

## 惯性制动全挂车与牵引车制动力分配优化设计

薛美儒<sup>1</sup>, 薛强<sup>1</sup>, 周良生<sup>2</sup>, 卫晓军<sup>2</sup>

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222; 2. 总后军事交通运输研究所, 天津 300161)

**摘要:** 介绍惯性制动系统工作原理, 建立全挂汽车列车制动力学模型, 建立了牵引车、全挂车制动力分配优化设计模型, 该模型以实际附着效率曲线与理想附着效率曲线之间的面积差最小为目标函数, 以 GB 12676—1999 中制动力分配要求为约束条件. 利用此模型对某汽车列车进行了优化设计, 结果表明, 该方法对全挂汽车列车制动系统设计具有一定指导意义.

**关键词:** 惯性制动系; 制动力分配; 优化; 全挂汽车列车

**中图分类号:** U469.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-6510(2011)03-0048-03

### Optimization Design of Braking Force Distribution for Towing Vehicle and Trailer with Inertia Braking System

XUE Mei-ru, XUE Qiang, ZHOU Liang-sheng, WEI Xiao-jun

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;

2. Institute of Military Transportation, Tianjin 300161, China)

**Abstract:** Working principle of the inertia braking system was introduced. The braking force mathematics model of full trailer train was established. The braking force distribution optimization model for towing vehicle and trailer was also established, which optimized goal is to obtain minimum area between the practical attachment curve and ideal curve, meanwhile it should be restricted by GB 12676—1999 regulation. Then, an optimizing design of a full trailer train was taken using this model. It's proved that this method is helpful for baking system design of trailer train.

**Keywords:** inertia braking system; braking force distribution; optimization; full trailer train

随着汽车列车成为当前商品运输的主要载体, 人们对它的行驶安全性也越来越重视. 汽车列车制动系统包含牵引车制动系统和挂车制动系统两部分, 二者既相互独立又相互作用, 因此制动性能较之双轴汽车要复杂得多, 不稳定工况也明显增多. 影响车辆制动性能的因素很多, 其中最重要的是轴间制动力的分配, 目前对于双轴汽车和半挂车的轴间制动力分配的研究较多<sup>[1-3]</sup>, 对全挂汽车列车制动性能的研究尚不多见, 对有惯性制动系统的全挂车组成的汽车列车的研究国内未见报道. 本文以汽车列车各轴实际附着效率曲线与理想附着效率曲线所围面积差最小为目标函数, 以 GB 12676—1999《汽车制动系统结构、性能和试验方法》对制动力的分配要求为约束条件, 对牵引车、挂车进行了制动力分配优化设计, 以期对全

挂车惯性制动系统的设计提供参考.

### 1 惯性制动系统工作原理

惯性制动系统是将制动时挂车向其牵引车靠近产生的惯性力转化为挂车制动力的制动系, 惯性制动系统产生制动力的能量来源于惯性作用无需额外提供能源. 惯性制动系统的使用可使得全挂车更具机动性和灵活性. 本文所研究的全挂车采用惯性制动系统, 当它与牵引车组成的汽车列车开始制动时, 牵引车刹车, 速度降低, 全挂车由于惯性作用瞬时速度不变, 导致挂车牵引环撞击牵引车牵引钩, 撞击力作用于全挂车牵引环, 通过一套机械传动机构拉动车轮制动器, 使之产生摩擦力矩, 致使全挂车产生制动.

