

峰值能量谱及其应用实例

美国罗克韦尔自动化公司 徐明

摘要 : 峰值能量在机械状态监控和故障诊断中的使用已有 20 年。与其它的高通滤波包络方法比较, 峰值能量的信号检测和过滤方面有其独特之处。近些年来, 除了传统的峰值能量通频幅值测量以外, 峰值能量谱和峰值能量时间波形的分析方法也得到开发, 并在振动分析中得到运用。本文描述了峰值能量的检测和处理过程, 并比较了它与其它的高通滤波包络方法的不同之处, 讨论了峰值能量测量中应注意的问题及峰值能量测量值的含义。最后, 用四个有关轴承和泵的检测实例说明了峰值能量的应用。

一、前言

峰值能量是在七十年代后期为检测滚动轴承故障而开发的。所谓“峰值能量”是指非常短的脉冲能量, 如滚动轴承的滚珠在滚道上的微小裂缝处发生冲击所引起的振动能量。峰值能量就是这种周期性的、短暂的机械冲击的一种量化表示。这种冲击或脉冲通常发生在滚珠与滚道、齿轮啮合齿或其它金属与金属之间的接触, 如转子摩擦, 滚珠润滑不良等。实际测量表明峰值能量还对超声波信号较为敏感, 例如气穴现象, 高压蒸气或气流, 液体的湍流干扰, 控制阀门噪声, 等等。

峰值能量测量是利用加速度传感器在一预定的高频范围内检测振动能量。在这一高频范围内, 机械冲击能量会激起加速度传感器以及机器结构的自振频率。这些响应频率作为载波频率与滚动轴承的故障频率调制。冲击能量的强度是脉冲振幅和重复率的函数, 由此冲击引起的信号能由加速度传感器测量并且由独特的过滤和检波电路加以处理, 信号测量的大小表示为“gSE”单位(峰值能量的加速度单位)。

自从峰值能量引入以来, 它在许多工业领域得到成功地应用并获得工业界的接受。峰值能量测量能提供机械故障的早期预测, 是振动分析的一个很有用的工具。除了传统的峰值能量通频幅值外, 其频谱和时间波形的分析方法及在故障诊断中的运用, 也在最近几年得到发展。虽然峰值能量已有二十年的历史, 但对其的理解和使用仍然存在许多问题。常规的振动测量频率范围是在传感器的频率响应曲线的线性范围以内进行的, 而峰值能量测量的频率范围远远这一线性范围, 是一种超高频率的测量。因而, 峰值能量对传感器自振频率及传感器的固定方法非常敏感。只有理解这一点, 才能合理选择测量参数以获得精确并且一致的测量结果。

本文描述了峰值能量的处理过程, 尤其对其独特的峰峰值检波和时间采样间隔特性做了详细论述。对于峰值能量测量

中应注意的问题及峰值能量测量值的含义，也进行了讨论。用四个有关轴承和泵的检测实例说明了峰值能量的应用。

二、峰值能量的信号处理过程

图(1)是峰值能量信号处理的流程图。振动信号由一加速度传感器测量并且由一频带滤波器进行过滤。有六个可选择的高通频率(低频界限)，100Hz，200Hz，500Hz，1000Hz，2000Hz和5000Hz。低通频率(高频界限)为65,000Hz，这是峰值能量频率范围的上限。采用高通滤波是为了滤除一些低频率的振动信号，如不平衡，不对中和机械松动等故障信号，轴承和齿轮等故障频率处的幅值通常比上述低频振动信号的幅值低的多。然后，将筛选的信号通过一个峰峰值检波器，该检波器不仅保持信号的峰峰值而且选用预定的采样时间间隔，这直接确定了峰值能量谱的最大频率(F_{max})。峰值能量检波器的输出信号是一锯齿形信号波形。对这一锯齿形信号做进一步处理，可得到峰值能量的通频幅值和峰值能量谱。

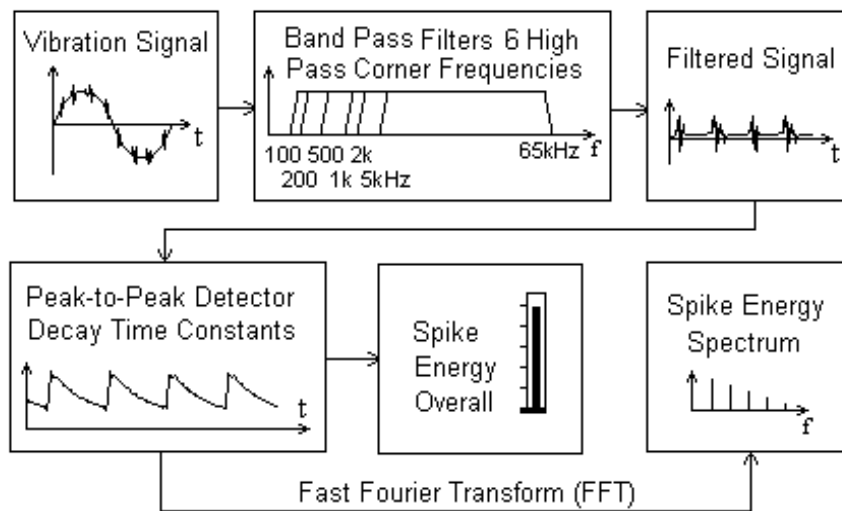


图1、峰值能量信号处理过程示意图

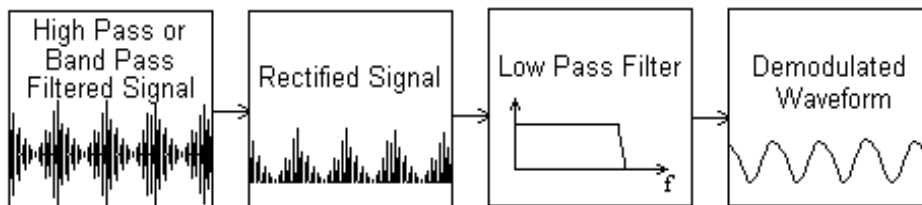


图2、信号包络处理过程示意图

与其它的包络或解调方法相比，gSE的峰峰值检波电路对故障频率更为敏感。典型的包络检波处理过程如图(2)所示，振动信号首先通过一高通滤波器(或带通滤波器)，已滤波的信号是经满波(或半波)矫正的，然后，矫正信号再通过一低通滤波器将故障频率从载波频率的中解调出来，低通滤波器会衰减矫正波形的峰值。而峰值能量的峰峰值检波器却能完整的保留这些脉冲峰值。另外选定一合适的采样间隔时间也利于有效地保留故障频率及其谐波波次。峰值能量峰峰值检波器的工作原理由图(3)可进一步说明。

