

1988

中国自动化学会第二届过程控制科学报告会论文集

工业过程模型化及控制

主编 俞金寿 华向明

华东化工学院出版社

1 9 8 8

中国自动化学会第二届过程控制科学报告会论文集

工业过程模型化及控制

主 编 俞金寿 华向明

华东化工学院出版社

内 容 简 介

本书涉及国内近年来在过程控制领域中的最新研究成果。主要介绍化工等过程建模与控制的方法和应用实例;先进控制理论和技术的发展与应用、计算机控制与智能化仪表等等。本书可作为大专院校自动控制专业教师、研究生以及本科生的良好学习资料,也可供从事过程控制的工程技术人员参考

ZQSC/28

1988

中国自动化学会第二届过程控制科学报告会论文集

工业过程模型化及控制

Gongye Guocheng Moxinghua ji Kongzhi

主编 俞金寿 华向明

责任编辑 范荷英

华东化工学院出版社出版
(上海市梅陇路130号)

新华书店上海发行所发行

上海竟成印刷厂排版

上海群众印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 21.625 字数 526千字
1989年10月第1版 1989年10月第1次印刷
印数 1-2200册

ISBN 7-5628-0059-6/TP·8

定价: 28.00元

卷四

中国自动化学会过程控制科学报告会

顾问: 周春晖 张钟俊 蒋慰孙 方崇智 王骥程 韩福田
韩建勋 袁璞 沈承林 庄兴稼 章先楼 项国波

主任委员: 吕勇哉

副主任委员: 邵惠鹤 孙优贤

常务委员: 吕勇哉 邵惠鹤 孙优贤 金以慧 潘日芳 席裕庚
潘立登 朱学峰

委员: 吕勇哉 邵惠鹤 孙优贤 金以慧 潘日芳 席裕庚
潘立登 朱学峰 俞金寿 徐用懋 高衿畅 谭昌元
钱积新 张雪申 杜维 刘玉林 曹元珍 王树青
杨树勋 宋凤凯 华向明 厉玉鸣 于士忠 黄道
何声亮

第二届科学报告会论文审查委员会

挑选委员会: 俞金寿 教授
孙优贤 教授
席裕庚 教授
钱积新 高级工程师
华向明 副教授
黄道 副教授
夏启军 博士

审查委员会: 俞金寿 孙优贤 席裕庚 华向明 韩正之

前 言

中国自动化学会第二届过程控制科学报告会于 1988 年 10 月 31 日至 11 月 3 日在浙江富阳举行。从事过程控制及有关领域的专家、教授和青年科技工作者 100 多人出席了这届会议。科学报告会的大部分委员和顾问也都到会。

经过论文评审委员会的挑选,选出 45 篇论文编入论文集。这些论文或着重过程控制新的应用,或着重控制理论的发展,各有特色,不少并有重大的理论和应用价值。

论文集的出版,反映了高等院校在这一领域的新贡献,显示了过程控制的新进展,对本行业有明显的参考意义。论文集的出版,也凝聚了各高等院校一年来在本领域刻苦努力的成果,特别是不少研究生在导师的指导下,新老结合,提出了很多新的方法,得到了新的成果。

