



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109635433 A

(43)申请公布日 2019.04.16

(21)申请号 201811517571.7

(22)申请日 2018.12.12

(71)申请人 湖北文理学院

地址 441053 湖北省襄阳市隆中路296号

(72)发明人 陈运星 马强 向立明 姚鹏华

(74)专利代理机构 南京纵横知识产权代理有限公司 32224

代理人 姚兰兰 董建林

(51)Int.Cl.

G06F 17/50(2006.01)

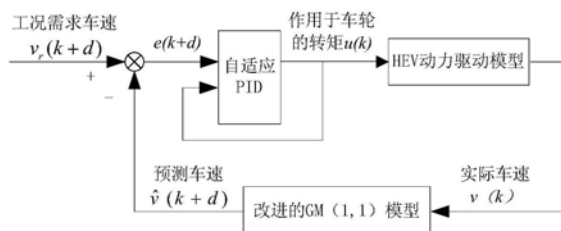
权利要求书3页 说明书7页 附图1页

(54)发明名称

一种改进灰色预测的混合动力汽车自适应PID动态控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种改进灰色预测的混合动力汽车自适应PID动态控制方法,包括如下步骤:(1)建立改进灰色预测模型GM(1,1);(2)建立自适应PID控制模型;(3)建立HEV动力驱动模型;(4)以典型工况(NEDC新欧洲行驶工况)的车速要求作为输入,基于Matlab/Simulink分别建立基于改进灰色预测的自适应PID闭环控制HEV行驶仿真模型和基于常规PID闭环控制的HEV行驶仿真模型,并分别对两个模型进行对比仿真分析。本发明通过建立改进的灰色预测模型,对HEV实际车速进行有效预测,同时建立参数可自动修正的自适应PID控制器,对HEV动力系统进行实时优化控制,使车速快速平稳上升,真正实现节能的目标。



1. 一种改进灰色预测的混合动力汽车自适应PID动态控制方法,其特征在于,包括如下步骤:

- (1) 建立改进的灰色预测模型GM(1,1);
- (2) 建立自适应PID控制模型;
- (3) 建立HEV动力驱动模型;

(4) 以典型工况的车速要求作为输入,分别建立基于灰色自适应PID闭环控制的HEV行驶仿真模型和基于常规PID闭环控制的HEV行驶仿真模型,并分别对两个模型进行对比仿真分析。

2. 根据权利要求1所述的改进灰色预测的混合动力汽车自适应PID动态控制方法,其特征在于,步骤(1)中,所述改进的灰色预测模型GM(1,1)具体的建立方法如下:

普通灰色预测序列:

$$\hat{v}^{(0)}(k+1) = (1-e^a)[v^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-ak}$$

GM(1,1)建模过程:

以 $V^{(0)}$ 为原始数据序列 $V^{(0)} = (v^{(0)}(1), v^{(0)}(2), \dots, v^{(0)}(n))$,对 $V^{(0)}$ 进行一次累加生成操作(AGO),得到 $V^{(0)}$ 的1-AGO序列 $V^{(1)} = (v^{(1)}(1), v^{(1)}(2), \dots, v^{(1)}(n))$,其中

$$v^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k v^{(0)}(i), k=1, 2, \dots, n,$$

设 $V^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列为 $Z^{(1)}$,其中

$$z^{(1)}(k) = 0.5[v^{(1)}(k) + v^{(1)}(k-1)], k=2, 3, \dots, n;$$

发展系数 a 和灰色作用量 b 由下式求得:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T V_n$$

$$\text{其中, } B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, V_n = [v^{(0)}(2) \quad v^{(0)}(3) \quad \dots \quad v^{(0)}(n)]^T.$$

3. 根据权利要求2所述的改进灰色预测的混合动力汽车自适应PID动态控制方法,其特征在于,所述普通灰色预测序列 $\hat{v}^{(0)}(k+1) = (1-e^a)[v^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-ak}$,知GM(1,1)模型的预测精度取决于:

(1-1) a 和 b 的值,而 a 和 b 的值依赖于原始序列 $V^{(0)}$ 和背景值 $Z^{(1)}$ 的构造形式;

(1-2) 原GM(1,1)模型以 $\hat{v}^{(1)}(1) = v^{(1)}(1)$ 为初始条件;根据GM(1,1)灰色模型的指数特性,利用在区间内 $[k, k+1]$ 积分的方法,令

$$z^{(1)}(k) = \frac{v^{(1)}(k) - v^{(1)}(k-1)}{\ln v^{(1)}(k) - \ln v^{(1)}(k-1)}, k=2, 3, \dots, n$$

优化了背景值,根据新信息优先原理提出了以 $y^{(1)}(n)$ 为初始条件的GM(1,1)模型:

$$\hat{v}^{(1)}(k+1) = [v^{(1)}(n) - \frac{b}{a}]e^{-a(k-n+1)} + \frac{b}{a}$$

根据上式进行k+d时刻的预测,其中d为步长,然后对累加后的数据进行还原,得到还原数据对k+d时刻的预测为:

$$\hat{v}(k+d) = [v^{(1)}(n) - \frac{b}{a}]e^{-a(k+d-n+1)}(1-e^a)。$$

4. 根据权利要求3所述的改进灰色预测的混合动力汽车自适应PID动态控制方法,其特征在于,步骤(2)中,所述自适应PID控制模型的建立方法如下:

PID离散控制式为:

$$u(k) = K_p e(k+d) + \frac{K_p}{T_i} \sum_{j=1}^{k+d} T_s e(j) + k_p T_d \frac{e(k+d) - e(k+d-1)}{T_s}$$

式中, T_s 为采样周期,k为采样序号, K_p 为比例系数, T_i 为积分时间, T_d 为积分时间, $e(k+d)$ 为工况需求车速 $v_r(k+d)$ 与预测车速 $\hat{v}(k+d)$ 之间的偏差,j表示采样时刻;

$$e(k+d) = v_r(k+d) - \hat{v}(k+d)$$

设

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k+d) - e(k+d-1) \\ x_2(k) = e(k+d) \\ x_3(k) = e(k+d) - 2e(k+d-1) + e(k+d-2) \end{cases}$$

由上式可知, $\Delta u(k) = K_p(k) x_1 + K_i(k) x_2 + K_d(k) x_3$,根据已有研究成果知:

$$\begin{cases} K_p(k) = K_p(k-1) + \Delta K_p(k) \\ K_i(k) = K_i(k-1) + \Delta K_i(k) \\ K_d(k) = K_d(k-1) + \Delta K_d(k) \end{cases}, \begin{cases} \Delta K_p(k) = n_p e(k+d) \frac{\partial \hat{v}(k+d)}{\partial u(k)} x_1(k) \\ \Delta K_i(k) = n_i e(k+d) \frac{\partial \hat{v}(k+d)}{\partial u(k)} x_2(k) \\ \Delta K_d(k) = n_d e(k+d) \frac{\partial \hat{v}(k+d)}{\partial u(k)} x_3(k) \end{cases}$$

式中, n_p, n_i, n_d 分别表示比例、积分、微分项的学习速度,利用符号信息 $\text{sign}[\partial \hat{v}(k+d) / \partial u(k)]$ 近似代替 $\partial \hat{v}(k+d) / \partial u(k)$,由此所带来的影响通过调整学习速度来补偿。

5. 根据权利要求1所述的改进灰色预测的混合动力汽车自适应PID动态控制方法,其特征在于,步骤(3)中,所述HEV动力驱动模型的建立方法如下:

根据汽车理论知识,将汽车行驶方程式作变形,得出相应的HEV动力驱动模型:

$$\frac{T \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta}{r} = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha + C_D \cdot A \cdot \frac{v^2}{21.15} + m \cdot g \cdot \sin \alpha + \delta \cdot m \cdot \frac{dv}{dt}$$

