

球磨机控制系统的设计

王永初

(精密机械工程系)

摘要

球磨机是火电厂的一种重要设备,它将原煤破碎并研成粉末.为了生产的安全性和稳定性,需要有温度、压力与差压控制系统,由于系统的耦合影响,系统长期处于手动状态,甚至被取消.本文介绍一种控制方案,该方案成功地应用于球磨机控制系统,经长期满负荷使用,证明具有显著的经济效益.

关键词 多变量控制, 解耦, 球磨机

一、问题的提出

长期以来火电厂磨煤机多变量控制系统的问题没有得到较好地解决,其主要原因是系统间的耦合,导致系统在调节过程中互相干涉,形成强烈的振荡倾向.磨煤机的作用是将原煤研磨成一定细度与干湿度的煤粉.供给锅炉作为燃料.工艺流程比较简单,原煤经煤斗、煤秤、给煤机后,同热风汇合进入球磨机研磨成煤粉,研磨以后的煤粉被热风吹入煤粉分离器,合格细度的煤粉进一步吹入煤粉仓,不合格的煤粉经分离后重新进入球磨机研磨.整个

系统包括三个子系统:(a) 磨煤机进出口两侧的差压控制系统;(b) 磨煤机出口侧的温度控制系统;(c) 磨煤机内部的负压控制系统.

磨煤机进出口两侧的差压代表生产的负荷量.负压与出口温度代表着研磨煤粉的干湿度,而且磨煤机内部处于负压的状态下,可以避免煤粉逸散到周围的空气里,造成对工作环境的污染.磨煤机在研磨过程中因摩擦而使煤粉温度升高,当煤粉温度达到某一个界限值时会自燃,酿成生产事故.因此差压、负压及温度是磨煤

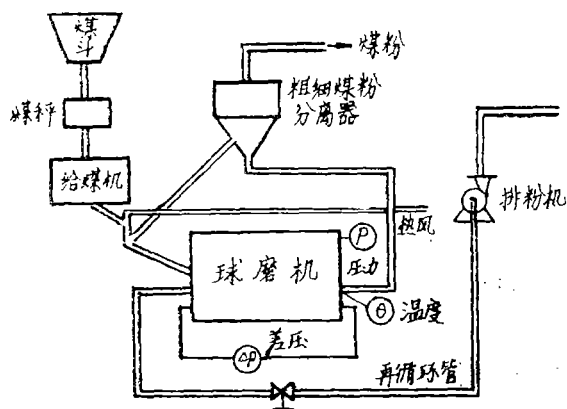


图 1

本文1989年6月23日收到.

机生产过程中要求加以控制的三个要素。目前各发电厂，几乎都是由热风来控制磨煤机出口的温度，由引风来控制负压，并由给煤机括板开度来控制差压，并构成三个控制子系统。但是这三个子系统间存在着耦合现象，使得三个子系统无法同时投入运行。

图1表示磨煤机的有关操作变量和被控制变量。

提高磨煤机控制质量的一个关键步骤，就是实行解耦控制。本文介绍我们研究的解耦方法在该设备的具体应用。

二、解耦方法的引入

豆坝发电厂是一个自动化水平较高的中型发电厂（两台 10^5kW 机组的发电设备），几乎热工过程参数全都实现仪表化控制或微型机控制。磨煤机原已采用TMC-80A微机进行控制，并已具备了现场必要的检测仪表与执行器/调节阀，本设计就是在这样的基础上进行的。川南电业局中试所提供的数学模型为

$$\begin{bmatrix} C_1(s) \\ C_2(s) \\ C_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.77}{(80s+1)^3} & \frac{-1.03}{(80s+1)^2(11s+1)} & \frac{0.17}{(60s+1)^2(8s+1)^2} \\ 0.02 & \frac{1}{(80s+1)(60s+1)^2} & \frac{0.44}{(11s+1)(8s+1)} \\ \frac{-0.08}{8s+1} & \frac{-0.12}{(60s+1)^3} & \frac{0.54}{11s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1(s) \\ m_1(s) \\ m_1(s) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

