



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107140168 B

(45)授权公告日 2019.03.19

(21)申请号 201710284023.3

(56)对比文件

(22)申请日 2017.04.26

CN 105584614 A, 2016.05.18,

(65)同一申请的已公布的文献号

CN 104820746 A, 2015.08.05,

申请公布号 CN 107140168 A

KR 101290290 B1, 2013.07.26,

(43)申请公布日 2017.09.08

CN 202586500 U, 2012.12.05,

(73)专利权人 武汉理工大学

审查员 罗露

地址 430070 湖北省武汉市洪山区珞狮路  
122号

(72)发明人 袁裕鹏 张洁楠 刘翰林 陈丁宁

(74)专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务  
所(特殊普通合伙) 42222

代理人 鲁力

(51)Int.Cl.

B63H 21/20(2006.01)

G05B 13/04(2006.01)

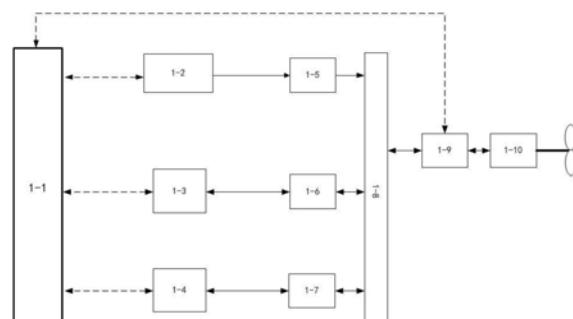
权利要求书4页 说明书7页 附图4页

(54)发明名称

一种基于小波-模糊逻辑的混合动力船舶能  
量管理系统及控制方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于小波-模糊逻辑的混合  
动力船舶能量管理系统及控制方法,本能量管理  
控制方法的核心为小波-模糊逻辑算法,利用传  
感器获取船舶的当前功率需求、蓄电池的荷电状  
态、超级电容的荷电状态等参数后,采用小波变  
换的方法将功率需求分解成高、中和低三个不同  
频率段的功率:其中将低频段作为燃料电池初步  
的输出参考功率、中频段作为蓄电池初步的参考  
功率需求、高频段作为超级电容初步的参考功率  
需求;本发明全面协调系统不同能源之间的功率  
流,即船舶的电力需求应按FC、蓄电池和超级电  
容的动态特性进行合理的分配,促进系统的整体  
性能、提高燃料的经济性。



1. 一种基于小波-模糊逻辑的混合动力船舶能量管理系统,其特征在于,包括能源系统能量管理系统采集装置;其中,

所述能源系统包括

燃料电池模块:船舶主电源,燃料电池输出的电能通过单向DC/DC中电压控制单元变压后给直流母线供电,同时通过双向DC/DC给锂电池和超级电容进行充电;

蓄电池模块:船舶备用和启动电源,为燃料电池正常启动提供所需装置提供能量;在紧急情况时由锂离子电池作为应急电源,承担全船紧急供电需求,从而增强混合动力系统的可靠性;

超级电容模块,船舶补偿电源,承担动力系统中高频变化的功率需求,并当动力系统功率需求大且频率快时,承担峰值电流输出,起到削峰填谷的作用,使燃料电池平缓的提供能量;

能量管理系统采集装置包括:

采集控制模块:采集燃料电池的输出电压、电流,锂电池的输出电压、电流、荷电状态,超级电容的电压、荷电状态及直流母线的电压、电流,并将采集到的数据进行转发、存储,并得到的船舶总的功率需求;为能量管理系统的智能算法的运算、处理提供数据支持,同时这些数据也会实时传送到船舶控制台的相关界面上,供控制台工作人员了解船舶运行情况;

小波转换模块:根据采集控制模块采集的数据得到的船舶总的功率需求,通过小波变换将得到高、中、低三个不同频率段的功率需求,根据混合动力系统特性,低频分量对应的功率为燃料电池的参考输入功率,中频分量对应的功率则为蓄电池的参考输入功率,高频分量对应的功率为超级电容的参考输入功率,得到三个输出量:燃料电池参考功率需求、蓄电池参考功率需求、超级电容参考功率需求;

模糊逻辑控制模块:将总的功率需求、蓄电池的荷电状态、超级电容的荷电状态作为输入量送入模糊控制器,经过模糊化,模糊推理,解模糊得到准确输入量,得到模糊规则;

工作模式制定:船舶正常航行时,按船舶当前功率需求分为三种工作模式,分别是

工作模式一:燃料电池作为主力源,超级电容及蓄电池作为被充电元件;

工作模式二:燃料电池做主力源,所述超级电容及蓄电池中其一作为辅助动力源;

工作模式三:燃料电池、蓄电池超级电容共同作为动力源。

2. 根据权利要求1所述的一种基于小波-模糊逻辑的混合动力船舶能量管理系统,其特征在于:所述采集控制模块包括电压传感器、直流电流传感器、霍尔传感器、CAN总线、PLC控制器、模糊逻辑控制器,采集控制步骤包括:

PLC控制器及相应传感器:所述PLC控制器和相应传感器构成数据采集系统对船舶运行状态和电源供电系统状态相关数据进行采集并送至上位机,所述传感器包括电压传感器、直流电流传感器、霍尔传感器;

上位机以及下位机:上位机接收PLC控制器采集的数据,下位机通过UART串口将电机主轴转速、GPS传感器信号、燃料电池、蓄电池、超级电容及母线上电压电流、供给功率及电池剩余电量数据发送至工控机;

工控机:接收下位机发送的数据并将数据解压整理,提取出驱动电机主轴转速和相关电参数,连同GPS模块采集的船舶航行数据送至模糊逻辑控制器;

模糊逻辑控制器:利用模糊逻辑控制算法对数据进行运算,制定控制策略与控制命令

发送至PLC控制器,由PLC控制各个动力源的工作状态和功率输出值。

3.一种基于小波-模糊逻辑的混合动力船舶能量管理控制方法,其特征在于,包括:

步骤1,获得三种能量源初步参考功率需求,通过小波变换将船舶所需实时功率分解为高、中、低三种不同频段的功率分别对应超级电容、蓄电池和燃料电池三种能量源;具体是采用Haar小波基,基于公式:

$$\begin{cases} 1 & t \in \left[0, \frac{1}{2}\right] \\ -1 & t \in \left[\frac{1}{2}, 1\right] \\ 0 & others \end{cases}$$

将采集控制模块所得到船舶总的功率需求P<sub>1</sub>,通过小波变换被分解为高频和低频功率信号,再将低频功率信号依次由高通滤波器和低通滤波器分解;经过二次分解后,需求功率被分解为高频信号x<sub>1</sub>、x<sub>2</sub>、x<sub>3</sub>及低频信号x<sub>0</sub>;根据混合动力系统特性,将低频信号分配给燃料电池和蓄电池,其参考输出功率分别为

$$P_{ref\_fc} = 0.6X_0(n)$$

$$P_{ref\_bat} = 0.4X_0(n)$$

将高频信号分配给超级电容,其参考输出功率为

$$P_{ref\_uc} = x_1 + x_2 + x_3$$

得到三个输出量:燃料电池初步参考功率需求P<sub>ref\_fc</sub>、蓄电池初步参考功率需求P<sub>ref\_bat</sub>、超级电容初步参考功率需求P<sub>ref\_uc</sub>;

然后编写模糊控制器获得蓄电池和超级电容能量的模糊参考输出功率P<sub>fuzzy\_bat</sub>和P<sub>fuzzy\_uc</sub>;

