

# MSC Fatigue

## 一体化疲劳设计软件

当前，从汽车、飞机到日常使用的手机，基于有限元的疲劳和损伤容限计算，已经可以快速预测产品寿命，无论产品承受的是时域，还是频域载荷。

MSC Fatigue是一款功能最为全面的高级疲劳设计软件，用户使用一个有限元应力结果，可以进行多种全面的疲劳分析。它在一个图形界面，无缝集成了CAE、动力学和耐久计算，产品模块包括MSC公司历时20多年开发的模块，以及nCode公司DesignLife产品的最新模块。

### MSC Fatigue 是一个集成 CAE 的一体化疲劳设计环境，可以帮助用户：

- ◆ 减少试验。MSC Fatigue的内置工具，可以模拟整车系统，缩短试验周期，节约企业成本
- ◆ 指导设计。样机疲劳失效，往往导致昂贵的改型，采用MSC Fatigue，可以提前验证新方案的有效性
- ◆ 管理疲劳&耐久数据。除了疲劳分析，耐久计算流程也包括试验室试验、本地试验和CAE数据处理，MSC Fatigue可以保存和管理整个耐久计算流程
- ◆ 深入理解疲劳性能。可靠性失效经常由于对疲劳理解不足，MSC Fatigue可以帮助用户辨识，影疲劳寿命的关键因素
- ◆ 快速复制分析流程。MSC Fatigue支持批处理运行方式，可以快速跟踪整个计算过程
- ◆ 提供疲劳材料参数。疲劳材料参数是疲劳耐久设计的核心，MSC Fatigue提供全面的疲劳材料试验服务，帮助用户获取恰当的材料参数
- ◆ 一站式解决方案。MSC公司提供高级疲劳设计软件MSC Fatigue，高级材料试验和疲劳工程咨询项目服务
- ◆ 提高研发效率。MSC Fatigue提供世界一流的集成化的耐久求解器，是唯一无缝集成MSC Nastran, Adams和Patran的耐久求解器。也是唯一能够直接读取Marc非线性结果的耐久求解器。在设计早期，可以帮助用户降低高昂的试验和样机费用，使产品性能更可靠，更快推向市场。MSC Fatigue易学易用，产品手册完备，包括快速入门手册、教程、用户论文和在线帮助。MSC公司拥有优秀的技术支持团队，快速解决用户发现的问题
- ◆ 产品功能特色
  - ☆ 高周疲劳 (HCF)，低周疲劳 (LCF) 和裂纹扩展
  - ☆ 支持多种有限元结果（静力、瞬态、模态、频率响应函数和功率谱密度）

- MSC Nastran
- Adams
- Marc
- ABAQUS
- ANSYS

☆ 高级分析模块：多轴疲劳，振动疲劳、振动台疲劳、焊接（点焊和缝焊）疲劳，软件应变片，轮毂疲劳，工具和断裂

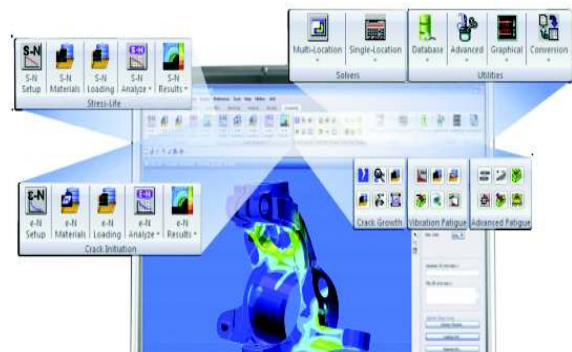
☆ 独特的优化功能

- 载荷比例因子
- 材料
- 表面加工/处理
- 存活率

☆ 试验/分析相关性

☆ 载荷谱

- 航空谱载荷定义



### MSC Fatigue 软件包

MSC Fatigue基本包如下：

软件包名称	功能简介
MSC Fatigue 求解器基本包	模块包括：应力寿命分析模块、应变寿命分析模块和虚拟应变片模块。
MSC Fatigue 求解器高级包	模块包括：裂纹扩展分析模块、振动疲劳分析模块、多轴疲劳分析模块、焊接疲劳分析模块、轮毂疲劳分析模块和工具箱模块。
MSC Fatigue 求解器完整包	MSC Fatigue 完整求解器包，包括基本包和高级包的所有功能。
MSC Fatigue 前后处理器	Patran为MSC Fatigue量身定制的前后处理器。

## 疲劳寿命评估原理

MSC Fatigue包括三种主要的疲劳寿命评估原理：应力寿命、应变寿命和裂纹扩展

### 应力寿命

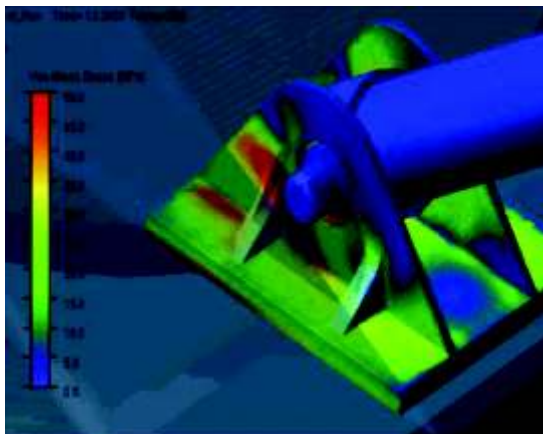
应力寿命法是一种传统方法，也称为S-N法，应用于高周疲劳（HCF-低载荷-长寿命）。本方法不区分裂纹的萌生和扩展，预测产品失效的总寿命

