

# 模块化动力系统功率流滚动优化控制策略

## Power Flow Rolling Optimization Control Strategy for Modular Power Architecture

**Abstract:**To improve the real-time performance of the power system, a modular power architecture composed of power modules, energy storage units, and energy conversion is proposed. The research on control methods for power systems was carried out with the goal of achieving optimal real-time work efficiency, and a rule-based power flow control strategy for power systems was obtained, thereby achieving reasonable power allocation and efficiency improvement in the power system. A rolling optimization control strategy is proposed to address the issue of uneven distribution of working time in power flow control power units. Research has been conducted on fixed order rolling optimization control strategies and cumulative working time based sorting rolling optimization control strategies. The research results indicate that both of the above two rolling optimization strategies can achieve uniform working time of the power unit and improve the durability of the power system, and the optimization effect of the sorting rolling optimization strategy based on cumulative working time is better.

**摘要:**为提高动力系统的实时工作性能,提出了一种由动力模组、储能单元以及能量转换组成的模块化动力系统。以实现动力系统实时工作效率最优为目标开展了动力系统的控制方法研究,获得了基于规则为主的动力系统功率流控制策略进而实现了动力系统的合理功率分配以及效率提升。针对功率流控制的动力单元工作时间占比分配不均的问题,提出了滚动优化控制策略,分别开展了基于固定位次的顺序滚动优化控制策略以及基于累计工作时间的排序滚动优化控制策略研究。研究表明,应用上述两种滚动优化策略均能实现动力单元的工作时间均匀化从而提升动力系统的耐久性,且基于累计工作时间的排序滚动优化策略的优化效果更好。

**关键词:**模块化动力系统;功率流控制策略;滚动优化

**Key words:**Modular power architecture; power flow control; rolling optimization

中图分类号:TK4\*\*\* (请查阅中图分类号第5版) 文献标识码:A

### 0 概述

模块化架构作为一种新型的动力构型方式,其对于实现动力系统多种特性的优化具有着重要的意义。模块化架构能够提升动力系统的综合工作效率<sup>[1]</sup>,由于其模块化所赋予的多动力模块高自由度能量输出,可以实现单个动力模块无法满足的始终保持动力系统运行在高效工作区域,默罕默德等<sup>[2]</sup>配置了多组燃料电池作为能源输出,实现了综合系统工作效率的提升;Raceanu等<sup>[3]</sup>将燃料电池于锂电池进行模块化组合,开展了针对该动力系统的基于规则的控制方法研究,实现了综合系统的燃油经济性提升以及寿命的延长。同时,模块化架构为动力系统提供了冗余功能<sup>[4]</sup>,使动力系统拥有了更高的自由度从而保证其在某几个动力模块无法正常工作

的情况下仍能稳定的输出能量<sup>[5,6]</sup>。而针对于模块化动力系统的控制方法近些年来也是层出不穷,由此衍生的功率流控制方法成为了车辆动力控制的关键技术之一<sup>[7]</sup>。功率流控制是基于系统优化目标和车辆使用条件为依据所进行的实时控制<sup>[8]</sup>,文献<sup>[9]</sup>介绍了一种基于随意动态规划方法的功率流控制策略,取得了较好的控制效果;文献<sup>[10,11]</sup>采用模糊控制实现功率流控制,但动力系统功率较大时其控制指令输出不稳定;文献<sup>[12]</sup>提出了较为稳定的功率流控制策略,但对于功率预测的研究仍有一定局限性。此外,上述功率流控制方法与车辆热管理的控制耦合较少,而功率流控制所达到的优化目标可能会对车辆的热流管理提出更高的要求。基于上述问题,本文针对混合动力汽车传统串联式结构进行局部构型

更新设计, 通过参数匹配以及方案优化得到了混合动力汽车串联式模块化动力系统构型。同时针对模块化动力系统构型以动力系统实时综合工作效率最优开展了功率流控制方法研究, 获得了模块化动力系统功率流控制策略。同时在功率流控制策略的基础上提出了动力单元滚动优化控制策略, 实现动力系统在功率流控制完成效率最优的同时辅助了动力系统的流管理系统, 提升动力系统的工作效率与耐久性能。