收稿日期: 2011-01-12; 修回日期: 2011-03-03

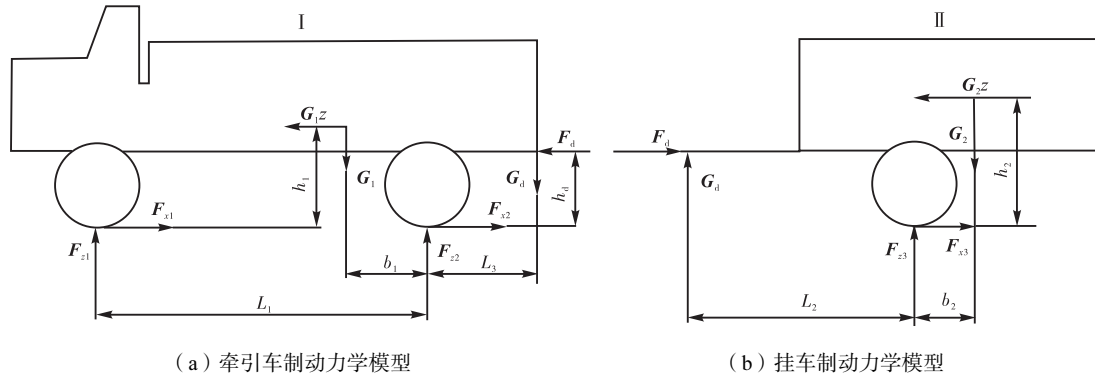
作者简介: 薛美儒 (1983—), 女, 河北人, 硕士研究生; 通信作者: 薛强, 教授, qxue@tust.edu.cn.

## 2 牵引车挂车制动力分配

### 2.1 全挂汽车列车制动力学模型

假设汽车列车在水平路面产生制动,所受空气阻力不大,各车轮与路面附着系数相同,全挂汽车列车制动时的力学模型如图1所示.图中I、II分别表示牵引车和挂车.设1、2、3分别表示牵引车前后轴和挂车车轴,其他符号意义如下: $G_1$ 、 $G_2$ 为牵引车和

全挂车所受重力,N; $F_{zi}$ 为各轴轴荷( $i=1,2,3$ ),N; $F_{xi}$ 为各轴车轮所受地面制动力( $i=1,2,3$ ),N; $h_1$ 为牵引车重心高,m; $h_2$ 为全挂车重心高,m; $h_d$ 为牵引点距地面高度,m; $b_1$ 为牵引车质心到后轴距离,m; $b_2$ 为全挂车质心到其车轴的距离,m; $L_1$ 为牵引车轴距,m; $L_3$ 为牵引车后轴到牵引点的距离,m; $L_2$ 为全挂车车轴到牵引点距离,m; $F_d$ 为牵引点水平分力,N; $G_d$ 为牵引点垂直分力,N; $z$ 为制动强度,无量纲.



(a) 牵引车制动力学模型

(b) 挂车制动力学模型

图1 全挂汽车列车制动力学模型

Fig.1 Braking force mathematics model of full trailer train

对于牵引车,用动静法得力的平衡方程为

$$\begin{cases} F_{x1} + F_{x2} = G_1 z + F_d \\ F_{z1} + F_{z2} = G_1 + G_d \\ F_{z1} L_1 + G_d L_3 = G_1 b_1 + G_1 z h_1 + F_d h_d \end{cases} \quad (1)$$

对于全挂车,用动静法得力的平衡方程为

$$\begin{cases} F_d + F_{x3} = G_2 z \\ F_{z3} + G_d = G_2 \\ G_d L_2 + F_d h_d + G_2 b_2 = G_2 z h_2 \end{cases} \quad (2)$$

且  $F_{x3} = \varphi F_{z3}$  (3)

由式(1)一式(3)求解,得在制动强度  $z$  下牵引车和全挂车下的轴荷:

$$\begin{cases} F_{z1} + F_{z2} = G_1 + \frac{G_2(zh_2 - b_2 - zh_d + \varphi h_d)}{L_2 + \varphi h_d} \\ F_{z3} = \frac{G_2 L_2 - G_2 z h_2 + G_2 b_2 + G_2 z h_d}{L_2 + \varphi h_d} \end{cases} \quad (4)$$

