文章编号:1673-5005(2019)02-0131-09

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2019.02.016

深水井控 STAMP/STPA 安全性分析

孟祥坤1,陈国明1,张肖锦1,2,朱 渊1,赵倩琳1,3

(1. 中国石油大学(华东)海洋油气装备与安全技术研究中心,山东青岛 266580;

2. 清华苏州环境创新研究院,江苏苏州 215163; 3. 中国石油化工股份有限公司天然气分公司,北京 100120)

摘要:传统安全分析方法无法解决复杂系统部件之间异常交互作用的评价问题。针对深水井控的复杂性和动态性特点,将井控系统在钻井过程中的安全性问题作为系统控制和反馈问题,基于系统理论的事故模型和过程(STAMP)模型,采用 STPA 系统性安全评估方法,构建井控系统在深水钻井过程中的控制关联模型和反馈回路,通过识别系统安全风险与约束、定义安全控制结构、分析不安全控制行为及关键因素等进行深水井控安全性分析。以 STAMP/STPA 作为分析准则,结合全动态多相流模拟软件 OLGA,建立深水井控工艺流程,以井涌后没有提供控制行为以及关井和压井等控制行为发生延迟为例,对井控作业的安全性进行动力学分析。结果表明:运用 STAMP/STPA 方法可从控制和约束角度为深水井控的安全系统性分析提供指导,通过对溢流、关井和压井过程模拟,可量化施加安全控制与约束行为以免事故发生与升级的时间裕量;该方法作为指导准则用于深水井控复杂系统安全性分析可行且有效。

关键词:深水; 井控; 安全分析; 约束; 事故和过程模型

中图分类号:TE 58 文献标志码:A

引用格式:孟祥坤,陈国明,张肖锦,等. 深水井控 STAMP/STPA 安全性分析 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019,43(2):131-139.

MENG Xiangkun, CHEN Guoming, ZHANG Xiaojin, et al. Safety analysis of deepwater well control based on STAMP/ STPA [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019,43(2):131-139.

Safety analysis of deepwater well control based on STAMP/STPA

MENG Xiangkun¹, CHEN Guoming¹, ZHANG Xiaojin^{1,2}, ZHU Yuan¹, ZHAO Qianlin^{1,3}

(1. Center for Offshore Engineering and Safety Technology (COEST) in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

2. Research Institute for Environment Innovation, Tsinghua, Suzhou 215163, China;

3. SINOPEC Gas Company, Beijing 100120, China)

Abstract: Traditional methods of safety analysis cannot solve the evaluation problem of the abnormal interactions among elements of complex systems. In view of the complex and dynamic characteristics of deeper well control, the safety analysis of deepwater well control during the drilling process is regarded as a system control and feedback problem in this study. Based on the accident model on the system theory, and the STAMP model, we use the STPA safety evaluation method to establish the control interaction model and feedback control loop of the well control system. In the model, the system safety risks and restrictions are identified. Then the control structure of the safety-related is defined, and the key factors which contribute to unsafe control behaviors are analyzed. Using the dynamic multiphase simulation software OLGA, and adopting the STAMP/ STPA as the criterion, we analyze the process of well control and simulate the unsafe control behaviors during the deepwater drilling. The dynamics analysis of the well control safety is performed, where the case without control after well kill and the

收稿日期:2018-06-22

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2017YFC0804501);国家工信部第七代超深水钻井平台创新专项(工信部联装[2016]24号);长 江学者和创新团队发展计划(IRT_14R58)

作者简介:孟祥坤(1988-),男,博士研究生,研究方向为海洋油气装备安全技术。E-mail:wsdy1002 @163.com。

通信作者:陈国明(1962-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为海洋油气工程及装备、油气安全工程。E-mail: offshore@126.com。

delay of control from shut in to well kill are taken as examples. The results show that the STAMP/STPA method is an effective solution to evaluate the safety of deep water well control from the perspective of control and feedback. The rational control can prevent accidents occurrence and escalating, which ensured the system safety in the certain time horizon, by modeling the process of well kick, shut in and well kill. The results also demonstrate that the method is available and useful for the safety analysis of deepwater well control.

