基于混杂模型预测控制的顺序实时决策混合动力能量管理策略研究

孙晓军[1*] 刘丛浩[1] 张 乔[1] 宋恩哲[2]
1.辽宁工业大学汽车与交通工程学院,锦州,121001
2.哈尔滨工程大学动力与能源工程学院,哈尔滨,150001

摘要:提出了一种用于船舶混合动力推进系统的动力分配优化策略和评估架构。从实验数据和组件特性角度出发,结合系统辨识、聚类算法等方法将连续变量和离散变量有效融合以构建反映船舶混合动力混杂特性的状态空间方程。定义了满足减少燃料消耗和提高动力性能的权衡性能指标函数,并设计了基于混合逻辑动态模型的混杂模型预测控制器(HMPC),使得天然气发动机、永磁同步电机和离合器的协同工作达到最优控制效果。最后,利用测试工况对所提出的 HMPC 在节能和动力提升方面进行实机测试,结果表明,与兼顾经济性与动力性的 HMPC 相比,燃料最优 HMPC 可节约 2.72%的燃料,动力最佳 HMPC 可提高 59.72%动力性能。

关键词:混合动力模型;能量管理;船舶混合动力;系统辨识;混杂系统
中图分类号:U674.925
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.026 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Research on Hybrid Power Energy Management Strategy Based on Sequential Real-time Decision Making with Hybrid Model Predictive Control

SUN Xiaojun[1*] LIU Conghao[1] ZHANG Qiao[1] SONG Enzhe[2]
1.School of Automobile and Traffic Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou, Liaoning, 121001
2.College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, 150001

Abstract: An optimization strategy and evaluation framework for power distribution in marine hybrid propulsion systems was developed. Experimental data and component characteristics were analyzed, and system identification and clustering algorithms were employed to integrate continuous and discrete variables effectively. A state-space equation was formulated to represent the hybrid characteristics of the propulsion systems. A trade-off performance index function was defined to balance fuel consumption reduction and power performance enhancement. Based on a mixed logical dynamic model, a hybrid model predictive controller(HMPC) was designed to optimize the collaborative operations of natural gas engines, permanent magnet synchronous motors and clutches. Finally, the proposed HMPC was tested in real machine in terms of energy saving and power improvement using test conditions. The results show that the fuel-optimal HMPC saves 2.72% fuel and the power-optimal HMPC improves power performance by 59.72% compared to the HMPC that combines economy and power.

Key words: hybrid power model; energy management; marine hybrid power; system identification; hybrid system

0 引言

在船舶行业能效法规日益严格与节能环保呼声不断增强的国际背景下,船用动力新型化、绿色化已成为一种发展趋势和研究热点。船用动力正从单一燃料发动机向多动力源相结合的混合动力系统转变,以实现更优的动力性能和燃料效率。船舶混合动力系统(marine hybrid power system, MHPS)属于多尺度动力耦合系统,较传统船舶动力增加了机械自由度和能量自由度[1-2]。混合动力的能源多样性赋予了船舶运行灵活、经济效益高的优点,但结构复杂和动力源工作时间尺度不一给能量管理带来了极大的挑战[3]。

船舶混合动力的技术发展路线与能量管理策略思路来源于混合动力汽车行业[4]。对能量管理策略的研究主要集中在优化模型与求解算法上。

收稿日期:2024-06-03
基金项目:辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(LJ212410154030);"春晖计划"合作科研项目(HZKY20220405);工信部高技术船舶科研项目(KY10300190077);辽宁工业大学博士启动基金(XB2023027)

优化模型方面，ZHANG 等[5]采用一阶模型为电池和超级电容进行了特性建模；BEATRICE 等[6]采用实机测试的发动机功率、比燃油消耗之间的关系来模拟柴油机工作过程。XU 等[7]利用线性关系来模拟发电机组功率的产生过程。以上研究主要将动力源简化为一阶模型或者利用实验数据拟合关系来模拟其特性，对动态响应快的动力源不会对能量管理策略产生很大的影响，但动态响应慢的动力源（如天然气发动机）响应延迟可能导致能量管理策略输出的分配能量发生突变，从而引发设备运行振荡等严重后果。在能量管理策略的求解算法方面，主要采用的方法包括基于规则、等效燃料最小策略（equivalent consumption minimization strategy，ECMS）、模型预测控制（model predictive control，MPC）以及启发式算法。AL-FALAHI 等[8]对配有混合动力系统的电动轮船进行了建模，并使用 MATLAB/Simulink 对电力管理系统进行了仿真。ECMS 是一种在线优化策略，常用于汽车领域，采用等效因子调整输出功率[9]。BASSAM 等[10]、YUAN 等[11]和 ZAHEDI 等[12]分析了 ECMS 在混合动力系统中的节能潜力。PLANAKIS 等[13]采用 MPC 解决柴电混合动力系统动力源功率分配问题。比较常见的 MPC 有自适应模型预测控制（adaptive model predictive control，AMPC）[14]、非线性模型预测控制（nonlinear model predictive control，NMPC）[15]等，但以上类型的 MPC 无法有效解决涉及连续变量和离散变量相互耦合系统中的能量分配问题。然而，混杂模型预测控制（hybrid model predictive control，HMPC）可充分结合连续和离散变量的动态行为，能够有效应对存在离散变量的控制系统，精确分配不同动力源能量，提高整体效率[16]。

因此，本文引入混杂系统，从实验数据和组件特性角度出发，利用面向控制的建模方法，搭建能反映天然气发动机动态特性以及离合器布尔控制量的混杂状态空间方程；提出了新型的基于混杂系统的船舶混杂模型预测控制器，其中性能指标函数包含减少燃料消耗和提升动力性能等目标，通过加权因子来权衡燃料消耗和动力性能。

1　实验平台与建模方法

1.1　实验装置

在船用混合动力实验台架上进行实验，台架实物如图 1 所示。电机驱动既可以为螺旋桨提供所需动力，也可以作为发电机组为储能系统充电。主要设备的系统参数如表 1 所示。实验台架由机械部分和电气部分构成。

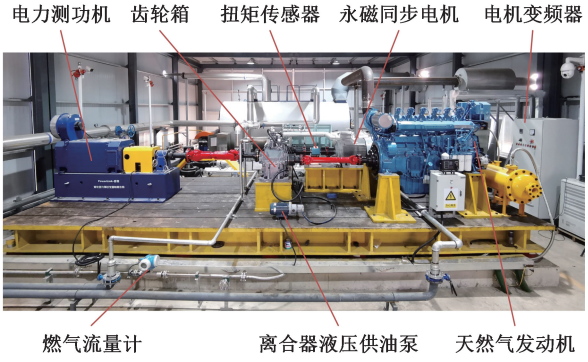


图 1　MHPS 台架实物图

Fig.1　Physical drawing of MHPS bench

表 1　设备特征参数

Tab.1　Equipment characteristics parameters

序号	设备	型号	设备参数与指标	功能
1	天然气发动机	6M33	标定功率 330 kW；标定转速 1500 r/min；最低空载稳定转速 650 r/min	动力源
2	电机	永磁同步可逆电机	额定功率 98 kW；额定电压 380 V；额定电流 285 A	动力源
3	齿轮箱	2F700	离合器型式：液压操纵湿式多片摩擦离合器；工作油压 1.4～1.6 MPa	耦合机械动力
4	储能系统	$LiFePO_4$	电池储能 205 kW·h；持续最高输出功率 102.8 kW；容量 315 A·h；额定电压 652.8 V	为 PMSM 提供动力以及进行能量储存
5	电力测功机	CAC-560	额定功率 560 kW；最高转速 3300 r/min；额定转矩 3055 N·m	模拟螺旋桨工况

1）机械部分。天然气发动机（natural gas engine，NGE）与永磁同步电机（permanent magnet synchronous motor，PMSM）通过万向节与齿轮箱连接，从而将动力输入到电力测功机中，以模拟实际螺旋桨的负载状况。NGE 配置了完全开源、可标定的电子控制器，以适应各种船舶类型。

2）电气部分。储能系统为电机提供动力或者将电机能量进行储存。

为了表征本文提出的混合动力结构中的多动力源工作过程，实验活动都是通过硬件在环（hardware-in-the-loop，HIL）测试系统发送控制命令的，HIL 实验平台的示意图见图 2。实时能量管理系统采用 CompactRIO 嵌入式实时控制器，支持热插拔的 I/O 模块。

嵌入到齿轮箱的离合器通过能量管理系统发送远程操作指令，如接排与脱排。天然气消耗通过科里奥利质量流量计进行测量；PMSM 输出扭矩由 kisler-4503 测量。本地测试台通过 FC2022C 数据采集模块在 PC 端记录测试数据。

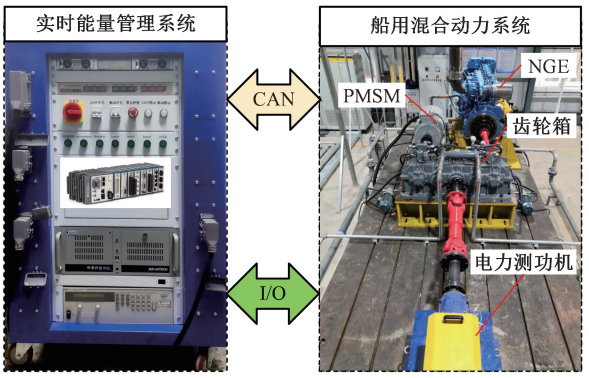


图 2 HIL 实验平台示意图

Fig.2 Schematic diagram of HIL experimental platform

1.2 面向控制的混合动力系统建模方法

1.2.1 系统辨识方法

预测误差模型(prediction error model, PEM)是系统辨识领域中应用比较广泛的一种方法[17-18],它通过系统的输入和输出参数来演化内部动态关系确定状态空间模型。该方法的原理为最小化估计误差来使所辨识状态空间趋近于现实状态。PEM 的理论表达式为

$$A(z^{-1})y(t)=\sum\left(\frac{P(z^{-1})}{Q(z^{-1})}u(t-d)\right)+\frac{R(z^{-1})}{S(z^{-1})}e(t)+\alpha \tag{1}$$

$$\hat{y}(t)=\frac{S(z^{-1})}{R(z^{-1})}\sum\left(\frac{P(z^{-1})}{Q(z^{-1})}u(t-d)\right)+\left(1-\frac{D(z^{-1})A(z^{-1})}{R(z^{-1})}\right)y(t)+\frac{S(z^{-1})}{R(z^{-1})}\alpha \tag{2}$$

$$\varepsilon(t)=y(t)-\hat{y}(t)=\frac{S(z^{-1})}{R(z^{-1})}\left[A(z^{-1})y(t)-\sum\left(\frac{P(z^{-1})}{Q(z^{-1})}u(t-d)\right)-\alpha\right] \tag{3}$$

