

借助实际振动分析简化设计

摘要

机械设计师经常使用振动仿真，作为一种既省时又经济高效的方法来取代构建实物模型、测试、修改和再测试其设计的传统方法。通过在计算机模型中确定动态载荷响应的影响因素，设计师甚至在切除一块金属前就能收集到进行适当改进所需的数据。除了大大减少必需的实际样机数量外，振动分析还显著降低了相关成本。



动态仿真简介

动态仿真有助于机械设计师设计更好的产品。在设计产品时，您往往需要解决操作上的问题，如：

- 工作在铣床上的夹具在晃动时会产生多大的误差？
- 通过新的网球拍或高尔夫球棒减少可感觉到的振动后，运动员的疲劳程度能否有所缓解？
- 零部件是否会因为电力传输时产生的线路噪声的振动而有所松动？
- 从重量或成本上不过度设计汽车发动机的安装托盘时，其厚度应为多少？
- 能否预测石油钻井机的转速是否会使系统处于安全操作区域，而不会因振动而分离？
- 系统或结构是否需要符合 MIL 规范、Telcordia GR-63 或统一建筑法规 (UBC) 对振动或抗震的要求？

过去，您可能要通过手算和几个构建模型/测试/重新设计周期解答这类问题。但现在，您可以利用动态仿真在设计初始阶段就对这些问题进行预测。

任何时候，只要零部件或装配体承受了不断变化或动态的载荷，在某种程度上它就会做出反应或发生振动，而这一反应或振动会从单纯的令人厌烦发展到极度危险。考虑下面三个实际范例：尽管设计糟糕的无绳电钻所产生的振动并不会导致消费者退货，但他们可能会告诫朋友们不要去买它。在测试过程中，由路面引发的令人不快的振动可能会吓跑买主，造成销售损失。此外，敏感电子部件的机械壳体或焊接点在运输过程中所产生的振动应力具有很大的潜在破坏性。

振动分析的主要目标是确定随时间变化的输入是否会在实际零件故障或用户感受方面产生无法接受的响应。

振动分析的主要目标是确定随时间变化的输入是否会在实际零件故障或用户感受方面产生无法接受的响应。在全面掌握这些信息之后，您甚至可以在制造样机或构造实际结构前改进您的设计。下文将讨论几种检查振动的方法，以及它们对设计取得成功的影响。

描述三种振动

我们举一个例子来阐释振动的基本概念以及用于仿真振动的技术。您想阻止邻居的猫在杆子上挂的鸟食容器上享用免费午餐。如果轻轻推动杆子，鸟食容器的速度和位移将与推力的输入速度和幅值成线性比例关系（图 1a）。然而，如果用相同的输入幅值但以更快速度开始晃动杆子，则最终会导致杆子顶部“猛烈摆动”，从而实现您阻止猫的目的（图 1b）。

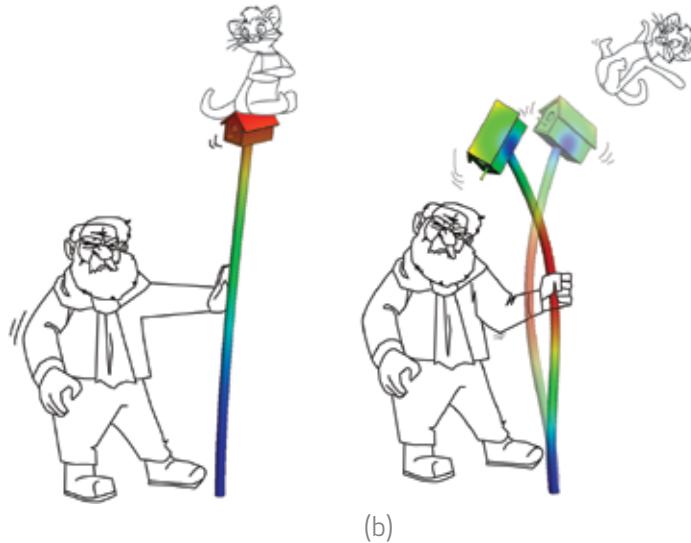


图 1: 缓慢晃动的杆子 (a) 与由更快速输入导致的猛烈运动 (b)

