

混合动力电动汽车中利用决策树 CART 算法的能源管理方案

徐 燕

(四川工业科技学院 智能制造与车辆工程学院, 四川 德阳 618500)

摘要: 针对混合动力电动汽车 (HEV) 氮氧化物 (NO_x) 排放的问题, 提出了一种基于决策树 CART 算法的柴油混合动力能源管理策略; 首先, 提出了一种结合决策树与回归树的分类算法 (CART), 针对类别和变量特征, 从一个或多个预测变量中预测出个例的趋势变化关系; 然后, 通过控制发动机和电动机之间的扭矩分配, 引入了额外的自由度以调整从纯燃料经济性情况到纯 NO_x 限制情况的优化权衡; 最后, 采用基于软件在环路和硬件在环仿真的方法, 从而根据动力系统配置了解系统性能, 并调整所提出的能源管理策略; 实验结果表明, 提出的柴油混合动力能源管理策略中, NO_x 的减少对燃料消耗的影响, 且可以通过选择最佳工作点和限制发动机动力来限制 NO_x 排放的潜力; 相比其他几种较新的同类方案, 提出的方案在同等燃料消耗的情况下 NO_x 排放量更小, 在燃料消耗略有下降的情况下, 可以显著降低 NO_x 。

关键词: 决策树; CART 算法; 柴油混合动力汽车; 能源管理策略; 预测变量

A Power Management Strategy Using Decision Tree CART Algorithm for Diesel Hybrid Electric Vehicle

Xu Yan

(School of Intelligent Manufacturing and Vehicle Engineering, Sichuan Institute of Industrial Technology, Deyang 618500, China)

Abstract: To solve the problem of nitrogen oxide (nox) emission of hybrid electric vehicle (HEV), a diesel hybrid energy management strategy based on decision tree CART algorithm is proposed. Firstly, a classification algorithm (Classification and Regression Tress, CART combining regression tree and decision tree) is proposed. According to the characteristics of categories and variables, the trend relationship of each case is predicted from one or more predictive variables. Then, by controlling the torque distribution between the engine and the motor, additional degrees of freedom are introduced to adjust the optimization tradeoff from pure fuel economy to pure restriction; Finally, the simulation method based on software in the loop and hardware in the loop is adopted to understand the system performance according to the power system configuration and adjust the proposed energy management strategy. The experimental results show that the proposed diesel hybrid energy management strategy can reduce the impact on fuel consumption and limit the emission potential by selecting the best operating point and limiting engine power. Compared with other relatively new schemes, the proposed scheme has smaller emissions under the same fuel consumption, and can be significantly reduced under the condition of slightly reduced fuel consumption.

Keywords: decision tree; CART (classification and regression tress) algorithm; diesel hybrid electric vehicle; energy management strategy; predictor variable

0 引言

随着清洁能源车辆的不断增加, 混合动力电动汽车被认为是减少燃料消耗和排放的有效方式^[1]。柴油混合动力汽车的主要目标是提高能源效率在最大限度地降低 NO_x 排放的情况下使用发动机^[2]。可见, 研究混合动力能源管理策略具有很好的现实意义和实用价值。

国内外许多专家及学者围绕柴油混合动力能源管理策略展开了深入的研究。文献 [3] 提出了一种柴油混合动力汽车的启发式策能源管理略, 但仅仅研究了驾驶循环中能

源管理问题。文献 [4] 提出的能源管理策略考虑了四种主要污染物 (NO_x , PM, HC, CO) 加权的燃料消耗, 但未考虑总 NO_x 排放的瞬时部分。文献 [5] 中提出了一种应用于汽车能量管理动态编程技术, 但策略对系统的性能感知不够, 无法根据动力系统配置调整能源管理策略。文献 [6] 提出了一种基于博弈论应用的能量管理控制器, 然后, 该方法在燃料消耗与 NO_x 排放之间的权衡效果欠佳。总之, 以上的研究考虑更多的是驾驶循环问题, 很少考虑总 NO_x 排放的瞬时部分, 仍有一定的改进空间^[7-9]。

本文提出的一种基于决策树 CART 算法的柴油混合动力能源管理策略, 在燃料消耗略有下降的情况下, 可以显著降低 NO_x 。其主要创新点为:

1) 现有的大多数方法中, 对个例的趋势变化关系不够

收稿日期: 2019-11-27; 修回日期: 2019-12-23。

作者简介: 徐 燕 (1987-), 女, 四川阆中人, 硕士, 讲师, 主要从事新能源汽车等方向的研究。

明确,而提出的方法结合回归树与决策树分类算法(CART),针对类别和变量特征,从一个或多个预测变量中预测出个例的趋势变化关系;

2) 现有的大多数方法中,从纯燃料经济性情况到纯 NO₃ 限制情况的优化权衡比较欠缺,而提出的方法通过控制发动机和电动机之间的扭矩分配,引入了额外的自由度以调整从纯燃料经济性情况到纯 NO₃ 限制情况的优化权衡;

