DOI: 10.3901/JME.2020.18.105

基于新型改进遗传算法的混合动力客车高效制动能量回收预测控制策略研究*

张渊博¹ 王伟达¹ 张华³ 杨超¹ 项昌乐¹ 李亮²

- (1. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081;
2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084;
3. 内蒙古一机集团宏远电器有限公司 包头 140032)

摘要: 制动能量回收是提升混合动力客车燃油经济性的核心技术之一。然而基于传统客车机械制动系统与制动能量回收系统集成的混合制动系统,在多种复杂市区、郊区甚至极限工况下,如何通过合理分配再生制动力矩和摩擦机械制动力矩,保证整车稳定性和经济性均衡最优,仍为新能源汽车领域亟待解决的难题。为此,提出一种基于新型改进遗传算法的混合动力客车高效制动能量回收控制策略。结合混合制动系统结构与动力学特性,搭建7自由度整车纵向动力学模型;考虑轮胎在临界稳定区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,采用遗传算法对有限时域内的前后轴机械制动力矩及电机制动力矩的最优分配问题进行预测求解,并采取滚动优化策略实现整个制动过程的最优控制,同时为了防止在预测域内收敛于局部最优解,设计多子种群各自迭代并组合优化的方法对遗传算法进行改进;基于多维表格和最近点的方法对该控制策略进行实时化处理,并完成仿真与硬件在环试验。试验结果表明提出策略在保证整车稳定性的同时,较实车控制器中采用的规则式控制策略,提升15%的制动能量回收率。

关键词: 混合动力客车; 制动能量回收; 改进遗传算法; 预测控制策略

中图分类号: U469

Research on Modified Genetic Algorithm-based High Efficiency Predictive Regenerative Braking Control Strategy for Hybrid Electric Bus

ZHANG Yuanbo¹ WANG Weida¹ ZHANG Hua³ YANG Chao¹ XIANG Changle¹ LI Liang²

- (1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;
2. The State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084;
3. Inner Mongolia First Machinery Group Hongyuan Electric Appliance Co., Ltd., Baotou 140032)

Abstract: Regenerative braking technology of electric vehicle is one of the main technologies to improve its economy. However, based on the hybrid braking system which integrates traditional mechanical braking system and regenerative braking system, how to reasonably distribute regenerative braking torque and friction mechanical braking torque to ensure the overall optimization of vehicle stability and economy in multiple complex working conditions is still a challenge. To solve this problem, an efficiency predictive regenerative braking control strategy based on modified genetic algorithm is proposed. Firstly, a 7 degree of freedom longitudinal vehicle dynamic model is built according to the braking system mechanical structure and dynamic characteristics. Then, considering the high non-linearity of tire in the unstable region and the multi-objective characteristics of stability, economy and other performance requirements in the braking process, the genetic algorithm is used to solve the optimal braking torque distribution problem in finite time domain, and the rolling optimization method is adopted to achieve the optimal control of the whole braking process. At the same time, in order to prevent that calculation result converges to local optimal solution, some modified methods are designed to improve the genetic algorithm; finally, based on the multi-dimensional table and the nearest point method, the real-time calculation of control strategy is realized, and the simulation and hardware in the loop tests are completed. The test results show that the proposed strategy can not only ensure the stability of the whole vehicle, but also improve the braking energy recovery by 15% compared with the regular control strategy which is used in the real vehicle controller.

Key words: hybrid electric bus; regenerative braking; modified genetic algorithm; predictive control

* 国家自然科学基金资助项目(51575043, U1764257, U1564210)。20191203
收到初稿, 20200619 收到修改稿

0 前言

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^[1-2]。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^[3]。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^[4]。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,只是将再生制动力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策略分配完成^[5]。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力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。

针对电动汽车,LI等^[6]提出了基于滑模控制理论的电机补偿制动控制策略,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。

针对混合动力汽车,杨阳等^[7]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,BERA等^[8]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等^[9]设计了基于状态Riccati方程的集成控制策略。

基于装备轮毂电机的电动汽车,HUANG等^[10]提出了非线性模型预测制动能量回收控制策略。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,LIU等^[11]也提出一种不确定性模型预测混合制动控制策略,提升了整车的经济性和鲁棒性。

