

Hybrid Excavator Electromechanical Coupling Analyzing and Decoupling Strategy

Dongyun Wang

The Engineering School, Zhejiang Normal University, Jinhua
Email: zsdwdy@zjnu.cn

Received: Sep. 9th, 2014; revised: Sep. 26th, 2014; accepted: Oct. 8th, 2014

Copyright © 2014 by author and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Parallel hybrid excavator technology has been successfully developed and showed good energy saving effect. Especially, it plays an important role for the life extension of the engine and the improvement of fuel efficiency. However, its power systems were composed by diesel engine, electric motor and pump coaxially. Although it can save installation space by this link style, it may cause a strong electromechanical coupling, and even severe shafting vibration and noise. Eventually, it may affect spindle life and driving experience. Based on the analysis of the parallel hybrid vibration coupling mechanism, a new strategy based on hardware and software optimization was put forwarded. The experiment results show that it could reduce shaft vibration and improve the driving condition.

Keywords

Hybrid Power-Train, Electromechanical Coupling, Vibration, Decoupling Strategy

混合动力挖掘机机电耦合分析及解耦策略

王冬云

浙江师范大学工学院, 金华
Email: zsdwdy@zjnu.cn

收稿日期：2014年9月9日；修回日期：2014年9月26日；录用日期：2014年10月8日

摘要

液压挖掘机并联混合动力技术已经得到成功应用，并表现出良好的节能效果，尤其对于发动机燃油效率及寿命提升作用明显。然而其动力系统大都采用发动机、电动/发动机和液压泵同轴耦合方式，节省了装配空间，但亦存在强机电耦合，引起严重的轴系振动和噪声，影响主轴寿命和驾驶体验。本文分析了并联混合动力耦合机理及振动原因，提出了基于硬件减振和软件策略优化的解耦方法，以减少轴系振动，改善驾驶环境。

关键词

混合动力，动力耦合，振动，解耦策略

1. 引言

液压挖掘机混合动力技术研究主要集中于动力复合模式、控制策略及能量回收等方面的研究[1]-[7]，随着研究的逐步深入，动力系统的振动耦合问题开始受到关注[8] [9]。在同等动力配置下，混合动力发动机可以配置较小功率[3]，尺寸也相对减小，为此很多研究者设计了盘形电动机结构，使发动机与盘形电动机所占空间与普通系统发动机所占空间差不多。因此并联式混合结构大都采用了发动机、电动/发电机于液压泵同轴硬连接结构。该结构虽节省空间，方便布局，但增强了轴系机电耦合，功率匹配控制不当将引起轴系剧烈振动。本文在分析并联系统轴系振动原因的基础上，提出了一种新的机电耦合解耦控制策略，以有效降低轴系振动。

2. 并联系统轴系振动分析

油电混合动力系统由发动机与电动机混合，理想状态下两个动力源应协调匹配输出功率，实现动力源之间、动力源负载的两级功率匹配。然而发动机与电动机的动力学特性完全不同，工作过程中容易产生各类振动耦合问题，具体分析如下。

2.1. 发动机轴系振动特性

发动机曲轴振动主要受周期性的燃烧气体压力和往复惯性力的激励，产生典型的扭转振动。在扭转力的作用下，曲轴出现收缩变形，产生张、合运动，进而又出现了弯曲振动和纵向振动。对于四缸发动机，燃烧气体爆发压力典型曲线如图1所示，压力的循环爆发直接引起发动机的横向振动。

2.2. 电动/发电机对轴系振动影响

采用电机作为辅助动力后，主轴轴系的刚度、阻尼、支撑方式和振动激励方式都将与单独发动机驱动时不同。当混合轴系旋转时，发动机曲轴受到周期性激励时会产生相应的振动，而电机转子因受振动影响又会造成转子与定子之间的气隙变化，当气隙不对称时，电机转子将产生干扰激励，并反过来干扰轴系。可见各类振动交叉耦合形成复杂的机电耦合振动[10]。混合轴系机电耦合原理如图2所示。

J_1 、 J_2 分别为发动机和电机的转动惯量， M_1 、 M_2 和 M_3 分别表示发动机、电机和负载的转矩， K_1 、 C_1 为发动机轴的刚度和阻尼系数， K_2 和 C_2 表示电动机的刚度和阻尼系数， K 和 C 表示弹性连接轴的刚度和阻尼系数， θ_1 和 θ_2 分别表示发动机轴和电机轴的转角，则机械系统的运动方程为[10]：

