

作者简介: 权龙, 男, 1959年3月生人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 现任太原理工大学机械电子工程研究所所长, 机械电子工程学科方向带头人, 教育部新型传感器与智能控制重点实验室方向带头人、副主任, 山西省委指定的高级专家, 中国机械工程学会高级会员, 中国机械工程学会流体传动与控制分会常务理事, 中国液气密协会专家委员会委员, 山西省液压与气动专业委员会理事长, 中国振动工程学会动态测试专业委员会理事。



多年来致力于电液伺服及比例控制技术中基础理论、关键元器件和系统集成的新原理及应用、机电一体化系统的计算机仿真、辅助试验、机电系统智能控制等领域的研究工作。作为高仿, 曾2次赴德国德累斯顿工业大学从事合作研究工作。获国家科技进步二等奖1项、省科技进步一等奖1项、省科技进步二等奖2项、技术发明二等奖1项, 获授权发明专利18项, 发表学术论文近百篇, 曾获得太原市科技启明星、山西省青年学术带头人称号。

提高工程机械能量利用率的技术现状及新进展

权 龙, 高有山, 程 珩

Technology to Improve the Energy Efficiency for Construction
Machinery: State of the Art

QUAN Long, GAO You-shan, CHENG Hang

(太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘 要:我国工程机械行业规模总量已跃居世界首位,成为国民经济发展的重要支柱产业之一。装载机和挖掘机产量均为世界第一,随着年产量和保有量的不断增加,工程机械已成为继汽车之后的又一燃油消耗主体,能量利用率已成为评价工程机械产品市场竞争力的重要指标。针对影响工程机械能量利用效率的主要因素,从提高元器件效率、降低液压系统能耗、动势能的回收再利用、动力匹配和混合动力技术方面,介绍了降低工程机械能耗的主要技术进展和新的研究成果。希望能对我国相关行业技术人员开发新的节能产品,探索、研究新的节能理论和方法,开发新型节能元件提供有益的启发,推动行业技术进步。

关键词:工程机械;能耗;能量回收;动力匹配;混合动力

中图分类号:TH137 文献标志码:B 文章编号:1000-4858(2013)04-0001-10

引言

“十一五”期间,我国工程机械行业有了巨大的发展,到2011年底,我国工程机械各类产品保有量约为500万台,年产量将近80万台,装载机、挖掘机、汽车起重机、压路机、叉车、推土机、混凝土机械等产品产量跃居世界首位,且有逐年增加趋势,工程机械行业成为我国的重要支柱产业之一。随着行业的发展和保有量

的增长,工程机械燃油消耗量也迅速增加,年消耗燃油近7千万吨,成为继汽车之后又一石化能源消耗主体。面对当前石化能源日益枯竭,全球气候变暖,环境污染日益严重的问题,降低能量损耗已成为工程机械领域的研究热点和前沿课题,单机能源效率成为评价工程

收稿日期:2013-03-15

机械产品市场竞争力的重要指标。下面分别从提高元器件效率、降低液压系统能耗、动势能的回收再利用、整机能量管理、采用混合动力技术等方面的技术现状和方法进行论述。

1 提高元器件效率

工程机械主要采用柱塞泵作为动力源,多路阀作为控制元件,液压缸和液压马达作为执行器。液压泵、液压阀、发动机以及液压管道等是影响工程机械能源效率的主要元器件,以负载敏感控制原理的挖掘机为例,阀及其回路的损失占到工作能量的35%,液压泵消耗33%,其他约4%,真正用于做功的只有31%多一点^[1],如果考虑发动机的效率,整机的能量利用率更低,所以提高各元器件自身效率是提高工程机械能源效率的有效措施。

柱塞泵能量损失主要包括容积损失和机械损失。引起容积损失的主要是轴向柱塞泵的柱塞副、配流副和柱塞与斜盘的接触副(滑靴)间隙之间的泄漏和油液的弹性;而引起机械损失的主要是柱塞泵各运动副的摩擦阻力和粘性油液在泵内流动时产生粘滞阻力。降低容积损失的根本措施是减少运动副之间的泄漏量,同时兼顾机械效率和润滑,相关的研究工作一直是液压技术领域国内外的研究重点。美国普渡大学和德国的Aachen工大都开展了轴向柱塞泵关键摩擦副润滑特性、泄漏特性、抗磨特性和减阻特性的研究工作,通过研究,已经在柱塞表面形状设计和配流盘表面的设计方面取得重要进展。图1所示为美国普渡大学提出通过波浪形表面形状改善柱塞泵效率原理,同时提高了泵的容积效率和机械效率,研究工作使柱塞泵在低压工作的效率提高10个百分点^[2-3]。德国Aachen工大的液压研究所则通过对柱塞两端形状的修改,柱塞表面的微结构、柱塞和缸体、滑靴配合的研究,同样减小了柱塞工作中的载荷和摩擦损失,提高了泵的工作效率,采用的柱塞形状如图2所示^[4]。

