

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.236

引用格式:周明威,孙冬野,王灿,等.电动重型商用车 AMT 系统效率最优换挡策略[J].重庆大学学报,2025,48(7): 1-12.



电动重型商用车 AMT 系统效率最优换挡策略

周明威^{a,b},孙冬野^{a,b},王 灿^{a,b},王伦斌^{a,b},王俊豪^{a,b}

(重庆大学 a. 高端装备机械传动全国重点实验室; b. 机械与运载工程学院, 重庆 400044)

摘要:为提高电动商用车的能量利用率,充分发挥其节能潜力,文中以多挡电控机械式自动变速箱(automated mechanical transmission, AMT)电动重型商用车为研究对象,提出了一种基于系统效率最优的换挡策略。基于电驱系统构型深入分析各部件损耗机理和动态效率特性,通过电驱系统效率曲面制定基于系统效率最优的换挡策略;建立电驱系统键合图模型,利用重构城郊工况进行换挡策略仿真分析;结合实车实验验证了文中策略的有效性和优越性。研究表明:该策略能实现电驱系统输出效率最优,比传统经济性换挡策略的整车能耗降低了 3.86%。

关键词:能量利用率;电动重型商用车;AMT;换挡策略;键合图

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)07-001-12

Optimal system efficiency shifting strategy of AMT electric heavy truck

ZHOU Mingwei^{a,b}, SUN Dongye^{a,b}, WANG Can^{a,b}, WANG Lunbin^{a,b}, WANG Junhao^{a,b}

(a. State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment; b. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To improve the energy efficiency of electric commercial vehicles and fully utilize their energy-saving potential, this study utilizes multi-gear automated mechanical transmission (AMT) electric heavy trucks as the research object and proposes a shifting strategy based on the optimal system efficiency. First, based on the electric drive system configuration, the loss mechanism and dynamic efficiency characteristics of each component are analyzed, and the shifting strategy based on the optimal system efficiency is formulated through the electric drive system efficiency surface. Second, a bond graph model of the electric drive system is established, and the simulation analysis of the shift strategy is carried out by using the reconstructed suburban working conditions. Finally, the effectiveness and superiority of the proposed strategy are verified through the real vehicle experiments. The research results indicate that the proposed strategy achieves real-time control of the optimal output efficiency of the electric drive system, and reduces the overall vehicle energy consumption by 3.86% compared with the traditional economic gearshift strategy.

Keywords: energy efficiency; electric heavy truck; AMT; shift strategy; bond graph

收稿日期:2024-09-25 网络出版日期:2024-12-02

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资助项目(2022CDJDX-004);重庆市技术创新与应用发展专项重大项目(CSTB2022TIAD-STX0005)。

Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities(2022CDJDX-004), and Chongqing Technological Innovation and Application Development Special Major Project(CSTB2022TIAD-STX0005).

作者简介:周明威(2000—),男,硕士研究生,主要从事电动汽车动力传动与控制研究,(E-mail)13592149043@163.com。

通信作者:孙冬野,男,教授,博士生导师,(E-mail) dysun@cqu.edu.cn。

随着环境污染和能源危机的不断加重,汽车产业电动化转型受到越来越多的关注^[1-2]。现阶段,重型商用车占据了汽车行业54.3%的碳排放量且电动化渗透率仅为0.7%^[3],其电动化转型具备巨大的节能潜力和环保价值。凭借着电控机械式自动变速箱(automated mechanical transmission, AMT)制造成本低、效率与操作可靠性高等优点,多挡AMT电动重型商用车成为重型商用车的主流车型^[4]。为充分开发AMT节能潜力,多数制造商通过增加AMT挡位数的方式降低能量损耗,但该方案会导致成本上升^[5]。因此,换挡策略成为改善多挡AMT电动重型商用车能量损耗的关键^[6]。

经济性换挡策略的研究主要分为传统经济性换挡策略和基于智能控制的经济性换挡策略两类。传统经济性换挡策略利用优化算法或者考虑多部件效率特性制定换挡策略,Roozegar等^[7]结合遗传算法提出一种基于变分法的换挡控制策略,可以实现快速换挡并降低能量损耗。Wang等^[8]引入DIRECT算法与模糊控制制定经济性换挡策略,该策略在保持电池充放电平衡的同时能够降低能量损耗。Nguyen等^[9]和王玮琪等^[10]将电驱系统多部件效率特性进行耦合分析,以综合效率最高为性能指标制定换挡策略,但是考虑部件不够全面且较理想化。此类研究换挡策略通常基于电机效率最优制定,忽略电驱系统部分的效率特性,使换挡策略无法确切表征各部件及整个系统效率随驾驶环境动态变化的特点。

基于智能控制的经济性换挡策略考虑人一车一路三者的交互适应,利用神经网络、深度强化学习等方法制定换挡策略。Hayashi等^[11]和You等^[12]利用神经网络等算法,引入换挡策略修正因子来解决电动重型商用车道路环境大幅度变化的问题。Lin等^[13]和Feng等^[14]考虑驾驶意图的影响,利用长短期记忆神经网络、k1散度进行驾驶风格识别并制定换挡策略,有效提升了换挡策略环境适应性。Chen等^[15]利用强化学习进行能量管理与换挡策略的多目标控制以提升能量利用率。此类研究换挡策略的制定对计算芯片要求较高,且需要长时间训练以制定策略,显著增加了车辆成本。

针对上述问题,文中提出了一种基于系统效率最优的换挡策略。基于电驱系统结构深入分析电驱系统各部件损耗机理和动态效率特性,通过电驱系统效率曲面制定基于系统效率最优的换挡策略;建立电驱系统键合图模型,利用重构城郊工况进行换挡策略仿真分析;通过实车实验验证文中改进策略的有效性和优越性。

1 基于系统效率最优的换挡策略

1.1 电驱系统构型

图1为某款电动重型商用车电驱系统结构原理图,主要由电气系统和机械传动系统两部分组成,电气系统包含电池、变换器、逆变器和电机,机械传动系统包含AMT、传动轴、主减速器、差速器、半轴和车轮。电动重型商用车关键参数如表1所示。车辆运行过程中,电驱系统接受整车控制器指令,通过电气系统与机械传动系统实现机、电、磁、热多能量耦合传递,最后将动力传送到车轮。

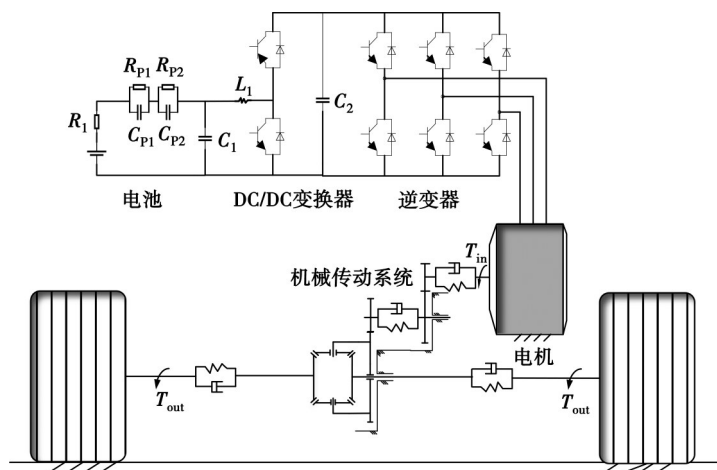


图1 电驱系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of electric drive system

