

文章编号: 1001-0920(2011)06-0821-05

加速度驱动型三关节体操机器人的动力学建模与分析

薛方正¹, 郭 亿¹, 李祖枢^{1,2}

(1. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044; 2. 重庆理工大学 计算机学院, 重庆 400044)

摘要: 针对加速度驱动型三关节体操机器人, 从机理和数据两方面进行了动力学模型分析. 首先通过机理分析得到模型的刚体动力学分量和电机驱动分量; 然后通过加速度阶跃响应曲线分析得到纯滞后分量. 综合这3种分量, 确定三关节体操机器人的模型结构, 并利用改进的遗传算法对该综合模型进行参数辨识. 将辨识后的模型与实际系统进行比较, 讨论了产生误差的原因.

关键词: 体操机器人; 参数辨识; 遗传算法; 动力学模型

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Dynamic model analysis for acceleration driven three-link acrobot

XUE Fang-zheng¹, GUO Yi¹, LI Zu-shu^{1,2}

(1. College 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 dynamic model of an acceleration driven three-link acrobot is analyzed by using mechanism and data based methods. The rigid body dynamic and motor driven models are given via mechanism analysis and the pure delay model is indicated by the acceleration pulse response curve. The three model components are integrated into a complex model structure for the dynamic model of the whole three-link acrobot. An improved generation algorithm(GA) is used to identify the parameters of the integrated model. The outputs of the model and robot are compared and the factors causing the errors are discussed.

Key words: acrobot; variable identification; generation algorithm; dynamic model

1 引言

体操机器人是一种由两连杆或三连杆组成的多关节系统, 其肩关节(和髋关节)有电机驱动, 但手部关节是自由的. 作为一类典型的欠驱动系统, 其研究不仅可以验证控制理论与技术研究的一些最新成果, 而且对于仿人机器人的步态控制、关节型机器人的特殊状态控制等也有较高的参考价值. 与两关节体操机器人相比, 三关节体操机器人是多输入多输出型欠驱动系统, 更具广泛意义.

目前, 体操机器人在控制器设计方面已经取得了较多成果, 多种类型的控制方法均在稳定控制或摆起稳定控制方面取得了成功, 包括LQR控制^[1]、鲁棒控制^[4]和其他基于Lyapunov函数^[2-3]的控制、迭代控制^[7]、基于遗传算法^[8]的控制、神经网络控制^[9]和其他智能控制^[5]、基于能量的控制^[6]等. 但大多数

成功的实例均是基于模型和仿真系统的, 在实物控制^[1,10]方面, 特别是三关节体操机器人实物控制方面的成果很少. 为了揭开体操机器人实物控制中的难点和瓶颈问题, 一些文献试图建立其精确模型^[10-11]. [10]研究了平衡点附近的建模及控制, 但没有讨论非平衡点附近的问题. [11]用无味卡尔曼滤波解决了两连杆体操机器人的模型参数辨识问题, 但没有扩展到三连杆情况. [12]用遗传算法部分解决了三连杆体操机器人的动力学模型参数辨识问题, 但没有考虑电机驱动过程. 此外, 大多数文献讨论的都是力矩驱动型体操机器人, 而实际机器人系统的力矩是较难测量的.

为了使模型与实际系统充分接近, 从而为进一步的控制打下基础, 本文研究基于加速度驱动的、充分考虑电机驱动特点的三关节体操机器人模型. 通过机理分析、响应曲线分析以及模型与实际系统的误差分析来研究模型中的各个分量. 目的是有助于找出导致

收稿日期: 2010-03-09; 修回日期: 2010-04-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60905053); 教育部博士点基金项目(20070611018).

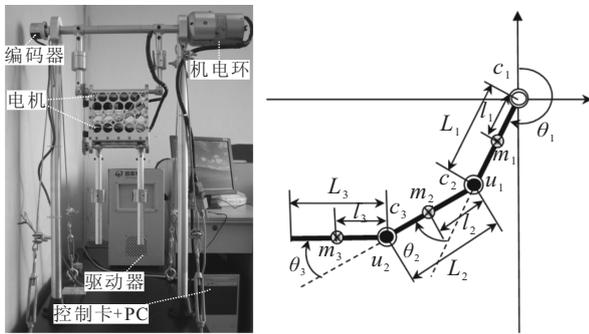
作者简介: 薛方正(1977-), 男, 副教授, 从事智能控制与机器人等研究; 李祖枢(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制与机器人等研究.

体操机器人实物控制困难的根本原因,从而进行有针对性的控制器设计.