此猛烈运动效应表明您的晃动速度在鸟食容器系统中产生了激发共振: 与输入 (b) 相比, 输出 (a) 现在高得出奇, 足以让猫懊恼不已了。

这种前后运动简单解释了振动过程中发生的事情。在系统中激发共振的时变输入会产生明显甚至灾难性的响应。但是, 不同速度的类似输入并不会激发共振, 因此不必担心。这些概念适用于各种各样的系统。因此, 利用振动分析, 您首先能够了解晃动什么时候会在产品其他地方产生无关紧要或灾难性的响应。

振动可用三种方式描述, 主要取决于驱动输入的性质或形式:

1. 在物理域或时域中, 您可以实时查看不断变化的实际移动。时域中的仿真通常称为瞬态分析。在上面鸟食容器例子中, 您可以计算每分钟的推动频率, 并且测量因推动而产生的振幅, 然后将这些输入提供给仿真。由于输入速度在仿真中会有所提高, 所以您所看到的梢端速度和位移与您用自己的码查看和测量的值相同。另一个输出可能是振荡的时间或次数, 这是杆子在晃动停止后由于自然阻尼而停下来所需要的时间或次数。

在描述动态事件的瞬态方法中, 任何参数 (如速度、幅值、方向或输入次数) 都可以按照它在实时事件中的方式进行更改。这些事件的计算机仿真必须在特定的时间间隔报告这些输出, 而不是显示连续响应情况 — 数字模拟两难的境地。由于持续时间的增加, 对这些问题的求解会消耗更多的时间和资源。您必须指定足够小的步长, 才能捕获所有变化以及对这些变化的响应。确定所需步长数的一般准则是, 响应中每个峰谷的步长数为 5。正如下面的图 2 所示, 这个数字在事件的瞬态分析中会快速增大。

利用振动分析, 您首先能够了解晃动什么时候会在产品其他地方产生无关紧要或灾难性的响应。

在描述动态事件的瞬态方法中, 任何参数 (如速度、幅值、方向或输入次数) 都可以按照它在实时事件中的方式进行更改。

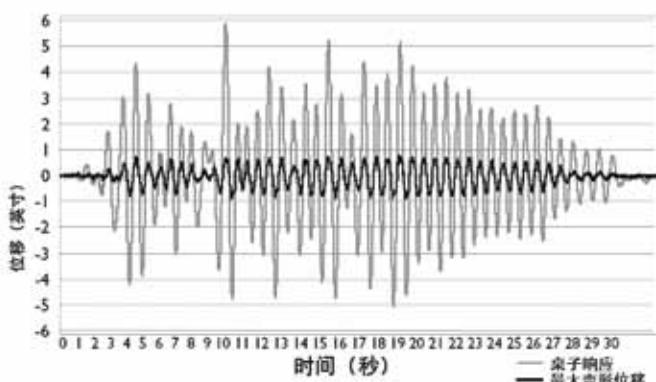


图 2: 振动台测试的瞬态输入

2. 借助频域分析方法，我们只能讨论给定频率下的输出幅值和输入。您必须假设所有输入本质上都是周期性的或正弦的，并且在该频率下的振幅保持恒定。当输入的变化只是速度，而不包括振幅、方向或输入次数时，此简化输出是最有效的。此方法普遍用于跨工作范围改变或扫描输入频率，并且确定最大可能的响应，如同执行振动台测试一样（图 3）。



图 3：具有可变频率的自动振动装置，可应用于阻止猫问题中的鸟食容器

输入可以是单频下的简单峰值力、位移或加速度，或者是描述输入幅值如何随频率变化的复杂功能或表格。

3. 描述振动的第三种方式与统计和概率分析有关。普通用法往往使人错误地认为此方法是随机振动。需要随机振动算例的情况是指：输入速度或频率以及振幅不可重复，但具有可预测平均载荷的情况。因此，您需要运用数学方法编译给定时间内的典型输入，以提供给定频率下可能产生的输入能量。