在峰值能量测量中，采样时间间隔最高频率(F_{max})的函数，它是由数采器(dataPAC)或监测软件(EMONITOR奥德赛或IQ2000)自动选定的。采样时间间隔决定了从峰峰值检波器出来的锯齿信号的外形，于是，它影响着峰值能量的通频幅值和峰值能量谱的谐波幅值。为了获得一致的峰值能量幅值，应保证数采器(dataPAC)或监测软件使用同样的采样时间间隔。

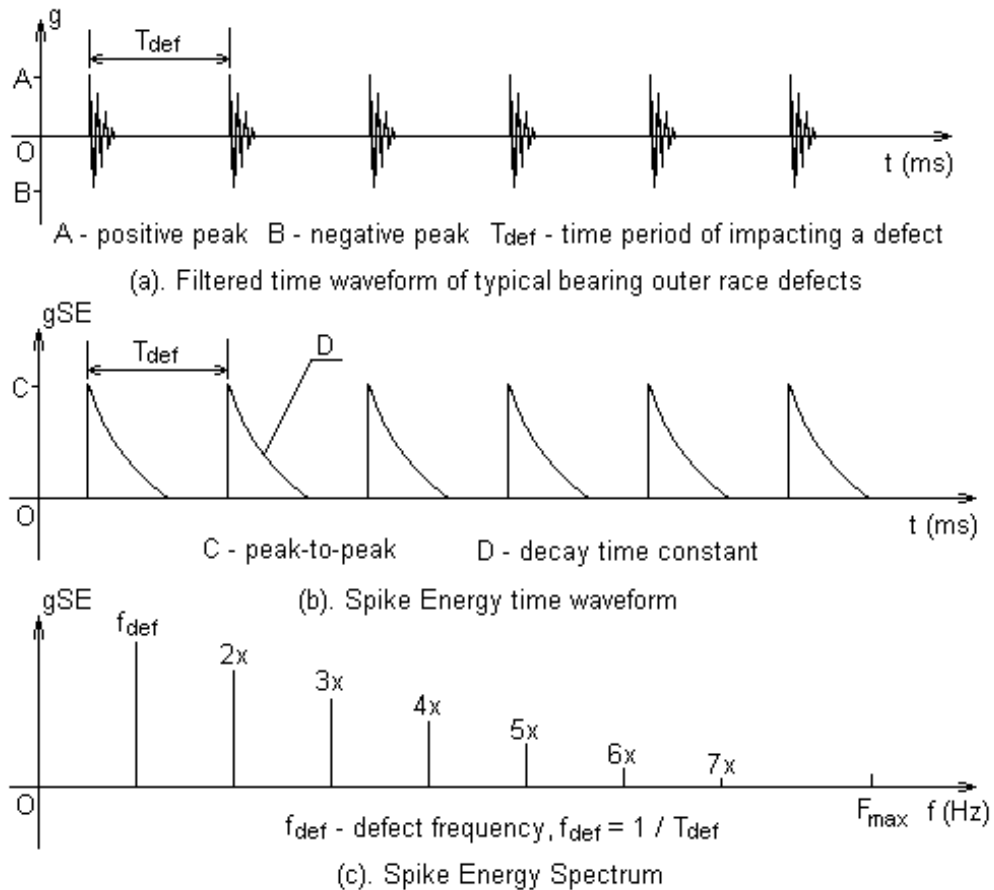
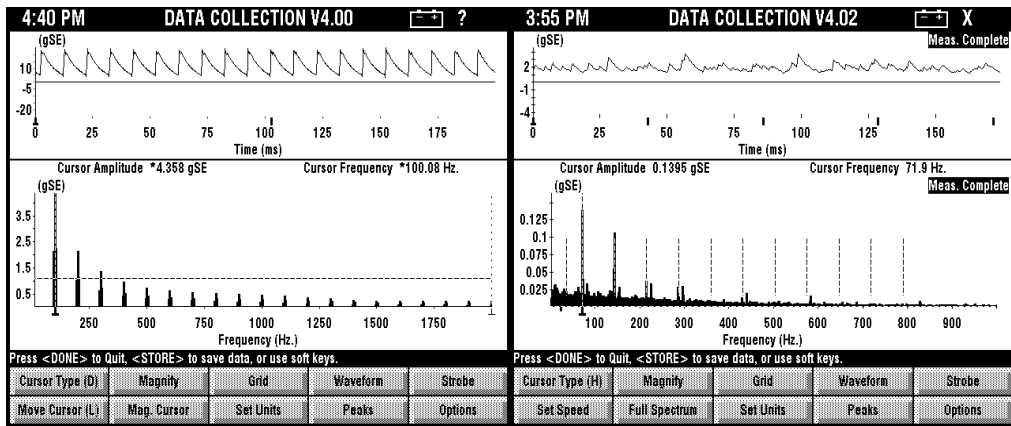