3) 现有的大多数方法中,对系统的性能感知不够,而提出的方法采用基于软件在环(SiL)和硬件在环(HiL)仿真的方法,以便根据动力系统配置掌握系统性能,并调整所提出的能源管理策略。

模拟和实验结果表明,提出的柴油 HEV 的全局能源管理策略,将排放约束纳入启发式或基于模型的监督策略的可行性。

1 提出的方法

提出的 CART 算法针对类别和变量特征,从样本中预测出个例的趋势变化关系;然后引入了额外的自由度以调整从纯燃料经济性情况到纯 NO₃ 限制情况的优化权衡,实现对发动机和电动机之间的合理扭矩分配控制,并;并采用基于软件在环路和硬件在环仿真的方法配置系统,从而调整所提出的能源管理策略。其基本流程图如图 1 所示。

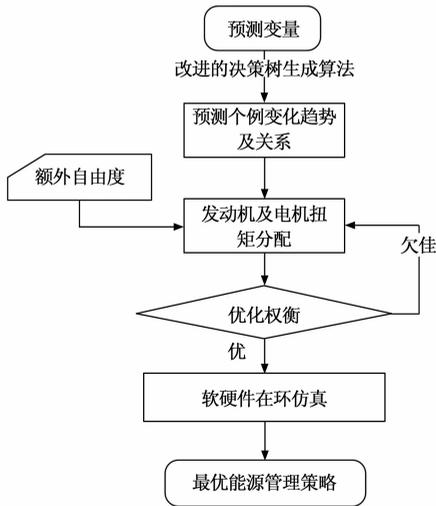


图 1 所提能源管理策略基本流程图

1.1 决策树 CART 算法

CART 算法呈多叉树结构,能够预测个例的变化趋势。通过样本属性分析,够确定样本子集中信息量最和子节点样本类别值。算法从根节点开始,针对样本属性对每一个非叶节点进行测试,新子节点也通过循环操作完成,直到达到终止条件循环结束。循环过程中,如何选择测试属性以及划分样本集是决策树构建的关键环节,不同决策树算法对于此环节所使用的算法各不相同。所提方法在此采用 CART 算法,其系统架构图如图 2 所示。

当预测向量 X 给定后,变量 Y 的条件分布可以通过该算法进行描述。预测空间被该算法使用二叉树模型划分为

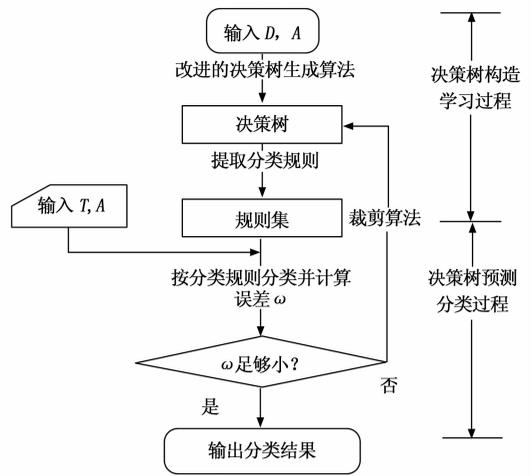


图 2 CART 算法系统架构图

若干个子集,变量 Y 在所划分子集上呈连续分布。CART 还有一种监督学习功能,即 CART 算法在对用户需求进行预测之前,必须提供一个对应的学习样本集对 CART 进行评估和重建。其中,CART 所使用的学习样本集结构如下:

$$L := \{X_1, X_2, \dots, X_m, Y\}$$

$$X_1 := (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{m1}), \dots, X_m := (x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mm})$$

$$Y := (y_1, y_2, \dots, y_k)$$

(1)

式中, $X_1 \sim X_m$ 为属性有序或者离散属性向量; Y 为属性有序或者离散的标签向量。

其中: T_{max} 构建树的过程为将样本集对应最大二叉树的过程。构建过程中通过最大复杂度削减算法对最佳分支规则进行寻找,主要包括降低属性向量基数和构建标准问题集两步。

数据预处理首先将向量分为若干段,以降低属性向量的基数;然后在数据预处理的基础上,针对属性向量构建不同标准的问题集,对于连续属性向量与离散属性向量的标准问题集的构建方法存在一定的不同。

首先引入用于测量每一个节点内 n ($n \geq 2$) 个类样本的差异程度的差异系数,该系数是生成原始树的关键系数。现有方法对于最佳分割闭值的选取大多采用基尼系数,而在 CART 算法中则首次以经济计量学中的 Gini 指数命名。若 T 中包含 N 个类别,则 T 所对应的 Gini 指数为:

$$Gini(T) = 1 - \sum_{j=1}^N p_j^2 \quad (2)$$

若将 T 分割为 N_1 和 N_2 两部分,则么分割这两部分的 Gini 指数则为:

$$Gini_{split(X)}(T) = \frac{N_1}{N} Gini(T_1) + \frac{N_2}{N} Gini(T_2) \quad (3)$$

