

# 网络化控制系统离散二次型最优控制综合设计

牛云<sup>1</sup>, 吴旭光<sup>1</sup>, 康军<sup>3</sup>, 洪亮<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学航海学院; 2. 西北工业大学自动化学院, 陕西西安 710072)  
(3. 长安大学电子工程学院, 陕西西安 710064)

**摘要:**基于网络 QoS 如延迟、丢包建立网络化控制系统状态方程, 提出一种根据网络 QoS 离散化连续系统二次型代价函数及设计相应最优 LQR (Linear Quadratic Regulator) 控制器的方法。针对系统控制性能对网络 QoS 的约束, 提出一种能够兼顾系统性能与网络 QoS 的控制与调度综合协调设计方法。仿真实验证明了提出的网络化控制离散二次型最优综合设计方法的必要性和与已有的二次型最优控制方法相比的优势。

**关键词:**网络化控制系统, 离散二次型最优控制, 网络 QoS 综合协调设计

中图分类号: TP393 文献标识码: A 文章编号: 1000-2758(2012)02-0227-07

对于多个控制回路共享信道资源且资源受限的网络化控制系统 (Networked Control Systems: NCS), 资源竞争或带宽调度策略引起的延迟、丢包使 NCS 控制系统性能 (Quality of Performance: QoP) 和网络服务质量 (Quality of Services: QoS) 之间存在相互制约关系。期望的 QoP 所产生的 QoS 需求可能会超过网络承载能力, 造成系统过载; 反之在当前 QoP 约束下, 网络带宽可能并未被充分利用, 从而造成网络资源的浪费。因此 NCS 设计时只有采用兼顾控制系统 QoP 和网络 QoS 的综合设计方法, 才能使系统达到最佳总体性能。

NCS 性能与资源调度综合设计涉及计算与控制、通信网络与控制等多个研究领域, 是近年来国内外的研究热点之一。Gaid 等<sup>[1]</sup> 针对网络资源受限的 NCS, 将协调设计问题看成一种混合整数二次规划问题, 采用分支-边界法搜索最优解, 分别讨论离线、在线带宽调度策略下的采样周期优化设定。文献 [2] 将 NCS 综合设计问题看成是控制性能、带宽占用率多重优化问题, 在系统稳定性和资源可调度性的约束下, 利用神经网络方法寻找最优采样周期分配。上述方法的一个共同特点是仅考虑了采样周期对控制系统的影响, 对采样周期调整后, 控制包时延及其抖动对控制系统的影响研究不足。

考虑网络诱导延迟, 文献 [3] 提出了一种考虑

时变延迟的 NCS 离散化建模方法, 提出了基于离散 LQR (Linear quadratic regulator) 的控制律与带宽调度交互设计方法。文献 [4] 提出一种网络带宽动态调度策略, 并通过时间需求分析同时考虑非控制数据的影响估计网络传输延迟上界。文献 [5] 用延迟的采样信息和之前的控制状态产生控制预测, 并在执行器端设计时延补偿器补偿前向通道的网络诱导延迟。采用速率单调 (RM) 和基于动态反馈调度算法调度预测控制数据包并比较性能差异。上述工作虽然考虑了传输延迟对控制性能的影响, 但对如何在综合设计中丢包的补偿未做讨论。

另外, 二次型代价函数常作为系统 QoP 的度量指标。对于连续二次型代价函数离散化问题, 以往的最优控制方法要么不考虑延迟, 给出有限时间二次型最优控制问题的解决方法<sup>[6]</sup>, 要么考虑延迟, 先将系统离散化, 再重新定义一个离散时间二次型性能指标, 然后基于上述指标设计最优控制器<sup>[3]</sup>, 但这种方法定义的性能指标与原连续性能指标无直接关系, 只能近似使其最优。

针对上述问题, 本文同时考虑延迟、丢包等因素对连续控制系统二次型指标进行离散化, 得到离散二次型性能指标, 并设计 LQR 最优控制律。并以此为基础给出 LQR 控制律与资源调度协调设计方法步骤, 最后通过实验说明了本文提出的控制与调度

