

Beasy

电化学腐蚀阴极防护及疲劳寿命裂纹扩展分析



Chengdu United Methodology Design Co., Ltd.
成都优迈达科技有限公司

成都优迈达科技有限公司

地址：成都高新区高朋大道 3 号东方希望大厦 B 座 2 楼 205/207/209 室

技术咨询电话：**028-85506078-8018**

<http://www.uni-cax.com> <http://www.umd-cax.com>

<http://www.get-technologys.com>

Email: info@umd-cax.com

目 录

产品介绍.....	4
一、 金属电化学腐蚀仿真软件 BEASY	4
1. 概述	4
2. BEASY 前后处理器	5
3. BEASY 腐蚀仿真管理器	6
4. BEASY 腐蚀仿真和腐蚀防护	8
4.1. 电化学腐蚀仿真	8
4.2. 关联影响	9
4.3. 对防腐系统设计的优化	9
4.4. 海洋工程应用	10
4.5. 地下基础结构的应用	10
4.6. 电场和磁场预测	11
5. 腐蚀与防护	12
5.1. 工程需要	12
5.2. 解决手段	13
5.3. 电流分析	13
5.4. 电场分析	13
5.5. 阴极防护设计	13
5.6. 防腐设计优化	14
5.7. 寄生电流干扰	15
5.8. 电极沉淀和相同制造过程模拟	15
6. BEASY 参与基于腐蚀仿真的飞行器管理系统	16
6.1. 背景:	16
6.2. 目标.....	16
6.3. 工作描述.....	17

6.4. 结果.....	17
6.5. 合作伙伴:	17
二、 疲劳寿命裂纹扩展及缺陷扫描 BEASY/Mechanical、CrackGrow	19
1. Beasy 疲劳和裂纹扩展分析	20
2. 产品可靠性预测	21
3. Beasy 腐蚀开裂和缺陷扫描的优势	21
3.1. 快捷的裂纹扩展建模	21
3.2. 自动裂纹扩展	22
3.3. 高精度	22
3.4. 更便捷的设计更改	22
3.5. 接触仿真	23
3.6. 与 Beasy 软件的有机集成.....	23

产品介绍

一、金属电化学腐蚀仿真软件 BEASY

1. 概述

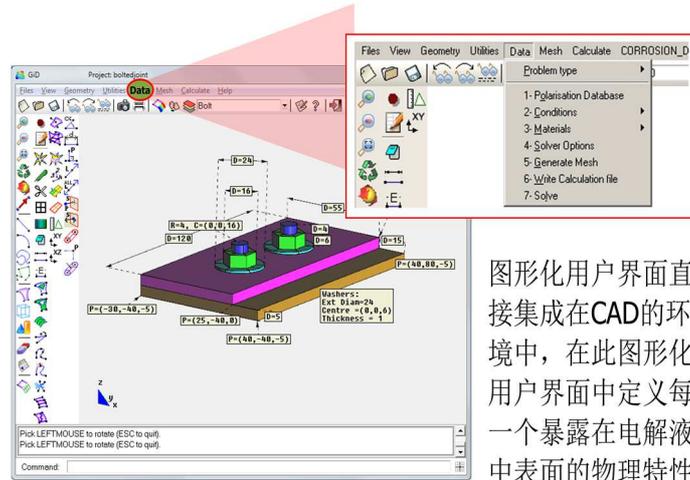
金属的腐蚀原理有多种，其中电化学腐蚀是最为广泛的一种，电化学腐蚀是金属腐蚀的主要方式，电化学腐蚀主要包含浓差电池腐蚀、电偶腐蚀核杂散电流腐蚀。当金属被放置在水溶液中或潮湿的大气中，金属表面会形成一种微电池，也称腐蚀电池(其电极习惯上称阴、阳极，不叫正、负极)。阳极上发生氧化反应，使阳极发生溶解，阴极上发生还原反应，一般只起传递电子的作用。腐蚀电池的形成原因主要是由于金属表面吸附了空气中的水分，形成一层水膜，因而使空气中CO₂，SO₂，NO₂等溶解在这层水膜中，形成电解质溶液，而浸泡在这层溶液中的金属又总是不纯的，如工业用的钢铁，实际上是合金，即除铁之外，还含有石墨、渗碳体(Fe₃C)以及其它金属和杂质，它们大多数没有铁活泼。这样形成的腐蚀电池的阳极为铁，而阴极为杂质，又由于铁与杂质紧密接触，使得腐蚀不断进行。



无论结构表面暴露在薄的电解质环境中，无论结构由多种材料构成，或是某种或多种合金，也无论结构是否有涂层防护或者涂层有局部的损坏等等，均可以使用Beasy腐蚀管理器仿真软件来进行仿真分析。该工具可以计算得到不同环境下这些结构的腐蚀情况：需要用户输入极化特性曲线，仿真计算的结构包括电流密度（清楚地标明最高值的位置），腐蚀电位，以及腐蚀率等。

