

doi: 10.7690/bgzdh.2014.12.019

机器鱼游动性能改善方法

孙琴, 武海健, 夏庆锋

(南京大学金陵学院机器人实验室, 南京 210089)

摘要: 为了提高机器鱼的推进速度和推进动力, 对机器鱼尾鳍的大小和形状进行改善。通过分析仿生机器鱼的波动方程得到尾鳍面积与推力的关系, 从鱼尾形状、鱼尾弧口深度、鱼尾大小、鱼尾软硬度 4 个方面出发, 依次采用 solidworks 设计了鱼尾形状, 根据 2 种软硬度下不同形状的游动速度, 得到最佳形状及软硬度, 在此最佳形状的基础上改变弧口深度, 并通过实体实验确定了最佳鱼尾大小方案。实验结果表明: 机器鱼的游动性能受鱼尾形状、大小、软硬度等多个因素共同影响, 使用较软材料的月牙形鱼尾对鱼游行较为有利。

关键词: 机器鱼; 游动性能; 鱼尾

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Robot Fish Swimming Performance Improve Methods

Sun Qin, Wu Haijian, Xia Qingfeng

(Laboratory of Robotics, Nanjing University Jinling College, Nanjing 210089, China)

Abstract: To improve the robot fish propulsion speed and propulsive force, change the size and shape of robot fish tail. Through analyzing fluctuation equation of bionics robot fish, acquire the relation of tail acreage and propulsive force, based on tail shape, arc-shaped end depth, size and hardness-softness, use solidworks to design tail shape, according to different swimming speed of different shapes under 2 hardness-softness conditions, acquire optimal shape and hardness-softness. Based on the optimal shape, change arc-shaped end depth, determine optimal tail size according to experiment. The experiment results show that the swimming performance is influenced by tail shape, size, hardness-softness and so on, use crescent tail made by soft material is good for swimming.

Keywords: robot fish; swimming performance; tail of the robotic fish

0 引言

国际水中机器人大赛是目前唯一一项完全由中国人自主创立并主导的国际机器人赛事, 是货真价实的“中国创造”。该项赛事以智能仿生机器鱼为主体, 在水中进行各种竞技、表演项目。因而, 机器鱼的游动性能在比赛中起到了关键作用。

自然界中, 不同种类的鱼类的尾鳍大小和形状各不相同, 导致其游动能力相差很大。而水球竞赛中, 为了提高竞技能力, 需要机器鱼获得较快的推进速度与较大推进动力。笔者对机器鱼尾鳍的大小和形状对游动性能的影响进行研究, 分别从理论计算和实验数据总结 2 个方面出发, 找寻最为合适的尾鳍的大小和形状, 从而使机器鱼获得较大的推进速度与推进动力。

1 相关的理论基础

1.1 仿生机器鱼的波动方程

鱼类在直线游动过程中, 会产生一个由鱼的后颈部向尾部传播的行波, 其波幅由前向后逐渐增大,

其参数由鱼的种类和水中的动力学特性决定^[1]。机器鱼的尾鳍并不能像鱼身可以进行大幅度的弯曲, 因此, 其波动方程也有所区别。所以笔者将机器鱼的波动情况分为鱼身(如图 1 中 OA 段)和尾鳍(如图 1 中 AB 段)2 方面进行讨论。

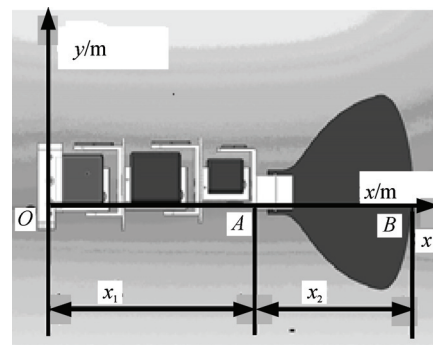


图 1 机器鱼波动方程分区示意图

鱼身波的波动方程如下式所示:

$$f_b(x, t) = (c_1x + c_2x^2) \sin(kx + \omega t) \quad (1)$$

式中: 原点位于鱼的头部和尾部的分界点(图 1 中的 O 点); $f_b(x, t)$ 是鱼在游动时产生垂直于机器

收稿日期: 2014-06-23; 修回日期: 2014-07-24

基金项目: 基于 CPG 模型的仿生机器鱼运动控制研究(201313646001Y)

