



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111332126 A

(43)申请公布日 2020. 06. 26

(21)申请号 201911307578.0

(22)申请日 2019.12.18

(71)申请人 北京理工大学

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街5号

(72)发明人 王伟达 张渊博 刘洋 刘辉  
倪俊 项昌乐

(74)专利代理机构 北京隆源天恒知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11473

代理人 吴航

(51)Int.Cl.

B60L 7/10(2006.01)

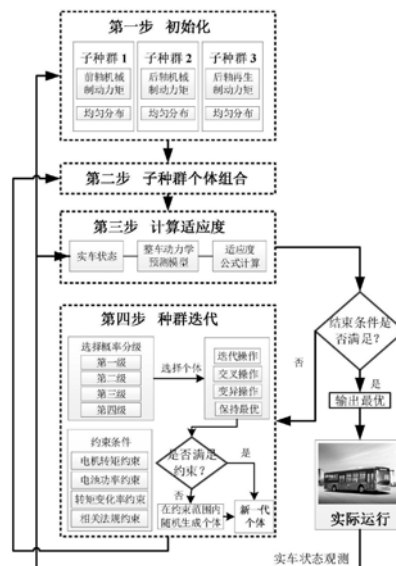
权利要求书3页 说明书15页 附图6页

(54)发明名称

车辆制动能量回收控制方法、装置、车辆及存储介质

(57)摘要

本发明提供一种车辆制动能量回收控制方法、装置、车辆及存储介质,该方法包括当整车控制器接收到制动信号时,根据车辆当前状态计算车辆所需制动力,得到前轮摩擦制动力矩、后轮摩擦制动力矩和电机再生制动力矩三个控制变量,基于预测模型的改进遗传算法计算所述三个控制变量;在所述模型预测控制的框架下执行遗传算法;采用多种群组合迭代和平均分布方法;输出所述最优控制序列后在下一时刻根据车辆状态重新计算所述最优控制序列的三个控制变量值;根据计算的每一时刻的最优控制序列的电机再生制动力矩,所述整车控制器向所述电机及其控制器发送控制信号。本发明实现在紧急制动工况下保证整车安全性,同时在常规制动工况下,提升制动回收能量。



1. 一种车辆制动能量回收控制方法,包括空气压缩机、气缸和制动阀组成的线控气压机械制动系统,和整车控制器、电机及其控制器、变速箱、电池及其管理单元、加速踏板位置传感器、制动踏板位置传感器、车速传感器组成的制动能量回收控制系统,所述线控气压机械制动系统中针对每个车轮都装有气压调节阀,所述线控气压机械制动系统用于单独调节控制每个车轮的轮缸压力,其特征在于,

当所述整车控制器接收到制动信号时,根据车辆当前状态计算车辆所需制动力,所述车辆所需制动力分配至前后轴的三个控制变量,所述三个控制变量为前轮摩擦制动力矩、后轮摩擦制动力矩和电机再生制动力矩,采用基于预测模型的改进遗传算法对所述三个控制变量进行计算;

在所述模型预测控制的框架下执行遗传算法,即通过对当前时刻的有限时域内的最优问题的求解得到最优控制序列的所述三个控制变量的值;

采用多种群组合迭代和平均分布方法来提升计算效率并防止其收敛于局部最优解;

输出所述最优控制序列后在下一时刻根据车辆状态重新计算所述最优控制序列的所述三个控制变量的值,用于实现整个制动过程中的滚动优化;

根据计算得到的每一时刻的所述最优控制序列的所述电机再生制动力矩,所述整车控制器向所述电机及其控制器发送控制信号,使得所述电机及其控制器控制电机输出相应制动力矩。

2. 根据权利要求1所述的车辆制动能量回收控制方法,其特征在于,还包括:

采用所述模型预测控制的控制架构,在每一时刻基于车辆当前状态和以前的历史信息或期望车速,采用所述遗传算法计算在有限预测时域和控制时域内的所述最优控制序列,得出当前时刻的最优控制量;

将所述三个控制变量放在不同子种群,预测计算时,所述不同子种群的个体进行组合,然后以每个个体在其所有组合中的最大的适应度作为其适应度值,最后所述不同子种群的个体分别进行迭代更新;

然后采用初始种群均匀分布的方法,对所述不同子种群中的每一个种群,将满足约束条件的可用区域被分为了几个平均的部分,并选择所述几个平均的部分的边界点作为所述不同子种群的个体值。

3. 根据权利要求1所述的车辆制动能量回收控制方法,其特征在于,还包括:

在所述约束条件范围内,依照均值分布的方法产生所述三个控制变量的所述不同子种群;

对所述三个控制变量的所述不同子种群中的个体进行排列组合;

利用所述预测模型对组合后的控制变量序列进行结果预测,并基于适应度函数,计算每一个个体的适应度;

当达到结束条件时,计算结束并输出最优控制组合中所述三个控制变量的第一个控制周期的值;

当没有达到所述结束条件时,在依照所述遗传算法的选择过程对所述不同子种群进行选择,并在所述约束条件下对选择的个体进行交叉和变异迭代,生成下一代种群个体。

4. 根据权利要求1-3任一项所述的车辆制动能量回收控制方法,其特征在于,所述遗传算法的基本算子包括选择算子,所述选择算子为:

将所述不同子种群中的个体依据所述其适应度值平均分为第一级、第二级、第三级和第四级,每次选择时,所述第一级中所述个体的选择概率为0.4,所述第二级中所述个体的选择概率为0.3,所述第三级中所述个体的选择概率为0.2,所述第四级中所述个体的选择概率为0.1,所述每次选择用于在选择父体和母体时更倾向于选择较优的所述个体。

5. 根据权利要求4所述的车辆制动能量回收控制方法,其特征在于,所述遗传算法的所述基本算子还包括交叉算子,所述交叉算子为:

当所述父体和所述母体确定后,需要根据其基因生成下一代个体,根据第一公式和第二公式确定所述交叉算子;

所述第一公式为:

$$u_{i,j}(t+1) = P_1 u_{ik}(t) + P_2 u_{ih}(t);$$

所述第二公式为:

$$u_{i,j+1}(t+1) = P_2 u_{ik}(t) + P_1 u_{ih}(t);$$

其中, $P_1$ 为随机生成的0到1之间的数值, $P_2$ 为1与 $P_1$ 的差值, $u_{ik}(t)$ 和 $u_{ih}(t)$ 为在t代选择的父体, $u_{i,j}(t+1)$ 和 $u_{i,j+1}(t+1)$ 为在t+1代经过交叉遗传之后的子体,i表示子种群数,j代表在i种群中的第j个个体。

6. 根据权利要求5所述的车辆制动能量回收控制方法,其特征在于,所述遗传算法的所述基本算子还包括变异算子,所述变异算子为:

在生成下一代新个体的过程中,同时随机生成一个介于0和10之间的随机数,如果所述随机数小于8,则所述个体不进行变异;如果所述随机数大于或等于8,则所述个体进行变异,其所携带的值为在所述约束条件范围内随机生成。

7. 根据权利要求6所述的车辆制动能量回收控制方法,其特征在于,还包括:

在迭代计算过程中,采取了保持最优的方法,即将上一代种群中的最优个体保留到下一代种群中,所述个体适应度最大,保留其基因用于在计算时更快更有效的收敛。

8. 一种车辆制动能量回收控制装置,其特征在于,包括:

计算单元,用于当所述整车控制器接收到制动信号时,根据车辆当前状态计算车辆所需制动力,所述车辆所需制动力分配至前后轴的三个控制变量,所述三个控制变量为前轮摩擦制动力矩、后轮摩擦制动力矩和电机再生制动力矩,采用基于预测模型的改进遗传算法对所述三个控制变量进行计算;

执行单元,用于在所述模型预测控制的框架下执行遗传算法,即通过对当前时刻的有限时域内的最优问题的求解得到最优控制序列的所述三个控制变量的值;

优化单元,用于采用多种种群组合迭代和平均分布方法来提升计算效率并防止其收敛于局部最优解;

输出单元,用于输出所述最优控制序列后在下一时刻根据车辆状态重新计算所述最优控制序列的所述三个控制变量的值,用于实现整个制动过程中的滚动优化;

