

离心式压缩机的喘振特征及喘振检测思路

蒲 斌 王朝阳 王 龙 刘 璇

国家管网集团西部管道公司, 新疆 乌鲁木齐 830013

摘 要:随着长输天然气管道无人站建设和区域化管理模式不断深入推进,由于长输天然气管道离心式压缩机运行压力高且输送介质为危险化学品,离心式压缩机防喘振控制系统失效后若无人干预出现持续喘振会产生严重后果,同时按照 API 670—2014《机器保护系统》相关要求,长输天然气管道离心式压缩机除了防喘振控制以外,还宜增加喘振检测功能,宜选用多种喘振检测方式对喘振情况进行监测,以对不同喘振情况作出快速响应。通过分析离心式压缩机发生喘振后的相关参数变化特征,发现离心式压缩机喘振时出口压力、流量变化幅度较大且周期性较为明显。提出了离心式压缩机多种喘振周期计数、喘振检测的相关思路,并对离心式压缩机运行时振动报警值设定提出建议。研究结果对于长输天然气管道离心式压缩机防喘振控制失效后,以喘振检测作为后备保护的相关研究具有借鉴意义。

关键词:离心式压缩机;喘振;喘振检测;出口压力;流量

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.05.003

Characteristics and detection of centrifugal compressor surge

PU Bin, WANG Chaoyang, WANG Long, LIU Xuan

PipeChina West Pipeline Company, Urumqi, Xinjiang, 830013, China

Abstract: As the development and regionalized management mode of unmanned station continue to advance, the centrifugal compressors for long-distance pipeline, with high operating pressure and handling hazardous process medium become an increasing concern. If there is no human intervention after the compressor surge control system fails, the continuous surge of the compressor could result in serious consequences. According to the relevant requirements of the API 670—2014 *Machine Protection Systems*, the long-distance pipeline centrifugal compressor should be provided with surge detection function in addition to the surge control. A variety of detection methods should be used to monitor the surge conditions for centrifugal compressor, so as to make a rapid response to different surge conditions of the compressor. The changes in characteristics of relevant parameters after centrifugal compressor surge are analyzed. It is found that the discharge pressure and flowrate change rapidly and periodically during surge of compressor. Finally, a variety of related ideas about surge cycle counting and surge detection are proposed, and suggestions are provided for the setting of vibration alarm values during compressor operation. This study

收稿日期:2021-12-29

作者简介:蒲 斌(1987-),男,陕西渭南人,高级工程师,学士,主要从事压缩机组、输油泵机组等油气储运设备设施的运行管理工作。E-mail:xtio@qq.com

provides reference for related research of surge detection as an additional line of defense in case the surge control of the centrifugal compressor of long-distance pipeline fails.

Keywords: Centrifugal compressor; Surge; Surge detection; Discharge pressure; Flowrate

0 前言

离心式压缩机由于结构简单、坚实可靠、运行效率高、维护成本低的优势^[1-5],在长输天然气管道中使用较多,缺点是容易发生喘振^[1-6]。根据 API 617—2014《轴流、离心压缩机和膨胀压缩机》(以下简称 API 617—2014)规定,离心式压缩机必须具备防喘振功能,一部分离心式压缩机厂家将防喘振控制集成在压缩机过程控制系统内,如 Rolly-Royce (RR) 公司、General Electric (GE) 公司、DRESSER-RAND 公司;一部分离心式压缩机厂家采用独立的第三方防喘振控制系统,如沈阳鼓风机集团股份有限公司(以下简称沈鼓)压缩机采用 CCC 防喘振控制系统。由于 API 617—2014 以及 API 670—2014《机器保护系统》(以下简称 API 670—2014)对于离心式压缩机是否配备喘振检测功能为非强制要求,因此目前长输天然气管道离心式压缩机具备喘振检测功能的较少,以防喘振控制为主,对于喘振的判断也以喘振线为依据。

2021 年,西气东输二线轮吐支线某站沈鼓电驱离心式压缩机由于外电波动发生喘振,喘振后以“压比—流量”为基础计算防喘振控制工作点失效,造成离心式压缩机长时间喘振。目前离心式压缩机防喘振控制相关理论研究以预防离心式压缩机发生喘振为主,对“压比—流量”预防喘振的控制方式失效后离心式压缩机发生喘振的喘振周期、喘振特征研究较少。诸多文献^[7,11]说明了离心式压缩机运行中存在大量防喘振控制失效引起离心式压缩机喘振的问题,具备防喘振控制而又发生喘振的可能原因^[11-12]有:测试喘振线与实际喘振线存在偏差;离心式压缩机结垢或其他因素导致其性能发生变化,喘振线产生偏差;防喘振控制裕度及防喘振参数设定不合理;防喘振控制信号变送器漂移、变送器故障或防喘振控制系统失效等。

在对防喘振控制优化和改进前,需要研究离心式压缩机因以上原因发生喘振后的相关参数的变化特征,根据变化特征结合 API 670—2014 相关要求,增加喘振检测功能以防止离心压缩机持续喘振造成设备失效、天然气泄漏等生产隐患。

1 离心式压缩机喘振检测概述

1.1 防喘振控制

离心式压缩机防喘振控制目前采用的是“压比—流

量”控制方式^[13],控制的输入参数有离心式压缩机入口压力、出口压力、流量,输出参数为防喘振阀的 4~20 mA 的模拟量阀位控制以及电磁阀快速打开防喘阀的开关量控制,将离心式压缩机入口温度、出口温度、转速、紧急停车或其他信号作为防喘振控制的补充信号。

