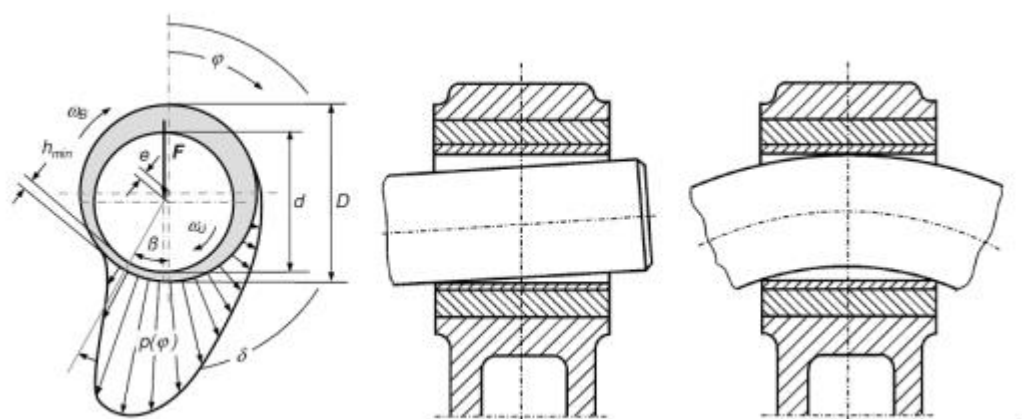


基于 ANSYS WB 平台的滑动轴承分析工具

1 概述

滑动轴承大量用于旋转机械结构，系统力学行为与滑动轴承的特性参数密切相关，有必要对滑动轴承进行计算以获取轴承参数，研究轴承受力状态，如油膜压力、油膜间隙、轴承剪力、油膜刚度、油膜阻尼等。但滑动轴承计算在本质上属于复杂的多物理场问题，涉及流体力学、结构力学、热力学，而且尺度极小，通常间隙量仅为数十到数百微米，经典三维 CFD 或者有限元计算难度很大。



基于 ANSYS WB 平台开发的滑动轴承计算工具 **Tribo-X inside ANSYS** 是基于热弹油膜动力学的滑动轴承求解器，它采用合理简化算法，实现从 3D 计算到 2D 计算的转换，基于简单模型快速完成滑动轴承计算。



Tribo-X inside ANSYS 将 **Tribo-X** 求解器集成到 ANSYS Workbench 环境中，基于 ANSYS 环境建模、设置滑动轴承计算参数并驱动 **Tribo-X** 求解器实现滑动轴承快速计算，解决了传统 CAE 方法难以计算滑动轴承的困难，可以获取轴承重要参数，研究轴承受力状态，预测旋转轴承系统的稳定性，对轴承参数进行设计优化，并可以将轴承计算与 ANSYS Mechanical 结构计算联合，精确考虑轴承特性对系统力学特性（如转子动力学）的影响。

2 Tribo-X inside ANSYS 概述

2.1 适用的轴承

目前版本功能支持的滑动轴承类型如图所示：

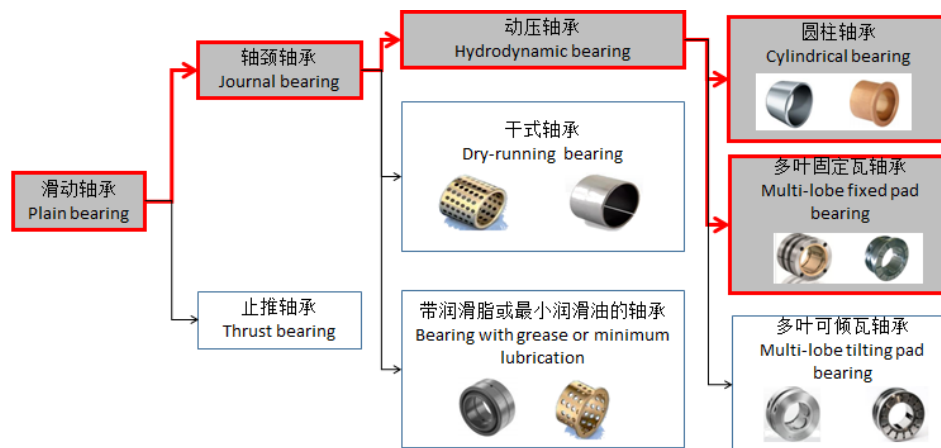


图 适用于 TriboX-inside ANSYS 进行分析的轴承（红线框内）

2.2 合理假定

- 油膜间隙远小于轴承尺寸
- 不考虑厚度方向的流动
- 厚度方向压力不变

2.3 理论公式

TriboX-inside ANSYS 基于 TEHD（热弹油膜动力学）的油膜轴承求解器，

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta(U_J + U_B) \frac{\partial h}{\partial \varphi} + 12\eta \frac{\partial h}{\partial t}$$

