

液压混合动力轮式装载机节能影响因素分析与优化*

石荣玲^{1,2} 赵继云¹ 孙 辉³

(1. 中国矿业大学机电学院, 徐州 221008; 2. 徐州市农机技术推广站, 徐州 221006;
3. 江苏徐州工程机械研究院, 徐州 221004)

【摘要】 分析了低速作业工况下轮式装载机的能耗损失和混合动力装载机节能潜力。根据液压储能的特点, 设计了液压混合动力并联式节能方案, 通过计算和仿真, 研究影响节能效果的主要因素, 并对其进行优化。结果表明: 优化液压混合动力系统的匹配关系, 合理选择控制策略参数, 充分回收制动动能和整机下长坡的重物势能, 有利于提高装载机的节能指标。

关键词: 装载机 液压混合动力 节能
中图分类号: TH137; TD422.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)03-0031-05

Energy-saving Potential and Influencing Factors for Hydraulic Hybrid Wheel Loader

Shi Rongling^{1,2} Zhao Jiyun¹ Sun Hui³

(1. School of Machine and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China
2. Xuzhou Agriculture Machinery Technique Extending Station, Xuzhou 221006, China
3. Jiangsu Xuzhou Construction Machinery Research Institute, Xuzhou 221004, China)

Abstract

According to the operating characteristics of wheel loaders, the energy distribution and saving potential of loader were researched through calculation and simulation. Combing the characteristics of hydraulic hybrid system, the parallel configuration of hydraulic hybrid wheel loader was presented, and the influencing factors for hydraulic hybrid wheel loader energy-saving potential were analyzed. Finally, the key parameters were optimized. The results show that optimization of hydraulic hybrid power system, selection of the appropriate parameters in control strategy, recovering the braking energy and long slope potential energy of loaders are helpful to improve the energy saving effect of hydraulic hybrid loader.

Key words Loader, Hydraulic hybrid, Energy saving

引言

装载机作业过程中存在频繁的起动和制动, 由于整机质量大, 减速制动时会释放出大量的能量, 因此, 采用混合动力技术回收浪费掉的制动动能和重物势能成为装载机节能降耗的一项有效措施^[1~2]。

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, 在工程机械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^[3~9]。本文以轮式装载机为研究对象, 分析装载机作业过程中的能耗损失、节能潜力和能量回收的主要途径。设计轮式装载机的并联式液压混合动力节能方案, 详细分析作业工况、控制策略参数、混合动力系统参数匹配等因素对节能效果和整机性能的影响。

1 混合动力装载机节能潜力分析

装载机的动力, 一部分通过液力变矩器和变速

收稿日期: 2010-07-06 修回日期: 2010-11-15
* 国家自然科学基金资助项目(50875054)
作者简介: 石荣玲, 博士生, 徐州市农机技术推广站高级工程师, 主要从事机械设计及理论研究, E-mail: xznjtmisshi@163.com

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。装载机作业工况的需求功率为

$$P = P_d + P_h + P_a \tag{1}$$

式中 P_d ——驱动功率 P_a ——整机附件功率
 P_h ——液压执行机构驱动功率
装载机行驶工况的驱动功率为^[10]

$$P_d = \frac{Gfv}{3.6} + \frac{Giv}{3.6} + \frac{C_DAv^3}{76.14} + \frac{\delta mvdv}{3.6dt} \tag{2}$$

式中 m ——装载机质量 G ——装载机重量
 v ——行驶速度 f ——滚动阻力系数
 i ——坡度阻力系数 δ ——质量转换系数
 C_D ——空气阻力系数
 A ——装功机迎风面积

液压混合动力轮式装载机基本参数如表 1 所示,典型的作业工况如图 1 所示^[11]。根据图 1 所示的工况,得出装载机在作业工况下的能耗和可回收能量对比如表 2 所示。

表 1 轮式装载机的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of wheel loader	
参数	数值
车轮有效半径/m	0.75
发动机功率(转速)/kW (r/min)	154 (2 200)
额定载质量/kg	5 000
整机质量/kg	17 000
最高车速/km·h ⁻¹	35
变速器速比	2.547, 0.683, R1.864
驱动桥速比	22.85

