

# 可变时延网络控制系统的建模和稳定性分析

田裕康<sup>1</sup>, 胡荣强<sup>2</sup>

(1. 武汉纺织大学电子信息工程学院, 湖北 武汉 430073; 2. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**对具有时变时延的网络控制系统,提出了一种新的网络控制系统模型,当假设网络控制系统的传感机构为时间驱动方式,执行器与控制器为事件驱动方式,将广义网络被控对象建模为一类含有不确定项线性系统.基于Lyapunov稳定性理论和线性矩阵不等式的方法,提出了系统渐近稳定存在的充分条件,仿真结果验证了稳定判据的可行性.

**关键词:**Lyapunov函数;时延;网络控制系统;线性矩阵不等式

中图分类号:TP273

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.07.024

## 0 引言

网络控制系统 (Networked Control Systems; NCS)是指通过实时通信网络形成的闭环反馈控制系统<sup>[1-2]</sup>.NCS与传统的控制系统相比,具有控制系统配置灵活性强和可远程监测、系统成本低和高可靠性、安装与维护简便、信息资源能共享等诸多优点.但是由于通信网络协议的时分复用和网络带宽、承载能力和服务能力的限制,使得信息不可避免出现网络诱导时延和丢包等现象发生,这给控制系统的稳定性和控制性能带来了不利影响,甚至可能导致整个系统不稳定<sup>[3]</sup>.当前现场总线控制系统(FCS)的出现已经给工业控制领域带来了深层次的革命,而以工业以太网为基础的网络控制系统由于具有开放性,低成本、高速率、便于和Internet集成等特点成为控制网络发展的趋势,但工业以太网时延的不确定性和时变性也阻碍了其在工业控制领域的快速发展.因此对网络控制系统中存在数据时延的稳定性分析及其控制问题的研究具有重要的理论和实际意义.

## 1 网络控制系统时延模型

对网络时延模型主要从时延的确定性和随机性两方面进行分析.引起网络时延因素主要有两部分,网络传输过程和数据处理过程,来源于计算延时,信息的编解码, A/D 与 D/A 变换,通信协议处理以及网络传输延时等.时延具有随机性的特点,采用确定性时延方法来设计 NCS 的控制器时,在控制器和执行器中设置接收缓冲区,将变化的

信号传输延迟转化为固定的最大传输延迟.将随机时变时延转化为确定性时延,然后针对相应的具有确定性时延的 NCS 来设计控制器.

考虑如图 1 所示的网络控制系统,包含了一个传感器和一个执行器的情况,对于具有多控制环的节点,可以转化为具有单控制环的多个节点之和,控制系统的反馈信号和控制信号都经通信网络传输,其中  $0\tau_{sr}$  和  $\tau_{cs}$  分别表示传感器到控制器之间的网络时延和控制器到执行器之间的网络时延,  $\tau_c$  表示控制器的计算时延.设网络控制系统满足以下假设条件:(1)无数据包丢失和时序错乱,不考虑噪声干扰情况(2)传感器为时间驱动,控制器和执行器为事件驱动.

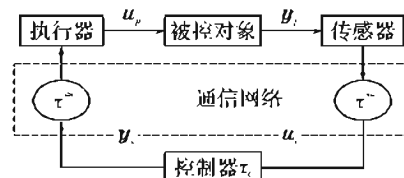


图1 网络控制系统结构图

Fig.1 The structure of networked control system

设连续被控对象和控制器的状态方程分别描述为

$$\dot{x}_p = A_p x_p(t) + B_p u_p(t) \quad (1)$$

$$y_p(t) = C_p x_p(t)$$

$$\dot{x}_c = A_c x_c(t) + B_c u_c(t) \quad (2)$$

$$y_c(t) = C_c x_c(t - \tau_c) + D_c u_c(t - \tau_c)$$

其中  $x_p \in R^n$ ,  $u_p \in R^m$ ,  $y_p \in R^p$  分别表示被控对象的状态向量,输入向量和输出向量,  $x_c \in R^a$ ,  $u_c \in R^m$ ,  $y_c \in R^p$  分别表示控制器的状态向量,输入向量