典型“压比—流量”防喘振控制图见图 1。喘振线为现场实际测定不同转速下的喘振点连接生成的线,也称为测试喘振线;防喘振控制设定一定的控制裕度由喘振线计算得到防喘控制线;防喘控制线与喘振线之间不同防喘振控制系统增加不同的控制响应线,如防喘报警线等。防喘振控制工作点在防喘控制线右侧运行,当工作点在防喘控制线左侧时,通过不同的控制方法打开防喘阀,使工作点恢复在防喘控制线右侧运行防止离心压缩机产生喘振,避免工作点到喘振线左侧,如果工作点到喘振线左侧,防喘振控制判断离心式压缩机发生了喘振。

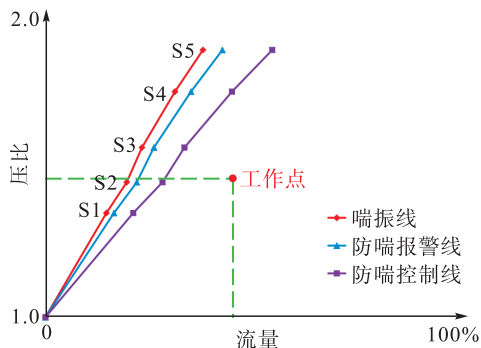


图 1 典型“压比—流量”防喘控制图

Fig. 1 Typical “pressure ratio-flowrate” anti-surge control chart

1.2 喘振检测的要求

随着长输天然气管道的不断发展,无人站、少人站建设^[14-17]不断增多,区域化管理模式和集中监视系统的应用等减少了人工对离心式压缩机运行的监控,离心式压缩机运行时的异常状况越来越依靠自动控制系统进行处置。长输天然气管道用离心式压缩机运行压力长期在 10 MPa 以上,且输送介质为危险化学品,如果发生喘振后无人干预及时摆脱喘振工况,有可能造成设备损坏以及天然气泄漏,给安全生产带来严重隐患。因此,根据 API 670—2014 的要求,对于长输天然气管道离心式压缩机宜增加喘振检测功能。离心式压缩机增加喘振检测功能有以下优点。

1) 离心式压缩机发生喘振的原因之一即是防喘振控制的失效,喘振检测作为防喘振控制失效的后备保护,在离心式压缩机发生喘振后可及时摆脱喘振对其造

成的损坏,以便停机对防喘振控制系统进行检修。

2) 运行中的离心式压缩机性能可能发生变化等异常状态,造成防喘振控制响应存在偏差引起离心式压缩机发生喘振,此时防喘振控制部分失效使其不能摆脱喘振,喘振检测进行应急处置停机后对防喘振控制进行调整及修正。

3) 在压缩机喘振线测试时,人工干预不及时造成离心式压缩机喘振^[18]时,喘振检测可以及时干预,防止喘振时间较长造成离心式压缩机损坏。

1.3 喘振检测的方法

长输天然气管道离心式压缩机防喘振控制系统通过离心式压缩机工作点流量与喘振线处流量进行比较判断是否发生喘振,这是作为防喘振控制的一部分,而不是喘振检测的内容。离心式压缩机发生喘振时,出现振动变大、轴位移发生波动、进口流量及出口压力周期性大幅波动等现象^[4,13,19-20]。离心式压缩机喘振时出口压力及流量的典型变化趋势^[12]见图2。

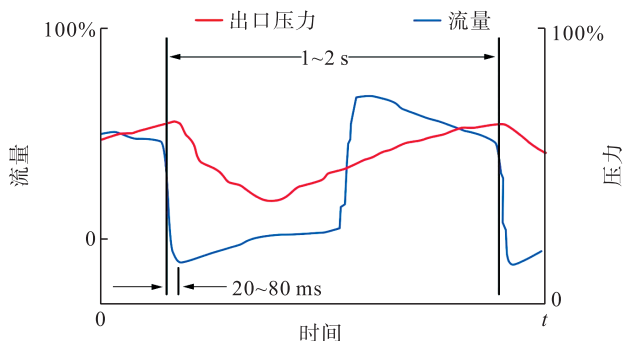


图2 喘振时出口压力及流量典型变化趋势图

Fig. 2 Discharge pressure and flow variations during a typical surge cycle

图2所示一个喘振周期为出口压力的下降时间和上升时间之和,喘振检测应具备检测每个喘振周期的能力。根据离心式压缩机喘振时的特征,API 670—2014介绍了以下3种喘振检测方法,这3种喘振检测方法需要设定固定的阈值或者设定输入信号的变化率阈值进行喘振检测。

1) 流量下降的检测方法。图2中流量下降的幅度较大,通过离心式压缩机流量与工作点压比条件下的最小喘振流量相比进行检测;流量下降的趋势较为迅速,通过流量下降的变化率进行检测。流量下降的检测方法宜选择小量程的流量传感器,以较快响应流量的变化。

