

# 并联式混合动力液压挖掘机参数匹配方法<sup>\*</sup>

林 潇 管 成 潘双夏 王冬云

(浙江大学机械设计研究所, 杭州 310027)

**【摘要】** 从混合动力液压挖掘机的结构入手,以系统全局效率优化为目标,提出了并联式混合动力液压挖掘机动力源单元和能量储存单元的优化目标函数、约束方程以及整机的参数匹配方法,并结合一台5 t混合动力液压挖掘机系统进行了部件参数匹配的实例研究,通过 Matlab/Simulink 建模分析得到经参数匹配后的系统,其各部件具有装机功率低、效率高、油耗低的良好特性。

**关键词:** 液压挖掘机 混合动力 部件参数 参数匹配

**中图分类号:** TH137; TD422.2 **文献标识码:** A

## Parameters Matching Method for Parallel Hybrid Hydraulic Excavators

Lin Xiao Guan Cheng Pan Shuangxia Wang Dongyun

(Institute of Mechanical Design, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

### Abstract

In order to optimize the efficiency of a parallel hybrid hydraulic excavator (PHHE), this paper firstly get started with the analysis of the system's structure, and then the optimal objective function and constraint equations that depict powertrain unit and energy storage unit for PHHE were put forward along with a parameter matching method for the machine. For the purpose of component sizing and matching in PHHE, one case was done in a 5 ton hybrid excavator, and the system with the designed parameters of components could reduce components' peak power, increase system efficiency and decrease fuel consumption rate by using Matlab and Simulink toolbox.

**Key words** Hydraulic excavator, Hybrid power, Component sizing, Parameters matching

### 引言

液压挖掘机工况复杂、恶劣,油耗大、尾气排放严重,因此其节能研究有很大的潜在经济效益和环保效果。当前,混合动力设计方法逐渐引入到汽车领域<sup>[1~3]</sup>。对比研究汽车与挖掘机的工况以及系统结构可以发现,挖掘机的工况波动频繁、剧烈,回转制动、动臂等复合动作势能回收等都非常适合采用混合动力设计方法<sup>[4~5]</sup>。因此可以借鉴混合动力汽车领域研究的经验和方法对混合动力液压挖掘机进行研究,以寻求液压挖掘机节能控制的突破。

混合动力液压挖掘机可以采用并联、串联和混联的动力源连接方式,考虑到整机系统的效率和节

能效果,应用并联式混合动力系统较为适宜。在并联式混合动力系统设计中,动力源部件参数确定、匹配是最为关键的技术环节。其参数匹配<sup>[6~7]</sup>不仅应考虑到特定机型外负载的状况,而且应结合各个动力源之间的特性,优化配置动力源,从局部优化动力单元、储存单元部件效率着手,进而达到全局系统效率最优化以及系统动力参数最小化。

本文首先分析并联式混合动力液压挖掘机的结构,进而提出动力单元、储存单元参数匹配的目标函数和约束方程,然后应用该匹配方法,结合5 t 液压挖掘机进行并联式混合动力参数匹配的实例分析,最终通过 Matlab/Simulink 建模仿真得出参数匹配后的并联式混合动力系统部件的工作特性。

收稿日期: 2008-06-11 修回日期: 2008-09-25

<sup>\*</sup> 浙江省科技计划资助项目(2006C11148)和浙江省台州市科技计划资助项目(07zju010)

作者简介: 林潇, 博士生, 主要从事混合动力液压挖掘机/汽车控制策略研究, E-mail: xlinzju@hotmail.com

# 1 混合动力概述

混合动力系统与传统的挖掘机系统相比,最为关键的是对动力源进行了改动,原先单发动机动力源系统的参数匹配,只需要考虑发动机参数与外负载需求功率相匹配;而混合动力系统由于具备多个动力源以及储存单元,不仅要对外负载状况进行深入分析,而且需要综合分析动力源内部参数的匹配与优化问题以及储存装置的匹配问题。

如图 1 所示,典型的并联式混合动力液压挖掘机是在动力源一侧引入电机系统以及能量储存装置,电机与发动机采用同轴连接共同驱动液压泵。因此对动力源来说,相当于从 1 个自由度变化为 2 个自由度,电机作为一个灵活的动力单元,可以跟随外负载的剧烈波动,从而实现发动机单元工作点的稳定与高效;在能量回收一侧,引入了液压能量回收单元,可以在动臂下降时,吸合离合器,回收动臂势能,进一步提高系统的效率和节能效果。

