汽 车 制 动 噪 声 的 研 究

刘伯威[1,2],杨 阳[1],熊 翔[1]
(1. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室,长沙 410083; 2. 湖南博云汽车制动材料有限公司,长沙 410205)

摘 要: 近年来,随着人们环保意识的增强,汽车制动产生的噪声污染备受关注. 本文分析了汽车制动噪声产生的特点,并从实验和理论两方面系统回顾了制动噪声的研究工作,重点对各种制动噪声的机理进行了分析和评述. 最后,指出目前制动噪声研究工作的不足,并对未来的研究工作提出了一些展望和建议.

关键词: 汽车;制动噪声;尖叫;综述
中图分类号: U465 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004 - 0595(2009)04 - 0385 - 08

自 20世纪 90年代以来,随着科学技术的进步,汽车工业正朝着“两低”(低能耗、低公害)、“三化”(车身轻量化、控制电子化、动力多样化)和“四性”(行驶安全性、耐久性、乘坐舒适性、操作方便性)的方向发展[1-2]. 人们在注重整车性能“硬”指标的同时,越来越倾向于汽车的人性化设计,不断提高车辆的乘坐舒适性等“软”性能指标[3-4]. 汽车的各项性能中,NVH(噪声、振动、声振粗糙度)特性是衡量汽车质量“软”性能指标的一个重要因素,而制动噪声又是其中一项非常重要的考核指标. 汽车制动时的尖叫声既产生噪声污染,又严重影响乘员的乘坐舒适性,损害人们的身体健康. 因此,降低汽车制动噪声,改善乘坐舒适性以及净化城市环境是汽车工程技术人员面临的一项重要任务. 在环保意识日益增强的 21世纪,开发与研制新一代高性能“绿色”刹车片成为摩擦材料生产企业以及汽车制造商急需解决的难题[5-7].

1 制动噪声的产生和特点

汽车制动引起的噪声是一个很复杂的自然现象,主要是由于制动器工作中发生振动造成的. 制动噪声的产生及噪声声压级的大小与很多因素有关,不仅与经典的摩擦振动理论联系紧密,还受到自身结构和复杂工况的强烈影响[8-9],如整个制动系统的刚度、制动速度、制动压力、对偶件的材质以及环境条件(温度、湿度、润滑条件)[10-11]等,有时这些因素的一个或多个发生变化,都会严重影响到制动噪声出现的状态及噪声声压级的大小. 由于其影响因素的复杂性,尽管学术界研究摩擦噪声已有相当长的历史,但仍有许多问题没有解决. 迄今为止,这个课题已吸引了包括摩擦学、振动力学、材料学和计算机模拟科学等诸多学者的兴趣,并发表了许多研究成果.

制动噪声的频率范围非常宽,从几十赫兹到上万赫兹不等. 一般根据振动频率的频段可分为低频振动噪声(低于 1 000 Hz)和中高频振动噪声(1 000～10 000 Hz以上). 文献中经常提到的 Moan、Hum、Judder、Groan、Roughness基本上可归入低频振动噪声的范围, Squeal则可划为中高频振动噪声范围. 而 Squeal又可分为低频尖叫(1～3 kHz)和高频尖叫(5～15 kHz),高频尖叫最高时可达到 120 dB左右,是人耳难以忍受的一种尖叫声,对人们的身心能够产生极大的危害,同时也是城市噪声的主要污染源之一[12].

2 国内外汽车制动噪声的研究现状

早期的制动噪声研究关注当时广泛使用的鼓式制动器,现在盘式制动器由于其广泛的应用已成为研究重点. 对制动噪声的研究 20世纪 30年代就有相关报道[13],并已积累了不少解决特定问题的工程

收稿日期: 2008 - 11 - 27; **修回日期**: 2009 - 04 - 07; **联系人**:刘伯威, e - mail: csuyy00804@126. com
基金项目:国家重点工业试验项目资助(计高技 1998[1817]).
作者简介:刘伯威(1966 -),副教授,从事高性能汽车制动材料的制备及性能研究.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

实用方法和分析问题的各种力学模型.但迄今为止,对该问题的研究从发生机理到分析方法均未取得一致结论.一方面因为制动器本身就是涉及诸多设计参数的复杂动力学系统,噪声的产生又与制动工况和使用环境密切相关;另一方面则是汽车工业的激烈竞争限制了研究工作的公开发表和交流.

