

# 盘 - 销摩擦系统摩擦接触力测试与特性分析

陈晶杰<sup>1</sup>, 张立军<sup>2,3\*</sup>, 刁坤<sup>2,3</sup>, 孟德建<sup>2,3</sup>, 余卓平<sup>1,2,3</sup>

(1. 同济大学 中德学院, 上海 200092; 2. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804;  
3. 同济大学 汽车学院, 上海 201804)

**摘要:** 测量分析动态摩擦接触力是研究摩擦振动与噪声发生机理的关键. 本文中建立了盘 - 销系统摩擦尖叫试验台架, 成功再现了摩擦尖叫. 采用三向力传感器对有无摩擦尖叫条件下的动态摩擦接触力进行了测量, 并利用小波信号分解、概率密度函数、功率谱密度函数、时频分析等方法进行了分析和讨论. 研究发现: 在发生摩擦尖叫时, 动态摩擦力和法向力发生高频波动, 是系统噪声的激励源; 无摩擦尖叫时的摩擦力和法向力的动态分量为典型的白噪声随机过程, 呈非高斯分布; 有摩擦尖叫时的摩擦力和法向力为窄带高频类谐波信号, 摩擦力呈非高斯分布, 而法向力近似为高斯分布; 模态耦合是导致盘 - 销系统发生动态接触力高频波动以及摩擦尖叫的原因.

**关键词:** 盘 - 销系统; 摩擦尖叫; 动态接触力; 模态耦合; 信号分析

中图分类号: U463.51

文献标志码: A

文章编号: 1004 - 0595(2013)02 - 0105 - 07

## Measurement and Characteristics Analysis of Frictional Contact Forces in a Pin - on - disc System

CHEN Jing - jie<sup>1</sup>, ZHANG Li - jun<sup>2,3\*</sup>, DIAO Kun<sup>2,3</sup>, MENG De - jian<sup>2,3</sup>, YU Zhuo - ping<sup>1,2,3</sup>

(1. CDHK of Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Clean Energy Vehicle Engineering Center of Tongji University, Shanghai 201804, China

3. School of Automotive Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Experimental investigation into frictional contact forces is key works on friction induced vibration and noise. In this paper, a test bench based on a pin - on - disc system was established and frictional squeal was successfully reproduced. The three direction contact forces were sampled by using a three - dimensional force transducer under squealing and non - squealing conditions. The measured signals were analyzed through wavelet decomposition, statistical probability, power spectral density and time - frequency analysis methods. It is found that the friction force and normal force had high - frequency pulsation during system squealing, and they were the excitation source of squeal. The dynamic part of friction force and normal force under non - squealing conditions were typical white - noise signals which were non - Gaussian distribution. The dynamic part of friction force was either non - Gaussian distribution, while the normal force was close to Gaussian distribution. Mode coupling mechanism was the origin of high - frequency frictional squeal and high - frequency oscillations of frictional contact forces.

**Key words:** pin - on - disc system, frictional squeal, dynamic frictional contact forces, mode coupling, signal processing

Received 10 July 2012, revised 5 November 2012, accepted 5 December 2012, available online 28 March 2013.

\* Corresponding author. E - mail: tjedu\_zhanglijun@ tongji. edu. cn, Tel: + 86 - 21 - 69589237.

The project was support by the National Natural Science Foundation of China (51175380) and the project funded by the Fundamental Research Funds for the Central Universities.

国家自然科学基金项目(51175380)和中央高校基本科研业务费专项资金资助.

制动器摩擦尖叫影响因素众多,发生机理复杂,至今尚未建立有效的控制措施<sup>[1-4]</sup>.近年来,摩擦尖叫研究日益朝摩擦学与动力学结合的方向发展,测量并分析摩擦副之间的动态接触力日益受到关注<sup>[1-4]</sup>.

在以往的制动器摩擦特性分析中,都是测量摩擦转矩和制动压力,通过等效换算得到摩擦力与法向力,并计算得到摩擦系数<sup>[5-6]</sup>.实际上,采用这种方法测量到的并非动态摩擦接触力,而仅仅是其平均值或低频分量,难以满足高频摩擦尖叫的研究需要. Winner 等<sup>[7]</sup>将4个力传感器集成到制动块上,测量了制动盘和制动块之间的动态法向力并确定了合力点的位置,但没有测量摩擦力.

考虑到实际制动器结构限制导致的动态接触力测量困难,自20世纪60年代以来,研究者开始利用盘-销系统研究与分析摩擦尖叫<sup>[1,8-13]</sup>,但研究中鲜有测量盘-销之间的动态摩擦力.陈光雄等<sup>[14-15]</sup>曾针对平面试块-钢球组成的往复滑动摩擦副,利用力传感器测量了动态摩擦力,分析了其动态特性以及摩擦噪声的模态耦合机理,但测量时法向力保持不变. Beloiu 等<sup>[16]</sup>率先利用三向力传感器测量了

盘-销系统的动态接触力,但没有对比有、无摩擦尖叫时的动态接触力特征.

