

全液压驱动管道机器人公理化设计*

房德磊^{1,2}, 尚建忠¹, 罗自荣¹, 杨军宏¹, 吴伟¹

(1. 国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073; 2. 天津科技大学 机械工程学院, 天津 300222)

摘要:随着管道机器人应用领域与任务需求的不断增大, 机器人设计中存在的问题日益突出, 如输出功能相互耦合、定位精度不高以及复杂环境下可靠性低。针对石油水平井对于管道机器人的特殊应用需求, 将公理化设计理论应用到机器人系统设计中, 创新设计一种基于挠性支撑结构的全液压驱动管道机器人。概述公理化基本原理与设计过程, 对全液压驱动管道机器人进行概念设计, 完成设计耦合性分析。确定机器人机械系统与液压系统具体结构组成, 并分析其工作机理。应用 AMESim 软件, 对机器人运动原理方案进行仿真分析, 结果表明: 全液压驱动管道机器人可以实现自动往复运动, 牵引力可以达到 30 kN, 运动速度可以达到 0.12 m/s; 机器人牵引能力与运动速度可以完成单独调节, 从而实现解耦设计。

关键词:公理化设计; 液压驱动; 管道机器人; 自动往复; 水平井

中图分类号: TP 242.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2019)06-063-07

Axiomatic design for purely hydraulic drive in-pipe robot

FANG Delei^{1,2}, SHANG Jianzhong¹, LUO Zirong¹, YANG Junhong¹, WU Wei¹

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: As the applications and the demands of in-pipe robot are increasing, the problems in robot such as the coupling of output functions, the low positioning accuracy and the low reliability in complex environment, are becoming more and more serious. The axiomatic design theory was applied to the design of in-pipe robot, and a purely hydraulic drive in-pipe robot based on the flexible support structure was presented, which can meet the special needs in the horizontal well. The principle and process of axiomatic design were summarized, and the robot concept design was carried out to complete the design coupling analysis. The concrete composition of mechanical system and hydraulic system of robot were designed and its working mechanism was analyzed. Based on AMESim, the motion principle of the robot was simulated and analyzed, and the results show that the robot can achieve automatic reciprocating motion, the traction force can reach 30 kN, and the motion speed can reach 0.12 m/s. Moreover, the traction capacity and the motion speed of the robot can be adjusted separately, which means the decoupling design is realized.

Keywords: axiomatic design; hydraulic drive; in-pipe robot; automatic reciprocating; horizontal well

管道机器人是一种可以在管道内部移动, 携带多种操作器与传感器进行相关管道作业的机电一体化系统^[1-4]。近年来, 随着机器人技术的飞速发展, 管道机器人的应用更加广泛, 尤其在石油水平井领域的应用越来越多。然而, 与一般管道相比, 水平井管道内部环境更加复杂: 位于地下 1000 m 甚至更深, 水平井内温度高达 150 °C, 井下压力高达 60 MPa, 这种恶劣条件对于机器人整机与零部件都提出了严峻考验^[5-6]。

总结现有水平井管道机器人应用技术, 虽然实现了基本功能, 但仍然存在很多不足。目前, 大多数水平井管道机器人采用电机驱动爬行轮方式, 爬行轮与管道内壁接触面积小, 造成输出牵引

力不足; 在复杂管道内部容易打滑, 影响机器人定位精度与运动稳定; 同时, 这种驱动模式引起输出功能耦合, 即牵引力与爬行速度相互制约, 不仅影响机器人负载能力, 还大大降低功耗性能。另一部分水平井管道机器人采用电液驱动方式, 液压传动可保证输出强大牵引力, 但狭小空间对电机与液压泵的尺寸结构与性能参数要求过高, 大量电子元件、电磁阀的集成设计, 严重影响机器人井下工作的可靠性与安全性^[7-8]。因此, 为满足水平井对管道机器人大牵引力、结构紧凑、运行可靠性的要求, 本文设计一种全液压驱动挠性支撑式水平井管道机器人。

现有管道机器人的开发大多依靠工程师设计

* 收稿日期: 2018-08-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675522, 51675527)

作者简介: 房德磊(1988—), 男, 河北秦皇岛人, 讲师, 博士, E-mail: fangdelei365@126.com

经验,设计理论体系并不完善,研究人员尝试在管道机器人研究中应用科学的理论设计方法^[9-12]。麻省理工学院的 SUH 提出公理化设计(Axiomatic Design, AD)理论,其目标是通过 Z 字形映射分解,对产品进行解耦以及优化设计^[13-15]。公理化设计理论给产品设计带来极大提升,在管道机器人方面出现了很多成功案例^[16-17]。Qiao 等应用公理化设计理论对轮式管道机器人与气囊式管道机器人进行设计评价,以第一定理为基础,完成自主锁止管道机器人概念设计与耦合性分析,研制牵引力可以超越静摩擦力限制的自锁机器人^[18]。基于公理化设计理论,Li 等提出螺旋驱动管道机器人解耦设计方法,通过采用螺旋轮倾角可控的设计,使机器人在性能约束下具备更强的环境适应能力以及低能耗优势^[19]。

