

摩擦引起的振动和噪声的研究现状与展望

张立军^{1,2}, 刁 坤^{1,2}, 孟德建^{1,2}, 庞 明^{1,2}

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

摘要: 以典型的制动尖叫为例, 针对摩擦引起的振动和噪声问题从试验研究与分析、发生机理与理论、建模方法与仿真 3 个方面对国内外的研究进展进行了综述. 在分析讨论主要研究困难和前期工作缺陷的基础上提出考虑系统参数的随机性、开展摩擦噪声不确定性研究的建议.

关键词: 摩擦振动; 摩擦噪声; 制动尖叫; 不确定性

中图分类号: U463.51

文献标志码: A

Friction-induced Vibration and Noise Research: the Status Quo and Its Prospect

ZHANG Lijun^{1,2}, DIAO Kun^{1,2}, MENG Dejian^{1,2}, PANG Ming^{1,2}

(1. Clean Energy Vehicle Engineering Center, Shanghai 201804, China; 2. College of Automotive Studies, Shanghai 201804, China)

Abstract: A comprehensive technical review on friction-induced vibration and noise is conducted from the aspects of experimental analysis, generation mechanisms, modeling methods and prediction by taking the automotive brake squeal as an example. On the basis of a discussion on difficulties and shortcomings of the former research, a proposal was put forward for an uncertainty research on frictional oscillation and acoustics by taking into account the stochastic parameters.

Key words: friction-induced vibration; friction-induced noise; brake squeal; uncertainty

摩擦引起的振动和噪声是机械学领域中具有较大学科深度与难度的课题, 研究时间长、涉及学科多^[1], 也是机械工程学科的研究前沿与重大科学问题之一^[2], 多年来研究热度持续不减. 其中, 制动器摩擦噪声作为一种非常典型的摩擦振动和噪声现象, 其研究进展基本体现了摩擦振动和噪声领域的

最新进展.

制动器是包括汽车在内的各种交通工具与军用装备的核心部件之一. 摩擦作用引起的各种振动与噪声问题严重影响交通工具的行驶安全性、舒适性以及环保性. 其中, 制动尖叫以频率高(1~16 kHz)、强度大(高达 100 dBA)而著称, 常发于摩托车、汽车、列车、轨道交通车辆以及飞机的制动器, 导致了巨大经济损失. 根据 2002 年世界著名咨询公司 J. D. Power 的调查报告, 在用户对汽车制动器的申诉中, 60% 以上归咎于制动尖叫^[3]. 北美地区每年大约有 10 亿美元被用于解决制动器振动与噪声问题^[4], 而摩擦材料生产商每年 50% 以上的资金也被用于解决相关问题^[5]. 因此, 制动尖叫控制历来是制动器研发的重点内容.

最早有关汽车制动器的摩擦尖叫研究可以追溯到 20 世纪 30 年代. 几十年的研究尽管取得了丰富的成果, 但仍未认清制动尖叫的发生机理, 亦未形成完善的控制手段. 本文针对摩擦振动和噪声问题, 以典型的制动尖叫为例, 从试验研究与分析、发生机理与理论、建模方法与仿真 3 个方面对国内外研究进展进行综述, 并在讨论的基础上提出未来的研究建议.

1 试验研究与分析

试验是进行制动尖叫研究的最基本途径, 有助于了解和把握制动尖叫的根本特征. 试验研究一般包括整车道路与台架试验. 其中, 台架试验广泛采用惯性测功台架试验方法. 目前, 台架试验主要应用欧洲 AK 噪声台架试验程序^[6-7] 和美国 SAE J2521 程序^[8]. 为便于观测分析, 激光多普勒测振仪、激光散斑干涉仪^[9-12] 等非接触式设备被用来测量尖叫时制动器的变形分布模式.

大量试验研究发现, 制动尖叫试验存在以下特

收稿日期: 2012-02-07

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

第一作者: 张立军(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为车辆振动噪声分析与控制.

E-mail: tjedu_zhanglijun@tongji.edu.cn

点^[13]:①制动尖叫再现困难,试验结果可重复性差;②同一制动器在相同的工况下尖叫的发生具有随机性;③尖叫的发生与否、频率及其分布以及与试验条件的关系极其复杂,极具不确定性.这种制动尖叫现象的随机性在很多综述性文献^[14-21]中也都有提及,这充分反映了制动尖叫问题的复杂性.

1.1 从振动力学角度开展的试验分析

早期的尖叫试验研究主要从振动力学角度开展.文献[22-24]通过试验研究发现,制动尖叫可能源于制动器各个部件之间的模态耦合,耦合模式主要表现为制动盘的偶数节径面外模态与制动块的弯曲模态的耦合.文献[18, 25-27]验证了尖叫制动盘的节径式面外模态,而且指出了制动块的弯扭组合振动模式.与此不同,Akebono公司的试验发现制动尖叫主要与制动盘的面内模态有关,而非面外模态^[28-29],Dunlap等^[30]也持相同的观点.但是,美国福特的Chen等^[31-32]却认为面内模态与面外模态的耦合才是尖叫的关键原因,但也有人认为制动块共振是尖叫的主要原因^[33-34].

国内从20世纪90年代起陆续开展鼓式制动器和盘式制动器尖叫试验研究^[35-39],研究主要从制动器及其关键零部件结构模态试验与分析、尖叫特性以及阻尼效应方面开展,但基本都属于跟踪性研究,结论也基本与国外类似.

从振动力学角度进行的试验研究基本认为制动尖叫来自于系统的耦合共振,不同的制动器可能存在不同的共振模式.但是,共振的激励来源、不同共振模式的决定因素以及与摩擦之间的耦合作用机制等问题仍然模糊不清.

