

基于时延补偿机理的网络化输出反馈控制器设计*

安宝冉^{1)†} 刘国平¹⁾²⁾

1) (哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150080)

2) (南威尔士大学工程学院, 英国庞特普里 CF37 1DL)

(2013 年 12 月 15 日收到; 2014 年 1 月 6 日收到修改稿)

本文考虑前向和反馈通道均存在网络时延的网络化控制系统, 提出了一种新的动态输出反馈控制器的设计方法. 针对状态可测和不可测两种情况, 整个设计过程采用不同的时延补偿机理, 来主动地消除网络时延的影响. 同时, 讨论了闭环网络化控制系统的稳定性. 最后的仿真实例表明了该方法的有效性.

关键词: 网络化控制, 时延补偿机理, 动态输出反馈, 稳定性

PACS: 02.30.Yy, 02.30.Ks

DOI: 10.7498/aps.63.090205

1 引言

网络化控制系统 (networked control systems, NCS) 集成了自动控制技术、网络通信技术及微电子技术的发展, 已成为近年来国际控制领域研究的热点课题^[1-4]. 与传统的控制系统不同, 它通过通信网络, 将控制系统中分布在不同地域空间的传感器、控制器和执行器联接组成闭环反馈控制回路, 各设备节点间数据和信息的传输通过网络实现^[5-8], 因而具有安装成本低, 易于维护和扩展, 效率高等优势, 更适用于大地域分布式系统. 但正是由于控制回路中引入了网络, 网络化控制系统的设计, 不可避免地遇到了传统控制理论不需要考虑的问题: 网络时延、数据丢包、采样方法、数据传输策略. 为解决这些问题, 目前已采用许多方法, 比如增广确定性离散模型, 最优随机控制, 摄动方法, 鲁棒控制, 模糊逻辑调制, 事件驱动控制, 混杂系统稳定性分析^[9-11]. 然而, 就解决网络延时而言, 大多数方法对网络化控制系统进行了一些严格的假设, 比如网络时延小于一个采样周期^[12], 并直接利用时滞系统的理论结果来设计网络化控制器^[13]. 这些方法, 带有极大的保守性, 只能以被动的方式降

低网络时延对网络化控制系统的影响. 事实上, 如何以主动的方式补偿网络时延并在保守性较弱的假设条件下设计控制器, 已成为网络化控制研究领域一个极具挑战性的课题.

本文对时延大于一个采样周期的网络控制系统进行了研究, 从控制角度提出了基于受控对象模型的网络时延主动补偿机理, 并分别针对状态可测和状态不可测的控制系统, 采用不同的时延补偿策略来设计动态输出反馈控制器, 并给出了网络化闭环控制系统渐近稳定的充要条件.

2 基于时延补偿机理的动态输出反馈控制器设计

由于通信网络在控制系统中的不同分布, 网络化控制系统有许多不同的结构, 例如网络可以存在于传感器与控制器之间, 存在于执行器与控制器之间, 或者存在于参考信号与控制器之间. 本文研究的网络化控制系统分布结构如图 1 所示.

考虑如下线性离散受控对象:

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

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61333003) 和国家自然科学基金面上项目 (批准号: 61273104) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: baoranan@126.com

其中, 状态向量 $x(t) \in \mathcal{R}^n$, 输出向量 $y(t) \in \mathcal{R}^l$, 输入向量 $u(t) \in \mathcal{R}^m$, 此外, $A \in \mathcal{R}^{n \times n}$, $B \in \mathcal{R}^{n \times m}$, $C \in \mathcal{R}^{l \times n}$ 为系统矩阵. 针对线性系统 (1), 为实现动态输出反馈控制律, 待设计的动态补偿器的形式为

$$\begin{aligned} z(t+1) &= Fz(t) + Hy(t), \\ u(t) &= Nz(t) + My(t), \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $z(t) \in \mathcal{R}^q$ 为动态补偿器的状态向量: $F \in \mathcal{R}^{q \times q}$, $H \in \mathcal{R}^{q \times l}$, $N \in \mathcal{R}^{m \times q}$, $M \in \mathcal{R}^{m \times l}$ 为待设计的参数矩阵.

