

# 基于 QFT 的加热炉温度控制系统的设计与仿真

左为恒, 王 彦

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

**摘 要:** 加热炉温度控制系统具有大惯性、大延迟和时变等特性, 采用常规控制方法的温控系统难以获得满意的控制效果。结合定量反馈理论 (QFT) 和模糊控制以及传统 PID 控制的各自优势, 对控制器进行设计。仿真结果表明, 所设计的控制器能够很好地解决由于加热炉温度控制系统模型参数具有不确定性而造成的控制系统鲁棒性设计问题, 以及能根据被控对象不同工况变化的要求, 获得满意的动态和静态控制特性。

**关 键 词:** 定量反馈理论 (QFT); 加热炉; 模糊控制; 鲁棒控制; PID 不确定系统

中图分类号: TK175 TP273 文献标识码: A

## 引 言

加热炉是工业生产的重要热工设备。由于加热炉温控制系统对象参数不易确定以及受到的扰动因素较多, 按常规典型工况整定的具有固定参数的控制手段难以适应控制系统, 因此往往不能取得满意的调节效果。本研究提出结合定量反馈理论 (quantitative feedback theory) 和模糊控制以及传统 PID 控制的各自优势, 对控制器进行设计。定量反馈理论是一种频域设计方法, 它将经典控制理论中的频域校正器设计思想推广应用到对不确定系统的鲁棒控制器设计, 将对象的不确定范围和系统的性能指标用定量的方式在 Nichols 图上形成边界, 进而以名义对象的开环频率曲线满足边界条件为要求, 在图上对系统进行综合设计。QFT 是一种工程设计方法, 所以它是目前鲁棒控制领域中具有较强实用价值和前景的一种设计方法。本研究设计的控制系统能够适应被控对象参数的变化, 具有较强的鲁棒性和自适应能力。

## 1 炉温控制系统的理论基础

### 1.1 QFT 理论

由于 QFT 研究的核心内容是 LTI/SISO 系统的

控制设计问题, 所以本研究以 LTI/SISO 系统为对象介绍 QFT 的基本原理及设计过程。

#### 1.1.1 涉及问题

用 QFT 理论进行控制器设计时涉及的问题可以分为单自由度结构问题和二自由度结构问题。图 1 为所研究的具有不确定性的二自由度结构控制系统, 其中,  $\{P(s)\}$  为一对象集合;  $G(s)$  为控制器, 用来解决对象不确定性, 在保证闭环稳定的同时, 使输出最大最小值之差在指标范围内;  $F(s)$  为预滤波器, 用来对闭环特性进行整形。  $d_1$  和  $d_2$  为外部干扰输入,  $u$  和  $y$  分别为输入和输出。

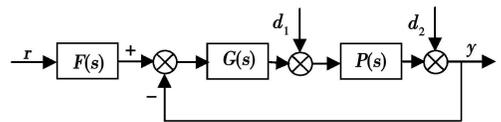


图 1 SISO QFT 两自由度控制系统结构

#### 1.1.2 对象模板<sup>[2]</sup>

QFT 理论的优点之一是其能设计出具有鲁棒性的控制器, 控制器的鲁棒性能是用来克服被控对象的不确定性, 所以在设计过程中精确地描述对象的不确定性就显得十分重要。另外, QFT 理论是一种基于 Nichols 图的频域设计方法, 对象的动态特性均由频率响应特性表示, 因此定义了一种频率响应来描述对象的动态特性。模板就是在给定频段上的含有不确定性的对象的频率响应集, 表征的是对象在某一频率点处的不确定范围, 映射到 Nichols 图上是一个区域。

在 QFT 设计中, 绘制系统的对象模板并不需要将所有的频率特征点全部求出, 而只需选取能够表征对象模板最大范围的频率特征点即可。在低频段, 对象参数变化只影响对象的相位特性, 幅值特性变化很小; 在高频段, 参数变化只影响对象的幅值特性, 对相位特性的影响很小。QFT 设计在低频段的

主要任务是提供足够的增益;在高频段是将增益压低,使开环特性曲线避开稳定性禁区。所以适当选取高、低频段的频率界限,设计达到指标要求后在频率界限之外的部分也满足设计要求,即模板可以选取在有限的频段内。