2.1 制动噪声实验研究概况

实验在制动噪声的研究中有着不可替代的作用,大多数研究制动噪声的方法都是实验法.理论研究主要回答了制动噪声的激励源问题,但由于理论研究总是在一些假设的前提下进行推导的,脱离实际情况.同时摩擦系统参数识别困难,因此理论计算大多只能定性的说明问题.另外,在实验中发现,条件都相同的各次试验中并非均能出现摩擦尖叫声.很显然,理论模型研究都不能考虑这些因素,必须在实验研究中加以解决.因此进行摩擦噪声的实验研究必不可少.

汽车制动噪声实验在国外研究较早,早在 20世纪 50年代,英国学者 Fosberry和 Holubecki就对盘式制动系统的噪声进行了实验研究,发现大多数制动噪声的产生和摩擦系数的减少有关,而制动片的摩擦特性和制动噪声没有必然联系,并总结出了如图 1所示的模型[14-15].随后,Spurr设计了一种实验装置(如图 2所示)[16],让制动片和刹车盘以带的形式接触并做往复滑动,且接触带宽度少于 3.175 mm,发现摩擦噪声只发生在接触带接近制动片前缘的时候,而当接触带移到制动片的后缘时,摩擦噪声有明显改善.

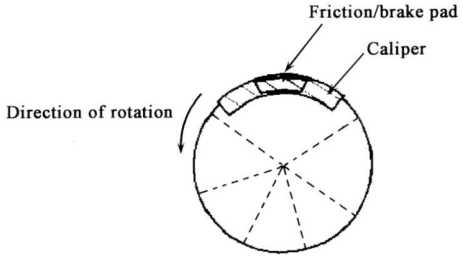

Fig. 1 Sketch map of Fosberry and Holubecki's model

图 1 Fosberry和 Holubecki的模型示意图

以前由于技术手段的限制,实验中噪声只能凭人耳去感受,这样测量误差极大,且只能定性的说明一些问题.现在随着科技的进步,大量先进的声音采集仪器相继出现,国外就有专门针对汽车噪声的 NVH惯性台架试验机.但由于其仪器精密度较高且对环境要求苛刻,所以售价昂贵(通常几百万人民币).国内大多数学校及科研单位都采用销-盘(pin-on-disc)型试验装置,或在定速试验机或台架试验机上添加声级计及一些辅助设备(如图 3)加以改装.销-盘型摩擦噪声试验装置的实验原理及测量原理见图 4,摩擦噪声由拾音器测取,通过频谱分析仪可得到噪声的自功率谱图及声压级的值[17].

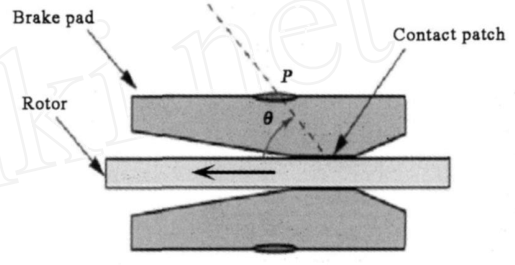

Fig. 2 Sketch map of Spurr's testing equipment

图 2 Spurr 实验装置示意图

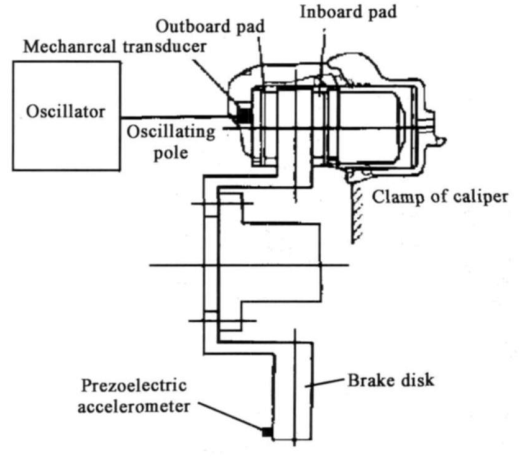

Fig. 3 Excitation test apparatus for disk brake assembly

图 3 盘式制动器总成的激振试验示意图

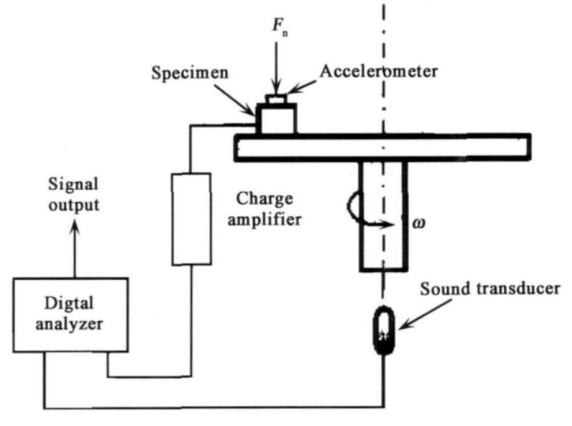

Fig. 4 Sketch of testing system for friction – induced noise

图 4 摩擦噪声试验系统简图

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

虽然影响制动噪声的因素比较复杂,但是通过多年实验验证以及经验积累,前人总结出制动噪声的发生大致有如下规律[18-20]:

(1) 车辆在低速制动和临近停车时,容易发生制动尖叫.

