

超临界火电机组协调系统建模及模型预测控制算法研究

李炳楠¹, 朱 峰¹, 燕志伟¹, 贺 勇²

(1. 润电能源科学技术有限公司, 河南 郑州 450052; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 452470)

摘 要: 针对因超临界火电机组协调系统建模精度不高, 进而影响先进控制算法控制效果的问题, 提出了一种分立-组合式建模方法, 并将其应用于模型预测控制算法中。首先, 利用子空间辨识方法分步求解分立的子系统模型, 之后将分立模型进行组合得到机组的整体模型, 以某 600 MW 超临界火电机组的多组实际数据为训练样本和检验样本, 模型输出参数的拟合度可达到 90% 以上, 从而解决了传统机理建模中假设条件较多、机组动态特性不足等问题; 其次, 以所建立的分立-组合模型为基础, 分别应用于模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 算法和常规 PI 解耦控制算法中, 由于 MPC 拥有对多进多出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 系统更好的适用性, 并可以在每个周期内求解带约束条件的最优解, 使得控制量在超调量方面幅度下降了近 20%, 调节时间缩短 30% 以上, 从而体现了所提改进算法在机组协调系统控制中的优越性。

关 键 词: 超临界火电机组; 子空间辨识; 分立-组合模型; 模型预测控制 (MPC)

中图分类号: TK221 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2020.02.016

[引用本文格式] 李炳楠, 朱 峰, 燕志伟, 等. 超临界火电机组协调系统建模及模型预测控制算法研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(2): 117-125. LI Bing-nan, ZHU Feng, YAN Zhi-wei, et al. Research on modeling and model predictive control algorithm for supercritical thermal power unit coordination system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2): 117-125.

Research on Modeling and Model Predictive Control Algorithm for Supercritical Thermal Power Unit Coordination System

LI Bing-nan¹, ZHU Feng¹, YAN Zhi-wei¹, HE-Yong²

(1. Rundian Energy Science and Technology Co. Ltd., Zhengzhou, Henan, China, Post Code: 450052; 2. State Grid Electric Power Research Institute of Henan Electric Power Company, Zhengzhou, Henan, China, Post Code: 452470)

Abstract: Aiming at the problem that the modeling accuracy of the supercritical thermal power unit coordination system is not high, affecting the control effect of the advanced control algorithm, a discrete-combined modeling method is proposed and applied to the model predictive control algorithm. The spatial identification method solves the discrete subsystem models step by step, and then combines the discrete models to obtain the overall model of the unit. The actual data of a 600 MW supercritical thermal power unit is used as the training sample and the test sample, and the fit of the model output parameters can reach more than 90%, which solves the problems of many assumptions in the traditional mechanism modeling and insufficient dynamic characteristics of the unit. Secondly, based on the established discrete-combined model, the model predictive control (MPC) algorithm and the conventional PI decoupling control algorithm are applied. Because MPC has better applicability to the MIMO system, and can solve the optimal solution with constraints in each cycle, the control amount is reduced by nearly 20% in terms of over-

收稿日期: 2019-06-11; 修订日期: 2019-07-25

基金项目: 国家电网公司总部科技项目 (521702150006)

Fund-supported Project: Science and Technology Project of State Grid Corporation Headquarters (521702150006)

作者简介: 李炳楠 (1983-), 男, 河南安阳人, 润电能源科学技术有限公司高级工程师, E-mail: lbn100@163.com.

shoot, and the adjustment time is shortened by more than 30%, indicating the superiority of the proposed improved algorithm in the control of the unit coordination system.

Key words: supercritical thermal power unit, subspace identification, discrete-combined model, model predictive control (MPC)

引言

超临界机组是一个庞大且复杂的系统,具有强耦合、非线性、多变量的特点^[1-3],这些特性使得传统的控制策略很难达到理想的控制效果。因此,很多先进控制算法开始被引入到超临界火电机组的控制中。然而,大多数先进控制算法对模型的精确度有着较高的要求,模型的好坏直接影响到控制效果。近些年,先进控制算法应用在机组部分环节,如脱硝、脱硫等,在模型准确的情况下,取得了较好的控制效果。但是对于机组整体而言,大多集中在以假设条件为前提,以简化期间环节为手段的机理模型方式。这种模型由一组复杂的非线性微分方程组成,主要适用于电站仿真机,却无法直接用于控制系统设计^[4-7]。即使勉强使用,也具有模型精度不高、动态特性包含不足的特点,从而给先进控制算法带来了许多困难,实际的控制效果不尽人意。

针对上述问题,利用状态子空间辨识方法,提出了一种分立-组合式建模方法,并将其应用于模型预测控制算法(MPC)中。这种改进方法,一方面简化了机组整体模型的建模步骤,提高了模型的精度;另一方面较大改善了传统控制算法中存在的控制量波动幅度大、稳定时间长的情况,提高了机组协调系统的控制效果。其中,状态子空间辨识方法是近年来出现的一种用于辨识线性镇定系统动态特性的时域技术,它直接由输入/输出数据矩阵序列,通过基本的代数运算求解系统模型,计算速度快,模型拟合度高,是一种真正意义上的多输入多输出系统辨识方法^[8];模型预测控制算法的工业技术和理论研究都取得了卓越成果,它可以处理各种约束,减少过程变量的波动幅度,将生产过程推进至关键约束条件边界上运行^[9-15]。