我们可以在功率谱密度 (PSD) 曲线或表格中表示所有相关频率下的各种估算能量。由于您可以查看系统在这些输入发生给定变化后应力或位移的增加或减少情况，所以运用比较法是使用这些问题的输出的最好方法。显而易见，相对于另外两种方法，PSD 曲线或表格是更近似的方法，而唯有此方法，才能描述系统对地震或路面噪声中出现的可变输入的响应（图 4）。

我们可以在功率谱密度 (PSD) 曲线或表格中表示所有相关频率下的各种估算能量。



图 4：鉴于振动的不规则性，将鸟食容器放在崎岖不平的路面上可能会让猫产生困惑。

定义振动仿真的基本知识

静态分析与动态分析之比较

静态算例假设载荷是常量或者在达到其最大值之前以非常缓慢的速度施加，并在到达最大值后不再随时间变化。有了这个假设，所有惯性效应必须忽略不计，包括激发的系统的速度和加速度。因此，静态算例产生的应力和位移是恒定不变的。

但在很多实际情形中，载荷并不会缓慢作用，而且可能会随时间或频率而变化。惯性和阻尼相互关联，并且需要使用动态算例来运行仿真。一个经常被误用的做法是，应用静力来仿真某结构可能在地震或撞击事件中所经受的位移情况。这些事件涉及作用于整个系统的（而不只是一个点或每个零部件重心的中心位置）加速度或减速度。此外，如果是由地震引起的载荷或振动台载荷，并且所应用的载荷因系统对初始应用的响应而出现反转，则零部件中产生的加速度在没有动态仿真的情况下是很难预测的。因此，静态简化很容易让人产生误解。保守还是非保守并不一致，因此静态简化不适用于大多数情况。

所有动态求解的建造块都是系统的自然频率或模式。

一般模态分析

所有动态求解的构建都是系统的自然频率或模式。所有实体都显示与任何载荷无关的共振频率或自然频率。此现象可视为系统在撞击或快速移除位移力后的自由振动。较低的自然频率（用赫兹表示，即每秒周数）是指需要最少能量实现的模态。长而细的悬臂（类似于图 5 中的码尺）显然只需较少能量就可以偏移 (a) 中的零件（最低自然频率），而偏移 (b) 中的零件（较高自然频率）则需要较多的能量。

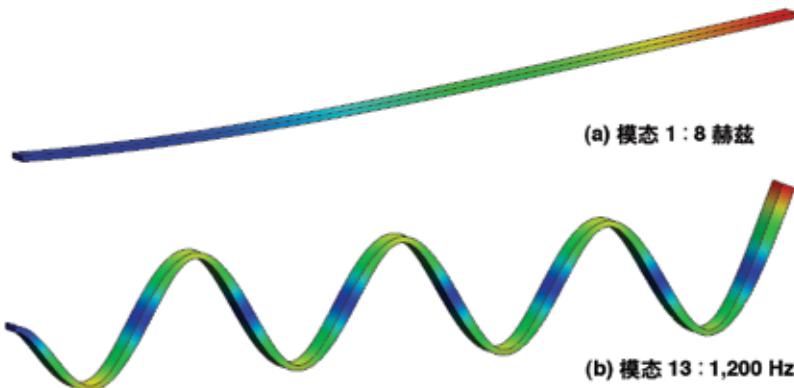


图 5：横梁的两种自然频率

因此，设计师通常只对前几种模式感兴趣，因为大多数反应都是以这些模式出现的。当较高频率形成共振时，响应放大程度一般小于较低频率。然而，长期的小应力振动可能会导致疲劳失效，更高的频率响应可能仍然是非常重要的，应当予以关注。

