有效振动分析的信号处理

摘要

有效的振动分析首先始于从工业标准的振动传感器，如加速度传感器获得一个准确的时域变化的信号。一个手持式数字仪器一般接入原始的模拟信号，并为用户的多种要求进行处理。根据用户对分析的要求和原始信号的最初单位，信号可被直接处理或经由数学积分器变换成振动测量的其他单位。根据感兴趣的频率，信号可能要经过一系列高通滤波器和低通滤波器的调理。根据期望得到的结果，信号可能被多次采样和平均。如果在数字仪器中需进行时间波形分析，那么确定采样点数和采样速率是必要的。观察的时间长度等于采样周期乘以采样点数。大部分手持式仪器也具有 FFT(快速傅里叶变换)处理方法，把全局时变输入信号采样分解为其单独的频率分量。在老式模拟仪器中，这个分析功能是由扫频滤波器来实现的。

定义 FFT 处理时要考虑很多设置参数：（1）分辨率线数；（2）最大频率；（3）平均类型；（4）平均次数，和（5）窗类型。这些参数互相作用影响得到的结果，并且需要在信息质量和完成数据采集所耗时间之间进行折中考虑。

预知维修的成功依赖于数据采集和变换过程中的几个要素：（1）总振动水平的趋势；（2）复合振动信号各个频率分量的幅值和频率；（3）在相同运行条件下，机器某一部分的振动信号相对于机器上另一个测量的相位关系。

本文将带领读者从振动传感器的输出，经过典型的现代数字技术振动测量仪器所完成的信号处理流程的各个阶段。并且，本文重点介绍了预知维修领域为完成准确分析而进行的快速有效的振动数据采集中所需的多个数据采集设置参数和折中考虑。

关乎振动分析成功的几项内容，将给予详细论述：模拟信号采样和调理；抗混淆测量；噪声滤波器技术；频带-低通，高通，带通；数据平均方法；和 FFT 频率转换。

1. 讨论

振动分析始于传感器输出的时变物理信号。从此信号的输入到振动测量仪器，有很多可能的选择去分析信号。本文的目的是关注内部信号处理路径，以及它和原始振动问题的最终根源分析之间的关系。首先，我们看如图 1 所示的仪器中典型信号路径的框图。

2. 时间波形

图 2.所示是一个典型的来自加速度传感器的模拟时间波形信号。

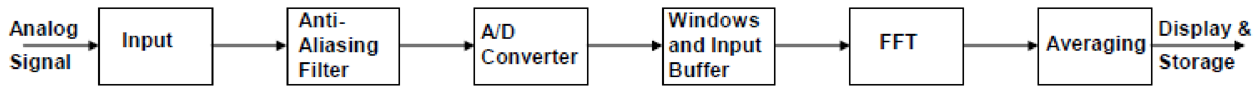


图 1. 典型信号路径

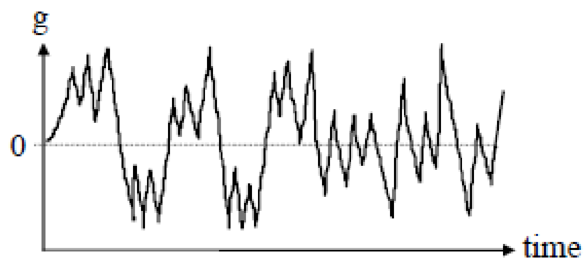


图 2. 典型时域波形

在数字仪器中几乎看到同样的信号。然而，在数字仪器中为了精确的重建绘图，必须规定一些参数。告诉仪器使用什么采样速率，和进行多少次采样是重要的。为此需确定：

a) 观察的时间长度。它等于采样周期乘以采样点数。可选择的最高采样频率是仪器的特性，单位为 Hz 或 CPM(1Hz=60CPM)。现代仪器中高达 150K Hz 采样速率也是常见的。

b) 可见的最高频率。它总是小于采样频率的一半。

选择的采样点数是像 1024 的数字(即 2^{10}，为后面 FFT 的计算提供方便)。所生成的时间波形需要一个有辨识能力的人员去评价，但在工业过程中作为一个分析工具是很受欢迎的。重要的是注意在此数据中通常可见到短暂的瞬变是，但是进一步的信号处理可能掩盖这些瞬变。

在数字信号处理过程中，有一些限制需要考虑：

- 低通滤波器 -- 消除任何高频率
- 高通滤波器 -- 消除直流和低频噪声
- 传感器特性 -- 一个因素，通常限定最低和最高有效频率，还有一个固有共振频率，传感器在此频率处放大信号。

另外，信号的积分 -- 从加速度传感器产生速度或位移信号或者从速度传感器产生位移信号 -- 往往会丢失低频信息并引入噪声。因为数字积分受 A/D 转换过程的动态范围的限制，输入信号的积分最好由模拟线路实现。数字线路往往引入更多的误差，而且如果在低频处存在干扰，积分会将此干扰放大。