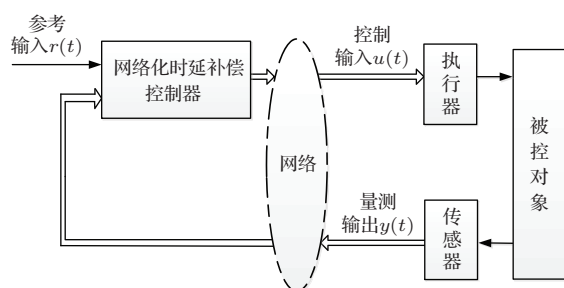


图1 网络化时延补偿控制系统

为方便进行稳定性分析, 假设系统的参考输入 $r(t) = 0$, 同时进行如下假设:

假设 1 矩阵对 (A, B) 是完全能控的, 矩阵对 (A, C) 是完全能观的.

假设 2 前向通道网络时延的上界不大于 τ 倍的采样周期, 比如一个网络中时延为 0.6 s, 采样周期为 0.04 s, 则 $\tau = 15$.

假设 3 反向通道网络时延的上界不大于 k 倍的采样周期.

假设 4 网络中传输的数据均带有时间戳.

注释 1 在实际的网络化控制系统中, 控制量序列是基于时间的, 所以需要同步控制器与执行器的系统时钟. 本文主要讨论网络化控制系统的稳定性, 故假设控制器与执行器的时钟已完成同步.

2.1 状态可测情况下的时延补偿机理

当状态可测时, 由于网络时延的存在, 在 t 时刻控制器端将不能获得执行器端的当前信息, 只能得到执行器端在 $t-k$ 时刻的信息 $y(t-k)$. 基于被控对象精确的数学模型, 采用 $t-k$ 时刻的输出值向前一步预测状态值为

$$\hat{x}(t-k+1|t-k) = Ax(t-k) + Bu(t-k),$$

$$\hat{z}(t-k+1|t-k) = Fz(t-k) + Hy(t-k), \quad (3)$$

其中,

$$\hat{x}(t-i|t-j) \in \mathcal{R}^n (i < j)$$

表示基于直到 $t-j$ 时刻的信息, 得到的 $t-i$ 时刻的预测状态. $z(t-k) \in \mathcal{R}^q$ 表示动态补偿器的状态向量在 $t-k$ 时刻的值. 基于控制器端的信息, 直到 $t+\tau$ 时刻的状态预测值和动态补偿器状态预测值可按 (3) 式进行迭代计算:

$$\begin{aligned} &\hat{x}(t-k+i|t-k) \\ &= A\hat{x}(t-k+i-1|t-k) \\ &\quad + Bu(t-k+i-1), \\ &\hat{z}(t-k+i|t-k) \\ &= F\hat{z}(t-k+i-1|t-k) \\ &\quad + HC\hat{x}(t-k+i-1|t-k), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $i = 2, 3, \dots, k+\tau$. 根据假设 2—4, 显然 k 与 τ 是固定常数. 从 $t-k$ 时刻至 $t-k+\tau-1$ 时刻所有的控制输入, 均能在控制器端计算得到, 其中部分控制输入不能在 t 时刻应用于受控对象中.

当被控对象的状态和动态补偿器的状态被估计后, 本文采用动态输出反馈的控制方法, 因此, 控制器端控制预测值可依据 (4) 式

$$\begin{aligned} &u(t+\tau|t-k) \\ &= N\hat{z}(t+\tau|t-k) + M\hat{y}(t+\tau|t-k) \\ &= N\hat{z}(t+\tau|t-k) + MC\hat{x}(t+\tau|t-k). \end{aligned} \quad (5)$$

在执行器端, 选取的控制输入为

$$\begin{aligned} u(t) &= u(t|t-k-\tau) \\ &= N\hat{z}(t|t-k-\tau) + MC\hat{x}(t|t-k-\tau). \end{aligned} \quad (6)$$

在状态可测的情况下, 采用上述控制策略可以补偿网络时延.