这是一个 3×3 维的耦合对象，并记

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) & g_{13}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & g_{23}(s) \\ g_{31}(s) & g_{32}(s) & g_{33}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.77}{(80s+1)^3} & \frac{-1.03}{(80s+1)^2(11s+1)} & \frac{0.17}{(60s+1)(8s+1)^2} \\ 0.02 & \frac{1}{(80s+1)(60s+1)^2} & \frac{0.44}{(11s+1)(8s+1)} \\ \frac{-0.08}{8s+1} & \frac{-0.12}{(60s+1)^3} & \frac{0.54}{11s+1} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

根据系统控制支路的耦合度定义

$$\xi_{ii}(s) = \frac{\sum_j \frac{g_{ji}(s)g_{ij}(s)p_j(s)}{1+p_j(s)g_{jj}(s)}}{g_{ii}(s)}, \quad (3)$$

式中， $g_{ij}(s)$ 为第 j 个回路至第 i 回路的耦合支路； $g_{ji}(s)$ 为第 i 回路至第 j 回路的耦合支路； $g_{ii}(s)$ 为 $g_{jj}(s)$ 分别为第 i 回路与第 j 回路的控制通道传递函数； $p_j(s)$ 为第 j 回路的控制器模型。

由于 $p_j(s)$ 通常均包含有积分功能，考虑稳态的耦合度时，式(3)可改写为

$$\xi_{ii} = \frac{\lim_{s \rightarrow 0} \sum_j \frac{g_{ji}(s)g_{ij}(s)}{g_{jj}(s)}}{\lim_{s \rightarrow 0} g_{ii}(s)}, \quad (4)$$

代入式(2)对象的有关函数可以求出:

(i) (m_1, c_1) 配对控制的耦合度

$$\xi_{11} = -0.6809,$$

(ii) (m_2, c_2) 配对控制的耦合度

$$\xi_{22} = -0.1245,$$

(iii) (m_3, c_3) 配对控制的耦合度

$$\xi_{33} = -0.7519,$$

在这三个控制支路中, $|\xi_{33}|$ 最大, 因此应先将 (m_3, c_3) 控制支路从系统中分离出来。分离网络矩阵记为 $B_1 A_1$, 并满足

$$G(s) B_1 A_1 = G_A(s), \quad (5)$$

式中, G_A 为保留 $G(s)$ 主对角线上元素的对角线矩阵, 并取

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & b_{13} \\ 0 & 1 & b_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 b_{13} 与 b_{23} 由如下方程式确定

$$\begin{cases} g_{11}(s)b_{13} + g_{12}(s)b_{23} + g_{13}(s) = 0, \\ g_{21}(s)b_{13} + g_{22}(s)b_{23} + g_{23}(s) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)求得

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} b_{13} \\ b_{23} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -g_{13}(s) \\ -g_{23}(s) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{0.77}{(80s+1)^3} & \frac{-1.03}{(80s+1)^2(11s+1)} \\ 0.02 & \frac{1}{(80s+1)(60s+1)^2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{-0.17}{(60s+1)(8s+1)^2} \\ \frac{0.44}{(11s+1)(8s+1)} \end{bmatrix} \\ &= \frac{(80s+1)^4(60s+1)^2(11s+1)}{Q(s)} \\ &\quad \cdot \begin{bmatrix} \frac{-0.17}{(80s+1)(60s+1)^3(8s+1)^2} + \frac{0.4532}{(80s+1)^2(11s+1)^2(8s+1)} \\ \frac{0.0034}{(60s+1)(8s+1)^2} + \frac{0.3388}{(80s+1)^3(11s+1)(8s+1)} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{(80s+1)^2 F_1(s)}{Q(s)(60s+1)(11s+1)(8s+1)^2} \\ \frac{(80s+1)(60s+1) F_2(s)}{Q(s)(8s+1)^2} \end{bmatrix}, \quad (8) \end{aligned}$$

