

某款高压共轨柴油机 ECU 散热器模态分析

王乔穆 赵仁飞 王垚

中汽研汽车检验中心(天津)有限公司 天津 300300

【摘要】利用高压共轨技术可以实现柴油机高压喷射以及喷油压力、喷油量、喷油定时和喷油率的柔性控制,代表着柴油机燃油喷射系统的发展方向。本文主要研究对高压共轨柴油机的 ECU 散热器进行模态试验,分析其动态特性,确定散热器的模态参数,从而为其优化设计提供参考。

【关键词】高压共轨;散热器;模态分析

引言

在柴油机百年发展历史进程中,有着三次重大的技术突破,分别是燃油喷射由气力喷射发展为机械喷射、涡轮增压技术的应用和近年来迅速发展的电控技术,在柴油机电控技术中,电控燃油喷射系统处于核心地位,也是当前最为活跃的研究开发领域之一。高压共轨式电控柴油机喷射系统具有高压、高脉动的特点以及高的可靠性要求,这就对喷油系统零部件在加工精度、结构刚度、密封性等方面提出了较高的要求。在计算机辅助工程方法中,通过仿真计算初步确定设计参数,然后采用有限元分析技术预测在静态和动态条件下结构的合理性,给产品设计及改进提供可靠的依据。

ECU(Electronic Control Unit)作为整车或发动机电控系统的核心部件,负责监控和协调各种电控装置的工作,实现对汽车各种工况的精细调控。在很大程度上,ECU 的性能决定整车的性能和档次。在发达国家的汽车工业中,汽车电控技术已经作为一项成熟的技术广泛地应用于现代汽车上,极大地改善了汽车的动力性、经济性、舒适性和降低有害物排放等方面的性能,是代表汽车技术发展水平的关键技术。

1.模态分析基本理论

模态分析理论是一门融振动理论、信号分析、数据处理、数理统计及自动控制理论于一体的综合理论。模态分析的首要任务是求出系统各阶模态参数,譬如系统的固有频率和阵型、模态质量、模态刚度、模态阻尼等。尽管实际选取的模态阶数不是很多,但是在处理大型复杂结构时,要想真正从理论上比较精确地计算这些模态参数也是极其困难的。一般地,结构的动态特性主要由少数前几阶模态决定,所以试验模态分析只需要识别其前几阶模态。模态参数识别是试验方法建模过程中最重要的环节。模态参数识别就是采用实测数据通过某种误差准则极小的优化算法,确定结构系统的模态参数,其中包括模态固有频率、模态阻尼比、模态质量、模态刚度及阵型等。目前常用的模态参数识别算法分为频域法、

时域法及时-频域法三大类。

利用实测频响函数识别系统模态参数的方法称为频域法。频域法以精确地估计频响函数为基础,以模态模型的频域展开式为识别公式,辅助变量最小二乘法、迭代法、残差法、泰勒级数展开等手段,对系统的模态参数进行局部或整体估计。利用频响函数的图像识别模态参数的方法,是早期的频域识别法,它适合于单模态估计的情况,可用于模态参数的粗略估计或为一些需要初参数的频域识别法提供初参数。频域法具有识别过程直观、物理概念清楚、识别精度高,可以通过平均处理消除有色噪声影响,可对频带外效应进行补偿,可提高模态阵型估计精度,适合于阻尼比较大的系统等特点。其不足之处是在频响函数估计中引入一定的时频变换误差或截断误差,频响函数是按频率的平方上升,会影响高频段的估计结果等。

利用实测时域响应数据或脉冲响应函数等识别系统模态参数的方法称为时域识别法。时域法以实测脉冲响应、自由衰减响应、随机激励响应、响应数据为基础,以时域模态模型为识别公式,辅之以最小二乘法、迭代法、参数模型估计法等手段,对系统的模态参数进行整体估计。时域法利用实测响应信号直接识别系统的模态参数,不需要进行 FFT 变换,减少了数据变换误差,提高了识别精度。利用实测时域输入输出数据、脉冲响应函数可以识别得到系统所有的模态参数。利用自由衰减信号、随机激励响应只能识别得到模态频率、模态阵型、模态阻尼比,不能得到模态质量、模态刚度和模态阻尼。

