飞机地面行驶振动特性测试:

imc 结构测试解决方案应用例

同其它机械结构一样，飞机机身以及整机结构都可以采用有限元软件进行完整精确地建模。有限元仿真方法为研究飞机的安全和可靠性是否满足设计要求提供了有效途径。对于飞机结构设计，除了关注结构的静态强度以及疲劳性能以外，其固有频率以及在运行过程中的振动响应特性也显得至关重要。

飞机地面行驶振动特性测试（GVT）是飞机研发过程中一项重要的试验任务，有利于研发人员更好地获取飞机的结构动态特性。基于 GVT 试验结果，可对建立的有限元结构模型进行验证和优化，从而最大程度减小有限元模型的不确定性。研发过程中，往往将仿真分析方法和试验测试相结合，识别结构中的关键部件，最后通过样机测试来验证设计结果。

与其它结构测试分析一样，试验过程中，需要对被测件（DUT）加载激励，同时在结构关键位置布置加速度计，测量从激励点到响应点的振动传递函数。通常采用 3 轴 ICP 型加速度传感器，以保证各个平动自由度方向的振动都能被测量到。振动传递函数通过计算激励点到响应点的频率响应函数（FRF）得到。

对于所有的钢架结构而言，不论是大型的火车车架，还是如飞机和汽车零部件的小型结构，都可采用冲击力锤敲击来提供激励载荷。其原理在于：一个尖锐冲击信号的频率分量可覆盖到比较广频带范围，这样才足以激励出结构所有可能的动态相应。事实上，对于一个完美的冲击信号，其频谱为平坦的等值分布，这样的冲击信号称为标准脉冲信号（Dirac）。

© imc Meßsysteme GmbH

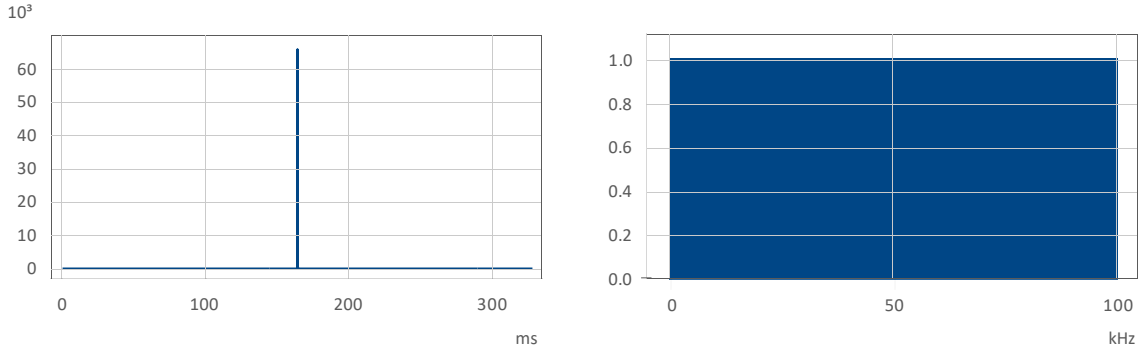

图 1: 标准脉冲信号及其频谱图

虽然，在实际测试过程中，力锤敲击产生的冲击信号并不是完美的脉冲信号，但对实际试验而言，完美脉冲信号并不是必须的。实际上，力锤的敲击信号已经包含足够带宽的激励谱，从而足以在相当宽频带范围内激励出结构的动态响应。考虑到力锤激励信号实际的频谱形状并非平坦的单位谱，因此，试验中为了计算频响函数，需要同时测量激励力信号和响应加速度信号。

当被测件不方便使用力锤激振，或需要同时激励多个不同的自由度时，通常采用电子或液压激振器。这样可以同时测量多个激励自由度到多个响应自由度的频响函数。

imc 测试测量系统发挥自身独特优势，可轻松将试验各步骤所需的各项功能无缝集成于一套专业的硬件设备中，其中最具代表性的就是 imc CRONOS*compact* 系列产品。

