

工程机械混合动力系统实验台测控系统*

黄中华^{1,2}, 刘质², 胡琼², 刘少军²

(1. 湖南工程学院机械工程学院 湘潭, 411101)

(2. 中南大学机电工程学院 长沙, 410083)

摘要 为了研究工程机械混合动力系统的机电耦合特性和轴系的振动特性, 研制了由柴油机、电动机和液压泵共轴连接组成的工程机械混合动力系统实验台。设计了由工控机、PCI 总线控制卡和组态软件组成的实验台测控系统, 分析测控系统输入信号和控制信号的数量与类型, 确定测控系统控制策略的设计原则和开发过程。通过在柴油机输出轴的端面布置3个加速度传感器实现柴油机工作时曲轴的振动特性, 对不同负载功率下柴油机曲轴的振动特性进行试验测试。测试结果表明, 柴油机曲轴的振动能量集中在径向, 轴向的振动能量可忽略不计; 设计的测控系统能实现混合动力系统轴系振动性能测试。

关键词 混合动力系统; 测控系统; 实验台; 工程机械

中图分类号 TU621

引言

随着全球工业的发展, 能源短缺和环境污染问题日趋严重, 品种和数量不断增加的工程机械所消耗的能源和排放的污染物已经引起了广泛关注, 国内、外对工程机械尾气的排放及噪声等限制也愈加严格。混合动力技术既继承了电力作为“绿色”能源超低排放的优点, 又弥补了电池动力不足的缺点, 它在汽车行业的成功应用为耗能大、排放差的工程机械领域提供了借鉴。近年来, 混合动力工程机械受到了工程机械领域的高度重视, 已成为国内、外著名工程机械生产厂家的研究热点^[1]。

工程机械混合动力系统中的柴油机、电动机和液压泵通常采用共轴连接。在动力系统状态切换过程中, 柴油机和液压泵的存在会降低电动机的响应速度, 阻碍电动机转速的快速变化, 影响电动机转矩的输出效率和传递速度。同样, 电动机的存在会提高柴油机和液压泵的响应速度, 加速柴油机和液压泵转速的快速变化, 影响柴油机转矩的输出效率和传递速度、液压泵转矩的输入效率和传递速度。柴油机、液压泵和电动机在动态特性方面的耦合作用, 改变了混合动力系统轴系的动态特性, 进而改变了动力系统能量传递效率和能量分配控制策略, 导致工程机械混合

动力系统在状态切换时轴系产生转速波动和冲击载荷^[2-7]。混合动力系统在运行时, 电动机和柴油机之间经常会因转速不同步而产生顺拖或倒拖, 在动力系统的轴系上产生冲击转矩或交变转矩。当作用于轴系上的冲击转矩过大时, 轴系的某一截面可能会发生强度失效。当作用于轴系的交变转矩频率与轴系某阶扭振频率相等或相近时会产生谐振^[8-12]。

与汽车平稳的工况相比, 工程机械负载变化幅度大、变化频繁, 混合动力单元各部件状态需要随负载变化而快速调整、匹配负载, 在混合动力汽车中并不突出的机电耦合问题在工程机械中显得尤为重要。混合动力系统较纯发动机驱动方式不同, 系统的激励特性被改变, 从而影响动力和传动系统的振动特性。为了研究发动机与电动机之间相互耦合产生的振动和不同工况下混合动力系统的振动特性, 研制了混合动力系统振动特性实验台, 为系统的优化设计和振动控制提供依据。

1 混合动力系统实验台

混合动力系统有3种连接模式: 串联式、并联式和混合式。串联式混合动力系统中, 发动机输出的机械能由发电机转化为电能, 电能输送到电动机, 由电动机产生驱动力矩驱动负载工作。这种结构的优点

* 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(2010AA044401); 教育部科学技术研究重点项目(212123); 湖南省教育厅重点资助项目(11A026); 湖南省学科带头人培养对象资助项目(湘教通(2011)388号)

收稿日期: 2011-07-12; 修改稿收到日期: 2011-11-03

是发动机的工作不受负载的影响,燃油经济性和排放好,但能量转换环节多、整体效率不高,另外需要配备大功率的发电机和电动机。并联式混合动力系统中,负载可由发动机和电动机共同驱动或各自单独驱动。电池可以补充发动机能量的不足,也可以吸收发动机多余的能量,更多的是起到辅助驱动的作用。混联式混合动力系统是串联式与并联式的综合。发动机的输出功率一部分直接驱动负载,另外一部分通过发电机转化为电能存储在电池中或输出给电动机。电动机可以用来驱动负载或者回收系统的势能和制动能。这种结构形式集中了串联式和并联式的优点,控制灵活,发动机、发电机和电动机等元件能够进行更多的优化匹配,缺点是部件多、布置困难、控制复杂。

