

文章编号:1671-1637(2012)01-0050-05

融雪剂路面上汽车制动距离计算模型

李志鹏, 彭涛, 王茜, 詹长书

(东北林业大学 交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:分析了汽车制动过程前、后轮受力状况,建立了汽车制动距离与路面附着系数的数学模型。在冰雪路面和使用融雪剂路面上进行了制动试验,应用 MATLAB 软件仿真计算了汽车在不同制动初速度下的制动距离。试验结果表明:在冰雪路面上,当汽车制动初速度分别为 10.8、24.4、31.4 km·h⁻¹时,制动距离分别为 2.959、18.378、26.264 m;在使用融雪剂路面上,当汽车制动初速度分别为 11.0、22.9、31.0 km·h⁻¹时,制动距离分别为 2.430、13.766、18.860 m。使用融雪剂后,附着系数明显提高,测试制动距离减小了 25%~28%,仿真计算制动距离减小了约 30%,两者接近,因此,计算模型可靠。

关键词:汽车工程;制动性能;制动距离;附着系数;冰雪路面;融雪剂

中图分类号:U462.32

文献标志码:A

Calculation model of automobile braking distance on pavement with deicing salt

LI Zhi-peng, PENG Tao, WANG Qian, ZHAN Chang-shu

(School of Traffic, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: The forces conditions of front and rear wheels during automobile braking process were analyzed, and a mathematical model of automobile braking distance and road adhesion coefficient was established. Braking tests on ice-snow-covered pavement and the pavement after using deicing salt were carried out, and the braking distances under different primary braking speeds were calculated by using MATLAB software. Test result shows that on ice-snow-covered pavement, when the primary braking speeds are 10.8, 24.4, 31.4 km·h⁻¹ respectively, the braking distances are 2.959, 18.378, 26.264 m respectively. On the pavement after using deicing salt, when the primary braking speeds are 11.0, 22.9, 31.0 km·h⁻¹ respectively, the braking distances are 2.430, 13.766, 18.860 m respectively. After using deicing salt, the adhesion coefficient of the pavement increases significantly, and the test braking distance decreases by 25%-28%, the simulation braking distance decreases by about 30% and is close to the test value. So the calculation model is feasible. 7 tabs, 4 figs, 14 refs.

Key words: automobile engineering; braking performance; braking distance; adhesion coefficient; ice-snow-covered pavement; deicing salt

Author resume: LI Zhi-peng(1963-), male, professor, +86-451-82191836, lizp386@sohu.com.

0 引言

公路上的积雪如果不及时清理,易形成压实的

冰雪路面,在很大程度上降低了轮胎与路面间的附着系数,极易引发交通事故。中国自 20 世纪 70 年代开始采用喷洒融雪剂的方式来消除路面积雪,但

收稿日期:2011-09-20

基金项目:国家 948 计划项目(2011-4-21);交通运输部西部交通建设科技项目(2006 318 000 83)

作者简介:李志鹏(1963-),男,黑龙江哈尔滨人,东北林业大学教授,从事寒区交通工程研究。

是,由于北方冬季漫长,雪量大,大多情况下在撒完融雪剂后不能很快达到理想的效果,而是在路面上形成一种夹杂有雪、融雪剂颗粒及尘土微粒的黑色盐水混合物(黑色雪泥)。国内外学者关于使用融雪剂后给汽车制动性能带来的实际影响的研究较少,李海军研究了在给定粗糙度和初速度情况下来确定装有 ABS 液压制动系统的车辆在沥青路面的制动距离^[1];张改研究了在不同路面情况下的安全距离,并提出了制动距离是速度、平均道路附着力和道路附着系数变化的函数^[2]。本文从试验和仿真 2 个方面来研究融雪剂作用后对汽车制动性能的实际影响。汽车具有良好的制动性能是汽车安全行驶的重要保障,重大的交通事故往往与汽车的制动距离过长,紧急制动时产生侧滑等情况有关。汽车制动性能的评价指标主要有制动效能(制动距离和制动减速度)、制动效能的恒定性及制动的方向稳定性三方面^[3]。而在考察汽车制动性能是否合格的指标主要有制动距离、制动减速度与侧向位移(制动跑偏)时,按照中国有关法规规定,汽车制动性能是在规定的条件下,通过测量相应初速度下的平均减速度或制动距离来评价^[4],因此,本文以汽车制动距离为主要研究目标。

