了解海底防喷器系统的主要故障场景：一种基于潜在语义分析的方法

Gustavo Jorge Martins de Aguiar、Ramon Baptista Narcizo、Rodolfo Cardoso、Iara Tammela、Edwin Benito MitaccMeza、Danilo Colombo、Luiz Antônio de Oliveira Chaves、Jamile Eleutério Delesposte

弗鲁米嫩塞联邦大学，累西腓街，里约 *das Ostras*，*28895-532*，里约热内卢，巴西

arXiv:2301.00844v1 [cs.IR] 2 Jan 2023

摘要

防喷器（BOP）系统是钻井阶段最重要的井控安全屏障之一，因为它能够防止井喷事件的发生。本文采用基于潜在语义分析的方法，研究防喷器系统的主要故障。研究从国际钻井承包商协会的RAPID-S53数据库中收集了全球各公司的 1312 条故障记录。该数据库记录了因防喷器系统故障和部件功能偏差而导致钻井作业中止的情况。研究采用所提出的方法，识别了环形防喷器、剪切闸板防喷器、补偿腔电磁阀和液压调节器的主要故障场景。这些场景包含有关纠正性维护程序的宝贵信息，例如常见的故障模式、所用检测方法、疑似原因和纠正措施。研究结果表明，所考察部件的主要故障是由弹性体密封件损坏引起的泄漏。大多数故障是在钻机上的防喷器系统进行功能和压力测试时检测到的。本研究通过应用基于成熟文本挖掘技术的方法，并分析国际数据库中的故障记录，提供了一种替代性的安全分析方法，有助于理解防喷器系统关键部件的故障。

关键词：防喷器、海上钻井、故障分析、潜在语义分析、维护程序、作业安全

1. 引言

当地下储层中的压力超过钻井液液柱施加的压力时，天然气、石油或其他井筒流体会失控地经由井筒流入大气或海中，具体取决于作业是在水下还是地面进行 [1]。这一事件称为井喷。虽然井喷并不常见，但它是石油和天然气行业最令人畏惧、破坏性最强的事故之一，对……构成重大威胁。设备、人员生命和环境 [2]。深水油气井勘探与开发中的井喷不仅会造成严重的环境灾害和财产损失，还会导致人员伤亡 [3]。这是造成海上钻井作业风险的主要事件之一 [4, 5]。仅井喷风险就占北海固定式平台人员伤亡、环境影响和经济价值损失总风险的 40% 至 50% [6]。

防喷器（BOP）系统是钻井阶段最重要的井控安全屏障之一，因为它能够通过关闭并密封井口，阻止井喷事件的发生 [7]。鉴于井喷事件带来的风险，防喷器对于监测和维护井完整性，以及保障机组人员和环境的安全至关重要 [8]。墨西哥湾、北海、西非近海和巴西近海正在加大对深水区域的油气勘探与生产，这些区域的水深超过 300 米 [9]。深水钻井作业使用海底防喷器，防喷器系统与钻井平台之间的距离约为三公里 [10]。由于深水钻井海床环境中的低温和高压等极端因素，钻井作业面临的作业和技术挑战日益复杂 [11]。

深水地平线半潜式钻井平台上的马孔多井发生井喷事故后，世界认识到防喷器系统的重要性 2010 [7, 8, 20]。这次井喷造成11人死亡，490万桶原油泄漏，并引发严重污染和生态损害 [8, 21]。除了估计达420亿美元的损失外，这一事件还引发了人们对防喷器系统的担忧，并促使石油和天然气行业制定新的维护和作业标准，以提高防喷器可靠性 [20, 22, 23]。事故发生后，防喷器风险分析在石油勘探和生产项目中变得更加重要；由于事件造成的后果，公众对海上钻井风险的认知也有所提高 [24, 25]。然而，风险管理实践未能跟上钻井作业日益增加的复杂性（这源于行业向深水区域扩张），导致灾难愈发严重 [3]。

防喷器是一组可从钻井平台远程控制的阀门，在发生井喷时，作为井控的主要屏障 [7, 12]。在钻井阶段，主要的控制方式是静水压力，由钻井液的重量予以平衡；防喷器系统则被视为能够防止井喷的最后手段之一 [13]。防喷器旨在紧急控制事件以及测试和培训场景中封闭井口，以确保系统具备执行所需功能的能力 [14]。行业公认的法规和标准要求已被制定为指南，用于确定测试策略，以检测潜在故障并减少防喷器系统不可用的情况 [15–18]。尽管部件对于执行所需功能至关重要，但主要还是通过测试对其进行监测；为确保作业期间的安全屏障有效，必须进行多项功能测试和压力测试 [19]。

复杂系统中的设备和部件故障，长期以来一直是工程领域出于各种目的所关注的问题 [26, 27]。设备或系统偏离运行状态，不仅会造成经济损失，还可能导致人员生命损失和环境损害 [27]。在此背景下，海上钻井同样需要高度重视安全。海上钻井平台发生井喷和爆炸，会带来重大的经济、环境和人员生命风险 [24, 28, 29]。由于风险极高，防喷器发生故障会影响整个生产系统的可用性 [30]。当有迹象表明防喷器系统的某个部件可能发生故障时，如何做出决策，是该行业面临的重大挑战之一 [31]。

在许多情况下，检测到防喷器发生故障后，必须将设备停机维修；根据船上 [20]可用性的情况，设备可能需要一周或更长时间才能恢复运行。此外，由于故障而撤出防喷器组和海洋钻井隔水管系统

是海上钻井中停机时间（非生产时间）成本最高的事件之一。通过提高防喷器系统的可靠性 [32]，可以避免每年因停机时间造成的数百万美元损失。该事件造成的成本甚至高于因计划维护而停产的成本 [33]。在 [34]，，研究人员调查了2007年至2009年墨西哥湾海底防喷器系统的故障，并收集了156起导致13,448小时（560天）停机时间的故障记录。鉴于任何需要撤出防喷器的问题或故障每天都会造成约120万美元的损失 [23]，，这156起故障总共造成了6.724亿美元的损失。

开展防喷器系统故障研究对于帮助石油和天然气公司识别哪些系统和部件容易发生故障至关重要，从而为损失预防决策提供有关故障情景的知识 [35]。对防喷器系统故障的研究需要对防喷器系统进行系统分析，并了解发生井喷时的主要关键故障及其后果 [36]。

石油和天然气行业中越来越多的公司正努力收集数据并创建有关其作业的数据库，以提取知识并支持未来的管理决策 [37]。故障记录至关重要，因为它们被用作数据分析流程的输入，以提高行业安全性、绩效和知识水平 [38]。虽然数据库中的维护记录可能包含维护技术人员撰写的干预措施文本描述，但由于难以自动分析文本，维护优化通常仅限于维护干预的时间信息 [39]。由于维护数据具有非结构化特征，并且包含带有特定术语的专业语言，自然语言处理工作面临重大挑战 [40]。

很少有研究分析维护文本记录，以更好地了解设备维护干预措施并改进未来决策。在 [41]，中，提出了一种基于半监督条件随机场（CRF）的信息提取方法，用于从桥梁检查报告中提取信息实体，以识别现有缺陷并采取维护措施。在 [42]，中，采用文本挖掘方法提取最常见的产品故障案例及其故障原因，并通过回归分析探究消费者维修经历与未来购买行为之间的关联。在 [39]，中，提出了一种利用文本信息识别设备退化状态的方法：通过聚类维护记录，并利用卷积神经网络（CNN）建立随机多状态退化模型。在 [43]，中，开发了一种文本挖掘方法，用于了解智能变电站二次设备的缺陷，该方法结合了全局词向量表示（GloVe）和基于注意力机制的双向长短期记忆网络（BiLSTM-Attention）。在 [44]，中，采用文本挖掘方法，从计算机化维护管理系统数据库中关于部件故障的工单等相关数据中提取建筑系统及其部件的故障模式信息。在 [45]，中，采用混合自然语言处理（hybrid-NLP）算法提取代表电气设备的实体。在 [46]，中，采用一种基于不平衡文本挖掘和自然语言处理技术的可持续故障诊断模型，从现场故障数据中提取故障特征词。在 [47]，中，开发了一种通过关键词提取方法从非结构化数据中提取根本原因文本，以识别根本原因因素的方法。在 [48]，中，提出了一种深度学习方法，用于处理电网故障报告；该方法将面向文本数据挖掘的循环神经网络（RNN）与长短期记忆网络（LSTM）相结合。在 [49]，中，一种

文本挖掘方法用于提取报告中的补充信息，并采用一种集成的时空方法，即地理与时间加权有序逻辑回归（GTWOLR），对天然气管道事故报告进行建模。在 [50],中，提出了一种基于一系列步骤的新方法，用于预处理和分解服务历史记录，从而识别能够区分健康风力涡轮机与故障风力涡轮机的相关词语和句子。

本研究旨在识别并分析 BOP 系统以下部件最常见的故障场景：环形防喷器、剪切闸板、调节器和补偿腔电磁阀。此外，还旨在确定如何检测这些故障，以及采取了哪些维护措施。为此，本文采用潜在语义分析（LSA），基于一个名为 RAPID-S53 的国际数据库中的防喷器纠正性维护文本记录，生成代表主题的概念。该数据库源自由国际钻井承包商协会（IADC）管理的防喷器可靠性联合工业项目。本文采用 LSA，是因为它能够根据上下文相似的文档提取多个概念主题，从而将文档和术语归入不同的主题组 [51, 52]。结合记录的上下文，这些概念可以被解释为融入领域专家知识的故障场景。了解这些场景对于采取行动、提高行业安全性至关重要，既能降低事故风险，也能提高设备可用性。

潜在语义分析已被证明是分析评论、产品反馈、维护干预报告及其他有助于决策的文本记录的有效工具 [53]。研究通过结合群组 RFM分析与概率潜在语义分析模型，按 [54] 对客户进行细分和分析，结果表明，所开发的方法能够提供洞察，并涵盖广泛的客户偏好。在 [55], ，研究使用潜在语义分析、Text2Vec和Doc2Vec技术分析来自帕金森病进展标志物倡议（PPMI）的数据。在 [56], ，研究使用潜在语义分析和潜在狄利克雷分配，识别美国联邦铁路管理局维护的铁路设备事故描述数据库中的主要事故主题。在 [51], ，研究使用潜在语义分析，从面向未来的数据源中提取语境相似的术语群组，其中包括专家和公众对无人机技术的关注。在 [57], ，研究使用潜在语义分析，从多准则决策领域的大量论文摘要中提取关键主题，并成功识别出文本中包含的主要类别和重要主题。

这项研究的主要贡献在于，所收集的信息可用于制定维护计划、开展可靠性研究，并支持识别钻井系统停机决策所涉及的关键工况。此外，文本挖掘结果为未来的预测分析工作流程提供了丰富的补充数据来源，而利用非结构化数据资源则有助于构建更准确的预测模型 [38]。

本文结构如下。第2节讨论理论背景，以及有关石油和天然气行业事故、防喷器系统部件及其功能的相关文献。第3节介绍研究方法，包括数据收集和潜在语义分析的应用。第4节和第5节呈现研究发现并展开讨论。第6节总结研究发现并阐述其影响。最后，第7节讨论研究的局限性，并提出进一步研究的建议。

2. 理论背景

2.1. 海上钻井中的井喷

近几十年来，经济增长推动了对石油和天然气资源的需求，这些资源仍是主要能源 [24]。钻井是石油和天然气行业的重要组成部分，其成功取决于能否显著提高作业流程的运行可靠性和可用性 [58]。深水钻井的生命周期阶段包括井位规划、钻井和完井；钻井阶段涵盖许多作业，例如钻进、下套管、固井、循环、流体置换和清理 [59]。鉴于深水钻井涉及复杂作业，必须在短时间内完成，且一旦出错便可能造成数千万美元的损失，因此平衡风险、工期和预算是一项艰巨任务 [59, 60]。

由于钻井所需的资金投入巨大，且钻井作业具有危险性，因此安全是首要任务，相关活动也受到法规和法律的严格监管 [61]。钻井阶段发生事故通常会导致生产中断，并损害相关公司的形象，因此，采取措施降低事故发生的频率和严重程度至关重要 [62]。此外，随着行业向水深更深的储层和地质构造更复杂的区域推进，钻井作业也变得更加复杂，风险随之增加 [3]。井控作业旨在通过明确地层流体开始流入井筒时应遵循的程序，维持井完整性 [2, 63]。井喷是地层流体不受控制地流至地面的现象，也是导致海上钻井相关风险的主要事件之一 [5]。

当井涌（地层流体流入井筒）未能及早发现，或井内的安全屏障（如防喷器）失效而无法密封 [2]时，就会发生井喷。当钻井液等流体柱施加的压力被地层压力超过时，就会发生井喷 [16]。井喷是海上钻井中代价高昂且令人担忧的作业风险，会导致延误、火灾、爆炸、人员伤亡、资产损坏以及环境损害 [6]。

由于深水井喷会造成严重后果，学者们对此进行了广泛研究 [25]。2010年4月20日发生的井喷，也称为深水地平线事故，引发了人们对深水钻井安全性的质疑 [8]。天然气在钻机甲板上爆炸并引发火灾，造成11名工人死亡；井喷还导致石油从受损的井中持续流出两个月 [8]。这场环境灾难影响了墨西哥湾地区的当地经济、脆弱的海岸线和野生动物，至今仍然如此 [64–66]。1984年8月16日，巴西的Enchova Central石油钻机发生井喷。平台上的大多数工人都获救，但救生艇下放系统失效，导致42人死亡，其中6人在从30至40米的高处跳入水中时丧生 [67]。1988年4月24日发生了第二次井喷，当时防喷器无法密封井口，阻止这一事件的尝试也未能奏效。钻杆被强行从井中顶出并撞上平台的一条支腿，产生的火花点燃了井喷泄漏的天然气，随后平台被摧毁 [62]。2009年8月21日，Montara H1油气井的操作员失去了对井的控制，导致井喷。此次事故没有造成严重伤害或人员死亡，但未受控制的烃类物质向大气中泄漏了75天 [61]。1982年10月21日，在墨西哥湾的Eugene Island区块361，井控失效，发生了严重井喷和火灾。一个或多个压力略高于正常水平的浅层含气砂层促使天然气流动；天然气从钻杆外侧流出，沿环形防喷器向上涌，最终造成大规模天然气井喷 [68]。