图 2: 便携机箱式 imc CRONOScompact 设备

© imc Meßsysteme GmbH

imc CRONOS*compact* 系列产品基于模块化设计，可配置多种插拔式采集与控制模块，客户可根据具体的试验需求自由选择模块类型：

1. 主机----用于控制测试进程和数据存储，同时与计算机通信。
2. imc Online FAMOS 处理器----用于数据的实时分析处理。例如，可以实时计算加速度信号的 RMS 值和频谱幅值，还能以毫秒级的响应速度触发紧急开关。
3. 信号发生及闭环控制模块----用于储存并输出激振信号来控制激振器，同时配备硬件 PID 控制器用于闭环控制。
4. 信号采集模块----配备支持 IEPE 型加速度传感器的专用采集模块，同时，如需将该套设备用于其它试验来采集其它类型传感器信号，如汽车性能试验、车队试验等，可自由选择多种其它类型的信号采集模块进行组合。

在 GVT 测试中，通常采用信号发生及闭环控制模块控制激振器。该模块配备较大的缓存空间，用于存储和输出预先定义的激振信号，如宽频白噪声信号以及其他类型的激振信号等。该模块直接集成模拟量输出功能，因此能以最快的速度输出激振信号，不涉及任何系统延迟。由于所有的处理均由独立的处理器完成，激振信号输出频率可达 80kHz，在不受激振器限制的前提下，足以激发所关注的任何频段的结构响应。

除了具备万用信号发生器的功能外，该模块还是一个强大的闭环控制引擎。可提供功能丰富的 PID 闭环控制功能，其 PID 控制器可应用于 8 个模拟量输出通道。这样，通过与所采集的信号进行实时交互，为控制器提供反馈信号，实现模拟量输出闭环控制功能。即使在闭环控制模式下，信号输出及控制循环频率仍可达 10kHz。

