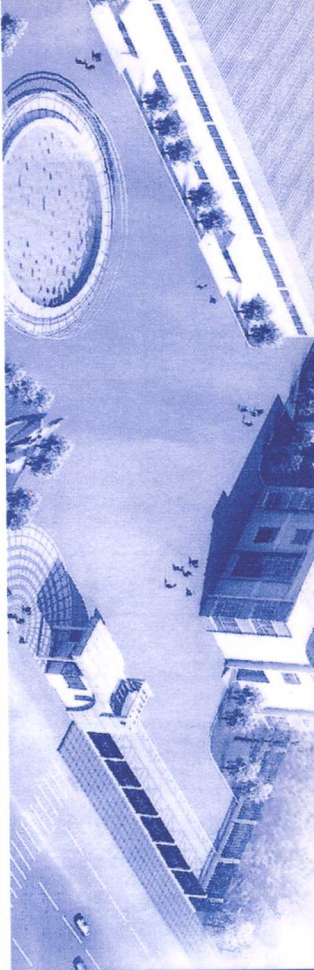


窑炉检测 与控制技术

刘教瑜 编著

YAOLU JIANCE YU KONGZHI JISHU



国防工业出版社

National Defense Industry Press

窑炉检测与控制技术

刘教瑜 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书从传感检测与自动化技术的角度,介绍了现代窑炉工业中若干重要的基本概念、理论和技术方法,内容包括窑炉模型、窑炉检测、窑炉经典控制、窑炉智能控制、窑炉灰色预测控制和窑炉节能技术,较好地归纳和描述了近十几年来,计算机技术、电子自动化技术和智能控制技术在工业窑炉生产过程的应用基础研究和实用化的发展成果。

本书可供建材专业科研人员和工程技术人员参考,也可作为高等学校建材和自动化等专业研究生和高年级本科生教材。

图书在版编目(CIP)数据

窑炉检测与控制技术/刘教瑜编著. —北京:国防工业出版社,2009.8

ISBN 978-7-118-06470-4

I. 窑... II. 刘... III. ①工业炉窑—检测②工业炉窑—控制 IV. TK175

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 124773 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 9 1/4 字数 168 千字

2009 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 25.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

相传,窑炉的历史可以上溯到炎黄时代乃至新石器时代。窑炉是伴随人类社会物质与精神生产进程而诞生和发展的复杂工程技术系统。窑炉结构是否合理,选型是否正确,直接关系到产品的质量,产量和能量消耗的高低等。现代窑炉技术涉及热工过程及设备、热工学、燃料燃烧学、工程热力学、传质传热学、工程流体力学、热工过程自动调节、耐火材料、电子电工、计算机、自动化等多门专业和多种技术。

本书从传感检测与自动化技术的角度,介绍了现代窑炉工业中若干重要的基本概念、理论和技术方法,内容包括窑炉模型、窑炉检测、窑炉经典控制、窑炉智能控制、窑炉灰色预测控制和窑炉节能技术,较好地归纳和描述了近十几年来,计算机技术、电子自动化技术和智能控制技术在工业窑炉生产过程的应用基础研究和实用化的发展成果。

本书得以完成,要由衷地感谢众多专家学者和工程技术人员,是他们公开发表的优秀研发成果,为本书提供了坚实的写作素材。也要感谢研究生贺欣、程永辉、陈堃、邓奕、王璞等人,是他们完成了本书部分内容的仿真和文字编辑工作。

