

# PFBC-CC 中燃气轮机的动态特性与系统控制方案研究\*

吕泽华 徐筠  
(清华大学)

**[摘要]** 本文建立了 PFBC-CC 中使用两种不同的轴系的燃气轮机动态数学模型, 并进行了仿真, 得到了燃气轮机的动态特性。在此基础上, 应用阶跃响应辨识法获得了 PFBC-CC 系统主要通道的传递函数矩阵。本文应用多变量鲁棒设计方法对被控对象进行了鲁棒控制系统设计。通过闭环摄动系统的仿真, 求出闭环摄动系统当存在着结构摄动时的阶跃响应。仿真结果表明: 用该方法设计的控制系统具有良好的鲁棒性能, 满足了被控系统的各项要求。

**关键词** PFBC-CC 动态特性 鲁棒控制器 鲁棒对角优势

**分类号** TK472 TP273.2

## 0 引言

本文研究我国贾汪 PFBC-CC 中试电站系统中单轴燃气轮机动态特性及为系统提供的控制方案。为使燃气轮机相对可靠, 贾汪中试电站采用在石油化工催化裂化装置动力回收系统中已应用的单轴燃气轮机的基础上加以发展。目前, 国外示范成功的 PFBC-CC 电厂均采用双轴燃气轮机, 为能与国外示范成功的 PFBC-CC 性能及贾汪电厂 PFBC-CC 机组性能做比较, 本文在贾汪电厂 PFBC-CC 系统的基础上, 对 PFBC 锅炉系统做相应的放大, 与双轴燃气轮机组成一个系统, 为与贾汪系统区别, 称之为一般 PFBC-CC 系统。本文也分析了一般 PFBC-CC 系统中双轴燃气轮机的动态特性并用鲁棒系统设计方法设计控制系统。

## 1 动态特性

### 1.1 系统描述

图 1 为我国贾汪中试电站原则性系统图

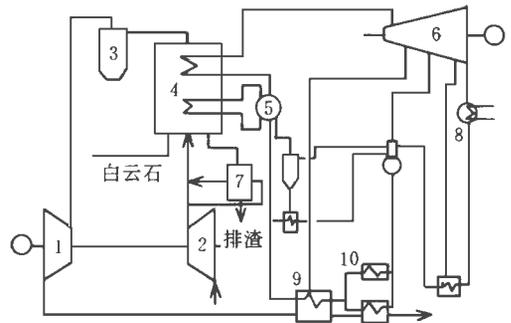


图 1 贾汪 PFBC-CC 中试电站原则性系统图

1. 燃气轮机
2. 压气机
3. 高温除尘器
4. PFBC
5. 汽包
6. 汽轮机
7. 冷渣器
8. 冷凝器
9. 高温省煤器
10. 低温省煤器

### 1.2 准定常假设

由于燃气轮机的动态过程较快, PFBC 锅炉的动态过程较慢, 所以, 可近似认为除 PFBC 锅炉烟气、汽水系统以及透平输出功率与压气机耗功率不再平衡需用转子运动微分方程描述外, 各部件稳态特性和流量连续方程仍然适用。

收稿日期 1995-07-26 收修改稿 1995-09-08 \* 国家攀登“B”资助项目

本文联系人 吕泽华 男 1945年生 副教授 100084 北京清华大学热能工程系

### 1.3 计算方法

在准定常条件保证下,可对 PFBC锅炉与燃气轮机分别建模 对于 PFBC锅炉采用分环节,对每个环节分别建模的方法,基本上用集中参数法处理,其中流化床床体是 PFBC锅炉的重要环节,处理方法是划分区域,根据每个区域的特点划分不同的控制体进而采用集中参数法建模 PFBC锅炉汽水系统部分的建模与常规锅炉汽水系统类似。

对于贾汪 PFBC- CC系统中的单轴燃气轮机,当其处于并网发电状态时,它的转速是恒定的,其转子运动微分方程退化为代数方程,其动态特性计算基本上采用稳态计算方程,其中压气机和烟气透平均用特性曲线描述 对于一般 PFBC- CC系统,由于低压轴是变转速运行的,因此需用转子运动微分方程来描述。

