

【主编 / 贾磊】

【中国自动化学会青年工作委员会系列丛书】

自动化理论、技术与应用

ZIDONGHUA LILUN
JISHU YU YINGYONG

(第11卷)

山东大学出版社

中国自动化青年工作委员会系列丛书

自动化理论、技术与应用

(第 11 卷)

主 编 贾 磊
副主编 王玉振 高 瑞

山东大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

自动化理论、技术与应用/贾磊主编. —济南:山东大学出版社,2004.8
(中国自动化学会青年工作委员会系列丛书)
ISBN 7-5607-2807-3

I. 自…

II. 贾…

III. 自动化技术-文集

IV. TP2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 069804 号

山东大学出版社出版

(山东省济南市山大南路 27 号 邮政编码:250100)

山东省新华书店经销

青岛星球印刷有限公司印刷

880×1230 毫米 1/16 48 印张 1516 千字

2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

定价:200.00 元

版权所有,盗印必究

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页、由本社营销部负责调换

前 言

面对新世纪的巨大挑战和机遇,新一轮的人才科技竞争已经展开,谁拥有人才和先进的科学技术,谁就拥有未来,这是时代的必然。因此,在激烈的国际竞争之中,在我国社会主义现代化建设已步入高速发展轨道的大好形势下,青年科技工作者肩负着艰巨而伟大的历史重任。自动控制学科的发展,对我国现代化建设具有意义重大的推动作用。中国自动化学会第19届青年学术会议就是在这样的背景下召开的。本届年会的宗旨是检阅我国自动控制及相关学科青年科技工作者的科研成果和水平,为促进青年科技工作者之间的交流和沟通提供一个良好的平台,努力提高我国自动控制及相关学科的整体水平。

本届年会由中国自动化学会青年工作委员会主办,山东省自动化学会协办,山东大学控制科学与工程学院承办。

本届年会在全国自动控制领域,特别是在青年科技工作者中产生了很大的影响。自2004年2月向各单位、个人发出征文通知,共收到来自全国六七十所高等院校、科研机构和大中型企业的论文163篇,征集的论文内容涉及整个自动控制领域的研究和开发应用,以及自动控制的相关学科。在这些论文中有许多是青年科技工作者在基层从事的研究工作;还有得到省部级自然科学基金和重大项目科研基金支持的项目;也有获得明显经济效益的研究开发课题。

本论文集共收录了145篇论文,分为广义系统、大系统、非线性系统、混沌系统、系统稳定与镇定;自适应、预测、变结构控制、 H_∞ 控制、优化和鲁棒控制;智能控制、模糊控制、人工智能与专家系统;系统建模、辨识和估计;规划、管理与自制、容错控制和故障诊断系统神经网络及应用;机器人与机器人控制;离散事件动态系统、调度、决策系统;混合动态系统及控制;计算机视觉、图像处理与模式识别;自动化仪表与过程控制;电力系统及其自动化;电机驱动及运动控制;传感器与检测技术;软件工程、并行处理;计算机集成制造系统;计算机软硬件技术及其应用;数据融合与软测量;单片机控制及其应用技术;企业发展策略及管理决策;工业过程与生产管理和其他部分等。这些论文有理论、有实践、有分析、有建议,内容丰富,基本上代表了当今我国青年科技工作者在自动控制学科领域的学术水平,比较全面的反映了近年来我国青年科技工作者在自动化及相关学科领域内取得的最新研究成果,具有一定的学术价值。由于篇幅所限,对于投稿的论文我们不能全部收录。无论是否收录本论文集,我们对所有应征论文的作者和热心推荐青年作者的专家与单位表示衷心的感谢!

中国自动化学会青年工作委员会对本届年会给予了高度的重视,把它列为学会主办的重大学术活动之一。学会的各级领导对会议的筹备和组织工作给予了热情关怀和悉心指导,山东大学的校领导和控制科学与工程学院的各级领导为年会的组织筹备工作创造了良好的条件。山东大学出版社的相关同志对该论文集的出版极为关心,为了使该论文集及时出版,他们付出了大量的汗水和劳动,在此我们谨向所有关心、支持和帮助我们的领导、前辈和朋友们表示我们最诚挚的谢意!

本论文集由贾磊任主编,王玉振、高瑞任副主编。

我们希望本届年会的召开和本论文集的出版能进一步促进我国自动控制及相关学科的蓬勃发展,激励青年科技工作者为祖国的社会主义现代化建设贡献青春和才智。

科技增强国力,青年开创未来!

中国自动化学会第19届青年学术会议组委会

2004年8月16日

目 录

1 广义系统、大系统、非线性系统、混沌系统、系统稳定与镇定

区间多项式稳定性理论在 PID 控制器设计中的应用	李雪芳 李东海 老大中 (1)
成本控制矩阵不确定的 SLQR 问题的研究	蒲兴成 黄席樾 汪纪锋 (6)
球形对象鲁棒镇定问题可解性必要条件	杜 凯 伍清河 (11)
Stable Model Reference Adaptive Fuzzy Control for SISO Nonlinear Systems	Zhang Huiyan (15)
一种高性能交流伺服非线性控制器的设计	魏 刚 刘锦波 (22)
Analysis on the System's Brittleness Entropy	Li Qi Jin Hongzhang Lin Deming (29)
Adaptive Control of Nonlinear Systems by Using Basis Function Networks	Chen Yuehui Dong Jiwen Yang Bo (33)
基于动平衡状态理论的反馈线性化直接方法研究	王 莉 王庆林 (42)
中立型微分系统 $\dot{x}(t) - \sum_{k=1}^N B_k \dot{x}(t - k\tau) = A_0 x(t) + \sum_{k=1}^N A_k x(t - k\tau)$ 时滞无关稳定的代数判据	魏 萍 郁文生 王 龙 (47)
混沌通信同步方法综述	陆锁军 童开峰 方建安 (57)