研究表明,并联式混合动力工程机械具有更好的节能优势,在配备相同发动机的情况下,并联混合动力液压挖掘机可以满足更大的驱动性能。并联混合动力系统不仅可以节省一台发电机,而且配备的电动机装机功率比串联系统低50%,有利于控制挖掘机整机成本。论文设计的并联式混合动力系统实验台如图1所示,发动机、电动机和液压泵共轴连接;电动机采用双轴输出;采用液压加载系统模拟动

力系统的实际负载,通过调节溢流阀的工作压力改变加载系统的输出功率;通过电子油门控制柴油机转速;电动机采用变频器控制,通过矢量控制方法实现电动机转矩控制。

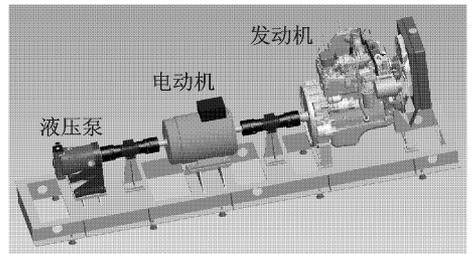


图1 实验台结构图

2 测控系统

实验台测控系统结构如图2所示,控制计算机采用工控机,数据采集装置采用PCI(peripheral component interconnect)总线采集卡,开发软件采用组态软件。工控机通过模拟输入输出、数字输入输出以及485通讯与各设备、传感器及按钮和显示等外部设备进行联系,所有逻辑控制及控制策略的实现在策略控制器中实现,所有的数据由数据管理器进行管理后输出、显示及保存。

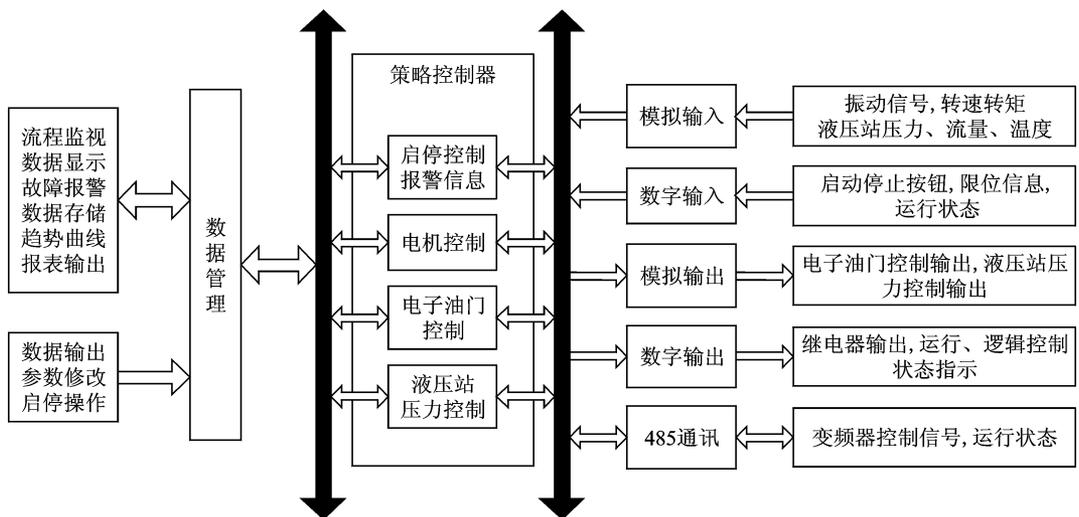


图2 测控系统结构

测控系统需要的测试信号及输出的控制信号如表1所示,选择数据采集卡PCI8360V作为模拟输入采集卡,采集发动机输出轴上 x, y, z 3个方向的振动信号(通过加速度传感器获得)、发动机和电机的转矩转速、液压站的压力、流量和温度等;选择控制卡PCI8327N作为模拟输出卡,输出电子油门控制

信号和溢流阀控制电压等;选择PCI8488作为数字量输入输出卡,且配有PS002作为继电器输出,启动停止按钮、限位信息和运行状态等作为数字输入信号,继电器输出、运行状态显示作为数字输出信号。通过组态软件对控制板卡进行设置。

