行走工程机械液压混合动力技术

闫丽娟[1],孙 辉[2],刘 伟[2],姜继海[3],赵 燕[2],韩家威[2]

(1. 徐工集团工程机械股份有限公司,江苏 徐州 221004;2. 江苏徐州工程机械研究院,江苏 徐州 221004;
3. 哈尔滨工业大学 机电工程学院,哈尔滨 150001)

摘 要:对比了行走工程机械与公路车辆的作业特点,分析了行走工程机械的节能潜力。针对其频繁起停、往复运动的作业特点,提出液压混合动力系统的节能方案,设计了再生制动策略和能量利用策略,开发了混合动力装载机和混凝土搅拌车样车。试验结果表明,行走机械液压混合动力系统能够实现各种工作模式的合理切换,有效地回收和再利用整机的制动动能,降低燃油消耗,提高整机的动力性能。

关键词:工程机械;液压混合动力;能量回收;液压泵/马达

中图分类号:TH137 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2014)02-0364-05

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201402014

Hydraulic hybrid technology of moving construction machinery

YAN Li-juan[1], SUN Hui[2], LIU Wei[2], JIANG Ji-hai[3], ZHAO Yan[2], HAN Jia-wei[2]

(1. *XCMG Constuction Machinery Co., Ltd., Xuzhou 221004, China*; 2. *Jiangsu Xuzhou Construction Machinery Research Institute, Xuzhou 221004, China*; 3. *School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: The operating characteristic of moving construction machinery is analyzed and the energy saving potential is evaluated. In view of the characteristics that moving construction machinery frequently start and stop, different energy saving schemes are proposed. Regenerative braking strategy and energy reuse strategy are designed based on the advantage of high power density of hydraulic accumulator. Prototypes of hydraulic hybrid loader and hydraulic hybrid concrete mixer truck are developed. Experiment results show that the hydraulic hybrid system can effectively recover and reuse the braking energy. The control strategies reasonably switch among various operation modes, reduce fuel consumption and improve the dynamic performance of the machine.

Key words: construction machinery; hydraulic hybrid; energy regeneration; hydraulic pump/motor

液压混合动力作为混合动力技术的一个重要分支,具有功率密度大、可靠性高、容易实现正反转等优点,因此在工程机械的行走装置和军用车辆的驱动系统中显示出较强的可应用性[1-2]。2004年,美国环保署(EPA)立项支持福特公司与Eaton等公司完成了首辆基于液压混合动力技术的运动型多用途车。由于液压混合动力技术带来的良好经济性、环保性及工程化推广的可行性,

收稿日期:2012-08-27.

基金项目:国家自然科学基金项目(50375033).

作者简介:闫丽娟(1964-),女,高级工程师.研究方向:工程机械.E-mail:yanlj@xcmg.com

通信作者:孙辉(1978-),男,高级工程师,博士.研究方向:流体传动及控制.E-mail:sunhuinievana@163.com

EPA 正在将该项技术推广应用到其他种类的车辆上[3-4]。2003 年,日立建机生产出了世界上第一台混合动力驱动的轮式装载机,2008 年沃尔沃研制出 L220F 型混合动力轮式装载机。为了提高下一代产品的竞争力和市场占有率,世界各大工程机械制造商纷纷开展了混合动力系统在工程机械上的应用研究[5]。

行走工程机械的作业过程中存在频繁起停和往复运动,由于整机重量大,所以减速制动时会释放出大量的能量[6],这部分能量通常被转化为热能浪费掉,同时还会导致系统发热和元件寿命的缩短。因此,采用混合动力技术回收传统工程机械浪费掉的制动动能和重物势能成为节能降耗的一项有效措施。本文针对行走工程机械的作业特点,提出不同的液压混合动力节能方案,针对液压混合动力系统功率密度大的特点,提出了再生制动策略和能量利用策略,最后通过试验验证其有效性,为液压混合动力工程机械的研制和开发奠定基础。

1　作业特点

行走工程机械与公路车辆具有截然不同的作业循环,如图 1、图 2、图 3 所示。可见,轮式装载机和叉车的平均作业速度较低(低于 20 km/h),作业周期短(低于 55 s),但制动频率高且周期性变化,最大速度处的制动减速度约 3 m/s²。公路车辆的制动频率低,正常行驶时发动机通常可工作于较好的燃油经济区。轮式装载机和叉车的负荷大幅度周期性变化,因此,发动机必须满足负载功率的频繁变化,导致燃油经济性恶化[7]。行走工程机械制动频繁、负荷周期性变化意味着整机作业过程中存在大量的可回收能量,需要混合动力系统具有瞬时存储和释放大功率流能量的特性。