铃铛运动产生了非常迷人的研究模型。您可以想像正在响的铃铛中产生的晃动效应，铃铛在大幅摆动着，铃声从它的边缘潺潺流出，就像各种音调在空中回荡。根据铃铛的几何形状、铸造精密程度以及材料，这些声音会发生变化，且长短不一。整体声音是铃铛在每个不同运动模式下同时产生的音调的融合，如下面图 6 所示。

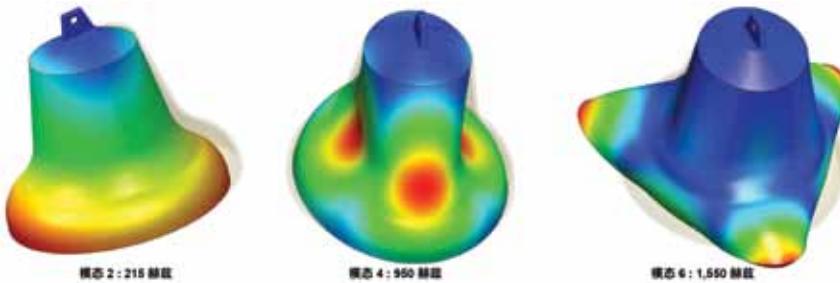


图 6: 响铃的模态。实际音调是由每个运动产生的音调叠加而成的。

在确定是否需要动态算例时，一个重要因素是输入的频率或脉冲持续时间。一般来说，如果输入的频率接近或大于零部件或系统的最低自然频率，则设计师应执行动态算例。如果动态输入是脉冲，则仿真应该比较脉冲的持续时间和自然频率的周期，自然频率的模态可能受到了该脉冲的激发。

频率周期是该频率的倒数，例如 10 赫兹波形的周期为 $1/10$ 或 0.1 秒。如果脉冲的持续时间与相关的自然频率接近，请考虑执行动态分析。

基于时间的分析

时间历史（瞬态）分析通常用于查看短暂脉冲时应力或位移的幅值（图 7）。如果激发产生了共振，则相应的应力或位移可能大于同等幅值的静态载荷产生的应力或位移。不过，实际持续时间也很重要。如果所应用的载荷相同，但释放速度更快，则持续时间可能会在系统有时间反应之前不断变化；这种情况下不会出现任何问题。同样，如果以较慢的速度应用载荷，则响应会达到静态情形下的状况；响应可能同样不太明显。瞬态分析将阐释这三种情形。

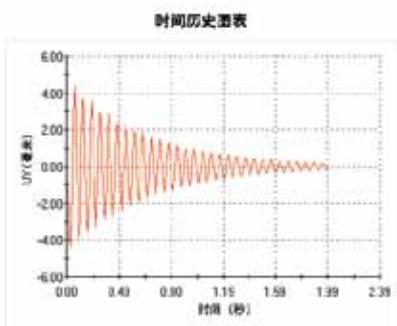


图 7: 结构上某单点处位移与时间关系的样本图解，由瞬态载荷形成的初始位移

谐波或频率响应分析

谐波分析对于分析这样的结构就十分重要了（图 8）。

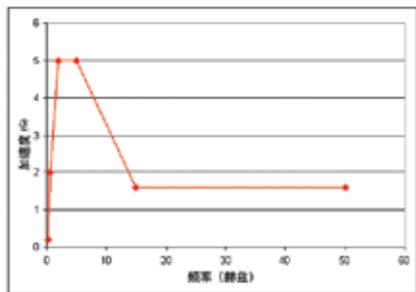


图 8: 电子测试中加速度与频谱的关系图

在确定是否需要动态算例时，一个重要因素是输入的频率或脉冲持续时间。

随机振动输入源于可持续无限时间的事件，但该事件的细节与时间无关。

一个典型例子是 1940 年横跨华盛顿州普吉特海湾 (Puget Sound) 的塔科玛纽约湾海峡吊桥在使用四个月后塌陷。作为一种节省成本的措施，原始设计已进行翻新，新设计中将桥板所支撑的重量减少了三倍多。一天清晨，当风速每小时达 35 到 46 英里的大风刮过时，大桥开始轻轻晃动，并且上下位移量达 3 到 5 英尺。几小时内，风力变幻无常，从而激发了扭曲模式。这种模式不断增强，直到水泥制成的路基块发生断裂。最后，整节路基块四分五裂，大块大块地掉到了河里。幸运的是，当地政府官员在上午十点封锁了大桥，没有一人受伤。

