

一类具有数据包丢失的长时延网络控制系统的分析与设计

谢成祥^{1,2}, 胡维礼²

(1. 江苏科技大学 电子与信息学院, 江苏 镇江 212003; 2. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对一类网络控制系统, 其网络诱导时延大于采样周期且存在数据丢包, 研究了其稳定性和控制器的设计. 在控制器端设计了一个状态预测器, 其预测状态根据传感器的数据进行更新, 然后用来确定控制作用. 分析了预测误差的收敛性, 证明了分离原理是成立的, 并依据分离原理分别设计了状态预测器和控制器, 给出了参数化设计方法. 仿真例子验证了方法的有效性.

关键词: 网络控制系统; 数据包丢失; 长时延; 分离原理; 状态预测器

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Analysis and design of a class of networked-control systems with long time-delay and data-packet-dropout

XIE Cheng-xiang^{1,2}, HU Wei-li²

(1. School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China;

2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: We study the stability and the design of a class of networked-control systems with long time-delay and data-packet-dropout. A state predictor is introduced in association with the controller; the predicted states are updated by the sensor data, and then are used to determine the control action. The convergence of the prediction-error is analyzed, and the separation principle is proved. By the separation principle, the parameters of the state predictor and the parameters of the controller are designed separately. Simulation results validate the effectiveness of the proposed methods.

Key words: networked control systems; data packet dropout; long time-delay; separation principle; state predictor

1 引言(Introduction)

网络控制系统中传感器信息及控制量均通过网络传输, 除了存在网络诱导时延之外, 还因为网络传输的不可靠性(网络节点故障、网络拥塞等), 导致数据包在传输过程中可能发生丢失, 使得控制器输入和控制量均无法及时更新, 影响系统的稳定性和性能, 严重时将使系统失去稳定性. 所以, 数据包丢失也是网络控制系统的分析和设计中必须要考虑的问题.

近年来, 针对数据包丢失的网络控制系统逐渐受到广泛的重视. Zhang等^[1]利用异步动态系统分析了单包传输及多包传输网络控制系统存在数据包丢失的情形, 但未考虑网络诱导时延; Lin^[2]讨论了数据包丢失率已知的网络控制系统的随机渐近稳定性, 并将系统输出的功率谱密度以丢包率函数的形式给出, 但没有考虑时延的影响以及丢包的补偿; Qiang^[3]将数据包丢失建模为系统的噪声过程, 并得

到了在此方法下的网络控制系统的等价模型, 在此基础上将丢包补偿器的设计转化为具有约束的最优调节器的求解问题; 张喜民等^[4]针对单包传输情况, 将同时存在网络诱导时延和数据包丢失的网络控制系统建模为具有事件率约束的异步动态系统, 依据Lyapunov稳定性原理, 给出了保证网络控制系统指数稳定的网络诱导时延和数据包丢失的条件; 邱占芝等^[5]、刘明等^[6]针对具有网络诱导时延和数据包丢失的网络控制系统, 在数据丢包率一定, 时延小于一个采样周期的情况下, 利用异步动态系统方法, 给出了使得闭环系统指数稳定的动态输出反馈控制器的设计方法; 李金娜^[7]针对长时延和有数据包丢失的网络控制系统, 基于一定的数据丢包率和随机时延, 将网络控制系统建模为由结构事件率约束的异步动态切换系统; Jing Wu^[8]将传感器-控制器和控制器-执行器的数据包丢失建模为不同的Markov链, 给出了闭环系统随机稳定的充分条件和控制律设计

方法; Mei Yu等^[9]将数据包丢失网络控制系统建模为切换系统,用切换系统理论进行分析和综合,通过求解一组LMI得到了保证闭环系统稳定的丢包上限; Huo Zhihong等^[10]将数据包丢失看作是传感器或执行器的故障,根据鲁棒容错控制理论来进行完整性设计,通过求解LMI的可行解获得控制器参数。

当存在数据包丢失时,为保证系统的性能,采用丢包补偿器是一种有效的方法。Mehrdad Sahebsara等^[11]研究了由数据包丢失网络控制系统的 H_∞ 滤波问题,将随机丢包率转化为系统参数的随机性,推导了具有随机参数的系统在随机输入和确定输入下的广义 H_∞ 范数,通过求解一组LMI来求得滤波器参数;王艳等^[12]考虑网络只存在于传感器和控制器的情况,采用丢包补偿器产生的预估状态代替系统的真实状态计算控制量,将网络控制系统建模为一类具有参数不确定性的离散切换系统,给出了系统的保性能控制器和丢包补偿器的协同设计方法; Shuli Sun等^[13]研究了具有数据包丢失的网络控制系统的最优线性估计问题,给出了最优线性估计器收敛的充分条件; Yu-Chu Tian等^[14]在输入输出框架下,当控制器采用PID控制算法,网络诱导时延小于一个采样周期时,研究了控制器-执行器的丢包补偿器的设计方法。

本文针对存在时变长时延和数据包丢失的网络控制系统,假设网络只存在于传感器和控制器之间,在控制器端设计一个状态预测器来对时变长时延和数据包丢失进行补偿,然后利用预测器状态构造控制律使闭环系统渐近稳定。基于分离原理,分别给出了状态预测器和控制器的设计方法。仿真结果表明了本文方法的有效性。

2 问题描述(Problem description)

本文研究的网络控制系统的结构图如图1所示,网络存在于传感器和控制器之间,其中, y 为被控对象的输出, z 为控制器的输入, u 为控制器的输出。

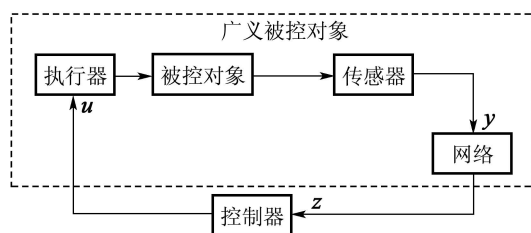


图1 网络控制系统结构图

Fig. 1 Structure of networked control systems

对上述网络控制系统,作如下假设:

1) 传感器节点采用时间驱动,周期为 T ,控制器节点也采用时间驱动以避免控制量的频繁切换(若采用事件驱动,则在长时延情况下,在一个采样周

期内可能接收到多个传感器数据,从而产生多个控制量,使执行机构进行多次切换); 2) 网络诱导时延 τ_k 是时变的且其上界存在且大于一个采样周期,即 $\tau_k \in (0, \bar{d}T)$, $\bar{d} > 1$; 3) 传感器节点采样被控对象的输出,传感器节点的数据包采用单包传输且带有时间戳,在数据传输过程中,数据包可能会丢失,数据包连续丢失次数的上界存在,记为 $\bar{N}$ 。

图1中的控制器一般为带有零阶保持器,以 T 为周期计算控制量。正如以上所述,对控制器而言,其接收到的数据是经过一定时延的被控对象的输出,并且由于可能出现的数据丢包现象,该数据的更新时间间隔是时变的,且为采样周期的整数倍。此时,可将网络等效为一个开关,每隔采样周期的整数倍的时间间隔接通一次,将传感器数据成功发送到控制器。由于网络诱导时延可能大于一个采样周期并且存在数据包丢失现象,因此,在一个采样周期内,控制器可能得不到新的传感器数据(称为空采样),也可能得到多个传感器数据,并且得到的数据是经时变时延之后的数据。控制器接收到多个传感器数据时,一般根据时间戳采用最新的数据,而将其他数据丢弃(这种情形称数据拒绝)。为克服时延和数据包丢失的影响,本文在控制器节点引入一个状态预测器来根据过去的测量数据预测对象的状态,控制器根据预测器的状态来计算控制量,于是,图1可以表示为图2。

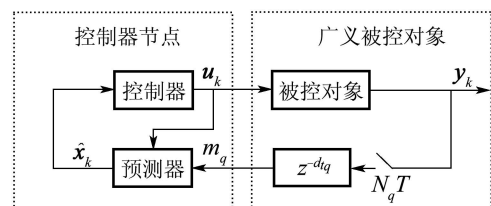


图2 网络控制系统的等效结构图

Fig. 2 Equivalent structure of networked control systems

图2中, d_{t_q} 为正整数,如果网络诱导时延为 τ_{t_q} ,则

$$d_{t_q} = \text{int}(\tau_{t_q}/T + 1), \quad (1)$$

其中 $\text{int}(\cdot)$ 表示取整运算。由假设2)可知, d_{t_q} 的上界为 $\bar{d}$, 于是

$$d_{t_q} \in \mathfrak{D} = \{1, 2, \dots, \bar{d}\}, \quad (2)$$

设在 t_q 个采样时刻,控制器端接收到一个新的数据 $y_{t_q-d_{t_q}}$,相邻两次接收到新数据的时间间隔为 $N_q T$, $N_q = t_q - t_{q-1}$ 。由假设3),从控制器端看,接收到数据的最坏情况可以由图3表示。

由图3可知, $\max(N_q) = \bar{N} + \bar{d}$, 所以

$$N_q \in \mathbb{N} = \{1, 2, \dots, \bar{N} + \bar{d}\}. \quad (3)$$

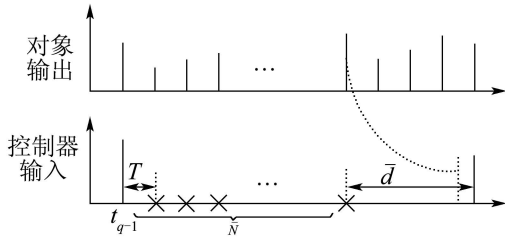


图3 控制器端接收到新数据的最大间隔

Fig. 3 Max interval between successive arriving sensor data

如上所述, 控制器端接收到传感器数据更新的时刻由 N_q 决定, N_q 的值在集合 $\mathbb{N}$ 内变化. 本文要解决的问题是要设计一个基于模型的状态预测器, 以在控制器端没有接收到新的传感器数据时估计被控对象的状态, 并在此基础上设计控制器使闭环系统渐近稳定.

3 状态预测器设计(Design of state predictor)

被控对象(稳定或不稳定)的离散状态方程为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{G}\mathbf{x}_k + \mathbf{H}\mathbf{u}_k, \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k. \end{cases} \quad (4)$$

当数据包传输的网络诱导时延大于采样周期且存在数据包丢失时, 如果没有任何补偿措施, 将会使得系统的性能下降甚至不稳定. 因此, 本文在控制器端设计一个与原系统形式相似的状态预测器, 若在一个采样周期内控制器没有得到新数据, 则用状态预测器的状态来计算控制量, 同时利用求得的控制量来预测下一时刻的系统状态(开环预测); 如控制器获得了新的传感器数据, 由于存在网络诱导时延, 故该数据是前若干时刻的传感器数据, 此时利用该数据对当前的预测状态作修正(闭环预测), 然后计算控制量. 设计目标要求状态预测器的状态和系统状态间的误差最终收敛到0.