过程控制科学报告会将一届一届地持续下去,愿报告会的质量不断提高,下届更优于本届。愿中国的过程控制事业不断发展,不断取得新的进步。

蒋 慰 孙

1989 年 3 月于华东化工学院

目 录

造纸机网前部“容错”控制策略·····	夏启军 孙优贤 周春晖 (1)
丙烯精馏塔微机控制·····	杜仰光 邵惠鹤 刘鸿强 戴自祥 蒋慰孙 (8)
酮苯脱蜡溶剂回收系统操作优化·····	张克进 俞金寿 邵惠鹤 (15)
圆网箱板纸机的自校正控制·····	祝和云 阮学斌 孙 红 周春晖 (21)
丙烷脱沥青过程建模与优化·····	赵 文 俞金寿 邵惠鹤 (29)
非理想多元物系精馏塔动态数学模型·····	杨 健 钱积新 周春晖 (35)
原油常压蒸馏塔最佳回流取热分配控制系统·····	曾文华 高衿畅 周春晖 (41)
催化裂化装置的建模及推理控制·····	巨军让 金以慧 (48)
乙苯脱氢工业生产过程的微机优化控制与管理·····	李宏光 陶振麟 张素贞 (55)
螺旋霉素发酵罐流加控制研究·····	周恒杰 陆建中 王树青 王骥程 (60)
流化床反应器的建模和控制(综述)·····	孔优根 孙优贤 钱积新 朱伯贤 (67)
尿素合成塔数学模型及仿真研究·····	周盛林 黄 道 蒋慰孙 (73)
聚合过程中分子量分布函数的确定·····	厉玉鸣 (80)
微机大型合成氨厂转化单元模拟培训系统·····	金建设 袁作礼 董文葆 (87)
长输管道的泄漏故障诊断·····	秦泗钊 王桂增 陶洛文 方崇智 (94)
挤出机压力、转速、温度的微机控制系统·····	陈国齐 (102)
废水生物处理的活性污泥过程非线性状态观测·····	柯益华 丁传花 (109)
河水污染的分散控制·····	韩正之 蒋慰孙 (115)
多变量系统预测控制的解耦设计·····	席裕庚 季红彬 (124)
智能预测控制系统在电弧炉冶炼中的应用·····	李静如 刘 伟 (132)
基于远程预测的隐式自校正控制·····	严伯钧 武松领 (137)
广义动态矩阵——PID 串级控制·····	席裕庚 李 彤 (145)
内模控制结构的简化设计·····	袁德成 黄聪明 (152)
基于状态方程的预估控制技术·····	丛松波 袁 璞 (159)
非线性时滞系统的最优控制及其应用·····	钱 锋 华向明 俞金寿 (166)
双线性状态-扰动综合观测器及其在造纸过程控制中的 应用·····	应依群 孙优贤 王庆国 (175)
双线性解耦控制及其应用研究·····	应依群 孙优贤 (185)
双线性时滞系统辨识及其应用·····	华向明 钱 锋 罗 纲 (194)
按段多重 Chebyshev 多项式系及其在非线性系统辨识中的应用 ····	顾幸生 胡仰曾 (202)
一类用于处理不确定信息的控制器——模糊自校正控制器···	钮 旋 钮晓鸣 张钟俊 (213)
一种智能自适应滤波方法·····	黄德先 袁 璞 (221)
改进型 Smith 预估器及其实验研究 ·····	冯 瑶 朱学峰 (228)
大纯滞后过程采样控制的研究进展·····	王士杰 赵冬青 (237)

复式自适应 bang-bang 控制系统及其应用	陈 杰	何衍庆	俞金寿 (245)
间歇生产过程的在线鲁棒优化控制方法	夏圀世	俞金寿	蒋慰孙 (253)
一种稳态大系统闭环递阶优化控制策略	张雪申	夏圀世	俞金寿 (263)
控制系统的容错性评定及容错最优综合问题的研究	叶银忠	潘日芳	蒋慰孙 (270)
带观测器的离散系统的鲁棒设计	胡庭姝		施颂椒 (276)
一种新的多变量系统结构辨识和参数估计算法	牛绍华		肖德云 (284)
一种多变量系统的递推辨识算法及其应用	张俊芝		熊淑燕 (291)
终值受限的广义系统二次指标最优控制问题	程兆林		阎九喜 (299)
模式识别法 PID 参数自整定	万起光		徐用懋 (305)
一类专家模糊控制器	吴勤勤	李振华	季建华 (311)
智能热式气体质量流量计的研制	曲海峰	张雪申	章先楼 (317)
快离子导体氧传感器的研究及其在汽车上的应用	王昌贵		肖雅龄 (325)

CONTENTS

A "Fault Tolerant" Control Strategy for the Headbox of a Paper-Making Machine	Xia Qijun, Sun Youxian, Zhou Chunhui (7)
Microcomputer-Based Control of a Propene/Propane Distillation Column	
Du Yangguang, Shao Huihe, Liu Hongqiang, Dai Zixiang, Jiang Weisun (14)	
The Optimizing for the Solvent Recovery System in the Keton-benzene Dewaxing Process.....	Zhang Kejin, Yu Jinshou, Shao Huihe (20)
Self-Tuning Control of a Cylinder Paperboard Machine	Zhu Heyun, Yuan Xuebing, Shun Hong, Zhou Chunhui (28)
Optimization of Operating Conditions in a Propane Deasphalting Process	Zhao Wen, Yu Jinshou, Shao Huihe (34)
Dynamic Modelling and Simulation of Complex Distillation Columns	Yang Jian, Qian Jixin, Zhou Chunhui (40)
Optimal Reflux Heat Distribution Control System for Crude Atmospheric Distillation Tower.....	Zeng Wenhua, Gao Jinchang, Zhou Chunhui (47)
Modelling and Inferential Control for FCCU.....	Ju Junrang, Jin Yihui (54)
Microcomputer-based Optimization and Management for Ethylbenzene Dehydrogenation Production Process	Li Hongguang, Tao Zhenlin, Zhang Suzhen (59)
Study on Feed Rate Control of a Spriamycin Fermentation Batch	Zhou Hengjie, Lu Jianzhong, Wang Shuqing, Wang Jicheng (66)
The Modeling and Control of Fluidized Bed Reactor——Survey	Kong Yougen, Sun Youxian, Qian Jixian, Zhu Boxian (72)
Steady State Mathematical Model of Urea Synthesis Reactor and Simulation Studies	Zhou Shenglin, Huang Dao, Jiang Weisun (79)
Determination of Molecular Weight Distribution Function of a Polymerisation Process	Li Yuming (86)
A Microcomputer-Based Training Simulator for the Reforming Section of Ammonia Plant	Jin Jianshe, Yuan Zuoli, Dong Wenbao (93)
Leakage Failure Diagnosis i nLong-transport Pipelines	Qin Sizhao, Wang Guizeng, Tao Luowen, Fang Chongzhi (101)
Microcomputer Control Systems for Pressure, Speed and Temperature of Extruder	Chen Guoqi (108)
Nonlinear State Observation in Activated Sludge Processes for Biological Waste-water Treatment.....	Ke Yihua, Ding Chuanhua (114)