### 1.4 计算结果

当系统中的煤量及压气机可调静叶角度或进口导叶角度扰动时,燃气轮机的动态特性计算结果如图 2 图 3所示。

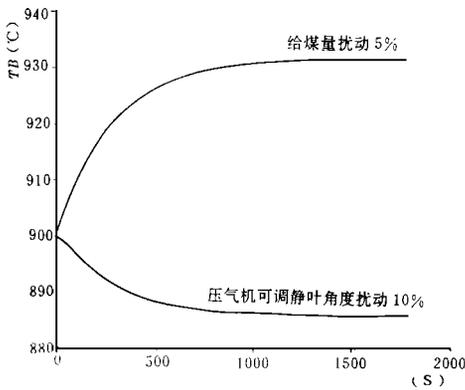


图 2 单轴燃气轮机动态特性

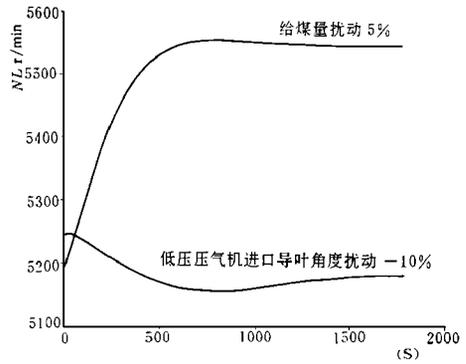
## 2 PFBC- CC主要回路控制系统设计

### 2.1 控制方法选用原则

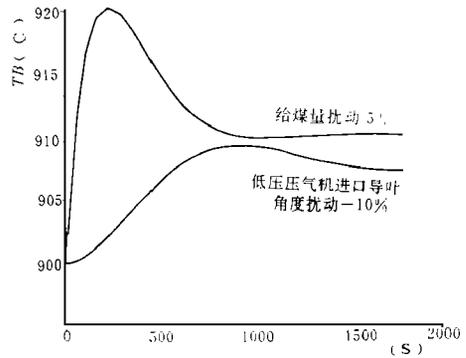
对于 PFBC- CC这样一个分布参数、非线性、时变、多变量严重耦合的调节对象,本文选用鲁棒系统设计方法对 PFBC- CC控制系统进行设计。用该方法设计的鲁棒控制系统使广义对象在一定的摄动范围内具有良好的鲁棒性。

### 2.2 鲁棒准优势算法<sup>[2]</sup>

设鲁棒预补偿器为  $K_R(s)$ ,则摄动系统的开环传递函数阵为  $Q_k(s) = G_k(s)K_R(s)$



(a)



(b)

图 3 双轴燃气轮机动态特性

在频域中系统描述不确定性可表示为:

$$M_k = \{G(s, T), T \in E\}$$

其中,  $T$ 为不确定参数向量,  $E$ 是这些向量的集合,从该集合中选取出典型的传递函数矩阵  $G_k(s)$  ( $k = 1, 2, \dots, n_1$ ) 能够覆盖广义对象各参数矩阵,在系统的工作频段内选取  $n_2$ 个频率点. 定义目标函数为:

$$J_r = \sum_{k=1}^{n_1} \sum_{l=1}^{n_2} C_{kl} \left( \sum_{j=1}^m |q_{kj}|^2 - |q_{kr}|^2 \right)$$

其中,  $C_{kl}$ 为加权系数,取约束条件为:

$$|q_{tr}(k_0)|^2 = 1$$

其中,  $k_0 \in (k_1, k_2, \dots, k_{n_2})$

$$t \in (1, 2, \dots, m)$$

则待求的  $K_R(s)$  即可通过求极值的方法求得。用该方法求得的鲁棒预补偿器  $K_R(s)$  阶次较低,易于工程实现。

### 2.3 鲁棒性分析<sup>[3]</sup>

考虑图 4 所示的多变量反馈扰动系统:

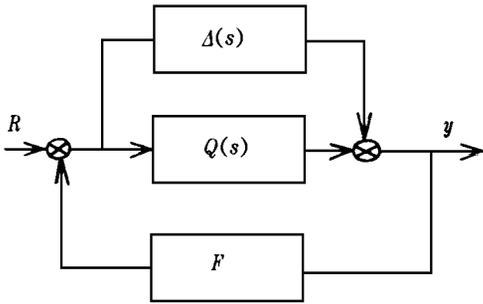


图 4 多变量反馈扰动系统

其中:  $Q(s) = G_i(s)K_R(s)$   
 $\Delta(s) \in C^{k \times n}$  为对于  $Q(s)$  的结构性加法扰动, 具有上界,

即:  $|\Delta_{ij}(s)| \leq |r_{ij}(s)| < \infty, 1 \leq i, j \leq n, \forall s \in D$

其中  $D$  为 Nyquist 围线。

在此基础上,文献[3]给出了如下定义和定理:

定义 鲁棒对角优势:若  $[F^{-1} + Q(s)]$  在  $D$  上满足:

$$|f_i^{-1} + q_{ii}(s)| - |\Delta_{ii}(s)| > \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (|q_{ij}(s)| + |\Delta_{ij}(s)|) \quad (1 \leq i \leq n)$$

或

$$|f_j^{-1} + q_{jj}(s)| - |\Delta_{jj}(s)| > \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n (|q_{ji}(s)| + |\Delta_{ji}(s)|) \quad (1 \leq j \leq n)$$

则称图 4 所示的扰动系统是行或列鲁棒对角优势的。

定理: 图 4 所示系统为结构性加法扰动,若满足:

- (1) 名义系统闭环稳定
- (2)  $[F^{-1} + Q(s)]$  在  $s \in D$  上为行或列对角优势。
- (3) 定义矩阵:

$$B(s) = \begin{pmatrix} |f_1^{-1} + q_{11}(s)| & -|q_{12}(s)| & \dots & -|q_{1n}(s)| \\ -|q_{21}(s)| & |f_2^{-1} + q_{22}(s)| & \dots & -|q_{2n}(s)| \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -|q_{n1}(s)| & -|q_{n2}(s)| & \dots & |f_n^{-1} + q_{nn}(s)| \end{pmatrix}$$

若系统是按定义在  $S \in D$  上为鲁棒对角优势的,即  $B - |\Delta|$  为对角优势矩阵,则图 4 所示的扰动系统鲁棒稳定。

### 2.4 鲁棒系统设计方法<sup>[3]</sup>

基于图 4 所示的扰动系统和鲁棒准优势化法以及在定义和定理的意义下,得到鲁棒系统设计方法。

(1) 从已知对象的一组传递函数矩阵  $G_K(s), (1 \leq K \leq n_1)$  中确定名义传递函数矩阵  $G_i(s)$ 。

(2) 采用鲁棒准优势化法设计鲁棒预补偿器  $K_R(s)$ ,补偿后名义系统传递函数矩阵为:

$$Q(s) = G_i(s)K_R(s)$$

扰动传递函数矩阵为:

$$\begin{aligned} \Delta_K(s) &= (G_K(s) - G_i(s))K_R(s) \\ &= \Delta G_K(s)K_R(s) \quad (1 \leq K \leq n_1) \end{aligned}$$

