

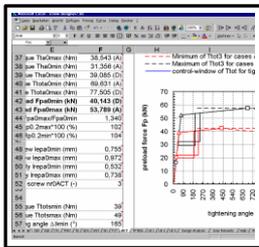
简介

锡根大学的MVP学院



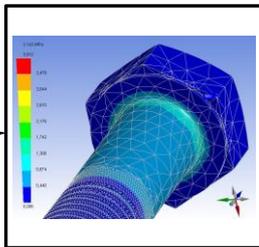
- MVP是机械零部件, 紧固件系统、产品革新行业界的优秀代表
- 我们是锡根大学机械工程学院的一员。这意味着我们可以为客户提供讲座, 组织研讨会, 用公共资金进行研发项目, 以及与业界的研究伙伴合作 (在几个分支中使用多元化网络进行合作)。
- 我们工作的两个重要工具是: 仿真实验室(分析和数值计算) 和检测实验室(实验验证, 主要有装配试验、振动试验。)

analytical simulation



understanding of
- basic mechanical systems
- local effects
- relationships between parameters
- etc.

numerical simulation



quantification of
- inhomogeneities of stresses, deflections
- local effects
- nonlinearities

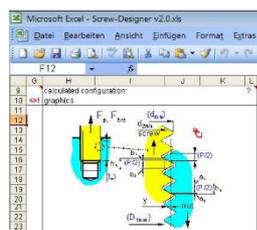
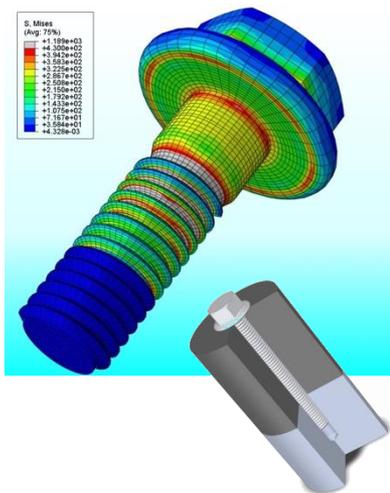
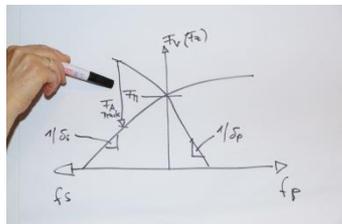
experimental verification



ensuring of
- behavior in reality
- covering all uncertainties

简介

AFS 为工业提供支持



Screw-Designer



- AFS是现代的工程机构，注重于为客户提供最有效的服务。
- 这意味着在产品的创新方面有三个重要领域：
 - 包含紧固在内的寿命工程
 - 复杂性仿真
 - 互动研讨会
- 深远的学术专长。
- 多年的工业支持项目经验(在AFS成立之前)。
- 在全球有多个公司为满足不同地方客户需求。(也可以使用发达的通讯技术进行交流)
- 我们为您提供有效的支持，所以您可以专注于您的主要工作，生产我们所有需要的创新产品

慧眼科技



基于有限元分析的螺纹连接仿真基础

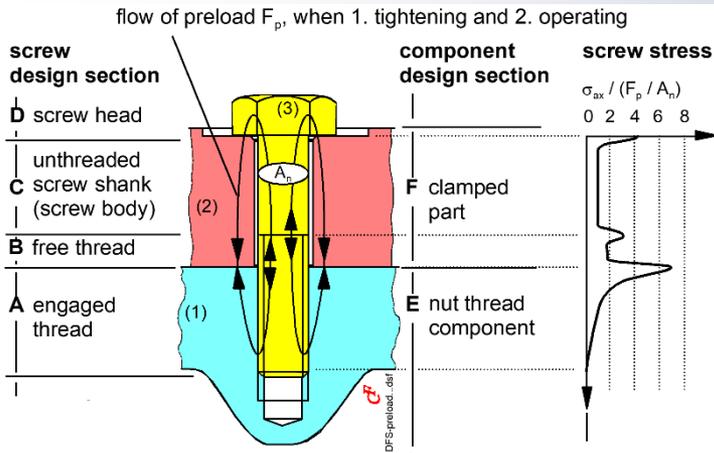
目录

主题	
何谓有限元分析?	有限元分析基础
何谓模拟模型?	采用数学模型来展示一个系统
有限元能提供何种螺栓分析信息?	与解析计算方法的比较
如何验证有限元模型?	建模及验证的技术
有限元模拟对螺纹连接有何重要性?	有限元分析的优势 – 展示负载变形行为
如何对螺栓进行模拟的建模?	案例：带4个螺栓的齿轮泵
螺纹连接先进模拟技术	有限元分析结果与分析评估相结合 案例：热负载 案例：振动负载 高应力应用相关



