

# 一种基于模型的输出反馈网络化控制系统\*

刘松暉<sup>1</sup>, 吴俊<sup>1</sup>, 徐巍华<sup>1</sup>, 陈生<sup>2</sup>

(1.工业控制技术国家重点实验室 浙江大学先进控制研究所, 浙江 杭州 310027; 2.南安普敦大学 电子与计算机学院, 英国 南安普敦 SO17 1BJ)

E-mail: [shliu@ipc.zju.edu.cn](mailto:shliu@ipc.zju.edu.cn) Tel: 0571-87952233-808

**摘要:** 本文提出一种基于模型的输出反馈网络化控制系统。其主要思想是通过引入对象的输入输出模型和缓存器来克服网络造成的信息反馈不及时。该系统在不能获得反馈信息的时候, 可以利用对象模型的输出值近似代替对象的输出值计算控制量, 而在网络通畅时刻则利用对象输出计算控制量并刷新模型。给出了具体的算法, 利用仿真示例验证了算法的有效性。

**关键词:** 网络控制系统; 网络时延; 模型; 输出反馈

**中图分类号:** TP 273

**文献标识码:** A

## 1. 引言

在传统的控制系统当中, 每一对传感器/控制器独立分配一个信道, 这种点对点的控制系统具有良好的实时性和可靠性。但在现代复杂工业过程中, 需要控制的节点成千上万, 独立分配信道势必使系统昂贵难以接受, 不易安装维护。随着计算机网络技术、通信技术等飞速发展, 网络控制系统 NCS (Networked Control Systems) 的出现解决了这个难题。在 NCS 当中, 所有的控制器和传感器以及其他智能现场设备都共用一个信道来传输数据, 实现了现场设备控制的分布化和网络化, 具有信息资源共享、连接数大大减少、易于扩展维护、高效率和灵活等优点。然而, 由于所有设备分时占用同一个网络信道, 而网络的承载能力和通信带宽有限, 必然会造成传感器的测量信息经常不能及时送达控制器的情况, 成为网络化控制的一个难点问题。

针对网络引入导致的上述控制难题, 许多研究者提出多种旨在降低其负面影响的控制策略<sup>[1,2]</sup>。这些策略可分为三类, 第一类从保证控制系统的控制性能 QoP (Quality of performance) 入手, 设计各种控制策略保证系统性能和稳定性<sup>[3,4,5]</sup>。这类策略的缺点是忽略了复杂的网络行为, 简单地将网络对系统的性能的影响归入各种不同时延, 丢包的结果, 片面强调控制系统稳定性和控制性能; 第二类控制策略则从保证控制网络服务质量 QoS (Quality of Service) 角度入手, 将问题归结为网络的调度问题, 例如 Zuberi, Cena 等采用给不同数据设定不同优先级的策略来配置带宽的使用<sup>[8,9]</sup>。这类控制策略侧重于保证网络时延的有界性、带宽资源利用率的提高, 而将控制系统性能简单归结为信息传输的实时性和可靠性, 缺少对网络化控制系统性能影响的确切研究; 第三类控制策略结合 QoP 和 QoS 的优点, 在设计控制系统同时考虑网络实现的问题, 有利于系统性能的总体提升, 因而这种策略已经成为网络化控制系统研究的主流。Hong 提出了一种采样时间调度方法用来恰当地选择一个采样时间周期, 在这个采样周期下网络时延对系统的控制性能影响不大, 并且不使系统失稳<sup>[10]</sup>。Montestruque 等提出了一种基于状态模型的网络化控制方法, 在控制器节点一侧建立一个关于被控对象的状态模型, 在网络未接通时刻, 利用此模型的状态作为对象状态的估计值进行状态反馈, 而在网络接通时刻, 就直接利用对象状态进行状态反馈<sup>[6,7]</sup>。这种方法可以在保证系统稳定性和性能的同时, 尽量减少对网络的使用从而降低网络负荷。

文献[6][7]均采取状态反馈控制结构, 在实际工程应用中, 直接测量状态往往是很困难的, 而输出信号的测量要容易的多。针对这一点, 我们提出了一种基于输入输出模型的输出反馈网络化控制系统。本文讨论基于下面假设: 整个网络化控制系统的延时仅存在于传感器和控制器之间。这在实际中有许多例子, 例如结合现场总线接口的智能仪表控制器, 以及工

\*本文工作得到国家自然科学基金(60374002、60421002)、973 计划(2002CB312200)、教育部新世纪人才支持计划(NCET-04-0547)和英国皇家工程院的资助

