

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.03.005

蠕动式石油井下爬行器液压系统的设计与研究^{*}

高 峰¹, 吴 庆², 詹保平², 杨睿凯¹, 王慧武¹, 王 琰¹

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安威盛电子科技股份有限公司, 陕西 西安 710304)

摘要:针对在水平井和大斜度井的测井、钻井等作业过程中,测井仪等工具无法靠重力下放到工作井段的问题,对大牵引力蠕动式爬行器的液压系统及其技术参数、压力特性进行了研究,提出了一种以工作液为液压传动介质的连续油管蠕动式大牵引力爬行器。根据爬行器工作原理,设计了爬行器的液压系统,根据井下作业的要求,确定了液压系统中各液压控制阀的技术参数,利用 AMES-IM 仿真软件对该液压系统进行了建模,设置了合理的系统参数,进行了液压系统的性能仿真分析研究,获得了爬行器液压系统中安全阀、前后卡爪切换控制阀、前后推进缸切换控制阀等主要控制阀的压力特性曲线。研究表明:所研究设计的液压系统可以有效保证爬行器运动的可靠性,各控制阀的参数可以保证爬行器足够的牵引力,为后续样机的研制提供了理论依据。

关键词:蠕动式爬行器;液压系统设计;驱动力;性能分析;石油井

中图分类号:TH137.8

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)03-0257-05

Research and design of hydraulic system for peristaltic crawler in oil downhole

GAO Feng¹, WU Qing², ZHAN Bao-ping², YANG Rui-kai¹,
WANG Hui-wu¹, WANG Yan¹

(1. School of Mechanical and Precision Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an WeiSheng Electronics Technology Co., Ltd., Xi'an 710304, China)

Abstract: Aiming at solving the problem that the drilling tools and logging instrument can't be put to the drilling sections only by gravity during drilling operation in horizontal well and highly-deviated well, a coiled tubing peristaltic crawler with high dragging ability was proposed, which used working fluid as hydraulic transmitting medium to provide power for drilling and putting down instrument. According to the working principles of crawler, a hydraulic circuit intended to realize creep walking of the crawler was designed with whole determined technical parameters of valves. After modeling hydraulic system and setting of systematic parameters properly, the dynamic performance of hydraulic circuit was simulated and analyzed with the software AMESIM, by which the changing laws of internal force for safety valve, switching valves between fore and rear claws as well as fore and rear progressing cylinders were obtained. The results show that the presented hydraulic system can meet the reliability requirements on peristaltic motion, and performance parameters of all control valves can ensure the enough dragging fore, which would lay the theoretical foundation for developing prototype.

Key words: peristaltic crawler; hydraulic system design; driving force; performance analysis; oil wells

0 引 言

在水平井和大斜度井的钻井、测井过程中,钻具、

测井仪等工具下放到一定斜度的井段时,无法靠重力继续下放到工作井段,这时需要一种工具将钻井、测井仪等工具输送到预定位置。爬行器则是一种操作方

收稿日期:2018-09-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775432);西安市科技计划项目(2017080CG/RC043(XALG029))

作者简介:高峰(1969-),男,宁夏中卫人,博士,教授,博士生导师,主要从事数控装备的设计分析及检测控制方面的研究。E-mail:gf2713@vip.

便、工作效率高、使用成本相对较低的输送设备。具有大牵引力的爬行器可以用于水平井钻井,代替传统钻井作业方法,不需使用钻柱,可降低钻井成本^[1-3]。目前,在爬行器的研制方面,国内的研究起步较晚,已开发的管内机器人大多数为轮式驱动方式,这也是大中型管道用机器人中实用化程度最高、数量最多的一种。轮式管道机器人虽具有结构简单、行走平稳、速度快、效率高、易于控制等诸多优点,但是这种爬行器输送能力小、体积大,尚未应用在石油井下管道中。

