

大型 LNG 工厂气动阀故障率分析预测

杨 焱¹ 张金龙² 何靖怡¹ 杨 玄¹ 李 杰¹ 邓向军¹

1. 中国石化江汉油田分公司江汉采油厂黄冈 LNG 经理部, 湖北 黄冈 438011;

2. 中国石油新疆油田公司, 新疆 克拉玛依 834000

摘 要:为探究 LNG 工厂控制阀故障率发展变化规律,预测关键零部件维修损坏频次,指引日常维护检修与备品备件的采购库存,收集 2014—2019 年某工程控制阀故障情况数据,丰富问题分析宽度,运用灰色系统均值 GM(1,1) 模型进行相关问题表征。研究表明:1) GM(1,1) 模型是基于累加生成和最小二乘法的指数拟合模型,具有“贫信息、小样本”的通用性优势,能在时间序列数据有限的前提下得到较高精度的预测结果;2) 本次建模得出的 2019 年故障情况预测较为可靠,其中定位器维修频次平均模拟相对误差仅 3.67%,但随着未来的发展,该模型的预测意义就越弱;3) 下步将运用 DGM 模型或 SDGM 模型全面提升原始均值 GM(1,1) 模型的精确性;4) 控制阀控制回路简单,但仅凭停工期间的阀门开度比不能及时和全面地发现问题,且该研究结果时效性有限,需要制定严谨而简便的阀门检测方案,并使相关数据适应于 GM(1,1) 建模。本研究通过简约数学算法,极大预测后续可能发生的异常工况,在成本可靠的前提下辅助生产。

关键词:GM(1,1); 控制阀; 故障; 灰色系统; LNG 工厂

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.06.006

Failure Rate Analysis and Prediction for Pneumatic Valve in Large LNG Plant

Yang Ye¹, Zhang Jinlong², He Jingyi¹, Yang Xuan¹, Li Jie¹, Deng Xiangjun¹

1. Hubei Xinjie LNG Project, Jiangnan Oil Production Factory, Sinopec Jiangnan Oilfield Branch Company, Huanggang, Hubei, 438011, China;

2. PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang, 834000, China

Abstract: This study aims to explore the development, and changes over time, of control valve failure rate in LNG plant, predict the frequency of repair and damage to key components, and guide the routine maintenance, purchase and inventory of spare parts. Data of control valve failure from a development project between 2014 to 2019 were collected to widen the issue analysis, and the Gray system mean GM(1,1) model was used to characterize the relevant problems. The study shows that: 1) GM(1,1) model is an exponential fitting model based on accumulation generation and least square method. It is versatile and can be used with “poor information and small sample” situation to get more accurate prediction results under the premise of limited time series data; 2) The failure prediction in 2019 obtained by this modeling is relatively reliable. The relative error of simulated positioner average maintenance frequency is only 3.67%. However, with longer time frame, the model

收稿日期: 2019-12-20

基金项目: 中国石油天然气集团公司重点工程“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 工厂生产运行工作。E-mail: fengjiming@yeah.net

prediction becomes less meaningful; 3) The next step is to use DGM model or SDGM model to comprehensively improve the accuracy of the original mean GM(1,1) model; 4) Although the control loop driving the control valve is simple; comparing valve opening ratios during shutdowns alone will not provide timely detection of overall control valve issues. In addition, this method has limited prediction time frame, so a rigorous and yet simple valve testing program needs to be developed, and relevant data could be adapted to GM(1,1) modeling. This study makes use of simple mathematical algorithm to predict, to a large extent, possible abnormal production scenarios in future operation, to enhance operation uptime at a reliable cost.