随机振动分析

随机振动输入源于可持续无限时间的事件，但该事件的细节与时间无关（图 9）。评估的时段越长，频域中的统计取样就越准确。提供给动态分析的相应数据汇总了由输入事件激发的所有频率下的总能量。路面几何体或地震随机力中的振动都是这种输入示例。

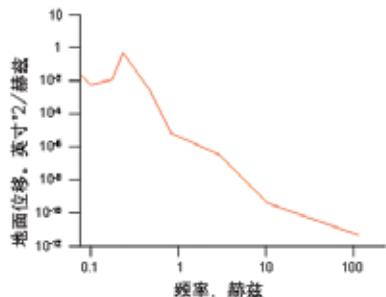


图 9：有关建筑拆毁现场附近的地面位移的 PSD 表示法

用于执行动态分析的方法

线性动态软件仿真可能有三种形式：时间历史（瞬态）分析、谐波分析或随机振动分析。机械工程师必须确定哪种方法（如果有）适合解决他们的工程难题。如前所述，算例要求的最佳指标是所拥有的输入数据的形式。针对这三种仿真，推荐的软件顺序是：创建适当的 CAD 模型、设置并执行频率分析以确定适用的共振频率，然后设置和运行选定的动态分析。

创建适当的 CAD 模型

动态仿真一般会占用大量时间和内存。抛开这两个原因不说，创建简化、有效的 CAD 模型通常还是值得的。对于这些算例来说，模型类型（横梁/线模型、抽壳/曲面模型或实体模型）的选择方法甚至尤为重要。对于应力结果，CAD 详细信息极其重要；而对于位移或加速度数据，更简单的 CAD 模型就足够了。在创建几何体时，也要记住各种算例的相对近似程度。由于瞬态分析使用“实际”输入，很少进行筛选或简化，因此详细实体模型对资源需求量大的特点可能会有所帮助。另一方面，由于谐波分析使用简化的数据库，随机振动算例会进一步简化基于时间的原始输入，所以高度详细的 CAD 描述值会开始迅速减少。

动态仿真一般会占用大量时间和内存。抛开这两个原因不说，创建简化、有效的 CAD 模型通常还是值得的。

执行频率分析

动态分析一般以系统中的自然频率为基础。在对随时间变化的响应执行更为详细的算例前，您必须确定这些频率（即确定模态响应）。在大多数软件仿真工具中，您可以在执行动态分析前发现此响应，或者可以使此任务自动完成，即将此任务作为三个可能的动态分析顺序中任何一个的第一步。

频率算例的输出（图 10）包括模态形状、模态频率和质量参与因子。其中，最后一项输出表明您可能很希望每个计算模式都参与动态响应。

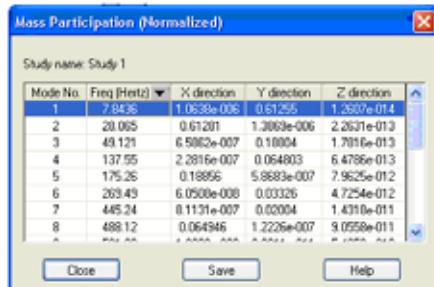


图 10：含质量参与因子的典型模态频率列表

审阅频率结果

对于系统的第一个动态仿真，您应该始终求解模态响应，并且应该在审阅该响应之后决定是否需要动态分析；如果需要，则必须决定要使用哪种动态分析。

如果在关注或工作范围内没有共振频率，您可能不必继续进行动态分析。即使频率属于工作输入的范围，您也应该确保它们代表的是应用的载荷实际激发的模态。例如，横向载荷可能会激发共振频率，但该频率下的模态可能是纵向的。这种情况下，载荷的动态方面对结果产生的影响可谓极度轻微。

