

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.03.025

## 压缩空气制冷测控系统的防喘振方法

张中楠<sup>1</sup>, 刘旺开<sup>1</sup>, 钱鹏<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学自动化科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 针对固定极限喘振控制方法存在的缺陷, 采用新型可变极限防喘振系统, 设计多重防喘振方法。介绍该控制系统的原理及控制方法, 针对喘振问题设定不同控制线, 根据不同的控制线产生不同的控制响应, 将闭环 PI 控制和开环控制相结合, 设计多重防喘振方法, 并在压缩空气制冷系统中进行试验验证。试验结果表明: 该系统运行可靠, 参数在误差允许的范围内, 能准确达到设定值, 并且长时间处于稳定状态, 使喘振得到有效控制。

**关键词:** 喘振; 喘振极限线; 喘振控制线; PI 控制

**中图分类号:** TP273+.5 **文献标志码:** A

## Anti-Surge Method of Compressing Air Refrigeration Measurement and Control System

Zhang Zhongnan<sup>1</sup>, Liu Wangkai<sup>1</sup>, Qian Peng<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautics Science & Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100191, China;

2. School of Automation Science & Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** For fixing limit anti-surge control method defects, using the new variable limit anti-surge system, the multiple anti-surge method is designed. The principle of the control system and control method is introduced. Aiming to surge, set different control lines. According to different control lines, creates different control responses. The Combine close-loop PI control with open-loop control and the multiple anti-surge methods are designed, and experimental verification in refrigeration system by compressing air. The results showed that the system is reliable, and the parameters in the range of allowable error. The set value can be reached accurately, and in a stable state for a long time. The surge is controlled effectively.

**Key words:** surge; surge limit line; surge control line; PI control

### 0 引言

压缩空气制冷系统的制冷部分由增压透平膨胀机组成。增压机在一定进口压力和转速下, 当增压机进口流量小于一定数值时, 机器会发生喘振, 此时压力会大幅波动, 并引起设备产生强烈的振动, 导致增压机效率降低, 严重时会造成设备损坏。喘振情况与管网特性有关。管网容量越大, 喘振振幅越大, 而频率越低; 管网容量越小, 则相反。原防喘振控制采用固定极限防喘振法, 依据增压机特性曲线, 选取固定流量值作为增压机喘振控制线, 但存在以下缺陷: 因固定极限防喘振法是保证机组在可预料的最坏工作状况下的安全, 因此安全区域较大, 导致系统效率降低。增压机能耗过大, 对增压机负荷需经常改变的生产装置就不够经济。因此, 笔者采用新型可变极限防喘振系统, 设计多重防喘振方法, 既解决了喘振问题, 又提高系统效率。

### 1 喘振各种控制线

#### 1.1 喘振特性曲线及经验公式

如图 1, 增压机的特性曲线是指: 出口绝压  $p_2$  与入口绝压  $p_1$  之比(或称压缩比)和增压机入口体积流量的关系曲线。

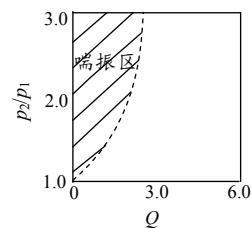


图 1 增压机的特性曲线

连接增压机不同转速下的特性曲线的最高点, 所得的曲线为喘振特性曲线, 其左侧部分称为喘振区, 如图 1 的阴影部分。

对于喘振极限线, 可以通过理论推导获得数学表达式。这条喘振极限线可用一个抛物线方程近

似，其经验公式为：

$$\frac{p_2}{p_1} = K \frac{Q^2}{T} + \alpha \quad (1)$$

其中： $Q$  为增压机入口的体积流量； $T$  为增压机入口的绝对温度； $p_1, p_2$  分别为增压机入口、出口压力； $K, \alpha$  均为常量，由增压机制造厂家提供。

### 1.2 喘振极限线

将喘振特性曲线近似为一条直线，即喘振极限线 (surge limit line, SLL)，如图 2 所示。增压机喘振极限线上的流量是增压机的喘振流量。

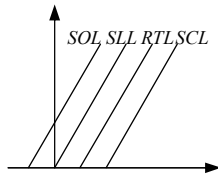


图 2 增压机各种控制线

控制的要点是计算增压机喘振近似度  $S_s$ ， $S_s$  近似等于喘振流量值除以实际流量值。即：

$$S_s = F_{\text{喘振}} / F_{\text{实际}} \quad (2)$$

当  $S_s=1$  时，操作点在喘振极限线上；当  $S_s>1$  时，即增压机实际流量值小于喘振流量值，增压机会发生喘振；当  $S_s<1$  时，即增压机实际流量值大于喘振流量值，增压机不会发生喘振。

