

1989

中国自动化学会第三届过程控制科学报告会论文集

工业过程模型化及控制

徐用懋 王诗宓 主编

清华大学出版社

INDUSTRIAL PROCESS MODELING AND CONTROL

Proceedings of 3rd Symposium of
Chinese Association of Automation
on Process Control

Beijing, China, November 1-4, 1989

Edited by
Xu Yongmao and Wang Shifu

Tsinghua University Press

1989中国自动化学会第三届

过程控制科学报告会论文集

工业过程模型化及控制

主编 徐用懋 王诗宓

清华大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了全国高等院校及研究应用部门近年来在过程控制领域中的最新科研和应用成果。第一部分为控制理论及应用方面的发展和成果，第二部分是关于实际工业过程的建模、优化控制及仿真系统，第三部分主要涉及智能控制及仪表，第四部分介绍计算机控制系统的状况、研究成果及一些新产品。

本书是大专院校自动控制专业教师、研究生及本科生的良好学习参考资料，也可供相应专业工程技术人员参考。

1989中国自动化学会第三届
过程控制科学报告会论文集
工业过程模型化及控制
主编 徐用懋 王诗宓

清华大学出版社出版
北京 清华园
国防工业出版社印刷厂印刷
新华书店总店科技发行所发行

开本：787×1092 1/16 印张：22 字数：520 千字

1991年3月第1版 1991年3月第1次印刷

印数：0001~1800

ISBN 7-302-00791-8/TP·287

定价：16.00 元

前 言

中国自动化学会第三届过程控制科学报告会于1989年11月1日到4日在北京清华大学召开。这次报告会是由北京化工学院自动化系、石油大学研究生院和清华大学自动化系联合承办的，论文集的收选工作也是三个单位共同承担的。

过程控制科学报告会是一个全国性的学术活动。这次会议共接受论文153篇，其中有17篇来自工厂和研究所，其余来自30多所高等院校。收入论文集的56篇论文中，有14篇来自工厂和研究所（包括与高等院校联合发表的）。这在一定程度上反映了我国过程控制的水平和发展趋势，从一个侧面显示了我国过程控制界科研工作的兴旺发达。过程控制科学报告会正愈来愈多地吸引着全国同行的共同兴趣。希望今后有更多的高等院校和工厂、研究所的同行们参加到这个学术活动中来，共同切磋，为提高我国过程控制水平做出更大贡献。

中国自动化学会第三届科学报告会得到机电部中国自动控制系统工程总公司、航空航天部634所、大连海运学院微电脑公司和北京计算机配件五厂等单位的大力支持。在本届会议筹备过程中和会议期间，吕明瑾教授、厉玉鸣副教授、金以慧副教授、徐博文副教授、王桂增副教授、肖德云副教授、钟道彩同志、蒋新官同志、严文典同志、宋卫荣同志、杨军同志、宋靖雁同志等做了大量的具体工作，我受会议组委会委托，在此一并表示衷心的感谢。

方 崇 智

1990年5月

目 录

第一部分 控制理论及应用

广义预测控制若干问题研究·····	席裕庚	厉隽桦(1)
多入多出系统预估控制器的设计·····	袁 璞	左 信(9)
预估-PI串级控制·····	邹全意	袁 璞(20)
改进的多变量内模控制器·····	沈建平 俞金寿	蒋慰孙(28)
重构控制律补偿传感器失效的容错控制研究·····	葛建华 孙优贤	周春晖(35)
一种模糊控制器的设计·····	倪华方 王树青	王骥程(41)
模糊线性复合模型的研究·····	于静江 顾钟文	周春晖(46)
求解稳态系统在线优化与控制问题的序列模型逼近法·····	刘智勇	万百五(52)
H^∞ 最优灵敏度控制器的一种工程设计方法及其应用·····	邹 颢	孙优贤(57)
鲁棒控制器设计的频域参数优化方法·····	郑 冰	王诗宓(64)
一种实用的解耦系统的设计方法·····		王永初(71)
变参考轨迹系数模型算法控制及其仿真·····	王治祥	王 洪(79)
一种脉冲响应模型的辨识方法及其应用·····	金元郁	顾兴源(85)
一种能抗突加负载干扰的极点配置自校正控制器·····	张学仑 王树青	王骥程(92)
变时滞及未知扰动过程的自校正技术的研究和应用·····	王力涛	蒋炳生(99)
精馏塔基于双线性模型的自校正PID控制·····	华向明	钱 锋(105)
自适应解耦控制精馏塔·····	王 纲	柴天佑(111)
长输管道泄漏检测和定位的现代方法·····	秦泗钊 王桂增	方崇智(118)
加热炉多变量控制系统的设计与实现·····	孙道峰 金以慧 张福义	王树本(124)
双线性最优控制及其在造纸过程中的应用·····	应依群	孙优贤(132)
预测-PID串级控制及其在合成氨变换工段的应用·····	谢剑英	季雪伟(139)
催化裂化装置提升管反应器的控制 ·····袁 璞 吴 峰 丛松波 黄德先 龚 辉 陈永生		徐世泰(144)
串级变比值调节在湿法磷肥生产中的应用·····	钱 江 殷向东	黄西孟(151)
非线性鲁棒观测器及其在发酵控制中的应用·····		褚 健(157)