Keywords: GM(1,1); Control valve; Fault; Gray system; LNG plant

0 前言

LNG 工厂是低温工程与化学工程的结合体,既有传统化工企业生产流程复杂、过程管控严格等特点,又具备低温工程领域对设备设施要求高,温度控制精确等特点^[1-3]。而低温 LNG 的获取需要在多重仪器仪表监控辅助下运用控制阀进行自动/半自动调控,确保透平机械与换热器的合理配合运行。所以控制阀的稳定性与故障率对 LNG 工厂的生产运行有着直接影响。

控制阀是以压缩空气为动力源,在一系列电信号传输情况下借助定位器、执行器、电磁阀等相关元件,调控气缸动作幅度,完成相应开关量或比例式调节^[4-6]。在故障诊断与相应统计分析研究方面,国外重点研究了控制阀故障产生机理,特别是在摩擦因素的检测和量化摩擦研究方面取得了曲线拟合和不同控制输出信号下的函数关系式,在本质上为产品的升级改造提供了基础^[3]。国内主要偏向于控制回路研究方面,例如运用 DAMADICS 平台,进行控制阀多类故障仿真模拟,为生产一线的仪器仪表故障检测提供解决方案^[7]。

灰色预测模型在实际运用范畴有着“贫信息、小样本”的通用性优势,现已运用于机械制造、交通运输与社会经济等方面^[8-10]。本文基于我国当前 LNG 产量最大的某工程为研究实例,缩小研究范围,提高预测精度,以工艺流程中运用最为广泛的控制阀为研究对象,将历年阀门维修频次与部件更换返修类别视为不确定性灰色系统,运用均值 GM(1,1) 模型进行数学分析,预测各部件损坏频次,为备品备件的采购与库存做科学指引。

1 工程简介

某工程天然气处理能力 $500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, LNG 产量为 $120 \times 10^4 \text{ t/a}$,生产操作弹性为 50% ~ 100%,工艺、设备全部国产化。所研 LNG 工厂工艺流程见图 1^[11]。工厂仪表控制方面,全厂气动控制阀 408 台,压力变送器 213 台,液位变送器 167 台,温度热电阻 229 支,各类流量计 120 套,FGS 安全附件(可燃气体报警仪 162 台、火焰探测器 33 台)。相关仪表控制阀需要稳定而连续性工

作,确保工艺系统连贯性运行。任一环节出现问题都会对整体生产运行造成不同程度的影响,甚至诱发联锁停机和安全事故。下节全景展示主工艺流程中控制阀故障对于生产运行的影响^[12]。

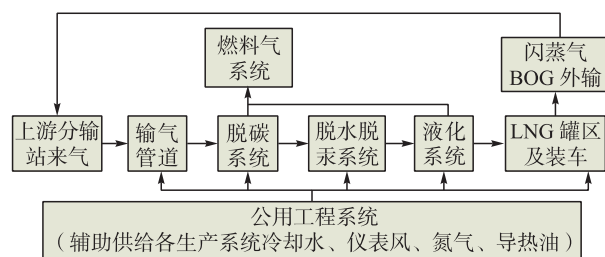


图 1 某 LNG 工厂主要工艺流程图

Fig. 1 Main process flow chart of a LNG plant

2 问题描述

所研工厂共配备气动控制阀 408 台,其中主流程工艺区联锁切断 SDV 阀 80 台,常规调节阀 129 台。阀门所调介质温度分布在 $-165 \sim 300^\circ\text{C}$ 之间。相关阀门还存在气液两相流、温度突变等情况影响。控制阀的常规检查仅凭给定 0%、30%、50%、70%、100% 操作数据进行开度比对不严谨。工厂自 2013 年 12 月竣工至今一直处于间歇生产状态,因阀门故障而诱发的重大工艺事件和联锁停机事故见表 1。

综上所述,所研工厂历年都发生过因控制阀故障而导致的突发工艺事件,严重影响工厂平稳率与生产安全。其中个别故障无法在线解决,需要停产检修,诱发工厂开工物料消耗与工时损失,间接增加了员工超劳程度和生产运行成本。下节运用 GM(1,1) 模型进行控制阀故障情况预判,指引停工检修与备品备件的采购库存^[13-14]。

3 建模预测

GM(1,1) 模型的基本原理为:将原始数据序列进行累加,充分弱化随机扰动因素后,进行新数据序列的指数增长规律表征。然后通过指数曲线进行模拟并运用最小二乘法进行具体参数的求解^[15-17]。在此选用通用性最强的均值 GM(1,1) 模型建模。