FEA螺栓连接有限元仿真基础

螺栓连接的原理和功能



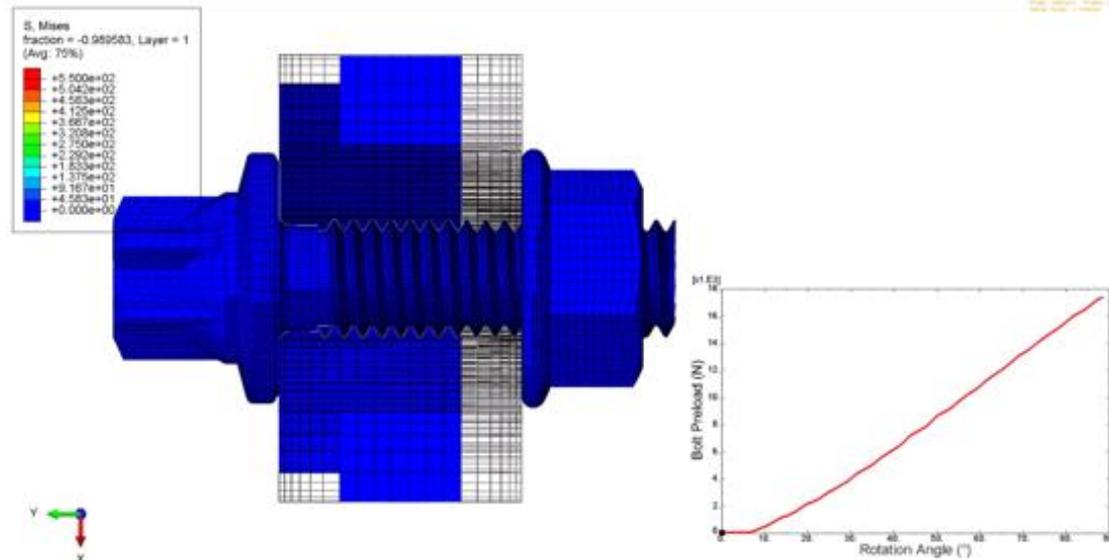
- 螺栓连接工作时会形成闭合的受力回路。
- 在拧紧过程中螺栓发生拉伸变形而被连接件发生压缩变形
- 在装配过程中螺栓会产生预紧力 F_p ，而被连接件会在接触面产生夹紧力 F_k 。

在工作状态下受到不同的外载荷

是 $F_k \neq F_p$

螺栓连接的功能:

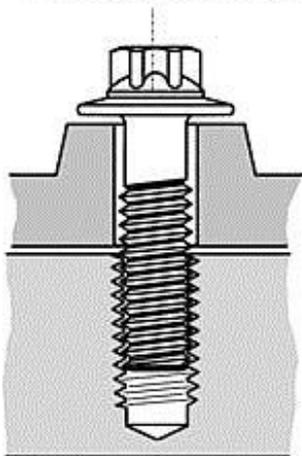
- 维持最小的夹紧力
- 拆卸和重复利用



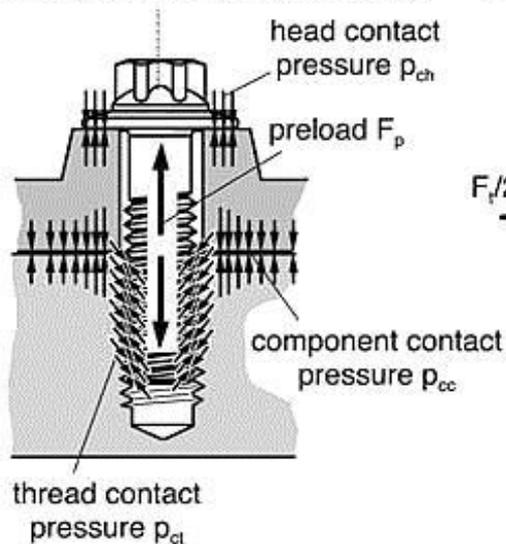
FEA螺栓连接有限元仿真基础

不同的机械载荷

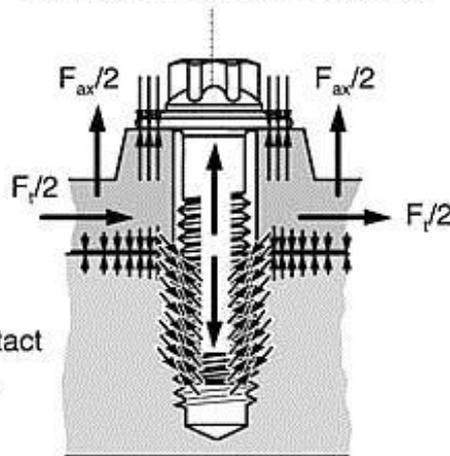
before tightening
without loading



after tightening
without mechanical loading



after tightening
with mechanical loading



– 任何螺栓连接点一般会受到两种不同方向的机械载荷:

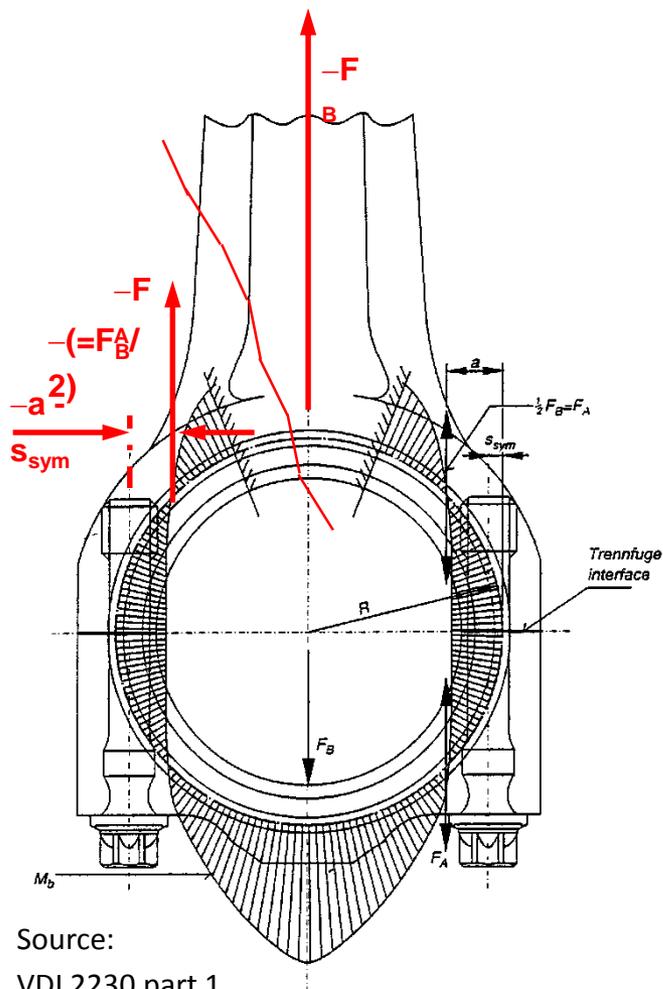
- 沿螺栓轴向的轴向载荷 F_{ax}
- 垂直于螺栓轴向的横向载荷 F_t

– 拧紧过程中的预紧力和外部的轴向载荷会造成连接位置存在应力，因此必须要考虑到螺栓的承载能力

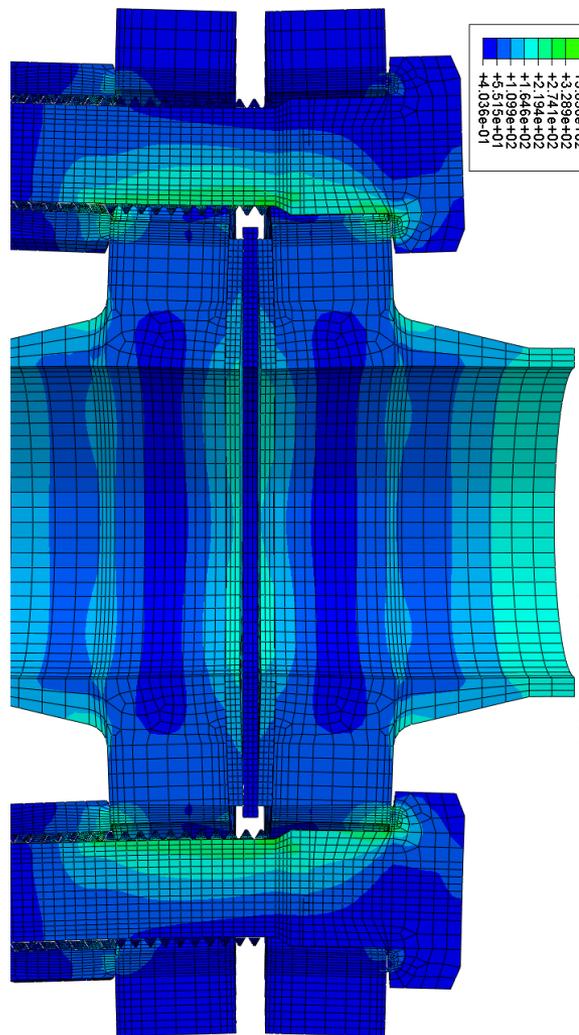


FEA螺栓连接有限元仿真基础

螺栓连接受偏心载荷



Source:
VDI 2230 part 1



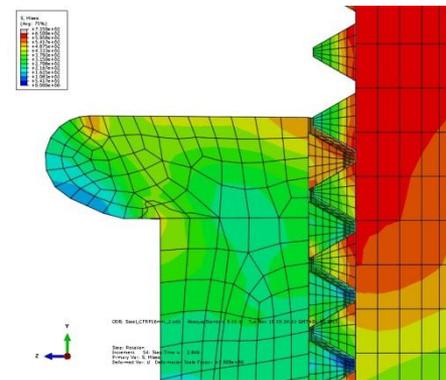
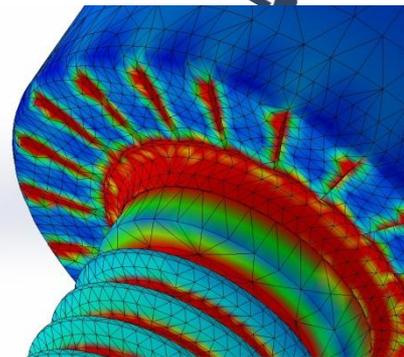
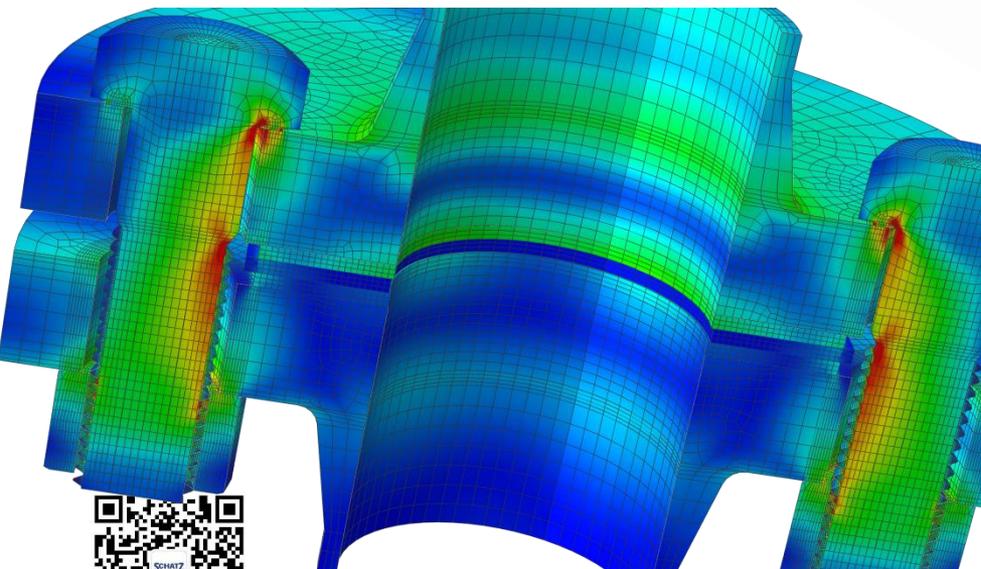
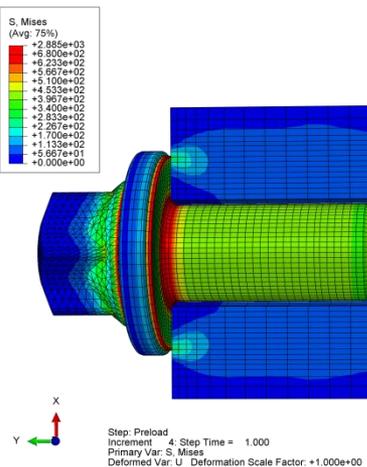
Source: Workshop VGB, Schrauben-
und Dichtungstechnik, Bielefeld, 2016

