



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111209633 B

(45) 授权公告日 2024. 04. 09

(21) 申请号 202010023517.8

CN 108215747 A, 2018.06.29

(22) 申请日 2020.01.09

CN 108336776 A, 2018.07.27

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 109033531 A, 2018.12.18

申请公布号 CN 111209633 A

CN 110194177 A, 2019.09.03

CN 110641456 A, 2020.01.03

(43) 申请公布日 2020.05.29

US 2011054816 A1, 2011.03.03

(73) 专利权人 重庆大学

US 2013096725 A1, 2013.04.18

地址 400044 重庆市沙坪坝区沙坪坝正街174号

张雷等. 超级电容管理技术及在电动汽车中的应用综述.《机械工程学报》.2017, 第53卷卷(第16期), 第32-43页.

(72) 发明人 胡晓松 韩杰 唐小林 李佳承

Teng Liu 等. A Bi-Level Control for

(74) 专利代理机构 北京同恒源知识产权代理有限公司 11275

Energy Efficiency Improvement of a Hybrid Tracked Vehicle.《IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS》.2018, 第14卷卷(第4期), 第1616-1625页.

专利代理师 赵荣之

Zhiyu Huang等. Modeling and multi-objective optimization of a stand-alone PV-hydrogenretired EV battery hybrid energy system.《Energy Conversion and Management》.2018, 第80-92页.

(51) Int. Cl.

G06F 30/15 (2020.01)

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 17/15 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 109752656 A, 2019.05.14

CN 110254418 A, 2019.09.20

CN 109733208 A, 2019.05.10

审查员 仁艳秋

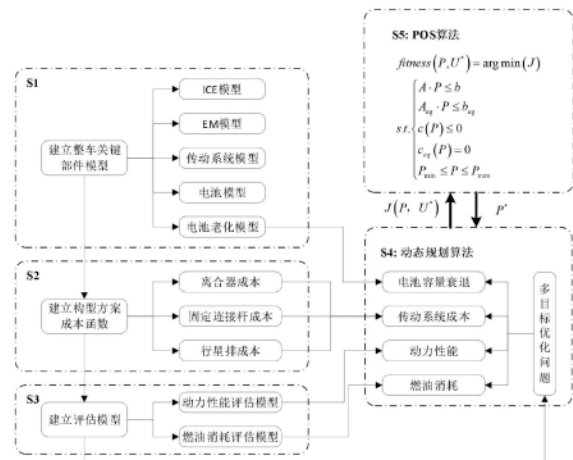
权利要求书3页 说明书7页 附图1页

(54) 发明名称

一种插电式混合动力汽车传动系统的评价与参数优化方法

(57) 摘要

本发明涉及一种插电式混合动力汽车传动系统的评价与参数优化方法,属于新能源汽车领域。该方法包括以下步骤:S1:建立插电式混合动力汽车ICE模型、EM模型、传动系统模型、电池模型及其容量衰退模型;S2:建立构型方案(行星排)成本优化目标函数;S3:基于动态规划算法建立燃油消耗评估模型与动力性能评估模型;S4:建立多目标优化问题,依照结果生成构型方案优选等级,得到相对最优的构型方案。S5:基于粒子群算法(POS)优化该传动系统参数。



1. 一种插电式混合动力汽车传动系统的评价与参数优化方法,其特征在于:该方法包括以下步骤:

步骤S1:建立ICE模型、EM模型、传动系统模型、电池模型和电池容量衰退模型;

步骤S2:基于传动系统模型,建立构型方案成本函数,包括离合器成本、固定连接杆成本和行星排成本;

步骤S3:建立动力性能评估模型和燃油消耗评估模型及其优化目标函数;

步骤S4:基于动态规划算法DP求解多目标优化问题的帕累托最优解,建立构型方案优选等级,得到最优的传动系统构型方案;

步骤S5:基于粒子群算法POS对最优传动系统方案进行参数优化;

所述步骤S1中,电池容量衰退模型的建立:

以A123系统生产的LiFePO₄单体电池为研究对象,建立电池老化的半经验模型,容量衰退百分比为:

$$Q_{loss,\%} = (a \cdot SOC + b) \cdot \exp\left(\frac{-E_a + \eta \cdot C_r}{R_g \cdot T_K}\right) \cdot (Ah)^z$$

其中a和b为拟合系数, E_a 为活化能, C_r 为放电速率, η 为放电速率修正系数, R_g 为气体常数, T_K 为电池温度,Ah为Ah-吞吐量,z为幂律因子;

为量化实际循环周期的老化效应,定义强度系数 σ 为:

$$\sigma(t) = \frac{Ah_{nom}}{Ah_{cyc}} = \frac{\int_0^{EoL} |I_{nom}(t)| dt}{\int_0^{EoL} |I(t)| dt}$$