Beasy的腐蚀和腐蚀防护仿真软件是电化学腐蚀计算的仿真工具，它广泛用于对防腐蚀技术的验证和优化，比如在船舶、风力发电、管道、储物箱和容器等结构中广泛使用的阴极

保护措施。当结构处在电解液环境中时，软件也可对此进行电化学腐蚀计算。



图形化用户界面直接集成在CAD的环境中，在此图形化用户界面中定义每一个暴露在电解液中表面的物理特性

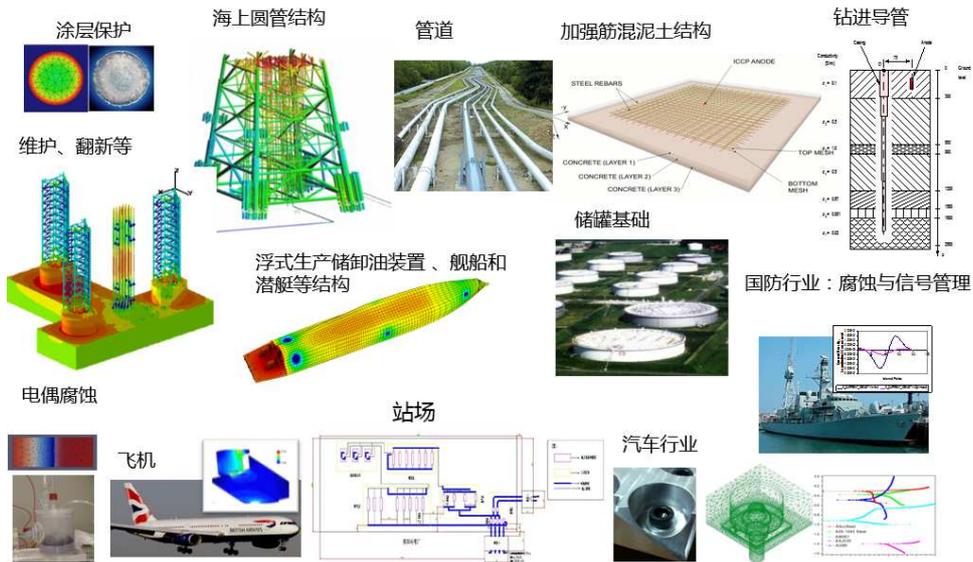
系统的实施从难易程度上来说可以分为三个阶段：

1、材料仿真

建立各种材料的数据库（特别是金属材料和各种合金材料），材料的数据库应该包含材料在各种环境下多年腐蚀和存储情况下的性能（环境包含盐雾、高温和低温、雨天等）。

2、部件的结构分析

3、设备的工作性能仿真



2. BEASY 前后处理器

Beasy的前后处理器可以方便地建立几何模型和对计算结果进行处理。

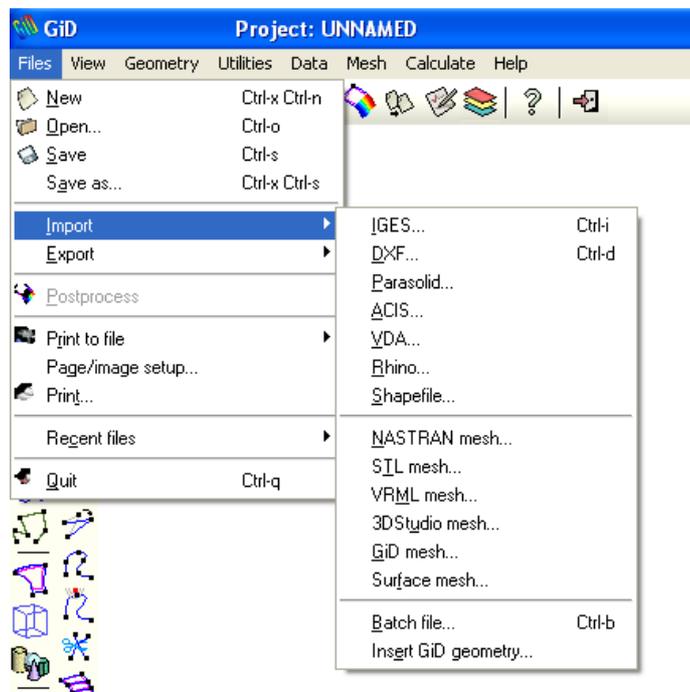
- ✧ 更佳的可可视化和使用舒适度；
- ✧ 现代化的用户化界面；
- ✧ 与CAD的良好连接；

- ✧ 功能强大的网格划分器；
- ✧ 对计算结果和模型的增强可视化；

现在，对设计和项目的实施面临更加苛刻的时间要求，Beasy能够保证一次建立的模型的结构数据可以在腐蚀防护的整个分析链中使用。这样做带来了实实在在的好处：减少了手工建模的工作量，降低了时间和费用，同时也降低了人工“出错”的几率，同时用户可以节省出更多的时间来研究Beasy软件的更多更深的功能。用户可以将他们的重点关注在评估计算结果，对不同的设计方案进行考核，通过对各种可选防腐解决思路的分析中，用户能够找到最优化的设计。

Beasy软件可以读取不同的CAD数据，这些CAD数据的类型覆盖海洋防腐环境各种CAD建模工具。在建模阶段对模型的保存是很有必要的，这样用户既可以对microSAS文件进行操作，也可以对三维数据（Parasolid、ACIS、Autocad或IGES格式）进行处理，对二维数据也可以保存（Autocad，dxf或IGES格式），也可以直接读取其他CAE软件划分好的网格（比如Nastran的网格文件），在包含阳极分布（牺牲阳极）的模型中也可以进行类似的处理。

当然，在使用CAD文件格式的读取时，应该保证数据能够足够详细地模拟实际结构，以保证寻求模型尺寸与模型复杂性之间的平衡。



3. BEASY 腐蚀仿真管理器

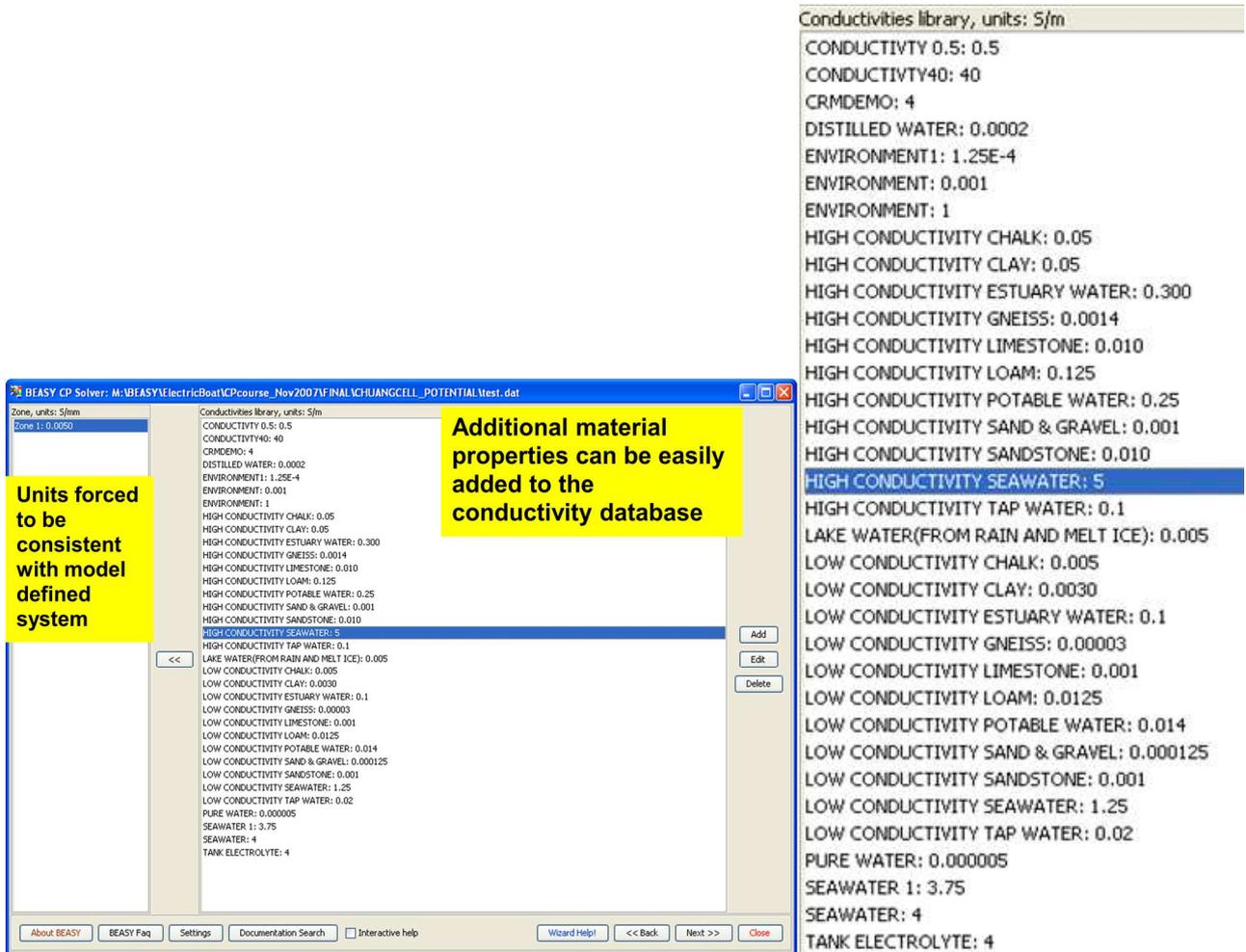
Beasy腐蚀仿真管理器建立电化学腐蚀的模型，暴露在电解质环境中的两种材料之间的电位差形成电流，只有这两种材料之间因电解质的存在而形成电路的通路连接时，就会形成

电流的流动。

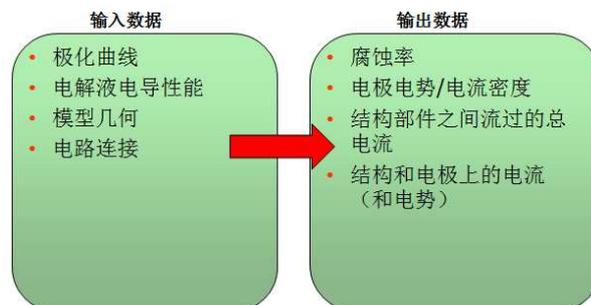
Beasy 的腐蚀仿真管理器从宏观的角度来模拟这一效应，因此我们将材料因薄电解液而有效地“连接”为一个闭合电路的区域建立分析模型。

