

文章编号: 1001-0920(2005)08-0873-05

随机延迟网络控制系统中的分段时戳动态矩阵控制

张奇智, 张 彬, 张卫东

(上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

摘 要: 针对网络控制系统中小于一个采样周期的随机延迟, 引入了分段时戳动态矩阵控制算法. 通过时戳方法测量网络延迟, 在线校正系统的阶跃响应系数向量和控制系数向量, 并采用分段算法来减少所需的在线计算量. 给出了算法的推导过程和程序实现方法, 并基于实时控制系统仿真平台 TrueTime 进行仿真研究. 应用该算法对共享以太网中直流电机进行控制, 取得了比标准动态矩阵控制算法更好的控制品质.

关键词: 网络控制系统; 随机延迟; 动态矩阵控制; 工业以太网

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Segmented Time-stamped Dynamic Matrix Control for Networked Control Systems with Random Delays

ZHANG Qi-zhi, ZHANG Bin, ZHANG Wei-dong

(Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China Correspondent: ZHANG Qi-zhi, E-mail: zhangqz@sjtu.edu.cn)

Abstract: To address network-induced delays which are less than one sampling period in Networked Control Systems (NCS), a segmented time-stamped Dynamic Matrix Control (DMC) algorithm is proposed. The network-induced delays are measured by a time-stamp method, based on which the vectors of step response coefficients and control coefficients are corrected in each sampling period. At the same time a segmented algorithm is introduced to reduce the online calculation burden. The algorithm derivation and program realization are firstly given, and then the algorithm is validated in a NCS simulation platform based on TrueTime. The proposed algorithm shows better performance than standard DMC algorithm for a DC motor control system in shared Ethernet.

Key words: Networked control systems; Random delays; Dynamic matrix control; Industrial Ethernet

1 引 言

网络控制系统(NCS)是指反馈回路通过网络相连接的控制系统. NCS 的主要特征是: 控制系统中各部件(传感器、控制器和执行器)之间的信息交换都是通过网络完成的^[1]. 集散控制系统、现场总线控制系统、工业以太网和无线遥控系统都属于 NCS 的范畴. NCS 的演进体现了控制系统向网络化、综合化和智能化发展的趋势. 工业以太网由于成本低廉、开放性好和发展潜力大等优点, 正在越来越多地应用于 NCS.

以太网 MAC 层采用的 CSMA/CD 协议是一种

随机的网络仲裁机制. 当用于 NCS 时会在控制回路中引入随机的网络延迟, 这些延迟会降低控制系统的性能甚至使其无法稳定. 解决这一问题有两条途径: 一条是在设计控制算法时不考虑网络延迟, 而是通过改进网络协议或者调度使延迟尽可能减小^[2]; 另一条是将网络延迟视为既定条件, 通过设计合适的控制算法使网络延迟对控制品质的影响降到最小^[3]. 相对而言, 后一条途径投入更少, 且具有更大的灵活性, 因此成为控制领域中的研究热点.

在对随机延迟 NCS 的研究中, 一些学者提出了不同的控制算法. Luck 和 Ray 利用队列把 NCS 中

收稿日期: 2004-06-29; 修回日期: 2005-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(60274032); 国家 973 计划项目子课题(2002cb312200-01-1).

作者简介: 张奇智(1978-), 男, 河南南阳人, 博士生, 从事工业以太网、网络控制系统的研究; 张卫东(1967-), 男, 黑龙江大庆人, 教授, 博士生导师, 从事现场总线、鲁棒控制等研究.

的随机延迟处理为固定延迟,然后针对时不变系统设计控制^[4,5]。Goktas 针对 NCS 在频域内使用鲁棒控制理论设计控制器,将随机延迟视为网络中的随机扰动^[6]。于之训等在有动态噪声及测量噪声存在的情况下,提出一种延迟补偿器结构,实现了对随机通讯延迟的补偿和对信号的最小方差预测^[7]。Nilsson 对延迟小于一个采样周期的 NCS,给出了随机最优控制器的设计方法^[8]。Srinivasagupta 等从应用角度出发,针对延迟小于一个采样周期的 NCS,提出了时戳模型预测控制(TSMPC)和平均时延模型预测控制(MDMPC)^[9]。这两种算法继承了 MPC 的许多优点,如对系统模型要求不高、鲁棒性好、可以方便地处理约束等。但 TSMPC 算法需要不断地在线实时修正系统的动态矩阵,在线计算量很大;MDMPC 算法不适于网络延迟抖动较大的情况。本文针对这种情况提出了分段时戳 DMPC 算法,在保留 TSMPC 算法精髓的同时大大降低了在线计算量。

