

DOI: 10.3901/JME.2021.12.267

往复压缩机气阀故障条件下气量调节失效的自愈调控方法研究*

王瑶^{1,2} 张进杰^{1,2} 周超¹ 江志农 刘雯华¹ 孙旭¹

(1. 北京化工大学高端机械装备健康监控与自愈化北京市重点实验室 北京 100029;

2. 压缩机技术国家重点实验室 合肥 230031)

摘要: 气阀是往复压缩机最易损部件,尤其在气量调节系统工作状态下,阀片断裂、弹簧断裂等故障频繁发生,进而导致压缩机气量调节失败,严重影响企业生产。为了使往复压缩机在部分气阀气量调节失效故障下,能够不停机自动在线调整恢复到接近正常的性能,构建气缸-气阀气量分配模型,提出一种通过气阀气量分布网络收缩重构和负荷再分配的自愈调控方法。利用主动自愈调控手段,完成故障区域快速隔离,组建新的调节域并寻找自愈路径,再通过负荷自适应分配实现机组故障后的自我恢复。介绍气量调节失效故障自愈调控系统的组成,并进行故障自愈调控性能试验。试验结果表明,自愈调控系统可在故障劣化的初期采用主动调控方法抑制故障的发展,在12 s内将气量调节失效故障的压力波动调整至许可范围内,实现机组不停机由部分气阀气量调节失效故障状态恢复到正常状态,使故障在线自愈,确保设备的健康运行。

关键词: 往复压缩机; 气阀气量调节失效; 区域收缩重构; 负荷自适应分配; 自愈调控

中图分类号: TH457; TB126

Research on Self-healing Control Method for Gas Regulation Failure in Reciprocating Compressor under Valve Fault Condition

WANG Yao^{1,2} ZHANG Jinjie^{1,2} ZHOU Chao¹ JIANG Zhinong^{1,3} LIU Wenhua¹ SUN Xu¹

(1. Compressor Health and Intelligent Monitoring Center of National Key Laboratory of Compressor Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. State Key Laboratory of Compressor Technology, Hefei 23031)

Abstract: Valves are the most vulnerable components of a reciprocating compressor. Especially under the working condition of the air volume regulating system, valve disc rupture, spring rupture and other faults occur frequently, which leads to the failure of gas regulation of compressor and seriously affects the production of enterprises. In order to make the compressor automatically adjust workloads without stopping the machine to achieve normal performance under flow regulation failure condition, the model of air distribution between cylinder and valves is constructed and a self-healing control method based on shrinkage reconfiguration and load redistribution of valve flow distribution network is proposed. When the failure of partial valve air flow regulation occurs, the self-recovery mechanism is realized by quickly isolating the fault actuators, forming a new control area and then finding a self-healing path to complete load adaptive allocation. The composition of the fault self-healing control system is introduced, and performance test is carried out. The results show that the self-healing control system can restrain the development of faults in the initial stage of faults deterioration and adjust the pressure fluctuation to the permissible range within 12 s. The results demonstrate that the self-healing control method can realize the recovery of compressor from gas regulation failure state without shutdown and the healthy operation of the equipment can be ensured.

* 国家重点研发计划(2016YFF0203305)、高校基本科研业务费专项资金(JD1912)和压缩机技术国家重点实验室(压缩机技术安徽省实验室)开放基金(SKJL-YJSJ201808)资助项目。20200927收到初稿,20210512收到修改稿

Key words: reciprocating compressor; gas regulation failure; region contraction and reconstruction; adaptive load distribution; self-healing control

0 前言

往复压缩机是石油、化工、天然气运输等行业重要的动力装备。近些年来越来越多的往复压缩机采用主动控制吸气阀的运动方式来改变压缩的气体体积^[1],使机组能够满足灵活的流量调节需求和实现低负荷高效率运行的目标。通过主动控制吸气阀调节压缩机气量,需要机组全部进气阀参与回流,一旦有个别气阀或其调节部件发生故障,将导致机组气量调节失稳甚至失败,造成机组负荷突增或瞬间降为零^[2]、压比增大等异常。一般当该类故障发生时,都需要立即切换至备用压缩机,将该压缩机停机进行处理^[3]。气阀是往复压缩机最易损部件,尤其在气量调节系统工作状态下,压叉断裂、阀片断裂、弹簧断裂等故障频繁发生^[4],严重影响企业生产。实际工程需求促使相关故障自愈调控技术发展,即在机组运行中当某个或某些气阀及其调节部件发生故障时,通过自动采取调控手段^[5],使机组自行消除故障。故障自愈调控方法可以实时调控,确保机组在设计条件下运行,避免相当一部分非计划紧急停车^[6],保证设备长周期、安全、高效运行。