模型假设在材料的表面有某种形式的电解液薄膜，这可能是由各种各样的情况产生的，比如：除冰剂飞溅到车身上、冷凝、海边的盐雾、液体的泄漏等等。

Beasy的腐蚀仿真管理器还可以用来确定潜在的腐蚀危险位置，并对防护措施进行评估。



上面显示的是各种腐蚀环境

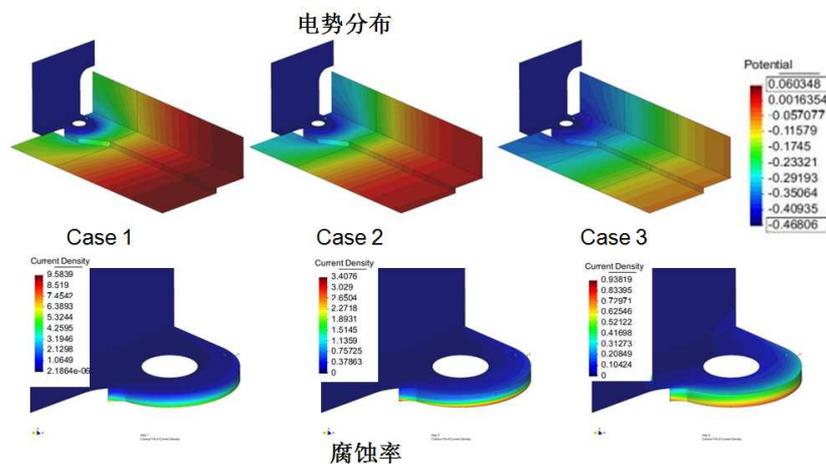


电化学腐蚀输入输出数据

4. BEASY 腐蚀仿真和腐蚀防护

对于防腐保护的结构，Beasy可以分析防腐控制策略是否有效，并计算在结构的整个生命周期中，防腐手段的效果如何。另外，也能分析防腐手段与附近系统的相互影响。

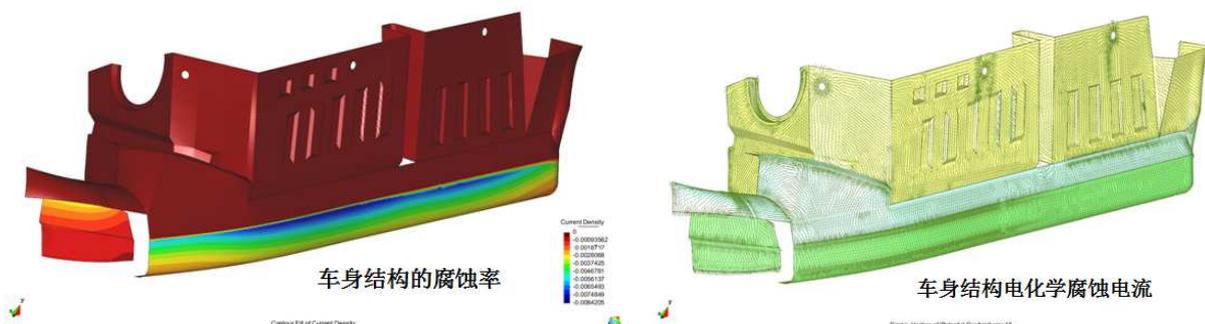
- ✧ 对电化学腐蚀进行仿真计算；
- ✧ 对防腐系统的设计进行优化；
- ✧ 减少后期试运行成本；
- ✧ 减少系统之间的相互干涉；
- ✧ 腐蚀产生的电磁场预测；
- ✧ 海洋工程应用；
- ✧ 地下基础结构应用。



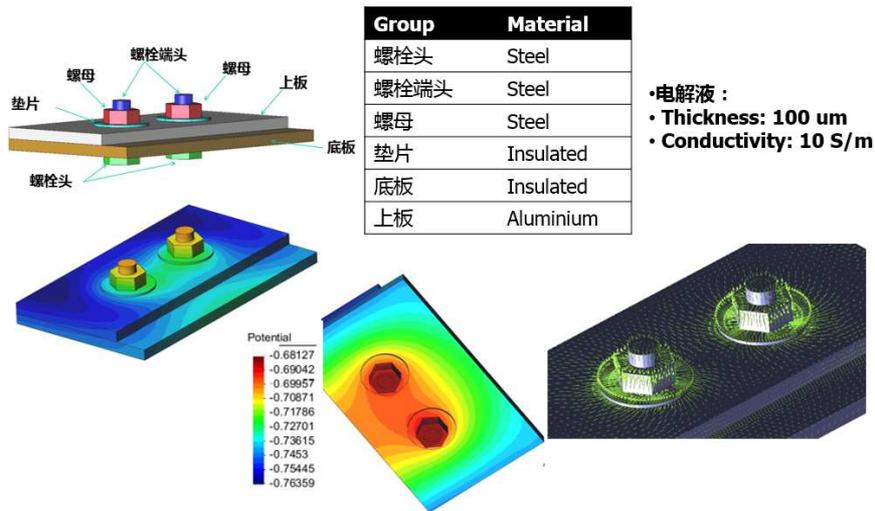
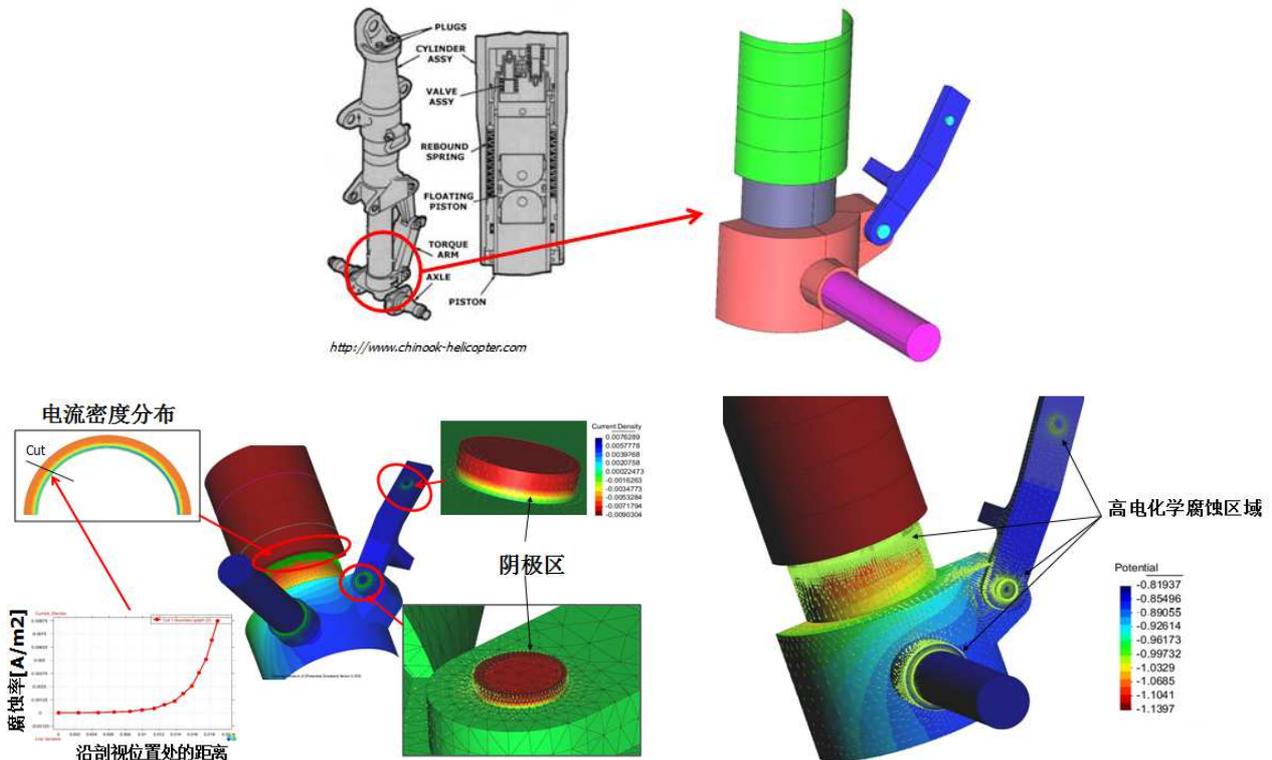
上图是飞机复合材料与铝合金连接件电化学腐蚀仿真分析后的腐蚀电位计腐蚀电流密度显示，三种工况表示了碳纤维加强复合材料上涂层的不同涂覆范围。