根据 [62] 对自1956年以来收集的数据进行的分析，井喷历来是全球各地区最常见的事故类型。在北美洲，记录了38起涉及井喷的事故，占该地区所有事故类型的38%。欧洲和北海作业也呈现出相同的模式，共记录了9起井喷（28%）。井喷也是南美洲、亚洲和非洲最常见的事故类型，分别占29起（82.8%）、12起（46.2%）和8起（57.2%）。这些数据凸显了在钻井作业中，井喷事故相较于其他类型事故的主导地位。

2.2. 防喷器系统

防喷器是一种用于密封、控制和监测油气井的电液系统 [7,16]。它能够承受高压，并通过环形防喷器和剪切闸板防喷器密封井筒，从而防止井喷 [63]。海底防喷器系统的两个主要子系统是防喷器组和控制系统 [15]。根据 [18]，防喷器组由一个或两个环形防喷器、三至六个闸板防喷器、两个连接器（一个用于连接防喷器与井口连接器，另一个用于连接下部海洋隔水管总成与防喷器），以及四至十个节流阀和压井阀组成。钻井公司会使用多个环形防喷器和闸板防喷器作为系统冗余，以提高防喷器组的可靠性 [7]。图 1 展示了典型的海底防喷器系统配置。

深水钻井作业中能够防止井喷的最关键屏障之一，是环形防喷器 [70]。环形防喷器是一种防喷器，它利用形状特殊的弹性密封部件，在管与井筒或裸眼之间形成密封 [16]。钻井期间，即使钻杆旋转，环形防喷器也能有效地在其周围保持密封；但在裸眼密封方面，它不如闸板防喷器有效

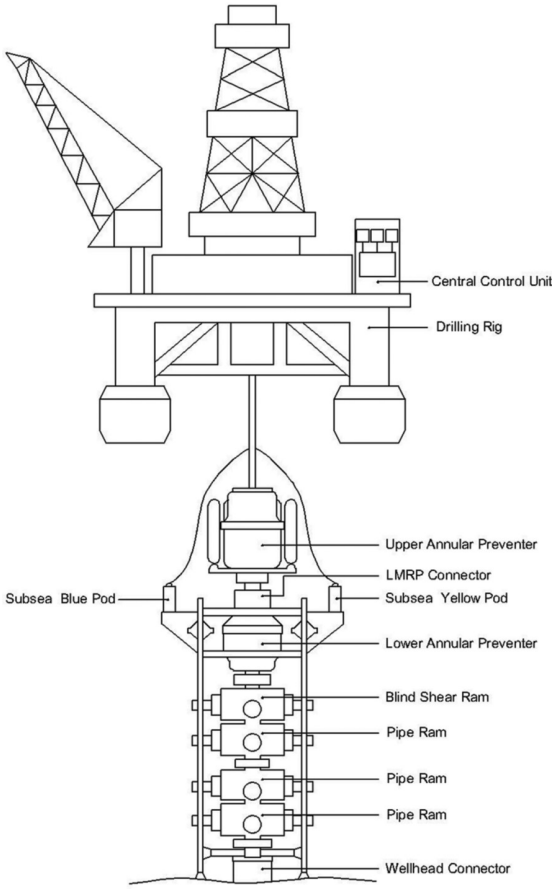


图1：典型的海底防喷器组配置 [69]。

，而且必须能够关闭井筒以符合相关法规 [7]。

壁厚持续增加，因为钻探超深井对钻柱提出了很高的要求，钻柱必须承受高拉伸载荷，这在某些情况下已超出部分剪切闸板成功剪断钻杆的能力 [71]。管子闸板、盲剪切闸板（BSR）和套管剪切闸板（CSR）是闸板防喷器的三种主要类型。管子闸板围绕钻杆关闭，限制钻杆与井筒之间的流动 [7]。盲剪切闸板的设计用途是在闸板关闭井口时剪断钻柱；而套管剪切闸板则应能够剪断套管，并有效密封

井孔，以阻止石油和天然气流动，从而应对潜在井喷等紧急情况 [15]。在防喷器的各种装置中，盲剪闸板是最后一道防线；一些深水防喷器采用两块盲剪闸板，以提高剪断钻杆并密封井筒的成功率 [72, 73]。

水下防喷器控制系统有两种类型：液压式和多路复用（MUX）式。随着勘探深度增加，人们发现液压控制系统中使用的脐带缆存在响应时间问题，因此以独立电缆取代了控制先导阀的液压管线，改用独立电缆来驱动补偿腔电磁阀（CCSV） [18, 35]。大多数用于深水钻井的海底防喷器与浅水钻井使用的防喷器类似，但其防喷器由多路复用控制系统控制，从而缩短了防喷器功能的启动时间 [73]。

防喷器MUX控制系统由两个子系统组成：电气系统和液压系统。液压系统包括泵、阀门、蓄能器、液体储存和混配设备以及歧管等部件 [7, 15]。钻井平台的地面控制部件包括中央控制单元（CCU）中的三台计算机、司钻控制台和钻井队长控制台，以及三个可编程逻辑控制器（PLC） [74, 75]。CCU是海底防喷器控制系统的核心，它利用PLC将来自地面控制台和控制面板的指令发送至水下配电点（POD） [74]。六个光纤中继器通过两条完全独立的水下脐带缆（由光纤和电线组成）在CCU与蓝色和黄色水下电子模块（SEM）之间完成通信，并传输信号和电力 [75]。蓝色和黄色SEM旨在解码地面信号，而它们的完全独立性使整个系统具备完全冗余能力，可用于控制所有水下功能并与CCU通信 [76]。解码后的信号会激活水下POD中的电磁阀，该阀向相应的功能液压阀发送液压先导信号，这种阀也称为底板安装阀（SPM） [76]。

配电点（POD）对于水下控制系统的性能至关重要。每个POD都包含补偿腔电磁阀、压力传感器、底板安装阀、压力调节器、流量计和液压蓄能器 [74, 77]。各POD完全相同，可安装在蓝色或黄色位置 [16]。SEM发出的解码信号可驱动POD，但只有其中一个接收液压液以执行防喷器功能，因此另一个POD无法发挥作用 [78]。随后，CCSV向相应的SPM发送液压信号，SPM随之启动，并向防喷器系统的相应功能输送加压液压液 [76]。

液压调节器通过刚性液压管线降低进入POD前供给流体的压力，是防喷器控制系统的另一个重要部件 [16, 18]。调节器阀芯根据阀门下游和上游的压力，控制供给口、输出口和排气口的节流孔大小；但防喷器控制系统中有两种压力调节阀 [79]。第一种是手动调节阀，称为手动科米调节器（MKR），在防喷器系统投入运行前，可在地面使用调节螺母设定所需的出口压力 [80]。另一种是可远程调节的调节器，称为液压Koomey调节器（HKR），可通过防喷器系统的控制面板从地面进行远程调节 [79]。

每个 POD 都包含一个蓄能器，用于在 MUX 系统中储存液压液，以便

在需要液压流量或泵的电源丢失时使用 [18, 80]。防喷器组中的蓄能器应提供足够容量和压力的可用液压液，以驱动指定的井控设备，并提供足够的剩余压力以维持密封能力 [16, 81]。为了更好地了解蓄能器的工作方式，请考虑关闭防喷器闸板的操作。如前所述，信号将从中央控制单元（CCU）传输到 SEM 进行解码，然后传输到 POD。随后，特定的补偿腔电磁阀将打开以执行该功能，触发 SPM 阀改变位置，使储存在蓄能器中的高压流体通过，从而关闭闸板 [78]。

防喷器部件主要通过测试进行监控，其中对防喷器执行的两项最关键测试是压力测试和功能测试 [19]。功能测试是对防喷器系统部件进行的一项作业，旨在验证其预期功能（即能否完成预定任务），且必须至少每周执行一次 [16]。对防喷器进行功能测试时，仅测试其执行功能的能力；由于无法确保其密封井筒的能力，这不足以保证钻井作业的安全性 [5]。对防喷器进行压力测试包括评估其执行功能和封隔压力的能力；压力测试也必须定期执行，测试间隔不得超过21天，并且由两项测试组成：低压测试和高压测试 [16]。

3. 方法论

该方法分为三个主要阶段：初始程序、LSA程序和LSA后续程序。每个主要阶段都由若干环节和更小的步骤组成。第一阶段，即初始程序，包括收集故障记录和准备数据。第二阶段，即LSA程序，包括预处理（为分析准备故障描述）以及对预处理后的记录进行LSA处理。第三阶段是LSA后续程序，首先利用概念-术语矩阵和文档-概念矩阵创建故障场景，随后由领域专家对MFS矩阵进行最终验证。该方法应用于国际钻井承包商协会（IADC）管理的RAPID-S53国际数据库中的防喷器纠正性维护文本记录。图2展示了本研究方法论的概述。

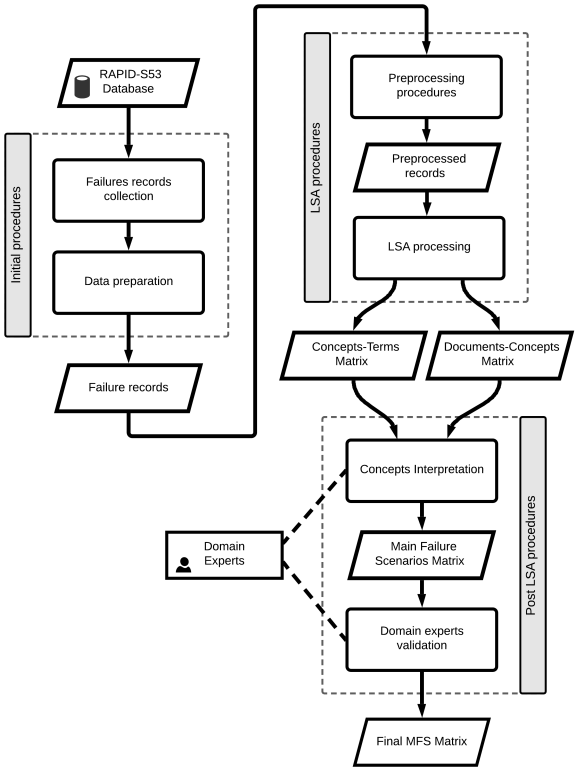


图2：所提方法论概览。

3.1. 数据收集

本研究使用的 RAPID-S53数据库源自防喷器可靠性联合工业项目。来自世界各地的石油和天然气勘探公司、钻井承包商以及原始设备制造商（OEM）均参与了该项目。该数据库

收录了与防喷器系统相关的设备功能异常和钻井作业中断的全球记录，并由国际钻井承包商协会（IADC）维护。该数据库的主要目标是提供大量数据，供各家公司用于提高井控设备的可靠性和效率。

RAPID-S53数据库中有关于事件登记的指南。对于每起被认为井控设备部件发生故障的事件，都必须生成一份报告。如果无需对部件立即采取直接的物理纠正措施，使其按设计运行，则无需报告该事件。但是，维护和测试期间发生的事件仍应报告，但仅报告缺陷（故障），而不报告任何与预防性维护相关的事件，例如部件的预防性更换 [82]。

数据从RAPID-S53收集到工作表中。记录涵盖了2012年1月至2018年11月期间来自26家不同公司的故障事件，共6380条登记记录。尽管这些登记记录了与故障事件相关的信息，例如故障时的使用量、维修时长和非生产时间，本研究仍聚焦于事件描述，以识别并理解防喷器系统的主要故障场景。故障文本平均长达448个术语，通常由两到三段组成，说明观察到的故障、受影响的部件和零件、检测方法以及纠正措施。

3.2. 数据准备

鉴于防喷器系统结构复杂，由多个子系统以及众多部件和零件组成，因此有必要使用寄存器子集，以提高潜在语义分析方法生成的概念描述防喷器系统中某些被认为更为关键的部件的主要故障场景的能力。

在 [5], 中，收集了墨西哥湾外大陆架上水下防喷器从1997年7月至1998年5月这十个月的数据。记录的117起故障造成了3638小时的停机时间（非生产时间）。闸板防喷器造成的停机时间占41%，总计损失1505小时；主要控制系统占28%（1021小时）；环形防喷器故障造成的停机时间占9%（337小时）。在 [34], 中，介绍了一项观察墨西哥湾水下防喷器故障的可靠性研究。该研究的数据包括2007年至2009年登记的156起故障，以及13448小时的非生产时间。由BOP控制系统引起的故障事件，例如调节器失效、电磁阀失效和控制液泄漏，是计划外非生产时间的主要原因，占35%，总计损失4712小时。环形防喷器和闸板防喷器分别是 [34], 中停机事件影响程度第二和第四大的来源，占比为17%（2345小时）和13%（1766小时）。

根据所提供的数据，选取防喷器系统的关键部件进行分析。根据故障记录中识别出的部件对数据进行分类。对以下部件的故障文本描述进行了潜在语义分析：环形防喷器、剪切闸板防喷器、补偿腔电磁阀和液压调节器。需要注意的是，数据库未区分盲剪切闸板和套管剪切闸板。不过，预期对故障事件描述字段应用潜在语义分析，能够区分这两种部件的故障场景。同样，在 RAPID-S53 数据库中，部件标记为调节器时，用于记录液压 Koomey 调节器（HKR）和手动 Koomey

