

# 基于 Simulink-AMESim 联合仿真的混合动力客车再生制动系统分析

王鹏宇, 王庆年, 胡安平, 于远彬

(吉林大学 汽车工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 对混合动力客车制动力分配系数的确定进行了分析。在并行再生制动系统的基础上, 提出通过调节气压 ABS 调节单元控制汽车机械制动力, 以改善混合动力客车制动力分配, 提高制动稳定性, 增加制动能量回收。建立了 Simulink-AMESim 联合仿真模型并进行了仿真分析。仿真结果表明: 这种再生制动系统可有效地提高汽车制动稳定性, 增加制动能量回收。

**关键词:** 车辆工程; 混合动力客车; 再生制动; AMESim; 仿真

**中图分类号:** U469.7    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1671-5497(2008)Sup.-0007-05

## Analysis of regenerative brake system of hybrid bus based on Simulink-AMESim co-simulation

Wang Peng-yu, Wang Qing-nian, Hu An-ping, Yu Yuan-bin

(College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The methodology to calculate the braking force distribution coefficient of the hybrid bus was studied. A strategy to control the vehicle friction braking force by controlling the pressure modulator of the air anti-lock braking system was suggested for the parallel regenerative brake system of the hybrid bus to improve its braking force distribution and braking stability, and increase the braking energy regeneration. A co-simulation model was built with the platform of Simulink-AMESim and the simulation was performed. The simulation demonstrated the positive and encouraging results.

**Key words:** vehicle engineering; hybrid bus; regenerative brake; AMESim; simulation

混合动力城市公交车是目前公认的混合动力车主要应用车型, 城市公交车主要工作在频繁起停的工况下, 混合动力城市公交车将能够显著地提高燃油经济性, 减少尾气排放, 降低污染。再生制动<sup>[1]</sup>技术应用到混合动力汽车上将能够部分回收制动消耗在制动器上的能量, 提高整车燃油经济性。就目前大多数混合动力汽车而言, 机械制

动与再生制动是并行的, 这种再生制动系统存在着机械制动子系统常开、机械制动力不可控、制动能量回收有限、驱动轴容易提前抱死等问题。本文尝试在并行再生制动系统基础上, 通过调节 ABS 调节单元来控制机械制动力, 从而提高再生制动系统性能。

收稿日期: 2007-08-30.

基金项目: “863”国家高技术研究发展计划项目(2006AA11A184); 吉林大学“985 工程”项目.

作者简介: 王鹏宇(1979-), 男, 博士研究生. 研究方向: 混合动力汽车驱动理论及控制技术.

E-mail: wpy123456789000@sohu.com

通讯联系人: 王庆年(1952-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 混合动力汽车驱动理论与控制技术, 汽车轮胎力学,

车辆通过性. E-mail: wqn@jlu.edu.cn

## 1 并行再生制动系统

图1所示为混合动力客车的并行再生制动系统制动控制策略<sup>[2,3]</sup>,这种制动力分配控制策略是在传统汽车定比例制动力分配控制策略思想的基础上发展起来的,具有控制系统简单、可靠性高、容易实现等优点,是一种应用价值很高的制动力分配控制策略。但是这种控制策略下制动力分配曲线高于I曲线,在附着系数低的路面上容易发生后轮先抱死的不稳定工况,同时为了尽可能提高制动稳定性,后轮再生制动力被控制在较小的范围,限制了再生制动能量的回收。如果可以通过简单地调解机构控制驱动轴机械制动力,使再生制动力起作用后的制动力分配曲线沿原有的制动力分配曲线β线分配,将提高整车的制动稳定性,同时提高再生制动能量回收率。

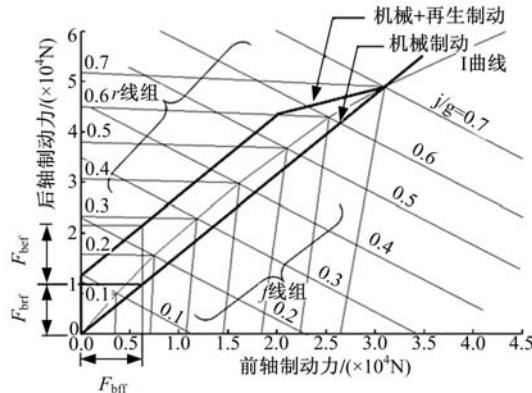


图1 并行再生制动系统制动控制策略

Fig. 1 Control strategy of parallel brake system

## 2 混合动力客车制动力分配

对于混合动力客车而言,后轴为驱动轴,其制动力由机械制动力与再生制动力共同提供。增大后轴制动力可以提高再生制动力的利用,但是过分增大会导致后轴先抱死的不稳定工况。因此合理地分配混合动力客车前后轴制动力可以在回收制动能量的同时保证汽车的制动稳定性。为保证制动时汽车的方向稳定性和有足够的附着效率,联合国欧洲经济委员会制定的ECE制动法规对双轴汽车的前、后轴制动力提出了明确的要求。由ECE法规对货车制动力的分配要求<sup>[4]</sup>可得不等式组

