

规范形Qi系统的Hopf分岔分析及控制

袁惠群¹, 张中华^{1,2†}

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 东北电力大学 理学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 文章研究了一个Qi系统的Hopf分岔控制问题. 根据计算的极限环曲率系数, 判定原系统的Hopf分岔类型, 并采用washout滤波器控制该系统的分岔行为. 首先讨论了控制器的线性增益对Hopf分岔点位置的影响, 然后引入规范形计算方法, 求出受控系统的Hopf分岔规范形. 分析了规范形中系数对控制参数的选择原则所产生之影响, 以及对Hopf分岔类型及极限环幅值的影响. 理论和仿真结果表明, 控制器的线性增益能使原系统的Hopf分岔点延迟或消失, 而非线性增益能则改变极限环的稳定性和极限环幅值的大小. 最后把washout滤波器和线性控制器的控制效果作了对比, 发现washout滤波器比之线性控制器具有一定的优势.

关键词: 分岔控制; 规范形方法; washout滤波器; Qi系统

中图分类号: O231.2 **文献标识码:** A

Bifurcation analysis and control of a Qi system based on normal form

YUAN Hui-qun¹, ZHANG Zhong-hua^{1,2†}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;
2. College of Science, Northeast Dianli University, Jilin Jilin 132012, China)

Abstract: This paper considers the Hopf bifurcation control for a particular dynamical system (Qi system). According to the limit cycle curvature coefficient, we determine the Hopf bifurcation type for the original system, and then the washout filter is adopted to control the Hopf bifurcation. Firstly, the influence of linear gain on the bifurcation point is analyzed; and then, the normal form theory is applied to develop the Hopf bifurcation normal form of the controlled system. We investigate the effects from the coefficients of the normal form on the parameter-selection criteria and the amplitude of the periodic solution as well as the type of Hopf bifurcation of the controlled system. Theoretical and simulation results show that the linear gain of the control function will delay or even eliminate the bifurcation point; while the nonlinear gain can change the stability of limit cycles or the amplitudes of oscillations. Finally, a comparison between the linear controller and the washout filter shows that the washout filter is superior to the linear control

Key words: bifurcation control; normal form method; washout-filter; Qi system

1 引言(Introduction)

非线性动力系统分岔控制具有重要理论研究和实际应用价值, 被广泛应用于化工、机械电子、电力系统及生物种群等方面^[1-2]. 但目前对分岔控制的研究现对较少, 主要集中在非线性动力系统的混沌控制和混沌同步方面^[3-5]. 分岔控制的主要任务是设计控制律改变非线性系统的分岔特性, 获得所需要的动力学行为, 如通过改变控制器的线性部分提前、延迟或消除Hopf分岔的发生, 通过改变控制器的非线性部分控制分岔产生的周期解振幅大小等^[6-8]. 文献[9]采用自适应方法研究了一个四维Qi系统的混沌同步问题, 文献[10]采用线性与非线性状态反馈, 实现了对四维Qi系统零平衡点的Hopf分岔反控制. 文献[11]通过非线性状态反馈研究了一个四维Qi系统

的极限环幅值控制问题. 文献[12]分析了一个三维四翼Qi混沌系统解的稳定性问题, 并采用washout滤波器控制系统在零平衡点的分岔行为, 但只讨论了控制器的线性部分对分岔行为的影响, 并且对具体的分岔类型没有进行理论推导. 本文在文献[12]的基础上, 详细研究了系统的分岔类型, 给出理论推导, 并采用washout滤波器控制系统的分岔行为, 首先讨论了线性增益对分岔位置的影响. 然后引入规范形(normal form)计算方法, 求出系统的Hopf分岔规范形, 通过规范形系数讨论控制参数的选择原则及对Hopf分岔类型及周期解振幅的影响. 最后对washout滤波器和线性控制器的控制效果进行对比, 得出washout滤波器相对于线性控制器具有一定的优势, 并对理论结果给出数值仿真. 另外, 文章中的

一些计算结果是采用MATLAB软件得出的, 部分取的是近似值.

