第 16 卷 第 4 期 控 制 与 决 策 2001 年 7 月
Vol.16 No.4 CONTROL AND DECISION July 2001

文章编号: 1001-0920(2001)04-0452-05

不确定非线性时滞系统的鲁棒可靠控制

徐兆棣[1], 张嗣瀛[2]
(1.沈阳师范学院 数学系,辽宁 沈阳 110031;2.东北大学 信息科学与工程学院,辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 研究一类包含状态时滞的未知非线性扰动项和参数不确定性的不确定时滞系统基于状态观测器的鲁棒可靠控制问题。其中非线性满足范数有界条件,参数不确定性是时变的。目的是设计状态观测器和线性无记忆观测状态反馈控制器,使得对于任意容许的不确定性以及在系统中预先指定的执行器子集合内执行器的失效,相应的闭环系统渐近稳定。最后给出一个数值例子验证了所得结果的有效性。
关键词: 时滞;状态观测器;执行器失效;可靠控制;鲁棒镇定
中图分类号: TP 273 文献标识码: A

Robust Reliable Control for Uncertain Nonlinear Systems with Time-delay

XU Zhao-di[1], *ZHANG Si-ying*[2]
(1. Department of Mathematics, Shenyang Normal University, Shenyang 110031, China; 2. School of Information Science and Engineering, Northeastern Universiyt, Shenyang 110004, China)

Abstract: The system under consideration involves state time-delay, parameter uncertainties and unknown nonlinear disturbances. The nonlinearities are assumed to satisfy the boundedness condition, and the parameter uncertainties are allowed to be time-varying unstructured. The purpose of work is to design a state observer and a linear memoryless dynamic output feedback controller such that, for all admissible uncertainties as well as actuator failures occurring among a prespecified subset of actuators, the closed-loop system is asymptotically stable. The simulation results show that the method is very effective.
Key words: time-delay; state observer; actuator failure; reliable control; robust stabilization

1 引 言

随着对系统可靠性要求的提高,系统可靠控制问题的研究受到许多学者的关注,并已取得了不少成果[1,2]。另外,不确定时滞系统的可靠控制问题具有较强的实际背景,不确定时滞系统状态反馈可靠控制问题的研究也取得了一些成果[3~5]。但对于实际工程系统,由于各种原因,很多情况下系统的状态不能或不能全部测量到,因而使状态反馈无法实现。解决状态反馈在性能上的不可替代性和实际中的无法实现性这一矛盾,其有效手段之一就是构造状态

收稿日期: 2000-03-10; 修回日期: 2000-05-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(69774005);国家攀登计划基金项目;沈阳师范学院博士科研启动基金项目
作者简介: 徐兆棣(1955—),男,辽宁丹东人,副教授,博士,从事复杂控制系统结构性及大系统鲁棒分散控制的研究;张嗣瀛(1925—),男,山东章丘人,教授,博士生导师,中国科学院院士,从事对策论及复杂控制系统的结构分析等研究。

观测器, 并通过用观测器状态代替真实状态来实现所要求的状态反馈。对于不确定时滞系统基于观测器的动态输出反馈可靠控制方面的结果, 目前尚未见报道。

本文研究一类具有状态时滞的非线性不确定系统基于观测器的动态输出反馈鲁棒可靠镇定问题。目的是设计状态观测器和线性无记忆观测状态反馈控制器, 使得相应的闭环系统对任意容许的不确定性和给定执行器集合中任意执行器失效仍是渐近稳定的。

2　系统描述及预备知识

考虑不确定非线性时滞系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A(t))x(t) + (A_d + \Delta A_d(t))x(t-d) + Bu(t) + Df(x(t)) \\ y(t) = Cx(t) \\ x(t) = \phi(t), \quad t \in [-d, 0] \end{cases} \tag{1}$$

其中, $x(t) \in R^n$ 是系统在时刻 t 的状态向量, $u(t) \in R^m$ 是系统的控制输入向量, $y(t) \in R^q$ 是控制输出向量, A, A_d, B, C 和 D 是具有适当维数的常值矩阵, $\Delta A(t)$ 和 $\Delta A_d(t)$ 是反映系统模型中实变参数不确定性的不确定实值矩阵, $f(\cdot): R^n \to R^{n_f}$ 是未知的非线性向量函数, $\phi(t)$ 是连续的向量初值函数, $d > 0$ 是滞后常数。

