

过程控制 科学技术与应用

朱学峰 陈伟基 黄道平 主编



华南理工大学出版社

第十三届中国过程控制年会论文集

过程控制科学技术与应用

朱学峰 陈伟基 黄道平 主编



A1025983

华南理工大学出版社

·广州·

图书在版编目 (CIP) 数据

过程控制科学技术与应用/朱学岷, 陈伟基, 黄道平主编. —广州: 华南理工大学出版社, 2002.7
ISBN 7-5623-1848-4

I. 过… II. ①朱… ②陈… ③黄… III. 自动化技术-应用-论文集 IV. TP29

总发行: 华南理工大学出版社 (广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

发行电话: 020-87113487 87111048 (传真)

E-mail: scut202@scut.edu.cn

<http://www2.scut.edu.cn/press>

责任编辑: 赖淑华 傅穗文

印刷者: 华南理工大学印刷厂

开本: 850×1168 1/16 印张: 54.875 字数: 1790 千

版次: 2002 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

印数: 1~380 册

定价: 198 元

版权所有 盗版必究

前 言

中国过程控制年会由中国自动化学会过程控制专业委员会每年举办一次。其宗旨是为过程控制领域的专家、学者、工程技术人员、研究生提供一个学术交流的机会,以便推动我国过程控制科学技术的发展。从1987年浙江大学举办第一届中国过程控制年会以来,至今已连续举办了十二届,均取得了良好的效果。第十三届中国过程控制年会于2002年7月29日至8月2日在澳门和珠海召开。会议由华南理工大学自动化科学与工程学院与澳门大学科技学院共同承办。参加会议的有来自香港、澳门、加拿大和中国大陆的200多位专家、学者、工程技术人员和研究生,其中包括数名中国科学院与中国工程院院士和许多海内外的著名专家、教授。

本次会议共收到投稿论文322篇,其中香港、澳门作者投稿14篇。经第十三届中国过程控制年会程序委员会组织评审,论文集共收录论文181篇,作为第十三届中国过程控制年会论文发表。这些论文在很大程度上反映了我国过程控制的最新研究成果与发展趋势。论文内容包括线性系统、非线性系统、复杂工业过程控制、过程建模、仿真、优化控制、智能控制、预测控制、自适应控制、鲁棒控制、 H_∞ 控制、软测量技术、检测技术、自动化仪表与计算机控制系统、模式识别与信号处理、生产过程综合自动化、系统监控与故障诊断等理论研究及实际应用成果。本论文集可供从事过程控制理论及应用、生产过程综合自动化研究的高等院校教师和研究生、科研单位的研究人员以及工业部门的工程技术人员参考。

由于编入本论文集的论文清样均来自论文作者,编辑时只能对个别论文的某些局部或格式进行编辑方面的校正,所以书中的欠缺之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

在本届年会的论文征集、审稿以及论文整理过程中,华南理工大学自动化科学与工程学院的肖迺、陈灼明、黄磊老师与部分研究生做了大量、细致的工作。澳门大学科技学院的部分师生也给予了大力的帮助。此外,广大作者也为论文集的编辑与出版给予了充分的支持,在此表示衷心的感谢。

编 者

2002年7月

目 录

一、控制理论与应用

离散时滞系统的降维状态预测观测器及预测控制器设计	唐功友(1)
基于稳定判据设计 MRACS 的研究	杨振野, 李玉忠, 赵士滨(6)
逆系统方法在非自衡系统中的应用	马小平, 宋夫华(11)
Spectrum Distribution For A Class Of The Second Order Coupled Generalized Distributed Parameter Systems	Ge Zhaoqiang(16)
对摄动矩阵中摄动元素的最大摄动界的研究	赵猛, 李平, 朴大雄, 张远志(21)
对非线性 PID 控制器的探讨	黄煥袍, 万晖, 曲云, 韩京清(24)
一种实用的连续系统零极点辨识算法的研究	罗毅, 苏秉理, 陆会明, 田涛(29)
区间牛顿法及其在化工领域中的应用	陈利民, 苏宏业(36)
基于无源性分析的输出反馈控制	张侃健, 冯纯伯(41)
复杂系统控制中的相关技术讨论	杨志, 李太福, 邵艳, 邓仁明(47)
带非线性跟踪——微分器的模糊 PID 控制器设计	唐凤, 武玉强(51)
Multivariable Decoupling Controller Using Multiple Models For Nonminimum-phase System	Xin Wang, Heng Yue, Xiaojie Zhou, Tianyou Chai(56)
基于泛布尔代数的温度控制器的设计与实现	袁佑新, 常雨芳, 黄文聪(61)
时滞抛物型分布参数系统的变结构控制	崔宝同, 王伟, 邓飞其, 刘永清(66)
双变量解耦控制系统的 Z 变换设计方法	王荣辉(71)
On-line Estimation And Predictive Control For Nonlinear Systems With Time-varying Time-delay	Yonghong Tan(77)
一类带扰动线性开关系统输出调节问题的控制策略	刘玉忠, 尹玉娟, 苑明智, 于海斌(83)
线性定常分布参数系统最优边界控制的 Haar 小波逼近算法	曾宪文, 顾幸生, 高桂革(88)

二、过程建模、仿真与优化控制

催化重整流程模拟	胡永有, 苏宏业, 褚健(93)
遗传序优化方法的初步研究	王凌, 张亮, 郑大钟(98)
连续工业过程主元模型研究	赵仕健, 徐用愚(103)
铅锌烧结过程透气性预测与操作优化系统	吴敏, 岑丽辉, 桂卫华, 杜玉晓, 唐朝晖(108)
烧结块状点智能集成预测模型的研究	陈勇, 桂卫华, 陈晓方, 唐朝晖, 杜玉晓, 李瑞娟(113)
中立型大系统的次优控制	肖会敏(118)
一类复杂对象的建模与模糊控制	刘鑫, 王迎春(123)
青霉素反复补料分批发酵过程的模型化与智能优化	徐亲民, 陆旋, 谷达(128)
Optimization of Corrosion Resistance of Laser Melted Plastics Mold Steels in Acidic Media by Automated Nd:YAG Laser	CT Kwok, KI Leong, FT Cheng, HC Man(133)
Delta 算子方法在系统建模与控制中的应用	张瑞金, 吴捷(138)
乙炔加氢反应器动态机理建模与先进控制	罗雄麟, 涂飞, 左信(143)

