

基于PolyMAX方法的转向系统 试验模态分析

□ 清友（苏州）汽车技术有限公司/吴叶彬

本文运用LMS数据采集系统与模态分析软件，针对某款汽车的转向系统模态试验开展了研究，详细阐述了转向系统模态试验的具体方法，同时利用最小二乘复频域法（PolyLSCF）对转向系统的模态参数进行了识别和结果分析。

汽车转向系统是汽车用来改变和恢复其车型路线的系统。转向系统的振动直接影响整车的NVH水平，而转向系统总成的模态数值又在一定程度上决定了转向系统的振动程度，因此转向系统总成模态数值是整车NVH重要指标之一。振动模态是弹性结构的固有的、整体的特性。模态分析技术是用于对零部件或工程结构系统进行动力学分析的现代化方法和手段，借此可以解决很多工程实际问题。本文利用LMS公司有关模态测试软件对某车型的转向系统进行比较完整的模态测量后，得出了转向系统的模态特性，对解决常见的车辆怠速方向盘抖动以及车辆运行转向过程中出现的振动噪声问题，具有重要的参考分析价值。

一般复杂的振动结构系统通常可以离散为具有N个自由度的线弹性系统，其多自由度系统特征方程为： $[M]\ddot{x}+[C]\dot{x}+[K]x=f(t)$ ；[M]—质量矩阵；[C]—阻尼

矩阵；[K]—刚度矩阵； $\{f(t)\}$ —力向量； $\{x(t)\}$ ：响应向量。假定初位移和初速度为0，通过拉氏变换得到拉氏域内传递函数矩阵 $[H(p)]$ （p为变量）： $[H(p)]=\frac{\{X(p)\}}{\{F(p)\}}=[Z(p)]^{-1}=\frac{1}{p^2[M]+p[C]+[K]}$ ；[Z(p)]：动刚度矩阵。对于线性系统，多自由度系统的频响函数是多个单自由度系统频响函数的线性组合。理论上对称的线弹性系统，传递函数只有一行或一列是独立的。因此，进行模态试验只需要固定单点激励，测试其他测点的传函响应，或者固定某一测点，进行多点力锤敲击获取所有传递函数矩阵。最后再通过模态参数估计就可后处理计算出结构物体的固有频率、阻尼比和模态振型等模态参数。

试验系统与仪器设备

模态试验系统基本上由激励系统、响应系统、分析仪及计算机三部分组成。转向系统模态试验的激励系统主要是力锤以及力传感器，

试验时通过敲击产生脉冲力信号激励转向系统的结构体，并获取力信号输入到软件分析仪中。响应系统是布置在转向系统结构体上的加速度传感器振动信号，该传感器为PCB三向加速度传感器，分别测取结构体的X/Y/Z三个方向的振动数据。分析仪是LMS公司的数采设备及其模态分析软件，可以实时将获取的测点时域信号经过A/D转换和FFT变换后变成频域信号，从而计算出频响函数，最后试验结果保存于计算机中。本试验是在实车上进行测试，转向系统处于正常安装状态，为了方便布置转向管柱上的传感器测点，将转向管柱上的装饰板拆卸。整个转向系统模态试验的简单框图如图1所示。

测试方案与试验过程

1. 建立模态几何模型

为了明确传感器测点位置，以便于进行试验及后处理模态参数的

识别，进行“几何建模”。几何建模的方法通常分为以下两个步骤：

(1) 传感器测点布置。首先测点要能全部反映出结构体的轮廓结构特性，且选取在刚度较大位置；其次测点要避免布置在模态节点位置，否则会出现模态丢失；另外测点一般均匀对称布置，并且尽可能布置较多的测点，以免出现模态振型相似使得模态不便于识别；某些需要布置在倾斜面的测点需要设置合理的欧拉角进行坐标变换，有利于模态振型的准确。

