

文章编号: 1001-0920(2006)06-0606-06

一类欧-拉系统的全系数自适应控制研究

雷拥军, 吴宏鑫

(中国空间技术研究院 北京控制工程研究所, 北京 100080)

摘要: 对于动力学方程未知的全驱动多变量欧-拉系统, 进行了基于特征模型的全系数自适应控制方法研究。根据全系数自适应控制思想, 针对全驱动欧-拉系统提出了差分方程形式的特征模型, 并得到该特征模型各系数的一些性质。基于建立的特征模型, 提出多变量黄金分割控制律和相应的自适应控制策略, 并对闭环系统的稳定性进行了分析。最后对两连杆的空间机器人进行了仿真, 仿真结果表明了该自适应控制方法的优越性。

关键词: 欧-拉系统; 自适应控制; 黄金分割; 多变量控制; 特征模型; 空间机器人

中图分类号: TP241

文献标识码: A

Study on All-coefficient Adaptive Control for a Class of Euler-Lagrange Systems

LEI Yong-jun, WU Hong-xin

(Beijing Institute of Control Engineering, Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100080, China)

Correspondent: LEI Yong-jun, E-mail: yungjun-lei@yahoo.com.cn

Abstract: A All-Coefficient Adaptive Control method based on characteristic models is studied for fully-actuated multi-variable Euler-Lagrange (E-L) systems with unknown dynamics. According to all-coefficient Adaptive Control theory, a characteristic model for an E-L system is introduced in the form of difference equation, and properties of its coefficients are discussed. On the basis of the characteristic model, a kind of golden-section controller and its corresponding adaptive controller for multi-variable systems are developed. The close-loop uniformly asymptotic stability of the system is analyzed with the proposed controller based on the characteristic model. At last, the proposed controller is implemented on a planar two-link space robot in the absence of the knowledge of dynamics. Simulation results illustrate the advantages of the proposed adaptive control schemes over other adaptive control methods.

Key words: Euler-Lagrange systems; Adaptive control; Golden-section; Multi-variable control; Characteristic models; Space robots

1 引言

基于特征模型的全系数自适应控制方法是为了解决现实中系统建模与控制两者往往脱钩这一问题而提出的。这一思想最早起源于20世纪80年代初期^[1], 现已发展为相互关联的三个主体部分, 即全系数自适应控制方法、黄金分割自适应控制器和特征建模。黄金分割自适应控制器, 是区别于目前现有自适应控制方法的新型自适应控制器, 它非常简单, 鲁

棒性非常强^[2]。所谓特征模型^[3,4], 就是根据对象的动力学特征、环境特征和控制性能要求所建的模型, 而不仅仅是对对象精确的动力学方程来建模。特征模型在形式和阶次上除考虑对象特征外, 主要取决于控制性能要求, 且比原动力学方程简单, 工程实现容易、方便。

基于特征模型的全系数自适应控制方法采用离散设计方法, 其算法简单, 控制品质好, 适应性和鲁

收稿日期: 2005-05-08; 修回日期: 2005-09-12

基金项目: 国家973计划项目(2002CB312205); 国家自然科学基金重点项目(60034010)。

作者简介: 雷拥军(1971—), 男, 湖南津市人, 博士生, 从事机器人自适应控制与智能控制的研究; 吴宏鑫(1939—), 男, 江苏丹徒人, 中国科学院院士, 博士生导师, 从事航天控制、自适应控制和智能控制等研究。

棒性强, 并已取得了广泛的成功应用^[1]. 在线性系统方面形成了比较完善的体系, 而且在非线性系统方面得到了一定程度的应用^[4], 但非线性系统的全系数自适应控制理论和方法还处于研究之中.

欧-拉 (E-L) 系统为其运动可采用 Euler-Lagrange 方程来描述的系统, 包括一大类机械、电力和机电等物理系统. 对于多变量的欧-拉系统, 往往具有时变、强耦合和非线性等特性, 最典型的为机械手系统^[5]. 由于动力学方程的复杂性和存在未建模动态, 因此很难建立其精确的数学模型, 即使建立起精确的数学模型, 也因模型的复杂性而难以控制^[6]. 为了解决建模与控制的问题, 本文针对一类全驱动的多变量欧-拉系统进行了特征建模和基于特征模型的控制研究.

