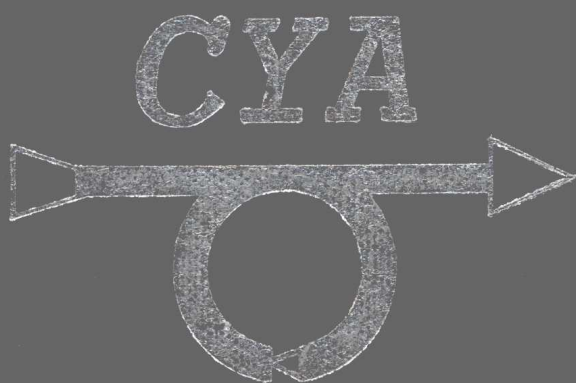


自动化理论、 技术与应用

——中国自动化学会第 13 届青年学术年会论文集

(第 5 卷)

主 编 李仁发 欧育立
副主编 朱立谷 刘国繁



中南工业大学出版社

自动化理论、技术与应用

——中国自动化学会第13届青年学术年会论文集
(第5卷)

主 编 李仁发 欧青立

副主编 朱立谷 刘国繁

中南工业大学出版社

内容简介

本书系中国自动化学会第13届(1998)青年学术年会论文集,收录由专家最终审定的论文122篇,内容涉及自动化理论、技术与应用和相关领域,包括线性与非线性系统、预测控制和鲁棒控制;智能控制、模糊控制、容错控制、专家系统;神经网络及其应用;过程控制、检测技术与自动化仪表;图象处理、模式识别、软件工程;电机运动、电力系统及其自动化;计算机技术及其应用;管理决策、系统工程等8个方面。

本书可供从事自动化研究工作的高等院校师生、科研院所的研究人员以及有关单位的工程技术人员参考。

自动化理论、技术与应用 ——中国自动化学会第13届青年学术年会论文集 (第5卷)

主 编 李仁发 欧青立

副主编 朱立谷 刘国繁

责任编辑 谭 平

中南工业大学出版社出版发行

(长沙市岳麓山,邮政编码 410083)

湘潭市瑞桑信息技术公司电脑排版中心排版

湖南大学印刷厂印刷

开本:787×1092 16开 印张:32.375 字数:825千字

1998年7月第1版 1998年7月第1次印刷

印数:001-400

ISBN7-81061-014-7/TP·002 定价:60.00元

前 言

自动化技术水平是衡量一个国家、一个民族的生产力水平和综合国力的一个重要标志。

未来终归是青年人的，民族的希望终归寄托在青年一代。青年一代的科学技术水平直接关系到 21 世纪中国的发展。中国自动化学会第 13 届青年学术年会的宗旨正是为了检阅我国青年科技人员在自动化及相关学科领域的研究与应用成果，促进我国青年科技人员之间的相互交流，以期进一步提高青年科技人员的水平和实力，提高我国自动化及相关学科的整体水平。

本届青年学术年会由中国自动化学会主办，湖南省自动化学会、湘潭大学、湘潭机电高等专科学校、中南工业大学协办，湘潭工学院承办。

本届年会在全国自动化领域，特别是在青年科技工作者中产生了很大的影响。自 1997 年底向各单位、个人发出征文通知，以及在《自动化学报》、《自动化博览》和《信息与控制》等杂志上登载征文通知以来，共收到来自全国 100 多所高等院校、科研机构和大中型企业的论文 250 余篇，征集的论文内容涉及到整个自动化领域的研究和开发应用，以及自动化的相关学科。在这些论文中有不少研究项目得到了国家自然科学基金和国家 863 计划以及部委、省、市重大科研基金的支持，具有较高的学术水平；有许多是青年科技工作者在基层从事的研究工作；不少是获得了国家、部省级科技奖的项目；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 122 篇论文，分为线性与非线性系统、预测控制和鲁棒控制；智能控制、模糊控制、容错控制、专家系统；神经网络及其应用；过程控制、检测技术与自动化仪表；图象处理、模式识别、软件工程；电机运动、电力系统及其自动化；计算机技术及其应用；管理决策、系统工程等部分。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化学科领域的学术水平，比较全面地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，具有一定的学术参考价值。由于篇幅有限，不少好文章只得忍痛割爱。无论是否入选本论文集，我们对所有应征文章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！

中国自动化学会对本届年会给予了高度的重视，学会各级领导和老一辈科学家对会议的筹备和组织工作给予了热情关怀和精心指导。湘潭工学院的领导和有关部门为年会的组织筹备工作创造了良好的条件。湖南省自动化学会、湘潭大学、湘潭机电高等专科学校等协办单位也给予了积极的支持与配合。中南工业大学出版社的领导对该书的出版工作极为关心，责任编辑谭平同志为本书的出版付出了辛勤的劳动。毛岳梅、陈卫华同志为本书的编排工作付出了大量的汗水和劳动。湘潭市瑞桑信息技术公司也为本届年会