在签署本协议的同时通知本刊, 否则默认您知情并同意。

## 1 模块化动力系统及功率流控制策略

### 1.1 模块化动力系统

传统的混合动力汽车串联式动力系统主要由发动机-发电机组、蓄电池、超级电容以及电机等部件组成, 各动力装置由电压母线串联而成, 如图 1(a) 所示。该动力系统根据其串联结构的特点能够快速稳定的提供电能输出, 但其发动机-发电机部分由于发动机曲轴连杆的存在使其整体的约束程度较高, 导致在发动机中某个单缸损坏时会影响其他缸内运动进而影响发动机的能量输出。同时发动机-发电机组整体体积较大, 结构布局设计时灵活度较低。

基于以上两个特点, 本文针对传统混合动力汽车串联式动力系统的发动机-发电机组进行了模块化设计。将发动机-发电机组换由多个动力单元模块组成的动力模组, 动力单元为自由活塞发电机, 其拥有着体积小、重量轻以及热效率高等优点, 单个自由活塞发电机输出功率低的缺点可通过设置多动力单元的方式弥补。经研究多动力单元(自由活塞发电机)组合而成的动力模组可以匹配传统内燃机的输出功率, 同时因其具有压缩比可调的特点, 动力模组工作时的指示热效率更高。此外自由活塞发电机去掉了曲柄连杆等机构从而使其制造成本降低且批量化生产难度降低, 因此将由动力单元(自由活塞发电机)组成的动力模组能够更贴合需要实现构型模块化以及结构轻量化的需要。此外, 在动力系统的能量转换与输出端加入了液压马达进而实现电能、机械能、液压能三种能量的相互转换与输出。经过能量匹配与方案结果对比最终得到模块动力系统构型, 如图 1(b) 所示。

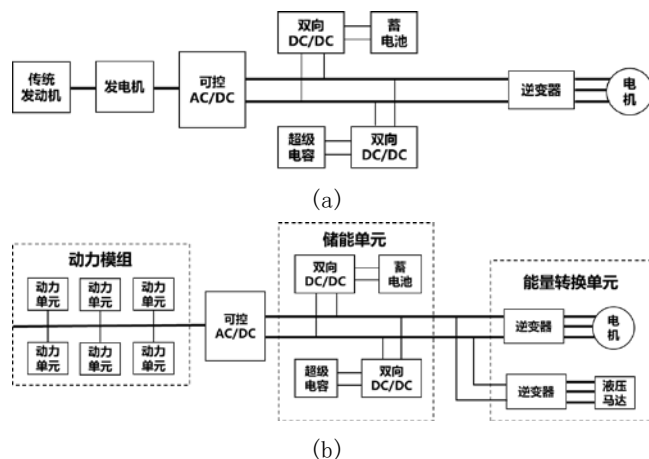


图 1 传统混合动力汽车动力系统结构(a)与模块化动力系统结构(b)

模块化动力系统主要由动力模组及其管理系统、储能单元及其管理系统、能量转换单元及其对应管理系统和控制系统组成, 如图 2 所示。其中动力模组由 6 个动力单元(自由活塞发电机)组成, 动力模组的管理系统主要是根据分配功率通过 MAP 控制各动力单元的能量输出并实时将动力单元运行信息反馈至控制系统中; 储能单元由蓄电池以及超级电容组成, 储能单元拥有的管理系统分为电池管理系统以及电容管理系统两部分, 二者也是根据分配功率控制电池与电容的能量输出或能量回收, 同时二者也将电池以及电容的运行特性情况反馈至控制系统中; 能量转换单元由液压马达和电机组成, 能量转换单元管理系统的主要功能是控制能量转换单元输出从动力模组以及储能单元中输送过来的电能或将电能转换为其他形式能量(如机械能、液压能)输出。动力模组内部的各动力单元发电部件并联于电压母线上, 由于动力模组产生的电压为交流电因此在其后串联一个整流逆变装置调整母线电压为稳定的直流电源从而方便后续装置的能量传递。储能单元中的蓄电池以及超级电容都配备双向 DC/DC 模块保证能量的输出与回收, 蓄电池与超级电容作为两个能量储存及供给的分支分别并联于电压母线上。最终电压母线连接能量转换单元实现能量输出与扭矩传递。