在此背景下,本文基于制动器振动与噪声惯性试验台架,建立盘-销模型试验装置,在成功再现间歇性制动尖叫的基础上,采用3向力传感器测量动态摩擦接触力,并采用小波分解、时频分析和概率统计的方法对比分析了有、无摩擦尖叫时的动态摩擦力特性,为摩擦尖叫发生机理研究奠定良好的基础.

## 1 盘-销系统的摩擦尖叫与动态接触力特性试验

### 1.1 试验装置和试验对象

试验在制动器动力学特性试验台上进行.图1所示为试验台的总体结构示意图.试验台主要由动力装置、惯量模拟装置、传动装置和制动试验对象组成.试验台的测控系统是基于 Matlab/xPC Target 环境设计的,即利用 xPC Target 环境在主机上设计测控模型,并用 Real-Time Workshop 和 Stateflow Coder 自动生成代码,下载到运行 xPC Target 实时内核的目标机,利用目标机完成试验台的转速工况加载以及制动液压力加载(图1中未显示液压控制回路系统).

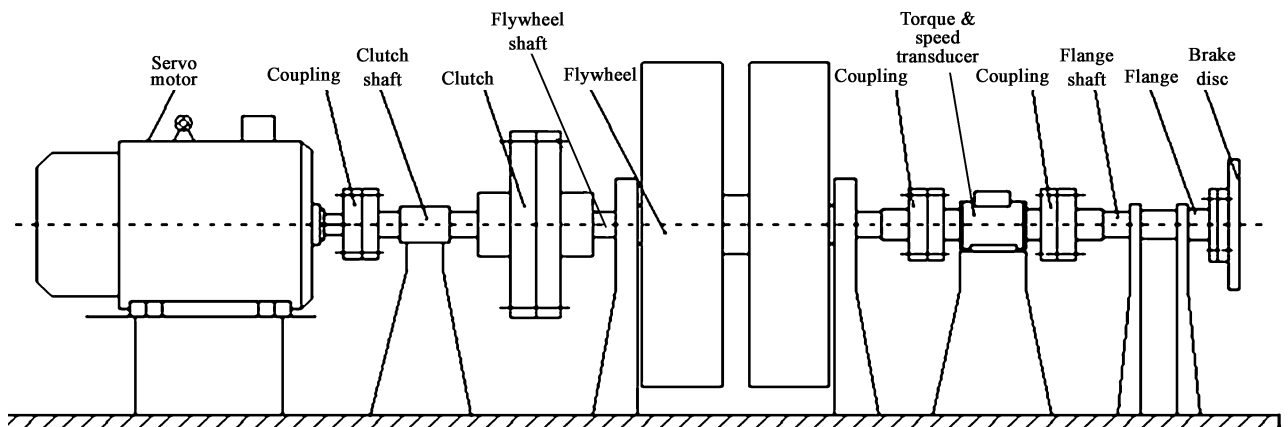


Fig. 1 Multi-propose test bench of brake dynamics

图1 多功能制动器动力学试验台

图2所示测盘-销系统.盘销系统由制动盘、摩擦片(截面为25 mm×25 mm,厚度为5 mm)和铝棒(为了满足三向力传感器和振动加速度传感器的安装要求,铝棒设计为A和B两段)组成.制动盘是灰铸铁材料的通风盘,摩擦片为半金属基无石棉制动摩擦材料,铝棒为纯铝材料.制动盘和摩擦片均经过500次预试验跑合,铝棒的表面光滑无毛刺.值得说明的是,为了降低惯性力对动态接触力测量精度的影响,应尽可能降低由振动加速度传感器、摩擦片和

铝棒A段组成部分的质量.本文研究中,摩擦片5 g,加速度传感器28 g,A段铝棒40 g,总质量仅为73 g.

图3所示盘-销系统的法向压力加载装置原理图.试验时,顺时针旋转螺杆手柄,螺杆向套筒内进给,使弹簧压缩提供铝棒的法向名义作用力.

### 1.2 试验方法

试验中测量动态接触力、振动加速度、摩擦噪声以及转速信号.动态接触力采用PCB三向力传感器

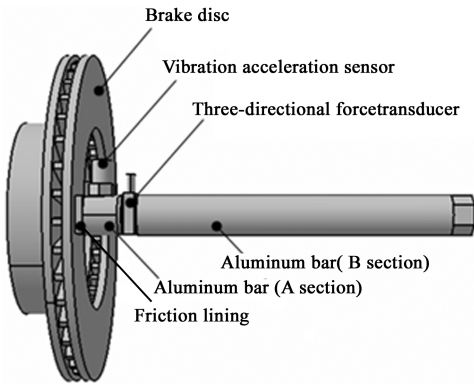


Fig. 2 Tested pin-on-disc system

图 2 试验盘-销系统

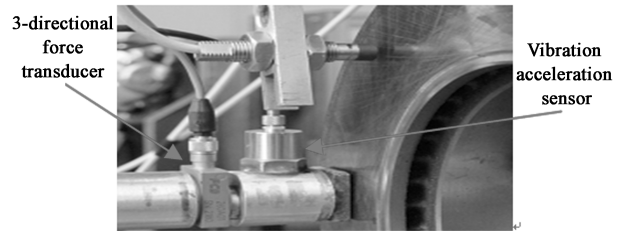


Fig. 4 Setup of related transducers

图 4 相关传感器的布置

转速信号由转矩/转速传感器测量. 测点具体布置如下: 三向力传感器通过铝棒安装固定后, 放置在制动盘一侧摩擦区域中心半径的位置, 且垂直高度与制动盘中心位置水平(见图 4).

