

文章编号: 1001-0920(2005)05-0511-05

## 具有数据包丢失及多包传输的网络控制系统稳定性

孙海燕, 侯朝桢

(北京理工大学 自动控制系, 北京 100081)

**摘要:** 在分析网络数据包丢失和多包传输原因的基础上, 研究存在数据包丢失和多包传输的网络控制系统稳定性问题. 根据网络数据包丢失模型, 提出了信号传输成功率应满足的系统指数稳定性条件, 并依据具有事件概率限制的异步动态系统理论建立了多包传输网络控制系统模型, 给出了判定系统指数稳定性的充分条件. 仿真示例验证了上述判定系统稳定性条件的有效性.

**关键词:** 网络控制系统; 异步动态系统; 数据包丢失; 多包传输; 指数稳定

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A

## Stability of networked control systems with data packet dropout and multiple-packet transmission

SUN Hai-yan, HOU Chao-zhen

(Department of Automatic Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China. Correspondent: SUN Hai-yan, E-mail: sun\_hai\_yan@bit.edu.cn)

**Abstract:** The stability problems of networked control systems (NCS) with data packet dropout and with multiple-packet transmission are discussed based on analyzing the reasons for data packet dropout and multiple-packet transmission in network. The system exponentially stable condition that must be satisfied by the signal transmission rate is proposed depending on the data packet dropout model. A n NCS with multiple-packet transmission is modeled according to the theory of an asynchronous dynamical system with rate constraints on events, and the sufficient condition for judging system exponential stability is obtained. The simulation example shows the effectiveness of the system stability conditions.

**Key words:** networked control systems (NCS); asynchronous dynamical systems (ADS); data packet dropout; multiple-packet transmission; exponentially stable

### 1 引言

网络控制系统利用网络作为被控对象与控制器之间的信号传输媒介, 形成闭环控制回路, 是计算机、通信、网络与控制等技术有机结合的高级控制形式. 它不仅利用网络连接地域广的优势延长了控制的距离, 利用计算机控制增强了控制方式的灵活性, 而且易于扩展和维护. 因此, 网络控制系统不仅局限于机器人的远程控制, 已更加广泛地应用于远程实验室、军事远程指挥监控和智能交通控制等领域<sup>[1~3]</sup>. 由于网络带宽的限制以及传输机制的影响,

网络控制系统不可避免地存在信号时延、数据包丢失及多包传输等问题. 其中: 数据包丢失定义为数据包冲突及网络节点发送失败; 多包传输是指由于网络单个数据包大小限制, 信号被分装在多个数据包中进行传输<sup>[4]</sup>. 这些问题都会导致闭环控制系统性能下降, 甚至失稳. 因此, 如何利用有限的带宽资源, 尽量减少网络对系统稳定性的影响是目前应关注的主要问题<sup>[4~8]</sup>.

Zhang 等<sup>[4]</sup>利用文献[5]提出的离散事件驱动的异步动态系统(ADS)理论, 分析了网络控制系统

收稿日期: 2004-07-19; 修回日期: 2004-10-27.

基金项目: 国防预研基金项目.

作者简介: 孙海燕(1975—), 女, 湖北武汉人, 博士生, 从事网络控制系统研究; 侯朝桢(1938—), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统、计算机控制、分布式控制、高级仿真体系结构等研究.

数据包丢失及多包传输稳定性问题 但他仅考虑了传感器与控制器之间存在网络连接的情况,而在实际网络控制系统中,往往在传感器与控制器以及控制器与执行器之间同时存在网络连接,这种情况更加复杂,需要进一步研究 Rabello 等<sup>[6]</sup>提出了在某一确定的数据包丢失率下,网络控制系统稳定性判定矩阵的优化计算方法,该方法计算较为复杂 本文针对双边网络闭环控制系统提出了保证系统指数稳定性的信号传输成功率的范围,解决了在保证系统稳定前提下允许多大程度数据包丢失的问题;基于异步动态系统理论对具有双边网络的闭环系统进行多包传输建模,并进一步提出了判定网络控制系统指数稳定性的充分条件