综合协调设计的有效性和优势。

### 1 系统描述

在网络化控制系统中,被控对象为线性时不变系统时,可描述为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1)$$

假设传感器是时钟驱动,控制器和执行器是事件驱动且数据单包传送,在网络控制过程中考虑网络延迟和丢包影响后,实际的网络控制系统可表示为<sup>[3]</sup>

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \quad t \in [i_k p + \tau_k, i_{k+1} p + \tau_{k+1}) \\ u(t) &= Kx(t) \quad t \in \{i_k p + \tau_k, k = 1, 2, \dots\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $p, \tau_k$  分别代表系统采样周期和闭环延迟,  $i_k (k = 1, 2, 3, \dots) \in Z^+$  且  $\{i_1, i_2, i_3, \dots\} \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ 。当  $i_{k+1} = i_k + 1$  时,表示数据处理过程中没有调度丢包现象,当  $i_{k+1} > i_k + 1$  时,表示出现了丢包现象。 $u(t)$  在  $(i_k - i_{k-1})p + \tau_k - \tau_{k-1}, k = 1, 2, \dots$  之间保持不变。(2)式可以作为 NCS 的通用描述模型,但直接使用对于控制器设计及系统稳定性讨论都不方便,下面基于上述模型,并假设控制包的闭环延迟小于系统采样周期,若延迟大于采样周期则视为出现丢包,即在上述两种情况下控制输入矢量  $u(t)$  分别满足

$$u(t) = \begin{cases} u(kp) & kp + \tau_k \leq t < kp + p \\ u(kp - p) & kp \leq t < kp + \tau_k \end{cases} \quad (3)$$

$$u(t) = u((k-1)p) \quad kp \leq t < kp + p \quad (4)$$

重新给出一种容易使用的 NCS 离散状态空间模型。

#### 1.1 考虑闭环延迟的 NCS 模型

当网络闭环延迟小于控制系统采样周期时的 NCS 离散化状态空间模型<sup>[3]</sup>,如(5)式所示

$$\begin{aligned} x((k+1)p) &= \Phi x(kp) + \Gamma_0(\tau_k) u(kp) + \\ &\quad \Gamma_1(\tau_k) u((k-1)p) \\ y(kp) &= Cx(kp) \end{aligned} \quad (5)$$

式中

$$\Phi = e^{Ap}, \Gamma_0(\tau) = \int_0^{p-\tau} e^{As} B ds, \Gamma_1(\tau) = \int_{p-\tau}^p e^{As} B ds$$

令  $Z(kp) = (x^T(kp) \ u^T((k-1)p))^T$ ,则由(5)式可得

$$\begin{aligned} Z((k+1)p) &= \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_1(\tau_k) \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} Z(kp) + \\ &\quad \begin{bmatrix} \Gamma_0(\tau_k) \\ I \end{bmatrix} u(kp) = \mathbf{G}Z(kp) + \mathbf{H}u(kp) \end{aligned} \quad (6)$$

令控制律  $u(kp) = -KZ(kp)$  代入(5)式可得

$$Z((k+1)p) = \mathbf{G}Z(kp) - \mathbf{H}KZ(kp) \quad (7)$$

(7)式为考虑延迟的 NCS 闭环离散状态空间模型。

#### 1.2 考虑丢包的 NCS 模型

根据如前所述的假设条件,当网络发生丢包时,(5)式中令  $\tau_k = p$ ,有

$$\begin{aligned} x((k+1)p) &= \Phi x(kp) + \Gamma_1(p) u((k-1)p) \\ y(kp) &= Cx(kp) \end{aligned} \quad (8)$$

同样,引入增广状态向量  $Z(kp) = (x^T(kp) \ u^T((k-1)p))^T$  有

$$\begin{aligned} Z((k+1)p) &= \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_1(p) \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} Z(kp) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ I \end{bmatrix} u(kp) \\ &= \hat{\mathbf{G}}Z(kp) + \hat{\mathbf{H}}u(kp) \end{aligned} \quad (9)$$