这些是数字信号和分析的原始因素。在讨论的限制和进一步的处理中，对设备状况进行非常精确的诊断是十分可能的。

3. FFT

进一步信号处理的常见形式是 FFT，即快速傅里叶变换。此方法采集时变物理信号，并将它分解为各分量，各个分量具有振幅、相位和频率。将频率与机器特性相联系，并参看振幅，可以很准确的定位机器问题。在模拟仪器中，相同的信息由扫频滤波器提供，被称为固定 Q（或定 % 带宽）滤波器，此处用一个低通/高通滤波器结合的等 % 带宽例如 2.5% 实时扫频一个信号去产生振幅对频率绘图。这使得在较低频率具有好的分辨率(如 600 CPM 的 2.5% 是 15 CPM 分辨率)，在高频处的分辨率较低(120000 CPM 的 2.5% 是 3000 CPM)。因此，频率轴通常为对数标尺，如图 3. 所示。

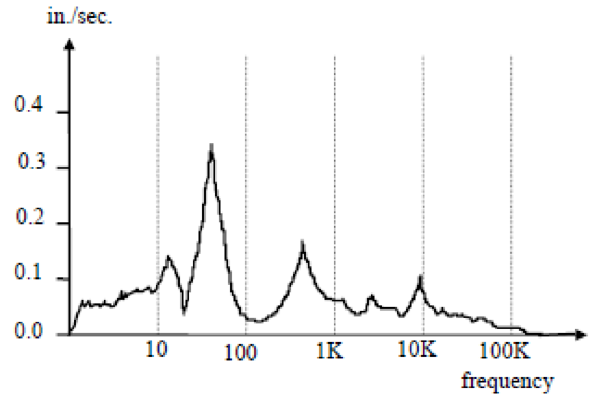


图 3. 振动速度-对数频率

调谐技术比 FFT 慢得多，尤其是低频时。因为只在某个瞬时查看每个频率，它也可能丢失信息。然而扫频滤波器仍不失为一个强大的分析工具，尤其对于恒稳态振动。

现代仪器中，FFT 更常被用来提供频域信息。

正如傅立叶理论所述：所有的波形，不论多复杂，都可以表述成具有不同振幅，相位和频率的正弦波的和。机器振动的情况下，这是十分正确的。一个机器的时间波形主要是由很多具有不同振幅和频率的正弦波的和。问题是将复杂的时域波形分解为组成它的各个分量。图 4 给出了一个例子。

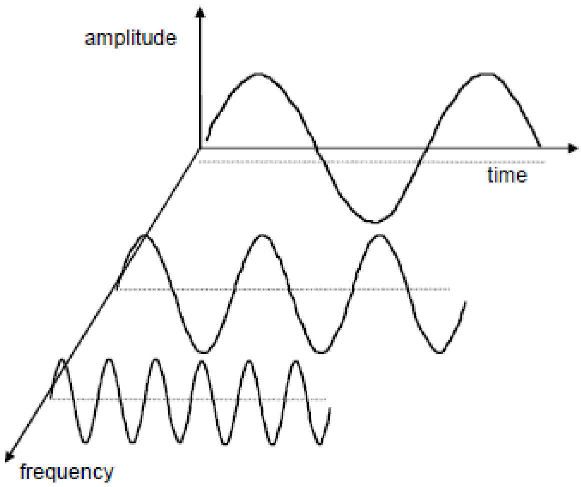


图4.复杂时域波形分量

所示有三个波形，绘制成时间，频率和振幅的3-D网格图。如果我们将波形叠加在一起，会看到如图 5 所示的复合时域波形；如果我们去掉时间轴，将会得到频率和振幅的图形，如图 6 所示，也就是 FFT。