### 1.1.3 对象性能指标边界

一般的控制器设计是根据所提出的各种性能指标列出相对应的约束函数,对组成的函数组求解得到最终的控制器参数,而利用 QFT 进行控制器的设计是在 Nichols 图上进行的。对于给定的对象模板, QFT 设计方法是将向对象闭环提出的指标转化为对名义对象开环传函的限制,这些限制在 Nichols 图上表现为一些曲线区域,称为性能指标的边界<sup>[3]</sup>。3 种最普通的边界类型为稳定性边界、控制作用边界和灵敏度边界。针对控制系统要求, QFT 的一般设计指标包括稳定性和稳定域度指标、抗干扰性能指标和跟踪性能指标等。以跟踪性能指标为例介绍如何在 Nichols 图上绘制出跟踪边界曲线,如图 2 所示。

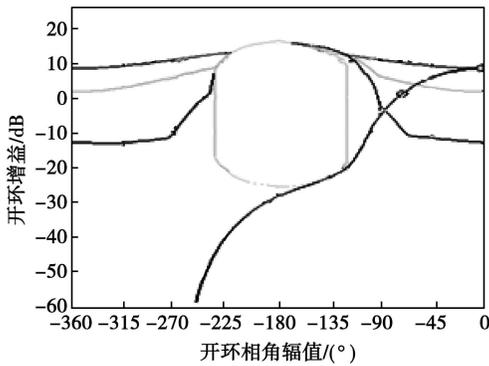


图 2 对象模板和边界

QFT 二自由度控制系统的闭环传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{L(s)F(s)}{1+L(s)} \quad (1)$$

式中:  $L(s)$ —开环传递函数,  $L(s) = G(s)P(s)$ 。

由闭环传递函数表达式 (1) 可知, 闭环传递函数界  $\Phi(s)$  的不确定性只取决于开环传递函数  $L(s)$  的不确定性, 即有:

$$\Delta \lg|\Phi(j\omega)| = \Delta \lg \left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \quad (2)$$

假设系统闭环跟踪指标要求系统闭环响应必须满足:

$$\Phi_l(\omega) \leq |\Phi(j\omega)| \leq \Phi_u(\omega) \quad (3)$$

式中:  $\Phi_l(\omega)$ 、 $\Phi_u(\omega)$ —给定的系统闭环响应上下跟踪指标。

由式 (2) 和式 (3) 得:

$$\Delta 20 \lg|\Phi(j\omega)| = \Delta 20 \lg \left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq \Delta 20 \lg|\Phi_u(j\omega)| - \Delta 20 \lg|\Phi_l(j\omega)| = \Delta M(\omega) \quad (4)$$

由开环传递函数  $L(s) = G(s)P(s)$  可知, 在 Nichols 图上, 通过平行移动 (移动幅度为  $G(s)$  的相位角度) 和垂直移动 (移动幅度为  $G(s)$  的幅值) 对象模板, 可将对象模板放置到两条等  $M$  线之间。当两条等  $M$  线之间的幅值差恰好等  $\Delta M(j\omega)$  时, 就保证了闭环  $\Phi$  的变化量小于或等于设计允许值。通过在对象模板中选择一个基准点 (对应的模型称为名义对象模型), 再在每个相角对应的垂直线上重复上述移动过程, 记住基准点的这些位置并连成曲线, 就构成了对名义对象开环频率响应进行约束的跟踪边界曲线。类似的, 可根据其它性能指标计算出稳定性边界、抗干扰边界等。对这些边界取交集, 就可得到设计控制器所需的复合频域边界。

### 1.1.4 设计整形<sup>[4]</sup>

在 Nichols 图上计算并绘制出复合频域边界后, 设计控制器  $G$  由于 QFT 是一种图形设计方法, 所以控制器  $G$  的设计过程也称为设计整形过程 (Loop Shaping)。在绘有复合频域边界的 Nichols 图上做出名义对象的开环频率响应曲线  $I_G(j\omega)$ , 由  $I_G(j\omega) = G(j\omega)P_0(j\omega)$  知, 当  $G=1$  即不加控制器时  $I_G(j\omega) = P_0(j\omega)$ ; 当给  $G$  加入零极点及增益时, 可以调整  $I_G(j\omega)$  的位置和形状。QFT 设计是使得开环频率响应曲线  $I_G(j\omega)$  在所选择的设计频率点处的位置位于对应频率点处的边界的上方, 且离边界越近越好, 在高频处还应保证  $I_G(j\omega)$  不与稳定边界相交。当  $I_G(j\omega)$  满足边界要求后, 用来调整的极点 and 零点以及增益就是控制器  $G$  的表达式。