令  $u(kp) = -\hat{K}Z((k-1)p)$  代入(9)式可得

$$Z((k+1)p) = \hat{\mathbf{G}}Z(kp) - \hat{\mathbf{H}}\hat{K}Z((k-1)p) \quad (10)$$

(10)式为考虑丢包的 NCS 闭环离散状态空间模型。

将由(7)式、(10)式描述的考虑网络 QoS 的 NCS 看成异步动态系统,其稳定性可由文献[7]中的定理 1 判定。

### 2 基于网络 QoS 的 NCS 离散二次型最优控制器设计

本文选取如下连续二次型代价函数

$$J_c = \int_0^\infty [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] dt \quad (11)$$

并假设控制包网络延迟不大于系统采样周期,则定理 1 给出了(11)式考虑网络延迟下的离散代价函数。

定理 1 假设控制包网络延迟不大于系统采样周期,且令  $\tau = \max_{k=1, 2, \dots, N} \{\tau_k\}$ ,则考虑网络延迟的离散代价函数为

$$J_d = \sum_{k=0}^N \begin{bmatrix} Z(kp) \\ u(kp) \end{bmatrix}^T \Lambda \begin{bmatrix} Z(kp) \\ u(kp) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中  $Z(kp) = (x^T(kp) \ u^T((k-1)p))^T$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Xi(\tau) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} + \Theta^T d \Xi(p - \tau) \Theta \quad (13)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} e^{A\tau} & (e^{A\tau} - I)A^{-1}B & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & I \end{bmatrix}$$

$$\Xi(h) = \begin{bmatrix} \Xi_{11}(h) & \Xi_{12}(h) \\ \Xi_{21}(h) & \Xi_{22}(h) \end{bmatrix} = \int_0^h e^{\psi\tau} Q_c e^{\psi} dt$$

(14)

$$\Psi = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad Q_c = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}$$

证明:

$$\text{令} \quad A = \begin{bmatrix} Q_{11}^d & Q_{12}^d & Q_{13}^d \\ Q_{21}^d & Q_{22}^d & Q_{23}^d \\ Q_{31}^d & Q_{32}^d & Q_{33}^d \end{bmatrix}$$

将(13)式展开有

$$\begin{aligned} Q_{11}^d &= \Xi_{11}(\tau) + e^{A^T \tau} \Xi_{11}(p - \tau) e^{A \tau} \\ Q_{12}^d &= \Xi_{12}(\tau) + e^{A^T \tau} \Xi_{11}(p - \tau) (e^{A \tau} - I) A^{-1} B \\ Q_{13}^d &= 0 + e^{A^T \tau} \Xi_{12}(p - \tau) \\ Q_{22}^d &= \Xi_{22}(\tau) + B^T (A^{-1})^T (e^{A^T \tau} - I) \Xi_{11}(p - \tau) \cdot \\ &\quad (e^{A \tau} - I) A^{-1} B \\ Q_{23}^d &= 0 + B^T (A^{-1})^T (e^{A^T \tau} - I) \Xi_{12}(p - \tau) \\ Q_{33}^d &= 0 + \Xi_{22}(p - \tau) \\ Q_{21}^d &= (Q_{12}^d)^T \quad Q_{31}^d = (Q_{13}^d)^T \quad Q_{32}^d = (Q_{23}^d)^T \end{aligned}$$