取反馈增益阵为  $F = \text{diag}\{f_i\},$ 按定义检验系统是否为鲁棒对角优势。

(3) 用单变量设计方法设计控制器  $K_C(s) = \text{diag}\{K_{ci}(s)\}$  使名义系统不仅稳定,而且具有良好的性能。

(4) 作诸系统的单位阶跃响应,检查系统是否为鲁棒稳定,而且具有良好的性能。

### 2.5 设计实例

本文应用鲁棒系统设计方法对贾汪 PFBC-CC 主要回路设计控制系统。由于 PFBC-CC 系统的复杂性,所需控制的参数很多,而且耦合严重,所以其控制回路相当复杂。目前仅粗略考虑两个主要回路的设计。压气机可调静叶角度和给煤量作为系统两个主要控制量;蒸汽负荷与流化床温度作为相应的两个被控制量。机理分析表明,PFBC-CC 系统具有明显的非线性,且由于工况的变化或者环境的改变,系统的参数具有不确定性,系统模型会发生扰动。在设计工况下应用系统仿真模型可求得系统名义传递函数矩阵  $G_1(s)$ ,根据  $G_1(s)$  又求得当系统存在着结构性加法扰动时的传递函数矩阵  $G_2(s)$  和  $G_3(s)$ <sup>[4]</sup>。

系统中的 PFBC 锅炉具有明显的纯时延,采用 Smith 预估技术对名义模型作准确补偿,而对其它模型作近似补偿。采用 Smith 预估补偿后的对象传递函数矩阵分别为:

$$G_1(s) = \begin{bmatrix} \frac{1.12}{325s + 1} & \frac{-0.2}{430s + 1} \\ \frac{0.7}{290s + 1} & \frac{-0.16}{200s + 1} \end{bmatrix}$$

$$G_2(s) = \begin{bmatrix} \frac{1.0}{300s+1} & \frac{-0.18}{400s+1} \\ \frac{0.63}{270s+1} & \frac{-0.144}{220s+1} \end{bmatrix}$$

$$G_3(s) = \begin{bmatrix} \frac{1.232}{400s+1} & \frac{-0.22}{470s+1} \\ \frac{0.77}{320s+1} & \frac{-0.176}{250s+1} \end{bmatrix}$$

选取  $G_1(s)$  为名义传递函数矩阵,应用鲁棒准优势化法求出鲁棒预补偿器  $K_R(s)$ :

$$K_R(s) = \begin{bmatrix} 3.45 & -1.66 \\ 14.31 & -9.45 \end{bmatrix}$$

于是名义系统传递函数矩阵为:

$$Q(s) = G_1(s)K_R(s)$$

其摄动传递函数矩阵为:

$$\Delta_1(s) = [G_2(s) - G_1(s)]K_R(s)$$

$$\Delta_2(s) = [G_3(s) - G_1(s)]K_R(s)$$

取反馈增益矩阵为单位阵,即:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

根据鲁棒对角优势定义检验系统是否为鲁棒对角优势,分别计算名义系统的  $[F^{-1} + Q(s)]$  的优势度及摄动系统,当摄动分别为  $\Delta_1(s)$  和  $\Delta_2(s)$  的优势度,其优势度曲线如图 5 所示。

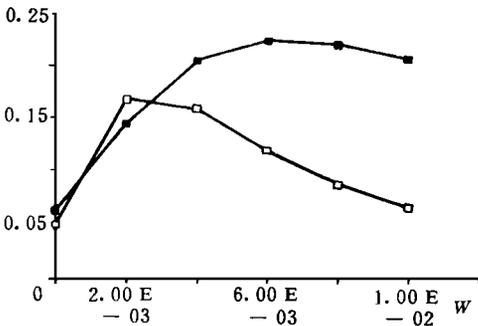


图 5(a)

由摄动系统的优势度曲线得知,该摄动系统已经达到鲁棒对角优势,又由定理知该摄动系统为鲁

棒稳定的。

用单变量系统理论设计控制器

$$K_C(s) = \begin{bmatrix} 2 + \frac{0.02}{S} & 0 \\ 0 & 5 + \frac{0.05}{S} \end{bmatrix}$$

使名义系统不仅稳定,而且具有良好的性能。

分别对名义系统和摄动系统作闭环阶跃仿真,结果如图 6 所示。

从图中看出该鲁棒控制系统具有良好的鲁棒性能,而且名义系统和摄动系统关联都比较小,具有良好的瞬态和稳态特性,是比较令人满意的。对于一般 PFBC-CC 系统主要回路控制系统的设计方法与此类似,不再赘述。