为了使动力机械设备在发生故障时能达到接近正常的性能,控制系统设计应采用容错控制、故障检测和隔离和恢复方法^[7]。当设备执行机构故障时,根据执行机构的位置和是否被卡住对执行机构故障进行分类和评估^[8]。然后根据设定的重构路径、路径规划和自适应性的调节和控制方法完成故障的自愈化^[9]。近些年来国内外学者在动力机械及工业设备的自愈化方面做了很多研究,如 HYUNSOO 等^[10]研究了四腿机器人故障自愈技术,RANJIBARAN 等^[11]研究了运行状态四旋翼飞行器故障自愈技术,QI 等^[12]研究了无人直升机执行器卡死故障的自愈控制方法。国内王庆锋等^[13]基于可靠性设计和故障仿生自愈原理,研制具有自诊断及自愈化为特征的智能化电液控制系统,提出一种基于功能代偿的多靶点电液控制系统故障自愈调控方法。王维民等^[14]研究了在离心式压缩机转子上引入轴位移故障自愈

调控机制,以轴位移为控制参量,实时调控转子的残余轴向力,保证推力轴承的最小油膜厚度,实现离心压缩机轴位移故障的自愈;GAO 等^[15]研究了故障仿生自愈原理与基于参数和结构的稳态靶向抑制方法。

目前,关于气阀故障条件下气量调节失效的自愈调控研究报道较少。在本文中,通过构建多气阀气量分配模型,提出了一种通过气阀气量分布网络收缩重构实现故障点的快速隔离和非故障区的负荷重分配的自愈调控方法;介绍了气量调节失效自愈调控系统的组成,最后在压缩机实验台上进行了气量调节失效故障自愈调控试验,验证了方法的有效性和实用性。

1 气量调节失效故障

往复压缩机气量调节器的关键部件是卸荷器、卸荷杆和电控液压调节器中的密封元件,如图 1 所示。如果其受到损坏或者出现疲劳磨损,调节特性和功能就会受到影响。表 1 所示为气量调节主要失效部位、失效形式及相关的影响,从表中可以看出,当某个气量调节器常见失效部位发生不同情况的失效后,将导致所在气缸负荷突增或者瞬间降低,该气阀失去气量负荷调节能力,进而导致前后级压比异常增大。

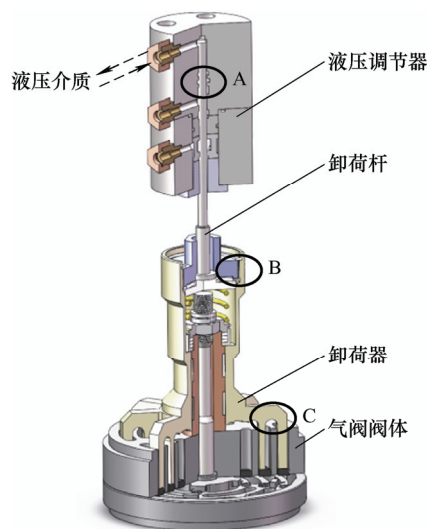


图 1 气量调节器的关键部件及常见失效部位

表 1 气量调节失效部位、形式及影响

| 失效部位 | 失效形式 | 失效后的影响 |
|--------------------|--|--|
| 区域 A：液动力介质密封元件 | ① 长期磨损或温度过高使得密封圈损坏或密封间隙增大，造成密封失效；② 介质污染，密封面处摩擦力矩明显增大，卸荷杆卡塞 | ① 液压调节器中无法形成密闭腔体，卸荷杆无法下行，所在气缸负荷突增；② 卸荷杆无法及时上行，所在气缸负荷突降 |
| 区域 B：卸荷器与卸荷杆螺纹连接元件 | 螺纹因受到腐蚀或者长期冲击疲劳使连接产生松动或直接脱离，卸荷杆对卸荷器失去作用 | 动力无法作用到卸荷器上，气阀调节失效，所在气缸负荷突增 |
| 区域 C：卸荷器与阀片撞击元件 | 长期不均匀撞击导致连接件松动、卸荷杆磨损或者直接断裂 ^[4] | 卸荷器下行位移不够，气阀调节失效，所在气缸负荷突增 |

2 自愈调控原理

气阀故障条件下气量调节失效的自愈调控原则是故障情况下不丢失气量负荷调节能力，维持设备连续运行。建立了气阀故障条件下气量调节失效后的负荷突变主动自适应调控策略，在线实时监测故障发生的征兆，计算评估设备的工况状态与正常工况的偏离程度，通过自愈调控策略适量调整参与回流的进气阀通流面积并改变气体回流时长，抑制局部负荷突变导致的压比过大或过小。构建的自愈调控框架如图 2 所示，框架划分为三个层次：目标层、监测诊断层和自愈调控层^[16]。目标层为往复压缩机设备及气体压缩过程，监测诊断层包括特征监测和状态评估，分别实现故障监测诊断与状态指标的计算评估功能，自愈调控层主要通过气阀通流面积自适应调整和负荷丢失补偿方法实现对目标设备的自愈调控。其中状态评估指标包括安全性指标(压比超限)、可靠性指标(丢负荷或者负荷突增)、经济性指标(能量损耗率)、优质性指标(气量偏差)和灵活性指标(负荷无级调节能力)。