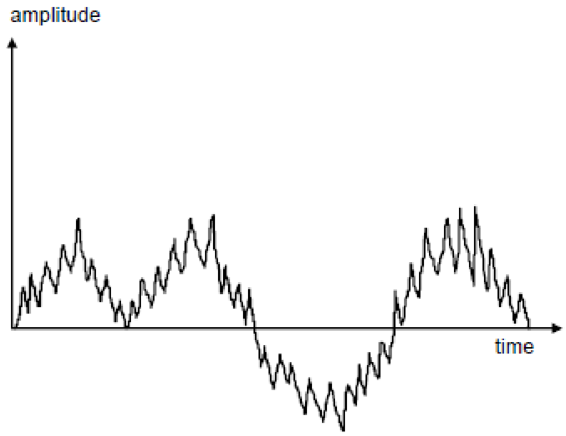


图5. 组合时域波形

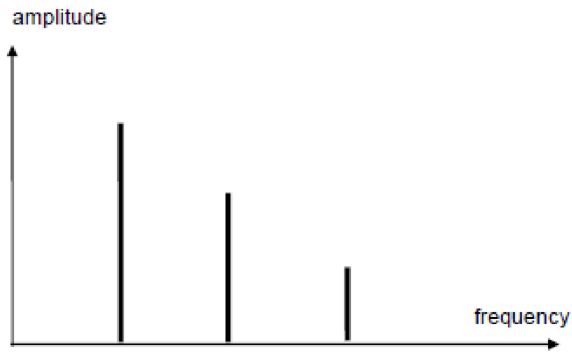


图6. 频率分量和幅值

当在一个仪器中设定 FFT 测量时，需要选择一些选项，如图 7 所示。

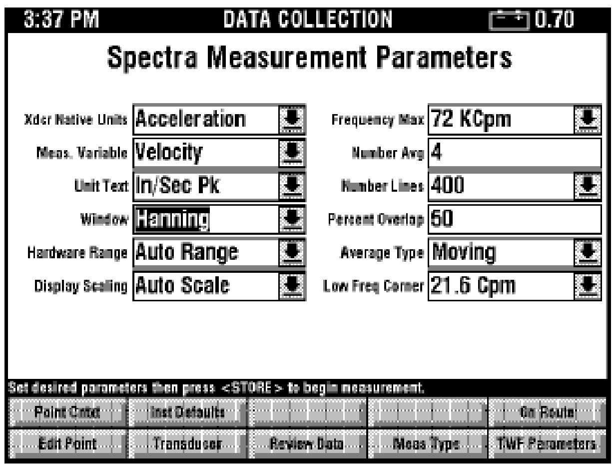


图7. FFT设置参数

重要参数如下：

- Fmax
- 平均次数
- 谱线数
- 平均类型
- 重叠百分比
- 低频截至
- 窗类型

每项将在后面详细讨论。

4. 分辨率线数

FFT 分辨率描述出 FFT 绘图中信息的线的数目，如图 8 所示，典型值为100，200，400，800，1600，3200，6400和12800。每条线将覆盖一个频率范围，每条线的分辨率简单计算为 Fmax/线的数目。例如，Fmax为120000CPM，400线，分辨率为300CPM每条线。