本书可供建材专业科研人员和工程技术人员参考,也可作为高等学校建材和自动化等专业研究生和高年级本科生教材。

著 者

2009年7月

目 录

第 1 章 窑炉概述	1
1.1 窑炉概念	1
1.2 窑炉分类	1
1.3 窑炉发展方向	2
1.3.1 绿色窑炉的标准	2
1.3.2 实现绿色窑炉的努力方向	3
1.3.3 实现绿色窑炉的目标	4
1.4 中国窑炉技术的发展	4
第 2 章 窑炉模型	6
2.1 窑炉自回归滑动平均模型	6
2.1.1 离线建立窑炉系统数学模型	6
2.1.2 模型参数的实际辨识	8
2.1.3 窑炉模型参数的仿真验证	9
2.2 窑炉神经网络模型	10
2.2.1 神经网络概述	10
2.2.2 人工神经网络的结构及原理	11
2.2.3 窑炉温度场模型	13
2.3 窑炉遗传算法模型	16
2.3.1 陶瓷产品生产分析	16
2.3.2 窑炉排序的模型化	17
2.3.3 计算机仿真实验	19
2.3.4 模型分析	20
2.4 隧道窑炉计算机模拟	21
2.4.1 窑炉模拟的必要性	21
2.4.2 窑炉模拟的内容	22
2.4.3 系统模型	23
2.4.4 程序编制	25

2.4.5 系统组成与模拟实验	26
2.5 数字窑炉模型	27
2.5.1 窑炉设计数字化	27
2.5.2 窑炉设计数字化关键技术	27
2.5.3 玻璃窑炉数值模拟实例	29
第3章 窑炉检测技术	31
3.1 窑炉用热电阻和热电偶	31
3.1.1 窑炉用热电传感器	31
3.1.2 温度智能测温板的硬件设计	31
3.1.3 实际测量结果与分析	34
3.2 窑炉红外扫描测温	35
3.2.1 红外扫描系统组成	35
3.2.2 红外扫描系统工作原理	35
3.2.3 红外扫描系统功能及特点	36
3.3 玻璃窑炉液面激光测量	37
3.3.1 激光测量仪原理	37
3.3.2 仪器性能与指标	40
3.3.3 玻璃液位测控的几种方法比较	40
3.3.4 JYK-Ⅲ型激光液面仪的应用前景	41
3.4 窑炉温度场灰度图像测量	41
3.4.1 火焰温度检测原理	41
3.4.2 系统结构	42
3.4.3 软件设计	44
3.4.4 实验结果	45
3.5 窑炉温度场彩色图像测量	46
3.5.1 彩色图像测温原理	46
3.5.2 彩色图像测温系统构成	47
3.5.3 彩色图像测温实验	48
3.6 窑炉自动跟踪预警系统	49
3.6.1 窑炉跟踪监测原理	49
3.6.2 窑炉跟踪监测电路	50
3.6.3 窑炉跟踪监测软件	52
第4章 窑炉经典控制	54
4.1 窑炉温度自校正控制	54

4.1.1	窑炉温度 CARMA 预测模型	54
4.1.2	窑炉温度自校正控制算法分析	55
4.1.3	窑炉温度加权最小方差自校正控制器设计	57
4.1.4	窑炉温度加权最小方差自校正控制仿真	58
4.2	玻璃窑炉液位非线性 PID 控制	59
4.2.1	玻璃窑炉分析	59
4.2.2	玻璃窑炉液位测量与控制分析	60
4.2.3	非线性 PID 控制系统设计	61
4.2.4	实例仿真与应用	63
4.3	玻璃窑炉燃烧系统优化控制	65
4.3.1	窑炉最佳燃烧分析	65
4.3.2	燃烧过程优化原理及控制方案设计	65
4.3.3	最佳风—油比的自寻优控制算法	66
4.3.4	燃烧应用实例	67
4.4	窑炉 DMC—PID 串级控制	68
4.4.1	窑炉温度控制滞后	68
4.4.2	窑炉温度 DMC 控制算法	69
4.5	窑炉无模型自适应控制	72
4.5.1	玻璃窑炉控制参数分析	72
4.5.2	窑炉 MFA 算法	74
4.5.3	MFA 控制器实现	76
4.6	窑炉在线自寻最优控制	77
4.6.1	陶瓷窑炉热效率分析	77
4.6.2	自寻最优控制算法	78
4.6.3	陶瓷窑炉自寻优仿真实例	80
第 5 章	窑炉智能控制	82
5.1	窑炉模糊控制	82
5.1.1	模糊控制基础	82
5.1.2	油烧辊道窑烧成带模糊控制	83
5.2	窑炉模糊 PID 控制	85
5.2.1	窑炉模糊 PID 控制的必要性	85
5.2.2	FUZZY—PID 控制器的设计	86
5.2.3	FUZZY—PID 控制器的仿真	89
5.3	窑炉分段决策模糊控制	90