为了在满足整车稳定性的同时尽可能地提高制动回收能量,KIM等^[12]运用基于常规遗传算法的优化控制策略来求取再生制动力与液压机械制动力之间力矩分配的最优问题,设计了制动能量回收控制

策略并验证了其有效性。

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,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策略研究仍为空白。本文的主要创新工作如下:首先提出了一种基于新型改进遗传算法的混合动力客车高效制动能量回收控制策略,该策略基于遗传算法并融合了模型预测控制理论中的预测控制、滚动优化等特性,同时为了防止算法在预测域内收敛于局部最优解,设计了多子种群各自迭代并组合优化等方法对遗传算法进行了改进;然后,考虑轮胎在临界稳定区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,在算法中采用了非线性3自由度预测模型,并设计了在不同控制模式下的变权重适应度函数,最后基于多维表格和最近点的方法对所设计的制动能量回收控制策略进行了实时化处理,并完成了仿真与硬件在环试验。

1 整车模型

以一款装备同轴并联机电耦合系统的客车为研究对象^[13],提出了一种基于改进遗传算法的再生制动集成控制策略,客车驱制动系统构型如图1所示。

图1 同轴并联客车驱制动系统构型示意图

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。

为验证所设计集成制动策略的有效性,建立7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。

1.1 整车动力学模型

考虑悬架特性,建立了汽车动力学模型^[13](图2),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。

图2 线控串联制动系统构型

模型中具体公式如下。

纵向运动公式

$$\frac{1}{2}m\ddot{x} + \frac{1}{2}m_s D_0 \ddot{\theta} = F_{x1} + F_{x2} - \frac{1}{2}F_{\text{resist}} \quad (1)$$

式中, m 为客车质量(kg); m_s 为客车的簧上部分质量(kg); F_{x1} 、 F_{x2} 分别为地面对前后轮提供的驱制动力(N); F_{resist} 为阻力(N); D_0 为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

$$F_{\text{resist}} = F_f + F_w + mgi \quad (2)$$

$$F_f = mg(f_1 + f_2 \dot{x}) \quad (3)$$

$$F_w = \frac{C_d A \dot{x}^2}{21.15} \quad (4)$$

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 代表汽车行驶过程中的迎风面积(m²); i 代表坡度; g 为重力加速度。

汽车垂向运动公式

$$\frac{1}{2}m_s \ddot{Z} + F_{s1} + F_{s2} = 0 \quad (5)$$

式中, F_{s1} 、 F_{s2} 分别为前后轴悬架对客车簧上部分的弹性力(N)。

俯仰运动公式

$$\frac{1}{2}J_y \ddot{\theta} - \frac{1}{2}m_s D_0 \ddot{x} - F_{s1}a + F_{s2}b = 0 \quad (6)$$

式中, J_y 为汽车俯仰运动的转动惯量(kg·m²); a 、 b 为汽车质心到前后轴轴心的纵向距离(m); l 为前后轴之间的纵向距离(m)。

轮胎运动公式

$$m_1 \ddot{Z}_1 - F_{s1} + K_{b1} Z_1 = 0 \quad (7)$$

$$m_2 \ddot{Z}_2 - F_{s2} + K_{b2} Z_2 = 0 \quad (8)$$

$$J_1 \dot{\omega}_1 = F_{s1} R_1 - T_{b1} \quad (9)$$

$$J_2 \dot{\omega}_2 = F_{s2} R_2 - T_{b2} - T_{\text{reb}} \quad (10)$$

$$F_{z1} = m_s g b / 2l + m_1 g - K_{b1} Z_1 \quad (11)$$

$$F_{z2} = m_s g a / 2l + m_2 g - K_{b2} Z_2 \quad (12)$$

式中, Z_1 、 Z_2 分别为前后轮的垂向位移(m); m_1 、 m_2 分别为前后轮的车轮质量(kg); K_{b1} 、 K_{b2} 分别为前后轮的垂向刚度(N/m); J_1 、 J_2 分别为前后轮的转动惯量(kg·m²); R_1 、 R_2 分别为前后轮车轮半径(m); T_{b1} 、 T_{b2} 分别为前后轮上所受到的机械制动力矩(N·m); T_{reb} 为电机提供的再生制动力矩(N·m)。 F_{z1} 、 F_{z2} 分别为前后轮对地面的垂直载荷(N)。 ω_1 、 ω_2 分别为前后轮的角速度。