式中:$y(t)$ 为系统的实际输出;$\hat{y}(t)$ 为预测输出;$\varepsilon(t)$ 为预测误差;$e(t)$ 为干扰信号;α 为校正系统偏移;$u(t-d)$ 为控制输入信号;$\frac{P(z^{-1})}{Q(z^{-1})}$ 为输入传递函数;$\frac{S(z^{-1})}{R(z^{-1})}$ 为噪声传递函数;$A(z^{-1})$ 为系统输出 $y(t)$ 的当前值与其历史值之间的关系;$D(z^{-1})$ 为系统模型中用于描述反馈特性的多项式。

天然气发动机属于非线性程度高、工作过程复杂多变的系统,为了能够充分表征天然气发动机工作过程,采用“划分工作区域+PEM”结合的方式进行建模,以得到每个工作区间的状态空间方程。

1.2.2 基于聚类方法的 PWARX 辨识算法

为了利用数学理论与方法解决工程中船舶领域最优求解面临的非线性问题,如天然气发动机的天然气消耗、电机的工作效率等问题,FERRARI-TRECATE 等[19] 提出基于聚类方法的一种在特征空间多面体分区上使用线性预测器的分段仿射自回归各态历经(piecewise auto regressive exogenous,PWARX)算法。PWARX 算法基本思路是通过聚类算法对子模型区域进行无监督划分,然后在子模型区域再进行 PWA 线性识别。PWARX 是一种由有限个仿射子模型集成的模型,一个 PWA 回归问题需要从 N 个数据集$\{\boldsymbol{x}(k),\boldsymbol{y}(k)\}(k=1,2,\cdots,N)$ 重建 PWA 映射 f,如下式所示:

$$\boldsymbol{y}(k)=f(\boldsymbol{x}(k))+\boldsymbol{\varepsilon}(k) \tag{4}$$

$$f(\boldsymbol{x}(k))=\begin{cases}\boldsymbol{\theta}'_1\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\1\end{bmatrix} & \boldsymbol{x}\in J_1\\ \boldsymbol{\theta}'_2\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\1\end{bmatrix} & \boldsymbol{x}\in J_2\\ \vdots & \vdots\\ \boldsymbol{\theta}'_s\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\1\end{bmatrix} & \boldsymbol{x}\in J_s\end{cases} \tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{x}(k)$ 为回归向量;$\boldsymbol{\varepsilon}(k)$ 为误差量;$\{\boldsymbol{\theta}_i\}_{i=1}^{s}$ 为各个线性子模型的回归参数,$\{\boldsymbol{\theta}'_i\}_{i=1}^{s}$ 为$\{\boldsymbol{\theta}_i\}_{i=1}^{s}$ 的转置,$\boldsymbol{\theta}_i\in\mathbf{R}^{n+1}$;$\{J_i\}_{i=1}^{s}$ 为各个子模型在凸多面体作用域内的分割,并满足 $\bigcup_{i=1}^{s}J_i=\mathbf{R}$,$J_i\cap J_j=\varnothing$,$i\neq j$。

PWARX 涉及到的具体步骤如下:① 将每个数据关联一个局部仿射模型;② 将具有相似特性的局部仿射模型聚类到相同的集群中;③ 以相同的方式将数据点分类到对应的集群中;④ 求解各个集群的参数向量和区域。

1.2.3 混杂系统建模方法

MHPS是一个典型的混杂系统,它既包含如发动机燃气消耗和电池荷电状态(SOC)这样的连续变量动态系统,又包含由事件触发的离合器的接脱排和电池充放电这样的离散事件动态系统。系统工作过程中存在物理规律、区间划分、逻辑规则和操作约束,单纯用连续的或离散的数学模型都难以描述混合动力系统的这种混杂特性,因此,引入混合逻辑动态(mixed logical dynamical, MLD)建模思路对 MHPS 的子系统进行融合建模。

MLD建模是由 BEMPORAD 等[20] 提出的一种混杂系统建模方法。利用 HYSDEL(hybrid systems description language)工具将启发式知识、逻辑判断与约束条件转换成混合整数不等式嵌入到状态方程中,具有较好的理论及实际工程应用前景,可得到具有良好表达形式且可扩展的状态空间方程[21-22],如下式所示:

$$\left.\begin{aligned}&\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u}(k)+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{\delta}(k)+\boldsymbol{B}_3\boldsymbol{z}(k)+\boldsymbol{B}_5\\&\boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{D}_1\boldsymbol{u}(k)+\boldsymbol{D}_2\boldsymbol{\delta}(k)+\boldsymbol{D}_3\boldsymbol{z}(k)+\boldsymbol{D}_5\\&\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{\delta}(k)+\boldsymbol{E}_3\boldsymbol{z}(k)\leqslant\boldsymbol{E}_4\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{E}_1\boldsymbol{u}(k)+\boldsymbol{E}_5\\&\boldsymbol{x}\in\mathbf{R}^{n_c}\times\{0,1\}^{n_b},\boldsymbol{u}\in\mathbf{R}^{m_c}\times\{0,1\}^{m_b}\\&\boldsymbol{y}\in\mathbf{R}^{p_c}\times\{0,1\}^{p_b},\boldsymbol{\delta}\in\{0,1\}^{r_b},\boldsymbol{z}\in\mathbf{R}^{r_c}\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{x}$ 为状态变量；$\boldsymbol{u}$ 为控制变量；$\boldsymbol{y}$ 为输出变量；$\boldsymbol{\delta}$ 为引入的辅助离散变量；$\boldsymbol{z}$ 为引入的辅助连续变量；$\boldsymbol{A}$ ～ $\boldsymbol{E}$ 分别为相应的系数矩阵；n_c、n_b、m_c、m_b、p_c、p_b、r_c、r_b 为变量个数，其中下角标 c、b 用来描述变量为连续变量还是逻辑变量。

2　MHPS 的动态建模与模型验证

MHPS的动力总成仿真模型中主要由 NGE、PMSM、离合器嵌入的齿轮箱、储能系统组成。

2.1　天然气发动机

NGE 建模主要分为理论建模与实测建模。理论建模即在已知天然气发动机各种特征参数情况下，利用热力学知识以及模拟燃料燃烧求得天然气发动机各种参数，但子系统之间相互耦合，具有很强的非线性特性[23]。实测建模是通过已有的天然气发动机运行数据建立关于节气门开度、燃气喷射量、扭矩和转速等数据库，通过数据拟合和系统辨识等方法模拟 NGE 运行特性，而实测模型可以反映部分动态特性、精确度偏高等优势[24]。MHPS 的能量管理系统更加关注 NGE 扭矩分配过程的动态响应，而非燃烧过程的具体反应，因此，采用“空间填充实验设计与 V 优化设计(V-optimality design)”方法相结合来设计实验点，如图 3a 所示。受混杂系统分区间整合思想的启发，采用“分区间 + 系统辨识”方法对 NGE 进行建模，区间划分如图 3b 所示。系统辨识的状态方程为

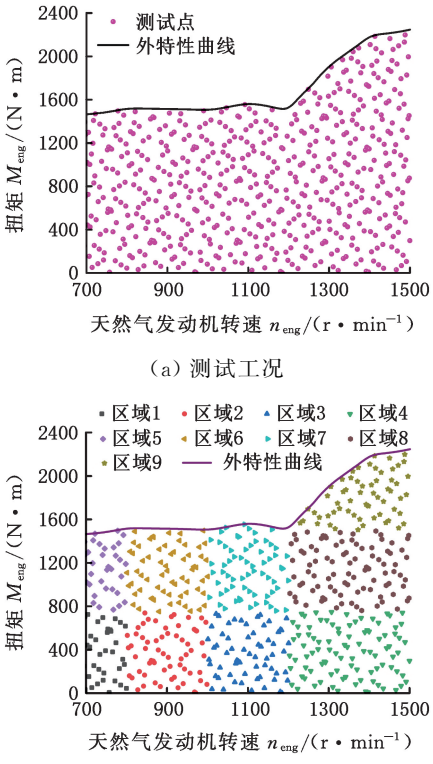
$$\left.\begin{aligned}
&\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}_{\mathrm{reg},i}\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_{\mathrm{reg},i}\boldsymbol{u}(k)\\
&\boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{C}_{\mathrm{reg},i}x(k)+\boldsymbol{D}_{\mathrm{reg},i}\boldsymbol{u}(k)\qquad i=1,2,\cdots,9\\
&\boldsymbol{u}(k)=[\theta_{\mathrm{thr}}\quad \dot{m}_{\mathrm{eng_gas}}]\\
&\boldsymbol{y}(k)=[n_{\mathrm{eng}}\quad M_{\mathrm{eng}}]\\
&\omega_{\mathrm{eng}}=\frac{2\pi}{60}n_{\mathrm{eng}}
\end{aligned}\right\}\tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{A}_{\mathrm{reg},i}$、$\boldsymbol{B}_{\mathrm{reg},i}$、$\boldsymbol{C}_{\mathrm{reg},i}$、$\boldsymbol{D}_{\mathrm{reg},i}$ 为已辨识的系统矩阵；θ_{thr} 为节气门开度，%；$\dot{m}_{\mathrm{eng\_gas}}$ 为燃气喷射量，kg/h；n_{eng} 为 NGE 的转速，r/min；M_{eng} 为 NGE 的输出扭矩，N·m；ω_{eng} 为 NGE 的角速度，rad/s。

在图 3a 所示的测试工况下，利用质量流量计采集燃气消耗量，并绘制了燃气消耗二维分布图(图 4a)。为了便于混杂模型测试控制采用 PWARX 方法进行线性化，划分区域如图 4b 所示。线性化公式如下：

区域 1

$$\left.\begin{aligned}
&\dot{m}_{\mathrm{eng_gas}}=0.0322n_{\mathrm{eng}}+0.0219M_{\mathrm{eng}}-35.0867\\
&0.3320n_{\mathrm{eng}}+0.9433M_{\mathrm{eng}}\leqslant 1294.2874\\
&0.6616n_{\mathrm{eng}}+0.7498M_{\mathrm{eng}}\geqslant 1297.3555\\
&650\ \mathrm{r/min}\leqslant n_{\mathrm{eng}}\leqslant 1500\ \mathrm{r/min}\qquad M_{\mathrm{eng}}\geqslant 0
\end{aligned}\right\}\tag{8}$$