### 2 网络控制系统数据包丢失模型<sup>[6]</sup>

存在数据包丢失的网络控制系统如图 1 所示<sup>[6]</sup>. 其中: 网络信号采样周期为  $h$ , 被控对象的状态信号为  $x(kh)$ , 状态反馈控制器接收到的状态信号为  $\bar{x}(kh)$ , 控制器发出的控制信号为  $-K\bar{x}(kh)$ , 执行器接收到的控制信号为  $\hat{x}(kh)$ . 将双边网络分别看成开关  $S$  和  $\bar{S}$  当  $S$  和  $\bar{S}$  关闭时, 网络成功传输信号, 即  $\bar{S}_1: \bar{x}(kh) = x(kh)$ ,  $S_1: \hat{x}(kh) = -Kx(kh)$ ; 当  $S$  和  $\bar{S}$  断开时, 网络中断, 数据包丢失, 则接收端信号  $\bar{x}(kh)$  和  $\hat{x}(kh)$  分别保持前一次的值<sup>[6]</sup>, 即  $\bar{S}_2: \bar{x}(kh) = \bar{x}((k-1)h)$ ,  $S_2: \hat{x}(kh) = \hat{x}((k-1)h)$ .

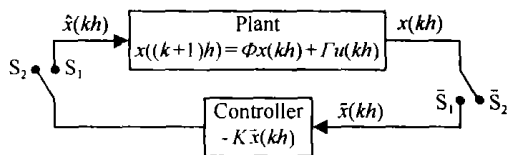


图 1 存在数据包丢失的网络控制系统结构图

假设不存在网络时的闭环控制系统稳定, 且仅考虑数据包丢失问题, 不考虑时延的影响, 则定义广义被控对象状态为

$$z(kh) = [x^T(kh), \bar{x}^T(kh), \hat{x}^T(kh)]^T,$$

具有数据包丢失的网络控制系统表示为<sup>[6]</sup>

$$z((k+1)h) = \tilde{\Phi} z(kh), S = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

当两个开关分别位于  $S_2$  和  $\bar{S}_2$ ,  $S_1$  和  $\bar{S}_1$ ,  $S_1$  和  $\bar{S}_2$ ,  $\bar{S}_1$  和  $S_2$  时, 有

$$\tilde{\Phi}_1 = \begin{bmatrix} \Phi & 0 & \Gamma \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, \tilde{\Phi}_2 = \begin{bmatrix} \Phi & 0 & \Gamma \\ \Phi & 0 & \Gamma \\ 0 & -K & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Phi}_3 = \begin{bmatrix} \Phi & 0 & \Gamma \\ 0 & I & 0 \\ 0 & -K & 0 \end{bmatrix}, \tilde{\Phi}_4 = \begin{bmatrix} \Phi & 0 & \Gamma \\ \Phi & 0 & \Gamma \\ 0 & 0 & \Gamma \end{bmatrix}.$$

### 3 具有丢包的网络控制系统稳定性

根据以上描述, 具有数据包丢失的网络控制系统可看成一个具有固定发生概率的离散事件驱动的异步动态系统<sup>[4,6]</sup>. 记  $E_1$  和  $\bar{E}_1$  分别表示开关  $\bar{S}$  关闭和断开事件,  $E_2$  和  $\bar{E}_2$  分别表示开关  $S$  关闭和断开事件. 这些事件发生的概率固定且相互独立, 分别为  $r_1, 1-r_1, r_2, 1-r_2$ , 则从传感器到控制器网络信号传输的成功率为  $r_1$ , 数据包平均丢失率为  $1-r_1$ , 从控制器到执行器网络信号传输的成功率为  $r_2$ , 数据包平均丢失率为  $1-r_2$ .