其中,T为汽车需求转矩, i_g 为变速器传动比, i_0 为主减变速器传动比, η 表示传动系统的机械效率,r表示车轮滚动半径,m表示整车质量,g表示重力加速度,f为道路滚动阻力系数, α 为道路行驶时的道路坡度角, C_D 为行驶过程中的空气阻力系数,A为车辆迎风面积,v为车辆行驶速度,t为混合动力汽车行驶时间, δ 为汽车旋转质量换算系数;

其中,上述公式中的第一项是在有坡度路面行驶才存在,第四项是在非匀速行驶条件下才存在,当车辆在水平道路上匀速行驶时是不存在上述两项阻力的。

6. 根据权利要求1所述的改进灰色预测的混合动力汽车自适应PID动态控制方法,其特征在在于,步骤(4)中,所述基于灰色自适应PID闭环控制的HEV行驶仿真模型仿真建模时,以典型工况的车速要求作为输入,通过自适应PID控制,得出汽车行驶过程中作用于车轮的驱动力矩,并经过汽车动力驱动模型,得到实际的汽车车速,最后由所述灰色预测模型将预测车速反馈。

7. 根据权利要求6所述的灰色预测的混合动力汽车自适应PID动态控制方法,其特征在在于,

所述基于常规PID闭环控制的HEV行驶仿真模型仿真建模时,与灰色自适应PID闭环控制相比,常规PID闭环控制无自适应模块和灰色预测模块。

一种改进灰色预测的混合动力汽车自适应PID动态控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及混合动力汽车控制技术领域,特别是涉及一种改进灰色预测的混合动力汽车自适应PID动态控制方法。

背景技术

[0002] 节能与环保是当前汽车工业发展的主题,因此研究高效节能的新能源汽车就成为了热点。传统混合动力汽车(HEV)在行驶过程中因系统惯性和滞后性严重影响车速的动态响应,不能满足车速响应对行驶工况的要求,并且由于HEV整车系统的非线性以及车速的时变性,要通过建立精确模型进行控制很难实现。另外,传统的并联式HEV动力系统控制策略并未考虑HEV实际行驶过程中控制策略的实现问题,忽略了HEV的动态特性,这些导致实际控制效果与预期差别较大,不仅不能实现能量在多能源动力系统合理分配,甚至可能导致动力系统整体效率的恶化,严重影响整车的动力性、经济性和排放性。

[0003] 目前被广泛采用的控制策略大多从优化目标函数出发,或以发动机油耗最小、或以汽车排放最小、或以综合发动机油耗及电动机等效油耗最小为优化目标,对各动力子系统的理论最优工作点进行计算,力求使HEV具有优良的环保与节能的性能。尽管各种控制策略的优化目标及优化方法有所侧重,但它们均较少考虑HEV的动态特性对其控制策略的反作用,其结果将可能导致HEV动态特性指标变坏,甚至出现难以实现HEV控制策略优化目标的状况。

[0004] 通过采用常规的车速PID闭环控制,提高了HEV的动态特性,但过分追求HEV的动态特性,会造成HEV动力系统驱动能力与其动态响应能力不足,使HEV控制策略能耗优化目标变差。

发明内容

[0005] 针对现有技术存在的不足,本发明目的是提供一种改进灰色预测的混合动力汽车自适应PID动态控制方法,对HEV动力系统实时优化控制,使车速快速平稳上升,真正实现节能的目标;HEV车速响应有了明显提高,且动力系统动态控制效果得到明显改善。

[0006] 为了实现上述目的,本发明是通过如下的技术方案来实现:

[0007] 本发明将改进后的灰色预测与自适应PID控制结合,并将二次型性能指标引入到PID控制器的整定过程中,加权系数自动可调,实现了自适应PID的最优控制律。用HEV动力驱动模型输出的车速历史数据,预测未来几步的车速,并将预测车速作为反馈信号与工况设定值进行比较得出偏差,作为自适应PID控制器的输入。从而使被延迟了的被控量超前反映到控制器,同时PID控制器的输出值直接反馈回来,作为自适应PID的修正参数,使控制器提前动作,实现动力系统的事先调节,从而减少超调量和加速调节过程,消除时滞对动态响应的影响,提高HEV车速响应和动力系统控制效果。

