

DOI: 10.3901/JME.2014.18.118

并联式混合动力挖掘机系统设计 及其耦合控制策略*

杜 磊 杨福源 徐梁飞 欧阳明高

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 基于某 6 t 级小型挖掘机, 设计以超级电容作为储能元件的并联式混合动力系统, 并给出动力系统各部件的参数。并联式混合动力挖掘机的动力系统是具有强非线性双输入双输出耦合系统: 输入为发动机加速踏板命令和启动发电一体机(Integrated starter generator, ISG)转矩命令, 输出为发动机转速和超级电容的电荷状态(State of charge, SOC)。在 Matlab/Simulink 中对动力系统建模, 并提出 3 种控制策略进行仿真。仿真结果表明, 使用发动机加速踏板命令和 ISG 转矩命令耦合控制发动机转速和超级电容 SOC 的“耦合控制策略”较优。另外, 以某型 6 吨挖掘机为基础, 制造一台混合动力挖掘机原型机, 并且设计基于 CAN 网络的分布式控制系统, 基于 MPC561 单片机自主开发一款 32 位整车控制器。实车试验的结果表明, 耦合控制策略能够实现发动机转速波动在 ± 100 r/min 以内, 超级电容 SOC 在循环间基本保持不变, 发动机工作在相对高负荷低油耗工作区, 系统综合节油率在 15%左右。

关键词: 挖掘机; 并联混合动力; 耦合控制; 仿真

中图分类号: TG156

Design and Coupling Control Strategy for Parallel Hybrid Excavator

DU Lei YANG Fuyuan XU Liangfei OUYANG Minggao

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: A parallel hybrid power train system is designed based on a 6 t hydraulic excavator, and the specifications are introduced. The power train of a parallel hybrid excavator is a two-input-two-output system with engine torque and integrated starter generator (ISG) torque as inputs while engine speed and state of charge(SOC) of super capacitor as outputs. The model of the powertrain is built in Matlab/Simulink. Three control strategies are designed and simulated. The results show that the “coupling control strategy” is the best of the three. A 32-bit HCU is developed. A prototype hybrid excavator is built. Testing results show that the fluctuation of the engine speed is within ± 100 r/min, and the SOC of super capacitor can be kept sustaining during work cycles. Compared with a traditional hydraulic excavator, the engine operates more efficiently, reducing fuel consumption by approximately 15%.

Key words: excavator; parallel hybrid; coupling control; simulation

0 前言

为应对日益严峻的环境和能源挑战, 混合动力系统被广泛应用于汽车、船舶、工程机械上, 以改善其燃油经济性和排放。作为工程机械的主力, 挖掘机工作在典型的频繁变载工况下, 随负载变化, 发动机的转矩会剧烈波动, 转速也波动较大, 因此导致发动机经常工作在瞬态工况下, 燃油经济性和排放较差。简单估计, 一台 6 吨级小型挖掘机, 一年燃油消耗大概在 10 t(按照一年工作 200 天, 每天

工作 8 h 计算), 以混合动力改善其燃油经济性和排放, 潜力很大。

2004 年 5 月, 小松集团(Komatsu)推出 PC200-8 型并联式混合动力挖掘机, 标称节油率达 25%。2007 年 1 月, 日本神户制钢公司(Kobe Steel)向市场推出了 SK70H 型串联式混合动力挖掘机, 据该公司统计, 节油率达到 40%。2011 年 7 月, 日立建机(Hitachi)设计制造了 ZH200 型并联式混合动力挖掘机, 降低油耗 20%以上。国内三一重工集团 SY215C Hybrid 混合动力挖掘机降低油耗 30% 以上; 柳工集团 922D 型混合动力挖掘机节能 20%左右^[1]。韩国现代重工研究所 KWON^[2]设计了并联式混合动力挖掘机, 以超级电容作为储能器件, 他提出了针对并联

* 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划, 20121867893)。
20130929 收到初稿, 20140612 收到修改稿

式系统的控制策略, 在实车试验中实现了 8% 的节油率, 但仿真结果显示节油的潜能为 24%。浙江大学王冬云^[1]基于工况, 分别对串联式和并联式系统进行了参数匹配和动力系统控制, 仿真结果显示串联式系统节油率 38.3%, 并联式系统达到了 42%。

本文旨在以并联式混合动力的方式降低挖掘机的油耗。第一部分简要分析了传统液压挖掘机的工况, 根据输出功率曲线选择目标的发动机的工作点。在第二部分中, 简要介绍了并联式混合动力挖掘机的构型和参数。第三部分在 Matlab/Simulink 中对动力系统进行建模, 并提出 3 种控制策略分别仿真分析。在最后一节中, 介绍了控制器和原型机的开发。在实地测试中, 耦合控制策略的有效性得到验证。

1 混合动力挖掘机工况分析

液压挖掘机的动力系统主要由发动机、液压泵和动作液压缸组成, 以某型挖掘机为例, 其典型构型如图 1 所示。挖掘机的基本动作包括挖掘、提升、回转、卸料和行走, 每个动作都由与发动机同轴连接的三个液压泵(P1、P2、P3)驱动, 由分配阀控制。