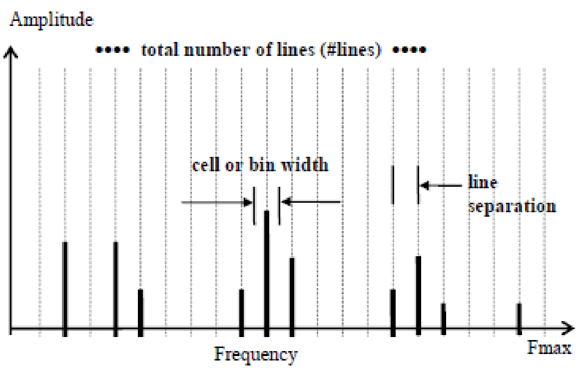


图8. FFT分辨率

5. Fmax

这是仪器可以获得和显示的最高频率。当选择 Fmax 时，我们也设置了其它的参数，其中之一就是抗混淆滤波器。

因为用来产生 FFT 的操作是数字的，并且我们采用数字化的时域波形产生 FFT，在时域波形图上我们实际上看到一系列点，如图 9 所示。

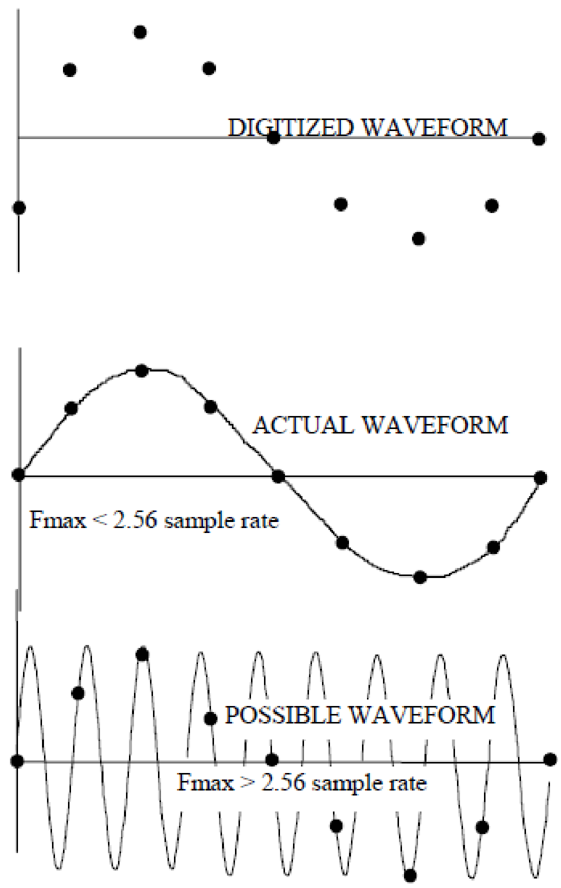


图9. 数字采集和混淆现象

6. 混淆现象

为了保证从这些点产生正弦波，我们需要以远高于我们关心的最高频率的采样速率去采样。根据仙农和奈奎斯特定律，最低采样速率至少是Fmax的两倍。也就是说，为了定义一个纯正弦波，必须要以至少两倍于它的基本频率去采样。由于抗混叠滤波器的复制，超过最高频率含量的两倍是必须的。2.5倍就足够了，但是为了和计算机世界一致，通常使用2.56。如果应用了较低的采样速率，原始时变信号可能无法重建，并可能发生“混淆”现象。出现这个现象时，一个高频率成分倾向于看上去像一个较低的频率，如图 9 所示。

图 10 表示在混淆现象时，滤波器复制和折叠

频率现象。

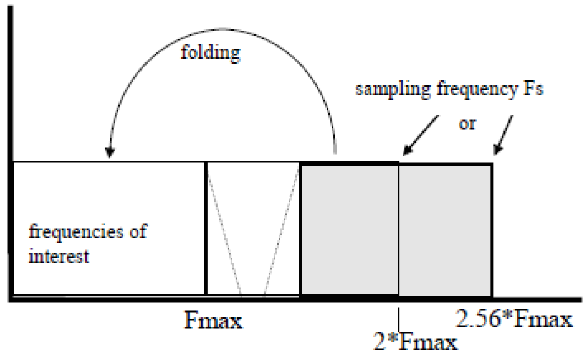


图10. 混淆的折叠现象

两个信号的频率差落在感兴趣的频率范围内时，这两个信号就会发生混叠。这个频率差在采样过程中是总会产生的。

为了保证在信号内不含任何高频组分（高于所选的 Fmax 值），我们使用抗混叠滤波器来抑制高于 Fmax 的原始信号。这个技术的引入节省了处理时间，保证所选频率范围内信息是准确的。

7. 数据采集时间

当参数 Fmax 和分辨率线数选定后，采集有效 FFT 数据的总体采样时间就确定了。

对于 400 线的 FFT，由于涉及的计算，我们需要波形上的 1024 个点。点数(N=2.56 ＊ 线数) 由下面的计算得到：

带宽(BW)= Fmax/线数

$T_{(obs)}$ = 1/BW = 线数/ Fmax

$T_{(obs)}$ = N ＊ $T_{(sample)}$ = N ＊ (1/(2.56＊ Fmax))

N = 2.56 ＊ 线数

其中，

线数 = FFT分辨率的总线数
Fmax = 最高分析频率
N = 采样点数
$T_{(sample)}$ = 采样周期(sec.)

$T_{(obs)}$ = 观察时间长度

图 11 是一个采样的例子。

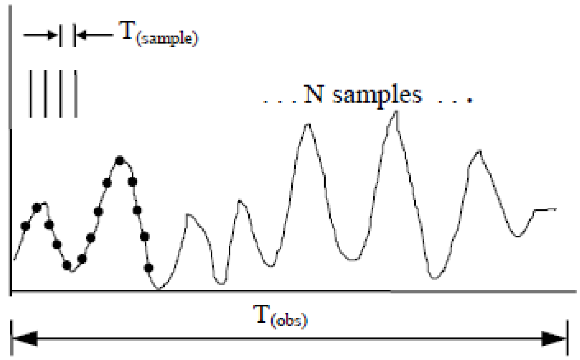


图11. 采样和观察时间

假设我们要 Fmax 为 120000 CPM 和 400 线的分辨率，我们就可以确定采样的时域波形的长度。

- 避免混叠，选择一个120000 CPM 的低通滤波器
- 避免混叠，我们以 307200 CPM (= 2.56*120000) 采样
- 采样 1024 点来产生 400 线的分辨率

这部分观察的时域波形将是 1024 个采样，一共0.2s，这样，我们需要一个至少5KHz采样率的仪器(0.2 秒内 1024 采样 = 5120 采样/秒)。

另外一个例子，400 线 FFT，Fmax 为 6000CPM 要求一个观测时域波形的计算如下：

$T_{(obs)}$ = N ＊ $T_{(sample)}$ = N ＊ (1/(2.56＊ Fmax))

= 1024 ＊(1/(2.56＊ 100Hz))

= 1024 ＊ (1/256)

= 4 s

虽然较低的 Fmax 提供了改进的显示频率分辨率，但并不是免费得到的。数据收集时间会显著增长。(当测量时选择低频截止点也会发生同样的事情)