2 自适应、预测、变结构控制、 H_∞ 控制、优化和鲁棒控制

时滞线性切换系统的稳定与镇定	景 丽 高立群 (66)
具有 H_∞ 、圆形极点和状态方差约束的待机控制	马 静 (71)
An Adaptive Deadbeat Current Controller for High Performance Induction Machine Drives	Cheng Jinlu Zhang Chengjin (75)
二自由度 PID 控制器及其参数的 IMC 整定	巨 辉 (82)
含有未知时滞的不确定关联大系统的鲁棒自适应控制	王春晓 李俊民 (87)
Adaptive H_∞ Control of Synchronous Generators with Hamiltonian Function Method	Li Shujuan Wang Yuzhen (93)
Observer Design for Synchronous Generators with Both Steam Value and Excitation Controls	Chen Jing Wang Yuzhen (100)
一类约束时滞不确定系统的 PID 控制器设计及其应用	滕海涛 朱瑞军 潘学军 (106)
基于满意优化的多约束非线性预测控制	胡玉娥 (109)
Chaos Synchronization Based on Optimal Control	Liu Tongshuan Guan Xinping Xu Hao (114)
基于广义预测控制的改进 Smith 预估器	李攀峰 杨明辉 田学民 (121)
城市主干路相位差的实时优化及实现	迟恩先 全 军 汤春华 (125)
基于种群参考的 XOHC 算法	谢集平 丁晓东 贾晓辉 肖龙光 (130)
一类不确定时滞系统鲁棒故障诊断滤波器设计的 LMI 方法	何 宁 钟麦英 (135)

3 智能控制、模糊控制、人工智能与专家系统

高精度模糊控制器的研究与进展	田 勇	沈祖诒	(140)
基于模糊理论和粗集的规则提取约简方法及其应用	吴军生	翟纯玉 林家恒	(146)
模糊 PD 控制在室外移动机器人路径跟踪中的应用	洪 鑫	盛珣华	(152)
智能语音播放体育比赛记分器的研究与开发	杨志宏	王 志 杨 鹏	(157)
学习控制在智能假肢中的研究	王 辉	杨 鹏 郭 欣	(161)
基于 Fuzzy-PID 控制的陀螺温度控制系统研究	马小霞	李汉舟 马建辉	(165)
模糊系统最优保性能控制应用研究	陈 珺	刘 飞	(170)
基于集对分析的模糊逻辑及其推理方法研究		成科扬	(176)
基于遗传算法的 Fuzzy-PID 控制器的仿真研究		周应兵	(183)
用 BP 神经网络逼近模糊控制芯线的自学习模糊控制	严海林	戴亚平	(188)
基于模糊控制的直流电动机调速系统的仿真研究	肖海荣	刘文江	(194)

4 系统建模、辨识和估计

基于改进蚁群算法的非线性系统辨识	徐 珊	左 斌 司守奎	(198)
基于 C MEX S-函数交流异步电机控制系统仿真建模研究	沈艳霞	薛 花 姜建国	(202)
功率因数校正系统的建模仿真	冯兴田	张加胜	(208)
基于数据安全的射频识别系统	李 军	王划一 李巍巍	(213)
基于开关函数的三相 PWM 电压型逆变器的仿真研究	孙 霞	夏东伟	(217)

5 规划、管理与自制、容错控制和故障诊断系统

基于神经网络专家系统的内燃机故障诊断研究	李彦凤	刘 玫 方汉学	(221)
基于改进小波包和模糊神经网络的故障诊断专家系统	李春鑫	李天伟	(225)
基于神经网络自举的水电机组故障诊断	鹿卫国	戴亚平 高 峰	(230)
UML 建模机制研究及在系统需求分析中的应用	王 枫	石冰心	(235)
基于模糊模式识别的柴油机故障诊断	赵 芳	方汉学	(243)
基于支持向量回归的润滑油中金属含量预测	杨 俊	谢寿生	(248)
FTA 的一种有效搜索策略	浣 上	龙志强	(253)
小波网络在故障信息识别中的应用	丁军航	原明亭	(258)

6 神经网络及应用

FMLP 模糊神经网络在倒立摆控制中的应用	李 建	王划一 许媛媛	(263)
一种改进的模糊极小极大神经网络在水电机组故障诊断中的应用	唐烨华	戴亚平	(269)
一种配电网超短期负荷预测的神经网络方法	苏庆新	邓 娜 汤兵勇	(275)
用于非线性回归估计的支持向量机	史清江	王延江	(279)
基于遗传-神经网络的 ITS 交通量的研究	秦伟刚 贾 磊 庞清乐	臧利林 张立东	(285)
一种基于小波网络的控制算法研究	郭彤颖	曲道奎 王海忱	(289)
基于免疫算法的神经网络集成	张正道	张 新 于丹石	(297)
一种智能 PID 控制器的设计	张 云	贾 磊	(303)

7 机器人与机器人控制

仿人机器人跳跃控制算法的研究	绳 涛	李 迅	(307)
仿人机器人环境适应控制的研究	绳 涛	马宏绪	(313)
不确定机器人系统模糊滑模控制器设计	孙炜伟	武玉强	(320)
基于 DTS-CMAC 的机器人分布式智能控制	王俊松 刘玉敏 田 库	谢 超	(326)
基于物体识别的室内机器人导航	李新征 易建强 赵冬斌 洪一平	钟志光	(330)
一类足球机器人色标系统的分析与设计	张 真 陈 波 马 坤 李晓磊 田国会		(336)