4.1. 电化学腐蚀仿真

在腐蚀存在的情况下，Beasy可以用来仿真计算电场和电化学反应（极化）。在电解液环境下，可以计算金属结构的电势、电流、腐蚀率等。



起落架的腐蚀仿真



螺栓连接件的腐蚀仿真分析

4.2. 关联影响

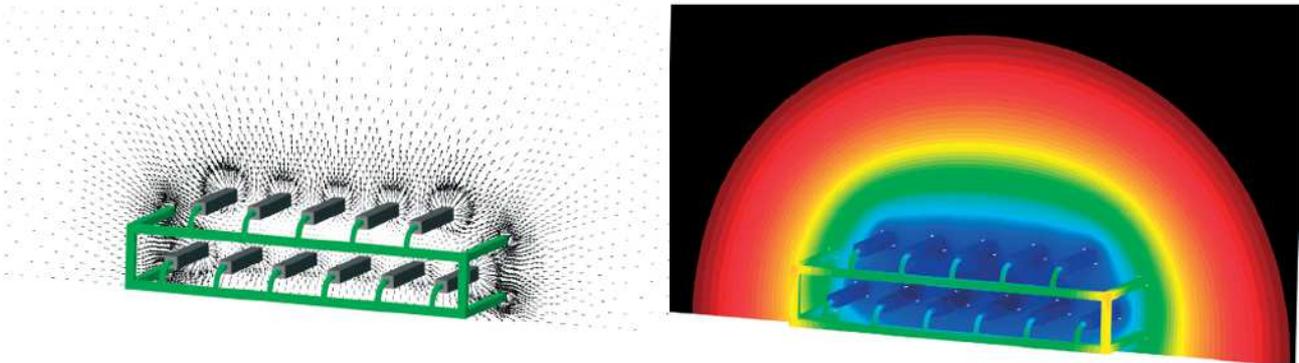
模型中有相邻的结构可能会影响到防腐系统的运行，Beasy可以定量地分析出它们之间的相互影响并对防腐系统的设计提出修改意见。

4.3. 对防腐系统设计的优化

Beasy提供了对防腐系统的性能进行仿真计算的能力，并对关键参数进行修改进行优化计算以获得最佳的防腐结构设计。

4.4. 海洋工程应用

在海洋工程的环境中，计算机仿真计算的一项主要任务就是预测阴极保护的效果。对于石油和天然气工程、舰船等结构来说，牺牲阳极和外加电流的阴极保护系统的防腐性能都可以使用Beasy软件来进行仿真计算。



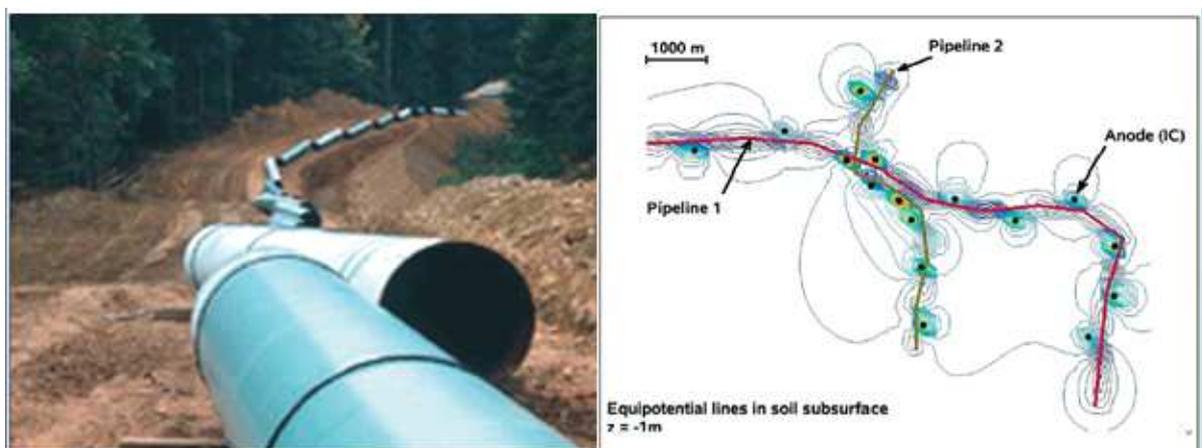
阳极阵列中的电流及相互干扰

阳极阵列在附近海水的电位

如上图所示，使用牺牲阳极得到结构的阴极保护是常用的方法：腐蚀防护工程师即使具有丰富的经验与知识也会面临阳极阵列设计的难题：比如阵列中的阳极会相互影响，连接电缆的布局需要仔细设计以避免对牺牲阳极保护效果的干扰和降低，需要仔细评估放置位置，以避免与附件管路或结构之间的相互干扰等等。Beasy软件可以建立三维仿真分析模型，包含阳极阵列、连接线缆和附近的结构，在阳极阵列的整个寿命周期中分析保护效果，计算阳极阵列与临近结构之间的相互影响，仿真阳极阵列的消耗并优化阳极阵列的布局及位置等。

4.5. 地下基础结构的应用

当今的地下环境，要想理清有多少种不同的电脉冲相互影响是非常困难的：电源线、铁路运输线、通讯电缆、工厂的基础等等，而这些也仅是埋在地下的各种基础结构的神经网络的部分。Beasy提供的工具可以对这样的复杂系统来进行仿真，并预测各种管路和存储罐的阴极保护是如何工作的。