Decentralized Control for River Pollution	Han Zhengzhi, Jiang Weisun (123)
Decoupling Design of Multivariable Predictive Control Systems	Xi Yugeng, Ji Hongbin (131)
The Application of Intelligent Predictive Control in the Electric Arc Furnace	Li Jingru, Lu Wei (136)
Implicit Self-Tuning Control Based on Long Rang Predictive Control	Yan Bojun, Wu Songling (144)
Generalized Dynamic Matrix-PID Cascade Control.....	Xi Yugeng, Li Tong (151)
Simplified Internal Model Control	Yuan Decheng, Huang Congming (158)
Predictive Control Based on State Space Model	Chong Songbo, Yuan Pu (165)
Optimal Control of Nonlinear Systems with Time-Delay and Its Application	Qian Feng, Hua Xiangming, Yu Jinshou (174)
The State-Disturbance Composite Observer for Bilinear Systems and Its Application to Papermaking Process Control	Ying Yiqun, Sun Youxian, Wang Qingguo (184)
Bilinear Decoupling Control and Its Application	Ying Yiqun, Sun Youxian (193)
Identification of Bilinear Systems with Time-delay and Its Application	Hua Xiangming, Qian Feng, Luo Gang (201)
Piecewise Multiple Chebyshev Polynomials and Their Application to Identification of Nonlinear Systems.....	Gu Xingsheng, Hu Yangzeng (212)
Fuzzy Self-tuning Controller: A Kind of Controller Used to Deal with The Systems Under Uncertainties	Niu Xuan, Niu Xiaoming, Zhang Zhongjun (220)
An Intelligent Adaptive Filtering Method.....	Huang Dexian, Yuanpu (227)
Modified Smith Predictor and Its Experiment Results	Feng Yao, Zhu Xuefeng (236)
Progress in Researches on Sampled Control Systems for Processes with Long Dead Times.....	Wang Shijie, Zhao Dongqing (244)
Double Adaptive Bang-Bang Control System and Its Application	Chen Jie, He Yanqing, Yu Jinshou (252)
An On-line Optimizing Control Technique with Robustness for Batch Processes	Xia Quanshi, Yu Jinshou, Jiang Weisun (262)
An On-line Hierarchical Optimizing Control Strategy for Steady-state Large-scale Systems.....	Zhang Xueya, Xia Quanshi, Yu Jinshou (269)
On Fault-tolerance Evaluation and Optimal Synthesis of Control Systems	Ye Yinzong, Pan Rifang, Jiang Weisun (275)
Robust Control for Discret-time Systems with Observers	Hu Tingshu, Shi Songjiao (283)
A New Algorithm for Structure Identification and Parameter Estimation of Mul- tivariable Systems.....	Niu Shaohua, Xiao Deyun (290)

A Recursive Identification Algorithm for Multivariable System and Its Application	Zhang Junzhi, Xiong Shuyan (298)
The Linear-quadratic Optimal Control Problem of Generalized State-space Systems with Constrained Terminal States.....	Cheng Zhaolin, Yan Jiuxi (304)
Pattern Recognition-based PID Auto-tuning.....	Wan Qiguang, Xu Yongmao (310)
A Kind of Expert Fuzzy Controller.....	Wu Qinqin, Li Zhenhua, Ji Jianhua (316)
Development of Intelligent Thermal Gas Mass Flowmeters	Qu Haifeng, Zhang Xueshen, Zhang Xianlou (324)
Study on Fast Ionic Conductor Qxygen Sensor and Its Application in Controller of Automobile.....	Wang Changgui, Xiao Yaling (331)

