

上海大学出版社

2005年上海大学博士学位论文 64



基于网络整定的控制系统中 网络诱导延时的分析及 解决方法研究

- 作者：李力雄
- 专业：控制理论与控制工程
- 导师：费敏锐



上海大学出版社

2005年上海大学博士学位论文 64



基于网络整定的控制系统中 网络诱导延时的分析及 解决方法研究

Shanghai University Doctoral Dissertation (2005)

Analysis and Solution for Network- induced Delays in Networked Tuning Based Control Systems

Candidate: Li Lixiong

Major: Control Theory and Control Engineering

Supervisor: Fei Minrui

Shanghai University Press

• Shanghai •

摘 要

随着信息技术的不断成熟与发展,通信网络作为传输媒介被广泛用于各种控制系统中,在传统网络控制系统中,控制回路通过以现场总线为代表的各种专用控制网络形成闭环.网络控制系统的出现,为自动化系统提供了一种先进、高效的底层通信与控制手段.同时,随着被控对象复杂度以及控制要求的不断提高,许多学者提出了各种类型的先进控制算法,其中包含针对被控对象的复杂辨识算法和针对控制器的参数整定算法,并利用参数估计、辨识获得的结果完成控制器参数的在线修正,这种方法在学术界获得了很高程度的认同.但由于底层控制器的计算资源有限,难以完成复杂的辨识和整定算法,这是先进控制算法在实际应用中的瓶颈之一.

于是,作者在传统的网络控制的基础上,创新性地提出了基于网络整定的控制系统的思想,即利用通信网络上远程整定单元的计算资源完成复杂的整定算法,并实现本地控制器参数的在线修正,从而实现整定回路的网络闭环.由此,本地控制器得以可靠地完成简单的控制任务,而复杂的参数估计、辨识任务则由连接于通信网络之上的远程整定单元实现,这对解决先进控制的实际应用瓶颈具有重要的价值.

作者的主要目的是研究基于网络整定的控制系统之中,网络传输的不确定现象对于辨识、整定算法和控制算法的影响,并进一步探索使用通信网络对于系统控制性能和收敛性的影

响,最后提出相应的解决方案来保证系统的稳定性及提高控制性能.具体研究成果如下:

首先,提出了基于网络整定的控制系统的新概念.在此基础上,从通信和控制角度研究了闭合其整定回路的通信网络所存在的主要不确定现象——网络诱导延时的各种性质,分析了网络诱导延时的组成成分和诱发延时的主要因素,即通信协议和控制设备,为研究网络诱导延时对于系统性能和稳定性的影响提供基础.此外,根据远程整定单元对于通信网络中数据传输次序的敏感程度,把整定算法分为静态和动态两种类型分别进行研究.

第二,采用连接于通信网络之上的远程整定单元在线修正本地控制器的参数,提出并构建了采用静态整定算法的基于网络整定的类PD型模糊控制系统,其中本地控制器完成简单的控制信号计算和输出,而参数整定过程在远程整定单元中实现.针对整定回路中的网络诱导延时,构建了由延时引发的性能下降函数,提出了定量分析延时对于系统控制品质影响的方法.另外,在性能下降函数的基础上,提出并建立了最大可容许延时和最大性能下降的概念,为基于网络整定的控制系统的分析与设计提供了一种简单、可行的途径.

第三,针对经典的自适应控制系统包含内环和外环,借助通信网络实现外环(整定回路)内的信息传输,使得辨识(参数估计)过程经由通信网络闭环,由此提出并构建了一种采用动态整定(辨识)算法的网络整定控制系统——基于网络辨识的自适应控制系统,其中远程整定单元(即辨识器或参数估计器)完成对象参数的辨识或估计,而本地控制器根据辨识获得的参数

产生控制信号. 通过大量实验表明, 随机时变的网络诱导延时可能导致控制系统参数估计不收敛以致控制系统输出不收敛.

