

DOI: 10.3901/JME.2023.20.385

非道路移动装备高效电驱液传技术新进展^{*}

权 龙 闫志鑫 章硕峰 杨雨鑫 葛 磊 李泽鹏

(太原理工大学新型传感器与智能控制教育部和山西省重点实验室 太原 030024)

摘要: 双碳背景下, 电驱动方式成为有效解决非道路移动装备碳排放与能源浪费问题的重要途径。然而, 目前的电驱方式仅是用电池和电动机取代了内燃机, 液压系统仍沿用集中式动力源供能、多路阀分配动力的阀控方式, 存在系统能量转换、传递效率低的不足, 需要大容量的电池组满足工作时长的需求, 导致成本高, 制约其推广应用。因此, 提升液压系统的能效成为破解非道路移动装备电动化技术瓶颈的关键所在。对数字变排量泵技术、离散数字液压阀技术、浮杯泵技术, 国际上三种显著提升液压系统能效的方法、研究进展、应用效果进行了分析和论述。进一步对团队所提出的电气液压双动力驱动重载直线执行器的工作原理、能效特性和应用效果进行介绍, 所介绍的四种新型传动方式和现有技术对比, 普遍可提高能效 50% 以上, 为电动化非道路移动装备的推广应用奠定了基础。

关键词: 数字变排量泵; 离散数字液压阀; 浮杯泵; 电气液压双动力驱动

中图分类号: TH137

New Progress in Energy-efficient Electrical Drive and Hydraulic Transmission Technologies for Non-road Mobile Equipment

QUAN Long YAN Zhixin ZHANG Shuofeng YANG Yuxin GE Lei LI Zepeng

(Key Lab of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: Under the dual-carbon background, electric drive becomes an important way to solve the problem of carbon emission and energy waste of non-road mobile equipment. However, the current first-generation electric drive machine only replaces the combustion engine with batteries and motors. Hydraulic system is still using the valve control mode that centralized power supply energy, multi-way valve distributes the power. The existing technology has the disadvantages of system energy conversion and low transfer efficiency. Need to use a large capacity battery to meet the needs of the machine working hours, which also leads to the high cost of the machine, restricting its application. Therefore, improving the energy efficiency of hydraulic system becomes the key to break the bottleneck of electrification technology of non-road mobile equipment. This paper analyzes and discusses the latest international methods, research progress and application effect of digital variable displacement pump, discrete digital hydraulic valve and floating cup pump which can significantly improve the energy efficiency of hydraulic system. Finally, the working principle, energy efficiency characteristics and application results of the teams proposed electric-hydraulic dual-drive heavy-duty linear actuator are introduced. Compared with the existing technology, the four new transmission modes can increase the energy efficiency of the system by more than 50% , which lays a foundation for the popularization and application of the electric non-road mobile equipment.

Key words: digital variable displacement pump; discrete digital hydraulic valve; floating cup pump; electric-hydraulic dual-drive

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51875385, 51805349)。20230713 收到初稿, 20230825 收到修改稿

0 前言

鉴于内燃机远高于电池的能量密度, 液压传动的高功率密度、优良操控特性和抗冲击耐振动方面的优势, 各种类型工程、建筑、矿山、林业和农业机械等非道路移动装备, 普遍采用内燃发动机驱动液压泵作动力源, 经多路阀和管路分配与传递动力, 控制多执行器复合动作的集中式液压系统, 非道路移动机械也成为液压技术最为广泛和最主要的应用领域。但在充分利用液压传动技术优势的同时, 双碳背景下, 集中式动力源供能的液压系统能量转换、传递效率低的不足也越来越凸显。

研究表明, 控制阀口极大的能量损失、发动机长时间工作在低效区以及动能转换过程能量的浪费, 是造成非道路移动装备装机功率大、燃油消耗大、排放差和发热严重的根源, 也是制约非道路移动装备高效作业和节能减碳的三个关键环节, 其中控制阀产生的能量损失最为严重。以液压挖掘机为例, 虽然普遍采用了泵阀复合的节能技术, 但由于作业中执行器载荷差异较大, 整机能效不足 20%^[1]。这将使 80% 以上的燃油转化为非做功的热能浪费掉, 一方面加重了对环境的污染、碳排放, 产生温室气体效应, 使人类生存环境恶化, 另一方面也加快了地球上人类赖以生存的不可再生能源的消耗速度, 因此, 电驱动非道路移动装备作为可以有效解决碳排放与能源危机问题的重要途径成为全球行业的热点。

近年来, 国内外的工程机械领军企业都纷纷推出了电池作为动力的挖掘机、装载机, 但只能算是第一代产品, 仅仅是用电池和电动机替代了内燃机, 虽然动力源的能效极大的提高, 并实现零碳排放。但液压系统依然沿用现有集中动力源供能, 多路阀分配动力的方式, 液压系统的能效仅 30% 左右, 电池提供能量的 70% 被浪费掉。为了满足长续航时间作业的需求, 需要大容量的电池组, 这大幅提升了用户的购机成本, 因而, 提升液压系统的能效就成为破解工程机械电动化技术瓶颈的最关键和核心所在。文章对近年来显著提升液压系统能效的数字变排量液压泵、数字液压阀控数字缸、变转速浮杯泵系统和电气液压双动力驱动技术的研究进展做了重点论述。

1 数字变排量泵技术及系统构型

1.1 数字变排量泵技术原理

数字变排量的概念最早是由爱丁堡大学的 RAMPEN^[2]和 SALTER 在 20 世纪 80 年代提出, 目的是解决传统泵/马达在小排量时能效低的问题。数字变排量泵(Digital displacement pump, DDP)最初是轴向柱塞泵的形式^[3], 但考虑到配流的难易, 目前的产品和研究普遍采用径向柱塞泵的形式^[4], 径向形式与轴向形式相比有以下优点: 由于滑靴表面位于线速度较低的凸轮轴表面上, 减小了摩擦损失; 配流阀离传动轴较远, 为大流量阀的安装提供了足够的空间; 径向形式便于多个泵沿轴线并列布置, 泵的输出功率和排量可根据需求方便组合和调整。此外, 主轴轴承上的径向负载可以通过各个泵柱塞圆周方向的错位布置以及主动控制各个柱塞腔的压力来减小。

图 1 是径向柱塞式数字变排量泵的工作原理图, 由凸轮轴、柱塞、缸体、吸油阀、排油阀、高压回路和低压回路组成, 多个柱塞沿圆周方向均匀排布, 数量可根据需求调整, 随着凸轮轴的旋转, 柱塞腔容积由小到大再到小周期性变化, 柱塞交替地吸油和排油, 每个柱塞腔就相当于一个单独的泵源, 通过吸油阀和排油阀控制与高、低压回路的通断。空载时, 所有柱塞腔通过吸油阀始终与低压回路连通, 各个柱塞腔腔内的压力很小, 能量损失很小; 工作时, 每个柱塞的排油量都可以根据实际的需求从零到最大通过排油阀导通时间调控, 使得低排量时泵的压缩损失、摩擦损失和泄漏损失相对较小, 使泵在部分排量下也具有高效率, 整个泵就相当于是有多个变排量的单柱塞泵组成。

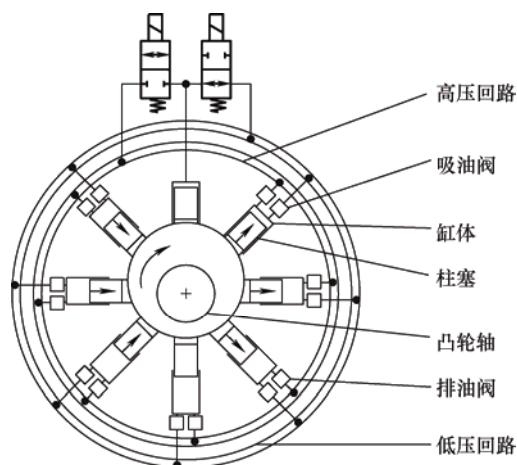


图 1 数字变排量泵的原理

此外, 整泵可看作是错位排布的多柱塞腔泵, 随柱塞数的增加降低了系统的流量脉动、减小了噪音。如果使排油阀与高压回路双向导通油, 排油阀作为进油阀引入高压油时, 数字变排量泵就成为数字式变排量液压马达。

数字变排量泵与斜盘式柱塞泵的效率 and 功率损失对比如图 2 所示, DDP 在整个排量范围内效率约为 93%, 斜盘式柱塞泵在排量大于 40% 时, 泵的效率可保持在 87% 左右, 随排量减小泵的效率明显下降, 最小值 60% 左右; 在整个排量范围内, 数字变排量泵的功率损失约为斜盘式柱塞泵的一半。

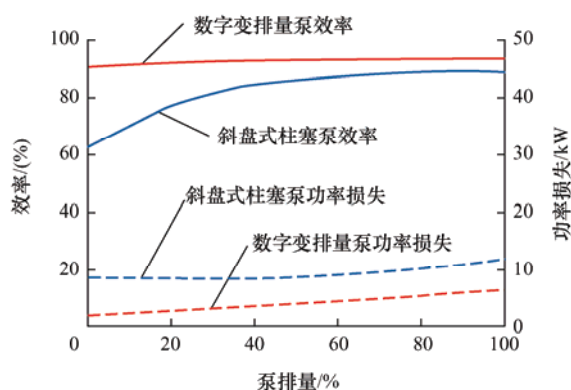


图 2 数字变排量泵与斜盘式柱塞泵的效率 and 功率损失对比

数字变排量泵的一种最简单的系统构型是在不改变原有液压系统的基础上, 仅仅将斜盘式柱塞泵替换为数字变排量泵, Artemis Intelligent Power Ltd 在 DEXTER 项目中将一台 16 t 履带挖掘机(JCB JS160)的原有液压泵替换为串联式双排数字变排量泵, 其它部分没有进行更改, 并对改装前后的挖掘机进行了测试, 结果表明, 改装后的挖掘机生产效率提高 28%, 同时仍能节省 10% 的燃料^[5]。