1.2 从摩擦学角度开展的试验分析

一般的研究认为,摩擦系数越大尖叫的倾向性越大^[22],但是有研究者认为摩擦系数与相对速度为负斜率时比恒定摩擦系数时更易尖叫^[23],而也有人认为摩擦系数随压力的变化比随速度的变化更重要^[28],莫衷一是.因此,相关研究逐渐从简单的摩擦外特性深入到摩擦学领域.

早在1999年,Allied-Signal公司的Rhee等^[40]通过试验发现,摩擦碎屑经由压缩效应形成摩擦层并会使摩擦系数增加,达到一定的限值时就会发生制动尖叫.瑞典Uppsala大学的Jacobson教授团队从20世纪90年代开始制动器摩擦特性的试验研究^[41-49],系统分析了连续制动时制动尖叫与摩擦系数增长之间的关系^[41],有力验证了文献[22]和[40]的研究结论.他们还通过大量试验分析了制动块的

接触面积^[42]和不同固体润滑材料^[43-44]对制动尖叫的影响,提出了制动块接触突起的特征化方法^[45],分析了接触凸点的形成和磨损过程^[46],考察了湿度对尖叫的作用^[47]以及制动时摩擦力相对于制动压力的滞后效应^[48-49].

德国Braunschweig大学的Ostermeyer教授等^[50-51]则认为摩擦接触特性主要取决于制动块表面介观尺度上的摩擦层生成与破坏,并建立了与压力滞后的动态摩擦系数特性模型.与 k 类似,Ibrahim等^[52]通过试验发现法向力与摩擦系数是动态变化的,而且表现为非高斯随机过程,这种时变特性对系统的随机稳定性和制动尖叫具有重要影响^[53-54].

国内从摩擦学的角度进行试验研究的典型代表是陈光雄教授.他和他的团队详细测试分析了金属往复摩擦引起的振动噪声的时变特性、摩擦力特性、表面形貌变化特征以及相互作用关系^[55-60].虽然不是针对制动器进行直接试验分析,但是研究思路、方法和手段都是从摩擦学角度进行摩擦噪声机理研究的重要探索.

从摩擦特性角度开展的试验研究对于揭示尖叫的触发机理以及发展过程极其重要.但是由于摩擦接触面动态变化,加之制动器结构复杂,难以精确测量,同时在何种尺度下考虑表面形貌以及摩擦效应及其对尖叫的影响,仍然有待进一步探索.

2 发生机理与理论

从3方面阐述尖叫机理理论:①摩擦振动理论;②自锁-滑动与模态耦合理论;③摩擦激励与结构耦合统一理论.

2.1 摩擦不稳定振动理论

制动器主摩擦副的摩擦特性具有明显的系统依赖性,并具有动态时变的特点.众所周知,摩擦作用可能引起摩擦振子的粘滑振动或自激振动,可能是引起尖叫的原因.早期主要研究常数摩擦特性下的自激振动,或者具有摩擦系数-相对速度负斜率特性下的不稳定振动^[14-21],近年来开始研究更多种摩擦特性下的不稳定振动特性. Shin等^[61]基于2自由度非线性模型分析了制动盘的面外和面内运动特征,发现摩擦系数-相对速度负斜率特征导致了系统的不稳定. Awrejcewicz等^[62]则基于Stribeck摩擦特性模型分析了系统不稳定及混沌现象. Yang等^[63-64]考虑Popp-Stelter动摩擦特性,分析了3自由度非平滑动力学系统的周期运动、拟周期运动及混沌运

动特性。但是,仅仅考虑摩擦-速度特性的理论尚不足以全面解释制动尖叫产生的机理。

考虑到摩擦特性的复杂性,文献[48,65-66]从摩擦界面出发研究摩擦表层的变形、接触表面的粗糙度、第三体的动态特性等与摩擦噪声的内在联系,认为由于表面形貌使得摩擦力存在动态分量,从而激励结构发生共振与尖叫。Park等^[67]则指出,制动盘的端面跳动会引起摩擦力的周期性变化,进而引起振动不稳定与尖叫。Lee等^[68]分析制动尖叫信号的间歇性特征,认为制动盘不平度、支架刚度等因素使得摩擦力动态变化,进而触发系统振动而产生尖叫,呼应了Rhee等^[69]提出的“尖叫锤击激励假说”。

国内主要研究了摩擦-速度外特性引起的不稳定或自激振动。管迪华等^[35,36,70]提出的结构闭环耦合动力学模型,申军烽^[71]开展的鼓式制动器摩擦块接触及其对振动噪声的影响,都具有重要参考价值。吕红明等^[72]考虑制动盘表面的几何形貌,针对“盘-销”系统分析了表面形貌对摩擦间歇性尖叫的影响机理。另外,陈光雄等^[55-60,73-74]从摩擦学的角度开展了大量的试验研究与理论分析,基于试验发现了与文献[48-49]类似的摩擦力滞后于法向力的现象,提出时滞摩擦尖叫模型并分析了不稳定区域特性,认为法向接触的分离是尖叫的产生原因^[75-76]。

但是,目前从摩擦特性角度开展的机理研究基本都基于简单的外特性模型,而且严重忽视了摩擦特性的随机性与时变性,因此也不能完善解释具有复杂结构与摩擦特性的制动尖叫现象,也未能满足设计与预测的需求。