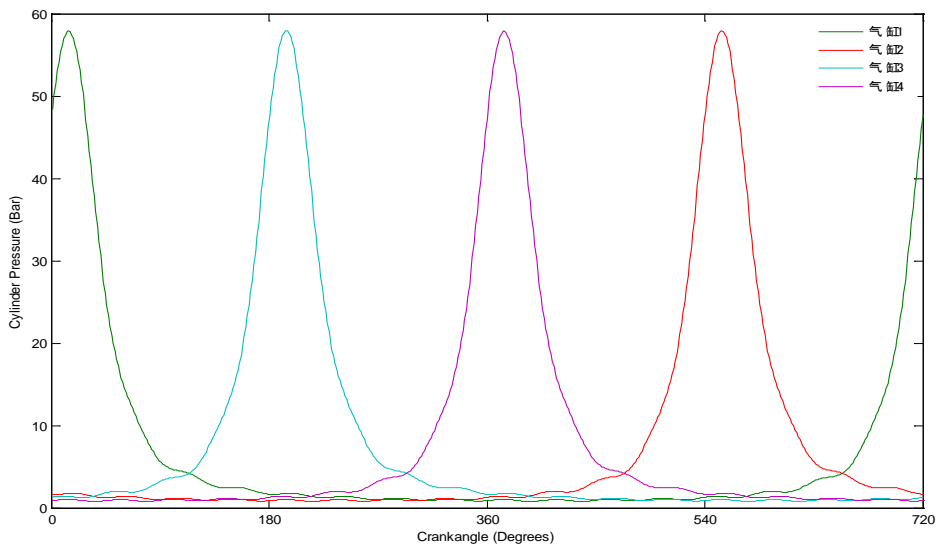


Figure 1. Four-cylinder diesel engine combustion gas explosion pressure curve
图 1. 四缸柴油发动机燃烧气体爆发压力曲线

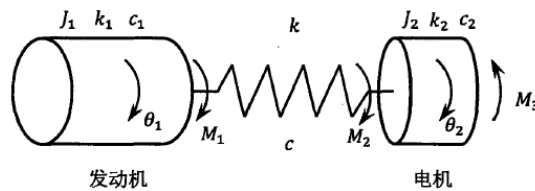


Figure 2. Hybrid excavator shaft coupling structure diagram
图 2. 混合动力挖掘机轴系耦合结构图

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1 + c_1 \dot{\theta}_1 + k_1 \theta_1 + c(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + k(\theta_1 - \theta_2) = M_1 \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + c_2 \dot{\theta}_2 + k_2 \theta_2 + c(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + k(\theta_2 - \theta_1) = M_2 - M_3 \end{cases} \quad (1)$$

从方程中可以看出,由于电磁输出转矩涉及到电动机的电流和磁链,机械部分和电气部分是相互耦合在一起的。研究表明,在电动辅助驱动模式下,因电磁力矩和发动机力矩同时作为振动激励,轴系振动比发动机模式时振幅和共振频率均有所提高。而电动机为发电模式时,电池转矩作为轴系旋转的反向阻力矩,虽然对轴系共振频率影响不大,但共振峰值有所减小。

3. 解耦策略

混合动力轴系振动由发动机、电动机各自振动特性及相互耦合振动组成,如果对每个振动源从振动机理入手,并通过建立数学模型进行仿真验证再进行减振方法研究,将会非常复杂。本文从实际应用出发,通过硬件和软件策略两个方面结合以进行轴系减震。硬件方面参考文献[11]所述,在发动机、电动机和液压泵的连接处设计专用扭转减震器,软件方面则通过控制策略的优化以协调双动力源的动力输出,提高其匹配程度。

电动动力模式下,以主动力源发动机的工作点稳定为目标,辅助动力源跟随控制。策略具体步骤为:

- 1) 根据工况等级确定发动机的目标油门位置 α ;
- 2) 根据油门位置 α 查表确定系统目标转速 n_e ;

- 3) 控制电动机的扭矩输出使系统转速 n 稳定在目标转速 n_e ;
- 4) 根据能量储存单元 ESU 的 SOC 和当前载荷工况等级确定动态最佳混合度, 调整发动机的油门位置 α ;
- 5) 循环执行 1)~4)。