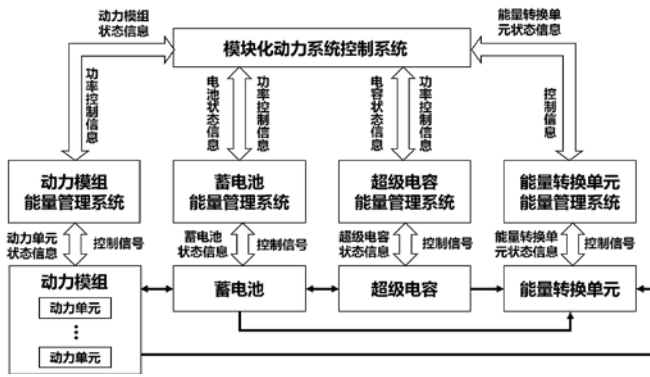


图 2 模块化动力系统示意图

## 1.2 功率流控制策略

目前针对串联式动力系统的多个动力模块，在满足各装置负载电力需求的前提下需要对动力装置实现高效优化管控，由此衍生出的功率流控制成为了关键技术。本文中模块化动力系统的控制系统基于功率流控制方法进行开发，控制系统分别包括能量需求预测模块与功率流控制模块。首先将速度信息输入至能量需求预测模块中得到功率需求，随后需求功率信息传递至功率流控制模块进行功率分配，本文基于 XX 的一种工况进行功率预测，如图 3 所示。

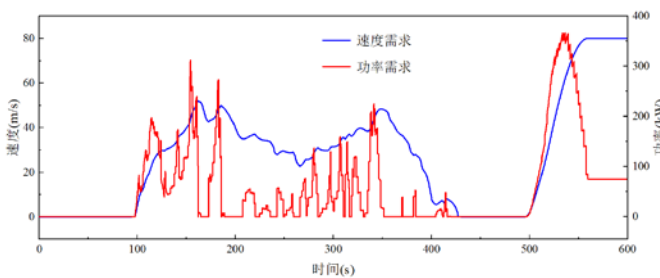


图 3 速度需求与预测功率需求

功率流控制策略作为模块化动力系统的控制核心，以实现动力系统综合效率实时最优为目标将分配功率信号传递至各动力模块的能量管理系统中进而完成执行动作。由于过高频率的功率需求对于动力单元以及蓄电池有着较大的不良影响因素，因此该策略首先对需求功率进行高低频分配并将高频功率分配至超级电容中，随后分频得到的低频功率再次分别分配至蓄电池以及动力单元中。动力单元的自身运行特性使其对应不同的功率输出有着低效工作区以及高效工作区，因此为了实现动力系统的效率最优要尽量保证动力模组中的动力单元工作在最优工作点（本文标定动力单元的最优工作点的输出功率为 25kW）即分配给动力模组的功率需求应是动力单元最有工作点所对应功率的整数倍。由于蓄电池处于确定 SOC 区间时工作效率始终保持优秀，

因此控制策略根据低频功率控制蓄电池进行能量的补充或回收，使得动力模组功率分配功率的合理性进而实现动力单元工作在最优工作点。功率分配流程如图 4 所示。

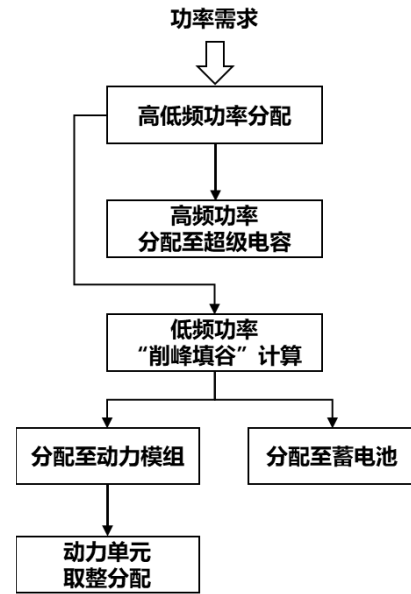


图 4 功率分配流程图

针对图 3 工况中预测得到的功率需求进行功率分配，得到分配至各动力单元的功率曲线，如图 5 所示。观察图 5 得到动力单元的分配功率可以保证各动力单元工作在最优工作点，但前三个动力单元的工作时间明显要比后三个动力单元的工作时间长。各动力单元间的累计工作时间逐渐拉大使得经常处于工作阶段的动力单元耐久性下降进而影响动力模组中各动力单元的耦合工作，最终导致模块化动力系统的综合工作效率下降。使得该情况发生的主要原因是未考虑动力单元的序列从而导致相位排在前面的动力单元始终要承担工作任务。