1.2 DDP 研究进展

配流阀是数字变排量泵的核心元件, 配流阀采用电磁控制插装式高速开关阀, 使用中承受十亿次以上的开关循环, 其通流能力、动态响应、驱动功耗关系到泵的可控性、能效、转速范围和运行的平稳性。

NØRGÅRD^[6]总结了数字变排量泵吸油阀和排油阀几种不同配置并给出了不同配置的功能及优缺点; 当吸油阀和排油阀均采用电磁铁控制开闭时, 为了避免排油阀在电气故障时一直处于打开状态, 使得柱塞腔体与高压回路保持连通, 与低压空转相比, 造成了更大的能量损失, 排油阀中增设了一个弹簧保持阀关闭^[7], 但同时也增加了阀的开启的功

率; 当数字变排量泵只工作在泵送和空转模式时, 吸油阀是一个电磁阀, 排油阀是一个单向阀, KUTTLER 等^[8]将排油阀直接嵌入到吸油阀中, 简化了结构, 吸油阀执行器包括一个双向电磁铁和一个永磁体, 下部匝数较多的线圈用于关闭吸油阀, 上部线圈用于抵消永磁体的磁通, 降低了闭合电磁力, 克服了大排量泵吸油阀电磁铁在开始关闭时力较小的问题, 减小了冲击, 扩大了阀的行程, 永磁体辅助弹簧保持阀打开, 降低了阀的功耗; 当数字变排量泵工作在马达模式时, 要求排油阀能在高压差下主动打开, STEIN 等^[9]设计了一种电磁驱动的常闭阀, 该阀包括阀芯和电枢两个运动部件, 线圈通电时, 阀芯不能运动, 而电枢运动, 打开一个小的辅助流道使柱塞腔和高压回路连通, 压力平衡后阀打开。为了减小阀的节流损失, 数字变排量泵的吸油阀和排油阀均采用了环形阀座的设计^[10-11]。

数字阀的瞬态开关性能是限制数字变排量泵转速的一个重要原因, ROEMER 等^[12-13]设计了一种动圈式阀, 针对不同的电源电压电流比进行了优化设计, 结果表明, 该阀开关时间仅略高于 1 ms, 在流量为 600 L/min 时, 压降低于 0.05 MPa, 使数字变排量泵能够高效运行。在动圈式阀的基础上, MADSEN 等^[14]设计了一种动磁铁式阀, 永磁体可保持阀的状态, 线圈不需要通电, 可降低阀的功耗, 该阀采用单个线圈, 线圈与液压油有效隔离, 结构简单, 阀内无复杂电气接口。MARSCHAND 等^[15]提出了一种由机械阀控制的径向柱塞数字变排量泵, 克服了电磁阀控制不准确、开启面积有限等问题, 可靠性高, 但系统的灵活性受到了限制。

数字变排量泵的控制策略包括全行程、部分行程和连续部分行程三种, 其中又有分流和限流两种模式, 控制策略的选择取决于对跟踪性能和能效的要求, 以及机器的配置方式和应用。全行程和部分行程的响应会依赖于泵转速, 连续部分行程的响应只与阀的响应有关且排量调整更精确, 但对阀的性能要求较高, 限流模式中会出现空化现象。数字变排量泵的吸油阀和排油阀会在柱塞到达上止点和下止点时延迟打开或提前关闭, 减小了柱塞腔与液压回路的压力梯度, 有利于阀的打开并避免了压力冲击^[16]。MERRILL 等^[17]通过建立仿真模型在不同工况下对数字变排量泵/马达控制策略进行了研究, 结果表明, 连续限流策略在泵送和马达运行中都能产生最低的功率损失, 阀响应的微小变化会导致很大

的功率损失。BREIDI 等^[18]提出了通过高低压管路压力波动预测阀延迟的算法,试验表明,预测误差在 5% 以下,改善了泵的性能。YUE 等^[19]研究了带有流量分配阀和辅助止回阀的数字变排量泵的自适应流量分配控制方法,在四个轴旋转角度下,通过比较流量分配阀进出口之间的压差与预设阈值调整控制信号,补偿了电机速度的波动和流量分配阀响应的变化影响,有效避免了油液回流,提高了泵的容积效率。

丹佛斯(Danfoss)^[20]推出了一款数字变排量泵,该泵利用嵌入式计算机控制超高速电磁阀,实时开启或关闭每一个柱塞腔,使得数字变排量泵具有超强的可控性和极高的工作效率以及更快的响应,配有多个出口,每个出口可以单独控制流量和压力,可实现流量动态分配与共享,提高了系统灵活性,实现了节能降耗。

1.3 DDP 系统构型及应用效果

在原有泵交换系统构型的基础上,进行了进一步的改进。数字变排量泵的泵组通过联动阀连接到不同的“执行单元”,根据各个执行器的需求改变连接到“执行单元”的泵排量,使得能量供应与执行器的功率需求更匹配。液压系统中,阀的损失是比较大的,图 3 为一种“工作总线”的结构,取消了原有的主阀,泵直接连接到执行器,减小了阀口的节流损失。LAGARDE 等^[21]对泵交换系统进行了试验测试,在此基础上,通过建立模型比较了改进的几种系统构型,仿真结果表明,采用联动阀进行动态流量分配的数字变排量系统最高可减少 24.8% 的能量需求。

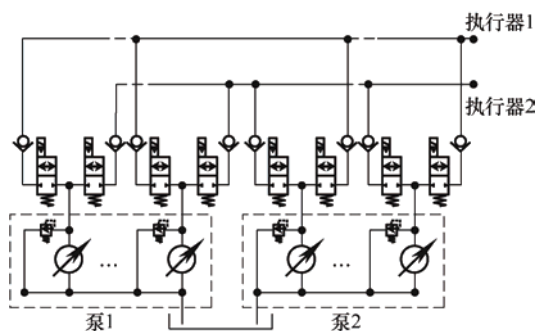


图 3 DDP+工作总线

进一步地,考虑到系统能量回收与利用,有两种方案,如图 4 所示,一种是数字变排量泵/马达(Digital displacement pump/motor, DDPM)通过扭矩耦合直接利用回收能量,将存储在执行器中的能量用来驱动其他执行器。该方案减少了能量转换环节,实现了能量的直接利用^[22]。另一种是 DDPM+蓄能

器的形式,将存储在执行器中的能量储存到蓄能器中。该方案中,蓄能器不是由执行器直接充液,而是由泵/马达进行充液,避免了直接充液造成的节流损失,同时,存储在蓄能器中的能量能够在不同压力水平的执行器中传递且无节流损失。

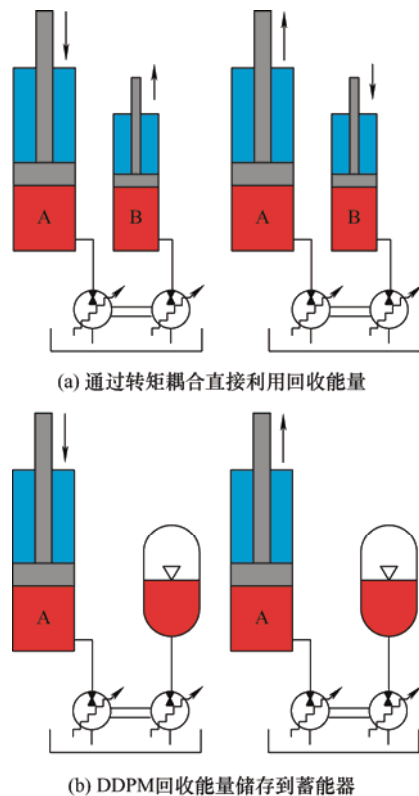


图 4 具有能量回收利用的 DDPM 回路原理

此外, HUTCHESON 等^[23]对数字变排量泵/马达控制的液压缸在离散节流模式和差动模式下的特性进行了研究,流量误差分别在 5% 和 10% 以内,差动节流模式比离散节流模式的能量回收效果显著,但只适合轻载的场合。

1.4 DDP 应用

数字变排量技术最早是用在波浪发电装置上,解决了传统泵/马达在低排量时能效低的问题并可以满足兆瓦级的高功率要求。1994 年 Artemis Intelligent Power Ltd(AIP)公司成立,该公司一直致力于数字变排量技术的开发和完善,并将该技术应用于风力发电、铁路、工业、混合动力车辆和非道路机械等领域。

2018 年丹佛斯(Danfoss)收购 Artemis Intelligent Power Ltd 并在爱丁堡建立生产基地,依托数字变排量泵技术为非道路移动装备开发低能耗高生产率的数字排量泵及液压系统。图 5 为应用数字变排量泵的装载机和挖掘机。丹佛斯(Danfoss)^[24-26]对不同系统构型的挖掘机在装车和平地工作模式的油耗进行

了测试, 测试结果表明, 与现有挖掘机相比, 采用联动阀进行动态流量分配的数字变排量系统可节省燃料 30% 以上, 采用数字变排量技术并进行能量回收, 与原系统相比可节省燃料 50% 以上, 系统能效显著提高。



(a) 装载机



(b) 挖掘机

图 5 数字变排量泵在非道路移动装备中的应用(Danfoss)