3.1 状态预测器(State predictor)

在控制器端构造一个与原系统形式相同的动态系统, 其形式如下:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{H}\mathbf{u}_{k-1}, \quad (5)$$

其中 $\hat{\mathbf{x}}$ 为预测器状态. 当控制器未接收到新的传感器数据时, 可利用式(5)预测当前系统的状态. 假设在 $k = t_q$ 时刻, 控制器接收到第 q 个新的传感器数据, 记为

$$\mathbf{m}_q = \mathbf{y}_{t_q - d_{t_q}} = \mathbf{C}\mathbf{x}_{t_q - d_{t_q}}, \quad (6)$$

利用该数据, 对由(5)得到的状态预测值作修正, 即

$$\hat{\mathbf{x}}_{t_q} = \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}}_{t_q-1} + \mathbf{H}\mathbf{u}_{t_q-1} + \mathbf{L}(d_{t_q})(\mathbf{m}_q - \mathbf{C}\mathbf{x}_{t_q-d_{t_q}}), \quad (7)$$

其中 $\mathbf{L}(d_{t_q})$ 为待定的预测器校正增益. 将 $\mathbf{x}_{t_q-d_{t_q}}$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_{t_q-d_{t_q}}$ 分别用 $\mathbf{x}_{t_{q-1}}$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_{t_{q-1}}$ 来表示, 由式(4)(5)递推

计算, 可得

$$\mathbf{x}_{t_q-d_{t_q}} = \mathbf{G}^{-d_{t_q}+1}(\mathbf{x}_{t_{q-1}} - \sum_{i=2}^{d_{t_q}} \mathbf{G}^{i-1} \mathbf{H}\mathbf{u}_{t_q-i}),$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{t_q-d_{t_q}} = \mathbf{G}^{-d_{t_q}+1}(\hat{\mathbf{x}}_{t_{q-1}} - \sum_{i=2}^{d_{t_q}} \mathbf{G}^{i-1} \mathbf{H}\mathbf{u}_{t_q-i}).$$

于是

$$\mathbf{y}_{t_q-d_{t_q}} = \mathbf{C}\mathbf{G}^{-d_{t_q}+1}(\mathbf{x}_{t_{q-1}} - \sum_{i=2}^{d_{t_q}} \mathbf{G}^{i-1} \mathbf{H}\mathbf{u}_{t_q-i}), \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{t_q} = \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}}_{t_q-1} + \mathbf{H}\mathbf{u}_{t_q-1} + \mathbf{L}(d_{t_q})\mathbf{C}\mathbf{G}^{-d_{t_q}+1}(\mathbf{x}_{t_{q-1}} - \hat{\mathbf{x}}_{t_{q-1}}), \quad (9)$$

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{H}\mathbf{u}_{k-1}, & t_{q-1} + 1 \leq k \leq t_q - 1; \\ \hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{H}\mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{L}(d_k)\mathbf{C}\mathbf{G}^{-d_k+1}(\mathbf{x}_{k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k-1}), & k = t_q. \end{cases} \quad (10)$$

3.2 状态预测误差的收敛性分析(Convergence analysis of state predict error)

取 $\theta_k = 1$ 表示有新数据到达控制器, $\theta_k = 0$ 表示控制器没有接收到新数据, 则式(10)可改写为

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{H}\mathbf{u}_{k-1} + \theta_k \mathbf{L}(d_k) \mathbf{C} \mathbf{G}^{-d_k+1}(\mathbf{x}_{k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k-1}). \quad (11)$$

定义 $\mathbf{e}_k = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k$, 则由式(4)和(11)可得预测误差方程为

$$\mathbf{e}_k = (\mathbf{G} - \theta_k \mathbf{L}(d_k) \mathbf{C} \mathbf{G}^{-d_k+1}) \mathbf{e}_{k-1} = (\mathbf{I} - \theta_k \mathbf{L}(d_k) \mathbf{C} \mathbf{G}^{-d_k}) \mathbf{G} \mathbf{e}_{k-1}. \quad (12)$$

由于 θ_k 和 d_k 均在有限集合内取值, 因此, 式(12)可看作是一个自主切换的切换系统, 文献[16]采用公共Lyapunov函数方法设计 $\mathbf{L}(d_k)$ 使得预测误差渐近收敛到0. 但是, 考虑到 $\theta_k = 0$ 时, 式(12)变为

$$\mathbf{e}_k = \mathbf{G} \mathbf{e}_{k-1}. \quad (13)$$

对上式来说, 如果 $\mathbf{G}$ 有单位圆外的特征值, 则公共Lyapunov函数不存在, 因此, 文献[16]中的方法不适用. 因此, 要对式(12)作必要的转化以设计 $\mathbf{L}(d_k)$.

定义 $\mathbf{E}_q = \mathbf{e}_{t_q}$, $\mathbf{E}_{q-1} = \mathbf{e}_{t_{q-1}}$, 显然, 若 $\lim_{q \rightarrow \infty} \mathbf{E}_q = 0$, 则 $\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{e}_k = 0$. 下面建立 $\mathbf{E}_q$ 和 $\mathbf{E}_{q-1}$ 的关系.

由式(12)可知, 当 $t_{q-1} + 1 \leq k \leq t_q - 1$ 时, $\theta_k = 0$, 误差方程即为式(13). 由式(13)递推, 并考虑到 $t_q - t_{q-1} = N_q$, 可得

$$\mathbf{e}_{t_q-1} = \mathbf{G}^{N_q-1} \mathbf{E}_{q-1}, \quad (14)$$

而当 $k = t_q$ 时, $\theta_k = 1$, 由式(12)可得

$$\mathbf{E}_q = \mathbf{e}_{t_q} = (\mathbf{I} - \mathbf{L}(d_{t_q}) \mathbf{C} \mathbf{G}^{-d_{t_q}}) \mathbf{G} \mathbf{e}_{t_q-1},$$

将式(14)代入上式, 可得

$$\mathbf{E}_q = (\mathbf{I} - \mathbf{L}(d_{t_q}) \mathbf{C} \mathbf{G}^{-d_{t_q}}) \mathbf{G}^{N_q} \mathbf{E}_{q-1}, \quad (15)$$