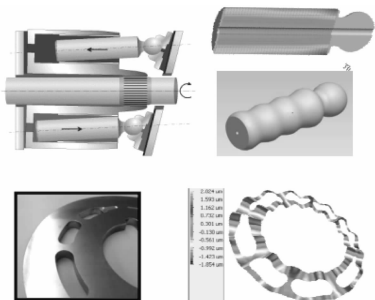


图1 波浪形柱塞表面和配流盘表面

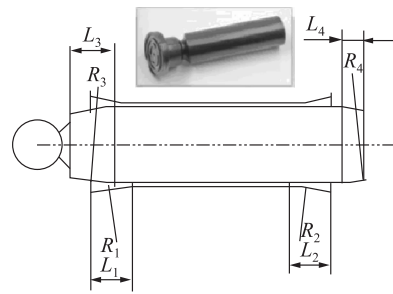


图2 两端锥形柱塞结构

国内浙江大学液压研究所构建了柱塞泵配摩擦副的试验系统,并对轴向柱塞泵滑靴副的动力学进行分析,获得了滑靴副油膜特性的实时变化规律^[5]。

参照电气技术中功率电子的开关控制模式,美国明尼苏达大学提出基于高速开关阀、定量液压泵的变量液压泵/马达控制原理(虚拟变量泵/马达原理),图3是控制原理^[6]。研究工作的目标是获得控制精度和响应相当于比例阀控系统、能量效率相当于变量泵的液压系统,相对于变量泵具有低的成本和简单的结构。工作中,二位三通高速开关阀按脉宽调制方式工作,当其与液压蓄能器连通时,泵的流量输入到蓄能器,当其与油箱接通时,将泵输出的流量油排入到油箱,改变阀的占空比,就可连续地控制流入到蓄能器的流量,关系研究工作成败的关键因素是高速开关阀能达到的流量和响应时间,只有当开关速度足够高时,才能使泵输出的流量波动比较小,高速开关阀旁通油箱产生的功率损失也较小。由于传统的锥形和滑阀型液压阀加速、减速需要长的时间和大的驱动功率,提出采用旋转型的控制方式,结构和原理如图4所示。该阀具有轴向和旋转两个自由度,通过特殊的结构设计,油液沿切线方向作用在冲击式涡轮后流入阀腔,流出时再经过反冲击式涡轮,产生使阀芯自动旋转的转矩,这一转速与阀芯圆周方向窗口个数的乘积就是阀的调制频率,阀的占空比通过改变阀芯沿轴向的位置调整,通过改变阀的结构可以有二位二通和二位四通型的功能。

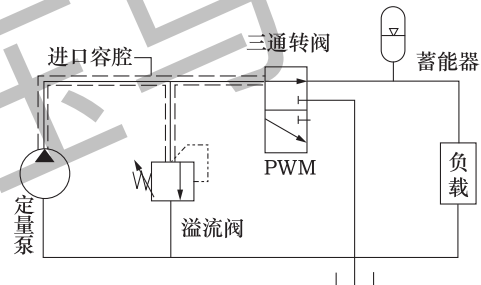


图3 虚拟比例液压泵/马达回路原理

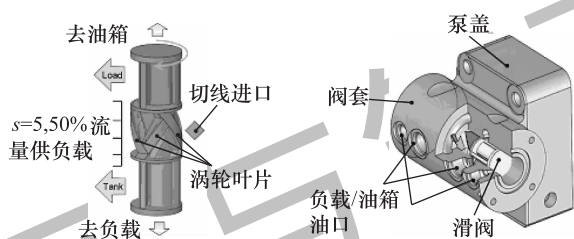


图 4 旋转型二位三通高速开关阀工作原理及剖面图

多路阀作为工程机械液压系统控制元件,具有结构紧凑、管路简单的特点,但存在较大的能量消耗,为了减小阀的损失,芬兰 Tampere 大学提出数字控制的方式降低阀的通流阻力,就是用开关型的液压阀,替代连续控制的阀,同时达到连续控制元件具有的特性,实现液压系统的节能^[7]。图 5 所示是一个典型进出口独立阀控差动缸的回路,每一个控制阀采用 4 或 5 个开关阀组成的数字阀组成。

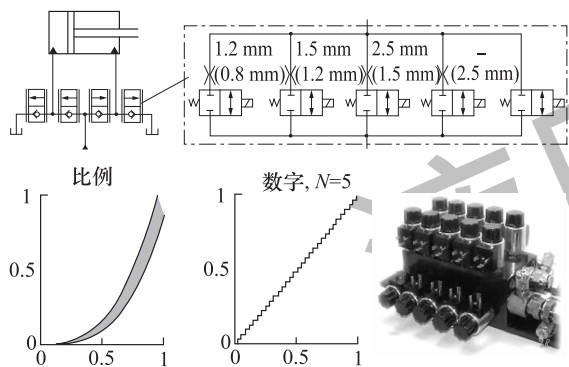


图 5 数字阀控差动缸回路、数字阀的组成、控制特性及元件实物照片

用一组低成本的开关阀代替高价、可靠性差的伺服和比例阀,这些开关阀并联连接,按液压 DA 转换器的数字方式控制通过的流量,流量控制等级为 2^n 。一般四个开关阀可具有一个比例阀的功能。比例阀的线性误差较大,采用数字控制虽然不能连续调节流量,但控制非常准确,控制效果取决于阀的数量。该种控制方法的优点是简单和低成本,控制电路简单,方便与计算机和 PLC 连接,可靠性高,抗油液污染能力强,不需要阀芯位置反馈,无泄漏,较比例多路阀节能 36%,无需其他辅助阀就可以控制所有的负载工况,所有的信号故障都可以通过软件补偿,同时不影响工作性能,研究表明,与数字液压缸配合用于挖掘机,可降低能耗 80%^[8],具有非常好的应用前景,生产该技术产品的芬兰 Norrhydro 公司已在我国常州建立生产工厂。

2 降低液压系统能耗

工程机械一般为单泵或双泵供油多执行器并联运

行系统,工作时负载的较大变化将影响速度控制的精度和稳定性,而多执行器负载的差别会造成系统效率低、能耗大。研究液压系统的集成方法是提高系统能量效率的方法之一,目前工程机械常用的液压系统有以下几种方案。