### 应变寿命

应变寿命法用于高载荷下低寿命的预测（低周疲劳LCF），考虑高载荷下的材料的屈服，采用应变寿命进行建模和评估零件的寿命，通常指形成一个工程裂纹。

### 裂纹扩展

弹性断裂力学（LEFM）用于预测部件中裂纹的扩展过程，直至瞬间断裂导致失效。本方法在航空行业广泛应用，损伤容限是航空行业的设计标准。



## MSC Fatigue求解器基本包

MSC Fatigue根据有限元模型提供的应力或应变结果、载荷的变化和材料的疲劳特性，评估产品的寿命。

MSC Fatigue求解器基本包，包括传统的应力寿命法（S-N或全寿命）和应变寿命法（E-N，局部应变或裂纹萌生），用户可以在自己熟悉的建模环境中，即使对于疲劳分析了解不多，也可以直接进行疲劳寿命评估。

应力寿命法和应变寿命法的共同特色：

- ◆ 雨流循环计数
- ◆ 统计置信参数
- ◆ 表面光洁度/表面处理的影响
- ◆ Palmgren-Miner线性损伤累积，包括可变Miner累积 (>0, 缺省值为1.0)
- ◆ 自定义寿命单位
- ◆ 多轴应力状态评估
- ◆ 安全系数分析
- ◆ 应力/应变张量的合并/分解：任一分量、最大绝对主、带符号的Von Mises等效值、带符号的Tresca/Shear等效值
- ◆ 临界面分析
- ◆ 比例因子（应力集中定义）
- ◆ 偏置（静力工况）
- ◆ 结果转换（全局系统和面分解）
- ◆ 高达500个工况同时计算

应力寿命法的特色：

- ◆ Goodman, Gerber, 插值类型的应力修正（多平均和多R比曲线, Haigh图, Bastonaire）
- ◆ 焊接结构分析（BS7608）
- ◆ 材料和部件S-N曲线
- ◆ FKM平均应力修正（2012版本）

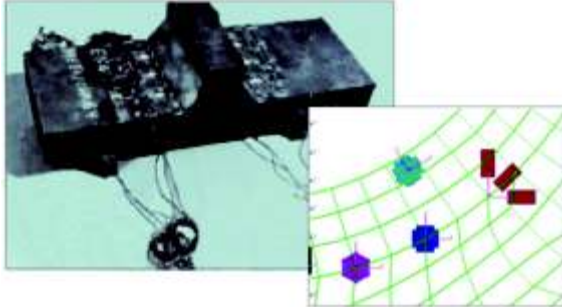
应变寿命法的特色：

- ◆ Neuber和Hoffmann Seeger弹塑性修正
- ◆ 循环应力-应变追踪
- ◆ Smith-Watson-Topper, Morrow和插值类型的应力修正（多平均和多R比曲线）
- ◆ 基于Hoffman-Seeger的高级双轴修正（针对非比例加载）



疲劳分析基本包还包括虚拟应变片模块，用户可以在MSC Nastran有限元模型中创建软件形式的虚拟应变片，在结构承受随时间变化的载荷时，根据需要定义标准类型的应变

片，可以提取结构上任意一点的应力/应变时间历程。虚拟应变片支持静态、准静态有限元加载过程，并可以与试验采集数据进行比较，增强有限元模型的可信度。



虚拟应变片

## MSC Fatigue 裂纹扩展模块

MSC Fatigue裂纹扩展模块，采用有限元模型的应力或应变结果、载荷的变化和循环材料属性，评估裂纹的扩展速率和时间。裂纹扩展常采用传统的线弹性断裂力学(LEFM)。

裂纹扩展建模

MSC Fatigue裂纹扩展模块，针对结构裂纹的扩展寿命，提供了复杂的裂纹扩展建模方法。特色包括：

- ◆ Kitagawa最小裂纹尺寸
- ◆ 断裂韧性破坏准则
- ◆ 平均应力修正
- ◆ 考虑循环重组的雨流循环计数
- ◆ 指定初始以及最终裂纹长度
- ◆ 平面应力修正
- ◆ 缺口效应建模
- ◆ 迟滞和闭合效应建模
- ◆ 基于有效应力强度因子范围的修正Paris法则建模
- ◆ 自定义寿命单位
- ◆ 断裂力学的三角形求解（应力-应力强度-裂纹长度）
- ◆ NASA/FLAGRO 2.03 的图形接口（通过Patran或MSC

Fatigue前后处理)

- ◆ 应力张量合并和分解

用户可以读入各种不同的有限元模型和结果，包括：Patran, MSC Nastran(op2和XDB格式), Marc, ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS 和SDRC。



## MSC Fatigue 振动疲劳模块

MSC Fatigue振动疲劳模块，预测在多个随机振动载荷下结构的疲劳寿命。根据有限元计算获取的应力功率谱密度(PSD)或传递函数，预估结构的疲劳寿命。

评估结构在随机载荷下的响应是产品设计的关键之一，随机响应最好在频域使用PSD输入获得。MSC Fatigue振动疲劳模块支持外部响应的PSD，也支持根据PSD载荷和系统传递函数，振动模块自己计算应力的PSD。

Fatigue振动疲劳模块使用S-N方法预测疲劳寿命，支持测量或计算生成的应力影响的PSD进行一站式求解。功能特色包括：

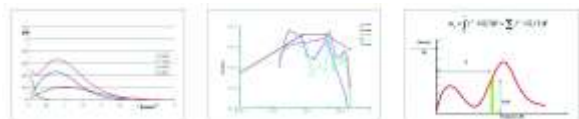
- ◆ 焊接结构分析 (BS7608)
- ◆ Goodman和Gerber应力修正
- ◆ 雨流循环的概率密度函数
- ◆ 应力/应变合并/分解
- ◆ 有限元结果的转换
- ◆ 根据传递函数和输入载荷的PSD，在任意位置计算主

