

PCHD 系统的参数镇定

陈 宁, 戴佳阳, 郭宇骞, 桂卫华, 熊丝琦

(中南大学 信息科学与工程学院, 410083 长沙)

摘 要: 采用无源性的控制方法研究了端口受控耗散哈密顿(PCHD)系统的参数镇定问题. 对于含未知参数的 PCHD 系统, 根据无源特性设计控制器使闭环系统的平衡点随参数漂移时, 仍能保持稳定. 所设计的控制器的结构与原系统结构相同, 这样不仅使得闭环系统保持耗散结构而且使得闭环能量分布随参数的漂移而变化, 且总在平衡点处达到极小, 从而建立 PCHD 系统参数稳定性. 以励磁系统为例, 分析了该系统参数变化对平衡点的影响, 设计了使励磁系统参数稳定的控制器, 仿真例子证明了设计的有效性.

关键词: 参数稳定性; Hamiltonian 结构; 参数镇定; 无源性控制

中图分类号: TM301

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)11-0112-06

Parametric stabilization of port-controlled Hamiltonian systems with dissipation

CHEN Ning, DAI Jia-yang, GUO Yu-qian, GUI Wei-hua, XIONG Si-qi

(School of Information Science and Engineering, Central South University, 410083 Changsha, China)

Abstract: This paper investigates parametric stabilization of port-controlled Hamiltonian systems with dissipation (PCHD). A controller is designed to make the PCHD system parametric stable as the parameters drift based on its passivity. The form of the controller is related to PCHD system. Thus, the closed-loop system maintains dissipative form and the energy function achieves its minimal value at the equilibrium point determined by the unknown parameter. An excitation system is taken as an example, and the effect of equilibrium point of the system is analyzed as the parameter varies. A controller is designed to make the excitation system parametric stable. Simulation results are given to show the effectiveness of the proposed method.

Key words: parametric stability; Hamiltonian form; parametric stabilization; passivity-based control

参数稳定性的定义是由 M. Ikeda 等^[1]首次提出. 在研究含扰动参数的 Lotka-Volterra 模型时, 发现参数变化时会影响系统平衡点的稳定性, 所以提出传统分析非线性系统稳定性的方法中仅考虑平衡点的稳定性是不符合实际的, 进而提出了参数稳定性的概念. 研究稳定性的传统分析方法是假设系统的平衡点在全参数变化范围内始终不变, 在这样的假设基础之上进行平衡点稳定性的研究. 实际上, 在大部分非线性系统中, 参数的不确定性会对系统的结构产生影响, 导致系统

平衡点的漂移或消失^[2-4], 甚至有可能使得系统不稳定. 所以忽略参数漂移的对系统影响的假设是与实际不相符的, 在考虑平衡点稳定性的同时有必要考虑参数变化对平衡点存在性的影响. 以励磁系统为例, 励磁系统是一个具有非线性性质和不确定参数的实际工程系统. 在励磁系统中, 不确定参数的变化导致系统平衡状态发生改变的现象给系统的分析和控制系统的设计带来了许多困难. 因此, 考虑励磁系统中参数的影响是很有必要的.

近年来, 有许多学者研究参数稳定性并取得了一系列的成果. Y. Ohta 等^[5]研究了具有参数不确定特性的非线性系统的参数 2 次稳定性问题; A. I. Zecevic 等^[6]研究了一类具有全局 Lipschitz

收稿日期: 2012-02-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61074001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010QZZD016).

作者简介: 陈 宁(1970—)女, 教授, 博士生导师.

通信作者: 陈 宁, ningchen@csu.edu.cn.

条件的非线性系统的参数镇定问题,通过改良的非线性矩阵不等式方法求得了系统在参数漂移时的参数稳定区域,并与分析增益调度方法做了比较;T. Wada 等^[7-8]研究了单输入/单输出的不确定参数和定常参考输入的 Lurie 系统,分析了 Lurie 系统在含参数扰动输出情况下,扰动参数在其邻域内变化时对平衡点位置和稳定性的影响,并将参数稳定性的概念扩展到上述 Lurie 非线性控制系统中,提出了参数绝对稳定性的定义.同时还研究了多变量的 Lurie 系统的参数绝对稳定性问题,求得了保持平衡点全局渐近稳定的非线性矩阵不等式(LMI)条件并且确保了系统平衡点的存在性;G. Silva 等^[9]提出了一类具有奇异扰动系统的参数绝对稳定性问题.以上方法主要采用 Lyapunov 函数来研究参数稳定性,关于非线性系统的参数稳定性的研究还远远不够深入.