2 系统分岔分析(Bifurcation analysis)

考虑三维Qi系统

$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x) + yz, \\ \dot{y} = cx + dy - xz, \\ \dot{z} = -bz + xy, \end{cases} \quad (1)$$

其中 a, b, c, d 为系统参数, 这里, 本文只研究系统零平衡点 $O(0, 0, 0)$ 的分岔情况. 为与已有文献结果比较^[12], 选定 $b = 43, c = -18, d = 14, a$ 为分岔参数, 当 $a = a_0 = 14$ 时, 系统(1)发生Hopf分岔. 下面判断分岔类型. 当取上述参数条件时, 系统(1)在平衡点 $O(0, 0, 0)$ 的线性化矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -14 & 14 & 0 \\ -18 & 14 & 0 \\ 0 & 0 & -43 \end{bmatrix}.$$

矩阵 A 对应特征值为

$$\lambda_{1,2} = \pm 7.48331i, \lambda_3 = -43.$$

令 $X = TU$, 其中:

$$T = \begin{bmatrix} 0.58333 & -0.311805 & 0 \\ 0.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$X = [x \ y \ z]^T, U = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T,$$

则系统(1)可化为如下标准型:

$$\begin{cases} \dot{u}_1 = -7.48331u_2 + g_1(u_1, u_2, u_3), \\ \dot{u}_2 = 7.4831u_1 + g_2(u_1, u_2, u_3), \\ \dot{u}_3 = -43u_3 + g_3(u_1, u_2, u_3), \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} g_1(u_1, u_2, u_3) = 0.41574u_2u_3 - 0.77777u_1u_3, \\ g_2(u_1, u_2, u_3) = -3.86042u_1u_3 + 0.77777u_2u_3, \\ g_3(u_1, u_2, u_3) = 0.437498u_1^2 - 0.23385u_1u_2. \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入文献[13]中的计算公式, 得

$$\begin{cases} G_{110} = -2.13808i, w_{11} = 0.00254, \\ w_{20} = 0.00189 + 0.00202i, g_{20} = 0, g_{11} = 0, \\ G_{21} = 0, G_{101} = -0.77777 - 1.72234i. \end{cases} \quad (4)$$

将上述数据代入下式:

$$\sigma_1 = \text{Re} \left\{ \frac{g_{20}g_{11}}{2\omega_0} i + G_{110}w_{11} + \frac{G_{21} + G_{101}w_{20}}{2} \right\}. \quad (5)$$

计算得 $\sigma_1 = 0.001 > 0$, 所以, 原系统Hopf分岔类型为亚临界, 极限环不稳定, 产生增幅振荡. 如图1-2所示.

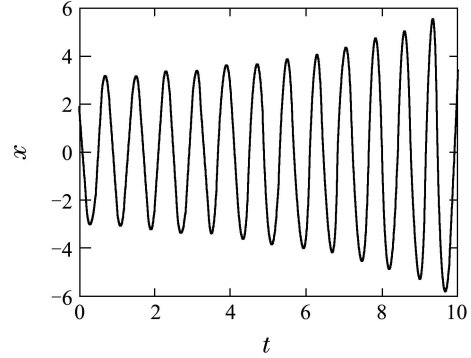


图1 $a = 14$ 时, 系统(1)波形图

Fig. 1 Waveform chart of system(1) with $a = 14$

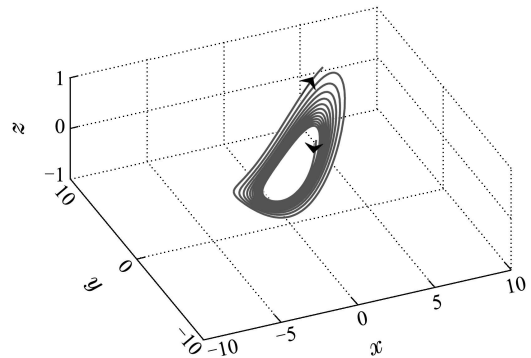


图2 $a = 14$ 时, 系统(1)相图

Fig. 2 Phase chart of system (1) with $a = 14$

3 系统分岔控制(Bifurcation control)

取参数 $b = 43, c = -18, d = 14$, 对系统(1)施加washout滤波器控制得:

$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x) + yz, \\ \dot{y} = -18x + 14y - xz + k_1(y - \xi v) + k_2(y - \xi v)^3, \\ \dot{z} = -43z + xy, \\ \dot{v} = y - \xi v, \end{cases} \quad (6)$$

其中: ξ 为滤波器常数, k_1, k_2 分别为线性增益和非线性增益, 显然, washout滤波器没有改变原系统的平衡点 $O(0, 0, 0)$.