应力响应的PSD

- ◆ Palmgren-Miner线性损伤累积，包括可变Miner累积 (>0, 缺省值为1.0)
- ◆ 多轴应力状态评估
- ◆ 表面光洁度/表面处理修正
- ◆ 同时施加20个包括对应输入PSD的有限元工况
- ◆ 根据多个时间历程数据、ASCII文件、界面输入、指定波形（正弦、三角），创建PSD
- ◆ 数据转换
- ◆ PSD和雨流数据的显示

丰富的求解算法：

- ◆ Dirlik
- ◆ Narrow Band
- ◆ Steinberg
- ◆ Tunna Wirsching Hancock
- ◆ Kam & Do



Dirlik求解

典型的振动加速度定义

PSD产生的矩

## MSC Fatigue 振动台模块

MSC Fatigue振动台模块预测在单一随机振动载荷下，零部件的疲劳寿命。

振动台试验在各行各业广泛使用，是零部件产品设计完成前的验证性试验。典型的输入载荷为：位移、速度或加速度的PSD

疲劳分析往往在频域进行，而不是传统的时域。其中，输入载荷处理和损伤分析，都在频域采用功率谱密度(PSD)进行。

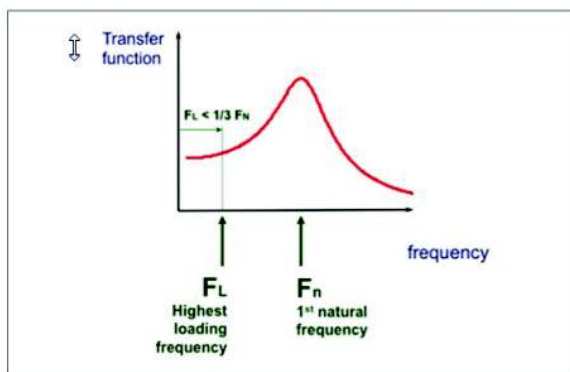
MSC Fatigue振动台模块支持外部响应的PSD，也支持根据PSD载荷和系统传递函数，振动台模块自己计算应力的PSD。传递函数计算支持各种应力值，包括主应力。

多种求解算法：

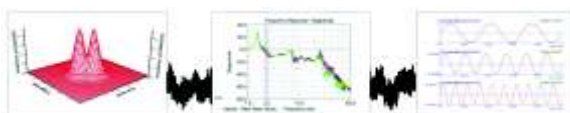
- ◆ Dirlik
- ◆ Narrow Bank
- ◆ Steinberg
- ◆ Lalanne

全新的正弦扫频能力：

- ◆ 多轴应力状态评估
- ◆ 表面光洁度/表面处理修正
- ◆ 同时施加20个包括对应输入PSD的有限元工况
- ◆ 根据多个时间历程数据、ASCII文件、界面输入、指定波形（正弦、三角），创建PSD
- ◆ 数据转换
- ◆ 雨流循环计数和损伤直方图，应力PSD输出为CSV格式



载荷的最高频率，是否大于一阶固有频率的三分之一？



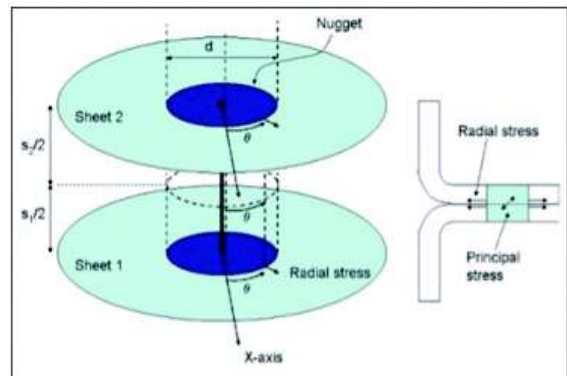
## MSC Fatigue点焊疲劳模块

MSC Fatigue点焊模块采用S-N（全寿命）法，根据MSC Nastran 或 Adams 计算结果，预测钣金件之间点焊的疲劳寿命。

现代汽车结构通常有4000-6000个点焊，大约80%的车身疲劳耐久问题，和点焊有关。点焊设备价格昂贵，在车身设计的早期阶段，需要快速准确地预测点焊的疲劳寿命。

MSC Fatigue点焊模块支持3种最常用点焊建模方法，使用Rupp, Storzel 和 Grubisic 算法计算焊核和相邻板材的应力。特色如下：

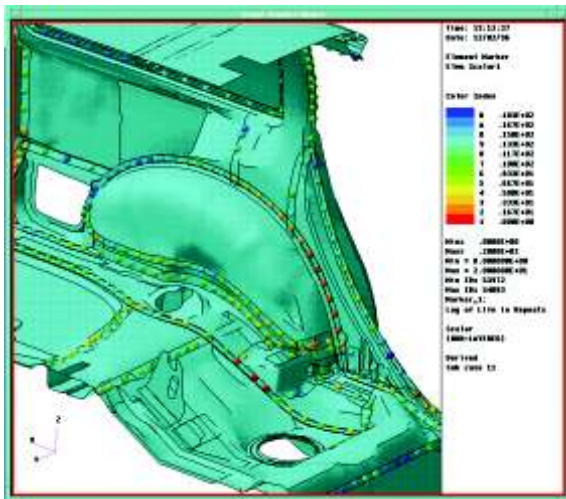
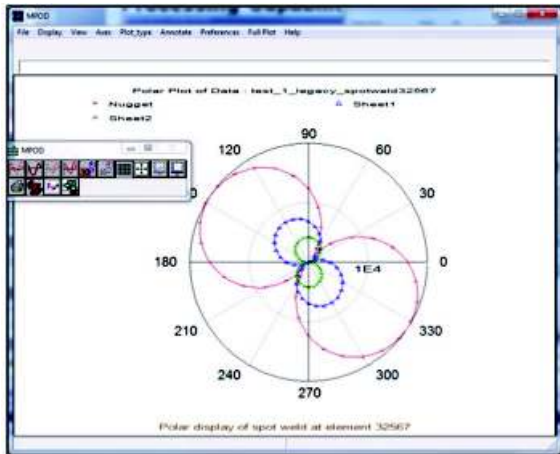
- ◆ 支持刚性梁点焊模型
- ◆ 支持MSC Nastran Cweld 单元点焊模型
- ◆ 支持CHEX/MPC点焊模型
- ◆ 自动生成点焊组
  - 根据板材厚度
  - 根据焊核直径
- ◆ 150个分析组
- ◆ 每个组中点焊数量不限
- ◆ 支持500个载荷通道