[0008] 本发明的一种改进灰色预测的混合动力汽车自适应PID动态控制方法,包括如下步骤:

[0009] (1) 建立改进的灰色预测模型GM(1,1);

[0010] (2) 建立自适应PID控制模型;

[0011] (3) 建立HEV动力驱动模型;

[0012] (4) 以典型工况 (NEDC新欧洲行驶工况) 的车速要求作为输入, 分别建立基于灰色自适应PID闭环控制的HEV行驶仿真模型和基于常规PID闭环控制的HEV行驶仿真模型, 并分别对两个模型进行对比仿真分析。

[0013] 步骤(1)中, 所述改进的灰色预测模型GM(1,1)具体的建立方法如下:

[0014] 普通灰色预测序列:

$$[0015] \quad \hat{v}^{(0)}(k+1) = (1-e^a)[v^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-ak}$$

[0016] GM(1,1)建模过程:

[0017] 以 $V^{(0)}$ 为原始数据序列 $V^{(0)} = (v^{(0)}(1), v^{(0)}(2), \dots, v^{(0)}(n))$, 对 $V^{(0)}$ 进行一次累加生成操作(AGO), 得到 $V^{(0)}$ 的1-AGO序列 $V^{(1)} = (v^{(1)}(1), v^{(1)}(2), \dots, v^{(1)}(n))$, 其中

$$[0018] \quad v^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k v^{(0)}(i), k=1, 2, \dots, n,$$

[0019] 设 $V^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列为 $Z^{(1)}$, 其中

$$[0020] \quad z^{(1)}(k) = 0.5[v^{(1)}(k) + v^{(1)}(k-1)], k=2, 3, \dots, n;$$

[0021] 发展系数 a 和灰色作用量 b 由下式求得:

$$[0022] \quad \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T V_n$$

$$[0023] \quad \text{其中, } B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, V_n = [v^{(0)}(2) \ v^{(0)}(3) \ \dots \ v^{(0)}(n)]^T.$$

[0024] 所述普通灰色预测序列 $\hat{v}^{(0)}(k+1) = (1-e^a)[v^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-ak}$, 知GM(1,1)模型的预测精度取决于:

[0025] (1-1) a 和 b 的值, 而 a 和 b 的值依赖于原始序列 $V^{(0)}$ 和背景值 $Z^{(1)}$ 的构造形式;

[0026] (1-2) 原GM(1,1)模型以 $\hat{v}^{(1)}(1) = v^{(1)}(1)$ 为初始条件; 根据GM(1,1)灰色模型的指数特性, 利用在区间内 $[k, k+1]$ 积分的方法, 令

$$[0027] \quad z^{(1)}(k) = \frac{v^{(1)}(k) - v^{(1)}(k-1)}{\ln v^{(1)}(k) - \ln v^{(1)}(k-1)}, k=2, 3, \dots, n$$

[0028] 优化了背景值, 根据新信息优先原理提出了以 $v^{(1)}(n)$ 为初始条件的GM(1,1)模型:

$$[0029] \quad \hat{v}^{(1)}(k+1) = [v^{(1)}(n) - \frac{b}{a}]e^{-a(k-n+1)} + \frac{b}{a}$$

[0030] 根据上式进行 $k+d$ 时刻的预测, 其中 d 为 d 步长, 然后对累加后的数据进行还原, 得到还原数据对 $k+d$ 时刻的预测为:

$$[0031] \quad \hat{v}(k+d) = [v^{(1)}(n) - \frac{b}{a}]e^{-a(k+d-n+1)}(1-e^a)。$$

[0032] 步骤(2)中,所述自适应PID控制模型的建立方法如下:

[0033] PID离散控制式为:

$$[0034] \quad u(k) = K_p e(k+d) + \frac{K_p}{T_i} \sum_{j=1}^{k+d} T_s e(j) + k_p T_d \frac{e(k+d) - e(k+d-1)}{T_s}$$

