



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114834622 A

(43) 申请公布日 2022.08.02

(21) 申请号 202210593221.9

(22) 申请日 2022.05.27

(71) 申请人 哈尔滨工程大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区南通大街145号哈尔滨工程大学科技处知识产权办公室

(72) 发明人 刘胜 张紫萌 张兰勇 宋健

王高杰 常佳程 谭逸凡

(51) Int. Cl.

B63H 21/20 (2006.01)

B63H 21/21 (2006.01)

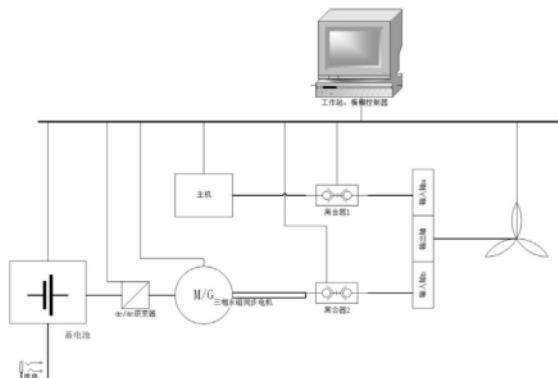
权利要求书2页 说明书9页 附图5页

(54) 发明名称

一种基于模糊控制的船舶柴电混合动力推进系统

(57) 摘要

本发明公开了一种基于模糊控制的船舶柴电混合动力推进系统,根据船舶柴油机推进和电力推进特点,将柴油机动力和电机动力有效结合起来,通过设计的模糊控制器根据柴油机的特性曲线进行柴油机动力与电机动力的协调分配,并通过传动装置,包括离合器、齿轮箱、传动轴系,传递给螺旋桨,进而推动船舶航行。柴电混合动力船舶推进系统包括低速柴油机、三相永磁同步电机、离合器、齿轮箱、传动轴系、调距桨,并通过在工作台中根据柴油机的负荷特性曲线,分析柴油机的最佳工作点,进而分析船舶在不同工况下,柴油机的最佳输出功率。本发明有助于柴电混合动力船舶推进系统设计的发展。



1. 一种基于模糊控制的船舶柴电混合动力推进系统,其特征在于:包括柴油机、电机、模糊控制器、电磁离合器、齿轮箱以及传动轴系、螺旋桨、DC/DC变换器和蓄电池;柴油机和三相永磁同步电机以并联的方式,连接在齿轮箱的两个输入轴上,柴油机和电动机的输出轴上同时配备有不同的离合器1和离合器2,在不同的工作模式下,离合器的开关状态有所不同;在三相永磁同步电机侧,配备由DC/DC逆变器;当三相永磁同步电机做轴带发电机进行发电时,整合三相永磁同步电机侧的电,并将所发电能传递给蓄电池,对蓄电池进行充电;当三相永磁同步电机做电动机使用时,直接由蓄电池对其进行驱动,DC/DC逆变器此时不工作;模糊控制器进行柴电混合动力船舶工作模式具体如下:

步骤1:将蓄电池的输入信号SOC利用量化因子 K_1 进行模糊化、船舶运行所需功率 T_n 利用量化因子 K_2 首先进行模糊化,并根据模糊化后的值确定模糊化之后蓄电池剩余电量SOC为模糊子集 $\{XS, S, PS, M, PB, B, XB\}$ 中的哪个子集,并确定模糊化后船舶运行所需功率 T_n 为模糊子集 $\{XS, S, PS, M, PB, B, XB\}$ 中的哪个子集,并在两者的隶属函数曲线中,找出将输入进行模糊化后的位置;

步骤2:利用模糊控制推理关系,if A and B then C,根据建立的模糊规则控制表,得出当下柴油机输出转矩 T_e 所处的模糊子集,为 $\{XS, S, PS, MS, M, MB, PB, B, XB\}$ 中的一个;其中,S表示极小,S表示小,PS表示较小,MS表示中小,M表示中等,MB表示中大,PB表示较大,B表示大,XB表示极大;

步骤3:根据输出的柴油机输出转矩的模糊子集,利用加权平均法 $T_e' = \frac{\sum k_i x_i}{\sum x_i}$,对柴油机输出转矩所处档位进行判决,继而利用量化因子 K_3 , $T_e = \frac{T_{e,max}}{2} + k_3(T_e' - \frac{T_{e,min} + T_{e,max}}{2})$,将柴油机输出转矩的档位转化为真实的柴油机的输出功率;

步骤4:根据柴电混合动力系统的数学模型,将柴油机的输出功率转换为柴油机油门控制信号以及电机的励磁电压的控制信号,控制柴油机和电机的输出,并进行工作模式的选择,其中电机的输出功率由船舶运行所需功率与柴油机输出功率之差得出。

2. 根据权利要求1所述的一种基于模糊控制的船舶柴电混合动力推进系统,其特征在于:当蓄电池电量不充足,且螺旋桨端船舶运行所需功率较大时,柴油机输出功率提供全部船舶运行所需功率,此时利用柴油机作为推进动力,运行于工况点;控制离合器1处于接合状态,三相永磁同步电机不工作,相对应的离合器2处于断开状态,DC/DC逆变器处于不工作状态,电池剩余电量不变。

3. 根据权利要求1所述的一种基于模糊控制的船舶柴电混合动力推进系统,其特征在于:当蓄电池电量充足,且螺旋桨端船舶运行所需功率较小时,柴油机输出功率几乎为0,此时电动机提供船舶运行所需功率,推动船舶航行;三相永磁同步电机处于工电动机作状态,输出功率由船舶运行所需功率与柴油机输出功率之差给出,蓄电池直接给电动机供给电能,DC/DC逆变器不工作,离合器2处于接合状态,柴油机不工作,离合器1处于断开状态。

4. 根据权利要求1所述的一种基于模糊控制的船舶柴电混合动力推进系统,其特征在于:当蓄电池电量不充足,且螺旋桨端船舶运行所需功率较小时,柴油机输出功率不仅能够满足船舶航行,同时还有富裕功率能给带动电机,给蓄电池充电;三相永磁同步电机处于发电机工作状态,吸收功率由船舶运行所需功率与柴油机输出功率之差给出,离合器1和离合

器2全部处于接合状态,柴油机输出功率一部分经离合器1、齿轮箱送给螺旋桨,一部分经离合器1、齿轮箱、离合器2送给轴带发电机;此时DC/DC逆变器工作,将轴带发电机所发电能进行整合后送给蓄电池,给蓄电池充电。

5.根据权利要求1所述的一种基于模糊控制的船舶柴电混合动力推进系统,其特征在于:当蓄电池电量充足,且船舶运行所需功率为极大时,柴油机输出功率在最佳工况点附近,不能提供全部的船舶运行所需功率,剩余功率由电动机提供;三相永磁同步电机处于电动机工作状态,输出功率由船舶运行所需功率与柴油机输出功率之差给出,离合器1和离合器2都处于接合状态,蓄电池直接给电动机供给电能,DC/DC逆变器不工作。

一种基于模糊控制的船舶柴电混合动力推进系统

技术领域

[0001] 本发明属于船舶柴电混合动力推进控制领域,具体涉及一种基于模糊控制的船舶柴电混合动力推进系统。

背景技术

[0002] 21世纪是挑战与机遇并存的世纪,其中能源与环境则是人类面临的最严峻的问题,能源资源储备量有限,资源耗竭的危机逐步逼近,环境污染日趋恶化,严重影响了经济发展,这些同样是船舶营运业需要应对的难题。在船舶营运业中耗能占比最大同时也是污染排放占比最大的一部分就是船舶动力推进系统。传统的船舶动力推进系统以柴油机为主动力,石油产品则是船舶柴油机的主要燃料,同时柴油机的排放也是对大气造成污染的重要污染源。