表 1 电动重型商用车关键参数
Table 1 Key parameters for electric heavy truck

参数	数值	参数	数值
满载质量/kg	18 000	电池电压/V	360
迎风面积/m ²	7.854	电池容量/(A·h)	778
风阻系数	0.55	电机最大转速/(r·min ⁻¹)	3 500
滚阻系数	0.01	电机最大转矩/(N·m)	1 400
车轮半径/m	0.506		

1.2 电驱系统动态效率特性分析

现有经济性换挡策略多数基于电机效率最优制定而理想化处理其他部件效率特性,此方法缺乏对电驱系统众多部件的全面耦合分析,导致电驱系统的实际工作效率无法达到最优。为真正表征电驱系统及其部件效率随车辆行驶状态和工作环境动态变化的情况,深入剖析电驱系统各个部件的损耗机理和动态效率特性,建立电驱系统随汽车运行工况实时变化的动态效率模型。

1.2.1 电池损耗与效率模型

电池的功率损耗主要由充放电电流、内阻和电路压降变化引起,可得电池损耗和动态效率数学模型为:

$$P_R = NI_1^2 \cdot R_1, \tag{1}$$

$$P_{RC} = NI_1 \left(\int \left((I_1 - V_{p1}/R_{p1})/C_{p1} \right) + \int \left((I_1 - V_{p2}/R_{p2})/C_{p2} \right) \right), \tag{2}$$

$$\eta_{bat} = P_{out_bat} / (P_{out_bat} + P_R + P_{RC}). \tag{3}$$

式中: P_R 、 P_{RC} 、 P_{out_bat} 分别为电池内阻功率损耗、电池极化电路功率损耗、电池输出功率,kW; V_{p1} 、 V_{p2} 分别为一阶极化电压、二阶极化电压,V; R_1 、 R_{p1} 、 R_{p2} 分别为电池内阻、一阶极化电阻、二阶极化电阻, Ω ; C_{p1} 、 C_{p2} 分别为一阶极化电容、二阶极化电容,F; N 为单体电池个数; I_1 为电池主回路电流,A; η_{bat} 为电池效率,取0~1。

电池动态效率特性如图 2 所示。在中低加速踏板开度时,车辆持续、稳定工作在效率较高区域,当车辆处于高加速踏板开度时,动力电池的效率最低,车辆处于使用时间较短、频次较低的极限工况。

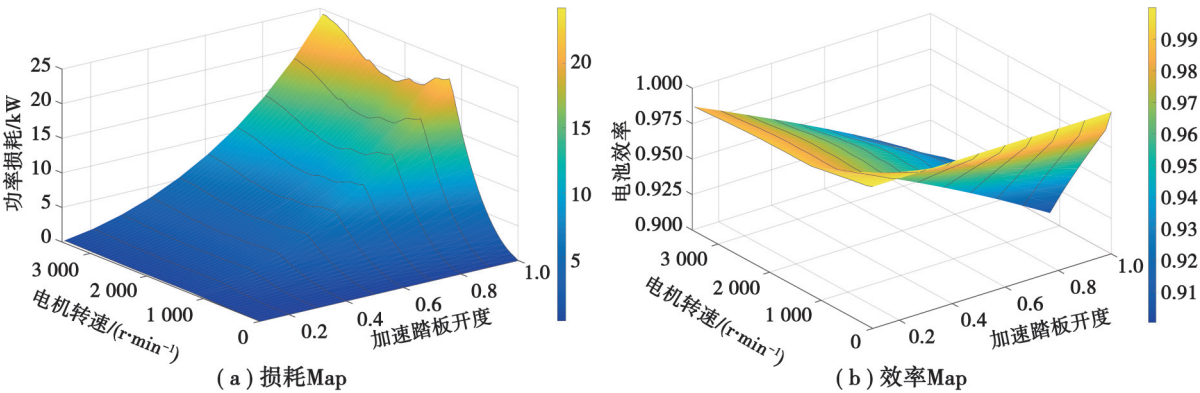


图 2 电池损耗与效率特性
Fig. 2 Battery loss and efficiency characteristics

1.2.2 逆变器损耗与效率模型

逆变器损耗主要分为 4 部分:IGBT(insulated gate bipolar transistor)导通损耗、IGBT 开关损耗、续流二极

管(freewheeling diode, FWD)导通损耗、FWD反向恢复损耗,建立逆变器的损耗和动态效率数学模型为:

$$P_{\text{cond_IGBT}} = I_c (V_{\text{ce0}} + I_c (R_2 + K_{\text{RT}} \Delta T_{\text{J_IGBT}})), \quad (4)$$

$$P_{\text{cond_FWD}} = I_f (V_{\text{f0}} + I_f (R_3 + K_{\text{RT}} \Delta T_{\text{J_FWD}})), \quad (5)$$

$$P_{\text{sw_IGBT}} = f (E_{\text{sw_on}} + E_{\text{sw_off}}), \quad (6)$$

$$P_{\text{sw_FWD}} = f E_{\text{sw_rec}}, \quad (7)$$

$$\eta_{\text{inverter}} = P_{\text{out_inverter}} / (P_{\text{out_inverter}} + P_{\text{cond_IGBT}} + P_{\text{cond_FWD}} + P_{\text{sw_IGBT}} + P_{\text{sw_FWD}}). \quad (8)$$

式中: $P_{\text{cond_IGBT}}$ 、 $P_{\text{cond_FWD}}$ 、 $P_{\text{sw_IGBT}}$ 、 $P_{\text{sw_FWD}}$ 、 $P_{\text{out_inverter}}$ 分别为 IGBT 导通损耗、FWD 导通损耗、IGBT 开关损耗、FWD 反向恢复损耗、逆变器输出功率, kW; $\Delta T_{\text{J_IGBT}}$ 、 $\Delta T_{\text{J_FWD}}$ 分别为 IGBT、FWD 的结温温差, °C; K_{RT} 、 K_{RT} 分别为 IGBT、FWD 导通电阻温度系数, 3.0×10^{-6} ; f 为开关频率, Hz; $E_{\text{sw_on}}$ 、 $E_{\text{sw_off}}$ 、 $E_{\text{sw_rec}}$ 分别为 IGBT 开通能量消耗、IGBT 关断能量消耗、FWD 反向恢复能量消耗, mJ; I_c 、 I_f 分别为 IGBT 集射极电流、FWD 导通电流, A; V_{ce0} 、 V_{f0} 分别为 IGBT、FWD 门槛电压, V; R_2 、 R_3 分别为 IGBT、FWD 导通电阻, Ω ; η_{inverter} 为逆变器效率, 取 0~1。

逆变器动态效率特性如图 3 所示。由图 3(a)可知, 逆变器损耗随着电机需求功率的增大而显著增大, 进入恒功率区后趋于平缓。由图 3(b)可知, 除了由于电流的突变导致效率出现短暂的低效区, 逆变器的效率普遍较高, 且效率损失也较为固定, 仅受到固定开关频率影响。

