

# 混合动力挖掘机能量管理系统控制策略研究<sup>\*</sup>

王辉<sup>†</sup>, 孙梅迪, 何哲文, 黄守道, 荣飞, 袁小芳

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**针对最优控制理论设计的混合动力挖掘机最佳燃油控制策略具有全局寻优计算量大、需提前预知系统所有工况状态的不足,本文提出一种实时最佳燃油能量管理策略,对发动机的“转速-功率-燃油耗率”进行数值建模,在直流母线电压稳定的约束下,计算使发动机高效运行的储能系统功率补偿量,并作为控制决策输出;随后,采用有限控制集模型预测控制实现储能系统在该控制决策下的快速功率控制.仿真验证了该方法的有效性和正确性;工程试验表明,该策略在挖掘机平地轻载、重载旋转工况下的燃油耗量分别为传统机型的82.2%和77.6%,可供实际设计参考.

**关键词:**混合动力; 能量管理; 预测控制; 最佳燃油控制

**中图分类号:** TM46

**文献标志码:** A

## Research on Control Strategy for Energy Management System of Hybrid Power Excavator

WANG Hui<sup>†</sup>, SUN Meidi, HE Zhewen, HUANG Shoudao, RONG Fei, YUAN Xiaofang

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The way of using optimal control theory to implement the optimal fuel control strategy of hybrid excavator is limited, because its computational complexity is large and the working conditions must be known in advance for global optimization. A real-time optimal fuel control strategy was proposed in this paper to solve the problem. An engine model of "speed-power-fuel consumption rate" was established. Under the constraint of DC bus voltage stability, the power compensation of the energy storage system was calculated as a control instruction, which can make the engine work efficiently. Finite control set model predictive control algorithm was proposed to follow the instruction speedily and flexibly. Through the simulation, the effectiveness of the proposed approach was demonstrated. Engineering practice results indicate that the fuel consumption is 82.2% and 77.6% of the prediction of the traditional model with flat light load and heavy load, respectively.

**Key words:** hybrid power; energy management; predictive control; optimal fuel control

混合动力挖掘机回转系统具有启、制动频繁,功率变化范围大等特点,存在发动机工作点分散,燃油效率

<sup>\*</sup> 收稿日期:2016-09-08

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(61573133), National Natural Science Foundation of China(61573133); 湖南省战略性新兴产业科技攻关项目(2012GK4080), Strategic Emerging Industry Science and Technology Project of Hunan Province(2012GK4080)

**作者简介:**王 辉(1960-),男,湖南沅江人,湖南大学教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: huang1960@163.com

低等问题<sup>[1-3]</sup>.为提高燃油效率,发动机最佳燃油控制策略(optimal fuel control strategy, OFCS)被广泛应用于混合动力挖掘机动力总成系统中<sup>[4-5]</sup>.

为实现 OFCS,文献[5]分析了发动机外特性工作点与燃油消耗的关系,并在此基础上建立了动力系统模型,以最低油耗为优化目标,在蓄电池终值状态的约束条件下进行全局优化,但计算量大,不适用于在线控制;文献[6-7]采用 Pontryagin 极值原理和 Hamilton 算子将优化目标和约束条件进行了线性简化,减少了 OFCS 的计算量;文献[8]则在同类动力系统结构上采用动态规划进行全局最优求解,在减少计算量的同时实现了与 OFCS 相似的效果.然而,文献[5-8]均将储能元件的终值状态作为约束条件,需提前获知系统未来所有工况的状态信息,只适用于固定循环工况,算法实时性差.

由于难以获知挖掘机的全局工况,部分文献在配备超级电容的能量管理策略设计中,针对储能系统的瞬时状态而非终值约束条件,采用模糊控制、神经网络等方法得到 OFCS 的控制律<sup>[9-10]</sup>,实时保证发动机的燃油耗率最少,易于工程实现<sup>[11]</sup>.但目前该类方法的不足之处在于:求解最优功率控制补偿量多基于规则,缺少一定的数值算法支撑;同时,采用 PI 线性控制实施 OFCS<sup>[11]</sup>,储能系统动态性能依赖于 PI 参数整定,难以满足挖掘机回转系统快速变化的功率需求<sup>[12]</sup>.

本文针对混合动力能量管理系统设计了上、下两层控制策略.首先针对储能系统提出一种实时最佳燃油控制策略(real-time OFCS, ROFCS),通过对发动机“转速-功率-燃油耗率”进行数值建模,在系统直流母线电压稳定的约束下,得到储能系统最佳补偿功率;采用有限控制集模型预测控制(finite control set model predictive control, FCS-MPC)实现 ROFCS,并通过引入可变权重系数调整函数兼顾了储能系统功率补偿和有效工作区间限制.该方法实现了能量管理策略与功率控制的解耦,降低了能量管理系统的复杂度.最后,根据某串联式混合动力挖掘机实验样机搭建 Matlab 仿真平台进行有效性验证,对比分析了不同工况下该策略的性能;实验验证了其可行性.

## 1 串联式混合动力挖掘机能量管理

本文研究的串联式混合动力挖掘机动力总成系统结构拓扑如图 1 所示.发动机与发电机刚性耦合

相连,经背靠背双 PWM 功率变换器实现能量转换并驱动各电机,带动回转系统和液压系统工作,其中 PWM 整流控制直流母线电压稳定, PWM 逆变控制各驱动电机转速.超级电容和双向 DC/DC 组成的储能系统并联在母线上<sup>[4]</sup>,用作瞬时功率交换与补偿;双向 DC/DC 处于 boost 模式,超级电容配合发-发电机组共同驱动负载;双向 DC/DC 处于 buck 模式,超级电容吸收能量.