2.2 自锁-滑动与模态耦合

自锁-滑动(sprag-slip)理论^[77-78]主要用于解释制动器结构因素对制动尖叫产生的影响,后来开始出现联合考虑摩擦系数-相对速度负斜率与自锁-滑动联合作用的理论。Vayssi re等^[79]对制动盘尖叫与表面形状的关系进行了试验研究,发现摩擦接触角度对尖叫具有重要的影响。Sinou等^[80]建立了一种含非线性刚度的2自由度的自锁-滑动模型,应用中心流形定理分析了系统在平衡点附近的分岔行为。自锁-滑动理论虽然有助于解释针对摩擦块端部几何形状设计控制尖叫的效应,但是由于对问题的过多简化而具有明显局限性,不能用于实际部件的设计。

目前,模态耦合理论^[81-82]成为制动器尖叫机理的研究热点之一。Hamabe等^[83-84]提出了一种单质量2自由度的模型,解释了摩擦引起的模态耦合和

系统的不稳定性原理,还特别指出了系统阻尼的作用^[85]。Popp等^[86]基于由平移和扭转运动组成的单质量2自由度系统推导了系统不稳定的必要条件。Rusli等^[87]提出L形梁模型,应用模态耦合理论分析了梁的摩擦尖叫特性。Wagner等^[88]建立6自由度制动盘摆动模型,分析了哥氏力和摩擦力联合导致系统模态耦合而出现不稳定的问题。Ouyang等^[89]则采用多尺度方法研究了移动载荷作用下圆盘非线性耦合系统的参数振动。管迪华教授等^[70]提出的能量馈入的制动尖叫理论从根本上属于模态耦合机理。由于模态耦合理论只能作为一种频率域的线性化理论方法,不利于清晰解释尖叫发生的内在机理。

2.3 摩擦激励与结构耦合统一理论

在发现任何一种单独的机理都不能够完整地解释尖叫现象后,Ford公司的Chen^[90-91]提出了所谓的“统一理论”。该理论认为:①制动盘/块接触表面间的瞬时作用会产生冲击性激励;②不同的冲击激励与模态耦合的强弱组合都可能产生尖叫;③尖叫时可能产生不同于结构固有频率以及与振型不同的制动器变形分布特征。④以制动盘第1阶面内模态频率为限值,低频尖叫主要来源于制动盘的面外模态和钳体、支架、制动块等元件的模态耦合,而高频尖叫则主要来源于制动盘面外模态与制动块模态的耦合。该理论其实是在模态耦合的基础上增加了摩擦力的激励作用。

Zhang等^[92]认为一些主要由制动盘面内模态和面外模态综合而成的整体模态会易于因摩擦力而激发面外振动,引起辐射尖叫。但Papinniemi等^[93]却发现制动盘的面内周向模态与面外模态分离后仍然会出现尖叫。由于制动盘受力的不对称,面内周向模态可能存在频率不同、相位不同、振型相同的二重裂分模态(doublet-mode splitting),并在摩擦力作用下裂分模态又重新耦合导致了不稳定。Mottershead等^[94]则认为动态摩擦系数随速度的变化导致了制动盘面内周向运动的不稳定,进而引起制动盘面外振动,且频率仍与面内周向模态频率基本一致。

Kinkaid等^[95]综合考虑摩擦特性、模态耦合、材料物理特性对面内模态引起制动尖叫的机理进行了探索,认为周向摩擦力的瞬间反向形成冲击,可能会激发起面内模态振动,并由于制动盘结构、接触状态的不对称和材料的泊松特性进一步引起制动盘的面外振动,乃至产生制动尖叫噪声。这些“统一”理论的研究思路体现了更强的系统观,开创了制动摩擦尖叫研究的新思路,但是仍然需要进一步深化。

3 建模方法与仿真

与机理分析采用简单模型不同,基于有限元的制动尖叫建模与分析方法可以考虑复杂的制动器几何形状与材料特性并进行预测与指导设计,成为工程领域应用研究的重点.目前主要是采用频率域复特征值法与时间域瞬态动力学分析方法.

3.1 复特征值法

复特征值法主要基于模态耦合理论,通过有限元建模提取系统复特征值和模态,利用特征值实部的符号与大小,分析系统是否不稳定以及判断尖叫的倾向性.例如,Chung等^[96]通过有限元复特征值分析指出制动尖叫的主要模态特征:①至少有2阶模态发生耦合;②耦合的模态中至少有1个是面外模态;③制动盘/块之间的面外模态和面内周向模态耦合更容易使系统不稳定.管迪华等^[36,97]基于有限元和模态综合方法建立了盘式制动器制动尖叫的摩擦耦合模型,利用复特征值分析计算子结构模态的贡献因子和馈入能量分析了子结构弹性振动对系统尖叫倾向的影响.

在制动器设计中,通过修改制动器零件的几何结构或材料特性可以分离耦合模态,消除不稳定.随着计算技术的进步,基于全模型刚度矩阵直接修改的复特征值法已成为近年主流的分析方法^[98-100].AbuBakar等^[101]通过建立制动块的磨损程度与制动压力、制动盘上接触点的旋转线速度、制动时间的关系特性分析了磨损对制动接触应力及系统复特征值的影响.Hassan等^[102]基于制动盘/块模型,研究了摩擦过程中热机耦合造成的温度升高、接触应力变化对复特征值的影响.Júnior等^[103]测量了制动块弹性模量和阻尼随温度的变化关系、制动块固有频率随磨损程度的变化关系以及摩擦副接触刚度随接触压力的变化特性等,并分析了它们对制动器复特征值的影响.

但是,复特征值法不能明确地指出产生制动尖叫的机理,而且线性化的假设缺乏对时变的载荷和材料特性等非稳态特征的考虑,常常出现不稳定频率的“过预测”和“欠预测”,限制了其预测精度与可靠性^[104].