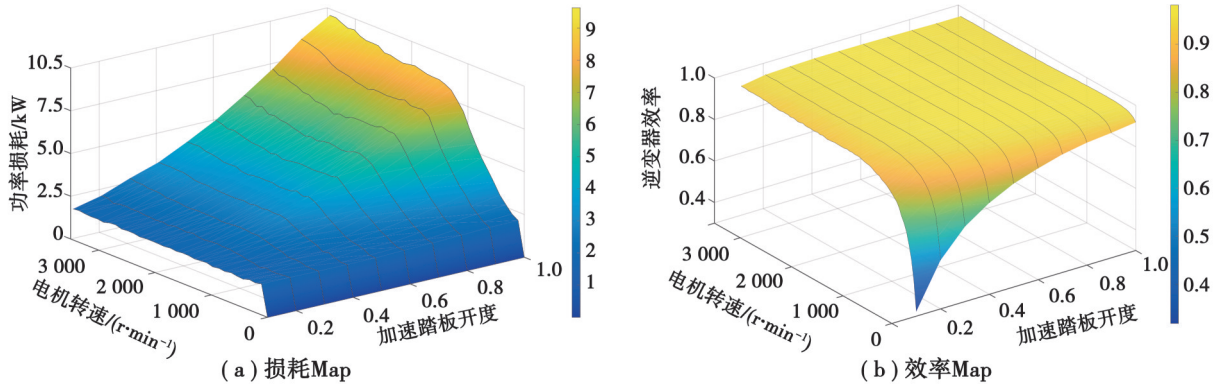


图3 逆变器损耗与效率特性

Fig. 3 Inverter loss and efficiency characteristics

1.2.3 变换器损耗与效率模型

除开开关器件损耗, 变换器滤波电容和电感的寄生电阻亦会产生少量功率损耗。建立变换器的损耗和动态效率数学模型如下:

$$P_{\text{LC_R}} = I_2^2 \cdot R_4 + I_3^2 \cdot R_5 + I_4^2 \cdot R_6, \quad (9)$$

$$\eta_{\text{dc}} = P_{\text{out_dc}} / (P_{\text{out_dc}} + P_{\text{IGBT}} + P_{\text{LC_R}}). \quad (10)$$

式中: $P_{\text{LC_R}}$ 、 P_{IGBT} 、 $P_{\text{out_dc}}$ 分别为变换器寄生电阻损耗功率、IGBT 开关器件损耗功率、变换器输出功率, kW; L_1 为变换器电感, H; C_1 、 C_2 分别为变换器电容, F; I_2 、 I_3 、 I_4 分别为变换器电感 L_1 电流、电容 C_1 电流、电容 C_2 电流, A; R_4 、 R_5 、 R_6 分别为变换器电感 L_1 、电容 C_1 、电容 C_2 的寄生电阻, Ω ; η_{dc} 为变换器效率, 取 0~1。

变换器动态效率特性如图 4 所示。由图 4(a)可知, 除开开关器件损耗, 寄生电阻损耗影响随着需求功率增加而逐渐显著。由图 4(b)可知, 寄生电阻损耗在恒功率区达到最大, 此时效率 Map 会出现一个较大“陡坡”。

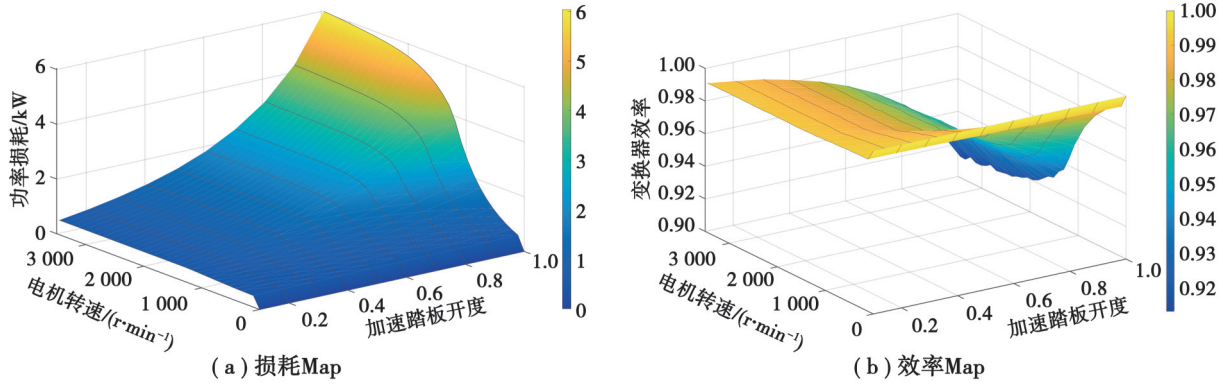


图 4 变换器损耗与效率特性

Fig. 4 Converter loss and efficiency characteristics

1.2.4 电机损耗与效率模型

永磁同步电机损耗中绕组铜损、定子铁损及机械损耗均可进行推导求解,而杂散损耗占比较低且由高次谐波和齿槽谐波导致,无法保证计算精度,进行理想化处理。建立电机的损耗和动态效率数学模型如下:

$$P_{Cu} = (1/R_c (L_q di_{oq}/dt + \omega_c \varphi_f) + (Jd\omega_m/dt + B\omega_m + T_L) / (1.5p_n \varphi_f))^2 \cdot R_s, \quad (11)$$

$$P_{Fe} = (1/R_c) (L_q di_{oq}/dt + \omega_c \varphi_f)^2, \quad (12)$$

$$P_M = B(\omega_m)^2, \quad (13)$$

$$\eta_{pmsm} = P_{out_pmsm} / (P_{out_pmsm} + P_{Cu} + P_{Fe} + P_M). \quad (14)$$

式中: P_{Fe} 、 P_{Cu} 、 P_M 、 P_{out_pmsm} 分别为电机铁损、电机铜损、电机机械损、电机输出功率, kW; R_c 、 R_s 分别为定子电阻、铁损电阻, Ω ; ω_m 、 ω_c 分别为机械角速度、电角速度, rad/s; B 为机械阻尼, $N \cdot m \cdot s/rad$; J 为转动惯量, $kg \cdot m^2$; T_L 为负载转矩, $N \cdot m$; p_n 为极对数; φ_f 为永磁体磁链, Wb; i_{oq} 为 q 轴电感电流, A; η_{pmsm} 为电机效率, 取 0~1。

电机动态效率特性如图 5 所示。由图 5 可知,低转速区电机损耗以铜损为主,高转速区铁损和机械损耗占据电机总损耗的主要部分。故电机在低转速和高转速区间效率较低,在中等转速区间效率较高。