业应用中复杂的 PLC 系统等。

本文后面内容安排为：第 2 节介绍基于模型的输出反馈网络化控制系统的结构及其算法；第 3 节用一个不稳定被控对象仿真验证本文算法的有效性；第 4 节简要总结本文的工作。

## 2. 输出反馈网络化控制系统算法

由于网络的引入导致信息反馈滞后，如图 1 所示，网络化控制系统一般都会在控制器前加入一缓存器来缓存最近一次反馈回来的信息，以便在无反馈信息到来时将其当作当前时刻的反馈值送往控制器进行运算。该方法缺点在于当网络时延较大时，当前可用反馈值严重过时，这对实时性要求高的控制系统是不可容忍的。

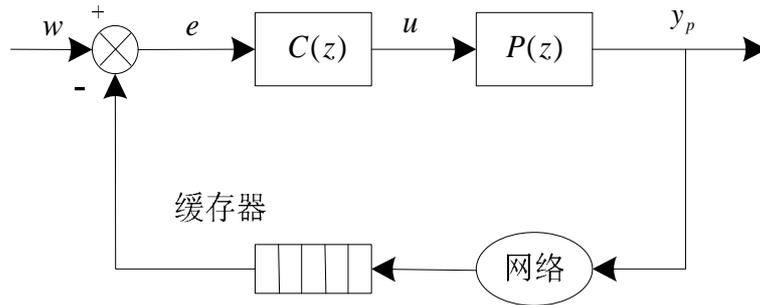


图 1 不基于模型的网络化控制系统

图 2 所示为本文提出的输出反馈网络化控制系统。其中， $P(z)$  为严格因果的离散被控对象； $C(z)$  为离散控制器； $M(z)$  为设计者建立的关于  $P(z)$  的模型； $w$  为系统参考输入； $e$  为系统参考输入与模型输出的差，即  $e = w - y_m$ 。在时刻  $k$ ， $P(z)$  输出  $y_p(k)$ ，若此时刻网络繁忙不可用，则将  $y_p(k)$  存放在缓存器中， $y_m(k)$  由  $M(z)$  自己计算得出，这样在对象输出不能及时反馈的情况下可以保证闭环控制运算不受影响；如果在时刻  $k$  网络是畅通的，则将原来存放在缓存器的历史数据和  $y_p(k)$  一起送往  $M(z)$ ，以使  $y_m(k) = y_p(k)$ ，并让  $M(z)$  利用收到的数据更新其内部信息以使未来时刻的  $y_m$  更接近于  $y_p$ 。

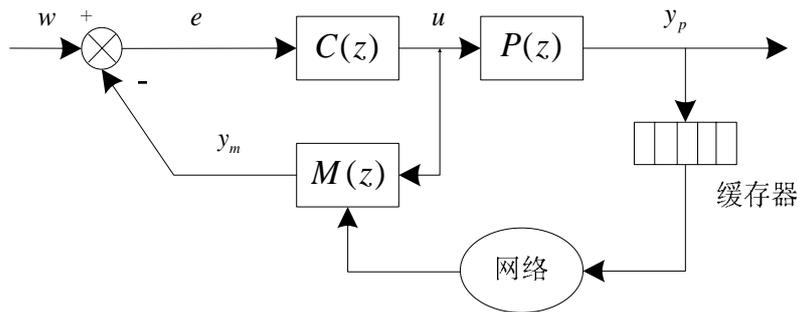


图 2 基于模型的网络化控制系统

下面以一个 SISO 线性的  $M(z)$  为例具体展示本文算法。设

$$M(z) = \frac{\beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_n z^{-n}}{1 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_n z^{-n}} \quad (1)$$

假设在图 2 系统中，当时刻  $k$  满足条件

$$k = h_l, \quad l \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad (2)$$

时网络通，否则网络不通。其中  $h_{t+1} - h_t$  是网络接通间隔。当  $k \neq h_t$  时，模型的运算为：

$$y_m(k) = \beta_1 u(k-1) + \dots + \beta_n u(k-n) - \alpha_1 y_m(k-1) - \dots - \alpha_n y_m(k-n) \quad (3)$$

当  $k = h_t$  时，模型利用网络传来的数据更新信息，具体运算为：

$$\begin{cases} y_m(k) = y_p(k) \\ y_m(k-1) = y_p(k-1) \\ \vdots \\ y_m(h_{t-1} + 1) = y_p(h_{t-1} + 1) \end{cases} \quad (4)$$

