

振动测试在发动机生产过程中的作用与发展

□ 上海大众动力总成有限公司/尤凤青 戚文炎

在发动机生产过程中振动测试始终监控着每台发动机的运行，其精确、稳定的特点保证了发动机的质量。同时随着科技的发展，振动测试也逐步成为不可或缺的一个关键测试。

振动测试作为发动机整机的一个测试手段，主要应用于装配线及测试模块。我公司共拥有4套缸盖振动测试、4套缸体振动测试和2套涡轮增压器振动测试，振动测试被集成在装配线的冷试检测设备上。

发动机振动测试原理

发动机的振动特性主要表现形式是异响，为了提高发现异常振动的精确性，采用接触式振动传感器，可去除空气介质在能量传播过程中的干扰，通过发动机本体的能量传递直接发现异常振动。

由于整个冷试过程中发动机都是处于运转的过程，可以认为检测环境为非静止的环境，所以采用了弹簧式的接触式加速度传感器（见图1）。振动包括正弦振动与随机振动，发动机异常振动往往都是以正弦的形式体现，而随机振动则是外界的杂音等。

通过加速度传感器能够收集到发动机在一个时间段内发动机本体的振动，通过处理器过滤掉随机振动，将过滤放大后的曲线体现出来。如果出现了异常振动则会出现异常的能量变化，这时候也就会造成纵坐标

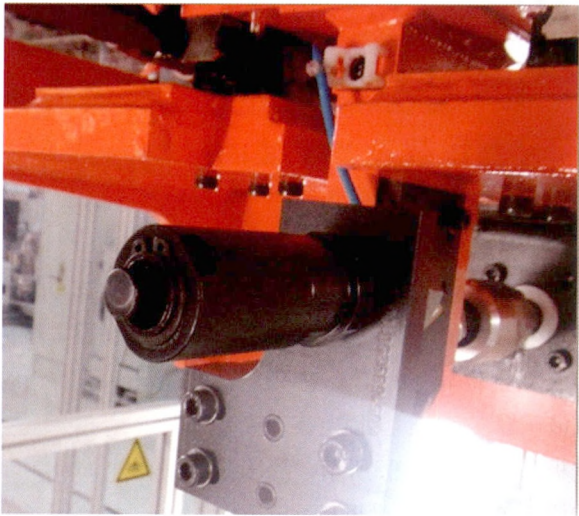


图1 弹簧接触式加速度传感器

曲线的变化。但是由于这里收集到的信号仅仅为未经过处理的初级信号，所以敏感度很差，而通过傅里叶变换，将时间域的函数表示为频率域的函数 $F(\omega)$ 的积分，而正弦振动由于具有一定的频率所以能够很容易地分离出来，而随机振动一般作为设备杂音会被

FFT分解成多个频率振动的总和，从而分散在谱域曲线的各处。为了方便分析，设备自动将频率Hz转化成为了曲轴倍数Ord，至此，设备具备了分辨发动机中各主要部件频率情况的能力（见图2）。

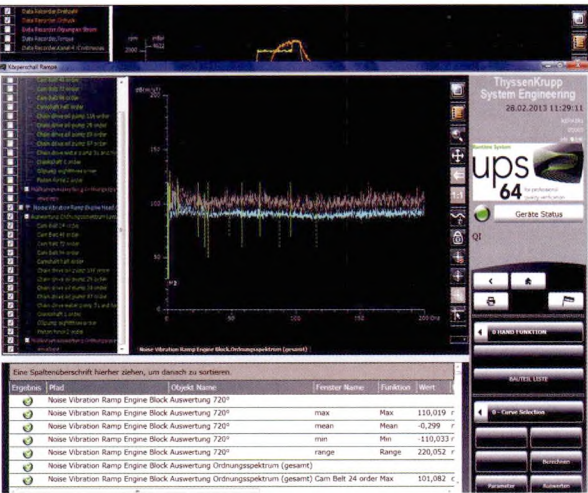


图2 谱域曲线示意

测试方案介绍

确定传感器类型后，并且也通过FFT能够发现各个频率上的问题，下一步需要定义振动系统，告诉系统如何判定合格与不合格曲线。

1.时域测试

由振动系统收集到的以时间为横坐标的物理曲线我们称之为时域曲线（见图3）。时域测试即为基于时间坐标轴的初始曲线上的测试窗口，在发动机低速运转的情况下先进行时域测试，一旦出现严重问题立即自动停止测试。这样既发现了缺陷，又保护了设备，因此时域

