

基于 Markov 延迟特性的闭环网络控制系统研究

于之训 陈辉堂 王月娟

(同济大学电气工程系·上海, 200092)

摘要: 针对控制网络中固有的随机传输延迟, 提出了一种新颖的控制模式, 实现了对存在多步随机传输延迟的网络控制系统的数学建模. 基于该模型, 利用 Markov 链理论, 得到了满足给定性能指标的随机最优控制律, 同时给出了求取相应的 Markov 链状态转移矩阵的方法. 文末通过实验研究, 验证了所提理论的正确性和有效性.

关键词: 闭环网络控制; 传输延迟; Markov 链

文献标识码: A

Research on Markov Delay Characteristic-Based Closed Loop Network Control System

YU Zhixun, CHEN Huitang and WANG Yuejuan

(Department of Electrical Engineering, Tongji University · Shanghai, 200092, P. R. China)

Abstract: Aiming at the stochastic transfer delay inherently existing in the control network, a novel control pattern is proposed, which implements the modeling of the network control system with multi-step stochastic transfer delay. Based on this model, utilizing Markov chain theory, the stochastic optimal control law satisfying the pre-specified performance index is obtained. Also the method calculating the corresponding Markov state transition matrix is given. Experimental results show the correctness and the validity of the proposed theory.

Key words: closed loop network control system; transfer delay; Markov chain

1 引言(Introduction)

随着控制系统规模的日益扩大, 很多控制系统采用现场总线等技术构成一个控制网络. 这种控制网络属于一种完全的分布式控制结构, 具有信息资源能够共享、连接线大大减少、易于系统的扩展等优点. 但另一方面, 由于网络中的信息源很多, 信息在传送时要分时占用总线, 而网络的通信带宽有限, 因此不可避免地存在着信息的碰撞、重发等现象, 这就使得信息在传输过程中不可避免地存在着延迟. 而且随着通信协议和网络中负载情况的变化, 该延迟是随机时变的.

在一个闭环系统中, 随机时变延迟的存在使得常规的控制系统设计方法不再适用, 给控制系统的分析与设计带来很大的困难. 对于这个问题, 已有人从不同侧面、不同角度做过研究, 包括控制器的设计、观测器的设计等. 如 Asok Ray 提出了一种增广对象模型^[1], 利用系统当前状态以及延迟输出、延迟控制信息构成一新的状态向量, 这样就把延迟信息包含在新的增广对象里面, 然后通过对该增广对象

的分析来进行控制器的分析与设计. 但由于每一步的延迟信息不知道且时变, 因此上述增广对象为一时变对象, 目前还没有有效的工具对该类对象进行设计, 只能对其进行一些定性分析. 在文献[2]中, A. Ray, L. W. Liou, J. H. Shen 提出了一种状态估计的方法, 从统计的观点对获得的信息进行分析和处理. 但其最大延迟时间限制为一个采样周期, 当传输延迟多于一个采样周期时, 该方法不再适用.

当传输延迟多于一个采样周期时, Luck and Ray 提出了一种方法^[3]: 在控制器和执行器端分别设立接收缓冲区, 缓冲区的长度要大于各自的(传感器→控制器, 控制器→执行器)最大延迟周期数, 各个节点实行同步采样, 这样就把随机的时变延迟转化成了固定延迟, 相应地, 原有随机时变系统也就被转化成了一确定系统. 这种方法的优点是可以利用现有的确定性系统的设计方法进行控制器的设计, 缺点是由于缓冲区将所有的时延都转化成了最大时延, 相当于人为地将时延进行了扩大化, 因此降低了系统应有的控制性能.

针对上述时延网络控制系统设计的现状,本文提出了一种新的控制模式:传感器节点和执行器节点采用时间驱动即等周期同步采样的工作方式,而控制器节点采用事件驱动的工作方式,即传感器信息的到达启动控制器计算相应的控制量.同时在传感器和控制器节点发送端设置发送缓冲区,以确保信息按产生的时间先后依次到达接收端.采用这种控制模式,得到了具有随机时变传输延迟的网络控制系统的数学模型.进一步利用 Markov 链理论和随机最优控制理论,得到了满足给定二次型性能指标的最优控制律.