其中 Ah_{nom} 为SOC_{nom}=0.35, $C_{r,nom}$ =2.5C和 $T_{K,nom}$ =298.15K的实验条件下,放电到寿命终止的总Ah-吞吐量, Ah_{cyc} 为实际循环条件下,放电到寿命终止的总Ah-吞吐量; Ah_{nom} 与 Ah_{cyc} 分别定义为:

$$Ah_{nom} = \left[\frac{Q_{cyc,EoL}}{(a \cdot SOC_{nom} + b) \cdot \exp\left(\frac{-E_a + \eta \cdot C_{r,nom}}{R_g \cdot T_{K,nom}}\right)} \right]^{\frac{1}{z}}$$

$$Ah_{cyc} = \left[\frac{Q_{cyc,EoL}}{(a \cdot SOC + b) \cdot \exp\left(\frac{-E_a + \eta \cdot C_r}{R_g \cdot T_K}\right)} \right]^{\frac{1}{z}}$$

其中, $Q_{cyc,EoL}$ 根据经验取值20%;

为表征由于电池内部电荷交换产生的有效寿命衰减,定义有效Ah-吞吐量为:

$$Ah_{eff}(t) = \int_0^t \sigma(\tau) \cdot |I(\tau)| d\tau$$

$\min Ah_{\text{eff}}(t)$ 为最小化电池容量衰退目标函数；

所述步骤S3包括以下步骤：

S31: 确定传动系统状态转移方程如下：

$$X(k+1) = f[X(k), U(k)] \quad k=0, 1, 2 \cdots N-1$$

其中, $X(k)$ 与 $U(k)$ 分别为 k 阶段的状态变量和控制变量, f 为状态转移函数；

S32: 建立动力性能评估模型：

以加速时间来量化汽车动力性能, 建立如下式所示的加速时间成本函数 J_{acc} ：

$$J_{\text{acc}}(X(0)) = \phi_{\text{acc}}(X(N_{\text{acc}})) + \sum_{k=0}^{N_{\text{acc}}} \left(\frac{\Delta v}{a(X(k), U(k))} \right)$$

上式为从初始状态 $X(0)$ 到终止状态 $X(N_{\text{acc}})$ 的加速时间, 其中, $\phi_{\text{acc}}(X(N_{\text{acc}}))$ 为偏离终止约束惩罚项, Δv 为单位速度步长 1km/h , $a(X(k), U(k))$ 为 k 阶段的加速度；

S33: 建立燃油消耗评估模型：

燃油消耗评估模型的代价函数包括两部分：燃油消耗量与模式切换惩罚项；

1) 燃油消耗量如下式所示：

$$g_f = \sum_{k=0}^{N-1} f_f(\omega_e, T_e) \cdot \Delta t$$

其中, g_f 为总燃油消耗量； ω_e 为发动机转速, T_e 为发动机转矩, $f_f(\cdot)$ 为燃油消耗率的插值函数, $\Delta t=1$ ；

2) 模式切换惩罚项如下式所示：

$$P_{\text{shift}}(k) = \sum_{k=0}^{N-1} \left(\begin{array}{l} \lambda(\beta_1 \cdot \frac{1}{2} I_e [\omega_e(k+1) - \omega_e(k)]^2 \\ + \beta_2 \cdot \frac{1}{2} I_{MG1} [\omega_{MG1}(k+1) - \omega_{MG1}(k)]^2 \\ + \beta_3 \cdot \frac{1}{2} I_{MG2} [\omega_{MG2}(k+1) - \omega_{MG2}(k)]^2 \end{array} \right) \quad \begin{cases} \lambda=0 & \text{无模式切换} \\ \lambda=1 & \text{存在模式切换} \end{cases}$$

其中, λ 为模式切换的判断因子, 模式切换惩罚项为模式切换前后各动力元件的动能损失, β_1 、 β_2 、 β_3 为各动力元件的动能变化权重系数；

燃油消耗评估模型总代价函数如下式所示：

$$J_{\text{fuel}} = g_f(k) + P_{\text{shift}}(k)。$$

2. 根据权利要求1所述的一种插电式混合动力汽车传动系统的评价与参数优化方法, 其特征在于: 所述步骤S2中, 构型方案成本函数的建立:

$$J_{\text{cost}} = \alpha_1 \cdot \text{clu}_{\text{cost}} + \alpha_2 \cdot \text{per}_{\text{cost}} + \alpha_3 \cdot \text{sets}_{\text{cost}}$$

其中, J_{cost} 为构型方案总成本, clu_{cost} 为离合器成本, per_{cost} 为固定连接杆成本, $\text{sets}_{\text{cost}}$ 为行星排成本, α_1 、 α_2 、 α_3 为价值权重系数。

