

【主编 / 丛爽】

【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10卷)

中国科学技术大学出版社

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

(第 10 卷)

主编 丛爽



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书是中国自动化学会青年工作委员会组织编写的系列丛书《自动化理论、技术与应用》第10卷,所收录用的119篇文章是中国自动化学会第18届青年学术年会正式发表的论文。内容涉及自动化理论、技术和应用的多个方面及其相关领域,共分为八大部分:线性系统与非线性系统控制;自适应、预测及鲁棒控制;智能控制、神经网络、模糊控制;机器人、运动控制;模式识别、故障诊断与决策技术;计算机技术及应用;传感器与检测技术及过程控制;系统工程、理论、方法及应用。

本书读者对象为自动化领域的高等院校师生、科研院所的研究人员以及企事业单位的工程技术人员,同时也适合于其他领域研究人员了解自动化领域的最新研究方向和科研成果。

图书在版编目(CIP)数据

自动化理论、技术与应用 / 丛爽主编. —合肥:中国科学技术大学出版社, 2003.3
(中国自动化学会青年工作委员会系列丛书)
ISBN 7-312-01595-6

I. 自… II. 丛… III. 自动化技术—文集 IV. TP2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 051040 号

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号, 邮编: 230026; 电话: 0551-3602900)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本: 880mm×1230mm/16 印张: 40.25 字数: 1350 千

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1—240 册

ISBN 7-312-01595-6/TP·321 定价: 150.00 元

前 言

本书是中国自动化学会青年工作委员会组编的《自动化理论、技术和应用》的第十卷,所收录的 119 篇文章是中国自动化学会第 18 届青年学术年会正式发表的论文,内容共分八个部分:(1)线性系统与非线性系统控制;(2)自适应、预测及鲁棒控制;(3)智能控制、神经网络、模糊控制;(4)机器人、运动控制、模式识别;(5)图像处理、故障诊断与决策技术;(6)计算机技术及应用;(7)传感器与检测技术及过程控制;(8)系统工程、理论、方法及应用。这些论文的作者均为活跃在自动化领域的高等院校、企事业单位以及生产第一线的青年学者。其中不乏已取得突出成就的知名青年专家。不少论文还得到国家自然科学基金、863(973)计划及部委、省、市科研基金的支持,有的还获得了国家、部委级科技奖励,还有的已取得或即将取得明显的经济效益。因此,本书内容较全面迅速地展现了中国自动化领域多个研究方向的最新理论、技术和应用的最近所取得的研究成果。

本届青年学术年会是由中国自动化学会、中国自动化学会青年工作委员会主办,中国科学技术大学承办。会议的组织工作是在青年工作委员会的直接指导下,由中国科学技术大学自动化系承担的。会议的组织委员会除了向各有关单位及个人发出会议征文通知外,还在《自动化学报》、《控制理论及应用》、《控制决策》、《模式识别与人工智能》、《自动化博览》等学术刊物上刊登了征文通知。因此得到了广泛的响应,共收到来自全国一百多所高等院校、科研机构和企事业单位提交的论文 189 篇,经仔细认真的评审后,有 119 篇论文被会议正式录用、出版。

本届年会还将继续设立大会最佳论文奖和最佳应用论文奖,以鼓励在自动化领域做出出色工作的青年学者。

本卷丛书的特点是,在非线性控制、自适应和优化鲁棒控制以及智能、模糊控制和神经网络等方面仍然是人们研究的热点;另一方面,人们更加关心和致力于机器人控制以及计算机软硬件应用技术方面的发展研究,正在将自动控制的多种先进理论与国家经济技术的发展需要紧密结合,向实际应用方面发展。

随着社会以及各行各业对自动化技术要求的不断提高,使我们青年自动化人感到任重道远。历史赋予我们施展自己才能和智慧的好机会,让我们携起手来,以严谨的科学态度、严肃的学术作风,认真地对待每一项研究,从实际出发,扎扎实实地把中国的自动化事业不断地推向新的高峰,为人类贡献出自己的聪明才智。

中国自动化学会第 18 届青年学术年会组织委员会
2003 年 6 月 9 日

目 录

1. 线性系统与非线性系统控制

模型参考逆系统的稳定性初探·····	张 扬	王庆林	(001)
二阶动力学系统的鲁棒特征结构配置·····	王国胜	段广仁	(005)
抗饱和和补偿控制器的设计与其在精馏塔中的应用·····	戴 丹	王景成	(011)
对地观测小卫星目标自动跟踪系统的分析与研究·····	胡国军	李世忠	(017)
Adaptive synchronization of uncertain chaotic system·····	Li Huiguang	Yu Shengli	Li Guoyou (024)
周期性系统能控性及其判据·····		郭 戈	(029)
实际意义下 n -D 多项式矩阵互质性的判定·····	摆玉龙	吕振肃	杨金祥 (033)
广义不确定系统静态输出反馈的鲁棒控制·····	张红梅	张国山	(039)