试验工况设置为: ①拖滞制动, 制动盘转速 100 r/min, 摩擦副相对速度 1.05 m/s; ②铝棒控制长度 72 mm; ③法向名义载荷: 200、400、600 和 800 N.

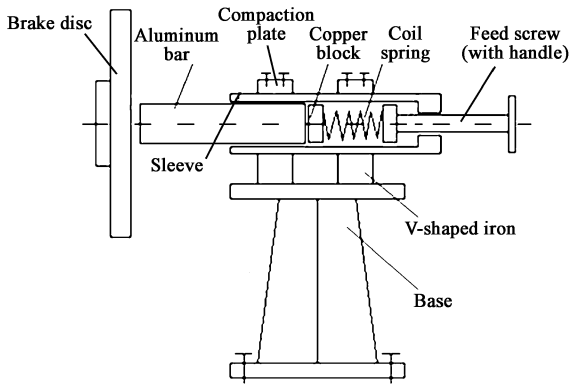


Fig. 3 Device for applying normal force

图 3 法向压力加载装置

## 2 动态摩擦接触力特性分析

为了深入研究动态摩擦接触力的特征, 下面分别考察在有摩擦尖叫和无摩擦尖叫的条件下, 动态接触力的时间域总体特征与静/动态分量特征, 包括概率密度统计特征、功率谱密度函数特征和时频特征. 受篇幅限制, 下面仅以 200 N 名义法向力下的测试结果进行分析.

### 2.1 摩擦接触力的时间域总体特征

图 5 所示为实测得到的间歇性尖叫时的动态摩

同时测量法向压力、摩擦力和径向力信号; 振动加速度由压电式加速度计测量; 噪声信号由声级计测量;

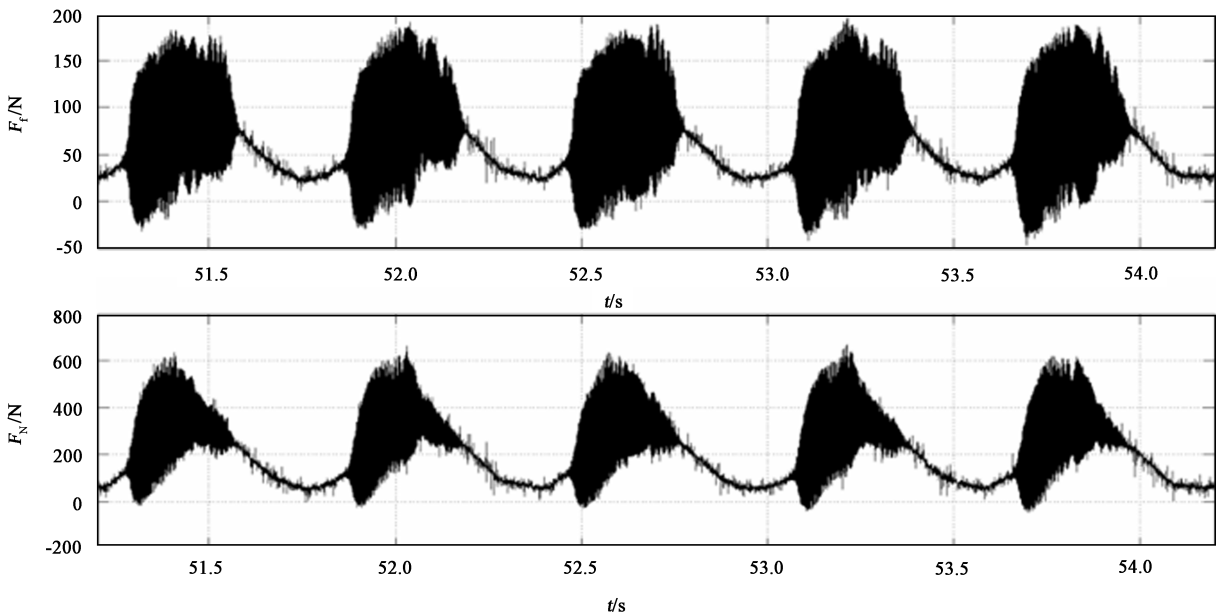


Fig. 5 Friction force and normal force during intermittence squealing

图 5 间歇性尖叫时的摩擦力和法向力

擦力  $F_f$  和法向力  $F_N$ . 由图 5 可知: 盘-销系统发生了周期性的间歇摩擦尖叫, 在此过程中, 动态接触作用力也同步出现了间歇性幅值增大的现象. 这种周期性的间歇尖叫和动态力幅值变化主要是由于制动盘存在一定的端面跳动, 且制动盘定速旋转引起的.