3.2 瞬态动力学分析法

瞬态动力学分析法可以考虑制动过程中客观存在的大量非线性因素,通过仿真从初始状态到稳定状态的非线性瞬态过程的时间响应研究远离平衡位

置或非线性因素如何对系统的不稳定性(包括制动尖叫的发生、发展)产生作用,具有重大的应用前景.

Chargin等^[105]将制动盘/块之间的摩擦力定义为相对滑动速度的函数,发现系统出现不稳定并产生尖叫.Nagy等^[106-107]则基于试验数据确定了制动器摩擦系数与滑动速度及接触压力的关系,针对盘式制动器通过非线性瞬态分析研究了多个频率下的不稳定模态,其中4个频率与试验结果一致.Gordon等^[108]定义了立方非线性接触刚度,通过瞬态分析发现不稳定性随摩擦系数增加而增大.Sinou等^[109-110]也通过定义制动盘/块之间的立方非线性接触刚度,分析了盘式制动器的非线性瞬态特性,发现系统随着摩擦系数的变化产生周期解和拟周期解.Massi等^[111]对其设计的制动试验装置进行了ANSYS有限元建模,进行显式积分计算得到时域响应,利用频谱分析发现了倍频现象.Ouyang等^[112]则针对制动器模型,应用瞬态动力学方法研究了摩擦过程中的热机耦合对制动器尖叫影响.

瞬态分析法的缺点是需要过长的计算时间以及占用大量的磁盘空间,且数据难以直接用于设计修改.另外,因为制动尖叫的高频率,显式积分的时间步长就很小;而隐式积分虽然可以有更大的时间步长,但会衰减高频模态.Ouyang等^[113]采用复特征值分析法和瞬时动态分析方法研究制动尖叫,在模型和边界条件相同的情况下,利用不同的接触机理和积分方式,瞬态分析结果不尽相同,说明瞬态分析方法还有待完善.

4 讨论与展望

综合近80年来从动力学、摩擦学以及二者相结合的角度所开展的制动摩擦噪声研究成果,结合笔者课题组自行开展的前期研究,对深化摩擦振动和噪声的未来研究进行如下的讨论:

目前,国内外公认的制动摩擦尖叫的研究难点在于:①尖叫的发生具有明显的随机性与间歇性特点,不仅同一生产批次的制动器的尖叫发生存在很大的离散性,即使是同一制动器,其尖叫台架试验结果也具有明显的随机特征;②摩擦接触区域与接触力对于尖叫存在重要影响,但是它动态、时变、随机,难以精确测量与分析;③接触关系涉及的时间尺度宽、空间尺度大,建模与仿真难度大;④制动器等对象的结构复杂,影响因素众多,且各种参数具有分布特征,导致产品稳健设计困难.这些难点导致制动摩

擦尖叫的研究难以轻易取得理论上的重大突破。

虽然前期研究取得了显著成果,但是针对上述难点的研究存在明显的缺陷,主要表现在:

第一,试验研究都清楚地表明,制动尖叫的发生存在显著的随机性与间歇性特点,但是以前却将这一极其重要现象简单笼统地归结于制动工况的多样性以及制动器结构的复杂性,未予以足够的重视。文献[114-115]在前期研究中特别注意到:①不同的相同型号制动器的尖叫台架试验结果不同;②即使是同一个制动器试件,制动尖叫的发生也存在离散性,而且尖叫的噪声强度以及频率成分等也存在一定的差别。由此推测,可能是由于磨损或者热机耦合效应导致的摩擦接触作用的实时变化导致了这种制动尖叫的不确定性。

第二,前期的机理理论与数值计算建模与分析大都基于“系统参数完全理想可控”的确定性假设条件开展研究,所建立的动力学模型也是确定性的,几乎完全忽视了动态时变的摩擦特性以及随机不确定结构因素。而实际的制动器结构具有明显的随机性:①系统与组件的几何尺寸、材料特性以及连接关系的随机性;②由于摩擦磨损以及摩擦生热等效应导致的摩擦特性与接触压力分布等的随机性。因此,制动器实际上可以视为一个典型的随机结构系统,其动力学特性必然表现出随机性,包括制动摩擦尖叫。由此推想,可能正是由于前期理论是基于“确定性”的假设条件,所以不能完全解释具有“随机性”的制动尖叫现象,而各种基于“确定性”理论建立的模型也就难以满足准确预测的需求。

基于上述文献综述与讨论,笔者认为非常有必要基于“系统参数不完全理想可控”的“不确定性”假设研究摩擦尖叫的发生机理及其控制方法,从不确定性非线性动力学建模、系统耦合动力学行为分析、稳健设计方法以及台架试验研究等方面开展工作,进一步完善现有的摩擦噪声理论,为更加有效地控制制动器尖叫等摩擦尖叫现象提供理论支持。

参考文献:

- [1] 周仲荣,雷源忠,张嗣伟. 摩擦学发展前沿[M]. 北京:科学出版社,2006.
ZHOU Zhongrong, LEI Yuanzhong, ZHANG Siwei. Frontier of tribology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [2] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011—2020)[M]. 北京:科学出版社, 2010.
Engineering and Materials Science Division of NSFC. Strategy report of mechanical engineering discipline development (2011—2020)[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [3] Yang M, Blaschke P, Afaneh A H. A study of disc brake high frequency squeal and disc in-plane/out-of-plane modes[C]//SAE Paper. [S.l.]; SAE, 2003; 2003-01-1621.
- [4] Akay A. Acoustics of friction[J]. Journal of Acoustical Society of America, 2002, 111(4): 1525.
- [5] Abendroth H, Wernitz B. The integrated test concept: Dyno-vehicle, performance-noise[C]//SAE Paper. [S.l.]; SAE, 2000; 2000-01-2774.
- [6] Parimal M, Walter R, Fawzi, et al. Mojcar and Los Angeles city traffic vehicle testing: a comparison and analysis of subjective ratings and objective measurements [C]//SAE Paper. [S.l.]; SAE, 2002; 2002-01-2600.
- [7] 余卓平, 孟德建, 张立军. 基于道路和台架的制动器振动噪声试验方法研究[J]. 汽车技术, 2009(6): 1.
YU Zhuoping, MENG Dejian, ZHANG Lijun. Study on vibration and noise test methods for brake based on road and bench[J]. Automobile Technology, 2009(6): 1.
- [8] SAE. Standard J2521 Disc and drum brake dynamometer squeal noise matrix[S]. [S.l.]; Brake NVH Standards Committee, 2006.
- [9] Chen F, Brown G M. Recent advances in brake noise and vibration engineering using laser metrology [J]. Optical Engineering, 2003, 42(5): 1359.
- [10] MacPherson W N, Reeves M. Multipoint laser vibrometer for modal analysis[J]. Applied Optics, 2007, 46(16): 3126.
- [11] Marschner H, Reckwerth D. Innovative vibration measurement technology for brake development[J]. Automobil Technische Zeitschrift. 2008, 110(2): 1.
- [12] Krupka R, Ettemeyer A. Brake vibration analysis with three-dimensional pulsed ESPI[J]. Experimental Techniques, 2001, 25(2): 38.
- [13] Liu W M, Pfeifer J L. Introduction to brake noise & vibration [EB/OL]. [2011-12-01]. www.sae.org/events/bce/honeyuell-liu.pdf.
- [14] Hoffmann N, Gaul L. Friction induced vibrations of brakes; research fields and activities[C]//SAE Paper. [S.l.]; SAE, 2008; 2008-01-2579.
- [15] Chen F. Disc Brake Squeal; an Overview[C]//SAE Paper. [S.l.]; SAE, 2007; 2007-01-0587.
- [16] Kinkaid N M, O'Reilly O M, Papadopoulos P. Review of automotive disc brake squeal [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 267(1): 105.
- [17] Chen F, Abdelhamid M K, Blaschke P, et al. On automotive disc brake squeal Part III: Test and evaluation [C]//SAE Paper. [S.l.]; SAE, 2003; 2003-01-1622.
- [18] Papinniemi A, Joseph C S, Zhao J Y, et al. Brake squeal; a literature review[J]. Applied Acoustics, 2002, 63(4): 391.
- [19] Brooks P C, Nishiwaki M, Barton D C. Brake system noise and vibration; A review[C]//IMEchE International Conference on Braking. Leeds; [s.n.], 2002; 53-74.
- [20] Yang S, Gibson R F. Brake vibration and noise; reviews, comments, and proposals [J]. International Journal of Materials Product Technology, 1997, 12(4/5): 496.
- [21] Crolla D A, Lang A M. Brake noise and vibration-The state of the art[J]. Vehicle Tribology in Leeds-Lyon Tribology Series, 1991, 18: 165.