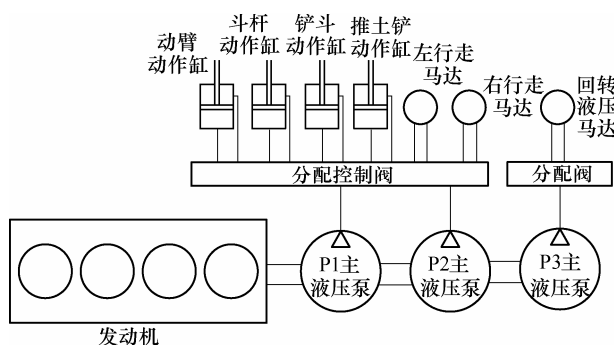


图 1 传统挖掘机动力系统的一般构型

液压泵输出功率的计算公式为

$$P = \frac{pq_V}{612} \quad (1)$$

式中 P —— 液压泵输出功率;

p —— 液压泵出口压力;

q_V —— 液压泵排量。

在挖掘机的液压泵出口处安装压力传感器, 令挖掘机工作在典型的周期性工况下, 获得如图 2 所示的实时压力曲线。

可以看到, 挖掘机工况具有典型的周期性, 其中包含了挖掘、提升、回转、卸料、回转、挖掘的典型工作循环。

P1、P2 泵的流量和 P3 泵压力相关, 如式(2)所示

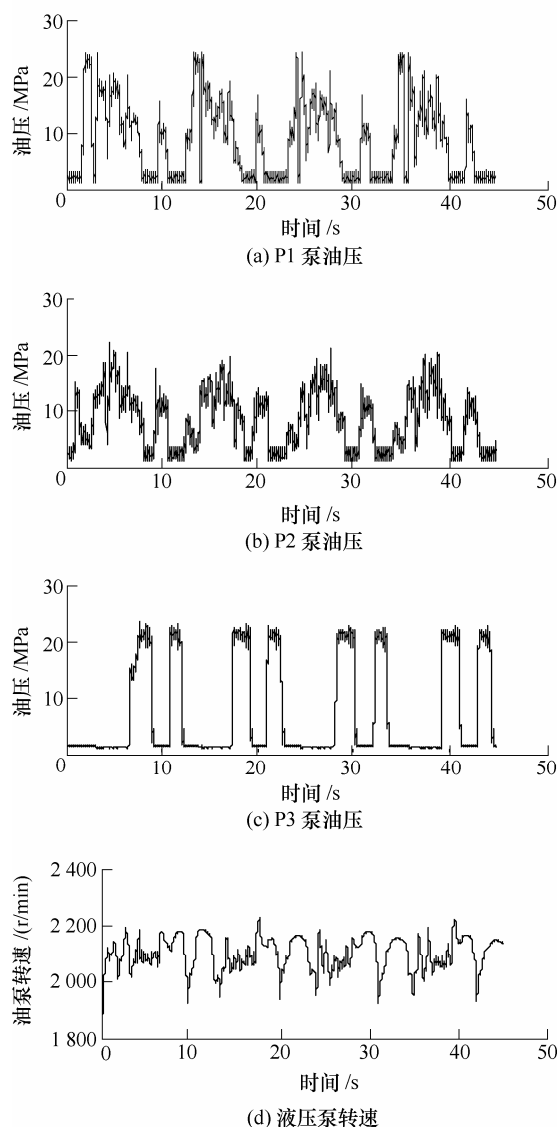


图 2 周期性工况下液压泵实时数据

$$\left\{ \begin{array}{l} q_V = 28 \text{ L/min} \quad 0 \leq p_1 \leq 12.544 \\ q_V = -1.306p + 44.39 \quad 12.544 \leq p_1 \leq 21.04 \\ q_V = -0.392p + 25.16 \quad 21.04 \leq p_1 \leq 41.16 \\ q_V = 9 \text{ L/min} \quad p_1 \geq 41.16 \\ q_V = 28 \text{ L/min} \quad 0 \leq p_2 \leq 25.5 \\ q_V = -1.12p + 56.56 \quad 25.5 \leq p_2 \leq 35.3 \\ q_V = -0.35p + 29.355 \quad 35.3 \leq p_2 \leq 47 \\ q_V = 13 \text{ L/min} \quad p_2 \geq 47 \end{array} \right. \quad p_3 = 20.6 \quad p_3 = 0.98 \quad (2)$$

式中 p_1 —— P1 泵液压(MPa);

p_2 —— P2 泵液压(MPa);

p_3 —— P3 泵液压(MPa)。

P3 泵的流量恒定为 18 mL/r。将图 2 中的液压泵压力和转速等数据输入式(2), 得到液压泵的实时

输出功率曲线, 取液压泵的效率为 90%, 得到发动机的实时功率曲线, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 这是 4 个满负荷循环发动机的输出功率曲线, 平均一个循环的时间为 12 s, 发动机最大输出功率 31 kW 左右, 最小输出功率 5 kW 左右。图 2 中液压泵的转速即发动机的转速, 在 1 900 r/min 和 2 200 r/min 之间来回波动, 发动机工况变化十分剧烈, 瞬态工况频繁发生, 这是传统挖掘机燃油经济性差的重要原因。由于工程机械具有全程调速特性, 当负载较小时, 发动机工作在高速低负荷工作区, 燃油经济性差。如果应用混合动力技术令发动机远离这一工作区, 那么挖掘机的燃油经济性将得到改善。

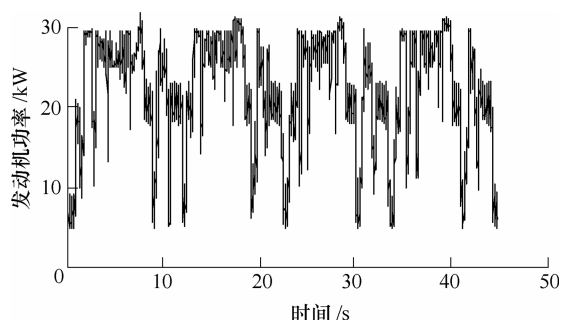


图 3 发动机实时功率曲线

2 混合动力系统设计

基于某型 6 吨级小型挖掘机, 本文提出了并联式混合动力系统构型, 如图 4 所示。发动机、启动发电一体机(Integrated starter generator, ISG)和液压泵 P1、P2 同轴并联, 一台永磁同步电动机取代液压泵 3 和回转液压马达。使用超级电容作为能量存储装置。