第四, 针对基于网络辨识的自适应控制系统中数据传输的错序问题, 提出了辨识器端和控制器端产生数据错序的判断方法, 在此基础之上利用时间标签和缓冲器技术提出了一种放大随机时变延时至固定最大延时的解决方案(解决方案 I)和改进的缓冲器法(解决方案 II), 并在理论上严格证明了控制系统的输出收敛性. 随后, 针对通信品质和控制品质相互关联的特点, 在解决方案 I 基础之上, 进一步提出了综合考虑通信品质和控制品质的主动丢包法(解决方案 III), 提升了系统的控制品质和实用性, 仿真结果也验证了其有效性.

最后, 在基于网络辨识的自适应控制系统基础之上, 针对仿射非线性对象, 进一步提出和构建了基于网络辨识的自适应模糊控制系统, 并理论证明了解决方案 I 同样能够保证其输出收敛性. 由此表明作者提出的解决方案对于考虑不同类型被控对象、采用不同的整定(辨识)算法的一般系统仍然有效, 并进一步说明了基于网络整定的控制系统的可行性和所提出的解决方案的泛化性.

关键词 通信网络, 网络诱导延时, 错序, 丢包, 模糊控制, 自适应控制, 收敛性

Abstract

With the advent and rapid development of information technologies, communication networks are being used as popular transmission medium in control systems. In traditional networked control systems (NCSs), control loop is closed through special control networks with different incarnations; DeviceNet, ControlNet, Profibus, Modbus, etc. The emergency of NCSs provides a novel and effective way to implement device level communication and control.

In the meantime, plenty of advanced control strategies with identification or tuning algorithms are presented to realize the control of complex objects. Therefore, the controller can automatically adapt itself to retain control performance as the controlled plant is under changes. This technique has been well-accepted in academic area. But in real applications, the complicated tuning algorithms can not be carried out with limited computation resources in device level controller. This problem is the major obstacle for the feasible implementation of advanced control strategies in real applications.

In this paper, a new control system framework, defined as Networked Tuning based Control Systems (NTCS), is first presented to remove above obstacle. Its defining feature is a

tuning loop consisting local controller and remote computational and tuning device, and this loop is closed through communication networks. Obviously, the insertion of network can offer modularity and flexibility in practical applications. More importantly, the controller is developed with the ability to communicate to remote tuning device through networks. Thus, the remote tuning device can handle very complex tasks such as online parameter estimation for the controller while the local controller can be simple and cheap enough to only do limited work.

Local controller and remote computational and tuning device are connected through communication network in NTCSs. Hence, the non-deterministic phenomena such as network-induced delays are inevitable during data transmission, and will deteriorate the real-time transmission of tuning result from tuning device to controller and even destabilize the entire system. This paper aims to study network-induced delays' influence on control systems and what we can do to relieve this influence, guarantee system stability and improve control quality.

First of all, network-induced delay, which is the most important non-deterministic phenomena, is studied. The sources of delays including communication protocols and control devices are discussed and the possibility of reducing all delays into an equivalent delay is proposed. Moreover, the criteria to choose suitable communication protocol and control device in NTCSs are presented. In general cases,

clock-driven local controller and event-driven remote tuning device connected by Ethernet is a good option in real applications.

Then, networked tuning based quasi-fuzzy control system is established where the parameter self-tuning is implemented by remote tuning device and the tuning results are used by the local controller to compute control signal. Here, the tuning algorithm belongs to static algorithm, and all delays in the tuning loop can be lumped into an equivalent round-trip delay. Then, the performance degradation function is presented to measure the performance degradation caused by network-induced delays. Moreover, the maximum allowable delay can be given by maximum allowable performance degradation. This method makes it possible for the control engineers to design suitable NTCSs.

Next, a class of adaptive control systems that called networked identification (parameter estimation) based adaptive control system is to be studied, in which the tuning loop (identification loop) in the adaptive control system is closed through communication network. The identification loop is composed of a remote tuning device (identifier) and a local controller, where the remote identifier estimates the parameters of the plant and these estimates are provided to the local controller to implement the control law. Hence, it is a typical incarnation of NTCS with dynamic tuning algorithm. Clearly, the network-induced delays caused by the communication network are inevitable and randomly time-

varying in general. And the delay between controller and identifier can make a mess the transmitted data package sequences which may deteriorate the control performance even destabilize the system.

