



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404356

引用格式:邱艳华,赵祥东,何焱,等.基于关联分析的集输撬装设备运行故障诊断[J].科学技术与工程,2025,25(13):5408-5414.

Qiu Yanhua, Zhao Xiangdong, He Yan, et al. Fault diagnosis of gathering and transportation skid-mounted equipment based on association analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(13): 5408-5414.

## 基于关联分析的集输撬装设备运行故障诊断

邱艳华<sup>1</sup>, 赵祥东<sup>2</sup>, 何焱<sup>3</sup>, 温庆<sup>1</sup>, 刘勇<sup>4</sup>, 林宇<sup>1</sup>, 吴宇<sup>1</sup>, 王嘉欣<sup>2</sup>, 王欣<sup>2\*</sup>

(1. 中国石油西南油气田公司集输工程技术研究所, 成都 610031; 2. 西南石油大学计算机与软件学院, 成都 610500;  
3. 四川长宁天然气开发有限责任公司, 成都 610051; 4. 重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆 401331)

**摘要** 中国在页岩气的勘探开发中通常采用便于拆迁、运输与再组装的撬装设备,而撬装设备长期处于高压高温的工作环境中,容易产生故障。为了杜绝生产事故,消除安全隐患,有必要对集输撬装设备进行定期监测和故障诊断。常用的设备故障诊断方法仅仅能够得到相对独立和离散的故障信息,无法把故障之间的关联关系挖掘出来。对此,提出了两阶段关联分析技术,对页岩气集输撬装设备的故障信息展开分析,发现故障间的关联关系及缺陷类型分布,进而指导设备维护与工艺优化。在真实数据上的实验表明,所提出的方法准确发现了撬装设备缺陷位置间的关联关系及缺陷类型分布,为集输撬装设备的预防性检测和优化设计提供了新的解决方案。

**关键词** 撬装设备; 故障分析; 关联分析; 缺陷分布; Apriori

中图分类号 TE934; 文献标志码 A

## Fault Diagnosis of Gathering and Transportation Skid-mounted Equipment Based on Association Analysis

QIU Yan-hua<sup>1</sup>, ZHAO Xiang-dong<sup>2</sup>, HE Yan<sup>3</sup>, WEN Qing<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>4</sup>, LIN Yu<sup>1</sup>,  
WU Yu<sup>1</sup>, WANG Jia-xin<sup>2</sup>, WANG Xin<sup>2\*</sup>

(1. Gathering Engineering Technology Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610031, China;  
2. School of Computer Science and Software Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;  
3. Sichuan Changning Natural Gas Development Limited Liability Company, Chengdu 610051, China;  
4. School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

**[Abstract]** In China's shale gas exploration and development, skid-mounted equipment is typically used due to its ease of disassembly, transportation, and reassembly. This equipment is often operated in high-pressure and high-temperature environments. As a result, faults are more likely to occur. To prevent production accidents and eliminate safety hazards, regular monitoring and fault diagnosis of skid-mounted gathering and transportation equipment are essential. Only relatively independent and discrete fault information is typically provided by conventional fault diagnosis methods. The relationships between faults are not uncovered. In response, a two-stage association analysis technique was proposed to analyze fault data from shale gas gathering and transportation skid-mounted equipment. The relationships between faults and defect type distributions were identified, providing valuable guidance for equipment maintenance and process optimization. It has been demonstrated through experiments on real data that the method proposed accurately identifies the relationships between defect locations and the distribution of defect types in skid-mounted equipment. A new solution is provided for the preventive detection and optimized design of gathering and transportation skid-mounted systems.

**[Keywords]** skid-mounted equipment; fault analysis; association analysis; defect distribution; Apriori

近年来,随着各国油气资源需求不断增长,页岩气作为一种新兴油气资源已成为全球范围内勘探开发的新亮点。据统计,全球非常规天然气储量

远超常规天然气,在非常规天然气中,页岩气可采储量占63%<sup>[1]</sup>;预计到2035年,非常规天然气产量将达到1.6万亿m<sup>3</sup>。页岩气在能源结构化转型的

收稿日期:2024-06-12 修订日期:2025-02-06

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金(52222402);油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放性研究课题(PLN 2022-33);南充市科技计划(23XNSYSX0111)

第一作者:邱艳华(1984—),女,汉族,四川成都人,高级工程师。研究方向:油气田地面集输。E-mail:qiuyan0320@163.com。

\*通信作者:王欣(1981—),男,汉族,江苏扬州人,博士,研究员。研究方向:人工智能、机器学习及智慧油气田。E-mail:xinwang@swpu.edu.cn。

浪潮中扮演着重要角色<sup>[2]</sup>。中国页岩气资源非常丰富,因此,大力开发储量丰富的页岩气是中国中长期调整能源结构、实现碳达峰碳中和<sup>[3]</sup>的现实选择。

