



高等学校计算机科学与技术教材

- ① 原理与技术的完美结合
- ② 教学与科研的最新成果
- ③ 语言精炼，实例丰富
- ④ 可操作性强，实用性突出

基于Web的 远程监控系统

□ 陆璐 刘发贵 编著

◎ CD-ROM

清华大学出版社

● 北京交通大学出版社



TP277/8D

2008

高等学校计算机科学与技术教材

基于 Web 的远程监控系统

陆 璐 刘发贵 编著

清华大学出版社

北京交通大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书全面、系统地论述基于 Web 的计算机远程监控技术。全书共分 9 章,对常用的远程控制系统智能控制算法进行介绍;基于 Web 模式的远程控制系统实现原理及所涉及的关键技术做了深入剖析;并对基于 Web 模式的远程控制系统的多媒体大对象数据同步传输进行讨论;同时对搭建用于开发远程控制系统的 Web 平台部分关键模块的编程实现进行了介绍;针对典型 Web 远程监控系统进行介绍,包括集散控制系统,机器人控制系统;最后本书还重点介绍了一个大型的基于 Web 远程监控系统实例:基于气象站的远程监控系统,通过该实例可以全面了解基于 Web 的远程监控是如何实现的,以供读者参考并在实践中加以应用。本书理论联系实际,反映当今世界计算机技术与远程监控智能控制算法相结合的最新技术成果。本书可以作为高等院校计算机远程控制课程的教材或参考书,也可作为从事计算机软件开发的科技人员和高级工业控制工程技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

基于 Web 的远程监控系统 / 陆璐, 刘发贵编著. —北京: 清华大学出版社; 北京交通大学出版社, 2008.3

(高等学校计算机科学与技术教材)

ISBN 978-7-81123-148-9

I. 基… II. ①陆… ②刘… III. 远程网络-计算机监控-高等学校-教材
IV. TP277 TP393.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 166602 号

责任编辑: 谭文芳

出版发行: 清华大学出版社 邮编: 100084 电话: 010-62776969 <http://www.tup.com.cn>
北京交通大学出版社 邮编: 100044 电话: 010-51686414 <http://press.bjtu.edu.cn>

印刷者: 北京东光印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印张: 9.5 字数: 243 千字 附光盘 1 张

版 次: 2008 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81123-148-9/TP·388

印 数: 4 000 册 定价: 25.00 元 (含光盘)

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

序 言

基于 Web 的远程监控系统是网络技术的发展及和自动化技术相结合应运而生的。本书介绍控制系统与 Internet/Intranet 环境建立开放性连接基础上进行控制数据实时可靠性传输的服务质量管理算法,通过对现场设备进行远程监控,实现整个生产过程的自动化与全局管理。网络技术中的服务质量管理控制是为网络传输提供性能保证和区分服务,然而,仅靠该机制并不能完全解决远程数据实时传输问题。由于机电系统结构的复杂性,监测节点的多元性和分布性,传输实时性等特性决定了对服务器数据传输响应能力增高,连接请求的增长使得 Web 服务器面临超载问题。因此研究基于 Web 服务器实现服务质量管理控制算法,同时为不同类型的用户提供性能保证和服务区分,提高数据传输效率,对远程自动化设备的监测与管理,尤其是对有危险与污染的工作现场设备的远程控制具有很大的理论指导与实践意义。

本书全面、系统地论述基于 Web 的远程监控技术。全书共分 8 章,对常用的远程控制系统智能控制算法进行介绍;对基于 Web 模式的远程控制系统实现原理及所涉及的关键技术做了深入剖析;对基于 Web 模式的远程控制系统的多媒体大对象数据同步传输进行讨论;对搭建用于开发远程控制系统的 Web 平台部分关键模块的编程实现进行了介绍;对典型 Web 远程监控系统进行介绍,包括集散控制系统,机器人控制系统。重点介绍一个大型的基于 Web 远程监控系统实例:基于气象站的远程监控系统,通过该实例可以全面了解基于 Web 的远程监控是如何实现的,以供读者参考。

本书理论联系实际,反映当今世界计算机技术与远程监控智能控制算法相结合的最新技术成果,是一本非常实用的计算机远程监控教材。本书总结了作者多年从事计算机远程监控的研究和开发成果,可以作为高等院校计算机远程控制课程的教材或参考书,也可作为从事计算机软件开发的科技人员和高级工业控制工程技术人员的参考用书。

本书由陆璐、刘发贵编著,陈磊,邱传龙,叶渝,阮镇江等进行了整理和校稿工作。限于作者水平,书中难免会有不妥和错误之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2008 年 1 月