(2) 按照结构体的各个零部件的搭接状态将各个测点连接成线或面，勾勒出结构体的简化结构特性，从而建立整个结构体的模态几何模型。

根据上述建模方法，鉴于转向系统总成的结构特点，本试验至少要选取八个测点，以便全面地揭示其结构模态。方向盘上平均分布四点，转向管柱上一般也平均分布

四点，如果管柱上出现不好布点的地方，可根据实际情况偏移一下距离。用一支蜡笔、标签或其他不会留下永久痕迹的方法，在方向盘及转向管柱上标明测点位置，作为传感器的布置区域，并测量记录好测点坐标，测点坐标测量值应精确到10mm。最后在Test.lab的Geometry模块里设置测点坐标参数进行建模，模型图如图2所示。

2. 安装传感器

如果实验室传感器数量有限，对方向盘转向管柱总成进行分组模态测试，先是方向盘，然后是转向管柱。首先用布基胶带将铁垫片粘紧在方向盘上、下、左、右四个位置（参照几何模型的坐标位置），如图3所示，将四个加速度传感器（带有磁铁）安装在四个铁垫片上，确保传感器与方向盘粘贴紧固。测试完方向盘的数据，则拆掉传感器，大致平均安装到转向管柱

的四个点（参照几何模型的坐标位置）上，如图4所示，确保传感器与转向立柱粘贴紧固。

3. 激励位置的确定

理想的激励位置是刚度较大且又能激出所有模态的地方，另外要方便操作力锤、注意避开节点，因为激振在节点上，任何模态也激不出来。本试验采取多点激振多点拾振的试验方法，调整方向盘处于平直向前位置且没有锁定。当转向立柱是可调整的，中间位置要相对所有的设置被选定好。在方向盘的最