和本书的出版工作提供了大力支持。在此,我们谨向所有关心、支持和帮助本届学术年会的领导、前辈和朋友们表示最诚挚的谢意。

本书由李仁发、欧青立任主编,朱立谷、刘国繁任副主编。

我们希望本届学术年会的召开和本书的出版能进一步促进我国自动化及相关学科的蓬勃发展,激励青年科技工作者为祖国的科技进步和现代化建设贡献青春和才智。

中国自动化学会第13届青年学术年会组织委员会

1998年6月28日

目 录

1. 线性与非线性系统、预测控制和鲁棒控制

鲁棒FDF设计方法研究	何英姿 张 兵	吴宏鑫 (1)
非线性预测控制系统对一类扰动的鲁棒性	耿晓军	席裕庚 (7)
具有不确定系数的单一和复合时滞系统的鲁棒稳定性	王耀斌	胥布工(12)
具有时滞时变的线性区间系统的鲁棒稳定性	安吉尧	李仁发(17)
强跟踪滤波器的实验研究	张泳健	周东华(22)
SMITH预估控制鲁棒性研究	党选举	古天龙(27)
区间灰色线性系统的解式构成方法	郭小定 吴新开	王 好(32)
多模型预测控制的平滑切换	李少远	席裕庚(36)
GPC控制律的连续性研究	吴玮琦	席裕庚(40)
大攻角下的战术导弹控制系统解耦设计	何卫国 刘怀勋	段朝阳(44)
具有闭环极点和方差约束的离散系统控制器设计		苏绍兴(49)
变结构控制在导弹姿态控制系统中的应用	王武义	邓方林(53)
关联动态时滞系统的分散镇定		庄 青(57)
受迫Duffing系统的混沌共振	谢 立 张云华	俞蒙槐(62)

2. 智能控制、模糊控制、容错控制、专家系统

发动机可变相位系统的模糊控制器设计	陶建武	常文秀(66)
基于改进BP算法的神经网络智能PID控制及其应用		王春芳(70)
一类模糊控制系统的稳定性分析及其稳定化设计	安吉尧	李仁发(75)
基于参考模型的自适应模糊控制器在大时滞过程中的应用		
.....	谢庆国 赵 金 万淑芸	沈安文 (81)
提高异常诊断快整性的预测方法	张光红	吕明瑾 (87)
分散式故障诊断专家系统的设计及研究	郝 平 李 成 李 钢	李 伟 (91)
一种基于模型的故障诊断系统	钱震林	符雪桐 (96)
专家系统构造工具与断层遥感影像智能判释系统的构造	亢 峰	田盛丰(100)
专家系统中知识获取方法的研究	王道平	冯振声(105)
基于视觉的双机器人基坐标系的标定	苏剑波	席裕庚(109)
一种机器人力/位置控制系统的稳定性研究	伍江杭 伍朝晖 谢光汉	符 曦(114)
自适应控制技术的研究	刘 芳	(119)

3. 神经网络及其应用

模糊神经网络和遗传算法相结合的控制策略	丛 爽 钱 镇	(123)
---------------------------	---------	-------

基于神经网络的自校正PID控制	张翠芳	何 蓉	吕 强(128)
基于遗传算法求解TSP问题的一种新思路	李晓仕	李天牧	(132)
模糊神经网络在列车自动运行控制系统中的应用	党建武	靳 蕃	(136)
C-TSP问题几种解法的比较	王佳斌	李旭明	(142)
一类连续分布时滞神经网络模型的全局稳定性		曹进德	(147)
基于修正影响函数的神经网络鲁棒BP算法	董选明	裘丽华	王占林(151)
一种离散时间递归网络的逼近能力研究		徐立新	(155)
应用人工神经网络实现煤气发生炉的最优控制		陈 希	(159)
基于神经元网络的感应电机无速度传感器控制系统	邵宗凯	黎 英	(163)
基于模糊神经网络的伺服调速控制	王 辉	王耀南	孙 炜(167)
神经网络在旋转机械振动预测中的应用	戈志华	李如翔	宋之平(172)

4. 过程控制、检测技术与自动化仪表

视觉信号的三维重构技术及其在远程作业系统中的应用	孙季丰	陈海东	(176)
可编程控制器在LDJ-10000压力机中的应用	史美官	欧青立	(180)
卷烟厂除尘设备PLC控制系统	刘 原	唐耀庚	(184)
Lon Works网络技术及在楼宇自控系统中的应用	石春和	周新莲	(188)
工业链条锅炉风煤比的优化控制	李 琳	杨新海	刘光星(192)
对用“间歇单元”防积分饱和方法的分析与探讨	杨 乐	祝和云	(196)
液压系统状态参数超声波管外检测原理与装置	彭佑多	刘德顺	张会福
	郭小定	叶笑洋	(200)
应用超声回波技术精确测定泥沙沉速	赵 玲	齐 俊	江晓花(204)
压差式液位传感器与开关电容电荷平衡A/D接口及应用	刘教民	孙壮志	赵 艳(209)
电阻炉温的快响应高稳态精度智能控制	黄采伦	毛岳梅	(213)
调制解调器在污水流量计中的应用	史百舟	王生德	范文兵(218)
汽车发动机点火系统的微机控制	范文兵	史百舟	王生德(222)
圆柱壳角速率传感器耦合振动的近似解析分析	樊尚春	刘广玉	(226)
故障转子系统非线性动力学行为检测与分析试验台的研制	朱萍玉	陈安华	(230)
离心磨矿机分批产品粒度分布模型研究	岳文辉	唐果宁	周 贤(234)
中小型煤机制造厂如何提高齿轮制造质量	吴克军	王克喜	王文丽(238)

