

# 盘式制动系统摩擦动力学研究进展

王靖岳<sup>1,2</sup>, 王同义<sup>1</sup>, 吕坤<sup>1</sup>, 王军年<sup>2</sup>

1. 沈阳理工大学汽车与交通学院, 沈阳 110159

2. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025

**摘要** 基于国内外关于盘式制动器的相关研究,总结了常用的盘式制动器动力学模型和盘式制动器振动研究方法,介绍了多种模型和研究方法的应用范围、优缺点等进行了。从优化制动器结构、改变制动器参数、主动控制等方面分析了制动摩擦噪声的控制措施,从不确定性条件下的研究方法、新材料、新技术等方面展望了盘式制动器的未来研究方向。

**关键词** 盘式制动器;非线性;模型;噪声;噪声抑制;摩擦

制动系统的功用是使汽车以适当的减速度降速行驶直至停车;在下坡行驶时,使汽车保持适当的稳定车速;使汽车可靠地停在原地或坡道上<sup>[1]</sup>。目前,汽车所用摩擦制动器分为盘式和鼓式2大类。盘式制动器与鼓式制动器相比具有以下优点:(1)热稳定性好;(2)制动力矩与行进方向无关;(3)易于设计双回路制动系;(4)制动衬块上压力分布均匀,磨损均匀;(5)尺寸小,质量轻,散热性好;(6)衬块和制动盘之间间隙小,缩短制动协调时间。因此,盘式制动器在乘用车上得到广泛的应用,其结构如图1所示。但制动过程中不时发生的振动和噪声不仅影响了车辆的乘坐舒适性,还有可能降低制动系统效能并引发其他故障。基于降低盘式制动系统的摩擦振动噪声的动力学分析具有

重要意义<sup>[2]</sup>。因为汽车制动系统是个典型的干摩擦系统,所以干摩擦研究理论是制动器研究的核心与基础。

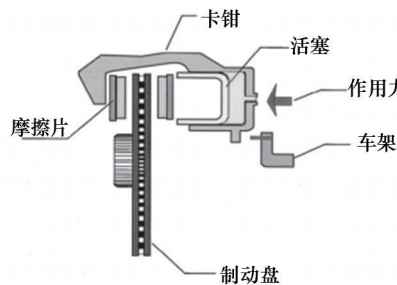


图1 盘式制动器结构示意图

收稿日期:2022-01-09;修回日期:2022-03-06

基金项目:汽车仿真与控制国家重点实验室开放基金项目(20191203);辽宁省自然科学基金项目(2020-MS-216)

作者简介:王靖岳,教授,研究方向为车辆系统动力学与控制,电子信箱:abswell@126.com

引用格式:王靖岳,王同义,吕坤,等.盘式制动系统摩擦动力学研究进展[J].科技导报,2023,41(10):106-114;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.10.010

## 1 干摩擦研究现状

1931年, Hartog<sup>[3]</sup>建立了理想干摩擦模型, 开启了对干摩擦运动学的研究。1939年, Bowden 和 Leben<sup>[4]</sup>创造性地提出黏-滑运动的概念之后, 黏-滑运动与摩擦运动系统的非线性特性之间的关系不断被深入研究。Stelter<sup>[5]</sup>基于单质量块和双质量块传送带模型探究了干摩擦作用下系统黏-滑运动的分岔行为和混沌。Hetzler 等<sup>[6]</sup>建立单质量传送带模型并引入 strbeck 摩擦, 研究了阻尼、摩擦系数等参数对系统稳定性与分岔特性的影响, 并以汽车盘式制动系统搭建实验设备验证了结果的合理性。Li 等<sup>[7]</sup>通过单质量块传送带模型研究了摩擦系统的稳定极限环与混沌行为。Johannessen 等<sup>[8]</sup>在对油井钻头的黏-滑运动进行研究时发现, 当系统最大静摩擦力大于动摩擦力时, 黏-滑运动发生。丁千等<sup>[9]</sup>系统地介绍了机械系统摩擦动力学的近期研究状况, 将多种摩擦模型进行归纳、分类, 并介绍了摩擦动力学在噪声抑制、摩擦耗能、振动控制等方面的研究现状。

