

制动设计的突破性发展

新方法能在设计过程早期仿真制动尖叫问题。

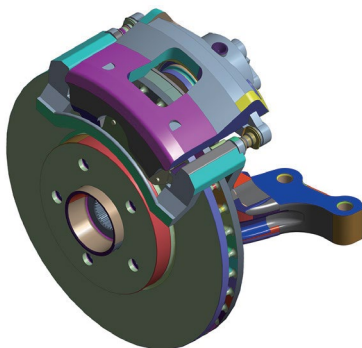
作者：Greg Roth，首席工程师兼工程技术国家科学院院士，TRW北美公司，美国利沃尼亚
Mike Hebbes，ANSYS区域技术经理

数 十年来，摩擦造成的制动尖叫一直是汽车产业面临的一大挑战，随着其它噪声源问题已经得到缓解或解决，该问题在今天就变得尤为突出。TRW和其他制动生产商此前采用的制动尖叫仿真方法，需要在进行结构分析前手动为刹车片、转子等组件之间的界面建模。这种方法的缺点在于需要对组件之间的接触情况进行假设再通过物理测试进行验证，这就需要花费大量时间和资金，并且延误产品研发过程。

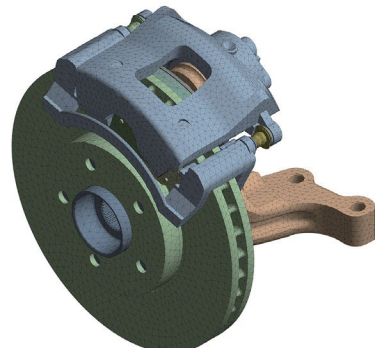
TRW近期确认了一种新方法，其采用 ANSYS Mechanical 软件建立初始接触并计算刹车片、刹车盘之间的滑动接触。仿真研究已经确认该方法能够充分考虑系统接触情况，其可仿真制动噪声问题并且减少模型调整所需的物理测试。整个仿真过程在统一环境中进行，通过自动化仿真流程的多个环节，并针对设计优化或制造差异分析设置批处理运行模式，大幅节约了仿真时间。相对于传统方法而言，它可在更短时间内设计和构建出更安静的制动系统。

仿真制动尖叫的挑战

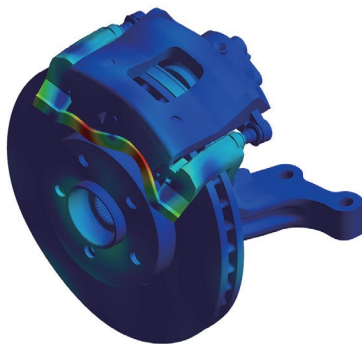
研究人员估计，包括盘式制动尖叫在内的噪声、振动和声振粗糙度问题，



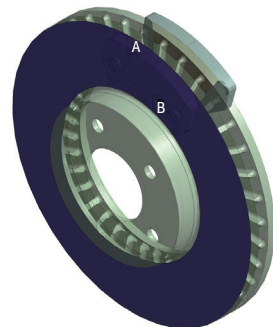
典型的TRW制动系统，刹车盘转子（绿色）和周边通风孔。制动钳（相邻的粉色和灰色部分）装有刹车片，通过检查孔能够看到。这里也显示了制动钳底座（蓝绿色和灰色）和转向节（蓝色）。



盘式转子（绿色）上的四面体网格、制动钳和制动钳底座（都是灰色）以及转向节装配体（棕褐色）。



不稳定模式下的复本征值的可视化效果。制动钳底座（黄色、红色）上的相对变形曲线图按比例放大后清晰可见。



刹车片和盘式转子的剖面图，突出显示了转子和其中一个刹车片之间的摩擦接触对（用A和B标出）。

仅对北美的汽车产业就会产生每年约10亿美元的质保成本。其中至少1亿美元的费用是由制动尖叫造成的。如果能在设计早期，即在投入上百万美元进行详细设计阶段的原型构建、制造工具等工

作之前，就发现候选设计的潜在尖叫问题，那将会让汽车供应商和设备制造商大获裨益。由于我们不可能完全精确地按照尺寸和材料规范生产每一个组件，制造过程中不可避免会出现小的差异性

