



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103935360 B

(45) 授权公告日 2016. 05. 04

(21) 申请号 201410193080. 7

B60W 20/16(2016. 01)

(22) 申请日 2014. 05. 08

审查员 鲁俊龙

(73) 专利权人 长春工业大学

地址 130021 吉林省长春市朝阳区延安大街  
2055 号

(72) 发明人 张袅娜 丁海涛 于海芳 张哲  
武冬梅 王莹莹 王国亮

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务  
所 22210

代理人 田春梅

(51) Int. Cl.

B60W 40/12(2012. 01)

B60W 10/06(2006. 01)

B60W 10/08(2006. 01)

B60W 20/11(2016. 01)

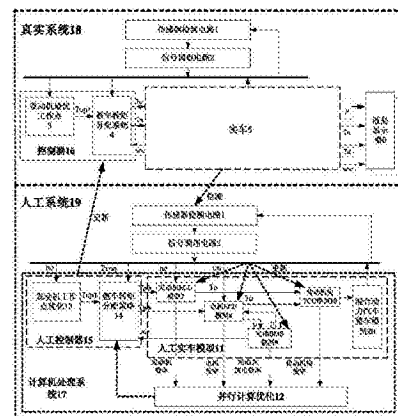
权利要求书3页 说明书11页 附图2页

(54) 发明名称

基于并行控制的混合动力汽车整车转矩分配  
系统及其方法

(57) 摘要

基于并行控制的混合动力汽车整车转矩分配系统及其方法涉及混合动力汽车控制领域,该系统由真实系统和人工系统组成,真实系统负责驱动实车实际运行,人工系统负责针对实车实时运行状态进行实车建模与控制器参数优化,二者并行执行。真实系统由传感器检测电路、信号调理电路、控制器和液晶显示器组成;人工系统由传感器检测电路、信号调理电路、计算机处理系统组成。本发明基于并行控制的混合动力汽车整车转矩分配系统,其结构简单,易于实现,可靠性高,提高了发动机燃油利用率,降低了排放,有效的改善了实车全寿命周期的实际运行性能及工作效率。



1. 基于并行控制的混合动力汽车整车转矩分配系统,其特征在于,该系统包括并行执行的真实系统(18)和人工系统(19),真实系统(18)包括传感器检测电路(1)、信号调理电路(2)、控制器(16)和液晶显示器(6),人工系统(19)包括传感器检测电路(1)、信号调理电路(2)和计算机处理系统(17);传感器检测电路(1)检测实车(5)中的发动机的转速、电机的转速、制动踏板或加速踏板的开度,经信号调理电路(2)对信号进行滤波处理后送给控制器(16)和计算机处理系统(17);

控制器(16)根据当前发动机转速经查表获得发动机当前转速下的最优工作转矩,根据信号调理电路(2)送来的踏板开度信息获得实车(5)的需求转矩,并与上述最优工作转矩做差,同时根据实车(5)中电池的电压、电流和温度信息经计算获得电池剩余能量soc,根据上述做差求得的转矩差值和电池剩余能量soc经二维查表计算求得当前车况下发动机的需求转矩,然后根据发动机的需求转矩求得电机的需求转矩;控制器(16)将发动机需求转矩与电机需求转矩传送给实车(5),作为实车(5)实时运行的设定值;液晶显示器(6)实时显示实车(5)的运行参数:电机转矩、发动机转矩、电池剩余能量soc以及燃油消耗值,方便用户实时掌握当前车况信息;

计算机处理系统(17)以发动机燃油消耗、尾气排放最低为目标,采用混沌自适应遗传算法,计算求得发动机全转速范围内的最优转矩工作曲线,然后根据当前发动机转速经插值计算求得发动机工作的最优转矩;根据信号调理电路(2)送来的踏板开度信息获得实车(5)的需求转矩,并将需求转矩与最优转矩做差运算,同时通过计算机处理系统(17)中的电池BMS模型获得电池剩余能量soc,根据所求得的转矩差值和电池剩余能量soc采用三层前馈神经网络算法计算求得电动机和发动机的需求转矩;计算机处理系统(17)根据传感器检测电路(1)获得当前工况下实车(5)中的发动机转速和转矩、电机转速和转矩、电机需求功率、电池剩余能量soc、发动机燃油消耗的实际值,然后实时修正计算机处理系统(17)中的人工实车模型,使之与实车(5)满足相似性定理,之后利用修正后的人工实车模型计算发动机效率、电机效率、电池当前工况下的充放电效率以及传动机构效率,计算机处理系统(17)根据人工实车模型的计算结果,采用TD法以整车效率最高为目标,实时调整整车转矩分配策略的网络权值,分别得到发动机最优转矩 $T_{opt}$ 与其转速 $n_e$ 构成的 $T_{opt}=f(n_e)$ 的一维数表、发动机实时转矩 $T_e$ 与整车需求转矩 $T_{req}$ 和发动机最优转矩 $T_{opt}$ 的差值、电池剩余能量soc构成的 $T_e=f(T_{req}-T_{opt}, soc)$ 的二维数表,并将其赋值给控制器(16),使得控制器(16)的参数随着车辆的工作状况可以在全寿命周期中获得优化。

2. 基于权利要求1所述的基于并行控制的混合动力汽车整车转矩分配系统的整车转矩分配方法,其特征在于,该方法包括如下步骤:

1) 基于自适应混沌遗传算法获得发动机全转速范围内的最优转矩曲线,存放于计算机处理系统(17)内的发动机工作点优化模块(13)中,并将其生成 $T_{opt}=f(n_e)$ 的一维数表存放于控制器(16)内的发动机最优工作点模块(3)中,然后设计基于线性补偿的三层前馈神经网络的整车转矩分配优化算法,将其存放在计算机处理系统(17)内的整车转矩分配策略模块(14)中,并将其生成 $T_e=f(T_{req}-T_{opt}, soc)$ 的二维数表存放在控制器(16)内的整车转矩分配系统模块(4)中;设计基于TD算法的神经网络权值更新规则,将其存放在计算机处理系统(17)内的并行计算优化模块(12)中;

2) 根据传感器检测电路(1)获取当前发动机转速信息,通过发动机最优工作点模块

(3),获得当前转速下的发动机最优转矩,求得与需求转矩的差值后,与电池剩余能量soc共同作为整车转矩分配系统模块(4)的输入,经插值计算求得对应的发动机需求转矩,根据 $T_{req}-T_e=T_m$ 求得当前电机转矩 $T_m$ ,将求得的发动机需求转矩和当前电机转矩 $T_m$ 输入给实车(5),驱动实车(5)运行,并将表征整车状态的参数送入液晶显示器(6)中显示;

3)利用传感器检测电路(1)和信号调理电路(2)将实车(5)运行中的需求转矩 $T_{req}$ 和发动机转速 $n_e$ 输入到计算机处理系统(17)中,发动机工作点优化模块(13)以发动机的经济性和排放最优为指标,利用自适应混沌遗传算法,全转速范围内搜索得到当前转速下发动机最优工作转矩 $T_{opt}$ ;

将发动机优化后的转矩 $T_{opt}$ 作为整车转矩分配策略模块(14)的输入,整车转矩分配策略模块(14)选用带有输入输出线性映射的三层前馈小波神经网络,根据式(7)求得发动机转矩 $T_e$ ,然后根据 $T_{req}-T_e=T_m$ 求得当前电机转矩 $T_m$ ;

$$T_e = \sum_{j=1}^5 c_j |a_j|^{-1/2} \psi \left( \left( \sum_{k=1}^2 a_j l_{kj} x_k - b_j \right) / a_j \right) + \sum_{k=1}^2 x_k d_k \quad (7)$$