$$\beta \geq (b + zh_g)/L, z = 0.15 \sim 0.3 \quad (1)$$

$$\beta \geq 1 - (z + 0.07)(a - zh_g)/(0.85zL) \quad (2)$$

$$z = 0.2 \sim 0.8$$

$$\beta \leq (z + 0.07)(b + zh_g)/(0.85zL) \quad (3)$$

$$z = 0.2 \sim 0.8$$

式中: $\beta$ 为制动力分配系数; $a$ 、 $b$ 为质心到前、后轴距离; $L$ 为轴距; $h_g$ 为质心高度; $z$ 为制动强度。

将上述不等式绘制成图,如图2所示。图中A线和B线分别称为上控制线和下控制线,C线称为抱死顺序控制线,也可以称为第二下控制线。从图中可以看出,只有 $\beta$ 在上下控制区域内(在虚线区域内)才满足ECE法规。

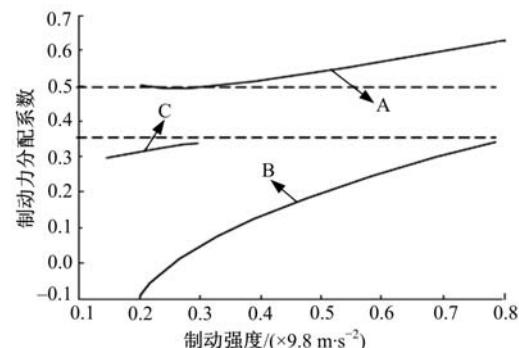


图2 按ECE法规得到的制动力分配系数控制线

Fig. 2 Distribution coefficient of brake force accord to ECE rule

由于混合动力客车是后轴驱动,再生制动力作用在后轴上,考虑混合动力客车制动力分配时,应使 $\beta$ 尽量小,可以更多地利用再生制动力,提高能量回收。因此只需确定 $\beta$ 下限即可。如图当 $z = 0.3$ 时,由式(1)得到的 $\beta$ 值为满足ECE法规的第二下控制线的最大值,此值就应为混合动力客车 $\beta$ 值的下限 $\beta_{min}$ 。这样混合动力客车进行制动力分配时,就可以尽量使用后轴再生制动力,但 $\beta$ 不能低于 $\beta_{min}$ ,即

$$\beta = F_{u1}/F_{u2} + F_r > \beta_{min} = (b + 0.3h_g)/L \quad (4)$$

按照这样的制动力分配系数确定方法进行仿真分析,结果表明,这种分配方法可在中小制动强度下有效地保证汽车制动稳定性,而在大制动强度下会发生后轴先抱死的不稳定工况。图3所示为在湿沥青路面(附着系数0.65)进行大制动强度制动(制动踏板开度65%)的仿真结果。后轴先于前轴抱死是由于大制动强度下发生轴荷转移,前轴轴荷增大而后轴轴荷减小所致。因此这种分配系数确定方法并不理想。