问题，那么确认这些小差异是否会造成一些制成品的尖叫问题就显得格外重要。

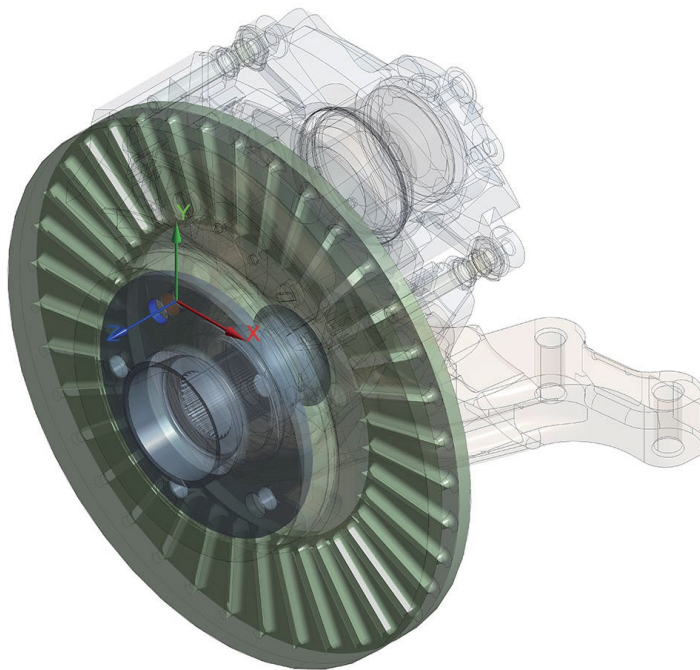
尽管我们不能充分了解产生制动尖叫的所有原因，但普遍接受的一个观点是：这种噪声是摩擦力不稳定性导致的，进而引发了自激振动。制动尖叫问题要远比将可测量的载荷施加到结构上的典型仿真问题复杂。仿真制动尖叫通常需要繁琐的网格生成过程，涉及手动创建刹车片和刹车盘之间的耦合。动态分析可用来分析系统的本征频率，以明确是否会出现尖叫。

这种方法的一大缺点是，挠曲等因素可能改变刹车盘和刹车片表面接触的方式。二者可能以任何角度以及大于或小于预期值的力进行接触。就传统方法而言，解决接触条件的不确定性需要构建和测试物理原型，将测量结果与仿真预测情况进行比较后再调整模型。首次尝试往往匹配性很差，这就需要多次重复运行仿真，每次都要调整接触情况，直到预测结果准确匹配物理测试为止。这种方法不仅成本高昂而且极为耗时。

新仿真方法的研发

TRW工程师希望准确仿真制动尖叫而无需为验证测试投入额外的时间和资金。TRW团队与ANSYS技术服务人员通力合作，在物理测试前用非线性静态解决方案确立初始接触情况并计算刹车片和刹车盘之间的滑动接触，从而准确定义接触条件。ANSYS软件使整个制动尖叫仿真过程能够整合到ANSYS Workbench环境中，从而自动仿真预期的制造差异，并明确设计是否满足鲁棒性要求。

TRW和ANSYS联合研发的全新仿真流程首先把CAD模型导入到Workbench



转子和轮毂之间的连接点之一

TRW工程师希望准确仿真制动尖叫而无需为验证测试投入额外的时间和资金。

中。量产级制动装配体的参数化CAD模型包含各种组件级模型，如刹车片装配体、制动钳、转子和转向节等。此外，创建组件模型时要考虑到制造差异性问题。在初始导入后，软件自动检测并设置装配体部件之间的接触或连结。ANSYS网格划分技术为生成六面体主导的网格或四面体网格提供了多种方法，具体则取决于分析人员的要求。

成功仿真制动尖叫需要根据此前的线性或非线性预加载状态来捕获结构的线性行为。TRW团队用线性扰动分析法

来求解预加载阶段的线性问题，这在ANSYS Mechanical中基本属于自动化的过程。工程师随后用非线性静态解决方案来确定初始接触情况并计算刹车片和刹车盘之间的滑动接触。施加于刹车盘上的应力和旋转会产生预加载效果，并且摩擦接触会在静态结构分析过程中产生不对称的刚度矩阵。

在线性扰动分析的第二阶段，TRW工程师进行QR阻尼或非对称模态分析。本征求解器使用接触单元生成的非对称刚度矩阵，并且可能得出复杂的本征频率。扰动分析的结果显示每个模数的阻尼频率，并给出了特征值的稳定性或实数部分。当耦合模式显示正的实数值，说明系统中的不稳定性可能是产生制动尖叫或噪声的一个原因。此外，分析结果还包括了模态形状，工程师可借助这一有用的诊断信息来改变设计并消除不稳定性。