发送单元,用于根据计算得到的每一时刻的所述最优控制序列的所述电机再生制动力矩,所述整车控制器向所述电机及其控制器发送控制信号,使得所述电机及其控制器控制电机输出相应制动力矩。

9. 一种车辆,包括空气压缩机、气缸和制动阀组成的线控气压机械制动系统,和整车控制器、电机及其控制器、变速箱、电池及其管理单元、加速踏板位置传感器、制动踏板位置传

感器、车速传感器组成的制动能量回收控制系统,所述线控气压机械制动系统中针对每个车轮都装有气压调节阀,所述线控气压机械制动系统用于单独调节控制每个车轮的轮缸压力,其特征在于,还包括存储有计算机程序的计算机可读存储介质和处理器,当所述计算机程序被所述处理器读取并运行时,实现如权利要求1-7任一项所述的车辆制动能量回收控制方法。

10. 一种计算机可读存储介质,其特征在于,所述计算机可读存储介质存储有计算机程序,当所述计算机程序被处理器读取并运行时,实现如权利要求1-7任一项所述的车辆制动能量回收控制方法。

## 车辆制动能量回收控制方法、装置、车辆及存储介质

### 技术领域

[0001] 本发明涉及车辆制动能量回收控制方法,特别是装备同轴并联机电耦合系统与电控气压机械制动系统的混合动力客车的制动能量回收控制方法。

### 背景技术

[0002] 近年来,随着汽车保有量的持续增长,环境污染和能源短缺问题日益加剧,车辆电动化成为汽车工业发展的必然趋势。混合动力汽车作为汽车电动化的代表性技术,已逐渐成为汽车行业竞相研究的热点。制动能量回收技术作为混合动力汽车实现节能的关键技术之一,能够将制动过程中的动能转化为电能,从而大幅度提升整车的燃油经济性。目前,混合动力汽车的制动系统主要分为两种构型,一种是并联构型,该构型对汽车原有的机械系统不做改动,只是将制动能量回收转矩附加于原有系统提供的机械制动力之上共同完成制动功能。另一种是串联构型,该构型中制动踏板与原有机械制动系统已经解耦,总的制动力由机械制动系统与制动能量回收系统依照控制方法分配完成,例如Liang Li, Yuanbo Zhang, Chao Yang, et al. Model Predictive Control-based Efficient Energy Recovery Control Strategy for Regenerative Braking System of Hybrid Electric Bus[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 111: 299-314的文章所述。当电机介入制动系统时,如何在多种复杂市区、郊区甚至极限工况下,通过对整车需求制动转矩在制动能量回收系统和机械制动系统之间的合理分配保证整车稳定性和经济性均衡最优,成为亟待解决的难题。

[0003] 针对电动汽车,李亮等人提出了基于滑模控制理论的电机补偿制动控制方法,利用电机响应速度快的特点,在ABS系统触发的情况下,通过电机转矩快速补偿驱动轮的液压机械制动转矩变化需求,提升了系统的稳定性(LI Liang, LI Xujian, WANG Xiangyu et al. Transient switching control strategy from regenerative braking to anti-lock braking with a semi-brake-by-wire system[J]. Veh Syst Dyn. 2016, 54(2): 231-257)。

[0004] 针对混合动力汽车,杨阳等人设计了一种基于防抱死控制系统硬件的制动能量回收与液压制动协调控制系统,并通过仿真验证了该方案的有效性和可行性。针对电动汽车,TKBera提出了基于滑膜控制理论的防抱死制动系统和制动能量回收系统协调控制器,在紧急刹车制动时,保证了车轮滑移率保持在其最优滑移率;针对前轮驱动电动汽车的制动控制问题,Kanarachos设计了基于状态Riccati方程的集成控制方法。

[0005] 基于装备轮毂电机的电动汽车,王俊敏提出了非线性模型预测制动能量回收控制方法。基于电动汽车的混合制动系统,基于不确定性模型预测控制理论,刘威等也提出一种不确定性模型预测混合制动控制方法,提升了整车的经济性和鲁棒性。

[0006] 为了在满足整车稳定性的同时尽可能的提高制动回收能量, Kim运用基于常规遗传算法的优化控制方法来求取制动能量回收力与液压机械制动力之间转矩分配的最优问题,设计了制动能量回收控制方法并验证了其有效性。

[0007] 基于上述调研,针对装备同轴并联机电耦合系统与电控气压机械制动系统的客车,如Yang C, Jiao X, Li L, et al. A robust  $H^\infty$  control-based hierarchical mode transition control system for plug-in hybrid electric vehicle[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 99: 326-344所述,在多种复杂市区、郊区甚至极限工况下,综合考虑电机、电池、机械制动系统的转矩与功率约束,以保证整车制动安全性为前提,基于改进遗传算法的高效制动能量回收预测控制方法仍为空白。

## 发明内容

[0008] 本发明解决的问题是,针对装备同轴并联机电耦合系统与电控气压机械制动系统的客车,如何在多种复杂市区、郊区甚至极限工况下,综合考虑电机、电池、机械制动系统的转矩与功率约束,基于改进遗传算法高效进行制动能量回收预测,以保证整车制动安全性。

[0009] 为解决上述问题,第一方面,本发明提出了一种车辆制动能量回收控制方法,包括空气压缩机、气缸和制动阀组成的线控气压机械制动系统,和整车控制器、电机及其控制器、变速箱、电池及其管理单元、加速踏板位置传感器、制动踏板位置传感器、车速传感器组成的制动能量回收控制系统,所述线控气压机械制动系统中针对每个车轮都装有气压调节阀,所述线控气压机械制动系统用于单独调节控制每个车轮的轮缸压力,

[0010] 当所述整车控制器接收到制动信号时,根据车辆当前状态计算车辆所需制动力,所述车辆所需制动力分配至前后轴的三个控制变量,所述三个控制变量为前轮摩擦制动力矩、后轮摩擦制动力矩和电机再生制动力矩,采用基于预测模型的改进遗传算法对所述三个控制变量进行计算;

[0011] 在所述模型预测控制的框架下执行遗传算法,即通过对当前时刻的有限时域内的最优问题的求解得到最优控制序列的所述三个控制变量的值;

[0012] 采用多种种群组合迭代和平均分布方法来提升计算效率并防止其收敛于局部最优解;

[0013] 输出所述最优控制序列后在下一时刻根据车辆状态重新计算所述最优控制序列的所述三个控制变量的值,用于实现整个制动过程中的滚动优化;

[0014] 根据计算得到的每一时刻的所述最优控制序列的所述电机再生制动力矩,所述整车控制器向所述电机及其控制器发送控制信号,使得所述电机及其控制器控制电机输出相应制动力矩。

[0015] 进一步地,所述的车辆制动能量回收控制方法还包括:

[0016] 采用所述模型预测控制的控制架构,在每一时刻基于车辆当前状态和以前的历史信息或期望车速,采用所述遗传算法计算在有限预测时域和控制时域内的所述最优控制序列,得出当前时刻的最优控制量;

[0017] 将所述三个控制变量放在不同子种群,预测计算时,所述不同子种群的个体进行组合,然后以每个个体在其所有组合中的最大的适应度作为其适应度值,最后所述不同子种群的个体分别进行迭代更新;

[0018] 然后采用初始种群均匀分布的方法,对所述不同子种群中的每一个种群,将满足约束条件的可用区域被分为了几个平均的部分,并选择所述几个平均的部分的边界点作为所述不同子种群的个体值。

[0019] 进一步地,所述的车辆制动能量回收控制方法还包括:

[0020] 在所述约束条件范围内,依照均值分布的方法产生所述三个控制变量的所述不同子种群;

[0021] 对所述三个控制变量的所述不同子种群中的个体进行排列组合;

[0022] 利用所述预测模型对组合后的控制变量序列进行结果预测,并基于适应度函数,计算每一个个体的适应度;

[0023] 当达到结束条件时,计算结束并输出最优控制组合中所述三个控制变量的第一个控制周期的值;

[0024] 当没有达到所述结束条件时,在依照所述遗传算法的选择过程对所述不同子种群进行选择,并在所述约束条件下对选择的个体进行交叉和变异迭代,生成下一代种群个体。

[0025] 进一步地,所述遗传算法的基本算子包括选择算子,所述选择算子为:

[0026] 将所述不同子种群中的个体依据所述其适应度值平均分为第一级、第二级、第三级和第四级,每次选择时,所述第一级中所述个体的选择概率为0.4,所述第二级中所述个体的选择概率为0.3,所述第三级中所述个体的选择概率为0.2,所述第四级中所述个体的选择概率为0.1,所述每次选择用于在选择父体和母体时更倾向于选择较优的所述个体。

[0027] 进一步地,所述遗传算法的所述基本算子还包括交叉算子,所述交叉算子为:

[0028] 当所述父体和所述母体确定后,需要根据其基因生成下一代个体,根据第一公式和第二公式确定所述交叉算子;

[0029] 所述第一公式为:

$$[0030] \quad u_{i,j}(t+1) = P_1 u_{ik}(t) + P_2 u_{ih}(t);$$

[0031] 所述第二公式为:

$$[0032] \quad u_{i,j+1}(t+1) = P_2 u_{ik}(t) + P_1 u_{ih}(t);$$

[0033] 其中, $P_1$ 为随机生成的0到1之间的数值, $P_2$ 为1与 $P_1$ 的差值, $u_{ik}(t)$ 和 $u_{ih}(t)$ 为在 $t$ 代选择的父体, $u_{i,j}(t+1)$ 和 $u_{i,j+1}(t+1)$ 为在 $t+1$ 代经过交叉遗传之后的子体, $i$ 表示子种群数, $j$ 代表在 $i$ 种群中的第 $j$ 个个体。

[0034] 进一步地,所述遗传算法的所述基本算子还包括变异算子,所述变异算子为:

[0035] 在生成下一代新个体的过程中,同时随机生成一个介于0和10之间的随机数,如果所述随机数小于8,则所述个体不进行变异;如果所述随机数大于或等于8,则所述个体进行变异,其所携带的值为在所述约束条件范围内随机生成。

[0036] 进一步地,所述的车辆制动能量回收控制方法还包括:

[0037] 在迭代计算过程中,采取了保持最优的方法,即将上一代种群中的最优个体保留到下一代种群中,所述个体适应度最大,保留其基因用于在计算时更快更有效的收敛。

[0038] 第二方面,本发明还提出了一种车辆制动能量回收控制装置包括:

[0039] 计算单元,用于当所述整车控制器接收到制动信号时,根据车辆当前状态计算车辆所需制动力,所述车辆所需制动力分配至前后轴的三个控制变量,所述三个控制变量为前轮摩擦制动力矩、后轮摩擦制动力矩和电机再生制动力矩,采用基于预测模型的改进遗传算法对所述三个控制变量进行计算;

[0040] 执行单元,用于在所述模型预测控制的框架下执行遗传算法,即通过对当前时刻的有限时域内的最优问题的求解得到最优控制序列的所述三个控制变量的值;

[0041] 优化单元,用于采用多种群组合迭代和平均分布方法来提升计算效率并防止其收敛于局部最优解;

[0042] 输出单元,用于输出所述最优控制序列后在下一时刻根据车辆状态重新计算所述最优控制序列的所述三个控制变量的值,用于实现整个制动过程中的滚动优化;

[0043] 发送单元,用于根据计算得到的每一时刻的所述最优控制序列的所述电机再生制动力矩,所述整车控制器向所述电机及其控制器发送控制信号,使得所述电机及其控制器控制电机输出相应制动力矩。

[0044] 第三方面,本发明还提供了一种车辆,包括空气压缩机、气缸和制动阀组成的线控气压机械制动系统,和整车控制器、电机及其控制器、变速箱、电池及其管理单元、加速踏板位置传感器、制动踏板位置传感器、车速传感器组成的制动能量回收控制系统,所述线控气压机械制动系统中针对每个车轮都装有气压调节阀,所述线控气压机械制动系统用于单独调节控制每个车轮的轮缸压力,还包括存储有计算机程序的计算机可读存储介质和处理器,当所述计算机程序被所述处理器读取并运行时,实现如上所述的车辆制动能量回收控制方法。

[0045] 第四方面,本发明还提供了一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质存储有计算机程序,当所述计算机程序被处理器读取并运行时,实现如上所述的车辆制动能量回收控制方法。

[0046] 实验结果显示,所提出的控制方法在紧急制动工况下可以保证整车的安全性,同时在常规制动工况下,与现在同轴并联混合动力客车中通用的基于规则的制动能量回收控制方法相比,能够提升15%的制动回收能量。

## 附图说明

[0047] 图1是本发明实施例中同轴并联客车驱制动系统构型示意图。

[0048] 图2是本发明实施例中电机效率MAP图。

[0049] 图3是本发明实施例中气压制动系统特性图。

[0050] 图4是本发明实施例中制动能量回收控制方法框架步骤图。

[0051] 图5是本发明实施例中砂石路面仿真实验结果。

[0052] 图6是本发明实施例中标准工况下本发明制动能量回收控制方法实验结果。

[0053] 图7是本发明实施例中标准工况下规则式制动能量回收控制方法对比实验结果。

[0054] 图8是本发明实施例中制动能量回收控制方法硬件在环实验结果。

[0055] 附图标记说明:

[0056] 1-空气压缩机,2-干燥器,3-储气缸,4-四回路开关阀,5-气缸,6-制动踏板,7-制动踏板行程模拟器,8-制动阀,9-气压调节阀,10-发动机,11-离合器,12-ISG电机,13-逆变器,14-电池组,15-中间传动机构,16-制动轮缸,17-制动器,18-车轮。

## 具体实施方式

[0057] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更为明显易懂,下面结合附图对本发明的具体实施例做详细的说明。

[0058] 需要说明的是,在后续的描述中,使用用于表示元件的诸如“模块”、“部件”或“单



元”的后缀仅为了有利于本发明的说明,其本身没有特定的意义。因此,“模块”、“部件”或“单元”可以混合地使用。

[0059] 本发明实施例的一种车辆制动能量回收控制方法,首先结合客车制动系统机械结构与动力学特性,搭建面向混合动力客车制动过程的7自由度纵向动力学模型;然后结合制动系统轮胎在临界稳定领域的高度非线性以及制动过程中稳定性、经济性等性能要求的多目标特性,选择遗传算法对有限时域内的前后轴机械制动转矩及电机制动转矩的最优分配问题进行预测求解,并采取了对控制周期滚动优化的方式实现整个制动过程的最优控制,同时为了防止收敛于局部最优解,对遗传算法进行了针对性的改进;最后基于多维表格和最近点的方法对该控制方法进行了实时化处理。

[0060] 整车模型

[0061] 针对一款装备同轴并联机电耦合系统的客车,提出了一种基于改进遗传算法的制动能量回收控制方法。客车驱制动系统构型如图1所示。

[0062] 驱动系统由发动机,离合器,电机等部件构成,制动系统则分为两部分,一部分是电机,变速箱,电池等部件所组成的制动能量回收系统,一部分是空气压缩机,气缸和制动阀等所组成的线控气压机械制动系统。线控气压机械制动系统中针对每个车轮都装有气压调节阀,可以单独调节控制每个车轮的轮缸压力。

[0063] 建立七自由度整车纵向动力学模型,其中制动系统涉及的主要部分描述如下。

[0064] 整车动力学模型

[0065] 考虑悬架特性,建立了汽车动力学模型,标识前代表汽车的前进方向,即OX方向,汽车质点设为O,汽车垂向运动方向由OZ表示,横向运动方向由OY表示,该模型主要考虑汽车的纵向与垂向运动特性。

[0066] 模型中具体公式如下:

[0067] 纵向运动公式:

$$[0068] \quad \frac{1}{2}m\ddot{x} + \frac{1}{2}m_s D_0 \ddot{\theta} = F_{x1} + F_{x2} - \frac{1}{2}F_{resist}$$

[0069] 式中m代表客车质量(kg); $m_s$ 代表客车的簧上部分质量(kg); $F_{x1}$ , $F_{x2}$ 分别代表地面对前后轮提供的驱制动力(N); $F_{resist}$ 代表阻力(N); $D_0$ 代表质心到汽车俯仰运动中心轴线的距离(m),式中阻力表达如下:

$$[0070] \quad F_{resist} = F_f + F_w + mg_i$$

$$[0071] \quad F_f = mg(f_1 + f_2 \dot{x})$$

$$[0072] \quad F_w = \frac{C_D A \dot{x}^2}{21.15}$$

[0073] 式中 $F_f$ 代表滚动阻力(N); $F_w$ 代表空气阻力(N); $F_i$ 代表坡度阻力; $f_1$ , $f_2$ 代表滚动阻力系数; $C_D$ 代表空气阻力系数; $A$ 则代表汽车行驶过程中的迎风面积( $m^2$ ), $i$ 代表坡度。