## 2 盘式制动器动力学模型

干摩擦理论支持了制动系统动力学研究的发展。在盘式制动系统研究中, 研究者们根据不同研究方向和重点, 提出一系列盘式制动器动力学模型。

### 2.1 摩擦块-传送带模型

在盘式制动系统研究中简化摩擦块-传送带模型的应用最为广泛, 该模型将摩擦块和摩擦盘简化为如图2(a)的质量块和传送带形式, 结构简单, 可以很好地模拟出制动器的摩擦运动特性, 方便进行深层次分析。Shin 等<sup>[10]</sup>将汽车制动系统简化为2自由度传送带模型, 研究了系统阻尼和刚度对横向黏-滑运动特性的影响。Awerjcewicz 等<sup>[11]</sup>将盘式制动器简化为2自由度传送带模型, 用数值法对系统进行稳定性分析, 并进一步探究了系统黏-滑运动与汽车颤振之间的联系。韩秋实等<sup>[12]</sup>运用传送带模型, 在水平、竖直和转动3个方向上分析了系统的高频振动。用基础传送带模型探究摩擦系数的非线性变化特性与制动系统的振动、噪声的相关性, 但摩擦系数的变化并不能完全解释噪声现象。Spurr<sup>[13]</sup>研究发现摩擦系数为常数时, 斜撑也会导致制动颤振。由此, 一些学者改进了传送带模型, 发展出描述摩擦力和法向接触力之间耦合的解析模型。Sinou 等<sup>[14]</sup>提出了 sprag-slip 模型(图2(b))。张佳慧等<sup>[15]</sup>基于 sprag-slip 模型, 研究了参数在斜撑运动特性的作用。不同的是, 该研究将模型中制动压力设置为变量, 发现制压动力的变化规律影响系统的稳定性。唐进元等<sup>[16]</sup>基于改进的 sprag-slip 模型, 求解出系统临界稳定时的制动速度, 并研究了在不同的制动速度范围下, 系统刚度对系统颤振的影响。发现系统刚度在一定的制动速度范围内对系统颤振影响较大。

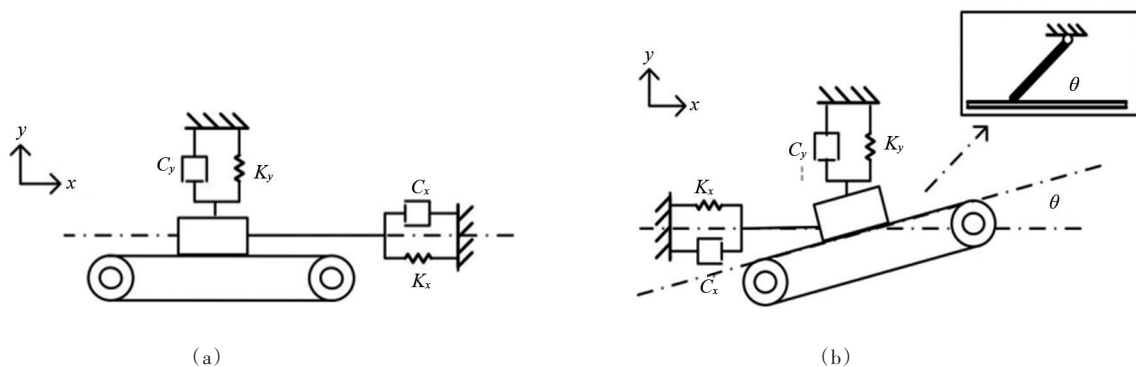


图2 传统摩擦块-传送带模型(a)与 sprag-slip 模型(b)

## 2.2 弹性制动盘模型

在制动器实际运动中,摩擦块与制动盘的面外振动存在耦合关系,而刚性传输带模型忽略了该问题。为了建立更加接近实际的模型,学者们提出了弹性制动盘模型。Beloiu 将<sup>[17]</sup>盘式制动器简化为一个均匀的转子和 2 个垫块,并采用 Mindlin 理论将相对较厚的转子和垫块模拟为一维连续梁,通过基于频率-时域的分析 and 实验研究了接触力的非线性和随机性对盘式制动系统低频和低频噪声产生的影响。Ouyang 等<sup>[18]</sup>研究了滑块在柔性圆盘表面的面内振动和圆盘的横向振动,探究了滑块和圆盘的刚度和阻尼对振动的不同影响。Liang 等<sup>[19]</sup>研究了极性正交各向异性旋转圆盘在固定集中横向荷载作用下的固有频率和稳定性,对旋转圆盘的自由振动进行了初步的固有频率和相应的振型分析,结果表明模比或泊松比较大的圆盘具有较高的固有频率,提高模比或降低泊松比均可改善系统的稳定性。Li 等<sup>[20]</sup>建立弹性圆盘模型,研究了一个 2 自由度的旋转质量块激励下的弹性薄环形圆盘的力学行为,发现振动中滑块与盘的分离现象。赵旖旎等<sup>[21]</sup>为了探究块与盘的耦合关系对系统振动的影响,基于柔性薄盘理论,建立了刚柔耦合模型,发现摩擦盘的弹性振动会对摩擦块运动产生强迫激励,并且在一定转速范围内盘-块将产生共振。

## 2.3 简化梁模型

Joe 等<sup>[22]</sup>将对摩擦盘振动的数值分析和实验结果进行对比,发现摩擦盘的振动主要是盘外缘的横向振动,而周向、径向振动可以忽略,由此提出了简化梁模型。贾尚帅等<sup>[23]</sup>基于建立的简化梁模型,通过数值和实验发现制动盘外缘的横向振动是系统失稳和产生尖叫的主要原因。李金录<sup>[24]</sup>将制动盘简化为一维环形梁模型,发现局部接触会改变系统的振动对称性,刚度非线性和摩擦作用会改变摩擦盘的振幅。

