

用于防抱制动系统的路面不平特征识别算法

孔磊 宋健 严忆泉 沈俊

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 为提高防抱制动系统(ABS)在不平路面上的控制效果,研究 ABS 在不平路面上的信号特征和路面不平度识别方法。建模仿真可证明从轮加速度信号中识别路面不平度的可行性;对加速度信号的时域频域分析,提出识别路面不平度的“能量比重法”和“穿越计次法”;提出基于多级穿越门限、多级不平累加值及自减参数的 ABS 路面不平度实时识别算法;对基于路面不平度识别的 ABS 不平路面补偿算法进行初步研究。结果表明,该算法实时性好,能准确识别路面不平度,计算量小,能满足 ABS 实时控制需要。

关键词: 汽车防抱制动系统 路面不平度 特征识别

中图分类号: U463.54

0 前言

目前,大多防抱制动系统(ABS)将轮减速度和滑移率作为主要控制参数。当汽车在不平道路上制动时,车轮产生振动,引起轮速波动,从而影响轮减速度和滑移率的计算,将干扰 ABS 正常工作,可能引起误动作,影响制动效果,因此研究不平路面对 ABS 的影响及 ABS 在不平路面上的控制方法十分必要。

文献[1]的研究表明,路面不平能激发车轮圆周切向速度变化,增加车轮的瞬时抱死程度,影响汽车制动稳定性,路面形状、道路不平激发的汽车垂直振动和车轮纵向振动是影响 ABS 系统的主要因素^[1]。为了补偿路面不平对 ABS 系统的干扰,文献[2]提出可以根据轮速中的不平度成分对决定减压的减速度门限和持续减压时间进行调整,文献[3-5]提出了设计数字滤波器、建立竞争神经网络的路面辨识模型等增强 ABS 抗路面不平度干扰能力的方法。

识别路面不平度是提高 ABS 在不平路面上控制效果的重点和难点,通常对于路面不平度的识别可以通过专用的测量仪器^[6-8],但这显然不适用于 ABS 系统现有的硬件条件。本文从不平路面上制动的动力学分析出发,基于 ABS 系统特点,结合大量实车试验数据,寻找不平路面上的轮加速信号特征,提出了 ABS 路面不平度识别的实时算法,同时也对不平路面上 ABS 的补偿控制方法进行了初步研究。

1 不平路面上制动过程动力学分析

建立单轮模型,如图 1 所示,其中 m' 为整车质量, m 为车轮质量, k 为悬架刚度, r 为车轮半径, ω 为车轮角速度, F_z 为路面正压力, F_{xb} 地面制动力, T_u 为制动器制动力矩。

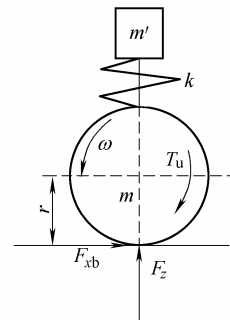


图 1 单轮模型

在不平路上,这里的 F_z 应为 $F_z(t)$, $F_z(t)$ 除了车的静态质量外,还包括制动减速时轮荷转移和由于路面不平引起轮荷振动。路面不平属于随机量, $F_z(t)$ 也可以视为随机量,为了求解方程,暂定 $F_z(t)$ 为恒定量 F_z , 最后再进行处理。

1.1 制动过程的动力学关系

汽车在不平路面的动力学关系建立过程如下所述。

(1) 忽略行车过程中的空气阻力和滚动阻力,有

$$F_{xb} = F_z \phi_b \quad (1)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = F_{xb} r - T_u \quad (2)$$

式中 ϕ_b ——路面附着系数

I ——车轮转动惯量

(2) 将滑移率附着系数曲线简化为如图 2 所示的两段直线, 则两段直线的方程分别为

$$\varphi_b = \varphi_p \frac{\lambda}{\lambda_p} \quad 0 \leq \lambda \leq \lambda_p \quad (3)$$

$$\varphi_b = \varphi_s + \frac{(1-\lambda)(\varphi_p - \varphi_s)}{(1-\lambda_p)} \quad \lambda_p < \lambda \leq 1 \quad (4)$$

