

文章编号: 1001-0920(2006)02-0201-04

网络传输延迟与丢包的补偿及系统稳定性分析

索格罗, 阳宪惠

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘 要: 针对网络传输在控制系统中引发的问题, 提出在控制器节点采用针对延迟和丢包的补偿估计器, 以提高控制系统的性能. 当延迟小于一个采样周期且数据包传输率已定时, 将包含该补偿估计器的网络控制系统 (CEDP-NCS), 描述为具有两个事件的异步动态系统, 并推导出保证系统稳定的时变双线性矩阵不等式. 仿真结果表明, 所提出的方法能有效提高控制系统的性能.

关键词: 网络控制系统; CEDP-NCS; 网络延迟; 丢包;

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Compensation for Network-induced Delays and Packet Dropout and System Stability Analysis

SOGLO B ienvenu, YANG X ian-hui

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China Correspondent: YANG Xian-hui, E-mail: yangxh@mail.tsinghua.edu.cn)

Abstract Due to the influence of network transmissions on networked control systems (NCS), compensation and estimation for network-induced delays and packet dropout at the controller unit are proposed to improve the performance of control systems. Using a time driven sensor, an event and time driven controller and assuming that the delays are less than a sampling period with packet transmitted at a fixed rate, the system obtained by using the compensation and estimation methods for delays and packet drop in networked control system (CEDP-NCS) is modeled as an asynchronous dynamical system (ADS) with two events. A stability condition is derived in terms of time varying bilinear matrix inequalities (BMI). Simulation results prove that our approach can effectively improve the control system performance.

Key words: Networked control systems; CEDP-NCS; Delays; Packet drop

1 引 言

网络通信具有许多优点, 如节点间资源共享、互可操作、连接简便等, 从而推动了它在不同控制系统中的应用. 网络化控制系统 (NCS) 是指控制系统中传感器、控制器、执行器等单元, 通过网络连接构成的反馈控制系统. 网络的引入使得控制系统的分析和综合变得更加复杂. 因为网络作为信息传输的途径, 不可避免地会在控制系统中引发传输延迟、瞬时错误和数据包丢失等问题, 对控制系统的性能指标造成负面影响.

网络传输对控制系统的影响问题备受关注. Walsh 等^[1]考虑了连续模型和连续控制器, 针对 M/M/O 网络控制系统提出了 TOD 网络控制协议的概念, 并给出了解析的单数据包传输问题的全局稳定条件. Yang 等^[2]分析了延迟大于一个采样周期时网络控制系统的随机稳定性问题, 并利用随机优化理论来设计控制器. Babak^[3]针对丢包现象, 利用线性二次型控制方法对网络控制系统进行建模, 并讨论了整个系统的稳定条件. 为了降低丢包对控制系统的影响, 龙承念等^[4]提出一种补偿方案, 根据数据

收稿日期: 2004-12-24; 修回日期: 2005-03-16

基金项目: 国家 863 计划项目 (2002AA 412420).

作者简介: 索格罗 (1974—), 男, 贝宁人, 博士生, 从事网络控制系统等研究; 阳宪惠 (1947—), 女, 湖南澧县人, 教授, 博士生导师, 从事工业数据通信、网络控制系统等研究.

包是否丢失分别设计了开环估计器和闭环估计器

上述文献或只讨论网络延迟, 或只讨论数据包丢失, 而实际系统在网络传输时, 延迟和丢包是同时存在的 樊卫华等^[5]同时考虑传输延迟和数据包丢失的情况, 建立了网络控制系统的异步动态系统模型, 导出了系统指数稳定的充分条件

为提高网络控制系统的性能, 本文针对延迟和数据包丢失现象, 提出了在控制器节点同时采取补偿或估计的方法 (CEDP-NCS), 如图 1 所示 补偿方法针对网络延迟, 采用控制器建立的对象状态的近似模型和收到的带时间戳的单数据包来完成. 当数据包丢失时, 采用与上述相同的状态模型和已知的对象状态来实现对象状态的估计. 如果延迟小于一个采样周期且数据包传输率已定, 则整个网络控制系统可描述为具有两个事件的异步动态系统, 从而导出了时变的双线性不等式 (BM I), 以保证整个系统的稳定性