点焊疲劳求解器功能包括：

- ◆ 求解相邻板材之间的点焊
- ◆ 三层板材点焊的修正（2011版本）
- ◆ 支持焊核和板材疲劳寿命
- ◆ 雨流循环计数
- ◆ 统计置信参数
- ◆ Palmgren-Miner线性损伤累积
- ◆ 可变Miner累积 (>0, 默认值为1.0)
- ◆ 点焊S-N曲线
- ◆ 增加，创建或修改材料数据
- ◆ 寿命和损伤的图形化显示
- ◆ 自定义寿命单位
- ◆ 焊核和板材寿命/损伤的极坐标显示（2012版本）
- ◆ 应力时间历程输出（2012版本）
- ◆ 损伤和循环的直方图（2012版本）
- ◆ 失效位置 - 焊核，上下板材





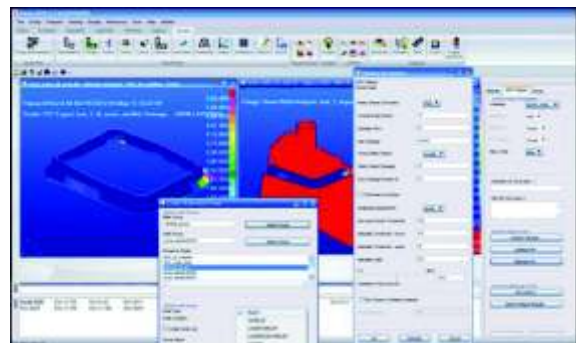
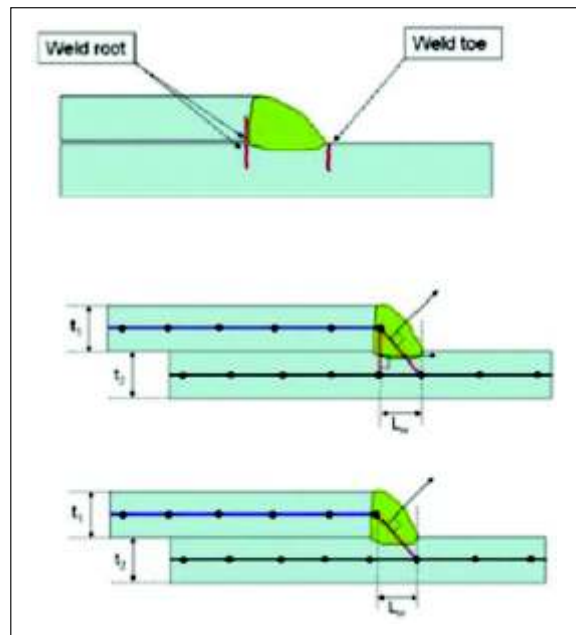
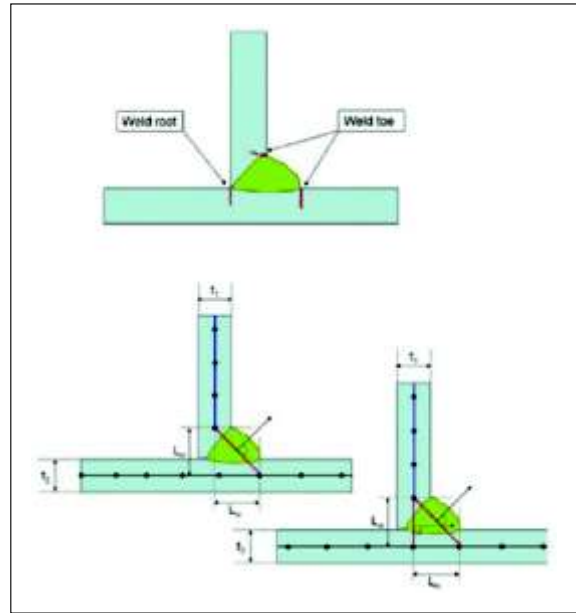
## MSC Fatigue 缝焊疲劳模块

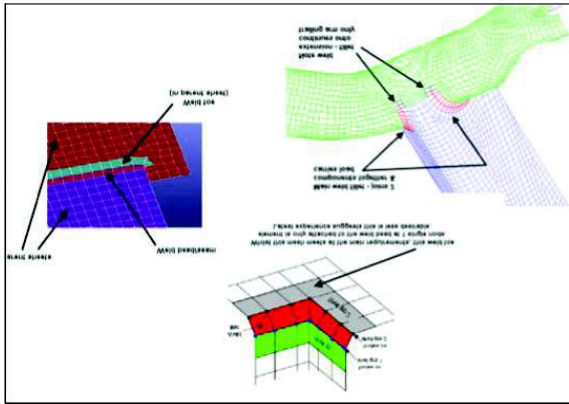
MSC Fatigue 缝焊疲劳模块，不仅支持传统标准的焊接规范（BS5400/ BS7608等），也支持更现代的结构应力法，进行缝焊的疲劳设计。