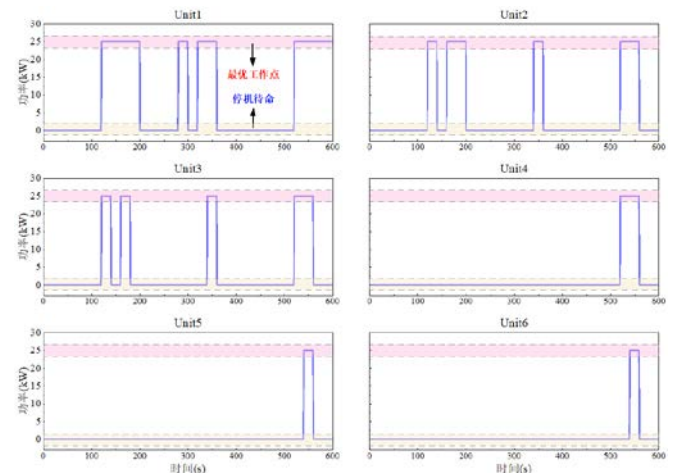


图 5 动力单元功率分配结果

## 2 动力单元功率分配矩阵滚动优化策略

针对上文中功率分配至各动力单元出现的累计工作时间不均衡的情况, 本节提出了两种动力单元功率分配矩阵滚动优化策略进而避免动力单元功率分配不均导致的模块化动力系统综合工作效率下降。

### 2.1 基于固定位次的顺序滚动优化策略

基于上文以确定的模块化动力系统构型得到动力模组中动力单元的匹配数量为 6 个, 因此所设立的动力单元功率分配矩阵形式为  $1 \times 6$  矩阵, 如式 1 所示。

$$P = [P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6] \#(1)$$

式中功率分配矩阵  $P$  内的  $P_1$  至  $P_6$  分别代表分配到 1 至 6 的 6 个动力单元功率。

基于对模块化动力系统多组仿真数据的分析, 本文制定了基于固定位次的顺序滚动优化策略。首先定义动力单元功率分配矩阵的迭代时间间隔, 随后定义动力单元功率分配矩阵每一次迭代时向后滚动的位数, 每达到一次迭代时间间隔后, 动力单元功率分配矩阵开始迭代滚动从而实现逐渐将各动力单元的累计工作时间控制均匀化。

该控制策略的主要实现流程如下, 首先动力模组能量管理系统接收需求功率信号并进行取整计算从而完成动力单元功率分配矩阵初始化, 随后在功率分配过程中实时记录仿真时间, 每当记录时间达到定义迭代时间间隔的进行一次动力单元功率分配矩阵迭代滚动, 由此进行循环直至仿真运行结束, 具体流程图如图 6 所示。

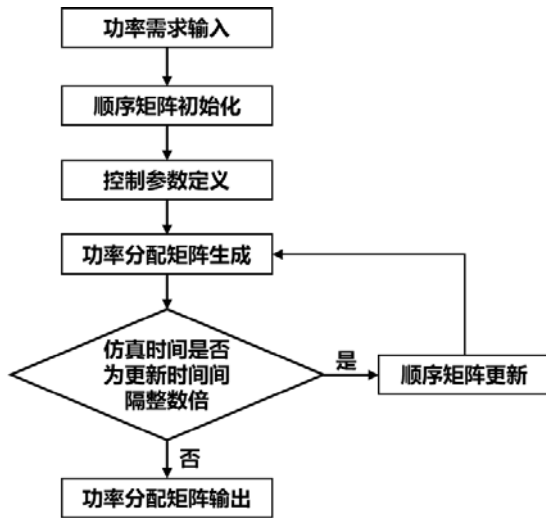


图 6 基于固定位次的顺序滚动优化策略流程图

进一步开展确定动力单元功率分配矩阵向后滚动位数的研究工作, 其主要分析模块化动系统的动

力模组中动力单元数量所获得。由于本文所定义的动力单元功率分配矩阵为  $1 \times 6$  矩阵, 而在一次时间间隔中过大的矩阵位数迭代实际上是会削弱矩阵的更新模式进而削弱滚动优化的效果, 因此本文中最终定义动力单元功率分配矩阵向后滚动的位数不超过动力单元总数的一半即确定滚动优化矩阵的位数可以为向后一位、向后两位以及向后三位。

同时动力单元功率分配矩阵的迭代滚动间隔时间是另一个需要确定的关键参数, 基于本文中第一节所提到的测试运行工况仿真时间总长, 该策略的动力单元功率分配矩阵迭代滚动间隔时间最大应不超过总仿真运行时间的四分之一。而考虑到动力单元不能够在极短时间内频繁切换的实际运行特性, 将最小迭代滚动时间间隔约束在 20s。最终将动力单元功率分配矩阵的向后滚动位数于迭代滚动时间间隔进行耦合仿真并进行计算结果对比得到最优的匹配参数进行应用, 该部分内容将在第三章展开讨论。