图 润滑方程

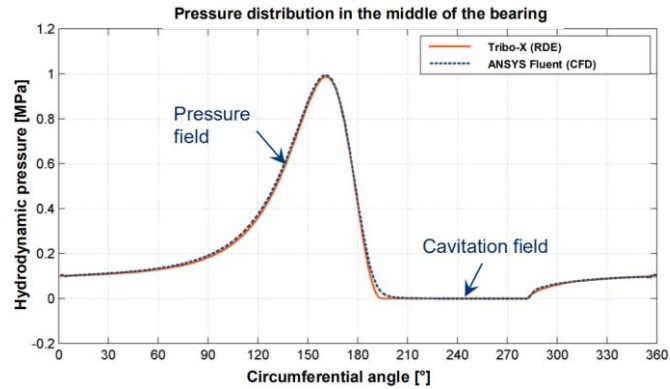


图 三维 NS 方程(CFD)与二维雷诺方程 (Tribo-X) 计算结果对比

- RDE 与 CFD 计算结果存在微小偏差
- RDE 计算时间明显低于 CFD 的计算时间

2.4 应用方向

Tribo-X 求解器集成在 ANSYS Workbench 环境中，二者优势互补。其中 ANSYS Workbench 提供强大的前处理建模、后处理结果查看能力，Tribo-X inside ansys 提供全面、快速、精确的滑动轴承计算能力，同时 Tribo-X inside ansys 可以与 ANSYS 优化模块集成进行滑动轴承参数优化，与 ANSYS 结构动力学模块结合，无缝传递轴承参数进行转子动力学分析。

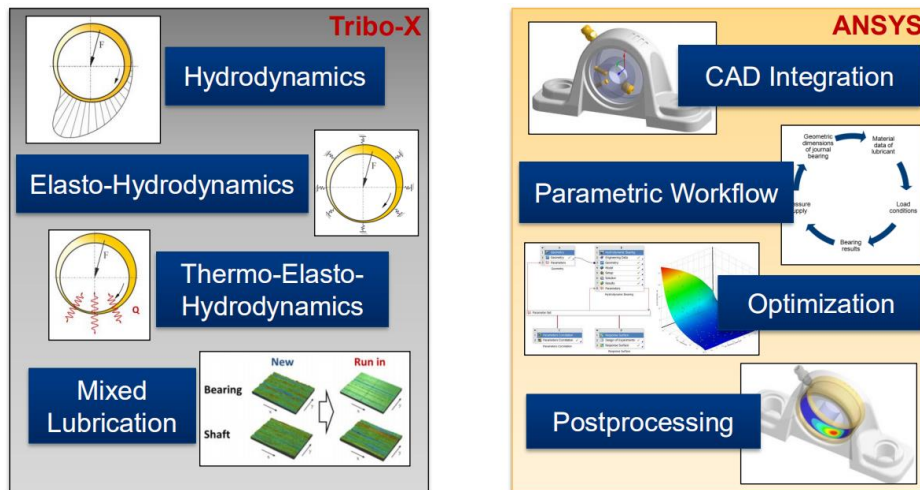
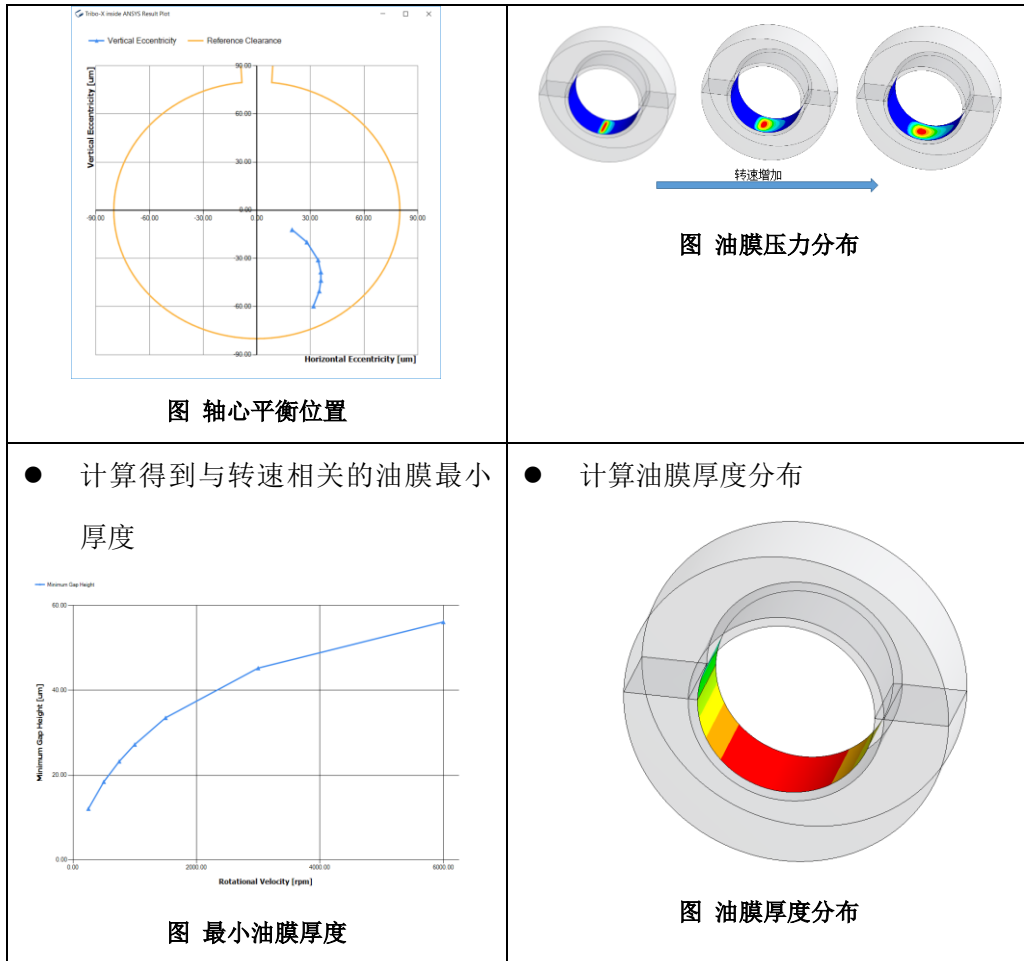


