

DOI: 10.3901/JME.2014.20.136

# 基于典型作业工况的串联式电传动推土机功率 跟随控制策略\*

宋 强<sup>1</sup> 曾 普<sup>1</sup> 何士娟<sup>2</sup> 王 红<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学电动车辆国家工程实验室 北京 100081;  
2. 机械工业出版社 北京 100037)

**摘要:** 为提高串联式混合动力推土机的燃油经济性, 研究动力传动系统的能量分配策略。分析发动机和发电机的动态工作特性, 通过台架试验建立发动机的动力输出特性模型、油耗特性模型和发电机的效率特性模型; 通过超级电容的电阻串并联模型结构分析, 建立超级电容的动态工作模型, 设定荷电状态的安全工作范围。基于台架试验及模型获得的发动机最佳燃油消耗曲线, 提出一种最佳燃油消耗曲线的功率跟随控制策略。研究推土机的典型作业工况, 在典型作业工况下对提出的控制策略进行仿真, 阐述超级电容的荷电状态及电压、电流的变化规律, 并与传统机械传动结构的原型机在发动机工作转速、转矩、油耗和加速踏板位置变动等参数方面进行对比分析。结果表明, 在推土机典型作业工况下, 采用最佳燃油消耗曲线的功率跟随控制策略与原型机相比, 节油率达 13.1%。

**关键词:** 串联式电传动履带推土机; 发动机-发电机组; 功率跟随; 控制策略; 燃油经济性

**中图分类号:** U415; TP319

## Power Flowing Control Strategy of Series Hybrid Tracked Bulldozer at the Typical Working Condition

SONG Qiang<sup>1</sup> ZENG Pu<sup>1</sup> HE Shijuan<sup>2</sup> WANG Hong<sup>1</sup>

(1. National Engineering Laboratory for Electric Vehicles, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;  
2. China Machine Press, Beijing 100037)

**Abstract:** Powertrain system and its energy control strategies are studied in order to improve fuel consumption of a kind of series hybrid tracked bulldozer. Mathematical models of engine's output power, fuel consumption, and generator's efficiency are established base on their dynamic working characteristic analysis and experimental data on test bench. By utilizing series-parallel topological structure between ultracapacitor and resistance, an ultracapacitor's dynamic working model is setup, and its working scope of state of charge(SOC) is build. The lowest fuel consumption curve is found after above models' optimization, and a power flowing control strategy based on the engine's optimal fuel consumption is proposed. This power flowing control strategy is simulated under a bulldozer's typical working duty. The variations of ultracapacitor's charge and discharge parameters, like voltage, current, and SOC are demonstrated. The engine's rotate speed, output torque, fuel consumption and the position of accelerate pedal are revealed comparing to these of the prototype tracked bulldozer with traditional mechanical powertrain structure. The results show that the proposed control strategy is verified well, and, the engine fuel economy can be improved 13.1% compared to the prototype one under the same typical working duty of the bulldozer.

**Key words:** series hybrid tracked bulldozer; engine-generator; power following; control strategy; fuel economy

## 0 前言

将电传动技术运用到工程机械领域, 是实现节

能减排的重要途径。2010 年, 卡特彼勒公司推出世界第一辆串联混合动力履带式推土机 D7E, 以发动机-发电机组作为能量源为两台驱动电动机提供能量, 没有辅助能量存储单元, 控制策略相对简单。与传统机型相比, 一氧化碳和氮氧化合物的排放分别降低 10%和 20%, 成本降低 10%, 燃油经济性提高 25%<sup>[1]</sup>。

\* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAG04B02)。20131013 收到初稿, 20140731 收到修改稿

