

「鼓风机」

# AV50-12高炉鼓风机 防喘振控制系统的设计与实现

文/江苏永钢集团有限公司 张娟 施洪亮 周琦

针对AV50-12高炉鼓风机采用手动模式进行防喘振调节，控制精度低，供风压力波动幅度大，易发生喘振，造成高炉崩料、灌渣等事故的问题，通过进行喘振试验，确定喘振线，再根据防喘振控制原理，基于S7-400可编程序控制器，组态采用Wincc人机界面软件，工业以太网作为通信网络进行数据传输，设计了一套响应速度快、控制精度高，防喘振调节和逆流保护完善的控制系统。

在冶金企业中，高炉鼓风机是高炉生产环节中一个至关重要的设备，目前江苏永钢集团建有450 m<sup>3</sup>高炉四座，配套有四台AV50-12全静叶可调式轴流风机。高炉鼓风机的运行情况和高炉生产相互影响，相互制约，为了保证高炉的连续高产运行，这就要求高炉鼓风机具有良好的控制性能和完善的联锁保护功能。

轴流式压缩机本身具有喘振，失速的固有特性。当运行工况超过了压缩机的稳定工作区，就会发生喘振，使得压缩机内气流紊乱，产生剧烈的振动和热能积聚，对压缩机具有非常强的危害性和破坏性。所以在实际运行中必须对透平压缩机实施喘振主动控制和安全保护措施，使压缩机工作在稳定的工作区。

## 防喘振控制原理

从喘振形成的机理进行分析，在排气压力一定的情况下，避免出现压缩机内流量过小就能防止喘振的发生。在实际运行中，防喘振控制原理就是通过调整出口防喘振阀开度，降低排气压力，同时增大压缩机流量，使工况点远离喘振区域。

如图1所示，喘振自动控制就是利用这一原

理，首先确定一条防喘振线。要求工况点始终在防喘振线下方运行，如果工况点超过防喘振线，防喘振阀将自动打开至一定开度，以降低出口压力，工况点远离喘振线。

## 永钢集团AV50-12高炉鼓风机组的喘振试验

喘振是轴流式压缩机的固有特性之一，由于工艺设计差异以及现场设备安装的不同，压缩机的实际喘振特性曲线一定有所差别，目前都是通过对比风机进行喘振试验，根据实测的喘振工况点，再转换成折线函数把各喘振点连接起来绘制出实际的喘振线。

喘振试验就是首先将防喘振阀全开，静叶设定在某个固定开度，然后逐渐关小防喘振阀，直到压缩机组发生喘振（临界点），再快速地打开防喘振阀，记录下相关的试验数据。重复静叶不同开度的过程，记录下所有试验数据，作为防喘振控制计算和防喘振条件推导的依据。

永钢集团AV50-12高炉鼓风机调试阶段，由陕西鼓风机厂派来的专业人员测试鼓风机性能参数。本次试验分别在四个静叶角度（32°、45°、56°、67°）下进行了试验，试验参数的记录主要读取计算机画面显示值。

### 1. 喘振线的理论计算

喘振试验的目的是计算并确定喘振线，它是进行防喘振控制系统设计的重要依据和关键。因为表1中喉部压差是在实际环境温度下的检测值，

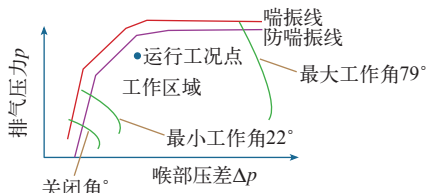


图1 鼓风机运行工况及防喘原理图

表1 机组性能参数表

| 参数       | 1     | 2      | 3      | 4     |
|----------|-------|--------|--------|-------|
| 静叶角度/(°) | 32    | 45     | 56     | 67    |
| 静叶标尺/mm  | 27    | 37     | 46     | 55    |
| 进气温度/℃   | 27.27 | 26.46  | 27.07  | 38.41 |
| 喉部压差/kPa | 2.6   | 4.461  | 5.39   | 7.23  |
| 排气压力/kPa | 318.8 | 387.64 | 424.15 | 449.5 |
| 附注       | 已喘    | 已喘     | 已喘     | 已喘    |

所以必须将其根据温度补偿公式转化为理想状态(标准状态)下的喉部压差。即:

$$\Delta p_{\text{修正}} = (T_{\text{平均}} + 273.15) \times \Delta p_{\text{测量}} / (T_{\text{测量}} + 273.15)$$

式中,  $T_{\text{平均}}$  为鼓风机性能测试风机入口温度平均值;  $\Delta p_{\text{测量}}$  为正常工作时喉部压差实测值;  $T_{\text{测量}}$  为正常工作时风机入口温度实测值;  $\Delta p_{\text{修正}}$  为喉部压差修正值。

表2 补偿后的实测喘振点

| 补偿后的喘振点 | $\Delta p_1$ | $\Delta p_2$ | $\Delta p_3$ | $\Delta p_4$ |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| kPa     | 2.9          | 4.77         | 5.76         | 7.75         |