(2) 摩擦系数基本相同的摩擦材料在产生尖叫倾向上具有随机性,同一摩擦材料安装于某一制动器可能有尖叫倾向,而安装于另一制动器却极可能没有噪声.

(3) 随着摩擦系数的增大,制动尖叫的倾向增大,且尖叫频率随着制动压力的升高而略有增加.

(4) 鼓式和带式制动器通常比盘式制动器更容易产生尖叫.

(5) 在制动块底板上(钢背)粘贴阻尼材料能在一定程度上抑制制动高频噪音,但并不是总能达到明显的改善效果.

(6) 产生制动尖叫的振动在摩擦滑动方向和法向总是耦合的.

从上述分析可以看出,通过摩擦噪声实验,可以得到很多有用的规律,并可验证现有的制动噪声理论.但其局限性也非常明显,如有些系统参数不容易改变,同时往往试验条件不同,产生的结果也不一样,这对理论分析产生极大地困难.另外,通过大量试验总结出来的规律只是经验性的总结,并不能对一些突发情况提出更改措施及对一些试验结果做出预测.

2.2　制动噪声机理研究概况

前面已提及单纯实验研究的一些不足,很多科研工作者在实验的基础上,运用现代化的检测手段对制动噪声的机理进行分析,并提出了各种各样的噪声机理.查阅以前的文献[21-23],早期对制动噪声的研究都是先找出制动噪声机理,再建立相应的动力学模型,以减少振动振幅为目的.因此研究制动噪声的工作大部分都转化为对摩擦振动的研究.而从现有的文献[24-28]来看,制动噪声的研究中对黏着-滑动振动及材料摩擦特性的研究占了较大的比重,而且计算机模拟技术也越来越多的应用于噪声机理的分析.其模型经历了从单自由度自激振动模型到两自由度自激振动模型,直至现在的多自由度自激振动模型.到目前为止共形成了七八种不同的理论,被大多数接受的理论主要有 4 种,分别为:摩擦力-相对速度关系的负斜率理论、Sprag-Slip 理论、模态耦合理论和摩擦学理论,下面分别予以论述.

2.2.1　摩擦力-相对速度关系的负斜率理论

最早提出的摩擦噪声激发机理是黏着-滑动机理,早在 20 世纪 30 年代,Mills[29]通过对不同的鼓式制动器进行研究,发现制动尖叫产生的一个必要条件就是 $d\mu_k/dv_s$ 小于 0,并最终导致了摩擦力-相对速度关系的负斜率理论的提出.由于摩擦力-相对速度关系的负斜率机理产生的原因和物理模型(如图 5)与黏着-滑动现象产生的原因一样,所以在很多研究中,把这两种机理归为同一类机理:摩擦力-相对速度关系的负斜率机理.

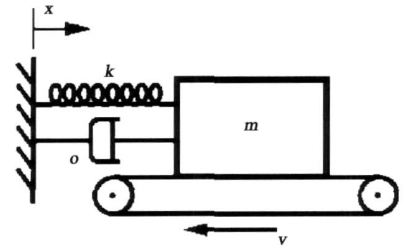

Fig 5　A single degree-of-freedom model of friction vibration

图 5　摩擦振动的单自由度模型

对上面简化的模型建立刚性摩擦材料的运动微分方程为:

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=F_k(v-\dot{x}) \tag{1}$$

其中 m 为刚性摩擦片质量,c 为结构阻尼,k 为弹簧刚度,F_k 为摩擦力.

由于制动时振动一般为微幅振动,对公式(1)用泰勒级数按 x 的幂次展开,并去掉 x 二次以上各项,可将公式(1)改写为:

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+F_k(v_0)\dot{x}+kx=0 \tag{2}$$

假定摩擦力曲线在某一区域内具有负斜率,设其绝对值为 a_1,则公式(2)可改写为:

$$m\ddot{x}+(c-a_1)\dot{x}+kx=0 \tag{3}$$

求解可得:

$$x=Ae^{\frac{a_1-c}{2m}}\left(\cos\omega t+\frac{c-a_1}{2mw}\sin\omega t\right) \tag{4}$$

$$\text{圆频率 } \omega=\sqrt{\frac{k}{m}-\frac{(c-a_1)^2}{4m^2}} \tag{5}$$

从公式(4)可以看出,理论公式的解表示的是一个往复振动,当 a_1 大于 c 时,表示系统的振动将无限增大,此即摩擦力-相对滑动速度关系的负斜率引起摩擦振动的理论解释.当 a_1 小于 c 时,则表示系统的的振动将逐渐减少,直至消失.同时,如果

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

摩擦力 -相对滑动速度曲线的斜率为正值,则不可能发生自激振动.

