

基于分组解耦的制粉系统控制研究

孙灵芳,郝永红

(东北电力大学 自动化工程学院,吉林 吉林 132012)

摘要: 针对非线性、多变量、强耦合的电厂制粉系统,运用分组解耦方法,通过分组解耦网络运算,分离出最大耦合度的支路,降低了系统之间的耦合,提高了系统的控制精度。结合动态矩阵控制(DMC)算法仿真,结果表明基于分组解耦的控制算法明显降低了控制系统的耦合度,使系统达到满意的控制效果,对进一步应用研究具有很好的参考价值。

关键词: 分组解耦方法;耦合度;动态矩阵控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)09-0065-03

AMill pulverizing system of power plant control based on group decoupling method

Sun Lingfang, Hao Yonghong

(School of Automation Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: In this paper we use group decoupling method in a multi-variable non-linear decoupling system. With the decoupling network, the maximum degree of coupling branch separated from the system. So the degree of coupling between the system is lower and the accuracy of the system is improved. The computer simulation of a three-input three-output mill pulverizing system is given, use of DMC (Dynamic Matrix Control Algorithm) simulation, simulation results show that the decoupling algorithm significantly reduces the degree of the coupling system, allowing the system to achieve satisfactory control effect. It has a good reference value for further applications.

Key words: group decoupling method; degree of decoupling; dynamic matrix control

耦合是生产过程中普遍存在的一种现象。在多变量系统中,由于各变量之间的耦合作用,一个输入量的改变通常会引起部分、甚至所有输出量的变化,降低了控制系统的调节品质。耦合严重时,可能会导致系统无法投入运行。

近些年,随着控制理论不断发展,越来越多的解耦理论应运而生。现行的解耦控制方法,如特征结构配置解耦、自校正解耦、线性二次型解耦、奇异摄动解耦等^[1-3],大都建立在精确的系统模型上,而且所设计的解耦控制器对模型的不确定性十分敏感。然而实际应用辨识得到的系统模型往往不准确,模型参数在各种因素的影响下不断发生摄动。智能解耦方法,如神经网络解耦、模糊解耦,虽然在一类非线性系统中的应用已经有一些研究成果,但是更多的解耦都带有一种尝试性,通常需要依靠大量仿真实验来研究。分组解耦是一种按需解耦的方法,

是对传统解耦方法的补充。本文运用的分组解耦方法^[4],从系统中具有最大耦合度的支路开始分离系统,每分离一次,系统的总耦合度就会降低,达到解耦的目的。

1 分组解耦方法

对于一个强耦合的系统,首先对系统进行耦合度分析,从具有最大耦合度的支路进行分离系统,将该支路从系统中剥离出来,由此剩下的系统的耦合度就相对原系统的耦合度降低,而且时常是大幅降低。或者说每次分离系统的一个支路或分离系统的一组支路,系统总的耦合度就会降低,这就是弱化耦合度的方法。

研究发现,许多系统仅需要进行一两次耦合度分离,原先耦合度很高的系统就变成了弱耦合系统,或者说系统各支路之间的关联影响变得不密切,也就达到本文对原系统进行解耦的目的。

假设一个 $n \times n$ 的耦合系统,可以表示为:

技术与方法

Technique and Method

$$\begin{bmatrix} x_1(s) \\ x_2(s) \\ \vdots \\ x_n(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \cdots & G_{1n}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \cdots & G_{2n}(s) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{n1}(s) & G_{n2}(s) & \cdots & G_{nn}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1(s) \\ m_2(s) \\ \vdots \\ m_n(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

将式(1)利用分组解耦的方法,分离为两组互不干涉的子系统,若将控制变量和被控变量划分为两类,即:

$$X(s) = [X_1(s) \ X_2(s)]^T$$

$$M(s) = [M_1(s) \ M_2(s)]^T$$

其中 $X_1(s)$ 是 r 维向量, $X_2(s)$ 是 $n-r$ 维向量; $M_1(s)$ 是 r 维向量, $M_2(s)$ 是 $n-r$ 维向量。则原系统可以写为分块矩阵的形式:

$$\begin{bmatrix} X_1(s) \\ X_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1(s) & G_2(s) \\ G_3(s) & G_4(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1(s) \\ M_2(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

分组解耦网络 $D(s)$ 也是一个分块矩阵:

$$D(s) = \begin{bmatrix} I & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & I \end{bmatrix} \quad (3)$$

则 $G(s)$ 的传递函数矩阵模型变成一个对角矩阵传递函数:

$$\hat{G}(s) = \begin{bmatrix} \hat{G}_1(s) & 0 \\ 0 & \hat{G}_4(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1(s) - G_2(s)G_4^{-1}(s)G_3(s) & 0 \\ 0 & G_4(s) - G_3(s)G_1^{-1}(s)G_2(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