对于系统(1), 做如下假设[3]:

假设 1　参数不确定性 $\Delta A(t)$ 和 $\Delta A_d(t)$ 满足条件

$$\Delta A(t) = M\Xi(t)N, \quad \Delta A_d(t) = M_d\Xi_d(t)N_d \tag{2}$$

其中, M, N, M_d 和 N_d 是已知的实值常数矩阵, $\Xi(t)$ 和 $\Xi_d(t)$ 是具有 Lebesgue 可测元素的未知实变矩阵, 且

$$\Xi^{\mathrm{T}}(t)\Xi(t) \le I, \quad \Xi_d^{\mathrm{T}}(t)\Xi_d(t) \le I \tag{3}$$

式中 I 是具有适当维数的单位矩阵。

假设 2　存在已知的实值常数矩阵 G, 使得未知的非线性向量函数 $f(\cdot)$ 满足如下有界性条件

$$\| f(x(t)) \| \le \| Gx(t) \| \tag{4}$$

注 1　与文献[3]的假设 2.1 相比, 本文假设 1 的条件更宽松一些。

本文所要研究的问题是: 对于给定的不确定时滞系统(1)～(4), 设计动态输出反馈控制器

$$u(t) = -K\hat{x}(t) \tag{5}$$

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \tag{6}$$

使得对任意容许的不确定性及预先指定的执行器子集合中任意执行器的失效, 系统(1)的闭环系统渐近稳定。其中, $\hat{x}(t) \in R^n$ 为观测器状态, K 为控制器增益, L 为观测器增益。

引理 1　设 x 和 y 为任意两个相同维数的向量, ϵ 为任意一个正常数, 则

$$2x^{\mathrm{T}}y \le \epsilon^{-1}x^{\mathrm{T}}x + \epsilon y^{\mathrm{T}}y$$

3　主要结果

首先考虑没有控制器失效时, 系统(1)基于观测器(6)的鲁棒镇定。令 $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, 则有

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) + \Delta Ax(t) + (A_d + \Delta A_d)x(t-d) + Df(x(t)) \tag{7}$$

定理 1　若系统(1)满足假设 1 和假设 2, 且存在正常数 $\epsilon_i (i = 1, 2, 3, 4)$, γ_c 和 γ_o 使得如下 Riccati 方程和不等式

$$P_cA + A^{\mathrm{T}}P_c + P_cR_cP_c + Q_c = 0 \tag{8}$$

$$P_oA + A^{\mathrm{T}}P_o + P_oR_oP_o + Q_o < 0 \tag{9}$$

分别存在对称正定解 P_c 和 P_o, 其中

$$R_c = -\gamma_cBB^{\mathrm{T}} + \epsilon_1^{-1}MM^{\mathrm{T}} + \epsilon_2^{-1}A_dA_d^{\mathrm{T}} + \epsilon_3^{-1}M_dM_d^{\mathrm{T}} + \epsilon_4^{-1}DD^{\mathrm{T}}$$

$$Q_c = (1 + \epsilon_1)N^{\mathrm{T}}N + (1 + \epsilon_2)I + (1 + \epsilon_3)N_d^{\mathrm{T}}N_d + (1 + \epsilon_4)G^{\mathrm{T}}G$$

$$R_o = MM^{\mathrm{T}} + A_dA_d^{\mathrm{T}} + M_dM_d^{\mathrm{T}} + DD^{\mathrm{T}}$$

$$Q_o = -2\gamma_oC^{\mathrm{T}}C + \gamma_cP_cBB^{\mathrm{T}}P_c$$

则由式(5)和(6)给出的动态输出反馈控制器鲁棒镇定闭环系统(1)。其中

$$K = \gamma_cB^{\mathrm{T}}P_c, \quad L = \gamma_oP_o^{-1}C^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

证明　考虑由式(1), (5)～(7)构成的增广闭环系统

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A + \Delta A - BK)x(t) + (A_d + \Delta A_d) \times x(t-d) + BKe(t) + Df(x(t)) \\ \dot{e}(t) &= (A - LC)e(t) + \Delta A(t)x(t) + (A_d + \Delta A_d)x(t-d) + Df(x(t)) \end{aligned} \tag{11}$$

构造正定函数

$$V(x(t), e(t)) = x^{\mathrm{T}}(t)P_cx(t) + e^{\mathrm{T}}(t)P_oe(t) + \int_{-d} x^{\mathrm{T}}(\sigma)Sx(\sigma)\,\mathrm{d}\sigma$$