步骤2,:模糊化;通过模糊逻辑控制模块将根据权利要求1所述采集控制模块所得到的船舶总功率需求P<sub>1</sub>和蓄电池的荷电状态SOC<sub>bat</sub>、超级电容的荷电状态SOC<sub>uc</sub>通过玛达尼控制推理方法模糊化,并选用合适的隶属度函数进行对论域的划分;根据工程经验选取隶属度函数;其中,由于三角形隶属度函数与梯形隶属度函数相对简单,适用于工程,所以蓄电池模糊控制输出功率P<sub>fuzzy\_bat</sub>和超级电容模糊控制参考输出功率P<sub>fuzzy\_uc</sub>采用了三角形隶属度函数和梯形隶属度函数外,其他三个变量都采用三角形隶属度函数;在MATLAB仿真环境中建立系统仿真模型,通过实验结果调试隶属度函数的参数;具体如下:

将蓄电池荷电状态SOC<sub>bat</sub>分为:L(低)为' trimf' , [a<sub>L1</sub> a<sub>L2</sub> a<sub>L3</sub>]、M(中)为' trimf' , [a<sub>M1</sub> a<sub>M2</sub> a<sub>M3</sub>]、H(高)为trimf' , [a<sub>H1</sub> a<sub>H2</sub> a<sub>H3</sub>]三个模糊集合;

将超级电容荷电状态SOC<sub>uc</sub>分为:L(低)为' trimf' , [b<sub>L1</sub> b<sub>L2</sub> b<sub>L3</sub>]、M(中)为' trimf' , [b<sub>M1</sub> b<sub>M2</sub> b<sub>M3</sub>]、H(高)为' trimf' , [b<sub>H1</sub> b<sub>H2</sub> b<sub>H3</sub>]三个模糊集合;

将总功率需求分为:S(小)为' trimf' , [c<sub>S1</sub> c<sub>S2</sub> c<sub>S3</sub>]、M(中)为' trimf' , [c<sub>M1</sub> c<sub>M2</sub> c<sub>M3</sub>]、B(大)为' trimf' , [c<sub>B1</sub> c<sub>B2</sub> c<sub>B3</sub>]三个模糊集合;

将蓄电池的模糊控制输出功率P<sub>fuzzy\_bat</sub>和超级电容模糊输出功率P<sub>fuzzy\_uc</sub>分为:NB(反向大)为' trapmf' , [d<sub>NB1</sub> d<sub>NB2</sub> d<sub>NB3</sub> d<sub>NB4</sub>]、NM(反向中)为' trapmf' , [d<sub>NM1</sub> d<sub>NM2</sub> d<sub>NM3</sub> d<sub>NM4</sub>]、NS(反向小)为' trapmf' , [d<sub>NS1</sub> d<sub>NS2</sub> d<sub>NS3</sub> d<sub>NS4</sub>]、Z(双向趋于0)为' trimf' , [d<sub>Z1</sub> d<sub>Z2</sub> d<sub>Z3</sub> d<sub>Z4</sub>]、PS(正向

小)为' trapmf' , [dPS1 dPS2 dPS3 dPS4]、PM(正向中)为' trapmf' , [dPM1 dPM2 dPM3 dPM4]、PB(正向大)为' trapmf' , [dPB1 dPB2 dPB3 dPB4]七个模糊集合;

步骤3:根据系统的动态特性设立规则库:船舶功率需求为P<sub>1</sub>,燃料电池输出功率为P<sub>FC</sub>,蓄电池输出功率为P<sub>bat</sub>,超级电容输出功率为P<sub>UC</sub>能量控制规则如下:

控制规则a.当P<sub>1</sub>处于模糊子集小时,系统进入工作模式一,此时P<sub>FC</sub>=P<sub>1</sub>-P<sub>bat</sub>-P<sub>UC</sub>,此时超级电容及蓄电池处于充电状态,且优先给超级电容充电;

控制规则b.当P<sub>1</sub>处于模糊子集中时,系统进入工作模式二,此时P<sub>1</sub>=P<sub>FC</sub>+P<sub>UC</sub>或P<sub>1</sub>=P<sub>FC</sub>+P<sub>bat</sub>,燃料电池与超级电容或蓄电池中SOC处于模糊子集大的一方混合供电;

控制规则c.当P<sub>1</sub>处于模糊子集大时,系统进入工作模式三,此时P<sub>1</sub>=P<sub>FC</sub>+P<sub>UC</sub>+P<sub>bat</sub>,三种动力源混合供电;

步骤4:去模糊化得到所需的控制输出量燃料电池的功率要求、蓄电池的功率要求、超级电容的电压要求;其中去模糊化采用面积重心法,即将描述输出模糊集合的隶属度函数曲线与横坐标所围成的面积的均分点所对应的论域元素作为判决结果,公式为

$$v_0 = \frac{\int_{\alpha_L}^{\alpha_H} \int v f(v) dv}{\int_{\alpha_L}^{\alpha_H} \int f(v) dv}$$

式中v<sub>0</sub>解模糊化后的精确值,v为输入变量,f(v)为隶属度函数,α<sub>H</sub>为相应隶属度函数上限,α<sub>L</sub>为相应隶属度函数下限;

根据以上所述,可以得到各模糊量去模糊化后的精确值:

$$\text{蓄电池荷电状态: L (低)} = \frac{\int_{\alpha_{L1}}^{\alpha_{H1}} \int SOC_{bat} \times f_L(SOC_{bat}) d(SOC_{bat})}{\int_{\alpha_{L1}}^{\alpha_{H1}} \int f_L(SOC_{bat}) d(SOC_{bat})} = a_1, \text{式中SOC}_{bat} \text{为蓄电池剩余电量}$$

值,f<sub>L</sub>(SOC<sub>bat</sub>)为L(低)相应的隶属度函数,α<sub>H1</sub>为L(低)相应的隶属度函数上限,α<sub>L1</sub>为相应隶属度函数下限;同理可得M(中)=a<sub>2</sub>,H(高)=a<sub>3</sub>;

$$\text{超级电容荷电状态: L (低)} = \frac{\int_{\alpha_{L2}}^{\alpha_{H2}} \int SOC_{UC} \times f_L(SOC_{UC}) d(SOC_{UC})}{\int_{\alpha_{L2}}^{\alpha_{H2}} \int f_L(SOC_{UC}) d(SOC_{UC})} = b_1, \text{式中SOC}_{UC} \text{为超级电容剩余}$$

电量值,f<sub>L</sub>(SOC<sub>UC</sub>)为L(低)相应的隶属度函数,α<sub>H2</sub>为L(低)相应的隶属度函数上限,α<sub>L2</sub>为相应隶属度函数下限;同理可得M(中)=b<sub>2</sub>,H(高)=b<sub>3</sub>;

$$\text{参考功率需求: S (小)} = \frac{\int_{\alpha_{L3}}^{\alpha_{H3}} \int P_1 \times f_S(P_1) d(P_1)}{\int_{\alpha_{L3}}^{\alpha_{H3}} \int f_S(P_1) d(P_1)} = c_1, \text{式中P}_1 \text{为船舶功率需求}, f_S(P_1) \text{为S (小)}$$

