

基于工艺参数灰色关联度分析的天然气 脱水装置异常检测

彭波¹, 张波¹, 谭健¹, 谭治斌², 梁天佑², 尹爱军²

(1. 中国石油西南油气田分公司 重庆气矿, 重庆 400021;

2. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: **目的** 针对石化设备常用的维修方式导致设备检维修成本高的问题, 同时保障设备的可靠运行, 建立基于灰色关联度的设备异常检测模型, 快速识别异常设备。**方法** 利用灰色关联度分析法计算增压站数据清洗后各生产监测参数间的关联度, 并以计算得到的关联度建立参数间的关联度矩阵, 实现参数间的聚类。利用基于参数之间的灰色关联度变化的方法, 识别参数聚类结果中同类监测参数对应设备的异常状态。**结果** 在大部分时间段, 同类监测参数的关联性较高, 预测关联性出现异常时为设备异常状态。**结论** 相对于监测参数阈值判断等方法, 基于灰色关联度分析法的预测模型具有较高的预测精度, 实现了异常设备的快速有效识别, 保障了设备的可靠运行, 降低了设备检维修成本。

关键词: 异常检测; 灰色关联度; 参数聚类; 脱水装置

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.05.005

中图分类号: TB114

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)05-0018-06

Anomaly Detection of Natural Gas Dehydration Unit Based on Grey Correlation Analysis of Process Parameters

PENG Bo¹, ZHANG Bo¹, TAN Jian¹, TAN Zhi-bin², LIANG Tian-you², YIN Ai-jun²

(1. Chongqing Gas District of Southwest Oil and Gasfield Company-, Chongqing 400021, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: Objective To establish an abnormal detection model of equipment based on grey relational degree to quickly identify abnormal equipment to solve the high cost of equipment maintenance caused by the common maintenance methods of petrochemical equipment, and ensure the reliable operation of equipment. **Methods** The grey relational degree analysis method was used to calculate the relational degree among the production monitoring parameters of the supercharger station after data cleaning. And a relational degree matrix among the parameters was established by the relational degree calculated to realize clustering of parameters. The abnormal state of the equipment corresponding to the same monitoring parameters in the clustering results was identified by the method of grey relational degree change among the parameters. **Results** Similar monitoring parameters were highly correlated in most time periods. And the abnormal state of equipment was predicted when the correlation was abnormal. **Conclusion** Compared with the methods of threshold judgment of monitoring parameters, the prediction model based on grey correlation analysis method has higher prediction accuracy, realizes fast and effective identification of abnormal

收稿日期: 2019-03-05; 修订日期: 2019-03-15

基金项目: 重庆市重点产业共性关键技术创新专项重大研发项目 (cstc2017zdcy-zdxxX0005); 中国石油重庆气矿科研项目 (k18-11)

作者简介: 彭波 (1982—), 男, 重庆人, 主要研究方向为天然气地面集输工程。

通讯作者: 尹爱军 (1978—), 男, 重庆人, 博士, 教授, 主要研究方向为智能测试与仪器, 智能运维与健康管理。

equipment. It ensures the reliable operation of equipment, and reduces the cost of equipment maintenance.

KEY WORDS: anomaly detection; grey correlation degree; parameter clustering; dehydration unit

石化设备检维修常用的方式为：事后维修（Breakdown Maintenance, BM），定时维修（Time-based Maintenance, TBM）和状态维修（Condition Based Maintenance, CBM）^[1]。事后维修由于故障发生的随机性，容易导致安全事故，且无法保障维修的快速性，扰乱生产计划。定期维修由于未考虑设备实际运行情况，易产生过度维修或维修不足的缺点。状态维修依据设备的运行状态，可实现基于设备可靠性的维修，但对监测系统和技术人员的素质要求较高。

目前，基于工艺监测参数的大数据分析技术越来越多地应用于设备健康管理领域。灰色关联度分析（GRA）由于其突出的参数间关联分析能力而在异常监测中得到广泛应用，从而实现了设备的可靠性维修^[2-3]。刘凌刚运用灰色关联度法优选了舰船装备维修方案决策^[4]。李子龙利用灰色关联度建立了电厂关键设备模型^[5]，并以此提出设备预警分析。文中采用灰色关联分析法，对天然气增压站脱水装置的监测数据建立聚类模型，再通过同类参数间的灰色关联度，实现对设备的异常检测。实际应用结果表明，该方法具有良好的应用效果。