2) 离心式压缩机入口温度变化的检测方法。离心式压缩机入口温度变化大于离心式压缩机入口管线的温度变化,比较两者之间的变化情况对离心式压缩机喘振情况进行检测。

3) 离心式压缩机出口压力下降的检测方法。图2

中离心式压缩机出口压力的下降幅度较大,下降趋势较快,可以通过对离心式压缩机出口压力变化和变化率变化的阈值进行检测。

对于已经现场应用的长输天然气管道离心式压缩机,方法2需要在离心式压缩机吸入口,靠近叶轮位置处增加热电偶,实施较为困难,方法1、3的信号已经采集,实施较为容易。

GE压缩机机组在离心式压缩机过程控制系统内增加了喘振检测功能,见图3。对离心式压缩机出口压力进行滤波,将滤波后压力减去当前出口压力得到压差 Δp ,如果 Δp 大于设定阈值,则喘振计数1次,当设定时间内喘振计数次数达到设定值,执行相关报警及停机动作。

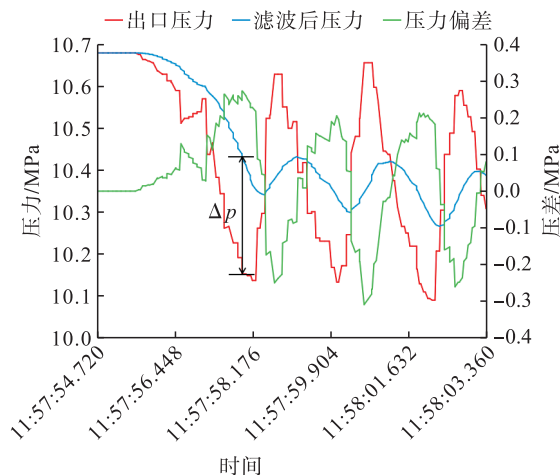


图3 GE压缩机机组喘振检测方式图

Fig. 3 GE centrifugal compressor surge detection method

2 离心式压缩机喘振时的特征

2.1 防喘振控制输入参数喘振时的变化

离心式压缩机喘振强度、频率主要受离心式压缩机出口管容的影响,也与自身结构设计、运行工况相关,不同生产商的离心式压缩机在运行中发生喘振时的表现特点也不同。但在离心式压缩机实际运行中,发生喘振时的特征变化均较小。

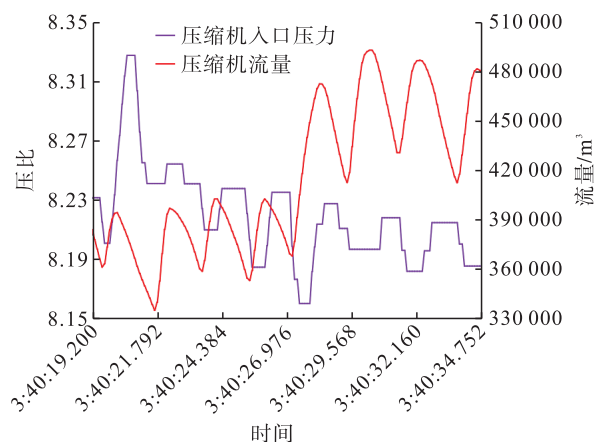
离心式压缩机防喘振控制的关键输入参数为离心式压缩机入口压力、出口压力和流量。轮吐线某10.5 MW沈鼓离心式压缩机发生喘振时3个输入参数随防喘阀开度变化的趋势见图4。

1) 离心式压缩机入口压力每个喘振周期的变化幅度范围为0.3%~1.5%,出口压力每个喘振周期的变化幅度范围为3.9%~4.7%,流量每个喘振周期的变化幅度范围为8.6%~30%,离心式压缩机出口压力、流量喘振时的变化幅度较大且明显,入口压力喘振时的变化较为稳定。

2) 由于离心式压缩机出口压力喘振时的变化幅度较为稳定,分析防喘阀不同开度时喘振周期变化情况,

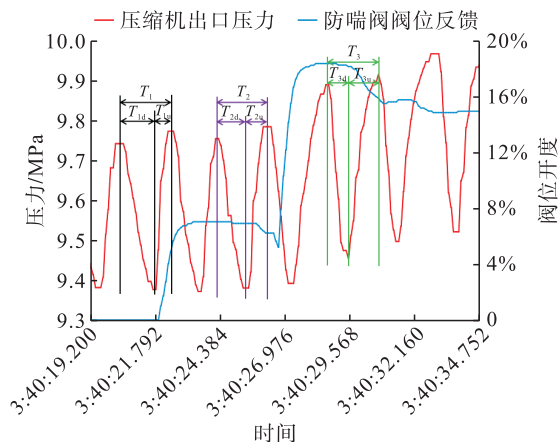
见图 4-b)。 T_1 周期,离心压缩机防喘阀全关; T_2 周期,离心压缩机防喘阀开度为 7%; T_3 周期,离心压缩机防喘阀开度为 17%。

a) 防喘阀开度较小,离心式压缩机未脱离喘振时,出口压力在喘振时的变化幅度不明显,流量的变化幅度随防喘阀开度增大而增大;b) 防喘阀开度增大后,喘振周期中出口压力的下降加快即 $T_{1d} > T_{2d} > T_{3d}$,上升减慢



a) 喘振时入口压力与流量变化趋势图

a) Variation trend of compressor suction pressure and flow during surge



b) 喘振时出口压力随防喘阀阀位变化趋势图

b) Variation trend of discharge pressure and anti-surge valve position during surge