式中 λ —— 滑移率

λ_p —— 峰值附着系数对应的滑移率

φ_b —— 纵向附着系数

φ_p —— 峰值附着系数

φ_s —— 滑动附着系数

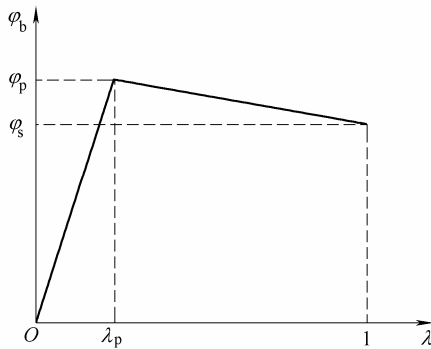


图 2 附着系数—滑移率曲线

(3) 制动轮缸增压与减压的斜率固定, 即制动力矩随时间线性变化。

增压时

$$T_u = (p_0^+ + p_+ t) A_s K_{ef} r_k \quad (5)$$

减压时

$$T_u = (p_0^- - p_- t) A_s K_{ef} r_k \quad (6)$$

式中 K_{ef} —— 制动器制动效能因数

p_+ —— 制动轮缸增压斜率

p_- —— 为制动轮缸减压斜率

p_0^+ —— 增压初始值

p_0^- —— 减压初始值

A_s —— 轮缸面积

r_k —— 制动器摩擦力等效半径

(4) 这里认为一个 ABS 周期很短, 并忽略一个 ABS 周期内车速的降低, 这样滑移率可以表示为

$$\lambda = 1 - \frac{\omega r}{v} = 1 - \frac{\omega}{v/r} = 1 - \frac{\omega}{\omega_0} \quad (7)$$

式中 v —— 车速

1.2 制动过程的动力学方程求解

考虑简单的增、减压 ABS 操作, 滑移率被控制在 $\lambda = \lambda_p$ 附近, 则 ABS 的控制过程可以简单地分解为四个阶段: 增加至 $\lambda = \lambda_p$; 继续增压至 $\lambda > \lambda_p$ 达到门限; 减压至 $\lambda = \lambda_p$; 继续减压至 $\lambda < \lambda_p$ 达到门

限。联立式(1)~(7), 对 4 个阶段分别求解方程, 可分别得到以下结果。

(1) 增压至 $\lambda = \lambda_p$ 过程, 解得

$$\omega = N \exp\left(-\frac{A}{\omega_0} t\right) + \frac{B}{A} \omega_0 + \frac{C \omega_0^2}{A^2} - \frac{C \omega_0}{A} t \quad (8)$$

$$\text{式中 } A = \frac{F_z r \varphi_p}{I \lambda_p}$$

$$B = \frac{F_z r \varphi_p}{I \lambda_p} - \frac{p_0^+ A_s K_{ef} r_k}{I}$$

$$C = \frac{p_+ A_s K_{ef} r_k}{I}$$

$$N = \frac{A-B}{A} \omega_0 - \frac{C}{A^2} \omega_0^2$$

忽略过渡过程, 可以得到

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{B}{A} + \frac{C \omega_0}{A^2} - \frac{C}{A} t \quad (9)$$

因此有

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega_0} = -\frac{C}{A} = -\frac{p_+ A_s K_{ef} r_k \lambda_p}{F_z r \varphi_p} \quad (10)$$

从而可以得到该阶段轮加速度 $\dot{\omega}$ 的变化规律。

另外 3 个过程的动力学方程可以同理解得。

(2) 继续增压至 $\lambda > \lambda_p$ 达到门限过程时

$$\dot{\omega} = -\frac{AN}{\omega_0} \exp\left(-\frac{A}{\omega_0} t\right) - \frac{C \omega_0}{A} \quad (11)$$

$$\text{式中 } A = -F_z r \frac{\varphi_p - \varphi_s}{I(1-\lambda_p)}$$

$$B = \frac{F_z r \varphi_s - p_0^+ A_s K_{ef} r_k}{I}$$

$$C = \frac{p_+ A_s K_{ef} r_k}{I}$$

(3) 减压至 $\lambda = \lambda_p$ 过程时

$$\dot{\omega} = -\frac{AN}{\omega_0} \exp\left(-\frac{A}{\omega_0} t\right) - \frac{C \omega_0}{A} \quad (12)$$

