

Research and Application of Feedforward PID Compound Control of Blast Furnace Top Pressure

Jinhua Liu¹ Zhibo Liu²

1. Valin ArcelorMittal Automotive Steel Co., Ltd., Loudi, Hunan, 417009, China

2. Cold Rolling Mill of Hunan Valin LianGang Thin Sheet Co., Ltd, Loudi, Hunan, 417009, China

Abstract

The top pressure of 3200m³ blast furnace (BF) of Hunan Valin LYS always fluctuates within ± 5 kPa, and can't stabilize in short term. Analysis is done in the aspect of BF process and finds the main contributors to the fluctuation are top charging and uniform pressure at charge vessel. Through analysis on variation of charge surface flow, charge feedforward model is built. Through analysis on pressure uniforming at charge vessel, uniform pressure feedforward model is built, and mathematical model for BF top PID feedforward combining control also is designed, so that top pressure is stabilized. Shopfloor operation shows that, TRT BF top pressure feedforward PID combining control which is described in this paper can better improve steady-state accuracy and anti-interference ability of top pressure than existing PID control, with control accuracy improved up to ± 3 kPa, which could be of guidance to top pressure control of other BFs.

Keywords

blast furnace; TRT; top pressure control; feed forward model; feed forward PID compound control

高炉顶压前馈 PID 复合控制系统的应用

刘金花¹ 刘志波²

1. 华菱安赛乐米塔尔汽车板有限公司, 中国·湖南 娄底 417009

2. 湖南华菱涟钢薄板有限公司冷轧板厂, 中国·湖南 娄底 417009

摘要

针对湖南华菱涟钢 3200m³ 高炉炉顶压力一直在 ± 5 kPa 内波动且在短时间内不能趋于稳定, 从高炉工艺方面分析影响高炉炉顶压力波动的主要因素为炉顶布料和料罐均压, 通过对布料过程中料面流量的变化分析建立了布料前馈模型; 通过对料罐均压过程分析, 建立了料罐均压前馈模型, 设计了一套高炉顶压 PID 前馈复合控制算法, 达到稳定炉顶压力的目的。现场运行效果表明本文设计的 TRT 高炉顶压前馈 PID 复合控制较现有 PID 控制能明显改善炉顶压力的稳态精度与抗干扰能力, 控制精度提高到 ± 3 kPa, 并为其他高炉炉顶压力控制提供了指导作用。

关键词

高炉; 顶压控制; TRT; 前馈模型; 前馈 PID 复合控制

1 引言

涟钢 7# 高炉为 2010 年建成投产的一座容量为 3200m³ 的大型高炉, 炉顶引进了卢森堡 PW 公司的无料钟炉顶, 采用并罐式下料方法, 通过干法布袋除尘、减压阀组与 TRT(Blast-Furnace Top Pressure Recovery Turbine Unit) 静叶联合调节, 顶压控制方式采用普通 PID 控制。自 2010 年投产运行以来, 高炉炉顶压力一直在 ± 5 kPa 范围内变化, 炉顶压力波动大且在短时间内不能趋于稳定, 严重影响着 7# 高炉生产的稳顺运行。本文通过分析炉顶压力波动的关键影响因素,

对炉顶布料过程、炉顶料罐均压等进行优化, 提出了一种前馈 PID 复合控制策略的 TRT 高炉顶压控制方案, 当突变干扰因素开始作用, 顶压还没有变化时, 前馈数学模型输出的值提前作用在 TRT 静叶的开度控制上, 以消除或减小突变扰动对顶压的影响; 当没有突变干扰因素时, 利用普通的 PID 对静叶进行控制, 使顶压去逐渐适应缓变因素, 从而使前馈 PID 复合控制协同合作, 以达到将炉顶压力稳定控制在 ± 3 kPa 内的目的^[1]。

