

不平路面上制动附着系数变化的仿真分析

左曙光 程悦荪 刘德彰 徐爱明
(南京航空航天大学) (吉林工业大学) (南京航空航天大学)

提 要 文章采用一种非线性时变轮胎模型, 仿真分析了当路面不平度幅值和频率改变时, 附着系数的变化规律, 并从理论上解释了车速提高时制动附着系数下降的原因, 为进一步分析附着系数的影响因素提供依据。

关键词 路面不平度 制动 附着系数 轮胎模型

Simulation and Analysis of Variation of Adhesive Factor on Rough Road Surface

Zuo Shu-guang

Cheng Yue-sun

(*Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing*) (*Jilin University of Technology*)

Liu De-zhang Xu Aiming

(*Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*)

Abstract A nonlinear tyre model is proposed in this paper. The variation laws of the adhesive factor while the amplitude and frequency of the road surface changes are simulated and analyzed by means of the tyre model. The conclusion that adhesive factor decreases while the vehicle velocity increasing is explained.

Key words Roughness of road surface Brake Adhesive factor Tyre model

制动附着系数的大小直接影响车辆的制动性能。车辆制动过程中附着系数的变化规律一直被研究者关注。制动附着系数定义为车辆制动力和垂直载荷的比值, 它受胎体、地面材料、车速和路面状况等因素的影响。从实验中总结出了制动附着系数与滑移率、制动附着系数与车速的变化关系等一些很有价值的结论。本文从理论上探讨路面不平度的频率和幅值的变化对制动附着系数的影响, 以便进一步研究车辆制动过程。

1 非线性时变轮胎力学模型

要分析路面不平度对附着系数的影响, 须建立一个合适的轮胎力学模型, 为此假设:

本文主要是为了研究车辆的直线制动规律, 不考虑路面不平度在轮胎宽度方向上的

收稿日期: 1996-12-04 1997-07-15 修订

左曙光, 博士后, 南京市御道街29号 南京航空航天大学二系206教研室, 210016

变化,且假定只有在接地印迹长度上的那部分胎面发生弹性变形,而不与地面接触的部分胎面则保持圆形;轮胎是均匀对称的,全部质量集中在轮心上;不考虑制动过程中路面摩擦引起轮胎的周向变形;鉴于在一般情况下车辆在硬路面上行驶,建模中略去路面的变形;假定轮胎由多个沿径向分布的弹簧阻尼单元组成,各分布弹簧阻尼单元变形是独立的;车辆制动过程中,轮胎与地面的附着系数在接地长度内各处,只随各点的瞬时滑移率的变化而变化。轮胎力学模型简化为图 1 所示的形式。

在轮胎的接地印迹长度 l 上,均匀分布有 n 个径向分布的刚度阻尼单元,图中只画出了某一瞬时某一个分布弹簧阻尼单元。在该时刻地面对车轮的作用力(垂直力和水平制动力)就是各分布弹簧阻尼单元产生的径向分布力和分布制动摩擦力的合力。

将径向分布力 $F_c(x)$ 和分布地面制动摩擦力 $F_b(x)$ 沿垂直和纵向分解^[1],就可以确定出作用于轮胎上角度为 θ 处的垂直力 $F_z(x)$ 、水平力 $F_x(x)$ 和地面制动力矩 $T_g(x)$:

$$\begin{cases} F_x(x) = -\sin\theta F_c(x) + \cos\beta F_b(x) \\ F_z(x) = \cos\theta F_c(x) + \sin\beta F_b(x) \\ T_g(x) = -F_z(x)x - F_x(x)[z - h(x)] \end{cases}$$

式中 $\theta = \arctg(x/(z - h(x)))$, $\beta = -\arctg(dh(x)/dx)$ 。

作用于车轮上的垂直载荷 F_z 、制动力 F_x 和地面制动力矩 T_g 为接地印迹长度 l 上分布力的矢量和。

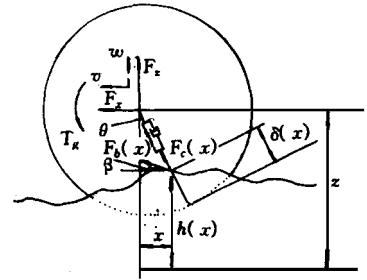
2 路面附着系数的理论分析

模拟计算分析假定车轮中心的高度位置不发生变化,保证车辆在某一滑移率下制动,让车轮通过一个波长的正弦路面,模拟计算车轮通过正弦路面时每时刻地面对它的水平制动力和垂直作用力。水平制动力和垂直作用力的比为制动附着系数。这样模拟的实质是测车轮不跳动状态下的制动附着系数,用控制轮胎垂直变形的办法产生垂直力和相应的附着力。

