

# 串级控制在矿渣立磨热风炉中的应用

孙 涛

(石横特钢集团有限公司, 山东 肥城 271612)

**摘要:**针对矿渣立磨生产过程中热风炉煤气流量调节的人工依赖性强、磨机出口温度控制精度低以及生产效率低下等问题, 该文建立了一个串级控制系统。该控制系统中有两个控制器温度控制器和流量控制器, 其中温度控制器的输出值被设定为流量控制器的目标设定值, 而流量控制器根据设定值调整煤气流量, 从而实现对煤气流量的精确控制。通过该控制系统的建立, 出口温度的波动被有效控制在  $\pm 1$  °C 的范围内, 高炉煤气的消耗减少了  $3 \text{ m}^3/\text{t}$ , 显著提升了矿渣立磨生产的效率和稳定性, 有效取代了传统的人工操作方式, 对于推动矿渣立磨生产的技术进步和效率提升具有重要意义。

**关键词:**矿渣立磨; 热风炉; 自动燃烧; 串级控制

**中图分类号:**TP273

**文章编号:**1000-0682(2024)04-0027-05

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.04.006

## Application of cascade control in slag vertical mill hot blast furnace

SUN Tao

(Shiheng Special Steel Group Co., LTD., Shandong Feicheng 271612, China)

**Abstract:** Aiming at the problems such as strong artificial dependence, low precision and low production efficiency of gas flow regulation of hot blast furnace during slag vertical mill production, this paper establishes a cascade control system, in which there are two controllers, temperature controller and flow controller. The output value of the temperature controller is set as the target setting value of the flow controller, and the output of the flow controller controls the gas regulating valve, so as to achieve the accurate control of the gas flow. Through the establishment of the control system, the fluctuation of the outlet temperature is effectively controlled within the range of  $\pm 1$  °C, and the consumption of blast furnace gas is reduced by  $3 \text{ m}^3/\text{t}$ , which significantly improves the efficiency and stability of slag vertical mill production, effectively replaces the traditional manual operation mode, and is of great significance for promoting the technical progress and efficiency improvement of slag vertical mill production.

**Keywords:** slag vertical mill; hot blast stove; automatic combustion; cascade control

## 0 引言

在矿渣立磨生产中, 磨机出口温度的稳定控制对于确保产品品质和生产效率至关重要。然而, 由于煤气压力、来料水渣含水量等多种因素波动, 操作人员需要频繁调整温度, 导致温度波动较大, 增加了能源消耗。经过对国内其他相关产线进行调研, 发现各生产线的运行状况也基本相似, 目前行业内普

遍采用人工操作方式调节磨机的热风炉煤气流量和出口温度, 且目前市场上尚无较先进的技术可供借鉴。因此, 为了提高矿渣立磨生产的效率和稳定性, 实现燃烧自动控制, 以替代传统的人工操作方式, 成为行业内亟待解决的问题。该文综合考虑了常规控制和串级控制系统的构成、特性及其在各工艺领域的应用场景。通过深入剖析不同控制模式的优缺点和适用性, 决定引入串级控制策略, 实现温度与流量的双重控制, 使磨机出口温度能够稳定控制在设定值附近, 整个控制过程无需人工介入, 且运行稳定、可靠。

收稿日期: 2024-02-29

第一作者: 孙涛(1974—), 男, 山东肥城人, 本科, 高级工程师, 电气自动化专业。E-mail: 13105489767@163.com

## 1 矿渣立磨工艺流程简介及存在问题

立磨生产矿渣粉时的工艺流程见图 1。原料仓中的矿渣被定量送入立磨进行精细研磨。随后,在高速热风气流的带动下,小颗粒细粉经过选粉机的筛选,只有合格的细粉才会被主排风机引导至收尘器进行收集。之后,细粉再通过空气斜槽和入库斗式提升机被送入成品矿渣粉库。而那些无法被热风带起的物料,会通过排渣口排出,并借助循环斗式提升机返回立磨,与新料混合后再次进行粉磨。为了烘干矿渣粉,热风炉会提供所需的热风,并通过调节阀调控煤气流量,以维持磨内热风温度的恒定。然而,在实际生产过程中,磨机出口的热风温度会受到多种因素的影响,如水渣的水分含量、煤气压力、磨内压差等。这些因素的变化都可能导致温度产生较大的波动。当温度过低时,料层会变厚,这不仅会增加磨机的功率和电耗,还会加剧磨机的振动,从而严

