

离心式压缩机

防喘振控制方法

离心式压缩机喘振产生的原因及解决方案——离心式压缩机是工业生产中的重要设备，其具有排气量大、结构简单紧凑等优点，但也存在一些缺点如稳定工况区间较窄、容易发生喘振。喘振给压缩机带来危害极大，为了保障压缩机稳定运行，必须应用有效的防喘振控制。本文主要介绍了离心式压缩机喘振产生的原因，详细叙述了压缩机防喘振的意义与方法，以离心式空气压缩机为例，基于霍尼韦尔 DCS 系统如何实现防喘振控制。

文 / 葛昕炜 褚瑞华 傅江东 李翔

离心式压缩机工作及喘振原理

离心式压缩机的工作原理

随着我国工业的迅速发展，工业气体的需求日益增长，离心式压缩机因其优秀的性能及较大的排气量而被广泛应用于工业生产中。在离心式压缩机中，汽轮机（或电动机）带动压缩机主轴叶轮转动，在离心力作用下，气体会被甩到工作轮后面的扩压器中去。

而在工作轮中间形成稀薄地带，前面的气体从工作轮中间的进气部分进入叶轮，由于工作轮不断旋转，气体能连续不断地被甩出去，从而保持了气压机中气体的连续流动。气体因离心作用增加了压力，以很高的速度离开工作轮，经扩压器后速度逐渐降低，动能转变为静压能，压力增加，同时气体温度相应升高，在单级

压缩不能达到压力要求的情况下，需要经过多级压缩，压缩前需要经过气体冷却器冷却，经过这种多级冷却多级压缩后，最终达到气体压缩的目的。

喘振产生的原因

喘振是目前离心式压缩机容易发生的通病。离心式压缩机的操作工况偏离设计工况导致入口流量减小，使得压缩机内部叶轮、扩压器等部件气流方向发生变化，在叶片非工作面上出现气流的旋转脱离，造成叶轮通道中气流无法通过。该工况下，压缩机出口压力及与压缩机联合工作的管网压力会出现不稳定波动，进而使得压缩机出口气体反复倒流即“喘

振”现象。

另外，压缩机的吸入气体温度发生变化时，其特性曲线也将改变，如图 1、图 2 所示，这是压缩机在某一恒定转速情况下，因吸入气体温度变化时的一组特性曲线。曲线表明随着温度的升高，压缩机易进入喘振区。

喘振现象的发生，由于气体反复倒流，会打破压缩机原有的运动平衡，导致转子的振动增大，在旋转中与定子接触摩擦，通常监控上的表现为压缩机出口的压力反复波动，轴承温度逐渐升高。严重喘振时的强烈振动，会使压缩机定子和转子发生断裂，密封和轴承损坏，造成事故，所以应

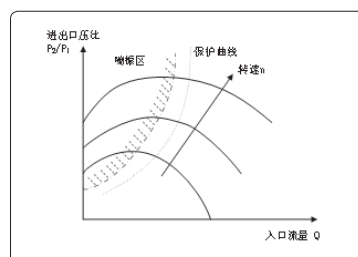


图 1 离心压缩机的性能曲线

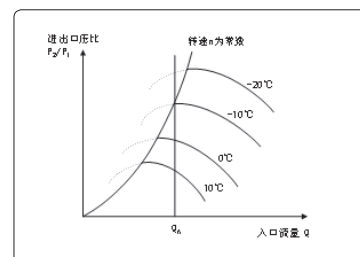


图 2 温度对性能曲线的影响

本文作者供职于杭州制氧机集团股份有限公司。

防止压缩机进入喘振工况。

为了避免压缩机在正常运行时进入喘振区,通常会配有回流阀或放空阀,由于压缩机发生喘振的根本原因是进气量减小或用气量降低,在控制中通过打开回流阀或放空阀增加压缩机的进气量或排出量,可以达到防止喘振的目的。

防喘振控制

喘振曲线的生成

空气压缩机随机资料中,厂家通常会给出理论的喘振曲线: F (Nm^3/h)- P (kPa), F 表示压缩机入口流量,作为曲线的横坐标; P 表示压缩机的排气压力,作为曲线的纵坐标。喘振曲线一般是在

第一象限中的一条弧线如图3所示,喘振曲线的左侧处于“小流量,高压力”的工况,工作点到该区域中压缩机就会发生喘振;喘振曲线右侧处于“大流量,小压力”的工况,工作点在该区域中可正常工作,不会发生喘振。

压缩机的工程师在现场会进行实际的喘振测试,以此来获得最真实的喘振曲线,在压缩机入口无流量计时,会用入口的喉部差压代替流量进行计算,理论上喉部差压与流量的平方成正比,具体步骤为:

1. 将压缩机出口去下游的管道切断,一般会在出口管道加装盲板,因为排气无法进入下游,只能通过防喘阀放空,若防喘阀

关小,则会造成出口压力憋高、流量减小的情况,以此来模拟喘振的工况。

2. 保证防喘阀全开情况下,起动压缩机,用导叶调节合适的喉部差压,然后缓慢关闭防喘阀,直至压缩机的振动出现不规则波动,出口压力出现周期性波动,表明出现喘振征兆,需要迅速打开防喘阀。

3. 控制室人员查看控制系统中的历史趋势,记录下喘振发生时的进气温度、排气温度、入口压力、排气压力以及喉部差压等参数,以此作为喘振曲线的一组数据。

4. 改变导叶开度,以不同的入口的流量,重复进行2、3步骤,测试出不同工况下的喘振点。

5. 将各喘振点拟合,做出喘振曲线。

防喘振控制方案

喘振试验数据作为喘振联锁线,工作点运行到该线,判断为已经发生喘振,需要立即联锁停压缩机,并将防喘阀电磁阀失电,因为阀门故障开特性,防喘阀全开,以防止设备损坏;喘振线向右偏移5%作为保护线,工作点运行到保护线上,判断为即将发生喘振,联锁防喘阀电磁阀失电,阀门全开,使工作点快速远离保护线,但不停压缩机,待机器工作稳定后,可以再次关小防喘阀重新加载;喘振线向右偏移10%作为控制线。工作点离喘振线越远,越不容易发生喘振,但是过度的防喘振会导致大量气体回流或者放空,造成能源的浪费,因此正常运行时需要将工作点控制在合适的区间里,如图4所示。