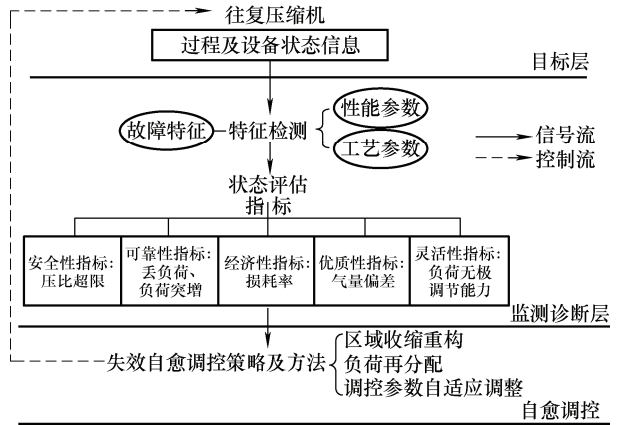


图 2 气量调节失效自愈调控框架

气量调节失效的自愈调控原理，是建立设备运行中消除局部气阀故障的主动控制机制，在故障发生后，通过气量分布网络的收缩重构实现对故障点的快速隔离和非故障区的负荷重分配，实现故障恢复。

如图 3a 所示，在气缸周向分布有多个进气阀，气体进入气缸、回流或者排出气缸的流动以及气缸内的热力学状态均由所有进气阀行为共同作用完成。气缸内需要压缩的气体量分配给各个气阀，气阀的进气量由气量调节机构进行调节。如图 3b 所示构建了单气缸多气阀辐射型气量分配模型，气缸内压缩的气体量为主干线(图中粗实线)，每个气阀的气量为分支线，分支线长度表示流过气阀的气体通流量，虚线位置代表每个气阀的最大通流量。故障前，气缸内总气体量均匀分配给所有进气阀，通过所有进气阀实际通流量的调整满足不同压缩气量的需求；当出现某个或者某几个气阀气量调节失效故障时，首先将故障调节阀隔离，如图中气阀 1 气量调节失效后被隔离，其通流量突变至满气量，之后在气量调节区域内去掉故障区形成新的调节域，区域收缩后，通过在重构的调节域内重新分配气量保持气缸内压缩气体量不变，实现自适应的分配控制。

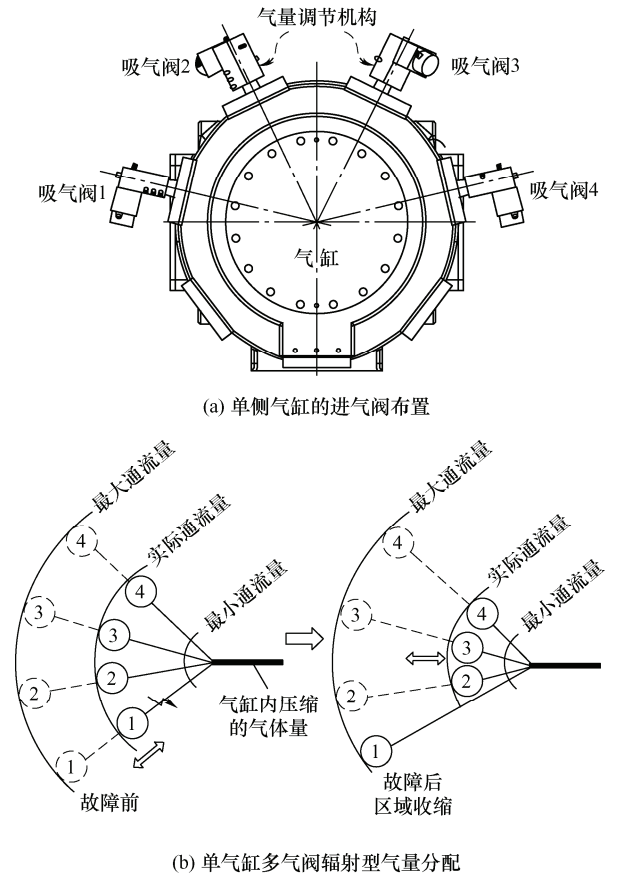


图 3 往复压缩机气阀分布及气量分配示意图

3 自愈调控策略和负荷分配

3.1 部分气阀气量调节失效故障自愈调控策略

部分气阀气量调节失效故障自愈总体调控流程如图 4 所示, 当系统检测到故障信息后首先确定故障点的位置和故障部件的数量, 启动硬件通路隔离方式将故障的气阀气量调节结构隔离; 然后以单侧气缸的非故障调节区形成新调节域, 通过比较负荷转移量和新域负荷裕度评估自愈能力, 判断单侧气缸的新调节域是否存在自愈路径, 若存在则启动单侧自愈调控策略; 若不存在则以双侧气缸的非故障调节区再次形成新调节域, 评估自愈能力, 判断双侧气缸的新调节域是否存在自愈路径, 若存在则启动双侧自愈调控策略, 若不存在则该故障下设备无法实现自愈, 必须采取人工检修排除故障; 若存在自愈路径, 则可以启动自愈策略进行恢复。

$$C_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \rightarrow n_{s-I} \\ \rightarrow n_{s-II} \end{matrix} \quad (1)$$

