中,那么小臂在 T 时间内应走的转角为

$$\Delta\theta_2 = \theta_{2d} - \theta_{2c} \tag{27}$$

小臂在这段 T 时间的速度为

$$n_2 = \frac{\Delta\theta_2}{T} \tag{28}$$

将式(25)~式(27)代入式(28)得

$$n_2 = \frac{\theta_{2d} - \theta_{2c}}{T} = \frac{A_2(\theta_{1c} + n_{1_set} \times T)\cos\varphi}{A_1 T} - \frac{A_2 n_{1_set} \sin\varphi/(2\pi f)}{A_1 T} - \frac{\theta_{2c}}{T} \tag{29}$$

在实际程序中,小臂工作在增加式位置闭环模式,因此小臂在摆角位置上能与主臂保持稳定的相位差,同时,由于在增加式位置闭环模式中可不断更改目标位置,速度曲线是在现有基础上重新解算,因此小臂的速度不会出现剧烈的波动,所构成的控制框架如图 6 所示.

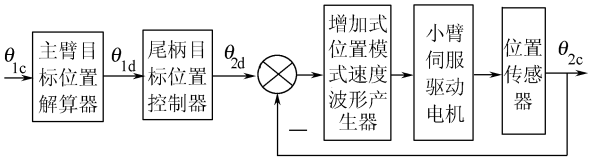


图 6 小臂拍动控制框架

3 高频拍动实现的探讨

影响拍动频率提高的因素有很多,控制上包括程序的循环周期、运动参数的调节等,硬件上包括运动控制卡、电机及驱动器的电气特性、减速器减速比的大小、各部分的工作状态、拍动部分的惯量等等. 本文主要分析控制上对拍动频率的影响.

经过测试,程序的循环周期为 20 ms,那么这意味着什么呢? 当拍动频率为 $f = 0.25$ Hz 时,一个拍动周期内,程序运行的次数为

$$n_s = 1/(f \times T) = 1/(0.25 \times 0.02) = 200 \tag{30}$$

即每个拍动周期内主臂的速度及小臂的位置被设置 200 次,认为这可以接受,尽管波形有些失真. 当拍动频率达到 $f = 2.5$ Hz 时,一个拍动周期内,程序运行的次数为

$$n_s = 1/(f \times T) = 1/(2.5 \times 0.02) = 20 \tag{31}$$

即一个拍动周期内主臂的速度及小臂的位置仅能被设置 20 次,显然此时波形已严重失真,主臂与小臂的相位差更是无法保证. 由此可见,基于这种

伺服控制方式,实现高频拍动就要缩短程序的循环周期.

分析前述的控制算法,发现其中有很多实时的浮点运算过程,这会占用运动控制器大量的运行时间. 采用查表过程代替部分的浮点运算. 可使运算过程简化:在保持一定精度的前提下,建立主臂位置与对应速度、主臂位置与对应时间的数表,用于设置主臂转速;建立角度 ψ 与 $\sin\psi$、ψ 与 $\cos\psi$ 关系的数表,解算小臂参量时用. 在随后的测试中证实程序的循环周期大幅减小,拍动频率得到提高,但也是有限度的. 要使拍动频率进一步提高,就必须摆脱程序循环周期对它的束缚.

通过机械机构实现运动规律是一个可供参考的选择,国内外进行这方面研究的单位也有很多. 如日本运输省船舶技术研究所在 2001 年设计的机器鱼实验平台 UPF2001[6],它的推进装置如图 7 所示,减速电机带动曲柄滑块机构产生符合正弦摆动的前后往复运动,往复运动的连杆再带动连杆机构驱动尾鳍,使尾鳍攻角摆动,同时通过一块"V"形铁带动尾柄间歇的产生主拍动. 这一摆动结构使用连杆机构实现两关节的传动和协调,只用一个电机驱动,因此容易实现高的拍动频率,控制上也很简单,但缺点是关联的机械结构占用了很大的空间和排水量,同时限制了运动规律的变化,对水流的适应性变差,并且不能实现转向.