对于异步动态系统  $z((k+1)h) = \tilde{\Phi} z(kh), s = 1, \dots, 4$ , 定义 Lyapunov 函数<sup>[6]</sup>

$$V(x) = x^T P x, P > 0,$$

则关于具有数据包丢失的网络控制系统指数稳定性, 有如下引理:

引理 1<sup>[6]</sup> 对于异步动态系统结构的网络控制系统, 如果存在 Lyapunov 函数  $V: R^n \rightarrow R_+$  及对应于离散事件  $E_1, E_2, \bar{E}_1, \bar{E}_2$  的标量  $\alpha_i, \alpha_{\bar{i}}, \bar{\alpha}_i, \bar{\alpha}_{\bar{i}}$  满足  $\alpha_i > 0, i = 1, \dots, 4$ , 使得

$$\alpha_i^1 \alpha_{\bar{i}}^2 \bar{\alpha}_i^1 r_1 \bar{\alpha}_{\bar{i}}^2 > 1, \quad (2)$$

且满足非线性矩阵不等式

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_1^T P \tilde{\Phi}_1 - P &= (\bar{\alpha}_1^2 \alpha_1^2 - 1) P, \\ \tilde{\Phi}_2^T P \tilde{\Phi}_2 - P &= (\alpha_2^2 \alpha_{\bar{2}}^2 - 1) P, \\ \tilde{\Phi}_3^T P \tilde{\Phi}_3 - P &= (\bar{\alpha}_3^2 \alpha_3^2 - 1) P, \\ \tilde{\Phi}_4^T P \tilde{\Phi}_4 - P &= (\alpha_4^2 \alpha_{\bar{4}}^2 - 1) P, \end{aligned} \quad (3)$$

则系统保持指数稳定

当被控对象的状态信号和控制信号分别以成功率  $r_1$  和  $r_2$  被传输时, 网络控制系统平均传输成功率  $\bar{r} = (r_1 + r_2)/2$ , 等效的采样周期为  $h_{\text{eff}} = h/\bar{r}$ . 这表明在采样周期较短时, 系统允许一定的数据包丢失以节约网络带宽, 这时闭环网络控制系统依然保持稳定<sup>[4]</sup>. 因此, 在保证系统稳定性前提下, 对于网络信号传输成功率  $r_1$  和  $r_2$  的取值范围, 有如下定理:

定理 1 对于式(1)描述的存在数据包丢失的网络控制系统, 设网络数据包传输成功率为  $r_1$  和  $r_2$ , 假定没有数据包丢失时的闭环控制系统稳定 ( $(\Phi - \Gamma K)$  特征值在单位圆内), 则有:

1) 如果开环系统  $(\Phi)$  临界稳定, 则闭环网络控制系统对于  $0 < r_i < 1, i = 1, 2$ , 保持指数稳定;

2) 如果开环系统  $(\Phi)$  不稳定, 则闭环网络控制系统保持指数稳定, 如果

$$\frac{\eta}{\eta_b - \eta_b + m(\eta - \eta_b)} < r < 1, \quad (4)$$

$$r_1 = r, r_2 = m r_1 = m r,$$

其中  $\eta = \log[\lambda_{\text{max}}^2(\tilde{\Phi})], i = 1, \dots, 4, m > 0$

证明 设

$$\beta_1 = (\overline{\alpha_1 \alpha_2})^{-2}, \beta_2 = (\alpha_1 \alpha_2)^{-2},$$

$$\beta_3 = (\overline{\alpha_1 \alpha_2})^{-2}, \beta_4 = (\alpha_1 \overline{\alpha_2})^{-2}. \quad (5)$$

将式(5)代入(3), 正定对称阵  $P$  满足

$$\tilde{\Phi} P \tilde{\Phi} + \beta_i P, \quad i = 1, \dots, 4$$

其中  $\beta_i$  的选择必须满足  $\beta_i < \lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi})$ . 对式(2)两边分别取对数, 且记  $r_1 = r, r_2 = m r_1 = m r, m > 0$ , 且为常量, 则

$$\frac{\log \beta_1}{(\log \beta_3 - \log \beta_2) + m (\log \beta_4 - \log \beta_2)} < r - 1. \quad (6)$$