在非理想制动下,全挂列车各轴利用附着系数为

$$\varphi_i = \frac{F_{xi}}{F_{zi}} = \frac{\beta_i G_{zi}}{F_{zi}} \quad (5)$$

式中, $\beta_i$ 为汽车列车各轴制动力分配系数.将附着系数  $\varphi$  与制动强度  $z$  的比值  $E = z/\varphi$  称为附着效率<sup>[4]</sup>.附着效率  $E$  表示汽车附着条件的利用情况, $E$  越大,表明路面附着条件发挥得越充分,制动力分配也就越合理.根据式(5)可得

$$E_i = \frac{z_i}{\varphi_i} = \frac{F_{zi}}{\beta_i G} \quad (6)$$

定义牵引车、挂车实际制动力分配系数为<sup>[4]</sup>

$$\beta = \frac{F_{x3}}{(G_1 + G_2)z} \quad (7)$$

将牵引车前后轴作为一个整体考虑,由上述公式可得牵引车车轴与全挂车车轴实际附着效率分别为

$$E_I = \frac{G_1(L_2 + \varphi h_d) + G_2(\varphi h_d - b_2)}{(1 - \beta)(G_1 + G_2)(L_2 + \varphi h_d) + \varphi G_2(h_d - h_2)} \quad (8)$$

$$E_{II} = \frac{G_2 L_2 + G_2 b_2}{\beta(G_1 + G_2)(L_2 + \varphi h_d) + \varphi G_2(h_2 - h_d)} \quad (9)$$

对式(8)、(9)进行分析可以得出,对  $E_i$  影响较大的有牵引车与全挂车制动力分配系数  $\beta$ ,全挂车质心到其车轴的距离  $b_2$ ,全挂车车轴到牵引点距离  $L_2$ ,牵引点距地面高度  $h_d$ ,挂车重心高  $h_2$ .因为除制动力分配系数  $\beta$  外,重心等其他参数的改变影响挂车的总体结构,本文是对汽车列车的局部优化,在不改变挂车整体结构尺寸的基础上,通过优化牵引车、全挂车制动力分配系数  $\beta$  改善整车的制动性能.

## 2.2 牵引车与全挂车制动力分配优化设计模型

### 2.2.1 设计变量

由上述分析可知,优化牵引车、挂车制动力分配系数  $\beta$  可明显改善整车制动性能,因此选  $\beta$  作为设

计变量, 即  $X = \beta = [x_1]$ .

2.2.2 目标函数

由前述可知, 利用附着系数与制动强度关系曲线可以评定制动力分配的合理性, 当利用附着系数  $\varphi$  越接近制动强度  $z$ , 或附着效率  $E$  越大, 制动力分配也就越合理. 理想的附着效率曲线是  $\varphi = z$  (即  $E = 1$ ). 考虑本文研究对象在满载情况下使用的概率远远高于空载使用概率, 因此目标函数取满载工况下, 在常用路面附着系数为 0.2~0.8 范围内, 实际附着效率曲线与理想附着效率曲线 ( $E = 1$ ) 所包围面积最小. 即

$$\min f(x) = 0.6 - \int_{0.2}^{0.8} E d\varphi \quad (10)$$

2.2.3 约束条件

国家强制性制动标准 GB 12676—1999《汽车制动系统结构、性能和试验方法》规定了汽车在任何载荷情况下都要满足的车轴制动力分配. GB 12676—1999 对汽车列车的制动力分配要求如下<sup>[5]</sup>:

(1) 对于附着系数在 0.2~0.8 之间的各种车辆都必须满足  $z \geq 0.1 + 0.85(\varphi - 0.2)$ ;

(2) 对于制动强度  $z$  在 0.15~0.3 之间, 各车轴的附着系数利用曲线必须位于公式  $\varphi = z \pm 0.08$  确定的与理想附着系数利用直线平行的两条直线之间;

(3) 对于制动强度  $z \geq 0.3$ , 后轴附着系数利用曲线必须满足  $z \geq 0.3 + 0.74(\varphi - 0.38)$ .