Keywords: deepwater; well control; safety analysis; restriction; accident model and process

深水海域目前已成为油气勘探开发的重要接替 区,与陆上钻井相比,深水钻井更为复杂^[1]。信息 化和自动化程度的提高使得深水钻井平台呈现出信 息集成、劳动密集和设备集中的特点,也为钻井事故 模型的构建和分析提出了新的挑战。井喷作为深水 钻井作业平台面临的最严重事故[2],一旦失控引发 火灾爆炸,将严重威胁平台人员、设备和环境安全。 如2010年墨西哥湾"深水地平线"半潜式平台井喷 爆炸事故,造成11人遇难及490万桶原油泄漏,事 故成本超过600亿美元[3]。因此防止井喷的发生并 控制其灾变事故是保障深水钻井作业安全的重中之 重。深水井控失效导致井喷的致灾机制复杂.风险 因素众多。深水作业外部环境的恶劣性以及系统内 部组件关联、信息融合、软硬件组合和人机结合的特 点,使得影响井喷的风险因素增加且关联性增强,加 之人为因素的复杂性,导致安全分析更加困难。传 统的基于故障类型的事故模型,如事件树和事故树 模型均假设事故的发生是线性的,认为系统的安全 性依赖于系统各部件的可靠性;同时,将人、软件与 硬件作为独立要素考虑,忽略了系统各组成部分之 间的耦合性和相关性,无法从系统联系的角度解释 钻井事故发生的内在机制^[4]。基于系统理论的事 故模型和过程(system-theoretic accident model and process,STAMP)作为传统安全分析方法的拓展^[5], 一方面适应深水钻井系统集成化、信息化发展的安 全可靠性评估需求,另一方面可直观阐明深水钻井 失效连锁灾变事故的发生过程。STAMP 模型由 Leveson^[6-7]提出,目前已在航空航天^[8]、核电^[9-10]和 高铁^[11-12]等行业得到广泛应用。该模型适用于现 代复杂的人与软硬件结合系统的安全性分析与控 制,但在定量分析方面尚显不足。鉴于此,笔者针对 复杂系统安全分析所面临的系统性和定量性挑战, 提出 STAMP 系统性分析与动力学分析相结合的方 法,从控制角度对深水井控作业安全性进行分析:基 于 STAMP/STPA 方法,根据井控作业流程,定义安 全控制结构,对其不安全控制行为和潜在风险进行 详细分析:采用 OLGA 动力学分析方法,分析井涌后

"没有提供控制行为"和"控制行为发生延迟"工况 下系统的安全性。

1 STAMP/STPA 机制

1.1 STAMP 基本原理

复杂系统安全性是特定环境下由系统相关要素 交互作用所产生的一种涌现特性^[6],事故的原因是 对系统组件、人为因素、环境以至社会与管理因素间 复杂相互作用控制不当的结果^[12],系统安全性分析 要求发现系统中潜在的不安全行为或因素,并及时 采取控制与约束措施。区别于传统的基于部件可靠 性理论的安全性分析方法,STAMP 模型是基于系统 理论和控制理论,将安全性视为系统组元、人为因 素、环境因素和组织管理因素在非线性相互作用下 的一种整体涌现性。复杂系统作为一种开放的非线 性系统^[13],子系统之间以及系统与外界之间有物 质、信息和能量的交互,安全评估的要点是要明确系 统内部各种功能组件及其逻辑控制关系,分析组件 可能遭遇的外部干扰和环境因素,从而明确系统正 常运行所需的控制要求。