为了解释所要观测的时域波形长度和达到的分辨率之间的关系，考虑你需要如何检测一个由频率相近的两个波形组成的信号。如果两个波形从开始同相位，那两者充分分开去显示它们的不同频率，需要很长的时间。例如，当两个机器以近似相同的速度运行时，可以听到“节拍”的声音。总之：*为了达到频域的高分辨率，要求较长的采样时间。*

8. 平均次数

仪器利用数字化时域波形并执行数学运算来产生 FFT，然而，只观察时域波形的一部分可能排包含了一些由随机振动影响引起的峰值，为了减小这个值，通常观察时域波形的几个部分，计算几个FFT并显示一个平均的结果。通常采用四次平均。

在大部分 FFT 分析仪中都提供平均来辅助解释数据。平均为数据采集提供可重复的结果，有利于机器劣化的早期报警。平均也能帮助解释复杂的噪声丰富的信号。

平均的类型包括：线性，指数，峰值保持，和同步时间平均。每种类型具有特殊的特性，使其适用于特定的应用，简述如下。

线性平均

线性平均中，每个瞬时频谱都累加到下一个频谱，结果被总的频谱数除。这个方法适用于为故障趋势获得重复性数据，如大部分预知维修程序中所应用的。此方法也适用于对平均消除随机的背景振动。

峰值保持平均

峰值保持不是一个真正的平均方法。在采样时间中，获取和显示每个分析单元中寄存的峰值。这个方法非常适于观测瞬变或应力分析。

指数平均

这个方法使用最新采集的频谱并将其权重大于以前数据。它适用于观测相对于采样时间缓慢变化的变化的状态，例如一个稳态过程。

同步平均

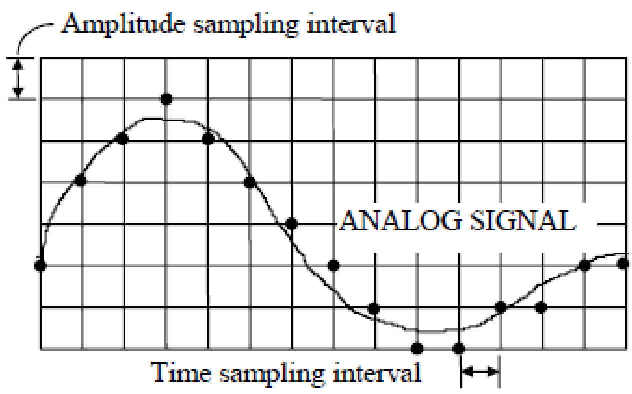
这个方法利用来自被分析机器的一个同步信号，这个同步信号通常取自光电、电磁传感器或其他形式的转速计输入。

平均时间周期内，振动输入在与轴旋转正好相同的时刻被采样。这个方法被证明是一个滤除随机背景振动的有用工具。

9. A/D转换

物理模拟信号必须转换成适于计算机处理的数字形式，此时需要一个A/D转换器。基于时间基准的采样间隔是一个重要的参数，但是通常，A/D由它的幅值分辨率来区分。

因为计算机以2的幂或二进制数工作，A/D转换器分为12位，14位，16位等。这样，12位分辨率的A/D转换器可在一个幅值范围内提供4096间隔(或量化等级，$2^{12}=4096$)。分辨率越高，振幅分辨率越佳，动态范围也越佳。16 位分辨率的 A/D 提供 1/65536 的精确度，或者是96dB的动态范围。振幅分辨率的概念如图12所示。



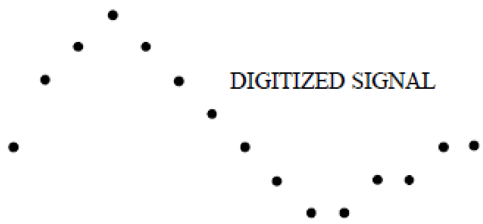


图12. 信号幅值采样

12位A/D转换器产生满刻度量程的0.024%的分辨率，16位A/D的性能高出16倍，或者满量程的0.0015%。这个额外的分辨率为我们提供了同时查看大小振幅的能力。

10. 窗类型

采样信号时必须执行的另一步是加窗，真实的时变模拟信号乘以其它已知的时间函数，来被“框架化”。这个数学操作的结果是提供一个看上去连续的周期性的采样时域波形。在采样周期(窗)的开始和结束部分，采样信号被赋值0来“填充”不连续部分。

然而，使用窗函数中，频率和振幅分辨率之间存在折中。如果信号为周期性的并准确地匹配采样时间，若我们不使用窗函数(用矩形窗)，频率和振幅分辨率很完美。例如，采样开始于正弦波的零点，也必须结束于零以便给出好的分辨率。如果不是如此，波形具有正弦波和矩形波的特性—在FFT主频率两边的旁瓣上引起“泄露”。因此，大部分的窗函数要保证在采样时间内信号的开始和结束于同一量值，这样可以避免使用同步信号采样。

