

基于压力脉动的往复压缩机故障诊断方法研究

焦圳

(沈阳远大压缩机有限公司 辽宁 沈阳 110027)

摘要: 往复式压缩机最常见的故障为易损件——气阀和活塞环的故障,这两种故障都会对压缩机管路压力振动信号造成影响。本文通过采集往复压缩机管路内的压力脉动信号作为诊断压缩机内部故障性质的方法,首先在理论上建立了气阀和活塞环参数与管路压力脉动的关系模型;然后通过采集管路振动信号,对信号进行分解与重构;最后应用神经网络算法对故障进行识别。结果表明:分析管路的压力脉动可用于往复式压缩机的状态监测。

关键词: 往复式压缩机;压力脉动;故障诊断

1 研究背景

作为石油炼化企业的重要设备,往复压缩机组的运行状态直接影响整个生产流程的效率。因此如何有效预测和诊断往复式压缩机易损件故障,是压缩机设备健康管理的重要应用之一。在压缩机易损件中,气阀和活塞环发生故障时都表现为往复压缩机系统压力发生异常波动,因此研究压缩机出现排气阀和活塞环故障等故障时压力脉动的时域特征^[1]并用于状态监测,是检测和诊断气阀故障的重要手段之一。

近年来,许多故障诊断方法得到了广泛的研究,并取得了一些成果。张思阳等^[2]提出了一种结合EMD和样本熵的往复压缩机气阀故障诊断方法并得到有效应用。仲继卉^[3]提出了一种基于信息熵和支持向量机的压缩机阀门故障诊断方法,该方法在压缩机阀门故障诊断中表现出良好的性能。一些研究人员将局部均值分解(LMD)的概念引入到往复式压缩机的故障诊断中^[4]。该方法显著减少了端点效应和包络的不准确性,但后续研究仍需基于常规方法提取振动信号特征。而基于深度学习的神经网络在当前的智能故障诊断中具有潜在优势^[5],如卷积神经网络(CNN)、深度信念网络(DBN)和自动编码器(AE)及其衍生算法,已应用于故障检测和诊断。

本文以标准API 618提供的往复式压缩机平稳运行的允许压力脉动为判断标准,建立因气阀与活塞环故障引起压缩机泄漏量与压力脉动的映射方程,提出一种结合小波包和神经网络算法的往复压缩机

故障监测方法。

2 压缩机压力脉动特征

2.1 压力脉动

典型的往复式压缩机气体流通结构由压缩机气缸、管道和储气罐三部分组成。建立单级往复压缩机物理模型如图1所示,压缩机正常工作时,通过活塞在气缸中的往复运动实现压缩气体,气体通过进气阀和排气阀流经气缸和管道以不同压力排出。为研究管道中气体形成的压力脉动,假设气体流经气阀及管道的方向为一维的,压力波沿主方向传播,且气体与外界环境的热交换忽略不计。管道中的压力脉动变化与气缸压力可以表达为^[6]:

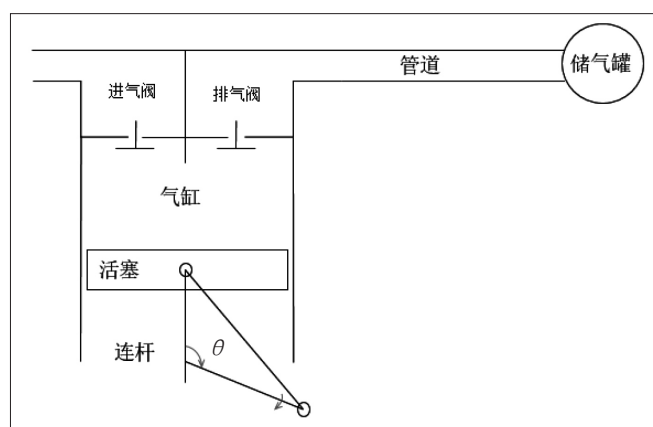


图1 单级往复压缩机的物理模型

$$P_{d2x} = \cos(kx + i\alpha x) \frac{P_{d1x}}{dt} - \sin(kx + i\alpha x) \frac{dm}{dt} \frac{a}{s^2} \quad (1)$$