[0003] 船舶柴油机一般使用低速柴油机,由于柴油不易挥发和压缩点火等原因,柴油机冷启动性能较差,即使有启动预热装置,也要预热一定时间后才可启动。柴油机动力由于其功率密度大,其自身在某些工作区间热效率低,排放大量污染物也限制了其进一步发展。随着相关政策法规的不断健全,柴油机的产生的污染物排放成为船舶动力系统集成设计必须考虑的问题。为满足政策法规的要求,柴油机在船舶推进系统设计中应进一步降低其使用率。中国船级社发布的《绿色船舶规范》把低噪声作为绿色船舶的一部分,用以改善船员的工作和居住条件、降低其劳动强度。船舶柴油机由于其高噪声的缺点,不符合船舶对于良好工作环境的发展趋势。传统船舶柴油机单机推进系统结构过于简单,在多种海况中其工作特性差,不符合系统模块化、集成化的发展趋势,在人工智能、自动控制等技术的飞速发展下,其单一、局限的工作模式亟待提高。

[0004] 要想实现船舶航行过程中的零污染和零油耗,其中一个措施就是采用船舶电力推进系统,但是由于受发电方式、功率密度、以及储能技术的影响,现阶段大部分纯电动船舶存在着速度、加速度以及自控性能不高的问题,同时其续航能力也容易受电池容量制约。考虑到船舶柴油机推进系统和船舶电力推进系统各自都有优缺点,柴电混合动力推进系统,能够充分利用柴油机能量密度高,动力强劲的优点,同时兼顾电力推进无污染、零排放的特点,在某些特定工况,保证柴油机始终在较高的效率区间运行,提高燃料的利用率,同时大大降低有害气体的排放。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种基于模糊控制的船舶柴电混合动力推进系统。

[0006] 本发明的目的通过如下技术方案来实现:

[0007] 一种基于模糊控制的船舶柴电混合动力推进系统,包括柴油机、电机、模糊控制器、电磁离合器、齿轮箱以及传动轴系、螺旋桨、DC/DC变换器和蓄电池;柴油机和三相永磁同步电机以并联的方式,连接在齿轮箱的两个输入轴上,柴油机和电动机的输出轴上同时配备有不同的离合器1和离合器2,在不同的工作模式下,离合器的开关状态有所不同;在三

相永磁同步电机侧,配备由DC/DC逆变器;当三相永磁同步电机做轴带发电机进行发电时,整合三相永磁同步电机侧的电能,并将所发电能传递给蓄电池,对蓄电池进行充电;当三相永磁同步电机做电动机使用时,直接由蓄电池对其进行驱动,DC/DC逆变器此时不工作;模糊控制器进行柴电混合动力船舶工作模式具体如下:

[0008] 步骤1:将蓄电池的输入信号SOC利用量化因子 K_1 进行模糊化、船舶运行所需功率 T_n 利用量化因子 K_2 首先进行模糊化,并根据模糊化后的值确定模糊化之后蓄电池剩余电量SOC为模糊子集{XS,S,PS,M,PB,B,XB}中的哪个子集,并确定模糊化后船舶运行所需功率 T_n 为模糊子集{XS,S,PS,M,PB,B,XB}中的哪个子集,并在两者的隶属函数曲线中,找出将输入进行模糊化后的位置;

[0009] 步骤2:利用模糊控制推理关系,if A and B then C,根据建立的模糊规则控制表,得出当下柴油机输出转矩 T_e 所处的模糊子集,为{XS,S,PS,MS,M,MB,PB,B,XB}中的一个;其中,S表示极小,S表示小,PS表示较小,MS表示中小,M表示中等,MB表示中大,PB表示较大,B表示大,XB表示极大;

[0010] 步骤3:根据输出的柴油机输出转矩的模糊子集,利用加权平均法 $T_e' = \frac{\sum k_i x_i}{\sum x_i}$,对柴油机输出转矩所处档位进行判决,继而利用量化因子 K_3 , $T_e = \frac{T_{e,max}}{2} + k_3(T_e' - \frac{T_{e,min} + T_{e,max}}{2})$,

将柴油机输出转矩的档位转化为真实的柴油机的输出功率;

[0011] 步骤4:根据柴电混合动力系统的数学模型,将柴油机的输出功率转换为柴油机油门控制信号以及电机的励磁电压的控制信号,控制柴油机和电机的输出,并进行工作模式的选择,其中电机的输出功率由船舶运行所需功率与柴油机输出功率之差得出。

[0012] 进一步地,当蓄电池电量不充足,且螺旋桨端船舶运行所需功率较大时,柴油机输出功率提供全部船舶运行所需功率,此时利用柴油机作为推进动力,运行于工况点;控制离合器1处于接合状态,三相永磁同步电机不工作,相对应的离合器2处于断开状态,DC/DC逆变器处于不工作状态,电池剩余电量不变。

[0013] 进一步地,当蓄电池电量充足,且螺旋桨端船舶运行所需功率较小时,柴油机输出功率几乎为0,此时电动机提供船舶运行所需功率,推动船舶航行;三相永磁同步电机处于工电动机作状态,输出功率由船舶运行所需功率与柴油机输出功率之差给出,蓄电池直接给电动机供给电能,DC/DC逆变器不工作,离合器2处于接合状态,柴油机不工作,离合器1处于断开状态。

[0014] 进一步地,当蓄电池电量不充足,且螺旋桨端船舶运行所需功率较小时,柴油机输出功率不仅能够满足船舶航行,同时还有富裕功率能给带动电机,给蓄电池充电;三相永磁同步电机处于发电机工作状态,吸收功率由船舶运行所需功率与柴油机输出功率之差给出,离合器1和离合器2全部处于接合状态,柴油机输出功率一部分经离合器1、齿轮箱送给螺旋桨,一部分经离合器1、齿轮箱、离合器2送给轴带发电机;此时DC/DC逆变器工作,将轴带发电机所发电能进行整合后送给蓄电池,给蓄电池充电。

[0015] 进一步地,当蓄电池电量充足,且船舶运行所需功率为极大时,柴油机输出功率在最佳工况点附近,不能提供全部的船舶运行所需功率,剩余功率由电动机提供;三相永磁同步电机处于电动机工作状态,输出功率由船舶运行所需功率与柴油机输出功率之差给出,

离合器1和离合器2都处于接合状态,蓄电池直接给电动机供给电能,DC/DC逆变器不工作。

[0016] 本发明的有益效果在于:

[0017] 本发明根据船舶柴油机推进和电力推进特点,将柴油机动力和电机动力有效结合起来,通过设计的模糊控制器根据柴油机的特性曲线进行柴油机动力与电机动力的协调分配,并通过传动装置,包括离合器、齿轮箱、传动轴系,传递给螺旋桨,进而推动船舶航行。柴电混合动力船舶推进系统包括低速柴油机、三相永磁同步电机、离合器、齿轮箱、传动轴系、调距桨,并通过在工作台中根据柴油机的负荷特性曲线,分析柴油机的最佳工作点,进而分析船舶在不同工况下,柴油机的最佳输出功率。该发明对柴电混合动力船舶的柴油机和电机的安装型式,系统整体架构进行详细说明,并对柴油机和电机两种动力协调分配的控制方法进行阐述,有助于柴电混合动力船舶推进系统设计的发展。

