

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.211

轨道交通装备用混合动力包构型与能量管理策略

类延磊^{1a,2}, 孔令昊², 胡明辉^{1a,1b}, 陈爽^{1a}, 孟凡杰²

(1. 重庆大学 a. 机械与运载工程学院; b. 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中车大连机车
研究所有限公司, 辽宁大连 116021)

摘要: 搭载传统燃油动力包的内燃动车组是运行在非电气化轨道交通中的主力机型, 存在效率低、油耗高的缺点。针对这一问题, 设计了一种轨道交通装备用混合动力包的构型方案, 建立了混合动力动车组的数学模型, 分析了不同模式下该构型方案的运行状态, 结合整车线路运行条件, 提出了一种基于动态规划算法的能量管理策略。仿真结果表明, 在该能量管理策略控制下, 装备混合动力包的动车组相较于纯燃油动车组燃油经济性提升了 32.11%。

关键词: 轨道交通装备; 混合动力包; 能量管理策略; 燃油经济性

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)01-052-17

Hybrid power pack configuration and energy management strategy for rail transit equipment

LEI Yanlei^{1a,2}, KONG Linghao², HU Minghui^{1a,1b}, CHEN Shuang^{1a}, MENG Fanjie²

(1a. College of Mechanical and Vehicle Engineering; 1b. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. CRRC Dalian Institute Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116021, P. R. China)

Abstract: The main type of rail transit equipment used in non-electrified railways is diesel multiple units (DMUs) powered by traditional fossil fuels, which suffers from low efficiency and high fuel consumption. To address this issue, a configuration scheme for a hybrid power pack for railway equipment was designed, and a mathematical model for the hybrid locomotive was established. The operational status of this configuration scheme under different modes was investigated, and an energy management strategy based on dynamic programming algorithm was proposed, with considering the operating conditions. Simulation results demonstrate that with this energy management strategy, the fuel economy of the hybrid powertrain locomotive is improved by over 32.11% compared to that of the pure fossil fuel locomotive.

Keywords: rail transit equipment; hybrid power pack; energy management strategy; fuel economy

收稿日期: 2023-03-19 网络出版日期: 2023-05-26

基金项目: 辽宁省“揭榜挂帅”科技攻关项目(2021JH1/10400073); 中国中车 GCT 项目(2020CTA291)。

Supported by Liaoning Science and Technology Project (2021JH1/10400073), and CRRC GCT Project (2020CTA291).

作者简介: 类延磊(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事轨道交通装备用动力与传动设备研究, (E-mail) leiyanlei0501@126.com。

通信作者: 胡明辉, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) minghui_h@163.com。

21世纪以来,全球各国均面临严峻的能源危机问题。轨道交通作为能源消耗大户,在节能减排方面有巨大提升空间,推行具备高运行效率、低能量消耗特性的电气化轨道与动车组是各国应对能源危机的重要措施^[1-2]。然而,受建设成本与地理环境因素限制,难以实现所有轨道线路的电气化,工况多变的非电气化线路仍会大量、长期存在^[3-5]。传统燃油动车组作为非电气化轨道交通中的主力机型,受发动机特性的限制,难以高效率、低油耗运行^[6-7]。为解决该问题,当务之急是开发高效节能的非电气化轨道通用新型动车组。

混合动力系统作为一种高效节能的动力驱动装置,适用于非电气化轨道交通。混合动力系统按结构形式可分为串联式、并联式与混联式^[8]。目前,多数混合动力动车组采用单模式串联混合动力系统,其中发动机-发电机组用于能量供应,驱动电机用于独立驱动车轮。串联式混合动力机车虽能保证发动机全工况高效运行,但其存在较大的能量转化损失且需配备大功率等级的驱动电机以保证动力性^[9]。目前在机车上鲜有并联式与混联式混合动力系统的应用与研究,但其在乘用车上的应用相对成熟。并联式混合动力系统中发动机直接参与驱动,但由于发动机转速与轮端转速不能完全解耦以至于其无法全工况高效运行^[10]。混联式混合动力系统主要通过行星轮系与电机实现发动机功率与轮端功率的完全解耦,可保证系统全工况高效运行^[11]。综上,面对工况多变的非电气化轨道线路,混联式混合动力系统能更好地保证机车的高效、节能运行。

混合动力系统构型一定程度上确定了动车组的节能潜力,而能量管理策略则直接决定了系统的节能潜力能否被充分利用。现有的能量管理策略可分为2类——基于规则的能量管理策略和基于优化方法的能量管理策略。基于规则的能量管理策略现已大量应用于混合动力动车组的控制^[12-14],其关键参数的制定依赖于工程经验,难以保证系统运行过程中的燃油经济性^[15]。基于优化方法的能量管理策略通过最优算法求解混合动力系统中各动力源的最优能量分配方式,在混合动力乘用车上已有相关技术研究,但在混合动力动车组上鲜有研究。按算法类别,基于优化算法的能量管理策略可分为在线优化能量管理策略与离线优化能量管理策略。在线能量管理策略的代表为等效燃油消耗最小的能量管理策略^[16],该策略适用于混合动力系统的实时控制,但其中的等效燃油因子对工况的依赖程度较高,不合适的等效燃油因子难以保证燃油经济性最优和电池SOC平衡。离线能量管理策略的代表为基于动态规划算法的能量管理策略^[17],该策略能保证燃油经济性的全局最优,但其前提条件为事先已知全局运行工况。对于固定轨道线路上运行的动车组而言,每次运载任务前已知全局运行工况,即载运质量、线路坡度、目标车速已知,因此,可以利用动态规划算法制定混合动力动车组的能量管理策略,以确保动车组以最优燃油经济性运行。

综上所述,对于非电气化轨道交通,现有的动车组混合动力构型单一且节能潜力有限,此外现有的混合动力动车组能量管理策略的经济性有待提高。针对上述问题,文中设计了一种新型动车组混合动力包构型方案^[18],分析该构型典型工作模式的功率流状态,建立混合动力动车组仿真模型,并在此基础上提出一种基于动态规划算法的能量管理策略,以保证动车组的高效节能运行。

1 轨道交通装备用混合动力包构型方案

1.1 构型介绍与模式划分

混合动力系统通过多种能量源结合所实现的牵引效果是单一动力传动系统无法达到的。图1所示的混合动力装备是一种多动力源动力传动集成系统,即混合动力包。混合动力包以动力单元的形式整体悬挂在基于混合动力动车组车梁下方,为车辆提供所需的牵引动力和辅助电力。根据车辆功率需求情况,可以配置不同数量的混合动力包。文中研究的混合动力动车组如图2所示,共有3节车厢,配备2个混合动力包。混合动力包包括柴油机、永磁电机/发电机、动力电池、变速箱、混动箱、控制系统和其他辅助设备。在车辆牵引过程中,柴油机和电机的输出功率通过混动箱耦合后输出到轮端;在车辆制动过程中,轮端功率通过混动箱和电机进行能量回收并储存至动力电池中,关于该混合动力包的详细信息已在专利^[18]中公开。

图3为混合动力包构型方案,其中动车组附件与动力电池电气连接;电机MG1、电机MG2分别通过逆变器与动力电池电气连接;柴油机、MG1、MG2通过功率耦合机构与变速箱机械连接,并通过车轴齿轮箱将动力传递至车轮。功率耦合机构构型如图3所示,其中柴油机通过离合器C1与行星架相连,MG1通过减速齿轮副 Z_1-Z_2 (齿数分别为 z_1 和 z_2)与齿圈相连,MG2通过减速齿轮副 Z_4-Z_5 (齿数分别为 z_3 和 z_4)与太阳轮相连,变速箱与齿圈共轴,行星架与齿圈之间装配有离合器C2,整车及各部件参数如表1所示。

