

上海大学出版社

2006年上海大学博士学位论文 89



基于TCP/IP网络的 延时建模及网络先进 PID控制器研究

- 作者：周晓兵
- 专业：控制理论与控制工程
- 导师：费敏锐



上海大学出版社

2006年上海大学博士学



基于 TCP/IP 网络的 延时建模及网络先进 PID 控制器研究

- 作者：周晓兵
- 专业：控制理论与控制工程
- 导师：费敏锐



图书在版编目(CIP)数据

2006年上海大学博士学位论文.第2辑/博士学位论文编辑部编.—上海:上海大学出版社,2010.6

ISBN 978-7-81118-513-3

I. 2... II. 博... III. 博士—学位论文—汇编—上海市—2006 IV. G643.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第162510号

2006年上海大学博士学位论文

——第2辑

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路99号 邮政编码200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线66135110)

出版人:姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海华业装潢印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 890×1240 1/32 印张 278 字数 7760千

2010年6月第1版 2010年6月第1次印刷

印数:1—400

ISBN 978-7-81118-513-3/G·514 定价:880.00元(44册)

Shanghai University Doctoral Dissertation (2006)

**The Research of Modeling for
Network-induced Delays and
Advanced PID Controller
Based on TCP/IP Network**

Candidate: Zhou Xiaobing

Major: Control Theory and Control Engineering

Supervisor: Fei Minrui

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单:

- | | | | |
|-----|-----|------------------|--------|
| 主任: | 庄松林 | 教授,上海理工电子信息工程学院 | 200030 |
| 委员: | 顾幸生 | 教授,上海交大电子工程系 | 200030 |
| | 董德存 | 教授,同济大学交通学院 | 200072 |
| | 程维明 | 教授,上海工程技术大学 | 200072 |
| | 丁永生 | 教授,东华大学信息科学与技术学院 | 200051 |
| | 李少远 | 教授,上海交大自动化系 | 200240 |
| | 郑建国 | 教授,东华大学旭日工商管理学院 | 200051 |
| 导师: | 费敏锐 | 教授,上海大学 | 200072 |

评阅人名单:

- | | | |
|------------|-------------------|--------|
| 丁永生 | 教授, 东华大学信息科学与技术学院 | 200051 |
| 李少远 | 教授, 上海交大自动化系 | 200240 |
| 郑建国 | 教授, 东华大学旭日工商管理学院 | 200051 |

评议人名单:

- | | | |
|------------|--------------------|--------|
| 陈启军 | 教授, 同济大学 | 201800 |
| 马宏绪 | 教授, 国防科技大学三院 | 410073 |
| 付敬奇 | 教授, 上海大学机电工程与自动化学院 | 200072 |
| 朗文鹏 | 教授, 上海大学机电工程与自动化学院 | 200072 |

答辩委员会对论文的评语

周晓兵同学的博士学位论文“基于 TCP/IP 网络的延时建模及网络先进 PID 控制器研究”以国家自然科学基金项目“网络诱导延时对先进控制学习收敛性的影响及补偿策略”(项目批准号:60274031)为背景;针对基于 TCP/IP 协议的网络控制系统中的延时建模、PID 控制器的设计及延时补偿等问题,进行了深入的理论分析和研究,论文选题具有重要的理论意义和应用价值。

论文对过程控制系统的发展以及相关领域的国内外研究现状作了较为详细的综述。以基于 TCP/IP 网络的控制系统为研究对象,按照控制系统信息传递的特点,构建了校园网上网络延时测试平台,测量并分析了校园网上网络延时的特性,建立了网络延时的统计模型,为进一步针对其他类型 TCP/IP 网络控制的分析设计奠定了实验分析基础;针对线性低阶工业时滞对象,推导了参数化 PI 控制器的增益稳定范围,提出了基于延时统计模型的控制增益离线优化算法和在线增益整定算法,为已有 PI 控制器的网络应用提供了一个在线整定的有效途径;通过将延时分解为常数项和扰动项,建立了包含乘性扰动的延时数学模型,提出了采用延时的中位数和均值选取模型参数的方法,给出了采用 H_{∞} 理论和 μ 分析方法设计网络鲁棒 PID 控制器的算法和 PID 参数的在线整定方法;针对复杂的工业过程,给出了采用最小二乘支持向量机的建模方法,并利用广义预测控制理论推导