本文首先对公理化设计基本原理进行简要概述,基于公理化设计第一定理,对全液压驱动管道机器人(Purely Hydraulic Drive In-pipe Robot, PHDIRobot)进行概念设计以及耦合性分析。通过确定机器人机械系统以及液压系统具体结构与元件,完成对机器人原理样机的设计与制造。应用 AMESim 软件,对管道机器人全液压驱动过程进行仿真分析,验证设计方案可行性与正确性,同时为后续实验验证与研究奠定基础。

1 机器人概念设计

1.1 公理化设计概述

AD 理论是探究设计过程中存在的基本公理,构建清晰的设计路线与框架,减少传统设计中的人工经验的依赖,避免不可预测或者不可估量的设计结果。其主要核心概念包括设计域、映射过程以及设计公理等。

在整个设计过程中,AD 理论包含四个设计域,分别为用户域、功能域、物理域以及过程域,如图 1 所示。四个域分别通过用户需求(Customer Attributes, CAs)、功能需求(Function Requirements, FRs)、设计参数(Design Parameters, DPs)以及过程变量(Process Variants, PVs)来表达。映射过程指设计域之间关系的“Z”字形分解,得到一个完整的可以通过 DPs 物理实现的体系。相邻设计域间映射主要有两种:相同层级间映射以及不同层级间映射,分别由图 1 中实线和虚线表示。基于域间映射,SUH 提出两条设计公理:独立公理与信息公理。独立公理要求 FRs 独立,即表示满足设计独立需求的最小集合;信息公理是要求设计过程中最小信息量原则,即满足独立公理的同

时,包含最小信息量的设计为最好的设计。

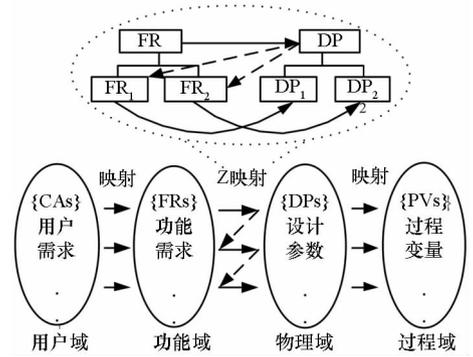


图 1 设计四域以及映射过程

Fig. 1 Four design domains and mapping process

基于公理化设计理论,产品设计的主要步骤如下:

- 1) 明确用户需求:在公理化设计理论中,首先在用户域中明确设计目标,即用户需求。
- 2) 确定功能需求:根据用户需求反复确定设计任务中的功能需求,这也是整个产品设计的核心。
- 3) 确定设计方程:为实现功能需求,需确定设计方程,其中,域之间的映射必须满足独立公理,即每一项 FR 的变化不引起其他 FRs 的变化。
- 4) 反复迭代分解:如果 DPs 不是一个完整的物理实现体系,就要进行 Z 字形分解,把 DPs 分解到下一层 FRs,然后跳回步骤 3 执行,当满足独立公理后,设计完成。

经过上述设计步骤,分解后的层级与拓扑结构将会显示产品设计的详细流程。

1.2 概念设计与分析

基于 AD 理论相关准则,明确用户需求。全液压驱动管道机器人应用于石油水平裸眼井开发领域,井口径为 215.9 mm,但受复杂地形影响,井眼不规则,有的位置大于 215.9 mm。同时,井眼管道不是标准圆,因此支撑结构要合理设计,保证与井壁有良好接触。其他主要性能包括:牵引速度达到 0.8~0.12 m/s,牵引力 10~30 kN。本文对用户需求的定义为“钻井用输送仪器与拖拽线缆”,将第一层功能需求 FR 设定为“裸眼井内负载运动”,通过设计“全液压驱动管道机器人”实现上述需求,设定为 DP。因此,在机器人第一层设计中,FR 和 DP 的描述如下:

- 1) FR:裸眼井内负载运动。
- 2) DP:全液压驱动管道机器人。

基于设计目标,管道机器人需要具有三种基本功能:一是具有强大动力,二是在井内不同位置

保持力封闭与形封闭,三是完成运动输出。为了实现以上三种功能,机器人设计第一层 DP 应该包括液压动力输出单元、井壁支撑机构以及能够完成伸缩与负载运动的行走机构。机器人设计第一层到第二层的映射过程,如图 2 所示。