泄露(拖尾)是采样中FFT算法试图处理不连续点引起的。FFT将不连续点看做调制频率。这产生了并不真实存在的频谱组分(边带)。窗口的使用也影响了我们保持振幅精确的情况下，分辨接近的频率成分的能力，一方面的优化必会牺牲另一方面。

有很多可用的窗函数。矩形窗(实际是没有窗)，平顶窗，海明窗，凯赛-贝赛尔窗和汉宁窗均可用。汉宁窗可能是使用最普通的(上升的余弦)。对于分析正弦波很适宜，它提供了对频率和振幅分辨率很好的折中。图13.所示是其效果图。

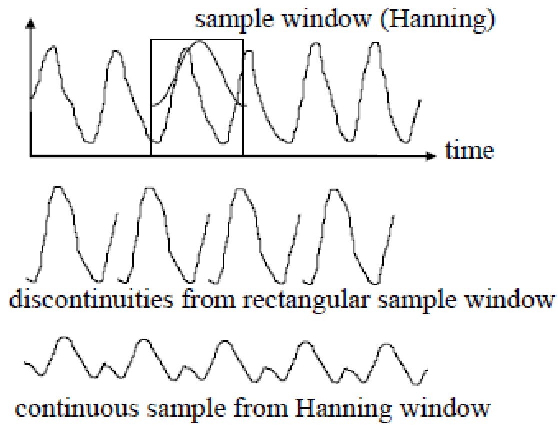


图13. 汉宁窗采样

接下来，FFT 取走时域波形的加窗值，为分辨率的每个线计算幅值。

分辨率的每条线等效于每个 FFT bin 覆盖范围内的振动信号的总值。每个线有一个FFT bin ，对于120 KCPM Fmax 400 线谱，每个 bin 是300 CPM频宽。这给FFT一个300CPM 常数带宽，同分辨率。

每个bin可看做一个低通/高通滤波器。滤波器的特性由窗的形状决定。对汉宁窗，每个bin的滤波器特性如图14.所示。

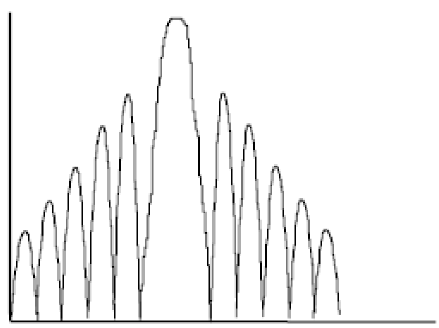


图14. 汉宁窗特性

滤波器形状有斜边，没有平坦的顶部，这样会引入一些误差。滤波器顶部形状能导致高达16%的幅值误差(常被称为栅栏误差)，并且，因为斜边的存在，一个bin中的频率将在其他几个bins中被见到，这就是泄露，如图15.所示。