第二部分 建模、优化控制与仿真

聚酯过程分子量分布控制的研究·····	王 晖 曹柳林 尤 勇	江 弘
刘念泉 鞠 伟 于庭月 张守善 谢 寮 陈 扑 周 群		郭更新(164)
建模技术在制碱工业中的应用·····	韩建勋	饶 欣(166)
精馏塔建模与操作优化·····	彭认沛 徐博文 范全义	唐 杰(174)
三十万吨乙烯装置乙烯塔的建模与优化·····	丁利华 俞金寿	(185)

丙烯腈流化床反应器的温度模型·····熊 焰 孙优贤	钱积新(190)
连续退火炉的计算机优化控制·····黄正军	徐用懋(196)
乙烷裂解炉的建模与优化控制·····钱 锋 华向明	金 超(200)
大型合成氨系统计算机在线调优及氢氮比特性分析·····侍洪波	黄 道(206)
闪蒸塔单元的建模及 PIGS 仿真器简介·····唐 楠	吴重光(213)
催化裂化装置仿真系统的设计与实现·····吕明瑾	陈 冠(219)

第三部分 智能控制与仪表

调节参数的专家式自学习·····田 华	蒋慰孙(223)
一类智能控制算法的研究·····张雪亚	夏圉世(230)
PID参数自整定系统·····谢新民 徐博文	范全义(237)
智能PID调节器·····柏建国 罗毅平	高 山(242)
具有学习功能的智能控制系统·····马建国 夏焕彬	吕玉康(247)
用专家系统概念构造焦炉自适应控制系统·····薛云灿 胡周成	吕勇哉(252)
锅炉的智能燃烧控制系统·····	阳宪惠(258)
谷氨酸发酵过程 pH 值的智能控制·····朱学峰 麦志文	林楠林(263)
电渣重熔过程的专家控制·····王 宁 涂 健	李雨膏(271)
智能PI温度控制算法及其应用·····李 平	庄兴稼(277)
电动调节仪表的计算机辅助教学·····阎 勇	刘淑萍(282)
节能型调节阀——新执行器·····张玉润 祝和云 周春晖 何尧基	左 兵(287)

第四部分 计算机控制系统

石化生产过程应用计算机控制的现状及展望·····秦瑞歧	(293)
分散型控制系统及其应用的实践·····刘毓满	(299)
计算机监控系统在大中型石化企业控制系统改造中的地位 and 作用 ·····郑庆生 杨佃福 王桂增 徐用懋	(307)
DMC-500 系列 锅炉微机控制系统燃烧控制特点·····黄读业 傅光永	郭兴安(313)
DCS-88小型通用集散控制系统及其通信网络 ·····吉吟东 张曾科 朱善君 戴忠达	(319)
DCS-100计算机分散控制系统·····王锦标 杨佃福	(326)
快速火情控制系统·····张文政 魏桂香 姜 波 薛锦诚	(330)
DMC-500 系列 锅炉微机控制系统的开发生产与推广应用 ·····傅光永 黄读业 郭兴安	(334)
工业过程控制的硬件支持·····郝丕荣	(336)
CRTP——工业自动化的保证·····王希之	(338)