N_s

本文采用状态矩阵确定故障信息, 如式(1)所示, 将压缩机气缸的每个气阀的状态作为元素构建

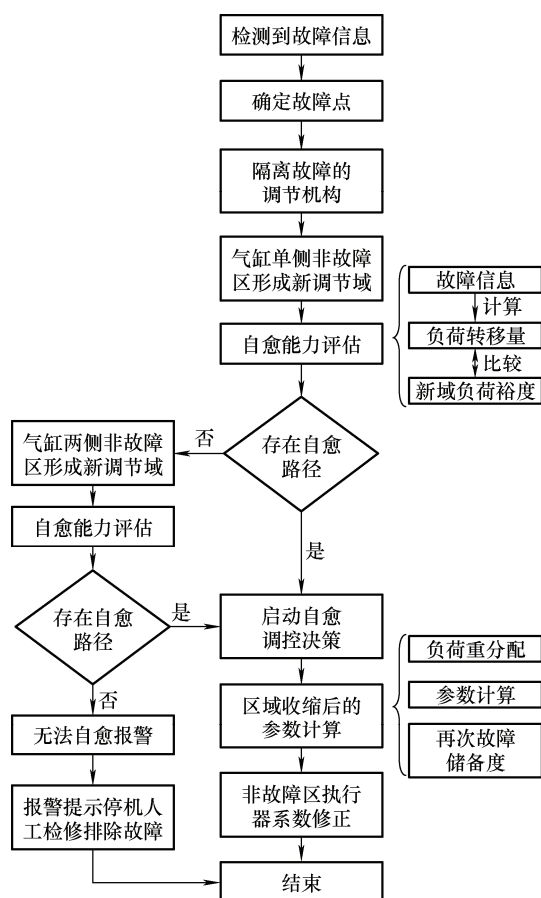


图 4 部分气阀气量调节失效故障自愈调控策略

状态矩阵第一行表示盖侧所有气阀的状态, 第二行表示轴侧所有气阀的状态, 1 代表正常状态, 0 代表故障状态。自愈调节系统将由状态矩阵确定故障点位置和故障点的数量。

3.2 区域收缩重构后的负荷分配

由单气缸多气阀辐射型气量分配模型可知, 气缸内需要压缩的气体由每个气阀的实际通流量决定, 设 η_q 为单个气阀气量负荷, η_Q 为气缸总气量负荷, η_{Q-I} 、 η_{Q-II} 分别为盖侧和轴侧气缸的总气量负荷。

$$\eta_q = \frac{q}{q_{\max}} \quad (2)$$

$$\eta_Q = \eta_{Q-I} = \eta_{Q-II} = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (3)$$

式中, q 为单个气阀的实际通气量, q_{\max} 为单个气阀最大通气量, $\eta_q \in [\eta_{q-\min}, 1]$, $\eta_{q-\min}$ 是避免气阀超温的最小气量负荷。 Q 为单侧气缸实际压缩气体量, Q_{\max} 单侧气缸最大压缩气体量, $\eta_Q \in [\eta_{Q-\min}, 1]$ 。

(1) 单侧气缸区域收缩单侧负荷分配。在无故障状态下, 气缸的总气量负荷均匀分配给每个气阀, 即 $(\eta_q)_i = \eta_Q$; 当单侧气缸 N_s 个进气阀中 n_{s-I} 个阀回流故障时, n_{s-I} 个故障调节阀被隔离, 负荷恢复到满气量, 即 $q_1 = q_2 \cdots = q_{n_{s-I}} = q_{\max}$ 。在单侧气缸区域内去掉故障区形成新的调节域, 区域收缩后, 通过调节域内重新分配气量负荷保持气缸内压缩气体量不变, 则

$$\eta_Q = \frac{n_{s-I} q_{\max} + (N_s - n_{s-I}) q^*}{N_s q_{\max}} = \frac{n_{s-I}}{N_s} + \left(1 - \frac{n_{s-I}}{N_s}\right) \frac{q^*}{q_{\max}} \quad (4)$$

式中, n_{s-I} 为盖侧回流故障的阀数量, N_s 为单侧气缸总进气阀数, q^* 为区域收缩后无故障区域的单个气阀通气量。

设单侧气缸区域收缩单侧非故障区气阀重分配的负荷为 $\eta_q^* = \frac{q^*}{q_{\max}}$, 得

$$\eta_Q = \frac{n_{s-I}}{N_s} + \left(1 - \frac{n_{s-I}}{N_s}\right) \eta_q^* \quad (5)$$

$$\eta_q^* = \frac{1}{1 - \frac{n_{s-I}}{N_s}} \left(\eta_Q - \frac{n_{s-I}}{N_s} \right) \quad (6)$$

(2) 单侧气缸区域收缩双侧负荷分配。当单侧气缸部分气阀气量调节失效后, 在单侧气缸区域内去掉故障区, 区域收缩后, 将双侧气缸无故障区重构形成新的调节域, 通过调节域内重新分配气量负荷保持气缸内压缩气体量不变, 假设盖侧气缸 N_s 个进气阀中 n_{s-I} 个回流故障, 轴侧气缸 N_s 个进气阀中

n_{s-II} 个回流故障, 区域收缩后无故障区域的单个气阀通气量 q^* , 得

$$\eta_q = \frac{(n_{s-I} + n_{s-II})q_{\max} + (2N_s - n_{s-I} - n_{s-II})q^*}{2N_s q_{\max}} = \frac{n_{s-I} + n_{s-II}}{2N_s} + \left(1 - \frac{n_{s-I} + n_{s-II}}{2N_s}\right) \frac{q^*}{q_{\max}} \quad (7)$$