2.1 负载敏感技术

工程机械的液压系统属多执行器复合动作系统,为了降低节流损失和各执行器动作互不干涉,广泛采用负载敏感和负流量控制技术,其基本原理是利用负载变化引起的压力变化,调节泵的输出压力,使泵的压力始终比最大的负载压力高出约 2 MPa,而输出流量适应系统的工作需求。传统的负载敏感方式为液压-机械控制,通过梭阀阀组和压力检测管网选择出最高的负载压力,用选出的压力控制变量泵斜盘的摆角,为了使各个液压执行器的动作不受负载压力变化的影响,在每一联控制阀的进口都装有压差补偿器以保证控制阀的压差恒定。液压-机械方式,当压力检测管路较长时,管路的时间常数对系统动特性有负面影响的相移,引起负载压力检测信号的延迟,导致系统动态过程产生振荡,甚至不稳定,见图 6 中对应测试曲线。

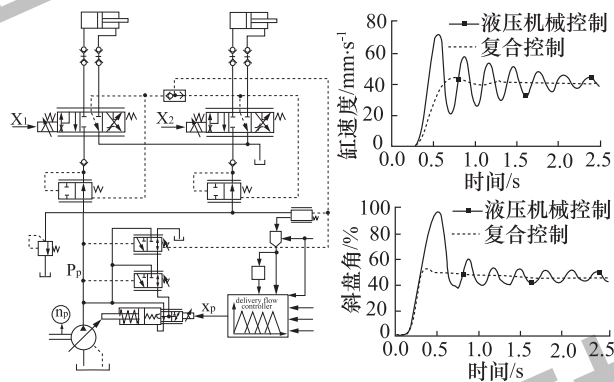


图 6 流量匹配负载敏感控制原理及压差控制和流量控制对比试验测试结果

为了简化先导控制管路、消除先导控制管网引起的滞后,国外进一步发展了用电子比例阀代替液控减压阀的负载敏感技术,德国力士乐 (Rexroth) 公司进一步发展了称为 LUDV 的抗流量饱和负载敏感控制原理,在需求流量大于动力源所能提供的最大流量时,所有执行器运动速度按相同的比例减小,保证速度的相对稳定性。但是由于挖掘机工作中各个执行器驱动的负载相差很大,而负载敏感和负流量控制只能和最高负载相匹配,所以仍然存在很大的能耗,研究表明,消耗在控制阀上的能耗超过 30%^[1],所以,降低液压系

统的能耗一直是该领域的重点研究课题。代表性的工作有,在液压负载敏感控制基础上,上世纪90年代初德国研究者提出电液负载敏感控制原理,用压力传感器取代复杂的压力检测管网,通过阀口流量计算公式控制阀的流量,省掉了压差补偿器,简化了系统的机械结构,降低了能耗^[9-11]。日本学者对应用高速开关阀控制压力电闭环比例泵组成的电液负载敏感系统作了研究,并提出用比例压力阀改变压差补偿器的补偿压差,实现抗流量饱和的流量分配控制^[12]。冯培恩教授领导的课题组对正流量和负流量控制系统作了研究,提出了正负流量复合控制的方法对负流量系统进行改进^[13]。

传统的负载敏感原理控制量是压差,可称为压力匹配型的负载敏感技术。这种技术的缺陷是存在较大的压差损失,最低也在2 MPa左右;系统的稳定性较差,容易引发振动。为此,德国Aachen工大的Zaeh博士进一步提出无需压力传感器、按流量计算负载压差和按总流量控制多执行器的原理^[9],德国Braunschweig大学教授Harms提出根据比例阀的流量设定值或阀芯位置确定出负载所需流量,对泵的流量进行控制的流量匹配控制原理^[14],因这几种方法需要检测液压泵的转速和摆角,不便在移动设备中应用,当时并未引起足够重视。直到2001年,Dresden工业大学液压研究所的Helduser教授,进一步提出了用位移传感器检测比例流量阀压差补偿器开口量、泵出口旁通压差补偿器开口量,不需要检测泵转速的流量匹配控制原理,这一技术才引起人们的关注,研究课题获得了德国国家基金DFG的连续资助^[15],取得了降低能耗10%以上的效果,成为电液控制技术新的研究热点^[16-18],Dresden工业大学液压研究所进一步发展了双回路的流量匹配负载敏感技术,显著降低了节流损失^[19],国内浙江大学也对该项技术做了深入的研究^[20]。图6给出Braunschweig大学提出的流量匹配多执行器控制原理及其与传统压差负载敏感对比的测试结果。该系统是在传统液压机械负载敏感回路的基础上,用电比例控制泵的排量,增设压差传感器构成,为了减小损失,不设控制排量的辅助泵,所以保留了原负载敏感泵的排量-压差控制机构,用以解决低工作压力和小流量工况系统的可控性,从对比试验可知,新的回路,泵和最高负载控制阀之间的压力损失由2 MPa减小为1 MPa,减小了系统的能耗和发热,操作平稳性获得了很大提高^[18]。

2.2 直接泵控技术

负载敏感技术虽然取得了很大的进展,但毕竟是阀控系统,始终存在大的节流损失,为了彻底消除这部分损失,一项新的技术是采用闭式泵控系统。这一技术最早出现是上世纪90年代初,德国利勃海尔公司申请了泵控双出杆缸的专利,代替传统的阀控伺服系统,用于大型客机的操控。上世纪90年代末,原德国汉堡工业大学的Monika教授开始研究泵控差动缸技术,并一直致力于将这一技术应用于工程机械,该技术基本回路原理如图7所示。