5.3.1	窑炉分段决策的必要性	90
5.3.2	多模态控制算法设计	91
5.3.3	仿真研究	92
5.4	窑炉神经网络 PID 控制	93
5.4.1	窑炉控制参数调整的必要性	93
5.4.2	BP 神经网络 PID 控制原理	94
5.4.3	窑炉仿真实验	97
5.5	窑炉动态递归神经网络控制	98
5.5.1	玻璃窑炉油压罐分析	98
5.5.2	玻璃窑炉机理建模与 PID 控制	99
5.5.3	玻璃窑炉动态递归神经控制	100
5.5.4	仿真实验分析	103
第 6 章	窑炉灰色预测控制	105
6.1	窑炉解耦及灰色预测 PID 控制	105
6.1.1	气氛与温度的耦合现象	105
6.1.2	解耦及灰色预测 PID 控制策略	106
6.1.3	气氛温度解耦控制的 SIMULINK 仿真及效果分析	108
6.2	窑炉灰色神经网络控制	113
6.2.1	回转窑的灰色系统特征	113
6.2.2	回转窑灰色神经网络控制器结构	114
6.2.3	回转窑灰色 BP 神经网络算法	115
6.2.4	回转窑灰色 BP 神经网络仿真	118
6.3	窑炉灰色神经网络 PID 控制	120
6.3.1	窑炉 PID 控制改进的必要	120
6.3.2	BP 神经网络 PID 算法	121
6.3.3	窑炉温度灰色 BP 神经网络 PID 控制	122
第 7 章	窑炉节能	124
7.1	工业窑炉节能	124
7.1.1	窑炉能耗现状	124
7.1.2	高能耗原因分析	124
7.1.3	工业窑炉中燃烧及热利用特点	125
7.1.4	热损失	127
7.1.5	工业窑炉的节能	128
7.1.6	工业窑炉的改造	130

7.1.7	系统节能和梯级用能	131
7.2	窑炉节能自动控制	132
7.2.1	玻璃窑炉节能出发点	132
7.2.2	熔化池温度控制与节能	132
7.2.3	燃烧控制与节能	133
7.2.4	窑压控制与节能	134
7.2.5	玻璃液位控制与节能	134
7.2.6	火焰换向自动控制与节能	135
7.3	窑炉高电耗控制	136
7.3.1	高电耗现状	136
7.3.2	变频调速与自动控制技术的结合	137
7.3.3	对象特性及控制中存在的问题	137
7.3.4	控制策略选取	138
7.3.5	控制算法	139
7.3.6	投资与效果	139
参考文献		141

第 1 章 窑 炉 概 述

1.1 窑炉概念

窑炉是伴随文明社会的出现而诞生的工程技术系统。我国窑炉生产历史悠久,历史上的宋代就有五大名窑之说,包括汝窑、官窑、哥窑、定窑和钧窑^[1]。

窑炉是指在工业生产中用燃料或者电能产生热量,将物料或工件进行冶炼、焙烧、烧结、熔化、加热的热工设备。窑炉是一种用耐火材料砌成的用以煅烧物料或烧成制品的设备,被煅烧的原料和燃料往往共处一个空间,或燃烧区与煅烧区直接相通,常见的有砖窑、石灰窑、炭窑。

窑炉结构是否合理,选型是否正确,直接关系到产品的质量、产量和能量消耗的高低等。

现代窑炉技术涉及热工过程及设备、热工学、燃料燃烧学、工程热力学、传质传热学、工程流体力学、热工过程自动调节、耐火材料、电子电工、计算机、自动化等多门专业和多种技术。

通常,描述一个窑炉的基本理化指标包括烟温、流量、含氧量、二氧化硫、氮氧化物、烟道静压、颗粒物(烟尘)等 7 个参数,此外作为一个生产系统,人们还关心其热效率、成品率、生产效率等经济技术指标。