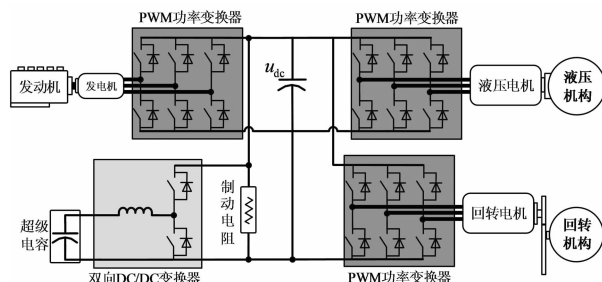


图 1 串联式混合动力挖掘机动力总成系统拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of series hybrid excavator powertrain

由图 1,不考虑各电机和变流器的功率损耗,动力总成系统功率守恒<sup>[5]</sup>:

$$P_{\text{eng}} = P_{\text{hy}} + P_{\text{sw}} + P_{\text{R}} - P_{\text{sc}} = \frac{n_{\text{eng}} \cdot T_{\text{eng}}}{9.55} \quad (1)$$

式中:  $n_{\text{eng}}$  和  $T_{\text{eng}}$  分别为发动机转速和转矩;  $P_{\text{eng}}$  为发动机功率;  $P_{\text{sc}}$  为超级电容补偿功率;  $P_{\text{hy}}$  和  $P_{\text{sw}}$  分别为液压系统驱动电机功率和回转电机功率<sup>[13]</sup>;  $P_{\text{R}}$  为制动电阻功率.在挖掘机作业中,发动机转速由驾驶员控制,转矩随负载需求而变化,即发动机的输出功率由负载功率和超级电容补偿的瞬时功率共同决定,在负载功率可测前提下,改变超级电容的补偿功率可改变发动机输出功率.

当负载功率需求较大时, PWM 整流难以控制母线电压稳定,发动机转速易跌落.加大油门阀度可以稳定当前转速,同时产生大力矩以提高输出功率,但会增加油耗,造成发动机燃油效率偏低;采用超级电容补偿这一部分瞬时大功率可以避免油门位置的频繁改变,使发动机工作点在一指定区域内保持稳定,并在减少发动机油耗和功率输出的同时,满足负载需求.同理,当负载功率需求较小时,易使发动机以高转速低功率运行,将同样影响燃油效率;此时将超级电容作为负载进行充电,可提升发动机输出功率,改善其工作点和燃油率.

为此,可通过两层控制策略提高燃油效率.上层能量管理策略用以分析发动机当前转速下,使其燃

油效率最高的输出功率点,并给出此情况下超级电容应补偿的功率;下层功率控制策略用以执行该决策,通过控制双向 DC/DC 来调控  $P_{sc}$ ,进而间接调配发动机输出功率点.控制结构框图如图 7 所示.

2 基于 ROFCS 的上层控制策略

发动机正常运行时可用转速和转矩描述其外特性工作点.对应不同的工作点,发动机的燃油消耗率也不同.在额定转速、转矩下,发动机油耗最少而做功效率最高;在此额定工作点附近一定范围内视为燃油率高效区.根据项目团队对某发动机的测试数据,其外特性-燃油消耗曲线可拟合如图 2 所示.

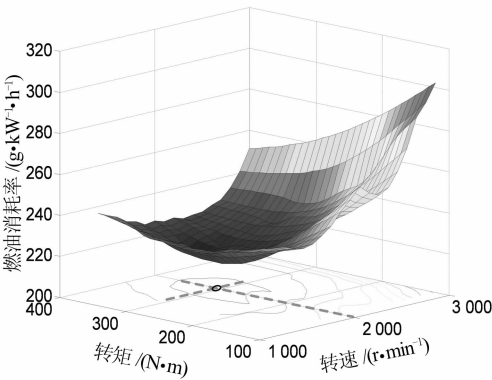


图 2 发动机燃油消耗率曲线  
Fig. 2 Curves of engine fuel consumption

由图 2 可知,发动机在不同的转速下,均能对应一个特定的最佳转矩值,使其在当前转速下油耗率最低,燃油效率最高.因此,可根据发动机万有特性曲线测试数据绘制“转速-转矩曲线”,用查表法构造出当前转速和对应最佳转矩的函数:  $T_{eng}^* = f(n_{eng})$ ,进而得到使燃油消耗率最低的对应输出功率  $P_{eng}^*$ ,如式(2):

$$P_{eng}^* = \frac{n_{eng} \cdot f(n_{eng})}{9.55} \tag{2}$$

式中:  $P_{eng}^*$  为一系列离散值的集合,考虑将其作为转速  $n_{eng}$  的连续函数来得到发动机转速区间内的完整映射,则利用 Matlab 对其进行线性拟合,得到如图 3 所示的发动机最佳转速-输出功率曲线,和对应式(3)所示的数值模型.

$$P_{eng}^* = F(n_{eng}) \tag{3}$$

由此可得 ROFCS 的基本原理:根据发动机当前转速,由式(3)得到此时的发动机最佳输出功率  $P_{eng}^*$  (最佳工作点),以此为控制目标,根据式(1)调

控  $P_{sc}$ ,使  $P_{eng}$  尽可能接近于  $P_{eng}^*$ ,从而使发动机工作点处于高效区.

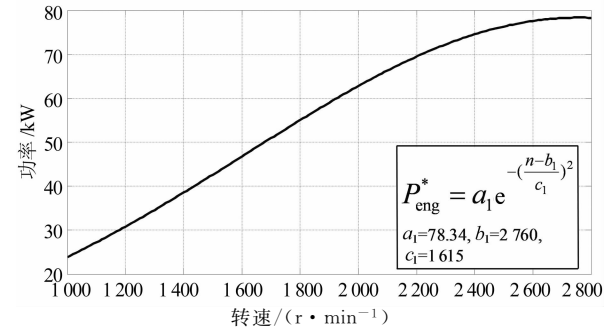


图 3 最佳转速-输出功率曲线  
Fig. 3 Optimal speed-power curve

在配置超级电容储能系统的混合动力系统中,超级电容的终值状态可以不用考虑<sup>[9-11]</sup>,但由于动力系统中电能的交换均存在于直流母线上,因此在对超级电容进行功率补偿的控制时,需保证直流母线电压稳定,防止电压泵升或跌落;同时还需考虑超级电容瞬时充放电的功率范围.综上,ROFCS 的控制目标可设为:

$$\begin{aligned} \min J &= (P_{eng}^* - P_{eng})^2 \\ \text{s. t. } u_{dc} &= u_{dco} \\ P_{min} &\leq P_{sc} \leq P_{max} \end{aligned} \tag{4}$$

式中:  $u_{dco}$  为系统带载运动前整流控制的母线电压恒定值,  $u_{dc}$  为系统带载运动后母线电压.定义:  $P_{sc} > 0$  时,超级电容释能;  $P_{sc} < 0$  时,超级电容储能.目标函数  $J$  采用二次函数处理调节后发动机输出功率与最佳工作点之间的正负偏差.