3. 根据权利要求1所述的一种插电式混合动力汽车传动系统的评价与参数优化方法, 其特征在于: 步骤S4中, 多目标优化问题的建立:

综合考虑插电式混合动力汽车构型方案对燃油经济性、动力性、成本及动力电池寿命的影响, 建立如下多目标优化函数:

$$J(P^*, U^*) = \operatorname{argmin}(J)$$

$$s.t. \begin{cases} X(k+1) = f[X(k), U(k)] & k = 0, 1, 2 \dots N-1 \\ P \in P_{all} \\ U \in U_{all} \end{cases}$$

其中, J 为多目标构成的目标向量, $J = [J_{fuel}, J_{acc}, J_{cost}, Ah_{eff}]^T$, P_{all} 为可行动力元件参数集, U_{all} 为可行系统控制策略集。

4. 根据权利要求1所述的一种插电式混合动力汽车传动系统的评价与参数优化方法, 其特征在于: 所述步骤S5中, 传动系统参数优化函数的建立:

$$\operatorname{fitness}(P, U^*) = \operatorname{argmin}(J)$$

$$s.t. \begin{cases} A \cdot P \leq b \\ A_{eq} \cdot P = b_{eq} \\ c(P) \leq 0 \\ c_{eq}(P) = 0 \\ P_{min} \leq P \leq P_{max} \end{cases}$$

其中, A 和 A_{eq} 分别为线性不等式和线性等式矩阵, $c(\cdot)$ 和 $c_{eq}(\cdot)$ 分别为非线性不等式和非线性等式约束, P_{min} 和 P_{max} 为动力部件参数控制变量的边界约束。

一种插电式混合动力汽车传动系统的评价与参数优化方法

技术领域

[0001] 本发明属于新能源汽车领域,涉及一种插电式混合动力汽车传动系统的评价与参数优化方法。

背景技术

[0002] 由于其续航里程、动力电池容量以及寿命等问题,纯电动汽车(Electric Vehicles, EVs)尚未广泛普及。混合动力汽车(Hybrid Electric Vehicles, HEVs)作为传统燃油车和纯电动汽车的过渡异军突起,成为研究热点。

[0003] 混合动力汽车的动力系统由多个动力源构成,通过合理的传动系统结构设计和能量管理策略,可以实现需求功率在各动力源之间的合理分配以及动力系统部件之间的协调控制,在保证动力性的前提下,改善整车经济性。

[0004] 与传统的串联式、并联式、混联式混合动力汽车传统系统结构相比,功率分流式传动系统由于引入行星排、离合器和固定连接杆,导致混合动力汽车构型方案众多,设计更加复杂,同时,成本也相应增加。插电式混合动力汽车兼具混合动力汽车和纯电动汽车的优点,具有较大容量的动力电池作动力源,更换动力电池成本很高,因此,在传动系统设计中,应将动力电池循环寿命考虑在内。

[0005] 因此,在插电式混合动力汽车传动系统设计中,需要综合考虑构型方案成本、燃油经济性、动力性和电池循环寿命优化构型方案,同时优化传动系统参数,以达到整体性能最优的目的。

发明内容

[0006] 有鉴于此,本发明的目的在于提供一种插电式混合动力汽车传动系统的评价与参数优化方法,可以用于插电式混合动力汽车拓扑构型方案的设计,以提高整车燃油经济性。

[0007] 为达到上述目的,本发明提供如下技术方案:

[0008] 一种插电式混合动力汽车传动系统的评价与参数优化方法,该方法包括以下步骤:

[0009] 步骤S1:建立ICE模型、EM模型、传动系统模型、电池模型和电池容量衰退模型;

[0010] 步骤S2:基于传动系统模型,建立构型方案成本函数,包括离合器成本、固定连接杆成本和行星排成本;

[0011] 步骤S3:建立动力性能评估模型和燃油消耗评估模型及其优化目标函数;

[0012] 步骤S4:基于动态规划算法DP求解多目标优化问题的帕累托最优解,建立构型方案优选等级,得到最优的传动系统构型方案;

[0013] 步骤S5:基于粒子群算法POS对最优传动系统方案进行参数优化。

[0014] 可选的,所述步骤S1中,电池容量衰退模型的建立:

[0015] 以A123系统生产的 LiFePO_4 单体电池为研究对象,建立电池老化的半经验模型,容量衰退百分比为:

$$[0016] \quad Q_{loss,\%} = (a \cdot SOC + b) \cdot \exp\left(\frac{-E_a + \eta \cdot C_r}{R_g \cdot T_K}\right) \cdot (Ah)^z$$

[0017] 其中a和b为拟合系数, E_a 为活化能, C_r 为放电速率, η 为放电速率修正系数, R_g 为气体常数, T_K 为电池温度, Ah为Ah-吞吐量, z为幂律因子。