本文采用状态子空间辨识方法得到超临界机组协调系统的分立-组合模型将辨识得到的机组模型

应用于 MPC 控制器,使用常规 PI 解耦控制器对所辨识的机组模型进行测试,并同 MPC 算法的预测结果进行比对。

1 超临界火电机组协调系统模型的建立

1.1 状态子空间方法

采用 N4SID 开环子空间辨识方法对超临界火电机组协调系统进行模型辨识。子空间辨识方法采用状态空间形式来描述所要辨识的系统,在建立模型的时候根据提供的输入输出数据,构造 Hankle 矩阵并进行计算,得到所要辨识对象的状态空间模型^[14]。其核心思想是运用斜向投影的性质将系统分解为确定性部分和随机性部分,从而将噪声项消除。

线性时不变系统的状态空间模型为:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (2)$$

其中, $\mathbf{u}(k) \in R^p$ 、 $\mathbf{y}(k) \in R^q$ — k 时刻的输入输出数据, $\mathbf{x}(k) \in R^n$ — k 时刻的状态变量。当其中的 $\mathbf{w}(k)$ 、 $\mathbf{v}(k)$ 都为零时,表示的是确定性系统(即没有噪声干扰),当不为零时则描述的是随机性系统。

将上述等式进行前向迭代,可得到系统的状态空间矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}(k) \\ \mathbf{y}(k+1) \\ \vdots \\ \mathbf{y}(k+i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^i \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{CB} & \mathbf{D} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{CA}^{i-1}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{i-2}\mathbf{B} & \cdots & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{u}(k+1) \\ \vdots \\ \mathbf{u}(k+i) \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(3)表达形式按照某个中间时间点分解成上下两个部分,分别对应过去和未来时间点,根据子空间辨识的标准定义形式得到:

$$\mathbf{X}_f = \mathbf{A}^i \mathbf{X}_p + \Delta_i \mathbf{U}_p + \Delta_i^s \mathbf{E}_f \quad (4)$$

$$Y_p = \Gamma_i X_p + H_i^d U_p + H_i^s E_p \quad (5)$$

$$Y_f = \Gamma_i X_f + H_i^d U_f + H_i^s E_f \quad (6)$$

其中, U_p 、 U_f 矩阵的构造如下:

$$U_p = \begin{bmatrix} u_0 & u_1 & \cdots & u_{j-1} \\ u_1 & u_2 & \cdots & u_j \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ u_{i-1} & u_i & \cdots & u_{i+j-2} \end{bmatrix}$$

$$U_f = \begin{bmatrix} u_i & u_{i+1} & \cdots & u_{i+j-1} \\ u_{i+1} & u_{i+2} & \cdots & u_{i+j} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ u_{2i-1} & u_{2i} & \cdots & u_{2i+j-2} \end{bmatrix}$$

U_p 、 $U_f \in R^{pixj}$, Y_p 和 Y_f 的构造原理与 U_p 、 U_f 相同, 此处不再详述。另外, Γ_i 、 H_i^d 矩阵构造如下:

$$\Gamma_i = [C \quad CA \quad CA^2 \quad \cdots \quad CA^i]^T$$

$$H_i^d = \begin{bmatrix} D \\ CAB & D \\ \vdots & \ddots & \ddots \\ CA^{i-2}B & CA^{i-3}B & \cdots & D \end{bmatrix}$$

$$H_i^s = \begin{bmatrix} 0 & C & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots \\ CA^{j-2} & CA^{j-3} & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta_i = [A^{i-1}B \quad A^{i-2}B \quad \cdots \quad B]$$

$$\Delta_i^s = [A^{i-1} \quad A^{i-2} \quad \cdots \quad 1]$$

在子空间辨识方法中, 首先需要在不知道状态空间模型的前提下, 通过过程的输入输出数据确定动态系统的状态序列。这也是子空间辨识方法区别于其它输入输出模型辨识方法的主要不同之处。子空间算法的主要贡献在于 Kalman 滤波估计状态可以通过对输入输出数据进行 QR 分解或奇异值分解 (SVD) 得到。由系统方程容易得到:

$$\begin{pmatrix} x_{i+1} & x_{i+2} & \cdots & x_{i+j} \\ y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i & x_{i+1} & \cdots & x_{i+j-1} \\ u_i & u_{i+1} & \cdots & u_{i+j-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_i & w_{i+1} & \cdots & w_{i+j-1} \\ v_i & v_{i+1} & \cdots & v_{i+j-1} \end{pmatrix} \quad (7)$$

一旦状态可知, 状态空间模型辨识问题就转变为一个最小二乘问题, 即:

$$\begin{pmatrix} \hat{A} & \hat{B} \\ \hat{C} & \hat{D} \end{pmatrix} = \min_{A, B, C, D} \left\| \begin{pmatrix} \hat{x}_{i+1} & \hat{x}_{i+2} & \cdots & \hat{x}_{i+j} \\ y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-1} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x}_i & \hat{x}_{i+1} & \cdots & \hat{x}_{i+j-1} \\ u_i & u_{i+1} & \cdots & u_{i+j-1} \end{pmatrix} \right\|_F^2 \quad (8)$$