其中

$$Q(s) = 474624s^4 + 27686.4s^3 + 206s^2 + 14.238s + 0.7906, \quad (9a)$$

$$F_1(s) = -(131648s^4 + 10885.84s^3 + 4454.41s^2 + 124s + 0.5468), \quad (9b)$$

$$F_2(s) = 19148.8s^4 + 2458.88s^3 + 236.88s^2 + 23.8918s + 0.3422. \quad (9c)$$

B_1 为 (m_3, c_3) 支路的列解耦矩阵, 加入 B_1 以后, $G(s)$ 演变为

$$G(s)B_1 = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) & 0 \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & 0 \\ g_{31}(s) & g_{32}(s) & \hat{g}_{33}(s) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中

$$\hat{g}_{33}(s) = g_{31}(s)b_{13} + g_{32}(s)b_{23} + g_{33}(s). \quad (11)$$

A_1 为 $G(s)$ 的 (m_3, c_3) 支路的行解耦矩阵

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中

$$a_{3j} = -\frac{g_{3j}(s)}{\hat{g}_{33}(s)}, \quad j = 1, 2. \quad (13)$$

(m_3, c_3) 支路从 $G(s)$ 分离以后, 系统的耦合度明显降低, 此时

$$\xi_{11} = \xi_{22} = -0.0268,$$

$$\xi_{33} = 0.$$

B_1A_1 解耦网络加入以后, 系统的静态耦合度减少28倍多, 因此系统的耦合度大大弱化. (m_3, c_3) 支路分离后, 对象耦合部分的特性记成

$$\begin{bmatrix} c_1(s) \\ c_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1(s) \\ m_2(s) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

这个部分的解耦网络矩阵为

$$D_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{g_{12}(s)}{g_{11}(s)} \\ -\frac{g_{21}(s)}{g_{22}(s)} & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

三、解耦网络的实现

上述计算的解耦网络实现有较大的困难, 原因是每一个网络的元素均为高价的传递函数, 例如 b_{13} 为 6/8 阶, b_{23} 为 6/6 阶, 再将其拉普拉斯变换转变为 z 变换, 无论是系数的计算或者在线解耦都是很费时费事的. 为此需要先对各个解耦支路的网络模型加以降阶简化, 然后再将 s 函数转换成 z 函数. 为了使模型规范化, 降阶简化模型为 2/2 的指定阶. 我们采用保留主极点与低阶时间矩拟合的方法来确定降阶模型.

b_{13} 与 b_{23} 的分母多项式有一部分根已经确定, 即仅由 $Q(s)$ 的根来定. 由于 b_{13} 与 b_{23} 最有意义的极点是处在 s 复平面的左边半平面上, 且离 s 复平面虚轴最近的极点, 并且降阶模型为 2/2

的指定阶, 因此 $Q(s)$ 仅需求出两个最小的根, 同已确定的 b_{13} 及 b_{23} 的根相比较, 从中选择两个最小的根. 利用我们开发的MODED模型简化程序求出 $Q(s)$ 两个最小的具有负实部的极点分别为

$$\begin{aligned}s_1 &= -0.03928, \\s_2 &= -0.0458, \\s_{3,4} &= 0.01337 \pm j0.02705.\end{aligned}$$

b_{13} 除上述的四个极点外, 还有 $s_5 = s_6 = -0.125$, $s_7 = -0.09091$, $s_8 = -0.01667$. b_{23} 除上述四个极点外, 尚有 $s_5 = s_6 = -0.125$ 两个极点. 按照保留主极点的原则, b_{13} 与 b_{23} 分别记成

$$\hat{b}_{13} = \frac{\alpha_0 + \alpha_1 s + \alpha_2 s^2}{(s + 0.01667)(s + 0.03928)}, \quad (16)$$

$$\hat{b}_{23} = \frac{\beta_0 + \beta_1 s + \beta_2 s^2}{(s + 0.03928)(s + 0.0458)}, \quad (17)$$

\hat{b}_{13} 与 \hat{b}_{23} 的三个待定参数, 可以按一阶、二阶与三阶时间矩拟合条件式确定, 即

$$\lim_{s \rightarrow 0} \hat{b}_{i3} = \lim_{s \rightarrow 0} b_{i3}, \quad i = 1, 2, \quad (18a)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{d\hat{b}_{i3}}{ds} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{db_{i3}}{ds}, \quad i = 1, 2, \quad (18b)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{d^2\hat{b}_{i3}}{ds^2} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{d^2b_{i3}}{ds^2}, \quad i = 1, 2, \quad (18c)$$