2.1 不平路面上地面作用力、附着系数的模拟分析

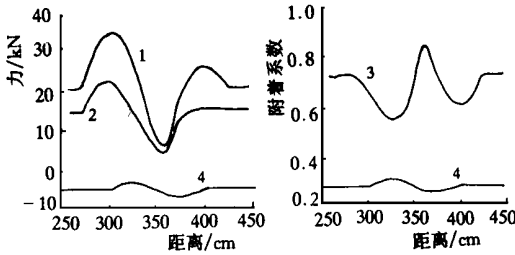
图 2 给出了一组模拟曲线。模拟条件为:半径为 0.762 m、分布刚度为 7041.06 N/m、分布阻尼为 95.72 N·s/m 的拖拉机后制动轮上参数为模拟参数,让车轮以 8 m/s 的速度在幅值为 1.5 cm、波长为 100 cm 的正弦路面上匀速抱死拖滑(滑移率 $s = 1.0$)。

从制动力、垂直载荷曲线变化图上看,制动力和垂直载荷的变化区间比一个正弦波长,这是由于变化开始时,尽管轮心未上正弦路面,但轮胎外缘已开始和正弦波接触,正弦波路段已对车轮产生力的贡献,从而使轮心的作用力发生变化;在轮心已拖滑过正弦路面之后,但正弦波路面的一小部分仍在接地印迹区内,这部分正弦路面对车轮仍有力的贡献,使得轮心的垂直载荷和制动力存在变化。



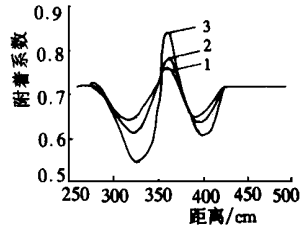
R —轮胎自由半径; z —车轮中心的垂直高度; v, w —轮心的水平和垂直速度分量; $h(x)$ —距轮心正下方处的路面不平度; $dh(x)/dx$ —距轮心 x 处的路面不平度的斜率; $\delta(x)$ —弹簧阻尼单元径向变形
图 1 非线性时变轮胎力学模型

如果用等效附着系数表示该时刻的制动力与垂直载荷的比, 随着车轮在正弦路面上的拖滑, 路面不平度的变化, 作用于车轮上的垂直载荷和水平制动力在发生变化, 等效附着系数也随着变化。图 2 中的 1、2、3 三条曲线为车轮拖滑过一个整正弦路面后的垂直载荷、水平制动力和等效附着系数的变化曲线。从附着系数变化曲线图上分析: 附着系数不只与滑移率 s 有关, 还和路形 $h(x)$ 有关。这段等效附着系数平均值比平路上的平均附着系数小。表明路面不平度降低了路面的制动附着系数。



1. 垂直载荷 2 制动力 3 附着系数 4 正弦路面

图 2 模拟计算中力、附着系数随路形变化关系



1—1 m/s 2—3 m/s 3—8 m/s

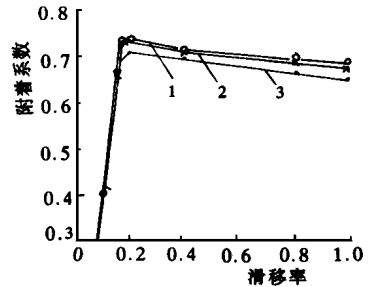
图 3 附着系数受速度影响变化曲线

2.2 同一路面上车速对附着系数的影响

模拟仍采用以上所述的轮胎参数和路形条件, 让车轮以 1、3 和 8 m/s 三种速度抱死拖滑 (滑移率 $s = 1$), 通过幅值为 1.5 cm, 波长为 100 cm 的正弦路面。图 3 为三种速度下附着系数的变化曲线, 曲线 3 变化最大, 曲线 1 变化最小, 曲线 2 变化处于中间。说明附着系数的变化是速度的函数。

如将各个正弦波形上的附着系数值分别进行平均, 其中曲线 3 的均值最小, 曲线 2 的均值比 3 大, 曲线 1 的均值最大, 但三条曲线的均值都小于平路上的制动附着系数值, 表明速度增大使得附着系数减小。