STAMP 模型认为事故的发生是系统在运行过 程中对组元失效、外部扰动和交互紊乱缺乏有效控 制,导致不安全情形出现^[14]。该方法重点考虑事件 发生的时机和次序,通过对复杂动态过程的控制流 程辨识安全威胁,开展安全评估。STAMP 提出 3 类 基本控制缺陷,指导复杂系统的安全分析^[8],具体 包含:①控制指令错误或不足(不安全控制行为); ②控制行为执行不充分;③反馈信息错误或不足。

1.2 STPA 分析方法

STPA(system-theoretic process analysis)是基于 STAMP的系统性安全评估方法,通过构建由控制 器、执行器、控制过程和传感器构成的反馈控制回路 (图1)^[10],分析控制行为在性能、时间或逻辑上的 不合理情形,辨识不安全控制作用和场景。STPA的 执行包含以下步骤^[15]:①辨识导致事故的系统状态 或条件,定义系统风险;②开发安全控制结构,识别 系统元件之间的关联关系,分析安全需求和限制;③ 识别不安全控制行为导致的约束失效,STPA 定义了 4 种不安全控制行为,即没有提供控制行为、控制行

为错误或不安全、控制行为发生延迟、控制行为结束 过早:④不安全控制行为关键原因分析。



Fig. 1 General safety control structure based on STAMP

2 深水钻井系统 STAMP/STPA 分析

与其他安全分析方法相似,STAMP/STPA 方法 主要识别系统存在的风险,但不同之处在于,传统安 全分析方法通过分析得到系统各组件的危险概率; STPA 是通过辨识在井控过程中的控制指令错误或 不足、控制行为执行不充分以及反馈信息错误或不 足等,识别系统控制回路中的不安全状态,从系统控 制和约束的角度进行安全性分析。

2.1 深水钻井系统安全风险与约束

深水钻井时,地层孔隙压力和破裂压力之间的 安全窗口比较窄,导致井控作业窗口较窄;井涌余 量、最大允许关井套压和隔水管钻井液安全增量随 水深增加而降低;同时,深水地层上覆岩层压力低, 导致地层疏松,井壁稳定性差,井控操作容易造成井 漏等复杂状况^[16]。

图 2 为典型的控压钻井(MPD)过程^[17],水下井口 处配置防喷器组,经隔水管、辅助管线等与钻台上的节 流压井设备连通。正常钻进时,钻井液在循环系统中 单相流动;发生井涌后,地层流体首先侵入井筒环空, 若发现较晚,油气可能进入隔水管段,并迅速发展为井 喷;关井时,通过关闭防喷器(BOP)使得套管压力稳 定;压井时,通过钻杆—井筒环空—节流管线的循环通 道驱替溢流,使地层和井底压力达到新的平衡。



Fig. 2 Schematic of managed pressure drilling (MPD) flow process

将井筒压力作为深水钻井井喷事故的安全约 束条件,通过相应的约束屏障对压力进行控制^[18]。 控压钻井通过相关设备控制钻进过程中的压力 场,利用钻井液柱压力平衡地层压力,可有效阻止 地层流体侵入井筒^[19],是防止井涌的初级约束屏 障;但在深水作业过程中,常因内外环境变化使得 压力控制遭到破坏而产生井涌,此时则需要依靠 防喷器组、旋转控制头和节流压井管汇等设备进 行关井和压井作业,重新恢复对深水井的压力控 制,此为防止井喷的二级约束屏障;若没有及时发 现井涌或防喷器失效,则会升级成为井喷,作用于 井喷失控灾变事故扩大后的应急阶段的消防系统 等为三级约束屏障。

2.2 定义安全控制结构

对于井控安全,最有效的策略是在钻井过程中 控制井筒液柱压力,并在溢流出现初期进行及时控 制。据图1所示的反馈控制回路,深水钻井作为复 杂的人机系统,钻台上由工控机和相关操作人员共 同构成控制器(图3),节流压井管汇、节流阀、旋转 控制头和水下防喷器组(图2)构成执行器,井筒压 力为控制过程,随钻测压系统 PWD 和其他信号传 递设备则为传感器。







