

本文引用格式: 李玉坤,庞玉川,李汝强,等.井下油管内切割装置开发与应用[J].自动化与信息工程,2022,43(3):37-43.

LI Yukun, PANG Yuchuan, LI Ruqiang, et al. Development and application of downhole tubing internal cutting device[J]. Automation & Information Engineering, 2022,43(3):37-43.

井下油管内切割装置开发与应用*

李玉坤¹ 庞玉川² 李汝强³ 刘玉国⁴

陈帅¹ 吴涛¹ 杨进川¹ 王鄯尧¹ 彭启凤¹

(1.中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580

2.中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580

3.胜利油田分公司工程技术管理中心, 山东 东营 257000

4.胜利油田分公司石油工程技术研究院, 山东 东营 257000)

摘要: 油气田开发中后期生产过程中, 油管砂埋、砂卡现象多发。为准确高效解卡, 并最大限度地减少油管遇卡造成的损失, 研制井下油管内切割装置。该装置通过电动系统驱动; 利用锚爪和扶正器固定在油管内壁; 步进电机带动滚珠丝杠转动, 圆锥体逐步向外推出刀具至与被割油管内壁接触; 电动马达带动刀具高速旋转, 从内部切割油管。室内测试结果表明: 该装置可准确高效地完成油管切割, 切割后刀齿完整性好, 油管切口平整、光滑, 作业效果良好; 操作简单、自动化程度高, 为处理遇卡油管提供新思路, 具有较好的应用前景。

关键词: 切割装置; 油管内切割; 解卡; 井下作业

中图分类号: TE935

文献标识码: A

文章编号: 1674-2605(2022)03-0007-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2022.03.007

Development and Application of Downhole Tubing Internal Cutting Device

LI Yukun¹ PANG Yuchuan² LI Ruqiang³ LIU Yuguo⁴ CHEN Shuai¹

WU Tao¹ YANG Jinchuan¹ WANG Shanyao¹ PENG Qifeng¹

(1.College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum Huadong, Qingdao 266580, China

2.College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum Huadong, Qingdao 266580,

China 3.Engineering Technology Management Center, Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, China

4.Petroleum Engineering Technology Research Institute, Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, China)

Abstract: In the middle and later stage of oil and gas field development, the phenomenon of tubing sand burial and sand sticking occurs frequently. In order to realize accurate and efficient unblocking and minimize the loss caused by tubing jamming, a downhole tubing inner cutting device is developed. The device is driven by an electric system; The anchor claw and centralizer are used to fix it on the inner wall of the oil pipe; The stepping motor drives the ball screw to rotate, and the cone gradually pushes out the tool to contact the inner wall of the cut pipe; The electric motor drives the cutter to rotate at high speed to cut the oil pipe from the inside. The indoor test results show that the device can complete the cutting accurately and efficiently, the integrity of the cutter teeth after cutting is good, the oil pipe incision is flat and smooth, and the operation effect is good; The operation is simple and the degree of automation is high, which provides a new idea for dealing with stuck tubing and has a good application prospect.

Keywords: mechanical cutting; inside tube cutting; remove sticking; underground operation; tubing

0 引言

随着油田勘探、开采的不断深入, 油井事故也愈

发频繁^[1], 尤其在油田开发的中后期, 经常遇到油管砂埋、砂卡现象。若处理措施不当, 可能使作业复杂

化,造成作业事故,甚至油气井报废^[2]。目前,处理油管遇卡的常用方法有倒扣法、切割法^[3]。其中,倒扣法劳动强度大、效率低、修井费用高;切割法大都采用爆炸切割,断口极不规则^[4],附近留有残渣,且切割后的油管口径比原口径大,影响下一步作业^[5]。受套管与油管环空间隙的限制,管外套铣作业无法实现,油管内切割成为目前主要的解卡方式^[6]。

