

# 电动汽车电液复合制动系统优化设计

赵万忠 谷霄月 王春燕 胡明煜

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016)

**摘要:**针对当前复合制动系统再生制动力分配策略分析不全面的问题,基于电动汽车复合制动系统结构形式和驾驶员制动意图的分类,对再生制动力分配方法进行了研究。确定了制动力分配控制策略,并以制动感觉、制动能量最大化为优化目标,对复合制动系统进行了多目标优化设计。结果表明复合制动系统能够综合能量回收效率和制动稳定性等因素,保证驾驶员获得满意的制动感觉,有效提高汽车制动的安全性、舒适性和稳定性。

**关键词:**电动汽车;电液复合制动;制动力分配;制动感觉;优化设计

**中图分类号:**U461.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2013)06-0871-04

## Optimization Design of Electro-hydraulic Brake System with In-wheel Electric Vehicle

Zhao Wanzhong, Gu Xiaoyue, Wang Chunyan, Hu Mingyu

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Due to the analysis of the composite brake force distribution strategy is not comprehensive, the braking force distribution control strategies are researched based on the different kinds of electric-hydraulic brake system structure and the intention of driver braking. With stability of the electric vehicles and braking sensation being the objectives, the electro-hydraulic brake system is multi-objective optimized. The results indicate that it can improve the efficiency of energy use and the braking ability of the vehicle, and provide good braking feel, thus improving the safety, comfort and stability of the automotive braking system.

**Key words:** electric vehicles; electric-hydraulic brake; braking force distribution; braking feel; optimization

电动车在城市行驶工况下,由于平均车速不高,交通拥挤,车辆经常停启,制动过程中大部分牵引能量通过摩擦以热能的形式消耗。如果将这部分能量转化为机械能量回收起来,则可提高车辆能量利用效率,减少能源消耗,同时延长车辆续航里程<sup>[1]</sup>。再生制动是将车辆在制动或减速过程中的动能,通过电机转化为电能并储存在蓄电池中,当车辆需要启动或加速时,再将蓄电池中的电能释放

出来<sup>[2]</sup>。

目前,电动汽车制动系统研究主要集中在制动能量回收方法、制动能量的回收效率、功率转换器与驱动电机的控制技术、再生制动的控制方法、电液复合制动的协调等方面<sup>[3-6]</sup>,其中制动力分配控制策略是国内外学者普遍关注的热点问题。早在 20 世纪 90 年代,来自美国德克萨斯 A&M 大学的 Yimin Gao 提出了 3 种经典的再生制动制动力分

**基金项目:**国家自然科学基金(51375007,51005115,51205191)资助项目;南京航空航天大学基本科研业务费专项科研基金(NS2013015,NS2012086)资助项目;中央高校基本科研业务费专项基金(11CX04039A)资助项目;江苏省汽车工程重点实验室开放基金(QC201101)资助项目。

**收稿日期:**2013-08-15;**修订日期:**2013-10-15

**通信作者:**赵万忠,男,副教授,1982 年出生,E-mail:zhaowanzhong@126.com。

配策略,并在城市循环工况下进行了仿真<sup>[7]</sup>。Hoon Yeo等人也提出了一种再生制动制动力分配控制算法,再生制动力矩由车辆速度、电机容量及电池荷电状态(State of charge, SOC)所决定,液压制动力矩作为辅助制动系统,补充再生制动力矩的不足,并通过对无级变速器的控制,使电机工作保持在高效区<sup>[8]</sup>。

虽然在制动力分配策略方面已有较多的研究文献和报道,但无论是控制策略还是优化方法均未考虑制动感觉因素。然而,制动感觉是评价制动性能好坏的终极因素,也是衡量制动系统好坏的重要标准,因此有必要综合考虑制动感觉、制动稳定性等因素对制动系统进行多目标优化设计,以提高系统的制动性能和制动感觉。

## 1 电动汽车动力学模型

整车分别以前、后轮的接地点为中心可以求得扭矩平衡式,分别为

$$\begin{cases} F_{z1}L = Gb + m \frac{du_a}{dt} h_g \\ F_{z2}L = Ga - m \frac{du_a}{dt} h_g \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F_{z1}$ 和 $F_{z2}$ 分别为前后轮地面对汽车前轮法向反作用力; $G$ 为汽车总重量; $u_a$ 为车速; $m$ 为汽车总质量; $h_g$ 为汽车的质心高度; $a$ 和 $b$ 为汽车质心到前后轮中心的距离; $L$ 为前后轮之间的距离。