CONTENTS

PART I CONTROL THEORY AND APPLICATIONS

Some Studies on Generalized Predictive Control	
.....	Xi Yugeng, Li Junyi(1)
Predictive Controller Design for MIMO system	
.....	Yuan Pu, Zuo Xin(9)
PC-PI Cascade Control System	Zou Quanyi, Yuan Pu(20)
A New Improved Multivariable Internal Model Controller	
.....	Shen Jianping, Yu Jinshou, Jiang Weisun(28)
Study of Fault-Tolerant Control by Reconfiguring Control	
Law Against Sensor Failure	
.....	Ge Jianhua, Sun Youxian, Zhou Chunhui(35)
A Kind of Fuzzy Controller Design	
.....	Ni Huafang, Wang Shuqing, Wang Jicheng(41)
Study of Fuzzy Linear Combined Model	
.....	Yu Jingjiang, Gu Zhongwen, Zhou Chunhui(46)
Sequence Model Approximation Method for On-Line	
Optimization and Control of Steady State Systems	
.....	Liu Zhiyong, Wan Baiwu(52)
An Engineering Design Method of H^∞ Optimal Sensitivity	
Controller and Its Application	Zou Biao, Sun Youxian(57)
A Parameter Optimization Approach in Frequency Domain	
for Robust Controller Design	 Zheng Bing, Wang Shifu(64)
A Utility Method of Decoupling System Design	 Wang Yongchu(71)
Alterate Reference Trajectory Coefficient Model	
Algorithmic Control and Simulation	
.....	Wang Zhixiang, Wang Hong(79)
An Identification Method of Impulse Response Model	
and Its Application	 Jin Yuanyu Gu Xingyuan(85)
A Pole Placement Self-Tuning Controller with	
Suddenly-Applied-Load-Disturbance Rejection	
.....	Zhang Xuelun, Wang Shuqing, Wang Jicheng(92)
Research and Application of Self-Tuning Technique for	
Processes with Variable Time-Delay and Unknown	

Disturbances.....	Wang Litao, Jiang Bingsheng(99)
The Self-Tuning PID Control of Distillation Columns Based on Bilinear Models	Hua Xiangming, Qian Feng(105)
Adaptive Decoupling Control of a Distillation Column	Wang Gang, Chai Tianyou(111)
The New Methods for Leak Detection and Location in Long Transport Pipeline.....	Qing Sizhao, Wang Guizeng, Fang Chongzhi(118)
Design and Realization of Multivariable Control System for a Reboiler Oil Furnace	Sun Daofeng, Jin Yihui, Zhang Fuyi, Wang Shuben(124)
Bilinear Optimal Control and Its Application to Papermaking Process.....	Ying Yiqun, Sun Youxian(132)
Predictive-PID Cascade Control and Its Application to Shifted-Workshop at Synthetic Ammonia Plant	Xie Jianying, Ji Xuewei(139)
Riser Reactor Control of Catalytic Cracking Unit	Yuan Pu, Wu Feng, Cong Songbo, Huang Dexian, Gong Hui, Chen Yongsheng, Xu Shitai(144)
The Application of Cascade-Variable Ratio Control to Superphosphate Wet Process	Qian Jiang, Yin Xiangdong, Huang Ximeng(151)
Nonlinear Robust Observer Design and Its Application to Biomass Estimation in Fermentation Process	Chu Jian(157)

PART I MODELING, OPTIMIZATION CONTROL AND SIMULATION

Study on MWD Control in PET	Wang Hui, Cao Liulin, You Yong, Jiang Hong, Liu Nianquan, Ju Wei, Yu Tingyue, Zhang Shoushan, Xie Liao, Chen Pu, Zhou Qun, Guo Gengxin (164)
Application of Modeling Technique in Soda Industry	Han Jianxun, Rao Xin(169)
Modeling and Operation Optimization of a Distillation Column	Peng Renpei, Xu Bowen, Fan Quanyi, Tang Jie(178)
Modeling and Optimization of Ethylene Tower in Three Hundred Thousands Ton Ethylene Plant	Ding Lihua, Yu Jinshou(185)
The Modeling of Temperature Distribution in a Fluidized-Bed Reactor.....	Xiong Yan, Sun Youxian, Qian Jixin(190)