当前中国对页岩气的勘探开发尚处于工业化开发的早期阶段,面临着许多技术、经济方面的困难<sup>[4]</sup>。页岩气开采初期井口压力高,含砂含水量高,需要能够满足集输要求的工艺设备。在页岩气开发过程中,通常采用便于拆迁、运输与再组装的撬装设备<sup>[5]</sup>。这类设备具有灵活调配、重复利用、低成本等优势。撬装设备实现了集输站场管道、设备、机泵、控制柜、电气仪表等功能组件的一体化,与站场内常规设备相比,撬装设备布置紧凑,若单一组件失效,可能诱发撬装平台上其他组件的连锁失效,会造成设备损坏的连锁事故<sup>[6]</sup>。同时,随着设备使用年限的增加,发生事故的几率也在增加。开采设备长期处于高温高压的状态下,存在易燃易爆的安全隐患。因此,监控设备的运行状态,对设备进行状态监测、故障诊断十分必要<sup>[7]</sup>。

近年来,研究人员提出了一系列基于机器学习的设备故障诊断技术,利用机器学习对故障诊断,能够有效提升生产信息化运维水平<sup>[8]</sup>。文献[9]提出了一种基于 KShape 数据增广与混合神经网络的故障诊断方法,该方法扩充了系统工况样本,可有效识别地层堵塞、油管漏失等故障。文献[10]提出了一种基于贝叶斯单源域领域泛化算法的天然气管道故障诊断方法,该方法提升了小样本场景下天然气管道故障诊断的准确性。文献[11]提出了一种考虑多通道传感器位置信息的 Bagging 集成卷积神经网络柱塞泵故障诊断方法,该方法解决了柱塞泵振动信号不平稳问题,进而提升了故障诊断精度。上述技术有效提升了设备故障诊断的准确率,提高了设备的运行效率。

然而,上述故障诊断方法仅能够得到相对独立和离散的故障信息,无法获悉故障间的关联关系;研究表明,故障诊断不仅需要发现设备缺陷位置的故障信息,还需要挖掘出故障间的关联关系<sup>[12-13]</sup>,进而辅助故障预判,优化设备工艺等。因此,对页岩气平台撬装设备进行关联分析具有重要的现实意义。关联分析是数据挖掘技术的一个重要研究方向<sup>[14]</sup>,旨在揭示数据集中各项集间的潜在关联关系,Apriori 算法是关联规则挖掘任务的经典算法之一<sup>[15-16]</sup>。

近期的研究工作中,国内外研究人员已将关联规则挖掘技术应用于多个领域的故障关联分析<sup>[17]</sup>。以国内学者陈秀秀等<sup>[18]</sup>为例,在航空工程领域利用

Apriori 算法分析大量航空设备故障数据,有效地发现了航空设备故障间的关联规则;张雁鹏等<sup>[19]</sup>设计了关联规则与相似度相结合的赋权 Apriori 算法用于新型列车运行控制系统故障定位;石大亮等<sup>[20]</sup>提出了一种基于关联规则的分类方法,用于船用柴油机故障诊断;周家玉等<sup>[21]</sup>提出了一种基于关联规则的变压器故障诊断方法,有效提高了故障诊断精度。与此同时,国际上的研究进展同样引人注目。例如, Xiao 等<sup>[22]</sup>采用改进的 Apriori 算法挖掘配电网中各影响因素的关联关系,建立配电网故障-环境模式识别库,为配电网运行风险预警奠定基础; Jumaili 等<sup>[23]</sup>聚焦于云计算环境下的智能故障诊断系统,依托 Apriori 算法搭建了连锁故障诊断模块。

虽然关联分析已经在故障诊断方面取得了应用,但针对集输撬装设备,如何采用关联分析发现设备间故障的关联关系,尚未得到有效解决。现通过关联分析挖掘出设备故障缺陷位置间的关联规则,然后根据挖掘出的关联规则进一步设计缺陷类型分布检验算法(AssoTPChk),用于开展缺陷类型分布分析,为撬装设备的故障判断提供新的解决方案。

## 1 基于关联分析的故障诊断

页岩气的开发周期长,投资高,对集输设备的要求高。页岩气平台井橇装装置完善了工艺和设备统筹优化的设计流程,形成了“标准化、模块化、橇装化和滚动开发”的技术标准,有利于提高页岩气开采效率和开发质量。然而撬装设备的结构紧凑,设备密度大,同时平台井站的生产撬装、增压撬装常随着滚动开发的进行而搬迁,增加了设备的损伤风险。不仅如此,长期在高温高压环境下工作也会造成设备故障,并引发安全问题。因此,定期对撬装设备进行检测尤为重要,常规的检测方法仅仅能得到相对独立且离散的故障信息,然而通过关联分析挖掘出设备故障缺陷位置间的关联规则,根据挖掘出的关联规则进一步进行缺陷位置所对应的缺陷类别的数据分析,能够辅助撬装设备的设计、制造,进而提升设备可靠性,降低设备的故障率。现面向页岩气集输撬装设备检修数据,对其进行关联分析,得到故障关联规则,为撬装设备的故障判断提供新的解决方案。