2 分段时戳 DMPC 算法

2.1 算法描述

考察线性定常的单输入单输出 NCS,假设被控对象的连续状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t), \\ y(t) = c^T x(t). \end{cases} \quad (1)$$

如果系统的采样周期为 h ,则在忽略网络延迟时将连续系统(1)离散化,可得^[10]

$$\begin{cases} x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma u_k, \\ y_k = c^T x_k. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Phi = e^{A h}$, $\Gamma = \int_0^h e^{A s} b ds$

设 τ_k^c , τ_k 和 τ_k^a 分别为第 k 个采样周期内传感器到控制器、执行控制算法以及控制器到执行器之间的延迟。当它们的总和小于一个采样周期时($\tau_k = \tau_k^c + \tau_k + \tau_k^a < h$),考虑控制延迟后将连续系统(1)离散化,可得^[8]

$$\begin{cases} x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma_0(\tau_k) u_k + \Gamma_1(\tau_k) u_{k-1}, \\ y_k = c^T x_k \end{cases} \quad (3)$$

式中

$$\Gamma_0(\tau_k) = \int_0^{h-\tau_k} e^{A s} b ds, \Gamma_1(\tau_k) = \int_{h-\tau_k}^h e^{A s} b ds$$

当 NCS 采用随机网络来完成通信任务时,其动态特性会随网络引入延迟的大小而变化。在 DMPC 算法中,如果仍用式(2)表示的离散系统来预测系统的未来输出,则不能得到准确的预测输出值,并由此导致控制品质恶化。此时在每个采样周期,应改由式(3)所表示的离散系统来预测系统的未来输出。为式(2)的阶跃响应系数得到式(3)的阶跃响应

系数,给出如下定理:

定理 1 如果无延迟离散系统(2)的阶跃响应系数向量为 $a = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T$,将 $\Gamma_0(\tau_k)$ 和 $\Gamma_1(\tau_k)$ 简写为 Γ_0 和 Γ_1 ,则延迟离散系统(3)在第 k 个采样周期的阶跃响应系数向量为

$$a_k = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T = [a_1 - c^T \Gamma_1, a_2 - c^T \Phi \Gamma_1, \dots, a_N - c^T \Phi^{N-1} \Gamma_1]^T. \quad (4)$$

证明 由前述定义可知 $\Gamma = \Gamma_0 + \Gamma_1$,初始状态向量 $x_0 = x_0$ 在 $t = 0$ 时对系统(2)和(3)分别施加单位阶跃输入

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$$

离散化可得

$$u_n = u_n = \{\dots, u_{n-1}, u_0, u_1, \dots, u_n\} = \{\dots, 0, 1, 1, \dots, 1\}. \quad (5)$$

在 $t = 1h$ 时系统的阶跃响应系数为

$$a_1 = y_1 |_{u_0} = c^T x_1 = c^T (\Phi x_0 + \Gamma u_0) = c^T (\Phi x_0 + \Gamma), \quad (6)$$

$$a_1 = y_1 |_{u_0} = c^T x_1 = c^T (\Phi x_0 + \Gamma_0 u_0 + \Gamma_1 u_{-1}) = c^T (\Phi x_0 + \Gamma_0). \quad (7)$$

式(6)与式(7)相减可得

$$\begin{cases} a_1 - a_1 = \\ c^T (\Phi x_0 - \Phi x_0 + \Gamma - \Gamma_0) = c^T \Gamma_1, \\ x_1 - x_1 = \Gamma_1. \end{cases} \quad (8)$$

在 $t = 2h$ 时系统的阶跃响应系数为

$$a_2 = y_2 |_{u_1} = c^T x_2 = c^T (\Phi x_1 + \Gamma u_1) = c^T (\Phi x_1 + \Gamma), \quad (9)$$

$$a_2 = y_2 |_{u_1} = c^T (\Phi x_1 + \Gamma_0 u_1 + \Gamma_1 u_0) = c^T (\Phi x_1 + \Gamma_0 + \Gamma_1). \quad (10)$$