国外的石油井下输送工具相对成熟,如 WELLTEC 公司牵引爬行器是一种靠液压驱动的轮式爬行器^[4],它具有工作稳定、爬行速度快等优点,但是输送力较小;SONDEX 公司的牵引爬行器主要由张力测量装置、电路系统、电机及传动系统、爬行轮和扶正器组成,是目前牵引爬行器中唯一采用电机和机械传动机构来控制驱动牵引爬行器的^[5-7],其不足之处在于爬行轮数量少,在井下管道内的越障能力、牵引能力受到限制,只适用于割缝箍管完井,对于射孔完井,射孔眼的结构限制了爬行轮牵引爬行器的应用;SMARTTRACT 公司的抓靠臂滑动式牵引爬行器是最新发展的具有双向的推/拉力牵引爬行器系统^[8],爬行器由电缆接头、电路部分、液压部分和上、下抓靠臂组成,抓靠臂与套管内壁是面接触,在同等正压力条件下可获得更大的附着力,能提供较大的牵引力,对动力源功率需求较小,抓靠臂式的爬行方法可以有选择地与管壁间歇式接触,在管内的越障能力强,该牵引爬行器的应用范围较广,适用于割缝箍管完井和射孔完井,其最大不足之处在于整体结构的长度偏大,运动不灵活。

在我国,这方面还位于起步阶段,水平井输送仪器的井下工具大多为进口。陈浩发明了一种克服水平井段钻进靠钻铤重力的爬行器,其负载能力大,但适应性较差、体积庞大;高进伟等人^[9]设计的水平井井下爬行器,实现了在变径井的自适应功能,解决了容易侧翻的问题,具有良好的适应性,但无法控制爬行器在井内的旋转。

为了提高爬行器对大牵引力要求,及对管道结构、内壁的自适应性,蠕动式运动方式应运而生^[10-11]。王嵩等^[12]提出了一种基于形状记忆合金(SMA)的管道蠕动机器人,外观成正方体形,通过协调控制十二组 SMA 直线驱动器的动作,可以实现机器人在管道内沿多个方向的蠕动前行;张延恒等^[13]提出了一种采用电磁吸合装置驱动双球头+柔性软轴结构,并能实现自发电的管道柔性蠕动机器人,它通过自身的驱动装置在管道内实现了有动力蠕动行走,还可以在流动液体

环境下利用压差实现无动力运动。但上述蠕动式爬行器输送能力很小,尚不足以输送井下工具,爬行器的可靠性对环境要求也很高。液压驱动蠕动式石油井下爬行器作为一种新型的井下输送工具,由于其具有大推力的输送能力,不仅可以输送常规的测井仪器,还可以代替传统钻井设备,输送钻杆及钻头,提供钻压力,完成钻井作业。徐洪等人^[14]设计的蠕动管道爬行器具有自动调节的功能,能适应各种弯曲的管道,但是其摩擦力会随着输送载荷的增大而增大;曹建树等人^[15]设计的蠕动式管道爬行器,利用液压系统和液压油路完成了管道的作业,但在一定载荷情况下存在着冲击振动。作为蠕动式石油井下爬行器的动力源,液压回路是最为重要的部分,它不仅控制整个爬行器完成蠕动式爬行前进,还要能为钻头提供 2 t 以上的钻压力,因此,液压回路的设计是否合理,关系到爬行器在工作工程中的稳定性、可靠性和安全性。

本文将提出一种以液压系统作为驱动力控制的爬行器,采用液动换向阀设计具有高低压保护的液压系统,使用 AMESim 搭建液压回路模型,以分析爬行器在工作各阶段的驱动性能。