相应的隶属度函数,α<sub>H3</sub>为S(小)相应的隶属度函数上限,α<sub>L3</sub>为S(小)相应隶属度函数下限;同理可得M(中)=c<sub>2</sub>,B(大)=c<sub>3</sub>;

$$\text{蓄电池模糊控制输出功率: NB (反向大)} = \frac{\int_{\alpha_{L4}}^{\alpha_{H4}} \int P_{bat} \times f_{NB}(P_{bat}) d(P_{bat})}{\int_{\alpha_{L4}}^{\alpha_{H4}} \int f_{NB}(P_{bat}) d(P_{bat})} = d_1, \text{式中P}_{bat} \text{为蓄电}$$

池输出功率,f<sub>NB</sub>(P<sub>bat</sub>)为NB(反向小)相应的隶属度函数,α<sub>H4</sub>为NB(反向小)相应的隶属度函数上限,α<sub>L4</sub>为NB(反向小)相应隶属度函数下限;同理可得NM(反向中)=d<sub>2</sub>,NS(反向小)=d<sub>3</sub>,Z(双向趋于0)=d<sub>4</sub>,PS(正向小)=d<sub>5</sub>,PM(正向中)=d<sub>6</sub>,PB(正向大)=d<sub>7</sub>;

$$\text{超级电容模糊控制输出功率: NB (反向大)} = \frac{\int_{\alpha_{L5}}^{\alpha_{H5}} \int P_{UC} \times f_{NB}(P_{UC}) d(P_{UC})}{\int_{\alpha_{L5}}^{\alpha_{H5}} \int f_{NB}(P_{UC}) d(P_{UC})} = e_1, \text{式中P}_{UC} \text{为蓄电}$$

池输出功率,f<sub>NB</sub>(P<sub>UC</sub>)为NB(反向小)相应的隶属度函数,α<sub>H5</sub>为NB(反向小)相应的隶属度函数

上限,  $\alpha_{L5}$  为 NB (反向小) 相应隶属度函数下限; 同理可得 NM (反向中) =  $e_2$ , NS (反向小) =  $e_3$ , Z (双向趋 0) =  $e_4$ , PS (正向小) =  $e_5$ , PM (正向中) =  $e_6$ , PB (正向大) =  $e_7$ ;

将根据模糊规则推断的结果根据以上规则去模糊化后即可值即为蓄电池的模糊控制输出功率  $P_{fuzzy\_bat}$  和超级电容模糊输出功率  $P_{fuzzy\_uc}$

步骤五: 小波变换得到的蓄电池和超级电容参考功率输出与模糊控制得到的燃料电池和超级电容的参考功率输出调节量的差, 作为最终的功率输出值, 即

$$P_{bat} = P_{ref\_bat} - P_{fuzzy\_bat}$$

$$P_{UC} = P_{ref\_uc} - P_{fuzzy\_UC}$$

燃料电池输出功率可由小波变换得到的燃料电池参考功率输出与模糊控制输出量的差得出, 即:

$$P_{FC} = P_{ref\_fc} - P_{fuzzy\_bat} - P_{fuzzy\_UC}.$$

# 一种基于小波-模糊逻辑的混合动力船舶能量管理系统及控制方法

## 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于小波-模糊逻辑的混合动力船舶能量管理系统与控制方法，具体是一种根据船舶的实时功率需求，通过小波-模糊逻辑理论方法分析，从而合理分配燃料电池、蓄电池和超级电容三种能量源输出的功率的管理与控制方法。

## 背景技术

[0002] 航运是世界公认的最为经济的运输手段之一，对世界经济的发展起到了重要的作用，但随着世界贸易量的增大，能源需求的增加，带来的环境问题也日益突出。就目前清洁能源技术的发展现状来看，以风能、太阳能、核能以及燃料电池为代表的清洁能源已初步具备船舶上的应用基础，但仅利用风能或太阳能等单一模式并非为最优的应用模式。根据船型结构、航行区域和营运特点的不同，多种能源的综合利用的混合动力船舶技术已经作为一个发展方向在船舶应用领域掀起了新一轮的研究热潮。

[0003] 混合动力船舶包含两种或更多能量转换装置，或同一种装置使用两种或更多种燃料。当混合能源系统结合在一起时，能克服单独使用其中任何一种能源的固有局限性。但多个能量单元增加了系统的复杂性，如何使由多个能量单元构成的混合动力系统稳定、可靠、高效的工作是混合动力船舶的关键技术之一。

[0004] 目前在混合动力能量管理策略方面的研究大多集中在汽车领域，而在船舶混合动力能量管理策略方面研究较少。针对混合动力船舶推进系统的结构和运动特性，其能量管理常用的方法大致分为三类：基于规则的能量管理策略、基于优化控制的能量管理策略和基于智能控制算法的能量管理策略。其中，基于规则的控制算法可分为静态逻辑门限控制算法；基于优化控制的能量管理策略可分为瞬时优化和全局优化两大类；基于智能控制算法的能量管理策略有基于模糊逻辑控制算法、小波算法、神经网络算法等。局优化策略无法用于实时控制，但可以对其进行优化，全局优化策略在控制过程中需提前知道航道和通航环境等基本信息，因此难度较大且计算量大。瞬时优化策略最大的特点就是计算量大、成本高，该控制策略只能优化瞬时的系统效率。逻辑门限制控制策略没有经过优化处理，所以控制效果不理想。

[0005] 本发明设计了一种基于小波-模糊逻辑的混合动力船舶能量管理系统与控制方法，通过模糊逻辑与小波变换得到各动力源的实际输出功率，当蓄电池和超级电容充有足够的电量时，FC系统输出功率降低以节省燃料费用；而当电池和超级电容充电量较低时，FC系统输出较多的功率以满足整个系统的功率需求，从而实现在不损害船舶性能和部件寿命的前提下，合理分配各能量单元的功率输出，实现各能量单元的工作性能优化，同时减少功率损耗，促进系统的整体性能、提高燃料的经济性。

## 发明内容

[0006] 本发明的目的在于设计一种基于小波-模糊逻辑的混合动力船舶能量管理系统与

控制方法,根据蓄电池、超级电容、燃料电池的SOC值和船舶功率需求来给燃料电池、蓄电池和超级电容三种能量源分配功率输出的方法,从而实现各能量单元的工作性能优化。

[0007] 本发明采用以下技术措施来实现:

[0008] 本发明的一种基于小波-模糊逻辑的混合动力船舶能量管理系统与控制方法包括:

[0009] 一种基于小波-模糊逻辑的混合动力船舶能量管理系统,其特征在于,包括能源系统能量管理系统采集装置;其中,

[0010] 所述能源系统包括

[0011] 燃料电池模块:船舶主电源,燃料电池输出的电能通过单向DC/DC中电压控制单元变压后给直流母线供电,同时通过双向DC/DC给锂电池和超级电容进行充电。

[0012] 蓄电池模块:船舶备用和启动电源,为燃料电池正常启动提供所需装置提供能量;在紧急情况时由锂离子电池作为应急电源,承担全船紧急供电需求,从而增强混合动力系统的可靠性。

[0013] 超级电容模块,船舶补偿电源,承担动力系统中高频变化的功率需求,并当动力系统功率需求大且频率快时,承担峰值电流输出,起到削峰填谷的作用,使燃料电池平缓的提供能量。

[0014] 能量管理系统采集装置包括:

[0015] 采集控制模块:采集燃料电池的输出电压、电流,锂电池的输出电压、电流、荷电状态,超级电容的电压、荷电状态及直流母线的电压、电流,并将采集到的数据进行转发、存储,并得到的船舶总的功率需求。为能量管理系统的智能算法的运算、处理提供数据支持,同时这些数据也会实时传送到船舶控制台的相关界面上,供控制台工作人员了解船舶运行情况;

