·2026中国汽车工程学会年会优秀论文(选登)·

面向低温环境的混合动力汽车能量管理策略研究

钟翔君　董翔宇　杜鑫熠　储琦　李刚

(北京汽车研究总院有限公司,北京 101300)

【摘要】针对低温工况下整车行驶阻力增加、电池能力衰减的问题,提出了基于低温动力自适应调节的能量管理策略。分析了低温环境下整车阻力及电池能量的变化规律,基于车辆使用期间的近期温度变化,优化了低温下不同工况的电池荷电状态(SOC)平衡点,控制发动机提前起动为整车提供能量;重构了低温下整车阻力模型,以实时行驶工况确定的单位里程内SOC变化率为输入,构建了基于功率惩罚系数的增程器发电功率动态调节模型,实时闭环控制增程器输出对应的转速、扭矩。在公共道路开展了低温下的整车测试,测试结果表明:在SOC > 25%时,发动机可及时起动为整车提供能量,相较于常温策略提前起动发动机并延缓了电池放电速率,保障低温下更长的续驶需求;在车速分别为80 km/h、100 km/h、120 km/h、140 km/h的低温(-20~-35 ℃)行车场景下,整车电量保持微充不掉电,过程中增程器运行正常,无飞车或转速超调,电池无过充或过放现象,为用户低温下的驾驶及采暖等需求提供了较好的基础保障。

主题词:低温　混合动力汽车　增程能量管理策略　功率惩罚系数

中图分类号:U469.72　　**文献标志码:**A　　**DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20260494

Research on Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Low-Temperature Environments

Zhong Xiangjun, Dong Xiangyu, Du Xinyi, Chu Qi, Li Gang

(Beijing Automotive Technology Center Co., Ltd., Beijing 101300)

【**Abstract**】To address the problems of increased driving resistance and degraded battery capability under low-temperature conditions, an energy management strategy based on adaptive power regulation at low temperatures is proposed. The variation patterns of vehicle driving resistance and battery energy under low-temperature conditions are analyzed. Based on the recent temperature variations during vehicle operation, the SOC (state of charge) balance points for different operating conditions at low temperatures are optimized, and the engine is controlled to start in advance to supply energy for the vehicle. The driving resistance model under low-temperature conditions is reconstructed. Taking the SOC change rate per unit mileage determined by real-time driving conditions as the input, a dynamic regulation model for the power generation of the range extender based on a power penalty coefficient is constructed, and the output speed and torque of the range extender are controlled in real time in a closed loop. Vehicle tests are conducted on public roads under low-temperature conditions. The test results show that the engine can be started in time to supply energy for the vehicle when the SOC is above 25%; compared with the strategy at normal temperature, the proposed strategy starts the engine earlier and slows the battery discharge rate, ensuring a longer driving range under low-temperature conditions. In low-temperature driving scenarios (-20 ℃ to -35 ℃) at vehicle speeds of 80, 100, 120 and 140 km/h, the battery SOC is maintained with slight recharging and without depletion; during the process, the range extender operates normally, no engine runaway or rotational speed overshoot is observed, and the battery is free from overcharging or over-discharging, providing a sound foundation for the driving and heating requirements of users under low-temperature conditions.

Key words: Low temperature, Hybrid electric vehicle, Range-extended energy management strategy; Power penalty coefficient

【引用格式】钟翔君, 董翔宇, 杜鑫熠, 等. 面向低温环境的混合动力汽车能量管理策略研究[J]. 汽车技术, 2026(10): 15-24.

ZHONG X J, DONG X Y, DU X Y, et al. Research on Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Low-Temperature Environments[J]. Automobile Technology, 2026(10): 15-24.

通信作者:钟翔君(1995—),男,博士学位,工程师,研究方向为混动系统能量管理控制策略,xjzhong1004@163.com。

1 前言

新能源汽车正处于快速发展的窗口期[1]，其中混合动力汽车凭借动力效率高、节能效果突出及综合续驶里程长等优势，成为新能源汽车重要的技术分支。

能量管理作为混合动力汽车动力控制的核心，其功能优劣直接影响整车的性能表现[2]。相较于传统燃油车或者纯电动汽车，混动车辆的系统更加复杂，需要兼顾电池、电机、发动机等多个动力子系统的工作状态，且随着用户需求场景的不断增加，对整车能量管理在动力需求、油耗及驾乘静谧性等方面提出了更高的要求[3]。针对越野车在复杂工况下多动力源难以协同优化的难题，尹必峰等[4]将电池放电倍率与等效燃油消耗最小化相结合，构建动力自适应控制框架，实现整车功率的实时分配。Wang等[5]基于电池及超级电容器的温度特性，建立变温条件下的控制模型，完成了不同环境温度下的效率验证。Zhou等[6]利用迁移学习与深度强化学习协同控制的方式，优化了多场景的车辆动力配置，有效降低了多种测试工况的能耗。Ialam等[7]结合瞬时功率平衡与电池荷电状态（State of Charge，SOC）的约束，动态协调能量流在各动力源的分配，有效预防电池过充、过放，并有效提升了续航能力。

传统的混动汽车能量管理以最佳燃油经济性或SOC平衡保电为主要研究和应用方向，以经验规则预设或定点参数控制为主，这类方式虽然实现简便、对规则化场景的适配性较好，但研发周期较长、研发投入较高且过于依赖专家经验，难以精准匹配复杂用户场景的需求[8]。针对此情况，国内外学者开展了一系列研究。王宝森等[9]利用道路特征参数重构整车动力学模型，并通过动态规划构建最优策略模型优化能量分配，有效降低了实际道路工况下的油耗。曹龙龙等[10]结合需求功率、加速度、SOC等参数确定最佳等效因子，并通过模糊控制实现了功率的自适应调节。周彬等[11]通过对踏板需求进行解析与分类，结合电池能耗衰减规律，确定等效因子与电池衰减权重系数，有效改善了燃油经济性。然而，上述研究鲜有考虑车辆在不同温度场景特别是低温场景下的性能差异。相关研究表明，车辆在不同环境温度下的车辆阻力及续驶里程呈现不同表现[12-13]。现有低温环境下的研究多集中于SOC估算、低温热管理系统等领域[14-15]，涉及整车动力和能量管理协同优化的研究相对不足。此外，低温下空气密度增加导致整车行驶阻力增加，部分地区冬季需更换冬季轮胎以保证正常驾驶，其轮胎滚动阻力较普通轮胎明显增加，导致低温环境下的整车阻力与常温时差异较大，常温环境下的控制策略难以直接应用于低温场景。

针对上述问题，本文从实际低温场景出发，综合考虑低温环境下电池特性、车辆阻力变化、增程器功率变化等因素，构建整车功率自动调控模型，优化低温多场景的整车需求与动力匹配方案，以期改善低温下的动力性能。

2 低温环境对整车性能的影响

2.1 低温环境对车辆动力的影响

为研究低温环境对整车驾驶性能的影响，本文选取某款混动汽车进行了不同环境温度下的整车动力性测试。测试环境温度分别为0 ℃、-30 ℃，测试工况包括巡航车速80 km/h、100 km/h和120 km/h，考察轮端功率与功率比的变化情况，实车测试结果如图1所示。由于整车阻力影响动力系统各部分的能量分配，而动力系统控制策略直接影响轮端实际功率，因此，本文以轮端功率为研究对象，分析低温环境对巡航车速下整车阻力的影响，并对比不同温度下的差异。