从图 2 可以看出,第二层设计并没有完全具体化,需继续分解功能域和物理域。在功能域分解中,系统输出动力需要具备动力源,同时对机器人运动来说,有效的动力控制必不可少。在实现力封闭与形封闭的功能上,管道机器人要具备:当支撑机构锁止管壁时,要提供足够正压力,保证静摩擦力大于负载力;当机器人行走时,支撑机构要收缩调整,保证接触管壁,并尽量减小前进阻力。在输出运动方面,机器人通过液压缸伸缩实现机体移动,同时还要完成对井下工具以及线缆的拖拽任务。因此,PHDIRobot 设计功能域第三层分解,如图 3 所示。

基于第三层功能域分解,设计对应物理域如下:在液压动力输出单元,为实现纯液压驱动,机器人借助高压钻井液,动力源为地面超高压泵,钻井液通过连续油管输送到液压控制单元,压力介质经过控制单元供给执行器。在管壁支撑单元,

设计连杆与挠性弹片相结合的结构,不仅能增大接触面积以提高静摩擦力,还能增强井壁的适应能力;当机器人移动,通过复位弹簧的作用,保持支撑机构张开一定角度,提高机构通过性。机器人向前移动,通过行走液压缸交替伸缩来实现。同时,为满足负载需求,锁止力需要足够大,保证拖拽顺利完成。综上,关于机器人第三层物理域的分解如图 4 所示。

设计经过第三层功能域与物理域分解,管道机器人已经基本完成物理实现,只有动力单元的控制部分需要进一步分解。根据功能需求,机器人动力控制首先要完成钻井液的过滤,形成高压介质,高压介质经过集成阀块系统,进入不同液压缸执行支撑或行走任务。与其他机器人不同,设计中管道机器人液压缸可以实现自动往复运动,所以,对于阀控系统,不仅可以实现油液的开关,还能实现油液的换向。PHDIRobot 第四层功能域与物理域分解如图 5 所示。