若前后轮同时抱死时,前后轮制动力大小与各轮的附着力相等,此时有

$$\begin{cases} F_{h1} + F_{m1} + F_{h2} + F_{m2} = \varphi G \\ F_{h1} + F_{m1} = \varphi F_{z1} \\ F_{h2} + F_{m2} = \varphi F_{z2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $F_{h1}$ 和 $F_{h2}$ 分别为汽车前后轮液压制动力; $F_{m1}$ 为汽车前轮电机再生制动力; $F_{m2}$ 为汽车后轮电机再生制动力; $\varphi$ 为前后轮都抱死时的制动强度。

消去 $\varphi$ ,则可以得出前后轮制动力的关系

$$F_{h2} + F_{m2} = \frac{G}{2h_g} \sqrt{b^2 + \frac{4h_g L}{G} (F_{h1} + F_{m1})} - \frac{1}{2} \left( \frac{Gb}{h_g} + 2(F_{h1} + F_{m1}) \right) \quad (3)$$

由式(3)所得出的曲线就是标准的 $I$ 曲线(即前后轴同时达到抱死状态时前后轴制动力分配的曲线)。但是只有当前后轮制动力的附着系数大小一样时才可以满足此规律。

## 2 电动轮汽车制动力分配策略

根据制动目标的不同可将制动力分配分为3

种:(1)回收制动能为目标的纯电机制动力分配;(2)回收制动能为目标的复合制动力分配方法;(3)制动能量回收效率为目标的复合制动力分配方法。

### 2.1 回收制动能为目标的纯电机制动力分配策略

比较电机可提供的总制动力与实现制动所需的总制动力 $F_{breed}$ ,当满足

$$F_{breed} \leq F_{bvf} + F_{bvr} \quad (4)$$

式中: $F_{bvf}$ , $F_{bvr}$ 分别为电机可提供的前后轴制动力。

则处于小强度制动情况,完全由电机制动力满足,此时

$$\begin{cases} F_{m1l} = F_{m1r} = \frac{1}{2} (F_{breed} - F_{bvr}) \\ F_{m2l} = F_{m2r} = \frac{1}{2} F_{bvr} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $F_{m1l}$ , $F_{m1r}$ , $F_{m2l}$ 和 $F_{m2r}$ 分别为前轴左、右侧和后轴左、右侧可以提供的电机制动力大小。

### 2.2 回收制动能为目标的复合制动力分配方法

当电机制动力无法满足制动需求时,电机可提供制动力 $F_{bvf}$ , $F_{bvr}$ 。假设目标制动强度 $z$ 所需的总制动力 $F_{breed}$ ,则存在如下关系

$$(F_{bvf} + F_{bvr} \leq F_{breed}) \& (z < z_{control}) \quad (6)$$

式中: $z_{control}$ 为判断制动强度是中制动强度还是大制动强度的门限值,本文取0.5。此时有

$$(F_{h1} + F_{m1}) + (F_{h2} + F_{m2}) = F_{breed} \quad (7)$$

充分利用电机制动力时

$$\begin{cases} F_{m1} = F_{bvf} \\ F_{m2} = F_{bvr} \end{cases} \quad (8)$$

液压制动力按 $\beta$ 线分配方法要求是

$$\frac{F_{h1}}{F_{h2}} = \frac{\beta}{1-\beta} \quad (9)$$

实际的前后轴的总制动力

$$\begin{cases} F_{bf} = F_{m1} + F_{h1} = \beta(F_{breed} - F_{bvr}) + (1-\beta)F_{bvf} \\ F_{br} = F_{m2} + F_{h2} = (1-\beta)(F_{breed} - F_{bvf}) + \beta F_{bvr} \end{cases} \quad (10)$$

### 2.3 制动效率为目标的复合制动力分配方法

当需要紧急制动时,制动强度满足下式

$$z \geq 5 \quad (11)$$

此时处于大制动强度需求,接近临界制动工况,以满足制动性能,提高制动效率为目标。

因此,以提高制动效率为目标进行制动力分配,即使实际制动力点( $F_{bf}$ , $F_{br}$ )尽可能接近理想制动力点( $F_{idealr}$ , $F_{idealr}$ ),之后根据汽车车速确定电机转速,从而确定电机可确定的最大制动力 $F_{bvf}$ 和 $F_{bvr}$ ,液压制动力为 $F_{h1} = (1-\beta)/\beta \cdot F_{h2}$ 。

### 3 参数优化

#### 3.1 优化目标

目标一:为了使制动过程回收的能量最大,则对制动能量参数取反可以方便优化算法的计算

$$Y_1 = - \int (F_{m1} + F_{m2}) r h dt \quad (12)$$

式中: $r$ 为车轮有效半径; $\eta$ 为电机制动力传递效率。

目标二:制动力分配系数尽量接近理想制动力分配曲线,即

$$Y_2 = \left| \beta_z - \frac{F_{m1} + F_{h1}}{F_{m2} + F_{h2}} \right| = |\beta_z - \beta_{hyb}| \quad (13)$$