图 3 中,下行箭头均为控制行为,上行箭头均为 反馈过程。确定井涌及井喷事故可承受风险值域 后,由深水钻井相关人员根据反馈的井筒压力信息 发出控制指令。井控相关人员(包含平台经理、高 级队长、司钻、钻井液录井工和固井工等)形成上下 层控制关系,通过相关传感器反馈所形成的各项信 息,判断是否超过可承受风险阈值,进而通过控制相 关执行器(图 2),实现井控操作。

正常钻进时,PWD 实时监测地层孔隙压力和环 空循环当量钻井液密度,并上传至钻台控制系统,保 证在钻进过程中及时发现溢流;监测到溢流后,停泵 并直接关闭防喷器完成关井操作;关井后,缓慢开 泵,调节节流阀开度控制井口回压,保持井底压力略 高于地层压力以防止新溢流进入井筒;采用司钻法 压井^[20],泵入原密度钻井液,钻井液经钻杆下行至 井底,将溢出流体经井筒环空排出,溢出流体与钻井 液混合物从防喷器经节流管线返回平台并进行分 离;用重钻井液替换原密度钻井液,先后经钻杆、井 筒环空、防喷器与节流管线将钻井液排出。

2.3 不安全控制行为

依据 STAMP/STPA 模型,从4 类不安全控制 行为角度,分析井控指令错误或不足导致的系统 性风险。表1 识别出的不安全控制行为,可转化 为作用于井筒压力的安全约束。为防止井喷事故 的发生,在深水钻井过程中需保证系统控制行为 符合安全约束。

表1 潜在不安全控制行为

Table 1 Potential and unsafe control

不安全控制行为	不安全控制行为导致的风险	安全约束
没有提供 控制行为	钻井过程中,没有监测到溢流; 发现溢流后没有采取措施,导致井涌发生; 井涌发生后,没有关闭防喷器,导致井喷发生	钻井流量计、液面指示仪和录井等监测系统定时检维修, 提高监测预警精度; 发现溢流后及时按照操作规程,重新建立压力平衡; 井涌发生后,立即停钻并关闭防喷器
控制行为 错误或不 安全	控制系统算法错误,钻井液密度反向调节; 注入钻井液密度过大或过小,引发井筒压力与地层压力 失衡	提高控制系统算法精度,正确调节钻井液密度; 注入钻井液密度正确,保证井筒压力与地层压力平衡
控制行为 发生延迟	监测到溢流过晚; 监测到溢流后,停钻、关闭 BOP 等控制信号发出过晚; BOP 因故障原因未及时关闭,导致井喷发生	提高监测系统报警精度; 监测到溢流后,立即发出停钻、关闭 BOP 等控制信号; BOP 定时检维修
控制行为 结束过早	关井时间过短,套压未稳定即开始压井; 压井时间过短,钻井液注入量不足,井筒压力未调整到位	关井后,地层和井筒压力达到平衡后方可压井; 压井后,严格计算钻井液注入量,使井筒压力调整到位

2.4 关键原因分析

在确定不安全控制行为导致的危险后,根据控制 反馈模型以及 STAMP/STPA 的提出的基本控制缺 陷,总结不安全控制行为导致井涌及井喷事故的关键 因素:控制行为执行不充分和反馈信息错误或不足。

2.4.1 控制行为执行不充分

在钻进过程中发现溢流后提供了控制行为,但 执行时控制行为并不充分,包含:

(1)发现井涌并发出防喷器关闭指令后,防喷器未完全关闭。

(2) 泵入钻井液循环量和注入水泥量不足,导 致油井安全余量降低。

(3)关井时,在节流管线与井筒环空未形成循 环回路前即注入压井液,井底压力短时间内快速增 大导致地层压裂。

(4) 压井时, 压井管线中未注入水合物抑制剂, 造成压井管线堵塞。

(5)天然气溢流到达井口时,未判断套压是否 超过套管最大允许压力,因套压过高压漏井筒。

2.4.2 反馈信息错误或不足

反馈信息错误或不足的关键原因包含:

(1)反馈信息产生阶段。测量钻井液密度和井 筒压力的方法存在缺陷^[21];系统各阀门状态信息的 获取不充分或存在缺陷;井控方法的选择不恰当;其 他与井控相关的重要信息没有及时获取或获取方法 错误。

(2)反馈信息传输阶段。有关钻井液密度和井 筒压力的反馈信息不正确、延时或丢失;各级控制人 员的反馈信息不正确、延时或丢失;反馈信息显示有 井涌等危险的发生,但实际并无危险。

(3)外部因素影响。外部(如平台监理)指挥信

息不正确;海洋和地层环境的获取不充分、不正确或 丢失。

3 深水井控工艺流程控制实例分析

STAMP/STPA 分析方法从系统控制和约束的角 度定性分析深水井控作业的安全性,定义安全控制 结构,辨识不安全控制行为和产生危险的关键原因; 以系统性分析为基础,根据井控 STAMP/STPA 分析 流程,对深水钻井作业控制过程进行定量分析,构建 正常钻进—井涌—关井—压井阶段的动力学模型, 以"没有提供控制行为"和"控制行为发生延迟"为 例,将不安全控制行为抽象成发现井涌后未施加约 束以及延时施加关井和压井约束,通过井控实际作 用时机来评估井控危险状况。

3.1 深水井控动力学模型

以深水天然气井为例,进行井涌发生后的井控 动力学分析。天然气进入井筒环空后,使得钻井循 环系统中含有钻井液、地层岩屑、天然气三相流体, 流体在循环系统中为多相流动,满足质量守恒和动 量守恒^[20]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_1 \alpha_1 A) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_1 \alpha_1 v_1 A) = 0, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{s}\alpha_{s}A) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_{s}\alpha_{s}v_{s}A) = q_{s}, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{g}\alpha_{g}A) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_{g}\alpha_{g}v_{g}A) = q_{g}, \qquad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 \alpha_1 v_1 A + \rho_s \alpha_s v_s A + \rho_g \alpha_g v_g A) + \\ \frac{\partial}{\partial z} (\rho_1 \alpha_1 v_1^2 A + \rho_s \alpha_s v_s^2 A + \rho_g \alpha_g v_g^2 A) g \sin \theta A + \\ \frac{\partial (PA)}{\partial z} + \frac{\partial p_f}{\partial z} = 0.$$
(4)

式中,A 为井筒环空横截面积, m^2 ; ρ_1 、 ρ_s 和 ρ_g 为密 度(下标1、s和g分别代表钻井液、地层岩屑与天然 气三相), kg/m^3 ; α 为三相的体积分数,%;v为流 速,m/s; q_s 为单位厚度内产出岩屑的速度, $kg/(m \cdot s)$; q_g 为单位厚度内气侵速度, $kg/(m \cdot s)$;g为自 由落体加速度, m/s^2 ; θ 为井斜角,(°)(本文中为竖 直井,90°); p_t 为系统内沿程阻力损失,MPa。

式(1) ~ (3)分别为液相、固相和气相质量守 恒方程,式(4)为三相动量守恒方程。

实例天然气井的工况为:水深为1828 m,井深 为5304 m,地层温度为100 ℃,海底环境温度为3 ℃,钻杆直径0.1086 m,井筒环空当量直径0.2953 m,隔水管环空当量直径0.47 m,节流管线直径 0.132 m,地层压力54 MPa,管壁平均传热系数为 500 W/(m² · K)。

根据钻井流程和安全控制结构,采用全动态多 相流模拟软件 OLGA 进行动力学仿真,建立深水天 然气井控工艺流程模型,如图 4 所示。OLGA 软件 可对混合流体的质量、动量与能量守恒方程进行数 值求解。

