

有限元分析

有针对性地优化和改善机床性能

在对机床的静态和动态性能作出评判的同时，可以向机床制造厂家提供有针对性的支持，以实现设备潜能的最大发挥。

文 | Christian Brecher 等



机床必须满足多方面的要求。从用户角度看，诸如高生产效率和可靠性强的设备等因素是至关重要的，对于机床制造厂商来说，这就意味着要达到最具经济性的工艺参数，例如在稳定生产状态下达到较大的切深和较高的进给量。生产状态不稳，即可表现为设备发生振动，尤其在机床结构和部件刚性不足的时候。

出于这种原因，机床整体就需要达到很高的静态和动态刚性。如果生产状态不稳定，则机床的理论功效就无法被充分利用。

RWTH Aachen 大学 WZL 学院可以为设备和生产流程提供测量技术方面的帮助，以对设备振动问题作出客观的评估，并对设备特征作出描述。对此，可以揭示出静态特性曲线、动态柔性频率特性、生产过程中的振荡形式与振颤特征等现象。通过此类探索，不稳定的生产流程可以得到识别，机械结构上的原因即可得到确定。

为了对机床的机械结构性能作出详细分析和优化，WZL 学院可以采用有限元 (FEM) 方法，对机床的结构进行模拟，通过 FE 建模和测量数值补偿，对机床结构进行详细的分析和虚拟优化，所获得的优化结构可以被纳入到下一步设计



图 1 通往动态稳定的机床之路

工作中去。最后，对在设计中所做的修改通过后续新的工艺探索活动加以测评。下文以 Wema Voltland Technology 公司的一台特种机床为例，对整个过程作出描述。

位于 Plauen/Vogtland 地区的 Wema Vogtland 公司是一家在各类机床改造和大修领域的主导供应厂商，同时也是一家机床制造厂商（尤其是特种机床）。可被纳入到拥有全自动工件转载功能的生产线上的此类特种机床能够用于对诸如用户专用工件的铣削加工。设备构造

如图 2 左侧所示，该设备基本上由一个可分成两半（即侧面单元和中间单元）的床身、铣削单元和工件夹持单元构成（图中未显示出来），带有加工主轴和刀座的铣削单元可以在 X 和 Z 轴方向上移动，中间单元拥有一个可安装工件支架的连接板。