由理想的前后轴制动力分配公式可以得到理想的制动力分配系数为

$$\beta = F_{u1}/F_u = (b + zh_g)/L \quad (5)$$

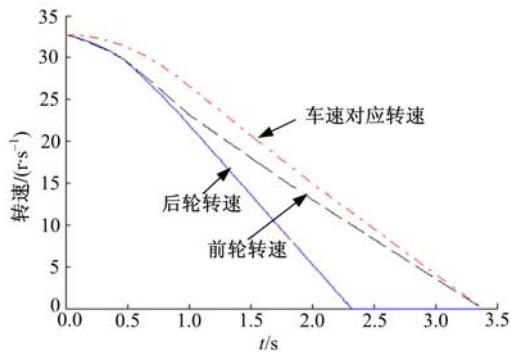


图 3 按 ECE 法规得到的制动力分配系数仿真结果

Fig. 3 Simulation results for distribution coefficient according to ECE Rule

根据式(5)绘制制动力分配系数与制动强度的关系图,如图 4 所示。图中 E、D 线分别为空载、满载的理想制动力分配系数对应制动强度的关系曲线。可以看出,抱死顺序控制线 C 即为满载理想制动力分配系数对应制动强度关系曲线 D 在制动强度  $z=0.1 \sim 0.3$  上的一段。处于 D 线上方的点总是前轮优先,后轮抱死。从图 4 还可以看出,前文确定的制动力分配系数  $\beta_{min}$  只能保证在制动强度  $z$  小于  $0.3 g$  的情况下前轮先于后轮抱死,而在大制动强度下并不能保证汽车的制动稳定性。理想的制动力分配系数  $\beta$  值边界应根据制动强度的不同而改变,如图中 D 线(D 线上方的点为保证汽车制动稳定性的工作点)。采集制动踏板开度信号是混合动力汽车的发展趋势,因此按图中 D 线分配客车制动力是可以实现的。图 4 还表明,空载的理想制动力分配系数 E 线在 D 线下方,而汽车部分载荷的理想制动力分配系数应该介于 D 线与 E 线之间,因此 D 线上方的点高于空载和部分载荷汽车理想制动力分配系数对应制动强度关系曲线,保证前轴先于后轴抱死。图 5 是在同样条件下根据理想制动力分配曲线进

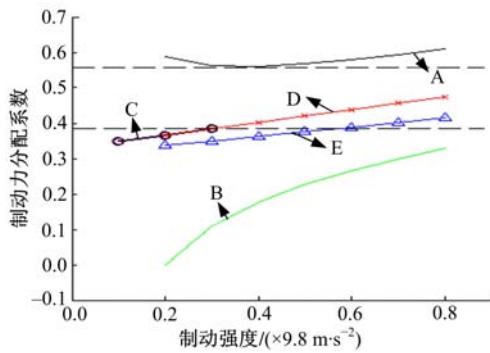


图 4 理想的制动力分配系数曲线

Fig. 4 Ideal distribution coefficient of brake force

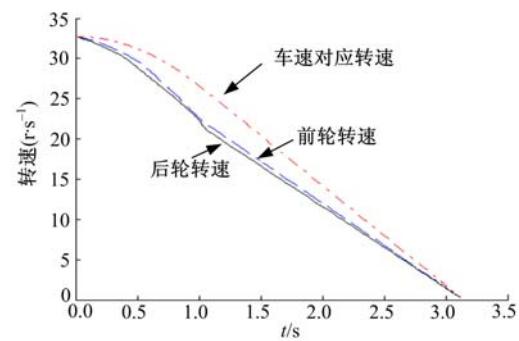


图 5 按 D 线分配制动力的仿真结果

Fig. 5 Simulation results for ideal distribute coefficient  
行制动力分配的仿真结果,前、后轴均不抱死。

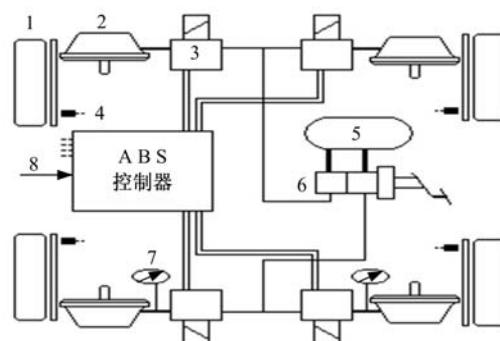
### 3 建模与分析

#### 3.1 ABS 调节单元工作原理

为提高汽车的安全性,我国规定 12 t 以上的客车要求安装 ABS 系统。大型商用车的制动系统大多是气压制动系统,在其上使用的 ABS 系统是气压 ABS 系统。气压 ABS 系统由轮速传感器、电子控制单元和压力调节单元等组成。

ABS 控制器根据各车轮转速传感器输入的车轮转速信号对车轮的运动状态进行监测,在防抱死制动过程中,ABS 控制器根据各车轮的运动状态可以发出减小、保持或增大车轮所处控制通道制动压力的控制指令,再根据控制指令驱动相应制动压力调节装置中的电磁阀,实现对相应控制通道的制动压力调节。

本文尝试利用客车原有的 ABS 压力调节装置来调节制动管路压力,实现对驱动轴制动力的控制。图 6 所示为带有 ABS 的制动系统,在其驱动轴制动管路加装压力传感器,并建立 ABS 控制



1-车轮;2-制动气室;3-ABS 调节单元;4-轮速传感器;