在窑炉生产过程中,能源的利用效率和环境保护始终是人们关注的重点。能源利用效率,是指设备为达到特定目的,供给能量的有效利用程度在数量上的表示,它等于有效能量占供给能量的百分数。现代窑炉由于采用了电子自动化技术和新材料技术,能源利用率明显提高,正朝着节能、环保、高效的方向发展^[2]。

1.2 窑炉分类

窑炉按适用的领域,可以分为^[3]以下几种:

(1) 陶瓷窑炉,包括特种陶瓷烧结高温电炉及电子陶瓷烧结推板窑炉、压电陶瓷烧结隧道窑炉、日用与建筑陶瓷辊道窑炉、艺术与特种陶瓷梭式窑炉。

(2) 材料器件窑炉,包括磁性(软)材料烧结氮窑炉、磁性(硬)材料烧结电窑炉、钎铁硼烧结真空窑炉、铁氧体烧结真空窑炉、原料回转窑炉。

(3) 粉末冶金窑炉,包括网带式粉末冶金烧结窑炉、推杆式粉末冶金烧结窑炉、网带式精还原窑炉、蒸汽处理窑炉。

(4) 稀土材料窑炉,包括稀土粉体材料灼烧窑炉、荧光粉及发光粉气氛窑炉、珠光粉及颜料灼烧窑炉、化工粉末热处理窑炉。

(5) 特种高温电炉,包括 1750℃ 高温箱式电炉、1900℃ 铬酸钼高温电炉、1600℃ 气氛保护升降电炉、微波烧结电炉、1600℃ 气氛保护管式电炉。

(6) 金属热处理炉,包括台车式、箱式、罩式电阻炉、井式回火(渗碳)电阻炉,网带式钎焊炉,光辉炉,金属熔化坩埚炉,真空热处理炉,气淬炉,感应熔炉,中频炉,滚筒炉,盐浴炉。

(7) 玻璃窑炉与焚烧炉,包括玻璃熔化坩埚炉、珐琅烧成炉、热弯炉、钢化炉、单室推拉热弯炉、多室连续式热弯炉、垃圾焚烧炉。

(8) 实验室电炉,包括 600℃ ~ 1700℃ 系列箱式炉、全纤维电阻炉、管式电阻炉、碳管炉、高温坩埚熔化炉、气氛保护箱式炉。

(9) 烘箱与烘道,包括热风循环干燥箱、远红外电焊条烘箱、蒸汽式烘箱与烘房、网带式隧道烘道、高温非标烘箱。

另外,窑炉作为一个大型的工业生产系统,还需要一系列的窑炉配套设备,包括氨分解炉、制氢机等净化设备、干粉压机、热压注机、风机、球磨机、气流粉碎机、喷雾干燥机、燃烧器和燃烧系统等,以及窑炉耐火材料,包括炉膛耐火材料、保温材料 高温匣钵、坩埚、烧舟、实验炉炉膛、多晶莫来石纤维。此外,窑炉还需要一些附件,包括热电偶、补偿导线、测温环、红外测温仪、图像测温仪、温度仪表、气氛分析仪、高温网带、电炉变压器、硅碳棒、硅钼棒、电热丝、铬酸钼、流量调节阀等。

1.3 窑炉发展方向

当今窑炉的发展趋势是由自动化、大型化向绿色(环保节能型)窑炉方向发展^[4]。

1.3.1 绿色窑炉的标准

1. 低消耗(节能型)

低消耗包括低燃料消耗、低电能消耗、低水消耗、低耐火材料及其他资源

消耗。

2. 低污染(环保型)

低污染包括低废气(CO_2)排放,低 SO_2 及 NO_x 气体排放,低烟尘排放,无黑烟,低污水排放,完全燃烧,低噪声及振动,无黑烟,低污水排放,燃料完全燃烧,低噪声及振动,工作环境舒适。