式中: $j$ 为模型的隐节点数, $j=1, \dots, 5$ ;  $k=1, 2$ ,  $k$ 为系统输入量个数,其中 $x_1$ 为soc,  $x_2$ 为 $\Delta T=T_{req}-T_{opt}$ ;  $c_j$ 为隐层神经元至输出层神经元的连接权值;  $l_{kj}$ 为输入层神经元至隐层神经元的连接权值,  $d_k$ 为输入层到输出层神经元的连接权值;

将求得的发动机和电机需求转矩,送入计算机处理系统(17)内的人工实车模型模块(11)中,发动机和电机控制系统采用直接转矩控制方式,分别求得实际的发动机转矩与转速值、电机的转矩与转速值、发动机效率 $\eta_e$ 、电机效率 $\eta_m$ 、传动机构效率 $\eta_{tx}$ 、电池的充电效率 $\eta_{chg}$ 或放电效率 $\eta_{dis}$ ,根据式(8)计算求得整车效率;

$$\begin{aligned} d_j(t+1) &= d_j(t) + \beta(\eta_{HEV\_i}(t+1) + \gamma \eta_{HEV\_all\_i}(t+1) - \eta_{HEV\_all\_i}(t)) x_j(t) \quad (8) \\ c_j(t+1) &= c_j(t) + \beta(\eta_{HEV\_i}(t+1) + \gamma \eta_{HEV\_all\_i}(t+1) - \eta_{HEV\_all\_i}(t)) y_j(t) \\ a_{ij}(t+1) &= a_{ij}(t) + \alpha(\eta_{HEV\_i}(t+1) + \gamma \eta_{HEV\_all\_i}(t+1) - \eta_{HEV\_all\_i}(t)) y_i(t) (1-y(t)) \operatorname{sgn}(c_j(t)) x_j(t) \end{aligned}$$

式中, $i$ 为网络输入层节点个数, $j$ 为网络隐层节点个数, $\alpha, \beta$ 为修正系数, $\eta_{HEV\_i}(t+1)$ 为第 $t$ 次至 $t+1$ 次整车效率, $\eta_{HEV\_all\_i}(t+1)$ 为前 $t+1$ 次整车总效率之和, $\eta_{HEV\_all\_i}(t)$ 为前 $t$ 次整车总效率之和;

4)带有输入输出线性映射的三层前馈小波神经网络的权值通过并行计算优化模块(12)按照整车效率式(8)最优的原则,根据式(9)进行权值调整;

$$\eta_{HEV\_i}(t+1) = \eta_e(t+1) \cdot \eta_m(t+1) \cdot \eta_{tx}(t+1) \cdot \eta_{disch}(t+1) \cdot \eta_{chg}(t+1) \quad (9)$$

式中, $\eta_e(t+1)$ 为发动机效率, $\eta_m(t+1)$ 为电机效率, $\eta_{disch}(t+1)$ 和 $\eta_{chg}(t+1)$ 分别为电池充放电效率, $\eta_{tx}(t+1)$ 为传动机构的传动效率;

5)将步骤4)调整后的权值分别送给整车转矩分配系统模块(4)和整车转矩分配策略模块(14)中,更新后的整车转矩分配系统模块(4)控制实车(5)实时运行;更新后的整车转矩分配策略模块(14)控制人工实车模型模块(11)与真实系统(18)并行运行;

6)实车(5)的输出数据一方面送给液晶显示器(6)输出,另一方面经传感器检测电路(1)和信号调理电路(2),分别送给计算机处理系统(17)内的人工控制器(15)、控制器(16)以及人工实车模型模块(11),后者用于更新人工实车模型,使之与实车(5)在全寿命运行周

期内满足最大的相似性；

7)执行步骤2),循环进行。

## 基于并行控制的混合动力汽车整车转矩分配系统及其方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及混合动力汽车控制领域,特别涉及一种基于并行控制的混合动力汽车整车转矩分配系统及其方法。

### 背景技术

[0002] 混合动力汽车(HEV)以其兼具了传统燃油汽车和纯电动汽车的优点且同时具有低排放、低能耗等特点,成为当今最具应用前景的汽车。混合动力汽车包含至少两种车载动力源的设计方式增加了系统控制的灵活性,通过动力源和其它部件相互的协调控制,可形成不同的工作模式,以适应不同的行驶工况。因此整车控制策略是决定整车能耗及排放的关键技术。建立先进合理的转矩分配控制策略,利用电机提供的辅助转矩“削峰补填谷”调整发动机的实时工作点,使其工作在效率较高的区域,以达到节油降排的目的,以及对现有控制策略进行优化已成为国内外各著名汽车公司和研究机构探索的核心技术之一。通过分析混合动力系统各个部件的工作效率,发现发动机工作效率高的点未必是整个系统能耗较低点,因此基于燃油消耗及排放最优的整车的工作模式切换规则以及转矩分配控制策略很难保证全工况条件下整车系统效率最优。

[0003] 目前比较传统的转矩分配方法有以下四种:基于规则的逻辑门限控制、瞬时优化能量管理策略、全局最优控制、智能控制策略。基于规则的逻辑门限控制策略是根据发动机的静态效率曲线图,根据预先设定的规则,选择混合动力汽车的工作模式并实现模式之间的切换。基于规则的逻辑门限控制策略算法简单易行,具有很好的鲁棒性;但属于静态控制策略,不考虑实际行驶工况的动态变化,无法获得最优的性能;瞬时优化控制策略是以混合动力汽车的瞬时等效油耗和排放最小或系统功率损失最小为目标确定工作模式,进行效率优化,其缺点是需要进行大量的浮点运算,实时性较差;控制效能过分依赖总成各部件性能特性参数的精确性,受电池老化、发动机动态特性等的影响,在实际车辆的实时控制中难以实现;全局优化控制策略是以汽车在制定循环工况下的油耗和排放最小为目标选择工作模式进行效率优化。全局最优控制策略需要预先知道整个行驶工况,才能获得混合动力汽车在该行驶工况下的全局最优性能,这在实际车辆的实时控制中难以得到应用;智能控制的基本出发点是模仿人的智能,根据复杂被控动态过程的定性信息和定量信息,进行定性定量综合集成推理决策,以实现难以建模的非线性复杂系统的控制,所以非常适合于混合动力汽车动力总成的控制。

[0004] 神经网络控制具有很强的非线性拟合的能力,便于研究复杂的非线性关系,而且学习规则简单,便于计算机实现,在智能控制领域得到广泛应用;但神经网络在全局更新时收敛速度较慢,容易陷入局部极小值,不能实现全局最优。并且神经网络的隐层节点一般都采用非线性函数,使得网络的输入和输出为非线性关系,忽略了输入和输出的线性关系;随车用车时间的增加,一些汽车零部件的老化,原有的策略由于不能及时根据用车状况实时调整转矩分配方法中的设计参数,因此不能实现真正的优化分配。并行计算可将工作分离成多个离散部分,可同时运行多个程序指令,有助于同时解决各个离散部分问题,并且这种

多计算资源情况下解决问题的耗时要少于单个计算资源下的耗时,有效提高系统的运行速度。

### 发明内容

[0005] 为了解决混合动力客车非线性、强耦合、在运行中难以实时快速准确控制、不能根据车辆的机械磨损等信息及时调整控制器参数、不能保证全寿命运行周期过程中系统效率最优、发动机在工作时平均负荷率和燃油利用率过低的技术问题,本发明提出了一种基于并行控制的混合动力汽车整车转矩分配系统及其方法。