聚酯缩聚反应过程在线分子量分布的最优估计	范文兵, 张素贞(149)
生化反应过程的模型化与先进控制	金晓明, 王树青(153)
基于数据挖掘的自动寻优控制仿真系统	刘复岩, 吕韶义(158)
改进遗传算法在酯化反应过程在线多目标优化的应用	石伟, 张素贞(162)
基于严格机理方法计算 FCCU 主分馏塔粗汽油干点	刘先广, 黄德先, 田学民(167)
一个多相催化间歇反应过程的数学模型研究	张浞, 蔡瑞英, 王延儒(172)
产品回收系统的库存随机最优控制研究	陈金志, 涂革生(177)
大功率整流机组并列运行的效率优化算法	申群泰, 易伟民(182)
谈炼钢过程控制模型的国产化	杜斌(186)
重组酵母发酵过程的代谢流模型验证	周海英, 袁景洪, 易静(190)

三、智能控制

Fuzzy Traffic Control Based Phase Sequencer	Shen Guojiang, Liu Xiang, Sun Youxian(195)
一类模糊系统的逼近问题	刘晓华, 冯恩民(200)
铅锌烧结过程透气性的混沌遗传算法神经网络模型	杜玉晓, 吴敏, 桂卫华, 岑丽辉, 唐朝晖(205)
渐近推理的直接专家控制	林小峰, 杨晓军, 孟庆波, 宋绍剑(210)
COA 和 LSE 在模糊系统优化设计中的应用研究	柳贺, 黄道(214)
一种模糊聚类的多神经网络在密闭鼓风炉产量预测模型中的应用	李瑞娟, 桂卫华, 陈晓方, 唐朝晖, 李林, 陈勇(219)
基于 Mropolis 准则的混沌控制方法	林元庆(224)
基于 TPS 的用于过热器汽温控制的模糊控制器	王锦标, 王烨(228)
广义信息熵融合异构 RBF 多神经元网络	潘立登, 吴宁川, 赵恒永, 张进明(232)
基于遗传算法的决策树分类器及其应用研究	朱群雄, 王艳清(238)
基于温度场分布的空气循环炉火炉智能控制系统	周璇, 贺建军, 喻寿盛, 桂卫华(242)
基于遗传算法的进化神经网络在甲醇合成中的应用	陈秉威, 黄道(247)
基于放电恒流控制的 FUZZY 控制器的设计	徐冉, 于伟, 郑伟(252)
炼铁过程的信息网络化与炉温智能控制	刘祥官, 刘芳, 蒋美华, 梁新亚, 刘元和, 吴晓峰, 罗登武, 王子金(258)
小波分析在控制中的应用及展望	朱春明, 黄道平(263)
基于实时混合模拟平台的大纯迟后对象的智能控制	赵英凯, 李湘君, 王维(269)
基于元学习的加工过程智能协作控制	温霞, 陈统坚, 彭永红(274)
基于 PID 神经网络的自学习温度控制系统	舒怀林, 舒华(278)
中压馈线自动化中的分段/环网型智能重合控制器	廖力清, 曾可, 凌玉华, 陈辉辉(283)
基于模糊神经网络的 SZ 级合成氨机现场总线控制系统	黄友锐(287)
焦炉集气管压力的模糊解耦调节	方康玲, 周红军, 李曦, 陈国年(292)
基于智能控制的链霉菌发酵补料优化	方菠, 许锋, 孙优贤(297)
灵巧手指的力/位置混合智能控制	张龙, 谭永红(302)
基于遗传算法的 QoS 路由选择策略	胡世余, 谢剑英, 陈应麟, 谢斌(308)
Architecture of an Intelligent Learning Environment for Learning Fraction Operations	KONG Siu Cheung, KWOK Lam For(313)

四、预测控制与自适应控制

机动再入飞行器自适应飞行控制系统研究	王小虎, 陈翰馥, 蔡维黎(318)
无模型自适应控制技术的研究与应用	牟学民(323)

温室温度的预测算法与节能控制策略	郑应文(327)
基于模糊聚类和最小二乘回归的罩式退火炉冷却时间预报	刘全利,王志刚,王晓东,王伟(331)
压合过程的自适应控制技术	范迷和(336)
基于非线性部分最小二乘法的聚丙烯熔融指数预报	黄敏杰,叶昊,王桂增(340)
预测 PID 控制在内部热耦合精馏塔过程上的应用	耿辉,刘兴高,徐用懋(345)
动力调谐陀螺力平衡回路的自抗扰控制	陈沂彦,黄一,韩京清,杨雨,魏宗康(350)
基于不同采样周期的多变量预测控制研究	陆顾新,黄道平,陈铁梅,王永庆(355)
多变量预测控制在工业精馏塔系中的应用	金晓明,荣 冈,王树青(360)
改进的 Specialised Learning 算法及其在非线系统自适应控制中的应用	张日东,李平(365)
多模型非线性预测控制方法	夏晓华,金以慧(370)
广义预测控制的快速算法及在典型过程控制中的应用	许 敏,李少远(375)

五、鲁棒控制、 H_∞ 控制

基于遗传算法的确定结构 H_∞ 鲁棒控制器设计	王兴成,任英(383)
鲁棒进化算法设计	史欣,曹柳林,王晶(388)
H_∞ 设计在锁相环路滤波器中的实现	李森,席斌(392)
线性结构不确定时滞系统的时滞依赖型鲁棒可镇定控制器设计	胡中功,徐利新(397)
Robust H_∞ Filtering for the Delta Operator Formulated Uncertain Systems with Error Variance Constraints	Zhang Duanjin, WuJie(402)
一种基于 LMI 的约束系统滚动时域 H_∞ 控制方法	陈 虹,韩光信(407)
一种基于 LMI 优化的极点配置 H_∞ 估计方法	陈 虹,孙鹏远,申欲晓(412)
一般时变非线性系统 H_2/H_∞ 混合控制	尚群立,薛安克(418)

