

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20200031

两级压力源的移动机器人高效率液压系统设计

房德磊, 胡瑞彤, 张峻霞, 李盼, 张遵浩

(天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 针对移动机器人单泵源多执行器液压系统效率低下、能量浪费严重等问题, 提出一种基于两级压力源的高效率液压系统. 以某型液压驱动管道机器人为例, 分析不同液压缸负载特性, 设计两级压力源液压系统结构与驱动方式, 建立高压蓄能器数学模型以及系统效率计算公式, 通过数据计算与仿真分析验证两级压力源系统节能效果. 结果显示, 液压缸活塞运动精度达到 3 mm, 时间延迟为 0.05 s. 由于大幅度减小节流损失, 两级压力源系统效率比单级压力源系统效率提高了 29.3%. 两级压力源系统实现执行器供给压力与负载匹配, 有效降低能量损失与装机功率, 具有良好的应用前景.

关键词: 两级压力源; 液压系统; 驱动效率; 节流损失; 移动机器人

中图分类号: TH112 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2020)06-0055-05

Designing Mobile Robot Efficient Hydraulic System Based on Two-stage Pressure Source

FANG Delei, HU Ruitong, ZHANG Junxia, LI Pan, ZHANG Zunhao

(Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: In view of the low efficiency and serious energy waste of the hydraulic system of many robot actuators with single pump source, this paper proposes a hydraulic system based on two-stage pressure source. After analyzing the load characteristics of different cylinders of a certain in-pipe robot, the structure and driving mode of a two-stage pressure source hydraulic system were designed. Mathematical modeling and driving efficiency calculation were established. The performance of the two-stage pressure source system was simulated. The result shows that the control accuracy reaches 3 mm, and the time delay is 0.05 s. Compared with the single-stage system, the efficiency of the two-stage system is improved by 29.3%. The two-stage pressure source system can realize the matching between output pressure and actuator loads and effectively reduce energy loss. Therefore, it has a good application prospect.

Key words: two-stage pressure source; hydraulic system; drive efficiency; throttling loss; mobile robot

“节能与环保”是当今世界发展的主题, 我国把节能高效作为国家经济发展的重要目标之一^[1-3]. 随着制造技术、电子技术以及控制技术的飞速发展, 液压系统已经在移动机器人中广泛应用, 然而驱动效率低、能量消耗大等问题始终困扰这类系统^[4-5].

对于移动机器人, 系统效率低下会引起诸多问题^[6-7]. 首先, 效率低下会导致系统能量消耗大, 在同等能量储备情况下, 系统输出有用功减少, 直接影响

机器人的负载能力与工作范围. 其次, 为了弥补浪费的能量, 系统需要装配功率更大的动力源, 液压元件的性能指标与结构参数相应增大, 整个系统质量与体积增大. 另外, 效率低下导致系统发热严重, 如果散热不及时, 很可能影响机械部件正常运转. 对于移动机器人来说, 液压系统效率将是关乎其广泛应用与性能提升的关键问题^[8].

针对液压系统效率问题, 学者们已经开展了很多

收稿日期: 2020-03-05; 修回日期: 2020-05-21

作者简介: 房德磊 (1988—), 男, 河北秦皇岛人, 讲师, fangdelei@tust.edu.cn

研究工作^[9-10]. Kogler 等^[11]应用蓄能器、细长管以及高频开关阀组件设计液压变压器,通过 PWM 信号控制系统输出流量与压力. 然而,作为惯性元件,细长管的布置会占用很大空间. 同时,由于存在压力波,细长管内回油将影响压力与流量稳定输出. Ho 等^[12]利用液压马达与飞轮组件构成惯性元件,通过与大容量蓄能器相结合,实现液压系统能量的释放与回收. 鉴于重量和体积限制,这种方法只能适用于大型或者固定机械装备中. 以上方法可以一定程度上提高液压系统效率,但大部分没有考虑系统体积与重量,因此不利于在小型移动机器人系统中实现与应用.

移动机器人液压系统大多采用单泵源驱动多执行器结构. 这种系统效率低下,因为泵源输出压力无法与多执行器负载匹配,产生很大节流损失. 本文以某型液压驱动管道机器人为例,基于管道机器人不同

液压缸负载特性,提出一种两级压力源液压系统,通过减小液压阀节流损失,提高机器人液压系统驱动效率.