设双侧非故障区重分配的负荷为 $\eta_q^* = \frac{q^*}{q_{\max}}$, 得

$$\eta_q = \frac{n_{s-I} + n_{s-II}}{2N_s} + \left(1 - \frac{n_{s-I} + n_{s-II}}{2N_s}\right) \eta_q^* \quad (8)$$

$$\eta_q^* = \frac{1}{1 - \frac{n_{s-I} + n_{s-II}}{2N_s}} \left(\eta_q - \frac{n_{s-I} + n_{s-II}}{2N_s} \right) \quad (9)$$

比较式(5)、(8)可以看出, 单侧和双侧负荷分配唯一的区别是气量调节失效故障的气阀比率, 因此将两个方程统一表示为

$$\eta_q = K_e + (1 - K_e) \eta_q^* \quad (10)$$

$$\eta_q^* = \frac{1}{1 - K_e} (\eta_q - K_e) \quad (11)$$

式中, K_e 为负荷分配域的故障率因子, $K_e \in [0, 1]$ 。

区域收缩重构后的负荷分配是在故障情况下不丢失气量负荷调节能力为控制原则, 由气缸固定负荷 η_q 和故障率因子 K_e 根据上式来确定新域的单个气阀气量负荷。

3.3 故障自愈路径

由式(10)可得非故障和故障情况下调节域内气缸与气阀气量负荷关系曲线, 如图 5 所示。在无故障时 η_q 与 η_q^* 相等, 由气阀的最小气量负荷(通常为 0.2)决定了气缸的最小气量负荷, 如图 5 曲线 A 所示。当出现气阀调节失效故障时, 气缸单侧重构调节域和双侧重构调节域的 η_q 与 η_q^* 的关系分别如图 5

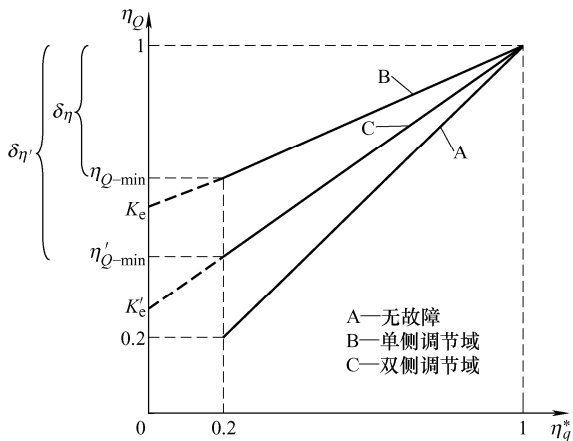


图 5 新调节域的气缸及气阀气量负荷关系

曲线 B 和曲线 C 所示, 在固定的气阀最小气量负荷下, 负荷分配域的故障率因子 K_e 决定了区域收缩重构后的气缸气量负荷调节裕度 δ_{η} 。

当部分气阀气量调节失效故障后将气阀负荷节点收缩形成新的调节域时, 通过判断气缸最大负荷调整量 $1 - \eta_q + \Delta\eta_q$ ($\Delta\eta_q$ 为设备运行中的负荷波动量) 是否在负荷调节裕度内确定是否存在自愈路径: 在单侧调节域内 $\delta_{\eta} = 0.8 - 0.8K_e$, 若 $1 - \eta_q + \Delta\eta_q \leq 0.8 - 0.8K_e$, 则单侧调节域内存在自愈路径, 否则不存在自愈路径。

在双侧调节域内 $\delta_{\eta}' = 0.8 - 0.8K_e'$, 若 $1 - \eta_q + \Delta\eta_q \leq 0.8 - 0.8K_e'$, 则双侧调节域内存在自愈路径, 否则不存在自愈路径。

3.4 调控参数计算

在确定自愈路径并计算得到调节域内的负荷分配量 η_q^* 后, 需要根据气缸容积和缸内压力的关系计算压缩机单一循环周期中的气量调节参数。

气量负荷调节下的缸内压力与气缸容积关系 (P-V 图) 见图 6, 在压缩机气缸气量负荷为 1 的情况下, 工作循环过程为曲线 1-2-3-4-1, 其中 1-2 为气缸余隙中高压气体的膨胀曲线, 曲线 2-3 为吸气过程, 3-4 为压缩过程, 4-1 为排气过程。在分配负荷为 η_q^* 的情况下, 工作循环过程为曲线 1-2-3-5-6-1, 其中在吸气过程终了时气缸内多余的气体回流, 曲线 3-5 为回流过程, 5-6 和 6-1 分别为压缩和排气过程。