表 1 阀门故障重大事件记录表

Tab. 1 Major events records of valve failure

时间	事件记录	工艺影响	故障分析	维修
2014 年	试运期间原料气进气总阀人为操作失误,关闭	整体工艺系统波动	人为失误	恢复流程,稳定系统
2015 年	BOG 压缩机出口控制阀背压无法开启	BOG 压缩机无法正常启动	气缸执行器选型有误或气缸老化	后续改造安装手动均压阀
2016 年	甲烷压缩机防喘振阀门自整定失效	甲烷压缩机进气量波动,电流波动	定位器故障	需要停产更换放大器并重新整定
2017 年	夏季停工期间丙烯压缩机防喘振阀异常动作	无	故障防喘振阀过滤器破损,杂质侵入;仪表风水露点超标	吹扫干燥仪表风管线,更换过滤器
2018 年	冷箱产品线 14 - HV - 102 故障关	联锁停机	电磁阀腐蚀失效	更换电磁阀
2019 年	三脱区胺液循环线 12 - SDV - 103 异常关断;丙烯制冷循环压缩机极冷线 15 - TV - 310 控制阀失灵;LNG 储罐进液阀门异常关;重烃洗涤塔 14 - SDV - 104 异常关	胺液循环终止,后端胺液循环泵憋压,前端吸收塔液位骤降;丙烯制冷系统紊乱,压缩机各级进气量失衡,联锁停机;产品线憋压,联锁停机;重烃洗涤塔液位上涨	电磁阀老化失效;执行器弹簧老化;执行器接线端子腐蚀;电磁阀老化失效	更换相应组件

1) 设时间序列 $X^{(0)}$ 有 n 个观测值, $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3) \cdots x^{(0)}(n)\}$, 通过一次累加生成新序列:

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3) \cdots x^{(1)}(n)\} \quad (1)$$

2) 生成新序列变化趋势微分方程:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = b \quad (2)$$

式中: a 为发展系数; b 为灰色作用量, 运用最小二乘法求得:

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (3)$$

3) 构造数据矩阵:

$$B = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}[X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)] & 1 \\ \cdots & \cdots \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(n-1) + X^{(1)}(n)] & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$Y_n = \begin{pmatrix} X^{(0)}(2) \\ X^{(0)}(3) \\ \cdots \\ X^{(0)}(n) \end{pmatrix} \quad (5)$$

4) 均值求解预测模型:

$$\hat{X}^{(1)}(K+1) = \left[\hat{X}^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (6)$$

5) 残差检验, 按预测模型进行计算 $\hat{X}^{(1)}(i)$, 并将 $\hat{X}^{(1)}(i)$

累减生成 $\hat{X}^{(0)}(i)$, 然后计算原始序列 $X^{(0)}(i)$ 与 $\hat{X}^{(0)}(i)$ 的绝对误差序列和相对误差序列^[18-19]:

$$\Delta^{(0)}(i) = X^{(0)}(i) - \hat{X}^{(0)}(i) \quad (7)$$

式中: $i = 1, 2, \cdots, n$ 。

$$\Phi(i) = \frac{\Delta^{(0)}(i)}{X^{(0)}(i)} \times 100\% \quad (8)$$

式中: $i = 1, 2, \cdots, n$ 。

控制阀故障情况数据见表 2。根据上节问题描述, 分别令 2014 - 2018 年控制阀故障率, 各部件维修频次为

表 2 控制阀故障情况数据表

Tab. 2 Control valve failure data

时间	综合故障率 / (%)	电磁阀维修频次 / 次	定位器维修频次 / 次	过滤器维修频次 / 次	执行器维修频次 / 次	阀门本体维修频次 / 次	突发状况频次 / 次
2014 年	0.80	3	2	2	0	0	1
2015 年	1.40	6	3	5	0	0	4
2016 年	2.45	6	4	7	4	6	12
2017 年	2.90	15	6	9	8	7	8
2018 年	6.30	18	9	16	6	9	6

原始数据序列,预测 2019-2021 年未来时间发展下的相应参数。在此以做全数据序列实例算法过程展示。

综合故障率全数据运算过程:

- 1) 初始化建模原始序列:0.80,1.40,2.45,2.90,6.30。
- 2) 原始序列的 1-AGO 生成:0.80,2.20,4.65,7.55,13.85。
- 3) 1-AGO 生成序列的紧邻均值生成:1.50,3.42,6.10,10.70。
- 4) 计算灰色模型发展系数 $a = -0.52$ 和灰色作用量 $b = 0.45$ 。
- 5) 模拟值与模拟误差见表 3。

表 3 综合故障率模拟误差表

Tab.3 Simulation error of comprehensive failure rate

序号	实际值	模拟值	残差	相对模拟误差 / (%)
1	1.40	1.13	0.27	19.29
2	2.45	1.90	0.55	22.56
3	2.90	3.19	-0.29	9.86
4	6.30	5.35	0.95	15.09

通过表 3 进一步计算可知平均模拟相对误差为 16.70%。结合图 2 综合分析可知,模型数据成明显上升趋势,且模拟误差相对较小,模型精度良好。进一步根据式(6)均值求解预测模型得出未来 2 年控制阀综合故障率分别为 8.98%、15.08%。

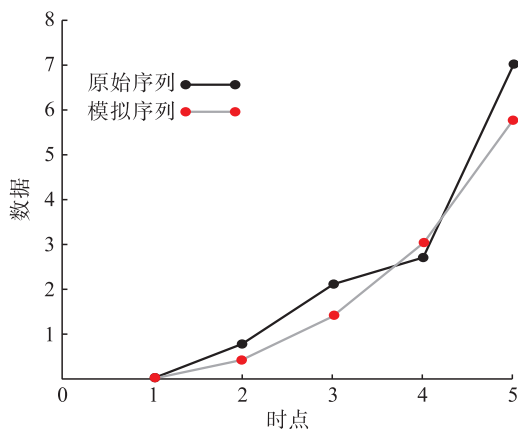


图 2 综合故障率数据序列变化趋势图

Fig.2 Trend of comprehensive failure rate data series

电磁阀维修频次全数据运算过程:

- 1) 初始化建模原始序列:3,6,6,15,18。
- 2) 原始序列的 1-AGO 生成:3,9,15,30,48。
- 3) 1-AGO 生成序列的紧邻均值生成:6,12,22.5,39。
- 4) 计算灰色模型发展系数 $a = -0.404$ 和灰色作用量 $b = 3.229$ 。
- 5) 模拟值与模拟误差见表 4。

表 4 电磁阀维修频次模拟误差表

Tab.4 Simulation error of maintenance frequency of solenoid valve

序号	实际值	模拟值	残差	相对模拟误差 / (%)
1	6	5.47	0.53	8.85
2	6	8.19	-2.19	36.47
3	15	12.26	2.74	18.27
4	18	18.35	-0.35	1.97

通过表 4 进一步计算可知平均模拟相对误差为 16.39%。结合图 3 综合分析可知,模型数据呈明显上升趋势,相对误差较小,模型精度良好。进一步根据式(6)均值求解预测模型得出未来 2 年电磁阀维修频次分别为 27.48、41.14。

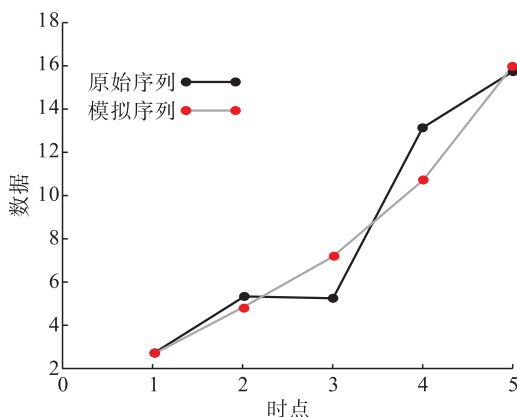


图 3 电磁阀维修频次数据序列变化趋势图

Fig.3 Trend of solenoid valve maintenance frequency data series

定位器维修频次全数据运算过程:

- 1) 初始化建模原始序列:2,3,4,6,9。
- 2) 原始序列的 1-AGO 生成:2,5,9,15,24。
- 3) 1-AGO 生成序列的紧邻均值生成:3,7,12,19.5。
- 4) 计算灰色模型发展系数 $a = -0.38$ 和灰色作用量 $b = 1.50$ 。
- 5) 模拟值与模拟误差见表 5。