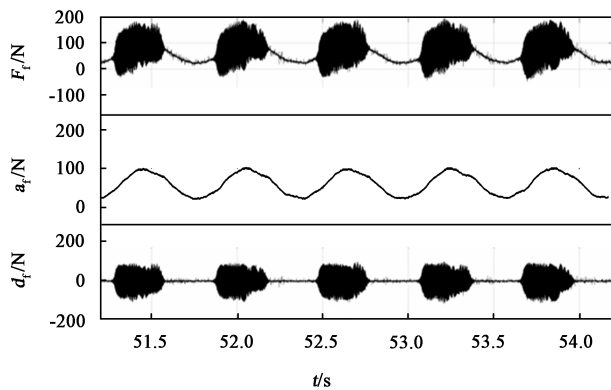
## 2.2 摩擦接触力的静态与动态分量特征

### 2.2.1 信号的小波分解

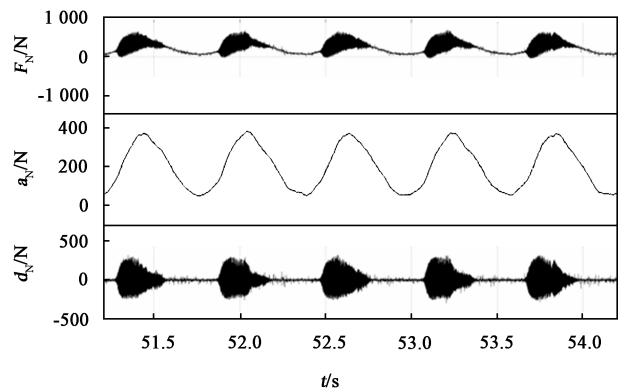
在对比滤波、短时傅里叶变换、小波分析等方法优缺点的基础上, 本文使用离散小波分解的方法对动态摩擦接触力信号进行小波分解, 为后续的信号分析与处理奠定基础. 具体利用 MATLAB 小波分解工具箱对实测的原始摩擦力和法向力信号进行 6 层离散小波分解, 小波分解尺度为 2, 选用小波基

db5<sup>[17-18]</sup>.

图 6 分别显示了摩擦接触力原始信号、准静态分量和动态分量. 其中, 准静态分量即为第 6 层的近似分量, 动态分量则是通过小波重构得到的, 即为各层细节分量的总和. 将图 6 和图 5 结合分析可知: ① 摩擦力和法向力的准静态分量呈周期性变化, 是由于制动盘的端面跳动所致; ② 在摩擦尖叫时段内, 在摩擦力与法向力的稳态趋势分量的基础上, 作用力剧烈波动, 呈现明显的单频率变幅值类谐波信号特征; 在无摩擦尖叫时段内, 摩擦力和法向力的波动量都很小, 而且呈现随机信号特征; ③ 摩擦尖叫主要由摩擦接触力的动态分量激励产生, 但是摩擦尖叫的发生与消减似乎与动态接触力的准静态量的大小



(a) Friction force



(b) Normal force

Fig. 6 Original, static and dynamical part of contact forces

图 6 动态摩擦接触力原始信号、准静态量信号与动态分量

也存在一定的关系.

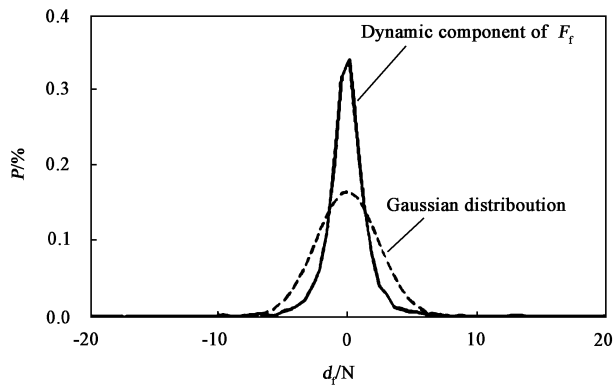
### 2.2.2 概率密度函数分析

分别选取无摩擦尖叫时间段和有摩擦尖叫时间段的动态摩擦接触力进行概率密度分析, 分析的对象包括摩擦接触力原始信号和动态分量. 图 7 和图 8 分别为无摩擦尖叫时间段和有摩擦尖叫时间段的动态摩擦接触力的概率密度分析结果, 图中的实线代表动态分量实际的概率密度函数, 虚线代表高斯分布的概率密度函数, 实、虚两线的对比揭示了动态分量实际分布偏离高斯分布的程度. 由图 7 和图 8 联合分析可知: ① 在无摩擦尖叫的时间段内, 摩擦力和法向力的动态分量都呈均值为 0 N 的对称非高斯分布, 而摩擦力和法向力的原始信号则均为非对称非高斯分布. 这说明, 无尖叫时的动态分量主要是摩擦接触面具有随机性的表面粗糙度引起的接触力波动; ② 在有摩擦尖叫的时段内, 摩擦力的动态分量和原始信号分别呈均值约为 0 和 90 N 的对称非高斯