1 系统构成与驱动方式

某型基于单向锁止机构的管道机器人主要由三部分构成:机械系统、液压动力系统、液压控制系统. 如图 1 所示,机器人通过前后液压支撑臂交替锁止管道,中间伸缩液压缸往复伸缩实现向前移动. 此类型管道机器人设计参数如下:外径 84 mm,总长度 5.2 m,最大移动速度 0.15 m/s,最大牵引力 8 000 N,适应管径 106 ~ 220 mm. 管道机器人应用在石油水平井开发维护领域,机器人前端安装井下作业工具及检测仪器,完成各种作业任务.

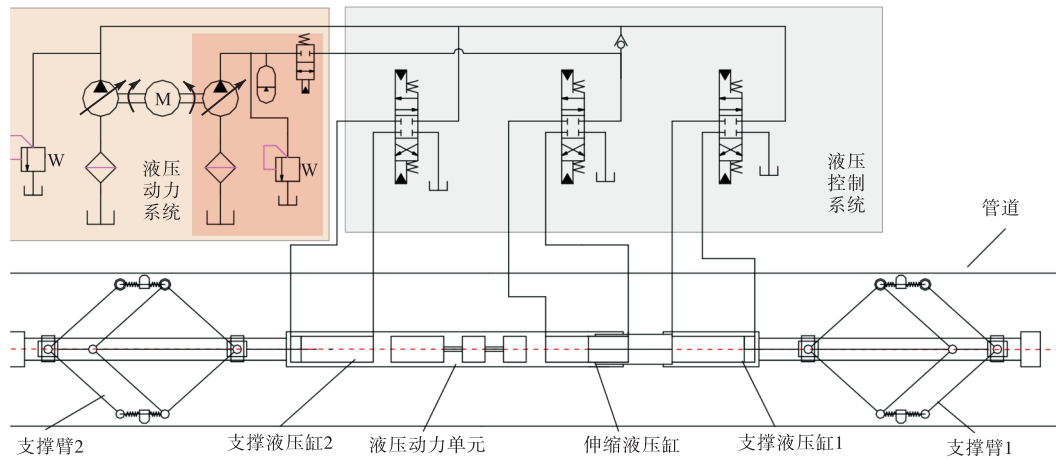


图 1 基于单向锁止机构的管道机器人系统示意图

Fig. 1 Diagram of the in-pipe robot based on one-way locking mechanism

传统机器人液压系统为单级压力源供能,为保证各执行器全部正常工作,系统输出压力设定为所有执行器中供油压力最大值. 然而,不同液压缸在不同工作模式所受负载相差较大,即使在同一种工作模式下,液压缸在不同时刻所受负载也有差别. 以修井工况为例,机器人支撑臂 2 锁止管道,伸缩液压缸活塞伸出,提供修井所需较大推力,修井完成,机器人支撑臂 1 锁止管道,伸缩液压缸活塞收回,拖拽机器人机体后半段向前. 上述过程中,伸缩液压缸负载变化从 -300 N 到 6 500 N,差异十分明显,如图 2 所示中实线所示.

为保证机器人正常工作,单级压力源系统压力必须满足液压缸最大峰值负载需求,即 6 500 N,然而,其他液压缸不需要这么大输出压力,因此系统多余油压将会在液压阀处进行节流. 这种节流引起的能量

损失会通过热量形式向外界散失,不仅降低机器人负载能力与移动范围,如果散热不及时,还将影响整个系统运行的可靠性.