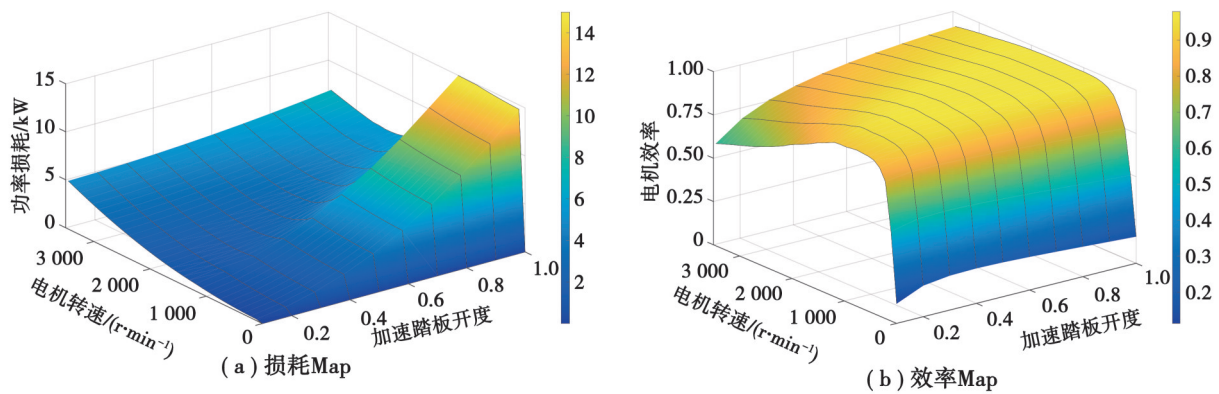


图 5 电机损耗与效率特性

Fig. 5 Motor loss and efficiency characteristics

1.2.5 机械传动系统损耗与效率模型

区别于传统机械传动系统功率损失和动态特性的理论计算方法,以惯性效应(惯量损失)、容性效应(柔度损失)和阻性效应(摩擦损失)来表征机械传动系统的能量损失。机械传动系统能量传递及功率损耗路径如图 6 所示,其中惯性效应与阻性效应造成机械传动系统转矩的损失,容性效应造成机械传动系统转速的损

失,建立机械传动系统的损耗和动态效率数学模型如下:

$$T_{out} = ((T_{in} - T_{AMT1})i_g - T_{AMT2})i_0 - T_{differential} - T_{half_shaft}, \quad (15)$$

$$\omega_{out} = (\omega_{in}/i_g - \omega_{shaft})/i_0 - \omega_{half_shaft} - \omega_{wheel}, \quad (16)$$

$$\eta_{mt} = T_{out}\omega_{out}/(T_{in}\omega_{in}) \quad (17)$$

式中: T_{in} 、 T_{out} 、 T_{AMT1} 、 T_{AMT2} 、 $T_{differential}$ 、 T_{half_shaft} 分别为传动系统输入转矩、传动系统输出转矩、AMT主动轴损失转矩、AMT从动轴损失转矩、主减速器及差速器损失转矩、半轴损失转矩, $N \cdot m$; ω_{in} 、 ω_{out} 、 ω_{shaft} 、 ω_{half_shaft} 、 ω_{wheel} 分别为传动系统输入转速、传动系统输出转速、传动轴损失转速、半轴损失转速、车轮损失转速, rad/s ; I_5 、 I_6 、 I_7 、 I_8 、 I_9 分别为 AMT 主动轴转动惯量、AMT 从动轴转动惯量、主减速器及差速器转动惯量、左车轮转动惯量、右车轮转动惯量, $kg \cdot m^2$; R_7 、 R_8 分别为 AMT 主动、从动轴摩擦系数, 取 0~1; C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 分别为传动轴柔度、左半轴柔度、右半轴柔度、左车轮柔度、右车轮柔度, $(^\circ)/(N \cdot m)$; i_g 、 i_0 分别为 AMT 传动比、主减速比; η_{mt} 为机械传动系统效率, 取 0~1。

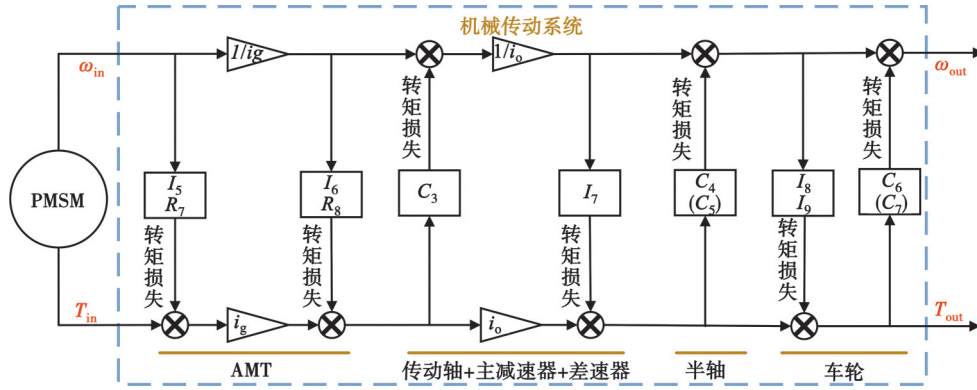


图6 机械传动系统功率损耗路径图

Fig. 6 Power loss path diagram of mechanical transmission system

部分机械传动系统动态效率特性如图7所示。机械传动系统效率特性中,I、II挡处于起步加速阶段,惯性效应和容性效应显著,其效率相对较低;III、IV、V挡为商用车常用挡位,效率较高且波动较小;VI挡时电机输出转速未得到传动比的削减,整个传动系统承受较高的转速,效率较III、IV、V挡略有降低。

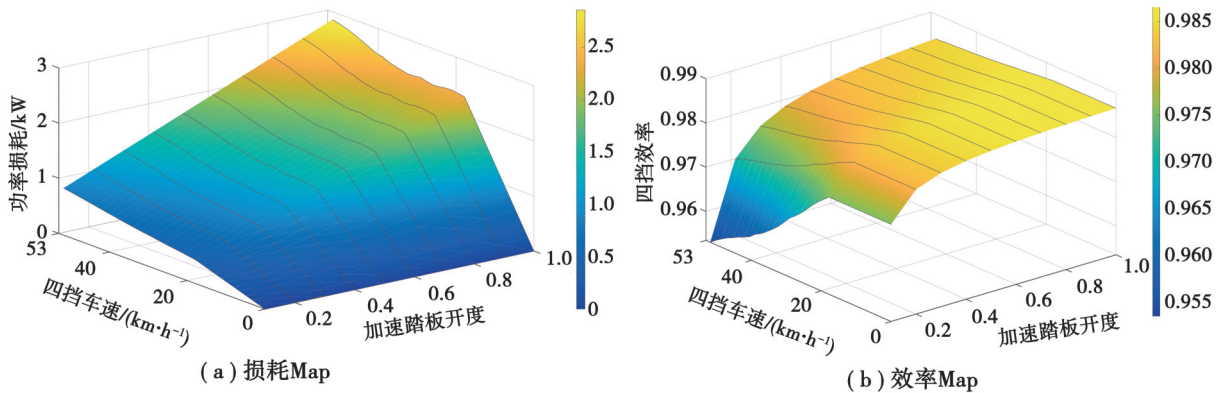


图7 机械传动系统损耗与效率特性(以四挡为例)

Fig. 7 Loss and efficiency characteristics of transmission systems (in fourth gear, for example)