## 2.4 复杂模型

上述模型均为简单质量块-传送带模型或盘-块模型,对制动器结构进行了简化,忽略了制动器其他结构以及悬架、车轮对摩擦运动的影响。因此,很难模拟制动系统的真实运动状况,而仅仅用

来深入分析黏滑振动的发生机理及其振动特性。基于此,许多学者寻求更符合实际情况的制动系统复杂模型,希望能进行工程运用。Lee 等<sup>[25]</sup>首次建立了考虑动力传动系统转动、制动盘转动和制动器平移的三维 3 自由度制动颤振模型,以及与之等效的 3 自由度平移振动模型(图 3)。Crowther 等<sup>[26]</sup>首次提出将制动和驱动系统由摩擦界面耦合,建立 4 自由度扭转振动力学模型,然后研究各种工况下制动系统的黏-滑运动特性。何仁等<sup>[27]</sup>为了研究制动系统的控制策略,建立了 1/4 车辆制动系统模型,此模型在工程上也有所应用。Hochlenert<sup>[28]</sup>对一个现实 12 自由度盘式制动器模型进行非线性稳定性分析,并运用中心流行定律分析了响应次临界 Hopf 分岔的转折点。文献[29]~[31]利用模态综合理论,建立包含制动器结构的模态综合模型(图 4),从制动系统整体结构入手,通过分析摩擦面的摩擦耦合

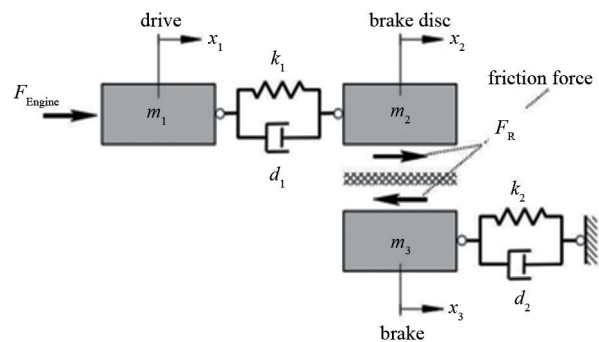


图3 3自由度制动颤振模型

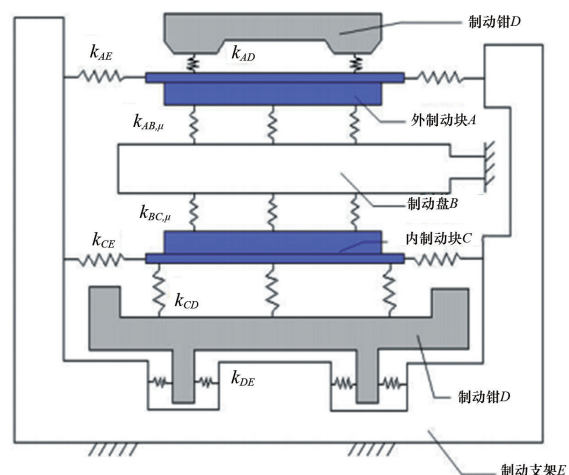


图4 模态综合模型

与各部件联接界面的弹性耦合对耦合模型的影响,可清晰地展现系统不稳定模态的子结构模态构成(如制动钳支架的某阶弹性模态),从而量化了对子结构进行修改的目标,找到了抑制制动噪声的有效途径。

### 3 盘式制动器振动研究方法

目前盘式的研究方法主要是解析方法、实验方法和基于有限元的数值分析法3种。以下对3种方法进行对比,并分析其各自的优缺点。

1) 解析方法。在制动噪声产生机理的探索阶段,解析法运用广泛。该阶段主要是利用解析法对简化的集中质量模型的摩擦运动特性进行计算与分析,由此来探究摩擦系统产生噪声的原因。其中平均法、多尺度法、小参数法是常用的解析方法。解析法具有初始条件明晰,推导过程严谨,分析透彻等优点。黏-滑运动机理、负斜率特性机理、自锁-滑动机理等经典噪声理论研究过程中,皆用到解析法。但是由于适用于解析法的分析模型过于简单化、理想化,不能模拟制动器实际运动状态,所得结论的应用也比较有限。

2) 实验方法。相比解析法,实验法能较为真实地模拟制动器的运动状况,从而得到可靠数据结果,常用方法有整车道路实验和制动器台架实验。Jang等<sup>[32]</sup>在实验中设置了多组摩擦副组合,研究动静摩擦因数之差对黏-滑运动的影响。张立军等<sup>[33]</sup>采用台架实验,研究了制动压力、发动机转速波动、动静摩擦因数差值对制动颤振的影响,并提出通过改变制动器参数来抑制颤振的方法。Eriksson等<sup>[34]</sup>运用实验法研究了接触表面材料的变化对摩擦系数的影响。Pan等<sup>[35]</sup>运用盘式制动器声振实验台,研究了摩擦系数、摩擦力波动系数和等效A声级3个参数在不同制动压力和制动初速度下的变化规律,结合对摩擦片微观特性的实验分析,从摩擦学角度揭示盘式制动器摩擦噪声的发生规律及机理。但实验中对摩擦界面数据的采集十分困难,只能简单模拟制动器低速下的摩擦运动状态,且所需要的测量仪器也十分昂贵,所以台架的模态测试居多。