2 涟钢 7# 高炉工艺原理

高炉系统作为一个复杂的工艺过程, 包括了高炉鼓风机、

热风炉、原料、炉顶、高炉本体、粗煤气、净煤气、TRT、喷煤、冷却等多个子系统，基本工艺流程如下图所示：

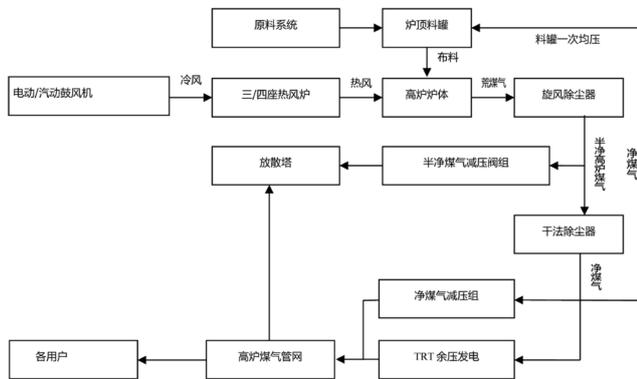


图1 高炉工艺流程图

3 关键影响因素分析

在实际生产中，影响顶压波动的因素众多，主要有高炉鼓风机风量变化、热风炉换炉过程、炉体内部变化、炉顶布料过程、炉顶料罐均压和TRT静叶实时控制状态等，而如鼓风机操作和热风炉换炉引起的热风压力的变化、TRT和减压阀组之间切换顶压控制权限引起的顶压波动以及炉内等未知因素引起的顶压波动，将利用普通PID闭环调节来逐渐适应，本文主要对炉顶布料过程、炉顶料罐均压两个主要影响因素进行详细分析，并建立前馈数学模型^[2]。

3.1 炉顶布料影响

高炉在正常冶炼时，炉内炉料不断的消耗，料面会不断的下降，随着冶炼强度的增加，料面下降的速度加快，需要及时通过炉顶布料，将炉料及时补充到炉内，保证一个合理的料面高度，才能保证高炉顺行、高产。

炉顶高炉煤气要通过料面从炉内溢出，布料过程中，炉料布到料面后，因出气通道被覆盖，造成透气性变差，料面煤气流阻力加大，到达炉顶的煤气流量减小，炉顶压力迅速降低。正常冶炼过程中，这种情况是频繁造成顶压波动的主要因素之一。

3.2 炉顶料罐均压影响

料罐在布料之前需要对料罐进行均压，一次均压的高炉煤气引自干法布袋之后的净煤气主管上，因为净煤气压力与料罐压力存在压力差，高炉煤气的总流量会突然增加，而高炉产生的煤气量几乎没有变化，从而造成顶压迅速降低。这

种情况也是频繁造成顶压波动的因素，是采用前馈控制的主要内容之一。

4 前馈控制数模建立

前馈是当扰动产生后，顶压还未发生变化之前，根据扰动作用的大小进行控制，以消除或减小扰动作用对顶压的影响，如果运用得当，可以把顶压的扰动消灭于萌芽之中，使顶压不会或减少因扰动而产生影响^[3]。

4.1 布料前馈数模建立

(1) 布料规则

高炉炉内煤气流分布是否合理，是高炉顺行生产的必要条件，在进行炉顶布料时，需要按照一定的布料规则进行，溜槽布料通常采用环形布料，根据料面气流的要求，每个环形区域所布的炉料重量各不相同，焦批和矿批每个环形区域所布的炉料重量也不相同，一般在控制程序中会设置两个布料矩阵，一个为焦批的，一个为矿批的，程序根据所布炉料类型，自动选择对应的矩阵，矩阵中规定了一个炉料批的重量、每个环形区域布料的圈数，计算的溜槽倾角，起始布料角度等信息，布料时按照该表的信息，自动控制溜槽的倾角进行布料。

(2) 料面流量的变化

炉料到达料面后，煤气料面流量会有一定量的减小，随着冶炼的进行，经过一段时间物料消耗，料面流量又会逐渐恢复到布料前的流量；不同的布料环，煤气气流各不相同；不同炉料的透气性不同，如焦炭的透气性较好，烧结矿的透气性较差，小烧结矿的透气性最差，透气性差的料批，对料面气流的影响更大一些；每一个料批的批重不同，根据布料制度计算的每一圈的料重也不相同，同样档位，所布炉料重量不同，煤气流量减小量也不相同。

(3) 布料引起总煤气量减小量：

$$F_c = K_{dc} \Delta F_{tc} + (1 - K_c) F_{t(n-1)c} \quad (\text{公式1})$$

公式1中 F_c ——为一个布料批次引起的煤气流量当前减小量 (m^3/h)；

K_{dc} ——为布料档位为 c 时的煤气流量减小系数；

ΔF_{tc} ——为布料档位为 c 时的煤气流量减小量 (m^3/t)；

K_c ——为布料档位为 c 时的煤气流量恢复系数；

$F_{t(n-1)c}$ ——为布料档位为 c 时的上个 Δt 计算周期的煤气流量减小量 (m^3/t)。

上式是在不同布料档位下的布料前馈计算模型，模型中不同档位的系数或参数的设置 (如 K_{dc} , K_c) 是不同的，在实际的工程应用时，应创建参数表，将所有档位的模型参数列入其中，并根据在线测试结果 (在测试时，需要由弱到强逐渐调整，直到得出满意的结果) 对参数表中的系数或参数值进行确定，复合控制系统正式投入运行后，系统就可以根据布料品种和布料档位，自动选择对应数据表中的参数，从而计算出相应的前馈量^[4]。