1.2.6 电驱系统损耗与效率模型

由电驱系统所有部件的损耗机理和效率特性分析可知,电气系统中各部件的损耗和效率特性均受到整车需求功率的影响,机械系统中各部件的损耗和效率特性主要受到变速器所处挡位以及传动系统传递的转矩和转速的影响。综合前文的工作,得到整个电驱系统的损耗和效率数学模型为:

$$\Delta P_{\text{sys}} = \Delta P_{\text{bat}} + \Delta P_{\text{dc}} + \Delta P_{\text{inverter}} + \Delta P_{\text{pmsm}} + \Delta P_{\text{mt}}, \quad (18)$$

$$\eta_{\text{sys}} = \eta_{\text{bat}} \cdot \eta_{\text{dc}} \cdot \eta_{\text{inverter}} \cdot \eta_{\text{pmsm}} \cdot \eta_{\text{mt}} \quad (19)$$

式中: ΔP_{sys} 、 ΔP_{bat} 、 ΔP_{dc} 、 $\Delta P_{\text{inverter}}$ 、 ΔP_{pmsm} 、 ΔP_{mt} 分别为电驱系统功率损耗、电池功率损耗、变换器功率损耗、逆变器功率损耗、永磁同步电机功率损耗、传动系统功率损耗, kW; η_{sys} 为电驱系统效率, 取 0~1。

部分电驱系统动态效率特性如图 8 所示。电驱系统动态效率特性中,其瞬时损耗随着挡位升高逐渐降低。当车辆处于极限工况时,电驱系统的功率损耗急剧上升,最高可达 50 kW。当车辆正常工作时,电驱系统的瞬时功率损耗较低,将持续工作在高效率区。

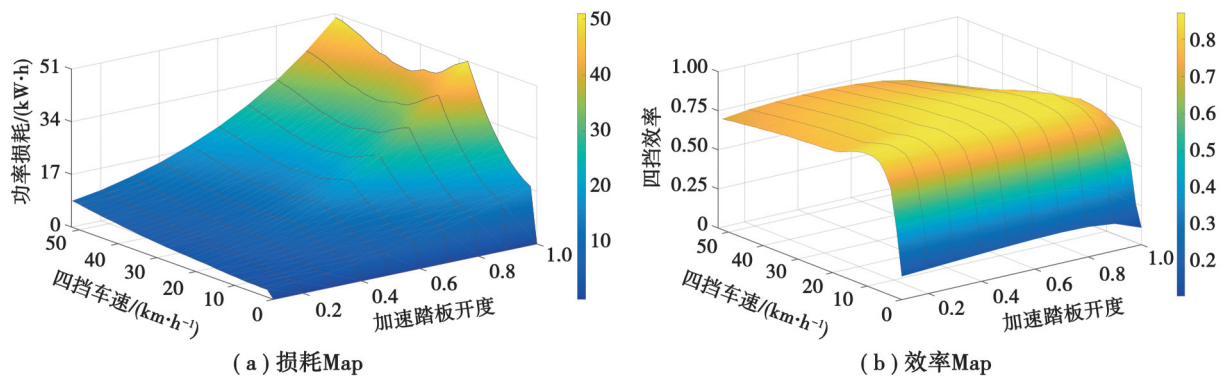


图 8 电驱系统损耗与效率特性(以四挡为例)

Fig. 8 Loss and efficiency characteristics of electric drive system (in fourth gear, for example)

根据图 8 中损耗 Map 图构建部分工况下部件损耗占比如图 9 所示。不同加速踏板开度下,电驱系统各部件损耗所占比例变化不同但趋势类似,低速时电机损耗占比最大,随着车速增加电池损耗逐渐成为电驱系统主要损耗,符合实际情况。

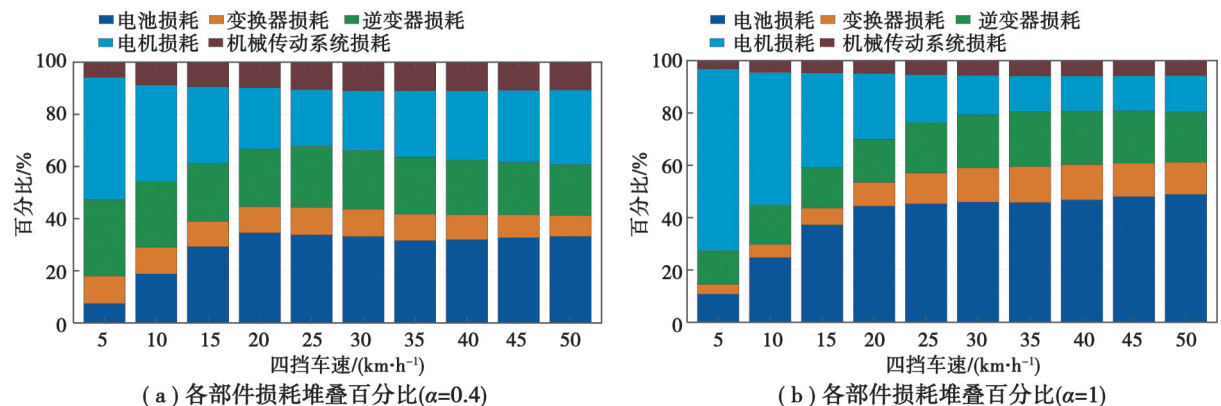


图 9 电驱系统部件损耗占比图(以四挡为例)

Fig. 9 Electric drive system component loss percentage diagram (in fourth gear, for example)

1.3 换挡曲线制定

根据电驱系统动态效率特性分析,得到如图10(a)所示的不同挡位下电驱系统效率曲面,从左至右依次为I至VI挡。在基本满足车辆动力性的前提下,保证AMT换挡前后电驱系统的工作效率最优,换挡曲线制定原则为:当I挡电驱系统效率曲面开始下降,与处在上升阶段的II挡电驱系统效率曲面相交时,将挡位切换至II挡,即将I挡与II挡电驱系统效率曲面的交线定义为I挡至II挡的升挡曲线,其余挡位的升挡曲线制定原理依此类推。将升挡曲线向 X - Y 平面投影并进行延迟处理即可得到图10(b)的AMT换挡曲线。