分割过程通常采从根节点开始以二叉树表示^[10]的分割规则对样本进行分割,并以递归形式完成所有节点分割:

- 1) 选择每个节点的最优分割点。
- 2) 节点的分割规则为在这些最优分割点中选取相对于该

节点的最优分割点, 分割规则依据公式 (3) 取最小值时确定。

3) 对该节点分割出来的两个子节点继续进行分割。

上述分割过程一直进行到叶节点的个数少于设定值时, 或者样本中不存在其他类别节点为止, 此时所构建的层次越多, 叶节点越多, 所生成的树即为 T_{\max} 。

1.2 HEV 的全局能源管理方案

基于软件在环路和硬件在环仿真进行, 以便根据动力系统配置掌握系统性能, 并调整所提出的能源管理策略。所提出柴油 HEV 的全局能源管理方案, 考虑到燃油消耗目标之外的稳态和瞬态 NO_3 排放。在所提出的方法中, 稳态和瞬态部件如图 3 所示单独处理。发动机扭矩 $T_{\text{eng},ss}^{\text{sp}}$ 和电动机扭矩 $T_{\text{mot},ss}^{\text{sp}}$ 设定点由基于 ECMS 的策略计算, 该策略包括将稳态 NO_3 排放映射到成本函数中。第二个功能包括一个基于模型的策略, 该策略适应在可能发生 NO_3 峰值的瞬态阶段期间的静态扭矩分配。这导致计算发动机扭矩 ($T_{\text{eng},t}^{\text{sp}}$) 和电动机扭矩 ($T_{\text{mot},t}^{\text{sp}}$) 的两个轨迹。

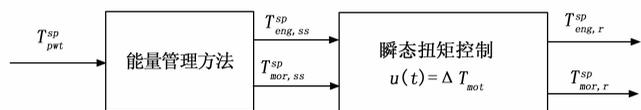


图 3 基于 ECMS 控制器级联的瞬态扭矩控制器的静态和动态扭矩分配策略

图 4 中所示的车辆架构是一种并行混合架构, 在变速器前侧使用分离式启动发电机 (SSG) 和后传动电机 (EM) 允许进行动力辅全电动驱动、再生制动和电池充电。其中, 柴油发动机基本参数为直列四缸 1.6 升直喷发动机, 最大输出功率为 50 kW, 峰值扭矩 150 N·m。发动机使用高 EGR 率在低温燃烧模式下操作, 使得发动机 NO_3 排放接近欧 6 排放标准而无需专门的后处理。为了向汽缸供应 EGR, 发动机具有 (低压) EGR 回路。LP EGR 回路将处理系统和柴油颗粒过滤器后的废气带到压缩机上游。在这种配置中, 与 HP EGR 模式相比, 系统具有更慢的燃烧气体稳定时间。然后根据 NO_3 排放峰值, 发动机瞬态更加剧烈, 因为它们主要由 EGR 时滞引起。这是一个奇特的案例研究, 旨在使用电机的动力辅助系统开发和验证瞬态 NO_3 限制策略。

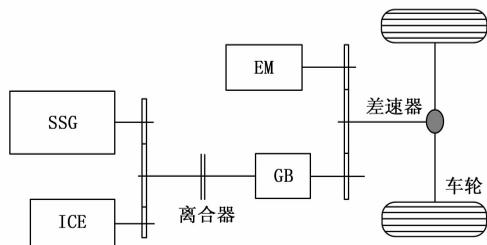


图 4 并联混合动力电力推进系统

采用基本规则来调整电池尺寸, 以保持电池能量与电机功率比恒定且接近 35 Wh/kW。该值根据参考混合动力系统选择, 其中电动机的额定功率为 42 kW, 电池的能量为 1.5 kWh。车辆质量也适合于考虑电机和电池尺寸。相

应的配置在表 1 中详细描述。

表 1 混合动力电动汽车系统的相关参数

| 项目 | 系统 1 | 系统 2 | 系统 3 |
|----------|------|------|------|
| 车辆质量/kg | 1260 | 1580 | 1650 |
| EM 功率/kW | 10 | 15 | 20 |
| 电池能量/Wh | 290 | 500 | 710 |

在建模中, 车辆速度曲线和驾驶员的扭矩需求是主要的模型输入。车轮上的扭矩请求 $T_{\text{pwt}}^{\text{sp}}$ 取决于驾驶条件, 并且可以根据驾驶员需求进行评估。此外:

$$T_{\text{pwt}}^{\text{sp}}(t) = R_1 T_{\text{mot},ss}^{\text{sp}}(t) + R_{\text{gb}} T_{\text{eng},ss}^{\text{sp}}(t) \quad (4)$$

其中: R_{gb} 是齿轮比, R_1 是前轴比。扭矩设定值可以是正的或负的, 取决于车辆运行条件 (牵引或制动)。 $T_{\text{mot},ss}^{\text{sp}}$ 是要求的电动机扭矩, 发动机扭矩是控制输入:

$$u(t) = T_{\text{eng},ss}^{\text{sp}}(t)u(t) = T_{\text{eng},ss}^{\text{sp}}(t) \quad (5)$$