2 加速度驱动型三关节体操机器人

实际的体操机器人往往设计成加速度驱动型.这种将加速度作为给定输入的驱动方式,在操作手和轮式机器人等方面也有成功应用.加速度驱动有3点优势:1)省去了力矩检测环节;2)可充分利用电机配套的驱动与控制器;3)加速度闭环可以减少各关节连杆质量对控制器的影响.

加速度驱动型三关节单杠体操机器人的物理模型如图1所示,机器人的肢体参数按人体关节统计参数的比例特征设计.机器人手臂、躯干和腿分别定义为第1,2,3个连杆,手关节、肩关节和髋关节分别定义为第1,2,3个关节.第 n 个连杆的长度、质心-轴心距、质量和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.



(a) 实物图 (b) 抽象模型

图1 加速度驱动型三关节体操机器人

3 基于机理的三关节体操机器人模型分析

加速度驱动型三关节体操机器人的工作过程为:加速度指令转化为速度输入到电机驱动器,多电机协同工作改变体操机器人的各关节状态.机理分析得到体操机器人动力学模型结构如图2所示.其中: $r_{\ddot{\theta}_n}, e_{\dot{\theta}_n}, r_{i_n}, i_n, T_n$ 分别为体操机器人第 n 个关节的角加速度指令、角速度偏差、电流给定、电流和力矩; L_f 为刚体动力学模型; $C_{\dot{\theta}_n}, L_{\dot{\theta}_n}$ 分别为第 n 个关节的速度控制器和电流闭环; K_n 为第 n 个关节的转矩系数.可以看出,除了一些简单环节,该模型主要

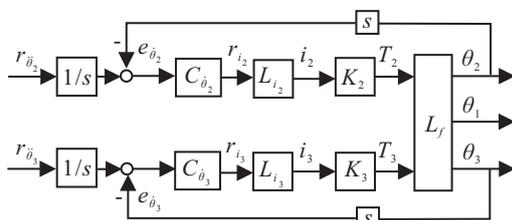


图2 三关节体操机器人的模型结构

包括两个部分:从力矩到角度的刚体动力学模型和一个是从速度偏差到力矩的电机驱动模型.

3.1 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(图1),其带耗散能^[15]的动力学拉格朗日方程为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_n} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_n} + \frac{\partial V}{\partial x_n} + \frac{\partial DE}{\partial x_n} = u_n. \quad (1)$$

其中: T 为系统动能,且有

$$T = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^3 \left\{ J_n \left(\sum_{k=1}^n \dot{\theta}_k \right)^2 + m_n \left[\left(\frac{d}{dt} \left(\sum_{k=1}^{n-1} L_k \sin \left(\sum_{j=1}^k \theta_j \right) \right) + l_n \sin \left(\sum_{j=1}^n \theta_j \right) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} \left(\sum_{k=1}^{n-1} L_k \cos \left(\sum_{j=1}^k \theta_j \right) \right) + l_n \cos \left(\sum_{j=1}^n \theta_j \right) \right)^2 \right] \right\};$$

V 为势能,且有

$$V = \sum_{n=1}^3 m_n g \left[\sum_{k=1}^{n-1} L_k \cos \left(\sum_{j=1}^k \theta_j \right) + l_n \cos \left(\sum_{j=1}^n \theta_j \right) \right];$$

DE 为耗散能,且有

$$DE = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^3 c_n \dot{\theta}_n^2;$$

u_n 为第 n 个关节的力矩输入; x_n 为广义坐标且 $x_n = \theta_n$.将拉格朗日方程转化为状态方程形式,有

$$A(X) \ddot{X} = B(X, \dot{X}) \dot{X} + C(X) + D. \quad (2)$$

其中

$$A(X) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{12} & A_{22} & A_{23} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} \end{bmatrix},$$

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

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

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

$$A_{22} = J_2 + J_3 + m_2 l_2^2 + m_3 [L_2^2 + l_3^2 + L_1 L_2 \cos \theta_2 + 2L_2 l_3 \cos \theta_3],$$

$$A_{23} = J_3 + m_3 [l_3^2 + L_2 l_3 \cos \theta_3],$$

$$A_{33} = J_3 + m_3 l_3^2;$$

$$B(X, \dot{X}) = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix},$$

$$B_{11} = -C_1, B_{22} = -C_2, B_{33} = -C_3,$$

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

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

$$B_{21} = -m_2 L_1 l_2 \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 - m_3[L_1 l_2 \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 - L_1 l_3 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_2 + \theta_3)],$$

$$B_{23} = m_3 L_2 l_3 \sin \theta_3 (2\dot{\theta}_1 + 2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3),$$