这样,采用分组解耦控制方法,当给系统分组以后,引入一个解耦矩阵 $D(s)$,使重新组成的等效被控对象成为一个方块对角矩阵,即 $G(s)D(s) = \hat{G}(s)$,其中 $\hat{G}(s)$ 为原系统的等效被控矩阵。

因为向量 $X_1(s)$ 和向量 $X_2(s)$ 无相互之间的耦合,所以原系统可以分为两个互不耦合的子系统,其中向量 $X_1(s)$ 的维数和向量 $X_2(s)$ 的维数可以按解耦的需要进行确定,但是必须保持 $X_1(s)$ 的维数和 $X_2(s)$ 的维数之和为 n 。由此可见,分离之后的子系统的维数总是比原系统小,而且系统的耦合程度也必然降低。

2 仿真实例

选取在某稳定工作点附近,经典的无低温风钢球磨中储式制粉系统,其对象的数学模型传递函数矩阵^[5]为:

$$\begin{bmatrix} T(s) \\ P(s) \\ \Delta P(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.77}{(80s+1)^3} & \frac{-0.1}{(60s+1)^3} & \frac{-0.13}{(110s+1)(80s+1)^2} \\ \frac{1.6}{8s+1} & \frac{0.54}{11s+1} & \frac{0.12}{(60s+1)^3} \\ \frac{0.18}{20s+1} & \frac{0.256}{30s+1} & \frac{0.3}{(110s+1)^3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_h(s) \\ F_r(s) \\ F_c(s) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: T 为磨煤机出口温度, P 为磨煤机入口负压, ΔP 为磨煤机进出口差压, F_h 为热风门开度, F_r 为再循环风门开度, F_c 为给煤量。

系统的相对增益矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 0.9508 & 0.4312 & -0.3820 \\ -0.0494 & 1.2922 & -0.2428 \\ 0.0985 & -0.7234 & 1.6248 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由系统的相对增益矩阵可知,系统存在严重的耦合,需要对其进行解耦控制。

取 $\lambda_r = \max(|\lambda_{ii}|)$, ($i=1, 2, 3$), 由于第 r 个回路耦合度最大,将第 r 个回路从系统中分离出来。

这是一个 3×3 的复杂耦合系统,可以通过引入两个分离网络矩阵 $A(s)$ 和 $B(s)$,将 3×3 复杂系统分离为一个单回路系统和一个两输入两输出系统,如式(7)所示:

$$G(s)B(s)A(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) & 0 \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & 0 \\ 0 & 0 & \hat{g}_{33}(s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $A(s)$ 为 $G(s)$ 的 r 支路的行解耦矩阵, $B(s)$ 为 $G(s)$ 的第 r 个回路的列解耦矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & b_{13} \\ 0 & 1 & b_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过计算,有:

$$\begin{bmatrix} b_{13} \\ b_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -g_{13}(s) \\ -g_{23}(s) \end{bmatrix} \quad (9)$$

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

$$a_{31} = -\frac{g_{31}(s)}{\hat{g}_{33}(s)} \quad a_{32} = -\frac{g_{32}(s)}{\hat{g}_{33}(s)}$$

由于解耦网络实现存在较大困难,每一个网络的元素都为高阶的传递函数,所以在进行系数计算或者在线解耦时很难获得满意的控制效果。因此需要对各个解耦支路进行模型降阶简化,本文采取平衡实现的模型降阶算法对上述网络元素进行降阶处理。降阶后的网络元素为:

$$\hat{b}_{13} = \frac{-0.12s - 0.0008}{s^2 + 0.2577s + 0.0018}$$

$$\hat{b}_{23} = \frac{0.008s - 0.00003}{s^2 + 0.0216s + 0.00018}$$

$$\hat{g}_{33} = \frac{-0.1s - 0.0001}{s^2 + 0.01968s + 0.00018}$$

$$a_{13} = -\frac{g_{31}(s)}{\hat{g}_{33}(s)} = -\frac{0.18}{20s+1} = \frac{0.18s^2 + 0.003s + 0.0000324}{1.98s^2 + 0.101s + 0.0001}$$

$$a_{32} = -\frac{g_{32}(s)}{\hat{g}_{33}(s)} = -\frac{0.256}{30s+1} = \frac{0.256s^2 + 0.005s + 0.0000461}{2.97s^2 + 0.102s + 0.0001}$$

通过对降阶前后模型的阶跃响应曲线进行比较分析,仿真结果表明,降阶后模型的动态特性和降阶前的动态特性基本吻合,从而验证了降阶前后,降阶模型在时域范围内,同原模型具有比较好的相似度,同时也验证了平衡实现的降阶算法的正确性和可靠性。如图1、图2所示。