六、软测量与检测技术

一种油液质量智能检测系统的设计与实现	刘升俭,曹自强(423)
基于模糊神经网络的软测量建模	刘瑞兰,苏宏业,高倩,褚健(427)
基于 DSP 的谐波和无功电流检测	王晓毛,冯操生,张森(431)
基于神经网络的在线软测量技术在 PTA 生产过程中的应用	杜文莉,钱锋(436)
一种改进的神经网络部分最小二乘软测量建模方法	李春富,叶昊,王桂增(441)
单片控制的数据采集与通信	赵定远,赵卫东,杨勇(446)
基于递归神经网络的跳水机松散状况软测量	李 明,郭艳玲,刘佳(450)
基于小波神经网络的软测量技术在发酵过程中的应用	王宇红,黄德先,高东杰,金以慧(454)
硫酸盐法间歇蒸煮过程纸浆 Kappa 值软测量模型研究	李 艳,张 健,黄道平,朱学峰(459)
基于升温曲线模式识别的蒸煮过程卡伯值预测	张健,李艳,黄道平,朱学峰(464)
立德粉质量指标回归神经网络软测量模型研究及其改进	陆峰,罗飞,毛宗源(468)
软测量在 PTA 氧化反应器出料质量控制中的应用	陈磊,姜捷,何衍庆(473)
一种基于多线程的数据采集技术及其应用	姜德胜,成叶红,孙秀霞(477)
基于 PLS 的间歇蒸煮过程 Kappa 值软测量方法	李向阳,朱学峰,黄道平,刘焕彬(482)

七、自动化仪表与计算机控制系统

广州石化进口倾点分析仪改造	符青灵,黄方,梁锐全,李为民(487)
水轮机特性对数曲线投影法的原理和应用实例	徐冠华,程芳真,王宇丁,周小英,张保平(491)
PLC 热备冗余系统及其应用	伍锦荣,章云,李德麟(496)
双机容错系统切换控制逻辑的设计与实现	王生铁,侯晓坤,董志学(501)

LonWorks 在智能家庭控制系统的应用	章捷, 颜文俊(506)
可编程控制器在 MDF 系统中的应用	周国平(511)
现场总线控制网络与企业信息网的集成化研究与设计	同绪丽, 谭瑛, 曾建潮(516)
西门子 PLC、变频器及现场总线在过程控制中的应用	袁晓红, 张连永(520)
TMS320F240 在全数字 PMSM 伺服系统中的应用	魏东, 王克成(523)
基于 DSP 新型频率监控仪的研究	阎秋报, 阳春华, 桂卫华(526)
PC 与 PLC 通信在自来水滤清控制中的实现	刘国繁(531)
LonWorks 网络“即插即用”技术的实现	凌志浩, 俞金寿(536)
TM 卡预付费智能水表	黄清波, 范慧玲, 蒋鹏, 孙优贤(541)
PLC 在三万吨模锻水压机电控系统技术改造中的应用	贺建军, 喻寿益, 桂卫华(546)
I ² C 总线技术及其在控制系统中的应用	郭新宇, 汪慎独(550)
新型高效节能电力测功器	张笑微(555)
基于单片机智能化干点分析仪的控制系统设计	曹洁, 陈希平, 骆东松, 丁守成(559)
用于工业色谱仪的 PC-104 测控系统研究	程明霄, 高喜奎, 王晓荣, 赵业琴, 胡钢, 杨成贵, 徐淮明(564)
PLC 在 PDC 钻头焊接系统中的应用	刘先广, 陈卫红, 张朝晖, 徐建飞, 许敬年(569)
基于现场总线的智能断路控制器的研究	赵跃华(573)
先进控制与现场总线控制系统集成技术研究	苑明哲, 刘玉忠, 周悦, 于海斌(578)
工控组态软件 Kingview 在马蹄焰玻璃窑炉控制系统中的应用	石学文, 武玉强(582)
机器人化铲掘机基于 CAN 总线控制研究	路同俊, 杜志江, 吴平川, 刘洪波(586)
组态软件 WinCC 在轻质墙板生产线中应用中的一些思考	孙磊, 王荣华, 王士敏(591)

八、模式识别与信号处理

基于 Hausdorff 距离的动态数字手势识别	吴江琴, 张良国(594)
一种基于色彩量化的图像彩色分类方法	吕建平, 刘进海(600)
基于像素的图像融合方法研究	吕晓琪, 王洪仁(605)
基于 ART2 网络的微晶玻璃颜色分类	艾娇燕, 朱学峰(610)
微晶玻璃的颜色检测与分类	刘笛, 谢华, 朱学峰(615)
模式聚类在制浆蒸煮过程数据预处理中的应用研究	陈铁梅, 黄道平, 陆顺新, 朱学峰(620)
基于颜色和形态的小型移动机器人分割方法	葛斌, 张晓东, 赵静(625)
一种新的基于网络侦听技术的过程数据析取方法	吴誉, 许晓鸣, 任德祥, 方志宏(628)
一种图像适时无线处理系统	郑天祺, 郭豫嘉(633)
基于 OPC 技术的数据采集系统	曹燕萍, 谢剑英, 陈应麟(636)

九、生产过程综合自动化

MES 中的性能分析技术	赵霞, 邹毅军, 王林, 许晓鸣(641)
主元分析在 MES 中的应用	王林, 邹毅军, 赵霞, 姚文杰, 陈国富(645)
氧化铝生产过程综合自动化系统集成技术的研究	王永富, 史大为, 郑秀萍, 柴天佑, 梁雨峰(650)
基于微晶集群平台的高效并行关联规则挖掘算法	杨欣成, 孙京浩, 黄道(655)
基于 STEP 和 CORBA 的流程行业供应链信息集成研究	年劲飞, 黄道(661)
自控技术在宝钢能源 EMS 系统中的应用	方喆(666)
石化企业 CIMS 应用与发展	张志耀, 赵建华, 周嘉骅(669)
一种基于面向对象的 ERP 系统的设计与实现方法	马力, 吕建平(672)
流程工业中的信息集成系统	孙鹤旭, 花季伟, 董现, 褚建东(677)
Pareto 多目标进化算法在初轧生产调度中的应用	张春槐, 邵惠燕, 吴沂军(682)