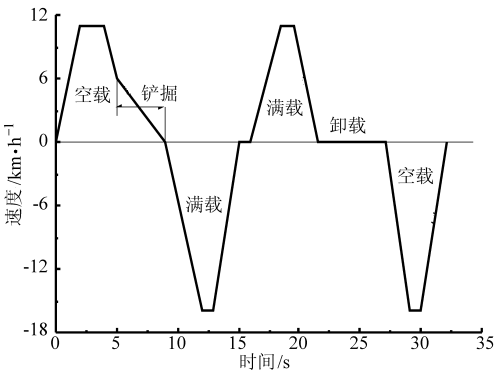


图 1 装载机的典型作业工况

Fig. 1 Typical operating conditions of the wheel loader

由表 2 可见,作业工况的能耗中,发动机的能量损耗、克服路阻的能量损耗和液压执行机构的能量损耗较多,而克服风阻消耗的能量很小。发动机的能量损耗主要由装机功率过大,而正常工况下发动机常处于小负荷/高油耗区域所致。液压系统的能量损失主要与元件的工作原理、材料性能和加工工

艺有关^[5]。装载机作业工况的行驶速度低,平均车速通常为 10 km/h,因此,整机克服风阻的能耗只有 5 kJ,可忽略不计。装载机作业工况时存在着频繁的制动和下坡,进行能量回收几率多,可回收能量的级别大。在可回收的能量中,装载机动臂处的可回收重物势能较小,只有 44 kJ;而整机制动动能和下长坡重物势能很大,分别为 451 kJ 和 237 kJ,因此液压混合动力装载机的能量回收,主要为整机的制动动能和下坡势能。

表 2 装载机能耗及可回收能量对比
Tab. 2 Comparison of loader energy consumption and recycling energy

参数	数值
装载机需求驱动能量 E_d	866
发动机损失的能量 E_e	260
液压执行机构消耗的能量 E_{hg}	44
装载机克服路阻消耗的能量 E_f	275.8
装载机制动时克服路阻消耗的能量 E_{fb}	70.7
装载机克服风阻消耗的能量 E_a	5
可回收的制动动能 E_r	451
可回收的载荷重物势能 E_{hg}	44
下长坡可回收的整机重物势能(6 m 长 10°坡) E_{hv}	237

2 能量回收的影响因素

并联式液压混合动力装载机的配置方式如图 2 所示^[11]。

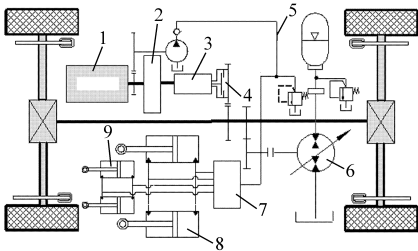


图 2 并联式液压混合动力装载机原理图

Fig. 2 Configuration of parallel hybrid loader

1. 柴油机 2. 液力变矩器 3. 变速器 4. 离合器 5. 液压蓄能器 6. 液压泵/马达 7. 分配阀 8. 动臂油缸 9. 翻斗油缸

液压泵/马达、液压蓄能器和溢流阀等构成液压再生系统,与发动机一起形成双动力驱动。制动时,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,用于装载机的再起动和铲掘工况,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阀损失。

2.1 行驶工况

装载机的行驶工况主要分为高速行驶工况和低速作业工况。低速作业工况下,装载机前进最高车

速为 11.5 km/h,倒车的最高车速为 16.5 km/h,发动机经常工作在低效率的部分负荷工况下;高速行驶工况通常是装载机到达作业区域前的行驶工况,最高车速为 37 km/h。两种工况的加减速频率不一样,再生能量占整个作业工况驱动能量的比例也有很大不同^[12]。在低速作业工况下,整机制动频繁,可回收能量所占的比重明显高于高速行驶工况,实际上,装载机绝大部分时间都处于低速作业工况,因此液压混合动力装载机只对低速作业工况的制动动能进行能量回收。

2.2 液压混合动力系统输出转矩

液压混合动力系统功率密度大,可单独驱动和制动车辆。制动时,传统的摩擦制动系统可较少甚至不参与制动过程。整机制动转矩为

$$T_r = \frac{2\pi m \frac{dv}{dt} r}{i_0} \tag{3}$$

式中 r ——车轮半径 i_0 ——主减速比

根据土方机械制动系统标准^[13],装载机的制动距离为

$$L = \frac{v^2}{68} + \frac{v^2}{124} \left[\frac{m}{32\,000} \right] \frac{v^2}{44} \tag{4}$$