在国内,目前普遍采用的油管内切割方式有电缆切割、连续油管输送切割、钻具带油管割刀切割等。现有切割方式对井身结构、管柱尺寸以及修井设施条件有较高要求,尤其在套管内处理2-7/8"油管,工具、输送钻具等强度受到极大限制,各种措施得不到有效实施,处理难度较大。为解决现有切割方式在处理2-7/8"油管时存在的技术限制,本文开发一套井下油管内切割装置。该装置配备锚爪和扶正器,可保证切割稳定;利用电动马达驱动刀具在遇卡油管内部高速旋转切割;采用电力驱动便于精确控制刀具进给,

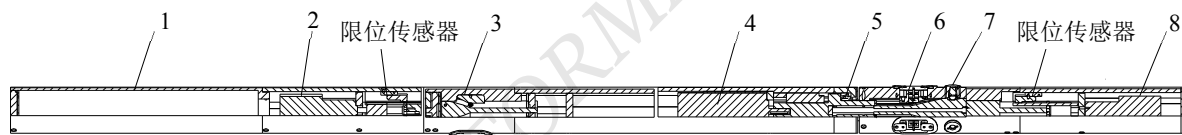
监控切割过程^[7];操作简单便捷,自动化程度高,且切口平滑,避免管柱塑性变形和屈曲变形等不可逆损伤的发生^[8];延长油井使用寿命,为油井遇卡处理提供一种便捷可靠的方法。

1 装置组成及工作原理

1.1 装置组成

井下油管内切割装置主要由电动马达、锚定机构、刀具总成、旋转扶正机构等部分组成,结构如图1所示。

图1中,电路板盒子内装有印制电路板,是整个装置的控制系统;锚爪经圆锥体推出,将整个装置固定在油管内壁;导电滑环将导线连接到旋转切割部件,解决导线缠绕问题;刀具总成利用滚珠丝杠传动将电机的旋转运动转变成刀具的径向进给;旋转扶正机构安装在刀具下端,减小因马达工作而产生的摆动。



1—电路板盒子; 2—锚固步进电机; 3—锚爪; 4—电动马达; 5—导电滑环; 6—刀具总成; 7—旋转扶正机构; 8—推刀步进电机。

图1 井下油管内切割装置结构示意图

1.2 装置工作原理

首先,利用电缆将井下油管内切割装置下放到油管的切割位置;然后,通过地面的直流稳压电源给装置供电,锚定机构将装置固定在油管内壁,使装置在切割时不产生轴向位移和环向偏移^[9];最后,推刀步进电机与电动马达启动,同时带动旋转扶正机构和刀

具推出并旋转,实现油管内切割作业。

2 装置结构设计

2.1 锚定机构

锚定机构由锚固步进电机、联轴器、滚珠丝杠、锚爪、圆锥体、限位传感器和压缩弹簧等组成,结构如图2所示。

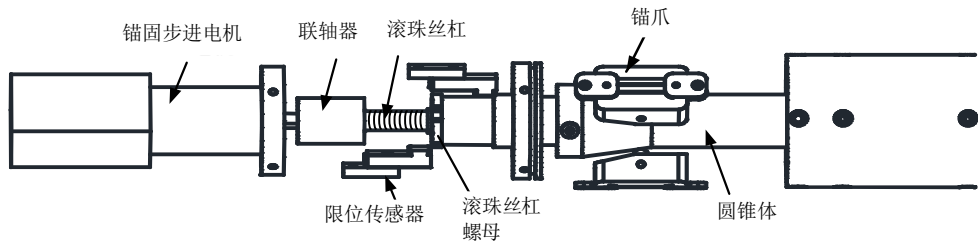


图2 锚定机构示意图

锚定机构工作时，锚固步进电机带动滚珠丝杠转动，圆锥体轴向移动推出锚爪。当限位传感器感应到滚珠丝杠螺母时，锚爪刚好锚定在油管内壁^[10]，为整个装置提供支撑。切割完成后，压缩弹簧使锚爪回缩。