目 录

引言	1
第 1 章 远程控制智能控制算法	5
1.1 二维变因子学习控制算法	5
1.1.1 概述	5
1.1.2 连续系统学习控制器设计	5
1.1.3 离散系统学习控制律的设计	7
1.2 非线性系统神经网络稳定自适应控制器的研究	9
1.2.1 概述	9
1.2.2 基于标称模型的仿射非线性系统控制器的研究	9
1.3 神经网络稳定自适应控制器的设计	13
1.4 控制器仿真及实验研究	17
1.4.1 控制器在气动伺服系统中的应用	17
1.4.2 控制器在机器人系统中的应用	18
小结	20
第 2 章 远程控制的原理与网络模式的发展	21
2.1 远程控制的原理	21
2.2 网络远程控制模式的发展	21
2.2.1 传统的客户-服务器模式的体系结构	22
2.2.2 浏览器-服务器模式的体系结构	23
小结	24
第 3 章 基于 Web 的相关编程技术	25
3.1 主流 Web 编程语言的介绍	25
3.1.1 CGI 技术	25
3.1.2 ASP 技术	26
3.1.3 PHP 技术	27
3.1.4 JSP/Servlet 技术	27
3.2 使用 JSP/Servlet 技术的必要性	29
3.3 Java 及其相关技术	30
3.3.1 Java 语言	30
3.3.2 Java Applet	31
3.4 数据库技术	32
3.4.1 网络数据库介绍	32
3.4.2 实时数据库的探讨	33

3.4.3 通过 Web 访问数据库	34
3.5 超文本语言简介	35
3.5.1 HTML 和 SGML	35
3.5.2 XML	36
3.6 JavaBeans	37
3.6.1 软件组件简介	37
3.6.2 Java 开发组件介绍	38
小结	41
第 4 章 网络控制系统 Web 服务器服务质量管理方案的研究	42
4.1 引言	42
4.2 Web 服务器自适应内容传输算法	48
4.2.1 负载监测	48
4.2.2 使用控制	48
4.3 网络 QoS 管理实现算法	49
4.3.1 执行隔离	50
4.3.2 服务多样性	50
4.3.3 容量共享性	50
4.4 Web 服务器 QoS 控制算法实施模型设计	50
4.4.1 系统服务器模型	50
4.4.2 自适应软件 API	50
4.4.3 实施负载监测	51
4.4.4 实施使用控制	51
4.5 系统仿真测试结果	51
4.5.1 估计传输服务时间	51
4.5.2 防止拒绝请求	52
4.5.3 执行隔离	52
4.5.4 服务多样性	52
4.5.5 进程容量共享	53
4.6 网络控制系统多媒体信息同步传输管理方案的研究	54
4.6.1 网络控制系统信息分类	54
4.6.2 QoS 管理方案及算法	57
4.6.3 测试结果	59
小结	60
第 5 章 基于 Web 的远程控制系统基本结构的研究	61
5.1 典型系统的分析与方案	61
5.1.1 系统功能	61
5.1.2 系统结构	61
5.1.3 系统工作流程	63
5.1.4 系统软硬件环境和开发工具	63

5.2 基于 UML 的设计规划	64
5.2.1 产生用例图	65
5.2.2 产生类图	65
5.2.3 产生框架代码	67
5.3 系统部分的编程实现	68
5.3.1 Servlet API	68
5.3.2 JSP 使用的动作元素	70
5.3.3 系统服务器部分编程	72
5.3.4 数据库部分编程	73
5.3.5 Java Applet 编程	75
小结	78
第 6 章 远程监控系统典型系统设计	79
6.1 基于集散控制的远程监控系统	79
6.1.1 集散控制系统	79
6.1.2 基于集散控制的远程监控系统	80
6.1.3 基于集散控制的远程监控软件体系结构	81
6.2 基于移动终端的远程机器人控制系统	99
6.2.1 应用系统的组成	99
6.2.2 系统关键问题的解决	100
6.2.3 系统测试结果	102
小结	103
第 7 章 基于 Web 的远程监控系统流程组态软件说明文档	104
7.1 概述	104
7.2 软件整体构架	104
7.3 类详细说明	105
7.4 运行情况	107
小结	109
第 8 章 基于 Web 的远程监控系统案例分析	110
8.1 自动气象站系统组网介绍	110
8.1.1 业务体系结构	110
8.1.2 自动气象站的特点	111
8.1.3 自动气象站的通信模式	112
8.2 自动气象站系统设计	112
8.2.1 整体设计	112
8.2.2 采集中心系统	115
8.2.3 分布式业务服务系统	123
8.2.4 自动气象站监控保障系统	125
8.3 自动气象站运行实时监控设计	126
8.3.1 监控系统的运行模式	126

8.3.2	技术方案	126
8.3.3	监控的业务内容	127
8.3.4	单站实时监控设计	127
8.3.5	全网实时监控设计	131
8.4	自动气象站设备远程在线调试诊断设计	133
8.4.1	技术方案	134
8.4.2	软件系统体系结构	134
8.4.3	软件设计	135
8.5	软件实现与测试	137
8.5.1	平台选择	137
8.5.2	开发过程	137
8.5.3	系统实现	138
8.5.4	测试情况	140
	小结	142
	参考文献	143

引 言

本书的研究意义

随着计算机技术的进步,计算机网络技术以一日千里的速度迅速发展。经过 30 多年的发展,计算机网络在现代信息社会中的地位已不能由第二种方式取代。借助计算机网络,企业可以从事各种各样的经营活动,人们可以访问全球信息、娱乐和商务站点。计算机和网络技术的发展使人类走进了信息时代,跨入了网络社会,网络化使远程观测、远程信息反馈、远程控制、复杂市场的多方面跟踪监测成为可能。近年来,基于互联网的远程控制系统得到了设计人员的广泛重视。通过这种系统,控制人员可以在互联网的任意节点上控制其他节点上的设备。