Optimal Computer Control of Continuous Annealing	
Furnace.....	Huang Zhengjun, Xu Yongmao(196)
Modeling and Optimizing Control of the Ethane Cracking	
Furnace.....	Qian Feng, Hua Xiangming, Jin Chao(200)
On-Line Computer Optimization of Synthetic Ammonia	
Process and Discussion About the Characteristic of	
the Ratio of H/N.....	Shi Hongbo, Huang Dao(206)
The Modeling of Flash Drum and Introduction to the	
Process Industry Simulator for General Use	
.....	Tang Nan, Wu Chongguang(213)
The Design and Accomplishment of the FCCU Simulator	
.....	Lu Mingjin, Chen Guan(219)

PART II INTELLIGENT CONTROL AND INSTRUMENTATION

Expert-Like Self-Learning of Regulation Parameters	
.....	Tian Hua, Jiang Weisun(223)
An Intelligent Control Algorithm Based on Phase	
Trajectory.....	Zhang Xueya, Xia Quanshi(230)
Systems for Auto-Tuning of PID Control Parameters	
.....	Xie Xinmin, Xu Bowen, Fan Quanyi(237)
An Intelligent PID Controller	
.....	Bai Jianguo, Luo Yiping, Gao Shan(242)
Intelligent Process Control System with Learning	
Functions.....	Ma Jianguo, Xia Huanbin, Lu Yukang(247)
An Adaptive Thermal Control System for Coke Oven	
Battery Using Expert Systems Concepts	
.....	Xue Yuncan, Hu Zhoucheng, Lu Yongzai(252)
An Intelligent Burning Control System of Boilers	
.....	Yang Xianhui(258)
Intelligent Control of Glutamic Acid Fermentation	
.....	Zhu Xuefeng, Mai Zhiwen, Lin Nanlin(263)
Expert Control of Electroslag Remelting Processes	
.....	Wang Ning, Tu Jian, Li Yugao(271)
An Intelligent PI Temperature Control Algorithm with	
Applications.....	Li Ping, Zhuang Xingjia(277)
CAI in Electrical Control Instrumentation.....	Yan Yong, Liu Shuping(282)
The Energy-Saving Control Valve-A New Actuator	
.....	Zhang Yuren, Zhu Heyun, Zhou Chunhui,
	He Yaoji, Zuo Bing(287)

PART IV COMPUTER CONTROL SYSTEMS

- The Present and the Future of Applications of Computer
Control to Petrochemical Production Processes
.....Qing Ruiqi(293)
- Distributed Control System and Its Applications.....Liu Yuman(299)
- Process Monitoring and Supervisory Control at Large and
Medium-Sized Petrochemical Plants; Its Function and
Application
.....Zheng Qingsheng Yang Dianfu, Wang Guizeng, Xu Yongmao(307)
- Characteristics of DMC-500 Boiler Microcomputer
Control System in Burning Control
.....Huang Duye, Fu Guangyong, Guo Xing'an(313)
- DCS88—A Small Scale General Total Distributed Control
System and Its Communication Network on the Process
Control Basis
..... Ji Yindong, Zhang Zengke, Zhu Shanjun, Dai Zhongda(319)
- DCS-100 Computer Distributed Control System
.....Wang Jingbiao, Yang Dianfu(326)
- A Speedy Control System of the Case on Fire
.....Zhang Wenzheng, Wei Guixiang, Jiang Bo, Xue Jincheng(330)

第一部分 控制理论及应用

广义预测控制若干问题研究

席裕庚 厉隽烽

(上海交通大学自动控制系)

摘要: 本文通过把广义预测控制转化为内模控制结构, 导出了其中控制器、滤波器的定量表达, 并在此基础上分析了闭环系统的动态特性、稳定性和鲁棒性, 为设计广义预测控制系统提供了理论依据。

关键词: 广义预测控制, 内模控制, 控制系统分析

一、引言

广义预测控制 (GPC)^[1] 是80年代中期由 Clarke 等提出的一类新型预测控制算法。这一算法以 CARIMA 模型为基础, 采用了长时段的优化性能指标, 结合了辨识和自校正机制, 表现出良好的鲁棒性并有广泛的适用范围。近年来, 它在国内外控制界已引起了广泛的重视。

