



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115877709 A

(43) 申请公布日 2023. 03. 31

(21) 申请号 202211316011.1

(22) 申请日 2022.10.26

(71) 申请人 浙江大学

地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

(72) 发明人 黄豪彩 宋子龙 吴哲远 王卿

(74) 专利代理机构 杭州天勤知识产权代理有限公司 33224

专利代理师 彭剑

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006.01)

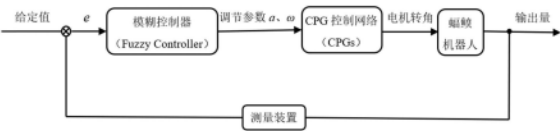
权利要求书3页 说明书9页 附图5页

(54) 发明名称

一种仿生蝠鲼机器人运动控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种仿生蝠鲼机器人运动控制方法,包括:(1)在仿生蝠鲼机器人的柔性胸鳍上选取若干特征点,建立描述特征点运动的数学模型;(2)对CPG控制器进行改进,引入幅值调节参数 a 和频率调节参数 ω 改进CPG控制器;(3)设计基于摄动法的CPG控制器参数整定方法;(4)将改进的CPG控制器与仿生蝠鲼机器人进行耦合;(5)以改进的CPG控制器作为控制胸鳍扑动的底层运动控制器,以模糊控制器为高层决策控制器,搭建基于CPG模型的分层控制架构,使用模糊算法控制CPG控制器的输入参数 a 和 ω ,以实现对蝠鲼机器人运动速度的闭环控制。利用本发明,在控制器受到干扰后仍能快速收敛,继续产生给定模式的周期信号。



1. 一种仿生蝠鲼机器人运动控制方法,其特征在于,包括:

(1) 在仿生蝠鲼机器人的柔性胸鳍上选取若干特征点,建立描述特征点运动的数学模型,通过分析特征点的运动规律描述柔性胸鳍的扑动特征;

(2) 对CPG控制器进行改进,引入幅值调节参数 a 和频率调节参数 ω 改进CPG控制器,通过上述参数调节CPG控制器输出振荡信号的特性;

(3) 设计基于摄动法的CPG控制器参数整定方法;

(4) 将改进的CPG控制器与仿生蝠鲼机器人进行耦合,使得改进后的CPG控制器在缺乏周期输入信号的情况下产生稳定、模式可调节的周期振荡信号;

(5) 以改进的CPG控制器作为控制胸鳍扑动的底层运动控制器,以模糊控制器为高层决策控制器,搭建基于CPG模型的分层控制架构,使用模糊算法控制CPG控制器的输入参数 a 和 ω ,以实现蝠鲼机器人运动速度的闭环控制。

2. 根据权利要求1所述的仿生蝠鲼机器人运动控制方法,其特征在于,步骤(1)中,通过分析特征点的运动规律描述柔性胸鳍的扑动特征具体为:

通过二次曲线拟合胸鳍的扑动轮廓,建立任意时刻三条鳍线的扑动曲线表达式

$$\begin{cases} \mathbf{Z} = \mathbf{A}\mathbf{X}^T\mathbf{X} \quad (0 \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{M}) \\ \int_0^M \sqrt{\mathbf{Z}'^T\mathbf{Z}' + 1} \, dx = \mathbf{L} \end{cases} \quad (1)$$

式中, \mathbf{Z} 表示不同鳍线在扑动时的竖直方向位移; \mathbf{A} 由柔性胸鳍的扑动幅度系数 $a(t)$ 组成, $\mathbf{A}^T = (a_1(t) \ a_2(t) \ a_3(t))$; \mathbf{X} 表示不同鳍线沿展向分布的位置坐标; \mathbf{M} 表示不同鳍线沿 x 轴的坐标范围,由曲线长度积分公式确定; \mathbf{L} 表示不同鳍线的长度;

通过测量生物蝠鲼特征点的实际位移,函数拟合得到扑动幅度系数 $a(t)$ 随时间的函数表达式;由此得到各个特征点在任意时刻在竖直方向的位移;通过分析特征点的位移,得到蝠鲼机器人胸鳍的扑动周期性规律。

3. 根据权利要求1所述的仿生蝠鲼机器人运动控制方法,其特征在于,步骤(2)中,改进CPG控制器的数学表达式如下:

$$\ddot{x} + \varepsilon(ax^2 - 1)\dot{x} + \omega^2x = 0 \quad (2)$$

式中, x 为改进CPG控制器的输出信号,状态变量 \dot{x} 为 x 对时间的一阶导数,状态变量 \ddot{x} 为 x 对时间的二阶导数, ε 为非线性强度系数, a 为幅值调节参数, ω 为频率调节参数。

4. 根据权利要求1所述的仿生蝠鲼机器人运动控制方法,其特征在于,步骤(3)中,基于摄动法的CPG控制器参数整定方法具体为:

采用多尺度奇异摄动法求取CPG控制器输出信号的解析解,进而分析控制器参数与输出信号的定量关系,以实现CPG控制器对仿生蝠鲼机器人的有效控制。

5. 根据权利要求4所述的仿生蝠鲼机器人运动控制方法,其特征在于,采用多尺度奇异摄动法求取CPG控制器输出信号的解析解过程如下:

引入 $T_0 = t$ 、 $T_1 = \varepsilon t$ 两个时间尺度,将近似解级数展开,见式(3):

$$x(t, \varepsilon) = x_0(T_0, T_1) + \varepsilon x_1(T_0, T_1) \quad (3)$$

$x(t)$ 对时间 t 求一阶导数见式(4):

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}x(t) &= \frac{\partial}{\partial T_0}x(t) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial T_1}x(t) \\ &= (D_0 + \varepsilon D_1)x(t)\end{aligned}\quad (4)$$

式中, D_0 、 D_1 为微分算子, $D_0 = \frac{\partial}{\partial T_0}$, $D_1 = \frac{\partial}{\partial T_1}$;

同样对时间 t 求二阶导数, 同时略去 ε 高次项化简, 计算结果见式 (5):

$$\begin{aligned}\frac{d^2}{dt^2}x(t) &= \frac{d}{dt}\left[\frac{\partial}{\partial T_0}x(t) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial T_1}x(t)\right] \\ &= (D_0 + \varepsilon D_1)^2 x(t) \\ &= (D_0^2 + 2\varepsilon D_0 D_1)x(t)\end{aligned}\quad (5)$$

将式 (3)、式 (4) 和式 (5) 带入改进 CPG 控制器的数学表达式得式 (6):

$$\begin{aligned}&(D_0^2 + 2\varepsilon D_0 D_1)(x_0 + \varepsilon x_1) \\ &+ \varepsilon(ax_0^2 + 2\varepsilon ax_0 x_1 + a\varepsilon^2 x_1^2 - 1)(D_0 + \varepsilon D_1)(x_0 + \varepsilon x_1) \\ &+ \omega^2 x_0 + \varepsilon \omega^2 x_1 = 0\end{aligned}\quad (6)$$

展开后略去 ε 高次项, 化简合并同类项得到式 (7):

$$D_0^2 x_0 + \omega^2 x_0 + \varepsilon(D_0^2 x_1 + 2D_0 D_1 x_0 + ax_0^3 D_0 - D_0 x_0 + \omega^2 x_1) = 0 \quad (7)$$