目前串联混合动力技术多采用发动机-发电机组与辅助能量存储单元(动力电池或超级电容等)共同作为车辆能量源<sup>[2-5]</sup>,其能量分配策略有恒温器型和功率跟随型<sup>[6-7]</sup>两种,对于恒温器型控制策略,当动力电池的荷电状态(State of charge, SOC)低于最低设定值时,发动机以设定的恒功率运行,当 SOC 高于最高设定值时,发动机不工作,此时,动力电池需要满足可能出现的瞬时大功率放电的需要,对电池放电效率和使用寿命均有不利影响。功率跟随型控制策略要求发动机-发电机组的输出功率跟踪工况负载要求,导致发动机工作点频繁波动,影响了发动机的效率和排放特性。文献[8]针对插电式混合动力汽车采用恒温器控制方式,以动力电池和超级电容共同作为辅助能量源,提高了辅助能量单元放电效率和使用寿命,但这种控制方式比较复杂,很少应用于工程机械车辆上;文献[2]中的串联混合动力轮式挖掘机系统采用功率跟随的控制方式,并以超级电容作为辅助能量源,燃油消耗与对应的传统结构原型机相比降低了 24%,但其发动机采用单一工作点控制,在一定程度上限制了经济性的提高。

本文针对串联式混合动力推土机系统,并结合推土机的作业特点,提出了一种基于发动机最佳燃油消耗曲线的功率跟随控制策略。即发动机的工作点被控制在其燃油消耗最低的曲线上,以期更加有效地降低油耗。同时,在典型作业工况下,考虑到推土机对高速行驶和加速性能要求不高,但在低速作业时的功率需求波动剧烈的特点<sup>[9]</sup>,利用超级电容高功率密度、可短时提供大功率和电流的特点<sup>[10-11]</sup>,将其作为辅助能量源。通过分析发动机-发电机组的工作点和超级电容的 SOC 状态,合理匹配功率,确保推土机在正常作业条件下提高燃油经济性。

## 1 系统建模

串联式混合动力推土机的能源动力系统主要由以下几部分组成:发动机、发电机、超级电容、电动机驱动系统、相关控制器等,如图 1 所示。

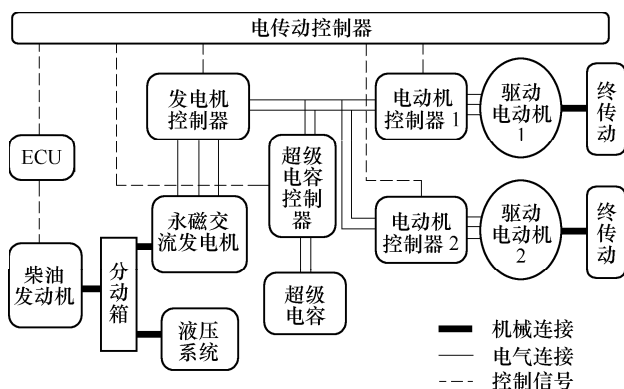


图 1 串联式混合动力推土机能源动力系统

### 1.1 发动机模型

柴油发动机工作特性与加速踏板位置  $\alpha_1$  以及飞轮的转速紧密相关,为了准确建立其工作特性模型,确保建模的精度,利用台架试验法,通过实际台架试验数据建立发动机工作特性模型,如图 2 所示。

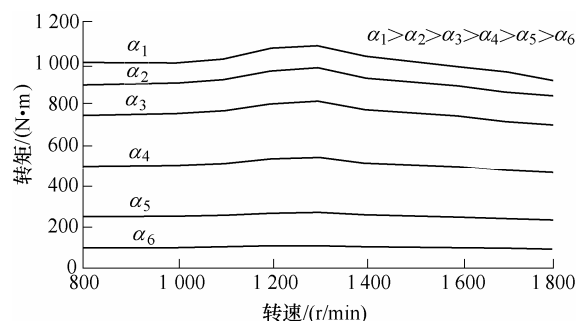


图 2 发动机转矩-转速特性

发动机的稳态输出转矩

$$T_e = \alpha T_{e_{\max}}(n_e) \quad (1)$$

式中  $\alpha$  ——加速踏板位置;

$T_e$  ——发动机飞轮输出转矩;

$T_{e_{\max}}(n_e)$  ——转速为  $n_e$  时的最大转矩。

发动机的动态输出转矩可以通过稳态转矩特性获得<sup>[12]</sup>

$$T_e^D = T_e - J_e \frac{d\omega_e}{dt} \quad (2)$$

式中  $T_e^D$  ——发动机动态输出转矩;