8 离散事件动态系统、调度、决策系统

基于随机 Petri 网的工作流层次建模及其性能评估	孙 萍	(341)
基于遗传算法的排课问题求解	胡献华 陈 江 陈启华	(347)
基于单机排序问题的降落飞机分组排序策略研究	杨秋辉 游志胜	(352)
虚拟手抓握动作的研究与实现	卢晓军 李 焱 贺汉根	(357)

9 混合动力学系统及控制

调宽采样控制系统的 HDS 有界性分析	杜 洋 王 焱 高 瑞	(364)
混合动力轿车多能源动力总成控制系统研制与开发	王小明 宋剑锋 陈 熙 周 荣 吴志新	(371)
Adaptive Finite-Time Control of Second Order Nonlinear Systems	Hong Yiguang Wang Jiankui	(376)

10 计算机视觉、图像处理与模式识别

地图分形信息研究的算法分析	赵 青 刘孝贤	(381)
一种基于整数小波变换的无损编码算法	付 炜 林春雨 景 源 孟 娟	(387)
一种基于部分先验信息的模糊图像恢复新算法	段立晶 梁德群 王新年	(391)
在线掌纹的定位技术	许媛媛 林家恒 李 建 刘 静	(396)
指纹识别系统原理与设计	李华丰 刘萌萌 余立建	(402)
周期特性在小目标观测参数估计中的应用	卜彦龙 沈林成	(409)
合成孔径雷达图像的人造目标分割研究	曹兰英 夏良正	(415)
Intel IPP 的图像处理应用与研究	卢义刚 雷跃明 李殿赞	(419)
基于视觉与电子地图的 AGV 组合导航系统研究	张在房 沈敏德	(425)
小波包在信号去噪中的应用	梁志伟 邱书波	(432)

11 自动化仪表与过程控制

基于可编程片上系统的干式电力变压器智能温控仪	刘 涛 李现明	(437)
基于 VxD 技术的自行火炮发动机瞬时转速测量装置设计	徐荣武 李志宁 封汉颖	(442)

12 电力系统及其自动化

- 提高电压稳定的 SVC 非线性控制策略 王晓燕 邱晓燕 (447)
 一种基于工业以太网和 LONWORKS 总线的配电系统网络架构 陈桂友 孙同景 钟麦英 (452)

13 电机驱动及运动控制

- 一种扩展隶属函数及其在电力系统故障选线中的应用 仇志华 康忠健 张加胜 (456)
 异步电动机变频调速系统的最小损耗控制策略 崔纳新 张承慧 (462)
 无刷直流电机控制系统及其在电动自行车上的应用 王荣忠 孙同景 陈桂友 (468)
 多电平逆变器拓扑综述 邱心涛 夏东伟 (473)
 大功率直流屏用高频开关电源研制 李永臣 卢鑫 孙立业 (479)
 采用恒流控制的内燃机车柴油机启动方法的仿真研究 江春冬 (483)

14 传感器与检测技术

- 一种基于毫米波雷达的金属探测器的设计 王博 王新城 (486)
 开环光纤陀螺信号的一种测试方法 卫瑞 汪顺亭 缪玲娟 朱昀熠 (491)
 基于 89C51 的网络中心监控系统的设计与实现 刁勇 都永铃 周志群 耿欣 (495)
 小波自适应在抑制心电噪声中的应用 陈振生 亓慧 张艳丽 (499)
 长输管道泄漏检测技术现状及发展 丁新 隋青美 蒋奇 国兵 (503)
 基于 SOM 和 BP 神经网络的入侵检测模型研究 杨立洁 杨波 (508)
 Optimal Scalar Weighted Information Fusion for Multi-Sensor Kalman Predictors
 Sun Shuli (512)
 受激布里渊散射的声子衰减特性研究 邱卫卫 隋青美 张桂涛 (518)
 基于 AT89C51 的无线远程测温系统设计 彭寒梅 王根平 易灵芝 (523)
 基于布里渊散射的分布式光纤传感器的发展 韦斌 隋青美 张桂涛 (526)

15 软件工程、并行处理

- 导航仪器故障诊断系统软件可靠性评估 黄谦 李天伟 李春鑫 (531)

16 计算机集成制造系统

- 基于 Web 的建筑管理系统集成方法研究 曾明 陈立定 胥布工 (535)

17 计算机软硬件技术及其应用

- PS/2 键盘和鼠标的接口研究及其在单片机中的应用 张轶飞 张智詮 王宏 姚蓼 (541)
 基于互联网的远程控制系统关键技术研究 李晓琪 戴亚平 (548)
 可编程平衡 GOLD 码的 VHDL 实现 赵林军 梁芳 崔淇 (554)
 基于通用串行总线的数据采集系统开发 侯冬冬 耿艳峰 郑金吾 万勇 (557)
 一种新型免疫算法及在优化中的应用 任伟建 王爱军 霍凤财 (561)

一种基于 J2EE 和 J2ME 的、支持移动办公的办公自动化系统设计与实现

.....	杨 武 涂 飞 何 波	(565)
基于 VC++ 微观城市交通仿真系统的研究与实现	臧利林 贾 磊 秦伟刚	张立东 (570)
CAN 现场总线在测控系统中的应用	代爱妮	潘松峰 (576)
基于现场总线的压力自动检测系统		原明亭 (582)
基于 C/S 的复杂流程工业生产调度系统的研究与开发	王 珂	李歧强 (585)
钢铁工业 MES 中的质量智能判定管理系统的设计与应用	江辉智 罗 键	曹浪财 (590)
Linux 设备驱动程序设计	李洪峻	李 迅 (595)
地面机动目标跟踪的多模算法与滤波方法的研究		曲 岩 (599)
多地点远程智能语音报警系统设计	易灵芝	王根平 (604)
SINS 组合导航系统中多串口的扩展	牛彦奎 沈 军	缪玲娟 (609)
大规模 One to One 营销优化软件的设计与实现	熊亚军 吴 敏	何 蓓 (613)
uC/OS-II 下的 ST16C554 串行通信系统的设计与实现	刘 刚 缪玲娟	沈 军 (618)
基于 Internet 的远程实验室的研究	沈桂兰	李 辉 (622)