这样, 状态预测误差的收敛性问题就转化为式(15)所描述系统的渐近稳定性问题. 对此, 有以下结论:

定理 1 对于式(15)所示误差系统和 $d_{t_q} \in \mathfrak{D}$, $N_q \in \mathbb{N}$, 若存在公共的对称正定矩阵 $\mathbf{P}$ 以及矩阵 $\mathbf{Y}(d_{t_q})$, 使得以下线性矩阵不等式成立

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P} & (\mathbf{P} - \mathbf{Y}(d_{t_q})\mathbf{C}\mathbf{G}^{-d_{t_q}})\mathbf{G}^{N_q} \\ * & -\mathbf{P} \end{bmatrix} < 0, \quad (16)$$

则误差系统(15)渐近稳定, 且 $\mathbf{L}(d_{t_q}) = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{Y}(d_{t_q})$ 为所求的状态预测器校正增益. 其中, $*$ 表示对称项.

证 定义Lyapunov函数为 $V(q) = \mathbf{E}_q^T \mathbf{P} \mathbf{E}_q > 0$, 若

$$\Delta V(q) = V(q) - V(q-1) = \mathbf{E}_{q-1}^T (\mathbf{M}_{N_q, d_{t_q}}^T \mathbf{P} \mathbf{M}_{N_q, d_{t_q}} - \mathbf{P}) \mathbf{E}_{q-1} < 0,$$

其中 $\mathbf{M}_{N_q, d_{t_q}} = \mathbf{I} - \mathbf{L}(d_{t_q})\mathbf{C}\mathbf{G}^{-d_{t_q}}\mathbf{G}^{N_q}$, 则系统(15)是渐近稳定的. 上式等价于 $\mathbf{M}_{N_q, d_{t_q}}^T \mathbf{P} \mathbf{M}_{N_q, d_{t_q}} - \mathbf{P} < 0$, 由Schur补性质, 上式等价于

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} & (\mathbf{I} - \mathbf{L}(d_{t_q})\mathbf{C}\mathbf{G}^{-d_{t_q}})\mathbf{G}^{N_q} \\ * & -\mathbf{P} \end{bmatrix} < 0,$$

对上式左乘、右乘 $\text{diag}\{\mathbf{P}, \mathbf{I}\}$, 并令 $\mathbf{Y}(d_{t_q}) = \mathbf{P}\mathbf{L}(d_{t_q})$ 即可得到式(16). 证毕.

3.3 状态预测器设计(Design of state predictor)

定理1给出了状态预测误差渐近稳定的条件, 通过求解线性矩阵不等式(16)可得到使预测误差渐近稳定的预测器校正增益. 在具体设计时, 可将误差系统(15)的极点配置到期望的区域, 以满足误差系统动态性能的需求, 即设计预测器校正增益 $\mathbf{L}(d_{t_q})$, 使得系统(15)的极点位于给定的中心为 $\alpha + j0$, 半径为 r 的圆盘 $D(\alpha, r)$ 内, 圆盘 $D(\alpha, r)$ 位于单位圆内.

定义 1 对复平面中的区域, 若存在适维的对称正定矩阵 $\mathbf{S}$ 和矩阵 $\mathbf{T}$, 使得

$$D = \{s \in \mathbb{C} | \mathbf{S}s + \mathbf{T}s + \bar{s}\mathbf{T}^T < 0\}, \quad (17)$$

其中 $\bar{s}$ 是 s 的共轭, 则称 D 是一个线性矩阵不等式区域, 简记为LMI区域.

定义 2 对复平面中给定的LMI区域 D 和矩阵 $\mathbf{W}$, 如果矩阵 $\mathbf{W}$ 的所有特征根都位于区域 D 中, 即 $\lambda(\mathbf{W}) \in D$, 则称矩阵 $\mathbf{W}$ 是 D -稳定的.

引理 1 [15] 对于给定的LMI区域式(17), 矩阵 $\mathbf{W}$ 是 D -稳定的充要条件是存在对称正定矩阵 $\mathbf{P}$, 使得

$$\mathbf{S} \otimes \mathbf{P} + \mathbf{T} \otimes (\mathbf{H}\mathbf{P}) + \mathbf{T}^T \otimes (\mathbf{H}\mathbf{P})^T < 0. \quad (18)$$

定理 2 对于给定的圆盘 $D(\alpha, r)$, 对所有的 $d_{t_q} \in \mathfrak{D}$ 和 $N_q \in \mathbb{N}$, 误差系统(15)是 D -稳定的充要条件是: 存在对称正定矩阵 $\mathbf{X}$ 和矩阵 $\mathbf{Y}(d_{t_q})$, 使得如

下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} -r\mathbf{X} & \mathbf{X}(-\alpha\mathbf{I} + \mathbf{G}^{N_q}) - \mathbf{Y}(d_{t_q})\mathbf{C}\mathbf{G}^{N_q-d_{t_q}} \\ * & -r\mathbf{X} \end{bmatrix} < 0. \quad (19)$$

此时 $\mathbf{L}(d_{t_q}) = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{Y}(d_{t_q})$ 为所求的状态预测器校正增益.