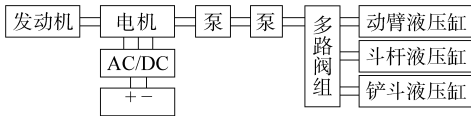


图 1 并联式混合动力液压挖掘机连接结构示意图

Fig.1 Connection structure of hybrid hydraulic excavators

其动力源部分工作模式有以下几种情况:①发动机单独驱动模式,此模式工作于发动机输出的优化转矩能够匹配外负载,并且电池 SOC 值过高,不需要充电,该模式与传统液压挖掘机工作方式相同。②发动机与电机联合驱动模式,此模式工作于发动机输出一定的优化转矩,电机输出一定的能量驱动电机,输出额外的转矩共同匹配外负载,此时电池 SOC 值下降,电机的驱动能力会受到电池 SOC 值的制约。③发动机驱动外负载和电机,该模式下发动机输出的优化转矩大于外负载的需求,因而将有一部分发动机的输出能量通过电机发电转化为电池的内能储存起来,此时电池的 SOC 值上升,并且电机的发电容量受到电池容量的限制。④动臂势能回收模式,在挖掘机处于动臂下降阶段时,外负载较小,可以用电机的发电功能实现动臂势能的回收,并且将回收的势能储存到电池中。

# 2 参数匹配目标

并联式混合动力液压挖掘机需要考虑的参数匹配单元如表 1 所示。

系统整体优化目标为:在多工作点动态控制策略下,各部件效率最优化(发动机处于高效工作区

表 1 并联式混合动力挖掘机参数匹配单元

Tab.1 Parameters matching units of hybrid hydraulic excavators

匹配单元	技术参数
柴油发动机	标定功率, 标定转速, 标定转矩
电机系统	额定转矩, 额定转速, 峰值功率, 母线电压, 母线电流
储存装置	额定电压, 峰值电流, 峰值功率

域,电机发电/电动效率处于高效区),储存装置 SOC 值在一定周期内平衡且具有一定的波动量,发动机油耗最小,并且系统整体参数配置为最经济、装机功率最小的方案。

## 2.1 动力单元

并联式混合动力液压挖掘机动力单元包括柴油发动机和电机,其中电机具备发电/电动功能。目前动力单元的配置有 2 种方案:柴油发动机 + 异步电机;柴油发动机 + 永磁同步电机。永磁同步电机相比于交流感应电机、开关磁阻电机、无刷直流电机等其他电机控制系统,具有以下优点:高性能永磁材料提供励磁,功率密度高;转子无励磁绕组,故无转子铜耗,电机效率较高;转子转动惯量较小,动态性能好;低转速下,效率较高、输出转矩大。对于混合动力液压挖掘机系统而言,额外增加的部件譬如电机、电池对挖掘机整机的空间布置提出了较高要求,在有限的空间内部件体积对整机的布置具有很大影响,因此电机的功率密度是选型的重要指标。永磁同步电机体积小、质量轻、功率密度高,现有的永磁同步电机甚至可以超过 1 kW/kg。因此选择系统动力单元方案为柴油发动机 + 永磁同步电机。

对于柴油发动机,要求发动机能提供外负载需求转矩的平均值,并且能在整机多工作点动态控制策略下使得发动机工作在最佳油耗区域内,即发动机工作在高效区。

发动机的优化目标函数为

$$m = \min \int_{t_0}^{t'_0} \frac{\dot{m}_{fuel\_rate}(T_e, n_e)}{3600} \frac{2\pi T_e n_e}{60} dt \quad (1)$$

发动机的约束方程为

$$T_{eN} = \frac{\int_{t_0}^{t'_0} T_{load} dt}{t'_0 - t_0} \quad (2)$$

式中  $\dot{m}_{fuel\_rate}(T_e, n_e)$ ——燃油率

$T_e$ ——发动机转矩  $n_e$ ——发动机转速

$T_{load}$ ——外负载需求转矩

$t_0$ ——周期工况起始时间

$t'_0$ ——周期工况终止时间

对于永磁同步电机,要求其尽可能工作在高效区间,并且发动机能提供额外的峰值驱动转矩或吸收多余的发动机能量,即:

永磁同步电机的优化目标函数为

$$\eta_{mm} = \max \frac{\int_{t_0}^{t'_0} T_m \frac{2\pi n_m}{60} dt}{\int_{t_0}^{t'_0} i_b u_b dt} \quad (3)$$

$$\eta_{mg} = \max \frac{\int_{t_0}^{t'_0} i_b u_b dt}{\int_{t_0}^{t'_0} T_m \frac{2\pi n_m}{60} dt} \quad (4)$$

永磁同步电机的约束方程为

$$P_{mN} = \frac{2\pi n_{mN}}{60} \max \left( \frac{\int_{t_0}^{t'_0} T_{load} dt}{t'_0 - t_0}, T_{load\_max} - \frac{\int_{t_0}^{t'_0} T_{load} dt}{t'_0 - t_0} \right) \quad (5)$$

式中  $\eta_{mm}$ ——电机电动效率

$\eta_{mg}$ ——电机发电效率

$T_m$ ——电机转矩  $n_m$ ——电机转速

$i_b$ ——电池电流  $u_b$ ——电池电压

$P_{mN}$ ——电机额定功率

$T_{load\_max}$ ——外负载需求转矩最大值

$n_{mN}$ ——电机额定转速

## 2.2 储能单元

并联式混合动力液压挖掘机的储能单元目前有2种方案:采用超级电容或NIMH电池组。超级电容,体积小,能在瞬间吸收/释放能量,非常适合混合动力液压挖掘机的工况特点,但应用超级电容的技术还处于起步阶段,成本较高;而NIMH电池组,虽然功率体积比较小,体积较大,瞬间吸收/释放能量的能力较弱,但是能储存大量的能量,并且技术成熟,成本较低廉。因此结合多方面的因素综合考虑,选择NIMH电池组作为实验用的储能单元。

NIMH电池组的优化目标函数为

$$\eta_{bc} = \frac{\Delta E_b}{\int_{t_0}^{t'_0} i_{bc} u_{bc} dt} \quad (6)$$

$$\eta_{bd} = \frac{\int_{t_0}^{t'_0} i_{bd} u_{bd} dt}{\Delta E_b} \quad (7)$$

NIMH电池组的约束方程为

$$i_{b\_peak} = \frac{P_{m\_peak}}{u_{bN}} \quad (8)$$

式中  $\eta_{bc}$ ——电池充电效率

$\eta_{bd}$ ——电池放电效率

$\Delta E_b$ ——电池能量变化值

$i_{bc}$ ——电池充电电流

$u_{bc}$ ——电池充电电压

$i_{bd}$ ——电池放电电流

$u_{bd}$ ——电池放电电压

## 3 参数匹配方法

选取5t液压挖掘机作为研究对象,配上电机+电池组实现混合动力,力求通过参数匹配,降低发动机功率。目前主要考虑为轻度到中度的混合动力配置方案,即中排量发动机配中等功率的电机、电池组。

### (1) 整机系统参数确定

一台标准5t液压挖掘机,系统净重4510kg,装机功率34kW,系统最大转矩需求为152N·m。

### (2) 柴油发动机选型

并联式混合动力液压挖掘机的发动机、电机与液压泵同轴相连,因此 $n_e = n_m = n_c$ 。在本例中选择柴油发动机的平均转速为 $n_{eN} = 2000$  r/min,发动机的平均转矩为液压泵出口转矩的平均值,即

$$T_{eN} = \frac{\int_0^{60} T_{load} dt}{60} = 85.5 \text{ N}\cdot\text{m}$$

计算可得,对于该种外负载发动机所需要提供的平均功率为17.9kW,考虑到20%的设计余量以及柴油发动机的型号种类,最终选择的柴油发动机标定功率为22kW。

### (3) 永磁同步电机选型

因为与发动机同轴,所以

$$n_{mN} = n_{eN} = 2000 \text{ r/min}$$

$$T_{mN} = \max | T_{load} - 1.1 T_{eN} | = 56 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$P_{mN} = T_{mN} \frac{2\pi n_{mN}}{60} = 11.7 \text{ kW}$$

电机直流母线的电压选择直接关系到电机、电池连接线上的损耗以及高压绝缘问题,有2种比较普遍的母线电压方案,一种是240V,一种是400V。实例中设定电机直流母线额定电压 $U_{dcN} = 240$  V,电压范围为216~360V,则电机母线电流为 $I_{dcN} = \frac{11.7 \times 10^3}{240} = 50$  A,考虑到设计余量,电机的额定功率取为15kW。