设控制器  $C(z)$  能镇定  $M(z)$ ，不难看出，当  $P(z)$  与  $M(z)$  完全相等时，无论  $h_{t+1} - h_t$  有多大，图 2 所示系统都是稳定的。如果存在模型误差，由于在网络畅通时刻用对象的输出值刷新模型内部信息，可以一定程度上减少模型失配的影响。

### 3. 算法有效性验证

下面以一个不稳定对象为例，分别采用图 1 和图 2 结构构成控制系统，并在不同延时特性下进行阶跃响应仿真实验对比，以验证本文控制策略的有效性。取二阶被控对象为：

$$P(z) = \frac{0.096z^{-1} - 0.0868z^{-2}}{1 - 1.819z^{-1} + 0.819z^{-2}} \quad (5)$$

对象模型：

$$M(z) = \frac{0.08z^{-1} - 0.1z^{-2}}{1 - 1.6z^{-1} + 0.6z^{-2}} \quad (6)$$

可以看出 (5) 式所示被控对象是不稳定的，而对比 (5) 和 (6) 式，可以发现对象和模型之间存在比较明显的误差。取控制器  $C(z)$ ：

$$C(z) = \frac{7.0 - 6.5z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (7)$$

#### (1) 时延为常数的情况

分别取时延（即网络接通间隔  $h_{t+1} - h_t$ ）为 1 与 2 进行仿真，仿真结果分别见图 3、图 4。

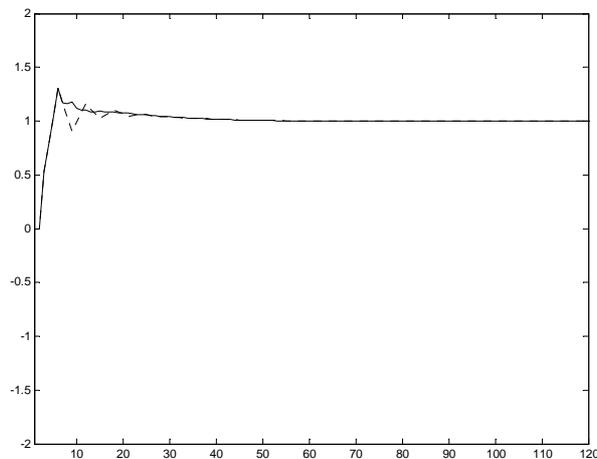


图 3 时延固定为 1 时系统阶跃响应曲线对比

其中采用本文算法得到的系统阶跃响应如图中实线所示，而采用图 1 所示的传统网络化控制系统算法的系统阶跃响应如图中虚线所示。从图中可以看出，当时延为 1 时，二者阶跃响应差别不大，只是本文算法过渡更平稳；当时延增加到 2 时，本文的算法仍能使系统控制性能维持在一个可以接受的水平，而采用图 1 算法的系统阶跃响应则已经严重发散。可见图 1 所示系统对时延变化非常敏感，系统极易失稳。而本文算法能在得不到反馈信息时，利用模型输出代替对象输出进行闭环运算，即使模型存在较大误差，但因为定时利用对象输出刷新模型内部信息，因此其系统可以承受较大时延而保持稳定。进一步，如果模型与对象精确匹配，则可以完全不受时延得影响，这对传统方法而言是不可能的。

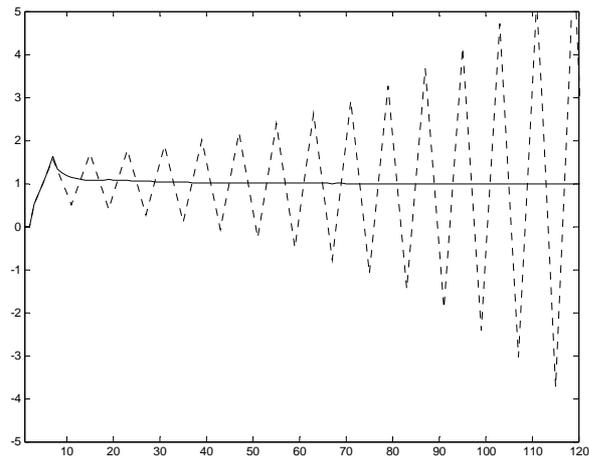


图 4 时延固定为 2 时系统阶跃响应曲线对比

## (2) 时延为随机情况

假定延时（即网络接通间隔  $h_{i+1} - h_i$ ）为随机有界，取其上界为 5，仿真结果见图 5。当采用图 1 算法时系统的阶跃响应曲线如图 5 虚线所示。采用本文算法情况下，系统阶跃响应曲线如图 5 中实线所示。可以看出，采用图 1 算法情况下，整个系统严重发散；而在采用本文算法情况下，由于利用模型运算补偿时延，系统动态与稳态性能均表现良好。可见本文算法在时延为随机情况下仍然有效。