[0074] 汽车垂向运动公式:

$$[0075] \quad \frac{1}{2}m_s \ddot{Z} + F_{s1} + F_{s2} = 0$$

[0076] 式中 $F_{s1}$ , $F_{s2}$ 分别代表前后轴悬架对客车簧上部分的弹性力(N)。

[0077] 俯仰运动公式:

$$[0078] \quad \frac{1}{2} J_y \ddot{\theta} - \frac{1}{2} m_s D_0 \ddot{x} - F_{s1} a + F_{s2} b = 0$$

[0079] 式中 $J_y$ 代表汽车俯仰运动的转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ); $a, b$ 为汽车质心到前后轴轴心的纵向距离(m); $l$ 代表前后轴之间的纵向距离(m)。

[0080] 轮胎运动公式:

$$[0081] \quad m_1 \ddot{Z}_1 - F_{s1} + K_{b1} Z_1 = 0$$

$$[0082] \quad m_2 \ddot{Z}_2 - F_{s2} + K_{b2} Z_2 = 0$$

$$[0083] \quad J_1 \dot{\omega}_1 = F_{x1} R_1 - T_{b1}$$

$$[0084] \quad J_2 \dot{\omega}_2 = F_{x2} R_2 - T_{b2} - T_{reb}$$

$$[0085] \quad F_{z1} = m_s g b / 2l + m_1 g - K_{b1} Z_1$$

$$[0086] \quad F_{z2} = m_s g a / 2l + m_2 g - K_{b2} Z_2$$

[0087] 式中 $Z_1, Z_2$ 分别代表前后轮的垂向位移(m); $m_1, m_2$ 分别代表前后轮的车轮质量(kg); $K_{b1}, K_{b2}$ 分别代表前后轮的垂向刚度(N/m); $J_1, J_2$ 分别代表前后轮的转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ); $R_1, R_2$ 分别代表前后轮车轮半径(m); $T_{b1}, T_{b2}$ 分别代表前后轮上所受到的机械制动转矩(Nm); $T_{reb}$ 代表电机提供的制动能量回收转矩(Nm)。 $F_{z1}, F_{z2}$ 分别代表前后轮对地面的垂直载荷(N)。 $\omega_1, \omega_2$ 分别为前后轮的角速度。

[0088] 悬架运动公式如下

$$[0089] \quad F_{z1} = K_1 (Z - Z_1 - a\theta) + C_1 (\dot{Z} - \dot{Z}_1 - a\dot{\theta})$$

$$[0090] \quad F_{z2} = K_2 (Z - Z_2 + b\theta) + C_2 (\dot{Z} - \dot{Z}_2 + b\dot{\theta})$$

[0091] 式中 $C_1, C_2$ 分别代表前后轴悬架的阻尼; $K_1, K_2$ 分别代表前后轴悬架的刚度(N/m)。

[0092] 结合上述公式可得,该模型主要考虑了汽车纵向速度、悬架以上部分车身垂向位移及俯仰角,前后轮的垂向位移以及转动角速度7个自由度。

[0093] 轮胎模型

[0094] 轮胎的建模方案有很多,本发明选择了常用的魔术公式来模拟轮胎特性,具体公式如下:

$$[0095] \quad \mu_i = \sigma D \sin (C \tan^{-1} \{B S_{xi} - E [B S_{xi} - \tan^{-1} (B S_{xi})]\})$$

$$[0096] \quad S_{xi} = \frac{\omega_i R_i - v}{v}$$

$$[0097] \quad F_{xi} = \mu_i F_{zi} \quad i \in \{1, 2\}$$

[0098] 式中, $\mu$ 代表摩擦系数, $s$ 代表轮胎的滑移率, $\sigma$ 代表地面附着系数, $B, C, D$ 和 $E$ 是魔术公式中的相关参数,其具体意义为: $B$ :刚度因子; $C$ :曲线形状因子,决定曲线的形状特性; $D$ :峰值因子,表示曲线的最大值; $E$ :曲线曲率因子,决定曲线最大值附近的形状。

[0099] 电池模型

[0100] 对于电池模型,本发明采用了简单的电池内阻模型。锂电池的容量参数设为80Ah,具体公式如下:

$$[0101] \quad I^2 \times R_{int} - V_{oc} \times I + P = 0$$

[0102] 式中 $R_{int}$ 为内阻( $\Omega$ ); $I$ 为电流(A); $V_{oc}$ 为电池开端电压(V); $P$ 为负载功率(kw)。

$$[0103] \quad SOC = SOC_0 - \int \frac{Idt}{Q}$$

[0104] 式中Q为额定电量(C);SOC<sub>0</sub>为初始SOC。

[0105] 电机模型

[0106] 选择的ISG电机能够输出的最大转矩为750Nm,电机额定功率与峰值功率分别为92Kw和121Kw。如图2所示,电机效率主要通过标定的电机效率MAP图得到。

[0107] 气压机械制动系统模型

[0108] 气压制动系统的结构如图1所示。系统由空气压缩机提供压力,而制动轮缸的压力可以由各轮上的调节阀进行控制。在实际中,气压制动系统的响应曲线可以进行适当的简化,如图3所示。其中百分比(20%,50%,100%)代表了调节伺服阀的开启程度。当控制器给出压力指令时,气压制动系统首先会有一个短暂的制动器起作用的时间,然后实际制动气体压力会呈现近似线性的上升,最终到达目标压力p<sub>t</sub>。制动气压的变化率因调节阀特性的不同而各有不同。到达目标压力的响应特性可以表示如下:

$$[0109] \quad \tau_x = \frac{p_t}{u_x} + \tau_0$$

[0110] 式中,p<sub>t</sub>表示目标制动压力,u<sub>x</sub>表示制动压力的变化率,τ<sub>0</sub>表示气压制动系统的起作用时间。

[0111] 制动气压和气压制动转矩的关系如下式所示:

$$[0112] \quad T_b = k_{pb}p$$

[0113] 其中,T<sub>b</sub>表示作用于车轮上的气压制动转矩,p表示制动轮缸的气体压力,系数k<sub>pb</sub>可以通过气压制动系统的反复试验进行标定。

[0114] 在模型中用到的参数如表1所示。

[0115] 表1仿真模型中的部分参数

参数	单位	数值	参数	单位	数值
A	m <sup>2</sup>	8.46	B	--	8.98

	$c$	--	1.62	$c_1, c_2$	kN•s/m	30
	$c_o$	Ns <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.51	$D$	--	1
	$D_o$	m	0.1545	$E$	--	0.5
	$J_1, J_2$	kgm <sup>2</sup>	14	$J_y$	kgm <sup>2</sup>	70875
	$K_1, K_2$	kN/m	700	$K_{b1}, K_{b2}$	kN/m	980
	$R_1, R_2$	m	0.48	$T_s$	ms	10
[0117]	$a$	m	3.06	$b$	m	2.04
	$f_1$	--	0.0076	$f_2$	--	$5.6 \times 10^{-5}$
	$g$	m/s <sup>2</sup>	9.81	$h$	m	1
	$l$	m	5.1	$m$	kg	14000
	$m_s$	kg	13180	$m_1, m_2$	kg	67
	$u_x$	MPa/s	5			
				$k_{pb}$	--	20000

[0118] 制动能量回收控制方法

[0119] 制动系统中车轮等部件在临界失稳区域具有高度非线性特性,遗传算法可以直接利用与实际切合度更高的非线性方程求解适应度,通过不断优化迭代选择所有历史个体中适应度最优的个体,所以采用遗传算法求解最优控制序列。为了提升算法的有效性和可靠性,对该算法进行了针对性改进,首先将该算法放于模型预测控制的框架下,即通过对当前时刻的有限时域内的最优问题的求解得到最优控制序列,输出该序列后在下一时刻根据其车辆状态重新计算最优问题,实现整个制动过程中的滚动优化,其次采用了多种群组合迭代和平均分布等方法来提升算法计算效率并防止其收敛于局部最优解。遗传算法计算量极大,难以满足实时需求,针对该缺陷,根据遗传算法输入制作了多维表格,用最近点的方法对其进行了实时化处理。

