



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106055830 B

(45)授权公告日 2019.01.25

(21)申请号 201610439260.8

(22)申请日 2016.06.20

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106055830 A

(43)申请公布日 2016.10.26

(73)专利权人 吉林大学

地址 130012 吉林省长春市前进大街2699号

(72)发明人 郭建华 初亮 刘翠 许楠

赵竟园 石大排 马玉哲 张树彬
刘初群 哈林骐

(74)专利代理机构 长春吉大专利代理有限责任公司
22201

代理人 齐安全 杜森垚

(51)Int.Cl.

G06F 17/50(2006.01)

(56)对比文件

CN 102785575 A,2012.11.21,

US 8560155 B2,2013.10.15,

CN 101492046 A,2009.07.29,

CN 102381314 A,2012.03.21,

CN 101602364 A,2009.12.16,

张玉盼.插电式混合动力汽车控制策略研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程技术II辑》.2016,全文.

审查员 姜朝霞

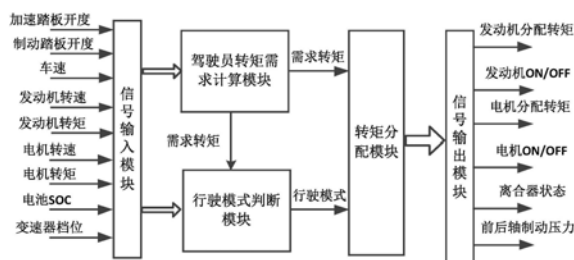
权利要求书4页 说明书11页 附图2页

(54)发明名称

基于动态规划的PHEV控制门限参数优化方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于动态规划的PHEV控制门限优化方法,首先基于行驶模式建立插电式混合动力汽车基于规则的逻辑门限值控制策略,门限值控制策略总体架构包括信号输入模块、信号输出模块、驾驶员转矩需求计算模块、行驶模式判断模块、转矩分配模块,提出PHEV行驶模式判别方法及不同行驶模式下的转矩分配方法;然后建立PHEV动态规划动力学仿真模型,在典型工况下,以最小油耗为优化目标,采用动态规划法求得发动机及电机的最优转矩分配点;最后依据动态规划法求得的发动机及电机的最优转矩分配点,基于PHEV行驶模式判别条件,提取门限值控制门限。本发明使采用RB控制策略的PHEV能够获得接近DP优化结果的理论最小油耗,提高其经济性。



1. 一种基于动态规划的PHEV控制门限参数优化方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一、基于行驶模式,建立插电式混合动力汽车基于规则的逻辑门限值控制策略,PHEV采用的基于规则的的门限值控制策略总体架构包括信号输入模块、信号输出模块、驾驶员转矩需求计算模块、行驶模式判断模块、转矩分配模块,提出PHEV行驶模式判别方法及不同行驶模式下的转矩分配方法;

具体包括以下步骤:

1.1) 整车控制器从CAN线上接收整车控制所需的车辆状态信号,包括:加速踏板开度 α_a 、制动踏板开度 α_b 、车速 v_h 、发动机转速 n_e 、发动机转矩 T_e 、电机转速 n_m 、电机转矩 T_m 、电池SOC、变速器档位 n_g ;经所述信号输入模块进行异点剔除后,传递给后续模块;

1.2) 所述驾驶员转矩需求模块计算驾驶员驱动需求转矩和制动需求转矩;

驱动需求转矩 T_{d_req} 为:

$$T_{d_req} = T_{v_req}(v_h) \cdot \alpha_a / i_g$$

式中, T_{v_req} 为合成转矩,其为车速 v_h 的函数,依据发动机和电机外特性合成得到,N.m;

i_g 为变速器速比;

需求制动转矩 T_{b_req} 为:

$$T_{b_req} = K_b \cdot \alpha_b$$

式中, K_b 为制动因数;

1.3) 所述行驶模式判断模块依据控制门限和车辆状态参数按照规则判断PHEV的行驶模式,包括驱动模式、制动模式、停车模式三种主模式;

1.4) 所述转矩分配模块计算不同模式下的发动机及电机转矩;

步骤二、建立PHEV动态规划动力学仿真模型,在典型工况下,以最小油耗为优化目标,采用动态规划法求得发动机及电机的最优转矩分配点;

步骤三、依据所述步骤二动态规划法求得的发动机及电机的最优转矩分配点,基于所述步骤一提出的PHEV行驶模式判别条件,提取门限值控制门限。

2. 如权利要求1所述的一种基于动态规划的PHEV控制门限参数优化方法,其特征在于,所述步骤1.3) 中停车模式、驱动模式和制动模式三种主模式的判断条件为:

1.3.1) 驱动模式: $\alpha_a \geq \alpha_{a_min}$ & $\alpha_b = 0$, 其中, α_{a_min} 为最小加速踏板开度门限;

1.3.2) 制动模式: $\alpha_a \geq 0$ & $\alpha_b = \alpha_{b_min}$, 其中, α_{b_min} 为最小制动踏板开度门限;

1.3.3) 停车模式: $\alpha_a \geq 0$ & $\alpha_b = 0$ & $v_h < v_{h_min}$, 其中, v_{h_min} 为最小停车车速门限。

3. 如权利要求2所述的一种基于动态规划的PHEV控制门限参数优化方法,其特征在于,所述步骤1.3.1) 驱动模式包括以下子模式:

1.3.1.1) 纯电动模式:当 $n_e \leq n_{idle}$ & $T_{d_req} \leq T_{d_EV}$ & $SOC \geq SOC_{min}$ 时,进入纯电动模式,其中, n_{idle} 为发动机怠速转速; T_{d_EV} 为纯电动最高转矩门限; SOC_{min} 为CD模式最小允许SOC;

1.3.1.2) 发动机驱动模式:当 $n_e > n_{idle}$ & $T_{d_EV} < T_{d_req} \leq T_{d_EN}$ 时,进入发动机驱动模式,其中, T_{d_EN} 为发动机驱动最高转矩门限;

发动机驱动模式中,又根据SOC的状态分为纯发动机驱动及行车充电两种子模式:

当 $SOC > SOC_{chr}$ 时,发动机仅驱动车辆;

当 $SOC \leq SOC_{chr}$ 时,发动机不仅驱动车辆还需要带动电机给电池充电,其中, SOC_{chr} 为行车充电最小SOC;

1.3.1.3) 联合驱动模式: $T_{d_req} > T_{d_EN} \& SOC > SOC_{min}$, 在联合启动模式下, 发动机和电机联合驱动车辆行驶;

需要确定并优化的门限为 T_{d_EV} 和 T_{d_EN} , 一般 $T_{d_EV} < T_{d_EN}$, 且均为发动机转速 n_e 的非线性函数。

4. 如权利要求1所述的一种基于动态规划的PHEV控制门限参数优化方法, 其特征在于, 所述步骤1.4) 中驱动模式下发动机及电机转矩计算方法为:

1.4.1) 纯电动模式:

$$\begin{cases} T_m = T_{d_req} \\ T_e = 0 \end{cases}$$

1.4.2) 纯发动机驱动模式:

$$\begin{cases} T_m = 0 \\ T_e = T_{d_req} \end{cases}$$

1.4.3) 行车发电模式:

$$\begin{cases} T_m = T_{d_EN} - T_{d_req} & T_m < 0 \\ T_e = T_{d_EN} \end{cases}$$