图3、峰值能量的峰峰值检波

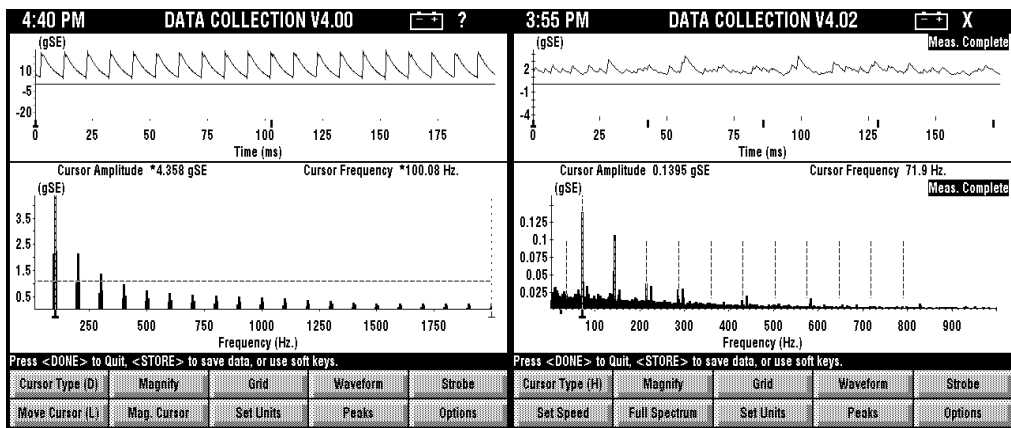


(a) 信号发生器数据

(b) 实测数据

图 4、峰值能量的时域波形图及谱图

峰值能量时域波形和谱图如图 4(a) 和 4(b) 所示，图 4(a) 的输入信号是由信号发生器发出的频率为 100Hz 的故障信号，峰值能量时域波形呈规则的脉冲排列，并且每一个脉冲都呈指数衰减形。在这一特例中，选择了特定的采样间隔以保证在下一个脉冲到来之前，前一脉冲衰减到零。峰值能量谱中呈现十分清晰的故障频率及其谐波成分。图 4(b) 所示的峰值能量时域图和谱图是从一机器上测得的，其时域波形显然是实时测得的信号形状，在峰值能量谱中，有明显的故障频率 (71.9Hz) 成分及其谐波成分。在实际应用中，峰值能量的峰峰值可由时域波形决定，如图 4(b) 中的峰峰值大约为 3.5 gSE。



(a) 信号发生器数据

(b) 实测数据

图 4、峰值能量的时域波形图及谱图

三、峰值能量测量中的问题

1. 加速度传感器及其固定

峰值能量是一高频测量过程，它的读数受加速度传感器和传感器固定条件的影响。不同的加速度传感器有不同的构造和自振频率。工业用加速度传感器自振频率范围较宽，通常在10kHz和50kHz之间，这取决于传感器的构造和固定方法。通常的位移、速度和加速度测量中，即使使用不同的传感器，其读数也应该是相同的，因为测量的频率范围一般都在传感器的线性频率范围以内。而对于峰值能量测量，其读数则取决于传感器的构造和固定方式，因为大多数工业用加速度传感器的自振频率都在峰值能量的测量频率范围以内。因此，为保证峰值能量测量值的一致性，就需确保始终使用同一个传感器。

峰值能量测量也需要更加严格的传感器固定以保证与其振动参数的比较，这是因为不同的固定方法将得到不同的传感器响应频率，采集峰值能量数据的最好的传感器固定方法是用螺栓固定，在这种固定方式中，仅仅有一个接触面，即传感器与机器的接触面。这就使得高频信号的传输更为可靠，并且有利于获得一致的测量结果。手持式探测器不可用于峰值能量的测量，因为这种方式将导致高频成分的大量丢失。在实际的监测中通常使用磁铁固定的方式以缩短监测时间，这种固定方式，有两个接触面，即传感器与磁铁、磁铁与机器。为了将高频振动信号的损失减到最小，接触面之间需保证平滑、干净，在接触面之间涂一层薄薄的润滑油脂会更有利于高频信号的传输。对于螺栓固定方式，螺栓孔应保证与固定表面垂直，螺栓的长度应该比孔的深度短以保证加速度传感器和固定表面之间的直接接触。电缆插座应保证足够牢固，以防干扰读数的准确性。如果传感器固定在机器活动部分，传感器电缆应该固定在机器或附属组件之上，尽量减小测量期间的电缆运动。图5和图6描述了不同传感器和固定方式下，传感器的固有频率变化。图5表示两种不同传感器各自的频率响应曲线。曲线A和C是Entek IRD 943加速度传感器的频响曲线，曲线B是Entek IRD 970加速度传感器的频响曲线。A和B均采用螺栓固定的方式，C采用磁铁固定的方式。三个传感器均固定于一个以1g加速度，在0到50kHz之间变频振动的振动台上。从图中发现，螺栓固定的943传感器在22.75kHz处有一突出的幅值，970传感器在31.25kHz和32.50kHz处有两个较小的共振峰值，磁铁固定的943传感器在12.50kHz和18.00kHz处有两个较小的共振峰值，另在32.00kHz处还有一个更小的共振峰值。

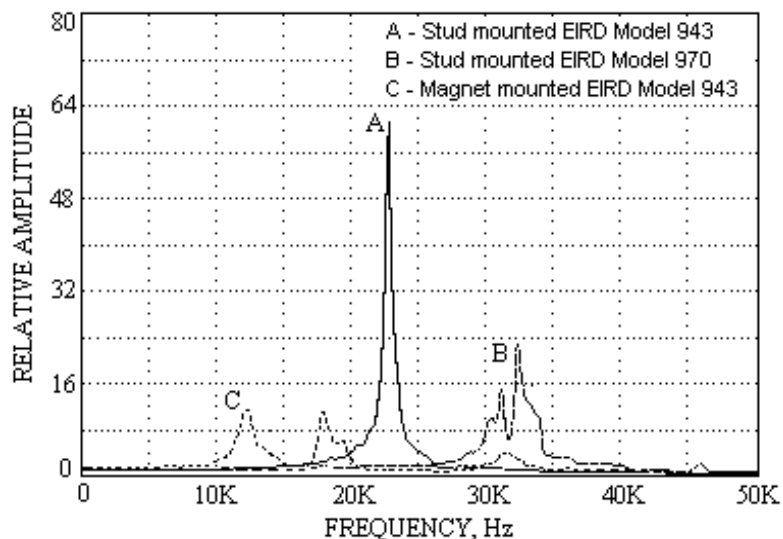
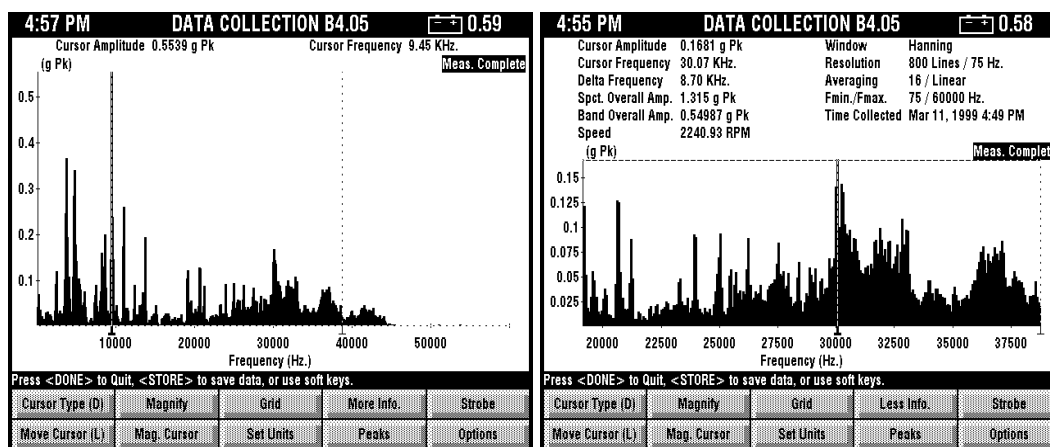


