

文章编号: 1001-0920(2012)02-0308-05

一类三关节体操机器人的类等效建模

薛方正¹, 厚之成¹, 李祖枢^{1,2}

(1. 重庆大学 智能自动化研究所, 重庆 400044; 2. 重庆理工大学 计算机学院, 重庆 400044)

摘要: 无力矩驱动模式的电机驱动器使得三关节体操机器人控制难度增加, 但具有实际意义. 针对该类机器人系统, 提出了基于“类等效”思想的简化动力学模型, 该模型由刚体动力学和加速度驱动两个子模型构成. 利用拉格朗日法建立刚体动力学方程; 使用频率响应法得到加速度驱动模型的伯德图并确定了其阶次, 根据阶跃响应曲线确定其纯滞后; 使用改进的遗传算法辨识模型参数. 通过对简化前后的模型进行对比实验以及简化模型的稳定控制实验, 验证了简化模型的有效性和优越性.

关键词: 体操机器人; 参数辨识; 类等效建模; 动力学模型

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Quasi-equivalent modeling of a three-link acrobot

XUE Fang-zheng¹, HOU Zhi-cheng¹, LI Zu-shu^{1,2}

(1. Institute of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Computer, Chongqing Ligong University, Chongqing 400044, China. Correspondent: XUE Fang-zheng, E-mail: frank_xfz@sina.com.cn)

Abstract: The control difficulty will rise if the three-link acrobot uses a motor driver without torque-driven mode, but it's of practical. A simplified dynamic model composed of body dynamic and motor driven model based on “quasi-equivalent” method is presented to solve the modeling problem of such a robot. The body dynamic function is constructed by using Lagrange function. The order of acceleration driven model is identified by the Bode Plot via frequency response based modeling method, and the pure delay is added according to the acceleration response curves. The variables of the model are identified by using a modified generation algorithm(GA). Experiments show the effectiveness and superiority of the simplified model.

Key words: acrobot; variable identification; quasi-equivalent modeling; dynamic model

1 引言

三关节体操机器人是一种由两个主动关节和一个被动关节组成的欠驱动系统. 多数情况下, 肩关节和髋关节是主动的, 手关节是被动的. 三关节体操机器人是一种多输入型欠驱动系统, 因此比两关节体操机器人和倒立摆系统更适合作为研究欠驱动问题的标准平台.

欠驱动体操机器人系统的研究大致有两种目的: 1) 利用欠驱动机器人系统的难控性, 将其作为标准平台验证新的理论、技术和方法; 2) 针对实际的机器人系统可能出现的欠驱动状态, 开展建模与控制技术方面的研究. 本文主要关注第2个方面的意义, 因为机器人在工作过程中, 难免会出现欠驱动状态, 解决这个问题对提高机器人的安全性和适应性非常重要. 比如,

仿人机器人在步行时, 适当引入欠驱动步态可以节省能量; 而在空间机器人上设计欠驱动关节可以节省电力、负重和空间资源; 在机器人关节电机损坏的情况下, 全驱动机器人会退化为欠驱动机器人, 因此有必要设计应急的欠驱动控制预案.

在体操机器人的建模与控制领域, 基于仿真系统的控制算法研究较多. 基于能量的控制^[1]、智能控制^[2-3]、学习控制^[4]和现代控制理论^[5]等方法都取得了较好的控制效果. 而在实物控制方面, 基于力矩驱动模式^[6-7]的两关节体操机器人控制已有报道, 三关节情况较少见. 为了使基于模型和实物的控制研究更好地衔接, 一些学者进行了精确建模的研究, 包括平衡点附近的建模^[3]、基于无味卡尔曼滤波的建模^[8]、考虑不确定性的建模^[9]等. 大部分的研究都假

收稿日期: 2010-09-14; 修回日期: 2011-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60905053); “211工程”三期建设项目(S-09108).

作者简介: 薛方正(1977-), 男, 副教授, 从事机器人与智能控制的研究; 厚之成(1987-), 男, 硕士生, 从事机器人与智能控制的研究.