式中: $\beta_z$ 为理想前后轮制动力分配系数; $\beta_{hyb}$ 为实际前后轮制动力分配系数。

#### 3.2 约束条件

##### (1) 电机约束

本设计所选电机制动力矩和驱动力矩大小相当,优化设计时主要考虑在电池状态满足充电状态下的特性

$$T_{reg} = \begin{cases} T_{max} & u_a \leq u_m \\ \frac{2\pi r T_{max} n_e}{60 u_a} & u_a > u_m \end{cases} \quad (14)$$

式中: $T_{max}$ 为电机最大力矩; $T_{reg}$ 为制动过程中电机的最大再生制动力矩; $u_m$ 为电机基速对应的车速。

(2) 联合国欧洲经济委员会(Economic commission of Europe, ECE)法规约束

ECE法规规定:在车辆所有载荷状态下,当制动强度 $z$ 大于0.15而小于0.80时,前轴附着系数利用曲线应位于后轴上方;当附着系数 $\eta$ 大于0.2而小于0.8时,制动强度 $z \geq 0.1 + 0.7(\eta - 0.2)$ ;即当制动强度 $z$ 在0.15~0.80, $\eta_t \geq \eta_r$ ;当制动强度 $z$ 在0.1~0.52时,根据利用附着系数定义有

$$\begin{cases} \eta_t = \frac{\beta_{hyb} z L}{b + z h_g} \\ \eta_r = \frac{(1 - \beta_{hyb}) z L}{a - z h_g} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\eta_t$ 为前轮附着系数; $\eta_r$ 为后轮附着系数; $\beta_{hyb}$ 实际复合制动前后轮制动力分配系数。

由式(15)可以推出制动力分配系数如下

$$\begin{cases} \beta_{hyb} \geq \frac{b + z h_g}{L} & 0.15 \leq z \leq 0.8 \\ \beta_{hyb} \leq \frac{(z + 0.04)(b + z h_g)}{0.7 z L} & 0.1 \leq z \leq 0.52 \\ \beta_{hyb} \geq 1 - \frac{(z + 0.04)(a - z h_g)}{0.7 z L} & 0.1 \leq z \leq 0.52 \end{cases} \quad (16)$$

##### (3) 制动感觉约束

汽车在制动过程考虑的制动舒适性主要考虑的是汽车的减速度的突变。前部液压制动补偿电机制动,电机在扭矩增减时速度很快,会影响制动的瞬时制动减速度的突变,从而会影响制动舒适性。本文设计的评价指标主要是由汽车的冲击度 $j$ 来衡量,即减速度的变化率 $da/dt$ <sup>[9]</sup>

$$j = da/dt = (d^2 u_a)/(dt^2) < 10 \quad (17)$$

式中: $a$ 为汽车的纵向减速度。

德国学者研究认为人体在感觉舒适的范围内所能承受的最大减速度变化率为 $10 \text{ m/s}^3$ ,加速度变化率越小,舒适度越好,如果减速度变化率超过 $10 \text{ m/s}^3$ ,制动感觉的舒适程度严重降低<sup>[10]</sup>。

### 4 优化结果

根据以上的优化目标和优化约束分析可设置优化变量为

$$X_1 = \eta_r, X_2 = \beta_{hyb} \quad (18)$$

首先运用C++对优化目标、约束条件、优化变量进行编译,然后在ISIGHT软件进行设置,并选取遗传算法为优化算法,对制动回收能量和制动力分配曲线进行优化设计。设计时选取: $z=0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8$ 等点进行优化计算。其中仿真参数为: $m=800 \text{ kg}; h_g=560 \text{ mm}; a=900 \text{ mm}; b=870 \text{ mm}; L=1770 \text{ mm}; u_a=30 \text{ km/h}$ 。

运用Isight软件得到优化前后制动力分配曲线如图1和图2所示。分析图1和图2可得,制动力分配控制策略还受ECE法规、电机特性、舒适性等条件的约束,优化结果是一段不算平滑的曲线。其中前轮的制动力是电机再生制动力和前轮液压制动力的叠加,较优化前前轮制动力曲线较小;后轮制动力较优化前制动力稍微提高,这样提高制动安