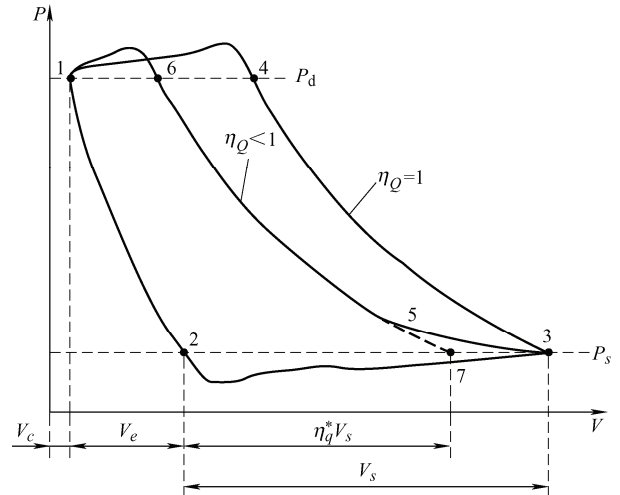


图 6 气量负荷调节下的 P-V 图

随着活塞的运动气缸容积周期性地增大和缩小, 气缸的瞬时容积和容积变化率分别为^[17]

$$V_{cy} = V_c + \frac{\pi D_{cy}^2}{4} r \left(1 - \cos \theta + \frac{\lambda}{2} \sin^2 \theta \right) \quad (12)$$

$$\frac{dV_{cy}}{d\theta} = \frac{\pi D_{cy}^2}{4} r \left(\sin \theta + \frac{\lambda}{2} \sin 2\theta \right) \quad (13)$$

式中, V_c 为气缸余隙容积, D_{cy} 为气缸缸径, r 为曲轴半径, λ 为曲轴连杆比, θ 为曲轴转角。

图 6 中位置 3 为活塞内止点位置, 对应的气缸容积为活塞行程容积, 即

$$V_3 = V_c + \frac{\pi D_{cy}^2}{2} r \quad (14)$$

在吸气压力 P_s 状态下, 气量负荷 η_q^* 所对应的气体体积为 $\eta_q^* V_s$, 由此得图 7 中位置 7 的坐标(V_7 , P_s), $V_7 = \eta_q^* V_s + V_e + V_c$, 得到压缩曲线 5-6 方程如下^[18]

$$\frac{\eta_q^* V_s + V_e + V_c}{V_c + V_{cy}} = \left(\frac{P_{cy}}{P_s} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (15)$$

结合式(14)和(15)得

$$\frac{\eta_q^* \left(V_c + \frac{\pi D_{cy}^2}{2} r \right) + (1 - \eta_q^*) (V_e + V_c)}{V_c + V_{cy}} = \left(\frac{P_{cy}}{P_s} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (16)$$

式中, V_{cy} 和 P_{cy} 分别为曲线任一位置的气缸瞬时容积和气缸压力, m 为压缩过程指数。

回流过程气缸压力和体积满足以下微分方程

$$\frac{dP_{cy}}{d\theta} = - \frac{k P_{cy}}{V_{cy}} \frac{dV_{cy}}{d\theta} - \frac{k}{\omega V_{cy}} P_s^{\frac{1}{k}} P_{cy}^{\frac{k-1}{k}} \sum_i^n (A_{sv})_i \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_s \left[\left(\frac{P_{cy}}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \quad (17)$$

式中, k 为热压缩系数, ω 为曲轴角速度, n 为新调节域气阀个数, A_{sv} 为单个气阀有效通流面积, R 为气体常数, T_s 为进气温度。分别由式(16)和(17)结合式(12)和(14)得到压缩曲线 5-6 和回流曲线 3-5, 两曲线的交点即为负荷 η_q^* 对应的调控点, 由此得到调控点的曲轴转角 θ_s 。

4 气量调节失效自愈调控系统与试验

本文所介绍的气量调节失效自愈调控系统组成如图 7 所示, 其工作原理为温度和振动传感器用于监测气阀气量调节失效的故障和故障定位; 控制单元根据故障信息打开隔离开关, 将故障的气阀气量调节结构隔离, 然后根据以非故障调节区组成新调节域, 计算区域收缩重构后负荷分配量和对应的气量调节参数, 最后由控制器根据调节参数确定控制参数修正量并输出调控信号至气阀上的气量调节器。

以图 7 中所示两缸压缩机为试验对象, 分别测试了气缸一侧气阀气量调节不同失效故障程度下的排气压力的突变现象以及自愈调控后的恢复情况。如

图所示, 气缸一侧 4 个进气阀($N_s = 4$), 设定故障前的气缸总气量负荷 $\eta_Q = 0.6$, 根据分配域的故障率确定非故障区气阀重分配的负荷 $\eta_q^* = \frac{1}{1 - K_e} (\eta_Q - K_e)$ 。