$J_e$  ——发动机转动元件的转动惯量。

发动机的燃油消耗  $b_e$  为转矩  $T_e$  和转速  $n_e$  的函数,可用多项式表示为

$$b_e = f(T_e, n_e) = \sum_{j=0}^s \sum_{i=0}^j A_k T_e^i n_e^{j-i} \quad i, j=0,1,\dots, s \quad (3)$$

式中  $s$  ——模型阶数;

$A_k$  ——多项式系数;

$$k = (j^2 + j + 2i) / 2。$$

### 1.2 发电机模型

发电机在发电状态向直流母线提供电流,其动力学方程为

$$J_g \frac{dn_g}{dt} = T_g - T_e^D \quad (4)$$

式中  $J_g$  ——发电机转动惯量;

$T_g$  ——发电机轴端转矩;

$n_g$  ——发电机转速。

发电机转子轴端转矩、转速和控制器端输出直流电压和电流的关系用公式表示为

$$\frac{U_g I_g}{1000 \eta_g} = \frac{T_g n_g}{9549} \quad (5)$$

式中  $U_g$ ——发电机驱动系统输出直流电压;  
 $I_g$ ——发电机驱动系统输出直流电流;  
 $\eta_g$ ——发电效率,是发电机转速和转矩的函数。

$$\eta_g = f(T_g, n_g) \quad (6)$$

通过台架试验得到发电机轴端转矩、转速、输出电压和电流数据,采用最小二乘法拟合<sup>[13]</sup>得到发电机发电效率 Map 图,如图 3 所示。

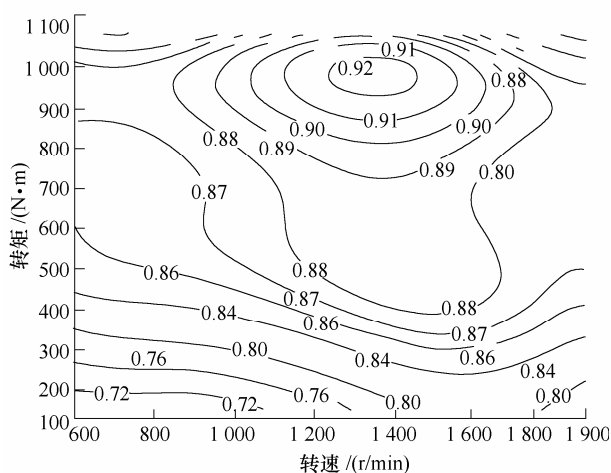


图 3 发电机发电效率 Map 图

### 1.3 超级电容模型

将超级电容等效为理想电容器  $C$  与大阻值电阻  $R_L$  并联,以及与小阻值电阻  $R_{ES}$  串联<sup>[14-15]</sup>的形式,如图 4 所示。

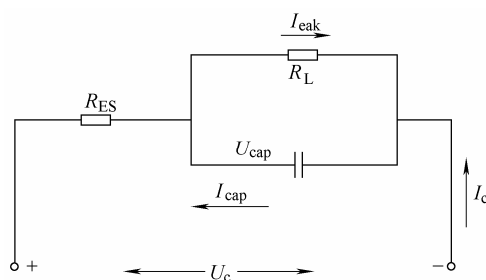


图 4 超级电容模型

定义充电时电流为负值,放电时电流为正值,则超级电容的数学模型为

$$\begin{cases} I_{cap} = I_c + I_{leak} = -C \frac{dU_{cap}}{dt} \\ U_c = U_{cap} - I_c R_{ES} \\ SOC = \frac{U_c - U_{min}}{U_{max} - U_{min}} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $C$ ——超级电容容量;  
 $U_c$ ——超级电容的端电压;

SOC——电池荷电状态

$U_{cap}$ ——电容电压;

$U_{max}$ ——超级电容最高工作电压;

$U_{min}$ ——超级电容最低工作电压;

$I_c$ ——超级电容的输入输出电流;