和输出向量, 分别是控制回路中被控对象、传感器和执行器对应的维数,  $A_p, B_p, C_p$  和  $A_c, B_c, C_c, D_c$  是具有适当维数的已知实常系数系统矩阵。由于数据从被控对象传输到控制器和从控制器到被控对象都需要经过公共通信网络, 从而网络的时延可以用下述关系式描述

$$\begin{cases} u_c = y_p(t - \tau_{sc}) \\ u_p = y_c(t - \tau_{ca}) \end{cases} \quad (3)$$

其中  $0 \leq \tau_{ca} \leq \tau_{ca, \max}$ ,  $0 \leq \tau_{sc} \leq \tau_{sc, \max}$ ,  $0 \leq \tau_c \leq \tau_{c, \max}$ ,  $\tau_{c, \max}$  和  $\tau_{sc, \max}$  分别是传感器到控制器、控制器到执行器之间和的最大网络时延。  $\tau_{ca, \max}$  是控制器的最大计算时延, 由方程 (1) - (3) 并定义  $x(t) = [x_p^T(t) \ x_c^T(t)]^T$  为 NCS 的状态变量, 则 NCS 的状态方程可表示为:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} A_c & 0 \\ 0 & A_p \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_c C_p & 0 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & B_p C_c \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x(t - \tau_{ca} - \tau_c) + \\ &+ \begin{bmatrix} B_p C_p D_c & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x(t - \tau_{sc} - \tau_{ca} - \tau_c) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{如果定义 } A_0 = \begin{bmatrix} A_c & 0 \\ 0 & A_p \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_c C_p & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & B_p C_c \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, A_3 = \begin{bmatrix} B_p C_p D_c & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$0 \leq \tau_1 = \tau_{sc} \leq \tau_{sc, \max} = \tau_{1, \max}$$

$$0 \leq \tau_2 = \tau_{ca} \leq \tau_{ca, \max} = \tau_{2, \max}$$

$$0 \leq \tau_3 = \tau_{sc} + \tau_{ca} + \tau_c \leq \tau_{sc, \max} + \tau_{ca, \max} + \tau_c = \tau_{3, \max}$$

考虑到实际上时延都是时变的, 则 (4) 可变为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=0}^3 A_i x(t - \tau_i(t)), t > 0 \\ x(t) = \phi(t), t \in [-\bar{\tau}, 0] \end{cases} \quad (5)$$

这里  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  是新的系统状态向量,  $A_i$  是适当维数的实常系统矩阵,  $\tau_i(t)$  为时变连续函数, 且  $\tau_0 \equiv 0, 0 \leq \tau_i(t) \leq h_i \leq \bar{\tau}, \bar{\tau} = \max\{\tau_i\}, \dot{\tau}_i(t) \leq d_i < 1, i=0, 1, 2, 3$ , 其中  $\bar{\tau}$  是  $\tau_i$  的上界,  $\phi$  是  $-\bar{\tau} \leq t \leq 0$  上的已知实值连续可微初始向量函数。

## 2 稳定性分析

**定理 1** 若存在  $n \times n$  正定对称矩阵  $P_1, P_2, P_3, S_1, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2, Z_3 > 0$  和  $R_i > 0, i=1, 2, 3$  满足如下线性矩阵不等式 (LMI):

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \psi & P^T \begin{bmatrix} 0 \\ A_1 \end{bmatrix} - Y_1^T P^T \begin{bmatrix} 0 \\ A_2 \end{bmatrix} - Y_2^T P^T \begin{bmatrix} 0 \\ A_3 \end{bmatrix} - Y_3^T \\ * & -S_1(1-d_1) & 0 & 0 \\ * & * & -S_2(1-d_2) & 0 \\ * & * & * & -S_3(1-d_3) \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

$$\text{并且 } \begin{bmatrix} R_i & Y_i \\ * & Z_i \end{bmatrix} \geq 0, i=1, 2, 3 \quad (7)$$

