

1、一种混合动力履带车辆速度与能量协同优化方法，其特征在于，所述混合动力履带车辆速度与能量协同优化方法包括：

步骤一，采用坐标变换方法将原有既定轨迹的 GPS 坐标转换为车辆局部坐标系坐标；

步骤二，构建混动履带车辆速度与能量协同优化模型；

步骤三，利用强化学习方法，实现混动履带车辆路径跟随过程中速度与能量的协同优化。

2、如权利要求 1 所述的混合动力履带车辆速度与能量协同优化方法，其特征在于，所述步骤一中，将原有既定轨迹的 GPS 坐标转换为车辆局部坐标系坐标的具体过程为：GPS 经纬度—二维平面坐标系—车辆局部坐标系的坐标变换，对路径的 GPS 坐标通过高斯-克吕格投影法进行转化，将路径的 GPS 经纬度坐标信息进行处理，得到对应的二维平面坐标信息，完成 GPS 经纬度向二维平面坐标系的坐标变换。

3、如权利要求 2 所述的混合动力履带车辆速度与能量协同优化方法，其特征在于，所述 GPS 经纬度—二维平面坐标系—车辆局部坐标系的坐标变换，具体为： XOY 为二维平面坐标系， $X^*O^*Y^*$ 为局部坐标系， (x_0^*, y_0^*) 为局部坐标系原点在二维平面坐标系下的坐标；A 点在二维平面坐标系下的坐标为 (x_A, y_A) ，转化到局部坐标系后坐标为 (x_A^*, y_A^*) ；局部坐标系相对二维平面坐标系的旋转角度为 ϕ ，以逆时针方向旋转为正，则 A 的平面坐标转换表示如下：

$$\begin{cases} x' = (x_A - x_0^*) \cos \phi + (y_A - y_0^*) \sin \phi \\ y' = -(x_A - x_0^*) \sin \phi + (y_A - y_0^*) \cos \phi \end{cases} ;$$

在路径跟踪问题中，局部坐标系的原点固定于无人履带车形心，且车头方向为局部坐标系 X^* 轴正向，则 $(x_A - x_0^*)$ 和 $(y_A - y_0^*)$ 表征车辆在全局坐标系中实际位置与目标位置的误差， (x', y') 为车辆局部坐标系下的误差。

4、如权利要求 1 所述的混合动力履带车辆速度与能量协同优化方法，其特征在于，所述步骤二中，构建混动履带车辆速度与能量协同优化模型，包括：车辆运动学建模、动力学建模以及能量管理模型。

5、如权利要求4所述的混合动力履带车辆速度与能量协同优化方法，其特征在于，所述车辆运动学建模具体为：履带车辆的运动动力学建模相对复杂，纵向动力学中阻力包括滚动阻力 F_g 、上坡阻力 F_p 和空气阻力 F_w ，分别计算得到并计算总阻力 F_r ，如下：

$$\begin{cases} F_g = mgf \cos \theta' \\ F_p = mg \sin \theta' \\ F_w = \frac{C_d A}{21.15v^2} \\ F_r = F_g + F_p + F_w \end{cases} ;$$

式中， θ' 为坡度， C_d 为空气阻力系数， A 为迎风面积；
直线行驶方向：

$$\begin{cases} m\dot{v} = F_1 + F_2 - F_g - F_p - F_w \\ F_{drive} = F_1 + F_2 \\ F_t = \varphi F_N \\ F_1 = T_1 i_0 \eta_T / r \\ F_2 = T_2 i_0 \eta_T / r \\ P_{longitudinal}^D = F_{drive} \cdot v \end{cases}$$

式中， m 和 I_z 分别表示履带车的整备质量和航向转动惯量， v 和 \dot{v} 分别表示履带车形心位置的速度和加速度； φ 为地面附着系数， F_N 为地面给履带车辆的支持力，此处等于车重； F_{drive} 为车辆总驱动力， F_t 为地面所能提供的最大附着力，当 $F_{drive} \leq F_t$ 时车辆不发生滑转； F_1 和 F_2 分别表示两侧驱动电机提供的轮边驱动力， T_1 和 T_2 分别表示两侧电机的输出转矩、 i_0 表示轮边传动比、 r 是驱动轮半

径, η_r 是电机轴到履带的效率, $P_{longitudinal}^D$ 为车辆行驶时的纵向需求功率;
旋转方向:

$$\begin{cases} I_z \dot{\omega} = (F_2 - F_1)B / 2 + (f_l - f_r)B / 2 - M_{veh} \\ f_l = f_r = 0.5 fmg \\ M_{\mu} = 0.25 \mu mgL \\ P_{steer}^D = (I_z \dot{\omega} + 0.25 \mu mgL) / Bv / R \end{cases} ;$$