MARSHALL 等^[27]将数字变排量泵应用到一台 4.5 t 的柴油叉车上, 与原来叉车相比, 燃料消耗降低了高达 41%。

2 离散型数字阀控数字液压缸技术

2.1 离散数字液压阀原理及其构型

离散数字阀的理念最早可以追溯到 1961 年, BOWER 等^[28]提出了一种基于多阀并联结构的阀控缸系统专利, 其输出流量是由三组并联开关阀控制。MURPHY 等^[29]的专利将上述理念扩展到控制液压缸两腔的流量。日本学者 TANAKA^[30]研究了二进制编码的并联开关阀, 测试了阀组的压力和流量特性, 并将其应用在注塑机上。国内浙江大学刘荣^[31]设计了一种广义脉码调制的离散液压数字阀, 该阀在保持控制精度的前提下, 提升了流量控制范围。芬兰坦佩雷理工大学 LINJAMA 等^[32-34]为控制水液压系统, 提出了数字流量控制单元(Digital flow control unit, DFCU)的概念, 在前人研究基础上总结和完善了离散数字阀的理论。

离散数字阀构成原理如图 6 所示。原理是用一组电磁开关阀来替代连续控制的比例阀或伺服比例阀, 每组开关阀的个数可以根据应用对象的需求来确定。与传统模拟式液压阀相比, 数字阀的优势在

于开关式工作原理和并联布置的结构。一方面开关阀工作原理简单, 动态响应快, 最大流量的响应时间和单个阀的响应时间一样。另一方面开关阀独立并行工作, 冗余性高, 抗污染能力强。即使某些阀出现故障, 数字阀也能重新调整构型, 并保持一定的工作能力。具体使用中, 阀组中各个阀的面积可以根据编码方式来确定比例关系, 最基本的编码方式有等值编码、二进制编码和斐波那契数列三种, 等值编码每个阀的开口面积相等, 二进制编码阀的面积按 2 的幂次递增, 斐波那契编码的第一个阀和第二个阀的面积相等, 从第 3 个阀开始, 阀的面积为前两个阀的面积之和, 如第 3 个阀的面积是第一个阀面积的 2 倍, 以此类推。图 7 给出三种编码方式阀组的面积变化关系(流量步长为 1 L/min)。从图 7 中的曲线可以看出, 3 种编码方式, 同样是 4 个阀, 具有同样的最大开口面积, 等值编码阀流量的分辨率最低, 最小流量是二进制编码阀的 4 倍, 要提高分辨率就需要增加阀的数量。斐波那契编码阀的流量分辨率和变化率均介于等值编码与二进制编码之间, 流量分辨率值和流量变化率均是二进制编码的 2.14 倍。因此, 从流量分辨率, 变化率和达到相同流量所需要阀的数量等方面来看, 二进制编码方式是最佳的组合。

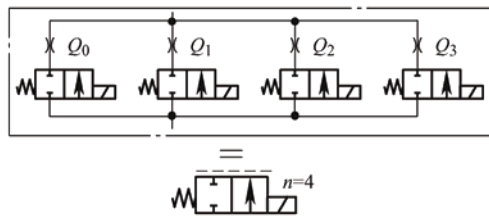


图 6 4 位数字阀示意图

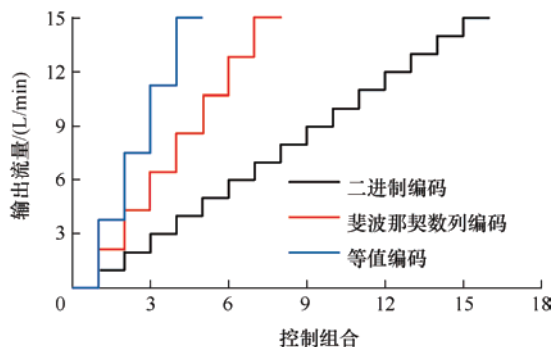


图 7 二进制编码的 4 位数字阀流量曲线

2.2 离散数字液压阀系统

离散数字阀控液压缸系统原理如图 8 所示, 其由恒压动力源, 液压缸和离散数字阀组成。其中液压缸可以是两腔, 三腔或四腔液压缸。系统采用进

出口独立的方式控制液压缸的运动,即每两个数字阀为一组,分别控制每个腔室的进油和回油。阀组通过开关阀的启闭进行节流,从而实现了液压缸腔室压力和流量的同时独立调节。相对于传统液压系统,进出口独立控制实现了进、出油口解耦,可有效降低能耗。而离散数字阀的应用则提高了系统的可靠性与控制自由度。

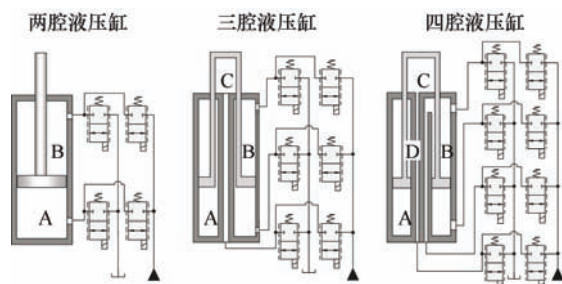


图 8 离散数字阀控液压缸系统工作原理

2.3 离散数字液压阀及其系统研究进展

离散数字液压阀的研究进展可以分为离散数字阀构型设计和基于数字阀的控制系统研究两个方面。

在离散数字阀设计方面,目前的离散数字阀主要受到阀组体积过大,开关阀切换动态特性差等因素制约。刘荣等^[35]将多个开关阀集成到一个阀块上,通过对阀块内部结构的仿真和优化,降低了阀的能耗与噪声。LINJAMA 等^[36]为减小离散数字阀体积,将数百层 2 mm 厚的钢板电镀后再热处理融合。该方案成功将 64 个小型高速开关阀集成在一个阀岛上。尽管该数字阀岛重量是类似伺服阀的 3 倍,但阀组的尺寸却与伺服阀相近。LAAMANEN 等^[37]则针对数字阀在状态切换时容易发生流量冲击的问题,总结了防止冲击的解决方案。结果表明延迟阀的启闭时间可以降低流量冲击的幅值。通过采用减少开关阀启闭次数的控制策略,系统发生冲击的概率会显著降低。而斐波那契数列,脉冲数等编码方式理论上也可以抑制流量冲击。HANSEN 等^[38]研究了开关阀不同启闭时间对于流量冲击的影响程度,并重新设计了并联开关阀的开启顺序,优化了过渡过程中的瞬态通流面积,改善了阀组切换时的动态特性。

此外受最小阀通流能力制约,离散数字阀的小流量调节能力弱于伺服阀^[39]。HUOVA 等^[40]针对该问题,研究了将 PWM 控制的高速开关阀与离散数字阀相结合的方法。PWM 开关阀可以通过调节控制信号占空比的方式来改变开关频率,进而调节输出流量,其小流量特性优于离散数字阀。试验结果

表明该方法可有效提高阀的控制精度。PALONIITTY 等^[41]研究了 PFM 编码的数字阀,多个开口面积相同的阀轮流开启,通过调节每个阀的开启频率实现流量的精细调节。试验结果表明该方案可以提高位置控制精度,但阀组在工作时存在共振现象。

而在离散数字阀系统方面,LIU 等^[42]设计了基于广义脉码数字阀的位置控制系统,其采用了回油节流调速,并通过换向阀控制液压缸运动方向。试验结果表明在采用了 Bang-Bang 控制、PID 控制和模糊控制相结合的控制策略后,系统稳态误差和稳定时间大幅减小。LINJAMA 等^[32]则在水液压系统中使用两组数字阀分别控制进油和回油流量,电磁换向阀改变流向,并设计了基于代价函数的开环和闭环控制策略。该方案控制效果接近水液压伺服系统,但由于电磁换向阀响应较慢,影响了系统的轨迹跟踪精度。针对该问题,LINJAMA 等^[43]又使用四组离散数字阀组成了进出口独立控制系统,并在随后提出了基于模型的力-位置复合控制方法^[44],该方法有效提高了系统的控制性能。

上述数字阀系统仍然是采用节流控制,为进一步降低系统能耗,研究学者提出了基于多级压力源的离散数字阀控数字液压缸系统。其中数字液压缸指的是具有两个以上腔室的液压缸。LINJAMA 等^[45]最早通过两级压力源控制数字液压缸,试验表明由于开关阀不进行节流控制,系统能耗降低了 60%。HUOVA 等^[46]使用离散数字阀节流控制三腔液压缸,有效提高了速度跟踪特性。由于液压缸只有两个压力等级的输入,使得在压力较大的超越负载工况时,系统节流损失较大。为解决该问题,DELL'AMICO 将三级压力源与四腔液压缸相结合,构成图 9 所示的系统构型原理,该系统能够根据负载将性,控制离散数字阀实现压力源与负载的匹配^[47]。数字阀只进行开关控制,很大程度上消除了节流损失。此外该系统还允许回收能量。由于能量损失的减少与蓄能器提供峰值功率,系统可以采用更小的动力源,并使其稳定工作在高效区间。HUOVA 等^[48]将该结构应用于液压马达,马达输出离散力矩,仿真结果显示系统能耗显著降低。为平稳和高效地控制数字缸,HEYBROEK 等^[49]采用外环位置控制,内环力控制的双闭环方式控制数字缸,并通过压力传感器间接测量负载力作为参考信号。HEEMSKERK 等^[50]使用开关阀与比例阀混合控制数字缸。为不产生大量能耗损