作者简介: 孙琴(1993—), 女, 江苏人, 本科, 从事通信、机器人研究。

鱼身体的摆动幅度； x 是鱼体的长度； $k = 2\pi/\lambda$ 是产生的鱼体波的个数， λ 是鱼体波的波长； c_1 和 c_2 分别是鱼体波波幅包络线的一、二次项系数； ω 是鱼体波的频率 $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ ； t 表示时间。（文中选取的 $k = 13.6$ ， $c_1 = 0.2$ ， $c_2 = 0$ ， $T = 2s$ ）。

机器鱼的波动方程的仿真图如图 2 所示。下面按照尾鳍是否是刚体分 2 种情况进行讨论。如果机器鱼的尾鳍是刚体，则 AB 段波动方程为线性，斜率为 OA 段在 A 点的导数 k_{x1} ， k_{x1} 可由式 (2) 确定。

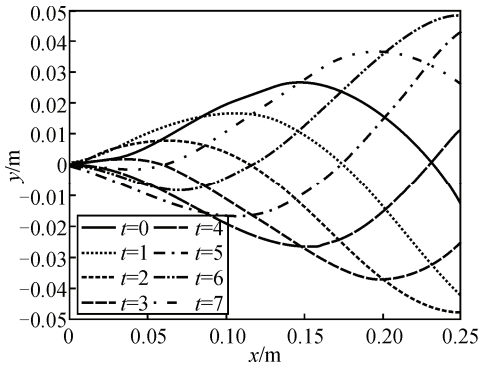


图 2 机器鱼的波动方程仿真

$$k_{x1} = (c_1 + 2c_2x_1) \sin(kx_1 + \omega t) + k(c_1x + c_2x^2) \cos(x_1k + \omega t) \quad (2)$$

因而 $x \in (x_1, x_1 + x_2)$ ，机器鱼的波动方程为式 (3) 所示，其仿真如图 3 所示。

$$f_b(x, t) = f_b(x_1, t) + k_{x1}(x - x_1) \quad (3)$$

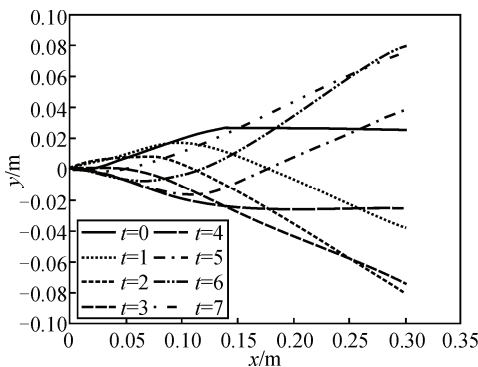


图 3 (尾鳍为刚体) 机器鱼的波动方程仿真

如果机器鱼尾鳍是可以形变的，则此种情况下 AB 段的波动方程如式 (4) 所示。

$$f_b(x, t) = f_b(x_1, t) + c_3k_{x1}((x - x_1) + c_4(x - x_{x1})^2) \quad (4)$$

其中 $c_3 = 3$ ， $c_4 = -4$ 为常数，这 2 个常数是在实体实验结束之后，通过对数据进行分析得到。式(4) 的仿真如图 4 所示。

如图 5 所示，通过在某个时刻将刚体尾鳍和软体尾鳍的摆动幅度放在一起进行对比，可以明显看

出，较软的尾鳍在鱼游动时产生的摆动幅度较大。当尾鳍长度为 x_3 时，其形变最大，这个时候产生的动力也最大。那么，笔者将通过实验来探求 x_3 的数值。进而寻找到运动性能最好的尾鳍长度。