重影响产量和质量。相反,当温度过高时,料层会变薄,稳定性降低,容易引发磨机工况的波动。此外,过高的温度还会导致产品细度变粗,甚至可能损坏立磨设备和收尘器的滤袋,增加煤气的消耗和设备损坏的风险。因此,为了保持生产的稳定性和效率,必须将磨机出口的温度精确控制在  $96^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$  的范围内。

石横特钢集团有限公司微粉车间自 2010 年 3 月正式投产以来,一直采用 3 台 30 万吨级的矿渣立磨磨机进行生产。然而,磨机热风炉的煤气流量调节也是完全依赖于操作人员的手动操作。据统计,操作人员需要每分钟至少调整两次温度,工作强度大且效率低下。尽管如此,由于调节过程中的滞后性,温度控制的精确性仍然难以保证,温度的波动范围通常维持在  $90^{\circ}\text{C} \sim 101^{\circ}\text{C}$  之间。这种不稳定的温度环境不仅严重影响了产品的质量和产量,而且还导致了大量的能源浪费。

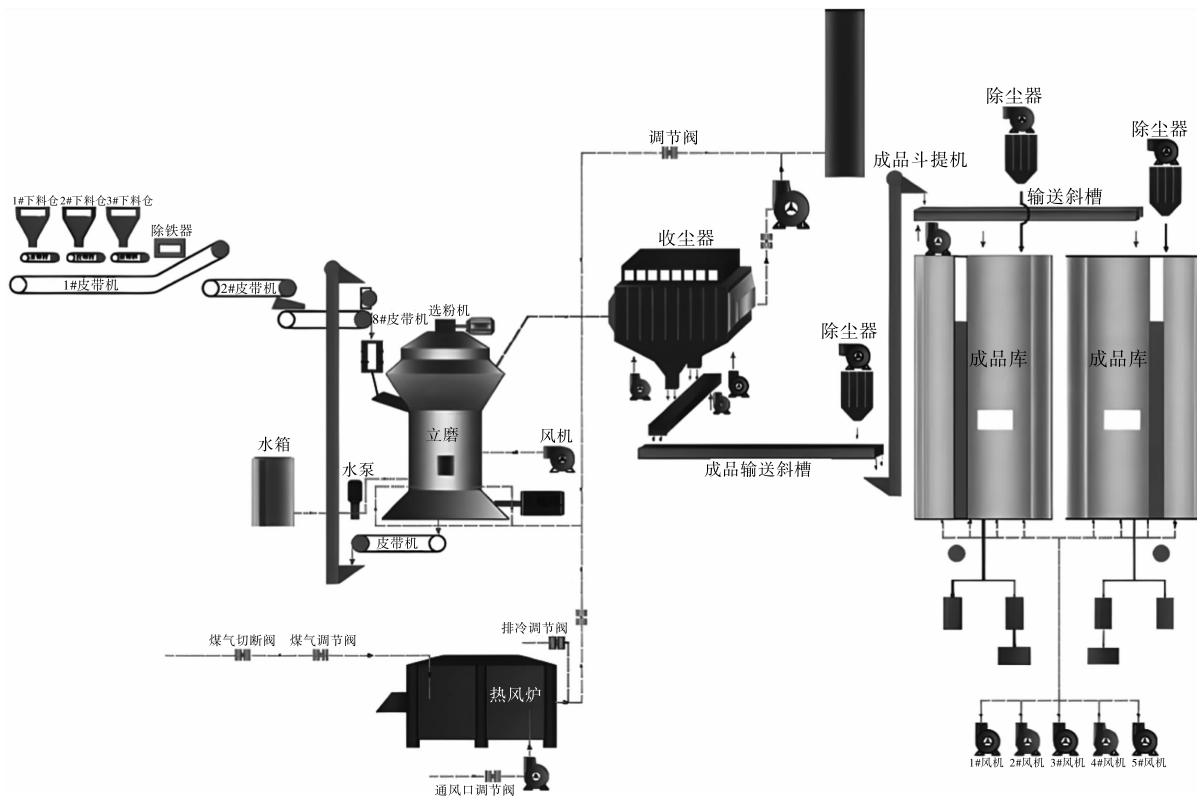


图 1 立磨磨粉矿渣工艺流程图

## 2 方案设计与选择

为了实现这一目标,需要对现有的工艺流程和每台磨机工作特性进行全面的分析和优化,找出影响温度控制的关键因素,并结合常规控制与串级控制的构成特点,进行深入的比较和分析,从而确定最

佳的自动加热控制模式以及相应的控制策略。

### 2.1 常规控制方案

常规控制是一种广泛应用于工程实际的常见控制算法,其结构简单,适用于一般生产过程的控制需求。图 2 展示了热风炉出口温度的常规控制系统框图,该系统由被控对象、测量变送器、调节器和调节