图 4 某 10.5 MW 沈鼓离心式压缩机喘振时防喘振控制参数变化趋势图

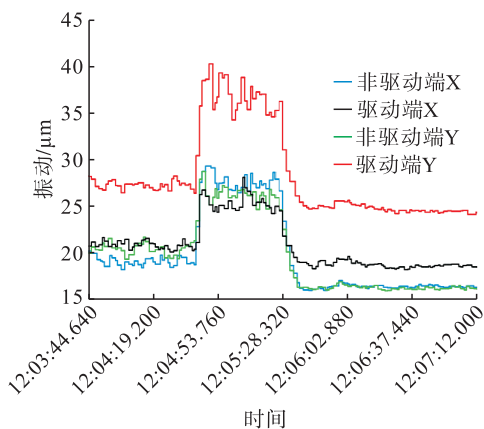
Fig. 4 Variation trend of anti-surge control parameters of a 10.5 MW SBW centrifugal compressor during surge

受离心式压缩机结构、运行工况等因素的影响,离心压缩机喘振时各输入参数的变化幅度不尽相同。某沈鼓离心式压缩机出口压力的变化幅度范围为 3.9% ~ 4.7%,具体为 0.37 ~ 0.5 MPa,而西三线某站 RR 离心式压缩机喘振后出口压力的变化幅度小于 60 kPa,其流量变化也不明显。

2.2 离心压缩机喘振时振动的变化

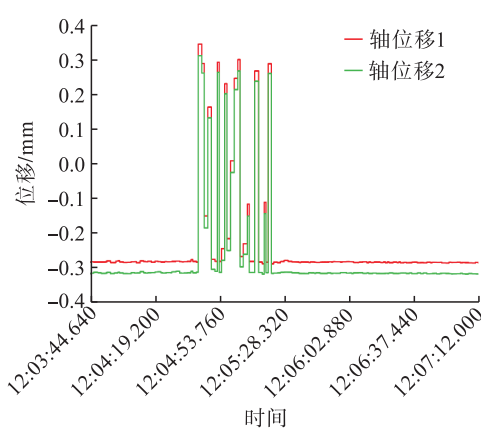
离心式压缩机喘振时,压缩机及其驱动机的振动均

有变化,某站沈鼓电驱离心式压缩机及 RR 燃驱离心式压缩机喘振时驱动机的振动变化均不明显,动力涡轮 (Power Turbine, PT) 的振动变化较同步电机振动变化略大,但是变化远小于压缩机振动、位移的变化情况,而 RR 燃驱离心式压缩机在喘振时轴位移无明显变化,原因可能是喘振时间较短。沈鼓电驱离心式压缩机喘振时振动、轴位移变化情况见图 5,表 1 为正常运行与喘振时振动值变化情况。



a) 喘振时振动变化趋势

a) Vibration change trend during compressor surge



b) 喘振时轴位移变化趋势

b) Variation trend of axial displacement during compressor surge

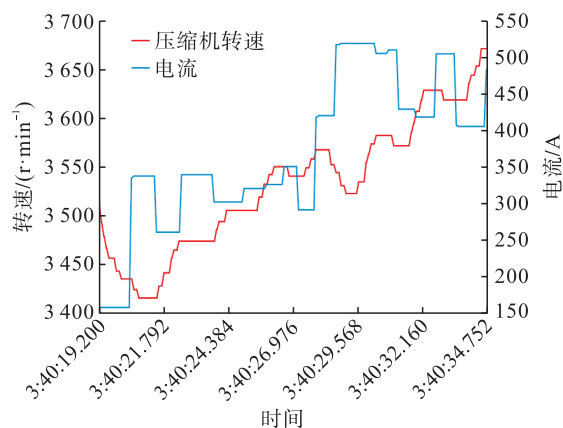
图 5 某站沈鼓电驱离心式压缩机喘振时振动及轴位移变化趋势图

Fig. 5 Variation trend of vibration and axial displacement of a SBW compressor during surge

表 1 某沈鼓与某 RR 离心式压缩机运行与喘振时振动变化对比表

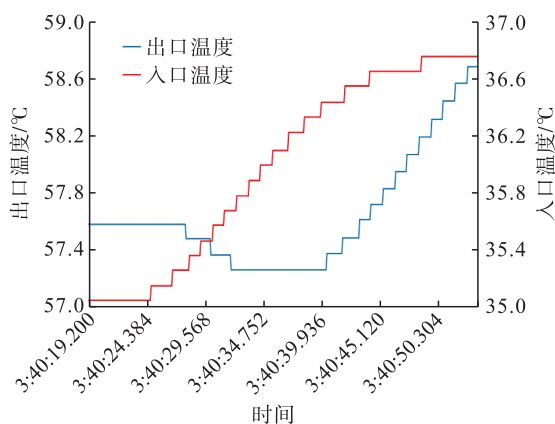
Tab. 1 Comparison of vibration changes between compressor operation and surge of a SBW compressor and a RR compressor

机组	测点	正常运行 / μm	喘振 / μm
RR1#	非驱动端 X	24	45
	非驱动端 Y	23	62
	驱动端 X	17	73
	驱动端 Y	17	48
RR2#	非驱动端 X	19	76
	非驱动端 Y	17	61
	驱动端 X	16	73
	驱动端 Y	16	80
RR3#	非驱动端 X	22	84
	非驱动端 Y	20	88
	驱动端 X	30	91
	驱动端 Y	26	78
沈鼓 1#	非驱动端 X	10	17
	非驱动端 Y	11	18
	驱动端 X	20	35
	驱动端 Y	20	43
沈鼓 3#	非驱动端 X	19	29
	非驱动端 Y	22	28
	驱动端 X	21	28
	驱动端 Y	28	41



a) 喘振时转速及电机电流变化趋势

a) Variation trend of speed and motor current during compressor surge



b) 喘振时压缩机入口和出口温度变化趋势

b) Trend of suction and discharge temperature during compressor surge

图 6 离心式压缩机喘振时相关参数变化趋势图

Fig. 6 Trend of relevant parameters during compressor surge

3 离心式压缩机喘振检测思路

3.1 喘振及周期检测

3.1.1 喘振及周期检测参数的选择

前文分析可知,喘振时离心式压缩机出口压力、流量的波动性和周期性较为明显。某沈鼓离心式压缩机喘振时压力与流量的变化趋势见图 7,受传感器测量、实际喘振工况的影响,实际压力、流量的变化趋势与图 2 典