证 给定的圆盘 $D(\alpha, r)$ 可表示为

$$D(\alpha, r) = \{s \in \mathbb{C} | (s - \alpha)(\bar{s} - \alpha) - r^2 < 0\},$$

由于 $r > 0$ 和 $(s - \alpha)(\bar{s} - \alpha) - r^2 < 0$, 可以推出

$$\begin{bmatrix} -r & s - \alpha \\ \bar{s} - \alpha & -r \end{bmatrix} < 0,$$

即

$$\begin{bmatrix} -r & -\alpha \\ -\alpha & -r \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \bar{s} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} < 0,$$

由定义1, 定义

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} -r & -\alpha \\ -\alpha & -r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

圆盘 $D(\alpha, r)$ 可表示为如式(17)所示的LMI区域. 由引理1, 系统(15)是 D -稳定的充要条件是存在对称正定矩阵 $\mathbf{P}$, 使得

$$\mathbf{S} \otimes \mathbf{P} + \mathbf{T} \otimes \mathbf{M}_{N_q, d_{t_q}} + \mathbf{T}^T \otimes \mathbf{M}_{N_q, d_{t_q}}^T < 0,$$

上式等价于

$$\begin{bmatrix} -r\mathbf{P} & (-\alpha\mathbf{I} + (\mathbf{I} - \mathbf{L}(d_{t_q})\mathbf{C}\mathbf{G}^{-d_{t_q}})\mathbf{G}^{N_q})\mathbf{P} \\ * & -r\mathbf{P} \end{bmatrix} < 0,$$

对上式左乘、右乘 $\text{diag}\{\mathbf{P}^{-1}, \mathbf{P}^{-1}\}$ 并令 $\mathbf{X} = \mathbf{P}^{-1}$ 即可得(19). 证毕.

4 控制器设计(Controller design)

针对存在时变长时延和数据包丢失的网络控制系统, 利用3中的方法设计状态预测器, 然后用预测器状态构造反馈控制律, 即

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}_k, \quad (20)$$

将式(4)和(5)联立, 并考虑到式(20), 可得系统的闭环方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_k \\ \mathbf{e}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} + \mathbf{H}\mathbf{K} & -\mathbf{H}\mathbf{K} \\ 0 & (\mathbf{I} - \theta_k \mathbf{L}(d_k)\mathbf{C}\mathbf{G}^{-d_k})\mathbf{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k-1} \\ \mathbf{e}_{k-1} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

本节的任务是设计控制律式(20), 使闭环系统式(21)渐近稳定.

定义

$$\mathbf{Z}_q = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{t_q} \\ \mathbf{e}_{t_q} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Z}_{q-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{t_{q-1}} \\ \mathbf{e}_{t_{q-1}} \end{bmatrix},$$

采用与3中相类似的方法, 系统式(21)的稳定性问题等价于

$$\mathbf{Z}_q = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} - \theta_k \mathbf{L}(d_{t_q}) \mathbf{C} \mathbf{G}^{-d_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{G} + \mathbf{H} \mathbf{K} & -\mathbf{H} \mathbf{K} \\ 0 & \mathbf{G} \end{bmatrix}^{N_q} \mathbf{Z}_{q-1} \quad (22)$$

的稳定性问题. 而

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G} + \mathbf{H} \mathbf{K} & -\mathbf{H} \mathbf{K} \\ 0 & \mathbf{G} \end{bmatrix}^{N_q} = \begin{bmatrix} (\mathbf{G} + \mathbf{H} \mathbf{K})^{N_q} & \mathbf{W}_{N_q} \\ 0 & \mathbf{G}^{N_q} \end{bmatrix},$$

其中: $\mathbf{W}_{N_q} = \mathbf{G} + \mathbf{H} \mathbf{K} \mathbf{W}_{N_q-1} + \mathbf{W}_{N_q-1} \mathbf{G}$, $\mathbf{W}_0 = -\mathbf{H} \mathbf{K}$. 于是, 式(22)可写成:

$$\mathbf{X}_q = \Xi_q \mathbf{X}_{q-1}, \quad (23)$$

其中:

$$\Xi_q = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\text{CL}}^{N_q} & \mathbf{W}_{N_q} \\ 0 & \mathbf{G}_{\text{E}}(d_{t_q}, N_q) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_{\text{CL}} = \mathbf{G} + \mathbf{H} \mathbf{K},$$

$$\mathbf{G}_{\text{E}}(d_{t_q}, N_q) = (\mathbf{I} - \mathbf{L}(d_{t_q}) \mathbf{C} \mathbf{G}^{-d_{t_q}}) \mathbf{G}^{N_q}.$$

因此, 闭环系统的特征值, 即 Ξ_q 的特征值由 $\mathbf{G}_{\text{CL}}^{N_q}$ 和 $\mathbf{G}_{\text{E}}(d_{t_q}, N_q)$ 的特征值组成. 由线性系统理论可知, 如果 $\mathbf{G}_{\text{CL}}$ 的特征值在单位圆内, 则 $\mathbf{G}_{\text{CL}}^{N_q}$ 的特征值一定也在单位圆内. 于是从表面上看, 若利用分离原理分别设计 $\mathbf{L}(d_{t_q})$ 和 $\mathbf{K}$, 使得 $\mathbf{G}_{\text{CL}}$ 和 $\mathbf{G}_{\text{E}}(d_{t_q}, N_q)$ 的特征值均在单位圆内, 就可以保证系统式(23)渐近稳定. 但系统式(23)是时变系统, 而对于时变系统, 系统矩阵的特征值在单位圆内既不是系统渐近稳定的充分条件也不是必要条件. 因此, 对式(23)所示的线性离散时变系统. 应用分离原理时需要加以证明.

定理3 若以下条件满足, 则闭环系统式(23)渐近稳定.