[0016] 小波转换模块:根据采集控制模块采集的数据得到的船舶总的功率需求,通过小波变换将得到高、中、低三个不同频率段的功率需求,根据混合动力系统特性,低频分量对应的功率为燃料电池的参考输入功率,中频分量对应的功率则为蓄电池的参考输入功率,高频分量对应的功率为超级电容的参考输入功率,得到三个输出量:燃料电池参考功率需求、蓄电池参考功率需求、超级电容参考功率需求。

[0017] 模糊逻辑控制模块:将总的功率需求、蓄电池的荷电状态、超级电容的荷电状态作为输入量送入模糊控制器,经过模糊化,模糊推理,解模糊得到准确输入量,得到模糊规则。

[0018] 模糊规则制定:船舶正常航行时,按船舶当前功率需求分为三种工作模式,分别是

[0019] 工作模式一:燃料电池作为主力源,超级电容及蓄电池作为被充电元件;

[0020] 工作模式二:燃料电池做主力源,所述超级电容及蓄电池中其一作为辅助动力源;

[0021] 工作模式三:燃料电池、蓄电池超级电容共同作为动力源。

[0022] 在上述的一种基于小波-模糊逻辑的混合动力船舶能量管理系统,所述采集控制模块包括电压传感器、直流电流传感器、霍尔传感器、CAN总线、PLC控制器、模糊逻辑控制器,采集控制步骤包括:

[0023] PLC控制器及相应传感器:所述PLC控制器和相应传感器构成数据采集系统对船舶运行状态和电源供电系统状态相关数据进行采集并送至上位机,所述传感器包括电压传感

器、直流电流传感器、霍尔传感器；

[0024] 上位机以及下位机：上位机接收PLC控制器采集的数据，下位机通过UART串口将电机主轴转速、GPS传感器信号、燃料电池、蓄电池、超级电容及母线上电压电流、供给功率及电池剩余电量数据发送至工控机；

[0025] 工控机：接收下位机发送的数据并将数据解压整理，提取出驱动电机主轴转速和相关电参量，连同GPS模块采集的船舶航行数据送至模糊逻辑控制器；

[0026] 模糊逻辑控制器：利用模糊逻辑控制算法对数据进行运算，制定相关的控制策略与控制命令发送至PLC控制器，由PLC控制各个动力源的工作状态和功率输出值。

[0027] 一种基于小波-模糊逻辑的混合动力船舶能量管理控制方法，其特征在于，包括：

[0028] 步骤1，获得三种能量源初步参考功率需求，通过小波变换将船舶所需实时功率分解为高、中、低三种不同频段的功率分别对应超级电容、蓄电池和燃料电池三种能量源；具体是采用Haar小波基，基于公式：

$$[0029] \quad \begin{cases} 1 & t \in \left[0, \frac{1}{2}\right) \\ -1 & t \in \left[\frac{1}{2}, 1\right) \\ 0 & others \end{cases}$$

[0030] 将采集控制模块所得到船舶总的功率需求 $P_1$ ，通过小波变换被分解为高频和低频功率信号，再将低频功率信号依次由高通滤波器和低通滤波器分解。经过二次分解后，需求功率被分解为高频信号 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 及低频信号 $x_0$ 。根据混合动力系统特性，将低频信号分配给燃料电池和蓄电池，其参考输出功率分别为

[0031]  $P_{ref\_fc} = 0.6x_0(n)$

[0032]  $P_{ref\_bat} = 0.4x_0(n)$

[0033] 将高频信号分配给超级电容，其参考输出功率为

[0034]  $P_{ref\_uc} = x_1 + x_2 + x_3$

[0035] 得到三个输出量：燃料电池初步参考功率需求 $P_{ref\_fc}$ 、蓄电池初步参考功率需求 $P_{ref\_bat}$ 、超级电容初步参考功率需求 $P_{ref\_uc}$ 。

[0036] 然后编写模糊控制器获得蓄电池和超级电容能量的模糊参考输出功率 $P_{fuzzy\_bat}$ 和 $P_{fuzzy\_uc}$ 。

[0037] 步骤2，模糊化。通过模糊逻辑控制模块将根据权利要求1所述采集控制模块所得到的船舶总功率需求 $P_1$ 和蓄电池的荷电状态 $SOC_{bat}$ 、超级电容的荷电状态 $SOC_{uc}$ 通过马达尼控制推理方法模糊化，并选用合适的隶属度函数进行论域的划分。根据工程经验选取隶属度函数。其中，由于三角形隶属度函数与梯形隶属度函数相对简单，适用于工程，所以蓄电池模糊控制输出功率 $P_{fuzzy\_bat}$ 和超级电容模糊控制参考输出功率 $P_{fuzzy\_uc}$ 采用了三角形隶属度函数和梯形隶属度函数外，其他三个变量都采用三角形隶属度函数。在MATLAB仿真环境中建立系统仿真模型，通过实验结果调试隶属度函数的参数。具体如下：

[0038] 将蓄电池荷电状态 $SOC_{bat}$ 分为：L(低)为‘trimf’， $[a_{L1} \ a_{L2} \ a_{L3}]$ 、M(中)为‘trimf’， $[a_{M1} \ a_{M2} \ a_{M3}]$ 、H(高)为‘trimf’， $[a_{H1} \ a_{H2} \ a_{H3}]$ 三个模糊集合；

[0039] 将超级电容荷电状态SOC<sub>UC</sub>分为:L(低)为' trimf' , [b<sub>L1</sub> b<sub>L2</sub> b<sub>L3</sub>]、M(中)为' trimf' , [b<sub>M1</sub> b<sub>M2</sub> b<sub>M3</sub>]、H(高)为' trimf' , [b<sub>H1</sub> b<sub>H2</sub> b<sub>H3</sub>]三个模糊集合;

[0040] 将总功率需求分为:S(小)为' trimf' , [c<sub>S1</sub> c<sub>S2</sub> c<sub>S3</sub>]、M(中)为' trimf' , [c<sub>M1</sub> c<sub>M2</sub> c<sub>M3</sub>]、B(大)为' trimf' , [c<sub>B1</sub> c<sub>B2</sub> c<sub>B3</sub>]三个模糊集合;

[0041] 将蓄电池的模糊控制输出功率P<sub>fuzzy\_bat</sub>和超级电容模糊输出功率P<sub>fuzzy uc</sub>分为:NB(反向大)为' trapmf' , [d<sub>NB1</sub> d<sub>NB2</sub> d<sub>NB3</sub> d<sub>NB4</sub>]、NM(反向中)为' trapmf' , [d<sub>NM1</sub> d<sub>NM2</sub> d<sub>NM3</sub> d<sub>NM4</sub>]、NS(反向小)为' trapmf' , [d<sub>NS1</sub> d<sub>NS2</sub> d<sub>NS3</sub> d<sub>NS4</sub>]、Z(双向趋于0)为' trimf' , [d<sub>Z1</sub> d<sub>Z2</sub> d<sub>Z3</sub> d<sub>Z4</sub>]、PS(正向小)为' trapmf' , [d<sub>PS1</sub> d<sub>PS2</sub> d<sub>PS3</sub> d<sub>PS4</sub>]、PM(正向中)为' trapmf' , [d<sub>PM1</sub> d<sub>PM2</sub> d<sub>PM3</sub> d<sub>PM4</sub>]、PB(正向大)为' trapmf' , [d<sub>PB1</sub> d<sub>PB2</sub> d<sub>PB3</sub> d<sub>PB4</sub>]七个模糊集合。