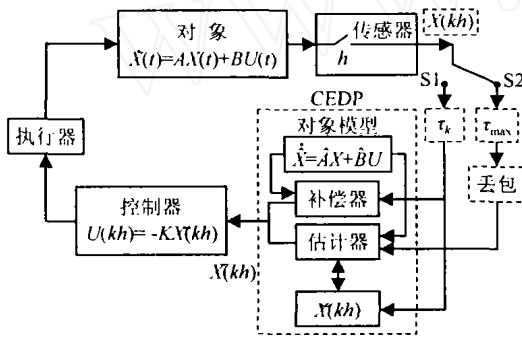


图 1 网络控制系统 CEDP-NCS 异步动态系统

2 网络控制系统 CEDP-NCS 的建模

为了便于分析, 现作如下假设:

- 1) 采用时间驱动传感器, 采样周期为 h ;
- 2) 控制器节点同时采用时间和事件驱动方式;
- 3) 网络延迟 $\tau_k < h$ 且是随机的, 网络只在传感器和控制器之间运行;
- 4) 当预先设定的定时器超过 $\tau_{\max} < h$, 且控制器未收到数据包时, 则以丢包处理

设被控过程由如下时间连续对象描述:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t), Y(t) = CX(t). \quad (1)$$

采用时间离散的控制

$$U(kh) = -K\bar{X}(kh), k = 0, 1, \dots \quad (2)$$

其中: $X \in R^n, U \in R^m, Y \in R^p; A, B, C, K$ 具有与之匹配的维数

根据式(1)和(2), 得到离散化的状态方程

$$X((k+1)h) = e^{Ah}X(kh) + \int_{kh}^{kh+h} e^{A(kh+h-s)}BU(kh)ds \quad (3)$$

假设没有引入网络时系统是稳定的, 网络控制

系统 CEDP-NCS 可模拟为一个以速率 r 关闭的开关 当开关位于 S1 时, 意味着带有 $X(kh)$ 的数据包被正确传送, 且控制器针对传输延迟采取补偿措施 根据图 1 中对象模型并利用式(3), $kh + \tau_k$ 时刻的状态为

$$\bar{X}(kh) = X(kh + \tau_k) = e^{A\tau_k}X(kh) + \int_{kh}^{kh+\tau_k} e^{A(kh+\tau_k-s)}B ds U((k-1)h).$$

因此当开关位于 S1 时, 有

$$\bar{X}(kh) = \begin{cases} \bar{X}((k-1)h), kh < t < kh + \tau_k; \\ X(kh + \tau_k) = \hat{\Phi}(\tau_k)X(kh) + \hat{\Gamma}(\tau_k)U((k-1)h), kh + \tau_k < t < (k+1)h; \\ \tilde{X}(kh) = X(kh), t < kh + \tau_k \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\hat{\Phi}(\tau_k) = e^{A\tau_k}, \hat{\Gamma}(\tau_k) = \int_0^{\tau_k} e^{A\tau_k-s}B ds$

当开关位于 S2 时, 意味着所传输的数据包丢失, 控制器采用估计器的输出 $\bar{X}(kh)$ 替代所丢失的数据包中的 $X(kh)$, 从而可估计出对象状态 $\bar{X}(kh) = X((k-1)h + h + \delta h)$. 运用 CEDP 对象模型和式(3), 得

$$X(kh + \delta h) = \hat{\Phi}(H)\tilde{X}((k-1)h) + \hat{\Gamma}(H)U((k-1)h).$$

由于数据包有可能连续丢失, 因此估计出 kh 时刻的值

$$\tilde{X}(kh) = \hat{\Phi}(h)\tilde{X}((k-1)h) + \hat{\Gamma}(h)U((k-1)h).$$

可见当开关位于 S2 时, 有

$$\bar{X}(kh) = \begin{cases} \bar{X}((k-1)h), kh < t < kh + \tau_{\max}; \\ X(kh + \delta h) = \hat{\Phi}(H)\tilde{X}((k-1)h) + \hat{\Gamma}(H)U((k-1)h), kh + \tau_{\max} < t < (k+1)h; \\ \tilde{X}(kh) = \hat{\Phi}(h)\tilde{X}((k-1)h) + \hat{\Gamma}(h)U((k-1)h), t < kh + \tau_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