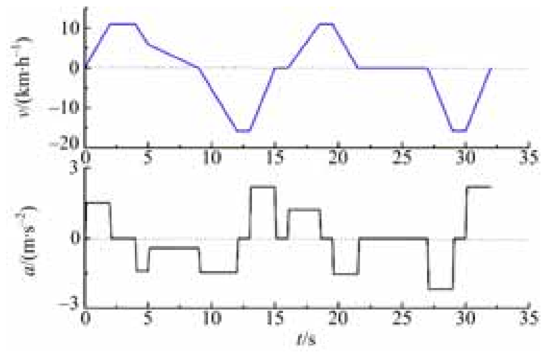

图 1　轮式装载机的作业循环

Fig. 1　Operating cycle of the wheel loader

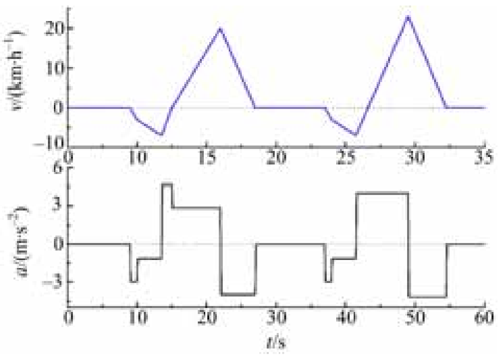

图 2　叉车的作业循环

Fig. 2　Operating cycle of the forklift truck

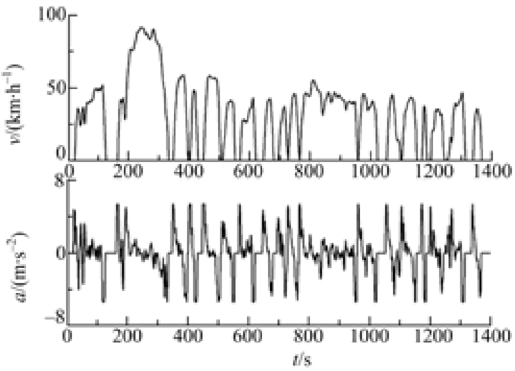

图 3　公路车辆的驱动循环

Fig. 3　Velocity profile of the automobile

2　液压混合动力系统

根据行走工程机械传动装置的特点,可以采用不同动力配置的液压混合动力系统。串联式液压混合动力叉车主要由发动机、液压泵马达、蓄能器和液压泵组成,如图 4 所示。串联式结构实现了发动机与车轮间无直接机械连接,可保证发动机始终工作于最佳燃油经济区,发动机输出功率与整机需求功率的差值由液压混合动力系统来提供或者吸收。通过控制液压泵马达的排量可实现轮边独立驱动,制动或下坡时可回收叉车的惯性能。

并联式液压混合动力装载机主要由发动机、液力变矩器、变速箱、液压蓄能器、耦合器和液压泵/马达等组成,如图 5 所示。发动机的动力一部分通过液力变矩器和变速器驱动行驶机构,实现装载机行驶,另一部分通过液压油泵驱动液压油缸,实现转向和装载工作。液压泵/马达、液压蓄能器和耦合器等构成液压再生系统,与发动机一起形成双动力驱动系统。在装载机制动时,变速