2. 自适应、预测及鲁棒控制

基于遗传算法具有模糊鲁棒性的控制器综合·····	吴淮宁	李 勇	蔡开元 (045)
不确定时变时滞系统鲁棒跟踪控制 LMI 方法·····	宋申民	陈兴林	强文义 (052)
模型预测控制在飞行器控制系统中的应用·····	赵鸿昌	魏 岳	刘志远 (059)
离散时间系统间接自适应控制系统的有界性性质·····	杨昌利	龚妙昆	阮荣耀 (064)
不确定性时滞系统的鲁棒镇定控制器设计·····	王 星	李智斌	(073)
一种基于神经网络的鲁棒自适应逆控制·····	彭道刚	杨 平	韩 璞 于希宁 (077)
点预测控制器鲁棒性分析·····	罗中良	邝小磊	(082)
一类非线性系统的模糊趋近律控制·····	张金明	罗强一	刘东波 李人厚 (086)
Robust Passive Control for a Class of Uncertain Singular Systems ·····	Dong Xinzhuang	Zhang Qingling	(092)
广义系统鲁棒 H_2 控制器存在的一个充分条件·····		房庆祥	(098)
一类混沌系统的自适应同步控制·····	李惠光	于胜利	尹海欣 关新平 (103)
有界扰动下 PSFS 自适应控制·····	王秀红	杨振光	(110)
An Adaptive Prediction Model of Road Traffic Volume Based on Grey Relevancy Analysis ·····	Xu Lunhui	Fu Hui	(116)
Point to Point Control of Linear Time-Varying System by Iterative Learning ·····	Zhang Liping	Yang Fuwen	(122)
带控制输入广义系统 Wiener 状态估值器·····		许 燕	(129)
带有色观测噪声系统极点配置固定区间 Kalman 平滑器·····	孙书利	丁桂娟	(134)
线性系统的高阶积分观测器设计·····	吴爱国	段广仁	(140)
一种消除滤波发散的新方法·····	彭艳朝	郭志斌	胡昌华 (147)

3. 智能控制、神经网络、模糊控制

基于小波神经网络的城市小时用水量预测·····	张文静	徐洪泽	(153)
人工神经网络在航天试验效能评估中的应用·····		毛庆华	(158)
用 Boltzmann 机求解典型 NP 优化问题 TSP·····	王怡雯	丛 爽	窦秀明 (163)
面向对象技术用于专家系统的知识表示与推理·····	黄世奇	郑 健	王长利 潘 蕾 (171)

模糊神经网络在有源降噪中的仿真研究·····	姜丽飞 李传光 薛鸿德	(176)
智能法学初探——侦破信息分析与决策支持系统·····	邵 柏 王浩业 张 江	(181)
一种新型二维自调整模糊控制器的设计·····	苏建华 徐洪泽 郑 伟	(186)
MAS 虚拟协商系统的建立及其应用·····	苏安洋	(191)
系统设计中冲突消解的应用研究·····	杨 洋 陈 杰 窦丽华	(197)
智能维修训练系统的设计与实现·····	李 鸣 吕贵洲 魏震生	(203)
基于 T-S 推理 Smith 模糊控制器·····	方千山	(207)
A General Multi-concept Learning Algorithm Based on Cognitive Model ·····	朱世松	(212)
仓库设备的智能控制设计·····	张英锋 冯仁斌 柏 林 张金祥	(218)
一种通用的参数自调节模糊控制器·····	胡慧琴 李少远	(223)
自适应线性网络及其应用·····	丛 爽 钱辉环 程剑锋	(229)
模糊综合评判在分析考试成绩中的应用·····	李向正 禹建丽	(234)
电子商务中的模糊 Vague 综合评判模型·····	刘 扬	(238)
一种模糊变参数控制方法·····	杨景明 赵亚军 吴晓辉 杨秋霞	(244)
病体生存控制初探·····	张 宇	(249)

4. 机器人、运动控制

基于主从遥控和显微视觉技术的微操作机器人·····	荣伟彬 孙立宁 曲东升 陈立国	(254)
基于 DSP 的 HIT-IV 型双足机器人关节控制器的研究·····	刘金宝 麻 亮 强文义	(260)
中型足球机器人的决策模型·····	赵增荣 赖 汝 黄 鸿	(266)
Kinematic Synthesis of Parallel Manipulators: A Lie Theoretic Approach ·····	刘冠峰 孟 健 徐吉杰 李泽湘	(271)
Convergence Analysis and Experimental Study of Geometric Algorithms for Real-time Grasping Force Optimization·····	徐吉杰 刘冠峰 李泽湘	(278)
基于多 Agent 的模块自重构机器人控制策略研究·····	赵 杰 杨 冬 张 亮 蔡鹤皋	(285)
转基因微注射中的微操作机器人系统·····	张 灵 章 云 杨宜民	(290)
六维控制器中微分运动转换法·····	张晓辉	(295)
Robocup 中 Agent 体系结构及其决策算法·····	曹卫华 吴 敏	(300)
并联机构的运动控制应用·····	王 昕 李泽湘	(305)
基于 PWM 技术的步进电机混合驱动方法·····	阮成功 陈 硕 蓝兆辉 辻 峰男	(309)
平台稳定回路有饱和和特性时的控制方案设计·····	魏宗康 徐 强 夏 刚 杨 雨	(314)
矢量控制型永磁同步电机位置伺服系统 H_∞ 控制方法应用研究 ·····	毛 谦 姚 郁 曹 聪	(319)
汽车电动助力转向系统设计中若干问题的研究·····	谢 喧 徐洪泽 袁志明	(326)
Base Joint Position/Torque Control for HIT-1 Robotic Hand ·····	XIE Zong-Wu LIU Hong JIANG Li	(331)
Application of ANFIS Controllers for Robotic Manipulator Systems·····	李才永	(339)

5. 模式识别、故障诊断与决策技术

基于 Robocup 中型组足球机器人视觉图像识别的一种快速算法 ·····	白利勇 黄 鸿 赵增荣	(347)
---	-------------	-------