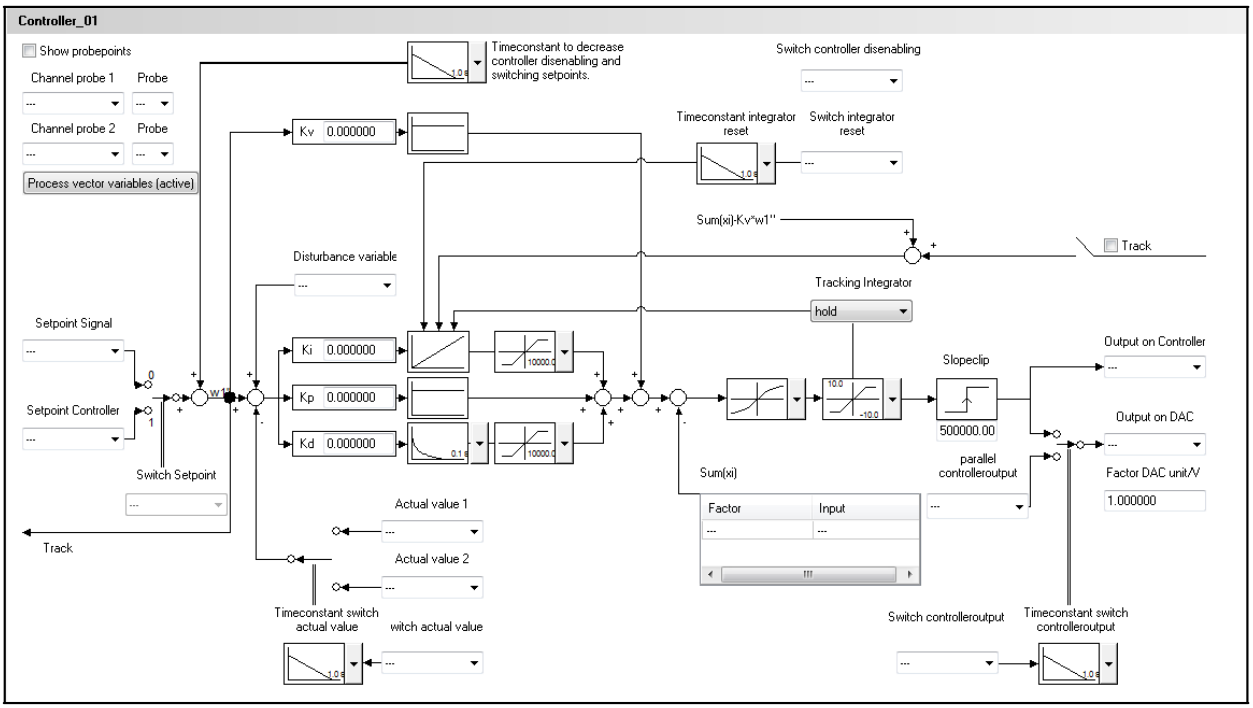

图 3: imc 信号发生器及 PID 控制器原理图

© imc Meßsysteme GmbH

当进行单频激振时，该模块可发挥出最大的灵活性：正弦波信号的频率和幅值可实时动态调整。并可通过主机自动控制，生成扫频正弦信号和阶跃正弦信号。例如，在某一频率产生 10 个周期的正弦信号后，接着自动生成下一个频率的正弦周期信号。以上所有步骤和状态的实现都通过 imc 操控软件---- imc STUDIO 来完成。

图 4:基于 imc 测试系统的飞机小翼疲劳测试

在 imc STUDIO 中，还可设置形象的交互式虚拟控件，如仪表盘、数值输入框等，通过这些控件直接控制激振信号的频率。在一些特殊的试验中， 当不需要自动生成信号时，该功能显得非常方便。

图 5: imc STUDIO 操控界面实例

© imc Meßsysteme GmbH

同时，imc STUDIO 还能即时处理各种参数的运算与验证，如频响函数、互谱、自谱等。为了实现这些功能，imc STUDIO 无缝集成了以下两个软件包：

1. imc Inline FAMOS。用于试验数据的实时在线计算。
2. imc FAMOS。试验完成后的数据分析，或者试验过程中针对某一段数据的分析计算（FRFs）。imc FAMOS 作为一个功能强大的数据后处理工具，也可独立使用。

基于这些集成的数据处理工具，在试验过程中，imc STUDIO 可直接快速显示 FRFs 及其它数据分析结果。

针对结构振动测试，imc 开发出 imc WAVE Structural AnalyzerI 软件包，极大地方便了试验的操作。根据试验需求，设计专有的图形化用户界面，引导用户快速设置试验参数，包括自由度定义、连击检测设置等。

图 6: imc WAVE 测试界面：采用力锤激励的 3 自由度频响函数

用户不仅可以在 imc STUDIO 或 imc WAVE 中实时浏览数据， 还可一键将数据导出至结果后处理软件中。imc STUDIO 将频响函数等计算结果导出为通用格式数据（UFF）。导出文件中不仅包含数据结果，还包括所有测点序号及自由度信息(+X, -X, +Y, -Y, +Z, -Z)， 这对于后处理软件分析结果非常重要。基于这些原始信息，可将传递函数直接分配到几何模型上，从而快速完成模态参数识别，并通过 3D 动画显示模态振型。