$$\text{其中 } Y_i = [Y_{i1} \ Y_{i2}], Z_i = \begin{bmatrix} Z_{i1} & Z_{i2} \\ * & Z_{i3} \end{bmatrix}$$

$$i=1, 2, 3, P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ P_2 & P_3 \end{bmatrix},$$

$$\psi = P^T \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_0 & -I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_0 & -I \end{bmatrix}^T P +$$

$$\sum_{i=1}^3 h_i Z_i + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 S_i & 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^3 h_i R_i \end{bmatrix} +$$

$$\sum_{i=1}^3 \begin{bmatrix} Y_i \\ 0 \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^3 \begin{bmatrix} Y_i^T \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

\* 代表矩阵块的转置部分 (下同), 则网络控制系统 (5) 渐进稳定。

证明  $\dot{x}_i(t) = y(t)$  令, 由牛顿-莱布尼兹公式

$$x(t - \tau_i) = x(t) - \int_{-\tau_i}^t \dot{x}(s) ds \text{ 和 (5) 得到}$$

$$0 = -y(t) + \left\{ \sum_{i=0}^3 A_i \right\} x(t) - \sum_{i=1}^3 A_i \int_{-\tau_i(t)}^t y(s) ds \quad (8)$$

$$\text{令 } E \dot{\bar{x}}_i(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ \sum_{i=0}^3 A_i & -I \end{bmatrix} \bar{x}$$

$$(t) - \sum_{i=1}^3 \begin{bmatrix} 0 \\ A_i \end{bmatrix} \int_{-\tau_i(t)}^t y(s) ds \quad (9)$$

其中  $\bar{x}(t) = [x(t) \ y(t)]^T, E = \text{diag}\{I, 0\}$ , 构造如下 Lyapunov-Krasovskii 函数:

$$V(t) = x^T(t) E P x(t) + V_2 + V_3 \quad (10)$$

$$V_2 = \sum_{i=1}^3 \int_{-h_i}^0 \int_{\theta}^t y^T(s) R_i y(s) ds d\theta \quad (11)$$

$$V_3 = \sum_{i=1}^3 \int_{-\tau_i(t)}^t x^T(\tau) S_i x(\tau) d\tau \quad (12)$$

显然  $EP = P^T E \geq 0$ , 注意到  $x^T(t) E P x(t) = x^T(t) P_1 x(t)$ , 对 (10) 第一项沿系统的轨迹的求时间导数为

$$\frac{d}{dt}\{\bar{\mathbf{x}}^T(t)EP\bar{\mathbf{x}}(t)\} =$$

$$2\mathbf{x}^T(t)P_1\dot{\mathbf{x}}(t) = 2\bar{\mathbf{x}}^T(t)P^T\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ 0 \end{bmatrix} = 2\bar{\mathbf{x}}^T(t)P^T \begin{bmatrix} \mathbf{y}(t) \\ -\mathbf{y}(t) + \left\{ \sum_{i=0}^3 A_i \right\} \mathbf{x}(t) - \sum_{i=1}^3 A_i \int_{t-\tau_i(t)}^t \mathbf{y}(s) ds \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$V_2(t) = \sum_{i=1}^3 \mathbf{y}^T(t) \tau_i R_i \mathbf{y}(t) - \sum_{i=1}^3 \left\{ \int_{\tau_i(t)}^t \mathbf{y}(s) R_i \mathbf{y}(s) ds \right\} \quad (14)$$

$$V_3(t) = \sum_{i=1}^3 \{ \mathbf{x}^T(t) S_i \mathbf{x}(t) - (1 - \dot{\tau}_i(t)) \mathbf{x}(t - \tau_i(t)) S_i \mathbf{x}(\tau_i(t)) \} \leq \sum_{i=1}^3 \{ \mathbf{x}^T(t) S_i \mathbf{x}(t) - (1 - d_i) \mathbf{x}(t - \tau_i(t)) S_i \mathbf{x}(\tau_i(t)) \} \quad (15)$$