失, 比例阀只节流控制液压缸一个小腔室, 进而控制液压缸速度与输出力。结果表明该方案可有效提高输出力的分辨率。

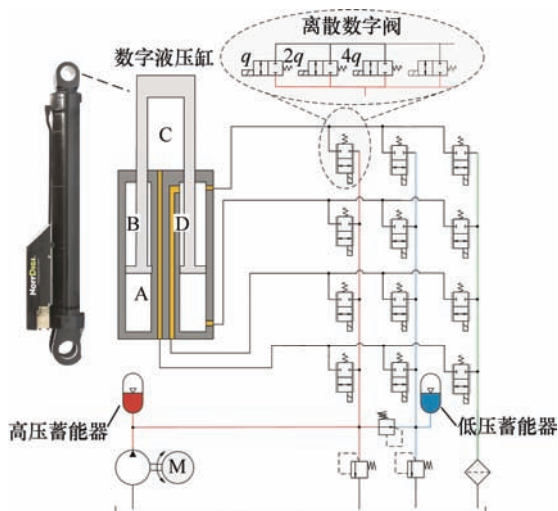


图9 数字阀控数字缸系统工作原理

2.4 离散型数字阀控数字液压缸系统构型及应用

关于数字阀系统的应用很多, 包括装载机^[51]、挖掘机^[52]、列车车身平衡系统^[53]、造纸机辊^[54]等。进一步地, 为了兼顾低系统能耗, 高可靠性和低成本的要求, DELL'AMICO^[47]首次将离散数字阀, 数字液压缸和三级压力源结合, 其系统构型如图9所示。

来自瑞典和韩国的沃尔沃团队与芬兰Norrhydro公司密切合作, 将芬兰坦佩雷大学的研究思路转化为成熟的技术方案, 并成功应用于如图10所示的沃尔沃30 t级挖掘机^[49]。研究人员将数字液压缸系统与负载敏感液压系统进行对比。试验结果显示, 系统能耗大幅降低。生产效率提高5%~12%, 燃油效率提高45%~60%, 能量回收率可达80%, 泵尺寸减少40%。该系统因此获得了2021沃尔沃技术奖^[55]。



图10 数字液压缸系统试验样机

3 变转速浮杯泵技术及其系统构型

3.1 浮杯泵的基本原理

1972年, 美国通用公司的CLARKE为减小柱塞所受径向力, 从而减小柱塞与缸体之间的磨损, 提出了一种新型的轴向柱塞泵结构: 杯状柱塞呈环形分布在中心转子上, 同时每个柱塞都对应独立的柱塞缸。2002年, 荷兰Innas公司在此基础上进行了二次创新, 发明了定排量浮杯泵(Floating cup pump)^[56], 结构如图11所示, 主要元部件有主轴、柱塞板、柱塞、轴承、浮杯盘、浮杯、配流盘、止动环、弹簧、支撑环、轴销等。

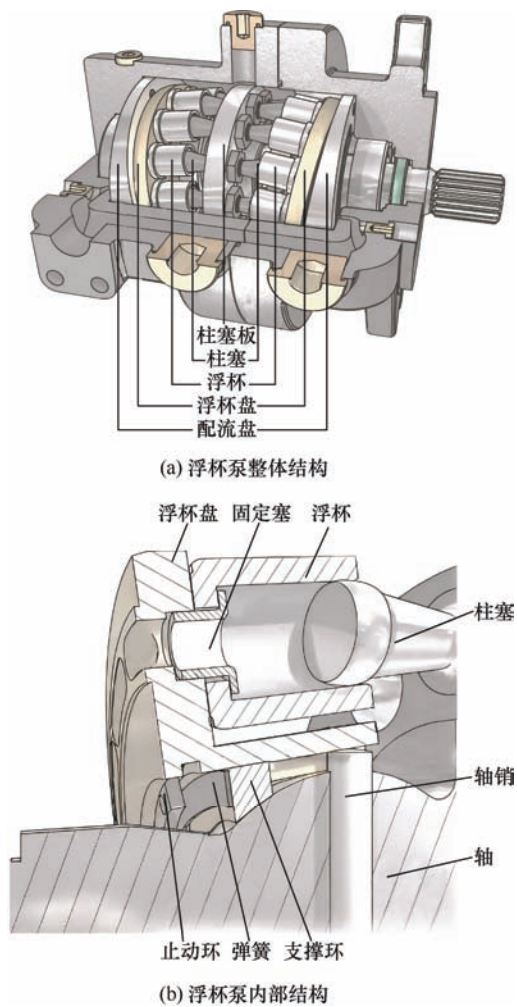


图11 浮杯泵结构

浮杯泵采用镜像对称设计, 柱塞板两侧各有12个呈环形排列的柱塞, 每个柱塞都对应浮杯盘上一个独立的缸筒(即浮杯)。为了减小流量脉动, 两侧柱塞错位布置, 或将一侧配流盘旋转 15° ^[57], 使浮杯泵相当于24柱塞的液压泵, 流量脉动大幅减小。柱塞头部被设计为球形, 以保证旋转过程中, 柱塞与浮杯之间始终处于线密封状态, 同时补偿部

分浮杯所受离心力,减小浮杯与柱塞之间的摩擦力。浮杯由底面开有配流槽的浮杯盘支撑,固定塞和液压力共同作用使浮杯紧贴浮杯盘的表面。

柱塞板与浮杯盘之间的倾斜角度被限制在 12° 以下,柱塞的圆周运动会使浮杯盘上浮杯的运动轨迹变为椭圆^[58]。为了补偿造成的椭圆偏差,固定塞和浮杯盘之间留有微小的间隙以保证每个浮杯都能够在浮杯盘上的一定范围内自由运动。

为了保证柱塞与浮杯之间的同步转动,柱塞板与轴设计成一个整体,浮杯盘与轴之间通过止动环、波形弹簧、支撑环与轴销连接在一起,通过轴销驱动浮杯盘随轴一起转动。

浮杯盘底部的配流槽和配流盘组成配流副,在浮杯泵工作过程中,柱塞相对固定,浮杯沿柱塞轴向运动,改变浮杯内工作腔容积,通过固定塞将油液经配流盘上的配油窗口吸入/排出。

研究表明,与斜盘式柱塞泵相比,浮杯泵的输出流量更加平稳,压力脉动大幅减少,流体噪声与机械噪声显著降低。低转速情况下扭矩损失小,这保证了浮杯泵低转速运行时的工作能力。目前,浮杯泵的容积效率 96%,整体效率范围为 94%~97%。同时,浮杯泵结构紧凑,质量较轻,使得浮杯泵能够以更高转速运行^[59-62]。

3.2 浮杯泵研究进展

ACHTEN 等^[63]采用将柱塞头部掏空,形成圆柱形油腔体代替活塞环密封的方法,使得柱塞头能够随着浮杯一起受压肿胀,达到补偿浮杯杯体形变减小间隙的目的。研究表明,在 35 MPa 的压力下,单个柱塞泄漏量由实心柱塞的 12 mL/min 减少到 2 mL/min。

在吸油过程中,轴向压力不足以将浮杯压紧在浮杯盘上。由于离心力的作用,浮杯会有脱出浮杯盘的趋势,此时浮杯底部的连接孔可能会将固定塞卡死,导致泄漏量增多。为避免固定塞卡死,减少泄漏量,VAN DEN BRINK 等^[64]研究采用碟型弹簧代替固定塞的方法,将浮杯压紧在浮杯盘上,同时保证浮杯在浮杯盘上小幅度运动的能力。研究表明,使用碟型弹簧压紧浮杯在不影响机械效率的同时,可有效减少泄漏量,提高容积效率。

浮杯受到的离心力以及浮杯与柱塞之间的摩擦力作用到浮杯盘上会产生较大的倾覆力矩,而倾覆力矩是限制浮杯泵转速的主要原因。为了提高浮杯泵的转速,ACHTEN 等研究采用减小浮杯壁厚的方法实现浮杯减重。以排量为 $24 \text{ cm}^3/\text{r}$ 的浮杯泵为例

进行改造,将浮杯内壁厚度由 2.25 mm 减小到 1.1 mm,浮杯杯底厚度由 1.5 mm 减小到 1 mm,同时浮杯质量减少了 61%。这将有效降低浮杯所受的离心力及浮杯与柱塞之间的摩擦力,从而提高浮杯泵的机械效率。研究表明,使用新的设计方案,在满足浮杯强度要求的同时,排量为 $24 \text{ cm}^3/\text{r}$ 的浮杯泵工作压力可达 50 MPa,倾覆临界转速能达到 7 600 r/min,能在 5 000 r/min 的转速范围内稳定运行^[65]。

为了方便实现浮杯泵的自动化和规模化生产,MOMMERS 等^[66]研究采用将柱塞整体拆分为球形柱塞冠和柱塞杆两个结构的方法,柱塞冠与浮杯内壁直接接触,柱塞杆作为柱塞冠放置的底座。研究表明,采用新型柱塞结构的浮杯泵与原有浮杯泵相比,高工作压力下新型浮杯泵柱塞与浮杯之间的泄漏量明显减少,新型浮杯泵的效率略有提高。同时,可以采用冲压工艺生产新型柱塞,进一步降低了生产成本,提高了生产效率。

为了实现浮杯泵变排量控制,ACHTEN 等^[67]研究采用 2 个前作动器,2 个后作动器,2 个偏置柱塞,1 根偏置弹簧组成的控制机构,实现对斜盘(配流盘)倾斜角度的驱动和控制。研究表明,与滑靴式变排量斜盘柱塞泵相比,斜盘轴向所受的支撑力减少了 90%,大幅度改善了浮杯泵的动态特性。

