

基于灰色关联分析法的溶液泵振动分析

杨 焱¹ 何靖怡¹ 李 杰¹ 王远飞² 向俊杰³

1. 中国石化江汉油田分公司江汉采油厂湖北新捷 LNG 项目部, 湖北 黄冈 438011;

2. 中国石油青海油田分公司勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202;

3. 昆仑能源黄冈液化天然气有限公司, 湖北 黄冈 438011

摘 要:为探究某 LNG 工厂脱碳 MDEA 溶液泵振动联锁停机影响要因,对事件发生规律进行梳理,全面分析运行工况,指导下步整改。基于某次振动联锁实例,采用灰色关联分析法,丰富数据量,选取事件发生前后全过程运行数据进行分析。研究得出,温度、振动、仪表损坏等诱发机泵联锁的原因具有交叉性,既能单一触发联锁又能互相促进导致停泵。运用灰色关联分析法进行数学建模,能充分利用当前数据,根据不同工况灵活设定母因子与子因子,有效将模糊定性的联锁停机现象进行全数据式动态分析。量化问题诱发点,多快好省地指导现场故障排除,解决了因分析手段有限而导致的决策瓶颈,避免了盲目拆解泵体诱发的误工现象,在一定程度上降低了购买更换备件的经济风险,提升了技术管理水平。

关键词:脱碳;MDEA 溶液泵;振动;灰色关联分析法

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.02.008

Vibration Analysis of Lean Pump Based on Grey Relational Analysis

Yang Ye¹, He Jingyi¹, Li Jie¹, Wang Yuanfei², Xiang Junjie³

1. Hubei Xinjie LNG Project Department, Jiangnan Oil Production Factory, Sinopec Jiangnan Oilfield Branch Company, Huanggang, Hubei, 438011, China; 2. China Petroleum Qinghai Oilfield Branch of Exploration and Development Research Institute, Dunhuang, Gansu, 736202, China; 3. Kunlun Energy Huanggang LNG Ltd, Huanggang, Hubei, 438011, China

Abstract: In order to explore the main factors influencing the vibration interlock shutdown of a decarbonized lean fluid pump in a LNG plant, the occurrence law of the event has been sorted out by comprehensively analyzing the operating condition so as to guide the rectification in the next step. Based on an example of vibration interlock, the grey relational analysis method is adopted to enrich data volume and the whole process operation data before and after the event is selected for analysis. The results show that temperature, vibration, instrument damage and other causes of pump interlock are intersecting, which can not only trigger interlock but also promote each other to stop the pump. The grey relational analysis method is used for mathematical modeling to make full use of current data. According to different working conditions, the master factor and sub-factor are set flexibly, and the whole data dynamic analysis is carried

收稿日期:2018-07-31

基金项目:中国石油西气东输二线管道工程项目(CQE 200700506)

作者简介:杨 焱(1989-),男,湖北天门人,工程师,硕士,主要从事 LNG 工厂工艺生产管理工作。

out for the fuzzy qualitative interlock shutdown. Induction points have been quantified, and guidance for trouble-shooting at site has been conducted effectively to solve the bottle-neck effects due to limited analyzing methods and avoid blind pump dismantle. The economic risks of buying and replacing spare parts have been reduced and the technical management level has been improved to certain extent.

Keywords: Decarbonization; Lean pump; Vibration; Grey relational analysis

0 前言

机泵作为输送流体或使流体增压的机械已广泛用于石油、化工、医药、军工等领域,其主要原理为将原动机的机械能或其他外部能量传送给液体,使液体能量增加,属于通用机械的一种。主要分为容积式、动力式和其他类型三类^[1-3]。

在石油化工领域天然气脱碳环节,机泵在满足介质特性要求前提下,进行液体输送和提供化学反应的压力流量,保证工艺装置正常运行^[4]。在机泵故障诊断与处理方面,国外凭借先进自动化仪表采集技术结合人工智能算法,通过加速度计和流量计采集到泵在正常和不同故障工况下的振动和流量信号,同时对其采用小波包分解进行去噪,进行核超限学习机式的复杂工况下机泵故障诊断^[5];国内则还是采取原始的逐点排除法进行故障点拆解式诊断和分析,直观检测故障源及损坏零件^[6]。