设电机可采用力矩驱动模式,而在工程中大量使用的经济型电机驱动器往往不支持力矩驱动模式.虽然很多驱动器都有电流环,但电流环被封装在速度环里,控制器既得不到电流数据也不能直接给定电流,基于该类驱动器的体操机器人研究具有很强的实际意义.文献[10]试图通过拉格朗日方程和遗传算法解决这类三关节体操机器人的动力学建模问题,但忽略了电机驱动过程.

本文以使用无力矩驱动模式的电机驱动器的三关节体操机器人(以下称三关节体操机器人)为对象,研究其建模与控制问题,以期对基于此类驱动器的机器人欠驱动控制器设计提供帮助.

2 三关节体操机器人及建模分析

图1(a)展示了三关节体操机器人系统的实物,包括机器人本体、电机驱动器、控制卡和计算机等.机器人的电机驱动器不支持力矩驱动模式,机器人的肢体参数按人体环节统计参数的比例特征设计.

三关节体操机器人能够被抽象为1个由3节连杆、3个关节连接构成的刚体,如图1(b)所示.机器人手臂、躯干和腿分别定义为第1个、第2个、第3个连杆,手关节、肩关节和髋关节分别定义为第1个、第2个、第3个关节.第 n 个连杆的长度、质心-轴心距、质量以及以质心为转轴时的转动惯量分别为 L_n, l_n, m_n, J_n ,第 n 个关节的摩擦系数和角度分别为 c_n, θ_n ,角度的正方向为顺时针方向.

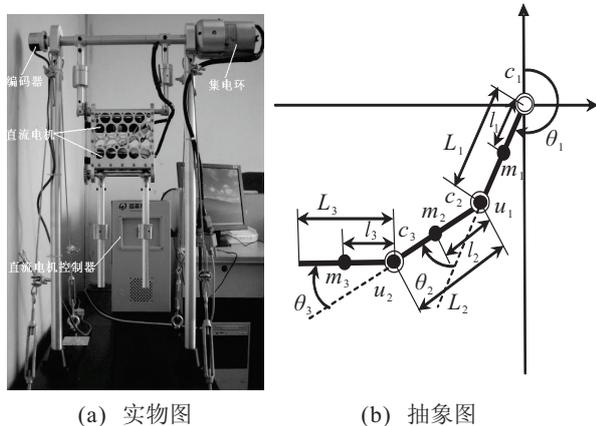


图1 三关节体操机器人模型

三关节体操机器人的控制过程为:计算机根据当前状态计算控制律,发送至控制卡速度闭环的给定(如速度闭环在驱动器上,控制卡退化为一个输入输出通道),通过驱动器驱动电机运动,从而带动机器人运动.由于驱动器不支持力矩驱动模式,从控制器的角度看,体操机器人的模型是从关节速度给定到位置输出的映射.该模型包括电机驱动和刚体动力学两部分:电机驱动模型是一个速度加电流双闭环结构,

其阶次为3阶或4阶;刚体动力学模型一般用拉格朗日方程建立.如将该模型转化为状态方程形式,则须设计14个以上的状态变量,并且状态转移矩阵复杂.

3 三关节体操机器人的类等效建模

为了降低模型的复杂度,减少计算量,本文基于“类等效”的思路,进行模型简化.

3.1 类等效建模

类等效建模是一种工程中常用的模型简化方法^[11],其中心思想是:为了降低模型复杂性,只关注系统与模型在特征参数(包括超调、转折频率、调节时间、静差、纯滞后时间等)上的等价,而忽略高频干扰等次要信息.类似的思路在空间系统^[12]等的建模与控制问题上有非常成功的应用.

基于遗传算法等搜索技术的参数辨识算法的发展,使得类等效建模更为方便:只需先确定模型的结构,使得模型与实际系统在结构上是等价的,再使用遗传算法搜索合适的参数,便可保证模型的有效性.