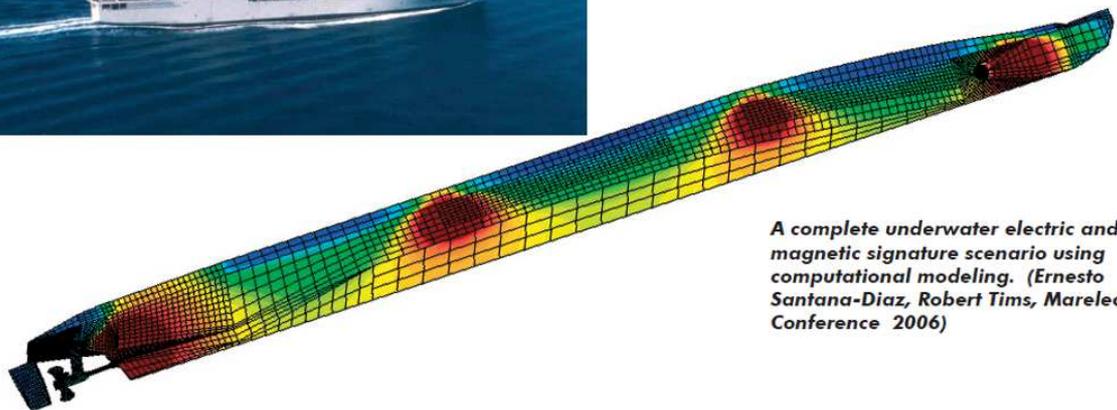


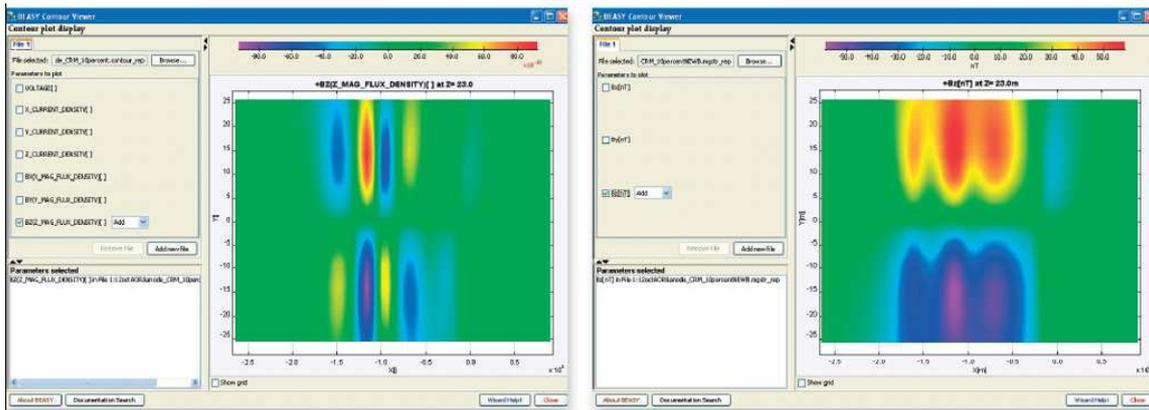
4.6. 电场和磁场预测

与Beasy公司的Beasy公司的CRM软件组合在一起进行分析，可以预测与防腐相关的电场和磁场。

BEASY的电磁信号管理分析软件，是国际上国防等敏感单位广泛使用的仿真工具，它主要预测阴极保护系统的性能并减小其相关的电和磁信号，降低目标的被侦测性。

BEASY软件能准确地仿真计算舰船潜艇表面的电化学反应以及围绕舰船和潜艇的电、磁场。





海水中腐蚀电流引起的船身附件海水磁场

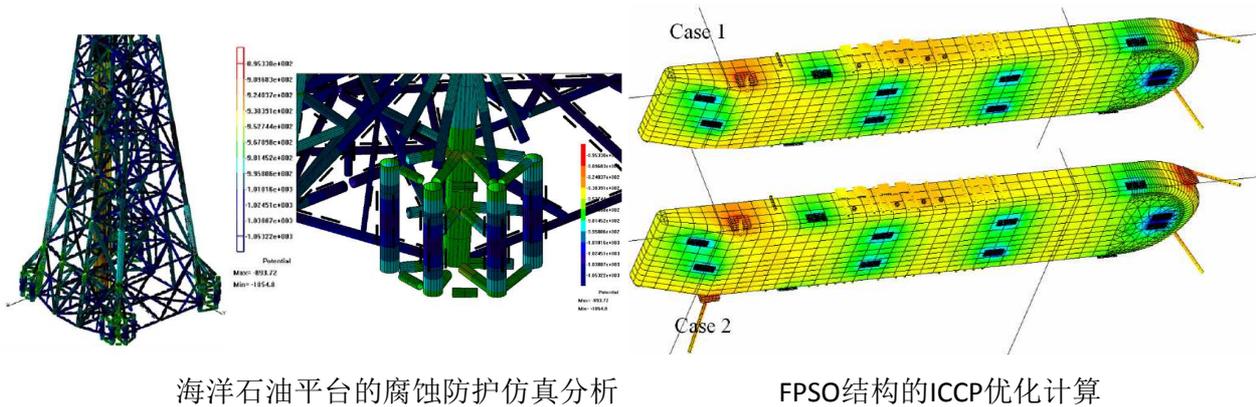
船体结构的磁场——由于电流流回到船体结构引起

5. 腐蚀与防护

5.1. 工程需要

在机械、船舶、海洋平台工业中，被置于恶劣的环境中金属结构如果处于无防护状态将很容易受到腐蚀。表面涂装可有效地阻止腐蚀过程，但是为起到更长时间的保护作用，以消耗阳极为代价的阴极保护系统经常被使用。当结构的电势能控制在一个适当的水平，就可以在电解液（如海水）中建立起一个能够保护结构免受腐蚀影响的系统。腐蚀防护设计人员需要解决以下问题：

- ✧ 电流腐蚀的改善及更可靠的设计模拟
- ✧ 腐蚀仿真过程优化
- ✧ 阴极保护系统设计
- ✧ 电场预测
- ✧ 寄生电流腐蚀
- ✧ 阳极位置优化
- ✧ 防护系统寿命预测
- ✧ 诊断数据的评价与表述
- ✧ 电解沉淀及其他的类似过程的模拟
- ✧ 环境条件变化的过程仿真
- ✧ 静电场的分析
- ✧ 强制牺牲阳极系统工程



5.2. 解决手段

利用BEASY工具,能对任意电解质和材料数量的腐蚀问题建模,并被用于通常电流问题的模拟。BEASY 腐蚀和防腐能被用来研究任何静电问题,同时也能用于寄生电流腐蚀问题,电解沉积问题和计算电场周围的任何系统。

5.3. 电流分析

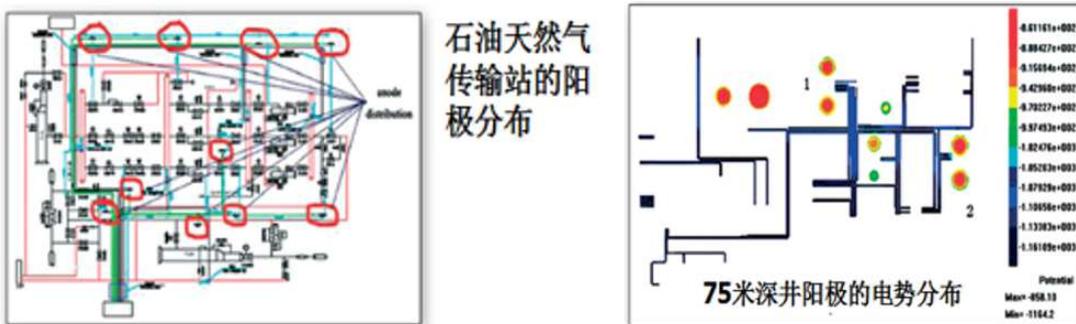
- ✧ 在结构和电解质中预测电流密度和势能
- ✧ 多分区分析不同属性的电解质
- ✧ 稳态且时间相关的非线性极化特性描述
- ✧ 漂浮的电极
- ✧ 场边界的简化(如无限边界)表达
- ✧ 腐蚀率预测
- ✧ 电流通量及如何随时间的变化预测

5.4. 电场分析

- ✧ 由任何材料组成的结构都能被定义
- ✧ 预测结构(在电解质中)周围的势场
- ✧ 预测近场和远场
- ✧ 仿真多电流源间的相互作用
- ✧ 预测腐蚀相关的水下电场(UEP)

