

诱导延时和数据包丢失的广义网络控制系统的建模及其控制

陆锦军^{1,2}, 卞艺杰³, 王执铨¹

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094; 2. 南通职业大学现代教育技术中心, 江苏 南通 226007;
3. 河海大学信息中心, 江苏 南京 210094)

摘要 针对广义网络控制系统的延时和数据包丢失问题, 在诱导延时时间小于和大于采样周期 T 、单包传输和多包传输数据包丢失情况下, 建立广义网络控制系统的模型并进行相关控制器设计. 最后探讨了使网络控制系统稳定所允许的最大延时界限, 为实际控制工程中广义网络控制对象的研究提供了理论依据.

关键词 网络延时 数据包丢失 单包传输 多包传输 对象建模 控制器

中图分类号 TP13 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2006)05-0578-05

通过通讯网络形成的闭环反馈控制系统称为网络控制系统 (network control system, NCS), 其结构见图 1. 其中广义被控对象包含工业控制对象和通讯网络两部分. NCS 的主要优点是可以实现资源共享, 提高系统的灵活性和可靠性. 但是, 将通讯网络引入网络控制系统之后带来很多不确定因素, 如网络延时、数据包丢失、误码等问题, 使得分析和设计网络控制系统非常困难^[1]. 文献 [2] 讨论了集成通信控制 (类似于 NCS) 的随机控制问题, 给出了控制器的具体结构形式, 但缺乏严谨的科学证明. 文献 [3] 讨论了网络诱导延时小于 1 个采样周期 NCS 的随机最优控制问题, 但其所得的控制律太复杂. 迄今为止, 还没有对网络诱导延时和数据包丢失广义被控对象进行全面分析和建模的文献, 只是对某一种或其中几种网络特性进行建模.

本文分别研究了在网络诱导延时时间小于和大于采样周期、单包传输和多包传输数据包丢失的情况下, 建立广义网络控制系统的模型及其控制器的问题, 并且提出了使网络控制系统稳定所允许的最大延时界限.

1 诱导延时小于 T 时数据包丢失的 NCS 建模及其控制器设计

为分析 NCS 的时延, 给出以下定义:

定义 1 在 NCS 中, 从传感器采样到某数据的时刻起至该数据开始被控制器处理的时间称为传感器—控制器时延.

定义 2 在 NCS 中, 从控制器产生某控制信号的时刻起至该控制信号被作动器处理的时间, 称为控制器—作动器时延.

网络诱导延时主要是指从传感器到控制器的传输时延 τ_{sc}^k 和从控制器到执行器的传输时延 τ_{ca}^k 之和. 控制器的计算延时可并入任何一方中.

假设传感器为时间驱动, 控制器和执行器为事件驱动, 采样周期为 T , NCS 中被控对象为线性时不变系统, 其连续状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau^k) + v(t) \\ y(t) = Cx(t) + w(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $v(t)$, $w(t)$ 为互不相关的零均值白噪声.

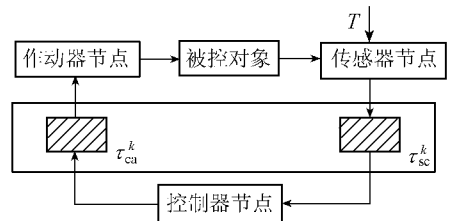


图 1 NCS 结构

Fig.1 Structure of NCS

1.1 单包传输数据包丢失

单包传输数据包丢失情况如图 2 所示^[4]. 网络可看成 1 个不定时关断的开关. 当开关为闭合时(即开关打在 S_1 位置), 包含 $y(k)$ 的数据包被传输; 当开关为打开状态时(即开关打在 S_2 位置), 数据包被丢失, 开关的输出维持原来的值.