电动机功率 P_{elec} 通常用映射描述, 作为电动机转矩和速度 N_{mot} 的函数:

$$P_{\text{elec}}(t) = f_{\text{elec}}(T_{\text{mot},ss}^{\text{sp}}, N_{\text{mot}}) \quad (6)$$

发动机燃油消耗 (FC) 和 NO_3 排放由稳态状态映射提供, 这取决于发动机扭矩和速度 N_e :

$$\dot{m}_f(t) = f_{\text{FC}}(T_{\text{eng},ss}^{\text{sp}}, N_e) \quad (7)$$

$$\dot{m}_{\text{NO}_3}(t) = f_{\text{NO}_3}(T_{\text{eng},ss}^{\text{sp}}, N_e) \quad (8)$$

这两个映射描述了发动机校准产生的准静态性能。它们将被引入能源管理策略。注入的燃料质量 \dot{m}_f 使用燃料 $Q_{\text{th},v}$ 的较低热值转换为燃料动力, 燃料 $Q_{\text{th},v}$ 是给定燃料的常数:

$$P_{\text{fuel}}(t) = Q_{\text{th},v} \dot{m}_f(t) \quad (9)$$

电池组被建模为基本等效电路, 其包括与电阻 R_0 串联放置的电压源 U_0 。这两个变量根据电池充电状态 (State of Charge, SOC) 而变化。电池电流和电压由下式给出:

$$U_{\text{bat}} = U_0(\text{SOC}) - R_0(\text{SOC}) I_{\text{bat}} \quad (10)$$

$$I_{\text{bat}} = \frac{U_0}{2R_0} - \sqrt{\frac{U_0^2}{4R_0^2} - \frac{P_{\text{elec}}}{R_0}} \quad (11)$$

其中: 电池电量为 $P_{\text{bat}} = P_{\text{elec}} = U_{\text{bat}} I_{\text{bat}}$ 。电池 SOC 的变化由电池电流和功率计算:

$$\dot{\text{SOC}}(t) = \begin{cases} -\frac{I_{\text{bat}}}{Q_0}, & \text{if } P_{\text{elec}} > 0 \\ -\eta_{\text{bat}}(\text{SOC}) \frac{I_{\text{bat}}}{Q_0}, & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

其中: Q_0 是电池容量, η_{bat} 代表其法拉第效率。电池 SOC 是系统状态 ($x(t) = \text{SOC}(t)$)。电池的电化学功率是:

$$P_{\text{ec}} = -Q_0 U_0(\text{SOC}) \dot{\text{SOC}}(t) \quad (13)$$

在发动机瞬态期间发生的 NO_3 峰值占总 NO_3 排放的重要部分。通过进一步改进空气系统结构 (更短的 LP EGR 系统, HP 和 LP EGR 系统的组合, 使用可变气门驱动 (VVA) 的内部 EGR) 或通过包括燃烧来实现 NO_3 瞬态部分的减少控制策略根据空气系统误差调整喷射设置。在这里, 考虑使用具有 LP EGR 系统且没有瞬态燃烧控制策略

的柴油发动机^[11]。目标是仅利用杂交提供的额外自由度。对于快速扭矩瞬态，NO₃ 峰值振幅更高，并且只要扭矩梯度减小，这些峰值就会减小。此外，NO₃ 峰值与 BGR 误差 ($\epsilon F_1 = F_1^{sp} - F_1^{est}$) 密切相关。这一点表明，NO₃ 排放与扭矩需求密切相关，峰值幅度随扭矩梯度而增大。提出了启发式方法，其中包括发动机扭矩设定点动力学的限制。应用了类似的原理，同时引入系统模型来计算有限的发动机扭矩需求。该策略的原理如图 5 所示。