2.2 状态不可测情况下的时延补偿机理

当状态不可量测时, 为估计受控对象的状态向量, 设计如下受控对象状态观测器:

$$\begin{aligned} &\hat{x}(t-k+1|t-k) \\ &= A\hat{x}(t-k|t-k-1) + Bu(t-k) + L(y(t-k) \\ &\quad - \hat{y}(t-k)), \\ &\hat{y}(t-k) = C\hat{x}(t-k|t-k-1), \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $L \in \mathbb{R}^{n \times l}$ 为状态观测器增益矩阵. 当状态观测器 (7) 提供了向前一步状态预测之后, $t-k+2$ 时刻至 $t+\tau$ 时刻的状态预测序列为

$$\begin{aligned}\hat{x}(t-k+2|t-k) &= A\hat{x}(t-k+1|t-k) \\ &\quad + Bu(t-k+1), \\ &\vdots \\ \hat{x}(t+\tau|t-k) &= A\hat{x}(t+\tau-1|t-k) \\ &\quad + Bu(t+\tau-1).\end{aligned}\quad (8)$$

类似地, 动态补偿器状态预测序列为

$$\begin{aligned}\hat{z}(t-k+1|t-k) &= F\hat{z}(t-k|t-k-1) \\ &\quad + HC\hat{x}(t-k|t-k-1), \\ \hat{z}(t-k+2|t-k) &= F\hat{z}(t-k+1|t-k) \\ &\quad + HC\hat{x}(t-k+1|t-k), \\ &\vdots \\ \hat{z}(t+\tau|t-k) &= F\hat{z}(t+\tau-1|t-k) \\ &\quad + HC\hat{x}(t+\tau-1|t-k).\end{aligned}\quad (9)$$

同 2.1 节相同, 控制器端产生的控制输入预测值 $u(t+\tau|t-k)$ 可由 (5) 式得到. 执行器端选取的控制输入量 $u(t)$ 服从 (6) 式.

3 稳定性分析

3.1 基于状态可测时延补偿机理的网络化闭环控制系统稳定性

将时间 t 向后平移 k 步时, 由 (1) 与 (2) 式可以得到

$$\begin{aligned}x(t-k+1) &= Ax(t-k) + Bu(t-k), \\ z(t-k+1) &= Fz(t-k) + Hy(t-k).\end{aligned}\quad (10)$$

比较 (10) 式与 (3) 式, 可知,

$$\begin{aligned}\hat{x}(t-k+1|t-k) &= x(t-k+1), \\ \hat{z}(t-k+1|t-k) &= z(t-k+1).\end{aligned}\quad (11)$$

经过迭代运算, 容易得到

$$\begin{aligned}\hat{x}(t+\tau|t-k) &= x(t+\tau), \\ \hat{z}(t+\tau|t-k) &= z(t+\tau).\end{aligned}\quad (12)$$

在上式中, 用 $t-\tau$ 替换 t ,

$$\hat{x}(t|t-k-\tau) = x(t),$$

$$\hat{z}(t|t-k-\tau) = z(t).\quad (13)$$

根据时延补偿机理, 受控对象 t 时刻接收到的控制输入量为

$$\begin{aligned}u(t) &= u(t|t-k-\tau) \\ &= N\hat{z}(t|t-k-\tau) + MC\hat{x}(t|t-k-\tau) \\ &= Nz(t) + MCx(t).\end{aligned}\quad (14)$$

因此, 整个网络化闭环控制系统等效为如下形式:

$$\begin{bmatrix} x(t+1) \\ z(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + BMC & BN \\ HC & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix}.\quad (15)$$

显然, 采用时延补偿控制策略后, 克服了网络时延对系统的影响, 只要闭环系统的极点位于单位圆内, 就能保证系统的稳定性. 同时, 网络化控制系统的动态输出反馈控制器设计完全可以采用传统的控制方法, 以达到期望的控制效果.