18 数据融合与软测量

跟踪密集多回波环境下多机动目标的 IMM-PC 算法		汪圣利 (627)
一种基于证据理论的目标识别加权数据融合	张文华 张凤鸣	惠晓滨 (631)

19 单片机控制及其应用技术

单片机通讯中波特率自动跟踪的一种方法	国 兵	隋青美 (635)
应用 F2812 的数字运动控制系统	耿庆锋 吕 强 苏奎峰	乔志刚 (640)

20 企业改革发展策略及管理决策

灰色机会约束规划在生产计划优化中的应用	侯艳君	赵 钦 (647)
VMI 战略联盟合作基础的博弈分析	陈联丁	罗 键 (652)

21 工业过程与生产管理

PLY600 配料控制器与 InTouch 的通讯实现	郭庆强 金 萍	李歧强 (657)
变电站自动排水系统的研制与应用		林德概 (661)
串行通讯技术在工业控制现场中的应用	徐 健 马 宾	王划一 (664)
基于粗糙集分析方法的煤炭自燃早期预测	谭立云 高学东	唐加福 (668)
基于多分辨率分析的小波网络建模方法在发酵过程中的应用	高永超 隋青美	丁军航 (673)
控制系统理论在项目过程管理中的应用		王根平 (678)
炼焦生产的 Freelance2000 控制系统	陶文华	李晓峰 (682)
自动控制系统在水泥工业的应用研究	狄小峰	袁铸钢 (686)
现场总线技术及其应用	王孝红 王斌鹏 孟庆金 袁铸钢	景绍洪 韩 斌 (691)
面向订单的服装企业的生产计划的动态调度方法	范丹丹 方建安	王直杰 (697)

22 其 他

智能交通系统(ITS)综述.....	张立东	贾 磊	臧利林	秦伟刚 (702)
一种基于电话网络的人体急救报警器				李 可 (708)
分层聚类法中采用不同距离聚类的比较分析				张秋霞 (714)
开关电源的一种新型方案的研究与开发	张 磊	张加胜		高春侠 (719)
低能电子束的能量沉积模拟与曝光分析	宋会英	张玉林	魏守水	孔祥东 (724)
基于 GPS 和 IGRF 的航行器磁航向地磁偏角修正	刘歌群	刘卫国	卢京潮	高建尧 闫建国 (729)
一种基于网格的雷达优化配置与部署方法	白 玉	张 娟		窦丽华 (734)
GM(1,1)灰色预测模型方法及其应用研究——基于福建省人均 SO ₂ 排放量的案例分析			董文波	米 红 (740)
基于 Matlab/Simulink 的三水箱系统建模与动态仿真	王晓鹏	曾照香		杜培宇 (746)
集约生产计划模型的分解迭代算法与整数仿真		冯德鸿		刘红美 (751)

1 广义系统、大系统、非线性系统、混沌系统、系统稳定与镇定

区间多项式稳定性理论在 PID 控制器设计中的应用

李雪芳¹ 李东海² 老大中¹

(1 北京理工大学 机电工程学院 北京 100081)

(2 清华大学 热能工程系 北京 100084)

E-mail:lixuefang0320@sohu.com

摘 要 针对模型参数经常存在一定的不确定性的单变量系统,通过研究区间多项式稳定性理论在鲁棒 PID 控制器设计中的应用,以幅值相位裕量法为例提出了对此类控制对象 PID 控制器的鲁棒性分析和设计的方法和步骤,并进行了实例研究.

关键词 区间多项式稳定性理论,PID 控制器,鲁棒性

The Applications of Interval Polynomial Stabilization Theorem in PID Controllers

Li Xuefang, Li Donghai, Lao Dazhong

(1 Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

(2 Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract For the single variable control systems with uncertain model Parameters, throughing the studies of the applications of Interval Polynomial Stabilization Theorem in PID controllers. A new method is proposed to design robust PID controllers based on the method of GPM.

Key words interval polynomial stabilization theorem; PID controllers; robust

1 引 言

经典的反馈控制系统设计中,PID 控制器是根据被控对象的精确模型设计的,但在工程实际中,控制对象的模型参数经常存在一定的不确定性. 区间多项式稳定性理论的发展,为鲁棒 PID 控制器的设计提供了理论上的依据. 故本文研究了区间多项式稳定性原理在鲁棒 PID 控制器设计中的应用,旨在探索一种新的鲁棒 PID 控制器设计的方法. 并针对实参数在有界范围内变动的一类控制对象,在区间

多项式稳定性理论的基础上,提出了对此类控制对象 PID 控制器的鲁棒性分析和设计的方法和步骤,并进行了实例研究。

2 区间多项式稳定性理论在鲁棒 PID 控制器设计中的应用

2.1 控制系统简介

本文所研究对象为单变量系统,传递函数表示为:

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0}{a_ns^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \quad (1)$$