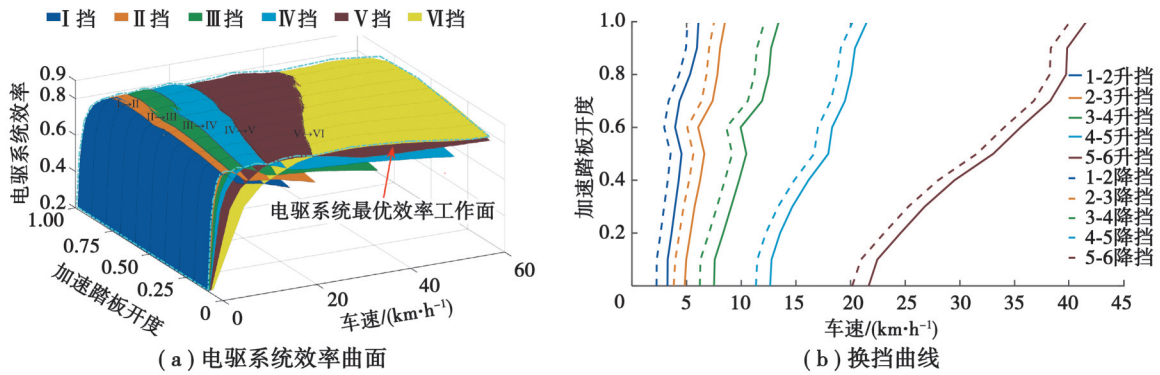


图10 基于系统效率最优的换挡策略

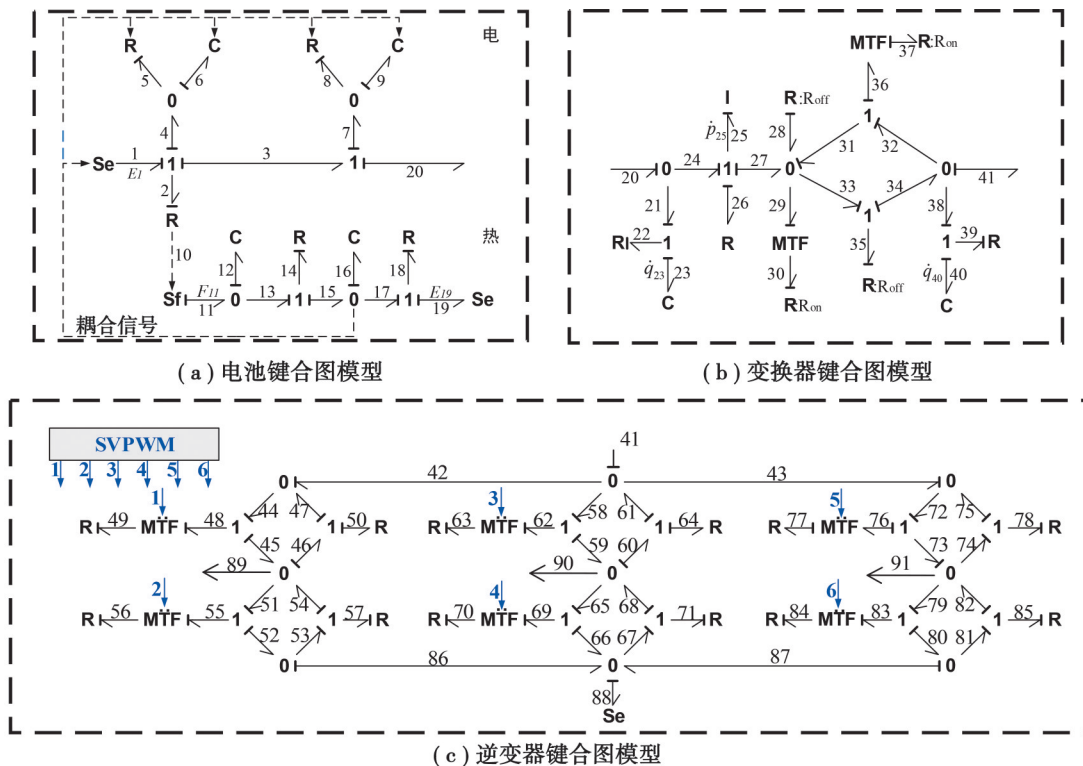
Fig. 10 Shifting strategy based on optimal system efficiency

2 建模与仿真分析

2.1 电驱系统键合图建模

键合图理论^[16-17]能将机、电、热、磁、液等多种能量形式采用统一的语言符号表达,直观地呈现多种能量场之间的相互耦合关系、系统内部功率流向和系统各部件能量损失,非常适合文中的研究。

基于图1的电驱系统结构原理图,分别建立电池、变换器、逆变器、电机、机械传动系统键合图模型如图11所示,文中不详细赘述键合图建模及验证过程,仅展示部件键合图模型用于后续仿真分析。