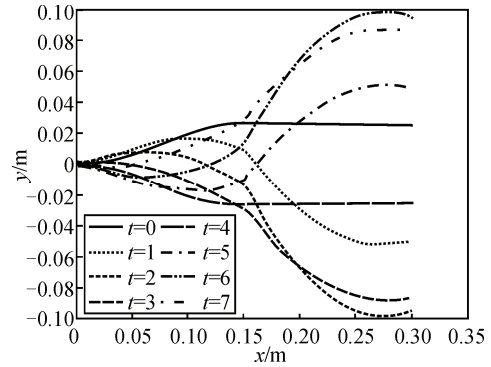


图 4 (尾鳍为较软材料) 机器鱼波动方程仿真

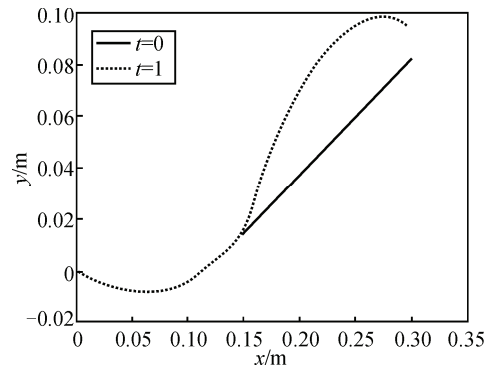


图 5 软(上)硬(下)尾鳍同一时刻的波动方程仿真

1.2 尾鳍的推力估算

鱼尾在摆动时可以产生有力的拍动，紧接着再迅速反方向拍动一次，第 1 次拍动产生一个大涡流，第 2 次拍动产生一个完全反向旋转的涡流。当 2 个涡流自鱼尾推开相互削弱时，便形成一股强大的射流^[2](射流：推进器依靠向后拨水来产生推力形成具有与推力方向相反附加速度的水流)。考虑到射流的影响^[3]，以及尾鳍的相关运动学参数的关系，推导出尾鳍推力的函数关系表达式如下：

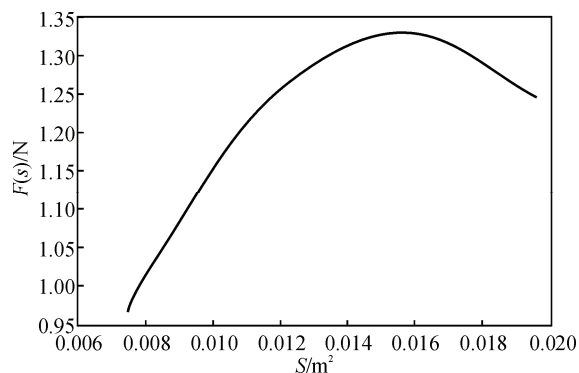
$$F(S) = 2\pi\rho(-C_1^5S^2 + C_2^5S + C_3) \times (fh_0)^2 \times \sin(2\pi ft) \cos[\alpha_0 \cos(2\pi ft - \psi)] \times \{2\pi \sin(2\pi ft) - \tan[\alpha_0 \cos(2\pi ft - \psi)] / (Sr/2)\} \quad (5)$$

式中： S 为尾鳍面积； f 为鱼尾摆动频率； h_0 为鱼尾摆动振幅； α_0 为摆动幅角； Sr 为斯特劳哈尔数； ρ 为水密度。

控制参数 f 、 h_0 、 α_0 、 Sr 、 ρ 不变，仅考虑尾鳍面积 S 对推力 F 的影响，画出 $S-F$ 关系图 6。

如图 6 所示，尾鳍面积 S 与推力 F 成二次型关系，即理论上，在不考虑其他因素影响的条件下会

有一个最优的尾鳍面积，使鱼产生最大推力，从而获得很快的速度。鱼在实际的游行过程中，鱼尾的摆动振幅、摆动频率、摆动幅角等参量是给定的，而式(4)中的 C_1 、 C_2 、 C_3 的值是不确定的，笔者通过实验来确定 C_1 、 C_2 、 C_3 ，从而获得更为精确的尾鳍面积与推力的关系图。