图 Tribo-X inside ANSYS 与 ANSYS 联合分析

1. 轴承平衡状态计算

<ul style="list-style-type: none"> ● 不同转速下轴心平衡位置 	<ul style="list-style-type: none"> ● 计算得到与转速相关的油膜压力分布
---	--



2. 轴承刚度与阻尼计算

转子系统动力学行为与轴承动力特性高度相关，滑动轴承动力特性的轴承系数为油膜刚度和油膜阻尼，而油膜刚度与阻尼取决于轴承平衡位置及转速，Tribo-X 可以计算转速相关的轴承刚度与阻尼系数。轴承系数可以自动无缝传递到 ANSYS 转子动力学计算系统，进而进行考虑轴承系数的转子动力学分析。



图 基于轴承参数进行模态分析

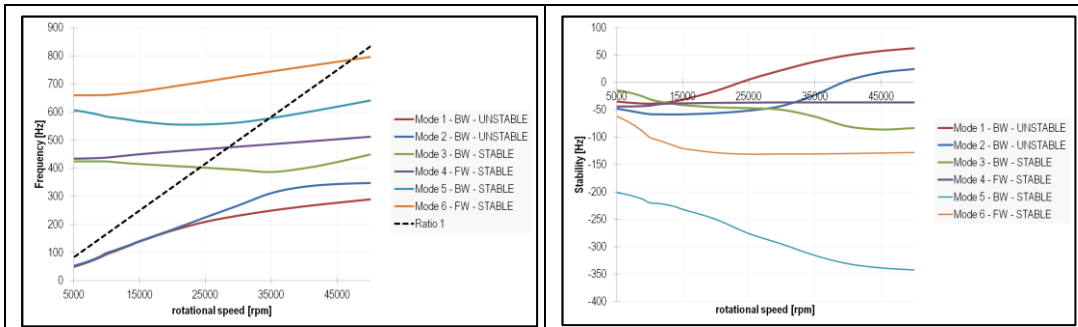


图 临界转速分析

图 系统稳定性分析

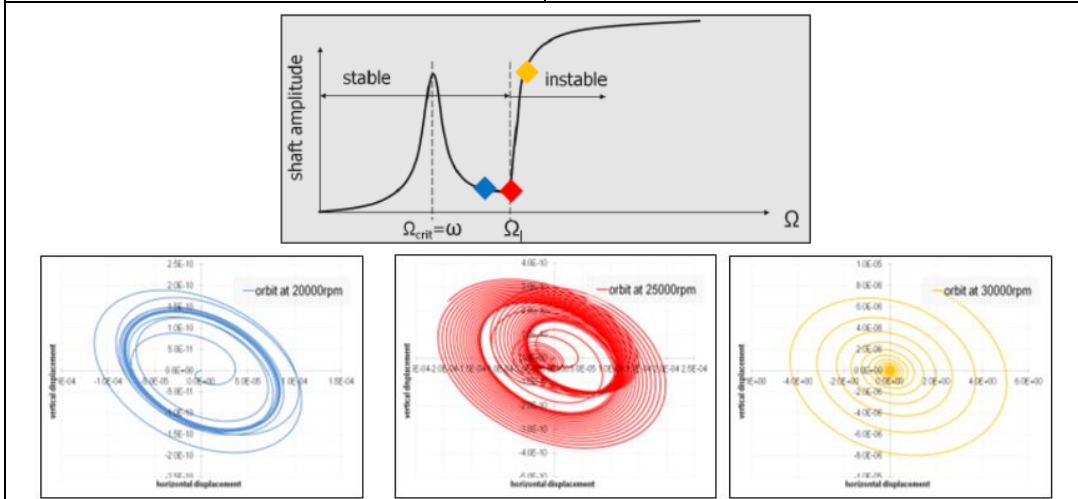


图 转子系统瞬态动力学分析

3. 气穴的模拟

油膜间隙中会产生气穴，滑动轴承的油膜气穴主要来源于空气穴。Tribo-X 采用质量守恒算法，在二维雷诺方程中引入充油率，后处理可以提供充油率结果，用于识别气穴区域。