其中:  $\beta_i > 1, i = 1, \dots, 4$ , 且  $\beta_3 > \beta_2, \beta_4 > \beta_2, \beta_i$  为常量. 可通过最小化  $\log \beta_i$  来计算  $r$  的取值范围. 设  $\eta = \log(\lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi}))$ ,  $i = 1, \dots, 4$ , 则  $\eta = (\log \beta_i)_{\min}$ . 代入式(6), 有

$$\frac{\eta}{\eta_b - \eta_b + m(\eta_b - \eta_b)} < r - 1$$

注1 当被控对象状态信号与控制信号通过同一个网络路径进行传输时, 设网络数据传输功率为  $r$ , 则  $r_1 = r_2 = r, m = 1$ , 此时

$$\frac{\eta}{\eta_b + \eta_b - 2\eta_b} < r - 1, \quad r_1 = r_2 = r. \quad (7)$$

#### 4 多包传输网络控制系统建模

具有多包传输的网络控制系统如图 2 所示. 由于数据包大小有限, 被控对象状态信号被分装在独立的两个数据包内依次传输至控制器, 传输顺序为  $x_1 \quad x_2 \quad x_1 \quad x_2 \quad \dots$ ; 控制信号也被分装在两个数据包内依次传输至执行器, 传输顺序为  $-K_1 \bar{x}_1 \quad -K_2 \bar{x}_2 \quad -K_1 \bar{x}_1 \quad -K_2 \bar{x}_2 \quad \dots$

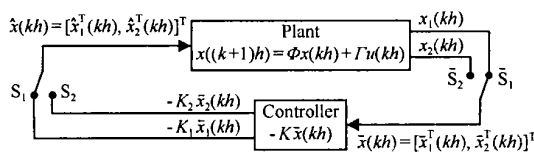


图 2 多包传输网络控制系统结构图

在不考虑网络信号时延及数据包丢失情况下, 具有多包传输的网络控制系统也可看成具有固定发生概率的离散事件驱动的异步动态系统. 离散事件  $\bar{E}_1$  和  $E_1$  分别表示被控对象状态信号的第 1 个数据包和第 2 个数据包被依次发送; 事件  $\bar{E}_2$  和  $E_2$  分别表示控制信号第 1 个数据包和第 2 个数据包被依次发送. 这些事件发生的概率分别为  $r_1, 1 - r_1, r_2, 1 - r_2$ . 每个数据包占用网络传输一次信号时间分别为 50%, 所以  $r_1 = r_2 = 50\%$ . 多包传输网络控制系统模型为

$$\bar{S}_1: \bar{x}_1(kh) = x_1(kh),$$

$$\bar{x}_2(kh) = x_2((k - 1)h);$$

$$\bar{S}_2: \bar{x}_1(kh) = x_1((k - 1)h),$$

$$\bar{x}_2(kh) = x_2(kh);$$

$$S_1: \hat{x}_1(kh) = -K_1 \bar{x}_1(kh),$$

$$\hat{x}_2(kh) = x_2((k - 1)h);$$

$$S_2: \hat{x}_1(kh) = x_1((k - 1)h),$$

$$\hat{x}_2(kh) = -K_2 \bar{x}_2(kh).$$

记  $x(kh) = [x_1^T(kh), x_2^T(kh)]^T$ , 且

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \end{bmatrix}, \quad K = [K_1 \quad K_2]$$

定义广义被控对象状态为  $X(kh) = [x_1^T(kh), x_2^T(kh), \bar{x}_1^T(kh), \bar{x}_2^T(kh), \hat{x}_1^T(kh), \hat{x}_2^T(kh)]^T$ , 则多包传输网络控制系统可表示为

$$X((k + 1)h) = \tilde{\Phi} X(kh), \quad (8)$$

其中  $i = 1, \dots, 4$ . 当两个开关分别位于  $S_2$  和  $\bar{S}_2, S_1$  和  $\bar{S}_1, S_1$  和  $\bar{S}_2, \bar{S}_1$  和  $S_2$  时, 有