调节器（MKR）的故障。

RAPID-S53 根据部件被划分为更小的数据集，并将与所选部件相关的数据收集到特定工作表中。随后，对术语（一元语法、二元语法和三元语法）进行分词；对于每个部件工作表，最低频率设为记录总数的 2.5%，以形成初始词袋（BoW）。对这些词袋进行分析，并利用其辅助创建术语词典，其中包含在 RAPID-S53 等技术文本数据库中常见的二元语法和三元语法。这样一来，环形元件、浸泡试验、密封板、排气口和泄漏孔等过去分开出现的术语，将以连接组成术语的两个或三个词的下划线形式出现在概念中，从而便于解释概念。该列表还用于创建同义词词典。图 3 展示了本研究的潜在语义分析与数据准备之间的关系。

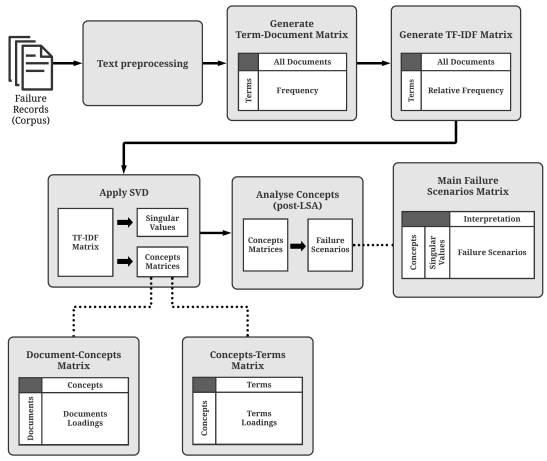


图3：研究初始程序概述。

本研究使用了 Python——一种日益应用于学术研究的编程语言 [83], was used in this study。数据科学领域中另一种日益流行的工具是 Jupyter Notebook。本研究使用了 NumPy、Matplotlib、Seaborn、Scikit-learn、Pandas、Pandas-Profiling、NLTK 和 SciPy 库 [84–90]。

具体工作表共对应1312条故障记录和6565小时的停机时间。考虑到前文所述的停机时间成本，工作表中记录的故障造成了超过3亿美元的经济损失。环形防喷器部件故障共247条记录，导致2778小时的非生产时间；剪切闸板故障共310条记录，导致1706小时的停机时间。作为BOP控制系统部件的调节器和CCSV发生故障的记录分别为421条（1121小时非生产时间）和334条（960小时非生产时间）。

3.3. 潜在语义分析

近几十年来，人们开发了许多模型，以理解文本文档中词语的用法。由于词语可用于各种语境，这是一项重大挑战 [91]。文本是一种复杂度很高的非结构化信息形式，并由许多词语或术语（如二元语法和三元语法）组成，这些词语或术语在全文中组合起来表达不同观点。因此，去除与文本所表达观点无关的词语，以减少术语数量，对于开展分析至关重要 [92–94]。处理数千个维度可能会对文本挖掘结果产生负面影响；减少维度数量则可在不损失数据重要特征的前提下提高准确性和效率 [95]。潜在语义分析（LSA）最初作为一种信息检索技术提出 [96, 97] ，后来被定义为知识获取、归纳和表征理论 [98], ，是一种能够从语境相似的文本记录中提取主题和观点的模型 [51]。

潜在语义分析是一种广为人知的数学方法，用于提取并呈现文本数据中的

语义结构 [51, 96]。该数学模型基于这样一种观点：含义相似的词语更有可能出现在相似的语境中 [56]。它通过利用训练文档中发现的词语关联来获取语义知识 [96]。因此，系统对某个词语的解读取决于训练语料库如何使用语言，以及词语在训练语料库中的关联方式 [91]。该模型通过分析训练语料库中词语共同出现的统计模式，为词语生成语义表示 [56]。根据语料库文档构建的语义空间包含语义向量，也称为概念或主题。每个向量都与文档集合中的每个词语对应一个特定数值，该数值可解释为该词语对形成特定概念的贡献 [97]。因此，潜在语义分析可以考察文档之间的关系与相似性，以及这些文档中包含的术语（由一个或多个词语构成），并识别文本中呈现的观点（主题） [98]。

根据 [51] 和 [57]的说法，潜在语义分析包含三个主要步骤。第一步是创建词频（TF）矩阵，其中每一行代表一个词或术语，每一列代表一篇文档或一种上下文，而每个单元格中的值则表示某个术语在一篇文档中出现的频率 [99]。一些研究认为，可将预处理流程作为第一步，以获得更好的结果 [57]。随后，对术语的频率进行转换，形成词项-文档矩阵，转换后的值称为词频-逆文档频率（TF-IDF），用于反映一个词对于集合中某篇文档的重要程度 [53]。最后，采用奇异值分解（SVD）降低矩阵的维度；这是一种特征向量分解和因子分析技术 [96]。这种划分为三个主要步骤的方式与.....的划分相当相似，后者将其划分为四个主要步骤，其中前三个与上述步骤相同，最后一个则与通过向量相似度进行信息检索有关。

预处理步骤通常包括筛选出分析人员感兴趣的文档，并剔除不相关的词语和术语 [100]。多项研究强调了文本挖掘研究中预处理流程的重要性，有助于改进信息检索和主题建模所用的技术 [92–94]。移除停用词和词干提取是预处理文本数据时最常用的技术 [94]。其他重要的预处理技术还包括删除不必要的标点符号、将字母转换为小写以及词形还原 [92]。

分词是本研究文本预处理阶段的第一项工作，它将这些文本转换为由其中包含的所有单词和术语组成的向量 [93]。通过初步实验性分词，可以确定预处理阶段需要考虑的关键术语，并建立术语及其同义词词典。在本研究中，分词至关重要，因为防喷器系统故障的RAPID-S53数据库记录中经常出现许多技术术语和表达，例如组件名称和维护程序。本研究依次删除了不必要的标点符号、将字母转换为小写，并从记录中删除停用词。随后，使用WordNet词性标注和 WordNet 词形还原器对文本进行词形还原 [101, 102]。一些研究表明，尽管词形还原的计算成本较高，但它比词干提取更精确，且能产生更好的结果 [103, 104]。本研究选择词形还原而非词干提取的另一个原因是，词干提取更容易产生错误或不存在的术语；而描述防喷器

系统的故障。

预处理流程之后，接下来是构建词项-文档矩阵，并计算为每条失效记录建立的词典中各术语的频率。随后对频率值进行转换，以构建 TF-IDF矩阵；该矩阵会按词语出现的频率降低其影响，因为这些词语对理解记录中的各种主题贡献不大 [105]。根据 [99], ，计算 TF-IDF矩阵各项的方法有多种，本研究中的计算方式为

$$w_{ij} = tf_{ij} \cdot idf_i \tag{1}$$

其中，

$$idf_i = log\left(\frac{1+N}{1+n_i}\right) + 1 \tag{2}$$

N 是语料库中的记录总数， n_i 是包含索引为 i 的术语的记录数。 idf_i 表示索引为 i 的术语在文档 j中出现的稀有程度，所得值越高，该术语越罕见。随后对每个文档得到的 TF-IDF 向量应用欧几里得范数。最终的 TF-IDF向量记为v_j ，并按如下方式计算。

$$v_j = \frac{w_j}{\sqrt{{w_{1j}}^2 + {w_{2j}}^2 + \cdots + {w_{nj}}^2}} \tag{3}$$

奇异值分解技术能够将大量数据的维度降至更易处理的数量，同时不会丢失原始变量中的大量信息，这正是 LSA 使用该技术的原因 [105]。SVD 满足处理 TF-IDF矩阵的要求，该矩阵包含大量数据 [96]。

从数学角度来看，奇异值分解将术语与文档矩阵或 TF-IDF矩阵$A_{t\times d}$，分解为另外三个矩阵的乘积： $G_{t\times m}$，一个正交矩阵，其中 m 表示数据的维度； $S_{m\times m}$，一个对角矩阵，其奇异值按降序排列；以及 $D_{d\times m}$，列正交矩阵 [96–98] 的转置。也就是说，

$$A_{t\times d} = G_{t\times m} \cdot S_{m\times m} \cdot (D_{d\times m})^T \tag{4}$$

其中， t 表示术语的数量， d表示语料库中文档的数量。矩阵会截断为任意数量的概念，以 k 表示，从而去除原始矩阵中的噪声，并提取文档的语义关系 [106]。就最小二乘误差而言，SVD 的结果是对原始矩阵的最佳 k 维近似 [99]。

在由奇异值分解创建的同一潜在语义空间中，每个术语和文档都表示为一个 k 维向量 [99]。每个 n 潜在语义概念（位于区间 $I = [1, 2, \ldots, k]$ 内）都关联着一组术语和文档的数值，称为载荷。因此，SVD 会生成两个概念载荷矩阵，一个对应词语，另一个对应文档。这些术语载荷和文档载荷可用于解释或标记每个概念 [51]。图 4 展示了 LSA 的各个阶段及其输出。

科学领域中，最优概念数量仍是一个开放问题。分析生成的概念的奇异值图，是确定这一数量最常见的方法之一 [105]。其逻辑是，与某个概念相关联的奇异值越高，该概念就越能解释数据方差 [107]。在故障记录的语境下，奇异值较高的概念几乎可以肯定地界定部件的主要故障场景（这些场景在记录中出现得更频繁）。将图中的肘部，或收益开始加速递减的位置可视化，是确定所考虑概念的一种可能标准 [105, 108]。多项研究结合奇异值技术，考察了对概念贡献最大的术语（通过术语载荷），以揭示文本中隐藏的主题

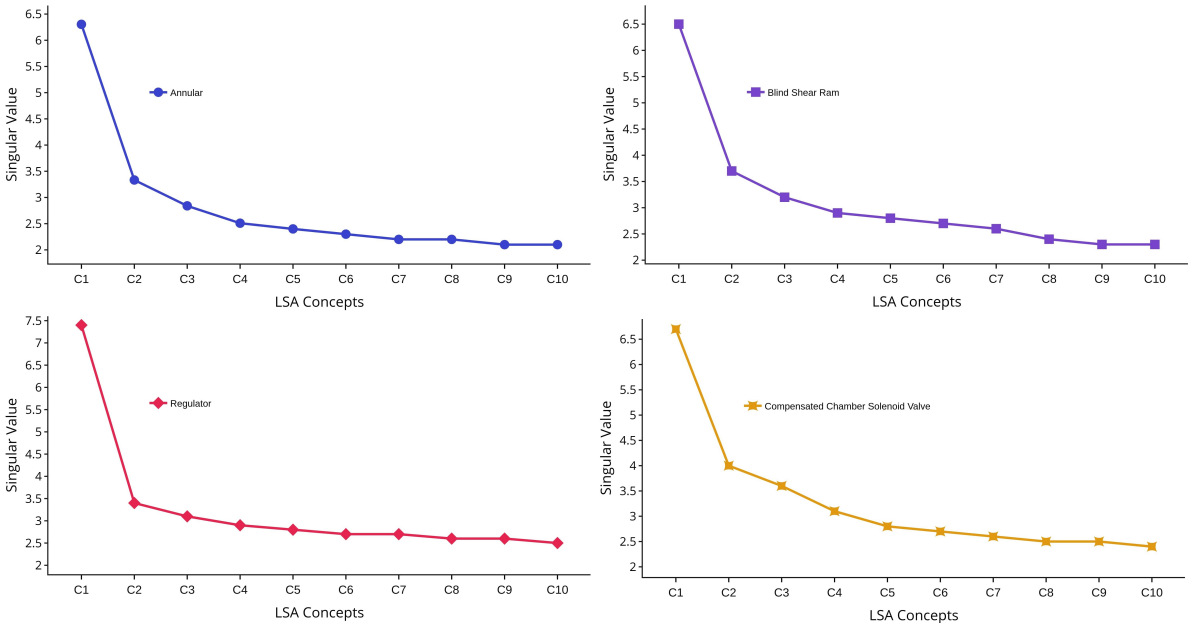


图4：潜在语义分析及其后续程序和输出概览。

记录或文档 [109, 110]。鉴于不可能分析 SVD 生成的所有概念，使用奇异值作为截断规则来确定应分析的概念数量，是一种值得考虑的解决方案。

构建场景需要利用概念-术语（CT）矩阵中的词项载荷和文档-概念（DC）矩阵中的文档载荷来解释概念 [52]。研究人员分析了高负载术语和文档，以识别由纠正性维护作业相关信息构成的故障场景。确定适当的术语和文档载荷阈值至关重要，并会影响解释过程，但目前尚无确定该阈值的既定方法 [51]。根据 [111]，，研究人员必须根据连贯性，通过经验确定每个场景的适当载荷阈值。每个概念的术语或文档都可以有不同的阈值，但必须采用较高的载荷值，以确保场景足够具体 [51]。

由于本研究所用语料库由故障记录文本构成，因此生成的概念所对应的高负载术语具有很强的专业性。这些术语大多是部件名称、检测方法、观察到的故障以及纠正措施。因此，负责解释概念并构建故障场景的领域专家对这些术语进行了简单分类，这有助于将故障场景构建阶段作为解释过程的初始步骤。图5展示了一个理论概念的高负载术语分类示例。对术语进行分类并非解释概念所必需，但确实有助于解释。