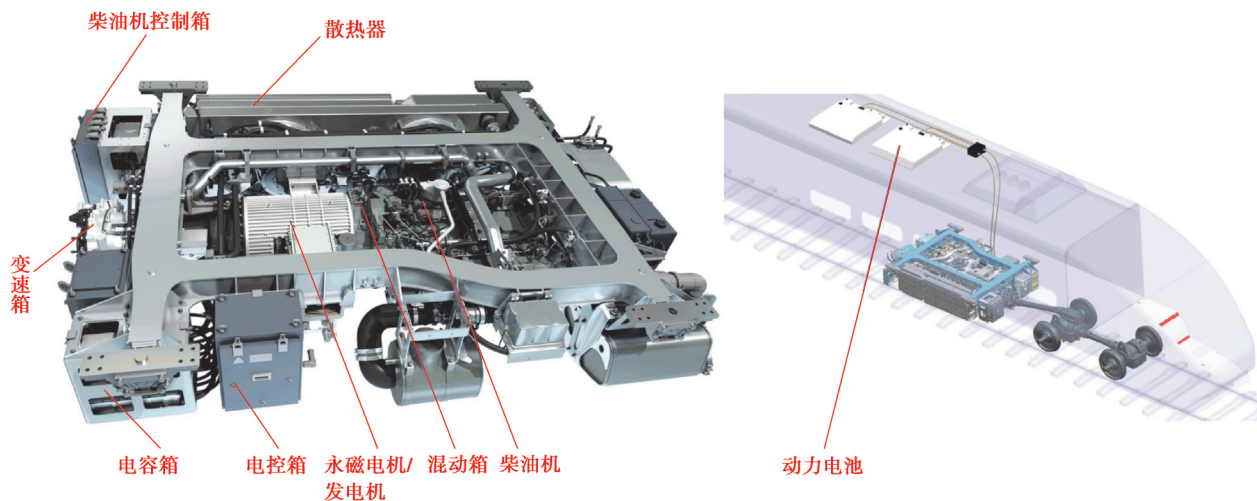


图1 混合动力包

Fig. 1 Hybrid power pack



图2 混合动力动车组

Fig. 2 Hybrid multiple units

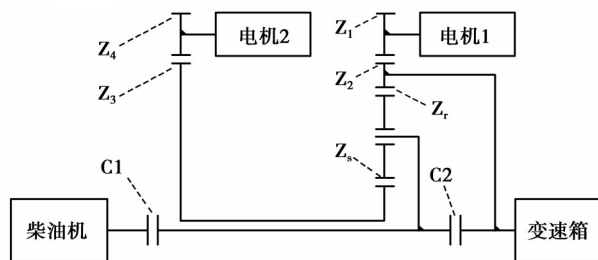


图3 混合动力包构型方案

Fig. 3 Hybrid power package configuration

表1 整车与部件参数

Table 1 Locomotive and component parameters

参数名	值	参数名	值
整车质量/t	186	柴油机最大功率/kW	390
粘着质量/t	62	柴油机最大转速/(r·min ⁻¹)	2 100
车轮半径/m	0.436	柴油机最小转速/(r·min ⁻¹)	1 000
车轴齿轮箱速比	3.8	柴油机最大扭矩/(N·m)	2 300
最大黏着力/kN	110	电机额定功率/kW	150
辅助功率/kW	180	电机峰值功率/kW	281
电池额定功率/kW	153	电机最大转速/(r·min ⁻¹)	10 000
电池额定电压/V	644	电机额定最大扭矩/(N·m)	220
行星轮系特征参数 $k_c=Z_r/Z_s$	2.24	电机峰值最大扭矩/(N·m)	368
Z_2/Z_1 速比	3.73	Z_3/Z_4 速比	3.73

通过控制 C1、C2、柴油机、MG1 和 MG2 的工作状态,可实现 7 种不同的工作模式,各工作模式中部件的运行状态如表 2 所示。

表 2 各工作模式中部件运行状态
Table 2 The status of components in each mode

模式	模式编号	柴油机	MG1	MG2	C1	C2
混合驱动 1	1	ON	ON	ON	ON	OFF
混合驱动 2	2	ON	ON	ON	ON	ON
纯电驱动	3	OFF	ON	ON	OFF	ON
纯柴驱动	4	ON	OFF	OFF	ON	ON
制动能量回收	5	OFF	ON	ON/OFF	ON	ON/OFF
驻车充电	6	ON	ON	ON	ON	OFF
驻车待机	7	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

注:ON 表示柴油机、MG1、MG2 工作,离合器 C1、C2 结合;OFF 表示柴油机、MG1、MG2 停机,C1、C2 分离。

1.2 典型工作模式下功率流分析

1.2.1 混合驱动 1 模式的功率流分析

混合驱动 1 模式中 C1 闭合、C2 分离,此时柴油机、MG1、MG2 和传动系统组成输出功率分流系统。由于 MG1、MG2 均可工作在驱动状态与充电状态,因此混合驱动 1 模式中存在 4 种不同的子模式。各子模式功率流状态如图 4 所示,图中 P_{eng} 、 P_{MG1} 、 P_{MG2} 、 P_{AT} 分别为流经柴油机、MG1、MG2 与变速箱的机械功率,单位为 W。文中,若无特殊说明,所有扭矩的单位为 N·m,所有转速的单位为 r/min,设变速箱输入端的扭矩为 T_{ATin} ,转速为 n_{ATin} ,MG1 的扭矩为 T_{MG1} ,MG2 的转速为 n_{MG2} 。

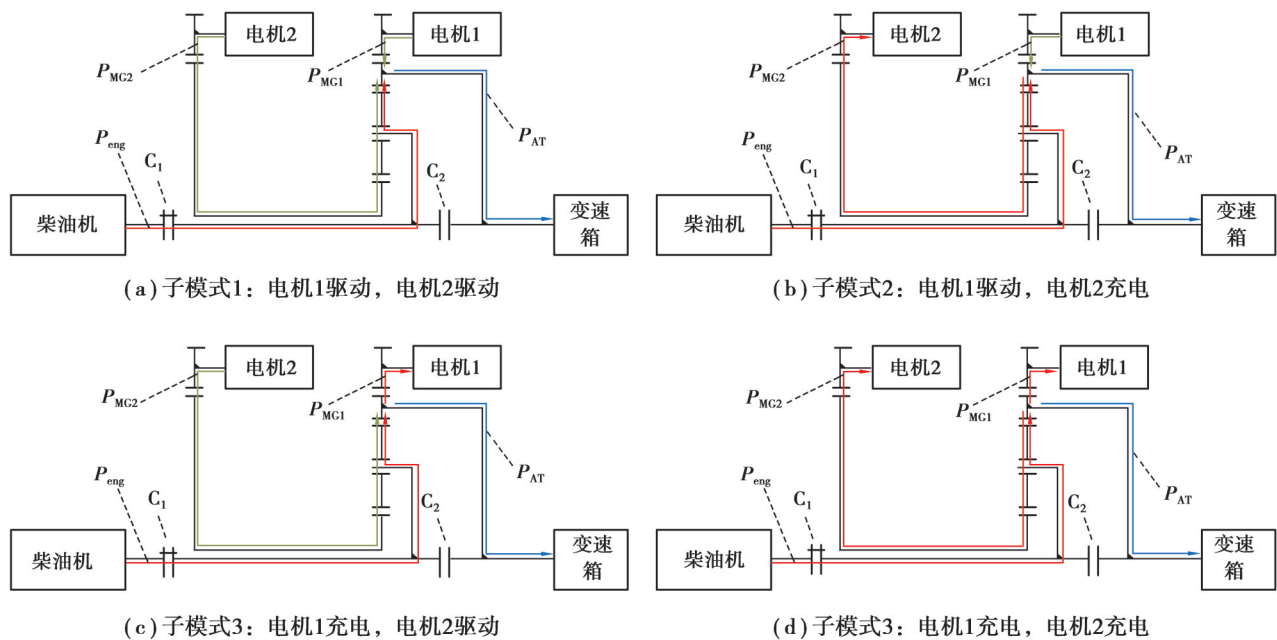


图 4 混合驱动 1 模式下各子模式的功率流

Fig. 4 Power flow status in hybrid drive mode 1

柴油机扭矩为

$$T_{eng} = - \left(T_{ATin} + T_{MG1} \times \frac{z_2}{z_1} \right) \times \frac{k_c + 1}{k_c} \quad (1)$$

柴油机的转速为

$$n_{\text{eng}} = \frac{n_{\text{MG2}} z_4 + k_c n_{\text{ATin}} z_3}{z_3 + k_c z_3} \quad (2)$$

MG2 的转矩为

$$T_{\text{MG2}} = \frac{z_4}{k_c z_3} \times \left(T_{\text{ATin}} + T_{\text{MG1}} \times \frac{z_2}{z_1} \right) \quad (3)$$

MG1 的转速为

$$n_{\text{MG1}} = n_{\text{ATin}} \times \frac{z_2}{z_1} \quad (4)$$

1.2.2 混合驱动 2 模式的功率流分析

混合驱动 2 模式中 C1、C2 闭合, 此时行星轮系锁止, 太阳轮、齿圈与行星架转速相同, 因此柴油机、MG1、MG2 和传动系统构成转矩耦合式混合动力系统。为保证系统不出现功率循环, MG1、MG2 仅可同时处于驱动或充电状态, 因此混合驱动 2 模式中存在 2 种不同的子模式, 其功率流状态如图 5 所示。

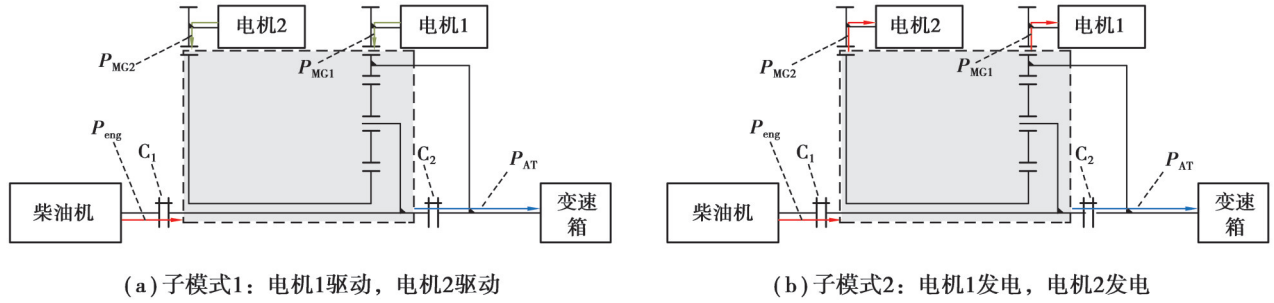


图 5 混合驱动 2 模式下各子模式的功率流

Fig. 5 Power flow status in hybrid drive mode 2

设 MG1 的转矩为 T_{MG1} , 则柴油机的转矩为

$$T_{\text{eng}} = T_{\text{ATin}} - T_{\text{MG1}} \cdot \frac{z_2}{z_1} - T_{\text{MG2}} \cdot \frac{z_3}{z_4} \quad (5)$$