5. 图象处理、模式识别、软件工程

基于自组织特征映射网的手写体数字识别	余鹏飞	李天牧	(242)
基于小波分析的图像边缘提取	张 锐	李笑颖	李天牧(246)
工业过程图像处理技术及其应用		刘国才	(250)
一种新的共振峰平滑算法	刘 兵	杨 鉴	(254)
一种联机自动连续摄影测量系统		黄 鹰	(259)
基于边缘检测算子的两类B样条小波的性质和作用	刘曙光	刘明远	何 钺(263)
彩色表格中手写体数字的分离与提取	李海燕	李笑颖	李天牧(268)

基于物理意义的计算机3D建模与动画研究	徐建波	宋君强(272)
用随机服务系统理论分析微机联锁系统	郭 进	(275)
多媒体系统构造模型探讨	贺小箭 朱才亮 王文丽	谭 文(280)
基于高级遗传算法的任意无向加权图的K点连通扩充算法	曹其国	孙雨耕(284)
轧制计划的数学模型及其优化算法	吕振辽 樊治平 杨伟智 李荣峰 朱发俊 胡国奋	顾永兴(288)
交互式多模型算法性能分析	梁 彦 潘 泉	张洪才(291)
生化反应过程人工智能建模方法的探讨	陈元青	王树青(295)

6. 电机运动、电力系统及其自动化

并联谐波直流环的异步电机直接转矩控制系统	崔颖博	黄念慈(299)
电力系统负载—频率鲁棒控制器的设计	潘静川	胥布工(303)
SPWM变频调速装置定子电压补偿新方法	李 松	高 嵩(308)
点火电流对煤的发热量检测影响	高 松	李清河(312)
用于串联型电力有源滤波器的谐波电压瞬时检测方法	姚为正 刘国繁	王兆安(315)
基于C/S模式的牵引供电调度管理自动化系统网络设计	王 倩	(320)
带能量恢复的PWM速度控制系统的研究	王生德 范文兵	史百舟(324)
变电所户外端子箱湿度控制系统	樊绍胜 扶蔚鹏	王鉴光(327)
变频调速定压供水系统	尤 文 林晓梅 王研梅	王 雷(330)
建筑物设备自动化系统在智能建筑中的应用	彭 玲	(334)
毫米波系统高精度自动跟踪电源研究	姚 毅 贾金玲	黄大华(338)

7. 计算机技术及其应用

通用船舶主机遥控模拟系统实时多任务软件设计	王锡淮	鲍敏中(342)
基于内容的多媒体信息查找技术的研究	朱学芳 苏 勇 王 勇	王绍棣(347)
Tag Switching在Internet上的应用	沈小亮	(351)
共享java应用的协作环境	陈品德 李方敏	蒋清明(354)
基于Internet的多媒体桌面会议系统	史小宏 程崇虎	魏应彬(359)
关于桌面电视会议系统的几个技术难题探讨	史小宏 程崇虎	魏应彬(365)
利用OLE技术提高软件重用率	黎 旭	(370)
ODBC下的C/S应用	黎 旭 陈 静	(373)
传统数据库网关的性能改进	李方敏 陈品德	彭小兵(377)
Activex与网络教学	魏应彬 程崇虎	史小宏(382)
如何提高计算机控制系统的可靠性	周少武 郭小定 黄采伦	王 京(386)
钛宝石激光器波长自动扫描系统接口电路和软件设计	陈红兵 高军毅	侯再红(390)
大型橡胶厂密炼机上辅机的计算机控制系统	于 飞 刘喜梅	刘川来(394)
12位高速数据采集卡的研制	李京兵	(398)
利用PSPICE研究控制系统的一种方法	王 群 姚为正	耿芸玲(401)
“同步与稳定”软件开发方法	刘建勋 刘祖润	谭汉松(405)

利用MFC开发应用程序界面	蒋清明	刘祖润	陈品德(409)
课程教学计划管理信息系统开发与应用			曾湘勤(413)
面向对象的需求分析方法	姚新钦		何奕胜(416)
一个新的基于Client/Server结构的医院业务管理信息系统	周付章		张扬传(420)
分布式英语听力训练系统			谢建国(423)
微机上二维大数组的处理方法和运行效率			李枚毅(427)
Novell网络在工控中的现场应用	徐光远	毛岳梅	王京(430)
Netware 到 Windows NT的网络移植			谭敏生(433)
水泥预制板应力测试仪			张炳煜(436)
变压器器身加热真空干燥控制系统			杨体贤(439)
80C196KC单片机在三相寻优电力稳压器中的研究	骆武宁		海涛(443)
用8031单片机实现的PWM控制			李晓秀(448)
温湿度多功能智能测试仪的软硬件设计	董恩生		董庆伟(452)
实现“倒计时”的一种方法	邹于丰	张志飞	蒋清明(456)
CAPP系统中零件聚类的一种新方法	王昌凌	肖人彬	彭少勇(460)
道路工程集成CAD系统的开发	张志飞	杨晃	刘祖润 郭小定(464)
基于Forpro的MIS系统数据文件的管理方法			赵青梅(468)
微机控制铁路信号的故障—安全性研究	曹荣敏		祝爱萍(472)
挡土墙设计应用程序的研制	曾瑞	杨晃	邹阿金(476)
通信中Visual Basic语言的应用			李小映(479)
放射免疫数据处理系统研究	孙星明		杨力华(483)

8. 管理决策、系统工程

关于制造模式变革的新认识	肖人彬(486)
运输问题的快速算法及其多重最优解的研究	王志忠(490)
企业经营预警系统	林凤 金瑞龄(494)
以风险为目标的使用检查模型	高崎(498)
一种基于再生产点性质的生产与存贮问题的求解	万国成 江树彬 张丽清(502)
炼油厂油品调合控制、优化和计划集成系统	王洪元 邬国英 钱积新 赵涤之 李为民 童微木(507)