1 汽车制动距离数学模型的建立

1.1 汽车受力分析

图 1 为质量为 M 的汽车在水平路面上制动时的受力情形, F_{z1} 和 F_{z2} 分别为地面对前、后轮的法向反作用力; F_{xb1} 和 F_{xb2} 分别为前轮和后轮的地面制动力; G 为汽车重力; h 为汽车质心高度; a 为汽车质心至前轴中心线的距离; b 为汽车质心至后轴中心线的距离; L 为汽车轴距; v 为汽车行驶速度。图 1 忽略了空气阻力、汽车的滚动阻力偶矩以及旋转质量减速时产生的惯性力偶矩^[5],另外,本文为方便计算,附着系数 φ 取定值。

根据力的平衡条件,分别对汽车后轮和前轮接地点取力矩,可得

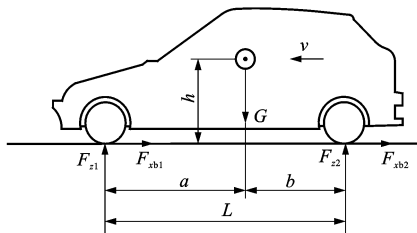


图 1 受力分析

Fig. 1 Force analysis

$$\begin{cases} F_{z1}L = Gb + MBh \\ F_{z2}L = Ga - MBh \end{cases} \quad (1)$$

$$B = \frac{dv}{dt}$$

式中: t 为时间; B 为制动减速度。

若在不同附着系数的路面上制动时,汽车前、后轮都抱死(不论是同时抱死还是先后抱死),此时地面作用于前、后轮的法向反作用力分别为^[6-7]

$$\begin{cases} F_{z1} = \frac{G}{L}(b + \varphi h) \\ F_{z2} = \frac{G}{L}(a - \varphi h) \end{cases} \quad (2)$$

1.2 汽车制动距离的数学模型

从驾驶人开始踏下制动踏板到制动结束,整个制动过程包括驾驶人行动反应、制动器起作用、持续制动及松开制动器 4 个阶段^[8]。在简化的制动过程中,制动时间见图 2^[9], t_0 为制动总时间; t_1 为驾驶人反应时间; t_2 为制动器作用时间; t_3 为持续制动时间; t_4 为制动力消除时间。

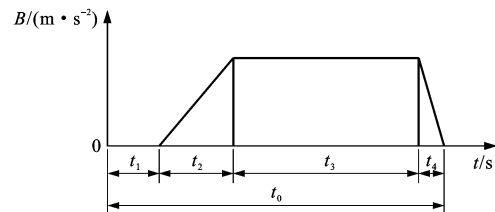


图 2 制动时间

Fig. 2 Braking times

评价汽车制动性能的制动距离,一般是指从驾驶人踩制动踏板开始到汽车完全停止所驶过的距离,包括制动器起作用时间 t_2 和持续制动时间 t_3 2 个阶段汽车驶过的距离,分别为 s_2 和 s_3 ^[10]。

制动器起作用时间 t_2 包含制动器协调时间 t_{21} 和制动力增长时间 t_{22} ,所以汽车制动距离 s_2 包括了这 2 个阶段汽车驶过的距离 s_{21} 和 s_{22} ,即

$$s_2 = s_{21} + s_{22} \quad (3)$$

在 t_{21} 阶段,由于汽车惯性的作用,汽车车轮为纯滚动状态,此时汽车基本无外力作用,以制动初速度 v_0 作匀速运动,有

$$s_{21} = v_0 t_{21} \quad (4)$$

在 t_{22} 阶段,制动力增长,制动减速度线性增大,车轮处于边滚边滑状态,汽车只能前轮先抱死,所以本文只分析前轮先抱死时汽车前、后轮地面制动力变化,见图 3^[11]。图 3 中: F_1 和 F_2 分别为前、后轮附着系数; F_3 和 F_4 分别为前、后轮制动器制动力; t_c 为制动力开始增长至前轮抱死的时间。

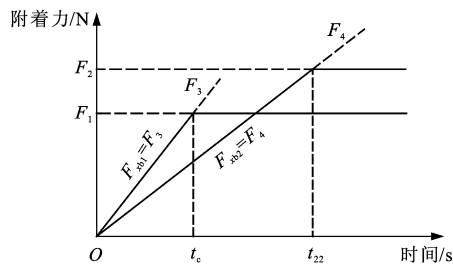


图 3 附着力

Fig. 3 Adhesive forces

由图 3 可得,在前、后轮制动器制动力作用下,前、后轮都处于边滚边滑的状态,则有

$$\begin{cases} F_{xb2} = \frac{F_2}{t_2} t \\ F_{xb1} = F_3 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} F_{xb2} = F_4 \\ F_4 = \frac{1-\beta}{\beta} F_3 \end{cases} \quad (6)$$