表 5 定位器维修频次模拟误差表

Tab.5 Simulation error of positioner maintenance frequency

序号	实际值	模拟值	残差	相对模拟误差 / (%)
1	3	2.76	0.24	8.13
2	4	4.03	-0.03	0.82
3	6	5.90	0.10	1.66
4	9	8.63	0.37	4.07

通过表 5 进一步计算可知平均模拟相对误差为 3.67%。结合图 4 综合分析可知,模型数据吻合性极强,呈明显上升趋势,模型精度优异。进一步根据式(6)均

值求解预测模型得出未来 2 年控制阀定位器维修频次分别为 12.63、18.48。

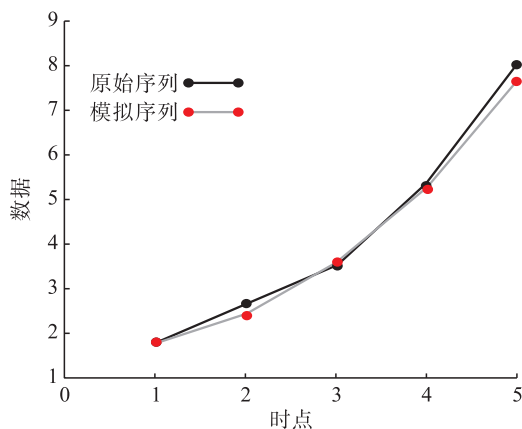


图 4 定位器维修频次数据序列变化趋势图

Fig. 4 Trend of positioner maintenance frequency data series

过滤器维修频次全数据运算过程:

- 1) 初始化建模原始序列: 2, 5, 7, 9, 16。
- 2) 原始序列的 1-AGO 生成: 2, 7, 14, 23, 39。
- 3) 1-AGO 生成序列的紧邻均值生成: 4.50, 10.50, 18.50, 31.00。
- 4) 计算灰色模型发展系数 $a = -0.41$ 和灰色作用量 $b = 2.62$ 。
- 5) 模拟值与模拟误差见表 6。

表 6 过滤器维修频次模拟误差表

Tab. 6 Simulation error of filter maintenance frequency

序号	实际值	模拟值	残差	相对模拟误差 / (%)
1	5	4.26	0.74	14.85
2	7	6.42	0.57	8.24
3	9	9.69	-0.69	7.66
4	16	14.62	1.38	8.64

通过表 6 进一步计算可知平均模拟相对误差为 9.85%。结合图 5 综合分析可知,模型数据吻合性强,呈明显上升趋势,模型精度优良。进一步根据式(6)均值求解预测模型得出未来 2 年控制阀过滤器维修频次分别为 22.05、33.27。

综上所述,所研工厂因政策与市场影响,生产过程不连续,生产负荷不饱满,长期处于间歇性生产状态^[20]。而全年的多频次开停工给仪器仪表寿命带来一定损耗,加之零部件自然老化问题,控制阀故障率和各零部件维修频次呈逐年上升趋势。运用 GM(1,1) 模型对相关数据进行运算,最终得出未来 2 年预测结果。

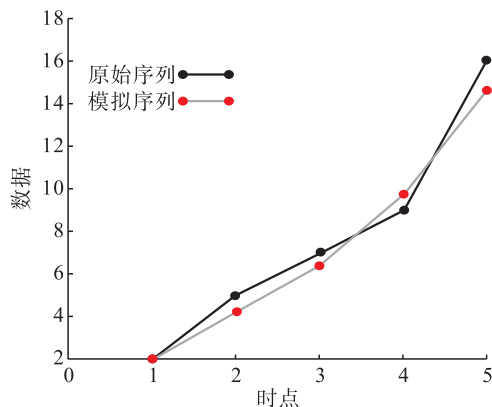


图 5 过滤器维修频次数据序列变化趋势图

Fig. 5 Trend of filter maintenance frequency data series

4 验证与展望

根据 2019 年控制阀故障情况统计,综合对比 GM(1,1) 模型预测值,并在 6 月停工检修期间做关键性阀门零部件拆解维护。通过表 7 控制阀故障情况对比表可以看出,模型预测值略大于现场实际值,误差可接受,预测结果能指引现场生产运行工作。通过图 6 控制阀故障部件现场拆解可以看出,露天暴晒处控制阀零部件损坏情况较为严重,主要表现为线路老化和腐蚀受潮影响^[21]。下步可进行防潮、遮阴处理。