$$\text{式中 } A = -F_z r \frac{\varphi_p - \varphi_s}{I(1-\lambda_p)}$$

$$B = \frac{F_z r \varphi_s - p_0^- A_s K_{ef} r_k}{I}$$

$$C = -\frac{p_- A_s K_{ef} r_k}{I}$$

(4) 继续减压至 $\lambda < \lambda_p$ 达到门限过程时

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega_0} = -\frac{C}{A} = \frac{p_- A_s K_{ef} r_k \lambda_p}{F_z r \varphi_p} \quad (13)$$

$$\text{式中 } A = \frac{F_z r \varphi_p}{I \lambda_p}$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{F_z r \varphi_p}{I \lambda_p} - \frac{p_0^- A_s K_{ef} r_k}{I} \\ \frac{p_0^- A_s K_{ef} r_k}{I} \end{pmatrix}$$

$$C = -\frac{p_0^- A_s K_{ef} r_k}{I}$$

1.3 动力学关系的结果分析

经过第 1.1、1.2 节动力学关系的建立以及方程的求解，可得出以下分析结果。

(1) 通过四个阶段方程的解可知，在确定的 ABS 增减压门限和增减压速率下，在 ABS 控制下的车轮角加速度有固定的频率范围。

(2) 上面得到的结果是基于路面正压力为恒定量 F_z 得到的，如果考虑传递路面不平引起的路面正压力的变化，即路面正压力 F_z 为时间的函数 $F_z(t)$ ，相对于方程来说，式(10)~(13)中的 A、B 部分将仅仅是一个瞬态值，得到的角速度变化规律只是在每个瞬态按上述表达式进行变化。

(3) 从微分方程的角度来看，常数 F_z 向函数 $F_z(t)$ 的转变使得平路面上的方程解成为一个常解，而考虑 $F_z(t)$ 后的解才是原微分方程的特解。因此角加速度的变化规律除了按 ABS 的固有规律变化外，还将按照 $F_z(t)$ 的规律即不平路面的规律变化。因此可以认为不平路面上的轮加速度信息可以看作路面不平度信号将 ABS 固有信号作为载波信号而成，从而从理论上定性说明可以通过对 ABS 轮加速度信号进行处理分析得到路面不平度。

(4) 从信号特征上来讲，不平度信号对 ABS 轮加速度信号造成的影响可以从两方面来考虑。一方面是在对不平路面上的 ABS 轮加速度信号进行频域分析时，可以从频域分布上分辨固有的 ABS 控制信号和不平度信号。另一方面，在时域上，轮加速度信号的振动幅值和周期也会发生相应的改变。

2 不平路面 ABS 信号特征分析

理论分析证明可以从轮加速度信号的频域或时域识别路面不平度。下面对实车试验数据进行离线分析，研究不平路面轮速信号的特点。试验数据来自本课题组自主开发的匹配在某越野车上的 ABS 系统(所取的数据均为左前轮)；以三种路面作为试验样本，分别相当于高级路面(平路面)、中级路面(一般不平路面)和低级路面(特别不平路面)^[4]。