1 灰色关联度分析

在稳定运行的系统中，设备的工况不会有太大的变化，因此正常运行情况下，相关监测变量会呈现出较强的关联性。当设备出现异常或设备工艺参数变化时，变量间的关联性将发生明显偏差，因此利用参数间的关联性分析可以检测设备的运行状态。也可通过参数的自关联性，分析监测参数的变化，实现对异常状态的识别。灰色关联分析^[6-10]的基本思想是根据两时间序列之间的几何相似程度，来确定比较参数之间的关联度。灰色关联度分析可运用于整体分析和局部分析。运用于整体分析时，即分析各特征参数间关联度的大小，得到灰色关联矩阵热力图，实现对参数进行聚类分析。运用于局部分析时，根据同类参数之间的关联性随时间的发展趋势，识别设备异常。

设设备共有 n 个监测参数，其中第 i 个参数的 m 个时间序列样本表示为 $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}) (i=1, 2, \dots, n)$ 。由于数据集各特征之间的量纲不同，它们对模型的影响程度是不一样的，因此进行如式（1）所示的标准化处理：

$$X_i^{(0)} = \frac{X_i - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

式中： μ 为 X_i 的均值； σ 为 X_i 的方差。则第 i 个参数可表示为：

$$X_i^{(0)} = (X_{i1}^{(0)}, X_{i2}^{(0)}, \dots, X_{im}^{(0)}) \quad (2)$$

令参数 $X_i^{(0)}$ 、 $X_j^{(0)}$ 在 k 时刻的绝对差为 $\Delta_{oi}(k)$ ：

$$\Delta_{oi}(k) = |X_{ik}^{(0)} - X_{jk}^{(0)}|, k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

则 $X_i^{(0)}$ 与 $X_j^{(0)}$ 在 k 时刻的关联系数 $\xi_{ij}(k)$ 为：

$$\xi_{ij}(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta_{oi}(k) + \rho_i^{\max \max_k} \Delta_{oi}(k)}{\Delta_{oi}(k) + \rho_i^{\max \max_k} \Delta_{oi}(k)} \quad (4)$$

式中： ρ 为分辨系数，其取值范围为 $(0, 1)$ ，通常 ρ 取 0.5； $\min_i \min_k \Delta_{oi}(k)$ 为第二级最小差； $\max_i \max_k \Delta_{oi}(k)$ 为第二级最大差。

于是 X_i 对 X_j 的灰色关联度 r_{ij} 为：

$$r_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_{ij}(k) \quad (5)$$

当 $X_i^{(0)}$ 与 $X_j^{(0)}$ 表示同一个参数时，成为自灰色关联度，否则为互灰色关联度。由式（5）可得， N 个参数间的灰色关联度矩阵 R 为：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 基于灰色关联度的参数聚类与异常检测

基于灰色关联度的参数聚类与异常检测的流程如图 1 所示。主要包括数据清洗、灰色关联度矩阵计算、参数聚类、基于关联度的异常检测等过程。

1) 数据清洗。在监测过程中，因为传感器等因素，数据中可能包含奇异点；或者因检修停产等原因，会存在数据缺失。为提高数据处理的精度与效率，文中采用 3σ 法^[11]清洗奇异点。计算其均值 μ 以及标准差 σ ，将位于区间 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 以外的数据视为异常值。对异常值和缺失数据，用均值 μ 代替。

2) 灰色关联矩阵计算。根据式（5）、（6），确定所有监测参数的关联度矩阵 R 。

3) 参数聚类。由灰色关联度矩阵 R ，设定聚类阈值。当参数间的关联度大于阈值时，则表示对应的参数属于同一类。

4) 异常检测。根据聚类结果，对同类参数，计算参数之间互灰色关联度随时间的变化，分析设备异常。同时，对每一个参数，计算其自关联性，结合互关联性，实现对设备异常状态的识别。