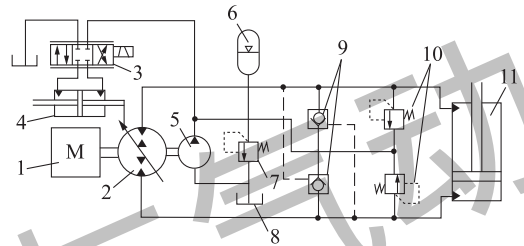


图7 泵控差动缸回路基本原理

该系统采用辅助泵5和蓄能器6对液压缸两腔预压紧,同时作为主泵2变量机构的控制油源,用两个液控单向阀9补偿差动缸的不对称流量^[21]。Monika教授带领的课题组对该项技术用于非路面机械的主动悬架控制、防翻转作用、用于轮式装载机、小型液压挖掘机的节能效果作了研究^[22-23],特别是采用4台变排量泵代替控制阀的液压挖掘机,测试表明可降低能耗49%,节能效果非常突出^[24]。随后,通过对发动机和液压泵工作点的优化及匹配,进一步降低燃油消耗17%^[25]。近年,通过在原有系统上设置液压泵和蓄能器组成的储能单元,构成新的液压混合动力全泵控挖掘机,在保持相同工作效率的前提下,可降低发动机装机功率50%,同时减少燃油消耗20%左右^[26]。最新的全泵控液压混合动力挖掘机回路原理如图8所示。至今,在美国国家基金重大项目的资助下,Monika教授的课题组已发表相关论文近百篇,多次被邀请做大会报告,并多次获得优秀论文奖。

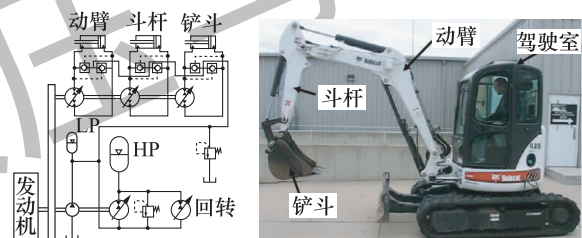


图8 全泵控液压混合动力挖掘机控制原理及样机照片

德国、日本、韩国等国的学者对泵控差动缸技术也做大量研究,德国利勃海尔公司对采用双变排量泵控制大功率差动缸组成的挖掘机作了研究,并申请了多国专利^[27],图 9 所示为该挖掘机的控制原理及样机照片。该系统中挖掘机的铲斗和斗杆采用泵控开式回路,动臂采用双变排量泵组成的泵控差动缸闭环回路,并在补偿油口连接蓄能器回收动臂下放的势能,实现动臂的驱动与控制一体化,回转采用二次调节技术回收上车制动的动能。研究表明,采用液压混合动力后可降低发动机功率 25%,同时提高动臂举升和回转加速能力 80%。

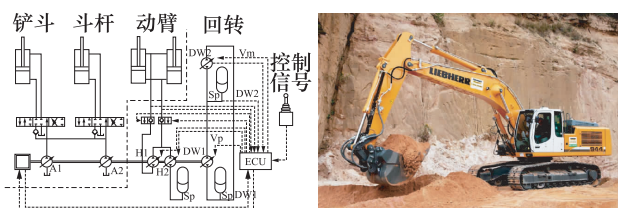


图 9 利勃海尔液压混合动力挖掘机原理及样机照片

韩国学者对采用单泵控差动缸作为动臂的挖掘机作了研究,动臂经液压马达驱动发电机回收势能,节能 12.5%,斗山公司也申请了相关的专利^[28],瑞典 Volvo 公司对采用液压变压器的装载机做了研究,申请了采用泵控差动缸技术的装载机专利^[29],德国 Aachen 工大的 Murrenhoff 教授以 30 t 挖掘机为例,对比分析了负载敏感、全泵控、液压变压器控制和部分泵控 5 种回路方案的能耗,其中采用液压变压器控制的回路原理如图 10 所示,恒压变量泵提供恒定的压力,每一个执行器都采用一个液压变压器控制,由于恒压源不能改变方向,用四通阀改变液压执行器的运动方向,结果表明,全泵控和采用液压变压器具有相同的效果,较负载敏感可降低装机功率 30%,回路中都没有设置储能回路,只是通过并联驱动转化利用了一部分动势能^[30]。

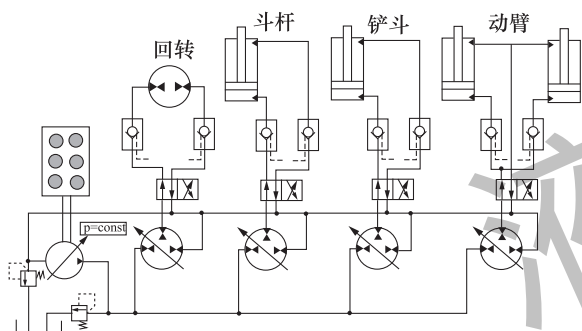


图 10 采用液压变压器控制的挖掘机回路原理

图 11 给出的是目前瑞典 Volvo 公司和林雪平大学合作正在研究的液压变压器控制装载机的回路原理。该系统增加了各 100 L 容量的高压和低压蓄能器,对比同一型号的机型,采用新的原理,发动机功率可减小 50%,降低燃油消耗 50%,但硬件费用会增大许多。采用液压变压器控制装载机还是挖掘机,整个系统的难点是液压变压器,目前还没有商业化可选的产品,目前看,荷兰 Innas 公司浮杯原理的液压变压器最具应用前景。