阀组成单回路闭环控制系统。图 3 所示是热风炉出口温度常规控制系统图,磨机生产系统的被控变量是出口温度,用高炉煤气流量作为操作变量。然而,当煤气上游压力发生波动时,即使煤气阀门开度保持不变,煤气流量也会受到影响,进而逐渐影响磨机出口温度。由于加热炉的热容较大,从操作变量到被控变量的时间常数较大,导致温度控制器在发现偏差后进行的控制不够及时,可能引起炉出口温度产生较大的动态偏差。此外,磨机实际生产工况较为复杂,若出口温度不能及时调整,可能会对磨机运行状况产生较大影响,严重时甚至导致立磨振动值上升并引起磨机振停。因此,常规控制在处理这种复杂工况时存在明显不足。

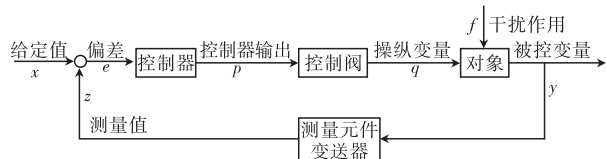


图2 热风炉出口温度常规控制系统框图

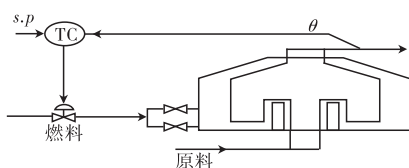


图3 热风炉出口温度常规控制系统图

## 2.2 串级控制方案

为了克服常规控制系统的局限性,必须引入复杂控制系统中的串级控制解决问题,串级控制系统通过两个控制器(温度控制器和流量控制器)来解决纯滞后较大、时间常数较大以及干扰多而强烈的变量控制问题。图4展示了热风炉出口温度与高炉煤气流量串级控制系统的示意图。系统不仅要考虑对出口温度的控制,同时还要对煤气流量进行调控,系统通过设置控温、控流量两个控制器予以实现。温度控制器TC的输出作为高炉煤气流量控制器FC的给定值,亦即流量控制器的给定值应该由温度控制的需要来决定它应该“变”或“不变”,以及变化的“大”或“小”。当温度偏高时,应把燃料气流量控制器的设定值减少一些;当温度偏低的时候,则应将燃料气流量控制器的设定值增加一些。据此,把两个控制器串接起来,流量控制器的设定值由温度控制器输出决定,即流量控制器的设定值不是固定的,这样既能迅速克服影响流量的扰动作用,又能使温度在其他扰动作用下也保持在设定值,即为串级控制系统。