当 $\tau^k \leq T$ 时, 对于系统, 式(1) 在 1 个采样周期 T 内积分, 得离散状态方程为^[4]

$$\begin{cases} x(k+1) = \varphi x(k) + B_0 u(k) + B_1 u(k-1) + v(k) \\ y(k) = Cx(k) + w(k) \end{cases} \quad (2)$$

$$\varphi = \exp(AT) \quad B_0 = \int_0^{T-\tau^k} \exp(As) ds B \quad B_1 = \int_{T-\tau^k}^T \exp(As) ds B$$

$$v(k) = \int_{kt}^{(k+1)T} \exp(A((k+1)T-s)) v(s) ds \quad w(k) = w(kt)$$

$$E[v(k)^T v(k)] = R_1 \geq 0 \quad E[w(k)^T w(k)] = R_2 \geq 0$$

定义 $Z(k) = [x^T(k), \bar{y}^T(k), u^T(k-1)]^T$, 则广义对象模型为

$$\begin{cases} Z(k+1) = \phi Z(k) + \Gamma_0 u(k) + \Gamma_1 v(k) \\ \bar{y}(k) = \Gamma_2 Z(k) \end{cases} \quad (3)$$

$$\phi = \begin{bmatrix} \varphi & 0 & B_1 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \Gamma_0 = \begin{bmatrix} B_0 \\ 0 \\ I \end{bmatrix} \quad \Gamma_1 = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \Gamma_2 = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \end{bmatrix}$$

1.2 多包传输数据包丢失

多包传输是指 NCS 中传感器、控制器的 1 个待发送数据被分成多个数据包进行传输. 网络中有时要进行多包传输. 一方面是单包字节大小的限制, 1 个数据包只能装载有限的信息; 另一方面是因为 NCS 传感器和作动器常常分布在 1 个很大的物理空间, 要将这些数据放在 1 个数据包中往往是不可能的. 传感器按以下次序发送数据包, $S_1, S_2, S_3, \dots, S_m, S_1, S_2, \dots$, 当开关打在 $S_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 时, 表示含有 Y_k^i 的数据包在网上传输, 则

$$y(k) = \begin{bmatrix} y_k^1 \\ y_k^2 \\ y_k^m \end{bmatrix} \quad \bar{y}(k) = \begin{bmatrix} \bar{y}_k^1 \\ \bar{y}_k^2 \\ \bar{y}_k^m \end{bmatrix} \quad (4)$$

图 3 表明, 当开关 S 在 S_1 位置时, 含有 y_k^1 的数据包准备传输, 而含有 y_k^1 的数据包又被丢失, 其余数据处于等待状态. 此时:

即
$$\bar{y}_k^1 = \bar{y}_{k-1}^1 \quad \bar{y}_k^2 = \bar{y}_{k-1}^2 \quad \bar{y}_k^3 = \bar{y}_{k-1}^3 \quad \dots \quad \bar{y}_k^m = \bar{y}_{k-1}^m \quad (5)$$

同理, 当开关在 S_i 时, 表示含有 y_k^i 的数据包在传输, 其余数据包处于等待状态, 而含有 y_k^i 的数据包又被丢失, 则此时:

$$\bar{y}_k^1 = \bar{y}_{k-1}^1 \quad \dots \quad \bar{y}_k^i = \bar{y}_{k-1}^i \quad \bar{y}_k^{i+1} = \bar{y}_{k-1}^{i+1} \quad \dots \quad \bar{y}_k^m = \bar{y}_{k-1}^m$$

$$(i = 1, 2, \dots, m)$$

即

$$\bar{y}_k = \bar{y}_{k-1} \quad (6)$$

定义状态向量为

$$\begin{cases} Z(k) = [x^T(k), \bar{y}^T(k), u^T(k-1)]^T \\ e(k) = [v(k)^T, w(k)^T]^T \end{cases} \quad (7)$$