由分解图 5 可以看出,高压钻井液可以通过过滤器形成驱动介质,然后通过主开关阀控制机器人运转启停,通过方向阀组完成高低压介质换向输送,完成液压缸自动往复运动。

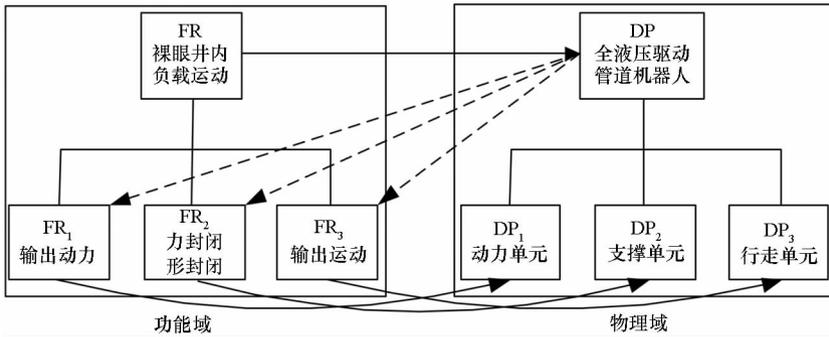


图 2 第一层到第二层 Z 形映射图

Fig. 2 The first layer to the second layer in Z maps

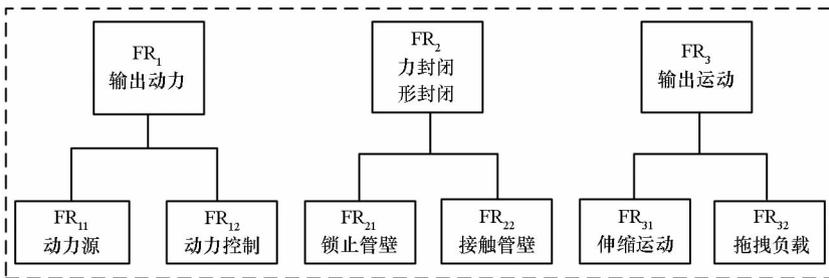


图 3 功能域第三层分解图

Fig. 3 The third layer decompositions in function domain

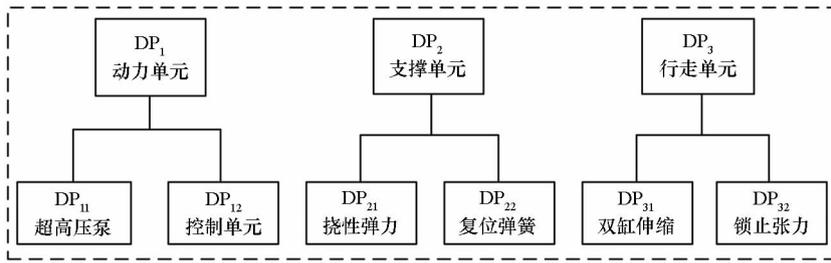


图 4 物理域第三层分解图

Fig. 4 The third layer decompositions in physical domain

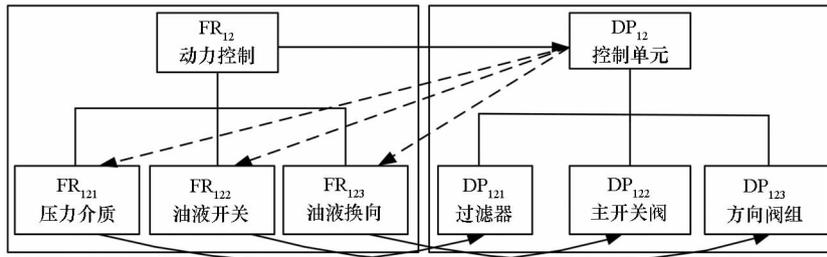


图 5 功能域与物理域第四层分解图

Fig. 5 The fourth layer decompositions in functional domain and physical domain

2 设计耦合性分析

根据设计公理的要求,产品设计在功能上应具有独立性,即每一项功能变化不会引起其他功能的变化。为了验证设计是否具有独立性,引入设计矩阵的概念。在相同层级上,设计目标对应的功能需求与设计参数之间的数学关系可以表示为:

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ \vdots \\ FR_i \end{pmatrix}_{i \times 1} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1i} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{i1} & A_{i2} & \cdots & A_{ij} \end{pmatrix}_{i \times j} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ \vdots \\ DP_j \end{pmatrix}_{j \times 1} \quad (1)$$

其中, $(FR)_{i \times 1}$ 为功能需求向量; $(DP)_{j \times 1}$ 为设计参数向量; $A_{i \times j}$ 为产品设计矩阵。

式(1)称作产品设计方程。当 $A_{ij} = 0$, 说明 DP_j 对 FR_i 没有影响; 当 $A_{ij} = X$, 说明 DP_j 对 FR_i 有影响。根据设计矩阵形式不同,设计过程可分为三种类型,如表 1 所示:独立设计,即设计矩阵为对角线矩阵的设计;解耦设计,即设计矩阵为三角矩阵的设计;耦合设计,即设计矩阵为其他类型的设计。

表 1 设计矩阵类型

Tab. 1 Types of design matrix

独立设计	解耦设计	耦合设计
$\begin{pmatrix} A_{11} & 0 \\ 0 & A_{22} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$

对于 PHDI Robot 的设计,因为设计第一层只包含单元元素,所以 FR 到 DP 的映射属于非耦合独立设计。第二层功能域到物理域映射关系如式(2)所示。

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中,等号右边的第一个矩阵就是设计矩阵。可以看出,设计矩阵非零元素都在对角线上,所以这个设计是独立设计,即第二层功能域与物理域之间没有干扰存在。

同理,得到第三层设计方程与设计矩阵,结果如下所示:

$$\begin{pmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} FR_{21} \\ FR_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} DP_{21} \\ DP_{22} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} FR_{31} \\ FR_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & 0 \\ X & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} DP_{31} \\ DP_{32} \end{pmatrix} \quad (5)$$

在式(3)和式(4)中,非零元素都位于主对角线,说明相关的功能需求与设计参数一一对应,即独立设计。而式(5)中,设计矩阵为下三角矩阵,是一种解耦设计。因为机器人的向前移动需求, FR_{31} 完全由液压缸伸缩决定。然而,机器人负载力输出与两者都有关联,即液压缸的伸缩运动伴随输出动力,但输出动力上限不能超过锁止力最

大值。

最后,对第四层设计进行耦合性分析,设计矩阵如式(6)所示:

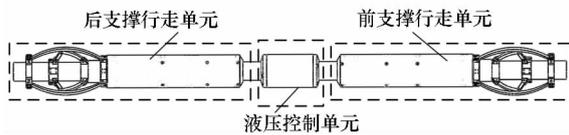
$$\begin{pmatrix} FR_{121} \\ FR_{122} \\ FR_{123} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} DP_{121} \\ DP_{122} \\ DP_{123} \end{pmatrix} \quad (6)$$

可以看出,关于第四层功能域与物理域的设计属于独立设计。因此,综合式(2)~(6)得出结论:PHDI Robot的整机设计属于解耦设计,每个设计过程与细节都是样机开发与研制的理论指导。

3 机器人系统设计

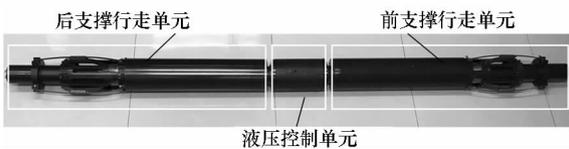
3.1 机械系统设计

对PHDI Robot机械结构进行具体设计,整体结构如图6所示,主要包括三部分:前支撑行走单元、液压控制单元以及后支撑行走单元。机器人全长3.4 m,支撑爬行单元外径135 mm。通过对前后挠性支撑单元交替进行支撑和收缩,可以实现牵引器的向前拖拽运动,同时,机器人适应管径为145~218 mm。机器人前端有快速连接模块,可以安装钻头或其他井下作业工具。机器人后端连接连续油管,输送高压钻井液,为机器人提供液压介质与行走动力。