这种系统一般采用客户-服务器(Client/Server, C/S)这种点对点结构实现对某一特定设备的控制。这种控制方案具有控制系统结构固定、客户控制端设备类型固定、客户控制程序固定和被控设备固定等特点,但这些特点已经无法满足生产生活中对远程控制的新要求。它的局限性表现在以下几个方面。

- ✧ 客户-服务器这种点对点控制结构无法满足对控制系统结构进行动态调整的要求;
- ✧ 客户控制端设备类型的固定,制约了控制端的灵活性;
- ✧ 客户控制程序固定,不但使得控制端软件不具有对软硬件平台的独立性,而且给分布式远程控制系统的升级带来困难;
- ✧ 控制系统所面向的控制对象单一,一套控制系统仅能提供一种设备的控制服务,既给多级分布的设备组的控制服务及管理带来诸多不便,也使控制端对设备组的控制变得复杂,从而使控制端设备缺乏便携性和灵活性。

因此,交互性、平台独立性、程序小型化、与硬件软件 and 用户接口的兼容性,以及系统的可扩展性,成为基于互联网的远程控制系统发展和研究的重点。

Web 技术以 HTTP 技术为基础,具有简单、高效、跨平台等优点,已经成为信息网络的一种最普遍应用的信息交互平台。基于 Web 技术的平台,采用浏览器作为统一的客户端程序实现的远程控制系统,已经逐渐成为了基于互联网的远程控制系统的的发展方向。这主要是因为它具有许多显著的优点:软件的安装、维护和升级容易,客户端只要拥有一个浏览器即可访问系统;系统具有良好的可扩展性,功能扩展的工作只需在服务器上完成,所有客户端软件都不需要改动。这些特点正是以往的控制模式所缺乏的,Web 技术大大减少了系统的费用,方便了用户。

设计与实现一个基于 Web 的远程控制系统,其主要目的并不是对远程终端的简单监控,它的应用价值更重要的是体现在以下的方面:

- ✧ 可提高工作效率和管理质量,提高系统管理层决策,把握全局事件和处理的能力。
- ✧ 能增强与办公自动化系统和管理信息系统之间的数据交换能力,与 Internet 可通过防火墙实现无缝连接。

- ✧ 系统集成可直接使用综合布线系统,网络扩展和升级十分容易,维护和培训工作量小。
- ✧ 尤其应用于工业系统控制站点的 Web 页面,可将各生产子系统的实时信息资源有机地组合起来,响应各控制浏览器的请求,把集成信息传递到需要的地方。控制人员通过信息导航和分析,可快速做出决策,并对整个系统进行优化控制,以达到高效、经济、节能、协调和安全的系统运行状态。

因此,使用目前流行的 Web 编程语言,如 JSP 等,采用先进的系统分析技术、网络软件开发技术、数据通信技术和数据库技术,设计和开发一套高效节省、主要面向各种企业的新型远程控制系统建设方案,从而实现现场的实时控制和数据处理,在我们目前的国情下具有广泛的应用背景和现实意义。

基于 Web 的远程控制系统国内外研究现状和发展趋势

基于 Web 的远程监控系统是随着网络技术的飞速发展,特别是 Internet 与 Intranet 的发展,以及与自动化技术相结合应运而生的。涉及自动化技术和计算机、通信等多学科技术的交叉。目前美国华盛顿大学谈自忠教授在实验室已经研究出基于 Internet 远程操作机器人控制系统,并在基于网络监控的无人工厂及具有危险性的场合开始初步运用。该系统尤其是对有危险以及污染的工作现场设备的控制更具有实际意义。

目前国内的监控系统主要是基于现场的控制系统,内部各相关控制系统各成体系,没有充分利用现有的网络资源。如何将现有的控制策略与网络技术结合起来实现远程监控,使控制系统具有更好的分布性及可操作性,将是能否很好实现管理与控制一体化的关键。

近年来随着 WWW 的迅猛发展,基于 Web 的应用由于其良好的开放性和可操作性越来越受到欢迎,浏览器-服务器(Browse/Server, B/S)模型业已经成为当今软件开发的重要方向。通过使用现场控制系统挂接 Internet 或者 Intranet 的方案,让使用者可以通过浏览器来进行远程的监测与访问功能,提高数据的共享性。同时,这还可以实现客户端程序的“零”安装,便于维护和管理,这时所有的数据交互,传递功能均在 Web 服务器端完成。考虑到由于机电系统结构的复杂性,监测节点的多元性和分布性,传输实时性等特性决定了对服务器数据传输响应要求增高。大量监测数据,控制画面的传送与显示,以及分布式环境中各个模块间的交互信息在网络中传输,使得 Web 服务器经常面临超载问题。

Web 请求的响应时间由两个因素决定:网络传输质量和 Web 服务器的性能。目前通常的基于 Internet 的 Web 服务器对传输过程中负载平衡及不同用户不同的传输质量要求几乎没有什么保证,它们基本上是没有加任何控制,属于尽全力型,因此其传输质量无法保证。A. Lyengar 等采用准入控制策略改善传输质量,当连接用户超过网络允许承受的用户数量时,其他用户将被拒绝连接,但这样连接的每个用户传输过程质量依然没得到保证,若出现抖动将无法消除,且被拒绝用户无法恢复连接。Halevi Y 等研究了客户端如何通过设置用户缓冲区保证多媒体信息连续播放的机制,而对传输过程中服务质量管理(Quality of Service, QoS)管理机制没有加以讨论。网络传输的 QoS 控制研究已十分活跃,包括通过综合服务来提供端到端的 QoS 保证,通过区分服务来提供可选择的区分服务等。但是,如果 Web 服务器不支持任何 QoS 控制,则仅靠网络 QoS 机制是不足以为用户提供满意的服务性能的。即在 Web 服务器超载的情况下,具备网络 QoS 控制的高级流可能仍会遭受服务拒绝。据估计,仅 2003 年全