求得

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= -0.45 \times 10^{-3}, & \alpha_1 &= -0.1666, & \alpha_2 &= -3.682, \\ \beta_0 &= 0.779 \times 10^{-3}, & \beta_1 &= 0.1738, & \beta_2 &= 0.1481,\end{aligned}$$

故有

$$\hat{b}_{13} = -\frac{0.45 \times 10^{-3} + 0.1666s + 3.682s^2}{0.655 \times 10^{-3} + 0.05595s + s^2}, \quad (19)$$

$$\hat{b}_{23} = \frac{0.779 \times 10^{-3} + 0.1738s + 0.1481s^2}{0.0018 + 0.0851s + s^2}, \quad (20)$$

\hat{b}_{13} 与 \hat{b}_{23} 分别表示 b_{13} 与 b_{23} 的降阶模型, 由式(11)可以求出 $\hat{g}_{33}(s)$

$$\begin{aligned}\hat{g}_{33}(s) &= g_{31}(s)\hat{b}_{13} + g_{32}(s)\hat{b}_{23} + g_{33}(s) \\ &= \frac{-0.08}{(8s+1)} \left(\frac{0.45 \times 10^{-3} + 0.1666s + 3.682s^2}{0.655 \times 10^{-3} + 0.05595s + s^2} \right) \\ &\quad - \frac{0.12}{(60s+1)^3} \left(\frac{0.779 \times 10^{-3} + 0.1738s + 0.1481s^2}{0.0018 + 0.0851s + s^2} \right) + \frac{0.54}{11s+1},\end{aligned} \quad (21)$$

$\hat{g}_{33}(s)$ 包括三个部分, 根据保留权最大与主极点的降阶原则, 显然应保留 $s_1 = -1/11$ 与 $s = -1/60$ 的极点, 在稳态匹配的条件下 $\hat{g}_{33}(s)$ 可降阶为

$$\hat{g}_{33}(s) = \frac{0.434}{(60s+1)(11s+1)}, \quad (22)$$

于是 A_1 网络为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{0.1843(60s+1)(11s+1)}{8s+1} & \frac{0.2765(11s+1)}{(60s+1)^2} & 1 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

B_1 与 A_1 网络的构成如图2所示,在图2 A_1 部分,射向 w_3 节点的两个交叉支路的传递函数分别为

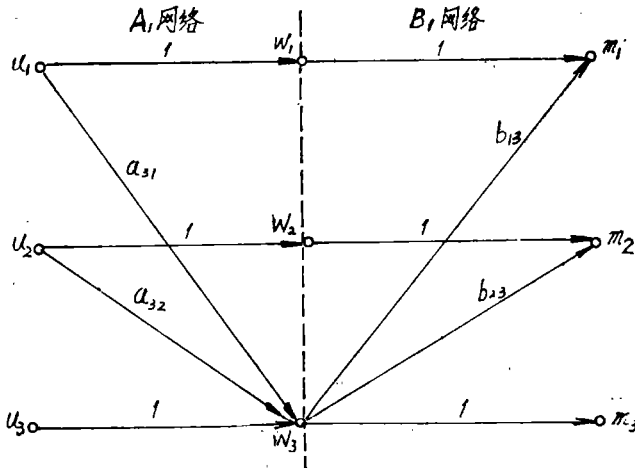


图2 B_1 与 A_1 网络

$$a_{31} = \frac{0.1843(60s+1)(11s+1)}{8s+1}, \quad (24)$$

$$a_{32} = \frac{0.2765(11s+1)}{(60s+1)^2}, \quad (25)$$

B_1 网络的交叉支路的传递函数 b_{13} 与 b_{23} 分别如式(19)、(20)所示。

(c_3, m_3) 支路从耦合系统分离以后, (c_3, m_3) 支路变成一个独立的子系统。由于 (c_3, m_3) 的分离使得系统的耦合度大大降低,即使其它系统不解耦按独立子系统进行设计也不会产生明显的干涉影响。

上述解耦网络 B_1 与 A_1 的传递函数矩阵是拉普拉斯算子 s 的多项式,换成计算机算式仅需进行如下替代

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T_s}$$

或者

$$s = \frac{2}{T_s} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$$

前者是差分替代法,后者是双线性变换法,替代后的网络均以差分方程式表示,我们专门设计一个解耦模块,插入在控制器与对象的执行器之间。本模块插入之后,原先不稳的系统变得相当平稳。