如果工作频率有可能激发多种自然频率和模态，则首先必须通过在工作频率上方推进计算的自然频率来修改设计。此任务称为模态回避。常见技术包括减重或重新分布、增加支撑功能，甚至更改材料。

如果无法修改设计，以致于整个操作速度范围不及第一个自然频率，则普遍做法是将较低模式更往下推。较低速度时的激发符合能源较少的要求，因此相应的振动会有所减轻。许多设计师都见过这种效应：一个机械装置在加速后会

“不停颤动”，而降到工作速度时所有明显的振动都会消失。如果您无法通过调整设计使自然频率尚可回避，则可能需要执行动态分析。

如果工作频率有可能激发多种自然频率和模态，则首先必须通过在工作频率上方推进计算的自然频率来修改设计。

设置动态分析

由于模态求解是以后动态算例的建造块，所以您必须确保为表示系统特征确定了足够多的模式。至少，您应该计算足够的模式来包括至少是最大工作频率两倍的自然频率。例如，如果您的输入频度范围为 0 到 50 赫兹，则自然频率列表应包括足够多的模式才能包括 100 赫兹。

除此准则外，还应该审阅指定输入方向的质量参与因子。所包括的质量参与因子加起来应不小于 0.8（或 80%）。这可能需要您包括比最大输入速度多两倍的模式，或者它会建议您包括少一些的模式。但是，请不要将所包括模式的数量减少到比最大输入频率少两倍的程度。这样做可能会导致求解忽略该频率下的响应，该求解会结合较低频率结果使输出超出可接受范围。

动态分析所必需的输入包括载荷幅值、方向、关注点或关注区域、阻尼、频率范围或时间跨度。借助输出值，您能够将应力、加速度和位移这样的参数与系统的已知限制进行比较。这样，您就可以确定系统是否会失败，或者能否降低成本。

动态分析所必需的输入包括载荷幅值、方向、关注点或关注区域、阻尼、频率范围或时间跨度。

对于瞬态分析，您所应用的载荷和约束应该与静态分析中完全相同，只是将载荷定义为随时间改变。

使用谐波分析时，您必须通过应用的载荷来使系统振动。您可以定义一张表格来说明随频率变化而增加或减少其振幅的载荷。或者，您可以在某个称为基准激发的约束下使系统振动。从数学上讲，这类似于振动台测试。

尽管设置随机响应分析与准备谐波分析相似，但载荷或基准激发的输入是对 PSD 与简单的力、位移、速度或加速度进行比较得出的。随机振动分析的输出提供了响应（位移、速度、加速度和应力）的 RMS（均方根）值和 PSD 值。此数据实际上表示给定频率下可能预计到的最大响应。由于输入是统计取样，所以输出可能不太精确。然而，这是获取随机事件中可靠设计数据的最有效方法。

阻尼

如果没有模态阻尼，动态分析通常是毫无意义的。阻尼 (ζ) 表示系统因振动运动而损失的能量。没有阻尼，激发的系统将永远处于振动状态。许多阻尼源都算得上是阻尼因子，例如材料效应、摩擦、噪音和环境效应（如流体交互作用）。此因子的范围一般介于 0.01（适用于小阻尼系统，如单个钢质零件）到 0.15（适用于大阻尼系统）。如果没有提供有关阻尼的任何其他数据，则通常选择 2% (0.02) 作为默认值。设定有效的阻尼因子对指导实际设计选择至关重要。