焊接分类法不需要对焊接的细节进行建模，采用焊接分类细节（载荷和几何）的部件S-N曲线进行寿命预测。该方法由于和有限元的集成度较低，对于汽车的薄壁件而言，稍显笨拙而且耗时很长。

最近，缝焊疲劳的研究重点是如何计算等效结构应力。MSC Fatigue中采用的等效结构应力法，来源于Ferner等（SAE 982311）。特色如下：

- ◆ 焊根/焊喉疲劳失效
- ◆ 钎焊和激光焊的类型更多
- ◆ 弯曲和拉伸S-N 曲线之间的插值
- ◆ 自定义弯曲比门槛值，调整插值起始点
- ◆ 完全的64位求解器（64位机器）
- ◆ 全新的DTMAT材料界面
- ◆ 缝焊支持全新的载荷谱界面





## MSC Fatigue轮毂疲劳模块

MSC Fatigue提供专门的轮毂疲劳分析工具，预测在特定的循环载荷下，轮毂的疲劳寿命。

MSC Fatigue轮毂疲劳模块首先确定每个工况下，轮毂上节点的应力时间历程曲线，确定每个节点的临界面，然后根据应力时间历程曲线，计算出载荷谱中所有载荷下的最大疲劳损伤值。

MSC Fatigue轮毂疲劳模块适用于汽车/飞机轮毂，以及其他旋转体。节点的应力时间历程曲线，一般不采用瞬态计算。往往采用在每个静力工况下，进行多次有限元静力计算，每次静力计算表示轮毂的转动，所有的静力工况，描述了轮毂上每个节点，随着转角的应力/应变变化。

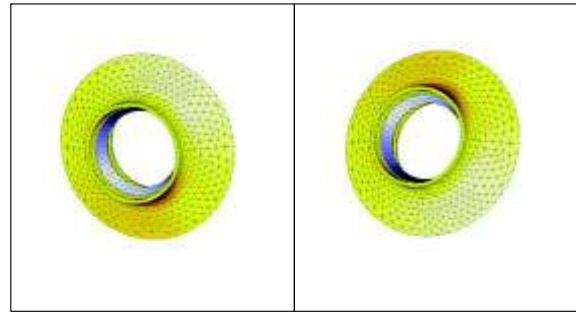
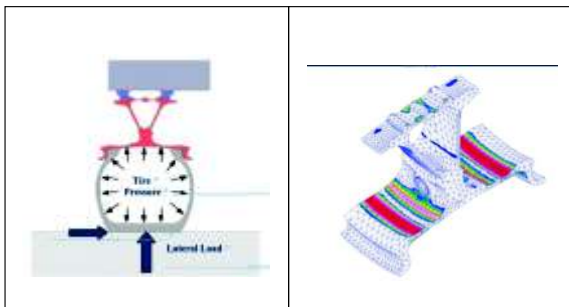
### 轮毂转动

轮毂转动通过边界条件和载荷的旋转来实现，多次有限元静力计算后，一旦获取应力/应变历程曲线，MSC Fatigue对每个加载工况，计算疲劳损伤和寿命。总损伤为所有加载工况的累加。

每个节点/单元的总损伤，可以通过损伤云图显示，用户可以辨识出疲劳临界区，对最大损伤区域进一步改进。

### 应用领域：

- ◆ 所有类型的车轮
- ◆ 在循环载荷作用下的旋转机械。



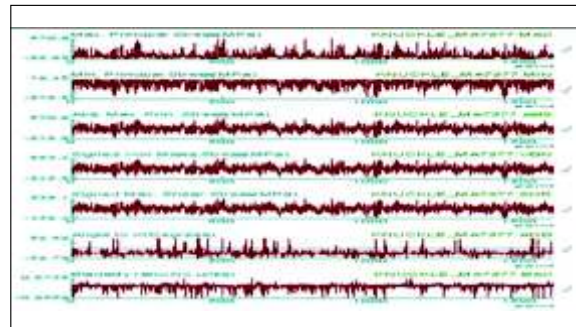
## MSC Fatigue多轴疲劳模块

MSC Fatigue多轴疲劳模块根据有限元模型的应力/应变结果和循环材料属性，进行失效寿命评估。

相对于单轴或比例加载状态，多轴应力状态是指非比例的多轴应力状态。多轴疲劳采用应变寿命法和应力寿命法进行疲劳寿命预测，也可以进一步计算安全系数。

### 安全系数分析

安全系数可以针对整个有限元模型计算，也可以选择部分模型进行。多轴应力状态的计算方法包括：Dang Van法和McDiarmid法。



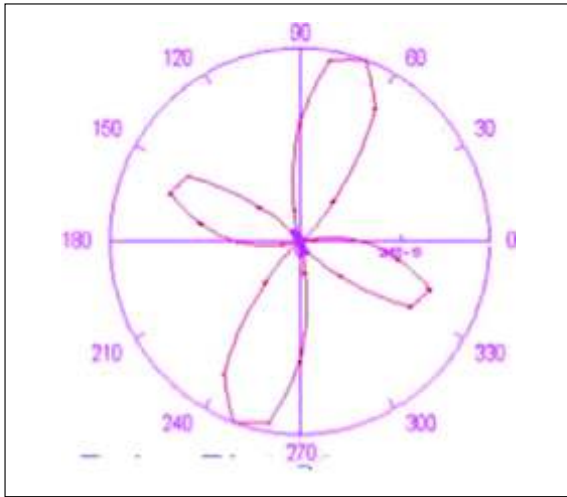
应变寿命（裂纹萌生 / E-N）法，可以根据多轴应力状态，评估形成一个工程裂纹的寿命。提供6种局部应变临界面法。特色包括：