摩擦力 -相对速度关系的负斜率理论较好地解释了制动噪声发生的机理,且能够解释很多实验现象.在过去的研究中该理论占很大的比重,现在对其研究的人很少,最近关于这方面的研究报导见于 Eriksson和 Jacobson[30]的文章.而且该理论也正受到越来越多的人的质疑,因为有的时候制动噪声也发生在摩擦力 -相对滑动速度关系为正的区域,这直接与该理论矛盾.而 Millner[31-32]亦证明了对于鼓式和盘式制动器,即使摩擦系数 μ为常数,制动噪声仍可发生.实际上,Lang和 Smales[33]就指出该机理只在解释振动频率低于 100Hz的时候比较重要.由于其局限性,所以就导致了其他理论的相继提出.

2.2.2 Sprag-Slip理论

Sprag-Slip理论是 Spurr在 1961年提出的[8],其基本原理就是摩擦面间由于自锁作用 (Sprag)导致整个摩擦系统结构不稳定,从而引起振动和摩擦噪声. Spurr[34]认为,即使摩擦系数 μ为常数,由于外力的变化导致摩擦力的改变也可以引起制动尖叫,噪声的产生与迅速变化的摩擦力有关,因此该理论可适用于系统出现不稳定的振动时摩擦系数 μ与滑动速度 v无关的情况. Spurr的理论可用图 6所示的模型说明.

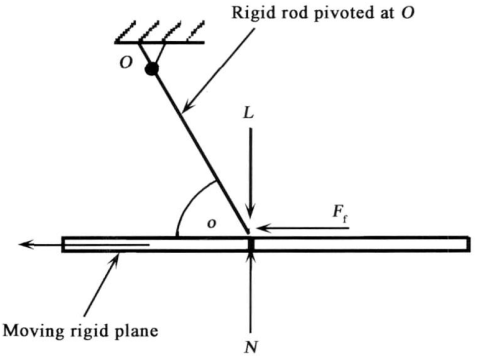

Fig 6 Model of sprag-slip

图 6 自锁 -滑动机理模型

在图 6所示的模型中,所有的连接均为刚性连接,刚性杆装在可以旋转的 O点,O点固定,并受到一个外加载力 的作用,同时平面从右向左运动,在平面和杆的接触点 (定义为 A点)就会产生一个摩擦力.根据 O点的受力情况,列出力的平衡方程:

$$N = \frac{L}{1 - \mu_k \tan\theta} \tag{6}$$

$$F_f = \mu_k N \tag{7}$$

把公式 (6)代入公式 (7),可得:

$$F_f = \frac{\mu_k L}{1 - \mu_k \tan\theta} \tag{8}$$

从公式 (8)可以看出,当 θ满足一定的条件时,即当 $\mu = \cot\theta$时,此时摩擦力 F_f将趋向于无穷大,相对运动在理论上变得不可能,从而导致自锁现象的出现.当然,出现自锁的前提条件就是 O点为刚性连接,但通常我们的刹车片属于黏弹性材料,当其变形到一定程度时,又会慢慢恢复到以前的状态,这样自锁状态就会解除,重新回到最初的接触状态,于是整个摩擦系统就会出现 Sprag-Slip的无限循环.该模型由于过于简单,以至于无法直接用于制动噪声的分析,但从中可以得出一个重要启示,就是制动器的结构因素在制动尖叫的产生中可能起着重要的作用.

该理论提出后,曾引起了很多学者的关注,并被一些研究者所接受[35].也有人把前两种理论结合起来,提出摩擦力 -相对滑动速度关系的负斜率和自锁 -滑动联合作用机理,这样就能较全面的解释一些现象.但由于 Sprag-Slip理论只考虑摩擦力方向的振动,而忽略了垂直于摩擦面方面的振动,所以有很明显的缺陷.