- 偏心性一般指受力区域或螺栓周围分布不均匀
- 导致偏心的原因可能是偏心的夹紧力或偏心的工作载荷
- 偏心一般会导致螺栓承受弯曲载荷, 会降低承受外载的能力。
- 因此在设计的时候必须要考虑偏心载荷。

1. 螺纹连接有限元仿真的重要性

需要对螺栓连接点进行有限元仿真

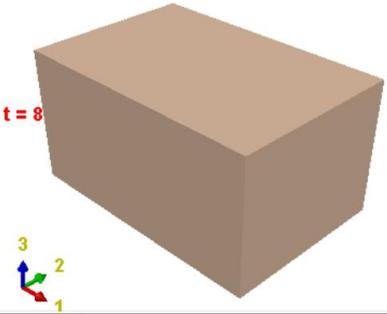
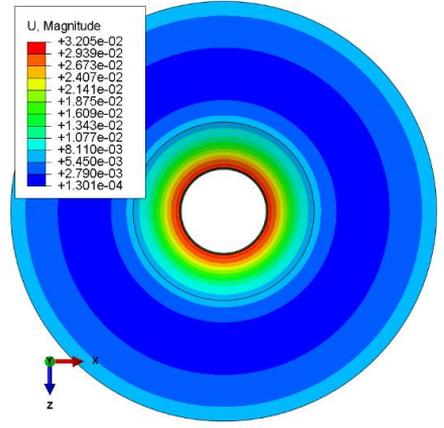
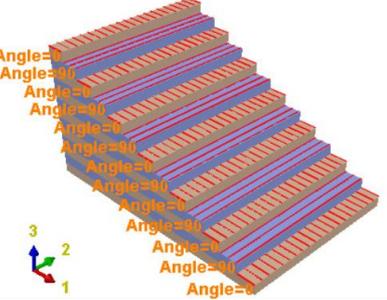
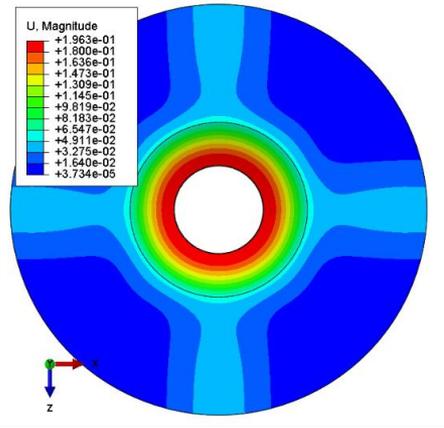
- 包含受力变形行为(LDB)
- 结合不同的受力类型和失效机制分析
- 克服计算分析的局限性
- 零件的虚拟测试和可视化
- 为解决问题进行设计的改进



1. 螺纹连接有限元仿真的重要性

均质材料和非均质材料的区别

碳纤维增强复合材料和铝合金的受力变形行为

Materials	Deformation plot	Assembly test
EN 7075-T6 Elastic-plastic, Isotropic, Homogeneous 		
T300-EP; Elastic, 13 layers 0/90 deg orientation (thickness = 0.61 mm) 		

– 均质的金属材料正在日益被像三明治结构和纤维增强高分子结构非均质材料取代.

– 这可能会影响结构的荷载变形行为

– 图像显示了不同材料夹紧零件的变形图应力分布

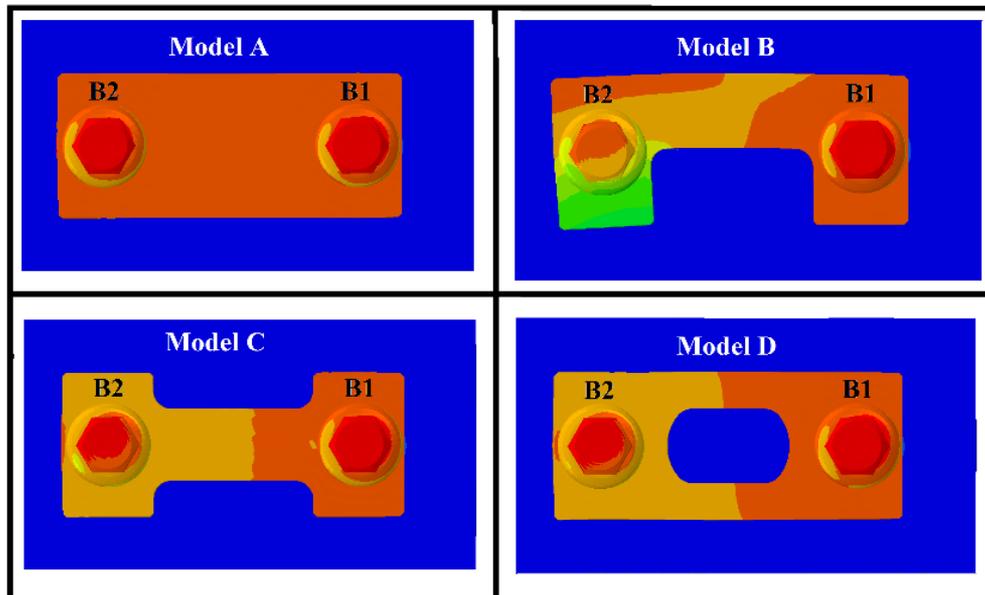
Source: SAE J1130: Contact mechanics of bolted joints with CFRP

comparison. Final report 2013.