其中 $S = (1 + \epsilon_2)I + (1 + \epsilon_3)N_d^{\mathrm{T}}N_d$。则 $V(x(t), e(t))$ 沿闭环系统(11)轨迹的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}(x(t), e(t)) &= \\ & 2x^{\mathrm{T}}(t)P_c\dot{x}(t) + 2e^{\mathrm{T}}(t)P_o\dot{e}(t) + \\ & x^{\mathrm{T}}(t)Sx(t) - x^{\mathrm{T}}(t-d)Sx(t-d) \end{aligned}$$

利用引理 1 及式(10) 可得

$$
\begin{aligned}
&\mathring{V}(x(t), e(t)) \leq \\
&x^{\mathrm{T}}(t)(P_cA + A^{\mathrm{T}}P_c + P_cR_cP_c + Q_c)x(t) + \\
&e^{\mathrm{T}}(t)(P_oA + A^{\mathrm{T}}P_o + P_oR_oP_o + Q_o)e(t)
\end{aligned}
\tag{12}
$$

利用条件(8) 和(9) 可得 $\mathring{V} < 0$, 根据Lyapunov 稳定性理论知闭环系统(11) 渐近稳定。即系统(1) 可由式(5) 和(6) 给出的动态输出反馈控制器鲁棒镇定。

下面考虑系统中部分执行器可能失效时, 系统(1) 的线性无记忆动态输出反馈控制器的设计。设 $\Omega \subseteq \{1, 2, \cdots, m\}$ 是预先指定的执行器的集合, 其中的执行器允许失效。即 Ω 中的执行器对镇定系统而言是多余的, 但可起到改善系统性能的作用。不失一般性, 假定执行器失效时相应的输出为零。我们的目的是设计状态观测器和线性无记忆观测状态反馈控制器(5), 使得对任意容许的参数不确定性和任意 $\omega \subseteq \Omega$(ω 中的执行器均失效), 闭环系统(11) 仍是渐近稳定的。

ω 中执行器均失效对输入的影响可用一个矩阵 $E_\omega = \mathrm{diag}(e_1, e_2, \cdots, e_m)$ 左乘控制输入 u 来表示[5]。其中

$$
e_i = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个执行器正常,} \\ 0, & \text{第 } i \text{ 个执行器失效,} \end{cases} \quad i = 1, 2, \cdots, m
$$

此时, 故障闭环系统的增广系统可写成

$$
\begin{cases}
\mathring{x}(t) = (A + \Delta A - BE_\omega K)x(t) + (A_d + \\
\qquad \Delta A_d)x(t-d) + BE_\omega Ke(t) + Df(x(t)) \\
\mathring{e}(t) = (A - LC)e(t) + \Delta A(t)x(t) + \\
\qquad (A_d + \Delta A_d)x(t-d) + Df(x(t))
\end{cases}
\tag{13}
$$

定理 2 若系统(1) 满足假设 1 和假设 2, 且存在正常数 $\epsilon_i(i = 1, 2, 3, 4)$, γ_c 和 γ_o 使得如下 Riccati 方程和不等式

$$
\tilde{P}_cA + A^{\mathrm{T}}\tilde{P}_c + \tilde{P}_c\tilde{R}_c\tilde{P}_c + Q_c = 0 \tag{14}
$$

$$
\tilde{P}_oA + A^{\mathrm{T}}\tilde{P}_o + \tilde{P}_oR_o\tilde{P}_o + \tilde{Q}_o < 0 \tag{15}
$$

分别存在对称正定解 $\tilde{P}_c$ 和 $\tilde{P}_o$, 其中

$$
\begin{aligned}
\tilde{R}_c = &- \gamma_cBE_\Omega B^{\mathrm{T}} + \epsilon_1^{-1}MM^{\mathrm{T}} + \epsilon_2^{-1}A_dA_d^{\mathrm{T}} + \\
&\epsilon_3^{-1}M_dM_d^{\mathrm{T}} + \epsilon_4^{-1}DD^{\mathrm{T}}
\end{aligned}
$$

$$
\tilde{Q}_o = - 2\gamma_oC^{\mathrm{T}}C + \gamma_c\tilde{P}_cBB^{\mathrm{T}}\tilde{P}_c
$$