2.ECU 散热器的模态试验

本次试验所用的 ECU 散热器是某公司正在研制的电控柴油机部件,试验件照片如图所示。试验的目的是测量散热器在自由状态下的模态参数,为结构设计及修改提供参考依据。

2.1.激励方法的选择

从频响函数的物理意义可知,若知道激励和响应,就可推知系统的特性。从这个意义上来说,有两种激励

方法可供选择, 其一是对结构上某点激励, 测得所有点的响应, 即单点激励的方法。其二是对结构某些点(一般是 2~4 个点)同时激励, 测得各点的响应, 即通常所说的多点激励方法。

激励方法的选择包括两方面的内容: 一是采用什么样的激振信号; 二是采用单点激振还是多点激振。问题的中心在于是否能够提供足够的能量, 把需要的频段中的模态全部激发出来。激励信号可采用随机信号、脉冲信号等。随机信号产生的方法可用白噪声发生器产生, 其优点是: 能量均匀分布在频带上, 且可在较宽频率范围内对结构进行激励, 总的激振力水平是可以控制的。其缺点是泄露误差大。用锤击法可以提供脉冲信号, 该方法的优点是: 设备简单, 不需要精心的设计安装激振器的夹具, 便于现场测试或在线测试; 激振点比较灵活, 敲击力方向可以任意; 测试精度能满足一定要求。缺点是: 激振力频率范围不易控制; 适合于低频, 高频模态不易激发出来。由于振动能量分散, 从而信噪比小; 锤击时还有可能过载, 使结构进入非线性范围。模态分析的频域法有两种: 单点激振法和多点激振法, 多点激振法需要昂贵的多点激振设备, 试验过程比较复杂, 但计算比较简单。单点激振法所需设备比较简单, 试验也比较容易, 但计算方法要复杂一些。

在本次实验中, 根据现有条件并综合考虑以上各因素, 最终激振信号采用锤击法所产生的脉冲信号。本文研究的散热器外形尺寸为 1990mm×1325mm×487mm, 激励位置在 ECU 散热器外壳的上表面, 结构总体较容易被激振。所以采用单输入多输出(SIMO)的模态试验方法。

2.2. 固定方式的选择

在进行部件模态试验分析时, 首先要确定被测物体的固定方式。固定方式一般有两种: 一种是按照其实际工作状态的方式约束, 这种固定方式主要用于较小的部件或在振动台上进行试验; 二是悬吊式, 使其处于自由状态下进行分析, 结构处于自由状态具有最多的自由度, 这样得到的模态参数便于与其它部件一起进行整体结构的综合模态分析。

实际上, 真正的自由状态是难以在实验室内实现的, 只能采用某种适当的方式来近似模拟自由状态。为了减小悬挂系统(试验对象作为刚体与弹性支撑装置组成的系统)对试验对象结构弹性模态的影响, 要求悬挂系统具有较低的刚度、较小的附加质量和零摩擦力。悬挂系统的固有频率与悬挂点布置一般应满足下列要求:

(1) 悬挂系统的固有频率为试验对象结构弹性模态

基本固有频率的 1/10-1/5 以下。否则, 应考虑悬挂系统对试验对象弹性模态特性的影响;

(2) 悬挂点应尽量选在试验对象结构刚度较大的节点附近, 避免结构悬挂的静应力引起结构刚度变化, 并确保悬挂系统稳定;

(3) 减小悬挂系统引起的附加阻尼对结构试验对象的影响;

(4) 实验对象的悬挂方向最好与结构主振方向垂直。

模态实验中, 试验夹具和支撑系统的设计与验证相当重要。当发现夹具和支撑系统的动态特性对所试验结构有明显影响时, 应将试验对象连同夹具一起作为整体进行动态分析。随着试验对象结构越来越大, 要设计一个具有理想界面或与试验对象耦合较小的夹具也越来越困难, 费用也相当昂贵, 有的需要从试验方法(如惯性质量界面和残余柔度)去解决这些矛盾。