2.2.3 模态耦合理论

前面两种研究制动噪声的理论都认为噪声是制动系统各组件的单自由度自激振动,但根据实验的研究结果,制动噪声发生时,往往同时有多个结构振动模式发生. 20世纪 80年代以来,研究者们已不再单纯地从简单的物理模型出发研究制动噪声问题,人们开始试图对实际制动器结构建立动力学模型,从理论上进行全面的分析. Kusano等[36]在实验研究中发现鼓式制动器的蹄和鼓各有一阶频率与发生尖叫的频率相近,认为这两阶模态频率在制动器工作时发生变化的幅度不同,可导致两者重合,就形成了噪声频率,因此解决问题的思路是避免这两阶频率靠近.这种说法虽然没有揭示噪声发生的机理,但该文献却提出了一种新的研究思路,即用模态分析的方法来研究制动噪声.

近年来,随着电子计算机技术处理数据的能力大幅提升,有限元方法日臻成熟,计算机辅助分析得到了更加广泛的应用,从单个零件的有限元分析到对整个制动器进行有限元整体建模 (如图 7),最后形成闭环耦合模型.这种方法大大降低了产品的开发成本,缩短了开发周期.另外它还具有可重复性,信息量大,方便快捷等优点.福特公司的研究小

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

组[37]在分析盘式制动器的制动噪声时,利用有限元模型表征摩擦系数 μ_k 随速度 v_s、接触界面温度 T 以及压力 P 的变化,同时他们还在制动系统中引入非线性短暂动力学分析,并结合实验结果,通过模拟得

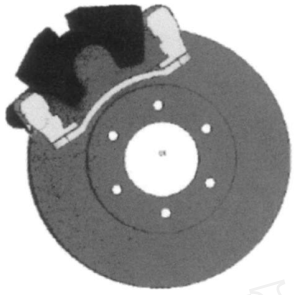

Fig 7　Finite element model of brake assembly
图 7　制动器有限元整体模型

到了很多有用的结论. Baba 等[38]设计了一种所谓的无旋帽形结构(非对称),通过实验结果及有限元模拟发现一种改良结构非常有用. 同时,他们通过建立详细的"高帽转子"的有限元模型,发现修改"帽"部件的尺寸可以抑制转子环面部分某些类型噪声的发生.

由模态藕合机理的理论可以看出,模态耦合机理发生的条件对摩擦系统有很严格的要求,理论对整个制动系统进行了简化,假设较多. 另外,由于用以分析多自由度自激振动模型的有限元方法比前述单自由度模型复杂且参数更多,而其分析精度又不高,因此,该理论的局限性也比较大. 但近年来制动噪声的研究大多数集中在制动系统的有限元复特征值分析上,当制动系统的任两个自然频率趋于一致时,系统就发生不稳定振动,产生尖叫噪声,而自然频率趋于一致就是模态耦合. 因此,现在国际上普遍认为模态耦合最有可能是尖叫噪声产生的机理.

2.2.4　摩擦学理论

过去研究者很少有从摩擦学的角度出发研究制动噪声的,其实制动噪声问题不仅与经典的摩擦振动理论有关,还与摩擦学系统相关理论和知识紧密相联.

在制动过程中,摩擦副真实接触面积远远小于名义接触面积. 从微观上看,摩擦表面是凹凸不平的,当两个表面在压力的作用下接触并发生相对运动时,摩擦表面的微凸体会受到表面的剪切应力而发生弹性形变,如果剪切应力大于微凸体材料的屈服应力,微凸体发生塑性变形,从而达到一个新的弹性变形平衡点. 这样微凸体不断振动直到所有的弹性势能以热量的形式耗散. 这个过程其实就是能量的相互转化过程,遵循能量守恒定理.

最近很多文献中提到的热点理论(Hot Spot Theory),其实也可以归属于摩擦学理论里面. 该理论认为制动盘表面在制动过程中产生热点导致振动噪声. 由于摩擦表面具有接触的不均匀性,造成摩擦副间相对较小的真实面积上承担相当大的载荷,其接触微凸体上的温度高于周围表面温度,形成"热点". 在一个典型的制动过程中,由于制动初期相互接触的微凸体数目较少,摩擦系数和局部"热点"温度升高较快,随着微凸体承载数目的增加以及自然散热,"热点"温度又迅速降低. 摩擦热的存在可引起材料表面黏着并改变材料表面层的接触刚度,从而直接影响制动过程中系统的稳定性. 在摩擦力导致的振动中,激励来自于连续滑动过程中黏滑转换以及微凸体连接的啮合和脱离. 因此,从材料摩擦学的角度研究制动噪声至关重要. 近年来,很多学者[7, 39]也都展开了这方面的工作,并得出了不少有益的结论.

总的说来,经过多年的理论研究,有两点结论被对大多数学者接受:①摩擦噪声是由于黏着-滑动效应以及摩擦力-速度曲线的负斜率特性诱发制动系统的某些部件的自激振动引发的,不是部件自锁产生的;②制动片与制动盘之间的接触刚度、摩擦系数及制动盘与制动片的刚度对摩擦噪声有重要影响.