为了全面地分析速度和附着系数之间的变化关系, 利用非线性时变轮胎模型对滑移率为 0.09、0.15、0.17、0.20、0.40、0.8、1.0 的上述三种速度, 在幅值为 1.5 cm、波长为 100 cm 的正弦路面上进行模拟计算。图 4 为三种速度下平均制动附着系数随滑移率的变化关系曲线。滑移率小时, 速度增大对附着系数的减小不很明显, 而随着滑移率的增大, 附着系数受车速的影响越来越明显, 当滑移率为 1 时, 附着系数随速度增大的减小量最大。



1—1 m/s 2—3 m/s 3—8 m/s

图 4 平均制动附着系数与滑移率的变化关系

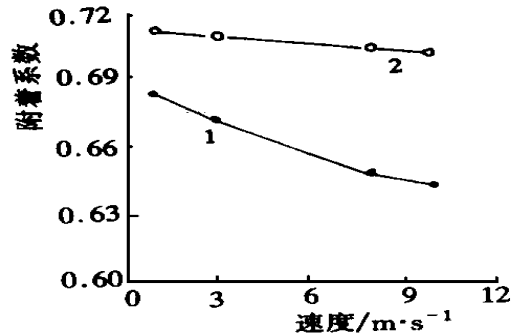
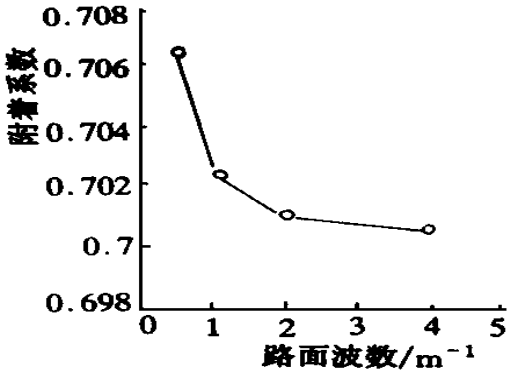
2.3 不同路面上附着系数随速度的变化分析

为了分析在路面不平度不同的情况下, 附着系数随速度的变化关系, 模拟分析中采用车轮的滑移率 s 为 1.0, 以 1 m/s、3 m/s、8.0 m/s 和 10.0 m/s 四种速度, 在幅值为 1.5 cm 和 0.8 cm, 波长为 100 cm 的两种正弦路面上的拖滑情况。图 5 为两种不同路面上附着系数随速度变化的曲线图。不平度大的路面 1 上, 附着系数随速度增大而减小得快; 在不平度小的路面 2 上, 附着系数随速度变化的规律则表现得不是特别明显。根据推理, 如果在理想平路

上,附着系数将不会随车速变化。引起附着系数变化的根源是路面不平度的变化。车速增大时,路面不平度对车轮的激振作用加剧,使得附着系数减小。

2.4 路面正弦波波长对制动附着系数的影响

路面波长反映出路面空间频率的大小。在滑移率为 1.0 时,让车轮以 8 m/s 的速度在幅值为 1.5 cm ,而波数分别为 0.5、1、2、4 的四种正弦路面上拖滑,模拟计算附着系数的变化规律。图 6 给出了附着系数随空间波形的变化规律。



1. 幅值为 1.5 cm 的正弦波 2. 幅值为 0.8 cm 的正弦波

图 5 不同路面上制动附着系数与速度变化关系

图 6 制动附着系数与路面波数变化关系

由图 6 可见,随着路面空间波数(频率)的增大,附着系数减小。表明在速度不变时,提高空间波数也使得制动附着系数减小。

3 结 论

本文采用作者提出一种用于制动过程的非线性轮胎力学模型,仿真分析了制动附着系数随路面不平度变化和车速变化而变化的规律,可知:

- 1) 在不平路面上,制动附着系数的瞬时值随路形而发生变化。
- 2) 在不平路面上,制动附着系数的平均值随车轮的速度升高而减小。路面不平度越大,附着系数随速度升高而减小的趋势越大。
- 3) 路面不平度对附着系数的影响主要是由于路面的变化引起了车轮上垂直力和水平力变化,从而导致附着系数的变化。不平度幅值越大,附着系数的变化就越大。

参 考 文 献

- 1 左曙光 路面不平度对拖拉机-挂车机组制动性能的影响—建模与仿真分析: [学位论文] 长春:吉林工业大学, 1996
- 2 Captain KM, Boghani A B, Womley D N. Analytical tire models for dynamic vehicle simulation. Vehicle System Dynamics, 1979
- 3 吴献金 关于路面纵向附着系数的讨论 汽车技术, 1987(1)