[0042] 步骤3:根据系统的动态特性设立规则库:船舶功率需求为P<sub>1</sub>,燃料电池输出功率为P<sub>FC</sub>,蓄电池输出功率为P<sub>bat</sub>,超级电容输出功率为P<sub>UC</sub>,能量控制规则如下:

[0043] 控制规则a.当P<sub>1</sub>处于模糊子集小时,系统进入工作模式一,此时P<sub>FC</sub>=P<sub>1</sub>-P<sub>bat</sub>-P<sub>UC</sub>,此时超级电容及蓄电池处于充电状态,且优先给超级电容充电;

[0044] 控制规则b.当P<sub>1</sub>处于模糊子集中时,系统进入工作模式二,此时P<sub>1</sub>=P<sub>FC</sub>+P<sub>UC</sub>或P<sub>1</sub>=P<sub>FC</sub>+P<sub>bat</sub>,燃料电池与超级电容或蓄电池中SOC处于模糊子集大的一方混合供电;

[0045] 控制规则c.当P<sub>1</sub>处于模糊子集大时,系统进入工作模式三,此时P<sub>1</sub>=P<sub>FC</sub>+P<sub>UC</sub>+P<sub>bat</sub>,三种动力源混合供电;

[0046] 本发明采用“IF-THEN”语句表达具体模糊规则,所述具体规则参考图6及图7

[0047] 步骤4:去模糊化得到所需的控制输出量燃料电池的功率要求、蓄电池的功率要求、超级电容的电压要求。其中去模糊化采用面积重心法,即将描述输出模糊集合的隶属度函数曲线与横坐标所围成的面积的均分点所对应的论域元素作为判决结果,公式为

$$[0048] v_0 = \frac{\int_{\alpha_L}^{\alpha_H} \int vf(v) dv}{\int_{\alpha_L}^{\alpha_H} \int f(v) dv}$$

[0049] 式中v<sub>0</sub>解模糊化后的精确值,v为输入变量,f(v)为隶属度函数,a<sub>H</sub>为相应隶属度函数上限,a<sub>L</sub>为相应隶属度函数下限。

[0050] 根据以上所述,可以得到各模糊量去模糊化后的精确值:

$$[0051] \text{蓄电池荷电状态: } L(\text{低}) = \frac{\int_{\alpha_{L1}}^{\alpha_{H1}} \int SOC_{bat} \times f_L(SOC_{bat}) d(SOC_{bat})}{\int_{\alpha_{L1}}^{\alpha_{H1}} \int f_L(SOC_{bat}) d(SOC_{bat})} = a_1, \text{式中SOC}_{bat} \text{为蓄电池剩余}$$

电量值,f<sub>L</sub>(SOC<sub>bat</sub>)为L(低)相应的隶属度函数,a<sub>H1</sub>为L(低)相应的隶属度函数上限,a<sub>L1</sub>为相应隶属度函数下限。同理可得M(中)=a<sub>2</sub>,H(高)=a<sub>3</sub>;

$$[0052] \text{超级电容荷电状态: } L(\text{低}) = \frac{\int_{\alpha_{L2}}^{\alpha_{H2}} \int SOC_{UC} \times f_L(SOC_{UC}) d(SOC_{UC})}{\int_{\alpha_{L2}}^{\alpha_{H2}} \int f_L(SOC_{UC}) d(SOC_{UC})} = b_1, \text{式中SOC}_{UC} \text{为超级电容}$$

剩余电量值,f<sub>L</sub>(SOC<sub>UC</sub>)为L(低)相应的隶属度函数,a<sub>H2</sub>为L(低)相应的隶属度函数上限,a<sub>L2</sub>为相应隶属度函数下限。同理可得M(中)=b<sub>2</sub>,H(高)=b<sub>3</sub>;

$$[0053] \text{参考功率需求: } S(\text{小}) = \frac{\int_{\alpha_{L3}}^{\alpha_{H3}} \int P_1 \times f_S(P_1) d(P_1)}{\int_{\alpha_{L3}}^{\alpha_{H3}} \int f_S(P_1) d(P_1)} = c_1, \text{式中P}_1 \text{为船舶功率需求}, f_S(P_1) \text{为S}$$

(小)相应的隶属度函数,a<sub>H3</sub>为S(小)相应的隶属度函数上限,a<sub>L3</sub>为S(小)相应隶属度函数下限。同理可得M(中)=c<sub>2</sub>,B(大)=c<sub>3</sub>;

[0054] 蓄电池模糊控制输出功率: NB (反向大)  $= \frac{\int_{\alpha_{L4}}^{\alpha_{H4}} \int P_{bat} \times f_{NB}(P_{bat}) d(P_{bat})}{\int_{\alpha_{L4}}^{\alpha_{H4}} \int f_{NB}(P_{bat}) d(P_{bat})} = d_1$ , 式中  $P_{bat}$  为

蓄电池输出功率,  $f_{NB}(P_{bat})$  为 NB (反向小) 相应的隶属度函数,  $\alpha_{H4}$  为 NB (反向小) 相应的隶属度函数上限,  $\alpha_{L4}$  为 NB (反向小) 相应隶属度函数下限。同理可得 NM (反向中) =  $d_2$ , NS (反向小) =  $d_3$ , Z (双向趋于 0) =  $d_4$ , PS (正向小) =  $d_5$ , PM (正向中) =  $d_6$ , PB (正向大) =  $d_7$ ;

[0055] 超级电容模糊控制输出功率: NB (反向大)  $= \frac{\int_{\alpha_{L5}}^{\alpha_{H5}} \int P_{UC} \times f_{NB}(P_{UC}) d(P_{UC})}{\int_{\alpha_{L5}}^{\alpha_{H5}} \int f_{NB}(P_{UC}) d(P_{UC})} = e_1$ , 式中  $P_{UC}$  为

蓄电池输出功率,  $f_{NB}(P_{UC})$  为 NB (反向小) 相应的隶属度函数,  $\alpha_{H5}$  为 NB (反向小) 相应的隶属度函数上限,  $\alpha_{L5}$  为 NB (反向小) 相应隶属度函数下限。同理可得 NM (反向中) =  $e_2$ , NS (反向小) =  $e_3$ , Z (双向趋于 0) =  $e_4$ , PS (正向小) =  $e_5$ , PM (正向中) =  $e_6$ , PB (正向大) =  $e_7$ ;

[0056] 将根据模糊规则推断的结果根据以上规则去模糊化后即可值即为蓄电池的模糊控制输出功率  $P_{fuzzy\_bat}$  和超级电容模糊输出功率  $P_{fuzzy\_uc}$

[0057] 步骤五: 小波变换得到的蓄电池和超级电容参考功率输出与模糊控制得到的燃料电池和超级电容的参考功率输出调节量的差, 作为最终的功率输出值, 即

[0058]  $P_{bat} = P_{ref\_bat} - P_{fuzzy\_bat}$

[0059]  $P_{UC} = P_{ref\_uc} - P_{fuzzy\_uc}$

[0060] 燃料电池输出功率可由小波变换得到的燃料电池参考功率输出与模糊控制输出量的差得出, 即:

[0061]  $P_{FC} = P_{ref\_fc} - P_{fuzzy\_bat} - P_{fuzzy\_uc}$ 。

[0062] 与现有技术相比本发明有如下的有益效果: 1、本发明的基于小波-模糊逻辑控制策略对变化的瞬时信号捕捉能力强, 可以将高频信号、中频信号和低频信号从所采集的信号中分离出来, 且根据具体的航行工况不需要依赖被控对象精确的数学模型可进行调整, 使控制的灵活性和可靠性得到很大提高; 2、本发明采用的能量管理策略在模糊逻辑的基础上, 采用小波变换对负载功率需求信号进行实时处理。满足船舶负载所需功率的同时, 降低功率需求瞬态变化对各能量源的不良影响, 通过对蓄电池、超级电容充放电合理的管理, 延长燃料电池、蓄电池使用寿命, 减少燃料消耗。

## 附图说明

[0063] 图1为本发明的电力系统构架图。

[0064] 图2为本发明的能量管理系统硬件结构图。

[0065] 图3为本发明的模拟船舶功率需求信号及经小波分解后的信号。

[0066] 图4为本发明的模糊逻辑控制结构图。

[0067] 图5为本发明的能量管理控制方法示意图。

[0068] 图6为燃料电池输出功率规则表。

[0069] 图7为蓄电池输出功率规则表。

## 具体实施方式:

[0070] 为了使本发明实现的手段、目的以及最终的效果易于明白了解, 以下将结合图示对本发明的实施例给出详细的说明。

[0071] 图中,1-1能量管理系统;1-2燃料电池;1-3蓄电池;1-4超级电容;1-5单向DC/DC转换器;1-6双向DC/DC转换器;1-7双向DC/DC转换器;1-8直流母线;1-9DC/AC逆变器;1-10电力推进装置;2-1显示器;2-2键盘和鼠标;2-3工控机;2-4网络交换机;2-5CAN口扩展卡;2-6数字量I/O模块;2-7模拟量I/O模块;2-8按钮;2-9指示灯;2-10指示灯;2-11燃料电池;2-12蓄电池;2-13超级电容;2-14推进电机;2-15PLC控制器;2-16DC/DC转换器;2-17DC/DC转换器;2-18DC/DC转换器

[0072] 一种混合动力船舶电力系统构架如图1所示,实线箭头方向为能量流动方向。

[0073] (1) 能源系统。包括燃料电池1-2最大功率为1.5kw,通过单向DC/DC转换器1-5与直流母线1-8相连;蓄电池1-3容量为1.65kwh,通过双向DC/DC转换器1-6与直流母线1-8相连;超级电容1-4共两组,总容量为0.106kwh,通过双向DC/DC转换器1-7与直流母线1-8相连。

[0074] (2) 能源管理系统,能量管理系统硬件构成如图2所示,当船舶运行工况发生变化时,管理系统下位机通过PLC及相关传感器构成数据采集系统对2-11燃料电池、2-12蓄电池、2-13超级电容及2-14推进电机的相关数据进行采集,通过2-10模拟量I/O模块上传至CAN总线,经2-5CAN口扩展卡将电机主轴转速、燃料电池、蓄电池、超级电容及母线上电压电流、供给功率及电池剩余电量等数据上传至2-4网络交换机,通过以太网送至2-3工控机。工控机数据处理软件将其解压整理,提取出驱动电机主轴转速和相关电参量,连同GPS模块采集的船舶航行数据利用模糊逻辑控制算法对其进行运算,根据制定的模糊控制规则制定相关的控制命令发送至PLC控制器2-15,由PLC分别通过2-16DC/DC变换器,2-17DC/DC变换器、2-18DC/DC变换器控制燃料电池、蓄电池、超级电容的工作状态和功率输出值。

[0075] 本发明设计的一种基于小波-模糊逻辑的混合动力船舶能源管理控制方法,包括以下步骤:

[0076] (1) 获得三种能量源初步参考功率需求:本发明采用Haar小波基。相比于其它常见的小波,Haar小波的母函数具有在时域中的滤波跨度最短,小波变换与其逆变换相同的优点。Haar小波表达式为:

$$[0077] \begin{cases} 1 & t \in \left[0, \frac{1}{2}\right) \\ -1 & t \in \left[\frac{1}{2}, 1\right) \\ 0 & others \end{cases}$$

[0078] 将船舶总的功率需求P-requirement,通过小波变换将得到三个不同频率段的功率需求,根据混合动力系统特性,将低频信号通过小波变换合理配置给燃料电池,将中频信号分配给蓄电池,将高频信号分配给超级电容,得到三个输出量:燃料电池初步参考功率需求(Pref\_fc)、蓄电池初步参考功率需求(Pref.bat)、超级电容初步参考功率需求(Pref.uc)。

[0079] 原始功率信号及通过小波分解获得的参考功率如图3所示:

[0080] (2) 获得三种能量源实际参考输出功率:如图3所示,通过模糊逻辑控制模块将三部分初步参考功率需求和蓄电池的荷电状态、超级电容的荷电状态通过模糊化、规则运算、去模糊化得到所需的控制输出量燃料电池的功率要求(Power.FC)、蓄电池的功率要求

(Power.Bat)、超级电容的电压要求(U.UC),然后由小波得到的参考功率需求和模糊逻辑得到的归一化的功率需求的乘积,作为燃料电池和蓄电池的实际参考功率需求。

[0081] (3) 制定隶属度函数:将SOC-bat(蓄电池荷电状态)分为L(低)、M(中)、H(高)三个模糊集合;将SOC-uc(超级电容荷电状态)分为L(低)、M(中)、H(高)三个模糊集合;将P\_requirement(总功率需求)分为S(小)、M(中)、B(大)三个模糊集合;将P-bat(蓄电池输出功率)分为NB(反向大)、NM(反向中)、NS(反向小)、Z(双向趋于0)、PS(正向小)、PM(正向中)、PB(正向大)七个模糊集合;将P-fc(燃料电池输出功率)分为S(小)、M(中)、B(大)三个模糊集合。

[0082] (4) 制定模糊规则:如图4所示,船舶正常航行时,按船舶当前功率需求分为三种工作模式:所述燃料电池作为主动力源,所述超级电容及蓄电池作为被充电元件,该工况为工作模式一;所述燃料电池做主动力源,所述超级电容及蓄电池中其一作为辅助动力源,该工况为工作模式二;所述燃料电池、蓄电池超级电容共同作为动力源,该工况为工作模式三。所述船舶功率需求为P1,所述燃料电池输出功率为Pfc,所述蓄电池输出功率为Pbat,所述超级电容输出功率为Puc,能量控制规则如下:

[0083] a. 当P1处于模糊子集小时,系统进入工作模式一,此时 $P_{fc}=P_1-P_{bat}-P_{uc}$ ,此时超级电容及蓄电池处于充电状态,且优先给超级电容充电;

[0084] b. 当P1处于模糊子集中时,系统进入工作模式二,此时 $P_1=P_{fc}+P_{uc}$ (或 $P_{bat}$ ),燃料电池及超级电容与蓄电池中SOC处于模糊子集大的一方混合供电;

[0085] c. 当P1处于模糊子集大时,系统进入工作模式三,此时 $P_1=P_{fc}+P_{uc}+P_{bat}$ ,三种动力源混合供电;

[0086] 以上仅为本发明的具体实施例,但本发明的技术特征并不局限于此。任何以本发明为基础,为实现基本相同的技术效果,所作出地简单变化、等同替换或者修饰等,皆涵盖于本发明的保护范围之中。