[0120] 在制动过程中需要考虑经济性,安全性等多个目标,本发明旨在保证汽车制动安全的前提下,尽可能跟随驾驶意图并最大程度的回收制动能量,从而在其他指标允许范围内提升整车经济性。为了提升遗传算法的有效性,本发明其进行了改进。如图7所示,本发明的改进遗传算法的制动能量回收控制方法的过程共分为5步。具体过程如表2所示:

[0121] 表2控制方法流程

步骤	内容
I	在约束条件范围内，依照均值分布的方法产生三个控制变量的初始种群
II	对各个控制变量种群中的个体进行排列组合。
III	利用预测模型对组合后的控制变量序列进行结果预测，并基于适应度函数，计算每一个个体的适应度。
IV	判断是否达到结束条件，如果是，算法结束并输出最优控制组合中每个控制变量的第一个转矩；如果不是，在依照遗传算法的选择过程对种群进行选择，并在约束条件下对选择的个体进行交叉和变异迭代，生成下一代种群个体。

[0123] 计算模型

[0124] 为了简化计算，在遗传算法中不再使用7自由度动力学模型，而是采用3自由度模型预测不同控制序列下的汽车行驶状态。相对于7自由度动力学模型，3自由度模型中不再考虑悬架系统对整车行驶状态的影响。在制动能量回收控制方法中，选择3自由度的整车动力学模型作为预测模型对汽车未来状态进行预测。具体公式如下所示：

$$[0125] \quad ma_1(k) = F_{x1}(k) + F_{x2}(k) - F_{resist}(k)$$

$$[0126] \quad a_1(k) = (T_{b1}(k) - R_1 F_{x1}(k)) / J_1$$

$$[0127] \quad \omega_1(k+1) = \omega_1(k) + a_1(k) T_s$$

$$[0128] \quad a_2(k) = (T_{b2}(k) + T_{reb} - R_2 F_{x2}(k)) / J_2$$

$$[0129] \quad \omega_2(k+1) = \omega_2(k) + a_2(k) T_s$$

[0130] 在上述公式中用到的变量可通过下式计算：

$$[0131] \quad F_{resist}(k) = F_f(k) + F_w(k)$$

$$[0132] \quad F_f(k) = mg(f_1 + f_2 v(k))$$

$$[0133] \quad F_w(k) = \frac{C_D A v(k)^2}{21.15}$$

$$[0134] \quad S_1(k) = (\omega_1(k) R_1 - v(k)) / v(k)$$

$$[0135] \quad S_2(k) = (\omega_2(k) R_2 - v(k)) / v(k)$$

$$[0136] \quad \mu_1(k) = \sigma D \sin[C \tan^{-1}(BS_1(k) - E\{BS_1(k) - \tan^{-1}[BS_1(k)]\})]$$

$$[0137] \quad \mu_2(k) = \sigma D \sin[C \tan^{-1}(BS_2(k) - E\{BS_2(k) - \tan^{-1}[BS_2(k)]\})]$$

$$[0138] \quad F_{z1}(k) = \frac{mg}{L} \left( b + \frac{a_1(k-1)h}{g} \right)$$

$$[0139] \quad F_{z2}(k) = \frac{mg}{L} \left( a - \frac{a_1(k-1)h}{g} \right)$$

$$[0140] \quad F_{x1}(k) = F_{z1}(k) \mu_1(k)$$

$$[0141] \quad F_{x2}(k) = F_{z2}(k) \mu_2(k)$$

[0142] 式中 $k$ 为时间步数; $v$ 为汽车车速; $T_s$ 为采样时间; $a_1$ 为加速度; $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 分别为前后轮的角加速度。

[0143] 约束

[0144] 结合系统特性,设定制动能量回收转矩的约束条件如下:第一,结合电机MAP图,通过对当前电机转速查表求得状态下电机所能输出的最大转矩;第二,结合电池状态,得到当前电池所能输出的最大功率,再结合转化后的功率与转速得到最大的制动能量回收转矩;第三,基于设定的最大制动能量回收转矩变化率限制以及上一时刻的制动能量回收转矩,得到当前的制动能量回收转矩限制。由于系统能够提供的气压制动转矩较大,所以对气压制动转矩的约束主要考虑系统设定的最大转矩变化率限制,具体描述公式如下:

$$[0145] \quad T_{reb} \omega_m \eta_{motor} \leq P_{batt\_lim}$$

$$[0146] \quad \begin{cases} T_{reb,max} \leq T_{reb} \leq 0 \\ |T_{reb}(k+1) - T_{reb}(k)| \leq T_{recharge,max} \cdot T_s \end{cases}$$

$$[0147] \quad |T_{b2}(k+1) - T_{b2}(k)| \leq T_{pchange,max} \cdot T_s$$

$$[0148] \quad |T_{b1}(k+1) - T_{b1}(k)| \leq T_{pchange,max} \cdot T_s$$

[0149] 式中 $\eta_{motor}$ 为电机效率, $\omega_m$ 为电机转速, $P_{batt\_lim}$ 为制动能量回收系统中电池在当前状态下的最大充电功率限制; $T_{reb,max}$ 为电机在当前状态下的最大转矩限制; $T_{recharge,max}$ 为制动能量回收转矩的最大变化率限制; $T_{pchange,max}$ 为气压制动转矩在当前时刻的最大变化率限制。

[0150] 不同的子种群的约束条件不一样,代表电机再生制动力矩的子种群的约束条件主要是当前转速下电机最大制动力矩与电池最大充电功率的约束,代表前后轴机械摩擦制动力矩的约束条件主要是制动转矩的变化率。

[0151] 适应度函数

[0152] 在制动过程中,首先要保证制动稳定性,其次应实现上层的驾驶意图,最后在上述前提下尽可能的提高经济性。本发明通过综合权衡上述性能,基于滑移率将制动状态分为一般控制模式和防抱死制动模式。

[0153] 一般控制模式

[0154] 一般控制模式启动的条件是在制动过程中前后车轮的滑移率均不超过设定值 $L_1$ 。该情况下由于滑移率较低,所以主要考虑的性能为实现驾驶意图和提高经济性。另外需要说明的是,随着滑移率变大,应通过调整前后轮的制动力分配比例,尽可能的不触发防抱死控制模式。其适应度函数如下:

$$[0155] \quad J(k) = J(u(k|k), \dots, u(k+h_c-1|k)) = w_x \sum_{i=1}^{h_x} \|e_i(k)\|^2 + w_y \sum_{i=1}^{h_y} (T_{re} \omega_2 \eta_i)^2 + w_z \sum_{i=1}^{h_z} (Sx_1^2 + Sx_2^2)$$

[0156] 式中:

$$[0157] \quad e_i(k) = v_{ref}(k+i|k) - v(k+i|k), i=1, \dots, h_p$$

$$[0158] \quad \eta_i = \eta_{trans} \eta_{motor}, i=1, \dots, h_p$$

[0159] 式中 $v_{ref}$ 是基于驾驶意图的期望车速。 $e_i$ 是期望车速与通过计算的预测车速之间的偏差。 $h_c$ 表示模型预测算法框架下的控制域。 $h_p$ 表示模型预测算法框架下的预测域。 $\eta_i$ 是制动时制动能量回收系统的效率。 $\eta_{trans}$ 是电机到车轮之间传动系统的效率。 $J$ 是适应度。 $w_x$ 、 $w_y$ 和 $w_z$ 分别为驾驶意图,经济性和制动稳定性的权重因子,且 $w_z$ 在前后轮的最大滑移率小于L2时为零,即此时由于滑移率低,不再考虑滑移率对稳定性的影响,等滑移率大于L2后为了尽可能不触发防抱死控制模式,该权重因子随着滑移率的增加而快速增大。

[0160] 防抱死(ABS)控制模式

[0161] 防抱死控制模式启动的条件是任何一个车轮的滑移率超过设定值L1。该模式中由于滑移率较大,存在车轮抱死从而导致车身运动处于不稳定区域的危险,所以该模式中主要考虑的是车身稳定性。其适应度函数如下:

$$[0162] \quad J(k) = J(u(k|k), \dots, u(k+h_c-1|k)) = w_x \sum_{i=1}^{h_p} \|e_i(k)\|^2 + w_y \sum_{i=1}^{h_p} (T_{re} \omega_2 \eta_i)^2 + w_z \sum_{i=1}^{h_p} ((S_1 - S_{xrefer})^2 + (S_2 - S_{xrefer})^3)$$