5-储气筒;6-制动阀;7-压力传感器;8-通信通道。

图 6 客车制动系统

Fig. 6 Brake system of hybrid bus

器-车辆控制器通信通道。

将气压 ABS 压力调节单元简化为由两个电磁开关阀组成(见图 7), 车辆控制器通过计算得到制动管路目标压力, 向 ABS 控制器发出命令控制两个电磁阀的开关, 最终实现机械制动力的控制。

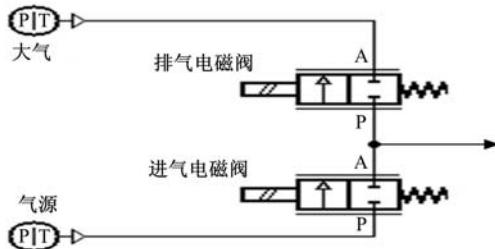


图 7 ABS 压力调节单元原理图

Fig. 7 Principle map of ABS adjust unit

### 3.2 压力调节单元的建模

压力调节单元采用 AMESim 软件进行建模, AMESim 软件是世界公认的一流仿真平台, 在工程领域应用广泛。基于此软件建立的制动系统 ABS 调节单元模型<sup>[5]</sup>具有更高的准确性。图 8 所示为客车制动系统的仿真模型, 此模型包含的所有子模块均为 AMESim 模型库中自带的子模型。模型可模拟 4 个制动气室中制动压力随 ABS 开关阀调节的变化过程。ABS 开关阀的开关命令由 Simulink 模型发出, 并由压力传感器模块向 Simulink 模型回馈制动气室制动压力信号。

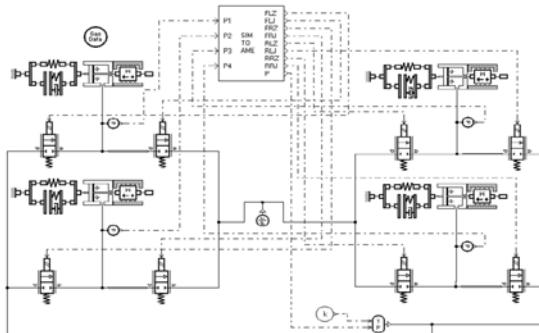


图 8 AMESim 仿真模型

Fig. 8 AMESim simulation model

### 3.3 制动系统仿真模型

在 Simulink 环境下建立客车制动过程仿真模型, 主要包括制动力控制模块, 再生制动力计算模块, 电机模型<sup>[6]</sup>, 电池模型, 车辆动力学仿真模块<sup>[7]</sup>以及 AMESim 模型。图 9 所示为仿真模型的控制逻辑图。

制动力控制模块根据驾驶员命令和驱动轴再

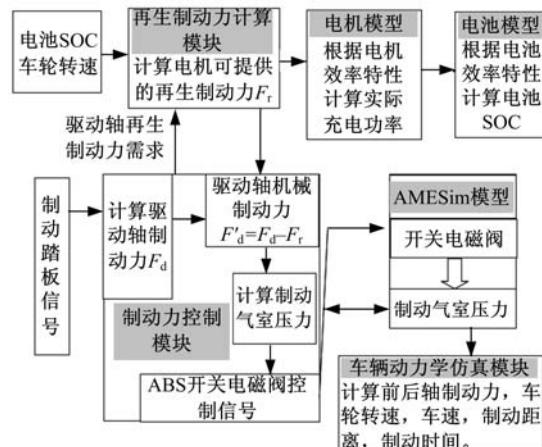


图 9 仿真模型控制逻辑

Fig. 9 Control logic of simulation model

生制动力分配情况计算制动气室目标压力, 向 AMESim 模型中的压力调节元件发出控制命令, 实现机械制动力的控制。车辆动力学仿真模块根据 AMESim 模型回馈的制动缸压力信号和电机工作情况计算出前、后轴制动力, 进一步计算各车轮转速, 客车车速等。