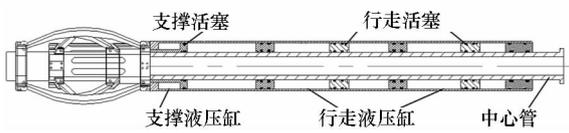
(a) PHDI Robot 三维模型

(a) Three-dimensional model of PHDI Robot



(b) PHDI Robot 实物模型

(b) Physical model of PHDI Robot



(c) 单侧支撑行走单元剖面

(c) Section of a unilateral support unit

图6 PHDI Robot 样机模型

Fig. 6 Prototype of PHDI Robot

支撑行走单元的结构剖面如图6(c)所示,主要部件包括:支撑液压缸、支撑活塞、行走液压缸、行走活塞、中心管以及挠性支撑组件。挠性支撑

组件采用连杆结构与挠性弹片相结合的方式,不仅可以保证强大支撑力,还增强了对井壁的保护与适应能力。

支撑行走单元是机器人运动的核心部件。支撑液压缸可以推动挠性支撑爪抓紧井壁,保证这部分机构锁止井壁,同时,行走液压实现机器人的另一部分相对移动。通常,挠性支撑组件锁止井壁越牢固,牵引机器人输出负载力越大。

3.2 液压系统设计

除上面提到的液压缸,机器人液压系统还包括集成阀块、过滤单元、液压阀以及相关管路。连续油管中的钻井液经过过滤单元,流入阀控系统,之后分配给不同液压缸,各液压缸回油出口连接机器人与井眼内壁的环形腔。

液压控制单元包括主开关阀、主方向阀、两个节流阀以及两个换向开关阀,如图7所示。主方向阀高压液路有两个出口,一个出口与支撑液压缸和行走缸的驱动腔连接,另外一个出口与另一端行走缸的回位腔相连。两个换向阀高压出口分别与主方向阀控制端口相连,引导主方向阀换向。

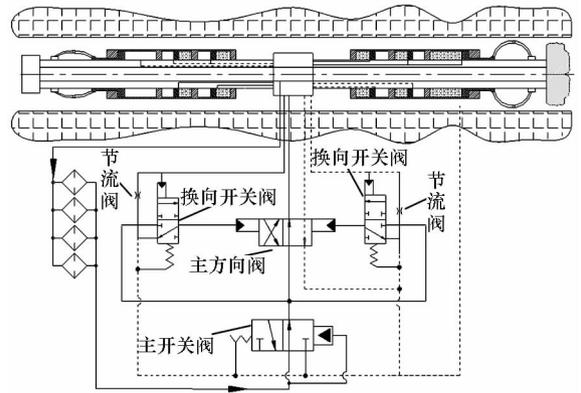


图7 PHDI Robot 液压系统

Fig. 7 Hydraulic system of PHDI Robot

3.3 运动原理分析

PHDI Robot 动力由钻井液提供,当钻井液进入支撑液压缸,驱动挠性支撑组件锁住井壁,否则,挠性支撑组件收缩。当高压钻井液进入行走液压缸左腔,推动活塞以及中心管向前移动。当高压介质进入行走液压缸右腔,液压缸外壳被推动,相对中心管向前移动。因此,PHDI Robot 通过前后支撑行走单元相互运动来实现移动。图8为机器人运动原理,图8中状态一为机器人初始状态。

如图8中状态二所示,前支撑液压缸流入高压介质,随之前支撑组件锁住井眼内壁;前行走液压缸的左腔流入高压介质,推动活塞以及中心管向前移动。与此同时,后支撑腔低压介质导致后