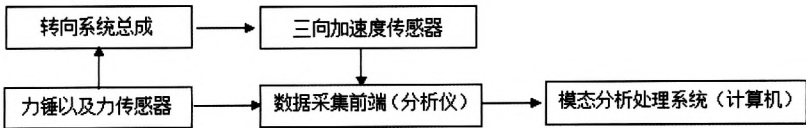


图1 转向系统模态试验测试系统图

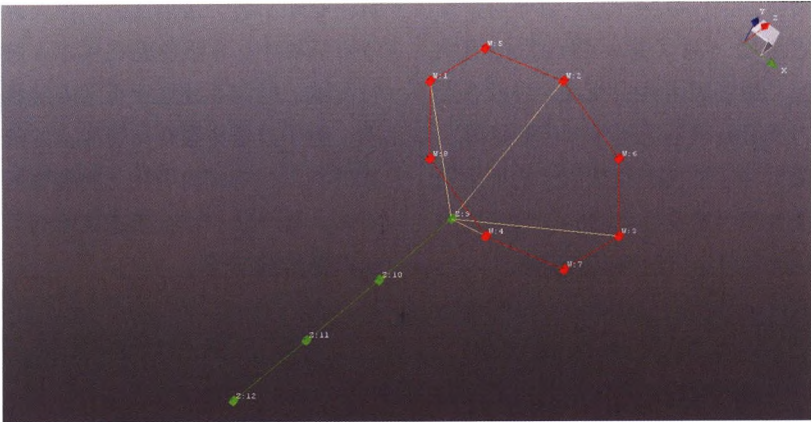


图2 转向系统总成几何模型

注：传感器安装点分布于图中M1、M2、M3、M4、M9、M10、M11、M12共八个测点；M5、M6、M7、M8是软件几何建模设置的从动点。

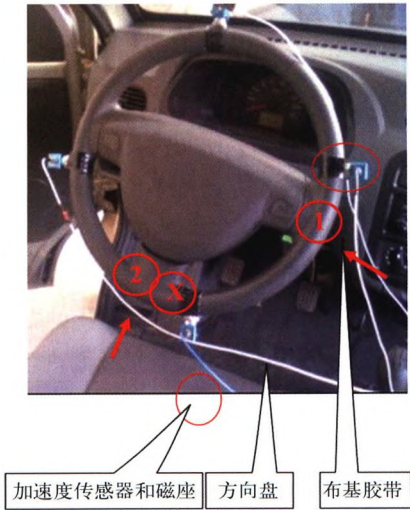


图3 方向盘传感器安装示意图

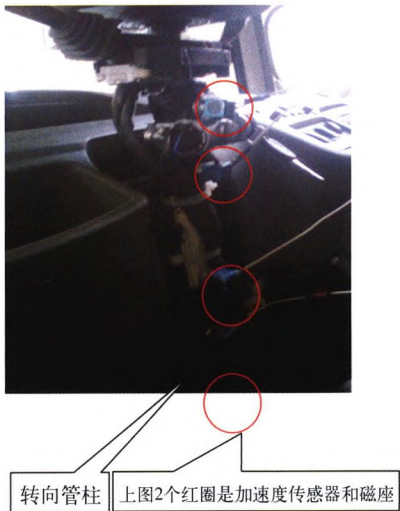


图4 立柱传感器安装示意图

后面（6点钟位置）和最右面（3点钟位置），选择几个可能的激励位置，如果由于障碍物而无法实现，可以在最前面和最左面的位置进行选择。如图3所示，图中标号1（红色箭头）为力锤敲击的-Y方向，敲击点为传感器附近的方向盘轮缘位置；标号2（红色箭头）为力锤敲击的Z方向，标号X为力锤敲击的-X方向，敲击点为传感器附近的方向盘轮缘位置。

4. 参数设置

在LMS Test. Lab模态测试软件中设置以下参数进行测试数据采集：

- (1) 脉冲激励输入信号。
- (2) 频带范围：0~64Hz。
- (3) 谱线数：128。
- (4) 平均次数：5次。
- (5) 自由触发模式。

H_1 或 H_v 频响函数估计；

输入信号窗函数选用Force-exponential；响应信号窗函数选用Exponential（响应保证在采样窗范围内衰减100%，有利于减少信号泄漏）。

为避免泄漏，激振力信号及测点信号一般可以加窗处理，另外测试时要检查下各测点的相干函数值。一般相干函数最好保证在0.9以上，这样数据会更准确。

5. PolyMAX模态识别方法

最小二乘复频域法(PolyLSCF)（即：PolyMAX)是基于最小二乘方法的一种算法，它采用离散时间频域模型，以多输入及多输出的频响函数进行计算，首先是建立含盖

模态频率、阻尼等信息的稳态图，然后再依据测试员的选择建立模态振型，以频响函数矩阵[H(t)]作为拟合函数。PolyLSCF具有较强的抗噪能力，有较高的系统误差容限，可以较便捷、有效地识别出系统的虚假模态，尤其对大阻尼、密集模态具有较强的模态识别功能。

模态识别方法还应注意以下技巧：如果频响总函数在分析带宽内模态较密集，极点较少、不好识别，可以将分析带宽范围缩小为几个小带宽进行细化分析，这样模态极点就会更为清晰，有助于模态识别。

模态识别过程还要注意结合模态频率、振型以及模态置信准则

(MAC)比较等方法对提取的模态参数进行检验与确认，避免虚假模态或者丢失模态等。

模态试验结果与分析

本试验重点分析一阶、二阶的模态振型的估计结果，记下固有频率和阻尼值。转向系统总成的模态振型主要有横向（Y向）振动和垂直（Z向）振动两种，不同的转向系统总成体现出的模态振型的先后顺序不一样。