1.4.4) 联合驱动模式:

$$\begin{cases} T_m = T_{d_req} - T_{d_EN} & T_m > 0 \\ T_e = T_{d_EN} \end{cases}$$

式中, T_m 为电机分配转矩; T_e 为发动机分配转矩。

5. 如权利要求1所述的一种基于动态规划的PHEV控制门限参数优化方法, 其特征在于, 所述步骤二具体包括以下过程:

发动机转矩和电机转矩可表示为:

$$\begin{cases} T_e = (1 - \mu_k) T_d \\ T_m = \mu_k T_d \end{cases}$$

式中, μ_k 为转矩比例系数, $\mu_k = T_m / T_d$;

T_d 为动态规划算法中的驾驶员需求转矩:

$$T_d = T_w / (\eta_t \cdot i_g \cdot i_0)$$

式中, η_t 为传动系统效率; i_g 为变速器速比; i_0 为主减速器速比; T_w 为车轮驱动转矩:

$$T_w = [mgf_r + \frac{1}{2} C_D \rho_d A V_a^2 + \delta m \frac{dV_a}{dt}] \cdot r$$

式中, m 为整车质量, kg; g 为重力加速度, $9.8 \text{ m}^2/\text{s}$; f_r 为滚动阻力系数; C_D 为风阻系数; ρ_d 为空气密度, kg/m^3 ; A 为迎风面积, m^2 ; δ 为旋转质量换算系数; V_a 为车速; r 为车轮滚动半径;

电机功率 P_m 由下式计算:

$$P_m = \frac{T_m \cdot \omega_m}{\eta_m(\omega_m, T_m)}$$

式中, η_m 为电机效率, 依据电机转速查询电机效率map图得到;

电池电流 I_b 由下式计算:

$$I_b = \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4R_i P_m}}{2R_i}$$

式中, U_{oc} 为电池开路电压, V; R_i 为电池内阻, Ω ;

状态变量SOC可由以下差分方程得到:

$$SOC_{k+1} = \frac{\eta_m I_b}{3600 Q_0} \Delta t + SOC_k$$

式中, Δt 为仿真时间步长; Q_0 为电池总容量, Ah;

约束条件如下:

$$\begin{cases} SOC_{\min} < SOC_k < SOC_{\max} \\ 0 < T_e(k) < T_{e_max} \\ 0 < |T_m(k)| < T_{m_max} \\ 0 < n_e(k) < n_{e_max} \\ 0 < n_m(k) < n_{m_max} \end{cases}$$

动态规划优化的目标为总油耗量J最小, 即:

$$\min J = \min \sum_{k=0}^{N-1} m_f(n_e(k), T_e(k), k)$$

式中, m_f 为单位时间内的燃油消耗率, g/kW.h, 由发动机转速和转矩查燃油消耗率特性表得到。

6. 如权利要求1所述的一种基于动态规划的PHEV控制门限参数优化方法, 其特征在于, 所述步骤三包括以下步骤:

3.1) 建立PHEV动态规划算法仿真模型: 将所述步骤二建立的PHEV动态规划动力学仿真模型采用Matlab工程计算软件依据Bellman算法编制成PHEV动态规划计算机仿真程序;

3.2) 选取典型标准工况作为仿真工况进行PHEV动态规划算法动力学仿真;

3.3) 提取发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EN} ;

3.4) 提取纯电动最高转矩门限 T_{d_EV} 。

7. 如权利要求6所述的一种基于动态规划的PHEV控制门限参数优化方法, 其特征在于, 所述步骤3.3) 提取发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EN} 包括以下过程:

3.3.1) 提取动态规划仿真中联合驱动模式下的发动机工作点;

PHEV门限值策略进入联合驱动的条件是: $T_{d_req} > T_{d_EN} \& SOC > SOC_{\min}$, 此时 $T_e = T_{d_EN}$;

在动态规划仿真结果中, 联合驱动模式下的发动机工作点 $T_{e_boost_i}$ 符合以下条件:

$$\begin{cases} SOC > SOC_{\min} \\ T_m > 0 \\ 0.7 \times T_{e_max} < T_{e_boost_i} < T_{e_max} \end{cases}$$

其中, T_{e_max} 为发动机最大转矩值, N.m;

在动态规划仿真得到的发动机工作点中, 提取符合上式的发动机工作点, 即为联合驱动模式下的发动机工作点 $T_{e_boost_i}$;

3.3.2) 在发动机怠速 n_{idle} 与最高转速 n_{e_max} 范围内, 等间隔选取发动机转速点;

3.3.3) 选取某转速点 n_{e_i} 在其某领域范围内的联合驱动模式下的发动机工作点 $T_{e_boost_i}$,求取这些工作点的均值 $T_{d_EN}(n_{e_i})$:

$$T_{d_EN}(n_{e_i}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{d_boost_i}$$

将 $T_{d_EN}(n_{e_i})$ 值作为该转速点 n_{e_i} 的发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EN} ;

重复本步骤,计算其它转速点的 T_{d_EN} ,得到离散的发动机驱动最高转矩门限;

3.3.4) 采用样条插值方法,对所述步骤3.3.3)中得到的离散门限进行平滑处理,得到发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EN} 。

8. 如权利要求6所述的一种基于动态规划的PHEV控制门限参数优化方法,其特征在于,所述步骤3.4)提取纯电动最高转矩门限 T_{d_EV} 的过程如下:

3.4.1) PHEV逻辑门限值策略进入纯电驱动的条件是:

$n_e \leq n_{idle} \& T_{d_req} \leq T_{d_EV} \& SOC \geq SOC_{min}$,在纯电驱动模式下各转速点电机工作点的最大值即为最高转矩门限 T_{d_EV} ;

在动态规划仿真结果中,先提取纯电驱动的电机工作点 $T_{m_ev_i}$ 满足以下条件:

$$\begin{cases} SOC > SOC_{min} \\ 0 < T_m < 0.7 \times T_{e_max} \\ T_e = 0 \end{cases}$$

在动态规划仿真得到的电机工作点中,提取满足上式的电机工作点,即为纯电机驱动电机工作点 $T_{m_ev_i}$;

3.4.2) 在发动机怠速 n_{idle} 与最高转速 n_{e_max} 范围内,等间隔选取发动机转速点;

3.4.3) 选取某转速点 n_{e_i} 在其领域范围内的纯电驱动的电机工作点 $T_{m_ev_i}$,对选取工作点依据转矩值进行从大到小排序,选取转矩值前N个点 $T_{m_ev_N}$:

$$T_{d_EV}(n_{e_i}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{m_ev_N} \quad N = 5$$

将 $T_{d_EV}(n_{e_i})$ 值作为该转速点 n_{e_i} 的发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EV} ;

重复本步骤,计算其它转速点的 T_{d_EV} ,得到离散的纯电动最高转矩门限;

3.4.4) 采用样条差值方法,对所述步骤3.4.3)中得到的离散门限进行平滑处理,得到发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EV} 。

基于动态规划的PHEV控制门限参数优化方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种插电式混合动力汽车的控制门限参数优化方法,尤其涉及一种基于动态规划的(Dynamic Programming,DP)的插电式混合动力汽车的控制门限参数优化方法,属于新能源汽车控制技术领域。

