第 25 卷 第 1 期　　中 国 电 机 工 程 学 报　　Vol.25 No.1 Jan. 2005
2005 年 1 月　　Proceedings of the CSEE　　©2005 Chin.Soc.for Elec.Eng.

文章编号：0258-8013（2005）01-0147-05　中图分类号：TP272；TK323　文献标识码：A　学科分类号：470·20

机炉协调系统的非线性输出跟踪控制

房　方，谭　文，刘吉臻

（华北电力大学控制科学与工程学院，北京市　昌平区 071003）

NONLINEAR OUTPUT TRACKING CONTROL FOR THE COORDINATED SYSTEM OF BOILER-TURBINE UNITS

FANG Fang, TAN Wen, LIU Ji-zhen

（College of Control Science & Technology, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China）

ABSTRACT: To trail off the multivariable, nonlinear and coupling behavior of boiler-turbine units, and to improve the load-following capability of coordinated control system, a nonlinear stable inversion theory and a multivariable output tracking control structure are used to design a nonlinear output-tracking controller for a benchmark nonlinear boiler-turbine unit model. The controller is composed of stable inversion and feedback controller. The stable inversion is implemented as a feedforward controller to improve the load-following capability, and the feedback controller is utilized to guarantee the stability and robustness of the whole system. Simulation tests show that the nonlinear output tracking structure can be applied to a wide range and have good decouple performance. The electric output and the steam pressure can track the desired trajectory accurately.

KEY WORDS: Boiler-turbine units；Coordinated control；Output tracking control；Nonlinear stable inversion

摘要：为了克服非线性环节以及能量供需之间关联耦合作用对协调系统控制品质的影响，提高单元制发电机组的快速负荷响应能力，本文基于非线性稳定逆原理，采用非线性输出跟踪控制结构，针对一个通用的非线性协调系统模型，设计出非线性输出跟踪控制器。该控制器由稳定逆系统及反馈控制器两部分组成，稳定逆系统相当于前馈部分，用于提高系统的响应速度；反馈控制器保证了系统的稳定。在不同负荷下的仿真试验表明，依据非线性输出跟踪控制策略设计出的控制系统具有良好的解耦效果和设定点跟踪能力。

关键词：单元机组；协调控制；输出跟踪控制；非线性稳定逆

1　引言

作为单元机组的主控系统，机炉协调控制系统对于机组运行的安全性、经济性以及机组的调峰、调频能力都有直接的影响。目前，对协调控制系统的优化研究主要局限于线性控制理论，途径主要有三个：①控制器的鲁棒设计和控制参数的鲁棒整定[1-3]；②控制策略/结构的优化[4-6]；③智能控制方法的应用[7-8]。但是，机炉协调系统被控对象是本质非线性的，随工况变化，系统的动静态特性均有较大改变，如何在不同的工况点获得同样良好的控制品质（包括快速的负荷响应能力，稳定的压力设定点跟踪能力，不同输入通道之间的解耦能力等）是我们在协调控制系统研究中需要进一步解决的问题。

将非线性控制思想应用于机炉协调控制是近来理论界的研究热点。如反馈线性化方法[9-10]、反步设计方法[11]以及增益调度方法[12]的研究等，尽管大多数非线性方法仍然处于仿真试验阶段，其研究深度及算法的实用性还不及线性化方法，但作为能够从本质上解决大范围、全工况优化运行的控制方案，非线性控制策略为协调控制系统的研究提供了很好的思路。

本文从克服非线性环节对协调控制系统性能的影响，减弱不同通道之间的关联耦合作用，同时使系统具有较快的设定点跟随能力的角度，将稳定逆理论及非线性输出跟踪结构引入到机炉协调控制系统的设计中，针对一个典型的非线性协调系统模型，求取其稳定逆的解，并结合已求得的 $\boldsymbol{H}_\infty$反馈控制器，建立了系统的非线性输出跟踪控制结构，通过在不同工况点的仿真试验以及与 $\boldsymbol{H}_\infty$单回路控制器的控制效果比较，验证了非线性输出跟踪控制结构的解耦效果及设定点快速响应能力。

基金项目：教育部博士点基金项目（20020079007）。

2 非线性输出跟踪方法

2.1 稳定逆问题

研究多变量非线性系统

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{X}) + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{X})\boldsymbol{U} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{H}(\boldsymbol{X}) \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{X} = [x_1, x_2, \cdots, x_n]$；$\boldsymbol{U} = [u_1, u_2, \cdots, u_m]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{Y} = [y_1, y_2, \cdots, y_m]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{X}) = [g_1(\boldsymbol{X}), g_2(\boldsymbol{X}), \cdots, g_m(\boldsymbol{X})]$；$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{X}) = [h_1(\boldsymbol{X}), h_2(\boldsymbol{X}), \cdots, h_m(\boldsymbol{X})]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{X})$，$\boldsymbol{g}_i (i = 1, 2, \cdots, m)$ 是充分光滑的向量场；$h_i (i = 1, 2, \cdots, m)$ 是充分光滑的标量函数。

稳定逆问题可描述为[13]：对于给定的光滑输出参考轨迹 $\boldsymbol{Y}_d(t) \in L_1 \cap L_2$，能够找到控制输入 $\boldsymbol{U}_d(t)$ 以及状态轨迹 $\boldsymbol{X}_d(t)$，使得：① $\boldsymbol{U}_d(t)$ 和 $\boldsymbol{X}_d(t)$ 满足微分方程：$\dot{\boldsymbol{X}}_d(t) = \boldsymbol{f}[\boldsymbol{X}_d(t)] + \boldsymbol{G}[\boldsymbol{X}_d(t)]\boldsymbol{U}_d(t)$；②能够获得精确输出跟踪：$\boldsymbol{H}[\boldsymbol{X}_d(t)] = \boldsymbol{Y}_d(t)$；③ $\boldsymbol{U}_d(t)$ 和 $\boldsymbol{X}_d(t)$ 是有约束的，并且当 $t \to \pm\infty$ 时：$\boldsymbol{U}_d(t) \to 0$；$\boldsymbol{X}_d(t) \to 0$。

此时，我们称 $\boldsymbol{U}_d(t)$ 和 $\boldsymbol{X}_d(t)$ 为给定参考轨迹 $\boldsymbol{Y}_d(t)$ 的稳定逆的解。为了对稳定逆问题进行求解，对于在平衡点 $\boldsymbol{X}_0$ 的邻域内的所有 $\boldsymbol{X}$，定义系统的相对阶向量 $\boldsymbol{r} = [r_1, r_2, \cdots, r_m]^{\mathrm{T}}$

$$L_{g_i} L_f^k h_i(x) \equiv 0, \quad (0 \le k \le r_i - 2,\ i = 1, 2, \cdots, m) \tag{3}$$

$$L_{g_i} L_f^{r_i - 1} h_i(x_0) \neq 0, \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \tag{4}$$

式中 $L_{g_i} L_f^k h_i(\boldsymbol{x}) = \dfrac{\partial (L_f^k h_i(x))}{\partial x} \cdot \boldsymbol{g}_i(x)$ 代表 $h_i(x)$ 对向量场 $\boldsymbol{f}$ 和 $\boldsymbol{g}_i$ 的高阶李导数。

若相对阶向量满足

$$r_1 + r_2 + \cdots + r_m = n \tag{5}$$

则可以进一步定义

$$\boldsymbol{\xi} = [y_1, \dot{y}_1, \cdots, y_1^{(r_1 - 1)}, y_2, \dot{y}_2, \cdots, y_2^{(r_2 - 1)}, \cdots, y_m^{(r_m - 1)}]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

$$[\boldsymbol{\xi}] = \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X}) \tag{7}$$

输入/输出间新的动态响应关系可描述为

$$\boldsymbol{Y}^{(r)} = \boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi})) + \boldsymbol{\beta}(\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi})) \tag{8}$$

式中

$$\boldsymbol{\beta}(\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi}))_{m \times m} = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1 - 1}[\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi})] & \cdots & L_{g_m} L_f^{r_1 - 1}[\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi})] \\ L_{g_1} L_f^{r_2 - 1}[\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi})] & \cdots & L_{g_m} L_f^{r_2 - 1}[\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi})] \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ L_{g_1} L_f^{r_m - 1}[\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi})] & \cdots & L_{g_m} L_f^{r_m - 1}[\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi})] \end{bmatrix}$$

是非奇异的，$\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi})) = [L_f^{r_1}[\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi})] \quad L_f^{r_2}[\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi})] \quad \cdots \quad L_f^{r_m}[\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi})]]^{\mathrm{T}}$。

令 $\boldsymbol{Y}(t) = \boldsymbol{Y}_d(t)$，即可得到

$$\boldsymbol{\xi} = \boldsymbol{\xi}_d = [y_{d1}, \dot{y}_{d1}, \cdots, y_{d1}^{(r_1 - 1)}, y_{d2}, \dot{y}_{d2}, \cdots, y_{d2}^{(r_2 - 1)}, \cdots, y_{dm}^{(r_m - 1)}]^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{Y}^{(r)}(t) = \boldsymbol{Y}_d^{(r)}(t) \tag{10}$$

结合(7)、(8)、(9)及(10)式，得到稳定逆系统的解

$$\boldsymbol{X}_d = \boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi}_d) \tag{11}$$

$$\boldsymbol{U}_d = [\boldsymbol{\beta}(\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi}_d))]^{-1}[\boldsymbol{Y}_d^{(r)} - \boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi}_d))] \tag{12}$$

2.2 非线性输出跟踪控制结构

一旦稳定逆问题得解，我们就可以通过图 1 所示的结构实现非线性输出跟踪控制[14]。

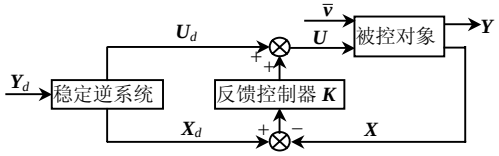


图 1 基于稳定逆的非线性输出跟踪控制结构
Fig.1 Structure of inversion-based output tracking control system

定义 $\bar{\boldsymbol{X}}(t) = \boldsymbol{X}_d(t) - \boldsymbol{X}(t)$，$\bar{\boldsymbol{U}}(t) = \boldsymbol{U}(t)_d - \boldsymbol{U}(t)$，$\bar{\boldsymbol{Y}}(t) = \boldsymbol{Y}_d(t) - \boldsymbol{Y}(t)$，则图 1 所示系统的误差动态可描述为

$$\dot{\bar{\boldsymbol{X}}} = \boldsymbol{f}(\bar{X}) + \boldsymbol{G}(\bar{X})\boldsymbol{U} + \boldsymbol{G}(\bar{X}_d)\bar{\boldsymbol{U}} + \boldsymbol{P}\bar{\boldsymbol{v}} \tag{13}$$

$$\bar{\boldsymbol{Y}} = \boldsymbol{H}(\bar{X}) \tag{14}$$

式中 $\boldsymbol{f}(\bar{\boldsymbol{X}}) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{X}_d) - \boldsymbol{f}(\boldsymbol{X})$；$\boldsymbol{G}(\bar{\boldsymbol{X}}) = \boldsymbol{G}(\boldsymbol{X}_d) - \boldsymbol{G}(\boldsymbol{X})$；$\boldsymbol{H}(\bar{\boldsymbol{X}}) = \boldsymbol{H}(\boldsymbol{X}_d) - \boldsymbol{H}(\boldsymbol{X})$；$\boldsymbol{P}$ 是扰动权系数阵；$\bar{\boldsymbol{v}}$ 是有界扰动，对于给定的正实向量 $\varepsilon_v > 0$，$\bar{\boldsymbol{v}}$ 满足：$\|\bar{\boldsymbol{v}}\|_{L2} < \varepsilon_v$。

假设闭环系统中从 $\bar{\boldsymbol{v}}$ 到 $\bar{\boldsymbol{Y}}$ 的非线性映射为：$\bar{\boldsymbol{Y}} = \boldsymbol{\varphi}(\cdot)\bar{\boldsymbol{v}}$，则可以选择适当的反馈控制器 $\boldsymbol{k}$（例如 $\boldsymbol{H}_\infty$ 控制器），使得闭环系统满足 $\|\bar{\boldsymbol{Y}}\|_{L2} < \|\boldsymbol{\varphi}(\cdot)\|_\infty \cdot \|\bar{\boldsymbol{v}}\|_{L2}$，由于 $\|\boldsymbol{\varphi}(\cdot)\|_\infty \cdot \|\bar{\boldsymbol{v}}\|_{L2}$ 是有界的，这也就意味着对于 $\varepsilon > 0$，$\|\bar{\boldsymbol{Y}}\|_{L2} < \gamma\varepsilon_v = \varepsilon$。从稳定逆问题的定义可知，$\boldsymbol{U}_d(t)$ 和 $\boldsymbol{X}_d(t)$ 是受约束有界的，在反馈控制器作用下 $\bar{\boldsymbol{X}}(t)$ 也是有界的，因此 $\boldsymbol{X}(t)$ 一定是有界的，所以系统能够获得稳定的 ε–跟踪。

稳定逆系统为非线性输出跟踪控制提供了标称情况下的前馈输入 $\boldsymbol{U}_d(t)$ 以及期望的状态轨迹 $\boldsymbol{X}_d(t)$，二者均是根据系统的内部结构由期望的输出轨迹预先确定的，与系统的初始条件及反馈状态信号无关。

3　机炉协调系统的非线性输出跟踪

3.1　机炉协调系统模型

机炉协调系统模型是协调控制系统设计的基础。Astrom(1987Bta)模型[14]是一种很具代表性的机炉协调系统模型，被国内外的研究人员广泛引用。该模型可用如下方程描述

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ -0.016x_1^{9/8}-0.1x_2\\ 0.19x_1/85\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0.9 & -0.0018x_1^{9/8} & -0.15\\ 0 & 0.073x_1^{9/8} & 0\\ 0 & -1.1x_1/85 & 141/85\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}u_1\\ u_2\\ u_3\end{bmatrix} \tag{15}$$

式中　x_1 为汽包压力；x_2 为输出功率；x_3 为汽包内汽水混合物密度；u_1 为燃油调节阀开度；u_2 为汽轮机调节阀开度；u_3 为给水调节阀开度。

实际系统的三个输出：汽包压力 P，输出功率 N，以及汽包水位 L 分别为

$$P=x_1 \tag{16}$$

$$N=x_2 \tag{17}$$

$$L=0.05(0.13073x_3+100\alpha_{cs}+(q_e/9-67.975)) \tag{18}$$

其中，质量系数 α_{cs}，蒸汽消耗率 q_e 分别为

$$\alpha_{cs}=\frac{(1-0.001538x_3)(0.8x_1-25.6)}{x_3(1.0394-0.0012304x_1)} \tag{19}$$

$$q_e=(0.854u_2-0.147)x_1+45.59u_1-2.514u_3-2.096 \tag{20}$$

输入 u_1、u_2、u_3 的速率和幅值限制如下

$$\left|\frac{du_1}{dt}\right|\le 0.007/\sec,\quad 0.0\le u_1\le 1.0 \tag{21}$$

$$-1.0\le\frac{du_2}{dt}\le 0.1/\sec,\quad 0.0\le u_2\le 1.0 \tag{22}$$

$$\left|\frac{du_3}{dt}\right|\le 0.05/\sec,\quad 0.0\le u_3\le 1.0 \tag{23}$$

3.2　协调控制系统的非线性输出跟踪设计

应用非线性输出跟踪控制策略，对机炉协调系统(15)-(23)进行控制系统设计。

首先求稳定逆系统的解。定义系统的输出方程为

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{H}(x)=[x_1,x_2,x_3]^{\mathrm{T}} \tag{24}$$

计算系统的相对阶向量 (r_1,r_2,r_3) 如下

$$\begin{cases}L_f h_1(x)=\dfrac{\partial h_1(x)}{\partial x}\boldsymbol{f}(x)=0\\ L_{g_1}h_1(x)=\dfrac{\partial h_1(x)}{\partial x}\boldsymbol{g}_1(x)=0.9\end{cases}\Rightarrow r_1=1 \tag{25}$$

$$\begin{cases}L_f h_2(x)=\dfrac{\partial h_2(x)}{\partial x}\boldsymbol{f}(x)=-0.016x_1^{9/8}-0.1x_2\\ L_{g_2}h_2(x)=\dfrac{\partial h_2(x)}{\partial x}\boldsymbol{g}_2(x)=0.073x_1^{9/8}\end{cases}\Rightarrow r_2=1(x_1\ne 0) \tag{26}$$

$$\begin{cases}L_f h_3(x)=\dfrac{\partial h_3(x)}{\partial x}\boldsymbol{f}(x)=0.19x_1/85\\ L_{g_3}h_3(x)=\dfrac{\partial h_3(x)}{\partial x}\boldsymbol{g}_3(x)=141/85\end{cases}\Rightarrow r_3=1 \tag{27}$$

当 $x_1\ne 0$ 时，$r_1+r_2+r_3=3$，$\boldsymbol{\beta}(x)_{3\times 3}=\begin{bmatrix}0.9 & -0.0018x_1^{9/8} & -0.15\\ 0 & 0.073x_1^{9/8} & 0\\ 0 & -1.1x_1/85 & 141/85\end{bmatrix}$ 是非奇异的。此时定义，$\boldsymbol{\xi}=[y_1,y_2,y_3]^{\mathrm{T}}$，则有

$$[\boldsymbol{\xi}]=\begin{bmatrix}y_1\\ y_2\\ y_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\end{bmatrix}=\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X}),\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi})=\boldsymbol{X} \tag{28}$$

输入/输出间新的动态响应关系可描述为

$$\begin{bmatrix}\dot{y}_1\\ \dot{y}_2\\ \dot{y}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ -0.016x_1^{9/8}-0.1x_2\\ 0.19x_1/85\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0.9 & -0.0018x_1^{9/8} & -0.15\\ 0 & 0.073x_1^{9/8} & 0\\ 0 & -1.1x_1/85 & 141/85\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}u_1\\ u_2\\ u_3\end{bmatrix} \tag{29}$$

令 $\boldsymbol{Y}(t)\equiv\boldsymbol{Y}_d(t)$，即可得到稳定逆系统的解

$$\boldsymbol{X}_d=\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi}_d)=\begin{bmatrix}x_{d1}\\ x_{d2}\\ x_{d3}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}y_{d1}\\ y_{d2}\\ y_{d3}\end{bmatrix} \tag{30}$$

$$\boldsymbol{U}_d=[\boldsymbol{\beta}(\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi}_d))]^{-1}[\dot{\boldsymbol{Y}}_d-\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\Phi}^{-1}(\boldsymbol{\xi}_d)))]=\begin{bmatrix}10/9 & 0.0274+0.0178x_{d1}^{-1/8} & 85/846\\ 0 & 13.6986x_{d1}^{-9/8} & 0\\ 0 & 0.1069x_{d1}^{-1/8} & 85/141\end{bmatrix}\left(-\begin{bmatrix}0\\ -0.016x_{d1}^{9/8}-0.1x_{d2}\\ 0.19x_{d1}/85\end{bmatrix}+\dot{\boldsymbol{Y}}_d\right) \tag{31}$$

反馈控制器 K 的设计参照文献[16]中的环路成型 $\boldsymbol{H}_\infty$ 方法，并将最终设计出的 $\boldsymbol{H}_\infty$ 控制器以等效的多变量 PI 控制器代替。这里仅给出控制器的设计结果，设计过程请参考原文献。

$$\boldsymbol{K}(s)=\begin{bmatrix}0.0736+0.0034/s & 0 & 0.9338+0.0282/s\\ 0 & 0.00331+0.0121/s & 0\\ 0 & 0 & 5.6035+0.1694/s\end{bmatrix} \tag{32}$$

该控制器是以平衡点 [x_1^0=108, x_2^0=66.65,

x_3^0=428]为标称工作点进行设计的。

4 仿真研究及结果分析

对于以上所设计的协调控制系统的非线性输出跟踪结构进行仿真检验，仿真过程均假设在 t=0 时刻，系统稳定在某一平衡工作点。

第 1 种情况：系统工作在平衡点[x_1^0=108, x_2^0=66.65, x_3^0=428]，控制器的初始输出为：[u_1^0=0.34, u_2^0=0.69, u_3^0=0.435]，此时系统的标称参数分别为：汽包压力 P=108Kg/cm^2，输出功率 N = 66.65 MW，汽包水位 L=0m。在 t=100s 时，x_1 受到幅值为 3 的阶跃扰动；从 t=400s 开始，汽包压力的给定值从 108Kg/cm^2 以 0.2Kg/cm^2/s 的速率上升到 123Kg/cm^2。系统的输出响应曲线如图 2 所示，图中的实线为本文采用的非线性输出跟踪控制结构的控制效果，虚线为文献[16]中设计的 $\boldsymbol{H}_\infty$单回路控制结构的控制效果，通过比较可以看出，$\boldsymbol{H}_\infty$控制器的抗干扰能力略优于本文使用的方法，但非线性输出跟踪方法具有更好的压力设定点跟踪能力，同时能更有效的消除对功率输出的耦合作用。

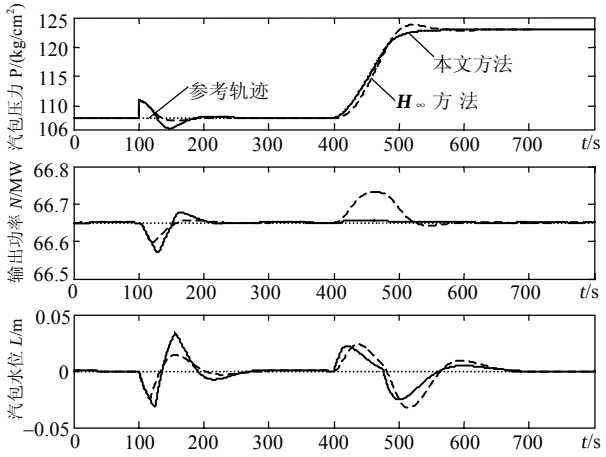


图 2 第 1 种情况下的系统响应曲线
Fig.2 Time responses for case 1

第 2 种情况：系统工作在平衡点[x_1^0 = 129.6, x_2^0 = 106.8, x_3^0 = 355.2]，控制器的初始输出为：[u_1^0 = 0.505, u_2^0 = 0.828, u_3^0 = 0.663]，此时系统的标称参数分别为：汽包压力 P = 129.6 Kg/cm^2，输出功率 N = 106.8 MW，汽包水位 L = 0 m。在 t=100s 时，x_2 受到幅值为 5 的阶跃扰动；从 t=400s 开始，输出功率的定值从 106.8MW 以 5MW/s 的速率下降为 76.8 MW。系统的输出响应曲线如图 3 所示。从图中看出，$\boldsymbol{H}_\infty$方法和非线性输出跟踪方法对负荷指令的跟踪性能相似，但非线性输出跟踪方法对汽包压力的解耦效果更为明显。

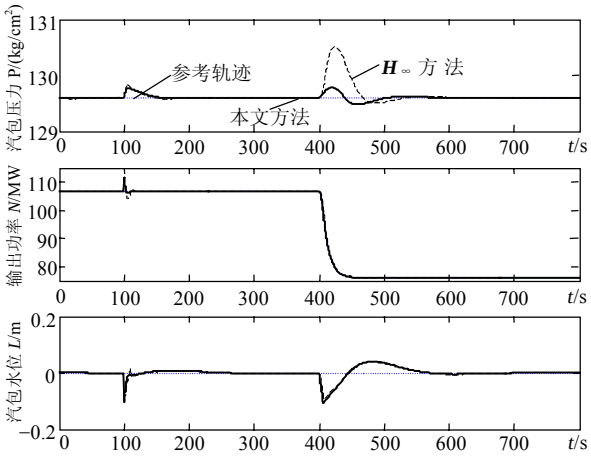


图 3 第 2 种情况下的系统响应曲线
Fig.3 Time responses for case 2

第 3 种情况：系统工作在平衡点[x_1^0 = 118.8, x_2^0 = 85.06, x_3^0 = 398.2]，控制器的初始输出为：[u_1^0 = 0.418, u_2^0 = 0.759, u_3^0 = 0.543]，此时系统的标称参数分别为：汽包压力 P = 118.8 Kg/cm^2，输出功率 N = 85.06 MW，汽包水位 L = 0 m。从 t=50s 开始，汽包压力的给定值从 118.8Kg/cm^2 以 0.2Kg/cm^2/s 的速率下降到 86.4Kg/cm^2、同时输出功率的定值从 85.06MW 以 5MW/s 的速率下降到 36.65MW；在 t=400 时，输出功率的给定值又以 5MW/s 的速率上升到 66.65MW。系统的输出响应曲线如图 4 所示。对于负荷指令和压力设定点的同时变化，非线性输出跟踪方法依然具有很好的跟踪性能；对于水位信号扰动的抑制，从幅值上看，$\boldsymbol{H}_\infty$控制方法略优于非线性输出跟踪方法。

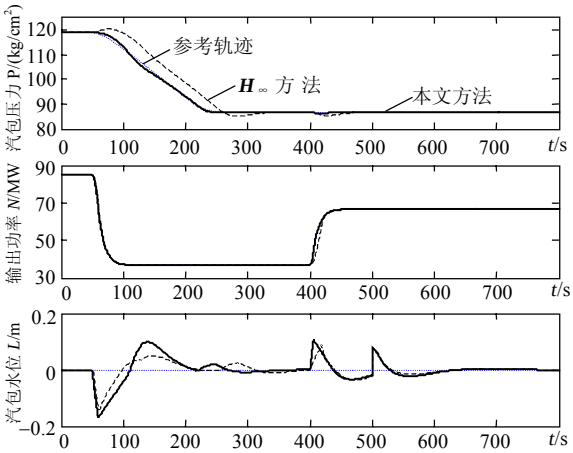


图 4 第 3 种情况下的系统响应曲线
Fig.4 Time Responses for Case 3

为了减弱执行器的输出约束(21)-(23)对于系统的控制品质的影响，在仿真过程中-主要采取了两方

面的措施，首先在反馈控制器的输出端加入了抗积分饱和的环节[17]，其次对于设定点的大范围变化进行适当的速率限制。

5　结论

（1）稳定逆问题的求解以及反馈控制器的设计是非线性输出跟踪控制结构设计的两个关键环节。由于非线性系统本身具有特殊性，因此稳定逆问题的求解针对不同的对象，往往需要采用不同的策略，通用性不强。反馈控制器的性能对非线性输出跟踪控制结构的稳定性及抗干扰能力具有决定性影响。

（2）从结构的角度分析非线性输出跟踪控制可知：由于反馈控制作用 $K(X_d(t)-X(t))$与前馈控制作用 $U_d(t)$并存，使得该结构具有了前馈—反馈控制系统快速设定点跟随能力的特点。但是由于前馈信号 $U_d(t)$对于状态、输出扰动是相对独立的，因此在实际仿真过程中非线性输出跟踪结构的抗干扰能力并不是很突出。

参考文献

[1] Chen K W, Asok R. Robust wide-range control of steam-electric power plants[J]. IEEE Transactions on Control System Technology，1997，5(1)：74-88.

[2] Tan W, Marquez H J, Chen T W. Multivariable robust controller design for a boiler system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology，2002，10(5)：735-742.

[3] Frederic L M, Gilles D. Design of a controller for a steam generator of a power plant using robust control and genetic algorithm [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications, Giasgow, Scotland, U. K，2002.

[4] Garduno-Ramirez R, Lee K Y. Multiobjective optimal power plant operation through coordinate control with pressure set point scheduling[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion，2001，16(2)：115-122.

[5] 于达仁，翁一武，王仲奇. 火电单元机组的柔性控制 [J]. 中国电机工程学报，2002，22(7)：129-133.
Yu Daren, Weng Yiwu, Wang Zhongqi. A study on flexible control method for a boiler-turbine units[J]. Proceedings of the CSEE，2002，22(7)：129-133.

[6] Prasad G, Irwin G W, Swidenbank E, *et al*. Plant-wide predictive control for a thermal power plant based on a physical plant model. IEE Proc. -Control Theory Appl.，2002，147(5)：523-537.

[7] Beheshti M T H, Rezaee M M. A new hybrid boiler master controller[C] . Proceedings of American Control Conference, Anchorage, AK, 2002.

[8] Prasad G, Swidenbank E, Hogg B. A neural net model-based multivariable long-range predictive control strategy applied in thermal power plant control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1998，13(2)：176-182.

[9] Bolek W, Sasiadek J, Wisniewski T. Linearization of non-linear MIMO model of large power plant station[C]. Proceedings of American Control Conference, Chicago, Illinois，2002.

[10] 房方，刘吉臻，谭文. 单元机组协调系统的非线性内模控制[J]. 中国电机工程学报，2004，24(4)：195-199.
Fang Fang, Liu Jizhen, Tan Wen. Nonlinear intermal model control for the boiler-turbine coordinate systems of power unit[J]. Proceedings of the CSEE，2004，24(4)：195-199.

[11] Bolek W, Sasiadek J and Wisniewski T. Adaptive BackStepping Control of a Power Plant Station Model[C]. IFAC 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain，2002.

[12] 黄祖毅，李东海，姜学志. 机炉协调的增益调度伺服系统[J]. 中国电机工程学报，2003，23(10)：191-198.
Huang Zhu-yi, Li Dong-hai, Jiang Xue-zhi. Gain scheduled servo system for boiler-turbine unit[J]. Proceedings of the CSEE，2003，23(10)：191-198.

[13] Zhao Hongchao，Chen Degang. A finite energy property of stable inversion to nonminimum phase nonlinear systems[J] . IEEE Transactions on Automatic Control，1998，43(8)：1170-1174.

[14] Santosh D, Degang C, Brad P, Nonlinear inversion-based output tracking[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1996, 41(7)：930-942.

[15] Bell R D, Åström K J. Dynamic models for boiler-turbine-alternator units : data logs and parameter estimation for a 160MW unit[R]. Report TFRT-3192, Dept. of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987.

[16] Tan W, Niu Y G, Liu J. Z. Robust control for a nonlinear boiler-turbine system[J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(6)：863-867.

[17] Åström K J, Wittenmark B. Computer-controlled systems-theory and design (third edition)[M]. Englewood Cliffs, NJ：Prentice Hall, 1997.

收稿日期：2004-08-26。

作者简介：

房　方(1976-)，男，博士研究生，研究方向为大机组智能优化控制，火电机组非线性控制；

谭　文(1969-)，男，教授，博士，研究方向为鲁棒及 H_∞控制，工业过程控制；

刘吉臻(1951-)，男，教授，博士生导师，研究方向为大机组智能优化控制，火电厂综合自动化。