球就有 10%~25% 的商业交易由于过长的 Web 响应延迟而遭终止,相当于损失了大约 23 亿美元的收入。

Web QoS 属于应用层的 QoS,它量度的是用户在与 Web 站点进行交互时所感受到的服务性能。由于 Web 基础设施的复杂性,影响 Web QoS 的因素很多。实际上,Web QoS 控制涉及构成 Web 的每一个元素,从网络技术和协议,到 Web 服务器(以及代理服务器)的硬件、软件(包括服务器应用软件、操作系统及中间件)体系结构。由于大多数 Web 基础设施的组件通常都无法轻易进行控制,所以实现 Web QoS 并非易事。相对而言,网络通信公司对其主干网具有完全的控制能力,因而能够向其客户提供基于网络可用性和保证网络响应时间的服务水平协议;而 Web 服务供应商则无法提供类似的服务保证契约,因为只能对 Web 基础设施的一小部分进行处理和操作。

目前,Web QoS 控制的研究已经越来越受到国外学界和业界的重视:许多网络及 Web 领域的著名国际会议都已把 Web QoS 作为一个重要的议题;尤其是机电系统的远程控制对数据响应和实时性能要求比较高,对 Web QoS 服务能力提出了更高的要求。我国的工业经过几十年的发展,尤其是 20 世纪 80 年代末以来的计算机产业的迅猛发展和普及应用,以及国家 863 高技术发展计划的推动,在许多设备制造企业进行了以信息技术为基础的改造,已经具备了实现远程监控技术的硬件体系基础。在软件方面,实时控制、远程监测、故障诊断等技术都有了一定成果和经验。然而对于一门综合性技术,我国尚未组织企业与研究部门结合并投入较大力量进行系统研究开发,致使我国远程控制技术研究和应用进展相对缓慢。

目前,对于远程控制技术的探索正处于积极的探索中,并有相应的应用系统出现。对于远程实时控制技术,国内外展开了积极的研究。其实,我们平时使用的 Windows XP 中,就提供了一个功能强大的远程桌面。它不仅可以远程访问、管理计算机,并且提供图形化的操作界面,同时提供了两种访问方式,一种是利用 Windows XP 本身的功能进行互相访问(C/S 方式),另一种是使用 IE 浏览器进行访问(B/S 方式)。而苹果公司的 Macintosh 机器的操作系统 Mac OS 上也提出“Remote Desktop”的概念和功能。3am Labs 公司的 Remotely Anywhere 是这类软件的典型代表,如果用户要在不同的地方远程控制一台计算机,只要被控制的计算机上安装了这款软件,那么就可以在任何一台能上网的计算机上通过浏览器(如 IE)对装有 Remote Anywhere 的计算机进行远程控制了。

以上的远程控制软件的控制对象主要是远端的计算机,在功能上仅仅是远方指令以互联网为媒介对本地计算机的简单实现,缺乏工业应用背景,而以下的研究则是将被控制端延伸到工业和科学上。

美国田纳西州立大学的 Jim Henery 设计了一个网上工程实验室,提供一系列远程控制实验,如压力控制、液面控制、温度控制、速度控制等。该远程实验系统由一台 Web 服务器和五台客户机构成的,每台客户机与一套实际的设备相连。用户通过 Internet 访问 Web 服务器,选择控制参数,然后 Web 服务器把这些参数写入文件传送给相应的客户机。客户机收到这些参数后,控制实验设备来完成实验,并把实验数据通过 Web 服务器生成实验结果图,返回给用户。

英国 Bradford 大学工业技术系于 1996 年研制出名为 Bradford Robotic Telescope 天文望远镜。该天文望远镜已在 Internet 对外开放,天文爱好者可以通过 Web 浏览器访问其主页,控制望远镜的角度和焦距,而且一般第二天可以在 E-mail 信箱里收到观测结果。

值得一提的是,Paul G Backes 等建造的 WITS(World Intergrated Trade Solution,世界集成贸易方案)系统,分布在美国各地的美国宇航局专家们使用该系统进行火星探路者的任务规划与控制,同时公众可以使用该系统进行虚拟操作,例如远程控制“勇气号”火星探测车等。

另外,还有 Berkeley 大学研制的 Mechanical Gaze 系统,西澳洲大学的 Telerobot 等。对于远程控制技术,国内的一些高校和企业也进行了积极研究。合肥工业大学提出了将 Internet 技术与现场监视系统结合起来,从而形成一种新的基于 Web 模式的工业信息监视系统。西安交通大学开发的基于 Internet 的快速成型和快速加工技术,只要用户安装 WWW 浏览器,就可以通过 HTTP 获得远程服务部(Tele-Service Bureau,TSB)在线技术支持和数据交换。比如提供 3D CAD 文件和物理模型,加工测试数据反馈给 TSB 等。