1) 存在对称正定矩阵 $\mathbf{P}$ 和矩阵 $\mathbf{L}(d_{t_q})$, 对所有的 $d_{t_q} \in \mathfrak{D}$, $N_q \in \mathbb{N}$, 式(24)成立:

$$\mathbf{G}_{\text{E}}(d_{t_q}, N_q) \mathbf{P} \mathbf{G}_{\text{E}}^{\text{T}}(d_{t_q}, N_q) - \mathbf{P} < 0. \quad (24)$$

2) 存在对称正定矩阵 $\mathbf{Q}$ 和矩阵 $\mathbf{K}$, 式(25)成立:

$$\mathbf{G}_{\text{CL}} \mathbf{Q} \mathbf{G}_{\text{CL}}^{\text{T}} - \mathbf{Q} < 0. \quad (25)$$

证 系统式(23)渐近稳定的充分条件是存在对称正定矩阵 $\mathbf{S}$, 使得

$$\Xi_q^{\text{T}} \mathbf{S}^{-1} \Xi_q - \mathbf{S}^{-1} < 0, \quad (26)$$

由Schur补性质, 上式等价于

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{S} & \Xi_q \\ \Xi_q^{\text{T}} & \mathbf{S}^{-1} \end{bmatrix} < 0,$$

再次使用Schur补性质, 上式等价于

$$\Xi_q \mathbf{S} \Xi_q^{\text{T}} - \mathbf{S} < 0. \quad (27)$$

同理, 式(24)和(25)分别等价于式(28)和(29), 即预测误差系统式(16)渐近稳定, 且在无网络时设计的反馈控制器使系统渐近稳定.

$$\mathbf{G}_{\text{E}}^{\text{T}}(d_{t_q}, N_q) \mathbf{P}^{-1} \mathbf{G}_{\text{E}}(d_{t_q}, N_q) - \mathbf{P}^{-1} < 0, \quad (28)$$

$$\mathbf{G}_{\text{CL}}^{\text{T}} \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}_{\text{CL}} - \mathbf{Q}^{-1} < 0. \quad (29)$$

下面证明存在 γ , 使 $\mathbf{S} = \text{diag}(\gamma \mathbf{Q}, \mathbf{P})$ 满足式(27).

当 $\mathbf{S} = \text{diag}\{\gamma \mathbf{Q}, \mathbf{P}\}$ 时, 将 Ξ_q 的表达式代入式(27), 可得

$$\begin{bmatrix} M & \mathbf{W}_{N_q} \mathbf{P} \mathbf{G}_{\text{E}}^{\text{T}}(d_{t_q}, N_q) \\ * & \mathbf{G}_{\text{E}}(d_{t_q}, N_q) \mathbf{P} \mathbf{G}_{\text{E}}^{\text{T}}(d_{t_q}, N_q) - \mathbf{P} \end{bmatrix} < 0,$$

其中: $M = \gamma[\mathbf{G}_{\text{CL}}^{N_q} \mathbf{Q} (\mathbf{G}_{\text{CL}}^{N_q})^{\text{T}} - \mathbf{Q}] + \mathbf{W}_{N_q} \mathbf{P} \mathbf{W}_{N_q}^{\text{T}}$. 上式等价于

$$\gamma[\mathbf{G}_{\text{CL}}^{N_q} \mathbf{Q} (\mathbf{G}_{\text{CL}}^{N_q})^{\text{T}} - \mathbf{Q}] + \mathbf{W}_{N_q} \mathbf{P} \mathbf{W}_{N_q}^{\text{T}} +$$

$$\mathbf{W}_{N_q} \mathbf{P} \mathbf{G}_{\text{E}}^{\text{T}}(d_{t_q}, N_q) (\mathbf{P} - \mathbf{G}_{\text{E}}(d_{t_q}, N_q) \mathbf{P} \cdot$$

$$\mathbf{G}_{\text{E}}^{\text{T}}(d_{t_q}, N_q))^{-1} \mathbf{G}_{\text{E}}(d_{t_q}, N_q) \mathbf{P} \mathbf{W}_{N_q}^{\text{T}} < 0,$$

即

$$\gamma[\mathbf{Q} - \mathbf{G}_{\text{CL}}^{N_q} \mathbf{Q} (\mathbf{G}_{\text{CL}}^{N_q})^{\text{T}}] >$$

$$\mathbf{W}_{N_q} \mathbf{P} \mathbf{W}_{N_q}^{\text{T}} + \mathbf{W}_{N_q} \mathbf{P} \mathbf{G}_{\text{E}}^{\text{T}}(d_{t_q}, N_q) (\mathbf{P} - \mathbf{G}_{\text{E}}(d_{t_q}, N_q) \cdot$$

$$\mathbf{P} \mathbf{G}_{\text{E}}^{\text{T}}(d_{t_q}, N_q))^{-1} \mathbf{G}_{\text{E}}(d_{t_q}, N_q) \mathbf{P} \mathbf{W}_{N_q}^{\text{T}}, \quad (30)$$

因为 $\mathbf{W}_{N_q} \mathbf{P} \mathbf{G}_{\text{E}}^{\text{T}}(d_{t_q}, N_q)$ 是 $\mathbf{G}_{\text{E}}(d_{t_q}, N_q) \mathbf{P} \mathbf{W}_{N_q}^{\text{T}}$ 的转置, 由式(24)和(25)以及 $\mathbf{P}$ 的对称正定性可知, $\mathbf{Q} - \mathbf{G}_{\text{CL}}^{N_q} \mathbf{Q} (\mathbf{G}_{\text{CL}}^{N_q})^{\text{T}}$ 和 $\mathbf{P} - \mathbf{G}_{\text{E}}(d_{t_q}, N_q) \mathbf{P} \mathbf{G}_{\text{E}}^{\text{T}}(d_{t_q}, N_q)$ 对称正定, 从而上式右边也是对称正定的, 于是总存在 γ , 使得式(30)成立, 进一步由上述过程反推, 式(27)成立, 即系统式(23)渐近稳定. 证毕.