相比 Lyapunov 函数方法,基于无源性控制(PBC)在非线性系统研究中得到了越来越多的关注^[10-13].基于无源性控制的优点是,对于具有耗散结构的系统的能量分布将随着未知参数的漂移而自动的改变,只要求解控制器使得闭环系统满足耗散结构,且能量函数总在未知参数对应的平衡点处取得极小值,这样就实现了参数不确定系统的参数镇定问题,相比 Lyapunov 方法不用求解复杂的 LMI 方程.由于 Hamiltonian 系统能方便地刻画出非线性系统的结构,可以通过一些方法使得 Hamiltonian 系统具有耗散结构,然后通过无源性控制求解系统的控制器.因此,它是研究参数稳定性的比较适合工具之一. Hamiltonian 系统的控制方法被广泛应用到实际工程的控制设计中,尤其是力学系统、电力系统及电机调速方面.如基于耗散 Hamiltonian 方法电力系统自适应控制^[14]等等.

本文研究含参数的 PCHD 系统的参数镇定问题,即设计控制器使 PCHD 系统的平衡点随参数漂移时,仍能保持稳定.首先基于系统无源特性设计了状态反馈控制器,实现 PCHD 系统参数镇定.然后,以励磁系统为例,分析了参数变化对励磁系统平衡点的影响,采用与原系统相同结构的状态反馈控制器对闭环系统能量进行整合,使得闭环系统的能量函数在未知参数对应的平衡点处取得极小值,从而实现励磁系统参数镇定.最后,数值仿真结果说明了设计的控制器是有效性的.

1 问题描述

考虑如下含参数的 PCHD 系统为

$$\begin{cases} \dot{x} = (J(x, \theta) - R(x, \theta)) \frac{\partial H(x, \theta)}{\partial x} + g(x, \theta)u, \\ y = g^T(x, \theta) \frac{\partial H(x, \theta)}{\partial x}. \end{cases} \tag{1}$$

式中: $J(x, \theta)$ 为反对称矩阵; $R(x, \theta)$ 为正定或半正定矩阵.其中: $x \in \mathbf{R}$ 是状态向量; $\theta \in \mathbf{R}^l$ 是任意参数; u 是输入; y 是输出; $H(x, \theta)$ 为 Hamiltonian 函数.

由于 PCHD 系统(1)是耗散系统,满足能量平衡方程

$$\dot{H}(x, \theta) |_{(1)} = -dH(x, \theta)R(x, \theta) \nabla H(x, \theta) + u^T y.$$

根据无源性的定义^[15],可以知道如果系统(1)的 Hamiltonian 函数 $H(x, \theta)$ 非负,则系统(1)是无源的.

设系统(1)具有耗散性,即参数 θ 在其邻域 $\Omega(\theta^*)$ 内漂移时结构矩阵 $J(x, \theta)$ 保持反对称, $R(x, \theta)$ 保持正定或半正定矩阵. Hamiltonian 函数 $H(x, \theta)$ 是非负函数并且满足 $\dot{H}(x, \theta) \leq 0$, 如果 Hamiltonian 函数 $H(x, \theta)$ 在 $x^*(\theta)$ 处取极小值,则 $x^*(\theta)$ 是系统(1)的稳定平衡点.如果在集合

$$M = \{x, \theta \mid \dot{H}(x, \theta) = 0\}$$

中不包含其他非平凡解,则 $x^*(\theta)$ 是系统(1)的渐近稳定平衡点.