### 1.3 喘振控制线

要防止喘振的发生，必须在操作点到达喘振极限线之前做出控制响应，增加增压机的流量。因此在 SLL 线右边设置一条喘振控制线 SCL，如图 2。

SLL 和 SCL 之间的区域称为喘振控制裕度 (surge control margin, SCM)。

$$SCM = -(b_1 + CR_{SO} + CR_D) \times f_4(Z) \quad (3)$$

式中： $b_1$  为初始控制偏置； $CR_D$  为微分响应，由  $dS_s/dt$  决定； $CR_{SO}$  为安全保险响应，正常时为 0； $f_4(Z)$  为控制线特性函数。

由式 (3) 可知 SCM 通常为常数，因此 SCL 与 SLL 几乎平行，从而扩展了增压机安全运行区域。防喘振偏移量  $Dev$  (操作点与 SCL 的距离) 表示为：

$$Dev = 1 - SCM - S_s \quad (4)$$

### 1.4 循环跳闸线

循环跳闸线 (recycle trip line, RTL) 规定一个操作极限，如果操作点越过这个极限，将快速打开防喘振阀，避免喘振发生。

RTL 与 SLL 的距离循环跳闸数 (recycle trip

margin, RTM) 为：

$$RTM = (RT - b_1 - CR_{SO}) \times f_4(Z) \quad (5)$$

式中： $RT$  为循环跳闸线距离； $b_1$  为初始控制偏置； $CR_D$  为微分响应，由  $dS_s/dt$  决定； $f_4(Z)$  为控制线特性函数。

### 1.5 安全保险线

安全保险线 (safety on line, SOL) 规定一个操作极限，如果操作点越过这个极限，表明增压机正在发生喘振，应迅速制止喘振。

## 2 防喘振控制方案

针对原喘振控制的缺陷，笔者采用新型可变极限防喘振系统。喘振控制部分由计算机测控软件、智能控制仪表和回流阀组成。现场的压力、流量等信号由压力变送器和流量计等变送成 4~20 mA 电流信号，传送到下位控制级的智能仪表。操作人员可通过测控软件获得各种试验数据，了解防喘振控制工作情况，实现防喘振控制。

### 2.1 防喘振设计原理

防喘振设计原理为：1) 通过调节回流阀的开度及增压机的工况，使防喘振偏移量 ( $Dev$ ) 尽可能接近零，从而使增压机能产生最大效率；2) 根据设定的不同控制线，当操作点越过不同的控制线产生不同的控制响应；3) 将闭环 PI 控制和开环控制相结合；4) 选择反应灵敏的变送器和响应动作快速的调节阀，提高防喘振控制系统的响应速度；5) 设计软件保护、硬件保护和手动切断阀多重防喘振方法，提高系统防喘振能力。

### 2.2 增压机回流阀

如图 3，本系统在增压机设置回流阀。该阀有以下用途：1) 压力调节：使增压机出口压力保持恒定，该阀的开大或关小，可使压力降低或升高；2) 防喘振：在进口流量接近或达到喘振流量时，该阀会自动打开，使进口流量增大，防止喘振的发生；3) 开大回流阀，可增加增压机的负荷，使膨胀机减速。

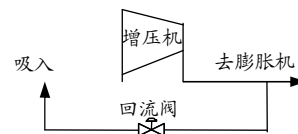


图 3 增压机回流阀

## 3 新型可变极限防喘振系统

计算机实时监控进口压力、出口压力及进口流量，计算操作点位置。根据操作点越过不同的控制

线产生不同的控制响应, 自动控制回流阀, 从而控制进口流量, 防止喘振发生。同时根据工况设定合适的 PI, 使系统稳定的工作。

### 3.1 防喘振 PI 控制

使用 PI 控制是为了解决因微小扰动而反复调节。根据防喘振偏移量 ( $Dev$ ) 设置相应的比例积分响应。当  $Dev$  接近零时, 设置缓慢调节的 PI, 保持工作过程稳定。当  $Dev$  小于零时, 设置快速调节 PI, 使操作点快速远离喘振区。缓慢调节和快速调节的 PI 是经过大量自整定试验得到的。