测量涉及各种不同的工艺参数和多种生产流程

在该机床样机的使用过程中，某些生产流程出现了性能不稳定的现象。为

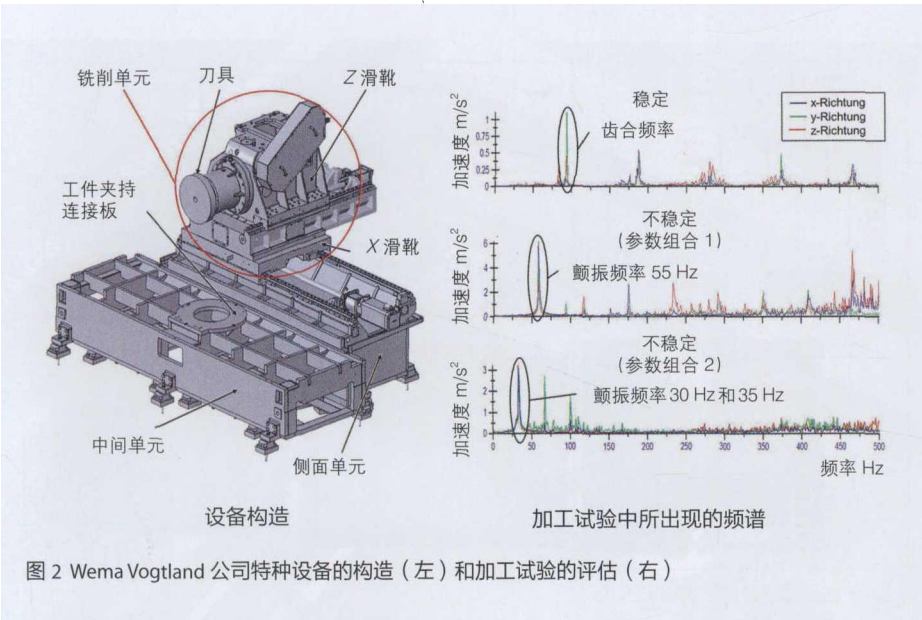


图2 Wema Vogtland 公司特种设备的构造（左）和加工试验的评估（右）

了能够更好地对生产流程作出评判，在加工过程中 WZL 学院对振动状况进行了测量。测量涉及多种生产流程和各种不同的参数，所测定的不仅仅是是不稳定的生产流程，同时也包含了稳定的生产流程，以便为分析和评判获得可比对的测量结果。

在对生产流程进行评判时，也对加速度信号的频率范围进行了分析和评判。当加工作业处于稳定状态时，主要显现齿合频率及其谐波；当加工作业因设备自发振动而处于不稳定状态时，则主要显现谐振频率。谐振频率在振幅上要明显超过齿合频率。对于所试验的设备不稳定生产流程，可以识别出 30 Hz、35 Hz 和 55 Hz 的颤振频率，如图2（右侧）所示。

为了查明不稳定生产流程的原因，对生产设备进行了测量。为了能够对设备静态性能特征作出描述，首先对静态特性曲线进行了记录。有了静态特性曲线，即可识别出机床静态刚性和以间隙方式出现的实际非线性（例如导向装置和轴承）状况。该机床显现出一种几乎直线的静态变形特征，并因在加载和卸载之间的滞后程度低而可被视为是无间隙和无摩擦状态。由此，为动态柔性特性和模态分析在测量技术上的可评判性提供了一种前提条件。

针对机床动态特性的研究和评定，

利用了设备的柔性频率特性。通过频率范围内的动态偏移及其动态力的商，可以计算出作为触发频率之上复杂数字的柔性频率特性数值。图3所示为各不同频率特性的相应振幅。依据柔性频率特性上的谐振峰值，可以得出设备固有频率。很容易看出，前三个固有频率与加工试验中所测得的颤振频率相一致。

借助于模态分析可以求得机床的本质形式并使之可视化

通过模态试验分析，可以实现对机床固有频率内本质形式的可视化。对此，可以确定出设备几何外形和网状模

型，其节点可以成为测量点。在每个测量点上，可以测得柔性频率特性，然后再获得设备所出现的本质形式并实现可视化。由此可以更好地理解设备在不同频率条件下的振动特性和设备结构上仍具改进潜力部位的第一个固有频率。

通过模态分析，可以为每个所识别的临界固有频率提供相应的振动形式（见图3）。30 Hz 时的固有形式表现出铣削单元和工件夹持装置在 Z 轴方向上的倾覆趋向；而 35 Hz 时的铣削单元和工件夹持装置则在 X 轴方向上呈现逆相倾覆；当频率为 55 Hz 时，可以看出铣削单元围绕着 Y 轴旋转。在进行测量试验之后，采用有限元（FEM）方法为机床建立起一个模拟模型，以便对设备状态进行详细的研究。模拟模型的建立分为三个步骤：结构部件的提炼、网络化和耦合。在第一个步骤中，对各个结构性部件进行了简化，以免无谓地增加计算时间。

从模态分析中可以看出，所有被观察的自有模态均从床身部件（侧面单元或中间单元）中产生。因此，对侧面单元和中间单元只作轻微地简化。而铣削单元和工件夹持单元则接受更大的提炼。然后，对各个部件进行网络连接，各网络单元大小要视相关结构部件的提