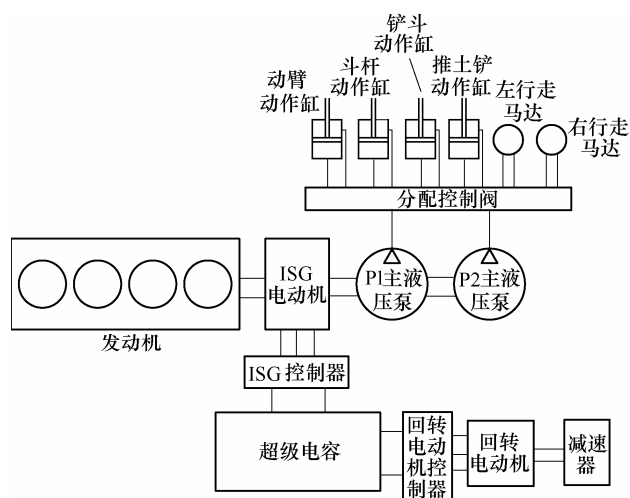


图 4 并联式混合动力挖掘机构型图

在此构型中, ISG 电动机和超级电容作为能量缓冲, 重载工况下, 辅助发动机工作; 轻载工况下, 吸收发动机多余的能量。发动机可以工作在一个较

窄的转速和转矩区间, 更加高效地运转。回转电动机能够回收转台制动的能量, 进一步提高燃油经济性。

相比串联式系统, 并联式系统有两点明显的优势。

(1) 动力系统的电力途径损失较少。在串联式系统中, 发动机和负载之间机械解耦, 发动机产生的能量需要经过发电电动机、整流器、电池、逆变器和电动机等一系列电力环节, 每个部件均有能量损失, 当挖掘机工作在满负荷状态时, 电力环节损失的能量不容忽视; 而并联式系统, 发动机和负载之间有机连接, 一部分能量直接从发动机传递给负载, 电力途径的损失较小。

(2) 电动机额定功率较小, 电容容量也较少, 体积和成本增加较少, 便于在 6 t 挖掘机紧凑的动力舱内布置。

因此, 选择并联式混合动力系统构型。

2.1 发动机参数选择

发动机的平均需求功率应由两部分构成: 液压泵的平均功率需求和电力途径的平均损耗功率(将超级电容, 整流器逆变器的损耗统一在 ISG 电动机和回转电动机的能量损耗之中)

$$\bar{P}_E = \bar{P}_H + \bar{P}_I + \bar{P}_S = 19.7 \text{ kW} \quad (3)$$

式中 \bar{P}_E ——发动机平均需求功率;

\bar{P}_H ——液压泵的平均功率需求;

\bar{P}_I ——ISG 的功率损耗;

\bar{P}_S ——回转电动机的功率损耗。

选择玉柴 YC4W85-40 型小型车用柴油机(发动机参数见表 1), 对其加速踏板特性曲线进行修改以符合工程机械的要求, 如图 5 所示。

表 1 玉柴 YC4W85-40 发动机参数

参数	规格
气缸	直列四缸
排气量/mL	1 220
额定功率/kW	40
最大转矩/(N·m)	190
最高空车转速/(r/min)	2 300
最低有效燃油消耗率/[g/(kW·h)]	235

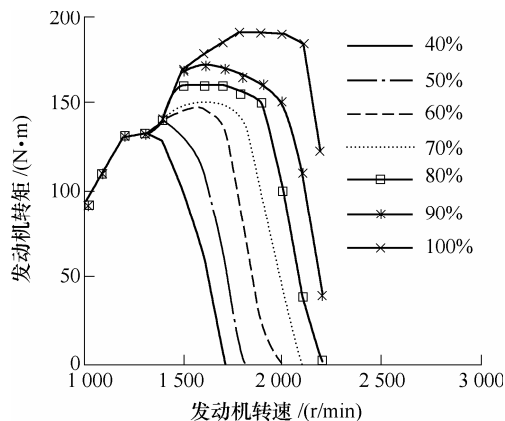


图 5 玉柴 YC4W85-40 加速踏板特性曲线

2.2 电动机参数选择

ISG 电动机的作用是“削峰填谷”。假设发动机以平均功率输出，一个循环内，ISG 电动机最大驱动功率为 13 kW，最大发电功率为 16.7 kW，转速为 2 100 r/min。定制永磁同步电动机，参数见表 2。

表 2 ISG 电动机参数

参数	规格
额定转速/(r/min)	2 100
额定功率/kW	10
最大功率/kW	20
最大驱动转矩/(N·m)	80
最大发电转矩/(N·m)	80

选择的电动机参数和原挖掘机的回转液压马达一致即可满足工作要求，定制永磁同步电动机，参数见表 3。

表 3 回转电动机参数

参数	规格
额定转速/(r/min)	1 200
额定功率/kW	15
最大功率/kW	20
最大驱动转矩/(N·m)	110
最大发电转矩/(N·m)	140

2.3 超级电容参数选择

在挖掘机工作循环内，ISG 电动机、回转电动机有驱动工况和发电工况，能量流动比较复杂。站在超级电容的角度，只有充电和放电两种工况。以此作为依据，分析超级电容端的能量收支。计算得到超级电容容量

$$C = \frac{2q}{U_1^2 - U_2^2} = 1.37 \text{ F} \quad (4)$$

式中 C ——超级电容的电容量；

q ——一个工作循环的充放电电量；

U_1 ——超级电容峰值电压；

U_2 ——超级电容谷值电压。

选择 Maxwell Technologies 公司的超级电容，参数见表 4。

表 4 超级电容参数

参数	要求
电容值/F	4.5
直流内阻(25 °C)/mΩ	116
额定电压/V	388
浪涌电压/V	410
最大持续工作电流(允许的温度升高为 40 °C)/A	88
工作温度范围/°C	-40~65