背景技术

[0002] 插电式混合动力汽车(Plug-in Hybrid Electric Vehicle,PHEV)具有较大容量的动力电池,并能够从外部电网为电池充电。当电池电量(SOC)充足时,PHEV可以主要依靠电机驱动车辆,即采用电量消耗模式(Charge Depleting,CD)行驶;当SOC下降到最小许可值(SOC_{min})时,可以采用电量维持模式(Charge Sustaining,CS),此时,PHEV相当于传统的混合动力汽车(Hybrid Electric Vehicle,HEV)。因此,PHEV兼具了电动汽车和混合动力汽车的优点,具有续驶里程长,油耗低,排放少等特点,非常适合我国的国情,是我国新能源汽车重点发展的车型之一。

[0003] 插电式混合动力汽车能量管理策略是PHEV设计的关键问题,目前,实际运行的PHEV多采用基于规则的门限值整车能量管理策略(Rule-based control strategy,RB)。该策略基于启发式的编程思想,依据车速、SOC以及驾驶员功率需求等判断PHEV的行驶模式,当上述状态变量达到某控制门限值时,PHEV进行模式切换,并依据不同模式控制动力系统部件的运行状态及分配转矩。该策略计算量小,实时性好,易于编程实现,因此,几乎所有商业化的PHEV均采用此类控制方法。基于规则的PHEV能量管理策略的控制门限是基于工程经验和试验数据进行设置和调整的,一般是在标准循环工况(如NEDC、FTP75等),以油耗最小为目标进行调整。但是由于该策略的控制门限一般有多个,且其与油耗之间的关系是非线性的,工程上需要大量的试验才能找到较优的控制门限值。但该方法耗时长,所确定的控制门限也往往不是最优的。

发明内容

[0004] 为了解决现有技术PHEV逻辑门限值控制中的控制门限不易确定和优化的问题,本发明提供一种基于动态规划(Dynamic Programming,DP)的PHEV控制门限优化方法。该方法的主要流程是:建立PHEV的动力学仿真模型,在典型工况下,以最小油耗为优化目标,采用动态规划法求得发动机、电机最优转矩分配点;以PHEV行驶模式特征为约束条件,提出门限提取方法,提取控制门限。本发明使采用RB控制策略的PHEV能够获得接近DP优化结果的理论最小油耗,提高其经济性。

[0005] 本发明的目的是通过以下方案实现的:

[0006] 一种基于动态规划的PHEV控制门限参数优化方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤一、基于行驶模式,建立插电式混合动力汽车基于规则的逻辑门限值控制策略,PHEV采用的基于规则的门限值控制策略总体架构包括信号输入模块、信号输出模块、驾驶员转矩需求计算模块、行驶模式判断模块、转矩分配模块,提出PHEV行驶模式判别方法及

不同行驶模式下的转矩分配方法；

[0008] 步骤二、建立PHEV动态规划动力学仿真模型，在典型工况下，以最小油耗为优化目标，采用动态规划法求得发动机及电机的最优转矩分配点；

[0009] 步骤三、依据所述步骤二动态规划法求得的发动机及电机的最优转矩分配点，基于所述步骤一提出的PHEV行驶模式判别条件，提取门限值控制门限。

[0010] 进一步地，所述步骤一包括以下步骤：

[0011] 1.1) 整车控制器从CAN线上接收整车控制所需的车辆状态信号，包括：加速踏板开度 α_a 、制动踏板开度 α_b 、车速 v_h 、发动机转速 n_e 、发动机转矩 T_e 、电机转速 n_m 、电机转矩 T_m 、电池SOC、变速器档位 n_g ；经所述信号输入模块进行异点剔除后，传递给后续模块；

[0012] 1.2) 所述驾驶员转矩需求模块计算驾驶员驱动需求转矩和制动需求转矩；

[0013] 驱动需求转矩 T_{d_req} 为：

[0014] $T_{d_req} = T_{v_req}(v_h) \cdot \alpha_a / i_g$

[0015] 式中， T_{v_req} 为合成转矩，其为车速 v_h 的函数，依据发动机和电机外特性合成得到，N.m；

[0016] i_g 为变速器速比；

[0017] 需求制动转矩 T_{b_req} 为：

[0018] $T_{b_req} = K_b \cdot \alpha_b$

[0019] 式中， K_b 为制动因数；

[0020] 1.3) 所述行驶模式判断模块依据控制门限和车辆状态参数按照规则判断PHEV的行驶模式，包括驱动模式、制动模式、停车模式三种主模式；

[0021] 1.4) 所述转矩分配模块计算不同模式下的发动机及电机转矩。

[0022] 进一步地，所述步骤1.3)中停车模式、驱动模式和制动模式三种主模式的判断条件为：

[0023] 1.3.1) 驱动模式： $\alpha_a \geq \alpha_{a_min} \& \alpha_b = 0$ ，其中， α_{a_min} 为最小加速踏板开度门限；

[0024] 1.3.2) 制动模式： $\alpha_a \geq 0 \& \alpha_b = \alpha_{b_min}$ ，其中， α_{b_min} 为最小制动踏板开度门限；

[0025] 1.3.3) 停车模式： $\alpha_a \geq 0 \& \alpha_b = 0 \& v_h < v_{h_min}$ ，其中， v_{h_min} 为最小停车车速门限。

[0026] 进一步地，所述步骤1.3.1)驱动模式包括以下子模式：

[0027] 1.3.1.1) 纯电动模式：当 $n_e \leq n_{idle} \& T_{d_req} \leq T_{d_EV} \& SOC \geq SOC_{min}$ 时，进入纯电动模式，其中， n_{idle} 为发动机怠速转速； T_{d_EV} 为纯电动最高转矩门限； SOC_{min} 为CD模式最小允许SOC；

[0028] 1.3.1.2) 发动机驱动模式：当 $n_e > n_{idle} \& T_{d_EV} < T_{d_req} \leq T_{d_EN}$ 时，进入发动机驱动模式，其中， T_{d_EN} 为发动机驱动最高转矩门限；

[0029] 发动机驱动模式中，又根据SOC的状态分为纯发动机驱动及行车充电两种子模式：

[0030] 当 $SOC > SOC_{chr}$ 时，发动机仅驱动车辆；

[0031] 当 $SOC \leq SOC_{chr}$ 时，发动机不仅驱动车辆还需要带动电机给电池充电，其中， SOC_{chr} 为行车充电最小SOC；

[0032] 1.3.1.3) 联合驱动模式： $T_{d_req} > T_{d_EN} \& SOC > SOC_{min}$ ，在联合启动模式下，发动机和电机联合驱动车辆行驶；

[0033] 需要确定并优化的门限为 T_{d_EV} 和 T_{d_EN} ，一般 $T_{d_EV} < T_{d_EN}$ ，且均为发动机转速 n_e 的非线性函数。

[0034] 进一步地,所述步骤1.4)中驱动模式下发动机及电机转矩计算方法为:

[0035] 1.4.1) 纯电动模式:

$$[0036] \quad \begin{cases} T_m = T_{d_req} \\ T_e = 0 \end{cases}$$

[0037] 1.4.2) 纯发动机驱动模式:

$$[0038] \quad \begin{cases} T_m = 0 \\ T_e = T_{d_req} \end{cases}$$

[0039] 1.4.3) 行车发电模式:

$$[0040] \quad \begin{cases} T_m = T_{d_EN} - T_{d_req} & T_m < 0 \\ T_e = T_{d_EN} \end{cases}$$

[0041] 1.4.4) 联合驱动模式:

$$[0042] \quad \begin{cases} T_m = T_{d_req} - T_{d_EN} & T_m > 0 \\ T_e = T_{d_EN} \end{cases}$$