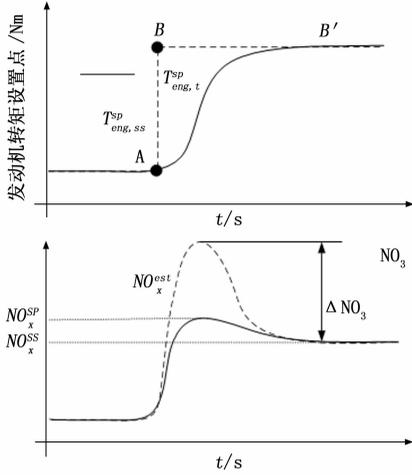


图 5 在扭矩步骤期间限制 NO₃ 峰值幅度的控制策略的原理

瞬态包括从 A 点到 B 点的增加的发动机扭矩步骤。在这种情况下，EMS 提出了一个标记为 $T_{eng,t}^{sp}$ 的扭矩步骤。该选择是从纯静态映射计算的解决方案，而不考虑柴油发动机约束。该策略的原理是保持 EMS 所要求的相同扭矩设定点 B，但是使得达到该值的轨迹被调整^[12]。扭矩设定点控制包括定义从 A 点到 B0 点的新的扭矩轨迹 $T_{eng,t}^{sp}$ ，以便避免或减少瞬态 NO₃ 峰值。车轮扭矩请求 T_{wct}^p 取决于行驶条件（速度和加速度），可根据驾驶员的要求（油门和制动踏板位置）进行评估。扭矩设定值可以是正的或负的，取决于车辆的运行条件（牵引或制动）。 $T_{mot,ss}^{sp}$ 是电动机所设定的转矩值， $T_{eng,ss}^{sp}$ 是发动机设定的转矩值。EMS 选择稳态分流比，其原则是仅在发动机瞬态期间修改其值。在稳态下，保持扭矩分配比。在瞬态中，稳态发动机和电动机扭矩变成两个轨迹：

$$T_{wct}^p(t) = R_1 T_{mot,t}^{sp} + R_{gb} T_{eng,t}^{sp} \quad (14)$$

在这两种情况下，车轮的扭矩请求都不会被修改。指令 $u(t)$ 定义为电机扭矩校正 $u(t) = \Delta T_{mot}$ 。然后对应于校正的电机转矩设定值的动态电机转矩请求为：

$$T_{mot,t}^{sp}(t) = T_{mot,ss}^{sp}(t) + u(t) \quad (15)$$

指令 $u(t)$ 是电机转矩的一部分，用于补偿瞬态期间的发动机转矩。指令 u 是从公式 (14) 和 (15) 中推导出来的，它可以表示为：

$$u(t) = \frac{T_{wct}^p(t) - R_{gb} T_{eng,t}^{sp}(t)}{R_1} - T_{mot,ss}^{sp} \quad (16)$$

指令 $u(t)$ 直接与静态电动机和动力系扭矩设定点以及动态扭矩设定值 $T_{eng,t}^{sp}$ 相关联。后者是关键变量，并且计算

它使得在瞬态期间产生的 NO₃ 峰值受到限制^[13]。按照这种方法，该策略与 EMS 级联应用。ECMS 确定某些时间尺度的最佳操作点，而更快的控制器确定最小化 NO₃ 的发动机和电机轨迹排放。计算用于扭矩轨迹计算的 NO₃ 轨迹，NO₃ 目标定义纯粹是启发式的，并且依赖于最大 NO₃ 峰值幅度的可调减小因子。可实现的 NO₃ 目标 NO_x^{sp} (图 5) 应该包含在实际（或估计）值和稳态值之间：

$$NO_x^{est} \geq NO_x^{sp} \geq NO_x^{ss} \quad (17)$$

目标 NO₃ 由一个衰减因子 ξ 经验性地修正：

$$NO_x^{sp} = NO_x^{ss} + \Delta NO_x \left(1 - \frac{\xi}{100}\right) \quad (18)$$

其中： ΔNO_3 是 NO₃ 峰值的幅度，称为稳态 NO₃ 值，如图 5 所示。

$$\Delta NO_3 = NO_3 - NO_x^{ss} \quad (19)$$

该方法简单并且允许灵活地调节 NO₃ 的还原水平。但是，由于不考虑系统饱和，因此无法保证系统实现此目标的能力。此外，减少因子 ξ 的值对于每个瞬态是恒定的^[14]。包括系统饱和度以定义可达到的 NO₃ 目标是必要的改进，以使瞬态扭矩控制器更通用且易于调节。这将导致根据可行的 NO₃ 目标而不是经验的 NO₃ 目标来定义限制因子 ξ 。这是这项工作的主要观点。扭矩控制策略必须考虑执行器限制，该限制取决于最大电机扭矩 T_{mot}^{max} 和由下式定义的静态电机扭矩：

$$T_{mot,ss}^{sp}(t) = \frac{T_{wct}^p(t) - R_{gb} T_{eng,ss}^{sp}(t)}{R_1} \quad (20)$$

接下来，指令 $u(t)$ 被限定为：

$$u(t) \in [0, (T_{mot}^{max} - T_{mot,ss}^{sp}(t))] \quad (21)$$

最大和最小的发动机扭矩可以表示为：

$$\begin{cases} T_{eng}^{sp,min} = \frac{T_{wct}^{sp} - R_1 T_{mot}^{max}}{R_{gb}} \\ T_{eng}^{sp,max} = T_{eng,ss}^{sp} \end{cases} \quad (22)$$

通过使发动机扭矩轨迹饱和来获得瞬态发动机扭矩设定值：

$$T_{eng,t}^{sp} = sat(\min(T_{eng}^f, T_{eng}^f), T_{eng}^{sp,min}, T_{eng}^{sp,max}) \quad (23)$$

函数中的符号表示 $sat(u, u_m, u_M)$ 定义为：

$$sat(u, u_m, u_M) = \begin{cases} u_m, & \text{if } u(t) \leq u_m \\ u, & \text{if } u_m \leq u(t) \leq u_M \\ u_M, & \text{if } u(t) \geq u_M \end{cases} \quad (24)$$