3. 低成本

低成本包括初投资成本低,投资回收期短,运行费用低,劳动成本低。

4. 高效率

窑炉内温度分布均匀,优等品率高,热效率高,操作控制灵活方便,自动化水平高,生产过程适应性强,劳动生产率高,竞争性强,经济效益高。

1.3.2 实现绿色窑炉的努力方向

1. 窑炉风机降低电耗和噪声的研究

目前国外先进风机噪声为 50dB~70dB,噪声较小,国产风机噪声为 80dB~90dB,有的甚至超过 100dB,噪声很大。国外一条窑炉风机使用功率为 50kW~70kW,而国产窑炉为 90kW~130kW(以产量相同的建筑卫生陶瓷窑炉计算)。

降低风机电耗的核心技术是在风机叶材料的选用上。进口风机叶使用高强度耐热铝合金,密度为 $2.5\text{t/m}^3 \sim 2.7\text{t/m}^3$ 。国产风机叶使用的却是锰钢,密度为 7.8t/m^3 。如果国产风机叶在选用了耐热铝合金后重新进行设计改进,并提高装配的质量,那么国产风机的电耗和噪声就有可能接近和降到进口风机的水平。如每条窑炉节电 50kW,年节电 40 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,以全国陶瓷行业 2 万条窑炉计算,每年可节电 40 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 左右,并大大改善窑炉烧成车间的工作环境,显著减少风机材料消耗和辅助费用。

2. 研究先进的窑炉燃烧器

陶瓷行业是耗能大户和污染大户, SO_2 跟水形成亚硫酸, NO_x 形成酸雨和光雾,对人畜、植物、建筑物都有较大危害。

要以辊道窑为对象研究适用于窑炉使用的低 NO_x 燃烧器(如脉冲式燃烧器等),既要保证窑内温度均匀,断面温差小,又要使燃料完全燃烧,避免局部高温以减少 NO_x 的生成。

3. 使用新型的耐火材料和涂料

对于陶瓷窑炉,采用耐高温的陶瓷纤维做内衬,可以有效提高陶瓷窑炉的热效率。为减少陶瓷纤维粉化脱落,利用多功能涂层材料(如远红外线涂料)来保护陶瓷纤维,既提高纤维抗粉化能力,又可增加窑炉内传热效率,节能降耗。由

于陶瓷纤维导热系数比较小,增强了窑炉的保温能力,减少了热散失,改善了烧成环境。

4. 研究新的窑炉自动控制方式和方法

利用人工神经网络技术、模糊控制技术、遗传算法技术等软计算技术进行模拟,以新的控制方式和方法来控制窑炉同一断面,同一水平面上的温差以及突破还原气氛控制的难点,并设计相应的控制系统和控制软件。使温度、气氛控制更精确和稳定,窑炉自动控制程度更高。

5. 建立窑炉污染净化研究检测中心

逐步建立窑炉污染排放数据库系统,以指导或提供窑炉污染净化的研究及改进,弄清有害气体和噪声在窑炉内产生的机理及减少生成污染的办法,可通过实验窑模拟实验解决。

1.3.3 实现绿色窑炉的目标

经过相关领域专家和工程技术人员不懈的努力,不久的将来一定可以全面实现绿色窑炉工程。它将使我国在目前先进的窑炉的基础上,燃料消耗下降 20%~30%,热效率提高 10%~20%,电力消耗下降 30%~50%,噪声、烟尘和废杂污染有较大幅度的下降。

1.4 中国窑炉技术的发展

经过二十多年的努力,我国的窑炉技术水平得到了很大提高,以陶瓷窑炉为例,窑炉技术呈现了如下特点^[5]。

(1) 窑炉发展辊道化:辊道窑具有产量大、质量好、能耗低、自动化程度高、操作方便、劳动强度低、占地面积小等优点,是当今陶瓷窑炉的发展方向。

(2) 燃料煤气化:气体燃料具有干净、雾化燃烧完全、温度稳定、产品质量好、能耗低、操作方便等优点,因而广泛应用于陶瓷窑炉。

(3) 窑炉轻型化:近十几年来,随着国产的各种性能优良的轻质耐火材料(如莫来石、低铁聚轻球、飘珠、陶瓷纤维等)不断面世,使得当今窑炉的厚度和重量大大减轻,辊道窑炉的重量也大大减轻,大大降低了窑炉基础的造价,也节约了大量的施工时间。