构造三关节体操机器人的简化模型结构如图2所示,其中 $r_{\ddot{\theta}_n}, r_{\dot{\theta}_n}, D_{Sn}$ 和 D_{An} 分别表示第 n 个关节的加速度给定、速度给定、速度驱动过程和加速度驱动过程.在速度给定前加积分环节的目的在于引入加速度给定,使得 D_{An} 的输入和输出的量纲保持一致. L 表示刚体动力学模型, L 的输入被设计为 $\ddot{\theta}_n$,使得自身结构得到简化.关节2和关节3的速度闭环忽略了两关节之间的相互影响,其依据是:一般控制卡或驱动器上的速度控制器大都是经过优化的,通过复杂的结构和智能的算法保证闭环响应曲线在存在扰动的情况下仍然可以达到工程控制要求(如3拍后完全跟踪输入信号),从而保证闭环响应曲线在主性能指标上的一致性.另外,由于自由关节1的存在,同时关节2与关节3的电机功率较大,关节减速器的放大倍数也较大,从而关节2与关节3之间的相互影响是有限的,最后的实验结果也验证了这一点.

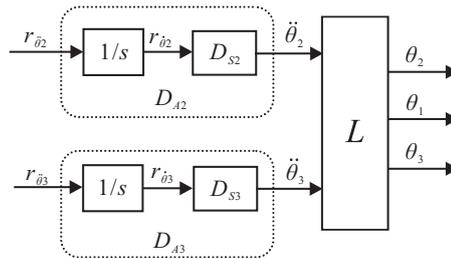


图2 三关节单杠体操机器人的简化模型

3.2 三关节体操机器人的简化模型

三关节体操机器人的总体模型结构如图2所示,需要进一步确定的是加速度驱动模型和刚体动力学模型的结构.

3.2.1 刚体动力学模型

为了尽量避免额外误差的引入, 本文使用可直接测量的相对角度, 即关节角作为模型参数. 体操机器人简化为如图 1 所示的三连杆结构, 带粘性阻尼的动力学拉格朗日方程为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{X}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial X_i} + \frac{\partial V}{\partial X_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{X}_i} = U_i, \quad (1)$$

$$i = 1, 2, 3.$$

其中: T 为系统动能, V 为系统势能, D 为系统耗散能, X_i 为系统的广义坐标. 将 T, V, D, X_i 的代数表达式代入拉格朗日方程, 便可得到系统的状态空间描述.

选取 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 作为拉格朗日方程的广义坐标, 有

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left\{ J_i \left(\sum_{k=1}^i \dot{\theta}_k \right)^2 + m_i \left[\left(\frac{d}{dt} \left(\sum_{k=1}^{i-1} L_k \sin \left(\sum_{j=1}^k \theta_j \right) + l_i \sin \left(\sum_{j=1}^i \theta_j \right) \right) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} \left(\sum_{k=1}^{i-1} L_k \cos \left(\sum_{j=1}^k \theta_j \right) + l_i \cos \left(\sum_{j=1}^i \theta_j \right) \right) \right)^2 \right] \right\}, \quad (2)$$

$$V = \sum_{i=1}^3 m_i g \left[\sum_{k=1}^{i-1} L_k \cos \left(\sum_{j=1}^k \theta_j \right) + l_i \cos \left(\sum_{j=1}^i \theta_j \right) \right], \quad (3)$$

$$D = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 c_i \dot{\theta}_i^2. \quad (4)$$

将体操机器人的动力学模型转化为状态方程形式, 得

$$A(X) \ddot{X} = B(X, \dot{X}) \dot{X} + C(X) + D. \quad (5)$$

其中: $X = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$; u_2, u_3 分别为肩关节和髋关节的角加速度;

$$A(X) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C(X) = \begin{bmatrix} C_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$B(X, \dot{X}) = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix};$$

$$A_{11} = J_1 + J_2 + J_3 + m_1 l_1^2 + m_2 [L_1^2 + l_2^2 + 2L_1 l_2 \cos \theta_2] + m_3 [L_1^2 + L_2^2 + l_3^2 + 2L_1 L_2 \cos \theta_2 + 2L_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2L_2 l_3 \cos(\theta_3)],$$

$$A_{12} = J_2 + J_3 + m_2 [l_2^2 + L_1 l_2 \cos \theta_2] + m_3 [L_2^2 + l_3^2 + L_1 L_2 \cos \theta_2 + L_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2L_2 l_3 \cos(\theta_3)],$$

$$A_{13} = J_3 + m_3 [l_3^2 + L_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 l_3 \cos(\theta_3)],$$

$$B_{11} = -C_1,$$

$$B_{12} = (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) [m_2 L_1 l_2 \sin(\theta_2) + m_3 (L_1 l_2 + L_1 l_3) \sin(\theta_2 + \theta_3)],$$

$$B_{13} = m_3 [L_1 l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2 l_3 \cos(\theta_3)] (\dot{\theta}_1 + 2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3),$$