[0006] 本发明解决技术问题所采取的技术方案如下:

[0007] 基于并行控制的混合动力汽车整车转矩分配系统,包括并行执行的真实系统和人工系统,真实系统包括传感器检测电路、信号调理电路、控制器和液晶显示器,人工系统包括传感器检测电路、信号调理电路和计算机处理系统;传感器检测电路检测实车中的发动机的转速、电机的转速、制动踏板或加速踏板的开度,经信号调理电路对信号进行滤波处理后送给控制器和计算机处理系统;控制器根据当前发动机转速经查表获得发动机当前转速下的最优工作转矩,根据信号调理电路送来的踏板开度信息获得实车的需求转矩,并与上述最优工作转矩做差,同时根据实车中电池的电压、电流和温度信息经计算获得电池剩余能量soc,根据上述求得的转矩差值和电池剩余能量soc经二维查表计算求得当前车况下发动机的需求转矩,然后根据发动机的需求转矩求得电机的需求转矩;控制器将发动机需求转矩与电机需求转矩传送给实车,作为实车实时运行的设定值;液晶显示器实时显示实车的运行参数:电机转矩、发动机转矩、电池剩余能量soc以及燃油消耗值,方便用户实时掌握当前车况信息;计算机处理系统以发动机燃油消耗、尾气排放最低为目标,采用混沌自适应遗传算法,计算求得发动机全转速范围内的最优转矩工作曲线,然后根据当前发动机转速经插值计算求得发动机工作的最优转矩;根据信号调理电路送来的踏板开度信息获得实车的需求转矩,并将需求转矩与最优转矩做差运算,同时通过计算机处理系统中的电池BMS模型获得电池剩余能量soc,根据所求得的转矩差值和电池剩余能量soc采用三层前馈神经网络算法计算求得电动机和发动机的需求转矩;计算机处理系统根据传感器检测电路获得当前工况下实车中的发动机转速和转矩、电机转速和转矩、电机需求功率、电池剩余能量soc、发动机燃油消耗等的实际值,然后实时修正计算机处理系统中的人工实车模型,使之与实车满足相似性定理,之后利用修正后的人工实车模型计算发动机效率、电机效率、电池当前工况下的充放电效率以及传动机构效率,计算机处理系统根据人工实车模型的计算结果,采用TD法以整车效率最高为目标,实时调整整车转矩分配策略的网络权值,分别得到发动机最优转矩 $T_{opt}$ 与其转速 $n_e$ 构成的 $T_{opt}=f(n_e)$ 的一维数表、发动机实时转矩 $T_e$ 与整车需求转矩 $T_{req}$ 和发动机最优转矩 $T_{opt}$ 的差值、蓄电池剩余能量soc构成的 $T_e=f(T_{req}-T_{opt}, soc)$ 的二维数表,并将其赋值给控制器,使得控制器的参数随着车辆的工作状况可以在全寿命周期中获得优化。

[0008] 基于并行控制的混合动力汽车整车转矩分配方法,包括如下步骤:

[0009] 1)基于自适应混沌遗传算法获得发动机全转速范围内的最优转矩曲线,存放于计算机处理系统内的发动机工作点优化模块中,并将其生成 $T_{opt}=f(n_e)$ 的一维数表存放于控制器内的发动机最优工作点模块中,然后设计基于线性补偿的三层前馈神经网络的整车转

矩分配优化算法,将其存放在计算机处理系统内的整车转矩分配策略模块中,并将其生成 $T_e=f(T_{req}-T_{opt},soc)$ 的二维数表存放在控制器内的整车转矩分配系统模块中;设计基于TD算法的神经网络权值更新规则,将其存放在计算机处理系统内的并行计算优化模块中;

[0010] 2)根据传感器检测电路获取当前发动机转速信息,通过发动机最优工作点模块,获得当前转速下的发动机最优转矩,求得与需求转矩的差值后,与电池剩余能量soc共同作为整车转矩分配系统模块的输入,经插值计算求得对应的发动机需求转矩,根据 $T_{req}-T_e=T_m$ 求得当前电机转矩 $T_m$ ,将求得的发动机需求转矩和当前电机转矩 $T_m$ 输入给实车,驱动实车运行,并将表征整车状态的参数送入液晶显示器中显示;

[0011] 3)利用传感器检测电路和信号调理电路将实车运行中的需求转矩 $T_{req}$ 和发动机转速 $n_e$ 输入到计算机处理系统中,发动机工作点优化模块以发动机的经济性和排放最优为指标,利用自适应混沌遗传算法,全转速范围内搜索得到当前转速下发动机最优工作转矩 $T_{opt}$ ;

[0012] 将发动机优化后的转矩 $T_{opt}$ 作为整车转矩分配策略模块的输入,整车转矩分配策略模块选用带有输入输出线性映射的三层前馈小波神经网络,根据式(7)求得发动机转矩 $T_e$ ,然后根据 $T_{req}-T_e=T_m$ 求得当前电机转矩 $T_m$ ;

$$T_e = \sum_{j=1}^5 c_j |a_j|^{-1/2} \psi \left( \left( \sum_{k=1}^2 a_j l_{kj} x_k - b_j \right) / a_j \right) + \sum_{k=1}^2 x_k d_k \quad (7)$$

[0014] 式中: $j$ 为模型的隐节点数, $j=1, \dots, 5$ ;  $k=1, 2$ ,  $k$ 为系统输入量个数,其中 $x_1$ 为soc, $x_2$ 为 $\Delta T=T_{req}-T_{opt}$ ;  $c_j$ 为隐层神经元至输出层神经元的连接权值;  $l_{kj}$ 为输入层神经元至隐层神经元的连接权值,  $d_k$ 为输入层到输出层神经元的连接权值;

[0015] 将求得的发动机和电机需求转矩,送入计算机处理系统内的人工实车模型模块中,发动机和电机控制系统采用直接转矩控制方式,分别求得实际的发动机转矩与转速值、电机的转矩与转速值、发动机效率 $\eta_e$ 、电机效率 $\eta_m$ 、传动机构效率 $\eta_{tx}$ 、电池的充电效率 $\eta_{chg}$ 或放电效率 $\eta_{dis}$ ,根据式(8)计算求得整车效率;

$$d_j(t+1) = d_j(t) + \beta(\eta_{HEV\_i}(t+1) + \gamma \eta_{HEV\_all\_i}(t+1) - \eta_{HEV\_all\_i}(t)) x_j(t) \quad (8)$$

$$c_j(t+1) = c_j(t) + \beta(\eta_{HEV\_i}(t+1) + \gamma \eta_{HEV\_all\_i}(t+1) - \eta_{HEV\_all\_i}(t)) y_j(t)$$

$$a_{ij}(t+1) = a_{ij}(t) + \alpha(\eta_{HEV\_i}(t+1) + \gamma \eta_{HEV\_all\_i}(t+1) - \eta_{HEV\_all\_i}(t)) y_i(t) (1 - y(t)) \operatorname{sgn}(c_j(t)) x_j(t)$$

[0019] 式中, $i$ 为网络输入层节点个数, $j$ 为网络隐层节点个数, $\alpha$ 、 $\beta$ 为修正系数, $\eta_{HEV\_i}(t+1)$ 为第 $t$ 次至 $t+1$ 次整车效率, $\eta_{HEV\_all\_i}(t+1)$ 为前 $t+1$ 次整车总效率之和, $\eta_{HEV\_all\_i}(t)$ 为前 $t$ 次整车总效率之和;