关于工况的识别方法以及工况与发动机目标油门位置的对应关系, 请参考文献[12], 电动机控制采用基于 PID 的 VPWM 控制算法, 控制逻辑如图 3 所示。

N, n, M ——分别表示功率, 转速, 扭矩。
 ICE, EM, P——分别表示发动机, 电动机和液压泵。

4. 实验及结果分析

为了验证提出的解耦策略对混合动力挖掘机轴系的影响, 我们在动力总成试验平台上进行了相关试验。试验台的动力总成配置按照 5-ton 挖掘机动力参数进行配置, 主要参数如表 1 所示, 试验台如图 4 所示。

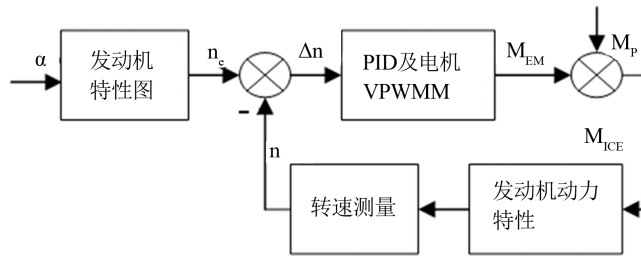


Figure 3. The motor control flow chart
 图 3. 电动机控制流程图

Table 1. The key components of a 5-ton excavator
 表 1. 5-ton 挖掘机动力参数表

部件名	型号	参数	部件名	型号	参数
发动机	ZN485Q	额定功率: 25 KW/2200 RPM 最大扭矩: 124.8 NM/1860 RPM	NIMH 电池	QNFG8	额定功率: 11.5 kw 额定电压: 240 V
电动机		额定功率: 10 KW/2200 RPM 最大扭矩: 55 N·m/1860 rpm 额定电压: 240 V	液压泵	力士乐 A11V	排量 60 ml/r

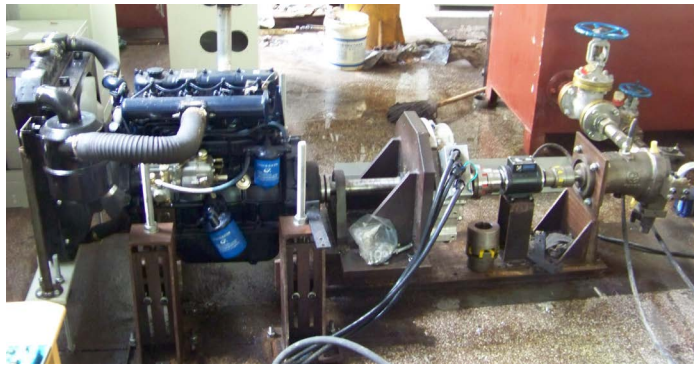


Figure 4. Parallel hybrid excavator Test Bench
 图 4. 并联混合动力挖掘机综合试验台

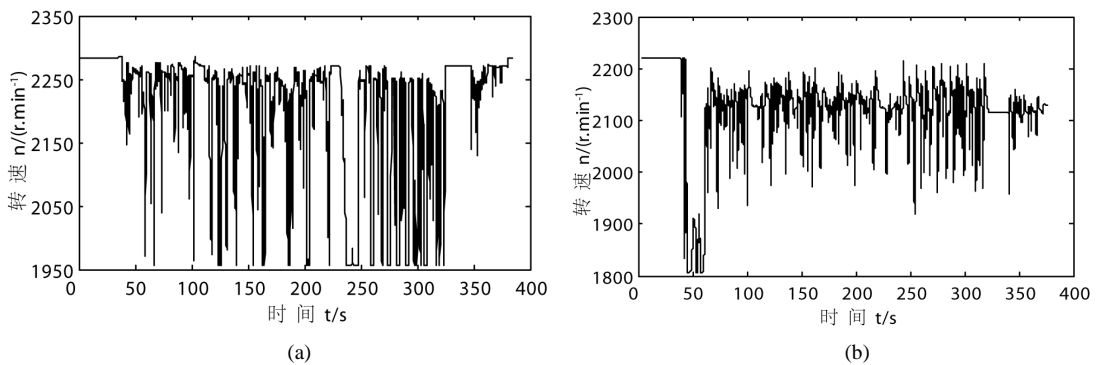


Figure 5. Normal power (a) and parallel hybrid (b) excavator engine speed fluctuation curve
图 5. 普通动力(a)与并联混合动力; (b)挖掘机发动机速度波动曲线