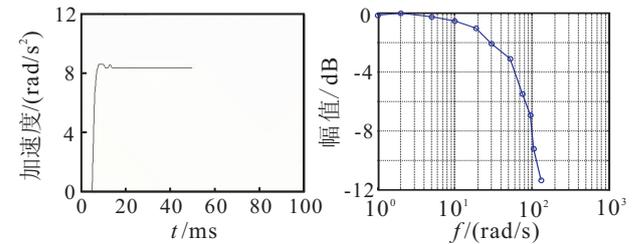
$$C_1 = m_1 g l_1 \sin(\theta_1) + m_2 g [L_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2 + \theta_3)] + m_3 g [L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)].$$

可以看出, 将 D 从关节力矩改为关节角加速度输入后, 系数矩阵 A, B, C (特别是矩阵的第 2 和第 3 行) 得到了非常大的简化.

3.2.2 电机驱动模型

电机驱动模型包括电机、电机驱动器及(速度)控制器等, 如果速度控制器和电流控制器被设计得复杂一些, 则电机驱动模型可能达到 4 阶或 5 阶.

根据类等效的思路, 先通过系统的响应曲线(图 3)来确定模型结构. 幅频响应曲线表明加速度驱动的传递函数构成 2 阶 0 型系统, 且有滞后环节, 滞后环节可通过阶跃响应曲线(滤波后)明显看出.



(a) 加速度阶跃响应

(b) 频率响应伯德图

图 3 体操机器人的响应曲线

综合频率响应和阶跃响应, 第 n 个关节的加速度驱动等效模型可表示为

$$D_{An} = e^{-\tau s} \frac{b_1 * s + b_0}{s^2 + a_1 * s + a_0}. \quad (6)$$

3.2.3 模型参数辨识

模型结构由图 2, 式 (5) 和 (6) 确定. 模型参数主要由物理参数、控制器参数和其他等效模型参数组成, 其中纯滞后时间可通过多次实验取平均值测量得到, 其他参数需要进行辨识. 待辨识的参数有

$$P = \{J_1, J_2, J_3, m_1, m_2, m_3, L_1, L_2, l_1, l_2, l_3, c_1, a_1, a_0, b_1, b_0\}.$$

为了避免基本遗传算法的收敛速度较慢的问题, 本文采用文献 [10] 中的改进遗传算法, 适应度函数被设计为

$$f = \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n (\theta_i(j) - \hat{\theta}_i(j))^2}{3 * n}, \quad (7)$$

其中 $\theta_i(j)$ 和 $\hat{\theta}_i(j)$ 分别表示模型和实际机器人的第*i*关节*j*时刻在预先设定的标准输入下的输出角度. 标准输入的设计考虑了两个因素: 1) 两路输入(分别为肩关节与髋关节加速度输入)的频率: 由传递函数的频率特性, 通过实验确定典型频率; 2) 两路输入的相位关系: 分别取0相位和180°相位为两种典型相位, 分别对应髋关节和肩关节同向和反向运动.

在遗传算法中, 选择种群大小为200, 交叉率 $P_c = 0.1$, 变异率 $P_m = 0.02$, 进化代数数为3000. 辨识得到的模型参数如表1所示, 最佳适应度为1.4844.

表1 参数表

J_1	J_2	J_3	m_1	m_2	m_3	a_0	a_1
0.00052	0.00487	0.00525	0.45	1.17	0.76	3260	20.0
l_1	l_2	l_3	L_1	L_2	c_1	b_0	b_1
0.076	0.0784	0.05	0.14	0.09	0.069	3260	20.0

4 仿真实验

4.1 简化前后模型的误差对比实验

基于以上模型结构及参数, 建立三关节体操机器人的Matlab仿真系统, 在仿真系统和实际系统中同时输入正弦信号(频率区别于辨识输入频率). 图4为模型与实际系统的输出对比, 其中左边和右边分别表示简化后与简化前模型, 虚线为实际输出, 实线为仿真输出.