式中, 为保证系统效率, 该模式下 $T_{\text{MG2}} = T_{\text{MG1}}$ 。

柴油机的转速为

$$n_{\text{eng}} = n_{\text{ATin}} \quad (6)$$

MG1 的转速为

$$n_{\text{MG1}} = n_{\text{ATin}} \times \frac{z_2}{z_1} \quad (7)$$

MG2 的转速为

$$n_{\text{MG2}} = n_{\text{ATin}} \times \frac{z_3}{z_4} \quad (8)$$

1.2.3 纯电驱动模式的功率流分析

纯电驱动模式中 C1 分离、C2 闭合, 此时行星轮系锁止, 太阳轮、齿圈与行星架转速相同, MG1、MG2 与传动系统构成转矩耦合式动力系统。因此 MG1 与 MG2 仅能工作在驱动模式, 其功率流状态如图 6(a) 所示, 由于两电机参数完全一致, 且速比 $z_2/z_1 = z_3/z_4$, 为保证系统效率, MG1 与 MG2 的转矩为:

$$\begin{cases} T_{\text{MG1}} = \frac{1}{2} T_{\text{ATin}} \cdot \frac{z_1}{z_2}, \\ T_{\text{MG2}} = \frac{1}{2} T_{\text{ATin}} \cdot \frac{z_4}{z_3}, \end{cases} \quad (9)$$

此时柴油机处于停机状态, $T_{\text{eng}} = 0$; MG1、MG2 的转速如式(7)和(8)所示。

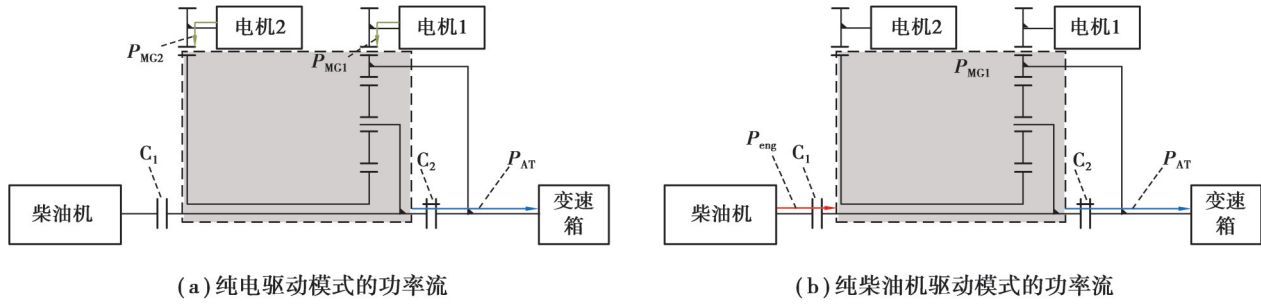


图 6 纯电驱动与纯柴油机驱动模式的功率流

Fig. 6 Power flow status in electric drive mode and engine drive mode

1.2.4 纯柴油机驱动模式的功率流分析

纯柴油机驱动模式中 C1、C2 闭合,此时行星轮系锁止, MG1 与 MG2 不工作,仅柴油机进行驱动,此时系统的功率流如图 6(b)所示,柴油机的转矩为

$$T_{eng} = T_{ATin} \quad (10)$$

柴油机的转速为

$$n_{eng} = n_{ATin} \quad (11)$$

此时 MG1 与 MG2 处于停机状态,忽略其空载阻力,则 $T_{MG1} = T_{MG2} = 0$,对应的电机转速如式(7)和(8)所示。

1.2.5 制动能量回收模式的功率流分析

为减少 C2 状态的切换频率,制动能量回收模式下的功率流状态取决于制动前离合器 C2 的工作状态。若制动前 C2 处于闭合状态,则由 MG1 与 MG2 共同进行能量回收;若制动前 C2 处于分离状态,则仅由 MG1 进行能量回收。故制动能量回收模式下存在 2 种子模式,其功率流状态如图 7 所示。

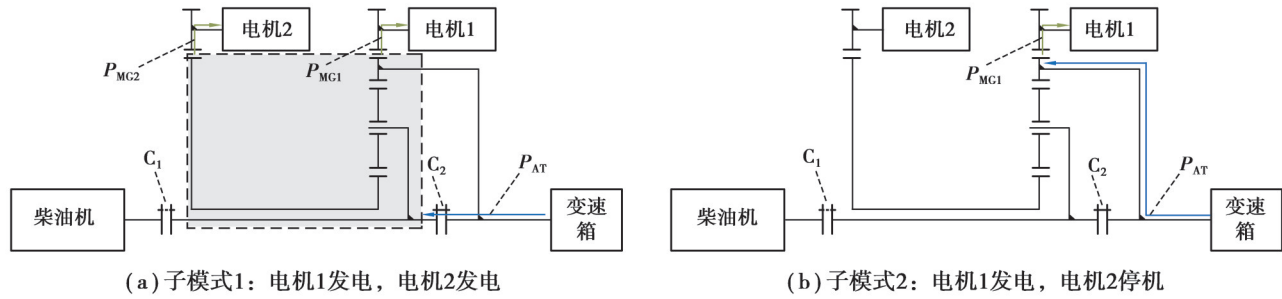


图 7 制动能量回收模式的功率流

Fig. 7 Power flow status in braking energy recovery mode

设 MG1 的转矩为 T_{MG1} ,则 MG2 的转矩为

$$T_{MG2} = \begin{cases} T_{MG1} = \frac{T_{ATin}}{2} \cdot \frac{z_1}{z_2}, & \text{子模式1;} \\ 0, & \text{子模式2。} \end{cases} \quad (12)$$

此时柴油机处于停机状态, $T_{eng} = 0$; MG1、MG2 的转速如式(7)和(8)所示。

1.2.6 驻车充电模式的功率流分析

驻车充电模式下, C1、C2 闭合,变速箱处于空挡 N,此时柴油机输出功率, MG1、MG2 通过传动系统吸收功率并向电池充电,该模式的功率流状态如图 8 所示。

此时变速箱输入端的扭矩为 $T_{ATin} = 0$,设柴油机转矩为 T_{eng} ,转速为 n_{eng} , MG1 的转矩为 T_{MG1} ,则 MG2 的转矩为

$$T_{MG2} = T_{MG1} = -\frac{T_{eng}}{2} \cdot \frac{z_1}{z_2}, \quad (13)$$

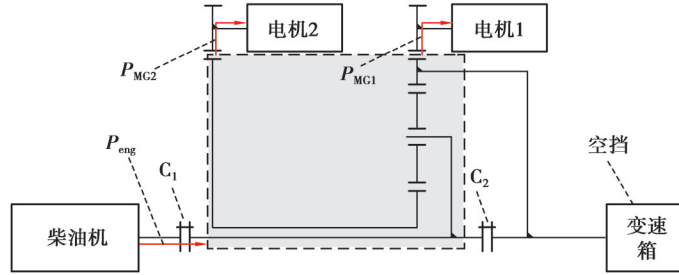


图8 驻车充电模式的功率流

Fig. 8 Power flow status in parking charging mode

此时AT输入端转速 $n_{ATin} = n_{eng}$, MG1与MG2的转速如式(7)和(8)所示。

驻车待机模式下, C1、C2分离, 变速箱处于空挡N, 此时柴油机、MG1、MG2均处于停机状态, 故 $T_{eng} = T_{MG1} = T_{MG2} = 0$, $n_{eng} = n_{MG1} = n_{MG2} = 0$, 仅动力电池为动车组附件供电。

2 混合动力动车组纵向动力学模型

2.1 柴油机模型

文中建立基于柴油机万有特性图的数值模型。当柴油机转速为 n_{eng} 、转矩为 T_{eng} 时, 对应的柴油机比油耗可表示为:

$$b_{eng} = M_{eng}(T_{eng}, n_{eng}), \quad (14)$$

式中, M_{eng} 为柴油机比油耗MAP, 如图9所示。

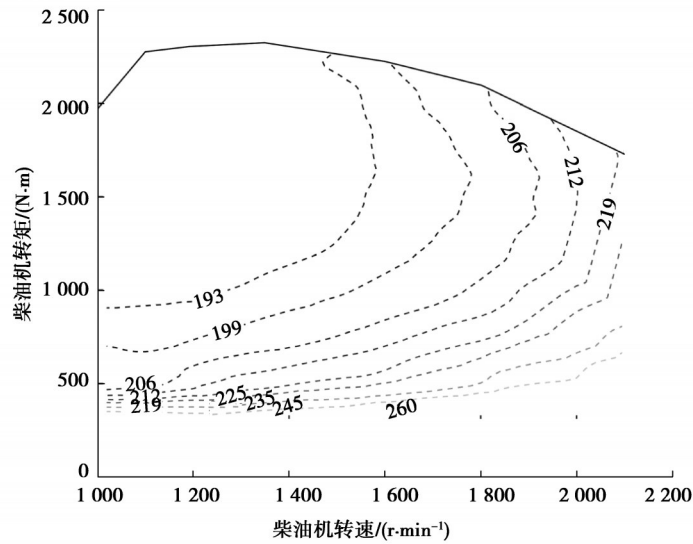


图9 柴油机比油耗MAP

Fig. 9 Specific fuel consumption MAP

此时柴油机的瞬时燃油消耗率为

$$\dot{m}_{fuel} = T_{eng} \times n_{eng} \times b_{eng} \quad (15)$$

2.2 电机模型

由于电机MG1与MG2参数相同, 因此该模型适用于MG1与MG2。该电机模型计算电机转矩为 T_{MG} 、转速为 n_{MG} 时的电功率 P_{MGelec} , W:

$$P_{MGelec} = \frac{\pi}{30} \times T_{MG} \times n_{MG} \times \eta_{MG}^{sgn(T_{MG} \times n_{MG})},$$

$$\text{sgn}(\cdot) = \begin{cases} 1, & T_{\text{MG}} \times n_{\text{MG}} \geq 0, \\ -1, & T_{\text{MG}} \times n_{\text{MG}} < 0. \end{cases} \quad (16)$$