$I_{leak}$ ——超级电容的漏电流;

$I_{leak} = U_{cap} / R_L$ 。

SOC 反映了超级电容储存电量的多少,即充放电的程度。SOC 太高不利于制动能量的回收, SOC 太低,不能够提供较大功率。考虑到超级电容的寿命,应使其工作在合理的电压范围内。超级电容的 SOC 安全范围一般在 $[0.2, 0.9]$ <sup>[16]</sup>。

## 2 控制策略

### 2.1 功率跟随控制策略

发动机-发电机组要使其输出功率跟踪工况的负载要求,超级电容作为辅助能量源一方面补充因负载需求功率过大造成的功率不足,另一方面在制动时回收能量,而电传动履带推土机作业时车速很低,其制动时回馈能量较少,因此未考虑制动时的能量回收策略。

超级电容 SOC 和负载需求功率大小决定了发动机-发电机组的工作点,其功率分配策略如表 1 所示。

表 1 功率分配

判断条件	超级电容状态	功率需求
$P_{req} < P_{e\_max}$	充电	$P_g = \eta P_e$
$SOC < SOC_{max}$		$P_{uc} = P_{dc} - P_g$
$P_{req} < P_{e\_max}$	不充电,不放电	$P_g = \eta P_e$
$SOC \geq SOC_{max}$		$P_{uc} = 0$
$P_{req} > P_{e\_max}$	放电	$P_g = \eta P_{e\_max}$
$SOC > SOC_{min}$		$P_{uc} = P_{dc} - P_g$
$P_{req} < P_{e\_max}$	充电	$P_g = \eta P_e$
$SOC < SOC_{max}$		$P_{uc} = P_{dc} - P_g$

表 1 中,  $P_{req}$  为发动机需要提供的机械功率;  $P_e$  为发动机发出的功率;  $P_{e\_max}$  为发动机最大输出功率;  $P_{dc}$  为直流母线需求电功率;  $P_g$  为发电机提供的电功率;  $\eta$  为发电机发电效率;  $SOC_{max}$  和  $SOC_{min}$  分别为超级电容荷电状态的最大和最小值;  $P_{uc}$  为超级电容的充放电功率,  $P_{uc}$  为正时表示在放电,为负时表示在充电。图 5 为控制策略流程图。

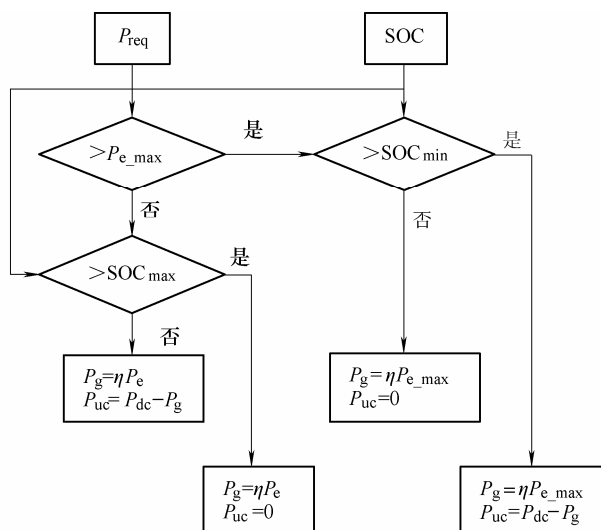
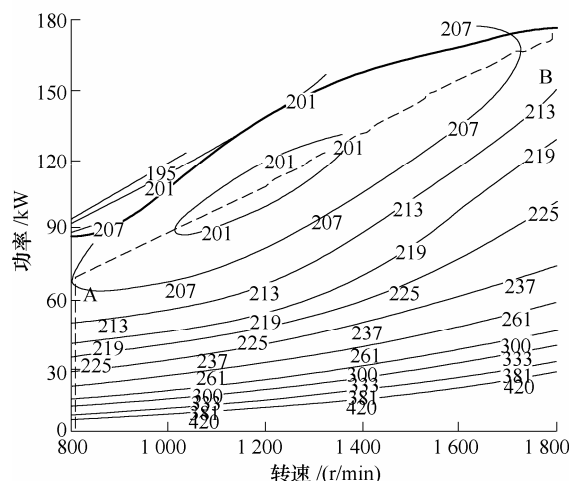