3.1 线性控制(Linear control)

当 $a = a_0 = 14, \xi = 0.1, k_2 = 0, k_1 \neq 0$ 时, 系统(6)在平衡点 O 的线性化矩阵对应的特征方程为

$$(\lambda + 43)[\lambda^3 + (0.1 - k_1)\lambda^2 + (56 - 14k_1)\lambda + 5.6] = 0. \quad (7)$$

根据Routh-Hurwitz条件, 式(7)的根均具负实部的充要条件为

$$0.1 - k_1 > 0, (0.1 - k_1)(56 - 14k_1) > 0,$$

即 $k_1 < 0$, 此时系统(6)在平衡点 O 渐近稳定, 说明当控制器的线性部分满足一定条件时, 可以使原系统的Hopf分岔行为消失. 如取 $\xi = 0.1, k_2 = 0, k_1 =$

-1时,式(7)的根为 $\lambda_{1,2} = -0.5099 \pm 8.3461i$, $\lambda_3 = -0.08$, $\lambda_4 = -43$ 特征根均为负实部,所以,系统(6)在平衡点 O 渐近稳定,原系统的Hopf分岔行为得到控制并稳定到平衡点 O ,如图3-4所示。

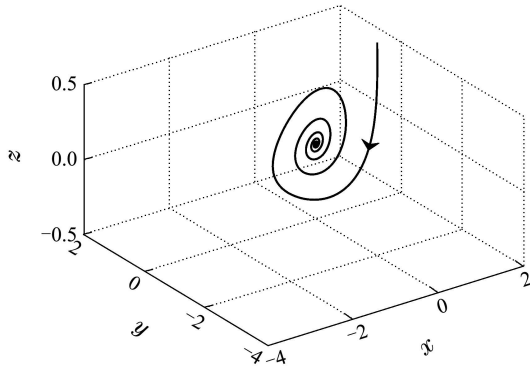


图3 $a = 14, \xi = 0.1, k_2 = 0, k_1 = -1$ 时,系统(6)相图
Fig. 3 Phase chart of system (6) with $a = 14, \xi = 0.1, k_2 = 0, k_1 = -1$

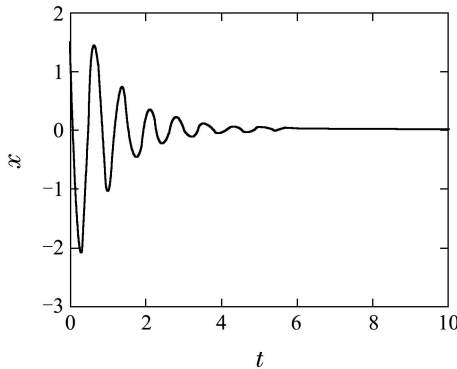


图4 $a = 14, \xi = 0.1, k_2 = 0, k_1 = -1$ 时,系统(6)波形图
Fig. 4 Waveform chart of system (6) with $a = 14, \xi = 0.1, k_2 = 0, k_1 = -1$

当 $\xi = 0.1, k_2 = 0, k_1 \neq 0, a \neq 14$ 时,系统(6)在平衡点 O 的线性化矩阵对应的特征方程为

$$(\lambda + 43)\{\lambda^3 + (a + 0.1 - k_1 - 14)\lambda^2 + [a(-k_1 - 14) + 18a - 1.4]\lambda + 1.8a\} = 0. \tag{8}$$

根据Routh-Hurwitz条件,式(8)的根全具负实部的充要条件为

$$\begin{aligned} a + 0.1 - k_1 - 14 &> 0, \quad a > 0, \\ (a + 0.1 - k_1 - 14)[a(0.1 - k_1 - 14) + 18a - 1.4] &> 1.8a. \end{aligned}$$