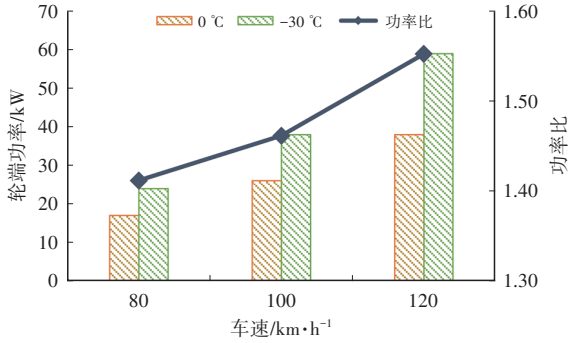


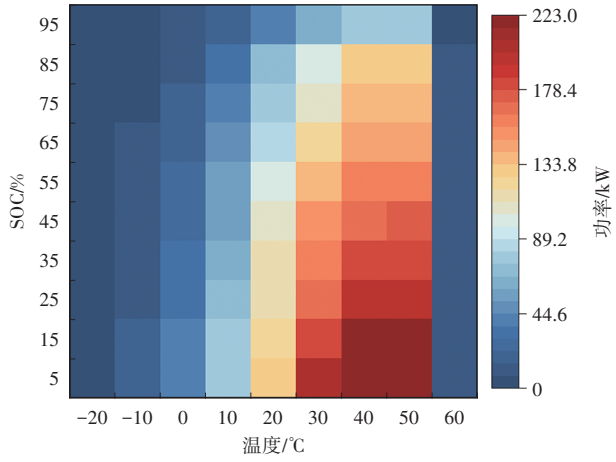
图1 不同温度下轮端功率对比

从图1中可以看出，温度、车速对轮端功率均有明显影响。在环境温度为-30 ℃时，各巡航车速下的轮端功率是0 ℃时的1.4~1.6倍，且随着车速增加，轮端功率和功率比逐渐增加。因此可以看出，-30 ℃下的轮端功率将远高于常温下的功率需求，即整车阻力远高于常温条件。综上，为保证在低温下的动力需求，需重新优化整车动力系统各部件的能量分配方案。

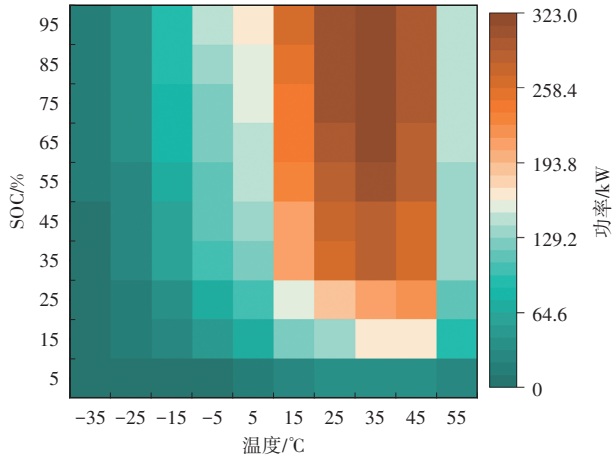
2.2 低温环境对动力电池的影响

新能源车辆的市场分布呈现南高北低的态势，重要原因之一是动力电池在低温状态下不稳定，容量衰减，且低温充电易出现析锂现象，可用容量衰减严重，导致北方低温环境下的新能源汽车市场发展缓慢，混动车辆也呈现出同样的分布趋势。为明确不同温度下电池充、放电能力的变化规律，在充分利用低温电池工

况可用容量的同时，防止电池过充、过放，以及延长使用寿命的前提下，统计了试验车辆所用的动力电池包的台架标定数据，得到不同温度下的电池充、放电功率特性，如图2所示。



（a）电池充电功率



（b）电池放电功率

图2　不同温度电池可用功率变化

由图2可知，常温下（15~45 ℃）的电池可用充电/放电功率较高，表明常温下电池包的性能及效率最优。而随着温度升高或降低，电池可用充电/放电能力出现不同程度的衰减，特别在温度低于0 ℃（或高于45 ℃）以后，电池可用充电/放电功率衰减最为严重，极低温（−30 ℃）环境下基本进入不可用状态，电池峰值功率、容量等相较于常温大幅降低。

综上，低温下的整车阻力明显增加，常温下的能量管理方案难以适配高阻力、低电池能力的低温运行环境，因此需要针对低温场景对混动车辆的各系统功率重新分配，在高需求功率时在可用边界范围内提升发电功率，保证整车动力需求；在电池能力接近上下边界时适当调整制动能量回收或发电功率，以规避电池过充或过放风险，从而改善低温下的整车性能。

3　低温环境能量管理策略

3.1　整车动力构型

本文以北汽已量产的某款自研混动车型为研究对象，其动力系统主要包括发动机和发电机组成的增程动力单元、动力电池、驱动电机、热管理系统等部分，构型如图3所示。动力电池和增程器是车辆的主要动力源，电池管理系统（Battery Management System，BMS）进行动力输入、输出的控制；增程器包含两级控制，发动机控制系统（Engine Management System，EMS）控制发动机输出目标转速、扭矩，发电机控制单元（Generator Control Unit，GCU）控制发电机输出目标转速、扭矩，从而为整车的轮端及高低压附件提供动力。车辆的驱动由驱动电机及电机控制单元（Motor Control Unit，MCU）实现，除驱动车辆行驶外，驱动电机在制动能量回收或滑行能量回收等场景下会为电池补充部分回收的能量。高压附件主要包括压缩机及正温度系数（Positive Temperature Coefficient，PTC）加热器，通过热管理系统（Thermal Management System，TMS）实现乘员舱采暖、发动机及电驱回路冷却等控制。

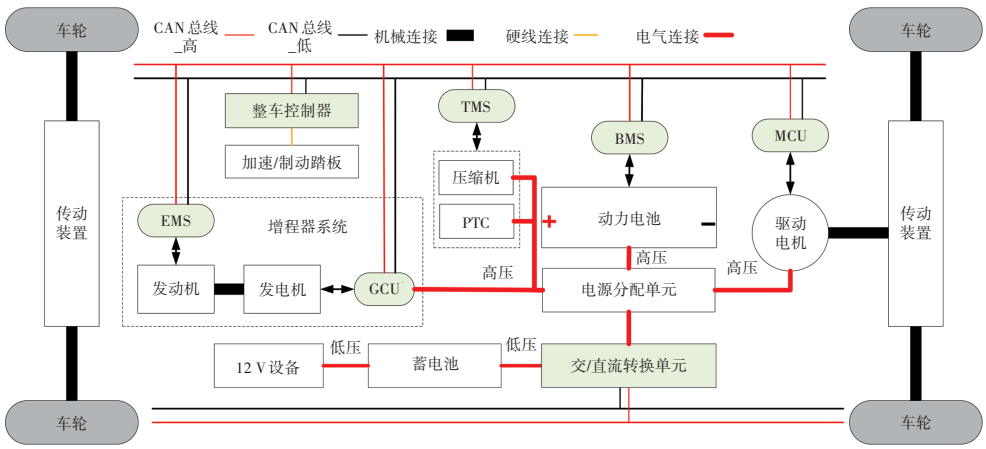


图3　整车动力系统构型

3.2 低温环境整车阻力模型

混动车型能量管理策略是在满足整车功率需求的前提下，合理分配各子系统的功率输出。而能量管理方案有效实施的前提是获取车辆的动力学模型，依据车辆的动力学模型可求解车辆的驱动力及对应的功率。本文只考虑车辆在平直路面的纵向运动，忽略转弯等侧向及俯仰的运动。根据车辆的运动状态分析，得到车辆的纵向动力学模型为：

$$F_{veh}=F_{air}+F_{rl}+F_{slp}+F_{a} \tag{1}$$

式中：F_{veh}为车辆的驱动力，F_{air}为车辆的空气阻力，F_{rl}为轮胎滚动阻力，F_{slp}为坡道阻力，F_{a}为加速阻力。

基于动力学模型的解析，得到驱动力的平衡方程为：

$$\frac{T_{whl}}{R_{tire}}=\frac{1}{2}\rho AC_{D}V_{veh}^{2}+G_{veh}gf\cos\theta+G_{veh}gf\sin\theta+\delta G_{veh}a_{veh} \tag{2}$$