其中: $H = (1 + \delta)h, \delta \in [0, \tau_{\max}/h]$ δ 的选择应使

$$J = \min_{\delta} \left| Y(\delta) - Y_{\text{ref}} \right| \quad (6)$$

其中: $Y(\delta)$ 是 CEDP-NCS 对不同 δ 值的输出, Y_{ref} 是控制系统的参考输出

考虑控制器信号在 $kh + \tau_k$ 时刻的变化, 则方程(3)可写成

$$X((k+1)h) =$$

$$\begin{aligned} &\Phi(h)X(kh) + \Gamma_0(\tau_k)U(kh) + \\ &\Gamma_1(\tau_k)U((k-1)h), \end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi(h) &= e^{A h}, \Gamma_0(\tau_k) = \int_0^{h-\tau_k} e^{A s} B ds, \\ \Gamma_1(\tau_k) &= \int_{h-\tau_k}^h e^{A s} B ds \end{aligned}$$

当采用式(4)和(7)时,如果系统的状态在事件 S1 发生,则可写成

$$\begin{cases} X((k+1)h) = \\ [\Phi(h) - \Gamma_0(\tau_k)K\hat{\Phi}(\tau_k)]X(kh) + \\ [\Gamma_1(\tau_k) - \Gamma_0(\tau_k)K\hat{\Gamma}(\tau_k)]U((k-1)h), \\ \tilde{X}(kh) = X(kh), \\ U(kh) = \\ -K\hat{\Phi}(\tau_k)X(kh) - K\hat{\Gamma}(\tau_k)U((k-1)h). \end{cases} \quad (8)$$

定义增广状态向量 $Z(kh) = [X^T(kh), \tilde{X}^T((k-1)h), U^T((k-1)h)]^T$, 则闭环系统为

$$Z((k+1)h) = \hat{\Psi}_1(k)Z(kh). \quad (9)$$

其中

$$\hat{\Psi}_1(k) = \begin{bmatrix} \Phi(h) - \Gamma_0(\tau_k)K\hat{\Phi}(\tau_k) & \dots & \Gamma_1(\tau_k) - \Gamma_0(\tau_k)K\hat{\Gamma}(\tau_k) \\ I & \dots & \vdots \\ -K\hat{\Phi}(\tau_k) & \dots & -K\hat{\Gamma}(\tau_k) \end{bmatrix}.$$

当事件 S2 发生时,运用式(5)和(7),系统的状态方程可写成

$$\begin{cases} X((k+1)h) = \\ \Phi(h)X(kh) - \Gamma_0(\tau_{\max})K\hat{\Phi}(H)\tilde{X}((k-1)h) + \\ [\Gamma_1(\tau_{\max}) - \Gamma_0(\tau_{\max})K\hat{\Gamma}(H)]U((k-1)h), \\ \tilde{X}(kh) = \hat{\Phi}(h)\tilde{X}((k-1)h) + \\ \hat{\Gamma}(h)U((k-1)h), \\ U(kh) = -K\hat{\Phi}(H)\tilde{X}((k-1)h) - \\ K\hat{\Gamma}(H)U((k-1)h). \end{cases} \quad (10)$$

因此闭环系统为

$$Z((k+1)h) = \hat{\Psi}_2 Z(kh). \quad (11)$$

其中

$$\hat{\Psi}_2 = \begin{bmatrix} \Phi(h) - \Gamma_0(\tau_{\max})K\hat{\Phi}(H) & \Gamma_1(\tau_{\max}) - \Gamma_0(\tau_{\max})K\hat{\Gamma}(H) \\ \vdots & \hat{\Phi}(h) & \hat{\Gamma}(h) \\ \vdots & -K\hat{\Phi}(H) & -K\hat{\Gamma}(H) \end{bmatrix}.$$

注 1 本文提出的 CEDP-NCS 建模方法是在对象状态均可测的条件下进行的. 如果控制器端的补偿器得不到对象状态的全部信息,则可运用现有改进的 Kalman 滤波器或其他预估方法