式中, η_{MG} 为电机效率, 可利用 T_{MG} 与 n_{MG} 对电机效率 MAP 进行插值获得。MG1 与 MG2 的效率 MAP 如图 10 所示。

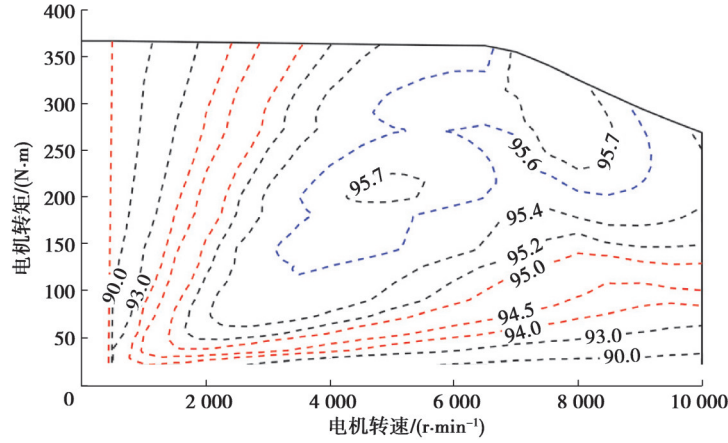


图 10 电机 MG1 与 MG2 的效率 MAP

Fig. 10 Motor efficiency MAP of MG1 and MG2

2.3 动力电池模型

使用等效内阻法对动力电池进行建模, 为

$$\begin{cases} I_{\text{batt}} = (E - \sqrt{E^2 - 4P_{\text{bOut}}R}) / (2R), \\ P_{\text{bOut}} = P_{\text{MG1elec}} + P_{\text{MG2elec}} + P_{\text{AUX}}, \\ \text{SOC}(k+1) = \text{SOC}(k) - I_{\text{batt}}(k) / (3600Q_{\text{batt}}), \\ P_{\text{batt}} = I_{\text{batt}} \times E. \end{cases} \quad (17)$$

式中: E 为电池开路电压, V ; R 为电池内阻, Ω ; E 与 R 受电池荷电状态 SOC 影响, 如图 11 所示; I_{batt} 为电池工作电流, A ; P_{bOut} 、 P_{batt} 、 P_{MG1elec} 、 P_{MG2elec} 、 P_{AUX} 分别为电池输出端、电池内部、电机 MG1、电机 MG2 与附件的电功率, W ; Q_{batt} 为电池容量, $A \cdot h$; k 表示时刻。

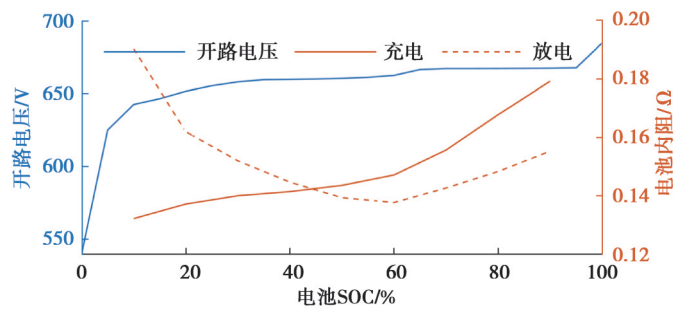


图 11 动力电池开路电压、内阻与 SOC 的关系

Fig. 11 Battery open circuit voltage, charge and discharge resistance

2.4 传动系统模型

从单个混合动力包到轮端的传动系统模型可简化为如图 12 所示。图中, 柴油机功率 P_{eng} 、MG1 功率 P_{MG1} 、以及 MG2 功率 P_{MG2} 通过功率耦合装置进行耦合, 并将扭矩经变速箱、车轴齿轮箱传递至车轮以克服轮端负载。图中 n_{ATin} 、 n_{ATout} 、 n_{whl} 分别为变速箱输入端转速、变速箱输出端转速和车轴齿轮箱输出端转速, r/min ; T_{ATin} 、 T_{ATout} 、 T_{whl} 、 F_f 分别为变速箱输入端转矩、变速箱输出端转矩和车轴齿轮箱输出端转矩, $N \cdot m$; F_f 为轮端阻力, N ; i_{AT} 、 i_{Final} 分别为变速箱与车轴齿轮箱速比。

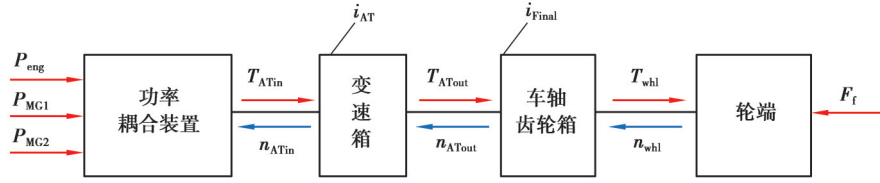


图12 传动系统模型简图

Fig. 12 Schematic diagram of the transmission system model

传动系统中,各模式下功率耦合机构的模型如1.2节所示。

变速箱模型可表示为

$$\begin{cases} T_{ATIn} = T_{ATOut} / i_{AT}, \\ n_{ATIn} = n_{ATOut} \times i_{AT}. \end{cases} \quad (18)$$

车轴齿轮箱模型可表示为

$$\begin{cases} T_{ATOut} = T_{wbl} / i_{Final}, \\ n_{ATOut} = n_{wbl} \times i_{Final}. \end{cases} \quad (19)$$

结合动车组阻力测试曲线,牵引阻力 F_w 可由经验公式计算

$$\begin{cases} F_w = F_f + F_r + F_g + F_c + F_a, \\ F_f = 3500 \times m_{adh} + 1.1 \times (m - m_{adh}) \times 9.81, \\ F_r = 5.25 C_w (12 + v)^2 / 100 \times 9.81, \\ F_g = s \cdot m \cdot 9.81, \\ F_c = 600 \times 1000 / R, \\ F_a = m \cdot a. \end{cases} \quad (20)$$

式中: F_f 、 F_r 、 F_a 、 F_g 、 F_c 分别为机械阻力、空气阻力、加速阻力、坡道阻力、曲线阻力, N; m_{adh} 为车辆黏着质量, t; m 为车辆总质量, t; C_w 为风阻系数; v 为动车组车速, km/h; R 为轨道曲率半径, m; s 为坡道系数, %; a 为加速度。

由于动车组共3节车厢且有2个混合动力包,因此2个混合动力包需共同克服牵引阻力 F_w , 故每个动力包需提供的轮端驱动扭矩 T_{wbl} 与轮端转速 n_{wbl} 可表示为:

$$\begin{cases} T_{wbl} = 1/2 \cdot F_w \cdot R_{wbl}, \\ n_{wbl} = 30 \cdot v / (\pi R_{wbl}), \end{cases} \quad (21)$$

式中, R_{wbl} 为车轮半径, m。

3 基于动态规划的能量管理策略

3.1 动态规划算法原理

动态规划算法是一种基于贝尔曼最优性原理,针对多级决策问题的数值解法^[19]。对于具有连续变量的决策问题而言,在理想的精度与足够的算力下可获得问题的最优解。动态规划算法可表示为基于上一时刻最优累计成本和当前时刻瞬时成本的迭代, k 时刻的全局最优累计成本函数为

$$Y^*(x_k, u_k) = \min [L_k(x_k, u_k) + Y_{k+1}^*(x_{k+1}, u_{k+1})], \quad (22)$$

式中: Y 表示最优累计成本函数; x 表示状态变量; u 表示控制变量; L 表示瞬时成本。

综上,动态规划算法是一种从后向前的最优化算法,若预知整个优化范围内的先验知识,即可利用动态规划算法离线求解出系统的最优累计成本及对应的最优控制率。

针对运行在某一固定线路上的动车组,其运行工况条件即车速-时间序列与坡度-时间序列固定且事先已知,故可以利用动态规划算法求解该混合动力动车组在该线路条件下的最优控制率,为最优能量管理策略。在求解保证最优燃油经济性的能量管理策略之前,需对问题进行如下假设:

- 1) 混合动力动车组相对线路而言可等效成质点,各车轮所处的坡度一致;
- 2) 混合动力动车组运行过程中不考虑除给定车速-时间序列之外的临时车速调度;
- 3) 不考虑海拔、气候等外界因素对混合动力动车组的影响。

3.2 混合动力动车组的最优燃油经济性问题

根据式(22)可知,最优累计成本函数是控制变量 u 、状态变量 x 和瞬时成本函数 L 的泛函,为求得满足混合动力动车组最佳燃油经济性的最优控制率,需选择合适的控制变量、状态变量和瞬时成本函数。