表 1 Nichols 控制规律

	传递函数	调整幅值	调整相角
常值增益	K	是	否
一阶零点或极点	(S+P)/P P/(S+P)	否	是
超前、滞后环节	(S+A)/(S+B)	否	是
二阶零点或极点	(S^2+2ξω S+ω^2)/ω^2 ω^2/(S+2ξω S+ω^2)	是	否
V形滤波器	ω^2/(S+2ξ_1ω S+ω^2) ω^2/(S+2ξ_2ω S+ω^2)	是	否
典型 PID	K_i / [1+S^2/ω^2+2ξ S/ω]	是	是

设计整形就是要生成一个控制器  $G(s)$ , 以使得开环传递函数  $L(s) = G(s)P(s)$  满足特定的指标要求。几种主要的校正环节的控制规律如表 1 所示。结合实际情况, 一般将控制器  $G$  选择设计成 PD 控制器。

1.2 PD 理论基础

典型 PD 控制规律为:

$$G(s) = K(1 + 1/T_i s + T_d s) \tag{5}$$

式中:  $K$ —增益;  $T_i$ —积分时间常数;  $T_d$ —微分时间常数。

式 (5) 也称为并行 PD

进一步可将 PD 转换为表 1 中的形式:

$$G(s) = \frac{K}{s} \left[ 1 + \frac{2\zeta S}{\omega_n} + \left(\frac{S}{\omega_n}\right)^2 \right] \tag{6}$$

式中:  $\zeta$ —阻尼比;  $\omega_n$ —自然频率。

式 (6) 相当于一阶积分加二阶微分因子。

设参数比  $n = T_i/T_d$ , 表示了微分与积分作用之间的相对比例关系。将式 (5) 变形为:

$$G(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_i s}{n} \right) = \frac{K}{T_i s} \left( 1 + T_i s + \frac{T_i^2}{n} s^2 \right) \tag{7}$$

与式 (6) 比较可得:

$$\zeta = \sqrt{n}/2, \omega_n = \sqrt{n}/T_i \tag{8}$$

根据 Ziegler-Nichols 法一般设  $n=4$  但串行 PID 要求  $n > 4$  根据文献 [5] 的内容  $n < 4$  的 PID 具有控制优势。先将经典 PID 控制器的  $n$  值取为 4 并针对系统稳定裕度指标及灵敏度指标来求解初始 PID 控制器, 然后再在 QFT 下对  $n$  值做进一步的调整, 求得最终的控制器。

1.2.1 初始控制器设计

常见的初始控制器设计指标有灵敏度指标为:

$$\left| \frac{1}{1 + P(\omega)G(\omega)} \right| \leq M_s \quad (M_s > 1, \omega > 0) \tag{9}$$

式中:  $P(s)$ —不确定性对象的名义传递函数;  $G(s)$ —PID 控制器。

稳定裕度指标:

$$\left| \frac{P(\omega)G(\omega)}{1 + P(\omega)G(\omega)} \right| \leq M_c \quad (M_c > 1, \omega > 0) \tag{10}$$

考虑系统灵敏度指标, 设 QFT 设计的名义对象为  $P(s) = N_p(s)/D_p(s)$ ,  $G(s)$  并行 PD 令  $n=4$  则:

$$\frac{KN_p(s)}{4SD_p(s)} \Big|_{s=j\omega} = \frac{1}{x(\omega) + jy(\omega)} \tag{11}$$

$$P(j\omega)G(j\omega) = \frac{(2 + j\omega T_i)^2}{T_i(x(j\omega) + jy(j\omega))} \tag{12}$$

将式 (12) 代入式 (9), 整理得:

$$(4 + T_i x(\omega) - \omega^2 T_i^2)^2 \geq R(\omega) T_i^4 \tag{13}$$

其中:

$$D(\omega) = (x^2(\omega) + y^2(\omega)) / M_s^2 - (x(\omega) + 4\omega)^2 \tag{14}$$