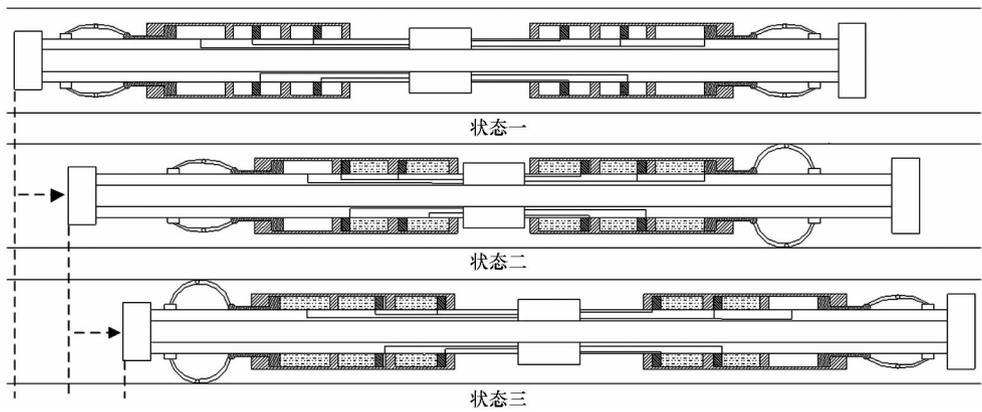


图 8 PHDI Robot 运动原理

Fig. 8 Diagram of PHDI Robot movement principle

支撑爪收缩,后行走液压缸的右腔流入高压介质,促使后支撑行走单元相对中心管向前移动。当前行走活塞移动到最右端,高压介质压力继续升高。当压力超过预设值,换向方向阀动作,引起主方向阀换向,导致油路发生改变。

如图 8 中状态三所示,主方向阀动作引起油液回路改变,后支撑液压缸流入高压介质,后支撑组件锁紧井眼内壁。后行走液压缸左腔流入高压介质,推动活塞以及中心管向前移动。与此同时,前行走液压缸右腔进入高压介质,前支撑行走单元相对于中心管向前移动。前支撑液压缸内为低压介质,导致前支撑组件处于收缩状态。当后行走活塞移动到液压缸最右端,高压介质压力持续升高。当压力达到预设值,换向方向阀动作,再一次改变油路方向。通过油路交替改变以及液压缸相互运动,实现 PHDI Robot 向前连续移动。

4 仿真分析与验证

应用 AMESim 对机器人运动过程进行仿真分析。仿真主要是为了验证全液压驱动原理可行性以及相关液压元件工作特性。在仿真中设定机器人所示负载压力为 30 kN,其他仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 管道机器人运动仿真参数

Tab. 2 Robot motion simulation parameters

参数	值
绝对工作压力	6.5 MPa
主开关阀开启压力	4 MPa
换向开关开启压力	12 MPa
活塞直径	120 mm
活塞杆直径	90 mm
行走液压缸行程	150 mm

通过仿真,首先得到机器人机体运动位移,如图 9 所示,可以看出,机器人可以实现连续移动。图中虚线表示钻井液流量为 50 L/min 时的位移变化,实线表示钻井液流量为 80 L/min 的位移变化,曲线斜率为管道机器人移动速度。当流量为 50 L/min 时,机器人速度为 0.08 m/s;当流量为 80 L/min 时,机器人速度为 0.12 m/s。因此得出结论,提出的全液压驱动管道机器人运动速度满足指标需求。同时,在仿真分析过程中,通过改变钻井液流量大小,就能改变机器人的行进速度,而且机器人牵引力可以保持不变,这种特性也说明机器人关于速度与牵引力的输出是一种解耦设计。

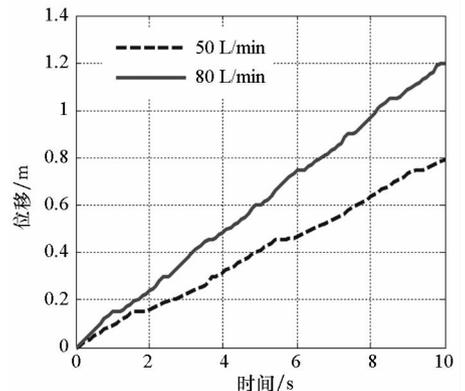


图 9 机器人运动位移曲线

Fig. 9 Robot movement displacements

为了进一步研究管道机器人行走特性,分析两行走液压缸相互运动特征,如图 10 所示。可以看出,机器人两行走液压缸活塞相对位移基本保持同步并且反向,可以满足牵引机器人对行走液压缸自动往复的要求,每只液压活塞运动行程为 0.15 m,运动周期大约为 2.4 s。结合运动原理可知,两行走液压缸的运动是相互靠近随之又相互远离的周期过程,最终实现机器人整体向前移动。