图4中,将钻杆和井筒环空视为连通的U形 管,防喷器简化为1和2两个节流阀,钻杆及隔水管 末端加单向阀1和2以防止模型内部发生倒流,节 流管线末端安装节流阀1。正常钻进时,防喷器1 关闭,防喷器2打开,流体按照钻杆—井筒环空—隔 水管—上部井口流动;发现井涌后关井时,停止钻 井,防喷器2关闭;压井时,防喷器1打开,通过调节 节流阀开度控制压井过程,流体则按照钻杆—井筒 环空—节流管路流动。



3.2 数值计算结果分析

3.2.1 没有提供控制行为

假定在正常钻进 30 min 后发生井涌,"没有提 供控制行为"即不采取关井措施时,井涌初期由于 气体尚未进入下部井口,持液率保持不变,但压力出 现小幅波动;约在 60 min 井涌气体开始进入下部井 口和隔水管,井口压力和持液率开始迅速降低,约在 100 min 降至最低值(图 5(a)),即井筒环空被喷 空。下部井口被喷空后,上部井口约在 100 min 也 迅速被喷空(图 5(b))。因此,气体进入隔水管之 前,系统存在 30 min 相对安全时间,此时压井可有 效防止井涌升级成为井喷;气体进入隔水管之后,约 在 85 min,上下井口压力和持液率均急剧下降,100 min 时形成持续的井喷。





Fig. 5 Relation of pressure and liquid holdup of wellbore with time without shut-in

由图 5 可知,发生井涌后,若因设备或人因失误 等原因而"没有提供控制行为",在井涌阶段末期, 即气体进入隔水管后,井口压力和持液率急速下降, 井涌在极短的时间内发展为井喷^[22]。 3.2.2 控制行为发生延迟

假定在井涌发生后某一时刻(5、15、25 和 35 min)被井控人员发现,立即施加控制和约束措施,即停泵并关闭防喷器,关井 15 min 后开始压井,将 溢流驱替排出。

图 6 为井控作业过程中下部井口持液率变化。 由图 6 可知,发现井涌的时间越晚,进入井筒内的气体越多,井口持液率的最低值越小;在不采取任何控制和约束措施条件下,气体约在 60 min 进入隔水管(图 5(a)),因此,在井涌发生后 5、15 和 25 min 关井时,气体尚未到达井口位置,关井初期井口持液率 未发生明显变化;井涌发生后 35 min 关井时,气体已进入下部井口,关井后井口持液率出现波动。压 井时,注入钻井液后,由于气体与钻井液混合流体在 井筒内上移,造成井口持液率降低;随着钻井液持续 注入,钻井液在混合流体中所占比例逐渐上升,溢流 逐步被排出,井口持液率上升并恢复至正常钻进时 的状态。



图 7 为井控作业过程中下部井口压力变化。由 图 7 可知,随着发现井涌的时间增加,提供控制行为 后井口压力波动值逐渐增大;关井初期,井内气体仍 然进入井筒,造成井口压力增加,且关井越晚,压力 增加值越大。压井时,对于井涌发生后 5、15 和 25 min 提供控制行为的工况,压井初期由于打开防喷 器 1,井口压力快速下降,但随即出现一段时间的相 对稳定状态,这是由于此 3 种工况下,井筒内气体尚 未到达井口,由井口进入节流管线的仍为钻井液;而 对于 35 min 后提供控制行为的工况,由于关井时气 体已经进入到井口,压井后井口压力快速下降。随 着注入钻井液量的增加,井筒内气体和钻井液混合 流体上移,造成井口压力逐步降至最低值;由于井涌 后提供控制行为的时间越晚,井筒内气体越多,气体 与钻井液混合流体密度越低,因此井口压力最低值 也越小;随着混合流体逐步被驱替排出,井口压力上 升,地层和井底压力达到新的平衡,井口压力重新达 到稳定,且高于井涌前的压力。