[0018] 本发明的模糊控制使系统工作模式切换过程中,依据模糊逻辑规则,兼顾系统在切换过程中的响应速度与稳定性,避免了系统切换过程中功率波动造成的不利因素,提升系统的稳定性。

[0019] 本发明在模糊隶属度函数的建立中,蓄电池剩余电量和船舶运行总需求转矩使用高斯型隶属度函数曲线对船舶混合动力系统的分辨率和响应速度的提升有很大的帮助,又能不至于使控制系统的稳定性太差,对于系统输出柴油机输出转矩使用三角型隶属度函数曲线,能大大提高系统精度。

[0020] 本发明能够充分利用柴油机和电机的特点,实现降低主柴油机的安装功率;在一定程度上提高推进装置的冗余性;提高动力推进系统的推进效率;降低柴油机的耗油量;提高燃油利用率;降低船舶行进过程中的二氧化碳排放量,从而降低环境污染的目标。

附图说明

[0021] 图1为本发明基于模糊控制的船舶柴电混合动力推进系统;

[0022] 图2为本发明的柴油机负荷特性曲线图;

[0023] 图3为本发明的模糊控制器的基本结构图;

[0024] 图4为本发明的蓄电池剩余电量的隶属度函数曲线图;

[0025] 图5为本发明的船舶运行的总需求转矩隶属度函数曲线图;

[0026] 图6为本发明的柴油机输出转矩隶属度函数曲线图;

[0027] 图7为本发明的模糊控制规则曲面图;

[0028] 图8为本发明的基于模糊控制的船舶柴电混合动力仿真模型;

[0029] 图9为本发明的柴油机万有特性曲线图;

[0030] 图10为本发明的柴油机模式;

[0031] 图11为本发明的电动机模式;

[0032] 图12为本发明的轴带发电机模式;

[0033] 图13为本发明的混合动力模式。

具体实施方式

[0034] 下面结合附图对本发明做进一步描述。

[0035] 本发明所述的基于模糊控制的船舶柴电混合动力推进系统通过以下技术方案来

实现:

[0036] 船舶柴电混合动力推进系统型式如图1所示,柴油机和三相永磁同步电机以并联的方式,连接在齿轮箱的两个输入轴上,柴油机和电动机的输出轴上同时配备有不同的离合器1和2,在不同的工作模式下,离合器的开关状态有所不同。同时在三相永磁同步电机侧,配备由DC/DC逆变器,当三相永磁同步电机做轴带发电机进行发电时,能有效整合三相永磁同步电机侧的电能,并将所发电能传递给蓄电池,对蓄电池进行充电。当三相永磁同步电机做电动机使用时,直接由蓄电池对其进行驱动,DC/DC逆变器此时不工作。

[0037] 基于模糊控制的柴电混合动力协调分配控制策略:

[0038] 步骤1:对柴油机特性曲线进行分析,如图2所示,柴油机的特性曲线使柴油机本身固有的特性,不随外界条件变化而改变,相关参数的变化通过实验测得。实验中采用将柴油机的喷油泵调节机构固定,通过改变柴油机负载的大小,使柴油机转速也随之变化,在这种条件下测得柴油机主要性能指标和工作参数随转速变化的规律。

[0039] 由图2中曲线可知,柴油机在转速 n_1 状态时开始工作,此时柴油机功率较低,且燃油消耗率极高,转矩较低,故在转速到达 n_1 之前,在电池剩余电量充足的情况下,根据轴带电机在低速区具有启动响应迅速,功耗低等特点,应使用轴带电机作电动机完成系统启动或短期低速航行等工作,此时系统工作在轴带电机单独推进的电动机模式。

[0040] 随着负荷增加,转速增加,柴油机的转矩增加,燃油消耗率减小,在转速达到 n_2 时,柴油机输出转矩达到最大,此时柴油机工作在燃油消耗率相对较小的状态下,且具有较好的输出功率,通常将该点定义为最佳工作点。随后在转速继续增加柴油机输出转矩开始小幅度减小,燃油消耗率在 n_3 处达到最低,故在船舶航行所需转矩和功率在柴油机能提供范围内时,应使柴油机工作在最佳工作点附近,此时系统通过柴油机单独推进,柴油机的富裕功率提供给轴带电机,对蓄电池进行充电,此时为轴带电机作发电机状态。

[0041] 在转速到达 n_4 处,柴油机功率输出和燃油消耗率达到较高值,输出转矩有一定程度降低,超过 n_4 状态后,柴油机的工作状态较差,故在转速高速 n_4 后以及柴油机无法满足船舶航行所需转矩时,柴油机应改变状态,处于适宜的恒功率状态,不足的系统所需的功率应通过轴带电机作电动机辅助推进。

[0042] 由此可知,将船舶的所需转矩的不同程度作为模糊控制的一个输入集合、将电池的剩余电量作为另一个输入集合,在不同的船舶航速要求下,将输入进行模糊化处理,模糊推理,进而控制系统的工作模式。

[0043] 步骤2:建立模糊控制器结构

[0044] 船舶混合动力推进节能控制系统的模糊控制器设计主要包括:输入输出变量的选取、输入输出变量模糊化、模糊隶属度函数定义、模糊规则制定。模糊控制器的基本结构如图3所示,通过其结构图可以看出,模糊控制器一般由四个部分组成,他们分别是:模糊化接口:将系统的输入与输出的实际论域转换为符合系统输入的模糊集合;规则库:根据系统的输入与输出之间的定性关系通过一些经验转换为控制规则,以便后续进行模糊推理;模糊推理:根据制定的模糊控制规则推理出整个系统各个输入输出模糊集合之间的关系;清晰化接口:对模糊控制器的输入输出的模糊集合进行清晰化得到系统的确切输入输出值。

[0045] 步骤3:输入输出变量模糊化

[0046] 对输入输出变量进行基本论域转化为模糊集合,其基本论域为 $[u_{\min}, u_{\max}]$,对其进

行模糊化得到的模糊集合为 $[u'_{\min}, u'_{\max}]$,则采用线性变换:

$$[0047] \quad u' = \frac{u'_{\min} + u'_{\max}}{2} + K \left(u - \frac{u_{\min} + u_{\max}}{2} \right)$$

[0048] 设蓄电池剩余电量为SOC,船舶运行的总需求转矩为 T_n ,柴油机的输出转矩为 T_e 。对于蓄电池剩余电量,讨论其实际变化范围为 $[0, SOC_{\max}]$,其中 SOC_{\max} 代表蓄电池的容量,为了对其在模糊控制器中进行等级划分,对其参数通过量化因子 K_1 进行量化,设定其模糊集合为 $[0, 1]$,其中0代表蓄电池剩余电量为0,0.5代表蓄电池剩余电量为中等,1代表蓄电池电量充足,其他的电量等级在区间内线性分布。

[0049] 同理,对于船舶运行的总需求转矩,其实际变化范围应该为 $[0, T_{n\max}]$,其中 $T_{n\max}$ 表示船舶运行总需求转矩最大值,为了对其在模糊控制器中进行等级划分,对其参数通过量化因子 K_2 进行量化,设定其模糊集合为 $[0, 1]$,其中0代表转矩为0,1代表船舶运行总需求转矩最大,其余转矩等级在区间内进行线性分布。