彩色图像分割新方法	田有文	(352)
一种基于物理建模技术的虚拟试衣系统的研究	张建英 张方强	(357)
应用虹膜识别提高接入控制安全的研究	范科峰 曾庆宁	(362)
应用于双视图三维复原的降维八点算法	姜桂祥 任 蕾 杨忠根	(366)
人脸识别关键技术研究	简武宁 戴亚平	(372)
小波分析在突变信号检测中的应用	赵红怡	(381)
多主体物流信息系统中的协作机制研究	高琳琦 李龙洙	(386)
基于模糊色的 Petri 网诊断系统建模	赵林度	(390)
一种综合智能故障诊断方法	张国军 周绍骑 李向忠	(395)
高速铁路走向方案优选模型研究	吴小萍 陈秀方	(400)
RC-4 切丝机刀辊调速系统原理防常见故障分析	黄振军 易 浩	(407)
作战计划智能决策支持系统研究	许 腾	(412)

6. 计算机技术及应用

基于多层过滤模型的试卷自动生成算法的设计与实现	李从利 薛模根 冷晓艳 卢 伟	(417)
在 Simulink 下实现对硬件接口的访问	聂雪媛 李驹光 刘国平	(423)
多 Agent 信息系统模型的优化	李 涛	(428)
基于软件主题的 XML/EDI 交换模型研究	刘红卫 刘 勤	(433)
Controller Design for Congestion Control in ATM Network Based on BFC Model	赵 雪 方建安	(437)
基于 MATLAB 的遗传算法工具箱	徐 瑛 任雪梅	(445)
MATLAB 仿真技术及其在电子电路中的应用	李 娜 张葛祥 金炜东	(453)
在 Borland C++ Builder 中调用 MATLAB 的方法及应用	郭志斌 彭艳朝 王跃钢	(459)
信息时代企业组织创新的技术支持理论初探——关于客户机/服务器系统的研究	杨 勇 陈建萍	(464)
芯片设计中时钟问题的探讨	詹文法 张 朔 周干民 周 萌	(470)
基于计算机技术的激光雷达回波接收控制系统	方海涛	(476)
天然气气瓶的自动疲劳实验	刘 兵 张 平	(480)
消防网络通信系统的设计与实现	万 红 冯冬青 李 明 覃 敏	(485)
Java 卡虚拟机技术研究	陈子勤	(488)
某新型火控计算机雷达接口模拟检测器设计	王志强 段修生 李胜军 孙书鹰	(493)
基于力信息的铅球运动员建模与仿真研究	袁红艳 唐毅 宋光明 江建举 邱联奎 葛运健	(497)
基于 TCP/IP 协议的网络控制系统的研究	彭 力 李 稳 李福进 林行辛	(501)
一个基于 TCP/IP 的服务器消息广播模型	姚新钦	(504)

7. 传感器与检测技术及过程控制

基于 IEEE1451 的网络化智能传感器的设计与实现	宋光明 卞亦文 吴仲城 戈 瑜 葛运建	(507)
基于 PIC16C773 的数据采集系统的设计	申 飞 许德章 吴仲城	(512)
基于多维力测力平台阵列的仿人机器人实际 ZMP 检测	钱 敏 吴仲城 戈 瑜	(516)

基于 HIOK13551 电池测试仪的铅酸蓄电池检测	高 娜 张锡恩 刘东升	(521)
Quartz Tuning-fork Temperature Sensor	XU Jun LI Xin	(525)
多传感器管理系统的体系结构	杨秀珍 何 友 鞠传文	(531)
通信光缆在线监测方法研究	吴春艳 刘少学	(536)
碳化塔塔板液位的软测量	易灵芝 李卫平 邓文浪 罗振中 谭平安	(540)
液压 AGC 监控系统上、下位串行通信的设计	杨秋霞 杨景明 吴晓辉	(544)
GSM 短消息业务在电力远程抄表系统中的应用	马兴录	(548)
连铸生产中塞棒自动控制系统的设计与应用	甄 然 闫鑫英 袁 转 杜深慧	(554)
采用 87C196KC 和 AC7863 对电力参数进行交流采样的技术	毛晓波 周 毅	(558)
酒 CPLD 的 PROFIBUS-DP 主站通信卡设计	张新房 徐大平 吕跃刚 王秋瑾	(563)
A Kind of Tree Structure in PDM	刘 舒	(568)
火电厂锅炉汽包水位的 DCS 控制	杨启亮 王 平 邢建春 王双庆 汪 嘎	(572)
基于极坐标系下的单站无源定位与跟踪算法	戴凌燕 严振华 金宏斌	(578)
椭圆曲线加密的时间攻击	付 凯	(582)
基于遗传算法的鲁棒 PID 控制器设计	金 鑫 谭 文 刘吉臻	(588)

8. 系统工程、理论、方法及应用

基于 Multi_Agent 的股市经济系统建模与分析	杨春霞 周 涛 周佩玲 刘 隽	(596)
军事物流系统的综合优化	张雪胭 高 鲁 田忠广	(602)
优势条件下兵力运用效能评估研究	高鲁 赵武奎 张雪胭	(607)
基于 UML 的医院挂号系统需求分析建模	宗 梅 马小平	(611)
生物安全柜控制器设计	金尚泰 徐茂生	(615)
高速公路收费系统服务功能扩展的研究	袁 玲	(620)
寡头垄断条件下严厉排污收费博弈模型分析	肖江文 赵 勇 罗云峰	(624)
信息经济与企业的可拓力对策	李 亮	(628)
人工智能在载人飞船环控生保系统中的应用	高 媛 赵新国	(632)

模型参考逆系统的稳定性初探*

张 炆 王庆林

(北京理工大学信息科学技术学院自动控制系 北京 100081)

摘 要 本文对基于动平衡态控制的模型参考逆系统的稳定性条件进行了初步分析,用 Nyquist 曲线仿真试验的方法尝试给出了一种判断模型参考逆系统稳定性的条件。

关键词 动平衡态, 模型参考逆系统, 稳定性, 乃氏判据

Primary Research of Model-Reference Inverse System

ZHANG Yang WANG Qing-lin

(Dept Automatic Control, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, P.R.China)

Abstract Primary researches are presented in this paper which is mainly according to conditions of stability of Model-Reference Inverse System based on Dynamic Equilibrium Theory. A method from simulation trials of Nyquist plots is given below which may judge stability of Model-Reference Inverse System.