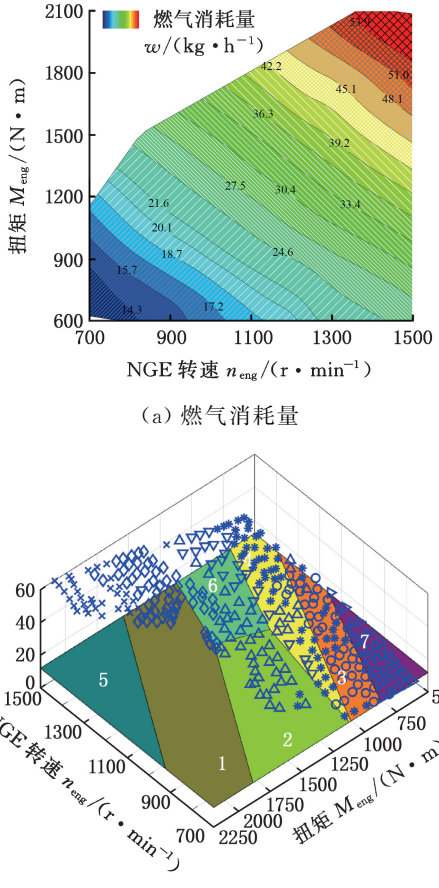


(a) 测试工况

(b) 操作区域

图 3　NGE 测试点和操作区域

Fig.3　The testing point and operating area of NGE



(a) 燃气消耗量

(b) 线性化区域

图 4　燃气消耗量测试与线性化

Fig.4　Gas consumption testing and linearization

区域 2

$$\left.\begin{aligned}&\dot{m}_{\text{eng\_gas}}=0.0256n_{\text{eng}}+0.0174M_{\text{eng}}-21.2853\\&0.7523n_{\text{eng}}+0.6588M_{\text{eng}}\geqslant 2142.3187\\&n_{\text{eng}}\leqslant 1500\ \text{r/min}\qquad M_{\text{eng}}\leqslant 2200\ \text{N}\cdot\text{m}\end{aligned}\right\}\tag{9}$$

区域 3

$$\left.\begin{aligned}&\dot{m}_{\text{eng\_gas}}=0.0177n_{\text{eng}}+0.0128M_{\text{eng}}-9.0717\\&0.5344n_{\text{eng}}+0.8452M_{\text{eng}}\leqslant 1749.1750\\&0.9809n_{\text{eng}}-0.1946M_{\text{eng}}\geqslant 949.6556\\&0.6211n_{\text{eng}}+0.7837M_{\text{eng}}\geqslant 1475.6601\\&n_{\text{eng}}\leqslant 1500\ \text{r/min}\end{aligned}\right\}\tag{10}$$

区域 4

$$\left.\begin{aligned}&\dot{m}_{\text{eng\_gas}}=0.0200n_{\text{eng}}+0.0141M_{\text{eng}}-12.4037\\&0.6235n_{\text{eng}}+0.7818M_{\text{eng}}\leqslant 1116.4617\\&n_{\text{eng}}\geqslant 650\ \text{r/min}\qquad M_{\text{eng}}\geqslant 0\end{aligned}\right\}\tag{11}$$

区域 5

$$\left.\begin{aligned}&\dot{m}_{\text{eng\_gas}}=0.0357n_{\text{eng}}+0.0235M_{\text{eng}}-42.9637\\&0.7523n_{\text{eng}}+0.6588M_{\text{eng}}\geqslant 2143.3187\\&n_{\text{eng}}\leqslant 1500\ \text{r/min}\qquad M_{\text{eng}}\leqslant 2200\ \text{N}\cdot\text{m}\end{aligned}\right\}\tag{12}$$

区域 6

$$\left.\begin{aligned}&\dot{m}_{\text{eng\_gas}}=0.0242n_{\text{eng}}+0.0226M_{\text{eng}}-25.2941\\&0.5344n_{\text{eng}}+0.8452M_{\text{eng}}\leqslant 1749.1750\\&0.9809n_{\text{eng}}-0.1946M_{\text{eng}}\geqslant 949.6556\\&0.6211n_{\text{eng}}+0.7837M_{\text{eng}}\geqslant 1475.6601\\&n_{\text{eng}}\leqslant 1500\ \text{r/min}\end{aligned}\right\}\tag{13}$$

区域 7

$$\left.\begin{aligned}&\dot{m}_{\text{eng\_gas}}=0.0134n_{\text{eng}}+0.0064M_{\text{eng}}-0.5992\\&0.6235n_{\text{eng}}+0.7818M_{\text{eng}}\leqslant 1116.4617\\&n_{\text{eng}}\geqslant 650\ \text{r/min}\qquad M_{\text{eng}}\geqslant 0\end{aligned}\right\}\tag{14}$$

表 2 列出了每个区域的均方误差(mean-square error, MSE)。

表 2 NGE 分区间的 MSE

Tab.2 MSE of NGE in different intervals

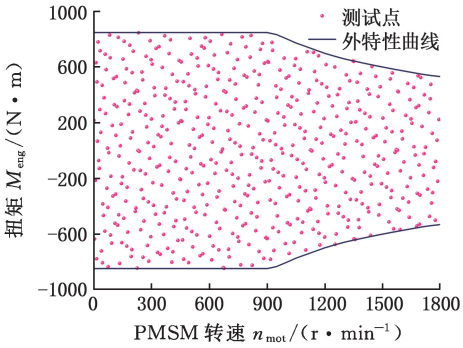
操作区域	1	2	3	4	5	6	7
MSE	0.03	0.06	0.04	0.05	0.05	0.06	0.03

2.2 电机-电池系统

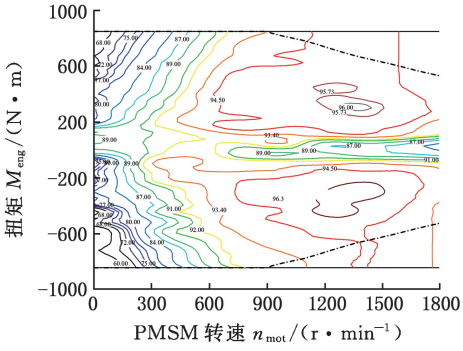
PMSM 与储能系统是电气部分最重要的组成部分。也采用“空间填充实验设计与 V 优化设计”相结合方法来设计实验点,如图 5a 所示。然后进行试验并且通过获取的试验数据制作图 5b 所示的效率图。由图 5b 可得到不同工况下电池功率的输出变化趋势,如图 6 所示。利用 PWARX 进行线性化,结果如下:

区域 1

$$\left.\begin{aligned}&P_{\text{bat}}=-0.0700n_{\text{mot}}+0.0775M_{\text{mot}}+56.4786\\&0.5283n_{\text{mot}}+0.8491M_{\text{mot}}\leqslant 148.4759\\&0.8487n_{\text{mot}}-0.5289M_{\text{mot}}\geqslant 677.6599\\&0.0159n_{\text{mot}}+0.9999M_{\text{mot}}\geqslant 418.6613\\&M_{\text{mot}}\geqslant -850\ \text{N}\cdot\text{m}\end{aligned}\right\}\tag{15}$$



(a) 测试工况



(b) 电机效率

图 5 PMSM 测试工况与效率图谱

Fig.5 Test conditions and efficiency profile of PMSM

区域 2

$$\left.\begin{aligned}&P_{\text{bat}}=-0.0318n_{\text{mot}}+0.1433M_{\text{mot}}+46.2313\\&0.5283n_{\text{mot}}+0.8491M_{\text{mot}}\geqslant 148.4759\\&0.3951n_{\text{mot}}-0.9186M_{\text{mot}}\geqslant 477.3193\\&0.4777n_{\text{mot}}+0.8785M_{\text{mot}}\leqslant 636.7388\\&0.9407n_{\text{mot}}-0.3391M_{\text{mot}}\geqslant 1068.168\\&n_{\text{mot}}\leqslant 1800\ \text{r/min},M_{\text{mot}}\geqslant -850\ \text{N}\cdot\text{m}\end{aligned}\right\}\tag{16}$$

区域 3

$$\left.\begin{aligned}&P_{\text{bat}}=0.07540n_{\text{mot}}+0.1032M_{\text{mot}}-71.7237\\&0.0961n_{\text{mot}}+0.9954M_{\text{mot}}\geqslant 607.8318\\&0.4918n_{\text{mot}}+0.8707M_{\text{mot}}\geqslant 783.8901\\&0.3181n_{\text{mot}}-0.9481M_{\text{mot}}\leqslant -90.2394\\&100\ \text{r/min}\leqslant n_{\text{mot}}\leqslant 1800\ \text{r/min},M_{\text{mot}}\leqslant 850\ \text{N}\cdot\text{m}\end{aligned}\right\}\tag{17}$$

区域 4

$$\left.\begin{aligned}&P_{\text{bat}}=-0.0453n_{\text{mot}}+0.0124M_{\text{mot}}+6.1450\\&0.8487n_{\text{mot}}-0.5289M_{\text{mot}}\leqslant 677.6599\\&0.1218n_{\text{mot}}+0.9926M_{\text{mot}}\leqslant 28.4799\\&0.8887n_{\text{mot}}+0.4584M_{\text{mot}}\leqslant -100\\&n_{\text{mot}}\geqslant 100\ \text{r/min},M_{\text{mot}}\geqslant -850\ \text{N}\cdot\text{m}\end{aligned}\right\}\tag{18}$$

区域 5

$$\left.\begin{aligned}&P_{\text{bat}}=0.0155n_{\text{mot}}+0.0966M_{\text{mot}}-13.110\\&0.3951n_{\text{mot}}-0.9186M_{\text{mot}}\leqslant 477.3193\\&0.0961n_{\text{mot}}+0.9954M_{\text{mot}}\leqslant 607.8318\\&0.9481n_{\text{mot}}-0.3179M_{\text{mot}}\geqslant 411.2406\\&0.9839n_{\text{mot}}+0.1788M_{\text{mot}}\leqslant 1262.5163\\&0.2156n_{\text{mot}}+0.9765M_{\text{mot}}\geqslant 205.8571\end{aligned}\right\}\tag{19}$$

区域 6

$$\left.\begin{aligned}&P_{\text{bat}}=0.0482n_{\text{mot}}+0.0238M_{\text{mot}}-9.8895\\&0.4918n_{\text{mot}}+0.8707M_{\text{mot}}\leqslant 783.8901\\&0.1218n_{\text{mot}}+0.9926M_{\text{mot}}\geqslant 28.47999\\&0.9481n_{\text{mot}}-0.3179M_{\text{mot}}\leqslant 411.2406\\&0.6100n_{\text{mot}}-0.7924M_{\text{mot}}\leqslant 201.5854\\&n_{\text{mot}}\geqslant 100\ \text{r/min}\end{aligned}\right\}\tag{20}$$