图 5、加速度传感器的频率响应



(a)最高频率为 60kHz 的频谱图

(b)30kHz 左右的细化谱图

图 6、用 Model943 传感器测得的转轴加速度频谱图

图 6(a)、6(b) 是用磁铁固定的 934 传感器实测的某皮带驱动的转轴的振动频谱图，图 6(a) 的频带宽为 0 到 60kHz。在这一特例中，高频成分高达 45kHz，由于磁铁固定方式的限制，不存在 45kHz 以上的频率成分。位于 9.45kHz 处的最大幅值表明磁铁固定的 943 传感器的自振频率位于此处，该值之所以比上述图 5(c) 的 12.50kHz 小，是因为磁铁与机器的接触程度较差。图 6(b) 是图 6(a) 在 30kHz 附近的细化谱，30kHz 到 33kHz 之间的众多波峰与图 (5)C 曲线的 32kHz 共振频率是对应的。这些传感器的自振频率是由轴承冲击或其它故障激起的，它以故障频率的载波频率的形式存在。由于不同传感器、不同固定方式都会引起固有频率地变化，冲击引起的共振频率和幅值也随之变化，所以峰值能量的读数必然会发生变化。

2. 峰值能量应用中的问题

在机械状态监测应用中，峰值能量的最大用途是研究其读数的变化趋势。由于峰值能量是高频振动测量值，所以对机器的动态特性、加速度传感器的类型、传感器的固定方式以及测量位置均非常敏感。为了得到稳定可靠的峰值能量变化趋势，在监测过程中一定要注意始终用同一个传感器，同样的固定方式，以及同样的测量位置，如果忽略这些细节问题，那么峰值能量读数将毫无意义。

根据机器动态特性的不同，某些类型的机器状态可以用峰值能量的通频幅值进行监测，无密封泵的状态监测即是一个这种类型的例子。无密封泵通常会发生两类问题，一类是工作过程故障，如干转、气穴、内循环等；另一类是机械故障，转子磨擦、止推轴承或转子轴承过度磨损等。由于这种泵的内部转子质量相对较小，传统的振动测量方法无法探测上述故障，其内部的流体问题反而会使普通测振的结果复杂化。而峰值能量却能检测上述两类问题，峰值能量的变化模式与泵的故障的对应关系已通过实验建立起来，利用峰值能量监测方法，能够比较确定的预测无密封泵的故障，从而减小了维修费用和停车时间。

在多数情况下，单独的峰值能量无法充分判断机器状态，这时就应该联合其它振动参量，如加速度、速度、位移等，来综合判断。峰值能量的增加通常预示轴承、齿轮或其它部件的早期故障，如果这时其它振动参量仍在容许范围内，则不必安排检修，但应注意观察加速度和速度的变化趋势。如果加速度读数超限而速度读数在限制范围内，应做振动频谱分析其原因并预期修理。如果速度、加速度和峰值能量读数均超限，则预示该机使用寿命已到。有时峰值能量读数会先降低然后增长到一个很大的值，在这种情况下应关机以防机器损坏。

对于普通的振动测量，通常有各类机械经多年总结出的振动量上限表，然而，为一般的机械寻找类似的峰值能量限制表是几乎不可能的，这是由于峰值能量的影响因素太多，例如不同的机器类型，操作条件，加速度传感器，传感器固定方法及周围的条件等。在另一方面，为固定类型的机器确定基于经验的峰值能量通频幅值界限表是可能的，但必须在表中说明测量条件。注意，测量条件的任何差异都可能导致错误的结论，而且该界限表对其它类的机器是不适用的。

谐波和边带是振动频谱上的普遍现象。谐波是指转轴的转动频率或与之相关频率的倍数，如风扇通过频率、齿轮啮合频率等。由低频激振引起的转速谐波在峰值能量测量时已被滤掉，所以峰值能量谱中的与转速相关的谐波表明轴转是被高频载波所调制的，如齿轮的啮合频率。

边带是指某一中心频率两侧等距排列的频率成分。通常边带很少关于中心频率对称分布，这是由于机器及其部件的非对称性所决定的。中心频率通常又称为载波频率，它可以是齿轮啮合频率、轴承通过频率的倍数、机体的固有频率或

传感器的响应频率等。边带又称为调制频率，是由某一信号的调制所引起的。调制有两种基本形式，即调频和调幅。调幅是指某一确定频率信号的幅值发生变化，调频是指某一确定幅值信号的频率发生变化。通常情况下，调幅与荷载变化有关，调频与速度变化有关。

滚动轴承的边带通常是其某一故障频率或倍频。滚动轴承的故障频率包括：外滚道频率 (BPFO)，内滚道频率 (BPMI)，滚动体频率 (BSF) 和保持架频率 (FTF)。滚动轴承的故障频率是非同步的频率。当故障发生在内滚道或滚动体在轴承载荷范围的内外旋转时，将引起振动幅值的变化，故会造成滚动轴承的调幅现象。

齿轮箱的边带是轴的转速或其某一倍频。当有齿轮偏心、轴弯曲或不对中等现象时，将产生调幅现象。当偏心度增加时，其边带幅值也增加。当某一个齿或几个齿有缺陷时，将发生啮合振动，这将引起齿轮角速度的变化，从而引起调频现象并产生许多边带族。

在许多情况下，调频和调幅是同时存在的，如处于弯曲轴上的齿轮也会发生调频现象，这是因为齿轮的轮齿运动于一个斜圆上，位置是变化的。实践中极少有关于载波频率对称的边带，这是由于载荷和齿轮轴的结构不对称所造成的。由于调频通常由确定的轴承、齿轮或其它零件引起，所以峰值能量谱对于检测这类机械故障非常有效。