Key words Dynamic Equilibrium, Model-Reference Inverse System, Stability, Nyquist Criterion

1 引 言

最初关于平衡状态概念^[1]的定义,均是针对自由系统的,而没有考虑系统有输入的情况。但是在绝大多数的控制问题中,我们面对的都是存在输入的受迫系统。动平衡状态控制理论^[2]是在状态空间基础上建立的一种对控制系统动态关系的新的描述,与经典控制理论和现代控制理论不同,这个理论认为输入对平衡状态的控制是直接的,而系统的状态(包括输出)则是在系统本身结构的约束下运动的。其输入、状态和输出间的关系如图 1。

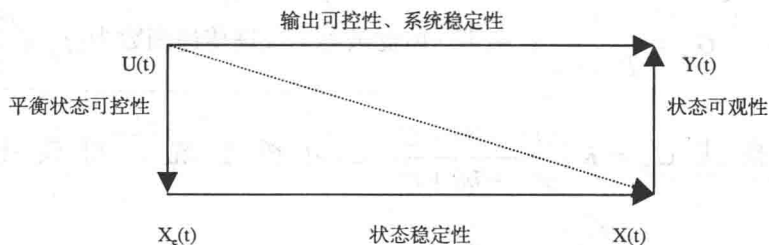


图 1 动平衡态输入输出关系图

定义: 对非自由控制系统(即受迫系统),将对应于控制输入 $u(t)$ 的特解(稳态解) $x_s(u(t))$ 定义为系统对应于控制输入 $u(t)$ 的动平衡状态。

* 国家自然科学基金资助项目,项目批准号 60274056;中国科学院王宽诚博士后工作奖励基金资助项目。

2 模型参考逆系统

将模型 G_m 的输出看作被控对象的动平衡状态，并以此来设计控制律，使系统满足要求。为维持系统中的偏差来产生必需控制量，我们提出将被控对象输出和模型输出同时偏置，并取 $G_f = G_m^{-1}$ 即可实现模型与实际系统输出偏差对输入之间的传递函数 $G_{re} = 0$ ，这就是模型参考逆系统方法。模型参考逆系统方法是在动平衡态理论指导下发展产生的一种新型的控制方法，如图 2 所示。

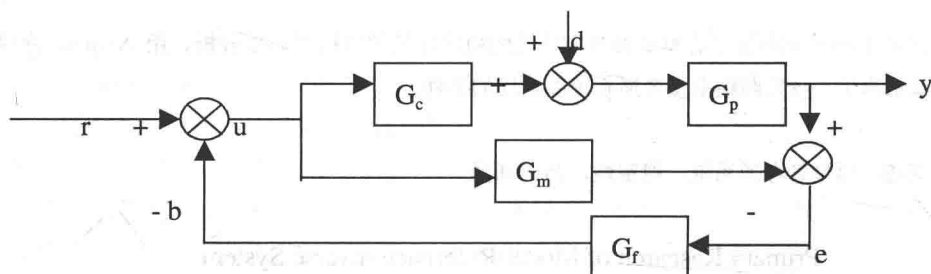


图 2 控制系统结构图

其中 G_p 为被控对象， r 为输入， y 为输出， d 为扰动， b 为反馈补偿， u 为控制， G_c 为串联校正环节， G_m 为参考模型， $G_f = G_m^{-1}$ 为 G_m 的逆系统。

图 2 所示的控制系统中，从输入 r 及扰动 d 至输出 y 间的闭环传递函数 G_{yr} 及 G_{yd} 分别为 $G_m(s)$ 和 0，即按上述设计方案实现的控制系统，其闭环输入输出关系完全由参考模型 G_m 决定，而与实际被控对象的结构无关。但在实际应用中如何判别这一特解（动平衡状态）的稳定性，是必须解决的关键问题。

3 系统稳定性分析

对线性定常系统，瓦西连科曾从全纯函数的条件出发证明了在这一方法设计的系统中，必须满足模型的分母与分子多项式阶次之差大于被控对象的分母与分子多项式阶次之差减 1，王庆林在其 2001 年的论文^[3]中的分析也得到了同样的结果。在本文中对模型的逆系统取代滤波器的形式，这样不仅可以解决由于系统闭环传递函数仅由 G_m 表示，而带来的相当的分析难度，同时又能够符合现实环境里模型逆系统功率有限，无法实现无穷放大倍数的情况。由于对非最小相位系统分析的不成熟，而且为了这种方法更适于工程师的应用，本文采用仿真实验加总结规律的方法。本文讨论参考模型为一阶的情况。

考虑忽略 G_c 时，令 $G_m = \frac{1}{T_m s + 1}$ ，则带一阶滤波器的反馈传递函数为 $G_f = \frac{T_m s + 1}{T_f s + 1}$ ，将被控对

象设成通用的模式 $G_p = K \frac{As^2 + Bs + C}{as^2 + bs + c}$ 。分析系统，得到闭环传递函数

$$G_{yr} = \frac{G_p}{1 + G_f(G_p - G_m)} = \frac{\frac{G_p}{1 - G_m G_f}}{1 + G_f \frac{G_p}{1 - G_m G_f}} = \frac{G}{1 + G_f G}, \quad \text{其中开环传递函数}$$

$$G_{open} = G_f G = \frac{1}{1 - G_m G_f} G_f G_p = K \frac{As^3 + Bs^2 + Cs + D}{as^3 + bs^2 + cs}, \quad \text{下面就对这个函数进行分析。}$$