定理3表明, 对于本文所研究的一类具有时变长时延和数据包丢失的网络控制系统, 可以用分离原理分别设计反馈控制增益矩阵 $\mathbf{K}$ 和状态观测器的校正增益矩阵 $\mathbf{L}(d_{t_q})$. 进一步, 如果被控系统能控能观, 则为确保系统的控制性能, 可用极点配置方法设计 $\mathbf{K}$, 用D-稳定方法根据定理2设计 $\mathbf{L}(d_{t_q})$.

5 仿真算例(Simulation examples)

考虑一个开环不稳定的被控对象, 采样周期 $T = 0.5$ s时, 离散化状态方程为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1.0513 & 0.0409 \\ 0 & 0.6219 \end{bmatrix} \mathbf{x}_k + \begin{bmatrix} 0.1036 \\ 0.0398 \end{bmatrix} u_k, \\ y_k = [1 \ 0] \mathbf{x}_k. \end{cases}$$

网络存在于传感器和控制器之间, 传感器和控制

器均为时间驱动,网络诱导时延时变不确定,且满足 $\tau_k \in (0, 4T)$;存在数据包丢失,且丢包的概率分布未知,但最大数据包连续丢失次数 $\bar{N} = 3$,系统的初始状态为 $\mathbf{x}_0 = [14 \ 4]^T$.要求设计状态预测器式(10)和状态反馈控制律式(20),且预测误差系统(16)的极点位于圆盘 $D(0.4, 0.4)$ 内.

将系统参数代入线性矩阵不等式(19),在 $d_{t_q} = 1, 2, 3, 4, N_q \in \mathbb{N}$ 时,求得状态预测器校正增益为

当 $d_{t_q} = 1$ 时, $\mathbf{L}(1) = [0.7168 \ 0.0136]^T$;

当 $d_{t_q} = 2$ 时, $\mathbf{L}(2) = [0.7509 \ 0.0143]^T$;

当 $d_{t_q} = 3$ 时, $\mathbf{L}(3) = [0.7823 \ 0.0149]^T$;

当 $d_{t_q} = 4$ 时, $\mathbf{L}(4) = [0.9671 \ 0.0023]^T$.

接着,利用极点配置方法,将 $\mathbf{G} + \mathbf{H}\mathbf{K}$ 的极点配置在0.7和0.75,可得状态反馈增益矩阵为 $\mathbf{K} = [-2.2953 \ 0.3668]$.

最后,利用求得的状态预测器和控制器,取预测器的初始状态为 $\hat{\mathbf{x}} = [14 \ 0]^T$,进行计算机仿真,可得系统状态响应曲线和状态预测误差系统状态响应曲线分别如图4和图5所示.仿真结果表明在本文设计的状态预测器和控制器作用下,系统是渐近稳定的.

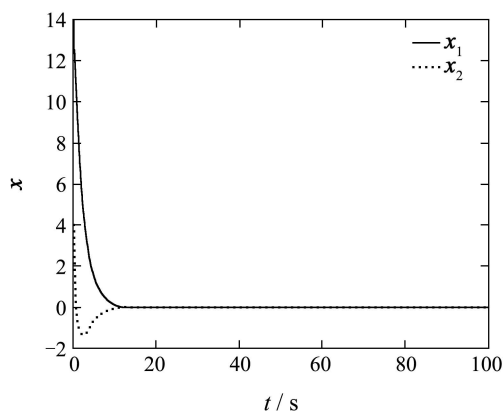


图4 网络控制系统状态响应曲线

Fig. 4 State response of networked control system

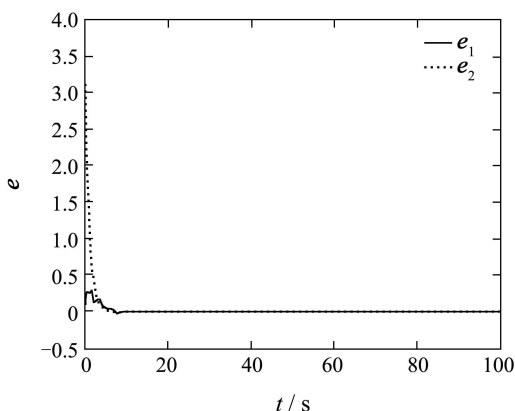


图5 状态预测误差曲线

Fig. 5 State predictor error curves

6 结论(Conclusion)

本章针对时变长时延和数据包丢失网络控制系统,考虑网络存在于传感器和控制器之间,传感器和执行器均为时间驱动,在控制器端设计状态预测器以补偿网络诱导时延和数据包丢失的影响,分析了预测误差的收敛性,建立了系统的闭环状态方程,证明了分离原理是成立的.基于分离原理,分别给出了状态预测器和状态反馈控制器的设计方法,并且可以配置闭环系统的极点以满足系统动态性能的需要.仿真结果表明,本文章所提出的方法是有效的.

参考文献(References):