区域 7

$$\left.\begin{aligned}&P_{\text{bat}}=0.0450n_{\text{mot}}+0.1888M_{\text{mot}}-75.4292\\&0.4777n_{\text{mot}}+0.8785M_{\text{mot}}\geqslant 636.7388\\&0.3181n_{\text{mot}}-0.9481M_{\text{mot}}\geqslant -90.2394\\&0.9839n_{\text{mot}}+0.1788M_{\text{mot}}\geqslant 1262.5163\\&n_{\text{mot}}\leqslant 1800\ \text{r/min}\end{aligned}\right\}\tag{21}$$

区域 8

$$\left.\begin{aligned}&P_{\text{bat}}=-0.0106n_{\text{mot}}+0.0707M_{\text{mot}}+7.9041\\&0.0159n_{\text{mot}}+1.0000M_{\text{mot}}\geqslant -418.6613\\&0.9407n_{\text{mot}}-0.3391M_{\text{mot}}\leqslant 1068.1680\\&0.8887n_{\text{mot}}+0.4584M_{\text{mot}}\geqslant 277.2272\\&0.2156n_{\text{mot}}+0.9765M_{\text{mot}}\leqslant 205.8571\\&0.6100n_{\text{mot}}-0.7924M_{\text{mot}}\geqslant 201.5854\end{aligned}\right\}\tag{22}$$

式中：P_{bat} 为电池输出功率，kW；n_{mot} 为 PMSM 的转速，r/min；M_{mot} 为 PMSM 的扭矩，N·m。

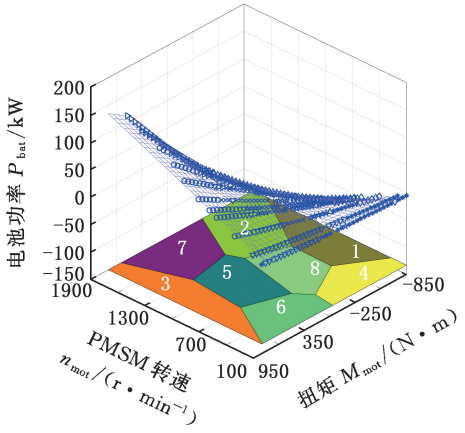


图 6　电池线性化分区间图

Fig.6　Battery linearization subinterval plot

每个区域的 MSE 如表 3 所示。

表 3　电池线性化后的 MSE

Tab.3　MSE of the battery after linearization

操作区域	1	2	3	4	5	6	7	8
MSE	7.0	7.7	11.5	4.7	21.5	7.0	16.5	5.8

为了直接反映电池荷电状态(SOC)的变化规律，将电机功率与电池功率结合得到如下关系：

$$\left.\begin{aligned}&P_{\text{bat}}=(\eta_{\text{bat}}\eta_{\text{mot}})^{k}P_{\text{mot}}=(\eta_{\text{bat}}\eta_{\text{mot}})^{k}M_{\text{mot}}\omega_{\text{mot}}\\&k=\begin{cases}1 & M_{\text{mot}}<0\\-1 & M_{\text{mot}}\geqslant 0\end{cases}\\&\frac{\text{d}S_{\text{SOC}}}{\text{d}t}=-\frac{P_{\text{bat}}}{Q_{\text{bat}}U_{\text{bat}}}\end{aligned}\right\}\tag{23}$$

式中：P_{mot} 为 PMSM 的输出功率，kW；η_{mot} 为 PMSM 的效率，%；η_{bat} 为电池的效率，%；ω_{mot} 为 PMSM 的转速，rad/s；Q_{bat} 为容量，A·h；U_{bat} 为电池电压，V；S_{SOC} 为电池荷电状态。

接下来进一步研究电池 S_{SOC} 与电池电压之间的关系[25]。通过实验测试了 $LiFeO_4$ 电池在 10 ℃、25 ℃ 以及 45 ℃ 下随着 S_{SOC} 变化的放电和充电电压的变化规律，结果如图 7 所示。观察图 7 知：S_{SOC} 为 0.3 ～ 0.9 时电池电压呈线性增长趋势，通过最小二乘法进行拟合，结果如图 8 所示。

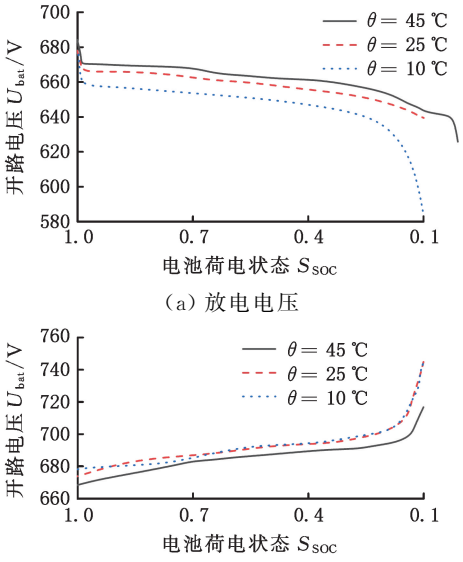


图 7　测试结果

Fig.7　Test results

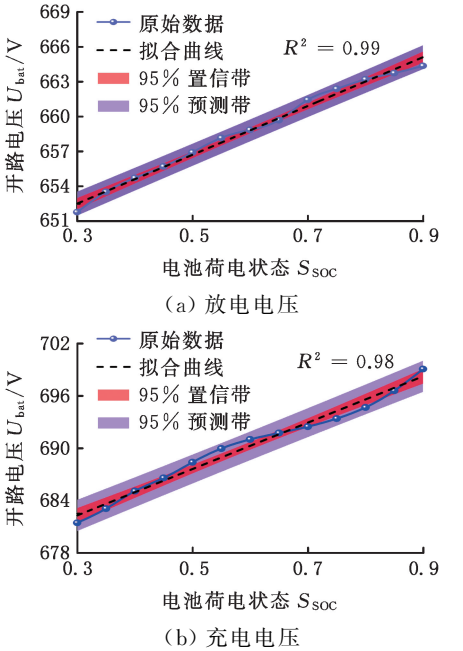


图 8　拟合效果

Fig.8　Fitting effect

拟合公式如下：

$$U_{\text{bat}}=\begin{cases}21.02S_{\text{SOC}}+646.20 & \text{放电}\\26.60S_{\text{SOC}}+674.31 & \text{充电}\end{cases}\tag{24}$$

2.3 齿轮箱

对于 MHPS，齿轮箱（包含嵌入式离合器）是耦合多动力源系统不可或缺的重要设备，采用双输入单输出的结构。齿轮箱运行过程中的机械损失 η_{gb}^{eff} 利用文献[26]的图谱进行计算。齿轮箱的动力耦合计算规则为

$$M_{gb\_out}=i_{gb}\eta_{gb}^{eff}\left(\frac{\omega_{gb\_in}}{\omega_{gb\_max}},\frac{M_{gb\_in}}{M_{gb\_max}}\right)(M_{cl}+M_{mot}) \tag{25}$$

式中：i_{gb} 为齿轮箱的齿数比；ω_{gb_in} 为齿轮箱输入角速度，rad/s；ω_{gb_max} 为齿轮箱允许的最大角速度，rad/s；M_{gb_in} 为齿轮箱输入扭矩，N·m；M_{gb_max} 为齿轮箱允许的最大输入扭矩，N·m。

离合器嵌入到齿轮箱中，与 NGE 端机械连接，通过接排和脱排控制指令 δ_{cl} 来实现其传递或切断 NGE 动力的作用，指令规则如下：

$$\delta_{cl}=\begin{cases}0 & \text{脱排}\\ 1 & \text{接排}\end{cases} \tag{26}$$

齿轮箱工作过程主要分为分离、滑摩与锁止三个状态[27]。不同阶段的接合过程如图 9 所示。其中，P_{cl_0} 为离合器未接合的工作压力，P_{cl_max} 为离合器完成接合后的工作压力。关于不同运动阶段所传递的转矩作如下解释。

1）分离。离合器主从动盘分离阶段，动力源与齿轮箱断开，传递扭矩为零，即

$$M_{cl}=0 \tag{27}$$

2）滑摩。离合器主从动盘滑摩阶段，接排工作压力逐渐上升，主从动盘边滑动边接排，此时传递扭矩计算规则如下：

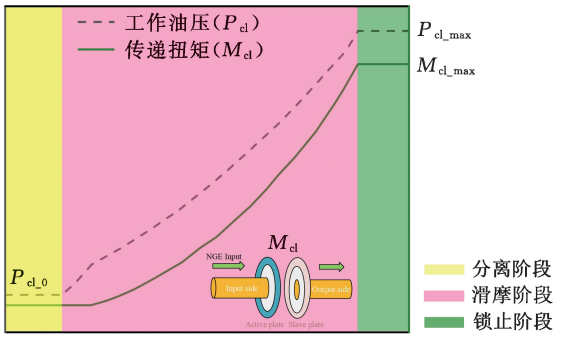


图 9 离合器不同阶段接合过程

Fig.9 Different stages of clutch operation

$$\left.\begin{aligned}M_{cl}&=\mathrm{sgn}(\Delta\omega)\mu_k R_{cl}N_{cl}A_{cl}P_{cl}\\ R_{cl}&=\frac{2(R_{out}^3-R_{in}^3)}{3(R_{out}^2-R_{in}^2)}\end{aligned}\right\} \tag{28}$$

式中：sgn(·) 为符号函数；$\Delta\omega$ 为离合器的主从动盘转速差，r/min；μ_k 为摩擦副动态摩擦因数；N_{cl} 为离合器摩擦片数；A_{cl} 为有效离合器作用面积，m^2；P_{cl} 为离合器工作压力，MPa；R_{cl}、R_{out}、R_{in} 分别为摩擦片的等效摩擦半径与内外半径，m。

3）锁止。离合器主从动盘转速相同并传递扭矩，作用于离合器上的静摩擦转矩和传递扭矩的表达式如下：

$$M_{cl\_max}=\mu_s R_{cl}N_{cl}A_{cl}P_{cl} \tag{29}$$

$$M_{cl}=\begin{cases}M_{eng} & M_{eng}<M_{cl\_max}\\ M_{cl\_max} & M_{eng}\geqslant M_{cl\_max}\end{cases} \tag{30}$$