图 11 显示了系统在各种频率下的典型增益（ A 表示加速度），其中 X 值为 1 时，表示系统在第一个自然频率下的激发 (ω = 激发频率； ω_n = 自然频率)。您可以看出，阻尼因子 (ζ) 为零时，从理论上讲动态放大（增益）可以是无限的。随着阻尼的加大，增益将快速减少。这些结果会大大影响您的决策。简单的测试有助于确定适用的阻尼。

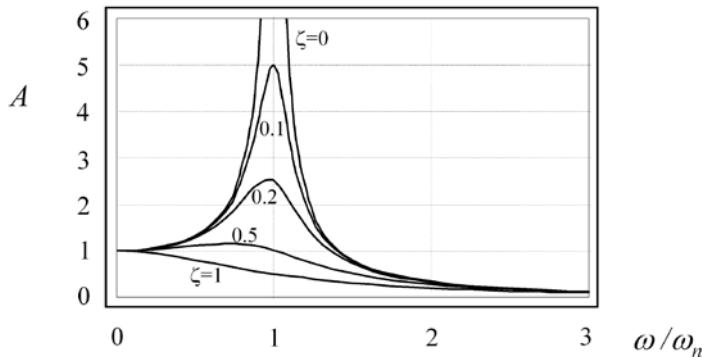


图 11：系统与各种阻尼因子产生共振时的系统增益

许多阻尼源都算得上是阻尼因子，例如材料效应、摩擦、噪音和环境效应（如流体交互作用）。

非线性动力学

动态分析要考虑的另一个方面是，到目前为止所讨论的所有仿真技术都属于线性算例，因为线性分析的所有规则都适用。如果材料本身显示非线性属性、零部件之间存在非线性接触，或者系统要经受需要非线性求解的大型位移，则必须执行非线性动态算例。由于在非线性状态下，模态频率的基本数学方法不能很好地发挥作用，因此大多数非线性动态求解都是在时域中进行的。

结论

由于多数产品都配有移动零件，并且都是在外力的作用下操作或移动的（甚至只是简单的运送过程），所以动态仿真任何预测仿真程序的自然延伸。尽早拥有产品对振动或碰撞的响应数据能使公司制定相应的早期设计更改决策。这种洞察能力不仅减少了对开发样机的需求，而且还确保样机和测试计划尽可能的有效。

例如，一家电信机柜制造商投入了四到六周的时间来建造、运输和测试单个样机，以了解三条轴上受地震引起的振动力，不过首次测试就指出有些焊接无效。于是，他们必须放弃所有后续测试结果。成本固然重要，但失去的项目时间却更为重要。作为应对措施，他们开始使用谐波响应分析来执行振动台测试，进而能够确定可能失败的地方。运用此数据，设计师能够确定有效、经济高效的修补措施，以减少这些失败的机会。他们还安排了样机的测试顺序，将最可能导致失败的测试放在了最后。因此，经过修改以后，这个具有破坏性的测试程序提供了最大的利益，而且浪费的时间、金钱或精力也很少或根本没有。

您将在主流设计仿真工具中找到本白皮书所介绍的技术。有些版本甚至集成到了常用的 CAD 系统中，如 Dassault Systèmes SolidWorks Corp. 提供的 SolidWorks® 3D CAD 软件。由于动态仿真可以帮助您设计出更好的产品，所以您可能会考虑在自己的应用中更深入地利用此技术。下面列出了三部有关振动分析的权威性著作。

参考

Elements of Vibration Analysis; Leonard Meirovitch; McGraw-Hill, Inc., 1986.
Mechanical Vibrations (fourth edition); Singiresu S. Rao; Pearson Education, Inc., 2005.
A Finite Element Dynamic Primer; D. Hitchings (ed.); NAFEMS; Glasgow, Scotland, 1992.

公司总部
Dassault Systèmes
SolidWorks Corp.
300 Baker Avenue
Concord, MA 01742 USA
电话: +1-978-371-5011
电子邮件: info@solidworks.com

亚太地区总部
电话: +65 6511 7988
电子邮件: infoap@solidworks.com
大中国区
电话: 400-818-0016
电子邮件: infochina@solidworks.com