[0050] 对于模糊控制器的输出:柴油机的输出转矩,其实际变化范围应该为 $[0, T_{e\max}]$,其中 $T_{e\max}$ 表示柴油机输出转矩最大值,同样的,为了对其在模糊控制器中进行等级划分,对其参数通过量化因子 K_3 进行量化,设定其模糊集合也为 $[0, 1]$,其中0代表转矩为0,0.5代表柴油机的最优转矩,该值由柴油机的速度特性和负载特性来决定,1代表柴油机能输出的最大转矩,其余转矩等级在区间内进行线性分布。

[0051] 步骤4:模糊集合隶属度函数:

[0052] 选择专家经验法对隶属度函数进行构造,通过对船舶混合动力节能控制系统和隶属度函数的曲线形状和分布对控制系统的影响的综合分析,总结得出对于蓄电池剩余电量和船舶运行总需求转矩使用高斯型隶属度函数曲线对船舶混合动力系统的分辨率和响应速度的提升有很大的帮助,又能不至于使控制系统的稳定性太差,对于系统输出柴油机输出转矩使用三角型隶属度函数曲线,能大大提高系统精度。

[0053] 用Matlab建立输入输出模糊集合的隶属度函数曲线如下,图4为蓄电池剩余电量的隶属度函数曲线,图5为船舶运行的总需求转矩隶属度函数曲线,图6为柴油机输出转矩隶属度函数曲线。图4、5、6中,XS表示极小,S表示小,PS表示较小,MS表示中小,M表示中等,MB表示中大,PB表示较大,B表示大,XB表示极大。

[0054] 步骤5:模糊控制规则制定

[0055] 船舶混合动力节能推进控制系统根据过程的模糊模型生成控制规则,且在设计时注意规则数量的合理性、一致性和完备性。混合动力船舶模糊控制规则的设计主要根据以下依据来制定:

[0056] (1)当蓄电池剩余电量不足时,柴油机的输出转矩应高于船舶运行的总需求转矩,柴油机运行时产生的富余功率送给轴带发电机,轴带发电机发电给蓄电池和船舶电网供电。

[0057] (2)当蓄电池剩余电量较为充足时,柴油机输出转矩应足以提供船舶运行的总需求转矩,这种情况下使柴油机在较高效率区工作,即为运行柴油机模式。

[0058] (3)当蓄电池剩余电量充足时,柴油机应该工作在最佳工作点附近,船舶运行的总需求转矩与柴油机的输出转矩的差值由电动机来进行补偿。

[0059] (4)当蓄电池剩余电量高时,使用柴油机作为主动力,电动机作为辅助动力进行混

合推进。

[0060] (5) 无论使用何种模式推进,为降低燃油消耗量,提高燃油利用率,柴油机的输出转矩都应在最优转矩以内,转矩超过最优转矩,将会导致柴油机故障。

[0061] 根据以上原则,对输入输出模糊集合进行等级划分,将蓄电池剩余电量和船舶运行的总需求转矩划分为7个等级,即分为7个模糊子集,将柴油机输出转矩划分为9个等级,即分为9个模糊子集。

[0062] 蓄电池剩余电量SOC的模糊集合,包含7个模糊子集: {XS,S,PS,M,PB,B,XB},船舶运行的总需求转矩 T_n 的模糊集合,包含7个模糊子集: {XS,S,PS,M,PB,B,XB},柴油输出转矩 T_e 的模糊集合,包含9个模糊子集: {XS,S,PS,MS,M,MB,PB,B,XB},其中,XS表示极小,S表示小,PS表示较小,MS表示中小,M表示中等,MB表示中大,PB表示较大,B表示大,XB表示极大。根据上述分析,制定模糊控制规则,见表1。

		T_e	T_n						
			XS	S	PS	M	PB	B	XB
[0063]	SOC	XS	XS	S	PS	MS	MS	M	M
		S	XS	XS	S	PS	PS	MS	MS
		PS	XS	XS	XS	S	S	PS	PS
		M	XS	XS	XS	XS	S	S	PS
		PB	XS	XS	XS	XS	XS	S	S
		B	XS	XS	XS	XS	XS	XS	XS
		XB	XS	XS	XS	XS	XS	XS	XS

[0064] 表1

[0065] 对于该问题的模糊推理语句为“if A and B then C”使用zadah法对模糊规则进行模糊推理,根据一个已知的电池剩余电量、船舶运行所需功率,根据经验得到一个已知的柴油机的最佳输出功率,即确定出模糊关系R。根据模糊控制规则表1,对其运用Matlab的图形化工具进行模糊规则的图形化,如图7所示:从模糊规则图形化曲面可以看出,当蓄电池剩余电量较为充足时,柴油机输出转矩小,依靠电动机作为辅助动力推动船舶航行,船舶运行对柴油机的依赖程度有所降低,能有效的降低船舶运行过程中柴油机的推进压力,降低燃油消耗率,实现节能推进。当蓄电池电量并不充足时,柴油机作为主动力进行推进,能很好的推动船舶航行,且其输出转矩始终处于最优转矩的范围内,能很好地提高柴油机的运行效率,以及燃油利用率。

[0066] 步骤6:模糊控制输出清晰化

[0067] 进行完步骤5模糊规则的判定后,模糊控制器将输出一个模糊量,该模糊量为柴油机输出转矩 T_e 的模糊集合 {XS,S,PS,MS,M,MB,PB,B,XB} 中的一个子集,不能直接用于控制执行机构,利用加权平均法对模糊控制的输出量进行判决:

[0068]
$$T'_e = \frac{\sum k_i x_i}{\sum x_i}$$

[0069] 其中, x_i 表示在决策出的模糊子集中,决策出的离散点, k_i 表示该离散的点对应的

权重,取每个模糊子集的中间值。该判决得出的结果为柴油机输出功率得档数 T'_e , T'_e 的变化范围为 $[T'_{e,\min}, T'_{e,\max}]$,并不代表柴油机的实际输出功率,继续对其进行线性变换,依旧使用量化因子 K_3 ,对其进行实际控制量的变化范围 $[0, T_{e,\max}]$ 的变换:

$$[0070] \quad T_e = \frac{T_{e,\max}}{2} + k_3 \left(T'_e - \frac{T'_{e,\min} + T'_{e,\max}}{2} \right)$$

[0071] 步骤7:柴电混合动力系统数学模型建立

[0072] 对船舶混合动力系统进行建模,根据柴油机模块仿真模型、电机模块仿真模型、模糊控制器模块仿真模型、齿轮变速箱模型进行联立。将船舶航行所需转矩和电池剩余电量作为模糊控制器的输入信号,输出柴油机航行所需转矩,通过柴油机负荷特性进而得到柴油机油门开度和电机励磁电压的控制信号,柴电混合动力系统建模如图8所示。

[0073] 通过柴油机喷油量和转矩关系如下图9所示,得到柴油机输出转矩和油门开度的关系,其中 α 表示油门开度, M 表示柴油机输出转矩;故通过柴油机开度 α 和柴油机转矩 M 关系,simulink中Fcn的函数为

$$[0074] \quad \left(\frac{\partial M}{\partial \alpha} \right) = \frac{M_0}{\alpha_0}$$