造纸机网前部“容错”控制策略

夏启军 孙优贤 周春晖

(浙江大学工业控制研究所)

摘要: 本文为造纸机网前部提出了一种能容许传感器失效的“容错”控制策略。该控制策略基于建立的对象模型,把系统测量输出分成几个向量并分别构造一个滤波器以估计系统状态。各滤波器的估计误差被用于计算其有效的置信度,并结合工艺经验进行故障诊断。一旦检测到传感器失效,迅速重组滤波器和控制器结构,以保证系统正常运行。仿真实验证实了该控制策略的可行性。

关键词: “容错”控制;故障检测;卡尔曼滤波器;造纸机

一、网前部模型及问题的提出

随着对控制系统可靠性和安全性要求的提高,人们日益感兴趣于“容错”控制系统。这类系统可适应其环境的显著变化,在部件正常工作时,系统具有指定的性能;若实际反馈系统的一个或多个关键部件(如传感器和执行机构)失效,使用监控系统检测并孤立它们,重组控制系统的结构,再次谋求最佳性能指标。“容错”控制策略是对传统控制策略的挑战,已在航天飞行控制中得到广泛的仿真研究和应用^[3],但在工业过程中的应用研究还很少。

网前部是造纸机的一个重要部分,其主要目的是稀释中浓纸浆为一定浓度的低浓纸浆,并尽可能稳定、均匀地把这种水和纤维的混合物分布在网上。工艺流程如图1所示。图中, G_1 、 G_w 和 G_2 分别是中浓纸浆、循环白水和低浓纸浆的流量; C_1 和 C_2 分别为中浓纸浆和低浓纸浆的浓度; H 为网前箱液位, u_1 和 u_2 分别是浆门开度和白水阀控制电流。

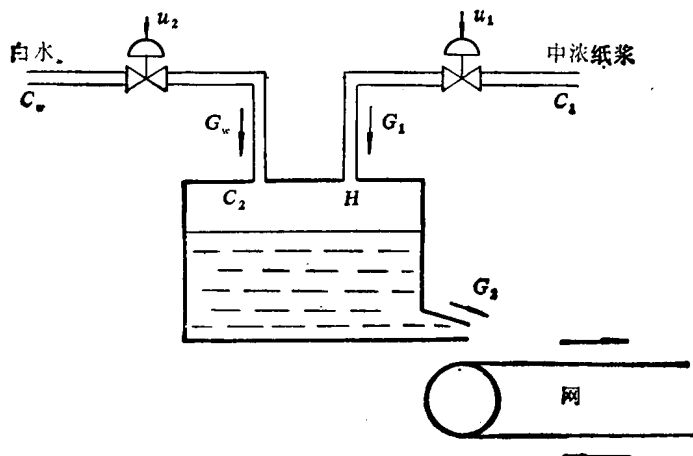


图1 造纸机网前部原理图

定义 $x(k) = (G_1(k), G_2(k), C_2(k))^T$, $u(k) = (u_1(k), u_2(k))^T$ 和 $r(k) = C_1(k-2)$ 分别为系统的状态向量、控制向量和可测扰动向量,则网前部动态特性可表示为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{D}\mathbf{r}(k) + \mathbf{w}(k)。 \quad (1)$$

式中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.6970 & 0 & 0 \\ 1 & 0.8667 & 0 \\ 0.1572 & -0.05033 & 0.9099 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -0.03443 & 0 \\ 0 & -0.6877 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.07881 \end{bmatrix}。$$

系统实时在线测量的工艺变量是中浓流量、中浓和低浓浓度及网前箱液位,被控变量是成纸绝干定量(记为 B_w)和低浓浓度。定义 $\mathbf{y}_m(k) = (G_1(k), H(k), C_2(k))^T$, $\mathbf{y}_r(k) = (B_w(k), C_2(k))^T$, 则测量输出方程和被控输出方程分别为

$$\mathbf{y}_m(k) = \mathbf{C}_m \mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k), \quad (2)$$

$$\mathbf{y}_r(k) = \mathbf{C}_r \mathbf{x}(k)。 \quad (3)$$

式中,

$$\mathbf{C}_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1.58 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_r = \begin{bmatrix} 0 & 3.49 & 1.753 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$\mathbf{w}(k)$ 和 $\mathbf{v}(k)$ 是互不相关的零均值高斯白噪声。

已有许多先进的控制算法成功地应用于网前部控制。例如,文献[5]为网前部设计了最优解耦控制器^[4],并用最佳渐消滤波器^[6]估计系统状态以实现解耦控制律

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(k)) + \mathbf{F}\mathbf{r}(k)。 \quad (4)$$