Obviously, the randomly time-varying delay and following packet-reordering are crucial to the networked identification based adaptive control systems. So the conditions for happening packet re-ordering both at the identifier and controller are discussed. And a method using the concept of fixed maximum delay is presented to avoid this problem. The time-stamping and buffers are necessary to implement this method. Moreover, the adaptive system is proven to be convergent if such a method is to be used. After that, in order to improve the performance and simplify the system, two modified methods are further proposed and the simulation results verify their validity and practicability.

Finally, a networked identification based adaptive fuzzy control system is established for a class of nonlinear affine objects. And the method of fixed maximum delay is used to tackle the problem of packet reordering induced by commutation networks. Similar to previous case, the adaptive fuzzy system is proven to be convergent if such a method is to be used.

Key words communication network, network-induced delay, packet re-ordering, packet loss, fuzzy control, adaptive control, convergence

目 录

第一章 绪论	1
1.1 通信网络在控制系统中的应用概况	1
1.2 基于网络整定的控制系统	3
1.3 相关领域的国内外研究现状	6
1.4 主要工作和特色	13
1.5 章节安排	15
第二章 基于网络整定的控制系统	17
2.1 引言	17
2.2 基于网络整定的控制系统的定义	18
2.3 基于网络整定的控制系统和传统的网络控制系统之间的 比较	20
2.4 远程整定单元的整定算法分类	23
2.5 本章小结	25
第三章 网络诱导延时分析	27
3.1 引言	27
3.2 影响网络诱导延时的主要因素	28
3.3 通信协议和设备驱动方式选择标准	31
3.4 网络诱导延时的性质分析	36
3.5 本章小结	38
第四章 基于网络整定的类 PD 型模糊控制系统	40
4.1 引言	40

4.2	基于网络整定的类 PD 型模糊控制器的构建	41
4.3	基于网络整定的类 PD 型模糊控制系统中的延时分析	45
4.4	通信网络对于控制性能的影响	50
4.5	控制性能分析	53
4.6	本章小结	60
第五章	基于网络辨识的自适应控制系统	62
5.1	引言	62
5.2	基于网络辨识的自适应控制系统的原理	64
5.3	延时和错序现象分析	67
5.4	延时和错序对控制性能的影响	74
5.5	本章小结	78
第六章	基于网络辨识的自适应控制系统的解决方案初探(方案 I) 及其收敛性分析	80
6.1	引言	80
6.2	解决方案 I—放大至最大延时策略	81
6.3	收敛性分析	82
6.4	本章小结	89
第七章	基于网络辨识的自适应控制系统解决方案再探(方案 II、III)	91
7.1	引言	91
7.2	放大至最大延时方法存在的问题	92
7.3	解决方案 II—改进的缓冲器法	93
7.4	解决方案 II 的收敛性分析	96
7.5	解决方案 III—主动丢包法	98
7.6	解决方案 III 的性能分析	102

7.7 本章小结	106
第八章 基于网络辨识的自适应模糊控制系统	107
8.1 引言	107
8.2 基于网络辨识的自适应模糊控制系统的原理	108
8.3 应用解决方案 I 后的收敛性分析	115
8.4 本章小结	119
第九章 总结与展望	120
9.1 全文总结	120
9.2 进一步工作的展望	123
附录 A 仿真软件 NetAdaptive 的设计与开发	128
A.1 引言	128
A.2 仿真软件包的设计目标	130
A.3 数字仿真软件 NetAdaptive 的开发	131
A.4 小结	135
A.5 主要符号说明	136
参考文献	138
致谢	150

