

网络控制系统综合模型研究

彭 晨, 岳 东

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 目前网络控制问题在国内外引起研究者极大的研究兴趣. 在以往网络控制研究中存在网络建模方法太细, 只能针对一类网络特殊情况建模的问题. 本文提出数据包单包传输情况下包含时变网络时延、网络传输丢包及错序等网络传输非理想过程情况下的通用模型. 并提出将采样周期与网络时延统一于一常数约束下的分析方法. 对控制与调度协作方法的研究具有较大的指导作用. 最后基于提出模型利用 IM I 方法进行仿真, 结果说明该方法的有效性.

[关键词] 网络控制系统, 建模, 时滞, 线性矩阵不等式

[中图分类号] TP393 TP273 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2005) 03-0024-04

A Study of Synthetic Model of Networked Control Systems

PENG Chen, YUE Dong

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Jiangsu Nanjing 210042, China)

Abstract Networked control has appealed more and more researchers both at home and abroad. In the former study of networked control, the method of Networked Control System (NCS) is too detailed and only applicable to special instances. The paper presents the general synthetic model of NCS, including time-varying network-delay and data drop-out under single-packet transport. This analytic method makes sampling-time and network-induced delay under a constant constraint and has great supervised effect on control and scheduling co-design. Simulation results show that the proposed method is effective.

Key words networked control systems, synthetic model, time-delay, IM I

0 引言

网络控制系统 NCS (Networked control systems) 是一种全分布式、网络化实时反馈控制系统. 是指某个区域现场传感器、控制器及执行器和通信网络的集合, 用以提供设备之间的数据传输, 使该区域内不同地点的用户实现资源共享和协调操作. 随着电子计算机和网络通信技术的发展以及控制和管理要求的不断提高, 使得控制系统正由封闭的集中体系加速向开放分布式体系发展. 集中式控制系统和集散式控制系统都有一些共同的缺点, 即随着现场设备的增加, 系统布线十分复杂, 成本大大提高, 抗干扰性较差、灵活性不够、扩展不方便等. NCS 对于网络的实时性要求更高, 网络结构也更加分散化. 这种网络化的控制模式具有信息资源能够共享、连接线数大大减少、易于扩展、易于维护、高

效率、高可靠性、灵活等优点. NCS 的研究正成为国际学术界研究的一个热点^[1, 2].

网络控制系统的建模是 NCS 分析、仿真和设计的基础. 虽然 NCS 早已被提出并取得一系列成果, 但 NCS 的建模仍没有很好解决. 本文在分析已有的建模方法基础上, 提出自己的建模方法.

1 NCS 传统建模方法分析

NCS 建模是研究网络控制系统首先遇到的问题, 目前已有的建模方法或是连续系统方法, 或是离散系统方法, 或是混合系统 ADS (asynchronous dynamical systems) 模型. Walsh^[1, 2]提出的连续系统建模方法, 网络通用配置为: (1) 控制规则设计不考虑网络存在; (2) 假设控制器是连续的且忽略控制器采样延时; (3) 忽略传输时延; (4) 网络传输没有误差及没有丢包、误码和错序等发生; (5) 没

收稿日期: 2004-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60474079) 和江苏省高校自然科学基金资助项目 (2003kzxtsjb131).