### 1.1 关联分析算法

Apriori 算法是关联规则挖掘任务最经典的算法之一<sup>[24]</sup>,其核心思想是通过对待选  $i$  项集进行集合连接操作,产生候选  $i+1$  项集;随后对候选  $i+1$

项集进行支持度的验证,产生频繁  $i+1$  项集( $i$  从 1 开始,通过迭代不断自增) Apriori 算法流程大致如下。

### 步骤 1 参数设置。

最小支持度阈值( $\text{min\_support}$ )和最小置信度阈值( $\text{min\_confidence}$ )。最小支持度阈值用于筛选支持度低于该阈值的候选项集;最小置信度阈值用于筛选置信度低于该阈值的关联规则。以下为支持度与置信度的定义。

$$\text{Support}(A) = \frac{\text{count}(A)}{\text{count}(\text{dataset})} \quad (1)$$

式(1)中:  $\text{count}(A)$  为项集  $A$  出现的次数;  $\text{count}(\text{dataset})$  为总数量。

$$\text{Confidence}(A \rightarrow B) = \frac{\text{Support}(A \cup B)}{\text{Support}(A)} \quad (2)$$

式(2)中:  $\text{Support}(A \cup B)$  为项集  $A \cup B$  的支持度;  $\text{Support}(A)$  为项集  $A$  的支持度。

### 步骤 2 产生频繁项集。

产生候选项集:从数据集中首先产生 1 项集(仅包含 1 个元素的项集),称为  $C_1$ ,并统计每个项集的频次。

剪枝与频繁项集生成:根据  $\text{min\_support}$ ,保留满足支持度要求的项集,得到频繁 1 项集  $L_1$ 。

迭代产生更大项集:根据  $L_1$  生成候选 2 项集  $C_2$ ,然后再生成频繁 2 项集  $L_2$ 。之后不断重复该过程,从  $L_{k-1}$  生成候选  $k$  项集  $C_k$ ,再通过剪枝得到频繁  $k$  项集  $L_k$ 。如果  $L_k$  为空,则停止迭代。

### 步骤 3 生成关联规则。

针对频繁项集  $L$ ,枚举其任一非空真子集  $L_s$ ,产生形如  $R: L_s \rightarrow L \setminus L_s$  的规则(其中,“ $\setminus$ ”运算表示集合相减)。其中  $L_s$  称为规则的先导,  $L \setminus L_s$  称为  $R$  的后继。若  $R$  的信任度不低于  $\text{min\_confidence}$  则保留,否则忽略。

## 1.2 关联分析流程

针对集输撬装设备展开了两个层级的故障关联分析。首先,通过关联分析,捕获同一设备不同位置缺陷间的关联关系;随后,进一步展开分析,捕获同一规则下,设备缺陷严重等级的分布状况。

### 1.2.1 缺陷位置关联分析

首先面向撬装设备的故障位置展开关联分析,捕捉同一设备中不同位置的故障间的关联关系。具体流程包括:扫描设备检修数据库中的每一项,形成故障候选项目集  $C_1$ ,随后从中筛选出满足阈值(即支持度不小于  $\text{min\_support}$ )的候选项目集作为频繁 1 项集。针对频繁 1 项集,进行笛卡尔积的运算,得到候选 2 项集,随后对候选 2 项集中的每一项通过阈值判定进行剪枝,得到频繁 2 项集。依

此类推,直至生成所有的频繁项集。

在频繁项集的基础上,利用前述规则生成方法得到同时满足最小置信度的关联规则集合。

根据得出的关联规则,展开分析,发现设备中哪些故障之间有较强的关联性,从而对设备的设计、检维修提供指导。

### 1.2.2 缺陷类型分布分析

不同位置的缺陷呈现出了不同严重程度的缺陷类型,如“内凹 56mm”等。为了深入探索满足“关联关系”的缺陷位置下的缺陷严重情况,进一步展开了缺陷类型分析。

首先对设备的缺陷状况进行了离散化处理,将缺陷划分为 5 个等级,SS:内凹 60~69 mm;S:内凹 50~59 mm;M:内凹 40~49 mm;W:内凹 30~39 mm;WW:内凹 20~29 mm。