[0020] 4)带有输入输出线性映射的三层前馈小波神经网络的权值通过并行计算优化模块按照整车效率式(8)最优的原则,根据式(9)进行权值调整;

$$\eta_{HEV\_i}(t+1) = \eta_e(t+1) \cdot \eta_m(t+1) \cdot \eta_{tx}(t+1) \cdot \eta_{disch}(t+1) \cdot \eta_{chg}(t+1) \quad (9)$$

[0022] 式中, $\eta_e(t+1)$ 为发动机效率, $\eta_m(t+1)$ 为电机效率, $\eta_{disch}(t+1)$ 和 $\eta_{chg}(t+1)$ 分别为电池充放电效率, $\eta_{tx}(t+1)$ 为传动机构的传动效率;

[0023] 5)将步骤4)调整后的权值分别送给整车转矩分配系统模块和整车转矩分配策略模块中,更新后的整车转矩分配系统模块控制实车实时运行;更新后的整车转矩分配策略模块控制人工实车模型模块与真实系统并行运行;

[0024] 6)实车的输出数据一方面送给液晶显示器输出,另一方面经传感器检测电路和信号调理电路,分别送给计算机处理系统内的人工控制器、控制器以及人工实车模型模块,后者用于更新人工实车模型,使之与实车在全寿命运行周期内满足最大的相似性;

[0025] 7)执行步骤2),循环进行。

[0026] 本发明的有益效果如下:

[0027] 1)本发明采用线性补偿的三层前馈神经网络控制策略,在神经网络模型输入输出非线性映射基础上增加了输入与输出的线性关系,提高了神经网络算法信息处理的鲁棒性和可靠性,有效的避免了转矩分配策略中的转矩调整规则的缺失现象,保证了混合动力系统整车效率最优情况下的转矩分配。

[0028] 2)本发明采用TD(时间差分)法对三层前馈神经网络的权值在结构和时间上基于整车效率最优的指标同时进行调整,使得神经网络权值不但在结构上获得更新,还考虑了时间轴上网络结构对系统性能指标的影响,有效地提高了转矩分配的准确性和实时性,提高了整车效率。

[0029] 3)本发明采用自适应混沌遗传算法求得满足发动机燃油消耗与排放指标最优条件的发动机最优工作转矩,根据当前发动机转速即可获得发动机在当前工况下的最优工作转矩,该转矩与实车需求转矩之差作为整车转矩分配优化模块的输入,这种基于最优曲线寻求发动机-电机的最佳能量组合,提高了发动机平均负荷率,使得发动机工作在最优油耗和最低排放点。有效的提高发动机的工作效率和燃油利用率,并减少了排放。

[0030] 4)本发明人工系统利用解析式获得与实车匹配的模型,并计算优化获得控制器参数。实车系统根据人工系统的计算结果,生成数表,作为真实系统的控制器,节约了系统实时运行时的计算时间,加快了真实系统的动态响应过程。

[0031] 5)本发明采用并行计算的方法,将整个系统分离成人工系统与真实系统,可同时运行多个程序指令,有效提高系统的运行速度,实现了实车全工况以及全寿命周期情况下进行发动机与电机转矩的分配优化,提高实车系统的工作效率。

[0032] 6)本发明简化了实车控制系统结构,具有鲁棒性强、实时性好、动态响应快、全寿命运行周期效率高等优点,且系统易于实现。

## 附图说明

[0033] 图1是本发明基于并行控制的混合动力汽车整车转矩分配系统的结构框图。

[0034] 图2是本发明中发动机工作点优化的流程图。

[0035] 图3是本发明中的整车转矩分配策略框图。

## 具体实施方式

[0036] 下面结合附图对本发明作进一步详细说明。

### 一、系统构成

[0038] 如图1所示,本发明基于并行控制的混合动力汽车整车转矩分配系统包括真实系统18和人工系统19两部分;真实系统18由传感器检测电路1、信号调理电路2、控制器16和液晶显示器6组成,控制器16包括发动机最优工作点模块3和整车转矩分配系统4两部分;人工系统19由传感器检测电路1、信号调理电路2、计算机处理系统17组成,其中计算机处理系统



17由人工控制器15、人工实车模型模块11和并行计算优化模块12组成,人工控制器15包括发动机工作点优化模块13和整车转矩分配策略模块14两部分,人工实车模型模块11包括发动机ECU(电子控制单元)模型7、电机ECU(电子控制单元)模型8、电池BMS(电池管理系统)模型9、传动机构TCU(自动变速箱控制单元)模型10和混合动力汽车整车模型20五部分。其中,发动机工作点优化模块13采用自适应混沌遗传算法,以发动机能耗及排送最优为目标,离线确定发动机全转速量程范围内的最优转矩工作曲线,并根据当前发动机转速求得对应的最优转矩值;整车转矩分配策略模块14根据发动机工作点优化模块13计算所得的最优工作转矩以及需求转矩二者的差值、人工实车模型模块11中的电池BMS模型9计算出的电池剩余能量soc值,采用线性补偿的三层前馈神经网络算法计算求得满足发动机最优能耗与排放指标的整车电机与发动机需求转矩分配值,神经网络的权值基于人工实车模型11中发动机效率、电机效率、电池充放电效率、传动机构效率最优的原则通过TD(时间差分)法进行时间与结构上的更新。真实系统18中的控制器16采用DSP单片机实现,实车14为真车;人工系统19中的计算机处理系统17采用DSP单片机实现。真实系统18与人工系统19采用并行控制的方式进行同步工作,由人工系统19根据传感器检测电路1获得的实车信息,进行实车模型的实时调整,使得二者随着时间、环境的变化以及机械磨损的影响下保持最大的相似性。并行计算优化模块12采用TD法在时间与结构上同时调整整车转矩分配策略模块14的网络参数,经优化计算后分别得到 $T_{opt}=f(n_e)$ 的map图、 $T_e=f(T_{req}-T_{opt}, soc)$ 的数表,并将其赋值给真实系统18中的控制器16,免去真实系统控制器参数优化的计算过程。

## [0039] 二、控制方案

[0040] 本发明将混合动力汽车整车转矩分配系统分为真实系统18与人工系统19两部分,构建一种真实系统与人工系统的并行控制模式,真实系统18负责驱动整车实际运行,人工系统19负责针对实车实时运行状态进行实车建模与控制器参数优化,二者并行执行。人工系统19选用带有线性补偿的三层前馈神经网络作为整车转矩分配算法,并将神经网络与TD法结合,使得网路权值能够在时间与空间上同步更新,并将网络优化的结果生成数表更新真实系统中的控制器16,从而实现混合动力汽车转矩分配的全寿命周期优化控制,克服了神经网络学习速度较慢和传统瞬时优化能量管理策略难以实时控制的缺点;具有鲁棒性强、实时性好、动态响应快、全寿命运行周期效率高等优点。