悬架运动公式如下

$$F_{s1} = K_1(Z - Z_1 - a\theta) + C_1(\dot{Z} - \dot{Z}_1 - a\dot{\theta}) \quad (13)$$

$$F_{s2} = K_2(Z - Z_2 + b\theta) + C_2(\dot{Z} - \dot{Z}_2 + b\dot{\theta}) \quad (14)$$

式中, C_1 、 C_2 分别为前后轴悬架的阻尼; K_1 、 K_2 分别为前后轴悬架的刚度(N/m)。

结合式(1)~(14)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。

1.2 轮胎模型

轮胎的建模方案有很多, 本文选择了常用的魔术公式来模拟轮胎特性, 具体公式如下

$$\mu_i = \sigma D \sin(\text{Carctan}\{BS_{xi} - E[BS_{xi} - \arctan(BS_{xi})]\}) \quad (15)$$

$$S_{xi} = \frac{\omega_i R_i - v}{v} \quad (16)$$

$$F_{xi} = \mu_i F_{zi} \quad i \in \{1, 2\} \quad (17)$$

式中, μ 为摩擦因数, s 为轮胎的滑移率, σ 为地面附着系数, B 、 C 、 D 和 E 是魔术公式中的相关参数, 其具体意义可以参考文献[14]。

1.3 电池模型

对于电池模型(图3), 本文采用了简单的电池内阻模型。锂电池的容量参数设为 80 A·h, 具体公式如下

$$I^2 \times R_{\text{int}} - V_{\text{oc}} \times I + P = 0 \quad (18)$$

式中, R_{int} 为内阻(Ω); I 为电流(A); V_{oc} 为电池开端电压(V); P 为负载功率(kW)。

图 3 电池内阻模型

电池荷电状态(State of charge, SOC), 用来表示电池电量状态, 采用安时积分法计算, 具体公式如下

$$\text{SOC} = \text{SOC}_0 - \int \frac{I}{Q} dt \quad (19)$$

式中, Q 为额定电量(C); SOC_0 为初始 SOC。

1.4 电机模型

选择的 ISG 电机能够输出的最大转矩为 750 N·m, 电机额定功率与峰值功率分别为 92 kW 和 121 kW。如图 4 所示, 电机效率主要通过标定的 MAP 图得到。

图 4 电机效率 MAP 图

1.5 气压机械制动系统模型

气压制动系统的结构如图 1 所示。系统由空气

表 1 仿真模型中的部分参数

名称	数值	名称	数值
迎风面积 A/m^2	8.46	轮胎魔术公式系数 B	8.98
轮胎魔术公式系数 C	1.62	前后悬架阻尼 $C_1, C_2/(\text{kN} \cdot \text{s/m})$	30
风阻系数 $C_D/(\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2)$	0.51	轮胎魔术公式系数 D	1
质心到汽车俯仰运动中心轴线的距离 D_0/m	0.154 5	轮胎魔术公式系数 E	0.5
前后轮的转动惯量 $J_1, J_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	14	汽车俯仰运动的转动惯量 $J_\varphi/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	70 875
前后轴悬架的刚度 $K_1, K_2/(\text{kN/m})$	700	前后轮的垂向刚度 $K_{b1}, K_{b2}/(\text{kN/m})$	980
前后轮车轮半径 $R_1, R_2/\text{m}$	0.48	控制周期时间步长 T_s/ms	10
汽车质心到前轴轴心的纵向距离 a/m	3.06	汽车质心到后轴轴心的纵向距离 b/m	2.04
滚动阻力系数 f_1	0.007 6	滚动阻力系数 f_2	5.6×10^{-5}
前后轴之间的纵向距离 l/m	5.1	客车质量 m/kg	14 000
客车的簧上部分质量 m_s/kg	13 180	前后轮的车轮质量 $m_1, m_2/\text{kg}$	67
制动压力的变化率 $u_x/(\text{MPa/s})$	5	制动转矩与轮缸压力的系数 $k_{pb}/(\text{N} \cdot \text{m/MPa})$	20 000