$$t_c = \frac{1-\beta b + \varphi h}{\beta a - \varphi h} t_{22} \quad (7)$$

式中: β 为制动器制动力分配系数。

在 t_{22} 阶段内,前、后轮地面制动力分别为

$$F_{xb1} = \begin{cases} \frac{F_1}{t_c} t = \frac{Mg\varphi(b+\varphi h)}{L} \frac{t}{t_c} & 0 \leq t \leq t_c \\ F_{z1}\varphi = \frac{Mg\varphi}{L}(b+\varphi h) & t_c < t \leq t_{22} \end{cases} \quad (8)$$

$$F_{xb2} = \frac{F_2}{t_{22}} t = \frac{Mg\varphi(a-\varphi h)}{L} \frac{t}{t_{22}} \quad 0 \leq t \leq t_{22} \quad (9)$$

汽车的制动减速度为

$$B = \begin{cases} -\frac{g\varphi(a-\varphi h)}{L(1-\beta)} \frac{t}{t_{22}} & 0 \leq t \leq t_c \\ -\frac{g\varphi(b+\varphi h)}{L} - \frac{g\varphi(a-\varphi h)}{L} \frac{t}{t_{22}} & t_c < t \leq t_{22} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{令 } A_1 = -\frac{g\varphi}{L}(b+\varphi h)$$

$$A_2 = -\frac{g\varphi}{L}(a-\varphi h)$$

对式(10)积分,可得 t_{22} 时间阶段末汽车的速度 v_1 和该时间内汽车的制动距离 s_{22} 分别为

$$v_1 = v_0 + A_2 \frac{t_c^2}{2t_{22}(1-\beta)} + A_1(t_{22}-t_c) + \frac{A_2(t_{22}-t_c)^2}{t_{22}} \quad (11)$$

$$s_{22} = v_0 t_c + \frac{A_2}{6t_{22}(1-\beta)} t_c^3 + \left[v_0 + \frac{A_1 t_c^2}{2t_{22}(1-\beta)} \right] (t_{22}-t_c) + \frac{A_1}{2} (t_{22}-t_c)^2 + \frac{A_2}{6t_{22}} (t_{22}-t_c)^3 \quad (12)$$

在 t_{22} 时间阶段末,汽车前、后轮都抱死,前、后轮的地面制动力都达到了最大值,等于附着力,且保持不变。在 t_3 时间内,汽车做匀减速运动直至停

止,减速度为 $-g\varphi$ 。汽车在制动过程中的持续制动时间内产生的制动距离 s_3 为

$$s_3 = \frac{v_1^2}{2g\varphi} \quad (13)$$

在制动过程中,汽车总制动距离为

$$s = s_2 + s_3 = s_{21} + s_{22} + s_3 \quad (14)$$

2 试验结果与仿真结果分析

2.1 试验

参照制动法规《汽车制动系统结构、性能和试验方法》(GB 12676—1999)的要求设计制动试验方案,分别在冰雪压实路面和使用融雪剂后的路面上进行试验^[12]。出于安全考虑,两种试验环境都分别以制动初速度为 10、20、30 km·h⁻¹(理想状态)进行制动试验,每种试验进行正反(往返)2 次,以消除风力、道路坡度的影响。试验车辆参数见表 1。在制动试验前,准备工作还需注意以下几点。

表 1 车辆参数

Tab. 1 Vehicle parameters

试验车辆型号	轮胎型号	制动器类型
宝来	195/65R15	盘式

(1)汽车油箱加至厂定容积的 90%,加满冷却液和润滑剂,试验加载为 200 kg(驾驶人、1 名试验员和仪器质量)。

(2)轮胎充气至厂定压力,绝对误差不超过 10 kPa;胎面花纹高度不低于新花纹的 50%。

(3)制动系统的部件应按制造厂的规定进行装配和调整,在试验之前,允许根据实际情况调整制动装置。

做好试验准备工作后,按照试验方案进行道路制动试验,2 种道路环境以及制动参数分别见表 2~5。

表 2 试验环境 1

Tab. 2 Test environment 1

试验日期	试验地点	天气	气温	道路状况	载荷情况
2011-01-07	东北林业大学林场	多云	-12℃	冰雪压实路面	空载

表 3 试验环境 1 下的制动参数

Tab. 3 Braking parameters under test environment 1

方向	$v_0 / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$B_{\max} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	s / m
正	10.3	2.26	2.860
反	11.6	2.30	3.058
正	23.6	2.08	17.569
反	25.1	2.41	19.186
正	32.6	2.12	27.151
反	30.2	2.33	25.376