试验结束后，检查采取的试验数据在分析频带范围的信号相干性较好，表明数据精确有效。最后采用PolyMAX方法对测试数据进行计

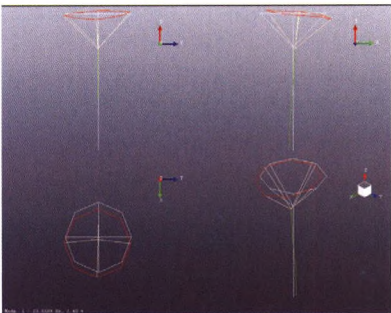


图5 第一阶垂直振动模态三向视图

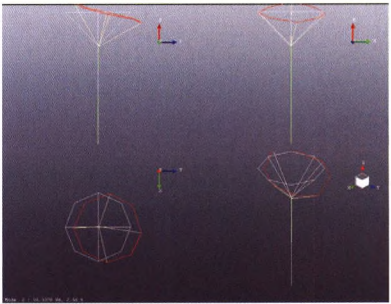


图6 第二阶横向振动模态三向视图

表1 第一阶振型描述表

模态号Mode No.: 1	振型描述Shape Description:
频率Frequency:23.56 Hz	垂直振动模态
阻尼Damp: 2.48%	

表2 第二阶振型描述表

模态号Mode No.: 2	振型描述Shape Description:
频率Frequency:35.34 Hz	横向振动模态
阻尼Damp: 2.56%	

算可以得出测试数据的频响函数总和以及模态指示函数；然后划分频带范围分析可得稳态图，清晰地识别出转向系统的一阶、二阶模态。

最后，要对模态识别结果进行模态参数验证，以确保避免虚假模态或丢失模态，通常可采用模态置信判据法（MAC图）。模态置信准则是两个向量间对应的相关系数，同一物理模态的两个向量间的MAC值通常应当接近于1比较合理，而不同模态的两个向量间的MAC值一般会较小。本试验也采用模态置信判据法对上述模态结果进行模态参数验证，图7是对转向系统总成一阶、二阶振型相关性的矩阵校验，采用的是模态置信准则（MAC）来估计。可以看出两阶

的振型具有很好的正交性，说明模态分析结果准确。

该款车辆在怠速工况下出现方向盘抖动的情况，车辆搭载的是四缸发动机，怠速转速是700rpm，可以计算出发动机怠速二阶激励的频率为23.33Hz；根据上述试验模态分析结果，转向系统的一阶模态的频率为23.56Hz，与发动机怠速二

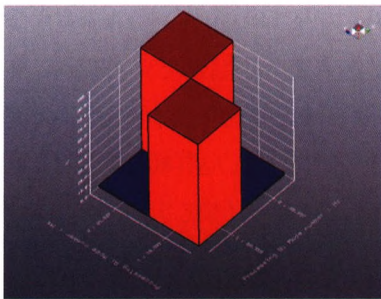


图7 模态置信判据（MAC）矩阵图

阶激励频率相近产生共振，是造成方向盘怠速抖动的主要原因。

结语

运用LMS软件可以完成对汽车转向系统总成的模态测试。本文较详细地介绍了通过力锤多点激励多点拾振的方法进行转向系统模态的试验过程，利用PloyMAX方法对测试数据进行了模态参数识别，测试结果可以得出转向系统总成的模态参数信息：模态频率、阻尼和振型等，可以验证前期的CAE仿真结果，验证设计的合理性，分析方向盘怠速抖动等NVH问题，对转向系统总成的设计及改进可起到重要的作用。**AUTO1950**

汽车工艺师

2018年 第8期 广告目次

Advertisement Catalogue

单位名称	查询编号	位置
汽车工艺师		封面
杭州友佳精密机械有限公司青岛办事处	1231	封二
柯尔柏斯来福临机械（上海）有限公司	8052	封三
浙江三维大通精锻科技有限公司	1739	封底
苏州信能精密机械有限公司	3068	1
尚亚（上海）国际贸易有限公司	5121	2
SMALLEY钢圈有限公司	8086	3
中轴协（北京）会展有限公司	6048	4
世媒公关咨询（北京）有限公司	7099	11