[0018] 为量化实际循环周期的老化效应, 定义强度系数 σ 为:

$$[0019] \quad \sigma(t) = \frac{Ah_{nom}}{Ah_{cyc}} = \frac{\int_0^{EoL} |I_{nom}(t)| dt}{\int_0^{EoL} |I(t)| dt}$$

[0020] 其中 Ah_{nom} 为 $SOC_{nom} = 0.35$, $C_{r,nom} = 2.5C$ 和 $T_{K,nom} = 298.15K$ 的实验条件下, 放电到寿命终止的总Ah-吞吐量, Ah_{cyc} 为实际循环条件下, 放电到寿命终止的总Ah-吞吐量; Ah_{nom} 与 Ah_{cyc} 分别定义为:

$$[0021] \quad Ah_{nom} = \left[\frac{Q_{cyc,EoL}}{(a \cdot SOC_{nom} + b) \cdot \exp\left(\frac{-E_a + \eta \cdot C_{r,nom}}{R_g \cdot T_{K,nom}}\right)} \right]^{\frac{1}{z}}$$

$$[0022] \quad Ah_{cyc} = \left[\frac{Q_{cyc,EoL}}{(a \cdot SOC + b) \cdot \exp\left(\frac{-E_a + \eta \cdot C_r}{R_g \cdot T_K}\right)} \right]^{\frac{1}{z}}$$

[0023] 其中, $Q_{cyc,EoL}$ 根据经验取值20%;

[0024] 为表征由于电池内部电荷交换产生的有效寿命衰减, 定义有效Ah-吞吐量为:

$$[0025] \quad Ah_{eff}(t) = \int_0^t \sigma(\tau) \cdot |I(\tau)| d\tau$$

[0026] $\min Ah_{eff}(t)$ 为最小化电池容量衰退目标函数。

[0027] 可选的, 所述步骤S2中, 构型方案成本函数的建立:

$$[0028] \quad J_{cost} = \alpha_1 \cdot clu_{cost} + \alpha_2 \cdot per_{cost} + \alpha_3 \cdot sets_{cost}$$

[0029] 其中, J_{cost} 为构型方案总成本, clu_{cost} 为离合器成本, per_{cost} 为固定连接杆成本, $sets_{cost}$ 为行星排成本, α_1 、 α_2 、 α_3 为价值权重系数。

[0030] 可选的, 所述步骤S3包括以下步骤:

[0031] S31: 确定传动系统状态转移方程如下:

$$[0032] \quad X(k+1) = f[X(k), U(k)] \quad k=0, 1, 2 \cdots N-1$$

[0033] 其中, $X(k)$ 与 $U(k)$ 分别为k阶段的状态变量和控制变量, f为状态转移函数;

[0034] S32: 建立动力性能评估模型:

[0035] 以加速时间来量化汽车动力性能, 建立如下式所示的加速时间成本函数 J_{acc} :

$$[0036] \quad J_{acc}(X(0)) = \phi_{acc}(X(N_{acc})) + \sum_{k=0}^{N_{acc}} \left(\frac{\Delta v}{a(X(k), U(k))} \right)$$

[0037] 上式为从初始状态 $X(0)$ 到终止状态 $X(N_{acc})$ 的加速时间,其中, $\phi_{acc}(X(N_{acc}))$ 为偏离终止约束惩罚项, Δv 为单位速度步长 1km/h , $a(X(k), U(k))$ 为 k 阶段的加速度;

[0038] S33:建立燃油消耗评估模型:

[0039] 燃油消耗评估模型的代价函数包括两部分:燃油消耗量与模式切换惩罚项;

[0040] 1) 燃油消耗量如下式所示:

$$[0041] \quad g_f = \sum_{k=0}^{N-1} f_f(\omega_e, T_e) \cdot \Delta t$$

[0042] 其中, g_f 为总燃油消耗量; ω_e 为发动机转速, T_e 为发动机转矩, $f_f(\cdot)$ 为燃油消耗率的插值函数, $\Delta t=1$;

[0043] 2) 模式切换惩罚项如下式所示:

$$[0044] \quad P_{shift}(k) = \sum_{k=0}^{N-1} \left(\begin{array}{l} \lambda(\beta_1 \cdot \frac{1}{2} I_e [\omega_e(k+1) - \omega_e(k)]^2 \\ + \beta_2 \cdot \frac{1}{2} I_{MG1} [\omega_{MG1}(k+1) - \omega_{MG1}(k)]^2 \\ + \beta_3 \cdot \frac{1}{2} I_{MG2} [\omega_{MG2}(k+1) - \omega_{MG2}(k)]^2 \end{array} \right) \quad \begin{cases} \lambda=0 & \text{无模式切换} \\ \lambda=1 & \text{存在模式切换} \end{cases}$$