2.2 旋转扶正机构

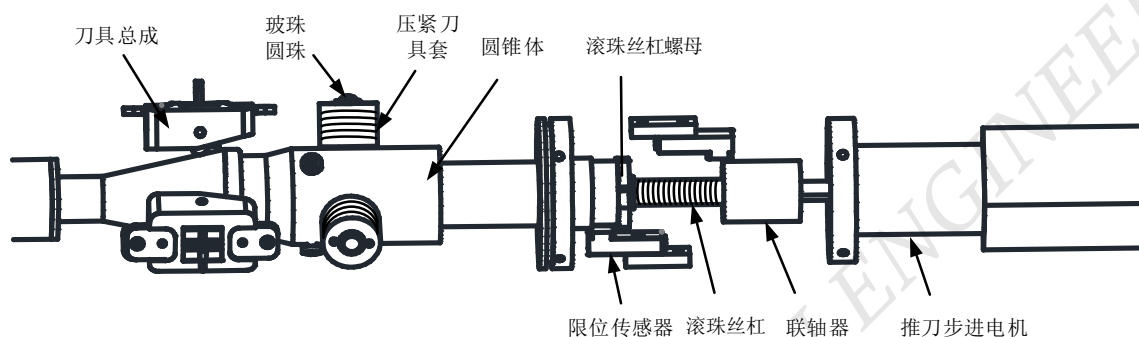


图3 旋转扶正机构示意图

旋转扶正机构可使刀具的受力尽量保持相同^[10]，减少刀具磨损和电动马达堵转，改善切割质量。图3中，玻璃圆珠是可以滚动的弹性球体，圆锥体移动使玻璃圆珠伸出并接触管壁，令装置在工作过程中始终保持居中状态，提高切割稳定性^[13]。切割完成后，压缩弹簧使玻璃圆珠回缩。

3 装置主要技术参数及工艺流程

3.1 主要技术参数

井下油管内切割装置的主要技术参数如表1所示。

表1 井下油管内切割装置的主要技术参数

参数名称	数值大小
设备总长	1 396.5 mm
设备外径	$\varnothing 55$ mm
刀具伸出最大外径	$\varnothing 76$ mm
工作电压	24 V 直流电压
切割对象尺寸	油管内径 $\varnothing 62$ mm 、外径 $\varnothing 73$ mm
刀具材料	高速钢
切割转速	380 r/min

受井斜及自身重力的影响，井下油管内切割装置在切割过程中会有轻微偏心，降低了油管内切割作业的成功率^[11]。在刀具下端安装旋转扶正机构，有助于在油管切割过程中进一步稳定并扶正刀具，防止装置离心晃动而割坏外层套管^[12]。旋转扶正机构由压紧刀具套、玻璃圆珠等组成，如图3所示。

3.2 工艺流程

井下油管内切割装置通过印制电路板控制整个切割流程，切割工艺流程如图4所示。

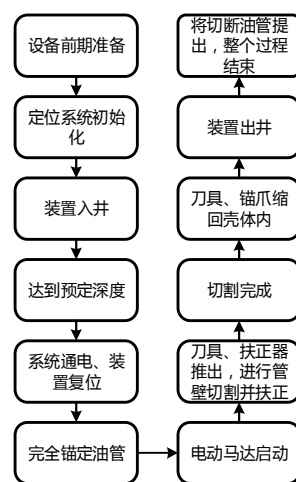


图4 井下油管内切割装置工艺流程图

1) 利用电缆将装置下放到油管内卡点位置，通电，装置复位。

2) 锚固步进电机的输出力矩经过滚珠丝杠传动使圆锥体向下移动，直至限位传感器感应到滚珠丝杠螺母，此时锚爪完全撑开并紧贴油管内壁，完成锚定。

3) 电动马达和推刀步进电机同时开始工作, 装置下部高速旋转, 刀具总成与旋转扶正机构逐渐向外推出, 切割深度不断增加直至限位传感器感应到滚珠丝杠螺母, 此时油管被完全割开。