然而, 由于优化的启发性质和算法的复杂性, 对于这一算法的理论研究十分困难。目前, 虽然对其闭环定量形式已有所推导^[2], 但尚未导出直接可供理论分析的结果, 系统的参数设计仍需通过仿真进行, 这对于广义预测控制的推广应用是不利的。

本文通过把广义预测控制转化为内模控制结构, 导出了其中控制器、滤波器的定量表达, 并在此基础上分析了闭环系统的动态特性、稳定性和鲁棒性。这些新的理论结果为设计广义预测控制系统提供了有益的参考。

二、广义预测控制算法

在本节中, 我们首先介绍 Clarke 在文[1]中所阐述的广义预测控制算法原理, 仅对若干记号作了修改。

广义预测控制采用 CARIMA 模型作为预测模型

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + C(z^{-1})\xi(k)/\Delta, \quad \Delta = 1 - z^{-1} \quad (1)$$

其中 A 、 B 、 C 分别为 z^{-1} 的 n 、 m 、 n 阶多项式, $\{\xi(k)\}$ 表示均值为零的白噪声序列。为简化计, 进一步设 $C(z^{-1}) = 1$ 。

考虑性能指标

$$J(k) = E \left\{ \sum_{j=1}^P q_j [y(k+j) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^M r_j [\Delta u(k+j-1)]^2 \right\} \quad (2)$$

其中 $w(k+j)$ 是由输出值 $y(k)$ 至设定值 c 的参考轨迹:

$$w(k+j) = \alpha^j y(k) + (1 - \alpha^j) c, \quad 0 \leq \alpha < 1 \quad (3)$$

为了求解优化式(2), 需对未来输出值 $y(k+j)$ 进行预报。为此, 考虑 Diophantine 方程

$$1 = E_j(z^{-1})A\Delta + z^{-j}F_j(z^{-1}) \quad (4)$$

其中 $E_j(z^{-1}) = e_{j0} + e_{j1}z^{-1} + \dots + e_{j,j-1}z^{-(j-1)}, e_{j0} = 1$

$$F_j(z^{-1}) = f_{j0} + f_{j1}z^{-1} + \dots + f_{j,n}z^{-n}$$

可得到预报方程

$$y(k+j) = G_j \Delta u(k+j-1) + F_j y(k) + E_j \xi(k+j) \quad (5)$$

此处 $G_j(z^{-1}) = E_j B = g_{j0} + g_{j1}z^{-1} + \dots = B(1 - z^{-1}F_j)/A\Delta \quad (6)$

注意到对象的传递函数为

$$G(z^{-1}) = \frac{z^{-1}B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = h_1 z^{-1} + (h_2 - h_1)z^{-2} + \dots \quad (7)$$

式中 $\{h_i\}$ 为其单位阶跃响应序列, 故可知 G_j 的前 j 项 $g_{j0}, \dots, g_{j,j-1}$ 正是 $\{h_i\}$ 的前 j 项 $h_1, \dots, h_j$

根据式(5), 对未来输出值的预报可忽略未来噪声的影响得到

$$\hat{y}(k+j) = G_j \Delta u(k+j-1) + F_j y(k) \quad (8)$$

其向量形式为

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{f}$$

其中 $\hat{\mathbf{y}} = [\hat{y}(k+1) \dots \hat{y}(k+P)]^T, \mathbf{u} = [\Delta u(k) \dots \Delta u(k+M-1)]^T,$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} h_1 & & & 0 \\ h_2 & h_1 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ h_p & & h_1 & \vdots \\ & & & h_{p-M+1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f(k+1) \\ \vdots \\ f(k+P) \end{bmatrix} = \mathbf{H}\Delta \mathbf{u}(k) + \mathbf{F}y(k) \quad (9)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} G_1 - h_1 \\ z(G_2 - h_2 z^{-1} - h_1) \\ \vdots \\ z^{P-1}(G_p - h_p z^{-(P-1)} \dots h_1) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_p \end{bmatrix}$$