由功率守恒,联立式(1)和式(3),可得目标函数:

$$J = (F(n_{eng}) - P_{load} + P_{sc})^2 \tag{5}$$

式中:  $P_{load} = P_{hy} + P_{sw} + P_R$ . 令  $P_{sc}$  为控制量,式(5)表明,可利用超级电容的瞬时功率来补偿发动机在当前转速下输出功率与最佳工作点之间的差量.

进一步,在超级电容瞬时输出功率  $P_{sc}$  的允许范围内,考虑系统母线电压稳定的约束条件,忽略损耗,系统带载运动前后,直流母线电容吸收能量  $E_c$  的方程式为<sup>[14]</sup>:

$$E_c = \frac{1}{2} C_{dc} (u_{dc}^2 - u_{dco}^2) = \int [P_{eng}(t) + P_{sc}(t) - P_{load}(t)] dt \tag{6}$$

式中:  $C_{dc}$  为直流母线电容.由式(6)可得出与式(4)中  $u_{dc} = u_{dco}$  等效的约束条件:

$$P_{eng} + P_{sc} - P_{load} = 0 \tag{7}$$

即任一瞬间,发动机的输出功率与超级电容的补偿功率应与负载功率匹配相等。联立式(4)、式(5)和式(7),可得到 ROFCS 下,超级电容储能系统补偿功率的给定值:

$$P_{sc}^* = \begin{cases} P_{load} - P_{eng}^* & P_{min} \leq P_{load} - P_{eng}^* \leq P_{max} \\ P_{min} & P_{min} \geq P_{load} - P_{eng}^* \\ P_{max} & P_{max} \leq P_{load} - P_{eng}^* \end{cases} \quad (8)$$

式(8)表示在超级电容储能系统允许工作区间内,且母线电压稳定的前提下,存在能使发动机工作点( $n_{eng}$ ,  $P_{eng}$ )位于最佳转速-输出功率曲线上的最优解  $P_{sc}^*$ ;而在储能系统补偿能力之外,  $P_{sc}^*$  会因为功率补偿受限而使得发动机输出功率偏离最佳曲线( $P_{eng} = P_{load} - P_{min|max} \neq P_{eng}^*$ ),进而导致燃油性能变差。

### 3 基于 FCS-MPC 的下层控制策略

储能系统功率控制策略,用以实施 ROFCS 制定的控制决策。然而,储能系统的功率控制并不能仅以式(8)给出的给定值作为控制目标,还应考虑超级电容充放电深度和双向 DC/DC 载流能力的约束。这些阶段性和非线性约束不易于在 ROFCS 中表征,故需在功率控制策略中进行控制。

传统 PI 控制结构固定,不利于实施储能系统的快速功率控制和提及的多目标约束。FCS-MPC 具有更快的动态响应和更灵活的设计方法,更易实现储能系统的功率控制和多目标约束<sup>[15-16]</sup>。

#### 3.1 FCS-MPC 预测模型

图4为储能系统电路拓扑,包括超级电容和双向 DC/DC 功率变换器。超级电容组等效为理想电容器  $C_{sc}$  串联等效内阻  $R_{est}$  的 RC 电路<sup>[12]</sup>。双向 DC/DC 在 boost 模式,储能系统释能;在 buck 模式,储能系统储能。

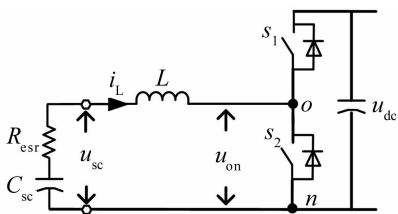


图4 超级电容储能系统电路拓扑

Fig. 4 Topology of energy storage system

储能系统稳定、连续状态工作时,忽略超级电容

器内阻,其数学模型可表示为

$$\begin{cases} u_{sc} = L \frac{di_L}{dt} + u_{on} \\ i_L = C_{sc} \frac{du_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $L$  为双向 DC/DC 电感;  $i_L$  为电感电流;  $u_{sc}$  为超级电容器端口电压;  $u_{on}$  由电路本身和可控管控制状态决定

$$u_{on} = s_1(1 - s_2) \cdot u_{dc} + (1 - s_1)(1 - s_2) \cdot \min(u_{sc}, u_{dc}) \quad (10)$$

式中:可控管开关状态  $s_{1,2} \in \{1, 0\}$ 。单级双向 DC/DC 共有  $2^2 = 4$  种开关状态,但为保证可控管安全,工程中禁止同一桥臂上下管同时导通直联的情况,即  $s_{1,2} \neq (1, 1)$ ,故有效开关状态为 3。

采用前向欧拉逼近将式(9)离散化,可得储能系统离散化数学模型

$$\begin{cases} i_L(k+1)^p = \frac{T_s}{L} \cdot (u_{sc}(k) - u_{on}(k)) + i_L(k) \\ u_{sc}(k+1)^p = \frac{T_s}{C_{sc}} \cdot i_L(k) + u_{sc}(k) \\ P_{sc}(k+1)^p = u_{sc}(k+1)^p \cdot i_L(k+1)^p \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $T_s$  为系统采样周期。根据前文定义,图4电流方向为正时  $P_{sc} > 0$ ; 电流反向时  $P_{sc} < 0$ 。

#### 3.2 FCS-MPC 代价函数

由于超级电容补偿的瞬时功率由  $u_{sc}$  与  $i_L$  决定,当 ROFCS 的功率给定值  $P_{sc}^*$  大于超级电容器电压和电感电流允许的最大额度时,需要通过功率控制进一步限制其功率补偿。该策略会使发动机工作点偏离 ROFCS 最优值,但有利于储能系统的长期运行和回报。因此代价函数不仅要包含最佳功率跟随项,还需包含电压限制和电流限幅。FCS-MPC 中可通过单个代价函数包含多个控制变量与约束条件实现不同功能的控制。

1) 为满足 ROFCS,使  $P_{sc}$  跟随  $P_{sc}^*$ ,代价函数第一项为  $(P_{sc}^* - P_{sc}(k+1)^p)^2$ 。