制衣工厂生产数据自动收集系统	黄裕松,陈伟基(685)
Full-scale Online Event Ticketing System——The Design and Implementation	
.....	Z. S. Guo W. I. Siu C. T. Wang(688)

十、系统监控与故障诊断

一种基于模糊神经网络的专家系统及在密闭鼓风机故障诊断中的应用	
.....	李林,桂卫华,赖旭芝,唐朝晖,陈晓方,李瑞娟(694)
一种远距离烟气黑度自动监测系统	孙进生,孙铁强(699)
OPC 技术在高炉监控系统中的应用	孙进生,刘利平(703)
基于现场总线的远程监控系统设计	曹燕萍,谢剑英,陈应麟(706)
遗传算法在导弹控制系统测试设备智能故障诊断中的应用研究	原清,贺新峰,刘湘荣(711)
南京热电厂输煤程序控制和监测保护系统研究	胡福年,吴军基(716)
离群挖掘在故障诊断中的应用研究	杨欣斌,孙京浩,黄道(720)
化工过程远程故障诊断技术研究	孙京浩,杨欣斌,黄道(726)
基于多智能体的化工过程故障诊断研究	孙京浩,杨欣斌,侍洪波,黄道(731)
Linux Based Bi-Directional Monitor And Control System	L M Tam, S C Tam, H K Tam, K U Lei(736)
有色金属冶炼余热发电过程分布式计算机监视与控制系统	周先德,吴 敏,桂卫华(740)
基于 PROFIBUS-DP 总线的罐区监控系统的研制	郝汉琪,陆宝春,徐德宏(745)
基于神经网络的传感器故障诊断方法研究	张海琳,杨平,韩瑾,王方红(750)
基于 Web 技术的工业监控系统研究	蔡翔云,姜麟(755)
线性不确定系统鲁棒故障检测器原理与设计	吴新开,章兢,胡小虎(761)
医院病房计算机监护系统设计与实现	徐云胜,伍林(766)
因特网实时智能在线手册	刘淑琴,宗韶妮,崔振起,朱学峰(770)

十一、其他

EIVM 共振柱数字控制系统	杨文龙, X. S. LI(775)
CICS 在基于 Web 的三层体系结构中的应用	朱群雄,姚胜锋(780)
交换以太网技术在控制网络中的运用	唐春晖,沈德耀(785)
探讨概念模式在中国企业的电子采购中的应用前景	庄严,方子钊(790)
虚拟现实技术在实验教学中的应用	袁佑新,彭祥敏,程增艳,王萍(795)
污水生化处理过程 Benchmark 的构造与评价	袁德成,樊立萍,于海斌(799)
基于信息优先级的交换式工业以太网的实时性分析	陈积明,王智,孙优贤(805)
Internet 在工业控制中的应用	成宇,徐立鸿(810)
Automatically Organizing Information Resources in WWW	Ho Cheuk Wai, Gong Zhiguo(815)
神经网络在雅芳销售预测中的应用	郭燕敏,裴海龙,谢斌(819)
基于流程模拟软件的在线应用平台	黄德先,顾键,王宇红,王京春(823)
DeviceNet 协议及产品开发	成继勋,沈洪远,曹照福,谢泽达(828)
面向商务协同的多 Agent 企业集成系统研究	李海刚,吴启迪(834)
间歇蒸煮过程中纸浆卡伯值光学监控技术	沈文浩,刘煥彬,谢益民(839)
一种基于信道反馈错误的自适应 MR-ARQ 协议吞吐量的分析	杨涛,谢剑英,陈应麟,谢斌(844)
Device Driver Development for Embedded Linux	
.....	Lei Un Pang, Vai Mang I, Mak Peng Un, Cheang Sek Un, (849)
快速开发嵌入式 Linux 操作系统	李远鹏,韦孟宇,郑锡玄,麦炳源(853)
Smart Audio Guidance System	Un Pok Choi, Kin Sang Chio, Weng Hongchan, Wei Ji Chen(857)
出版精品图书,服务广大读者——化学工业出版社自动化科技书和教材出版思路	刘哲,唐旭华(861)

离散时滞系统的降维状态预测观测器及预测控制器设计^①

唐功友

(青岛海洋大学计算机系 青岛 266003)

摘 要: 研究状态空间模型的离散时滞控制系统的降维状态预测观测器构造及最优预测控制器的设计问题。针对控制项含有时滞的离散系统,设计了一种降维状态预测观测器,并将该状态观测器用于离散时滞控制系统的最优状态反馈控制中。利用该状态预测观测器可将闭环系统的时滞项移至系统闭环结构之外,从而其优化控制规律完全可以按无时滞系统进行设计。对系统的性能进行了频域和时域分析。给出的性能指标计算公式表明,该预测控制器关于二次型性能指标是次优的。

关键词: 离散时滞系统, 预测控制, 降维状态观测器, 最优控制, 状态反馈

1 引言

模型预测控制(MPC)自70年代诞生以来,被认为是工业过程控制领域内最有吸引力的控制方法之一。MPD得到了控制界和工业界的普遍认同,并已广泛应用于工业过程控制中^[1, 2, 3]。预测控制不同于传统的最优控制,是一种基于模型和基于优化的控制,可以用来解决线性、非线性、定常、时变、时滞等系统的优化控制^[3]。它之所以具有强大生命力,应归功于其基本原理对于复杂工业环境的适应性。这些原理可归结于模型预测,滚动优化,反馈校正。预测控制非常类似于人类在复杂的动态环境中进行决策的行为。预测控制方法主要有 Richioli^[2]和 Mahra^[3]等提出的建立在脉冲响应基础上的模型启发控制(MPHC)或称模型算法控制(MAC), Cutler^[4]等提出的建立在阶跃响应基础上的动态矩阵控制(DMA),及 Clarke^[5, 6]等提出的具有长时段多步预测优化的广义预测控制等。MPC引起了众多科学研究和科研开发工作者的兴趣。90年代以来, MPC无论在理论上还是在实际应用中都得到了突飞猛进的发展^[7, 8]。