表 4 试验环境 2
Tab. 4 Test environment 2

试验日期	试验地点	天气	气温	道路状况	载荷情况
2011-01-09	东北林业 大学林场	多云	-10 ℃	融雪剂作用 后的路面	空载

表 5 试验环境 2 下的制动参数
Tab. 5 Braking parameters under test environment 2

方向	$v_0/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$		$B_{\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$		s/m	
正	11.2	11.0	3.91	3.84	2.470	2.430
反	10.8		3.76		2.390	
正	22.0	22.9	4.01	3.79	13.241	13.766
反	23.7		3.57		14.291	
正	30.9	31.0	3.91	3.71	17.551	18.860
反	31.0		3.50		20.168	

若前、后轮同时抱死,则最大制动减速度 B_{\max} 为

$$B_{\max} = g\varphi_1 \tag{15}$$

式中: φ_1 为滑动附着系数。

对于装有防抱死制动系统(ABS)的汽车,能达到的最大制动减速度为

$$B_{\max} = g\varphi_2 \tag{16}$$

式中: φ_2 为峰值附着系数。

在干燥路面上, φ_1 与 φ_2 的差别较小,而在潮湿路面的差别较大。若令 $\lambda = \frac{\varphi_1}{\varphi_2}$, λ 一般在 $1/3 \sim 1$ 之间^[13]。由试验所得数据可求得 2 种试验环境下各初速度下的峰值附着系数和滑动附着系数(λ 取 $2/3$),见表 6。

表 6 2 种试验环境下的 φ_1 和 φ_2
Tab. 6 φ_1 and φ_2 under two test environments

	$v_0/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	φ_1	φ_2
冰雪压实路面	10.8	0.152	0.228
	24.4	0.150	0.225
	31.4	0.149	0.223
融雪剂作用后的路面	11.0	0.256	0.384
	22.9	0.253	0.379
	31.0	0.247	0.371

将 2 种路面状况下的试验数据对比可得,使用融雪剂后轮胎与路面间的附着系数明显改善,提高了 $86\% \sim 92\%$,从而缩短了汽车制动距离,减少了 $25\% \sim 28\%$ 。另外,汽车速度的改变对附着系数也有一定影响,随着速度的增大,附着系数减小。

2.2 仿真

根据路面附着系数与制动距离的关系模型,利用 MATLAB 建立制动距离的仿真计算系统,在

冰雪压实路面和使用融雪剂后的路面上对试验车辆的制动距离进行仿真计算。模型中的基本参数见表 7^[14]。为方便与试验结果进行对比分析,仿真初速度为试验的实际初速度。由于该车型在低速时 ABS 系统不起作用,所以模型中的附着系数采用试验中各制动初速度下所得的滑动附着系数。2 种试验环境下的制动距离的试验值与仿真值对比见图 4,结果分析如下。

表 7 基本参数
Tab. 7 Basic parameters

M/kg	L/m	a/m	b/m	h/m	β	t_{21}/s	t_{22}/s
1 305	2.610	1.259	1.351	0.526	0.6	0.1	0.3

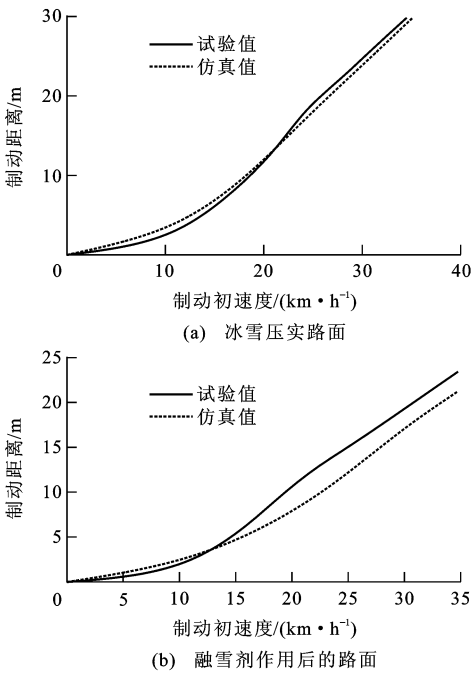


图 4 制动距离对比
Fig. 4 Comparison of braking distances

(1)仿真计算所得的制动距离与试验所得的制动距离接近,而路面的附着系数受速度、轮胎种类及磨损程度等因素的影响,在实际制动过程中是变化的,所以理论制动距离要比实际制动距离偏小。