### [0041] 1、本发明采用的控制算法

#### [0042] 1)基于自适应混沌遗传算法的发动机工作曲线优化确定

[0043] 发动机的转速和扭矩工作范围较宽,其燃油经济区域与最低排放区域是不重合的。为了获得理想的整车性能,必须兼顾处理燃油经济性和排放之间的关系。当汽车工况发生变化时,按照传统的基线值控制方法不易获得满足性能要求的最佳工作点。而实时自适应控制可以实现最优控制,但优化过程复杂,计算量大,这对实时性要求较高的汽车控制系统是不利的。因此本发明提出综合考虑燃油经济性和排放性能的模糊逻辑控制策略。根据发动机的经济性和排放运行特点,利用自适应混沌遗传算法,在某一给定速度下,根据控制目标寻求发动机-电机最佳能量组合来决定发动机的最优工作点,实现燃油消耗和各排放物都较少的目标。

[0044] 实现步骤如图2所示。

[0045] (1)初始种群:将待寻优的参数:发动机输出转矩表示为遗传算法的基因即个体,

采用二进制编码方式,多个个体组成群体,初始种群采用随机方法生成。

[0046] (2)适应度函数:本发明采用下列燃油消耗和各排放物指标的线性组合作为适应度函数,并且是以求函数最小值为优化目标。

$$[0047] \quad J = \omega_1 \frac{\text{燃油消耗}}{\text{最优燃油消耗}} + \omega_2 \frac{\text{HC排放值}}{\text{HC最优排放值}} + \omega_3 \frac{\text{CO排放值}}{\text{CO最优排放值}} + \omega_4 \frac{\text{NO}_x \text{排放值}}{\text{NO}_x \text{最优排放值}} \quad (1)$$

[0048] 式中, $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 、 $\omega_4$ 为燃油消耗和各排放物指标的权值,满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1$ 。当发动机冷启动时,发动机排放比较严重,为减少排放,应增大排放权值;而在其他工况时,排放较好,应减小排放权值。因此权值选择如表1所示。

[0049] 表1不同工况下的权值表

[0050]

权值	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$
冷启动工况	0.25	0.25	0.25	0.25
低速行驶工况	0.75	0.1	0.1	0.05
中速行驶工况	0.65	0.1	0.05	0.2
高速行驶工况	0.68	0.1	0.2	0.02

[0051] (3)选择:为保证适应度较高的个体有更多的机会遗传到下一代群体中,本发明采用赌盘选择的方式确定每个个体被选中的次数,即第*i*个个体被选择的概率是 $p_i = f_i / \sum f_i$ ,其中 $f_i$ 为第*i*个个体的适应度值。然后按照适应度值由高到低的顺序对个体排序,由此组成父本。

[0052] (4)交叉:采用自适应交叉概率 $P_c$ :

$$[0053] \quad P_c(t) = \sqrt{\frac{1}{2}(FA^2 + FC^2)} \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (2)$$

[0054] 式中, $t$ 为遗传代数; $T$ 表示终止代数; $FA = (F_{\max} - F) / (\bar{F}_{\max} - F_{\min})$ ;  $FC = (F_{\max} - F(x)) / (F_{\max} - F_{\min})$ ;  $F_{\max}$ 表示最大适应度值; $F_{\min}$ 表示最小适应度值; $\bar{F}$ 表示平均适应度值; $F(x)$ 取交叉串中较大适应度函数值。经过交叉操作,得到更新后的种群。

[0055] (5)变异:采用自适应变异概率 $P_m$ :

$$[0056] \quad P_m(t) = \frac{FM}{1 + FA} \left(1 - \frac{D}{D_{\max}}\right) f^{\frac{1}{L}} \quad (3)$$

[0057] 式中, $FM = (F_{\max} - F(x_m)) / (F_{\max} - F_{\min})$ ;其中, $L$ 表示染色体的长度; $D$ 表示父串之间的欧氏距离; $F(x_m)$ 表示变异个体 $x_m$ 的适应度值。对更新后的种群中的个体逐个进行变异操作。变异操作就是用一个随机产生的数值代替原来基因座上的数值。这样,经过选择、交叉、变异,得到新一代的种群。

[0058] (6)混沌插入:

[0059] 采用混沌插入算子更新群体中的部分个体。首先利用Logistic映射产生混沌变量序列 $\{z_k\}$

$$[0060] \quad z_{k+1} = \mu z_k(1 - z_k), k = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

[0061] 式中, $z_0 \in (0, 1)$ ,当 $\mu = 4$ 时,系统(4)为完全混沌状态。选取新群体中的适应度较

小的80%的个体 $\lambda_s^*$ ,  $\lambda_s \in (a, b)$ ,  $s=1, \dots, r$ ,  $r < N$ 。通过参数变换 $y_s^* = (\lambda_s - a)/(b - a)$ , 映射到 $[0, 1]$ 区间后形成矩阵 $y^* \in R^{r \times 1}$ ; 再以某一随机值为初值, 通过式(4)得到混沌序列 $z_k$ ,  $k=1, 2, \dots, 6r$ , 并形成矩阵 $y = \{y_j\} \in R^{r \times 1}$ , 将混沌序列矩阵 $y$ 加到参数矩阵 $y^*$ , 得:

$$[0062] \quad y^{*'} = (1 - \alpha)y^* + \alpha y \quad (5)$$

[0063] 式中,  $\alpha = 1 - [(m-1)/m]^\beta$ ,  $m$ 为进化代数;  $\beta$ 是整数, 随优化目标函数而定;  $0 < \alpha < 1$ , 采用自适应选取, 对矩阵 $y^{*'}$ 进行参数反变换:  $\lambda_s^{*'} = a + (b - a)y^{*'}$ ,  $s=1, \dots, r$ , 得到新的个体集合 $\lambda^{*'}$ , 以进行下一代的遗传搜索操作。由于混沌运动能够遍历空间所有状态, 选择80%的基因加上混沌扰动, 避免了由于早熟引发的进化停滞。

[0064] 依此类推, 经过遗传迭代后, 最终获得满足性能指标 $J$ 的优化转矩 $T_{opt}$ 。发动机的优化转矩 $T_{opt}$ 曲线是在稳态条件下将一定转速下的发动机最小比油耗点、最小比排放点加权求和后所连接成的曲线, 即综合考虑燃油经济性和排放后的目标函数。且可通过调整各自的权值, 在燃油经济性和排放性之间有所侧重。

[0065] 根据自适应混沌遗传算法获得的发动机工作曲线优化 $T_{opt} = f(n_e)$ , 建立一维map图, 利用查表的方式根据传感器检测到的当前发动机转速, 即可通过插值的方式求得与转速对应的发动机最优转矩 $T_{opt}$ 值。

[0066] 2) 基于三层前馈神经网络的整车转矩分配优化策略

[0067] 神经网络控制具有很强的非线性拟合的能力, 便于研究复杂的非线性关系, 而且学习规则简单, 便于计算机实现, 在智能控制领域得到广泛应用; 但神经网络在全局更新时收敛速度较慢, 容易陷入局部极小值, 不能实现全局最优。并且神经网络的隐层节点一般都采用非线性函数, 使得网络的输入和输出为非线性关系, 忽略了输入和输出的线性关系, 本发明的三层前馈神经网络结构, 输入和输出之间在非线性的基础上增加了线性映射的函数关系, 提高了神经网络算法信息处理的鲁棒性和可靠性, 有效的避免了转矩分配策略中的转矩调整规则的缺失现象, 保证了混合动力系统整车效率最优情况下的最佳转矩分配。基于三层前馈神经网络的整车转矩分配优化策略结构如图3所示。

[0068] 输入层的数据为:  $x(k) \{soc, \Delta T = T_{req} - T_{opt}\}$ ,  $soc$ 为蓄电池剩余能量、 $T_{req}$ 为需求转矩、 $T_{opt}$ 为发动机优化转矩。三层前馈神经网络的输出为发动机转矩记做:  $T_e(k)$ ,  $k$ 为采样时刻。