$$\tilde{\Phi}_1 = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & 0 & 0 & \Gamma_1 & \Gamma_1 \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & 0 & 0 & \Gamma_2 & \Gamma_2 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & 0 & 0 & \Gamma_2 & \Gamma_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ -K_2 \Phi_{21} & -K_2 \Phi_{22} & 0 & 0 & -K_2 \Gamma_2 & -K_2 \Gamma_2 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Phi}_2 = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & 0 & 0 & \Gamma_1 & \Gamma_1 \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & 0 & 0 & \Gamma_2 & \Gamma_2 \\ \Phi_{11} & \Phi_{12} & 0 & 0 & \Gamma_1 & \Gamma_1 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ -K_1 \Phi_{11} & -K_1 \Phi_{12} & 0 & 0 & -K_1 \Gamma_1 & -K_1 \Gamma_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Phi}_3 = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & 0 & 0 & \Gamma_1 & \Gamma_1 \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & 0 & 0 & \Gamma_2 & \Gamma_2 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & 0 & 0 & \Gamma_2 & \Gamma_2 \\ 0 & 0 & -K_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Phi}_4 = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & 0 & 0 & \Gamma_1 & \Gamma_1 \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & 0 & 0 & \Gamma_2 & \Gamma_2 \\ \Phi_{11} & \Phi_{12} & 0 & 0 & \Gamma_1 & \Gamma_1 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_2 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

#### 5 多包传输网络控制系统稳定性

基于以上分析, 对于两个数据包传输的网络控制系统, 有如下稳定性定理:

定理 2 如果  $\tilde{\Phi}$  的特征值位于单位圆内, 则具有多包传输的网络控制系统保持指数稳定, 其中

$$\tilde{\Phi} = \prod_{i=1}^4 \tilde{\Phi}_i \quad (9)$$

证明 由式(3)和(5)可知

$$\tilde{\Phi} P \tilde{\Phi}^{-1} \beta_i P, i = 1, \dots, 4; \quad (10)$$

$$\tilde{\Phi} P \tilde{\Phi}^{-1} = (\tilde{\Phi}_1 \cdot \tilde{\Phi}_2 \cdot \tilde{\Phi}_3 \cdot \tilde{\Phi}_4)^T P (\tilde{\Phi}_1 \cdot \tilde{\Phi}_2 \cdot \tilde{\Phi}_3 \cdot \tilde{\Phi}_4) \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 P. \quad (11)$$

其中  $\beta_i$  的选择满足

$$\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi}_1 \cdot \tilde{\Phi}_2 \cdot \tilde{\Phi}_3 \cdot \tilde{\Phi}_4) = \lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi}). \quad (12)$$

因为  $r_1 = r_2 = 50\% = 0.5$ , 式(2)变为  $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 > 1$ . 由定义知  $\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 = (\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4)^{-4}$ , 则  $0 < \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 < 1$ . 代入式(12)得

$$\lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi}) \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 < 1, \quad (13)$$

由此, 定理得证

注2 只要  $\tilde{\Phi}$  的特征值位于单位圆内, 则不需要每个  $\tilde{\Phi}_i (i = 1, \dots, 4)$  的特征值都在单位圆内, 即可保证网络控制系统指数稳定

## 6 仿真示例

### 6.1 数据包丢失网络控制系统

考虑被控对象模型

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u, \\ y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix},$$

网络信号采样周期  $h = 0.5$  s 对连续系统离散化得

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1.6929 & 3.0544 \\ 0.6109 & 1.6929 \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} 0.6929 \\ 0.6109 \end{bmatrix}.$$

当闭环极点为(0.5, -0.25)时, 离散状态反馈控制器增益  $K = [1.4510 \quad 3.4874]$ , 闭环控制系统  $(\Phi - \Gamma K)$  保持稳定. 设状态信号与控制信号通过同一网络传输,  $r_1 = r_2 = r$ , 则通过式(4)计算得到  $r = 0.73$ . 即当网络数据传输成功率大于0.73时, 闭环网络控制系统指数稳定, 这时网络数据包丢失率应小于27%. 网络信号的平均传输成功率  $\bar{r} = (r_1 + r_2)/2 = 0.73$  s, 等效的采样周期为  $h_{\text{eff}} = h/\bar{r} = 0.68$  s. 系统阶跃响应如图3所示.