本文研究用状态空间模型描述的控制项含有时滞的离散控制系统的降维状态预测观测器及最优预测控制器的设计问题。利用构造预测模型得到的被控对象预测输出向量和系统的控制向量,设计了一种降维状态预测观测器。并将该状态观测器用于离散时滞控制系统的最优状态反馈预测控制中。从频域的分析来看,应用该状态预测观测器可将闭环系统的时滞项移至系统闭环结构之外,从而其优化控制规律完全可以按无时滞系统进行设计。从时域对系统性能进行了分析,并给出了二次型性能指标计算公式。该计算公式表明,该预测控制器关于二次型性能指标是次优的。

2 预测控制系统设计

考虑用状态空间数学模型描述的控制项含有时滞的离散线性定常控制系统

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k-\tau), k=0,1,2,\dots; & x(0) = x_0 \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $x \in R^n$, $y \in R^r$, $u \in R^q$ 分别是状态向量、输出向量和控制向量; $\tau > 0$ 为整数时滞项。 A , B 和 C 分别是相应维数的常量矩阵。假设 A 为稳定矩阵, C 为满秩矩阵, (A, B) 和 (A, C) 分别是能控和能观测的。

本文建立的预测控制器包括状态预测观测器、预测与校正模型, 及最优状态反馈控制器。下面我们

^①国家自然科学基金课题(60074001)和山东省自然科学基金课题(Y2000G02)资助

分别讨论预测控制系统各模块的设计问题。系统的性能分析将在第3节中给出。

2.1 降维状态预测观测器设计

我们知道, 对于 $p \times n$ 满秩矩阵 C , 存在 $(n-p) \times n$ 矩阵 D 使得 $n \times n$ 矩阵 $\begin{bmatrix} C^T & D^T \end{bmatrix}$ 为可逆的。令

$$T = \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 \end{bmatrix}, \quad T^{-1}AT = \begin{bmatrix} A_1 & A_{12} \\ A_{21} & A_2 \end{bmatrix}, \quad T^{-1}B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $T_1 \in R^{n \times p}$, $T_2 \in R^{n \times (n-p)}$, $A_1 \in R^{p \times p}$, $A_{12} \in R^{p \times (n-p)}$, $A_{21} \in R^{(n-p) \times p}$, $A_2 \in R^{(n-p) \times (n-p)}$ 。

令 $\hat{y}(k+\tau)$ 为被控对象的预测输出。我们选择被控对象的预测输出 $\hat{y}(k+\tau)$ 和系统的控制向量 $u(k)$ 作为降维状态预测观测器输入, 构造降维状态预测观测器模型为:

$$w(k+\tau+1) = \hat{A}w(k+\tau) + \hat{B}u(k) + \hat{C}\hat{y}(k+\tau), \quad \hat{x}(k+\tau) = T_2w(k+\tau) + (T_1 + T_2H)\hat{y}(k+\tau) \quad (3)$$

其中 $w \in R^{(n-p)}$, $\hat{A} = A_2 - HA_{12}$, $\hat{B} = B_2 - HB_1$, $\hat{C} = A_2H + A_{21} - HA_{12}H - HA_1$, $H \in R^{(n-p) \times p}$ 为待定观测增益矩阵。

2.2 预测及校正模型设计

仿效系统 (1), 构造状态方程模型如下:

$$\tilde{x}(k+1) = A\tilde{x}(k) + Bu(k-\tau), \quad k = 0, 1, 2, \dots; \quad \tilde{x}(0) = \tilde{x}_0 \quad (4)$$

由 (4) 解得对系统未来 τ 拍时域内的预测状态向量为:

$$\tilde{x}(k+j) = A^j\tilde{x}(k) + \sum_{i=1}^j A^{j-i}Bu(k-\tau+j-i), \quad j = 1, 2, \dots, \tau \quad (5)$$

其中 $\tilde{x}$ 为系统预测状态向量。对系统未来时域输出向量的校正模型为:

$$\hat{y}(k+\tau) = C\tilde{x}(k+\tau) + F(y(k) - C\tilde{x}(k)), \quad j = 1, 2, \dots, \tau \quad (6)$$

其中 $\hat{y}(k+j)$ 为系统未来 j 拍预测输出向量, F 为加权矩阵, 用于控制预测模型精度。

2.3 最优预测控制律设计

控制的目的是选择状态反馈控制规律, 使性能指标:

$$J = \sum_{k=0}^M (x(k)^T Q x(k) + u(k-\tau)^T R u(k-\tau)) \quad (7)$$

取得极小值, 其中 $Q = C^T G C$, G 和 R 分别为 $p \times p$ 和 $q \times q$ 正定矩阵。我们知道, 如果通过选择矩阵 H 使得状态预测观测器 (3) 的观测误差能按任意要求的指数规律趋于零, 则预测最优化反馈控制律为

$$u(k) = (B^T P(k+\tau)B + R)^{-1} B^T P(k+\tau)A(x_s(k+\tau) - \hat{x}(k+\tau)) \quad (8)$$

其中 $\hat{x}(k+\tau)$ 为降维状态预测控制器的输出, x_s 为外部给定状态向量。对于定值调节系统而言, $x_s = 0$ 。

$P(k)$ 是 *Raccati* 矩阵差分方程

$$P(k) = A^T P(k+1)A - A^T P(k+1)B(B^T P(k+1)B + R)^{-1} B^T P(k+1)A + Q, \quad P(M) = 0 \quad (9)$$

的唯一正定解阵。当 $M \rightarrow \infty$ 时, (9) 变为 *Raccati* 矩阵代数方程

$$A^T P A - P - A^T P B (B^T P B + R)^{-1} B^T P A + Q = 0 \quad (10)$$

至此, 预测控制系统各模块设计完毕。下面我们将对该预测控制系统进行性能分析。

3 系统性能分析

3.1 频域分析

令系统的初始条件全部为零。为讨论方便, 我们取 $F = I$ 。系统 (1) 的 Z 变换表达式为

$$Y(z) = C(zI - A)^{-1} B z^{-r} U(z) \quad (11)$$

由状态观测器 (3) 得

$$Z(\tilde{x}(k+r)) = T_2(zI - \bar{A})^{-1} \bar{B} U(z) + (T_2(zI - \bar{A})^{-1} \bar{C} + T_2 H + T_1) Z(\tilde{y}(k+r)) \quad (12)$$