4) 上、下部减速步进电机反转, 使圆锥体复位, 刀具总成和锚爪在压缩弹簧的作用下回缩; 直至达到初始状态即可上提装置, 切割过程结束。

4 驱动电机的选型计算与分析

井下油管内切割装置用到的电机分别为锚定机构驱动电机、刀具推出驱动电机、旋转驱动电机, 分别用于锚爪推出、刀具总成推出和装置下部旋转。

4.1 锚定机构驱动电机

锚定机构是由锚固步进电机带动滚珠丝杠转动, 使圆锥体移动, 进而推出锚爪。锚定机构驱动电机的总负载包括 2 个密封圈的摩擦力、锚爪与圆锥体的摩擦力和圆锥体重力。

已知圆锥体的材质为 45 号钢, 密度 $\rho = 7.85 \text{ g/cm}^3$ 。

弹性联轴器的传动效率 $\eta_0 = 0.99 \sim 0.995$; 滚珠丝杠的传动效率 $\eta_1 = 0.85 \sim 0.95$; 球轴承的传动效率 $\eta_2 = 0.99$; 滚珠丝杠导程 $P = 2 \text{ mm}$ 。

根据经验公式可得密封圈的摩擦力为

$$f_{\text{密封圈}} = \pi d_1 (0.33 + 0.97 \mu d_0 P_1) \approx 143.37 \text{ N} \quad (1)$$

式中:

d_1 ——密封圈内径, mm;

μ ——硅胶泊松比, $\mu = 0.48$;

d_0 ——密封圈截面直径, mm;

P_1 ——密封油压, 对于 2500 m 深井, 关井稳定后立管压力 $P_1 = 2.45 \text{ MPa}$ 。

根据受力分析可得 1 个锚爪与圆锥体之间的摩擦力为

$$f_{\text{锚爪}} = \frac{F_f}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha} = \frac{k_2 m_{\text{锚爪}} g}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha} = \frac{0.15 \times 7 \times 7.85 \times 9.8}{1000 \times 0.26 \times 0.97} = 0.32 \text{ N} \quad (2)$$

式中:

F_f ——锚爪与油管内壁之间的摩擦力, N;

k_2 ——45 号钢的静摩擦系数, $k_2 = 0.15$;

α ——圆锥体斜面斜度, 取 $\alpha = 15^\circ$ 。

圆锥体重力为

$$G_{\text{圆锥体}} = \rho \cdot V_{\text{圆锥体}} \cdot g = \frac{45 \times 7.85 \times 9.8}{1000} \approx 3.5 \text{ N} \quad (3)$$

综上所述, 求得锚定机构驱动电机的总负载为

$$F_{\text{总}} = 2f_{\text{密封圈}} + 3f_{\text{锚爪}} + G_{\text{圆锥体}} = 291.2 \text{ N} \quad (4)$$

根据公式 $F_{\text{总}} = 2\pi M \cdot \eta_0 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 / P$ 推导可得滚珠丝杠需锚定机构驱动电机提供的力矩为

$$M = \frac{F_{\text{总}} \cdot P}{2\pi \eta_0 \eta_1 \eta_2} = \frac{291.2 \times 2 \times 10^{-3}}{2\pi \times 0.99 \times 0.9 \times 0.99} \approx 0.105 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5)$$

若将锚爪完全推出, 圆锥体需向下移动 23.5 mm, 滚珠丝杠导程为 2 mm, 故滚珠丝杠转速 (即电机输出轴转速) 需达到 11.75 r/min。又由于锚定机构驱动电机安装在装置内部, 结构紧凑, 故应使用尺寸小、重量轻、制造精度高的电机。本文选取高精度 28 微型行星减速步进电机 (28HS5006A4X-G), 其力矩最大可达 2 N·m。在带动负载的情况下, 最佳工作转速是 200~400 r/min, 减速比为 27, 输出轴转速在 7.4~14.8 r/min。