根据喘振试验测得的各喘振点的排气压力,与温度补偿后的喉部压差之间的关系,利用两点法和截距法,转换为折线函数,分别计算出喘振线各段的斜率 $k$ 和截距 $b$ (计算结果见表3),再用折线连接,就绘制出了试验喘振线,其横坐标为喉部压差,纵坐标为排气压力。为保护机组,保证安全裕量,将横坐标不变,纵坐标下移5%~10%得到该机组的喘振线和防喘振线(喘振线、防喘振线数据和图表见表4和图2)。

表3 各点的斜率和截距

| 喉部压差范围       | $k$       | $b$       | 排气压力值<br>$Y = (kx + b) \times a$<br>其中系数 $a$ : |
|--------------|-----------|-----------|------------------------------------------------|
| (0, 2.9]     | 74.827 58 | 0         | 红线(喘振线): 0.91                                  |
| (2.9, 4.77]  | 36.898 4  | 109.994 6 | 黄线(防喘振线): 0.88                                 |
| (4.77, 5.76] | 33.944 95 | 124.082 6 | 绿线(安全运行线): 0.88 × 0.95                         |
| (5.76, 7.75] | 12.562 82 | 250.638 2 |                                                |
| 7.75         | 0         | 348       |                                                |

表4 喘振线、防喘振线坐标系工艺参数

| 喉部压差/kPa | 排气压力/kPa(绝压) |        |        |
|----------|--------------|--------|--------|
|          | 红线           | 黄线     | 绿线     |
| 0        | 0            | 0      | 0      |
| 2.9      | 217          | 197.47 | 190.96 |
| 4.77     | 286          | 260.26 | 251.68 |
| 5.76     | 319.61       | 290.84 | 281.25 |
| 7.75     | 348          | 316.68 | 306.24 |
| 7.75     | 348          | 316.68 | 306.24 |

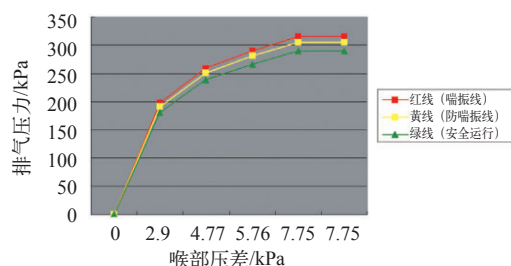


图2 喘振线、防喘振线对应折线图

在正常特性曲线上,喘振界线及防喘振线的位置均是随压缩机进气温度 $T$ 的变化而变化的,如图3所示。如进口温度升高为 $T_2$ ,即 $T_1 < T_2$ ,喘振线将向右下方移动,静叶角度不变时,喉部压差减小,即喘振流量减小了;反之,如进口温度下降为 $T_1$ ,即 $T_2 > T_1$ 时,喘振线将向左上方移动,静叶角度不变时,喉部压差增大,即喘振流量增大了;因此,需采用温度补偿法,使得喘振线、防喘振线根据温度变化进行修正,从而实现防喘振的精准控制。

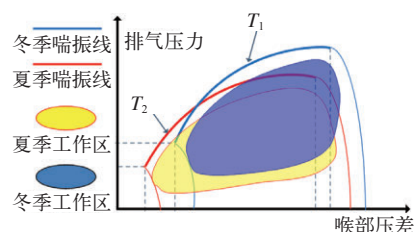


图3 喘振线随温度变化的修正曲线

## 高炉鼓风机防喘振控制功能的设计与实现

### 1. 防喘振控制程序的总体结构设计

防喘振控制程序的结构设计原理如图4所示,首先对现场采集信号进行数据处理,再将喉部压差信号根据进气压力、进气温度进行温压补偿,防喘折线函数根据补偿后的喉部压差值,自动计算出防喘振线对应工况点的排气压力高限SP;接着进行工况点超限判断,排气压力换算值作为采集值PV,根据设定值SP与采集值PV的差值进行PID控制。由于防喘阀为气闭阀,故将PID调节输出值与手动值(如图5所示,画面上的手动开/关或快开按钮,控制防喘振控制器内部手动输出值,动作幅度分别为:关:1%;开:1%;快开:5%)进行低值选择,即以开阀信号的输出为优先。

如果压缩机组处于闭锁状态,则直接输出数值0.0(全开)信号,控制防喘阀1、2全开。否则将进行低值比较,并经分程计算后送至防喘阀1,2进行开度调节。如果出现机组逆流或停机联锁信