本次试验采用悬吊的方式, 即用四根橡皮绳将 ECU 散热器悬吊起来, 要求橡皮绳伸长后的长度不能超过原长的两倍。

2.3. 参数设置

(1) 传感器灵敏度设置: 信号分析中的信号往往是电压形式, 分析结果也是一个与电压相关的量, 与工程实际的物理量之间有一定的换算关系。为了减少分析误差, 最好分析时将标准已知物理量信号送入分析设备中, 使分析设备上的数值与实际物理量之间建立直接的关系。也就是对传感器的灵敏度进行设置, 建立起电压单位与物理单位之间的换算关系。

(2) 采样频率: 若对信号作时域分析, 则采样频率越高, 信号的复原性越好。可取采样频率 f_s 为信号最高频率 f_c 的 10 倍。对于有些信号分析设备, 采样点数是有一定限值的, 采样频率高, 所采得的信号记录长度就会短, 会影响信号的完整性。

进行频域分析时, 为了避免混叠, 采样频率 f_s 最小必须大于或等于信号中最高频率 f_c 的 2 倍, 即 $f_s \geq 2f_c$ (采样定理)。在实际分析中, 一般采样频率取为信号中最高频率的 3~4 倍。若只对信号中某些频率成分感兴趣, 分析时的最高频率可取为感兴趣的最高频率。值得注意的是, 有些信号分析设备作频域分析时采样点数为固定值, 提高了 f_s , 分析频带宽度 ΔF 增加, 从而频率分辨率变差。

(3) 采样点数: 进行时域分析时, 采样点数越多, 越接近原始信号。进行频域分析时, 为了计算 FFT 的方便, 采样点数一般取 2 的幂数, 如: 32、64、128、256 等。

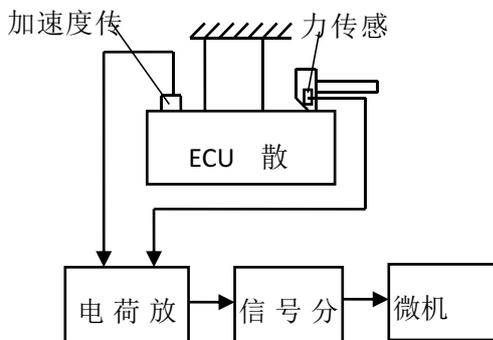
(4)信号的记录长度: 当 f_s 的采样点数 N 确定之后, 分析信号的记录长度就确定了。每一段样本的长度为 $T=N(1/f_s)$ 。为了减小分析的幅值误差, 分析中往往采取平均处理, 这时信号的记录长度还与平均的段数 q 有关。信号的记录长度为 $T'=q \cdot T_e$, T_e 为分段的信号长度。

(5)平均计算: 为了提高谱估计精度, 需要对采样数据实现平均化处理。对信号采用多次取样, 然后再进行平均处理, 处理的方法一般有两种: 一种是线性平均; 另一种是指数平均。

(6)试验频段选择: 试验频段的选择应考虑机械或结构在正常运行条件下激励力的频率范围。通常认为, 远离振源带的模态对结构实际振动响应的贡献量较小, 甚至认为低频激励激出的响应不含高阶模态的贡献。实际上, 高频模态的贡献的大小除了与激励频带有关外, 还与激振力的分布状态有关。因此, 试验频段应适当高于振源频段。此外, 如果属于部件试验, 试验的结果将会用于和其它多个部件进行装配综合分析, 以求取整体结构的模态。那么为使整体模态具有更高的精度, 部件模态的试验频段应适当放宽些, 以求取较多的模态。部件模态过少而部件装配时各部件之间的联接点较多时, 可能使整体综合分析不能进行

2.4. 试验方案

首先将结构在某一状态下进行单点激振, 通过测量激振力与振动响应, 分析激励点与各测点(响应点)之间的传递函数, 建立传递函数矩阵, 最后用频域多参考点参数辨识方法对试验的传递函数曲线进行拟合, 识别出结构的模态参数, 从而建立起结构的模态模型。试验的测试项目包括对激励力和测点加速度响应信号的测量。整个实验的基本框图如图所示:



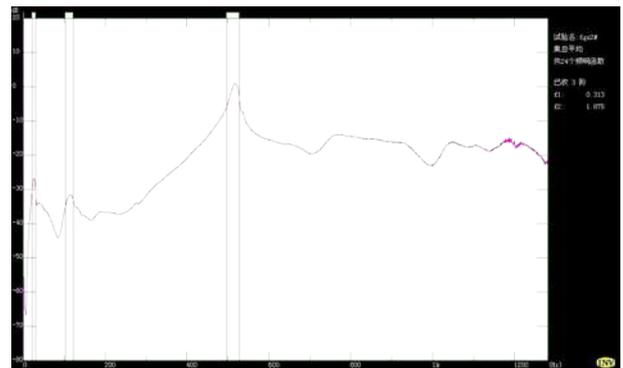
2.5. 数据处理及实验结果

由于实验中采用了锤击法所产生的脉冲信号作为激励信号, 因采样时间过短, 而响应衰减慢, 则响应信

号被截断而产生能量泄露。解决的办法是加指数窗。对于力脉冲信号, 由于脉冲持续时间短, 脉冲后面均为干扰信号, 为此可采用加力窗函数的办法。力窗函数的表达式见式(2-13)。同时对响应信号加指数窗。

$$W_f(t) = \begin{cases} 1, & t \leq 1.2\tau \\ \frac{1}{2} [1 + \cos \alpha_c (t - 1.2\tau)], & 1.2\tau \leq t \leq 1.8\tau \\ 0, & t \geq 1.8\tau \end{cases}$$

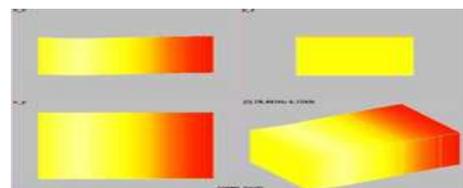
试验测试完毕后, 分析所有测点的频响函数, 散热器自由状态的模态频率主要在 0~600Hz 频段内。采用频率多参考模态拟方法进行模态分析, 经综合后, 获得结构的模态参数。模态的收取过程、模态试验结果、各阶振型如下



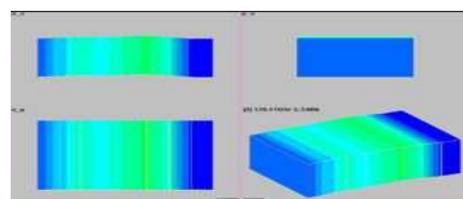
模态的收取

阶数	频率/Hz	阻尼比/%	模态质量	模态刚度	模态阻尼
1	28.493	6.726	2.4457e+004	7.8383e+008	5.8900e+005
2	128.115	5.338	7.1908e+005	6.1793e+007	4.6595e+011
3	513.212	2.407	4.7487e+004	7.3705e+006	4.9378e+011

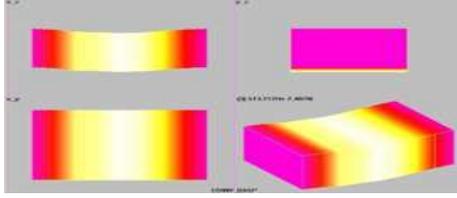
识别出的模态参数



第一阶阵型图



第二阶阵型图



第三阶阵型图

3.总结

本文从试验模态分析的理论出发,讨论了激励方法、固定方式、最佳激励位置以及具体试验设计的一些基本问题。不同的测试与分析系统,它们在性能、灵活性、大小和价格等方面是有区别的,需要试验设计者根据不同的需要进行选取。本次试验使用单点输入多点输出的方法对 ECU 散热器进行模态试验,并用频域多参考点模

态参数辨识方法来辨识模态参数。经综合后,获得了结构的模态参数,通过试验模态分析掌握了 ECU 散热器的动态性能。

【参考文献】

[1]王钧效,房克信.柴油机共轨式喷油系统的结构及发展动态[J].汽车技术,2017(9).11~19

[2]马建民.柴油机高压共轨系统 ECU 的研究与设计[D].上海:上海交通大学,2018.1~10

[3]夏倩.柴油机主要零部件的有限元分析与试验研究[D].武汉:武汉理工大学,2016.5~31

[4]谢志强.4120SG 型柴油机结构有限元分析[D].武汉:武汉理工大学,2015.10~25.