Fig. 7 Pressure variation of wellbore during well control

综合图 6、7,井涌发现时间越晚,气侵程度越严 重,施加约束时系统内的压力波动越大,对设备造成 损伤越大,进而引发井喷等严重事故后果的可能性 也越大。针对井涌没有及时被监测或判断的情况, 通过对关井和压井时机的合理调整,可以实现井涌、 关井和压井时的井筒压力控制。但是,延时井控必 须满足一定时间范围,综合分析,实例工况的安全操 作时间裕量为30 min。深水地平线井喷事故的直接 原因就是在发生大量溢流的情况下,仍然开泵循环, 而由于"控制行为发生延迟",停泵关井时,井筒已 完全被喷空,防喷器被刺漏后引发强烈井喷。因此, 采用 STAMP/STPA 作为系统性安全分析指导并划 定安全操作时间,根据井控系统安全控制结构,保障 传感器和执行器可靠性,提高包括井控相关人员在 内的控制器的时效性和研判水平,在系统相对安全 的时间内对控制过程实施约束,阻止井涌到井喷事 故的升级。

4 结 论

(1)STAMP/STPA 模型通过辨识系统风险和约 束、定义安全控制结构、指出不安全控制行为和分析 不安全行为产生的关键原因等流程,可对深水井控 作业过程进行安全性分析。

(2)STAMP/STPA 模型将工控机和井控人员作 为控制器,井控装备作为执行器,井筒压力作为控制 过程,信号传递设备作为为传感器。建立的井控过 程控制模型以"没有提供控制行为"和"控制行为发 生延迟"为例,量化了系统安全控制时间裕量,验证 了该方法在指导深水井控安全分析领域的可行性与 · 138 ·

有效性。

(3) 深水井控作为一项复杂系统工程,应用 STAMP/STPA 安全分析方法可以克服传统安全分析 方法无法评价系统组元异常相互作用的缺点;在实 际应用时,作为指导准则与动力学分析方法的结合, 可实现复杂系统安全分析的系统化与定量化操作。

参考文献:

- [1] TAMIM N, LABOUREUR D M, MENTZER R A, et al. A framework for developing leading indicators for offshore drillwell blowout incidents[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2017, 106:256-262.
- [2] 戴永寿,岳炜杰,孙伟峰,等."三高"油气井早期溢流 在线监测与预警系统[J].中国石油大学学报(自然科 学版),2015,39(3):188-194.

DAI Yongshou, YUE Weijie, SUN Weifeng, et al. Online monitoring and warning system for early kick foreboding on "three high" wells[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39 (3):188-194.

- [3] LI W, ZHANG L, LIANG W. An accident causation analysis and taxonomy (ACAT) model of complex industrial system from both system safety and control theory perspectives[J]. Safety Science, 2017,92:94-103.
- [4] PRANESH V, PALANICHAMY K, SAIDAT O, et al. Lack of dynamic leadership skills and human failure contribution analysis to manage risk in deep water horizon oil platform[J]. Safety Science, 2017,92:85-93.
- [5] 李娟,汪厚祥,林海涛.基于 STAMP 的舰载作战系统 软件安全研究[J]. 舰船科学技术,2010,32(9):63-66.

LI Juan, WANG Houxiang, LIN Haitao. Study on STAMP-based software safety for ship combat system[J]. Ship Science and Technology, 2010,32(9):63-66.

- [6] LEVESON N. A new accident model for engineering safer systems[J]. Safety Science, 2004,42(4):237-270.
- [7] LEVESON N. A systems approach to risk management through leading safety indicators [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015,136:17-34.
- [8] 郑磊,胡剑波. 基于 STAMP/STPA 的机轮刹车系统安 全性分析[J]. 航空学报,2017,38(1):246-256.
 ZHENG Lei, HU Jianbo. Safety analysis of wheel brake system based on STAMP/STPA[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017,38(1):246-256.
- [9] 刘杰,阳小华,余童兰,等. 基于 STAMP 模型的核动力 蒸汽发生器水位控制系统安全性分析[J].中国安全 生产科学技术,2014,10(5):78-83.

LIU Jie, YANG Xiaohua, YU Tonglan, et al. Safety analysis on control system for water level of steam generator in nuclear power plant based on STAMP model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014,10(5):78-83.