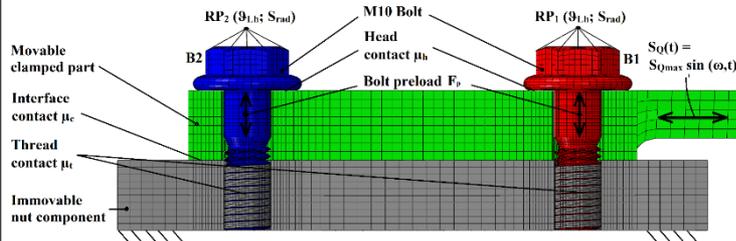
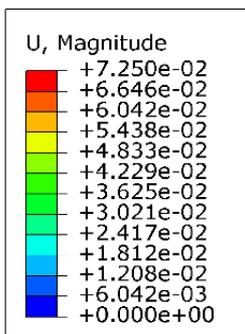


1. 螺纹连接有限元仿真的重要性

两点连接的受力变形行为



Legend



- 图中显示了两个螺栓连接的4个设计
- 夹紧长度= 15 mm
- 螺栓预紧力= 25 kN
- 最大振幅= 0.07 mm 的正弦波载荷
- 夹紧件的受力变形行为会影响螺栓的受力性能

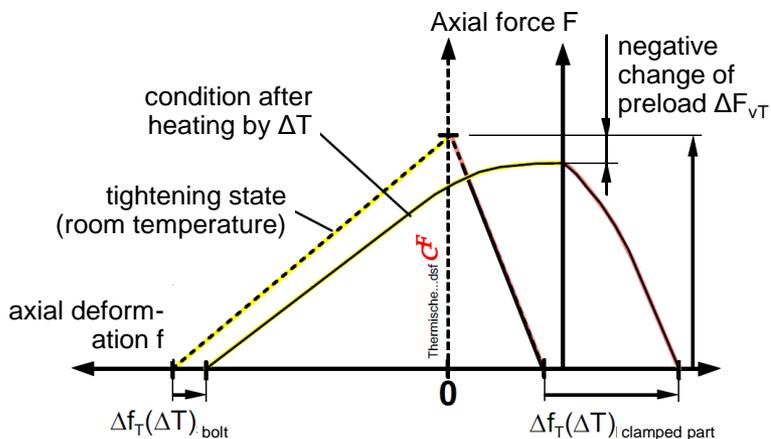
在模型A中，两个螺栓都受相同的横向力

- 在模型B中，一个螺栓受到横向力和一个弯矩

- 在模型C和模型D中，夹紧零件的受力变形行为降低了一个螺栓的载荷。

1. 螺纹连接有限元仿真的重要性

不同受力类型和失效机制的结合



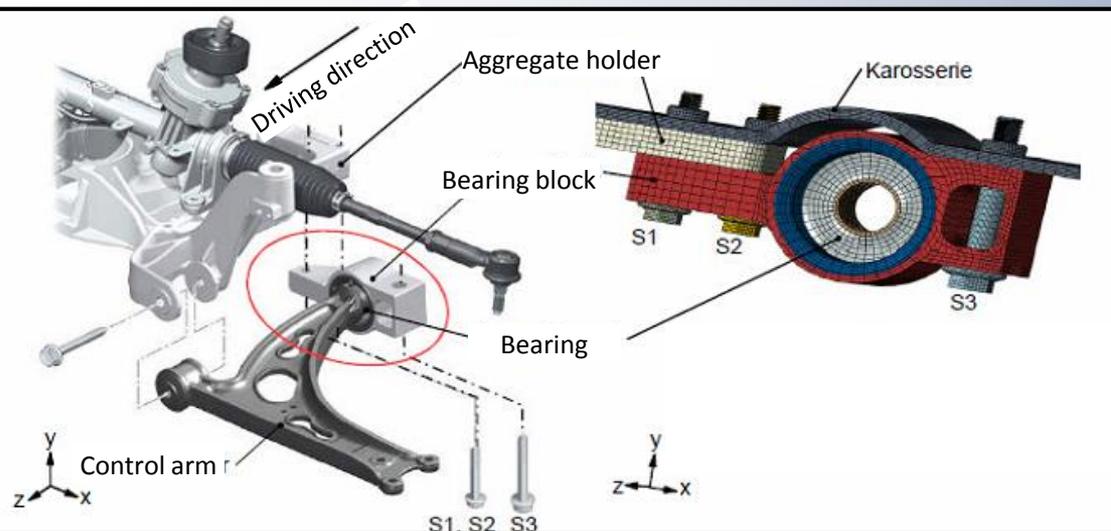
- 使用FEA可以很容易地实现不同负载类型的组合
- 某些零件经常同时受到热载荷和机械载荷，如连杆螺栓
- 由于轻量化设计，不同的材料被夹在一起-这导致材料复杂的热交换
- 预紧力松弛和自松的结合



Source: Prof. Christoph Friedrich, MVP

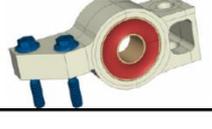
1. 螺纹连接有限元仿真的重要性

虚拟测试和改进设计



- 虚拟测试通过避免原型零件成本和有限的制造成本来节省资金
- 通过改变设计可以快速评估，以识别问题并解决问题。
- 左侧的例子展示了一个控制臂支座的设计
- 通过节约成本和提高可靠性分析相结合，通过仿真可以有效地实现轻量化设计