式(9)与式(10)相减可得

$$\begin{cases} a_2 - a_2 = \\ c^T (\Phi x_1 - \Phi x_1 + \Gamma - \Gamma_0 - \Gamma_1) = \\ c^T \Phi (x_1 - x_1) = c^T \Phi \Gamma_1, \\ x_2 - x_2 = \Phi \Gamma_1. \end{cases} \quad (11)$$

在 $t = nh$ 时令

$$\begin{cases} a_n - a_n = c^T \Phi^{n-1} \Gamma_1, \\ x_n - x_n = \Phi^{n-1} \Gamma_1. \end{cases} \quad (12)$$

式中 $n = 2, 3, \dots, N$. 则 $t = (n+1)h$ 时系统的阶跃响应系数为

$$a_{n+1} = y_{n+1} |_{u_n} = c^T x_{n+1} = c^T (\Phi x_n + \Gamma u_n) = c^T (\Phi x_n + \Gamma), \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 a_{n+1} &= y_{n+1} \Big|_{u_n} = c^T x_{n+1} = \\
 c^T (\Phi x_n + \Gamma_0 u_n + \Gamma_1 u_{n-1}) &= c^T (\Phi x_n + \Gamma_0 + \Gamma_1).
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

式(13)与式(14)相减可得

$$\begin{cases}
 a_{n+1} - a_n = \\
 c^T (\Phi x_n - \Phi x_n + \Gamma - \Gamma_0 - \Gamma_1) = \\
 c^T \Phi (x_n - x_n) = c^T \Phi \Gamma, \\
 x_{n+1} - x_n = \Phi \Gamma.
 \end{cases}
 \tag{15}$$

由数学归纳法可得到

$$a_n = a_n - c^T \Phi^{n-1} \Gamma, n = 1, 2, \dots, N.$$

参考标准DM C 算法^[11], 可得延迟离散系统(3)

在第 k 个采样周期的动态矩阵

$$A_k = \begin{bmatrix} a_1 - c^T \Gamma & \dots & 0 \\ a_2 - c^T \Phi \Gamma & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_P - c^T \Phi^{P-1} \Gamma & \dots & a_{P-M+1} - c^T \Phi^{P-M} \Gamma \end{bmatrix}_{P \times M}
 \tag{16}$$

其中 A_k 是网络时延 τ_k 的函数, 它的行数 P 和列数 M 分别为优化时域长度和控制时域长度. 在每个采样周期通过估计 τ_k , 并在线不断校正 A_k , 便可准确地获得存在网络延迟时系统的输出预测值

通过最小化性能指标

$$\min J_k = \sum_{i=1}^P q_i [\omega_{+i} - \tilde{y}_{k+i|k}]^2 + \sum_{j=1}^M r_j \Delta u_{k+j-1}^2,
 \tag{17}$$

式中: ω_{+i} 和 $\tilde{y}_{k+i|k}$ 分别为系统在 $t = (k+i)h$ 时的期望输出值和预测输出值, q_i 和 r_j 分别为误差权系数和控制权系数. 进而可求得第 k 个采样周期的反馈控制律

$$\Delta u_k = L_k E_{k+1|k}^P \tag{18}$$

式中: $E_{k+1|k}^P$ 是时间跨度为 Ph 的未来输出误差的预测向量; L_k 是与时延 τ_k 有关的控制系数向量, 可以通过下式求得:

$$L_k = [1, 0, \dots, 0] (A_k^T Q A_k + R)^{-1} A_k^T Q. \tag{19}$$

式中: $Q = \text{diag}[q_1, q_2, \dots, q_P]$, $R = \text{diag}[r_1, r_2, \dots, r_M]$ 分别为误差权矩阵和控制权矩阵

2.2 程序实现

通过在数据帧中携带时戳信息, 控制器可以测量第 k 个采样周期的延迟 τ_k . 但控制器无法通过同样的方法实时获取延迟 τ_k^c 和 τ_k , 它们可采用适当的时间序列预测方法来估计^[8], 或近似地取 τ_k^c 、 τ_k 和 τ_k ($\bar{\tau}$ 为执行控制算法的平均时间). 以下假定第 k 个采样周期的控制延迟 τ_k 已经获得

由于 L_k 的计算过程涉及到矩阵的求逆运算, 如

果每步都重新计算 L_k , 则对控制器的运算能力要求太高, 为此引入分段近似算法

假设 τ_k 在小于一个采样周期的某个延迟区间内变化, 即 $\tau_k \in [\epsilon_{\min}, \epsilon_{\max}]h$, 其中 $0 < \epsilon_{\min} < \epsilon_{\max} < 1$. 将 $[\epsilon_{\min}, \epsilon_{\max}]$ 等分为 n 个子区间, 对应于每个子区间, 利用式(4)和(19), 分别离线计算出一组阶跃响应系数向量和控制系数向量. 网络延迟参数取延迟子区间的中值(如表 1 所示), 计算结果存储到控制器中.