假设对于一个标称参数值 $\theta = \theta^* \in \mathbf{R}^l$ 时,系统(1)存在一个稳定的平衡状态 $x^* \in \mathbf{R}$.若存在参数 θ^* 的一个邻域 $\Omega(\theta^*) \subset \mathbf{R}^l$,使

1) 对任意的 $\theta \in \Omega(\theta^*)$,存在一个平衡点 $x^e(\theta) \in \mathbf{R}$;

2) 对任意的 $\theta \in \Omega(\theta^*)$,平衡点 $x^e(\theta)$ 是稳定的;

则称系统(1)关于参数 θ 是参数稳定的,且 $x^e(\theta^*) = x^*$.如果对于任意的邻域 $\Omega(\theta^*)$,存在 $\theta \in \Omega(\theta^*)$ 使系统(1)不存在平衡点,或者系统(1)存在平衡点 $x^e(\theta)$ 但它是不稳定的,则称系统(1)是参数不稳定的.

由上述参数稳定性定义可知,对于含参数的 PCHD 系统(1),只要使得在参数漂移的时候 $H(x, \theta)$ 随着平衡点的漂移能对平衡点保持正定,且系统(1)存在唯一的平衡点,则系统(1)参数稳定.

本文的目标是针对系统(1),设计状态反馈控制器 $u = a(x, \theta)$,使得由该控制器和系统(1)构成的闭环系统

$$\dot{x} = [J(x, \theta) - R(x, \theta)] \frac{\partial H_a(x, \theta)}{\partial x} \tag{2}$$

参数稳定.

当控制器 $u = a(x, \theta)$ 需要满足一定的结构约束条件, 才能够将系统 (1) 的 Hamiltonian 函数 $H(x, \theta)$ 整合为闭环系统 (2) Hamiltonian 函数 $H_a(x, \theta)$.

2 基于无源性的 PCHD 系统参数镇定

本文在一定条件下通过状态反馈 $u = a(x, \theta)$ 可以得到闭环系统 (2), 从状态反馈的观点看, 可以通过满足

$$g(x, \theta)a(x, \theta) = [J(x, \theta) - R(x, \theta)] \frac{\partial H_c(x, \theta)}{\partial x}$$

的状态反馈 $u = a(x, \theta)$ 得到闭环系统 (2).

引理 1^[10] 对于含参数的 PCHD 系统

$$\dot{x} = (J(x, \theta) - R(x, \theta)) \frac{\partial H(x, \theta)}{\partial x} + g(x, \theta)u, \tag{3}$$

如果存在函数 $C(x, \theta)$ 和矩阵 g_c 使得

$$[J(x, \theta) - R(x, \theta)] \frac{\partial C(x, \theta)}{\partial x} = -g(x, \theta)g_c^T, \tag{4}$$

那么由控制器

$$u = -g_c^T \frac{\partial H_c(\xi, \theta)}{\partial \xi} \Big|_{\xi=C(x, \theta)}, \tag{5}$$

和系统 (3) 构成的闭环系统可以等价于

$$\dot{x} = [J(x, \theta) - R(x, \theta)] \frac{\partial H_a(x, \theta)}{\partial x}, \tag{6}$$

其中

$$H_a(x, \theta) = H(x, \theta) + H_c(C(x, \theta), \theta).$$

证明 通过将控制器 (5) 代入系统 (3) 中, 可以得到

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [J(x, \theta) - R(x, \theta)] \frac{\partial H(x, \theta)}{\partial x} - \\ &g(x, \theta)g_c^T \frac{\partial H_c(\xi, \theta)}{\partial \xi} \Big|_{\xi=C(x, \theta)} = [J(x, \theta) - \\ &R(x, \theta)] \left(\frac{\partial H(x, \theta)}{\partial x} + \frac{\partial C(x, \theta)}{\partial x} \frac{\partial H_c(\xi, \theta)}{\partial \xi} \Big|_{\xi=C(x, \theta)} \right) = \\ &[J(x, \theta) - R(x, \theta)] \frac{\partial (H(x, \theta) + H_c(C(x, \theta), \theta))}{\partial x} = \\ &[J(x, \theta) - R(x, \theta)] \frac{\partial H_a(x, \theta)}{\partial x}. \end{aligned}$$

由上述分析可以得到如下定理.