### 3.2 循环跳闸线的控制响应

当增压机进口流量迅速降低, PI 控制无法将操作点保持在  $SCL$  的右边。为了快速打开喘振阀, 利用循环跳闸线  $RTL$  控制, 避免喘振的发生。

根据式 (4) 可知: 当  $Dev=0$  时, 操作点在  $SCL$  上。此时增压机效率最大, 保持稳定; 当  $Dev>0$  时, 操作点在  $SCL$  右边, 这时可以关闭回流阀减少实际流量值; 当  $Dev<0$  时, 操作点在  $SCL$  左边, 这时可以打开回流阀增大实际流量值; 当操作点移至  $RTL$  上时,  $Dev<0$ , 回流阀快速打开使操作点快速右移, 避免系统进入喘振区; 当操作点回到  $SCL$  右侧时, 缓慢关闭回流阀, 同时结合 PI 控制, 保持防喘振偏移量 ( $Dev$ ) 尽可能接近零, 从而使增压机能产生最大效率。

### 3.3 安全保险线的控制响应

操作点移动到  $SLL$  左侧时就会发生喘振。如果因意外 (过程变化, 特别严重的波动) 使操作点越过  $SOL$  线, 则启动安全状态响应, 在快速打开回流阀增加流量的同时,  $CR_{SO}$  自动加 1。由式 (3) 可知, 喘振控制裕度如  $SCM$  将增大,  $SCL$  与  $SLL$  的距离增大。当喘振再次发生时,  $CR_{SO}$  都会自动加 1, 限制喘振再次发生。当喘振原因消除之后, 可以手动通过测控软件恢复  $CR_{SO}$  为零, 使  $SCL$  工作在合理位置, 从而增大增压机的效率。

## 4 多重防喘振措施

为了保证系统安全, 在软件自动保护的同时, 还设计了硬件自动保护和手动切断紧急切断阀。

### 4.1 硬件自动保护

当操作点越过  $SOL$ , 软件根据  $SOL$  的控制响应, 快速打开回流阀增加流量, 自动断开回流阀控制线路, 保持现场回流阀状态不变, 防止软件自动保护的同时, 人为手动错误操作, 发生意外。当喘

振危险原因解除时, 自动恢复回流阀的控制线路。

### 4.2 手动切断紧急切断阀

在膨胀机进口处设置一个紧急切断阀 (气动薄膜切断阀), 当机组处于危险状态时, 根据各危险点发出的连锁信号。此阀能在很短的时间 (1~3 s) 内关闭。从而切断进入膨胀机的气源, 使其快速停车, 起到安全保护的作用。

## 5 试验结果

将防喘振方法应用到压缩空气制冷系统试验, 得到增压膨胀机压缩比 ( $p_2/p_1$ ) 与增压机入口流量 ( $Q$ ) 的关系曲线如图 4 所示。

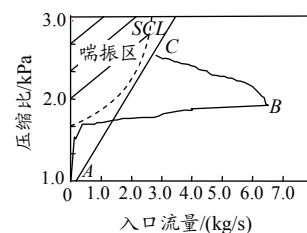


图 4 试验结果

制冷部分试验过程为: 1) 快速打开增压膨胀机的喷嘴, 此时进口流量、出口压力快速上升。然后缓慢打开喷嘴, 各参数缓慢上升至稳定状态。此过程见图 4 的曲线  $AB$ ; 2) 缓慢关闭回流阀, 此过程进口流量下降, 出口压力上升, 见图 4 的曲线  $BC$ 。最后操作点稳定在  $C$  点附近。

从图 4 中可知, 最终稳定点  $C$  点在喘振控制线  $SCL$  附近, 此时增压机发挥最大的效率。图 4 中  $B \rightarrow C$  过程中容易发生喘振, 该过程平稳, 参数在误差允许的范围, 准确地达到了设定值, 并且可以长时间处于稳定状态, 喘振得到了有效的控制。

## 6 结论

通过调试应用, 该系统运行稳定可靠, 实现了防喘振方法, 可对解决相关问题提供一定的参考。

### 参考文献:

- [1] 王树青, 等. 工程过程控制工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 290-294.
- [2] 侯平. 压缩机的喘振与3C防喘振控制器的基本控制[J]. 石油化工自动化, 2001(4): 29-31.
- [3] 祝旭彤, 张瑾. 空气压缩机新型防喘振控制系统原理及应用[J]. 兵工自动化及仪表, 2005, 32(5): 71-72.
- [4] 蒋平, 沈为群, 刘旺开, 等. 座舱压调试验台测控系统的设计[J]. 兵工自动化, 2007, 26(1): 65-67.
- [5] 钱鹏, 沈为群, 朱恺, 等. 高温环境模拟试验测控系统设计及高温控制方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(11): 2554-2556.