### (4) NIMH电池组选型

参数选择如下:额定电压 $U_{bN} = U_{dcN} = 240$  V;峰值功率 $P_{b\_peak} = 1.2 P_{m\_peak} = 18$  kW。

最终选择春兰QNFG8型高功率型金属氢化物

镍蓄电池<sup>[8]</sup>,单个电池单元端电压为 1.2 V,标称容量为 8 A·h,用 200 节电池单元串联起来,可以满足上述储能单元的性能要求。

### 4 结果分析

通过在 Matlab/Simulink 仿真系统中对液压挖掘机负载、发动机、永磁同步电机、NIMH 电池组的稳态以及瞬态动力学建模,并应用多工作点动态控制策略<sup>[9]</sup>,分析了经过参数匹配之后的混合动力液压挖掘机各部件的效率以及相关特性。

表 2 为传统挖掘机与混合动力挖掘机的动力源部件(柴油发动机,永磁同步电机)和 NIMH 电池组装机功率对比。通过对比可见,引入了电机和电池系统,降低了发动机的装机功率。定义混合度

$$\varphi = \frac{P_{\text{engine}}}{P_{\text{engine}} + P_{\text{motor}}} \times 100\%$$

则经过本参数匹配调整的 5 t 并联式混合动力液压挖掘机的混合度  $\varphi$  为 59.5%。

表 2 传统挖掘机与混合动力挖掘机装机功率对比

Tab.2 Power comparisons between traditional excavators and the hybrid hydraulic excavators

类别	发动机	电机	电池
传统挖掘机	34	—	—
混合动力挖掘机	22	15	18

图 2 为经过参数匹配后的并联式混合动力挖掘机转矩实时分配特性曲线,除了发动机起动状态下输出转矩出现大的波动外,在标准工况下,发动机输出转矩始终保持在 80 N·m 附近,电机的宽幅转矩输出抵消了负载转矩的频繁剧烈波动,因此发动机维持在相对稳定的状态,有利于提高发动机的油耗特性。

图 3 为电机在标准工况下工作点的实时曲线。由图 3 可见,电机进入稳态后,其大部分工作点位于

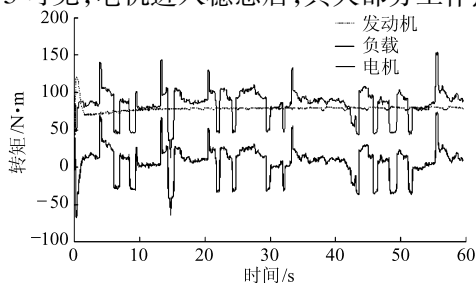


图 2 并联式混合动力液压挖掘机转矩分配曲线

Fig.2 Torque distribution curve among the required load torque, the engine's torque and the motor's torque in parallel hybrid hydraulic excavators

1 950~2 000 r/min 这一狭窄的区域内,其输出的转矩值位于 -50~50 N·m 之间,并且正负转矩值大致相当,表明电机处于发电状态与电动状态的时间相近,对电池来说充放电平衡能够较为容易地维持电池 SOC 值的平衡。

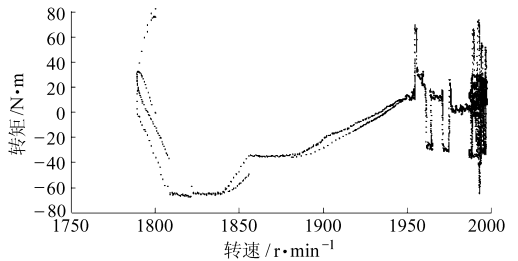


图 3 电机实时工作点曲线

Fig.3 Curve of real-time dynamic working points of the motor

如图 4 所示,虽然液压挖掘机工况恶劣、负载多变,但电机响应速度快的特性充分抵消外负载的波动,其输出的功率波动幅度在 -10~10 kW 之间,并且在发电与电动状态下频繁切换。因此有必要考虑电机、AC/DC 以及电池组充放电的效率。