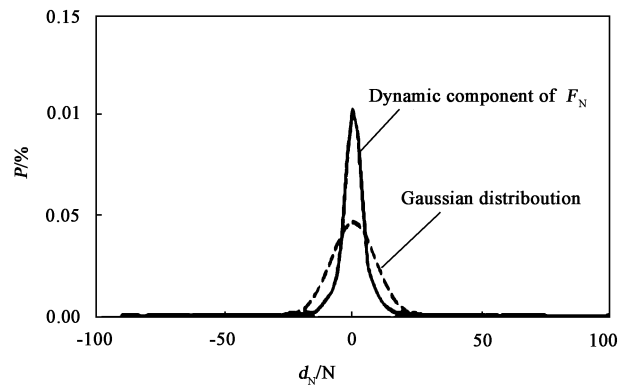
分布, 而法向力的动态分量非常接近于高斯分布, 法向力原始信号则是均值约为 300 N 的微不对称非高斯分布. 这说明尖叫时摩擦力和法向力都以动态分量为, 法向力的波动说明盘-销之间具有时变的接触关系(销具有显著的黏滑运动, 导致盘-销不能保持垂直对准状态), 由此可能产生黏滑和锁止联合作用的摩擦振动与噪声机制, 并会导致尖叫频率的时变性(见图 10).

### 2.2.3 功率谱密度函数分析

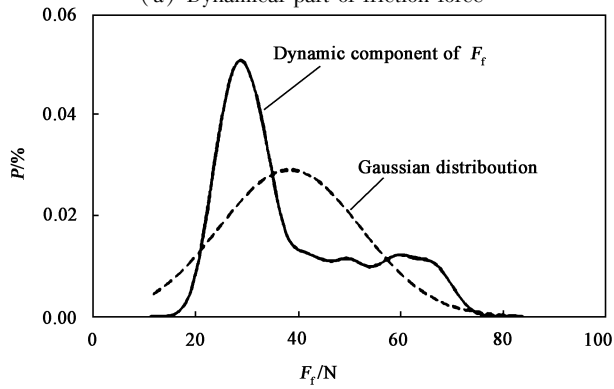
图 9 所示为无摩擦尖叫时间段和有摩擦尖叫时间段的摩擦力和法向力动态分量的功率谱密度函数分析结果, 图 9 中的虚线和实线分别代表无摩擦尖叫和有摩擦尖叫时的结果. 由图 9 可知: ① 无摩擦尖叫时, 无论是摩擦力还是法向力的动态分量, 功率谱密度函数在整个频率范围内基本保持恒定数值, 这表明无摩擦尖叫条件下的摩擦接触力为典型的白噪声随机过程. 这显然是由于接触表面的随机表面形



