

文章编号: 1001-0920(2009)01-0141-04

## 基于模型的输出反馈网络控制系统反馈调度研究

汤贤铭, 俞金寿

(华东理工大学 自动化研究所, 上海 200237)

**摘要:** 针对基于模型的网络控制系统缺乏应对动态变化的网络负载问题, 设计反馈调度器, 依据实际的网络拥塞情况, 调整基于模型的网络控制系统的状态更新时间. 为应对状态不完全可测的情况, 在控制结构中使用了状态观测器, 并证明了所提出系统在可更新时间情况下的稳定性. 仿真结果验证了稳定性条件的正确性和新网络控制系统结构的有效性.

**关键词:** 网络控制系统; 状态更新时间; 稳定性

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

## On feedback scheduling of output feedback model-based networked control systems

TANG Xian-ming, YU Jin-shou

(Research Institute of Automation, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China.

Correspondent: TANG Xian-ming, E-mail: mengfuqiao22@hotmail.com)

**Abstract:** A feedback scheduler is proposed for model-based networked control systems to cope with the flexible network load. The state update time is adjusted according to the real-time network congestion situation. State observer is used under the situation when the state of the controlled plant couldn't be acquired. The stability criterion of the proposed structure is proved under varying state update time. Simulation results illustrate the effectiveness of the stability condition and the novel control structure.

**Key words:** Networked control systems; State update time; Stability criterion

### 1 引言

在网络控制系统中, 共享式网络已成为受约束的资源. 通信网络的使用使控制系统的设计和分析变得复杂<sup>[1]</sup>, 这是因为网络的存在, 使得控制采样与控制执行之间产生了不确定的网络诱发时延. Montestruque 等<sup>[2]</sup>提出在控制器侧使用简单对象模型的控制方法, 即基于模型的网络控制系统 (MB-NCS), 以缓解网络的拥塞情况, 同时减少网络上数据包所经历的不确定时延.

本文在 MB-NCS 的基础上, 将其与反馈调度<sup>[3]</sup>方法相结合, 提出一种新的控制系统结构. 很多实际被控对象的状态不能直接测量, 所以本文的控制结构中使用了观测器, 以重构对象的状态, 并证明了该控制系统的稳定性, 实现了在资源受限条件下保持控制系统的稳定和具有良好的控制性能.

### 2 问题描述

网络控制系统设计中的一个主要的问题是如何

平衡各子系统对于网络带宽的需求. 当传感器与控制器之间的信号传输占用大量的网络带宽时, 控制信号的传送会面临更多的网络资源竞争, 出现控制信号被延迟的情况, 总体控制质量下降, 甚至造成控制系统不稳定.

针对这个问题, Montestruque 等提出的基于模型的网络控制系统, 尽量减少网络上包传输的数量, 使得网络有限的带宽可以完成更多的任务. MB-NCS 的相关论文大都存在一个主要问题, 即仅考虑系统的稳定性, 只追求延长两次传输之间的时间间隔, 这是以牺牲控制系统的控制性能为代价的. 为使 MB-NCS 更好地适应变化的网络情况, 本文提出基于模型的输出反馈网络控制系统反馈调度, 即 FS-MB-NCS 来应对动态变化的不确定网络负载.

### 3 基于模型的输出反馈网络控制系统设计

FS-MB-NCS 系统结构如图 1 所示. 图中:  $U$  为网络使用率,  $h$  为每次状态观测器更新对象状态的

收稿日期: 2007-09-28; 修回日期: 2008-01-30.

作者简介: 汤贤铭 (1982—), 男, 上海人, 博士生, 从事网络控制系统、网络调度的研究; 俞金寿 (1939—), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 从事过程模型化及优化控制、先进控制等研究.

周期. 在该控制结构中, 对象的状态向量不能直接测量, 可使用状态观测器估计. 反馈调度器的作用是获得网络的占用率, 依据网络的拥塞程度, 在保证 FS-MB-NCS 稳定的情况下, 动态地调整状态观测器来更新模型状态的频率, 以实现网络带宽利用率的最大化. 反馈调度过程就是监控调度产生的效果的过程, 通过对调度产生的误差进行监控, 持续地调整调度算法, 以使系统保持良好的性能<sup>[4]</sup>.