下面,首先对具有随机传输延迟的网络控制系统进行数学建模.

2 闭环网络系统的数学模型 (Mathematical model of closed loop network system)

对于闭环网络控制系统,可以用下面的框图 1 来表示其典型结构:

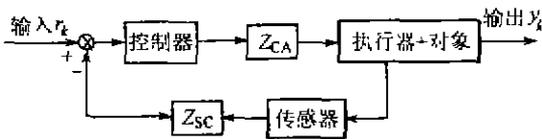


图 1 闭环网络控制系统框图

Fig. 1 Diagram of closed network control system

上图中, Z_{CA} 表示控制器到执行器的传输延迟, Z_{SC} 表示传感器到控制器的传输延迟,该两部分延迟分别位于系统的前向通道和反馈通道中.由于 Z_{CA} 与 Z_{SC} 都是随机时变的,因此图 1 所示系统是一个随机的时变系统.若传感器节点、控制器节点、执行器节点采用等周期同步采样的工作方式,则闭环系统中信息传输的时序图如图 2 所示:

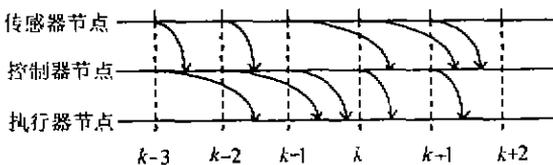


图 2 时间驱动方式下闭环网络控制系统中信息传输时序图

Fig. 2 Signals timing diagram of closed loop network control system under time-driven mode

对图 2 所示控制系统,除非在控制器和执行器接收端设置接收缓冲区从而将时变延迟转化为固定延迟,否则无法得到控制量的解析解,因为在采样时刻 k ,到达控制器节点的传感器信息无法确定.

针对上述情况,本文提出一种新的控制模式:控制器节点采用事件驱动的方式.只要传感器信息一

到达控制器端,控制器即启动,计算出相应的控制量,然后立即往执行器端发送.同时,为了防止传感器信息和控制器信息的丢失,在传感器和控制器发送端分别设置一发送缓冲区,其长度分别大于传感器到控制器和控制器到执行器的最大延迟周期数.只要缓冲区中有未被发送的信息,一旦检测到总线空闲,立即就会被发送出去.这样还可以同时保证传感器信息和控制器信息能够按照产生时间的先后顺序依次到达接收端.

对应于上面所提的控制模式,闭环系统中信息传输的时序图相应如图 3 所示.控制器的动作时间如图 3 中 $t_1, t_2, t_3, t_4 \dots$ 所示.从图 3 可以看出, $k-1$ 时刻执行器端所用的控制信号为 $u_{X_{k-2}}$, k 时刻所用的控制信号为 $u_{X_{k-2}}$, $k+1$ 时刻所用的控制信号也为 $u_{X_{k-2}}$, $k+2$ 时刻所用的控制信号为 u_{X_k} 等等.这里, $u_{X_{k-n}}$ 表示根据传感器信息 X_{k-n} 计算出的控制量.之所以这样表示,是因为在该控制模式下,控制器采用的是事件驱动的方式,即是 $X_k (k = 0, 1, 2, \dots)$ 的到达导致了控制量 u 的产生,为了突出这一点,所以用传感器信息 $X_k (k = 0, 1, 2, \dots)$ 作为控制量 u 的下标.

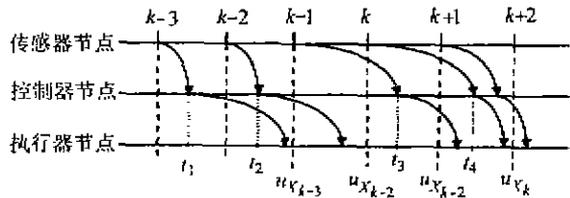


图 3 事件驱动方式下闭环网络控制系统中信息传输时序图

Fig. 3 Signals timing diagram of closed loop network control system under event-driven mode

利用上面提出的控制模式,首先对被控对象进行数学建模.假定连续被控对象状态方程如下:

$$\dot{X} = A_c X + B_c u, \tag{1}$$

其中 X 为被控对象的状态, u 为对象输入.

k 时刻的传输延迟 d_k 定义如下:假定 k 时刻控制器端的控制量为 $u_{X_{k-p}}$,则 $d_k = p$.