- ◆ 正应变
- ◆ 剪应变
- ◆ SWT-Bannantine
- ◆ Fatemi-Socie
- ◆ Wang-Brown（包括/不包括平均应力修正）

### 多轴疲劳算法：

多轴疲劳算法包括多轴非比例缺口修正，集成了基于能量的缺口处理方法，这些方法基于Neuber法和Mroz-Garud循环塑性模型

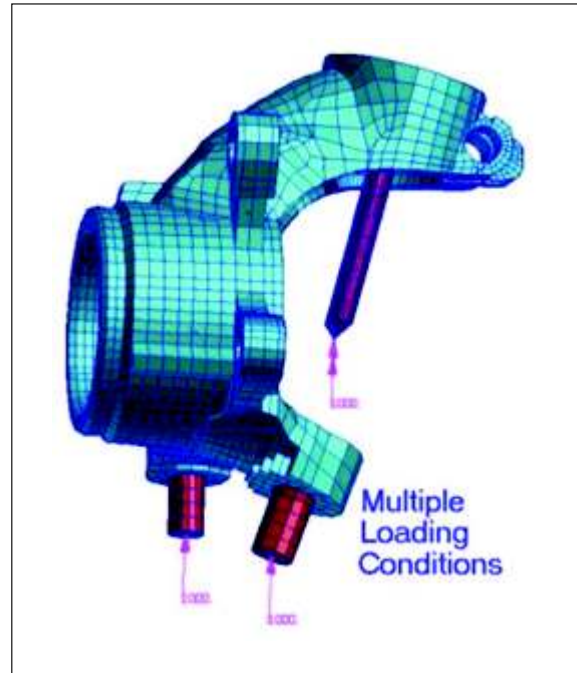
Fatigue多轴疲劳模块可以直接使用弹塑性应力/应变时间历程曲线，输入数据可以来源于有限元计算或物理试验。



临界面计算的极坐标图

多轴疲劳算法包括：

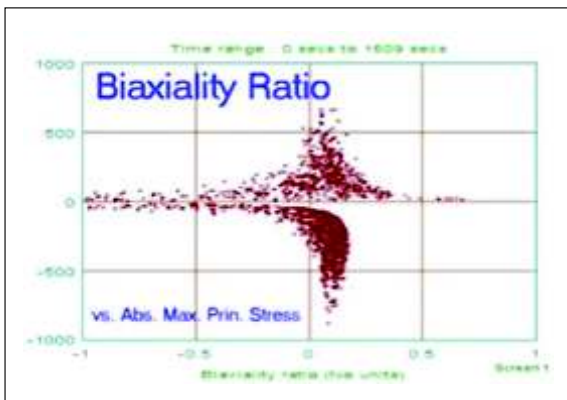
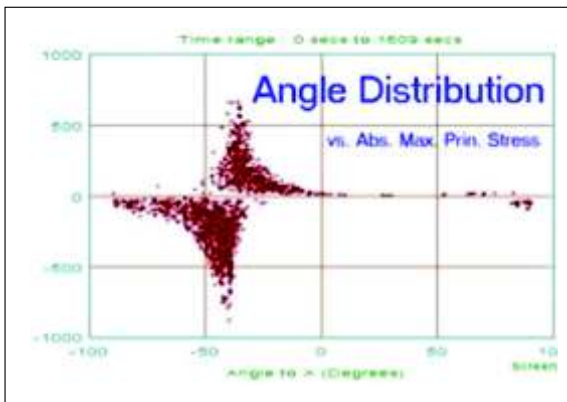
- ◆ 正应变
- ◆ 剪应变
- ◆ SWT-Bannantine
- ◆ Fatemi-Socie
- ◆ Wang-Brown (包括/不包括平均应力修正)
- ◆ 其他算法



## MSC Fatigue工具模块

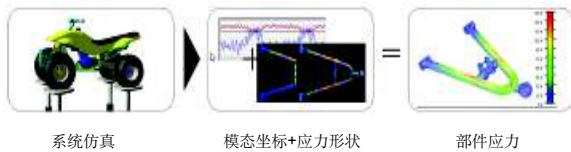
MSC Fatigue工具模块是高级实用的工具包，可以帮助用户收集、分析和处理试验数据，例如：应力或应变时间历程曲线。具体包括：

- ◆ 高级载荷处理工具
  - 四则运算 (MART)
  - 多通道编辑器 (MCOE)
  - 雨流循环计数器 ((MCYC)
  - 公式处理器 (MFRM)
  - 文件剪切和拷贝 (MLEN)
  - 多文件处理器 (MMFM)
  - 峰值峰谷抽取 (MPVXMUL)
  - 同步分析器 (MSIMMAX)
  - 幅值分布 (MADA)
  - 自功率谱密度 (MASD)
  - 快速傅立叶滤波 (MFFF)
  - 巴特沃思滤波 (MBFL)
  - 频率响应分析 (MFRA)
  - 统计分析 (MRSTAT)
- ◆ 高级疲劳工具
  - 单一位置S-N分析 (MSLF)
  - 单一位置E-N分析 (MCLF)
  - 循环和损伤分析 (MCDA)
  - 时间相关的损伤 (MTCD)





- 单一位置振动分析 (MFLF)
  - 多轴寿命分析 (MMLF)
  - 裂纹扩展数据分析 (MFCG)
  - Kt/Kf (MKTAN) 评估
- ◆ 图形显示和转换工具
- 图形化编辑 (MGED)
  - 多文件显示 (MMFD)
  - 快速查看 (MQLD)
  - 双参数显示 (MTPD)
  - 极坐标显示 (MPOD)
  - 三维显示 (MP3D)
  - 二进制/ASCII转换器 (MDTA/MATD)
  - 信号再生 (MREGEN)
  - RPC到DAC和DAC到RPC (MREMDAC/ MDACREM)
  - 跨平台转换 (MCONFIL)
  - 瀑布图文件生成 (MWFLCRE)