(4) 广泛使用自动控制技术:现在,从产品进窑、出窑、温度、压力、排烟、急冷、点火、送砖报警等都可自动控制,窑炉的可靠性、安全性、成品率以及环保和节能指标都得到了明显提高。

(5) 窑炉趋向大型化:为提高劳动生产率,减少占地面积,提高经济效益,目前窑炉在向大型化方向发展,并能烧制高、中、低温等各种规格尺寸的产品。

此外,辊道干燥器不断短型化、高速烧嘴国产化、辊棒大型化,成效明显。部分窑炉余热和废气、废渣得到了一定程度的利用和处理,窑炉的操作管理水平普遍大幅度提高。

第2章 窑炉模型

2.1 窑炉自回归滑动平均模型

窑炉系统是一个非线性、大滞后、慢时变、多输入/多输出系统,对这样一个复杂的系统,要想根据基本的物理或者化学原理建立系统的精确数学模型,几乎是不可能的。即使想采用系统辨识的方法建立其精确的数学模型,也存在很多技术难题。

通过大量的工程实践,人们发现在一定工艺条件下,窑炉温度值可以选用适当的控制算法来自动调节,使其保持在工艺给定值附近变化。一些窑炉系统已经实现了经典 PID 控制,当这类窑炉系统长期在工艺设定值附近运行时,就可以把该系统作为线性系统来考虑。这种在系统工作点附近用线性模型逼近非线性模型的方法,在工程上是可行的,理论上也是成立的。由于一般的窑炉被控温度与多种因素有关,当这些干扰、波动不是特别强烈时,都可以作为有色噪声来考虑。进一步地,假如窑炉温度只受喷油量来控制,这时,该控制系统可以作为单输入/单输出系统来处理。

王艳和任伟通过上述分析发现,可以用 CARMA(被控自回归滑动平均)模型来近似描述该被控系统。所以,只要选用适当的辨识算法,就能正确地估计出模型的各个参数,从而把该窑炉系统的数学模型建立起来^[6]。

2.1.1 离线建立窑炉系统数学模型

用辨识方法建立系统模型的第一步工作,就是进行建模的实验设计,对于本控制系统,就是要确定窑炉模型结构,系统纯滞后时间常数、模型阶次以及用于估计参数的数据采用方法等。

2.1.1.1 窑炉系统模型结构、模型阶次、纯滞后时间常数的确定

前已论及该控制系统可以用一个 CARMA 模型来近似描述,因此,该系统离散差分方程的一般形式为

$$A(q^{-1})Y(K) = B(q^{-1})U(K-d) + C(q^{-1})e(K) \quad (2-1)$$

其中

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \cdots + a_n q^{-n} \quad (2-2)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \cdots + b_n q^{-n} \quad (b_0 \neq 0) \quad (2-3)$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \cdots + c_l q^{-l} \quad (2-4)$$

式中: n 为系统模型阶次; l 为噪声模型阶次; d 为系统纯滞后时间常数; q^{-1} 为单位延时算子; $a_i, b_i, c_j (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, l)$ 为模型待辨识参数。

关于模型阶次和噪声阶次的确定, 选用了简单实用的损失函数检验法来确定系统模型阶次。它是通过计算不同阶次的拟合残差的平方和来实现的, 即

$$J(n) = \sum_{k=n+1}^{n+N} e^2(K) = \sum_{k=n+1}^{n+N} [Y(K) - \Phi_{K-N}^T \Theta]^2 \quad (2-5)$$

式中: N 为样本长度。于是可以得到一系列 $J(n)$ 值。

对于系统的一组输入/输出数据, 当 n 接近于系统的真实阶次时, $J(n)$ 值应该越小; 而当 n 越过系统的真实阶次时, $J(n)$ 值应基本保持不变。据此, 便可粗略地估计出系统模型的真实阶次。

根据上述方法, 对燃油烧嘴进行了 GLS 辨识, 得到损失函数数据。据此发现: 当窑炉模型的阶次 $n=3$ 时, 各车位的 $J(n)$ 值都较小; 而当阶次 $n>3$ 以后, 则 $J(n)$ 值应基本保持不变。所以, 在此选定系统模型的阶次为 3 次。