表 1 离线分段计算参数值

$[\epsilon_{\min}, \epsilon_1]h$...	$[\epsilon_{n-1}, \epsilon_{\max}]h$
$a_1 = a_k \Big _{\tau = \frac{1}{2}(\epsilon_{\min} + \epsilon_1)h}$...	$a_n = a_k \Big _{\tau = \frac{1}{2}(\epsilon_{n-1} + \epsilon_{\max})h}$
$L_1 = L \Big _{\tau = \frac{1}{2}(\epsilon_{\min} + \epsilon_1)h}$...	$L_n = L \Big _{\tau = \frac{1}{2}(\epsilon_{n-1} + \epsilon_{\max})h}$

在线计算流程如图 1 所示. 在第 k 个采样周期, 首先测定系统的实际输出 y_k , 并与上一步预测的输出值 $\tilde{y}_{k|k-1}$ 相比较, 得到预测误差 e_k ; 然后将这一误差与校正向量 h 相乘, 再与上一步的预测输出值向量相加, 得到校正的预测输出值向量 $\tilde{y}_{k|k-1}^N$; 最后通过移位设置该时刻的预测初值向量 $\tilde{y}_{k+1|k}^N$.

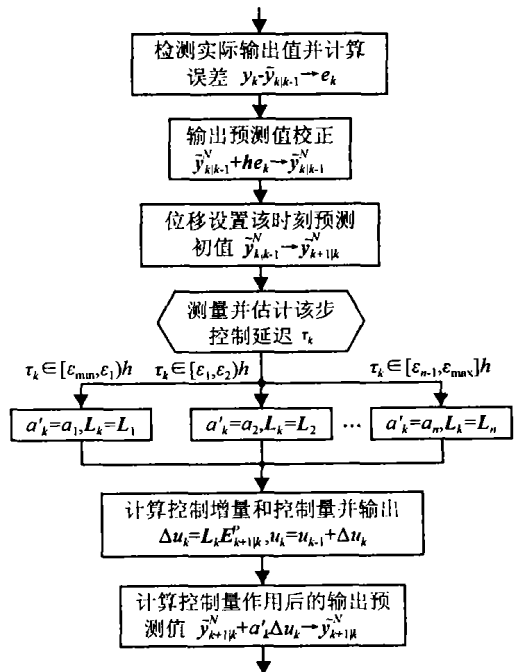


图 1 在线计算流程

根据 τ_k 的测量值估计该采样周期的控制延迟 τ_k , 并确定其所属的延迟子区间. 通过查表操作, 取出对应的阶跃响应系数向量和控制系数向量为该时刻的 a_k 和 L_k 赋值. 根据式(18)可计算该时刻的控制增量 Δu_k . 它通过累加运算求出控制量 u_k 作用于对象, 并与阶跃响应系数向量 a_k 相乘, 计算控制量作用后系统的预测输出值向量. 如此循环进行, 以实现在线控制

由于将阶跃响应系数向量和控制系数向量的校正工作改为离线进行, 在线运算只需根据估计的该时刻控制延迟 τ_k 而选取相应的计算系数, 大大减少了所需的在线计算量。增大子区间个数 n 可获得更好的控制品质, 但需要更多的存储空间。一般取 $n=10$, 即可逼近每步都根据 τ_k 重新计算 L_k 时的控制品质。

3 仿真研究

3.1 仿真平台

为检验分段时戳DMC算法的性能, 引入实时系统仿真平台 TrueTime, 它是瑞典Lund工学院自动化系开发的基于MATLAB/Simulink的仿真工具箱。TrueTime为用户提供了可定制的内核模块和网络模块。内核模块能够模拟执行实时任务的智能节点, 并能模拟A/D转换、D/A转换、网络接口和外部中断等。内核模块执行用户自定义的任务并进行中断处理, 它们代表实际过程中的控制任务。网络模块是事件驱动的, 根据用户选定的网络类型把消息分发到各个内核模块。网络模块的传输速率、最小帧长和丢包率等都可由用户设定, 以反映实际采用网络的特性^[12, 13]。