图 5 控制策略流程图



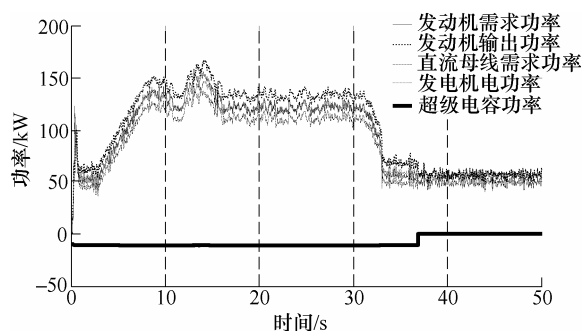


图 9 需求功率仿真结果

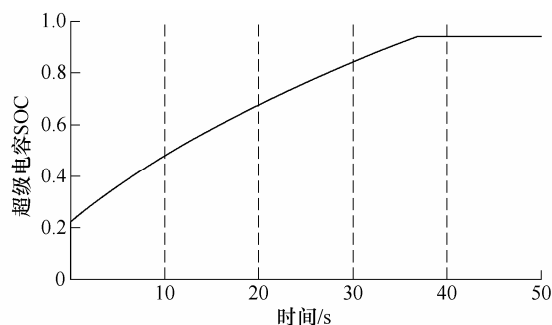


图 10 超级电容 SOC 仿真结果

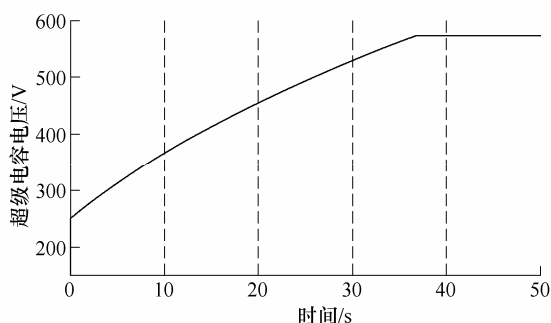


图 11 超级电容电压仿真结果

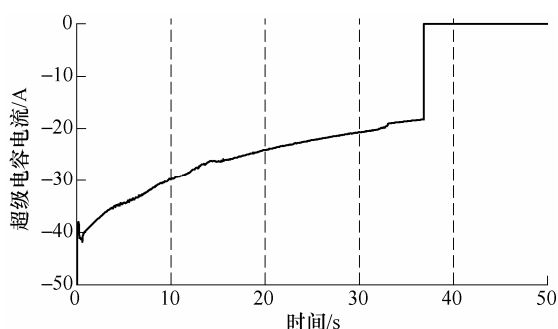


图 12 超级电容电流仿真结果

图 9 中，在 37 s 之前，发动机输出功率大于其需求功率，这是由于超级电容 SOC 初始为 0.2，发动机在提供功率满足推土机正常作业的同时，还要提供额外功率给发电机，用于超级电容充电。发动机额外提供的功率为 12 kW，考虑到发电机的效率，实际用于超级电容充电的电功率为 11 kW 左右。37 s 之后，超级电容 SOC 达到最大值 0.95，此时发动

机输出功率恰好等于其需求功率，如图 10 所示。

图 10 中还可以看出，直流母线需求功率为发电机电功率和超级电容功率之和，超级电容处于充电状态时，发电机电功率大于直流母线需求功率，超级电容充满后，发电机电功率等于直流母线需求功率。

图 8 所示的典型工况在第 1 s 内速度由 0 急速增至 3.1 km/h，这导致发动机输出功率在第 1 s 内瞬时波动，功率波动的瞬时最大值达 95 kW。1 s 后，车速稳定下来，发动机输出功率又急剧降至 62 kW，如图 9 所示。