据此建立约束条件如下:

$$\begin{cases} g_1(x) = (\varphi_1 - (z + 0.07) / 0.85)_{0.1 \leq z \leq 0.61} \leq 0 \\ g_2(x) = (\varphi_{II} - (z + 0.07) / 0.85)_{0.1 \leq z \leq 0.61} \leq 0 \\ g_3(x) = (z - 0.08 - \varphi_1)_{0.15 \leq z \leq 0.3} \leq 0 \\ g_4(x) = (z - 0.08 - \varphi_{II})_{0.15 \leq z \leq 0.3} \leq 0 \\ g_5(x) = (\varphi_1 - 0.08 - z)_{0.15 \leq z \leq 0.3} \leq 0 \\ g_6(x) = (\varphi_{II} - 0.08 - z)_{0.15 \leq z \leq 0.3} \leq 0 \\ g_7(x) = (\varphi_{II} - (z - 0.0188) / 0.74)_{z \geq 0.3} \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

至此, 已完成牵引车与挂车制动力分配的优化设计的全部数学模型.

3 实例

已知某全挂汽车列车在满载工况下的原始数据见表 1 和表 2.

表 1 牵引车数据

Tab.1 Data of towing vehicle

工况	$G_1/N$	$h_1/m$	$L_1/m$	$b_1/m$	$L_3/m$	$h_d/m$
满载	$3.724 \times 10^7$	1.1	4	1.001	1.3	0.608

表 2 全挂车数据

Tab.2 Data of trailer

工况	$G_2/N$	$h_2/m$	$L_2/m$	$b_2/m$
满载	$3.430 \times 10^7$	0.9	3.5	0.229

对上述数学模型, 采用 Matlab 最优化工具箱求解, 得出当分配系数取 0.449 5 时, 实际附着效率曲线与理想附着效率曲线之间所包围面积最小, 最小值为 0.019 3. 优化后的各轴利用附着系数与制动强度关系如图 2 所示. 由图可知, 优化后的牵引车和挂车制动力分配不仅符合 GB 12676—1999 的要求, 而且与理想曲线接近. 这表明优化结果准确有效.

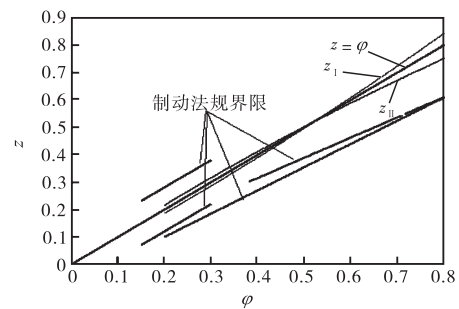


图 2 优化后的  $z - \varphi$  曲线

Fig.2  $z - \varphi$  curve after optimization

4 结 语

本文介绍了惯性制动系统的工作原理以及在全挂车中使用的优点; 建立了全挂汽车列车制动力学模型, 以及全挂车与牵引车制动力分配优化设计模型.

利用本文所建立的优化设计模型, 对牵引车与惯性制动全挂车进行制动力分配优化设计, 可以使汽车列车具有良好的制动稳定性和较高的制动效率, 所得结果也可为惯性制动系统的其他参数确定提供依据.

参考文献:

[1] 杨柳, 钱立军. 客车制动性能优化设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2007(4): 23-26.  
 [2] 王亚晴, 张代胜, 沈国清. 汽车制动力分配比的优化设计与仿真计算[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2005, 28(11): 1393-1396.  
 [3] 郑忠华, 王海, 吴植民. 半挂汽车列车轴间制动力的优化分配[J]. 专用汽车, 1992(1): 12-15.  
 [4] 刘惟信. 汽车制动系统的结构分析与设计计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 37-45.  
 [5] 全国汽车标准化技术委员会. GB 12676—1999 汽车制动系统结构、性能和试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.