作者简介: 彭晨 (1972-), 副教授, 主要从事网络控制、供应链等方面的研究. E-mail: PC@ email.njnu.edu.cn

有观测噪声存在. 对定常系统的被控对象、控制器分别建模, 然后通过网络推导误差, 结合控制器与被控对象的增广状态建立 NCS 模型. 模型需要在控制器端应用预测或滤波等方法获取被控对象的输出估计, 且网络在系统建模中作为扰动存在. 从建模的前提假设可以看出, 此建模方法不能分析网络异常行为如丢包及允许的最大丢包率、错序及错序处理方法等, 另外将网络控制作为连续对象处理, 在网络时延较大或采样周期较大的情况下, 该方法不能适用. 此外通过此建模方法对网络控制系统的稳定性分析结果表明, 此方法获得的最大允许时延保守性太强^[2]. Zhang Wei^[4-5]提出 NCS 动力学模型, 模型即包含连续变量又含离散变量的混合系统模型, 对时延大于或小于采样周期分别分析. 小于采样周期采用连续模型离散化方法, 得到包含时延的系统离散化模型, [10] 中采用此模型进行 H_∞ 鲁棒控制器设计问题时将其中的一段时延作为扰动处理, 没有充分利用此信息, 在时延小于采样但可能无限趋于采样周期的时候 ($\lim_{k \rightarrow \infty} \tau_k = T$, $\tau_k < T$), 显然就会发现此种处理方法的缺点: 网络时延大于采样周期情况, 只能建立一种时延处于两个连续周期期间的特殊情况的模型 ($(l-1)h < \tau_k < lh$, $l > 1$). [9] 中针对此情况, 运用 LM I 方法得到状态反馈控制器的设计方法, 但运用缓冲区方法假设网络延时符合此条件, 显然条件过于苛刻. [4-5] 中又分别针对单包传输、多包传输和有数据包丢失的系统分别建立相应模型, 但网络传输过程中存在不确定因素, 这样将网络时延与采样周期比较来分别建模及根据是否丢包来分别建模的方法, 有很大的局限性. [6] 中针对 [5] 中的状态反馈不能完全观测情况和没有考虑系统噪声及控制器本身的动态问题, 对 [5] 模型建行了拓展, 采用输出反馈, 考虑系统噪声及控制器本身的动态问题分别建立单包多包有数据丢失等的模型, 但同样存在难于应用的问题. [7] 基于异步动态事件建模, 本质上就是 [4] 中有丢包情况的建模, 只不过在概念上将开关闭合状态理解为网络处于空闲状态, 可以成功传输; 将开关处于打开状态理解为网络中有优先级比传感器节点高的节点正在传输数据, 传感器节点放弃发送, 等待下一周期的到来再进行采样和发送, 和信息已发送, 但在传输过程中丢失情况.

总结目前已有的网络控制系统建模方法存在这样几个问题:

(1) 网络理想化. 大多不考虑网络影响或网络异常如丢包、错序等情况.

(2) 网络模型过于细化. 针对一类特殊情况建

模, 在实际应用中价值不大.

(3) 目前主要建模对象是线性时不变定常系统, 对于时变不确定等系统, 缺乏有效的处理方法.

(4) 缺乏网络系统统一模型, 控制系统性能与网络服务质量 QOS (Quality of Services) 联系不紧密. 没有形成控制与网络协作分析设计的模型.

2 网络控制综合模型

在网络控制系统中, 假设被控对象是时滞不确定系统, 可描述为:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x}(t) + (\mathbf{A}_1 + \Delta\mathbf{A}_1)\mathbf{x}(t - d_1) \\ &\quad + (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})\mathbf{u}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t)$$

其中, $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$, $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^m$, 分别是适当维数的状态矢量和控制矢量; \mathbf{A} , \mathbf{A}_1 和 \mathbf{B} 为具有适当维数的常数矩阵; $\Delta\mathbf{A}$, $\Delta\mathbf{A}_1$ 和 $\Delta\mathbf{B}$ 为具有时变特征的不确定参数; d_1 为定常状态时延. 假设不确定参数 $\Delta\mathbf{A}$, $\Delta\mathbf{A}_1$ 和 $\Delta\mathbf{B}$ 范数有界且满足:

$$[\Delta\mathbf{A} \ \Delta\mathbf{A}_1 \ \Delta\mathbf{B}] = \mathbf{D}\mathbf{F}(t)[\mathbf{E}_1 \ \mathbf{E}_2 \ \mathbf{E}_3] \quad (2)$$

其中, $\mathbf{F}(t) \in \mathbf{R}^{ij}$ 为满足 $\mathbf{F}^T(t)\mathbf{F}(t) < \mathbf{I}$ 的不确定矩阵, \mathbf{D} , \mathbf{E}_1 , \mathbf{E}_2 , \mathbf{E}_3 为具有合适维数的常数矩阵.

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, 式 (1) 中 $\mathbf{u}(t)$ 通过零阶保持器实现, 真实控制输入是分段连续函数. 此外, 在网络传输过程中考虑网络延迟、丢包和错序等的影响后, 实际的控制系统可表示如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x}(t) + (\mathbf{A}_1 + \Delta\mathbf{A}_1)\mathbf{x}(t - d_1) \\ &\quad + (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})\mathbf{u}(t), \end{aligned}$$

$$t \in [i_k h + \tau_k, i_{k+1} h + \tau_{k+1}) \quad (3)$$

$$\mathbf{u}(i) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t - \tau_k), t \in [i_k h + \tau_k,$$