[0069] 隐含层的激活函数选择Mexicanhat小波函数:

$$[0070] \quad \Psi(x) = (1 - x^2) \exp(-x^2/2)$$

[0071] 式中,  $\Psi(x)$ 为小波函数, 满足在时域具有紧支撑, 在频域具有正则性, 将母小波进行伸缩和平移, 可得小波基函数:

$$[0072] \quad \Psi_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \Psi((x-b)/a) \quad (6)$$

[0073] 式中:  $a$ 为尺度因子,  $b$ 为平移因子,  $x$ 为隐含层的输入变量。

[0074] 系统的输出为发动机转矩 $T_e$ :

$$[0075] \quad T_e = \sum_{j=1}^5 c_j |a_j|^{-1/2} \Psi \left( \left( \sum_{k=1}^2 a_{jk} x_k - b_j \right) / a_j \right) + \sum_{k=1}^2 x_k d_k \quad (7)$$

[0076] 式中:  $j$ 为模型的隐节点数,  $j=1, \dots, 5$ ;  $k=1, 2$ ,  $k$ 为系统输入量个数, 其中 $x_1$ 为 $soc$ ,  $x_2$ 为 $\Delta T = T_{req} - T_{opt}$ ;  $c_j$ 为隐层神经元至输出层神经元的连接权值;  $l_{kj}$ 为输入层神经元

至隐层神经元的连接权值,  $d_k$ 为输入层到输出层神经元的连接权值。

[0077] 然后根据  $T_{req} - T_e = T_m$  求得当前电机转矩  $T_m$ 。

[0078] 3) 基于TD算法的三层前馈神经网络权值更新

[0079] 由于待寻优的小波神经网络只能实现非线性静态映射, 无法实现实时控制, 所以本发明采用TD(时间差分法)实现三层前馈神经网络权值在时间和结构上的更新, TD法是利用相继时间的预测值的差值来指导学习的。此方法可以将时间因素作为参数引入小波神经网络, 对权值进行调整, 充分发挥时间更新的特点, 克服了以往系统中难以实时控制的缺点。采用将系统多步预测的各步预测值在网络同时输出的方法, 即在  $t$  时刻不仅输出  $T_e(t)$  的值, 还要输出  $T_e(1), T_e(2), \dots, T_e(t+1)$  的值, 通过各瞬时预测值之差调整小波神经网络权值, 可得权值表达式:

$$[0080] \quad d_j(t+1) = d_j(t) + \beta(\eta_{HEV\_i}(t+1) + \gamma \eta_{HEV\_all\_i}(t+1) - \eta_{HEV\_all\_i}(t))x_j(t) \quad (8)$$

$$[0081] \quad c_j(t+1) = c_j(t) + \beta(\eta_{HEV\_i}(t+1) + \gamma \eta_{HEV\_all\_i}(t+1) - \eta_{HEV\_all\_i}(t))y_j(t)$$

$$[0082] \quad a_{ij}(t+1) = a_{ij}(t) + \alpha(\eta_{HEV\_i}(t+1) + \gamma \eta_{HEV\_all\_i}(t+1) - \eta_{HEV\_all\_i}(t))y_i(t)(1-y(t)) \text{sgn}(c_j(t))x_j(t)$$

[0083] 式中,  $i$  为网络输入层节点个数,  $j$  为网络隐层节点个数,  $\alpha, \beta$  为修正系数。  $\eta_{HEV\_i}(t+1)$  为第  $t$  次至  $t+1$  次整车效率,  $\eta_{HEV\_all\_i}(t+1)$  为前  $t+1$  次整车总效率和,  $\eta_{HEV\_all\_i}(t)$  为前  $t$  次整车总效率和。

[0084] 整车效率  $\eta_{HEV\_i}(t+1)$  计算如下:

$$[0085] \quad \eta_{HEV\_i}(t+1) = \eta_e(t+1) \cdot \eta_m(t+1) \cdot \eta_{tx}(t+1) \cdot \eta_{disch}(t+1) \cdot \eta_{chg}(t+1) \quad (9)$$

[0086] 式中,  $\eta_e(t+1)$  为发动机效率,  $\eta_m(t+1)$  为电机效率,  $\eta_{disch}(t+1)$  和  $\eta_{chg}(t+1)$  分别为电池充放电效率,  $\eta_{tx}(t+1)$  传动机构的传动效率。

[0087] (1) 电机的效率特性

[0088] 电机及其控制器总成的效率  $\eta_m$  按下式计算:

$$[0089] \quad \eta_m = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (10)$$

[0090] 式中,

$$[0091] \quad P_{out} = P_{mc} = \frac{P_{wh}}{\eta_{tx}} = \frac{T_{wh}\omega_{wh}/1000}{\eta_{tx}} \quad (11)$$

$$[0092] \quad P_{in} = P_{ess} = T_{mc}\omega_{mc}/1000$$

[0093] 式中,  $P_{out}$ (kW) 电机输出的机械功率;  $P_{in}$ (kW) 电机输入的电功率;  $P_{wh}$ (kW) 驱动轮的驱动功率;  $P_{mc}$ (kW) 电机功率;  $\eta_{tx}$ (%) 传动系机械传动效率;  $T_{wh}$ (Nm) 驱动轮的驱动转矩;  $\omega_{wh}$ (rad/s) 车轮转速;  $\omega_{mc}$ (rad/s) 电机转速;  $T_{mc}$ (Nm) 电机转矩。电机的输出机械功率由汽车的驱动轮转矩和车轮转速的乘积除以传动系机械效率所得。电机的输入功率是电池的输出功率也是电机输出转矩和电机转速的乘积。其中, 汽车的驱动轮转矩、车轮转速及电机的输出转矩和电机转速均能用传感器检测得到。当电机处于发电状态时, 其方向正好与之相反。

[0094] (2) 发动机效率特性

[0095] 以发动机有效热效率  $\eta_e$  表征发动机的效率特性。有效热效率  $\eta_e$  是有效功  $W_e$  与所消耗燃油热量  $Q_i$  之比值:

$$[0096] \quad \eta_e = \frac{W_e}{Q_l} \times 100\% \quad (12)$$

[0097] 式中,发动机的有效功如式(13)所示,发动机的有效功率如式(14)所示,消耗燃油热量如式(15)所示。

$$[0098] \quad W_e = P_e \Delta t \quad (13)$$

$$[0099] \quad P_e = T_e * \omega_e = \frac{T_e * n_e}{9550} \quad (14)$$

$$[0100] \quad Q_l = \Delta m_{fuel} h_u \quad (15)$$

[0101] 其中: $P_e$ (KW)为发动机的有效功率; $h_u$ (kJ/kg)为燃油的低热值; $\Delta t$ (s)为一个控制周期时间; $\Delta m_{fuel}$ (kg)为一个控制周期内的燃油消耗量。

[0102] 有效功是发动机的发出功率与控制周期时间的乘积,消耗燃油热量值是控制周期燃油消耗量与燃油热值的乘积。其中,车轮的转矩、转速和燃料的消耗量由传感器测出。

[0103] (3)电池效率特性

[0104] 当电机单独工作或联合驱动时,电池处于放电工况,电池SOC值下降,瞬时放电效率 $\eta_{disch}$ 定义为:

$$[0105] \quad \eta_{disch} = \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{4R_{dis} P_{ess}}{U_{oc}}} \right) \times 100\% \quad (16)$$