令 ε 的各次幂系数等于零, 得到方程见式 (8):

$$\begin{cases} \varepsilon^0: \frac{\partial^2 x_0(T_0, T_1)}{\partial T_0^2} + \omega^2 x_0 = 0 \\ \varepsilon^1: \frac{\partial^2 x_1(T_0, T_1)}{\partial T_0^2} + 2\frac{\partial^2 x_0(T_0, T_1)}{\partial T_0 \partial T_1} + ax_0^2 \frac{\partial x_0(T_0, T_1)}{\partial T_0} - \frac{\partial x_0(T_0, T_1)}{\partial T_0} + \omega^2 x_1 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

非摄动式 (8) 第一个等式的初始条件由控制器初始状态决定, 解微分方程得:

$$x_0(T_0, T_1) = \zeta(T_1) \cos[\omega T_0 + \beta_0] \quad (9)$$

式中, ζ 为时间尺度 T_1 的函数, β_0 为系统初相位, 与控制器的初始条件有关; 将 x_0 带入式

(8) 中第二个等式得到式 (10):

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 x_1}{\partial T_0^2} + \omega^2 x_1 &= 2\frac{\partial}{\partial T_1}\zeta \omega \sin(\omega T_0 + \beta_0) - \zeta \omega \sin(\omega T_0 + \beta_0) \\ &\quad + a\zeta^3 \omega \sin(\omega T_0 + \beta_0) \cos^2(\omega T_0 + \beta_0) \\ &= (2\frac{\partial \zeta}{\partial T_1} + \frac{a\zeta^3}{4} - \zeta)\omega \sin(\omega T_0 + \beta_0) + \frac{a\zeta^3}{4}\omega \sin 3(\omega T_0 + \beta_0)\end{aligned}\quad (10)$$

若期望解 $x_1(T_0, T_1)$ 中无形式如 $t \sin t$ 的发散项, 则需要消除共振项

$(2\frac{\partial \zeta}{\partial T_1} + \frac{a\zeta^3}{4} - \zeta)\omega \sin(\omega T_0 + \beta_0)$, 令振幅 $(2\frac{\partial \zeta}{\partial T_1} + \frac{a\zeta^3}{4} - \zeta)\omega = 0$, 得到式 (11) 如下:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial T_1} = \frac{\zeta}{2} \left(1 - \frac{a\zeta^2}{4}\right) \rightarrow \frac{\partial \zeta^2}{\zeta^2 \left(1 - \frac{a\zeta^2}{4}\right)} = \partial T_1 \quad (11)$$

对上式两边同时积分得 ζ 的表达式见式(12)：

$$\zeta = \frac{2}{\sqrt{a + \left(\frac{4}{\zeta_0^2} - a\right) e^{-\varepsilon t}}} \quad (12)$$

式中, ζ_0 为 $t=0$ 时 ζ 的初始值,与控制器的初始状态 $x(0)$ 、 $\dot{x}(0)$ 有关;

ε 为摄动量,当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时,忽略其影响,得到改进CPG控制器的一阶近似解析解见式(13)：

$$x(t) = \frac{2}{\sqrt{a + \left(\frac{4}{\zeta_0^2} - a\right) e^{-\varepsilon t}}} \cos(\omega t + \beta_0) \quad (13)$$

式中, β_0 为系统初相位,与控制器的初始状态 $x(0)$ 、 $\dot{x}(0)$ 有关。

6. 根据权利要求1所述的仿生蝠鲼机器人运动控制方法,其特征在于,步骤(4)中,将改进的CPG控制器与仿生蝠鲼机器人进行耦合时,CPG控制器控制胸鳍扑动,其输出振荡信号具有稳定的相位差,可由初相位 β_0 控制CPG单元间的相位关系,通过相位差建立多个CPG相互耦合的控制网络,实现对多个胸鳍驱动装置的协同控制。

7. 根据权利要求1所述的仿生蝠鲼机器人运动控制方法,其特征在于,步骤(5)中,选取改进CPG控制器输入参数中的频率调节参数 ω 为运动速度控制的相关变量,选择其增量 $\Delta \omega$ 为模糊控制器的输出变量;

选用蝠鲼机器人实际移动速度 v 与速度期望值 v_d 的差值 $e = v - v_d$ 及误差变化率 de 为模糊控制器的输入变量。

8. 根据权利要求7所述的仿生蝠鲼机器人运动控制方法,其特征在于,根据模糊控制器的输入变量、输出变量,确定对仿生蝠鲼机器人速度 v 的模糊控制规则表;控制过程中,选用基于重心法的精确化方法,将模糊推理后所得模糊语言变量转换成精确的输出变量 $\Delta \omega$,与上一时刻的 ω 累加后作为控制参数输入至CPG控制器,对CPG输出振荡信号的频率进行控制,进而以增量的形式改变胸鳍的扑动频率,使蝠鲼机器人的实际速度 v 逼近期望值 v_d 。

一种仿生蝠鲼机器人运动控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于水下机器人领域,尤其是涉及一种仿生蝠鲼机器人运动控制方法。

背景技术

[0002] 近年来,为进一步开发海洋资源、深入探索海洋,诸多学者着手水下机器人技术的研究工作,越来越多的水下机器人被应用到具有挑战性的水下任务。同时,任务要求的多样化及探测环境的复杂化对水下机器人各方面的性能提出更高要求。当前,由螺旋桨推进器作为主要动力的鱼雷状或开架式水下机器人存在着推进效率低、灵活性差和噪音大等缺点,且尚无妥善的解决策略。因此,对新型水下机器人的研究工作迫在眉睫。

[0003] 仿生学(Bionics)作为一门新兴学科,为机器人技术的发展注入活力。诸多学者开始对水下生物结构和行为的仿生学原理进行研究,试图从中得到启发和指导。蝠鲼的扑翼运动方式以稳定性好、机动性强和推进效率高等优点受到研究者的青睐,仿生蝠鲼机器人的研究成为当前水下仿生机器人研究工作的焦点。

[0004] 如公开号为CN110304223A的中国专利文献公开了一种仿生机器蝠鲼,包括头部舱、中心舱、一对胸鳍、尾鳍舱,所述胸鳍包括曲柄摇杆机构和锥齿轮机构,通过曲柄摇杆机构的协调周期运动实现仿蝠鲼波动式推进;通过锥齿轮机构与曲柄摇杆机构的配合实现蝠鲼胸鳍末端复杂闭合运动轨迹追踪。

[0005] 需要指出的是,当前对仿生蝠鲼的主要研究集中于运动原理解释、推进效率的提高和仿生结构的设计,如何实现仿生蝠鲼机器人有效控制的研究尚未完全展开,复杂流体环境下的系统建模、稳定可调周期振荡信号的产生、多模态运动的切换及平稳过渡和多自由度协同控制等问题成为研究过程中的技术难点。

[0006] 随着对神经生物学研究的不断深入,从生物节律运动角度出发的仿生控制方法受到学者们的广泛关注,中枢模式发生器(Central Pattern Generator,CPG)因模型参数化、自组织性、自适应性等特点被应用于模拟生物节律运动的底层控制器,这为仿生蝠鲼机器人的研究提供了思路。由于CPG高维度、非线性、强耦合的特点,只能通过数值方法对模型中的参数进行分析,定量解析模型参数与系统性能之间的关系十分困难,只能采用实验试凑法进行参数的整定,参数整定缺乏系统性、理论性。

[0007] 仿生蝠鲼机器人动力学建模困难是限制其发展的另一原因。由于蝠鲼在水中的运动涉及流体环境中的水动力学模型,当前难以精确建立其运动时的动力学模型,存在极大的建模不确定性,因此也难以通过动力学模型对蝠鲼的运动进行控制。