4. 结果

为提取主要故障场景，最大概念数 k 经过经验设定为10，这是因为对于每个防喷器部件而言，该概念数高于作者预期的主要故障场景数量。随后采用奇异值

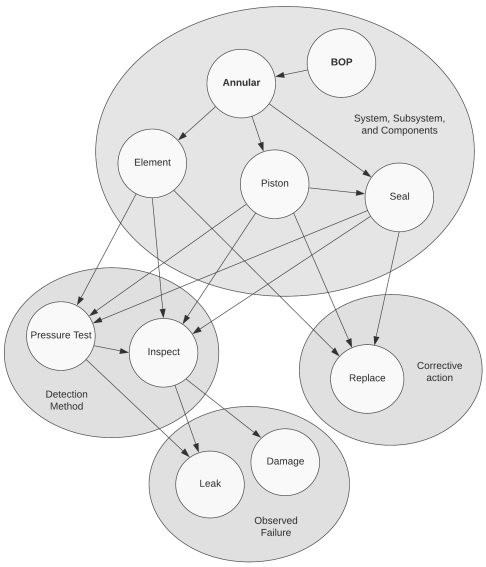


图5：理论概念术语分类示例。

肘部图，并结合高负载术语和文档的上下文分析，以确定由领域专家分析的概念数量。图6展示了每个防喷器部件对应前十个奇异值较高概念的奇异值图。

分析后，选取了八个与防喷器组组件相关的概念，其中四个是环形防喷器概念，四个是剪切闸板防喷器概念。与防喷器组组件类似，还选取了八个与BOP控制系统组件相关的概念，其中包括五个调节器概念和三个补偿腔电磁阀概念。分析这些概念时，评估认为每个概念最多使用二十五个术语，便足以理解其故障场景。所有概念均已命名（名称由部件名称缩写与该概念生成顺序编号组合而成，例如，AC1表示环形防喷器的第一个概念），其最高载荷词项列于表1和表2中。

这四位熟悉防喷器系统功能、失效——及维护作业的专家，根据CT矩阵中对每个概念贡献最大的术语的载荷，以及DC矩阵中载荷较高且高度相关的故障记录，分别对这些概念进行了阐释。随后对结果进行了比较，发现对于构建的大多数故障场景，阐释都相似。少数分歧通过讨论得到解决。以下故障场景代表了对这些概念的最终阐释。

场景AC1：本场景讨论环形防喷器的泄漏故障。除泄漏故障外，与本场景高度相关的记录还显示，检查期间观察到环形活塞上有划痕。有些记录将其描述为轻微划痕，另一些记录则更具体地指出，划痕深度未超过原始设备制造商（OEM）规定的可接受范围。受影响最严重的部件是头部密封件、腔室密封件、活塞密封件和环形密封元件（封隔器元件）。根据记录，泄漏是由密封件切口、挤压和磨损造成的。由于密封件由弹性材料（橡胶）制成，密封件损坏和磨损可能形成泄漏通道，导致流体泄漏。上下环形防喷器的故障发生概率似乎没有差异。通过地面压力测试检测到故障（此处“地面”指测试是在钻机上安装防喷器组的情况下进行）。根据与本场景高度相关的记录，发现泄漏后，工作人员在地面拆卸了环形防喷器，以调查并确定事故原因。纠正措施是在维护期间安装新的部件。观察到的故障可能影响防喷器系统在紧急情况下封闭井的能力。

场景 AC2：该场景涉及环形防喷器的密封球形环形元件因钻杆及其接头通过而发生的凸出失效。环形元件凸入井筒区域。

图6：奇异值图

表1：防喷器组部件相关概念及其最高载荷词项

概念	奇异值	对各个概念贡献最大的词项
环形防喷器故障概念		
AC1	6.304	密封件；环形防喷器；测试；压力；泄漏；压力_测试；元素；维护-保养；防喷器；活塞；new；描述；失效；上部_环形防喷器；检查；下部_环形防喷器；根本_原因；打开；更换；安装；观察；关闭；损坏。
AC2	3.333	元素；失效；测试；环形防喷器_元素；根_原因；压力_测试；主维护；描述；防喷器；橡胶；上部_环形防喷器_元素；工具；钻头_管道；尝试；循环；接头；拉出；通过；突出；保持；关闭；封隔器。
AC3	2.840	活塞；元素；刻痕；维护；new；描述；更换；适配器_环；检查；损坏；凹坑；环形防喷器_活塞；原因；根本_原因；更换；地面；发送；橡胶；拆卸；环形防喷器_元素；区域；孔；更换；密封件_区域；切屑。
AC4	2.509	密封件；下部_环形防喷器；滚动；井筒；上部；端盖；O形圈；mud；壳体；适配器；更换；安装；流体；拉出；橡胶；泄漏_孔；封隔器；元素；anti_挤出；移除；泄漏；Polypak 密封件_密封件；适配器_环。
剪切闸板的故障概念		
SRC1	6.485	密封件；压力；测试；阀盖；泄漏；盲板_剪切_闸板；门；防喷器；操作员；打开；维护；检查；压力_测试；失效；关闭；O形圈；闸板；新的；描述；损坏；拆除；铰链；更换。
SRC2	3.717	螺栓；刀片；检查；上部；裂纹；挡块；闸板_挡块；低；维护；non_破坏性的_测试；剪切_闸板；失效；压力_测试；盲_剪切_ram；橡胶；描述；侧向_密封件；扭矩；剪切；端部_of_井。
SRC3	3.186	压力；压力_测试；闸板；失效；低；橡胶；剪切_闸板；保持；测试；防喷器；盲_剪切_闸板；先前；尝试；井筒；完成；封隔器；高；表-面；变化；初始；腔体；良好；循环。
SRC4	2.927	门；铰链；后部；装配；活塞；前部；损坏；压力；年份；本体；压力_测试；关闭_腔室；拆除；注意；机组人员；位置锁定装置；凹坑；腔室-ber_测试；塞子；剪切_闸板；腔体；前部；锁定。

测试钻杆接头可能会楔住该元件，因为它由弹性体材料（橡胶）制成。由于无法使钻杆及其接头或测试工具通过环形元件，以及在作业（水下）期间进行的压力测试，发现了故障。通过无法在作业期间使钻杆接头通过环形防喷器来检测失效，比通过记录中的压力测试与此情景高度相关。此情景的纠正措施是在维护期间更换组件。

场景 AC3：此场景涉及环形防喷器活塞的损坏，例如点蚀和划伤（术语“擦伤”和“划痕”也被用作同义词）。点蚀故障属于一种腐蚀，会在部件上留下氧化痕迹。划伤通常出现在活塞的

上部，即活塞与适配器环密封件接触的位置。根据一些高度相关的记录，划伤的发生与活塞损坏有关，导致活塞与适配器环之间形成凸起边缘。其他记录表明，在腔室盖上发现了异物。大多数故障是在通过拆卸环形防喷器进行表面检查的例行维护作业期间观察到的。纠正措施是在维护期间更换部件。钻头旋转会在钻井作业期间产生可接受量的金属碎屑，同时铣削或切割套管后也会残留铁质碎屑。当钻井液从井中流出并返回地面时，岩屑、金属颗粒和铁质颗粒会通过防喷器组，可能进入环形防喷器和剪切闸板防喷器的腔体，从而损坏活塞等部件。与此场景相关的少数记录表明，故障原因是没有任何部件能够保护活塞免受划痕，而且从划痕处脱落的材料在活塞返回开启位置时被发现于顶部。

场景 AC4：此场景涉及由滚动密封件导致的环形防喷器泄漏故障。密封件从密封槽中滚出时，会形成泄漏通道。根据故障记录，这种故障更常发生在环形防喷器端盖密封件上。一些故障记录认为，端盖密封件反复出现此类故障，属于设计缺陷；另一些则称，故障是由维护错误造成的，例如安装了错误的密封件。在关联度很高的故障记录中，压力测试发生泄漏后，通过拆解并检查环形防喷器来确认密封件是否滚出，这种情况似乎很常见。泄漏经常通过泄漏孔发生；泄漏孔位于密封件下游，用于形成泄漏通道，以此判断密封件是否失去完整性。部件更换是此场景的纠正措施。

场景 SRC1：此场景涉及盲剪切闸板上的密封件（例如O形圈）受损所导致的泄漏故障。密封件损坏和磨损会造成泄漏通道，进而导致流体泄漏。通过功能测试和压力测试检测到这些故障，其中大多数测试在地面进行，并对盲剪切闸板进行了桩式测试。目视检测到泄漏后，常见的处理步骤是泄压并将盲剪切闸板门从本体上拆下，然后观察受损的密封件（例如被夹扁的密封件）和泄漏通道。一些高度相关的记录显示，备用O形圈和Polypak密封件更容易出现问题，但其他记录也显示，其他密封件同样可能发生故障。根据其中一份维护记录，缸盖周围的阀盖螺柱上附着了砂粒和污垢，内活塞上的碎屑更多。此场景的纠正措施是更换部件。另一种常见做法似乎是进行腔室测试，以确认盲剪切闸板能否执行其所需功能。与其他部件相比，盲剪切闸板门或门铰链更容易发生泄漏。

场景 SRC2：本场景涉及盲剪切闸板螺栓中的断裂或裂纹。通过无损检测和对该部件的检查发现了故障。根据高度相关的记录，这一故障是一个持续存在的问题，可能与设计或材料有关。纠正措施是更换出现裂纹的刀片螺栓。“井底”一词的出现表明，该故障场景通常在钻井作业程序结束时被检测到，例如在地面测试期间。

场景 SRC3：此场景涉及盲剪切闸板密封件失效，导致该部件无法维持所需的压力水平。在钻机上使用防喷器系统进行的高压测试检测到了

这些故障。检测到故障后，通常会先泄压，再拆卸盲剪切闸板以调查原因。记录显示，该故障仅在高压测试期间被检测到，而低压测试均成功通过。在此场景中，纠正措施是更换盲剪切闸板中的密封件。部分记录称，该故障由设计缺陷或制造错误导致，另一些记录则指出是密封件磨损所致。

场景 SRC4：本场景探讨盲剪切闸板的闸板门、阀盖和铰链发生的泄漏故障。一些高度相关的记录表明，这些故障是由螺栓和密封件等零件的问题造成的。记录指出，故障是由部件和零件磨损引起的，但值得注意的是，少数记录将维护错误指为故障的根本原因。大多数故障是在例行维护作业期间通过对盲剪切闸板进行腔室测试而发现的。在本场景中，纠正措施是在维护期间更换损坏的部件或零件。另一项常见作业似乎是进行腔室测试，以确定部件泄漏问题是否已解决。

场景 RC1：此场景涉及 HKR 和 MKR 调节器因密封件（如 O形圈）受损而发生的泄漏故障。大多数故障是在地面浸泡测试期间检测到的。目视发现泄漏来自排气管后，通常会先释放压力，再拆卸调节器；拆卸后发现了受损密封件和泄漏通道。此场景的纠正措施是在维护期间使用维修套件更换或修复受损部件。最后对调节器进行测试，如果未发现泄漏，则维护工作完成。根据高度相关的记录，故障是由调节器及其零件的磨损造成的。

场景 RC2：此场景描述了 HKR 调节器的一种故障：尽管已通过控制面板执行升压和降压命令，调节器仍无法达到和（或）维持所需压力。高度相关的故障记录显示，曾发生高于所需设定压力的压力波动。在地面功能测试期间以及防喷器水下作业期间均检测到了故障。根据记录，检测到压力振荡后，拆卸了调节器以调查故障的可能原因。此场景的纠正措施是在维护期间更换或维修（大修）调节器。怀疑部件（如 O形圈）的磨损是故障原因。

场景 RC3：本场景涉及 HKR 和 MKR 调节器的泄漏故障。故障是在地面功能测试和浸泡测试期间发现的，流体从排气管泄漏。本场景与场景 RC1 类似。这些泄漏是通过让流体流经泄漏孔而发现的。泄漏孔位于密封件下游，用于打开泄漏通道，从而判定弹簧壳体密封件是否失效。排气孔和排气管与弹簧壳体部件相连；此外，密封件（例如 O形圈）发生任何损坏，都可能导致流体进入弹簧壳体，并在流经弹簧壳体密封件的泄漏孔时被检测为泄漏。本场景的纠正措施是在维护期间更换损坏的部件，例如 O形圈和弹簧壳体密封件。

场景 RC4：此场景与场景 RC3 类似。两种场景的差异源于泄漏的特征。绝大多数情况都涉及滴漏。通过浸泡测试和地面功能测试检测故障。此场景的纠正措施是在维护期间更换部件。

场景 RC5：此场景描述

表2：与BOP控制系统部件相关的概念及其最高载荷词项

概念奇异值		对各概念贡献最大的术语
调节器故障概念		
RC1	7.379	调节器；泄漏；压力；排气口；备注；维护；防喷器；蓝色 _POD；安装；黄色 _POD；浸泡 _测试；测试；移除；流体；o _环；更换；描述；阀门；POD；新的；观察；重建；密封件；原始设备制造商。
RC2	3.358	压力；维护；描述；POD；增加；功能 _测试；规-定；减少；大修；地面；更换；水下；维护；黄色 _POD; 先导 _压力；失效；根本 _原因；设置；检查；备件；新的；供应 _调节器；回路；遥控潜水器。
RC3	3.092	soak_测试；泄漏；根本 _原因；更换 _new; blue_POD；原始设备制造商；维护-护；备注； 描述；装配； 歧管 _调节器；黄色 _POD; 供给 _调节器； 功能；弹簧 _壳体； 防喷器；手册 _调节器；vent_管；功能 _测试；机组人员；备件；检测；启动；泄漏 _孔；持续-trol_POD.
RC4	2.945	阀门；排气口；持续地； vent_管； 歧管 _调节器； 压力；soak_测试；时间；更换 _新的；功能；根 _原因；滴水；先导 _调节器；停止；注意；蓝色 _POD；循环；增加；范围。
RC5	2.755	备注；压力； 黄色 _POD；损坏； 歧管 _调节器； o_环；剪切 _密封件；vent_接口；seal_板； 机组人员；blue_POD；浸泡 _测试；re-放置 _新的；来；环形防喷器 _调节器；内部；防喷器；检查；水下；低；修订；密封件；部件；调节。
补偿腔电磁阀的故障概念		
SVC1	6.738	CCSV；泄漏；阀门；电磁阀；POD；功能；蓝色；维护；备注；soak_测试；拆除；防喷器；测试；黄色 _POD；更换；流体；安装；描述-内容；观察；打开；检查；排气口；新的；重建；o _环。
SVC2	3.999	阀门； 测试； 维护； 通过；建造； 建造 _不正确地； 事件；re-收 _oem_未使用；压力；直的；维持；接收 _oem; 专用于；end_of_井；测试 _工作台；原始设备制造商；应用；之前的；仓库；密封件；排气口；去-scription；根 _原因；排气口；流体；损坏。
SVC3	3.578	电磁阀；剪切 _密封件；密封件 _板；公共端；故障排除；泄漏；防喷器；重新放置 _原始设备制造商；多个；拆卸；台架 _测试；测试；电磁阀 _银行；反应激活；报告；Cameron；失效；目前；钻机；运行；调查；排水；磨损；接收；地面。