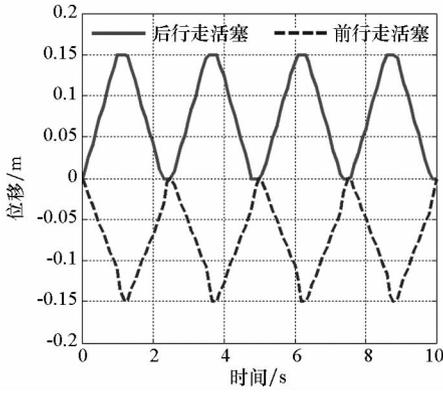


图10 行走液压活塞位移曲线

Fig. 10 Displacements of walking hydraulic pistons

对液压系统进行换向性能研究,得到仿真结果,如图11所示。

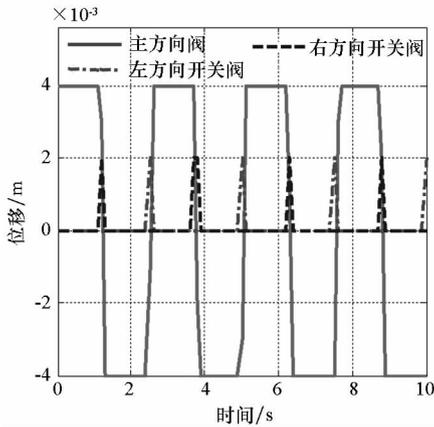


图11 换向阀组阀芯运动曲线

Fig. 11 Movements of reversing valve spools

由图11可以很清晰地看出换向阀组的运动特征:主方向阀阀芯位移在 -4 mm 到 4 mm 之间切换,是典型的周期运动,并且周期时间与行走液压缸活塞周期一致。同时也可以看出,主方向阀阀芯的动作随着换向开关阀的动作而触发,这也是行走液压缸实现自动往复运动的原因。

通过以上仿真分析可以看出,针对石油水平井对于管道机器人的特殊应用需求,本文提出的全液压驱动管道机器人行走方案可行。为了提高机器人在高温高压井下运动的可靠性,机器人不携带动力单元,利用高压钻井液实现机器人前后支撑行走单元的连续切换。同时,对于机器人牵引力以及行进速度的解耦设计得到验证:通过单独控制驱动介质的压力可以输出不同牵引力;同时,通过单独控制驱动介质的流量,可以实现机器人不同运动速度。

5 结论

针对石油水平井特殊环境要求,应用公理化

设计,对管道机器人系统结构与液压驱动方案进行设计与研究。设计一种基于挠性支撑的全液压驱动管道机器人,通过产品需求分析、理论设计研究以及仿真分析验证,最终得出以下成果与结论:

1)通过公理化设计原理与设计过程概述,对管道机器人进行了概念设计,并完成了设计耦合性判定与分析。

2)完成了管道机器人机械系统结构设计、液压系统元件选型以及原理样机研制。

3)分析了机器人全液压驱动实施过程以及行走液压缸自动往复运动机理,并得出相关元件工作特性。

4)基于软件仿真,对机器人设计原理方案进行了验证,结果表明:机器人牵引力可以达到 30 kN ,运动速度可以达到 0.12 m/s 。并且,实现了牵引能力与运动速度单独调节的解耦设计目标。

参考文献 (References)

- [1] Shao L, Wang Y, Guo B Z, et al. A review over state of the art of in-pipe robot [C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2015: 2180-2185.
- [2] Ismail I N, Anuar A, Sahari K S M, et al. Development of in-pipe inspection robot: a review [C]// IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (STUDENT), 2012: 310-315.
- [3] 张永顺, 迟明路, 程存欣, 等. 一种高性能花瓣廓形胶囊机器人[J]. 机械工程学报, 2017, 53(3): 9-16.
ZHANG Yongshun, CHI Minglu, CHENG Cunxin, et al. Petal-shaped capsule robot with high performance [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(3): 9-16. (in Chinese)
- [4] 郭瑞杰, 李杰, 王忠, 等. 一种管道机器人爬行机构的工作原理[J]. 机械设计, 2012, 29(11): 26-30.
GUO Ruijie, LI Jie, WANG Zhong, et al. Mechanism design of pipeline crawled robots [J]. Journal of Machine Design, 2012, 29(11): 26-30. (in Chinese)
- [5] Ma Y H, Hong D F, Chen Z B, et al. A multibody dynamic model of the drilling system with drilling fluid [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(7): 1-16.
- [6] Billingham M, El-Toukhy A M, Hashem M K, et al. Conveyance—down and out in the oil field [J]. Oilfield Review, 2011, 23: 18-31.
- [7] Al-Buali M H, Al-Mulhim A A, Sethi N, et al. Successful utilization of E-line tractor in horizontal, high pressure and high temperature gas wells [C]// SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference, 2015.
- [8] 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.
MA Renqi, CHEN Jianbing, ZHANG Xiliang. Development of hydraulically driven downhole robots [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(1): 77-80. (in Chinese)

(下转第99页)