4.2 料罐均压数模建立

料罐均压利用干法除尘后面的高压净煤气进行均压，该位置煤气压力设为 P_c ，料罐压力设为 P_k ，两点的压差就为 $P_c - P_k$ ，假设消耗在均压管道上的压差为 0，一均压阀前的压力就为 P_c ，如果 P_c 保持不变，通过阀的流量随 $P_c - P_k$ 的增大而增大，当 $(P_c - P_k) / P_c$ 达到柱塞流的临界压差比时，流量不再随 $P_c - P_k$ 的增大而变化，而是达到一个最大的极限值；通常认为均压前馈的值可以分成两段：

在 $P_k < 0.5P_c$ 时，前馈值采用

$$F_g = K_f \sqrt{(P_c - P_k)} \quad (\text{公式 2})$$

均压一段时间后，当 $P_k \geq 0.5P_c$ 时，前馈值采用

$$F_g = K_f \sqrt{0.5P_c} \quad (\text{公式 3})$$

公式 2、公式 3 中 F_g ——为均压引起的煤气流量增量 (m^3/h)；

K_f ——为调整系数；

P_c ——为净煤气压力 (kPa)；

P_k ——为当前罐压 (kPa)

公式 2、公式 3 中的 K_f 需要在调试过程中确定， P_c 、 P_k 两个压力是实际控制系统中读取的数据^[5]。

4.3 前馈 PID 复合控制

前馈控制系统为开环控制，不需要检测被控对象，通过实时跟踪主要干扰源的变化情况，在主干扰源刚发生变化，而被控对象还未产生偏差时，前馈控制系统就控制执行器产生调节动作，从而将被控对象将要产生的偏差消除在萌芽状态，达到稳定被控对象的目的，前馈 PID 复合控制原理如下

图所示：

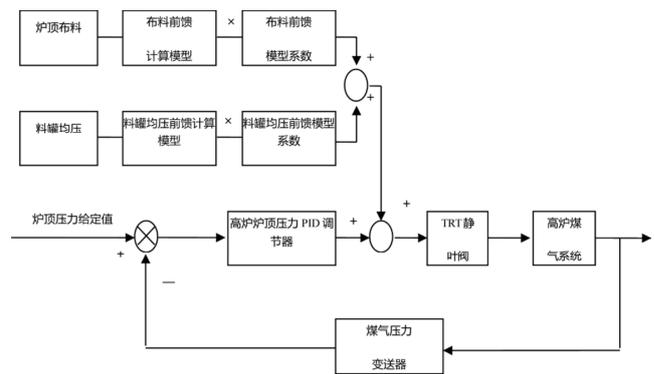


图 2 前馈 PID 复合控制原理图

对于高炉炉顶压力的控制，因为高炉煤气系统为一个由容器和管道组成的大气容，造成单独的 PID 控制难以达到要求，所以在闭环调节系统中，加入两个炉顶压力的主要干扰源的前馈控制：炉顶布料和料罐均压的炉压压力前馈控制系统，通过跟踪布料状态和料罐均压过程，两个前馈模型自动计算出前馈量，与前馈模型系数相乘后，转换为阀位信号，叠加到炉顶压力 PID 闭环调节器的输出后，控制 TRT 静叶阀的动作，当布料或均压时，根据其影响强度，前馈控制系统在顶压未发生变化时，提前作用于 PID 闭环调节器的输出量，从而减小 TRT 静叶开度；当布料或料罐均压的后期，其对炉压的影响逐渐减小时，前馈控制系统会逐渐减小其输出量，逐渐撤出其对 PID 输出的影响，直到前馈控制系统的输出为 0，从而完成了前馈控制系统对炉顶压力的一个调节周期，前馈控制系统工作过程中，PID 闭环控制系统仍然在正常工作，从而对未知 (或前馈系统未完全消除的顶压偏差) 因素引起的炉顶压力偏差值，进行实时的调节，在前馈控制系统输出为 0 时，PID 完全接管了炉顶压力的调节任务^[6]。