发明内容

[0008] 本发明提供了一种仿生蝠鲼机器人运动控制方法,在受到干扰后仍能快速收敛,继续产生给定模式的周期信号,在改变振幅、角频率等振荡特性时,能够利用极限环的渐进收敛特性,在有限时间内平稳过渡,控制仿生蝠鲼机器人输出环境适应性行为。

[0009] 一种仿生蝠鲼机器人运动控制方法,包括:

[0010] (1) 在仿生蝠鲼机器人的柔性胸鳍上选取若干特征点,建立描述特征点运动的数学模型,通过分析特征点的运动规律描述柔性胸鳍的扑动特征;

[0011] (2) 对CPG控制器进行改进,引入幅值调节参数 a 和频率调节参数 ω 改进CPG控制器,通过上述参数调节CPG控制器输出振荡信号的特性;

[0012] (3) 设计基于摄动法的CPG控制器参数整定方法;

[0013] (4) 将改进的CPG控制器与仿生蝠鲼机器人进行耦合,使得改进后的CPG控制器在缺乏周期输入信号的情况下产生稳定、模式可调节的周期振荡信号;

[0014] (5) 以改进的CPG控制器作为控制胸鳍扑动的底层运动控制器,以模糊控制器为高层决策控制器,搭建基于CPG模型的分层控制架构,使用模糊算法控制CPG控制器的输入参数 a 和 ω ,以实现对蝠鲼机器人运动速度的闭环控制。

[0015] 本发明的核心是设计CPG作为底层运动控制器,控制仿生蝠鲼机器人的运动,并提出一种CPG控制器的参数整定方法,以模糊控制器作为高层决策器,在不建立蝠鲼机器人动力学模型的情况下,对其运动速度 v 进行控制使其能够跟踪期望值 v_d 。

[0016] 步骤(1)中,通过分析特征点的运动规律描述柔性胸鳍的扑动特征具体为:

[0017] 通过二次曲线拟合胸鳍的扑动轮廓,建立任意时刻三条鳍线的扑动曲线表达式

$$\begin{cases} \mathbf{Z} = \mathbf{A}\mathbf{X}^T\mathbf{X} \quad (0 \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{M}) \\ \int_0^M \sqrt{\mathbf{Z}'^T\mathbf{Z}' + 1} \, dx = L \end{cases} \quad (1)$$

[0019] 式中, Z 表示不同鳍线在扑动时的竖直方向位移; A 由柔性胸鳍的扑动幅度系数 $a(t)$ 组成, $A^T = (a_1(t) \, a_2(t) \, a_3(t))$; X 表示不同鳍线沿展向分布的位置坐标; M 表示不同鳍线沿 x 轴的坐标范围,由曲线长度积分公式确定; L 表示不同鳍线的长度;

[0020] 通过测量生物蝠鲼特征点的实际位移,函数拟合得到扑动幅度系数 $a(t)$ 随时间的函数表达式;由此得到各个特征点在任意时刻在竖直方向的位移;通过分析特征点的位移,得到蝠鲼机器人胸鳍的扑动周期性规律。

[0021] 改进CPG控制器的数学表达式如下:

$$\ddot{x} + \varepsilon(ax^2 - 1)\dot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (2)$$

[0023] 式中, x 为改进CPG控制器的输出信号,状态变量 \dot{x} 为 x 对时间的一阶导数,状态变量 \ddot{x} 为 x 对时间的二阶导数, ε 为非线性强度系数, a 为幅值调节参数, ω 为频率调节参数。

[0024] 步骤(3)中,基于摄动法的CPG控制器参数整定方法具体为:

[0025] 采用多尺度奇异摄动法求取CPG控制器输出信号的解析解,进而分析控制器参数与输出信号的定量关系,以实现CPG控制器对仿生蝠鲼机器人的有效控制。

[0026] 采用多尺度奇异摄动法求取CPG控制器输出信号的解析解过程如下:

[0027] 引入 $T_0 = t$ 、 $T_1 = \varepsilon t$ 两个时间尺度,将近似解级数展开,见式(3):

$$x(t, \varepsilon) = x_0(T_0, T_1) + \varepsilon x_1(T_0, T_1) \quad (3)$$

[0029] $x(t)$ 对时间 t 求一阶导数见式(4):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x(t) &= \frac{\partial}{\partial T_0}x(t) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial T_1}x(t) \\ &= (D_0 + \varepsilon D_1)x(t) \end{aligned} \quad (4)$$

[0031] 式中, D_0 、 D_1 为微分算子, $D_0 = \frac{\partial}{\partial T_0}$, $D_1 = \frac{\partial}{\partial T_1}$;

[0032] 同样对时间 t 求二阶导数, 同时略去 ε 高次项化简, 计算结果见式 (5):

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2} x(t) &= \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial T_0} x(t) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial T_1} x(t) \right] \\ [0033] \quad &= (D_0 + \varepsilon D_1)^2 x(t) \\ &= (D_0^2 + 2\varepsilon D_0 D_1) x(t) \end{aligned} \quad (5)$$

[0034] 将式 (3)、式 (4) 和式 (5) 带入改进 CPG 控制器的数学表达式得式 (6):

$$\begin{aligned} &(D_0^2 + 2\varepsilon D_0 D_1)(x_0 + \varepsilon x_1) \\ [0035] \quad &+ \varepsilon (ax_0^2 + 2\varepsilon ax_0 x_1 + a\varepsilon^2 x_1^2 - 1)(D_0 + \varepsilon D_1)(x_0 + \varepsilon x_1) \\ &+ \omega^2 x_0 + \varepsilon \omega^2 x_1 = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

[0036] 展开后略去 ε 高次项, 化简合并同类项得到式 (7):

$$[0037] \quad D_0^2 x_0 + \omega^2 x_0 + \varepsilon (D_0^2 x_1 + 2D_0 D_1 x_0 + ax_0^3 D_0 - D_0 x_0 + \omega^2 x_1) = 0 \quad (7)$$

[0038] 令 ε 的各次幂系数等于零, 得到方程见式 (8):

$$[0039] \quad \begin{cases} \varepsilon^0: \frac{\partial^2 x_0(T_0, T_1)}{\partial T_0^2} + \omega^2 x_0 = 0 \\ \varepsilon^1: \frac{\partial^2 x_1(T_0, T_1)}{\partial T_0^2} + 2 \frac{\partial^2 x_0(T_0, T_1)}{\partial T_0 \partial T_1} + ax_0^2 \frac{\partial x_0(T_0, T_1)}{\partial T_0} - \frac{\partial x_0(T_0, T_1)}{\partial T_0} + \omega^2 x_1 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

[0040] 非摄动式 (8) 第一个等式的初始条件由控制器初始状态决定, 解微分方程得:

$$[0041] \quad x_0(T_0, T_1) = \zeta(T_1) \cos[\omega T_0 + \beta_0] \quad (9)$$

[0042] 式中, ζ 为时间尺度 T_1 的函数, β_0 为系统初相位, 与控制器的初始条件有关; 将 x_0 带入式 (8) 中第二个等式得到式 (10):

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^2 x_1}{\partial T_0^2} + \omega^2 x_1 = 2 \frac{\partial}{\partial T_1} \zeta \omega \sin(\omega T_0 + \beta_0) - \zeta \omega \sin(\omega T_0 + \beta_0) \\ [0043] \quad &+ a\zeta^3 \omega \sin(\omega T_0 + \beta_0) \cos^2(\omega T_0 + \beta_0) \\ &= (2 \frac{\partial \zeta}{\partial T_1} + \frac{a\zeta^3}{4} - \zeta) \omega \sin(\omega T_0 + \beta_0) + \frac{a\zeta^3}{4} \omega \sin 3(\omega T_0 + \beta_0) \end{aligned} \quad (10)$$