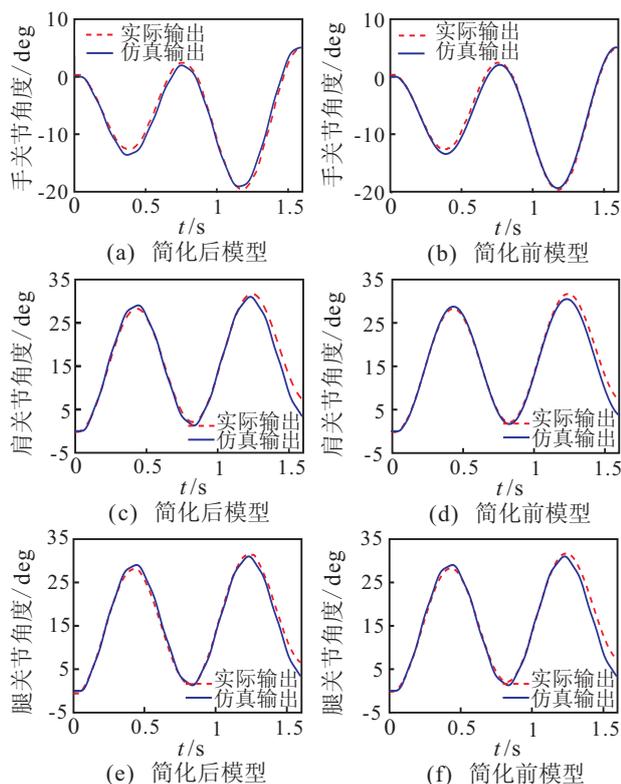


图4 仿真系统输出与实际系统输出对比

通过图4的比较可以看出, 两种建模方法在第1个周期内都具有较高的精度, 且相差不大, 遗传算

法辨识的最佳适应度都近似为1.5(分别为1.4844和1.67354).

4.2 简化前后模型的平衡控制器实验

将传递函数(6)转化为状态方程形式, 再按图2的结构与式(5)进行3个状态方程的整合, 得到一个有10个状态变量的状态方程. 针对该方程在平衡点附近进行泰勒级数展开, 忽略高次项, 得到平衡点附近的线性化方程. 使用Matlab的LQR计算工具对线性化后的状态方程进行LQR控制器设计, 控制效果如图5所示. 平衡控制器的吸引域为1.35°.

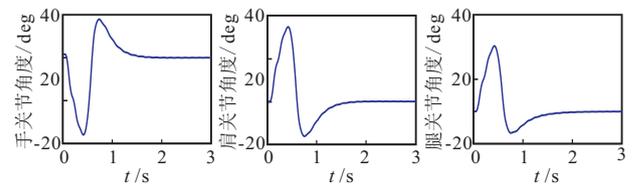


图5 平衡控制仿真结果

在一些特殊情况下(如电机驱动能力非常强, 加速度给定的变化很小或限制在很小范围), 可以忽略加速度驱动过程, 此时状态方程的阶次将更为减少, 平衡控制器的设计更为简单.

5 结论

由于使用不支持力矩驱动模式的电机驱动器, 三关节体操机器人的模型复杂、建模困难. 本文针对该机器人, 提出了一种基于类等效思想的简化模型: 1) 图2, 式(5)和(6)确定了该机器人的简化模型, 其电机驱动模型、刚体动力学模型都更为简单, 化为状态方程后状态变量数较少; 2) 图4表明简化模型与实际机器人系统的响应在有限周期内比较接近, 因体操机器人的平衡控制过程一般会在2次左右的摆动后稳定, 所以该模型可用来定量指导平衡控制器的设计, 并对摆起控制器有定性指导意义. 模型误差随着时间增加有增加趋势, 需要更深入研究. 误差可能主要来自: 1) 机械精度、齿轮公差、材料柔性等导致的不对称性和摩擦力不可预测; 2) 基于windows的定时器导致的数字系统控制周期不确定.