2.1 不平路面 ABS 信号的频域分析

2.1.1 制动信号分析

分别对平路面 ABS 制动、不平路面 ABS 制动、不平路面常规制动三种情况的轮加速度做快速傅里叶变换(FFT)，得到轮加速度频域分布如图 3 所示。

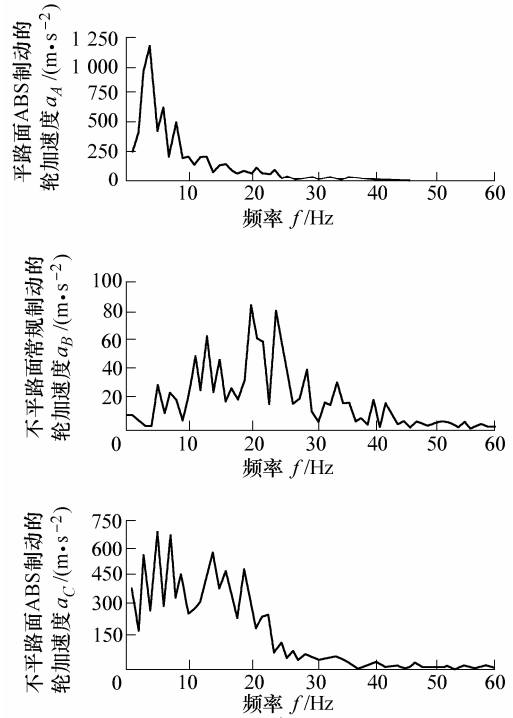


图3 轮加速度频域分布

通过对比可知，ABS 正常动作带来加速度的变化(ABS 制动信号)在频域上主要在 10 Hz 以下(平路面 ABS 制动)，而路面不平引起的加速度信号主要分布在 10~20 Hz(不平路常规制动)。不平路面上的 ABS 制动的轮加速度信号，可以看作由平路面上的 ABS 制动信号和不平路面的不平度信号叠加而成。

ABS 制动信号和不平路信号在频域上有所区分，但是在 10 Hz 左右有所重叠，简单地使用低通滤波固然可以滤去路面不平信号，但也将损失一部分有用的 ABS 信号。

2.1.2 能量比重法识别路面不平度

分别在车辆在平路面、一般不平路面、特别不平路面上进行 ABS 制动，根据数据分析，路面不平的影响在频域上体现为高频部分能量增加，因此可以用高频部分能量的比重做为路面不平度的统计特征。由于路面不平引起的信号主要集中在 10~30 Hz，因此选择[10, 30] Hz 这个频率区间内的信号能量在总能量中所占的比例(定义其为 ζ)做为路面不平度的识别特征，称为“能量比重法”，如式(14)所示

$$\zeta = \frac{\int_{10}^{30} |X(f)|^2 df}{\int_0^{30} |X(f)|^2 df} \tag{14}$$

在三种路面进行多次 ABS 制动试验，用能量比重法对轮加速度信号进行统计，结果如图 4、表 1 所示。

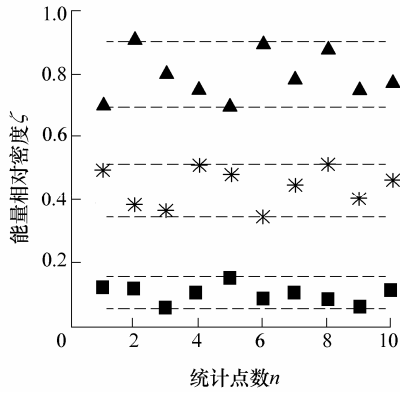


图 4 能量比重法统计特征

■平路面 *一般不平路面 ▲特别不平路面

表 1 三种路面的能量比重法统计数据

路况	平路面能量密度 ζ_1	一般不平路面能量密度 ζ_2	特别不平路面能量密度 ζ_3
均值	0.107	0.443	0.794
最大值	0.157	0.516	0.904
最小值	0.063	0.348	0.696
标准差	0.026	0.058	0.072