- [22] Felske A, Hoppe G, Matth H. Oscillations in squealing disc brakes-analysis of vibration modes by holographic interferometry[C]//SAE Paper. [S. l.]:SAE, 1978; 780333.
- [23] Murakami H, Tsunada N, Kitamura T. A study concerned with a mechanism of disc-brake squeal[C]//SAE Paper, [S. l.]:SAE, 1978; 841233.
- [24] Nishiwaki M, Harada H, Okamura H, et al. Study on disc brake squeal[C]//SAE Paper. [S. l.]:SAE, 1989; 890864.
- [25] Fieldhouse J D, Newcomb T P. The application of holographic interferometry to the study of disc brake noise [C]//SAE Paper. [S. l.]:SAE, 1993; 930805.
- [26] Fieldhouse J D, Newcomb T P. Double pulsed holography used to investigate noisy brakes [J]. Optics and Lasers in Engineering. 1996, 25(6):455.
- [27] Talbot C, Fieldhouse J D. Animations of a disc brake generating noise[C]//SAE Paper. [S. l.]:SAE, 2001; 2001-01-3126.
- [28] Ichiba Y, Nagasawa Y. Experimental study on brake squeal [C]//SAE Paper. [S. l.]:SAE, 1993; 930802.
- [29] Matsuzaki M, Izumihara T. Brake noise caused by longitudinal vibration of the disc rotor[C]//SAE Paper. [S. l.]:SAE, 1993; 930804.
- [30] Dunlap K B, Riehle M A, Longhouse R E. An investigative overview of automobile disc brake noise[C]//SAE Paper. [S. l.]:SAE, 1999; 1999-01-0142.
- [31] Chen F, Chen S E, Harwood P. In-plane mode/friction process and their contribution to disc brake squeal at high frequency [C]//SAE Paper. [S. l.]:SAE, 2000; 2000-01-2773.
- [32] Chen F, Chern J, Swayze J. Modal coupling and its effect on brakesqueal [C]//SAE Paper. [S. l.]:SAE, 2002; 2002-01-0922.
- [33] Saad A, Watany M, Abouel-Seoud S, et al. Passenger car disk brake squeal [C]//Proceedings of the International SAMPE Symposium and Exhibition. Anaheim; [s. n.], 1998; 1158-1169.
- [34] Watany M, Abouel-Seoud S, Saad A, et al. Brake squeal generation[C]//SAE Paper. [S. l.]:SAE, 1999; 1999-01-1735.
- [35] 管迪华, 朱新潮, 成波. 鼓式制动器结构振动噪声研究[J]. 汽车工程, 1993, 15(2):71.
GUAN Dihua, ZHU Xinchao, CHENG Bo. Study on structure vibration noise of drum brake[J]. Automobile Technology, 1993, 15(2):71.
- [36] 孙振华, 曾庆华, 蒋东鹰, 等. 盘式制动器制动尖叫的研究[J]. 汽车工程, 1999, 21(6):326.
SUN Zhenhua, ZENG Qinghua, JIANG Dongying, et al. Study on automotive disc brake squeal[J]. Automobile Technology, 1999, 21(6):326.
- [37] 王登峰, 王玉为, 黄海涛, 等. 盘式制动器制动尖叫的有限元分析与试验[J]. 汽车工程, 2007, 29(8):705.
WANG Dengfeng, WANG Yuwei, HUANG Haitao, et al. Finite element analysis and testing on disc brake squeal [J]. Automobile Technology, 2007, 29(8):705.
- [38] 侯俊, 过学迅. 汽车盘式制动器阻尼降噪试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(12):72.
HOU Jun, GUO Xuexun. Experimental analysis of brake squeal noise with use of damping insulator[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(12):72.
- [39] 贾宏禹, 曹献坤, 黄之初, 等. 关于粘弹性盘式制动器摩擦片的模态分析[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(9):60.
JIA Hongyu, CAO Xiankun, HUANG Zhichu, et al. Modal analysis on viscoelastic brake shoe of disc brake[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(9):60.
- [40] Rhee S K, Jacko M G, Tsang P H S. The role of friction film in friction, wear, and noise of automotive brakes[C]//SAE Paper. [S. l.]:SAE, 1990; 900004.
- [41] Bergman F, Eriksson M, Jacobson S. Influence of disk topography on generation of brake squeal[J]. Wear, 1999, 225/229(Part D): 621.
- [42] Bergman F, Eriksson M, Jacobson S. The effect of reduced contact area on the occurrence of disc brake squeals for an automotive brake pad[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers D, 2000, 214(5): 561.
- [43] Bergman F, Eriksson M, Jacobson S. The effect of Cu2S solid lubricant addition, and varying density, on the occurrence of brakes squeals for one low-metal, organic type brake pad[C]//Proceedings of the 17th Annual SAE Brake Colloquium and Engineering Display. Warrendale; SAE, 1999; 1999-01-3394.
- [44] Bergman F, Gudmand-Høyer L, Eriksson M, et al. The effect of Cu2S, PbS, Sb2S3 solid lubricants on the occurrence of brakes squeals for three automotive brake pad matrix types [C]//Proceedings of the Eighth International Conference on Tribology. Aarhus; [s. n.], 1998; 665-672.
- [45] Bergman F, Eriksson M, Jacobson S. Surface characterization of brake pads after running under silent and squealing conditions[J]. Wear, 1999, 232(2): 163.
- [46] Eriksson M, Lundquist A, Jacobson S. A study of the influence of humidity on the friction and squeal generation of automotive brake pads[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers D, 2001, 215(3): 329.
- [47] Eriksson M, Lord J, Jacobson S. Wear and contact conditions of brake pads; dynamical in situ studies of pad on glass[J]. Wear, 2001, 249(3/4): 272.
- [48] Eriksson M, Bergman F, Jacobson S. On the nature of tribological contact in automotive brakes[J]. Wear, 2002, 252 (1/2):26.
- [49] Eriksson M, Jacobson S. Friction behaviour and squeal generation of disc brakes at low speeds[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers D, 2001, 215(12): 1245.
- [50] Ostermeyer G P, Müller M. New insights into the tribology of brake systems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers D, 2008, 222(7): 1167.
- [51] Ostermeyer G P, Graf M. Mode coupling instabilities induced by a periodic coefficient of friction[C]//SAE Paper. [S. l.]:SAE, 2010; 2010-01-1687.
- [52] Ibrahim R A, Madhavan S, Qiao S L, et al. Experimental investigation of friction-induced noise in disc brake systems[J]. International Journal of Vehicle Design, 2000, 23(3/4): 218.
- [53] Qiao S L, Ibrahim R A. Stochastic dynamics of systems with friction-induced vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 223(1): 115.
- [54] Ibrahim R A. Friction-induced noise and related problems in automotive brakes[C/CD]//Recent Research Developments in Sound and Vibration. Kerala; [s. n.], 2002.
- [55] 陈光雄, 周仲荣. 金属往复滑动摩擦振动形成机理的实验研究与分析[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(6):425.