由此可导出最优控制律

$$\hat{\mathbf{u}} = (\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \mathbf{G} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{Q} (\mathbf{w} - \mathbf{f})$$

这里

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w(k+1) \\ \vdots \\ w(k+P) \end{bmatrix} = \mathbf{L}y(k) + \mathbf{N}c \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \alpha^2 \\ \vdots \\ \alpha^P \end{bmatrix} \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 1 - \alpha \\ 1 - \alpha^2 \\ \vdots \\ 1 - \alpha^P \end{bmatrix}$$

而 $\mathbf{Q} = \text{diag}(q_1, \dots, q_P)$, $\mathbf{R} = \text{diag}(r_1, \dots, r_M)$ 为权矩阵。

即时控制增量 $\Delta u(k)$ 可取 $\tilde{\mathbf{u}}$ 的第一个元素得到

$$\Delta u(k) = \mathbf{d}^T(\mathbf{w} - \mathbf{f}) \quad (11)$$

其中 $\mathbf{d}^T = [d_1, \dots, d_P]$ 为 $(\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \mathbf{G} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{Q}$ 的第一行。

在控制过程中, 将在线递推 E_j , F_j , 并由式(9)、(10)算出 $\mathbf{w}$ 和 $\mathbf{f}$ 代入式(11)计算控制作用。

三、广义预测控制的内模控制描述

上述广义预测控制算法公式(9)、(10)、(11)可以用图1所示的结构加以描述:

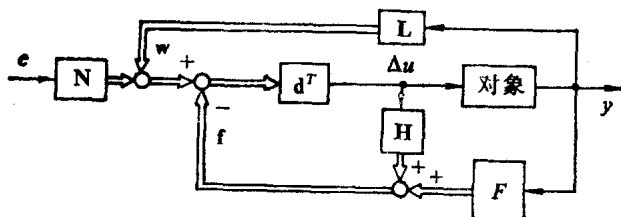


图 1

经过图2所示的变换, 可以将其变为图3所示的内模控制结构。

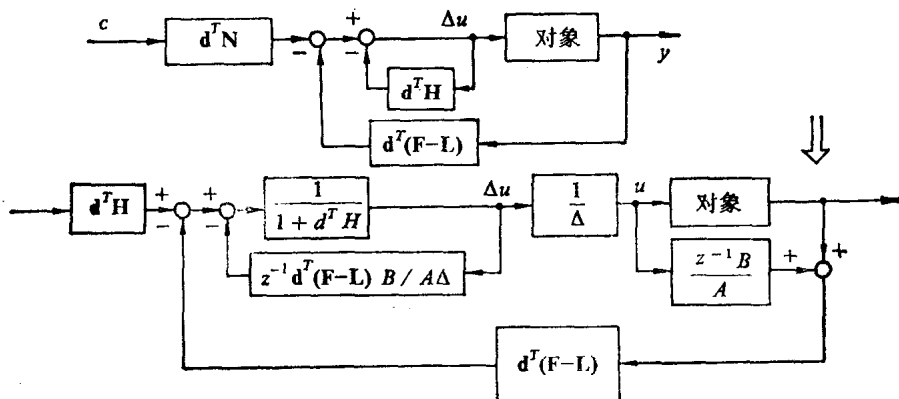


图 2

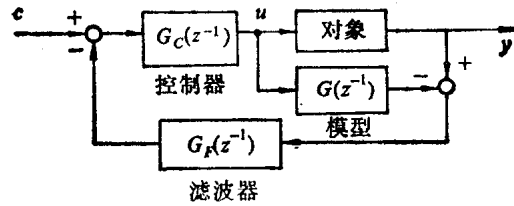


图 3

图 3 中各环节的传递函数为

模型 $G(z^{-1}) = \frac{z^{-1}B}{A}$

控制器 $G_c(z^{-1}) = \frac{d^T N A}{(1 + d^T H) A \Delta + z^{-1} B d^T (F - L)}$

滤波器 $G_F(z^{-1}) = \frac{d^T (F - L)}{d^T N}$

由于控制器和滤波器的表达式涉及到向量 F 和 H ，它们分别与 F_i 、 E_i 有关，需要递推计算。这对定量分析其性质是不便的，所以我们将设法消去 E_i 、 F_i ，使之只与对象参数 A 、 h_i 以及控制参数 d_i 有关。