式中 $N(s)$ 与 $D(s)$ 均为多项式,并且是互质的, $N(s)$ 的阶数 $\leq D(s)$ 的阶数。

所研究的被控制对象模型含有一定的不确定性,设其传递函数的参数在有界区域内变动,因此构成一个传递函数族 $\{G(s)\}$ 。

所采用的 PID 型控制器的表达式:

$$C(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s = \frac{K_i + K_p s + K_d s^2}{s} \quad (2)$$

其参数 K_p, K_i, K_d 均为正实数,因此所有的 PID 型控制器组成一个控制器集合 $\{PID\}$ 。

2.2 Kharitonov 定理分析 PID 控制器鲁棒性

图 1 所示闭环控制系统的传递函数为:

$$G_b(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

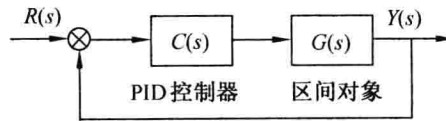


图 1 闭环区间控制系统

将式(1)和(2)代入可得其特征多项式为:

$$T(s) = s \cdot D(s) + (K_i + K_p s + K_d s^2) \cdot N(s)$$

为了简化公式推导,把 $N(s)$ 写成更一般的形式:

$$N(s) = b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0$$

当 $j = m+1, m+2, \dots, m+n$ 时, $b_j = 0$, 可得:

$$\begin{aligned} T(s) &= s \cdot (a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0) + (K_i + K_p s + K_d s^2) \cdot (b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0) \\ &= K_i b_0 + (a_0 + K_p b_0 + K_i b_1) s + (a_1 + K_d b_0 + K_p b_1 + K_i b_2) s^2 + (a_l + K_d b_{l-1} + K_p b_l + K_i b_{l+1}) s^{l+1} \\ &\quad + \dots + (a_{n-1} + K_d b_{n-2} + K_p b_{n-1} + K_i b_n) s^n + (a_n + K_d b_{n-1} + K_p b_n) s^{n+1} + K_d b_n s^{n+2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $l = 1, 2, \dots, n-1$, 令

$$T(s) = q_0 + q_1 s + q_2 s^2 + \dots + q_l s^l + \dots + q_{n+1} s^{n+1} + q_{n+2} s^{n+2}$$

因为 K_p, K_i, K_d 均为大于零的实数,很容易看出, $T(s)$ 各项系数取值区间的上限为各系数多项式中 a, b 都取最大值,下限为 a, b 都取最小值

$$\begin{aligned} q_0 &\in [K_i b_0^-, K_i b_0^+] \\ q_1 &\in [a_0^- + K_p b_0^- + K_i b_1^-, a_0^+ + K_p b_0^+ + K_i b_1^+] \\ &\dots \dots \\ q_{l+1} &\in [a_l^- + K_d b_{l-1}^- + K_p b_l^- + K_i b_{l+1}^-, a_l^+ + K_d b_{l-1}^+ + K_p b_l^+ + K_i b_{l+1}^+] \\ &\dots \dots \\ q_{n+2} &\in [K_d b_n^-, K_d b_n^+] \end{aligned} \quad (4)$$

由此可以得出四个 Kharitonov 多项式^[2]

$$\begin{aligned} T_1(s) &= q_0^- + q_1^- s + q_2^+ s^2 + q_3^+ s^3 + q_4^- s^4 + q_5^- s^5 + \dots \\ T_2(s) &= q_0^+ + q_1^- s + q_2^- s^2 + q_3^+ s^3 + q_4^+ s^4 + q_5^- s^5 + \dots \\ T_3(s) &= q_0^+ + q_1^+ s + q_2^- s^2 + q_3^- s^3 + q_4^+ s^4 + q_5^+ s^5 + \dots \end{aligned}$$

其中 q^+, q^- 为(4)式中所示各区间的边界. 如果这四个 Kharitonov 多项式均为 Hurwitz 稳定的, 则说明所设计的 PID 控制器能镇定整个区间函数族内的所有对象, 满足鲁棒性要求.

由于 Kharitonov 定理要求多项式各参数之间相互独立, 而实际控制系统的特征多项式(3)的各系数不是独立变化的, 因此, 上面所提的条件为判定 PID 控制器能否镇定整个区间函数族的充分条件, 即能满足上述要求的 PID 控制器一定满足鲁棒性要求. 这为参数在有界区域内变动的工程对象的 PID 控制器鲁棒性分析提供了一种简便有效的方法. 对于存在纯延时的被控对象, 可以对纯延时采用 Pade 近似, 也可以用上述方法来近似分析控制器的鲁棒性.

2.3 广义 Kharitonov 定理分析 PID 控制器鲁棒性

广义 Kharitonov 定理^[3], 也叫盒子定理, 是判断控制器镇定区间对象族的充要条件. 对象传递函数如式(1)所示.

(1) 哈里托诺夫顶点对象

Kharitonov 顶点对象是由分子、分母多项式族的 Kharitonov 顶点多项式构成的多项式的全体:

$$G_K^{i,j} = \frac{N_K^j(s)}{D_K^i(s)}, \quad i = \overline{1,4}, j = \overline{1,4} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} N_K^1(s) &= b_0^- + b_1^- s + b_2^+ s^2 + b_3^+ s^3 + b_4^- s^4 + b_5^- s^5 + \dots \\ N_K^2(s) &= b_0^+ + b_1^- s + b_2^- s^2 + b_3^+ s^3 + b_4^+ s^4 + b_5^- s^5 + \dots \\ N_K^3(s) &= b_0^+ + b_1^+ s + b_2^- s^2 + b_3^- s^3 + b_4^+ s^4 + b_5^+ s^5 + \dots \\ N_K^4(s) &= b_0^- + b_1^+ s + b_2^+ s^2 + b_3^- s^3 + b_4^- s^4 + b_5^+ s^5 + \dots \end{aligned}$$

类似地可以写出 $D_K^i(s), i = 1, 2, 3, 4$.