2 制动能量回收控制策略

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

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(图 5)。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_t 。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

$$\tau_x = \frac{p_t}{u_x} + \tau_0 \quad (20)$$

式中, p_t 表示目标制动压力, u_x 表示制动压力的变化率, τ_0 表示气压制动系统的起作用时间。

图 5 气压制动系统特性图

制动气压和气压制动转矩的关系

$$T_b = k_{pb} p \quad (21)$$

式中, T_b 为作用于车轮上的气压制动转矩, p 为制动轮缸的气体压力, 系数 k_{pb} 可以通过气压制动系统的反复试验进行标定。

在模型中用到的部分参数如表 1 所示。

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, 并基于模型预测控制理论对实车进行了优化控制。

如图 6 所示, 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,模型预测控制为遗传算法提供预测模型、状态参数和性能指标,基于性能指标设定遗传算法的适应度函数。该方法的预测模型为3自由度整车动力学模型,在遗传算法中利用该预测模型对个体(即一组控制序列)的适应度值,不断迭代找到最优控制序列,并输出最优控制序列的当前时刻控制量,在下一步再次重复此过程实现滚动优化,即通过对当前时刻的有限时域内的最优问题的求解,得到当前的最优控制序列,输出该序列中的第一组控制量(即当前时刻的最优控制量),在下一时刻根据其车辆状态重新计算最优问题,并输出下一时刻最优控制序列的第一组控制量,实现下一时刻的控制,以此类推。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。

可能跟随驾驶意图并最大程度地回收制动能量,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,对该算法进行了改进,基于改进遗传算法的制动能量回收控制策略的过程可分为以下四个步骤。

第一步:基于模型预测控制在控制域的初始化约束范围,依照均值分布的方法产生三个控制变量的初始种群。

第二步:对各个控制变量种群中的个体进行排列组合。

第三步: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。

第四步: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。

2.1 计算模型

为了简化计算,在制动能量回收控制策略中,不再使用7自由度动力学模型,而是选择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。其中3个自由度分别为纵向车速,前轮转速和后轮转速,相对于第1.1节描述的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。

具体公式如下

$$ma_1(k) = F_{x1}(k) + F_{x2}(k) - F_{\text{resist}}(k) \quad (22)$$

$$\alpha_1(k) = (T_{b1}(k) - R_1 F_{x1}(k)) / J_1 \quad (23)$$

$$\omega_1(k+1) = \omega_1(k) + \alpha_1(k)Ts \quad (24)$$

$$\alpha_2(k) = (T_{b2}(k) + T_{\text{reb}} - R_2 F_{x2}(k)) / J_2 \quad (25)$$

$$\omega_2(k+1) = \omega_2(k) + \alpha_2(k)Ts \quad (26)$$

式(22)用到的变量可通过式(27)~(29)计算

$$F_{\text{resist}}(k) = F_f(k) + F_w(k) \quad (27)$$

$$F_f(k) = mg(f_1 + f_2 v(k)) \quad (28)$$

$$F_w(k) = \frac{C_d A v(k)^2}{21.15} \quad (29)$$

式(23)、式(25)用到的变量可通过式(30)~(37)计算

$$S_1(k) = (\omega_1(k)R_1 - v(k)) / v(k) \quad (30)$$

图6 制动能量回收控制策略总框架

在制动过程中需要考虑经济性,安全性等多个目标,该策略旨在保证汽车制动安全的前提下,尽

$$S_2(k) = (\omega_2(k)R_2 - v(k)) / v(k) \quad (31)$$

$$\mu_1(k) = \sigma D \sin[C \arctan(BS_1(k) - E\{BS_1(k) - \arctan[BS_1(k)]\})] \quad (32)$$

$$\mu_2(k) = \sigma D \sin[C \arctan(BS_2(k) - E\{BS_2(k) - \arctan[BS_2(k)]\})] \quad (33)$$

$$F_{z1}(k) = \frac{mg}{L} \left(b + \frac{a_1(k-1)h}{g} \right) \quad (34)$$

$$F_{z2}(k) = \frac{mg}{L} \left(a - \frac{a_1(k-1)h}{g} \right) \quad (35)$$

$$F_{x1}(k) = F_{z1}(k)\mu_1(k) \quad (36)$$

$$F_{x2}(k) = F_{z2}(k)\mu_2(k) \quad (37)$$

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; α_1 、 α_2 分别为前后轮的角加速度。

2.2 约束

结合系统特性, 设定再生制动力矩的约束如下:

① 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; ② 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再生制动转矩; ③ 基于设定的最大再生制动转矩变化率限制以及上一时刻的再生制动转矩, 得到当前的再生制动转矩限制。由于系统能够提供的气压制动力矩较大, 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

$$T_{reb} \omega_m \eta_{motor} \leq P_{batt_lim} \quad (38)$$

$$\begin{cases} |T_{reb, max}| \geq |T_{reb}| \\ |T_{reb}(k+1) - T_{reb}(k)| \leq T_{rechange, max} \cdot Ts \end{cases} \quad (39)$$

$$|T_{b2}(k+1) - T_{b2}(k)| \leq T_{pchange, max} \cdot Ts \quad (40)$$

$$|T_{b1}(k+1) - T_{b1}(k)| \leq T_{pchange, max} \cdot Ts \quad (41)$$

式中, 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; $T_{rechange, max}$ 为再生制动转矩的最大变化率限制; $T_{pchange, max}$ 为气压制动系统摩擦制动转矩在当前状态下的最大变化率限制。

2.3 适应度函数

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地提高经济性。本文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控制模式。

2.3.1 一般控制模式

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 $L1$ 。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, 尽可能地不触发防抱死控制模式。其适应度函数如下

$$J(k) = J(u(k|k), \dots, u(k+h_c-1|k)) = w_x \sum_{i=1}^{h_x} \|e_i(k)\|^2 + w_y \sum_{i=1}^{h_y} (T_{re} \omega_2 \eta_i)^2 + w_z \sum_{i=1}^{h_z} (S_{x1}^2 + S_{x2}^2) \quad (42)$$

$$e_i(k) = v_{ref}(k+i|k) - v(k+i|k) \quad i=1, 2, \dots, h_p \quad (43)$$

$$\eta_i = \eta_{trans} \eta_{motor} \quad i=1, 2, \dots, h_p \quad (44)$$

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。 η_i 是制动时制动能量回收系统的效率。 η_{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 、 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 0, 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。

2.3.2 防抱死(ABS)控制模式

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

$$J(k) = J(u(k|k), \dots, u(k+h_c-1|k)) = w_x \sum_{i=1}^{h_x} \|e_i(k)\|^2 + w_y \sum_{i=1}^{h_y} (T_{re} \omega_2 \eta_i)^2 + w_z \sum_{i=1}^{h_z} ((S_1 - S_{xrefer})^2 + (S_2 - S_{xrefer})^2) \quad (45)$$

式中, S_{xrefer} 是车轮期望滑移率。

2.4 模型预测控制架构下遗传算法改进

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。

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。

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，本文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。

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。

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。

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。

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。

$$u_{i,j}(t+1) = P_1 u_{ik}(t) + P_2 u_{ih}(t) \quad (46)$$

$$u_{i,j+1}(t+1) = P_2 u_{ik}(t) + P_1 u_{ih}(t) \quad (47)$$

式中， $u_{ik}(t)$ 、 $u_{ih}(t)$ 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。

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。

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。

2.5 实时化方法

基于遗传算法的制动能量回收控制策略的计算量较大，从而计算效率较低，难以满足实时性需求。

针对该问题，设计提出控制策略的等效控制策略，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^[15]。CANALE 等^[16]通过实际试验验证了该实时化方法的可行性和有效性。

用上述基于改进遗传算法的控制策略进行离线运算，生成基于输入集的多维表格^[17]。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。同时设置多维表格时，首先对车速进行平均划分，然后基于车速对前轮转速、后轮转速以及期望车速设定上下限，并在其上下限内进行平均划分。简化后输入集 W_v 以及表格各维度内点之间的间隔 Δw 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， v_{define} 为表格中每个点的设定车速。

$$W = (v, \omega_1, \omega_2, v_{\text{ref}}, \sigma)^T \in R^5 \quad (48)$$

$$W_v = (0, v_{\text{define}} - 10, v_{\text{define}} - 10, v_{\text{define}} - 10Ts, 0.1)^T \leq w \leq (90, v_{\text{define}} + 1, v_{\text{define}} + 1, v_{\text{define}} + Ts, 0.9)^T \quad (49)$$

$$\Delta w = (1, 1, 1, Ts, 0.1)^T \quad (50)$$

3 仿真结果分析

为了验证所提出控制策略及其实时化等效策略的制动安全性以及能量回收效率，本文分别进行了仿真和硬件在环试验。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 硬件在环试验。