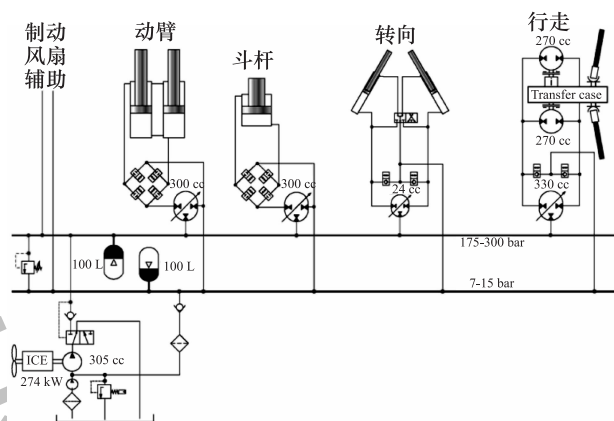


图 11 采用液压变压器的装载机控制系统原理

国内对泵控缸技术也开展了大量的研究工作,北京航空航天大学重点研究了用于飞机舵机的泵控双出杆缸系统,哈尔滨工业大学的姜继海教授对泵控缸用于舰船舵机作了研究,重点研究了二次调节技术控制的液压挖掘机,并申请了采用液压变压器控制整机的专利。太原理工大学对采用双变速泵控制的差动缸系统做了深入研究,发表了多篇论文,特别是研发成功两种配流方式的可补偿差动缸面积差、能够像泵控双出杆缸一样控制差动缸的新型差动泵^[31],图 12 所示是新型差动泵的两种配流盘照片及控制差动缸的回路原理,该原理不仅不需要辅助阀补偿差动缸的不对称流量,还可以直接回收差动缸运动中的动势能。

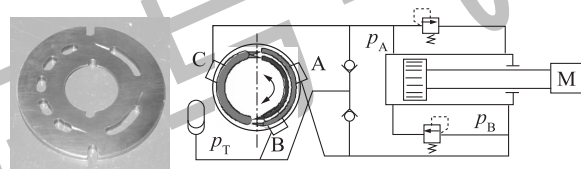


图 12 可补偿差动缸面积差的差动柱塞泵配流盘及控制差动缸回路原理

相对于阀控技术,直接泵控技术在节能方面具有很大的优势,具有节流损失小,可进行能量回收,有更高的能源利用效率,且液压回路元器件少、系统简单、

可控性好,在固定设备和工程自动化装备中具有广阔应用前景。

3 能量回收技术

许多工程机械的共同特点是用一定重量的工作装置,将物料举升到指定高度后卸载,采用多路阀控制工作装置频繁地举升和下降会浪费许多能量,还有一些机构,如挖掘机的上车频繁地加速启动和减速制动,如果能够回收与利用工作机构举升后积累的势能、回转机构制动的动能,对提高工程机械的能量效率将非常有益,是当前工程机械节能技术的研究热点方向。

3.1 回转系统动能回收

回收大惯性回转机构制动的动能,最直接的方法是采用二次调节技术,1993年3月,德国O+P杂志就发表了应用二次调节技术回收回转制动动能的论文,2009年瑞典林雪平大学的K Pettersson对比研究了开式和闭式二次调节方式用于控制轮式挖掘机回转的节能效果,降低能耗60%。我国哈尔滨工业大学的姜继海教授对二次调节技术用于挖掘机回转的节能技术也做了大量研究,并申请了阀控与二次调节并联驱动回转运动的发明专利。韩国釜山大学的Triet Hung Ho,对闭式回路中增设蓄能器储能的回转系统做了研究,回路原理如图13所示。

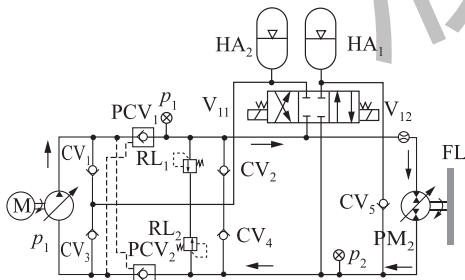


图13 可回收制动动能的闭式回转系统

在传统的闭式回转系统中增设了方向阀和高压蓄能器 HA_1 和低压蓄能器 HA_2 ,采用方向阀控制系统是处于驱动还是制动工况,当方向阀处于左位,电机和蓄能器 HA_1 共同提供能量驱动飞轮(回转机构)加速旋转,达到预期转速后,方向阀回到中位,只有电机提供动力,低压蓄能器 HA_2 向低压回路补充油液。当制动时,电磁铁 V_{12} 通电,方向阀处于右位,低压蓄能器为吸油管路补油,高压蓄能器存储飞轮的制动动能。反方向运行过程也类似,只是加速启动时,方向阀处于右位,制动时处于左位。试验台测试表明,比较没有储能回路,随压力和次级转速的变化,该系统可节能10%~20%。

除了回转机构,在许多起吊设备也常常采用液压马达驱动,特别是大吨位的起重机,如港口起重机、履带吊等,工作载荷变化范围很大,为了满足大的起吊能力,需要原动机采用大的装机功率,会增加排放和能耗,为了解决这一问题,利勃海尔公司提出一种称为Hybridantrieb PactronicR,闭式液压马达回路和二次调节技术混合的驱动方案,原理如图14所示。