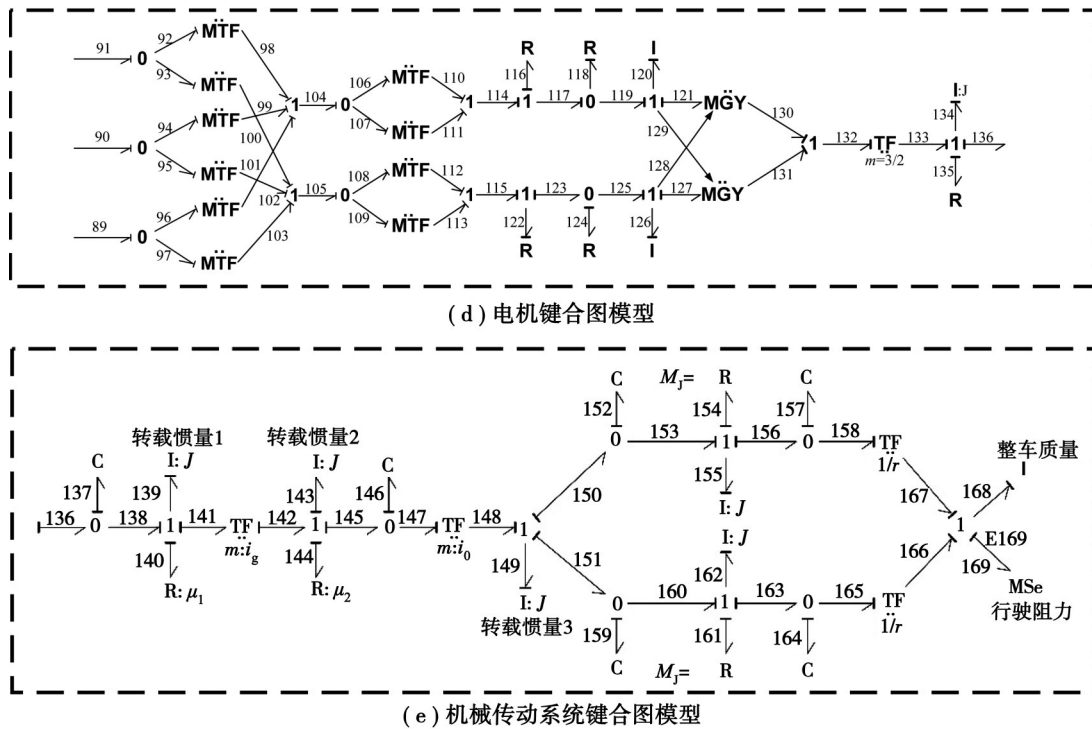


图 11 电驱系统键合图模型

Fig. 11 Electric drive system bond graph modeling

2.2 仿真分析

文中研究对象所采取的换挡策略为基于电机效率最优制定的传统经济性换挡策略,制定过程与上文类似,此处不予赘述,其结果如图 12 所示。

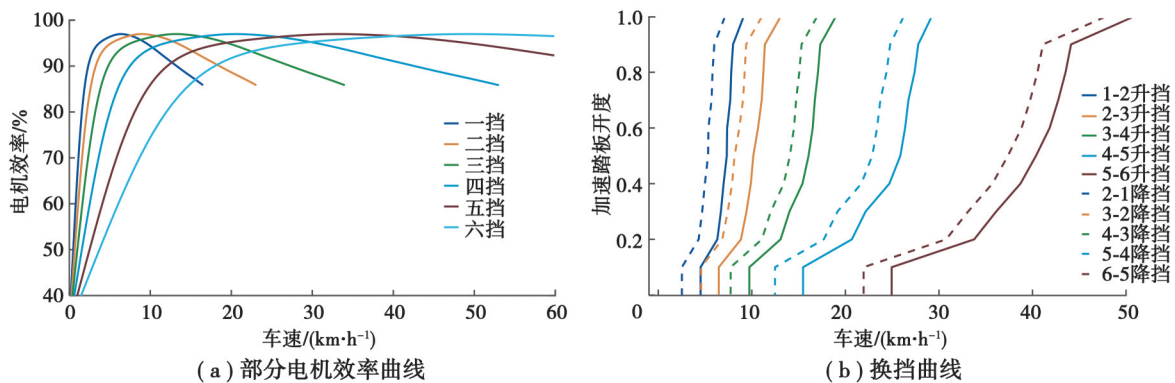


图 12 传统经济性换挡策略

Fig. 12 Traditional economy shifting strategy

为验证基于系统效率最优的换挡策略的优越性,基于重构工况将文中提出的策略与研究对象所采取的换挡策略进行对比分析,仿真结果如图 13 所示。由图 13(a)可以看出,基于系统效率最优的换挡策略能够实现车速跟随。如图 13(b)所示,在整个测试工况下,基于系统效率最优的换挡策略具有更好的节能效果,其能耗较传统策略降低了 4.079%,SOC(state of charge)变化量减少了 0.27%。由于变速器换挡操作集中于低速区域,选取工况低速区域进行分析发现,基于系统效率最优的换挡策略换挡点变化较为显著,其中 2 挡升 3 挡换挡点最为显著,如图 13(c)所示。整个工况下电机工作点如图 13(d)所示,电机工作点在低转速区发生了显著变化,这和 13(c)中现象相互印证。

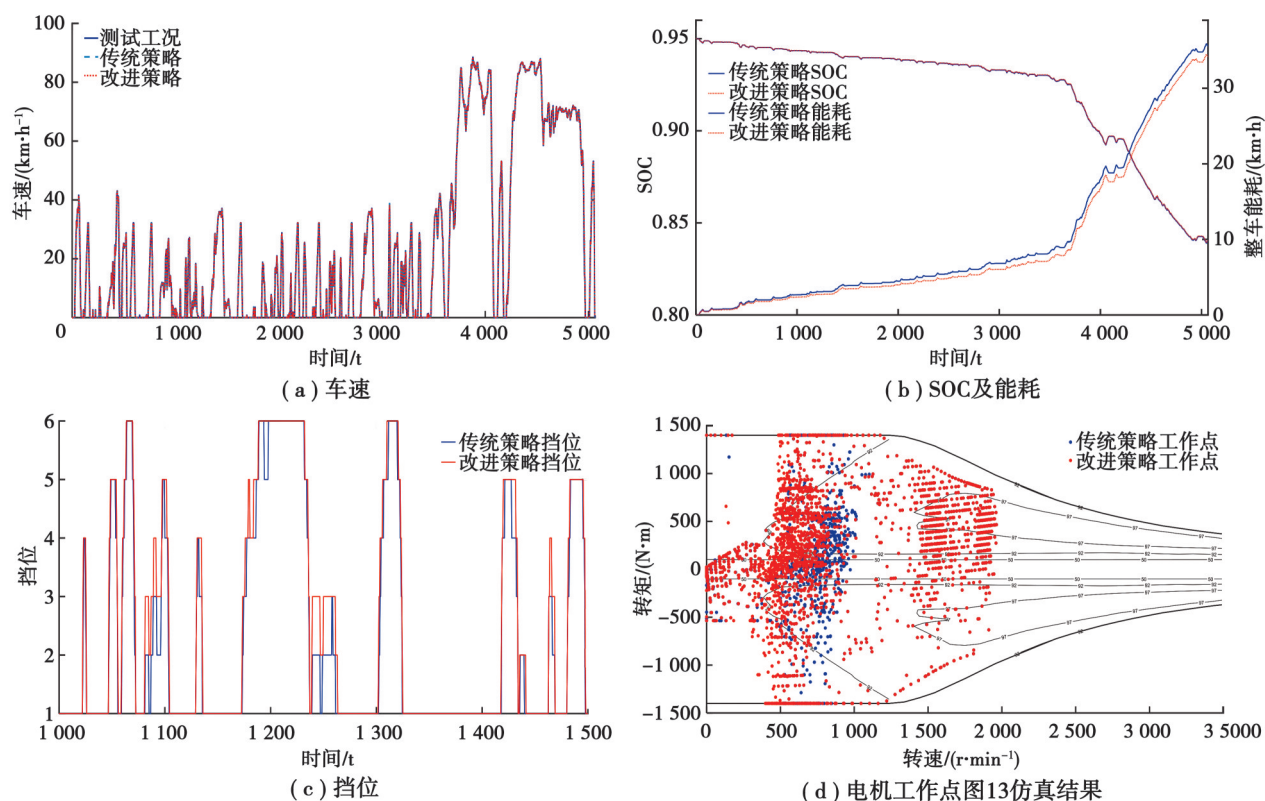


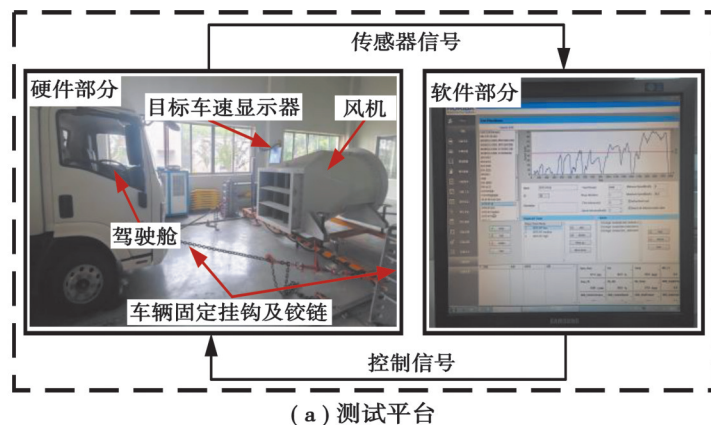
图13 仿真结果

Fig. 13 Simulation results

3 实验验证

为验证键合图模型的有效性和基于系统效率最优的换挡策略的优越性,文中搭建了实车能耗测试平台,如图14(a)所示。整个测试系统可以分为2个部分:软件部分和硬件部分。软件部分主要包括系统控制平台、通信系统,系统控制平台用来设定控制信号、观测实验状态,通信系统为 Advantech Co. Ltd 公司 IPC-610L 系列产品,主要负责信息交互;硬件部分主要由上位机、车辆固定挂钩、风机、实验车辆、目标速度显示器、车辆位置传感器等组成。