式中：M_{cl_max} 为离合器主从动盘最大静摩擦扭矩，N·m；μ_s 为静态摩擦因数。

经过以上分析，在 MHPS 的运行过程中离合器传递扭矩的逻辑判断如表 4 所示。

表 4 离合器传递扭矩的逻辑判断条件

Tab.4 Logical judgment condition for clutch transmission torque

阶段	符号与取值	判断条件	传递扭矩	约束条件
分离	$\delta_0\in\{0,1\}$	$\delta_{cl}=0\&P_{cl}=P_{cl\_0}$	$M_{cl}=0$	$\delta_0+\delta_1+\delta_2=1$
滑摩	$\delta_1\in\{0,1\}$	$\delta_{cl}=1\&P_{cl}>P_{cl\_0}$	$M_{cl}=\mathrm{sgn}(\Delta\omega)\mu_k R_{cl}N_{cl}A_{cl}P_{cl}$	
锁止	$\delta_2\in\{0,1\}$	$\delta_{cl}=1\&P_{cl}=P_{cl\_max}$	$M_{cl}=\begin{cases}M_{eng} & M_{eng}<M_{cl\_max}\\ M_{cl\_max} & M_{eng}\geqslant M_{cl\_max}\end{cases}$	

本节基于集总参数来建立多动力源耦合动力学过程[28]，涉及的计算公式如下：

$$\frac{d\omega_{eng}}{dt}(J_{eng}+J_{cl\_active}+\delta_{cl}J_{cl\_slave}+\delta_{cl}J_{mot}+\delta_{cl}J_{gb})=\delta_{cl}M_{mot}+\delta_{cl}M_{cl}-\delta_{cl}M_{load} \tag{31}$$

$$\frac{d\omega_{mot}}{dt}(\delta_{cl}J_{eng}+\delta_{cl}J_{cl\_active}+J_{cl\_slave}+J_{mot}+J_{gb})=M_{mot}+\delta_{cl}M_{cl}-M_{load} \tag{32}$$

式中：J_{cl_active}、J_{cl_slave} 分别为主从动盘转动惯量，kg·m^2；J_{gb} 为齿轮箱的转动惯量，kg·m^2；J_{mot} 为 PMSM 的转动惯量，kg·m^2；M_{load} 为来自电力测功机加载的负载，N·m。

3 制定能量管理策略

提出的能量管理策略将系统动力性与经济性相关的参数集成到一个算法中，优化问题的数学描述如下：

$$\left.\begin{aligned}&\min\ \boldsymbol{J}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u})\\ &\text{s.t.}\quad \boldsymbol{x}(k+1)=f(\boldsymbol{x}(k),\boldsymbol{u}(k))\\ &\qquad h_i(\boldsymbol{x})=0,i=1,2,\cdots,m\\ &\qquad g_j(\boldsymbol{x})\geqslant 0,j=1,2,\cdots,n\end{aligned}\right\} \tag{33}$$

式中：$h_i(\boldsymbol{x})=0$ 为等式约束；$g_j(x)\geqslant 0$ 为不等式约束。

关于式中的预测模型、等式与不等式约束以及目标函数在下面循序展开。

3.1 优化变量

为了更好地集成第 2 节所搭建的面向控制的混合动力系统，且鉴于本文中采用 MLD 的模型具有可扩展优势，定义了系统变量如下：

1）NGE转速 ω_{eng}、PMSM转速 ω_{mot} 以及 S_{SOC} 被作为状态变量。

2）操作输入分为连续和离散两种，节气门开度 θ_{thr}、燃气喷射量 $\dot{m}_{eng\_gas}$ 以及 PMSM 控制扭矩 M_{mot} 被作为连续控制变量；离合器的状态控制 δ_{cl} 为离散操作变量。

3）干扰输入是应用于动力系统的外部负荷 M_{load}。

4）输出为状态变量、NGE 扭矩 M_{eng}、PMSM 扭矩 M_{mot} 以及等效燃料消耗 $\dot{m}_{total}$。

面向控制模型的上述相关变量如下：

$$\left.\begin{aligned}
&\boldsymbol{x} = (\omega_{eng}, \omega_{mot}, S_{SOC})^{T}\\
&\boldsymbol{y} = (\omega_{eng}, \omega_{mot}, M_{eng}, M_{mot}, \dot{m}_{total}, S_{SOC})^{T}\\
&\boldsymbol{u}_{c} = (\theta_{thr}, \dot{m}_{eng_gas}, M_{mot})^{T}\\
&u_{d} = \delta_{cl} \in \{0,1\}\\
&u_{load} = M_{load}
\end{aligned}\right\} \tag{34}$$

3.2　目标函数

MHPS 的能量管理问题是一个多目标协同问题，在控制过程中需要满足动力性和经济性的目标需求。

1）动力性。动力性方面遵循速度参考的变化，调节 PMSM 输出扭矩，快速使整个系统达到平稳，保证 NGE 以一个准静态的方式运行。

2）经济性。在预测时间窗口内，使 NGE 和 PMSM 的等效燃料消耗最小化。等效燃料消耗率作如下定义：

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_{eng\_gas} + s_{eqv}\frac{P_{bat}}{Q_{LHV}} \tag{35}$$

式中：Q_{LHV} 为天然气低热值，kJ/kg；s_{eqv} 为等效因子，将电力转化为同等的燃料消耗。

通过以上分析可以得到最终的目标函数为

$$J = \sum_{i=1}^{N-1}\{Q_{\omega}[(\omega_{mot} - \omega_{ref})^{2} + \delta_{cl}(\omega_{eng} - \omega_{ref})^{2}] + Q_{m}\dot{m}_{total}\} \tag{36}$$

式中：Q_{ω}、$Q_{\dot{m}}$ 为权重系数；N 为预测步长。

3.3　预测模型

为了最小化目标函数（式(36)），考虑运行过程中设备的工作限值以及容量限值，以确保不违反物理约束和操作约束。

1）外特性约束。在运行过程中，各动力源的最大输出扭矩和最小输出扭矩的限值见图 10。

根据外特性限制，其数学表达式为

$$\left.\begin{aligned}
&0 \leqslant M_{eng} \leqslant M_{eng_enve}\\
&-M_{mot_enve} \leqslant M_{mot} \leqslant M_{mot_enve}
\end{aligned}\right\} \tag{37}$$

式中：M_{eng_enve}、M_{mot_enve} 分别为NGE和PMSM的外特性限值，N·m。

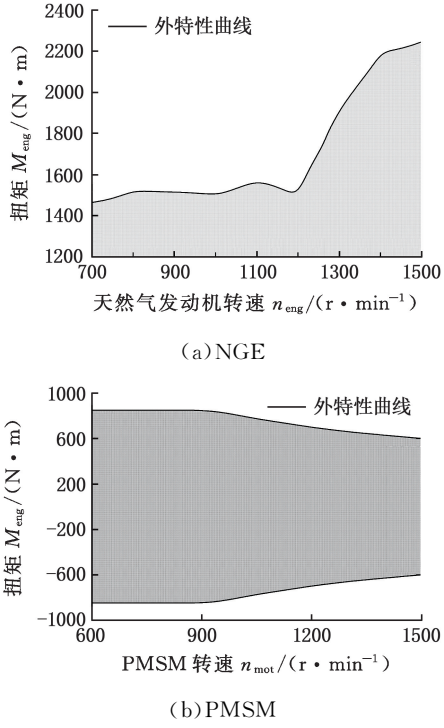


图 10　设备外特性

Fig.10　External characteristics of the device

2）电池约束。考虑电池的过度充电和深度放电等影响因素，确定 S_{SOC} 最佳允许范围。结合文献[29-30]以及网址 https://www.mpoweruk.com/bms.htm 的内容，给出图 11 所示的工作范围，最终确定 SOC 的最佳范围为

$$0.4 \leqslant S_{SOC} \leqslant 0.8 \tag{38}$$

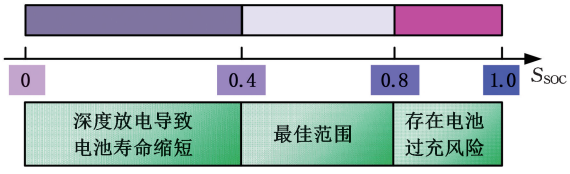


图 11　SOC 最佳范围

Fig.11　Optimal range of SOC

3）扭矩平衡约束。对于船舶混合动力系统，总输出扭矩包括 NGE 与 PMSM，满足系统的负载扭矩。其数学描述如下：

$$M_{cl} + M_{mot} = M_{load} \tag{39}$$

4）离合器运行状态约束。离合器存在三种工作状态，分别为分离 δ_0、滑摩 δ_1 与锁止 δ_2，运行过程中有且仅有一种工作模式，故存在等式约束如下：

$$\delta_0 + \delta_1 + \delta_2 = 1 \tag{40}$$

MLD 方法将逻辑关系转换为混合整数的线性不等式，然后利用 HYSDEL 工具箱对 MHPS 模型进行描述，编译后即可获得 MLD 模型，具体表达式如下：

$$\boldsymbol{x}(k+1) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u}(k) + \boldsymbol{B}_2\boldsymbol{\delta}(k)$$

$$\boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(k)$$

$$\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{\delta}(k)+\boldsymbol{E}_3\boldsymbol{z}(k)\leqslant\boldsymbol{E}_4\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{E}_1\boldsymbol{u}(k)+\boldsymbol{E}_5$$