2) 超级电容的储能状态可用其端电压  $u_{sc}$  来代替电荷状态进行描述<sup>[12]</sup>。设超级电容允许工作区间为  $u_{sc} \in (u_{min}, u_{max})$ ,当  $u_{sc}$  等于极限值,储能系统应停止功率补偿并保持  $u_{sc} = u_{min, max}$ ,避免超级电容因过度充、放电而加速设备损耗。结合电容充放电方程  $i_L = -C_{sc} du_{sc}/dt$ ,当保持  $u_{sc}$  于某一值不变,相应的电流  $i_L$  为 0,故此时储能系统的功率补偿为 0。因此,为保证超级电容端电压不超过所允许的区间,代价函数第二、三项为  $(u_{max} - u_{sc})^2$  和  $(u_{min} - u_{sc})^2$ 。

3) 储能系统的载流能力取决于双向 DC/DC 变换器允许通过的最大电流  $i_1$  以及超级电容允许最大

电流  $i_2$ , 令  $i_{L,max} = \min(i_1, i_2)$ . 在补偿同等大小的瞬时功率时, 超级电容端电压  $u_{sc}$  越小, 对通过的电流  $i_L$  要求越高; 当超级电容电压过低而需要补偿功率 ( $P_{sc}^*$ ) 较大时, 储能系统将作大电流运行,  $i_L$  易达到  $i_{L,max}$ , 造成过流故障. 为实现对电流  $i_L$  的快速限制, 可加入非线性函数  $f$ : 当  $i_L < i_{L,max}$  时,  $f=0$ , 当前所选开关控制量有效, 对应的预测值可用以评估;  $i_L > i_{L,max}$  时,  $f$  为无穷大, 所选开关控制量被舍弃.

$$f = \begin{cases} 0, & i_L(k+1) \in [-i_{L,max}, i_{L,max}] \\ \infty, & i_L(k+1) \in (-\infty, -i_{L,max}) \cup (i_{L,max}, \infty) \end{cases}$$

(12)

综上, 可得 FCS-MPC 的代价函数.

$$g = w_1 k_1 (P_{sc}^* - P_{sc}(k+1))^p + w_2 k_2 (u_{max} - u_{sc}(k+1))^p + w_3 k_3 (u_{min} - u_{sc}(k+1))^p + f$$

(13)

式中:  $k_1 \sim k_3$  为标么化系数,  $w_1 \sim w_3$  为可变权值系数, 用于调整代价函数中的评估目标, 进而改变 ROFCS 不同的控制对象.

三个可变权值系数的设计原则为: 当超级电容端电压  $u_{sc}$  等于  $(u_{min} + u_{max})/2$  时,  $w_1 = 1$  而  $w_{2,3} = 0$ , 式(13)中第一项为评估主导项, 储能系统作功率补偿跟随; 当超级电容端电压较高时,  $w_2$  大于  $w_1$ 、 $w_3$ , 式(13)中第二项为主导项, 限制超级电容最大充电电压, 第一项则变为次要项;  $w_3$  同理. 由此, 上述  $w_1$ ,  $w_2$  和  $w_3$  的设计方法可表示为:

$$w_1 = 4 \cdot \frac{-u_{sc}^2 + (u_{max} + u_{min}) \cdot u_{sc} - u_{max} u_{min}}{(u_{max} - u_{min})^2}$$

(14)

$$w_2 = \begin{cases} 0, & u_{sc} \in \left[ u_{min}, \frac{u_{min} + u_{max}}{2} \right] \\ 1 - w_1, & u_{sc} \in \left[ \frac{u_{min} + u_{max}}{2}, u_{max} \right] \end{cases}$$

(15)

$$w_3 = \begin{cases} 1 - w_1, & u_{sc} \in \left[ u_{min}, \frac{u_{min} + u_{max}}{2} \right] \\ 0, & u_{sc} \in \left[ \frac{u_{min} + u_{max}}{2}, u_{max} \right] \end{cases}$$

(16)

三个权重函数图像如图 5 所示. 采用该设计方法可将多控制目标进行分段, 有利于算法的灵活性; 而二阶函数能在满足当前控制器计算能力的同时, 保证一定的算法精度.

3.3 制动电阻控制策略

电机制动时会回馈大量电能至母线, ROFCS 会使得发动机和电机同时给超级电容充电, 储能系统受自身吸纳能力限制无法将其全部吸收, 为保证母线电压不泵升, 需由制动电阻将过盛电能进行卸荷.

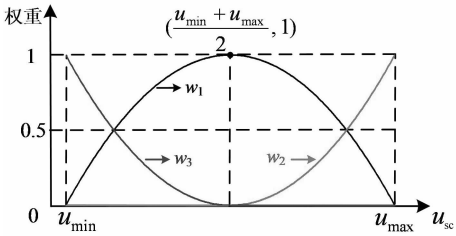


图 5 权重调整函数  
Fig. 5 Weighting adjusting functions

制动电阻可采用简单的逻辑门限规则控制: 当母线电压上升至设定的阈值电压  $U_{thr}$  时, 开启制动电阻, 因此式(1)中  $P_R$  由下式决定:

$$P_R = \begin{cases} 0, & u_{dc} \leq U_{thr} \\ u_{dc}^2/R, & u_{dc} > U_{thr} \end{cases}$$

(17)

3.4 FCS-MPC 算法实施

求解式(13)的 FCS-MPC 目标函数, 可令系统在  $t_k$  时刻进行数据采样, 并进行母线电压过压保护判定, 判断是否启用制动电阻; 通过 ROFCS 上层能量管理策略, 得到储能系统最佳补偿功率值; 再利用式(7)离散模型依次对  $u_{on}(k)$  的 3 种有效开关状态进行遍历计算, 得到 3 组  $t_{k+1}$  时刻储能系统的电压、电流和功率预测值<sup>[15-16]</sup>; 通过代价函数对 3 组预测值进行在线评估, 选取使代价函数最小的开关状态为  $t_{k+1}$  时刻的系统控制量, 实现对给定值的快速跟随.

综上, 基于 FCS-MPC 的 ROFCS 两层控制动态求解流程图如图 6 所示, 对应控制框图如图 7 所示.