[0163] 式中 $S_{xrefer}$ 是车轮期望滑移率。

[0164] 结束条件

[0165] 遗传算法的结束条件一般是迭代代数或者性能达到某个程度,本方法的结束条件设为一定的迭代代数,达到迭代代数后算法结束。

[0166] 模型预测控制架构下遗传算法改进

[0167] 综合考虑整车稳定性和经济性,采用基于预测模型的新型改进遗传算法对制动过程中的制动转矩分配问题进行求解,具体描述如下:

[0168] 首先,采用模型预测控制的控制架构,在每一时刻基于车辆的当前状态变量和以前的历史信息,采用遗传算法计算在有限预测时域和控制时域内的最优控制序列,然后输出当前时刻最优的控制量,在以后的每一次控制时间节点重复该过程,最后实现整个制动过程的滚动优化控制。

[0169] 其次,在有限迭代次数的遗传算法中,如果把所有控制变量都放在同一个种群中,可能会造成不同控制变量之间的相互干扰,影响算法的求优效率。为了解决该问题,本发明将三个控制变量放在不同的子种群,预测时,不同子种群的个体进行组合,然后以每个个体在其所有组合中的最好的适应度作为其适应度值,最后子种群的个体分别进行迭代更新。

[0170] 然后采用初始种群均匀分布的方法,对每一个种群,将满足约束条件的可用区域被分为了几个平均的部分,并选择每个部分的边界点作为初始种群的个体值。

[0171] 继而根据优化问题的具体情况,对遗传算法过程中的基本算子,包括选择算子、交叉算子和变异算子,设置如下:

[0172] 选择算子:将种群中的个体依据其适应度值平均分为四级,每次选择时,第一级中个体选择概率为0.4,第二级为0.3,第三级为0.2,最后一级为0.1,这样在选择父体和母体时更倾向于选择较优的个体。

[0173] 交叉算子:当父体和母体确定后,需要根据其基因生成下一代个体,交叉算子的方程如下所示,随机生成0到1之间的数值 $P_1, P_2$ 为1与 $P_1$ 的差值。

$$[0174] \quad u_{i,j}(t+1) = P_1 u_{ik}(t) + P_2 u_{ih}(t)$$

$$[0175] \quad u_{i,j+1}(t+1) = P_2 u_{ik}(t) + P_1 u_{ih}(t)$$

[0176] 其中: $u_{ik}(t), u_{ih}(t)$ 为在t代选择的父体, $u_{i,j}(t+1), u_{i,j+1}(t+1)$ 为在t+1代经过交

叉遗传之后的子体,  $i$ 表示子种群数,  $j$ 代表在  $i$ 种群中的第  $j$ 个个体。

[0177] 变异算子:在生成下一代新个体的过程中,同时随机生成一个介于0和10之间的数字。如果该随机数小于8,则该个体不进行变异;如果该随机数大于或等于8,则该个体进行变异,其所携带的值为在约束范围内随机生成。

[0178] 最后,在遗传算法迭代过程中,采取了保持最优的方法,即将上一代种群中的最优个体保留到下一代种群中,该个体适应度优良,保留其基因有助于算法更快更有效的收敛。

[0179] 实时化方法

[0180] 基于遗传算法的制动能量回收控制方法的计算量较大,从而计算效率较低,针对该问题,设计提出控制方法的等效控制方法,首先基于输入量制作了多维表格,然后车辆制动时通过选择表格中距离当前状态最近的点的控制量的方法来实现策略的实时性。

[0181] 用上述基于改进遗传算法的控制方法进行离线运算,生成基于输入集的多维表格。由于实际控制器存储空间限制,对输入集进行了简化,不再需要输入上一时刻的气压制动转矩,即不再在表格中考虑气压制动转矩变化率,而是将该限制放于多维表格后面作为输出上下限硬性约束。简化后输入集  $W_v$ 以及表格各维度内点之间的间隔  $\Delta w$ 如下所示,其中前后轮转速的数值为其乘以轮胎半径之后的等效值。

[0182]  $W = [v, \omega_1, \omega_2, v_{ref}, z]^T \in R^5$

[0183]  $W_v = [0, v_{define}-10, v_{define}-10, v_{define}-10T_s, 0.1]^T \leq w \leq [90, v_{define}+1, v_{define}+1, v_{define}+T_s, 0.9]^T$

[0184]  $\Delta w = [1, 1, 1, T_s, 0.1]^T$

[0185] 本发明的方法所需输入包括有:历史信息主要用于车辆的车速预测,如果不将车速预测模块包含在算法中的话,即未来一段时间的车速算作其它控制器给的已知量(比如现在无人驾驶技术,就会进行未来一段时间的车速规划),那么历史信息由期望车速代替;车辆状态主要包括各个车轮轮速,车速,前后轮的摩擦制动力矩以及再生制动力矩,和路面附着系数。前后轮的摩擦制动力矩以及再生制动力矩主要用于计算最优控制序列时的约束,因为考虑到系统振动及执行器的机械特性,算法对转矩变化率进行了约束。

[0186] 本发明的控制序列是指算法计算的控制变量在控制域内的最优控制序列,本发明的制动力分配方法主要涉及三个控制变量:前轮的摩擦制动力矩,后轮的摩擦制动力矩,再生制动力矩。假如控制域为5个控制周期,则控制序列为一个3\*5的矩阵,即三个变量在每个控制周期的输出值组合成为控制序列,控制时只输出控制序列的第一排,即只输出在第一个控制周期的值,等到了下个控制周期,系统会重新计算相应的最优控制序列,从而进行滚动优化。

[0187] 实验验证

[0188] 为了验证所提出控制方法及其实时化等效策略的制动安全性以及能量回收效率,本发明分别进行了仿真和硬件在环实验。验证由三部分组成:(1)汽车制动稳定性验证;(2)汽车制动能量回收能力验证;(3)硬件在环实验。

[0189] 汽车制动稳定性验证

[0190] 制动安全性的仿真工况设定如下:初始车速为80Km/h,期望制动减速度为-0.7g,在砂石路面上进行模拟仿真,附着系数设为0.6。

[0191] 首先在砂石路面上验证汽车安全性。其仿真结果如图5所示。为触发ABS模式,期望



减速度设为 $0.7g$ ,而路面附着系数设为 $0.6$ ,所以在图5(a)中,实际车速并未完全跟随期望车速,但可以看出,在充分利用砂石路面的附着力之后其制动减速度也近似 $0.6g$ 。如图5(b)所示,由于触发ABS模式之后,为防止车轮抱死,制动过程将不再换挡,档位锁定在高档,传动比较小,所以相对于机械制动转矩来说,电机提供的制动能量回收转矩较小,但是经过计算之后可得,电机已经输出了其最大制动转矩,而需求制动转矩与制动能量回收转矩之间的差值由机械制动转矩补偿。在图5(c)中,可以看到滑移率在 $0.15$ 附近,整个制动过程车轮未曾抱死,整车安全性得到保障。如图5(d)所示,制动过程中回收的制动能量为 $kJ$ ,由于紧急制动过程时间较短,且该过程的主要目标是保证制动安全性,所以制动能量回收效率较低。

[0192] 制动能量回收能力验证

[0193] 制动能量回收效率的仿真工况设置为中国国家标准工况,驱动过程采取的是常用的基于规则式策略,制动过程中作为对比的基准策略同样为基于规则的控制方法,该策略简单描述如下:在制动踏板低于门限值 $C$ 时,需求制动转矩全部由电机提供,当其高于门限值 $C$ 时,需求制动转矩在前后轴进行成比例分配(随制动踏板的增大,驱动轴分配的制动转矩比例逐渐减小,最后前后轴趋向于其负载比例),其中后轴上分配的制动转矩优先由电机提供,若电机不能满足时,由气压机械制动转矩补偿,前轴上分配的制动转矩则全部由气压机械制动转矩提供。