HKR 调节器泄漏是由剪切密封件、O形圈和密封板等部件损坏所致。这些故障是在地面浸泡测试期间检测到的，泄漏发生在排气口。检测到故障后，拆卸了调节器，以确定故障原因。根据一些高度相关的记录，发现剪切密封件存在损坏，例如O形圈被切割、挤出或啃蚀，剪切密封件受损，以及密封板上有划痕。此场景的纠正措施是在维护期间更换损坏的部件。

场景 SVC1：本场景探讨补偿腔室电磁阀因泄漏而失效的问题。使用地面浸泡测试和功能测试来检测故障，两项测试均在地面进行。根据高度相关的记录，泄漏经常发生在排气管中。目视发现排气管泄漏后，通常会拆下并拆卸 CCSV 进行调查。此场景的立即纠正措施是更换部件，可以是重建的阀门或新的阀门，然后进行测试，以确认故障是否已解决。此场景中得分较高的记录指出了多种故障原因。记录称，泄漏是由密封板磨损以及密封件（包括密封组件、O形圈和剪切密封件）损坏所致。部分密封板已有磨损和擦伤。

场景 SVC2：该场景与场景 SVC1 相似。根据高度相关的记录，施加压力时，阀门无法密封，导致流体直接通过并流向排气口。测试在地面进行，可能是在井的末端附近或事件发生前进行的。

场景 SVC3：此场景涉及 CCSV 泄漏。在地面进行功能测试时，发现流体从电磁阀组的公共排气口或公共排液口流出，因而确认存在泄漏。根据高度相关的记录，常见的故障排查流程是找出发生泄漏的具体补偿腔电磁阀，然后拆解检查。一些记录提到，密封板和剪切密封件上有划痕和磨损迹象，泄漏是由磨损造成的。在此场景中，纠正措施是在维护期间更换整个 CCSV，或仅更换密封件。

5. 讨论

本研究报告的故障场景表明，防喷器系统部件的关键故障模式可能由多种原因引起，并可通过多种方法检测。一些场景彼此相似，但在细节上有所不同，例如观察到的故障以及检测方法或检测条件。例如，一些环形泄漏故障是由不同的部件问题导致的，如头部密封件、腔室密封件或活塞密封件损坏；这些故障有时通过压力测试检测，有时则通过功能测试检测。尽管使用了奇异值肘部图，但领域专家对于解决分析相似故障场景及缺少关键参数（如故障模式）的概念这一问题至关重要；他们帮助确定了本研究分析中应考虑的概念截断数量。值得注意的是，一些未纳入分析的概念具有与所选分析概念相似的术语，且对应的故障记录负载值较高。它们可能代表故障场景的一种变体，涉及出现频率较低的维度，例如不同的检测方法。

潜在语义分析结果突显了防喷器系统 RAPID-S53 非计划纠正性维护记录中更常见的失效情景。正如作者所预期，在所研究的部件中，数据库显示有三种或更多更频繁报告的故障情景。此外，还

能够识别所有情景中受影响的系统、子系统、部件、所用检测方法、观察到的故障，以及为解决问题而采取的即时纠正措施。研究结果表明，除了部件之间相互作用这一事实外，故障和维护措施还因部件而异，甚至同一部件也会因观察到的故障类型不同而有所差异。这一结果特征很可能是由于防喷器系统及其部件的复杂性所致，该系统包含大量子部件和零件。

为了充分理解本研究的发现，有必要评估故障场景与其他针对所选防喷器系统部件的研究结果之间的相似之处和差异。环形防喷器故障场景报告的泄漏故障原因包括密封件受损或卷曲、环形防喷器活塞损坏，以及环形防喷器密封球形元件突出。在 [5], 中观察到，该研究收集的 12 起环形防喷器故障中，有 6 起为内部泄漏（泄漏穿过关闭的环形防喷器）故障，另外 6 起则是无法完全打开。在一项较新的研究中，收集的 24 起环形防喷器故障里，无法完全打开和内部泄漏是最常见的故障模式，共占 15 起故障 [112]。这些观察到的主要故障模式也出现在故障场景中。内部泄漏故障模式包含在泄漏故障中，而环形防喷器密封球形元件突出（属于场景 AC2）则相当于无法完全打开。在 [112] 中收集的一起内部泄漏故障与场景 AC3 的情况相似：打开上部环形防喷器后，观察到一些金属切屑卡在环形活塞和壳体之间；纠正措施是拆下活塞、转接环和填料元件，并全部更换为新的部件。在 [34], 中，许多内部泄漏故障是通过泄漏孔发生的，原因是密封件受损，这与场景 AC1 和 AC4 中的情况相同。研究还报告了一起在运行防喷器前测试期间发现的、未详细说明的环形防喷器故障，该故障通过更换活塞得到纠正。与场景 AC3 中的故障类似，这起故障可能是在检查拆卸后的环形防喷器时发现的。

检测方法因所观察到的故障而异，但总体而言，在环形防喷器的故障场景中，地面压力测试和水下压力测试最为常见，其次是检查和地面功能测试。若干与所报告概念相关的故障记录显示，使用液压测试并结合拆卸后的环形防喷器检查来确定泄漏故障的原因； [34] 也观察到了这一情况。可靠性研究中观察到的大多数完全开启故障，都是由于无法让钻杆或测试工具穿过环形球形元素，因此需要增加工具载荷（上提力）；而泄漏故障主要通过水下压力测试来识别 [34, 112]。此外，环形防喷器故障场景中最常见的维护纠正措施是更换部件，但在某些情况下，会更换整个环形防喷器。其他可靠性研究所收集故障的维护程序也观察到了这一点，这些研究涵盖了1999年至 2019 [5, 34, 112], ，说明在某些情况下，存放一台备用环形防喷器，比等待受影响部件维修所造成的非生产时间成本更低。

剪切闸板的故障包括盲剪切闸板和套管剪切闸板的故障，但每个概念的高负载术语和记录仅包括盲剪切闸板的故障。套管剪切闸板的故障报告频率几乎可以确定低于盲剪切闸板的故障，这一点可以在更有针对性的研究中进一步考察。当钻井系统内的压力变得无法控制时，防喷器系统中的盲剪切闸板

是最后一道关键防线；如果盲剪切闸板能够按需使用，就不会发生井喷 [15]。因此，盲剪切闸板是钻井作业和防喷器系统安全的关键部件。在盲剪切闸板场景中，存在多种故障模式，包括因受损密封件、闸板门和铰链等受损部件导致的泄漏，螺栓断裂和裂纹，以及因密封件受损而无法维持规定压力水平。此前的两项可靠性研究 [34, 112]收集并分析了少量盲剪切闸板故障；合并两项研究后，共收集到六起盲剪切闸板故障。其中五起故障由盲剪闸板泄漏造成，四起为内部泄漏（通过关闭的闸板发生），一起为外部泄漏。有一起内部泄漏的报告未说明受影响的部件或原因，因此根据实际未报告的原因和检测方法，该故障可能归入场景 SRC1、SRC3 或 SRC4。另一起内部泄漏由侧向T形密封失效引起，这会导致泄漏通道存在，与场景 SRC1 相符。阀盖密封件失效导致了另一起内部泄漏；外部泄漏则由阀盖门密封件失效引起，这两起故障均类似于场景 SRC4 中观察到的高度相关故障。第五起报告的泄漏故障是：盲剪切闸板处于解锁位置时，泄漏通过 BSR EVO锁紧电机发生。第六起故障发生在盲剪切闸板因液压软管未连接到歧管而无法关闭时，该故障发生于防喷器维护期间。此前报告的故障中，没有一起与 SRC2 相符；SRC2 涉及剪切闸板刀片螺栓的断裂或裂纹。

地面压力测试是盲剪切闸板防喷器故障情形中最常报告的盲剪切闸板故障检测方法，其次是检查和地面功能测试。常见的做法是在这些高度相关的故障情形中，先通过液压测试识别泄漏，再拆解盲剪切闸板进行检查，以确定故障原因。此前可靠性研究 [34, 112] 中确认的五起泄漏故障，有三起是在防喷器安装测试期间检测到的，其中一起通过压力测试发现，另一起是在执行功能测试期间发现。在三起泄漏故障中，防喷器被拉出进行维修，并更换了受影响的部件；一起未说明采取了何种纠正措施；还有一起报告称，13天后防喷器因其他原因在钻机上时，故障才得到纠正。这些情形表明，在防喷器位于钻机上时进行的测试中发现了更多故障，但未涉及是否需要将防喷器从水下拉至钻机上的问题。然而，可靠性研究报告的故障中，防喷器被拉出，且钻井公司损失了生产时间，这凸显了盲剪切闸板防喷器对钻井作业安全的重要性。

本研究中调节器的故障场景表明，受损密封件会导致泄漏；密封板、弹簧壳体等部件会发生故障；调节器也可能因无法达到和（或）维持所需压力而发生故障。研究结果（例如场景 RC1 和 RC2 指出密封件磨损是故障原因）支持了一些学者的观点 [113]：磨损的剪切密封件（即因划伤、侵蚀而磨损）是调节器部件发生流体泄漏的主要原因之一，因为供液阀芯或排气阀芯上的密封件一旦劣化，就无法隔离连接通道。这一事实进一步印证了故障场景所反映的流体泄漏与受损密封件之间的关联。调节器内部泄漏是影响防喷器系统安全的重要故障模式，因为这类不良状态会影响系统的预期寿命、运行可用性以及整体系统安全和环境安全 [113]。

场景 RC3、RC4 和 RC5 表明，密封件劣化可能导致泄漏；但这些场景也适用于由密封件切割、挤出和啃蚀损坏所引起的泄漏。场景 RC2 表示防喷器系统可能发生一种潜在危险的故障：压力调节器产生或未能抑制的压力振荡，会使相邻部件承受动态载荷，而这些载荷在设计时可能未曾考虑 [113]。在某些情况下，场景 RC1、RC3 和 RC5 可能导致压力振荡，并使调节器无法维持所需压力（如 RC2 所示），但这取决于泄漏特性。

调节器故障场景中的大多数故障是通过地面功能测试或检查检测到的，而 CCSV 故障场景中的主要检测方法是功能测试和浸泡测试，这两种测试均在钻机上的防喷器处进行。通过液压测试检测到泄漏后，为调查故障原因而检查部件的流程，在补偿腔电磁阀和调节器的高度相关故障场景中也很常见。因此，这四种部件的故障场景表明，至少对于所考察部件的故障而言，这是石油和天然气行业的一种通行流程。

补偿腔电磁阀是防喷器控制系统的重要部件，SVC1、SVC2 和 SVC3 故障场景表明，最常观察到的故障是泄漏，各场景之间的差异主要取决于维护作业。当操作员命令防喷器系统执行特定功能时，信号会从中央控制单元发送至 SEM 进行解码，随后传送至特定的补偿腔电磁阀（位于 POD 中，与所需功能相关联）；该阀开启后，会使一个 SPM 阀改变位置，从而让储存在蓄能器中的高压流体流动 [78]。由于每项功能都有各自的补偿腔电磁阀，而且有些功能对防喷器系统来说比其他功能更为关键（例如，关闭盲剪切闸板、关闭环形防喷器），如果 CCSV 未能触发底板安装阀，受影响的功能便决定了该故障所涉及的风险。补偿腔电磁阀发生故障，可能导致无法控制所研究的其他部件，进而无法执行其规定功能。控制系统部件（例如电磁阀和调节器）发生泄漏会增加作业成本，而过度泄漏则可能导致控制回路中的液压压力损失 [10]。

研究结果表明，测试对于检测所研究的四种部件的故障，以及保障钻井阶段作业和活动的安全至关重要，因为测试程序出现在DC矩阵中频繁出现的相关故障记录所对应的情景中。尽管RAPID-S53中的文本故障记录由众多钻井承包商生成，且每家承包商都有自己的监测程序，但这些情景指出了能够检测不同故障模式的具体程序。这些程序很可能更有效地监测所研究部件执行其所需功能的能力。然而，许多故障是在防喷器装在钻机上时通过测试检测出来的，这给公司带来了挑战，因为监测防喷器系统的状态需要耗费高昂成本。将防喷器拉到钻机上时，必须停止钻井作业，公司还必须承担回收和维护防喷器系统的费用，以及整台钻机的非生产时间。情景还引出了另一个重要问题：在水下防喷器上进行的测试或其他监测程序，能否有效监测所研究部件执行其所需功能的能力？此外，为什么大多数故障都是在系统位于钻机上时通过测试检测出来的？如果钻井系统内的压力变得无法控制，而防喷器位于水下，且环形防喷器、剪切闸板防喷器等部件无法按需关闭井筒，整台钻机都将陷入危险之中。

如果钻井系统内的压力变得无法控制，而防喷器位于水下，且环形防喷器、剪切闸板防喷器等部件无法按需关闭井筒，整台钻机都将陷入危险之中。

6. 结论

本文采用一种基于著名的潜在语义分析（LSA）方法的文本挖掘方法，提取信息并了解四种防喷器部件的主要故障场景：环形防喷器、剪切闸板防喷器、调节器和补偿腔电磁阀。本研究考察了由负责防喷器系统维护的工程师和技术人员报告的共 1312 条故障及纠正性维护描述，以评估每种部件最常见的故障、检测方法、维修实践、故障原因、钻井公司面临的挑战，以及他们在防喷器系统故障方面的经验。根据非结构化故障描述，研究发现所研究的四种防喷器部件各自至少存在三种主要故障场景。尽管本研究仅考察了四种部件的故障描述，但它是迈向了解防喷器系统主要故障场景的一步。