式中：T_{whl}为传动系统的轮端扭矩；R_{tire}为轮胎半径；ρ为空气密度；A为车辆迎风面积；g为重力加速度；C_{D}为车辆的风阻系数，环境温度的变化会影响空气密度，进而导致风阻系数产生差异；V_{veh}为车速；G_{veh}为车辆整备质量；θ为道路的角坡度；f为滚动阻力系数，低温下由于冬季轮胎/四季轮胎的差异，导致滚动阻力系数存在差异；δ为旋转质量换算系数；a_{veh}为车辆加速度。

风阻、滚动阻力等阻力差异在整车端体现为轮端需求功率的变化，综合各项阻力与动力需求，得到车辆的总需求功率为：

$$P_{mot}^{req}=\frac{1}{\eta_{mot}}F_{veh}V_{veh}=\frac{T_{whl}}{\eta_{mot}R_{tire}}\rho V_{veh} \tag{3}$$

式中：P_{mot}^{req}为驱动电机的需求功率，η_{mot}为驱动电机的传动效率。

混动车辆的主要能量源由电池与发动机提供，分别为轮端电机、低压和高压附件系统提供所需功率。整车的功率平衡模型为：

$$P_{bat}+P_{eng}=P_{mot}^{req}+P_{DC}+P_{TMS} \tag{4}$$

式中：P_{bat}为动力电池功率；P_{eng}为发动机功率；P_{mot}^{req}为驱动电机功率；P_{DC}为低压附件的功率，其范围与硬件选型有关，本文的取值范围为[0 kW,2.5 kW]；P_{TMS}为热管理等高压附件的功率，其范围与硬件选型有关，本文的取值范围为[0 kW,8 kW]，其中低压附件功率与高压附件功率的总消耗为整车总附件功率，后文统称为附件功率。

综上可知，低温下电池可用功率衰减，而轮端驱动需求功率显著上升，且伴随着低温下的乘员舱采暖、电池加热等更高的附件功率需求，导致低温下对电池、电驱、发动机等系统的功率分配提出了更高的要求。

3.3 低温环境动力调节模型

针对低温动力电池性能衰减、整车动力及采暖需求增加的问题，考虑低温场景的动力电池及发动机特性，在现有能量管理方案的基础上，基于当前驾驶工况优化车辆发动机起停及动力系统的功率分配，提升低温工况下的驾乘舒适性。

在常规行车发电工况中，增程器的实际发电功率与电池的可用功率、SOC、车速、附件功率、道路坡度、轮端功率需求等参数相关。其中，电池可用功率、SOC、车速、轮端功率需求等是判断增程器起停时刻的重要依据。为使车辆在低温下可以保持较好的动力性及乘员舱采暖的能力，需对SOC平衡点进行偏移控制，以优化增程器起停机及发电功率的控制。低温下SOC平衡点确认逻辑如图4所示，以近几天内最低环境温度及最低电芯温度确定：

$$\begin{cases}SOC_{tar}=SOC_{bse}+\lambda_{SOC}^{[T,M_{veh}]}\\ \lambda_{SOC}^{[T,M_{veh}]}=f(T_{bms,min}^{L5},T_{out,max}^{L5})\end{cases} \tag{5}$$

式中：SOC_{tar}为偏移后的控制SOC值；SOC_{bse}为基础控制SOC平衡点值；$\lambda_{SOC}^{[T,M_{veh}]}$为SOC偏移量，与车辆能量模式($M_{veh}$)、近5天的电芯和环境温度($T$)相关，是一个二维参数表，温度越低，偏移量越高；$T_{bms,min}^{L5}$为近5天电芯温度的最低值；$T_{out,max}^{L5}$为近5天环境温度的最低值；$L5$为近5天存储的最低温度数量。

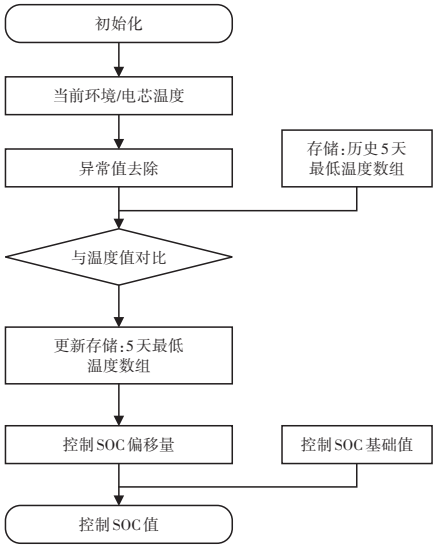


图4 SOC偏移控制流程图

通过上述低温工况控制逻辑，在低温工况下更早控制增程器起动，并提高发电功率，保证SOC可维持在相对较高水平以保证后续的整车功率需求。

为进一步满足各场景下的车辆驱动及用电需求，基

于单位时间内单位里程的SOC变化规律闭环控制发电功率的实际幅值：

$$\begin{cases} e(i)=\dfrac{\Delta SOC(i)}{\Delta L_{\mathrm{mil}}(i)} \\ \Delta SOC(i)=SOC_{\mathrm{E}}(i)-SOC_{\mathrm{S}}(i-T_i) \\ \Delta L_{\mathrm{mil}}(i)=L_{\mathrm{mil,E}}(i)-L_{\mathrm{mil,S}}(i-T_i) \end{cases} \tag{6}$$

式中：e为单位里程SOC变化率，其正、负表征电池充、放电状态，绝对值反映当前行程电池充、放电速率；i为计算时刻；ΔSOC为单位时间T_i内SOC的变化量；SOC_{E}、SOC_{S}分别为初始电量及末端荷电状态；T_i为计算的时间区间；ΔL_{mil}为单位时间T_i内里程的变化；$L_{\mathrm{mil,E}}$、$L_{\mathrm{mil,S}}$分别为初始车辆里程及末端车辆里程。

将单位里程SOC变化率作为控制增程器发电功率的输入，建立功率惩罚系数调节模型：

$$Y_{\mathrm{PI}}(i)=K_{\mathrm{P}}\cdot e(i)+K_{\mathrm{I}}\cdot\sum_{t=1}^{i}e(i)\mathrm{d}t \tag{7}$$

式中：Y_{PI}为功率惩罚系数，其取值范围为[-1,1]，该值为正表示需要提高增程器的发电功率，为负值表示需要降低增程器的发电功率；K_{P}为比例增益项；K_{I}为积分增益项。