[0045] 其中, λ 为模式切换的判断因子,模式切换惩罚项为模式切换前后各动力元件的动能损失, β_1 、 β_2 、 β_3 为各动力元件的动能变化权重系数;

[0046] 燃油消耗评估模型总代价函数如下式所示:

$$[0047] \quad J_{fuel} = g_f(k) + P_{shift}(k)$$

[0048] 可选的,步骤S4中,多目标优化问题的建立:

[0049] 综合考虑插电式混合动力汽车构型方案对燃油经济性、动力性、成本及动力电池寿命的影响,建立如下多目标优化函数:

$$[0050] \quad \begin{aligned} & J(P^*, U^*) = \arg \min(J) \\ & s.t. \begin{cases} X(k+1) = f[X(k), U(k)] & k = 0, 1, 2 \dots N-1 \\ P \in P_{all} \\ U \in U_{all} \end{cases} \end{aligned}$$

[0051] 其中, J 为多目标构成的目标向量, $J = [J_{fuel}, J_{acc}, J_{cost}, Ah_{eff}]^T$, P_{all} 为可行动力元件参数集, U_{all} 为可行系统控制策略集。

[0052] 可选的,所述步骤S5中,传动系统参数优化函数的建立:

$$[0053] \quad \text{fitness}(P, U^*) = \arg \min(J)$$

$$[0054] \quad s.t. \begin{cases} A \cdot P \leq b \\ A_{eq} \cdot P \leq b_{eq} \\ c(P) \leq 0 \\ c_{eq}(P) = 0 \\ P_{min} \leq P \leq P_{max} \end{cases}$$

[0055] 其中, A 和 A_{eq} 分别为线性不等式和线性等式矩阵, $c(\cdot)$ 和 $c_{eq}(\cdot)$ 分别为非线性不等式和非线性等式约束, P_{min} 和 P_{max} 为动力部件参数控制变量的边界约束。

[0056] 本发明的有益效果在于:将动态规划算法和粒子群算法相嵌套,在原有燃油经济性和动力性的基础上,充分考虑传动系统结构设计对动力电池循环寿命的影响,进行综合对目标优化,同时对传动系统参数进行优化,进一步提升插电式混合动力汽车的综合性能。

[0057] 本发明的其他优点、目标和特征在某种程度上将在随后的说明书中进行阐述,并且在某种程度上,基于对下文的考察研究对本领域技术人员而言将是显而易见的,或者可以从本发明的实践中得到教导。本发明的目标和其他优点可以通过下面的说明书来实现和获得。

附图说明

[0058] 为了使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合附图对本发明作优选的详细描述,其中:

[0059] 图1为本发明所述评价和参数优化方法的整体流程图;

[0060] 图2为多目标优化算法方案。

具体实施方式

[0061] 以下通过特定的具体实例说明本发明的实施方式,本领域技术人员可由本说明书所揭露的内容轻易地了解本发明的其他优点与功效。本发明还可以通过另外不同的具体实施方式加以实施或应用,本说明书中的各项细节也可以基于不同观点与应用,在没有背离本发明的精神下进行各种修饰或改变。需要说明的是,以下实施例中所提供的图示仅以示意方式说明本发明的基本构想,在不冲突的情况下,以下实施例及实施例中的特征可以相互组合。

[0062] 其中,附图仅用于示例性说明,表示的仅是示意图,而非实物图,不能理解为对本发明的限制;为了更好地说明本发明的实施例,附图某些部件会有省略、放大或缩小,并不代表实际产品的尺寸;对本领域技术人员来说,附图中某些公知结构及其说明可能省略是可以理解的。

[0063] 本发明实施例的附图中相同或相似的标号对应相同或相似的部件;在本发明的描述中,需要理解的是,若有术语“上”、“下”、“左”、“右”、“前”、“后”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此附图中描述位置关系的用语仅用于示例性说明,不能理解为对本发明的限制,对于本领域的普通技术人员而言,可以根据具体情况理解上述术语的具体含义。

[0064] 本发明所述的插电式混合动力汽车传动系统构型方案的评价与参数优化方法,参照图1,其具体包括以下步骤:

[0065] S1:以A123系统生产的LiFePO₄单体电池为研究对象,建立电池老化的半经验模型,其容量衰退百分比为:

$$[0066] \quad Q_{loss,\%} = (a \cdot SOC + b) \cdot \exp\left(\frac{-E_a + \eta \cdot C_r}{R_g \cdot T_K}\right) \cdot (Ah)^z$$

[0067] 其中a和b为拟合系数,E_a为活化能,C_r为放电速率,η为放电速率修正系数,R_g为气体常数,T_K为电池温度,Ah为Ah-吞吐量,z为幂律因子。

