

调节 L_2 增益抑制耦合发电机组的混沌现象

谭拂晓¹, 关新平¹, 刘德荣², 罗小元¹

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 中国科学院 自动化研究所 复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100190)

摘要: 耦合发电机系统在一定条件下出现混沌, 它可能导致系统失控, 使系统彻底崩溃. 当系统存在不确定因素干扰时, 提出了 L_2 性能准则控制方法: 使耦合发电机系统渐近稳定和进行干扰抑制. 然后采用非线性系统无源化方法设计混沌系统的反馈控制律, 利用 L_2 增益进行干扰抑制. 最后计算机仿真证明该方法的有效性.

关键词: 耦合发电机; L_2 性能准则; 无源化; 渐近稳定; 干扰抑制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Chaos suppression in the coupled dynamo-system by adjusting the L-two-gain

TAN Fu-xiao¹, GUAN Xin-ping¹, LIU De-rong², LUO Xiao-yuan¹

(1. College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China;

2. The Key Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Under certain conditions, chaos may occur in a coupled dynamo-system, which can cause the system to be out of control or completely to breakdown. To deal with the uncertain disturbances in the system, we put forward the L-two-gain control scheme to asymptotically stabilize the chaotic system and restrain the disturbance. The passivity method is then applied to design the feedback stability controller, and the L-two-gain is adjusted to restrain the disturbance. The simulation results demonstrate the validity of the method.

Key words: a coupled dynamo; L-two performance; passivity; the asymptotically stabilization; restrain the disturbance

1 引言(Introduction)

以 L_2 增益为基础的非线性鲁棒控制主要利用Lyapunov理论、耗散系统理论, 直接从非线性系统出发进行性能分析、干扰抑制与控制器设计^[1,2]. 无源性是耗散性的一个重要特例, 它将输入—输出的乘积作为能量的供给率, 体现了系统在有界输入条件下能量的衰减特性, 因而无源性是稳定性的一种更高层次的抽象^[3,4]. 无源化是无源性在非线性和非线性控制系统设计中的应用. 在对系统进行反馈控制律设计时, 常常需要构造一个Lyapunov函数, 文献[5~7]研究表明, 这一过程可转化为构造一个使系统无源的存储函数.

文献[8,9]研究了耦合发电机系统. 它是一个具有混沌特征的三维自治系统, 是由连接在一起的两台发电机组成, 其中任何一台发电机都处于另一台发电机产生的电流所形成的磁场之中. 由于耦合发电

机的数学模型是多变量, 强耦合的非线性系统, 能呈现出非常丰富的动态行为, 如极限环和混沌.

当电机运行在混沌状态时, 其系统状态会出现不规则运动, 某些系统状态会出现过大的振荡幅度, 导致电机系统的控制性能不稳定. 不规则电磁噪声过大等问题, 直接影响到系统的运行质量和可靠性^[8~12]. 考虑耦合发电机系统之间的参数摄动、电压的波动以及温度变化等不确定因素的影响, 对其进行控制是一个非常重要的研究课题.

由于耦合发电机系统是非线性动力学中的一种特殊运动形式, 因此运用非线性理论中的 L_2 增益和无源化方法来分析和解决耦合发电机的混沌现象, 消除系统中的混沌运动, 降低系统自激振荡的危害, 实现耦合发电机系统的快速稳定.

但是由于 L_2 增益的附加条件较强, 并且当系统存在扰动时控制输入和干扰输入通道要满足一定的

匹配条件, 因而限制了该方法的应用范围^[13,14]. 本文是把现有文献中的 L_2 增益和非线性无源化从理论的抽象转化成工程实际的一次运用. 特别是在对非线性系统的坐标变换方程的选取、系统无源化时数据转化的处理、Lyapunov函数的构造以及怎样进行干扰抑制等问题进行一次工程实践探索.

本文首先提出耦合发电机混沌控制问题, 然后给出 L_2 性能准则. 采用无源化方法分析和设计该混沌系统的反馈镇控制定律, 以 L_2 增益为手段进行干扰抑制, 最后使用计算机仿真证明该方法的有效性.