4.2 刀具推出驱动电机

刀具推出驱动电机负载与锚定机构相差不大, 同理也可选用 28HS5006A4X-G 减速步进电机。若将刀具总成完全推出, 圆锥体需移动 36.8 mm, 即滚珠丝杠需要转动 18.4 r。因此, 刀具推出驱动电机输出轴转速在 7.4~14.8 r/min, 可在 2 min 内完全推出刀具, 满足电机工作条件。

4.3 旋转驱动电机

刀具材料为高速钢, 耐磨耐用。若要切断油管, 总进刀量需大于 5.5 mm。为保证切割流畅, 刀具的主轴转速控制在 300~500 r/min。旋转驱动电机采用大扭矩直流减速电机 (RS775), 额定转速为 380 r/min, 最大力矩达 18.5 kgf·cm。

5 室内切割效果分析及注意事项

5.1 室内模拟切割及效果分析

对井下油管内切割装置进行室内模拟应用实验。利用三脚试验架使试验管柱垂直固定于地面；将井下油管内切割装置放入试验管柱内，直流稳压电源提供 24 V 稳定电压，装置开始自动切割油管，如图 5、图 6 所示。利用印制电路板中的 LED 灯监控切割过程，20 min 后显示切割完毕，油管被完全切断，切割过程快速稳定，满足遇卡油管的切割作业要求。