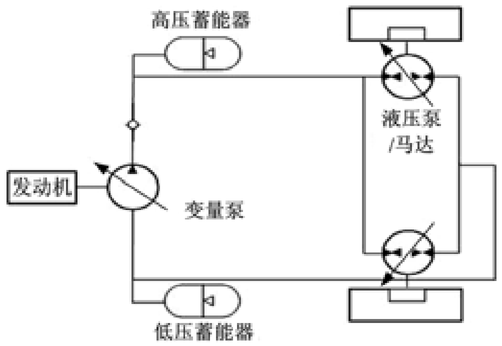

图 4　串联式液压混合动力叉车原理图

Fig. 4　Schematic of series hydraulic hybrid forklift truck

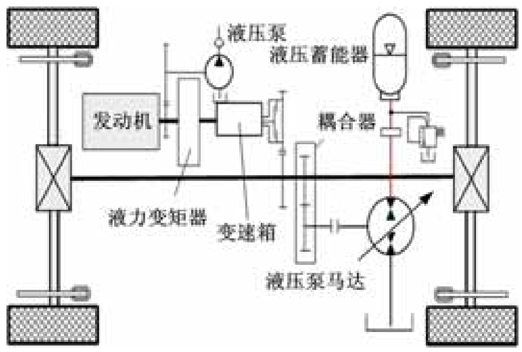

图 5　并联式液压混合动力装载机原理图

Fig. 5　Parallel architecture of hydraulic hybrid wheel loader

器后离合器断开，液压泵/马达工作于泵工况，回收车辆的制动能，并将其存储于高压蓄能器中。在装载机起动时，液压泵/马达工作于马达工况，利用回收的能量为装载机提供辅助功率，实现余能的再次利用[7]。在装载机铲掘时，液压泵/马达工作于马达工况，为装载机提供辅助牵引功率，有效抑制发动机掉转现象，保证使发动机工作于最佳燃油经济区，减少液压工作系统的溢流损失。

3　能量控制策略

混合动力工程机械的控制策略包括再生制动和能量利用策略。再生制动通过控制混合动力系统的动力元件，将制动时耗散的动能进行回收；能量利用策略负责整机能量分配和动力系统的控制[8-10]。

3.1　再生制动策略

液压混合动力工程机械的制动转矩分为液压泵/马达提供的液压再生制动转矩和传统的制动器提供的摩擦制动转矩两部分，两者之和为总的制动转矩。在制动过程中，液压泵/马达工作在泵工况，把整车动能转换成液压能存储于液压蓄能器中，实现整车能量回收，同时通过传动系统对车轮产生制动力（再生制动力），整机的制动力 F_b 可表示为

$$F_b = \begin{cases} F_{hyd}, & j \leqslant 3 \\ F_{hyd} + F_{fri}, & j > 3 \end{cases} \tag{1}$$

式中：F_{hyd} 为液压再生制动力；F_{fri} 为摩擦制动力；j 为制动减速度。

液压再生制动力分配曲线如图 6 所示。典型作业工况下，正常制动时制动减速度通常集中在 3 m/s²，液压泵/马达提供全部制动力，回收整机制动动能，如图 6 中 OA 段。当制动减速度 $3<a<6$ m/s² 时，液压泵/马达和摩擦制动系统共同提供制动力，液压再生制动力如图 6 中 AB 段。紧急制动时，整机制动力由摩擦制动系统提供，液压再生制动力按图 6 中 BC 段递减。整车满载、中等载荷和空载时，再生制动力分配曲线分别为 OABC、OA_1B_1C 和 OA_2B_2C。

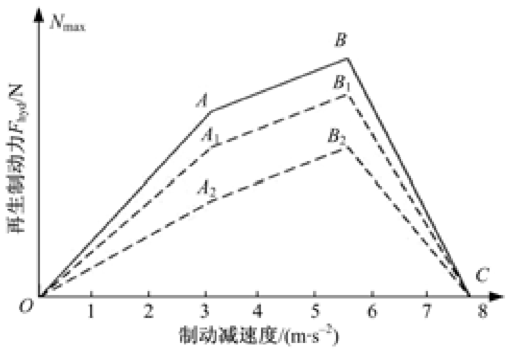

图 6　液压再生制动力分配曲线

Fig. 6　Hydraulic regenerative braking force distribution curves

3.2　能量利用策略

（1）起动时，根据能量存储情况液压蓄能器为整机提供全部或部分能量，同时保证液压泵/马达工作于大负荷工况，提高系统的工作效率。

（2）当整机空负荷行驶时，调整发动机工作状态到最佳燃油经济区，发动机输出的多余能量由液压蓄能器回收，为整机的作业工况或加速提供辅助功率。

（3）当整机全动力驱动时，液压蓄能器提供辅助牵引功率，同时保证发动机工作于最佳燃油经济区。

4　试　验

试制液压混合动力装载机和液压混合动力混凝土搅拌车两种样机，进行制动能回收和再利用

试验研究，能量回收试验曲线如图 7、图 8、图 9 所示。由试验曲线可以看出，混合动力装载机平均制动车速较低（10 km/h），路阻大，再生制动过程中，蓄能器压力仅由 13 MPa 升高到 14.2 MPa，压力变化幅度小；混合动力混凝土搅拌车平均制动车速较高（35 km/h），路阻小，再生制动过程中，蓄能器压力由 17.8 MPa 升高到 26.4 MPa，压力变化幅度明显，能量回收率高。不同车速下的装载机制动能回收的曲线表明：制动速度高，整机可回收能量大，同时液压泵/马达又处于高效区，制动能回收率较高，蓄能器压力变化明显。制动速度低时（低于 5 km/h），液压泵马达处于低效率区，同时由于路阻较大，制动能回收效率很低，虽然处于再生制动模式，但蓄能器压力基本不变。