3.2.1 控制变量选择

根据图 3 混合动力包构型方案及 1.2 节功率流分析结果可知,当轮端的车速与坡度已知情况下,不同模式下的自变量选择如表 3 所示时,柴油机、电机 1、电机 2 的运行状态可唯一确定。因此选择控制变量 u 为模式编号 M 、电机 1 转矩 T_{MG1} 、电机 2 转速 n_{MG2} 、发动机转矩 T_{eng} 和变速箱挡位 N_g 的集合:

$$u = [T_{MG1}, T_{eng}, n_{MG2}, N_g, M]。 \tag{23}$$

表 3 各工作模式下的自变量

Table 3 The argument of components in each mode

模式	M	柴油机	MG1	MG2	变速箱
混合驱动 1	1		T_{MG1}	n_{MG2}	N_g
混合驱动 2	2		T_{MG1}		N_g
纯柴驱动	3	T_{eng}			N_g
纯电驱动	4		T_{MG1}		N_g
制动能量回收	5		T_{MG1}		N_g
驻车充电	6		T_{MG1}		
驻车待机	7				

各控制变量的约束为

$$\begin{cases} M \in \{1,2,3,4,5,6,7\}; \\ N_g \in \{0,1,2,3,4,5,6\}; \\ T_{MG1} \in \{ T_{MG1,i} | T_{MG1,i} = \Delta T_{MG} \times i, T_{MG1,i} \in [-T_{MGMax}(n_{MG1}), T_{MGMax}(n_{MG1})], i \in Z+ \}; \\ T_{eng} \in \{ T_{eng,i} | T_{eng,i} = \Delta T_{eng} \times i, T_{eng,i} \in [-T_{engMax}(n_{eng}), T_{engMax}(n_{eng})], i \in Z+ \}; \\ n_{MG2} \in \{ n_{MG2,i} | n_{MG2,i} = \Delta n_{MG} \times i, n_{MG2,i} \in [-n_{MGMax}, n_{MGMax}], i \in Z+ \}。 \end{cases} \tag{24}$$

式中: T_{MGMax} 、 T_{engMax} 分别为电机与柴油机外特性; n_{MGMax} 为电机最大转速; ΔT_{MG} 、 Δn_{MG} 、 ΔT_{eng} 分别为电机转矩、电机转速和柴油机转矩的离散化网格精度。

3.2.2 状态变量与状态转移函数

针对所研究的混合动力动车组,给定当前时刻的运行条件与控制变量,若上一时刻的电池 SOC 的状态已知,则可通过电池模型式(17)获得当前时刻的电池 SOC,结合混合动力动车组的动力学模型,此时整个系统的运行状态可唯一确定,故选取电池 SOC 作为系统的状态变量:

$$x = SOC。 \tag{25}$$

运行过程中,电池 SOC 需保证始末状态一致,且 SOC 维持在给定的范围内,故电池 SOC 的约束为

$$\begin{cases} SOC(1) = SOC(end); \\ SOC(k) \in \{ SOC_i | SOC_i = \Delta SOC \times i, SOC_i \in [SOC_{min}, SOC_{max}], i \in Z+ \}。 \end{cases} \tag{26}$$

式中: SOC_{min} 、 SOC_{max} 分别为 SOC 的上、下限值; ΔSOC 为电池 SOC 的离散化网格精度。

系统的状态变量为电池 SOC,则系统的状态转移函数可表示为

$$SOC(k) = f(SOC(k+1), u(k), c(k)), \tag{27}$$

式中: f 表示整车仿真模型,其结构如图 13 所示; $c(k)$ 表示 k 时刻的工况条件,为 k 时刻车速、加速度与坡度的集合。

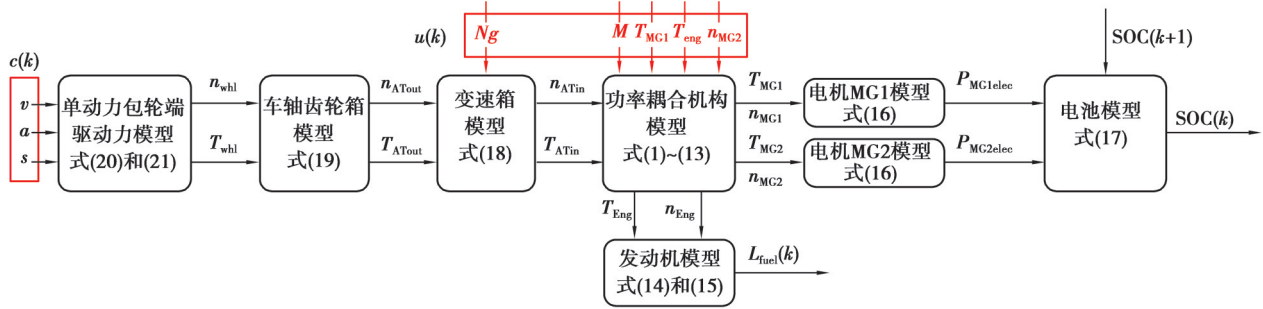


图 13 整车仿真模型结构图

Fig. 13 Structure diagram of vehicle simulation model

3.2.3 瞬时成本函数与决策函数

针对混合动力动车组燃油经济性最优化问题,瞬时成本函数为瞬时燃油消耗;此外考虑到模式、挡位和柴油机扭矩频繁突变会导致传动系统振动冲击,甚至影响部件使用寿命。故在瞬时成本函数中引入对模式、挡位和柴油机扭矩变化的惩罚,为

$$L = L_{\text{fuel}} + L_{N_g} + L_M + L_{T_{\text{eng}}}, \quad (28)$$

式中: L_{fuel} 为柴油机瞬时燃油消耗函数; L_{N_g} 为挡位变化惩罚函数; L_M 为模式变化惩罚函数, $L_{T_{\text{eng}}}$ 为柴油机扭矩变化惩罚函数。式(28)中各项函数为

$$\begin{cases} L_{\text{fuel}}(k) = \dot{m}_{\text{fuel}}(T_{\text{eng}}, n_{\text{eng}}) \times T_s, \\ L_{N_g}(k) = w_{N_g} \times (|N_g(k) - N_g(k+1)|), \\ L_M(k) = w_M \times (|M(k) - M(k+1)|), \\ L_{T_{\text{eng}}}(k) = w_{T_{\text{eng}}} \times (|T_{\text{eng}}(k) - T_{\text{eng}}(k+1)| / T_{\text{engMax}}), \end{cases} \quad (29)$$

式中: w_{N_g} 、 w_M 、 $w_{T_{\text{eng}}}$ 分别为挡位变化、模式变化、柴油机扭矩变化的惩罚权重系数; T_s 为单个步长对应的的时间间隔,取1s; T_{engMax} 为发动机的最大扭矩值。

基于瞬时成本函数 L ,最优能量管理策略的决策函数可表示为基于每一个 $k+1$ 时刻电池SOC状态下使得 k 时刻瞬时成本函数 $L(k)$ 与 $k+1$ 时刻累计成本函数之和最小的控制变量集合,为

$$\begin{cases} Y^*(k, \text{SOC}(k)) = \min [L(k) + Y^*(k+1, \text{SOC}(k+1))], \\ u^*(k, \text{SOC}(k)) = \arg \min_{u \in \text{eq}(24)} [L(k) + Y^*(k+1, \text{SOC}(k+1))], \end{cases} \quad (30)$$

式中: $Y^*(k+1, \text{SOC}(k+1))$ 为 $k+1$ 时刻当电池SOC为 $\text{SOC}(k+1)$ 时的最优累计成本; $Y^*(k, \text{SOC}(k))$ 为 k 时刻当电池SOC为 $\text{SOC}(k)$ 时的最优累计成本; $u^*(k, \text{SOC}(k))$ 为 k 时刻最优累计成本所对应的最优控制变量集合。

3.3 基于动态规划算法求解最优燃油经济性问题

基于上述混合动力动车组燃油经济性问题定义,可利用动态规划算法从后往前逐步求解出最优能量管理策略,具体的求解流程如图14所示。图中 f 表示混合动力动车组模型,已由文中第2节给出; ΔT_{MG} 、 ΔT_{eng} 、 Δn_{MG} 、 ΔSOC 分别表示电机扭矩、发动机扭矩、电机转速和电池SOC的离散化网格精度; M_{List} 、 $N_{g\text{List}}$ 、 T_{MGList} 、 T_{engList} 、 n_{MGList} 、 SOC_{List} 分别为模式、挡位、电机扭矩、发动机扭矩、电机转速和电池SOC的离散化序列。从图14中可以看出,该算法流程可分为后向计算和前向寻优2个部分。通过后向计算获得每一步的最优累计成本和对控制率的候选解,通过前向寻优从候选解中提取出最优累计成本和对应的最优控制率。