定理 1 对于含参数的 PCHD 系统 (3), 如果函数 $C(x, \theta)$ 和矩阵 g_c 满足条件 (4), 且如果此时闭环系统 (6) 在 θ 的一个邻域 $\theta \in \Omega(\theta^*)$ 内是耗散的, 且在 $\theta \in \Omega(\theta^*)$ 时闭环系统修正能量函数 $H_a(x, \theta)$ 对于 $\theta \in \Omega(\theta^*)$ 的平衡点 $\bar{x} = x^e(\theta)$ 是正定的, 即 $\dot{H}_a(x, \theta) \Big|_{\theta \in \Omega(\theta^*)} \leq 0$. 从而闭环系

统 (6) 在 θ 的邻域 $\theta \in \Omega(\theta^*)$ 是关于参数 θ 是参数稳定的, 系统 (3) 可以被控制器 (5) 参数镇定.

证明 对于整合后的系统能量函数 $H_a(x, \theta)$,

如果在邻域 $\theta \in \Omega(\theta^*)$ 内 $\dot{H}_a(x, \theta) \leq 0$, 由闭环系统 (6) 的耗散性和 Hamiltonian 函数 $H_a(x, \theta)$ 的正定性知系统 (6) 在 θ 的邻域 $\theta \in \Omega(\theta^*)$ 的平衡点是稳定的平衡点. 所以显然闭环系统 (6) 在 θ 的邻域 $\theta \in \Omega(\theta^*)$ 是关于参数 θ 是参数稳定的.

由上述讨论可知, 如果可以通过设计控制器使得系统的结构矩阵在 θ 的邻域 $\theta \in \Omega(\theta^*)$ 内保持耗散, 当参数 θ 在邻域变化时, 虽然系统 (6) 的平衡点是变化的, 但是此时系统是耗散的, 只要选取合适的能量函数 $H(x, \theta)$, 函数 $C(x, \theta)$ 和矩阵 g_c 使得修正后的能量函数 $H_a(x, \theta)$ 沿闭环系统 (6) 的轨迹的导数 $\dot{H}_a(x, \theta) \leq 0$, 就可以使得系统 (6) 在 $\theta \in \Omega(\theta^*)$ 内关于参数 θ 参数稳定.

3 励磁系统的参数镇定

以励磁系统为例

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{M}P_m - \frac{D}{M}(\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{M} \frac{E'_q V_s}{x_{d\Sigma}} \sin \delta, \\ \dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_d} E'_q + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} V_s \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}} V_f. \end{cases} \tag{7}$$

式中: δ 为转子角; ω 为转速; E'_q 为 q 轴暂态电势; P_m 为机械功率; M 为发电机转动惯量; $\frac{E'_q V_s}{x_{d\Sigma}} \sin \delta$ 为有功功率; T'_d 为 d 轴短路暂态时间常数; T_{d0} 为 d 轴开路暂态时间常数 x_d 为 d 轴同步电抗; x'_d 为 d 轴暂态电抗; V_f 为发电机励磁电压.

定义

$$\begin{cases} x_1 = \delta, \\ x_2 = \omega - \omega_0, \\ x_3 = E'_q. \end{cases}$$

记 $a = \frac{\omega_0}{M}P_m$, $b = \frac{D}{M}$, $c = \frac{\omega_0 V_s}{M x_{d\Sigma}}$, $d = \frac{1}{T'_d}$, $e = \frac{1}{T_{d0}} \frac{(x_d - x'_d) V_s}{x'_{d\Sigma}}$, $\lambda = \frac{c}{e}$, 将控制记为 $u = \frac{1}{T_{d0}} V_f$, 那么系统 (7) 可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = a - bx_2 - cx_3 \sin x_1, \\ \dot{x}_3 = -dx_3 + e \cos x_1 + u. \end{cases} \tag{8}$$

当 $u = 0$ 时, 令 $\dot{x} = 0$ 可以看到此时开环系统

的平衡点会随着参数的变化而变化, 假设系统(8)的 a 为变化参数, 分析开环系统的平衡点情况, 在 $u = 0$ 时, 令 $\dot{x} = 0$ 由系统(8)可以得到

$$\begin{cases} x_2 = 0, \\ a - cx_3 \sin x_1 = 0, \\ -dx_3 + e \cos x_1 = 0. \end{cases} \quad (9)$$