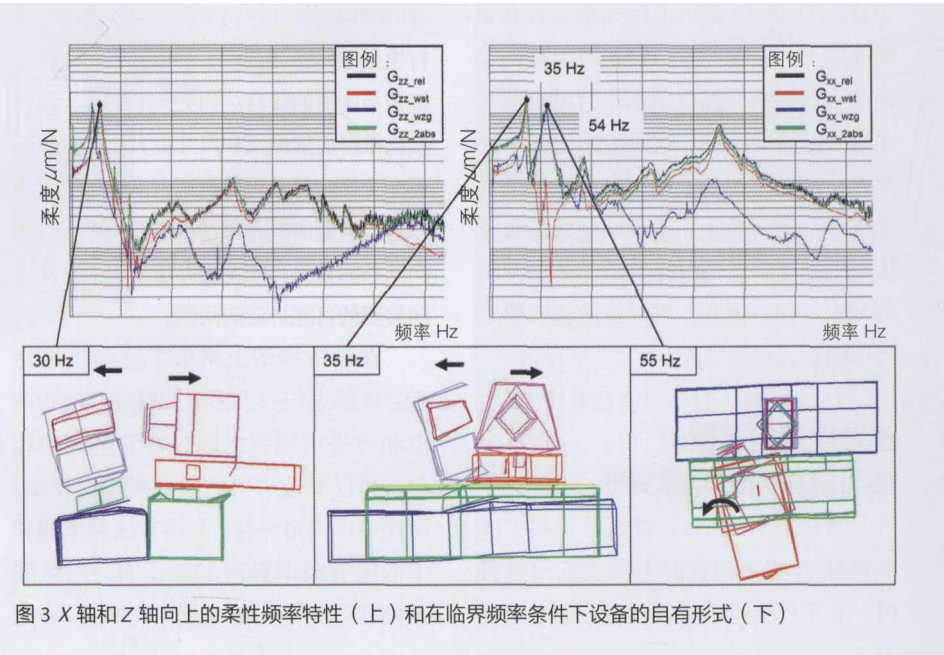


图3 X 轴和 Z 轴向上的柔性频率特性（上）和在临界频率条件下设备的自有形式（下）

炼程度而定。

在下一个步骤中，把结构部件汇总到总的模拟模型中去，其重点在于对部件之间的连接进行展现。在实际应用中，结构部件往往是通过各种不同的元件进行相互耦合的。在建立完整的模拟模型之后，可依据机械试验结果对模型进行补偿，补偿之后的模拟和测量临界自有形式的对比情况，见图 4。

制订改进建议书
并验证改进措施的成果

在经过补偿的设备整体模型的模拟结果的基础上，可以对相关的临界固有频率的自有形式进行详细的变形分析，分析的目的在于对设备相应振动的原因进行识别。对此，可以识别出造成结构部件发生极大变形的部位，变形的原因也构成了振动现象的原因，这些振动现象必须得到排除，以便设备在这些部位上的刚性得到加强，同时把临界固有频率推移到一个较高的频率范围。

通过采取提高固有频率的办法，总体上可以降低原先拥有固有频率的那些部位的动态柔性。因此可以认定，增强床身的刚性可以降低部件动态问题的严重程度，并避免产生颤动振荡。

图 4 所示下部区域所识别出的相关固有频率相对应的设备变形状况。针对 30 Hz 时铣削单元和工件夹持装置在 Z 轴方向上的倾覆问题，振荡原因首先应该从工件夹持装置与设备中间单元相互连接的区域里查找，这是因为这里出现最严重的变形现象。尽管在床身上设置了大量的横向筋条，但是连接板仍会发生变形，导致整个中间单元在 Z 轴方向上发生弯曲。由此，可以造成侧面单元与中间单元相互裂开。