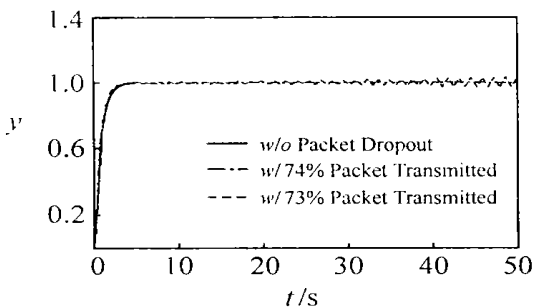


图3 具有数据包丢失的网络控制系统阶跃响应

### 6.2 多包传输网络控制系统

考虑被控对象模型<sup>[4,6]</sup>

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix} u, \\ y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix},$$

连续状态反馈控制器为  $u = -Kx$ , 网络信号采样周期  $h = 0.3$  s. 当闭环极点为(-0.5, -0.75)时, 反馈增益  $K = [3.75, 11.5]$ . 对连续系统离散化, 得

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0.2955 \\ 0 & 0.9704 \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} 0.0045 \\ 0.0296 \end{bmatrix}.$$

这时采用连续控制器的闭环控制系统  $(\Phi - \Gamma K)$  仍然保持稳定. 可依据式(8)求得

$$\tilde{\Phi}_1 = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.2955 & 0 & 0 & 0.0045 & 0.0045 \\ 0 & 0.9704 & 0 & 0 & 0.0296 & 0.0296 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9704 & 0 & 0 & 0.0296 & 0.0296 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & -11.1596 & 0 & 0 & -0.3404 & -0.3404 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Phi}_2 = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.2955 & 0 & 0 & 0.0045 & 0.0045 \\ 0 & 0.9704 & 0 & 0 & 0.0296 & 0.0296 \\ 1.0 & 0.2955 & 0 & 0 & 0.0045 & 0.0045 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ -3.75 & -1.1081 & 0 & 0 & -0.0169 & -0.0169 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Phi}_3 = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.2955 & 0 & 0 & 0.0045 & 0.0045 \\ 0 & 0.9704 & 0 & 0 & 0.0296 & 0.0296 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9704 & 0 & 0 & 0.0296 & 0.0296 \\ 0 & 0 & -3.75 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Phi}_4 = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.2955 & 0 & 0 & 0.0045 & 0.0045 \\ 0 & 0.9704 & 0 & 0 & 0.0296 & 0.0296 \\ 1.0 & 0.2955 & 0 & 0 & 0.0045 & 0.0045 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -11.5 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

并验证  $\lambda_{\max}(\tilde{\Phi}_i) = 1, i = 1, \dots, 4$ , 而  $\lambda_{\max}(\tilde{\Phi}) = 0.5908 < 1$ . 此时网络控制系统保持指数稳定. 网络信号的平均传输成功率  $\bar{r} = (r_1 + r_2)/2 = 0.5$  s, 等效的采样周期为  $h_{\text{eff}} = h/\bar{r} = 0.6$  s, 系统阶跃响应如图4所示. 因此, 只要  $\tilde{\Phi}$  的特征值在单位圆内, 具有多包传输的网络控制系统便可保持指数稳定.

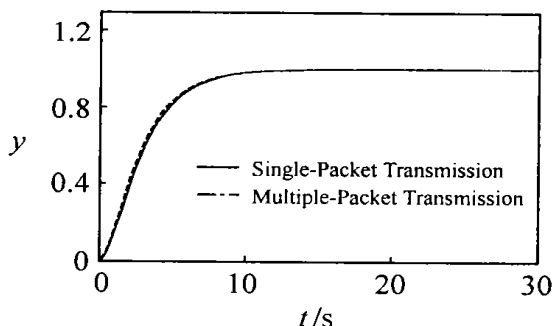


图 4 多包传输网络控制系统阶跃响应

## 7 结 语

本文分析了双边网络控制系统数据包丢失模型, 依据异步动态系统理论提出了在保持系统指数稳定下网络信号传输成功率的范围, 给出了数据包丢失的最大限度。利用异步动态理论对具有多包传输的双边网络控制系统进行建模, 提出了判定系统指数稳定的充分条件, 并进行了理论证明。仿真示例验证了数据包丢失及多包传输网络控制系统稳定性判定条件的有效性。

