数字双胞胎

如何构建一台机床的数字双胞胎

采用构建机床结构数字双胞胎的新方法，可以使系列化机床轻结构的通用模型适应于机床实时动态性能的分析。

文 | Stefanie Apprich

更多精彩请扫描二维码

在机床和加工设备的设计、开发和投产过程中，人们越来越多地应用虚拟的机床样机。这是可描绘出机床及其机械部件物理特征、传动和控制相互之间的联动关系并同时与加工工艺之间的互动关系的仿真模型。根据各种不同的应用场合，虚拟样机可具有不同的侧重点。

虚拟样机通常与硬件在环 Hardware-in-the-Loop(HiL) 仿真和虚拟运行相结合，可称作是数字双胞胎。但如果所设计的虚拟样机只是供结构部件与进给轴、控制调节系统和加工工艺等方面的互动模拟之用、则称之为数字双胞胎就不准确。

图 1 ISW 所展示的系列化机床轻结构的样机

模拟模型无法准确勾勒出结构动力性能

模拟模型不能准确地勾勒出机床设备的真实动力性能，尤其是结构动力性能。因此需要在模型与物理设备之间通过参数匹配来进行动态性能纠偏。对此，又需要用到设备、大量时间和专业知识。为了降低这方面的工作量，斯图加特大学机床控制技术与加工设施学院（ISW）开发出新的方法（图 2）。

行走柱式轻型动力机床设备的虚拟模型（图 1）在运行过程中基于测量信号连续与机床设备的实际动态性能相匹配。由此可以产生轻型机床结构的数字双胞胎。

机床轻结构的动态性能

高效模型化的难点在于参数编写。在机械零部件的动态模拟上，工作难点在于对可替代刚性、材料和阻尼特性值的选择上。以当今技术水平来说，虚拟样机可以从机床设备研发和设计的角度对今后的物理机床的动力性能作出很好的预测。例如，在研发阶段可以对切削加工流程、对进给轴和传动调节以及设备的结构动力性所带来的影响问题进行探究，为设备的规划和设计提供相应的预测。模拟模型的主要固有频率通常会与今后实际设备的固有频率产生小于 20% 的偏差，但是在设计调节功能和避免振动或生成诸如机床诊断等更多功能的过程中，这些模型往往都显得不够准确。例如，当所预测的设备固有频率与后来实际设备的固有频率发生 15% 的偏差时，则用以生成小振动轨迹的特定 Input-Shaping 方法的效果也就减弱了大约 25%。此外，如果机床设备结构的动力特性在设备整个工作区域内发生改变，则

会额外加大在研发阶段对动力特性准确模型化措施的难度。动力串行和刀具单侧动作的机床，如行走柱式机床和龙门式机床，便是设备动力特性可与刀具在整个工作区域内中心点发生改变而改变的例子。