鲁棒 FDF 设计方法研究*

何英姿 张 兵 吴宏鑫

(北京控制工程研究所, 北京, 100080)

摘 要 故障检测滤波器 (FDF) 是故障检测与隔离 (FDI) 方法中一种重要而系统的方法, 但到目前为止有关这种方法的研究基本上都基于模型参数精确已知情况, 本文研究了具有模型误差时 FDF 的鲁棒决策方法, 得到了一些有意义的结论。

关键词 FDI FDF 模型误差 鲁棒决策

1 引言

FDI 是近年来控制界的一个热门话题。从本质上来说 FDI 方法可以分为两大类, 即基于状态估计的方法和基于参数估计的方法。关于故障检测与诊断各种方法及其应用的综述可参见代表性文章^[1,2]。

FDF 是一种基于状态估计的方法。它由 Beard 于 1976 年首次提出^[3], 它的出现标志着 FDI 技术从传统的基于系统输入输出的无模型方法到基于模型的解析冗余方法的飞跃。FDF 又称故障灵敏滤波器, 它是一个全阶状态估计器, 但其观测器增益阵选取特殊, 使得输出残差 (输出估计误差) 在特定的故障发生时具有特定的方向。一般选择观测器增益阵使得残差在执行机构或元部件故障时固定在某一特定方向而传感器故障时维持于某一平面内。

FDF 方法用于故障检测的一个优越性是它无需故障模式信息, 因为在这种方法中故障检测的重要信息在于残差方向而非其时间函数。由于这一特点, FDF 在最近 20 年里得到广泛的重视。但是, FDF 方法对模型不确定的鲁棒性问题一直没有结论。仅有的对 FDF 方法鲁棒性的研究是利用未知输入观测器方法^[4]。这种方法设计比较复杂, 要求预先知道未知输入的结构矩阵, 占用较多的设计自由度, 使 FDF 只能在剩余自由度上进行设计。

设计鲁棒 FDI 方法的途径有两种, 一是设计一种对不确定具有鲁棒性的残差产生方法, 这是从根本上解决问题, 但这种方法难度较大, 通常有一些严格限制条件, 不易实现; 另一途径即所谓的鲁棒残差决策, 通过分析模型误差等不确定性对系统的影响, 在检测和隔离时采用统计决策或附加适当的阈值, 这种方法相对较简单和实用。对于 FDF, 未知输入观测器属于前一种方法, 本文希望用第二种方法从鲁棒决策的角度来解决模型存在误差时的鲁棒 FDF 设计, 得到合适的故障检测阈值。

2 FDF 的鲁棒决策方法

2.1 基本 FDF 方法

考虑系统 $\dot{x} = Ax + Bu$ $y = Cx$ (2.1.1)

其中, $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times q}$, $C \in R^{m \times n}$, 当系统发生部件或执行机构故障时, 系统方程为

$$\dot{x} = Ax + Bu + f_i \mu_i \quad y = Cx$$

其中, $f_i \in R^{n \times 1}$ 是预先知道的故障方向, μ_i 是任意未知时变标量。传感器故障时, 系统可以描述为:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad y = Cx + q_i \mu_i$$

其中, $q_i \in R^{m \times 1}$ 是与第 i 个传感器故障相对应的单位向量。

检测滤波器具有如下通常的线性观测器形式:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad \hat{y} = C\hat{x}$$

如果定义状态估计误差和输出残差分别为:

$$e = x - \hat{x} \quad \varepsilon = y - \hat{y} = Ce$$

则无故障时闭环方程为: $\dot{e} = Ge$ ($G = A - LC$) $\varepsilon = Ce$

对于部件或执行器故障, 误差方程可写为

$$\dot{e} = Ge + f_i \mu_i \quad \varepsilon = Ce \quad (2.1.2)$$

FDF 的目的是确定检测增益阵 L 使故障 f_i 下输出残差 ε 与 Cf_i 成正比, 并使得滤波误差 ε 在出现故障的瞬间以及达到稳态后始终与 Cf_i 成正比。可以证明传感器故障下检测增益阵的设计与之统一, 它将 ε 方向固定在一个平面内^[9]。

FDF 设计的核心可归结为求解下面的方程组

$$\begin{pmatrix} \lambda_j I - A & L \\ C & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_j' \\ w_j' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ w_j' \end{pmatrix}$$

其中 $w_j' = Cf_i = Cv_j'$ ($j=1,2,\dots,n_i; i=1,2,\dots,r$)。在这里, 与故障 f_i 有关的特征值与特征向量的数目 n_i 是待定的, n_i 个有关特征向量 v_j' ($j=1,2,\dots,n_i$) 构成了故障 f_i 的检测空间。 n_i 的确定, L 增益阵的求取等参见文献[5], 这里不具体叙述。

2.2 模型存在误差带来的问题

无模型误差时, FDF 设计过程保证令故障输出方向 (Cf_i) 等于某一个或某几个系统特征向量 (Cv_j') 的组合, 使得此故障下的输出残差方向是这个特征向量或这几个特征向量中的任何一个在输出空间的投影, 同时输出残差方向也就与故障输出方向一致。FDF 方法检测与隔离故障的依据是看输出残差向量在残差空间的方向是否与所设计的某个故障输出方向一致, 故障的检测与隔离同步进行, 为简便起见, 后文均用检测代称。