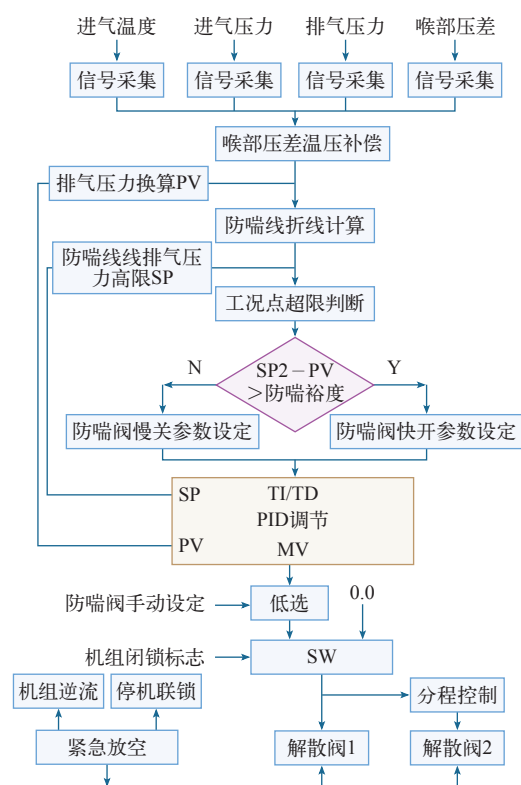


图4 防喘振控制程序结构原理图

号，联锁电磁阀失电，防喘阀气路被切断瞬间全开，此时，防喘阀不受输出值控制。

防喘振阀1、2的控制采用分程重叠调节，防喘振控制器输出开阀规律如下：

控制器输出值为0%时，防喘振阀1、2全关；控制器输出值为0~70%时，防喘振阀1逐渐打开至控制输出为93.5%，防喘振阀2仍处于全关；控制器输出值大于70%时，防喘振阀1的控制输出继续增加，防喘振阀2逐渐打开，控制器输出递增；控

制器输出值为75%时，防喘振阀1控制输出为100%阀门全开，防喘振阀2控制输出为16.8%；当控制器输出值为100%时，防喘振阀1、2控制输出均为100%阀门全开。

阀门规律与开阀规律相反，先关防喘振阀2，再关防喘振阀1。

## 2. 高炉鼓风机逆流保护

根据防喘振控制程序结构的设计，在工况点接近防喘线时，防喘阀自动进行快速调节，保证工况点远离喘振区。但是如果出现防喘阀失灵、喉部压差测点故障等情况，机组就有发生喘振的危险，因此必须设置逆流保护。逆流是最危险的工况，对轴流式压缩机的危害最大，所以逆流保护也是最重要、最关键的联锁保护。

当高炉鼓风机在电动机运行且静叶已打开 ( $\geq 22^\circ$ ) 时，判断喉部压差小并持续10 ms，经逻辑判断后控制系统发出喘振报警信号；如果此信号再持续4s，控制系统进入安全运行。所谓安全运行就是将静叶闭锁在  $22^\circ$ ，同时通过电磁阀失电迅速打开防喘振阀，止回阀强制关闭，送风阀关闭；再持续5 s产生持续逆流报警信号，同时执行持续逆流联锁停机操作（如图6所示）。

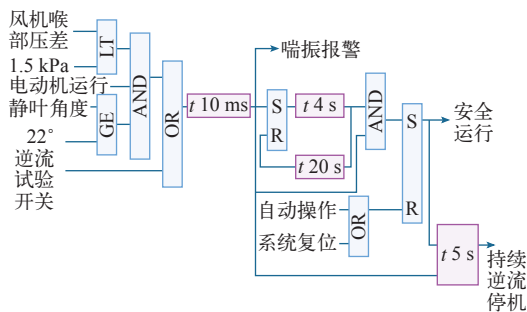


图6 逆流保护逻辑框图

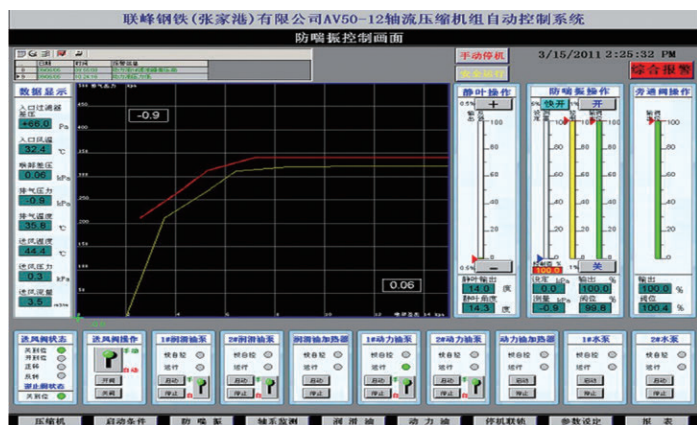


图5 防喘振工况监视及控制画面

## 结束语

AV50-12高炉鼓风机防喘振控制设计了手/自动控制的组合模式，以及逆流等保护功能完善，已成功应用于江苏永钢集团公司高炉配套鼓风机组，实践证明控制系统响应速度快、控制精度高，达到了预期设计的各项指标，为鼓风机组和高炉的长期安全运行提供了有效保障。EA

(收稿日期：2014.12.25)

[编辑：白文亭]