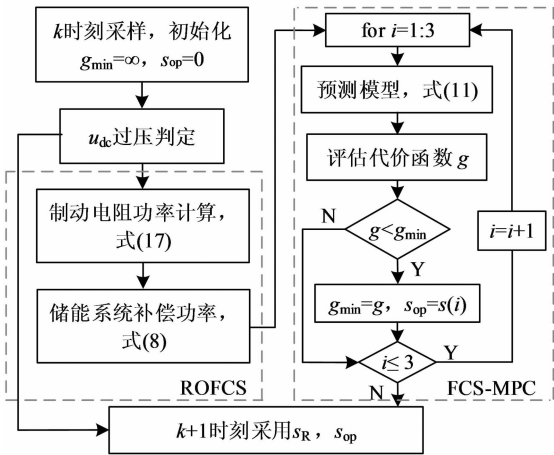


图 6 两层控制动态流程图  
Fig. 6 Dynamic flowchart of two-level control scheme

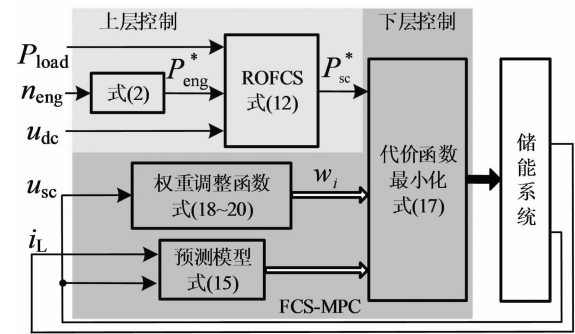


图 7 能量管理系统两层控制结构  
Fig. 7 Two-level control structure  
of energy management system

4 仿真分析与工程试验

4.1 仿真分析

本文以某 21t 串联式混合动力挖掘机实验样机平地回转为例,基于 Simulink 平台搭建仿真,验证方法可行性。仿真模型中,回转电机给定转速为  $2\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ;超级电容容值为  $0.3\text{ F}$ ,最大电压  $400\text{ V}$ ;双向 DC/DC 电感  $0.3\text{ mH}$ ,最大电流  $150\text{ A}$ ;代价函数  $k_1\sim k_3$  分别设为  $0.001,1$  和  $1$ 。表 1 为模拟工况,回转电机与液压电机均为表贴式 PMSM。仿真分析前提:1)不考虑各项损耗;2)液压系统在回转过程负载不变;3)限于篇幅,本文仅将发动机控制于额定工作点: $n_{\text{eng}}^*=2\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $P_{\text{eng}}^*=65\text{ kW}$ ;4)取  $u_{\min}=100, u_{\max}=300, U_{\text{thr}}=600$ 。

表 1 仿真模拟工况  
Tab. 1 Simulated conditions

|      |      |                 |
|------|------|-----------------|
| 负载转矩 | 液压电机 | 96 N·m (20 kW)  |
| (轻载) | 回转电机 | 263 N·m (55 kW) |
| 负载转矩 | 液压电机 | 144 N·m (30 kW) |
| (重载) | 回转电机 | 311 N·m (65 kW) |
| 负载转矩 | 液压电机 | 191 N·m (40 kW) |
| (过载) | 回转电机 | 360 N·m (75 kW) |

图 8 为:重载,  $u_{\text{sc}}$  初始值为  $272\text{ V}$ ,  $u_{\text{sc}}$  在控制过程中达到  $u_{\text{max}}$  的工况。

由式(8)可知,轻载时 ROFCS 输出负  $P_{\text{sc}}^*$ , 下层 FCS-MPC 控制储能系统跟随该给定,  $P_{\text{sc}}$  为负, 超级电容吸收功率,  $u_{\text{sc}}$  充电升高, 导致  $w_2 > w_1$ , FCS-MPC 限制超级电容储能;随着电机负载需求增大,  $P_{\text{sc}}$  转为释能,  $i_{\text{L}}$  反向后  $u_{\text{sc}}$  放电下降, 评估目标向  $w_1$  转移;当转速达到额定值, 电机功率回落, 为补

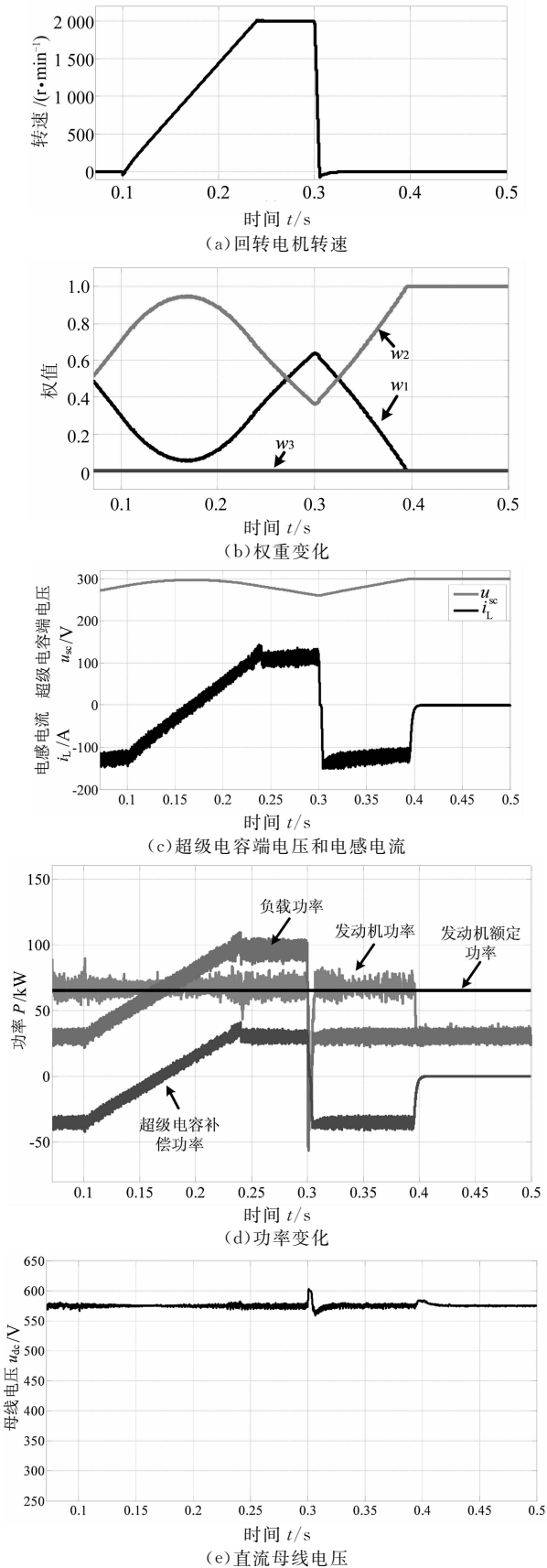


图 8 重载, 初始  $u_{\text{sc}}=272\text{ V}$  工况下控制效果  
Fig. 8 Control effects at heavy load,  
initial  $u_{\text{sc}}=272\text{ V}$