3 稳定性分析

定理 1^[6] 对于具有事件率约束的异步动态系

统,连续系统可由离散化的状态方程描述为

$$X((k+1)h) = f_s(X(kh)), s = 1, 2, \dots, N.$$

如果存在 Lyapunov 函数 $V(X(k)): R^n \rightarrow R_+$, 满足

$$\begin{aligned} &\beta_1 \|X(kh)\|^2 \leq V(X(kh)) \\ &\beta_2 \|X(kh)\|^2, \beta_{1,2} > 0 \end{aligned} \quad (12)$$

以及标量 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N > 0$, 使得

$$\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_N > \alpha > 1, \quad (13)$$

$$V(X((k+1)h)) - V(X(kh))$$

$$(\alpha_s^2 - 1)V(X(kh)), s = 1, 2, \dots, N. \quad (14)$$

其中: N 为系统中存在的事件个数, $r_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为这些事件的发生率, 其衰减指数大于 α . 则该系统是指数稳定的.

证明参见文献[7]

推论 1 对于由式(9)~(11)描述的网络控制系统 CEDP-NCS, 设数据包传输的成功率为 r , 如果存在 Lyapunov 函数 $V(Z(kh)) = Z^T(kh)PZ(kh)$, P 对称正定, 且满足

$$\beta_1 \|Z(kh)\|^2 \leq V(Z(kh))$$

$$\beta_2 \|Z(kh)\|^2, \beta_{1,2} > 0$$

以及存在标量 $\alpha, \alpha > 0$, 满足

$$\begin{cases} r \log \alpha + (1-r) \log \alpha > \log \alpha > 0; \\ \hat{\Psi}_1^T(k)P\hat{\Psi}_1(k) - \alpha^{-1}P\alpha^{-1} < 0, k = 1, 2, \dots, m; \\ \hat{\Psi}_2^T P \hat{\Psi}_2 - \alpha^{-1}P\alpha^{-1} < 0, 0 < P. \end{cases} \quad (15)$$

(16)

其中 m 为成功传输到控制器的对象状态个数. 该系统是指数稳定的. 不等式(15)和(16)是以 P 和 $\log \alpha, \log \alpha$ 为参数的时变的双线性矩阵不等式 (BMI).

证明 由式(13)可直接推出 $\alpha \alpha^{1-r} > \alpha > 1$. 对其取对数即得式(15). 由式(14)得 $V(Z((k+1)h)) - V(Z(kh)) = (\alpha_s^2 - 1)V(Z(kh)), s = 1, 2$, 即

$$V(Z((k+1)h)) \leq \alpha^2 V(Z(kh)). \quad (17)$$

由 $V(Z(kh)) = Z^T(kh)PZ(kh)$, 当 $s = 1$ 时运用式(9), 则式(17)变为 $\hat{\Psi}_1^T(k)P\hat{\Psi}_1(k) - \alpha^{-1}P\alpha^{-1} < 0, k = 1, 2, \dots, m$. 同理, 当 $s = 2$ 时运用式(11), 则式(17)变为 $\hat{\Psi}_2^T P \hat{\Psi}_2 - \alpha^{-1}P\alpha^{-1} < 0$

4 数值计算与仿真结果

为实现所提出的 CEDP-NCS 模型, 本文采用文献[8]设计的基于代理的网络控制系统仿真平台 [8] 运用网络仿真软件 NS-2 26^[9] 和改进的 Multi-data UDPmd 数据包传输应用数据, 以仿真网络化控制系统中的数据传输

图 2 显示了 4 个被控对象 (1, 2, 3, 4) 和 TCP/FTP 信源 (0) 通过路由器 (5, 6) 分别与控制器

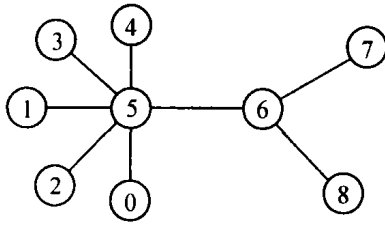


图 2 数据包仿真画面

(8) 和 TCP/Sink(7) 连接的数据包传输过程
考虑状态方程

$$\dot{X}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} X(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} U(t),$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} X(t).$$