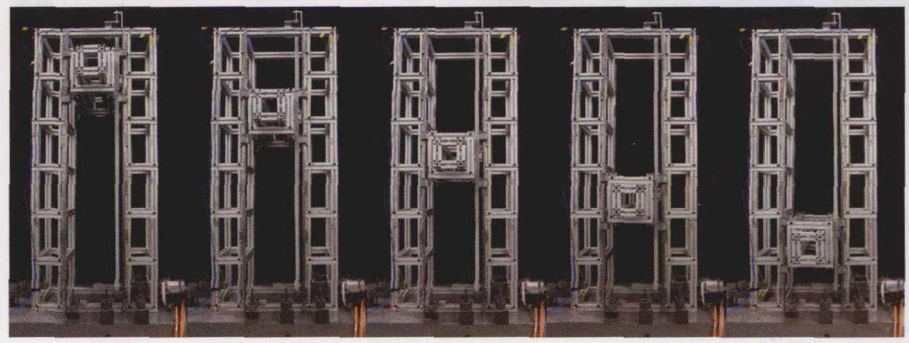

图 3 ISW 所展示的具有五种不同姿态的系列化机床轻结构样机

由标准铝型材构成的轻型结构

针对机床轻结构的各种状态下的动力性能和这种结构的数字双胞胎自动生成所需方法的研究，ISW 可提供一台试验样机。图 3 所示五种离散状态下的轻型结构和行走立柱动能状况。所设计的结构由标准铝型材及其连接件构成。垂直轴由一个齿轮三角皮带机构进行传动，而齿轮三角皮带则通过一个快速控制原型机化系统（Rapid-Control-Prototyping-System）来运行。垂直轴拥有一个 1200 mm 的行程，它系统性地改变了机床结构的动力特性。滑枕的水平位置可以进行人工调节。样机在机床结构上可以真实反映实时效果，但这只是在较低的频率范围和合适的成本开支的条件之下方可达到。借助于模型分析手段，在五个不同位置上对实验室样机的动力性能进行测验。其结果显示了行走立柱的最初三个主要自有模量、最初的弯曲模量和切变模量。根据滑枕在垂直方向上的不同位置，自由频率可以发生变化。当滑枕处于最下方的位置时，第一个模量的频率将会是 12.8 Hz；而当滑枕处于最上方的位置时，第一个模量的频率则将会是 16.4 Hz。从整体上看，自有频率可最大移动 22%。ISW 样机所表现出来的与姿态相关的动力性能也在工业龙门铣床上得到验证。对这种在虚拟机床上不断变化着的设备特性的准确描绘（即对机床结构数字双胞胎的制订），将可以提供更多的新机遇。

轻型结构数字双胞胎的生成和用途

通过数字双胞胎，可以使调节参数与各种不同的机床动力特性相匹配，从而可以实现对高性能驱动调节技术的设计。最差动力特性的姿态也不再决定着调节回路的动力性。此外，还可以通过采用 Input Shaping（输入整形）的方法，在轨道设计阶段即对可在工作区域内发生变化的动力特性作出考虑，以便能够在每种姿态上以最大的动力极限值来进行定位，而不会发生过调现象。安全层面可以降低，加工作业则可更快速地开始。通过数字双胞胎与设备真实的动力特性相定期匹配，可以在较长一段时间内掌握机床设备的动力特性状况。因此，也可以实现对机床设备动力特性的改变情况进行跟踪。从中也可以推导出有关设计或服务等方面的论断。通过对设备特性改变的定期跟踪和评判，可以根据需要对维护时间间隔做出计划。

ISW 为机床轻结构所研发出的制订数字双胞胎的方法，利用了一种通用的参数有限段模型，它可以反映出一定数量的自有模量。弹簧和阻尼元件的模型参数可被连续编写。对此，主要采用 Recursive-least-Squares（循环最小平方）评估者系统。该系统在控制系统内测量信号和所测量的加速度信号的基础上，对模型参数进行更改（图 2）。参数匹配只在非生产的辅助时间内进行。这可确保设备轻型结构的动力性能被识别，而非加工流程被识别。诸如切削加工过程等加工流程的动力性，则主要要视机床设备的几何外形和加工参数等因素而定。

针对每种姿态（即使是设备处于工作区域内的行走运动之中），完成了参数编写的模型可以反映出机床设备的真实动态性能。借助于这种方法，即使在没有专家知识的情况下，也可以自动生成机床轻结构所需的准确的数字双胞胎，使机床设备的效用潜能在将来得到最充分的发挥。MM

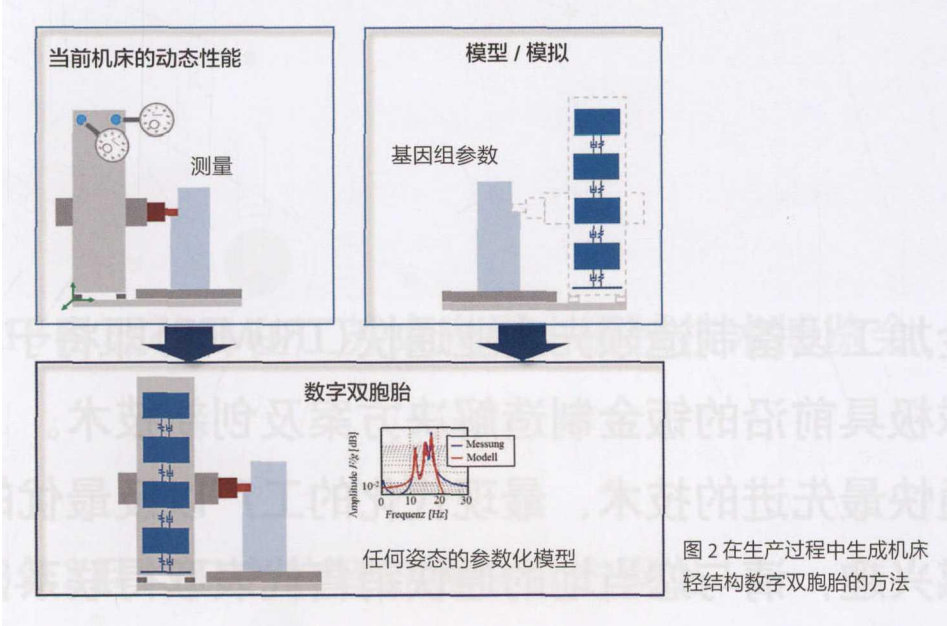

图 2 在生产过程中生成机床轻结构数字双胞胎的方法