[0043] 式中, T_m 为电机分配转矩; T_e 为发动机分配转矩。

[0044] 进一步地,所述步骤二具体包括以下过程:

[0045] 发动机转矩和电机转矩可表示为:

$$[0046] \quad \begin{cases} T_e = (1 - \mu_k) T_d \\ T_m = \mu_k T_d \end{cases}$$

[0047] 式中, μ_k 为转矩比例系数, $\mu_k = T_m / T_d$; T_d 为动态规划算法中的驾驶员需求转矩:

$$[0048] \quad T_d = T_w / (\eta_t \cdot i_g \cdot i_o)$$

[0049] 式中, η_t 为传动系统效率; i_g 为变速器速比; i_o 为主减速器速比; T_w 为车轮驱动转矩:

$$[0050] \quad T_w = [mgf_r + \frac{1}{2} C_D \rho_d A V_a^2 + \delta m \frac{dV_a}{dt}] \cdot r$$

[0051] 式中, m 为整车质量,kg; g 为重力加速度,9.8m²/s; f_r 为滚动阻力系数; C_D 为风阻系数; ρ_d 为空气密度,kg/m³; A 为迎风面积,m²; δ 为旋转质量换算系数; V_a 为车速; r 为车轮滚动半径;

[0052] 电机功率 P_m 由下式计算:

$$[0053] \quad P_m = \frac{T_m \cdot \omega_m}{\eta_m(\omega_m, T_m)}$$

[0054] 式中, η_m 为电机效率,依据电机转速查询电机效率map图得到;

[0055] 电池电流 I_b 由下式计算:

$$[0056] \quad I_b = \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4R_i P_m}}{2R_i}$$

[0057] 式中, U_{oc} 为电池开路电压,V; R_i 为电池内阻,Ω;

[0058] 状态变量SOC可由以下差分方程得到:

[0059]
$$SOC_{k+1} = \frac{\eta_m I_b}{3600 Q_0} \Delta t + SOC_k$$

[0060] 式中, Δt 为仿真时间步长; Q_0 为电池总容量, Ah;

[0061] 约束条件如下:

[0062]
$$\begin{cases} SOC_{\min} < SOC_k < SOC_{\max} \\ 0 < T_e(k) < T_{e_max} \\ 0 < |T_m(k)| < T_{m_max} \\ 0 < n_e(k) < n_{e_max} \\ 0 < n_m(k) < n_{m_max} \end{cases}$$

[0063] DP优化的目标为总油耗量J最小, 即:

[0064]
$$\min J = \min \sum_{k=0}^{N-1} m_f(n_e(k), T_e(k), k)$$

[0065] 式中, m_f 为单位时间内的燃油消耗率, g/kW.h, 由发动机转速和转矩查燃油消耗率特性表得到。

[0066] 进一步地, 所述步骤三包括以下步骤:

[0067] 3.1) 建立PHEV动态规划算法仿真模型: 将所述步骤二建立的PHEV动态规划动力学仿真模型采用Matlab工程计算软件依据Bellman算法编制成PHEV动态规划计算机仿真程序;

[0068] 3.2) 选取典型标准工况作为仿真工况进行PHEV动态规划算法动力学仿真;

[0069] 3.3) 提取发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EN} ;

[0070] 3.4) 提取纯电动最高转矩门限 T_{d_EV} 。

[0071] 进一步地, 所述步骤3.3) 提取发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EN} 包括以下过程:

[0072] 3.3.1) 提取动态规划仿真中联合驱动模式下的发动机工作点;

[0073] PHEV门限值策略进入联合驱动的条件是: $T_{d_req} > T_{d_EN} \& SOC > SOC_{\min}$, 此时 $T_e = T_{d_EN}$;

[0074] 在动态规划仿真结果中, 联合驱动模式下的发动机工作点 $T_{e_boost_i}$ 符合以下条件:

[0075]
$$\begin{cases} SOC > SOC_{\min} \\ T_m > 0 \\ 0.7 \times T_{e_max} < T_{e_boost_i} < T_{e_max} \end{cases}$$

[0076] 其中, T_{e_max} 为发动机最大转矩值, N.m;

[0077] 在动态规划仿真得到的发动机工作点中, 提取符合上式的发动机工作点, 即为联合驱动模式下的发动机工作点 $T_{e_boost_i}$;

[0078] 3.3.2) 在发动机怠速 n_{idle} 与最高转速 n_{e_max} 范围内, 等间隔选取发动机转速点;

[0079] 3.3.3) 选取某转速点 n_{e_i} 在其某领域范围内的联合驱动模式下的发动机工作点 $T_{e_boost_i}$, 求取这些工作点的均值 $T_{d_EN}(n_{e_i})$:

[0080]
$$T_{d_EN}(n_{e_i}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{d_boost_i}$$

[0081] 将 $T_{d_EN}(n_{e_i})$ 值作为该转速点 n_{e_i} 的发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EN} ;

- [0082] 重复本步骤,计算其它转速点的 T_{d_EN} ,得到离散的发动机驱动最高转矩门限;
- [0083] 3.3.4) 采用样条插值方法,对所述步骤3.3.3)中得到的离散门限进行平滑处理,得到发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EV} 。
- [0084] 进一步地,所述步骤3.4)提取纯电动最高转矩门限 T_{d_EV} 的过程如下:
- [0085] 3.4.1) PHEV逻辑门限值策略进入纯电驱动的条件是:
- [0086] $n_e \leq n_{idle} \& T_{d_req} \leq T_{d_EV} \& SOC \geq SOC_{min}$,在纯电驱动模式下各转速点电机工作点的最大值即为最高转矩门限 T_{d_EV} ;
- [0087] 在动态规划仿真结果中,先提取纯电驱动的电机工作点 $T_{m_ev_i}$ 满足以下条件:
- [0088]
$$\begin{cases} SOC > SOC_{min} \\ 0 < T_m < 0.7 \times T_{e_max} \\ T_e = 0 \end{cases}$$
- [0089] 在动态规划仿真得到的电机工作点中,提取满足上式的电机工作点,即为纯电机驱动电机工作点 $T_{m_ev_i}$;
- [0090] 3.4.2) 在发动机怠速 n_{idle} 与最高转速 n_{e_max} 范围内,等间隔选取发动机转速点;
- [0091] 3.4.3) 选取某转速点 n_{e_i} 在其领域范围内的纯电驱动的电机工作点 $T_{m_ev_i}$,对选取工作点依据转矩值进行从大到小排序,选取转矩值前N个点 $T_{m_ev_N}$:
- [0092]
$$T_{d_EV}(n_{e_i}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{m_ev_N} \quad N = 5$$
- [0093] 将 $T_{d_EV}(n_{e_i})$ 值作为该转速点 n_{e_i} 的发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EV} ;
- [0094] 重复本步骤,计算其它转速点的 T_{d_EN} ,得到离散的纯电动最高转矩门限;
- [0095] 3.4.4) 采用样条差值方法,对所述步骤3.4.3)中得到的离散门限进行平滑处理,得到发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EV} 。
- [0096] 本发明的有益效果:
- [0097] 本发明解决了PHEV逻辑门限值控制中的控制门限不易确定和优化的问题,依据本方法获取的控制门限能够使PHEV的油耗接近动态规划求得的理论最小油耗,提高了PHEV的经济性,为PHEV控制系统设计提供了有益的参考。