在此基础上,设计了缺陷类型分布检验算法(AssoTPChk)展开缺陷类型分布分析。该算法及运行流程如表 1 和图 1 所示。

通过缺陷类型分布分析,可以进一步发现满足缺陷位置关联关系的设备,其对应缺陷位置下的缺陷严重等级的分布情况,如某规则  $R$  下的缺陷类型分布情况如表 2 所示。

以上分布信息可望对设备的维护起到更加有效的指导作用。在实验分析章节,将对缺陷类型分布分析做进一步的介绍。

表 1 AssoTPChk 运行流程

Table 1 Running flow of AssoTPChk

输入:数据集 $D$ ,规则 $R$
输出:规则 $R$ 下的缺陷类型分布
1. 运用规则 $R$ ,发现数据集 $D$ 中满足 $R: A \rightarrow B$ 的设备集合 $S$ ;
2. 遍历 $S$ 中的设备 $E_i$ ;
3. 如果 $E_i$ 的缺陷类型满足 $R_D: D_A \rightarrow D_B$ , 则更新 $R_D$ 的频次;
4. 输出 $R$ 下的缺陷类型 $R_D$ 及其频次。

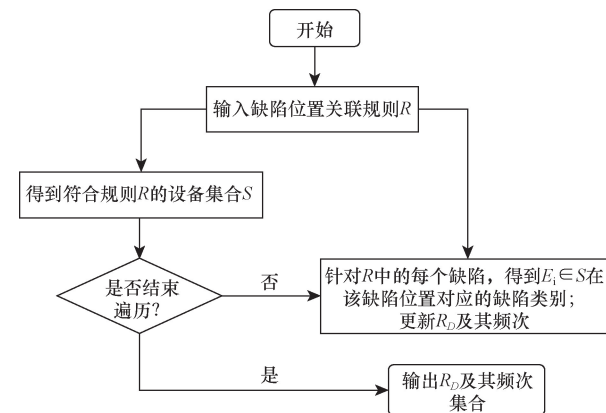


图 1 缺陷类别获取流程图

Fig. 1 Defect class acquisition flowchart

表 2 缺陷类型分布表

缺陷类型	分布占比情况/%
S→W	60
SS→SS	20
SS→M	20

## 2 实验分析

以 2018 年以来长宁页岩气平台原料气管线故障诊断数据为分析对象。实验代码由 Python 编写。

### 2.1 数据选取

以编号 19061 的撬装设备的射线检测故障为例。数据示例如表 3 所示。其中, 阴影标注的数据列作为故障信息列, 用于开展关联分析。以 1#25 到 -15 为例, 它表明 19061 撬装设备第一张 X 光片上 -25 至 +15 范围内存在内凹 22 mm 的缺陷。

### 2.2 故障信息预处理

开展关联分析前, 有必要对数据进行预处理, 使其满足关联分析算法的要求。针对页岩气集输撬装设备, 首先筛选出故障信息, 其中包含: 撬装设备名称、撬装设备编号、射线检测日期、焊口编号、缺陷类别、缺陷位置等。为了方便后续针对缺陷类别展开的二次分析, 进一步将缺陷类别进行离散化处理, 最终形成分析可用的数据集  $D$ 。

### 2.3 实验结果

首先开展缺陷位置关联分析。在最小支持度 ( $\min\_support$ ) 和最小置信度 ( $\min\_confidence$ ) 分别为 0.05 和 0.5 的情况下, 获得一批规则, 其中具有代表性的规则如表 4 所示。

分析表明, 撬装设备不同位置之间会出现故障共生的现象, 具体的关联结果如下 (仅列举具有代表性的前 10 个规则)。

(1) 当 1#20 位置发生故障时, 1#30 到 -30 位置有 75% 的概率会发生故障。

(2) 当 3#10 位置发生故障时, 3#0 位置有 60% 的概率会发生故障。

(3) 当 1#0 位置发生故障时, 1#30 到 -30 位置有 57% 的概率会发生故障。

(4) 当 1#30 到 -20 位置和 1#30 到 -30 位置同时发生故障时, 1#0 位置一定会发生故障。

(5) 当 1#-5 位置和 2#0 位置同时发生故障时, 1#-10 位置有 67% 的概率会发生故障。

(6) 当 1#0 位置和 1#30 到 -30 位置同时发生故障时, 1#20 到 -20 位置有 50% 的概率会同时发生故障。

(7) 当 1#30 到 -30 位置、1#40 到 -20 位置和

2#30 到 -30 位置同时发生故障时, 3#35 到 -35 位置一定会发生故障。

(8) 当 1#15 位置发生故障时, 1#-10 位置、1#-20 位置和 4#370 位置有 67% 的概率会同时发生故障。

(9) 当 1#0 位置和 1#30 到 -30 位置同时发生故障时, 1#20 位置和 1#30 到 -20 位置有 50% 的概率会同时发生故障。

(10) 当 1#30 到 -30 位置、1#30 到 -35 位置和 1#5 到 -25 位置同时发生故障时, 1#20 位置和 3#30 到 -20 位置一定会同时发生故障。