1 爬行器液压系统设计

液压系统主要为爬行器提供动力,并控制爬行器实现蠕动式前进。爬行器及其液压系统图如图 1 所示。

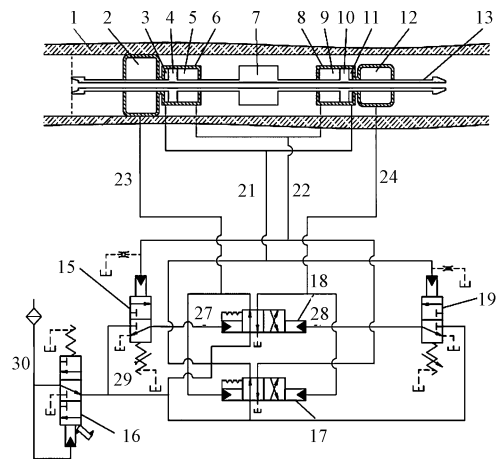


图 1 爬行器及其液压系统图

1 - 水平井;6,8 - 推进缸;7 - 控制单元;13 - 钻头;15,19 - 液动换向阀;16 - 安全阀;17 - 推进切换控制阀;18 - 卡爪切换控制阀;4,10 - 活塞;2,12 - 卡爪

从图 1 中可以看出:该爬行器包括卡紧单元 2、12,活塞缸推进单元 4、6 及 8、10,液压控制单元 7。其中,液压控制单元 7 的原理图展开如图 1 中下半部分的液压回路。

爬行器主要技术参数如表1所示。

表1 爬行器主要技术参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
外径/mm	100	活塞缸行程/mm	500
伸张外径/mm	145	最大压差/MPa	11
内径/mm	13	最大输出力/N	22 600
长度/m	6.5	爬行速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.1-0.2
工作温度/($^{\circ}\text{C}$)	140		

爬行器分为前后两个卡爪,在工作中,前后卡爪依次卡紧井壁,为爬行器推进钻井设备提供足够的摩擦力,避免爬行器打滑。活塞缸推进单元为爬行器的推进部件,分为前后两个活塞推进缸,在前后卡爪依次卡紧井壁时,前后活塞推进缸依次动作提供前进驱动力。液压控制单元是爬行器的关键组成部分,由液压回路和液压阀组成,用于控制爬行器完成蠕动式爬行。

爬行器的爬行动作为四步一循环,使爬行器在井下具有连续爬行能力,拖动井下设备前进。

爬行器蠕动式爬行动作分解如图2所示。

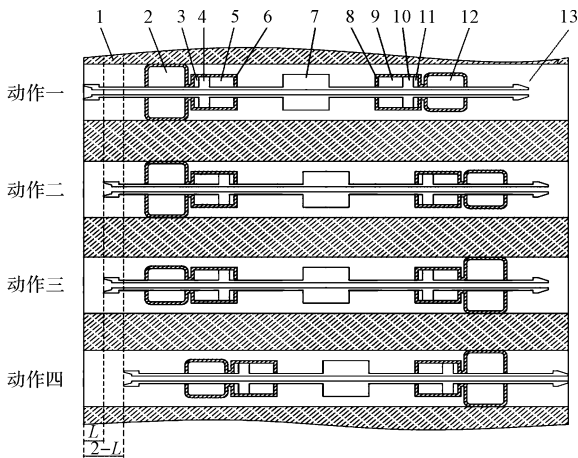


图2 爬行器蠕动式爬行动作分解

1-井壁;2-后卡爪;3,9-后活塞腔;4,10-活塞;5,11-前活塞腔;6-后推进缸;7-控制单元;8-前推进缸;12-前卡爪;13-钻头

由图2可知具体的动作如下:(1)当后卡爪2夹紧井壁,前卡爪12撤回后,后活塞腔3开始进油,推动活塞4前进,同时,前活塞腔11进油,前推进缸8和前卡爪12前进,前活塞腔5和后活塞腔3中的工作液流至爬行器外;(2)当活塞4和10完成一个行程后,后卡爪2开始撤回,前卡爪12开始夹紧;(3)当前卡爪12夹紧井壁,后卡爪2撤回后,前活塞腔5开始进油,后推进缸6和后卡爪2前进,同时,后活塞腔9进油,推动活塞10前进,前活塞腔3和后活塞腔11中的工作液流到爬行器外;(4)当活塞4和10完成一个行程后,后卡爪2开始夹紧,前卡爪12开始撤回,至此,爬行器回到初始状态,此时爬行器前进了两个活塞行程,