第一章 绪 论

1.1 通信网络在控制系统中的应用概况

随着控制系统规模的日益扩大、复杂程度的不断提高,在工业现场,传感器、控制器、执行器的数目不断增长.原先这些控制设备之间采用点对点连接,但这种连接方式所需要的连接电缆与设备数的平方成正比,当设备较多时,布线复杂且难以维护.自上世纪 80 年代以来,计算机网络技术和通信技术有了飞速发展,采用串行通信网络把不同的计算机(设备)进行连接并实现实时通信已是轻而易举,于是人们开始考虑在控制系统中引入“通信总线(网络)”的可能性^[1].特别是随着近年来计算机网络的不断普及,相关设备成本逐渐下降,网络传输能力的普遍提高和网络资源的极大丰富,使网络概念和方式被越来越多地渗透到控制领域,其中较为典型的是现场总线控制(Fieldbus Control)、基于 PC 的控制(PC-based Control,主要采用以太网组建),甚至还有基于 Internet 的远程控制(Internet-based Remote Control).人们把这种控制回路通过通信网络闭环的控制系统称为网络控制系统^[2, 3](Networked Control Systems, 简称为 NCSs),其结构见图 1-1.显然,具有计算及通信能力的传感器、控制器和执行器是构建网络控制系统的技术基础.

可见,计算机网络技术在控制领域的应用,为控制系统注入了新的活力.可以说,网络控制系统是计算机控制系统的更高发展.在技术层面上,这些基于网络的控制方式通信速率高、布线方便、系统组建和组态灵活、网络资源分散并共享,尤其适于复杂对象的控制^[4];而在经济效益层面上,这种控制方式可以大大节省相关的安装、调试、

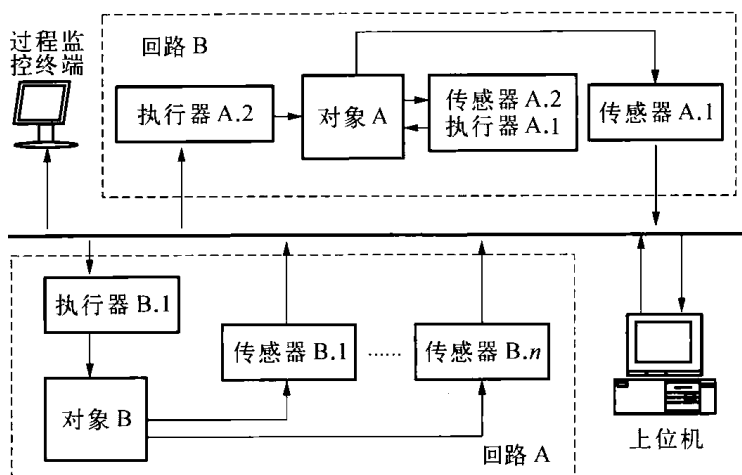


图 1-1 网络控制系统结构图

组态和维护的时间及费用,而且这种网络控制方式可以方便地实现与企业管理信息系统(MIS)或企业资源计划系统(ERP)的无缝连接,无疑可以提升企业的生产经营效率和灵活性,甚至可以改变企业的经营管理方式^[5]。例如在现代工业企业中,利用网络控制技术在生产现场建立高度集成的自动化控制和信息网络平台,不仅可以及时、准确地采集和传递各种数据,确保对生产过程的精确控制,还能有效地解决与外部网络通信问题,将生产和管理联网。这样,企业能够及时获得第一手生产数据,从而高效地、低成本地建立、实施和调整生产活动。同时,这将有利于企业对生产人员和生产过程的管理,从而充分挖掘提高效率 and 降低成本的潜力。

近 20 年来,网络控制的概念被广泛应用于汽车、智能楼宇、大规模制造系统、智能高速公路交通系统、城市公用设施及企业供应和物流链之中^[4, 6, 7],充分体现了网络控制的巨大优势。由此,国内外相关的自动化设备制造和集成企业纷纷开发出相应的软硬件产品以符合客户对网络控制的迫切需求,例如:

■ 澳大利亚悉雅特公司^[8]认为先进的自动化系统必须支持世界上所有通信路由和方式,因此其产品一般都能与各种流行的通信

网络连接以实现网络控制方式.

■ 德国倍福电气有限公司^[9]尤其重视控制设备向 IT 产品发展的趋势,其产品以工业以太网为主流,并支持各种流行的现场总线协议.