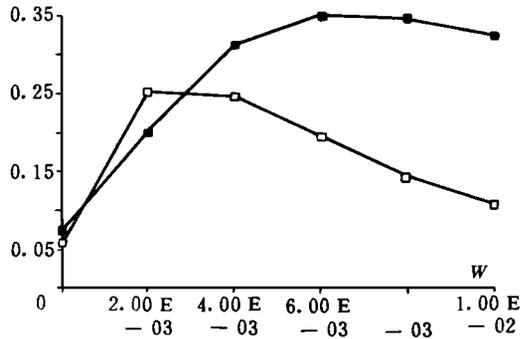


图 5(b)

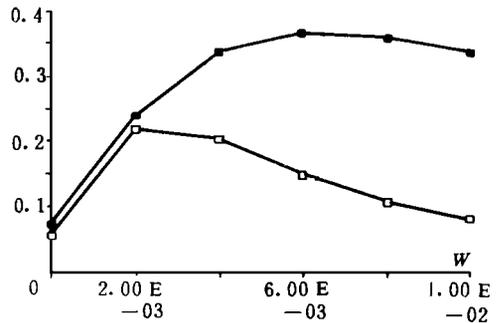


图 5(c)

图 5 鲁棒对角优势曲线

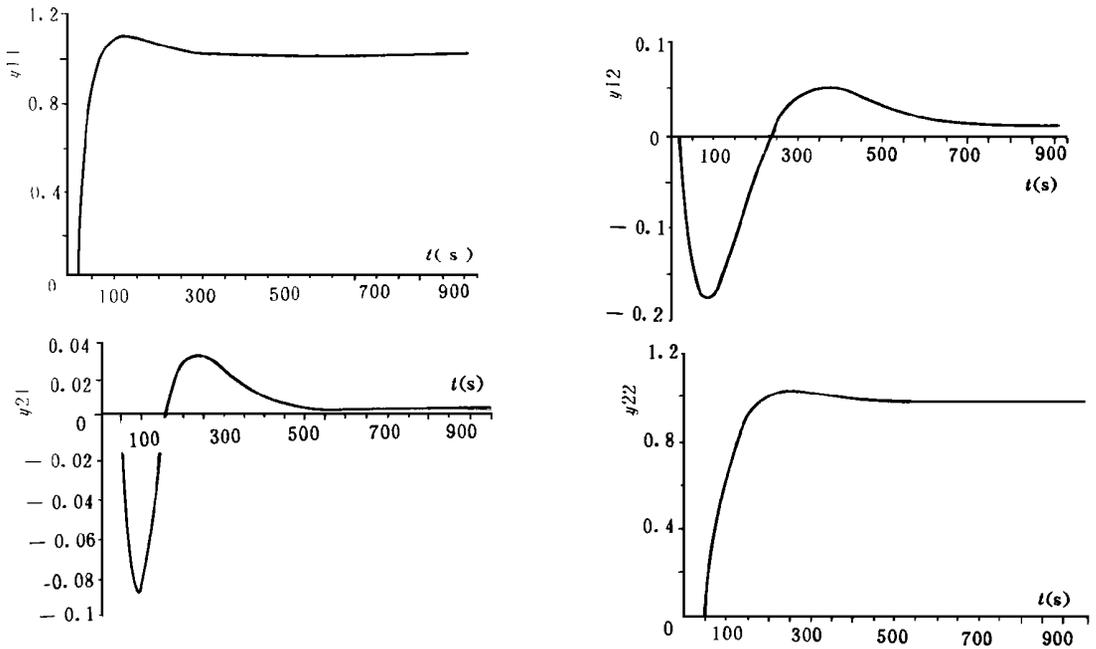


图 6 闭环系统单位阶跃响应

### 3 结 论

通过比较两个系统在同样幅度负荷扰动下流化床温度的变化,得知采用双轴燃气轮机的 PFBC-CC 系统更趋于适合负荷变化的要求,即流化床温度变化较小。这主要是由于双轴燃气轮机低压轴设计成变转速运行,可以自适应地调整其转速,使空气流量适应负荷变化的要求。同时动态特性分析表明,单纯依靠双轴燃气轮机低压轴变转速运行无法完全满足 PFBC 锅炉负荷变化时对空气流量的要求,所以要求低压压机进口导叶可调。