装载机作业速度下的制动距离为 3.7 m,装载机制动时间与制动距离及制动转矩的关系如图 3 所示。由图可见,液压混合动力系统的制动转矩必须大于 900 N·m。

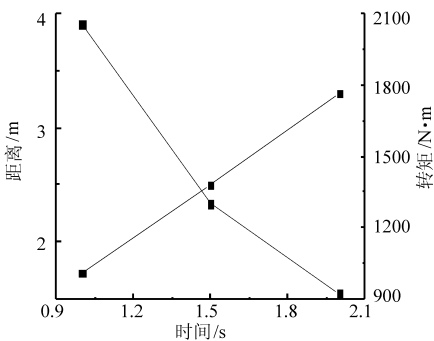


图 3 装载机制动时间与制动距离及制动转矩关系

Fig. 3 Relationship of braking time, braking distance and brake torque

液压混合动力系统的输出转矩与耦合器传动比的关系为

$$T_r = pV_{p/m}i_{p/m} \tag{5}$$

式中 p ——液压蓄能器工作压力
 $V_{p/m}$ ——液压泵/马达排量
 $i_{p/m}$ ——耦合器传动比

扭矩耦合器传动比的设计要保证液压泵/马达在驱动和制动过程中工作于高效区,即

$$i_{p/m} = \frac{0.377rn_{e-P/M}}{i_0v} \tag{6}$$

式中 $n_{e-P/M}$ ——液压泵/马达效率最高时对应转速
扭矩耦合器的传动比对制动能的回收和液压泵/马达的工作效率有着直接的影响^[11]。由于装载机作业时车速较低,因此,扭矩耦合器传动比增大,有助于使用小排量的液压泵/马达,降低成本;扭矩耦合器传动比降低有助于提高液压泵/马达的工作效率。

从图 4 可见,随着扭矩耦合器传动比的增大,整机所需液压泵/马达的排量和质量明显降低,而液压泵/马达的工作效率略有降低,因此需要综合考虑价格、整车质量增加以及效率等因素来选择耦合器传动比,使系统的整体性能最佳。

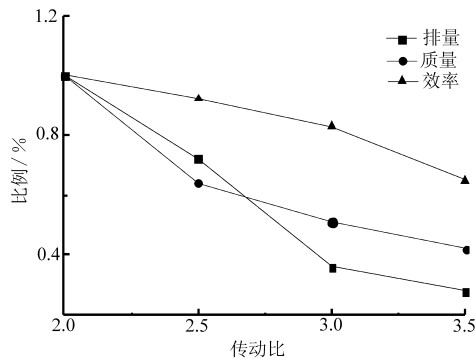


图 4 扭矩耦合器传动比对系统的影响

Fig. 4 Influence of coupler ratio on the hybrid system

2.3 液压蓄能器容积

由于装载机作业工况车速较低,因此液压蓄能器容积的确定应以回收装载机作业工况下制动时的全部动能为准。为了便于铲掘,铲掘时的制动能可不回收,则蓄能器的容积参数由下式决定

$$E = - \int_{v_1}^{v_i} p dV = \frac{p_1 V_1}{n-1} \left[\left(\frac{p_1}{p} \right)^{\frac{1-n}{n}} - 1 \right] \geq \frac{1}{2} (m_e v_1^2 + m_f v_r^2 + m_f v_1^2) \tag{7}$$

式中 p_1 ——液压蓄能器最低工作压力
 V_1 ——液压蓄能器内气体在最低压力的体积
 n ——气体的多变过程指数
 m_e ——装载机空载质量
 m_f ——装载机满载质量
 v_1 ——前进一档最高车速
 v_r ——倒挡最高车速

液压蓄能器的最低工作压力应满足为装载机提供运输车速下的全部制动转矩^[11],即

$$p_{\min} \geq \frac{2\pi m \frac{dv}{dt} r}{i_0 i_{p/m} V_{p/m}} \tag{8}$$

同时,液压蓄能器最高工作压力不得大于液压泵/马达所允许的最高工作压力。

不同容积液压蓄能器在制动时压力变化如图 5

所示。在液压蓄能器最低工作压力一定的情况下, 液压蓄能器的容量越大, 可回收的能量越多, 系统压力在回收能量的过程中变化幅度越小, 液压混合动力系统提供的再生制动转矩变化幅度越小, 制动过程中摩擦制动系统参与制动工作的几率越大, 单一制动工况下能量回收率略低; 液压蓄能器的容量越小, 系统压力在回收能量的过程中变化幅度越明显, 液压混合动力系统提供的再生制动转矩变化幅度越大, 摩擦制动系统参与制动工作的几率越小, 单一制动工况下能量回收率略高, 但由于容积有限, 液压蓄能器常因充满而提前结束液压再生制动, 造成整个作业工况的制动能回收率降低。