式中, $\hat{\mathbf{x}}(k)$ 是估计状态, $\mathbf{f}(\cdot)$ 是一向量线性函数,具体形式见文献[4],图2是网前部控制系统方框图。

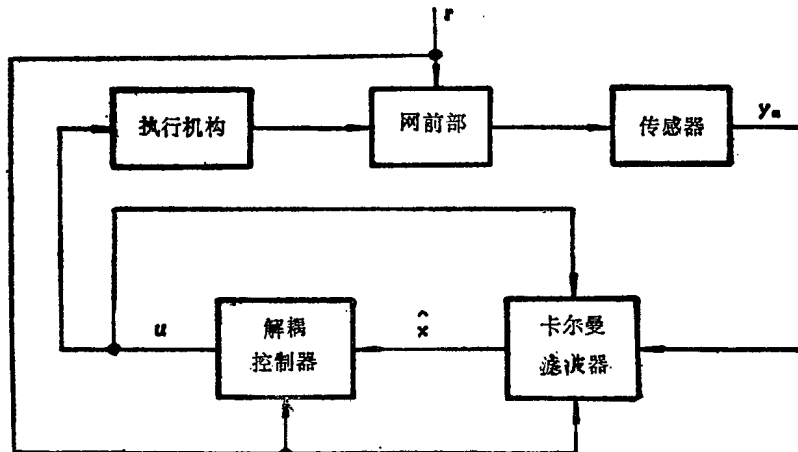


图2 网前部控制系统示意图

现有算法(包括上述算法)都假设传感器和执行机构运行正常,在这个假设下设计使某个性能指标最佳的控制规律。但实际上我国造纸工业专用仪表缺口大,精度、稳定性和可靠性严重不足,容易在运行中失效。一旦故障出现,按传统方法设计的控制系统的性能将严重恶化。

网前部系统中容易发生的故障是:(1)中浓浓度传感器;(2)低浓浓度传感器;(3)网前箱液位传感器。本文的目的是提出一种能容忍传感器失效的控制策略。该策略在线计算量小、系统结构重组方便、易于实施,适合工程应用。

二、多测量向量故障检测方法

为了使系统保持高性能运行,关键之一是要迅速且准确地检测出故障。最近十多年,已发展了许多故障检测与诊断方法^[1,2],如检测滤波器、推广似然比法和多模型方法等。但是,应用到工业过程,还存在一些问题。如:(1)方法较复杂,在线计算量大;(2)其中不少方法的故障检测过程不能完成状态估计,而状态估计是实现控制律所必需的;(3)系统结构重组困难;(4)在工业过程中,由于种种限制,不可能提供足够的硬件“冗余”,这会给确定故障源带来困难。

鉴于上述原因,本文提出的方法把故障检测与状态估计合为一体,并用工艺经验辅助故障检测。

考虑下列离散随机系统:

$$\mathbf{x}(k+1) = A\mathbf{x}(k) + B\mathbf{u}(k) + D\mathbf{r}(k) + \mathbf{w}(k), \quad (5)$$

$$\mathbf{y}_m(k) = C_m\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k), \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_r(k) = C_r\mathbf{x}(k). \quad (7)$$

式中, $\mathbf{x} \in R^n$, $\mathbf{y}_m \in R^m$ 和 $\mathbf{y}_r \in R^r$ 分别是系统状态、测量向量和被控向量; $\mathbf{w}(k)$ 和 $\mathbf{v}(k)$ 为互不相关的零均值高斯白噪声,

$$E[\mathbf{w}(k)\mathbf{w}^T(j)] = Q\delta_{kj}, \quad E[\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^T(j)] = R\delta_{kj}. \quad (8)$$

在工业过程控制中,系统式(5)、式(6)不但满足可控性条件,往往还有一定“冗余”。也就是说,系统满足 (C_m, A) 可观,且可以构造一组量测方程

$$\mathbf{y}_{m_i}(k) = C_{m_i}\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}_i(k), \quad (i=1, \dots, N). \quad (9)$$

式中, $\mathbf{y}_{m_i} \in R^{m_i} \subset \mathbf{y}_m(k)$, $E(\mathbf{v}_i(k)\mathbf{v}_i^T(k)) = R_i$, 满足 (C_{m_i}, A) 可观。因此可由每个 $\mathbf{y}_{m_i}$ 设计一个滤波器。可以设想:若把测量方程(6)按式(9)重新分组,使 $\mathbf{y}_{m_i}$ 和 $\mathbf{y}_{m_j}$ ($i \neq j$) 至少有一个分量不同,并使每个 $\mathbf{y}_{m_i}$ 只包含一个容易发生故障的传感器输出,然后据此设计 N 个滤波器。根据各滤波器的工作情况可检测传感器失效。以下假设测量方程已按上述要求分组。