式中: P_{d2x} 、 P_{d1x} —管道压力(MPa)、气缸压力(MPa);

x — 管道长度 (m);
 dm/dt — 气缸内气体净质量 (N/s);
 a — 气体声速 (m/s);
 s — 管道横截面积 (m²);
 α — 管道阻尼系数。

研究表明, 气缸内部的气体流量变化是导致管道产生压力脉动的重要因素, 当故障是由气阀或活塞环引起时, 这时气缸内的气体流量因泄漏量而减小。因此考虑研究管道的压力脉动的变化趋势, 可以对压缩机的故障, 特别是气阀和活塞环故障进行诊断。

2.2 泄漏质量流量方程

当气阀或活塞环因故障而引起泄漏时, 气体质量流在整个循环中的定向流动具有一维性, 气体泄漏面积形式恒定, 流过孔口面积等于泄漏面积, 这时泄漏质量变化将引起压力脉动的变化。

通过孔口面积的气体质量流量可由式 (2) 给出:

$$\frac{dm}{dt} = C_d A_o A_i \sqrt{\frac{2\rho\Delta P}{A_i^2 - A_o^2}} \quad (2)$$

式中: A_o — 孔口面积 (mm²);
 A_i — 入口面积 (mm²);
 ρ — 流体密度 (kg/mm³);
 Δp — 孔口两端的压力差 (MPa);
 C_d — 气阀流量系数。

下面讨论在不同泄漏情况下泄漏面积对气体流量的影响。

2.2.1 当气阀泄漏时

假定阀门在整个循环中保持打开状态, 若 X_e 表示泄漏量关于阀门最大流量面积占比的等效阀门升程当量, 则阀板的泄漏面积可表示为:

$$A_0 = \pi D_b X_e \quad (3)$$

式中: D_b — 排气阀当量直径 (m)。

通过气阀的气体质量流量应取决于泄漏面积和阀门两端的压力差。需要注意只要排气阀关闭或阀门升程小于等效阀门升程时, 泄漏面积不变。因此气阀泄漏面积可以表示为:

$$\begin{cases} A_0 = \pi D_b X_e, X_e(t) \leq X_e \\ A_0 = \pi D_b X_e(t), X_e(t) > X_e \end{cases} \quad (4)$$

当气体流量由 A_o 区域进行后, 孔口入口面积 A_i 应由式 (5) 得出:

$$\begin{cases} A_i = \pi D_c^2 / 4, P(t) > P_d \\ A_i = \pi D_{pd}^2 / 4, P(t) < P_d \end{cases} \quad (5)$$

式中: D_{pd} — 排气室当量直径 (m);

D_c — 气缸直径 (m);

P_d — 排气压力 (MPa)。

2.2.2 当活塞环泄漏时

理想状态下, 活塞环应起到完美密封作用, 但在实际应用中, 各种因素影响会导致活塞密封件接触面和气缸镜面之间形成油楔的条件不断变化。当密封结构两端压降升高时, 油楔则易脱离, 在活塞环和气缸之间形成间隙, 则泄漏面积可表示为:

$$A_o = \frac{\pi}{4} (D_c^2 - D_p^2) \cdot \frac{X_p}{100} \quad (6)$$

式中: D_p — 活塞环直径 (m);

X_p — 活塞环中的泄漏百分比。

孔口入口面积 A_i 计算公式如下:

$$A_i = \pi D_c^2 / 4 \quad (7)$$

2.3 泄漏对气缸压力的影响

连续泄漏产生的气体质量流量通过气缸, 会对气缸内压力造成影响。若泄漏面积一定且已知, 气体质量流量仅为压缩机气缸和管道内压力的函数, 即气缸内压力的瞬时变化可表示为:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{d1}}{dt} = & -P_{d1} \left[\frac{dV}{dt} \left(\frac{1}{V} + \frac{R}{VC_v} \right) + \frac{hA}{mC_v} \right] + \frac{hAT_w R}{VC_v} \\ & + X_e \frac{R}{V} \left[T_s \left(\frac{dm_s}{dt} + \frac{dm_p}{dt} \right) - T_d \frac{dm_d}{dt} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