3 动力系统建模及仿真

3.1 动力系统建模

本文重点研究发动机工作点的改善和燃油经

济性的提升，对动力系统的瞬态动力学性能暂不深入研究，所以采用发动机平均值模型建模仿真。根据动力系统构型图 4，可以列出动力系统的动态方程

$$T_E + T_I - T_f - T_p = \frac{\pi}{30} J \frac{dn}{dt} \quad (5)$$

式中 T_E ——发动机转矩；

T_I ——ISG 电动机转矩；

T_f ——动力系统摩擦转矩；

T_p ——液压泵负载转矩；

J ——动力系统转动惯量；

n ——发动机转速。

动力系统的转动惯量包括发动机的曲轴连杆机构的惯量 $J_1=0.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，ISG 电动机转子惯量 $J_2=0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 以及液压泵的转子惯量 $J_3=0.042 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。所以

$$J = J_1 + J_2 + J_3 = 0.242 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

发动转矩和发动机加速踏板、转速相关，且发动机转矩对加速踏板信号的动态响应是一阶惯性环^[3]

$$T_E = F(f(\alpha, n), t) \quad (6)$$

式中 α ——发动机加速踏板位置；

n ——发动机转速；

t ——时间。

动力系统摩擦力矩由发动机，ISG 电动机，液压泵三者的摩擦力矩之和构成，其中 ISG 电动机和液压泵的摩擦力矩可以看成常数，发动机的摩擦力矩则和冷却液温度、发动机转速相关

$$T_f = h(\theta, \omega) + A \quad (7)$$

式中 θ ——发动机冷却液温度；

A ——ISG 电动机和液压泵摩擦转矩。

经过测试，ISG 和液压泵的固有摩擦力矩大约为 10 N·m。

液压泵负载转矩与液压泵出口压力和液压泵排量相关。而本文使用液压泵的排量和出口压力由式(2)确定

$$T_p = (p_1 + p_2) q_v \times 10^3 \quad (8)$$

超级电容采用 RC 模型，如图 6 所示。

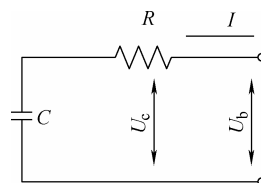


图 6 超级电容 RC 模型

$$\begin{cases} \frac{dU_c}{dt} = -IC \\ U_c = IR + U_b \end{cases} \quad (9)$$

式中 U_c ——超级电容内部电压;

U_b ——超级电容端电压;

I ——电流;

R ——超级电容电阻。

式(5)~(9)将动力系统表达成为数学模型,依据上述各式,在 Matlab/Simulink 中建立动力系统模型。

3.2 控制策略及仿真对比

在本文的并联式混合动力系统构型中,发动机和 ISG 电动机同轴连接。发动机加速踏板信号直接影响发动机转速,间接影响超级电容电荷状态(State of charge, SOC); ISG 电动机转矩直接影响超级电容 SOC,间接影响发动机转速。该系统是一个双输入双输出系统。系统输入量为发动机加速踏板命令和 ISG 电动机转矩命令,输出量为发动机转速和超级电容 SOC。对控制系统而言,输出量是发动机加速踏板命令和 ISG 电动机转矩命令,反馈量是发动机实际转速和超级电容实际 SOC。

动力系统的控制目标是发动机转速稳定,超级电容 SOC 循环间基本不变,本文设计了 3 种不同的控制器,如图 7 所示。控制策略 1 采用解耦控制的手段,通过 PI 控制器,使用发动机加速踏板命令控制发动机转速,使用 ISG 电动机转矩命令控制超级电容 SOC。与控制策略 1 类似,控制策略 2 通过 PI 控制器,使用 ISG 电动机转矩命令控制发动机转速,使用发动机加速踏板命令控制超级电容 SOC。控制策略 3 采用了耦合控制的手段,发动机加速踏板命令和 ISG 电动机转矩命令分别通过两个不同权重的 PI 控制器控制发动机转速和超级电容 SOC。

挖掘机工作在频繁变载的工况下,要求控制策略具有快速性,准确性和稳定性。PI 控制器有较好的鲁棒稳定性和跟踪性能,适合具有强非线性性的系统,因此各闭环控制器均采用 PI 控制器的形式^[2]。ISG 电动机的转矩响应时间为 10 ms 级,能够通过 PI 控制器快速改变转矩,但是本文采用的涡轮增压柴油机对于加速踏板信号的响应往往达到秒级,为了提高发动机转速闭环的快速性,采用反馈 PI+前馈控制手段,根据负载的变化对发动机加速踏板命令进行非线性补偿。

将上述三种控制策略在 Matlab/Simulink 中建立模型,与第 3.1 节的动力系统模型一起构成了仿真模型,如图 8 所示。

将图 3 的功率曲线输入模型进行仿真,得到了如图 9~11 所示的结果,结果按照策略 1、策略 2 和策略 3 的顺序呈现。相应地得到了每种控制策略的燃油消耗率,从而计算出节油率,如表 5 所示。