如此循环往复,连续爬行。

如图1所示,实现上述4个动作的爬行器的液压控制回路主要由5个通过油路连接的液压阀构成,包括一个安全阀16,一个活塞缸切换控制阀17,一个卡爪切换控制阀18,两个换向阀15、19。其中,卡爪切换控制阀用来控制前后卡爪的依次卡紧收缩的顺序,当该阀在左工位时,后卡爪卡紧井壁,前卡爪收缩,而在右工位时,前卡爪卡紧井壁,后卡爪收缩。活塞缸切换控制阀是用来控制前后活塞缸按照先后顺序依次伸缩撤回,实现爬行器前进。当该阀在左工位时,后活塞推动设备前进,在右工位时,前活塞缸推动设备前进。换向阀是根据回路中压力变化,用来控制卡爪切换控制阀和活塞缸切换控制阀的工作顺序,实现爬行器先卡紧再推进的动作。安全阀用来保护爬行器避免因内部压力增大造成破坏,当爬行器内压力增加到安全阀调定值时,安全阀打开,内部压力得到释放。

该液压回路采用定量泵泵入工作液驱动回路运行,各个液压阀阀芯的驱动依靠爬行器内部压力变化进行切换。因此,相对于现有的靠电机驱动的爬行器,该爬行器内部无需电路,当爬行器下放到环境复杂恶劣的石油井下时,增强了爬行器的可靠性,另外,相比于电机驱动的爬行器,依靠液压驱动,该爬行器拥有更大的输送能力。

2 液压系统建模及仿真分析

为了分析液压系统的动态特性,缩短设计周期、降低成本,提高系统稳定性和可靠性,本研究对该液压系统进行仿真分析。

根据实际工程的设计指标,本研究采用AMESim软件建立了爬行器液压系统的仿真模型,为爬行器在实际工程中的应用提供支撑。

爬行器液压系统模型如图3所示。

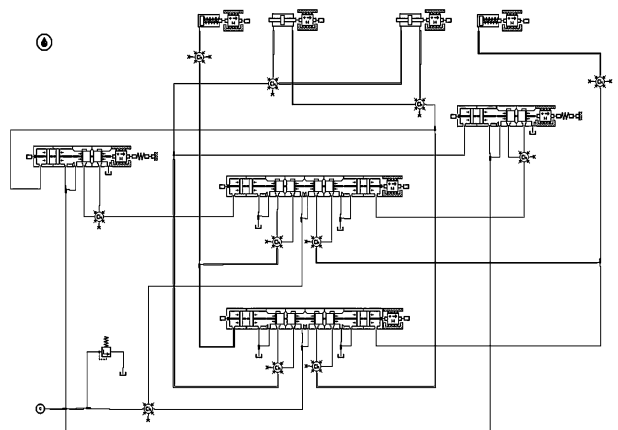


图3 爬行器液压系统模型

该液压系统用两个单活塞缸分别代表前后卡爪推进缸,两个双向活塞缸分别代表前后活塞推进缸。本文利用液压库模型建立了交换阀模型、卡爪切换控制阀模型和活塞缸切换控制阀模型,系统直接调用安全阀模块。

液压系统主要技术参数如表 2 所示。

表 2 液压系统主要技术参数

参数	值
定量泵流量/(L·min ⁻¹)	20
负载/Kg	2 000
活塞缸切换最大阀口开度/m	0.008
活塞缸切换最小阀口开度/m	-0.008
安全阀最大阀口开度/m	0.008
安全阀最小阀口开度/m	-0.008
安全阀开启压力/MPa	12
交换阀最大阀口开度/m	0.008
交换阀最小阀口开度/m	-0.008
卡爪缸切换换向压力/MPa	1
推进缸切换换向压力/MPa	1
活塞推进缸行程/m	0.6
前后卡爪推进缸行程/m	0.05

AMESim 的求解过程采用变步长、变阶数、鲁棒性好的智能求解器,可以根据所建立的模型自动选择最佳积分算法。仿真时间设置为 0~60 s,利用仿真得到爬行器执行 4 个动作时的压力变化情况。