1. 控制器传递函数 $G_c(z^{-1})$

首先，把 $G_c(z^{-1})$ 的分母部分改写为

$$A_c(z^{-1}) = A \Delta + d^T \begin{bmatrix} G_1 A \Delta \\ z G_2 A \Delta \\ \vdots \\ z^{p-1} G_p A \Delta \end{bmatrix} - A \Delta d^T \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 + h_1 z \\ \vdots \\ h_p + \dots + h_1 z^{p-1} \end{bmatrix} + z^{-1} B d^T \begin{bmatrix} F_1 - \alpha \\ F_2 - \alpha^2 \\ \vdots \\ F_p - \alpha^p \end{bmatrix}$$

结合式(6)，可将上式进一步写作

$$A_c(z^{-1}) = A \Delta + B d^T \begin{bmatrix} 1 \\ z \\ \vdots \\ z^{p-1} \end{bmatrix} - A \Delta d^T \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 + h_1 z \\ \vdots \\ h_p + \dots + h_1 z^{p-1} \end{bmatrix} - z^{-1} B d^T \begin{bmatrix} \alpha \\ \alpha^2 \\ \vdots \\ \alpha^p \end{bmatrix} \\ = A \Delta \{ 1 - [d_1 h_1 + d_2 (h_2 + h_1 z) + \dots + d_p (h_p + \dots + h_1 z^{p-1})] \} \\ + B [-(d_1 \alpha + \dots + d_p \alpha^p) z^{-1} + d_1 + d_2 z + \dots + d_p z^{p-1}]$$

不失一般性，令

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = b_1 + b_2 z^{-1} + \dots + b_n z^{-(n-1)}$$

根据式(7)，可导出递推关系

$$b_1 = h_1$$

$$b_2 = (h_2 - h_1) + h_1 a_1$$

$$\vdots$$

$$b_n = (h_n - h_{n-1}) + (h_{n-1} - h_{n-2})a_1 + \cdots + (h_2 - h_1)a_{n-2} + h_1 a_{n-1}$$

$$0 = (h_i - h_{i-1}) + (h_{i-1} - h_{i-2})a_1 + \cdots + h_1 a_{i-1}, \quad i > n$$

由此经进一步推导可得

$$A_c(z^{-1}) = 1 + \bar{a}_1 z^{-1} + \cdots + \bar{a}_{n+1} z^{-(n+1)} \quad (13)$$

其中

$$\begin{pmatrix} 1 \\ \bar{a}_1 \\ \vdots \\ \bar{a}_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & & & 0 \\ & \ddots & & \\ c_2 - c_1 & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & 1 \\ & & c_{n+2} - c_{n+1} & \cdots & c_2 - c_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \quad (14)$$

或简记为

$$\mathbf{a}_c = \mathbf{C} \mathbf{a}$$

式中 $c_i = d_0 h_{i-1} + d_1 h_i + \cdots + d_p h_{i+p-1}$

$$d_0 = -\mathbf{d}^T \mathbf{L} = -(d_1 \alpha + \cdots + d_p \alpha^p) \triangleq -\lambda$$

于是可得

$$G_c(z^{-1}) = \frac{(d_r - \lambda) A(z^{-1})}{A_c(z^{-1})} \quad (15)$$

其中 $d_r = d_1 + \cdots + d_p$

2. 滤波器传递函数 $G_F(z^{-1})$

我们把滤波器的表达式改写为

$$G_F(z^{-1}) = \frac{\mathbf{d}^T (\mathbf{F} - \mathbf{L})}{\mathbf{d}^T \mathbf{N}} = \frac{1}{d_r - \lambda} \sum_{i=1}^P d_i (F_i - \alpha^i)$$

$$= \frac{1}{d_r - \lambda} \left(\sum_{i=1}^P d_i F_i - \lambda \right) \triangleq \frac{1}{d_r - \lambda} B_F(z^{-1})$$