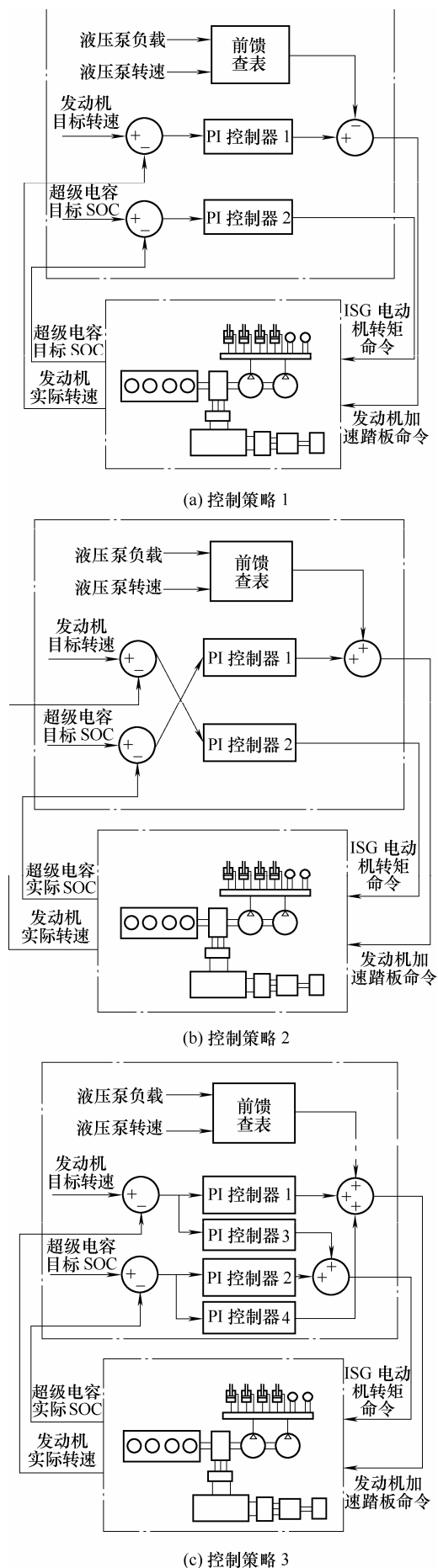


图 7 三种控制策略示意图

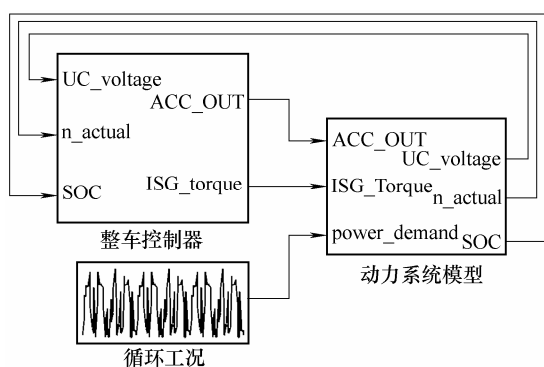
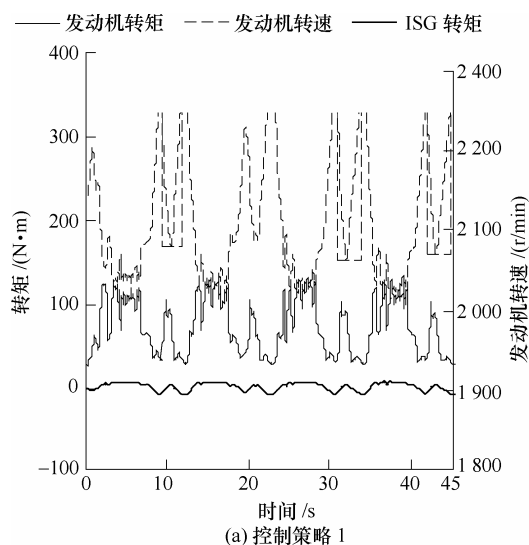
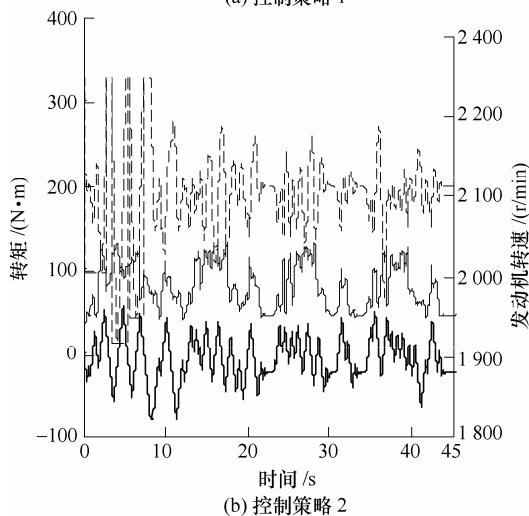