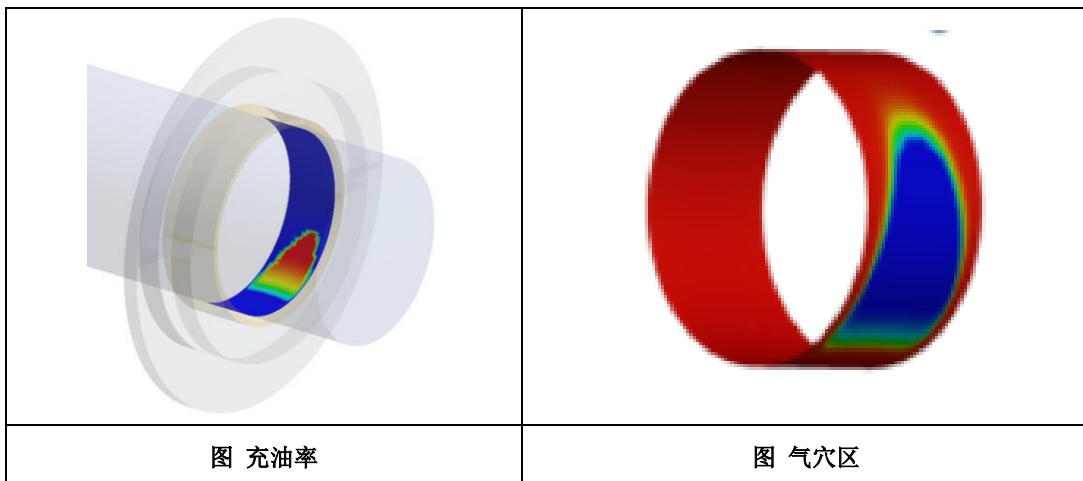
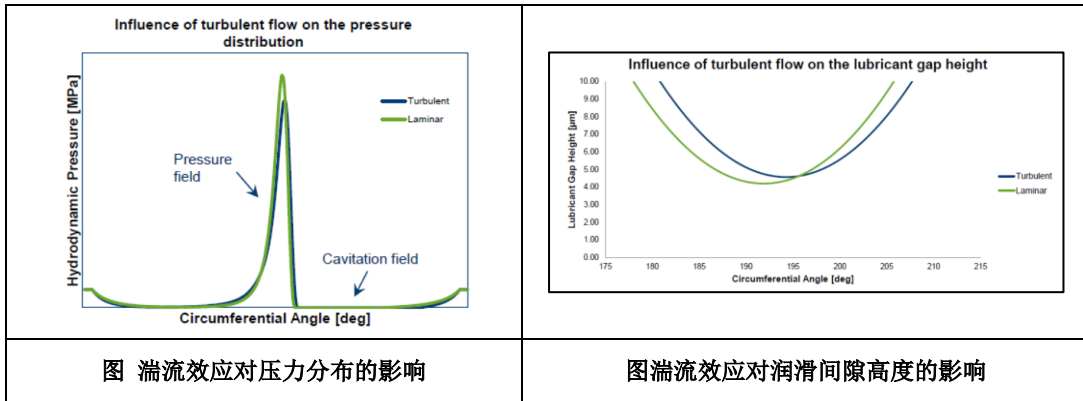