将(14)式展开有

$$\begin{aligned} Q_{11}^d &= \int_0^\tau e^{A^T t} Q e^{A t} dt + e^{A^T \tau} \int_0^{p-\tau} e^{A^T t} Q e^{A t} dt \cdot e^{A \tau} \\ Q_{12}^d &= \int_0^\tau e^{A^T t} Q (e^{A t} - I) dt \cdot A^{-1} B + \\ &\quad e^{A^T \tau} \int_0^{p-\tau} e^{A^T t} Q e^{A t} dt \cdot (e^{A \tau} - I) A^{-1} B \\ Q_{13}^d &= 0 + e^{A^T \tau} \int_0^{p-\tau} e^{A^T t} Q (e^{A t} - I) e^{A t} dt \cdot A^{-1} B \\ Q_{22}^d &= \int_0^\tau B^T (A^{-1})^T (e^{A^T t} - I) Q (e^{A t} - I) A^{-1} B + \\ &\quad R dt + B^T (A^{-1})^T (e^{A^T \tau} - I) \int_0^{p-\tau} e^{A^T t} Q e^{A t} dt \cdot \\ &\quad (e^{A \tau} - I) A^{-1} B \\ Q_{23}^d &= 0 + B^T (A^{-1})^T (e^{A^T \tau} - I) \cdot \\ &\quad \int_0^{p-\tau} e^{A^T t} Q (e^{A t} - I) dt \cdot A^{-1} B \\ Q_{33}^d &= 0 + \int_0^{p-\tau} B^T (A^{-1})^T (e^{A^T t} - I) \cdot \\ &\quad Q (e^{A t} - I) A^{-1} B + R dt \\ Q_{21}^d &= (Q_{12}^d)^T \quad Q_{31}^d = (Q_{13}^d)^T \quad Q_{32}^d = (Q_{23}^d)^T \end{aligned}$$

将(9)式所示性能指标按采样周期  $p$  离散化得

$$J_c = \sum_{k=0}^N \int_{kp}^{kp+p} [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] dt \quad (15)$$

方程(2)的解为

$$x(t) = e^{A(t-t_0)} x(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-\theta)} B u(\theta) d\theta \quad (16)$$

令  $t_0 = kp$  并将(3)式代入上式有

$$x(t) = \begin{cases} \Phi(t) x(kp) + \Gamma_0(t) B u(kp - p) & kp \leq t < kp + \tau \\ \Phi(t) x(kp) + \Gamma_1 B u(kp - p) + \\ \Gamma_2(t) B u(kp) & kp + \tau \leq t < kp + p \end{cases} \quad (17)$$

式中

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= e^{A(t-kp)} \quad \Gamma_0(t) = (e^{A(t-kp)} - I) A^{-1} \\ \Gamma_1 &= (e^{A \tau} - I) A^{-1} \quad \Gamma_2(t) = (e^{A(t-kp-\tau)} - I) A^{-1} \end{aligned}$$

将(17)式带入(15)式做适当代换、展开,并与(14)式展开的结果对比,定理得证。

至于定理1中矩阵积分算子

$$\int_0^h e^{A^T t} Q e^{A t} dt$$

可采用文献[8]附录所列方法计算。

$$\text{若令} \quad A = \begin{bmatrix} Q_d & N_d \\ (N_d)^T & R_d \end{bmatrix}$$

式中

$$Q_d = \begin{bmatrix} Q_{11}^d & Q_{12}^d \\ Q_{21}^d & Q_{22}^d \end{bmatrix}, \quad N_d = \begin{bmatrix} Q_{13}^d \\ Q_{23}^d \end{bmatrix}, \quad R_d = Q_{33}^d$$

则(10)式可以写成如下形式

$$J_d = \sum_{k=0}^N z^T(kp) Q_d z(kp) + u^T(kp) R_d u(kp) + 2z^T(kp) N_d u(kp) \quad (18)$$

在(18)所示性能指标下,满足如下 Riccati 方程(19)的状态反馈控制器  $u(kp) = -Kz(kp)$ , 以及 Hermite 阵  $S$  使  $J_d$  最小<sup>[8]</sup>

$$\begin{bmatrix} S + K^T H K & K^T H \\ H^T K & H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G^T \\ H^T \end{bmatrix} S [G \quad H] + \begin{bmatrix} Q_d & N_d \\ (N_d)^T & R_d \end{bmatrix} \quad (19)$$

将(19)展开,消去  $H$  可得

$$S = G^T S G + Q_d - (G^T S H + N_d) \cdot (H^T S H + R_d)^{-1} (H^T S G + N_d^T) \quad (20)$$