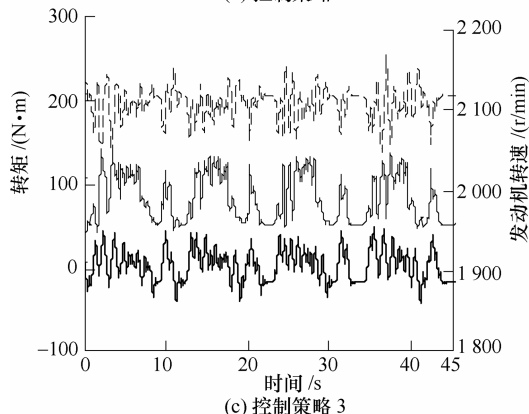
图 8 仿真模型



(a) 控制策略 1

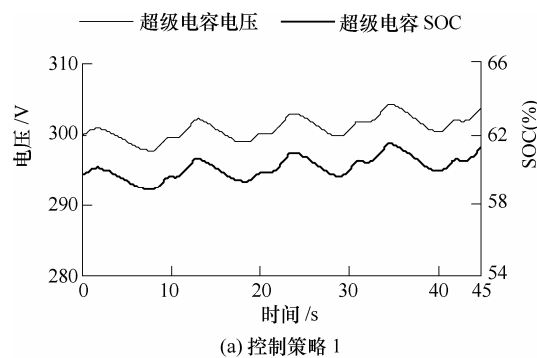


(b) 控制策略 2

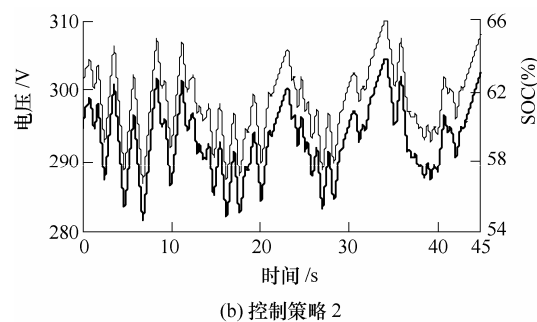


(c) 控制策略 3

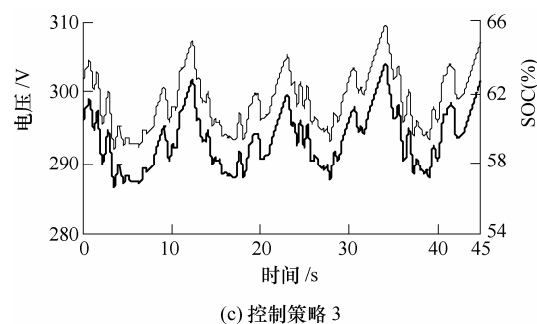
图 9 仿真结果之发动机转速、转矩和 ISG 电动机转矩



(a) 控制策略 1



(b) 控制策略 2



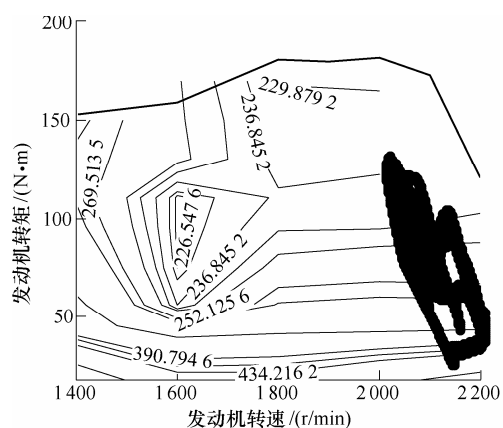
(c) 控制策略 3

图 10 仿真结果之超级电容电压和 SOC

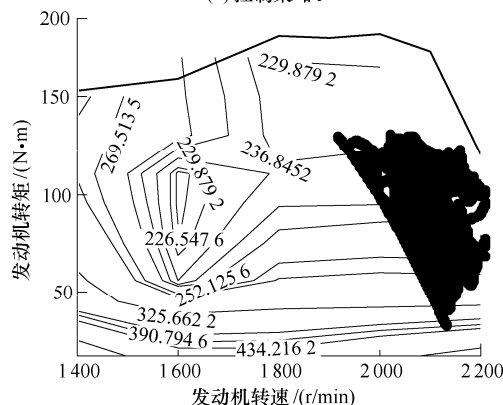
分析仿真结果如下所述。

策略 1。发动机转速波动 ± 50 r/min 左右, 超级电容 SOC 和电压波动较小。但是从发动机工作区域来看, 高速低负荷区域占据了相当的比重, ISG 电动机基本上没有起到“削峰填谷”的作用, 相对于原来的全程调速柴油机没有本质改善。根据表 5 的结果, 节油率仅为 2.25%, 相对于原机没有明显改善。

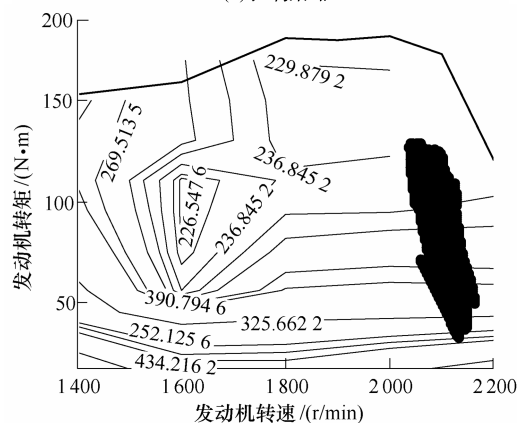
策略 2。发动机转速和超级电容 SOC 波动都比较大, 虽然发动机避开了高速低负荷工作区, 但是工作区太大, 瞬态工况较多, 不利于燃油经济性从其节油率也验证了这一点, 仅为 4.38%, 虽然比策略 1 多, 但是燃油经济性改善不明显。其原因主要是 ISG 电动机的额定功率较小, 单独使用 ISG 电动机不足以响应负载的高频变化, 不能稳定发动机的工作点。以上两种控制策略采用了解耦控制, 由于挖掘机工作在频繁剧烈变载的工况下, 而且为了节约成本和空间, 发动机与 ISG 电动机额定功率选择得都较小, 如果使用解耦控制单纯依靠发动机或者 ISG 电动机, 将不能够稳定转速, 更起不到“削峰填谷”调节工作点效果。