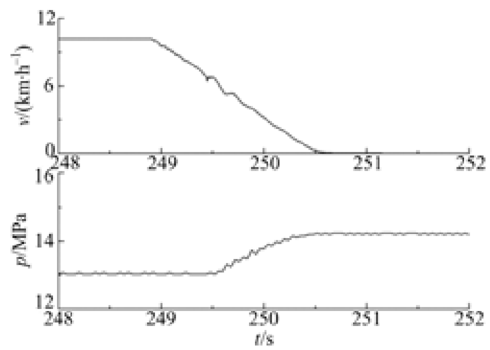

图 7　装载机制动能量回收试验曲线

Fig. 7　Braking energy recycled of loder

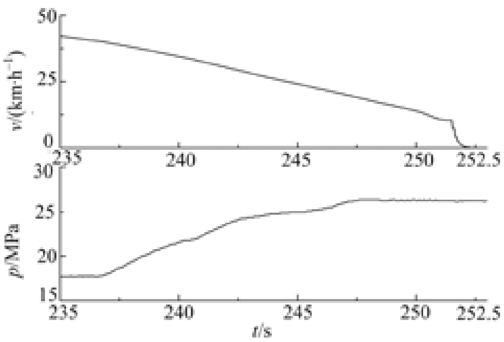

图 8　混凝土搅拌车制动能量回收试验曲线

Fig. 8　Braking energy recycled of concrete mixer truck

存储时间对回收能量影响的试验曲线如图 10 和图 11 所示。从图中可以看出，储存时间越长，蓄能器压力下降幅度越明显，证明能量损失增加。蓄能器的保压时间长短决定了能量利用效率的高低，为了提高能量利用效率，回收的能量应在短时间内迅速应用，同时也可通过向蓄能器中添加泡沫的方法降低蓄能器存放能过程中的热损失，提高蓄能器的能量存储效率。

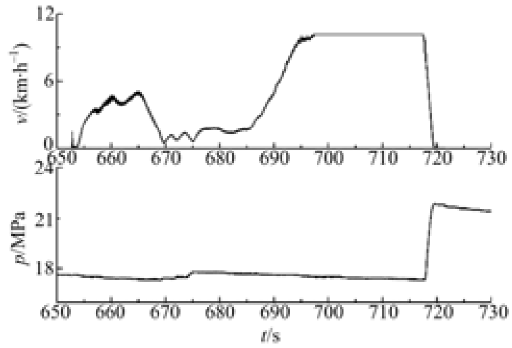

图 9　不同速度的装载机制动能量回收试验曲线

Fig. 9　Loader braking energy recycled at different velocities

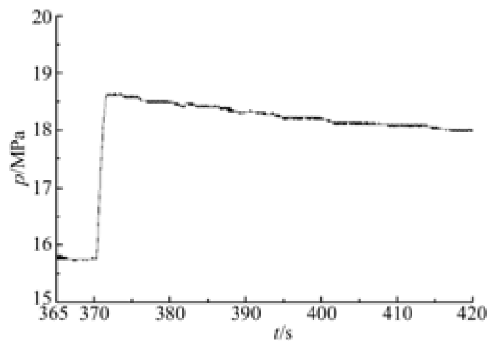

图 10　长时间保压蓄能器的压力变化

Fig. 10　Accumulator pressure varies in long time energy storage

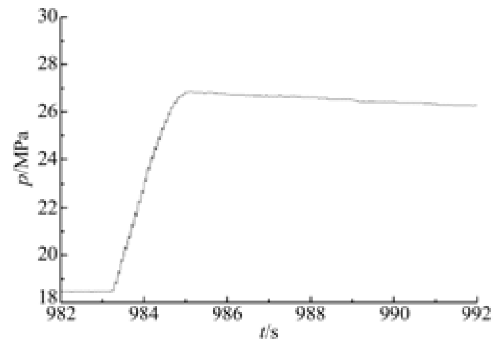

图 11　短时间保压蓄能器的压力变化

Fig. 11　Accumulator pressure varies in short time energy storage

由图 7～图 11 可见，行走工程机械平均制动车速较低（如装载机），可采用多次回收单次释放策略，即蓄能器多次回收整机制动动能直至压力达到最高预设压力时，一次性释放全部能量；整机平均制动车速较高（如混凝土搅拌车），采用单次回收单次释放策略，可明显提高能量回收率和再利用率。