经过不断的改进,Bucher 公司推出了最新的 AX 系列浮杯泵,其结构如图 12 所示。AX 系列浮杯泵的排量 $18 \text{ cm}^3/\text{r}$ 到 $122 \text{ cm}^3/\text{r}$ 不等。工作压力 45 MPa,压力峰值 50 MPa,没有最低转速限制,最高转速目前可达 3 600 r/min,整体效率在 94%到 97%之间^[68]。

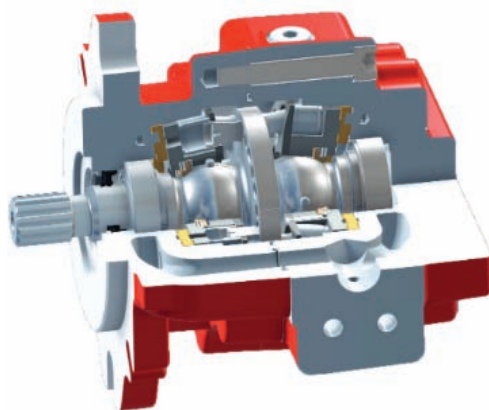


图 12 AX 系列浮杯泵

3.3 变转速浮杯泵系统构型及应用

变转速浮杯泵控系统使用变转速电机驱动定排量浮杯泵,通过改变电机转速和方向控制液压

缸的运行模式和速度。图 13 是 Bucher 公司设计的多执行器分布式控制回路系统原理^[69], 整个系统所用泵均为浮杯泵/马达, 其中包含多个执行器子系统, 变转速浮杯泵系统(绿色框线部分)是其中最主要的子系统。

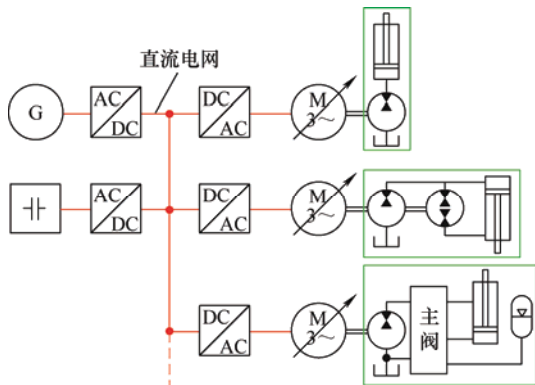


图 13 多执行器分布式控制回路系统

多执行器分布式控制回路系统包含三种变转速浮杯泵控液压缸系统。① 开式回路, 运行时符合二象限工况, 只存在阻抗伸出、超越缩回两种运行模式, 该系统中浮杯泵/马达可启用马达工况进行能量回收, 回收能量以电能形式存储在 DC 系统中; ② 闭式回路, 运行时符合四象限工况, 存在阻抗伸出、阻抗缩回、超越伸出、超越缩回四种运行模式, 一个浮杯泵被用来补偿差动缸流量, 该系统可以进行能量回收; ③ 开式回路, 运行时符合四象限工况, 在系统中利用蓄能器可进行能量回收。为了避免阀口带来的节流损失, 变转速浮杯泵控直驱系统①、②可以充分发挥浮杯泵的效率优势。

研究表明, 在进行相同重量的负载举升和下放作业时, 传统负载敏感系统中电机输出功率分别为 20.5 kW 和 26.2 kW, 闭式泵控系统中电机输出功率减少到 8.8 kW 和 6.1 kW, 变转速浮杯泵系统中电机输出功率减少到 4.7 kW 和 3.9 kW, 变转速浮杯泵系统的整体效率是传统负载敏感系统的四到五倍。

Bucher 公司已经将多执行器分布式控制回路系统应用在所设计的电动化装载机、叉车、推土机等电动化非道路移动装备上^[69]。直流环节中的电能由蓄电池、超级电容、柴油发电机或燃料电池提供。通过直流电网连接电动化非道路移动装备中所有的旋转和直线执行器, 每个执行器所属的子系统从电网中提取能量, 利用变转速电机控制排量 AX 浮杯泵/马达运行, 子系统回收的能量可以储存在直流电网或是直接提供给其他执行器子

系统, 整机效率普遍提高 50%。

4 电气液压双动力集成驱动直线执行器

为了提高机器的能效, 新的一种方式是采用电机机械直线执行器, 也称为电缸。就是伺服电机经过减速器驱动滚珠丝杠副构成的直线执行器。虽然具有能效高的优势, 但存在功率密度低的不足, 目前主要用在小功率的机器上, 受电机功率密度的制约, 还难以用于大功率的重载机器。因此, 现有传动技术难以同时满足重型装备高效能、高功率密度与高性能的需求。

为了解决上述问题, 本研究团队将液压缸的活塞与电机机械执行器的螺母集成为一体, 发明了图 14 所示的电气液压双动力融合协同驱动的重载直线执行器^[70-73]。

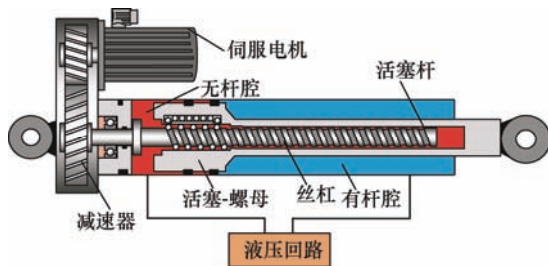


图 14 电液双动力直线执行器原理图

如图 14 所示, 电气液压双动力直线执行器由伺服电机、减速器、丝杠、活塞杆、活塞-螺母副及液压回路组成。电机经减速器驱动丝杠旋转, 丝杠经螺母带动活塞杆作直线运动, 构成电机机械直线执行器; 液压回路输出的高压油液作用在活塞-螺母副的两端面, 压力差直接驱动螺母和塞杆作直线运动, 构成液压缸。电机输出的扭矩经丝杠转换为力与液压力共同作用在活塞-螺母上驱动活塞杆运动, 所以活塞杆在电气和液压双动力的共同驱动下伸出和收回, 实现了液压传动与电机机械传动的输出力耦合。通过更换不同的液压回路, 电气液压双动力直线执行器可匹配任意回路的液压系统。

电气液压双动力直线执行器可通过液压单元来放大电气单元输出力, 从而弥补电机机械传动功率密度低的不足, 在轻载工况可以仅采用电机机械传动直接驱动负载, 在重载工况, 通过液压系统放大电气动力后共同驱动负载。定义液压系统的输出力为 F_H , 电机机械单元输出的力为 F_E , 则液压单元对电气单元的力放大系数 K 可表示为

$$K = \frac{F_H}{F_E} = \frac{\frac{\pi D^2}{4} p_a - \frac{\pi d^2}{4} p_b}{T_E \frac{2\pi}{L_p}} = k(p_a D^2 - p_b d^2) \quad (1)$$

式中, p_a 、 p_b 分别为液压缸两腔的压力; D 为活塞直径; d 为活塞杆直径; T_E 为电机输出转矩; L_p 为丝杠导程; q_L 为液压系统流量; ω 为电机转速。

由式(1)可知, 电气液压双动力直线执行器的力放大系数与液压缸两腔的压力和活塞两端面直径成正比。理论上, 通过增大活塞直径、提高液压系统压力就可方便地提升电机机械执行单元的功率密度。但活塞直径会受到结构的限制, 不易过大, 主要通过提高执行器两腔压力差来方便地提高液压单元输

出力, 实现液压力放大电气动力的目的。

为了降低液压和电气两传动单元的耦合影响, 设计了如图 15 所示的控制策略。电机机械传动单元控制执行器速度和位置, 通过电机自身转速传感器, 可实现执行器速度闭环控制, 通过电机转角传感器或外置位移传感器, 可实现执行器位移闭环控制, 发挥电机机械单元控制精度高的优势。液压传动单元调控输出力克服外负载力, 使电机机械仅克服执行机构惯性力、摩擦力等较小阻力, 保证电机机械传动单元承载能力, 发挥液压传动单元输出力大的优势。

所研制的电液双动力直线执行器, 兼具高效、高功率密度和高性能, 是目前综合性能较优的直线驱动与传动系统^[74]。

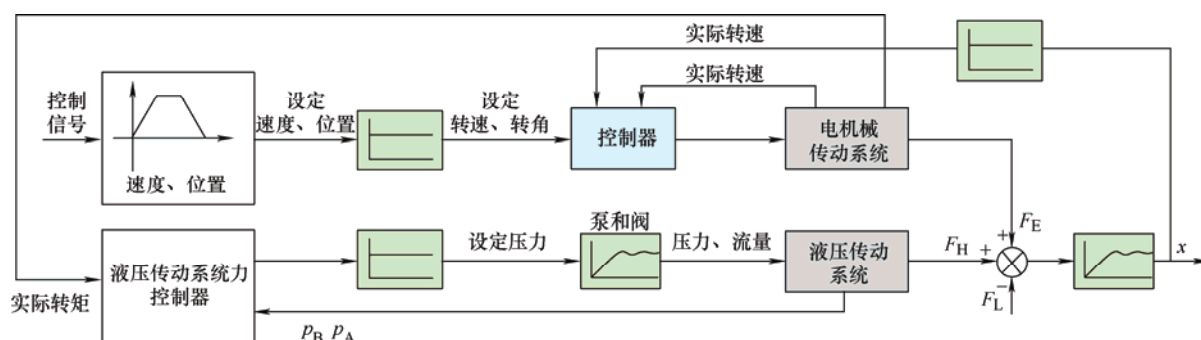


图 15 电液双动力直线执行器控制策略

为了测试电气液压双动力直线执行器的特性, 根据文献[71]中建立的试验平台, 对系统特性进行测试分析。图 16 所示为仅有惯性负载工况下, 双动力直线执行器的速度阶跃响应特性曲线。