由功率变化可以看出，在铲土阶段，发动机输出的功率很大，而且功率波动也很大。这与实际中推土机在低速铲土作业时，受到较大且剧烈变化的作业阻力是相符的。在运土阶段，铲刀与土壤之间的作业阻力变化相对平缓，发动机输出功率的波动相对铲土阶段较小。

### 3.2 发动机最佳燃油曲线控制策略与原型机对比分析

将最佳燃油曲线控制的仿真结果与原型机在图 8 的典型工况下的试验结果对比。两种情况下发动机转速、转矩、功率和加速踏板位置的变化如图 13~16 所示。

由转速和加速踏板位置曲线可以看出，原型机发动机转速波动较小，加速踏板位置波动较平稳；而在最佳燃油曲线控制下，发动机转速随着目标功率的变化而变化，导致转速和加速踏板位置的波动相对于原型机较大些。同时还可以看出，原型机由于是传统机械结构，车速与发动机转速之间有固定的传动比关系，当车速较低时，发动机转速较低，当车速增加时，发动机的转速也随着增加；而电传动系统由于发动机-发电机组与驱动轮之间没有机械连接，车速的变化与发动机转速的变化不再有固定的关系，发动机转速的变化只跟其所采用的控制策略有关，从图 13 和图 14 可以明显看出，在空载行驶阶段车速上升为 3.1 km/h，原型机发动机转速为 1 800 r/min，已达到发动机的最大工作转速；而电传动系统此时发动机的转速为 1 000 r/min；但转速虽然较低，转矩却相对较大，原型机的转矩为 300 N·m，而电传动系统转矩平均为 600 N·m。

由发动机功率曲线可以看出，电传动系统发动机输出功率比原型机的大。这是由于电传动系统发动机要根据超级电容 SOC 的状态的变化决定是否提供额外功率用于给超级电容充电。

由油耗曲线可以看出，原型机的平均燃油消耗率要比最佳燃油曲线控制策略下的平均燃油消耗率

高, 两种情况下最终的燃油消耗量分别如下: 原型机 564 g, 最佳燃油曲线控制模式下为 490 g, 相对于原型机, 最佳燃油曲线控制策略下节油 13.1%。