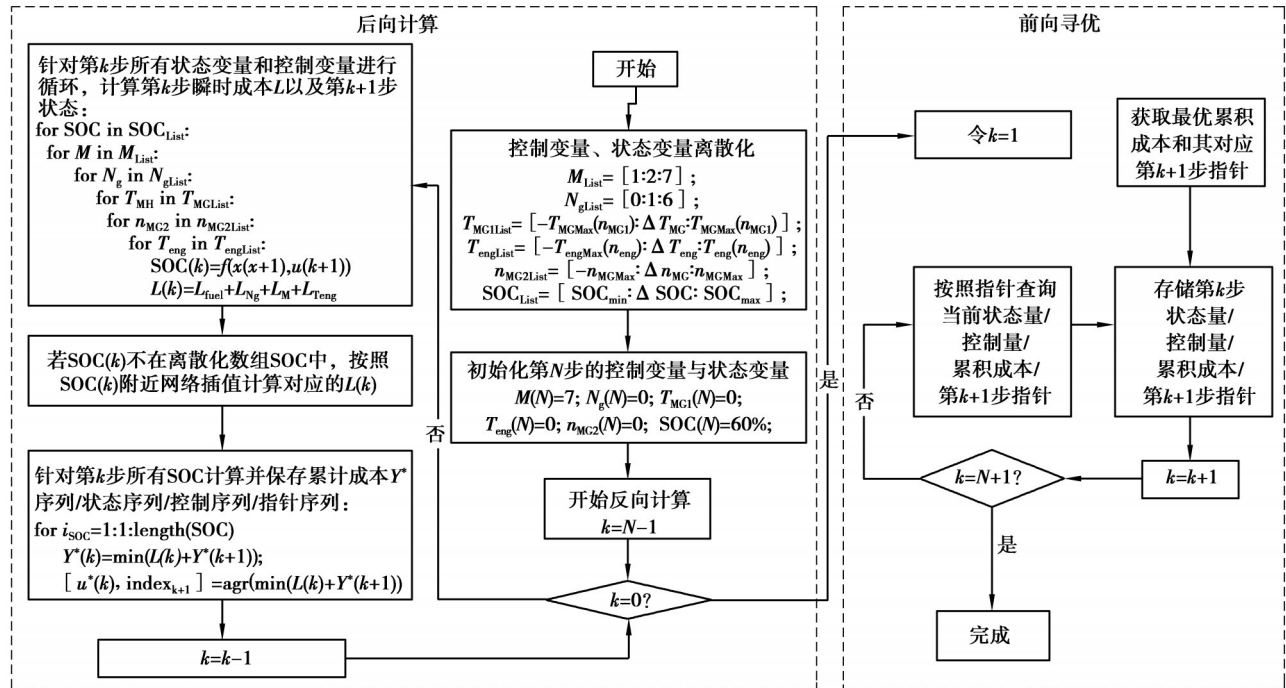


图 14 最优能量管理策略的求解流程

Fig. 14 The solution process of optimal energy management strategy

4 仿真测试与对比分析

为验证文中提出的基于动态规划算法的能量管理策略的经济性,基于 Matlab 仿真平台搭建模型进行仿真测试,并将测试结果与纯燃油动车组的仿真结果进行对比分析。

4.1 工况条件与参数设置

选取国内某实际轨道线路为混合动力动车组运行条件工况,该工况全长 220 km,途经 12 个站点,坡度、车速与时间的关系如图 15 所示。

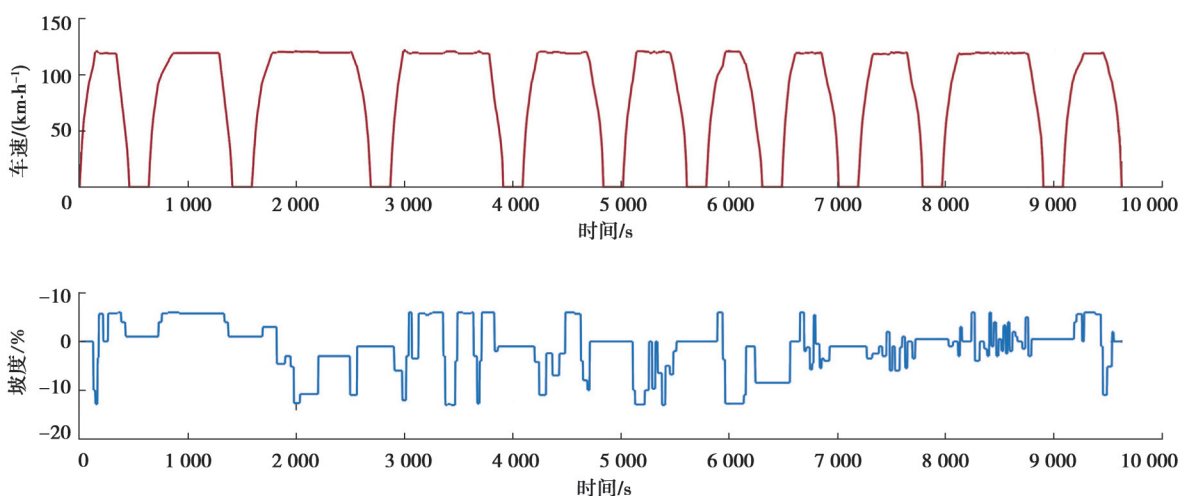


图 15 工况运行条件

Fig. 15 Operating condition

图14所示的算法流程需设置的主要参数见表4所示。其中, ΔT_{MG} 、 ΔT_{eng} 、 Δn_{MG} 为控制变量离散化精度,理论上其离散化精度越高,算法的结果越接近最优解,但求解速度越慢。为保证算法的准确性与时效性,以控制变量对应的数值模型精度对控制变量进行离散化。图10与图11分别为柴油机与电机的MAP,其中柴油机MAP纵坐标为柴油机扭矩,数据间隔为10 N·m,电机MAP的横纵坐标为电机转速与扭矩,数据间隔分别为100 r/min与5 N·m;当动态规划算法中对连续变量的离散化精度小于上述MAP的数据间隔时,难以提升算法结果的准确性,但会导致算法求解时间加长,影响算法实效性。因此 T_{MG1} 、 n_{MG2} 和 T_{eng} 的离散化网格精度按对应MAP的数据间隔进行取值,分别为5 N·m、100 r/min和10 N·m。

ΔSOC 为状态变量离散化精度,可由控制变量的离散化精度计算得到。已知电机扭矩的网格精度为 ΔT_{MG} ,电机转速的网格精度为 Δn_{MG} ,电机的平均效率为 $\eta_{MG,mean}$,可得电池功率的最小增量约为 $\Delta T_{MG} \times \Delta n_{MG} \times \pi / (30 \times \eta_{MG,mean})$,将其代入电池方程式(17),可近似求解出电池SOC的离散化网格精度 ΔSOC 。

w_{Ng} 、 w_M 、 w_{Teng} 的取值通过试凑法获得,试凑的依据是在不大幅降低燃油经济性的同时,惩罚因子可以有效限制挡位、模式和柴油机扭矩的频繁突变。

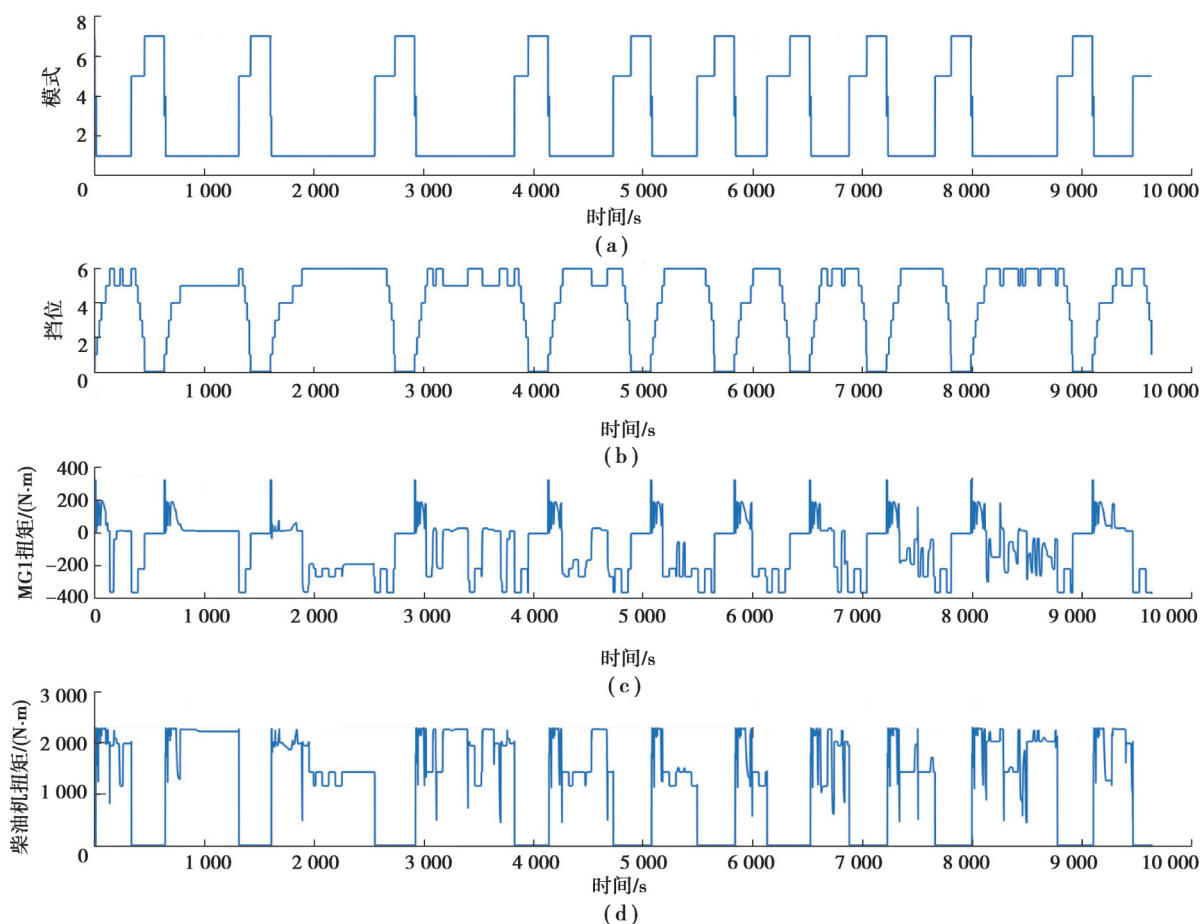
表4 算法主要参数

Table 4 Main parameters of algorithm

参数名	$\Delta T_{MG}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$\Delta T_{eng}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$\Delta n_{MG}/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$\Delta SOC/\%$	w_{Ng}	w_M	w_{Teng}
参数值	5	10	100	0.01	0.000 1	0.000 2	0.000 1