2 E-L 系统的特点模型

考虑全驱动的欧-拉系统, 可采用 Euler-Lagrange 方程建立相应的数学模型^[5]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}(q, \dot{q}) \right) - \frac{\partial L}{\partial q}(q, \dot{q}) = Q \quad (1)$$

其中: q 和 $\dot{q} \in R^n$ 分别为系统的广义坐标与其对时间的导数, n 为系统输入与输出的维数; Lagrange 函数 $L(q, \dot{q}) \triangleq T(q, \dot{q}) - V(q)$, 系统的动能 $T(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q}$, $M(q) \in R^{n \times n}$ 为广义惯量阵, 且满足 $M(q) = M^T(q) > 0$, $V(q)$ 为系统的势能; $Q \in R^n$ 为外力, 一般有 $Q = -\frac{\partial F}{\partial q}(q) + Bu$, $u \in R^n$ 为控制量, $B \in R^{n \times n}$ 为非奇异的方阵, $F(q)$ 为瑞利耗散函数, 一般形式为 $F(q) = \frac{1}{2} \dot{q}^T R \dot{q}$, $R = R^T \in R^{n \times n}$.

为了简化分析, 不妨假设势能 $V(q) = \frac{1}{2} q^T K q$, $K = K^T > 0$, 则可将式(1)用微分方程表示为

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + R \dot{q} + Kq = Bu \quad (2)$$

其中: $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$, 且满足 $M(q) - 2C(q, \dot{q})$ 为反对称阵.

式(2)又可表示为

$$\ddot{q} + a_1 \dot{q} + a_2 q = b_0 u \quad (3)$$

其中: $a_1 = M^{-1}(q)(C(q, \dot{q}) + R) \in R^{n \times n}$,

$$a_2 = M^{-1}(q)K \in R^{n \times n},$$

$$b_0 = M^{-1}(q)B \in R^{n \times n}.$$

对式(3)使用

$$\ddot{q} = \frac{q(k+1) - 2q(k) + q(k-1)}{T_s^2},$$

$$\dot{q} = \frac{q(k) - q(k-1)}{T_s}.$$

进行近似离散化可得

$$q(k+1) = f_1(k)q(k) + f_2(k)q(k-1) + \beta_0(k)u(k) + e(k) \quad (4)$$

其中: $f_1, f_2, \beta_0 \in R^{n \times n}$ 为方程的系数矩阵, $e(k) \in R^n$ 为零均值白噪声.

定理 1 在 (q, \dot{q}) 的一个包含平衡点的有界集 Ω 内, 将式(3)离散化后得到的式(4)的各参数矩阵具有以下特征性质:

- 1) 当 $a_2 = 0$ 时(也即式(2)中的 $K = 0$), $f_i = I$ (I 为相应维数的单位阵, 下同);
- 2) 当 $a_2 > 0$ 时, 如果采样时间 $T_s > 0$, 则有 $f_i = I - a_1 T_s + a_2 T_s^2$, $\beta_0 = b_0 T_s$, 且有 $f_1 = 2I - a_1 T_s + a_2 T_s^2$, $f_2 = -I + a_1 T_s$, 同时 $\beta_0 = b_0 T_s$;
- 3) 当采样时间足够小时, 各参数矩阵为慢时变的, 且当 $T_s \rightarrow 0$ 时 $f_i \rightarrow I$ 与 $\beta_0 \rightarrow b_0$ 成立.

证明 对式(3)采用上述方法离散化后整理得 $f_1 = 2I - a_1 T_s + a_2 T_s^2$, $f_2 = -I + a_1 T_s$, $\beta_0 = b_0 T_s$. 在 (q, \dot{q}) 的一个有界集 Ω 内可知 a_1, a_2 与 b_0 有界, 故特征性质 1) 和 2) 成立.