### 4 Simulink-AMESim 联合仿真

本文在上述搭建的联合仿真模型中, 分别对并行式再生制动系统与加入 ABS 调节的再生制动系统进行仿真模拟。图 10、图 11 分别为两种

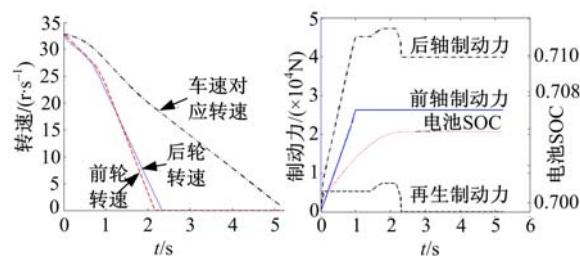


图 10 并行再生制动系统仿真结果

Fig. 10 Simulation results of parallel regenerate brake system

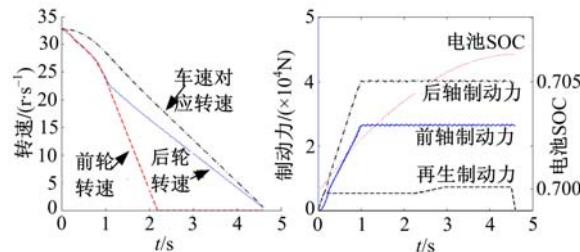


图 11 ABS 调节再生制动系统仿真结果

Fig. 11 Simulation result of regenerate brake system with ABS adjust

制动系统在湿土路面中等制动强度下进行制动的仿真结果。经过计算可知,该工况为前轴抱死,后轮不抱死的特定情况。图 10 为并行制动系统仿真结果,再生制动力作用时,驱动轴制动力为再生制动力与摩擦制动力之和,超过了道路附着极限,因此在 2.3 s 时后轴抱死,再生制动力停止作用。图 11 为加入 ABS 调节的制动系统的仿真结果,可以看出,由于 ABS 调节单元的控制作用,后轴制动力并没有因为再生制动力参与作用而增加,因此后轮并没有抱死,再生制动力一直作用,回收了更多的能量,而且制动时间更短。

在不同的路面条件以及制动强度要求(制动踏板开度)下进行多次仿真,表 1 为三种制动系统仿真结果。可以看出,加入 ABS 调节的再生制动系统在不同路面、极限制动强度条件下均表现出与传统制动系统相当的制动能力,均未丧失制动稳定性,同时回收的制动能量远远高于并行再生制动系统。仿真结果表明,本文提出的再生制动系统在制动稳定性以及制动能量回收能力上具有更明显的优势。

表 1 几种制动系统仿真结果

Table 1 Simulation results of several brake systems

制动系统	路面	踏板开度 /%	制动距离 /m	能量回收 /kJ	车轮是否抱死
传统车	雪路面	15	99	无	否
制动系 统	土路(湿)	45	42	无	前轮先抱死
	沥青(湿)	60	32	无	否
并行再 生制动 系统	雪路面	15	85	443	后轮抱死
	土路(湿)	45	44.6	186	后轮先抱死
	沥青(湿)	60	31.5	184	后轮抱死
ABS 调节	雪路面	15	99	736	否
再生制 动系统	土路(湿)	45	42	298	前轮先抱死
	沥青(湿)	60	31.8	236	否

## 5 结束语

对混合动力客车再生制动控制策略的核心问

题(即制动力分配系数的确定方法)进行了分析,提出一种基于理想制动力分配的制动力分配系数计算方法。针对目前再生制动系统的缺陷提出了一种改进方案。在 AMESim 软件环境下建立了带有 ABS 的气压制动系统模型,对两种制动系统进行了仿真分析。仿真结果表明:加入 ABS 调节单元调节机械制动力的再生制动系统在制动能量回收能力以及制动稳定性等方面均优于并行再生制动系统。而且这种再生制动系统在原有 ABS 系统的基础上稍加改动就可以实现,实用性很强。

## 参考文献:

- [1] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光.现代电动汽车技术[M].北京:北京理工大学出版社,2002.
- [2] Gao Yi-min, Chen Li-ping, Ehsani Mehrdad. Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV[C]//SAE Paper,1999.
- [3] 王鹏宇,段幼华,张国强.并联式混合动力客车再生制动控制策略仿真研究[DB/OL].中国科技论文在线[2006-12-20]. [http://www.paper.edu.cn/paper.php?serial\\_number=2006-12-329](http://www.paper.edu.cn/paper.php?serial_number=2006-12-329).
- [4] 张立军,朱博,贾云雷.依 ECE 法规进行汽车制动力分配新方法[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(2):276-279.  
Zhang Li-jun, Zhu Bo, Jia Yun-lei. New method for braking force distribution of automobile according to ECE regulation[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(2):276-279.
- [5] 郑智忠,王会义,祁雪乐,等.气压 ABS 压力调节单元的建模与分析[J].机床与液压,2005(8):117-119.  
Zheng Zhi-zhong, Wang Hui-yi, Qi Xue-le, et al. Modeling and analysis of pressure modulator of air ABS[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2005(8): 117-119.
- [6] 方泳龙.汽车制动理论与设计[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [7] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,1989.