了一步预测 PID 控制器参数的算法,使 PID 控制器具有预测功能,并有接近于广义预测控制的性能;针对随机的网络延时提出了在控制器节点预测对象输出,并计算多步 PID 控制器参数预测值,执行器节点在收到的控制信息中选择最新控制值的控制策略。利用实测的网络延时仿真,结果表明了所提方法的有效性。

论文条理清晰、层次分明、论点明确,实验数据可靠、分析严谨。论文研究具有创新性,表明作者具有本学科坚实宽广的基础理论和系统深入的专门知识,具备较强的科研能力和创新能力。

在答辩过程中,周晓兵同学叙述清楚,回答问题正确。经答辩委员会投票表决,一致同意通过其博士学位论文答辩,并建议授予工学博士学位。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会投票表决,一致同意通过周晓兵同学的博士学位论文答辩,并建议授予工学博士学位。

答辩委员会主任: **庄松林**

2006 年 9 月 19 日

摘 要

由于控制、计算机、通信网络等技术的进步,导致了现场总线技术的产生,也导致了网络控制系统的应用。在网络控制系统中,控制回路通过网络形成闭环。同时,由于以太网具有易组网、应用广泛、价格低廉的优势,正在快速地进入工业自动化领域。而且在企业信息化和全局优化的要求之下,甚至出现了基于 Internet 的网络控制系统。在这种系统中,往往采用 TCP/IP 协议连接,可以统称为 TCP/IP 网络。TCP/IP 网络的延时是随机的、不确定的,给网络控制系统的分析和设计带来了困难,因此研究基于 TCP/IP 网络的网络控制系统设计问题具有重要学术探索价值。

PID 控制由于其自身的优点,如结构简单、容易实现、物理概念清晰等,在实践过程中积累了丰富的参数整定经验,仍然广泛应用于工业控制过程中。探讨 PID 控制器在网络延时下的参数整定方法具有重要的现实意义。

于是,本文以一个 TCP/IP 网络的实例与 Internet 连通的校园网的网络控制系统为研究对象,测量并分析校园网网络延时的特性,建立网络延时的统计模型,并在此基础上研究网络 PID 控制器的设计方法及补偿措施。本文的主要研究成果如下:

首先,在校园网上建立了一个基于应用层的测试平台。在该平台上获得了比较充分的延时实验数据。利用小波分析方法和方差聚类分析方法揭示了与 Internet 连通的校园网的

网络延时具有自相似特性的规律。由于校园网络延时的复杂性,当采用短时段网络延时期序列建立网络延时分布统计模型时,仅仅采用一个分布模型描述延时是不精确的。为了获得在一个滑窗中实用的网络延时统计模型,在多个较简单的备选分布中通过卡方检验确定了两个拟合度最好的模型,即广义指数分布模型及 Pareto 分布模型。同时,为了克服卡方检验精度依赖于样本长度的问题,也为了能够在线获得合适的延时分布模型,提出了采用支持向量机分类器获得分布模型的思路和方法。

由于 TCP/IP 协议具有不会丢包、但可能错序的特点,在执行器节点及控制器节点上的设备驱动方式必须要仔细选择。考虑到 TCP/IP 网络控制系统的这些特点,提出了在执行器节点上人为丢弃过期到达数据包的算法。

上述分析、测试及建模过程,给出了校园网络延时特性分析的可靠结果。这些结果克服了网络控制系统设计分析时只能假设网络特性的不准确做法,为进一步针对其他类型 TCP/IP 网络控制的分析设计奠定了实验分析基础。