1.2 控制参量选择与分立模型组合

火电机组的实时监测参数数据巨大, 这些参数都反映了火电机组的运行状态。协调系统最关注的输出参量包括负荷、主汽压力 and 主汽温度, 而输入参量则需要有所选择。在尝试了多种输入参数和反复建模比较后, 挑选出了汽机调阀开度、燃料量、总水量、风煤比、中间点温度和减温水流量作为协调系统辨识的关键变量。其中, 利用燃料量、给水量和汽机阀门开度可以很好地建立负荷、主汽压力和中间点温度的数学模型, 然后再由中间点温度、风煤比以及减温水流量对系统主蒸汽温度进行建模。通过将各分立模型进行组合, 形成了五输入三输出的协调系统模型, 如图 1 所示^[16]。

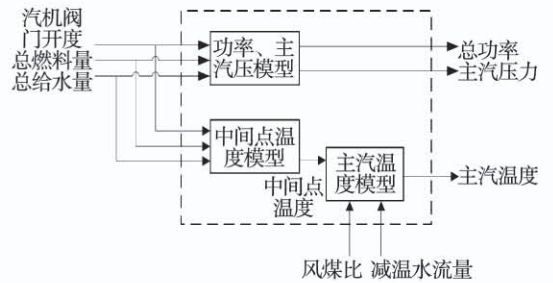


图1 分立模型组合框图

Fig.1 Diagram of discrete model combination

利用上述状态子空间方法, 采用某电厂超临界 600 MW 机组全天的运行数据, 辨识数据都经过归一化等预处理, 采样时间为 5 s, 全天采样点数为 17 280 个, 所得到的模型如表 1 所示。图 2 ~ 图 4 为负荷、主汽压力和主汽温度的模型输出和实际输出数据的对比结果, 可以看出三种参量的拟合度分别为 92.3%、94.5% 和 88.78%, 满足预测控制等以模型为基础的控制方法对协调系统模型精度的要求。

2 模型预测控制算法应用

2.1 模型预测控制算法设计

以所建立的机组协调模型为基础, 利用模型预测控制算法 (MPC) 对协调系统进行控制。模型预

测控制算法集模型预测、滚动优化和反馈校正于一体,精确把控被控对象的动态特性。与其他控制策略不同的是,MPC 算法的核心是将控制问题转换为一个求解带约束的最优化问题,并通过实时刷新每个时刻点的数据不断更新和求解该最优化问题,从

而得到最优化的控制增量。经典的 MPC 算法有三种,分别是:模型算法控制(MAC)、动态矩阵控制(DMC)和广义预测控制(GPC)^[17],其基本思想都是一致的,结构图如图 5 所示。

表 1 模型实例
Tab. 1 Model instance

系数	功率、主汽压模型	中间点温度模型	主汽温度模型
A	$\begin{bmatrix} 0.98 & -6.4e^{-3} \\ -1.1e^{-2} & 0.99 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.99 & -0.045 \\ 0.024 & 0.92 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.99 & -5.66e^{-2} \\ 5.91e^{-2} & 0.88 \end{bmatrix}$
B	$\begin{bmatrix} -4.62e^{-6} & 5.62e^{-5} & 1.11e^{-4} \\ 2.23e^{-6} & 4.61e^{-5} & 1.06e^{-4} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.1e^{-4} & -1.03e^{-4} \\ 8.7e^{-5} & -4.9e^{-4} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -9.55e^{-6} & -1.58e^{-5} & 1.05e^{-4} \\ 4.85e^{-5} & 4.44e^{-5} & 2.13e^{-4} \end{bmatrix}$
C	$\begin{bmatrix} 106.5 & 3.51 \\ 70.69 & 68.54 \end{bmatrix}$	$[38.5 \quad -0.64]$	$[31.04 \quad -0.67]$
D	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$[0 \quad 0 \quad 0]$	$[0 \quad 0 \quad 0]$