则系统最优 LQR 反馈增益阵  $K$  由(21)式给出

$$K = (R_d + H^T S H)^{-1} (H^T S G + N_d^T) \quad (21)$$

推论1 当 NCS 出现丢包时离散代价函数为

$$J_d = \sum_{k=0}^N \begin{bmatrix} z(kp) \\ u(kp) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Xi(p) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(kp) \\ u(kp) \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中  $\Xi(p)$  由(14)式定义。

而系统最优 LQR 反馈增益阵  $\hat{K}$  为

$$\hat{K} = (\hat{H}^T S \hat{H})^{-1} (\hat{H}^T S \hat{G}) \quad (23)$$

$$S = \hat{G}^T S \hat{G} + \Xi(p) - (\hat{G}^T S \hat{H}) (\hat{H}^T S \hat{H})^{-1} (\hat{H}^T S \hat{G}) \quad (24)$$

### 3 多控制闭环下 QoP 与 QoS 综合设计

网络化控制是多个控制回路共享信道资源,对网络资源的竞争,使得控制系统网络 QoS 需求产生的网络负载,可能造成系统过载,需要进行综合协调设计。

设  $J_{ij}, R_{ij}, C_{ij}$  分别表示控制回路  $i$  的第  $j$  组控制指标,指标产生的 QoS 约束和控制律,则根据前几节的论述,控制系统的性能指标用(25)式表示

$$J_{ij} = f(R_{ij}, C_{ij}) \quad (25)$$

令  $\Pi_i$  表示系统的性能指标上界,即

$$J_i \leq \Pi_i \quad (26)$$

必须被满足,所有满足(26)式的  $J, R, C$  可行集合记为

$$A_{ij} = \{R_{ij}, J_{ij}, C_{ij}\} \quad (27)$$

所有控制回路  $R_{ij}$  的一个集合  $R_j$ ,构成了 NCS 对网络 QoS 的期望值,该集合可作为网络资源调度策略的调度目标。然而,仅当  $R_j$  满足网络资源的可调度条件时,才能由网络资源调度策略实现。资源的可调度条件指如果保证所需要的网络 QoS 参数,则实际负载不大于所采用调度算法的最大允许负载(记作 MANL)。MANL 与带宽等网络参数及所选的带宽调度策略有关<sup>[9]</sup>。若令  $h(R_j)$  表示所有回路 QoS 约束产生的网络负载,则带宽可调度条件为

$$h(R_j) \leq \text{MANL} \quad (28)$$

$A_{ij}$  中符合(28)式的集合就组成了 NCS 的可调度集合 Sche。

### 4 实验分析

实验使用 Truetime 全数字网络化实时控制仿真平台进行。建立由网络模块互连的传感器、控制器、执行器等节点对被控对象进行控制。传感器由时间驱动,控制器和执行器由事件驱动。

#### 4.1 控制器性能对比

本部分实验着重对比不同 LQR 控制器设计方法在系统 QoP 上的差异,因此,仅考虑单个控制回

路,并假设不出现丢包。控制对象采用如下倒立摆系统

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \omega_0^2 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_0^2 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = [1 \ 0]x(t) \quad (29)$$

式中,  $\omega_0$  为倒立摆的自然频率,此处取  $\omega_0 = 10$ 。设采样周期  $p = 0.1$  s,系统闭环延迟上界  $\tau = 0.02$  s,则按照 1.1 节方法离散化(29),得开环离散状态方程,采用连续二次型代价函数(9),其中  $Q = I, R = I$ 。根据第 2 节提出的方法得到形如(18)式的离散系统二次型代价函数,其中

$$d = \begin{bmatrix} 4.208 & 0.6975 & 1.306 \\ * & 0.1411 & 0.2499 \\ * & * & 0.4836 \end{bmatrix}$$

$$N_d = \begin{bmatrix} 2.784 \\ 0.4421 \\ 0.8343 \end{bmatrix} \quad R_d = 2.021$$