以 CHTC (China heavy-duty truck cycle) 能耗为评价指标,利用实验平台进行原车与搭载改进换挡策略的车辆能耗实验,实验结果如图14(b)、(c)所示。由图14(b)可知,在CHTC工况下,键合图模型输出能耗与实车真实能耗误差为3.21%,验证了所搭建的仿真模型的有效性,仿真和实验中搭载基于系统效率最优的换挡策略的整车能耗较传统策略分别降低了4.13%和3.86%,验证基于系统效率最优的换挡策略的优越性。进一



(a) 测试平台

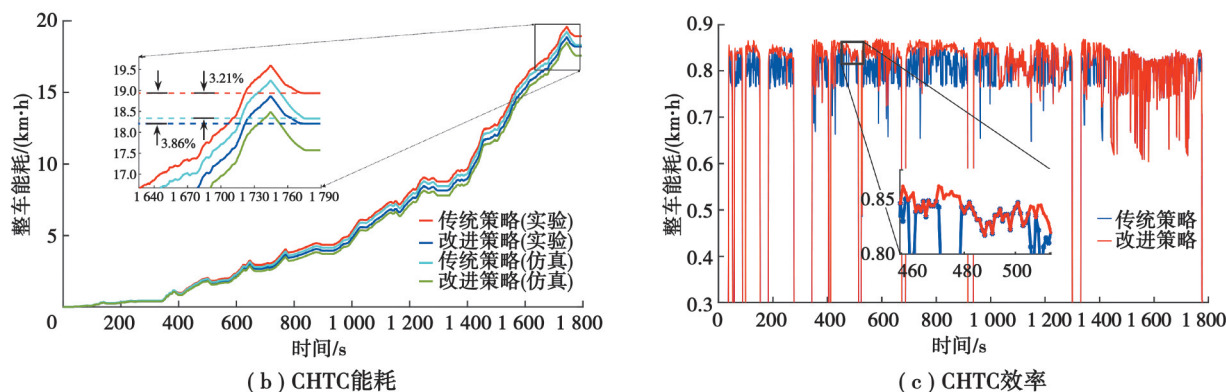


图 14 实验测试平台及结果

Fig. 14 Experimental test platform and results

步的实验细节如图 14(c)所示,描述了整个 CHTC 工况下效率变化情况,基于系统效率最优的换挡策略在低速区域对效率的提升较为显著,这是因为变速器换挡操作主要集中在此区域,当车速较高时,2 种换挡策略的效率曲线重叠部分较多。

4 结 论

1)构建基于系统效率最优的换挡策略。基于电驱系统结构,分别推导了电池、变换器、逆变器、电机、机械传动系统的损耗公式和动态效率特性,得到电驱系统效率模型,并基于电驱系统动态效率曲面制定了基于系统效率最优的换挡策略。

2)建立电驱系统键合图模型,利用重构城郊工况进行换挡策略仿真分析。仿真结果表明:在测试工况下,基于系统效率最优的换挡策略能耗降低了 4.668%,SOC 变化量减少了 0.27%。

3)搭建实车能耗测试平台,通过实车实验验证键合图模型的有效性和基于系统效率最优的换挡策略优越性。实验结果表明:在 CHTC 工况下,键合图模型与实车测试真实能耗误差为 3.21%,仿真和实验中搭载基于系统效率最优的换挡策略能耗分别降低了 4.13% 和 3.86%。

参考文献

- [1] Saha A, Simic V, Senapati T, et al. A dual hesitant fuzzy sets-based methodology for advantage prioritization of zero-emission last-mile delivery solutions for sustainable city logistics[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2023, 31(2): 407-420.
- [2] Sun X D, Jin Z J, Xue M Z, et al. Adaptive ECMS with gear shift control by grey wolf optimization algorithm and neural network for plug-In hybrid electric buses[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(1): 667-677.
- [3] 郝旭,陆贤涛,杨静,等.中国零碳商用车市场渗透率建模:以重型长途牵引货车为例[J].汽车工程,2024,46(2): 253-259.
Hao X, Lu X T, Yang J, et al. Modeling on the penetration rate of China's commercial vehicle market: taking heavy-duty long-haul trucks as an example[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(2): 253-259. (in Chinese)
- [4] Liu X D, Du J, Cheng X Q, et al. An adaptive shift schedule design method for multi-gear AMT electric vehicles based on dynamic programming and fuzzy logical control[J]. Machines, 2023, 11(9): 915.
- [5] Kwon K, Lee J H, Lim S K. Optimization of multi-speed transmission for electric vehicles based on electrical and mechanical efficiency analysis[J]. Applied Energy, 2023, 342: 121203.
- [6] Eckert J J, da Silva S F, Santicioli F M, et al. Multi-speed gearbox design and shifting control optimization to minimize fuel consumption, exhaust emissions and drivetrain mechanical losses[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 169: 104644.
- [7] Roozegar M, Angeles J. A two-phase control algorithm for gear-shifting in a novel multi-speed transmission for electric vehicles[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 104: 145-154.

- [8] Wang S H, Zhang K M, Shi D H, et al. Research on economical shifting strategy for multi-gear and multi-mode parallel plug-in HEV based on DIRECT algorithm[J]. *Energy*, 2024, 286: 129574.
- [9] Nguyen C T, Walker P D, Zhang N. Shifting strategy and energy management of a two-motor drive powertrain for extended-range electric buses[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 153: 103966.
- [10] 王玮琪, 王伟达, 孙晓霞, 等. 重型车辆多挡并联混合动力系统的联合优化控制策略[J]. *兵工学报*, 2021, 42(10): 2242-2250.
- Wang W Q, Wang W D, Sun X X, et al. The joint optimal control strategy of multi-gear parallel hybrid power system of heavy-duty vehicle[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(10): 2242-2250. (in Chinese)
- [11] Hayashi K, Shimizu Y, Dote Y, et al. Neuro fuzzy transmission control for automobile with variable loads[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1995, 3(1): 49-53.
- [12] You Y, Wu J T, Meng Y L, et al. Adaptive shift strategy of a novel power-cycling variable transmission for construction vehicles [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2024, 171: 104563.
- [13] Lin X Y, Li Y L, Xia B. An online driver behavior adaptive shift strategy for two-speed AMT electric vehicle based on dynamic corrected factor[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 48: 101598.
- [14] Feng J H, Qin D T, Liu Y G, et al. Data-driven cloud-based intelligent gear-shift decision strategy of vehicle considering driving behavior and environment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 429: 139558.
- [15] Chen J X, Shu H, Tang X L, et al. Deep reinforcement learning-based multi-objective control of hybrid power system combined with road recognition under time-varying environment[J]. *Energy*, 2022, 239: 122123.
- [16] Arogeti S A, Wang D W, Low C B, et al. Fault detection isolation and estimation in a vehicle steering system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(12): 4810-4820.
- [17] Silva L I, Bouscayrol A, De Angelo C H, et al. Coupling bond graph and energetic macroscopic representation for electric vehicle simulation[J]. *Mechatronics*, 2014, 24(7): 906-913.

(编辑 詹燕平)