如果系统 (2.1.1) 的模型存在误差, 则故障下的输出残差方向并不能与设计方向符合。假设真实系统为:

$$\dot{x} = A_0 x + B_0 u \quad y = Cx \quad (2.2.1)$$

用于建立观测器的系统模型为

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad y = Cx \quad (2.2.2)$$

这里, $A, A_0 \in R^{n \times n}$, $B, B_0 \in R^{n \times q}$, $C \in R^{m \times n}$, 且 (A, B) 能控, (A, C) 能观。

设

$$A = A_0 + \delta A \quad B = B_0 + \delta B$$

则故障 $f_i \mu_i$ 下的误差系统方程为

$$\dot{e} = G_0 e + f_i \mu_i - \delta A \hat{x} - \delta B u \quad \varepsilon = C e \quad (2.2.3)$$

其中 $G_0 = A_0 - LC$ 。如果考虑噪声以及未建模动态等, (2.2.3) 进一步可表达为

$$\dot{e} = G_0 e + f_i \mu_i + w \quad \varepsilon = C e$$

其中 w 与 $f_i \mu_i$ 相混合而一起作用于误差系统, 它代表了模型参数误差、噪声、未建模动态等的影响。与式 (2.1.2) 相比可知, 除了 w 项外, (2.2.4) 式的不同之处还有 G 与 G_0 的差别。由于 FDF 设计的特点, 上述两类不确定性从不同的角度影响故障检测性能。前者“污染”故障向量而影响故障检测, 称为“显性不确定性”, 后者改变了误差系统的特征方向从而改变了故障下设计残差输出方向, 称为“隐性不确定性”。FDF 的鲁棒决策要解决的问题是: 分析上述两部分不确定性对故障检测的影响, 采用附加阈值等手段使模型存在误差时 FDF 方法检测故障尽量准确。

2.3 FDF 的鲁棒决策

在上一节中给出了隐性和显性两类不确定性, 相应也有隐性阈值和显性阈值之分。

2.3.1 隐性阈值

系统模型由(2.2.2)描述, 相应于故障方向 $f_j (j=1, \dots, r)$ 的隐性阈值可由如下定理给出。

定理 1: 设 G 如前定义, 特征根 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$, 相应特征向量 $v_i (i=1, 2, \dots, n)$, 并满足 $\|\delta G\| = \|\delta A\| \leq \sigma$, G_0 也如前定义, 且 G_0 的特征根相应为 $\lambda_{0i} (i=1, 2, \dots, n)$, 特征向量为 $v_{0i} (i=1, 2, \dots, n)$ 。记特征值扰动为 $\delta \lambda_i = \lambda_{0i} - \lambda_i$, 特征向量扰动为 $\delta v_i = v_{0i} - v_i$, π_i 为所设计的故障 f_i 下的输出残差向量 ($\pi_i = C v_i^j$), π_{0i} 为对应的实际输出残差向量 ($\pi_{0i} = C v_{0i}$), 则隐性隔离阈值 $Y_{thj} (j=1, 2, \dots, r)$ 如下表示

$$Y_{thj} = \max_j \left\{ \arccos \left(1 - \frac{r_i^2 \sigma^2 \beta_j^2}{2} \right) \right\} \quad (2.3.1.1)$$

$$\text{其中 } r_i = \frac{\|C\| \cdot |v_i|}{|C v_i|} \quad \beta_j = \left\| (\lambda_j' I - G) \right\| \cdot (1 + \text{Cond}(H)) \quad (j=1, 2, \dots, n_i)$$

$$H \text{ 为 } G \text{ 之对角化矩阵, } H^{-1} G H = \Lambda = \text{diag}(\lambda_j) = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{pmatrix}$$

$$\text{Cond}(H) = \|H\| \cdot \|H^{-1}\|$$

证明: 根据已知可以得到 $\delta v_i = -T_i^{-1}(\lambda_i)(\delta \lambda_i I - \delta G)v_{0i}$, 其中 $T_i(\lambda_i) = \lambda_i I - G$ 。

设 α_i 为 π_i 与 π_{0i} 的夹角, 根据欧氏空间中向量夹角的定义并利用 $\delta \pi_i$ 与 π_i 和 π_{0i} 分别近似正交 (零向量与任何向量正交) 的特性可以得到:

$$\cos \alpha_i \approx \frac{\langle \pi_{0i}, \pi_{0i} \rangle - \frac{1}{2} \langle \delta \pi_i, \delta \pi_i \rangle}{|\pi_i| \cdot |\pi_{0i}|} \approx 1 - \frac{|\delta \pi_i|^2}{2 |\pi_{0i}|^2}$$

又

$$\delta\pi_i = C\delta v_i, \quad \pi_{0i} = Cv_{0i}$$

所以

$$\begin{aligned} \cos \alpha_i &\approx 1 - \frac{|C\delta v_i|^2}{2|Cv_{0i}|^2} = 1 - \frac{|CT_i^-(\delta\lambda_i I - \delta G)v_{0i}|^2}{2|Cv_{0i}|^2} \\ &\geq 1 - \frac{1}{2} \left(r_i \|T_i^-\| (Cond(H)\sigma + \sigma) \right)^2 \geq 1 - \frac{(\beta_i r_i \sigma)^2}{2} \end{aligned}$$

即

$$\alpha_i \leq \arccos \left(1 - \frac{\beta_i^2 r_i^2 \sigma^2}{2} \right)$$

故障 f_j, μ_j 对应检测空间中的 n_j 个特征向量, 因此选取这 n_j 个 α_i 中的最大上界作为隐性阈值是合适的, 即阈值可由 (2.3.1.1) 式给定。证毕!