图 充油率

图 气穴区

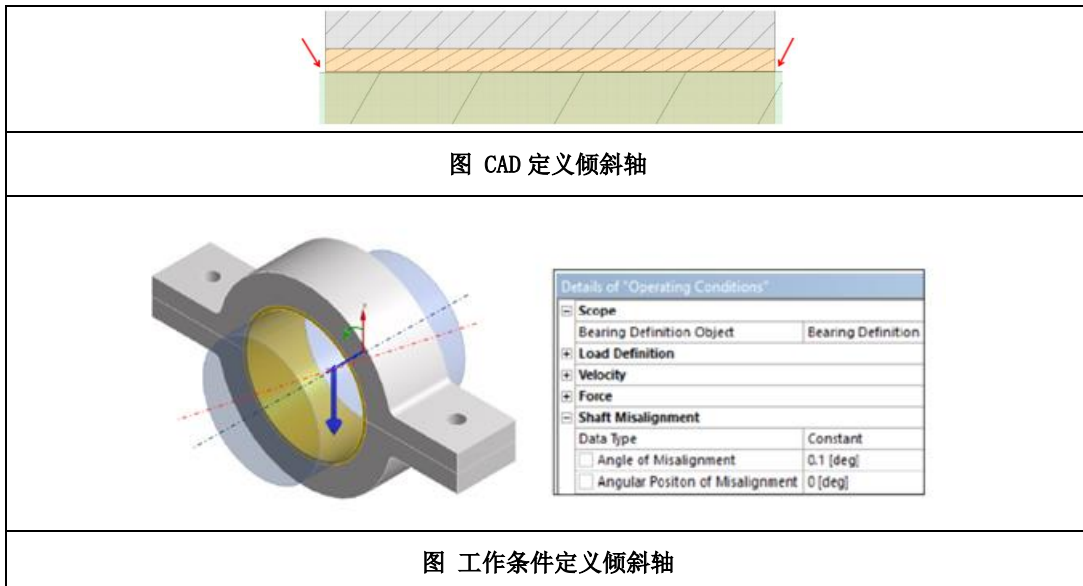
4. 低粘度润滑液在高转速情况下的湍流效应模拟

对于低粘度润滑液（如水）在高转速情况下，有必要考虑湍流效应。考虑湍流通常会提升油膜摩擦力，从而获得更好的轴承承载能力。



5. 考虑轴承形状或者位置偏差的滑动轴承计算

制造或者工作条件都可能产生轴承形状或位置偏差，进而影响油膜厚度和压力分布。可以基于 CAD 模型直接定义倾斜轴，也可以基于工作条件定义倾斜轴。



6. 考虑轴承座弹性的滑动轴承分析

经典油膜动力学计算理论将轴承视为刚性体，使得轴承计算承载能力比实际承载能力偏低，对于高负载滑动轴承尤为明显。Tribo-X 可以基于轴承有限元模型提取轴承柔度矩阵，在考虑线弹性材料行为的基础上，计算弹性变形对油膜压力及油膜间隙等计算结果的影响。

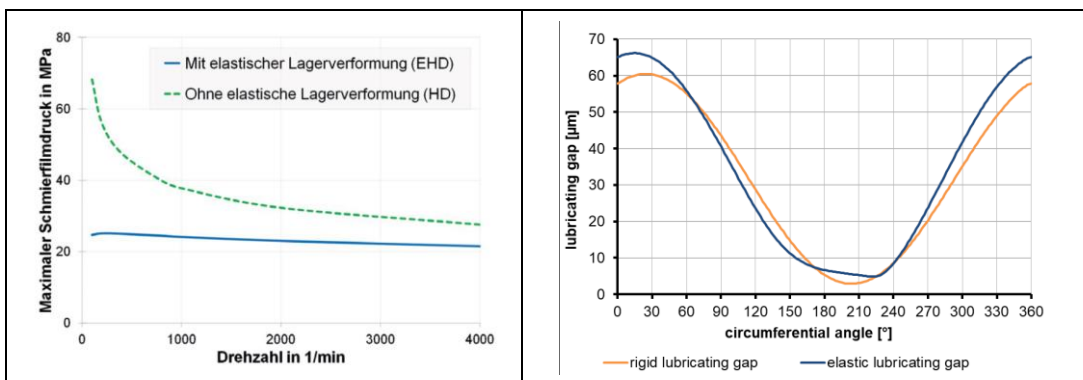
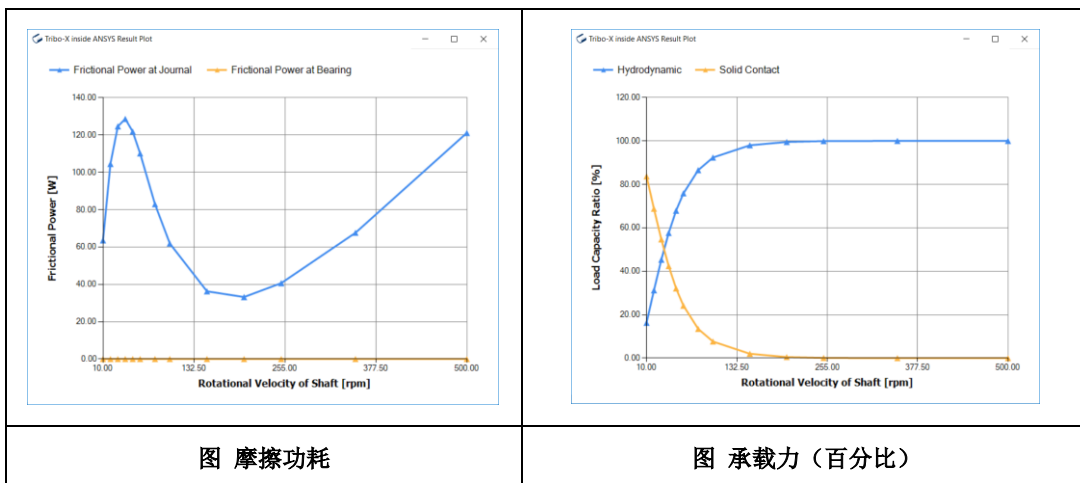