可以看到此时系统的平衡点会随着参数 a 的变化而变化, 因为 $a > 0, c > 0, d > 0, e > 0$, 求解方程组(9)得

$$\begin{cases} x_1 = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2ad}{ec}, x_1 \in [0, 2\pi), \\ x_2 = 0, \\ x_3 = \frac{e}{d} \cos\left(\frac{1}{2} \arcsin \frac{2ad}{ec}\right). \end{cases}$$

若 $a > \frac{ec}{2d}$, 此时开环系统不存在平衡点;

若 $a = \frac{ec}{2d}$ 时, 系统平衡点为 $\left(\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\sqrt{2}e}{2d}\right)$ 和 $\left(\frac{5\pi}{4}, 0, -\frac{\sqrt{2}e}{2d}\right)$; 若 $0 < a < \frac{ec}{2d}$, 系统平衡点为 $\left(\frac{1}{2} \arcsin \frac{2ad}{ec}, 0, \frac{e}{d} \cos\left(\frac{1}{2} \arcsin \frac{2ad}{ec}\right)\right)$, 此时系统有 4 个平衡点.

由上述分析可知, 在 $u = 0$ 时, 开环系统(8)对于 $a \in (0, \infty)$ 是参数不稳定的.

考虑系统(8)其他参数确定, 分析系统(8)在 u 变化时的闭环系统平衡点情况, 把 u 看作参数, 令 $\dot{x} = 0$, 由系统(8)得

$$\begin{cases} x_2 = 0, \\ a - cx_3 \sin x_1 = 0, \\ -dx_3 + e \cos x_1 + u = 0. \end{cases}$$

当 $u \leq -e$ 时, $d > 0$, 所以 $\bar{x}_3 < 0, \sin \bar{x}_1 < 0$, 由于 $\cos \bar{x}_1$ 可正可负, $\bar{x}_1$ 在第 3、4 象限, 系统存在 2 个平衡点. $u \geq e$, 因为 $d > 0$, 所以 $\bar{x}_3 > 0$, $\sin \bar{x}_1 > 0$, 由于 $\cos \bar{x}_1$ 可正可负, $\bar{x}_1$ 在第 1、2 象限, 系统存在 2 个平衡点.

当 $-e < u < e$ 时, 若 $0 < u < e$, 若 $u + e \cos \bar{x}_1 > 0$, 那么 $d > 0$, 所以 $\bar{x}_3 > 0, \sin \bar{x}_1 > 0$, 由上述讨论知存在 2 个平衡点, 若 $u + e \cos \bar{x}_1 < 0$, 那么 $d < 0$, 与已知矛盾, 所以此时系统不存在平衡点, 所以当 $-e < u < e$ 时, 系统存在 2 个平衡点.

采用本文讨论的方法设计系统的控制器, 取系统(8)的 Hamiltonian 函数为

$$H = -cx_3 \cos x_1 - ax_1 + \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}d\lambda x_3^2.$$

那么

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \begin{pmatrix} cx_3 \sin x_1 - a \\ x_2 \\ -c \cos x_1 + d\lambda x_3 \end{pmatrix}.$$

系统(8)可以描述成

$$\dot{x} = (J - R) \frac{\partial H}{\partial x} + gu.$$

其中

$$J = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\lambda} \end{pmatrix}, g = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

其中: $b = \frac{D}{M} > 0; \lambda = \frac{c}{e} > 0$, 取 $C(x) = x_3, g_c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\lambda} \end{pmatrix}$ 容易验证条件(4)成立.