T_{eng}^f 是可行的扭矩轨迹，其定义了可实现的瞬态 NO₃ 排放。后者对应于在气缸氧含量（即 BGR）不处于稳态条件的瞬态条件期间可以执行的 NO₃ 排放的现有最小值。系统饱和度不包括在所提出的算法中，是 IFP Energies nouvelles 的一项持续工作。因此，瞬态发动机扭矩设定值可以表示为：

$$T_{eng,t}^{sp} = sat(T_{eng}^f, T_{eng}^{sp,min}, T_{eng}^{sp,max}) \quad (25)$$

瞬态转矩控制策略的仿真结果是确定是否可以限制总 NO₃ 排放的瞬态部分 (TP)。使用模拟整个混合动力车辆的仿真平台来模拟驾驶循环。该想法是模拟系统的 NO₃ 还

原因子 ξ 的几个值，范围从 0%（基线情况）到 100%。后一种情况对应于所有 NO₃ 排放 TP 的限制。为了比较这些模拟，适应等效因子。为了满足最终电池充电状态的限制，通过二分法找到等效因子的值：

$$SOC(t_0) = SOC(t_f) = 50\% \quad (26)$$

t_0 和 t_f 是所考虑的驾驶循环的初始和最终时间。模拟是针对由电动机的功率定义三个混合水平：

$$P_{mot} = \{10 \text{ kW}, 15 \text{ kW}, 20 \text{ kW}\} \quad (27)$$

实际上，电池容量和车辆质量适应电动机功率。纯电动驱动仅在 20 千瓦的情况下启用。EMS 找到稳态最佳扭矩分配重新分配，其最小化准静态 NO₃ 和燃料消耗之间的折衷。对于参数 $k_{fc/NO_3} = 0.4$ 的恒定值，获得所显示的结果。混合水平和该设定变量对柴油 HEV 的 NO₃ 排放和燃料消耗的影响不是所提出方法的目的，因为它仅影响 NO₃ 和 FC 之间的静态平衡^[15]。该策略作用于涉及增加 BGR 设定点的瞬态阶段。 $\xi = 0\%$ 对应于参考情况，没有瞬态策略；另外两个情况（50% 和 90%）说明了可调瞬态 NO₃ 还原参数的影响。对于第二个扭矩瞬态（ $t = 203 \text{ s}$ ），可以完全避免 NO₃ 峰值，调整参数可以灵活地降低峰值幅度。

2 实验结果及分析

2.1 瞬态参数 ξ 对 NO₃ 排放与燃料消耗之间权衡的影响

在第一个扭矩瞬变中，在 50% 和 90% 的情况下观察到 NO₃ 减少的饱和度。这种饱和度可以很容易地解释，在 $\xi = 50\%$ 时，电机转矩设定值已达到其最大值（ T_{mot}^{max} ）。结果，在不增加电动机最大扭矩（即电动机尺寸）的情况下，并不能实现 NO₃ 排放的减少。可以注意到，该策略不会影响稳态发动机和电机转矩设定值。一旦瞬态结束，则等于 EMS 选择的那个值（ $T_{mot,ss}^{sp} = T_{mot,t}^{sp}$ 和 $T_{eng,ss}^{sp} = T_{eng,t}^{sp}$ ）。当策略启用时，SOC 逐渐减小，因为在每个瞬态阶段期间通过消耗电能削减 NO₃ 峰值。缺失的能量必须恢复，以便在遵守最终 SOC 约束的情况下完成驾驶循环。这是通过调整能量管理策略中的等效因子来完成的，该策略稍微修改了静态工作点选择。

图 6 所示为该策略对累积 NO₃ 排放和燃料消耗的影响。由于瞬时峰值降低，总 NO₃ 排放量以燃料消耗量略有增加的代价显著下降。这证明了选择部分 NO₃ 还原而不是完全消除的策略的有效性。事实上，在这种情况下，最有趣的案例是 $\xi = 50\%$ 时，因为它允许全局氮氧化物减少 17%，燃料消耗的增加仅为 2%。

图 7~9 展示了 3 种车型瞬态策略参数 ξ 对 NO₃ 排放与燃料消耗之间权衡的影响。NO₃ 排放的 TP 定义为总排放和稳态排放之间的差异。总排放量由计算得到：

$$NO_x^{tot} = \Phi(N_e, \psi_1(N_e, T_{eng,t}^{sp}), F_{int}^{tot}) \quad (28)$$

所提出的方法使用相同的 NO₃ 模型计算稳态 NO₃ 排放。但是，不使用估计的 BGR 作为输入，而是使用计算出的稳态值：

$$NO_x^{ss} = \Phi(N_e, \psi_1(N_e, T_{eng,t}^{sp}), \vartheta(N_e, T_{eng,t}^{sp})) \quad (29)$$