(2)试验所得的制动距离随制动初速度的变化曲线与仿真所得的曲线类似,当汽车制动初速度小于 $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,实际制动距离增长较慢;当制动初速度大于 $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,实际制动距离与制动初速度大致呈线性变化。

(3)通过仿真计算结果可知,使用融雪剂缩短了汽车的制动距离,比在冰雪压实路面上缩短了约 30% ,这与试验结果接近。

3 结 语

本文在冰雪压实路面和融雪剂作用后的路面上进行制动试验,获得 2 种路况下不同制动初速度的制动距离和最大减速度,基于由试验数据计算所得的滑动附着系数,应用 MATLAB 对 2 种路况下的制动距离进行了仿真计算。使用融雪剂后轮胎与道路间附着系数有所改善,较压实的冰雪道路的附着系数提高了 86%~92%,从而缩短了汽车的制动距离,缩短幅度 25%~28%。本文所建立的仿真模型可靠,可用于估算某一车型在不同路面状况下以不同制动初速度制动时的制动距离。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 李海军. 雪后路面大量“撒盐”的危害及防护措施[J]. 山东建筑大学学报, 2009, 24(2): 184-188.
LI Hai-jun. Corrosion and protective measure after a large quantity of “spreading salt”[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2009, 24(2): 184-188. (in Chinese)
- [2] 张 改. 汽车制动性能测试方法分析与研究[J]. 中国测试, 2010, 36(4): 34-37.
ZHANG Gai. Analysis and research on braking performance test methods for the motor [J]. China Measurement and Test, 2010, 36(4): 34-37. (in Chinese)
- [3] 杨仁华. 汽车制动系统可靠性[J]. 科技资讯, 2006(32): 216-217.
YANG Ren-hua. Automobiles braking system reliability[J]. Science and Technology Information, 2006 (32): 216-217. (in Chinese)
- [4] 胡忠梅. 汽车制动性能评价与建议系统的开发研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2009.
HU Zhong-mei. Research and development of evaluation and suggestion system for automobile braking performance[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [5] 赵又群, 林 葵. 基于虚拟试验的路面附着系数估计[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(2): 309-315.
ZHAO You-qun, LIN Fen. Estimation of road pavement adhesion factor based on virtual experiment[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(2): 309-315. (in Chinese)
- [6] 刘景辉. 轿车制动系建模与仿真及 ABS 控制策略[D]. 上海:

上海交通大学, 2007.

- LIU Jing-hui. Modeling and simulation of autocar braking system and ABS control strategy[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [7] 吴利军, 王跃建, 李志强. 面向汽车纵向安全辅助系统的路面附着系数估计方法[J]. 汽车工程, 2009, 31(3): 239-243.
WU Li-jun, WANG Yue-jian, LI Ke-qiang. Estimation method of road adhesion coefficient for vehicle longitudinal safety assistant system[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(3): 239-243. (in Chinese)
- [8] 王保全. 越野车制动性能的分析研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
WANG Bao-lei. Analysis and research on braking performance of off-road vehicle[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [9] 王润琪, 蒋科军. ABS 汽车制动距离分析与计算[J]. 中南林业学院学报, 2005, 25(2): 70-73.
WANG Run-qi, JIANG Ke-jun. Analysis and calculation of braking distance of ABS automobiles[J]. Journal of Central South Forestry University, 2005, 25(2): 70-73. (in Chinese)
- [10] 吴 明. 汽车制动距离与速度的关系[J]. 公路与汽运, 2010(3): 46-49.
WU Ming. Relationship of automobile braking distance and speed[J]. Highways and Automotive Applications, 2010(3): 46-49. (in Chinese)
- [11] 雷腾飞. 基于路面状况的汽车制动性能仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
LEI Tong-fei. Braking performance simulation of vehicles based on road surface condition[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [12] GB 12676—1999, 汽车制动系统结构、性能和试验方法[S].
GB 12676—1999, road vehicle-braking systems-structure, performance and test methods[S]. (in Chinese)
- [13] 刘 力, 罗禹贡, 李志强. 基于归一化轮胎模型的路面附着系数观测[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(5): 116-119.
LIU Li, LUO Yu-gong, LI Ke-qiang. Tire-road friction coefficient estimation based on normalized tire model[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(5): 116-119. (in Chinese)
- [14] 彭育辉, 王良模. 对四轮汽车制动过程计算机仿真的研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2003, 31(2): 182-185.
PENG Yu-hui, WANG Liang-mo. A study on the simulation of vehicle's braking process[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2003, 31(2): 182-185. (in Chinese)