假定 $(d_k)_{max} = n$,则对(1)进行离散化并考虑随机传输延迟的影响(见图 3),可得网络控制系统的开环离散时间模型为

$$X_{k+1} = \Phi X_k + \beta_0 \Gamma u_{X_k} + \beta_1 \Gamma u_{X_{k-1}} + \dots + \beta_n \Gamma u_{X_{k-n}}, \tag{2}$$

其中

$$\Phi = e^{A_c T}, \Gamma = \int_0^T e^{A_c t} dt \cdot B_c, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n \in \{0, 1\},$$

且满足 $\sum_{i=0}^n \beta_i = 1$. 也就是说, 在采样时刻 k , 执行器端的控制量为 $u_{X_k}, u_{X_{k-1}}, \dots, u_{X_{k-n}}$ 中的一个.

3 最优控制律(Optimal control algorithm)

3.1 传输延迟的 Markov 特性(Markov characteristic of transfer delay)

假定 k 时刻的传输延迟为 d_k , 且 $m \leq d_k \leq n$, 即最小传输延迟为 m , 最大传输延迟为 n . 因为控制量 u_{X_k} 是按 X_k 产生的先后顺序依次到达执行器端的, 因此根据 d_k 的值就可以确定 d_{k+1} 的概率分布情况, 而与 d_0, d_1, \dots, d_{k-1} 的值无关, 也就是说, 传输延迟序列 $\{d_k, k = 0, 1, 2, \dots\}$ 构成一 Markov 链, 即 $P(d_{k+1} = j | d_0, d_1, \dots, d_k = i) = P(d_{k+1} = j | d_k = i), i, j \in S = \{m, m+1, \dots, n\}$. 定义转移概率

$$P(d_{k+1} = j | d_k = i) = q_{(i-m)(j-m)},$$

则对所有的 $i, j \in S$, 有 $q_{(i-m)(j-m)} \geq 0$, 且

$$\sum_{j=m}^n q_{(i-m)(j-m)} = 1.$$

引入 Markov 状态概率分布

$$\pi(k) = [\pi_0(k) \quad \pi_1(k) \quad \dots \quad \pi_{n-m}(k)],$$

则

$$\pi(k+1) = \pi(k)Q_M. \quad (3)$$

其中

$$\pi_i(k) = P(d_k = i + m),$$

$$Q_M = [q_{(i-m)(j-m)}]_{i,j \in S}$$

为状态转移矩阵, $\pi(0) = \pi^0$ 已知.

3.2 状态转移矩阵的求取(Derivation of state transition matrix)

从上面的分析可知, $\{d_k, k = 0, 1, 2, \dots\}$ 为一 Markov 链, 因此, 必须知道它的状态转移矩阵, 才能根据其初始状态概率分布, 得到各个时刻的概率分布情况, 从而为后面计算最优控制律提供必需的概率分布. 那么在控制网络中, 如何求取该 Markov 链的状态转移矩阵呢?

在上述控制模式下, 系统中的信息实际是按下述方式传送的: 首先由传感器到达控制器, 然后再以“接力”的方式由控制器传送到执行器. 在这种传送方式下, 信息从传感器到达执行器的延迟概率分布可以通过实验的方法事先测得, 假定为 $p_i, i = m, m+1, \dots, n, \sum_{i=m}^n p_i = 1$, 其中 m 表示最小传输延迟, n 表示最大传输延迟. 这样, 就有下面的定理.

定理 1 假定从传感器信息 X_k 产生到 u_{X_k} 到达执行器的最小传输延迟为 m , 最大传输延迟为 n , 即

$(d_k)_{\min} = m, (d_k)_{\max} = n$, 且网络中以上述“接力”方式发送信息的延迟概率分布为 $p_i, i = m, m+1, \dots, n, \sum_{i=m}^n p_i = 1$, 则状态转移矩阵 Q_M 的各元素求取如下

$$q_{(i-m)(j-m)} = \frac{p_i}{\sum_{k=i}^n p_k} * \frac{p_{i-1}}{\sum_{k=i-1}^n p_k} * \dots * \frac{p_j}{\sum_{k=j}^n p_k} * \frac{\sum_{k=j}^n p_k}{\sum_{k=j-1}^n p_k},$$