$$B_{31} = -m_3[L_1 l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_3 - L_2 l_3 \dot{\theta}_1 \sin \theta_3],$$

$$B_{32} = -m_3 L_2 l_3 \sin \theta_3 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2);$$

$$C(X) = [C_1 \ C_2 \ C_3]^T,$$

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

$$C_2 = m_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + m_3 g[L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)],$$

$$C_3 = m_3 g l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3);$$

$$D = [0 \ u_2 \ u_3]^T,$$

u_2 和 u_3 分别为肩关节和髋关节的力矩输入。

3.2 电机驱动模型

从速度偏差到力矩的电机驱动模型包括电机、电机的驱动器和控制器, 即速度控制器和电流闭环(含电机模型)。速度控制器可以看成PI控制器及类似结构, 即

$$C_{\dot{\theta}} = K_P(1 + K_I/s), \quad (3)$$

其中 K_P, K_I 分别为比例和积分系数。由文献[13]可知, 电流环一般可以看作一个二阶系统

$$L_i = \frac{\beta_1 s + \beta_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}, \quad (4)$$

其中 α, β 为模型系数。因此, 电机驱动模型可近似为一个三阶系统, 即

$$T_{dv} = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (5)$$

其中 a, b 为电机驱动模型系数。

4 基于数据的模型分析

基于数据的模型分析有基于实际系统的阶跃响应数据和基于模型误差数据两种。图3为体操机器人的加速度阶跃响应(滤波后), 虽然加速度曲线由于差分的原因并不完美, 但仍可以清楚地看出, 加速度指令的阶跃响应存在明显的纯滞后。根据文献[14], 为

了使模型的主要特征与实际系统一致, 即“类等效”, 必须加入纯滞后环节, 定义为

$$T_{dl} = e^{-\tau s}, \quad (6)$$

其中纯滞后时间 τ 可通过多次实验取平均数测得。

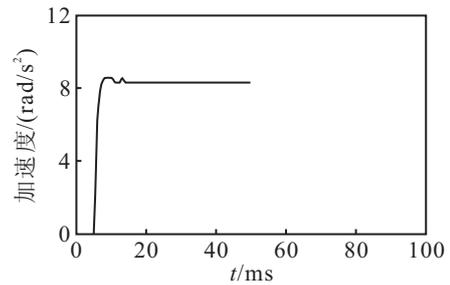


图3 加速度阶跃响应曲线

基于误差数据的模型分析, 就是首先按模型机理分析和基于阶跃响应分析得到模型结构; 然后进行模型参数辨识; 最后进行输出比较。模型结构由图2, 式(2), (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, 其中等效时滞参数直接测量, 其他参数需要进行统一辨识, 待辨识的参数有

$$P = \{J_1, J_2, J_3, m_1, m_2, m_3, L_1, L_2, l_1, l_2, l_3, c_1, c_2, c_3, a_2, a_1, a_0, b_2, b_1, b_0\}.$$

本文使用遗传算法进行模型参数辨识。为了避免基本遗传算法收敛速度较慢的问题, 采用文献[12]中的改进遗传算法。

1) 适应度函数设计。适应度函数定义为

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

其中: n 为连续样本的个数, $\theta_i(j)$ 和 $\hat{\theta}_i(j)$ 分别为模型和实际系统的第 i 关节在第 j 时刻对于标准加速度输入的响应。综合考虑两个因素: 两路输入(分别为肩关节和髋关节的加速度输入)的频率(通过实验确定典型频率)和两路输入的相位关系。将两路标准输入设计为两组, 分别是幅值为 $1 \text{ (rad/s}^2\text{)}$, 频率为 2.5 的相位相同和相位相反的余弦函数。

2) 遗传算法的主要步骤如下:

Step 1: 采用混合编码的方法产生初始的可行解。

Step 2: 计算种群中各个体和整个种群的适应度。

Step 3: 若整个种群的适应度过大, 则进行集成动态编码的反馈式突变; 否则进行普通的反馈式突变。

Step 4: 按轮盘赌策略选择个体进行可变精度交叉。

Step 5: 对交叉后的两个体进行正交矩阵实验, 产生一个最优的子孙。

Step 6: 以变异率 P_m 进行混合变异操作。

Step 7: 重复 Step 4~Step 6, 产生足够的新的子孙.

Step 8: 将先辈种群和后代种群混合, 按照适应度降序排列, 并选择一批较好的个体作为下一代先辈种群.

Step 9: 若不满足算法的终止条件, 则重复 Step 2~Step 8.

Step 10: 算法终止.