(a) 控制策略 1



(b) 控制策略 2



(c) 控制策略 3

图 11 仿真结果之发动机工作点

表 5 各控制策略的节油率

控制策略	燃油消耗率/(L/h)	节油率(%)
原机	8.00	—
1	7.82	2.25
2	7.65	4.38
3	6.51	18.63

策略 3。发动机转速波动 ± 50 r/min, ISG 电动机响应了高频的负载转矩, 发动机响应低频负载转矩, 发动机基本避开了高速低负荷工作区; 超级电容 SOC 循环间基本保持不变, 电压保持在安全有效的区间。节油率达到了 18.63%, 相对原机有了明显的改善。此仿真结果验证了耦合控制策略的有效性。在此控制策略中, 各 PI 控制器的参数见表 6。

表 6 控制策略 3 的 PI 控制器参数

PI 控制器	K_p 值	K_i 值
1	1.0	0.10
2	0.2	0.01
3	2.0	0.50
4	0.2	0.01

综合考虑上述仿真试验的结果, 耦合控制策略 3 相对于其他两种策略有明显的优势, 因此选做现场试验的控制策略。

4 实车试验

为了验证控制策略的可行性和可靠性, 一台 6 吨混合动力挖掘机原型机被制造出来(图 12)。另外, 自主设计开发了基于 MPC561 单片机的 32 位动力系统控制器(Power control unit, PCU)(图 13)。



图 12 混合动力挖掘机原型机



图 13 动力系统控制器

这台原型机使用了网络控制手段, 以动力系统控制器作为控制系统核心, 和各智能节点以 CAN 网络通信。图 14 展示了控制网络的架构。PCU 通过 CAN 网络与发动机控制器(Engine control unit, ECU)和电动机控制器(Motor control unit, MCU)通信, 获得发动机和电动机的转速转矩信号。PCU 通过模拟量输入端口获得驾驶员操作意图和超级电容 SOC。发动机通过模拟量输出端口控制发动机加速踏板, 通过 CAN 网络控制 ISG 电动机转矩。

图 15 显示了原型机在 60 s 内执行 5 个工作周

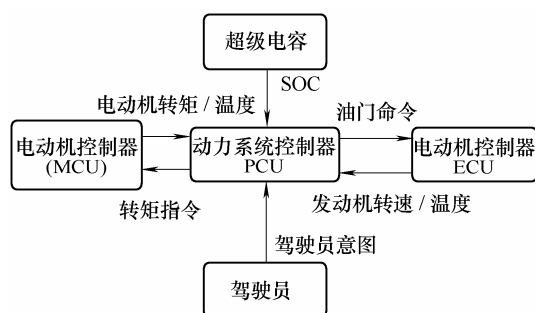
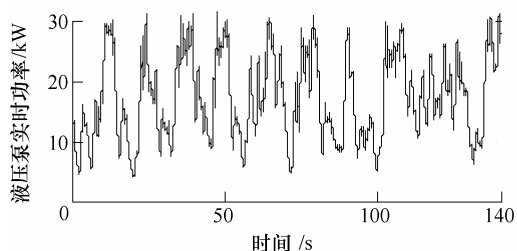
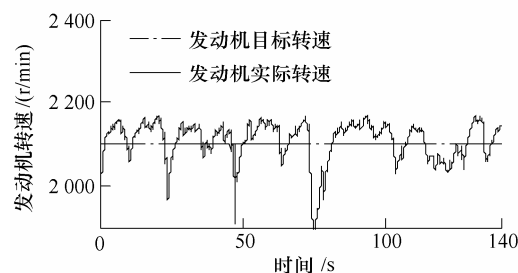