表 7 控制阀故障情况对比表

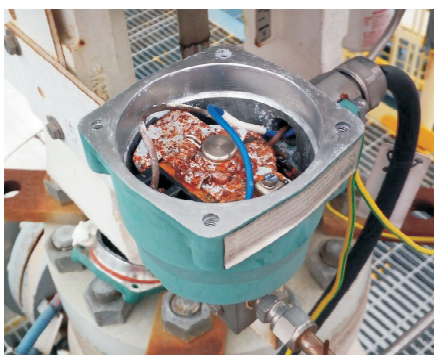
Tab. 7 Control valve failure comparison

实际值及 预测值	综合故障 率 / (%)	电磁阀维 修频次 / 次	定位器维 修频次 / 次	过滤器维 修频次 / 次
2019 年实际值	9.24	32.00	11.00	19.00
2019 年预测值	8.98	27.48	12.63	22.05
2020 年预测值	15.08	41.14	18.48	33.27

注:所有数据统计以年中 6 月为计算节点。

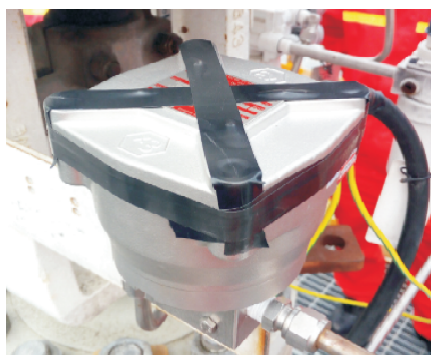
依据本文 GM(1,1) 数学建模运算分析过程和现场实际检修情况,做下步研究展望。

1) 从数学建模与数据分析方面而言,GM(1,1) 模型属于预测类别的模型,是灰色系统理论原始经典构想下的核心模型。但该模型的运算机理是将离散形式的原始数据通过白化方程运算得到连续形式的结果,离散形式到白化形式的跳跃式运算会导致最终预测结果的偏差和不稳定^[9]。所以进行纯指数序列的拟合运算时,未来的扰动因素会使时间较远的结果产生误差。在当前仪表故障率预测运用中只进行 GM(1,1) 新陈代谢模型式的次年预测,指引短期内各部件备品备料的采购库存较为可信。下步还需进行模型的过程化运算改进,运用 DGM 模型或 SDGM 模型全面提升原始均值 GM(1,1) 模型的精确性。



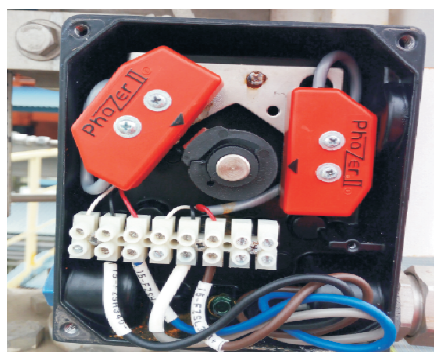
a) 电磁阀进水腐蚀

a) Water corrosion of solenoid valve



b) 对更换电磁阀进行密封处理

b) Seal the new solenoid valve



c) 定位器接线端子老化

c) Aging of positioner terminal



d) 过滤器老化堵塞

d) Filter aging and clogging

图 6 控制阀故障部件照片

Fig.6 Photo of faulty parts of control valve

2) 从现场实践与检测方法方面而言, 仅凭停工期间的阀门开度比对无法及时并全面地发现问题。且该方法时效性有限, 需要制定严谨而简便的阀门检测方案, 并使相关数据适应于 GM(1,1) 建模。在此提出一种基于执行器可测量信号冗余分析方法构想^[10]。充分利用现场已知数据, 进行执行器可测量变量的函数关系构造, 并将相关数据带入 GM(1,1) 模型, 在全面检测当前执行机构故障的同时进行零部件故障率判定式预测。