2 问题描述(Problem formulation)

耦合发电机非线性系统, 其数学模型可以表示如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = -\mu x + y(z + a), \\ \dot{y} = -\mu y + x(z - a), \\ \dot{z} = 1 - xy. \end{cases} \quad (1)$$

其中各符号定义及其运行条件见文献[8,9]. 当 $\mu = 1$, $a = 2$ 时, 耦合发电机产生混沌. 其三维相空间演化见图1所示.

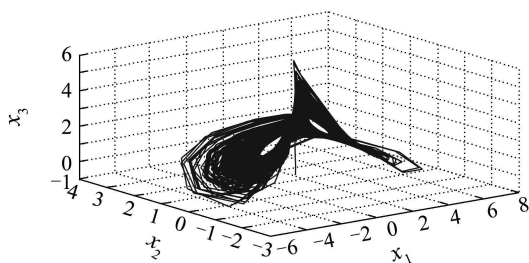


图1 耦合发电机混沌系统相平面图

Fig. 1 Phase image of the coupled dynamos chaos

考虑系统参数变化和外部扰动(如电压波动、温度变化等不确定因素)的影响, 将式(1)写成以下一般形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mu x_1 + x_2(x_3 + a) \\ -\mu x_2 + x_1(x_3 - a) \\ 1 - x_1 x_2 \end{bmatrix} + g_1(x)\omega + g_2(x)u.$$

上式中的 ω 为外部扰动, u 为控制输入. 为便于控制器的设计, 将上式写成如下的非线性方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g_1(x)\omega + g_2(x)u, \\ z = h(x). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $x \in \mathbb{R}^3$ 为状态向量; $u \in \mathbb{R}$, $z \in \mathbb{R}$ 分别为输入信号和输出信号; $f(x)$, $g_1(x)$, $g_2(x)$ 为3维向量函数.

对于耦合发电机系统(2), 该混沌控制问题可以转化为下列 L_2 性能准则. 任意给定的正数 γ , 求状态反馈镇定控制律 $u = A(x) + B(x)$, $A(0) = 0$, 并使

闭环性能满足

1) 当 $\omega = 0$ 时, 控制律为 $u = A(x)$ 使闭环系统在 $x = 0$ 时是渐近稳定;

2) 若 $\omega \neq 0$ 时, 控制律为 $u = A(x) + B(x)$, 则对于任意给定的 $T > 0$, 当 $x = 0$ 时, 不等式

$$\begin{aligned} \int_0^T \|z(t)\|^2 dt &\leq \\ \gamma^2 \int_0^T \|\omega(t)\|^2 dt, \quad \forall \omega \in L_2[0, T] \end{aligned} \quad (3)$$

成立. 其中: $L_2[0, T] = \{\omega_T(t) | \omega_T \in L_2\}$, z 为可测量的输出信号.

3 基于 L_2 性能准则的反馈控制律(Feedback control law based on L_2 performance)

由于耦合发电机系统是一非线性系统, 因此本文根据非线性微分同胚变换, 采用Lie导数和Lie括号分析和设计该系统的反馈控制律. 设计分两步: 第1步设计当扰动 $\omega = 0$ 时的控制律; 第2步设计当 $\omega \neq 0$ 时的系统控制律. 两步求得控制律相加, 就是扰动作用下耦合发电机系统总的控制律.

3.1 $\omega = 0$ 时, 耦合发电机系统坐标变换(Coordinate transform of coupled dynamos system at $\omega = 0$)

当 $\omega = 0$ 时, 耦合发电机系统(2)可写成下式:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g_2(x)u, \\ z = h(x). \end{cases} \quad (4)$$

此时取 $g_2(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$, $h(x) = x_1 x_2$, 那么可以求得以下数据:

$$\begin{aligned} L_{g_2}h(x) &= 0, \quad L_{g_2}L_f h(x) = x_1^2 \neq 0, \\ L_f h(x) &= -2x_1 x_2 + x_2^2(x_3 + 2) + x_1^2(x_3 - 2), \\ [f, g_2](x) &= -\frac{\partial f}{\partial x} g_2 = \begin{bmatrix} -x_2 & -x_1 & 0 \end{bmatrix}^T. \end{aligned}$$