控制器增益 $K = [27 \ 11]$ (极点配置在 $-5 \pm j$), 初始条件为 $[1 \ 0]^T$. 系统采用连续的对象和离散的控制器 $u_k = -K\bar{X}_k$. 设对象的近似模型为 $A = A, B = B$, 以 $h = 0.05 \text{ s}$ 采样对象 1 的状态 (对象 1 和对象 2 采用同样的采样周期, 其他对象采样周期从 $[0.045 \text{ s} \ 0.055 \text{ s}]$ 中随机选择).

依据图 2 的仿真结果, 仿真时间为 3.0 s , 网络传输延迟 $\tau_k = [37.7 \text{ ms} \ 48.2 \text{ ms}]$, 丢包率为 13.33% ; 设 $\tau_{\max} = 48.5 \text{ ms}$, 利用上节的仿真环境, 选取 $\delta = \frac{\tau_{\max}}{10h} p, p = 0, 1, \dots, 10$, 满足 $\delta = 0.194$ 的要求

运用 Matlab-LMI 工具箱^[10], 根据式 (15) 和 (16) 得到 CEDP-NCS ($\delta = 0.194$) 可行的 α 和 P 参数值

$$\alpha = 1.1644, \alpha_c = 0.6470,$$

$$P = \begin{bmatrix} 1.6232 & 0.3225 & -0.2489 \\ 0.3225 & 0.1358 & -0.0671 \\ -0.2489 & -0.0671 & 0.7379 \\ -0.0662 & -0.0686 & 0.2864 \\ 0.0098 & 0.0014 & 0.0225 \\ -0.0662 & 0.0098 & \\ -0.0686 & 0.0014 & \\ 0.2864 & 0.0225 & \\ 0.1710 & 0.0120 & \\ 0.0120 & 0.0015 & \end{bmatrix}.$$

网络控制系统 CEDP-NCS 的衰减指数为 $\alpha = \alpha_c \alpha_c^r = 1.0767$. 没有采取任何措施的 NCS 的衰减指数为 $\alpha = 1.0570$

进一步利用图 2 对 CEDP-NCS 随时间变化进行仿真, 并与没有 CEDP 的网络控制系统进行比较, 结果如图 3 和图 4 所示. 仿真结果以及计算的系统衰

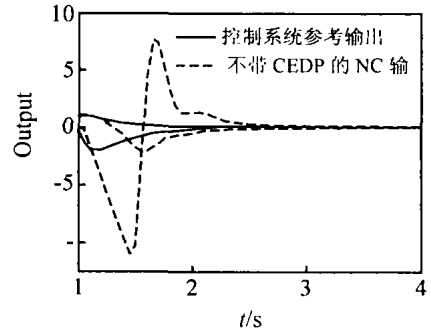


图 3 不带 CEDP 的网络控制

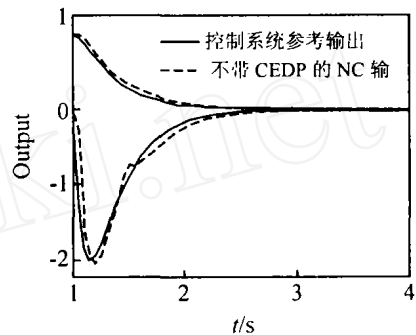


图 4 CEDP-NCS 系统仿真输出

减指数表明, 所提出的 CEDP-NCS 方法能够提高受延迟和丢包影响的网络控制系统的性能.

5 结 语

本文针对网络控制系统中存在的延迟和数据丢包现象, 提出采用相应的补偿和估计器的方法, 减少延迟和丢包对控制系统性能的负面影响. 将针对延迟丢包的补偿估计器的网络控制系统 CEDP-NCS, 描述为具有两个事件的异步动态系统, 推导出保证系统稳定的时变双线性不等式 (BM I), 并通过 BM I 方程解得出系统的衰减指数. 仿真结果表明, 所提出的方法能有效提高网络控制系统的性能

参考文献 (References)

[1] Walsh G, Ye H, Bushnell L. Stability Analysis of Networked Control Systems [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2002, 10(3): 438-446

[2] Yang Y, Xu D, Tan M, et al. Stochastic Stability Analysis and Control of Networked Control Systems with Randomly Varying Long Time-delays [A]. *Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation* [C]. Hangzhou, 2004: 1391-1395

[3] Babak A S. Stability of Networked Control Systems in the Presence of Packet Losses [A]. *Proc of IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Hawaii, 2003: 676-681.