2.3　抑制制动噪声采取的措施

为解决上述问题,通过大量的理论研究及实验验证,人们提出了各种各样的方法来降低制动噪声. 文献[40]指出通过在制动块底板上(包括内制动块和外制动块)粘贴阻尼材料层,由于阻尼材料本身的迟滞性,形成接触摩擦并导致能量损耗,能够在一定程度上起减振降噪的作用. 文献[41]提出改变制动盘帽的形状,破坏制动盘的对称性来抑制制动噪声. 文献[42]等用高频扰动方法来消除噪声,通过对安装在活塞上的压电传感器施加高频电压引起底板和制动摩擦块振动,利用这种振动来光滑摩擦力,从而消除制动尖叫.

上述方法归纳起来可分为 3类. ①从结构因素入手,修改制动器部件,如制动衬片和制动蹄的几何参数和形状. ②从制动器材料因素入手,通过改变刹车盘的微观组织及调整制动材料的配方组成来消除制动噪音. ③前面 2种方法的结合,改变制动器的

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

振动特性.如优化制动器部件的刚度、阻尼等.对于已设计定型的制动器,不可能通过改变其结构设计来解决制动噪声问题,唯一可调整的就是改进摩擦材料的配方.所以在解决制动噪声问题上,摩擦材料不是制动噪声产生的主要原因,但却是解决此类问题的主要方法.因此,很多汽车摩擦材料生产厂家都是通过调整材料的配方去消除制动噪声.

3 汽车制动噪声研究存在的问题及展望

迄今为止,对制动噪声的研究内容主要集中在汽车盘式和鼓式制动器这两方面.理论研究思路都一样,都是从摩擦系统振动的角度出发去研究.目前绝大部分研究都是从动力学角度来分析噪声,并总结出了多种理论和振动模型,但无论是摩擦振动理论,还是有限元分析,都局限在判断系统的稳定性方面,能外延的结论不多,许多理论能解释一些制动噪声现象,但却不能解释另一些现象,更不能预测摩擦噪声的发生和消失.目前关于制动噪声理论研究的前沿问题主要有:①制动噪声发生后是如何演化的?稳定性理论只能说明噪声的起始,不能说明噪声是有界的.一般认为制动系统发生噪声后,随着振动幅值的增大,系统遇到了非线性因素,但这个非线性因素又是什么?②制动尖叫噪声的有限元预测(复特征值分析)得到很多不稳定模态,但为何制动尖叫噪声一般都是单频率噪声,并且这个频率对应的复特征值实部的数值不是所有实部为正的数值中最大的?③现在很多学者从摩擦学角度研究制动摩擦噪声,已经发现有噪声的摩擦表面形貌与没有噪声的摩擦表面形貌不同,但摩擦学特征与制动摩擦噪声之间的连接桥梁又是什么?因此,尽管制动噪声的研究已取得长足进步,但到目前为止还没有还没有一种理论和模型能解释所有的制动噪声现象,制动噪声的理论研究仍有很多工作要做.

在噪声理论研究中,理论模型对实际情况做了很多简化处理,忽略了一些次要因素对制动噪声成因机理的影响,而某些场合这些恰恰又是影响制动噪声的重要因素.对于制动噪声这样复杂的问题,实验研究有无可替代的作用,但多年来对制动噪声的实验研究还停留在表面浅层的认识上,测量的技术水平较低,许多状态变量不能准确测量,对测量的数据的深入分析也不够,因此,更好的理论急需现代化的检测手段.

综上所述,在制动噪声问题的研究中,实验研究和理论分析一个都不能少.研究中要遵循摩擦系统动力学特有的规律,兼顾动力学与摩擦学,从制动系统结构设计及摩擦副材料设计两方面着手,优化结构的同时发展性能优良的摩擦制动材料,从根本上消除或抑制制动噪声.同时,为了实现摩擦噪声的定量分析,有必要探讨提高模型参数识别准确性的途径.建立一套符合实际制动噪声的模型和准确的噪声抑制的分析方法,这样可以大大缩短车辆开发设计的周期、降低研制费用.

4 结束语

当今世界,节能和环保是汽车工业的两大主题.今后汽车制动材料的主要研究方向是更安全、更轻量化、更环保.因此积极开发新型绿色环保摩擦材料是21世纪的重点研究课题.自20世纪以来,尽管关于制动噪声的研究已超过70年的历史,且在该领域已取得了长足的进步.但由于问题的复杂性,该领域目前仍然存在着大量的理论和技术空白,其中有许多是世界性的难题,这意味着相对于汽车技术的其他研究方向,在汽车噪声控制领域中,目前尚未形成被发达国家技术垄断的格局.因此,积极开展制动噪声理论和工程应用方面的研究,抢占技术的至高点,意义重大.