3) 模型参数的辨识结果. 选择种群大小为 200, 交叉率为 0.1, 变异率为 0.02, 进化代数数为 3000. 辨识后得到的模型参数值见表 1, 遗传算法收敛曲线见图 4, 最佳适应度为 1.673 54.

表 1 参数表

J_1	J_2	J_3	m_1	m_2
0.005 025	0.005 25	0.005 25	0.44	1.55
m_3	l_1	l_2	l_3	L_1
0.3	0.028	0.056	0.166	0.18
L_2	c_1	c_2	c_3	b_0
0.28	0.364	0.246	0.246	400
b_1	b_2	a_0	a_1	a_2
480	108	0.01	0.01	0.001

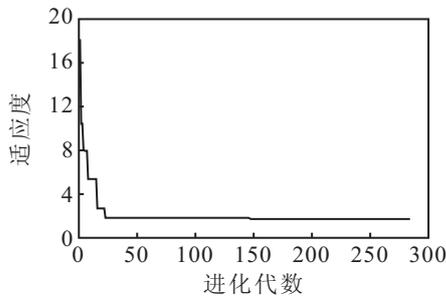
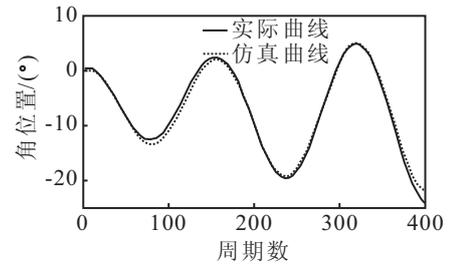


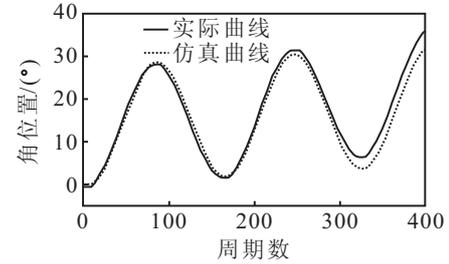
图 4 遗传算法收敛曲线

4) 误差曲线分析. 基于以上模型结构及参数, 建立三关节体操机器人的 Matlab 仿真模型, 在仿真模型和实际系统的两个主动关节中同时输入幅值为 $1(\text{rad/s}^2)$, 频率为 1.25 (与参数辨识信号的频率不同) 的同相位余弦信号. 图 5 为模型与实际系统的输出对比. 从图 5 中可以看出, 模型与实际系统基本符合, 并呈现 3 个特点: 第 1 个周期的精度较高, 随着时间增加误差会增加; 腕关节精度最高, 肩关节其次, 髋关节最差; 实际系统输出有单侧偏移倾向.

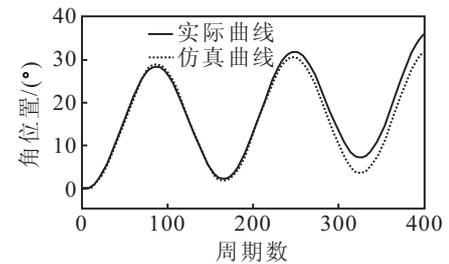
讨论 1 (误差原因分析) 腕关节处于最末端, 受到其他关节的扰动最小, 因而精度高, 这表明在能量的传递环节 (关节处) 存在未建模的能量储放动态. 第 1 个周期的精度比第 2 个周期高, 因此系统中存在的未建模的误差累计项可能来自齿轮回差或加工精度等因素. 实际输出单侧偏移, 这可能是由自系统的非对称性引起的, 电机、减速齿轮和机械加工精度等也均有可能是产生该项误差的因素.



(a) 手关节



(b) 肩关节



(c) 腕关节

图 5 仿真与实际系统输出的比较

5 结论

三关节体操机器人是一种多输入多输出的欠驱动系统, 其研究对体操机器人、人形机器人和各类欠驱动系统的控制具有重要意义. 本文针对实际的加速度驱动型体操机器人, 进行了详细的模型分析: 图 2, 式 (2), (5), (6) 和讨论 1 展示了体操机器人实际系统中存在的刚体动力学、电机驱动、纯滞后和未建模分量; 从图 5 可以看出, 模型在第 1 周期内已经比较精确, 因此, 对实际系统的控制器设计有指导意义; 从控制上看, 模型中的纯滞后环节是导致控制难度的一个重要因素, 另外, 电机的加速能力将很大程度上影响控制品质. 针对体操机器人的模型分析对其他类似机器人具有借鉴意义.