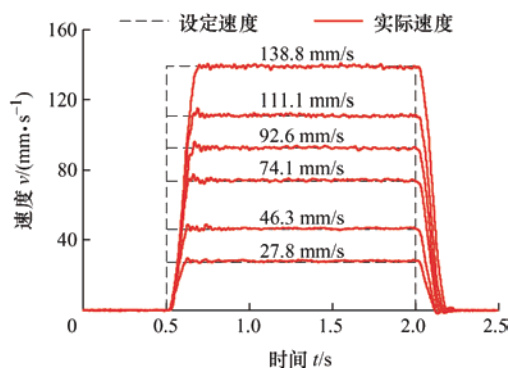


图 16 双动力直线执行器速度阶跃响应特性

由图 16 所示速度曲线可知, 阶跃响应过程中, 电液双动力直线执行器几乎不存在速度超调, 速度响应滞后小, 在时间 0.5 s 时, 给定速度阶跃信号, 电液双动力直线执行器速度响应滞后约 5.8~17.8 ms。

随着设定速度的增大, 双动力直线执行器速度响应时间成比例增大, 设定速度值为 28 mm/s 时,

响应时间为 87 ms, 当设定速度值为 139 mm/s 时, 响应时间为 189 ms。同时, 鉴于伺服电机转速闭环控制的优良性能, 电液双动力直线执行器速度控制精度高, 速度波动小。

图 17 所示为双动力直线执行器的位置阶跃响应特性曲线。电液双动力直线执行器具有良好的位置阶跃响应特性, 位置阶跃变化过程运行平稳, 无超调和波动, 同时电液双动力直线执行器定位精度高, 定位误差小于 0.05 mm。

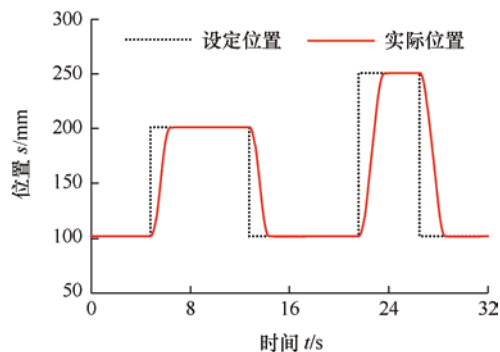


图 17 双动力直线执行器位置阶跃响应特性

设定执行器位置为 350 mm, 阶跃方式改变加载液压缸无杆腔的压力, 对双动力直线执行器的加载

特性进行了测试, 获得了图 18 所示的负载阶跃响应特性。

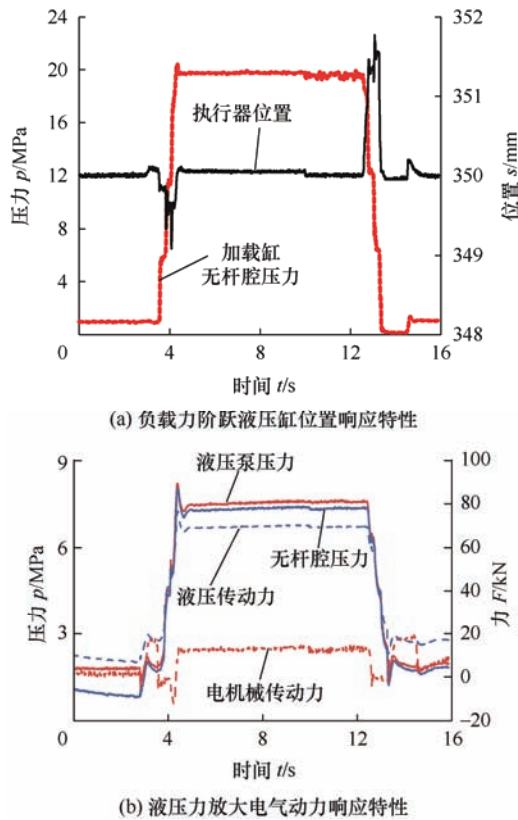


图 18 双动力直线行器负载阶跃响应特性曲线

如图 18a 所示, 在 60 kN 负载力的作用下, 执行器位置瞬间减小, 动态误差达到 0.8 mm, 经过约 0.5 s 的时间, 执行器位置又回到了原有的设定值。当负载力突然减小至 4 kN 时, 受液压力的作用执行器突然伸出, 位置偏差值达到 1.5 mm, 当负载力稳定于 4 kN 不变时, 执行器位置又恢复到 350 mm 保持不变, 表明由于液压力的作用, 系统具有较大的位置刚度。

图 18b 所示为双动力直线执行器两腔压力和电机械驱动的输出力特性曲线。在负载力升高与降低的瞬间, 由于电机械传动单元动态位置刚度较液压传动单元大, 电机械单元首先响应负载力变化, 补偿液压传动单元输出力与负载力之差。随后, 液压单元的输出力快速上升, 很快就与外负载力平衡, 这时, 电机械单元的输出力有所减小, 随后又上升到一个稳定值。当加载力稳定在 60 kN 时, 执行器无杆腔压力约为 7.5 MPa, 液压传动单元输出力 69.8 kN, 电机械传动单元输出力为 11.2 kN。因此, 电液双动力直线执行器液压单元输出力是电机械传动单元的 6.23 倍, 验证了液压放大电气动力特性。

在前面研究成果的基础上, 把上述技术方案应用于实验室 6 t 液压挖掘机的动臂和斗杆, 对电液双动力直线执行器实际运行特性及节能效果进行了测试。图 19 所示为采用电液双动力直线执行器改造现有 6 t 小型挖掘机的样机照片。



图 19 电液双动力直线执行器驱动挖掘机照片

图 20 所示为测试电液双动力直线执行器驱动挖掘机挖掘过程的功率和能量特性测试曲线。

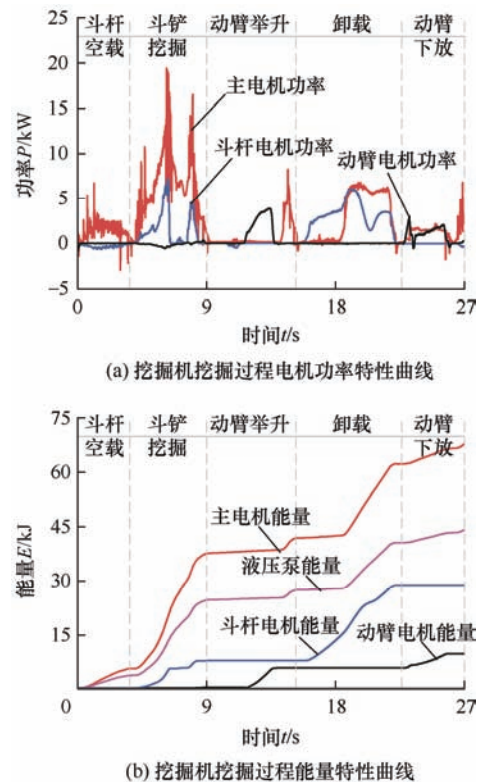


图 20 电气液双动力驱动液压挖掘测试曲线

挖掘过程中, 电液动力源向斗杆和铲斗提供液压能, 图 20a 所示为挖掘作业时系统功率特性曲线。由图中曲线可知, 斗铲复合挖掘时电液动力源和斗杆电机输出功率最大, 其中主电机峰值功率为 19.4 kW, 斗杆电机峰值功率为 7.2 kW。动臂举升过程中, 电液动力源不为动臂执行器提供能量, 维持较小功率运行; 动臂电机输出能量克服工作装置

和物料惯性力和部分重力,存在 4.7 kW 的峰值功率。卸载过程中,电液动力源仅为铲斗液压缸提供能量,当仅斗杆液压缸缩回时,动力源维持较小运行功率;当斗杆和铲斗复合作业时,主电机功率增大,为铲斗液压缸提供动力。

图 20b 所示为挖掘机系统能量特性曲线。一个挖掘循环中,主电机消耗的电能为 67.1 kJ,液压泵输出的能量为 43.7 kJ,电机及液压泵自身损耗为 23.4 kJ,动力源能效为 65.1%。斗杆电机消耗的能量为 28.4 kJ,其中电机的自身损耗为 4.77 kJ。动臂电机消耗的能量为 11.73 kJ,其中电机的自身损耗为 2 kJ。计算可得,一个挖掘循环中,整机能耗为 107.23 kJ,各执行器有用功为 62 kJ。因此,电液双动力直线执行器应用于挖掘机,可将整机能效由原机的不足 14%^[75]提升至 57%,节能效果显著。

鉴于电液双动力直线执行器在典型工程机械-液压挖掘机的优良的应用效果,该技术可配合不同的液压回路,进一步推广应用至航空航天、国防装备、农业机械和重型机械等领域。

5 结论

通过对上述几种提升液压系统能效方法的研究进展、应用效果进行分析和论述,可得到以下结论。

(1) 数字变排量泵与斜盘式柱塞泵相比,能耗显著降低,同时响应更快,噪音更低。该泵的每个柱塞进排油可独立控制,提高了系统控制灵活性,适用于电驱动和内燃机驱动的非道路移动装备,采用数字变排量并结合能量回收的挖掘机液压系统,较原系统可节约燃油 50% 以上,用于电驱动机器可显著减少电池容量与成本。

(2) 离散数字液压阀使用一组并联的电磁开关阀实现了流量的近似连续控制。与连续节流的比例阀相比具有动态响应快,冗余性高,抗污染能力强等优点。结合数字液压缸用于控制液压挖掘机,生产效率提高了 5%~12%,燃油效率提高了 45%~60%,能量回收率可达 80%。