本文基于某 LNG 工厂脱碳装置 MDEA 溶液循环泵单次典型振动联锁跳停实例,深入挖掘数据隐含信息。以保障机泵平稳运行为目的,运用灰色关联分析法进行某次振动联锁实例分析^[7]。深入探讨联锁停泵问题的复杂要因,为下步工艺改进和操作优化提供量化依据。

1 工况概述

某 LNG 工厂脱碳装置选用双塔设计(吸收+再生),

运用活化 MDEA 溶液进行循环洗涤,能有效脱除原料气中所含二氧化碳,并在后端产量波动前提下动态调节 MDEA 溶液循环量(88~288 m³/h),保证能耗与脱碳效果的均衡。MDEA 溶液循环泵选用大连华能 HKD 系列水平中开多级离心泵(图 1),共设置 3 具(1 用 2 备),采用 450 kW 电机驱动,配备温度、压力、振动、功率等联锁保护。该泵设计流量 10~1 400 m³/h,扬程 2 000 m,温度 -60~+200 ℃,压力 25 MPa^[8]。该泵投运以来发生过泵体驱动端机械密封烧毁、出口阀门开关不利和不同程度的温度、振动诱发联锁停泵等事件。

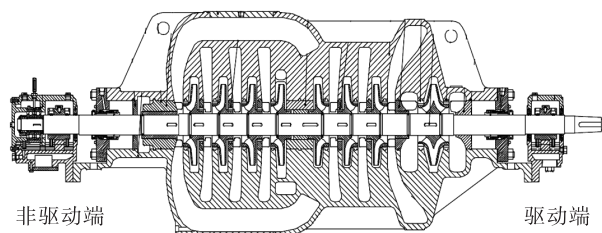


图 1 泵剖面图

2 数据准备

2018 年 3 月 11 日下午 13:25 高压 MDEA 溶液泵 A 轴承端温度高报警,13 日凌晨 3:31 轴承负载端振动联锁跳停,事后紧急切换 B 泵运行。收集整理 2018 年 3 月 11 日 6:46 至 3 月 13 日 3:42 联锁跳停后关键数据做折线图(图 2),可以看出,机泵轴承端温度、电机非轴承端