$$(h_0 = 0.2 \text{ m}; f = 2 \text{ Hz}; k = \frac{\pi}{3}; \alpha_0 = \frac{\pi}{9}; Sr = 0.5;$$

$$t = 5; C_1 = 1260; C_2 = 630; C_3 = 300)$$

图6 尾鳍面积与推力关系 Matlab 仿真

2 鱼尾形状大小的设计

理论表明：尾鳍作摆动与平动的复合运动时，其摆动能够产生超过90%的推进力^[4-5]。根据仿生学原理，其推进力的大小主要由尾鳍的展弦比和后掠角等参数决定。在一定范围内，大的展弦比可以提高推进力和效率，因为它可以减小摩擦力，同时较高的尾鳍刚度有利于产生较大的推进力，但会对推进效率起到一定的负面影响。显然，为了提高机器鱼的推力和驱动效率，尾鳍形状的优化是关键。在尾鳍面积一定的情况下，尽管大展弦比可以提高推力，但会削弱尾鳍根部的刚度，减小尾鳍的振幅，使推力减小，这明显是对矛盾量。而且考虑到如果单纯理论分析，即便分析得再透彻，毕竟也只是理论值，与实际值还是有一定差距。于是笔者试图通过实验来解决这个矛盾获取最优的方案模型。考虑到机器鱼比赛环境大体一致，所测得的数据可适用于水球比赛，而且分析得到的结论即最佳尾鳍方案同样适用于大赛。

图7给出了实验中所测量的各种形状的鱼尾。

鱼尾的主要区别在于鱼尾形状、鱼尾弧口深度、鱼尾大小、鱼尾软硬度4个方面，因而本实验主要从这4个方面开展。首先设计鱼尾形状，再通过solidworks 仿真画出形状，最后进行实体测量，测量2种软硬度下不同形状的游动速度，得到最佳形

状及软硬度。在这个最佳形状的基础上改变弧口深度，通过仿真、实体实验得到最佳鱼尾弧口深度。在这个最佳弧口深度的基础上改变鱼尾的大小，再通过仿真、实体实验得到最佳大小，从而最终得到最佳的鱼尾形状大小方案。



图7 实验中所用的鱼尾

如图8所示，以月牙尾为例对测量的参数(弧口长度，弧口宽度，鱼尾长度，鱼尾宽度)进行了相关的标注说明，其中弧口深度=弧口长度/弧口宽度，鱼尾大小=鱼尾长度×鱼尾宽度。其他形状的鱼尾以此类推。

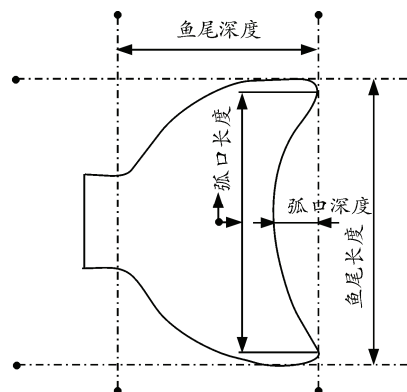


图8 鱼尾结构参数

3 实验测量及数据分析

实体实验是在设计以及仿真完成的基础上进行的，主要从鱼尾形状、弧口深度、鱼尾大小，鱼尾软硬度这4个方面分别探测。测量时控制测量电压恒定不变，控制鱼尾摆动频率为FAST不变。通过测量机器鱼游动的距离以及游动所用的时间，从而算出鱼游动的速度，并对不同鱼尾鱼游动的速度进行比较。

3.1 鱼尾形状以及软硬度对速度的影响测量

控制鱼尾的大小不变，弧口不变，改变鱼尾的形状以及软硬度，如图9所示。分别对不同形状以及不同软硬度的鱼尾进行电压、游动路程以及游动时间测量，每组数据测量3次，并对3次所求数据取平均。测量数据如表1所示，数据关系如图10。