其中, f_l 和 f_r 则分别表示左、右侧履带的滚动阻力, f 表示两侧履带的滚阻系数; B 表示两侧履带中心距, M_{veh} 为履带车转向阻力矩, g 为重力加速度, L 为履带接地长度, P_{steer}^D 为车辆转弯所需的转向功率; ς 为转向阻力系数, 用经验公式计算得到:

$$\varsigma = \varsigma_{max} / (0.925 + 0.075R / B) ;$$

式中, ς_{max} 表示履带车最大转向阻力系数, R 表示履带车转向半径, 转向半径计算公式:

$$R = \frac{B \cdot (v_i + v_o)}{2 \cdot (v_i - v_o)} ;$$

式中, v_i 和 v_o 分别代表转向时内外侧履带的速度;

车辆运行的总需求功率 P_{dem} 等于纵向行驶所需功率 $P_{longitudinal}^D$ 和转向所需功率 P_{steer}^D 之和, 由两侧电机提供。

6、如权利要求 4 所述的混合动力履带车辆速度与能量协同优化方法, 其特征在于, 所述履带车辆跟踪过程运动学建模: 根据履带车的运动过程, 其运动状态方程表示如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{v_1 + v_2}{2} \cos(\theta) \\ \dot{y} = \frac{v_1 + v_2}{2} \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \frac{v_2 - v_1}{2B} \end{cases} ;$$

式中， x ， y ， θ 分别表示履带车形心在大地坐标系中的坐标及相对与大地坐标系的转角；

根据两侧履带速度得到车辆形心线速度和旋转角速度：

$$\begin{cases} v = \frac{v_1 + v_2}{2} \\ \omega = \frac{v_2 - v_1}{B} \end{cases} ;$$

初始时刻车辆位于全局坐标系原点，经过时间 t 后其位于全局坐标系 (x, y) 处，并用 $P(x, y, \theta)$ 表征；所需跟踪目标的位置在全局坐标系下表示为 $P_{\text{target}}(x_{\text{target}}, y_{\text{target}}, \theta_{\text{target}})$ ，无人履带车路径跟踪误差表示为：

$$P_{\text{error}} = \begin{bmatrix} x_{\text{error}} \\ y_{\text{error}} \\ \theta_{\text{error}} \end{bmatrix} = P_{\text{target}} - P = \begin{bmatrix} x_{\text{target}} - x \\ y_{\text{target}} - y \\ \theta_{\text{target}} - \theta \end{bmatrix} ;$$

将路径跟踪误差转换至车辆局部坐标系下：

$$P_{\text{error}}^{\text{veh}} = \begin{bmatrix} x_{\text{error}}^{\text{veh}} \\ y_{\text{error}}^{\text{veh}} \\ \theta_{\text{error}}^{\text{veh}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\text{error}} \\ y_{\text{error}} \\ \theta_{\text{error}} \end{bmatrix} ;$$

路径跟踪误差定义为横向误差与角度误差之和：

$$E_y = \left((y_{\text{error}}^{\text{veh}})^2 + (\theta_{\text{error}}^{\text{veh}})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \Big|_{x_{\text{target}}, y_{\text{target}} = \text{index}(\min(\sqrt{(x_{\text{error}}^{\text{veh}})^2 + (y_{\text{error}}^{\text{veh}})^2}))} \quad \circ$$

7、如权利要求 4 所述的混合动力履带车辆速度与能量协同优化方法，其特征在于，所述能量管理模型构建，具体为：使用串联混动履带车辆模型，车辆行驶所需功率由发动机-发电机组和输出功率共同提供；

EGS 中发电机的输出电压和电磁转矩关系表示为：

$$\begin{cases} U_g = K_e w_g - K_x w_g I_g \\ T_g = K_e I_g - K_x I_g^2 \end{cases} ;$$

其中， U_g 和 I_g 是发电机的输出电压和电流， w_g 和 T_g 是发电机转速和转矩； K_e 和 K_x 是电动势系数和电阻系数；根据转矩平衡，EGS 中发动机和发电机间动态

关系满足：

$$\begin{cases} n_e = n_g \\ T_e - T_g = \frac{\pi}{30} (J_e + J_g) \frac{dn_g}{dt} \end{cases} ;$$