假设式(8)有一对纯虚特征根 $\pm iw$,代入式(8),然后根据方程等式两边实部与虚部系数分别相等,计算得

$$(a + 0.1 - k_1 - 14)[a(0.1 - k_1 - 14) + 18a - 1.4] = 1.8a,$$

即

$$(4.1 - k_1)a^2 + (k_1^2 + 9.8k_1 - 60.19)a + 1.4k_1 + 19.46 = 0. \tag{9}$$

此时,系统(6)在平衡点 O 发生Hopf分岔,令

$$\begin{aligned} \Delta &= (k_1^2 + 9.8k_1 - 60.19)^2 - \\ &4(4.1 - k_1)(1.4k_1 + 19.46), \\ f(a) &= (4.1 - k_1)a^2 + (k_1^2 + 9.8k_1 - \\ &60.19)a + 1.4k_1 + 19.46. \end{aligned}$$

若 k_1 满足下列不等式:

$$\begin{cases} k_1 > 0.1, \\ 4.1 - k_1 > 0, \\ \Delta \geq 0, \\ f(14) > 0, \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} k_1 > 0.1, \\ 4.1 - k_1 < 0, \\ \Delta \geq 0, \\ f(14) < 0, \end{cases}$$

则系统(6)在分岔参数 $a > 14$ 处发生Hopf分岔.说明当控制器的线性增益满足一定条件时,可使原系统Hopf分岔行为延迟.如取 $\xi = 0.1, k_2 = 0, k_1 = 0.9683$,系统(6)在 $a = 15 > a_0$ 处发生亚临界Hopf分岔,极限环不稳定,产生增幅振荡,如图5所示.此时系统(6)对应的线性化矩阵有一对纯虚特征根 $\lambda_{1,2} = \pm w_0i = \pm 6.7509i$ 和两个负根 $\lambda_3 = -0.1316, \lambda_4 = -43$,特征根 $\lambda_{1,2}(a)$ 在 $a = a_0$ 处对 a 的导数的实部为

$$a'(0) = -0.4958. \tag{10}$$

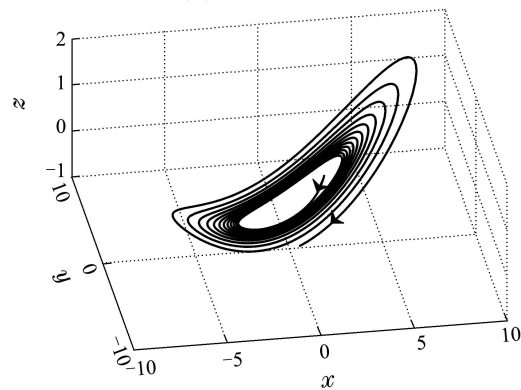


图5 当 $\xi = 0.1, k_2 = 0, k_1 = 0.9683$ 时,系统(6)相图
Fig. 5 Phase chart of system (6) with $\xi = 0.1, k_2 = 0, k_1 = 0.9683$

综上所述,当控制器的线性增益满足一定条件时,可延迟或消除原系统的Hopf分岔行为,但不改变原系统分岔类型。

3.2 非线性控制(Nonlinear control)

当取 $\xi = 0.1, k_1 = 0.9683, a = 15$ 时,系统(6)的线性和非线性部分分别为

$$\begin{aligned} B &= \begin{bmatrix} -15 & 15 & 0 & 0 \\ -18 & 14.9683 & 0 & -0.0968 \\ 0 & 0 & -43 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -0.1 \end{bmatrix}, \\ f(\tilde{X}) &= \begin{bmatrix} yz \\ -xz + k_2(y - 0.1v)^3 \\ xy \\ 0 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

其中 $\tilde{X} = [x \ y \ z \ v]^T$, 由上面讨论知, 矩阵 B 有一对纯虚特征根 $\lambda_{1,2} = \pm 6.7509i$, 设对应特征向量为 $\varphi, \bar{\varphi}$, 其中

$$\varphi = \begin{pmatrix} -0.652250 + 0.152362i \\ -0.720822 - 0.14118i \\ 0 \\ -0.022490 + 0.106440i \end{pmatrix}.$$