由于 $E_1 = 1$, 可得 $F_1 = z(1 - A)$, 其各项系数为

$$\begin{pmatrix} f_{10} \\ f_{11} \\ \vdots \\ f_{1,n-1} \\ f_{1n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - a_1 \\ a_1 - a_2 \\ \vdots \\ a_{n-1} - a_n \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - a_1 & 1 & & 0 \\ & a_1 - a_2 & \ddots & \\ & \vdots & \ddots & \ddots \\ & 0 & & 1 \\ a_n & & & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \triangleq \bar{\mathbf{A}} \mathbf{f}_0$$

根据 F_1 的递推公式⁽¹⁾

$$F_{j+1} = z(F_j - A f_j)$$

可得

$$\begin{pmatrix} f_{j+1,0} \\ f_{j+1,1} \\ \vdots \\ f_{j+1,n-1} \\ f_{j+1,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{j1} \\ f_{j2} \\ \vdots \\ f_{jn} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 - a_1 \\ a_1 - a_2 \\ \vdots \\ a_{n-1} - a_n \\ a_n \end{pmatrix} f_{j0}$$

此式可记为

$$f_{j+1} = \bar{A} f_j = \bar{A}^j f_1 = \bar{A}^{j+1} f_0$$

由此可得

$$G_F(z^{-1}) = \frac{1}{d_s - \lambda} [z^T (d_1 \bar{A} + d_2 \bar{A}^2 + \cdots + d_p \bar{A}^p) f_0 - \lambda] \quad (16)$$

式中 $z^T = [1 \quad z^{-1} \cdots z^{-p}]$ 。显然, $G_F(z^{-1})$ 乃至 $B_F(z^{-1})$ 都是 z^{-1} 的多项式。

一旦已知 $A(z^{-1})$ 、 h_i 、 d_j , 即可由式 (15)、(16) 求出 $G_C(z^{-1})$ 、 $G_F(z^{-1})$ 的数学表达式。

四、广义预测控制系统的闭环分析

在本节中, 我们将在上述内模控制结构的基础上, 分析广义预测控制系统的闭环特性。

在图 3 所示的内模控制结构中, 设实际对象的 Z 传递函数为

$$G_P(z^{-1}) = \frac{z^{-1} B_P(z^{-1})}{A_P(z^{-1})}$$

由图可得控制量和输出量对于设定值的传递函数

$$\frac{Y(z^{-1})}{C(z^{-1})} = \frac{G_C G_P}{1 + G_C G_F (G_P - G)} = \frac{(d_s - \lambda) z^{-1} A B_P}{A_C A_P + z^{-1} B_F (A B_P - B A_P)} \quad (17)$$

$$\frac{U(z^{-1})}{C(z^{-1})} = \frac{G_C}{1 + G_C G_F (G_P - G)} = \frac{(d_s - \lambda) A A_1}{A_C A_P + z^{-1} B_F (A B_P - B A_P)} \quad (18)$$

1. 模型无失配时的动态响应和稳定性

若模型与对象间无失配, 即 $G_P(z^{-1}) = G(z^{-1})$, 由式 (17) 可得

$$\frac{Y(z^{-1})}{C(z^{-1})} = \frac{(d_s - \lambda) z^{-1} B(z^{-1})}{A_C(z^{-1})}$$

由此可知:

(1) 广义预测控制系统的动态特性此时取决于特征多项式 $A_C(z^{-1})$, 在系统设计时必须保证 $A_C(z^{-1})$ 稳定且有较快收敛的零点;

(2) 广义预测控制不能改变系统的零点, 经控制后系统的纯滞后或非最小相位性质仍将保留。

2. 模型失配时的鲁棒性

由式 (17)、(18) 可知, 控制量和输出量对设定值的传递函数有相同的特征多项式

$$p(z^{-1}) = A_C(z^{-1}) A_P(z^{-1}) + z^{-1} B_F(z^{-1}) [A(z^{-1}) B_P(z^{-1}) - B(z^{-1}) A_P(z^{-1})]$$

闭环系统的鲁棒性取决于上式的零点是否全部在单位圆内。

特别, 当系统只有增益失配时, 记 $A_P(z^{-1}) = A(z^{-1})$, $B_P(z^{-1}) = \mu B(z^{-1})$, 则式 (17)、(18) 可写作