当$e>2\%$/km时，触发功率系数补偿，当$e<0.5\%$/km时，退出功率系数补偿。

在获取功率惩罚系数的基础上，计算得到增程器的发电功率：

$$P_{\mathrm{eng,act}}(t)=P_{\mathrm{eng,bse}}(t)\cdot(1+Y_{\mathrm{PI}}(t)) \tag{8}$$

式中：$P_{\mathrm{eng,act}}$为增程器输出功率，依据该值控制增程器输出转速和扭矩；t为计算时刻；$P_{\mathrm{eng,bse}}$为增程器原始的输出功率。

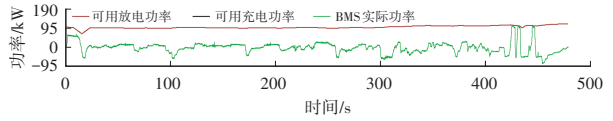
4 低温性能验证

4.1 测试工况

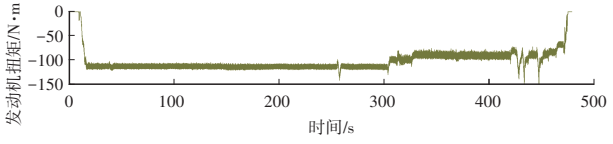
为充分验证本文策略在低温环境下的效果及系统可靠性，在呼伦贝尔北部地区的G331国道进行了实车测试与验证。测试时环境温度为-20~-35 ℃，试验车辆为北汽自研已量产混动车型。测试内容分别为基于低温偏移的起停机策略验证及不同巡航车速下的行车发电情况验证。为了保证测试结果的一致性，采用同一台试验车在相同的路段进行测试；驾驶员及驾驶风格不变，乘员舱采暖保持在26 ℃、4挡风量不变，不同的测试工况交替连续进行。实际测试在国道固定路段往返进行，掉头时存在短暂加减速现象，不影响整体的数据情况。

4.2 结果与分析

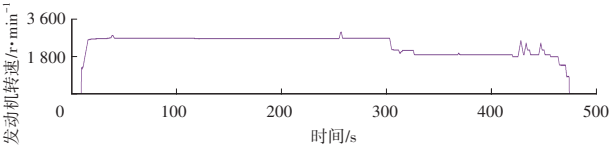
由于不同模式的SOC平衡点不一致，但是低温偏移的原则保持一致，此处以强制纯电模式为例，分别测试了原策略及新策略下的行车起停机情况，如图5和图6所示。由图中可知，原策略在低温下保持了和常温相同的起停机逻辑，将强制纯电模式的起机SOC平衡点设置较低，在130 km/h行驶工况下，SOC降低至起机阈值后发动机才起动运行，高于停机的阈值后停止运行。新策略中SOC>25%时，发动机已起动为整车提供能量，过程中虽然SOC是缓慢降低的趋势，但是延缓了电池放电的速率，能够保障在低温下更长的续驶需求。



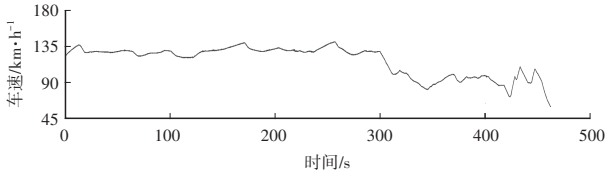
(a)充放电功率



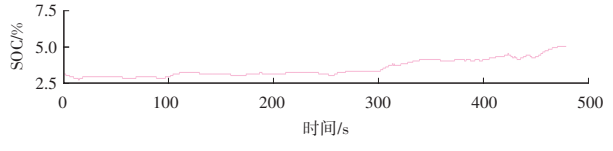
(b)发动机扭矩



(c)发动机转速

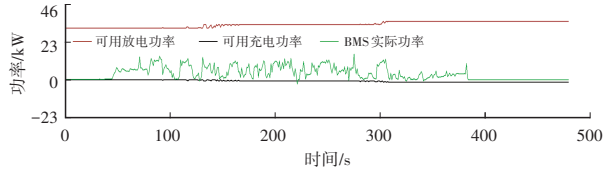


(d)车速

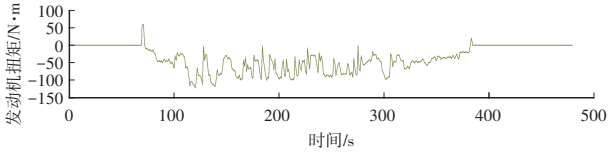


(e)SOC

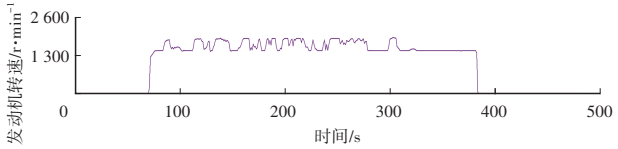
图5 原策略低温行车起停机情况



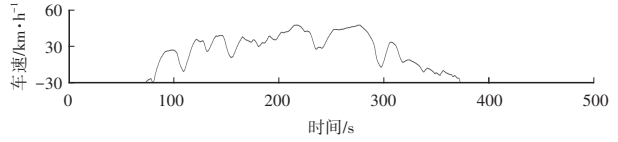
(a)充放电功率



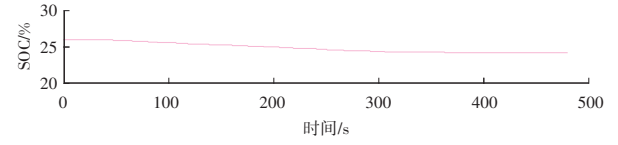
(b)发动机扭矩



(c)发动机转速



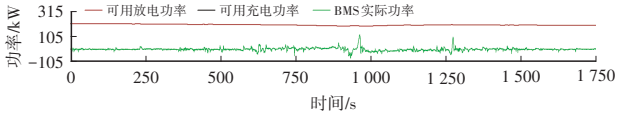
(d)车速



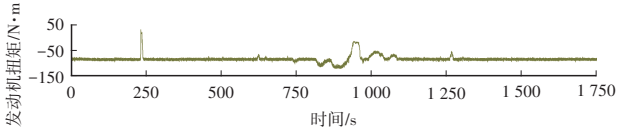
(e)SOC

图6　新策略低温行车起停机情况

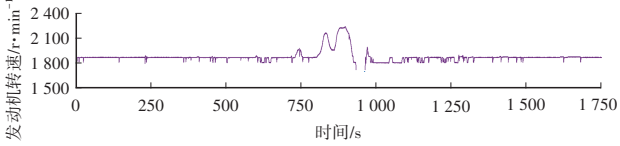
进一步在80 km/h、100 km/h、120 km/h、140 km/h不同巡航车速、电池SOC为20%~30%的条件下开展试验，测试整车动力性及各系统的稳定性，结果如图7~图14所示。从图中可以看出，原策略中不同车速下增程器可以正常控制起停机，且发电情况与常温基本一致，但是相较于常温，电池的充电量显著降低。在车速为80 km/h、100 km/h、120 km/h下连续行驶30 min，SOC基本维持稳定或者微充（上涨0.2%~2.3%），而140 km/h行驶工况整车无法保电，SOC微放（下降3.5%），整体保电情况不佳，难以满足低温下用户的驾乘需求。新策略中，随着行驶工况的变化，控制增程器输出不同的功率，在车速为80 km/h、100 km/h、120 km/h连续行驶15 min左右，SOC处于微充电的状态（上涨3%~3.5%），在车速140 km/h连续行驶10 min左右，SOC保持微充（上涨2%）。优化后的方案保电情况优于原方案，且过程中增程器运行正常，无飞车或转速超调的现象，电池无过充或过放现象，整体符合预期。