因为式 (9) 的解集在 Nichols 图上为椭圆形边界的外侧, 从而有:

$$\omega^2 T_i^2 - (x(\omega) - \sqrt{D(\omega)}) T_i - 4 \geq 0 \tag{15}$$

求解式 (15), 取其较大的正实根作为  $T_i$  的解集  $T_i(\omega)$ , 如图 3 所示。

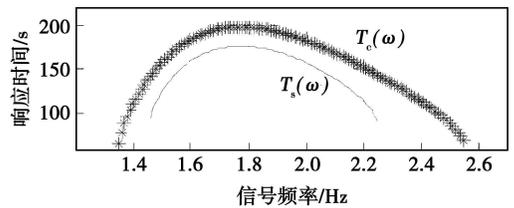


图 3 参数  $T_i$  解集

同理, 根据稳定裕度指标求解式 (10) 即获得稳定裕度指标的解集  $T_c(\omega)$ , 求解过程与  $T_s(\omega)$  相似。

解集  $T_s(\omega)$ 、 $T_c(\omega)$  是保持系统鲁棒稳定所需  $T_i$  的解集区间。将其绘制在一张图上, 如图 3 所示, 并选取边界中间最高点一段区间平均值作为初始控制器的积分时间参数  $T_{i0}$ 。

1.3 QFT 法 PD 调节器设计

控制器的设计是一个综合的过程, 需要平衡各种设计指标, 并对不同设计频带之间的性能进行折衷。考虑式 (3) 所示的伺服跟踪指标, 它要求系统开环传函具有一定的开环增益, 以满足跟踪精确度的要求。依据 QFT 理论设计时, 当在 Nichols 图上获得伺服指标的边界曲线后, 可直接将开环特性向上移动, 使其低频增益满足指标边界要求, 移动的垂直距离  $K_p$  即为所需增益值。

由于 PD 自身结构的限制, 很难对系统高频进行调整, 而 QFT 对系统开环进行调整, 具有对不同频段性能进行“剪裁”的特性, 可以方便地完成系统高频的补偿。基于 QFT 的 PD 设计过程<sup>[6-7]</sup>:

(1) 数据测试准备及对象模板的生成。包括选择设计频率点集, 选择名义对象, 并根据不确定对象在所选频率点集处的频率响应数据在 Nichols 图上绘制对象模板。

(2) 绘制性能指标边界。根据对象模板和设计指标要求, 在 Nichols 图上生成名义对象的开环频率响应的各个设计指标边界, 其主要包括稳定边界、跟踪边

界、鲁棒性能边界, 并取不同边界的交集得到复合频域边界。

(3) 将名义对象开环特性绘制在 Nichols 图上, 为其加入一阶积分, 并根据伺服指标确定补偿增益值  $K$

(4) 令  $n=4$  根据设计指标  $M_s, M_r$  分别求解不等式 (9) 和式 (10), 求得  $T_0$ , 并将  $T_0$  转换为  $\xi_0, \omega_0$  代入式 (6)。

(5) 在 Nichols 图上为开环传递函数加入二阶环节  $1+2\xi_0 S/\omega_0 + (S/\omega_0)^2$ , 调整  $\omega_0$  为  $\omega_n$ , 调整  $\xi_0$  为  $\xi$  使得系统满足步骤 (2) 中的设计指标边界要求, 从而得到最终的控制器参数。

(6) 最终 PD 控制器为:

$$G(s) = \frac{K_f}{s} \left[ 1 + \frac{2\xi_s^*}{\omega_n^*} s + \left(\frac{s}{\omega_n^*}\right)^2 \right] \quad (16)$$

根据上述步骤求得的控制器  $G$  是考虑到对象参数变化的全局最优解, 不能根据系统工况变化实时在线改变控制器参数, 提高系统响应速度和改善控制品质。因此, 研究提出结合模糊控制技术对基于 QF 的 PD 调节器设计所得参数根据系统响应情况进行在线调整, 以提高系统的响应速度和控制精确度。

## 2 模糊 PD 控制器

模糊控制器的结构如图 4 所示。控制系统由模糊控制器和 PD 控制器两部分构成。其中, 模糊控制器由 3 个子模糊控制器 (FC1、FC2、FC3) 组成。模糊控制系统以误差  $e$  和误差的变化率  $ec$  作为输入, 运用模糊控制原理来对参数  $K_p, K_i, K_d$  进行在线修改, 以满足不同  $e$  和  $ec$  时对控制参数的不同要求, 使被控对象有良好的动静态响应特性。

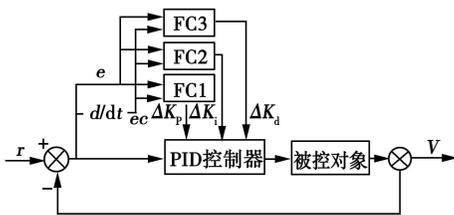


图 4 自适应模糊控制系统框图

根据 PID 的控制作用特点以及人工调整经验, 分别得到 3 个参数的模糊调整规则表, 如表 2~表 4 所示。其中, {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB} 为参数