这项研究具有理论和实践方面的潜力。从学术角度来看，与以往研究不同，本研究仅聚焦于故障的文字描述，其中包含故障模式、原因和检测方法等信息，有助于深入了解防喷器系统的主要故障。鉴于针对最常见的防喷器故障及维护程序的研究十分有限，本文提出的故障场景或可为未来研究提供参考。此外，目前关于哪些防喷器测试程序更能有效检测某些类型的故障的信息也很匮乏。学者可利用这些场景，研究与纠正性维护相关的维护程序；借助故障信息开展可靠性与安全分析及风险管理；或将其作为输入，用于开发针对所研究部件的防喷器系统状态监测理论模型。

此外，研究结果表明，在钻机上对防喷器进行测试是主要故障检测方法之一，这一发现值得特别关注，因为它进一步凸显了学者、机构以及石油和天然气公司近期为提高防喷器系统可靠性所作努力的重要性。很少有研究使用文本挖掘分析维护描述（这类文本技术性很强且十分复杂），而本文所述方法有望缓解维护数据中固有的技术词汇问题。在分析非结构化故障描述并识别主要故障场景方面，该方法取得了令人鼓舞的结果。通过定制和调整，本研究提出的方法可用于从其他设备的数据库中提取与维护程序相关的信息。

钻井公司和防喷器制造商可以利用这些故障场景改进其服务和产品。尽管每家钻井公司都有自己的程序，用于调查钻井作业期间在防喷器系统中检测到的异常，但负责防喷器系统的管理人员可以利用这些场景，在调查所研究部件的异常时辅助决策，因为这些场景指出了可能更有效地检测特定故障的检测方法。了解最常见的故障模式、能够识别这些故障的检测程序及其原因，也有助于工程师和技术人员制定更完善的维护程序，并开展防喷器系统的可靠性分析。

研究结果确立了各部件故障场景之间的相关程度（奇异值），使钻井承包商能够集中精力监测更频繁发生的故障。相关程度对于降低钻井阶段各项作业的成本至关重要。这些故障场景可以为防喷器制造商提供可靠的部件故障评估，从而有助于设计更好的产品或服务。例如，监管机构可以利用这些研究结果促使石油和天然气公司采取行动；这对于通过降低事故风险、提高设备可用性来改善行业安全至关重要。

研究结果可能促使石油和天然气公司重新考虑用于测试防喷器系统部件的测试程序。正如这些场景所表明的，测试防喷器系统对于提高安全性至关重要。然而，防喷器测试越频繁，系统的可用性就越低。测试系统不仅会损害其可用性，而且每进行一次功能测试，即使没有使系统超负荷，也会消耗系统使用寿命中的一次功能次数。如果某个部件设计可使用200次，那么每次功能测试都会消耗其1/200的使用寿命。长期考察部件时，功能测试会大幅缩短其预期使用寿命。例如，环形防喷器的使用寿命通常为500次加压，或者其上盖和壳体可使用15年 [70, 114],因此，如果每周至少测试一次，并假设除测试外该部件从未加压，那么环形防喷器的使用寿命约为十年。如果将钻井作业导致的每周一次加压计算在内，环形防喷器的估计使用寿命为五年；若每周加压两次，则为三年，依此类推。在评估压力测试的影响时，这种影响会更加严重，因为压力测试会使系统超负荷。因此，钻井公司必须考虑这些程序的有效性——这些程序用于调查在防喷器系统中检测到的异常，而调查过程可能会将部件的使用寿命缩短至原本应有寿命的一小部分。如前所述，故障场景可以帮助他们确定哪些程序可能更有效。

7. 局限性

尽管本研究在利用故障记录文本数据方面向前迈进了一步，但仍需指出一些局限性。非计划纠正性维护的描述，是通过故障事件登记表中的开放式问题添加到 RAPID-S53 中的；尽管文本高度专业，这些描述仍带有一定主观性。记录质量存在差异，具体表现为描述中信息量有所不同，而这取决于报告者的经验，以及其是否积极报告故障的所有细节。有些描述记录了整个调查过程，包括故障机制等细节，可作为讨论基于状态的维护的适当依据。然而，另一些记录对纠正性维护的描述非常简短，这不利于数据库建设和研究。这两类记录数量都很少，对潜在语义分析结果影响不大，但钻井公司必须努力提高负责报告故障的工作人员的参与度，使描述比目前包含更多信息。

基于一种广为人知的文本挖掘技术，本分析得出了有关所研究的防喷器系统部件最常见故障及纠正性维护程序的知识。另一方面，由于故障记录仅收集自 RAPID-S53，所得结果仅限于单个数据库。此外，尽管该数据库包含来自全球各地的报告，但大多数故障记录来自在

美国墨西哥湾海域作业的钻井公司，因此，分析结果可能无法反映所有国家的主要故障模式。在美国墨西哥湾海域，环形防喷器和剪切闸板防喷器的故障描述约占所分析数据的 60% 至 65%；而同一地区调节器和补偿腔电磁阀的故障描述约占 80%。

这些场景按照潜在语义分析生成概念的顺序呈现（从奇异值由高到低排列），这些概念可与文本故障记录中的发生频率相关联。一些被列为第二、第三或第四的故障场景，可能比部件首个场景中所示的故障对钻机安全构成更大风险。因此，潜在语义分析并未考虑故障模式的严重程度。潜在语义分析通过系统性的数学分析进行，但在解释概念时需要人工参与，这会引入主观性。分析人员的知识对采用潜在语义分析方法进行文本挖掘所得结果的重要性不容低估。为解决这一局限，研究人员、工程师以及具有石油和天然气行业经验的技术人员组成团队进行了修订。

8. 建议

研究结果揭示了故障事件按部件故障模式、检测方法、纠正措施、疑似原因及发生频率进行的细分情况。未来研究可将基于科学的方法所得结果作为基础，对所研究的防喷器系统部件开展可靠性研究，并开发状态监测、维护程序评估、风险管理和安全分析的理论模型。行业法规和标准要求已制定并不断完善，以提高钻井阶段的安全性 [16, 18]。然而，研究结果强调，石油和天然气公司、监管机构、技术研究机构及学者必须研究智能且实用的解决方案，在保持或提升安全性的同时，提高防喷器系统可用性。对于石油和天然气钻井公司的未来而言，通过寻求监测防喷器系统的创新方式（例如与部件状态维护相关的新技术、技巧和方法，以及其他智能解决方案）来提高监测程序的有效性至关重要。这些努力对于提高防喷器系统的可用性，以及保障钻机工作人员和环境的安全必不可少。

例如，在 [15], 中，提出了一种基于状态的方法，将BSR防喷器测试活动纳入多阶段马尔可夫过程，以分析不可用性，并研究测试错误和延迟维修对部件不可用可能性的影响。在 [30], 中，将利用近实时故障数据库更新的故障树分析纳入作业决策流程，以减少防喷器系统内部复杂故障传播导致的钻机非生产时间。在 [70], 中，提出了一种高保真方法，结合理论计算方法（TCM）、有限元分析（FEA）和应力测试实验（STE），监测环形防喷器顶盖和壳体的应力。在 [115], 中，提出了一种自适应的基于模型的方法，通过调整模型系数，将第一性原理模型与现场数据相结合，对环形防喷器的功能进行实时状态监测；这些系数被解释为环形防喷器的健康指标。这些都是近期研究的例子，展示了提高钻井作业安全性、同时提升防喷器系统部件可用性的新解决方案，而这两点对石油和天然气行业的未来与可持续发展都至关重

要。朝这一方向所做的努力，有望通过降低事故风险来改善维护管理并提升行业安全。

本研究的讨论可通过将数据库中的摘录应用于防喷器系统的其他重要部件（如管子闸板和SPM阀门）加以拓展，从而了解这些部件的主要失效情景。此外，收集视频报告等智能维护解决方案有望增加技术人员和工程师所描述的信息量。在此背景下，由人类专家逐条审查服务记录所面临的挑战可能会大幅增加。因此，学者和石油和天然气公司可以探索文本挖掘方法（如潜在语义分析）能否在不丢失大量信息的情况下，将海量数据降维至更易处理的规模，从而从维护程序的文本描述中提取有用信息。

致谢

作者谨此感谢巴西国家石油公司 Petrobrás 提供的资金支持（No.ANP:20741-5）。

参考文献

[1] N. Khakzad, F. Khan, N. Paltrinieri, 《将未遂事故数据应用于重大事故风险分析》, 《可靠性工程与系统安全》126（2014年）116–125。doi:10.1016/j.ress.2014.01.015。URL https://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2014.01. 015[2] N. Khakzad, F. Khan, P. Amyotte, 《海上钻井作业的定量风险分析：贝叶斯方法》, 《安全科学》57（2013年）108–117。doi:10.1016/j.ssci.2013.01.022。URL https://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2013.01. 022[3] B. Verweijen, K. Lauche, 《需要发生多少次井喷才能吸取教训？灾害演变的制度视角》, 《安全科学》111（2019年）111–118。doi:10.1016/j.ssci.2018.06.011. URL https://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06. 011[4] L. Xue, J. Fan, M. Rausand, L. Zhang, 《基于安全屏障的海上钻井井喷事故模型》, 《过程工业损失预防杂志》26 (1) (2013年) 164–171. doi:https: // doi.org/10.1016/j.jlp.2012.10.008. URL https://doi.org/ 10 1016 2012 10 008 . / [5] j.jlp. . . P. Holand, W. Hauser, M. Rausand, 《深水应用海底防喷器系统的可靠性》(11 1999). URL https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/ tap-technical-assessment-program/319aa.pdf[6] L. B. Andersen, 《用于分析勘探钻井井喷风险的随机建模》, 《可靠性工程与系统安全》61 (1- 2) (1998) 53–63. doi:10.1016/s0951-8320(97) 00067-7. URL https://dx.doi.org/10.1016/s0951-8320(97) 00067-7 [7] Z. Liu, Y. Liu, B. Cai, D. Zhang, C. Zheng, 《共因失效情况下海底防喷器组可靠性的动态贝叶斯网络建模》, 《过程工业损失预防杂志》38 (2015年) 58–66. doi:https://doi.org/10.1016/j.jlp. 2015.09.001. URL https://doi.org/ 10 1016 2015 09 001 . / [8] j.jlp. . . J. E. Skogdalen, I. B. Utne, J. E. Vinnem, 《制定安全指标以预防海上石油和天然气深水钻井井喷》, 《安全科学》49 (8-9) (2011) 1187–1199. doi:10.1016/j.ssci.2011.03.012. URL https://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2011.03. 012[9] L. Zheng, P. D. Yapa, F. Chen, 《深水石油和天然气井喷模拟模型——第一部分：理论与模型构建》, 《水力学研究杂志》41 (4) (2003) 339–351. doi:10.1080/00221680309499980. URL https://doi.org/10.1080/ 00221680309499980[10] T. Wassar, M. Mutlu, M. A. Franchek, J. Gui- terrez, 《海底防喷器控制系统泄漏监测》, 载于：2018年5月1日星期二第2天，卷2，OTC，2018年，页1214–1220. doi:10.4043/28955-MS.[11] B. Cai, Y. Zhang, H. Wang, Y. Liu, J. R. Gao, C, 《基于动态贝叶斯网络的工程系统退化与维护韧性评估方法》, 《可靠性工程与系统安全》209 (2021年). doi:https: // doi.org/10.1016/j.ress.2021.107464. URL https://doi.org/ 10 1016 2021 107464 . / [12] j.ress. . F. B. Martins, J. Bittencourt, M. S. Santos,

T. M. Amato，《通过集成管理方法提高防喷器可靠性》，载于：《海洋技术大会》，OTC，2015年。doi:10.4043/26182-MS. URL https://onepetro.org/OTCBRASIL/proceedings/15OTCB/1-15OTCB/ 84035 RiodeJaneiro,Brazil/[13]

J. P. Sattler，《马孔多事件之后的防喷器性能——目前进展如何？》，载于：SPE北极与极端环境技术会议暨展览会，石油工程师学会，2013年。doi:https://10.2118/166869-MS. URL https://onepetro.org/SPEDC/proceedings/13DC/All-13DC/Amsterdam,TheNetherlands/176818[14]M. Affleck, M. Gilleland，《地面防喷器应用中遥控钻井防喷器启动技术开发背景》，载于：SPE/IADC中东钻井技术会议暨展览会，石油工程师学会，2016年。doi:https://10.2118/178221-MS. URL https://onepetro.org/SPEDC/proceedings/13DC/All-13DC/Amsterdam,TheNetherlands/176818[15] S. Wu, L. Zhang, A. Barros, W. Zheng, Y. Liu，《测试策略下水下盲剪闸板防喷器的性能分析》，《可靠性工程与系统安全》169 (2018年) 281– 298. doi:10.1016/j.ress.2017.08.022. URL https://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2017.08. 022[16] API，《API标准53：钻井井喷防控设备系统》(2018年). URL http://iwcc.ir/wp-content/uploads/2020/01/API-St-53-2018.pdf[17] BSEE，《安全与环境执法局防喷器（BOP）维护与检查研究最终报告》(2013年). URL https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/tap-technical-assessment-program//693aa.pdf[18] ISO，ISO 14224：石油和天然气工业——设备可靠性与维护数据的收集和交换（2016年）。[19] F. B. Martins, R. Cardoso, I. Tammela, D. Colombo, B. A. de Matos，《将基于状态的维护和预测与健康管理概念与可靠性方法应用于防喷器：文献综述》，《巴西运营与生产管理期刊》15 (1) (2018年) 78–95. doi:10.14488/bjopm.2018.v15.n1.a8. URL https://dx.doi.org/10.14488/bjopm.2018. v15.n1.a8 [20] N. Lukin，《多路复用海底防喷器环形闸板失效风险管理》（2016年9月）。