[0068] 为量化实际循环周期的老化效应,定义强度系数σ为:

$$[0069] \quad \sigma(t) = \frac{Ah_{nom}}{Ah_{cyc}} = \frac{\int_0^{EoL} |I_{nom}(t)| dt}{\int_0^{EoL} |I(t)| dt}$$

[0070] 其中Ah_{nom}为SOC_{nom}=0.35,C_{r,nom}=2.5C和T_{K,nom}=298.15K的实验条件下,放电到寿命终止的总Ah-吞吐量,Ah_{cyc}为实际循环条件下,放电到寿命终止的总Ah-吞吐量。Ah_{nom}与Ah_{cyc}分别定义为:

$$[0071] \quad Ah_{nom} = \left[\frac{Q_{cyc,EoL}}{(a \cdot SOC_{nom} + b) \cdot \exp\left(\frac{-E_a + \eta \cdot C_{r,nom}}{R_g \cdot T_{K,nom}}\right)} \right]^{\frac{1}{z}}$$

$$[0072] \quad Ah_{cyc} = \left[\frac{Q_{cyc,EoL}}{(a \cdot SOC + b) \cdot \exp\left(\frac{-E_a + \eta \cdot C_r}{R_g \cdot T_K}\right)} \right]^{\frac{1}{z}}$$

[0073] 其中,Q_{cyc,EoL}根据经验取值20%。

[0074] 为表征由于电池内部电荷交换产生的有效寿命衰减,定义有效Ah-吞吐量为:

$$[0075] \quad Ah_{eff}(t) = \int_0^t \sigma(\tau) \cdot |I(\tau)| d\tau$$

[0076] S2:建立构型方案成本函数如下:

$$[0077] \quad J_{cost} = \alpha_1 \cdot clu_{cost} + \alpha_2 \cdot per_{cost} + \alpha_3 \cdot sets_{cost}$$

[0078] 其中,J_{cost}为构型方案总成本,clu_{cost}为离合器成本,per_{cost}为固定连接杆成本,sets_{cost}为行星排成本,α₁、α₂、α₃为价值权重系数。

[0079] S3:建立整车性能评估模型,具体包括:

[0080] S31:确定传动系统状态转移方程如下:

$$[0081] \quad X(k+1) = f[X(k), U(k)] \quad k=0, 1, 2 \cdots N-1$$

[0082] 其中,X(k)与U(k)分别为k阶段的状态变量和控制变量,f为状态转移函数。

[0083] S32:建立动力性能评估模型:

[0084] 以加速时间来量化汽车动力性能,建立如下式所示的加速时间成本函数 J_{acc} :

$$[0085] \quad J_{acc}(X(0)) = \phi_{acc}(X(N_{acc})) + \sum_{k=0}^{N_{acc}} \left(\frac{\Delta v}{a(X(k), U(k))} \right)$$

[0086] 上式为从初始状态 $X(0)$ 到终止状态 $X(N_{acc})$ 的加速时间,其中, $\phi_{acc}(X(N_{acc}))$ 为偏离终止约束惩罚项, Δv 为单位速度步长 1km/h , $a(X(k), U(k))$ 为 k 阶段的加速度,可由如下式求解。

$$[0087] \quad a(X(k), U(k)) = \frac{dv}{dt} = \frac{F_v(X(k), U(k)) - (mgf \cos i + mg \sin i + 0.5 \rho_{air} C_D A_f v(k)^2)}{\delta m}$$

$$[0088] \quad F_v(X(k), U(k)) = T_{out}(X(k), U(k)) \cdot i_{ro} \div R_w$$

[0089] 其中, m 为汽车质量, g 为重力加速度, f 为滚动阻力, i 为坡度, ρ_{air} 为空气密度, C_D 空阻系数, A_f 迎风面积, $v(k)$ 为 k 阶段车速, δ 为整车等效转动惯量, $F_v(X(k), U(k))$ 为驱动力, $T_{out}(X(k), U(k))$ 为传动系统输出端转矩, i_{ro} 为主减速器传动比, R_w 为车轮旋转半径。

[0090] S33:建立燃油消耗评估模型:

[0091] 燃油消耗评估模型的代价函数应包括两部分:燃油消耗量与模式切换惩罚项。

[0092] 燃油消耗量如下式所示:

$$[0093] \quad g_f = \sum_{k=0}^{N-1} f_f(\omega_e, T_e) \cdot \Delta t$$

[0094] 其中, g_f 为总燃油消耗量; ω_e 为发动机转速, T_e 为发动机转矩, $f_f(\cdot)$ 为燃油消耗率的插值函数, $\Delta t=1$ 。