则由式(5) 和(6) 给出的动态输出反馈控制器可鲁棒镇定故障闭环系统(1)。其中

$$
K = \gamma_cB^{\mathrm{T}}\tilde{P}_c, \quad L = \gamma_o\tilde{P}_o^{-1}C^{\mathrm{T}} \tag{16}
$$

类似于定理 1 的讨论, 利用 $E_\omega^{\mathrm{T}}E_\omega = E_\omega$, $E_\Omega^{\mathrm{T}}E_\Omega = E_\Omega$, $E_\omega \geq E_\Omega \geq 0$, 容易证明结论成立。

注 2 方程(14) 和不等式(15) 并不是独立的, 因此求解时需先由方程(14) 解出 $\tilde{P}_c$, 再将 $\tilde{P}_c$ 代入式(15) 求解 $\tilde{P}_o$。

注 3 方程(14) 的求解涉及到参数 γ_c 和 $\epsilon_i(i = 1, 2, 3, 4)$ 的选取。当系统(1) 完全可控时(这是受控系统通常应满足的条件), 必能适当选取正常数 γ_c 和 ϵ_i, 使 Riccati 方程(14) 存在对称正定解矩阵 $\tilde{P}_c$。为减小保守性, 可对已选定的正常数 ϵ_i 进行修订。修订的原则是保持方程(14) 存在对称正定解, 同时使相应两项(例如引理 1 中的 $\epsilon^{-1}x^{\mathrm{T}}x$ 与 $\epsilon y^{\mathrm{T}}y$) 之差的绝对值尽可能小。

注 4 当 $\tilde{P}_c$ 已知时, 不等式(15) 存在对称正定解 $\tilde{P}_o$, 等价于线性矩阵不等式

$$
\begin{bmatrix} \tilde{P}_oA + A^{\mathrm{T}}\tilde{P}_o + Q_o & \tilde{P}_oU \\ U^{\mathrm{T}}\tilde{P}_o & -I \end{bmatrix} < 0 \tag{17}
$$

存在对称正定解矩阵 $\tilde{P}_o$, 其中 $U = [M \quad A_d \quad M_d \quad D]$。

根据上面的讨论, 可按如下步骤设计故障闭环系统(1) 的动态输出反馈控制器(5) 和(6):

Step1: 选取适当的正常数 γ_c 和 $\epsilon_i(i = 1, 2, 3, 4)$, 使 Riccati 方程(14) 存在对称正定解矩阵 $\tilde{P}_c$;

Step2: 按注 3 的原则修订 $\epsilon_i(i = 1, 2, 3, 4)$, 并求出相应的 $\tilde{P}_c$;

Step3: 将求得的 $\tilde{P}_c$ 代入式(17) 求解, 如果式(17) 存在对称正定解矩阵 $\tilde{P}_o$ 和正常数 γ_o, 则式(5) 和(6) 中的控制器增益 K 和观测器增益 L 由式(16) 确定。

4 仿真例子

考虑文献[3] 所讨论的例子, 其中系统矩阵做了微小改动, 并添加了系统输出。具体数据如下

$$
A = \begin{bmatrix} -2 & 0.1 & -0.1 \\ -0.3 & -2 & -0.2 \\ 1 & -0.2 & 0.2 \end{bmatrix}
$$

$$
C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}
$$

其余数据参见[3]。

注 5 由于系统矩阵 A 与文献[3] 所讨论的例子稍有不同, 此时, [3] 所给方法已不适用(其中 Riccati 方程(20) 对于所给参数无解)。

取 $\epsilon_i = 1, i = 1, 2, 3, 4, \gamma_c = 1$, 当 $\Omega_1 = \{3\}$ 时(即控制器 3 可能失效), 令 $E_{\Omega_1} = \mathrm{diag}[1 \quad 1 \quad 0]$, Riccati 方程(14) 存在对称正定解。利用注 3 的原则修订 $\epsilon_i(i = 1, 2, 3, 4)$, 可取 $\epsilon_1 = 18.235$, $\epsilon_2 = 0.016$,