■ 美国罗克韦尔公司^[10]开发了控制信息协议(CIP),采用 Rockwell 的“生产者/消费者”模型代替传统的源/地址型模型,并在此基础上形成了 DeviceNet-ControlNet-Ethernet/IP 三层网络结构作为网络控制系统的解决方案. Rockwell 曾针对传统的 I/O 设备和具有网络连接能力的 I/O 设备所构建的系统性能和价格进行过比较^[11],对于一套 120 个节点的系统,传统的设备单价低廉,但需要量大.而网络设备随着 IT 业的发展,单价与传统相比并不是很高,但需要量下降了许多,因此网络控制方案的总体估价仅仅是前者的三分之一.更为重要的是,后者具有很强的拓展能力,以后进一步添加设备时候,易于实现且不需要改变系统结构. Rockwell 利用网络控制方案对著名聚酯树脂生产企业 Scott Bader 进行自动化改造,采用基于 DeviceNet 的 PC-based 控制器并通过 Ethernet 与企业的局域网连接进行管理,两年就收回了投资^[12].

1.2 基于网络整定的控制系统

在网络控制系统被不断扩大应用的同时,为了克服传统控制策略的不足以求获得更好的控制效果,各种先进控制策略应运而生.特别是计算机软硬件技术的发展,使计算机在工业控制的应用中得到了普及的同时,也推动了高级过程控制、人工智能控制等复杂工业控制算法、策略的诞生、发展和完善,比如基于模糊逻辑、神经网络或遗传算法的智能控制、鲁棒控制、预测控制以及自适应控制等等^[13-15].

与传统控制算法相比,这些先进控制策略(算法)有一个共同特点:控制策略一般包含复杂的辨识或整定算法,且实施比较困难并要占用相当的资源,由此控制设备应有很强的计算能力.而在传统的控

制系统之中,控制器的计算能力是相当有限的,而且过于复杂的控制算法将影响系统的可靠性,这对于先进控制策略的实际应用提出了巨大的挑战. 通信网络在控制系统中的出现,为先进控制策略的应用提供了新的手段. 由于网络把所有的计算资源连成一体,从而使网络上丰富和共享的计算资源、存储资源为先进控制策略的实施提供了重要的技术保障. 比如,在网络控制系统中,单个控制节点的计算能力是有限的,为了保证实时性和安全性,不可能实施过于复杂的先进控制策略,但它可以通过网络共享其他计算机的资源来实施先进控制策略. 甚至还可以利用企业内部网和 Internet 上的计算资源来完成先进控制策略所需要的计算任务^[16].

由此,具有先进控制功能的控制器分为两部分: 1) 简单的本地控制器,负责控制信号的产生、处理与可靠输出; 2) 远程整定单元,负责对象结构或参数的辨识,控制参数甚至结构的优化以及稳定性的监测与保证. 它们之间采用通信网络连接,这是一种具有远程整定单元的控制系统,其结构参见图 1-2.

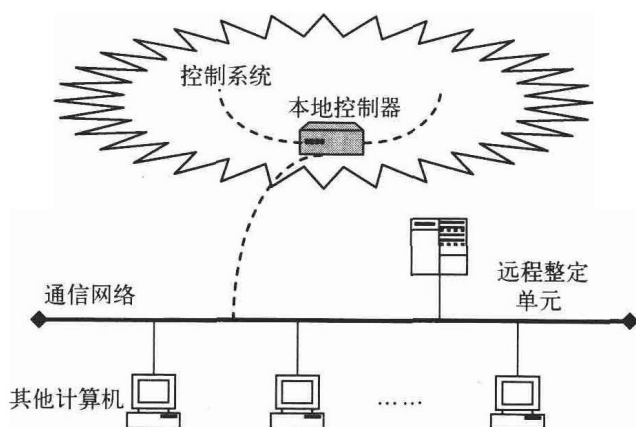


图 1-2 具有远程整定单元的控制系统

本文的研究对象就是这种本地控制器和远程整定单元共存的先进控制系统,称之为基于网络整定的控制系统. 可见,这种架构与传