当发生反相倾覆时
会出现较大的局部变形

当频率为 35 Hz，铣削单元和工件夹持装置在 X 轴方向上发生反相倾覆时，在工件夹持装置与设备中间单元相

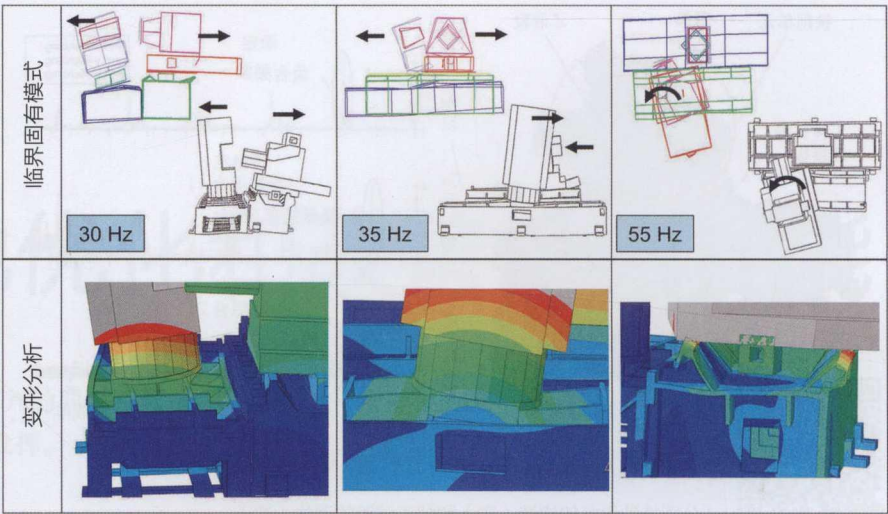


图 4 在临界频率条件下的变形分析

连接的区域内会出现较大的局部变形（见图 4 的中下部分）。如同 30 Hz 时的自有形式一样，连接板会发生变形，这是因为用于试验的纵向筋条无法承受连接板的变形力。

与以往所观察到的两种固有频率相反，当频率为 55 Hz 和铣削单元绕着 Y 轴旋转时，其振荡的原因在于侧面单元的导向区域内（见图 4，右下部分），尽管为了稳定导向轨道，在侧面单元里加入横向筋条，但后导向装置仍然会发生倾覆。

在识别振荡原因之后，该公司与制造厂家一起合作，制订出了如何增强机床床身的结构刚性和如何采用有限元方法进行模拟检验和评判等多种措施。为了使连接板与床身的接合达到更大的刚性，连接板被做得更加结实和尺寸更大，以便后面两个横向筋条可以发挥出支撑连接板的作用。在侧面单元里，也需要采取增加横向筋条的数量和厚度的办法来解决后部导向装置的可能折弯的问题。

在设备模型上采取了这些措施之后，重新进行一次模拟。通过对初始模型和改进型模型之间的自有形式的对比，可以对改进措施的效果作出评定。由此可以把第一种，即 30 Hz 频率模式下的固有频率提高 128%，把 35 Hz 频率模式下的固有频率提高 138%，和把

55 Hz 频率模式下的固有频率提高 35%。通过提高此类频率，可以明显看出机床床身结构的刚性得到了提高。

依据正面的评估结果，对由此做了设计更改的设备床身进行制造，也对设备进行了改造。为了能够作出最终的评估，再次采用所有相关的作业流程参数对加工试验进行了测量，并检验了设备流程不稳定性问题。试验结果表明，检验的所有作业流程整体稳定，所要求的工件误差范围也得到了保证。

通过整体作业流程方式
有针对性地实现对设备的改进

借助于一个包含测量和模拟试验与模拟结构改进内容在内的整体作业流程，可以得到一个有针对性的特种设备结构改进的结果，并阻止振荡现象的再生。

首先从测量技术角度对设备特征进行表述，并对造成设备加工流程不稳定性现象的临界固有频率进行识别，然后为设备建立相应的模型并作补偿，对临界频率条件下设备振荡特征进行了详细的模拟和分析，由此可以制订出增强设备结构部件刚性的有针对性的措施。在制造厂家落实好改进措施之后，再通过第二次测量检验工作来验证整改措施的最终成果。MM