图 弹性变形对压力分布的影响

图 弹性变形对油膜间隙的影响

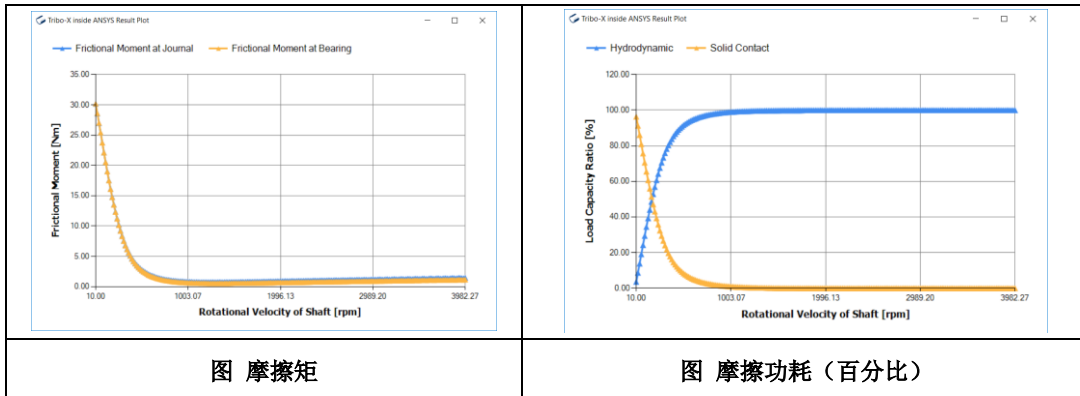
7. 考虑混合摩擦状态的滑动轴承分析

混合摩擦状态是指固体表面摩擦与液体摩擦并存，Tribo-X 可以通过定义轴与轴承表面粗糙度同时考虑表面材料的塑性屈服应力进行混合摩擦分析。



8. 滑动轴承瞬态分析

计算随时间变化载荷作用下的轴承响应，比如循环载荷作用下的瞬态轴承分析及非循环载荷作用下的瞬态轴承分析



9. 滑动轴承热分析

定义轴承材料的热属性及温度相关的润滑油材料属性，考虑轴承与油膜的热传导，计算油膜间隙温度分布。

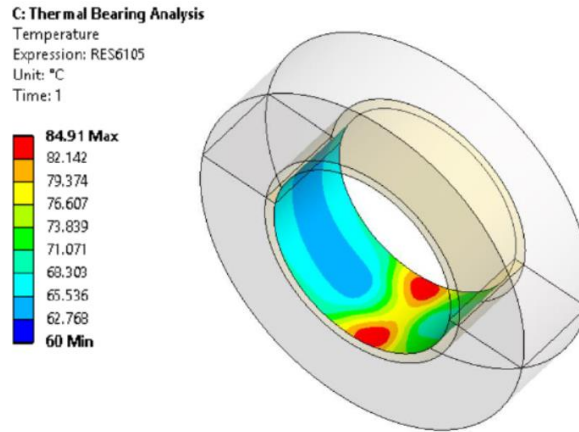


图 油膜间隙温度分布

10. 设计优化

- 全参数化工作流程，CAD 三维软件参数化建模并用于优化（optiSLang，DX）
- 参数研究：确定最重要的工作参数

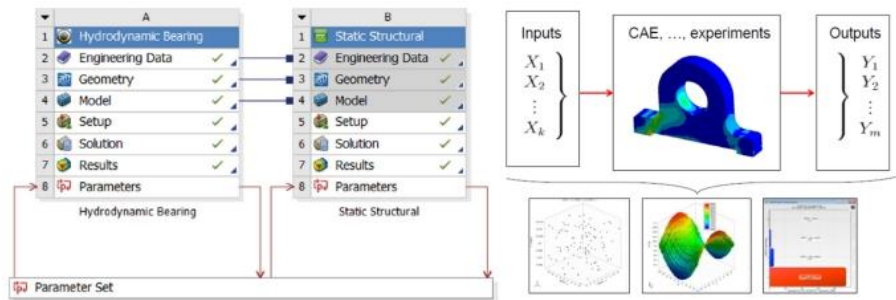


图 参数化分析与优化

3 Tribo-X inside ANSYS 详细功能说明

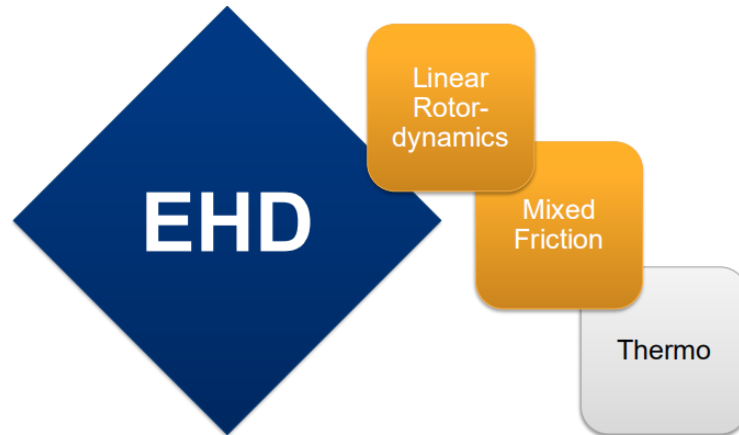
3.1 操作系统及版本

- 操作系统：Microsoft Windows 10（64 Bit）
- 对应的 ANSYS 版本：Tribo-X inside ANSYS 嵌入在 ANSYS WB 平台使用，直接利用 ANSYS WB 平台进行前后处理，支持 ANSYS 18.0 及以上版本。