故该发电机系统相对阶为2. 则坐标变换方程为

$$\begin{cases} L_{g_2}\eta(x) = \frac{\partial \eta}{\partial x_3} = 0, \\ L_{[f, g_2]}\eta(x) = x_2 \frac{\partial \eta}{\partial x_1} + x_1 \frac{\partial \eta}{\partial x_2} = 0. \end{cases}$$

其中 $\eta(x) = x_1^2 - x_2^2$ 是该方程组的一个解.

对于系统耦合发电机系统(4), 取以下坐标变换:

$$\begin{cases} \xi_1 = h(x) = x_1 x_2, \\ \xi_2 = L_f h(x) = \\ \quad -2x_1 x_2 + x_2^2(x_3 + 2) + x_1^2(x_3 - 2), \\ \eta(x) = x_1^2 - x_2^2, \end{cases} \quad (5)$$

使该系统变换成如下标准链式结构:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = v, \\ \dot{\eta} = f_0(\eta, \xi_1) = [L_f \eta(x)]. \end{cases} \quad (6)$$

其中 v 为坐标变换后的控制输入. 那么可以得到

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= [L_f \eta(x)] = \\ & \begin{bmatrix} 2x_1 - 2x_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_1 + x_2(x_3 + 2) \\ -x_2 + x_1(x_3 - 2) \\ 1 - x_1x_2 \end{bmatrix} = \\ & -2(x_1^2 - x_2^2) + 8x_1x_2. \end{aligned}$$

由式(5)的逆变换, 最终可得

$$\dot{\eta} = -2\eta + 8\xi_1. \quad (7)$$

其中变换阵为

$$\Phi(x) = [\eta \ \xi_1 \ \xi_2]^T = [\eta(x) \ h(x) \ L_f h(x)]^T.$$

该变换阵具有局部微分同胚, 即它的Jacobi矩阵对任意 x 非奇异.

3.2 $\omega = 0$ 时, 耦合发电机系统反馈控制律(Feedback control law of coupled dynamos system at $\omega = 0$)

由坐标变换后的标准链式结构式(6)可知该系统是由两个积分器串联构成. 由于系统(6)的相对阶是2, 故分两步设计反馈镇定控制律.

无源化递推设计反馈控制律时需要用到相对阶为1的一些结论, 因此由式(6)可知系统相对阶为1时系统可表示如下:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = v, \\ \dot{\eta} = f_0(\eta, \xi_1). \end{cases} \quad (8)$$

定理 1 考察系统(8), 如果存在函数 $\beta_1(\eta)$ ($\beta(0) = 0$)和正定函数 $W(\eta)$, 使得下式成立:

$$\dot{W} = L_{f_0} W(\eta) < 0, \quad \forall \eta \neq 0, \quad (9)$$

并且子系统可以表示成

$$f_0(\eta, \xi_1) = f_0(\eta) + f'_0(\eta, \xi_1)\xi_1, \quad (10)$$

则使闭环系统在原点稳定的反馈控制律为

$$v = \frac{\partial \beta_1}{\partial \eta} f_0(\eta, \xi_1) - L_{f'_0} W(\eta) - \xi_1 + \beta_1(\eta). \quad (11)$$

证 略. 见参考文献[5,14].

耦合发电机系统(4), 由于相对阶为2, 通过坐标变换转换成标准链式结构式(6), 则反馈镇定控制律设计如下.

第1步 首先视积分器 ξ_1 的输入 ξ_2 为假想控制信号, 利用 η 子系统与积分器 ξ_1 的串联结构, 并根据定

理1的结论, 求得 (η, ξ_1) 坐标的子系统所对应的镇定控制律 $\beta_2(\eta, \xi_1)$.