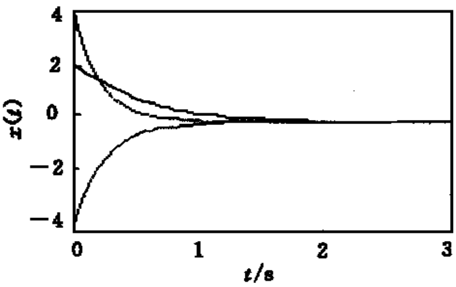

图 1　$\Omega_1=\{3\}, \omega_1=\varnothing$ 系统的状态响应

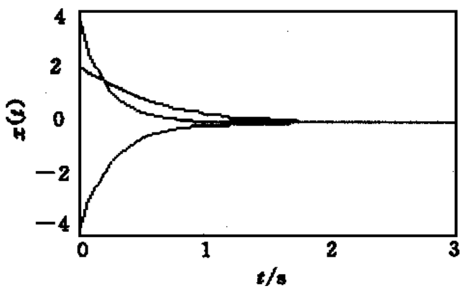

图 2　$\Omega_1=\{3\}, \omega_1=\{3\}$ 系统的状态响应

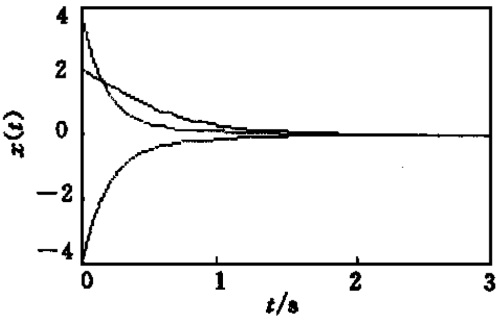

图 3　$\Omega_2=\{2\}, \omega_2=\varnothing$ 系统的状态响应

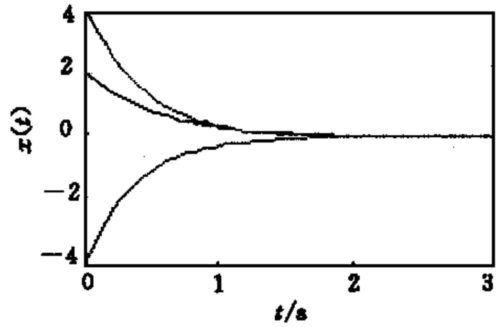

图 4　$\Omega_2=\{2\}, \omega_2=\{2\}$ 系统的状态响应

$\epsilon_3=5.901, \epsilon_4=0.2599$。相应地, 由式(14) 和(17) 可分别解得

$$\tilde{P}_{c1}=\begin{bmatrix}0.3257 & -0.0109 & 0.0987\\ -0.0109 & 0.2122 & 0.0032\\ 0.0987 & 0.0032 & 0.6686\end{bmatrix}$$

$$\tilde{P}_{o1}=\begin{bmatrix}7.0897 & -1.0162 & -2.7614\\ -1.0162 & 3.5775 & 1.5053\\ -2.7614 & 1.5053 & 2.1024\end{bmatrix}$$

$$\gamma_o=6.5336$$

类似地, 当 $\Omega_2=\{2\}$ 时(即控制器 2 可能失效), 令 $E_{\Omega_2}=\mathrm{diag}[1\quad 0\quad 1]$, 取 $\epsilon_1=26.8012$, $\epsilon_2=0.027$, $\epsilon_3=8.673$, $\epsilon_4=0.3353$, $\gamma_c=1$, 由式(14) 和(17) 可分别解得

$$\tilde{P}_{c2}=\begin{bmatrix}0.3816 & -0.0741 & 0.2004\\ -0.0741 & 0.2933 & -0.1493\\ 0.2004 & -0.1493 & 0.8721\end{bmatrix}$$

$$\tilde{P}_{o2}=\begin{bmatrix}12.1872 & -1.2634 & -5.6351\\ -1.2634 & 5.5529 & 2.5404\\ -5.6351 & 2.5404 & 4.4151\end{bmatrix}$$

$$\gamma_o=20.4865$$

对应地, 控制器增益矩阵和观测器增益矩阵分别为

$$K_1=\begin{bmatrix}0.3301 & 0.3146 & 0.8762\\ 0.2272 & -0.4646 & 0.9488\\ 0.1118 & 0.0034 & 0.7365\end{bmatrix}$$

$$K_2=\begin{bmatrix}0.3964 & 0.2090 & 0.9629\\ 0.5200 & -0.8692 & 1.5895\\ 0.2243 & -0.1650 & 0.9614\end{bmatrix}$$

$$L_1=\begin{bmatrix}-1.2431 & 1.3002\\ 2.3491 & 2.1139\\ -6.4223 & 0.1943\end{bmatrix}$$

$$L_2=\begin{bmatrix}-2.8141 & 2.6195\\ 4.2425 & 3.7404\\ -10.6729 & 1.1912\end{bmatrix}$$