总之,制动噪声问题是目前国内外摩擦材料行业科研的前沿和热点,国内外摩擦材料行业已经把制动噪声列为摩擦材料的重要考核验收指标,因而展开制动噪声理论方面的研究,积极开发新型绿色环保摩擦材料,不仅对汽车摩擦材料企业生产高性能、高品质刹车片具有很大的指导意义,还将具有非常重要的社会意义和经济意义.

参考文献:

[1] 贾宏禹. 材料的粘弹性对摩擦片振动与制动噪声的影响研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.
Jia Hongyu. Study on the influence of friction material viscoelasticity on vibration and braking noise [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.

[2] 顾立文. 美国汽车制动器的发展[J]. 汽车与配件, 1998, (11):22.
Gu L W. Development of American automobile brake assembly [J]. Automobile and Parts, 1998, (11):22.

[3] Kim S J, Cho M H, Lim D S, *et al* Synergistic effects of aramid pulp and potassium titanate whiskers in the automotive friction material[J]. Wear, 2001, 251:1 484 - 1 491.

[4] 何东新, 王成国, 王海庆. 汽车用摩阻材料的研究状况[J]. 工程塑料应用, 2002, 30 (2): 54 - 57.
He D X, Wang C G, Wang H Q. Investigation status of friction

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

materials for automobiles[J]. Engineering Plastics Application, 2002, 30 (2): 54 - 57.

[5] Junichiro Yamabe, Masami Takagi, Toshiharu Matsui, *et al* Development of disc brake rotors for trucks with high thermal fatigue strength[J]. JSAE Review, 2002, 23: 105 - 112.

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

[7] Papinniemi Antti, Lai Joseph C S, Zhao Jiye, *et al* Brake squeal a literature review [J]. Applied Acoustics, 2002, 63 (4): 391 - 400.

[8] Ibrahim R A. Friction - induced vibration, chatter, squeal, and chaos, Part 2: Dynamics and modeling[J]. Applied Mechanics Review, 1994, 47: 227 - 253.

[9] Bergman F, Mikael E, Eriksson M, *et al* Influence of disc topography on generation of brake squeal [J], Wear, 1999: 621 - 628.

[10] Eriksson M, Bergman F, Jacobson S. Surface characteristic of brake pads after running under silent and squealing conditions [J], Wear, 1999: 163 - 167.

[11] Crolla D A, Lang A M. Brakes noise and vibrations - the state of the art[J]. The Proceedings of the Leeds - Lyon Symposium on Tribology, 1990, 165 - 174.

[12] **黄学文,张金换,董光能,等. 汽车摩擦制动噪声研究进展与发展趋势** [J]. **汽车工程**. 2007, 29(5): 385 - 388.
Huang X W, Zhang J H, Dong G N, *et al* Progress and development trend of research on friction - induced brake squeal of vehicles[J]. Automotive Engineering 2007, 29(5): 385 - 388.

[13] H R Mills Brake squeak, Technical Report 9000 B [M], Institution of Automobile Engineers, 1938.

[14] R A C Fosberry, Z Holubecki Interim report on disc brake squeal, Technical Report 1959/4[M], Motor Industry Research Association, Warwickshire, England, 1959.

[15] R A C Fosberry, Z Holubecki Disc brake squeal: its mechanism and suppression, Technical Report 1961/1 [M], Motor Industry Research Association, Warwickshire, England, 1961.

[16] R T Spurr. A theory of brake squeal, Proceedings of the Automobile Division [M], Institution of Mechanical Engineers 1961 - 1962(1) (1961) 33 - 52.

[17] **陈光雄. 金属往复滑动摩擦噪声的研究** [D]. **成都: 西南交通大学**, 2002.
Chen Guangxiong Investigation into friction - induced noise under metal reciprocating sliding conditions [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.

[18] Ouyang H, Mottershead J E, Brookfield D J, *et al* A methodology for the determination of dynamic instabilities in a car disc brake [J]. International Journal of Vehicle Design, 2000, 23 (3/4): 241 - 261.

[19] Wayne V N. Brake squeal analysis by finite elements [J]. International Journal of Vehicle Design, 2000, 23 (3/4): 263 - 275.

[20] **主安成. 盘式制动器制动噪声机理研究及声场的数值模拟** [D]. **福州:福州大学**, 2006.
Zhu Ancheng The research on mechanism of (braking noise of disk - brake and numerical simulation of it's acoustic field[D]. Fuzhou: Fuzhou university, 2006.