根据文献[7]中提出的计算 normal form 的直接方法, 引入变换:

$$\tilde{X} = \varphi u + \bar{\varphi} \bar{u} + \sum_{j+k \geq 2} H_{jk} u^j \bar{u}^k. \quad (11)$$

即可求得方程的Hopf分岔normal form

$$\dot{u} = 6.7509iu + C u^2 \bar{u}, \quad (12)$$

其中 $C = \langle \psi, F_{21} \rangle$, ψ 满足 $(B^T - 6.7509iI)\psi = 0$ 及 $\langle \psi, \varphi \rangle = 1$, 解得

$$\psi = \begin{pmatrix} -0.340503 - 1.782630i \\ -0.384823 + 1.613229i \\ 0 \\ -0.023052 - 0.005859i \end{pmatrix}.$$

将非线性变换(11)代入非线性项中整理成关于 u, \bar{u} 的多项式形式

$$f(\tilde{X}) = \sum_{j+k \geq 2} F_{jk} u^j \bar{u}^k, \quad (13)$$

其中 F_{21} 为 $u^2 \bar{u}$ 对应的系数向量:

$$F_{21} = (F_{21,1}, F_{21,2}, F_{21,3}, 0)^T, \quad (14)$$

其中:

$$F_{21,1} = \bar{\varphi}_2 H_{20,3} + \varphi_2 H_{11,3} = -0.022219 + 0.000624i,$$

$$F_{21,2} = -(\varphi_1 H_{11,3} + \bar{\varphi}_1 H_{20,3}) + (\varphi_2 - 0.1\varphi_4)^2 (\bar{\varphi}_2 - 0.1\bar{\varphi}_4) k_2 = 0.020916 - 0.003462i + (-0.387598 - 0.081898i) k_2,$$

$$F_{21,3} = \bar{\varphi}_1 H_{20,2} + \varphi_1 H_{11,2} + \bar{\varphi}_2 H_{20,1} + \varphi_2 H_{11,1} = F_{21,4} = 0.$$

上式中, $H_{jk,m}$ 表示向量 H_{jk} 中的第 m 个元素, 其中:

$$H_{11} = -B^{-1} F_{11}, \quad (15)$$

$$H_{20} = [2i\omega_0 I - B]^{-1} F_{20}, \quad (16)$$

I 为与 B 同阶的矩阵.

$$F_{11} = [0 \ 0 \ \varphi_1 \bar{\varphi}_2 + \bar{\varphi}_1 \varphi_2 \ 0]^T = [0 \ 0 \ 0.897288 \ 0]^T, \quad (17)$$

$$F_{20} = [0 \ 0 \ \varphi_1 \varphi_2 \ 0]^T = [0 \ 0 \ 0.491677 - 0.017735i \ 0]^T. \quad (18)$$

经计算得

$$H_{11} = [0 \ 0 \ 0.020867 \ 0]^T,$$

$$H_{20} = [0 \ 0 \ 0.010525 - 0.002892i \ 0]^T.$$

由以上各式, 计算 C 得

$$C = 0.006214 + 0.281276k_2 + (0.074470 - 0.593768k_2)i. \quad (19)$$

所以, 受控制系统的normal form为

$$\dot{u} = 6.7509iu + [0.006214 + 0.281276k_2 + (0.074470 - 0.593768k_2)i]u^2 \bar{u}. \quad (20)$$

由式(10)知 $\alpha'(0) < 0$, 根据 Hopf 分岔理论, 当 $\text{Re}(C) < 0$, 即 $k_2 < -0.02209$ 时, 系统(6)在 $a = 15$ 处发生超临界Hopf分岔, 原系统分岔类型被改变, 不稳定极限环变为稳定极限环, 并且极限环幅值会随着 k_2 的减小而减小, 如图6-7所示. 这说明, 控制器的非线性增益能改变原系统的分岔类型和极限环幅值. 另外, 由式(19)知, 当 $k_2 = 0$ 时, $\text{Re}(C) > 0$, 系统为亚临界Hopf分岔, 与前面2.1节中的讨论相符合.