5 应用效果前后对比

5.1 控制系统硬件及软件实现

涟钢 7 # 高炉的控制系统为 SIEMENS 公司 S7-400H 系列产品，采用的是 SIEMENS Step7 与 WinCC 过程控制系统，该系统的电源、通信网络、CPU 均按冗余配置，具有较强的容错能力，能够保证在一套出现故障时系统仍能继续稳定可靠的运行，并且具备非常强大的工业控制功能，负责整个 7 # 高炉的自动化生产^[7]。

从系统设计功能上看，考虑到控制系统应用到高炉上时，需要高炉工长根据原燃料条件、高炉以及 TRT 系统的主要设

计参数、各工长及操作人员的管理习惯进行适用性修改，因此必须使软件系统具有较好的可修改性和可维护性。软件系统通常按照数据库层——程序层——界面层分别进行设计，再链接成完整的软件系统。这样的系统设计加强了高炉生产的科研、管理和优化决策，提高了高炉的管理效率和工长操作水平，也为企业进一步建立MES系统创造了良好的条件^[8]。下图为高炉工长操作画面：

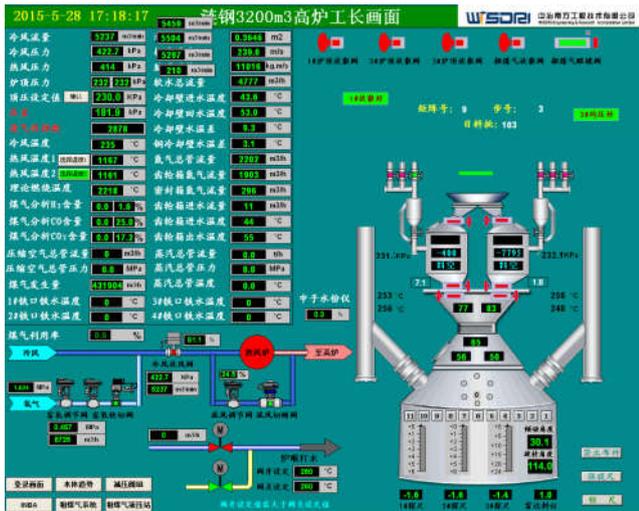


图3 高炉工长画面

5.2 前馈 PID 复合控制模型的顶压测试及分析

未投入前馈数学模型之前，单独的PID控制效果如图4所示，图中绿色的方框趋势线为焦炭的布料时段，较高的玫瑰红方框趋势线为矿石布料时段，白色为炉顶压力趋势线，设定值为一条黄色的直线，下面黄色的趋势线为TRT静叶开度的趋势线，从图中左边可以看出，顶压在逐渐稳定时，因为一个焦炭批次的布料，造成了顶压迅速上升，PID开始作用，增加开度但因为跟不上压力变化的节奏，造成调节效果不够理想，顶压波动较大，最大波动值 $> 4\text{kPa}$ ，可以明显看出静叶开度的变化随着炉顶压力的波动而波动，静叶的动作明显滞后于顶压的变化，造成顶压波动较大。

投入前馈模型后的前馈PID复合控制趋势如图5所示，图中下部的白色小台阶，为布料前馈模型作用的输出，图中中部的粉色的趋势线为均压的前馈模型输出，可以看出在顶压还未波动，开始均压或布料时（因为在PLC的程序中可以获取布料的方式和布料时间，程序甚至在布料前的一定时间内），前馈数学模型就已经开始输出前馈值，有效的抑制了布料和均压过程对炉顶压力的影响，从图中可以看出投入前

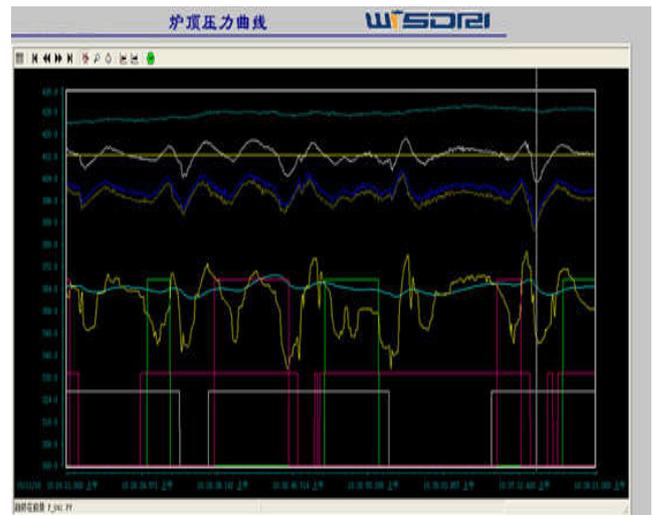


图4 普通PID控制效果

馈模型后，整个炉顶压力的波动得到了有效的控制，最大波动值控制到了 $\pm 3\text{kPa}$ 以内，整个顶压的趋势线明显好于未投入前馈模型的趋势，提升了高炉顶压的控制水平，保证了较高的冶炼强度下的高炉稳定安全。