本文仿真所采用的NCS结构如图2所示。传感器、控制器和执行器分别由3个独立的内核模块实现, 随机延迟网络由采用CSMA/CD协议的网络模块实现。传感器和执行器与实际对象分别通过A/D转换器和D/A转换器相连接, 传感器、控制器和执行器之间的通信都是通过网络模块进行的。另外采用一个干扰内核模块, 模拟实际网络中由其他站点产生的数据流量。

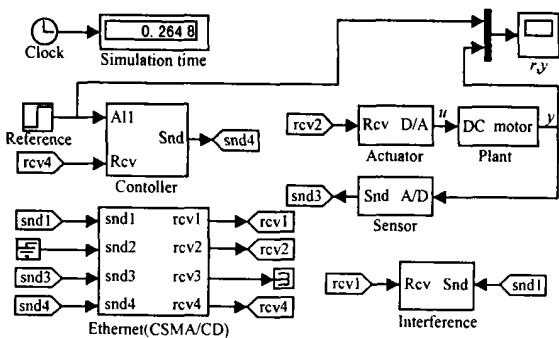


图2 用TrueTime实现的随机延迟NCS仿真平台

时间驱动传感器包含一个周期任务, 它在每个采样周期通过A/D转换器采样过程信号, 内嵌时间戳后通过网络送往控制器。控制器包含一个由事件驱动的任务, 当有通过网络传送来的传感器数据时被触发。控制器在接收到采样数据后, 按预先设定的控制算法计算出控制量, 并通过网络送往事件驱

动的执行器。执行器接收到控制信号后立即进行D/A转换, 作用于被控对象。

3.2 仿真结果

仿真对象为直流电机, 其状态空间方程为

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -4 & -0.03 \\ 0.75 & -10 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} u,$$

$$y = [0 \ 1]x.$$

设计要求系统的阶跃响应上升时间小于0.5s, 稳态误差小于5%, 超调小于10%。

首先设计标准的DMC控制器, 设计参数根据文献[11]选定。采样周期选为0.04s。模型时域长度、预测步长和控制步长通过试凑法分别选为40、15和5。等值误差权系数和控制权系数分别选为1和0.001, 等值校正系数选为1。在标准DMC控制器作用下, 无网络延迟时控制系统的阶跃响应如图3所示, 满足设计要求。

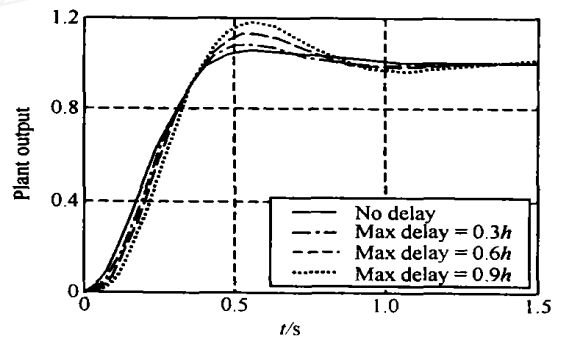


图3 系统的动态响应

在前面构建的仿真平台上实现该标准DMC算法, 通过调节干扰内核所占用的带宽来改变闭环回路的网络延迟。作为对比, 把最大网络延迟分别为0.3h, 0.6h和0.9h时系统的阶跃响应曲线也画在图3中。由图可以看出, 系统的动态响应随网络延迟的增大而变坏, 超调量和稳定时间都有增加。当控制延迟大于等于0.6h时, 系统的超调量已不能满足设计要求。

改用本文提出的分段时戳DMC算法设计控制器。在控制器内核的初始化程序中, 首先按表1计算出10个延迟子区间的阶跃响应系数向量和控制系数向量, 存储在控制器的私有工作区间。控制器在得到第k个采样周期的延迟后, 通过查表操作可从其私有工作区间取得相应的计算系数。系统的最大网络延迟分别为0.3h, 0.6h和0.9h时, 分段时戳DMC算法作用下的阶跃响应曲线如图4所示。可见系统的超调量和稳定时间得到明显改善, 接近于无延迟时标准DMC控制算法的控制品质。