[21] D A Crolla, A M Lang Brake noise and vibration - the state of the art, in: D. Dowson, C. M. Taylor, M. Godet, (Eds), Vehicle Tribology[M], Number 18 in Tribology Series, Leeds, England, 1991: 165 - 174.

[22] M R North. Discbrake squeal, in: Braking of Road Vehicles, Automobile Division of the Institution of Mechanical Engineers [M], Mechanical Engineering Publications Limited, London, England, 1976: 169 - 176.

[23] S Yang, R F Gibson. Brake vibration and noise: reviews, comments, and proposals[J], International Journal of Materials and Product Technology, 1997(12): 496 - 513.

[24] B Wikie, J M Hill Stick - slip motion for two coupled masses with side friction [J]. Non - Linear Mechanics, 2000, 35: 953 - 962.

[25] A R Crowther, N Zhang Torsional finite elements and nonlinear numerical modelling in vehicle powertrain dynamics[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 284: 825 - 849.

[26] J Awrejcewicz, D Sendkowski Stick - slip chaos detection in coupled oscillators with friction [J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42: 5 669 - 5 682.

[27] **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 - 155.
Guan D H, Su X D. An overview on brake vibrations and noise [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(4): 150 - 155.

[28] **陈光雄,周仲容,黎虹. 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(8): 643 - 645.
Chen G X, Zhou Z R, Li H. Profile analysis related to friction - induced noise under reciprocating sliding conditions [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002(8): 643 - 645.

[29] H R Mills Brake squeak, Technical Report 9000 B [M], Institution of Automobile Engineers, 1938.

[30] M Eriksson, S Jacobson. Friction behaviour and squeal generation of disc brakes at low speeds[J], Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers D 215 (D12), 2001: 1 245 - 1 256.

[31] Millner N. A theory of drum brake squeal[J]. IMech E, 1976, c39/76: 170 - 185.

[32] Millner N. An analysis of disc brake squeal[C]. SAE780332, 1978.

[33] A M Lang, H Smales An approach to the solution of disc brake vibration problems, in: Braking of Road Vehicles Automobile Division of the Institution of Mechanical Engineers [M], Mechanical Engineering PublicationsLimited, Suffolk, England, 1993: 223 - 231.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[34] R T Spurr. A theory of brake squeal, Proceedings of the Automobile Division, Institution of Mechanical Engineers 1961 - 1962 (1) (1961) 33 - 52.

[35] SW E Earles, M Badi. Oscillatory instabilites generated in a double - pin and disc undamped system: a mechanism of disc - brake squeal, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers C 198 (1984) 43 - 49.

[36] Kusano M. Experimental study on the reduction of drum brake noise[C]. SAE851465, 1985.

[37] Y K Hu, S Mahajan K Zhang. Brake squeal DOE using nonlinear transient analysis[M], Technical Report 1999 - 01 - 1737, SAE, Warrendale, PA, 1999.

[38] Ouyang H, Nack W, Yuan Y, *et al*. Numerical analysis of automotive disc brake squeal: a review. International Journal of Vehicle Noise and Vibration 1 (3/4) (2005) 207 - 231.

[39] Meifal Rusli, Masaaki Okuma. Effect of surface topography on mode - coupling model of dry contact sliding systems [J], Journal of Sound and Vibration, 2007(308), 3 - 5: 721 - 734.

[40] 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.
Zhang F, Guan D H. A Study on the damping method to suppress the disc brake squeal[J]. Automotive Engineering, 2003, 25(3): 264 - 268.

[41] Baba H, Wada T, Takagi T. Study on reduction of brake squeal caused by in - planevibration on rotor[R]. SAE Technical Report, 2001, 1: 3 158.

[42] Cunefare K A, Graf A J. Disc Brake Rotor Squeal Suppression Using Dither Control[R]. SAE Technical Report, No. 2001 - 01 - 1605.

The Research on Brake Noise of Automobile

LIU Bo - wei[1,2], YANG Yang[1], XIONG Xiang[1]

(1. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Hunan Boyun Automobile Brake Material Co., LTD, Changsha 410205, China)

Abstract: Recently, with the increasing sense of environment protection, automotive brake noise attracts much more attention than before. This paper analyzed the characteristics of automobile brake noise, and systematically reviewed the research on experiment and theory of brake noise. Then, different experimental and analytical studies on brake noise are analyzed and commented. Finally, some limitations on present study are pointed out, and some suggestions are put forward for the future research.

Key words: automobile, braking noise, squeal, review

Author: LIU Bo - wei, male, born in 1966, Associate Professor, e - mail: csuyy00804@126.com

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net