$$k = 1 \ 2 \ 3 \ \dots]$$

其中 h 为采样周期, $i_k (k = 1 \ 2 \ 3 \ \dots)$ 是一些整数且 $\{i_1, i_2, i_3, \dots\} \subset \{0 \ 1 \ 2 \ 3 \ \dots\}$, τ_k 是时间延迟, 此值表示从被控制对象采样时刻到执行器执行控制信号的时间间隔. 显然 $\bigcup_{k=1}^{\infty} [i_k h + \tau_k, i_{k+1} h + \tau_{k+1}) = [t_0, \infty)$, $t_0 \geq 0$ 文中, 我们假设在第一个控制信号到达控制对象之前 $\mathbf{u}(t) = 0$ 并且存在一个常数 $\eta > 0$ 使 $(i_{k+1} - i_k)h_k + \tau_{k+1} \leq \eta$ $k = 1 \ 2 \ 3 \ \dots$

系统 (3) 可重写为:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x}(t) + (\mathbf{A}_1 + \Delta\mathbf{A}_1)\mathbf{x}(t - d_1) \\ &\quad + (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})\mathbf{K}\mathbf{x}(i_k h), \end{aligned}$$

$$t \in [i_k h + \tau_k, i_{k+1} h + \tau_{k+1}) \quad (4)$$

显然系统 (4) 的解在 $t \in [i_k h + \tau_k, i_{k+1} h + \tau_{k+1})$ 上是连续的, 由于 $\bigcup_{k=1}^{\infty} [i_k h + \tau_k, i_{k+1} h + \tau_{k+1}) = [t_0, \infty)$, $t_0 \geq 0$ 可扩展为系统 (4) 的解在 $t \in [t_0, \infty)$ 是连续的.

注 1: 从延迟 τ_k 定义可知此延迟即包含传感器到控制器时延, 又包含控制器到执行器时延. 另外传输时延、等待时延、处理时延等都包含在此时延中.

注 2: 式 (3) 考虑的是在有网络引入作用后控制信号分段连续的实际控制系统作用模型, 没有运用将被控对象、控制器和网络三者分别考虑再通过误差等建立联系的建模方式. 没有将系统模型离散化, 不会由于离散化带来控制采样抖动、周期性振荡等情况.

注 3 式 (3) 中, $\{i_b, i_2, i_3, \dots\}$ 是 $\{0, 1, 2, 3, \dots\}$ 的子集, 此处不需 $i_{k+1} > i_k$. 当 $\{i_b, i_2, i_3, \dots\} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ 时, 表示传输过程中没有错序现象; 当 $i_{k+1} < i_k$ 时表示包没有按采样时序发送, 后采样的信息可能经不同路由先到达控制器, 传输过程中有错序现象, 如图 1 所示.

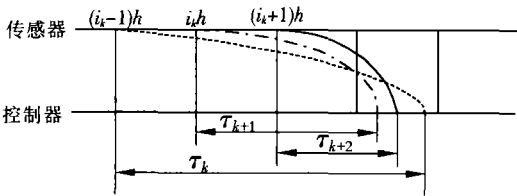


图 1 网络传输错序及丢包示例

注 4 式 (3) 中, 当 $|i_{k+1} - i_k| > 1$ 时, 表示发生了丢包现象, 丢包个数为 $|i_{k+1} - i_k - 1|$. 式 (3) 中并不要求 $\tau_{k+1} = \tau_k$, 表示了网络控制时延的随机性、不确定性, 表达网络 QOS 对网络控制效果的影响.

模型中假设存在一个常数 $\eta > 0$ 使 $(i_{k+1} - i_k)h + \tau_{k+1} \leq \eta, k = 1, 2, 3, \dots$, 其中并不要求采样周期是定常的, 这样就为研究控制与网络调度协作时, 通过主动丢包或在一定允许范围内调节采样周期

等调度策略, 找到一个统一于模型的分析方法. 如当 $i_{k+1} = i_k + 1$ 时 $h + \tau_{k+1} \leq \eta, k = 1, 2, 3, \dots$, 表示采样周期与时延综合性能受约束, 而不要求采样周期与时延关系, 如不要求 $h > \tau_{k+1}$.

模型 (3) 表示的非理想网络情况如图 1 所示, 从图中可以看出 $h + \tau_{k+1} \leq \tau_k, 2h + \tau_{k+2} \leq \tau_k$, 先采样信号后到, 表示有错序情况发生; 假如采用主动丢包调度方法将发生错序的先采后到的信息丢弃 (如图中点线所示), 表示在 $(t = (i_k - 1)h)$ 时刻丢包情况发生.