将  $Q_d, N_d, R_d$  带入 Riccati 方程(20),并与(21)式联立,得到最优离散 LQR 控制器为

$$[1.478 \ 0.1799 \ 0.3325]$$

当初值为  $Z(0) = [0.3 \ 0 \ 0]$  时,在控制器  $K$  下系统的性能指标设计值为 2.14。本文将上述方法记为: Niu。作为比较,分别采用文献[3]提出的先将系统离散化后,再重新定义一个离散时间二次型性能指标(记为: Peng),以及文献[6]不考虑延迟的离散二次型最优控制问题的解决方法(记为: Ogata)设计控制器。表 1 列出了控制器及最优稳态性能指标设计值。

表 1 几种 LQR 控制器及性能指标设计值

|       | 控制器                             | 性能指标 |
|-------|---------------------------------|------|
| Niu   | $K = [1.478 \ 0.1799 \ 0.3325]$ | 2.14 |
| Peng  | $K = [1.626 \ 0.1682 \ 0.3060]$ | 2.83 |
| Ogata | $K = [1.132 \ 0.1364]$          | 1.90 |

在单位脉冲激励下,验证上述三种最优控制方法的性能。图 1 显示了系统的响应曲线。其中  $y_1(k), y_2(k), y_3(k)$  分别表示在控制方法 Niu、Ogata、Peng 下的输出,  $u_1(k), u_2(k), u_3(k)$  分别表示不同方法下的控制量输出幅值。可见本文提出的方法状态量和控制量的幅值较小,但系统收敛速度比 Peng 要慢。

图 2 显示了系统的性能指标曲线。可见 Ogata

方法由于未考虑延迟,所以在系统存在延迟时,其性能达不到设计指标 ( $4 > 1.90$ ),Peng 和本文的方法都能够达到设计指标,但我们的方法二次型性能更优越。

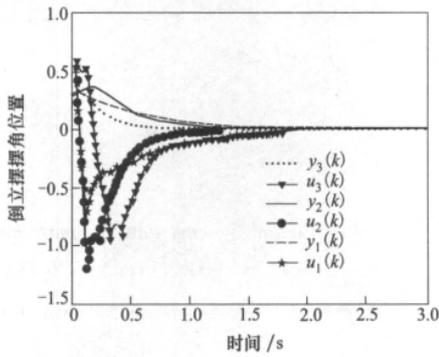


图 1 系统单位脉冲响应

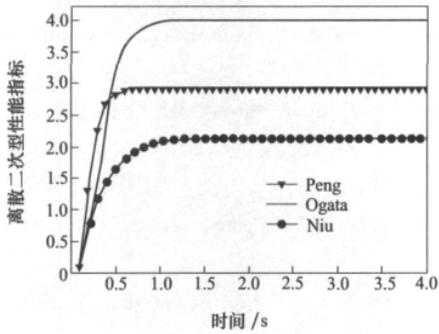


图 2 系统二次型性能

#### 4.2 控制与调度综合设计仿真实验

本部分实验用于展示控制与调度综合协调设计的必要性。仿真实验通过共享网络控制三个倒立摆,自然频率分别取 10、6.2、3.1,单位 rad/s。采样周期为 0.1 s。系统的性能指标上限  $\Pi_i = 3$ 。控制包长  $L$  为 1 000 bits。网络使用 CSMA/AMP 协议,

带宽  $B = 500$  kb/s, MANL 与所选的带宽调度策略有关,本文使用不可抢占的时限单调调度算法,所以  $MANL = 0.78 * B = 390$  kp/s<sup>[10]</sup>。先设定网络无丢包,按照图 2 步骤寻找可调度的最优组合  $AVL_{opt}$  ( $h(RQoS_{opt}) = 380$  kb/s  $<$  MANL),作为对比,还考察使系统过载组合  $AVL_{ovl}$  ( $h(RQoS_{ovl}) = 433$  kb/s  $>$  MANL)。结果如表 2 所示。 $\tau$  表示各控制回路闭环延迟上界,单位 s。