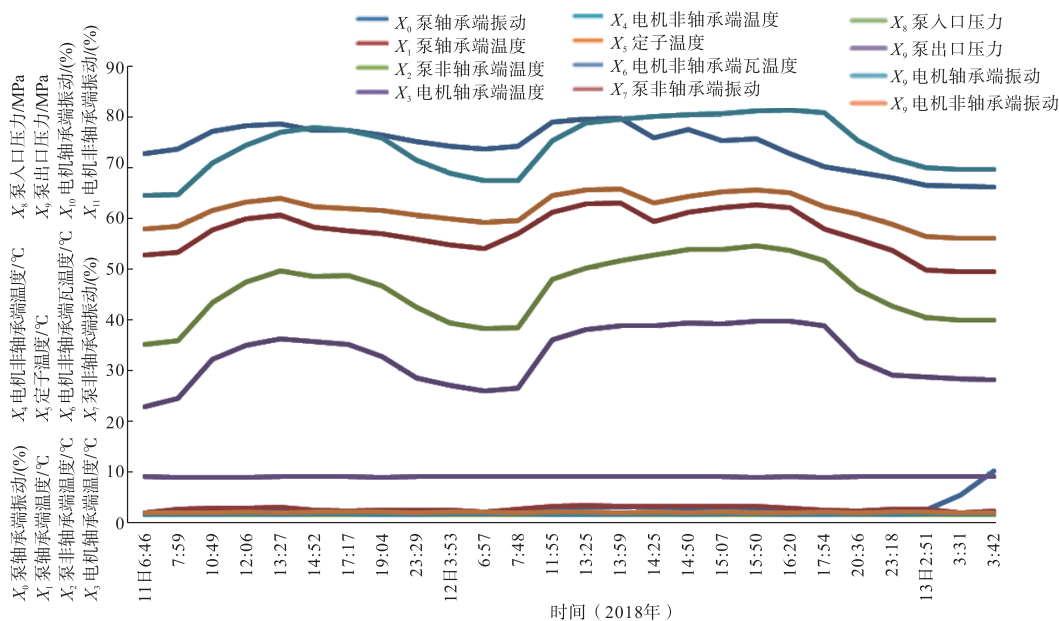


图 2 联锁事件全数据折线图

轴瓦温度、泵非轴承端温度变化曲线形状相似,电机轴承端温度与电机非轴承端温度变化曲线形状相似,且各温度测点变化趋势显一致性,存在互为影响可能。其中,机泵轴承端温度 3 月 12 日 13:25 达 78.9℃报警值前有突然上升过程,与前一周期 11 日 6:46 到 14:52 现象类似,查阅前一天数据均显周期性变化。与前段时间不同的是定子温度高温持续时间明显变长(12 日 13:25,

78.9℃至 17:00,81.7℃),共持续 4 h。

根据当前数据表征,初步判断该事件为温度高导致轴承材料性质改变,诱发机械形变最终导致振动连锁^[9-11]。该事件因果关系为典型多因素互为影响导致,但互为影响情况不明,且数据太过冗余,需简化数据(表 1),做数学建模式具体分析^[12]。

表 1 建模数据准备表

数据项	2018 年 3 月 11 日				2018 年 3 月 12 日				2018 年 3 月 13 日
	6:46	7:59	12:06	17:17	7:48	14:25	16:20	23:18	3:42
X_0 泵轴承端振动 / (%)	1.8	2.3	2.6	2.1	2.3	2.9	2.5	2.4	10.2
X_1 泵轴承端温度 /℃	73	73.8	78.5	77.6	74.4	76.1	73	68.2	66.3
X_2 泵非轴承端温度 /℃	52.8	53.4	60.1	57.7	57	59.5	62.2	53.7	49.5
X_3 电机轴承端温度 /℃	35.1	35.8	47.4	48.7	38.5	52.9	53.7	42.6	39.9
X_4 电机非轴承端温度 /℃	22.8	24.5	34.9	35.1	26.4	38.7	39.7	29	28.2
X_5 定子温度 /℃	64.6	64.8	74.5	77.5	67.5	80.2	81.5	71.9	69.8
X_6 电机非轴承端轴瓦温度 /℃	58.1	58.5	63.4	62	59.7	63.1	65.1	58.9	56.2
X_7 泵非轴承端振动 / (%)	1.9	2.6	2.8	2.3	2.7	3.3	2.8	2.7	2.3
X_8 泵入口压力 /MPa	1.4	1.4	1.4	1.5	1.4	1.4	1.4	1.5	1.4
X_9 泵出口压力 /MPa	8.9	8.8	8.8	8.9	8.9	9	8.9	9	8.9
X_{10} 电机轴承端振动 / (%)	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.6
X_{11} 电机非轴承端振动 / (%)	1.9	1.9	2	2	1.9	2	1.9	2	1.9

3 建模分析

灰色关联分析法(GRA 法)是基于母因素与子因素间的多因素灰色关联度排序,从而统计分析因素间强弱、大小关系的方法^[13]。主要特点为运用各因素的样本数据进行定量计算,广泛运用在量化数据丰富的工程领域。若样本数据列反映出两因素变化的态势基本一致,则它们之间的关联度较大;反之关联度较小^[14-16]。从思路上讲,关联分析属于几何处理范畴。与其他传统的多因素分析方法相比,灰色关联分析对数据要求较低且计算量小,更易控制^[17]。

现基于上节所述,选用灰色关联分析法做数学建模。根据算法特性,选取关键节点,带入表 1 数据进行运算。

3.1 确定分析序列

在对 MDEA 溶液泵振动连锁问题分析上,设泵轴承端振动为母因子 X_0 ;其余各项简化数据后分别设为子因子 $X_1 - X_{11}$ (表 1),构成参考序列和比较序列。

3.2 序列的无量纲化

数据准备时,由于系统中各因素列计算单位不同,不便于比较。因此在分析之前,首先要进行标准化(无量纲化)数据处理,将各数据标准化成介于 0 至 1 之间的数据最佳。其在此选用均值法进行处理。公式为:

$$y_i(k) = \frac{x_i(k)}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(1)} \quad (1)$$

式中: $i=0,1,2,\cdots m,k=1,2\cdots n$ 。

无量纲化后矩阵:

1.000 0	1.277 7	1.444 4	1.166 6	1.277 7	1.611 1	1.388 8	1.333 3	5.666 6
1.000 0	1.010 9	1.075 3	1.063 0	1.019 1	1.042 4	1.000 0	0.934 2	0.908 2
1.000 0	1.011 3	1.138 2	1.092 8	1.079 5	1.126 8	1.178 0	1.017 0	0.937 5
1.000 0	1.019 9	1.350 4	1.387 4	1.096 8	1.507 1	1.529 9	1.213 6	1.136 7
1.000 0	1.074 5	1.530 7	1.539 4	1.157 8	1.697 3	1.741 2	1.271 9	1.236 8
1.000 0	1.003 0	1.153 2	1.199 6	1.044 8	1.241 4	1.261 6	1.113 0	1.080 4
1.000 0	1.006 8	1.091 2	1.067 1	1.027 5	1.086 0	1.120 4	1.013 7	0.967 2
1.000 0	1.368 4	1.473 6	1.210 5	1.421 0	1.736 8	1.473 6	1.421 0	1.210 5
1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.071 4	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.071 4	1.000 0
1.000 0	0.988 7	0.988 7	1.000 0	1.000 0	1.011 2	1.000 0	1.011 2	1.000 0
1.000 0	1.000 0	1.066 6	1.066 6	1.066 6	1.066 6	1.000 0	1.000 0	1.066 6
1.000 0	1.000 0	1.052 6	1.052 6	1.000 0	1.052 6	1.000 0	1.052 6	1.000 0

3.3 计算关联系数

关联系数,实质上是曲线间几何形状的差别程度,所以用曲线间差值大小做关联系数的衡量尺度。对于一个参考数列 X_0 有若干个比较数列 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 。各比较数列与参考数列在各个时刻的关联系数 $\xi(X_i)$ 可由下列简化公式算出:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi \Delta_{\max}} \quad (2)$$

式中: ξ 为分辨系数,在此分别取 0.5 和 0.2 进行计算;

$\Delta_{oi}(k)$ 为第 k 个时间点的第 i 个数据项的绝对差值;

1.000 0	0.899 1	0.865 6	0.958 2	0.901 9	0.807 1	0.859 5	0.856 3	0.333 3
1.000 0	0.899 3	0.885 9	0.969 8	0.923 0	0.830 8	0.918 5	0.882 6	0.334 7
1.000 0	0.902 2	0.961 9	0.915 0	0.929 3	0.958 1	0.944 0	0.952 1	0.344 3
1.000 0	0.921 3	0.965 0	0.864 5	0.952 0	0.965 0	0.871 0	0.974 8	0.349 4
1.000 0	0.896 4	0.890 9	0.986 3	0.910 8	0.865 5	0.949 2	0.915 2	0.341 5
1.000 0	0.897 7	0.870 7	0.959 8	0.904 8	0.819 2	0.898 6	0.881 5	0.336 1
1.000 0	0.963 3	0.987 8	0.981 8	0.943 2	0.949 8	0.965 5	0.964 4	0.348 0
1.000 0	0.895 4	0.842 6	0.961 5	0.895 4	0.795 6	0.859 5	0.895 4	0.337 6
1.000 0	0.891 6	0.839 2	0.934 5	0.895 4	0.798 6	0.859 5	0.891 6	0.337 6
1.000 0	0.895 4	0.862 9	0.959 6	0.918 5	0.813 7	0.859 5	0.877 1	0.340 9
1.000 0	0.895 4	0.858 6	0.954 2	0.895 4	0.809 8	0.859 5	0.894 4	0.337 6

3.4 计算关联度及其排序

关联系数是比较数列与参考数列在各个时刻的关联程度值,过于分散的解不便于进行整体性比较,因此应该将各个时刻的关联系数集通过求平均值简化集中为一个值。最终得出比较数列与参考数列间关联程度的数量表示,关联度 r_i 公式为式(3),结果见表2。