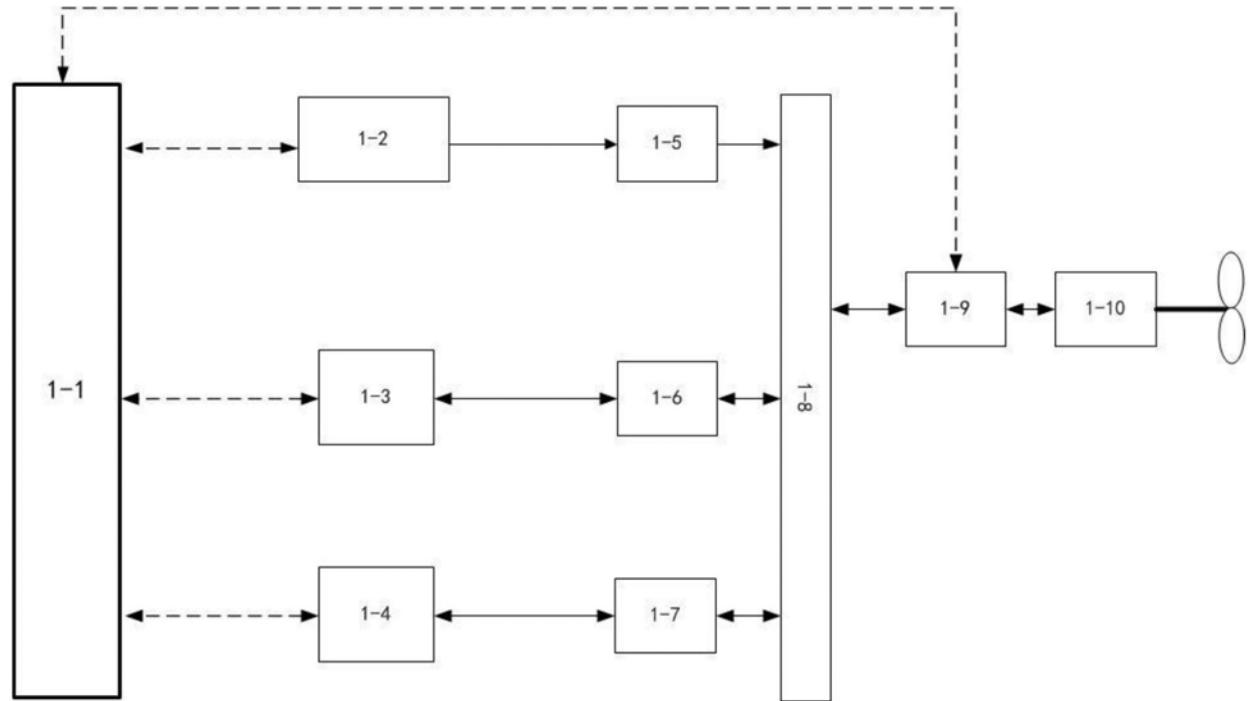


图1

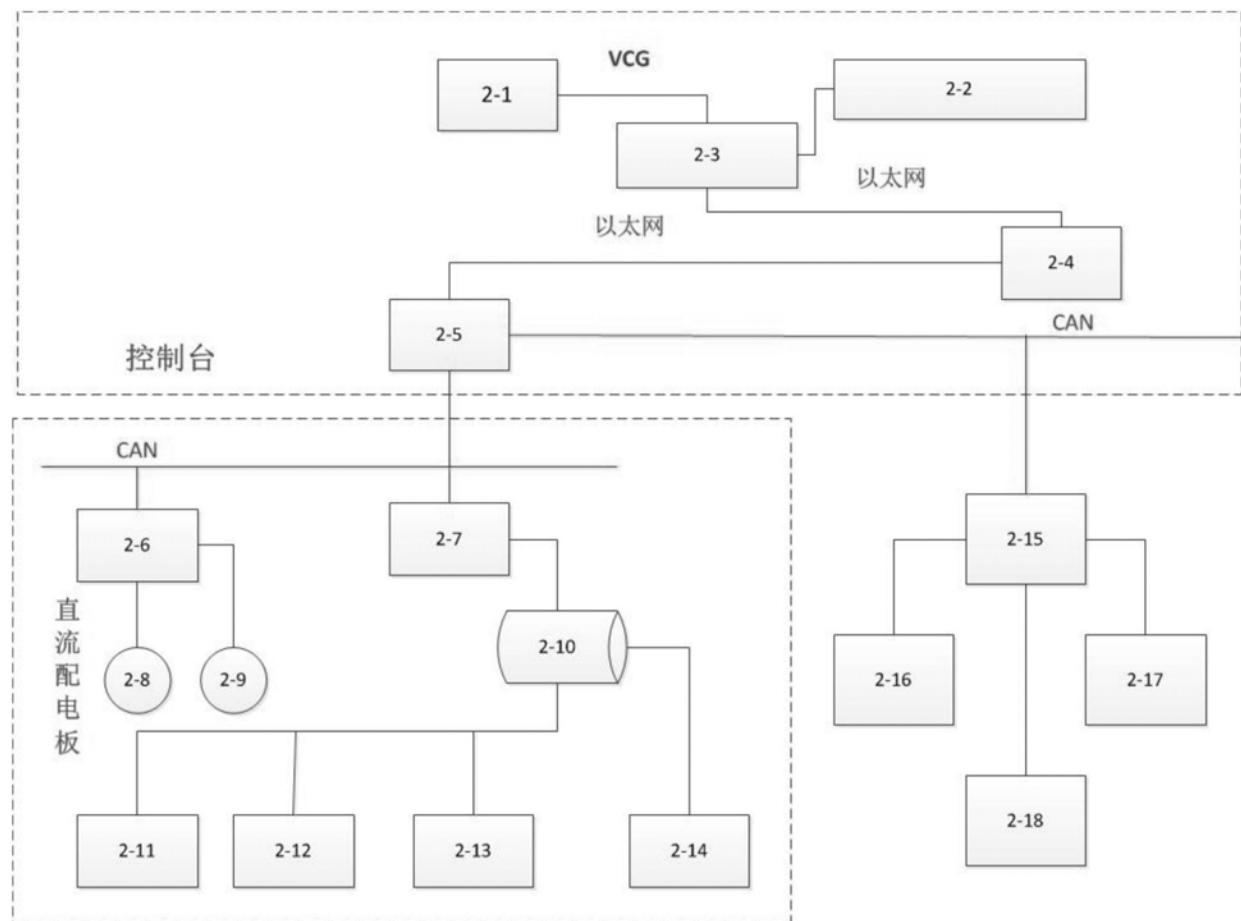


图2

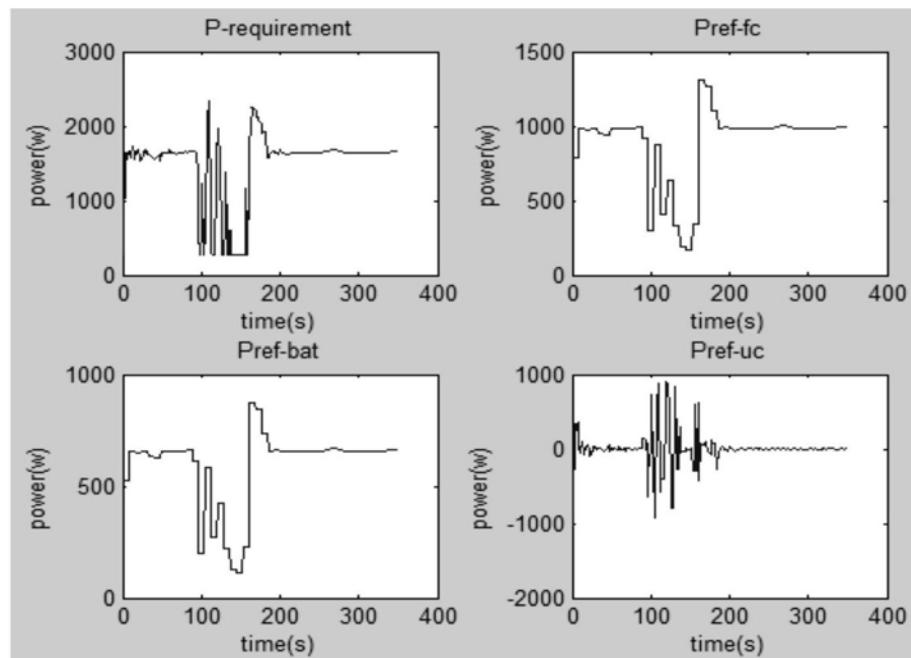


图3

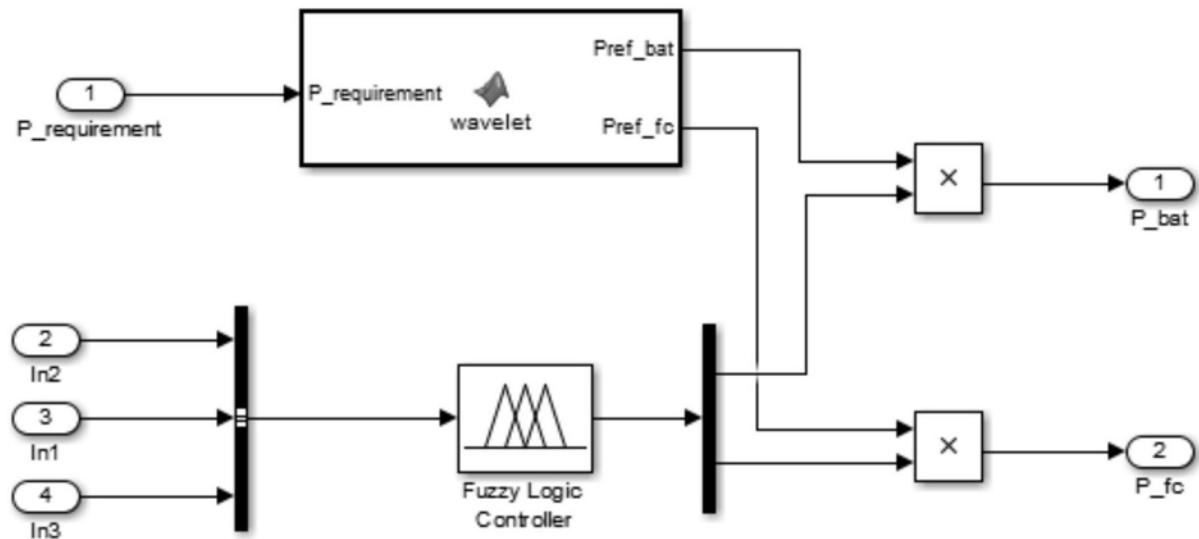


图4

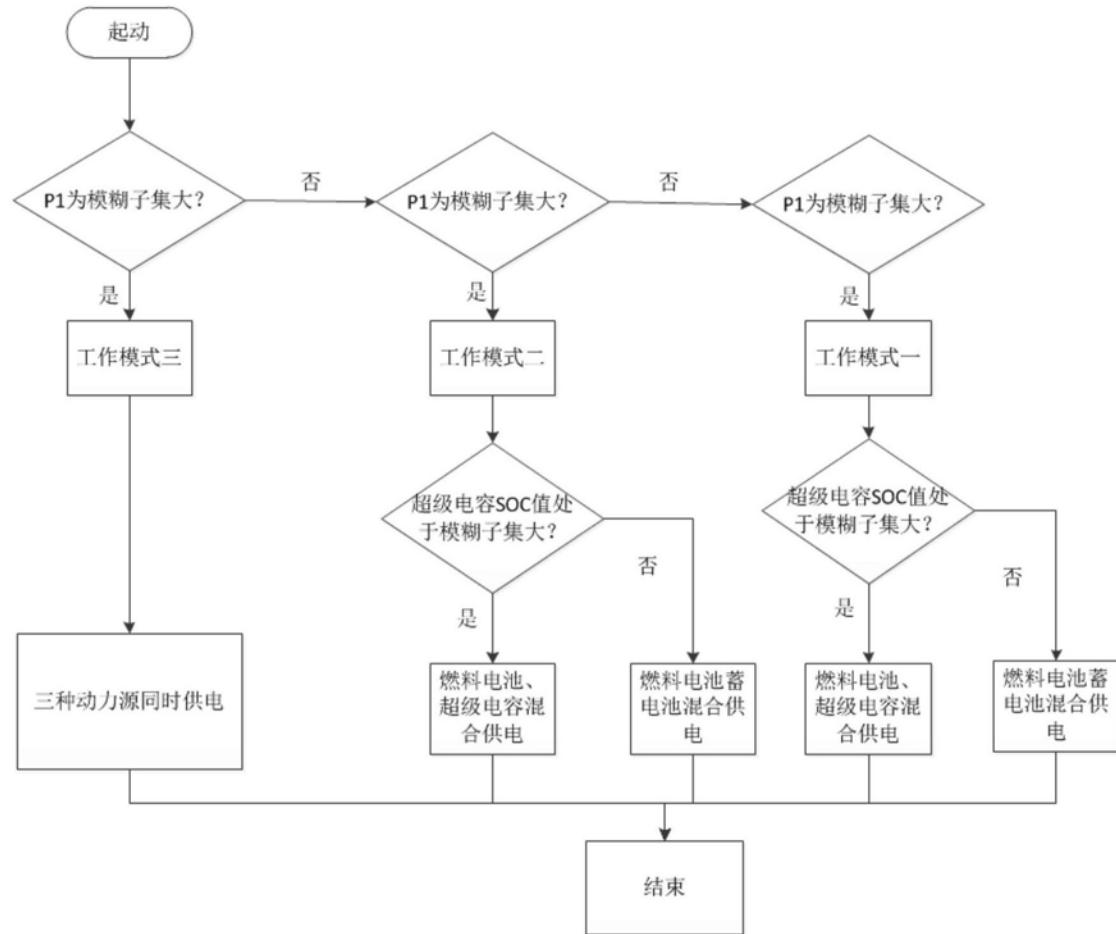


图5

P	SOC-bat SOC-uc	H	M	L
B	H	B	B	B
	M	B	B	B
	L	B	B	B
M	H	M	M	B
	M	M	B	B
	L	M	B	B
S	H	S	M	M
	M	M	B	B
	L	M	B	B

图6

P	SOC-bat SOC-uc	H	M	L
B	H	PB	PM	Z
	M	PB	PS	Z
	L	PB	PS	PS
M	H	PS	PM	NS
	M	PM	PS	Z
	L	PM	PM	Z
S	H	Z	NM	NB
	M	Z	NM	NB
	L	PS	NM	NB

图7