$K_p, K_i, K_d$  模糊量的子集。

表 2  $K_p$  的模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	PS	PS	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB	NB

表 3  $K_i$  的模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PM	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB

表 4  $K_d$  的模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	Z
NS	Z	NS	NS	NS	NS	NS	Z
Z	Z	NS	NS	NS	NS	NS	Z
PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

模糊控制规则实质上是根据操作者的实践经验总结得到的一条条模糊条件语句集合。模糊控制器的核心是“IF... THEN”形式的模糊控制规则:

$$\text{If } e \text{ is } A \text{ and } ec \text{ is } B, \text{ then } \Delta K_i \text{ is } C_i$$

其中:  $A, B$  和  $C_i$ —误差  $e$  误差变化率  $ec$  和输出量  $\Delta K_i$  ( $i = p, i, d$ ) 的模糊子集。

系统输入变量误差  $e$  和误差变化率  $ec$  的模糊子集合为 {PB, PM, PS, Z, NS, NM, NB}, 所对应的论域为 {-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6}。系统控制输出变量  $\Delta K_p, \Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  的模糊子集为 {PB

PM PS Z NS NM NB), 所对应的论域为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。各模糊子集的隶属度函数均采用简单的三角型隶属函数。

模糊推理算法采用 Mamdan 推理方法, 解模糊化方法采用重心法。根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数模糊控制规则, 应用模糊合成推理计算生成 PD 参数的修正矩阵表, 并存储于计算机中。在线运行时, 根据计算查表得修正参数并代入式 (17) 计算求得最终 PID 的 3 个参数:

$$\begin{aligned} K_p &= K_{p0} + \Delta K_p \{ \xi, \xi_c \}_p \\ K_i &= K_{i0} + \Delta K_i \{ \xi, \xi_c \}_i \\ K_d &= K_{d0} + \Delta K_d \{ \xi, \xi_c \}_d \end{aligned} \quad (17)$$

系统在线运行过程中, 通过对模糊逻辑规则的处理结果, 完成对 PD 参数的在线自校正, 其中  $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$ 、 $K_{d0}$  为通过前面讲的 QFT 方法求的参数值。

### 3 仿真研究

被控对象为 220 V 单向交流电阻加热炉, KS200A800V 双向晶闸管过零触发控制。由阶跃响应的飞升曲线测得对象特性为具有纯滞后的一阶惯性环节, 即对象为:

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s} \quad (18)$$

其中, 参数变化范围  $K \in [2, 3, 6]$ ,  $T_s \in [150, 206]$ ,  $\tau \in [30, 50]$ 。

式 (9) ~ 式 (10) 中取  $M_k = 1.58$ ,  $M_\phi = 1.2$  这保证了闭环系统最小增益裕度为 1.8 dB 最小相位裕度为 45°。根据给定算法, 求得  $K_p = 0.9$ ,  $T_0 = 184$ ,  $\omega_{n0} = 0.011$ 。在 Nichols 图上对加热炉的系统进行调整最后取  $T_0 = 200$ ,  $\omega_{n0} = 0.029$ 。此时控制器为:

$$G(s) = \frac{0.9}{200s} \left[ 1 + \frac{5.774s}{0.029n} + \left( \frac{s}{0.029n} \right)^2 \right] \quad (19)$$

根据式 (19) 求得的 PD 控制器参数对系统进行仿真研究, 选取式 (18) 中某个参数 (分别选择参数  $K$ 、 $T_s$  和  $\tau$ ) 为上、下边界和基准值, 分别比较系统在其它两个参数变动的情况下的阶跃响应。图 5 为闭环系统阶跃响应曲线, 从中可以看出在系统参数变化的种情况下, 系统闭环响应都能满足预期的设计指标, 获得满意的控制效果。