[0194] 仿真结果如图6和图7所示,在图(a)中可以看出,两种策略的车速跟随效果都很好,实际车速和期望车速几乎重合。如图(b)所示,提出策略相对于对比策略,在制动过程中的电机转矩更大一些,由于制动减速度较小,制动能量回收转矩不足以满足需求时,剩余的制动转矩几乎全部由后轮机械制动转矩进行补偿,此处不再列出。如图(c)所示,由于整个工况没有紧急制动情况,所以车轮滑移率在 $0.1$ 以内,符合预定的要求。最后如图(d)所示,相对于对比策略,本发明所提出的制动能量回收控制方法在工况中回收的制动能量大幅度提高。

[0195] 硬件在环实验

[0196] 硬件在环系统主要包括DSPACE及其上位机,控制器及其上位机等。DSPACE上位机中具有除控制系统以外的整车模型,其通过DSPACE专用线与DSPACE实现通讯。而在控制器上位机中,控制方法模型通过自动代码生成技术生成核心控制程序,然后该程序与外围的一些底层通讯程序等结合,形成完整的控制器程序,上位机2与控制器通过CAN线进行通讯,可以方便的向控制器烧录程序。进行硬件在环实验时,DSPACE中虚拟模拟整车和环境,控制器为实际控制器,DSPACE与实际控制器之间通过CAN通讯实现硬件在环仿真。

[0197] 硬件在环实验的工况设定为砂石路面上的紧急制动工况,与制动安全性验证的仿真实验相同。实验结果如图8所示,曲线与图5基本近似,但由于等效策略中控制序列是根据车身状态查表得出,数据变化较大,所以曲线中存在一定波动,总体控制效果稍差,回收的制动能量也较小。但从图8(c)中可以看出,该策略同样保障了车轮滑移率在安全范围内。

[0198] 表3详细给出验证试验的数据对比,如表所示,在紧急制动工况中,在砂石路面上的模型在环结果较好,最大滑移率为 $0.19$ ,在硬件在环实验中,由于采取等效策略,控制效果不如模型在环实验,最大滑移率为 $0.3055$ ,所有试验中车轮均未抱死,说明所提出的控制方法能够保证汽车在制动过程中的安全性。在国家标准工况下,基于规则式的控制方法回

收制动能量为4686.2kJ,而本发明所提出的基于遗传算法的制动能量回收控制方法回收制动能量为5397.8kJ,相对于规则式控制方法提升15.19%,回收能量在总制动能量的占比达到60.27%,从而验证了本发明的制动能量回收效率。

[0199] 表3本发明控制方法与基准方法仿真结果对比

实验	最大滑移率(前轮)	最大滑移率(后轮)	总制动能量(kJ)	回收制动能量(kJ)	制动能量回收率(%)
[0200] 紧急制动, 砂石路面	0.1784	0.1902	3364.3	212.85	6.33
标准工况, 规则式	0.0216	0.0209	9241.8	4686.2	50.71
标准工况, 遗传算法	0.0237	0.0210	8955.7	5397.8	60.27
硬件在环实验	0.1766	0.3055	3364.3	142.37	4.23

[0201] 在本发明另一实施例中一种车轮制动能量回收控制装置包括:

[0202] 计算单元,用于当整车控制器接收到制动信号时,根据车辆当前状态计算车辆所需制动力,所述车辆所需制动力分配至前后轴的三个控制变量,所述三个控制变量为前轮摩擦制动力矩、后轮摩擦制动力矩和电机再生制动力矩,采用基于预测模型的改进遗传算法对所述三个控制变量进行计算;

[0203] 执行单元,用于在所述模型预测控制的框架下执行遗传算法,即通过对当前时刻的有限时域内的最优问题的求解得到最优控制序列的所述三个控制变量的值;

[0204] 优化单元,用于采用多种群组合迭代和平均分布方法来提升计算效率并防止其收敛于局部最优解;

[0205] 输出单元,用于输出所述最优控制序列后在下一时刻根据车辆状态重新计算所述最优控制序列的所述三个控制变量的值,用于实现整个制动过程中的滚动优化;

[0206] 发送单元,用于根据计算得到的每一时刻的所述最优控制序列的所述电机再生制动力矩,所述整车控制器向所述电机及其控制器发送控制信号,使得所述电机及其控制器控制电机输出相应制动力矩。

[0207] 在本发明另一实施例中,一种车辆包括空气压缩机、气缸和制动阀组成的线控气压机械制动系统,和整车控制器、电机及其控制器、变速箱、电池及其管理单元、加速踏板位置传感器、制动踏板位置传感器、车速传感器组成的制动能量回收控制系统,所述线控气压机械制动系统中针对每个车轮都装有气压调节阀,所述线控气压机械制动系统用于单独调节控制每个车轮的轮缸压力,还包括存储有计算机程序的计算机可读存储介质和处理器,当所述计算机程序被所述处理器读取并运行时,实现如上所述的车辆制动能量回收控制方法。

[0208] 在本发明另一实施例中一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质存储有计算机程序,当所述计算机程序被处理器读取并运行时,实现如上所述的制动能量回收控制方法。

[0209] 虽然本发明披露如上,但本发明并非限定于此。任何本领域技术人员,在不脱离本发明的精神和范围内,均可作各种更动与修改,因此本发明的保护范围应当以权利要求所限定的范围为准。