不同数量气阀气量调节故障下的自愈调控参数见表 2 所示。

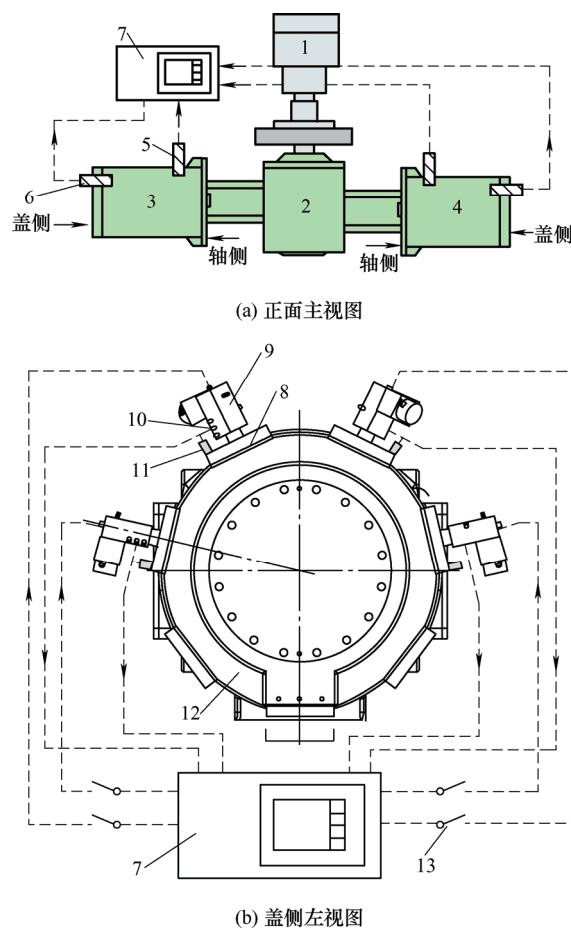


图 7 气量调节失效自愈调控系统组成

1. 电动机 2. 曲轴 3. 一级气缸 4. 二级气缸
5. 轴侧缸气压传感器 6. 盖侧缸气压传感器
7. 控制器 8. 气阀 9. 气量调节器 10. 温度传感器
11. 振动传感器 12. 气缸 13. 隔离开关

表 2 自愈调控参数

| 故障数 | 参数 | | |
|-----|-------|---------------|-----------------------|
| | 自愈路径 | 分配域的故障率 K_e | 非故障区重分配的负荷 η_q^* |
| 1 | 单侧分配域 | 0.250 | 0.467 |
| 2 | 单侧分配域 | 0.500 | 0.200 |
| 3 | 双侧分配域 | 0.375 | 0.360 |

分别测试了不同数量气阀气量调节失效下, 造成负荷突增和突降两种情况下的排气压力曲线以及采用自愈调控系统的调控效果, 故障数为 2, 曲线如图 8 所示。待机组在设定负荷下运行稳定后, 测得稳态排气压力为 328 kPa, 从图中 A 点时刻开始

故障发生, 导致负荷突增后, 排气压力快速升高至 373 kPa(图 8 中故障劣化曲线 1), B 点时刻启动自愈调控系统后, 经过区域收缩和负荷调整, 可以快速抑制故障的发展, 将排气压力恢复至正常状态; 负荷突减后, 排气压力快速降低至 300 kPa(图 8 中故障劣化曲线 2), 启动自愈调控系统后, 同样实现了快速抑制故障的发展, 将排气压力恢复至正常状态。

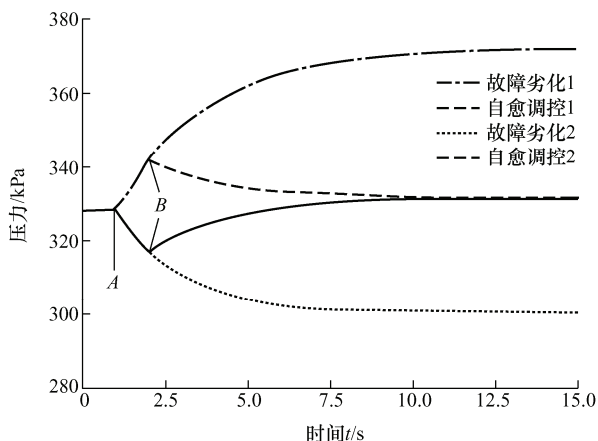


图 8 气量调节失效故障劣化及自愈调控

自愈调控指标见表 3, 自愈调控系统在故障发生后 1 s(5 个循环周期)内完成故障的识别和启动自愈调控。在 12 s 内实现故障调节机构隔离、区域收缩后的负荷重分配以及参数的自适应调整。系统调控后与故障前的压力稳态偏差分别为 3.6 kPa 和 3.4 kPa, 此偏差在 2% 的允许范围之内。

表 3 自愈调控指标

| 故障 | 指标 | | | |
|------|------------------|----------------|--------------|--------------|
| | 故障到自愈 调控的间隔/s | 最大压力 波动/kPa | 故障自愈 时间/s | 稳态偏差/ kPa |
| 故障 1 | 1 | +13.7 | 10.8 | 3.6 |
| 故障 2 | 1 | -11 | 11.9 | 3.4 |

综上所述, 试验台的自愈调控系统根据区域收缩重构的负荷再分配原理, 快速地将压缩机气量调节失效后的压力波动调整至许可范围内, 实现了机组不停机状态下, 由部分气阀故障导致气量调节失效恢复到正常调节状态, 确保了设备的健康运行。

5 结论

(1) 本文针对往复压缩机常见的气阀故障导致气量调节失效问题, 提出了一种基于调节域重构和负荷再分配的故障自愈调控策略。实现了无需人为干预, 利用自愈调控手段, 在部分气阀故障后快速

隔离故障区域, 组成新的调节域并寻找自愈路径, 基于负荷自适应分配实现故障自我恢复。

(2) 针对一台两缸压缩机, 介绍了自愈调控系统的组成。该系统根据计算区域收缩重构后负荷分配量和对应的气量调节参数, 确定控制参数修正量并输出调控信号至气阀上的气量调节器, 改变气缸进气量, 进而抑制故障后排气压力的波动, 使其恢复至正常状态。