## 2.3 串级控制系统设计

通过对常规控制和串级控制方案的分析与比较,尤其是在煤气压力或原料水分存在较大波动的情况下,常规控制系统的控制质量较差。因此,该方案选择串级控制作为实现热风炉自动控制的最终策略。图5为热风炉出口温度串级控制系统的框图,该系统包含两个闭合回路(主回路和副回路)、两个控制器(主控制器和副控制器)以及两个测量变送器(分别测量主变量和副变量)。主回路是一个定值控制系统,而副回路则是一个随动控制系统。在该方案中,选择的副变量即为操纵变量(煤气流量)本身。温度控制器的输出作为流量控制器的设定值,流量控制器根据设定值调整煤气流量。这种串级控制结构的特点是两个控制器串接使用,副回路具有快速调节作用,能够有效地克服副回路中的扰动影响。当干扰来自于煤气压力或流量的波动时,副回路能够及时地进行调整以减少这种干扰对主变量的影响,从而提高出口温度的控制质量。

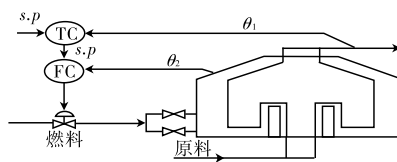


图4 热风炉出口温度串级控制系统

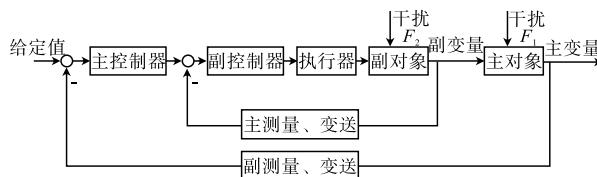


图5 热风炉出口温度串级控制系统的框图

## 3 控制程序开发

### 3.1 上位机界面改造

原上位机系统采用的是西门子的 SIMATIC-WinCC 过程监视系统。为了提升上位机对相应操作的控制能力,需要在上位机画面中增加一些关键功能。具体来说,需要增加主、副控制器的 PID 参数设置与修改功能,这些参数包括增益(GAIN)、积分时间( $T_i$ )和微分时间( $T_d$ )。此外,还需增加磨机出口温度的设定功能。在上位机系统中,还应能实现调节阀的自动/手动控制切换功能。当切换到手动模式时,操作人员可以直接在上位机界面上手动操作调节阀的阀位输出值,从而对调节阀进行直接的手动控制,同时为了实时监控调节阀的状态,上位机画面还应实时显示调节阀的阀位输出值以及阀位反

馈值。这样,操作人员可以随时了解调节阀的工作状态,并根据需要做出相应的调整。

### 3.2 PLC 程序搭建

磨机采用的是西门子 S7-400 系列 PLC 控制系统,主、副 PID 控制功能利用 SIEMENS 公司 PLC 编程软件 S7 的功能块 FB41“CONT\_C”在 OB35 功能块中分别进行调用编程。

#### 3.2.1 主、副控制回路

主、副回路的手、自动切换按钮 MAN\_ON 为同一个变量,即同时切换为手动或自动状态,主回路为温度 PID 控制,采用 PID 控制模式,而副回路采用 PI 模式,两控制回路的设定值(SP\_INT)与测量值(PV\_IN)均采用实际工程量,因此主回路的调节

输出 LMN 需折算成相应煤气流量值后送副回路作为副回路的设定值(SP\_INT),副回路设定值(SP\_INT)实时接受主回路的输出值(LMN),而副回路的 PID 调节输出值(LMN)去控制调节阀的开度实现串级控制,同时还要实时地将煤气流量折算成 0~100% 的值作为主回路的手动输出值(MAN),目的是使主回路的手动输出值(MAN)始终跟踪副回路测量值(PV\_IN),确保在手动状态下主回路的输出值(LMN) = 副回路设定值(SP\_INT) = 副回路测量值(PV\_IN),以便为将回路切换为 Automatic = True 时的瞬间,副回路 SP\_INT 与副回路测量值(PV\_IN)保持一致,以保证回路切换瞬间,调节阀开度保持不变。控制逻辑程序图如图 6。