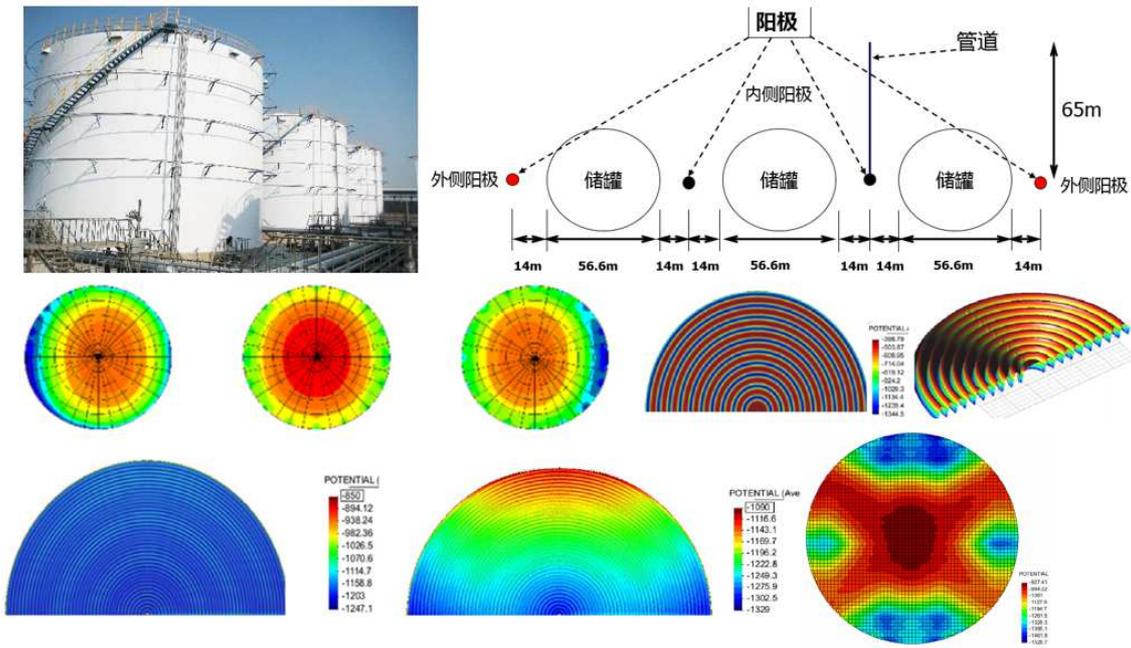
5.5. 阴极防护设计

- ✧ 评估新设计的防腐电极类型和形状
- ✧ 考察新的阳极类型和形状

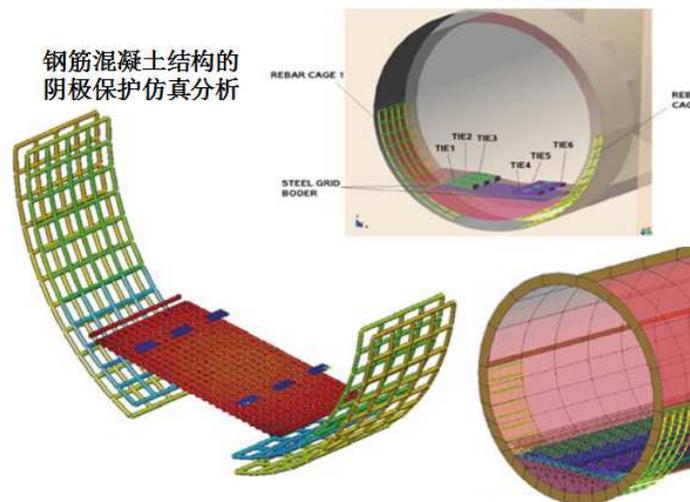


5.6. 防腐设计优化

- ✧ 结构关键区域的局部细化 (如结构节点, 支撑导向等)
- ✧ 大型复杂结构的整体建模
- ✧ 环境条件的变化模拟及石灰质的比例设定
- ✧ 阳极消耗比率预测, 平均余命, 直径减少
- ✧ 通过优化阳极模拟阳极分布以减少重量和拖曳
- ✧ 通过改进使防腐设计更可靠和阳极分布更合理
- ✧ 优化阳极和相关电极位置
- ✧ 寄生电流及防腐系统相互作用预测
- ✧ 不同防腐过程优化



地下储罐阴极保护及地上储罐底部防护电化学分析



5.7. 寄生电流干扰

- ✧ 预测干扰场
- ✧ 定义独立的导电系统
- ✧ 预测系统间的相互作业
- ✧ 预测结构和电解液中的电位和电流
- ✧ 模拟独立(浮游)电极

5.8. 电极沉淀和相同制造过程模拟

- ✧ 模拟腐蚀和沉极问题
- ✧ 可以定义任何形状和数量的电极

6. BEASY 参与基于腐蚀仿真的飞行器管理系统

基于腐蚀仿真的飞行器管理——SICOM 系统（Simulation-based corrosion management for aircraft）。

6.1. 背景：

利用针对腐蚀产生与发展的预测工具的应用与集成的腐蚀管理的概念正成为腐蚀防护领域新技术、新的结构设计以及材料和表面防护技术发展进步的驱动力，此外它还能缩短新产品向市场推广的时间。

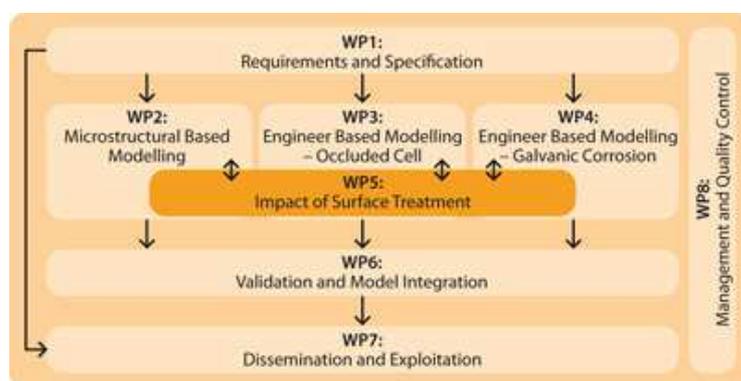
目前的腐蚀防护理念认为腐蚀破坏必须在结构达到临界破坏之前被发现并被修复。但腐蚀的影响难以预测这使得我们必须非定期进行维护，维护成本高昂。例如美国航空工业一年由于腐蚀直接导致的花费被估计高达 22 亿美元，其中设计制造费用 2 亿美元，腐蚀维护 17 亿美元，以及停工损失 3 亿美元。而对腐蚀源的产生及腐蚀扩展的可靠预测办法将会为新的经济的腐蚀维护与修复策略提供基础。

6.2. 目标

SICOM 开发的模型已经成为预测性维护概念的基础部分。它能够提供腐蚀的产生及演变的数据，这将填补腐蚀检测与结构腐蚀影响计算之间的空白。来自环境条件、腐蚀监测系统或非破坏检测的数据可作为输入数据，模型的输出数据可用于修复过程，也可作为结构完整性分析计算程序的补充。

模型中需定义能描述腐蚀条件及在役飞行器经验数据的参数。局部腐蚀将通过数值化的微尺度模型进行仿真，它考虑到结构的微观结构和微观电化学条件。对于给定的宏观环境依靠数值计算方法，中尺度的闭塞单元中铝合金的腐蚀速率用可用结构的物理因子及几何因子表达。

Beasy 目前正在开发以工程为基础的用于预测电化学腐蚀行为数值方法，并扩大应用到飞行器结构单元中去。该模型被规划为决策辅助工具的一部分，使得工程师可查看它产生的数据或分析数据趋势。



项目组织示意图

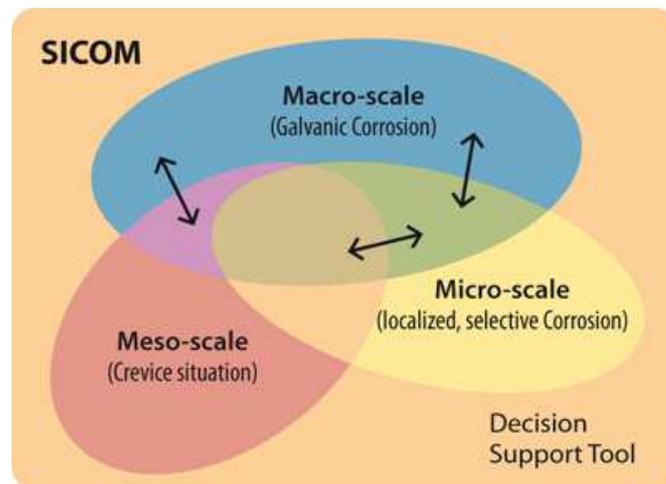
6.3. 工作描述

在考虑微观结构及产生的微尺度电化学条件下用一个数值微尺度模型用于模拟铝合金的局部腐蚀。给定微观环境条件下中尺度的闭塞单元中的铝合金的腐蚀速率通过结构的物理参数和几何因子数值计算获得。预测电化学腐蚀行为的数值模型将被建立并扩展应用到飞行器结构单元中去。同时考虑表面处理中抑制剂释放对仿真结果的影响，以及镀层的影响和氧化物降解的影响。最终利用分析项目的结果建立起针对学术及技术应用的辅助决策工具。考虑铝合金表面的特殊处理工艺及局部破坏可对该模型进一步扩展。