$$r_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_i(k) \quad (3)$$

综上所述,运用灰色关联分析法分辨系数 ξ 取 0.5 计算得出所有因素关联度都 >0.4 (一般 >0.4 为主要关联项)。所以降低分辨系数 ξ 至 0.2 再次计算,得出关联度仍然 >0.4 。故进行关联度从强由弱排序: X_7 泵非轴承端振动 $> X_3$ 电机轴承端温度 $> X_4$ 电机非轴承端温度 $> X_5$ 定子温度 $> X_2$ 泵非轴承端温度 $> X_6$ 电机非轴承端轴瓦温度 $> X_{10}$ 电机轴承端振动 $> X_{11}$ 电机非轴承端振动 $> X_8$ 泵入口压力 $> X_1$ 泵轴承端温度 $> X_9$ 泵出口压力。由此可见以上 11 项因素都会不同程度影响 MDEA 溶液泵正常运行,且均为要因。以本次振动连锁为问题分析源,将所有管理因素分为 4 个梯队。由数据表征结果可以看出,母因子泵轴承端振动直接关联 X_7 泵非轴承端振动。而第 2、3 梯队影响因素中全为各测点温度,直到第 4 梯队才再次出现振动要因,且夹杂泵入/出口压力等因素。可见本次事件为温度诱发振动连锁,

$\min_k |X_0(k) - X_i(k)|$ 为两层式取绝对差值中最小值计算,第一层为先分别由各比较序列在各个时刻的值与参考序列在各个时刻的值之绝对差值中取最小值,再由这些最小值当中选取最小值,简记为 $\Delta_{\min}$;

$\max_k |X_0(k) - X_i(k)|$ 为两层式取绝对差值中最大值计算,第一层为先分别由各比较序列在各个时刻的值与参考序列在各个时刻的值之绝对差值取最大值,再由这些最大值当中选取最大值,简记为 $\Delta_{\max}$ 。

计算矩阵为:

存在互为影响关联性,与连锁事件全数据折线图直观分析一致。综合证明数学模型与实际吻合。

表2 关联度及排序

影响因素	分辨系数 ξ 取 0.5		分辨系数 ξ 取 0.2		梯队
	关联度	排序	关联度	排序	
X_7 泵非轴承端振动	0.900 4	1	0.844 6	1	1
X_3 电机轴承端温度	0.878 5	2	0.798 1	2	2
X_4 电机非轴承端温度	0.873 6	3	0.790 0	3	
X_5 定子温度	0.861 7	4	0.766 4	4	
X_2 泵非轴承端温度	0.849 4	5	0.743 6	5	3
X_6 电机非轴承端轴瓦温度	0.840 9	6	0.727 3	6	
X_{10} 电机轴承端振动	0.836 4	7	0.719 0	7	4
X_{11} 电机非轴承端振动	0.833 9	8	0.714 5	8	
X_8 泵入口压力	0.832 0	9	0.712 3	9	
X_1 泵轴承端温度	0.831 2	10	0.710 7	10	
X_9 泵出口压力	0.826 3	11	0.700 9	11	

通过灰色关联分析结论可得:电机轴承端(泵驱动端)温度是诱发本次连锁的主要因素,且电机非轴承端温度与定子温度因素也应该同时考虑。为后续拆解论证作充分参考,结合现场实际情况,先预设性判定如下问题:

1) 润滑油污染或缺油导致的机泵本体各温度测点异常。

2) 温度探头损坏或安装不到位诱发的仪表数据采集失真。

3) 轴、瓦安装间隙过小导致巴氏合金磨损诱发温度异常。

4) 设备老化或现场操作失误导致的循环水线阻塞、介质冷却失效诱发的温度异常。

4 验证与指引

综合上节数学建模与直观分析,基于问题预设情况描述,做现场拆解式验证,为后续机泵操作与改造做科学指引^[18]。

现场拆解故障泵电机轴承端(泵驱动端)轴瓦,可见机械旋转部件光滑,未见磕碰与磨损现象,但释放润滑油时有明显水质流出,润滑油整体呈乌黑浑浊状,且油量不足,测润滑油含水 14.37%。进一步检查轴瓦处仪表探头及其附件,发现底层温度探头安装孔错位,探头插入深度不足,测点数据失真,有联锁失效或异常联锁风险。现场拆解情况与上节预设情况吻合,再次证明灰色关联建模有效,问题判定正确。观察现场,查阅脱碳 MDEA 溶液泵运行记录得出:

1) 操作方面,因成本问题,驱动端原装载重机械密封(5万余元)损坏后维修更换为常规机械密封(2万余元)。后续启泵操作时均采用人为冲水降温 15 min 方式规避启动瞬间的机械密封烧毁。

2) 安装布置方面,机泵为露天卧式摆放,仅为控制柜设置有遮雨篷,且机泵为 1 用 2 备,因为开工周期不确定,单台机泵运行时间存在偏差。

3) 设计方面,机泵冷却液(胺液)接入处为泵体进口,当冷却液灌入后会迅速被泵体抽吸排出,无法充分冷却机械密封(未执行启泵冲水操作前发生过机械密封烧毁事件)。

由以上运行记录可知,操作习惯、现场机泵布置与机泵冷却线设计问题同时导致了此次联锁停机事件的发生。深入来看表象的振动、温度联锁也不单纯是某单一测点诱发的瞬时问题。不同时间段的复合性数据变化有着互为影响的规律^[19],后续需要在运行、维护与改造多个环节进行改进。具体指引如下:

1) 为了达到机械密封完全冷却的目的,下次大修时改造冷却液接入点到泵体非载重端。

2) 启泵操作时适当减少冲水时间和流量,同时形成润滑油污染程度化验检测长效机制,并阶段性更换润滑油。

3) 下次大修时在泵体处搭建雨棚,并均衡各泵运行

时间,防止长时间未运转和雨水冲刷导致机泵的部件老化、进水。

4) 强化机泵检修现场监督,保证现场施工精细化,全面预防零部件磕伤、安装间隙过大、零部件装反等人为失误。形成关键仪表测点的长效性数据分析与现场探头检测机制^[20]。

5 结论

机泵的良好运转需要科学的运转使用机制和精细的维护保养。间歇停运和人为闲置在一定情况下会降低机泵使用寿命、隐藏已有问题和弊病,严重影响脱碳系统正常运转。所研工厂由于受 LNG 市场波动所制,开工率不饱满。工厂存在设备和管理上的“低、老、坏”现象。需要强化认识。

运用灰色关联分析法进行数学建模,能充分利用当前数据。根据不同工况灵活设定母因子与子因子,有效将模糊定性的联锁停机现象进行全数据式动态分析。量化问题诱发点,多快好省地指导现场故障排除,解决了因分析手段有限而导致的决策瓶颈,避免了盲目拆解泵体诱发的误工现象,在一定程度上降低了购买更换备件的经济风险,提升了技术管理水平。

参考文献:

- [1] 赵国栋. 化工机泵设备的维护保养与节能降耗的关系[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(1): 121.
- [2] 肖杰. 天然气脱碳工艺方法述评[J]. 气体净化, 2010, 10(3): 7-11.
- [3] 姜民政, 张迪, 段天玉, 等. 有杆泵同井注采系统工况诊断方法研究[J]. 石油机械, 2018, 46(1): 78-82.
- [4] 高海山. 石油化工泵节能技术[J]. 炼油技术与工程, 2009, 39(4): 44-46.
- [5] Jiao X, Jing B, Huang Y, et al. Research on Fault Diagnosis