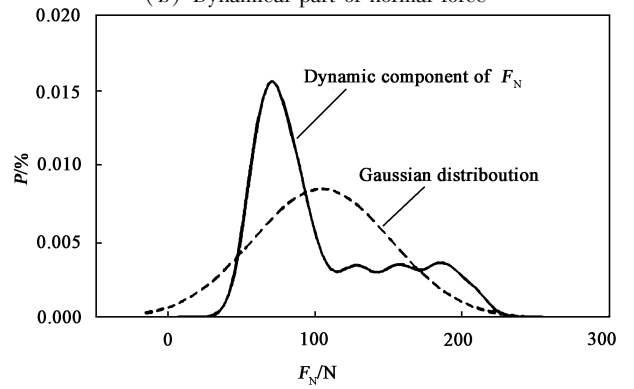
(a) Dynamical part of friction force



(b) Dynamical part of normal force



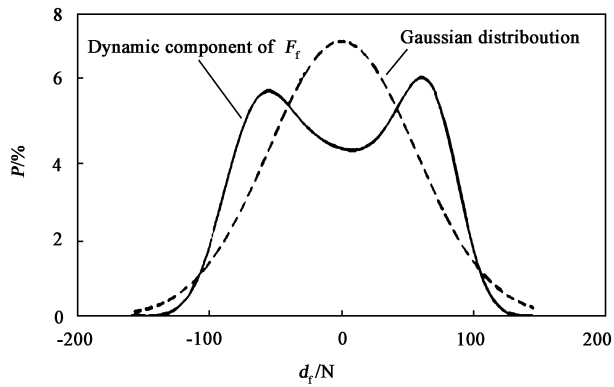
(c) Friction force



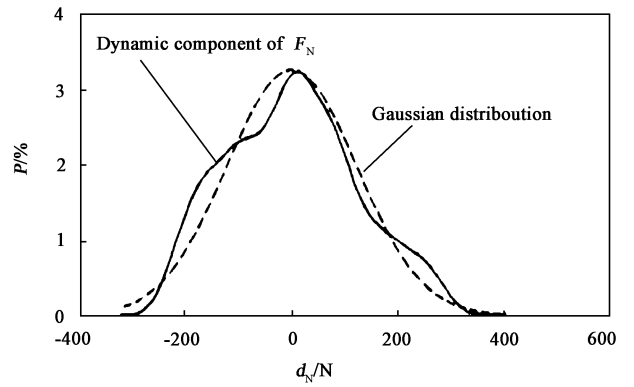
(d) Normal force

Fig. 7 Probability function of contact force under non-squealing conditions

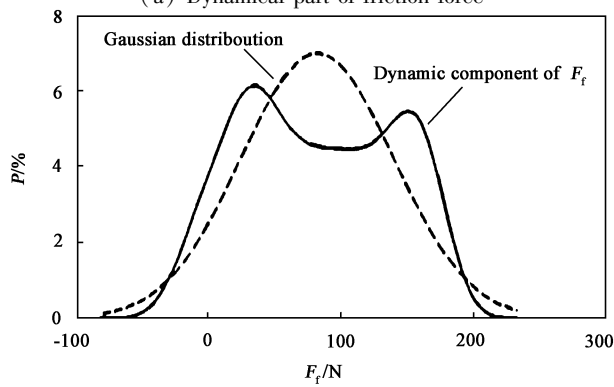
图 7 无尖叫时段的动态摩擦接触力的概率密度函数



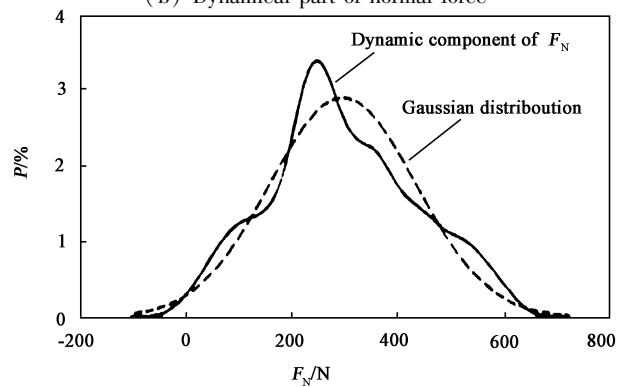
(a) Dynamical part of friction force



(b) Dynamical part of normal force



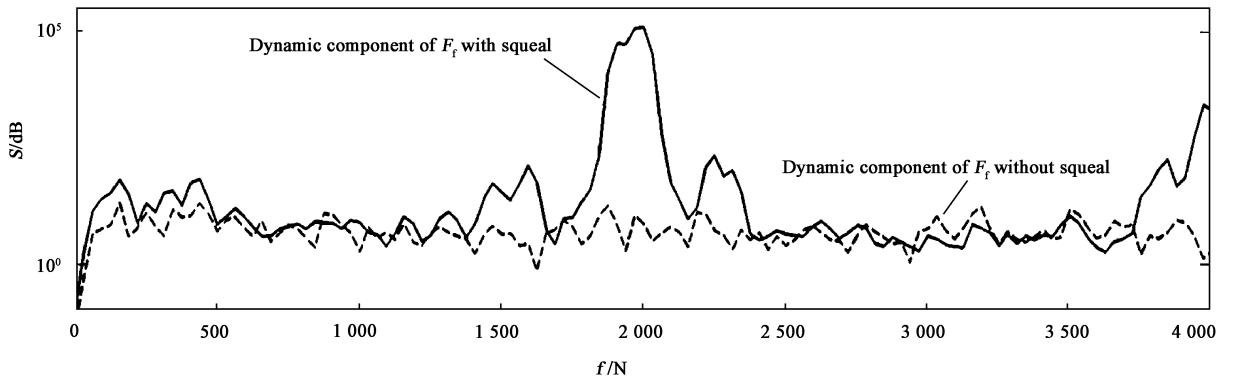
(c) Friction force



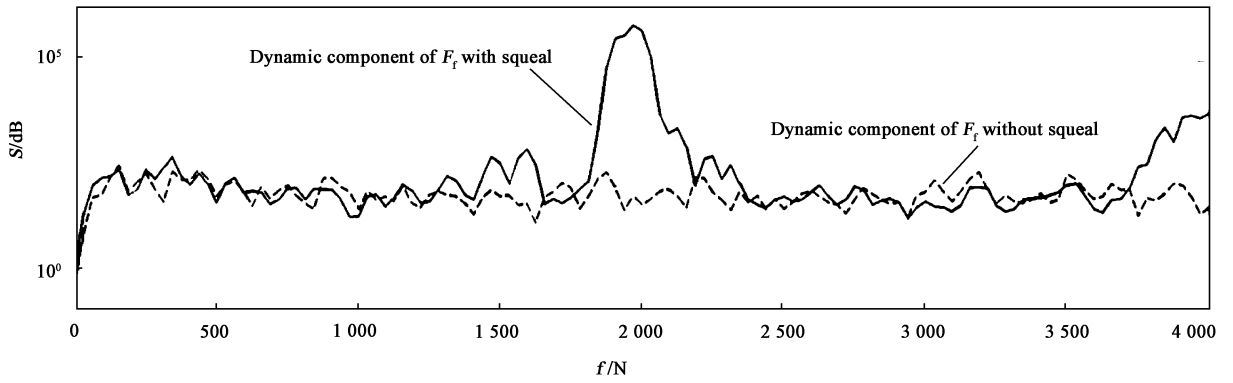
(d) Normal force

Fig. 8 Probability function of contact force under squealing conditions

图 8 尖叫时段的动态摩擦接触力的概率密度函数



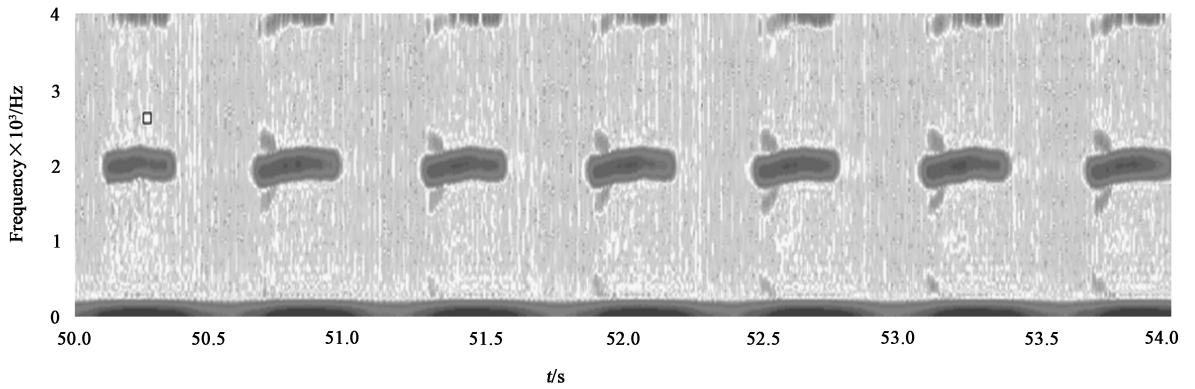
(a) Spectral density function of normal force