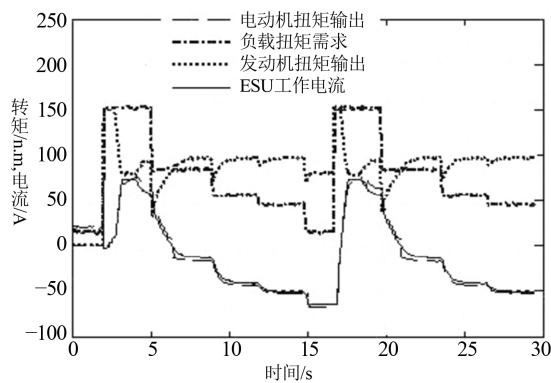


Figure 6. The output torque of the dual power source during mine cycling
图 6. 挖掘循环过程中双动力源的扭矩输出

试验以参考文献[12]所述的重载挖掘负载数据为输入,采集了轴系速度与扭矩输出曲线,同时试验与5-ton普通动力挖掘机的参数进行了对比。速度波动曲线对比如图5所示。显然采用动力匹配策略的混合动力挖掘机轴系速度波动减少了很多。只是在加载瞬间轴系波动还是相对较大,这也反映了发动机与电动机的机电强耦合特性。

为了进一步验证本策略的效果,我们对两个典型全负荷挖掘循环过程中,发动机、电动机的扭矩输出和能量存储单元的电流输出进行了记录,结果如图6,除了在负载突变的瞬间,发动机的输出扭矩波动很小,大大改善了发动机的运行环境。

5. 结论

因发动机、电动机和液压泵同轴连接,并联式混合动力挖掘机轴系存在较强机电耦合,产生复杂的振动特性。因挖掘机动力布置特点,在无法改变并联混合动力布置结构的前提下,硬件环节设计了扭转减震器并结合软策略优化以协调双动力源的动力输出,以提高双动力源的匹配程度。经5-ton混合动力挖掘机试验台验证表面,采用软硬件结合的方法,能够有效降低轴系的速度波动,同时能够较好实现双动力源与负载的动力匹配。

基金项目

国家自然科学基金编号: 51205368; 浙江省自然科学基金编号: LQ12E05003。

参考文献 (References)

- [1] Wang, D.Y., Lin, X. and Zhang, Y. (2011) Fuzzy logic control for a parallel hybrid hydraulic excavator using genetic algorithm. *Automation in Construction*, **20**, 581-587.
- [2] Lin, X., Pan, S.X. and Wang, D.Y. (2008) Dynamic simulation and optimal control strategy for a parallel hybrid hydraulic excavator. *Journal of Zhejiang University Science A*, **9**, 624-632.
- [3] Wang, D.Y., Guan, C., Zhang, M.J., *et al.* (2009) Performance analysis of hydraulic excavator power-train hybridization. *Automation in Construction*, **18**, 249-257.
- [4] Xiao, Q., Wang, Q.F. and Zhang, Y.T. (2008) Control strategies of power system in hybrid hydraulic excavator. *Automation in Construction*, **17**, 361-367.
- [5] 管成, 徐晓, 林潇 (2012) 液压挖掘机回转制动能量回收系统. *浙江大学学报工学版*, **46**, 142-149.
- [6] Wang, T. and Wang, Q. (2012) Optimization design of permanent magnet synchronous generator for potential energy recovery system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **27**, 856-863.
- [7] Choi, J., Kim, H. and Yu, S. (2011) Development of integrated controller for a compound hybrid excavator. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **25**, 1557-1563.
- [8] 黄中华, 谢雅, 邓奕等 (2012) 混合动力挖掘机动力系统轴系模态分析. *工程机械*, **43**, 25-29.
- [9] Zuo, J.-Y., Liu, S.-J. and Huang, Z.-H. (2012) Simulation analysis of the vibration characteristics of the parallel hybrid shaft system. *Applied Mechanics and Materials*, **190**, 825-831.
- [10] 左金玉 (2013) 混合动力工程机械动力轴系机电耦合振动研究. 硕士论文, 中南大学, 长沙.
- [11] 岳东鹏 (2005) 轻度 HEV 混合动力系统轴系机电耦合动力学特性研究. 博士论文, 天津大学, 天津.
- [12] 王冬云, 管成 (2010) 基于工况识别和动态混合度优化的控制策略. *中国机械工程*, **21**, 2790-2793.