表 2 不同组合的仿真结果

| 回路  | $\tau$ | JQoP    | 控制增益阵 $K$                 |
|-----|--------|---------|---------------------------|
| 优化组 |        |         |                           |
| 1   | 0.01   | 2.016 8 | [1.298 9 0.155 7 0.149 4] |
| 2   | 0.02   | 2.065 2 | [1.649 4 0.348 0 0.255 6] |
| 3   | 0.025  | 2.470 8 | [1.971 1 0.769 2 0.179 1] |
| 过载组 |        |         |                           |
| 1   | 0.01   | 2.0168  | [1.298 9 0.155 7 0.149 4] |
| 2   | 0.015  | 2.016 3 | [1.566 0 0.332 9 0.185 4] |
| 3   | 0.02   | 2.420 6 | [1.930 4 0.757 2 0.141 9] |

使用表 2 中相应的控制律并满足相应的延迟约束时,优化组各控制回路对初值为 0.3 的脉冲响应如图 3 所示,可见各回路均渐近稳定且综合性能指标满足设计值,同时网络负载小于且最接近 MANL,因而网络性能也得到了优化。因此,提出的 NCS 控制与调度综合协调设计兼顾了控制系统 QoP 和网络 QoS,使 NCS 总体性能得到优化。图 4 显示了过载组脉冲响应,显然,过载时低优先级回路(loop2, loop3)延迟超过上界,系统实际控制性能与设计性能有较大差距。

当网络中存在丢包时,使用推论 1 的结论设计控制器,且在一定丢包率下,系统稳定性可由文献 [7] 中的定理 1 判定。图 5 显示了优化组在网络存在 20% 丢包率时的脉冲响应,可见其仍然是稳定的,但动态性能有所下降。

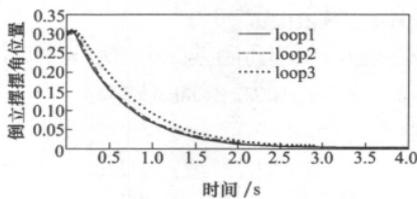


图 3 优化组脉冲响应

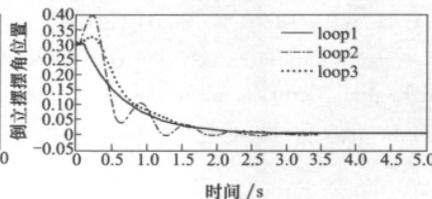


图 4 过载组脉冲响应

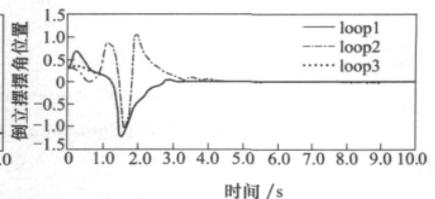


图 5 优化组 20% 丢包率下脉冲响应

## 5 结 论

本文基于网络 QoS(延迟、丢包)提出了一种连续二次型代价函数离散化方法,并结合 NCS 离散状态空间模型给出最优控制矩阵。鉴于 NCS 整体性

能受到控制律、网络服务质量等诸多因素的影响,提出了一种综合考虑 QoP 和网络 QoS 的协调设计方法。仿真实验证明了提出的 NCS 离散二次型最优综合设计方法的必要性和有效性。基于本文结果,研究满足控制性能需求的更高效资源调度算法,是我们今后的努力方向之一。