3.2 基于状态观测器时延补偿机理的网络化闭环控制系统稳定性

令 $\varepsilon(t) = [x^T(t) \ z^T(t)]^T$, 结合系统 (1) 和动态输出反馈控制律 (2), 可整理为如下形式:

$$\begin{aligned}\varepsilon(t+1) &= A'\varepsilon(t) + B'u(t), \\ y(t) &= C'\varepsilon(t),\end{aligned}\quad (16)$$

其中,

$$A' = \begin{bmatrix} A & 0 \\ HC & F \end{bmatrix}, \quad B' = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C' = [C \ 0].$$

当状态不可测时, 受控对象和动态补偿器的第一步状态预测形式可以表示为

$$\begin{aligned}\hat{\varepsilon}(t-k+1|t-k) &= A'\hat{\varepsilon}(t-k|t-k-1) \\ &\quad + B'u(t-k) + L'(y(t-k) \\ &\quad - \hat{y}(t-k)), \\ \hat{y}(t-k) &= C'\hat{\varepsilon}(t-k|t-k-1),\end{aligned}\quad (17)$$

其中,

$$L' = \begin{bmatrix} L \\ 0 \end{bmatrix}.$$

基于上式, 将时间向前平移 k 步时, 可表示为

$$\begin{aligned}\hat{\varepsilon}(t+1|t) &= A'\hat{\varepsilon}(t|t-1) + B'u(t) \\ &\quad + L'(y(t) - \hat{y}(t)).\end{aligned}\quad (18)$$

(18) 式与 (16) 式相减, 得到如下误差方程:

$$e(t+1) = (A' - L'C')e(t),\quad (19)$$

其中, $e(t) = \varepsilon(t) - \hat{\varepsilon}(t|t-1)$. 通过状态预测方程迭代方程 (8) 与 (9), 很容易得到

$$\begin{aligned} & \hat{\varepsilon}(t+\tau|t-k) \\ &= (A')^{k+\tau-1} \hat{\varepsilon}(t-k+1|t-k) \\ &+ \sum_{i=2}^{k+\tau} (A')^{k+\tau-i} B' u(t+i-k-1). \end{aligned} \quad (20)$$

同样地, 使用 (7) 式,

$$\begin{aligned} & \hat{\varepsilon}(t+\tau|t-k+1) \\ &= (A')^{k+\tau-2} \hat{\varepsilon}(t-k+2|t-k+1) \\ &+ \sum_{i=3}^{k+\tau} (A')^{k+\tau-i} B' u(t+i-k-1) \\ &= (A')^{k+\tau-2} \left[A' \hat{\varepsilon}(t-k+1|t-k) \right. \\ &\quad \left. + B' u(t-k+1) + L' (y(t-k+1) \right. \\ &\quad \left. - \hat{y}(t-k+1)) \right] \\ &+ \sum_{i=3}^{k+\tau} (A')^{k+\tau-i} B' u(t+i-k-1) \\ &= (A')^{k+\tau-1} \hat{\varepsilon}(t-k+1|t-k) \\ &+ \sum_{i=2}^{k+\tau} (A')^{k+\tau-i} B' u(t+i-k-1) \\ &+ (A')^{k+\tau-2} L' C' e(t-k+1). \end{aligned} \quad (21)$$

(21) 与 (20) 相减, 得

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}(t+\tau|t-k) &= \hat{\varepsilon}(t+\tau|t-k+1) - (A')^{k+\tau-2} \\ &\quad \times L' C' e(t-k+1). \end{aligned} \quad (22)$$

根据 (22) 式, 进一步迭代, 推出

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}(t+\tau|t-k) &= \hat{\varepsilon}(t+\tau|t+\tau-1) - \sum_{i=0}^{k+\tau-2} (A')^i \\ &\quad \times L' C' e(t+\tau-i-1). \end{aligned} \quad (23)$$

上式中, 使用 $t+\tau$ 替代 t , 给出

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}(t|t-k-\tau) &= \hat{\varepsilon}(t|t-1) - \sum_{i=0}^{k+\tau-2} (A')^i \\ &\quad \times L' C' e(t-i-1). \end{aligned} \quad (24)$$

根据时延补偿策略, 被控对象的控制输入为

$$\begin{aligned} u(t) &= G \hat{\varepsilon}(t|t-k-\tau) = G \left(\hat{\varepsilon}(t|t-1) \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=0}^{k+\tau-2} (A')^i L' C' e(t-i-1) \right), \end{aligned} \quad (25)$$

其中, $G = [MC \ N] \in \mathcal{R}^{m \times (n+q)}$.