## 参考文献(References)

- [1] Sadjadi B A. Stability of networked control systems in the presence of packet losses[A]. *Proc of the 42nd IEEE Conf on Decision and Control*[C]. Maui, Hawaii, 2003: 676-681.
- [2] Tipsovan Y, Chow M-Y. Control methodologies in

networked control systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(10): 1099-1111.

- [3] 杨丽曼, 李运华, 袁海斌. 网络控制系统的时延分析及数据传输技术研究[J]. *控制与决策*, 2004, 19(4): 361-366.
- (Yang L M, Li Y H, Yuan H B. A analysis of time delay in networked control systems and study of data transmission technology[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(4): 361-366.)
- [4] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(2): 84-99.
- [5] Hassibi A, Boyd S P, How J P. Control of asynchronous dynamical systems with rate constraints on events[A]. *Proc of the 38th IEEE Conf on Decision and Control*[C]. Phoenix, 1999: 1345-1351.
- [6] Rabelo A, Bhaya A. Stability of asynchronous dynamical systems with rate constraints and applications[J]. *IEEE Proc Control Theory and Applications*, 2003, 150(5): 546-550.
- [7] Branicky M S, Phillips S M, Zhang W. Scheduling and feedback co-design for networked control systems[A]. *Proc of the 41st IEEE Conf on Decision and Control*[C]. Nevada: Las Vegas, 2002: 1211-1217.
- [8] Ling Q, Lemmon M D. Robust performance of soft real-time networked control systems with data dropouts[A]. *Proc of the 41st IEEE Conf on Decision and Control*[C]. Nevada: Las Vegas, 2002: 1225-1230.

(上接第 510 页)

## 参考文献(References)

- [1] Tang G Y, Luo Z W. Suboptimal control of linear systems with state-delay[A]. *Proc of IEEE Conf on SMC*[C]. Tokyo, 1999, 5: 104-109.
- [2] 唐功友, 王芳. 具有小时滞的线性大系统的次优控制[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(1): 121-124.
- (Tang G Y, Wang F. Suboptimal control for linear large-scale systems with small time-delay[J]. *Control Theory and Applications*, 2003, 20(1): 121-124.)
- [3] Yu L, Chu J. An LM I approach to guaranteed cost control of linear uncertain time-delay systems[J]. *Automatica*, 1999, 35(6): 1155-1159.
- [4] Mahmoud M S. Robust  $H_\infty$  control of discrete systems with uncertain parameters and unknown delays[J]. *Automatica*, 2000, 36(4): 627-635.
- [5] Zhao X H, Tang G Y. Suboptimal control of linear discrete large-scale systems with state time-delay[A]. *Proc of the 4th Int Conf on Control and Automation*[C]. Montreal, 2003: 404-408.
- [6] Lindquist A, Yakubovich V A. Optimal damping of

forced oscillations in discrete-time systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(6): 786-802.

- [7] Tang G Y. Feedforward and feedback optimal control for linear system with sinusoidal disturbances[J]. *High Technology Letters*, 2001, 7(4): 16-20.
- [8] Wang W, Tang G Y. Feedback and feedforward optimal control for offshore jacket platforms[J]. *China Ocean Engineering*, 2004, 18(4): 515-526.
- [9] Mulgund S S, Stengel R F. Optimal nonlinear estimation for aircraft flight control in wind shear[J]. *Automatica*, 1996, 32(1): 3-13.
- [10] White M T, Tomizuka M. Increased disturbance rejection in magnetic disk drives by acceleration feedforward control and parameter adaptation[J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(6): 741-751.
- [11] Lancaster P, Lerer L, Timenetsky M. Factored forms for solutions of  $AX - XB = C$  and  $X - AXB = C$  in companion matrices[J]. *Linear Algebra and its Applications*, 1984, 62: 19-49.