在一个采样间隔系数矩阵的变化量为

$$\begin{aligned} \Delta f_i(k) &= f_i(k) - f_i(k-1) = \\ &= (a_1(k) - a_1(k-1))T_s + \\ &= (a_2(k) - a_2(k-1))T_s^2, \\ \Delta \beta_0(k) &= \beta_0(k) - \beta_0(k-1) = \\ &= (b_0(k) - b_0(k-1))T_s. \end{aligned}$$

对于一般物理系统可知, 在 (q, \dot{q}) 的一个有界集 Ω 内的 a_1, a_2 与 b_0 存在且有界, 因而有

$$f_i = \lim_{T_s \rightarrow 0} \frac{\Delta f_i(k)}{T_s} = I, \quad \beta_0 = \lim_{T_s \rightarrow 0} \frac{\Delta \beta_0(k)}{T_s} = b_0,$$

故性质 3) 成立.

注 1 当采用其他近似离散化方法时, 均有与定理 1 相似的结论.

注 2 由性质 2) 和 3) 可知, 即使原系统是时变的, 但当采样时间非常小时其对应的离散化方程的系数矩阵是慢时变的. 因此将系统看作慢时变甚至近似定常系统来处理有利于系统参数的辨识.

定义 1 与原系统式(2)在一定性能指标下等价, 且系数满足定理 1 中性质的差分方程(4)称之为 E-L 系统的特征模型(除非特别说明, 以下简称特征模型).

3 基于特征模型的黄金分割控制律设计及稳定性分析

根据建立的全驱动的欧-拉系统的特征模型,

借鉴线性系统中单变量黄金分割控制器^[2]的形式,设计出基于此特征模型的多变量黄金分割控制器与多变量黄金分割跟踪控制器

3.1 调节控制器设计及稳定性分析

对于具有离散系统(4)形式的特征模型,可设计出如下多变量黄金分割自适应律:

$$u(k) = u_G(k) = \beta^{-1}(-L_1 f_1 q(k) - L_2 f_2 q(k-1) + v(k)) \quad (5)$$

来实现调节控制 其中:控制输入项 $v(k) = L_2(I - f_1 - f_2)q(k)$, 黄金分割系数 $L_1 = \frac{3 - \sqrt{5}}{2}$

$L_2 = \frac{\sqrt{5} - 1}{2}$ 在分析系统的稳定性之前先给出两个引理:

引理 1 对于渐近稳定的 SISO 时不变离散系统 $x(k+1) = \theta x(k) + r(k)$ (即 $|\theta| < 1$), 如果输入 $r(k) = 0(k+1)$, 则有 $x(k) = 0(k+1)$.

证明 系统的解可表示为

$$x(k) = \theta^k x(0) + \sum_{j=0}^{k-1} \theta^{k-1-j} r(j),$$

再利用极限的定义即可证明, 此略

引理 2^[7] 对于 n 维多变量线性时变系统

$$y(k+1) = A(k+1)y(k), \quad (6)$$

在以原点为平衡点处一致渐近稳定的充要条件为: 对于任意给定的一个正定赫米特阵(或实对称阵) $Q_L(k)$, 存在一个正定赫米特阵(或实对称阵) $P_L(k)$, 使得

$$A(k+1)^T P_L(k+1) A(k+1) - P_L(k) = -Q_L(k) \quad (7)$$

成立, 并且存在常数 $m_i > 0$ 与 $M_i > 0, i = 1, 2$, 满足 $m_1 I \leq P_L(k) \leq M_1 I, m_2 I \leq Q_L(k) \leq M_2 I$

定理 2 如果采样时间 T_s 足够小, 则具有离散系统式(4)形式的特征模型, 在多变量黄金分割控制律式(5)下能保持整个闭环系统的一致渐近稳定性

证明 令

$$s(k+1) = q(k+1) - L_2 q(k), \quad (8)$$

利用式(8), 则式(4)可变形为

$$s(k+1) = -L_2 s(k) + f_1 q(k) + (-L_2^2 I + f_2)q(k+1) + \beta u(k). \quad (9)$$