将 (25) 式代入状态方程 (16), 得

$$\begin{aligned} \varepsilon(t+1) &= A' \varepsilon(t) + B' G \left(\hat{\varepsilon}(t|t-1) \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=0}^{k+\tau-2} (A')^i L' C' e(t-i-1) \right) \\ &= A' \varepsilon(t) + B' G \left(\varepsilon(t) - e(t) \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=0}^{k+\tau-2} (A')^i L' C' e(t-i-1) \right) \\ &= (A' + B' G) \varepsilon(t) - B' G \left(e(t) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=0}^{k+\tau-2} (A')^i L' C' e(t-i-1) \right). \end{aligned} \quad (26)$$

同时, 根据 (19), 可知

$$e(t-j+1) = (A' - L' C') e(t-j), \quad (27)$$

其中, $j = 0, 1, \dots, k+\tau-1$. 设

$$\begin{aligned} E(t) &= [e^T(t) \ e^T(t-1) \ \dots \ e^T(t-\tau-k+1)]^T \\ &\in \mathcal{R}^{(n+q)(\tau+k) \times 1}, \end{aligned}$$

将 (26) 与 (27) 式写成如下简化形式:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon(t+1) \\ E(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' + B' G & \Phi(k, \tau) \\ 0 & \Xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon(t) \\ E(t) \end{bmatrix}. \quad (28)$$

其中,

$$\begin{aligned} \Phi(k, \tau) &= [-B' G \ -B' G L' C' \ -B' G A' L' C' \ \dots \\ &\quad -B' G (A')^{k+\tau-2} L' C'] \\ &\in \mathcal{R}^{(n+q) \times (n+q)(k+\tau)}, \\ \Xi &= \text{diag}(A' - L' C' \ \dots \ A' - L' C') \\ &\in \mathcal{R}^{(n+q)(k+\tau) \times (n+q)(k+\tau)}. \end{aligned}$$

因此, 状态不可测时, 采用网络化预测控制机理后, 整个闭环系统可以用 (28) 式描述. 显然, 上述闭环系统矩阵是一个上三角矩阵, 当且仅当对角线上的每一个矩阵块稳定时, 此上三角系统稳定. 故当且仅当矩阵 $A' + B' G$ 和 $A' - L' C'$ 的特征值都位于单位圆内时, 整个闭环系统稳定, 这意味着网络化预测控制闭环系统 (28) 的稳定性与网络时延无关. 为保证稳定性, 基于网络化预测控制机理的动态输出反馈控制器的设计过程, 包含了两个重要的步骤:

1) 根据需要的性能指标, 设计动态输出反馈控制器, 求解合适的参数矩阵 F, H, N, M . 这一步,

保证了本地闭环控制传统(无网络控制系统)能够达到预期的控制目标.

2) 采用观测器设计方法, 设计状态观测器增益矩阵 L , 使得矩阵 $A' - L'C'$ 的特征值位于单位圆内.

4 仿真实验

为验证本文提出的算法的有效性, 本节选择文献[14]中采用的伺服电机模型, 作为被控对象进行仿真实验. 当采样时间为0.04 s时, 该伺服电机的辨识模型为

$$G(z^{-1}) = \frac{0.05409z^{-2} + 0.115z^{-3} + 0.0001z^{-4}}{1 - 1.12z^{-1} - 0.213z^{-2} + 0.335z^{-3}}.$$

同时, 此系统可以转化为如下状态空间形式:

$$A = \begin{bmatrix} 1.12 & 0.213 & -0.335 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [0.05409 \ 0.11500 \ 0.00010].$$