其中, $Z(w(t)) = W(z)$ 为 $w(t)$ 的 Z 变换。由构造状态模型 (4) 和校正模型 (6) 得

$$Z(\tilde{x}(k+r)) = (zI - A)^{-1} B U(z), \quad Z(\tilde{y}(k+r)) = (1 - z^{-r}) C Z(\tilde{x}(k+r)) + Y(z) \quad (13)$$

从而, 有

$$Z(\tilde{y}(k+r)) = C(1 - z^{-r})(zI - A)^{-1} B U(z) + Y(z) \quad (14)$$

再由预测最优反馈控制律 (8), 并取 $M \rightarrow \infty$, 得

$$U(z) = (B^T P B + R)^{-1} B^T P A (X_s(z) - Z(\tilde{x}(k+r))) = K(X_s(z) - Z(\tilde{x}(k+r))) \quad (15)$$

其中 $K = (B^T P B + R)^{-1} B^T P A$ 。综合 (11)、(12) 和 (15), 可以得到闭环控制系统的结构图如下

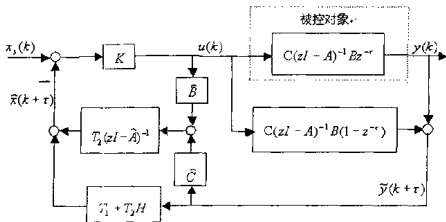


图 1 闭环控制系统的结构图

其中 $x_s(k)$ 是外部给定状态向量。对于定值调节系统而言, $x_s(k) \equiv 0$ 。由图 1 容易看出, 无模型失配时,

闭环控制系统的结构图在原理上与下图等效:

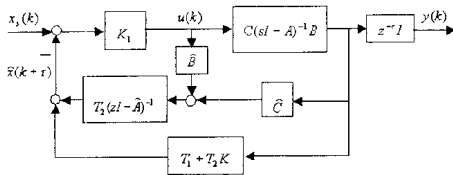


图2 闭环控制系统的等效原理结构图

从图2可知, 由该状态预测观测器构成的将闭环系统将系统的时滞项移至系统闭环结构之外。因此闭环系统的极点已与时滞项无关。

3.2 时域分析

令 $x_{oc} = (D - HC)x - w = \bar{x}_c - H\hat{x}_1$ 为状态观测误差, $x_{pc} = x - \bar{x}$ 为状态预测误差 $y_{pc} = y - \hat{y}$ 为输出预测误差。则由(1)和(3)的第一式得状态观测误差方程

$$x_{oc}(k + \tau + 1) = \hat{A}x_{oc}(k + \tau) + \hat{C}y_{pc}(k + \tau) \quad (16)$$

而由(1)、(4)和(6)得预测误差方程

$$x_{pc}(k + \tau + 1) = Ax_{pc}(k + \tau), \quad y_{pc}(k + \tau + 1) = C(x_{pc}(k + \tau) - x_{pc}(k)) \quad (17)$$

因为 (A_{22}, A_{12}) 是可观测的, 从而由(16)知, 我们可以通过选择矩阵 H , 使得 $(A_2 - HA_{12})$ 的特征值配置在任意要求的左半根平面内, 以保证状态观测误差按预先给定的指数速率趋于 $\hat{C}y_{pc}(t)$ 。所以观测器的观测精度取决于预测模型输出预测误差 y_{pc} 。由(17)和积分中值定理可以得到 y_{pc} 的估计式如下:

$$y_{pc}(k + \tau) = C(x_{pc}(k + \tau) - x_{pc}(k)) = C(A^\tau - I)x_{pc}(k) \quad (18)$$

由上式可知, $\|y_{pc}\|$ 的值取决于 $\|x_{pc}\|$ 和 $\|x_{pc}(k + \tau) - x_{pc}(k)\|$ 。因为矩阵 A 是稳定矩阵, 所以由(16)的第一式知, 状态预测误差满足 $x_{pc}(k) \rightarrow 0, (k \rightarrow \infty)$ 。然而, 由于开环系统即使稳定一般也只具有其自身的平衡能力, $x_{pc}(k)$ 趋于零的能力通常是较慢的。因此仅有这一条件很难达到满意的控制指标要求。输出预测误差 y_{pc} 取决于 $(x_{pc}(k + \tau) - x_{pc}(k))$ 的值说明我们并不一定要求 $\|x_{pc}\|$ 很小, 只要 $x_{pc}(k)$ 变化缓慢, 则可保证输出预测误差 $\|y_{pc}\|$ 就比较小。输出预测误差 y_{pc} 取决于 τ 的大小, 说明对小时滞系统效果更好。因此在系统扰动不太恶劣或在小时滞的情况下, 本文的设计方法一般是可行的。

显然, 如果忽略输出预测误差 $y_{pc}(t)$ 和状态观测误差 $x_{oc}(t)$, 则系统的性能指标近似为最优控制, 即 $J = x^T(0)P(0)x(0)$ 。因此, 在一般情况下, 预测控制器关于系统(1)和性能指标(7)是次优的。

4 结论

本文利用预测模型得到的被控对象预测输出向量和系统的控制向量,设计了一种降维状态预测观测器。并将该状态观测器用于时滞控制系统的最优状态反馈控制中。从频域的分析来看,本文提出的降维状态预测观测器可将系统的时滞项移至系统闭环结构之外。故它具有 *Smith* 预估器^[9]相同的功能。而该状态预测观测器利用了预测模型的系统输出预测值,因此应用更灵活,且具有更强的鲁棒性。通过时域性能分析和对给出的性能指标计算表明,该预测控制器关于二次型性能指标是次优的。从而对含有控制时滞的控制系统预测控制律的分析与设计提供了理论依据。该文的方法可以很方便地应用于系统的有限时段多步预测优化控制。