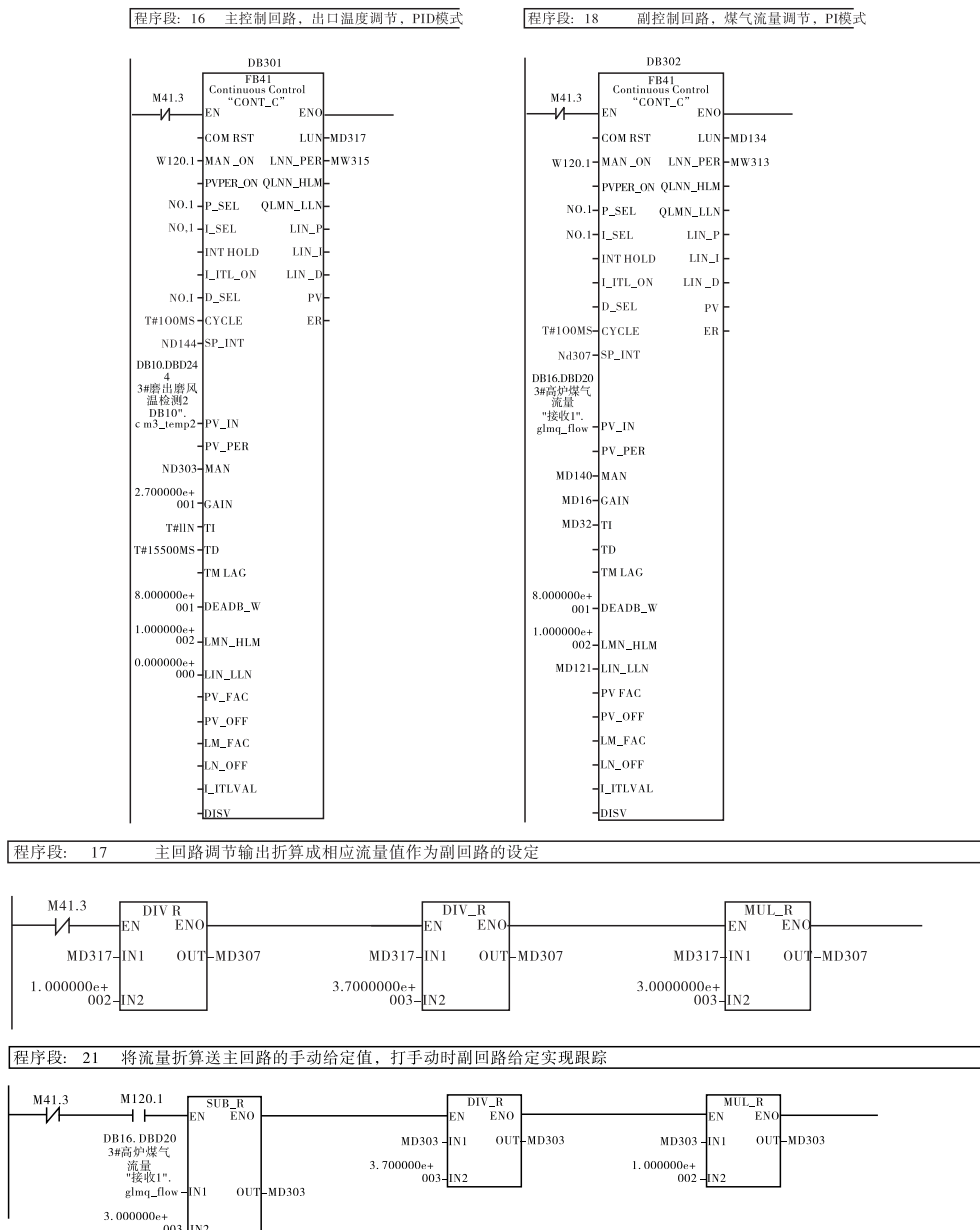


图 6 主、副控制回路控制逻辑程序图

### 3.2.2 无扰动切换

在手动与自动切换的瞬间,给煤气调节阀的输出信号不能发生突变现象,以免切换过程给生产带来较大扰动,造成危险。因此在自动状态下,阀位手动给定值要跟随现场调节阀的阀位反馈值的变化而