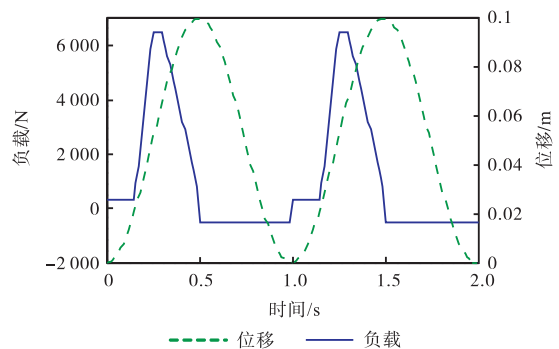


图 2 伸缩液压缸负载特性曲线

Fig. 2 Load characteristic of the hydraulic telescopic cylinder

结合管道机器人液压缸负载变化大、峰值压力时间短的特点,本研究提出一种新型高效率两级压力源液压系统:利用开关阀和高压蓄能器构建高压源,配合低压泵源系统实现两级驱动方式,如图1所示.液压系统低压源对3个液压缸进行低压供能,而高压源储存能量,随时准备高压辅助供能.液压缸执行低压负载时,开关阀关闭,液压缸由低压泵源供能;当液压缸负载超过预设值,低压泵源不能满足所需压力要求,开关阀打开,液压缸由高压源供能.采用两级压力源液压系统,设计低压泵源,其系统输出压力可以低于液压缸峰值负载所需压力,由于高压源的存在,可以补充峰值压力不足.因此,采用两级压力源液压系统可以减小单级压力源系统长时间高压供能产生的节流损失,提高液压系统驱动效率.

2 数学建模与分析

对于两级压力源液压系统,高压蓄能器是核心元件,其参数的选择关乎系统供能的效果,因此有必要对蓄能器的参数进行匹配设计.设高压蓄能器预设状态为 (p_0, V_0) ,最低压力工作状态为 (p_1, V_1) ,最高压力工作状态为 (p_h, V_h) ,有气体状态方程

$$p_0 V_0 = p_1 V_1^n = p_h V_h^n = p_x V_x^n = C \quad (1)$$

式中: p_x 为蓄能器压力; V_x 为蓄能器体积; n 为多变指数; C 为常数.对于充气式蓄能器取 $p_0 = k \cdot p_1$,一般情况下, k 的取值为0.8~0.85.

忽略蓄能器进出口节流损失,在高压供能阶段,伸缩缸受力方程表示为

$$p_x A_2 - p_1 A_1 - m \frac{d^2 y}{dt^2} - B_p \frac{dy}{dt} - F_L = 0 \quad (2)$$

式中: p_1 为回油压力; A_1 与 A_2 为液压缸活塞面积; B_p 为黏性阻尼系数; F_L 为负载.

因此,任意时刻,蓄能器体积表示为

$$V_x = V_1 - y \cdot A_2 \quad (3)$$

同时,蓄能器压力表示为

$$p_x = p_h \left\{ \frac{V_h}{V_1 - y \cdot A_2} \right\}^n \quad (4)$$

对于蓄能器容量的选择,理论上容量越大越好,但同时要兼顾蓄能器充放能量动态性能.因此,要综合伸缩缸负载,设定相关边界条件,对蓄能器预充压力与体积进行合适的选配.

为评价单级压力源系统与两级压力源系统工作效率,建立相关数学表达式.对于单级压力源系统,

伸缩机构供给能量为

$$E_1 = \int_0^T P_{in} dt = \int_0^T p_s Q_s dt \quad (5)$$

式中: P_{in} 为单级压力源输出功率; p_s 与 Q_s 分别为单级压力源系统输出压力与流量; T 为单级系统供能时间.

对于两级压力源系统,供给能量为

$$\begin{aligned} E_2 &= \int_0^{T_1} P_{in}^{(1)} dt + \int_0^{T_2} P_{in}^{(2)} dt \\ &= \int_0^{T_1} p_1 Q_1 dt + \int_0^{T_2} p_2 Q_2 dt \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $P_{in}^{(1)}$ 与 $P_{in}^{(2)}$ 分别是两级系统输出低压输出功率与高压输出功率; p_1 与 p_2 分别是两级系统输出低压压力与高压压力; Q_1 与 Q_2 分别是低压模式与高压模式输出流量; T_1 与 T_2 分别是低压模式与高压模式供能时间.

设系统执行相同任务,所受负载为 F ,伸缩缸运动位移为 s , P_{out} 为执行负载所需功率.因此,伸缩机构周期内运动所需能量为

$$E_{out} = \int_0^{T_{per}} P_{out} dt = \int_0^{T_{per}} F ds \quad (7)$$

综上,计算得到两种液压系统效率为

$$\begin{cases} \eta_1 = \frac{E_{out}}{E_1} \times 100\% \\ \eta_2 = \frac{E_{out}}{E_2} \times 100\% \end{cases} \quad (8)$$

3 仿真实验

为了验证两级压力源液压系统的可行性与节能效果,基于Matlab与AMESim联合仿真对两级压力供能与单级压力供能过程进行分析.对于机器人伸缩机构,两种液压系统执行相同负载与位移,相关曲线如图2所示.其中,位移输入信号为理想正弦信号,频率为1 Hz,幅值为0.1 m.