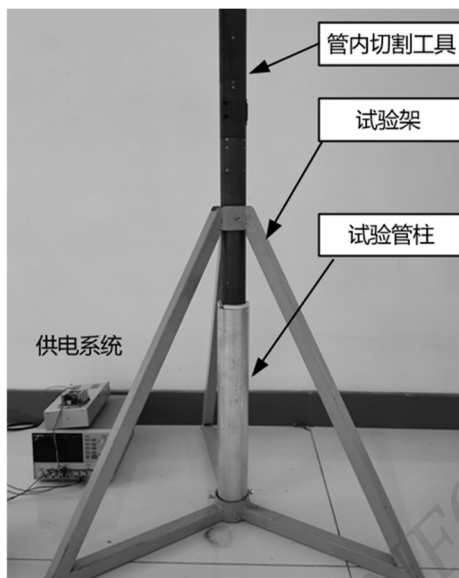


图 5 室内模拟切割（作业前）

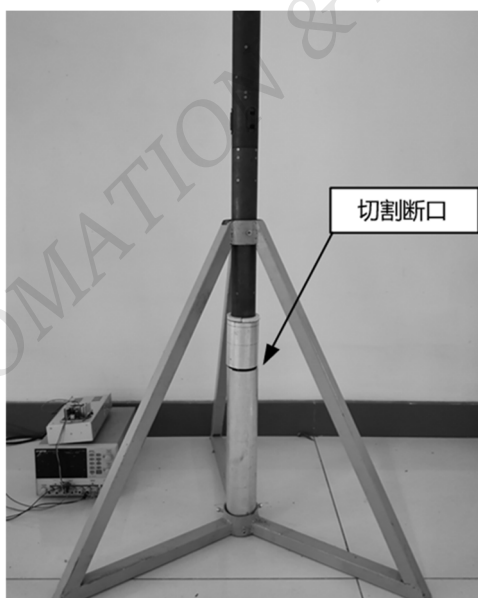


图 6 室内模拟切割（作业后）

切割完成后上提装置，发现刀具无明显磨损，如图 7、图 8 所示。试验管柱断面光滑平整，如图 9 所示，整体效果良好。



图 7 刀具状况（切割作业前）

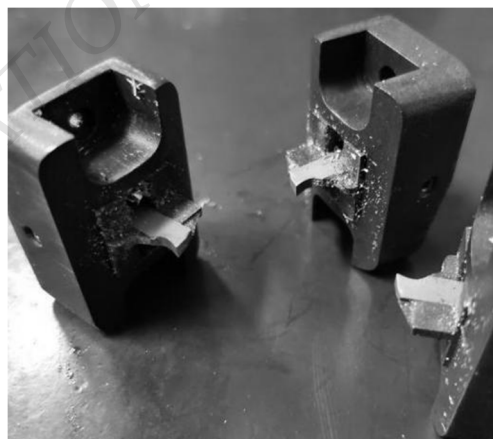


图 8 刀具状况（切割作业后）



图 9 切割断面

5.2 注意事项

为确保切割的稳定性,提高一次切割成功率,需注意如下事项:

- 1) 该装置目前适用于内径为 $\phi 62$ mm、外径为 $\phi 73$ mm 的油管,可移植到井下更大尺寸油管切割;
- 2) 装置下井前应先通井,采用比内割刀外径大 3 mm 左右的通井规通至切割深度以下 5 m,以保证装置下井时畅通无阻^[14];
- 3) 装置下井前,需先复位,确保刀头处于缩回状态,避免下放过程中刀片磨损;刀片若磨损不仅减弱切削能力,还会加剧刀具振动,影响切割成功率^[15];
- 4) 检查装置各螺栓是否拧紧,防止漏水;装置各管筒之间的接口螺纹需保持清洁,并涂螺纹密封胶^[16];
- 5) 装置下放过程要平稳,速度均匀,如下放遇阻,应立刻上提装置检查原因;
- 6) 使用后清除刀具总成、锚爪部位的油污、泥渣,检查各构件的安全性,涂防锈油并存放于干燥通风处。

6 结语

井下油管内切割装置是一种快速处理油管遇卡的有效修井装置,具有较强的实用性。本文主要解决的问题如下:

- 1) 滚珠丝杠传动精确控制刀具进给,并配备限位传感器,可准确控制进给量,不仅满足了装置结构简单、操作方便的需求,还改善了刀具的工作环境,确保切割准确、高效;
- 2) 锚定机构中的 3 个锚爪由圆锥体同步推出,确保装置与油管内壁同轴心;弧形曲面的锚爪使装置更加紧固地固定在油管内壁,起到支撑作用;
- 3) 旋转扶正机构可稳定并扶正割刀,解决了切割过程摆动大,易偏心的问题,提高切割成功率;
- 4) 该装置刀具材质可根据不同油管材质进行调整,常用强度高、耐磨的高速钢,可提高切割速度和使用寿命,且切割后断面规则;
- 5) 通过电动马达带动装置下部高速旋转,运行

平稳准确;与聚能切割相比,切割后的管径大小基本不变且更加平整,有利于后续操作;与化学切割相比,切割过程更加环保;与大力拉拔和活动解卡相比,可避免出现管塑性变形和屈曲变形等不可逆损伤。