液压混合动力系统单独驱动的试验曲线见图

12。在发动机不工作的情况下,液压蓄能器提供全部驱动能量(442～465 s),液压泵/马达单独驱动整机速度达到10.6 km/h,当液压蓄能器压力达到最低工作压力16 MPa时,液压混合动力系统不工作。可见,液压混合动力系统可有效地回收和再利用车辆的制动动能,避免发动机工作在低速/大转矩的高油耗区,降低油耗和尾气排放。

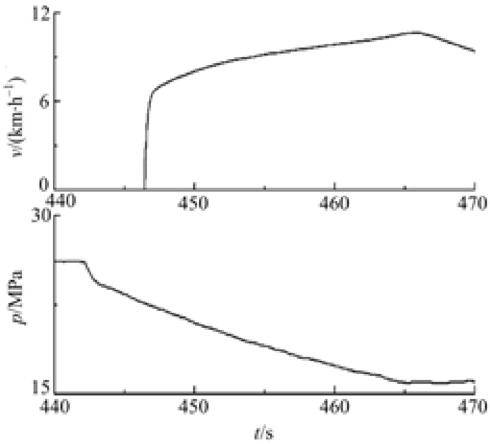

图12 液压混合动力系统单独驱动试验曲线

Fig. 12 Energy release curves of hydraulic hybrid system

5 结束语

分析了行走工程机械的节能潜力,根据主机产品特点设计不同配置方式的液压混合动力系统,结合液压系统功率密度大的特点,设计了液压再生制动策略和能量利用策略,实时地控制混合动力系统的能量分配和制动能量的回收,实现混合动力系统的不同工作模式及模式间的动态切换。试制行走工程机械液压混合动力样机,对制动能回收进行了试验验证,重点分析了能量保存时间、车速等对节能效果的影响。试验研究表明,将液压混合动力技术应用于行走工程机械,可有效地回收整机的制动动能,降低燃油消耗,提高整机动力性能。

参考文献:

[1] Simon B, Christine E, Edward G, et al. Hydraulic hybrid systems for commercial vehicles[C]// SAE Paper, 2007-01-4150.

[2] 魏英俊. 新型液压驱动混合动力运动型多用途车的研究[J]. 中国机械工程,2006,17(15):1645-1648.
Wei Ying-jun. Study on a new type of hydraulic hybrid sport utility vehicle[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(15): 1645-1648.

[3] 杜玖玉,苑士华,魏超,等. 车辆液压混合动力传动技术发展及应用前景[J]. 机床与液压,2009, 37(2): 181-184.
Du Jiu-yu, Yuan Shi-hua, Wei Chao, et al. The application and development of hydraulic hybrid powertrain of vehicle[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(2): 181-184.

[4] Alexander K, Monika I. Power split transmissions versus hydrostatic multiple motor concepts - a comparative analysis[C]// SAE Paper, 2004-01-2676.

[5] 张彦廷,王庆丰,肖清. 混合动力液压挖掘机液压马达能量回收的仿真及试验[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 218-222.
Zhang Yan-ting, Wang Qing-feng, Xiao Qing. Simulation and experimental research on energy regeneration with hydraulic motor for hybrid excavator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 218-222.

[6] 张彦廷. 基于混合动力与能量回收的液压挖掘机节能研究[D]. 杭州:浙江大学机械工程学院,2006.
Zhang Yan-ting. Research on energy saving for hydraulic excavators based on hybrid and regeneration [D]. Hangzhou: Department of Mechanical Engineering,Zhejiang University, 2006.

[7] Xiao Q, Wang Q F, Zhang Y T. Control strategies of power system in hybrid hydraulic excavator[J]. Automation in Construction, 2008(17):361-367.

[8] 彭栋,殷承良,张建武. 基于模糊控制的并联式混合动力汽车制动控制系统[J]. 吉林大学学报:工学版,2007, 37(4):756-761.
Peng Dong, Yin Cheng-liang, Zhang Jiang-wu. Braking system for parallel hybrid electric vehicle with fuzzy control logic[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(4):756-761.

[9] 孙辉,姜继海,王昕. 静液传动混合动力车辆再生制动策略研究[J]. 东北大学学报,2008,29 (6):248-252.
Sun Hui, Jiang Ji-hai, Wang Xin. Research on the regenerative braking control strategy for hydrostatic transmission hybrid vehicle[J]. Journal of Northeastern University, 2008, 29 (6): 248-252.

[10] Kim Y J. Integrated modeling and hardware-in-the-loop study for systematic evaluation of hydraulic hybrid propulsion options [D]. USA: University of Michigan,2008.