基于管道机器人运动原理和液压系统在修井工况下工作需求,设定相关仿真参数见表1.

仿真得到两种液压系统输出功率曲线,如图3所示,在整个机器人运动过程中,两级压力源系统的输出功率小于单级系统的输出功率,仅在液压缸负载力较大时段,两级液压系统的输出功率略高于单级液压系统的输出功率.应用公式得到单级压力源系统供能输出总能量为2892 J,两级压力源系统中系统所供给的总能量为1394 J.由于2 s内伸缩运动需求总能量为789 J,因此完成机器人在2 s内的运动,单级压力源系统的效率为27.3%,而两级压力源系统效率为

56.6%，两级液压系统效率比单级系统提高了 29.3%。

表 1 液压系统主要仿真参数

参数	数值
伸缩缸内腔直径/m	0.03
活塞杆直径/m	0.015
液压缸行程/m	0.1
低压回路系统压力/MPa	7.5
蓄能器预充气压力/MPa	18
蓄能器容积/L	0.2
蓄能器多变指数	1.2

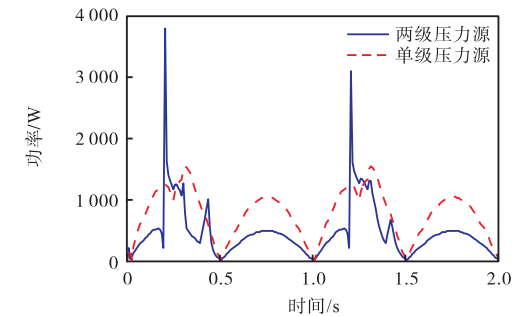


图 3 两种液压系统功率曲线
Fig. 3 Power curves of two hydraulic systems

对功率曲线进行积分计算，得到 2 s 内机器人运动供给能量变化曲线，如图 4 所示，最下面绿色点划线所描述的是伸缩液压缸工况实际需要的能量变化，中间蓝色实线描述的是两级压力源系统供给的能量变化，最上面红色虚线描述的是单级压力源系统供给的能量变化。

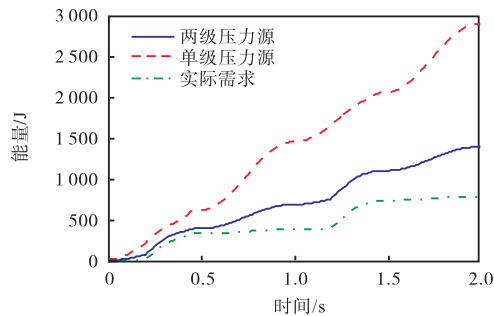


图 4 两种液压系统供给能量曲线
Fig. 4 Energy curves of two hydraulic systems

从图 4 可以看出：两级压力源系统的输出能量始终低于单级压力源系统的输出能量，这表明相对于单级压力源供能系统，两级压力源系统具有更高的驱动效率。

4 性能分析

前面验证了两级压力源系统的节能效果，下面对

供能系统工作性能进一步分析。两级压力源液压系统驱动液压缸活塞位移曲线如图 5 所示。两级压力源系统能够使液压缸按规划路径运动，并且跟随性良好，控制精度达到 3 mm，时间延迟为 0.05 s，可以达到牵引器工作性能需求。在开关阀打开，蓄能器释放油压瞬间，引起液压缸活塞波动，这种现象要通过对液压阀开口的预先控制予以规避，保证液压缸活塞稳定运行。

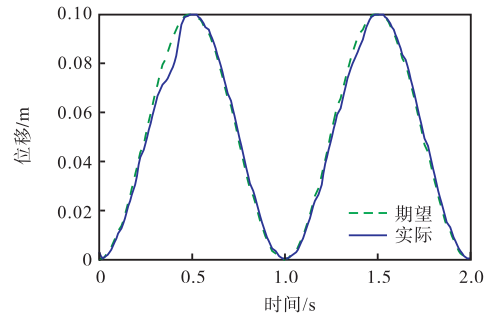


图 5 两级压力源液压缸活塞位移曲线
Fig. 5 Displacement of the hydraulic cylinder piston with two-stage pressure source