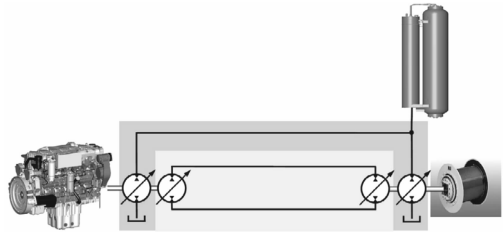


图14 闭式和二次调节混合的液压马达控制方案

可以看出,内部回路是双向变量泵和变量马达组成的闭式系统,外部是典型的二次调节系统,液压蓄能器和变量泵组成辅助的动力源,当该系统下放重物时,二次调节用的变量马达和变量泵都向蓄能器充油储能,当起吊重物时,一方面发动机(电机)通过闭式回路直接驱动绞盘,同时蓄能器也通过二次调节的液压马达驱动绞盘。试验研究表明,对于峰值功率1340 kW,平均功率500 kW的工作循环,采用新的方案,只需670 kW装机功率就能满足需求,还可降低能耗30%,这也意味着减少30%的 CO_2 排放。

3.2 动臂液压缸势能回收

回收再利用动臂的势能可以有液压、机械和电气多种方式,最简单的方法就是在原有液压系统中直接转化,图15a所示是动臂缸势能直接用于斗杆缸的回路原理,前提是两个机构必须同时工作,动臂缸势能产生的压力要大于斗杆工作的压力,如用于斗杆的空载伸出和收回。图15b所示回路设置一个液压蓄能器,缓冲动臂下降的势能,蓄能器的油口通过比例阀连接到动臂缸的下腔,同时也连接到主液压泵的吸油口,动臂下降过程,如果发动机驱动负载,蓄能器中的液压油提高主泵的入口压力,减小其进出口压差来降低发动机的能耗,如果发动机不驱动负载,则动臂的势能转化为液压能存储在蓄能器中,比例节流阀控制动臂下放的速度。德国力士乐公司对该种方案做了研究表明,在14 t的轮式挖掘机上进行试验,在同样的工作循环下,较不采用动臂动臂势能再生的机型每小时可减少1 L的燃油消耗,45 t的机型,每小时可减少燃油消耗3 L。

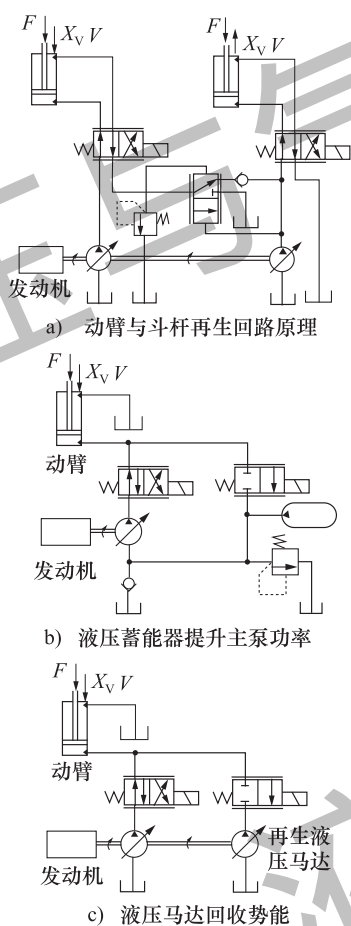


图 15 重力势能直接回收利用原理

图 15c 所示回路,采用液压马达将动臂下降的势能转化为液压马达的输出扭矩,辅助发动机工作,由于同轴连接,前提是必须有别的执行机构处于工作状态。如果液压马达的输出轴与发动机输出轴脱离,储能就非常方便,这时液压马达可以驱动冷却风扇等辅助设

施,驱动发电机将势能转化为电能存储在蓄电池中,这也是混合动力工程机械采用的主要能量回收方式。日本的卡亚巴工业株式会社开发出一套用于挖掘机的独立能量回收系统,既可以用于混合动力机型,也可以用于普通的液压挖掘机,图 16 是所采用的回路原理及实物照片,该回路已在包括我国在内的多个国家申请了专利,并在 2012 年上海举办的工程机械国际展览会上展示了这一单元。工作中动臂下放的势能或回收制动的动能驱动变量液压马达,液压马达驱动变量泵通过阀 4 向主回路输出流量,多余的能量也可以通过发电机存储在电池中,通过样机的对比测试,加装能量回收系统后,挖掘机每一个工作循环(挖掘、90°回转、装载)可降低燃油消耗 27% 左右。

液压系统主要依靠蓄能器来存储能量,现有技术充气压力固定不变,当外部的压力低于蓄能器的压力,就无法储能,而当蓄能器的压力低于外部的压力,蓄能器就不能释放能量,导致蓄能器只能在很小的压力范围内工作,为使液压系统蓄能器充气压力可变,在较大的充气压力范围内具有高的效率和能量存储密度,美国 Minnesota 大学提出一种新的双腔开放式的蓄能器控制回路原理,压缩空气的压力可从大气压一直到 350 bar 范围内调整,既可以利用压缩储能,也可以利用压缩空气排油,作用是提高能量储存密度,同时传递大的功率值,控制原理如图 17 所示。

4 动力系统匹配及混合动力技术

工程机械中,发动机都按最大的工作载荷配置功率,而实际工作中,机器大部分时间都只工作在部分负载工况,使发动机工作在低效率状况,即动力系统不匹配,也是造成能量浪费的主要原因之一。传统的工程