- [10] 刘朝晖,陈智,吴志强,等. STPA 方法在数字化反应 堆紧急停堆系统安全性分析中的研究与应用[J].核 动力工程,2015,36(增2):157-161.
 LIU Chaohui, CHEN Zhi, WU Zhiqiang, et al. Research and application of STPA to digital reactor shutdown system in NPP for system safety analysis[J]. Nuclear Power Engineering, 2015,36(sup2):157-161.
- [11] 刘金涛,唐涛,赵林,等. 基于 STPA 的 CTCS-3 级列控 系统功能安全分析方法[J].中国铁道科学,2014,35 (5):86-95.

LIU Jintao, TANG Tao, ZHAO Lin, et al. Functional safety analysis method of CTCS-3 level system based on STPA[J]. China Railway Science, 2014, 35(5):86-95.

- [12] OUYANG M, HONG L, YU M, et al. STAMP-based analysis on the railway accident and accident spreading: taking the China: Jiaoji railway accident for example
 [J]. Safety Science, 2010,48(5):544-555.
- [13] 马刚,杜宇鸽,杨熙,等.复杂系统风险评估专家系统
 [J].清华大学学报(自然科学版),2016,56(1):66-76.

MA Gang, DU Yuge, YANG Xi, et al. Risk assessment expert system for the complex system [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2016, 56 (1):66-76.

[14] 王起全,吴嘉鑫.基于 STAMP 模型的地铁拥挤踩踏 应急联动系统设计[J].中国安全科学学报,2016,26 (12):158-162.
WANG Qiquan, WU Jiaxin. Designing a linkage system for response to subway stampede accidents based on

STAMP model [J]. China Safety Science Journal, 2016,26(12):158-162.

- [15] RAUSAND M. 风险评估理论、方法与应用[M]. 刘一 骝,译. 北京:清华大学出版社, 2013:134.
- [16] 褚道余. 深水井控工艺技术探讨[J]. 石油钻探技术, 2012,40(1):52-57.
 CHU Daoyu. Well control technology in deepwater well
 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012,40(1):52-57.
- [17] BHANDARI J, ABBASSI R, GARANIYA V, et al. Risk analysis of deepwater drilling operations using Bayesian network[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,38:11-23.

 [18] 刘刚,李伯尧,徐加兴,等.应用贝叶斯网络识别深水 井控主要风险诱因[J].中国安全科学学报,2015,25
 (5):157-163.
 LIU Gang, LI Boyao, XU Jiaxing, et al. Application of

Bayesian network to identifying principal risk factors in deepwater well control[J]. China Safety Science Journal, 2015,25(5):157-163.

- [19] ABIMBOLA M, KHAN F, KHAKZAD N, et al. Safety and risk analysis of managed pressure drilling operation using Bayesian network [J]. Safety Science, 2015,76: 133-144.
- [20] 王志远,孙宝江,高永海,等. 深水司钻法压井模拟计算[J]. 石油学报,2008,29(5):786-790.
 WANG Zhiyuan, SUN Baojiang, GAO Yonghai, et al.

Simulation computation of well killing with deepwater driller's method [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29

(5):786-790.

 [21] 田家林,杨应林,杨令瑞,等. 井喷失控井天然气喷量 测定计算与实验研究[J]. 天然气工业,2017,37(3): 77-82.

TIAN Jialin, YANG Yinglin, YANG Lingrui, et al. Estimation of gas blowout volume in wells with uncontrolled blowout and laboratory studies [J]. Natural Gas Industry, 2017,37(3):77-82.

[22] 孙宝江,王志远,公培斌,等. 深水井控的七组分多相 流动模型[J]. 石油学报,2011,32(6):1042-1049.
SUN Baojiang, WANG Zhiyuan, GONG Peibin, et al. Application of a seven-component multiphase flow model to deepwater well control [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(6):1042-1049.

(编辑 沈玉英)