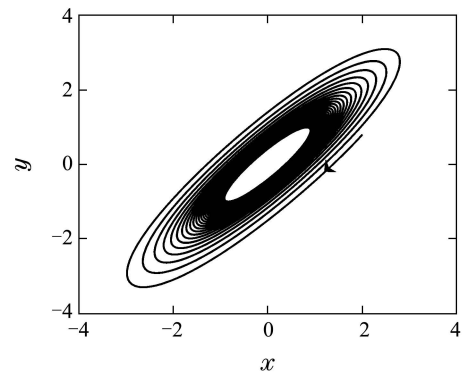


图 6 当 $a = 15, \xi = 0.1, k_1 = 0.9683, k_2 = -0.05$ 时, 系统(6)极限环

Fig. 6 Limit cycles of system (6) with $a = 15, \xi = 0.1, k_1 = 0.9683, k_2 = -0.05$

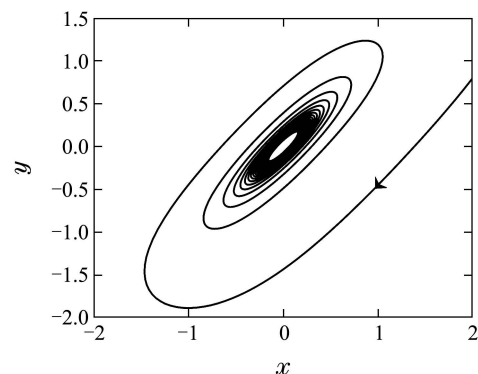


图 7 当 $a = 15, \xi = 0.1, k_1 = 0.9683, k_2 = -1.5$ 时, 系统(6)极限环

Fig. 7 Limit cycles of system (6) with $a = 15, \xi = 0.1, k_1 = 0.9683, k_2 = -1.5$

3.3 控制方法对比(Control method comparison)

取参数 $b = 43$, $c = -18$, $d = 14$, 当 $a = 14$ 时系统(1)发生Hopf分岔, 此时对系统(1)施加线性控制器得

$$\begin{cases} \dot{x} = 14(y - x) + yz, \\ \dot{y} = -18x + 14y - xz + k_1y, \\ \dot{z} = -43z + xy, \end{cases} \quad (21)$$

其中 k_1 为线性增益, 显然, 施加控制器后并没有改变原系统的平衡点 $O(0, 0, 0)$. 当取 $k_1 = -1$ 时, 系统(21)的线性化矩阵对应的特征方程有一对纯虚特征根 $\lambda_{1,2} = -0.5 \pm 8.3516i$ 和一个负根 $\lambda_3 = -43$. 特征根均具负实部, 所以系统(21)在平衡点 O 渐近稳定, 即施加控制后原系统Hopf分岔行为消失, 并逐渐稳定到平衡点 O . 如图8所示.

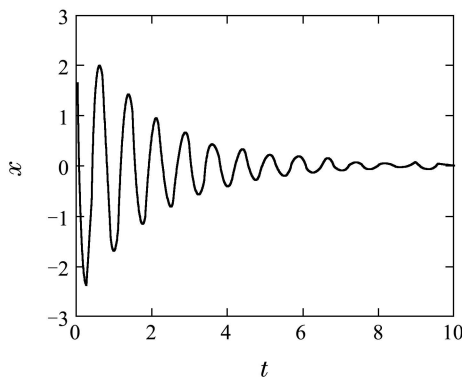


图8 $a = 14, k_2 = 0, k_1 = -1$ 时, 系统(21)波形图

Fig. 8 Waveform chart of system (21) with $a = 14, k_2 = 0, k_1 = -1$

从图4和图8可以看出, 在同样的参数条件下, washout滤波器使原系统Hopf分岔行为消失的速度比线性控制器使原系统Hopf分岔行为消失的速度快、效率高. 所以, 相对于线性控制器而言, washout滤波器具有一定的优势.