$$\forall m \leq j \leq i \leq n,$$

$$q_{(i-m)(i-m+1)} = \frac{\sum_{k=i+1}^n p_k}{\sum_{k=i}^n p_k}, \quad \forall m \leq i \leq n-1,$$

$$q_{(i-m)(j-m)} = 0, \quad \forall i+1 < j \leq n.$$

证 假定 k 时刻的传输延迟 $d_k = i$, 即 k 时刻作用于对象的控制量为 $u_{X_{k-i}}$.

令 $j \leq i$, 则 $k+1$ 时刻的传输延迟 $d_{k+1} = j$ 即 $k+1$ 时刻作用于对象的控制量为 $u_{X_{k+1-j}}$ 的概率为

$$P\{d_{k+1} = j \mid d_k = i\} =$$

$$P\{u_{X_{k-i+1}} \text{ 的传输延迟} = i\} \times$$

$$P\{u_{X_{k-i+2}} \text{ 的传输延迟} = i-1\} \dots$$

$$P\{u_{X_{k+1-j}} \text{ 的传输延迟} = j\} \times$$

$$P\{u_{X_{k-j}} \text{ 的传输延迟} \geq j \mid u_{X_{k-j}} \text{ 的传输延迟} = i\} =$$

$$\frac{p_i}{\sum_{k=i}^n p_k} * \frac{p_{i-1}}{\sum_{k=i-1}^n p_k} * \dots * \frac{p_j}{\sum_{k=j}^n p_k} * \frac{\sum_{k=j}^n p_k}{\sum_{k=j-1}^n p_k}.$$

令 $j = i+1$, 则 $k+1$ 时刻的传输延迟为 $d_{k+1} = j$ 即 $k+1$ 时刻作用于对象的控制量仍为 $u_{X_{k+1-j}} = u_{X_{k-i}}$ 的概率为

$$P\{d_{k+1} = j \mid d_k = i\} =$$

$$P\{u_{X_{k-i+1}} \text{ 的传输延迟} \geq i+1 \mid u_{X_k} \text{ 的传输延迟} = i\} =$$

$$\sum_{k=i+1}^n p_k / \sum_{k=i}^n p_k.$$

令 $j > i+1$, 显然, $P\{d_{k+1} = j \mid d_k = i\} = 0$, 因为在 $d_k = i$ 的前提下, $\max d_{k+1} = i+1$. 综上, 定理 1 得证.

3.3 最优控制律的求取(Derivation of optimal control algorithm)

针对(2)所示时延网络控制系统的开环数学模型, 设计控制律, 使下述性能指标

$$J_N = E\{X_N^T P_N X_N + \sum_{k=0}^{N-1} [X_k^T Q X_k + u_k^T R u_k]\} \quad (4)$$

达到最小.

首先, 引入一新的状态向量 $Z_k = [X_k^T \ u_{X_{k-n}} \ u_{X_{k-n+1}} \ \dots \ u_{X_{k-1}}]^T$, 则数学模型(2)可以表示为

$$Z_{k+1} = A_k Z_k + B_k u_{X_k}. \quad (5)$$

其中

$$A_k = \begin{bmatrix} \Phi & \beta_n \Gamma & \beta_{n-1} \Gamma & \dots & \dots & \beta_1 \Gamma \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad B_k = \begin{bmatrix} \beta_0 \Gamma \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}.$$

相应地, 性能指标(4)可以表示为

$$J_N = E \left\{ Z_N^T P'_N Z_N + \sum_{k=0}^{N-1} [Z_k^T Q' Z_k + u_{X_k}^T R u_{X_k}] \right\}. \quad (6)$$

其中

$$P'_N = \begin{bmatrix} P_N & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

说明: 从状态方程(2)可以看出, 对应于 $d_k = m, m+1, \dots, n$, 向量 $[\beta_0 \ \beta_1 \ \dots \ \beta_n]$ 的值分别对应为

$$\begin{aligned} & [0 \ 0 \ \dots \ \beta_m = 1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0], \\ & [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ \beta_{m+1} = 1 \ 0 \ \dots \ 0], \dots, \\ & [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ \beta_n = 1]. \end{aligned}$$