经现场测试得出以下结论：前馈PID复合控制系统，可以达到快速性，准确性，稳定性的要求，能够将顶压波动控制在 $\pm 3\text{kPa}$ 以内，明显优于单独的PID控制，前馈PID复合控制方式的上升时间和调节时间比单独的PID控制短，且在动态过程的振荡次数比单独的PID控制少，因此，前馈PID复合控制方式能达到优化控制的目的，与单独的PID控制方式相比具有一定的优越性^{[9][10]}。

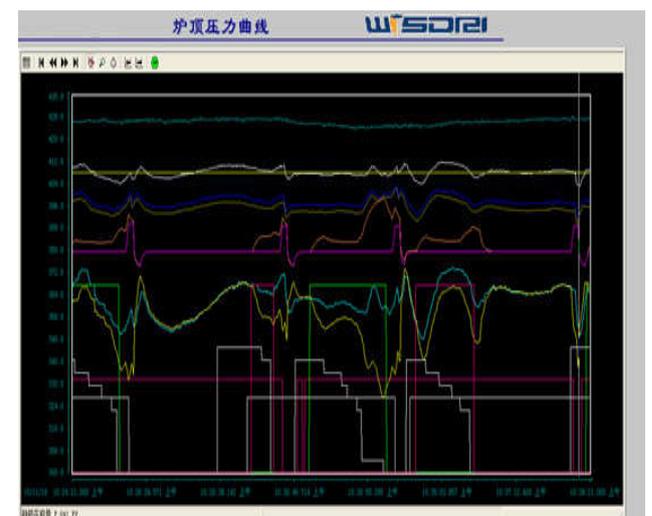


图5 前馈PID复合控制的效果

6 结语

本文通过对涟钢7#高炉整个工艺流程及炉顶调压工艺

原理进行介绍,详细分析了炉顶压力波动大的主要影响因素,并结合现场实际生产情况,在原有控制系统设计要求的基础上,将炉顶压力控制方式由单独的PID控制方式优化为前馈PID复合控制的总体控制结构。现场运行结果表明,高炉炉顶压力波动大幅减小,基于PID控制及前馈数学模型的炉顶压力控制在实际应用中取得了较好的控制效果,提高了炉顶压力抗干扰能力,控制精度提高到 $\pm 3\text{KPa}$,实现了研究目标,并为其他高炉炉顶压力控制提供了指导作用^{[11][12]}。

参考文献

- [1] 张克宏.高炉炉顶压力控制技术[J].电气时代,2008,(6):16-18.
- [2] 马琴,马玉玲,赵佳.高炉TRT发电机组自动控制系统研究[J].冶金动力,2005(5):88-90.
- [3] 高尚敏,杨春节,宋执环.TR系统过程控制研究[J].电站系统工程,2007,23(5):58-60.
- [4] 任长青,王宏华.一种改进的Fuzzy-PID复合控制研究[J].电气技术与自动化,2007,36(5):137-139.
- [5] 李婷婷.正常工况下TRT系统高炉顶压动态建模及控制研究.浙江大学信息科学与工程学院浙江大学,2007.
- [6] 杨春节,吴平,宋执环.炼铁高炉TRT系统炉顶压力动态数学模型研究[J].浙江大学学报,2006,40(9):1536-1539.
- [7] 盛钢,柳黎光.TR系统顶压稳定技术研究与实践[J].通用机械,2005(8):96-99.
- [8] 陈奇福,吴敏,安剑奇,等.模糊PID控制在高炉炉顶压力控制系统中的应用[J].冶金自动化,2010,34(2):10-14.
- [9] 丁尔云,王云顺.PLC在高炉炉顶压力调节中的应用[J].河北省科学院学报,2007,24(3):56-58.
- [10] 毕勇,张先保,吴忠业.2500m³高炉炉顶压力控制实例[J].冶金动力,2008(1):88-91.
- [11] Liu Jin-hin,Wang Shu-qing,Zhang Jian-ming.Problems and solving plan for real-time control of blast furnace expert system[J].Journal of Zhejiang University:Engineer Science,2000,34(6):613-618.
- [12] Hu B G,Yim H.Review of fuzzy-PID control techniques and some important issues[J].Acta Automatica Sinica,2001,27(4):567-584.