本文应用最佳渐消卡尔曼滤波器^[9]估计系统状态

$$(F_i) \begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_i(k+1|k) = A\hat{\mathbf{x}}_i(k) + B\mathbf{u}(k) + D\mathbf{r}(k), \\ \hat{\mathbf{x}}_i(k) = \hat{\mathbf{x}}_i(k|k-1) + K_i(k)\mathbf{r}_i(k), \quad (i=1, \dots, N) \\ \mathbf{r}_i(k) = \mathbf{y}_{m_i}(k) - C_{m_i}\hat{\mathbf{x}}_i(k|k-1). \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\hat{\mathbf{x}}_i$ 是根据 $\mathbf{y}_{m_i}$ 得到的状态估计值。滤波增益 $K_i(k)$ 由下列方程计算

$$\begin{aligned} P_i(k+1|k) &= \lambda_i(k) A I_i(k) A^T + Q, \\ K_i(k) &= P_i(k|k-1) C_{m_i}^T [C_{m_i} P_i(k|k-1) C_{m_i}^T + R_i]^{-1}, \\ P_i(k) &= P_i(k|k-1) - K_i(k) C_{m_i}^T P_i(k|k-1). \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $\lambda_i(k)$ 是最佳渐消系数,表示克服常规卡尔曼滤波器的数据饱和现象。

根据随机控制理论,滤波器 (F_i) 有效的置信度 $P_i(k)$ 可由状态估计误差 $\mathbf{y}_i(k)$ 确定,其计算式为

$$P_i(k+1) = \frac{F_i(\mathbf{y}_i(k+1)) P_i(k)}{\sum_{j=1}^N F_j(\mathbf{y}_j(k+1)) P_j(k)}. \quad (12)$$

式中, F_i 是假设模型正确(传感器运行正常)情况下 $\mathbf{y}_i(k+1)$ 的概率密度。显然在这种情况下

$\mathbf{v}_i$ 是一零均值高斯白噪声序列, 其方差为

$$E[\mathbf{v}_i(k)\mathbf{v}_i^T(k)] = \mathbf{V}_i(k) = \mathbf{C}_{m_i}\mathbf{P}_i(k|k-1)\mathbf{C}_{m_i}^T + \mathbf{R}_i, \quad (13)$$

因此

$$F_i(\mathbf{v}_i(k+1)) = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2}\mathbf{v}_i(k+1)^T \mathbf{V}_i^{-1}(k)\mathbf{v}_i(k+1)\right\}}{[(2\pi)^{m_i} \det(\mathbf{V}_i(k))]^{1/2}}. \quad (14)$$

对于本节介绍的问题, 滤波器(F_i)的有效性反映了 $\mathbf{y}_{m_i}$ 的有效性。 $\mathbf{P}_i(k)$ 就是 $\mathbf{y}_{m_i}$ 的相对置信度。当没有传感器失效时, 滤波器的状态估计有一定精度, $\mathbf{P}_i(k)$ ($i=1, \dots, N$) 应大于某一值。若发生传感器失效, 则测量向量中包含失效传感器的滤波器估计误差增大, 置信度下降。因此对 $\mathbf{P}_i(k)$ 规定一下限 $P_{i\min}$

$$\mathbf{P}_i(k) \begin{cases} > P_{i\min} & \mathbf{y}_{m_i} \text{ 中传感器工作正常,} \\ \leq P_{i\min} & \mathbf{y}_{m_i} \text{ 中有传感器失效.} \end{cases} \quad (15)$$

从而实现传感器故障的检测与诊断。

在计算置信度 $\mathbf{P}_i(k)$ 时须求矩阵 $\mathbf{V}_i(k)$ 的逆和行列式值, 当维 m_i 较高时, 计算量较大。为减小在线计算量, 可考虑选用稳态卡尔曼滤波器, 离线计算 $\mathbf{K}_i(k)$ 、 $\mathbf{V}_i^{-1}(k)$ 及 $\det(\mathbf{V}_i(k))$ 。

系统最终状态估计是各滤波器(F_i)的加权和。注意到 $\sum_{i=1}^M \mathbf{P}_i(k) = 1$, 可以选择 $\mathbf{P}_i(k)$ 为权系数。当无故障时,

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \sum_{i=1}^N \mathbf{P}_i(k) \hat{\mathbf{x}}_i(k), \quad (16)$$

当滤波器(F_i)失效时, 取消它在加权和中的作用,

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \sum_{i \neq j}^N \mathbf{P}_i(k) \hat{\mathbf{x}}_i(k) / \sum_{i \neq j}^N \mathbf{P}_i(k), \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_r(k) = \mathbf{C}_r \hat{\mathbf{x}}(k). \quad (18)$$

