

· 经验交流 ·

热风炉燃料流量神经网络解耦控制

袁晓红,王旭仁,柏 玲

(首都师范大学 信息工程学院,北京 100048)

摘要:热风炉系统通过焦炉煤气和高炉煤气分别控制热风炉拱顶温度和废气温度,二者在一个系统内燃烧,彼此相互交叉、相互影响。应用神经网络解耦控制技术,对燃料流量控制进行解耦,解耦后的子系统变为单变量系统,以实现燃料流量的最优控制和拱顶温度及废气温度的平稳控制。采用前馈补偿器完成解耦控制,解耦补偿器采用 BP 神经网络结构。根据现场实际数据仿真验证,表明该控制策略具有较好的动态跟踪特性,能满足复杂多变量控制系统的控制要求。

关键词:热风炉;神经网络;解耦控制;最优控制

中图分类号: TF325.64 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7059(2009)03-0063-03

Neural network decoupling control for fuel flow of hot blast stove

YUAN Xiao-hong, WANG Xu-ren, BA ILing

(College of Information Engineering, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Based on neural network decoupling control technique, fuel flow control of hot blast stove was decoupled and decoupled subsystem was transformed into a single variable system. Therefore, optimization control of fuel flow, and stable control of arch temperature and waste gas temperature were realized. Decoupling control was achieved by use of feedforward compensator with BP neural network structure. Simulation results show that the control strategy has better dynamic tracking property and can meet the requirement for complex multivariable control system.

Key words: hot blast stove; neural network; decoupling control; optimization control

0 引言

热风炉控制主要包括燃烧控制和送风控制。燃烧控制是指在热风炉内燃烧焦炉煤气和高炉煤气,使炉内达到满足向高炉鼓风的蓄热量和温度。控制目标是热风炉的拱顶温度和废气温度,控制输入分别是焦炉煤气流量和高炉煤气流量以及与之对应的助燃空气流量。由于二种煤气流量相互影响着拱顶温度和废气温度,因此引入多变量解耦控制算法来消除其影响,实现燃料流量的最优控制^[1]。本文只讨论热风炉的燃烧控制。

1 热风炉燃烧控制原理

在热风炉燃烧初始阶段,以较大的煤气量以

及相应的助燃空气量进行快速加热,使热风炉拱顶温度和废气温度迅速达到设定值,此阶段的高炉煤气流量的设定值由系统操作画面直接设定,焦炉煤气流量设定值由“焦/高”比乘以高炉煤气流量设定,助燃空气流量设定值由高炉煤气对应的空燃比乘以高炉煤气流量加上焦炉煤气对应的空燃比乘以焦炉煤气流量。当热风炉的废气温度和拱顶温度接近设定值后,系统进入温度控制管理期,热风炉的废气温度由高炉煤气流量控制,热风炉的拱顶温度由焦炉煤气流量控制,当温度控制管理期结束后,热风炉燃烧结束,进入送风期或闷炉期。

收稿日期: 2008-10-13; 修改稿收到日期: 2009-01-07

基金项目: 北京市教育委员会科技发展计划项目(KM200710028017)

作者简介: 袁晓红(1964-),女,辽宁大连人,副教授,主要研究方向为计算机控制与算法。

2 神经网络解耦控制

解耦控制是实现多变量系统最优控制的一种比较有效的方法。要完成解耦,一般有二种方法,一种是系统状态反馈解耦,另一种是前馈补偿器解耦。本系统中采用引入神经网络补偿器的方法,对二输入(高炉煤气流量和焦炉煤气流量)、二输出(废气温度和拱顶温度)的多变量系统进行解耦,对解耦后的子系统进行单变量控制,使各个子系统都能达到预期的控制目标。