由于本项目选用的组态软件不支持森兰SB70G18.5

表1 测控系统输入信号及控制信号

名称	数量	说明
输入信号	加速度传感器	3 发动机输出轴端面的振动
	转速传感器	2 发动机及电机的转速
	转矩传感器	2 发动机及电机的转矩
	压力传感器	1 液压站压力
	温度传感器	1 液压站温度
	流量传感器	1 液压站流量
	控制信号	变频器上电断电
变频器的启动停止		1 通信给定
电机与变频器的接通与断开		1 交流接触器
控制电源接通断开		1 接触器
液压站加载与卸载		1 电磁阀
变频器频率的给定		1 通信给定
发动机电动油门		1 电动油门
溢流阀控制电压		1 电磁阀

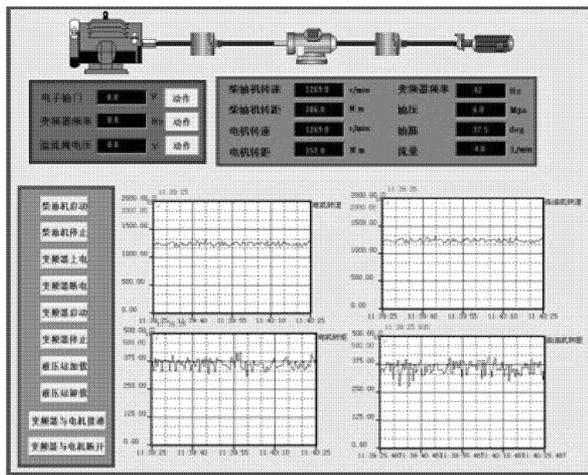


图3 测控系统界面

2) 发动机工作在高效低排区原则: 并联型混合动力系统以发动机作为主要动力, 电机为辅助动力, 控制系统应尽可能保证发动机工作在高效低排区。

基于上述原则, 控制系统选择基于转矩控制的控制策略, 控制器根据负载需求转矩来分配发动机和电动机的输出转矩, 以求燃油经济性和排放性能达到最佳, 同时在电动机接入、调速以及断开的过程中以减小混合动力系统的冲击振动为控制目标来确定电动机的控制策略。因此, 在进行实验台控制策略的研究之前, 先要进行转矩分配比的选择实验和电动机的控制性能试验, 然后才能确定系统的控制策略。

首先是转矩分配比的实验, 保持加载系统的输出功率不变, 测量在不同的转矩分配比下发动机的燃油消耗量、电力消耗量以及系统的振动特性, 综合分析能耗和振动, 确定动力系统的最佳转矩分配比。

其次是电动机控制策略的确定, 保持发动机的工作点不变, 使其输出稳定的转速和转矩, 逐步增大加载系统的输出功率, 当发动机的输出功率大于负载功率时发动机的富余功率驱动电动机发电, 当发动机的输出功率小于负载功率时电动机自动接入动力系统辅助发动机拖动负载。电动机的控制策略包括: 不同工况下电动机的接入、调速和断开控制策略; 以减小混合动力系统轴系的冲击振动为控制目标, 研究时变载荷下电动机的控制策略。

混合动力系统的控制框图如图4所示, 根据负载的变化实时调整电动机的输出转矩, 使发动机工作在高效区。

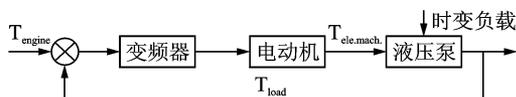


图4 混合动力系统控制框图

变频器, 因此在 I/O 设备组态中选择 MODBUS 协议, 创建森兰变频器, 根据变频器定义的参数地址在数据库组态中建立对应的 I/O 连接。变频器的参数通过操作面板给定, 控制信号(变频器启动停止、矢量控制输出)和运行状态通过 RS485 与工控机通讯。

实验台的控制策略在组态软件的控制策略生成器中完成。组态软件的控制策略生成器采用功能框图的方式进行程序设计, 并具备与实时数据库、图形界面系统通讯的功能。首先, 根据实验要求编写各元件控制逻辑图, 根据控制策略的要求配置 I/O 设备; 然后, 根据逻辑图创建策略及子策略, 建立 I/O 通道与基本控制功能块的连接; 最后, 对创建的控制策略进行编译和排错, 利用控制策略编辑器的各种调试工具对编辑的策略进行分段离线调试、总调试和在线调试。