设存在函数 $\beta_1(\eta)$ 和正定函数 $W(\eta)$, 使得

$$\frac{\partial W}{\partial \eta} f_0(\eta, \beta_1(\eta)) < 0, \quad \forall \eta \neq 0,$$

成立. 即当 $\xi_1 = \beta_1(\eta)$ 时, η 子系统在 $\eta = 0$ 是渐近稳定.

令 $\xi'_1 = \xi_1 - \beta_1(\eta)$, 则 (η, ξ_1) 子系统就可以表示为

$$\begin{cases} \dot{\xi}'_1 = \xi_2 - \dot{\beta}_1(\eta), \\ \dot{\eta} = f_0(\eta, \xi'_1 + \beta_1(\eta)). \end{cases}$$

进一步, 若将 ξ_2 看作是该系统的假想控制输入, 那么根据定理1可以得到镇定控制律为

$$\begin{aligned} \xi_2 &= \beta_2(\eta, \xi_1) = \frac{\partial \beta_1}{\partial \eta} f_0(\eta, \xi_1) - \\ & L_{f'_0} W(\eta) - \xi_1 + \beta_1(\eta, \xi_1), \end{aligned} \quad (12)$$

其中 f'_0 满足

$$f_0(\eta, \xi'_1 + \beta_1(\eta)) = f_0(\eta, \beta_1(\eta)) + f'_0(\eta, \xi'_1)\xi'_1,$$

并且令

$$\begin{aligned} \eta' &= [\eta \ \xi'_1]^T, \\ F_0(\eta', \xi_2) &= \begin{bmatrix} f_0(\eta, \xi'_1 + \beta_1(\eta)) \\ \xi_2 - \dot{\beta}_1(\eta) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

则系统可以表示成

$$\begin{cases} \dot{\eta}' = F_0(\eta', \xi_2), \\ \dot{\xi}'_2 = v. \end{cases} \quad (13)$$

第2步 以 v 为坐标变换后的控制输入, 求使系统 (η, ξ_1, ξ_2) 稳定的反馈控制律.

由第1步可得, 对于该系统的 η' 子系统, 当 $\xi_2 = \beta_2(\eta, \xi_1)$ 时, 正定函数取

$$W'_1(\eta, \xi'_1) = W(\eta) + \frac{1}{2}\xi'^2_1.$$

该正定函数将满足

$$\frac{\partial W'_1}{\partial \eta'} F_0(\eta', \beta_2(\eta')) < 0, \quad \forall \eta' \neq 0.$$

令 $\xi'_2 = \xi_2 - \beta_2(\eta, \xi_1)$, $\beta_2(\eta, \xi_1) = \beta_2(\eta')$. 并记 $F'_0(\eta', \xi'_2) = [0 \ 1]^T$, 则有 $F_0(\eta', \xi'_2 + \beta_2(\eta')) = F_0(\eta', \beta_2(\eta')) + F'_0(\eta', \xi'_2)\xi'_2$.

由式(11)可得系统(13)的反馈控制律

$$v = \frac{\partial \beta_2}{\partial \eta'} F_0(\eta', \xi_2) - L_{F'_0} W'(\eta') - \xi_2 + \beta_2(\eta').$$

又由于

$$L_{F'_0} W'(\eta') = \left[\frac{\partial W}{\partial \eta} \ \xi'_1 \right] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \xi'_1 = \xi_1 - \beta_1(\eta),$$

因此可以得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial \beta_2}{\partial \eta'} F_0 &= \left[\frac{\partial \beta_2}{\partial \eta} \quad \frac{\partial \beta_2}{\partial \xi_1'} \right] F_0 = \\ \frac{\partial \beta_2}{\partial \eta} f_0(\eta, \xi_1' + \beta_1) &+ \frac{\partial \beta_2}{\partial \xi_1'} (\xi_2 - \dot{\beta}_1(\eta)). \end{aligned}$$

故最终可以求得系统(7)的反馈控制镇定律为

$$\begin{aligned} v &= \frac{\partial \beta_2}{\partial \eta} f_0(\eta, \xi_1) + \frac{\partial \beta_2}{\partial \xi_1'} (\xi_2 - \dot{\beta}_1(\eta)) - \\ &\xi_1 + \beta_1(\eta) - \xi_2 + \beta_2(\eta, \xi_1). \end{aligned} \quad (14)$$

3.3 $\omega \neq 0$ 时, L₂干扰抑制(Restrain the disturbance based on L₂ performance at $\omega \neq 0$)

根据文献[14 ~ 16], 存在以下定理.