[0106] 当发动机驱动并发电或再生制动工作模式时,电池处于充电工况,电池SOC值上升,电池瞬时充电效率 $\eta_{chg}$ 定义为:

$$[0107] \quad \eta_{chg} = \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{4R_{chg} P_{ess}}{U_{oc}}} \right) \times 100\% \quad (17)$$

[0108] 式中, $R_{chg}$ ( $\Omega$ )电池充电内阻; $R_{dis}$ ( $\Omega$ )电池放电内阻; $U_{oc}$ (V)电池开路电压;电池充电内阻、电池放电内阻和电池开路电压由内阻传感器和电压传感器测得, $P_{ess}$ (kW)由公式(11)得到。

[0109] (4)传动机构效率

[0110] 传动机构效率 $\eta_{tx}$ 是指所究并联混合动力汽车所包含的转矩合成装置、变速箱和主减速器在内的机械传动机构的传动效率,即汽车驱动轮处的输出功率与发动机曲轴输出功率与电机输出功率之和的比值(忽略离合器的影响):

$$[0111] \quad \eta_{tx} = \frac{\int_0^{T_{cyc}} P_{wh} dt}{\int_0^{T_{cyc}} (P_e + P_m) dt} \times 100\% \quad (18)$$

[0112] 式中: $\eta_{tx}$ (%)传动系机械传动效率; $P_{wh}$ (kW)驱动轮的驱动功率,如式(10); $P_e$ (kW)发动机输出功率,如式(14); $P_m$ (kW)电机功率,如式(10); $T_{cyc}$ (s)行驶工况的总时间。根据传感器检测到的实车数据每个采样时刻进行更新计算。

[0113] 2.本发明基于并行控制的混合动力汽车整车转矩分配方法包括如下步骤:

[0114] 1)基于自适应混沌遗传算法获得发动机全转速范围内的最优转矩曲线,存放于计

计算机处理系统17内的发动机工作点优化模块13中,并将其生成 $T_{opt}=f(n_e)$ 的一维数表存放于控制器16内的发动机最优工作点模块3中,然后设计基于线性补偿的三层前馈神经网络的整车转矩分配优化算法,将其存放在计算机处理系统17内的整车转矩分配策略模块14中,并将其生成 $T_e=f(T_{req}-T_{opt},soc)$ 的二维数表存放在控制器16内的整车转矩分配系统模块4中;设计基于TD算法的神经网络权值更新规则,将其存放在计算机处理系统17内的并行计算优化模块12中;

[0115] 2)根据传感器检测电路1获取当前发动机转速信息,通过发动机最优工作点模块3,获得当前转速下的发动机最优转矩,求得与需求转矩的差值后,与电池剩余能量soc共同作为整车转矩分配系统模块4的输入,经插值计算求得对应的发动机需求转矩,根据 $T_{req}-T_e=T_m$ 求得当前电机转矩 $T_m$ ,将求得的发动机需求转矩和当前电机转矩 $T_m$ 输入给实车5,驱动实车5运行,并将表征整车状态的参数送入液晶显示器6中显示;

[0116] 3)利用传感器检测电路1和信号调理电路2将实车5运行中的需求转矩 $T_{req}$ 和发动机转速 $n_e$ 输入到计算机处理系统17中,发动机工作点优化模块13以发动机的经济性和排放最优为指标,利用自适应混沌遗传算法,全转速范围内搜索得到当前转速下发动机最优工作转矩 $T_{opt}$ ;

[0117] 将发动机优化后的转矩 $T_{opt}$ 作为整车转矩分配策略模块14的输入,整车转矩分配策略模块14选用带有输入输出线性映射的三层前馈小波神经网络,根据式7求得发动机转矩 $T_e$ ,然后根据 $T_{req}-T_e=T_m$ 求得当前电机转矩 $T_m$ ;

$$[0118] \quad T_e = \sum_{j=1}^5 c_j \left[ a_j \left[ \psi \left( \left( \sum_{k=1}^2 a_{kj} l_{kj} x_k - b_j \right) / a_j \right) \right] + \sum_{k=1}^2 x_k d_k \right] \quad (7)$$

[0119] 式中: $j$ 为模型的隐节点数, $j=1, \dots, 5$ ;  $k=1, 2$ ,  $k$ 为系统输入量个数,其中 $x_1$ 为soc, $x_2$ 为 $\Delta T=T_{req}-T_{opt}$ ;  $c_j$ 为隐层神经元至输出层神经元的连接权值; $l_{kj}$ 为输入层神经元至隐层神经元的连接权值, $d_k$ 为输入层到输出层神经元的连接权值;

[0120] 将求得的发动机和电机需求转矩,送入计算机处理系统17内的人工实车模型模块11中,发动机和电机控制系统采用直接转矩控制方式,分别求得实际的发动机转矩与转速值、电机的转矩与转速值、发动机效率 $\eta_e$ 、电机效率 $\eta_m$ 、传动机构效率 $\eta_{tx}$ 、电池的充电效率 $\eta_{chg}$ 或放电效率 $\eta_{dis}$ ,根据式(8)计算求得整车效率;

$$[0121] \quad d_j(t+1) = d_j(t) + \beta(\eta_{HEV\_i}(t+1) + \gamma \eta_{HEV\_all\_i}(t+1) - \eta_{HEV\_all\_i}(t)) x_j(t) \quad (8)$$

$$[0122] \quad c_j(t+1) = c_j(t) + \beta(\eta_{HEV\_i}(t+1) + \gamma \eta_{HEV\_all\_i}(t+1) - \eta_{HEV\_all\_i}(t)) y_j(t)$$

$$[0123] \quad a_{ij}(t+1) = a_{ij}(t) + \alpha(\eta_{HEV\_i}(t+1) + \gamma \eta_{HEV\_all\_i}(t+1) - \eta_{HEV\_all\_i}(t)) y_i(t) (1 - y(t)) \operatorname{sgn}(c_j(t)) x_j(t)$$

[0124] 式中, $i$ 为网络输入层节点个数, $j$ 为网络隐层节点个数, $\alpha$ 、 $\beta$ 为修正系数, $\eta_{HEV\_i}(t+1)$ 为第 $t$ 次至 $t+1$ 次整车效率, $\eta_{HEV\_all\_i}(t+1)$ 为前 $t+1$ 次整车总效率之和, $\eta_{HEV\_all\_i}(t)$ 为前 $t$ 次整车总效率之和;

[0125] 4)带有输入输出线性映射的三层前馈小波神经网络的权值通过并行计算优化模块12按照整车效率式(8)最优的原则,根据式(9)进行权值调整;

$$[0126] \quad \eta_{HEV\_i}(t+1) = \eta_e(t+1) \cdot \eta_m(t+1) \cdot \eta_{tx}(t+1) \cdot \eta_{disch}(t+1) \cdot \eta_{chg}(t+1) \quad (9)$$

[0127] 式中, $\eta_e(t+1)$ 为发动机效率, $\eta_m(t+1)$ 为电机效率, $\eta_{disch}(t+1)$ 和 $\eta_{chg}(t+1)$ 分别为

电池充放电效率,  $\eta_{tx}(t+1)$  为传动机构的传动效率;

[0128] 5) 将步骤4) 调整后的权值分别送给整车转矩分配系统模块4和整车转矩分配策略模块14中, 更新后的整车转矩分配系统模块4控制实车5实时运行; 更新后的整车转矩分配策略模块14控制人工实车模型模块11与真实系统18并行运行;