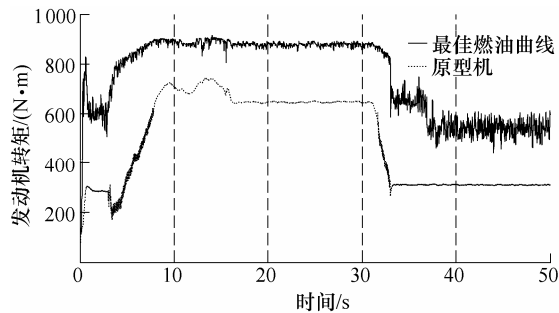


图 13 最佳燃油消耗曲线控制和原型机发动机转矩比较

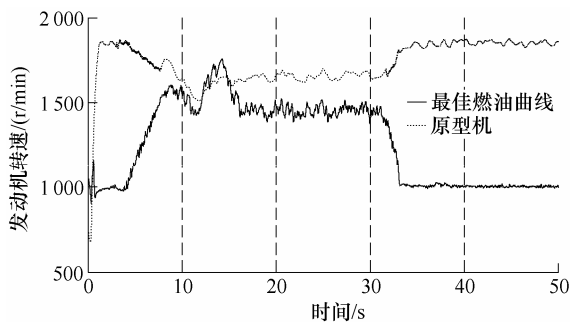


图 14 最佳燃油消耗曲线控制和原型机发动机转速比较

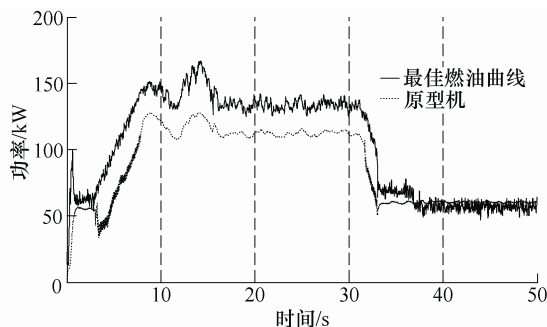


图 15 最佳燃油消耗曲线控制和原型机发动机功率比较

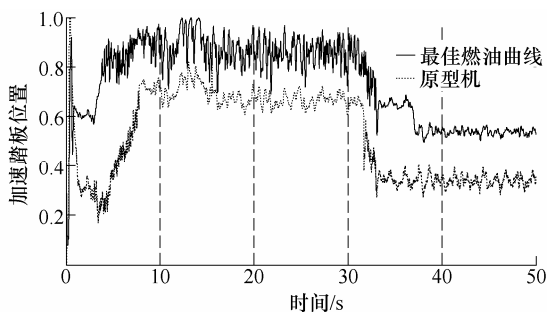


图 16 最佳燃油消耗曲线控制和原型机加速踏板位置比较

通过上述分析可以发现, 与传统机械结构的原型机相比(图 17), 电传动系统采用发动机最佳燃油曲线控制一方面可以有效地降低油耗, 另一方面可以在推土机需求功率较低而行驶速度较高时, 有效地控制发动机转速不至过高。但不足的地方是在推

土机需求功率较大且波动频繁时, 会导致发动机转速随着目标功率也频繁波动。

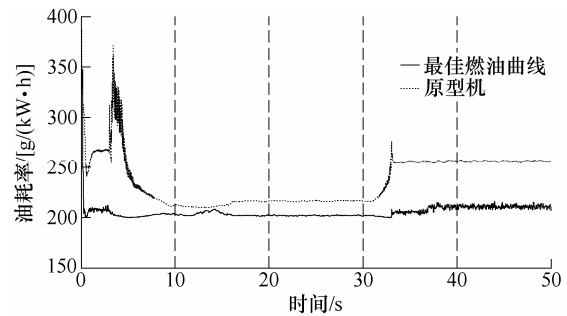


图 17 最佳燃油消耗曲线控制和原型机油耗率比较

## 4 结论

(1) 通过分析串联式混合动力推土机中发动机-发电机组及超级电容的工作特性, 并结合台架试验数据, 建立了发动机、发电机和超级电容的数学仿真模型; 提出了基于最佳燃油曲线的功率跟随控制策略, 在推土机典型作业工况下对控制策略进行仿真试验, 分析了系统的功率流动关系以及超级电容 SOC、电流和电压的变化; 最后与传统机械结构的原型机在典型工况下的试验结果进行了对比。

(2) 结果表明, 所提出的基于最佳燃油曲线的功率跟随控制策略能够有效地跟随推土机的需求功率。在典型作业工况下与原型机相比, 一方面, 电传动系统采用发动机最佳燃油曲线控制, 在推土机低功率较高速行驶时, 可有效地控制发动机转速不至过高, 但在推土机需求功率较大且波动频繁时, 发动机转速波动较频繁; 另一方面, 采用发动机最佳燃油曲线控制可以有效降低油耗, 节油率可达 13.1%。

(3) 实际推土机在发动机和发电机之间还存在一定的传动结构, 若考虑到这部分的功率扰动以及制动回馈能量对发动机油耗的影响, 控制策略有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] 胡传正, 魏彬. 电传动技术在工程机械上的应用[J]. 工程机械, 2011(8): 56-60.
- HU Chuangzheng, WEI Bin. Application of electric drive technology to the construction equipment[J]. Construction Machinery and Equipment, 2011(8): 56-60.
- [2] KWON T S, LEE S W, SUL S K, et al. Power control algorithm for hybrid excavator with supercapacitor[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2010,