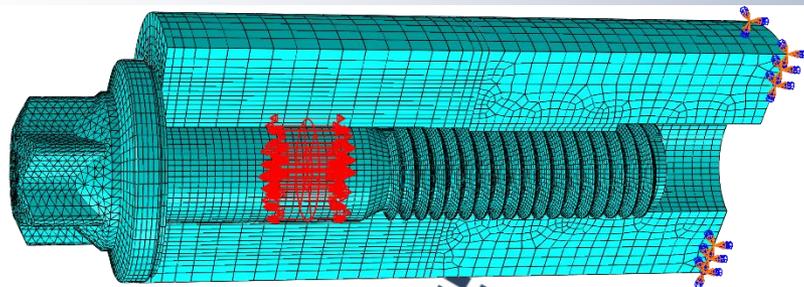
Source: From Self-loosening of bolted joints in lightweight design - computational determination and prevention through engineering design of fastening system. DVM 2011 (in German).

Variation	Material	Weight
V1 (Actual) 	Aluminium EN AW 6082	0,995 kg
V2 (only 2 bolts) 	Aluminium EN AW 6082	0,897 kg
V3 (light weight design) 	Magnesium mit Aluminiumhülsen (Verbundguss; Durchmesser 24 mm)	0,629 kg (- 37 % gegenüber V1)

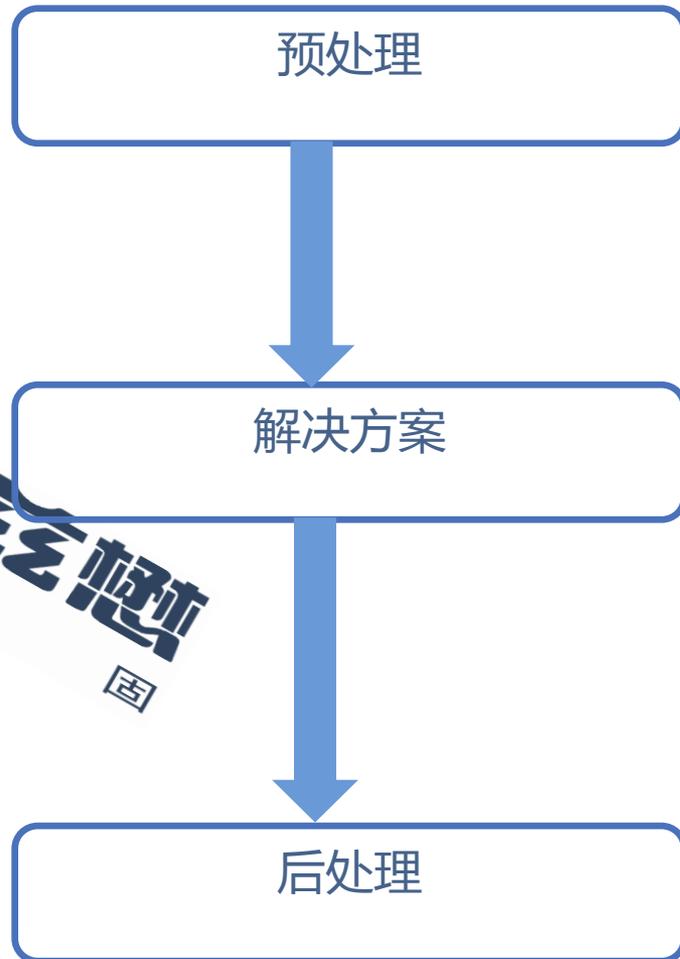
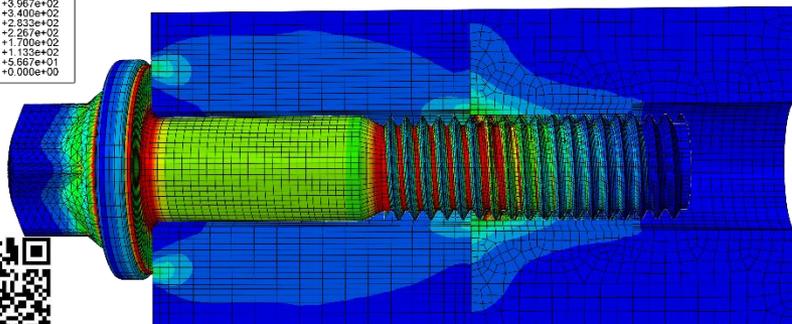
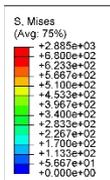