[0044] 若期望解 $x_1(T_0, T_1)$ 中无形式如 $t \sin t$ 的发散项, 则需要消除共振项

$(2 \frac{\partial \zeta}{\partial T_1} + \frac{a\zeta^3}{4} - \zeta) \omega \sin(\omega T_0 + \beta_0)$, 令振幅 $(2 \frac{\partial \zeta}{\partial T_1} + \frac{a\zeta^3}{4} - \zeta) \omega = 0$, 得到式 (11) 如下:

$$[0045] \quad \frac{\partial \zeta}{\partial T_1} = \frac{\zeta}{2} \left(1 - \frac{a\zeta^2}{4} \right) \rightarrow \frac{\partial \zeta^2}{\zeta^2 \left(1 - \frac{a\zeta^2}{4} \right)} = \partial T_1 \quad (11)$$

[0046] 对上式两边同时积分得 ζ 的表达式见式 (12):

$$[0047] \quad \zeta = \frac{2}{\sqrt{a + \left(\frac{4}{\zeta_0^2} - a \right) e^{-\varepsilon t}}} \quad (12)$$

[0048] 式中, ζ_0 为 $t=0$ 时 ζ 的初始值, 与控制器的初始状态 $x(0)$ 、 $\dot{x}(0)$ 有关;

[0049] v 为摄动量, 当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时, 忽略其影响, 得到改进CPG控制器的一阶近似解析解见式 (13):

$$[0050] \quad x(t) = \frac{2}{\sqrt{a + \left(\frac{4}{\zeta_0^2} - a \right) e^{-\varepsilon t}}} \cos(\omega t + \beta_0) \quad (13)$$

[0051] 式中, β_0 为系统初相位, 与控制器的初始状态 $x(0)$ 、 $\dot{x}(0)$ 有关。

[0052] 步骤 (4) 中, 将改进的CPG控制器与仿生蝠鲼机器人进行耦合时, CPG控制器控制胸鳍扑动, 其输出振荡信号具有稳定的相位差, 可由初相位 β_0 控制CPG单元间的相位关系, 通过相位差建立多个CPG相互耦合的控制网络, 实现对多个胸鳍驱动装置的协同控制。

[0053] 步骤 (5) 中, 选取改进CPG控制器输入参数中的频率调节参数 ω 为运动速度控制的相关变量, 选择其增量 $\Delta \omega$ 为模糊控制器的输出变量;

[0054] 选用蝠鲼机器人实际移动速度 v 与速度期望值 v_d 的差值 $e = v - v_d$ 及误差变化率 de 为模糊控制器的输入变量。

[0055] 根据模糊控制器的输入变量、输出变量, 确定对仿生蝠鲼机器人速度 v 的模糊控制规则表; 控制过程中, 选用基于重心法的精确化方法, 将模糊推理后所得模糊语言变量转换成精确的输出变量 $\Delta \omega$, 与上一时刻的 ω 累加后作为控制参数输入至CPG控制器, 对CPG输出振荡信号的频率进行控制, 进而以增量的形式改变胸鳍的扑动频率, 使蝠鲼机器人的实际速度 v 逼近期望值 v_d 。

[0056] 与现有技术相比, 本发明具有以下有益效果:

[0057] 1、本发明使用的基于非线性振荡器的CPG控制器, 利用非线性系统自激振荡现象产生稳定的周期信号, 在此基础上引入幅值、频率调节参数, 得到的改进CPG控制器在受到干扰后仍能快速收敛, 继续产生给定模式的周期信号, 在改变振幅、角频率等振荡特性时, 能够利用极限环的渐进收敛特性, 在有限时间内平稳过渡。

[0058] 2、本发明针对生物神经元的CPG控制器模型复杂、参数繁多难以整定的问题, 引入基于非线性振荡器的CPG控制器, 并使用多尺度摄动法近似解析CPG控制器, 实现对CPG控制器参数的定量整定。

[0059] 3、本发明针对CPG控制器缺乏决策能力的问题, 引入模糊控制器作为高层决策器, 搭建基于CPG控制器的分层控制架构, 提高仿生蝠鲼机器人的环境适应能力。

附图说明

[0060] 图1为本发明在仿生蝠鲼机器人的柔性胸鳍上选取特征点的示意图;

[0061] 图2为CPG控制器的相平面图;

[0062] 图3为不同初始状态下CPG控制器的输出信号;

[0063] 图4为受到外部扰动时的CPG控制器输出信号和相平面图;

- [0064] 图5为摄动法近似解析解拟合效果图；
 [0065] 图6为CPG控制器实现对胸鳍扑动的控制示意图；
 [0066] 图7为多个CPG控制器对多个胸鳍进行协同控制的网络结构图；
 [0067] 图8为基于CPG模型的分层控制架构结构图；
 [0068] 图9为模糊控制流程示意图；
 [0069] 图10为本发明仿真实验过程中追踪给定速度的示意图；
 [0070] 图11为本发明仿真实验过程中CPG控制器输出波形变化示意图；
 [0071] 图12为本发明仿真实验过程中极限环变换图。

具体实施方式

[0072] 下面结合附图和实施例对本发明做进一步详细描述,需要指出的是,以下所述实施例旨在便于对本发明的理解,而对其不起任何限定作用。

[0073] 本发明的控制对象以生物蝠鲼为仿生原型,通过对蝠鲼生物特性的分析可知,其主要依靠柔性胸鳍扑动实现自由游动,因此,建立胸鳍扑动的运动学模型,是后续对蝠鲼机器人进行运动控制的关键。

[0074] 一种仿生蝠鲼机器人运动控制方法,包括如下步骤:

[0075] 步骤一:运动学建模

[0076] 首先在柔性胸鳍上选取若干特征点,建立描述特征点运动的数学模型,通过特征点的运动规律描述研究柔性胸鳍的扑动特征,选取特征点如图1所示。

[0077] 通过二次曲线拟合胸鳍的扑动轮廓,建立任意时刻三条鳍线 K_{12} K_{10} 、 K_{23} K_{20} 、 K_{31} K_{30} 的扑动曲线表达式,见式(1.1)

$$[0078] \quad \begin{cases} \mathbf{Z} = \mathbf{A}\mathbf{X}^T\mathbf{X} \quad (0 \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{M}) \\ \int_0^M \sqrt{\mathbf{Z}'^T\mathbf{Z}' + 1} \, dx = \mathbf{L} \end{cases} \quad (1.1)$$

[0079] 式中, \mathbf{A} —由柔性胸鳍的扑动幅度系数 $a(t)$ 组成, $\mathbf{A}^T = (a_1(t) \, a_2(t) \, a_3(t))$;

[0080] \mathbf{L} —不同鳍线的长度;

[0081] \mathbf{M} —不同鳍线沿 x 轴的坐标范围,由曲线长度积分公式确定;

[0082] \mathbf{X} —不同鳍线沿展向分布的位置坐标;

[0083] \mathbf{Z} —不同鳍线在扑动时的竖直方向位移。

[0084] 通过测量生物蝠鲼特征点的实际位移,函数拟合得到扑动幅度系数 $a(t)$ 随时间的函数表达式。由此得到各个特征点任意时刻在竖直方向的位移,分析特征点的位移,得到蝠鲼机器人胸鳍的扑动周期性规律。