[0095] 模式切换惩罚项如下式所示:

$$[0096] \quad P_{shift}(k) = \sum_{k=0}^{N-1} \left(\begin{array}{l} \lambda(\beta_1 \cdot \frac{1}{2} I_e [\omega_e(k+1) - \omega_e(k)]^2 \\ + \beta_2 \cdot \frac{1}{2} I_{MG1} [\omega_{MG1}(k+1) - \omega_{MG1}(k)]^2 \\ + \beta_3 \cdot \frac{1}{2} I_{MG2} [\omega_{MG2}(k+1) - \omega_{MG2}(k)]^2 \end{array} \right) \quad \begin{cases} \lambda=0 & \text{无模式切换} \\ \lambda=1 & \text{存在模式切换} \end{cases}$$

[0097] 其中, λ 为模式切换的判断因子,模式切换惩罚项为模式切换前后各动力元件的动能损失, β_1 、 β_2 、 β_3 为各动力元件的动能变化权重系数。

[0098] 燃油消耗评估模型总代价函数如下式所示:

$$[0099] \quad J_{fuel} = g_f(k) + P_{shift}(k)$$

[0100] S4:综合考虑插电式混合动力汽车构型方案对燃油经济性、动力性、成本及动力电池寿命的影响,建立多目标优化函数如下:

$$[0101] \quad J(P^*, U^*) = \arg \min(J)$$

$$[0102] \quad s.t. \begin{cases} X(k+1) = f[X(k), U(k)] & k = 0, 1, 2 \dots N-1 \\ P \in P_{all} \\ U \in U_{all} \end{cases}$$

[0103] 其中, J 为多目标构成的目标向量, $J = [J_{fuel}, J_{acc}, J_{cost}, Ah_{eff}]^T$, P_{all} 为可行动力元

件参数集, U_{all} 为可行系统控制策略集。

[0104] 如图2算法方案所示,通过加权系数法处理该多目标问题,通过不同权系数组合方式,得到帕累托最优解集。

$$[0105] \quad \begin{cases} J = \omega_1 \cdot J_{fuel} + \omega_2 \cdot J_{acc} + \omega_3 \cdot J_{cost} + \omega_4 \cdot Ah_{eff} \\ \sum_{n=1}^4 \omega_n = 1 \\ \omega_n \in [0:0.1:1] \\ n \in [1, 2, 3, 4] \end{cases}$$

[0106] 其中, J 为多目标优化成本, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为燃油经济性、动力性、成本及动力电池寿命的权重系数。

[0107] 根据构型方案的设计要求,同时基于上述多目标优化问题的帕累托最优解集,生成构型方案优选等级,得到相对最优的构型方案。得到此构型方案的最优控制策略集 U^* 。

[0108] S5:基于最优控制策略 U^* 建立传动系统参数优化函数如下:

[0109] $fitness(P, U^*) = \arg \min(J)$

$$[0110] \quad s.t. \quad \begin{cases} A \cdot P \leq b \\ A_{eq} \cdot P \leq b_{eq} \\ c(P) \leq 0 \\ c_{eq}(P) = 0 \\ P_{min} \leq P \leq P_{max} \end{cases}$$

[0111] 其中, A 和 A_{eq} 分别为线性不等式和线性等式矩阵, $c(\cdot)$ 和 $c_{eq}(\cdot)$ 分别为非线性不等式和非线性等式约束, P_{min} 和 P_{max} 为动力部件参数控制变量的边界约束。

[0112] 1) 在可行动力元件参数集中随机生成初始可行解(粒子),其位置 θ 和移动速度 v ;

[0113] 2) 在第 q 代的第 s 个粒子的个体最优位置为 P_s , 全局最优位置为 G 。

$$[0114] \quad v_s^{q+1} = \phi v_s^q + \kappa_1 [\gamma_{1,s} (P_s - \mathcal{G}_s^q)] + \kappa_2 [\gamma_{2,s} (G - \mathcal{G}_s^q)]$$

$$[0115] \quad \mathcal{G}_s^{q+1} = \mathcal{G}_s^q + v_s^{q+1}$$

[0116] 其中, \mathcal{G}_s^q 和 v_s^q 分别为在第 q 代的第 s 个可行解的位置和速度, 种群由 m 个粒子组成, 即 $s = [0, 1, 2, \dots, m]$, P_s 和 G 分别为直到第 q 代时第 s 个粒子的最优位置和全部粒子的最优位置, $\gamma_{1,2} \in [0, 1]$ 为均匀分布随机值, $\kappa_{1,2}$ 为加速度常数, ϕ 为粒子产生一定动能的惯性。

[0117] 通过上述POS算法,对插电式混合动力汽车传动系统进行参数优化,实现提升汽车性能、降低构型方案成本与改善动力电池寿命的综合目标。

[0118] 最后说明的是,以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制,尽管参照较佳实施例对本发明进行了详细说明,本领域的普通技术人员应当理解,可以对本发明的技术方案进行修改或者等同替换,而不脱离本技术方案的宗旨和范围,其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