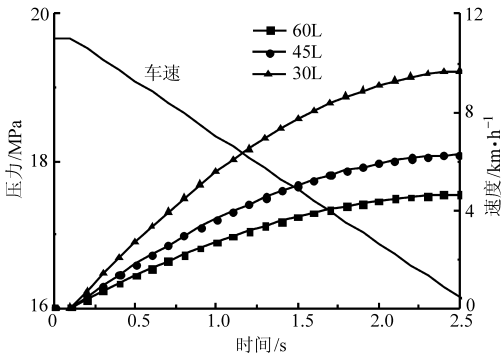


图 5 液压蓄能器容积对系统性能的影响
Fig.5 Effect of hydraulic accumulator volume on hybrid system

对图 1 所示工况进行装载机节能效果进行研究, 得出使用不同液压蓄能器情况下整机的制动能回收率情况如表 3 所示。可见, 采用大容积的液压蓄能器, 系统的制动能回收率得到了明显提高, 但液压蓄能器的容积达到最优值后(40 L), 随着蓄能器容积的继续增加, 制动能的回收率降低, 同时大容积的液压蓄能器也给整机安装带来了困难。

表 3 蓄能器容积对制动能回收率的影响
Tab.3 Effect of accumulator volume on braking energy regeneration

容积/L	20	30	40	50
制动能回收率/%	32.22	48.65	61.80	60.33

2.4 控制参数

制动时, 整车控制器根据踏板下行的幅度、速度以及加速度来识别目标制动减速度, 进而对摩擦制动转矩和液压再生制动转矩进行分配。

(1) 当制动减速度 $a_b \leq a$ (再生制动减速度参考值, $a = \frac{T_{P/M}}{mr}$) 时(轻度制动), 这种情况一般出现

在装载机正常作业的工况下, 整车制动力完全由液压泵/马达提供。

(2) 当制动强度 $a < a_b < b$ (紧急制动参考值) 时, 采用复合制动方式, 并以液压再生制动为主, 摩擦制动为辅, 制动力不足的部分由摩擦制动进行补充。

(3) 当制动强度 $a_b \geq b$ 时, 考虑车辆制动的安全性, 液压再生制动不参与工作, 制动力全部由摩擦制动系统提供^[11]。

再生制动减速度参考值 a 的选择对整车节能效果有着直接的影响, 再生制动减速度参考值对车辆制动能回收的影响如图 6 所示。再生制动减速度参考值 a 增大, 整车制动距离降低, 克服路阻消耗的能量降低, 回收的制动能量增加; 当再生制动减速度参考值达到最优值后, 随着 a 的进一步增加, 整机所需的制动转矩超过液压混合动力系统可提供的最大制动转矩, 传统摩擦制动系统提供不足的制动转矩, 实际回收的制动能降低。因此控制策略中, 液压再生制动的减速度参考值应选择回收能量最大时所对应的减速度。根据上述结论, 图 4 所述的混合动力装载机制动能控制策略中的再生制动减速度参考值 a 选择为 1.6, 这样可保证整机安全制动的前提下, 最大限度地回收装载机的制动能。

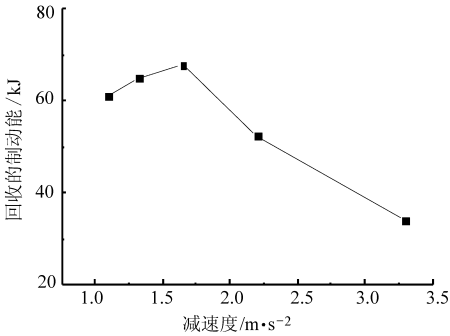


图 6 再生制动减速度参考值与回收的制动动能关系
Fig.6 Relationship between a and regenerated braking energy

2.5 载荷

在满载和空载情况下, 装载机的质量相差很大^[14], 可回收能量对比如图 7 所示。可见, 满载工况下, 整机的可回收能量明显高于空载工况, 并且在制动减速度 1.3 m/s^2 时, 可回收的能量差额最大。因此在根据制动减速度设计整机的制动策略时, 可根据整机载荷情况动态调整再生制动减速度参考值。满载时, 液压再生制动减速度参考值可相应地降低, 反之, 则相应地拓宽。根据上述结论, 图 7 所述的液压混合动力装载机控制策略采用动态调整控制参数的方法, 即空载时, 再生制动减速度参考值 a 选择为 1.6 m/s^2 , 满载时, 混合动力装载机再生制动