2. 螺纹连接有限元仿真简介

有限元方法的基本步骤



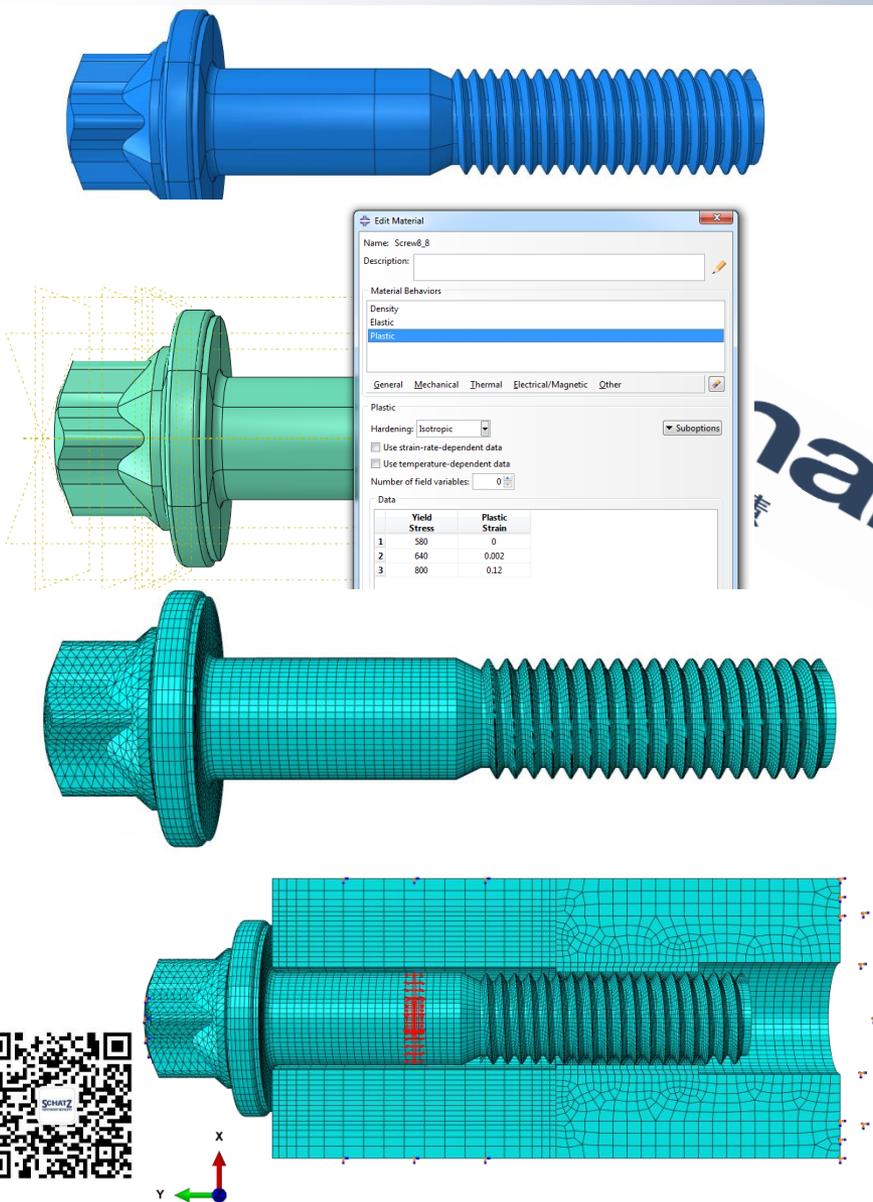
$$\begin{bmatrix} -1 & -\frac{53}{18} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{56}{9} & -\frac{53}{18} & 0 \\ 0 & -\frac{53}{18} & \frac{56}{9} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{53}{18} & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \left. \frac{d\bar{u}}{dx} \right|_{x=0} \\ u_2 \\ u_3 \\ \left. \frac{d\bar{u}}{dx} \right|_{x=1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{53}{18} \\ -\frac{28}{9} \end{Bmatrix}$$



Step: Preload
Increment: 4, Step Time = 1.000
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00