3) 基于有限元的数值分析法。基于有限元模型(图5)的数值分析法可以真实地进行各种结构的仿真、材料的制动系统在多种工况下的运动状况。通过对仿真结果分析,可以预测样机的噪声特性,进而为制动器设计改进提供支持。与解析法和实验法相比,有限元数值分析法能够兼顾结果的可靠性和成本的低廉性。如今,国内外制动噪声的研究多基于有限元数值法开展。其中经典的研究工作有:1989年,Liles<sup>[36]</sup>首次使用基于有限元的复特征值分析方法研究制动噪声问题,通过求解具有尖叫倾向的不稳定模态,成功预测了制动尖叫的发生;1994年,Nagy等<sup>[37]</sup>首次使用基于有限元的瞬态动力学分析方法对制动尖叫进行预测,研究指出制动系统稳定性主要取决于制动盘与摩擦块之间的摩擦特性;2003年,Ouyang等<sup>[38]</sup>将汽车盘式制动器系统的振动与动态不稳定性转化为移动载荷问题,并运用解析法和数值法相结合的方式对简化制动器进行稳定性分析;2006年,AbuBakar等<sup>[39]</sup>分别运用复特征值分析法和瞬间动态分析法对制动器进行稳定性预测,通过对数据结果的分析,研究了这两种方法的相关性;2008年,Dai等<sup>[40]</sup>采用带摩擦耦合的增强型动力有限元模型,分析了盘式刹车片结构的减噪设计。

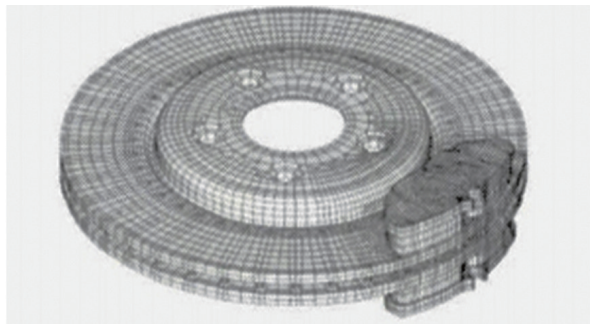


图5 盘式制动器有限元模型

近几年研究者不断对复特征值分析法和瞬间动态分析法的优缺点进行对比分析,并提出了很多弥补缺陷的方法。为了弥补复特征法的不足预测问题,广义模态振幅稳定性分析方法被开发出来,用于识别系统在摩擦引起的振动下的非线性动力响应的模态,并逼近准周期振动<sup>[41]</sup>。

## 4 制动器噪声抑制理论及方法

盘式制动系统的动力学研究,总体是为了研究噪声发生机理,展现系统参数、工作工况以及环境因素等对噪声的影响,为振动噪声的抑制提供理论依据。张立军等<sup>[42-43]</sup>详细地整理了近些年关于制动噪声机理的研究工作,把噪声机理相关理论分为摩擦特性理论、自锁-滑动理论、模态耦合理论和统一理论。以下从摩擦系数、阻尼、接触压力、制动系统的安装刚度、结构参数和新技术几个方面,介绍基于上述理论的噪声抑制方法的研究。

1) 摩擦系数。Beloiu<sup>[44]</sup>认为摩擦系数由一个常数加上随机成分构成,并得出摩擦系数与尖叫频率、横向振动和尖叫发生的相关性。发现尖叫发生总伴随大的随机摩擦系数。Culla等<sup>[45]</sup>利用蒙特卡洛法和概率统计法,随机组合了4800组摩擦系数,在制动盘杨氏模量和接触刚度不同的组合,寻找最优的参数组合。Gu等<sup>[46]</sup>利用测功仪实验数据和有限元法分析了工作参数变化对制动器噪声的间接影响,提出了一种基于蒙特卡罗抽样和粒子群算法的噪声优化方法,并对制动器衬片结构和材料参数进行了优化。

2) 阻尼。张芳等<sup>[47]</sup>、侯俊等<sup>[48]</sup>研究了阻尼对制动噪声的影响,通过数值分析和实验,指出制动背板附加阻尼层可以有效减少系统的不稳定模态。Ûradníek等<sup>[49]</sup>利用有限元技术研究了材料相关阻尼对盘式制动器动态不稳定的影响,数值分析表明系统的不稳定模式对圆盘和摩擦材料组件之间的阻尼比有显著的敏感性。Ataei等<sup>[50]</sup>研究利用新型压电叠堆脉冲阻尼器来控制摩擦系统的不稳定状态,其原理为通过对阻尼参数的调节,使系统混沌运动得到控制。但根据文献[42]可知,不合理的阻尼层,可能会影响系统的特性而增加不稳定性,而且阻尼建模和确定阻尼系数十分复杂,所以还没有学者从理论角度对增加阻尼的方法进行定量的分析,对于如何利用阻尼来实现噪声抑制还需要进一步研究<sup>[51]</sup>。