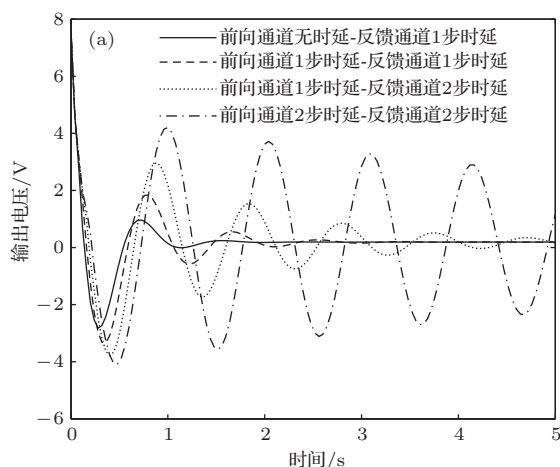


图2 状态可测情况下的时延补偿动态输出反馈控制稳定性
延补偿后的网络化控制效果

4.2 基于状态观测器时延补偿机理的网络化动态输出反馈控制仿真

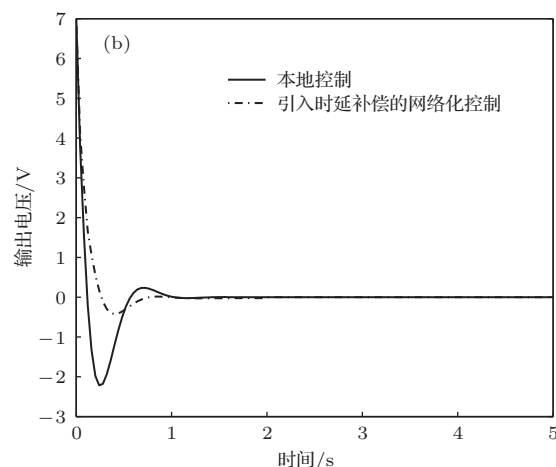
本仿真实例假定受控对象的状态不可测, 控制器采用基于状态观测器的动态输出反馈设计. 状态观测器的初值为 $\hat{x}(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$, 采用极点配置方法, 状态观测器增益矩阵设计为

$$L = [5.9985 \ 6.9101 \ 8.8422]^T.$$

系统的状态初值为 $x(0) = [27 \ 48 \ 64]^T$. 网络时延, 无论固定时延还是随机时延都将极大地降低了网络化控制系统的控制性能, 如果不采用时延补偿策略, 甚至将使系统不稳定. 为测试网络化预测控制系统的性能, 在不考虑系统不确定性的基础上, 本文进行了离线仿真实验, 动态补偿器的参数矩阵设计为 $F = 1$; $H = 0.057$; $M = -0.84$; $N = -0.05$.

4.1 基于状态可测时延补偿机理的网络化动态输出反馈控制仿真

此仿真实例假定受控对象的状态可测, 控制器采用动态输出反馈设计. 当控制回路前向通道和反馈通道分别存在不同的网络时延时, 受控对象的响应曲线如图2(a)所示, 这表明网络时延降低了控制性能和系统稳定性. 图2(b)描述了本地控制和加入时延补偿的网络化控制后的系统响应输出曲线, 在本地控制中, 控制回路不存在时延; 网络化控制中, 假定控制回路前向通道时延 $\tau = 2$, 反馈通道时延 $k = 2$. 实验结果表明, 采用时延补偿的网络化控制, 能够保证闭环网络化系统的稳定性.



(a) 未采用时延补偿的网络化控制效果; (b) 采用时

当控制回路前向通道和反馈通道分别存在不同的网络时延时, 受控对象的响应曲线如图3(a)所示, 这表明网络时延降低了控制性能和系统稳定性. 图3(b)描述了本地控制和加入时延补偿的网络化控制后的系统响应输出曲线, 在本地控制中, 控制回路不存在时延; 网络化控制中, 假定控制回路前向通道时延 $\tau = 2$, 反馈通道时延 $k = 3$. 实验结果表明, 采用时延补偿的网络化控制, 能够保证稳定性, 同时能达到预期的控制效果.