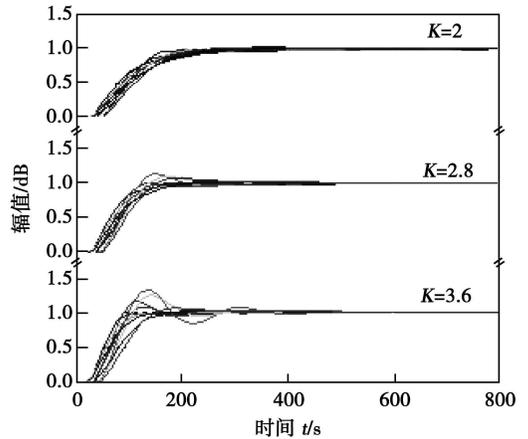


图 5 对象参数  $K$ 、 $T_s$ 、 $\tau$  变动时闭环系统的阶跃响应

### 4 结论

QFT 是一种实用性很强的鲁棒控制器工程设计方法。本研究提出了基于 QFT 的 PD 控制器设计方法设计出初始控制器, 在结合模糊控制的优点设计出最终控制器。仿真结果表明, 所设计的控制器能够有效抑制对象参数变化的影响, 系统响应达到了满意的动静特性, 证明了设计方法的有效性, 说明其具有一定的工程应用价值。

#### 参考文献:

- [1] HOROWITZ J. Survey of quantitative feedback theory [J]. International Journal of Control (S0020-7179), 1991, 53(2): 255-291.
- [2] 王杰, 周永年. 基于 QFT 的火电厂主汽温控制系统的设计与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(17): 4537-4543.
- [3] 王蕾. QFT 在飞行控制系统中的应用 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [4] HOUPEL SCH. Application of QFT to control system design [J]. International Journal of Robust Nonlinear Control (S1049-8923), 1997, 7(6): 515-531.
- [5] KRISTIANSSON B. Robust and optimal tuning of PI and PD controllers [J]. EE Proc Cont Theory APR 2002, 149(1): 17-25.
- [6] 肖永利, 张琛, 吴庆宪. QFT 在水下潜器控制系统设计中的应用 [J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(4): 446-449.
- [7] 张庆振, 杨春宁, 安锦文. QFT 在导弹俯仰通道控制中的应用 [J]. 弹箭与制导学报, 2000, 23(3): 6-9.

介质特性对脱硫浆液循环泵性能影响的数值分析 = Numerical Analysis of the Influence of the Medium Characteristics on the Performance of a Desulfurization Slurry Circulating Pump [刊, 汉] / WANG Shudong HU San'ao CAO Rui et al Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control North China University of Electric Power Beijing China Post Code 102206 // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(6). — 657 ~ 662

By using numerical calculation software Fluent 6.2 which is based on the philosophy of computational fluid dynamics and on the basis of choosing a rational multiphase flow model and control equation, numerically simulated was the flow field inside a hybrid flow type desulfurization slurry circulating pump in a 300 MW thermal power plant. The influence of such medium characteristics as particle diameter, solid phase volumetric points and slurry density etc on the pump performance was studied. Then, a mechanism analysis was conducted of such phenomena as poor hydraulic performance and serious abrasion of the flow path components etc existing in the practical operation of the desulfurization slurry circulating pump due to the particularity of the medium in hoping to provide reference for improving the theory of the pump under discussion and for its practical modification and operation in thermal power plants. Key words: desulfurization slurry circulating pump, medium characteristics, multiphase flow, numerical simulation, hydrodynamic performance

基于 QFT 的加热炉温度控制系统的设计与仿真 = Design and Simulation of a Temperature Control System for a Heating Furnace Based on the Quantitative Feedback Theory [刊, 汉] / ZUO Weiheng WANG Yan (National Key Laboratory on Power Transmission and Distribution Equipment System Safety and New Technology Chongqing University Chongqing China Post Code 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(6). — 663 ~ 667

The temperature control system for heating furnaces is characterized by such features as a big inertia, a long delay and time variation etc. It is difficult to achieve satisfactory control effectiveness for a temperature control system by adopting the conventional control methods. By making use of respective advantages of the quantitative feedback theory, fuzzy control and traditional PID (proportional, integral and differential) control, a controller was designed. The simulation results show that the controller being designed can solve very well the robust design problem of the control system resulting from the uncertainty of the parameters of the control system for the heating furnace and can also obtain satisfactory dynamic and static control characteristics in compliance with the requirement for changes of operating conditions of the object under control. Key words: QFT (quantitative feedback theory), heating furnace, fuzzy control, robust control, PID (proportional, integral and differential), uncertainty system

波纹通道内充分发展层流流动的简化分析 = Simplified Analysis of the Laminar Flow Fully Developed Inside the Corrugated Passages [刊, 汉] / SHI Jinsheng (College of Mechanical Engineering Tianjin University of Science and Technology Tianjin China Post Code 300222) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(6). — 668 ~ 671

Perturbed was the fixed type laminar flow in the passages formed by two corrugated plates having different ampli-