5 结论

1) 信息化时代下, 控制阀的监测已经实现了智能定位器通过 HART 协议、总线等方式采集阀门自身的信息, 并通过相关电信号的计算提前预测阀门故障。但是相关系统的构建需要一定成本, 后期运维费用未知, 性价比及其市场推广性有限。所以充分运用当前数据进行 GM(1,1) 建模辅助生产更为可行。

2) 所研 LNG 工厂设备设施较新, 但还是发生了因关键部位控制阀故障导致的联锁停机, 且在未来时间发展上呈上升趋势。运用均值 GM(1,1) 模型进行 2019 年故障情况预测为控制阀备品备件的采购提供了工作指引, 并指引了大修过程中对易损件的提前检查更换。其中

定位器维修频次平均模拟相对误差仅 3.67%, 模型数据吻合性极强, 模型精度优异, 极具推广性。

3) GM(1,1) 模型是基于累加生成和最小二乘法的指数拟合模型, 具有“贫信息、小样本”的通用性优势, 能在时间序列数据有限的前提下得到较高精度的预测结果。但随着未来时间的发展, 不确定因素越多, 该模型的预测意义就越弱。所以在当前仪表故障率预测运用中只进行新陈代谢模型式的次年预测, 指引短期内各部件备品备料的采购库存。当前的控制阀常规检查和生产运行期间人为巡检的外观检查不能保证控制阀故障的即时预警和相关零部件的损耗性评估。下步需充分运用现场可测物理量参数进行相关分析和数学建模, 挖掘可用信息, 指引控制阀故障判断。

参考文献:

- [1] 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.