本文应用多变量鲁棒系统设计方法对 PFBC-CC 系统进行了鲁棒性设计,使系统在满足鲁棒对角优势的条件下达达到鲁棒稳定,从而圆满地解决了当系统存在较大扰动情形下的稳定性问题。该方法具有保守性小,所设计的控制器简单,易于工程实现的

特点。仿真结果表明:用该方法设计的多变量鲁棒控制系统完全满足被控对象在性能上的各项要求,结果令人满意。

### 参 考 文 献

- 1 吕泽华. SK 15HE 燃气轮机实时仿真器的动态数学模型与仿真. 热能动力工程, 1994, 9(5)
- 2 庞国仲等. 一种多变量系统鲁棒设计方法. 自动化学报, 1994, 20(2)
- 3 庞国仲等. 鲁棒对角优势及在多变量系统鲁棒设计中的应用. 控制理论与应用, 1993, 10(4)
- 4 Yaman Arkun, et al. Robust Nyquist Array Methodology: A new theoretical framework for analysis and design of Robust multivariable feedback system. INT. J. CONTROL, 1984, 40(4)
- 5 章名耀等, 贾汪增压流化床燃烧联合循环中试电站的设计概念. 东南大学学报, 1992, 22(9)

PFBC-CC中燃气轮机的动态特性与系统控制方案研究\* = A Study on Dynamic Characteristics of Gas Turbines of PFBC-CC and System Control Versions [刊,中] /Lu Zehua, Xu Jun (Tsinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(2). 81~ 85

By setting up a dynamic mathematical model for two different shafting gas turbines of PFBC-CC and conducting their simulation obtained are the dynamic characteristics of the gas turbines. On this basis the use of a step response identification method resulted in the obtaining of a transfer function matrix for the main channels of the PFBC system. A multivariable robust design method was used to perform the robust control system design of a controlled object. By way of the simulation of a closed loop perturbation system the authors determined the step response of the closed loop perturbation system in the presence of a structural perturbation. The simulation results have shown that the control system designed by using the above-cited method features fine robust performance, thus meeting the various requirements of the controlled system. Key words PFBC-CC, dynamic characteristics, robust controller, robust diagonal dominance

塔型飞灰浓缩器分离机理的探讨 = An Exploratory Study on the Separation Mechanism of a Tower-type Fly-ash Concentrator [刊,中] /Li Gongbo (Xi'an Thermotechnical Institute), Wen Long (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(2). -86~ 90

On the basis of an experimental study of tower-type fly-ash concentrator cold-state simulation the authors discuss the variation relationship of gas/solid dual phase fluid inside the concentrator and the effect of various main experimental factors on the fly-ash particle trap/separation function. In addition, a regressive numerical calculation was carried out for the test results and a computation formula obtained for evaluating the main technical performance indexes of the tower-type fly-ash concentrator. key words centrifuge factor, concentration efficiency

CFB锅炉的循环倍率 = Circulation Factor of CFB Boilers [刊,中] /Li Jun, Li Yintang (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(2). -91~ 92

At present there exist two different definitions for the circulation factor of CFB boilers, which is a major parameter for the design and operation of such boilers. In this paper an analysis is given of the numerical relationship of these two different definitions and the possible problems are pointed out because of the simultaneous presence of these definitions with the method of resolving such problems being proposed. key words CFB boiler, circulation factor, definition

圆形与扇形可倾瓦推力轴承的润滑性能对比试验研究 = A Comparative Experimental Study of Lubricating Characteristics of Circular and Sector Tilting Pad Thrust Bearings [刊,中] /Wang Jizhi, Li Yonghai (Harbin University of Science & Technology), Zheng Yongcai, Liu Shuqing (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(2). -93~ 95