© imc Meßsysteme GmbH

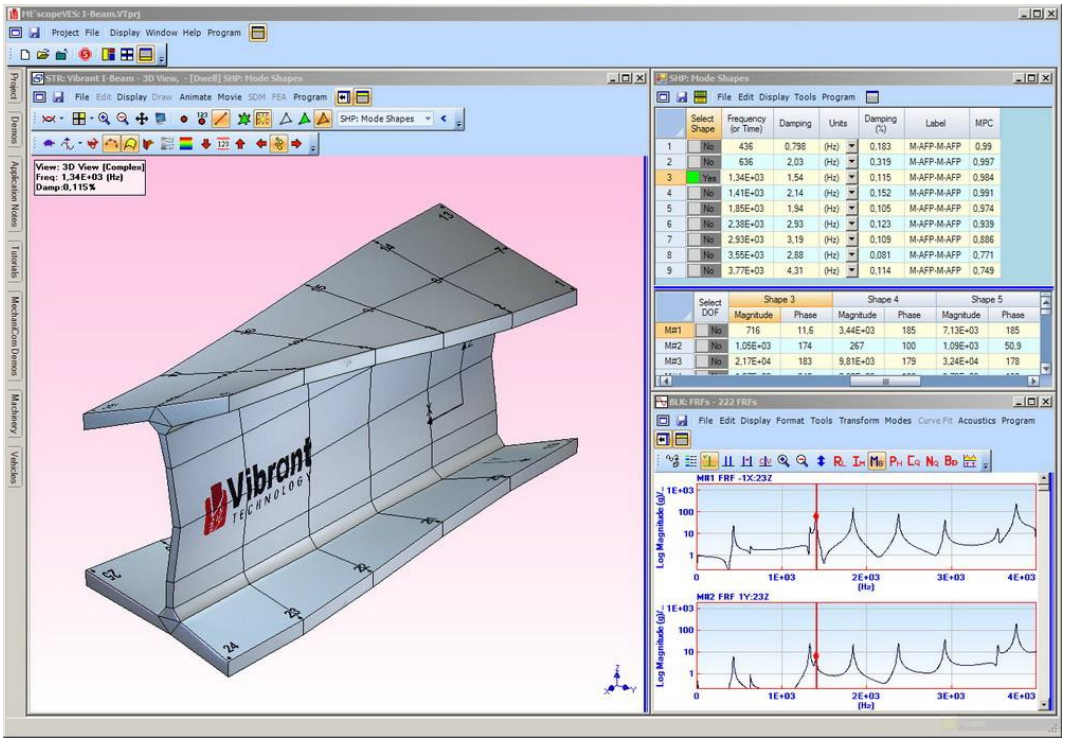

图 7: ME'scope 模态参数识别

由于 imc STUDIO 可导出通用格式数据，因此可采用多种后处理软件进行结果分析，如 Vibrant's ME'scope、LMS Test.Lab 等。

该套 imc 振动测试解决方案由 imc CRONOS*compact* 系列硬件模块和 imc STUDIOT 软件包构成。该方案强大的功能之一，同时也是其明显的优势，在于它可同时应用于其他类型的试验。imc CRONOS*compact* 系列产品基于模块化设计，可自由组合多种类型的模块，从而极大扩展了该产品的应用范围：

- 万用数据采集。除了振动测试，该设备还可可用于桥路应变测试、压力测试（s/g 或 4-20 mA）、温度测试、位移测试、力测试等。
- 专用采集模块可采集高隔离温度、电压、声压以及高达 1000V 的高压等信号。
- 提供 CAN 或者 ARINC 接口，可采集飞机总线或汽车 ECU 总线信号。

- 提供与疲劳测试台架控制器的数据交换通信接口，如穆格的航空试验台控制器。
- 集成压力扫描通信接口，可用于飞行试验中涉及的大规模压力测试。
- 提供 PCM 接口， 可将飞机的实时数据传输至地面基站。