1)离心式压缩机喘振时振动均明显增大,由于离心压缩机结构、工艺条件、运行压力等的影响,对其振动、位移变化影响不同。RR 离心式压缩机喘振时振动的变化幅度远大于沈鼓离心式压缩机喘振时振动的变化幅度,沈鼓离心式压缩机轴位移的变化幅度远大于 RR 离心式压缩机的变化幅度。

2)对于沈鼓电驱离心式压缩机,喘振时轴位移的变化幅度较大,短时间内波动幅度达到了 0.6 mm,远大于喘振对离心式压缩机振动的影响。

2.3 其他影响

离心式压缩机喘振后转速、驱动电机电流波动,压缩机入口温度、出口温度会上升,见图 6。

1)喘振时离心压缩机转速处于升速阶段,转速波动大约 50 r/min,电流波动幅度在 100 A,不同于离心压缩机出口压力、流量变化趋势,转速、电流波动的规律性和周期性稍弱。

2)离心式压缩机的入口温度、出口温度均有明显上升,出口温度先降后升,受温度探头热电阻材料特性的影响,响应较为缓慢,没有周期性。

型喘振变化趋势有所不同,但是喘振时出口压力、流量变化的周期一致,幅度均较为明显,在对喘振周期进行检测和计数时,既可以使用出口压力也可以使用流量进行检测。

如图 4 所示,离心式压缩机防喘阀打开后,出口压力、流量变化中的下降周期和上升周期将发生变化,如果采用变化率方式进行喘振检测,则变化率将发生较明显的变化,变化率的阈值设定需合理。

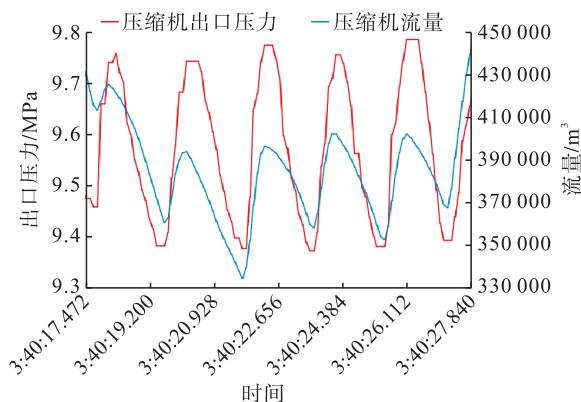


图7 离心式压缩机喘振时压力与流量变化趋势图

Fig. 7 Pressure and flow trend during compressor surge

3.1.2 自适应阈值的检测思路

对于喘振时不确定参数的波动范围时,可以采用自适应方式进行喘振周期检测和计数,具体见图 8。以出口压力为例,设定出口压力变化范围的阈值 Δp , Δp 应大于正常工作时传感器的波动范围,一般喘振周期为 0.3 ~ 3 s,如正常运行时最长喘振时间 3 s,传感器波动范围为 10 kPa,可设定 Δp 为 15 kPa,由于发生喘振时出口压力变化趋势首先是下降,因此设定触发喘振检测计数的条件如下。

1) 3 s 内离心式压缩机出口压力的最大值与最小值之差大于 15 kPa, 判断波动范围非传感器的正常波动。

2)当离心式压缩机出口压力小于上一步计算时最大值与最小值之差的 $1/2$,用于判断压力向下变化,如图8中 $p_1 < p_0$ 。

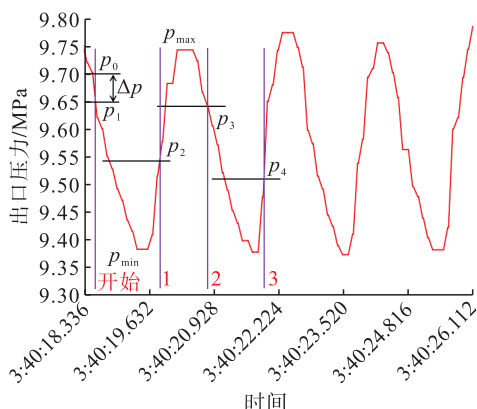


图 8 自适应喘振周期检测方式图

Fig. 8 Adaptive surge cycle detection method

当喘振检测计数的条件触发后,在最长计数周期 3 s 内发生以下条件后计数器加 1 并进入下一个检测计数周期,否则清零重新开始检测。

1) 当离心式压缩机出口压力大于触发喘振计数时压力的最大值 p_0 与当前计数周期的最小值 $p_{\min}$ 之差的 $1/2$ 时, 即计数器 ≥ 1 时, 表明出口压力在经历了下降周期

后进入了上升周期,此时即认为离心压缩机发生了喘振。

2) 当计数器计数结果为奇数时, 下一个计数周期计数的条件为当前离心式压缩机出口压力小于本次计数周期内最大值与下一个计数周期最小值差值的 $1/2$; 当计数器计数结果为偶数时, 下一个计数周期计数的条件为当前离心式压缩机出口压力大于本次计数周期内最大值与下一个计数周期最小值差值的 $1/2$ 。