偿  $P_{eng}^*$ ,  $P_{sc}$  再次储能, 直至  $u_{sc} = u_{max}$ , 充电限制成为完全主导项,  $i_L$  降为 0, 超级电容不参与调节, 发动机偏离最佳点以平衡负载。

回转全过程, 由于功率匹配良好, 直流母线上冗余功率较少, 直流母线电压基本保持稳定。

图 9 为: 过载,  $u_{sc}$  初始值 138 V,  $i_L$  在控制过程中达到  $i_{L,max}$ ,  $u_{sc}$  达到  $u_{min}$  的工况。超级电容电压  $u_{sc}$  较低时, 需要更大的电感电流  $i_L$  进行功率补偿, 导致  $i_L$  易达到最大值, 此时代价函数将舍弃对应的开关控制量,  $i_L$  被限制。同时因为负载过大, 为尽可能保持发动机在高效区, 超级电容以最大  $i_L$  放电补偿,  $u_{sc}$  持续下降直至  $u_{min}$ 。当  $u_{sc} = u_{min}$  (图中为 0.28 s 左右), FCS-MPC 通过减小  $i_L$  来限制功率输出, 代

价函数放弃功率补偿。可以看到, 由于  $i_L$  和  $u_{sc}$  受限制, FCS-MPC 无法再控制超级电容作深入补偿, 且瞬时补偿功率降为 0; 此时发动机离开额定最优点以平衡负载, 输出功率基本等于负载消耗功率。该过程一直持续至 0.3 s 电机制动。在制动电阻的协同卸荷下, 直流母线电压在全程保持稳定。

图 8 和图 9 验证了在三种极端工况下 FCS-MPC 实施代价函数中功率补偿、电压限制、电流限幅的有效性。事实上, 以上三种工况亦能反映: 超级电容储能状态越好, ROFCS 的优化效果越明显; 反之, 当超级电容储能过高或过低, ROFCS 与 FCS-MPC 能够调控的功率补偿阈值越少。

图 10 为初始  $u_{sc}$  充足 ( $u_{sc} = 200$  V) 工况下, 模拟

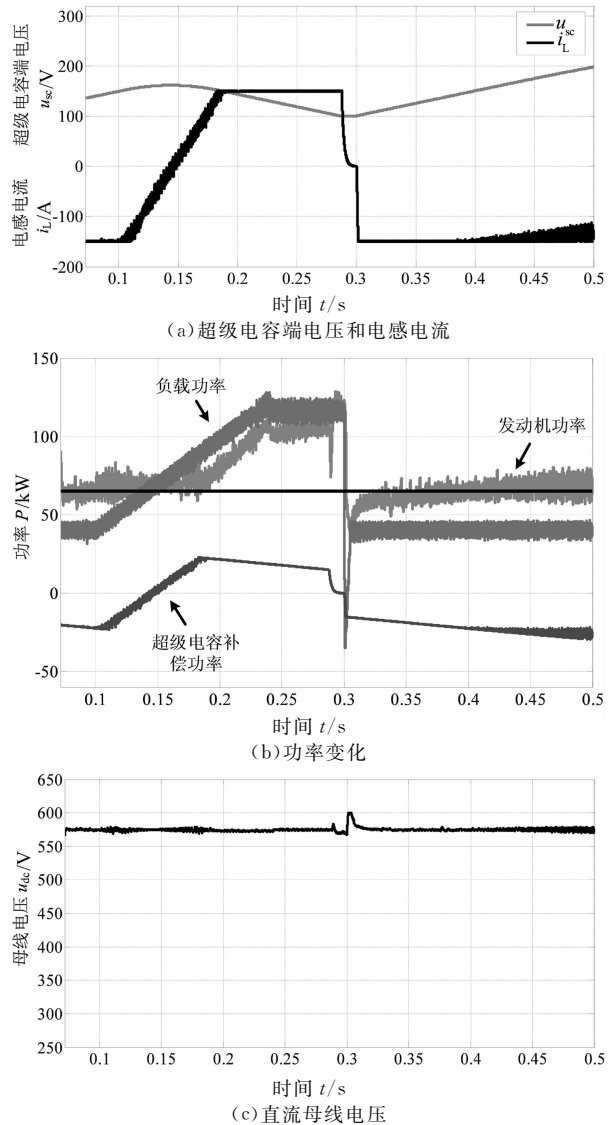


图 9 过载, 初始  $u_{sc} = 138$  V 工况下控制效果  
Fig. 9 Control effects at overload, initial  $u_{sc} = 138$  V

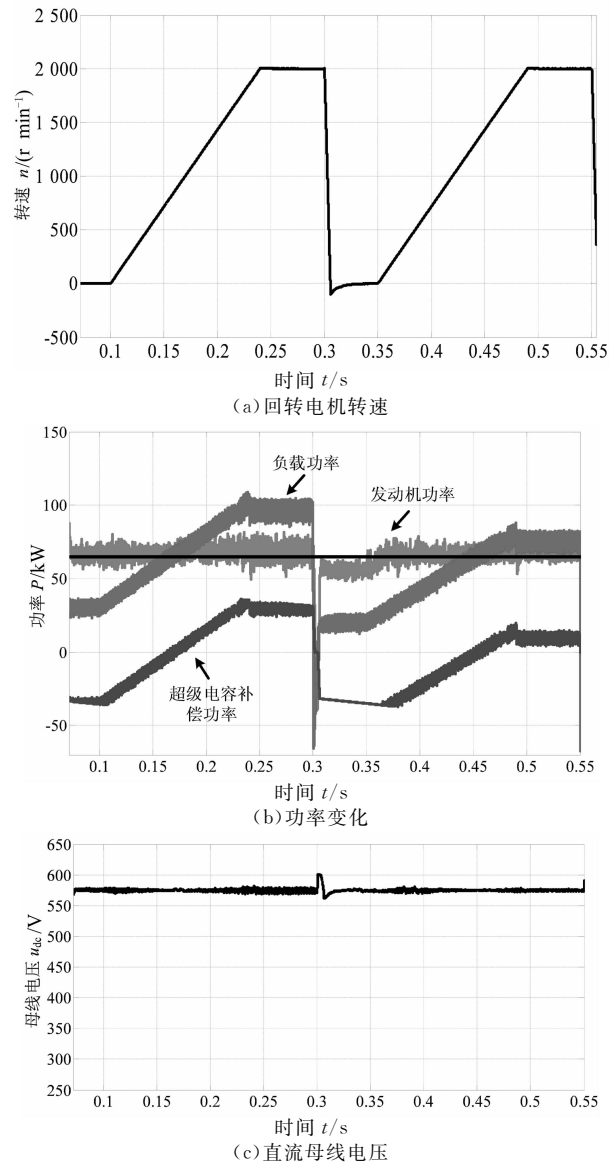


图 10 轻载, 初始  $u_{sc} = 200$  V 工况下控制效果  
Fig. 10 Control effects at light load, initial  $u_{sc} = 200$  V