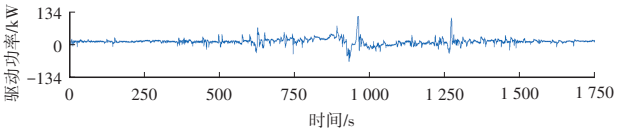
(a)充放电功率



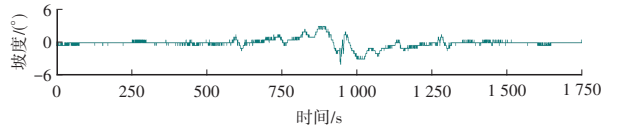
(b)发动机扭矩



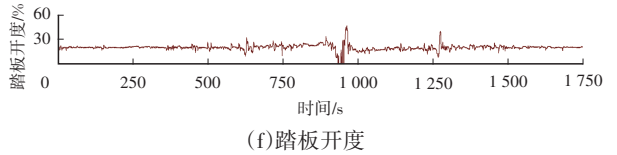
(c)发动机转速



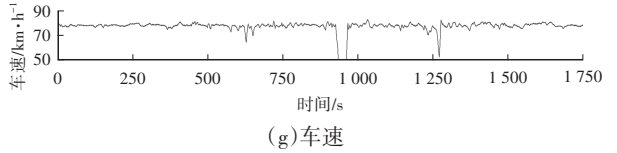
(d)驱动功率



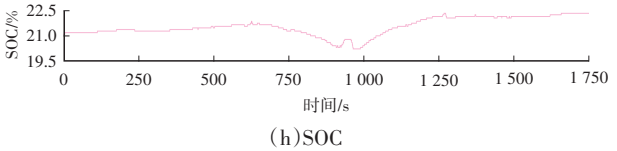
(e)坡度



(f)踏板开度

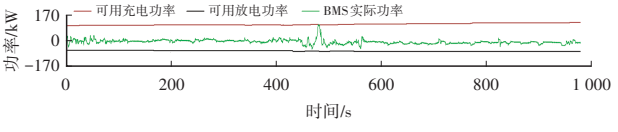


(g)车速

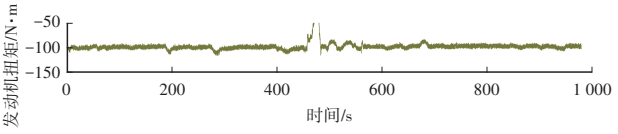


(h)SOC

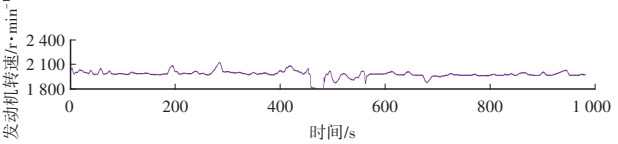
图7　原策略低温80 km/h行车工况



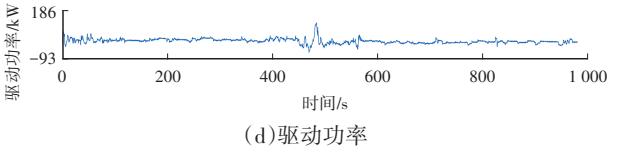
(a)充放电功率



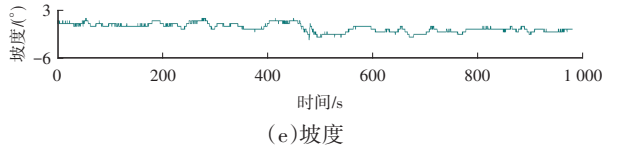
(b)发动机扭矩



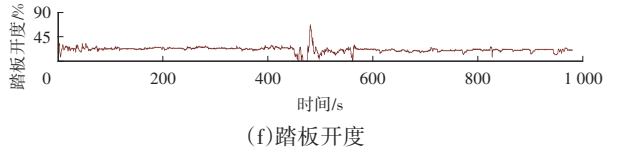
(c)发动机转速



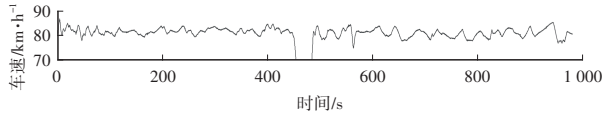
(d)驱动功率



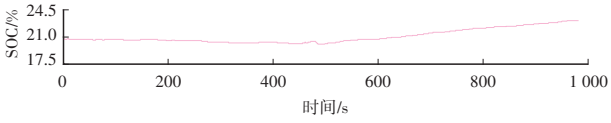
(e)坡度



(f)踏板开度

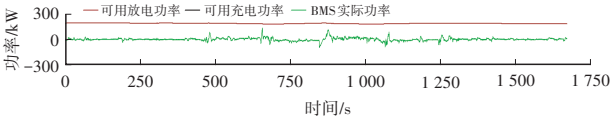


(g)车速

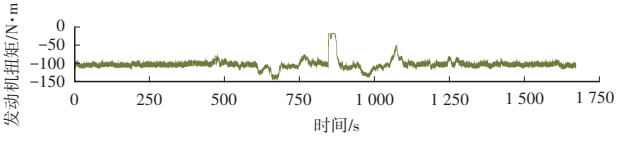


(h)SOC

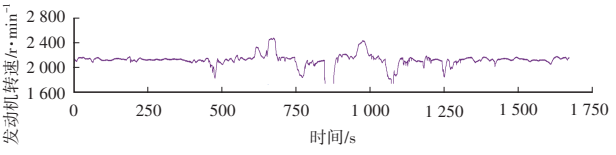
图8　新策略低温80 km/h行车工况



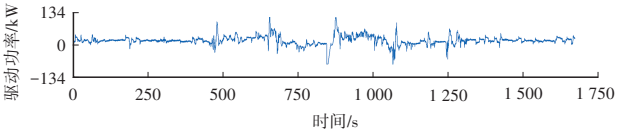
(a)充放电功率



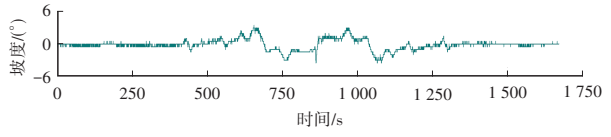
(b)发动机扭矩



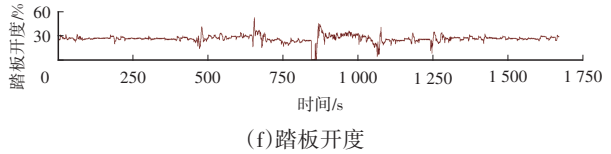
(c)发动机转速



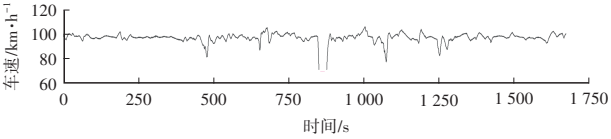
(d)驱动功率



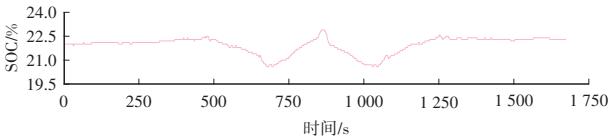
(e)坡度



(f)踏板开度

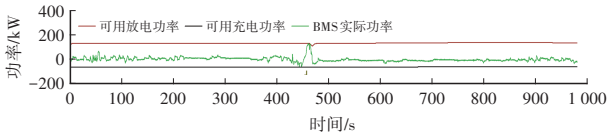