[0075] 通过模糊控制器输出得到柴油机输出转矩时,通过MATLAB Fcn函数模块,其中柴

油机功率为 $P_e = \frac{M_e n_s}{9550}$,轴带电机功率为 $P_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N \eta_N$,定义分段函数

$$[0076] \quad P_N = \begin{cases} P \dots \dots M \leq 0.3M_m \\ 0 \dots \dots 0.3M_m \leq M \leq 0.8M_m \\ P - P_e \dots 0.8M_m \leq M \end{cases}$$

[0077] 其中 P 为船舶运行所需功率。通过上述关系联立得到电机励磁电压,柴油机和轴带电机输出转速在变速箱中进行合成作为船桨一体化模型的输入转速,通过反馈环节中将船舶转矩信号反馈到模糊控制器输入,进而实现船舶航行转矩的闭环控制。

[0078] 系统由柴油机、电机、模糊控制器、电磁离合器、齿轮箱以及传动轴系、螺旋桨、DC/DC变换器、蓄电池组成。通过以系统目标航速、电池剩余电量为系统输入信号,通过模糊逻辑控制器驱动柴油机油门开度,调节系统的动力模式,分别建立系统柴油机模式、电动机模式、轴带发电机模式、混合动力模式,通过控制器调节柴油机和电机的工作状态,实现混合动力系统的稳定运行。

[0079] 利用模糊控制器进行柴电混合动力船舶工作模式的选择。模糊控制器输入为接收到的蓄电池剩余电量信号SOC以及螺旋桨端船舶运行所需功率信号 T_n 。首先将蓄电池的输入信号SOC利用量化因子 K_1 进行模糊化、船舶运行所需功率 T_n 利用量化因子 K_2 首先进行模糊化,并根据模糊化后的值确定模糊化之后蓄电池剩余电量SOC为模糊子集 $\{XS, S, PS, M, PB, B, XB\}$ 中的哪个子集,并确定模糊化后船舶运行所需功率 T_n 为模糊子集 $\{XS, S, PS, M, PB, B, XB\}$ 中的哪个子集,并在两者的隶属函数曲线中,找出将输入进行模糊化后的位置。其次,利用模糊控制推理关系“if A and B then C”,根据建立的模糊规则控制表(见表1),可以得出当下柴油机输出转矩 T_e 所处的模糊子集,为 $\{XS, S, PS, MS, M, MB, PB, B, XB\}$ 中的一个。接

着,根据输出的柴油机输出转矩的模糊子集,利用加权平均法 $T_e' = \frac{\sum k_i x_i}{\sum x_i}$,对柴油机输出转

矩所处档位进行判决,继而利用量化因子 K_3 , $T_e = \frac{T_{e,\max}}{2} + k_3(T_e' - \frac{T_{e,\min}}{2} + \frac{T_{e,\max}}{2})$,将柴油机输

出转矩的档位转化为真实的柴油机的输出功率。最后,根据柴电混合动力系统的数学模型,将柴油机的输出功率转换为柴油机油门控制信号以及电机的励磁电压的控制信号,控制柴油机和电机的输出,并进行工作模式的选择,其中电机的输出功率由船舶运行所需功率与柴油机输出功率之差给出。

[0080] 柴电混合动力船舶的四种工作模式如下:

[0081] (1) 柴油机模式:当蓄电池电量不充足,且螺旋桨端船舶运行所需功率较大时,柴油机输出功率提供全部船舶运行所需功率,此时利用柴油机作为推进动力,运行于最佳工况点,由于其热效率高,功率密度大的特点,因此能很好地推动船舶航行。故此状态时采用柴油提供推进动力单独推进的模式,该模式下系统运行图如图10所示:工作站,即模糊控制器接收蓄电池的剩余电量的信号,以及螺旋桨端船舶运行所需功率的信号,将柴油输出信号、电机输出信号、DC/DC逆变器工作信号、离合器开合信号分别传递给各个单元。利用工作站中相应的智能控制器,控制离合器1处于接合状态,三相永磁同步电机不工作,相对应的离合器2处于断开状态,DC/DC逆变器处于不工作状态,电池剩余电量不变。功率流:柴油机—离合器1—齿轮箱—传动轴系—螺旋桨

[0082] (2) 电动机模式:当蓄电池电量充足,且螺旋桨端船舶运行所需功率较小时,柴油机输出功率几乎为0,此时电动机提供船舶运行所需功率,推动船舶航行。故此状态下采用电动机来推动混合船舶航行,该模式下系统运行如图11所示:工作站,即模糊控制器接收蓄电池的剩余电量的信号,以及螺旋桨端船舶运行所需功率的信号,将柴油输出信号、电机输出信号、DC/DC逆变器工作信号、离合器开合信号分别传递给各个单元。利用工作站中相应的智能控制器,此时,三相永磁同步电机处于工电动机作状态,输出功率由船舶运行所需功率与柴油机输出功率之差给出,蓄电池直接给电动机供给电能,DC/DC逆变器不工作,离合器2处于接合状态,柴油机不工作,离合器1处于断开状态。功率流:蓄电池—电动机—离合器2—齿轮箱—传动轴系—螺旋桨。

[0083] (3) 轴带发电机模式:当蓄电池电量不充足,且螺旋桨端船舶运行所需功率较小时,柴油机输出功率不仅能够满足船舶航行,同时还有富裕功率能给带动电机,给蓄电池充电。故此状态下采用轴带发电机运行模式,模式下系统运行图如图12所示:工作站,即模糊控制器接收蓄电池的剩余电量的信号,以及螺旋桨端船舶运行所需功率的信号,将柴油输出信号、电机输出信号、DC/DC逆变器工作信号、离合器开合信号分别传递给各个单元。利用工作站中相应的智能控制器,三相永磁同步电机处于发电机工作状态,吸收功率由船舶运行所需功率与柴油机输出功率之差给出,离合器1和离合器2全部处于接合状态,柴油机输出功率一部分经离合器1、齿轮箱送给螺旋桨,一部分经离合器1、齿轮箱、离合器2送给轴带发电机。此时DC/DC逆变器工作,将轴带发电机所发电能进行整合后送给蓄电池,给蓄电池充电。功率流:柴油机—离合器1—齿轮箱—传动轴系—螺旋桨;柴油机—离合器1—齿轮箱—离合器2—轴带发电机—DC/DC逆变器—蓄电池。

[0084] (4) 混合动力模式:当蓄电池电量充足,且船舶运行所需功率为极大时,柴油机输

出功率在最佳工况点附近,不能提供全部的船舶运行所需功率,剩余功率由电动机提供。故该航行状态使用柴油机和电动机来共同驱动,可以满足混合动力船舶的功率需求,该模式下系统运行图如图13所示:工作站,即模糊控制器接收蓄电池的剩余电量的信号,以及螺旋桨端船舶运行所需功率的信号,将柴油输出信号、电机输出信号、DC/DC逆变器工作信号、离合器开合信号分别传递给各个单元。利用工作站中相应的智能控制器,三相永磁同步电机处于电动机工作状态,输出功率由船舶运行所需功率与柴油机输出功率之差给出,离合器1和离合器2都处于接合状态,蓄电池直接给电动机供给电能,DC/DC逆变器不工作。功率流:柴油机—离合器1—齿轮箱—传动轴系—螺旋桨;蓄电池—电动机—离合器2—齿轮箱—传动轴系—螺旋桨。