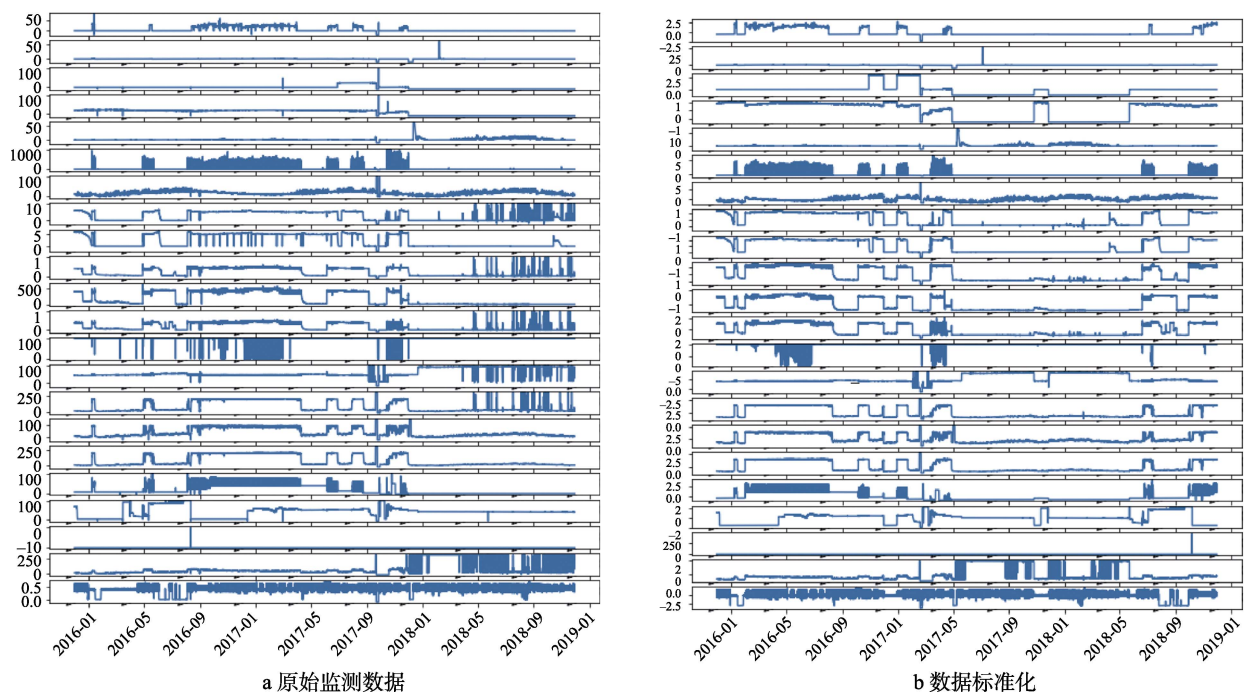


图 3 原始监测数据及数据标准化

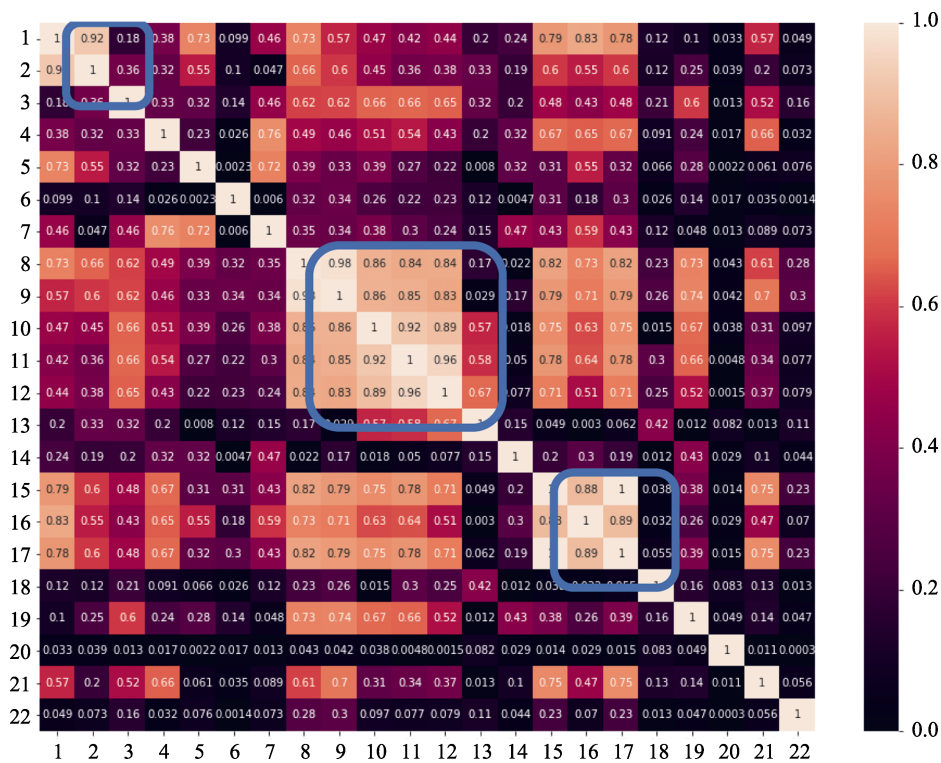


图 4 参数关联度矩阵热力图

燃料气压力（11）聚为一类；分离器差压（2）和计量差压（1）聚为一类。聚类结果与阈值相关，不同阈值的聚类结果稍有差异。根据实际工况，文中的聚类阈值为 0.85。

3.3 异常检测分析

依聚类结果，以重沸器中部温度、重沸器尾部温

度和精馏柱顶部温度聚类组为例，分析重沸器的设备状态。该类数据的原始数据与预处理后的数据如图 5 所示，从上至下依次为重沸器中部温度、重沸器尾部温度、精馏柱顶部温度。