定理 2 当 $\omega \neq 0$ 时, 考察耦合发电机混沌系统(2), 设控制输入和干扰输入通道满足以下匹配条件: 即存在适当的函数阵 $g_1'(x)$, 使 $g_1(x) = g_2(x)g_1'(x)$ 成立. 并且存在镇定控制律 $A(x)$ 及Lyapunov函数 $V(x)$, 使得下式成立:

$$\frac{\partial V(x)}{\partial x} (f(x) + g_2(x)A(x)) \leq \frac{1}{2} h^T(x)h(x),$$

那么, 对于任意给定的 $\gamma > 0$, 则该系统所对应的L₂性能准则的解为

$$u = A(x) + B(x), \quad (15)$$

$$B(x) = -\frac{1}{2\gamma^2} g_1'(x) g_1'^T(x) g_2^T(x) \frac{\partial^T V(x)}{\partial x}. \quad (16)$$

证 略.

4 数值计算与仿真研究(Computation and simulation study)

4.1 $\omega = 0$ 时, 反馈控制律 $A(x)$ (Feedback control law $A(x)$ at $\omega = 0$)

对于耦合发电机非线性系统(2), 当 $\omega = 0$ 时设其参数为 $\mu = 1$, $a = 2$. 因此可以根据上面的分析步骤求得反馈控制率 $A(x)$.

令 $\xi_1 = \beta_1(\eta) = -\eta$, $\xi_1' = \xi_1 - \beta_1(\eta)$, $W(\eta) = \frac{1}{2}\eta^2$. 可以验证

$$\dot{W} = L_{f_0} W = \eta \dot{\eta} = -10\eta^2 < 0.$$

由式(10)可得到 $f_0' = 8$. 根据式(12), 则可以得到 $\beta_2(\eta, \xi_1) = -7\eta - 9\xi_1$.

令 $\xi_2' = \xi_2 - \beta_2$, 则 $\frac{\partial \beta_2}{\partial \xi_1'} = -9$. 此时 $W' = W(\eta) + \frac{1}{2}(\xi_1 - \beta_1)^2$, 可以验证 $\dot{W}' < 0$.

根据式(14), 并结合 $\xi_1 = \beta_1(\eta) = -\eta$, $\dot{\xi}_1 = \xi_2 = -\dot{\eta}$, 可以得到 $\omega = 0$ 时控制律为

$$v = -6\dot{\eta} - 8\eta - 10\xi_1 = 4\eta - 58\xi_1.$$

根据式(5)(14)最终可以得到 $\omega = 0$ 时的反馈控制律

$$A(x) = 4(x_1^2 - x_2^2) - 58x_1x_2.$$

4.2 $\omega \neq 0$ 时, 反馈控制律 u 和 $B(x)$ (Feedback control law u and $B(x)$ at $\omega \neq 0$)

当 $\omega \neq 0$ 时, 令 $\omega = \sin(0.01t)$. 取 $g_1'(x) = [1 \ 0 \ 0]$. γ 取大于零的值. 根据定理2中的匹配条件, 取正定的存贮函数

$$\begin{aligned} V(x) &= W(\eta) + \frac{1}{2}(\xi_1')^2 + \frac{1}{2}(\xi_2')^2 = \\ &\frac{1}{2}\eta^2 + \frac{1}{2}(\xi_1 - \beta_1(\eta))^2 + \\ &\frac{1}{2}(\xi_2 - \beta_2(\eta, \xi_1))^2. \end{aligned}$$