又 $\{d_k, k = 0, 1, 2, \dots\}$ 为一 Markov 链且其状态转移矩阵已根据定理 1 计算出, 因此, 其状态概率分布 $\pi(k)$ 可以通过(3)求得. 这样, $E\{\cdot\}$ 的求取如下:

$$\begin{aligned} E\{\cdot\} &= \\ & \pi_0(k) [\cdot]_{| [0 \ 0 \ \dots \ \beta_n = 1 \ 0 \ \dots \ 0]} + \\ & \pi_1(k) [\cdot]_{| [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ \beta_{n+1} = 1 \ \dots \ 0]} + \dots + \end{aligned}$$

$$Q' = \begin{bmatrix} Q & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

这样, 时延网络控制系统(2)关于性能指标(4)的最优控制律的问题, 就转化为系统(5)关于性能指标(6)的最优控制律的问题. 相应地, 有下面的定理.

定理 2 给定系统(5)和性能指标(6), 则使性能指标(6)最小的控制律为

$$u_{X_k}^* = - [R + E(B_k^T S_{k+1} B_k)]^{-1} E(B_k^T S_{k+1} A_k) Z_k. \quad (7)$$

其中

$$S_k = E(A_k^T S_{k+1} A_k) + Q' - E(A_k^T S_{k+1} B_k) [R + E(B_k^T S_{k+1} B_k)]^{-1} E(B_k^T S_{k+1} A_k), \quad (8)$$

$$S_N = P'_N,$$

$E\{\cdot\}$ 为 $[\cdot]$ 关于 d_k 的数学期望.

证 利用动态规划方法即可证得^[5], 这里从略.

根据定理 1, 系统(5)的状态转移矩阵为如下形式

$$Q_M = \begin{bmatrix} q_{00} & q_{01} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ q_{10} & q_{11} & q_{12} & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ q_{20} & q_{21} & q_{22} & q_{23} & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 \\ q_{(n-m-2)0} & q_{(n-m-2)1} & q_{(n-m-2)2} & \dots & \dots & q_{(n-m-2)(n-m-1)} & 0 \\ q_{(n-m-1)0} & q_{(n-m-1)1} & q_{(n-m-1)2} & q_{(n-m-1)3} & \dots & q_{(n-m-1)(n-m-1)} & q_{(n-m-1)(n-m)} \\ q_{(n-m)0} & q_{(n-m)1} & q_{(n-m)2} & q_{(n-m)3} & \dots & q_{(n-m)(n-m-1)} & q_{(n-m)(n-m)} \end{bmatrix}.$$

$$\pi_{n-m}(k) [\cdot]_{| [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots \ \beta_n = 1]}.$$

由于控制器采用的是事件驱动的方式, 因此, 每来一个传感器信息, 就可以根据(7)式计算出对应于该传感器信息的控制量, 而无须知道该传感器信息到达控制器时的传输延迟.

4 实验研究 (Experimental research)

为了验证本文中所提控制模式和控制方法的有效性, 在 LonWorks 现场总线构成的网络系统上进行了实验研究, 实验对象为直流伺服电机, 对其进行位置伺服控制. 通过辨识, 被控对象(包括功放、直流伺服电机、减速机构)模型为

$$G_P(s) = \frac{\theta}{u} = \frac{0.488}{0.05s + 1},$$

其中 θ 为角位移, 单位为脉冲, u 为输入控制信号。

取电机角位移 θ (单位: 脉冲)、角速度 ω (单位: 脉冲/秒) 为系统状态, 可得被控对象状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 9.756 \end{bmatrix} u(t).$$

取采样周期 $T = 40\text{ms}$, 得其离散状态方程为

$$\begin{bmatrix} \theta_{k+1} \\ \omega_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.02753 \\ 0 & 0.4493 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_k \\ \omega_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0061 \\ 0.2686 \end{bmatrix} u_k.$$

实验框图见图 1, 其中传感器、控制器和执行器节点采用自行研制的智能型分布式网络控制器。通过调整网络负载, 使最小传输延迟 $(d_k)_{\min} = 2$, 最大传输延迟 $(d_k)_{\max} = 4$ 。对应(4)所示性能指标, 取 Q