3.4 优化算法

基于 3.1 ～ 3.3 节的分析，考虑解决混杂系统最小化控制问题[31-32]，得到优化模型如下：

$$\min J(\theta_{\text{thr}},\dot{m}_{\text{eng\_gas}},M_{\text{mot}},\delta_{\text{cl}})=$$

$$\sum_{i=1}^{N-1}Q_\omega[(\omega_{\text{mot}}-\omega_{\text{ref}})^2+\delta_{\text{cl}}(\omega_{\text{eng}}-\omega_{\text{ref}})^2]+Q_{\text{m}}\dot{m}_{\text{total}} \tag{41}$$

$$\text{s.t. } \boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u}(k)+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{\delta}(k)$$

$$\boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(k)$$

$$\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{\delta}(k)+\boldsymbol{E}_3\boldsymbol{z}(k)\leqslant\boldsymbol{E}_4\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{E}_1\boldsymbol{u}(k)+\boldsymbol{E}_5$$

$$\theta_{\text{thr\_min}}\leqslant\theta_{\text{thr}}\leqslant\theta_{\text{thr\_max}}$$

$$0\leqslant\dot{m}_{\text{eng\_gas}}\leqslant\dot{m}_{\text{eng\_gas\_max}}$$

$$-M_{\text{mot\_enve}}\leqslant M_{\text{mot}}\leqslant M_{\text{mot\_enve}}$$

$$0.4\leqslant S_{\text{SOC}}\leqslant 0.8$$

上述控制问题推导变成的混合整数二次规划（MIQP）问题采用 Gurobi 求解器求解，文献[33]对其优越性进行了证明。所应用的 HMPC 流程图见图 12。

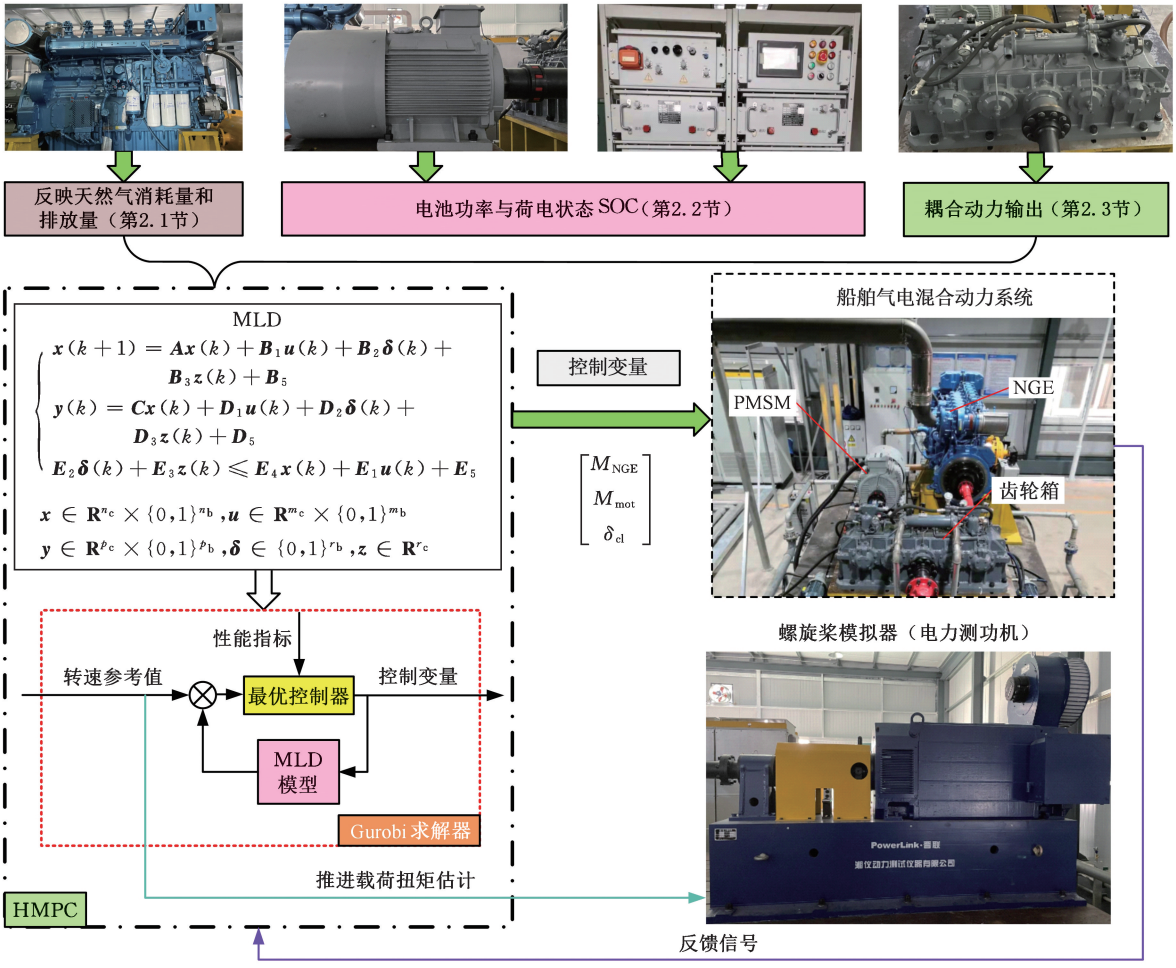


图 12 建议的混杂模型预测控制流程图

Fig.12 A proposed HMPC flow chart

燃料消耗可通过式(35)进行计算，但式(35)缺少对动力跟踪性能的定量描述，引入多线位置距离(locality in-between polylines，LIP)来定量评估[34]。LIP 的定义如下：

$$A_{\text{LIP}}(P,S)=\sum_{\forall p_i}A_i\omega_i \tag{42}$$

$$\omega_i=\frac{L_P(\delta_i,\delta_{i+1})+L_S(\delta_i,\delta_{i+1})}{L_P+L_S} \tag{43}$$

式中：A_{LIP} 为多线位置距离；A_i 为第 i 个多边形所包围的面积；ω_i 为第 i 个多边形的长度占总长度的百分比；p_i 为两条轨迹 P 和 S 所包围的多边形；δ_i 为两条曲线的交点；$L_P(\delta_i,\delta_{i+1})$、$L_S(\delta_i,\delta_{i+1})$ 分别为曲线 P 和曲线 S 在两个交点 δ_i、δ_{i+1} 的曲线长度；L_P、L_S 为曲线 P 和曲线 S 的总长度。

当 ω_i 值较大时，说明两条轨迹之间缝隙较大，LIP 也较大，LIP 越小说明两条工作曲线轨迹相似度越高。LIP 计算示意图见图 13。

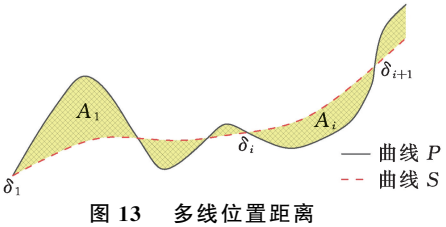


图 13 多线位置距离

Fig.13 Locality in-between 2D polylines

4　实验结果与讨论

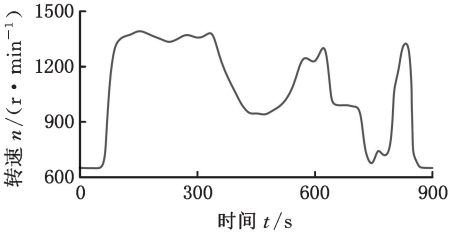
在本节中，船舶操作周期考虑了推进转速和推进负载，以研究动力性能和燃料消耗之间的权衡关系。为了评价所提出的 HMPC 性能，建立了 HIL 实验平台，如图 2 所示。

4.1　测试工况

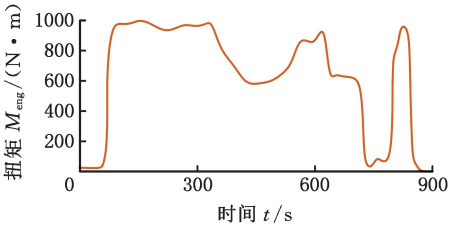
由于缺乏针对不同船舶类型的标准测试工况数据，本文采用文献[35]的船舶测试工况并对其针对 MHPS 的转速限值进行了微调，如图 14 所示。为了在测试工况中合理地评估能量管理策略的动力提升性能和经济性能，应该保证 SOC 在运行周期内始终保持一致。因此，对式(41)进行扩充，表达式如下：

$$\min J(\theta_{\mathrm{thr}},\dot{m}_{\mathrm{eng\_gas}},M_{\mathrm{mot}},\delta_{\mathrm{cl}})=\sum_{i=1}^{N-1}\alpha Q_{\omega}[(\omega_{\mathrm{mot}}-\omega_{\mathrm{ref}})^2+\delta_{\mathrm{cl}}(\omega_{\mathrm{eng}}-\omega_{\mathrm{ref}})^2]+(1-\alpha)Q_{\dot{m}}\dot{m}_{\mathrm{total}}+Q_{\mathrm{soc}}(S_{\mathrm{SOC}}-S_{\mathrm{SOC,ref}})^2 \tag{44}$$

式中：α 为系数，用来调节动力性能与燃料消耗的加权因子，取值为[0,1]；Q_{soc} 为电池 SOC 的跟踪权重。



(a) 转速



(b) 扭矩

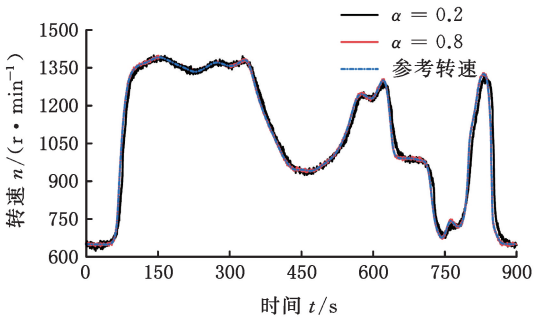
图 14　测试工况

Fig.14　Operating cycle

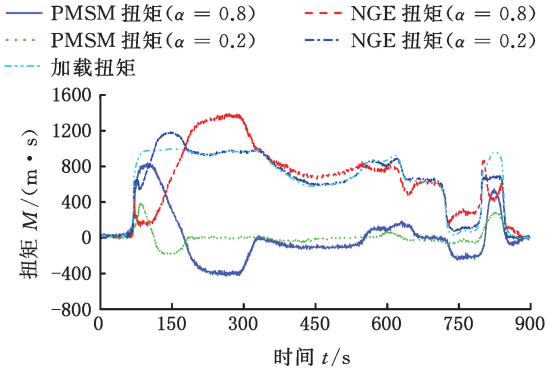
4.2　测试结果分析

为了评估不同的燃料消耗与动力提升加权策略，采用了相同的测试循环工况并限制 S_{SOC} 值始终不变，以产生可比较的实验结果。图 15 给出了 $\alpha=0.2$(侧重于燃料消耗)与 $\alpha=0.8$(侧重于动力性能提升)运行周期下的实验结果并进行了比较。

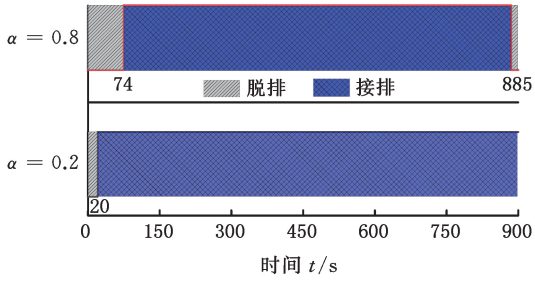
由图 15a 可以看出，与 $\alpha=0.2$ 相比，$\alpha=0.8$ 的跟踪效果极佳，也是由于 $\alpha=0.8$ 侧重于动力源转速跟踪，跟踪效果越好越能体现动力性能提升效果；两个 HMPC 执行了不同的扭矩分割风格，分