3) 接触压力及分布。制动器盘-块间的压力及分布直接影响摩擦力大小,所以关于接触压力及

分布的研究也十分重要。Dai等<sup>[40]</sup>指出制动块和盘相对滑动时,制动压力偏于制动块前端,会对制动噪声产生影响。为了改变压力分布,Papinniemi<sup>[52]</sup>对制动背板阻尼层进行了改进。Li等<sup>[53]</sup>对接触压力和接触刚度的关系进行了计算。隋鑫等<sup>[54]</sup>利用刚柔耦合模型,研究了盘块接触刚度比对Hopf分岔的影响,发现接触刚度比增大会导致Hopf分岔失稳点增大。

4) 制动系统的安装刚度。制动系统的安装刚度,即制动盘在车轮上、制动钳及摩擦片在壳体上的整体刚度对系统的振动频率以及抗磨损能力有着直接影响。盛勇生等<sup>[55]</sup>建立了制动钳钳体和制动钳支架的几何模型和有限元模型,计算了它们固有频率分别在20 kHz和18 kHz以下的各阶实模态和复模态,并对结构刚度分析和振动模态进行分析,得到不同工况下的结构刚度振动噪声情况。詹斌等<sup>[56]</sup>建立了有限元模型,利用复特征值分析技术,确定制动器的安装支架是主要的不稳定模态,通过增加支架的刚度消除了系统的不稳定状态。所以,通过合理匹配、优化设计制动器的安装刚度参数,可以有效抑制制动噪声的产生。

5) 结构参数。结构改进抑制噪声多是对一个存在噪声的制动器或者设计中的样机进行噪声预测和分析。其通常做法是对制动器进行模态分析,寻找出对噪声贡献较大的子结构,通过最优化法和逆向求解法等策略来优化结构从而改变其噪声频率。Eda等<sup>[57]</sup>利用遗传算法策略,对制动盘、活塞、支架、卡钳耦合界面的尖叫倾向灵敏度进行了研究。文献[58]~[61]对噪声制动器的制动卡钳、制动器支架、摩擦片和散热筋等结构进行了结构优化,并通过实验对比,取得了一定的噪声抑制效果。Zhu等<sup>[62]</sup>研究了刹车片的材料参数和形状对刹车片摩擦声的影响,仿真结果表明增大刹车片的杨氏模量可以有效抑制制动尖叫,但增大或减小刹车片的泊松比均不利于抑制制动尖叫的产生,改变刹车片的形状会导致不稳定模态的数量、频率发生变化。

6) 新技术。Osenin等<sup>[63]</sup>介绍了在车辆临近停止时,相互重叠系数与制动尖叫发生具有相关性,将盘式制动器的相互重叠系数提高到接近1.0,可

以有效抑制制动器尖叫的产生。Meehan等<sup>[64]</sup>采用模态耦合模型,研究了制动尖叫噪声的产生、增长、极限环幅值和抑制方法,并对制动尖叫过程中负斜率、斜撑和模态耦合等机理的影响进行了定量分析。摩擦片和制动盘的材料直接影响制动特性,通过运用新型材料来优化制动系统的性能一直是研究热点,文献[65]—[66]中研究者尝试调制各种复合材料来改善制动器的性能。

贾尚帅<sup>[67]</sup>应用基于微分几何法和线性二次型最优控制相结合的方法,设计了单输入单输出的非线性控制器,以便通过推迟2自由度盘式刹车系统Hopf分岔的临界速度,减少减速型刹车过程中的摩擦颤振,避免刹车啸叫。Budinsky等<sup>[68]</sup>提出了一种新型的原型系统,利用改变多活塞对置制动钳的前后活塞压力的方法自动抑制盘式制动器的尖叫声。新系统包括一个新型模块化四活塞制动钳,一个双通道制动驱动系统和一个先进的控制系统,当检测到尖叫声时,能够改变前后活塞压力比。修正后的压力比使得制动垫/制动盘界面处的压力中心位置发生变化,产生了新的制动系统动态参数,从而产生不同的尖叫声倾向。制动摩擦噪声抑制的主动控制多为理论与实验探究阶段,其实用性前景尚不明确。

## 5 结论

现在还没有统一的理论能解释制动器振动噪声产生的机理,也没有统一的理想仿真模型对制动器问题进行分析,模型各有优缺点,多根据研究侧重点选择。未来关于盘式制动器的研究,会结合现有的解析法、实验法、有限元法,并综合运用多学科知识,在研究方法、新型材料和主动控制技术不断寻求突破。