设将系统镇定到平衡点 $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3)^T$, $H_c = f(x_3)$, 使得 $H_a = H + H_c$ 在平衡点 $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3)^T$ 达到极小值, 那么必有 $\nabla H_a \Big|_{\bar{x}} = 0$ 和 $\text{Hess}\{H_a\} \Big|_{\bar{x}} > 0$, 即下列条件必须满足

$$\begin{cases} c\bar{x}_3 \sin \bar{x}_1 - a = 0, \\ \bar{x}_2 = 0, \\ \frac{dH_c}{dx_3} \Big|_{\bar{x}_3} = c \cos \bar{x}_1 - d\lambda \bar{x}_3, \\ c\bar{x}_3 \sin \bar{x}_1 > 0, \\ \frac{d^2 H_c}{dx_3^2} \Big|_{\bar{x}_3} > \frac{c \sin^2 \bar{x}_1}{\bar{x}_3 \cos \bar{x}_1} - \lambda d. \end{cases}$$

为此, 取

$$H_c = \frac{1}{2} p x_3^2 + (c \cos \bar{x}_1 - p \bar{x}_3) x_3 - \frac{1}{2} \lambda x_3^2 d.$$

式中: p 为一个参数, 满足 $p > \frac{c \sin^2 \bar{x}_1}{\bar{x}_3 \cos \bar{x}_1}$. 因此

$$H_a = -cx_3 \cos x_1 - ax_1 + \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}p x_3^2 + (c \cos \bar{x}_1 - p \bar{x}_3) x_3.$$

所以控制器为

$$u = -\frac{1}{\lambda}(p x_3 + c \cos \bar{x}_1 - p \bar{x}_3 - \lambda d x_3). \quad (10)$$

可以使得系统(8)的闭环系统为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = a - b x_2 - c x_3 \sin x_1, \\ \dot{x}_3 = e(\cos x_1 - \cos \bar{x}_1) - \frac{p}{\lambda}(x_3 - \bar{x}_3). \end{cases} \quad (11)$$

要证明此时系统(11)的参数稳定性, 只要证明在参数 a 邻域内的平衡点的唯一性. 假设 $(\bar{x})$

是闭环系统的解,满足 $\dot{V}(\bar{x}) = 0$,那么

$$\begin{cases} c\bar{x}_3\sin \bar{x}_1 - a = 0, \\ \bar{x}_2 = 0, \\ -c\cos \bar{x}_1 + p\bar{x}_3 + c\cos \bar{x}_1 - p\bar{x}_3 = 0. \end{cases}$$

证明 上述方程组在 a 邻域内存在唯一解 $\bar{x}$,即闭环系统(11) 在 a 邻域 $(0, \infty)$ 内存在唯一平衡点 $\bar{x}$. 系统由 LaSalle 不变原理知道系统(8) 渐近稳定,所以控制器(10) 参数镇定系统(8).

4 仿真结果

为了验证本文设计的控制器的有效性,对设

计的控制器进行了数值仿真. 设系统(8) 中参数分别取值为: $a = \frac{\omega_0 P_m}{M} = 2\,066.8, b = \frac{D}{M} = 0.395, c = \frac{\omega_0 V_s}{M x_{d\Sigma}'} = 1\,148.2, d = 0.2, e = \frac{(x_d - x_d') V_s}{T_{d0} x_{d\Sigma}'} = 6, \lambda = \frac{c}{e} = 191.37$.

系统的工作点选为 $\bar{\delta} = \bar{x}_1 = 0.55, \bar{\varepsilon} - \omega_0 = \bar{x}_2 = 0, \bar{E}_q' = \bar{x}_3 = 3.443\,7$,取控制器的参数 $p = 36\,000$. 假设参数 a 从 $2\,066.8$ 漂移到 $2\,273.4$,仿真结果如图 1 ~ 图 3 所示.