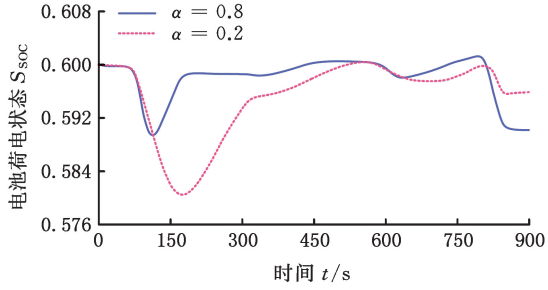
(a) 转速跟踪



(b) 扭矩分配



(c) 离合器的命令



(d) SOC 变化

图 15　相关参数的变化规律

Fig.15　The variation pattern of related parameters

别称为 HMPC-Ⅰ($\alpha=0.2$)和 HMPC-Ⅱ($\alpha=0.8$)，如图 15b 所示。在 67 s 进行急加速的过程中，HMPC-Ⅱ 采用 PMSM 快速加载的策略，而 HMPC-Ⅰ 采用 NGE 提供主要动力，由于不能及时输出所需动力，受扭矩平衡约束(式(39))的限制，PMSM 有一定延迟的被动输出所需剩余扭矩，导致出现如图 15a 中输出转速较目标转速滞后的现象。HMPC-Ⅰ 在 20 s 接排供 NGE 输出动

力，较 HMPC-Ⅱ 提前了 54 s。从总体来看，HMPC-Ⅰ 中，PMSM 大部分时间不工作，产生此现象也是由于给 PMSM 提供动力的电池能源来源于 NGE，存在能源的二次转换。若经常采用 PMSM，会导致燃料消耗的增加。HMPC-Ⅱ 中，PMSM 扮演着积极输出动力的角色，保证了转速实时跟踪，这必然导致燃料消耗的增加。如图 15c 所示，在 885 s 时，为了确保燃料消耗达到最佳，离合器保持接排，以便及时响应 NGE 并输出扭矩。此外，性能指标(式(42))保证了 SOC 在初始值范围内波动。

综上，两个 HMPC 策略侧重点不同，结果在 NGE 工作时间、PMSM 主动协调作用以及转速跟踪方面存在很大的差异，导致了解决方案的不同。图 15 定性描述了分配策略的性能，下面采用工作时间占比以及性能指标参数来定量评估 HMPC 的性能提升能力。

MHPS 依据 NGE 和 PMSM 的工作状态可以分为四种工作模式，如表 5 所示。依据表 5，将图 15b 进行工作模式划分，如图 16 所示。燃料消耗和动力提升取决于 PMSM 的工作时机和工作时长，如图 17 和表 6 所示。HMPC-Ⅰ 较 HMPC-Ⅱ 工作模式变化频繁，HMPC-Ⅱ 充分利用了 NGE 工作在高扭矩区和转速下降区域进行充电。在循环周期为 900 s，不同 HMPC 的每个工作模式时间占比饼状图见图 18。观察图 18 可知，与 HMPC-Ⅱ 相比，HMPC-Ⅰ 的 EP 工作时间增加了 27%，从而有效降低了燃料消耗，节省了 283 g 燃料；与 HMPC Ⅰ 相比，HMPC Ⅱ 中，PMSM 主动输出占比达到了 29.6%，保证了急加速和急减速过程中扭矩平衡，动力性能提高了 67.2%。

表 5　工作模式动力源情况

Tab.5　Operating mode power source situation

工作模式	NGE	PMSM	离合器	备注
电机推进模式(MP)	停机	电动机模式	脱排	图 22a
机械推进模式(EP)	运行	停机	接排	图 22b
机械推进充电模式(EPC)	运行	发电机模式	接排	图 22c
混合推进模式(HP)	运行	电动机模式	接排	图 22d

图 19 总结了从燃料消耗最少到动力性能最优的对比关系。从图中观察可知，燃料消耗最优 HMPC 可以减少 5.49%；动力性能最大可提高 54.63%。值得注意的是，动力提升性能和经济性能权衡关系呈现一个负正比趋势，即一个既节能又动力响应快的控制器是很难存在的，可以根据实际航行情况来调节策略满足特定的需求。

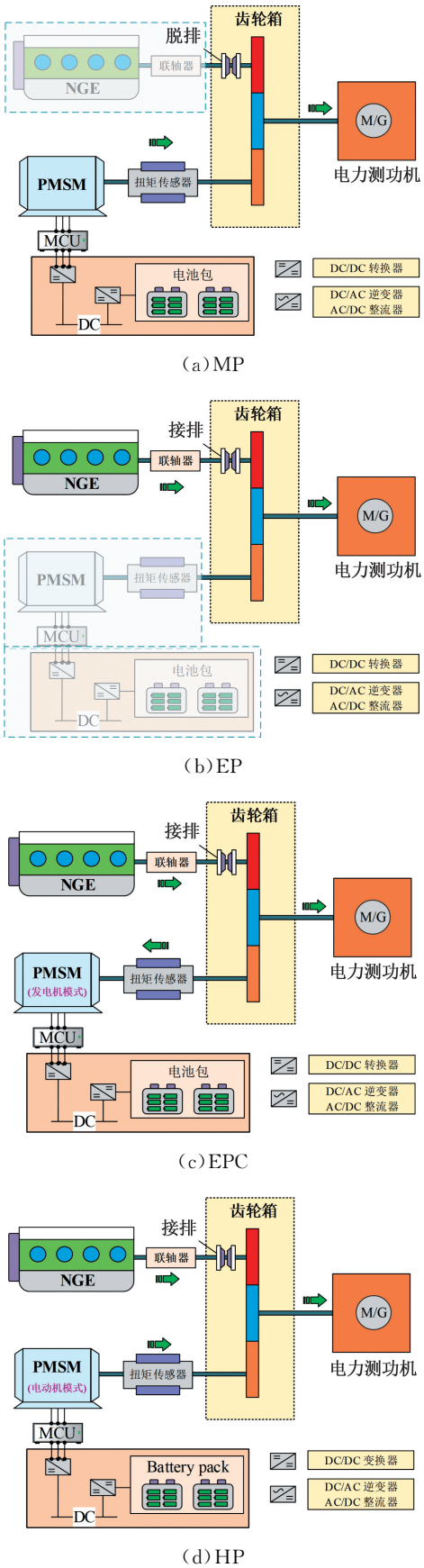
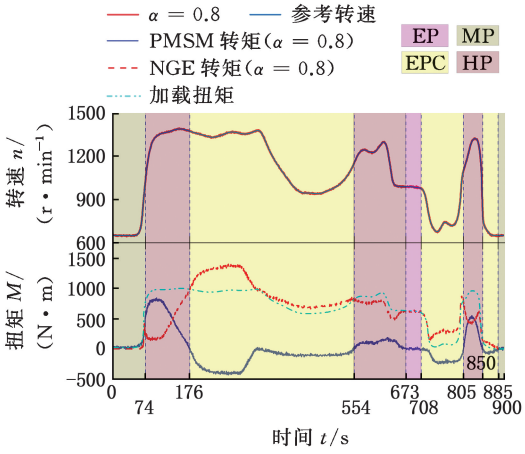
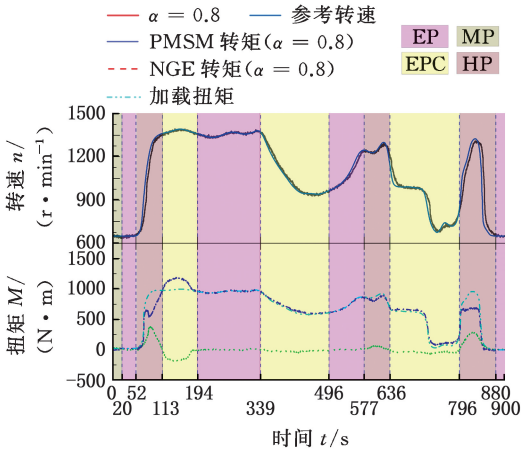


图 16　工作模式

Fig.16　System operation mode



(a)$\alpha=0.8$



(b)$\alpha=0.2$

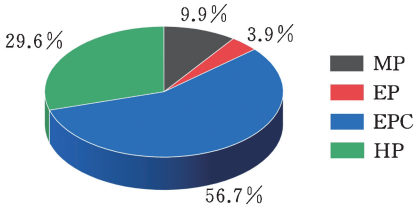
图 17　工作模式区间划分

Fig.17　Working mode interval division

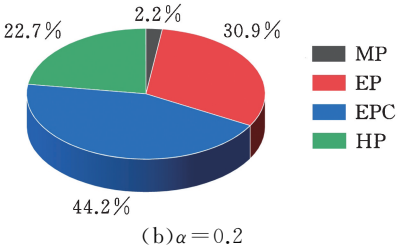
表 6　实验结果分析

Tab.6　Analysis of experimental results

性能指标	加权因子 α						
参数	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
A_{LIP}	61.3	57.6	49.5	36.5	25.2	18.9	14.7
m_{total}(g)	5007	5011	5098	5147	5236	5294	5298



(a)$\alpha=0.8$



(b)$\alpha=0.2$

图 18　时间占比

Fig.18　Time share pie chart

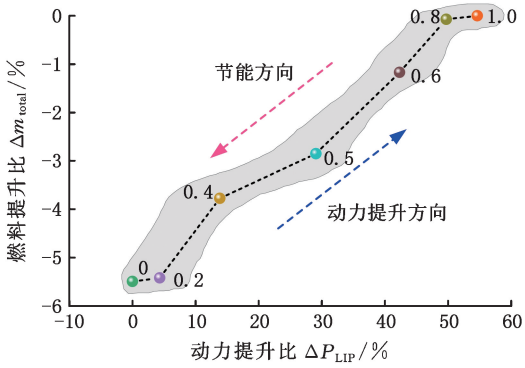


图 19　燃料消耗和动力性能提升之间的权衡性能

Fig.19　Performance trade-offs between fuel consumption and power performance improvement

5　结语

针对船舶混合动力推进系统的能量分配提出了一个基于系统辨识、混杂系统和最优控制的能量管理策略评价体系。通过模型预测控制的概念设计提高动力性能和减少燃料消耗的性能指标函数，并通过加权因子来权衡评估动力提升和燃料消耗能力。

实验在船用混合动力实验台架上进行，通过系统辨识、聚类分析、混杂系统建模等方法建立了适用于混杂模型预测控制(HMPC)的预测模型，通过系统辨识和混杂系统的集成来反映天然气发动机的运行动态性能。设计了基于 HMPC 的能量管理分配策略，并用于船舶混合动力系统。

最后，利用操作循环对 HMPC 进行实验测试，期望遵循参考转速满足约束要求。不同的加权因子导致能量策略的侧重点不同，从而在 NGE 工作时间、PMSM 主动协调等方面产生差异，进而影响各个方面的性能提升程度。在这个评价体系中，HMPC 控制器可根据不同的指标需求来调节加权因子，满足操作人员与运行环境需求。

在未来的工作中，计划深入探究不同工况下的加权因子自动调整机制，使得能量管理系统能够动态响应变化的操作需求和环境条件。此外，将继续研究更精确的系统辨识和混杂系统方法，以进一步提高预测模型的准确性，从而增强 HMPC 控制器在实际应用中的鲁棒性和适应性。

参考文献：

[1] DEROLLEPOT R, VINOT E. Sizing of a Combined Series-parallel Hybrid Architecture for River Ship Application Using Genetic Algorithm and Optimal Energy Management[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2019, 158:248-263.