挖掘机连续两次回转动作的功率状态. 0.1 s~0.3 s 重载旋转, 模拟挖掘机负荷土方工作; 0.3 s~0.35 s 旋转完毕并卸载土方, 负载减小; 0.35 s~0.5 s 轻载回旋, 模拟挖掘机旋转至新工作点. 可以看到, 在超级电容状态良好, 负载要求不高的情况下, 储能系统的能量管理性能较好,  $P_{\text{eng}}$  可保持在最佳值附近; 而在回转全过程, 母线电压也基本保持稳定.

4.2 工程试验

为进一步验证本文所述方法的有效性, 将上、下层控制策略和算法应用于该实验样机中, 采用 480V·10F 超级电容器组, 其余参数均与前文一致. 采用 TMS320F28335 DSP 作为控制器. 工程测试以挖掘机平地轻载回转 180°为标准, 实验数据经控制板蓝牙模块输出至 PC 记录, 并用 Matlab 画出, 如图 11 所示.

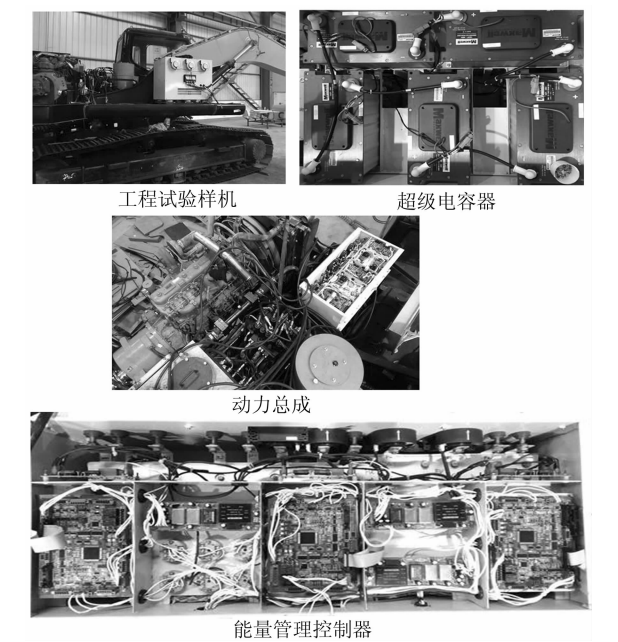


图 11 工程试验样机(不含覆盖件)  
Fig. 11 Experimental prototype (No cover)

图 12 为采用本文所述方法的混合动力挖掘机和未采用任何控制策略的传统液压型挖掘机, 分别在轻载和重载工况下平地 180°旋转 150 次的耗油情况. 结果显示混合动力挖掘机的耗油量分别为传统挖掘机的 82.2% 和 77.6%, 表明该方法可用于工程实际且能改善挖掘机的燃油经济性.

图 13 为采用本文研究策略, 混合动力挖掘机在超级电容储能状态不同时, 发动机-发电机组的工作点分布, 以及输出功率波形. 图 13(a) 为超级电容端电压初始值为  $u_{\text{sc}} = 160 \text{ V}$  时启动回转运动的发动机工作点分布, 样本为采样记录(采样时间 1 000 s)

中随机选取的若干点. 图中曲线为某 65 kW 发动机万有特性曲线. 从发动机的工作点分布可以看出, 基于 FCS-MPC 的 ROFCS 有效, 发动机能运行在高效区, 但受限于超级电容储能状态有限, 其功率补偿能力也有一定限制, 发动机的工作点较为分散. 图 13(b) 为超级电容初值  $u_{\text{sc}} = 210 \text{ V}$  时开始旋转, 由于超级电容初始储能状态良好, 控制补偿效果优于前者, 发动机工作点也更为密集.

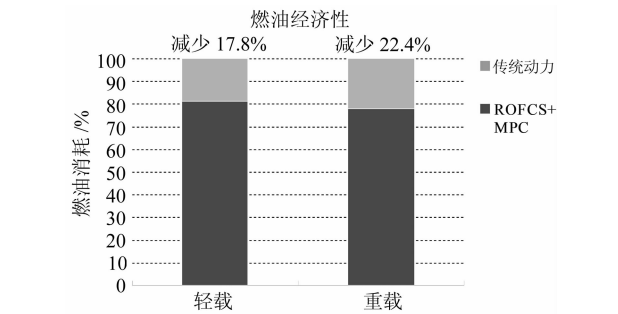


图 12 燃油消耗对比  
Fig. 12 Comparison of fuel consumption

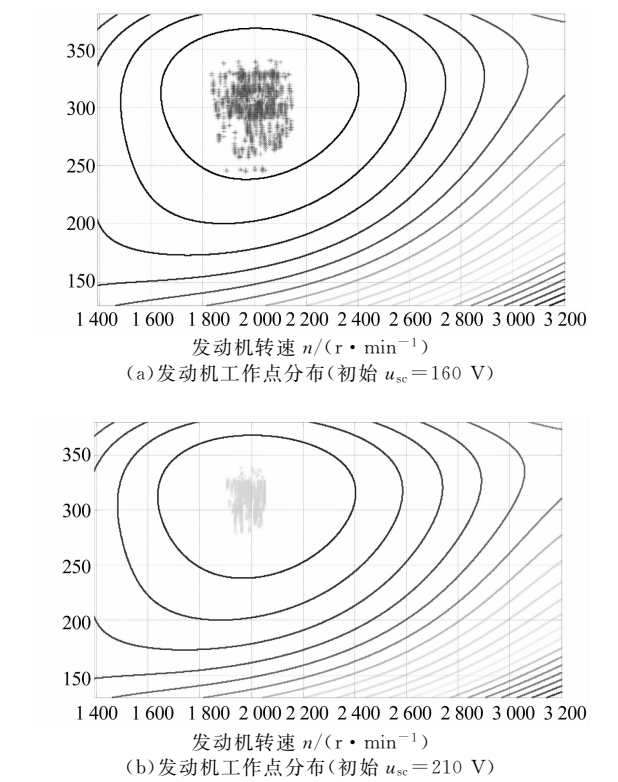


图 13 ROFCS 及 FCS-MPC 控制下  
发动机工作点分布  
Fig. 13 Operating points map under  
ROFCS and FCS-MPC