可见，能量比重法得到的数据与实际路面的不平程度一致，即能量比重(平均值)越大，路面不平程度越高。

2.2 不平路面 ABS 信号的时域分析

频域法的分析基于对轮加速度的 FFT 变化，计算量比较大，不适用于在 ABS 控制器中应用，同时实时性不好。对于实际使用来说，时域的分析更有价值。

2.2.1 时域信号分析

路面不平引起轮加速度信号振动幅值和周期的变化。图 5 所示为三种路面上的轮加速度信号。

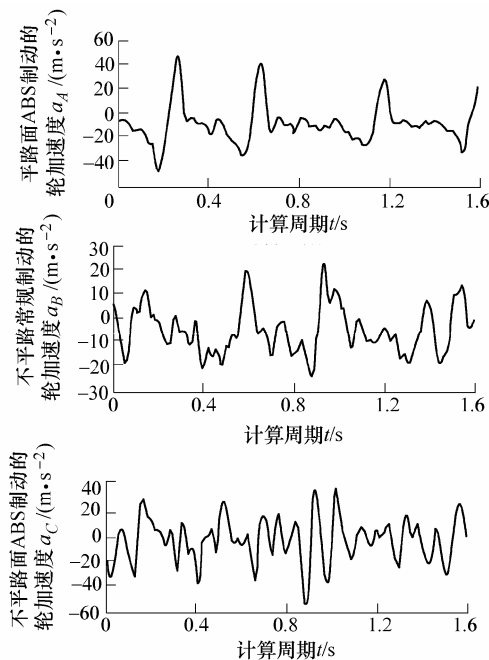


图 5 三种路面上的轮加速度信号

可见，随着路面不平度的提高，轮加速度信号波动加剧，即轮加速度信号波动的周期(连续两个峰值之间的时间)变小，同时幅值呈增大趋势(仅对不平路面的数据有效)。由此可设定加速度穿越门限，对确定计数周期内的轮加速度穿越该门限的次数进行统计，定义为穿越次数，将穿越次数作为时域上不平路面的数字特征，称为“穿越计次法”。

2.2.2 穿越计次法识别路面不平度

车辆在三种样本路面上进行 ABS 制动，按照穿越计次法得到的统计规律如图 6、表 2 所示。

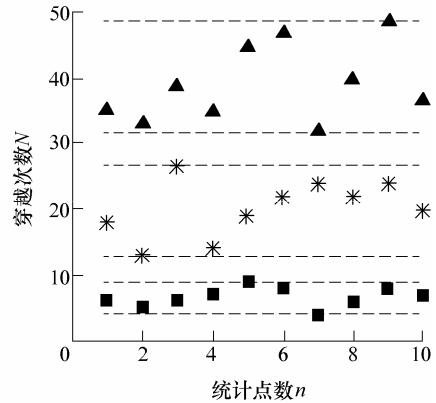


图 6 穿越计次法统计规律

■平路面 *一般不平路面 ▲特别不平路面

表 2 三种路面穿越次数相关统计值

路况	平路面穿越次数 N_1	一般不平路面穿越次数 N_2	特别不平路面穿越次数 N_3
均值	6.6	20.3	39.2
最大值	9	27	49
最小值	4	13	32
标准差	1.43	4.22	5.67

可见，时域的穿越计次法得到的统计规律与实际路面的不平程度一致，即平均穿越次数越大，路面不平程度越大。

3 实时不平度识别方法

对实车数据进行离线处理，提出了识别路面不平度的频域和时域方法，即能量比重法和穿越计次法，均可以很好识别路面不平度。但实际应用两种方法均有不足，能量比重法计算量大，穿越计次法计算周期长，不适用于 ABS 控制的实时性要求和单片机有限的运算能力，因此须要进一步研究路面不平度识别的实时算法。

仍分析轮加速度信号的时域特征，并运用穿越计次法。由于轮加速度信号随着路面不平程度的增加而波动剧烈并且振幅变大，综合考虑轮加速度信号的波动周期和振幅，识别路面不平度，实时算法流程如图 7 所示。

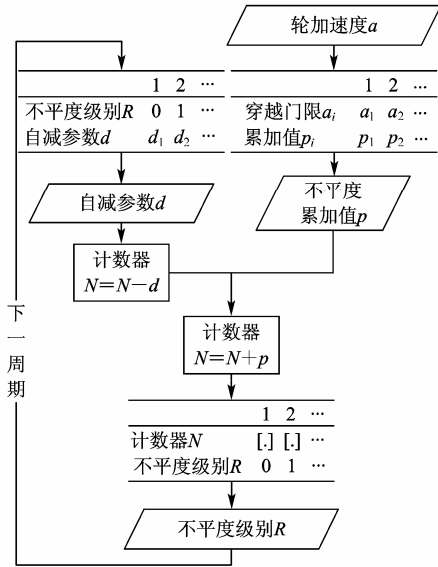


图7 实时算法流程图

3.1 算法定义

实时算法的定义如下。

(1) 定义路面不平度级别 R , R 为正整数, 0 代表平路面, 数字越大不平程度越高。

(2) 定义路面不平度计数器 N , 划分计数器 N 的计数值范围, 与不平度级别 R 对应, 即落在某确定范围的计数器 N 的值对应唯一确定的不平度指数 R 。