3.2 功能模块

Tribo-X inside ANSYS 为滑动轴承力学特性分析以及设计优化提供了便捷而高效的工

具，包括三个功能模块，区分基本功能模块和附加功能模块：



模块		功能说明
基础功能模块	EHD (Elasto-Hydro-Dynamic) 弹性水动力模块	支持 HD 轴承分析及 EHD 轴承分析 <ul style="list-style-type: none"> ● HD 轴承分析：建立在刚性轴承表面假设的基础上，轴承表面无弹性变形，因此对润滑油间隙高度无影响，在此假设情况下进行滑动轴承分析。 ● EHD 轴承分析：可以考虑轴承刚度的特性，轴承的弹性变形会影响产生的润滑油间隙高度（取决于轴承的设计、材料和轴承的支撑以及工作条件），在此条件下进行滑动轴承分析。 <p>此模块是其他模块计算的基础。</p>
附加功能模块	Linear Rotor-dynamics 线性转子动力学分析模块	该模块用于计算速度相关的刚度及阻尼系数，来确定线性化的轴承系数
	Mixed Friction 混合润滑模块	混合润滑模块可以考虑轴承和轴的表面粗糙度对滑动轴承进行分析，载荷区分为流体动力压力和实体接触压力两部分 $P_{tot} = P_{hyd} + P_{solid}$ <p>可以计算 过渡转速（transition rotational velocity）、轴承高应力表面以及载荷的分布情况。</p>
	Thermo (Beta 版)	通过求解能量方程计算润滑间隙的温度场

	热模块	
--	-----	--

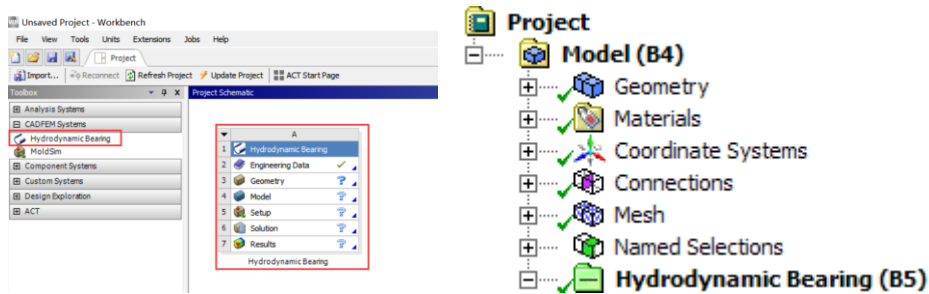
3.3 计算流程

3.3.1 前处理

1) 材料及几何模型

材料、轴承和轴的几何模型以及网格划分定义等操作基于 ANSYS Workbench 环境完成，等同于 ANSYS Mechanical 分析系统的基本操作。

其中轴承与轴之间的间隙自动识别为润滑区域，完成基于轴承几何的油膜建模，可定义轴的初始位置。



2) 有限元网格处理

在求解过程中，TrboX-inside ANSYS 映射 ANSYS 的网格生成适用于雷诺方程求解的网格，采用自己的网格，因此存在 ANSYS 轴承与轴的网格质量影响滑动轴承求解器的精度，对于网格质量建议如下：

- 轴与轴承表面的网格质量应保证足以捕获几何形状
- 建议采用带中节点的单元可以更好的描述几何形状
- 润滑供油区域的单元尺寸应足够小，在几何选择的尺寸方向至少包含三个单元