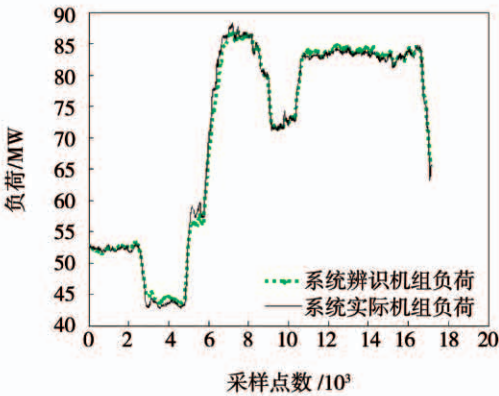


图 2 负荷曲线
Fig. 2 Diagram of load curve

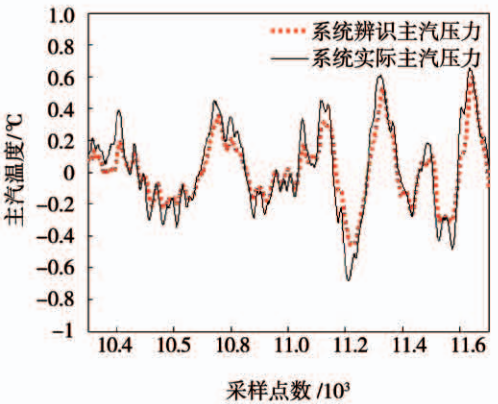


图 4 主汽温度曲线
Fig. 4 Diagram of main steam temperature curve

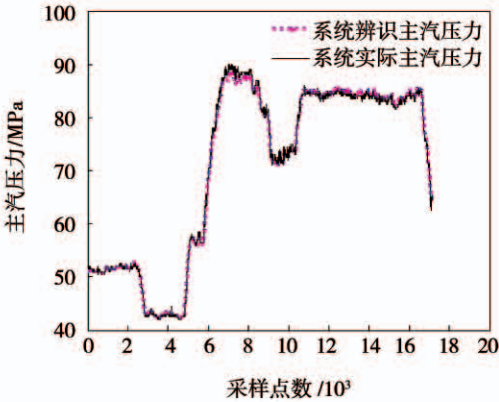


图 3 主汽压力曲线
Fig. 3 Diagram of main steam pressure curve

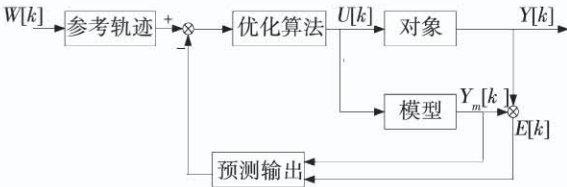


图 5 模型预测控制算法结构示意图
Fig. 5 Diagram of model predictive control algorithm

根据系统理论,对于一个动态系统,其未来响应可以分解为两部分,分别是自由响应和强迫响应:

$$y[k+j] = y_0[k+j|k] + y_f[k+j|k], j = 1, 2, \dots, n \tag{9}$$

其中, $y[k+j]$ 为系统在 k 时刻后的未来各步输出; $y_0[k+j|k]$ 为系统在 k 时刻后的自由响应输出; $y_f[k+j|k]$ 为系统在 k 时刻后的强迫响应输出。

自由响应输出是由系统过去各步的控制量 $u[k-i]$ ($i>0$) 所产生的输出, 并且与系统本身的特性有关。当系统处于 k 时刻时, 可以利用系统模型和系统过去各步的控制量 $u[k-i]$ 来计算自由响应输出 $y_0[k+j|k]$ 的数值;

在系统无扰动的情况下, 强迫响应输出是系统未来各步控制量 $u[k+i]$ ($i>0$) 所产生的输出, 输出结果取决于系统本身特性和未来各步的控制量。与 $y_0[k+j|k]$ 不同的是, 在 k 时刻, $y_f[k+j|k]$ 是待定的可变量, 并可以按照控制要求, 通过确定未来各步的控制量 $u[k+i]$ 来确定其数值大小。

由于上述协调系统的模型表现形式为空间状态方程, 为了方便对接, 将 MPC 算法也用状态方程来描述。假设整个状态向量是可测的, 也就是 $x(k|k) = x(k)$ 。此时, 不考虑扰动和测量噪声对系统的影响, 则可以通过迭代模型实现过程的预测:

$$\begin{aligned} x(k+1|k) &= Ax(k) + Bu(k|k) \\ x(k+2|k) &= Ax(k+1|k) + Bu(k+1|k) \\ &= A^2x(k) + ABu(k|k) + Bu(k+1|k) \\ &\vdots \\ x(k+N|k) &= Ax(k+N-1|k) + Bu(k+N-1|k) \\ &= A^Nx(k) + A^{N-1}Bu(k|k) + \cdots + \\ &\quad Bu(k+N-1|k) \end{aligned} \quad (10)$$

在公式(10)的第一行使用 $u(k|k)$ 而不是 $u(k)$, 是因为 k 时刻还不知道 $u(k)$, $u(k)$ 需要通过 MPC 计算得出。另外, 因为 $\Delta u(k+j|k) = u(k+j|k) - u(k+j-1|k)$, 而且在 k 时刻 $u(k-1)$ 是已知的, 所以有:

$$\begin{aligned} u(k|k) &= \Delta u(k|k) + u(k-1) \\ u(k+1|k) &= \Delta u(k+1|k) + \Delta u(k|k) + u(k-1) \\ &\vdots \\ u(k+m-1|k) &= \Delta u(k+m-1|k) + \cdots + \Delta u(k|k) + u(k-1) \end{aligned} \quad (11)$$

其中, m —控制时域, 且 $m < N$

当 $1 \leq j \leq m$ 时, 有:

$$x(k+1|k) = Ax(k) + B[\Delta u(k|k) + u(k-1)]$$

$$\begin{aligned} x(k+2|k) &= A^2x(k) + AB[\Delta u(k|k) + u(k-1)] + \\ &\quad B[\Delta u(k+1|k) + \underbrace{\Delta u(k|k) + u(k-1)}_{u(k+1|k)}] = \\ &= A^2x(k) + (A+I)B\Delta u(k|k) + B\Delta u(k+1|k) + (A+I)Bu(k-1) \\ &\quad \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x(k+m|k) &= A^mx(k) + (A^{m-1} + \cdots + A + I)B\Delta u(k|k) \cdots \\ &\quad + B\Delta u(k+m-1|k) \cdots + (A^{m-1} + \cdots + A + I)Bu(k-1) \end{aligned} \quad (12)$$