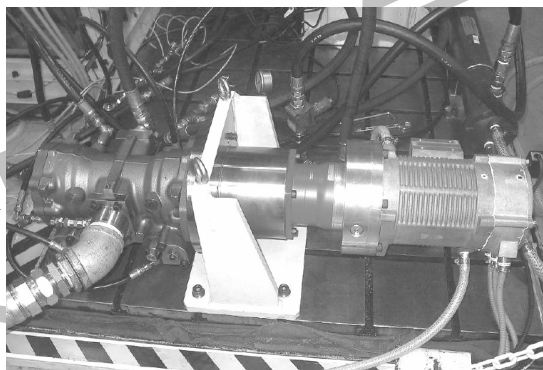
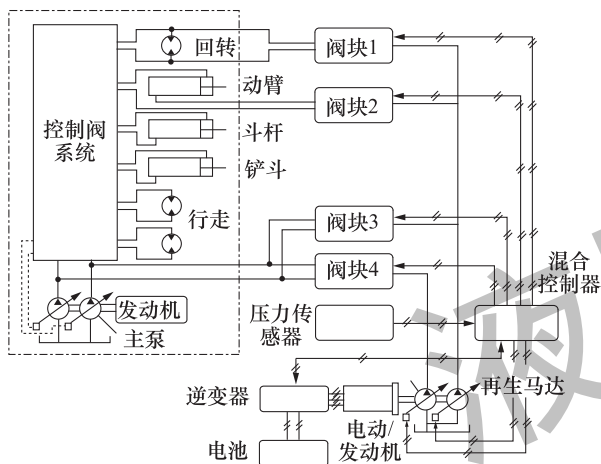


图 16 卡亚巴工业株液电能量回收原理及实物照片

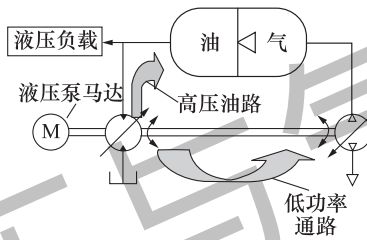


图 17 双腔开放式的蓄能器控制回路原理

机械,为了系统匹配,常采用的方式有分工况控制,根据工况对发动机和液压泵的工作区间进行划分,常见的划分有重载、轻载、经济、破碎、吊重等;转速感应控制,通过检测发动机的掉速来控制液压泵的吸收功率,减小发动机的功率储备,有效防止发动机过载;发动机自动减速和自动怠速控制,轻载时降低转速或进入怠速(40%左右的工作周期);发动机与泵匹配控制;在发动机分工况控制的基础上,按照发动机被划分的工作区间,相应地调节泵的吸收功率,使发动机稳定运行在目标工作点附近。有的控制系统还增加了发动机转速控制,使发动机尽可能移向高效率区。

为了使发动机和负载更好地匹配,新的方法是采用混合动力,使发动机更多的工作在高效区,实现节能和减排,同时采用电气方式,回收再利用传统液压挖掘机浪费掉的势能和动能。目前,国外著名工程机械制造企业相继推出混合动力产品,如卡特公司 D7E 推土机、小松公司 HB205 挖掘机、Volvo 公司 L220F 轮式装载机、凯斯公司 CX2108B 挖掘机和日立建机的混合动力装载机和挖掘机 ZX200 等。其中日本小松公司对工作性能参数比较一致的常规动力(PC200-8)和混合动力(HB205-1)挖掘机,在等作业量和作业速度的情况下进行了三次燃油消耗对比试验,采用混合动力后燃油消耗量降低 25% 以上。我国也非常重视混合动力工程机械的研发工作,在国家 863 计划重点项目的支持下,浙江大学有 5 篇博士学位论文专门针对混合动力挖掘机的关键技术开展研究,并与中联重科、徐工、三一、山河智能等多家企业合作研发出了样机,多家企业申请了相关的发明专利,其中 6 项已经授权。

因工程机械一个作业循环中液压泵的瞬时功率较大而输出功率平均值较小、柴油机的负荷变化剧烈,为了动态地匹配发动机和液压系统的功率,在分功率控制的基础上,太原理工大学机电所进一步提出采用发动机停缸控制的方法^[32]。在小负荷或怠速时切断部分汽缸的供油进行柴油机停缸控制,提高柴油机的负荷率。在大负荷时恢复供油,使柴油机跟踪负荷工作

在高效区域,降低燃油消耗,减少排放,提高柴油机在工程机械整个工作循环中的燃油经济性,并保证整机的动力性和较低的制造成本。图 18 为试验测试挖掘机重载模式下(柴油机转速 2200 r/min),柴油机全部气缸工作和柴油机第 1 缸断油停缸时油耗对比曲线,可知在重载工作模式下,采用停缸技术每个工作循环油耗量平均下降 13%。发动机转速越高,部分负载工况越是偏离其高效区,停缸节能效果越明显。试验测试也表明,当发动机工作在 2000 r/min 的经济模式下,停缸技术每个工作循环油耗量平均下降 11%。

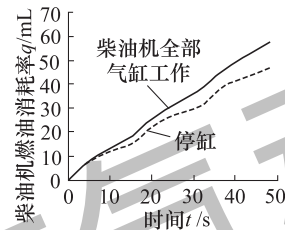


图 18 重载模式下传统发动机和单缸断油工作燃油消耗对比

5 结论

以上分析表明,近年来工程机械采用了一系列新技术新方法来提高能量利用率,获得了很大的进步和发展。

(1) 在提高液压泵效率方面取得了重要的进展,引入了基于开关阀的数字控制技术进一步降低了节流损失,但也注意到,目前控制元件本身的效率已很高,要想进一步的改善,需要高的投入和更深层次开展基础研究。