(3) 设置 m 个轮加速度比较门限 $a_i (i=1, 2, \dots, m)$, 对应设置 m 个不平度累加值 $p_i (i=1, 2, \dots, m)$, 即轮加速度幅值越大, 能够穿越的门限越高, 对应的累加值越大。

(4) 设置不平度自减参数 d , 对应不平度级别 R , 不平度级别越高, 自减参数越大。

(5) t 为计算周期, $t-1$ 为上个计算周期。

3.2 算法流程

各具体的实时算法流程如下所述。

(1) 根据 $R(t-1)$ 确定不平度的递减参数 d 。

(2) 不平度计数器自减, $N(t) = N(t-1) - d$ 。

(3) 比较本周期的轮加速度所能达到的穿越门限, 对应的不平度累加值累计在计数器中, 例如: 轮加速度达到穿越门限 $a_k (1 \leq k \leq m)$, 则有 $N(t) = N(t) + p_k$ 。

(4) 运用计数器 $N(t)$ 的值来确定本周期的不平度级别 $R(t)$ 。

(5) 下一个计算周期, 重复上述步骤(1)~(4)。

3.3 需要说明的问题

在具体实施流程中有以下几个问题需要说明。

(1) 自减参数 d 。自减参数实现了不平度级别识别的自动跳转, 例如: 车辆由 1 级不平路进入平路面, 轮加速度不再达到穿越门限, 计数器 N 由于自

减参数 d 的存在持续减小, 直到计数值进入平路面的计数范围, 不平度级别 R 变为 0, 实现了跳转。另外自减参数 d 应与不平度累加值 p_i 合理匹配, 实现计数器值的相对稳定。

(2) 不平度级别的划分、计数器取值范围、穿越门限、不平度累加值、自减参数等参数的设定需要根据实际情况通过试验进行标定匹配。

将算法形成程序整合到 ABS 控制软件中, 通过实车试验验证效果, 如图 8 所示。

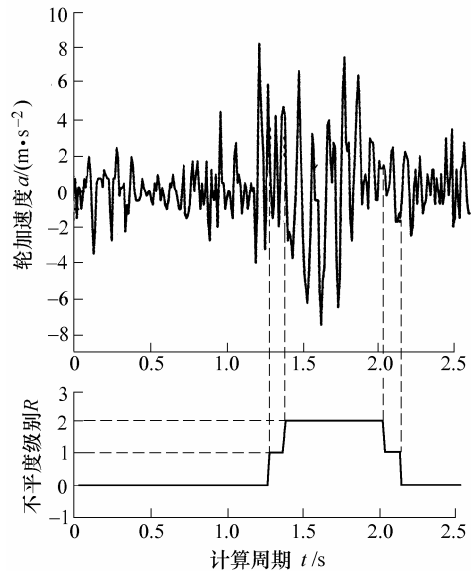


图8 路面不平度识别的实车验证

图 8 所示路面情况为: 车辆由平路面行驶进入一小段不平路面, 然后再次进入平路面的过程。可见本算法可以实时识别出路路面不平度, 当路面不平度跃变时, 也能及时识别, 可以满足 ABS 控制的需要。

4 不平路面 ABS 控制方法的探讨

鉴于篇幅关系, 本文重点讨论路面不平度的识别, 对于基于不平度识别的 ABS 不平路上的控制方法的补偿策略仅做初步分析。

路面不平度给 ABS 控制主要带来两方面的问题: 一是误进入 ABS; 二是 ABS 的误动作(主要是误减压, 造成制动强度低), 因此需要对这两个方面进行修正。

(1) 对上文提出路面不平度的识别方法做一定修正, 主要是分为 ABS 动作和不动作两种情况(ABS 动作指进入 ABS 控制循环, 进行增压、减压、保压等操作)。ABS 动作前的路面不平度的识别按照原算法进行。