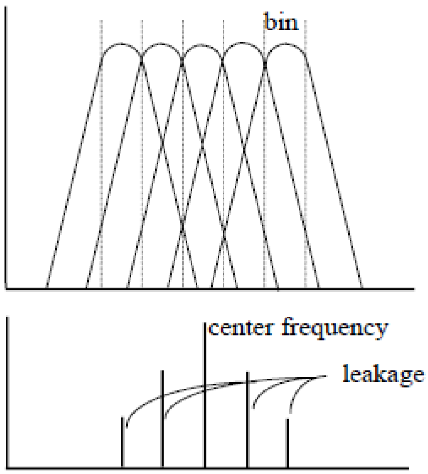


图15. 汉宁窗的泄漏

汉宁窗是个好的折中窗，主频被很好地确定并且通常只在一个bin中有最大值，振幅相对较精确。

其他窗适合特殊应用，下面讨论一部分。

平顶窗

平顶窗有覆盖几个bin的较宽的滤波器。它指示出现在几个频率的信号，但是具有可以给出非常准确的幅值的优点，主要应用在校准。

矩形窗

其实就是没有窗。使用它的优点用于起停机测试，如果窗口被与转速同相的信号触发，可以获得很好的阶比跟踪。这个窗也被用在瞬态变化。

海明窗

海明窗以牺牲幅值来实现更佳的频率分辨率，与汉宁窗相比，有较少的信号泄露到相邻的 bin。它可被用来分离较近的频率分量。

凯赛-贝赛尔窗

这个窗在分离相近频率方面甚至更优于海明窗技术，因为滤波器有更少的泄露到相邻的 bin。然而，初始的主包络覆盖几个bin，所以其分辨率会差于海明窗。

布莱克曼-哈里斯窗

布莱克曼-哈里斯窗也是一个频率分离的好工具，并且它提供好的幅值精度。

11. 提高处理速度

有两个常用的方法加速FFT处理。(1)叠加平均，与汉宁窗结合效果很好；(2)折叠FFT，与任何窗函数可有效结合。

叠加平均

当计算FFT 选择大于1次平均时，使用叠加采样是可能的，如图16.所示。

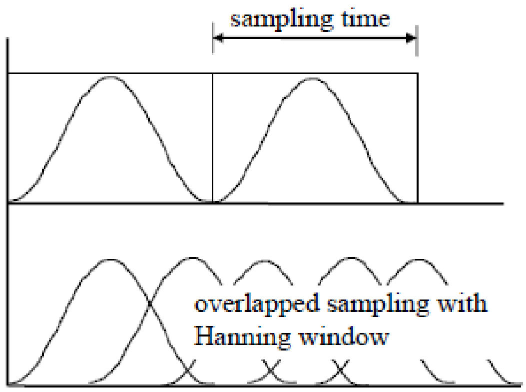


图16. 叠加采样

这种方法效果很好，因为在通常的平均方法中采样的前部分和最后部分的振幅被减小，但是叠加采样在这些点会有完整的读数。精度的降低是很小的，但对于低Fmax 和多次平均的FFT 来说，采集数据时间可以显著缩短。例如400 线的FFT，Fmax为6000CPM，8次非叠加平均，采样时间32秒。而50%的叠加平均，采样只需要18秒。

折叠 FFT

当计算FFT时，会产生一组数据，如图17.所示，

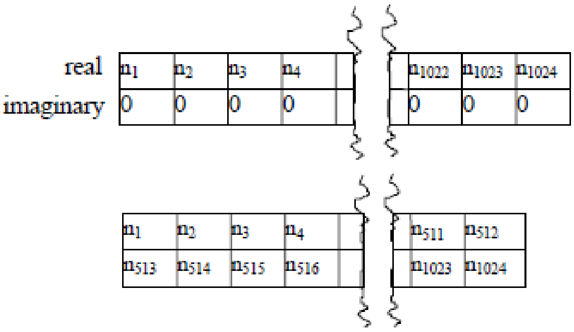


图17. 折叠矩阵

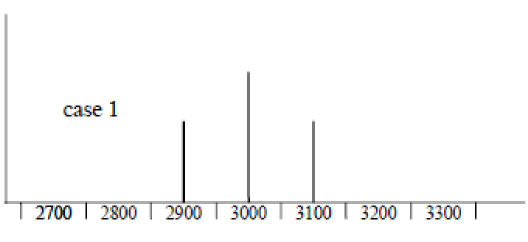
每个数都匹配一个虚数。在计算中，在每个位置都需要一个数，故有 n^2 乘法，但是最后我们会丢失一半的结果。为了优化所耗时间，在输入上我们用实数取代所有的虚数并且只有一半长度的数组。这也就意味着将近一半的计算时间，如公式所示：

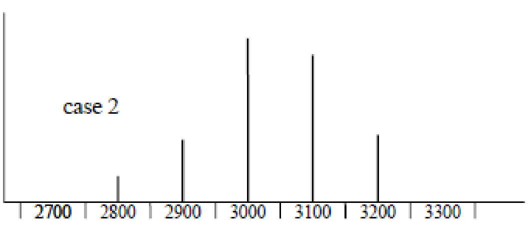
$$512\ln(512)/1024\ln(1024)$$

这个例子中，到最后我们确实需要一点额外时间去抽取出结果，但仍有非常值得的时间节省。

12. 改进频率分辨率

使用汉宁窗，我们知道在一个bin中有幅值时就会在临近的bin中产生泄漏，在距离较远的bin也可能有泄漏，图18.给出了三种可能性。





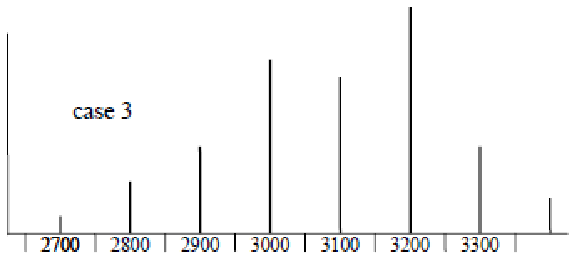


图18. FFT Bin泄漏，3种情况

第一个情况，在临近主频处有相同高度的bin，第二个有不等同的泄露，第三个展示了两个相近频率分量。

第一种情况，因为相邻bin 严格相等，振动频率在bin中心--3000CPM处。

第二种情况，泄漏到3100bin 较大，精确的频率不是3000而是3000和3050之间的某处。通过计算，很精确的确定一个分量的频率是可能的，得到比原始FFT高出10倍或更高的分辨率。