[0035] 式中, T_s 为采样周期, k 为采样序号, K_p 为比例系数, T_i 为积分时间, T_d 为微分时间, $e(k+d)$ 为工况需求车速 $v_r(k+d)$ 与预测车速 $\hat{v}(k+d)$ 之间的偏差, j 表示采样时刻;

$$[0036] \quad e(k+d) = v_r(k+d) - \hat{v}(k+d)$$

[0037] 设

$$[0038] \quad \begin{cases} x_1(k) = e(k+d) - e(k+d-1) \\ x_2(k) = e(k+d) \\ x_3(k) = e(k+d) - 2e(k+d-1) + e(k+d-2) \end{cases}$$

[0039] 由上式可知, $\Delta u(k) = K_p(k) x_1 + K_i(k) x_2 + K_d(k) x_3$,根据已有研究成果知:

$$[0040] \quad \begin{cases} K_p(k) = K_p(k-1) + \Delta K_p(k) \\ K_i(k) = K_i(k-1) + \Delta K_i(k) \\ K_d(k) = K_d(k-1) + \Delta K_d(k) \end{cases}, \begin{cases} \Delta K_p(k) = n_p e(k+d) \frac{\partial \hat{v}(k+d)}{\partial u(k)} x_1(k) \\ \Delta K_i(k) = n_i e(k+d) \frac{\partial \hat{v}(k+d)}{\partial u(k)} x_2(k) \\ \Delta K_d(k) = n_d e(k+d) \frac{\partial \hat{v}(k+d)}{\partial u(k)} x_3(k) \end{cases}$$

[0041] 式中, n_p 、 n_i 、 n_d 分别表示比例、积分、微分项的学习速度,利用符号信息 $sign[\partial \hat{v}(k+d) / \partial u(k)]$ 近似代替 $\partial \hat{v}(k+d) / \partial u(k)$,由此所带来的影响通过调整学习速度来补偿。

[0042] 步骤(3)中,所述HEV动力驱动模型的建立方法如下:

[0043] 根据汽车理论知识,将汽车行驶方程式作变形,得出相应的HEV动力驱动模型:

$$[0044] \quad \frac{T \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta}{r} = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha + C_D \cdot A \cdot \frac{v^2}{21.15} + m \cdot g \cdot \sin \alpha + \delta \cdot m \cdot \frac{dv}{dt}$$

[0045] 其中, T 为汽车需求转矩, i_g 为变速器传动比, i_0 为主减变速器传动比, η 表示传动系统的机械效率, r 表示车轮滚动半径, m 表示整车质量, g 表示重力加速度, f 为道路滚动阻力系数, α 为道路行驶时的道路坡度角, C_D 为行驶过程中的空气阻力系数, A 为车辆迎风面积, v 为车辆行驶速度, t 为混合动力汽车行驶时间, δ 为汽车旋转质量换算系数;

[0046] 其中,上述公式中的第一项是在有坡度路面行驶才存在,第四项是在非匀速行驶条件下才存在,当车辆在水平道路上匀速行驶时是不存在上述两项阻力的。

[0047] 步骤(4)中,所述基于灰色自适应PID闭环控制的HEV行驶仿真模型仿真建模时,以典型工况的车速要求作为输入,通过自适应PID控制,得出汽车行驶过程中作用于车轮的驱动力矩,并经过汽车动力驱动模型,得到实际的汽车车速,最后由所述灰色预测模型将预测车速反馈。

[0048] 上述基于常规PID闭环控制的HEV行驶仿真模型仿真建模时,与灰色自适应PID闭

环控制相比,常规PID闭环控制无自适应模块和灰色预测模块。

[0049] 本发明所能达到的有益效果:

[0050] 本发明的一种改进的灰色预测模型的自适应PID控制方法,通过建立改进的灰色预测模型,对HEV实际车速进行有效预测,同时建立参数可自动修正的自适应PID控制器,对HEV动力系统进行实时优化控制,使车速快速平稳上升,真正实现节能的目标;HEV车速响应有了明显提高,且动力系统动态控制效果得到明显改善。解决了HEV动态特性的提高受限于HEV动力系统驱动能力和响应能力的问题。