[0085] 以上所述仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

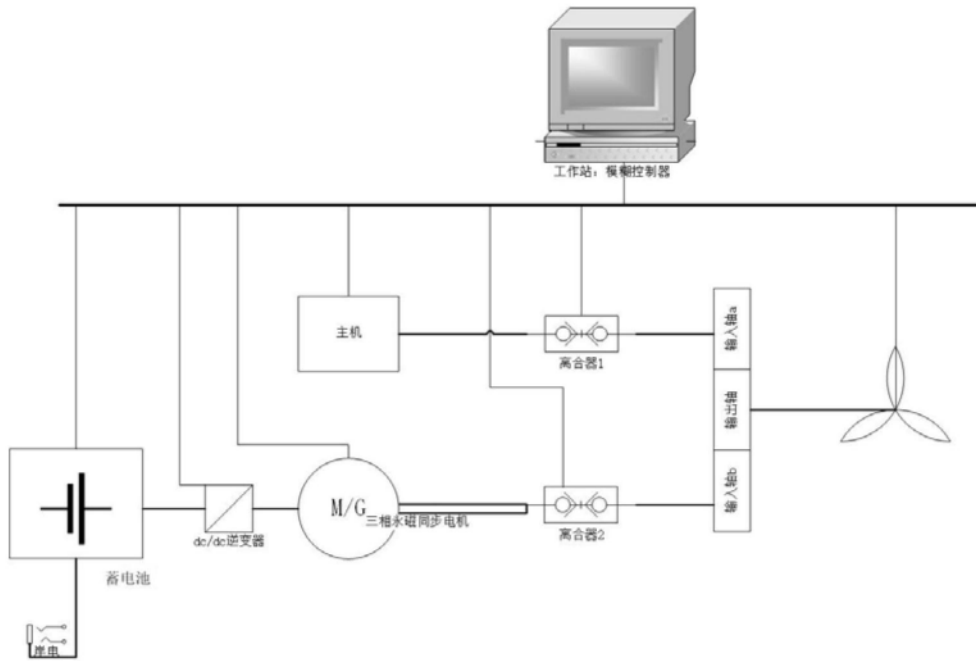


图1

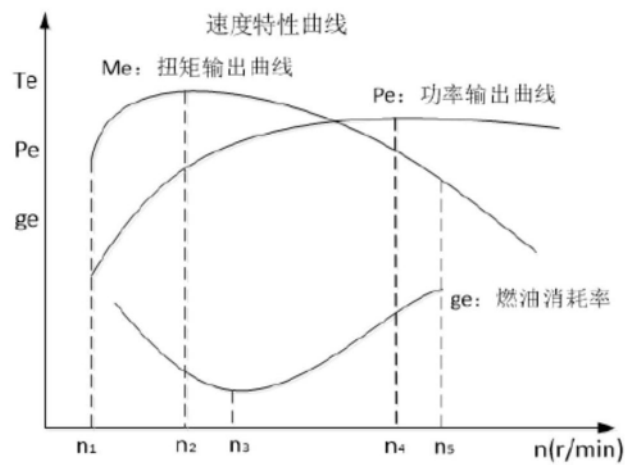


图2

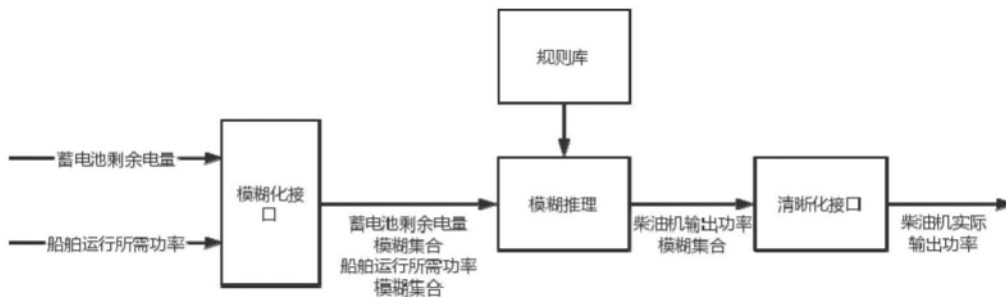


图3