进一步分析可以发现, 以上缺陷位置关联规则所揭示的缺陷位置, 与图 2、图 3 所示的撬装设备失效集中位置高度吻合。

随后, 开展缺陷类型分布分析。根据 690 条缺陷位置关联规则, 选取 446 条置信度为 100% 的规则进行缺陷类别分布分析, 得到 40 条分布信息, 代表性结果如表 5 所示。

关联规则说明: 以规则  $[ '2\#30 \text{ 到} -30' ] = = > [ '1\#30 \text{ 到} -30' ]$  为例, 表示在全部设备中有 13% 的设备会在 2#30 到 -30 和 1#30 到 -30 两个位置同时发生故障, 在该关联规则下, 会出现内凹 50 ~ 59 mm 和内凹 60 ~ 69 mm, 内凹 30 ~ 39 mm 和内凹 50 ~ 59 mm, 以及



图 2 撬装设备失效集中位置

Fig. 2 Failure concentration of skid equipment



图 3 排污气管线易失效位置

Fig. 3 Failure location of blowdown gas line

内凹 60 ~ 69 mm 和内凹 30 ~ 39 mm 的缺陷严重程度分布,且各占 33%;以规则[ '1#30 到 -30', '1#5 到 -25' ] = = > [ '1#30 到 -35' ] 为例,表示在相应的缺陷位置,所有的缺陷严重程度为内凹 40 ~ 49 mm(W) 和内凹 60 ~ 69 mm(SS)。

## 2.4 缺陷成因分析

### 2.4.1 撬内原料气管线失效情况分析

分析显示,撬装设备失效位置集中在除砂器至分离器之间的工艺管线,尤其集中在角式节流阀后的两个弯头和一个三通前后。

表 3 编号为 19061 的撬装设备的部分检测数据

Table 3 Partial test data of skid mounted equipment No. 19061

撬装名称或撬装编号	规格/材质	射线检测检测日期 (年.月.日)	桩号 (填写 PG VG WW)	焊口编号	缺陷类别 尺寸	缺陷位置
19061	88.9 mm × 10 mm/L360N	2023.7.14	PG	19061-CS-PG-1F	内凹 22 mm	1#25 到 -15
19061	88.9 mm × 10 mm/L360N	2023.7.14	PG	19061-CS-PG-2F	内凹 13 mm	3#40 到 -15
19061	88.9 mm × 10 mm/L360N	2023.7.14	PG	19061-CS-PG-6WF	内凹 48 mm	1#30 到 -18
20099	88.9 mm × 10 mm/L360N	2023.9.1	PG	20099-CS-PG-41WF	内凹 45 mm	1#25 到 -20
20099	88.9 mm × 10 mm/L360N	2023.9.1	PG	20099-CS-PG-42W	内凹 40 mm	2#30 到 -10
⋮						

表 4 缺陷位置关联规则表(部分)

Table 4 Defect location association rule table (part)