3.1 汽车制动稳定性验证

制动安全性的仿真工况设定如下：初始车速为 80 km/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。

首先在砂石路面上验证汽车安全性。其仿真结果如图 7 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 7a 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 7b 所示，由于触发 ABS 模式之后，为防止车轮抱死，制动过程将不再换档，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，电机提供的再生制动转矩较小，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

求制动转矩与再生制动转矩之间的差值由机械制动转矩补偿。在图 7c 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 7d 所示, 制动过程中回收的制动能量为 212.85 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。

图7 砂石路面仿真试验

3.2 制动能量回收能力验证

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策略^[11], 该策略简单描述如下: 在制动踏板低于门限值 C 时, 需求制动力矩全部由电机提供, 当其高于门限值 C 时, 需求制动力矩在前后轴进行成比例分配(随制动踏板的增大, 驱动轴分配的制动力矩比例逐渐减小, 最后前后轴趋向于其负载比例), 其中后轴上分配的制动力矩优先由电机提供, 若电机不能满足时, 由气压机械制动力矩补偿, 前轴上分配的制动力矩则全部由气压机械制动力矩提供。

仿真结果如图 8、9 所示, 从图 8a 和图 9a 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。对比图 8b 和图 9b 可得, 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, 再生制动力矩不足以满足需求时, 剩余的制动力矩几乎全部由后轮机械制动力矩进行补偿, 此处不再列出。如图 8c 与图 9c 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 8d 与图 9d 所示, 相对于对比策略, 本文所提出的制动能量回收控制策略在工况中回收的制动能量大幅度提高。

图8 标准工况-制动能量回收策略

3.3 硬件在环试验验证

硬件在环系统如图 10 所示, 主要包括 DSPACE 及其计算机, 控制器及其计算机。实际上该硬件在环试验验证是一种控制器在环验证, 其中控制器部分为实际车辆中使用的控制器, 除控制器之外的其他部分均在 DSPACE 中进行基于模型的虚拟模拟,

图9 标准工况-规则式制动能量回收策略

该试验主要验证的是等效控制策略的实时性以及有效性。

图10 硬件在环系统图

DSPACE 计算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实现通信。

而在控制器计算机中,控制策略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信程序等结合,形成完整的控制器程序,计算机2与控制器通过CAN线进行通信,可以方便地向控制器烧录程序。进行硬件在环试验时,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通信实现硬件在环仿真。

硬件在环试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试验相同。试验结果如图11所示,曲线与图7基本近似,但为了满足实际控制器的实时性需求,在硬件在环试验中采用的是基于最近点方法的等效控制策略,而由于控制器存储空间的限制,在使用最近点方法时牺牲了一定的精度,所以等效控制策略的效果不如所提出的策略在模型在环中表现出来的效果,可以看出图11中数据变化较大,曲线中存在一定波动,总体控制效果稍差,且回收的制动能量也较小。但从图11c中可以看出,该策略同样保障了车轮滑移率在安全范围内。

图11 硬件在环试验

表2详细给出验证试验的数据对比,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, 在硬件在环试验中, 由于采取等效策略, 控制效果不如模型在环试验, 最大滑移率为 0.305 5, 所有试验中车轮均未抱死, 说明所提出的控制策略能够保证汽车在制动过程中的安全性。在国家标准工况下, 基于规则式的控制策略回收制

动能量为 4 686.2 kJ, 而本文所提出的基于遗传算法的制动能量回收控制策略回收制动能量为 5 397.8 kJ, 相对于规则式控制策略提升 15.19%, 回收能量在总制动能量的占比达到 60.27%, 从而验证了提出的策略的制动能量回收效率。

表 2 基于遗传算法控制策略与基准策略仿真结果对比

试验	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 (%)
紧急制动, 砂石路面	0.178 4	0.190 2	3 364.3	212.85	6.33
标准工况, 规则式	0.021 6	0.020 9	9 241.8	4 686.2	50.71
标准工况, 遗传算法	0.023 7	0.021 0	8 955.7	5 397.8	60.27
硬件在环试验	0.176 6	0.305 5	3 364.3	142.37	4.23