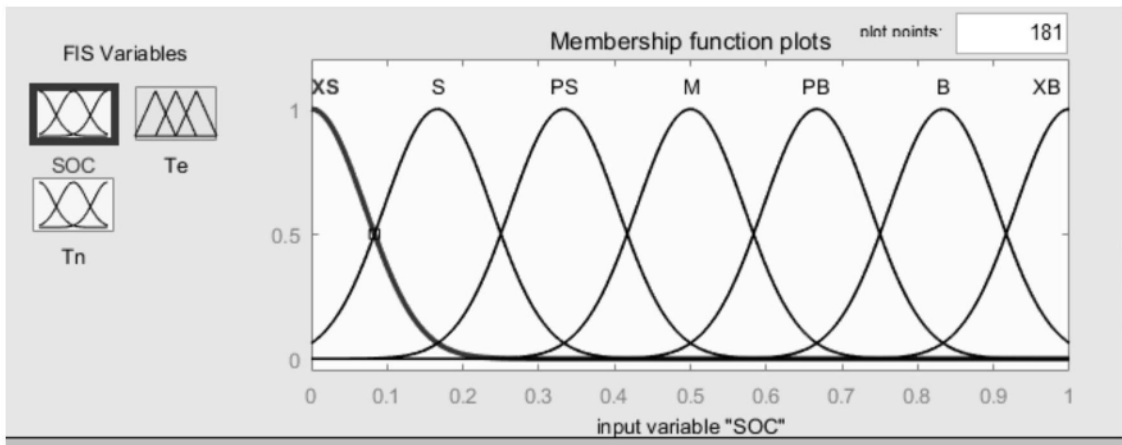


图4

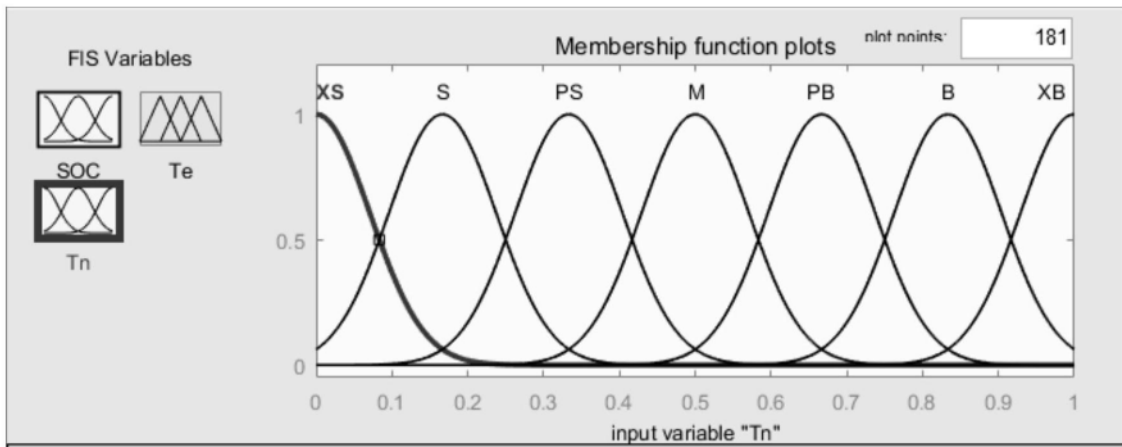


图5

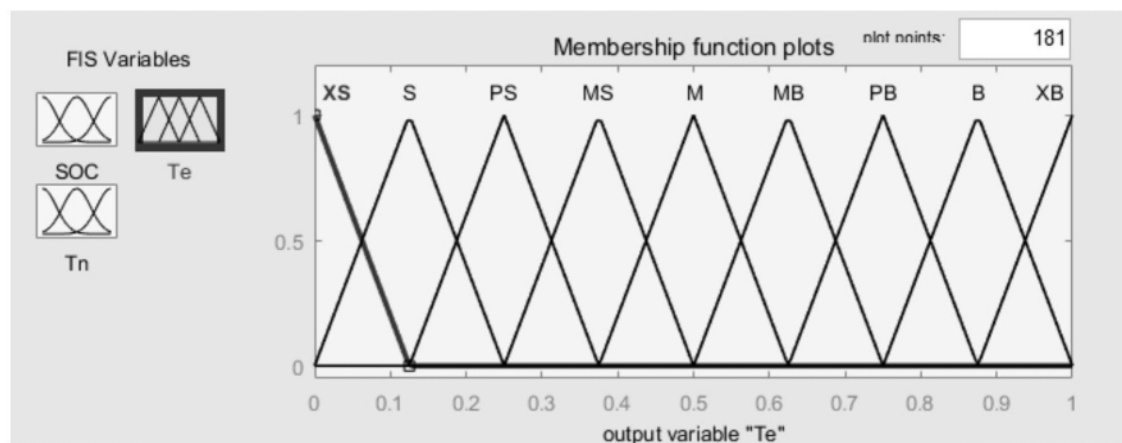


图6

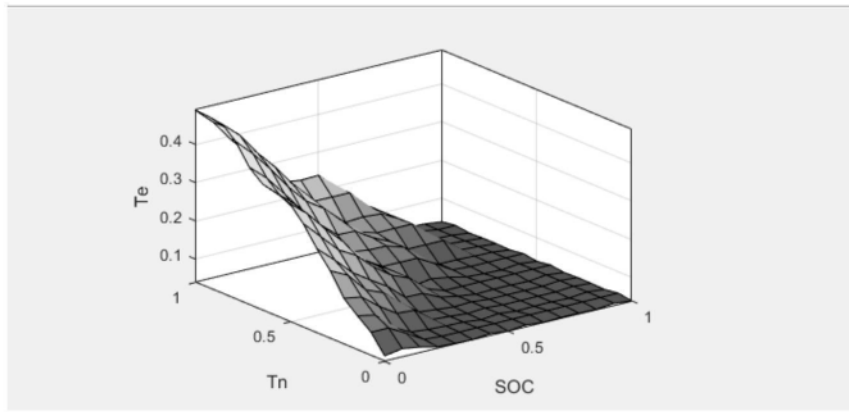


图7

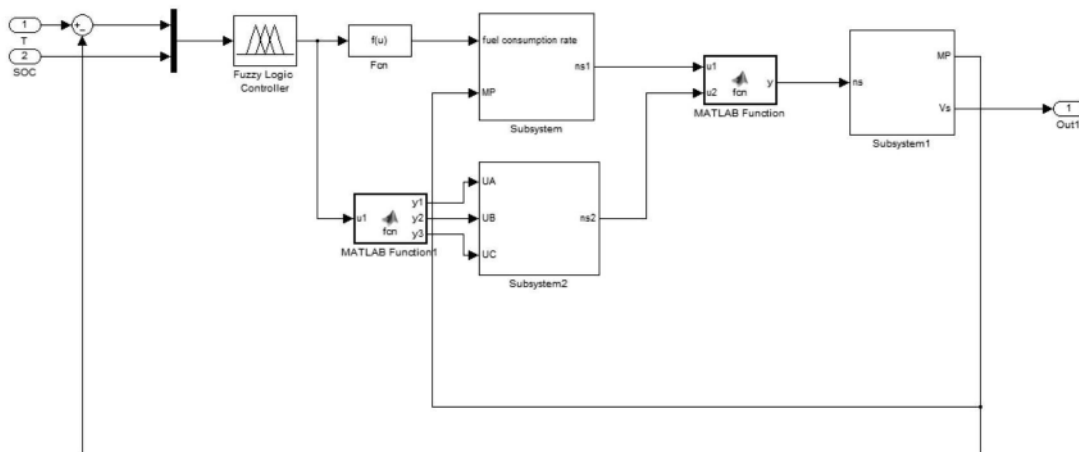


图8