$= \begin{bmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $R = 0.01$ 。通过实验, 测得 $p_2 = 0.4$, $p_3 = 0.3$, $p_4 = 0.3$, 根据定理 1, 相应求得状态转移矩阵。

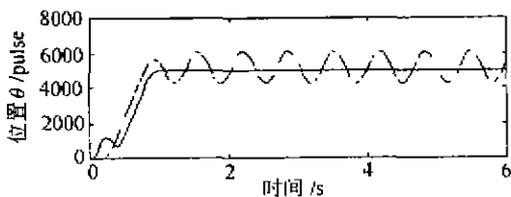
$$Q_M = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 & 0.2 & 0.3 & 0.5; \\ & 0.2 & 0.3 & 0.5 & & \end{bmatrix}.$$

当性能指标(4)中的 $N \rightarrow \infty$ 时, 根据本文中所述 Markov 控制方法计算出的控制律为

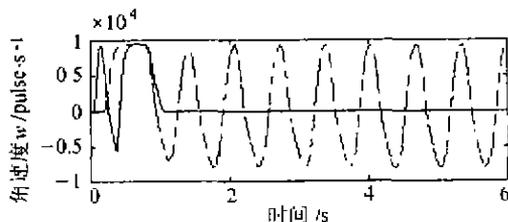
$$u_{X_k} = - [13.1984 \quad 0.7088] X_k - 0.1075 u_{X_{k-4}} - 0.2285 u_{X_{k-3}} - 0.2675 u_{X_{k-2}} - 0.2103 u_{X_{k-1}}.$$

若不考虑传输延迟, 则控制律为

$$u_k = - [19.4347 \quad 1.8522] X_k.$$



(a) 角位移响应曲线
(a) Angle displacement response curve



(b) 角速度响应曲线
(b) Angle speed response curve

图 4 时延网络电机状态响应曲线

Fig. 4 State response curve of network motor

实验结果见图 4, 从中可以看出 Markov 控制方法明显的控制效果。图中, 实线表示 Markov 控制方法, 虚线表示常规控制方法。

5 结论(Conclusion)

针对控制网络中固有的随机传输延迟问题, 本文提出了一种新颖的控制模式: 控制器节点采用事件驱动的方式, 同时在传感器和控制器节点发送端设置发送缓冲区, 以确保信息按产生的时间先后依次到达接收端。采用这种控制模式, 利用传输延迟的 Markov 特性, 得到了具有多步随机传输延迟的网络系统的数学模型, 并解析地得到了满足给定二次型性能指标的最优控制律, 成功地解决了原来时间驱动模式下对这类网络系统无法获取其解析随机控制律的难题。实验结果表明了本文所提控制模式的有效性。

参考文献(References)

- [1] Ray A. Integrated communication and control systems: Part I - analysis [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1988, 110(4): 367 - 373
- [2] Ray A, Liou L W and Shen H J. State estimation using randomly delayed measurements [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1993, 115(1): 19 - 26
- [3] Rogelio Luck and Asok Ray. An observer-based compensator for distributed delays [J]. *Automatica*, 1990, 26(5): 903 - 908
- [4] Johan Nilsson. *Real-Time Control Systems with Delays* [M]. Sweden: Lund Institute of Technology, 1998
- [5] Wu Shouzhang. *Application Optimal Control* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1987
- [6] De Koning W L. Infinite horizon optimal control of linear discrete time systems with stochastic parameters [J]. *Automatica*, 1982, 18(4): 443 - 453

本文作者简介

于之训 1972 年生, 1995 年毕业于同济大学电气工程系, 同年免试攻读硕士研究生, 1996 年转为博士研究生, 研究领域为基于通讯网络的控制系统的研究。Email: yuzhixun@yahoo.com

陈辉堂 1933 年生, 毕业于上海交通大学, 现为同济大学电气工程系教授, 博士生导师, 研究方向为机器人控制与智能控制。

王月娟 1935 年生, 毕业于西安交通大学, 现为同济大学电气工程系教授, 博士生导师, 研究方向为机器人控制与智能控制。