[0129] 6) 实车5的输出数据一方面送给液晶显示器6输出, 另一方面经传感器检测电路1和信号调理电路2, 分别送给计算机处理系统17内的人工控制器15、控制器16以及人工实车模型模块11, 后者用于更新人工实车模型, 使之与实车5在全寿命运行周期内满足最大的相似性;

[0130] 7) 执行步骤2), 循环进行。

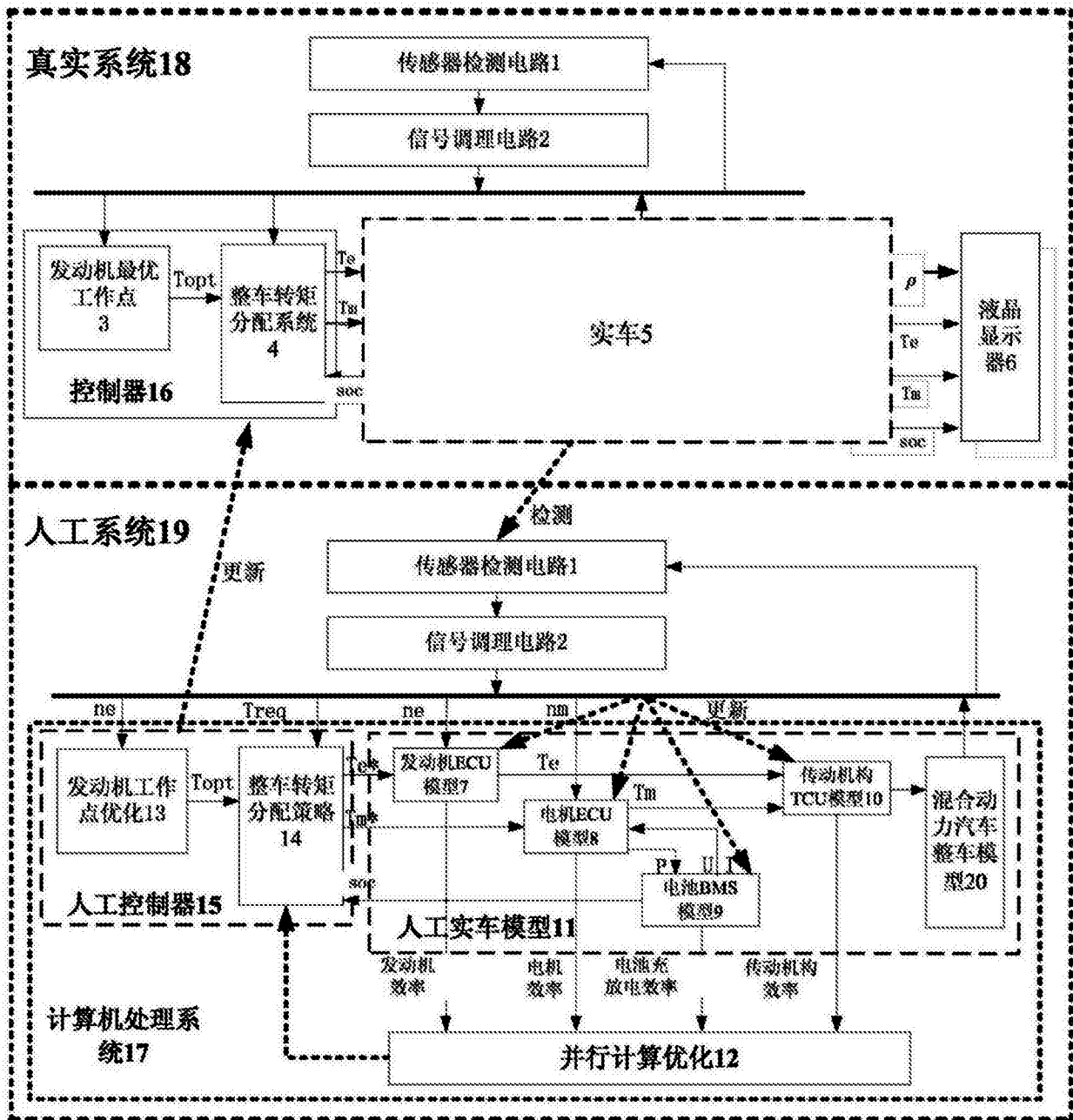


图1



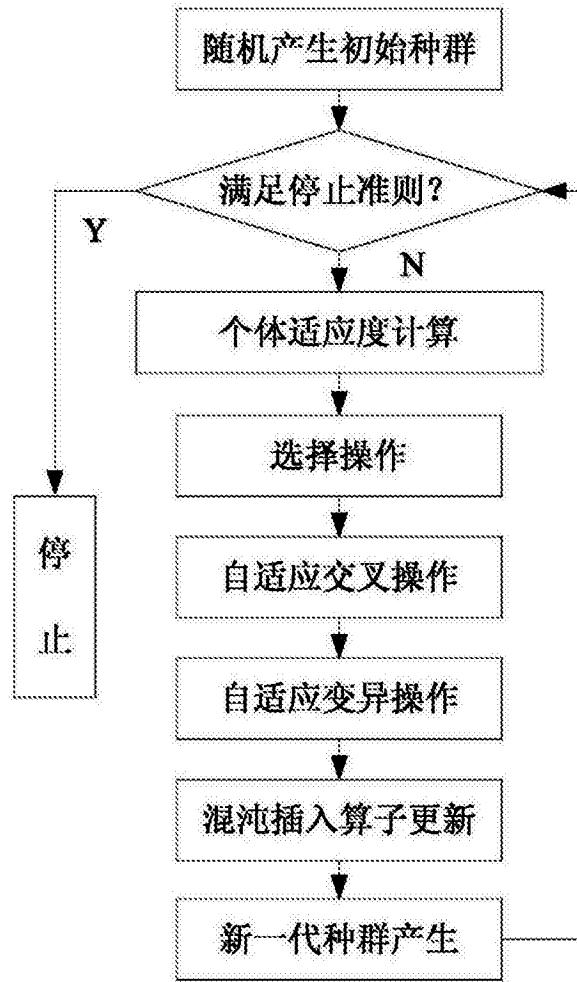


图2

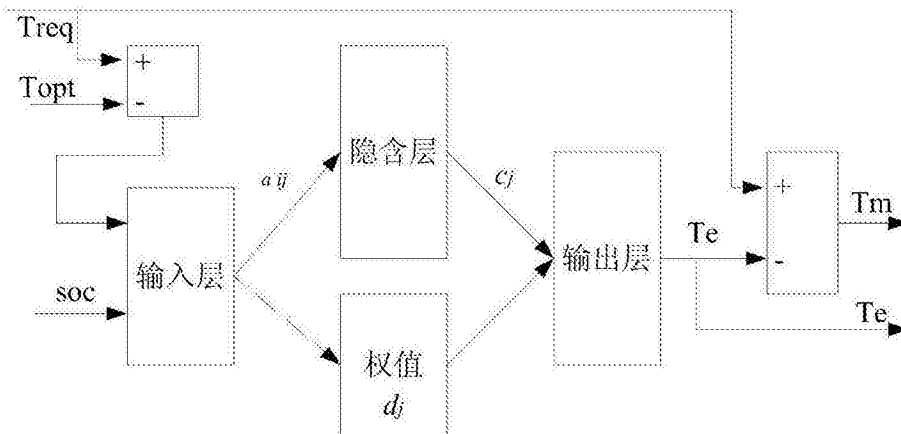


图3