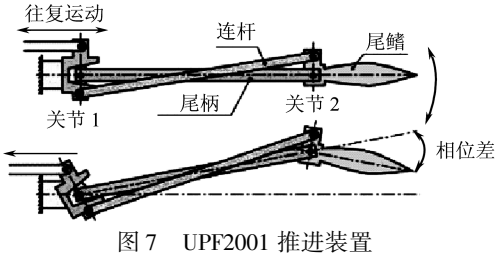


图 7　UPF2001 推进装置

通过硬件逻辑实现算法是一个新的方向. 原来在现场可编程门阵列(FPGA)中实现包含复杂的浮点运算的算法是很困难的,但近年来随着集成电路工艺水平的不断提高,以及体系结构方面的发展,FPGA 的容量、速度、资源都有了很大的提高,已经能够满足一般算法的要求. 采用这种方法可以极大地提高算法的响应速度,同时能够保持控制上的灵活性,按照需要实现运动规律的变化.

4　试验测试

设计的尾鳍拍动控制算法在 SPC-III 仿生机器鱼系统中得到了应用. SPC-III 仿生机器鱼是北京航空航天大学机器人研究所研制的 SPC 系列第 3 代机器鱼,如图 8 所示.

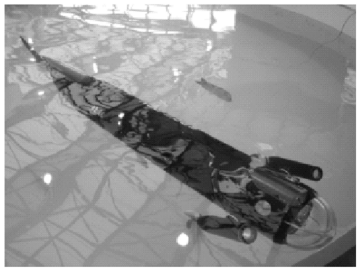


图 8　SPC-III 机器鱼

为了验证控制算法的性能进行了试验测试. 使尾鳍在加载的情况下拍动,拍动频率分别为 0.25 Hz,0.5 Hz,1 Hz,1.5 Hz,2 Hz,主臂及小臂摆动振幅都为 23°,两者相位差为 60°. 绘得了主臂及小臂摆角与时间的关系曲线. 见图 9 ~ 图 13.

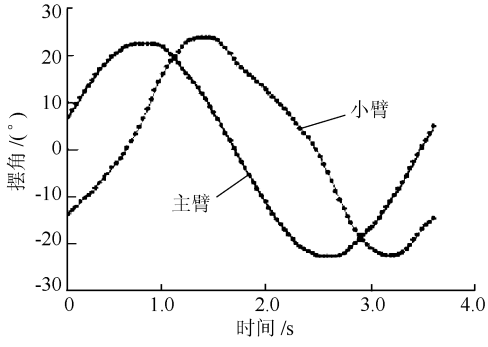


图 9　摆角与时间的关系曲线(f=0.25 Hz)

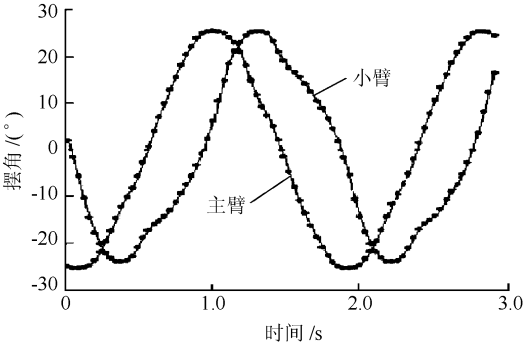


图 10　摆角与时间的关系曲线(f=0.5 Hz)

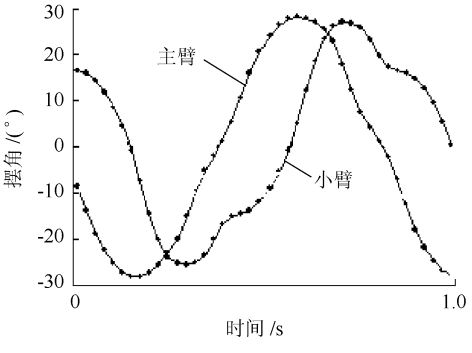


图 11　摆角与时间的关系曲线(f=1.0 Hz)