现在,基于 Web 的远程控制系统已投入到实际的应用领域,如深海探测、井下作业和空间探测等,并取得很好的经济效益,其应用前景是十分广阔的。今后的发展方向应该是尽量满足数据传送的实时性要求、数据的事件驱动及数据源主动传送等。主控端采用何种方法将网络实时监控系统的信息及时、安全、便捷地反映到浏览器上,给远程客户提供一个统一的界面将是以后远程控制追求的一个具体目标,当中包括了计算机技术、网络技术和监控技术的发展。本书针对 Web QoS 控制机制和控制算法进行研究,提出一套基于 Web 服务器的远程监控系统的架构并对每部分具体实现做了详细描述,具有很好的理论研究价值和应用参考。

本书的主要内容

将一个基于 Web 的远程控制系统应用于工业背景下,它应包括两大部分:现场控制级和远程控制级。现场控制级的软件设计主要是单片机、工控机等软件设计,它们的主要功能是实现现场设备的数据采集,并且把采集到的数据和设备的状态信息转换成为数据库可存储的标准的数据格式和 HTML 的语言格式,通过 Web 服务器发送到远程客户端,供远程控制级软件使用。本书给出了现场控制级的框图,但整个的着重点将是放在远程控制级上,即是如何通过 Web 来实现对现场设备的控制,而现场设备的信息又是如何被反映到客户端的浏览器上。本书主要包括的内容如下。

1. 对常用的远程控制系统智能控制算法进行介绍。
2. 对基于 Web 模式的远程控制系统实现原理,以及所涉及的关键技术进行深入剖析,学习应用 JSP, Java/JavaBean 等编程技术和数据库,RMI,XML 等传输格式。
3. 对基于 Web 模式的远程控制系统的多媒体大对象数据同步传输进行讨论。
4. 搭建用于开发远程控制系统的 Web 平台,完成部分关键模块的编程实现。
5. 对典型 Web 远程监控系统进行介绍,包括集散控制系统,机器人控制系统,给出相关组态软件实现代码。
6. 介绍一大型的基于 Web 远程监控系统实例——基于气象站的远程监控系统。通过该例子全面了解基于 Web 的远程监控是如何实现的。

第1章 远程控制智能控制算法

远程监控系统控制终端需要对控制单元进行实时操作和控制,本章主要介绍控制终端常用的实时控制算法,包括学习控制算法、神经网络控制算法等。这些算法都是属于智能控制范畴,不需要预先知道精确的系统对象模型,便于对目前日益复杂的非线性系统实施操作和控制。

1.1 二维变因子学习控制算法

1.1.1 概述

近些年来很多学者在研究迭代学习控制算法,迭代学习控制器对于处理这类重复性强的任务是一种非常有效的算法,它对系统模型参数要求不高,根据当前的系统输入输出对下次学习的输入进行调整。目前学习控制算法主要采用固定学习因子,仅仅根据学习误差调整控制输入,这样学习稳定性与收敛性证明充要条件和学习因子选取有关。而学习因子选取依赖系统参数,当系统参数未知时,学习算法很难保证这些条件成立,这就和学习控制在应用时,假设被控对象结构与参数未知形成了矛盾,因此必须解决在实际应用中判断学习稳定与修正学习增益相统一的算法。

Arimoto 等提出了在线辨识系统参数修正学习因子的方法。该算法计算量大,特别是当不知道系统阶次和时延,这时对系统辨识工作将很困难,同时在实际系统中不可避免地存在各种扰动,当扰动存在时如何保证辨识精度也是一个值得探讨的问题。

Zeng 提出沿学习轴辨识学习因子的方法是一条选择学习因子的新思路,但要求系统模型必须化为 Rossel 模型,且仅对连续定常线性系统且系数矩阵均可逆时学习控制收敛性才能保证,且两者都没考虑系统外来干扰,而实际过程中,外来干扰是不可避免的。

本章首先在考虑外在干扰时对连续时间系统提出一种动态辨识学习因子的新算法,它不论系统阶次如何,仅需辨识两个学习因子矩阵,且该辨识过程是一个沿学习轴辨识过程。为了计算机实现方便,本章同时给出离散系统相应的学习算法,给出了该学习算法收敛性条件,并提出了一种闭环学习算法去克服系统初始误差,最后将该算法用于可重复运动的气动伺服系统位置控制,仿真结果表明该算法具有跟踪精度高、收敛速度快的特点。

1.1.2 连续系统学习控制器设计

考虑如下连续时间动态系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) + \xi(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) \\ x(0) &= x_0 \end{aligned} \quad (1-1)$$

这里 $x(t)$, $u(t)$ 分别为 $n \times 1$ 维状态矢量和 $m \times 1$ 维控制矢量, $\xi(t)$ 为 $n \times 1$ 维外部干

扰,系统矩阵 $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ 满足

$$\begin{aligned} A(t+NT) &= A(t) \\ B(t+NT) &= B(t) \\ C(t+NT) &= C(t) \end{aligned} \quad (1-2)$$