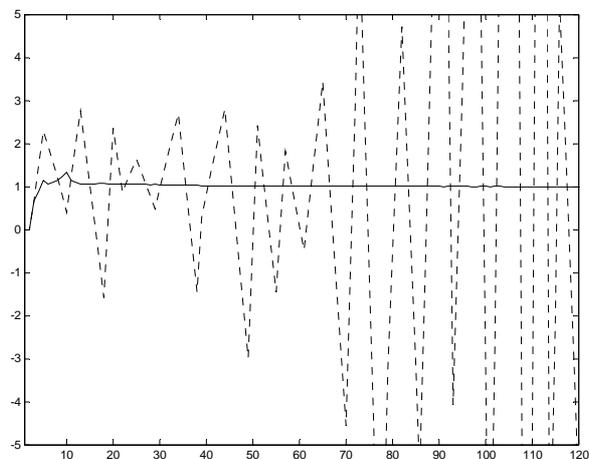


图 5 时延随机情况系统阶跃响应曲线对比

## 4. 结论

本文提出一种基于输入输出模型的输出反馈网络化控制系统结构, 给出系统的控制思想和具体控制算法。仿真结果表明本文的控制策略直接采用可以测量的输出信号, 方便实用; 由于采用了模型运算补偿网络传输延时, 且利用对象输出刷新模型内部信息以减小模型失配影响, 本文控制结构能很好的抑制固定延时和随机时延对系统性能的影响, 从而获得一个较好的控制水平。

## 参考文献

- [1] Tipsuwan Y, Chow M Y. Control methodologies in networked control systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(10): 1099-1111.
- [2] 黎善斌, 王智, 张卫东, 孙优贤. 网络控制系统的研究现状与展望 [J]. 信息与控制, 2003, 32 (3): 239~244
- [3] Luck R, Ray A. An observer-based compensator for distributed delays[J]. *Automatica* 1990, 26(5): 903~908
- [4] Luck R, Ray A. Experimental verification of a delay compensation algorithm for intergrated communication and control systems[J]. *International Journal of Control*, 1994, 59(6), 1357-1372.
- [5] Chan H, Özgüner Ü. Closed-loop control of systems over a communication network with queues[A]. *Proceedings of the American control Conference*, Baltimore, Maryland, June 1994 : 811-815
- [6] Montestruque L A, Antsaklis P J. On the model-based control of networked systems[J]. *Automatica* 39(2003) 1837-1843
- [7] Montestruque L A, Antsaklis P J. State and output feedback control in model-based networked control systems[J]. *41<sup>st</sup> IEEE Conf Decision and Control*[C].Las Vegas, 2002: 1620-1625.
- [8] Zuberi K M, Shin K G. Design and implementation of efficient message scheduling for controller area network [J]. *IEEE Trans On Computers*, 2000,49(2):182-188.
- [9] Cena G, Valenzano A. Achieving round-robin access in controller area networks[J]. *IEEE Tram on Industrial Electronics*, 2002. 9(6): 1202—1213
- [10] Hong, S. H. (1995). Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems. *IEEE Transactions on Control Systems technology*, 3(2), 225-230.

## 作者简介:

**刘松晖** (1979—), 男, 浙江大学信息学院控制理论与控制工程专业硕士研究生, 研究方向为网络时延控制;  
**吴俊** (1967—), 男, 浙江大学控制系先进控制研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为鲁棒控制、抗脆弱控制和模型降阶;

**徐巍华** (1976—), 女, 浙江大学控制系先进控制研究所讲师, 博士, 主要研究方向为鲁棒控制, 抗脆弱控制。

**陈生** (1957—), 男, 英国南安普敦大学电子与计算机学院教授, 博士, 主要研究方向为信号处理、移动通信和抗脆弱控制

# **A Class of Model-Based Output-Feedback Networked Control Systems**

**Abstract:** In this paper a class of output-feedback networked control systems is addressed. A key idea about this class of system is to introduce a plant model and a buffer to overcome the defect of feedback lag introduced by the network usage. When the feedback is unavailable, the control output is computed based on the plant model output, and when available, based on the plant output, meanwhile, the plant model is updated with the plant output. The concrete algorithm has been presented, and some simulations have been made to verify the algorithm.

Keyword: Networked Control System; Network Time-delay; Model; Output Feedback