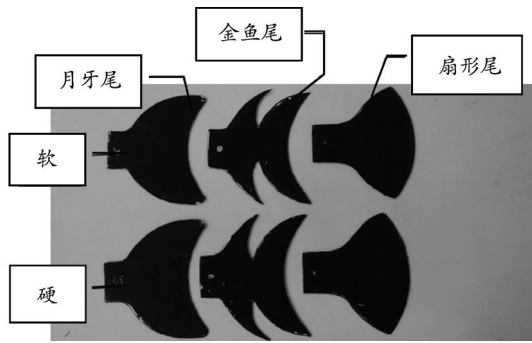


图 9 不同形状不同软硬度的鱼尾

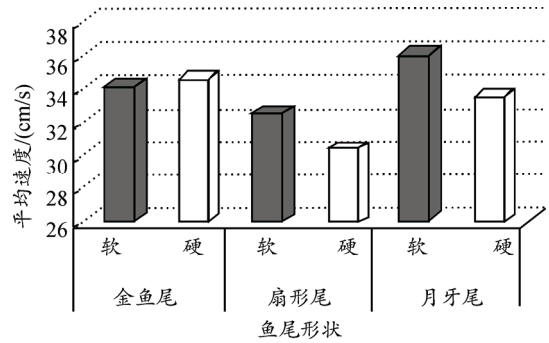


图 10 形状、软硬度对速度影响柱状

表 1 不同形状以及软硬度下鱼游动速度记录

测试形状		电压/V			时间/s			路程/cm			速度/(cm/s)			平均速度/ (cm/s)
		测试 1	测试 2	测试 3	测试 1	测试 2	测试 3	测试 1	测试 2	测试 3	测试 1	测试 2	测试 3	
金鱼尾	软	5.69	5.65	5.64	8.998	8.633	8.602	300	298	298	33.341	34.518	34.643	34.167
	硬	5.89	5.89	5.87	8.536	8.471	8.597	295	296	295	34.560	34.942	34.314	34.605
扇形尾	软	5.59	5.58	5.55	9.329	9.252	9.018	300	297	302	32.158	32.101	33.488	32.582
	硬	5.66	5.67	5.70	9.591	10.073	9.984	296	302	300	30.862	29.981	30.048	30.297
月牙尾	软	5.70	5.59	5.58	8.098	8.267	7.958	292	293	292	36.058	35.442	36.692	36.064
	硬	5.73	5.71	5.72	9.123	9.341	9.103	308	310	308	33.761	33.187	33.835	33.594

上述实验数据表明：考虑到电压大于 5.3 V 为满压，表 1 中数据保证了电压恒定，即控制了鱼在游动时动力恒定不变。从图 10 明显可看出：月牙鱼尾速度最快，在 3 种鱼尾中月牙鱼尾为最佳鱼尾，如表 1 及图 10，鱼尾的软硬对速度的影响并无规律所寻，软硬对速度的影响随着形状的不同而不同。

3.2 鱼尾弧口深度以及软硬度对速度的影响测量

控制月牙形鱼尾大小不变，改变月牙形鱼尾的弧口深度以及软硬度，如图 11 所示。分别对不同弧口深度以及不同软硬度的鱼尾进行电压、游动路程以及游动时间测量，每组数据测量 3 次，并对 3 次