- [2] 刘华怡,张其方. 气动调节阀的工作原理及计算选型[J]. 石油化工自动化,2018,54(2):54-58.
Liu Huayi, Zhang Qifang. Working Principle and Calculating Selection of Pneumatic Control Valve [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2018, 54 (2): 54-58.
- [3] 陈兴武,狄海瑞,于涛. 气动调节阀故障检测与诊断技术研究综述[J]. 电大理工,2013(2):30-32.
Chen Xingwu, Di Hairui, Yu Tao. Review of Fault Detection and Diagnosis Technology for Pneumatic Control Valve [J]. Study of Science and Engineering at RTVU, 2013 (2): 30-32.
- [4] 谈斐祺,谢磊,王挺任. 基于稀疏性贝叶斯极限学习机的气动调节阀多类故障诊断[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版),2015,15(3):271-276.
Tan Feiqi, Xie Lei, Wang Tingren. Multi-Fault Diagnosis of Pneumatic Control Valve with Sparse Bayesian Extreme Learning Machine [J]. Journal of Shanghai Institute of Technology (Natural Science), 2015, 15 (3): 271-276.
- [5] 杨烨,陆学同,刘健,等. 基于灰色关联分析与层次分析法的LNG工厂冬防保温[J]. 油气储运,2019,38(1):81-86.
Yang Ye, Lu Xuetong, Liu Jian, et al. Winter Insulation of LNG Plant Based on Grey Correlation Analysis and Analytical Hierarchy Process [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38 (1): 81-86.
- [6] 杨玄,杨烨,王远飞. 系统工程框架下的LNG工厂平稳率核算方案[J]. 炼油与化工,2019,30(1):50-53.
Yang Xuan, Yang Ye, Wang Yuanfei. LNG Plant Stable Rate Accounting Plan Under System Engineering Framework [J]. Refining Chemical Industry, 2019, 30 (1): 50-53.
- [7] 陈世伟. HTP气动阀门定位器故障维修[J]. 中国仪器仪表,1998(6):45-46.
Chen Shiwei. Troubleshooting of HTP Pneumatic Valve Positioner [J]. China Instrumentation, 1998 (6): 45-46.
- [8] 刘锦民,王小伟,滕志君,等. 气动薄膜调节阀膜头漏气的预判断、分析及处理[J]. 小氮肥,2016,44(5):17-20.
Liu Jinmin, Wang Xiaowei, Teng Zhijun, et al. Prejudgment, Analysis and Treatment of Air Leakage in Diaphragm Head of Pneumatic Diaphragm Control Valve [J]. Small Nitrogenous Fertilizer Plant, 2016, 44 (5): 17-20.
- [9] 徐华锋,方志耕. 优化白化方程的GM(1,1)模型[J]. 数学的实践与认识,2011,41(7):163-167.
Xu Huafeng, Fang Zhigeng. GM (1, 1) Model with Optimization Whitenization Equation [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41 (7): 163-167.
- [10] 盛锴,周年光,宋军英,等. 再热凝汽式汽轮机阀门流量特性在线监测优化[J]. 中国电力,2017,50(12):62-67.
Sheng Kai, Zhou Nianguang, Song Junying, et al. Online Monitoring and Optimization of Valve Discharge Characteristics for a Reheat Turbine [J]. Electric Power, 2017, 50 (12): 62-67.
- [11] 王化祥,林慧. 智能式电气阀门定位器[J]. 电子质量,2003(9):17-18.
Wang Huaxiang, Lin Hui. Intelligent Electrical Valve Positioner [J]. Electronics Quality, 2003 (9): 17-18.
- [12] 王素凤,高欣. 工业锅炉用智能气动阀门定位控制器的研究[J]. 机床与液压,2010,38(2):80-82.
Wang Sufeng, Gao Xin. Research on the Intelligent Pneumatic Valve Position Control System for Industrial Boiler [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38 (2): 80-82.
- [13] 唐文军,刘俊清. 气动阀门定位器控制系统的研究[J]. 环球市场,2016(35):241.
Tang Wenjun, Liu Junqing. Research on Control System of Pneumatic Valve Positioner [J]. Global Market, 2016 (35): 241.
- [14] 曹长刚,张卫华,杨彦召. 智能总线气动阀门定位器控制系统研究[J]. 铜业工程,2009(1):78-82.
Cao Changgang, Zhang Weihua, Yang Yanzhao. Research on Control System of Intelligent Fieldbus Pneumatic Valve Locator [J]. Copper Engineering, 2009 (1): 78-82.
- [15] 罗丹,戴吉生,张龙. 气动阀调试和常见故障分析与处理[J]. 科技视界,2015(20):233-234.
Luo Dan, Dai Jisheng, Zhang Long. Pneumatic Valve Debugging and Common Fault Analysis and Treatment [J]. Science & Technology Vision, 2015 (20): 233-234.
- [16] 朱宏伟. 气动阀门常见故障的分析[J]. 矿山机械,2009,37(18):81-82.
Zhu Hongwei. Analysis of Common Faults of Pneumatic Valve [J]. Mining & Processing Equipment, 2009, 37 (18): 81-82.
- [17] 孙旺成. 气动阀门在线诊断测试原理与展望[J]. 中国机械,2015(10):144-145.
Sun Wangcheng. Principle and Prospect of Online Diagnostic Test for Pneumatic Valve [J]. Machine China, 2015 (10): 144-145.
- [18] 汪伟. 几种电动、气动阀门调试技术分析[J]. 科技创新与应用,2014(23):84-85.
Wang Wei. Analysis on Debugging Technology of Several Electric and Pneumatic Valves [J]. Technology Innovation and Application, 2014 (23): 84-85.
- [19] 施志昌,施嘉文. 气动阀门的工作原理及故障分析[J]. 中国科技纵横,2018(3):74-75.
Shi Zhichang, Shi Jiawen. Working Principle and Fault Analysis of Pneumatic Valve [J]. China Science and Technology, 2018 (3): 74-75.
- [20] 肖昊,杨艳,丁宁,等. LNG工厂自动化控制系统分析及应用[J]. 辽宁化工,2019,48(3):233-235.
Xiao Hao, Yang Yan, Ding Ning, et al. Analysis and Application of Automation Control System for LNG Plants [J]. Liaoning Chemical Industry, 2019, 48 (3): 233-235.
- [21] 李明远,安立璋. LNG(液化天然气)发展及其自动化系统[J]. 仪器仪表用户,2006,13(2):61-63.
Li Mingyuan, An Lizhang. Development of LNG and the Automatic System [J]. Instrumentation Customer, 2006, 13 (2): 61-63.