[0085] 步骤二:基于改进非线性振荡器的CPG控制器

[0086] 由步骤一可知,对仿生蝠鲼机器人控制的核心问题是产生稳定的、模式可调节的周期振荡信号,以控制胸鳍产生多模态的周期扑动。利用谐波函数产生的简谐信号稳定性较差,在受到干扰后容易发散而不能重新收敛回原始振荡状态。基于非线性振荡器的CPG控制器利用非线性系统的自激振荡特性,为解决这一问题提供了有效方法。

[0087] 基于van der pol振子的CPG控制器是具有非线性阻尼的非线性二阶系统,控制器的数学表达见式(2.1)

[0088] $\ddot{x} + \varepsilon(x^2 - 1)\dot{x} + x = 0$ (2.1)

[0089] 令状态变量 $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, 将方程改写为状态空间表达式如式 (2.2) 所示

[0090]
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \varepsilon(1 - x_1^2)x_2 - x_1 \end{cases} \quad (2.2)$$

[0091] 式中, x_1 、 x_2 为状态变量, ε 为非线性强度系数。

[0092] 取 $\varepsilon = 0.1$, 作CPG控制器的相平面图如图2所示。不同初始状态下CPG控制器的输出信号如图3所示, 图中, (a) 为初始状态位于极限环内, (b) 初始状态位于极限环外。如图4所示, 图中, (a) 为在受到外部扰动时的CPG控制器输出信号, (b) 为受外部扰动的CPG相平面图。

[0093] 由图2~4可知, 基于非线性振子的CPG控制器存在唯一的极限环, 在各种初始条件下均能快速收敛至极限环上, 产生稳定的周期振荡信号。在受到外部扰动而偏离极限环时能够迅速收敛回极限环, 继续产生周期振荡信号。以上结果显示基于非线性振荡器的CPG控制器满足胸鳍驱动对周期性信号的要求。在此基础上, 引入幅值调节参数 α 和频率调节参数 ω 改进CPG控制器, 通过上述参数调节控制器输出振荡信号的特性, 以满足胸鳍驱动对CPG信号多模态、可调节的要求。

[0094] 改进CPG控制器的数学表达见式 (2.3)

[0095] $\ddot{x} + \varepsilon(\alpha x^2 - 1)\dot{x} + \omega^2 x = 0$ (2.3)

[0096] 式中, ε 为非线性强度系数, α 为幅值调节参数, ω 为频率调节参数。

[0097] 步骤三: 基于摄动法的CPG控制器参数整定方法

[0098] 要将CPG控制器与被控对象相耦合, 首先需要定量分析CPG控制器的参数对输出信号振荡特性的影响。目前对CPG参数的整定多采用实验试凑法, 本发明使用多尺度奇异摄动法求取CPG控制器的近似解析解, 进而分析控制器参数与输出信号的定量关系, 以实现CPG控制器对仿生蝠鲼机器人的有效控制。

[0099] 首先引入不同尺度的时间变量 T , 时间尺度 T 受小参数 ε 影响按 $T_n = \varepsilon^n t$ 规律影响, 综合考虑求解精度和求解实时性, 本次求解一次近似解, 引入 $T_0 = t$ 、 $T_1 = \varepsilon t$ 两个时间尺度。将近似解级数展开, 见式 (3.1)

[0100] $x(t, \varepsilon) = x_0(T_0, T_1) + \varepsilon x_1(T_0, T_1)$ (3.1)

[0101] $x(t)$ 对时间 t 求一阶导数见式 (3.2)

[0102]
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x(t) &= \frac{\partial}{\partial T_0}x(t) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial T_1}x(t) \\ &= (D_0 + \varepsilon D_1)x(t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

[0103] 式中, D_0 、 D_1 为微分算子, $D_0 = \frac{\partial}{\partial T_0}$, $D_1 = \frac{\partial}{\partial T_1}$ 。

[0104] 同样对时间 t 求二阶导数, 同时略去 ε 高次项化简, 计算结果见式 (3.3)

$$\begin{aligned}
[0105] \quad \frac{d^2}{dt^2} x(t) &= \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial T_0} x(t) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial T_1} x(t) \right] \\
&= (D_0 + \varepsilon D_1)^2 x(t) \\
&= (D_0^2 + 2\varepsilon D_0 D_1) x(t)
\end{aligned} \tag{3.3}$$

[0106] 将式 (3.1)、式 (3.2) 和式 (3.3) 带入改进CPG控制器的数学表达式 (3.3) 得式 (3.4) :

$$\begin{aligned}
[0107] \quad & (D_0^2 + 2\varepsilon D_0 D_1)(x_0 + \varepsilon x_1) \\
& + \varepsilon (a x_0^2 + 2\varepsilon a x_0 x_1 + a \varepsilon^2 x_1^2 - 1)(D_0 + \varepsilon D_1)(x_0 + \varepsilon x_1) \\
& + \omega^2 x_0 + \varepsilon \omega^2 x_1 = 0
\end{aligned} \tag{3.4}$$

[0108] 展开后略去 ε 高次项,化简合并同类项得到式 (3.5) :

$$[0109] \quad D_0^2 x_0 + \omega^2 x_0 + \varepsilon (D_0^2 x_1 + 2D_0 D_1 x_0 + a x_0^3 - D_0 x_0 + \omega^2 x_1) = 0 \quad (3.5) \text{ 令 } \varepsilon \text{ 的各次幂系数等于零,得到方程见式 (3.6) :}$$

$$[0110] \quad \begin{cases} \varepsilon^0 : \frac{\partial^2 x_0(T_0, T_1)}{\partial T_0^2} + \omega^2 x_0 = 0 \\ \varepsilon^1 : \frac{\partial^2 x_1(T_0, T_1)}{\partial T_0^2} + 2 \frac{\partial^2 x_0(T_0, T_1)}{\partial T_0 \partial T_1} + a x_0^2 \frac{\partial x_0(T_0, T_1)}{\partial T_0} - \frac{\partial x_0(T_0, T_1)}{\partial T_0} + \omega^2 x_1 = 0 \end{cases} \tag{3.6}$$

[0111] 非摄动式 (3.3.6a) 的初始条件由控制器初始状态决定,解微分方程 (3.6a) 得:

$$[0112] \quad x_0(T_0, T_1) = \zeta(T_1) \cos[\omega T_0 + \beta_0] \tag{3.7}$$

[0113] 式中, ζ 为时间尺度 T_1 的函数, β_0 为系统初相位,与控制器的初始条件有关。将 x_0 带入式 (3.6b) 得到式 (3.8) :

$$\begin{aligned}
[0114] \quad \frac{\partial^2 x_1}{\partial T_0^2} + \omega^2 x_1 &= 2 \frac{\partial}{\partial T_1} \zeta \omega \sin(\omega T_0 + \beta_0) - \zeta \omega \sin(\omega T_0 + \beta_0) \\
&+ a \zeta^3 \omega \sin(\omega T_0 + \beta_0) \cos^2(\omega T_0 + \beta_0) \\
&= (2 \frac{\partial \zeta}{\partial T_1} + \frac{a \zeta^3}{4} - \zeta) \omega \sin(\omega T_0 + \beta_0) + \frac{a \zeta^3}{4} \omega \sin 3(\omega T_0 + \beta_0)
\end{aligned} \tag{3.8}$$