为了确定该系统的纯滞后时间常数, 分别改变了几对烧嘴的控制量 (已处于开环状态), 并记录系统输出端测得这种改变所需的时间, 确定系统的纯滞后时间为 2min。

2.1.1.2 数据的采集与预处理

采集数据时, 是使系统处于手动状态下 (人为不断地调整烧嘴的开度) 直接采集的, 这样就保证了系统输入端和输出端的噪声是不相关的, 这给参数的辨识带来了较大方便, 而且也保证了系统参数的可辨识性。

具体采集方法是建立一个随机数据文件, 系统在巡回检测状态下每采样一次, 就存盘一次。然后, 离线对采集到的数据进行预处理。

虽然采集到的数据 (控制量 $U(K)$) 和窑炉温度 $Y(K)$ 在系统进行采集前就经过了限幅、复合滤波等处理, 已滤除了由于量化、传输等可能引入的噪声, 但是, 当这些数据用于辨识窑炉模型参数时, 还应滤除系统的稳态分量。

系统的稳态值 U_0 和 Y_0 可按下式计算:

$$U_0 = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N U(K) \quad (2-6)$$

$$Y_0 = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N Y(K) \quad (2-7)$$

式中: N 为采集到数据的个数, 即样本长度; $U(K)$, $Y(K)$ 为采集到的窑炉系统输入/输出数据。

实际用于辨识模型参数的数据 $\bar{U}(K)$ 、 $\bar{Y}(K)$ 分别由下面两式给出:

$$\bar{U}(K) = U(K) - U_0 \quad (2-8)$$

$$\bar{Y}(K) = Y(K) - Y_0 \quad (2-9)$$

原始数据的这种预处理方法虽然简单, 但是, 在实际的辨识模型参数过程中发现: 若不对原始数据进行上述预处理, 则 GLS 辨识算法收敛不了。这是因为直接采集到的数据 $U(K)$, $Y(K)$ 中, 包含了较大成分的系统稳态输入/输出值相对含有模型的信息较少。这样, 就相当于 GLS 辨识算法中矩阵 P 的各元素都近似相等, 并且随着迭代次数的增多, 这种近似程度在加强, 最后, 达到一定程度后, 矩阵 P 的各元素几乎完全相等。此时, 矩阵 P 的逆矩阵不存在, 则算法发散, 使辨识工作不能进行下去。相反, 若先将原始数据进行上述的预处理, 然后用预处理后的数据进行参数的辨识, 则算法迭代十次左右便可以达到收敛。

2.1.2 模型参数的实际辨识

实际的窑炉系统是受有色噪声干扰的, 所以上面的 $C(q^{-1})e(k)$ 构成一个相关序列。由于噪声序列存在这种相关性, 故选用了广义最小二乘法来进行窑炉系统参数的辨识, 以保证参数估计的无偏性和一致性。

2.1.2.1 GLS 辨识算法

GLS 辨识算法的基本思想是引入一个噪声白化滤波器。首先将有色噪声滤成无色噪声并按普通最小二乘法进行参数的辨识; 然后, 把这个辨识结果作为迭代的初值, 并由它求出残差序列, 这时又可以利用普通最小二乘法把白色滤波器的参数估计出来; 最后, 再一次用普通最小二乘法估计系统的参数。这样反复迭代, 直到参数估计值收敛到近似不变为止。

式(2-1)中 $e(k)$ 为白噪声, 而 $C(q^{-1})e(k)$ 为有色噪声, 必须把 $C(q^{-1})e(k)$ 滤成白噪声。当 $C(q^{-1})$ 的零点全部在单位圆外时, 则 $[C(q^{-1})]^{-1}$ 存在, 故可令

$$H(q^{-1}) = [C(q^{-1})]^{-1} \quad (2-10)$$

用 $H(q^{-1})$ 乘式(2-1)两边, 则得

$$A(q^{-1})H(q^{-1})Y(K) = B(q^{-1})H(q^{-1})U(K-d) + e(k) \quad (2-11)$$

令

$$Y^*(K) = H(q^{-1})Y(K) \quad (2-12)$$