将控制律式(5)代入式(9), 可得

$$s(k+1) = -L_2 s(k) + L_2 f_1 y(k) + (-L_2^2 I + L_1 f_2)q(k-1) + v(k). \quad (10)$$

由定理 1 的性质 2) 可知, 当采样时间 $T_s \rightarrow 0$ 时, $\sum_{i=1}^2 f_i \rightarrow I$ 令 $\Delta f = I - f_1 - f_2$, 则式(10)可变形为

$$s(k+1) = -L_2 s(k) + L_2 f_1 y(k) + (-L_2^2 f_1 - L_2 \Delta f)q(k-1) + v(k). \quad (11)$$

将式(10)变为式(11)用到了关系式 $L_1 - L_2^2 = 0$ 将 $v(k)$ 的表达式代入式(11), 整理得

$$s(k+1) = -L_2 f_2 s(k). \quad (12)$$

由定理 1 的性质 2) 可知, 对于 $\forall \epsilon > 0$, 当 $T_s \rightarrow 0$ 时 $\exists \delta > 0$ 使得 $1 - f_2 \geq \epsilon$ 成立, 则有

$$s(k+1) = -L_2 f_2 s(k) = L_2(1 - 1 + f_2) s(k) = L_2(1 - \epsilon) s(k).$$

如果选取 $\epsilon < 1/L_2 - 1 = L_1/L_2$ 时, 则有

$$s(k+1) = \gamma s(k). \quad (14)$$

其中 γ 为一常数, 且满足 $0 < \gamma < 1$ 因此由式(14)可知, 当 $k \rightarrow \infty$ 时, $s(k) \rightarrow 0$ 一致渐近收敛于零, 即有 $s(k) \rightarrow 0$, 于是有 $q(k) \rightarrow 0$ 故由式(8)和引理 1 可得当 $k \rightarrow \infty$ 时 $q(k) \rightarrow 0$

注 3 从理论分析来看, 当 T_s 足够小时, 上述设计的多变量黄金分割控制律可以镇定具有式(2)形式的所有不稳定的多变量全驱动欧-拉系统

3.2 跟踪控制器设计及稳定性分析

对于跟踪问题, 可设计如下的多变量跟踪控制律:

$$u(k) = u_r(k) + u_G(k). \quad (15)$$

其中

$$u_r = \beta^{-1}(q_r(k+1) - f_1 q_r(k) - f_2 q_r(k-1)),$$

$$u_G(k) = \beta^{-1}(L_1 f_1 \tilde{q}(k) + L_2 f_2 \tilde{q}(k-1) + v(k)).$$

辅助控制输入项

$$v(k) = -L_2(I - f_1 - f_2)\tilde{q}(k),$$

$$\tilde{q}(k) = q_r(k) - q(k),$$

$q_r(k)$ 为期望的跟踪信号

定理 3 对于期望的有界轨迹序列 $\{q_r(k)\}$, 如果采样时间 T_s 足够小, 则具有离散系统式(4)形式的特征模型, 在多变量黄金分割全系数自适应控制律式(15)的作用下能实现整个闭环系统的渐近跟踪控制

证明 令 $s(k+1) = \tilde{q}(k+1) - L_2 \tilde{q}(k)$, 将式(15)代入式(4), 经整理后按定理 2 的证明方法即可得证, 此略

4 基于特征模型的黄金分割自适应控制律设计

实际的复杂系统一般很难建立精确的数学模型,有时甚至会无法建立其数学模型,因此特征模型式(4)的参数一般无法知道,因此,可结合参数辨识算法与上节设计的多变量黄金分割控制律,将辨识得到的参数按“必然性等价”原理^[8]进行控制器的设计,以实现基于特征模型的多变量黄金分割自适应控制