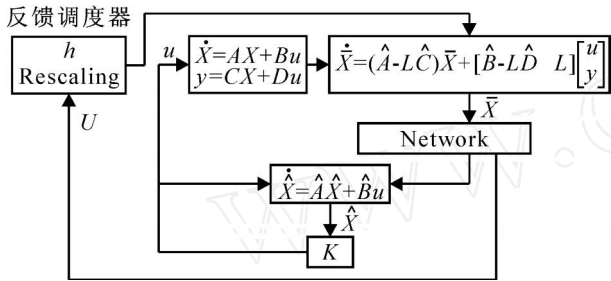


图 1 FS-MB-NCS 系统结构图

图 1 所示系统的动态过程可由下列方程表示:  
对象

$$\dot{X} = AX + Bu, \quad y = CX + Du;$$

模型

$$\dot{\hat{X}} = \hat{A}\hat{X} + \hat{B}u, \quad y = \hat{C}\hat{X} + \hat{D}u;$$

控制器

$$u = KX;$$

观测器

$$\dot{\bar{X}} = (A - LC)\bar{X} + [B - LD \quad L] \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix},$$

其中  $t \in [t_k, t_{k+1})$ .

定义观测器估计与控制器模型之差

$$e = \bar{X} - X;$$

$$e(t) = \begin{cases} \bar{X}(t) - X(t), & t \in (t_k, t_{k+1}); \\ 0, & t = t_k; \end{cases}$$

$$\bar{A} = A - A, \quad \bar{B} = B - B, \quad \bar{C} = C - C,$$

$$\bar{D} = D - D, \quad t \in [t_k, t_{k+1}).$$

有  $u = KX$ . 所以有

$$\dot{X} = AX + BKX, \quad \dot{\hat{X}} = (A + BK)X,$$

$$\dot{\begin{bmatrix} \bar{X} \\ X \\ \hat{X} \end{bmatrix}} = \begin{bmatrix} LC & BK + LD\bar{K} & A - LC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X} \\ X \\ \hat{X} \end{bmatrix}.$$

初值  $X(t_k) = \bar{X}(t_k)$ , 于是具有变化  $h(k)$  的系统可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{X}(t) \\ \dot{\bar{X}}(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} A & BK \\ LC & A - LC + BK + LD\bar{K} \\ LC & LD\bar{K} - LC \\ & -BK \\ & -BK - LD\bar{K} \\ & A - LD\bar{K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(t) \\ \bar{X}(t) \\ e(t) \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} X(t_k) \\ \bar{X}(t_k) \\ e(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(t_k) \\ \bar{X}(t_k) \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\forall t \in [t_k, t_{k+1}) \text{ with } t_{k+1} - t_k = h(k).$$

定义

$$Z = \begin{bmatrix} X(t) \\ \bar{X}(t) \\ e(t) \end{bmatrix},$$

o =

$$\begin{bmatrix} A & BK & -BK \\ LC & A - LC + BK + LD\bar{K} & -BK - LD\bar{K} \\ LC & LD\bar{K} - LC & A - LD\bar{K} \end{bmatrix},$$

则系统可表示为

$$\dot{Z} = {}_o Z, \quad t \in [t_k, t_{k+1}); \quad (1)$$

$$z(t_k) = \begin{bmatrix} X(t_k) \\ \bar{X}(t_k) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

定义在  $t \in [t_k, t_{k+1})$  时, 系统响应

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \bar{x}(t) \\ e(t) \end{bmatrix} = e^{o(t-t_k)} \begin{bmatrix} x(t_k) \\ \bar{x}(t_k) \\ 0 \end{bmatrix} = e^{o(t-t_k)} z(t_k). \quad (2)$$

在  $t_k$  时刻,  $e(t)$  归零. 所以

$$z(t_k) = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} z(t_k).$$

用式(2) 计算  $z(t_k)$ , 可得

$$z(t_k) = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e^{o h(k)} z(t_{k-1}).$$

由式(2), 在  $t_0$  时刻

$$z(t_0) = z_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ \bar{x}_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

是初始状态. 因此

$$z(t) = e^{o(t-t_k)} z(t_k) = e^{o(t-t_k)} \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e^{o h(k)} z(t_{k-1}) =$$

$$e^{o^{(t-t_k)}} \left( \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e^{o^{h(j)}} \right) z_0.$$

其中  $\begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e^{o^{h(j)}}$  拥有

$$\begin{bmatrix} M_{j1} & M_{j2} & M_{j3} \\ M_{j4} & M_{j5} & M_{j6} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

的形式, 因此  $\prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e^{o^{h(j)}}$  拥有

$$\begin{bmatrix} \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} M_{j1} & M_{j2} \\ M_{j3} & M_{j4} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \\ [0 & 0] & 0 \end{bmatrix}$$