关联规则	支持度	置信度
[ '1# - 10' ] = = > [ '1#10' ]	0.13	1.0
[ '2#30 到 -30' ] = = > [ '1#30 到 -30' ]	0.13	1.0
[ '2#20 到 -10' ] = = > [ '1# - 5' ]	0.09	1.0
[ '1#20' ] = = > [ '1#30 到 -30' ]	<b>0.13</b>	<b>0.75</b>
[ '1# - 5' ] = = > [ '2#0' ]	0.13	0.75
[ '1#15' ] = = > [ '4#370' ]	0.09	0.67
[ '3#10' ] = = > [ '3#0' ]	<b>0.13</b>	<b>0.6</b>
[ '1#0' ] = = > [ '1#30 到 -30' ]	<b>0.17</b>	<b>0.57</b>
[ '1#5' ] = = > [ '2#0' ]	0.09	0.5
[ '1# - 10', '1# - 20' ] = = > [ '1#10' ]	0.09	1.0
[ '1#30 到 -20', '1#30 到 -30' ] = = > [ '1#0' ]	<b>0.09</b>	<b>1.0</b>
[ '1#30 到 -30', '1#30 到 -35' ] = = > [ '1#20' ]	0.09	1.0
[ '1#20 到 -20', '3#30 到 -30' ] = = > [ '3#25 到 -30' ]	0.09	1.0
[ '1#40 到 -20' ] = = > [ '2#30 到 -30', '3#35 到 -35' ]	0.09	1.0
[ '1# - 5', '2#0' ] = = > [ '1# - 10' ]	0.09	0.67
[ '1#30 到 -30', '2#30 到 -30' ] = = > [ '1#20 到 -10' ]	0.09	0.67
[ '1#0', '1#30 到 -30' ] = = > [ '1#20 到 -20' ]	<b>0.09</b>	<b>0.5</b>
[ '1# - 10', '1# - 20', '1#10' ] = = > [ '1#15' ]	0.09	1.0
[ '1#10', '2#20 到 -10' ] = = > [ '1# - 10', '1# - 5' ]	0.09	1.0
[ '1#30 到 -30', '1#5 到 -25', '3#30 到 -20' ] = = > [ '1#20' ]	<b>0.09</b>	<b>1.0</b>
[ '1#30 到 -30', '1#40 到 -20', '2#30 到 -30' ] = = > [ '3#35 到 -35' ]	<b>0.09</b>	<b>1.0</b>
[ '1#15' ] = = > [ '1# - 10', '1# - 20', '4#370' ]	0.09	0.67
[ '1#30 到 -30', '2#30 到 -30' ] = = > [ '1#40 到 -20', '3#35 到 -35' ]	0.09	0.67
[ '1#0', '1#30 到 -30' ] = = > [ '1#20', '1#30 到 -20' ]	0.09	0.5
[ '4#370' ] = = > [ '1# - 10', '1# - 20', '1#10', '1#15' ]	0.09	1.0
[ '1# - 5', '2#20 到 -10' ] = = > [ '1# - 10', '1#10', '2#0' ]	0.09	1.0
[ '1# - 5', '1#10', '2#0', '2#20 到 -10' ] = = > [ '1# - 10' ]	0.09	1.0
[ '1# - 10', '1#10', '4#370' ] = = > [ '1# - 20', '1#15' ]	0.09	1.0
[ '1# - 10', '1# - 5', '1#10', '2#20 到 -10' ] = = > [ '2#0' ]	<b>0.09</b>	<b>1.0</b>
[ '1#30 到 -30', '1#30 到 -35', '1#5 到 -25' ] = = > [ '1#20', '3#30 到 -20' ]	0.09	1.0
[ '1#10', '2#0' ] = = > [ '1# - 10', '1# - 5', '2#20 到 -10' ]	0.09	0.67
[ '1# - 5' ] = = > [ '1# - 10', '1#10', '2#0', '2#20 到 -10' ]	0.09	0.5
[ '1#20' ] = = > [ '1#30 到 -30', '1#30 到 -35', '1#5 到 -25', '3#30 到 -20' ]	0.09	0.5

注:黑体行表示具有代表性的前 10 个规则。

表5 缺陷类别尺寸分布信息  
Table 5 Defect category size distribution information

关联规则	规则说明			
	类型序号	2#30 到 -30	1#30 到 -30	分布情况/%
[ '2#30 到 -30' ] == > [ '1#30 到 -30' ], 支持度 = 0.13, 置信度 = 1.0	1	S	SS	33
	2	W	S	33
	3	SS	W	33
[ '1#25 到 -30' ] == > [ '1#35 到 -25' ], 支持度 = 0.09, 置信度 = 1.0	1	WW	S	50
	2	S	SS	50
	类型序号	2#30 到 -25	1#30 到 -20	分布情况/%
[ '2#30 到 -25' ] == > [ '1#30 到 -20' ], 支持度 = 0.09, 置信度 = 1.0	1	S	M	50
	2	S	S	50
[ '1#20 到 -20', '3#30 到 -30' ] == > [ '3#25 到 -30' ], 支持度 = 0.09, 置信度 = 1.0	类型序号	1#20 到 -20, 3#30 到 -30	3#25 到 -30	分布情况/%
	1	M	S	100
[ '1#40 到 -20', '2#30 到 -30' ] == > [ '1#30 到 -30' ], 支持度 = 0.09, 置信度 = 1.0	类型序号	1#40 到 -20, 2#30 到 -30	1#30 到 -30	分布情况/%
	1	S	SS	50
	2	SS	W	50
[ '1#30 到 -30', '3#35 到 -35' ] == > [ '2#30 到 -30' ], 支持度 = 0.09, 置信度 = 1.0	类型序号	1#30 到 -30, 3#35 到 -35	2#30 到 -30	分布情况/%
	1	S	S	50
	2	W	SS	50
[ '1#30 到 -30', '1#5 到 -25' ] == > [ '1#30 到 -35' ], 支持度 = 0.09, 置信度 = 1.0	类型序号	1#30 到 -30, 1#5 到 -25	1#30 到 -35	分布情况/%
	1	W	SS	100