并根据式(16), 可以求得

$$\begin{aligned} B(x) &= \\ &-\frac{1}{2\gamma^2} (x_1^2 + x_2^2) \times (7(x_1^2 - x_2^2) + \\ &7x_1x_2 + x_1^2(x_3 - 2) + x_2^2(x_3 + 2)). \end{aligned}$$

此时根据L₂性能准则, 令 $\gamma = \sqrt{5}$ 时可以得到总控制律为

$$\begin{aligned} u &= A(x) + B(x) = \\ &4(x_1^2 - x_2^2) - 58x_1x_2 - \\ &0.1(x_1^2 + x_2^2) \times (7(x_1^2 - x_2^2) + \\ &7x_1x_2 + x_1^2(x_3 - 2) + x_2^2(x_3 + 2)). \end{aligned}$$

4.3 仿真研究(Simulation study)

对于耦合发电机的数学模型(1), 当 $\mu = 1$, $a = 2$ 时, 耦合发电机产生混沌(图1所示).

当 $\omega = 0$ 时, 在55s加控制 $A(x)$, 其仿真结果如图2所示. 系统很快实现了镇定.

当 $\omega \neq 0$ 时, 取 $\omega = \sin(0.01t)$. 在55s时加入控制 $u = A(x) + B(x)$, 系统经过一段时间调整, 在实现混沌镇定的同时有效的抑止了干扰, 见图3.

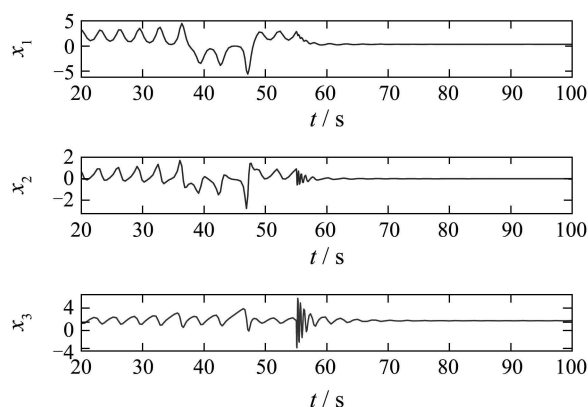


图2 无扰动时的系统镇定图

Fig. 2 The system stabilization figure without disturbance

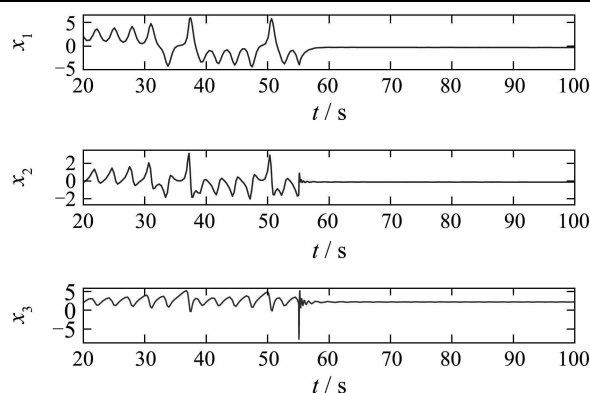


图3 有扰动时的系统镇定图

Fig. 3 The system stabilization figure with disturbance

5 结论(Conclusion)

本文针对耦合发电机混沌系统,采用无源化设计系统的反馈镇定控制律,以 L_2 增益为干扰抑止手段,并进行计算机仿真研究.通过计算机仿真可以看出在55s加上非线性控制律后,系统很快实现稳定.其超调量不大,调整时间短,因而证明了该方法的有效性.因此可以得出以下结论:该方法不用改变系统的固有参数,即可实现系统镇定和干扰抑制;计算求得控制律简单,表明无源化和 L_2 增益是实现非线性系统控制的一种有效方法.