该喘振检测计数方式的优点在于触发喘振检测计数的阈值设定较小,不受具体离心式压缩机的影响,检测较为迅速;缺点是采用流量方式检测时,对于图 4-a)中防喘阀打开导致流量大幅上升时,有可能喘振检测计数失效,到下一个喘振周期重新开始计数,对于出口压力变化较为稳定情况时连续检测并计数。

3.1.3 变化阈值的检测思路

对于离心式压缩机喘振时参数波动范围有数据积累时,如图9所示以离心压缩机出口压力为例,设定出口压力的变化阈值 Δp ,按照最大喘振周期3 s进行计算。

1) 当 3 s 内离心式压缩机出口压力的最大值与最小值的差值大于 Δp 时, 计数为 1 次, 并重新开始计算下一个周期。

2) 下一个 3 s 计数周期内离心压缩机出口压力的最大值与最小值的差值大于 Δp 时,同时限定开始喘振计数时第 1 个周期时压力的最大值 p_0 与任意一个检测周期最小值的差值范围,计数加 1 次,对出口压力单向下降的情况进行排除。

当喘振检测计数 ≥ 2 次时,认为离心式压缩机发生了喘振。

该喘振检测计数方式的优点在于当喘振的变化幅值确定时,可以准确检测喘振的次数;缺点在于无喘振数据积累时阈值设定过大或者过小时不易检测到喘振。

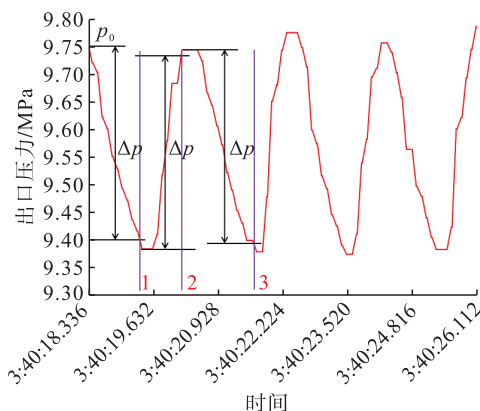


图 9 变化阈值喘振周期检测方式图

Fig. 9 Change threshold surge cycle detection method

3.1.4 变化率阈值的检测思路

参数单位时间的变化值即为参数的变化率,设定出口压力、流量单位时间变化阈值,即是设定参数的变化

率阈值。计算单位时间内输入参数的变化值,当变化值大于设定的变化阈值时,进行喘振检测计数。由于打开防喘阀等原因同样会造成出口压力、流量的大幅变化,需要对参数变化率的正、负方向同时进行检测,交替检测可以对喘振的上下波动进行检测。图 3 中 GE 机组的喘振检测方式也算是变化率检测计数的一种。

该喘振周期检测方法的优点在于喘振检测的快速,仅需对单位时间的变化情况进行检测,即可对参数进行判断;缺点在于变化率阈值不易确定,需要喘振数据的积累。

3.2 其他喘振检测思路

3.2.1 出口压力和流量的检测思路

离心式压缩机正常运行时,出口压力基本保持稳定,不存在快速上升和下降的情况,造成出口压力快速下降的原因较多,如打开防喘阀、压力变送器故障或者压力变送器取压处泄漏等。如果两个输入参数同时大幅波动时,传感器故障的可能性较小,打开防喘阀会造成出口压力快速下降,流量则会快速上升。而如果如图 7 所示出口压力和流量同时大幅下降或者大幅上升时,则离心式压缩机很有可能发生了喘振。

因此,对离心式压缩机出口压力、流量的变化值或变化率设定阈值,当两者同时大幅下降或大幅上升时,认为离心式压缩机发生了喘振,见图 2、图 7。

3.2.2 压比和流量的检测思路

离心式压缩机喘振时,出口压力的大幅波动会造成压比大幅波动,叠加流量的大幅波动使工作点的计算产生偏差。在喘振检测中对工作点进行计算时,应按照最大喘振周期 3 s 内的最大压比和最小流量对工作点进行计算,在最严苛的计算条件下,工作点在喘振线左侧时,则认为离心式压缩机发生了喘振。

由于防喘振控制常用 PID 控制,工作点的变化会直接影响 PID 控制响应的输出,防喘振控制中工作点计算仍采用实时参数进行计算,否则会造成防喘振控制超调,造成能耗的浪费。

3.2.3 振动的检测思路

根据 ISO 10816-3—2009《机械振动 通过非转动件的测量进行机械振动的评估 第 3 部分:现场测量时标称功率为 15 kW 和标称速度为 120 ~ 15 000 r/min 的工业机械》(Mechanical vibration—Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts—Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ,以下简称 ISO 10816-3—2009)的规定,压缩机振动的停机值由厂家设计设定,而报警值则需要根据现场旋转设备的运行情况进行调整,报警值为正常运行时的振动值加上振动 B 区上限值的 25%,振动 B 区的

上限值为 90 μm ,其 25% 为 22.5 μm ,也即是当异常原因导致压缩机振动范围较正常运行时振动变化上升 22.5 μm 时,压缩机振动应发出报警信号。

对比表 1 数据,喘振时某沈鼓离心式压缩机的振动上升较小,达不到上升 22.5 μm 的阈值,而某 RR 离心式压缩机的 X、Y 探头振动值上升均达到了报警值,因此可以通过离心式压缩机振动值的变化检测其是否发生喘振。