该组参数的互关联性变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知，在大部分时间，三者的互关联性都在 0.9 以上，但在 2016 年 1 月 8 日至 2016 年 1 月 30 日间，

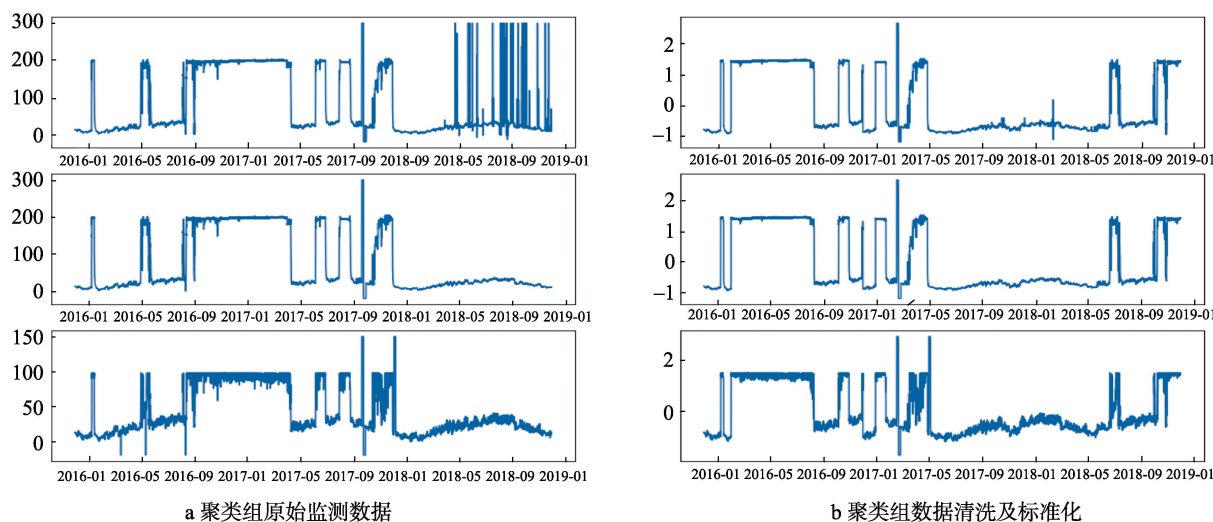


图5 聚类组参数数据标准化前后对比

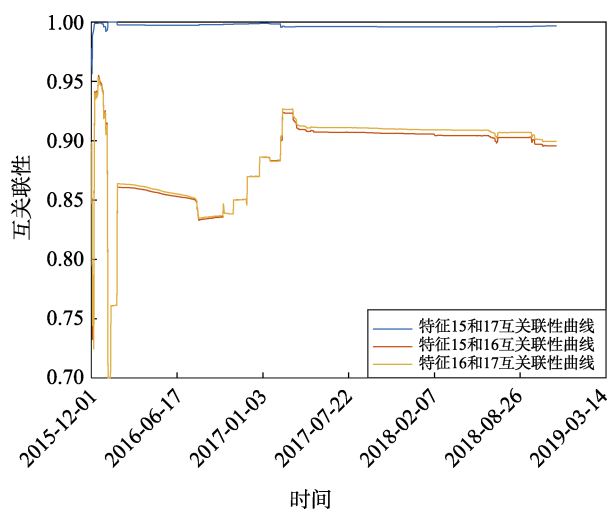


图6 互关联性变化曲线

精馏柱顶部温度与其他两者的关联性维持在 0.7 左右。在 2016 年 11 月 25 日至 2017 年 4 月 14 日间,重沸器中部温度、重沸器尾部温度与精馏柱顶部温度的互关联性逐渐从 0.85 升高至 0.9,可能是设备异常或工艺参数改变所致。由此进一步对自关联性进行分析。