(g)车速

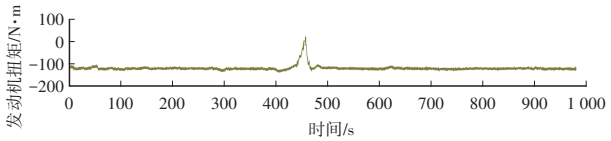


(h)SOC

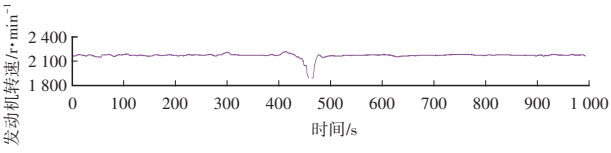
图9　原策略低温100 km/h行车工况



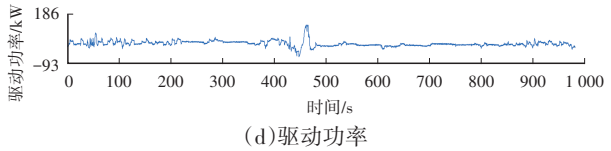
(a)充放电功率



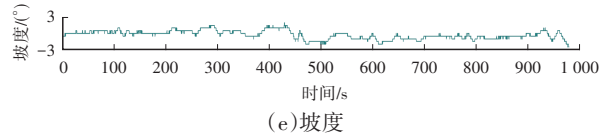
(b)发动机扭矩



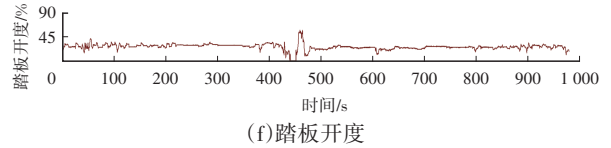
(c)发动机转速



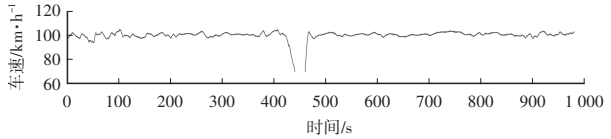
(d)驱动功率



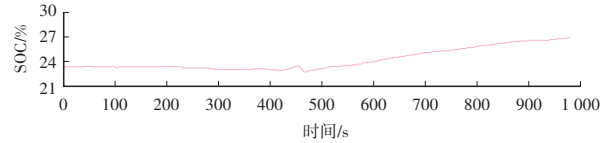
(e)坡度



(f)踏板开度

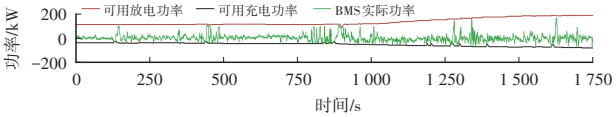


(g)车速

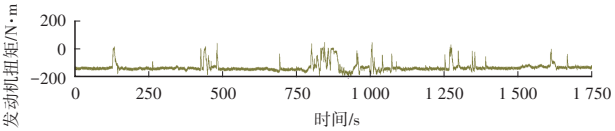


(h)SOC

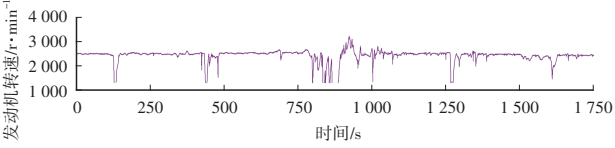
图10　新策略低温100 km/h行车工况



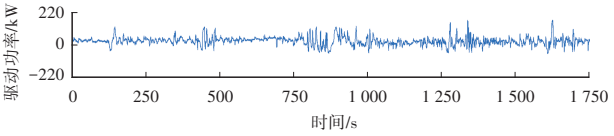
(a)充放电功率



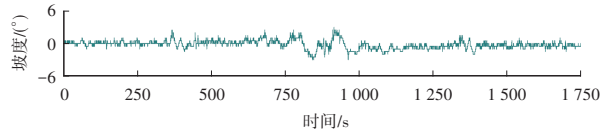
(b)发动机扭矩



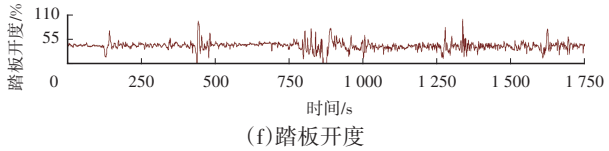
(c)发动机转速



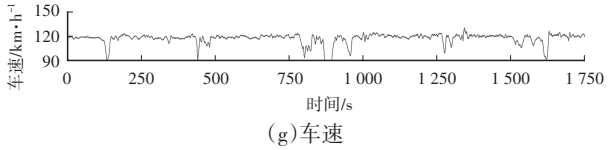
(d)驱动功率



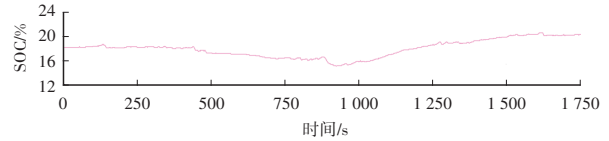
(e)坡度



(f)踏板开度

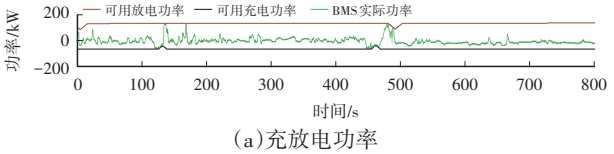


(g)车速

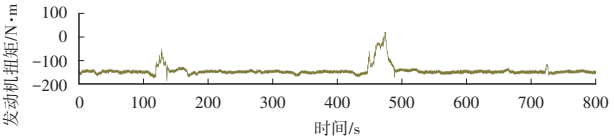


(h)SOC

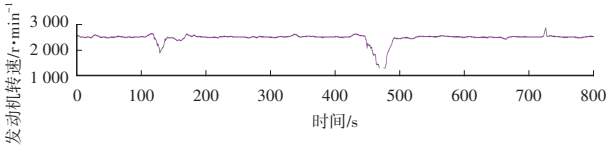
图 11　原策略低温 120 km/h 行车工况



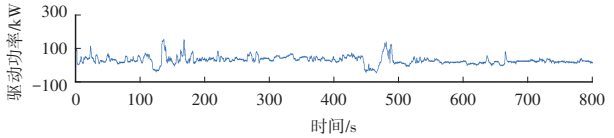
(a)充放电功率



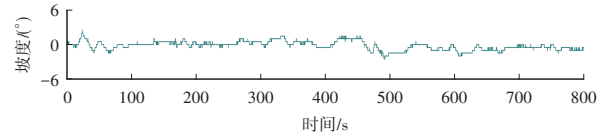
(b)发动机扭矩



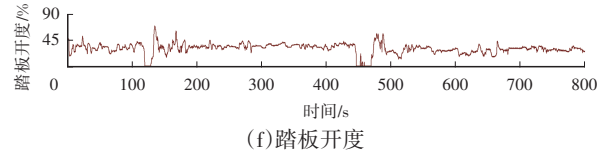
(c)发动机转速