式中: V 、 A — 为气缸容积 (m³)、截面面积 (m²);

R 、 C_v — 管道长度 (m);

dm_s/dt 、 dm_d/dt — 通过吸气阀、排气阀的质量流量 (N/s);

dm_p/dt — 通过泄漏活塞环的质量流量 (N/s);

T_s 、 T_d — 吸气阀、排气阀温度 (K);

T_w — 气缸壁的温度 (K)。

同时求解方程 (8) 和方程 (2) 并代入压力脉动方程 (1), 得到压缩机发生故障时的压力脉

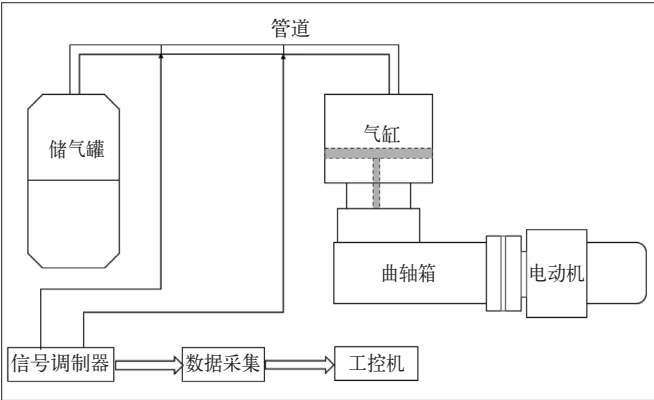


图 2 故障模拟实验布置图

动。若测得压缩机管道在运行状态下的压力脉动，通过对数据进行时域信号分解和重构，应用机器学习方法进行故障诊断，即可识别压缩机的故障类型。

3 实验与故障诊断

基于 2D90MG 往复式压缩机实验机的故障模拟实验平台，设备布置、传感器设置示意图如图 2 所示。预测压力脉动频率范围选用压电式加速度传感器，频率范围为 0.5 ~ 10000Hz，灵敏度为 100mV/g。实验压缩机的主要技术参数见表 1。

表 1 往复式压缩机主要技术指标

序号	参数	数值
1	进气压力	0.1MPa
2	额定排气压力	0.15MPa
3	气缸直径	105mm
4	气缸数	2
5	活塞行程	100mm
6	曲轴转速	14.3rev/s
7	管道中直弯部分的截面	1962mm ²
8	壁厚	8mm
9	容积流量	2.5m ³ /min

当曲轴以恒定转速运转时，以吸气过程的起始位置，即曲柄在在压缩过程中的中心位置为信号采集起点，也就是吸气过程的起始位置，进行信号的数据采集。选取 USB2830 高速数据采集卡，通过 USB 接口与工控机相连。数据采集分为三组，分别为压缩机正常运行、排气阀故障、活塞环故障三种状态下的管道振动信号。

4 压力脉动信号分析

本文对压力脉动进行了模拟，利用有限扰动理论模拟了压力脉动中的压力变化，证明了其对复杂管道系统中大压力脉动的预测能力。对 2D90MG 实验机三种工况下的振动数据进行采集，在额定转速下，每组实验设置采样点数为 4096 个，采集时间则为 0.16s，采集的信号通过降噪处理，选择 db10 小波基，采用小波包分解对振动信号进行特征提取。三种状态下的小波包重构信号如图 3 ~ 图 5 所示。建立 BP 神经网络模型，选取四种工作状态下，每组各 2000 组样本，其中 1400 组用于训练，另外 600 组用于测试。将训练样本输入 Softmax 训练模型，进行训练迭代。

通过图 3 ~ 图 5 的对比可知，在曲轴稳定输出的情况下，正常状态下压缩机的压力脉动在各频谱分量上呈规律变化，当气缸内压力增大时，脉动在高频区能量高且集中，与压缩机的热力循环过程基本一致。当排气阀发生泄漏时，过量的压缩空气通过排气阀并使管道内的压力增大，导致气缸与管道间的压力差增加，使脉动压力的峰值幅度增大且脉动剧烈。当活塞环发生泄漏时，在膨胀过程中，高压气体从活塞环故障处泄漏，气缸内的压力因此减小，脉动压力峰值变小。