附图说明

- [0098] 本发明的具体实施方式将在下文通过结合应用示例进行详细阐述。
- [0099] 图1是并联PHEV系统硬件结构;
- [0100] 图2是PHEV逻辑门限值控制策略构架;
- [0101] 图3是PHEV控制门限提取方法原理;
- [0102] 图4是3b类车辆WLTC循环车速时间历程。

具体实施方式

- [0103] 下面结合附图对本发明做进一步说明。以下实例将有助于本领域的技术人员进一步理解本发明,但不以任何形式限制本发明。
- [0104] 动态规划(DP)是一种全局优化方法,该方法采用Bellman原理,将整体动态规划问

题分解成一系列的最小化子问题逐步求解,所求得解不仅局部最优,并且是全局最优的。因此,从理论上说,按照动态规划优化的计算结果进行转矩分配,PHEV能获得理论最小油耗。但是,DP需要在已知工况下才能逆序求解优化问题,并且计算量非常巨大,几乎无法用于实际的PHEV控制。本文将动态规划法与门限值控制方法相结合,依据动态规划获得的发动机、电机最优转矩分配点,以PHEV行驶模式特征为约束条件,提取控制门限,解决PHEV控制门限值不易确定和优化的问题,使PHEV在实际的RB控制中能够获得接近理论最小的油耗,提高其经济性。

[0105] 图1为某并联插电式混合动力汽车硬件结构。需要声明的是:本专利所述及的方法适用于任何构型的PHEV,不仅限于本例中的PHEV构型。本例中的并联PHEV采用同轴并联结构。其中,电机同轴安装在自动变速器的输入轴上,电池可由外接充电器充电。PHEV控制系统包括:油门踏板(含踏板开度传感器)、制动踏板(含踏板开度传感器)、整车控制器(HCU)、发动机控制器(ECU)、电机控制器(MCU)、自动变速器控制器(TCU)、电池管理单元(BMU),各部件之间通过CAN总线交互信息。

[0106] 1.建立插电式混合动力汽车基于规则的逻辑门限值控制策略:

[0107] 基于行驶模式,建立插电式混合动力汽车逻辑门限值控制策略,提出该策略架构,提出PHEV行驶模式判别方法及转矩分配方法。

[0108] 图2为本例PHEV采用的基于规则的逻辑门限值控制策略总体架构(只包含能量管理部分),包括信号输入模块、信号输出模块、驾驶员转矩需求计算模块、行驶模式判断模块、转矩分配模块等。该门限值控制策略为“混合驱动”(Blended)型,即在电量消耗模式(CD)下,当控制参数达到相应门限值时,发动机将参与驱动车辆。该策略各模块的功能及计算步骤如下:

[0109] 1.1车辆上电并通过自检后,整车控制器(HCU)从CAN线上接收整车控制所需的车辆状态信号。包括:加速踏板开度 α_a (%)、制动踏板开度 α_b (%)、车速 v_h (km/h)、发动机转速 n_e (rpm)、发动机转矩 T_e (N.m)、电机转速 n_m (rpm)、电机转矩 T_m (N.m)、电池SOC、变速器档位 n_g 等。经信号输入模块进行异点剔除后,传递给后续模块。

[0110] 1.2计算驾驶员需求转矩。由驾驶员转矩需求模块根据加速踏板开度 α_a (%)、制动踏板开度 α_b 等计算驾驶员驱动需求转矩和制动需求转矩。驱动需求转矩 T_{d_req} 为:

$$[0111] \quad T_{d_req} = T_{v_req}(v_h) \cdot \alpha_a / i_g \quad (1)$$

[0112] 其中, T_{v_req} 为合成转矩,其为车速 v_h 的函数,依据发动机和电机外特性合成得到,单位N.m, i_g 为变速器速比。

[0113] 需求制动转矩 T_{b_req} 为:

$$[0114] \quad T_{b_req} = K_b \cdot \alpha_b \quad (2)$$

[0115] 其中, K_b 为制动因数。

[0116] 1.3行驶模式判断。由行驶模式判断模块依据控制门限和车辆状态参数按照规则判断PHEV的行驶模式,本例中PHEV的行驶模式及动力系统部件的工作状态如表1所示。本例中的行驶模式分成停车模式、驱动模式和制动模式三种主模式,每类主模式下又分为若干子模式。

[0117] 表1PHEV行驶模式

[0118]

主模式	子模式	发动机状态	电机状态	离合器状态
停车模式 (Stop)	完全停车模式	关闭	关闭	松开
	停车发电模式	开启	开启/发电机模式	结合
驱动模式 (Drive)	纯电动模式	关闭	开启/电机模式	松开
	纯发动机驱动模式	开启	关闭	结合
	行车充电模式	开启	开启/发电机模式	结合
	联合驱动模式	开启	开启/电机模式	结合
制动模式 (Brake)	机械制动模式	关闭	关闭	关闭
	再生制动模式	关闭	开启/发电机模式	关闭

[0119] 主模式的判断条件如下：

[0120] 1.3.1驱动模式： $\alpha_a \geq \alpha_{a_min} \& \alpha_b = 0$ ，其中， α_{a_min} 为最小加速踏板开度门限，本例中取为1%。

[0121] 1.3.2制动模式： $\alpha_a \geq 0 \& \alpha_b = \alpha_{b_min}$ ，其中， α_{b_min} 为最小制动踏板开度门限，本例中取为1%。

[0122] 1.3.3停车模式： $\alpha_a \geq 0 \& \alpha_b = 0 \& v_h < v_{h_min}$ ，其中， v_{h_min} 为最小停车车速门限，本例中取为0.5km/h。

[0123] 其中，制动模式中的再生制动模式一般由再生制动控制器负责制动转矩的计算，本例不对其控制门限进行优化；在停车模式中的停车发电模式，一般将发动机控制在最高效率点附近，本例也不对该模式门限进行优化。本例重点优化驱动模式的控制门限，因此仅列出驱动模式的模式判断条件及转矩分配计算方法。

[0124] 本例中，PHEV驱动模式包含三个子模式：纯电动模式，发动机驱动模式及联合驱动模式。三个子模式的判断规则如下：

[0125] 1.3.1.1纯电动模式：当 $n_e \leq n_{idle} \& T_{d_req} \leq T_{d_EV} \& SOC \geq SOC_{min}$ 时，进入纯电动模式，其中 n_{idle} 为发动机怠速转速，本例中 $n_{idle} = 800\text{rpm}$ ； T_{d_EV} 为纯电动最高转矩门限； SOC_{min} 为CD模式最小允许SOC，本例中， SOC_{min} 为0.3。

[0126] 1.3.1.2发动机驱动模式：当 $n_e > n_{idle} \& T_{d_EV} < T_{d_req} \leq T_{d_EN}$ 时，进入该模式，其中 T_{d_EN} 为发动机驱动最高转矩门限。

[0127] 在发动机驱动模式中，又根据SOC的状态分为：纯发动机驱动及行车充电两种子模式，即：当 $SOC > SOC_{chr}$ 时，发动机仅驱动车辆；当 $SOC \leq SOC_{chr}$ 时，发动机不仅驱动车辆还需要带动电机给电池充电，其中， SOC_{chr} 为行车充电最小SOC，本例中， SOC_{chr} 为0.45。

[0128] 1.3.1.3联合驱动模式： $T_{d_req} > T_{d_EN} \& SOC > SOC_{min}$ ，在该模式下，发动机和电机联合驱动车辆行驶。