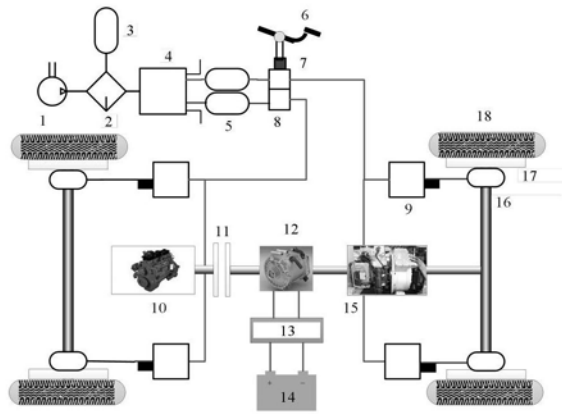


图1

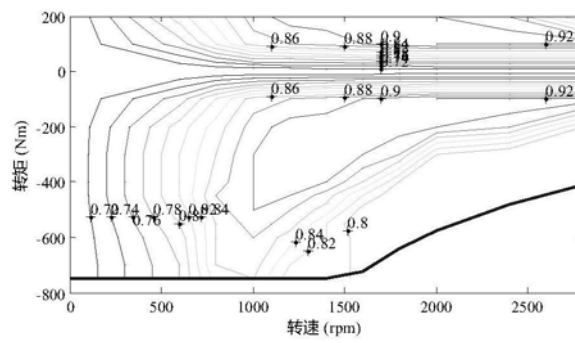


图2

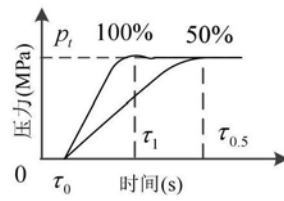


图3

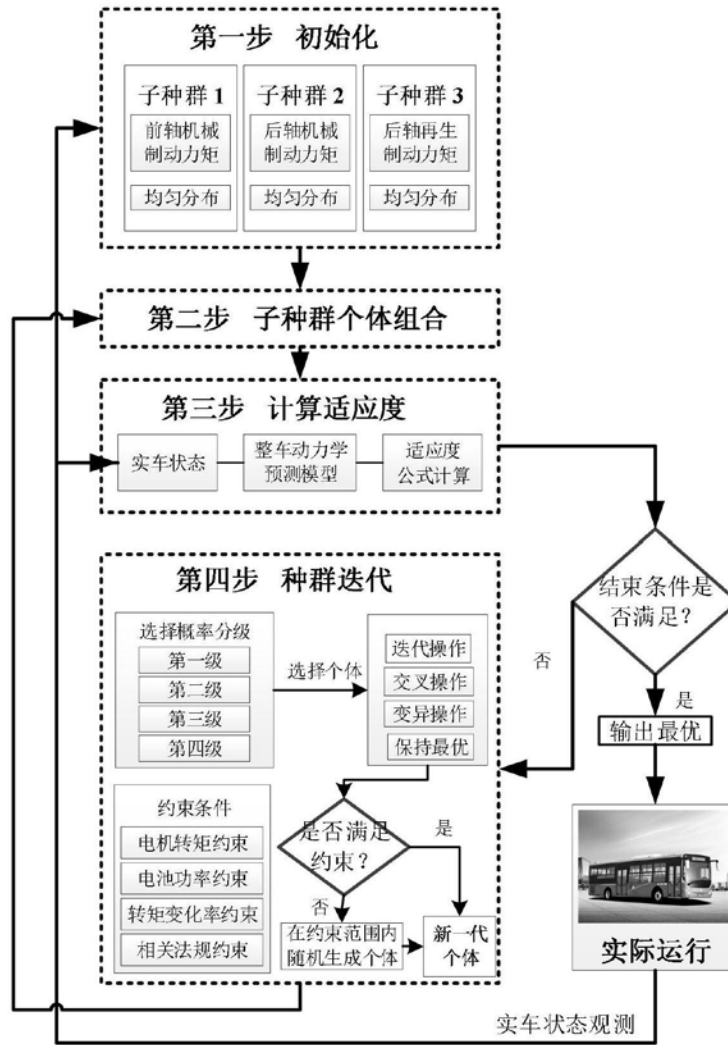


图4

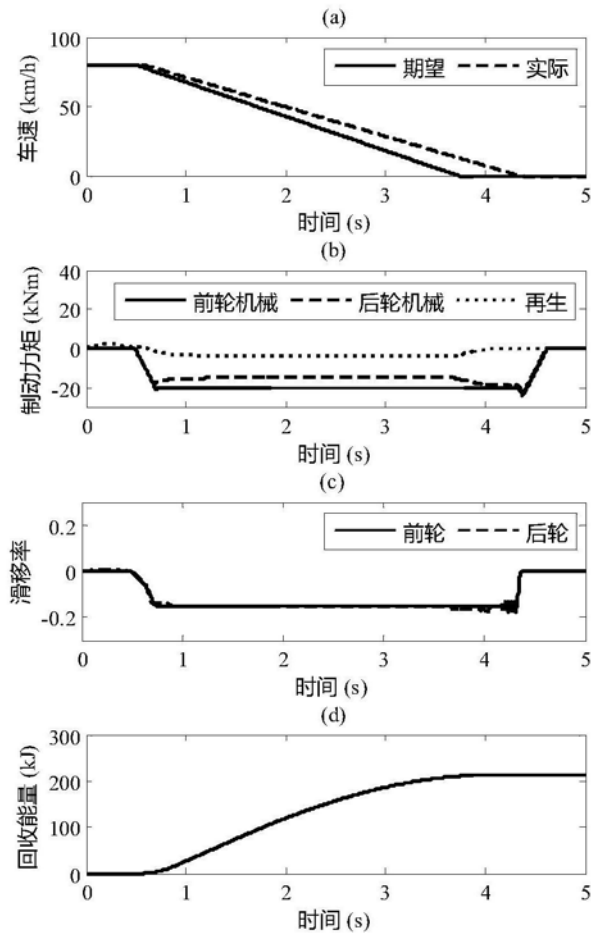


图5

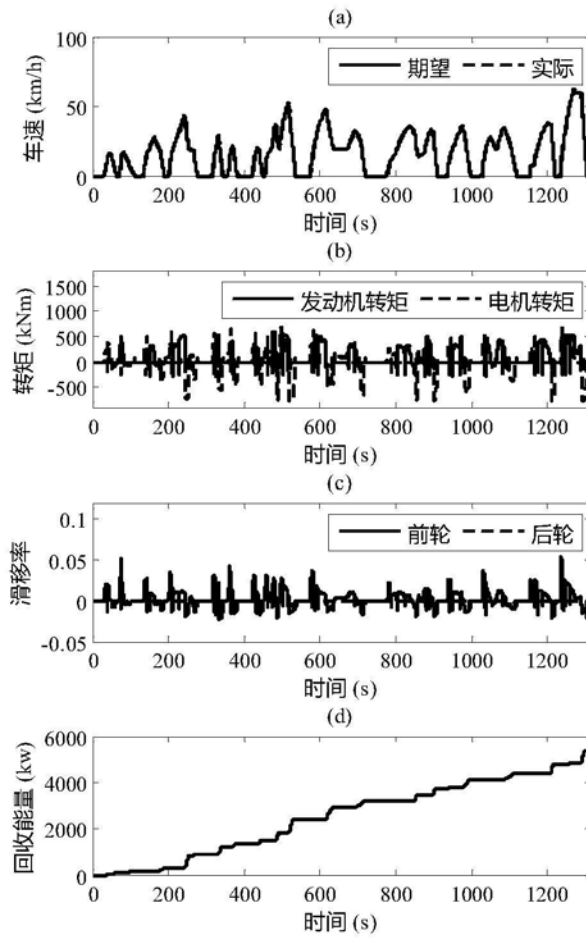


图6

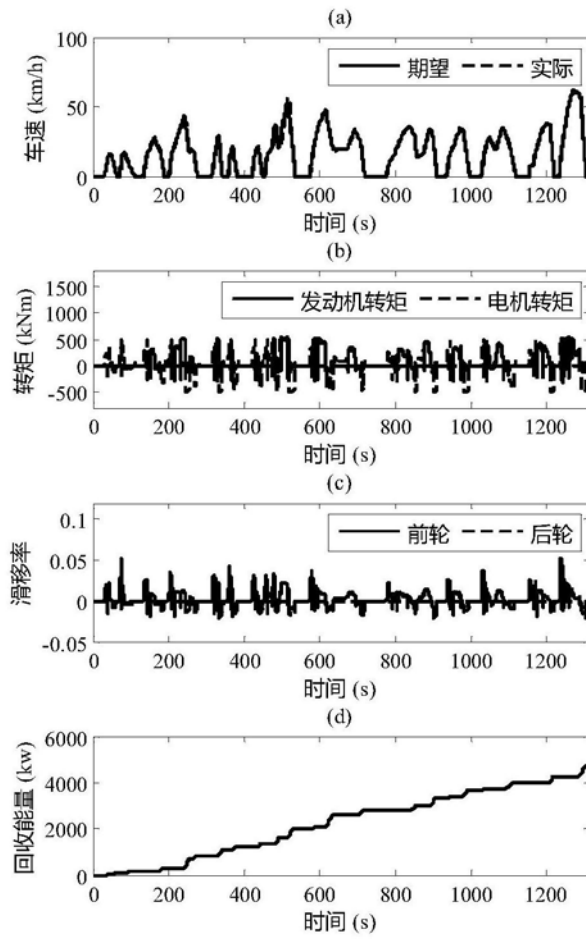


图7



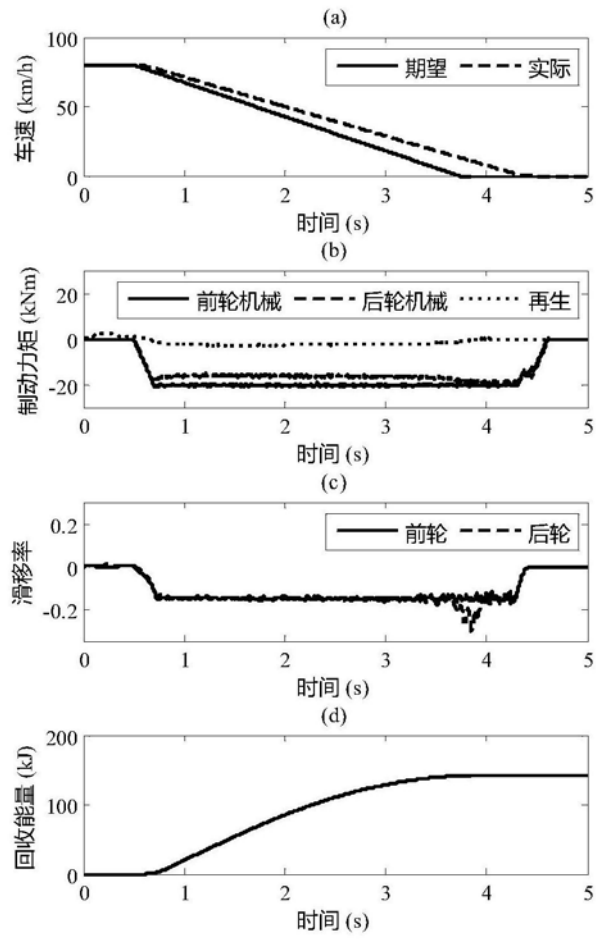


图8