测控系统人机界面如图3所示, 包括控制操作主画面、参数报表画面、实时及历史趋势图画面、工作报警画面, 可实现实验台的操作、控制、监视和数据采集等。

3 控制策略

通常说来, 混合动力工程机械动力系统的控制策略应该遵循如下原则^[13-14]。

1) 驱动优先原则: 控制系统应根据负载的转矩需求来分配发动机和电动机的输出转矩, 确保动力系统的输出转矩达到负载需求, 以保证工程机械的正常工作。

4 试验测试

为了测试实验台测控系统的性能,对柴油机轴系的振动特性进行了试验测试。图5为加速度传感器的安装位置及坐标示意图(按右手螺旋准则定义),图中: z 向为柴油机的轴向, x 向为柴油机的水平方向, y 向为柴油机的垂直方向。

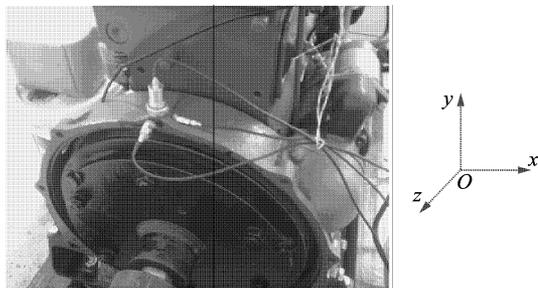


图5 传感器安装位置

对不同负载下柴油机曲轴的振动特性进行了试验测试。图6和图7分别为负载功率为5 kW时柴油机输出轴端面振动测量结果及其对应的频谱分析结果。可以看出,在柴油机的 x 方向和 y 方向存在周期性的振动,加速度的最大幅值约为 150 m/s^2 ;柴油机曲轴的振动能量主要集中在 x 方向和 y 方向,在 z 方向的振动能量非常小。可见,混合动力系统中柴油机曲轴的振动能量主要集中在径向。

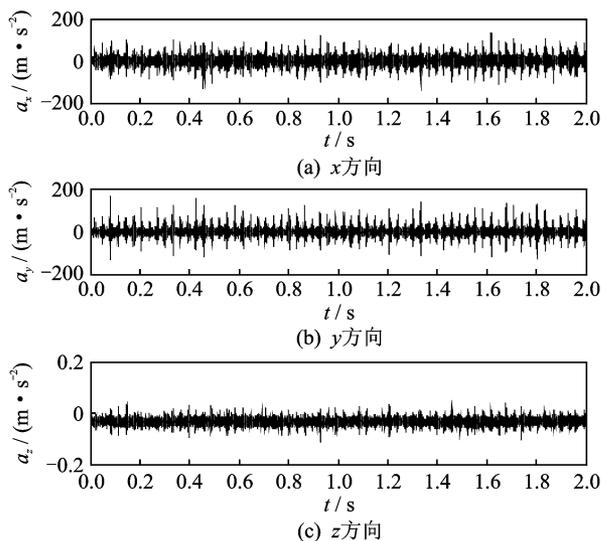


图6 柴油机端面振动信号

5 结束语

结合工程机械混合动力系统机电耦合特性和轴

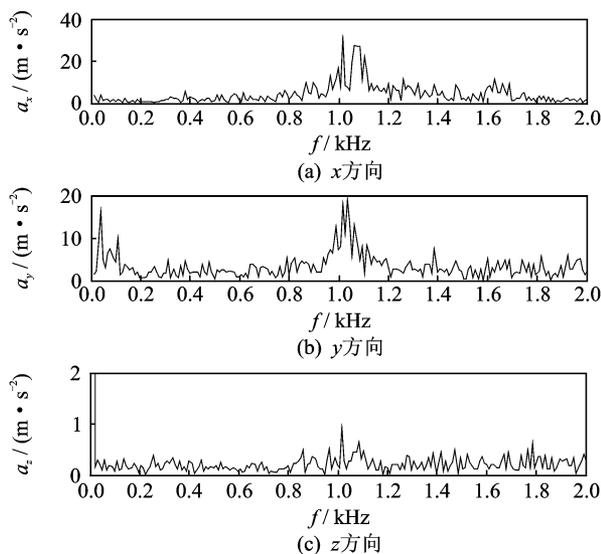


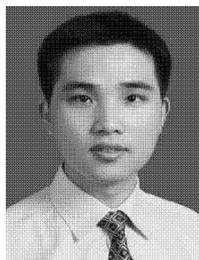
图7 柴油机端面振动信号频谱

系振动特性试验研究的需要,分析了测控系统的设计要求,给出测控系统的硬件构成。采用组态软件开发测控系统的人机界面,对不同负载下混合动力系统中柴油机曲轴的振动特性进行测试。测试结果表明,柴油机曲轴振动能量集中在径向,设计的测控系统能实现混合动力系统轴系振动性能测试。