因为模型 (3) 同时考虑了网络传输时延特征及网络丢包情况、定常或时变、时滞不确定或确定等情况、延迟大于或小于采样周期情况、定常或变采样周期情况, 所以可作为一类 NCS 单包传输的通用模型. 模型 (3) 与 [2, 4, 6] 中模型相比, 没有将连续过程离散化, 不是一种离散随机模型, 将网络传输过程中有无数据包丢失、错序等问题统一于模型 (3) 中, 并且可根据时延及采样周期的和小于一常数 $((i_{k+1} - i_k)h + \tau_{k+1} \leq \eta, k = 1, 2, 3, \dots)$ 来研究时延与采样周期的选择、丢包率等控制与调度协作问题, 为 NCS 研究提出一种新思路^[9].

3 模型应用示例

应用提出的 NCS 模型 (3), 假设系统全状态可测, 基于李亚普诺夫函数的稳定性分析方法和相关控制器设计方法, 应用 IMI 方法, 可推出如下定理 1 (证明过程略).

定理 1 对于给定的标量 η 和 $\lambda_i (i = 2, 3, 4)$, 假设存在标量 $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0, \varepsilon_3 > 0$ 和适当维数的矩阵 $P \in \mathbb{R}^{n \times n}, Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 非奇异矩阵 X 和矩阵 $Y, Z_i (i = 1, 2, 3), M_i (i = 1, 2, 3, 4)$, 如果

$$\begin{bmatrix} P_{11} + \Omega & P_{12} & P_{13} & P_{14} & \eta M_1 & \lambda E_1^T & 0 & 0 \\ * & P_{22} + \lambda_2 \Omega & P_{23} & P_{24} & \eta M_2 & 0 & \lambda E_2^T & 0 \\ * & * & P_{33} + \lambda_3 \Omega & P_{34} & \eta M_3 & 0 & 0 & \lambda Y^T E_3^T \\ * & * & * & P_{44} + \lambda_4 \Omega & \eta M_4 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\eta Q & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -\lambda \varepsilon_1 I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -\lambda \varepsilon_2 I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & -\lambda \varepsilon_3 I \end{bmatrix} < 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P_{14} &= P_{14} - \lambda_4 X A^T - X^T + M_4^T, \\ P_{22} &= -S_{12} - \lambda_2 A_1 X^T + \lambda_2 X A_1^T, \\ P_{23} &= \lambda_2 B Y + \lambda_3 X A_1^T - M_2^T, \\ P_{24} &= -\lambda_2 X^T + \lambda_4 X A_1^T, \\ P_{33} &= \lambda_3 B Y + \lambda_3 Y^T B^T - M_3^T - M_3^T, \\ P_{44} &= -\lambda_3 X^T + \lambda_4 Y^T B^T - M_4^T, \end{aligned}$$

$$(i_{k+1} - i_k)h + \tau_{k+1} \leq \eta, \quad k = 1, 2, 3 \quad (6)$$

$$1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 > 0 \quad (7)$$

其中:

$$P_{11} = S_{11} A X^T + X A^T + M_1^T + M_1^T,$$

$$P_{12} = A_1 X^T + \lambda_2 X A_1^T + M_2^T,$$

$$P_{13} = B Y + \lambda_3 X A_1^T - M_1^T + M_3^T,$$

$\mathcal{K}_{A4} = \eta \mathcal{R} - \lambda_4 X^T - \lambda_4 X,$
 $\Omega = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \mathcal{D} \mathcal{D}^T, \lambda = 1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4$
则具有状态反馈系统增益 $K = YX^{-T}$ 的系统 (4) 是渐近稳定的.

为验证上述建模方法的有效性给出如下的具有不确定性状态延时系统,

$$x(t) = (A + \Delta A)x(t) + (A_1 + \Delta A_1)x(t-d) + (B + \Delta B)u(t) \tag{8}$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.1 \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} -0.1 & 0 \\ 0 & -0.1 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E_1 = [0.2 \ 0],$$