[0129] 上述控制门限将发动机万有特性分成三个部分，如图3所示。本例中需要确定并优化的门限为 T_{d_EV} 和 T_{d_EN} ，图3中虚线表示 T_{d_EV} 和 T_{d_EN} 在未确定前的大致位置，一般 $T_{d_EV} < T_{d_EN}$ ，且均为发动机转速 n_e 的非线性函数。

[0130] 1.4发动机及电机分配转矩计算。由转矩分配模块计算不同模式下的发动机及电机转矩。

[0131] 本例仅列出驱动主模式下的分配转矩计算方法。

[0132] 1.4.1纯电动模式

$$[0133] \quad \begin{cases} T_m = T_{d_req} \\ T_e = 0 \end{cases} \quad (3)$$

[0134] 其中, T_m 为电机分配转矩; T_e 为发动机分配转矩。

[0135] 1.4.2纯发动机驱动模式

$$[0136] \quad \begin{cases} T_m = 0 \\ T_e = T_{d_req} \end{cases} \quad (4)$$

[0137] 1.4.3行车发电模式

$$[0138] \quad \begin{cases} T_m = T_{d_EN} - T_{d_req} & T_m < 0 \\ T_e = T_{d_EN} \end{cases} \quad (5)$$

[0139] 1.4.4联合驱动模式

$$[0140] \quad \begin{cases} T_m = T_{d_req} - T_{d_EN} & T_m > 0 \\ T_e = T_{d_EN} \end{cases} \quad (6)$$

[0141] 2. 建立PHEV动态规划动力学仿真模型,在典型工况下,以最小油耗为优化目标,采用动态规划法求得发动机及电机的最优转矩分配点:

[0142] 针对本例中图1所示构型的PHEV,建立动态规划动力学仿真模型。本例中,动态规划的状态变量 x 为电池SOC,控制变量为转矩比例系数 u_k ,即

$$[0143] \quad u_k = \frac{T_m}{T_d} \quad (7)$$

[0144] 其中, T_d 为DP算法中的驾驶员需求转矩,由下式求得

$$[0145] \quad T_d = T_w / (\eta_t \cdot i_g \cdot i_0) \quad (8)$$

[0146] 其中, η_t 为传动系统效率; i_g 为变速器速比; i_0 为主减速器速比; T_w 为车轮驱动转矩,由下式求得

$$[0147] \quad T_w = [mgf_r + \frac{1}{2}C_D\rho_dAV_a^2 + \delta m \frac{dV_a}{dt}] \cdot r \quad (9)$$

[0148] 其中, m 为整车质量, kg; g 为重力加速度, $9.8m^2/s$; f_r 为滚动阻力系数; C_D 为风阻系数; ρ_d 为空气密度, kg/m^3 ; A 为迎风面积, m^2 ; δ 为旋转质量换算系数; V_a 为车速; r 为车轮滚动半径。

[0149] 由公式(7),发动机转矩和电机转矩可表示为

$$[0150] \quad \begin{cases} T_e = (1 - \mu_k)T_d \\ T_m = \mu_k T_d \end{cases} \quad (10)$$

[0151] 电机功率 P_m 由下式计算

$$[0152] \quad P_m = \frac{T_m \cdot \omega_m}{\eta_m(\omega_m, T_m)} \quad (11)$$

[0153] 其中, η_m 为电机效率,依据电机转速查询电机效率map图得到。

[0154] 电池电流 I_b 由下式计算

$$[0155] \quad I_b = \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4R_i P_m}}{2R_i} \quad (12)$$

[0156] 其中, U_{oc} 为电池开路电压, V; R_i 为电池内阻, Ω 。

[0157] 则状态变量 SOC 可由以下差分方程得到

$$[0158] \quad SOC_{k+1} = \frac{\eta_m I_b}{3600 Q_0} \Delta t + SOC_k \quad (13)$$

[0159] 其中, Δt 为仿真时间步长, 本例取为 1s; Q_0 为电池总容量, Ah。

[0160] 上述状态变量和控制变量需要满足如下约束条件:

$$[0161] \quad \begin{cases} SOC_{\min} < SOC_k < SOC_{\max} \\ 0 < T_e(k) < T_{e_max} \\ 0 < |T_m(k)| < T_{m_max} \\ 0 < n_e(k) < n_{e_max} \\ 0 < n_m(k) < n_{m_max} \end{cases} \quad (14)$$

[0162] DP 优化的目标为总油耗量 J 最小, 即

$$[0163] \quad \min J = \min \sum_{k=0}^{N-1} m_f(n_e(k), T_e(k), k) \quad (15)$$

[0164] 其中, m_f 为单位时间内的燃油消耗率, g/kW.h, 由发动机转速和转矩查燃油消耗率特性表得到。

[0165] 按照上公式 (7) ~ (15), 采用 Bellman 算法编制 PHEV 动态规划计算机仿真程序, 实现 PHEV 的动态规划算法优化, 求出全局最优的发动机和电机转矩系数 u_k , 然后由公式 (10) 求出最优的发动机和电机分配转矩。

[0166] 3. 基于动态规划的 PHEV 控制参数优化:

[0167] 依据动态规划获得的发动机、电机最优转矩分配点, 基于 PHEV 行驶模式判别条件, 提取门限值控制门限。

[0168] 如前所述, 本例仅对纯电动最高转矩门限 T_{d_EV} 和发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EN} 进行提取, 步骤如下:

[0169] 3.1 建立 PHEV 动态规划算法仿真模型。将本实例所述的“2. PHEV 动态规划动力学仿真模型”, 采用 Matlab 工程计算软件依据 Bellman 算法编制成 PHEV 动态规划计算机仿真程序, 本例中, 仿真步长为 1s, SOC 网格划分间隔为 0.1%。

[0170] 3.2 PHEV 动态规划算法动力学仿真。选取某典型标准工况作为仿真工况, 工况的选取原则是: 使仿真工况的行驶里程与用户全天的平均行驶里程相近, 仿真工况应能反映实际用户的工况特征。

[0171] 本例采用全球统一轻型车测试程序 (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure, WLTP) 中的 3b 类车辆测试循环工况 (WLTC) 作为仿真标准工况, 如图 4 所示。一个 WLTC 循环工况行驶距离为 23.2km, 本例采用 3 个 WLTC 循环作为一次仿真运行工况, 总计行程约 70km。运行本例中初始仿真 SOC 为 95%, CD 模式允许最小 SOC 为 30%。

[0172] 3.3 提取发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EN} , 其步骤如下:

[0173] 3.3.1提取DP仿真中,联合驱动模式下的发动机工作点。

[0174] 由1.3.1.3可知,PHEV门限值策略进入联合驱动的条件是: $T_{d_req} > T_{d_EN} \& SOC > SOC_{min}$,由公式(6)可知,此时 $T_e = T_{d_EN}$ 。说明RB策略的联合驱动模式下的发动机工作点即为发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EN} 。若将动态规划中符合联合驱动的发动机工作点提取出来,并依据其确定RB策略的发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EN} ,则用该方法提取得到的 T_{d_EN} 就能达到与DP优化相近的控制效果。

[0175] 在动态规划(DP)仿真结果中,联合驱动模式下的发动机工作点 $T_{e_boost_i}$ 符合以下条件:

$$[0176] \quad \begin{cases} SOC > SOC_{min} \\ T_m > 0 \\ 0.7 \times T_{e_max} < T_{e_boost_i} < T_{e_max} \end{cases} \quad (16)$$