[0115] 若期望解 $x_1(T_0, T_1)$ 中无形式如 $t \sin t$ 的发散项,则需要消除共振项

$$(2 \frac{\partial \zeta}{\partial T_1} + \frac{a \zeta^3}{4} - \zeta) \omega \sin(\omega T_0 + \beta_0), \text{ 令振幅 } (2 \frac{\partial \zeta}{\partial T_1} + \frac{a \zeta^3}{4} - \zeta) \omega = 0, \text{ 得到式 (3.9) 如下:}$$

$$[0116] \quad \frac{\partial \zeta}{\partial T_1} = \frac{\zeta}{2} \left(1 - \frac{a \zeta^2}{4} \right) \rightarrow \frac{\partial \zeta^2}{\zeta^2 \left(1 - \frac{a \zeta^2}{4} \right)} = \partial T_1 \tag{3.9}$$

[0117] 对上式两边同时积分得 ζ 的表达式见式 (3.10)

$$[0118] \quad \zeta = \frac{2}{\sqrt{a + \left(\frac{4}{\zeta_0^2} - a \right) e^{-\varepsilon t}}} \tag{3.10}$$

[0119] 式中, ζ_0 为 $t=0$ 时 ζ 的初始值,与控制器的初始状态 $x(0)$ 、 $\dot{x}(0)$ 有关。

[0120] v 为摄动量,当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时,可忽略其影响,得到改进CPG控制器的一阶近似解析解见式(3.11)

$$[0121] \quad x(t) = \frac{2}{\sqrt{a + \left(\frac{4}{\zeta_0^2} - a\right) e^{-\varepsilon t}}} \cos(\omega t + \beta_0) \quad (3.11)$$

[0122] 式中, ζ_0 为 $t=0$ 时 ζ 的初始值, β_0 为系统初相位,与控制器的初始状态 $x(0)$ 、 $\dot{x}(0)$ 有关。

[0123] 取 $x(0)=2$ 、 $\dot{x}(0)=0$ 、 $\omega=1$,带入(3.7)得 $\varepsilon_0=2$ 、 $\beta_0=0$,取 $\varepsilon=0.1$,得到摄动量 $\varepsilon=0.1$ 时改进CPG控制器的一阶近似解析解拟合结果,如图5所示。

[0124] 由图5可知,在 $\varepsilon=0.1$ 时,使用多尺度摄动法能够以较高精度解析改进CPG控制器,本发明设定改进CPG控制器参数 $\varepsilon=0.1$,在此基础上研究改进CPG控制器的参数整定方法。

[0125] 由式(3.11)可知, $\left(\frac{4}{\zeta_0^2} - a\right) e^{-\varepsilon t}$ 为收敛项,表示初始状态对系统的影响将随时间削弱,当 $t \rightarrow \infty$ 时,即振荡信号达到稳态后,式(2.3)表述的改进CPG控制器的输出信号可由下式近似解析:

$$[0126] \quad x(t) = \frac{2}{\sqrt{a}} \cos(\omega t + \beta_0) \quad (3.12)$$

[0127] 由式(3.12)可知,振荡信号振幅 A 可由参数 a 调整,二者满足关系 $A = \frac{2}{\sqrt{a}}$,信号振荡频率可直接由 ω 调整,振荡信号初相位 β_0 由初条件决定,可由式(3.7)解算。

[0128] 步骤四:改进CPG控制器与仿生蝠鲼机器人的耦合

[0129] 由步骤三可知,改进CPG控制器能够在缺乏周期输入信号的情况下产生稳定、模式可调节的周期振荡信号,能够根据控制器输入参数定量调节振荡信号的振荡幅值、振荡频率,因此能够作为控制胸鳍扑动的底层运动控制器。下面将研究应用CPG控制器实现对胸鳍扑动的控制,如图6所示。

[0130] CPG控制器在控制胸鳍扑动时,其输出振荡信号具有稳定的相位差,可由初相位 β_0 控制CPG单元间的相位关系,通过相位差建立多个CPG相互耦合的控制网络,实现对多个胸鳍驱动装置的协同控制,控制网络结构如图7所示。图中, φ_{xy} 为对应CPG-x和CPG-y间的振荡相位差,可以通过调节各CPG控制单元的初相位 β_0 调节,满足如下关系:

$$[0131] \quad \varphi_{xy} = \beta_{x0} - \beta_{y0}$$

[0132] 步骤五:模糊CPG分层控制框架

[0133] 水下动力学建模的复杂性,使得CPG输入参数与蝠鲼机器人运动特性之间的关系十分复杂,难以建立控制系统的传递函数,模糊控制无需建立系统的控制模型,这为仿生蝠鲼机器人的环境适应性控制提供了可能。

[0134] 本发明以改进CPG策略为底层运动控制器,模糊控制器为高层决策控制器,搭建基于CPG模型的分层控制架构,使用模糊算法控制CPG的输入参数 a 、 ω ,以实现对蝠鲼机器人运动速度的闭环控制。模糊CPG分层控制结构图如图8所示。

[0135] 蝠鲼的游动速度与胸鳍扑动频率相关性最高,故选取改进CPG控制器输入参数中的 ω 为运动速度控制的相关变量,选择其增量 $\Delta\omega$ 为模糊控制器的输出变量。

[0136] 为保证控制系统的稳定性、准确性和快速性的要求,应综合考虑系统误差及误差变化率,因此选用蝠鲼机器人实际移动速度 v 与速度给定值 v_d 的差值 $e=v-v_d$ 及误差变化率 de 为模糊控制器的输入变量,这样构成一个二维模糊控制器如图9所示。

[0137] 模糊化输入、输出变量后,确定对仿生蝠鲼机器人速度 v 的模糊控制规则见表1。

[0138] 表1速度 v 的模糊控制规则表

| | | $\Delta\omega$ | | | | |
|--------|----|----------------|----|----|----|----|
| DE | E | NB | NS | ZE | PS | PB |
| | DE | | | | | |
| [0139] | NB | PB | PB | PB | PS | NB |
| | NS | PB | PS | PS | ZE | NB |
| | ZE | PB | PS | ZE | NS | NB |
| | PS | PB | ZE | NS | NS | NB |
| | PB | PB | NS | NB | NB | NB |

[0140] 选用基于重心法的精确化方法,将模糊推理后所得模糊语言变量转换成精确输出量 $\Delta\omega$,与上一时刻的 ω 累加后作为控制参数输入至CPG控制器,对CPG输出振荡信号的频率进行控制,进而以增量的形式改变胸鳍的扑动频率,使蝠鲼机器人的速度 v 逼近期望值 v_d 。

[0141] 为验证本发明的效果,用Simulink的仿真实验证明本发明所提出的控制方法的有效性。改进CPG控制器的非线性系数 ϵ 设定为0.1,仅选取改进CPG控制器输入参数中的 ω 作为运动速度控制的相关变量,将幅值调节参数 a 设定为1。

[0142] 模糊控制器中确定误差 e 的论域范围为 $[-10,10]$,误差 de 的论域范围为 $[-20,20]$,模糊控制器输出变量 $\Delta\omega$ 的论域为 $[-15,15]$ 。上述输入、输出变量与实际测量值间的关系可根据实际系统情况,由量化系数 k_1 、 k_2 、 k_3 确定。本次仿真选取 $k_1=1$, $k_2=0.75$, $k_3=0.01$ 。

[0143] 在初始速度数值为9时,追踪数值为3的阶跃信号,仿真结果如图10~图12所示。其中,图10展示了追踪给定速度,图11展示了CPG控制器输出波形变化,图12展示了极限环变换。由图10可知,以改进CPG策略为底层运动控制器,模糊控制器为高层决策控制器的分层控制框架能够实现仿生蝠鲼机器人对给定速度的快速追踪。由图11可知,在追踪给定速度的过程中,由于高层决策控制器对CPG振荡模态的控制,CPG控制器输出信号的振荡模式发生改变,且变化具有平稳性。由图12可知,在追踪给定速度的过程中,改进CPG控制器的状态变量由一个稳定的极限环快速收敛至另一稳定极限环,继续产生稳定的周期振荡信号。