参 考 文 献

- [1] 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.
Liu Liangchen. Current situation and prospect of construction machinery[J]. Construction Machinery and Maintenance, 2010(1):42-44. (in Chinese)
- [2] Katrasnik T, Trenc F, Medica V, et al. An analysis of turbocharged diesel engine dynamic response improvement by electric assisting systems[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(4): 918-926.
- [3] Moreno J, Ortuzar M E, Dixon J W. Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2):614-623.
- [4] Xiao Qing, Wang Qingfeng, Zhang Yanting. Control strategies of power system in hybrid hydraulic excavator[J]. Automation in Construction, 2008, 17(4): 361-367.
- [5] 肖清, 王庆丰, 张彦廷, 等. 液压挖掘机混合动力系统建模及控制策略研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(3):480-483.

- Xiao Qing, Wang Qingfeng, Zhang Yanting, et al. Study on modeling and control strategy of hybrid system in hydraulic excavator[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(3): 480-483. (in Chinese)
- [6] 肖清,王庆丰. 液压挖掘机混合动力系统的参数匹配方法[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 121-126.
Xiao Qing, Wang Qingfeng. Parameter matching method for hybrid power system of hydraulic excavator [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 121-126. (in Chinese)
- [7] 杜永祚,唐贵基,陈彭. 5kW 扭振模拟机组轴系扭振实验研究[J]. 振动、测试与诊断, 1993, 13(3): 1-8.
Du Yongzhuo, Tang Guiji, Chen Peng. Experimental study on torsional vibration of the shafts of 5 kW simulated generator[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1993, 13(3): 1-8. (in Chinese)
- [8] 岳东鹏,吴玉,王韬. 电磁作用对轻度混合动力系统振动和噪声的影响[J]. 车用发动机, 2010(5): 69-72.
Yue Dongpeng, Wu Yu, Wang Tao. The influence of electromagnetism on vibration and noise for mild hybrid system [J]. Vehicle Engine, 2010(5): 69-72. (in Chinese)
- [9] 郭玉杰,卢一兵,袁立平. 发电机转子不稳定振动的分析与处理[J]. 振动、测试与诊断, 2001, 21(2): 143-146.
Guo Yujie, Lu Yibing, Yuan Liping. Analysis and disposal of generator rotor vibration [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2001, 21(2): 143-146. (in Chinese)
- [10] 岳东鹏,苗德华,张峻霞. 机电耦合作用下混合动力系统轴系动力学分析[J]. 汽车工程, 2008, 30(3): 211-214.
Yue Dongpeng, Miao Dehua, Zhang Junxia. Dynamics analysis on shafts in hybrid system with electro-mechanical coupling [J]. Automotive Engineering, 2008, 30(3): 211-214. (in Chinese)
- [11] 段秀兵,郝志勇,岳东鹏. 汽车发动机曲轴扭振的多体动力学分析[J]. 汽车工程, 2005, 27(2): 233-235.
Duan Xiubing, Hao Zhiyong, Yue Dongpeng. Multi-body dynamics analysis on torsional vibration of automotive engine crankshaft [J]. Automotive Engineering, 2005, 27(2): 233-235. (in Chinese)
- [12] 岳东鹏,张峻霞. 混合动力轴系机电耦合振动的理论研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2010, 37(3): 3-5.
Yue Dongpeng, Zhang Junxia. Theory study of electro-mechanical coupling vibration on hybrid system shafts [J]. Tractor & Farm Transporter, 2010, 37(3): 3-5. (in Chinese)
- [13] 童毅,欧阳明高,张俊智. 并联式混合动力汽车控制算法的实时仿真研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 156-161.
Tong Yi, Ouyang Minggao, Zhang Junzhi. Real-time simulation and research on control algorithm of parallel hybrid electric vehicle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 156-161. (in Chinese)
- [14] 童毅,张俊智,欧阳明高. 混合动力汽车转矩管理策略[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2003, 43(8): 1134-1137.
Tong Yi, Zhang Junzhi, Ouyang Minggao. Torque management strategy for hybrid electric vehicles [J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2003, 43(8): 1134-1137. (in Chinese)



第一作者简介:黄中华,男,1979年11月生,副教授。主要研究方向为机械电子工程。曾发表《深海浮游微生物浓缩保压取样技术》(《机械工程学报》2006年第42卷第3期)等论文。

E-mail: csu707@163.com