这里 T 为一次学习时间, N 为正整数, $0 \leq t \leq T$, 且外部干扰 $\|\delta\xi_{j+1}(\cdot)\|_{\lambda} \leq \epsilon_d$ (这里 j 为学习次数), $\delta\xi_{j+1}(t) = \xi_{j+1}(t) - \xi_j(t)$, ϵ_d 是一有界正常数, ∞ 及 λ 范数分别定义为:

$$\|x(\cdot)\|_{\infty} = \sup_{0 \leq t \leq T} (x(t)) \quad \|x(t)\|_{\lambda} = \sup_{0 \leq t \leq T} [\exp(-\lambda t) \|e(t)\|_{\infty}] \quad (1-3)$$

为简化起见,下面用 A, B, C 来代替 $A(t), B(t), C(t)$, 当不考虑外部干扰时,由式(1-1)知

$$u(t) = B^+ (\dot{x}(t) - Ax(t)) = (CB)^{-1} \dot{y}(t) - B^+ AC^+ y(t) \quad (1-4)$$

$$u_d(t) = (CB)^{-1} \dot{y}_d(t) - B^+ AC^+ y_d(t) \quad (1-5)$$

$$e(t) = y_d(t) - y(t) \quad (1-6)$$

由式(1-4)、式(1-5)和式(1-6)得:

$$u_d(t) = u(t) - B^+ AC^+ e(t) + (CB)^{-1} \dot{e}(t) \quad (1-7)$$

这里 B^+, C^+ 分别表示 B, C 的广义逆。当考虑使用如下学习控制律:

$$u_{j+1}(t) = u_j(t) + k_1(i, j)e(t) + k_2(i, j)\dot{e}(t) \quad (1-8)$$

将式(1-8)写成离散形式, $k_1(i, j), k_2(i, j)$ 可采用如下递推算算法求出:

$$U^T(i, j) = [q_u(i, 1), q_u(i, 2), \dots, q_u(i, j)] \quad (1-9)$$

$$Y(i, j) = [q_y(i, 1), q_y(i, 2), \dots, q_y(i, j)] \quad (1-10)$$

$$q_y(i, j) = \begin{bmatrix} y(i, j) - y(i, j-1) \\ \dot{y}(i, j) - \dot{y}(i, j-1) \end{bmatrix} \quad (1-11)$$

$$q_u(i, j) = u(i, j) - u(i, j-1) \quad (1-12)$$

由递推最小二乘得增益阵 $k(i, j)$ 估计为:

$$\begin{cases} p(i, j+1) = p(i, j) - \frac{p(i, j) Y(i, j+1) Y^T(i, j+1) p(i, j)}{I + Y(i, j+1)^T p(i, j) Y(i, j+1)} \\ k(i, j+1) = k(i, j) + [u(i, j+1) - k(i, j) Y(i, j+1)] \frac{Y^T(i, j+1) p(i, j)}{I + Y(i, j+1)^T p(i, j) Y(i, j+1)} \end{cases} \quad (1-13)$$

评论:这种递推算算法不同于一般的最小方差参数估计,式(1-13)的估计是沿学习轴迭代进行的,而不是通常的学习轴,所以可以不像自适应算法那样在线求解估计值,而是在两次学习间隔上离线地运算。正因为这种特点,较为复杂的递推最小二乘的运算时间对控制效果没有影响,算法可以推广到运算速度较慢的微机上实现,而且在这种算法基础上可发展出更为复杂的算法。定理 1 给出了该学习控制律收敛性的必要条件。

定理 1 考虑式(1-1)的线性时变系统,若满足每次迭代初始误差为 0, (即 $e_j(0) = 0$), 且满足 $\|I - CBk_2\|_{\infty} < 1$, 则采用式(1-8)学习控制律将保证该系统输出 $y_j(t)$, 当 $j \rightarrow \infty$ 时收敛于 $y_d(t)$ 。

[证明]:

$$\begin{aligned} (1-1) \quad y_d(t) - y_{j+1}(t) &= \dot{y}_d(t) - [C \exp(At) x_j(0) + \int_0^t C \exp(A(t-\tau)) (Bu_j(\tau) + \\ &\quad \xi_{j+1}(\tau)) d\tau + \int_0^t C \exp(A(t-\tau)) (Bk_1 e_j(\tau) + Bk_2 \dot{e}_j(\tau)) d\tau] \end{aligned} \quad (1-14)$$

$$\int_0^t C \exp(A(t-\tau)) B k_2 \dot{e}_j(\tau) d\tau = \int_0^t C A \exp(A(t-\tau)) B k_2 e_j(\tau) d\tau + C B k_2 e_j(t) \quad (1-15)$$

将式(1-15)代入式(1-14)得:

$$e_{j+1}(t) = (I - C B k_2) e_j(t) - \int_0^t C \exp(A(t-\tau)) \delta \xi_{j+1}(\tau) d\tau - \int_0^t (C \exp(A(t-\tau)) B k_1 + C A \exp(A(t-\tau)) B k_2) e_j(\tau) d\tau \quad (1-16)$$