图 14 为以上超级电容两种储能状态下的发动机-发电机组输出功率波形, 采样周期 1 s, 采样总时间为 1 000 s. 可以看到, 发动机输出功率基本被稳定在最佳工作点附近, 两者的波动情况与前面分析

相符合. 波形中稳态误差产生的原因有可能是实际发动机-发电机组的内部损耗所致; 波形的毛刺有可能为: 采样电路的电磁干扰, 机身突然抖动和驾驶员操作方式的随机性.

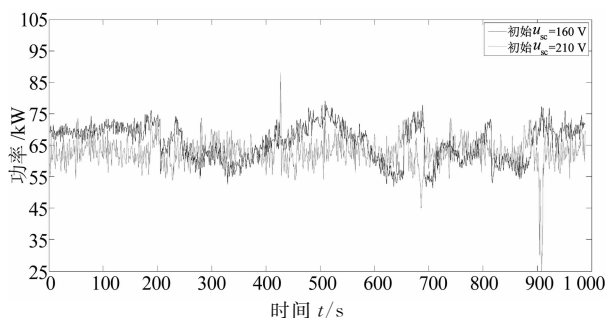


图 14 ROFCS 及 FCS-MPC 控制下发动机输出功率  
Fig. 14 Engine power under ROFCS and FCS-MPC

## 5 结 论

本文针对混合动力挖掘机超级电容储能系统进行能量管理策略和功率控制策略设计, 在能量管理策略中建立发动机“转速-最佳输出功率”数值模型, 在母线电压稳定约束下, 求解储能系统的功率补偿最优值. 在功率控制策略中采用 FCS-MPC 实施储能系统的功率控制, 使其可根据超级电容储能状态选择当前控制目标. 通过对比, 得出以下结论:

1) 基于发动机“转速-最佳输出功率”数值模型的 ROFCS, 可根据当前发动机转速和系统负载需求, 输出使发动机燃油耗率最低的储能系统功率补偿量, 无需获知其他工况信息.

2) 具有可变权值系数的 FCS-MPC 能够控制超级电容储能系统快速跟随 ROFCS 输出的功率补偿给定值, 并且可根据超级电容储能状态自动调节控制目标, 使其能在超级电容达到电压阈值或双向 DC/DC 达到电流最大值时进行功率补偿限制, 有利于系统的安全与长期运行.

## 参考文献

- [1] 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 Q F. Research on key technology of oil-electric hybrid excavator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 123—129. (In Chinese)
- [2] LIU G, DUAN S X, SONG D. Research on braking energy regeneration of slewing mechanism in hybrid excavator [C]// Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. 2011: 6020—6023.
- [3] PISU P, RIZZONI G. A comparative study of supervisory control strategies for hybrid electric vehicle[J]. IEEE Trans on Control System Technology, 2007, 15(3): 506—518.
- [4] KWON T S, LEE S W, SUL S K. Power control algorithm

- for hybrid excavator with supercapacitor[J]. IEEE Trans Industry Applications, 2010, 46(4): 1447—1455.
- [5] XIAO Y, GUAN C, LI P Y, *et al.* Optimal design of a compound hybrid system consisting of torque coupling and energy regeneration for hydraulic hybrid excavator[C]//IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2015: 1525—1530.
- [6] KIM N, CHA S W, PENG H. Optimal equivalent fuel consumption for hybrid electric vehicles[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2012, 20(3): 817—825.
- [7] KIM N, CHA S W, PENG H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2011, 19(5): 1279—1287.
- [8] BILBAO E, BARRADE P, ETXEBERRIA-OTADUI I, *et al.* Optimal energy management strategy of an improved elevator with energy storage capacitor based on dynamic programming [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2014, 50(2): 1233—1244.
- [9] WANG D Y, LIN X, ZHANG Y. Fuzzy logic control for a parallel hybrid hydraulic excavator using genetic algorithm[J]. Automation in Construction, 2011, 20(5): 581—587.
- [10] ATES Y, ERDINC O, UZUNOGLU M, *et al.* Energy management of an FC/UC hybrid vehicular power system using a combined neural network-wavelet transform based strategy [J]. Int J Hydngen Energy, 2010, 35(2): 774—783.
- [11] LEE J H, LEE S H, SUL S K. Variable speed engine generator with supercapacitor: isolated power generation system and fuel efficiency [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2009, 45(6): 2130—2135.
- [12] GRBOVIC P J, DELARUE P, MOIGNE P L, *et al.* Modeling and control of the ultracapacitor-based regenerative controlled electric drives[J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2011, 58(8): 3471—3484.
- [13] 郑泽东, 李永东. 永磁同步电机负载转矩观测器[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 30—36.  
ZHENG Z D, LI Y D. Load torque observer of permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 30—36. (In Chinese)
- [14] 肖磊, 黄守道, 黄科元. 不对称电网故障下直驱永磁风力发电系统直流母线电压稳定控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 123—129.
- XIAO L, HUANG S D, HUANG K Y. DC Voltage stability of directly-driven wind turbine with PM synchronous generator during the asymmetrical faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 123—129. (In Chinese)
- [15] RODRIGUEZ J, KAZMIERKOWSKI M P, ESPINOZA J R, *et al.* State of the art of finite control set model predictive control in power electronics[J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 1003—1016.
- [16] 沈坤, 章兢. 一种多步预测的变流器有限控制集模型预测控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 37—44.  
SHEN K, ZHANG J. A model predictive control scheme of multi-step prediction finite control set for converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 37—44. (In Chinese)