可以看出:①由图 9 和图 10 知,尾鳍在低频拍动(f=0.25 Hz,f=0.5 Hz)时比较稳定,主臂与

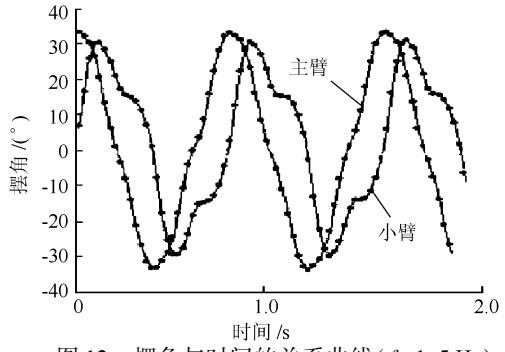


图 12 摆角与时间的关系曲线(f=1.5 Hz)

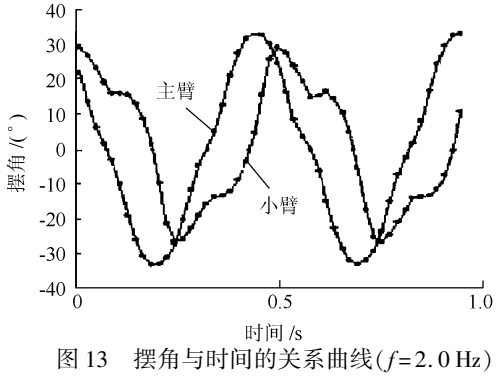


图 13 摆角与时间的关系曲线(f=2.0 Hz)

小臂间保持稳定的相位差;②由图 11 知,当频率增至 1 Hz 时,主臂与小臂间相位差基本稳定,但主臂与小臂的摆幅变大;③由图 12 和图 13 知,随着拍动频率的增加,拍动曲线失真现象更加严重,主臂摆动振幅明显变大,小臂与大臂间的相位差不稳定,在主臂摆角超出规定摆幅区域,小臂明显没有跟住大臂;④随着拍动频率的增加,每个拍动周期内的采样点成倍减少,在一定程度上会对曲线的走向产生影响,影响分析的结果.

5 结束语

通过分析尾鳍的拍动规律,得出了尾鳍拍动控制的数学模型,提出了"位置-速度+基于时间的速度补偿"的主臂控制算法和"两关节位置关系-目标位置+预测补偿"的小臂位置跟随控制算法,提高了尾鳍拍动的稳定性. 由于硬件及机构的限制,使得控制上不能摆脱程序循环周期的束缚.

参考文献 (References)

[1] Triantafyllou M S, Barrett D S, Yue D K P. A new paradigm of propulsion and maneuvering for marine vehicles[J]. Trans Soc Naval Architects Marine Eng, 1996, 104: 81-100

[2] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S. An efficient swimming machine [J]. Scientific American, 1995, 272:64-70

[3] Barrett D S, Triantafyllou M S, Yue D K P, et al. Drag reduction in fishlike locomotion[J]. Journal of Fluids Mechanics, 1999, 392: 183-212

[4] Morgansen K A. Nonlinear control methods for planar carangiform robot fish locomotion[C]// Proc 2001 IEEE International Conference on Robotic & Automation. New York: IEEE Press, 2001:523-528

[5] 梁建宏,王田苗,魏洪兴. 水下仿生机器鱼的研究进展 I——鱼类波动推进机理[J]. 机器人,2002,24(2):107-111
Liang Jianhong, Wang Tianmiao, Wei Hongxing. Research and development of underwater robofish-development of a small experimental robofish[J]. Journal of Robot, 2002, 24(2): 107-111(in Chinese)

[6] 杨海峰,李奇,姬伟 . 高精度伺服稳定跟踪平台数字控制器研制[J]. 东南大学学报(自然科学版),2004,34:96-100
Yang Haifeng, Li Qi, Ji Wei. Controller design for high accuracy digital servo stabilized tracking platform[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2004, 34:96-100(in Chinese)

[7] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002
Wang Xiaoming. Motor control based on MCU[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2002(in Chinese)