参考文献

- 1 Grimbie C J, Ordys A W. Predictive control for industrial applications[J]. *Annual Reviews in Control*, 2001, 25: 13-24
- 2 Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V, Scokaert P O M. Constrained model predictive control: Stability and optimality[J]. *Automatica*, 2000, 36(6): 789-814
- 3 Abdelghani-Idrissi M A, Arbaoui M A, Estel L, Richalet L. Predictive functional control of a counter current heat exchanger using convexity property[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2001, 40(5): 449-457
- 4 Richalet J. Model predictive heuristic control: applications to industrial process [J]. *Automatica*, 1978, 14: 413-428
- 5 Mehra R K. Model Algorithmic control (MAC), basic theoretical properties [J]. *Automatica*, 1982, 18: 401-404
- 6 Cutler C R, Ramaker B L. Dynamic matrix control--A computer control algorithm [A]. *JACC* [C]. San Francisco, 1980
- 7 Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control: I. The basic algorithm [J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 137-148
- 8 Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control: II. Extension and interpretations [J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 149-160
- 9 Qin S J, Badgwell T A. An overview of industrial model predictive control technology [A]. *AIChE Symposium Series: Fifth International Conference on Chemical Process Control* [C], California, 1996, 316(93): 232-256
- 10 Morari M, H. Lee Jay. Model predictive control: past, present and future[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1999, 23(4-5): 667-682
- 11 席裕庆, 耿晓军, 陈虹. 预测控制性能研究的新进展[J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(4): 469-475
- 12 Smith D J M. Closer control of loops with dead time [J]. *Chemical Engineering Progress*, 1957, 53(5): 271-280

Design of Reduced-Order Predictive State Observer and Predictive Controller for Discrete Systems with Time-Delay

Tang Gong-You

(Department of Computer Science Ocean University of QingDao QingDao 266003)

Abstract: Structure of reduced-order predictive state observer and design of predictive controller for discrete systems with control time-delay is studied. A reduced-order state predictive observer is design, and it is applied to optimal state feedback control for discrete systems with control time-delay. Using this state predictive observer, the time-delay term of the closed-loop system can be transferred to the outside of the system's closed-loop. Therefore, the optimal control law may be designed according to design methods of systems without time-delay. At the same time, the performance of the system is analyzed in frequency domain and time domain respectively. Computing formula of performance index obtained shows this predictive controller is suboptimal with respect to quadratic performance indexes.

Key words: discrete time-delay systems; predictive control; reduced-order state observer; optimal control; state variable feedback

基于稳定判据设计 MRACS 的研究

杨振野 李玉忠 赵士滨

(广东职业技术师范学院 广州 510665)

摘 要: 基于参数优化方法设计的模型参考自适应控制系统 (MRACS) 通常不能保证系统的稳定性。为此, 本文在文献^[1] 的基础上, 给出了较完善的基于局部参数优化方法设计 MRACS 的方法。与文献^[1] 的方法相比, 本文所提出的方法不仅可以适用与单调整参数的自适应控制系统也能够适用于多调整参数的场合。本文还采用实际工程应用系统验证了本方法的正确性和有效性。

关键词: 自适应控制, 模型参考, 稳定性, 收敛速度

1 引言

在实际工程中, 控制系统的稳定性是系统能否实际应用的首要前提。对于被控制对象的模型参数易于调整的系统大多采用模型参考自适应控制系统 (即 MRACS) 的控制方法。基于李亚普诺夫函数和基于超稳定性理论的设计方法虽然能确保系统的稳定性, 但结构过于复杂而且收敛速度较慢, 难以应用于实际系统中。基于局部参数优化方法设计的 MRACS 与其它几种设计方法相比, 具有收敛速度快和结构简单的优点, 因而有着较高的实际应用价值。然而, 由于基于局部参数优化方法设计的 MRACS 一般不能确保系统的整体稳定性^[3], 使得在实际应用中受到较多的限制。

文献^[2]基于文献^[1] 提出了一种能确保系统整体稳定性的基于局部参数优化方法设计的设计方法。但文献^[2]中所给出的方法仅能适用于单一变化参数的情形, 本文在文献^[2] 的基础上, 对于多变化参数的系统在保证全局稳定的条件下采用局部参数优化方法设计的方法进行了研究。

文中以实际工程应用的控制系统为控制对象, 对本文所提出的算法的正确性和有效性进行了实验验证。

2 设计方法

定理 1 ^[1] 设系统传递函数的分母多项式为:

$$f(s) = a_0 + a_1s + \dots + a_n s^n$$

式中: $a_i > 0, i = 0, 1, 2, \dots, n$;

则系统稳定的一个充分条件是:

$$a_{i-1} a_{i+2} \leq 0.4655 a_i a_{i+1}$$

式中: $i = 1, 2, \dots, p-2; p \geq 3$ 。

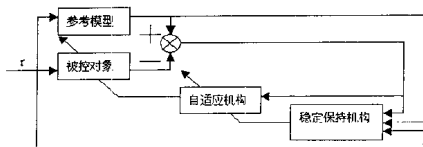


图1 一种能保证全局稳定性的MRACS结构框图

本文所研究的确保持定性的 MRACS 的结构如图 1 所示。由图 1 可知，它比通常的结构图增加了“稳定保持机构”。它的作用是在保证系统全局稳定的前提下，最大限度地加入参数适应调整步长 λ ，以期得到最快的参数收敛速度。“稳定保持机构”可由硬件或软件来实现。由硬件实现，跟踪速度快但系统硬件较复杂；如采用软件实现，则可以节约硬件开销且易于实现较为复杂的算法但速度稍慢，仅能适用于系统参数变化较慢的场合。

不失一般性，设参考模型的传递函数为：

$$G_m(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (1)$$

被控对象的传递函数为：

$$G_s(s) = \frac{N_s(s)}{D_s(s)} \quad (2)$$

系统广义误差为：

$$e = y_m - y_s \quad (3)$$

式中： y_m 为模型输出， y_s 被控对象的输出。考虑到可实现性，须使 $N(s)$ 和 $N_s(s)$ 的阶次分别低于 $D(s)$ 和 $D_s(s)$ 的阶次。根据上述限定可得：

$$D(s) = a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n \quad (4)$$

$$N(s) = b_0 + b_1s + \dots + b_ms^m \quad (5)$$

$$D_s(s) = \alpha_0 + \alpha_1s + \alpha_2s^2 + \dots + \alpha_ns^n \quad (6)$$

$$N_s(s) = \beta_0 + \beta_1s + \dots + \beta_ms^m \quad (7)$$

选定系统目标泛函为：

$$J(e) = -\frac{1}{2} \int_0^\infty e^2 d\tau \quad (8)$$

式中： $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 为系统可调整参数，系统的调节目标为调整这些参数使 J 趋于最小。