## 参考文献:

- [1] Ben G, Arben C, et al. Optimal Integrated Control and Scheduling of Networked Control Systems with Communication Constraints: Application to a Car Suspension System. *IEEE Trans on Control System Technology*, 2006, 14(4): 776-788
- [2] Li Zuxin, Wang Wanliang, et al. Optimal Bandwidth Scheduling for Resource-Constrained Networks. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(4): 443-448
- [3] 彭 晨 岳 东. 网络环境下基于网络 QoS 的网络控制器优化设计. *自动化学报* 2007 2(33): 214-217  
Peng Chen, Yue Dong. Network-Based Optimal Controller Design Based on QoS. *Acta Automatica Sinica*, 2007 2(33): 214-217 (in Chinese)
- [4] 牛 云,戴冠中,康 军. 网络化控制性能与带宽调度协调设计及其仿真. *控制与决策*, 2009, 24(9): 1415-1420  
Niu Yun, Dai Guanzhong, Kang Jun. Co-Design and Integrated Simulation of Networked Performance and Bandwidth Schedule. *Control and Decision*, 2009, 24(9): 1415-1420 (in Chinese)
- [5] Zhao Y B. Integrated Predictive Control and Scheduling Co-Design for Networked Control Systems. *IET Control Theory & Applications*, 2008, 2(1): 7-15
- [6] Katsuhiko Ogata. *Discrete-Time Control Systems (2nd Edition)*. Prentice Hall, 1994
- [7] Niu Yun, et al. Method of Control Performance and Network QoS Co-Design of Networked Control Systems. *Chinese Control and Decision Conference*, 2010, 108-113
- [8] Eker J, Hagander P, et al. A Feedback Scheduler for Real-Time Controller Tasks. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(12): 1369-1378
- [9] Peterson L, Davie S. *Computer Networks: A System Approach 3rd Edition*. Morgan Kaufmann Publisher, 2003, 454-457
- [10] Liu Jane W S. *Real-Time System*. Published by Pearson Education (US), 2000, 195-198

## An Effective Integrated Design Method of Discrete Linear Quadratic Regulator and Bandwidth Scheduling of Networked Control System

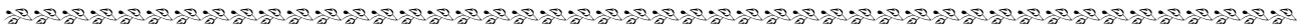
Niu Yun<sup>1</sup>, Wu Xuguang<sup>1</sup>, Kang Jun<sup>3</sup>, Hong Liang<sup>2</sup>

- ( 1. College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China  
2. Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China  
3. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China )

**Abstract:** Sections 1 through 3 of the full paper explain the integrated design method mentioned in the title, which we believe is new and more effective than previous ones. Their core consists of: (1) we discretize the continuous control model with the network qualities of service (QoS) such as network-induced delay and packet dropout; (2) we discretize the continuous quadratic cost function, which takes network QoS into account, and then design a dis-

crete linear quadratic regulator; (3) we propose an integrated design method for scheduling the bandwidth of networked control system, which considers both the quality of performance and the QoS. Section 4 simulates our integrated design method; the simulation results, given in Figs. 1 through 5 and Tables 1 and 2, and their analysis show preliminarily that the integrated design method is indeed more effective than previous ones.

**Key words:** algorithms, analysis, bandwidth, calculations, closed loop control systems, delay, design, dynamic response, feedback, functions, integration, models, optimization, quality of service, real time systems, scheduling, simulation, time varying systems; networked control system, discrete linear quadratic regulator



## 朱开轩、孙铁在《季文美纪念文集》书稿编审过程中的来电

感谢编辑部康宗焕同志应我 2012 年 4 月初的请求,亲自送给我 2011 年 12 月 29 日编辑部打印的关于朱开轩、孙铁来电情况的书面资料,内容较纪念文集第 277 页上的略有增加。

书面资料共有三段文字,兹摘录如下:

原国家教委主任、党组书记、全国人大常委会、科教文卫委员会主任朱开轩同志的秘书两次打来电话说:开轩同志住了两年医院,新近出院,身体虚弱,难于动笔,我代为表达开轩同志对纪念季校长百年华诞的祝贺和怀念。开轩同志还说,他在北航工作期间,与季老交往较多,季老知识渊博、办学思路清晰,对西工大做出了贡献;西工大成为全国重点大学是与季老分不开的。这次纪念活动很重要,祝这次活动成功。请代问学校老领导们好!向陈小筑书记和姜澄宇校长问好!

原航空工业部首任教育局局长孙铁同志打来电话说:刚从医院出来,听到西工大要在季校长百年华诞时举行纪念活动,我曾与季老交往较多,感情很深,理应写文章表达怀念之意,但因年事已高(今年九十岁),手发抖、字写不成了,只能向纪念文集编辑部打个电话,以表怀念之情。

胡沛泉  
2012 年 4 月