其中， J_e 和 J_g 分别是发动机和发电机的转动惯量；另外，发动机耗油率表达为发动机转矩以及转速的查表函数：

$$m_{fuel} = f(T_{eng}, w_{eng}) ;$$

电池模块由一阶内阻模型表示：

$$\begin{cases} V_{oc} = f(SOC) \\ R_{bat} = g(SOC) \\ P_{bat} = V_{oc} I_{bat} + (sign(I_{bat})) \cdot I_{bat}^2 R_{bat}(SOC) \\ SOC(t) = SOC - \frac{\eta_{bat} \int_{t_0}^{t_f} I_{bat} dt}{Q_{bat}} \end{cases} ;$$

其中， R_{bat} 和 V_{oc} 分别是电池内阻及开路电压； I_{bat} 是电池电流，当放电时为正值，充电时为负值； Q_{bat} 是电池电容， η_{bat} 是电池的充放电效率， P_{bat} 是电池输出功率； $sign(I_{bat})$ 是 $sign$ 函数，取值表示为 $\begin{cases} 1, I_{bat} \geq 0 \\ -1, I_{bat} < 0 \end{cases}$ ；

由于 EGS、电池和驱动电机控制器都与总线电相连，动力总成的功率分布满足以下关系：

$$\begin{cases} P_{dem} = P_g + P_{bat} \\ P_g = U_{dc} I_g \\ P_{bat} = V_{oc} + (sign(I_{bat})) \cdot I_{bat}^2 R_{bat} \\ U_{dc} = K_e w_g - K_x w_g I_g \end{cases} ;$$

其中， P_{dem} 是车辆行驶的需求功率， P_g 为发电机输出功率。

8、如权利要求 1 所述的混合动力履带车辆速度与能量协同优化方法，其特征在于，所述步骤三中，应用深度确定性策略梯度算法构建并求解协同优化问题，分为两个阶段，离线学习与在线应用；

离线学习阶段：根据定义的混动履带车速度规划模型，车辆距预瞄点的二维水平横坐标 x_{error} ，车辆距预瞄点的二维数值纵坐标 y_{error} ，转角 φ ，车辆行驶速

度 v ，车辆转弯速度 w 用于表征轨迹跟随中车辆运行状态，发动机转速 n_e 和电池 SOC 用于表征混合动力系统状态，将状态选取为 DDPG 状态变量， $s_t = \{x_{\text{error}}, y_{\text{error}}, \varphi, v, w, n_e, SOC\}$ ；对所选状态参数进行归一化处理，统一转换至取值区间 $[0,1]$ 或 $[-1,1]$ ；同理，选取转向内侧电机转矩 T_i 以及外侧电机转矩 T_o ，发动机转矩 T_e 作为 DDPG 算法动作变量， $a_t = \{T_i, T_o, T_e\}$ ；DDPG 算法中反馈奖励设置为 $r_t = -(E_y + \beta \cdot \dot{m}_{\text{fuel}} + \gamma \cdot P_{\text{bat}} + \kappa * (v0 > \sqrt{R \cdot \zeta \cdot g}) + \lambda * (F_{\text{drive}} > \varphi F_N))$ ，其中 κ 和 λ 为极大值；

采用并行式架构进行训练；首先将工作站中可用的 CPU 内核按适当比例分配给 MATLAB 并行工作器，工作器包含两类：仿真工作器以及学习工作器；每个学习工作器都有一份代理参数的副本，包括 DDPG 算法及其内部网络的参数；在算法每次迭代时，工作器运行仿真模型并将计算所获取的状态 s_t 、动作 a_t 、奖励 r_t 以及网络权重参数存入数据缓存区；每个学习器同步于数据缓存区检索并提取前一次迭代的相关数据，计算并更新网络权重系数；最后将学习器计算得到的网络参数传入模拟器，进行下一次的迭代计算，循环往复，直至达到预设的迭代次数；

在线应用阶段：将全局路径信息、初始状态变量 $s_0 = \{x_{\text{error}0}, y_{\text{error}0}, \varphi_0, v_0, w_0, n_{e0}, SOC_0\}$ 作为训练后的 DDPG 算法的输入，获取最优的动作变量，最优控制变量，最后将最优控制变量序列输入所构建的混动履带车速度规划模型中进行状态迭代更新，获取履带车辆两侧的最优速度序列。

9、一种接收用户输入程序存储介质，所存储的计算机程序使电子设备执行权利要求 1~8 任意一项所述混合动力履带车辆速度与能量协同优化方法包括的步骤。

10、一种计算机设备，其特征在于，所述计算机设备包括存储器和处理器，所述存储器存储有计算机程序，所述计算机程序被所述处理器执行时，使得所述处理器执行权利要求 1~8 任意一项所述混合动力履带车辆速度与能量协同优化方法的步骤。