当 $m < j < N$ 时, 有

$$\begin{aligned} x(k+m+1|k) &= A^{m+1}x(k) + (A^m + \cdots + A + I)B\Delta u(k|k) \cdots \\ &\quad + (A+I)B\Delta u(k+m-1|k) + (A^m + \cdots + A + I)Bu(k-1), \\ &\quad \vdots \\ x(k+N|k) &= A^Nx(k) + (A^{N-1} + \cdots + A + I)B\Delta u(k|k) \cdots \\ &\quad + (A^{N-m} + \cdots + A + I)B\Delta u(k+m-1|k) + (A^{N-1} + \cdots + A + I)Bu(k-1), \end{aligned} \quad (13)$$

将式(12)式(13)代入式(11), 有:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x(k+1|k) \\ \vdots \\ x(k+m|k) \\ x(k+m+1|k) \\ \vdots \\ x(k+N|k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ A^m \\ A^{m+1} \\ \vdots \\ A^N \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{m-1} A^i B \\ \sum_{i=0}^m A^i B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{N-1} A^i B \end{bmatrix} u(k-1) + \\ &\quad \begin{bmatrix} B & \cdots & 0 \\ AB+B & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{m-1} A^i B & \cdots & B \\ \sum_{i=0}^m A^i B & \cdots & AB+B \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{N-1} A^i B & \cdots & \sum_{i=0}^{N-m} A^i B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+m-1|k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

由此可以得出 Y 的预测方程为,

$$Y(k) = \Phi x(k) + \Gamma u(k-1) + G_y \Delta U(k) \quad (15)$$

模型预测控制对系统未来输出 $y[k+j]$ 的控制采用按时间分段、多步预测和滚动优化的策略, 每步

只考虑系统有限步长的优化控制问题。一般地,采用未来 p 步内的期望输出与实际输出之间的差值,以及未来 m 步控制增量的二次型函数作为系统未来 p 步内的系统目标函数:

$$J = \sum_{j=1}^p q_i (w[k+j] - y[k+j])^2 + \sum_{j=1}^m r_j \Delta u^2[k+j-1] \quad (16)$$

式中: q_i 、 r_j —误差加权系数和控制加权系数; $w[k+j]$ —未来 p 步的期望输出。通过对目标函数 J 的极小化可求得未来 m 步待优化的控制量序列 $u[k+j-1]$ 。

2.2 模型预测控制算法的约束处理

将式(16)改写成向量形式,并增加约束,

$$J_k = \|W(k) - Y(k)\|_Q^2 + \|\Delta U(k)\|_R^2$$
$$s. t. \begin{cases} y_{\min} \leq y(k+j|k) \leq y_{\max}, j=0, \dots, N \\ u_{\min} \leq u(k+j|k) \leq u_{\max}, j=0, \dots, m-1 \\ \Delta u_{\min} \leq \Delta u(k+j|k) \leq \Delta u_{\max}, j=0, \dots, m-1 \end{cases} \quad (17)$$

定义误差向量 E ,即,期望目标和系统自由响应之间的偏差。

$$E(k) = W(k) - \Phi x(k) - \Gamma u(k-1) \quad (18)$$

这样,可将目标函数改写为:

$$J_k = \|G_y \Delta U(k) - E(k)\|_Q^2 + \|\Delta U(k)\|_R^2 = [\Delta U^T(k) \ G_y^T - E^T(k)] Q [G_y \Delta U(k) - E(k)] + \Delta U^T(k) R \Delta U(k) = \Delta U^T(k) [G_y^T Q G_y + R] \Delta U(k) - 2 E^T(k) Q G_y \Delta U(k) + E^T(k) Q E(k) \quad (19)$$

最终,可表示成二次标准型:

$$J_k = \frac{1}{2} \Delta U^T(k) H \Delta U(k) + f^T \Delta U(k) + \text{const} \quad (20)$$

其中, $H = 2(G_y^T Q G_y + R)$, $f = -2 G_y^T Q E(k)$

另外,输入增量 Δu 和输入 u 之间的关系有:

$$\begin{bmatrix} u(k|k) \\ u(k+1|k) \\ \vdots \\ u(k+N_c-1|k) \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ \Delta u(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c-1|k) \end{bmatrix} + F u(k-1) \quad (21)$$

其中,

$$M = \begin{bmatrix} I & 0 & \dots & 0 \\ I & I & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I & I & \dots & I \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} I \\ I \\ \vdots \\ I \end{bmatrix}$$

综上,约束条件可以汇总为下列不等式:

$$\begin{bmatrix} I \\ -I \\ M \\ -M \\ G_y \\ -G_y \end{bmatrix} \Delta U(k) \leq \begin{bmatrix} b_1 \\ -b_2 \\ d_1 - F u(k-1) \\ -d_2 + F u(k-1) \\ y_1 - \Phi x(k) - \Gamma u(k-1) \\ -y_2 + \Phi x(k) + \Gamma u(k-1) \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中, b_1, b_2, d_1, d_2 的维数为 $m \times N$,分别包含了 m 份 $\Delta u_{\max}, \Delta u_{\min}, u_{\max}, u_{\min}$ 。同样, y_1 和 y_2 的维数为 N ,包含了 N 份 $y_{\max}$ 和 $y_{\min}$ 。

接下来就是求解标准二次规划 QP 问题,如式(23)所示,有很多标准算法可以求解该问题的约束优化问题。

$$\min_{\Delta U(k)} \frac{1}{2} \Delta U^T(k) H \Delta U(k) + f^T \Delta U(k) \quad (23)$$

假设最优解为 $\Delta U_{\text{opt}}(k)$,滚动优化策略要求在每个控制周期仅仅使用优化解的第一列(控制时域中的第一步),这样实时控制增量可写作:

$$\Delta u_{\text{opt}}(k) = [I_{n_u} \ 0 \dots 0]_{(m-1)} \Delta U_{\text{opt}}(k) \quad (24)$$

假设 $Q \geq 0, R > 0$,则 Hessian 矩阵 $G_y^T Q G_y + R > 0$ 。在这种情况下,QP 问题是严格凸的,这将确保唯一解的存在以及能够确保优化问题的终止。

2.3 计算结果及分析

针对表 1 所建立的机组模型,应用上述 MPC 控制理论,对各参量的幅值及变化率进行约束,以保证系统的稳定变化,如表 2 所示。其中,各参量的初始值经过尺度变换得到。

对模型进行升负荷测试,设定功率阶跃值为 10 (尺度变换后),其它参数不做改动。从图 5 中可以看出,为了充分利用机组的蓄热,加快机组初期的负荷响应速度,机组的阀开度、燃料量和给水量都迅速增大。另外,各输入量指令在滚动优化的过程中已考虑了幅值与变化率的约束,因此,各参量按要求稳

定、快速的变化,未出现较大的波动。其中,为了快速响应一次调频或 AGC 变化,阀开度会留有一定余量;其次,煤是机组发电的能量来源,燃料量和给水量将决定机组负荷的最终状态;风煤比是影响机组负荷的重要参数,为了保证煤的充分燃烧和散热较少,风煤比理论上讲应该是一个常数,此处根据经验值给出;减温水是调节主汽温度的最后一道工序,是系统的辅助手段,考虑到其对主汽温度的调节作用,没有做严格的约束处理。

表 2 输入输出参量约束

Tab.2 Input and output parameter constraints

参 数	幅值下限	幅值上限	变化率下限	变化率上限	初始值
阀开度	60	100	-0.3	0.3	88
燃料量	20	100	-3	3	65
给水量	20	100	-2	2	75
风煤比	-	-	-	-	36
减温水量	0	100	-0.8	0.8	44
负荷	40	70	-	-	50
主汽压力	40	70	-	-	50
主汽温度	-3	3	-	-	0

从图 6 可以看出,当系统负荷需要快速增加时,主汽温度和主汽压力都会随之变动。从图中分析可得,煤和水对机组的变负荷影响具有一定的滞后作用。另外,也可将主汽温度和主汽压力作为输出约束,是机组负荷调节必须满足的约束条件,即,在约束条件下,系统最大升负荷能力是一条有限的上升曲线。

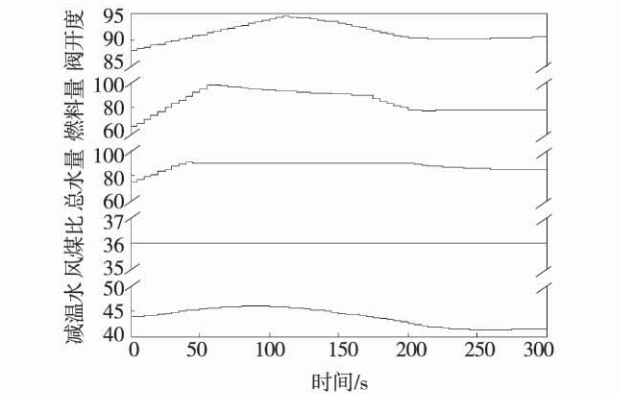


图 6 升负荷时的系统输入量

Fig.6 Diagram of system input at load rise

3 常规算法测试与比对

为了便于 MPC 与常规算法比对,对机组中常用的 PI 解耦控制算法进行测试。该算法以解耦理论为基础,将机组控制分为汽机主控和锅炉主控两个子控制器。其中,汽机主控满足电网负荷的需求,锅炉主控维持机炉之间的能量平衡,结构如图 7 所示。

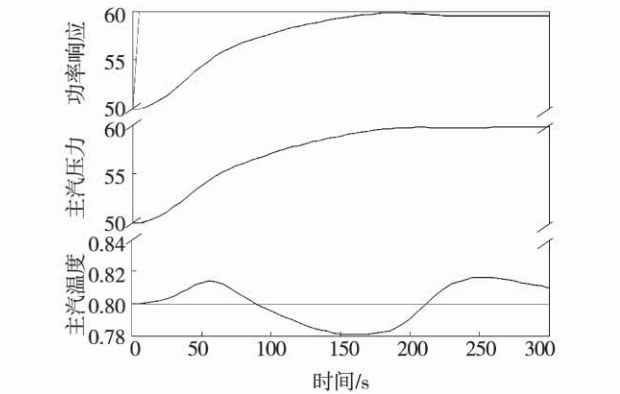


图 7 升负荷时的系统输出量

Fig.7 Diagram of system output at load rise

当机组负荷指令 N_0 改变时,负荷偏差 ΔN 同时发向汽机主控和锅炉主控,汽机侧通过 PI 控制器迅速改变汽机调门 U_T ,以跟随负荷指令变化; ΔN_e 通过限幅器后发到锅炉侧 PI 控制器,迅速改变燃料量 U_B ,以应对汽机侧变化,然而,当 ΔN_e 过大时,限幅器会对 ΔN 限幅,以防止锅炉灭火或燃料无法充分燃烧。

当主汽压力 P_0 改变时,压力偏差 ΔP_i 同时发向汽机主控和锅炉主控,锅炉侧通过 PI 控制器迅速改变燃料量 U_B ,以平衡输出功率所需的热量; ΔP_i 通过死区后发到汽机侧 PI 控制器,发出限制调门进一步变化的指令,防止过度利用蓄能,从而减小压力 P_0 的动态变化,其中,死区表达了允许主汽压力 P_0 在给定值附近变化的最大范围。

仍然以表 1 中的模型为被控对象,但由于实际机组中,为保持稳定的煤水比,给水控制大多将炉主控输出指令通过映射函数作为静态给水指令,再加上焓值修正或中间点温度修正来动态调整给水泵的转速。因此,此处仅使用了表 1 中的功率-汽机模型作为被控对象。测试结果如图 8、图 9 所示。

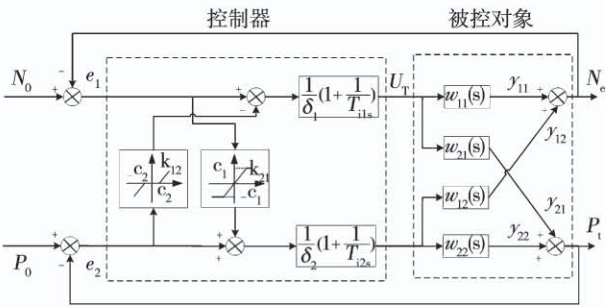


图 8 PI 解耦控制算法结构示意图

Fig. 8 Diagram of PI decoupling control algorithm

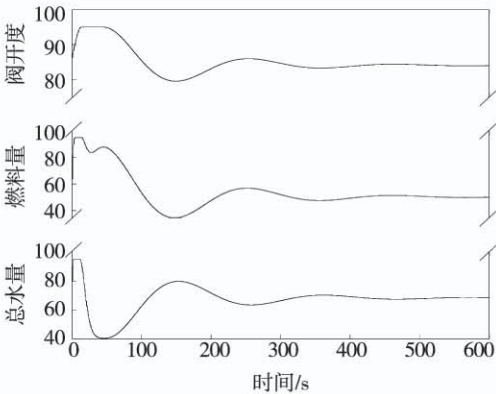


图 9 系统输入参量曲线

Fig. 9 System input parameter curve

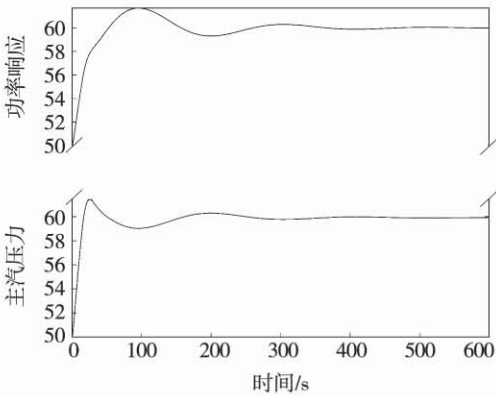


图 10 系统输出参量曲线

Fig. 10 System output parameter curve

为方便与 MPC 算法的比对,在升负荷时,设定功率阶跃值也是 10,其它参数不做改动。从图 6、图 8 可以看出,当需要急速增加发电负荷时,在调节煤、水和风等主要输入量的同时,先通过快速调节汽机阀门开度,利用机组储能,将发电负荷快速提高;而系统蒸汽压力会短时小幅下降,在锅炉燃烧系统

将新增能量补充进入系统后,蒸汽压力会恢复到相应的水平。MPC 控制算法与 PI 解耦控制算法的比对结果如表 3 所示。可以看出,MPC 算法较 PI 解耦算法在超调量方面幅度下降了近 20%,调节时间缩短 30% 以上,从而体现了改进算法的优越性。

表 3 两种算法的控制效果比对

Tab. 3 Comparison of the control effects of the two algorithms

参 数	功率响应		主汽压力	
	MPC	PI	MPC	PI
超调量/%	0	17.5	0	19.7
反调量/%	0	1.2	0	1.7
调节时间/s	230	400	250	360

4 结 论

以超临界火电机组协调系统为研究对象,利用子空间辨识方法对其进行数学建模并将结果应用于模型预测控制(MPC)算法中。首先,为提高模型精度,分步求解协调系统分立的子系统模型,再将分立模型进行组合,从而得到机组的整体模型。通过实际数据的验证,模型输出参量的拟合度可达到 90% 以上,从而解决了传统机理建模中假设条件较多、机组动态特性不足等问题;其次,将所辨识得到的模型结果分别应用于带约束的 MPC 算法和传统的 PI 解耦控制算法中。通过对两种算法测试结果的分析对比,得出在拥有高精度模型的前提下,MPC 算法在输出参量的超调量、反调量、调节时间等性能方面相比传统 PI 解耦算法提高了 20% ~ 30%,体现了所提出的建模改进算法在机组协调系统控制中的优越性。

参考文献:

[1] 中国电力委员会. 中国电力行业年度发展报告 2015 [M]. 北京: 中国市场出版社, 2015.
China Electricity Power Committee. China's Electric Power Industry Annual Development Report 2015 [M]. Beijing: China Market Press, 2015.
[2] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.

- ZHANG Chen-yue. Boiler dynamic characteristics and its mathematical model[M]. Beijing: Water Power Press, 1987.
- [3] 杨景祺, 戈黎红, 凌荣生. 超临界参数机组控制系统的特点及其控制策略[J]. 动力工程, 2005, 25(2): 221-225.
- YANG Jing-qí, GE Li-hong, LING Rong-sheng. Characteristics and control strategy of control system for supercritical parameter units[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(2): 221-225.
- [4] 于达仁, 徐志强. 超临界机组控制技术及发展[J]. 热能动力工程, 2001, 16(2): 115-121.
- YU Da-ren, XU Zhi-qiang. Supercritical unit control technology and development[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2001, 16(2): 115-121.
- [5] 肖伯乐, 赵铁成, 孙瑞. 超临界机组动态特性的分析[J]. 发电设备 2004(Z1): 21-25.
- XIAO Bo-le, ZHAO Tie-cheng, SUN Rui. Analysis of dynamic characteristics of supercritical units[J]. Power Generation Equipment 2004(supplement): 21-25.
- [6] SHINOHARA W, KODITSCHKE D E. A simplified model based supercritical power plant controller[C]. Proc of 35th IEEE Conf in Decision and Control, 1996: 4486-4491.
- [7] 孙磊, 吕剑虹, 魏静. 大型火电机组自动发电控制优化控制策略的研究[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(1): 5-8.
- SUN Lei, LYU Jian-hong, WEI Jing. Research on AGC optimization control strategy of large thermal power unit[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2008, 27(1): 5-8.
- [8] VERDULT V. Subspace identification of multivariable linear parameter-varying systems[J]. Automatica, ISSN: 0005-1098, 2002, 38(5): 805-814.
- [9] 冯玉昌, 史冬琳. 无模型自适应预测控制在过热汽温控制中的应用[J]. 热能动力工程, 2011, 26(4): 428-431.
- FENG Yu-cang, SHI Dong-lin. Application of the model-free self-adaptive prediction control in superheated steam temperature control[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(4): 428-431.
- [10] WANG Guo-liang, YAN Wei-wu, CHEN Shi-he, ZHANG Xi, SHAO Hui-he. Multi-model predictive control of ultra-supercritical coal-fired power unit[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering(English), ISSN: 1004-9541, 2014, 22(7): 782-787.
- [11] ZHANG F, ZHANG Y, WU X, et al. Control of ultra-supercritical once-through boiler-turbine unit using MPC and ESO approaches[J]. IET Control Technology and Applications, ISSN: 1751-8644, 2017: 994-999.
- [12] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制-现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.
- XI Yu-geng, LI De-wei, LIN Shu. Model predictive control: status quo and challenges[J]. Journal of Automation, 2013, 39(3): 222-236.
- [13] 邹涛, 潘昊, 丁宝苍, 等. 双层结构预测控制研究进展[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(10): 1327-1337.
- ZOU Tao, PAN Hao, DING Bao-cang, et al. Research progress on predictive control of double-layer structure[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(10): 1327-1337.
- [14] QIN S J, BADGWELL A. A survey of industrial model predictive control technology[J]. Control Engineering Practice, 2003, 7(11): 733-764.
- [15] 方吉吉. 先进预测控制在超超临界机组机炉协调系统上的应用[J]. 热能动力工程, 2013, 28(4): 381-385.
- FANG Ji-ji. Application of an advanced predictive control in turbine-boiler coordination systems destined for ultrasupercritical units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2013, 28(4): 381-385.
- [16] 贺勇, 李炳楠, 张广涛, 等. 火电机组间接建模策略研究[J]. 热力发电, 2019, 48(2): 83-89.
- HE Yong, LI Bing-nan, ZHANG Guang-tao, et al. Indirect modeling strategy for thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(2): 83-89.
- [17] 钱积新, 徐祖华. 预测控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- Qian Ji-xin, Xu Zu-hua. Predictive control[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.

(金圣迪 编辑)