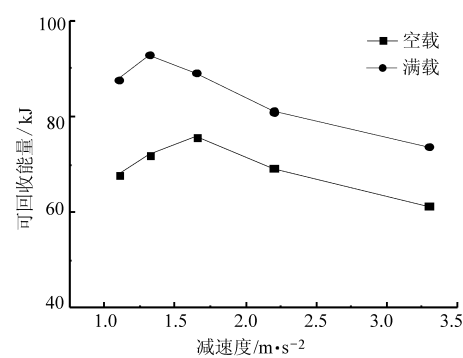


图 7 载荷对可回收能量的影响

Fig.7 Impact of load on the recoverable energy

减速度参考值 a 选择为 1.3 m/s^2 , 这样可在安全制动的前提下, 进一步提高混合动力系统的制动能回

收率。

3 结论

(1) 分析了轮式装载机作业工况下的能量消耗以及混合动力装载机的节能潜力和主要途径。

(2) 根据装载机的并联式液压混合动力方案, 详细分析了影响装载机节能效果的主要因素, 并对关键参数进行优化。

(3) 研究结果表明, 回收装载机低速作业工况的制动动能和整机下长坡的重物势能, 对混合动力系统进行优化匹配, 合理选择控制策略参数, 根据整车的载荷状况, 动态调整制动控制策略的参数可以提高装载机的节能指标。

参 考 文 献

1 王庆丰, 张彦廷, 肖清. 混合动力工程机械节能效果评价及液压系统节能的仿真研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12):135 ~ 140.

2 Xiao Qing, Wang Qingfeng, Zhang Yanting. Control strategies of power system in hybrid hydraulic excavator [J]. Automation in Construction, 2008, 17(4): 361 ~ 367.

3 Lin T L, Wang Q F, Hu B Z, et al. Development of hybrid powered hydraulic construction machinery [J]. Automation in Construction, 2010, 19(1): 11 ~ 19.

4 刘良臣. 混合动力工程机械的现状 & 展望[J]. 工程机械与维修, 2010(1):42 ~ 44.

5 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, 2006.

Zhang Yanting. Research on energy saving for hydraulic excavators based on hybrid and regeneration [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)

6 Hewko L O, Weber T R. Hydraulic energy storage based hybrid propulsion system for a terrestrial vehicle [C] // Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1990: 99 ~ 105.

7 张庆永, 常思勤. 液驱混合动力车辆制动过程能量损耗仿真研究[J]. 机床与液压, 2008, 36(9): 121 ~ 124.

Zhang Qingyong, Chang Siqin. Simulation study on energy loss during braking of hydraulic hybrid vehicle [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2008, 36(9): 121 ~ 124. (in Chinese)

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

9 Sun H, Jiang J H, Wang X. Parameters matching and control method for hydraulic hybrid vehicle with secondary regulation technology [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: English Edition, 2009, 22(1): 57 ~ 63.

10 王震坡, 孙逢春. 电动汽车能耗分配及影响因素分析[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(4):306 ~ 310.

Wang Zhenpo, Sun Fengchun. Analysis of energy consumption distribution and factors of influence in electric vehicles [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(4): 306 ~ 310. (in Chinese)

11 Sun Hui, Jing Junqing. Research on the system configuration and energy control strategy for parallel hydraulic hybrid loader [J]. Automation in Construction, 2010, 19(2): 213 ~ 220.

12 刘明辉. 混合动力客车整车控制策略及总成参数匹配研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.

Liu Minghui. Study on vehicle control strategy and assembly parameter matching for hybrid electric bus [D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese)

13 GB/T 21152—2007 土方机械 轮胎式机器 制动系统的性能要求和试验方法[S].

GB/T 21152—2007 Earth-moving machinery—braking systems of rubber-tired machines—systems and performance requirements and test procedures[S]. (in Chinese)

14 常绿. 装载机发动机与液力变矩器功率匹配优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 25 ~ 29.

Chang Lü. Optimization of power matching on torque converter with diesel engine for wheel loader [J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2010, 41(7): 25 ~ 29. (in Chinese)