4.2 仿真结果分析

根据4.1节给定的工况与参数设置,基于图14所示算法进行仿真,获得混合动力动车组的全局最优百公里油耗为52.53 L/100 km,对应的全局最优控制率与电池SOC状态轨迹如图16所示。



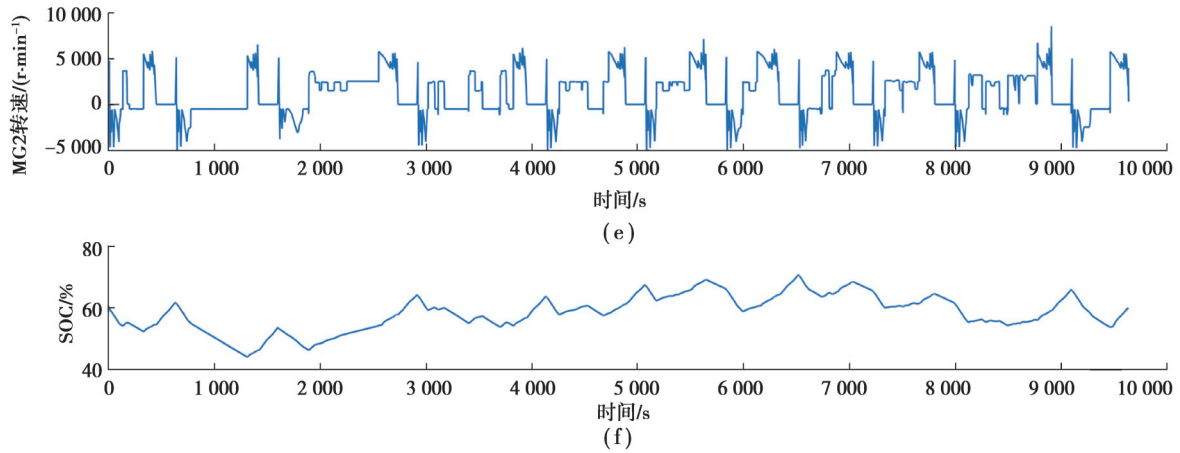


图 16 最优控制率与 SOC 轨迹仿真结果

Fig. 16 Optimal control and SOC trajectory simulation results

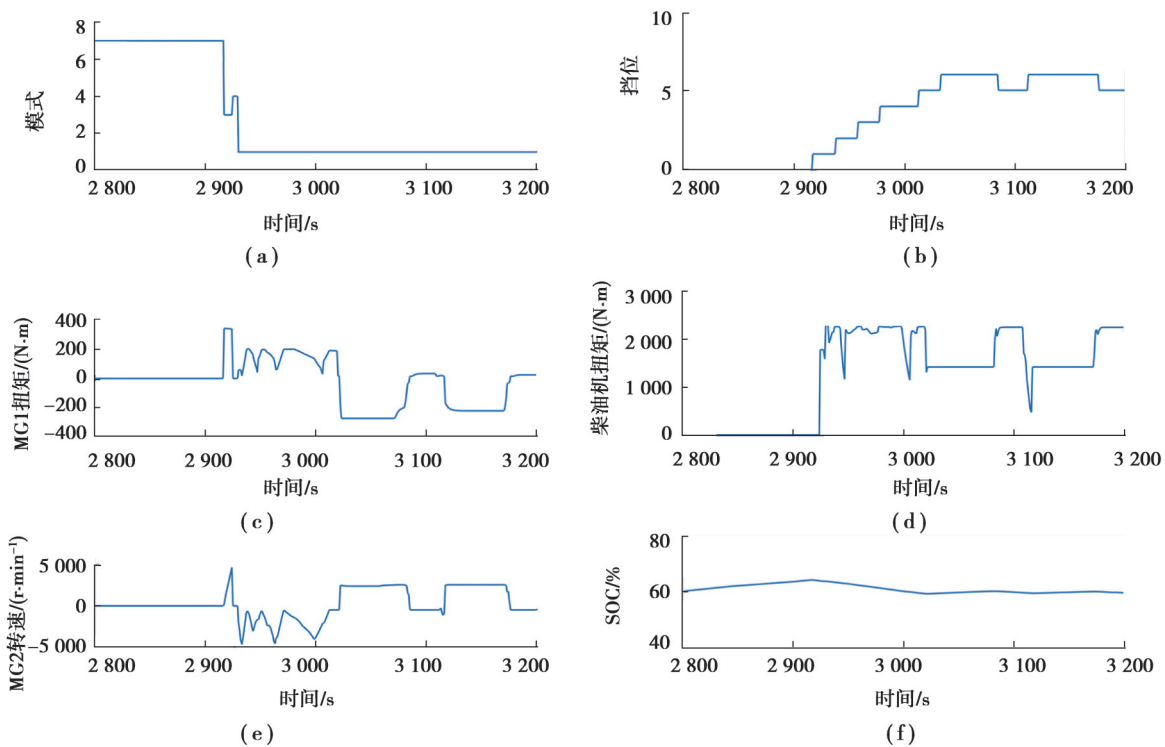


图 17 2 800 ~3 200 s 的最优控制率与 SOC 轨迹仿真结果

Fig. 17 Optimal control and SOC trajectory simulation results of 2 800 s to 3 200 s

结合图 16(a)(b)(d)与图 17(a)(b)(d),可以看出,模式、挡位和柴油机扭矩并未出现频繁突变,即使在加速过程中,模式、挡位、柴油机扭矩、电机 1 扭矩和电机 2 转速的变化均较为平稳,说明该控制策略具备合理性;从图 16(f)中可以看出,该过程中电池 SOC 初始状态与末状态均为 60%,说明该策略能保证电池 SOC 平衡;此外,由于线路运行始末电池 SOC 平衡,可认为整个运行过程中所需功率均来自于柴油机。

将驱动模式固定为纯柴油模式,则原混合动力动车组等效为纯燃油动车组,按图 14 所示算法流程进行仿真,可得纯燃油动车组的百公里燃油消耗为 77.38 L,混合动力动车组相对于传统纯燃油动车组的能耗经济性提升 32.11%,节能效果明显。图 18 为混合动力动车组与纯燃油动车组的柴油工作点分布,可以看出,混合动力动车组的柴油工作点主要分布在低燃油消耗率区间,而纯燃油动车组的柴油机工作点主要分布在外

特性和高燃油消耗率区间。图19为柴油机各油耗区间的工作点占比,可以看出纯燃油动车组有50.9%的工况点分布在高燃油消耗率区域;而混合动力动车组,在高燃油消耗率区域间的工况点占比仅为0.22%,低燃油消耗区域工况点占比高达93.89%;这说明了采用基于动态规划的能量管理策略控制下的混合动力动车组相较于传统燃油动车组而言能大幅度提升整车的燃油经济性。

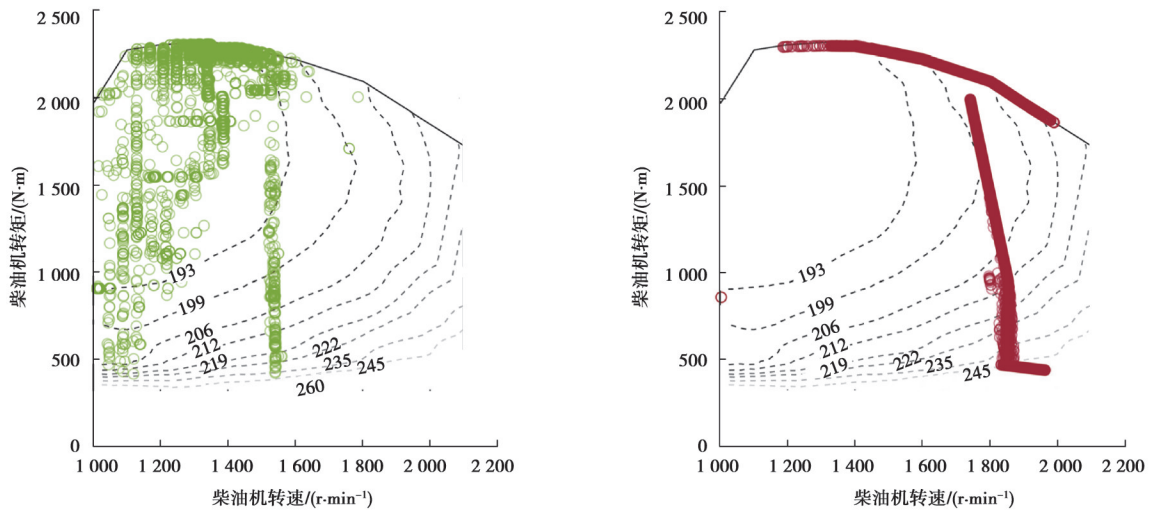


图18 柴油机运行工作点对比

Fig. 18 Comparison of engine working points

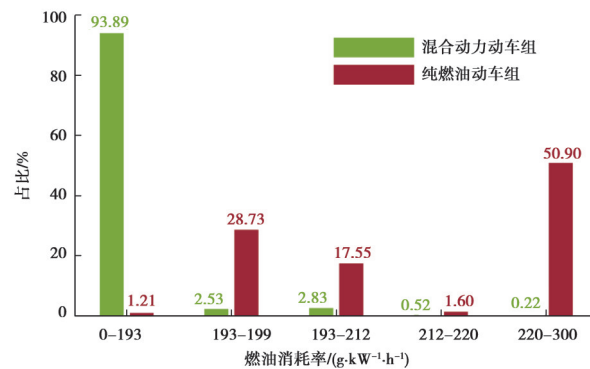


图19 各油耗区间柴油机工作点占比

Fig. 19 The proportion of engine working points in each fuel consumption interval