1) 不确定性分析研究。目前,国内外学者对制动噪声问题进行研究时,一般都是基于确定性分析方法,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。未来利用不确定性分析方法研究不确定因素对制动噪声影响的研究会不断出现,从而使研究更加逼近制动器真实工作状况,寻求抑制制动噪声的优化设计。例如,Sarrouy等<sup>[69]</sup>提出了一种随机特征值的计算方法,将制动器的摩擦系数和接触刚度设置为不确定参数,在处理制动器的随机工况时取得良好效果。吕辉等<sup>[70]</sup>基于区间不确定性分析,将制动器系统的摩擦系数、制动压力和磨损部件的厚度定义为不确定性参数,并运用区间参数进行描述,分析了不确定性条件下制动器系统稳定性变化的统计规律,为抑制制动噪声提供参考。但上述研究所考虑的参数较少,且参数均被处理为相互独立的概率变量或非概率变量。下一步需要完善制动系统其他参数(例如摩擦面微观结构和形貌参数、摩擦块阻尼、制动支架刚度等)对不确定性制动系统影响的研究,并建立变量相关的不确定研究方法。

2) 新材料。制动器摩擦副的材料直接影响制动器的性能,在制动器的研究中,新型材料的探索会不断进行。优秀的制动器材料需要有良好的耐磨性、耐热性、散热性、摩擦因数稳定性、强恢复性、质量轻等特点。例如,随着对制动器轻量化、长寿命要求的不断提高,部分车辆制动器的材料研究与应用逐渐由铸铁、铸钢转移到陶瓷基复合、铝基复合等材料上<sup>[71]</sup>。未来也可以采用先进技术对摩擦表面进行改性处理,减小动、静摩擦系数差值,从而减少黏-滑现象的产生,进而抑制摩擦制动低频噪声和振动的产生。

3) 新技术。在其他领域运用主动控制技术抑制振动噪声的研究很多。但由于制动系统噪声机理的复杂性,以及出现噪声情况的强随机性、不确定性,关于制动器的相关研究比较少,而且都处于实验和理论探索阶段。例如,利用具有压电效应的无铅压电陶瓷和半导体将制动时的振动能量转化为电能,电阻电路再以热的形式散发能量,电容电路可以改变有效刚度,从而达到抑制噪声产生的研究<sup>[72]</sup>。在未来,随着控制技术的进步和纯电动汽车的推广,制动噪声的主动控制技术会不断发展,最终实现工程运行。

## 参考文献 (References)

- [1] 王望予. 汽车设计[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2004: 257
- [2] Butlin T, Woodhouse J. A systematic experimental study of squeal initiation[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, 330(21): 5077-5095.
- [3] Hartog J P D. Forced vibrations with combined coulomb and viscous friction[J]. *Trans Asme*, 1931, 53(9): 107-115.
- [4] Bowden F P, Leben L. The nature of sliding and the analysis of friction[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical and Physical Sciences*, 1939, 169(938): 371-391.
- [5] Stelter K P. Stick-slip vibrations and chaos[J]. *Philosophical Transactions Physical Sciences & Engineering*, 1990, 332(1624): 89-105.
- [6] Hetzler H, Schwarzer D, Seemann W. Analytical investigation of steady-state stability and Hopf-bifurcations occurring in sliding friction oscillators with application to low-frequency disc brake noise[J]. *Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation*, 2007, 12(1): 83-99.
- [7] Li Y, Feng Z C. Bifurcation and chaos in friction-induced vibration[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2004, 9(6): 633-647.
- [8] Johannessen M K, Myrvold T. Stick-slip prevention of drill strings using nonlinear model reduction and nonlinear model predictive control[D]. South-Trondelag: Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [9] 丁千, 翟红梅. 机械系统摩擦动力学研究进展[J]. *力学进展*, 2013, 43(1): 112-131.
- [10] Shin K, Brenman M J, Oh J E, et al. Analysis of disc brake noise using a two degree of freedom model[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2002, 254(5): 837-848.
- [11] Awerjcewicz 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): 1931-1944.
- [12] 韩秋实, 许宝杰, 雷纪刚. 刹车装置摩擦噪声的动力学模型及理论分析[J]. *北京机械工业学院学报*, 1999, 14(2): 1-5.
- [13] Spurr R T. A theory of brake squeal[C]//*Proceedings of the Automobile Division*. London: Institution of Mechanical Engineers, 1961: 33-52.
- [14] 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 & Vibration*, 2003, 265(3): 527-559.
- [15] 张佳慧, 冯奇. Sprag-slip 现象实验设计及初探[J]. *噪声与振动控制*, 2008, 28(6): 92-96.
- [16] 唐进元, 熊兴波, 陈思雨. 含干摩擦的二自由度制动系统颤振分析[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(3): 178-181.
- [17] Beloiu D M, Ibrahim R A. Analytical and experimental investigations of disc brake noise using the frequency-time domain[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2006, 13(1): 277-300.
- [18] Ouyang H, Mottershead J E, Cartmell M P, et al. Friction-induced vibration of an elastic slider on a vibrating disc[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1999, 41(3): 325-336.
- [19] Liang D S, Wang H J, Chen L W. Vibration and stability of rotating polar orthotropic annular disks subjected to a stationary concentrated transverse load[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2002, 250(5): 795-811.
- [20] Li Z L, Ouyang H, Guan Z Q. Friction-induced vibration of an elastic disc and a moving slider with separation and reattachment[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 87(2): 1045-1067.
- [21] 赵旖旎, 丁千. 基于刚柔耦合模型的干摩擦制动系统振动分析[J]. *工程力学*, 2016, 33(3): 222-231.
- [22] Joe Y G, Cha B G, Sim H J, et al. Analysis of disc brake instability due to friction-induced vibration using a distributed parameter model[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2008, 9(2): 161-171.
- [23] 贾尚帅, 丁千. 刹车系统的摩擦自激振动和控制[J]. *工程力学*, 2012, 29(3): 252-256.
- [24] 李金录. 摩擦制动系统的动力学降维和分析[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [25] Lee W K, Shin M W, Kim S H, et al. The influence of humidity on the sliding friction of brake friction material [J]. *Wear*, 2013, 302(1/2): 1397-1403.
- [26] Crowther A R, Singh R. Analytical investigation of stick-slip motions in coupled brake-driveline systems[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2007, 50(3): 463-481.
- [27] 何仁, 刘存香, 李楠. 轿车电磁制动与摩擦制动集成系统的模糊控制[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(24): 83-87.
- [28] Hochlenert D. Nonlinear stability analysis of a disk brake model[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2009, 58(1/2): 63-73.
- [29] 蒋东鹰, 管迪华. 用闭环耦合模型对盘式制动器制动尖叫的研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1998, 38