2.1 神经网络解耦算法

设 N 维多变量系统的数学模型表达式为:

$$M(z^{-1}) = \begin{bmatrix} M_{11}(z^{-1}) & M_{12}(z^{-1}) & \dots & M_{1N}(z^{-1}) \\ M_{21}(z^{-1}) & M_{22}(z^{-1}) & & M_{2N}(z^{-1}) \\ \dots & & \dots & \dots \\ M_{N1}(z^{-1}) & M_{N2}(z^{-1}) & \dots & M_{NN}(z^{-1}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $M_{ij}(z)$ 为第 j 个输入变量对第 i 个输出变量的传递函数。引入神经网络补偿器,使该补偿器与原系统组成广义系统并达到解耦,这样广义系统的矩阵传递函数式(1)将变为对角有理式矩阵 $M(z^{-1})$:

$$M(z^{-1}) = \begin{bmatrix} M_{11}(z^{-1}) & & & \\ & M_{22}(z^{-1}) & & \\ & & \ddots & \\ & & & M_{NN}(z^{-1}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$M_{ij}(z^{-1})$ 是对角线上的传递函数,是神经网络补偿器的训练目标。

令 $M(z^{-1}) = M(z^{-1})G(z^{-1})$, 由式(2)可得出:

$$G(z^{-1}) = M^{-1}(z^{-1}) \times \begin{bmatrix} M_{11}(z^{-1}) & & & \\ & M_{22}(z^{-1}) & & \\ & & \ddots & \\ & & & M_{NN}(z^{-1}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)可知,只要 $M(z^{-1})$ 可逆,原系统即可以解耦。解耦补偿器采用 BP 神经网络,将其输出层定义为 N 个节点,分别记为 w_1, w_2, \dots, w_N , 作用于系统 M ; 将输入层定义为 u_1, u_2, \dots, u_N 。同时,还要考虑 k 时刻前的 w, u 。隐含层采用单层结构,其节点数与 $M(z^{-1})$ 的伴随矩阵和对角矩阵有关^[2]。

2.2 神经网络训练目标

采用最小二乘法完成 BP 学习算法,即网络的实际输出值与期望输出值的均方差最小,因此解耦控制的训练目标可取为:

$$\min E = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^n [y_r - y_{nr}]^2 \quad (4)$$

式中, y_r 为网络补偿器 G 的输出作用于第 r 个输出量的实际值; y_{nr} 为由式(4)计算的对象第 r 个输出量的目标输出。

2.3 神经网络补偿器训练算法

根据 BP 神经网络公式有:

$$u_b(k) = \sum_{c=1}^n w_{cb} x_c(k) \quad (5)$$

$$x_b(k) = f(u_b) \quad (6)$$

式中, $u_b(k)$ 为节点 b 在 k 时刻的输入; w_{cb} 为节点 c 到节点 b 的连接权值; $x_c(k)$ 为补偿器内节点 c 在 k 时刻的输出; $x_b(k)$ 为节点 b 在 k 时刻的输出。

根据式(4)算法原则,使 E 最小,取 E 对 w_{cb} 的偏导数,最终得出:

$$w_{cb}(k+1) = \frac{\partial E}{\partial w_{cb}(k)}$$

式中, η 为学习率。

解耦之后各子系统变为单输入单输出系统,可采用单变量控制。

2.4 神经网络模型结构

根据热风炉燃烧工艺过程,网络模型的输入层有 4 个神经元,输出层有 2 个神经元,隐含层有 6 个神经元,网络结构如图 1 所示。

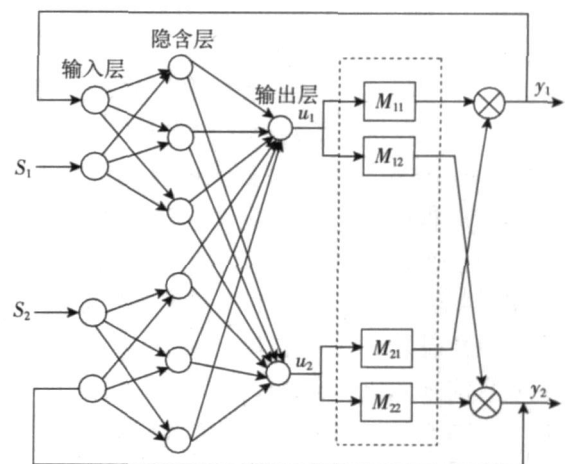


图 1 神经网络结构

Fig. 1 Construction of neural network

S_1, S_2 —焦炉、高炉煤气流量设定值; u_1, u_2 —焦炉、高炉煤气流量输出值; y_1 —拱顶温度测量值; y_2 —废气温度测量值

3 单变量预测控制

3.1 预测输出

多变量控制系统应用上述方法解耦后变成多个单输入单输出子系统组成的系统,子系统的传递函数为:

$$y_n(k) = m(z^{-1})u(k) \tag{7}$$

式中, $y_n(k)$ 为预测输出; $m(z^{-1})$ 为系数向量; $u(k)$ 为输入。

定义, D_0 为 $k-1$ 时刻对应的脉冲序列矩阵; D_1 为 k 时刻对应的脉冲序列矩阵; $U_{k-1}(k)$ 为 k 时刻前的输入矩阵; $U_k(k)$ 为系统在 k 时刻的输入矩阵; $Y_n(k)$ 为系统在 k 时刻的预测输出矩阵。

根据式 (7) 和上述定义, $Y_n(k)$ 可以表示为:

$$Y_n(k) = D_0 U_{k-1} + D_1 U_k \tag{8}$$

将式 (8) 作矩阵变换

$$Y_n(k) = D_0 U_{k-1} + B(k) + Qe(k) \tag{9}$$

式中, $Y_n(k)$ 为系统在 k 时刻的预测输出; B 为脉冲函数对应的响应矩阵; (k) 为 k 时刻待求基函数系数矩阵; Q 为系数矩阵; $e(k)$ 为系统在 k 时刻的偏差^[3]。

3.2 控制器设计

系统性能指标一般定义为:

$$\min E = \sum_{h=1}^H [y(k+h) - y_n(k+h)]^2 \tag{10}$$

式中, $y(k+h)$ 为系统实际输出值; 将式 (9) 代入式 (10)。

取 E 对 (k) 的一阶偏导数, 并使之等于零, 进行不断优化, 只取当前时刻的 $u(k)$, 因此得出:

$$u(k) = W(B^T - B)^{-1} B [D_0 U_{k-1} + Qe(k) - Y_n(k)] \tag{11}$$

式中, W 为系统优化系数矩阵。

4 仿真结果

本控制算法的仿真采用宝山钢铁股份有限公司 2 号高炉热风炉数据完成, 控制目标是保证热风炉拱顶温度稳定在 (1250 ± 15) , 废气温度稳定在 (355 ± 10) 。通过上述神经网络解耦控制算法, 调节焦炉煤气流量控制拱顶温度, 调节高炉煤气流量控制废气温度, 实现热风炉燃烧的最优控制^[4]。

根据宝钢高炉的热风炉数据, 其传递函数为:

$$M(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.85}{6020s^2 + 240s + 1} & \frac{-0.175}{3805s^2 + 155s + 1} \\ \frac{-1.2}{61s + 1} & \frac{0.63}{65s + 1} \end{bmatrix} \tag{12}$$

采样周期 $t=2$ s, 将系统离散化后经 1500 步训练可达解耦目标, 解耦后的单变量广义数学模型为:

$$\begin{aligned} y_1(k) &= 0.782y_1(k-1) + 0.643y_1(k-2) - \\ & 0.431y_1(k-3) - 0.312y_1(k-4) + \\ & 0.041u_1(k-1) + 0.052u_1(k-2) + \\ & 0.037u_1(k-3) + 0.003u_1(k-4) \\ y_2(k) &= 0.793y_2(k-1) + 0.541y_2(k-2) + \\ & 0.037u_2(k-1) + 0.017u_2(k-2) \end{aligned}$$