2.3.2 显性阈值

显性阈值与显性不确定性相对故障的大小有关, 假设当

$$\|\varepsilon\|_\tau \geq \rho \|\varepsilon_\Delta\|_\tau \quad (2.3.2.1)$$

时才检测到故障发生。其中 $\|\varepsilon\|_\tau$ 和 $\|\varepsilon_\Delta\|_\tau$ 分别代表系统的总输出残差大小和仅仅由显性不确定性导致的输出残差大小; $\|\cdot\|_\tau$ 表示一种基于残差均方根指标的范数算子^[5]。显性阈值可由如下定理给出。

定理 2: 对于 (2.2.1) 和 (2.2.2) 描述的系统, 利用 FDF 检测故障时的显性阈值可取为

$$X_{thi} = \arccos \left\{ 1 - \frac{d_i^2 (Cond(H))^2}{2(\rho+1)^2 \lambda_{\max}^2 \left(\sum_{j=1}^{n_i} \left(\frac{\alpha_j^i}{\lambda_j^i} \right) \right)^2} \right\} \quad (2.3.2.2)$$

其中, $d_i = \frac{\|C\| \cdot |f_i|}{|Cf_i|}$, $\lambda_{\max}$ 是 G 的最大特征值, α_j^i 是构成 f_i 的 n_i 个非零特征向量对应的非零系数, λ_j^i 是对应特征值, 上标 i 代表相应于故障 f_i 。

此定理证明过程比较繁琐, 限于篇幅这里只给出证明的简单思路。设

$$\varepsilon_0(t) = \int_0^t \exp(G(t-\tau)) (f_i, \mu_i(\tau)) d\tau \quad (2.3.2.3)$$

$$\delta\varepsilon_0(t) = \int_0^t \exp(G(t-\tau)) w(\tau) d\tau \quad (2.3.2.4)$$

令 ξ_i 代表 $\varepsilon(t) = \varepsilon_0(t) + \delta\varepsilon_0(t)$ 与 $\varepsilon_0(t)$ 的夹角, 类似于定理 1 可得到

$$\cos \xi_i \approx 1 - \frac{|\delta\varepsilon_0|^2}{2|\varepsilon_0|^2}$$

利用 (2.3.2.1) 式、(2.3.2.3) 式和 (2.3.2.4) 式以及范数性质等可推导出

$$\frac{|\delta\varepsilon_0|^2}{2|\varepsilon_0|^2} \leq \frac{(d_i \cdot Cond(H))^2}{2(\rho+1)^2 \cdot (\lambda_{\max})^2 \cdot \left(\sum_{j=1}^{n_i} \left(\frac{\alpha_j^i}{\lambda_j^i} \right) \right)^2}$$

因此

$$\xi_i \leq \arccos \left\{ 1 - \frac{d_i^2 (Cond(H))^2}{2(\rho+1)^2 \lambda_{\max}^2 \left(\sum_{j=1}^n \left(\frac{\alpha_j^i}{\lambda_j^i} \right)^2 \right)} \right\}$$

取 ξ_i 作为显性隔离阈值, 即得 (2.3.2.2) 式。

由 (2.3.1.1) 和 (2.3.2.2) 式得到 FDF 的故障检测阈值为

$$I_{thi} = X_{thi} + Y_{thi}$$

在应用 FDF 方法之前, 先求出每一个故障向量对应的检测阈值, 当发现输出残差落在某个设计方向的阈值之内则判断相应故障发生。

对于传感器故障, 先验确定两个故障方向, 然后根据这两个方向按照 FDF 方法进行设计, 并可利用平面夹角的概念获得检测阈值, 同样可得到鲁棒检测结果, 参见作者其它论文, 这里不再细述。

由于模型不确定性的影响, 故障检测不再是看残差是否与某个设计故障方向重合, 而是看它落在哪个检测锥 (以设计方向为中心以检测阈值为半锥角) 之中。当检测锥出现相交区域时, 相应故障虽可检测但不可隔离, 必须借助其它手段。

3 鲁棒 FDF 方法在卫星姿控系统故障检测中的仿真研究

为了说明 FDF 鲁棒决策方法的有效性, 下面看一个具体实例。假设卫星姿控系统的部件只在稳态以后才有可能发生故障。考虑某卫星在稳态运行时俯仰轴的姿态控制, 在平衡点对系统运动方程线性化, 得到一个四阶状态方程。其中状态变量为 $x = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4)^T$, 各分量分别代表俯仰姿态角, 帆板转角, 俯仰角速度和帆板转动角速度。控制作用为俯仰轮控力矩和帆板驱动力矩 T_y, T_p , 记为 $u = (T_y \ T_p)^T$ 。通过测量和数学解算等手段可以得到所有四个状态变量, 状态方程与输出方程各系数矩阵为:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0.0009 & -0.0009 \\ -0.0009 & 0.0332 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