(3) 与斜盘式柱塞泵相比,浮杯泵的压力脉动大幅减少,噪声显著降低,容积与机械效率大幅提高。应用在电动化非道路移动装备上的变转速浮杯泵控系统,在进行重载举升下放作业时,所需能量比传统负载敏感系统减少 80%,整机效率可提高 50% 以上。

(4) 电气液压双动力融合协同驱动直线执行器技术,将液压缸与电机械执行器集成一体,克服了现有传动方式的局限性,同时兼具高效、高功率密度与高性能。将电气液压双动力融合协同驱动直线执行器用于驱动挖掘机动臂和斗杆,较阀控系统能耗分别降低了 71.7% 和 43.7%;可将整机能效由原机的不足 14% 提升至 57%,节能效果十分显著。

6 展望

总结国内外研究现状可知,目前国际上尚没有可同时满足高功率密度、高能效和高性能品质的重载直线执行器,而现有的研究工作也都集中在各自的专业领域,虽然取得了很大的进展,但集中式动力源供能、控制阀分配动力的系统能效仍然很低;分布式的闭式泵控液压系统总装机功率大、大功率系统动态响应慢的问题依然存在。而电机械直线执行器受功率密度低制约主要用在轻载系统。

本团队提出的电气液压双动力协同驱动重载直线执行器方案,融合了电机械传动和液压传动两种方式的优点,克服了各自的不足;双动力协同驱动,同时也具有了集中式动力源供能总装机功率低和分布式系统高能效和高性能优势,有望破解现有技术无法同时兼具高功率密度、高能效和高性能品质的技术挑战,为重型装备践行双碳目标、实现智能化、绿色化和高端化提供原创的中国方案,在航空航天、海洋舰船、国防军工、矿山冶金、工程机械、农业和林业机械等重型装备领域具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] VUKOVIC M, LEIFELD R, MURRENHOFF H. Reducing fuel consumption in hydraulic excavators-A comprehensive analysis[J]. *Energies*, 2017, 10(5): 687.
- [2] RAMPEN W H S. The digital displacement hydraulic piston pump[D]. Edinburgh: University of Edinburgh, 1992.
- [3] SALTER S H, RAMPEN W H S. Fluid-working machine: US, 5259738[P]. 1993-11-09.
- [4] CALDWELL N J. Digital displacement hydrostatic transmission systems[D]. Edinburgh: University of Edinburgh, 2007.

- [5] GREEN M, MACPHERSON J, CALDWELL N, et al. DEXTER: The application of a digital displacement® pump to a 16 tonne excavator[C]// Proceedings of the 2018 Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control. ASME, 2018: 1-9.
- [6] NØRGÅRD C. Design, optimization and testing of valves for digital displacement machines[D]: Aalborg: Aalborg University, 2017.
- [7] RAMPEN W, STEIN U, BERNHARD P, et al. Electronically controlled valves: WO, 2010/106361 A1[P]. 2010-09-23.
- [8] KUTTLER O, LAIRD S, WADSLEY L. Fluid distribution valve: EP, 20, 080, 020, 083[P]. 2021-05-19.
- [9] STEIN U. Fluid-working machine: US, 12/440, 371[P]. 2014-06-24.
- [10] RAMPEN W, CALDWELL N, STEIN U. Annular valve: US, 7077378[P]. 2002-07-18.
- [11] NOGUCHI T, HIRANO H, KAWABATA S, et al. Poppet valve, hydraulic machine, and power generating apparatus of renewable-energy type: EP, 20, 150, 197, 211[P]. 2016-12-21.
- [12] ROEMER D B, JOHANSEN P, PEDERSEN H C, et al. Topology selection and analysis of actuator for seat valves suitable for use in digital displacement pumps/motors[C]// 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2013: 418-424.
- [13] ROEMER D B, BECH M M, JOHANSEN P, et al. Optimum design of a moving coil actuator for fast-switching valves in digital hydraulic pumps and motors[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(6): 2761-2770.
- [14] MADSEN E L, JØRGENSEN J M T, NØRGÅRD C, et al. Design optimization of moving magnet actuated valves for digital displacement machines[C]// Proceedings of the ASME/BATH 2017 Symposium on Fluid Power and Motion Control. ASME, 2017: 1-12.
- [15] MARSCHAND J R. Modeling, simulation, and design of a radial piston digital displacement unit [D]. Indiana: Purdue University, 2018.
- [16] DARNET J, BIDEAUX É. State-of-the-art of variable displacement technologies for radial piston hydraulic machines[C]// Proceedings of the BATH/ASME 2022 Symposium on Fluid Power and Motion Control. ASME, 2022: 1-11.
- [17] MERRILL K J, BREIDI F Y, LUMKES JR J. Simulation based design and optimization of digital pump/motors[C]// Proceedings of the ASME/BATH 2013 Symposium on Fluid Power and Motion Control. ASME, 2013: 1-8.
- [18] BREIDI F, GARRITY J, LUMKES JR J. Investigation of a real-time pressure based valve timing correction algorithm[C]// Proceedings of the ASME/BATH 2017 Symposium on Fluid Power and Motion Control. ASME, 2017: 1-11.
- [19] YUE Daling, ZUO Xiukun, LIU Zengguang, et al. An adaptive control method for the distribution valve of a digital pump[J]. Machines, 2023, 11(2): 148-162.
- [20] DANFOSS. Digital-Displacement-Pumps [EB/OL]. [2023-07-10]. <https://www.danfoss.com/zh-cn/products/dps/pumps/digital-displacement-pumps/digital-displacement-pumps/>.
- [21] LAGARDE J, GREEN M, DOLE A, et al. Danfoss digital displacement & editron: An efficient electro-hydraulic system for mobile applications[C]// Proceedings of the 13th International Fluid Power Conference. IFK, 2022: 1045-1058.
- [22] HUTCHESON J, ABRAHAMS D, MACPHERSON J, et al. Demonstration of efficient energy recovery systems using digital displacement® hydraulics[C]// Proceedings of the BATH/ASME 2020 Symposium on Fluid Power and Motion Control. ASME, 2020: 1-9.
- [23] HUTCHESON J, ABRAHAMS D, GREEN M, et al. Motion control of a hydraulic cylinder with a digital displacement pump-motor[C]// Proceedings of the 13th International Fluid Power Conference. IFK, 2022: 705-718.
- [24] BUDDEN J J, WILLIAMSON C. Danfoss digital displacement® excavator: test results and analysis[C]// Proceedings of the ASME/BATH 2019 Symposium on Fluid Power and Motion Control. ASME, 2019: 1-10.
- [25] PELLEGRINI M, GREEN M, MACPHERSON J, et al. Applying a multi-service digital displacement® pump to an excavator to reduce valve losses[C]// Proceedings of the 12th International Fluid Power Conference. IFK, 2020: 59-68.
- [26] MACPHERSON J, WILLIAMSON C, GREEN M, et al. Energy efficient excavator hydraulic systems with digital displacement® pump-motors and digital flow distribution[C]// Proceedings of the BATH/ASME 2020 Symposium on Fluid Power and Motion Control. ASME, 2020: 1-10.
- [27] MARSHALL P, LAGARDE J, DOLE A, et al. Application of a digital displacement combined propel &

- work function transmission to off-highway machines- case study on a 4.5t forklift[C]// Proceedings of the 13th International Fluid Power Conference. IFK, 2022: 691-704.
- [28] BOWER J L. Digital fluid control system US16838762A[P]. 1961-09-12.
- [29] MURPHY J R E, PETER W J. Hydraulic control system: US, 3038449[P]. 1962-06-12.
- [30] TANAKA H. Electro-hydraulic PCM control[J]. The Journal of Fluid Control, 1988, 18(1): 34-46.
- [31] 刘荣. 广义脉码调制液压伺服控制的理论和应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- LIU Rong. Theoretical and application researches on hydraulic servo control with generalized pulse code modulation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [32] LINJAMA M, KOSKINEN K T, VILENIUS M. Accurate trajectory tracking control of water hydraulic cylinder with non-ideal on/off valves[J]. International Journal of Fluid Power, 2003, 4(1): 7-16.
- [33] LAAMANEN A, LINJAMA M, TAMMISTO J, et al. Velocity control of water hydraulic motor[C]// Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power. The Japan Fluid Power System Society, 2002: 167-172.
- [34] LINJAMA M, LAAMANEN M S A, VILENIUS M. Is it time for digital hydraulics?[C]// The Eighth Scandinavian International Conference on Fluid Power, Proceedings of the Conference, May 7-9, 2003, Tampere, Finland. Tampere University of Technology, 2003: 347-366.
- [35] 刘荣, 王宣银. GPCM 控制阀内流道流场仿真[J]. 农业机械学报, 2005(4): 72-74.
- LIU Rong, WANG Xuanyin. Simualtion study on flow field of gallery of GPCM control valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005(4): 72-74.
- [36] LINJAMA M, PALONIITTY M, TIAINEN L, et al. Mechatronic design of digital hydraulic micro valve package[J]. Procedia engineering, 2015, 106: 97-107.
- [37] LAAMANEN A, LINJAMA M, VILENIUS M. Pressure peak phenomenon in digital hydraulic systems-a theoretical study[C]// Proceedings of the Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control (PTMC 2005). Centre for Power Transmission and Motion Control. 2005: 91-104.
- [38] HANSEN R H, ANDERSEN T O, PEDERSEN H C, et al. Control of a 420 KN discrete displacement cylinder drive for the wavestar wave energy converter[C]// Proceedings of the ASME/BATH 2014 Symposium on Fluid Power and Motion Control. ASME, 2014: 1-10.
- [39] LINJAMA M, SEPPÄLÄ J, MATTILA J, et al. Comparison of digital hydraulic and traditional servo system in demanding water hydraulic tracking control[C]// Fluid Power and Motion Control FPMC 2008, September 10-12, 2008, Bath, UK. FPMC, 2008: 393-403.
- [40] HUOVA M, PLÖCKINGER A. Improving resolution of digital hydraulic valve system by utilizing fast switching valves[C]// Proceedings of the Third Workshop on Digital Fluid Power, October 13-14. 2010, Tampere, Finland. Tampere University of Technology, 2010: 79-92.
- [41] PALONIITTY M, LINJAMA M, HUHTALA K. Equal coded digital hydraulic valve system-improving tracking control with pulse frequency modulation[J]. Procedia Engineering, 2015, 106: 83-91.
- [42] LIU R, PAN H, CHEN Y. Control strategy for electro-hydraulic position servo system with generalized pulse code modulation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(3): 50-53.
- [43] LINJAMA M, VILENIUS M. Energy-efficient motion control of a digital hydraulic joint actuator[C]//Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power. The Japan Fluid Power System Society, 2005: 640-645.
- [44] LINJAMA M, HUOVA M, HUHTALA K. Model-based force and position tracking control of an asymmetric cylinder with a digital hydraulic valve[J]. International Journal of Fluid Power, 2016, 17(3): 163-172.
- [45] LINJAMA M, VIHTANEN H P, SIPOLA A, et al. Secondary controlled multi-chamber hydraulic cylinder[C]// Proceedings of the 11th Scandinavian International Conference on Fluid Power, June 2-4, 2009, Linköping, Sweden. Linköping University Electronic Press, 2009: 2-4.
- [46] HUOVA M, LAAMANEN A, LINJAMA M. Energy efficiency of three-chamber cylinder with digital valve system[J]. International Journal of Fluid Power, 2010, 11(3): 15-22.
- [47] DELL'AMICO A, CARLSSON M, NORLIN E, et al. Investigation of a digital hydraulic actuation system on an excavator arm[C]// Proceedings of the 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power, June 3-5, 2013, Linköping, Sweden: Linköping University Electronic Press, 2013: 505-511.