系统仿真结果如图 1 所示, 仿真结果表明, 使用该算法系统具有较好的跟踪性能。

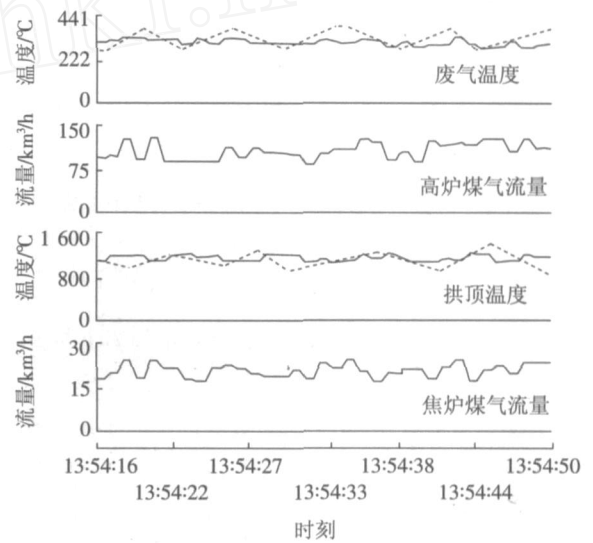


图 2 系统仿真结果

Fig. 2 Results of system simulation

—实际温度; —仿真温度

5 结论

传统的气体或液体的流量控制一般都采用 PD 控制, 这种控制方法对于单变量非耦合系统比较有效, 但对于多变量耦合系统, 仅仅采用简单 PD 控制则无法满足控制要求。在本系统中, 如果只用焦炉煤气流量控制拱顶温度, 用高炉煤气流量控制废气温度, 而不考虑二者的耦合影响, 系统的控制精度和系统的稳定性都会较差。引入神经网络解耦控制后, 系统的控制精度和稳定性得到了较大的提高, 能够满足控制要求。

参考文献:

[1] 马竹梧. 高炉热风炉全自动控制专家系统 [J]. 控制工程, 2002, 4(9): 57-62
MA Zhu-wu Full automatic control expert system of hot (下转第 70 页)

周上,烧嘴采用引进德国技术生产的亚高速切线烧嘴,燃烧充分,调节比大,噪音低,氮氧化物排放低,烧嘴出口方向与圆形炉膛的切线方向一致,可使炉气在炉膛形成一个火幕,保证工件表面热处理效率和质量。工件支撑托辊在加热过程中保持低速运转,通过程序设定其正反转及速度,防止轧辊窜动过量,保证受热均匀。在燃烧控制方面,将差温炉沿炉中心方向分为两个控制段,各段温度控制采用先进的脉冲燃烧技术。值得一提的是,该脉冲燃烧系统采用公司独立开发的程控脉冲变频技术,使用 PLC 通过程序运算及脉冲变频输出信号到控制器,控制烧嘴的大小火燃烧时间和频率。该燃烧方式优点是可较好地控制炉膛内温度的均匀性,通过强烈搅拌炉气的循环,保证温度场的均匀,经分段后沿辊径方向的各点升温速度保证一致,达到良好的控温效果。整个工艺过程全部由计算机和 PLC 仪表自动控制,无需人工干预,各工作点运行状态可在上位机进行全程监控。

自 2002 年在一重(集团)公司第 1 套差温炉系统成功调试(也是我国国内调试成功的首台全自动控制差温炉),至今在一重已陆续投运了 4 套该系统,系统一直运行良好,产值卓著。由于良好的运行绩效,大连万通公司又先后为鞍钢、中钢、天重等多家设计公司设计制作该设备多套,系统均运行稳定可靠。

(大连万通工业装备有限公司 工程部 唐 铮)