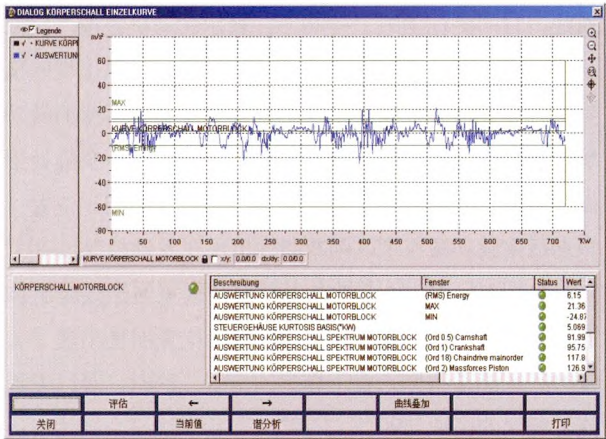


图3 时域曲线示意

测试适于被用作冷试的低速预检测测试。
测试窗口方面，在时域曲线上设置能量的上限窗口与下限窗口，一旦超差即停止设备的继续运转。窗口的大小由冷试工程师负责修改，在进行大量数据的正态分布统计并结合以往缺陷情况后进行窗口设定。

2.谱域测试

时域曲线经过FFT变换后产生的具有频率特征的曲线称为谱域曲线（见图4）。VWPT的产品均为活塞式4冲程汽油发动机，工作介质为汽油，通过活塞的形式带动曲轴从而产生动力。对比市场上所有的活塞式汽油发动机不难发现，曲轴传输动力这一点是永远不变的，而发动机的主要部件都是通过链条、皮带或者齿轮啮合与发动机唯一的动力源曲轴相连接。根据这一结构特性可以认为所有重要部件的运动特性都与曲轴有关，通过转速关系可以算出各重要部件的频率，而这些频率恰恰就表现在谱域曲线中。

通过在谱域曲线上设置参数就能监控各重要部件的振动情况，其中窗口的设置与调整与时域测试一样，由测试工程师本人通过以往的数据经验来设置。

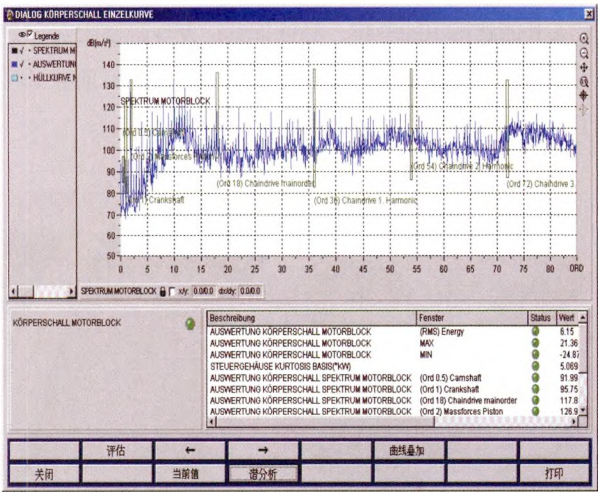


图4 谱域曲线示意

3.谱域包络线测试

包络线测试其实也是基于谱域测试这个概念所延伸出来的一项测试，即通过连续测试跟踪某一个频率零件在一段时间内的特性。为了能够更精确地发现问题，我们介入了窗口自学习系统，通过冷试工程师人为挑选发动机样本，计算机自动计算样本的某一频率在一段时间