- [48] HUOVA M, LINJAMA M. Digital hydraulic valve control in a multi-pressure system[C]// The 11th Workshop on Digital Fluid Power, September 19-20, 2022, Edinburgh, Scotland. The University of Edinburgh, 2022: 1-14.
- [49] HEYBROEK K, SAHLMANC M. A hydraulic hybrid excavator based on multi-chamber cylinders and secondary control-design and experimental validation[J]. International Journal of Fluid Power, 2018, 19(2): 91-105.
- [50] HEEMSKERK E, BONEFELD R, BUSCHMANN H. Control of a semi-binary hydraulic four-chamber cylinder[C]// Proceedings of the 14th Scandinavian International Conference on Fluid Power, May 20-22, 2015, Tampere, Finland. Tampere University of Technology, 2015: 20-22.
- [51] PETTERSSON K, HEYBROEK K, MATTSSON P, et al. A novel hydromechanical hybrid motion system for construction machines[J]. International Journal of Fluid Power, 2017, 18(1): 17-28.
- [52] KETONEN M, LINJAMA M. Digital hydraulic IMV system in an excavator-first results[C]// Proceedings of the 16th Scandinavian International Conference on Fluid Power, May 22-24, 2019, Tampere, Finland. Tampere University of Technology, 2019: 22-24.
- [53] FISCHER H, LAAMANEN A, ISO-HEIKO A, et al. Digital hydraulics on rails-pilot project of improving reliability on railway rolling stock by utilizing digital valve system[C]// Proceedings of the 14th Scandinavian International Conference on Fluid Power, May 20-22, 2015, Tampere, Finland. Tampere University of Technology, 2015: 644-654.
- [54] LINJAMA M, HOPPONEN V, IKONEN A, et al. Design and implementation of digital hydraulic synchronization and force control system[C]// Proceedings of the 11th Scandinavian International Conference on Fluid Power, June 2-4, 2009, Linköping, Sweden. Linköping University Electronic Press, 2009: 42-43.
- [55] VOLVO. Groundbreaking electro-hydraulic system wins volvo technology award[EB/OL] (2021-09-06) [2023-06-08]. <https://www.volvogroup.com/en/news-and-media/news/2021/sep/news-4059234.html>.
- [56] 张国贤. 液压气动专利讲坛(4)—浮杯泵[J]. 流体传动与控制, 2012(2): 54-56.
- ZHANG Guoxian. Hydropneumatic patent forum(4)-floating cup[J]. Fluid Power Transmission and Control, 2012(2): 54-56.
- [57] VAEL G E M, LOPEZ I, ACHTEN P A J. Reducing flow pulsation with the floating cup pump-theoretical analysis[C]// Proceedings of Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control (PTMC 2004). Professional Engineering Publishing Ltd, 2004: 123-141.
- [58] ACHTEN P A J, VAN DEN BRINK T L, POTMA J W. Movement of the cups on the barrel plate of a floating cup, axial piston machine[J]. International Journal of Fluid Power, 2004, 5(2): 25-33.
- [59] 桑勇, 王晓, 王鹏鹏. 浮杯原理及其在液压系统中的应用研究[J]. 液压气动与密封, 2014, 34(1): 23-28.
- SANG Yong, WANG Xiao, WANG Pengpeng. Floating-cup principle and its application research in the hydraulic system[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2014, 34(1): 23-28.
- [60] 巩良, 赵惠清. 一种新型变量浮杯泵[J]. 液压与气动, 2013(5): 108-110.
- GONG Liang, ZHAO Huiqing. A new design of variable floating cup pump[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2013(5): 108-110.
- [61] ACHTEN P A J, VAN DEN BRINK T L, PAARDENKOOPE T, et al. Design and testing of an axial piston pump based on the floating cup principle[J]. Proc. SICFP, 2003(3): 805-820.
- [62] ACHTEN P A J, SCHELLEKENS M P A, MURRENHOF H, et al. Efficiency and low speed behavior of the floating cup pump[J]. SAE transactions, 2004: 366-376.
- [63] ACHTEN P A J. Volumetric losses of a multi piston floating cup pump[C]// Proceedings of 50th National Conference on Fluid Power (NCFP). 2005: 337-348.
- [64] VAN DEN BRINK T L, ACHTEN P A J. Containing the cup in the floating cup axial piston machine[C]// Proceedings of the Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control(PTMC 2006). Centre for Power Transmission and Motion Control, 2006: 131-145.
- [65] ACHTEN P A J, EGGENKAMP S, POTMA J. Reducing the wall thickness of the cups and pistons in floating cup pumps and motors[C]// Proceedings of the 11th International Fluid Power Conference, IFAS, 2018: 84-95.
- [66] MOMMERS R F H, BEIJER J G J, ACHTEN P A J. High volume production of pistons and cups for floating cup pumps and motors[C]// Proceedings of the 11th International Fluid Power Conference. Wiley Publishing, 2022: 1-14.
- [67] ACHTEN P A J, EGGENKAMP S, POTMA H W. Swash

- plate oscillation in a variable displacement floating cup pump[C]// Proceedings of the 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power. Linköping University Electronic Press, 2013: 163-176.
- [68] Bucher Hydraulics. Efficient system solutions for the electrification of mobile machines[EB/OL]. (2022-09)[2023-07-10]. https://www.bucherhydraulics.com/datacat/files/Katalog/Systemloesungen/Elektrifizierung%20mobiler%20Maschinen/Elektrifizierung-mobiler-Maschinen_300-FL-9010633-en.pdf.
- [69] Bucher Hydraulics. Overall efficiency optimized[EB/OL]. (2020-09)[2023-07-10]. https://www.bucherhydraulics.com/datacat/files/Katalog/Fachartikel/Elektrifizierung/Technical%20Article_Electrification_100-en.pdf.
- [70] QIAO Shufei, QUAN Long, HAO Yunxiao, et al. Design and characteristic research of a novel electromechanical-hydraulic hybrid actuator with two transmission mechanisms[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2023, 18(2): 19.
- [71] HAO Yunxiao, QUAN Long, QIAO Shufei, et al. Coordinated control and characteristics of an integrated hydraulic-electric hybrid linear drive system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(2): 1138-1149.
- [72] LI Zepeng, WANG Chengwen, QUAN Long, et al. Study on energy efficiency characteristics of the heavy-duty manipulator driven by electro-hydraulic hybrid active-passive system[J]. Automation in Construction, 2021, 125: 1-13.
- [73] 乔舒斐, 郝云晓, 权龙, 等. 机电液混合驱动直线执行器构型设计与性能测试[J]. 机械工程学报, 2022, 58(5): 212-222.
- QIAO Shufei, HAO Yunxiao, QUAN Long, et al. Configuration design and performance test of electromechanical hydraulic hybrid driving linear actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(5): 212-222.
- [74] 郝云晓, 乔舒斐, 夏连鹏, 等. 液电混合直线驱动系统耦合特性及位置控制[J]. 机械工程学报, 2021, 57(22): 386-394.
- HAO Yunxiao, QIAO Shufei, XIA Lianpeng, et al. Coupling characteristics and position control of hydraulic-electric hybrid linear drive system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(22): 386-394.
- [75] AN K, KANG H, AN Y, et al. Methodology of excavator system energy flow-down[J]. Energies, 2020, 13(4): 951.
-
- 作者简介: 权龙, 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电液伺服及比例控制技术。
E-mail: quanlong@tyut.edu.cn
- 葛磊(通信作者), 男, 1987 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为电液动力源节能控制。
E-mail: 415597710@qq.com