由文献^[3]，采用梯度法对上述可调整参数进行寻优，使 $J(e)$ 达到最小值，可得：

$$\alpha_i = \int_0^\infty \lambda_s e \frac{\partial y_s}{\partial \alpha_i} d\tau + \alpha_i(0) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$\beta_i = \int_0^\infty \lambda_s e \frac{\partial y_s}{\partial \beta_i} d\tau + \beta_i(0) \quad i=0, 1, \dots, m \quad (10)$$

$$\frac{\partial y_s}{\partial \alpha_i} \approx -p' y_s \quad (11)$$

$$\frac{\partial y_s}{\partial \beta_i} = p' r \quad (12)$$

定理 2 设参考模型和被控对象的传递函数分别为 (1) 和 (2)，如果 $D(s)$ 是稳定的，且满足 $(a_i - \alpha_i) > 0$ ，则按梯度法设计的模型参考自适应控制系统的保证全局稳定的一个充分条件是：

$$(a_{i+1} - \alpha_{i+1})(a_{i+2} - \alpha_{i+2}) \leq 0.4655 (a_i - \alpha_i)(a_{i+1} - \alpha_{i+1}) \quad (13)$$

式中： $i = 1, 2, \dots, n; n \geq 3$ 。

证明：

将 (1) 和 (2) 式分别改写成微分方程形式:

$$a_0 y_m + a_1 y_m^{(1)} + a_2 y_m^{(2)} + \dots + a_n y_m^{(n)} = b_0 r + b_1 r^{(1)} + \dots + b_m r^{(m)} \quad (14)$$

$$a_0 y_s + a_1 y_s^{(1)} + a_2 y_s^{(2)} + \dots + a_n y_s^{(n)} = \beta_0 r + \beta_1 r^{(1)} + \dots + \beta_m r^{(m)} \quad (15)$$

由 (14)-(15) 并注意到 (3), 整理得:

$$a_0 e + a_1 e^{(1)} + a_2 e^{(2)} + \dots + a_n e^{(n)} + (a_0 - a_0) y_s + (a_1 - a_1) y_s^{(1)} + (a_2 - a_2) y_s^{(2)} + \dots + (a_n - a_n) y_s^{(n)} = (b_0 - \beta_0) r + (b_1 - \beta_1) r^{(1)} + \dots + (b_m - \beta_m) r^{(m)} \quad (16)$$

由系统假设可知 $D(s)$ 是稳定的, 所以 $a_0 e + a_1 e^{(1)} + a_2 e^{(2)} + \dots + a_n e^{(n)}$ 必为稳定的。对于 (16) 式, 要保证系统的全局稳定性则只需使其剩余部分:

$$(a_0 - a_0) y_s + (a_1 - a_1) y_s^{(1)} + (a_2 - a_2) y_s^{(2)} + \dots + (a_n - a_n) y_s^{(n)} = (b_0 - \beta_0) r + (b_1 - \beta_1) r^{(1)} + \dots + (b_m - \beta_m) r^{(m)} \quad (17)$$

保持稳定即可。假设自适应的速度是缓慢的, 即在分析系统稳定性时可近似认为系统参数是恒定的。基于这一假设, 引用定理^[1]可知: 使自适应控制系统保持稳定的充分条件为:

$$(a_{i+1} - a_{i+1}) (a_{i+2} - a_{i+2}) \leq 0.4655 (a_i - a_i) (a_{i+1} - a_{i+1}) \quad (18)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, p-2; p \geq 3$ 。

证毕。

对于实际系统, 方程阶次一般不高于三阶, 下面让我们以二阶系统为例来说明具体实现方法。设有三阶系统, 即 $n=3, m=2$ 。此时如将 (9) 和 (10) 代入 (18) 得:

$$(a_0 - \lambda_0) \int_0^\infty e^{\frac{\partial y_s}{\partial \alpha_0}} d\tau - a_0(0) (a_3 - \lambda_0) \int_0^\infty e^{\frac{\partial y_s}{\partial \alpha_3}} d\tau - a_1(0) \leq 0.4655 (a_1 - \lambda_0) \int_0^\infty e^{\frac{\partial y_s}{\partial \alpha_1}} d\tau - a_1(0) (a_2 - \lambda_0) \int_0^\infty e^{\frac{\partial y_s}{\partial \alpha_2}} d\tau - a_2(0) \quad (19)$$

显然, (19) 是一个关于 λ_0 的一元二次方程, 只需在线求解 λ_0 即可保证系统全局的稳定性。在实际应用中, λ_0 取稍小为宜, 以免使稳定性变差。

3 实验研究

我们将上述设计方法应用于油槽 (变压器油) 温度控制系统。该控制系统是为东风汽车集团公司设计试制的, 作为非标测试台用于标定汽车水温传感器。基本技术要求如下:

- 油温控制精度: $\pm 0.1^\circ \text{C}$
- 油温控制范围: $80^\circ \text{C} \sim 100^\circ \text{C}$
- 要求油温的变化规律为:

环境温度 $\rightarrow 80 \pm 0.1^\circ \text{C}$ 维持 5 分钟 $\rightarrow 100 \pm 0.1^\circ \text{C}$ 维持 5 分钟 $\rightarrow 80 \pm 0.1^\circ \text{C}$ 维持 5 分钟 $\rightarrow 100 \pm 0.1^\circ \text{C}$ 维持 5 分钟 $\rightarrow \dots$

由^[5]可知油槽温度控制系统的数学模型近似为:

$$G(s) = \frac{(s + \frac{1}{CwR}) \frac{1}{Cf}}{s^2 + \frac{1}{R} (\frac{1}{Cf} + \frac{1}{Cw}) s + Q} \quad (20)$$

式中: C_f 和 C_w 分别为油液和容器的热容; T_f 和 T_w 分别为油液和容器的温度; R 为总热阻; Q 为容器的散热损耗。之所以要考虑散热损耗, 是因为系统有降温的要求, 这一点不同于一般的恒温控制系统。将 (20) 化为 (2) 的二阶形式: