

钢铁企业高炉煤气平衡与综合优化

邱东^{1,2}, 陈爽¹, 仝彩霞¹, 朱里红¹, 王龙山²

(1. 长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012;

2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:高炉煤气是钢铁企业重要的二次能源,对高炉煤气平衡有一个合理的认识,可以达到节能降耗的目的,实现钢铁企业的可持续发展。针对高炉煤气的生产工艺,建立了基于BP神经网络的高炉煤气消耗预测模型,并进行了Matlab仿真,模型的预测误差降低,达到设计精度的要求,可以作为煤气调度和煤气平衡的参考依据。提出了高炉煤气综合优化方法,对提高高炉煤气的利用效率,制定合理的用能方案,实现节能减排具有重要意义。

关键词:高炉煤气;能源平衡;预测模型;优化

中图分类号:TP183

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2009)03-0196-04

Blast Furnace Gas Balance and Comprehensive Optimization in Iron and Steel Enterprises

QIU Dong^{1,2}, CHEN Shuang¹, TONG Cai-xia¹, ZHU Li-hong¹, WANG Long-shan²

(1. Dept. of Electrical and Electronic Eng., Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2. Dept. of Mechanical Science and Eng., Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Furnace gas is an important secondary energy in iron and steel enterprises, if furnace gas balance can be recognized reasonably, the objective of saving energy and the sustainable development in the iron and steel enterprises can be achieved. A consumption forecast model of furnace gas based on BP neural network is designed according to its production process and simulated by Matlab software. The model's prediction error reduced to the design requirements of precision. The prediction model can be used as a reference of gas scheduling and gas balance. The comprehensive optimization and management method of furnace gas is proposed. As a result, it is useful help to increase utilization efficiency of furnace gas and realize rational energy consumption so as to achieve energy saving and reduce discharge amount for iron and steel enterprises.

Key words: blast furnace gas; energy balance; forecast model; optimization

0 引言

高炉煤气是高炉生产中焦炭经气化后转变而得的,是高炉炼铁的副产品。每炼一吨生铁可产生热值为 $3300 \sim 4100 \text{ kJ/m}^3$ 的高炉煤气 $1300 \sim 1600 \text{ m}^3$ ^[1]。虽然高炉煤气是一种低热值的燃料,但由于钢铁企业巨大的发生量,因此产生的能源价值是相当可观的。以通化钢铁集团公司目前高炉煤气约 $180 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ 的平均流量和每年500万吨的钢产量计算,高炉煤气放散率每下降1%,企业吨钢综合能耗可减少约1.4kg标准煤。同时由于煤气的放散产生大量有害气体和粉尘,将对大气造成污染。而热风炉换炉送风可使高炉

煤气的发生量和压力大幅度波动,突发的大量煤气过剩或紧缺容易导致设备熄火和用户停产。所以,高炉煤气供应量与需求量之间的平衡以及优化调度,对科学合理地分析钢铁企业的能源消耗,完善制定高炉煤气生产计划,维护系统安全,实现节能减排,从而提高企业的综合实力具有重要的意义^[2]。

1 高炉煤气的工艺流程

高炉煤气是钢铁企业煤气量最大的一种宝贵能源。高炉煤气的主要可燃成分为CO,约占30%,还有少量的H₂和CH₄,其余为不可燃的N₂及CO₂,故其发热值较低。高炉煤气是一种无色、无味、有毒的低热值气体燃料,加热高炉煤气的设备必须保持严密。高炉煤气的高温气体易于充满炉膛,温度分布均匀,可以用于冶金企业的自用燃气,如加热热轧的钢锭、预热钢水

收稿日期:2008-07-01

基金项目:吉林省社会发展重大项目(20050414-2)

作者简介:邱东(1969-),男,吉林长春人,副教授,博士研究生,主要从事智能控制与工业节能技术的研究。

包等。也可以供给民用,如果能够加入焦炉煤气,就叫做“混和煤气”,这样可以提高热值。

高炉煤气从高炉出来时含有大量的粉尘,约为 $15 \sim 80 \text{ g/m}^3$ 或更多,因此在使用前必须经导出管、上升管和下降管进入重力除尘,除去粗颗粒粉尘;再进入布袋除尘,除尘净化等工序。高炉煤气的工艺流程如图1所示。

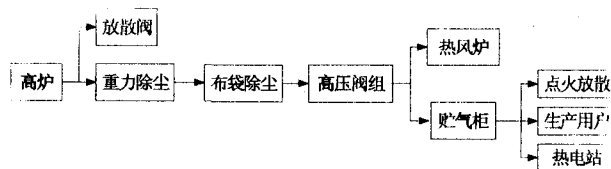


图1 高炉煤气工艺流程图

2 高炉煤气产量计算

煤气的供需平衡是一个复杂的系统工程,它不仅取决于煤气用户,而且还取决于产气设备和煤气储配、输送及其相关因素所组成的整个煤气系统,只有同时抓好煤气系统的每一个环节及相关因素,才能使煤气平衡处于最佳状态^[3]。

煤气的发生是煤气平衡系统的源头,对煤气的发生量进行科学的预测,有助于合理分配二次能源,避免煤气供应的不足或放散。

高炉煤气的发生量一般是根据高炉中碳的平衡来计算的,公式如下^[4]:

$$V_{\text{煤气}} = \frac{C_{\text{焦}} + C_{\text{油}} + C_{\text{煤}} + C_{\text{熔}} + C_{\text{料}} - C_{\text{铁}} - C_{\text{尘}}}{\frac{12}{22.4}(\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4)} \quad (1)$$

式中:

$V_{\text{煤气}}$ —— 每吨生铁发生的高炉煤气量, m^3 ;

$C_{\text{焦}}、C_{\text{油}}、C_{\text{煤}}$ —— 分别为每吨生铁消耗的焦炭、油、煤中的固定碳, kg/t 生铁;

$C_{\text{熔}}$ —— 每吨生铁消耗的溶剂中的固定碳, kg/t 生铁;

$C_{\text{料}}$ —— 炉料(废铁、烧结矿等)中的含碳量, kg/t 生铁;

$C_{\text{铁}}$ —— 生铁中的含碳量, kg/t 生铁;

$C_{\text{尘}}$ —— 炉尘中的含碳量, kg/t 生铁;

$\text{CO}_2、\text{CO}、\text{CH}_4$ —— 煤气中这些成分的相应的体积百分数;

高炉煤气的总产量 = 生铁产量 * 高炉煤气吨钢铁产量

通过上面的式子则可计算出每吨生铁高炉煤气的发生量和高炉煤气的总产量。

3 基于神经网络的高炉煤气消耗预测模型

高炉煤气的消耗涉及很多因素,对高炉煤气用户的历史数据进行研究发现:高炉煤气用户消耗量与相关因素的线性关系很不明显,没有必然的规律。基于上面的特点,采用非线性的预测方法,能较为有效地描绘系统的特征,得到相对准确的预测结果。网络在众多的预测方法中,人工神经网络算法有其独特的优越性,而非线性是神经网络的一个非常重要的性质,除此之外,神经网络还有非常强的容错性及大规模并行分布式结构,自学习、自组织、自适应能力。BP网络是一种单项传播的多层向前网络,是目前应用最多的一种神经网络形式,结合高炉煤气用户的特点,这里采用基于BP网络的预测方法对高炉煤气消耗量进行预测。

3.1 BP神经网络的概述

BP神经网络包括输入层、中间层(隐含层)和输出层,每一层内神经元的输出均传送到下一层。BP网络是一种误差回传神经网络,它的工作过程分为学习期和工作期两个部分^[5]。学习期是由输入信息的正向传播和误差的反向传播两个过程组成。正向传播过程中,输入信息从输入层到隐含层再到输出层进行逐层处理,如果输出层与期望输出不符,则转入误差的反向传播阶段,随着这种误差的反向传播修正的不断进行,权值得到不断的调整,网络对输入模式相应的正确率也不断上升。工作期中只有输入信息的正向传播。因此,BP网络的计算关键在于学习期中的误差反向传播过程。

3.2 高炉煤气消耗预测模型

如果BP网络的输入层、隐含层和输出层的单元个数分别为 $n、q、m$,则该三层网络可表示为 $\text{BP}(n, q, m)$,利用该网络可实现 n 维输入向量 $X^n = (X_1, \dots, X_n)^T$ 到 m 维输出向量 $Z^m = (Z_1, \dots, Z_m)^T$ 的非线性映射关系。在煤气消耗预测模型中,有三层BP网络,输入节点 x_i ,隐含层节点 y_j ,输出层节点 z_l 。输入节点与隐含层节点的网络权值为 w_{ij} ,隐含层节点与输出节点的网络权值为 v_{jl} , θ_j 隐含层第 j 单元的激活阈值, θ_l 输出层第 k 单元的激活阈值,激活函数 $f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ 。当输出节点的期望值为 t_l ,模型的计算公式如下^[6]:

隐含层节点的计算输出

$$y_j = f(\sum_i w_{ij} x_i - \theta_j) = f(\text{net}_j) \quad (2)$$

输出层节点的计算输出

$$z_l = f(\sum_j v_{jl} y_j - \theta_l) = f(\text{net}_l) \quad (3)$$

输出节点的误差

$$E = \frac{1}{2} \sum_i (t_i - z_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_i (t_i - f(\sum_j v_{ji} f(\sum_i w_{ij} x_i - \theta_j) - \theta_i))^2 \quad (4)$$

由于权值的修正 Δv_{ji} , Δw_{ij} 正比于误差函数沿梯度下降, 则有

$$\Delta v_{ji} = -\eta \frac{\partial E}{\partial v_{ji}} = \eta (t_i - z_i) f'(\text{net}_i) y_j \quad (5)$$

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \eta f'(\text{net}_j) \sum_i (t_i - z_i) f'(\text{net}_i) v_{ji} \quad (6)$$

其中:

$$\text{隐含层节点误差 } \delta'_j = f'(\text{net}_j) \sum_i \delta_i v_{ji}$$

$$\text{输入节点误差 } \delta_i = (t_i - z_i) f'(\text{net}_i)$$

隐含层节点误差 δ'_j 中的 $\sum_i \delta_i v_{ji}$ 表示输出节点 z_i 的误差 δ_i 通过权值 v_{ji} 向节点 y_j 反向传播成为隐含层节点的误差。

阈值 θ 也是变化值, 在修正权值的同时也需要修正, 原理同权值修正一样。

$$\Delta \theta_i = \eta \frac{\partial E}{\partial \theta_i} = \eta \delta_i, \theta_i(k+1) = \theta_i(k) + \eta \delta_i \quad (7)$$

$$\Delta \theta_j = \eta \frac{\partial E}{\partial \theta_j} = \eta \delta'_j, \theta_j(k+1) = \theta_j(k) + \eta \delta'_j \quad (8)$$

确定本模型的输入量有 3 个, 分别为 ζ_1 : 前一日的煤气用量, ζ_2 : 前一日的产量, ζ_3 : 当日的产量。进行网络训练, 选取网络的输入变量 $n = 3$, 输出变量为用户的消耗量 $m = 1$, 采用包含一个隐含层的神经网络 BP(3, q, 1)。利用以往的数据对 BP 网络进行训练, 在隐含层单元数 $q = 5$ 时, 经过一定次数的训练, 平均绝对误差达到精度要求, 因此最终采用的网络结构为 BP(3, 5, 1)。

按照 BP 神经网络的算法和训练步骤, 在 Matlab 环境下对用户消耗模型进行训练和仿真, 利用训练后的网络对用户的煤气用量进行预测, 预测值与实际值的对比曲线如图 2 所示, 相对误差曲线如图 3 所示。从图中可以看出相对误差最高在 0.9% 左右, 预测精度比较理想。

4 高炉煤气的综合优化

随着高炉技术的发展, 焦炭在高炉炉体内得到了更加充分的利用, 同时由于炼铁生产强度提高, 高炉的产铁能力也进一步提高, 这一方面导致了高炉煤气的热值降低, 另一方面也增加了高炉煤气的发生量。对钢铁企业高炉煤气系统进行综合优化, 可以使这种高炉煤气得到充分的利用, 对发展钢铁生产, 降低能源消

耗和生产成本都有重要的意义。

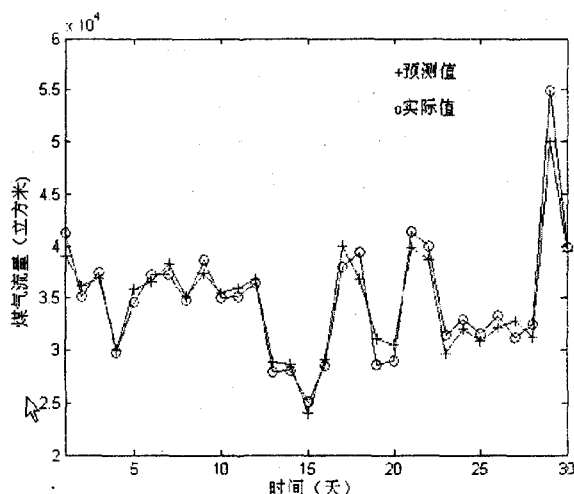


图2 预测流量与实际流量对比图

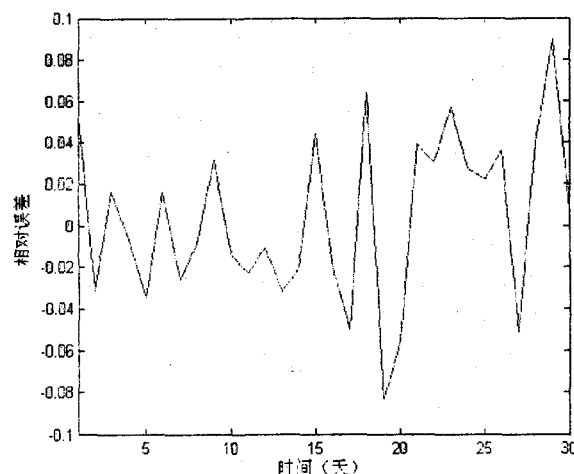


图3 相对误差曲线

4.1 综合分析高炉煤气的静态平衡和动态平衡

钢铁企业高炉煤气综合平衡主要分为静态平衡和动态平衡。静态平衡是以计划或规划为主, 对一段时间内的高炉煤气供、求量, 如年、月、周、日平衡, 结合期间生产计划、检修计划或技改项目等影响因素, 进行预测性地平衡; 动态平衡则是指高炉煤气压力、流量、热值随着生产过程波动而波动, 需要采取的即时平衡。静态平衡是宏观指导, 动态平衡随生产状况而变动。使高炉煤气的产出和使用达到动态平衡, 减少或消除煤气放散, 是高炉煤气平衡的目的, 只有综合分析影响平衡的各要素, 并在实践中不断积累, 将生产管理、技术改造等各环节密切配合, 才能达到好的效果。

4.2 设置煤气柜及高炉煤气缓冲用户

高炉煤气系统缓冲量的确定通常根据高炉煤气的产量和储气柜容量大小而定, 一般不应低于总产量的 5%~10%^[7]。高炉煤气发生量和用户消耗量之间的平衡始终是变化的, 高炉煤气缓冲用户和煤气储气柜是具有消化和补充能力的装备。高炉煤气缓冲用户就

是在最佳的高炉煤气平衡模式即高炉煤气充足时利用高炉煤气;而当气源厂检修或高炉煤气不足时,缓冲用户可燃用其它燃料。煤气柜在管网中的作用是补偿因高炉煤气供销波动造成的不平衡,一方面它可以储存系统中的过剩高炉煤气,另一方面当系统中的高炉煤气不足时,为保证生产线的正常运行,将柜中煤气补充到管网中。应建立与高炉煤气管网中小时流量相一致的大容量煤气柜,使其发挥自动削峰填谷的作用。

建立吞吐量较大的高炉煤气缓冲用户和煤气储气柜,对高炉煤气系统供应的不足或过剩有较强的吐纳能力,可以充分有效地利用已有资源,将高炉煤气波动减小到最低限度。

4.3 建立高炉煤气调控中心

煤气调度中心是企业煤气生产、输送、分配和动态调控强有力的机构。煤气调度中心目前已在各钢铁企业普遍推行,并且各厂的调度中心不再是简单地进行全厂煤气消耗和记录的一般煤气调度中心,而是发展成为现代化的能源管理系统。高炉煤气集中控制系统的建立,实现了对检测点进行采样,并通过计算机网络将采集的信息传输到能源管理中心进行集中处理、显示、累计和打印。另外对全厂的高炉煤气用量进行预测,并与煤气的回收情况结合起来进行合理调度和控制,从而有效地利用高炉煤气,减少放散,可以最大限度地节约能源。

煤气调度中心不仅能对全厂各个时期的煤气供需情况加以分析和整理,对全场的煤气调度起到指导作用,而且能在某时段煤气供应出现问题时,依照获得最大效益的原则,分出轻重缓急进行调控。从而保证了高炉煤气的安全生产和合理分配使用。

(1) 用户流量分配原则。高炉煤气的用户较多,主要有高炉、焦炉、轧钢、电厂、燃气轮机、低压锅炉等。根据生产工艺和设备特点,高炉煤气用户分为固定用户和调整用户,固定用户主要是轧钢、高炉等用户。高炉系统消耗量较大,所以在热风炉换向时它的波动对高炉煤气平衡有重要影响,燃气轮机只消耗高炉煤气,低压锅炉具有多种燃料组合模式,调节比较灵活;电厂是最重要的调整用户,吞吐能力约 $0 \sim 80 \text{ 万 m}^3/\text{h}$, 这给煤气调配创造了极其有利的条件。

(2) 高炉煤气失衡调整。对于热风炉换炉、轧钢

生产节奏变化、轧钢机组故障引起的波动,可以改变电厂使用量、改变低压锅炉的燃料组合模式;对于高炉临时减风或休风引起的煤气大量不足,一般可以减少或停止电厂使用量取得平衡。

(3) 煤气平衡预调整。物流对能耗的影响很大,生产节奏的变动,不仅影响到生产单元的能耗,还可能影响整个煤气系统的平衡。应与生产、炼钢、炼铁、轧钢等调度保持密切联系,主动把握炼钢的吹炼、轧钢的轧制等生产计划,预测其对高炉煤气系统造成的影响。

(4) 燃气—热力—电力综合平衡。在蒸汽发生设备中,有许多可以发电,而且发电量与蒸汽发生量可以相互调节,这给燃料最优配置提供了条件。煤气紧张时,可指令 CDQ 少发电多产蒸汽、电厂产蒸汽来降低低压锅炉的负荷,从而减少其煤气耗量。

5 结束语

钢铁企业的煤气平衡是一项复杂的系统工程,企业煤气产量的高低以及煤气供应量与需求量之间的平衡关系,对企业的产品成本和能源消耗影响极大。高炉煤气是钢铁企业重要的副产煤气之一,对高炉煤气用户的消耗量进行预测,有利于高炉煤气的合理分配及优化利用,不仅使企业高炉煤气的供需平衡达到相对良好的状态,而且有利于企业节能降耗,减少污染排放,降低生产成本,提高经济效益。

参考文献:

- [1] 顾洁,王少军.高炉煤气利用的研究[J].冶金能源,2006,25(1):32-34.
- [2] 邓万里,陈伟昌.宝钢高炉煤气系统平衡实践[J].宝钢技术,2003(2):31-33.
- [3] 鹏程.应用系统节能观点做好钢铁企业煤气平衡[J].中国能源,2000(8):37-38.
- [4] 吕佐周.冶金燃气[M].北京:冶金工业出版社,1985:25-26.
- [5] 田景文,高美娟.人工神经网络算法研究及应用[M].北京:北京理工大学出版社,2006:35-39.
- [6] 董长虹.Matlab神经网络与应用[M].北京:国防工业出版社,2005:68-71.
- [7] 黄乐天.梅钢煤气平衡及对策初探[J].宝钢技术,2002(5):55-59.

(上接第195页)

- continuities[J]. IEEE Trans. MTT, 1972, 20: 734-739.
- [7] 刘小龙,汪文秉.恒阻抗 TEM 喇叭辐射特性[J].强激光与粒子束,2003,15(11):88-90.
- [8] 粟毅.探地雷达理论与应用[M].北京:科学出版社,2006:88-89.
- [9] 高飞,刘其中.加载宽带天线分析[J].电子学报,1999,27(16):124-125.