假定传输数据包丢失(即 $\bar{y}(k) = \bar{y}(k-1)$), 网络诱导延时小于采样周期时广义被控对象的模型为

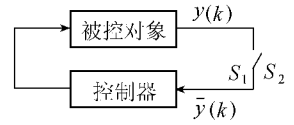


图 2 单包传输数据包丢失等效结构

Fig.2 Equivalent structure of data packet dropout in single packet transmission

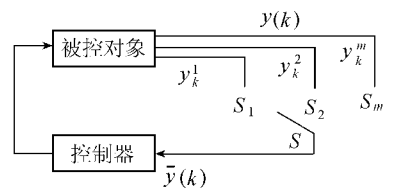


图 3 多包传输模型

Fig.3 Model of multiple packet transmission

$$\begin{cases} Z(k+1) = \phi'Z(k) + \Gamma'_0 u(k) + \Gamma'_1 e(k) \\ \bar{y}(k) = \Gamma'_2 Z(k) \end{cases} \tag{8}$$

$$\phi' = \begin{vmatrix} \varphi & 0 & B_1 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \qquad \Gamma'_0 = \begin{vmatrix} B_0 \\ 0 \\ I \end{vmatrix} \qquad \Gamma'_1 = \begin{vmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \qquad \Gamma'_2 = \begin{vmatrix} 0 & I & 0 \end{vmatrix}$$

1.3 延时时间小于 T 时随机最优控制器的设计

对于延时不超过 1 个采样周期 T 的延迟问题,可以应用随机控制理论,得到满足给定二次型性能指标的最优控制律.应用文献[5]的结论,得到当延迟是随机延迟并且相对独立时的控制律为

$$u_k = -L(\tau_k^{sc}) \begin{vmatrix} \hat{x}_{k|k} \\ u_{k-1} \end{vmatrix} \tag{9}$$

$$L_k(\tau_k^{sc}) = (Q_{22} + \tilde{S}_{k+1}^{22})^{-1} [Q_{12}^T + \tilde{S}_{k+1}^{21} \quad \tilde{S}_{k+1}^{23}]$$

$\hat{x}_{k|k}$ 即为 x_k 的估计值,由 $\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + \bar{K}_k(y_k - C\hat{x}_{k|k-1})$ 计算得到.

当延迟是随机分布,并且随机延迟概率分布函数受控于马尔可夫链时,得到的控制律为

$$u_k = -L_k(\tau_k^{sc}, r_k) \begin{vmatrix} \hat{x}_{k|k} \\ u_{k-1} \end{vmatrix} \tag{10}$$

$$L_k(\tau_k^{sc}, r_k) = (Q_{22} + \tilde{S}_i^{22}(k+1))^{-1} [Q_{12}^T + \tilde{S}_i^{21}(k+1) \quad \tilde{S}_i^{23}(k+1)]$$

$\tilde{S}_i^{21}(k+1), \tilde{S}_i^{22}(k+1), \tilde{S}_i^{23}(k+1)$ 由式(10)的相关计算可以得到.

2 延时大于 T 时数据包丢失的建模及其控制器设计

当 $\tau^k > T$ 时,假设 τ^k 有界,不妨设 $T < \tau^k < hT$ (h 为正整数),在 1 个采样周期 $[kT, (k+1)T]$ 内加到被控对象上的控制量 $u(t)$ 分段连续且最多有 $h+1$ 个不同的值.假设 $u(t)$ 的改变发生在时刻 $kT + t_i^k (i=0,1,\cdots, h)$,对于系统,式(1)在 $[kT, (k+1)T]$ 内积分可得其离散状态方程为^[2]

$$\begin{cases} x(k+1) = \varphi x(k) + \sum_{i=0}^h B_i u(k-i) + v(k) \\ y(k) = Cx(k) + w(k) \end{cases} \tag{11}$$

$$\varphi = \exp(AT) \qquad B_i = \int_{t_i^k}^{t_{i-1}^k} \exp(A(T-s))dsB \qquad t_{-1}^k = T \qquad t_h^k = 0$$