式(1-16)两端同乘 $\exp(-\lambda t)$, 再取 $\|\cdot\|_\lambda$ 范数得:

$$\begin{aligned} \|e_{j+1}(t)\|_\lambda &\leq \|I - C B k_2\|_\infty \|e_j(t)\|_\lambda + \varepsilon_d \sup_{0 \leq t \leq T} \|C \exp(A t)\|_\infty \int_0^t \exp(-\lambda(t-\tau)) d\tau + \\ &\quad \sup_{0 \leq t \leq T} \|C \exp(A t) B k_1 + C A \exp(A t) B k_2\|_\infty \int_0^t \exp(-\lambda(t-\tau)) \|e_j(\tau)\|_\lambda d\tau \leq \\ &\quad \|I - C B k_2\|_\infty \|e_j(t)\|_\lambda + \frac{\varepsilon_d}{\lambda} \sup_{0 \leq t \leq T} \|C \exp(A t)\|_\infty (1 - \exp(-\lambda T)) + \\ &\quad \frac{1}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda T)) \sup_{0 \leq t \leq T} \|C \exp(A t) B k_1 + C A \exp(A t) B k_2\|_\infty \|e_j(t)\|_\lambda \end{aligned} \quad (1-17)$$

当 $\|I - C B k_2\|_\infty < 1$, 可取足够大 λ 使 $\frac{\varepsilon_d}{\lambda} \sup_{0 \leq t \leq T} \|C \exp(A t)\|_\infty (1 - \exp(-\lambda T)) \rightarrow 0$, 且

$$\|I - C B k_2\|_\infty + \frac{1}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda T)) \sup_{0 \leq t \leq T} \|C \exp(A t) B k_1 + C A \exp(A t) B k_2\|_\infty < 1。$$

由此结合式(1-17)得: 当 $j \rightarrow \infty$ 时, $\|e_j(t)\|_\lambda \rightarrow 0$ 当 $t \in [0, T]$ 成立, 即式(1-1)所示的连续时间系数收敛。且由式(1-17)知当 $\|I - C B k_2\|_\infty = 0$ 即 $k_2 = (CB)^{-1}$, 且令

$$\sup_{0 \leq t \leq T} \|C \exp(A t) B k_1 + C A \exp(A t) B k_2\|_\infty = 0$$

由 $A \exp(A t) = \exp(A t) A$ 得:

$$k_1 = -B^+ A C^+$$

由此得: 当 $k_1 = -B^+ A C^+$, $k_2 = (CB)^{-1}$ 时, 系统收敛速度最快。

推论 1: 如果外部扰动是周期性干扰, 即 $\xi_j(t) = \xi_{j+1}(t)$, $0 \leq t \leq T$, 则类似上述证明可很方便地得到 $\|e_j(\cdot)\|_\lambda \rightarrow 0$, 当 $j \rightarrow \infty$ 。

以上是针对连续系统推导的学习控制律, 考虑到实际控制系统是以离散形式进行控制的, 则可把上述控制律推广至如下离散形式。

1.1.3 离散系统学习控制律的设计

考虑如下离散时间动态系统:

$$\begin{aligned} y(i+1) &= A(i)y(i) + B(i)u(i) \\ y(0) &= y_0 \end{aligned} \quad (1-18)$$

同样满足

$$A(i+NT) = A(i) \quad B(i+NT) = B(i) \text{ 及 } e_j(0) = 0 \quad (1-19)$$

则有如下定理成立:

定理 2 对式(1-18)离散时间系统采用如下学习控制律

$$u(j+1, i) = u(j, i) + k_1(j, i)e(j, i) + k_2(j, i)e(j, i+1) \quad (1-20)$$

当 $\|I - k_2B\|_\infty < 1$ 时, 该系统学习误差满足 $\lim_{j \rightarrow \infty} \|e(j, i)\| = 0$, 即该算法收敛。

[证明]:

$$\begin{aligned} u_d - u(j+1, i) &= u_d - u(j, i) - k_1e(j, i) - k_2e(j, i+1) \\ &= u_d - u(j, i) - k_1e(j, i) - k_2A(i)e(j, i) - k_2B(u_d - u(j, i)) \\ &= (I - k_2B)(u_d - u(j, i)) - (k_1 + k_2A(i))e(j, i) \end{aligned} \quad (1-21)$$

$$\begin{aligned} e(j, i) &= y_d(i) - y(j, i) \\ &= A(i-1) \cdots A(1)B(0)\Delta u(j, 0) + \cdots + B(i-1)\Delta u(j, i-1) \end{aligned} \quad (1-22)$$

$$\begin{aligned} \Delta u(j+1, i) &= ((I - k_2B)\Delta u(j, i) - (k_1 + k_2A(i))(A(i-1) \cdots A(1)B(0)\Delta u(j, 0) + \\ &\quad \cdots + B(i-1)\Delta u(j, i-1))) \end{aligned} \quad (1-23)$$

将上述结果写成矩阵形式为 $(0 \leq i \leq N)$:

$$\begin{bmatrix} \Delta u(j+1, 0) \\ \vdots \\ \Delta u(j+1, N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I - k_2(0)B(0) & 0 & \cdots & 0 \\ * & * & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & \\ * & & & I - k_2(N)B(N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(j, 0) \\ \vdots \\ \Delta u(j, N) \end{bmatrix} \quad (1-24)$$

则当 $\|I - k_2(i)B(i)\|_\infty < 1$ 时, 有

$$\|\Delta u(j+1, i)\|_\infty < \|\Delta u(j, i)\|_\infty \quad (1-25)$$

当 $j \rightarrow \infty, \Delta u(j, i) \rightarrow 0$, 即 $y(j, i) \rightarrow y_d(i)$ 。