(下转第 209 页)

- [6] 王子才, 张彤, 王宏伟. 基于混沌变量的模拟退火优化方法[J]. *控制与决策*, 1999, 16(4): 382-384
(Wang Z C, Zhang T, Wang H W. Simulated Annealing Algorithm Based on Chaotic Variable [J]. *Control and Decision*, 1999, 16(4): 382-384)
- [7] 罗小平, 韦巍. 一种基于生物免疫遗传学的新优化方法[J]. *电子学报*, 2003, 31(1): 59-62
(Luo X P, Wei W. A New Optimization Method on Immunogenetics [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(1): 59-62)
- [8] 葛红, 毛宗源. 免疫算法几个参数的研究[J]. *华南理工大学学报*, 2002, 30(12): 15-18
(Ge H, Mao Z Y. Research on Parameters of Immune Algorithm [J]. *J of South China University of Technology*, 2002, 30(12): 15-18)
- [9] 姚俊峰, 梅焱, 彭小奇. 混沌遗传算法(CGA)的应用研究及其优化效率评价[J]. *自动化学报*, 2002, 28(6): 935-942
(Yao J F, Mei C, Peng X Q. The Application Research of the Chaos Genetic Algorithm (CGA) and Its Evaluation of Optimization Efficiency [J]. *Acta Automation Sinica*, 2002, 28(6): 935-942)
- [10] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 等. *遗传算法及其应用*[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996: 92-97.
(Chen G L, Wang X F, Zhuang Z Q, et al. *Genetic Algorithm and Its Application* [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 1996: 92-97.)
- [11] 李亚东, 李少远. 一种新的遗传混沌优化组合方法[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(1): 143-145
(Li Y D, Li S Y. A New Genetic Chaos Optimization Combination Method [J]. *Control Theory and Applications*, 2002, 19(1): 143-145)

(上接第 204 页)

- [4] 龙承念, 代双凤, 关新平. 具有数据包丢失的网络控制系统的切换补偿策略研究[A]. *第 5 届全球智能控制与自动化大会论文集*[C]. 杭州, 2004: 1348-1351.
(Long C N, Dai S F, Guan X P. The Compensation Method of Networked Control System with Data-packet Dropout [A]. *Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation* [C]. Hangzhou, 2004: 1348-1351.)
- [5] 樊卫华, 蔡骅, 陈庆伟, 等. 基于异步动态系统的网络控制系统建模[J]. *东南大学学报*, 2003, 33(2): 194-196
(Fan W H, Cai H, Chen Q W, et al. Networked Control Systems Modeling Using A synchronous Dynamical System [J]. *J of Southeast University*, 2003, 33(2): 194-196)
- [6] Hassibi A, Boyd S P, How J P. Control of A synchronous Dynamical System s with Rate Constraints on Events[A]. *Proc of the IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Phoenix, 1999: 1345-1351.
- [7] Rabello A, Bhaya A. Stability of A synchronous Dynamical System s with Rate Constraints and Applications [J]. *Control Theory Applications*, 2003, 150(5): 546-550
- [8] Soglo A B, Yang X. Compensation Method for Long Time Network-induced Delays in Control System s[A]. *Proc of the 6th IASTED Int Conf on Intelligent Systems and Control* [C]. Honolulu, 2004: 221-226
- [9] Kevin F, Varadhan K. *The ns Manual: The VINT Project* [M]. Berkeley: USC/ISI and Xerox Park, 2003
- [10] Gahinet P, Nemirovski A, Laub A, et al. *MA TLAB LMI Control Toolbox* [M]. Natick: Math Works, 1995
- [11] Boyd S, Ghaoui L, Feron E, et al. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory* [M]. Philadelphia: SIAM, 1994