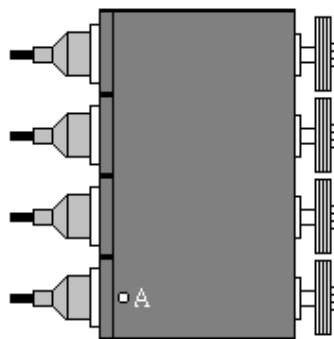
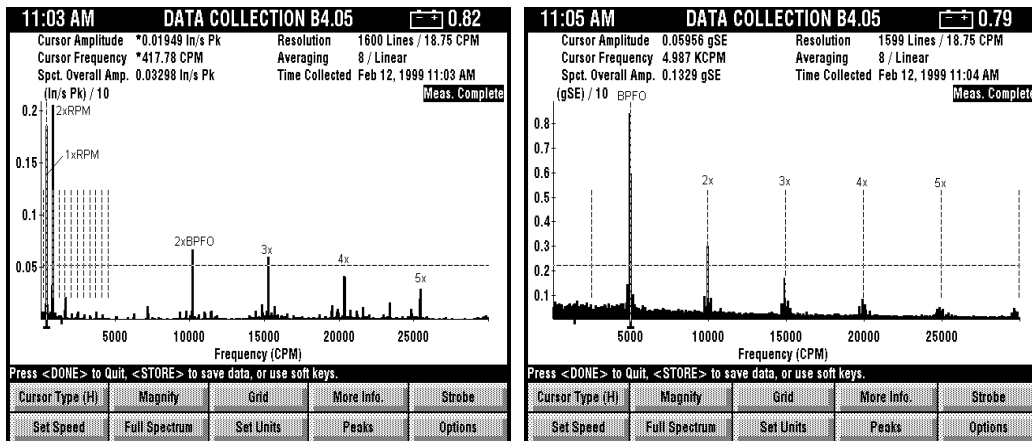


图 7、四轴镗孔机械示意图



(a) 速度频谱

(b) 峰值能量谱

图 8、四轴镗孔机的振动数据图

四、实例

实例一

本例是一个具有四根轴的机构，如图 7 所示，该机构用于镗孔半加工。其轴是由皮带驱动并由超轻型滚珠轴承支撑，转速为 417RPM。峰值能量谱的测量位置 A 如图七所示。

图 8(a)、8(b) 分别是测得的速度频谱和峰值能量谱。在速度频谱中二倍转速的幅值比一倍转速的幅值高，说明轴承失去了预载力，这是由轴承磨损造成的。从速度频谱还可看出有外滚道故障频率及其倍频存在，但外滚道故障频率处的幅值不明显。而在峰值能量谱上，外滚道故障频率及其倍频成分非常明显，这是典型地表征轴承故障的峰值能量谱图。本例用速度频谱和峰值能量谱检测出轴承磨损及轴承外滚道故障。

实例二

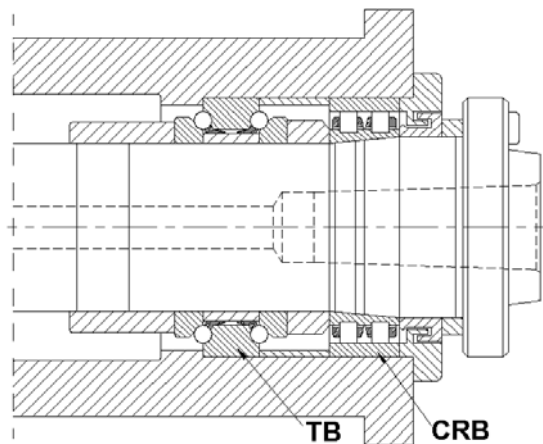
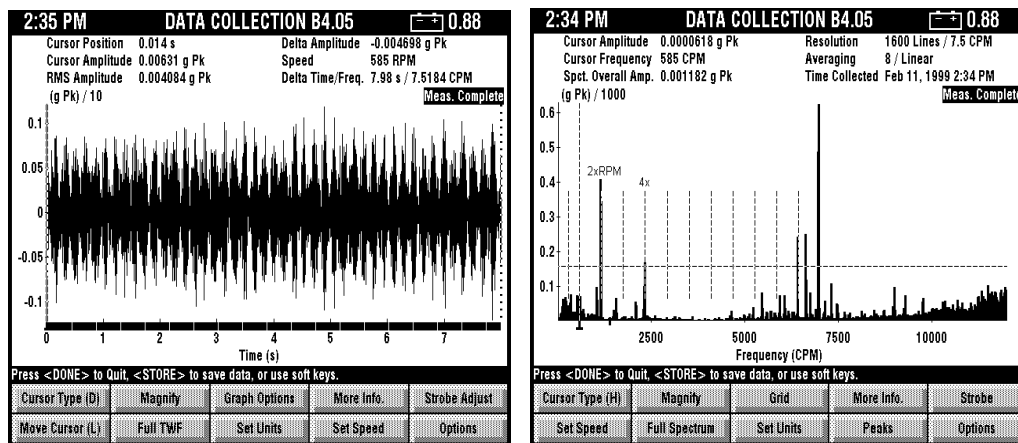


图 9、旋转机构前端支撑的结构图

本例说明一个新的旋转机构在试运行时代轴承预紧力的变化。其前端支撑如图(9)所示，一个双排的高精度滚柱轴承用来支撑径向力，另一个双向的向心推力轴承用于承受轴向力。为了保证足够的动态刚度和运行精度，轴承在安装时应保证一定的预紧力。滚柱轴承有一定锥度，通过轴向位置的调整可实现径向间隙或预紧力的调整。径向间隙或预紧力的大小取决于转速、载荷、润滑条件和所需的动态刚度，当然还取决于轴承座的精度。由于运行过程中温度的升高，会引起轴承间隙的减小及轴承预紧力的增加，所以在预置预紧力时应考虑温度因素的影响。通常用计量模板来保证轴承预紧力，但其并非百分之百可靠。为了保证高速运行状态，实际安装的预紧力比厂家推荐值稍小。在试运行期间，对不同转速状态进行了加速度和峰值能量测量。测量结果如图10-12所示。

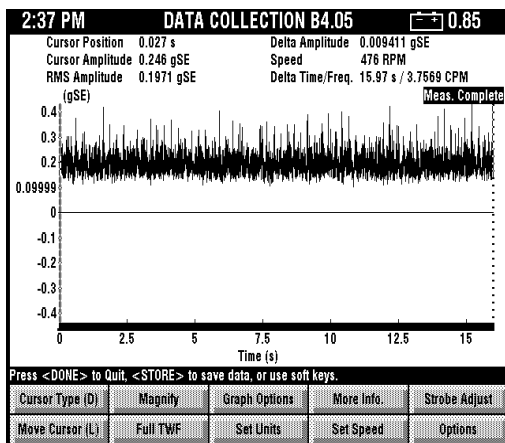
图10和图11是在低转速(大约500RPM)下测得的时域波形和谱图，加速度和峰值能量的时域波形都表明有冲击成分存在，但幅值很小。加速度频谱有较大的2倍和4倍频的频率成分，说明有松动问题存在，见图10(b)。在加速度频谱上有一个0.6g的幅值位于6875CPM处，这可能是轴承的某一故障频率。图11(b)的峰值能量谱清晰地表明0.7倍频及其谐波的频率成分，观察其相位变化，发现相位不稳定，这说明转轴的重心在工作过程中不稳定，可以断定，亚同步频率成分是由外滚道滑移引起的，同时外滚道冲击还引起转速频率及其倍频的峰值能量。