[0177] 其中, T_{e_max} 为发动机最大转矩值,N.m。

[0178] 在DP仿真得到的发动机工作点中,编程提取满足公式(16)的发动机工作点,即为联合驱动模式下的发动机工作点 $T_{e_boost_i}$ 。并绘制在发动机万有特性上,如图3所示(Δ 号)。

[0179] 3.3.2在发动机怠速 n_{idle} 与最高转速 n_{e_max} 范围内,等间隔选取发动机转速点。本例中以200rpm为间隔,即选取[800 1000 1200...5000 5200 5400]rpm处的发动机转速点。

[0180] 3.3.3选取某转速点 n_{e_i} 在其某领域范围内的联合驱动模式下的发动机工作点 $T_{e_boost_i}$ 。如在图3中,在转速点3000rpm $\pm$ 50rpm的范围内选取的联合驱动发动机工作点,然后求取这些工作点的均值 $T_{d_EN}(n_{e_i})$,即

$$[0181] \quad T_{d_EN}(n_{e_i}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{d_boost_i} \quad (17)$$

[0182] 将 $T_{d_EN}(n_{e_i})$ 值作为该转速点 n_{e_i} 的发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EN} 。重复本步骤,计算其它转速点的 T_{d_EN} ,得到离散的发动机驱动最高转矩门限。若在转速点 n_{e_i} 的领域范围内无任何发动机工作点,则采用2个邻近转速点 $T_{d_EN}(n_{e_i})$ 的均值作为该点的最高转矩门限。

[0183] 3.3.4采用样条插值方法,对上一步中得到的离散门限进行平滑处理,得到如图3所示的发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EN} ,如图3所示。

[0184] 3.4提取纯电动最高转矩门限 T_{d_EV} ,其步骤如下:

[0185] 3.4.1由1.3.1.1可知,PHEV逻辑门限值策略进入纯电驱动的条件是: $n_e \leq n_{idle} \& T_{d_req} \leq T_{d_EV} \& SOC \geq SOC_{min}$,可见在纯电驱动模式下各转速点电机工作点的最大值即为最高转矩门限 T_{d_EV} 。因此,在动态规划仿真结果中,先提取纯电驱动的电机工作点 $T_{m_ev_i}$,这些工作点满足下式要求:

$$[0186] \quad \begin{cases} SOC > SOC_{min} \\ 0 < T_m < 0.7 \times T_{e_max} \\ T_e = 0 \end{cases} \quad (18)$$

[0187] 在DP仿真得到的电机工作点中,提取满足公式(18)的电机工作点,即为纯电机驱动电机工作点 $T_{m_ev_i}$ 。并绘制在发动机万有特性上,如图3所示(*号)。

[0188] 3.4.2在发动机怠速 n_{idle} 与最高转速 n_{e_max} 范围内,等间隔选取发动机转速点。本例中以200rpm为间隔,即选取[800 1000 1200...5000 5200 5400]rpm处的发动机转速点。

[0189] 3.4.3选取某转速点 n_{e_i} 在其领域范围内的纯电驱动的电机工作点 $T_{m_ev_i}$ 。对选取工作点依据转矩值进行从大到小排序,选取转矩值前 N 个点 $T_{m_ev_N}$,本例中 $N=5$,然后求平均值 $T_{d_EV}(n_{e_i})$,即

$$[0190] \quad T_{d_EV}(n_{e_i}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{m_ev_N} \quad N=5 \quad (17)$$

[0191] 将 $T_{d_EV}(n_{e_i})$ 值作为该转速点 n_{e_i} 的发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EV} 。重复本步骤,计算其它转速点的 T_{d_EV} ,得到离散的纯电动最高转矩门限。若在转速点 n_{e_i} 的领域范围内无任何电机工作点,则采用2个邻近转速点 $T_{d_EV}(n_{e_i})$ 的均值作为该点的最高转矩门限。