所求数据取平均。测量数据如表 2 所示，数据关系如图 12 所示。

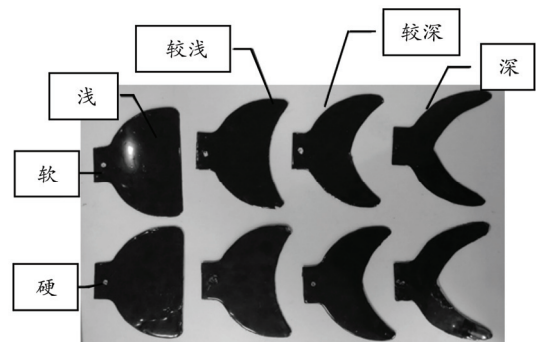


图 11 不同弧口深度、不同软硬度的鱼尾

表 2 不同弧口深度以及软硬度下鱼游动速度记录

测试形状		电压/V			时间/s			路程/cm			速度/(cm/s)			平均速度/ (cm/s)
		测试 1	测试 2	测试 3	测试 1	测试 2	测试 3	测试 1	测试 2	测试 3	测试 1	测试 2	测试 3	
深:长/宽= 10.5/5.4=1.94 cm	软	5.62	5.62	5.61	9.729	9.607	9.948	300	297	301	30.836	30.915	30.257	30.669
	硬	5.62	5.61	5.6	11.074	10.709	10.649	305	300	298	27.542	28.013	27.983	27.846
较深:长/宽= 10.5/3.6=2.916 cm	软	5.91	5.89	5.88	8.254	8.371	8.570	294	294	293	35.619	35.121	34.189	34.976
	硬	5.89	5.88	5.87	9.533	9.229	9.417	295	296	294	30.945	32.072	31.220	31.412
较浅:长/宽= 10.5/1.8=5.833 cm	软	5.70	5.59	5.58	8.098	8.267	7.958	292	293	292	36.058	35.442	36.692	36.064
	硬	5.73	5.71	5.72	9.123	9.341	9.103	308	310	308	33.761	33.187	33.835	33.594
浅:长/宽= 10.5/0=∞	软	5.89	5.87	5.86	8.106	8.982	9.761	290	305	339	35.776	33.956	34.730	34.820
	硬	5.9	5.89	5.90	9.367	9.425	9.438	303	296	305	32.348	31.405	32.316	32.023

上述实验数据表明：考虑到电压大于 5.3 V 为满压，表 2 中数据保证了电压恒定，即控制了鱼在游动时动力恒定不变。如图 12 明显可见，软的鱼尾比硬的鱼尾速度大得多，即月牙形鱼尾软的鱼尾好。如表 2 及图 12 所示，弧口长度/宽度=10.5/1.8= 5.833

cm 的鱼尾速度最快，在 4 种不同弧口深度鱼尾中弧口深度为 5.833 cm 的月牙鱼尾为最佳鱼尾。总结而言，弧口深度为 5.833 cm 的较软的鱼尾速度最快。

3.3 鱼尾大小对速度的影响测量

控制月牙形鱼尾弧口深度(弧口长度/宽度=

5.833 cm)以及软硬度(软)不变,改变月牙形鱼尾的大小,如图13。对不同弧口深度的鱼尾进行电压、游动路程以及游动时间测量,每组数据测量3次,并对3次所求数据取平均。测量数据如表3所示,数据关系如图14所示。

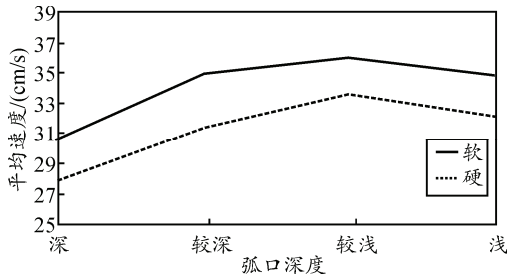


图12 形状、软硬度对速度影响折线

表3实验数据表明:考虑到电压大于5.3V为满压,数据保证了电压恒定,即控制了鱼在游动时动力恒定不变。由图14明显可看出:鱼游动的速度随着鱼尾大小的增大而增大,当到达一定值后,又随大小的增大而减小。如表3,鱼尾长×宽为14.25cm×12.25cm的鱼尾速度最快,在7种不同大小鱼尾中鱼尾长×宽为14.25cm×12.25cm的月牙鱼尾为