- (8): 4-10.
- [30] Yu J, Wang, Yong C et al. On the effect of friction law in closed-loop coupling disc brake model[J]. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 2016, 9(1):154-159.
- [31] Gao P, Ruan J, Du Y, et al. The prediction of braking noise in regenerative braking system using closed-loop coupling disk brake model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers—Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 125(1): 43-48.
- [32] Jang H, Lee J S, Fash J W. Compositional effects of the brake friction material on creepgroan phenomena[J]. Wear, 2001, 251(1/2): 1477-1483.
- [33] 张立军, 张兴, 孟德建. 汽车制动颤振瞬态特性与关键因素试验研究[J]. 机械工程学报, 2018(24): 118-128.
- [34] Eriksson M, Bergman F, Jacobson S. On the nature of tribological contact in automotive brakes[J]. Wear, 2002, 252(1/2): 26-36.
- [35] Pan W J, Ling L Y, Qu H Y, et al. Analysis of complex modal instability of a minimal friction self-excited vibration system from multiscale fractal surface topography[J]. European Journal of Mechanics/A Solids, 2021, 87: 104226.
- [36] Liles G D. Analysis of disc brake squeal using finite element methods[C]//SAE Noise & Vibration Conference & Exposition. 1989.
- [37] Nagy L I, Cheng J, Hu Y K. A New Method Development to Predict Brake Squeal Occurrence[C]//International Truck & Bus Meeting & Exposition. New York: Society of Automotive Engineers, 1994.
- [38] Ouyang H, Li W, Mottershead J E. A moving-load model for disc-brake stability analysis[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2003, 125(1): 53-58.
- [39] AbuBakar A R, Ouyang H. Complex eigenvalue analysis and dynamic transient analysis in predicting disc brake squeal[J]. International Journal of Vehicle Noise and Vibration, 2006, 2(2): 143-155.
- [40] Dai Y, Lim T C. Suppression of brake squeal noise applying finite element brake and pad model enhanced by spectral-based assurance criteria[J]. Applied Acoustics, 2008, 69(3): 196-214
- [41] Denimal E, Sinou J J, Nacivet S. Prediction and analysis of quasi-periodic solution for friction-induced vibration of an industrial brake system with the Generalized Modal Amplitude Stability Analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 506: 145-147.
- [42] 吕红明, 张立军, 余卓平. 汽车盘式制动器尖叫研究进展[J]. 振动与冲击, 2011, 30(4): 1-7.
- [43] 张立军, 刁坤, 孟德建, 等. 摩擦引起的振动和噪声的研究现状与展望[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 765-772.
- [44] Beloiu D M. Nonsmooth dynamics of disc brake systems and aeroelastic panels[D]. Detroit: Wayne State University, 2005.
- [45] Culla A, Massi F. Uncertainty model for contact instability prediction[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 126(3): 1111-1119.
- [46] Gu Y H, Liu Y C, Lu C D, et al. Brake noise reduction method based on Monte Carlo sampling and particle swarm optimization[J]. Shock and Vibration, 2021(5): 1-11.
- [47] 张芳, 管迪华. 抑制制动器振动噪声的阻尼方法的探讨[J]. 汽车工程, 2003, 25(3): 264-268.
- [48] 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): 72-74.
- [49] Úradníček J, Musil M, Gašparovič U, et al. Influence of material-dependent damping on brake squeal in the specific disc brake system[J]. Applied Sciences, 2021, 11(6): 2625.
- [50] Ataei M, Atai A A, Mirjavadi S, et al. Application of impulse damper in control of a chaotic friction-induced vibration[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2011, 25(2): 279-285.
- [51] 吴丹, 丁旺才. 含干摩擦碰撞系统的簇发振荡及稳定性分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 46-51.
- [52] Papinniemi A. Vibro-acoustic studies of brake squeal noise[D]. Sydney: University of New South Wales, 2007.
- [53] Li G F, Wu S P, Wang H P, et al. Global dynamics of a non-smooth system with elastic and rigid impacts and dry friction[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2020, 95(2): 105603.
- [54] 隋鑫, 丁千. 接触刚度对制动摩擦块时域-频域响应的影响[J]. 振动与冲击, 2019, 38(8): 198-202.
- [55] 盛勇生, 马力, 孙国辉, 等. 面向制动噪声的盘式制动器有限元复模态分析[J]. 机械设计与制造, 2007(11): 87-89.
- [56] 詹斌, 孙涛, 沈炎武, 等. 基于复特征值分析的某盘式制动器制动尖叫问题改进[J]. 振动与冲击, 2021, 40(5): 108-112.
- [57] Denimal E, Sinou J J, Nacivet S, et al. Squeal analysis based on the effect and determination of the most influ-