4 结论

本文提出了一个有效的基于改进遗传算法的制动能量回收预测控制策略。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区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力矩及电机制动力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近似点的实时化方法对该控制策略进行了实时化处理, 并完成了仿真与硬件在环试验, 仿真和硬件在环试验结果显示, 所提出的控制策略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, 与基于规则的制动能量回收控制策略相比, 能够提升 15% 的制动回收能量。

参 考 文 献

- [1] 刘辉, 李训明, 王伟达, 等. 基于最优功率分配因子的插电式混合动力汽车实时能量管理策略研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(4): 91-101.
LIU Hui, LI Xunming, WANG Weida, et al. Optimal power allocation factor based real time energy management strategy for a plug-in hybrid electric vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(4): 91-101.
- [2] 杨继斌, 徐晓惠, 张继业, 等. 燃料电池有轨电车能量管理策略多目标优化[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 153-159.

- YANG Jibin, XU Xiaohui, ZHANG Jiye, et al. Multi-objective optimization of energy management strategy for fuel cell tram[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 153-159.
- [3] WANG Qinpu, YANG Chao, LIU Yahui, et al. City-bus-route demand-based efficient coupling driving control for parallel plug-in hybrid electric bus[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31: 58.
- [4] 王钦普, 游思雄, 李亮, 等. 插电式混合动力汽车能量管理研究策略综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 1-19.
WANG Qinpu, YOU Sixiong, LI Liang, et al. Survey on energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 1-19.
- [5] LI Liang, ZHANG Yuanbo, YANG Chao, 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.
- [6] 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.
- [7] 杨阳, 邹佳航, 杨洋, 等. 混合动力汽车再生制动压力协调控制系统[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22): 127-135.
YANG Yang, ZOU Jiahang, YANG Yang, et al. Pressure coordinated control system for HEV regenerative braking[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(22): 127-135.
- [8] BERA T K, BHATTACHARYA K, SAMANTARAY A K. Bond graph model-based evaluation of a sliding mode

- controller for a combined regenerative and antilock braking system[J]. Proc. Inst. Mech. Eng., Part D, J Automot. Eng., 2010, 225: 918-934.
- [9] KANARACHOS S, ALIREZAEI M, JANSEN S, et al. Control allocation for regenerative braking of electric vehicles with an electric motor at the front axle using the state-dependent riccati equation control technique[J]. Proc Inst Mech Eng., Part D, J Automot. Eng., 2014, 228: 129-143.
- [10] HUANG X, WANG J. Model predictive regenerative braking control for lightweight electric vehicles with in-wheel motors[J]. Proc. Inst. Mech. Eng., Part D, J Automot. Eng., 2012, 226: 1220-1232.
- [11] LIU W, HE H, GUO H, et al. Control research for hybrid compound braking based on an uncertainty predictive model[C]//ITEC Asia-Pacific, Beijing: 2014: 1-6.
- [12] KIM D, KIM J, HWANG S, et al. Optimal brake torque distribution for a four-wheel-drive hybrid electric vehicle stability enhancement[J]. Proc. Inst. Mech. Eng., Part D, J Automot. Eng., 2017, 221: 1357-1366.
- [13] YANG C, JIAO X, LI L, et al. A robust H^∞ control-based hierarchical mode transition control system for plug-in hybrid electric vehicle[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 99: 326-344.
- [14] PACEJKA H B, BAKKER E. The magic formula tyre model[J]. Veh. Syst. Dyn., 1992, 21(Suppl.): 1-18.
- [15] CANALE M, FAGIANO L, MILANESE M. Set membership approximation theory for fast implementation of model predictive control laws[J]. Automatica, 2009, 45(1): 45-54.
- [16] CANALE M, FAGIANO L, RAZZA V. Approximate NMPC for vehicle stability: Design, implementation and SIL testing[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18: 630-639.
- [17] FUKUNAGA K. Introduction to statistical pattern recognition[M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1990.

作者简介: 张渊博, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为新能源汽车制动能量回收控制技术, 分布式独立电驱动汽车动力学及控制。

E-mail: yuanbzhang@163.com

王伟达(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为混合动力车辆, 机电传动控制, 车辆动力学及其控制。

E-mail: wangwd0430@163.com