4.1 特征模型的参数辨识算法

鉴于定理 1 中性质 3) 关于小时间间隔采样时参数的慢时变性和注 2,可采用带遗忘因子的最小二乘法辨识参数来实现特征模型的参数辨识,式(4)可写成下列表示形式:

$$q(k+1) = \Theta^T(k)\Phi(k) + e(k). \quad (16)$$

其中

$$\Theta(k) = [f_1, f_2, \beta]^T, \\ \Phi(k) = [q(k), q(k-1), u(k)]^T.$$

式(16)又可用分量表示为

$$q_i(k+1) = \Phi^T(k)\theta_i(k) + e_i(k). \quad (17)$$

带有遗忘因子的多变量递推最小二乘法如下:

$$\hat{\Theta}(k+1) = \frac{P(k-1)\Phi(k)}{\lambda(k) + \Phi^T(k)P(k-1)\Phi(k)} (q_i(k+1) - \Phi^T(k)\hat{\Theta}(k)) + \hat{\Theta}(k), \\ P(k) = \lambda^{-1}(k) (P(k-1) - \frac{P(k-1)\Phi^T(k)\Phi^T(k)P(k-1)}{\lambda(k) + \Phi^T(k)P(k-1)\Phi(k)}), \quad (18) \\ \lambda(k) = \mu_0\lambda(k-1) + (1 - \mu_0).$$

其中: $\hat{\Theta}(k)$ 为在采样时刻 k 对 Θ 的 i 列向量 θ 的估计值, $P(0)$ 可选为正定的对角阵, $0 < \mu_0 < 1$.

4.2 多变量黄金分割自适应控制律设计

将辨识得到的各参数估计值分别代替式(5)与(15)的真值,于是可得到以下的基于特征模型的多变量黄金分割自适应调节控制律和跟踪控制律.由前一部分的稳定性分析可知当辨识参数收敛于真值时,该控制律一定能保证系统一致渐近稳定或实现渐近跟踪控制

假设 $\hat{\beta}$ 非奇异,基于特征模型的多变量黄金分割自适应调节控制律 u 为

$$u(k) = u_G(k) = \hat{\beta}^{-1} (-L_1 f_1 q(k) - L_2 f_2 q(k-1) + \hat{v}(k)). \quad (19)$$

基于特征模型的多变量黄金分割自适应跟踪控制律 u 为

$$u(k) = u_r(k) + u_G(k). \quad (20)$$

其中

$$u_r(k) = \hat{\beta}_0^{-1} (q_r(k+1) - f_1 q_r(k) - f_2 q_r(k-1)), \\ u_G(k) = \hat{\beta}_0^{-1} (L_1 f_1 \hat{q}(k) + L_2 f_2 \hat{q}(k-1) - \hat{v}(k)),$$

控制输入项 $\hat{v}(k) = L_2 (1 - f_1 - f_2) \hat{q}(k)$, 当 $a_2 = 0$ (即式(2)中的 $K = 0$) 时取 $\hat{v}(k) = 0$, $\hat{\beta}_0, f_1$ 与 f_2 分别为式(4)中系数矩阵 β, f_1 与 f_2 的估计值,其他变量同前

注 4 特征模型的真值是指在一定的准则下式(4)与式(2)的输入输出数据拟合得最好时的系数矩阵值

在定理 2 与定理 3 中仅证明在参数为真值的情况下系统调节的稳定性与渐近跟踪问题,但原系统(2)的时变特性会引起特征模型参数辨识所得到的估计值与真值存在一定的偏差,对于该情况的稳定性有:

定理 4 假设 $\hat{\beta}_0$ 非奇异,则当采样时间 T_s 足够小时存在正常数 $\Delta_i > 0 (i = 1, 2, 3)$ 使只要辨识参数满足 $\beta_0^{-1} - \hat{\beta}_0^{-1} < \Delta_0, \beta_0^{-1} f_1 - \hat{\beta}_0^{-1} f_1 < \Delta_1, \beta_0^{-1} f_2 - \hat{\beta}_0^{-1} f_2 < \Delta_2$ 时,控制律(19) (或控制律式(20)) 可保证式(4)系统的渐近稳定性 (或实现渐近跟踪控制).