6.4. 结果

主要想获取的结果包括如下：

- 不同应用领域需输入输出数据的说明
- 质量转移模型及诱发局部腐蚀的关键参数
- 闭塞单元中铝合金腐蚀速率的数值计算
- 考虑镀层影响（包括相关的几何参数及化学参数）对质量转移模型的修正
- 电化学腐蚀模型能够预测不同条件下典型结构连接的腐蚀速率
- 建立辅助决策工具并对腐蚀管理具有广泛的应用



SICOM: 辅助决策工具

6.5. 合作伙伴：

- 德国空中客车股份有限公司
- 法国欧洲宇航防务集团研究中心
- 英国 Beasy-计算力学公司

- 瑞士联邦材料测试与研究实验室
- 欧洲系列相关大学等

二、 疲劳寿命裂纹扩展及缺陷扫描 BEASY/Mechanical、CrackGrow

Beasy的断裂力学仿真软件是有限元仿真计算工具的功能延伸：一旦结构有裂纹出现，即可使用Beasy的断裂力学仿真软件对其进行裂纹扩展计算。Beasy的断裂和裂纹扩展分析功能使工程师可以基于结构和部件的真实几何，使用全三维的虚拟样机手段来预测裂纹是如何扩展的以及这些裂纹是如何影响结构的整体性。

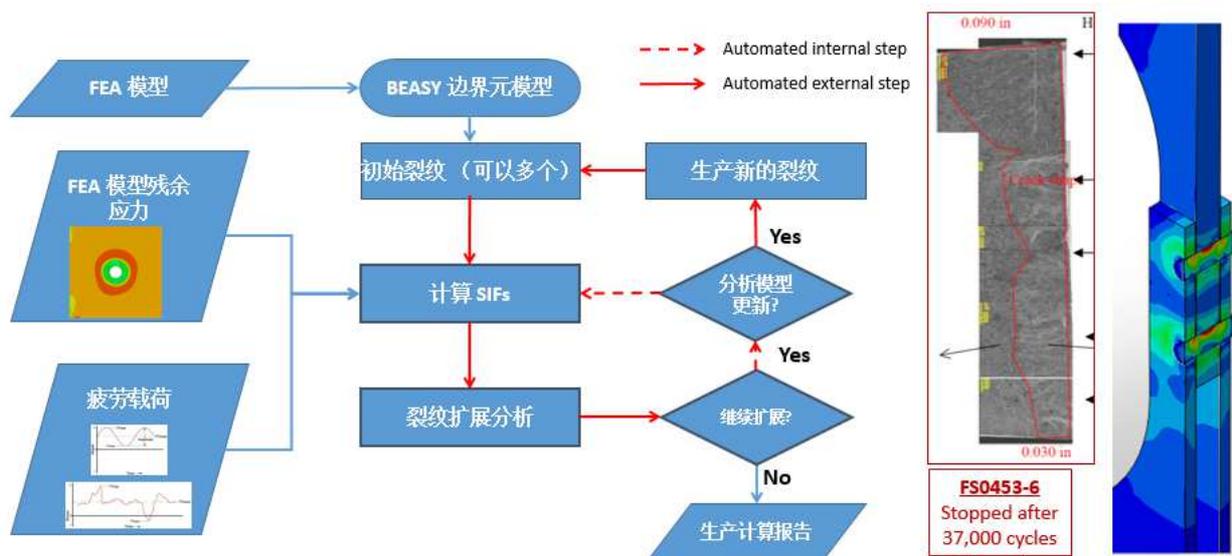
Beasy的裂纹仿真计算手段可以预测

- ✧ 应力强度因子
- ✧ 裂纹扩展率
- ✧ 临界裂纹尺寸
- ✧ 裂纹扩展路径

Beasy还提供如下附加模块：

Beasy的失效扫描在模型上建立临界裂纹尺寸的“映射图”，它们既可以使用Beasy模型的结果来计算，也可以使用有限元计算的结果（比如MSC.NASTRAN，ANSYS，ABAQUS等），这样可以轻易地标定出“临界”位置。在图形显示出的最小临界裂纹尺寸使用户能够清楚地确认结构中最需要关注的位置，并可将其相关信息输入到维护和检查计划中。

Beasy FE接口包括与常用有限元商业软件之间的接口，比如：NASTRAN，PATRAN ABAQUS 和 ANSYS。



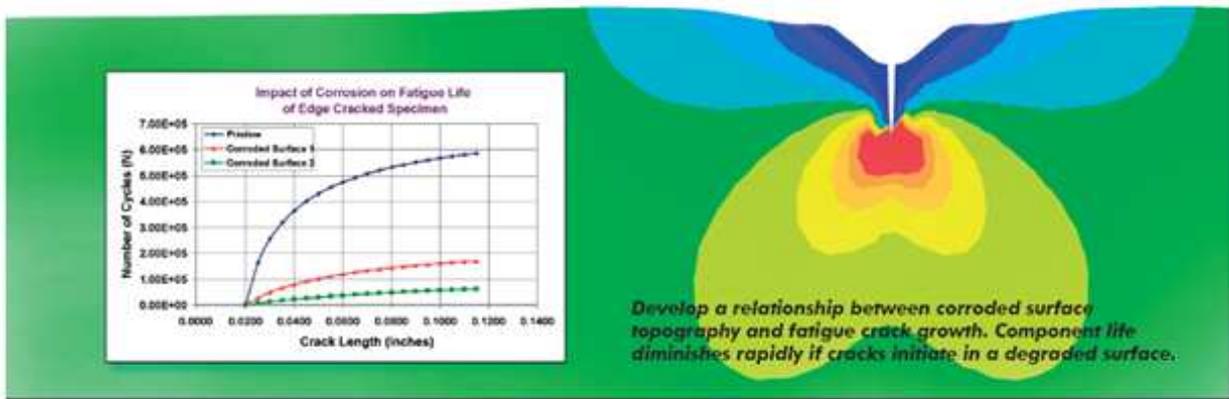
某装配件残余应力情况下的疲劳寿命分析及与实验对比

(来源于 Aircraft Airworthiness and Sustainment Conference March 22, 2016)

这是使用计算机仿真手段来进行设计和预测结构件的力学性能的仿真工具。Beasy软件使用边界元技术来进行分析：

- ◇ 减少网格划分时间；
- ◇ 全自动的网格划分，并且不会影响计算精度；
- ◇ 更容易进行设计方案的更改；
- ◇ 提升了计算结果的精度；
- ◇ 接触分析；
- ◇ 与Beasy的裂纹扩展分析集成在一起。

腐蚀与断裂力学的关联：对腐蚀结构的疲劳寿命预测



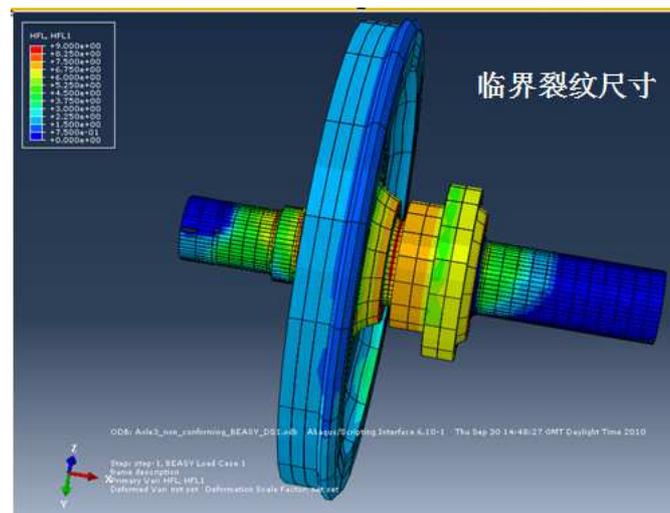
1. Beasy 疲劳和裂纹扩展分析

BEASY 疲劳与裂纹生长 提供了损伤结构残余强度和失效风险的完整工具。作为设计/分析过程中不可缺少的环节, 预测由各种因素引起的部件缺陷和失效的影响: 这些因素包括服役载荷、加工加工工艺、材料缺陷等。