内的曲线，并自动生成基于样本发动机的测试窗口，一旦有发动机在这个时间段内出现异常，设备自动报警（见图5）。

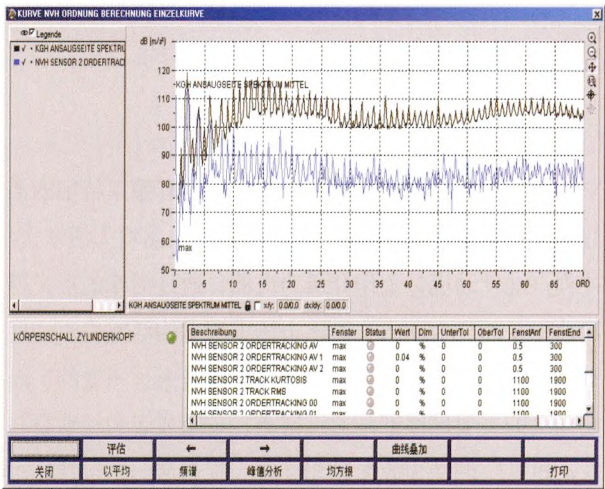


图5 谱域包络线

典型缺陷介绍

1.缸筒内部异物导致发动机异响

以下是一例时域测试报警的典型示例。一台发动机在短发冷试过程中振动测试时域信号测试报警，同时伴有耳能够辨识的异响。经过拆解后发现缸筒内部有金属碎屑，在活塞上下活动的过程中敲击燃烧室顶部引起了异响（见图6和图7）。

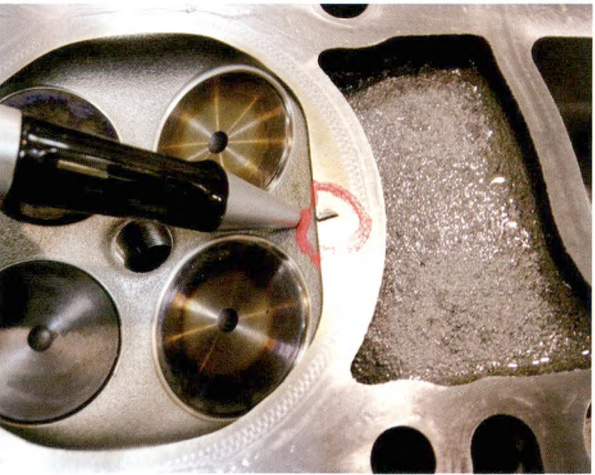


图6 缺陷图示

2.四缸连杆轴瓦漏装

对于轴瓦漏装此类的缺陷，可依靠缸体振动传感器来检测。由于EA111与EA211发动机的结构关系，在连

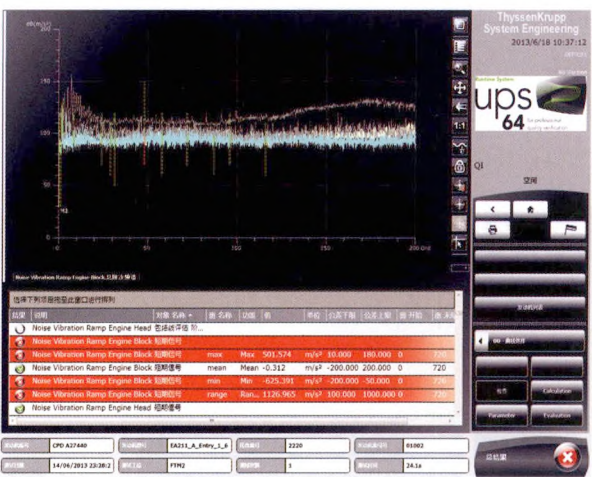


图7 测试结果

杆轴瓦上并没有油道，所以一旦出现轴瓦漏装的情况，就无法对发动机油压造成影响，但是振动测试能够精确发现此类缺陷，从而避免了市场及整车厂抱怨。

通过谱域测试图分析该缺陷：由于连杆轴瓦漏装的发动机会出现持续的异响，而该异响会持续出现，所以此异响不具备单一的振动频率，而是如同多个频率的曲线叠加。在谱域曲线上的表现则会表现为整体频率的上升，这是典型的连续异响现象。

3.两缸活塞装反

第三个典型案例则是在EA111 TSI发动机上，曾经出现过活塞反装的情况。由于TSI活塞顶部形状不对称，反装会造成气门敲击活塞，由于活塞的运动具有一定的周期性，所以这个敲击也是具有一定频率的正弦振动。

横坐标为时间曲线，纵坐标为能量坐标的时域信号曲线，时间坐标为0° ~ 720°，表示发动机完成一次做功的完整循环。而在这个循环中能够根据异响出现的横坐标时间先后来判断发动机的部件。比如，活塞的做功顺序为1→3→4→2，意味着每180°就会有一个缸处于做功行程，该案例出现超差的曲线出现在630°位置，根据活塞做功顺序可以判断问题出现在发动机2缸。