- 101-104. (in Chinese)
- [8] 谢汝峰. 液压泵噪声研究的进展[J]. 流体传动与控制, 2008(3): 32-34.
XIE Rufeng. The development of hydraulic pump noises research [J]. Fluid Power Transmission and Control, 2008(3): 32-34. (in Chinese)
- [9] 刘恒坤, 张晓, 弥柱. 空心机和 Halbach 永磁直线同步电机的牵引力和法向力分析[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(3): 94-97.
LIU Hengkun, ZHANG Xiao, MI Zhu. Analytical computation of normal and tangential forces in linear synchronous motor with air-core and Halbach permanent magnets [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(3): 94-97. (in Chinese)
- [10] 刘占生, 赵广, 龙鑫. 转子系统联轴器不对中研究综述[J]. 汽轮机技术, 2007, 49(5): 321-325.
LIU Zhansheng, ZHAO Guang, LONG Xin. Survey of the research on coupling with misalignment of rotary machinery[J]. Turbine Technology, 2007, 49(5): 321-325. (in Chinese)
- [11] 童剑飞, 樊启泰. 叠片联轴器不对中的力学模型建立及分析[J]. 机械设计与研究, 2002, 18(5): 44-45.
TONG Jianfei, FAN Qitai. Dynamic modeling and analysis of a membrane coupling subject to misalignment [J]. Machine Design and Research, 2002, 18(5): 44-45. (in Chinese)
- [12] 潘炜, 李辉. 液压泵机组振动分析[J]. 液压与气动, 2010(8): 74-75.
PAN Wei, LI Hui. The vibration analysis of hydraulic pump unit [J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2010(8): 74-75. (in Chinese)
- [13] 龙鑫. 齿式联轴器不对中动力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
LONG Xin. Analysis of dynamic characteristics of gear coupling with misalignment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [14] 杨超, 张敬彩, 刘红旗. 平行不对中梅花弹性联轴器力学状态研究[J]. 机械传动, 2014, 38(7): 10-11.
YANG Chao, ZHANG Jingcai, LIU Hongqi. Research of mechanical state of the parallel misalignment plum-shaped flexible coupling [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(7): 10-11. (in Chinese)
- [15] 李剑飞. 万向联轴节两轴角速比计算式的一个推导方法[J]. 太原机械学院学报, 1994(1): 86-89.
LI Jianfei. A deriving method for equation of angular velocity ratio of two shafts jointed to a universal joint [J]. Journal of Taiyuan Institute of Mechanical, 1994(1): 86-89. (in Chinese)
-
- (上接第 69 页)
- [9] Briner A, Nadezhdin S, Tessari S, et al. Successful logging on tractor in a high-temperature openhole horizontal well in a tight gas field [C]. SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, UAE, 2016.
- [10] 吴超群, 刘晨阳, 刘明尧, 等. 螺旋轮式水平井牵引机器人设计与分析[J]. 石油机械, 2016, 44(11): 63-67.
WU Chaoqun, LIU Chenyang, LIU Mingyao, et al. Design of spiral wheel horizontal well traction robot [J]. China Petroleum Machine, 2016, 44(11): 63-67. (in Chinese)
- [11] Li Y J, Liu Q Y, Chen Y H, et al. Design and analysis of an active helical drive downhole tractor [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(2): 428-437.
- [12] Ren T, Chen Y H, Liu Q Y. A helical drive in-pipe robot based on compound planetary gearing [J]. Advanced Robotics, 2014, 28(17): 1165-1175.
- [13] 王昊琪, 张旭, 唐承统. 复杂工程系统下基于模型的公理化设计方法 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(7): 184-198.
WANG Haoqi, ZHANG Xu, TANG Chengtong. Model-based axiomatic design approach for complex engineering systems [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(7): 184-198. (in Chinese)
- [14] 崔晓阳, 蔡远文, 史建伟. 公理化设计在可在轨组装飞行器总体设计中的应用 [J]. 兵工自动化, 2011, 30(5): 49-52.
CUI Xiaoyang, CAI Yuanwen, SHI Jianwei. Application of axiomatization design in general design for on-orbit assembled spacecraft [J]. Ordnance Industry Automation, 2011, 30(5): 49-52. (in Chinese)
- [15] 程幼明, 马鲁强. 基于公理化设计的可重构产品 C-F-D-P 映射过程 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 218-223.
CHENG Youming, MA Luqiang. C-F-D-P mapping process of reconfigurable product systems based on axiomatic design [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 218-223. (in Chinese)
- [16] 张国渊, 赵伟刚, 闫秀天, 等. 考虑多源信息耦合的高速涡轮泵转子动力学公理化设计方法 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(5): 47-55.
ZHANG Guoyuan, ZHAO Weigang, YAN Xiutian, et al. Axiomatic design method for the rotor dynamics of the multi-source information coupled high-speed turbo pump [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(5): 47-55. (in Chinese)
- [17] 王枫, 彭学院. 压缩机油簧阀组的公理化设计 [J]. 流体机械, 2011, 39(6): 38-42.
WANG Feng, PENG Xueyuan. Axiomatic design of the reed valve components of compressor [J]. Fluid Machinery, 2011, 39(6): 38-42. (in Chinese)
- [18] Qiao J W, Shang J Z. Application of axiomatic design method in in-pipe robot design [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(4): 49-57.
- [19] Li T, Ma S G, Li B, et al. Axiomatic design method to design a screw drive in-pipe robot passing through varied curved pipes [J]. Science China: Technological Sciences, 2016, 59(2): 191-202.