2.1 单包传输数据包丢失

图 2 开关打在 S_2 时,定义:

$$Z(k) = [x^T(k), \bar{y}^T(k), u^T(k-1), u^T(k-2), \cdots, u^T(k-h)]^T \tag{12}$$

则单包数据传输数据包丢失延时时间大于采样周期的广义对象模型为

$$\begin{cases} Z(k+1) = \phi Z(k) + \Gamma_0 u(k) + \Gamma_1 v(k) \\ \bar{y}(k) = \Gamma_2 Z(k) \end{cases} \tag{13}$$

$$\phi = \begin{vmatrix} \varphi & 0 & B_1 & B_2 & \cdots & B_h \\ 0 & I & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & I & 0 \end{vmatrix} \qquad \Gamma_0 = \begin{vmatrix} B_0 \\ 0 \\ I \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \qquad \Gamma_1 = \begin{vmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \qquad \Gamma_2 = \begin{vmatrix} 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

2.2 多包传输数据包丢失

定义状态向量为

$$\begin{cases} Z(k) = [x^T(k), \bar{y}^T(k), u^T(k-1), u^T(k-2), \cdots, u^T(k-h)]^T \\ e(k) = [v(k)^T, w(k)^T]^T \end{cases} \tag{14}$$

假设 $\bar{y}(k) = \bar{y}(k-1)$, 得到多包传输数据包丢失延时大于采样周期时广义被控对象的模型为

$$\begin{cases} Z(k+1) = \phi' Z(k) + \Gamma'_0 u(k) + \Gamma'_1 e(k) \\ \bar{y}(k) = \Gamma'_2 Z(k) \end{cases} \tag{15}$$
$$\phi' = \begin{vmatrix} \varphi & 0 & B_1 & B_2 & \cdots & B_h \\ 0 & I & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & \cdots & 0 \\ & & & & & \\ 0 & 0 & & 0 & I & 0 \end{vmatrix} \quad \Gamma'_0 = \begin{vmatrix} B_0 \\ 0 \\ I \\ 0 \\ & \\ 0 \end{vmatrix}$$
$$\Gamma'_1 = \begin{vmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ & \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \Gamma'_2 = \begin{vmatrix} 0 & I & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{vmatrix}$$

2.3 延时时间大于 T 时随机最优控制器的设计

当延迟超过 1 个采样周期 T , 并且各个时刻的延迟概率分布函数受控于马尔可夫链时, 可以将系统建模成马尔可夫跳变线性系统, 满足闭环系统稳定的条件问题可以用 Schur 补定理变为等价的线性矩阵不等式问题, 用 V-K 方法求解, 最终得出保证系统稳定的控制律.

3 系统稳定条件下的最大延迟时间

对于离散系统 $x(k+1) = Ax(k) + Bx(k-\tau)$, $x(k) = \Phi(k)$, $k \in [-\bar{\tau}, 0]$, 其中 $\tau > 1$, $\phi(\cdot)$ 是初始条件. 文献[6]给出了保证系统稳定的最大允许延迟界 $\bar{\tau}$ 应满足的线性矩阵不等式, 即如果存在 $P > 0, Q > 0$ 和 X, Y, Z 使得

$$\begin{vmatrix} \varphi_{11} & -Y & A^T P & \bar{\tau}(A-I)^T Z \\ -Y^T & -Q & B^T P & \bar{\tau} B^T Z \\ PA & PB & -P & 0 \\ \bar{\tau} Z(A-I) & \bar{\tau} ZB & 0 & -\bar{\tau} Z \end{vmatrix} < 0 \tag{16}$$
$$\varphi_{11} = -P + \bar{\tau} X + Y + Y^T + Q \quad \begin{vmatrix} X & Y \\ Y^T & Z \end{vmatrix} \geq 0$$

那么对于任何满足 $0 \leq \tau \leq \bar{\tau}$ 的延迟 τ , 系统渐近稳定.