[0144] 以上所述的实施例对本发明的技术方案和有益效果进行了详细说明,应理解的是以上所述仅为本发明的具体实施例,并不用于限制本发明,凡在本发明的原则范围内所做的任何修改、补充和等同替换,均应包含在本发明的保护范围之内。

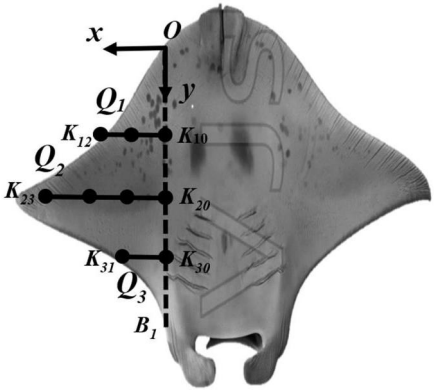


图1

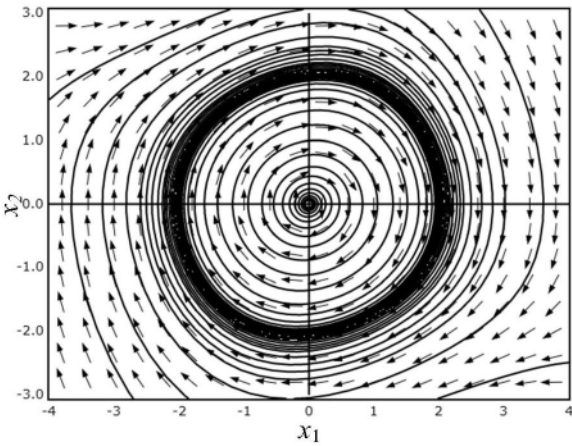


图2

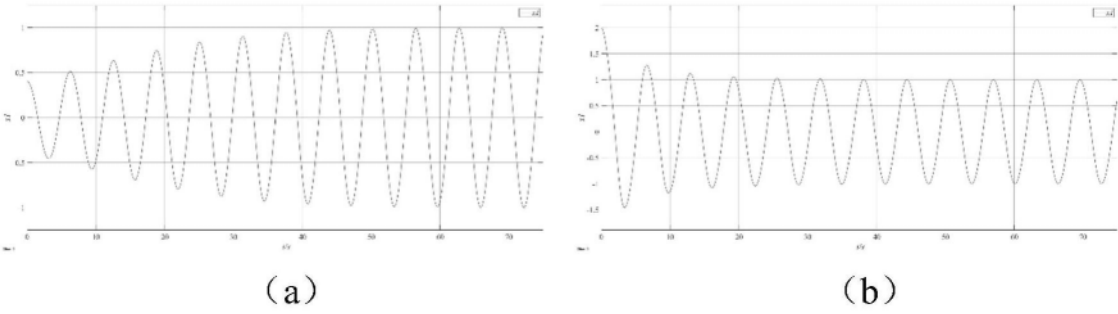


图3

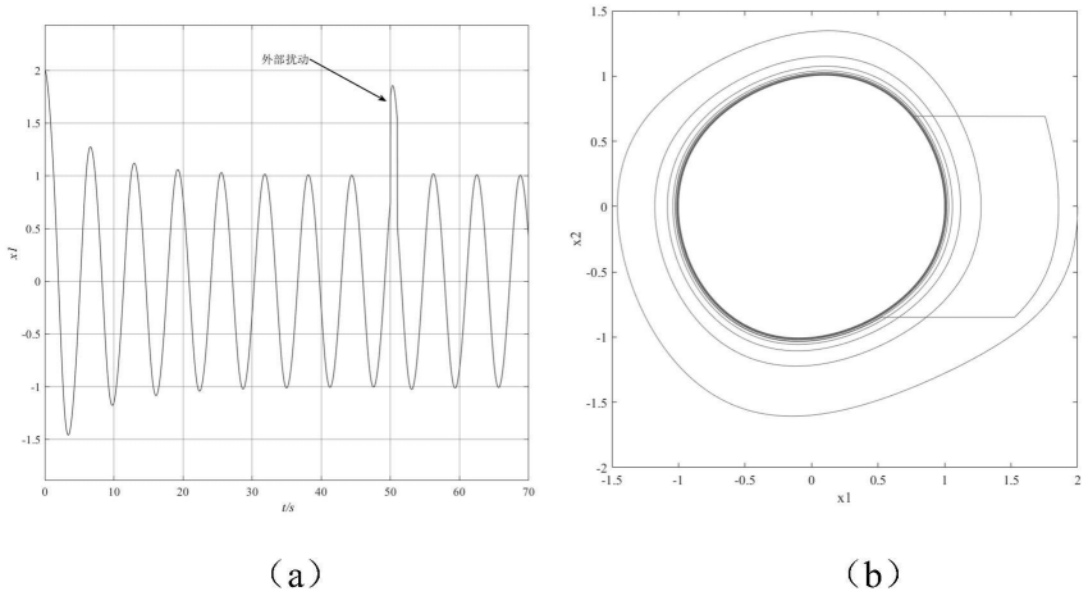


图4

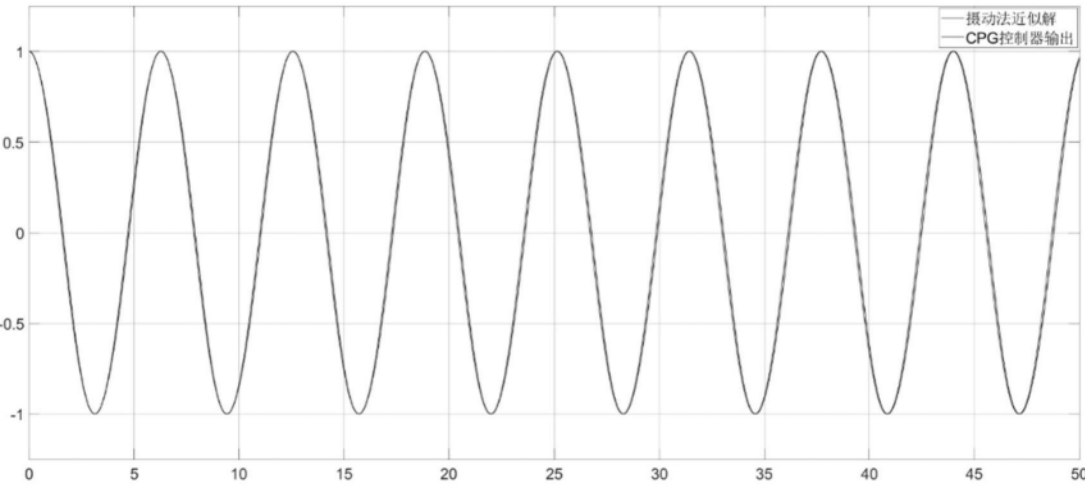