这样,原系统就被分离为两个独立的系统,一个双输入双输出的系统和一个单输入单输出的系统。两个子

技术与方法 Technique and Method

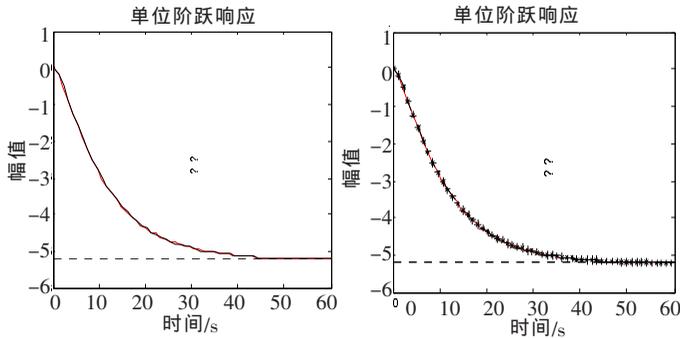


图1 降阶前 b_{13} 单位阶跃响应曲线 图2 降阶后 \hat{b}_{13} 单位阶跃响应曲线
系统的数学模型分别为:

$$\begin{bmatrix} T(s) \\ P(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.77 & -0.1 \\ (80s+1)^3 & (60s+1)^3 \\ 1.6 & 0.54 \\ 8s+1 & 11s+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_h(s) \\ F_r(s) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\Delta P(s) = \hat{g}_{33}(s) F_c(s) = \frac{-0.1s - 0.0001}{s^2 + 0.01968s + 0.00018} F_c(s)$$

通过对解耦前系统各支路的阶跃响应和分组解耦后系统各支路的阶跃响应比较分析得到:解耦前,由于系统各支路耦合的存在,当系统闭环时,各支路之间的干涉导致系统处于不稳定状态,呈现发散的调节过程;解耦后,系统各支路阶跃响应由不稳定变为稳定,系统的动态偏差减小,各支路之间的耦合减小。

本文对制粉系统原模型以及分组解耦后的子系统运用动态矩阵控制算法(DMC)进行控制,其控制效果如图3和图4所示。

由系统仿真结果分析得到:分组解耦前,系统存在严重耦合;分组解耦后, $(\Delta P, F_c)$ 支路从系统中分离出来,通过DMC控制曲线可知,系统耦合减弱,达到控制效果。

本文运用分组解耦方法,在钢球磨中储式制粉系统加入解耦网络之后,将 $(\Delta P, F_c)$ 支路分离出来后,变成一个独立的低阶子系统,使得系统的耦合度大大降低,近似地将 3×3 的强耦合系统简化为双输入双输出系统,降低系统耦合度。运用动态矩阵控制算法仿真分析,分组后的系统和原系统具有很好的相似度,保持了系统的动态特性,系统耦合降低,达到解耦目的。

参考文献

[1] 薛美盛,樊弟,魏衡华.多变量系统的广义预测控制解耦

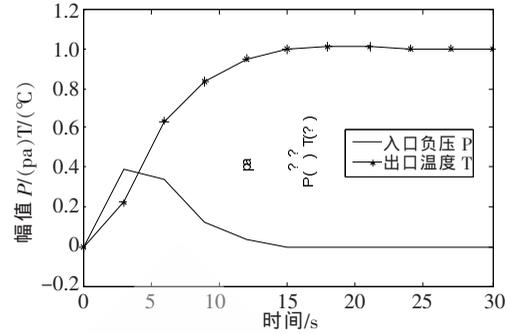


图3 分组解耦前系统控制输出曲线图

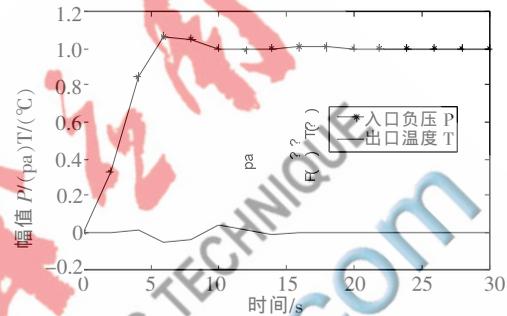


图4 分组解耦后系统控制输出曲线图

设计[J].控制工程,2011,18(1):39-42.

- [2] 桑保华,薛晓中.多变量解耦控制方法[J].火力与指挥控制,2007,32(11):13-16.
- [3] 孙静,孙建平,梁兆阳,等.双输入双输出时滞系统的解耦控制方法[J].仪器仪表用户,2008,15(4):108-109.
- [4] 王启志.工程解耦控制系统的研究[D].泉州:华侨大学,2002.
- [5] 王东风.制粉系统球磨机的模型算法解耦控制[J].工业仪表与自动化装置,2002(1):23-25.

(收稿日期:2013-01-17)

作者简介:

孙灵芳,男,1970年生,教授,博士,主要研究方向:换热设备污垢与对策,热工过程先进控制。

郝永红,男,1987年生,硕士研究生,主要研究方向:热工过程先进控制策略。