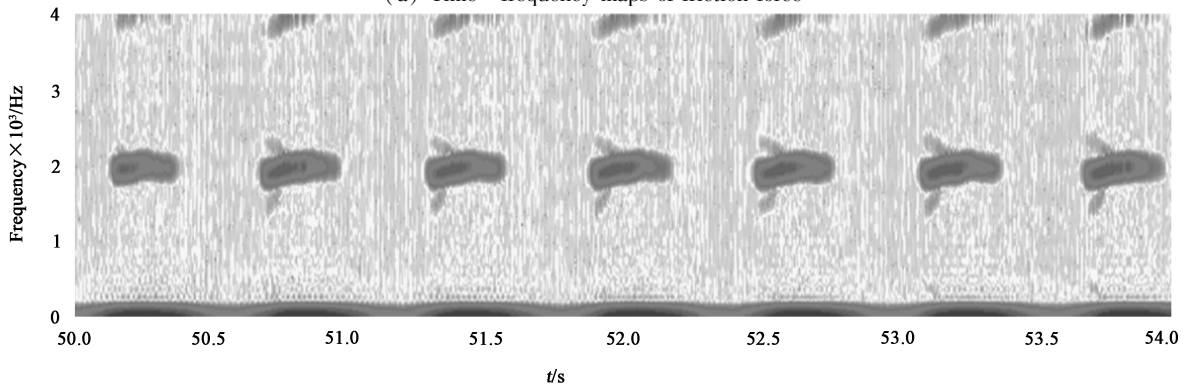
(b) Spectral density function of friction force

Fig. 9 Spectral density function of contact force under non - squealing and squealing conditions

图9 有无摩擦尖叫时的摩擦力与法向力动态分量的功率谱密度函数



(a) Time - frequency maps of friction force



(b) Time - frequency maps of normal force

Fig. 10 Time - frequency maps of friction force and normal force

图10 摩擦力与法向力的时频分析图

貌导致的<sup>[1]</sup>;②有摩擦尖叫时,摩擦力和法向力动态分量主要集中在尖叫频率(约为2 000 Hz)附近的很窄的频带内(1 700 ~ 2 200 Hz),呈现显著的窄带信号特征.这显然是由于系统在摩擦尖叫时产生了显著的模态耦合所致<sup>[1-4,14-15]</sup>.

#### 2.2.4 时频特性分析

图10所示为7次间歇性尖叫时摩擦力和法向力的时频特性图.由图10分析发现:①7次摩擦尖叫间歇性发生,每次尖叫的持续时间基本相同,呈现周期性的特点;②摩擦力和法向力的主频率约为2 000 Hz,但在尖叫期间主频率是不断变化的,呈先逐渐增大后逐渐减小的趋势;③摩擦力和法向力都呈现同样的时频特性,说明制动盘和销之间由于摩擦作用产生了明显的模态耦合的现象,并且在多次尖叫过程中出现约为1 400 Hz和2 500 Hz的两个频率在尖叫初期逐渐向2 000 Hz频率靠近耦合成一个频率的现象.