- of Airborne Fuel Pump Based on EMD and Probabilistic Neural Networks [J]. Microelectronics Reliability, 2017, 75: 296-308.
- [6] 黎晓勇,梁春育,陈文忠.立式多级离心泵故障诊断及分析处理[J].设备管理与维修,2018,(4):110-112.
Li Xiaoyong, Liang Chunyu, Chen Wenzhong. Fault Diagnosis and Analysis of Vertical Multistage Centrifugal Pump [J]. Plant Maintenance Engineering, 2018, (4): 110-112.
- [7] 罗毅,李昱龙.基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J].电网技术,2013,37(1):77-81.
Luo Yi, Li Yulong. Comprehensive Decision-Making of Transmission Network Planning Based on Entropy Weight and Grey Relational Analysis [J]. Power System Technology, 2013, 37 (1): 77-81.
- [8] 杨烨.数字化 LNG 工厂建设与应用[J].天然气与石油,2015,33(5):66-69.
Yang Ye. Construction and Application of Digital LNG Plant [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (5): 66-69.
- [9] 覃莉.机泵运行可靠性及提升途径研究[J].化工管理,2016,(31):100.
Qin Li. Study on Operation Reliability and Its Improvement of Machine Pump [J]. Chemical Enterprise Management, 2016, (31): 100.
- [10] 杨发义,邹春雨,包鑫.裂解气压缩机振动联锁停车事故处理过程及其分析[J].化工管理,2018,(4):150-153.
Yang Fayi, Zou Chunyu, Bao Xin. The Process of Cracking Gas Compressor Vibration Interlock Stopping Accident and Its Analysis [J]. Chemical Enterprise Management, 2018, (4): 150-153.
- [11] 陈勇,周媚.浅析轴类零件失效问题及其对策[J].中国机械,2015,(8):126-127.
Chen Yong, Zhou Mei. Discussion on the Failure Problems of Shaft Parts and Its Countermeasures [J]. Machine China, 2015, (8): 126-127.
- [12] 石广丰,田在祺,史国权,等.衍射光栅槽形隆起的数学建模及演变规律[J].工具技术,2017,51(5):108-111.
Shi Guangfeng, Tian Zaiqi, Shi Guoquan, et al. Mathematical Modeling and Evolution Rule of Lateral Groove Ridges of Diffraction Gratings [J]. Tool Engineering, 2017, 51 (5): 108-111.
- [13] 郭卫香,孙慧.西北 5 省碳排放与产业结构碳锁定的灰色关联分析[J].工业技术经济,2018,37(7):121-129.
Guo Weixiang, Sun Hui. A Grey Correlation Analysis of Carbon Emissions and Industrial Structure Carbon Locked in Northwest Five Provinces [J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2018, 37 (7): 121-129.
- [14] 张涛,樊文欣,蔡智清,等.基于灰色关联度筒形件强力旋压工艺参数优化[J].锻压技术,2017,42(7):88-91.
Zhang Tao, Fan Wenxin, Cai Zhiqing, et al. Parameter Optimization on Cylinder Power Spinning Based on Grey Correlation Degree [J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42 (7): 88-91.
- [15] 李济沅,邱玉婷,于竞哲,等.基于灰色关联度和 TOPSIS 的真空断路器运行状态综合评估[J].高压电器,2017,53(3):242-247.
Li Jiyuan, Qiu Yuting, Yu Jingzhe, et al. State Complex Evaluation Vacuum Circuit Breaker Based on Grey Correlation Degree and TOPSIS Method [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53 (3): 242-247.
- [16] 王雁凌,吴梦凯,周子青,等.基于改进灰色关联度的电力负荷影响因素量化分析模型[J].电网技术,2017,41(6):1772-1778.
Wang Yanling, Wu Mengkai, Zhou Ziqing, et al. Quantitative Analysis Model of Power Load Influencing Factors Based on Improved Grey Relational Degree [J]. Power System Technology, 2017, 41 (6): 1772-1778.
- [17] 杨烨,肖传桃,刘彬.基于灰色系统 GM(1,N)模型的脱碳装置效果分析[J].石油与天然气化工,2016,45(1):30-35.
Yang Ye, Xiao Chuantao, Liu Bin. Effect Analysis of Decarburization Device Based on the Grey System GM(1, N) Model [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2016, 45 (1): 30-35.
- [18] 邱逵达,赵昔.岭澳核电站循环水泵气囊密封损坏机理分析[J].润滑与密封,2003,(4):82-84.
Qiu Kuida, Zhao Xi. The Analysis of Failure Mechanism of Inflatable Seal in Circulating-water Pump at Ling'ao Nuclear Power Station [J]. Lubrication Engineering, 2003, (4): 82-84.
- [19] 刘家春,张子贤,尹伟,等.防治泵站水泵汽蚀损坏的措施[J].水泵技术,2011,(4):38-40.
Liu Jiachun, Zhang Zixian, Yin Wei, et al. Some Measures Used for Preventing Cavitation Damage of Water Pumps in Pumping Stations [J]. Pump Technology, 2011, (4): 38-40.
- [20] 杨烨,王海成,郑玉宝,等.大型 LNG 工厂开工复产方案优化及问题处理[J].石油与天然气化工,2018,47(2):57-64.
Yang Ye, Wang Haicheng, Zheng Yubao, et al. Program Optimization and Problems Handling of Start and Resumption Production of Large-scale LNG Plant [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2018, 47 (2): 57-64.