由(13)-(15)可以求得

$$\frac{dV(t)}{dt} \leq \mathbf{x}^T(t) \Gamma \mathbf{x}(t) - \sum_{i=1}^3 \{ (1 - d_i) \mathbf{x}^T(t - \tau_i) S_i \mathbf{x}(t - \tau_i) + \int_{h_i}^t \mathbf{y}^T(\tau) R_i \mathbf{y}(\tau) d\tau - \eta_i \} \quad (16)$$

其中  $\Gamma \triangleq P^T \begin{bmatrix} 0 & I \\ \sum_{i=0}^2 A_i & -I \end{bmatrix} +$

$$\begin{bmatrix} 0 & \sum_{i=0}^2 A_i^T \\ I & -I \end{bmatrix} P + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^2 S_i & 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^2 h_i R_i \end{bmatrix}$$

$$\eta_i(t) = -2 \int_{-\tau_i}^t \mathbf{x}^T(t) P^T \begin{bmatrix} 0 \\ A_i \end{bmatrix} \mathbf{y}(s) ds$$

根据文献[5](Moon不等式),对于任意

$$\Gamma_1 = \begin{bmatrix} I + \sum_{i=1}^3 \left[ h_i Z_i + \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} (Y_i - [0 \ A_i] P) + (Y_i - P \begin{bmatrix} 0 \\ A_i \end{bmatrix}) [I \ 0] \right] P^T \begin{bmatrix} 0 \\ A_1 \end{bmatrix} - Y_1^T & P^T \begin{bmatrix} 0 \\ A_2 \end{bmatrix} - Y_2^T & P^T \begin{bmatrix} 0 \\ A_3 \end{bmatrix} - Y_3^T \\ * & -S_1(1-d_1) & 0 & 0 \\ * & * & -S_2(1-d_2) & 0 \\ * & * & * & -S_3(1-d_3) \end{bmatrix} \quad (18)$$

应用Schur补定理<sup>[4]</sup>,并展开 $\Gamma_1$ ,则LMI(6)等价于 $\Gamma_1 < 0$ ,因此,由Lyapunov-Krasovskii稳定性理论,如果LMI(6)成立,则对任意 $\xi(t) \neq 0$ 都有 $\dot{V} < 0$ ,因此网络控制系统(5)渐进稳定.证毕.

$a \in R^n, b \in R^{2n}, N \in R^{2n \times 2n}, R \in R^{n \times n}, Y \in R^{2n \times 2n}, Z \in R^{n \times n}$ ,有

$$-2b^T N a \leq \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R & Y - N^T \\ Y^T - N & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$$

其中  $\begin{bmatrix} R & Y \\ Y^T & Z \end{bmatrix} \geq 0$

令  $N = N_i = P^T \begin{bmatrix} 0 \\ A_i \end{bmatrix}, R = R_i, Z = Z_i, Y = Y_i, a = y$

(s)和 $b = x(t)$ ,可以得到

$$\eta_i(t) \leq \int_{-\tau_i}^t \begin{bmatrix} \mathbf{y}^T(s) & \bar{\mathbf{x}}^T(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_i & Y_i - [0 \ A_i^T] P \\ Y_i^T - P \begin{bmatrix} 0 \\ A_i \end{bmatrix} & Z_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}(s) \\ \bar{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} ds = \int_{-\tau_i}^t \mathbf{y}^T(s) R_i \mathbf{y}(s) ds +$$

$$2 \int_{-\tau_i}^t \mathbf{y}(s) (Y_i - [0 \ A_i^T] P) \mathbf{x}(t) ds + \int_{-\tau_i}^t \mathbf{x}(t) Z_i \mathbf{x}(t) ds$$

$$= \int_{\tau_i}^t \mathbf{y}^T(s) R_i \mathbf{y}(s) ds + 2 \int_{\tau_i}^t \dot{\mathbf{x}}(s) (Y_i - [0 \ A_i^T] P) \mathbf{x}(t) ds + \tau_i \mathbf{x}^T(t) Z_i \mathbf{x}(t) \leq \int_{\tau_i}^t \mathbf{y}^T(t) R_i \mathbf{y}(s) ds +$$

$$2\mathbf{x}^T(t) (Y_i - [0 \ A_i^T] P) \mathbf{x}(t) - 2\mathbf{x}^T(t - \tau_i) (Y_i - [0 \ A_i^T] P) \bar{\mathbf{x}}(t) + h_i \bar{\mathbf{x}}(t)^T Z_i \bar{\mathbf{x}}(t) \quad (17)$$