## MSC Fatigue前后处理器

MSC Fatigue 前后处理器是所有疲劳求解器的前后处理器。提供快速便捷的建模、运行和后处理的图形界面。

特色和功能：

MSC Fatigue前后处理器可以帮助用户，直接方便地访问所有MSC Fatigue的功能，包括：

- ◆ 应力寿命疲劳
- ◆ 应变寿命疲劳
- ◆ 裂纹扩展
- ◆ 多输入振动疲劳
- ◆ 单输入振动台疲劳
- ◆ 缝焊疲劳
- ◆ 点焊疲劳
- ◆ 多轴疲劳
- ◆ 轮毂疲劳
- ◆ 疲劳工具

前后处理界面：

MSC Fatigue前后处理器集成在Patran环境下，完全按照疲劳分析的流程而设计，可有效引导用户一步步完成疲劳分析。计算完成后，可以随时修改输入参数，评估产品的疲劳灵敏度及进行优化设计。疲劳分析流程一般分为5步：

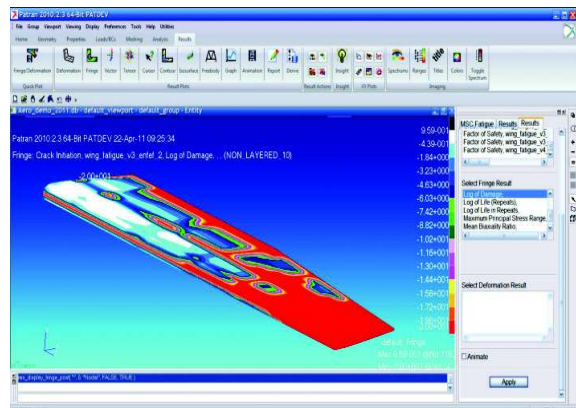
- 1) 输入循环材料特性
- 2) 输入载荷（时域或频域）
- 3) 输入几何信息（有限元应力或应变）
- 4) 执行疲劳求解
- 5) 计算结果的查看和优化

MSC Fatigue前后处理器可直接读入多种有限元软件的计算结果，包括：

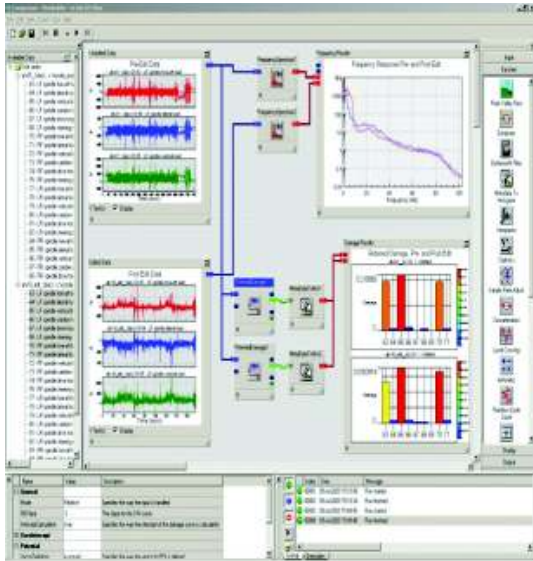
- ◆ Patran 中性文件及外部（单元、节点等）结果文件
- ◆ Patran、FEA、AFEA结果文件
- ◆ MSC Nastran的Op2文件、XDB文件及卡片数据文件
- ◆ Marc结果文件
- ◆ ABAQUS结果文件
- ◆ ANSYS结果文件
- ◆ SDRC结果文件

MSC Fatigue前后处理器支持各种方式，对有限元和疲劳结果进行后处理，包括：

- ◆ 云图、等值线
- ◆ 生成报告
- ◆ 损伤云图（线性和对数）
- ◆ 寿命云图（线性和对数），支持自定义单位
- ◆ 安全系数显示
- ◆ 双轴比
- ◆ 残余应力、比例因子的灵敏度
- ◆ 最大损伤区域，最差安全系数和最大双轴
- ◆ 材料库显示
- ◆ 载荷时间历程库显示





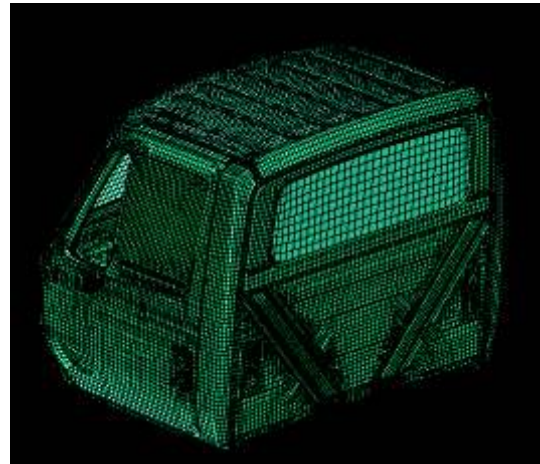


数据处理

### 有限元模型的建立

有限元模型包括驾驶室和车架有限元模型，具体包括：

- 1) 驾驶室网格模型
  - 2) 车架网格模型
  - 3) 材料数据
  - 4) 输入载荷时间历程曲线（针对每个事件）
  - 5) 模型简化
  - 6) 模型质量检查，包括：网格质量、材料属性、连接关系
  - 7) 模型完整性检查，确保单元的连接性和刚度/质量分布，具体包括：模态计算和各个方向下1.0 G载荷静力计算
- 试验获取（或者Adams虚拟台）获取驾驶室安装点力，车架模型可以忽略，需要输入12个载荷，在每个安装点的X, Y, Z方向施加。