第三种情况，在临近频率有两个大的分量，分离它们的唯一方法是用高分辨率的FFT（例如细化），或者将传感器转移地点，使其中之一消失。

13. 总值，频带和能量计算

作为一个一般原则，如果希望得到一个好的总值测量，要使用原始的模拟信号，或者直接从数字化的信号来计算。这是因为从FFT 得来的能量计算容易带来一些误差。

如果信号有一个显著的低频分量，从FFT 得来的计算值可能看不到它，因为 0 bin 和通常第一个bin 被放弃。如图19. 所示。

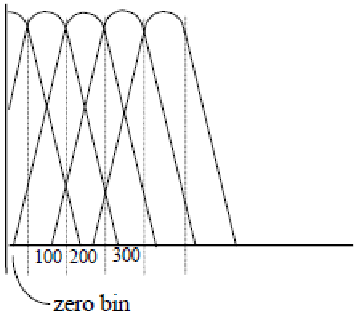


图19. 0 Bin 抑制

放弃 0 bin 是因为 FFT 电路路通常不是DC耦合的。第一个 Bin 也可能被放弃，例如由于积分引起的低频噪声。如果在这些频率处应该有一个有意义的分量，那么其振幅将会被丢失。

某些仪器制造厂商使用从 FFT 计算得到的总振值，是因为它快速。但是精确度却下降了。如果信号被采样之前，稳定时间不充足，那么误差也可能被引入到 FFT 中。

其次，从 FFT 计算得到的总振值会忽视高于 Fmax 的所有信号，一般的模拟总振值不会如此----因此，它们存在差异。

结果是，如果你打算利用数字信息产生的总振值，你需要准确知道正在开什么。而模拟总体值结果是准确的，和设置或解释无关。

然而，从 FFT 计算总振值自有其中原因。其一频带报警，一个频率范围内的能量被用作故障指示。如图20.所示。

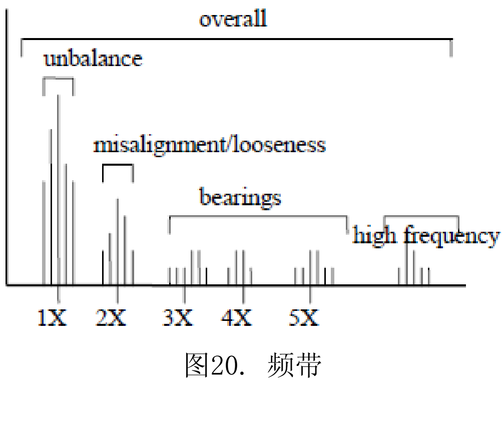


图20. 频带

例如在干草堆或轴承区域，虽然任何一个读数可能都不高，但是在这些频率处的高能量水平仍然是故障的指示。总值的计算由平方和根来完成，对于使用汉宁窗的FFT，公式如下：

$$Overall = \sqrt{\Sigma amplitude^2 / 1.5}$$

系数1.5 用来纠正汉宁窗的特性和信号对邻近bin的泄漏。在频带中没有任何谱线超限，但可能产生一个报警。如果频带只有一个bin宽，就不会有对邻近 bin 的泄露，所以，应该使用绝对报警值，不应该使用能量计算。(避免这种情况的指导原则是，总是设置报警限至少覆盖4个bin)。

14. 实时

实时这个术语经常被用在显示屏快速变化的仪器上，虽然这是对于实时分析的一个要求，但它不是全部的内容。实时能力可被描述为在分析中数据被捕获和显示而没有任何间隙的最快速率。换句话说，对于 FFT 意味着仪器可以获得全部采样，在下一个采样正在被捕获时可以计算和显示采样结果。下面是一个例子：

400 线的 FFT，Fmax为12,000 CPM，采样速率是512Hz，每个采样窗口用时2秒。如果屏幕每2秒更新一次，那么仪器的实时速率为200 Hz或12000CPM--也是它可显示的最高频率。

今天的现代仪器经常提到“Live-Time”显示。图形显示以这种形式给出，用来观察测量进行。一般，我们采用下面的公式：

实时速率 RTR = FFT 线数 * 更新速率

例如：RTR = 400 * 8次/秒 =3200Hz

15. 结论

经济可靠的 FFT 数据采集器和分析仪器的出现为实践振动技术的人员带来了很多新的术语。

理解信号处理和数据操作方面的这些基本概念，使你能够选择合适的仪器并理解其使用。

为了获得准确的数据，振动技术人员必须认真选择合适的参数：测量单位，Fmax，分辨率线数，平均，频带/警报，记录的大小等。

设置可接受的振动限值的流行方法是，利用得到工业验证的针对机器类型和运行状况的报警等级图表。

[刘俊田 译　　常英杰　校]