由于吸入气体的温度对喘振有一定的影响,温度越高,压缩

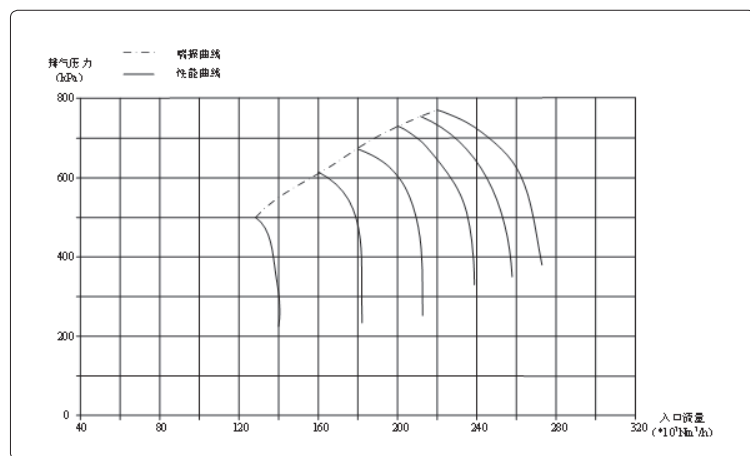


图3 压缩机理论喘振曲线

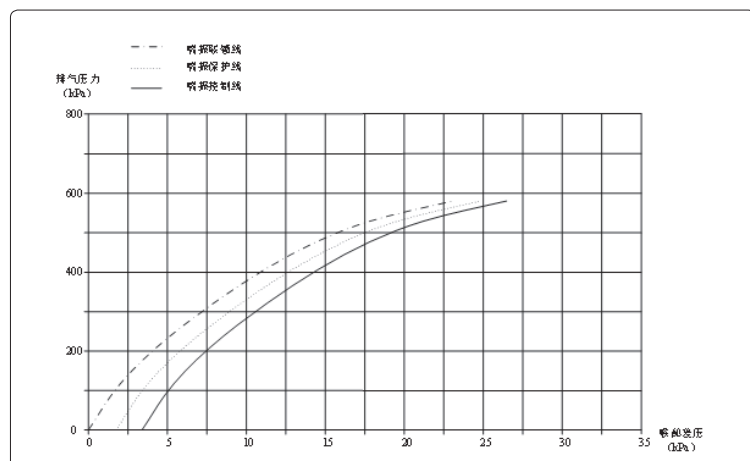


图4 压缩机实际喘振曲线

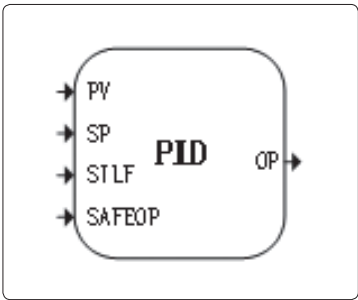


图 5 PID 块

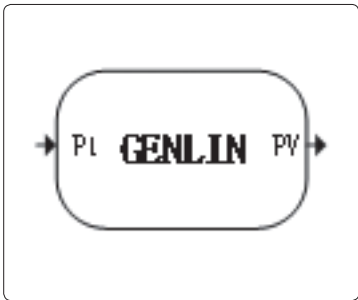


图 6 折线块

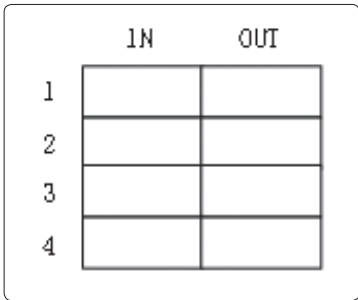


图 7 折线块设置

机的性能越差，其他条件相同的情况下越容易发生喘振，因此，还需对实际的喉部差压进行温度补偿，补偿到实测喘振曲线的入口温度再进行计算，具体补偿公式如下（ ΔP 为喉部差压）：

$$\Delta P(\text{补偿}) = \Delta P(\text{实测}) \times \frac{300K}{T + 273.15K}$$

霍尼韦尔系统实现喘振保护

1. PID 功块

PID 块是防喘振保护中最重要的部分，PV 引脚连接 AI 输入即实测排气压力；OP 引脚连接 AO 输出即控制对象——定位器；SP 引脚为被测量的设定值，在防喘振保护中会连接实际喉部差压经防喘振控制线计算得到的排气压力。

在 PID 块投入自动后，PID 块通过比较 PV 和 SP 的偏差，去计算 OP 的输出，使 PV 向 SP 靠近，从而实现将工作点控制在防喘控制线附近。SAFEOP 引脚可输入模拟量，输入的范围可在 OP 的范围中任意输入，由于防喘振中的 PID 块 OP 引脚一般连接的是阀门的定位器，通常 OP 的范围是 0~100；SFIL 引脚的作用是为了使 PID 无扰动地投入自动控制，当 SILF 引脚为 ON 时，将 OP 强制输出为 SAFEOP 的值并且将 PID 块的模式切换为手动，手动状态下 SP 跟踪 PV 的值。如图 5 所示。

2. 折线块

折线块只有输入输出两个引

脚，均用于连接模拟量，在设置中可以输出若干组 X-Y 的值，多组 X-Y 的值可以组合成一段连续的折线，输入值通过 Y(X) 的折线函数计算得到输出值，在防喘振保护中将实测到的喘振点输入 X-Y 的值中，输入引脚连接经过补偿的压缩机喉部差压值，输出引脚的值就是通过喘振曲线计算得到的对应排气压力值，可作为联锁或者控制的参数引用，可连到上述 PID 块的 SP 引脚，来实现对压缩机工作点的控制作用，如图 6、图 7 所示。

3. 逻辑与运算功能块

大于块 (GT)：比较 IN[1] 和 IN[2] 引脚，若 IN[1]> IN[2] 时，则输出由 OFF 变为 ON。

除法块 (DIV)：为数学运算中的除法，OUT= IN[1]/ IN[2]。

最大值块 (MAX)：OUT 输出 IN[1]、IN[2] 中最大的值，如图 8 所示。

4. 速率块

速率块的 P1 和 PV 引脚用于连接模拟量输入和输出如图 9 所示，作用是当 P1 变

化时，PV 的值按一定速率变化到 P1 的值，这里的一定速率是通过 PVROCPOSLM 和 PVROCNEGLM 两个参数进行设置，PVROCPOSLM 为上升速率限制，PVROCNEGLM 为下降速率限制，速率的单位为“工程单位 / 分钟”。通过速率块可实现防喘阀的快开慢关，快开是为了能够及时打开阀门防止喘振，慢关是为了调节工作点时使其慢慢靠近控制线，不至于因为调节过大而导致工作点撞到保护线，使电磁阀的联锁保护起作用。

5. 手操块

手操块一般用于手动输入给定 OP 的值如图 10 所示，常用于手动给定阀门开度。和 PID 块一样，手操块也有 SILF 和 SAFEOP 引脚，功能与 PID 块的相同。