取初始条件 $[x_1(0)\ \ x_2(0)\ \ x_3(0)]=[2\ \ 4\ \ -4]$ 进行仿真, 其结果如图1～图4所示。其中, 图1和图2是 $\Omega_1=\{3\}$ 时, 没有控制器失效($\omega_1=\varnothing$) 和控制器 3 失效($\omega_1=\{3\}$) 的结果; 图3和图4是 $\Omega_2=\{2\}$ 时, 没有控制器失效($\omega_2=\varnothing$) 和控制器 2 失效($\omega_2=\{2\}$) 的结果。仿真结果表明本文提出的可靠控制设计方法是有效的, 可以达到预期的控制目的。

5　结　　论

本文讨论了一类具有状态时滞的不确定非线性系统基于状态观测器的动态输出反馈鲁棒可靠控制问题。对于一个预先指定的执行器的集合, 提出一种与该集合有关的状态观测器和线性无记忆观测状态反馈控制器的设计方法。对于任意容许的不确定性,

该控制器不仅能镇定正常运行的系统,而且对于指定集合中任意执行器的失效仍能镇定相应的系统。控制器的设计方法依赖于一个 Riccati 方程和一个线性矩阵不等式正定解矩阵的存在性,计算简单且参数选择余地较大。为简单,本文仅考虑了常数时滞的情况。但因所设计的动态输出反馈控制器与时滞无关,因此所得结果很容易推广到时变时滞的情况。

参考文献:

[1] Seo C J, Kim B K. Robust and H_∞ control for linear systems with parameter uncertainty and actuator failure [J]. Automatica, 1996, 32(3): 456-467.

[2] Veillette R J, Medainc J V, Perkins W R. Design of reliable control systems [J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1992, 37(2): 290-340.

[3] Wang Z, Huang B, Unbehauen H. Robust reliable control for a class of uncertain nonlinear state-delayed systems[J]. Automatica, 1999, 35(6): 955-963.

[4] 顾永如,李歧强,程正群,等. 具有状态滞后的不确定系统的鲁棒可靠 H_∞控制[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(1): 149-151.

[5] 孙金生,李军,王执铨. 时滞不确定系统的鲁棒容错控制[J]. 控制理论与应用, 1998, 15(2): 266-271.

2002 中国控制与决策学术年会(14th CDC)征文通知

会议主题: 控制与决策系统的理论与应用

征文范围: 1. 广义系统、大系统、非线性系统、混沌系统、系统稳定与镇定; 2. 自适应、鲁棒、预测、变结构控制; 3. 系统滤波、辨识、参数估计; 4. 频域控制、状态反馈控制、最优控制、H_∞优化、动态规划、组合优化方法; 5. 智能控制、模糊控制、专家系统; 6. 神经网络及其应用; 7. 故障检测、容错、冗余、系统完整性; 8. 离散事件系统(FMS、CIMS)、混合系统; 9. 社会经济、生产计划、生产调度、生产管理系统; 10. 对策、决策理论及应用; 11. 信息管理、决策支持系统及系统仿真; 12. 军事信息科学与技术; 13. 其它(机器人、电力系统、拖动控制、工业过程控制、仪器仪表、计算机控制等)。

会议时间: 2002 年 5 月

论文要求: 1. 具有较高学术水平, 内容充实具体; 2. 未在国内外公开发行的刊物和全国性学术会议上发表或宣读; 3. 全文不超过 5000 字(含图表所占字数, 插图限 3～4 幅); 4. 写作格式参见本会论文集; 5. 原稿字迹清楚, 插图规范, 文中易混字母大小写及上下角标用铅笔标明; 6. 来稿请注明“CDC'2002 征文”字样, 并标明原稿属“征文范围”哪一类文稿; 7. 写清第一作者详细通讯地址、邮编及电话; 8. 来稿一式二份, 本会不退稿。

论文评优: 应广大作者和读者的要求, 本届年会将评选优秀论文。

论文出版: 录用论文统一编辑, 激光照排, 胶版印刷, 出版社正式出版发行。

截稿日期: 2001 年 11 月 15 日

录用通知: 2001 年 11 月 30 日以前

联系地址: 110004 沈阳市东北大学 125 信箱

联系人: 李淑华

电　话: (024)23906437

CDC'2002 组委会