的形式. 以  $z(t_0) = z_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ \bar{x}_0 \\ 0 \end{bmatrix}$  为初始条件, 可得

$$\left( \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e^{o^{h(j)}} \right) \begin{bmatrix} x_0 \\ \bar{x}_0 \\ 0 \end{bmatrix} = \left( \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e^{o^{h(j)}} \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x_0 \\ \bar{x}_0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

由此可得系统的响应为

$$z(t) = e^{o^{(t-t_k)}} \left[ \prod_{j=1}^k M(j) \right] z_0, \quad t \in [t_k, t_{k+1}), t_{k+1} - t_k = h(k).$$

其中

$$M(j) = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e^{o^{h(j)}} \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$h(j)$  是随时间变化的.

#### 4 稳定性分析

FS-MB-NCS 的特点是动态地在线调整模型的更新时间  $h$ , 因此必须首先保证系统在时变  $h(k)$  条件下的稳定性, 而不稳定的控制系统是不能应用的<sup>[5]</sup>. 系统的结构如图 1 所示, 在此讨论的被控对象是连续型且状态不完全可知 (输出反馈). 网络上传送的数据包中包含状态观测器对状态的估计值, 用以更新控制器一端对象模型的状态. 包传输发生在  $t_k$  时刻, 定义“更新时间”为两次连续的状态更新之间的长度, 即  $h(k) = t_{k+1} - t_k$ .

在证明稳定性时, 应保证在无法预知网络使用情况的前提下, 得出  $h$  可以变化的范围  $[h_{\min}, h_{\max}]$ ; 然后将反馈调度器可调节的范围设定在  $[h_{\min}, h_{\max}]$

之间变化.

**定理 1** 式(1) 所表示的系统, 在  $[h_{\min}, h_{\max}]$  是 Lyapunov 全局稳定的, 如果存在对称正定矩阵  $X$  使得  $Q = X - M X M^T$  对任意  $h \in [h_{\min}, h_{\max}]$  是正定的, 其中

$$M = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e^{o^h} \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

**证明** 系统输出响应的范数 (此处取 2-范数, 也可取其他类型的范数) 如下:

$$\begin{aligned} & \left\| e^{o^{(t-t_k)}} \left( \prod_{j=1}^k M(j) \right) z_0 \right\| \\ &= e^{o^{(t-t_k)}} \cdot \left\| \prod_{j=1}^k M(j) \right\| \cdot \|z_0\| \\ &= e^{-o^{h_{\max}}} \cdot \left\| \prod_{j=1}^k M(j) \right\| \cdot \|z_0\|. \end{aligned}$$

可见,  $e^{o^{(t-t_k)}}$  只有有限的增长, 最大值出现在  $h_{\max}$  时刻. 由此, 为保证输出响应范数收敛, 必须保证 3 项乘积趋于零,  $\left\| \prod_{j=1}^k M(j) \right\|$  的收敛将保证整个式子收敛. 而 Lyapunov 方程中, 存在对称正定的矩阵  $X$  保证了  $\left\| \prod_{j=1}^k M(j) \right\|$  收敛至零.

可变  $h$  范围的确定方法如下: 使用定理 1 可以确定变化的更新时间  $h$  的范围, 在这个范围内变化的  $h$  可保证系统的稳定性. 具体步骤如下:

Step 1: 设定一个标称  $h$ , 先设定  $Q$  为单位矩阵;

Step 2: 解 Lyapunov 方程, 可得到一个标称的  $X$ ;

Step 3: 在标称的  $h$  附近变化  $h$  的值, 用前面得到的  $X$  计算得出  $Q$ ;

Step 4: 当矩阵  $Q$  不再是正定时,  $h$  的值就是更新时间变化范围的上限.

使用不同的  $h$  的前提是,  $h$  的值应保证在  $h$  不变的情况下系统稳定. 有关固定更新时间, 系统的稳定性证明以及固定  $h$  的求取, 可参见文献[2].