同理, 当 k_2 收敛至 $B^+(i)$, k_1 收敛至 $-B^+(i)A(i)$ 时, 该系统收敛最快。

评论: 该算法优越性在于对系统先验知识要求不高, 无须知道系统阶次和时延, 且该辨识过程沿学习轴进行, 无须在线辨识系统参数。由于学习过程本质上是一个向逆系统逼近的过程, 学习因子 $k_1(j, i), k_2(j, i)$ 中包含了设定轨迹逆动力学系统的信息, 该学习控制器不仅可以学习某一种设定轨迹 $y_d(t)$, 还可以在此基础上较快地学习另一种相似的设定轨迹 $y_d'(t)$, 从而表现为某种类似人类的智能。

以上都假设系统初始误差为零, 当系统初始误差不为零时下述推论保证学习控制收敛性。

推论 2: 同样考虑式(1-18)的离散时间动态系统, 当初始误差不为零但能保证渐进趋于零(即 $\lim_{j \rightarrow \infty} e(j, 0) = 0$ 时), 采用如下的学习控制律能保证学习控制收敛。

$$u(i, j+1) = u(i, j) + k_1e(i, j) + k_2e(i+1, j) + k_3e(i, j+1) \quad (1-26)$$

特别地, 当 k_1, k_2, k_3 辨识结果分别收敛至 $-B^+A, B^+, B^+A$ 时, 该学习过程收敛最快。

该推论证明过程与定理 2 类似, 这里从略。

评论: 该算法提示我们当系统初始误差不为零但能渐近趋于零时, 该学习控制律是成立的, 这在实际系统中可认为 $\lim_{j \rightarrow \infty} \|e(0, j)\| < \epsilon$ (ϵ 是一给定界限)。这时可保证系统输出跟踪期望输出, 它不仅用到了上一次学习误差, 还用到了本次学习误差, 因此, 本质上它是一个闭环学习过程, 这个推论收敛性条件与定理 2 相比放宽了。

1.2 非线性系统神经网络稳定自适应控制器的研究

1.2.1 概述

前面从智能控制角度及非线性系统本身出发,设计了自学习控制器,对网络控制器智能控制进行了研究。但由于实际非线性控制系统往往由于高度耦合、高度非线性及时变等特性,再加上常常伴有各种内部及外部扰动,这些都使得先验知识获取困难化,从而影响了控制精度,这就涉及非线性系统鲁棒性问题。

考虑到在实际过程中常常可以获得一个系统近似模型,称为标称模型,仅根据该模型设计控制器,由于系统存在内部和外部各种不确定性,控制效果可能较差。本章给出一种控制方案,它通过设计一个具有 H_∞ 性能指标的控制器在线补偿非线性系统的不确定性,从而将仿射非线性系统鲁棒性问题转化为一个 H_∞ 干扰衰减问题,达到较好的控制效果。证明了采用该算法后系统全局稳定性,并且不确定性对控制误差影响能达到指定衰减程度。最后将该算法用于两连杆机械手轨迹跟踪,仿真结果显示该算法有效性。

当在实际过程中系统模型很难获得时,我们可以从智能控制角度出发,构造两个子网络模型去逼近仿射非线性系统线性化的系统模型,并根据该逼近模型对系统进行控制。当这两个子网络模型充分逼近系统实际模型时,基于该模型参数得到的控制量对实际系统的控制也能收到较好的效果。

由于神经网络具有很强的逼近能力,尤其 BP(Back Promulgate,反向传播)和 RBF(Radius Basis Function,径向基)网络具有逼近任何非线性函数的能力,它们被广泛用于不确定性系统模型逼近中。用 RBF 网络逼近系统模型,由于它的输出与网络参数为线性关系,采用线性系统及自适应控制理论就可保证它的收敛性。但由于 BP 网络比 RBF 具有更大范围逼近能力,对它的研究更有意义。不过 BP 网络收敛速度太慢,易于收敛到局部极小点及整个控制系统稳定性难以保证,它应同其他算法结合以保证系统全局稳定性同时改善收敛速度。本章使用 BP 网络逼近带噪声干扰的非线性系统,并用自适应控制律基于李氏稳定性理论动态调整网络参数,从理论上证明整个控制系统稳定性,并基于 H_∞ 控制理论选择控制量以削减噪声干扰。最后将该算法用于本文两个研究对象:气动伺服系统压力加载控制及机器人轨迹跟踪控制中,仿真及实验结果表明,该算法具有跟踪精度高、收敛速度快的优点。

1.2.2 基于标称模型的仿射非线性系统控制器的研究

1. 非线性系统 H_∞ 性能指标

通常实际系统中不可避免存在各种各样的扰动,如何保证当扰动存在时系统输出还能尽量逼近系统期望值一直是 H_∞ 的一个研究核心问题。 H_∞ 控制设计基本思想是从所有能使系统稳定的控制器中选取一个,使得系统噪声传递函数矩阵 H_∞ 范数指标最小。显然 H_∞ 不失为解决系统鲁棒性问题的一个有效手段。考虑如下 H_∞ 性能指标:

$$\min_{u(\cdot) \in L_2} \max_{0 \neq d(\cdot) \in L_2} \frac{\int_0^\infty \left(\frac{1}{2} \hat{x}^T(t) Q \hat{x}(t) + \frac{1}{2} u^T(t) R u(t) \right) dt}{\int_0^\infty \frac{1}{2} d^T(t) d(t)} \leq \gamma^2 \quad (1-27)$$