3 仿真结果分析

当液压阀控制系统出现故障,导致工作液无法流到爬行器外部而出现憋压,在爬行器内部压力上升到调定压力时,安全阀开启,保护爬行器不受破坏。

安全阀工作压力变化如图 4 所示。

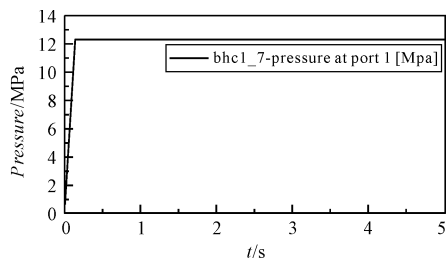
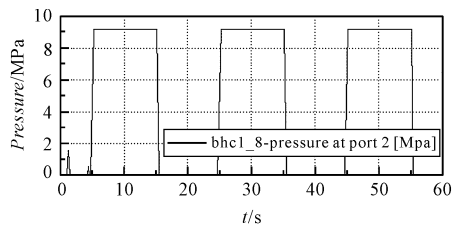


图 4 安全阀工作压力变化图

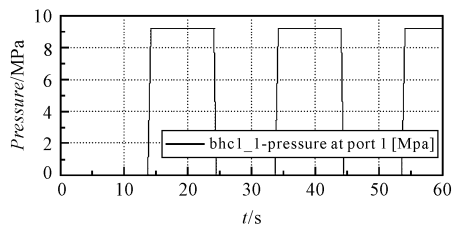
从图 4 中可以看出:安全阀响应时间约为 0.2 s,压力保持在约 12.2 MPa,与设定的开启压力 12 MPa 相一致。

前后卡爪液压缸压力变化曲线如图 5 所示。

从图 5 中可以发现:在爬行器放入井下时为自由状态,当定量泵泵入工作液时,首先工作液进入爬行器控制单元的油路中,进而对卡爪推进活塞缸活塞进行



(a) 前卡爪液压缸压力变化曲线

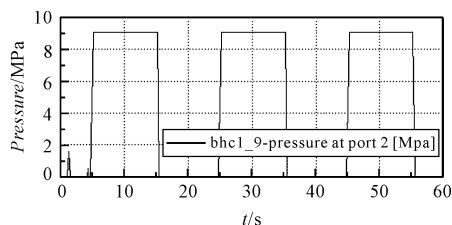


(b) 后卡爪液压缸压力变化曲线

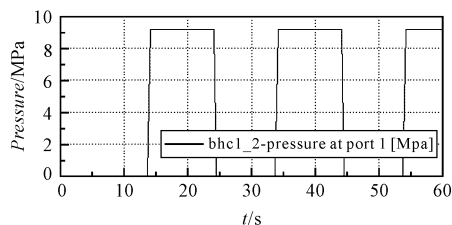
图 5 前后卡爪液压缸压力变化曲线

冲击,因此在 0~5 s 时出现压力波动,最高值约 1.8 MPa。当爬行器内部压力从自由状态稳定到工作状态后,爬行器开始工作,前卡爪推进活塞缸压力在大约第 5 s 时开始增加至 9.1 MPa,并保持约 10 s~15 s,而后卡爪压力为 0,处于放松状态。此时,前卡爪卡紧井壁,前活塞缸开始推进。在第 15 s 时,前卡爪在弹簧力作用下收缩,因此内部压力为 0,而后卡爪压力上升卡紧井壁。至此完成了一次卡紧动作,在第 15 s 至第 35 s 完成第二次卡紧收缩动作,如此往复循环。

前后推进缸压力变化曲线如图 6 所示。



(a) 前推进缸压力变化曲线



(b) 后推进缸压力变化曲线

图 6 前后推进缸压力变化曲线

从图(5,6)可以看出:在前卡爪在第 5 s 卡紧时,前推进缸压力升高,完成第一次活塞缸推进;在第 15 s 后卡爪卡紧时,后推进缸压力升高,完成第二次活塞缸推进,依次循环。