将(17)代入(16)得到  $\frac{dV(t)}{dt} \leq \xi^T(t) \Gamma \xi(t)$

其中

$$\xi^T(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{x}^T(t) & \mathbf{y}^T(t) & \mathbf{x}^T(t - \tau_1) & \mathbf{x}^T(t - \tau_2) & \mathbf{x}^T(t - \tau_3) \end{pmatrix}^T,$$

说明:定理1给出了不确定时变时延网络控制系统鲁棒渐进稳定条件,其归结于LMI是否有解,不等式是一个具有线性矩阵不等式约束的凸优化问题,可以利用MATLAB LMI工具箱方便地进行求解.

### 3 实例仿真

考虑如式(5)的网络控制系统,其状态方程为

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + A_1 x(t - \tau \sin t).$$

其参数为

$$A_0 = \begin{bmatrix} -2.1 & 0 \\ 0 & 0.91 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} -1.1 & 0 \\ -1.1 & -1.0 \end{bmatrix}$$

根据上述定理,并应用 MATLAB LMI 工具箱进行求解,可以求得保证系统渐进稳定最大允许网络诱导时延(MADB)分别为: $d_i = 0$ 时, $\bar{\tau} = 4.475$ ;  $d_i = 0.5$ 时, $\bar{\tau} = 3.687$ ;  $d_i = 0.9$ 时, $\bar{\tau} = 0.9546$ ,当 $\bar{\tau} = 3.687$ 时,LMI式(6)和式(7)的解为

$$P_1 = \begin{bmatrix} 235.0139 & 44.1032 \\ 44.1032 & 51.3965 \end{bmatrix}$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 158.4536 & 26.3987 \\ 26.3987 & 20.9856 \end{bmatrix}$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 233.7910 & -16.2760 \\ -16.2760 & 68.8741 \end{bmatrix}$$

$$S_1 = \begin{bmatrix} 32.9323 & 12.3636 \\ 12.3636 & 56.8956 \end{bmatrix}$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 352.2676 & -3.5710 \\ -3.5710 & 241.2158 \end{bmatrix}$$

$$Y_1 = \begin{bmatrix} 12.5612 & -4.2916 \\ -4.2961 & 25.5684 \end{bmatrix}$$

$$Y_2 = \begin{bmatrix} 58.9877 & 15.4871 \\ 15.4871 & 145.2145 \end{bmatrix}$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 251.3365 & 54.7484 \\ 54.7484 & 125.2563 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 65.8122 & 2.5065 \\ 2.5065 & 98.9650 \end{bmatrix}$$

$$Y_1 = \begin{bmatrix} 80.2632 & 52.9056 \\ 52.9056 & 184.6987 \end{bmatrix}$$

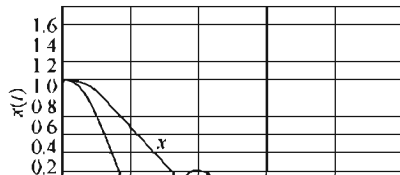
$$Y_2 = \begin{bmatrix} 7.9038 & 11.4235 \\ 11.4235 & 32.5114 \end{bmatrix}$$

$$Z_1 = \begin{bmatrix} 87.9854 & 15.6584 \\ 15.6584 & 169.2016 \end{bmatrix}$$

$$Z_2 = \begin{bmatrix} 258.1125 & 87.5614 \\ 87.5614 & 351.5642 \end{bmatrix}$$

$$h_1 = 15.2638, h_2 = 17.6857$$

系统在该时延下的状态响应曲线如图2所示,由图(2)可见该时延下系统是渐进稳定的.