$E_2 = [0 \ 0.1], \quad E_3 = 0.4$ 网络控制器的反馈增益设计为 $K = YX^{-1}$, 要求解出最大允许综合时滞 η_{max} 保证系统 (4) 的稳定性, 应用理论 1 在选取参数 $\lambda_1 = -1.1 \ \lambda_2 = 0.5 \ \lambda_3 = 8.4$ 的情况下求得 η_{max} 为 3.01, 相应的反馈增益为 $K = [-0.2855 \ -2.2768]$. 总而言之, 只要 $\eta \leq 3.01$, 系统 (4) 在选择网络控制器反馈增益为 $K = [-0.2855 \ -2.2768]$ 是渐进稳定的. 与上述方法类似, 假设 $E_1 = E_2 = E_3 = 0$ 不具有不确定性的系统 (4) 应用理论 1 选取参数 $\lambda_1 = -1.1 \ \lambda_2 = 0.5 \ \lambda_3 = 8.5$ 可以算法出 η_{max} 为 4.87 相应的反馈增益为 $K = [-0.1530 \ -1.5303]$ 算法的搜索过程如图 2 所示. 从图 2 中我们看出不同的 $\lambda_i (i = 1 \ 2 \ 3)$ 组合, 如组合 1: $\lambda_1 = -1.1 \ \lambda_2 = 0.5 \ \lambda_3 = 8.4$ 与组合 2: $\lambda_1 = -1.1 \ \lambda_2 = 0.4 \ \lambda_3 = 8.3$ 可以得出相同的 η 值 3.01

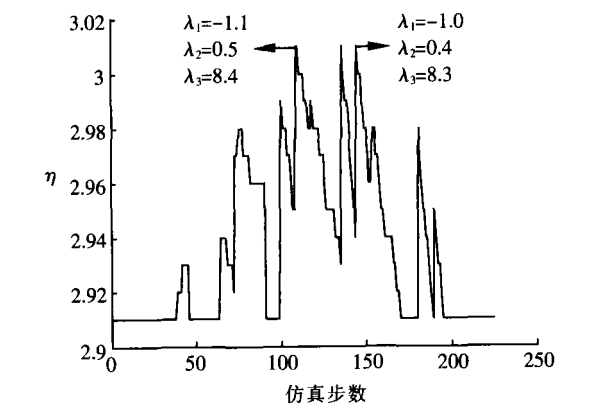


图 2 不同组合 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的 η 值

据 (6) $(i_{k+1} - i_k)h + \tau_{k+1} \leq \eta$ 假设已知采样周期 h 可以得到采样周期、丢包率、网络推导延时间的关系, 如表 1 所示. 特定的网络具有特定的网络时延, 如 CAN 网络具有时延分布已知的特征, 对于特定网络的特定延时可通过调整采样周期 (h) 使系统能容忍一定的丢包率 (e), 这为网络控制的

调度和丢包问题及变时滞问题提供一种全新的分析方法.

表 1 采样周期、丢包率及网络时延间关系

η_{max}	采样周期 (h)	丢包数 (e)	网络延时 (τ)
3.01	0.50	1	2.51
		2	2.01
		3	1.51
		4	1.01
		5	0.51
	1.00	1	2.01
		2	1.01

4 结论

在分析已有网络控制系统模型优缺点基础上, 针对传统建模方法太细、只能针对一类网络特殊情况建模的问题, 提出单包传输情况下的包含各种网络传输情况下的通用模型, 其中将采样周期与网络时延统一于一常数约束下的分析方法, 对控制与调度协作方法的研究具有较大的指导作用. 基于模型 (4) 的保性能控制及 H_2/H_∞ 控制是下一步将要研究的重点.

[参考文献]

[1] Ye Hong. Research on networked control system [D]. University of Maryland, 2000.
[2] Walsh G C, Ye H, Linda G, et al. Stability analysis of networked control system [J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 438-446.
[3] Octavian V Beldiman. Networked control systems [D]. Duke University, 2001.
[4] Zhang Wei. Stability analysis of networked control [D]. Case Western Reserve University, 2001.
[5] Zhang Wei, Michael S Branicky, Stephen M Phillips. Stability of networked control system [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.
[6] 朱其新, 胡寿松. 网络控制系统的分析与建模 [J]. 信息与控制, 2003, 32(1): 5-8.
[7] 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 (自然科学版), 2003, 33(2): 194-196.
[8] Yoo HoJun, Ryu HeeSeob, Yoo KyungSang et al. Compensation of networked control systems using LM F-Based Delay-dependent optimization method [C]. SICE 2002, 364-369.
[9] Yue D, Han Q L, Peng Chen. State feedback controller design of networked control systems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems - II, 2004, 51(11): 640-644.
[10] 姜培刚, 姜偕富, 李春文, 等. 基于 LM 方法的网络化控制系统的 H_∞ 鲁棒控制 [J]. 控制与决策, 2004, 19(1): 17-21.

[责任编辑: 刘健]