证明 结合估计值与真值无偏差时,由定理 2 与定理 3 所得闭环系统的一致渐近稳定性和引理 2,采用 Lyapunov 直接方法可以得证,此略

由定理 1 可知,小的采样时间可以保证系统特征模型的慢时变特性,从而有利于辨识;由定理 2 可知小的采样时间有利于系统的稳定性,因此为了使定理 4 中的条件得到满足,一般选取小的采样时间 T_s .

4.3 改进的多变量黄金分割自适应控制律

鉴于辨识算法本身的动态过程,在辨识器处于动态过程时所得到的估计值与真实值必然存在一定的偏差,自适应控制律在起始阶段,为了避免整个闭环系统出现动态特性变坏,甚至因 $\hat{\beta}$ 奇异使闭环系统失稳的情况,利用特征模型慢时变的特性可对前文所提出的控制器加以改进

调节控制律式(19)可用下式代替:

$$u(k) = u_G(k) = (\hat{\beta}_0 + \alpha(k)I)^{-1} (-L_1 f_1 \hat{q}(k) - L_2 f_2 \hat{q}(k-1) + \hat{v}(k)). \quad (21)$$

跟踪控制器式(20)可用下式代替:

$$u_G(k) = (\hat{\beta}_0 + \alpha(k)I)^{-1} (L_1 f_1 \hat{q}(k) +$$

$$L^{-1} \hat{v}_2 \hat{q}(k-1) - \hat{v}(k), \quad (22)$$

$$\alpha(k+1) = e^{-\rho} \alpha(k) + \sigma_0 \quad (23)$$

为了使控制输出平滑,对控制器的输出可进行如下滤波处理:

$$u_f(k) = \nu u(k) + (1 - \nu) u_f(k-1), 0 < \nu < 1 \quad (24)$$

式中: $\rho > 0, \alpha(0)$ 与 σ_0 为非零的小常数,且满足 $0 < \sigma_0 < \alpha(0)$,其他变量同前

由注 2 可知,辨识算法式(18)运行一定的时间后将进入稳态,辨识器的输出收敛于或趋近于真实值.由式(21)~(24)可知,此时 $\alpha(k)$ 的影响将逐渐减小直至消失.特征模型所具有的特点使得这一改进方法既能有效防止系统运行初期失稳的情况,又可避免当辨识输出收敛于系统真值时因 $\alpha(k)$ 而影响系统的调节或跟踪性能

5 仿真实例

选取文献[9]所建立的空间机器人系统为仿真对象(图 1 所示).

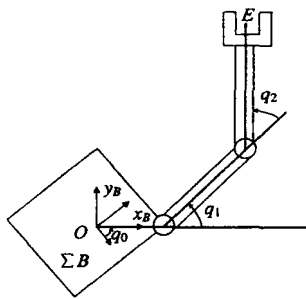


图 1 平面两关节空间机器人^[9]

对象参数的真值为^[9]: $m_0 = 200 \text{ kg}, m_1 = 5 \text{ kg}, m_2 = 5 \text{ kg}, I_0 = 100 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, I_1 = 2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, I_2 = 2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, b_0 = 0.5 \text{ m}, a_1 = 0.6 \text{ m}, b_1 = 0.6 \text{ m}, a_2 = 0.6 \text{ m}, b_2 = 0.6 \text{ m}$. 其中: m_i 表示连杆的质量, m_0 表示本体质量, a_i 表示从关节 i 到连杆 i 质心的距离, b_i 表示从连杆 i 质心到关节 $i+1$ 的距离, b_0 表示从本体质心到关节 1 的距离, I_i 表示连杆 i 相对于其质心的惯量. 动力学方程如式(2)所示^[9], 其中 $R = \mathbf{0}, K = \mathbf{0}$. 扰动及未建模动态与期望的本体姿态角分别为

$$u_d(q, \dot{q}, t) = \begin{bmatrix} 9q_0 \sin(18t) + 0.5 \\ 9q_1 \sin(18t) + 0.5 \\ 9q_2 \cos(18t) + 0.5 \end{bmatrix},$$

$$q_r = [q_{0r} \quad q_{1r} \quad q_{2r}]^T = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\pi}{180} (60 + 6 \sin(2t)) \\ \frac{\pi}{180} (34 + 6 \cos(2t)) \end{bmatrix}.$$