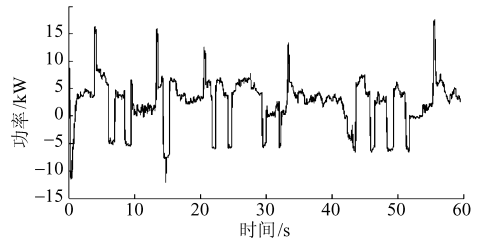


图 4 电机实时功率曲线

Fig.4 Real-time power curve of the motor

图 5 为系统部件的效率曲线,可见电池充放电效率能够维持在 0.9 以上,而电机(包括 AC/DC)的效率只能处于 0.6 水平附近,尤其是在电机状态切换过程中效率会低于 0.5,在正常运行中电机效率能够达到 0.8 以上。

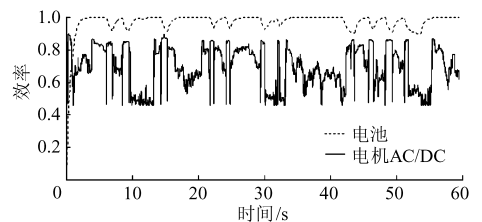


图 5 电机以及电池的实时效率曲线

Fig.5 Real-time efficiency curves of the motor and the battery

图 6 为经过标准工况后电池 SOC 值的变化情况。由图 6 可见,电池状态为净输出,其净输出能量约为 19.4 kJ。

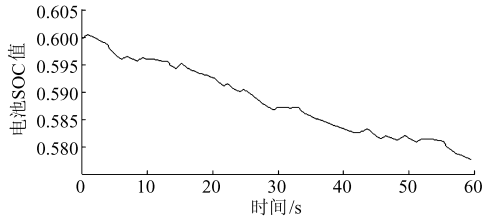


图6 NIMH电池组SOC变化值

Fig.6 Change of SOC of NIMH batteries

## 5 结束语

通过对5 t 液压挖掘机的典型工况研究,提出了对其并联式混合动力挖掘机动力源和储存装置进行参数匹配、优化的方法,从部件的优化、约束特性入手,建立了各个部件的目标优化函数和约束方程,最终实现了5 t 并联式混合动力液压挖掘机参数优化匹配,并且达到了高效率、低装机容量的系统特性。

## 参 考 文 献

- Antonio Sciarretta, Michael Back, Lino Guzzella. Optimal control of parallel hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(3): 352~363.
- Schouten N J, Salman M A, Kheir N A. Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 460~468.
- Seta Bogosyan, Metin Gokasan, Goering D J. A novel model validation and estimation approach for hybrid serial electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(4): 1485~1497.
- Kagoshima M, Sora T, Komiyama M. Development of hybrid power train control system for excavator[C]. JSAE Annual Congress, 2003, 86: 1~6.
- Nanjo T, Imanishi E, Kagoshima M. Power simulation for energy saving in hybrid excavator[J]. JSAE Transaction, 2004, 47(44): 101~106.
- 赵克刚, 黄向东, 罗玉涛. 混联式混合动力电动汽车动力总成的优化匹配与监控[J]. 汽车工程, 2005, 27(2): 146~151.  
Zhao Kegang, Huang Xiangdong, Luo Yutao. Optimal matching and monitoring of series-parallel HEV powertrain[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(2): 146~151. (in Chinese)
- 舒红, 秦大同, 杨为. 混合动力汽车动力传动系参数设计[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1): 19~22.  
Shu Hong, Qin Datong, Yang Wei. Study on parameter design of power and transmission system for hybrid electric vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1): 19~22. (in Chinese)
- 潘双夏, 王冬云, 李贵海. 基于能量守恒和四线法的SOC估算策略研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(5): 415~419, 452.  
Pan Shuangxia, Wang Dongyun, Li Guihai. A research on the estimation strategy of SOC based on the law of conservation of energy and four-lins' measurement[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(5): 415~419, 452. (in Chinese)
- Lin Xiao, Pan Shuangxia, Wang Dongyun. Dynamic simulation and optimal control strategy for a parallel hybrid hydraulic excavator[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2008, 9(5): 624~632.
- 王冬云, 管成, 潘双夏, 等. 液压挖掘机功率匹配与动力源优化综合控制策略[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 91~95.  
Wang Dongyun, Guan Cheng, Pan Shuangxia, et al. Control strategy of power matching and power sources optimization for hydraulic excavators[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 91~95. (in Chinese)
- 林潇, 管成, 裴磊, 等. 混合动力液压挖掘机动臂势能回收系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 96~101.  
Lin Xiao, Guan Cheng, Pei Lei, et al. Research on the system of arm potential energy recovery in hybrid hydraulic excavators[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 96~101. (in Chinese)