- [1] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILIPS S M. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84 – 99.
- [2] LING Q, LEMMON M D. Robust performance of soft real-time networked control systems with data dropouts[C] // *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*. Las Vegas: IEEE, 2002, 1225 – 1230.
- [3] LING Q, LEMMON M D. Soft real-time scheduling of networked control systems with dropouts governed by a Markov chain[C] // *Proceedings of 2003 American Control Conference*. Denver: IEEE, 2003: 4845 – 4850.
- [4] 张喜民, 李建东, 陈实. 具有时延和数据包丢失的网络控制系统稳定性[J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(3): 494 – 498 (ZHANG Ximin, LI Jiandong, CHEN Shi. Stability of the networked control systems with time-delay and data packet dropout[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 494 – 498.)
- [5] 邱占芝, 张庆灵, 刘明. 有时延和数据包丢失的网络控制系统控制器设计[J]. *控制与决策*, 2006, 21(6): 625 – 630, 635. (QIU Zhanzhi, ZHANG Qingling, LIU Ming. Controller design for networked control systems with time-delay and data packet dropout[J]. *Control and Decision*, 2006, 21(6): 625 – 630, 635.)
- [6] 刘明, 张庆灵, 邱占芝. 有时延和数据包丢失的网络控制系统反馈控制[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(2): 262 – 268. (LIU Ming, ZHANG Qingling, QIU Zhanzhi. Feedback control of NCS with time-delay and data packet dropout[J]. *System Engineering and Electronics*, 2007, 29(2): 262 – 268.)
- [7] 李金娜, 张庆灵, 王一女. 具有随机时延和丢包补偿的NCS的 H_∞ 控制[J]. *信息与控制*, 2007, 36(3): 315 – 321, 327. (LI Jinna, ZHANG Qingling, WANG Yinu. H_∞ control in networked control system with stochastic delays and packet dropout compensation[J]. *Information and Control*, 2007, 36(3): 315 – 321, 327.)
- [8] WU J, CHEN T W. Design of networked control systems with packet dropouts[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(7): 1314 – 1319.
- [9] MEI YU, LONG WANG, XIE G M, et al. Stabilization of networked control systems with data packet dropout via switched system approach[C] // *Proceedings of 2004 IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design*. Taipei: IEEE Computer Society Press, 2004, 363 – 367.
- [10] HUO Z H, FANG H J. Research on robust fault-tolerant control for networked control system with packet dropout[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2007, 18(1): 76 – 82.
- [11] MEHRDAD SAHEBSARA, TONGWEN CHEN, SIRISH L SHAH. Optimal H_∞ filtering in networked control systems with multiple packet dropouts[J]. *Systems and Control Letters*, 2008, 57(9): 696 – 702.

- [12] 王艳, 陈庆伟, 樊卫华, 等. 数据包丢失网络控制系统的保成本控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(2): 249–254.
(WANG Yan, Chen Qingwei, FAN Weihua, et al. Guaranteed cost control of networked control system with data-packet dropout[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(2): 249–254.)
- [13] SUN S L, XIE L H, XIAO W D, et al. Optimal linear estimation for systems with multiple packet dropouts[J]. *Automatica*, 2008, 44(5): 1333–1342.
- [14] TIAN Y C, DAVID LEVY. Compensation for control packet dropout in networked control systems[J]. *Information Sciences*, 2008, 178(5): 1263–1278.
- [15] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- (YU Li. *Robust Control—LMI Approach*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)
- [16] 王艳. 网络控制系统的控制与调度研究[D]. 南京: 南京理工大学博士学位论文, 2006.
(WANG Yan. *Control and scheduling of networked control systems*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.)

作者简介:

谢成祥 (1970—), 男, 博士, 副教授, 目前主要研究方向是网络控制系统、预测控制等, E-mail: xiechx701008@163.com;

胡维礼 (1941—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为非线性控制、智能控制理论及应用等, E-mail: hwl1002@sina.com.

第7届全国技术过程故障诊断与安全性学术会议

征文通知

全国技术过程故障诊断与安全性学术会议是由中国自动化学会技术过程故障诊断与安全性专业委员会主办的全国性学术会议. 本会议的宗旨是为控制领域的专家、学者、工程师及研究生提供一个关于故障诊断、可靠性、安全性理论与技术最新进展的交流、传播平台. 自1999年首届会议召开以来, 已经成功举办了6届. 第7届全国技术过程故障诊断与安全性学术会议由南京航空航天大学承办, 将于2011年8月初在南京航空航天大学科学馆召开.

中国六大古都之一的南京市地处长江“金三角”地区, 山环水抱, 葱笼毓秀, 水陆空交通十分便利, 是我国著名旅游城市和世界历史文化名城. 中山陵、明孝陵、总统府、雨花台、玄武湖等著名景点令你流连忘返. 尤其是夫子庙, 富有明清建筑风格的十里秦淮风光带的精华, 具有浓郁地方特色和文化氛围…….

借此机会, 大会组委会热忱欢迎广大科技工作者参加本次会议并顺访南京及周边景区. 录用论文将在《南京航空航天大学学报(自然科学版)》增刊(EI检索源刊)和《南京理工大学学报(自然科学版)》增刊(EI检索源刊)上刊登. 部分优秀论文将推荐到《控制工程》专刊发表.

1. 征文范围

● 状态监测与故障诊断 ● 人工智能与专家系统 ● 故障预测与预测维护 ● 系统辨识、状态与参数估计 ● 安全性分析、设计与评估 ● 自动测试技术 ● 容错控制 ● 测试信号处理 ● 实时可靠性评估与预测 ● 应用与实例分析 ● 计算智能 ● 其它

2. 稿件要求

论文必须未公开发表过, 每篇论文的篇幅(含图、工表)一般不超过6000字. 论文包括: 题目, 作者姓名, 作者单位信息, 中英文摘要(摘要为250字左右, 能够完整准确地反映论文的主要信息)、关键词, 正文, 参考文献, 作者简介和E-mail地址. 稿件的版式要求详见《南京航空航天大学学报》主页<http://nhxb.nuaa.edu.cn>上的“投稿须知”栏目.

3. 重要日期

论文投稿截止日期: 2011年1月31日 论文录用通知日期: 2011年3月1日

4. 投稿方式

稿件按照南京航空航天大学学报“投稿须知”的要求编排后, 用Word电子文档发送到会议组委会的电子信箱csp2011@nuaa.edu.cn. 投稿时请在电子邮件中告知作者的通讯地址和联系电话.

联系人: 杨浩、齐瑞云.

会议详细信息见会议网站<http://csp2011.nuaa.edu.cn>.