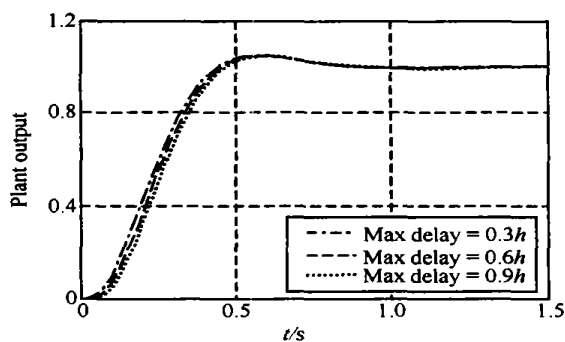


图 4 分段时戳DMC 算法的控制品质

4 结 论

本文针对NCS 中小于一个采样周期的随机延迟,提出了分段时戳DMC 算法,可以显著地改善随机NCS 的控制品质。由于引入了分段近似算法,与标准DMC 算法中的在线计算量相当,从而解决了TSMPC 算法中控制器在线计算量过大的问题。该算法可以方便地处理小于一个采样周期的固定延迟,并可推广到多变量控制系统。

参考文献(References)

- [1] Ye H. *Research on Networked Control Systems* [D]. University of Maryland College Park, 2000
- [2] Alves M, Tovar E. *Ethernet Goes Real-time: A Survey on Research and Technological Developments* [R]. Porto: Polytechnic Institute of Porto, 1998
- [3] Tipsuan Y, Chow M Y. Control Methodologies in Networked Control Systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(10): 1099-1111
- [4] Luck R, Ray A. Experimental Verification of a Delay Compensation Algorithm for Integrated Communication and Control Systems [J]. *Int J of Control*, 1994, 59(6): 1357-1372

- [5] Luck R, Ray A. An Observer-based Compensator for Distributed Delays [J]. *Automatica*, 1990, 26(5): 903-908
- [6] Goktas F. *Distributed Control of Systems over Communication Networks* [D]. University of Pennsylvania, 2000
- [7] 于之训, 陈辉堂, 王月娟. 具有随机通讯延迟和噪声干扰的网络系统控制 [J]. *控制与决策*, 2000, 15(5): 518-522
(Yu Z X, Chen H T, Wang Y J. Control of Network System with Random Communication Delay and Noise Disturbance [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(5): 518-522)
- [8] Nilsson J. *Real-time Control Systems with Delays* [D]. Lund: Lund Institute of Technology, 1998
- [9] Srinivasagupta D, Schattler H, Joseph B. Time-stamped Model Predictive Control: An Algorithm for Control of Processes with Random Delays [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2004, 28(8): 1337-1346
- [10] 杜继宏, 谢学书. *自动控制原理(下册)* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1992
(Du J H, Xie X S. *Automatic Control Principle (Vol 2)* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992)
- [11] 席裕庚. *预测控制* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993
(Xi Y G. *Predictive Control* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993)
- [12] Henriksson D, Cervin A, Arzen K E. TrueTime: Simulation of Control Loops under Shared Computer Resources [A]. *Proc of the 15th IFAC World Congress on Automatic Control* [C]. Barcelona, 2002
- [13] Henriksson D, Cervin A. *TrueTime 1.13 Reference Manual* [M]. Lund: Lund Institute of Technology, 2003

(上接第 872 页)

- [13] 李众, 杨一栋. 基于混合维云模型定性推理的调距桨螺距控制 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2003, 149(2): 162-167.
(Li Z, Yang Y D. The Controllable Pitch Propeller Control Based on Qualitative Reasoning of Variant Dimension Cloud Model [J]. *J of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 35(2): 162-167.)
- [14] 李众, 高键. 电液伺服变距系统的二维云模型控制研究 [J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(5): 1050-1052
(Li Z, Gao J. Study on Two-dimension Cloud Model

Control for Electric-hydraulic Servo Variable Pitch [J]. *J of System Simulation*, 2003, 16(5): 1050-1052)

- [15] 高键, 姜长生, 李众. 一种新的云模型控制器设计 [J]. *信息与控制*, 2005, 34(2): 157-162
(Gao J, Jiang C S, Li Z. A Novel Design of Controller Based on Cloud Model [J]. *Information and Control*, 2005, 34(2): 157-162)
- [16] Derek P A, Majhi S. Limitations of PD Controllers [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. San Diego, 1999: 3843-3847.