PID 控制器能镇定顶点对象是指 16 个顶点多项式

$$s \cdot D_K^i(s) + (K_i + K_p s + K_d s^2) \cdot N_K^j(s) \quad (6)$$

其中 $i = \overline{1,4}, j = \overline{1,4}$ 都稳定, 它是 PID 控制器镇定区间对象族的必要条件.

(2) 哈里托诺夫边对象

$$\begin{aligned} G_{s1}^{i,j} &= \frac{N_S^j(s)}{D_K^i(s)}, \quad i = \overline{1,4}, j = \overline{1,4} \\ G_{s2}^{i,j} &= \frac{N_K^j(s)}{D_S^i(s)}, \quad i = \overline{1,4}, j = \overline{1,4} \end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} N_S^1(s) &= (1-\lambda) N_K^1(s) + \lambda N_K^2(s), \lambda \in [0, 1] \\ N_S^2(s) &= (1-\lambda) N_K^2(s) + \lambda N_K^3(s), \lambda \in [0, 1] \\ N_S^3(s) &= (1-\lambda) N_K^3(s) + \lambda N_K^4(s), \lambda \in [0, 1] \end{aligned}$$

类似地可以写出 $D_S^i(s), i = 1, 2, 3, 4$.

PID 控制器能镇定边对象是指 32 个线段多项式:

$$s \cdot D_K^i(s) + (K_i + K_p s + K_d s^2) \cdot N_S^j(s), \quad i = \overline{1,4}, j = \overline{1,4} \quad (8)$$

$$s \cdot D_S^i(s) + (K_i + K_p s + K_d s^2) \cdot N_K^j(s), \quad i = \overline{1,4}, j = \overline{1,4} \quad (9)$$

都稳定. 控制器能鲁棒镇定区间对象族的充要条件是控制器 $C(s)$ 能鲁棒镇定 Kharitonov 边对象集合.

由于 PID 控制器的特殊性, 如(2)式所示, PID 控制器的分母为 s , 满足实突方向条件, 根据文献[4]的证明, (9)式的稳定性检验可简化为(6)式的稳定性检验, 而(6)式即为(8)式当 $\lambda = 0$ 时的情况, 因此, 对 PID 控制器而言, 满足鲁棒镇定的充要条件为(8)式为 Hurwitz 稳定的, 文献[5]利用充要条件讨论了 PID 控制器的设计. 我们注意到, 当被控对象传递函数仅分母系数存在不确定性时, (8)式和(3)式是等价的, 此时判定控制器鲁棒性的充要条件等价于上节中提到的充分条件. 文献[6]讨论的即为这种情

况下的 PID 控制器的设计.

3 鲁棒 PID 参数设计方法

3.1 设计思想

通过前面的分析,第 2 节所提出的充分性条件需要验证 4 个多项式的稳定性,第 3 节中的必要条件需要验证(6)式中的 16 个多项式的稳定性,而充要条件需要验证(8)中 16 个含有参数 λ 多项式的稳定性,在 PID 的设计中一方面要确保所设计的控制器满足鲁棒性要求,另一方面要考虑各判定条件的复杂性,尽量减少计算量.

3.2 具体步骤

基于上述设计思想,本文提出以下基于幅值相位裕量法的 PID 设计步骤:

- 确定被控对象传递函数模型 $G(s)$,各系数标称参数及系数的区间范围.
- 按照被控对象模型的标称参数,根据幅值相位裕量法^[6]整定 PID 控制器 $C(s)$ 的参数,由 PID 控制器和被控对象组成 PID 控制系统.
- 根据第三节所提出的充分条件判定控制器能否镇定给定的整个对象族,如果符合条件,则所整定的 PID 控制器满足要求,设计过程结束.
- 如果不符合充分性条件,则判断控制器 $C(s)$ 能否镇定 Kharitonov 顶点对象,即用劳斯判据检验 16 个顶点多项式的稳定性,如果其中某些多项式不稳定,则停止进一步检验,因为控制器已经不可能镇定整个对象族.返回步骤(2),通过增大幅值裕量重新整定 PID 控制器参数.
- 如果 16 个顶点多项式均稳定,则可以进一步判断控制器 $C(s)$ 能否镇定 Kharitonov 边对象,即检验广义 Kharitonov 线段多项式的稳定性.如果线段多项式均稳定,则 PID 控制器 $C(s)$ 能镇定整个对象族,设计过程结束;否则返回步骤(2),通过增大幅值裕量重新整定 PID 控制器参数.

4 实例研究

4.1 控制系统描述

500MW 涡轮发电机负载控制系统输入为蒸汽流量,负载为被控制量,被控对象传递函数为,

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)}, \text{ 其中}$$

$$D(s) = 4.17 \times 10^4 s^7 + 2.59 \times 10^6 s^6 + 8.81 \times 10^7 s^5 + 1.7 \times 10^9 s^4 + 2.05 \times 10^{10} s^3 + 1.86 \times 10^{11} s^2 + 1.22 \times 10^{12} s + 3.21 \times 10^{12}$$

$$N(s) = p_6 s^6 + p_5 s^5 + p_4 s^4 + p_3 s^3 + p_2 s^2 + p_1 s + p_0$$

标称参数:

$$p_6 = 1.93 \times 10^2, p_5 = 4.26 \times 10^4, p_4 = 2.22 \times 10^6, p_3 = 4.47 \times 10^7, p_2 = 4.82 \times 10^8, p_1 = 4.9 \times 10^9, p_0 = 1.67 \times 10^{10}$$