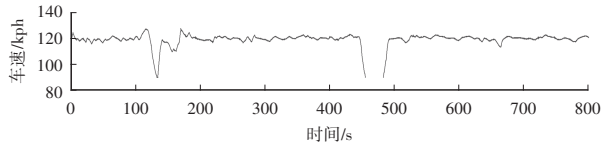
(d)驱动功率



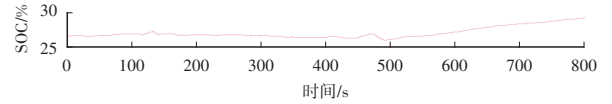
(e)坡度



(f)踏板开度

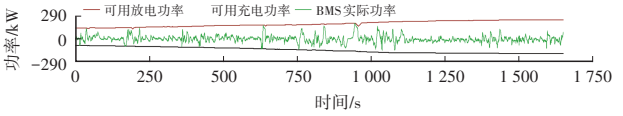


(g)车速

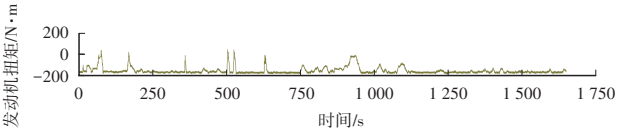


(h)SOC

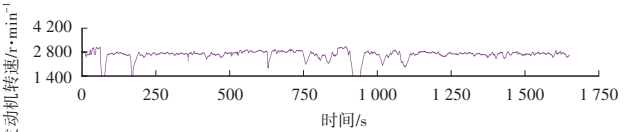
图 12　新策略低温 120 km/h 行车工况



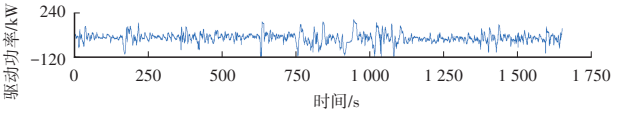
(a)充放电功率



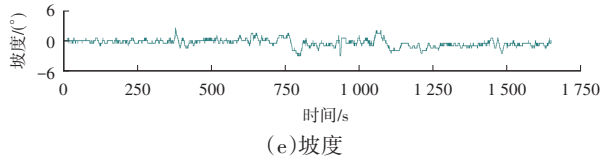
(b)发动机扭矩



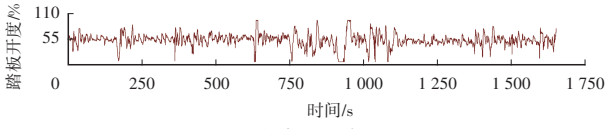
(c)发动机转速



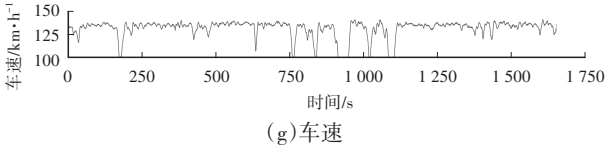
(d)驱动功率



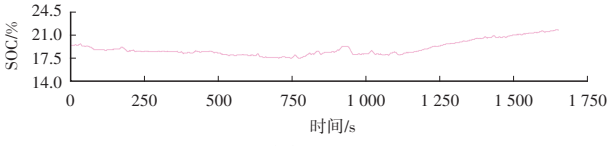
(e)坡度



(f)踏板开度

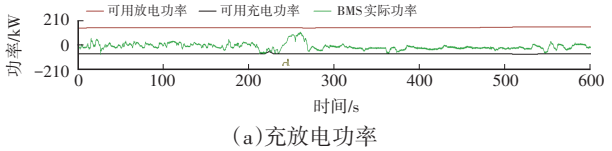


(g)车速



(h)SOC

图 13　原策略低温 140 km/h 行车工况



(a)充放电功率

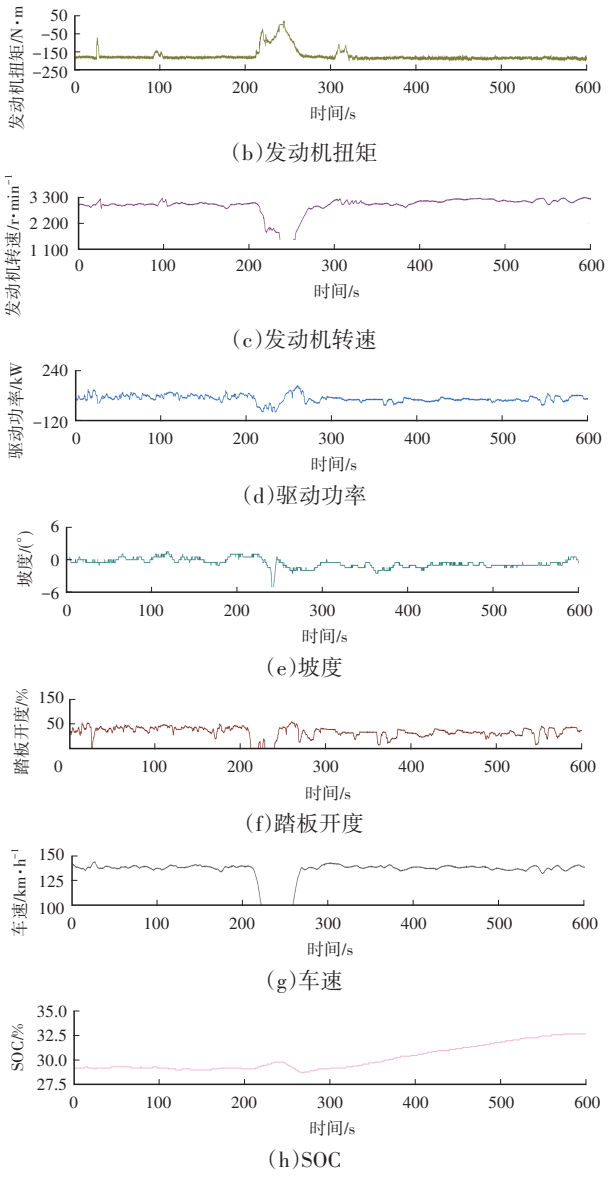


图14　新策略低温140 km/h行车工况

为直观对比2种方案，对不同工况下的电池每小时充电量及综合工况油耗进行分析，如图15、图16所示。原策略中，车速以80 km/h、100 km/h、120 km/h行驶的充电量分别为0.96 kW·h/h、0.16 kW·h/h、1.65 kW·h/h，车速为140 km/h时的充电量为−2.68 kW·h/h，整车保电情况较差。新策略中，车速为80 km/h、100 km/h、120 km/h时的电池充电量为5.78 kW·h/h、6.32 kW·h/h、6.35 kW·h/h，车速为140 km/h的电池充电量为7.9 kW·h/h，整车保电情况较好。同时，在低温不同巡航车速下，新策略的油耗较原策略有明显改善，80 km/h、100 km/h、120 km/h、140 km/h车速下油耗分别降低了2.96%、6.17%、5.8%、3.04%，有效降低了用户低温场景下的出行成本。新策略解决了原策略中的增程器发电难以满足整车功率需求的问题，为用户低温下的整车驾乘提供了较好的基础保障。