我们知道, 对于一个反映多项式的映射的曲线, 其整个算式前端系数体现在曲线上的作用, 是使曲线以原点为中心和分界点像 $+x$ 、 $-x$ 、 $+y$ 、 $-y$ 四个方向扩张, 因此对于此类系统, 比例环节对稳定性有极大的影响。以最小相位系统来说, 其开环传递函数在右半平面没有极点, 如果要使非最小相位系统稳定, 则必须存在至少一个逆时针的环包围 $J(-1, j0)$ 点, 亦即只要调整非最小相位系统的开环传递函数多项式, 就可以使 Nyquist 曲线产生满足要求的环组——与开环传递函数右半平面极点个数相等、嵌套在一起、逆时针旋转且环的边线都经过左半平面, 那么 K 的增大必然会使环最终“套”上 J 点, 令系统稳定。本文中称上述情况为具有“潜质”, 称满足逆时针和与实轴交点在左半平面两个条件, 环绕 J 点 n 次为具有 n 次“潜质”。

对于最小相位系统, 大量仿真结果显示, 整个多项式中 s 的最高次项的系数的变化可以改变系统稳定性, 即使满足瓦西连科条件也不能确保系统稳定, 这说明这个条件只是必要条件非充分条件。由于最小相位系统开环传递函数没有不稳定的极点, 所以此系统不能产生潜质 (反之则意味着 Nyquist 判据中 $P-Z=N$, $P=0$ 的同时也有 $N>0$, 即 $Z<0$, 这在物理上解释不通), 那么只要 Nyquist 曲线不顺时针包围 J 点即可, 对于函数

$$y = F(s) = \frac{As^3 + Bs^2 + Cs + D}{as^3 + bs^2 + cs}$$

若使 Nyquist 曲线无论在何种情况下都不包围 J 点, 就是要求对所有的 s 映射到 $F(s)$ 平面后, $F(s)$ 所有可能的值中, 虚部为零的值实部全部非负: 即

$$\forall s, \text{若 } \text{Im}F(s) = 0, \text{ 则 } \text{Re}F(s) \geq 0。$$

在非最小相位系统中, 对于开环传递函数中没有不稳定极点的情况, 只要顺时针的环不包围 J 点——对所有的 s 映射到 $F(s)$ 平面后 $F(s)$ 可能取到的值中, 虚部为零的值实部全部非负: 即 $\forall s, \text{若 } \text{Im}F(s) = 0, \text{ 则 } \text{Re}F(s) \geq 0。$

而对于其有不稳定极点的情况, 则需要逆时针环与顺时针环个数之差等于开环传递函数不稳定极点的个数。我们知道, Nyquist 曲线是关于实轴对称的, 而环的形成必然在 $F(s)$ 曲线与实轴的两个交点之间, 所以只需要考虑 $-\infty < s < 0$ 区间内曲线的性质。

(1) 首先, 曲线与实轴的交点个数必须大于 1。

(2) 其次, 为了出现逆时针的环, 对于两点 s_1 、 s_2 (两个虚数) 以及它们的映射 $F(s_1)$ 、 $F(s_2)$ (两个实数), 如果 $F(s_1)$ 和 $F(s_2)$ 之间的曲线出现在实轴上方, 要求若 $\text{Im } s_1 < \text{Im } s_2$, 则 $F(s_1) > F(s_2)$ ——在实轴上存在映射的 s , 虚部大的映射小; 如果曲线出现在实轴下方, 要求若 $\text{Im } s_1 < \text{Im } s_2$, 则 $F(s_1) < F(s_2)$ ——在实轴上存在映射的 s , 虚部大的映射大。

(3) 再次, 要出现足够的逆时针的环, 则要求 Nyquist 曲线与实轴的交点个数要足够, 一个环的产生需要一对点。

(4) 最后, 要求每个环都要有包围 J 点的潜质, 也就同时要求形成一个环的两个相邻 s 点, 其中至少有一个的映射出现在负实轴上。

满足这样条件的 G_p 可以实现稳定, 一旦出现满足稳定所需要的环, 则可以通过调整系数 K 的大小, 将 J 点套入环中, 系统因此稳定。若被控对象不满足条件, 则可以靠增加环节 G_c 调整来实现。

4 小 结

本文对应用 Nyquist 方法判断一种新模型的稳定性进行了分析, 给出了一系列新的条件。由于该方法分析直观、简便且易于编程实现, 所以其具有更强的实时性, 更适合于工程应用, 只是在规律的细则方面还有待进一步总结归纳, 以期得到更完美的结论。

参 考 文 献

- 1 Katsuhiko Ogata. Modern Control Engineering. Prentice-Hall International, Inc, 1997
- 2 王庆林, 动平衡状态及非线性时变控制系统设计, 中国科学院自动化研究所博士学位论文, 1998.10
- 3 王庆林, 控制系统的补偿控制研究, 中国科学院数学与系统科学研究院博士后研究工作报告, 2001.9
- 4 SUN Xiaohui, HAN Zengjin and ZHANG Zengke. Model Reference Adaptive Control of Induction Motor Base on Direct Torque Control. Control Theory and Applications, 2001.12:907-910
- 5 徐武雄, 汪洋, 乃奎斯特稳定判据判稳小议, 咸宁师专学报, 1999.12:56-58