从图8所示的光谱图中，无论是缸盖通道还是缸体通道都能够发现这一缺陷，在630°位置明显出现了大量的红色能量积聚，表示异响的出现。同时，可以发现能量积聚的区域与90°、270°、450°这三个缸活塞运动的频率一致。由此可以证明，此类正弦振动可以通过

谱域曲线测试出来。

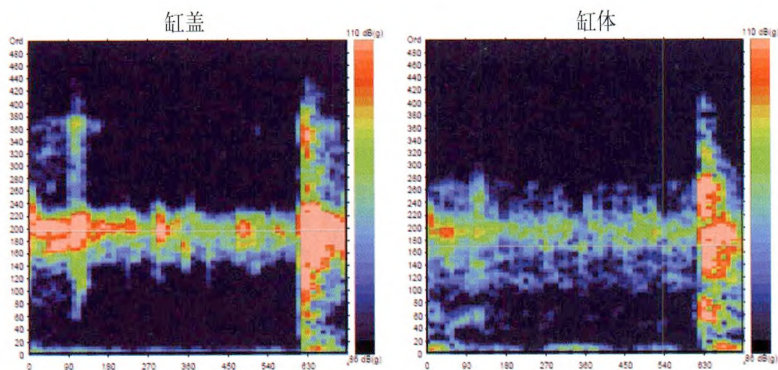


图8 光谱图示意

4.使用情况总结

根据目前我公司振动测试使用情况来看，振动测试能够发现一些独特的缺陷。而这些缺陷往往是其他测试项目无法或者难以检测出来的，所以振动测试在发动机检测中起到了重要的作用。

通过多年实践，振动测试在发动机测试领域中的使用特点总结如下：

- (1) 振动测试传感器非常敏感，对于长时间繁忙的生产任务来说，需要定期的清洁及保养，以保证传感器的接触位置稳定和传感器弹簧吸振能力。
- (2) 由于发动机的在线测试时间非常短，需要满足线上生产需求，这也就意味着振动测试的时间会很短，而有时有些缺陷无法在如此短的时间内出现，所以振动测试在线测试也具有一定的局限性。
- (3) 由于发动机本身的独特性，有些缺陷并不能在第一时间表现出来，或者并不是以振动的形式表现出来，所以振动测试并不能发现所有的缺陷。但是对于那些有固定振动频率、具有明显振动异响的缺陷测试有非常高的灵敏性。

振动测试的发展

1.振动测试在冷试上的发展

从目前我公司振动系统的使用与能力来说，振动测试在冷试中还有有一定的优化空间。比如信号过滤与分析这一块，近几年这一技术发展非常快，不断更新，已成为大幅度提升振动测试精度与准度的关键技术。

但是针对发动机的冷试，仍然有一点将会是永远伴随我们以及干扰判断的因素，那就是冷试的过程其实就是发动机第一次运转的过程，也是发动机第一次建立油压的过程，还是发动机零件从干摩擦到润滑摩擦的一个过程。在这一过程中由于发动机的振动特性是非常不稳定以及

不一致的，每台合格的发动机建立油压的过程都具有不一样的振动特性，而往往这些特性与真正有异常振动的发动机特性非常相似，所以这个特性会限制振动测试的能力。

2.振动测试在热试中的展望

与冷试不同，热试测试时间长，而且采用汽油驱动的形式，稳定性会非常高，测试一致性会非常好。对于整个测试环境，热试目前手段相对单一，除了读取ECU代码以及台架本身检测的功率转矩外，无法精确发现内部出现的问题，而这个环境恰恰就是最适合振动测试来判断内部特性的环境，所以笔者认为振动测试在热试中将会得到很好地运用。

3.整车上的应用

振动测试在整车上的应用相比冷试及热试这些模拟整车的环境来说会更有代表性。对于整车来说，每个重要部件都有其独特的振动特性。比如，发动机的整体振动特性表现为频率相对低，振动强烈，有明显的振幅，与外界路况及环境相对无关；变速器则表现为频率相对较高，杂音小，运行平稳，同样与外界路况与环境无关；而整个底盘系统则更多的是非周期性的振动，与外界路况与环境息息相关。

整车的异响往往无法彻底定位，这是因为人耳能够分辨但是无法读出频率。而振动测试在整车上能够清晰判断问题出现的位置，大大缩短分析周期，快速定位。所以振动测试的不断发展，对于整车分析来说是非常有帮助的。 **AUTO1950**