[0192] 3.4.4采用样条差值方法,对上一步中得到的离散门限进行平滑处理,得到如图3所示的发动机驱动最高转矩门限 T_{d_EV} 。

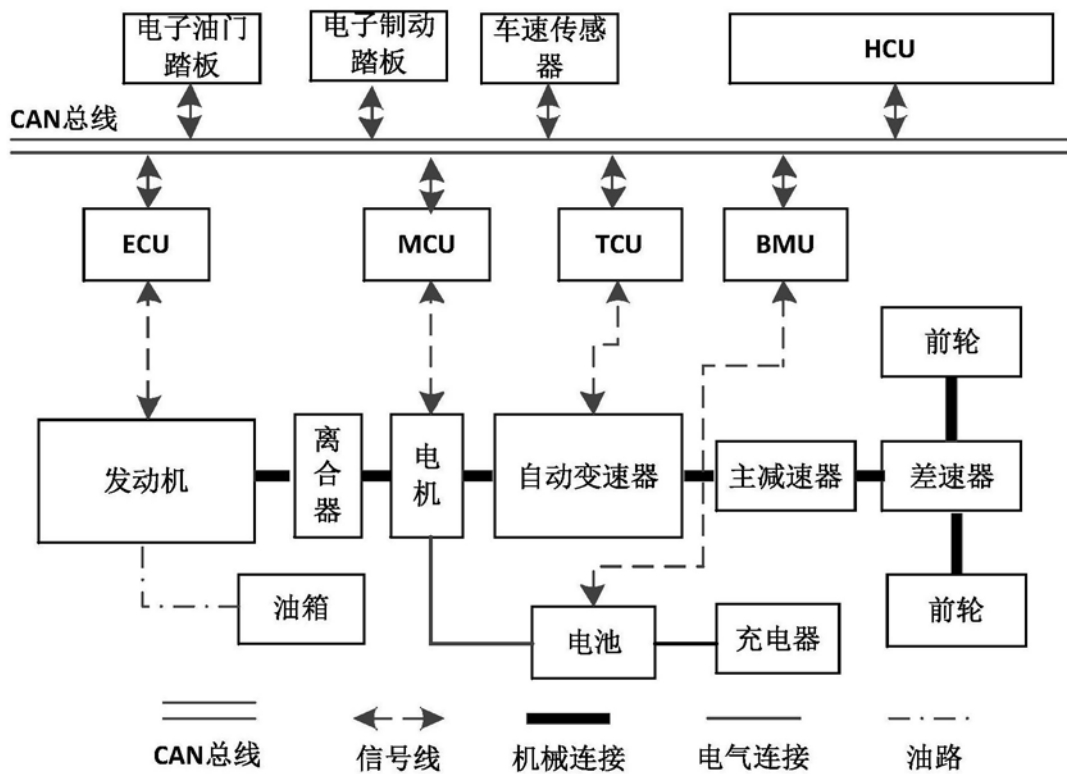


图1

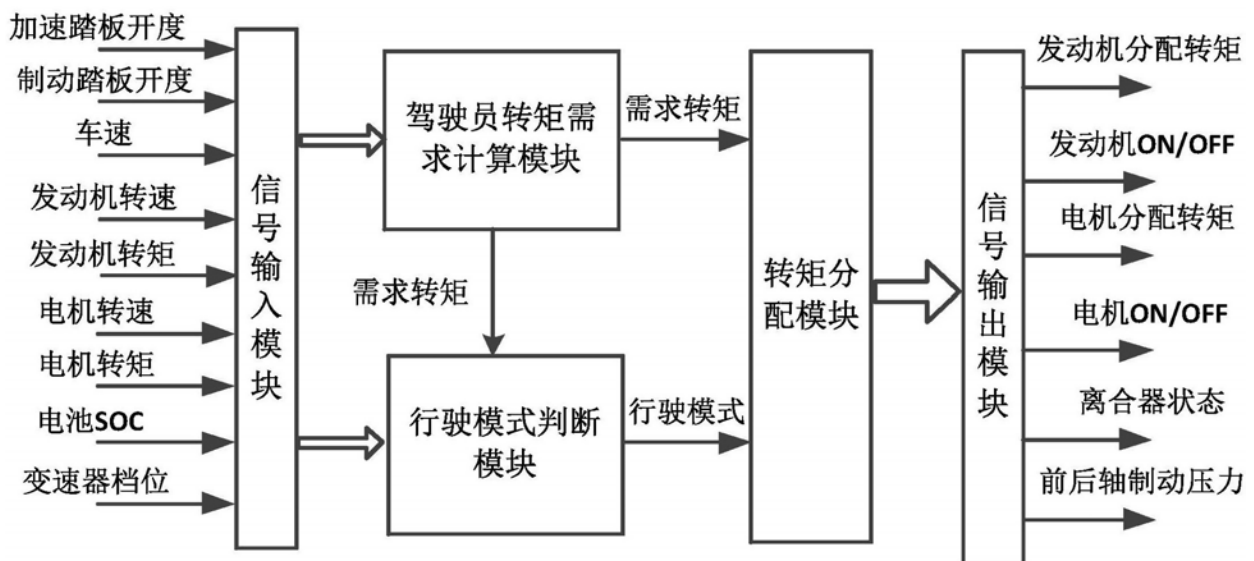


图2

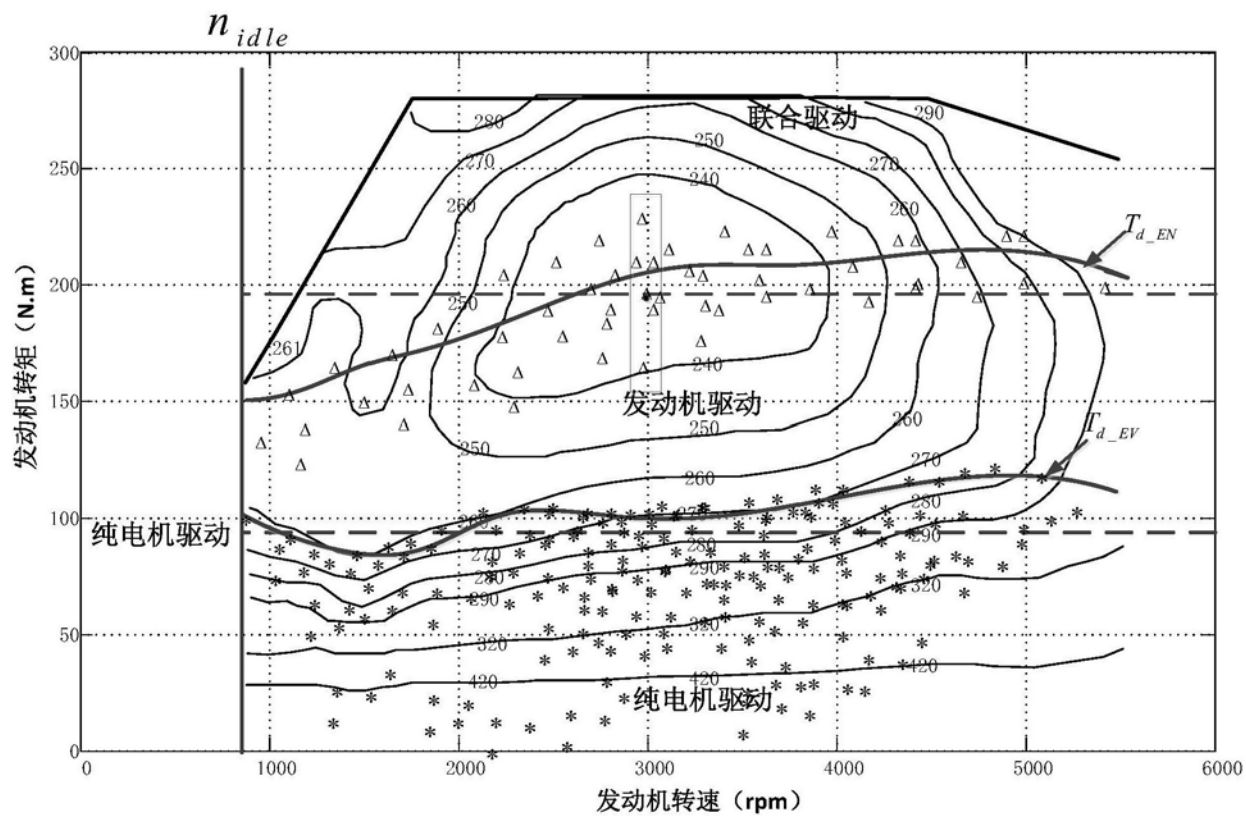


图3

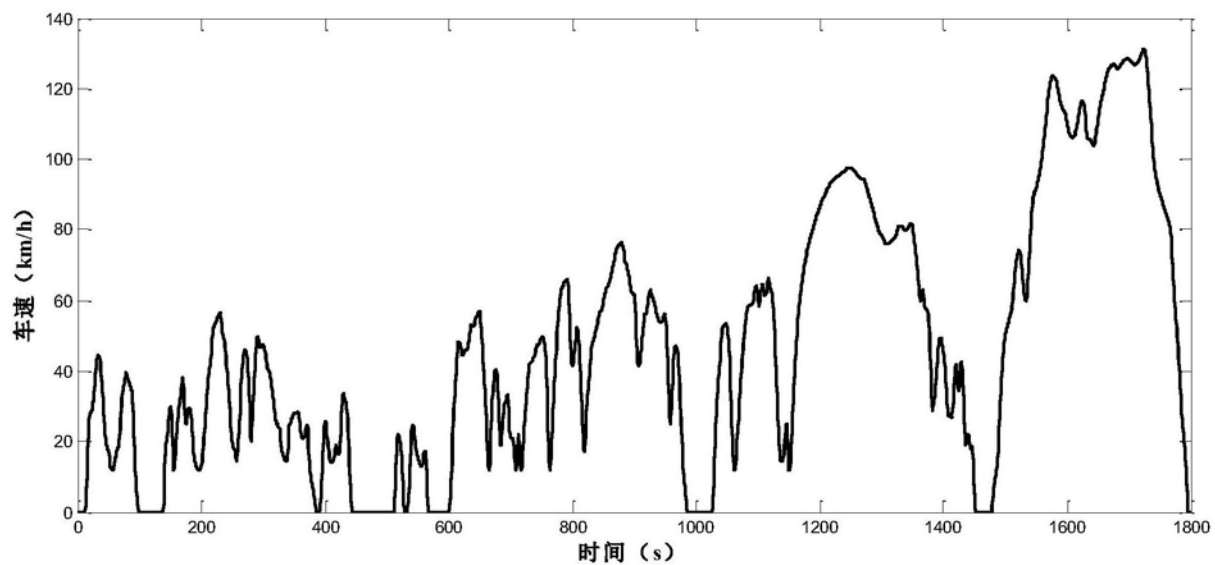


图4