- ential contacts between the different components of an automotive brake system[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 151: 192–213.
- [58] 夏祖国, 龚洪, 史建鹏, 等. 制动噪声改善方法分析研究[J]. *汽车技术*, 2015(9): 9–12.
- [59] 袁琼, 李仕生, 王国明, 等. 通风筋结构对盘式制动器颤振尖叫行为影响的仿真分析[J]. *机械设计*, 2020, 37(7): 36–44.
- [60] 姚庆军, 马扎根, 吴昊, 等. 用模态综合模型对制动器噪声进行模拟分析与抑制[J]. *汽车工程学报*, 2021, 11(3): 221–227.
- [61] Vasudevan B, Lenin N, Palanivel A, et al. Brake squeal analysis of disc brake[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46(2): 112–120.
- [62] Zhu Q, Chen G X, Wu B W, et al. Effect of the material parameter and shape of brake pads on friction-induced disc brake squeal of a railway vehicle[J]. *Tribology Transactions*, 2021, 64(2): 1–9.
- [63] Osenin Y I, Krivosheya Y V, Chesnokov A V, et al. Influence of the mutual overlapping coefficient on the process of a disc brake squealing during braking[J]. *Journal of Friction and Wear*, 2021, 42: 38–43.
- [64] Meehan P A, Leslie A C. On the mechanisms, growth, amplitude and mitigation of brake squeal noise[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 152: 33–39.
- [65] Wei L, Cheung C S, Choy Y S, et al. Tribology performance, airborne particle emissions and brake squeal noise of copper-free friction materials[J]. *Wear*, 2020, 448/449: 203215.
- [66] Ahlawat V, Yadav U, Nain S, et al. Potential of white ark shell powder in automotive brake friction composites[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 256: 4053–4062.
- [67] 贾尚帅. 若干非光滑系统动力学与应用非线性控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [68] Budinsky T, Brooks P, Barton D. A new prototype system for automated suppression of disc brake squeal[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers—Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2020, 235(5): 1423–1433.
- [69] Sarrouy E, Dessombz O, Sinou J J. Piecewise polynomial chaos expansion with an application to brake squeal of a linear brake system[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(3): 577–594.
- [70] 吕辉, 于德介. 基于区间分析的汽车盘式制动器的稳定性分析与改进[J]. *汽车工程*, 2016, 38(3): 317–322.
- [71] 曹云丽, 余毅权, 臧传相. 新型铝合金材料制动盘热-结构耦合分析[J]. *机械制造与自动化*, 2022, 51(1): 164–167.
- [72] 向晖, 全慧, 胡艺媛, 等. 类石墨烯单层结构 ZnO 和 GaN 的压电特性对比研究[J]. *无机材料学报*, 2021, 36(5): 492–496.

## Research progress of friction dynamics of disc brake system

WANG Jingyue<sup>1,2</sup>, WANG Tongyi<sup>1</sup>, LÜ Kun<sup>1</sup>, WANG Junnian<sup>2</sup>

1. School of Automobile and Transportation, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China

2. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China

**Abstract** Based on the relevant research literature of disc brake at home and abroad, this paper summarizes the commonly used disc brake models and brake noise research methods, and introduces the application range, advantages and disadvantages of the models and research methods. The control measures of brake friction noise are analyzed from the aspects of optimizing brake structure, changing brake parameters and active control. Finally, the future research direction of disc brake is prospected.

**Keywords** disc brake; nonlinear; model; noise; noise suppression; friction ●



(责任编辑 王志敏)