#### 5 仿真示例

仿真示例使用不稳定的双积分被控对象输出反馈的例子. 对象的动态特性可由状态空间表示为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0], D = 0.$$

对象模型为

$$A = \begin{bmatrix} 0.0958 & 1.0604 \\ -0.0066 & -0.0134 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -0.0518 \\ 1.0269 \end{bmatrix},$$

$$C = [0.9734 \quad -0.0137],$$

$$D = -0.0396.$$

反馈控制律  $u = Kx$  中  $K = \begin{bmatrix} - & 1 \\ - & 2 \end{bmatrix}^T$ , 状态观测器的

增益为  $L = \begin{bmatrix} 20 \\ 100 \end{bmatrix}$ , 状态观测器的特征值被配置在

- 10. 系统初始条件为

$$z(t_0) = z_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ x_0 \\ -x_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

以上控制系统, 当以固定时间更新系统模型状态时, 可求出保证系统稳定的  $h$  范围为  $[0, 12]$ . 当  $h$  发生变化时, 使用定理 1 的结论和方法, 可求出  $[h_{\min}, h_{\max}] = [0, 0.794]$ . 显然, 稳定的范围比固定更新时间缩小了, 但得到的好处是赋予了系统更大的灵活性.

作为简单的例子, 本文将网络的拥塞程度分为忙、中等和空闲 3 种状态. 反馈调度器的执行周期为 10 ms. 每个周期中, 反馈调度器从网络获得拥塞情况, 决定下一时刻对象模型的更新时间  $h$ . 当网络状态为忙时, 下一时刻反馈调度器会将更新时间  $h$  调整为 0.79 s; 当网络拥塞状态为中等时,  $h$  则调整为 0.6 s; 网络为空闲时,  $h$  取 0.1 s.

由上述分析可看出,  $h$  不论取什么数值, 都可以保证系统稳定. 取不同的  $h$  时, 对网络的带宽要求是明显不同的.  $h$  取 0.79 s 的带宽需求仅是  $h$  取 0.1 s 的八分之一, 对于网络流量的减少十分明显. 而  $h$  取 0.1 s, 虽然更多地占用了网络, 但可使 FS-MB-NCS 的控制性能更接近于连续系统, 获得更好的动态响应特性.

本文的仿真, 设定网络流量分阶段变化, 0 ~ 1.2 s 时干扰节点占用 50% 的网络带宽; 1.2 ~ 5 s 时干扰节点占用 20% 的网络资源; 在 5 s 以后, 干扰节点占用 90% 的网络资源. 系统的状态变化曲线和网络上流量变化以及反馈调度器效果如图 2 和图 3 所示.

由图可见, FS-MB-NCS 不仅保证了网络控制系统的稳定收敛, 同时实现了依据网络状态动态地调节状态更新率的目标.

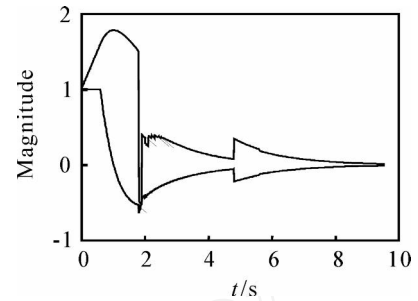


图2 FS-MB-NCS的状态变化情况

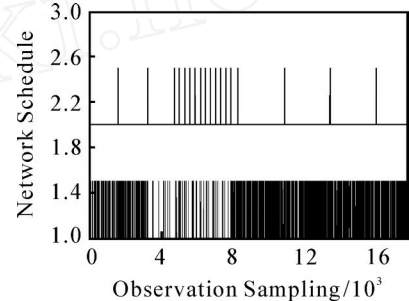


图3 网络上流量变化及反馈调度器效果

## 6 结论

本文提出了基于模型的输出反馈网络控制系统反馈调度的结构, 在控制结构中使用了输出反馈, 并证明了系统在可更新时间下的稳定性条件, 提出了求取更新时间范围的方法. 反馈调度器在保证系统稳定的条件下, 实现了控制性能与网络利用率之间的平衡. 未来的工作将致力于减少稳定性条件的保守性, 研究更复杂的被控对象(非线性对象), 以及考虑丢包情况下系统的稳定性.

## 参考文献(References)

- [1] Tang X M, Yu J S. Networked control system: Survey and directions[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007, 4688: 473-481.
- [2] Montestruque L A, Antsaklis P. Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(9): 1562-1572.
- [3] Yuan P J. An adaptive feedback scheduling algorithm for robot assembly and real-time control systems [C]. IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Beijing: IEEE, 2006: 2226-2231.
- [4] Xia F, Sun Y X. Control-scheduling co-design: A perspective on integrating control and computing [J]. J of Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems, 2006, 27(3): 367-370.
- [5] Astrom K J, Wittenmark B. Computer-controlled systems[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1997.