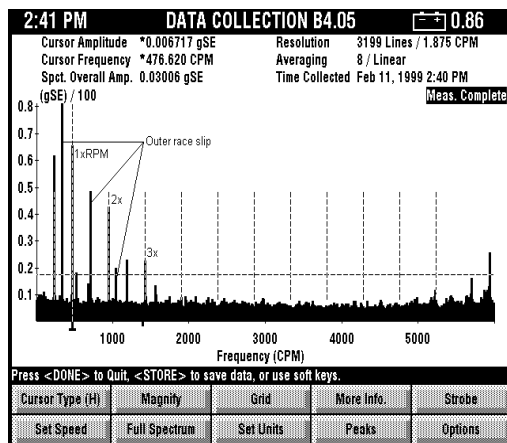
(a) 时域波形图

(b) 频谱图

图 10、转速为 585 RPM 时的加速度测量值

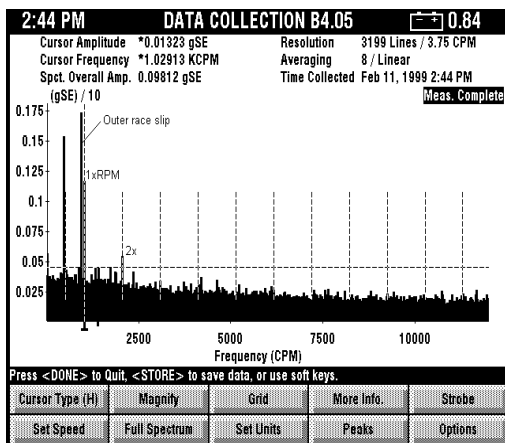


(a) 时域波形图

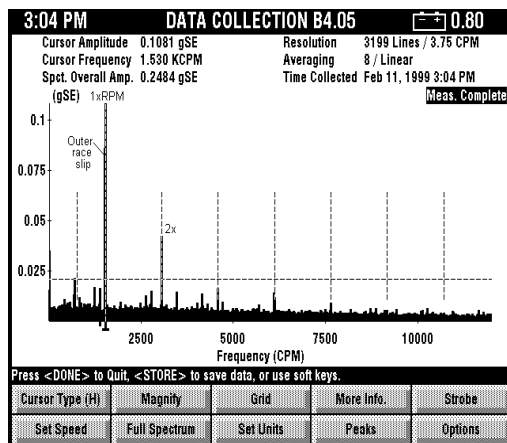


(b) 峰值能量谱图

图 11、转速为 476 RPM 时的峰值能量测量值



(a) 转速为 1029RPM 时



(b) 转速为 1530RPM 时

图 12、峰值能量谱图

看峰值能量谱图 12(a)，当转速为 1029RPM 时，其亚同步频率与转速之差不到 7.5CPM，虽然还存在外滚道滑移频率和转速的半倍频，但滑移频率的谐波已消失，这说明随着转速的提高，机构温度也升高，这时外滚道滑移有所减小。图 12(b) 是 1530RPM 转速下的峰值能量谱图，这时其亚同步频率与转速之差不到 3.75CPM，外滚道滑移频率已基本消失。上述结果在普通频谱图上是难以发现的，这进一步说明峰值能量谱的优势。

实例三



(a) 马达和泵

(b) 泵的近视图

图 13、垂直泵的实物图

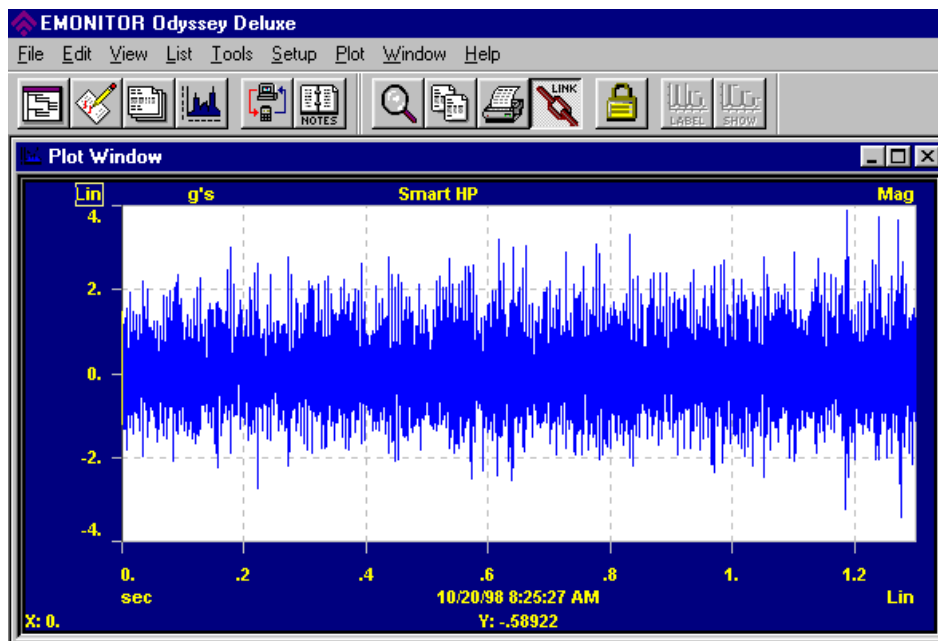


图 14、泵的加速度时域波形图

本例是关于一化工厂的某离心泵，它由一垂直马达和一垂直泵组成，如图 13(a) 和 13(b) 所示。泵的工作转速为 3575RPM，振动是在机体上靠近轴承处测得的，传感器用磁铁固定在机体上，型号为 Entek IRD Model 9000A。