参考文献 (References)

- [1] Leavitt J, Bobrow J E, Sideris A. Robust balance control of a one-legged, pneumatically-actuated, acrobot-like hopping robot[C]. Proc of 2004 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. New Orleans LA: IEEE Press, 2004: 4240-4245.
- [2] Xin X, Mita T, Kaneda M. The posture control of a two-link free flying acrobot with initial angular momentum[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(7): 1201-1206.

- [3] 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 and Applications, 2008, 2(3): 181-191.
- [4] 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: IEEE Press, 2005: 265-270.
- [5] Brown S, Passino K. Intelligent control for acrobat[J]. J of Intelligent Robotics System, 1997, 18: 209-248.
- [6] Xin X, Kaneda M. The swing up control for the acrobat based on energy control approach[C]. Proc 41st IEEE Conf Decision and Control. Las Vegas: IEEE Press, 2002: 3261-3266.
- [7] Luca A D, Oriolo G. Stabilization of the acrobot via iterative state steering[C]. Proc IEEE Int Conf of Robotics and Automation. Leuven: IEEE Press, 1998: 3581-3587.
- [8] Kawada K, Fujisawa S, Obika M, et al. Creating swing-up patterns of an acrobot using evolutionary computation[C]. Proc IEEE Int Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Espoo: IEEE Press, 2005: 261-266.
- [9] Zhao DB, Yi J Q. A particle swarm optimized fuzzy neural network control for acrobat[C]. Advances in Neural Networks — ISNN 2006: 3rd Int Symposium on Neural Networks. Chengdu: Springer Berlin/Heidelberg Press, 2006: 1160-1165.
- [10] Nji K, Mehrandezh M. An application of nonlinear parametric identification and control of a minimum phase acrobat[C]. Proc of the IEEE Conf on Decision and Control. San diego: IEEE Press, 2006: 6480-6487.
- [11] Araki N, Okada M, Konishi Y. Parameter identification and swing-up control of an acrobot system[C]. Proc IEEE Int Conf of Industrial Technology. Hong Kong: IEEE Press, 2005: 1040-1045.
- [12] 李祖枢, 张华, 古建功, 等. 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.
(Li Z S, Zhang H, Gu J G, et al. The dynamic parameters identification of three-link acrobot on horizontal bar[J]. Control Theory and Applications, 2008, 25(2): 242-246.)
- [13] Li Y L, Li Z S, Li J, et al. A novel approach to modeling and identifying the double loop DC motor driving system in Soccer Robots[C]. Proc of SPIE the Int Society for Optical Engineering. Gifu: SPIE Press, 2008, 6794(2): 1-6.
- [14] 李祖枢, 周其鉴, 任伟. 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, Zhou Q J, Ren W. Identification of “quasi-equivalent” model and pade approximation with multi-adjustable parameters for dynamical systems[J]. Acta Automatica Sinica, 1985, 11(1): 53-62.)
- [15] 洪善桃. 高等动力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.
(Hong S T. Advanced dynamics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996.)

~~~~~

(上接第820页)

- [5] 吕晓明, 黄考利, 连光耀. 基于混沌粒子群优化的系统级故障诊断策略优化[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(1): 217-220.  
(Lv X M, Huang K L, Lian G Y. Optimizing strategy of system level fault diagnosis based on chaos particle swarm optimization[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(1): 217-220.)
- [6] Ratnaweera A, Halgamuge S K, Watson H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients[J]. IEEE Trans on Evolutionary on Computation, 2004, 8(3): 240-255.
- [7] 介婧, 曾建潮, 韩崇昭. 基于群体多样性反馈控制的自组织微粒群算法[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(3): 464-471.  
(Jie J, Zeng J C, Han C Z. Self-organized particle swarm optimization based on feedback control of diversity[J]. J of Computer Research and Development, 2008, 45(3): 464-471.)
- [8] Zhan Z H, Zhang J, Li Y, et al. Adaptive particle swarm optimization[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 2009, 39(6): 1362-1382.
- [9] Mendes R, Kennedy J, Neves J. The fully informed particle swarm: Simpler, maybe better[J]. IEEE Trans on Evolutionary on Computation, 2004, 7(8): 204-210.
- [10] Shi Y H, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer[C]. Proc of IEEE Int Conf of Evolutionary Computation. Anchorage: IEEE Service Center, 1998: 69-73.
- [11] 方伟, 孙俊, 须文波. 一种多样性控制的粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2008, 23(8): 863-869.  
(Fang W, Sun J, Xu W B. Diversity-controlled particle swarm optimization algorithm[J]. Control and Decision, 2008, 23(8): 863-869.)