由于上述系统经过小角度线性化得到, 并略去了帆板带来的挠性, 因此模型必然存在误差。通过分析可知模型参数 A 处于真实参数的较小扰动范围之内, 设 $\sigma = 0.05$ 。考虑执行机构俯仰飞轮和帆板驱动机构的可能故障形式, 可以看到, 俯仰飞轮和帆板驱动机构的故障方向分别为:

$$f_1 = (1 \ -1 \ 0 \ 0)^T \quad f_2 = (-1 \ 36.9 \ 0 \ 0)^T$$

按照 FDF 设计方法, 设计出系统的观测增益阵为:

$$L = \begin{pmatrix} 6.02786 & 0.02786 & 0 & 0 \\ -1.02786 & 4.97214 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 8 \end{pmatrix}$$

相应特征值和特征向量分别为:

$$\begin{aligned} \lambda_1 = -6 \quad v_1 = (1 \quad -1 \quad 0 \quad 0)^T & \quad \lambda_2 = -5 \quad v_2 = (-1 \quad 36.9 \quad 0 \quad 0)^T \\ \lambda_3 = -7 \quad v_3 = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0)^T & \quad \lambda_4 = -8 \quad v_4 = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1)^T \end{aligned}$$

其中, v_1 相应于故障 f_1 的检测空间, v_2 相应于故障 f_2 的检测空间, 而 v_3 和 v_4 是剩余空间, 有

$$\pi_i = Cf_i = Cv_i, \quad (i=1,2)$$

考虑两个故障, 一是俯仰飞轮由于机械故障等导致飞轮减速, 从而输出力矩减小; 二是帆板驱动机构由于卡住等使得驱动力矩减弱。按照故障幅度相等, 取故障

$$T_y = T_{y0} - 0.0026 \quad T_p = T_{p0} - 0.0001$$

其中, T_{y0}, T_{p0} 代表预期力矩, T_y, T_p 代表实际力矩。仿真中以非线性带挠性的模型递推计算来模拟卫星真实姿态运动过程, 而 FDF 根据线性刚体模型进行设计, 并附加一定测量噪声。故障发生之前可得到无故障时的输出残差幅度, 随时监测残差幅度变化, 确定 ρ , 从而随时计算检测阈值。在这里所给的两种故障下可以得到 $\rho \approx 1.5$, 利用 (2.3.1.1) 和 (2.3.2.2) 式可以计算出:

$$X_{th1} = 53.0^\circ, Y_{th1} = 2.1^\circ, I_{th1} = 55.1^\circ \quad X_{th2} = 43.6^\circ, Y_{th2} = 1.4^\circ, I_{th2} = 45.0^\circ$$

如果 μ_i 时变, 则阈值也随之变化。另外, 由于 Cf_1 与 Cf_2 夹角为 145° , 这两个故障的检测锥是相离的, 因此是完全可分的。

从仿真曲线可以看到 (图略), 两种情况下残差方向均进入各自的检测锥之内, 因此易于检测故障发生。

4 小结

本文研究了存在模型误差时, FDF 的鲁棒决策方法, 得到了解析的故障检测阈值, 并对卫星姿态控制系统的执行机构故障进行了仿真研究。本文对 FDF 方法的实际应用作了一些必要工作, 对 FDF 设计有一定指导作用。

后续工作还需进一步研究 FDF 的故障诊断能力, 以便为故障系统重构等提供必要信息。

参考文献

- [1] Isermann R., Process fault detection based on modeling and estimation method — a survey, *Automatic*, Vol.20, No.4, pp387-404, 1984.
- [2] Paul M. Frank, Fault Diagnosis System Using Analytical and Knowledge-based Redundancy — a Survey and Some New Result, *Automatic*, Vol.26, No.3, pp459-474, 1990.
- [3] Beard R. V., Failure Accommodation in Linear System through Self-Reorganization. Rept MVT-71-1, Man Vehicle Lab, Cambridge, MA, 1971.
- [4] Jie Chen, Ron J. Patton and Hong-Yue Zhang, Design of unknown input observers and robust fault detection filters, *INT. J. Control*, Vol. 63, No.1, 85-105, 1996.
- [5] 周东华, 控制系统的故障检测与诊断技术, 清华大学出版社, 1994 年版.
- [6] 李清泉, 自适应控制系统理论、设计与应用, 科学出版社, 1990 年版.
- [7] J. H. Wilkinson, M. A. (Cantab.), Sc. D., The Algebraic Eigenvalue Problem, Clarendon Press, Oxford, 1965.

非线性预测控制系统对一类扰动的鲁棒性

耿晓军 席裕庚

(上海交通大学自动化研究所, 上海, 200030)

摘 要 本文考虑一般形式的非线性预测控制系统, 基于两种可稳定的预测控制策略, 分析了一类能量有限且随时间衰减的扰动下这两种策略的鲁棒稳定性, 分别得出了系统稳定的充分性结论, 说明了非线性预测控制系统具有强的鲁棒性。

关键词 预测控制 非线性系统 鲁棒性 ISS 稳定

1 引言

预测控制受到工业界普遍欢迎的重要原因之一, 在于它对外界扰动等不确定性因素的鲁棒性。许多根据传统或现代控制理论设计的控制策略在精确模型下有很好的控制性能, 但一旦考虑扰动等不确定因素, 系统性能就难以保证, 甚至系统无法稳定; 而预测控制的在线滚动优化策略, 却能大大提高系统的鲁棒性。