它们代表了废气再循环回路具有瞬时稳定时间时的排

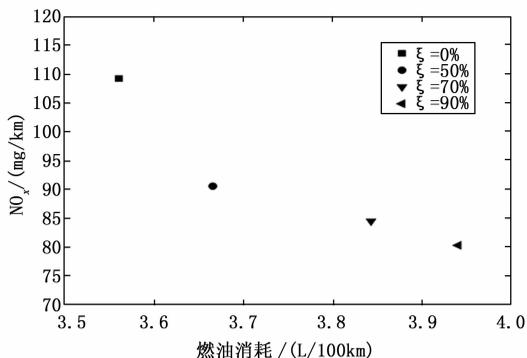


图 6 瞬态策略参数 ξ 对 NO₃ 排放与燃料消耗之间权衡的影响——FTP 全混合 20 kW

放量。由于静态工作点的轻微改变，即使累积的 NO₃ 排放的静态部分随着 ξ 的增加而略微增加，总 NO₃ 的排放也在减少。该策略允许将瞬态部分减少到一半（从 49% 到 24%），同时使累积的 NO₃ 排放量减少 26%。对于 $\xi = 90\%$ ，剩余的瞬态部分对应于电动机不能提供足够扭矩的部分的补充。

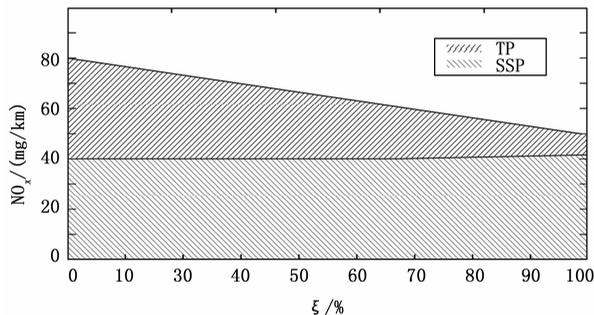


图 7 瞬态策略参数 ξ 对 NO₃ 瞬态部分的影响——FTP 全混合 20 kW

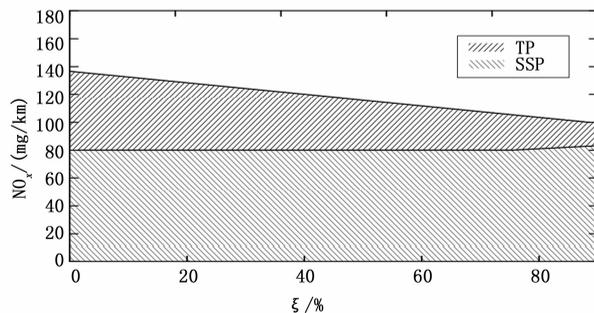


图 8 瞬态策略参数 ξ 对 NO₃ 瞬态部分的影响——FTP 全混合 15 kW

对于较低的混合水平（15 kW 和 10 kW），可用于瞬时 NO₃ 还原的电动机扭矩较低，并且排放不能像完全混合情况那样降低。在 8 千瓦时，电动机很快就达到了饱和，作为结果，瞬态 NO₃ 受到限制（图 9）。作为结论，只要未达到最大电动机扭矩，瞬态策略就允许控制 NO₃ 瞬态排放。使用 20 kW 的电动机，可以通过合理增加燃料消耗实现显著的 NO₃ 排放的减少。阻尼系数 ξ 的值调整 NO₃ 的 TP 和

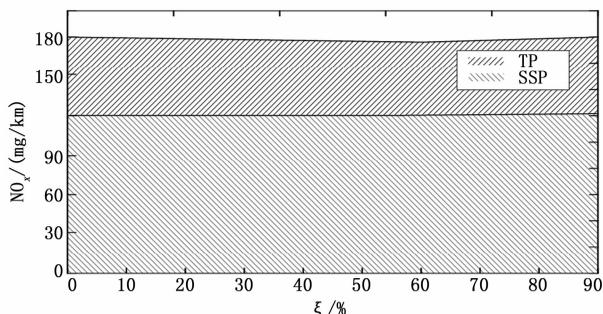


图 9 瞬态策略参数 ξ 对 NO_x 瞬态部分的影响——FTP 全混合 10 kW

FC 之间的折衷。

2.2 与其他几种较新方案的对比分析

为了更好地验证提出的能源管理方案的可靠性，将提出的算法与文献 [5] 和文献 [6] 提出的算法进行对比，研究 3 种方案中燃料对 NO_x 减排的影响，3 种方案均考虑了 3 种功率：20 kW、25 kW 和 30 kW，对比结果如图 10 所示。