### 4 结 语

针对实际 NCS 中普遍存在的时变时延,以上讨论了一类可变时延的 NCS 的稳定性问题,利用 Lyapunov 稳定性理论,给出了基于 LMI 形式的与

时延有关的渐进稳定判据,并通过实例仿真证明了结论的可行性.本方法可应用于工业以太网等网络控制系统的建模和稳定性分析,在实际中把本文的研究和工业以太网网络调度算法结合,从而进一步减小网络时延,是今后研究的方向.

#### 参考文献:

- [1] Bushnell L G. Networks and control[J]. IEEE Control System Magazine, 2001, 21(1): 22-23.
- [2] Walsh G C, Hong Y, Bushnell L G. Stability analysis of networked control systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 438-446.
- [3] W Zhang, M S Branicky, S M Phillips. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.
- [4] Boyd S L, Ghaoui E, et al. Linear matrix inequalities in system and control theory[M]. Philadelphia, PA: Siam, 1994.
- [5] Moon Y S, Park P, Kwon W H, Lee Y S. Delay-dependent robust stabilization of uncertain state-delayed systems[J]. International Journal of Control, 2001, 74(14): 1447-1455.
- [6] Yu M, Wang L, Chu T, et al. An LMI approach to networked control systems with data packet dropout and transmission delays[C]. Bahamas: The 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004.
- [7] 邹金安. 一种基于总线的传输流量估算方法[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(9): 66-68.
- [8] 樊卫华, 蔡骅, 陈庆伟, 等. 时延网络控制系统的稳定性[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 880-884.
- [9] Nilsson. Real time control systems with delays[D]. Sweden: Lund Institute of Technology, 1998.
- [10] Yue D, Han Q L, Peng C. State feedback controller design for networked control systems[J]. IEEE Trans Circuit and System, 2004, 51(11): 640-644.
- [11] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [12] 邱占芝, 张庆灵, 刘明. 有时延和数据包丢失的网络控制系统控制器设计[J]. 控制与决策, 2006, 21(6): 625-630.
- [13] 胡雄鹰. 基于结点的网络最大流算法[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(12): 67-68.
- [14] 胡学军. 基于 MATLAB 的时滞对象控制算法仿其分析[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 31(3): 92-95.

---

## Modeling and stabilization of networked control systems with time-varying delay

*TIAN Yu-kang<sup>1</sup>, HU Rong-qiang<sup>2</sup>*

(1. College of Electronics & Information Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 430073, China;

2. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Considering a class of network control systems (NCSs) with time-varying delay, a new model of the NCSs is provided under consideration of the network-induced delay in the transmission. Supposed that sensor nodes were time driven, actuators and the controller were event driven, the generalized plant was modeled as an uncertain linear system. In terms of the given model, the sufficient conditions is asymptotically stable given on the basis of utilizing Lyapunov stability theory and linear matrix inequality. Simulation results show that the stability criterion is feasible.

**Key words:** Lyapunov function; time delay; networked control system (NCS); linear matrix inequality

本文编辑:陈小平

---

☆

(上接第 61 页)

## Research progress on application of the monolith catalyst reactor for the catalytic hydrogenation of m-phenylenediamine

*BAO Chuan-ping, WU Guang-dong*

(Key Laboratory for Green Chemical Process of Ministry of Education, School of Chemical Engineering & Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The m-phenylenediamine is an important organic chemical raw material, and it is very active in applied research abroad. It can be manufactured by catalical hydrogenation of m-dinitrobenzene. The production methods of m-phenylenediamine and production reactor were discussed in this paper. In addition, the future prospect of the process for m-phenylenediamine synthesis by catalytic hydrogenation was viewed.

**Key words:** catalytic; hydrogenation; m-phenylenediamine; m-dinitrobenzene monolith catalyst reactor

本文编辑:张瑞