BEASY 基于边界元技术的软件工具能够通过断裂力学技术的先进应用定量描述结构寿命和残余强度。BEASY疲劳与裂纹生长评估能力的关键好处与特色是全自动预测实际部件或结构几何中裂纹生长过程, 从而通过简便的途径获得精确的预测结果, 提高设计人员对产品寿命的自信。

不需要在结构寿命预测的精度上妥协! 使用Beasy全自动的软件产品可以对结构的可靠性进行快速准确的预测。

下图是Beasy的疲劳寿命和裂纹扩展分析软件直接集成在Abaqus软件中, 可以直接在Abaqus软件中显示各种计算结果。



2. 产品可靠性预测

Beasy提供了功能强大的工具来评估受损结构件的残余强度和失效的危害性。它可以用来仿真计算由于在役载荷作用、制造和安装因素或材料缺陷等原因造成的结构缺陷或损伤对结构寿命的影响，这一过程是设计和分析中不可或缺的。

- ◇ Beasy提供了用户需要的关键信息：
- ◇ 裂纹会扩展吗？
- ◇ 裂纹的扩展是一种稳定缓慢的状态还是处在快速失稳阶段？
- ◇ 裂纹的扩展速率？
- ◇ 结构在失稳前，允许的裂纹临界尺寸是多大？
- ◇ 剩余强度如何？

3. Beasy 腐蚀开裂和缺陷扫描的优势

3.1. 快捷的裂纹扩展建模

Beasy 将边界元法的功能有机地集成在裂纹分析的建模中。现在，工程师可以将裂纹扩展建模分析作为标准应力分析的拓展。只需要选择裂纹的现状、尺寸和位置，Beasy通过自动网格重新划分将可以将当前的裂纹状态建立在新的分析模型中，然后计算出应力强度因子等数据。

- ◇ 单个或多个裂纹；
- ◇ 埋藏裂纹或边界裂纹；
- ◇ 直线裂纹前沿，曲线裂纹前沿，或弯曲裂纹前沿；
- ◇ 用双边界单元模拟裂纹；
- ◇ 用户自定义裂纹库。

3.2. 自动裂纹扩展

Beasy软件不仅能够计算出应力强度因子，还能预测裂纹是如何扩展的。在结构模型中需要的位置，Beasy自动实现网格的重新划分，这个过程的高度自动化的，裂纹扩展的的导向器会对用户进行实时导航。

为简化裂纹分析，通过精心设计裂纹导航器，指导用户完成断裂力学分析过程，并将与初始裂纹设置和裂纹扩展相关的分网工作自动化。裂纹导航器的设计思想是保证任何裂纹计算只需从足够完成应力分析包含网格，载荷和边界条件的简单模型入手，裂纹导航器引导用户完成。

- ✧ 定义何处萌生裂纹；
- ✧ 从标准裂纹形状库中选择需要的初始裂纹类型；
- ✧ 浏览材料数据，裂纹生长模型，延迟模型等，完成所需选项；
- ✧ 选择需要的载荷；

启动 BEASY 分析，预测应力强度因子或完成自动裂纹生长模拟。

3.3. 高精度

应力强度因子和裂纹扩展数据的历史使用标准参考解俩进行近似。Beasy通过使用真实几何结构、载荷历程和材料参数等为基础以保证寿命预测的高度准确性。计算结果中能真实地考虑了载荷的重新分配、多裂纹、真实裂纹路径和裂纹形状的因素。

在详细的仿真计算中，由于Beasy只对表面进行定义，因此对于圆角和其他小的特征都可以有效地模拟，这意味着不需要过多的简化即可对真实的几何进行建模分析，这样能得到更加准确的计算结果和疲劳寿命的预测。非连续单元允许用户更加准确的捕获结果快速变化位置的行为。

计算结果包括：

- ✧ 应力强度因子；
- ✧ 裂纹和模型变形；
- ✧ 裂纹扩展路径；
- ✧ 裂纹生长率；
- ✧ 残余强度。等等

3.4. 更便捷的设计更改

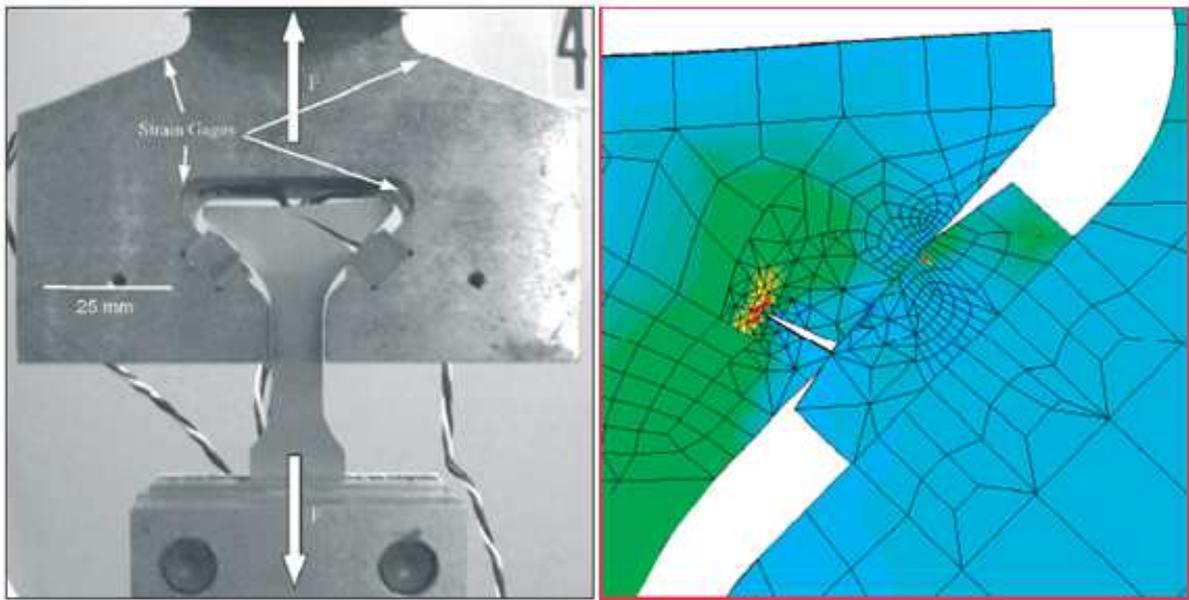
设计分析人员经常遇到这样的问题：对计算结果多次反复评估之后发现网格的划分不精细，因而得不到关心位置的详细信息。对于类似这样的问题，Beasy提供了更好的解决方

案，Beasy可以对局部的网格进行调整而不需要对整个模型进行重新划分。

3.5. 接触仿真

对于接触分析，Beasy有能力利用更少的网格和更准确的计算结果来进行仿真。支持节点与节点之间和节点与单元之间的接触。

Beasy的分析能可以用来优化接触部件的磨损，它是基于接触压力和滑移历史来得到详尽的数据报告。

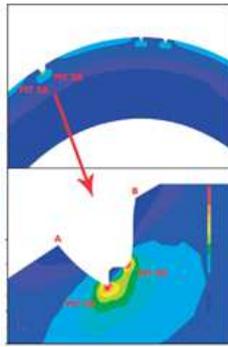


3.6. 与 Beasy 软件的有机集成

对疲劳寿命和可靠性预测来说，使用Beasy的疲劳和裂纹扩展软件可以将裂纹自动地加到分析模型中。

同时，使用Beasy软件的腐蚀仿真分析可以直接输出结构的腐蚀形貌，该腐蚀形貌可以是疲劳寿命分析的裂纹源，直接输出到Beasy的Fatigue & Crack Grow模块中进行结构的疲劳寿命的裂纹扩展分析。

在点蚀处导致应力 腐蚀的裂纹



点蚀及其结构的寿 命预测