- CHEN Guangxiong, ZHOU Zhongrong. An experiment investigation on mechanism of generation of friction-induced vibration under reciprocating sliding[J]. *Tribology*, 2001, 21(6):425.
- [56] 陈光雄,周仲荣,黎红,等. 金属往复滑动摩擦噪声与摩擦表面形貌特征关系的研究[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(8):85.
CHEN Guangxiong, ZHOU Zhongrong, LI Hong, et al. Profile analysis related to friction-induced noise under reciprocating sliding conditions [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(8):85.
- [57] 陈光雄,石心余. 摩擦噪声发生过程中摩擦力变化的研究[J]. *润滑与密封*, 2003(4):43.
CHEN Guangxiong, SHI Xinyu. Study on changes of the friction force during forming friction-induced noise[J]. *Lubrication Engineering*, 2003(4):43.
- [58] 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.
CHEN Guangxiong, ZHOU Zhongrong. Investigation of the modal coupling mechanism of squeal generation based on wavelet transformation[J]. *Tribology*, 2003, 23(6):524.
- [59] 黄学文,董光能,周仲荣,等. TiNi 形状记忆合金的滑动摩擦噪声特性研究[J]. *噪声与振动控制*, 2005(6):44.
HUANG Xuewen, DONG Guangneng, ZHOU Zhongrong, et al. Performance of TiNi shape memory alloy on suppressing friction-induced vibration and squeal under sliding conditions [J]. *Noise and Vibration Control*, 2005(6):44.
- [60] 陈光雄,周仲荣. 摩擦振动的时频特性[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(2):1.
CHEN Guangxiong, ZHOU Zhongrong. Time-frequency characteristics of friction-induced vibration [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(2):1.
- [61] Shin K, Brennan M J, Joe Y G et al. Simple models to investigate the effect of velocity dependent friction on the disc brake squeal noise[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2004, 5(1): 61.
- [62] Awrejcewicz J, Olejnik P. Friction pair modeling by a 2-dof system: numerical and experimental investigations [J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2005, 15(6): 1931.
- [63] Yang F H, Zhang W, Wang J. Sliding bifurcations and chaos induced by dry friction in a braking system[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2009, 40(3): 1060.
- [64] Popp K, Stelzer P. Stick-slip vibrations and chaos [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, 1990, 332(1624): 89.
- [65] Massi F, Berthier Y, Baillet L. Contact surface topography and system dynamics of brake squeal[J]. *Wear*, 2008, 265(11/12): 1784.
- [66] Hammerström L, Jacobson S. Surface modification of brake discs to reduce squeal problems[J]. *Wear*, 2006, 261(11): 53.
- [67] Park J P, Choi Y S. Brake squeal noise due to disc run-out[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2007, 221(7): 811.
- [68] Lee L, Gesch E. Discussions on squeal triggering mechanisms-A look beyond structural stability[C]// SAE Paper. [S.l.]: SAE, 2009; 2009-01-3012.
- [69] Rhee S K, Tsang P H S, Wang Y S. Friction-induced noise and vibration of disc brakes[J]. *Wear*, 1989, 133(1): 39.
- [70] 朱新潮,管迪华. 鼓式制动器噪声的结构闭环耦合理论模型[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 1994, 34(2):25.
ZHU Xinchao, GUAN Dihua. Theoretical model for structure closed loop coupling of drum brake noise [J]. *Journal of Tsinghua University: Natural Science*, 1994, 34(2):25.
- [71] 申军峰. 鼓式制动器接触与摩擦不均匀及其影响的动态过程仿真[D]. 长春:吉林大学, 2009.
SHEN Junfeng. Dynamic simulation of uneven contact and friction process of drum brake and its effect on NVH[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [72] 吕红明,张立军,余卓平. 接触表面不平度对摩擦尖叫噪声的影响[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(5):473.
LV Hongming, ZHANG Lijun, YU Zhuoping. Effects of surface roughness on the friction-induced squeal noise[J]. *Tribology*, 2011, 31(5):473.
- [73] 陈光雄,周仲荣. 摩擦系数影响摩擦噪声发生的机理研究[J]. *中国机械工程*, 2003, 14(9):766.
CHEN Guangxiong, ZHOU Zhongrong. Study on the dependence of the squeal generation on friction coefficient[J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(9):766.
- [74] 陈光雄,周仲荣,谢友柏. 摩擦噪声研究的现状和进展[J]. *摩擦学学报*, 2000, 20(6): 478.
CHEN Guangxiong, ZHOU Zhongrong, XIE Youbai. Current state and progress of the research of friction-induced noise[J]. *Tribology*, 2000, 20(6): 478.
- [75] Chen G X, Zhou Z R. A self-excited vibration model based special elastic vibration model of friction systems and time delays between the normal and friction forces; a new mechanism for squealing noise[J]. *Wear*, 2007, 262(9/10): 1123.
- [76] 陈光雄,刘启跃,金学松,等. 时滞摩擦尖叫噪声模型的稳定性研究[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(4):58.
CHEN Guangxiong, LIU Qiyao, JIN Xuesong, et al. Stability of a squealing noise model with time delay[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(4):58.
- [77] Spurr R T. A theory of brake squeal[J]. *Proceedings of the Automobile Division, Institution of Mechanical Engineers*, 1961(1): 33.
- [78] Crisp J D C, Fosberry R A C, Holubecki Z, et al. Communications on Jarvis and Mills' paper[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1963, 178(32): 857.
- [79] Vayssière C, Baillet L, Linck V, et al. Influence of contact geometry and third body on squeal initiation; experimental and numerical studies [C/CD]//*Proceedings of World Tribology Congress III, Washington D C*, 2005.
- [80] Sinou J J, Thouverez F, Jezequel L. Analysis of friction and instability by the centre manifold theory for a non-linear sprag-slip model[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 265(3): 527.
- [81] North M R. Disc brake squeal[C/CD]//*IMEchE Conference on Braking of Road Vehicles, C38/76*. London: [s. n.], 1976.
- [82] Liles G D. Analysis of disc brake squeal using finite element methods[C]//SAE Paper. [S.l.]: SAE, 1989; 891150.
- [83] Hamabe T, Yamazaki I, Yamada K et al. Study of a method for reducing drum brake squeal[C]//SAE Paper. [S.l.]: SAE, 1999; 990144.
- [84] Hoffmann N, Fischer M, Allgaier R, et al. A minimal model