对线性系统预测控制鲁棒性的研究目前已有不少成果^[1,2,3], 其中文[1]针对基于 CARIMA 模型的广义预测控制(GPC), 分析了噪声滤波器 T 对控制系统鲁棒稳定性的作用; 文[3]则针对几种典型的 GPC 策略, 定量地分析了 T 对鲁棒性的影响; 文[2]从频域角度研究了加权多步预测控制(WLPC)算法的鲁棒性, 给出了具有明晰频域意义的鲁棒性结果。对非线性系统预测控制而言, 其鲁棒稳定性的研究则很少, 引人注目的是 Nicolao 等^[4]对有终端约束预测控制的研究工作, 该文从性能指标的下降性出发, 利用性能指标的泰勒展开, 得出了幅值和增益扰动下的鲁棒稳定性结论。本文就是针对非线性系统, 研究这样一个问题: 在不考虑扰动信息下对系统设计的控制律, 当用于实际系统时是否仍能达到原定控制目的。对于线性系统定结论是肯定的, 而非线性系统则无此保证; 对于一次优化控制而言, 这一结论也是难以得到的; 预测控制的滚动优化则使其有了很大的保证。当外界扰动信号能量有限且随时间衰减时, 对于线性系统而言系统仍是渐近稳定的, 而非线性系统则无此保证; 下文对一般非线性系统两种稳定预测控制策略进行分析, 得到了这两种预测控制策略仍能保证控制系统稳定的结论。

本文第二节给出问题的数学描述及假设条件, 以及两种稳定的预测控制策略。第三节首先引出 ISS 的有关定义和结论, 然后得出这两种策略下系统的鲁棒性结果, 并说明一次优化控制无法得到类似结果, 第四节进行总结。

2 问题提出及描述

考虑离散时不变非线性系统

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)) + e(k) \quad (1)$$

其中 $f(\cdot)$ 为已知项, $(x, u) \rightarrow f(x, u): R^n \times R^m \rightarrow R^n$, $f(0, 0) = 0$ 。且满足 Lipschitz 连续性条件, 即对容许控制集 $\Omega_u \in R^m$, 存在 $M \in (0, \infty)$, 使得

$$|f(x_1, u) - f(x_2, u)| \leq M|x_1 - x_2| \quad (2)$$

对所有的 $x_1 \in R^n, x_2 \in R^n$, 和 $u \in \Omega_u$ 成立。 e_k 为未知干扰, 且满足如下条件:

$$\|e\|_2 < \infty, \text{ 且 } |e(k)| \rightarrow 0, \text{ 当 } k \rightarrow \infty \text{ 时} \quad (3)$$

即干扰信号能量有限, 幅值逐渐衰减到零, 前面式中 $\|\cdot\|$ 为欧几里德范数或其诱导范数, $\|\cdot\|$ 为 L_2 范数。不考虑扰动时系统描述为:

$$\hat{x}(k+1) = f(\hat{x}(k), u(k)) \quad (4)$$

称为原系统的名义系统, 也是本文预测控制的预测模型。

下面给出存在可行解的前提下, 能够使非线性系统稳定的两种预测控制策略, 这是第三节工作的基础。

策略 1^[5]: 采用如下有限时域性能指标

$$J_1(x(k)) = \sum_{i=0}^{N-1} \{l(x_k^i) + m(u_k^i)\} \quad x(k) = x_k^0, u(k) = u_k^0$$

s.t. $x_k^N = 0$

策略 2^[6]: 采用如下无穷时域性能指标

$$J_2(x(k)) = \sum_{i=0}^{\infty} l(x_k^i) + \sum_{j=0}^{N-1} m(u_k^j) \quad x(k) = x_k^0, u(k) = u_k^0$$

其中 $l(\cdot)$ 、 $m(\cdot)$ 分别满足下面条件:

- (1) $l(0) = 0$, 且存在连续严格增函数 $\varphi_i: [0, \infty) \rightarrow [0, \infty), i = 1, 2, \dots, \varphi_i(0) = 0$, 当 $x \rightarrow \infty$ 时 $\varphi(x) \rightarrow \infty$; 当 $x \neq 0$ 时有 $0 < \varphi_1(|x|) \leq l(x) \leq \varphi_2(|x|)$ 成立。
- (2) $m(0) = 0$, 且存在非减函数 $\phi: [0, \infty) \rightarrow [0, \infty), \phi(0) = 0$, 当 $u \neq 0$ 时有 $0 < \phi(|u|) \leq m(u)$ 成立。

x_k^i 表示 k 时刻对 $x(k+i)$ 的预测值, u_k^i 表示 k 时刻作用于系统预测模型的控制量。这两种策略都是在 k 时刻找到 N 步控制 $\{u_k^0, u_k^1, \dots, u_k^{N-1}\}$, 使性能指标极小, 而仅选取第一步控制量对实际系统进行控制。然后在下一控制时刻重新优化求解, 依次不断滚动。策略 1 的稳定性证明可参见文献[5], 策略 2 参见[6], 这里不作赘述。

3 干扰下稳定性分析

由于后面分析的需要, 下面首先简要给出 ISS (Input-to-State Stability) 的有关定义和结论。详细陈述和证明可参考文献[7,8]。

定义 1: 函数 $\gamma: R_{\geq 0} \rightarrow R_{\geq 0}$ 称为 K 类函数, 如果它是连续、严格增的, 且 $\gamma(0) = 0$ 。

定义 2: 函数 $\gamma: R_{\geq 0} \rightarrow R_{\geq 0}$ 称为 K_{∞} 类函数, 如果它是一个 K 类函数且当 $s \rightarrow \infty$ 时,

有

$$\gamma(s) \rightarrow \infty。$$