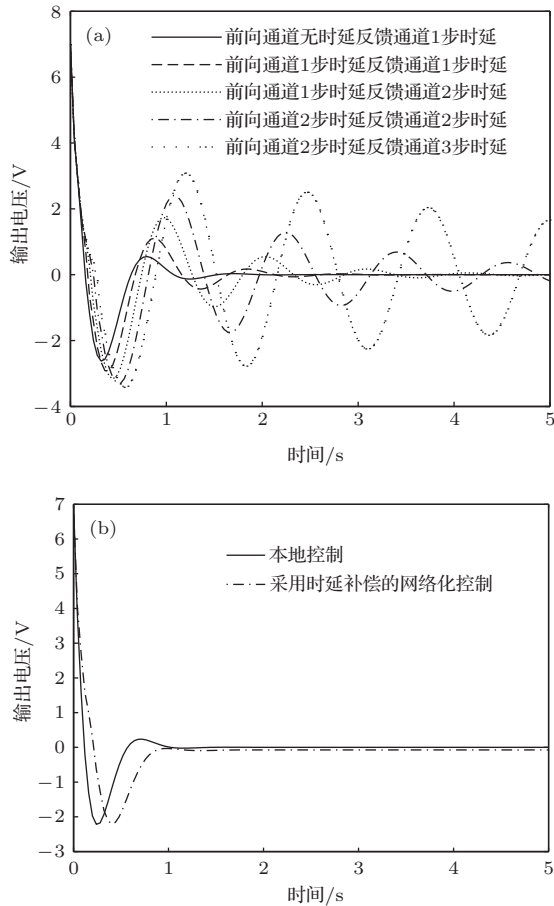


图3 基于状态观测器时延补偿的动态输出反馈控制稳定性 (a) 不同时延对本地控制性能的影响; (b) 采用时延补偿后的网络化控制效果

5 结 论

本文讨论了基于时延补偿机理的网络化动态输出反馈控制器的设计和闭环网络化控制系统的稳定性. 针对实际系统中受控对象状态可测与不可测的不同情况, 时延补偿机理提供了相应的时延补

偿算法, 并能够主动地消除网络时延的影响. 根据闭环网络化控制系统的稳定性条件来确定保证稳定的动态输出反馈控制器的相关参数矩阵. 对实际系统的仿真结果表明该方法是有用的.

感谢哈尔滨工业大学控制科学系付艳明教授和侯明哲博士在网络化控制系统稳定性方面的讨论.

参考文献

- [1] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Y 2007 *Proceedings of the IEEE* **95** 138
- [2] Tipsuwan Y, Chow M Y 2003 *Control Eng. Pract.* **11** 1099
- [3] Gupta R A, Chow M Y 2010 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **57** 2527
- [4] Ji L H, Liao X F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 220202 (in Chinese)[纪良浩, 廖晓峰 2012 物理学报 **61** 220202]
- [5] Choi D H, Kim D S 2008 *Int. J. Control Autom.* **6** 119
- [6] Ji K, Kim W J 2005 *Int. J. Control Autom.* **3** 591
- [7] Gérard M, Guy J, Christophe C 2008 *Proceedings of the 17th IFAC World Congress* Seoul, Korea, July 6–11, 2008 p11582
- [8] An B R, Liu G P 2012 *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation* Beijing, China, July 6–8, 2012 p831
- [9] Karimi Vanani S, Soleymani F 2012 *Chinese Phys. Lett.* **29** 030202
- [10] Wang J W, Zeng C B 2012 *Chinese Phys. B* **21** 110206
- [11] M Syed Ali 2012 *Chin. Phys. B* **21** 070207
- [12] Lian F L, Moyne J, Tilbury D 2003 *Int. J. Control* **76** 591
- [13] Tang B, Liu G P, Gui W H 2008 *IEEE Trans. Circ. Syst. II* **55** 464
- [14] Liu G P, Xia, Y Q, Chen J, David R, Hu W 2007 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **54** 1282

Using time delay compensation scheme in dynamic output feedback controller for networked control systems*

An Bao-Ran^{1)†} Liu Guo-Ping¹⁾²⁾

1) (School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

2) (School of Engineering, University of South Wales, Pontypridd CF37 1DL, U.K.)

(Received 15 December 2013; revised manuscript received 6 January 2014)

Abstract

This paper proposes a new method to design the dynamic output feedback controller for networked control systems (NCS) with communication delay in both forward and feedback channels. In order to remove the effects of the communication delay according to one's will, two different network delay compensation schemes are provided in two cases: the controlled plant whose state vectors can be measured and the one whose state vectors cannot be measured. Furthermore, another key part of this paper is to analyse the stability of the closed-loop networked control system. Finally, numerical simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: networked control, delay compensation scheme, dynamic output feedback, stability

PACS: 02.30.Yy, 02.30.Ks

DOI: [10.7498/aps.63.090205](https://doi.org/10.7498/aps.63.090205)

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61333003), and the General Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61273104).

† Corresponding author. E-mail: baoranan@126.com