在此之前, 文献[7,8]给出了保证系统性能(如稳定性)所能容许的最大允许传输间隔 τ .

设系统 $\dot{x}(t) = A_{11}x(t)$, $x(t) = [x_p(t), x_c(t)]^T$, 其中 x_p 和 x_c 分别表示对象和控制器状态. 当系统指数稳定时, 存在 1 个矩阵 P , 使得 $A_{11}^T P + PA_{11} = -I$, 设 $z(t) = [x^T(t), e^T(t)]^T$, 则网络闭环系统可以写成 $\dot{z}(t) = Az(t)$, 其中 $A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$. 设 NCS 有 p 个传感器节点, 定义 $\lambda_1 = \lambda_{\min}(P)$, $\lambda_2 = \lambda_{\max}(P)$. 如果满足:

$$\tau < \min \left\{ \frac{\ln 2}{p \|A\|}, \frac{1}{8 \|A\| (\sqrt{\lambda_2/\lambda_1} + 1) \sum_{i=1}^p i}, \frac{1}{16 \lambda_2 \sqrt{\lambda_2/\lambda_1} \|A\|^2 (\sqrt{\lambda_2/\lambda_1} + 1) \sum_{i=1}^p i} \right\} \tag{17}$$

则文献[6]的计算结果表明, 后者所给的最大允许延迟界较保守, 系统指数稳定.

4 结 语

本文在延时时间小于和大于采样周期 T 、单包传输和多包传输数据包丢失情况下建立网络控制系统的模型. 根据当延迟小于或大于 1 个采样周期时, 分延迟随机独立和延迟随机分布但概率分布函数受控于马尔可夫链 2 种情况进行最优控制器的设计, 并且探讨了保证网络控制系统稳定所允许的最大延时界限.

在实际工程应用中,在数据包传输丢失的情况下不变广义对象建模皆可按本文提出的方法进行,然后再进行控制器设计.对非线性对象及网络诱导时延大于1个采样周期时NCS闭环模型的建立有待于进一步研究.

参考文献:

- [1] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILIPS S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems, 2001, 21(2): 34-89.
- [2] LIOU L W, RAY A. A stochastic regulator for integrated communication and control systems part I: formulation of control law [J]. Trans ASME, 1991, 113(12): 604-611.
- [3] NILSSON J, BERNHARDSSON B, WITTENMARK B. Stochastic analysis and control of real-time systems with ran[J]. Automatica, 1998, 34(1): 57-64.
- [4] 朱其新, 胡寿松. 网络控制系统的随机输出反馈控制[J]. 应用科学学报, 2004, 22(1): 71-75.
- [5] 刘磊明, 童朝南, 袁立. 关于网络控制系统中的延迟对系统性能影响的研究[J]. 信息控制, 2005, 34(3): 263-268.
- [6] KIM D S, LEE Y S, KWON W H, et al. Maximum allowable delay bounds of networked control systems[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(11): 1301-1313.
- [7] WALSH G C, YE H, BUSHNELL L. Stability analysis of networked control systems[C]//Proceedings of American Control Conference. San Diego: IEEE, 1999: 2876-2880.
- [8] YE H. Research on networked control systems[D]. Baltimore: University of Maryland, 2000.

Modeling and control of generalized network control system with time-delay and data packet dropout

LU Jin-jun^{1,2}, BIAN Yi-jie³, WANG Zhi-quan¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Center of Modern Education and Technology, Nantong Vocational College, Nantong 226007, China;

3. Center of Information, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The model and relative controller of the generalized network control system are designed for the data packet dropout in single packet transmission and multiple packet transmission when time-delay is longer and shorter than the sampling period T . The maximum time-delay allowable for guaranteeing the stability of the network control system is discussed, providing a theoretic basis for studying the generalized network controlled objectives in control engineering.

Key words: network time-delay; data packet dropout; single-packet transmission; multiple-packet transmission; modeling for objective; controller