若 $N(s)$ 的系数在标称参数 10% 范围内取值,则

$$p_6 \in [1.74 \times 10^2, 2.12 \times 10^2], p_5 \in [3.83 \times 10^4, 4.69 \times 10^4], p_4 \in [2 \times 10^6, 2.4 \times 10^6], p_3 \in [4.02 \times 10^7, 4.92 \times 10^7], p_2 \in [4.34 \times 10^8, 5.30 \times 10^8], p_1 \in [4.41 \times 10^9, 5.39 \times 10^9], p_0 \in [1.51 \times 10^{10}, 1.84 \times 10^{10}]$$

4.2 应用区间多项式理论对系统进行判稳

根据标称参数,由幅值裕量法得 PID 控制器参数 $K_p = 5.63, K_i = 4.11, K_d = 11.25$ (PID1),代入(4)式得四个 Kharitonov 多项式,经过计算,四个多项式有两个不稳定,因此不满足充分条件,代入(7)式,得四个 Kharitonov 顶点多项式,经检验,顶点多项式均稳定,满足必要条件,再代入(9)式,得四个 Kharitonov 线段多项式,经检验,满足稳定性条件,因此,此 PID 控制器能鲁棒镇定整个区间对象族.若增大幅值裕量,得 $K_p = 1.27, K_i = 91.9, K_d = 2.5$ (PID2),代入(4)式,经检验,满足充分条件,因此该

PID 控制器也满足鲁棒性要求. 图 2 为闭环阶跃响应, $N(s)$ 取各系数区间的下界. 从图 2 中可以看出, 在这种情况下, 所设计的两个 PID 控制器都能保持系统稳定, 这和上面的分析结果相符.

5 结 语

本章针对具有实参数不确定性且参数在有界范围内变动的一类区间对象, 在 Kharitonov 及广义 Kharitonov 区间多项式定理的基础上, 分析了判定 PID 控制器能否镇定整个区间对象族的充分条件、必要条件和充要条件, 并据此提出了 PID 控制系统设计及鲁棒性分析的方法和具体步骤. 通过在涡轮机上的仿真应用, 证明了该方法是一种有效的方法.

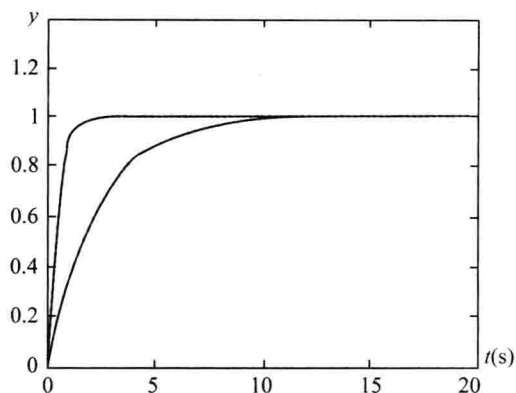


图 2 闭环阶跃响应(实线为 PID1, 虚线为 PID2)

参 考 文 献

- [1] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述. 自动化学报, 2000, 26(3), 347~355
- [2] Kharitonov V L. Asymptotic stability of an equilibrium position of a family of systems of linear differential equations. *Differentsial'nye Uravnenia*, 1978, 14; 2086~2088
- [3] Chapellat H and Bhattacharyya S P. A generalization of Kharitonov's Theorem: Robust stability of interval plants. *IEEE Tr. Auto. Control*, 1990, 34(3): 306~311
- [4] 冯纯伯, 田玉平等. 鲁棒控制系统设计. 南京: 东南大学出版社, 1995
- [5] Ho M T, Datta A, Bhattacharyya S P. Design of P PI and PID Controllers for Interval Plants. *Proceedings of the American Control Conference*, 1998
- [6] Huang Y J, Wang Y J. Robust PID tuning strategy for uncertain plants based on the Kharitonov Theorem. *ISA Transactions Instrument Society of America*, 2000, 39(4): 419~431

成本控制矩阵不确定的 SLQR 问题的研究*

蒲兴成^{1,2} 黄席樾¹ 汪纪锋²

(1 重庆大学自动化学院 重庆 400044 2 重庆邮电学院计算机学院 重庆 400065)

E-mail: puxingcheng@sina.com.cn

摘要 利用矩阵的相关性质和随机控制的相关理论,对广义随机代数 Riccati 方程的解进行研究.得到,若广义随机代数 Riccati 方程的解唯一,则该解是对称的;在假定线性随机系统的均方稳定性和精确能观性下,讨论广义随机代数 Riccati 方程的正解存在性,得到,若线性随机系统均方稳定并且精确能观,即使控制成本矩阵不正定,相应广义随机代数 Riccati 方程的反馈镇定解也是正定的;利用 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程,在假设线性随机系统反馈镇定解存在的情况下,得到了 SLQR 问题最优控制的具体形式,并指出广义代数 Riccati 方程的随机反馈镇定解与唯一最优控制器之间的关系.

关键词 随机代数 Riccati 方程, Hamilton-Jacobi-Bellman 方程,最优控制,成本控制矩阵

An Research on the Problem of SLQR under the Indefinite Cost Control Matrix

Pu Xingcheng^{1,2}, Huang Xiyue¹, Wang Jifeng²

(1 Automation Department, Chongqing university, Chongqing 400044)

(2 Chongqing Post and Telecommunication University, Chongqing 400065)

Abstract By using the related principle of the matrix and the theory of stochastic control, discusses the solution of the generalized SARE(stochastic Algebra Riccati Equation). Gets, if the solution of the generalized stochastic Algebra Riccati Equation is unique, then this solution is symmetry; under the assumption of the square stability and exact observability of the linear stochastic system, discusses the positive solution of the related SARE, gets, if the linear stochastic system is square stability and exact observability, then even the guaranteed cost control matrix is indefinite, the feedback stabilizing solution of the stochastic Algebra Riccati Equation is also positive; With the Hamilton-Jacobi-Bellman equation, under the condition of the existence of the linear stochastic system's feedback stabilizing solution, gets the feedback stabilizing solution optimal control concrete form of the SLQR, and points out the relation between the feedback stabilizing solution and the unique optimal control.