(3) 在试验台压缩机上进行了气阀故障气量调节自愈调控性能试验, 结果表明, 介绍的自愈调控系统可在 12 s 内将气量调节失效故障的压力波动调整至许可范围内, 实现了机组不停机由气量调节失效状态恢复到正常调节状态, 确保了压缩机的健康稳定运行。

参 考 文 献

- [1] WANG Y, JIANG Z N, ZHANG J J, et al. Performance analysis and optimization of reciprocating compressor with stepless capacity control system under variable load conditions[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 94: 174-185.
- [2] 高莉莉. HydroCOM 无极气量调节系统在往复式压缩机上应用研究[J]. 价值工程, 2017(20): 220-221.
GAO Lili. Study on application of HydroCOM stepless gas volume control system in reciprocating compressor[J]. Value Engineering, 2017(20): 220-221.
- [3] 任国庆, 于长旺, 冯文欣. 渣油加氢装置气量调节系统故障工艺处理过程[J]. 石油化工设备技术, 2016, 37(1): 12-14.
REN Guoqing, YU Changwang, FENG Wenxin. Technological treating process for stepless adjustment system fault in residual oil hydrogenation unit[J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 2016, 37(1): 12-14.
- [4] 王智, 韩高喜. HydroCOM 无级调量系统在齐鲁炼厂的应用[J]. 中外能源, 2011, 16(12): 78-82.
WANG Zhi, HAN Gaoxi. Application of HydroCOM system in sinopec qilu company[J]. Sino-Global Energy, 2011, 16(12): 78-82.
- [5] 潘鑫, 吴海琦, 高金吉. 旋转机械气液体式不平衡振动故障靶向自愈调控系统[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 146-152.
PAN Xin, WU Haiqi, GAO Jinji. Rotating machinery targeting self-recovery regulation system for imbalance vibration fault with liquid-transfer active balancing device[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015,

- 51(1): 146-152.
- [6] 高金吉. 装备系统故障自愈原理研究[J]. 中国工程科学, 2005, 7(5): 43-48.
- GAO Jinji. Research on the fault self-recovery principle of equipment system[J]. Engineering Science, 2005, 7(5): 43-48.
- [7] QI X, THEILLIOL D, QI J T, et al. Fault diagnosis and fault tolerant control methods for manned and unmanned helicopters: a literature review[C]//In Conference on Control and Fault-Tolerant Systems, France, Nice, 2013: 132-139.
- [8] HEREDIA G, OLLERO A, BEJAR M, et al. Sensor and actuator fault detection in small autonomous helicopters[J]. Mechatronics, 2008, 18(2): 90-99.
- [9] DROZESKI G R. A fault-tolerant control architecture for unmanned aerial vehicles. [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2005.
- [10] HYUNSOO P, KYUNG J K. The automated fault-recovery for four-legged robots using parallel genetic algorithm [J]. Procedia Computer Science, 2013(24): 158-166.
- [11] RANJBARAN M, KHORASANI K. Generalized fault recovery of an under-actuated quadrotor aerial vehicle [C] //Proceedings of 49th IEEE Conference on Decision and Control, June 27-29, 2012, Atlanta, USA. New York: IEEE, 2012: 4385-4392.
- [12] QI X, THEILLIOL D, QI J T, et al. Self-healing control method against unmanned helicopter actuator stuck faults[C] //Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems, May 27-30, 2014, Orlando, FL, USA. New York: IEEE, 2014: 842-847.
- [13] 王庆锋, 高金吉, 袁庆斌, 等. 主风机静叶可调执行机构自愈化智能电液控制系统研究与应用[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20): 185-192.
- WANG Qingfeng, GAO Jinji, YUAN Qingbin, et al. Research and application of self-recovery smart electro-hydraulic control system on axial-blower static blade adjustable actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(20): 185-192.
- [14] 王维民, 高金吉, 李燕, 等. 离心压缩机轴位移故障自愈调控系统试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(5): 49-54.
- WANG Weimin, GAO Jinji, LI Yan, et al. Experimental study about centrifugal compressor axial displacement fault self-recovery system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(5): 49-54.
- [15] GAO J J. A study of the fault self-recovering regulation for process equipment[C]//Proceedings of International conference on intelligent maintenance systems, Xi'an China. Changsha: National University Defense Technology Press, 2003: 779-786.
- [16] 卢旭. 面向分布式关键任务系统的自愈调控技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- LU Xu. Research on self-healing control technology for distributed critical task system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [17] FARZANEH-GORD M, NIAZMAND A, DEYMI-DASHTEBAYAZ M, et al. Effects of natural gas compositions on CNG (compressed natural gas) reciprocating compressors performance[J]. Energy, 2015: S0360544215008129.
- [18] SRINIVAS M N, PADMANABHAN C. Computationally efficient model for refrigeration compressor gas dynamics[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(8): 1083-1092.

作者简介: 王瑶, 男, 1992 年出生, 博士。主要研究方向为往复机械故障诊断与自愈工程。

E-mail: wyaobeijing@163.com

张进杰(通信作者), 男, 1987 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为往复机械故障监测诊断与节能降耗。

E-mail: zjj87427@163.com