如果 ABS 动作, 则需要考虑 ABS 动作造成的

轮加速度信号的波动,需对不平度识别进行修正,调整第 3 节的算法第(3)步为: $N(t) = N(t) + p_k - q$, 这里的 q 是与路面附着情况相关的修正参数;附着系数低的路面上,ABS 动作频繁,造成加速度波动频繁,对不平度识别的影响较高附着路面要大,即附着系数越低 q 值越大。

(2) ABS 进入前,实时根据识别的不平度等级调整 ABS 进入条件。

(3) ABS 进入后,采用修正算法进行不平度识别,根据不平度等级实时动态调整 ABS 的加速度门限和滑移率门限。

上述门限的调整和参数需要试验标定获取。

5 结论

(1) 通过建模分析从理论上得到,不平路面上的轮加速度信息可以看作路面不平度信号将 ABS 固有信号作为载波信号而成,并证明了在轮加速度的频域和时域上识别不平路面的可行性。

(2) 对轮加速度信号进行离线分析,提出了频域分析的“能量比重法”和时域分析的“穿越次法”的路面不平度识别方法,试验统计数据表明,可以完成对不平度的识别。

(3) 通过设置多级穿越门限、多级不平累加值以及相应的自减参数等,提出 ABS 路面不平度识别实时算法,试验证明,该算法实时性好、计算量小、不平路面识别准确,适于 ABS 实际控制器的需要。

(4) 基于路面不平度的识别,从防止 ABS 误进入和误动作两个方面,初步研究 ABS 在不平路面上的补偿方法。

参 考 文 献

- [1] 余卓平. 道路不平度对防抱制动系统的影响[J]. 汽车技术, 1995(2): 18-23.
- [2] WATANABE M, NOGUCHI N. A new algorithm for ABS to compensate for road-disturbance [R]//SAE 19900205, 1990.
- [3] 余卓平, 管迪华. 汽车防抱死制动装置抗路面不平度干扰的数字滤波法[J]. 中国公路学报, 1999, 12(1): 97-102.

- [4] 历朴, 宋健, 于良耀. 汽车防抱制动系统轮速信号异点剔除预处理算法[J]. 公路交通科技, 2001, 18(4): 120-122.
- [5] 王铁, 张国忠, 周淑文. 基于竞争神经网络的 ABS 路面辨识[J]. 东北大学学报, 2003, 24(6): 560-563.
- [6] 赵济海, 王哲人, 关朝雳. 路面不平度的测量分析与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000.
- [7] 汪铸, 帅克, 钱明军. 利用汽车垂直振动加速度判别路面等级的方法[J]. 南京师范大学学报, 2003, 3(3): 63-65.
- [8] 张洪信, 陈秉聪, 张铁柱, 等. 车辆纵振路面谱研究[J]. 汽车工程, 2002, 24(6): 513-515.

ALGORITHM OF FEATURE RECOGNITION OF ROAD ROUGHNESS FOR ANTI-LOCK BRAKE SYSTEM

KONG Lei SONG Jian YAN Yiquan SHEN Jun
(State Key Laboratory of Automotive Safety and
Energy, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: For improving the control effect of anti-lock brake system(ABS) on roughness road, the signal characteristic in this instance and the algorithm of recognizing the degree of roughness road for ABS are studied. Modeling and simulation are used to prove that recognizing the roughness degree from wheel acceleration signal is viable. Based on the time-frequency domain analysis, “energy specific weight method” and “account the times crossing method” are studied to identify road. Then a real-time algorithm for road roughness feature recognition is designed, which depends on multilevel cross threshold, roughness counter, and so on. Otherwise the compensation algorithm for ABS on roughness road is studied primarily. Experimental results show that this algorithm can recognize roughness degree exactly and rapidly, and can meet the demands for the real-time control of ABS well.

Key words: Anti-lock brake system(ABS)

Road roughness Feature recognition

作者简介: 孔磊, 男, 1978 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为防抱制动系统(ABS)的控制方法和关键技术。

E-mail: leikong@tsinghua.edu.cn