失效特征: 表现为存在腐蚀坑的分散性腐蚀, 弯头本体有减薄迹象, 存在分布的腐蚀坑, 弯头焊缝腐蚀严重, 存在整体减薄和较多的腐蚀坑。

失效原因: ①弯头、三通内壁腐蚀特征和集输管线腐蚀类似, 腐蚀坑内无腐蚀产物, 为长宁区块细菌腐蚀的明显特征, 现场失效大部分均为细菌腐蚀的特征; ②焊缝处腐蚀速度明显快于管材本体; ③在弯头处存在砂粒聚集现象, 含砂流体可能在一定程度上加快了腐蚀速度。

进一步分析显示, 设备的失效位置还集中在分离器排污法兰至排污调节阀后端, 重点集中在排污切断阀、流量计、调节阀前后大小头焊缝处, 占排污系统失效次数的 78% ~ 93%。

#### 2.4.2 撬内排污管线失效情况分析

失效特征: 表现为集中在排污管线大小头焊缝及法兰焊缝处的点蚀, 腐蚀速度较快且集中, 管线本体腐蚀轻微。

失效原因: ①焊缝处的局部腐蚀(点蚀、坑蚀)是导致焊缝失效的主要原因; ②焊缝处的局部腐蚀呈现较明显细菌腐蚀特征, 并且焊缝处的腐蚀速率明显快于管道、管件本体腐蚀速率; ③含砂返排液冲刷可导致失效速度加快。

### 3 结论

(1) 针对页岩气集输撬装设备的运行故障, 提出利用关联分析技术对设备故障位置的关联关系进行深入挖掘分析。

(2) 设计缺陷类型分布检验算法(AssoTPChk), 用于开展缺陷类型分布分析。

(3) 在真实数据上开展的实验验证了本文方法的有效性, 即: 利用关联分析对撬装设备的故障展开分析, 可以有效地揭示设备故障间的关联关系以及严重程度, 从而为预防性检测和优化设计提供依据。

#### 参 考 文 献

- [1] 杨丽丽. 新质生产力理念下中国油气高质量发展战略思考[J]. 中国矿业, 2024, 33(5): 32-38.  
Yang Lili. Strategic thinking on high-quality development of oil and gas in China under the concept of new quality productivity [J]. China Mining Industry, 2024, 33(5): 32-38.
- [2] 何希鹏, 蔡潇, 高玉巧, 等. 页岩气勘探开发实验技术研究进展与发展方向[J]. 天然气工业, 2024, 44(7): 12-26.  
He Xipeng, Cai Xiao, Gao Yuqiao, et al. Research progress and development direction of experimental technologies for shale gas exploration and development [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(7): 12-26.
- [3] 李敏, 刘雅利, 冯动军, 等. 中国海相页岩气资源潜力及未来勘探方向[J]. 石油实验地质, 2023, 45(6): 1097-1108.