通过神经网络训练可以从压力脉动的特征信号中将两种不同的故障识别出来，三种状态下神经网络输出结果及分布见表 2。

表 2 三种状态下神经网络输出结果及分布

故障类型	期望输出 二维编码	BP 网络的输出结果类概率分布				准确率
无故障	1 0 0 0	0.999	0.000	0.000	0.001	100%
	1 0 0 0	0.999	0.000	0.001	0.000	
	1 0 0 0	0.789	0.026	0.178	0.007	
气阀故障	0 0 1 0	0.032	0.004	0.963	0.001	93.3%
	0 0 1 0	0.028	0.054	0.914	0.004	
	0 0 1 0	0.030	0.001	0.969	0.000	
活塞环故障	0 0 0 1	0.062	0.081	0.171	0.686	95.2%
	0 0 0 1	0.014	0.198	0.098	0.690	
	0 0 0 1	0.039	0.110	0.147	0.704	

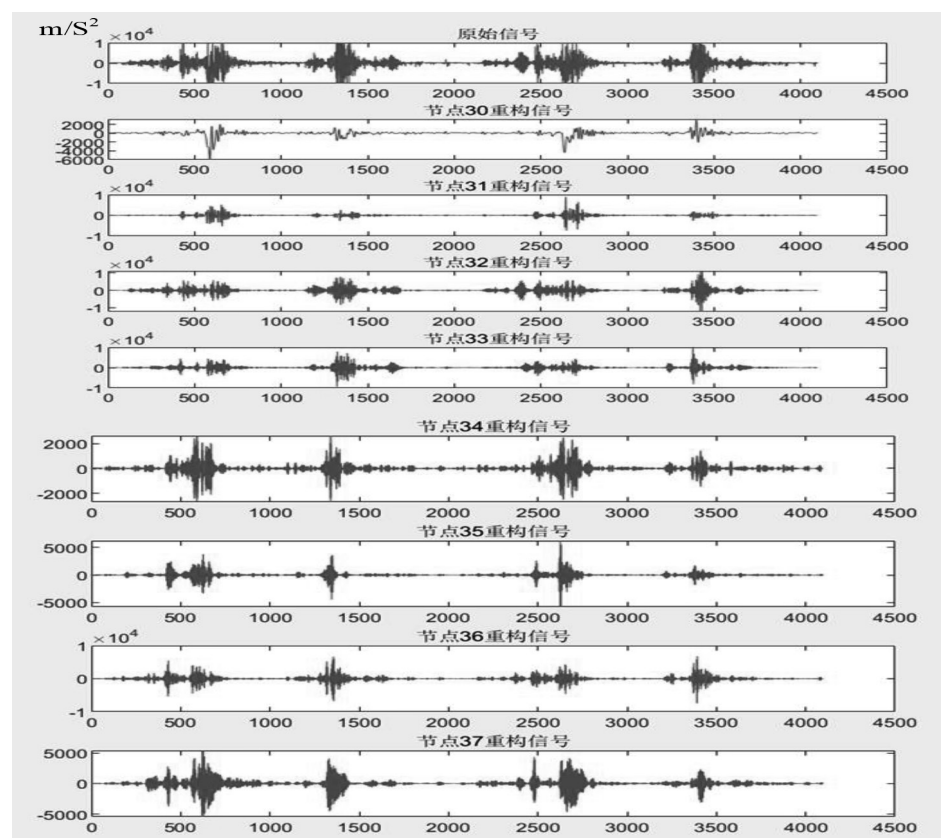


图3 正常状态下重构信号

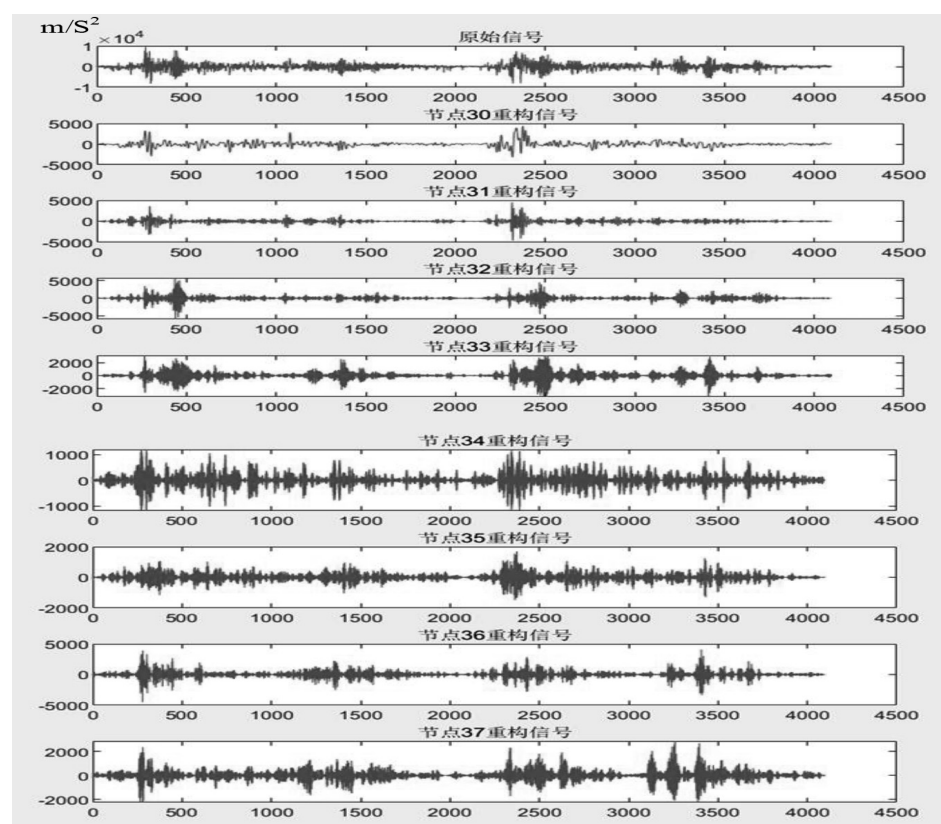


图4 排气阀故障状态下重构信号

5 结语

本文通过对压缩机管路压力脉动的性质研究进行故障诊断,得出以下结论:

(1) 与正常情况相对,活塞环泄漏故障时,管路的压力脉动的峰值因气缸内的压力变小而变小。而排气阀故障时因气缸与管道间的压差变大,压力脉动峰值变大且密集。

(2) 仿真结果显示,通过对管路压力脉动进行监测可作为压缩机状态监测和故障诊断的方法之一。

(3) 信号方法并分析可以有效诊断压缩机气阀或活塞环故障,但仿真结果可能受输入参数值的影响,如管道长度、管道直径、管道阻尼系数、气体中的声速和压缩机转速等。该方法也可以用于对压缩机的参数化设计研究,可为实际往复压缩机优化设计提供参考依据。

参考文献:

- [1] BIN XU, QUANKE FENG, XIAOLING YU. Prediction of Pressure Pulsation for the Reciprocating Compressor System Using Finite Disturbance Theory[J]. Journal of vibration and acoustics: Transactions of the ASME, 2009, 131(03): 987-1002.
- [2] 张思阳, 徐敏强, 王日新, 等. EMD与样本熵在往复压缩机气阀故障诊断中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014(06): 696-700.
- [3] 仲继卉. 基于EMD信息熵和支持向量机的往复压缩机轴承故