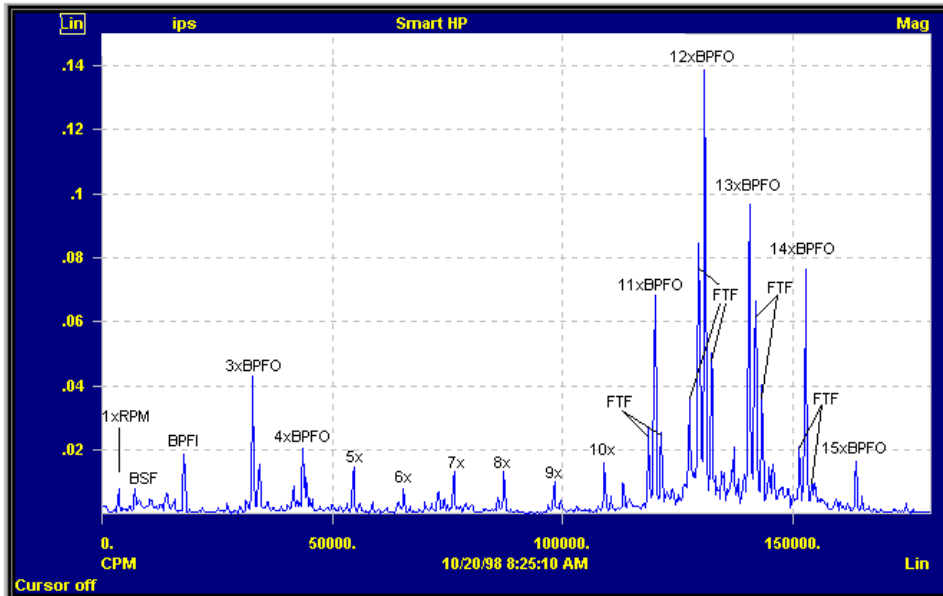


图 15、泵的速度频谱图

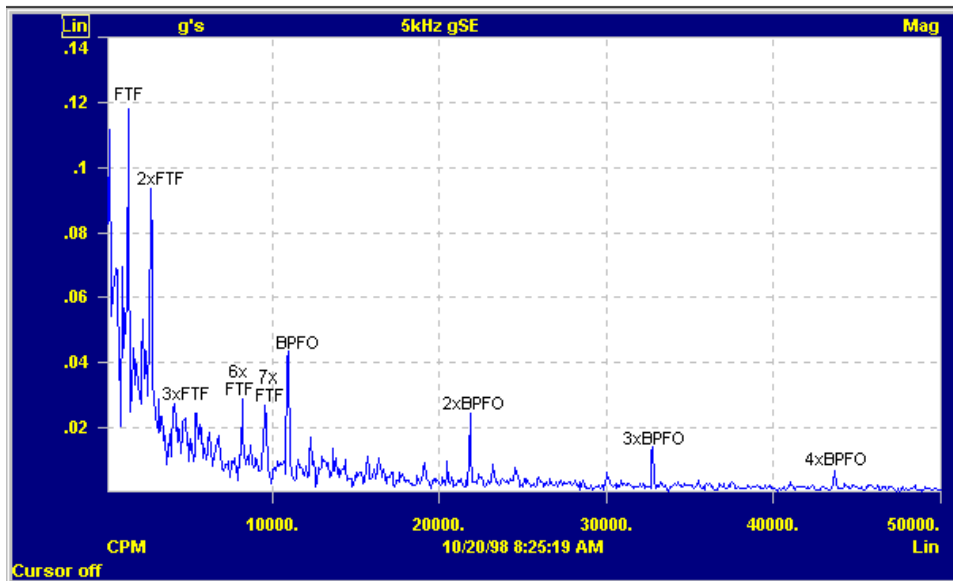


图 16、泵的峰值能量谱图

图 14 是加速度的时域波形图，由图中看出明显的冲击现象，振幅高达 4g，泵工作时现场噪声非常大。其峰值能量的通频幅值高达 5.11gSE，更说明冲击能量的存在。图 15 和 16 分别是测得的速度频谱和峰值能量谱。在速度频谱中，轴承外滚道故障频率的高次谐波是主要故障成分，在这些高次谐波处，还有关于保持架故障频率的边带成分。在峰值能量谱中，则

有明显的轴承外滚道故障频率和保持架故障频率，以及它们的谐波成分。充分说明轴承故障的存在。

实例四

最后一个实例用峰值能量的通频幅值，监测无密封泵工作状态。图 17 是该泵的剖视立体图，该泵的马达和泵轮共用一根轴，并装于一个封闭机体内，所以没有轴穿过机体时的密封问题，故称之为无密封泵。其转轴由滑动轴承所支撑，轴承和轴的润滑与冷却由泵本身产生液体的一部分来完成。

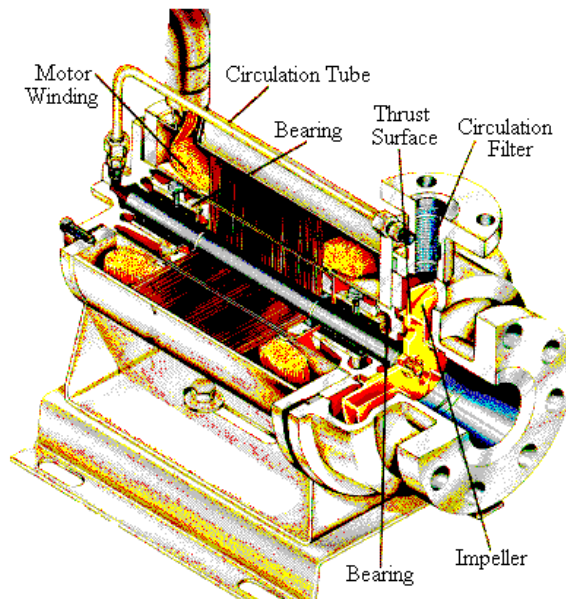


图 7、无密封泵的剖开图

泵的转速为 3450RPM，该试验泵装有监测转子径向和轴向位置的装置，峰值能量读数用 (EntekIRD)Model1911 加速度传感器和 (EntekIRD)Model15802 监测仪来获得，传感器用螺栓固定在泵体上，在试验过程中，泵模拟实际设置了一些工作状态，试验结果如图 18、19 所示。

试验结果表明，峰值能量通频幅值与转子的轴向位置测量值有直接的关系。图 18 表示当泵的流量从 50(加仑/分钟)到 190(加仑/分钟)逐渐变化时，峰值能量通频幅值与转子的轴向位置测量值的变化情况。当泵超过最佳效率点 150(加仑/分钟)时，转子开始向泵液入口处移动，同时峰值能量通频幅值也增加，曲线 B 和 C 具有相同的变化趋势。由此趋势看出，无密封泵应尽量避免工作在这种状态下。