需要强调的是, 本文所提出的方法基于一个重要假设: 成熟的驱动器或控制器产品可以保证闭环系统在各种情况下具有类似的控制品质, 这对于很多优秀的驱动器和控制器是合理的, 但也有例外. 比如, 电机的驱动能力不足时, 像体操机器人这种负载动态变化的情况会引起控制品质的大幅度下降, 因此, 该方法不适用电机功率较小的情况.

参考文献(References)

[1] Xin X, Kaneda M. The swing up control for the acrobot based on energy control approach[C]. Proc of 41st IEEE

- Conf on Decision and Control. Lasvegas, 2002: 3261-3266.
- [2] Kawada K, Fujisawa S, Obika M, et al. Creating swing-up patterns of an acrobot using evolutionary computation[C]. Proc of IEEE Int Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Espoo, 2005: 261-266.
- [3] Zhao Dongbin, Yi Jianqiang. A particle swarm optimized fuzzy neural network control for acrobot[C]. Proc of the 3rd Int Symposium on Neural Networks, Part II. Chengdu, 2006: 1160-1165.
- [4] Luca A D, Oriolo G. Stabilization of the acrobot via iterative state steering[C]. Proc of IEEE Int Conf of Robotics and Automation. Leuven, 1998: 3581-3587.
- [5] Lai X Z, She J H, Yang S X, et al. Control of acrobot based on non-smooth Lyapunov function and comprehensive stability analysis[J]. IET Control Theory & Applications, 2008, 2(3): 181-191.
- [6] Nji Klaus, Mehrandezh Mehran. An application of nonlinear parametric identification and control of a minimum phase acrobot[C]. Proc of the IEEE Conf on Decision and Control. San Diego, 2006: 6480-6487.
- [7] Leavitt John, Bobrow, James E, et al. Robust balance control of a one-legged, pneumatically-actuated, acrobot-like hopping robot[C]. Proc of 2004 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Leuven, 2004: 4240-4245.
- [8] Araki N, Okada M, Konishi Y. Parameter identification and swing-up control of an acrobot system[C]. Proc of IEEE Int Conf of Industrial Technology. Hong Kong, 2005: 1040-1045.
- [9] Yazici A, Karamancioglu A. Robust stabilization of acrobot by using its real structured uncertainty model[C]. Proc of 2nd Int Conf on Recent Advances in Space Technologies. Istanbul, 2005: 265-270.
- [10] 古建功. 三关节单杠体操机器人的动力学参数辨识[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 242-246.
(Gu J G. Dynamic parameter identification of three-link acrobot on horizontal bar[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(2): 242-246.)
- [11] 李祖枢. 动态系统“类等效”模型测辨及多可调参数的Pade模型降阶[J]. 自动化学报, 1985, 11(1): 53-62.
(Li Z S. Identification of “quasi-equivalent” model and pade approximation with multi-adjustable parameters for dynamical systems[J]. Acta Automation Sinica, 1985, 11(1): 53-62.)
- [12] 吴宏鑫, 胡军, 解永春. 基于特征模型的智能自适应控制[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009.
(Wu H X, Hu J, Xie Y C. Characteristic model-based intelligent adaptive control[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2009.)

~~~~~

(上接第307页)

- [5] No T S, Min B M, Stone R H, et al. Control and simulation of arbitrary flight trajectory-tracking[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(5): 601-612.
- [6] Wang M, Zhao J, Dimirovski G M. Variable structure control method to the output tracking control of cascade nonlinear switched systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2009, 3(12): 1634-1640.
- [7] Wang M, Zhao J, Dimirovski G M. Output tracking control of nonlinear switched cascade systems using a variable structure control method[J]. Int J of Control, 2010, 83(2): 394-403.
- [8] Li Q K, Zhao J, Dimirovski G M. Robust tracking control for switched linear systems with time-delay: An average dwell time approach[J]. Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems: Series B, 2009, 16(2): 167-180.
- [9] Li Q K, Zhao J, Liu X J, et al. Observer-based tracking control for switched linear systems with time-varying delay[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 2011, 21(3): 309-327.
- [10] Zemouche A, Boutayeb M. An unified  $H_\infty$  adaptive observer synthesis method for a class of systems with both Lipschitz and monotone nonlinearities[J]. Systems & Control Letters, 2009, 58(4): 282-288.