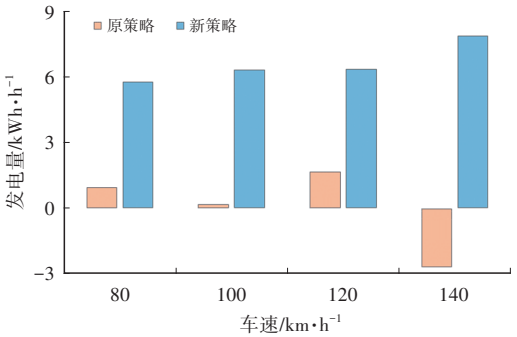


图15　低温工况不同车速发电量对比

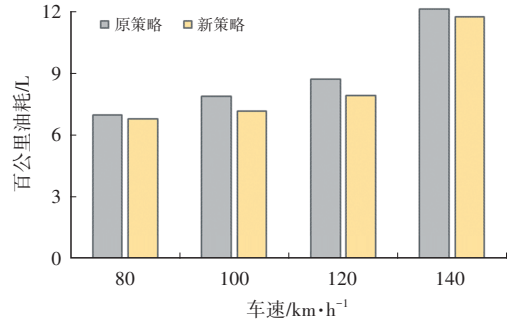


图16　低温工况不同车速油耗对比

5　结束语

针对低温环境下整车阻力高、动力电池能力衰减等问题，本文提出了基于低温动力自适应调节的能量管理策略，优化了车辆发动机起停及动力系统的功率分配，改善了低温下的动力性能，主要结论如下：

a. 分析了低温下整车阻力及电池能量的变化情况，基于车辆使用期间的近期温变情况调整SOC平衡点，并控制发动机起停，确保低温下更早起动发动机为整车提供能量，避免出现电池电量低的场景，为车辆当前及后续行驶提供电量保障。

b. 以当前行驶工况确定的单位里程SOC变化率为输入，构建了基于功率惩罚系数的增程器发电功率动态调节模型，实时闭环控制增程器输出对应的转速、扭矩，低温下80~140 km/h巡航车速行驶工况下，整车电量保持微充不掉电，满足了低温下用户驾驶及采暖的高功率用电需求。

参　考　文　献

[1] 冯琳, 蔡江浪, 贾鹏. 双积分政策下新能源汽车异质制造商竞争演变分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(6): 30−46.
FENG L, CAI J L, JIA P. Competitive Dynamics among Heterogeneous New Energy Vehicle Manufacturers under Dual−Credit Policy[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(6): 30−46.

[2] 何华强, 张俊, 王宁, 等. 基于规划路径能耗预测的PHEV

全局自适应能量管理[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(5): 884-891.
HE H Q, ZHANG J, WANG N, et al. Global Adaptive Energy Management of PHEV Based on Energy Consumption Prediction of Planned Paths[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 56(5): 884-891.

[3] 解少博, 张涛, 张风奇, 等. 考虑路口车辆排队影响的混动汽车速度规划与能量管理分层优化[J]. 机械工程学报, 2025, 61(14): 197-211.
XIE S B, ZHANG T, ZHANG F Q, et al. Hierarchical Optimization of Speed Planning and Energy Management for Hybrid Electric Vehicles Considering the Impact of Vehicle Queuing at Intersections[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(14): 197-211.

[4] 尹必峰, 张有煜, 解玄, 等. 基于放电倍率实时调节的增程式混合动力越野车能量管理策略研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2025, 39(6): 53-62.
YIN B F, ZHANG Y Y, XIE X, et al. Research on Off-Road Hybrid Electric Vehicles Energy Management Strategy Based on Real Time Adjustment of Discharge Rate[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2025, 39(6): 53-62.

[5] WANG C, LIU R, TANG A. Energy Management Strategy of Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles Based on Genetic Algorithm Optimization and Temperature Effect[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51.

[6] ZHU Z, HAN Y, DU A .Enhanced Eco-Driving and Energy Management for Heterogeneous Hybrid Electric Vehicles through Integrated Transfer Learning and Deep Reinforcement Learning[J]. Energy, 2026, 342.

[7] Islam A M, Jahan I, Farrok O. Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle with Real-World Driving Cycle: Six-Step Control Strategy for Dynamic Energy Management And Fuel Optimization[J]. Energy Conversion and Management, 2026, 29.

[8] 丁小凤, 李通, 赵富强. 增程式电动汽车能量管理策略研究综述[J]. 机械设计与制造, 2025(12): 372-379.
DING X F, LI T, ZHAO F Q. Review of Research on Energy Management Strategies for Extended-Range Electric Vehicle[J]. Machinery Design & Manufacture, 2025(12): 372-379.

[9] 王宝森, 秦炜, 杨建军, 等. 基于道路工况动态规划策略的混动能量管理优化[J]. 车用发动机, 2025(4): 50-57.
WANG B S, QIN W, YANG J J, et al. Optimization of Energy Management for Hybrid Electric Vehicle Based on Road Condition Dynamic Programming Strategy[J]. Vehicle Engine, 2025(4): 50-57.

[10] 曹龙龙, 钟勇, 邱煌乐, 等. 基于模糊控制的自适应等效油耗最小能量管理策略[J]. 车用发动机, 2025(2): 89-94.
CAO L L, ZHONG Y, QIU H L, et al. Energy Management Strategy of Minimum Adaptive Equivalent Fuel Consumption Based on Fuzzy Control[J]. Vehicle Engine, 2025(2): 89-94.

[11] 周彬, 王代辉, 董元发, 等. 考虑驾驶风格的混合动力汽车自适应等效能耗最小化策略[J]. 汽车技术, 2025(1): 9-19.
ZHOU B, WANG D H, DONG Y F, et al. Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy for Hybrid Electric Vehicles with Considerations of Driving Style[J]. Automobile Technology, 2025(1): 9-19.

[12] 李博, 张朋, 徐军辉, 等. 纯电动汽车行驶阻力影响因素和高低温阻力修正因子研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2021, 50(4): 63-67+77.
LI B, ZHANG P, XU J H, et al. A Study on the Influence Factors of Driving Resistance and High and Low Temperature Resistance Correction factors of Electric Vehicles[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2021, 50(4): 63-67+77.

[13] 刘頔, 滕欣余, 张国华, 等. 基于能量流分析的电动汽车低温能耗研究[J]. 汽车技术, 2023(8): 42-47.
LIU D, TENG X Y, ZHANG G H, et al. Research on Low Temperature Energy Consumption of Electric Vehicles Based on Energy Flow Analysis[J]. Automobile Technology, 2023(8): 42-47.

[14] 刘晴玮, 邱悦, 曾金梁, 等. 电动汽车高集成化直冷直热系统仿真与试验验证分析[J]. 机械设计, 2026, 43(1): 37-46.
LIU Q W, QIU Y, ZENG J L, et al. Simulation and Experiment of High-Integration Direct Cooling-Heating System for Electric Vehicles[J]. Machine Design, 2026, 43(1): 37-46.

[15] 蔡黎, 高乐, 徐青山, 等. 提升低温下电池SOC估算精度的算法[J]. 电池, 2021, 51(3): 252-256.
CAI L, GAO L, XU Q S, et al. An Algorithm for Improve Accuracy of Battery SOC Estimation at Low Temperature[J]. Battery, 2021, 51(3): 252-256.

（责任编辑　天下溪）
修改稿收到日期为2026年8月25日。