图5

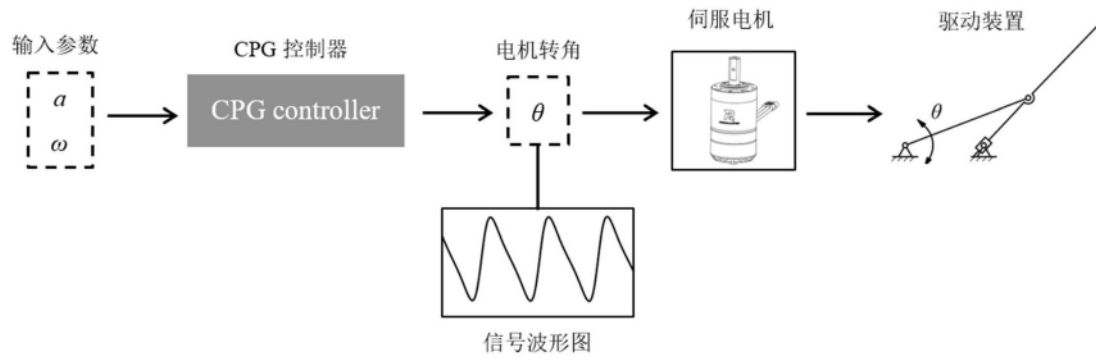


图6

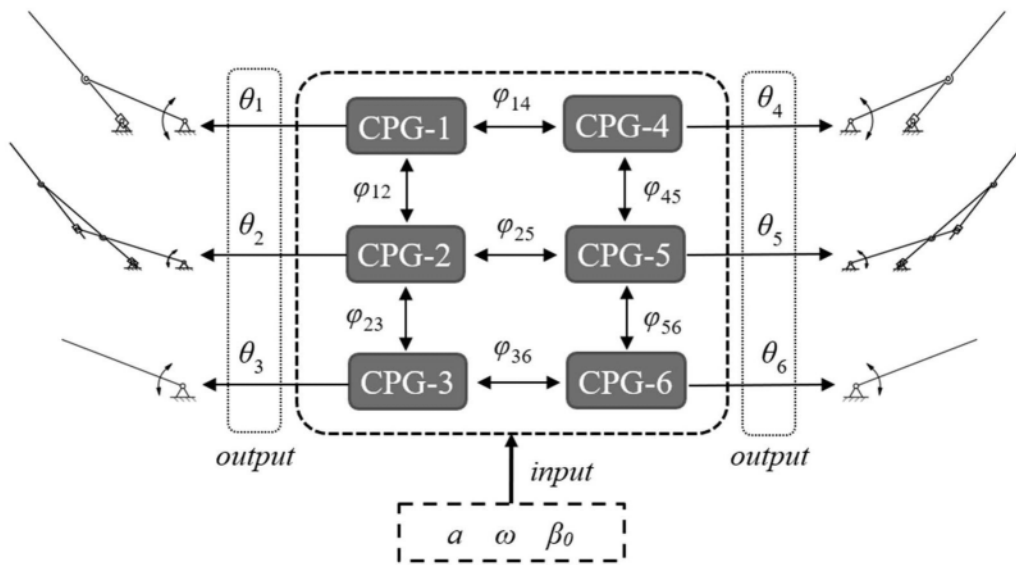


图7

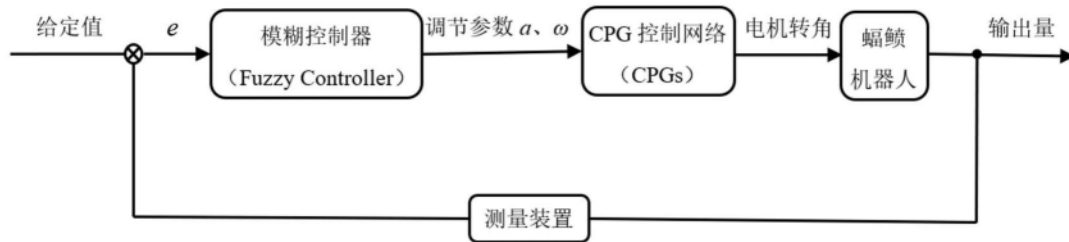


图8

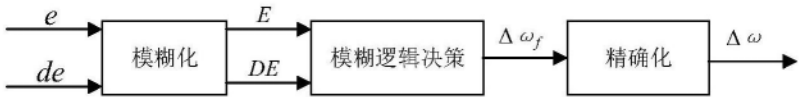


图9

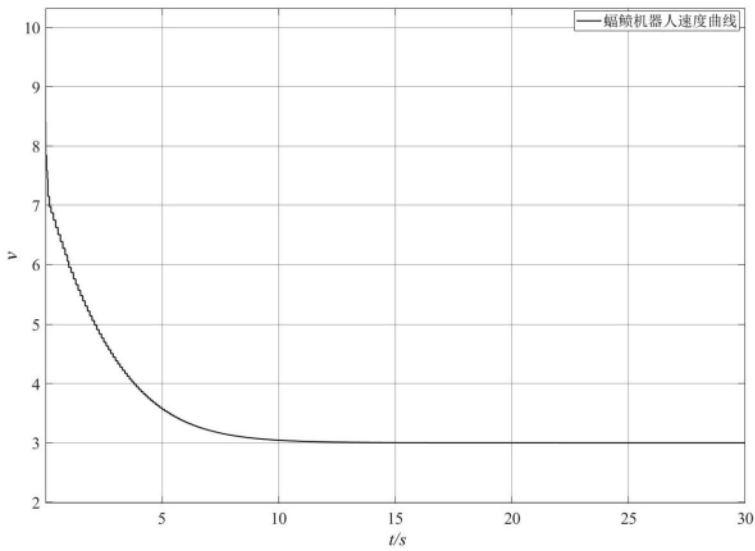


图10

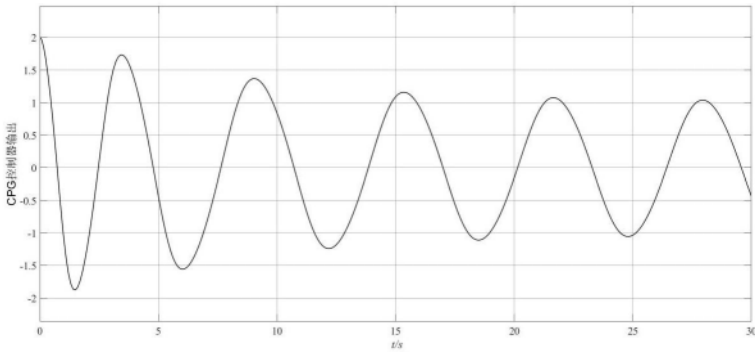


图11

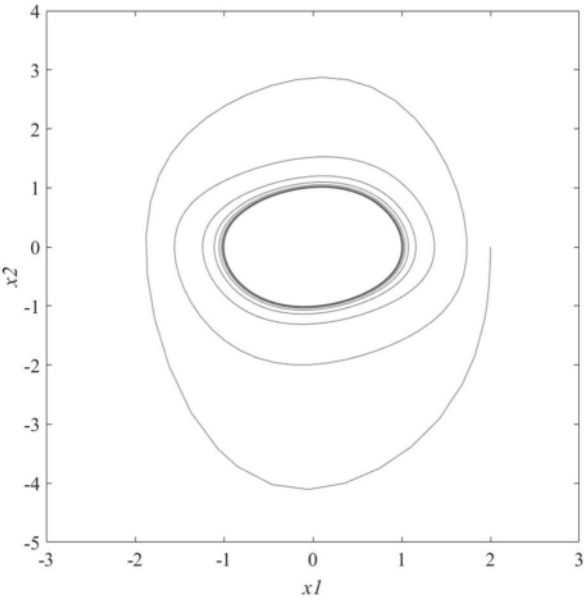


图12