### 2.2 基于累计工作时间占比的排序滚动优化策略

上文中提到的基于固定位次的顺序滚动优化策略能够在仿真运行过程中不断迭代动力单元功率分配矩阵从而实现控制优化目的。但是该优化策略是根据定义好的控制参量所进行的被动式控制策略, 并不能够根据实时运行情况进行准确地优化调整。针对上述策略所具有的局限性特点, 本小节提出了一种基于累计工作时间占比的排序滚动优化控制策略, 该策略能够通过实时计算各动力单元的累计工作时间占比进而动态调整最终实现动力单元功率分配的均匀化。

主动式的控制策略首先就是定义主动调控的依据参数, 根据本文被控对象的特点将依据参数定义位各动力单元的累计工作时间占比并最终形成累计工作时间占比矩阵并对应着上文中的动力单元功率分配矩阵, 如式 2 所示。

$$\begin{cases} \delta = \frac{T_w}{T_s} \\ T = [\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6] \end{cases} \#(2)$$

式中  $\delta$  表示累计工作时间占比,  $T_w$  代表动力单元的工作时间,  $T_s$  代表工况运行的总时间,  $T$  代表动力单元累计工作时间矩阵, 该矩阵中  $\delta_1$  至  $\delta_6$  分别对应中式 XX 中的  $P_1$  至  $P_6$ 。

基于累计工作时间占比的排序滚动优化控制策略首先是初始化排序滚动矩阵, 在初始化矩阵时根据动力单元的初始相位进行排列顺序定义即可。随

后在功率分配过程中结合式 XX 实时计算各动力单元的累计工作时间占比并进行实时排序更新累计工作时间占比排序矩阵。接下来根据定义的迭代更新时间间隔，在仿真运行时间达到定义时间数值的整数倍时基于此时刻的累计工作时间占比排序矩阵对动力单元功率分配矩阵进行为此调整，保证实时累计工作时间占比最小的动力单元在下一阶段的功率分配时得到最多的工作时间即动力单元功率分配矩阵的更新是由累计工作时间占比排序矩阵对应由小及大的顺序进行调整的。最终进行工况仿真的循环运行实现动力单元功率分配的均匀化，具体流程图如图 7 所示。

基于动力单元的累计工作时间占比矩阵可以开展实时排序进而协调分配到不同动力单元的功率需求，同时该控制策略也需要确定动力单元功率分配矩阵的迭代更新滚动间隔时间。与上一小节的运行情况相同，动力单元功率分配矩阵迭代滚动间隔时间最大应不超过总仿真运行时间的四分之一同时考虑动力单元的切换特性将最小迭代滚动时间间隔约束在 20s。最终耦合动力单元功率分配矩阵迭代滚动时间间隔进行仿真并进行计算结果对比得到最优的匹配参数进行应用，该部分内容将在下章展开讨论。

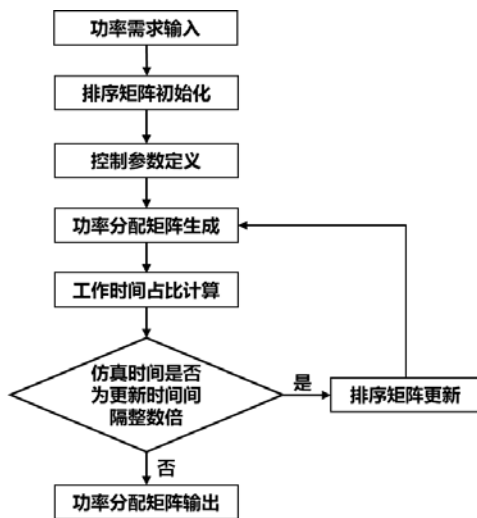


图 7 基于累计工作时间占比的排序滚动优化策略流程图

### 3 仿真结果验证

上文中提到两种动力单元功率分配优化策略其目的是为了实现在动力模组中各动力单元工作时间的均匀性，因此针对两种优化策略的结果验证应用方差指标来判断在上文所提到的运行工况下各动力单元累计工作时间占比与设定工作占比的偏离程度，