### 3 结论

a. 制动盘的端面跳动引发间歇性摩擦尖叫,动态摩擦力和法向力也同步发生高频波动,并激发系统的摩擦噪声辐射.

b. 无摩擦尖叫时的摩擦力和法向力的动态分量呈对称非高斯分布,而原始信号则为非对称非高斯分布;有摩擦尖叫时,摩擦力的动态分量和原始信号呈对称非高斯分布,而法向力的动态分量接近于高斯分布,原始信号则为微不对称非高斯分布.

c. 功率谱密度函数分析和时频分析表明,无摩擦尖叫时的摩擦力和法向力的动态分量为典型的白噪声随机过程;有摩擦尖叫时的摩擦力和法向力动态分量为窄带高频信号,源于系统的模态耦合.

#### 参考文献:

[1] Adnan Akay. Acoustics of Friction [J]. Journal of Acoustical Society of America, 2002, 111 (4): 1 525 - 1 548.

[2] N M Kinkaid, O M O' Reilly, P Papadopoulos. Review of automotive disc brake squeal [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 267 (1): 105 - 166.

[3] Norbert P. Hoffmann and Lothar Gaul. Friction induced vibrations of brakes: research fields and activities [J]. SAE Paper, 2008 (1): 579.

[4] Cantoni Carlo, Cesarini Riccardo, Mastinu Giampiero, et al. Brake comfort - a review [J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47 (8): 901 - 947.

[5] Ahmed ILM, S Leung P, Datta P K. Experimental investigations

of disc brake friction [J]. SAE Paper, 2000 (1): 2 778.

[6] Liang S, Chen G X, Dai H Y, et al. Experimental study on the friction characteristics of four vehicles brake materials [J]. Lubrication engineering, 2006 (3): 62 - 64 (in Chinese) [梁爽, 陈光雄, 戴焕云, 等. 四种车辆制动闸瓦材料摩擦特性试验研究 [J]. 润滑与密封, 2006 (3): 62 - 64].

[7] Degenstein T, Winner H. Dynamic measurement of the forces in the friction area of a disk brake during a braking process [J]. Proceedings of FISITA World Automotive Congress, October, 2006 in Yokohama, Japan.

[8] R T Spurr. A theory of brake squeal, proceedings of the automobile division [J]. Institution of Mechanical Engineers, 1961 (1): 33 - 52.

[9] W Woytek Tworzydło, Osama N Hamzeh, Wiesław Zaton, et al. Friction - induced oscillations of a pin - on - disk slider: analytical and experimental studies, Wear 236, 1999: 9 - 23.

[10] A Tuchinda, N P Hoffmann, D J Ewins, et al. Mode lock - in characteristics and instability study of the pin - on - disc system, 2001 IMAC XIX - 19th International Modal Analysis Conference.

[11] A Tuchinda, D J Ewins, N Hoffman. Effect of pin finite width on instability of pin - on - disc systems, 2002 IMAC - XX: Conference & Exposition on Structural Dynamics.

[12] R Allgaier, L Gaul, K Willner, et al. A study on brake squeal using a beam - on - disc model, 2002 IMAC - XX: Conference & Exposition on Structural Dynamics.

[13] W Liu, D J Ewins, E Petrov. Frequency response of an unstable pin - on - disk system, 2005 IMAC - XXIII: Conference & Exposition on Structural Dynamics.

[14] Chen G X, Shi X Y. Study on changes of the friction force during forming friction - induced noise [J]. Lubrication Engineering, 2003 (4): 43 - 45, 48 (in Chinese) [陈光雄, 石心余. 摩擦噪声发生过程中摩擦力变化的研究, 润滑与密封, 2003 (4): 43 - 45, 48].

[15] Chen G X, Zhou Z R. Based on wavelet transform study on coupling mechanism of friction noise [J]. Tribology, 2003, 23 (6): 524 - 528 (in Chinese) [陈光雄, 周仲荣. 基于小波变换的摩擦噪声模态耦合机理研究 [J]. 摩擦学学报, 2003, 23 (6): 524 - 528].

[16] Beloiu D M, Ibrahim R A. Analytical and experimental investigations of disc brake noise using the frequency - time domain [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2006, 13 (1): 277 - 300.

[17] Zhang G H, Zhang W J, Xue P X. Wavelet analysis basics [M]. Northwestern Polytechnical University Press, 2006 (in Chinese) [张国华, 张文娟, 薛鹏翔. 小波分析基础 [M]. 西北工业大学出版社, 2006].

[18] Gao Z, Yu X H. Principles and applications of wavelet analysis toolbox [M]. National Defence Industry Press, 2004 (in Chinese) [高志, 余啸海 编著. Matlab 小波分析工具箱原理与应用 [J]. 国防工业出版社, 2004].