4 结论(Conclusions)

研究了一个Qi系统的Hopf分岔行为及分岔控制问题, 通过计算极限环曲率系数判定了系统的Hopf分岔类型, 并采用washout滤波器控制器控制系统的分岔行为. 首先, 判定了控制的线性部分对Hopf分岔点的影响, 然后引入直接normal form计算方法, 求出系统的Hopf分岔规范形, 通过规范形系数讨论了控制参数的选择原则及对Hopf分岔类型及周期解振幅的影响, 讨论结果表明, 控制器的线性增益能延迟甚至消除系统的Hopf分岔, 控制器的非线性增益能改变Hopf分岔的类型和周期解振幅大小. 最后对washout滤波器和线性控制器的控制效果进行对比, 得出washout滤波器相对于线性控制器具有一定的优势.

参考文献(References):

- [1] ZHAO H T, LIN Y P, DAI Y X. Bifurcation analysis and control of chaos for a hybrid ratio-dependent three species food chain [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2011, 218(5): 1533 – 1546.
- [2] YI N, LIU P, ZHANG Q L. Bifurcations analysis and tracking control of an epidemic model with nonlinear incidence rate [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(4): 1678 – 1693.
- [3] 张群力. 环状脉冲控制下的多个混沌系统同步 [J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(2): 226 – 231. (ZHANG Qunli. Synchronization of multi-chaotic systems via ring impulsive control [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(2): 226 – 231.)
- [4] 高永毅, 李邦彦. 变参数非自治蔡氏电路的混沌同步 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(3): 389 – 394. (GAO Yongyi, LI Bangyan. Chaotic synchronization of non-autonomous Chua's circuits with variable parameters [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(3): 389 – 394.)
- [5] 王林泽, 高艳峰, 李子鸣. 基于新蝶状模型的混沌控制及其应用研究 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(7): 915 – 920. (WANG Linze, GAO Yanfeng, LI Ziming. Chaos control and its application based on novel butterfly-shaped model [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(7): 915 – 920.)
- [6] 崔岩, 刘素华, 葛晓陵. Langford系统Hopf分岔极限环幅值控制 [J]. *物理学报*, 2012, 61(10): 1 – 9. (CUI Yan, LIU Suhua, GE Xiaoling. Amplitude control of limit cycle from Hopf bifurcation in the Langford system [J]. *Acta Physical Sinica*, 2012, 61(10): 1 – 9.)
- [7] 吴志强, 孙立明. 基于washout滤波器的系统Hopf分岔控制 [J]. *物理学报*, 2011, 60(5): 1 – 5. (WU Zhiqiang, SUN Liming. Hopf bifurcation control of the system based on washout filter controller [J]. *Acta Physical Sinica*, 2011, 60(5): 1 – 5.)
- [8] LE H N, HONG K S. Hopf bifurcation control via a dynamic state-feedback control [J]. *Physics Letters A*, 2012, 376(4): 442 – 446.
- [9] SEBASTIAN SUDHEER K, SABIR M. Switched modified function projective synchronization of hyperchaotic Qi system with uncertain parameters [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(12): 4058 – 4064.
- [10] 刘素华, 唐驾时. 四维Qi系统零平衡点的Hopf分岔反控制 [J]. *物理学报*, 2008, 57(10): 6162 – 6168. (LIU Suhua, TANG Jiashi. Anti-control of Hopf bifurcation at zero equilibrium of 4D Qi system [J]. *Acta Physical Sinica*, 2008, 57(10): 6162 – 6168.)
- [11] 刘素华, 赵成刚, 唐驾时, 等. Qi系统的Hopf分岔分析与幅值控制 [J]. *动力学与控制学报*, 2008, 6(2): 141 – 145. (LIU Suhua, ZHAO Chengang, TANG Jiashi, et al. Hopf bifurcation analysis and amplitude control of limit cycle in the system [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2008, 6(2): 141 – 145.)
- [12] ZHANG R Y, SUN G L. Hopf bifurcation control of the Qi 3-D four wing chaotic system via washout filter[C] // *The 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing*. Harbin: IEEE, 2011, 1: 177 – 179.
- [13] HASSARD B D. *Theory and Application of Hopf Bifurcation* [M]. New York: Cambridge University, 1981.

作者简介:

袁惠群 (1954–), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为非线性动力学与控制、转子动力学与旋转机械故障诊断、机械动力学等, E-mail: yuan_hq@163.com;

张中华 (1979–), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向为非线性动力系统的分岔分析与控制, E-mail: zhangzhonghua1979@126.com.