变化,才能保证在手动至自动切换瞬间的生产稳定,系统所用的 FB41“CONT\_C”的控制模式从手动切换到自动是可以实现无扰切换,反之不是无扰切换,需要通过编程实现。无扰动切换程序如图 7。

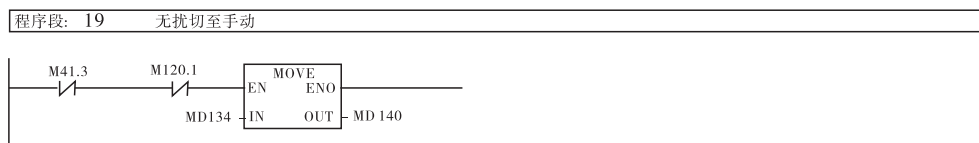


图 7 无扰动切换程序图

## 4 结束语

热风炉出口温度的串级控制方案的成功应用,取得了显著的成效。如图 8 所示,即使在煤气压力发生大幅度波动的情况下,依然能够稳定地将磨机出口温度控制在  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  的范围内,同时,该方案有效降低了高炉煤气的消耗量,显著减少了能源消耗,为企业带来了实实在在的经济效益。此外,该串级控

制方案的引入不仅取代了传统的人工操作方式,极大地减轻了员工的劳动强度,还显著提升了产品质量和生产效率。这不仅提高了企业的整体竞争力,也为员工创造了更加舒适的工作环境,提升了员工的工作满意度,为企业的可持续发展注入了新的活力,展现了工业自动化和智能化在生产效率提升、能源节约以及工作环境改善等方面的巨大潜力。

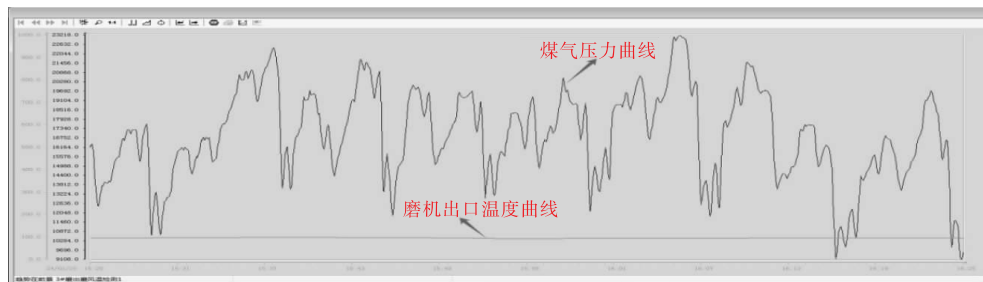


图 8 热风炉出口温度趋势图

### 参考文献:

- [1] 黄步余. 石油化工自动控制设计手册[M]. 4 版. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [2] 方康玲. 过程控制系统[M]. 2 版. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2007.
- [3] 俞金寿, 顾幸生. 过程控制工程[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [4] 曹辉, 霍昱. 可编程序控制器过程控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [5] 厉玉鸣. 化工仪表及自动化[M]. 4 版. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [6] 胡长征. 生物质热电厂化学吸收碳捕集的动态特性及控制策略研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2022.
- [7] 肖军, 耿青涛. 基于 PLC 的陶瓷辊道窑烧成段温度串级控制系统设计[J]. 化工自动化及仪表, 2019, 46(10): 857-861.
- [8] 刘阳, 王亚刚. 最小熵基准的并行串级控制系统的性能评估[J]. 控制工程, 2019, 26(10): 1899-1904.
- [9] 王瑞, 尤恩波. 关于水箱液位串级控制系统稳定参数的控制分析[J]. 工业仪表与自动化装置, 2016(06): 12-14.
- [10] 姜玉山, 严文福, 王育红, 等. 焦炉加热优化串级控制方案的研究与应用[J]. 山东冶金, 2005, 027(002): 25-27.
- [11] 张颖超. 串级控制系统抗二次干扰能力提高的诠释[J]. 工业仪表与自动化装置, 1996(3): 31-33.