图20为混合动力动车组电机运行工况点。由于电机MG1通过减速齿轮直接与变速箱输入轴相连,运行过程中转速始终为正,运行在电机效率曲面的一、四象限,主要作用是输出正扭矩或负扭矩将柴油机输出扭矩与变速箱输入端扭矩进行解耦。如图21所示,电机MG1的工作点有62.7%分布在高效区间;电机MG2通过减速齿轮与行星轮系的太阳轮相连,运行过程中转速与变速箱输出轴转速不直接耦合,可在电机效率曲面的4个象限中运行,主要作用是输出正转速或负转速将柴油机输出转速与变速箱输入端转速进行解耦,电机MG2的工作点有57.95%分布在高效区间。从电机MG1与MG2的运行情况可以看出,基于动态规划的能量管理策略在保证柴油机高效运行的前提下,同时可保证电机以较高效率方式运行,这进一步说明了基于动态规划算法的能量管理策略具有较好的能耗经济性。

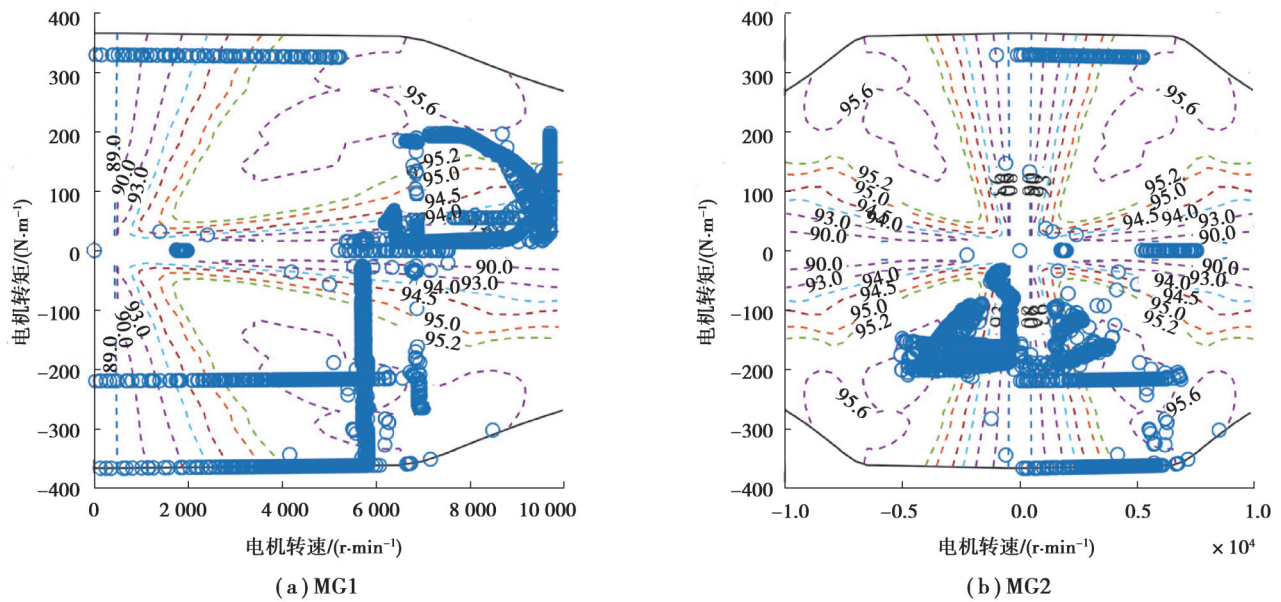


图 20 电机 MG1 与 MG2 运行工作点

Fig. 20 Motor MG1 and MG2 operation point

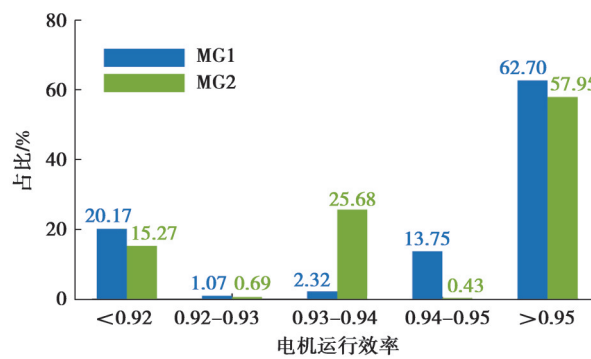


图 21 电机 1 与电机 2 的运行效率占比

Fig. 21 The proportion of MG1 and MG2 working points in each efficiency interval

5 结束语

文章设计了一种具有多种运行模式的混合动力动车组构型方案,分析了典型运行模式下的功率流状态,建立了混合动力动车组的纵向动力学模型,在此基础上,结合动车组运行条件,提出了一种基于动态规划的能量管理策略。仿真结果表明,与传统燃油动车组相比,在文中提出的该能量管理策略控制下,混合动力动车组在保证电池 SOC 平衡的同时,燃油经济性提升了 32.11%,有效地改善了柴油机的工作点,提升了动车组的能耗经济性。

参考文献

[1] Liu Q J, Wu M L, Li J, et al. Frequency-scanning harmonic generator for (inter)harmonic impedance tests and its implementation in actual 2 × 25 kV railway systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 4801-4811.

[2] 樊运新,龙源,江大发,等. 新能源混合动力机车发展现状及关键技术综述[J]. 电力机车与城轨车辆, 2023, 46(1): 1-11.
Fan Y X, Long Y, Jiang D F, et al. Overview of development status and key technologies of new energy hybrid electric locomotive[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2023, 46(1): 1-11.(in Chinese)

[3] Cipek M, Pavković D, Kljaić Z, et al. Assessment of battery-hybrid diesel-electric locomotive fuel savings and emission reduction potentials based on a realistic mountainous rail route[J]. Energy, 2019, 173: 1154-1171.

[4] Wen L, Song Q. Simulation study on carbon emission of China's freight system under the target of carbon peaking[J]. Science

of The Total Environment, 2022, 812: 152600.

- [5] Jaafar A, Akli C R, Sareni B, et al. Sizing and energy management of a hybrid locomotive based on flywheel and accumulators [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 3947-3958.
- [6] Cipek M, Pavković D, Krznar M, et al. Comparative analysis of conventional diesel-electric and hypothetical battery-electric heavy haul locomotive operation in terms of fuel savings and emissions reduction potentials[J]. Energy, 2021, 232: 121097.
- [7] 张弛, 吴健, 张维戈, 等. 机车油电混合动力系统的优化匹配[J]. 机车电传动, 2022(3): 89-101.
Zhang C, Wu J, Zhang W G, et al. Optimal sizing of diesel-electric hybrid powertrain for locomotive[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(3): 89-101.(in Chinese)
- [8] Anselma P G, Biswas A, Belingardi G, et al. Rapid assessment of the fuel economy capability of parallel and series-parallel hybrid electric vehicles[J]. Applied Energy, 2020, 275: 115319.
- [9] Qin Z B, Luo Y G, Zhuang W C, et al. Simultaneous optimization of topology, control and size for multi-mode hybrid tracked vehicles[J]. Applied Energy, 2018, 212: 1627-1641.
- [10] Wu W, Luo J L, Zou T G, et al. Systematic design and power management of a novel parallel hybrid electric powertrain for heavy-duty vehicles[J]. Energy, 2022, 253: 124165.
- [11] Tang X L, Zhang J M, Cui X Y, et al. Multi-objective design optimization of a novel dual-mode power-split hybrid powertrain [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(1): 282-296.
- [12] Olmos J, Gandiaga I, Lopez D, et al. Li-ion battery-based hybrid diesel-electric railway vehicle: In-depth life cycle cost analysis [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(6): 5715-5726.
- [13] Zhang G R, Chen W R, Li Q. Modeling, optimization and control of a FC/battery hybrid locomotive based on ADVISOR[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(29): 18568-18583.
- [14] Kaleybar H J, Brenna M, Li H A, et al. Fuel cell hybrid locomotive with modified fuzzy logic based energy management system [J]. Sustainability, 2022, 14(14): 8336.
- [15] Lü X Q, Wu Y B, Lian J, et al. Energy management of hybrid electric vehicles: a review of energy optimization of fuel cell hybrid power system based on genetic algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 205: 112474.
- [16] Hong Z H, Li Q, Han Y, et al. An energy management strategy based on dynamic power factor for fuel cell/battery hybrid locomotive[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(6): 3261-3272.
- [17] Peng H J, Chen Z, Li J X, et al. Offline optimal energy management strategies considering high dynamics in batteries and constraints on fuel cell system power rate: from analytical derivation to validation on test bench[J]. Applied Energy, 2021, 282: 116152.
- [18] 李文勇, 曹晓龙, 曲贵政, 等. 混合动力动车组动力系统混动箱: CN113859273A[P]. 2021-12-31.
Li W Y, Cao X L, Qu G Z, et al. Hybrid power box of power system of hybrid power motor train unit: CN113859273A[P]. 2021-12-31.(in Chinese).
- [19] Bellman R. Terminal control, time lags, and dynamic programming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1957, 43(10): 927-930.

(编辑 詹燕平)