第二,针对线性低阶工业时滞对象,采用简单的方法推导了参数化 PI 控制器的增益稳定范围,并证明了该范围与时滞的关系。根据增益范围和延时统计模型,提出了在不同模型参数条件下的控制器增益离线优化算法。为了保证能够得到全局最优解,寻优过程采用了遗传算法。并在离线寻优的基础上,在线通过实测的网络延时,由一个滑窗确定当前最合适的分布模型,并利用滑窗估计的模型参数在线确定最优的增益。

仿真结果表明了这种方法能够根据网络延时情况自整定参数化 PI 控制器增益,从而能够有效改善网络环境下 PI 控制

器的性能。这种方法为已有 PI 控制器的网络应用提供了一个在线整定的有效途径。

第三,通过将网络延时分解为常数项和扰动项,建立了网络延时的数学模型。将延时的常数项部分作为对象建模的一部分,从而构造一个广义的标称对象。延时的扰动部分作为乘性扰动加入系统。分别采用 H_∞ 理论和 μ 分析方法设计鲁棒网络 PID 控制器。经过分析表明,基于一个固定参数的网络延时数学模型设计的鲁棒 PID 控制器不可能满足所有延时情况下的性能需求,若要满足不同网络延时统计特性下的网络控制系统性能,网络延时的数学模型必须能够反映当前的统计特性,并由当前的网络延时数学模型自整定鲁棒 PID 控制器参数。分析结果表明:网络延时的中位数和均值是最好的模型参数选取参考。在分析的基础上,提出了离线设计好所有网络延时统计特性下的最优鲁棒网络 PID 控制器,并在线根据实测的网络延时统计特性(中位数和均值)确定当前最优的鲁棒网络 PID 控制器参数的算法。

最后,由于许多工业过程难以精确建模,考虑到最小二乘支持向量机有比神经网络更好的泛化及学习能力,故采用最小二乘支持向量机对对象建模,这种建模方法不仅适用于线性对象,也能对非线性对象建模。同时,利用广义预测控制理论推导了一步预测 PID 控制器参数的算法,使 PID 控制器具有基本等价于预测控制的性能。

由于网络延时的随机性,一步预测的 PID 控制器在多于一步延时情况下性能不能保证,为此提出在控制器节点利用向量机预测的对象输出代替实际的对象输出,用于推导多步的 PID 控制器预测参数。并将这些多步预测结果组合到同一个数据包中发送。对象节点根据已收到的控制信息,选择最

新的一个控制值用于对象控制。通过仿真分析,表明了算法的良好性能。

关键词 TCP/IP 协议 网络控制系统, 网络诱导延时自相似特性, 自整定 PID 控制, 支持向量机, 遗传算法, 广义预测控制, 鲁棒控制

Abstract

The advancement of control, computer, and communication networks technologies, lead to the development of fieldbus that labels the emergency of networked control systems (NCSs). Meanwhile, the technologies on general computer networks especially Ethernet have progressed rapidly. With widespread usages (80% of LAN market), increasing speed, decreasing price, and well-established infrastructure, Ethernet becomes major competitors to the industrial fieldbus. In response to the corporation information technology application and global optimization, Internet has been also used to NCSs. In the systems based on Ethernet and Internet, TCP/IP Protocol is widely adopted and these systems can be intituled as TCP/IP system. The randomness and indetermination of network-induced time delay in TCP/IP system makes the analysis and design of an NCSs complex. So it has significance to research on the design of NCSs over TCP/IP network.

PID control has a simple structure and can perform more reliably than many advanced controllers, so it's the most popular controller in industry. So it is very important to improve the performance of the PID controllers in NCSs.

In this paper, campus net linked to Internet, one instance out

of TCP/IP networks, is adopted to establish the NCSs. The network-induced delays are measured and their statistical characteristics are analyzed. The design methods and compensation schemes of PID controller over campus net are presented.