方差评价公式如下所示。

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n} \quad \#(3)$$

式中  $x_i$  表示第  $i$  个动力单元在整个运行时间内工作在最优效率点的时间占比， $x$  表示设定工作时间占比，对应 6 个动力单元该数值设为 1/6。

#### 3.1 基于固定位次的顺序滚动优化策略结果验证

首先针对一组动力单元功率分配矩阵向后滚动位数以及迭代更新时间间隔进行仿真进而验证基于固定位次的顺序滚动优化策略的可行性以及有效性。本文开展对迭代更新时间间隔为 100s 分别耦合向后滚动 1 位、2 位以及 3 位的仿真研究，功率分配结果如图 8 所示。

观察图 8 可知，相对于未加入滚动优化策略的功率分配结果，向后滚动 1 位、2 位以及 3 位的动力单元功率分配的均匀化程度均有提高，对应各优化策略下的方差计算结果列入表 1 中。

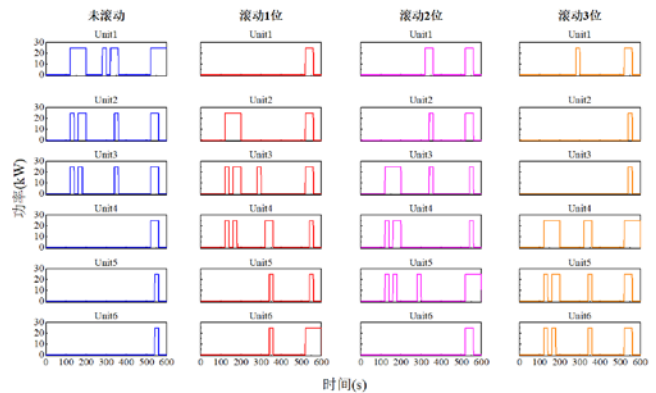


图 8 迭代更新时间间隔为 100s 的不同参数动力单元功率分配结果

表 1 迭代更新时间间隔为 100s 的不同参数方差结果

功率分配优化策略	方差 $\times 10^{-3}$
未滚动	14.6
滚动 1 位	3.6
滚动 2 位	3.7
滚动 3 位	11.4

表 1 中的数据证明了基于固定位次的顺序滚动优化策略确实可以降低方差即实现动力单元功率分配的均匀化从而验证了该方案的有效性。但同时可以观察到在 100s 时间间隔下加入滚动优化策略仍然会导致部分动力单元的工作时间占比分配不均匀，因此本文展开全参数下的功率分配结果对比，基于上文分析结果设置迭代更新时间间隔从 20s 至 150s，向后滚动位数由 1 位至 3 位。优化效果如表 2 所示。

表 1 基于固定位次的顺序滚动优化策略不同参数方差结果

滚动位数	迭代更新时间间隔(s)						
	20	30	40	50	60	70	80
	方差×10-3						
滚动 1 位	1.81	5.04	2.96	1.73	4.46	5.52	2.98
滚动 2 位	3.72	3.26	3.69	3.44	7.72	7.67	4.5
滚动 3 位	3.74	3.99	4.07	4.07	3.72	6.66	4.48
滚动位数	迭代更新时间间隔(s)						
	90	100	110	120	130	140	150
	方差×10-3						
滚动 1 位	3.32	3.65	2.69	4.39	4.17	3.33	3.20
滚动 2 位	3.00	3.69	6.44	7.82	6.35	4.50	3.64
滚动 3 位	6.30	11.44	7.77	3.35	3.66	4.13	3.62