实验测试表明,井下油管内切割装置安全可靠,作业性能稳定,切割后刀具完整,油管切口平滑,验证了该装置的可靠性。在处理油管遇卡方面有技术优势,值得继续研究和推广。

参考文献

- [1] 赵传伟,张辉,吴仲华,等.井下管柱电控切割工具的研制与试验[J].石油机械,2020,48(12):117-122.
- [2] 许清海,胡晋阳,熊燃,等.海上油田解卡工艺技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2018,38(9):185-186.
- [3] 刘海明,叶红,田明,等.连续油管机械切割技术在永 25-11 井的应用[J].复杂油气藏,2014,7(4):79-81.
- [4] JUPITER F L. Explosive removal of offshore structures[R]. USA: Continental Shelf Associate, Inc., 2004.
- [5] 郭红军,张宝和,刘俊峰,等.镁粉切割工具在 YH23-1-26 气井事故处理中的应用[J].石油天然气学报,2008(3):387-388.
- [6] 杜丙国.修井卡钻液解除理论分析与工艺技术研究[D].东营:中国石油大学(华东),2013.
- [7] 翟城城.电缆投送套管切割器的研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
- [8] 杜鑫芳,李志勇,王光明,等.热熔式内切割工艺在连续管解卡中的应用[J].石油机械,2016,44(5):106-108.
- [9] 王春光,周玉林,张志利,等.一种海洋平台清洗机器人吸附机构研究[J].机床与液压,2020,48(15):22-26.
- [10] 杜丙国,马清明.小直径管内水力切割器研制与应用[J].石油矿场机械,2013,42(1):78-80.
- [11] 李贵川,章桂庭,寇联星,等.水平井裸眼段防砂管柱水力内切割技术探讨[J].石油矿场机械,2011,40(8):68-71.
- [12] 孙巧雷,肖苏宸,廖振武,等.机械式内割刀的设计与研究[J].内江科技,2015,36(8):56,42.
- [13] 周伦,尹铁,张锋,等.管道全位置焊接机器人结构设计与分析[J].机床与液压,2020,48(21):36-40.
- [14] 朱涛,杨雄,吴占关,等.机械式内割刀切割技术在取换套施工中的研究与应用[J].化工设计通讯,2018,44(1):62-63.
- [15] 杨子玉.机械式内割刀切削性能影响因素研究[J].辽宁化工,2018,47(12):1268-1271.
- [16] 闫泓,张海鹏,张志良.集成深井套铣、切割、打捞套管工具[J].设备管理与维修,2019,447(9):30-31.

作者简介：

李玉坤，男，1973年生，博士，副教授，主要研究方向：机械工程、结构优化、力学性能测试及仿真。E-mail: mliyk@qq.com

庞玉川，男，1997年生，在读硕士研究生，主要研究方向：海洋石油装备技术。E-mail: 15553579981@163.com

李汝强，男，1974年生，工程师，主要研究方向：井下作业技术管理。E-mail: liruqiang.slyt@sinopec.com

刘玉国，男，1976年生，高级工程师，主要研究方向：采油工艺研究与石油机械设计。E-mail: liuyuguo.slyt@sinopec.com

陈帅，男，1997年生，在读硕士研究生，主要研究方向：结构安全。E-mail: 154228476@qq.com

吴涛，男，1997年生，在读硕士研究生，主要研究方向：结构安全。E-mail: 1084293337@qq.com

杨进川，男，1996年生，在读硕士研究生，主要研究方向：结构强度及可靠性。E-mail: 2990367636@qq.com

王鄯尧，男，1997年生，在读硕士研究生，主要研究方向：结构强度及可靠性。E-mail: wangshanyaoup@163.com

彭启凤（通信作者），女，1987年生，博士，工程师，主要研究方向：磁测应力、管道及电梯振动、特种设备结构可靠性分析。E-mail: pqf@upc.edu.cn

版权声明

为保护期刊和作者的合法权益，明确期刊与作者的著作权属，依照《中华人民共和国著作权法》的有关规定，就涉及的论文版权事宜特作以下声明：

1、凡投稿本刊的论文，作者应保证投稿论文为其原创作品，不涉及侵权和泄密问题，并保证职务作品排序无知识产权纠纷；

2、本刊已与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司签订协议，许可其以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文；作者的相关著作权使用费本刊以稿费形式一次性支付，如有异议，请在来稿时注明，本刊将做适当处理；

3、凡发表在本刊的论文，本刊均取得该论文的汇编权、翻译权、印刷版及电子版复制权、网络传播权和发行权等；任何其他期刊、媒体、网站或个人未经本刊书面授权均不得转载、转贴或以其他方式复制、发布、发表本刊论文；

4、经本刊授权许可的期刊、媒体、网站及各收录源，在下载使用本刊论文时必须注明文章原载出处，否则将视同侵权；对于不当转载或引用本刊论文而引起的民事纷争、行政处罚或其他损失，由相关责任人承担。

《自动化与信息工程》编辑部

二〇二二年一月一日