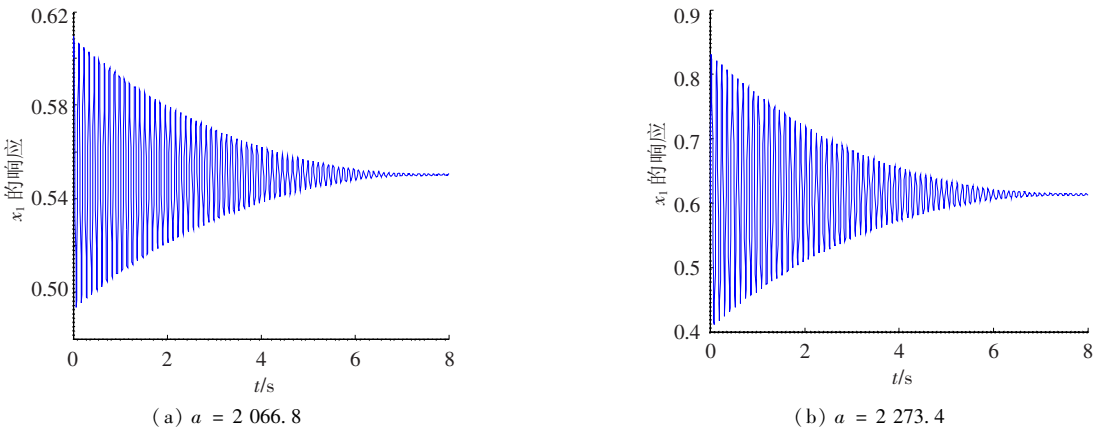


图 1 参数 a 取不同值时对应的 δ 响应

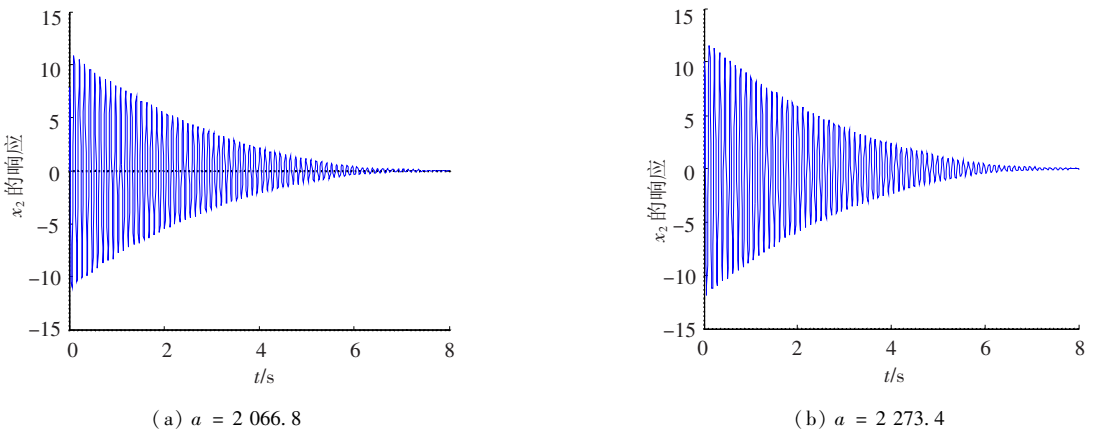


图 2 参数 a 取不同值时对应的 $\bar{\varepsilon} - \omega_0$ 响应

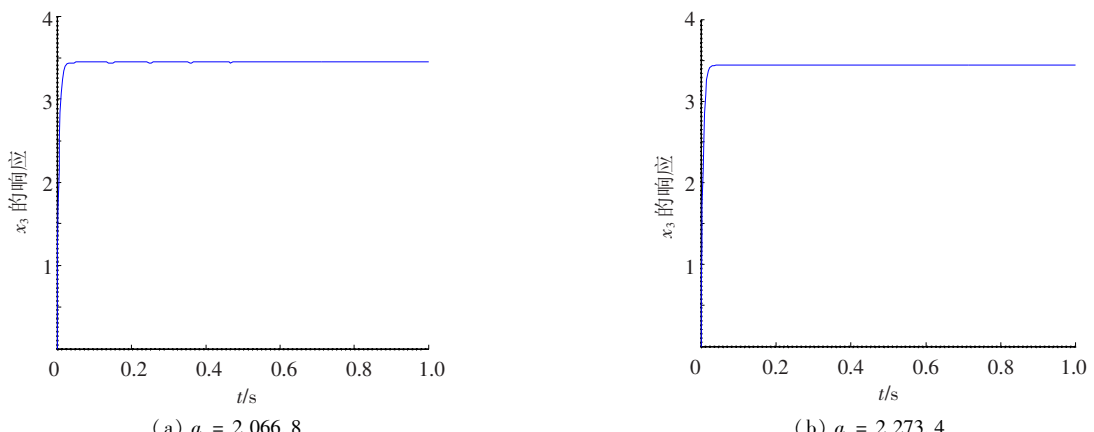


图 3 参数 a 取不同值时对应的 E_q' 响应

图 1 分别给出当参数 a 分别为 2 066.8 和 2 273.4 时对应的 δ 响应. 由 δ 响应不同, 可以看到, 在参数 a 发生漂移时, 平衡点的位置会随着漂移.