URL https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-28092016-110330/pt-br.php [21]V. Pranesh, K. Palanichamy, O. Saidat, N. Peter, 深水地平线石油平台中动态领导技能的缺失及人为失误对风险管理的贡献分析，《安全科学》92 (2017) 85–93。doi:10.1016/j.ssci.2016.09.013。URL https://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2016.09. 013[22] J. P. Sattler，防喷器性能——麦康多事故后时代的发展与后果，载于：等（编），SPE/IADC 钻井会议，第 2 卷，石油工程师学会，2013年。doi:10.2118/163531-MS。URL https://onepetro.org/SPEDC/proceedings/13DC/All-13DC/Amsterdam,TheNetherlands/176818[23]J. R. Huse, I. A. Alme，实时监测防喷器可靠性，载于：等（编），欧洲 HSE 会议及展览会，石油工程师学会，2013年。doi:https://doi.org/10.2118/164987-MS。URL https://onepetro.org/speuhse/proceedings/13HSE/All-13HSE/London,UnitedKingdom/ 177899 [24] X. Meng, X. Li, W. Wang, G. Song, G. Chen, J. Zhu，考虑不确定信息的深水钻井作业事故路径分析新方法，《可靠性工程与系统安全》205 (2021) 107255–107255。doi: 10.1016/j.ress.2020.107255。URL 10 1016 2020 107255 . /j.ress. . Z. [25] Yuan, Y. Hashemian, D. Morrell，最坏情况井喷情景下的超深水井喷井控分析，《天然气科学与工程杂志》27 (2015) 122–129。doi:10.1016/j.jngse.2015.08.047。URL https://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08. 047 [26] M. Shafiee, E. Enjema, A. Kolios，用于工程系统风险分析的集成故障树分析-失效模式与影响分析模型：海底防喷器案例研究，《应用科学》9 (6) (2019) 1192–1192。doi:10.3390/app9061192。URL https://dx.doi.org/ 10 3390 9061192 . / [27] app J. R. C. Bacelo，复杂可修复系统的风险与可靠性分析（2016）。URL http://pos.ucpel.edu.br/ppgeec/wp-content/uploads/sites/8/2018/03/8AA- BACELO.pdf [28]M. M. Abaei, E. Arzaghi, R. Abbassi, V. Garaniya, S. Chai, F. Khan，风暴条件下海洋结构物安全分析的稳健风险评估方法，《海洋工程》156 (2018) 167–178。

doi:10.1016/j.oceaneng.2018.02.016. URL https://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng. 2018.02.016[29] B. Cai, Y. Liu, Z. Liu, X. Tian, X. Dong, S. Yu, 在海底防喷器控制系统可靠性评估中使用贝叶斯网络，《可靠性工程与系统安全》108（2012）32–41。doi:10.1016/j.ress.2012.07.006。URL 10 1016 2012 07 006 。/j.ress. . . M. [30] Mutlu, Z. Arnold, M. A. Franchek, J. Meraz, 防喷器控制系统的定性故障树分析：用于实时可用性监测，载于：《海洋技术大会》，OTC，2017年。doi:10.4043/27814-MS。URL https://doi.org/10.4043/27814-MS [31] T. Jacobs, 防喷器监测旨在减少停机时间、提升洞察力，《石油技术期刊》66（2014）58–66。doi:https://doi.org/10.2118/0714-0058-JPT。URL https://doi.org/10.2118/0714-0058-JPT [32] P. Holand, M. Rausand, 海底防喷器系统的可靠性，《可靠性工程》19（4）（1987）263–275。doi:10.1016/0143-8174(87) 90058-8。URL https://dx.doi.org/10.1016/0143-8174(87) 90058-8[33]S. Klakegg, 安全关键系统可靠性评估的改进方法：防喷器系统应用示例（2012年6月）。URL https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/240869/629218_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y [34] P. Holand, H. Awan, 深水海底防喷器系统与井涌的可靠性，ES 201252（2012）。URL https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/tap-technical-assessment-program/674aa.pdf [35] E. Drægebø, 防喷器系统可靠性分析：电液式与全电式防喷器技术的比较研究（2014年）。URL https://core.ac.uk/download/pdf/ 52099996.pdf [36] H. Meng, G. Chen, X. Liu, Y. Zhu, 一种用于深水井喷事故应急响应的石油回收技术，《安全科学》113（2019年）134–143。doi:10.1016/j.ssci.2018.11.011。URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/ pii/S 0925753518306209 [37] H. Lu, L. Guo, M. Azimi, K. Huang, 油气4.0时代：系统综述与展望，《工业中的计算机》111（2019年）68–90。doi:10.1016/j.compind.2019.06.007。URL https://dx.doi.org/10.1016/j.compind. 2019.06.007[38] K. R. Holdaway, 驾驭石油和天然气大数据 利用分析技术挖掘油气大数据，载于《利用分析技术挖掘油气大数据》，第1版，第1卷，Wi- ley，2014年，第1–384页。doi:https://doi.org/10.1002/9781118910948。URL https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/ 10 1002 9781118910948 。/ Z. Yang, P. Baraldi, [39] E. Zio，维护记录聚类的新方法及其在维护优化案例研究中的应用，《可靠性工程与系统安全》203 (2020) 107103–107103。doi:10.1016/j.ress.2020.107103。URL https://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2020. 107103 [40] Y. Zhao, T. H. Xu，基于文本挖掘的高速铁路信号系统车辆车载设备故障诊断，《铁道学报》37 (8) (2015) 53–59。doi:10.3969/j.issn.1001-8360. 2015.08.009。[41]K. Liu, N. El-Gohary，基于本体的半监督条件随机场用于从桥梁检查报告中自动抽取信息，《建筑自动化》81 (2017) 313–327。doi:10.1016/j.autcon.2017. 02.003。URL https://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017. 02.003[42] A. R. Mashhadi, B. Esmaeilian, W. Cade, K. Wiens, S. Behdad，挖掘消费者维修电子产品的体验：产品设计见解与商业经验，《清洁生产杂志》137 (2016) 716–727。doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.144。URL https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016. 07.144[43] K. Chen, R. J. Mahfoud, Y. Sun, D. Nan, K. Wang, H. H. Alhelou, P. Siano，利用 GloVe 和基于注意力的双向长短期记忆网络挖掘智能变电站二次设备缺陷文本，《能源》13 (17) (2020) 4522–4522。doi:10.3390/en13174522。URL https://dx.doi.org/ 10 3390 13174522 。/ [44] en H. B. Gunay, W. Shen, C. Yang，挖掘建筑维护工单中的部件故障频率，《建筑研究与信息》47 (5) (2019) 518–533。doi:10.1080/09613218. 2018.1459004。URL https://dx.doi.org/10.1080/09613218.2018. 1459004[45] Z. Kong, C. Yue, Y. Shi, J. Yu, C. Xie, L. Xie，利用混合自然语言处理算法抽取电气设备故障文本中的实体，《IEEE开放获取期刊》9 (2021) 40216–40226。doi:10.1109/access.2021.3063354。URL https://dx.doi.org/10.1109/access.2021.

3063354[46] L. Shi, A. Li, L. Zhang，面向CTCS-3 数据预处理的不平衡文本挖掘可持续故障诊断，《可持续性》13 (4) (2021) 2155–2155。doi:10.3390/su13042155。URL https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/ 2155[47] L. Yang, K. Li, D. Zhao, S. Gu, D. Yan，基于文本数据识别高速铁路故障根本原因的网络方法，《能源》12 (10) (2019) 1908–1908。doi:10.3390/ en12101908。URL https://www.mdpi.com/1996-1073/12/10/ 1908[48] D. Wei, B. Wang, G. Lin, D. Liu, Z. Dong, H. Liu，基于循环神经网络-长短期记忆网络和故障检查报告的非结构化文本数据挖掘与故障分类研究，《能源》10 (3) (2017) 406–406。doi:10.3390/en10030406。URL http://www.mdpi.com/1996-1073/10/3/ 406[49] X. Li, P. Penmetsa, J. Liu, A. Hainen, S. Nam- bisan，紧急天然气输送管道事故严重程度：融合文本挖掘的综合时空方法的应用，《过程工业损失预防杂志》69 (2021) 104383–104383。doi:10.1016/j.jlp.2020.104383。URL https://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2020. 104383[50] M. A. Blanco, P. Marti-Puig, K. Gibert, J. Cusidó, J. Solé-Casals，利用维护服务历史通过文本挖掘评估风力涡轮机的故障状态，《能源》12 (10) (2019) 1982–1982。doi:10.3390/ en12101982。URL https://www.mdpi.com/1996-1073/12/10/ 1982[51] H. Kwon, J. Kim, Y. Park，运用潜在语义分析文本挖掘技术展望新兴技术的社会影响：无人机技术案例，《技术创新》60-61 (2017) 15–28。doi:10.1016/j.technovation.2017.01.001。URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/ pii/S0166497217300044[52] R. Blake, R. Ayyagari,

分析信息系统安全研究，以发现关键主题、趋势和机遇，《信息系统隐私与安全杂志》8 (3) (2012) 37–67。doi:10.1080/15536548.2012.10845660。URL https://dx.doi.org/10.1080/15536548.2012. 10845660[53] X. Pan, H. Wang, W. You, M. Zhang, Y. Yang，利用客户知识发现评估电子产品的可靠性，《可靠性工程与系统安全》199 (2020) 106925–106925. doi:10.1016/j.ress.2020.106925. URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/ pii/S0951832019307732[54] A. Apichottanakul, M.

Goto, K. Piewthongngam, S. Pathumnakul，基于购买数据稀疏性的猪肉行业多类别产品客户行为分析：一种混合方法，Cogent Engineering 8 (1) (2021) 1865598–1865598. doi:10.1080/23311916.2020. 1865598. URL https://dx.doi.org/10.1080/23311916.2020. 1865598[55] M. Frasca, G. Tortora，通过信息检索和机器学习技术可视化帕金森病生物医学数据之间的相关性，Multimedia Tools and Applications (2021). doi:10.1007/s11042-021-10506-x. URL http://link.springer.com/10.1007/s11042-021-10506-x[56] T. Williams, J. Betak，使用潜在语义分析和潜在狄利克雷分配分析铁路事故文本的比较，Procedia Computer Science 130 (2018) 98–102. doi:10.1016/j.procs.2018.04.017. URL https://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2018.04. 017[57]G. Kou, Y. Peng，潜在语义分析在文本分类中的应用，International Journal of Computers Communications & Control 10 (3) (2015) 357–357. doi:10.15837/ijccc.2015.3.1923. URL https://dx.doi.org/10.15837/ijccc.2015.3. 1923[58] N. Ramzali, M. R. M. Lavasani, J. Ghodousi，采用模糊事件树分析的海上钻井系统安全屏障分析，《安全科学》78 (2015) 49–59. doi:10.1016/j.ssci.2015.04.004. URL https://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2015.04. 004[59] J. E. Skogdalen, J. E. Vinnem，以深水地平线为案例研究的石油和天然气钻井定量风险分析，Reliability Engineer- ing & System Safety 100 (2012) 58–66. doi: 10.1016/j.ress.2011.12.002. URL https://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2011.12. 002[60] D. Rich, B. Rogers, Q. Dyson, K. Olson, J. Smart, D. Tiffin，墨西哥湾深水完井——细节决定成败，载于：海上技术会议，第1卷，石油工程师学会，2010年。doi:10.2523/20399-MS. URL http://www.spe.org/elibrary/servlet/ spepreview?id=OTC-20399-MS[61]J. Hayes，操作员能力与产能——蒙塔拉井喷事件的教训，《安全科学》50 (3) (2012) 563–574。

doi:10.1016/j.ssci.2011.10.009. URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/ pii/S0925753511002805 [62] Z. Ismail, K. K. Kong, S. Z. Othman, K. H. Law, S. Y. Khoo, Z. C. Ong，评估石油海上钻井事故：区域概况及减轻影响，测量 51 (1) (2014) 18–33. doi:10.1016/j.measurement.2014.01.027. URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/ pii/S0263224113004414 [63] M. Abimbola, F. Khan, N. Khakzad，海上钻井动态安全风险分析，《过程工业损失预防杂志》30 (2014) 74–85. doi:10.1016/j.jlp.2014.05.002. URL https://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2014.05. 002 [64] S. B. Joye, A. Bracco, T. M. Özgökmen, J. P. Chanton, M. Grosell, I. R. MacDonald, E. E. Cordes, J. P. Montoya, U. Passow，马孔多油井井喷六年后的墨西哥湾生态系统，Deep Sea Research Part II: Top- ical Studies in Oceanography 129 (2016) 4–19. doi:10.1016/j.dsr2.2016.04.018. URL https://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.04. 018 [65] C. M. B. Burns, J. A. Olin, S. Woltmann, P. C. Stouffer, S. S. Taylor，石油对陆生脊椎动物的影响：预测马孔多井喷的影响，《生物科学》64 (9) (2014) 820–828. doi:10.1093/biosci/biu124. URL https://dx.doi.org/10 1093 124 . / biosci/biu [66] C. R. Fisher, A. W. J. Demopoulos, E. E. Cordes, I. B. Baums, H. K. White, J. R. Bourque，作为深水地平线漏油事件生态系统层面影响指标的珊瑚群落，《生物科学》64 (9) (2014) 796–807. doi:10.1093/biosci/biu129. URL https://dx.doi.org/10 1093 129 . / biosci/biu [67] Q. Qi, I. Ershaghi，油田相关事故的若干方面，载于：and others（编），SPE年度技术会议暨展览，第5卷，石油工程师学会，2013年。doi:10.2118/166412-MS. URL https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings/13ATCE/2-13ATCE/New Orleans, Louisiana,USA/172122 [68] W. H. Martin, E. A. Marsh, E. G. Nubble，对1982年10月Eugene Island区块361井喷和火灾的调查，墨西哥湾（1983年）。URL https://doi.org/10 3133 83113 . /ofr B. Cai, [69] Y. Liu, Z. Liu, X. Tian, Y. Zhang, R. Ji，贝叶斯网络在水下防喷器作业定量风险评估中的应用，《风险分析》33 (7) (2013) 1293–1311. doi:https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01918.x。URL https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1539-6924.2012.01918.x [70] W. Li, Y. Tang, Y. He，深水环形防喷器关键应力区域的仿真与实验分析，《工程故障分析》106 (2019年) 104161–104161。doi:10.1016/j.engfailanal.2019.104161。URL https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019. 104161 [71] M. J. Jellison, R. B. Chandler, M. Payne, J. S. Shepard，超深水钻井推动钻柱技术创新，《SPE钻井与完井》23 (02) (2008) 190–200。doi:10.2118/ 104827-pa。URL https://dx.doi.org/10.2118/104827-pa [72] L. Zhu, S. F. Estefen, J. N. De, M. Chuju- talli, J. H. Souza, Mil，剪切闸板性能的数值模拟，载于：《美国机械工程师学会2018年第37届国际海洋、海上与北极工程会议》，第11B卷：海洋技术与海洋工程Carlos Guedes Soares教授荣誉研讨会，美国机械工程师学会，西班牙马德里，2018年。doi:10.1115/OMAE2018-78100。URL https://asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings/OMAE2018/51333/Madrid,Spain/277381 [73] P. Holand, 深水海底防喷器的可靠性，《SPE钻井与完井》16 (1) (2001) 12–18。doi:10.2118/70129-pa。URL https://dx.doi.org/10.2118/70129-pa [74] B. Cai, Y. Liu, Z. Liu, X. Tian, Y. Zhang, J. Liu，具有公共原因故障的海底防喷器系统性能评估，《石油科学与工程杂志》90-91 (2012年) 18–25。doi:10.1016/j.petrol.2012.04.007。URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/ pii/S0920410512000965 [75] B. Cai, Y. Liu, Q. Fan, Y. Zhang, S. Yu, Z. Liu，采用不完全修复和预防性维护的动态贝叶斯网络评估海底防喷器控制系统性能，《工程人工智能应用》26 (10) (2013年) 2661–2672。doi:10.1016/j.engappai.2013.08.011。URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/ pii/S0952197613001651 [76] B. Cai, Y. Liu, Z. Liu, X. Tian, H. Li, C. Ren，受多重错误冲击的海底防喷器控制系统可靠性分析，《过程工业损失预防杂志》25 (6) (2012年) 1044–1054。doi:10.1016/j.jlp.2012.07.014。

URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950423001001067[77] G. Childs, J. Sattler, R. Williamson，美国矿产管理局剪切闸板能力研究：申请编号3-4025-1001 (2004)。URL https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/tap-technical-assessment-program/463aa.pdf[78] Ø. Sætre，海底防喷器控制系统可靠性评估 (2015年)。URL https://core.ac.uk/download/pdf/30875719.pdf[79] M. Mutlu, T. Wassar, M. A. Franchek, J. A. Gutierrez，海底防喷器控制系统压力调节器的状态与性能分析，《海洋技术大会》2 (2018年) 1193–203。doi:10.4043/28861-MS。URL https://onepetro.org/OTCONF/proceedings/18OTC/2-18OTC/Houston,Texas, USA/179170[80] M. Mutlu, M. A. Franchek, J. A. Gutierrez, L. R. Pereira，采用基于物理模型的液压回路系统级性能与可靠性调查，载于：and others (Ed.)，《美国机械工程师学会2016年动态系统与控制会议》，第2卷，美国机械工程师学会，2016年，第1–10页。doi:https://doi.org/10.1115/DSCC2016-9717。URL https://asmedigitalcollection.asme.org/DSCC/proceedings-abstract/DSCC2016/50701/ V002 21 003 231110[81] T A / J. Quispe, S. F. Estefen, J. N. De, M. Souza, Mil，基于液压分析模型估算防喷器控制系统相关响应时间，载于：《美国机械工程师学会2018年第37届国际海洋、海上与北极工程会议》，第1卷，美国机械工程师学会，2018年，第1–11页。doi:10.1115/OMAE2018-78274。URL https://asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings/OMAE2018/51203/Madrid,Spain/277851[82] IADC，国际钻井承包商协会。可靠性与性能信息数据库指南文件 (2017年)。URL https://www.safeocs.gov/forms/WCR_Guidance_Rev2.1.pdf[83] K. J. Millman, M. Aivazis，面向科学家与工程师的Python，《科学与工程计算》13 (2) (2011) 9–12。doi:10.1109/mcse.2011. 36。URL https://dx.doi.org/10 1109 2011 36 ./[84] mcse. . S. van der Walt, S. C. Colbert, G. Varoquaux, NumPy数组：一种高效数值计算的数据结构，《科学与工程计算》13 (2) (2011) 22–30。doi:10.1109/mcse.2011.37。URL https://dx.doi.org/10.1109/mcse.2011.37[85] J. D. Hunter，Matplotlib，《Matplotlib：二维图形环境》，《科学与工程计算》9 (3) (2007年) 90–95。doi:10.1109/MCSE.2007.55。URL http://ieeexplore.ieee.org/document/ 4160265/[86] M. Waskom，O. Botvinnik，P. Hobson，J. Warmenhoven 等，《Seaborn：统计数据可视化》（2018年7月）。URL https://zenodo.org/record/1313201# .YM4 b KSm00[87] F. Pedregosa，G. Varoquaux，A. Gramfort，V. Michel，B. Thirion，O. Grisel 等，《Scikit-Learn：Python 机器学习》，《机器学习研究期刊》12 (2011) 2825–2830。URL https://www.jmlr.org/papers/volume12/pedregosa11a/pedregosa11a.pdf[88] W. Mckinney 等，《pandas：用于数据分析与统计学的基础 Python 库》，《用于高性能与科学计算的 Python》14 (9) (2011) 1–9。URL https://www.researchgate.net/publication/265194455_pandas_a_Foundational_Python_Library[89] E. Loper，B. S，NLTK：自然语言工具包，载于：and others（编），《ACL-02 自然语言处理与计算语言学教学有效工具和方法研讨会论文集》，ETMTNLP '02 第1卷，计算语言学协会，美国，2002年，第63–70页。doi:https://doi.org/10.3115/1118108.1118117。URL http://arxiv.org/abs/cs/0205028[90] E. Jones, T. Oliphant，P. Peterson 等，SciPy：Python 开源科学工具（2001年）。URL http://www.scipy.org/[91] P. J. Kwantes，N. Derbentseva，Q. Lam，O. Vartanian，H. H. Marmurek，使用潜在语义分析评估大五人格特质，《人格与个体差异》102 (2016) 229–233。doi:10.1016/j.paid.2016.07.010。URL https://dx.doi.org/10.1016/j.paid.2016.07. 010[92] G. Orellana，B. Arias，M. Orellana，V. Saquicela，F. Baculima，N. Piedra，《预处理技术对西班牙语和英语短文本和长文本分类的影响研究》，载于：2018年信息系统与计算机科学国际会议（INCISCOS），第2018卷，电气电子工程师学会，2018年，第277–283页。doi:10.1109/INCISCOS.2018.00047。URL https://ieeexplore.ieee.org/document/ 8564539/[93] D. Eler，D. Grosa，I. Pola，R. Garcia，R. Correia，J. Teixeira，《文本与观点挖掘中的文档预处理效果分析》，Information

9 (4) (2018) 100–100。doi:10.3390/info9040100。URL https://dx.doi.org/
10 3390 9040100 . /info
[94] C. F. da Silva，O. Santos，R. Vieira，评估文本挖掘预处理阶段中语言信息的使用，Inteligência Ar- tificial 9 (26) (2006) 59–66。doi:10.4114/ia. v9i26.845。URL https://dx.doi.org/
10 4114 9 26 845 . /ia.v i .
[95] S. Ramírez-Gallego，B. Krawczyk，S. García，M. Woźniak，F. Herrera，数据流挖掘数据预处理综述：现状与未来方向，《神经计算》239 (2017年) 39–57。doi:10.1016/j.neucom.2017.01. 078。URL https://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2017. 01.078
[96] S. T. Dumais，G. W. Furnas，T. K. Landauer，S. Deerwester，R. Harshman，利用潜在语义分析改善文本信息获取，载于：SIGCHI计算系统中的人为因素会议论文集 - CHI '88，第F1302部分第1卷，ACM出版社，1988年，第281–285页。doi:10.1145/57167.57214。URL http://portal.acm.org/citation.cfm?doid = 57167 57214 .
[97] S. Deerwester，S. T. Dumais，G. W. Furnas，T. K. Landauer，R. Harshman，基于潜在语义分析的索引，《美国信息科学学会会刊》41 (6) (1990) 391–407。doi:10.1002/(sici)1097-4571(199009)41:6<391::aid-asi1>3. 0.co;2-9。URL https://dx.doi.org/10.1002/(sici)1097-
4571 199009 41 6<391 1>3 0 2 9 ( ) : ::
[98] aid-asi . .co; - T. K. Landauer，P. W. Foltz，D. Laham，潜在语义分析简介，《话语过程》25 (2-3) (1998) 259–284。doi:10.1080/01638539809545028。URL https://dx.doi.org/10.1080/ 01638539809545028
[99] S. T. Dumais，潜在语义分析，《信息科学与技术年度评论》38 (1) (2005) 188–230。doi:10.1002/aris. 1440380105。URL https://dx.doi.org/
10 1002 1440380105 . /
[100] aris. R. Feldman，J. Sanger，《文本挖掘手册》，剑桥大学出版社，剑桥，2006年。doi:10.1017/CBO9780511546914。URL https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9780511546914/type/book
[101] C. Fellbaum，WordNet，载于：R. Poli，H. Michael，A. Kameas（编），《本体论的理论与应用：计算机应用》，施普林格荷兰，Dordrecht，2010年，第231–243页。doi:10.1007/978-90-481-8847-5_10。URL http://link.springer.com/10.1007/978-90- 481-8847-5 10_
[102] C. Fellbaum，《WordNet：电子词汇数据库》，麻省理工学院出版社，剑桥，马萨诸塞州，1998年。URL https://wordnet.princeton.edu/
[103] V. Balakrishnan，L.-Y. Ethel，《词干提取与词形还原：检索性能比较》，《软件工程讲义》2 (3) (2014年) 262–267。doi:10.7763/lnse.2014.v2.134。URL https://dx.doi.org/10.7763/lnse.2014.v2. 134
[104] T. Korenius，J. Laurikkala，K. Jrvelin，M. Juhola，《芬兰语文本文件聚类中的词干提取与词形还原》，载于：第十三届ACM信息与知识管理会议论文集——CIKM '04，ACM出版社，2004年，页码625–633。doi:10.1145/1031171. 1031285。URL http://portal.acm.org/citation.cfm?doid = 1031171 1031285 .
[105] G. D. Miner，J. Elder，R. A. Nisbet，《非结构化文本数据应用的实用文本挖掘与统计分析》，第1版，学术出版社，2012年。doi:10.1016/C2010-0-66188-8。URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/ pii/C20100061888
[106] M. W. Berry，S. T. Dumais，G. W. O'Brien，《运用线性代数进行智能信息检索》，《SIAM评论》37 (4) (1995年) 573–595。doi:10.1137/1037127。URL https://dx.doi.org/
10 1137 1037127 . / M.
[107] Yalcinkaya，V. Singh，《建筑信息建模（BIM）研究中的模式与趋势：潜在语义分析》，《自动化建筑》59 (2015年) 68–80。doi:10.1016/j. autcon.2015.07.012。URL https://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015. 07.012
[108] N. Evangelopoulos，T. Ashton，K. Winson- Geide man，S. Roulac，《潜在语义分析与房地产研究：方法与应用》，《房地产文献杂志》23 (2) (2015年) 353–380。doi:10.1080/10835547.2015. 12090411。URL https://dx.doi.org/10.1080/10835547.2015. 12090411
[109] E. Sezgen，K. J. Mason，R. Mayer，《航空公司乘客之声：理解客户满意度的文本挖掘方法》，《航空运输管理杂志》77 (2019年) 65–74。doi:10.1016/j.jairtraman.2019.04.001。URL https://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman. 2019.04.001
[110] Jahiruddin，M. Abulaish，L. Dey，一种概念驱动的生物医学知识提取与

文本语料库概念化可视化框架，《生物医学信息学杂志》43 (6) (2010年) 1020–1035。doi:10.1016/j.jbi.2010.09.008。URL https://dx.doi.org/10.1016/j.jbi.2010.09. 008[111] N. Evangelopoulos, X. Zhang, V. R. Prybutok，《潜在语义分析：五项方法论建议》，《欧洲信息系统杂志》21 (1) (2012年) 70–86。doi:10.1057/ ejis.2010.61。URL https://dx.doi.org/ 10 1057 2010 61 . /ejis. . P.
[112] Holand，《海底防喷器可靠性、测试与井涌》（2019年）。URL https://exprosoft.com/wp-content/uploads/2019/11/BOP-Final-report-15102019-signert-Open-1.pdf[113] M. Mutlu, T. Wassar, M. A. Franchek, J. A. Gutierrez，《海底防喷器控制系统压力调节器的状态与性能分析》，载于：海洋技术会议，OTC，休斯敦，2018年，页码1193–1203。doi:10.4043/28861-MS。URL https://onepetro.org/OTCONF/proceedings-abstract/18OTC/2-18OTC/ D 021 017 002 179170 S R / W. Qibing, Z. Shichao,
[114] W. Ge, Z. Xin, F. Chuanxin, Z. Chen等，《海底防喷器疲劳寿命与弃置判定研究》，《油田设备》46 (6) (2017年) 1–5。URL http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-SKJX201706001.htm[115] T. Wassar, M. Mutlu, M. A. Franchek, O. Hattab，《环形防喷器的基于模型的健康监测》，《SPE钻井与完井》34 (04) (2019年) 458–467。doi:10.2118/197041-pa。URL https://dx.doi.org/10.2118/197041-pa