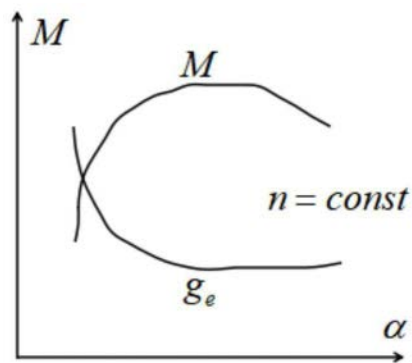


图9

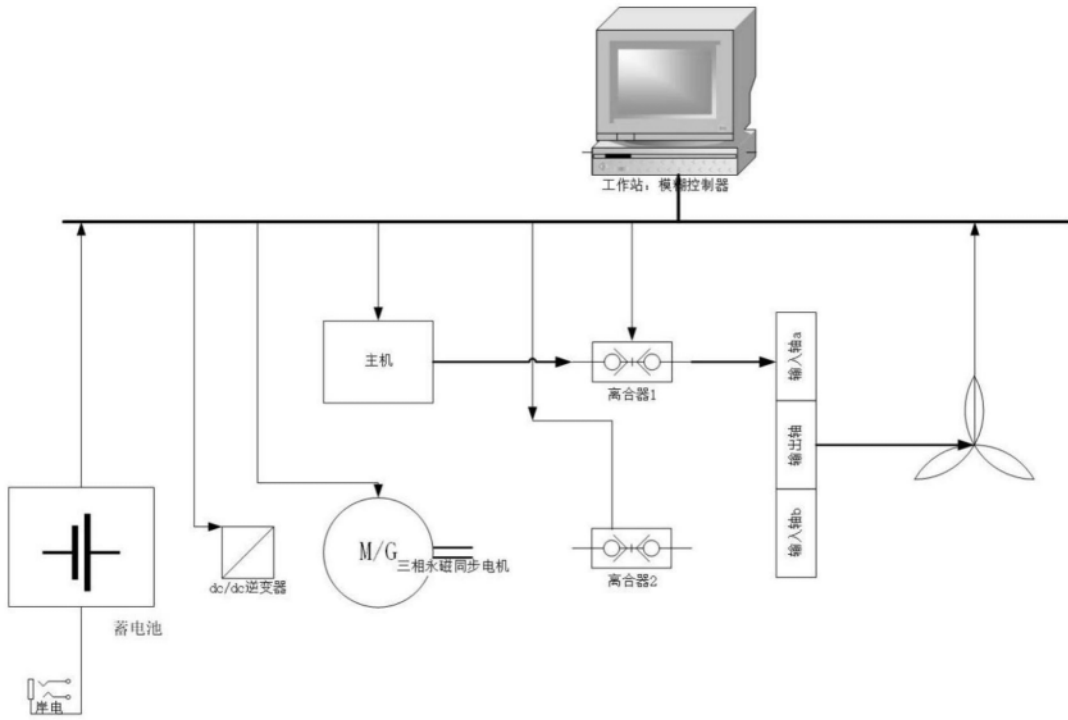


图10

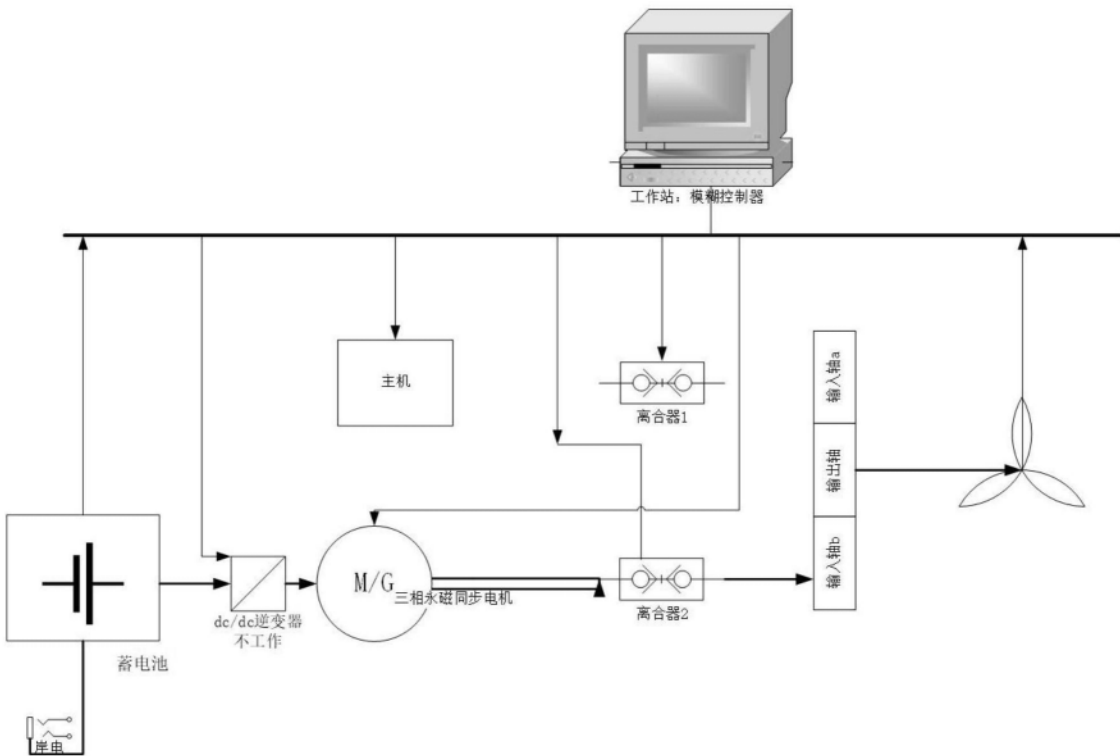


图11

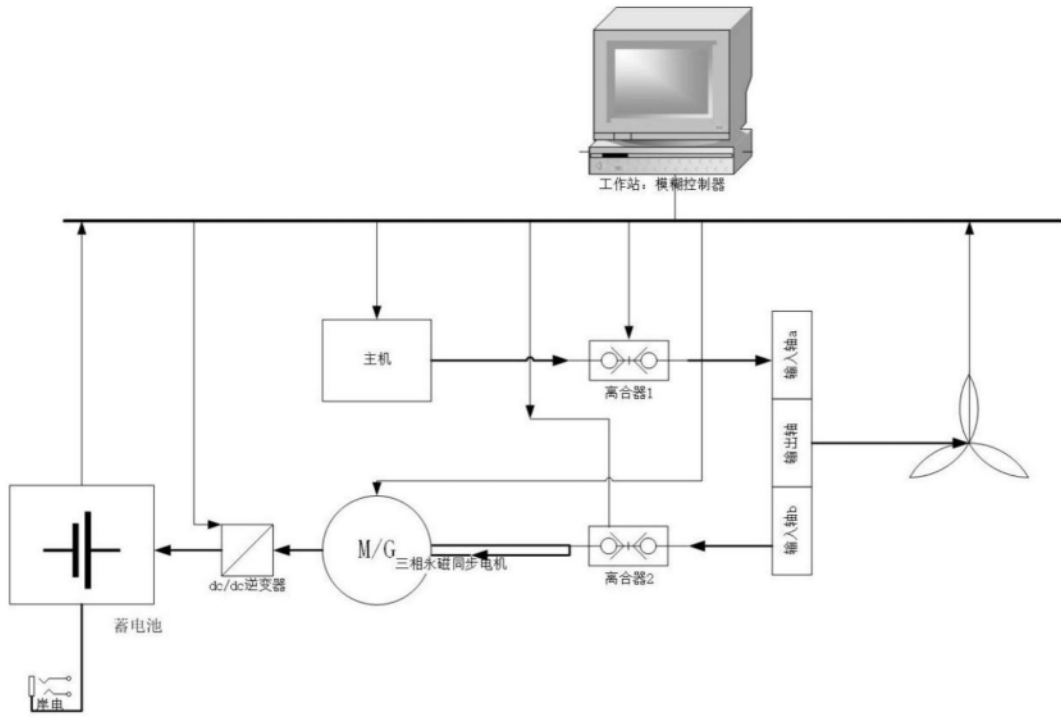


图12

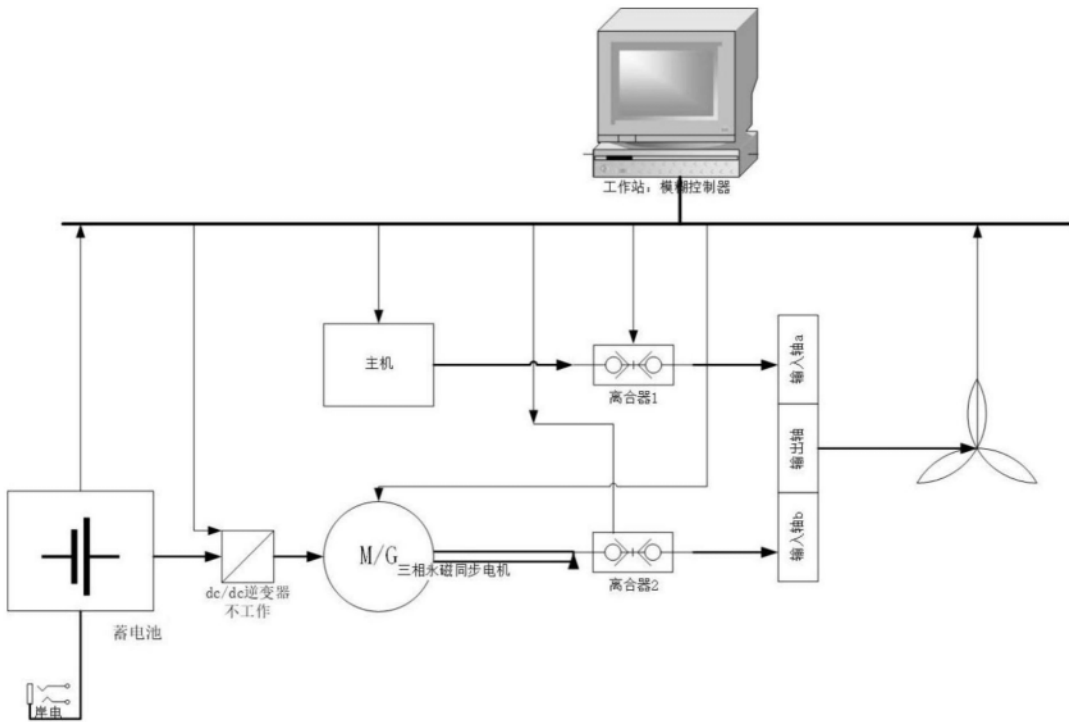


图13