观察表 2 可知基于固定位次的顺序滚动优化策略在迭代更新时间间隔为 50s，向后滚动 1 位时优化效果最好，功率分配结果对比如下图所示。

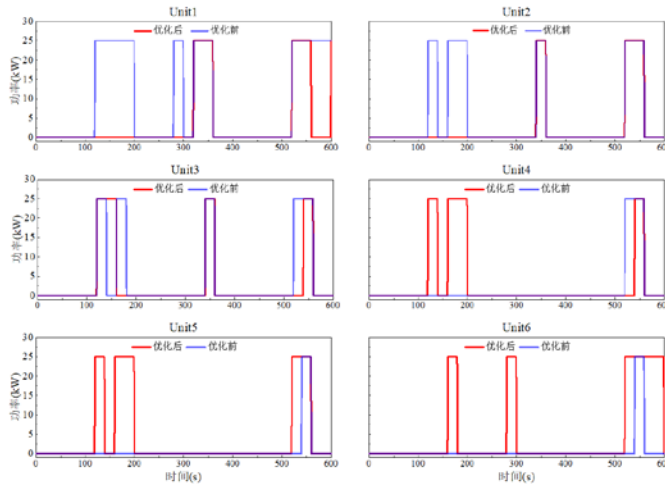


图 9 基于固定位次的顺序滚动优化前后效果对比

### 3.2 基于累计工作时间占比的排序滚动优化策略结果验证

与上一节的验证方法相同，首先定义基于累计工作时间占比的排序滚动优化策略的一组控制参数进行优化效果验证，开展对迭代更新时间间隔为 100s 时的优化策略仿真研究，各动力单元对应的排序位次与累计工作占比对比结果如图 10 所示。

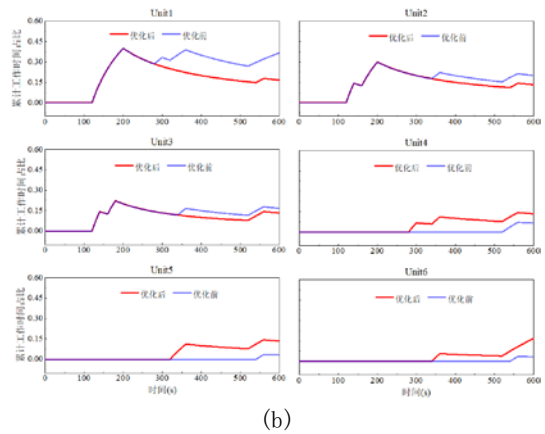
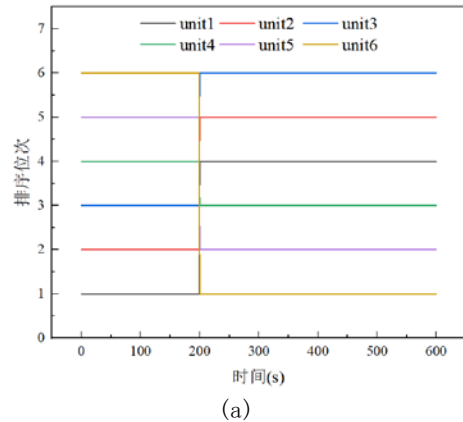


图 10 迭代更新时间间隔为 100s 的各动力单元排序结果 (a) 与累计工作时间占比 (b)

观察图 10(a)与图 10(b)可知，动力单元 1 和动力单元 2 在工况运行前期的排序位次靠前，因此累计工作占比高。而随着优化策略的实时计算与迭代更新，前半段工况累计工作占比较少几个动力单

元的位次逐渐提升, 分配到更多的功率进而提升累计工作占比最终实现动力单元功率分配的均匀化。接下来本文开展基于累计工作时间占比的排序滚动优化效果对比, 基于上文分析结果设置迭代更新时间间隔从 20s 至 150s。优化效果如表 3 所示。

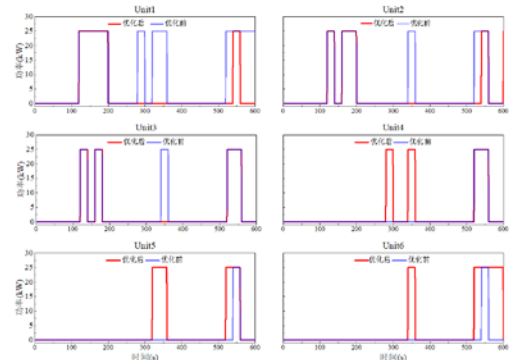


图 11 基于累计工作时间占比的排序滚动优化前后效果对比

表 2 基于累计工作时间占比的排序滚动优化策略不同参数方差结果

迭代更新时间间隔(s)	20	30	40	50	60	70	80
方差 $\times 10^{-3}$	0.723	0.815	1.09	0.899	1.09	0.843	1.13
迭代更新时间间隔(s)	90	100	110	120	130	140	150
方差 $\times 10^{-3}$	1.13	0.722	0.834	1.07	1.03	0.741	0.815

### 3.2 滚动优化策略效果对比

将上述两种优化策略的全参数优化分配结果进行对比, 如图 12 所示。观察图 12 可知, 基于固定位次的排序滚动优化策略中向后滚动 1 位的优化效果整体最优, 而基于累计工作时间占比的排序滚动优化策略优化效果整体好于基于固定位次的排序滚动优化策略优化效果。其中迭代更新时间间隔为 100s 的基于累计工作时间占比的排序滚动优化策略呈现出最好的控制效果。