在与文献[9]中仿真对象和条件相同的情况下,采用所提出的基于特征模型的黄金分割自适应控制律的仿真结果如图 2 所示.有关参数为: $T_s = 2 \text{ ms}, \lambda = 0.96, \mu_0 = 0.98, \rho = 0.01, \alpha(0) = 8 \times 10^{-6}, \nu = 1, \sigma_0 = 0, P(0) = 10^6 I_{9 \times 9}$. 图 3 为采用不同方法得到的关节 2 跟踪误差曲线.其中 3(a) 采用黄金分割自适应控制算法; 3(b) 采用鲁棒复合自适应控制方法^[9,10].

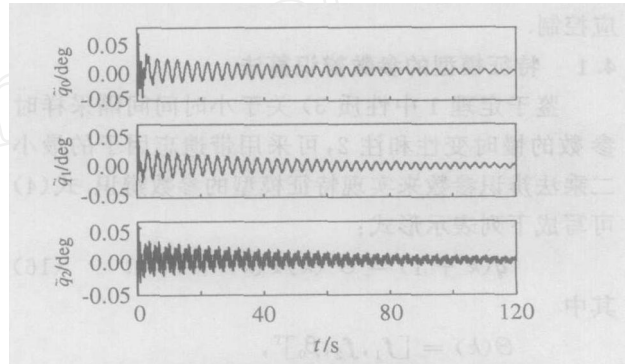
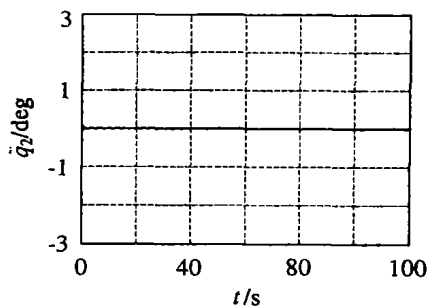
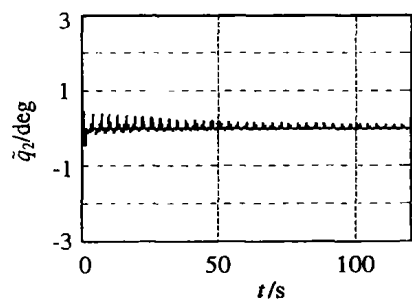


图 2 黄金分割自适应控制算法的跟踪误差



(a) 黄金分割自适应控制算法



(b) 鲁棒复合自适应控制算法

图 3 关节 2 的跟踪误差曲线

从图 2 的跟踪误差对比可以看到,多变量黄金分割自适应控制方法具有良好的跟踪性能.由图 3(a)与图 3(b)中关节 2 跟踪误差对比可知,在跟踪控制性能方面本文所提出的方法明显优于文献[9]中所提出的鲁棒复合自适应控制方法及其该文中所引用的其他自适应控制方法.另外两输出的跟踪性能,特别是在稳态时的控制精度,也优于文献[9]中所给出的结果.

6 结 语

本文基于特征模型的全系数自适应控制理论的思想,研究了多变量全驱动的欧-拉系统的基于特征模型的全系数自适应控制方法,建立了E-L系统的特征模型,利用建立的特征模型设计了相应的多变量黄金分割控制律和相应的多变量黄金分割自适应控制器,提出的基于黄金分割的多变量自适应控制策略在形式上简单,可调参数少,而且控制器的设计对系统动力学的先验知识依赖性不强

参考文献(References)