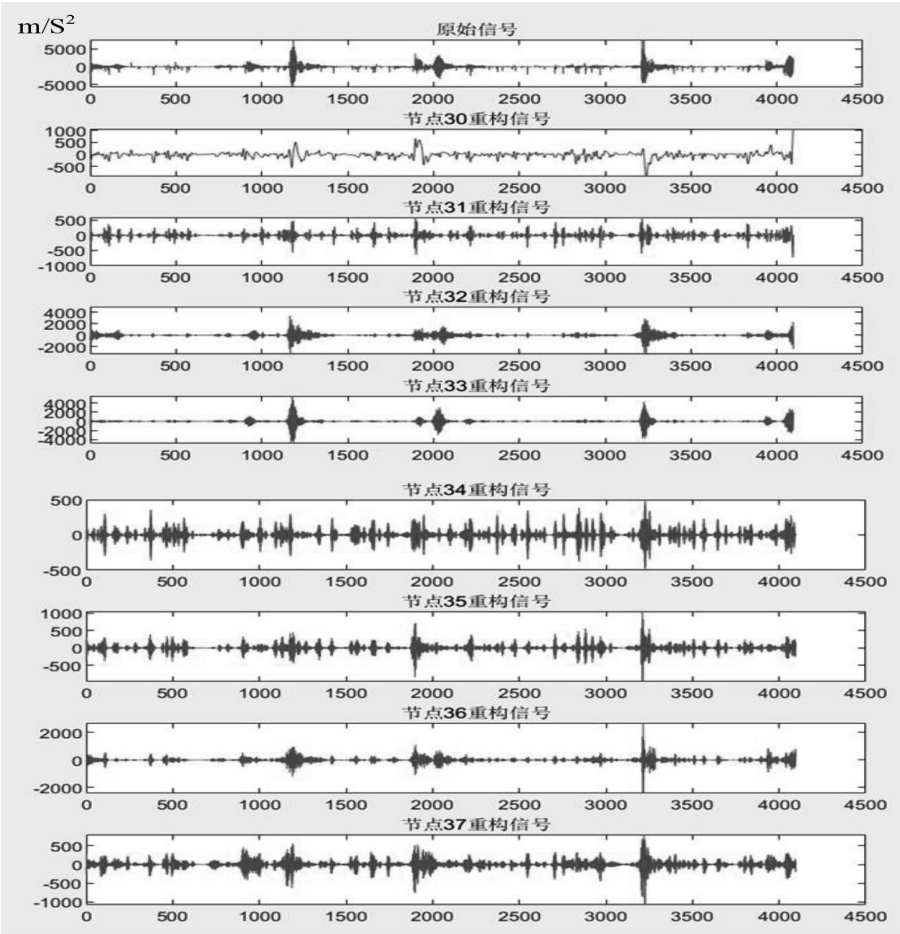


图 5 活塞环故障状态下重构信号

障诊断分析[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(12):91-94.

[4] 赵海洋, 徐敏强, 王金东. 有理 Hermite 插值局部均值分解方法及其往复压缩机故障诊断应用[J]. 机械工程学报, 2015(01):83-89..

[5] 董丽娟, 方召, 陈会涛. 基于深度学习和贝叶斯优化的压缩机故障诊断[J]. 机械设计与制造, 2023, 384(02): 45-52.

[6] HOUXI CUI, LAIBIN ZHANG, RONGYU KANG, et al. Research on fault diagnosis for reciprocating compressor valve using information entropy and SVM method[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(06):864-867.

作者简介: 焦圳 (1987.04-), 男, 汉族, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 机械设计制造与自动化。

(上接第 84 页)

趋势。

4 结语

烧结机漏风是影响烧结机利用系数和电耗的主要因素之一, 也是烧结行业普遍存在的难题。烧结机漏风治理的重点一般放在台车游板、正程轨道、滑道、头尾密封板和风箱。通过系统性治理改造, 烧结机系统漏风率明显降低, 对节能降耗、稳定烧结工况、提高烧结产量和质量起到很好的作用, 同时为炼铁厂其他烧结机漏风治理起到了很好的借鉴作用。

参考文献:

[1] 董书岐, 贾友剑, 吕明秀, 等. 降低烧结机漏风率的技术改造[J]. 设备管理与维修, 2016(06):63-65.

[2] 韩淑峰, 夏铁玉, 李恒旭, 等. 降低烧结机系统漏风率的生产实践[J]. 鞍钢技术, 2014(03):31-35.

作者简介: 陈俊宁 (1984.11-), 男, 汉族, 江西宜春人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 炼铁设备管理和维护。