Key words stochastic algebra riccati equation; Hamilton-Jacobi-Bellman equation; optimal control; cost control matrix

1 引言

成本矩阵不确定 SLQR(随机线性二次控制)问题,最初在文[1]中提出,与确定性 LQR(线性二次控制)问题不同的是,文[2]中得到的随机极大值原理并不能完全解决 SLQR 问题.产生这一现象的根本原因在于由 SLQR 问题得到的 GSARE(广义随机代数 Riccati 方程),比确定性 LQR 问题产生的 ARE(代数 Riccati 方程)要复杂得多.具体表现在: GSARE 的解存在和唯一性研究; GSARE 的解与一 FBSDE(正倒向随机微分方程)联系在一起,文[2]~[5]中已有论述; GSARE 的解的数字计算方法

* 资助项目:重庆邮电学院青年基金资助项目 A2003~07 及 A2004~20.

(GSARE 是一个非线性矩阵方程). 文[1]和文[6]在某些特殊假设下对 GSARE 的数字计算方法进行了探讨,得到了相关的结论. 文[7]在假设系数矩阵确定且成本矩阵正定情况下讨论了 GSARE 的最大正解的存在性问题. 本文在文[1]~[7]研究的基础上,对 GSARE 的解的性质进行探讨,在假设系数矩阵确定且成本矩阵不确定情况下讨论 GSARE 的最大正解存在性问题,并利用 HJBE(Hamilton-Jacobi-Bellman Equation)^[8],在假设随机系统反馈镇定解存在的情况下,讨论 GSARE 的反馈镇定解与 SLQR 问题的唯一最优控制器之间的关系.

2 问题描述

在文[1]所举例(1.1)基础上,考虑一个更一般的 SLQR(随机线性二次控制)问题:

$$\min E \frac{1}{2} \left\{ \int_0^1 [rx^2(s) + qu^2(s)] ds + x^2 \right\} \quad (1)$$

$$\text{subject to } dx(t) = mu(t)dw(t), x(0) = 0 \quad (2)$$

其中 $w(t)$ 为一维的标准布朗运动.

由(2)得: $x(t) = \int_0^t mu(s)dw(s)$, 又由 In to isometry 引理得:

$$E[x^2(t)] = E \left[\int_0^t mu(s)dw(s) \right]^2 = E \left\{ \int_0^t [mu(s)]^2 ds \right\}$$

将上式代入(1)有:

$$E \frac{1}{2} \left\{ \int_0^1 [rx^2(s) + qu^2(s)] ds + x^2(1) \right\} = E \left\{ \frac{1}{2} \int_0^1 [(1-t)rm^2 + q + m^2] u^2(s) ds \right\} \quad (3)$$

在确定性 LQR 问题中,常假定控制成本矩阵是正定的,否则,若控制成本矩阵负定,则易得控制量(范数)“越大越好”这一显著结论,而在 SLQR 问题中,上述结论将不再成立,如在式(3)中,当 $(1-t)rm^2 + q + m^2 > 0$ 时, q, r 不一定为正,甚至可以是负的,这样就导致了成本矩阵不确定的 SLQR 问题的研究. 其一般形式为:

$$J(t_0, x_0) = \inf E_{t_0, x_0} \frac{1}{2} \left\{ \int_0^T [x(s)Qx(s) + u^T(s)Ru(s)] ds + x'(T)Hx(T) \right\} \quad (4)$$

Subject to

$$\begin{cases} dx(t) = [A(t)x(t) + B(t)u(t)]dt + [C(t)x(t) + D(t)u(t)]dw(t) \\ x(t_0) = x_0 \in R^n \end{cases} \quad (5)$$

其中 A, B, C, D 是具有适当维数的矩阵. $w(t)$ 是具有适当维数的标准布朗运动.

本文在假设系统(5)的系数矩阵确定且均方稳定的情况下讨论相关 GSARE:

$$\begin{cases} A^T P + PA + C^T PC + Q - (PB + C^T PD) \\ (R + D^T PD)^{-1} (B^T P + D^T PC) = 0 \\ R + D^T PD > 0 \end{cases} \quad (6)$$

解的性质及在其他条件不变,系统精确能观时 GSARE(6)的正解存在性. 并利用 HJBE(Hamilton-Jacobi-Bellman 方程),在假设随机系统反馈镇定解存在的情况下,讨论 GSARE 的反馈镇定解与 SLQR 问题的唯一最优控制器之间的关系.

3 主要结果

定理 1 若 GSARE(6)的解唯一,则该解对称.

证明:不妨设 P^* 是上述 GSARE(6)的唯一解,即有:

$$A^T P^* + P^* A + C^T P^* C + Q - (P^* B + C^T P^* D) \cdot (R + D^T P^* D)^{-1} (B^T P^* + D^T P^* C) = 0 \quad (7)$$

在(7)的两边转置有:

$$A^T (P^*)^T + (P^*)^T A + C^T (P^*)^T C + Q - ((P^*)^T B + C^T (P^*)^T D) (R + D^T (P^*)^T D)^{-1} \cdot (B^T C P^*)^T$$