首钢矿业公司成功开发质量检验 计算机网络系统

首钢矿业公司质量检验中心负责进厂原燃料、公司内部物料转移以及精矿粉、烧结矿、氧化球生产和输出的理化检验工作,涉及 60 多种物料 158 个项目,年检数据信息近 31.5 万个。管理如此繁杂的数据信息,沿用手工抄写数据、靠电话传递信息的老方法,显然不能适应现代大工业生产和市场经济发展的客观需要。

为提高数据信息的管理水平,更好地发挥理化检验对生产经营的指导性作用,首钢矿业公司质量检验中心和计算机站,联合开发了具有八大功能模块的质量检验计算机网络系统。该系统以首钢矿业公司企业网络为基础,客户端通过网络连接数据库服务器,各种理化数据由各客户端输入,上传并存储在信息中心服务器。相关用户可通过首钢矿业公司网站,实时跟踪、查询有关物资或产品理化检

验的数据信息。

质量检验计算机网络系统的开通和平稳可靠的运行,展现出质量理化数据信息采集及时、准确、传递迅捷高效、流向多方同步、查询简单方便的良好性能。首钢矿业公司质量检验中心面对的是分布在百里矿区的 8 个生产经营厂矿和直属单位,过去,对于每一个理化数据,都要用电话重复多次报出,不仅传递速度慢,工作效率低,不利于生产组织和经营决策,而且数据储存靠手工制表,不利于长期保存和多用户多点位的随时查询,靠电话传递数据信息也容易出错,出了问题更无法追溯。特别是落后的数据信息管理方式,容易给不法分子提供可乘之机,损害企业和国家利益。如今,运用计算机网络技术和自行研发的应用软件,使质量理化数据管理实现了自动化、信息化和集约化,大大提高了质量理化数据的整体管理水平和技术水平,质量理化数据信息作为共享资源,对生产经营有效地发挥了指导性作用。同时,软件系统中保密和权限控制功能模块的设置,为保护企业利益、预防经济犯罪,筑起了高科技的防线。首钢矿业公司质量检验中心的质量检验计算机网络系统的开发成果,受到了上级公司的嘉奖。

(首钢矿业公司 办公室 刘承军)

攀长钢总配气站数据通信试点成功

攀钢集团四川长城特殊钢有限责任公司总配气站天然气通信工程,以其清晰的画面,平稳的运行,及时准确的实时数据,实时监控一次性试点成功而受到用户的好评。

总配气站承担着公司中坝生产区、含增生产区、武都生产区以及 50 万 t 棒材线的天然气供应任务,为了给决策者提供及时、准确、可靠的信息,攀长钢计量检测中心充分利用总配气站改造的机会,利用公司现有局域网和国内先进的智能控制记录仪,通过 Web 浏览器实现了对总配各管道天然气运行情况实施远程通信监控功能。技术人员能在任意地方,通过互联网观察到各管道天然气瞬时流量、压力、累计流量等参数的数值及变化曲线。当发生故障时,技术人员也可通过互联网检查、分析事故原因,真正实现远程与现场零距离,大大提高了检修进度,减少了故障热停工时间。

(攀钢集团四川长城特殊钢有限责任公司
计量检测中心 徐惠华)

(上接第 65 页)

blast stove for blast furnace [J]. Control Engineering of China, 2002, 4(9): 57-62

[2] 詹娟娟,陈 红. BP 神经网络的饱和分析及改进 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(3): 138-140

LU Juan-juan, CHEN Hong. Analysis and improvement of paralysis of BP neural networks [J]. Computer Simula-

tion, 2007, 24(3): 138-140

[3] 舒怀林,舒 华. 基于 PD 神经网络的自学习温度控制系统 [C] / 过程控制科学技术与应用. 广州:华南理工大学出版社, 2002

[4] 闻 新,周 露,李 翔,等. Matlab 神经网络仿真与应用 [M]. 北京:科学出版社, 2003

[编辑:魏 方]