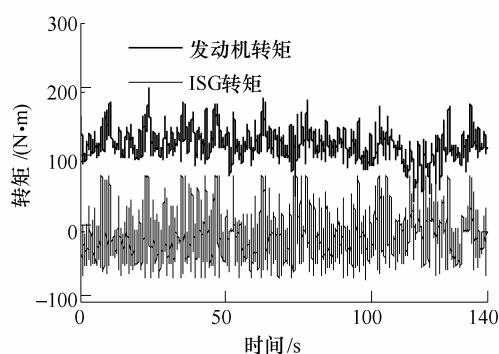
图 14 控制系统架构



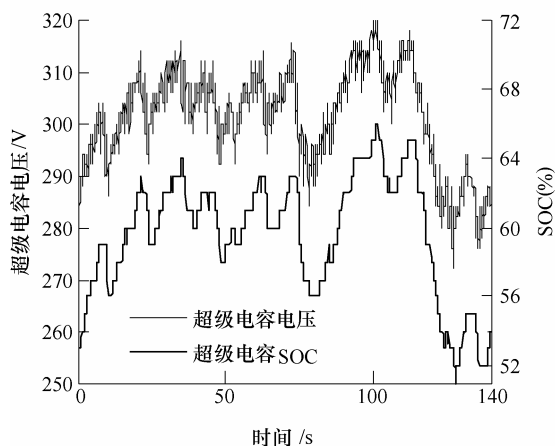
(a) 液压泵实时功率



(b) 发动机实时转速



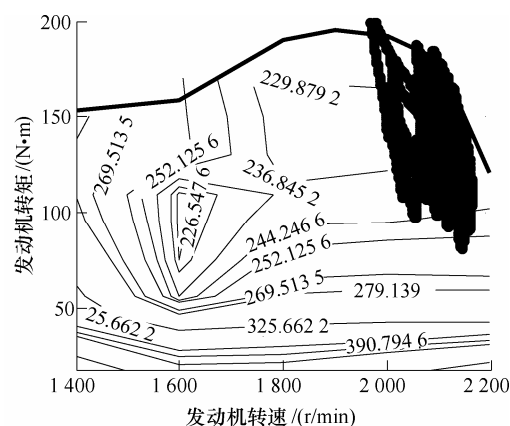
(c) 发动机与 ISG 实时转矩



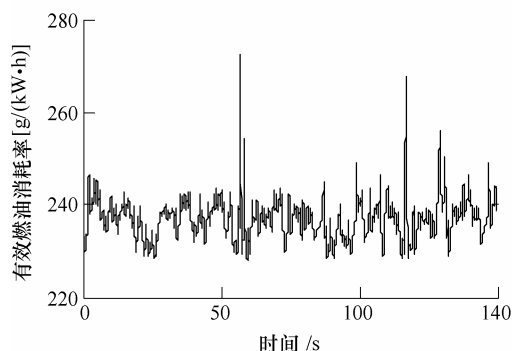
(d) 超级电容实时电压与 SOC

图 15 现场采集的性能数据曲线

期采集到的发动机、ISG 电动机和超级电容的数据。发动机的转矩保持相对稳定，而 ISG 电动机转矩变化迅速以应对瞬态负载。当负载功率超过了发动机的功率，ISG 协助发动机；当负载功率下降时，ISG 电动机吸收了额外的功率。结果发动机转速的波动被限制在 ± 100 r/min，发动机在高效区域运行，保持较低有效燃油消耗率 (Brake specific fuel consumption, BSFC)，从图 16 可以看出，发动机主要工作在有效燃油消耗率为 235 g/kWh 到 260 g/kWh 之间的工作区域内。测试结果表明，油耗约 6.8 L/h，相比于该型传统液压挖掘机 8 L/h 的平均油耗，混合动力挖掘机试验平台的节油率大约为 15%。



(a) 发动机工作点分布



(b) 发动机实时有效燃油消耗率

图 16 发动机实时数据

将采集到的发动机转速转矩数据稍加处理，得到了图 16 所示的发动机工作点。可以看到由于混合动力系统的应用，发动机避开了高转速低负荷的工作区，燃油经济性得到了提升。

5 结论

(1) 本文提取分析了挖掘机典型工况，设计了以超级电容为储能元件的并联式混合动力挖掘机。并给出了发动机、ISG 电动机、回转电动机和超级电容的参数。

(2) 在 Matlab/Simulink 环境中对动力系统进行建模。并且基于系统的耦合特性, 设计了 3 种控制策略并分别进行了仿真分析, 结果表明, 使用发动机加速踏板命令和 ISG 电动机转矩命令耦合控制发动机转速和超级电容 SOC 的“耦合控制策略”较优。

(3) 制造了一台 6 t 混合动力挖掘机原型机, 并且设计了基于 CAN 网络分布式控制系统, 自主开发了 32 位动力系统控制器。实际的挖掘场地测试采集的数据和仿真得到的数据基本吻合, 验证了控制策略的可行性。同时该挖掘机在实际工作情况下, 油耗大约为 6.8 L/h, 相比于该型传统液压挖掘机 8 L/h 的平均油耗, 混合动力挖掘机试验平台的节油率大约为 15%。

参 考 文 献

- [1] 王冬云. 混合动力挖掘机动力总成及参数匹配方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- WANG Dongyun. Research on the power-train hybridization and parameter matching of hydraulic excavators[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [2] KWON T. Power control algorithm for hybrid excavator with super capacitor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(4): 1447-1455.
- [3] 何彬, 程夕明, 曹桂军. 串联式混合动力辅助动力单元动态控制研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(1): 12-16.
- HE Bin, CHENG Ximing, CAO Guijun. Dynamic control for auxiliary power unit of series hybrid electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(1): 12-16.
- [4] 曹桂军, 欧阳明高. 柴油串联式混合动力控制系统的试验研究[J]. 清华大学学报, 2009, 49(11): 1844-1851.
- CAO Guijun, OUYANG Minggao. Experimental investigation of the control system of a diesel-hybrid powertrain[J]. J. Tsinghua Univ., 2009, 49(11): 1844-1851.
- [5] YOO S, AN S. Design and control of hybrid electric power system for a hydraulically actuated excavator[J]. SAE Int. J. Commer. Veh., 2009, 2(2): 264-273.
- [6] LEE H J, SUL S K. System configuration and control strategy for compound type hybrid excavator with ultra capacitor[C]//IEEE. 2010 International Power Electronics Conference (IPEC), June 21-24, 2010, Sapporo, 2010: 820-826.
- [7] 王庆丰. 油电混合动力挖掘机的关键技术研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 123-129.
- WANG Qingfeng. Research on key technology of oil-electric hybrid excavator[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 123-129.
- [8] WANG Tao, WANG Qingfeng. Optimization design of permanent magnet synchronous generator for potential energy recovery system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(4): 856-863.
- [9] 肖清, 王庆丰, 张彦廷. 液压挖掘机电容蓄能式并联混合动力系统结构及控制策略研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(5): 625-629.
- XIAO Qing, WANG Qingfeng, ZHANG Yanting. Research on structure and control strategy of parallel hybrid system applied to hydraulic excavator using capacitor as accumulator[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(5): 625-629.
- [10] 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研究[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 218-223.
- ZHANG Yanting, WANG Qingfeng, XIAO Qing. Simulation and experimental research on energy regeneration with hydraulic motor for hybrid drive excavator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 218-223.

作者简介: 杜磊(通信作者), 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车用和混合动力系统的控制与优化。

E-mail: l-du12@mails.tsinghua.edu.cn