由于实际的液压回路存在管路体积,本研究在设置仿真参数时设置了两处油路体积,当工作液进入液

压系统后,第一个油路体积首先充满工作液,出现冲击,然后第二个油路体积充满工作液,再次出现波动,当整个液压系统充满工作液后,爬行器开始工作。

4 结束语

本文针对水平井和大斜度井的钻井、测井过程对牵引力的要求,设计了一种液压蠕动式爬行器及其液压控制系统,用以实现爬行器的蠕动式爬行的自动控制及过压保护;利用液压仿真软件搭建了液压系统模型,进行了性能仿真分析,得到了液压控制阀的压力特性曲线。

由安全阀的压力曲线可以看出:系统最高压力达到设定的 12 MPa 时,压力不再升高,保护了系统中其它液压元件的正常工作;卡爪与推进缸在时序上符合先卡紧再推进的蠕动式爬行要求,压力值可以保证爬行器的牵引力;爬行器工作过程中前后卡爪活塞缸和前后推进缸的压力变化曲线,验证了液压系统设计的正确性。

该爬行器的设计相对于以往的爬行器具有输送能力大、工作可靠性高等优点。

该爬行器为蠕动式爬行器,其运动及推力为间隙式,因此在钻井工作中,会对钻具造成冲击,如果配合失速短节,可有效避免该现象,并能根据地层的硬度的变化自动调节钻进速度和钻进力,大大提高钻进速度。

参考文献 (References):

[1] 孙振纯,许岱文. 国内外水平井钻井技术现状初探[J]. 石油钻采工艺,1997,4(19):6-12.

- [2] 张绍槐,张洁. 21世纪中国钻井技术发展与创新[J]. 石油学报,2001,22(6):63-68.
- [3] 吴月先,钟水清,徐永高. 中国水平井技术实力现状及发展趋势[J]. 石油矿场机械,2008,37(3):33-36.
- [4] 马认琦,陈建兵,张玺亮. 液压驱动式井下机器人的研究与设计[J]. 钻采工艺,2017,40(1):77-80.
- [5] 张文杰,赵玉宛,鲍杰. Sondex 在中原测井中的应用[J]. 石油仪器,2013,27(2):31-33.
- [6] 刘清友,李维国. Sondex 井下爬行工具介绍[J]. 国外测井技术,2008,23(5):57-59.
- [7] 刘清友,李维国. Sondex 井下爬行器的研究与应用[J]. 石油钻采工艺,2008,30(5):116-117.
- [8] 高胜,孙文,倪晗,等. 石油井下牵引器设计现状及几点认识[J]. 机械设计,2014,31(2):1-8.
- [9] 高进伟,刘猛,李海凤. 水平井井下自适应爬行器的研制[J]. 石油机械,2005,33(z):100-103.
- [10] 郑毅,郑苹. 蠕动式管道爬行器运动控制系统建模与误差分析[J]. 仪器仪表与分析监测,2013(4):7-10.
- [11] 张延恒,冯文龙,年四成,等. 柔性蠕动管道机器人的牵引力及软轴结构稳定性分析[J]. 机器人,2013,35(4):477-483.
- [12] 王嵩,曹志奎. 一种基于 SMA 的管道里蠕动机器人及其反馈控制[J]. 传动技术,2005,19(1):29-32.
- [13] 张延恒,逢增辉. 一种蠕动式管道机器人的设计[J]. 机械设计与制造,2010(4):13-15.
- [14] 徐洪,林潘忠,王扬渝. 新型蠕动式管道机器人设计[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2015,36(5):561-565.
- [15] 曹建树,徐宝东,鲁军,等. 蠕动式污水管道清淤机器人[J]. 机床与液压,2014,42(21):50-53.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

高峰,吴庆,詹保平,等. 蠕动式石油井下爬行器液压系统的设计与研究[J]. 机电工程,2019,36(3):257-261.

GAO Feng, WU Qing, ZHAN Bao-ping, et al. Research and design of hydraulic system for peristaltic crawler in oil downhole[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(3):257-261.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>