附图说明

[0051] 图1是本发明的一种改进灰色预测的混合动力汽车自适应PID动态控制方法的工作流程图。

具体实施方式

[0052] 为使本发明实现的技术手段、创作特征、达成目的与功效易于明白了解,下面结合具体实施方式,进一步阐述本发明。

[0053] 如图1所示。本发明是一种改进灰色预测的HEV动力系统自适应PID动态控制方法,该方法将灰色预测与自适应PID控制结合,并将二次型性能指标引入到PID控制器的整定过程中,加权系数自动可调,实现了自适应PID的最优控制律。用HEV动力驱动模型输出的车速历史数据,预测未来几步的车速,并将预测车速作为反馈信号与工况设定值进行比较得出偏差,作为自适应PID控制器的输入。从而使被延迟了的被控量超前反映到控制器,同时PID控制器的输出值直接反馈回来,作为自适应PID的修正参数,使控制器提前动作,实现动力系统的事先调节,从而减少超调量和加速调节过程,消除时滞对动态响应的影响,提高HEV车速响应和动力系统控制效果。

[0054] 本发明的方法包括如下具体步骤:

[0055] 1、建立改进的灰色预测模型GM(1,1)。

[0056] 普通灰色预测序列: $\hat{v}^{(0)}(k+1) = (1 - e^a)[v^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-ak}$

[0057] GM(1,1)建模过程:以 $V^{(0)}$ 为原始数据序列 $V^{(0)} = (v^{(0)}(1), v^{(0)}(2), \dots, v^{(0)}(n))$,对 $V^{(0)}$ 进行一次累加生成操作(AGO),得到 $V^{(0)}$ 的1-AGO序列 $V^{(1)} = (v^{(1)}(1), v^{(1)}(2), \dots, v^{(1)}$

$(n))$,其中 $v^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k v^{(0)}(i), k = 1, 2, \dots, n$

[0058] 设 $V^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列为 $Z^{(1)}$,其中

[0059] $z^{(1)}(k) = 0.5[v^{(1)}(k) + v^{(1)}(k-1)], k = 2, 3, \dots, n$

[0060] 发展系数 a 和灰色作用量 b 可由下式求得:

[0061]
$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T V_n$$

[0062] 其中, $B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}$, $V_n = [v^{(0)}(2) \ v^{(0)}(3) \ \dots \ v^{(0)}(n)]^T$ 。

[0063] 普通灰色预测序列 $\hat{v}^{(0)}(k+1) = (1-e^a)[v^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-ak}$, 可知GM(1,1)模型的预测精度取决于: (1) a和b的值, 而a和b的值依赖于原始序列和背景值 $Z^{(1)}$ 的构造形式; (2) 灰色微分方程模型初始条件的选取, 原GM(1,1)模型以 $\hat{v}^{(1)}(1) = v^{(1)}(1)$ 为初始条件。根据GM(1,1)灰色模型的指数特性, 利用在区间内 $[k, k+1]$ 积分的方法, 令

[0064] $z^{(1)}(k) = \frac{v^{(1)}(k) - v^{(1)}(k-1)}{\ln v^{(1)}(k) - \ln v^{(1)}(k-1)}, k = 2, 3, \dots, n$

[0065] 优化了背景值。根据新信息优先原理提出了以 $y^{(1)}(n)$ 为初始条件的GM(1,1)模型:

[0066] $\hat{v}^{(1)}(k+1) = [v^{(1)}(n) - \frac{b}{a}]e^{-a(k-n+1)} + \frac{b}{a}$

[0067] 根据上式进行k+d时刻的预测, 然后对累加后的数据进行还原, 得到还原数据对k+d时刻的预测为:

[0068] $\hat{v}(k+d) = [v^{(1)}(n) - \frac{b}{a}]e^{-a(k+d-n+1)}(1-e^a)$

[0069] 上述两种方法能各自独立的提高GM(1,1)的精度, 本发明同时运用这两类改进方法, 同时优化背景值和初始条件, 提高GM(1,1)模型的预测精度。

[0070] 2、建立自适应PID控制模型。

[0071] PID离散控制式为:

[0072] $u(k) = K_p e(k+d) + \frac{K_p}{T_i} \sum_{j=1}^{k+d} T_s e(j) + k_p T_d \frac{e(k+d) - e(k+d-1)}{T_s}$

[0073] 式中, T_s 为采样周期, k为采样序号, K_p 为比例系数, T_i 为积分时间, T_d 为积分时间, $e(k+d)$ 为工况需求车速 $v_r(k+d)$ 与预测车速 $\hat{v}(k+d)$ 之间的偏差, j表示采样时刻;

[0074]

[0075] $e(k+d) = v_r(k+d) - \hat{v}(k+d)$

[0076] 若设

[0077]
$$\begin{cases} x_1(k) = e(k+d) - e(k+d-1) \\ x_2(k) = e(k+d) \\ x_3(k) = e(k+d) - 2e(k+d-1) + e(k+d-2) \end{cases}$$

[0078] 由上式可知, $\Delta u(k) = K_p(k) x_1 + K_i(k) x_2 + K_d(k) x_3$, 根据已有研究成果可知:

$$[0079] \quad \begin{cases} K_p(k) = K_p(k-1) + \Delta K_p(k) \\ K_i(k) = K_i(k-1) + \Delta K_i(k) \\ K_d(k) = K_d(k-1) + \Delta K_d(k) \end{cases}, \quad \begin{cases} \Delta K_p(k) = n_p e(k+d) \frac{\partial \hat{v}(k+d)}{\partial u(k)} x_1(k) \\ \Delta K_i(k) = n_i e(k+d) \frac{\partial \hat{v}(k+d)}{\partial u(k)} x_2(k) \\ \Delta K_d(k) = n_d e(k+d) \frac{\partial \hat{v}(k+d)}{\partial u(k)} x_3(k) \end{cases}$$

[0080] 式中, n_p 、 n_i 、 n_d 分别表示比例、积分、微分项的学习速度, $\partial \hat{v}(k+d) / \partial u(k)$ 通常未知, 利用符号信息 $\text{sign}[\partial \hat{v}(k+d) / \partial u(k)]$ 近似代替, 由此所带来的影响可通过调整学习速度来补偿。

[0081] 3、建立HEV动力驱动模型。

[0082] 参考汽车理论, 将汽车行驶方程式作变形, 得出相应的HEV动力驱动模型。

$$[0083] \quad \frac{T \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta}{r} = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha + C_D \cdot A \cdot \frac{v^2}{21.15} + m \cdot g \cdot \sin \alpha + \delta \cdot m \cdot \frac{dv}{dt}$$

[0084] 其中, T 为汽车需求转矩, i_g 为变速器传动比, i_0 为主减变速器传动比, η 表示传动系统的机械效率, r 表示车轮滚动半径, m 表示整车质量, g 表示重力加速度, f 为道路滚动阻力系数, α 为道路行驶时的道路坡度角, C_D 为行驶过程中的空气阻力系数, A 为车辆迎风面积, v 为车辆行驶速度; t 为混合动力汽车行驶时间, δ 为汽车旋转质量换算系数。其中上述公式中的第一项和第四项是在特定行驶条件下才存在的, 当车辆在水平道路上匀速行驶时是不存在上述两项阻力的。

[0085] 4、以NEDC(新欧洲行驶工况)典型工况的车速要求作为输入, 基于Matlab/Simulink分别建立基于灰色自适应PID闭环控制的HEV行驶仿真模型和基于常规PID闭环控制的HEV行驶仿真模型, 并分别对两个模型进行对比仿真分析。