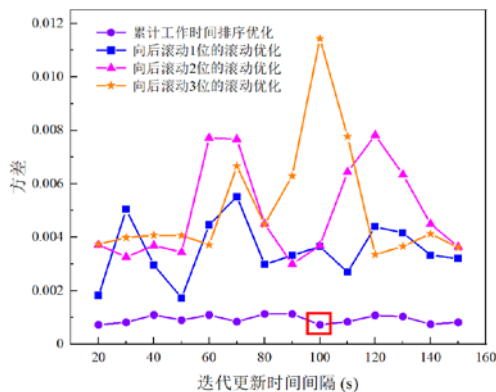


图 12 两种优化策略全参数优化分配结果方差对比

## 4 总结

本文基于传统混合动力汽车串联式结构进行局部更新设计提出了一种串联式模块化动力系统, 并针对该模块化动力系统形成了功率流控制策略。针

对控制策略中功率分配至动力模组使得各动力单元工作时间不均匀进而影响动力系统高效性与耐久性的问题, 本文提出了基于固定位次的顺序滚动优化策略与基于累计工作时间占比的排序滚动优化策略。结果表明, 两种优化策略均能改善动力单元分配不均的问题, 且经过综合对比两种优化策略得到基于累计工作时间占比的排序滚动优化策略的优化效果更好, 但由于基于累计工作时间占比的排序滚动优化策略是依据实时计算结果的主动调控, 因此在实时响应性上基于固定位次的顺序滚动优化策略体现出更快的控制速度。

### 参考文献:

- [1] N. Marx, L. Boulon, F. Gustin, D. Hissel, and K. Agbossou, "A review of multi-stack and modular fuel cell systems: Interests, application areas and on-going research activities," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 23, pp. 12101-12111, 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.187.
- [2] A. Khalatbarisoltani, M. Kandidayeni, L. Boulon, and D. L. St-Pierre, "Modular Energy Systems in Vehicular Applications," *Energy Procedia*, vol. 162, pp. 14-23, 2019.
- [3] M. Becherif, F. Claude, T. Hervier, and L. Boulon, "Multi-stack Fuel Cells Powering a Vehicle," *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 308-319, 2011.

- 5, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.613. CHEN G S, LIN T J, ZHANG Q C, et al. Exploration of technical route for China IV heavy-duty diesel engine with EGR[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012, 33(5): 1-9.
- [4] M. Raceanu, N. Bizon, and M. Varlam, "Experimental Results for an Off-Road Vehicle Powered by a Modular Fuel Cell Systems Using an Innovative Startup Sequence," *Energies*, vol. 15, no. 23, 2022, doi: 10.3390/en15238922.
- [5] N. Bizon, S. Pierfederici, M. Bahrami, and P. Thounthong, "Power equalizer for a series fuel cell architecture based on load tracking control," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 166, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112644.
- [6] Zhou et al., "A review on proton exchange membrane multi-stack fuel cell systems: architecture, performance, and power management," *Applied Energy*, vol. 310, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118555.
- [7] Farzad R S. Control strategies for hybrid electric vehicles: evolution, classification, comparison, and future trends[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, 56(5): 2393-2404.
- [8] Zhang X, Mi C. 车辆能量管理: 建模、控制与优化[M]. 张希, 米春亭, 译北京: 机械工业出版社, 2013: 134-137.
- [9] 邹渊, 陈锐, 侯仕杰, 等基于随机动态规划的混合动力履带车辆功率流控制策略[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(14): 91-96. ZOU Yuan, CHEN Rui, HOU Shi-jie, et al. Energy management strategy for hybrid electric tracked vehicle based on stochastic dynamic programming[J]-*Journal of Mechanical Engineering*. 2012, 48(14): 91-96. (in Chinese)
- [10] Li S G, Sharkh S M, Walsh F C, et al. Energy and battery management of a plug-in series hybrid electric vehicle using fuzzy logic[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(8): 3571-3585.
- [11] Hyeoun D L, Seung K S Fuzzy-logic-based torque control strategy for parallel-type hybrid electric vehicle[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1998, 45(4): 625-632.
- [12] 廖自力, 项宇, 刘春光等. 电传动装甲车辆混合动力系统功率流控制策略[J]. *兵工学报*, 2017, 38(12): 2289-2300.