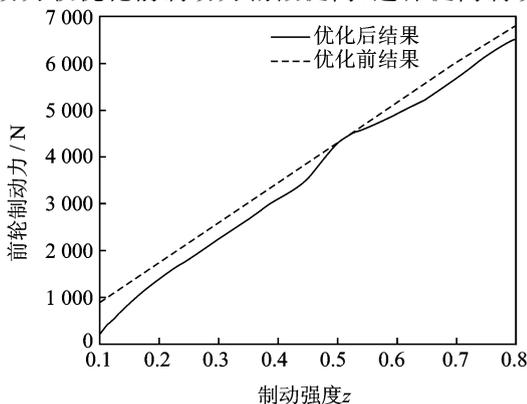


图1 前轮制动力优化结果

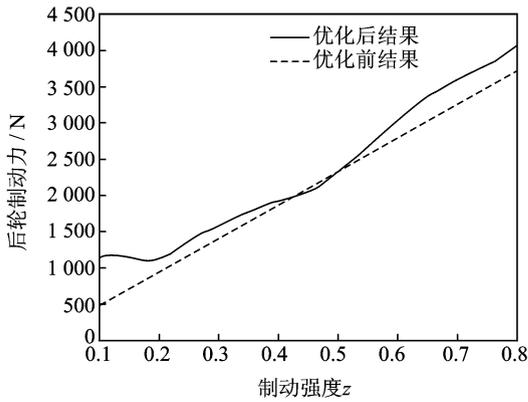


图2 后轮制动力优化结果

全性。由于在优化设计中,增加了制动感觉约束,即通过前部液压制动补偿电机制动,防止电机在扭矩增减时速度引起制动的瞬时制动减速度的突变。由图1和图2可知,制动强度没有突变,也就是说加速度范围控制在良好范围内,从而有效保证了制动感觉不受影响,提高了制动舒适性。此外,在该制动控制策略中,电机的再生制动力始终处于较大工作处,极大地提高了制动能量回收效率。

## 5 结束语

在设计汽车前后轮制动力分配比时,综合考虑了各种因素的影响,并以制动感觉、制动能量最大化为优化目标,对复合制动系统进行了多目标优化设计。优化结果表明:此策略使得汽车在较小强度制动时具有较高的能量回收效率,而当制动强度较大时,在能量回收的基础上充分利用地面附着系数,使制动效率达到较佳状态。因此,复合制动系统能够综合能量回收效率和制动稳定性等因素,保证驾驶员获得满意的制动感觉,满足制动法规对汽车制动力分配的要求,对汽车的制动系统的设计具有指导意义。

### 参考文献:

[1] He Xiaoling, Hodgson Jeffrey W. Modeling and simulation for hybrid electric vehicles—Part1: Modeling [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(4): 235-243.

[2] 王鹏宇. 混合动力汽车复式制动系统的设计与性能仿真[D]. 长春: 吉林大学, 2005.

Wang Pengyu. The design and simulation of the regenerative brake system of hybrid vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2005.

[3] Gao Yimin, Chen Liping, Ehsani M. Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV[C]//Future Transportation Technology Conference & Exposition. Warrendale, PA: [s. n.], 1999.

[4] Alfio N D', Morgando A, Sorniotti A. Electro-hydraulic brake systems: Design and test through hardware-in-the-loop simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(S1): 378-392.

[5] 余卓平,熊璐,张立军. 电液复合制动匹配研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(4): 455-457.

Yu Zhuoping, Xiong Lu, Zhang Lijun. A study on the matching of electro-hydraulic brake system[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(4): 455-457.

[6] 杨万庆. 电子液压制动系统 EHB 综述[J]. 城市车辆, 2007(6): 43-45.

Yang Wanqing. Overview of electronic hydraulic braking (EHB) systems[J]. Urban Vehicles, 2007(6): 43-45.

[7] Gao Yimin, Ehsani M. Electronic braking system of EV and HEV—Integration of regenerative braking, automatic braking force control and ABS[C]//Future Transportation Technology Conference. Costa Mesa, California; [s. n.], 2001.

[8] Yeo Hoon, Kim Donghyun, Hwang Sungho, et al. Regenerative braking system algorithm for a HEV with CVT ratio control during decelerative[C]//International Continuously Variable and Hybrid Transmission Congress. California, USA: [s. n.], 2004.

[9] 张泰,葛安林,郭立书,等. 改善车辆起步换挡品质提高乘坐舒适性的研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 18-24.

Zhang Tai, Ge Anlin, Guo Lishu, et al. Study on improving starting shift quality and comfort of automobile[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1): 18-24.

[10] 李宽. ATM 起步及换挡过程冲击特性的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.

Li Kuan. Study on start and shift jerk character of AMT[M]. Changchun: Jilin University, 2005.