(2) 当前负载敏感控制在工程机械中广泛采用,虽然仍在不断完善和发展,但因控制阀的节流损失,造成液压系统较大的能量消耗,是工程机械节能首先要解决的问题。

(3) 直接泵控技术具有很大节能优势,具有节流损失小,可进行能量回收,有更高的能量利用效率,且液压回路元器件少,系统简单、可控性好,具有广泛的发展前景。

(4) 能量回收利用是降低工程机械能量消耗的重要措施,合理的能量回收利用方案应该系统简单、成本低并具有较高的能量回收利用率。

(5) 整机能量管理及动力单元和工作装置的合理匹配,对降低工程机械能量消耗具有重要意义。混合动力作为一种技术方案,可有效提高工程机械发动机的燃油经济性,并可进行能量回收利用,需解决的问题是系统复杂、成本高。

以上各种技术仍有非常大的改进空间,同时也需要开发新技术、新方法,继续深入探索研究新的节能理论、开发新型节能元件、进行科学合理的整机动力匹配,以期进一步降低工程机械能量消耗,从而应对日益严峻的能源枯竭、环境污染及全球变暖等问题。

参考文献:

- [1] Zimmerman J, Pelosi M, Williamson C, Ivantysynova M. Energy Consumption of an LS Excavator Hydraulic System [C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Seattle, WA, USA, 2007:117-126.
- [2] Baker J. and Ivantysynova M, Investigation of Power Losses in the Lubricating Gap between Cylinder Block and Valve Plate of Axial Piston Machines[C]//Proc. 5th Fluid Power Net International PhD Symposium, Krakow, Poland, 2008: 302-319.
- [3] Ivantysynova M. Innovations in Pump Design What are Future Directions [C]//Proceedings of 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, TOYAMA, Japan, 2008:59-64.
- [4] Murrenhoff H, Claus Enekes, Stefan Gels, et al. Efficiency Improvements of Fluid Power Components Focusing on Tribological Systems [C]//7th International Fluid Power Conference, Aachen, Germany, 2010:215-248.
- [5] 徐兵,李迎兵,张斌. 轴向柱塞泵滑靴副倾覆现象数值分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(20):161-168.
- [6] H. Tu, M Rannow, M Wang, et al. Modeling and Validation of a High Speed Rotary PWM on/off Valve [C]//Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Conference, DSCC, USA, 2009:629-636
- [7] Backas J, Ahopelto M, Huova M. IHA-Machine: a Future Mobile Machine [C]//The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power, Tampere, Finland, 2011: 18-20.
- [8] Norrdigi, Saving Energy with Intelligent Power Management [EB/OL]. <http://www.norrhydro.com>, 2013-01-15.
- [9] Backé, W. Feigel, H-J. Neue Möglichkeiten Beim Elektro Hydraulischen Load-Sensing [J]. O + PÖlhydraulik und Pneumatik, 1990, 34(2):106-114.
- [10] Hlemut Fischer. Load Sensing System fuer mobil Arbeitsmaschinen[J]. O + PÖlhydraulik und Pneumatik, 1995, 39(4):298-303.
- [11] Heinrich Nikolaus. Load Sensing-lastunabhängige Dosierung von Verbraucherstroemen[J]. O + PÖlhydraulik und Pneumatik, 1994, 38(4):196-201.
- [12] Ken Ichiryu, Masami Ochiai, Tshkasa Toyooka. Simulation Study on Load Sensing Dynamics on Hydraulic Excavator [C]//Proceedings of the 2nd JHPS Int. Symposium on fluid power, Tokyo, Japan, 1993:477-482.
- [13] 冯培恩,高峰,高宇. 液压挖掘机节能控制方案的组合优化[J]. 农业机械学报, 2002, 33(4):5-8.
- [14] Zähe B. Energiesparende Schaltungen Hydraulischer Antriebe mit Veraenderlichem Versorgungsdruck und ihre Regelung [D]. Doctor Dissertation, RWTH Aachen, Germany, 1993.
- [15] Harms, H. -H. Entwicklungstendenzen in der Mobilhydraulik [J]. O + PÖlhydraulik und Pneumatik, 1994, 38(4): 172-182.
- [16] Djurovic M, Helduser S. Neue Loesungen zum Elektrohydraulischen Load-Sensing [C]//4th IFK Int. Conf. Dresden, Germany, 2004:59-70.
- [17] Holger J, Dirk Von Bueren, Energy-Saving Valve System for Mobile Hydraulic Application-Load-Control-System [C]//4th International Fluid Power Conference. Dresden, Germany, 2004:117-128.
- [18] Björn G, Thorsten S B. Hans-Heinrich Harms, Alternating Pump Control for a Load-Sensing System [C]//7th International Fluid Power Conference, Aachen, Germany, 2010:1-12.
- [19] R. Finzel, S. Helduser. Energy-Efficient Electro-Hydraulic Control Systems for Mobile Machinery/Flow Matching [C]//6th International Fluid Power Conference, Dresden, Germany, 2008:89-102.
- [20] Grösbrink, B., Harms, H. -H. Control Concept for an Advanced Load-sensing System [C]//ICFP 2009, Hangzhou China, 2009:201-204.
- [21] Rahmfeld, R. and Ivantysynova, M. New Displacement Controlled Linear Actuator Technology-A Suitable Control Element for Active Oscillation Damping [C]//The Eight Scandinavian International Conference on Fluid Power, Tampere, Finland, 2003:1139-1154.
- [22] Williamson, C., Zimmerman, J. and Ivantysynova, M. Efficiency Study of an Excavator Hydraulic System based on Displacement Controlled Actuators [C]//Bath ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control, Bath, UK, 2008:291-307.
- [23] Ivantysynova, M. Innovations in Pump Design-what are future directions [C]//Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, Toyama, Japan, 2008:59-64.
- [24] Zimmerman, J., Busquets, E. and Ivantysynova, M. 40% Fuel Savings by Displacement Control Leads to Lower Working Temperatures-A Simulation Study and Measure-