[2] 孙晓军，宋恩哲，姚崇. 船用混合动力推进系统能

量管理系统关键技术研究现状[J]. 中国机械工程，2022，33(4):469-481.
SUN Xiaojun，SONG Enzhe，YAO Chong. Research Status of Key Technologies for Energy Management System of Marine Hybrid Propulsion Systems[J]. China Mechanical Engineering，2022，33(4):469-481.

[3] YUAN Yupeng，WANG Jixiang，YAN Xinping，et al. A Review of Multi-energy Hybrid Power System for Ships[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2020，132:110081.

[4] KALIKATZARAKIS M，GEERTSMA R D，BOONEN E J，et al. Ship Energy Management for Hybrid Propulsion and Power Supply with Shore Charging[J]. Control Engineering Practice，2018，76:133-154.

[5] ZHANG Yijie，XUE Qimeng，GAO Diju，et al. Two-level Model Predictive Control Energy Management Strategy for Hybrid Power Ships with Hybrid Energy Storage System[J]. Journal of Energy Storage，2022，52:104763.

[6] BEATRICE C，CAPASSO C，COSTA M，et al. Model Based Optimal Management of a Hybrid Propulsion System for Leisure Boats[J]. Journal of Energy Storage，2022，46:103896.

[7] XU Lei，WEN Yintang，LUO Xiaoyuan，et al. A Modified Power Management Algorithm with Energy Efficiency and GHG Emissions Limitation for Hybrid Power Ship System[J]. Applied Energy，2022，317:119114.

[8] AL-FALAHI M D A，NIMMA K S，JAYASINGHE S D G，et al. Power Management Optimization of Hybrid Power Systems in Electric Ferries[J]. Energy Conversion and Management，2018，172:50-66.

[9] CHEN Z，MI C C，XIONG R，et al. Energy Management of a Power-split Plug-in Hybrid Electric Vehicle Based on Genetic Algorithm and Quadratic Programming[J]. Journal of Power Sources，2014，248:416-426.

[10] BASSAM A M，PHILLIPS A B，TURNOCK S R，et al. Development of a Multi-scheme Energy Management Strategy for a Hybrid Fuel Cell Driven Passenger Ship[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2017，42(1):623-635.

[11] YUAN L C W，TJAHJOWIDODO T，LEE G S G，et al. Equivalent Consumption Minimization Strategy for Hybrid All-electric Tugboats to Optimize Fuel Savings[C]// American Control Conference. Boston，2016:6803-6808.

[12] ZAHEDI B，NORUM L E，LUDVIGSEN K B. Optimized Efficiency of All-electric Ships by DC Hybrid Power Systems[J]. Journal of Power Sources，2014，255:341-354.

[13] PLANAKIS N，KARYSTINOS V，PAPALAMBROU G，et al. Transient Energy Management Controller for Hybrid Diesel-electric Marine Propulsion Plants Using Nonlinear MPC[J]. IFAC—Papers Online 2020，53(2):14710-14715.

[14] HOU J，SONG Z，HOFMANN H，et al. Adaptive Model Predictive Control for Hybrid Energy Storage Energy Management in All-electric Ship Microgrids[J]. Energy Conversion and Management，2019，198:111929.

[15] PLANAKIS N，PAPALAMBROU G，KYRTATOS N. Predictive Power-split System of Hybrid Ship Propulsion for Energy Management and Emissions Reduction[J]. Control Engineering Practice，2021，111:104795.

[16] BORRELLI F，BEMPORAD A，MORARI M. Predictive Control for Linear and Hybrid Systems[M]. Cambridge：Cambridge University Press，2017:375-385.

[17] KALELI A. Development of the Predictive Based Control of an Autonomous Engine Cooling System for Variable Engine Operating Conditions in SI Engines:Design，Modeling and Real-time Application[J]. Control Engineering Practice，2020，100:104424.

[18] de BRUIN L，MICHAEL J. Prediction Error Minimization:Implications for Embodied Cognition and the Extended Mind Hypothesis[J]. Brain and Cognition，2017，112:58-63.

[19] FERRARI-TRECATE G，MUSELLI M，LIBERATI D，et al. A Clustering Technique for the Identification of Piecewise Affine Systems[J]. Automatica，2003，39:205-217.

[20] BEMPORAD A，MORARI M. Control of Systems Integrating Logic，Dynamics，and Constraints[J]. Automatica，1999，35:407-427.

[21] TORRISI F D，BEMPORAD A. HYSDEL—a Tool for Generating Computational Hybrid Models for Analysis and Synthesis Problems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology，2004，12:235-249.

[22] WINKLER S，KÖRNER A，BREITENECKER F. Modelling Framework for Artificial Hybrid Dynamical Systems[J]. Nonlinear Analysis：Hybrid Systems，2021，42:101072.

[23] SUN X，YAO C，SONG E，et al. Optimal Control of Transient Processes in Marine Hybrid Propulsion Systems：Modeling，Optimization and Per-

formance Enhancement [J]. Applied Energy, 2022, 321:119404.

[24] TAVAKOLI S, SAETTONE S, STEEN S, et al. Modeling and Analysis of Performance and Emissions of Marine Lean-burn Natural Gas Engine Propulsion in Waves[J]. Applied Energy, 2020, 279:115904.

[25] PAPALAMBROU G, PLANAKIS N, KYRTATOS N. Transient and Disturbed Propeller Load Compensation in Hybrid Propulsion Using Propeller Estimator and Predictive Control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2022, 236:86-102.

[26] GODJEVAC M, DRIJVER J, DE VRIES L, et al. Evaluation of Losses in Maritime Gearboxes[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M:Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2016, 230:623-638.

[27] LI Antai, QIN Datong. Adaptive Model Predictive Control of Dual Clutch Transmission Shift Based on Dynamic Friction Coefficient Estimation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 173: 104804.

[28] KHAJIYEVA L, SABIROVA Y, KUDAIBERGENOV A, et al. Application of the Lumped-parameter Method for Modeling Nonlinear Vibrations of Drill Strings with Stabilizers in a Supersonic Gas Flow[J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 110:748-766.

[29] OVRUM E, BERGH T F. Modelling Lithiumion Battery Hybrid Ship Crane Operation[J]. Applied Energy, 2015, 152:162-172.

[30] HANNAN M A, LIPU M S H, HUSSAIN A, et al. A Review of Lithiumion Battery State of Charge Estimation and Management System in Electric Vehicle Applications: Challenges and Recommendations[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 78:834-854.

[31] BEMPORAD A, HEEMELS W, DE SCHUTTER B. On Hybrid Systems and Closed-loop MPC Systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47:863-869.

[32] TØNDEL P, JOHANSEN T A, BEMPORAD A. An Algorithm for Multi-parametric Quadratic Programming and Explicit MPC Solutions[J]. Automatica, 2003, 39:489-497.

[33] BEMPORAD A, NAIK V V. A Numerically Robust Mixed-integer Quadratic Programming Solver for Embedded Hybrid Model Predictive Control [J]. IFAC—Papers Online, 2018, 51:412-417.

[34] SU Han, LIU Shuncheng, ZHENG Bolong, et al. A Survey of Trajectory Distance Measures and Performance Evaluation[J]. The VLDB Journal, 2020, 29:3-32.

[35] PLANAKIS N, PAPALAMBROU G, KYRTATOS N. Ship Energy Management System Development and Experimental Evaluation Utilizing Marine Loading Cycles Based on Machine Learning Techniques [J]. Applied Energy, 2022, 307: 118085.

（编辑　王艳丽）

作者简介：孙晓军*（通信作者），男，1992 年生，讲师。研究方向为混合动力系统能量管理策略开发。发表论文 14 篇。E-mail: 18245904309@163.com。

本文引用格式：

孙晓军，刘丛浩，张乔，等.基于混杂模型预测控制的顺序实时决策混合动力能量管理策略研究[J]. 中国机械工程，2025，36(6)：1380-1393.

SUN Xiaojun, LIU Conghao, ZHANG Qiao, et al. Research on Hybrid Power Energy Management Strategy Based on Sequential Real-time Decision Making with Hybrid Model Predictive Control [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1380-1393.

《中国机械工程》机械人学堂第 8 期活动：2025 年航空航天高性能制造控形与控性前沿论坛成功举办

2025 年 5 月 27 日，由中国机械工程学会指导，中国机械工程杂志社、航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室（西北工业大学）主办，湖北工业大学、湖北省机械工程学会承办的 2025 年航空航天高性能制造控形与控性前沿论坛（中国机械工程学会会员服务月活动暨《中国机械工程》机械人学堂第 8 期活动）成功在线举办。本次论坛采用线上会议方式，通过网络会议室，中国机械工程杂志社视频号、中国机械工程学会视频号、蔻享学术直播多种方式分别面向特邀代表、专业群体和大众群体进行传播，总观看人次超过 7300。

围绕“航空航天高性能制造控形与控性”主题，本次论坛有幸邀请到了合肥工业大学韩江教授、西北工业大学姚倡锋教授、哈尔滨理工大学岳彩旭教授、大连理工大学孙玉文教授、西北工业大学李祥宇教授、昆明理工大学庞学勤副教授 6 位本领域高影响力学者和优秀研究团队的代表作专题报告、交流。会议围绕重点面向切削控形与控性、多能场复合/组合加工、制造表面与服役演化等研究方向进行交流与讨论。

此次论坛既为航空航天高性能制造领域的专家学者们构建了高层次学术交流阵地，又促成了创新思维的激荡与技术理念的交融！

（本刊编辑部）