## 疲劳案例：驾驶室耐久性分析

### 驾驶室耐久试验

根据国外统计，约有80%以上的机械零件的破坏为疲劳破坏。驾驶室疲劳仿真计算前，首先，需要收集道路试验数据，进行编辑浓缩后，生成一个载荷谱驱动文件，作为振动试验台试验和有限元仿真计算的输入。振动试验结果，可用于仿真和试验的相关性分析。输入载荷统计示例如下：

事件	持续时间 (S)	重复次数	总时间 (S)
比利时石块路 10mph	38	4	152
比利时石块路 12mph	58.0	29	1682.0
比利时石块路 14mph	54.0	7	378.0
卵石路	14.0	3	42.0

其中，全部事件应具有代表性，使测得的载荷具有典型性、概括性和集中性



振动试验

### 疲劳材料数据收集和定义

驾驶室疲劳材料一般包括两种，普通钢和高强度钢。高强度钢用在特定的区域，用来满足顶压试验。疲劳计算中，一般不做门和窗玻璃考虑。

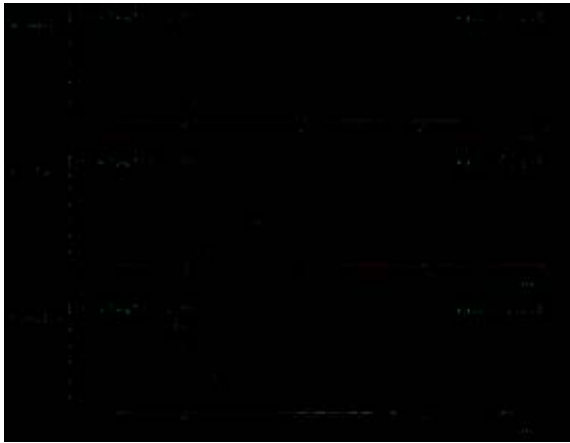
用户需要提供应力寿命材料曲线和应变材料，通过MSC Fatigue的材料管理器，进行定义。如果用户缺少材料的疲劳试验数据，MSC软件公司也提供材料疲劳试验服务。



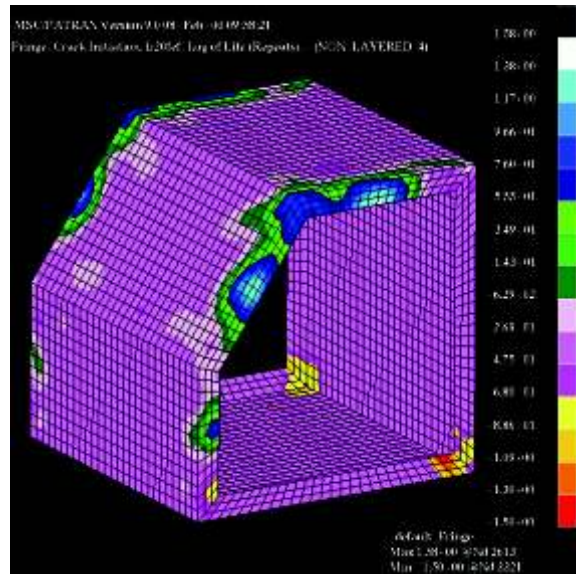
### 疲劳载荷处理

驾驶室疲劳计算，需要输入12组力时间历程曲线，施加位置在4个驾驶室安装点。载荷的处理，根据不同的计算方法不同。具体如下：

- 1) 准静态法，载荷可以直接使用
- 2) 振动法，需要将所有文件，转换至频域，并输出12x12 PSD矩阵
- 3) 瞬态法和模态叠加法，载荷需要转换成MSC Nastran的TABLED1卡片



左前载荷



### 疲劳仿真结果试验相关性分析

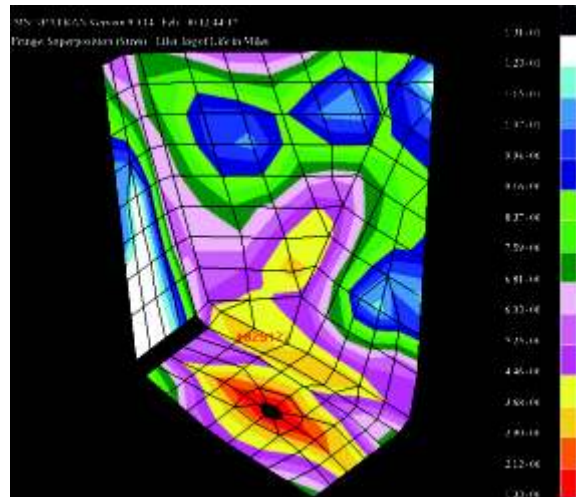
仿真计算结果比较包括关键位置和寿命次数，可以对仿真结果进行相关性分析，改进设计。



### 疲劳计算-模态叠加法

模态叠加法特点在于：通过瞬态计算结果，进行模态应力合并，不采用有限元求解器，从而大大减少了MSC Nastran求解文件的输出。而且，也支持应变寿命计算。模态叠加法求解步骤如下：

- 1) 检查模型
- 2) 进行正则模态计算，输出每阶模态的应力，保存至DBALL和MASTER
- 3) 对每个事件，运行瞬态分析，采用重启方法
- 4) 输入瞬态分析结果至Patran
- 5) 设定疲劳计算的共用参数、求解参数和材料
- 6) 对模态时间历程曲线，指定模态应力
- 7) 求解，进行雨流计数、损伤累计、模态应力合并
- 8) 合并所有事件的结果



疲劳失效位置