图 19 是有关泵入口压力对工作状态的影响。保持试验泵工作在 150(加仑/分钟)的最佳条件下，然后逐渐降低泵入口处的压力，同时记录峰值能量通频幅值与转子的轴向位置的变化值，由图中看出，随着入口压力的降低，峰值能量的通频幅值与转子的轴向位置测量值都有较大的增加，表明泵的

工作状态变坏；若恢复入口处的压力（大气压），以上二值均恢复正常。由此可见，同时监测上述二参数可准确判断无密封泵的工作状态。

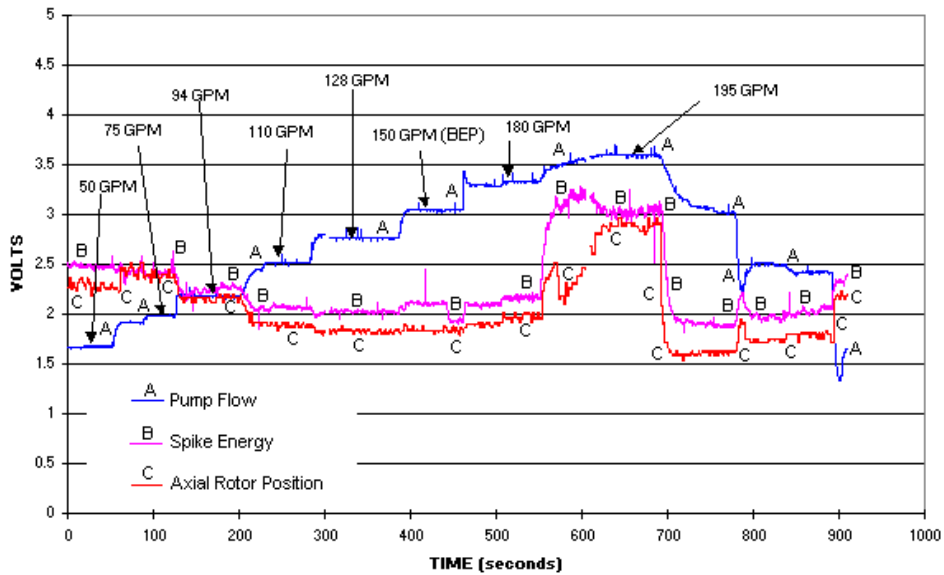


图 18、工作流量变化过程

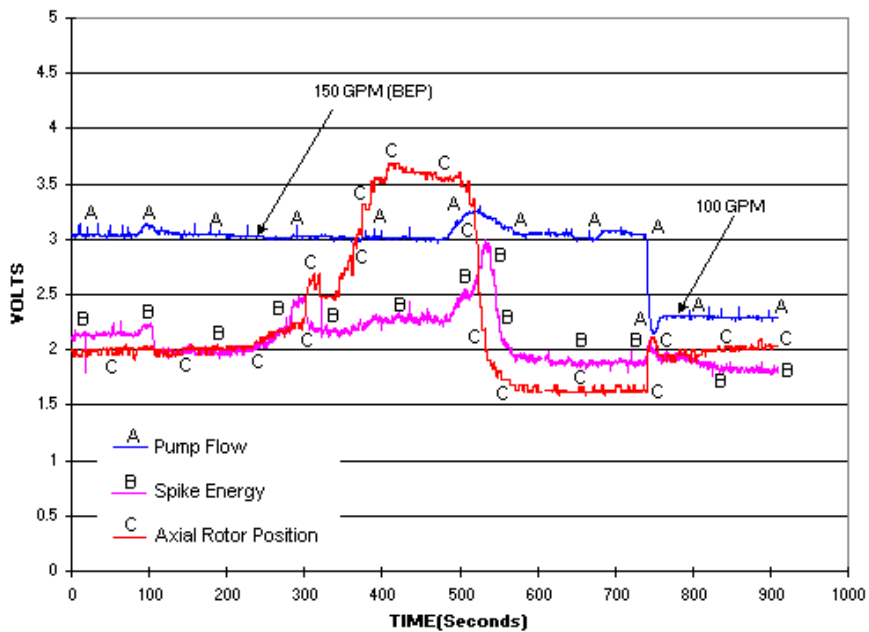


图 19、入口压力降低过程

五、 结论

峰值能量测量是设备状态监测和故障诊断的一种有效工具，峰值能量独特的峰峰值检波电路使其能够有效的捕捉冲击故障信息，这是其它方法，如包络处理，所无法比拟的。由于大多数工业用传感器的自振频率在峰值能量测量的采集频率范围内，所以，峰值能量读数对传感器及其固定方式十分敏感。为获得稳定的峰值能量测量值，应注意以下几点：

应保证始终使用同样的传感器、测量位置和固定方式，最好采用螺栓连接的固定方式。

峰值能量应用最多的是通过观察通频幅值读数的变化趋势来判定机械的工作状态，应注意必须是同一种机器、用同样的测量方法，才能借鉴关于幅值界限的经验值。

峰值能量谱中的故障特征频率及其谐波是调制频率，这些频率与其高频载波，如齿轮啮合频率、轴承故障频率的高次谐波、机体的振动响应频率、传感器自振频率等有关。所以，利用峰值能量谱无法检测低频故障，如不平衡、不对中等。

参考文献

1. Ming Xu, "Spike Energy™ and Its Applications," *Shock and Vibration Digest*, Vol. 27, No. 3, pp. 11-17, May/June, 1995.
2. Ming Xu and Julien Le Bleu, Jr., "Condition Monitoring of Sealless Pumps Using Spike Energy™," *P/PM Technology*, Vol. 8, Issue 6, pp. 42-49, December, 1995.
3. Julien Le Bleu, Jr. and James Lobach, "Continuous Monitoring of Sealless Pumps – The Next Step," *Proceedings of 15th International Pump Users Symposium*, Houston, Texas, pp. 125-131, March, 1998.
4. *Ford Motor Company Vibration Standards for New/Rehabilitated Machine Tool and Facility Equipment Procurement*, Engine Division, General Offices, 3001 Miller Road, Dearborn, Michigan and Transmission and Chassis, Division General Office, 29500 Plymouth Road, Livonia, Michigan, issued on June 26, 1985.
5. Ming Xu and Joseph M. Shea, "Using Vibration Analysis to Determine Bearing Preload in Machine Tool Spindles," *Proceedings of the 19th Vibration Institute Annual Meeting*, Indianapolis, Indiana, pp. 25-36, June 20-22, 1995.