- Li Min, Liu Yali, Feng Dongjun, et al. Resource potential and future exploration direction of facies shale gas in China Sea [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(6): 1097-1108.
- [4] 王公昌,姜瑞忠,徐建春. 当前页岩气资源开发的瓶颈及建议[J]. *复杂油气藏*, 2012, 5(2): 10-14.  
Wang Gongchang, Jiang Ruizhong, Xu Jianchun. Bottlenecks and suggestions for current shale gas resource development [J]. *Complex Oil and Gas Reservoirs*, 2012, 5(2): 10-14.
- [5] 刘旭,孙庆月. 页岩气试气工艺撬装设备研究与应用[J]. *石化技术*, 2023, 30(11): 155-157.  
Liu Xu, Sun Qinyue. Research and application of skid installation equipment for shale gas test process [J]. *Petrochemical Technology*, 2023, 30(11): 155-157.
- [6] 吴瑕,孙浩,宋长景. 页岩气集输站场撬装设备失效后果面积计算方法[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(10): 120-128.  
Wu Xia, Sun Hao, Song Changjing. Calculation method of failure consequence area of skid equipment in shale gas gathering station [J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(10): 120-128.
- [7] 唐振鑫. 油田机械设备状态监测与故障诊断技术研究[J]. *中国设备工程*, 2023(15): 194-196.  
Tang Zhenxin. Research on condition monitoring and fault diagnosis technology of oilfield machinery and equipment [J]. *China Equipment Engineering*, 2023(15): 194-196.
- [8] 宋俊述,王国防,王磊,等. 基于大数据的油田设备智能诊断技术研究[J]. *科技风*, 2023(21): 67-69.  
Song Junshu, Wang Guofang, Wang Lei, et al. Research on intelligent diagnosis technology of oilfield equipment based on big data [J]. *Science and Technology Wind*, 2023(21): 67-69.
- [9] 于继飞,姬煜晨,常振宁,等. 基于KShape数据增广与混合神经网络的注水系统故障诊断[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(24): 10235-10243.  
Yu Jifei, Ji Yuchen, Chang Zhening, et al. Fault diagnosis of water injection system based on KShape data augmentation and hybrid neural network [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 24(24): 10235-10243.
- [10] 董宏丽,商柔,汪涵博,等. 基于贝叶斯单源域领域泛化算法的天然气管道故障智能诊断[J]. *天然气工业*, 2024, 44(9): 27-37.  
Dong Hongli, Shang Rou, Wang Hanbo, et al. Intelligent fault diagnosis of natural gas pipeline based on Bayesian single source domain generalization algorithm [J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 44(9): 27-37.
- [11] 滕建强,罗凤,张菁,等. 考虑传感器位置的Bagging集成卷积神经网络柱塞泵故障诊断模型[J]. *机械设计与研究*, 2024, 40(4): 220-225.  
Teng Jianqiang, Luo Feng, Zhang Jing, et al. Bagging integrated convolutional neural network fault diagnosis model of plunger pump considering sensor position [J]. *Mechanical Design and Research*, 2024, 40(4): 220-225.
- [12] Chen L, Wang L, He Q, et al. Fault diagnosis method of intelligent substation based on improved association rule mining algorithms [C]//*Proceedings of Purple Mountain Forum 2019-International Forum on Smart Grid Protection and Control: Volume II*. Singapore: Springer, 2020: 403-413.
- [13] 胡杰,卿海华,魏敏,等. 基于多维关联规则的车辆故障障碍耦合方法研究[J]. *汽车工程*, 2024, 46(1): 161-169.  
Hu Jie, Qing Haihua, Wei Min, et al. Vehicle fault codes of multidimensional association rules based on the decoupling method re-
- search [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2024, 46(1): 161-169.
- [14] Steinbach M S. *Extending association analysis* [M]. Minneapolis: University of Minnesota, 2005.
- [15] Wang H, Gao Y. Research on parallelization of Apriori algorithm in association rule mining [J]. *Procedia Computer Science*, 2021, 183: 641-647.
- [16] 殷丽凤,李明状. 基于Apriori算法的关联规则分析应用[J]. *电子设计工程*, 2023, 31(15): 11-14, 19.  
Yin Lifeng, Li Mingzhuang. Based on Apriori algorithm of association rules analysis application [J]. *Journal of Electronic Design Engineering*, 2023, 31(15): 11-14, 19.
- [17] Inokuchi A, Washio T, Motoda H. An Apriori-based algorithm for mining frequent substructures from graph data [C]//*Principles of Data Mining and Knowledge Discovery: 4th European Conference*. Lyon: Springer, 2000: 7847517.
- [18] 陈秀秀,刘凯,马双涛,等. 基于Apriori算法的航空设备故障关联分析[J]. *山东师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 34(1): 48-53.  
Chen Xiuxiu, Liu Kai, Ma Shuangtao, et al. Fault association analysis of aviation equipment based on Apriori algorithm [J]. *Journal of Shandong Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 34(1): 48-53.
- [19] 张雁鹏,左兴. 基于赋权Apriori算法的新型列车运行控制系统故障定位方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(10): 4226-4239.  
Zhang Yanpeng, Zuo Xing. Novel fault location method of train operation control system based on weighted Apriori algorithm [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(10): 4226-4239.
- [20] 石大亮,张毅然,湛日景,等. 基于关联规则分类的船用柴油机故障诊断[J]. *内燃机学报*, 2023, 41(4): 369-375.  
Shi Daliang, Zhang Yiran, Zhan Rijing, et al. Fault diagnosis of marine diesel engines based on association rule classification [J]. *Transactions of CSICE*, 2023, 41(4): 369-375.
- [21] 周家玉,侯慧娟,盛戈峰,等. 状态参量关联规则挖掘及深度学习融合的变压器故障诊断算法[J]. *高压电器*, 2023, 59(3): 108-115.  
Zhou Jiayu, Hou Huijuan, Sheng Gehao, et al. Transformer fault diagnosis algorithm based on association rules mining of state parameters and deep learning [J]. *High Voltage Electrical Apparatus*, 2019, 59(3): 108-115.
- [22] Xiao M, Sun Y, Li K. Research on fault-environment association rules of distribution network based on improved Apriori algorithm [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 569(3): 032079.
- [23] Jumaili A A H A, Muniyandi C R, Hasan K M, et al. Intelligent transmission line fault diagnosis using the Apriori associated rule algorithm under cloud computing environment [J]. *Journal of Autonomous Intelligence*, 2023, 6(1): 640-648.
- [24] 浦慧忠. 基于Apriori算法的关联规则挖掘在人工智能+个性化学习系统中的实践与研究[J]. *信息记录材料*, 2022, 23(6): 185-188.  
Pu Huizhong. Practice and research of association rule mining based on Apriori algorithm in artificial intelligence + personalized learning system [J]. *Information Recording Materials*, 2022, 23(6): 185-188.