二阶动力学系统的鲁棒特征结构配置

王国胜^{1,2} 段广仁¹

¹ (哈尔滨工业大学控制理论与制导技术研究中心 哈尔滨 150001)

E-mail: wgschina@sina.com

² (装甲兵工程学院数学教研室 北京 100072)

摘 要 本文考虑了一类具有参数摄动的二阶动力学系统的鲁棒特征结构配置问题。首先利用定常二阶动力学系统特征结构配置的参数化结果,将该问题转化为具有约束条件的优化问题,然后在此基础上给出了求解此优化问题的梯度公式及鲁棒特征结构配置算法。数值例子及仿真曲线图表明该算法对参数摄动二阶动力学系统设计的有效性。

关键词 二阶动力学系统, 鲁棒特征结构配置, 参数摄动

中图分类号 TP13

Robust Eigenstructure Assignment in A Class of Second-Order Dynamic Systems

WANG Guo-Sheng^{1,2} DUAN Guang-Ren¹

¹(Center for Control Theory and Guidance Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

E-mail: wgschina@sina.com

²(Department of Mathematics, Armored Force Engineering Institute, Beijing, 100072)

Abstract In this paper the problem of robust eigenstructure assignment in a class of second-order dynamic systems is investigated. Based on the parametric solutions in a class of time-invariant second-order dynamic systems, this problem is changed into an optimal problem with some constraints, and then the simple effective algorithm about eigenstructure assignment is developed. A numerical example and its simulation figure show the effect of this proposed method in second-order dynamic system designs.

Key words Second-order dynamic systems, robust eigenstructure assignment, parameter disturbance

1 引 言

近些年来,二阶动力学系统以其在机器人和空间飞行器等机械振动领域中的广泛应用,得到很多学者的关注,尤其在二阶动力学系统的特征结构配置方面^[1-5],其中文[4]、[5]考虑了两类二阶动力学系统在比例加微分反馈控制下的特征结构配置问题,给出了闭环特征向量矩阵和增益矩阵的完全参数化形式,其中的自由参数为控制系统设计提供了很大的自由度。

由于特征结构配置设计较极点配置设计更能把握系统的特性,而实际系统又常常存在各种不确定性,因此对二阶动力学的鲁棒特征结构配置问题的研究是非常必要的。本文研究了一类具有参数摄动的二阶动力学系统的鲁棒特征结构配置问题,利用文[5]的特征结构配置参数化结果,建立了鲁棒特征结构配置度量指标的显式参数表达式,并在此基础上给出了一个简单、有效的优化算法。该算法不包

含“返回”过程, 具有较小的计算量, 且特征值也可参与优化, 因而在保证闭环系统性能的前提下进一步提高了系统的鲁棒性。

2 问题的描述

考虑具有参数摄动的二阶动力学系统

$$(E + \Delta E)\ddot{q} - (A + \Delta A)\dot{q} - (C + \Delta C)q = (B + \Delta B)u \quad (1)$$

其中 $q \in R^n$, $u \in R^r$ 分别为系统的状态向量和输入向量; $E, A, C \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times r}$ 为已知矩阵; 系

统满足下述假设条件:

假设 1: ΔE , ΔA , ΔB 和 ΔC 分别为系统参数 E, A, B, C 的摄动, 其中

$$\Delta E = \sum_{k=1}^l \delta_k E_k, \quad \Delta A = \sum_{k=1}^l \delta_k A_k, \quad \Delta B = \sum_{k=1}^l \delta_k B_k, \quad \Delta C = \sum_{k=1}^l \delta_k C_k \quad (2)$$

此处 E_k, A_k, B_k, C_k , $k=1, 2, \dots, l$ 为已知矩阵, δ_k , $k=1, 2, \dots, l$ 为绝对值小于 1 的未知标量;

假设 2: $\text{rank}(E + \Delta E) = \text{rank}(E) = n$; $\text{rank}(B) = r$;

假设 3: 矩阵对 $(E \ A \ B)$ 可控, 即 $\text{rank}[A - sE \ B] = n$, $\forall s \in C$ 。

当 $\Delta E, \Delta A, \Delta B, \Delta C$ 均为零时, 有

$$E\ddot{q} - A\dot{q} - Cq = Bu \quad (3)$$

称(3)为二阶动力学系统(1)的标称系统。

在比例加微分状态反馈律

$$u = K_0 q + K_1 \dot{q}, \quad K_0, K_1 \in R^{r \times n} \quad (4)$$

下, 标称系统(3)的闭环系统为

$$E\ddot{q} - (A + BK_1)\dot{q} - (C + BK_0)q = 0 \quad (5)$$

不失一般性, 本文考虑闭环系统(5)的特征值为互异自共轭的情形, 记特征值集为

$\Gamma = \{s_i \in C, i=1, 2, \dots, 2n\}$ 。再记特征值 s_i 对应的特征向量为 $v_i \in C^n, i=1, 2, \dots, 2n$, 则下述方程组成立:

$$[s_i^2 E - s_i(A + BK_1) - (C + BK_0)]v_i = 0, \quad i=1, 2, \dots, 2n \quad (6)$$

从而系统(3)在控制律(4)下的特征结构配置问题可表述如下:

问题 ESA: 给定标称二阶动力学系统(3)及数集 Γ , 求取参数形式的增益阵 $K_0, K_1 \in R^{r \times n}$ 和向量

$v_i \in C^n, i=1, 2, \dots, 2n$, 使其满足方程组(6)。

记

$$V = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_{2n}] \quad (7)$$

$$\Lambda = \text{diag}[s_1 \ s_2 \ \dots \ s_{2n}] \quad (8)$$

则方程组(6)可转化为

$$EV\Lambda^2 - (A + BK_1)V\Lambda - (C + BK_0)V = 0 \quad (9)$$

记

$$W = [K_0 \ K_1] \begin{bmatrix} V \\ V\Lambda \end{bmatrix} \quad (10)$$

将问题 ESA 中的增益阵 $K_0, K_1 \in R^{r \times n}$ 应用到系统(1)中, 与方程(9)相比, 误差如下:

$$\Delta E V \Lambda^2 - \Delta A V \Lambda - \Delta C V - \Delta B W = \sum_{k=1}^l (E_k V \Lambda^2 - A_k V \Lambda - C_k V - B_k W) \delta_k \quad (11)$$

记

$$\xi_{ki} = E_k v_i s_i^2 - A_k v_i s_i - C_k v_i - B_k w_i, \quad i = 1, 2, \dots, 2n \quad (12)$$

则误差方程(11)的一个合理度量为

$$J = \sum_{k=1}^l \left[\alpha_k \sum_{i=1}^{2n} \xi_{ki}^H \xi_{ki} \right] \quad (13)$$

其中 $(\bullet)^H$ 表示矩阵的复共轭转置, $\alpha_k, k = 1, 2, \dots, l$ 为适当的加权因子。于是摄动二阶动力学系统

(1)的鲁棒特征结构配置问题可描述如下:

问题 RESA: 给定摄动二阶动力学系统(1), 求解问题 ESA 且使得指标 J 达到最小。

3 问题的求解

因假设 3 成立, 故存在单模阵 $P(s)$ 和 $Q(s)$ 满足下式:

$$P(s)[A - sE \quad B]Q(s) = [0 \quad I] \quad (14)$$

对 $Q(s)$ 如下分块:

$$Q(s) = \begin{bmatrix} Q_{11}(s)^{n \times r} & Q_{12}(s) \\ Q_{21}(s) & Q_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (15)$$

令

$$E' = \text{diag}[I \quad E], \quad A' = \begin{bmatrix} 0 & I \\ C & A \end{bmatrix}, \quad B' = \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (16)$$

下面定理给出了问题 ESA 的参数化解。

定理 1^[5] 给定标称二阶动力学系统(3)及数集 Γ , 若矩阵对 $(E \quad A \quad B)$ 和 $(E' \quad A' \quad B')$ 可控, 则满

足方程组(6)的增益阵 $K_0, K_1 \in R^{r \times n}$ 的全体可参数化表示为:

$$[K_0 \quad K_1] = W \begin{bmatrix} V \\ V \Lambda \end{bmatrix}^{-1} \quad (17)$$

其中矩阵 V 和 W 的列向量分别为

$$v_i = L_{11}(s_i)g_i, \quad i = 1, 2, \dots, 2n \quad (18)$$

$$w_i = [Q_{21}(s_i)L_{21}(s_i) - Q_{22}(s_i)P(s_i)CL_{11}(s_i)]g_i, \quad i = 1, 2, \dots, 2n \quad (19)$$

而单模阵

$$H(s), \quad L(s) = \begin{bmatrix} L_{11}(s)^{n \times r} & L_{12}(s) \\ L_{21}(s) & L_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (20)$$

满足下式:

$$H(s)[Q_{12}(s)P(s)C + sI \quad -Q_{11}(s)]L(s) = [0 \quad I_n] \quad (21)$$

其中 $g_i \in C^r, i = 1, 2, \dots, 2n$ 是一组满足下述约束的自由参数向量:

约束 1: 当 $s_i = \overline{s_j}$ 时, 有 $g_i = \overline{g_j}$, $i, j = 1, 2, \dots, 2n$;

$$\text{约束 2: } \det \begin{bmatrix} L_{11}(s_1)g_1 & \cdots & L_{11}(s_{2n})g_{2n} \\ s_1 L_{11}(s_1)g_1 & \cdots & s_{2n} L_{11}(s_{2n})g_{2n} \end{bmatrix} \neq 0。$$

根据定理 1, 误差方程(13)等价于

$$J = \sum_{k=1}^l (\alpha_k \sum_{i=1}^{2n} g_i^H \Phi_i^H \Phi_i g_i) = \sum_{i=1}^{2n} \sum_{k=1}^l (\alpha_k g_i^H \Phi_i^H \Phi_i g_i) \quad (22)$$

其中

$$\Phi_i = E_k L_{11}(s_i) s_i^2 - A_k L_{11}(s_i) s_i - C_k L_{11}(s_i) - B_k [Q_{21}(s_i) L_{21}(s_i) - Q_{22}(s_i) P(s_i) C L_{11}(s_i)] \quad (23)$$

容易发现指标(22)可简化为

$$J(s_i, g_i, i = 1, 2, \dots, 2n) = \sum_{i=1}^{2n} J_i(s_i, g_i) \quad (24)$$

其中

$$J_i(s_i, g_i) = \sum_{k=1}^l (\alpha_k g_i^H \Phi_i^H \Phi_i g_i) \quad (25)$$

注意到 $J_i(s_i, g_i)$, $i = 1, 2, \dots, 2n$ 彼此所包含的参数相互独立, 所以优化指标 J 只需分别优化指标 $J_i(s_i, g_i)$, $i = 1, 2, \dots, 2n$ 即可, 即

$$\min J_i(s_i, g_i) \quad (26)$$

s.t. 约束 1 和 2, $i = 1, 2, \dots, 2n$

为了解决如(26)所述的非线性的优化问题, 需求出目标函数 J_i , $i = 1, 2, \dots, 2n$ 对各变量的梯度, 梯度公式如下:

$$\frac{\partial J_i(s_i, g_i)}{\partial g_i} = 2\Phi_i g_i, \quad i = 1, 2, \dots, 2n \quad (27)$$

$$\frac{\partial J_i(s_i, g_i)}{\partial s_i} = g_i^H \left(\frac{\partial \Phi_i^H}{\partial s_i} \Phi_i + \Phi_i^H \frac{\partial \Phi_i}{\partial s_i} \right) g_i, \quad i = 1, 2, \dots, 2n \quad (28)$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_i}{\partial s_i} = & (E_k s_i^2 - A_k s_i - C_k) \frac{\partial L_{11}(s_i)}{\partial s_i} + (2E_k s_i - A_k) L_{11}(s_i) - B_k \left(\frac{\partial Q_{21}(s_i)}{\partial s_i} L_{21}(s_i) + Q_{21}(s_i) \frac{\partial L_{21}(s_i)}{\partial s_i} \right) \\ & + B_k \left(\frac{\partial Q_{22}(s_i)}{\partial s_i} P(s_i) C L_{11}(s_i) + Q_{22}(s_i) \frac{\partial P(s_i)}{\partial s_i} C L_{11}(s_i) + Q_{22}(s_i) P(s_i) C \frac{\partial L_{11}(s_i)}{\partial s_i} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \Phi_i^H}{\partial s_i} = \left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial s_i} \right)^H, \quad i = 1, 2, \dots, 2n$$

注 1. 因矩阵特征向量是非唯一的, 在具体问题求解时, 可以事先取定向量 g_i , $i = 1, 2, \dots, 2n$ 中的某些元素, 从而减少一部分优化参数。

综合定理 1 及上述推导, 我们可以得到求解问题 RESA 的下述算法。

算法 RESA: 给定摄动二阶动力学系统(1), 若矩阵对 $(E \ A \ B)$ 和 $(E' \ A' \ B')$ 可控,

- 1) 满足(14)式的单模阵 $P(s)$ 和 $Q(s)$, 对 $Q(s)$ 如(15)分块;
- 2) 求解满足(21)的单模阵 $H(s)$ 和 $L(s)$, 对 $L(s)$ 如(20)分块;
- 3) 由(18)和(19)求取矩阵 V 和 W 的参数化表示;

- 4) 求取形如(26)的指标 J_i , $i=1,2,\dots,2n$, 并利用梯度法求解(26)式给出的优化问题;
- 5) 利用上一步求得满足约束 1 和 2 的参数 s_i 和 $g_i \in C^r, i=1,2,\dots,2n$, 计算出矩阵 V 和 W ;
- 6) 根据式(17)计算增益阵 K_0 和 K_1 。

4 数值算例

考虑形如(1)的摄动二阶动力学系统, 其中

$$E = I_2, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$E_2 = B_1 = C_1 = 0, \quad E_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

容易验证矩阵对 $(E \ A \ B)$ 和 $(E' \ A' \ B')$ 均可控。根据算法 RESA 有下述结果,

- 1) 求得满足(14)式的单模阵 $P(s)$ 和 $Q(s)$ 分别为

$$P(s) = I$$

$$Q(s) = \left[\begin{array}{cc|cc} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ \hline -1 & 1+s & s+2 & -1 \\ s & -s & -s & 1+s \end{array} \right]$$

- 2) 求得满足(21)式的单模阵 $H(s)$ 和 $L(s)$ 分别为

$$H(s) = I$$

$$L(s) = \left[\begin{array}{cc|cc} 1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & -1 \\ \hline -1 & -2s-1 & s & -2 \\ s-1 & 1-s & -1 & s-1 \end{array} \right]$$

- 3) 令 $g_i = [\alpha_i \ \beta_i]^T$, $i=1,\dots,4$, 由(18)和(19)可得矩阵 V 和 W 的列向量分别为

$$v_i = \begin{bmatrix} \alpha_i - \beta_i \\ -\alpha_i - \beta_i \end{bmatrix}, \quad w_i = \begin{bmatrix} \alpha_i(1+s_i^2+s_i) + \beta_i(s_i-1-s_i^2) \\ (1-s_i^2)(\alpha_i + \beta_i) \end{bmatrix}, \quad i=1,\dots,4 \quad (29)$$

- 4) 根据(26)式求得优化指标为

$$J_i(s_i, \alpha_i, \beta_i) = -\alpha_i \beta_i s_i - \beta_i^2 s_i^2 + \beta_i^2 s_i - 2\alpha_i^2 s_i - \alpha_i^2 - \alpha_i^2 s_i^2 + \beta_i^2, \quad i=1,\dots,4$$

取 $\beta_i = -1$, $i=1,\dots,4$, 利用梯度法算得

$$\begin{cases} s_1 = -0.1 \\ \alpha_1 = -0.0617 \end{cases}, \quad \begin{cases} s_{2,3} = -1.2685 \pm 0.5032i \\ \alpha_{2,3} = 0.4431 \mp 2.0502i \end{cases}, \quad \begin{cases} s_4 = -0.5 \\ \alpha_4 = -1 \end{cases}$$

- 5) 将上步所得各参数代入(29)式, 可得

$$V = \begin{bmatrix} 0.9383 & 1.4431 - 2.0502i & 1.4431 + 2.0502i & 0 \\ 1.0617 & 0.5569 + 2.0502i & 0.5569 - 2.0502i & 2 \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} 1.0539 & 2.5205 - 4.3519i & 2.5205 + 4.3519i & 1 \\ -1.0511 & 2.8155 + 0.0187i & 2.8155 - 0.0187i & -1.5 \end{bmatrix}$$

- 6) 由(17)算得增益阵为 $K = [K_0 \ K_1]$, 其中