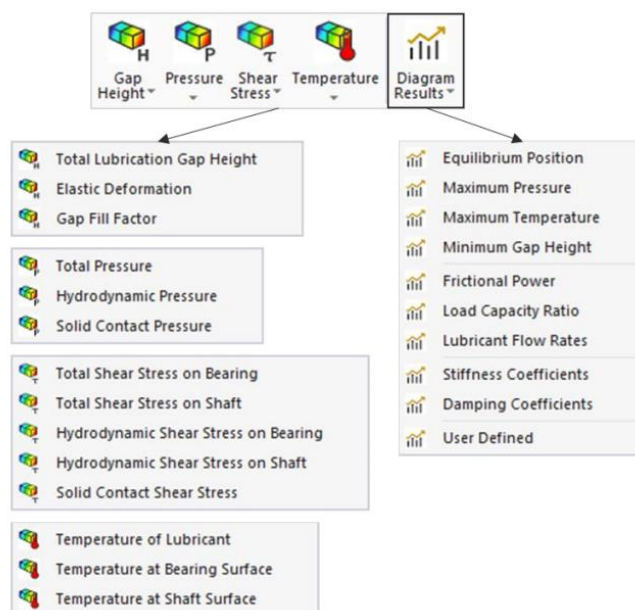
3.3.2 求解

对于滑动轴承求解，需要设定不同的边界条件：

边界条件	功能说明
轴承的定义	<p>用于确定液体滑动轴承的位置，可考虑不同轴承类型，如圆柱瓦、椭圆瓦，自动识别轴承几何特征，如斜度、弯曲、油膜间隙量，是确定轴承与轴之间润滑间隙的基础</p> <ul style="list-style-type: none"> - 自动识别轴承和轴的轮廓 - 轴承与轴之间的间隙自动识别为润滑间隙，完成油膜建模 - 可以通过设置相对偏心率和角度来确定轴的具体偏心位置
压力	考虑供油压力，用来定义润滑油的供应区域，支持任意形状的供油区域几何，支持多个润滑油供应区域
润滑材料	<p>用来定义润滑剂的材料性质</p> <ul style="list-style-type: none"> - 动力粘度 - 密度 - 润滑剂流入时的温度 - 润滑剂的蒸气压 - 环境温度
混合润滑	可以考虑轴承和轴的表面粗糙度
操作条件	<p>操作条件是用来定义滑动轴承负荷，速度或轴未对准条件。</p> <ul style="list-style-type: none"> - 轴的转速 - 载荷 - 可定义轴承不对齐
轴承的动力特性	实现动态轴承系数的计算
湍流	允许考虑润滑间隙内的湍流行为
求解器	基于输入完成求解

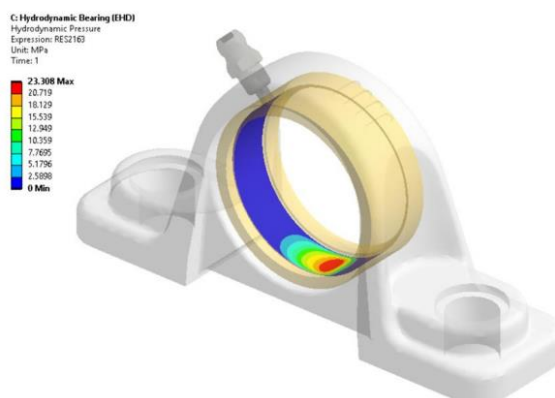
3.3.3 后处理

可以输出云图及表格的结果数据。



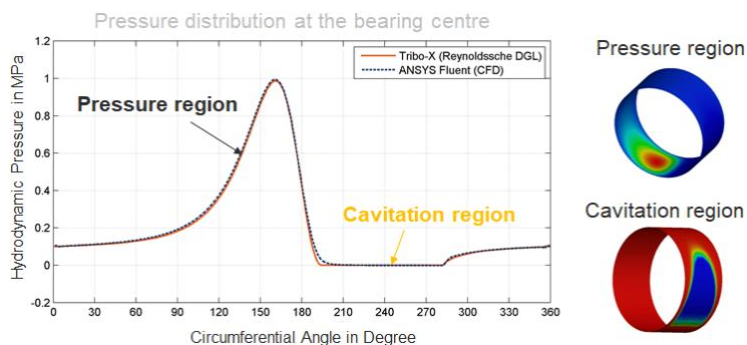
3.3.3.1 云图结果

可以展示流体动力压力、润滑间隙高度（或间隙填充比），剪应力以及温度等。



3.3.3.2 气穴区域

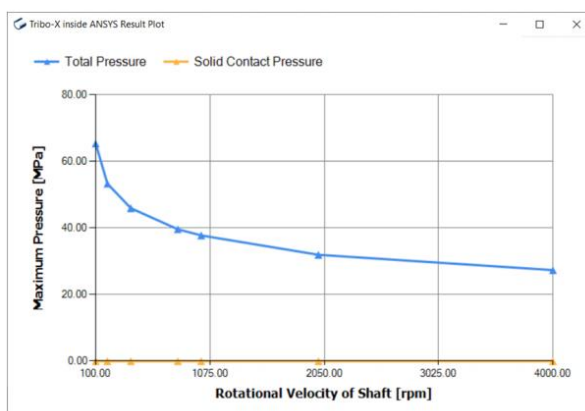
在不同的润滑间隙中会发生气穴现象，为了正确地模拟热平衡或轴承的负载能力，在 Tribo-X 中用适当的算法表示了气穴效应。



3.3.3.3 图表结果

可以显示不同类型的表结果数据:

- 最大压力
- 最小间隙高度
- 水平及垂直偏心
- 最小间隙高度处的偏心及角度
- 平衡位置的反力
- 摩擦力矩和能量 (power?)
- 承载能力比
- 润滑剂流量
- 刚度和阻尼系数
- 平均间隙填充系数
- 其他



4 Tribol-X inside ANSYS 的客户价值

- 解决了传统 CAE 方法难以计算油膜轴承的困难;
- 将滑动轴承快速求解器 Tribol-X 与 ANSYS 进行集成,可基于 ANSYS 模型进行油膜轴承计算;
- 研究轴承受力状态, 获取轴承重要参数;
- 快速精确的轴承油膜动力学分析
- 轴承弹性变形分析
- 轴承表面粗糙度混合摩擦分析
- 轴承刚度/阻尼系数计算, 与转子动力学分析集成
- 统一的集成环境: ANSYS Workbench
 - CAD 集成, 实现参数化设计
 - optiSlang 集成, 实现参数敏感性与优化分析