在工业过程中, 一些工艺变量的绝对值和变化趋势往往有一个合理的范围, 超出这个范围就表明传感器失效。在使用上述故障检测方法时辅之以这个工艺事实, 有时能大大简化故障检测过程。

三、网前部“容错”控制系统

为了实现“容错”控制, 必须经历故障检测和诊断、决策、系统结构重组等过程。对图 2 所示的网前部控制系统, 其“容错”控制策略实施原理如图 3 所示。

根据第二节中所述原则, 为达到便于故障诊断和故障出现时系统结构重组的目的, 我们把三个测量变量组合成二个向量 $\mathbf{y}_{m_1}(k) = (\mathbf{G}_1(k), \mathbf{H}(k))^T$ 和 $\mathbf{y}_{m_2}(k) = (\mathbf{G}_1(k), \mathbf{C}_2(k))^T$, 测量方程(2)也相应分割成

$$\mathbf{y}_{m_1}(k) = \mathbf{C}_{m_1} \mathbf{x}(k) + \mathbf{v}_1(k), \quad (19)$$

$$\mathbf{y}_{m_2}(k) = \mathbf{C}_{m_2} \mathbf{x}(k) + \mathbf{v}_2(k). \quad (20)$$

基于测量方程式(19)、式(20)和系统方程式(1)可设计二个滤波器(F_1 和 F_2), 并计算相应置信度。因为 $(\mathbf{C}_{m_2}, \mathbf{A})$ 可观, $(\mathbf{C}_{m_1}, \mathbf{A})$ 不完全可观, 故在滤波器(F_1)中, 用 $\mathbf{y}_{m_1}$ 滤波估计 $\mathbf{G}_1$ 和 $\mathbf{G}_2$, 而 $\mathbf{C}_1$ 的估计值直接取自实测值。

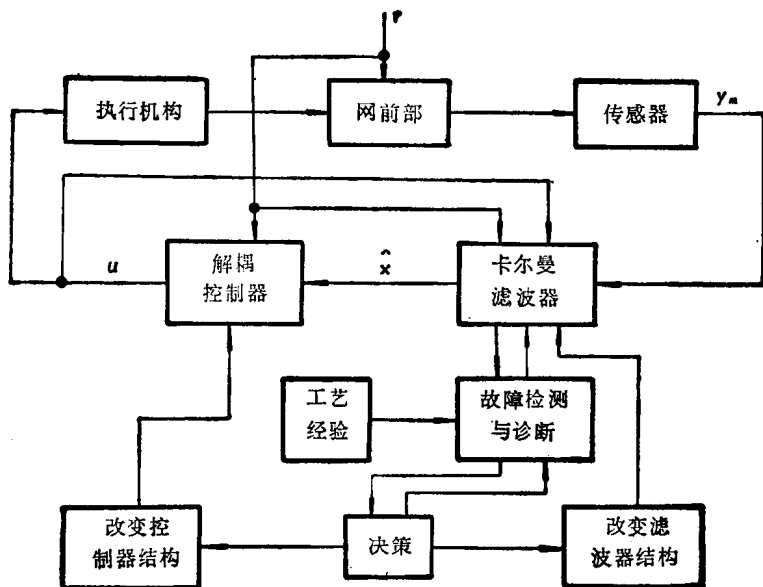


图3 网前部“容错”控制系统框图

由于中浓纸浆是分批存放在浆池中的，二次翻浆之间浓度变化不大，而在翻浆过程中，浓度是缓慢变化的。若记前次翻浆结束时浓度为 C_{10} ，则二次翻浆之间

$$|C_1(k) - C_{10}| < C_{\max}, \quad |C_1(k) - C_1(k-1)| < \Delta C_{\max}, \quad (21)$$

翻浆期间

$$|C_1(k) - C_1(k-1)| < \Delta C'_{\max}, \quad (22)$$

实验表明选择 $C_{\max}=30$, $\Delta C_{\max}=10$, $\Delta C'_{\max}=20$ 是比较合理的。

系统应根据置信度 $P_1(k)$ 和 $P_2(k)$ 及式(21)、式(22)诊断传感器故障，并根据故障源，自动改变控制器和滤波器结构，使系统正常运行。我们取 $P_{1\min}=P_{2\min}=0.15$ 。

(1) 若 $P_1(k) > P_{1\min}$, $P_2(k) > P_{2\min}$ ，说明滤波器工作正常，推知所有传感器均无故障。在这种情况下，最终状态估计为

$$\hat{x}(k) = \text{diag}[P_1(k), P_1(k), 0] \hat{x}_1(k) + \text{diag}[P_2(k), P_2(k), 1] \hat{x}_2(k). \quad (23)$$