分别对单级压力源系统以及两级压力源系统进行仿真，得到输出系统压力曲线，如图 6 所示。

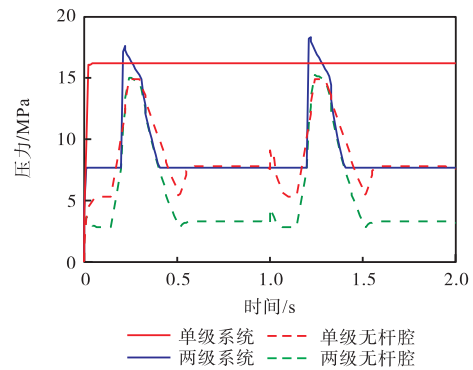


图 6 两种液压系统输出压力曲线
Fig. 6 Pressure curves of two hydraulic systems

对于单级压力源系统，输出压力如红色实线所示，一直保持在 16 MPa。在两级压力源系统中，输出压力随负载变化而变化(蓝色实线)，当执行器需要更大驱动力时，系统输出压力才会升高，而在其他时间，系统输出压力一直保持较低的水平(7.5 MPa)。因此，在两级压力源系统中的压力损失比在单级压力系统中少得多。

对比两种液压系统中液压缸无杆腔压力变化曲线，红色虚线为单级系统无杆腔内压力，绿色虚线为双级系统无杆腔内压力。可以看出，两级压力源系统中液压缸进出油口的压力比单级压力源系统要

小. 尤其是在负载很小, 执行器不需要很大驱动力的时间段(0.5 ~ 1 s, 1.5 ~ 2 s), 两级压力源系统中液压缸驱动压力会很小, 这也反映了两级压力源系统中液压阀的节流损失会更小.

5 结 语

(1) 基于管道机器人工作原理以及液压缸负载特性, 提出一种新型两级压力源供能系统, 通过实现输出压力与执行器负载压力相匹配, 提高液压系统驱动效率.

(2) 对高压蓄能器进行了数学建模与分析, 并建立了液压系统驱动效率计算方法, 通过数学计算与仿真验证了两级压力源液压系统的节能效果, 效率比单级压力系统提高了 29.3%, 主要原因在于大幅度减少节流损失.

(3) 对两级压力源液压系统驱动性能进行了仿真分析. 结果显示, 活塞位移跟随特性良好, 控制精度达到 3 mm, 时间延迟为 0.05 s, 可以达到牵引器性能指标要求.

参考文献:

- [1] Sevinchan E, Dincer I, Lang H. A review on thermal management methods for robots[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 140: 1-12.
- [2] Pan M, Plummer A, Agha A E. Theoretical and experimental studies of a switched inertance hydraulic system in a four-port high-speed switching valve configuration[J]. Energies, 2017, 10(6): 1-13.
- [3] Imam A, Rafiq M, Jalayeri E, et al. Design, implementation and evaluation of a pump-controlled circuit for single rod actuators[J]. Actuators, 2017, 6(10): 1-15.
- [4] Yu H, Choi I S, Han K L, et al. Development of a upper-limb exoskeleton robot for refractory construction[J]. Control Engineering Practice, 2018, 72: 104-113.
- [5] Jing C, Zhou J, Yuan S, et al. Research on the pressure ratio characteristics of a swash plate-rotating hydraulic transformer[J]. Energies, 2018, 11(6): 1-11.
- [6] Them A. Research on kinematics and pouring law of a mobile heavy load pouring robot[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018(4): 1-13.
- [7] Vukovic M, Leifeld R, Murrenhoff H. Reducing fuel consumption in hydraulic excavators: A comprehensive analysis[J]. Energies, 2017, 10(5): 1-25.
- [8] Xue Y, Shang J Z, Yang J H, et al. A new converter for improving efficiency of multi-actuators fluid power system[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2016, 30(5): 2273-2281.
- [9] 惠记庄, 杨永奎, 郑恒玉, 等. 基于蓄能器的挖掘机制动能量回收系统和控制优化[J]. 中国公路学报, 2016, 29(7): 143-151.
- [10] 姚静, 李彬, 孔祥东. 基于两级压力源的液压机快锻节能控制研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(10): 199-206.
- [11] Kogler H, Scheidl R. Energy efficient linear drive axis using a hydraulic switching converter[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2016, 138(9): 1-11.
- [12] Ho T H, Ahn K K. Design and control of a closed-loop hydraulic energy-regenerative system[J]. Automation in Construction, 2012, 22: 444-458.

责任编辑: 郎婧