最佳鱼尾。总结而言:弧口深度为5.833cm,鱼尾大小为14.25cm×12.25cm且较软的鱼尾速度最快。

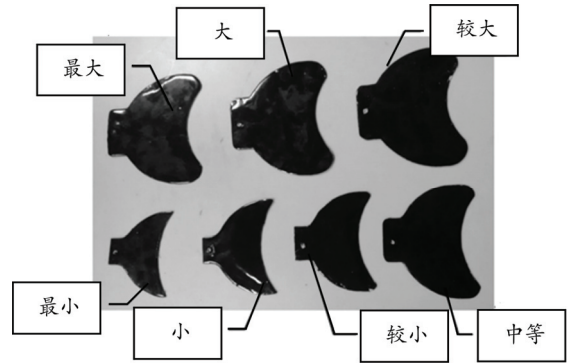


图13 不同大小的鱼尾

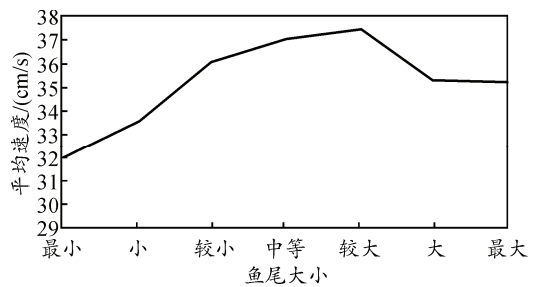


图14 鱼尾大小对速度影响折线

表3 不同大小下鱼游动速度记录

测试形状	电压/V			时间/s			路程/cm			速度/(cm/s)			平均速度/(cm/s)
	测试1	测试2	测试3	测试1	测试2	测试3	测试1	测试2	测试3	测试1	测试2	测试3	
最大: 鱼尾长×宽=15 cm×13 cm	5.30	5.31	5.31	8.456	8.450	8.404	300	296	295	35.477	35.029	35.102	35.203
大: 鱼尾长×宽=14.7 cm 5×12.75 cm	5.30	5.32	5.31	8.863	8.716	8.442	310	310	299	34.976	35.566	35.418	35.320
较大: 鱼尾长×宽=14.5 cm×12.5cm	5.36	5.33	5.32	7.830	8.168	8.177	300	303	303	38.314	37.095	37.055	37.488
中等: 鱼尾长×宽=13 cm×11.5 cm	5.37	5.32	5.34	8.126	7.776	8.143	295	298	297	36.303	38.323	36.473	37.033
较小: 鱼尾长×宽=11.75 cm×9.55 cm	5.37	5.39	5.38	8.098	8.267	7.958	292	293	292	36.058	35.442	36.692	36.064
小: 鱼尾长×宽=11 cm×8.9 cm	5.27	5.29	5.28	8.966	9.070	9.101	300	305	304	33.459	33.627	33.402	33.496
最小: 鱼尾长×宽=10 cm×7.5 cm	5.32	5.32	5.30	8.875	9.388	9.439	297	295	297	33.464	31.423	31.465	32.117

4 结束语

笔者通过对鱼尾运动学方程进行分析得到了大致合理的鱼尾方案,并进一步通过大量实验进行验证和细化。理论和实验结果表明:1) 机器鱼使用月牙形鱼尾较为合适;2) 使用较软的鱼尾材料对鱼游行较为有利;3) 选用鱼尾时弧口深度不能太深,参考弧口深度为:弧口长/宽=10.5/1.8=5.833 cm;4) 应用使用面积较大的鱼尾,参考鱼尾大小为:鱼尾长×宽=14.25 cm×12.25 cm。

参考文献:

[1] Sfakiotakis M, Lane D M, Davies JBC. Review of fish

swimming modes for aquatic locomotion[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering.1999, 24(2): 237-252.

[2] Triantafyllou M S, Triantafyllou G 5. An efficient swimming machine[J]. Scientific American, 1995(5): 64-70.

[3] 王田苗, 梁建宏基于理想推进器理论的尾鳍推力与效率估算[J]. 机械工程学报, 2005(8): 18-23.

[4] Tse F, Mores I E, Hinkle R T, Hinkle R T. Mechanical vibration theory and application[M]. 2 Ed Boston: Allyn and Bacon Inc, 1978: 89-128.

[5] 彭非, 苏琦, 李卫京. 三舵机仿鲹科机器鱼控制系统[J]. 兵工自动化, 2013, 32(12): 90-93.