First of all, a measurement environment based on application layer for network-induced delay over campus net is established and sufficient RTT (Round Trip Time) delay data are obtained. The analysis about these measurements reveal that the statistical characteristic of the RTT delays based on application layer over campus net is self-similar, so it is very difficult to design controller over campus net. Pareto distribution is the most suitable distribution candidate by Chi-square test method. Because of the complex of RTT delay over campus net, it's not precise to model the RTT delay by only one probability distribution function in a short period of time. In a RTT delay sliding window (the length is 150), Pareto distribution and generalized exponential distribution can be used to model the RTT delay in different actual network traffic condition by chi-square test. But the disadvantage of the chi-square test is that it requires a sufficient sample size in order for the chi-square approximation to be valid. Thus, the idea and method that use a support vector machine classifier to pick the suitable distribution from the Pareto distribution and the generalized exponential distribution online are put forward.

In campus net, TCP/IP protocol is adopted, and data packet loss is impossible. But the packets can arrive at a

network node in a wrong order, so the driven nodes in controller and executer node need to be choiced carefully. Considering the characteristic of control system, the arithmetic that the late packet is discarded is provided.

The results about RTT delays over campus net are realible through measuremen, analysis and modeling. Theses results can be applied to design NCSs based on TCP/IP network.

Then, aiming at lower order time dely linear plant in industrial process, the region of admissible gain of parameterization PI controller is presented, and the relationship between this region and time delay is derived. In order to use this controller as networked controller over campus net and maintain the best possible performance, the optimal gain need to be scheduled in real time with respect to network delay. This paper uses Pareto distribution and generalized exponential distribution to describe round-trip time (RTT) delays over campus net, and a support vector classifier is used to select the appropriate distribution model in real time. The optimal gain under different distribution model parameters is off-line evaluated by genetic algorithm (GA). Simulation results show that the methodology proposed provides better performance.

Next, the network-induced delay over campus net is modeled. The delay is divided into two parts, one is constant delay and another is uncertain delay varying from the constant delay. The delay is approximated by the first-order Pade approximation, and the uncertain delay part is treated as

the simultaneous multiplicative perturbation. The robust PID controllers are designed by H_∞ framework and μ -analysis. Through simulation, the robust PID controller with invariable parameters can't fulfil performances in all network traffic conditions. The parameters of delay model need to be computed by the mean and median of RTT delay. The parameters of PID controller are computed offline in all network traffic conditions, and the optimal parameters are determined online by the actual delay.

Finally, considering to traditional neural network approach have suffered difficulties with generalization, producing models than can overfit the data, and the support vector machines has been shown to be superior to neural network, least squares support vector machines (LS-SVM) is proposed to model the complex industrial process. A predictive PID controller based LS-SVM is presented which is mathematically equivalent to generalized predictive control (GPC). For using this GPC-based PID controller to campus net, a predictive algorithm and a control selector are introduced to the controller side and the plant side, respectively. Simulation results are presented to highlight the principles and effectiveness of this control scheme. correspondence is maintained.

Key words TCP/IP protocol, networked control system, the self-similarity of network-induced delay, auto tuning PID control, support vector machines, genetic algorithm, generalized predictive control, robust control

目 录

第一章 概述	1
1.1 过程控制系统与通信网络	1
1.1.1 集散式过程控制系统的产生	1
1.1.2 现场总线控制系统	4
1.1.3 工业以太网、Internet 与过程控制系统	6
1.2 网络控制系统	7
1.3 网络诱导延时及其对网络控制的挑战	9
1.4 相关领域的国内外研究现状	11
1.4.1 网络诱导延时的测量、分析和建模	11
1.4.2 网络控制系统的分析及设计	13
1.5 本文的主要工作和特色	19
1.6 章节安排	21
第二章 基于 TCP/IP 网络的控制系统	23
2.1 基于 TCP/IP 网络控制系统的体系结构	23
2.2 基于 TCP/IP 网络控制系统的通信协议	25
2.2.1 Internet 分层参考模型	25
2.2.2 Internet 协议(IP)	26
2.2.3 传输层协议(TCP 及 UDP)	27
2.3 设备驱动方式	29
2.3.1 时钟驱动与事件驱动	29
2.3.2 本文选择的设备驱动方式	30
2.3.3 延时叠加性	33