这里之所以修改式(16)所示的加权和形式，是因为考虑到 (F_1) 中低浓浓度估计直接取实测值，不如 (F_2) 中估计结果准确。

根据式(4)，实现的解耦控制律为

$$u(k) = f(\hat{x}(k)) + F_r r(k). \quad (24)$$

(2) 若 $P_1(k) \leq P_{1\min}$ ，知滤波器 (F_1) 工作异常。因为中浓浓度和低浓浓度对 (F_1) 无影响，故可断定液位传感器失效。此时最终状态估计为

$$\hat{x}(k) = \hat{x}_2(k), \quad (25)$$

控制规律同(1)。

(3) 若 $P_2(k) \leq P_{2\min}$ ，且不等式(21)、式(22)成立。 $P_2(k) \leq P_{2\min}$ 表明 (F_2) 工作异常，可能由中浓浓度或低浓浓度传感器失效引起，但式(21)、式(22)成立排除了中浓浓度传感器失效的可能，因而可断定低浓浓度传感器失效。此时

$$\hat{x}(k) = \hat{x}_1(k), \quad (26)$$

控制规律同(1)。

(4) 若 $P_2(k) \leq P_{2, \max}$, 且不等式(21)或式(22)不成立。根据(3)中分析, 是中浓浓度传感器失效。此时, 最终状态估计同(3)。解耦控制律中的前馈信号 $r(k)$ 须以故障前的信号代入, 记 k_0 为故障发生时刻, 则控制规律应为

$$r_0 \triangleq r(k_0 - 2), \quad (27)$$

$$u(k) = f(\hat{x}(k)) + F_r r_0(k). \quad (28)$$

在具体实施时, 还应注意: 滤波器的置信度是按式(12)计算的。在故障状态, 滤波器的置信度可能会很小, 即使故障消除也不能立即恢复正常运行, 因此须给它们规定一个下限。此外, 为防止滤波器无限发散, 应给滤波估计值的绝对值规定一个上限。

四、仿真研究和结论

造纸机网前部“容错”控制策略已进行仿真研究, 以确定它“容忍”故障的能力。仿真中定义故障为中浓浓度、低浓浓度和网前箱液位传感器输出中其中一个的阶跃变化。经过对每个传感器阶跃幅度分别为 40、30 和 20(计算机码)的故障状态的仿真研究, 证明故障检测系统能正确而又及时地检测出传感器失效。经自动修正控制器和滤波器结构, 系统能以较好性能正常运行。

本文提出的故障检测方法, 由于故障检测过程提供了系统状态估计, 因而实时计算量增加不大。这种方法非常适合于在故障状态时重新组织系统结构。对工艺变量的绝对值和变化趋势限值的检验, 是简化工业过程故障检测的一种有效方法。本文的“容错”控制策略简单、易于实施, 具有较高的工业应用价值。

参 考 文 献

- [1] Isermann R. Process fault detection based on modelling and estimation methods—a survey. *Automatica*, 1984; 20(4); 387~404.
- [2] Willsky A S. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems. *Automatica*, 1976; 12 (6); 601~611.
- [3] Deckert J C *et al.* F-8 DFBW sensor failure identification using analytic redundancy. *IEEE Trans Autom Contr*, 1977; 22 (5); 795~803.
- [4] Xia Qijun *et al.* An optimal decoupling with application to the control of paper machine headboxs. *4th IFAC Symposium on CAD*, Beijing, 1988.
- [5] 夏启军等. 超薄型电容器纸定量水分计算机控制. 中国造纸(待发表).
- [6] 夏启军等. “最佳渐消卡尔曼滤波算法及其在造纸过程中的应用”, 中国自动化学会第一届过程控制科学报告会论文集, 浙江大学出版社, 1988.

A "Fault Tolerant" Control Strategy for the Headbox of a Paper-Making Machine

Xia Qijun, Sun Youxian, Zhou Chunhui

(Research Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University)

Abstract: A "fault tolerant" control strategy for a headbox is proposed in this paper which is reliable to sensor failures. The techniques are based on the available plant model. The whole measurements are divided into a number of measurement vectors and with each of them a Kalman filter is implemented. The final estimate of system state is the multiplied addition of the state estimate generated by each filter. The residuals generated by filters are used to update the conditional probabilities for the validity of each of the Kalman filter and by using which the failure detection and isolation are carried out. Following failure detection the filter and controller are restructured so that the system remains to operate satisfactorily. Simulation results indicate that the system works very well in the presence of sensor failures.

Key words: "Fault tolerant" control; failure detection; Kalman filter, paper making machine