- for studying properties of the mode-coupling type instability in friction induced oscillations [J]. *Mechanics Research Communications*, 2002, 29(4):197.
- [85] Hoffmann N, Gaul L. Effects of damping on mode-coupling instability in friction induced oscillations[J]. *ZAMM*, 2003, 83(8): 524.
- [86] Popp K, Rudolph M, Kroger M, et al. Mechanisms to generate and to avoid friction induced vibrations[J]. *VDI-Berichte*, 2002(1736): 1.
- [87] Rusli M, Okuma M. Squeal Noise Prediction in dry contact sliding systems by means of experimental spatial matrix identification[J]. *Journal of System Design and Dynamics*, 2008, 2(2): 585.
- [88] Wagner U V, Schlagner S. On the origin of disk brake squeal [J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2009, 51(1/2): 223.
- [89] Ouyang H J, Mottershead J E. Optimal suppression of parametric vibration in discs under rotating frictional loads[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2001, 215(1): 65.
- [90] Chen F. On automotive disc brake squeal- Part I: Mechanisms and causes[C]//SAE Paper. [S. l.]: SAE, 2003: 2003-01-0683.
- [91] Chen F. Automotive disk brake squeal: an overview [J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2009, 51(1/2): 39.
- [92] Zhang F, Cheng L, Yam L H, et al. Modal characteristics of a simplified brake rotor model using semi-analytical Rayleigh-Ritz method[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 297(1/2): 72.
- [93] Papinniemi A, Zhao J, Stanef D, et al. An investigation of in-plane vibration modes in disc brake squeal noise [C]//SAE Paper. [S. l.]: SAE, 2005: 2005-01-3923.
- [94] Mottershead J E, Chan S N. Flutter instability of circular discs with frictional follower loads [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1995, 117(1):161.
- [95] Kinkaid N M, O'Reilly O M, Papadopoulos P. On the transient dynamics of a multi-degree-of-freedom friction oscillator: a new mechanism for disc brake noise [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 287(4/5): 901.
- [96] Chung C H J, Donley M. Mode coupling phenomena of brake squeal dynamics [C/CD]//SAE Paper. [S. l.]: SAE, 2003: 2003-01-1624.
- [97] Guan D H, Huang J C. The method of feed-in energy on disc brake squeal[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 261(2): 297.
- [98] Lou G, Wu T W, Bai Z. Disk brake squeal prediction using the ABLE algorithm[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 272(3/5): 731.
- [99] 陈光雄, 戴焕云, 曾京, 等. 踏面制动尖叫噪声的有限元分析[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(3): 203.
CHEN Guangxiong, DAI Huanyun, ZENG Jing, et al. Finite element analysis of the squeal propensity for a pad-wheel tread brake system[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3): 203.
- [100] 管迪华, 宿新东. 制动振动噪声研究的回顾、发展与评述[J]. *工程力学*, 2004, 21(4):150.
- GUAN Dihua, SU Xindong. An overview on brake vibrations and noise[J]. *Engineering Mechanics*, 2004, 21(4):150.
- [101] AbuBakar A R, Ouyang H J, James S, et al. Finite element analysis of wear and its effect on squeal[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2008, 222(7): 1153.
- [102] Hassan M Z, Brooks P C, Barton D C. A predictive tool to evaluate disk brake squeal using a fully coupled thermo-mechanical finite element model[J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2009, 51(1/2): 124.
- [103] Júnior M T, Gerges S N Y, Jordan R. Analysis of brake squeal noise using the finite element method: A parametric study[J]. *Applied Acoustics*, 2008, 69(2): 147.
- [104] Ouyang H J, Nack W V, Yuan Y, et al. Numerical analysis of automotive disc brake squeal: A review [J]. *International Journal of Vehicle Noise and Vibrations*, 2005, 1(3/4): 207.
- [105] Chargin M L, Dunne L W, Herting D N. Nonlinear dynamics of brake squeal[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1997, 28(1): 69.
- [106] Nagy L I, Cheng J, Hu Y. A new method development to predict brake squeal occurrence [C]//SAE Paper. [S. l.]: SAE, 1994: 942258.
- [107] Hu Y, Nagy L I. Brake squeal analysis using non-linear transient finite element method [C]//SAE Paper. [S. l.]: SAE, 1997: 971510.
- [108] Gordon J T, Liu S Y, Ozbek M. A nonlinear model for aircraft brake squeal analysis: stability analysis and parametric studies [J]. *Journal of Aircraft*, 1998, 35(4): 631.
- [109] Sinou J J, Coudeyras N, Nacivet S. Study of the nonlinear stationary dynamic of single and multi-instabilities for disk brake squeal [J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2009, 51(1-2): 207.
- [110] Sinou J J. Transient non-linear dynamic analysis of automotive disc brake squeal—on the need to consider both stability and non-linear analysis [J]. *Mechanics Research Communications*, 2009, 55(3): 207.
- [111] Massi F, Bailleb L, Giannin O, et al. Brake squeal: linear and nonlinear numerical approaches[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(6): 2374.
- [112] Ouyang H J, AbuBakar A R, Li L. A combined analysis of heat conduction, contact pressure and transient vibration of a disk brake[J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2009, 51(1/2): 190.
- [113] AbuBakar A R, Ouyang H J. Complex eigenvalue analysis and dynamic transient analysis in predicting disc brake squeal[J]. *International Journal of Vehicle Noise and Vibrations*, 2006, 2(2): 143.
- [114] 唐扬扬. 热机耦合效应对盘式制动器尖叫的影响分析[D]. 上海: 同济大学, 2011.
TANG Yangyang. Influence of thermo-mechanical coupling effect on disc brake squeal[D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [115] 王瑞. 接触状态对汽车鼓式制动器制动尖叫的影响研究[D]. 上海: 同济大学, 2011.
WANG Rui. Contact analysis and its effect on brake squeal of drum brake[D]. Shanghai: Tongji University, 2011.