- 46(4): 1447-1455.
- [3] 张艺莎, 王普琰. 混合动力工程机械关键技术探讨[J]. 工程机械文摘, 2011(4): 45-48.  
ZHANG Yisha, WANG Puyan. The key technologies of hybrid construction machinery[J]. Construction Machinery Digest, 2011(4): 45-48.
- [4] KIM S M, SL S K. Control of rubber tyred gantry crane with energy storage based on supercapacitor bank[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2006, 21(5): 1420-1427.
- [5] KAGOSHIMA M. Hybrid construction machine having auxiliary battery and control apparatus thereof: U.S. Patent 7, 279, 801[P]. 2007-10-09.
- [6] 李晓英, 于秀敏, 李君, 等. 串联混合动力汽车控制策略[J]. 吉林大学学报, 2005(2): 122-126.  
LI Xiaoying, YU Xiumin, LI Jun, et al. Control strategy for series hybrid-power vehicle[J]. Journal of Jilin University, 2005(2): 122-126.
- [7] MEHRDAD E, GAO Y, EMADI A. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, theory, and design[M]. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [8] RUI X, HONGWEN H, YI W, et al. Study on ultracapacitor-battery hybrid power system for PHEV applications[J]. High Technology Letters, 2010, 16(1): 23-28.
- [9] 中华人民共和国机械工业部. JB/T 7306-1994 履带式推土机技术条件[S]. 北京: 机械科学研究院 1995.  
The Ministry of Machinery Industry of the People's Republic of China. JB/T 7306-1994 Crawler bulldozers technical conditions[S]. Beijing: Mechanical Science Research Institute, 1995.
- [10] YOO H, SUL S K, PARK Y, et al. System integration and power-flow management for a series hybrid electric vehicle using supercapacitors and batteries[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2008, 44(1): 108-114.
- [11] ERDINC O, VURAL B, UZUNOGLU M. A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system[J]. Journal of Power Sources, 2009, 194(1): 369-380.
- [12] 宋晓鑫. 工程车辆传动系统建模与仿真[J]. 长春工业大学学报, 2008, 29(6): 680-683.  
SONG Xiaoxin. Modeling and simulation for the motion system of engineering vehicle[J]. Journal of Changchun University of Technology, 2008, 29(6): 680-683.
- [13] 黄万友, 程勇, 李闯, 等. 纯电动汽车驱动电动机系统效率模型的试验[J]. 江苏大学学报, 2012, 33(3): 259-263.  
HUANG Wanyou, CHEN Yong, LI Chuang, et al. Efficiency model test of electric vehicle driving motor system[J]. Journal of Jiangsu University, 2012, 33(3): 259-263.
- [14] 张臣, 陈杰. 车用超级电容器应用设计[J]. 电源技术, 2006, 30(9): 740-742.  
ZHANG Chen, CHEN Jie. Application design of supercapacitor used in vehicles[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2006, 30(9): 740-742.
- [15] 吴志伟, 张建龙, 殷承良. 混合动力汽车用混合能量存储系统的设计[J]. 汽车工程, 2012, 34(3): 190-196.  
WU Zhiwei, ZHANG Jianlong, YIN Chengliang. The design of hybrid energy storage system for hybrid electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(3): 190-196.
- [16] 孙尚志, 郝东辉, 孙骏. 电-电混合动力电动汽车的建模与仿真[J]. 农业装备与车辆工程, 2011(1): 11-15.  
SUN Shangzhi, HAO Donghui, SUN Jun. Modeling and simulation of hybrid electric vehicle with battery-ultracapacitor dual energy source[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2011(1): 11-15.
- [17] 黄英, 崔兆伟, 孙逢春, 等. 履带车辆电传动发动机一发电机组控制系统开发研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(1): 1-6.  
HUANG Ying, CUI Zhaowei, SUN Fengchun, et al. Research and development of engine-generator set control system for tracked vehicle electric drive system[J]. Acta Armamentaria, 2007, 28(1): 1-6.
- [18] WANG H, SONG Q, SUN Feng-Chun, et al. Parameters matching and simulation on a hybrid power system for electric bulldozer[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology, September 26-28, 2012, Shenyang: Atlantis Press, Paris, 2012: 2137-2142.
- 
- 作者简介: 宋强(通信作者), 男, 1973 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为电传动及试验测试技术。  
E-mail: songqiang@bit.edu.cn
- 曾普, 男, 1987 年出生。主要研究方向为新能源车辆与电驱动技术。  
E-mail: bit\_zengpu@163.com