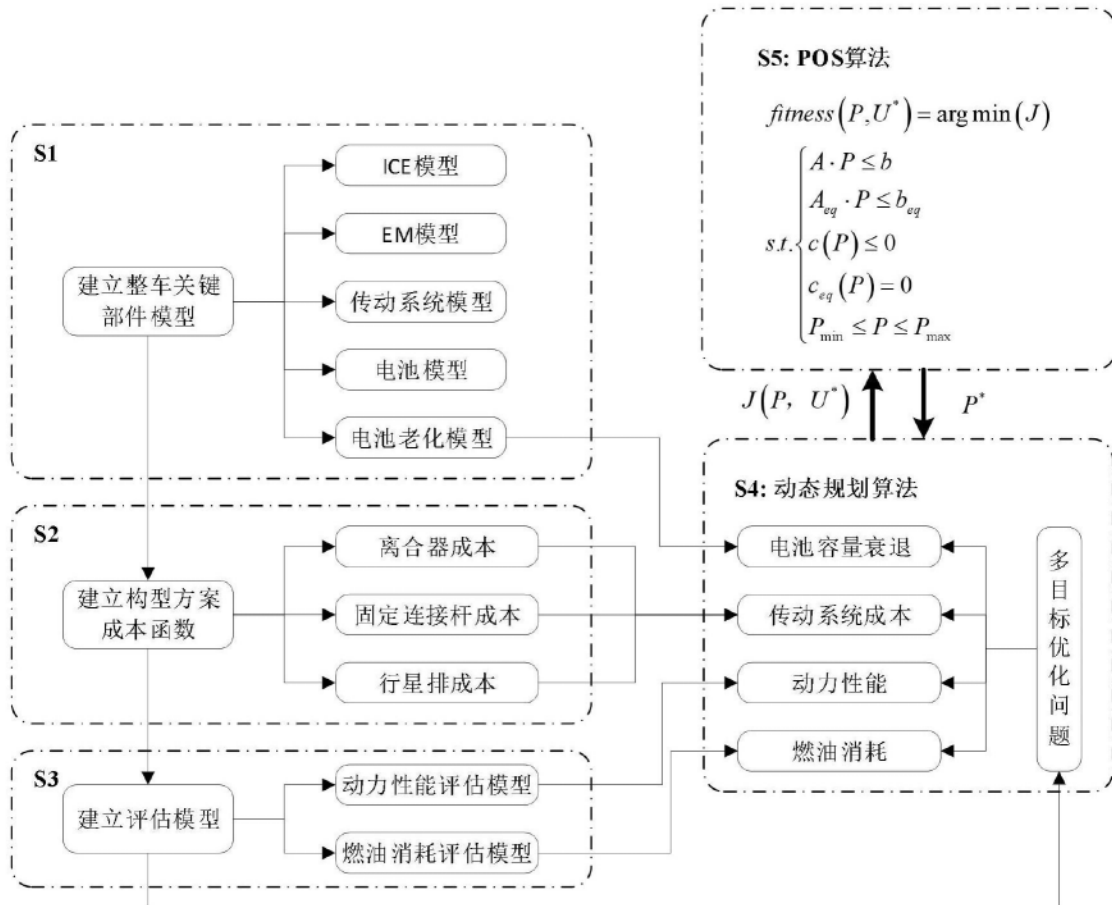


图1

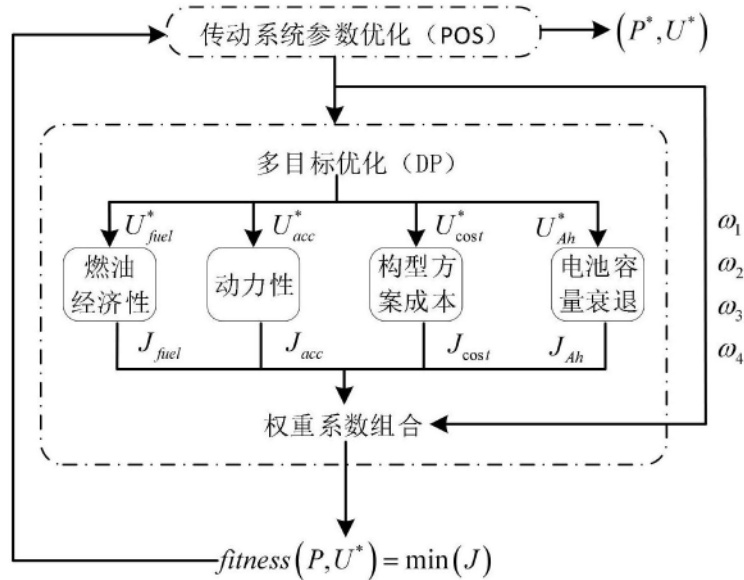


图2