该组参数的自关联性变化曲线如图 7 所示。重沸器尾部温度与精馏柱顶部温度的自关联性均值分别为 0.97 和 0.98。与互关联性曲线相对应的是,即在 2016 年 1 月 8 日至 2016 年 1 月 30 日,重沸器尾部温度与精馏柱顶部温度的自关联低于均值,且在 2016 年 1 月 30 日达到最低。由图 7 可知,这三个特征参数的自关联性始终保持在 0.88 以上。结合互关联性变化曲线,在该段时间内,设备工艺参数变化的可能性较大,但也不排除发生了设备异常的可能。在 2016 年 11 月 25 日至 2017 年 4 月 14 日的时间段,自关联性变化曲线在 0.96 范围内小幅波动,而互关联曲线逐渐增加,可能是工艺参数变化所致。

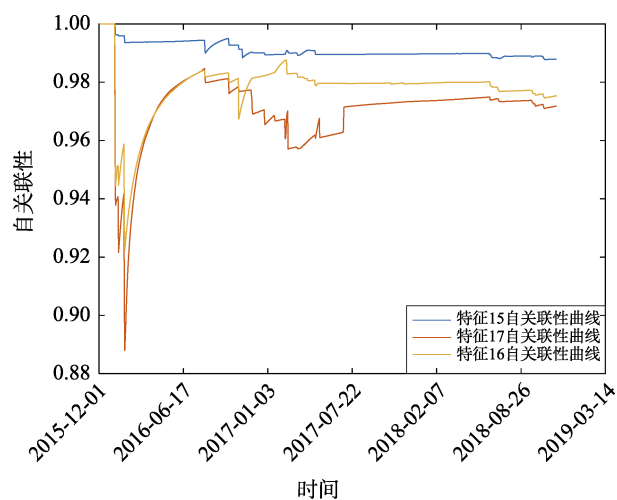


图7 自关联性变化曲线

由上述分析可知,在 2016 年 1 月 8 日至 2016 年 1 月 30 日左右,设备发生异常或工艺参数改变。在 2016 年 11 月 25 日至 2017 年 4 月 14 日左右,设备工艺参数调整。结合检维修记录和运行日志,这两段时间是发生了工艺参数的调整,并未发生设备异常情况。

4 结语

基于工艺大数据的设备健康管理已得到广泛关注。文中针对重庆气矿某脱水装置,利用其生产监测数据,采用灰色关联度分析方法,建立了设备异常检测模型。检测分析结果表明,利用基于灰色关联度的关联性分析方法可有效识别设备异常状态。文中所建立的异常检测模型可基于已有的生产检测数据,快速识别异常设备,不仅保障了设备的安全可靠运行,而且避免了因常规维修方式和设备故障停机产生的经济损失,实现了基于状态的检维修方式。下一步工作是建立设备健康管理平台,通过阈值矩阵实现参数异

常的自动报警。

参考文献：

- [1] 王勇. 基于 BIM 的石化设备离线维修研究与应用[D]. 武汉：华中科技大学, 2015.
- [2] 张丹. 浅谈石化企业基于可靠性的设备维修[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011(5): 101-101.
- [3] 张航伟. 以可靠性为中心的维修(RCM)在石化设备维修中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017(14): 31-32.
- [4] 刘凌刚, 耿俊豹, 魏曙寰, 等. 基于灰色关联 TOPSIS 法的舰船装备维修方案决策[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(5): 54-57.
- [5] 李子龙. 基于大数据的设备状态在线监测与预警诊断系统研究[D]. 北京：华北电力大学, 2016.
- [6] 陈娟, 马栋梁, 周涛, 等. 基于灰色关联度的超临界水自然循环换热系数影响因素分析[J]. 核动力工程, 2017, 38(2): 19-23.
- [7] 湛社霞, 匡耀求, 阮柱. 基于灰色关联度的粤港澳大湾区空气质量影响因素分析[J]. 清华大学学报：自然科学版, 2018, 58(8): 761-767.
- [8] 孙效功, 杨作升. 基于灰色关联度的聚类分析方法[J]. 中国海洋大学学报：自然科学版, 1995, 25(2): 229-232.
- [9] LIU J N K, HU Y X. Application of Feature-weighted Support Vector Regression Using Grey Correlation Degree to Stock Price Forecasting[J]. Neural Computing and Applications, 2013, 22(1): 143-152.
- [10] ZHAO S L, YI L T, CAO J H, et al. Research on Collaborative Design Agent Identification of Major Emergency Engineering Using an Improved TOPSIS Method Based on Grey Correlation Degree[J]. Revista de la Facultad de Ingenieria, 2016, 31(11): 34-49.
- [11] 张锦洲, 熊禾根. 基于 3σ 法的压力容器焊接质量控制系统的研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(5): 152-154.