- [1] 吴宏鑫. 全系数自适应控制理论及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1990
(Wu H X. *All-Coefficient Adaptive Control Theory and Its Application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990)
- [2] 孙多青, 吴宏鑫. 多变量黄金分割自适应控制系统的稳定性分析[A]. 2005年中国控制与决策学术年会论文集[C]. 哈尔滨, 2005: 85-88
(Sun D Q, Wu H X. Stability Analysis of Multivariable Golden Section Adaptive Control Systems[A]. *Proc of 2005 Chinese Control and Decision Conf* [C]. Harbin, 2005: 85-88)
- [3] Wu H X, Liu Y W, Liu Z H, et al. Characteristic Modeling and the Control of Flexible Structure[J]. *Science in China(Series F)*, 2001, 44(4): 278-291.
- [4] Wu H X, Wang Y C, Xin Y. Intelligent Control Based on Intelligent Characteristic Model and Its Application[J]. *China Science(Series F)*, 2003, 46(3): 225-241.
- [5] Park J, Chung W K. Transition to Nonlinear H Optimal Control From Inverse-optimal Solution for Euler-Lagrange System [A]. *Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. New Jersey: IEEE Press, 2001: 1161-1167.
- [6] Wai R J, Chen P C. Intelligent Tracking Control for Robot Manipulator Including Actuator Dynamics via TSK-Type Fuzzy Neural Network[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2004, 12(4): 552-559
- [7] 齐春子, 吴宏鑫, 吕振铎. 多变量全系数自适应控制系统稳定性的研究[J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(4): 489-494
(Qi C Z, Wu H X, Lv Z D. Study on the Stability of Multivariable All-coefficient Adaptive Control System [J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(4): 489-494)
- [8] Goodwin G C, Sin K S. *Adaptive Filtering, Prediction and Control* [M]. Prentice Hall, 1984
- [9] 王景. 空间机器人的轨迹跟踪自适应控制[D]. 北京: 北京控制工程研究所, 2000
(Wang J. *Adaptive Control of Trajectory Tracking for Space Robot* [D]. Beijing: Beijing Institute of Control Engineering, 2000)
- [10] 王景, 王昊瀛, 刘良栋, 等. 空间机械臂的鲁棒复合自适应控制[J]. *自动化学报*, 2003, 28(3): 378-384
(Wang J, Wang H Y, Liu L D, et al. Robust Composite Adaptive Control for Space Manipulators [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(3): 378-384)
- [26] Bagchi T P. Pareto-optimal Solutions for Multi-objective Production Scheduling Problems [A]. *First Int Conf on Evolutionary Multi-criterion Optimization* [C]. Springer-Verlag, 2001: 458-471.
- [27] 周永华, 陈禹六. 结合性能评价的多目标价值链设计[J]. *计算机集成制造系统-CIMS*, 2004, 10(2): 219-225
(Zhou Y H, Chen Y L. Multiobjective Value Chain Design Combined with Performance Evaluation [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2004, 10(2): 219-225)
- [28] Zitzler E, Thiele L, Laumanns M, et al. Performance Assessment of Multiobjective Optimizers: An Analysis and Review [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2003, 7(2): 117-132
- [29] Coello C A C. Handling Preferences in Evolutionary Multiobjective Optimization: A Survey [A]. *Congress on Evolutionary Computation* [C]. New Jersey, 2000: 30-37.
- [30] Mostaghim S, Teich J. Quad-trees: A Data structure for storing Pareto-sets in Multi-objective Evolutionary Algorithms with Elitism [A]. *Evolutionary Computation Based Multi-criteria Optimization: Theoretical Advances and Applications* [C]. Springer-Verlag, 2005: 81-104
- [31] Deb K, Pratap A, Meiyarivan T. Constrained Test Problems for Multiobjective Evolutionary Optimization [A]. *First Int Conf on Evolutionary Multi-criterion Optimization* [C]. Springer-Verlag, 2001: 284-298
- [32] 王跃宣, 刘连臣, 牟盛静, 等. 处理带约束的多目标优化进化算法[J]. *清华大学学报*, 2005, 45(1): 103-106
(Wang Y X, Liu L C, Mu S J, et al. Constrained Multiobjective Optimization Evolutionary Algorithm [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2005, 45(1): 103-106)

(上接第605页)