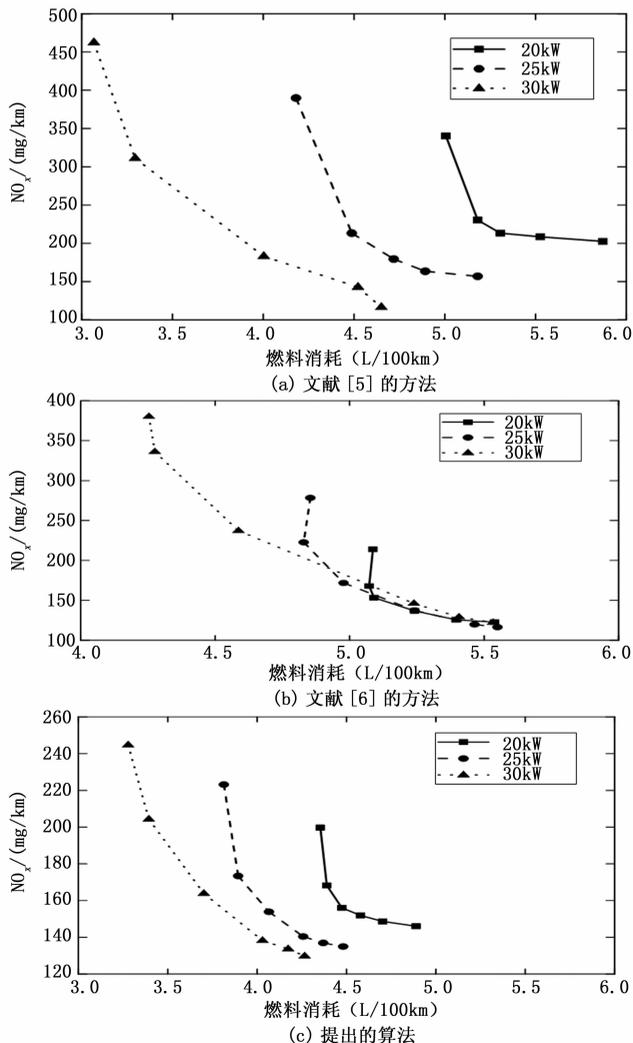


图 10 三种算法的模拟结果对比

从图 10 可以看出，文献 [5] 方案和提出的方案结果

中，功率越大，燃料消耗对 NO_x 排放量的影响越大，相比文献 [6] 方案，文献 [5] 方案和提出的方案获得的结果更具规律性。对比 3 种方案可以看出，提出的方案在同等燃料消耗的情况下 NO_x 排放量更小，在燃料消耗略有下降的情况下，可以显著降低 NO_x 。

3 结论

提出了一种基于决策树 CART 算法的柴油混合动力汽车能源管理策略，仿真结果表明，提出的方案可以减少 NO_x 排放的瞬态部分，该策略允许在不修改稳态部分的情况下限制瞬态部分。

未来的研究方向是监督稳态和瞬态 NO_x 排放，并通过缩减因子来调整 NO_x 减排和降低燃料消耗之间的权衡，有利于处理更多瞬态阶段的驾驶的能源管理。

参考文献：

- [1] 王添鑫. 新能源汽车 LLC 谐振 DC/DC 仿真设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (9): 262-266, 277.
- [2] 高 倩, 靳小波, 范利花, 等. 某型发动机控制器模拟接口电路测试性设计与验证 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (7): 7-10, 24.
- [3] Aldjia L, Mohamed K, Djalloul A, et al. Energy management and control of a hybrid water pumping system with storage [J]. Applied Solar Energy, 2017, 53 (2): 190-198.
- [4] 吴晓刚. 不同运行方式下增程式电动车能量管理策略优化 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22 (10): 96-105.
- [5] 王文霞. 数据挖掘中改进的 C4.5 决策树分类算法 [J]. 吉林大学学报: 理学版, 2017, 55 (5): 1274-1277.
- [6] 江志农, 魏东海, 王 磊. 基于 CART 决策树的柴油机故障诊断方法研究 [J]. 北京化工大学学报, 2018, 45 (4): 71-75.
- [7] Lyshevski S E. Energy conversion and optimal energy management in diesel-electric drivetrains of hybrid-electric vehicles [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 41 (1): 13-24.
- [8] 邓 涛, 罗俊林, 韩海硕, 等. 混合动力汽车工况识别自适应能量管理策略 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52 (1): 138-143.
- [9] Zhang J, Huang L, Shu J, et al. Energy management of PV-diesel-battery hybrid power system for island stand-alone micro-grid [J]. Energy Procedia, 2017, 105 (68): 201-206.
- [10] 王 涓. 基于加权 Pin-SVM 的钢板表面缺陷分类 [J]. 信息技术, 2019, (7): 116-120.
- [11] Camara M B, Gualous B D. Supercapacitors and battery energy management based on new european driving cycle [J]. Energy and Power Engineering, 2017, 6 (2): 168-177.
- [12] 基于粒子群算法的插电式混合动力客车实时策略 [J]. 机械工程学报, 2017, 53 (4): 77-84.
- [13] 李 奇, 陈维荣, 刘述奎. 燃料电池混合动力车辆多能源管理策略 [J]. 电工技术学报, 2017, 26 (1): 99-102.
- [14] Zhao D, Stobart R, Dong G, et al. Real-time energy management for Diesel heavy duty hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23 (3): 829-841.
- [15] 徐文庭, 殷昱煜, 王菊仙, 等. 基于 CART 与 SlopeOne 的服务质量预测算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23 (5): 163-173.