© imc Meßsysteme GmbH

图 8: imc CRONOScompact 控制和测量的欧直样机结构试验

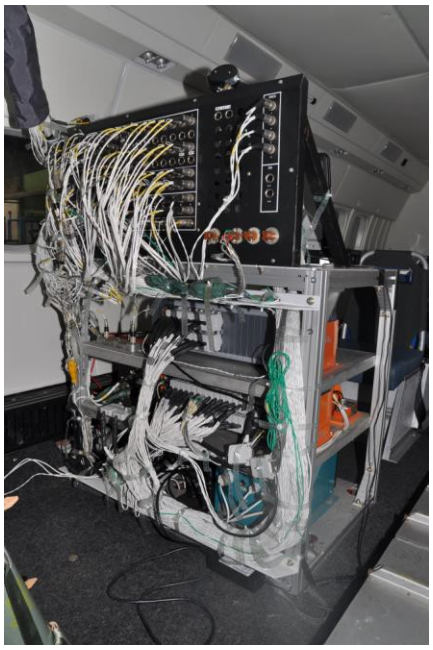

图 9: 多台 imc CRONOScompact 设备同步进行飞行试验

© imc Meßsysteme GmbH

附加信息

imc Meßsysteme GmbH

Voltastr. 5
13355 Berlin, Germany
Telephone: +49 (0)30-46 7090-0
Fax: +49 (0)30-46 31 576
E-Mail: hotline@imc-berlin.de
Internet: www.imc-berlin.com

德国 imc 集成测控有限公司，以 26 年专业经验，融合精湛的德国工艺、先进的制造技术与多项开发专利，设计制造专业的测试测量系统，致力于为全球工程技术领域提供包含硬软件的解决方案。

无论是整车测试、试验台架还是工厂或机械设备的自动化监控——imc 数据采集系统的优势获得测量业界的广泛认同，易于操作、性价比高，令测试更有效率！无论是研究、开发、测试还是试运行，imc 可提供标准化的测量设备和软件产品，以及完整的交钥匙解决方案。

对于机械/电子类测试应用，imc 测量系统提供高达每通道 100kHz 的采样频率，支持物理量测量的各种传感器，如压力、力、速度、振动、噪声、温度、电压或电流等信号。imc 的产品系列集成了信号调理和硬件的实时分析，并结合软件分析和测试管理产品，涵盖测量控制工作流程的所有方面，从信号调理单元、实时分析与控制，到自动化测试控制和生成测试报告。

imc 成立于 1988 年，总部设在柏林，拥有约 200 名员工，在全球 28 个国家或地区拥有 25 家合作伙伴。我们不断努力，为地面交通工具（汽车、商用车辆和铁路机车等）、航空航天、能源和土木工程等工业领域的客户创新提供最佳的测量解决方案！

imcAccess Co., Ltd.

北京
西城区裕民路 18 号北环中心 1110 室 100029
电话: 010-6552 8700 传真: 010-6552 1600

上海
长宁区新华路 728 号华联发展大厦 M10 室 200052
电话: 021-5230 1156 传真: 021-5230 1117

重庆
沙坪坝区沙正街 174 号理科楼 530 室 400040
电话：023-8131 6242

电邮: hotline.1@imcaccess.com
网站: www.imc-china.com

imcAccess 公司是由德国 imc 集成测控有限公司控股的贸易及技术服务公司，公司成立于 2002 年，独家负责德国 imc 公司产品在中国的全面推广以及技术服务！

我们竭诚为您提供快速、准确、及时的技术支持和服务：

1. 周到和专业地产品咨询服务，如产品的详细技术指标、硬件的方案配置；
2. 系列化的培训服务，从产品的硬件连接到软件的使用操作，以及结合应用的高级技术培训；
3. 快捷方便的沟通平台，如您在产品使用过程中有任何问题或需要，均可与我们专业的技术支持工程师取得联系；
4. 客制化服务，针对用户的实际需要，可谓客户完善现有分析功能，以及二次开发定制界面和功能；
5. 已有设备的定期校准、系统检查、系统升级等服务。

使用条款：

本文档版权归 imc Meßsysteme GmbH 所有，并保留一切权利。未经书面许可，任何公司或个人不得对此文档内容进行编辑、修改或以任何方式改变。该文档可以出版或复制。如果单独发表，我们要求必须包含我公司名称和网页链接 www.imc-berlin.com。尽管内容已精心准备，文档内容仍有可能包含错误。若有任何信息不正确，请通过 info@imcaccess.com 告知我们。如因文档使用不当造成的直接或间接损失，本公司不承担任何责任。