离心式压缩机轴位移运行时受运行压力、压比的影响,变化范围较大,报警值及停车值的设定以厂家设计为准,不宜按照运行情况进行调整,振动的报警值需要根据运行数据的积累进行调整。

为防止其他原因的振动上升使喘振检测出现错误,应设定当工作点防喘振工作裕度小于设定值后,此时振动达到高报警或轴位移达到高报警,认为离心式压缩机发生了喘振,该设定值应不大于防喘控制线的裕度。

3.3 综合喘振检测的思路

对喘振周期检测计数,宜选用任意一种检测计数方式,防止选择多种计数方式造成喘振周期的计数重复或者错误。任意一种喘振检测计数方式均须设定一定的阈值,防止对较小扰动进行误计数。

离心式压缩机的喘振不仅受其结构、运行压力的影响,还受现场工艺管道布局、管容等因素的影响,喘振后振动、压力及流量的波动情况各有特点,存在喘振时单一检测方式失效不能检测到喘振的可能性,喘振检测可采用多种检测方式,喘振周期检测技术的方式同样是喘振检测的方式,多种喘振检测方式可以对不同喘振作出快速响应。

评价喘振检测的功能是否优秀的标准,即是在尽可能少的喘振周期内检测到喘振并进行处置,为提升喘振检测的正确性和快速性,各喘振检测方式中参数的阈值需要现场实际测试和调整完善。初始时,应设定较小阈值,以快速响应检测,利用测试喘振线等测试工况,对喘振检测阈值进行调整和完善,正常运行过程中根据运行状态进一步完善。

3.4 喘振检测的系统分隔与输出

3.4.1 喘振检测的系统分隔

喘振检测的作用是当离心式压缩机防喘振控制失效后作为压缩机的后备保护,防止离心式压缩机持续喘振。条件具备的情况下应从防喘振控制系统中分隔出来,两者相互独立。离心式压缩机相比轴流式压缩机结构稳固,具备一定的抗喘振能力,可不单独增加喘振检测系统,将喘振检测的功能增加至离心式压缩机过程控制系统或联锁保护系统内即可。根据防喘振控制系统与过程控制系统的逻辑结构,可分为以下两种。

1) 防喘振控制系统独立于压缩机组过程控制系统时,如沈鼓离心式压缩机,可将喘振检测功能增加至过程控制系统或 ESD 系统。

2) 防喘振控制系统与过程控制系统采用同一系统时,如 GE、RR、DRESSER-RAND 离心式压缩机,可将喘振检测功能增加至 SIS 控制系统。

以上两种方式,喘振检测系统如果采用防喘振控制系统经过计算的流量、裕度相关数据时,应该增加独立的出口压力、流量单个参数或者多个参数的喘振检测方式,防止与防喘振控制系统共用参数失效的情况。

3.4.2 喘振检测的输出

喘振检测首先应具备喘振报警并快速打开防喘阀的功能。离心式压缩机的喘振周期为 0.3 ~ 3 s,如轮吐线某站沈鼓离心式压缩机喘振周期为 2.3 ~ 2.8 s,在 1 个或多个喘振周期内,喘振检测即可通过不同检测方式检测到喘振,检测到喘振后应通过防喘电磁阀快速打开防喘阀,使压缩机摆脱喘振工况,同时输出报警信息。

离心式压缩机发生喘振后是否联锁停机 API 617—2014 及 API 670—2014 无具体要求,由压缩机厂家和用户沟通决定,宜根据不同喘振情况进行评估。

1) 当离心式压缩机喘振影响较大,其振动、轴位移明显变化达到设计的振动停机值时应立即联锁停机。由于喘振造成的风险较高,应在喘振检测中增加联锁停机保护,防止喘振造成设备损坏。

2) 当离心式压缩机喘振影响不明显,其振动、轴位移变化幅度较小时,可在发生喘振时先不停机,允许喘振周期检测计数在一定范围内继续运行,由用户进行综合评估,保持管网的平稳运行。

4 结论

1) 长输天然气管道离心式压缩机宜独立于防喘振控制系统增加喘振检测控制功能,防止防喘振控制失效,长时间喘振造成设备损坏或天然气泄漏。

2) 离心式压缩机喘振后“压比—流量”防喘振控制相关参数会大幅度周期性波动,会引起防喘振控制工作点的计算失效,喘振后有可能造成防喘振控制失效。

3) 根据喘振时各参数变化情况,提供了喘振周期和喘振的检测思路,宜选用多种检测方式对离心式压缩机喘振情况进行检测。

4) 根据 ISO 10816-3—2009 的要求,离心式压缩机振动报警值应根据实际运行情况进行设定。

5) 喘振检测系统检测到喘振后应立即打开防喘阀,喘振后是否需要联锁停机应根据离心式压缩机喘振情况进行评估。

参考文献:

- [1] 蒲 斌,石耕睿,马永飞,等. 西气东输三线 RR 机组防喘振控制程序优化[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021 (4): 107-114.
PU Bin, SHI Gengrui, MA Yongfei, et al. Optimization of anti-surge control program for RR units of the 3rd West-East Gas Pipeline [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2021 (4): 107-114.
- [2] 方宏昌,肖昀斌. 基于 Tricon 控制器的重整氢压缩机防喘振控制[J]. 计算机与应用化学, 2011, 28(8): 1057-1062.
FANG Hongchang, XIAO Yunbin. Anti-surge control based on Tricon controller for hydrogen compressor in platforming unit [J]. Computers and Applied Chemistry, 2011, 28 (8): 1057-1062.
- [3] 王银锁. 离心式压缩机喘振分析及解决措施[J]. 自动化与仪器仪表, 2013 (4): 111-114.
WANG Yinsuo. Analysis on the surge of centrifugal compressor and its solutions [J]. Automation & Instrumentation, 2013 (4): 111-114.
- [4] 张 楠,董世建. 离心式压缩机防喘策略研究[J]. 辽宁化工, 2012, 41(4): 407-409.
ZHANG Nan, DONG Shijian. Study on anti-surge control of centrifugal compressors [J]. Liaoning Chemical Industry, 2012, 41(4): 407-409.
- [5] 宋海成. 离心式压缩机的防喘振控制[J]. 自动化技术与应用, 2015, 34(12): 9-14.
SONG Haicheng. Anti surge control of centrifugal compressor [J]. Techniques of Automation and Applications, 2015, 34 (12): 9-14.
- [6] 张春梅,张 超,徐自力. 压缩机系统高阶 Moore-Greitzer 模型的动态行为分析[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41 (1): 41-45.
ZHANG Chunmei, ZHANG Chao, XU Zili. Dynamics and analysis of higher order Moore-Greitzer model in compression system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41 (1): 41-45.
- [7] 赵 敏. 浅析气压机喘振的原因分析及对策[J]. 山东化工, 2020, 49(12): 107-108.
ZHAO Min. Analysis on the causes of surge of pneumatic engine and its measures [J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(12): 107-108.
- [8] 罗雄麟,赵决正,王 娟. 催化裂化装置气压机喘振控制的双时间尺度动态模拟[J]. 化工学报, 2012, 63 (增刊 2): 118-125.

- LUO Xionglin, ZHAO Juezheng, WANG Juan. Dual time scales based dynamic simulation of surge control in FCCU rich gas compressor [J]. CIESC Journal, 2012, 63(Suppl 2): 118-125.
- [9] 田海, 刘澄树. 多台压缩机防喘振系统控制方法的研究[J]. 电气传动, 2017, 47(10): 63-67.
- TIAN Hai, LIU Chengshu. Research on control method of anti-surge system for multiple compressors [J]. Electric Drive, 2017, 47(10): 63-67.
- [10] 钱迪, 郑会, 张沛, 等. 压缩机组 PLC 控制系统的国产化升级改造方案[J]. 油气储运, 2018, 37(1): 46-51.
- QIAN Di, ZHENG Hui, ZHANG Pei, et al. Localization upgrading scheme of PLC control system of compressor set [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(1): 46-51.
- [11] 王红君, 郑书轩, 赵辉, 等. 基于相似定律的鼓风机温度补偿优化策略[J]. 计算机仿真, 2016, 33(2): 244-247.
- WANG Hongjun, JIA Shuxuan, ZHAO Hui, et al. Temperature compensation optimization strategy of blower based on similarity theory [J]. Computer Simulation, 2016, 33(2): 244-247.
- [12] American Petroleum Institute. Machinery protection systems: API Standard 670—2014[S]. Washington D. C.: API Publishing Services, 2014.
- [13] 陈欣. 压缩机防喘振控制策略综述[J]. 石油化工自动化, 2011, 47(1): 47-50.
- CHEN Xin. The strategies summary on compressor anti-surge control [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2011, 47(1): 47-50.
- [14] 王振声, 董红军, 张世斌, 等. 天然气管道压气站一键启停站控制技术[J]. 油气储运, 2019, 38(9): 1029-1034.
- WANG Zhensheng, DONG Hongjun, ZHANG Shibin, et al. Control technologies for the one-key start and stop of compressor stations of gas pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(9): 1029-1034.
- [15] 董红军. 长输管道网格化管理实现基础与实施设想[J]. 油气储运, 2020, 39(6): 601-611.
- DONG Hongjun. Realization foundation and implementation assumption of grid management for long-distance pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(6): 601-611.
- [16] 高津汉. 天然气管道无人化站场的理念及设计要点[J]. 石化技术, 2019, 26(1): 169-170.
- GAO Jinhan. Concept and design points of unmanned station for natural gas pipeline [J]. Petrochemical Industry Technology, 2019, 26(1): 169-170.
- [17] 牟文昌加, 孟帅, 张天航. 天然气站场无人化技术发展现状及优化分析[J]. 石化技术, 2021, 28(7): 82-83.
- MU Wenchangjia, MENG Shuai, ZHANG Tianhang. Current situation and optimization analysis of unmanned natural gas stations and yards [J]. Petrochemical Industry Technology, 2021, 28(7): 82-83.
- [18] 张石超, 项卫东. RF2 /3BB36 型压缩机喘振线的测试方法[J]. 油气储运, 2008, 27(7): 49-51.
- ZHANG Shichao, XIANG Weidong. Testing method of the surge line of RF2 /3BB36 gas compressor [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2008, 27(7): 49-51.
- [19] 刘佳佳. 离心式压缩机防喘振控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- LIU Jiajia. Research on anti-surge control of centrifugal compression [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [20] 王凯. 防喘振调节阀的应用分析[J]. 石油和化工设备, 2017, 20(8): 65-68.
- WANG Kai. Application analysis of anti-surge regulating valve [J]. Petro & Chemical Equipment, 2017, 20(8): 65-68.