四、应用效果

国内火电厂球磨机控制系统目前几乎均没有投入运行,一些新设计的火电厂也取消了球磨机控制系统,因此本研究对提高火电厂的自动化水平有积极的意义。

本控制系统的微型机控制装置采用TMC-80A工业控制机,Z-80 CPU 芯片,模入48路,模出8路,开关输入16路,开关输出16路。软件采用模块组态,主机硬件电路实现程序自恢复,PID参数及解耦网络参数可在线调整,并配有画面显示,全部子系统参数均设置了参数报警与系统保护功能,本装置的软硬件由川南电热局中心试验所与重庆工业自动化仪表研究所完成。本装置构成的控制系统已在线连续运行9个多月,收到明显的经济效益。

根据财务部门出具证明与鉴定委员会审查,本系统直接经济效益为24万元/年,节电80万度。除发电设备检修期外均投入运行,年利用率为7000h。

五、系统的进一步改进

加入 B_1 与 A_1 网络后,系统的耦合度大大弱化,因此三个子系统同时闭环投入运行,即使有部分耦合形成的调节过程干涉振荡也是较微弱的,所以系统可以一次投运成功。但是考虑到系统整体控制品质的进一步提高,未解耦的较弱耦合的支路还可以进一步解耦,这时仅需再增加一个 A_b 解耦网络,这个网络安置在控制器函数矩阵与 A_1 网络矩阵之间。这样系统的解耦网络实际上是由三个部分组成,即

$$D(s) = B_1 A_1 A_b, \quad (26)$$

其中 A_b 网络矩阵为

$$A_b = \begin{bmatrix} 1 & D_{12}(s) & 0 \\ D_{21}(s) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (27)$$

A_b 中的待定元系 $D_{12}(s)$ 与 $D_{21}(s)$ 分别为

$$D_{12}(s) = -\frac{g_{12}(s)}{g_{11}(s)} = -\frac{1.3376(80s+1)}{11s+1}, \quad (28)$$

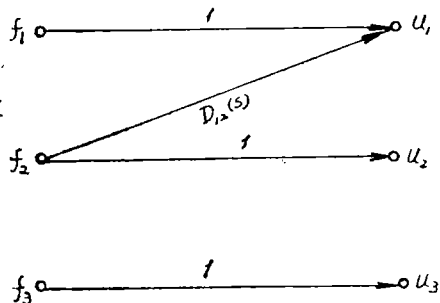


图3 A_b 网络

$$\begin{aligned} D_{21}(s) &= -\frac{g_{21}(s)}{g_{22}(s)} \\ &= \frac{0.02}{(80s+1)(60s+1)^2} \end{aligned} \quad (29)$$

由于 $D_{21}(s)$ 的静态增益是很小的,因此从工程应用的角度 $D_{21}(s)$ 可以忽略。这样 A_b 变成一个非常简单的网络矩阵,即使 A_b 加入对系统的复杂程度也不会增加多少,因此,今后如果对球磨机多变量系统进行改进设计,可以考虑增加一个 A_b 网络。 A_b 网络的结构如图3所示。

参 考 文 献

- [1] 王永初, 逐一支路分离的解耦方法, 控制理论与应用, 2(1989)。
[2] Desoer, C.A. and Chan, W.S., Interconnected linear multivariable System properties and Input-output stability, *IEEE, Trans, A-C*, 22, (1977)。
[3] Kokotovic, P.V., Recent trends in feedback design, *Automatica*, 2(1985)。

A Design of Control System for the Ball Mills

Wang Yongchu

Abstract

Being an important equipment in a fire powerplant, the ball mill is capable of breaking natural coals and milling them into coal powders. For the security and stability of production, a control system is needed for controlling over temperature, pressure and differential pressure. Owing to the coupling effect of systems, these systems are operated manually and are lain aside over a long period of time. This paper presents a control scheme applicable to the control system of ball mill. It was suuccessfully used under long time full load and proved to be a control scheme with significant economic benefit.

Key words multivariable control, decoupling, ball mills