图 2 和图 3 分别给出了不同参数 a 控制器的 E'_q 响应和速度响应. 由图 2 可知, 在参数 a 漂移时, $\varepsilon - \omega_0$ 响应依然收敛到给定值 0. 由图 3 所示, 设计的控制器在参数 a 漂移时, 响应 E'_q 均能够快速收敛到给定值.

5 结 论

1) 对于含未知参数的 PCHD 系统, 设计了基于无源特性的状态反馈方法求解系统参数镇定器, 使得闭环系统保持耗散结构.

2) 所设计的控制器使闭环系统修正后的能量函数随参数的漂移而变化, 且总在期望的平衡状态处达到极小, 使系统参数稳定.

3) 以励磁系统为例, 分析了系统随参数的变化, 励磁系统的平衡点发生漂移的现象. 设计了参数镇定器, 使闭环励磁系统参数稳定.

参考文献:

- [1] IKEDA M, OHTA Y, SILJAK D D. Parametric Stability [M]. Boston, Birkhauser: New Trends in System Theory, 1991.
- [2] KWATNY H G, PASRIJA A K, BAHAR L Y. Static bifurcations in electric power networks: loss of steady-state stability and voltage collapse[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1986, 33: 981-991.
- [3] ZECEVIC A I, MILJKOVIC D M. The effects of generation redispatch on Hopf bifurcations in electric power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2002, 49(8): 1180-1186.
- [4] SUNDARAPANDIAN V. New results on the parametric stability of nonlinear systems[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2006, 43(1/2): 9-15.
- [5] OHTA Y, SILJAK D D. Parametric quadratic stabiliz-

ability of uncertain nonlinear systems[J]. System Control Letters, 1994, 22(6): 437-444.

- [6] ZECEVIC A I, SILJAK D D. Stabilization of nonlinear systems with moving equilibria[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(6): 1036-1040.
- [7] WADA T, IKEDA M, OHTA Y, *et al.* Parametric absolute stability of Lur'e systems[J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1998, 43(11): 1649-1653.
- [8] WADA T, IKEDA M, OHTA Y, *et al.* Parametric absolute stability of multivariable Lur'e systems[J]. Automatica, 2000, 36(9): 1365-1372.
- [9] SILVA G, DZUL F A. Parametric absolute stability of a class of singularly perturbed systems[C]//Proceeding of the 37th IEEE conference on Decision and Control. Washington, DC: IEEE, 1998.
- [10] ORTEGA R, Van Der SCHAFT A J, MASCHKE B, *et al.* Interconnection and damping assignment passivity-based control on port-controlled hamiltonian systems [J]. Automatica, 2002, 38(4): 585-596.
- [11] MASCHKE B, ORTEGA R, Van Der SCHAFT A J. Energy-shaping Lyapunov functions for forced Hamiltonian systems with dissipation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(8): 1498-1502.
- [12] FUJIMOTO K, SUGIE T. Canonical transformation and stabilization of generalized Hamiltonian systems [J]. Systems & Control Letters, 2001, 42(3): 217-227.
- [13] ORTEGA R, GALAZ M, ASTOLFI A, *et al.* Transient stabilization of multi-machine power systems with non-trivial transfer conductances[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(1): 60-75.
- [14] XI Zairong. Adaptive stabilization of generalized Hamiltonian systems with dissipation and its application to power systems[J]. International Journal of Systems Science, 2002, 33(10): 839-846.
- [15] Van Der SCHAFT A J. L_2 -gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999.

(编辑 张 红)