6. 防喘振逻辑搭建

(1) 防喘控制线逻辑搭建

如图 11 所示，Pd11.PV 表示压缩机的喉部差压实测值；Pi1.PV 表示压缩机排气压力实测值；K 表示温度补偿系数，下同。

一般，PID 块的模式应处于

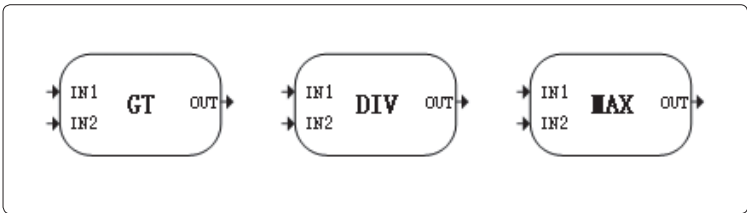
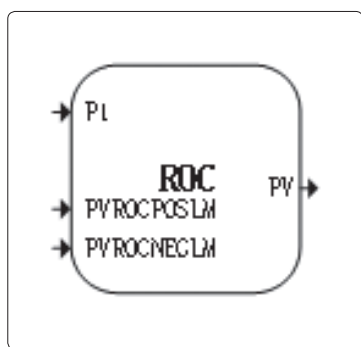
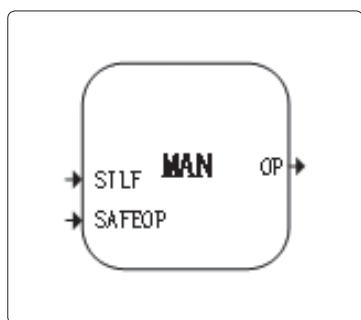


图 8 大于块、除法块、最大值块



CAS (串级) 模式, 该模式下 SP 值由折线块赋值得来, 屏蔽了 SP 的手动写入功能, 使得喘振控制线启用。

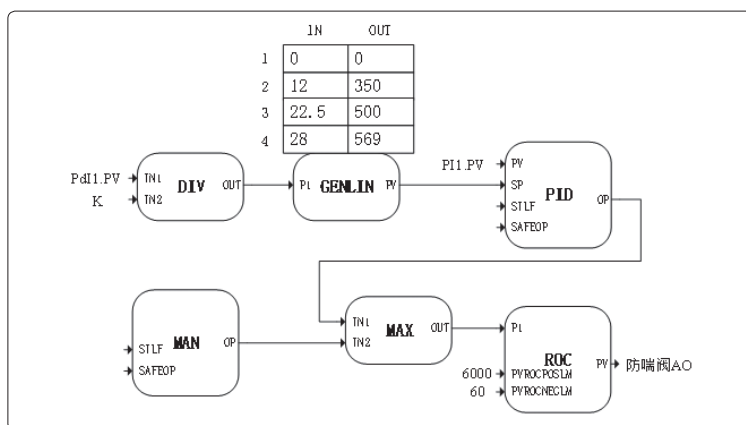
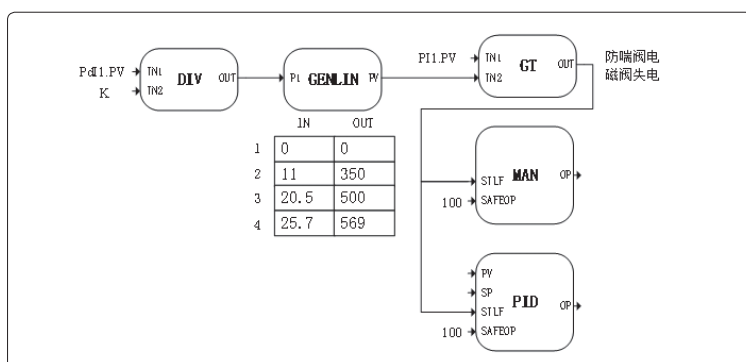


图 12 防喘振联锁线逻辑示意



在操作员通过手操块正常关小防喘阀时，由于速率块对下降速率限制为 $1\%/s$ ，直接输入目标开度，防喘会慢慢地关小，此时的 MAX 块高选输出为手操块的 OP 值，若工况发生波动，排气压力实测值高于或快速接近 SP 引脚的值时，PID 块正作用将 OP 输出值调大，当 PID 块的 OP 值大于手操块的 OP 值时由 PID 块接管阀门控制，由于速率块对上升速率限制为 $100\%/s$ ，所以防喘阀需快速地打开，使工作点下移。

(2) 防喘联锁线逻辑搭建

当补偿后的喉部差压经过喘振线的折线块计算后, 得到排气压力的计算值, 当实测的排气压力比计算值高时, 引起压缩机联锁停车, 如图 12 所示。

(3) 防喘保护线逻辑搭建

与喘振联锁线相似, 当排气压力高于保护线的折线块的计算值时, 联锁防喘阀的电磁阀失电, 并给防喘阀的手操块和 PID 块输出强制为 100 全开, 防喘振保护

线逻辑示意如图 13 所示。

结束语

本文介绍了离心式压缩机的工作原理及喘振的形成原因,详细叙述了防喘振控制的方案以及基于霍尼韦尔-PC 系统如何实现防喘振控制,DCS 中高集成度的模块为系统组态以及后期维护提供了便利,简单有效的防喘振控制对压缩机的安全稳定运行提供了保障。