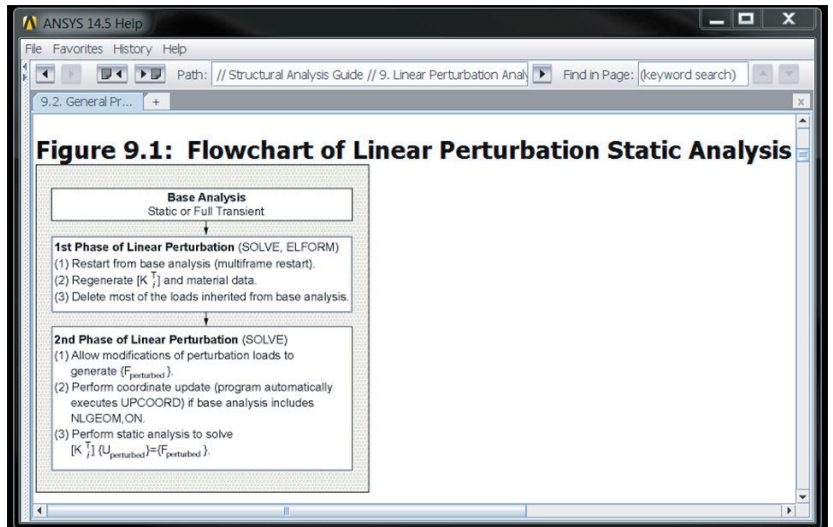
公司对此充满信心，他们认为这将显著改善制动质量，同时减少工程成本并缩短交付周期。

确定候选设计的鲁棒性

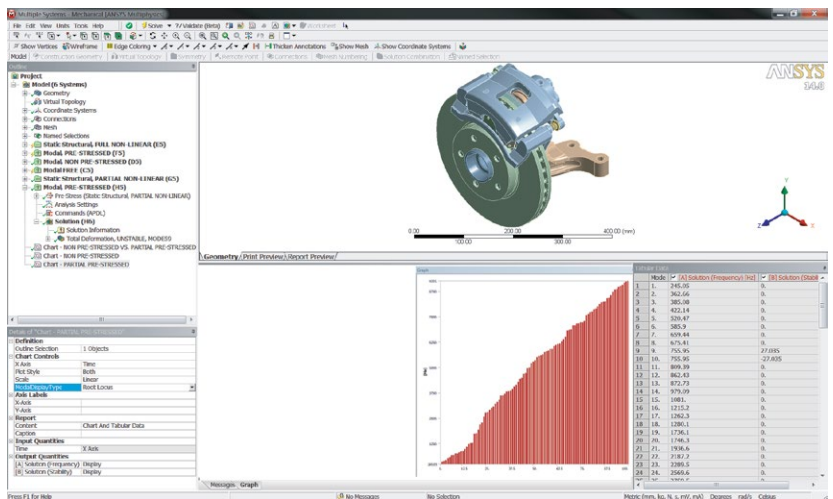
除了为制动尖叫准确建模外，新方法还有一大亮点，即通过研究来确定尺寸、材料容限和载荷等变量小的变化所产生的影响。不同构建之间存在这些差异，尽管它们都在容限之内，但仍存在导致制动噪声变化的几率。利用以前的仿真方法无法了解这些影响，新方法通过仿真成百上千种刹车单元是否产生尖叫，从而能够评估候选设计的鲁棒性。

TRW团队采用ANSYS Workbench确定候选设计的鲁棒性，以作为单个仿真的延伸。利用ANSYS DesignXplorer，团队通过试验设计(DOE)进行了一系列仿真，以尽可能少的仿真迭代来探索设计空间。TRW在DesignXplorer中执行了“更新所有设计点”，这样第一组参数值就会发送到Workbench的参数管理器，这个操作会把模型变更从CAD系统传递到后处理。TRW工程师随后仿真新的设计点，而输出结果则传递给将要保存的设计点表格。

这一过程一直持续到TRW完成所有设计点的求解。DesignXplorer会显示预期输出差异，工程团队因此可明确设计是否满足鲁棒性要求。如果不能满足，团队将分析敏感度图和其它图表，从而确定哪些参数需要调整或者固定，最终



线性扰动分析的流程图



部分预应力的复本征值分析生成的阻尼频率。模式9显示了正的实部，这说明它是制动尖叫的潜在来源。

获得所需的鲁棒性。这一信息有助于发现在不对设计造成任何影响的情况下能够适当放宽哪些容限。

充分确认

新的仿真方法在一系列仿真中证明了其功能，并且TRW团队通过物理测试对仿真结果进行了确认。这些确认研究说明了，无需使用物理测试来校准结果即可仿真制动噪声和其它输出参数（包

括模态形状和频率等）。显然，相对于传统仿真方法而言，这种新方法能更准确地仿真制动尖叫背后的物理现象。它能够将制造差异性整合到仿真过程中并预测发生尖叫的概率，这是另一大优势。

TRW正逐步将这种新方法实施到其未来的制动项目设计过程中。公司对此充满信心，他们认为这将显著改善制动质量，同时减少工程成本并缩短前置时间。