[0086] 基于灰色自适应PID控制的HEV行驶模型仿真建模时, 以NEDC(新欧洲行驶工况)典型工况的车速要求作为输入, 通过自适应PID控制, 得出汽车行驶过程中作用于车轮的驱动力矩, 并经过汽车动力驱动模型, 得到实际的汽车车速, 最后由改进的灰色预测模型将预测车速反馈。常规PID控制闭环仿真无自适应模块和灰色预测模块, 其它类似。选取NEDC工况中一段, 要求汽车车速在4s内从0加速到4.17m/s。控制系统的性能指标为: 上升时间 $t_r < 4s$, 最大超调量 $M_p < 5\%$, 稳态误差 $e_{\text{ss}} < 2\%$ 。车辆参数取自Cruise软件中某车型。具体实施例子如下:

[0087] 针对上述工况段, 调整两种PID控制器参数, 设定灰色自适应PID控制器 $K_p = 580$, $K_i = 2$, $K_d = 10$, 常规PID控制器 $K_p = 1700$, $K_i = 0.8$, $K_d = 10$, 此时灰色自适应PID控制能达到与常规PID控制一样的效果, HEV实际车速均能在2s内加速到设定车速, 且满足控制系统性能指标。但是对比此时所需的总输入力矩, 采用灰色自适应PID控制时, 所需总输入力矩瞬时达到最大值 $3.25kN \cdot m$ 后, 经较小波动在2s内逐渐降为0; 采用常规PID控制时, 所需总输入力矩瞬时达到最大值 $7.67kN \cdot m$ 后, 在2s内迅速降为0。虽然两种PID控制均实现了HEV车速的动态响应, 满足了工况要求, 但采用常规PID控制时, 对瞬时转矩的需求过大, 已超出发动机及电动机的驱动能力, 在实际中难以实现, 而采用灰色自适应PID控制时, 大大降低了对HEV动力驱动系统的要求。

[0088] 再针对同一工况段,当设定两种PID控制器参数相同时,都为 $K_p=580$, $K_i=2$, $K_d=10$ 时,采用常规PID控制的HEV实际车速响应曲线上升时间超过4s,不能满足急加速工况的要求。

[0089] 综上所述,通过在Matlab/Simulink平台建模仿真,通过调整灰色自适应PID控制器和常规PID控制器的参数,两种控制器均可以提高HEV实际车速的动态响应特性,满足实际工况的需求车速,而采用灰色自适应PID控制在实现车速动态响应的同时,大幅降低了对HEV动力系统的要求,满足HEV动力系统的驱动能力,优于常规PID控制。故采用灰色预测的HEV动力系统自适应PID动态控制方法能够提高HEV车速响应速度,降低对混合动力汽车动力系统驱动能力的要求,提高了混合动力汽车动力系统控制效果,有利于提高混合动力汽车整车动力性、经济性和排放性。

[0090] 以上显示和描述了本发明的基本原理和主要特征和本发明的优点。本行业的技术人员应该了解,本发明不受上述实施例的限制,上述实施例和说明书中描述的只是说明本发明的原理,在不脱离本发明精神和范围的前提下,本发明还会有各种变化和改进,这些变化和改进都落入要求保护的本发明范围内。本发明要求保护范围由所附的权利要求书及其等效物界定。

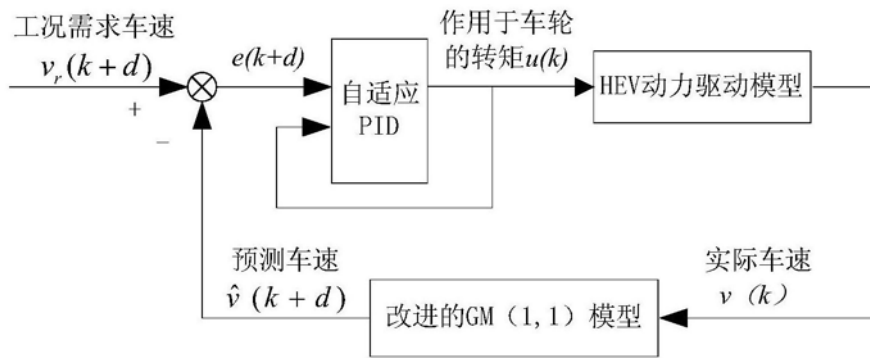


图1