参考文献(References):

- [1] BYMES C I, ISIDORI A, WILLMES J C. Passivity, feedback equivalence and the global stabilization of minimum phase nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1991, 36(11): 1228 – 1240.
- [2] VAN DER SCHFT A J. L_2 -gain analysis of nonlinear systems and nonlinear state feedback H_∞ control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992, 37(6): 770 – 784.
- [3] SANTOSUOSSO G L. Passivity of nonlinear systems with input-output feedthrough[J]. *Automatica*, 1997, 33(4): 693 – 697.
- [4] LIN W. Global robust stabilization of minimum phase nonlinear systems with uncertainty[J]. *Automatica*, 1997, 33(3): 453 – 462.
- [5] LIN W, SHEN T. Robust passivity and feedback design for minimum-phase nonlinear systems with structural uncertainty[J]. *Automatica*, 1999, 35(1): 35 – 47.
- [6] 梅生伟, 申铁龙, 孙元章, 等. 带有干扰的非线性系统的无源化控制. 控制理论与应用[J]. 1999, 16(6): 797 – 806.
(MEI Shengwei, SHEN Tielong, SUN Yuanzhang, et al. Passivation control of nonlinear systems with disturbance[J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(6): 797 – 806.)
- [7] 冯纯伯, 张佩健, 费树岷. 基于无源性分析的鲁棒控制系统设计[J]. 自动化学报, 1999, 25(5): 577 – 582.
(FENG Chunbo, ZHANG Kanjian, FEI Shumin. Passivity based design of robust control systems[J]. *Acta Automatic Sinica*, 1999, 25(5): 577 – 582.)
- [8] AGIZA H N. Controlling chaos for the dynamical system of coupled dynamos[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2002, 13(2): 341 – 352.
- [9] LI S, TIAN Y. Global stabilization of a coupled dynamo system[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2003, 16(5): 787 – 793.
- [10] 张波, 李忠, 毛宗源, 等. 利用Lyapunov指数和容量维分析永磁同步电机仿真中的混沌现象[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(4): 589 – 592.
(ZHANG Bo, LI Zhong, MAO Zongyuan, et al. Analyzing chaotic phenomenon in permanent-magnet synchronous motors with Lyapunov exponent and capacity dimension[J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(4): 589 – 592.)
- [11] 李洁, 任海鹏. 永磁同步电动机中混沌运动的部分解耦控制[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(4): 637 – 640.
(LI Jie, REN Haipeng. Partial decoupling control of chaos in permanent magnet synchronous motor[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(4): 637 – 640.)
- [12] 杨立永, 李正熙, 李华德, 等. 感应电动机中调速系统的自适应逆控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(1): 95 – 98.
(YANG Liyong, LI Zhengxi, LI Huade, et al. Adaptive inverse control of induction motor drive system[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(1): 95 – 98.)
- [13] 宫清先, 张化光, 孟祥萍. 一类MIMO非线性系统的稳定干扰解耦控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(2): 199 – 203.
(GONG Qingxian, ZHANG Huaguang, MENG Xiangping. Disturbance decoupling control with stability for a class of MIMO nonlinear systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(2): 199 – 203.)
- [14] 慕春隶, 梅生伟, 申铁龙. 非线性系统鲁棒控制理论的一些新进展[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(1): 1 – 6.
(MU Chundi, MEI Shengwei, SHEN Tielong. New developments in robust nonlinear control theory[J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(1): 1 – 6.)
- [15] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
(MEI Shengwei, SHEN Tielong, LIU Kangzhi. *Modern Robust Control Theory and Application*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [16] 胡跃明. 非线性系统理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
(HU Yueming. *Nonlinear Control Systems Theory and Application*[M]. Beijing: The National Defence Industry Press, 2002.)

作者简介:

谭拂晓 (1971—), 男, 燕山大学博士研究生, 主要研究方向是非线性系统的鲁棒控制、多智能体网络系统协调与合作控制, E-mail: Tanfxme@163.com;

关新平 (1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向是非线性系统的鲁棒控制、多智能体系统的协调与合作控制、复杂网络控制等;

刘德荣 (1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 美国伊利诺斯大学芝加哥分校电机与计算机工程系, 主要研究方向是智能控制理论及应用、人工神经网络、电力系统运行与控制、无线通讯与无线网络等;

罗小元 (1976—), 男, 博士, 主要研究方向是非线性系统的鲁棒控制、多智能体系统的协调与合作控制, 容错控制.