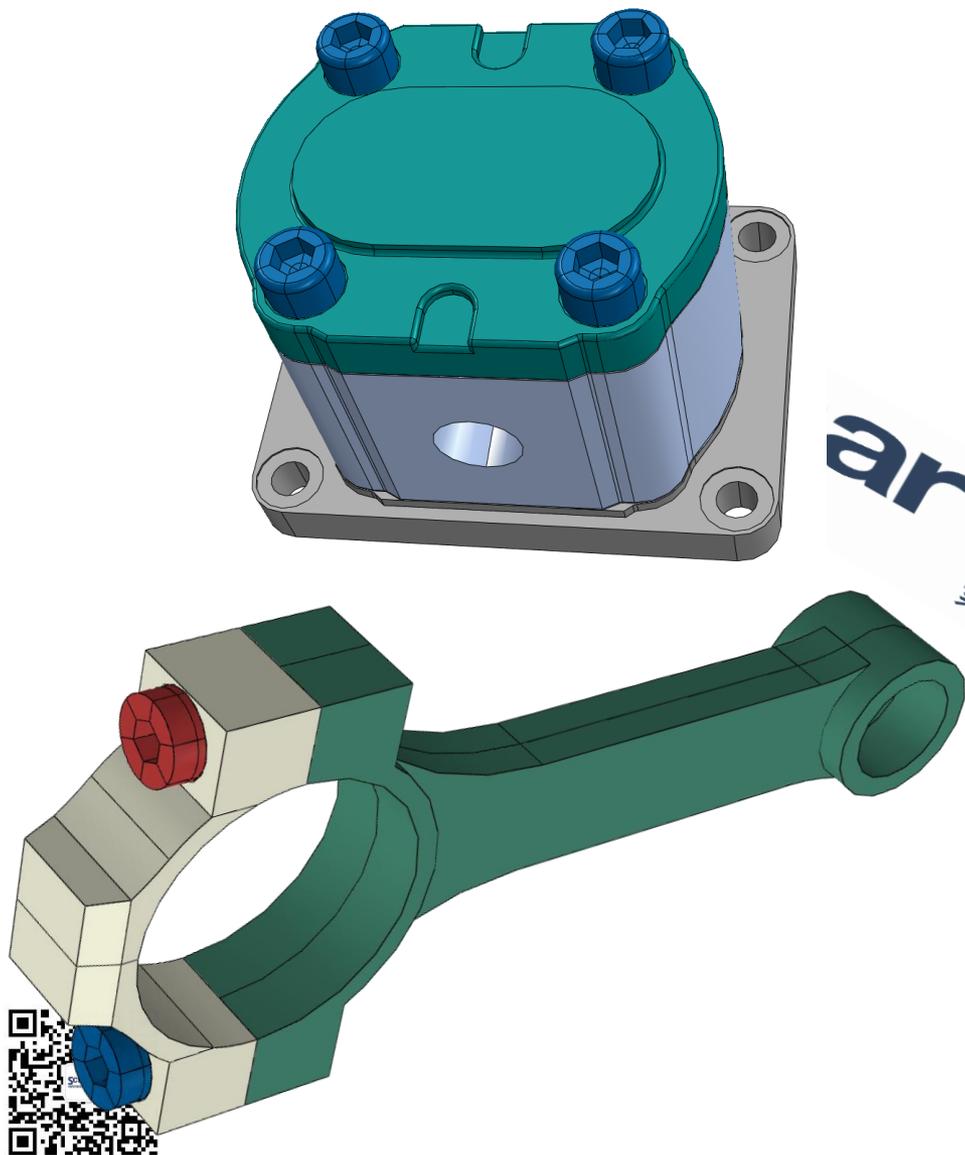
2. 螺纹连接有限元仿真简介

预处理 – 非常重要的环节



2. 螺纹连接有限元仿真简介

创建或导入零件

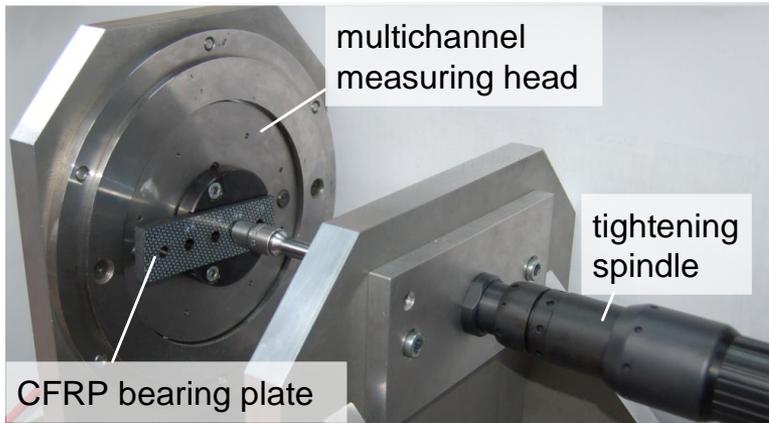


- 使用CATIA, Pro-E, Solidworks等CAD工具可以方便地创建三维零件和几何图形
- 文件格式标准, 如IGES(初始图形交换规范)和STEP(产品模型数据交换标准), 可用于将CAD工具中的零件和组件导出到FEA工具, 如Abaqus和Ansys。
- 一些产品应考虑在数据传输过程中信息的丢失
- 一些CAD工具可以直接导入原始文件格式

art
艺
之
创
造

3. 螺纹连接有限元仿真简介

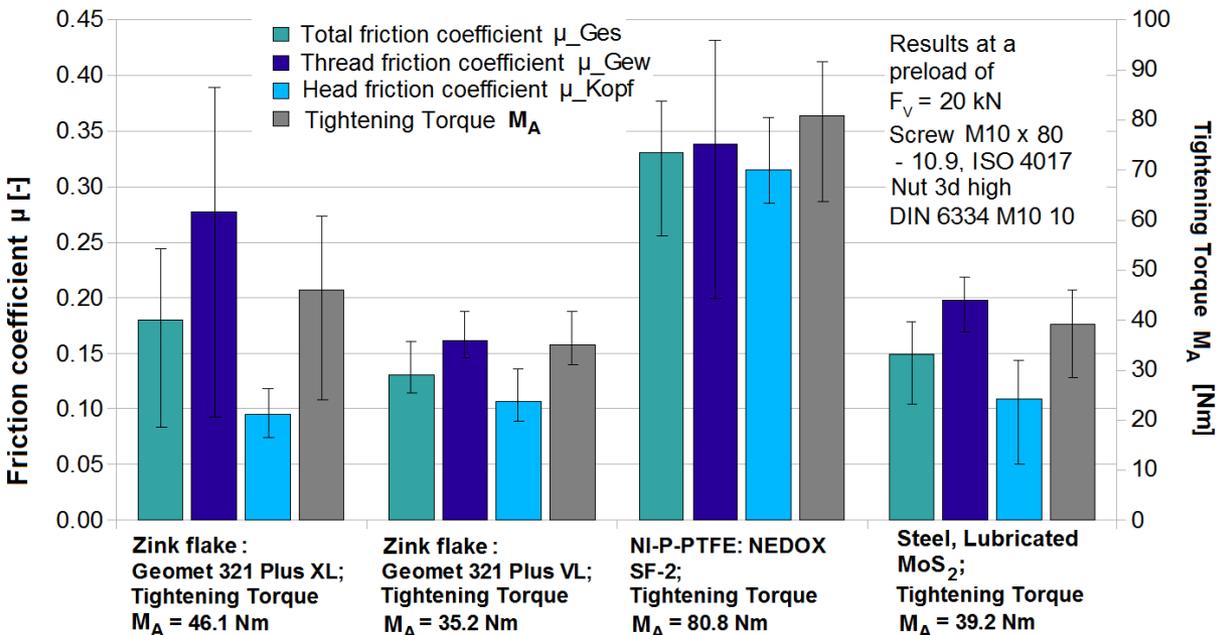
摩擦系数通过测试获得



- 可以测量摩擦系数;取决于接触区(材料, 润滑, 压力, 速度)
- 摩擦的变化影响连接状态
- 在使用新材料、表面粗糙度、涂层、清洗过程时, 建议按照 ISO 16047标准进行摩擦系数测

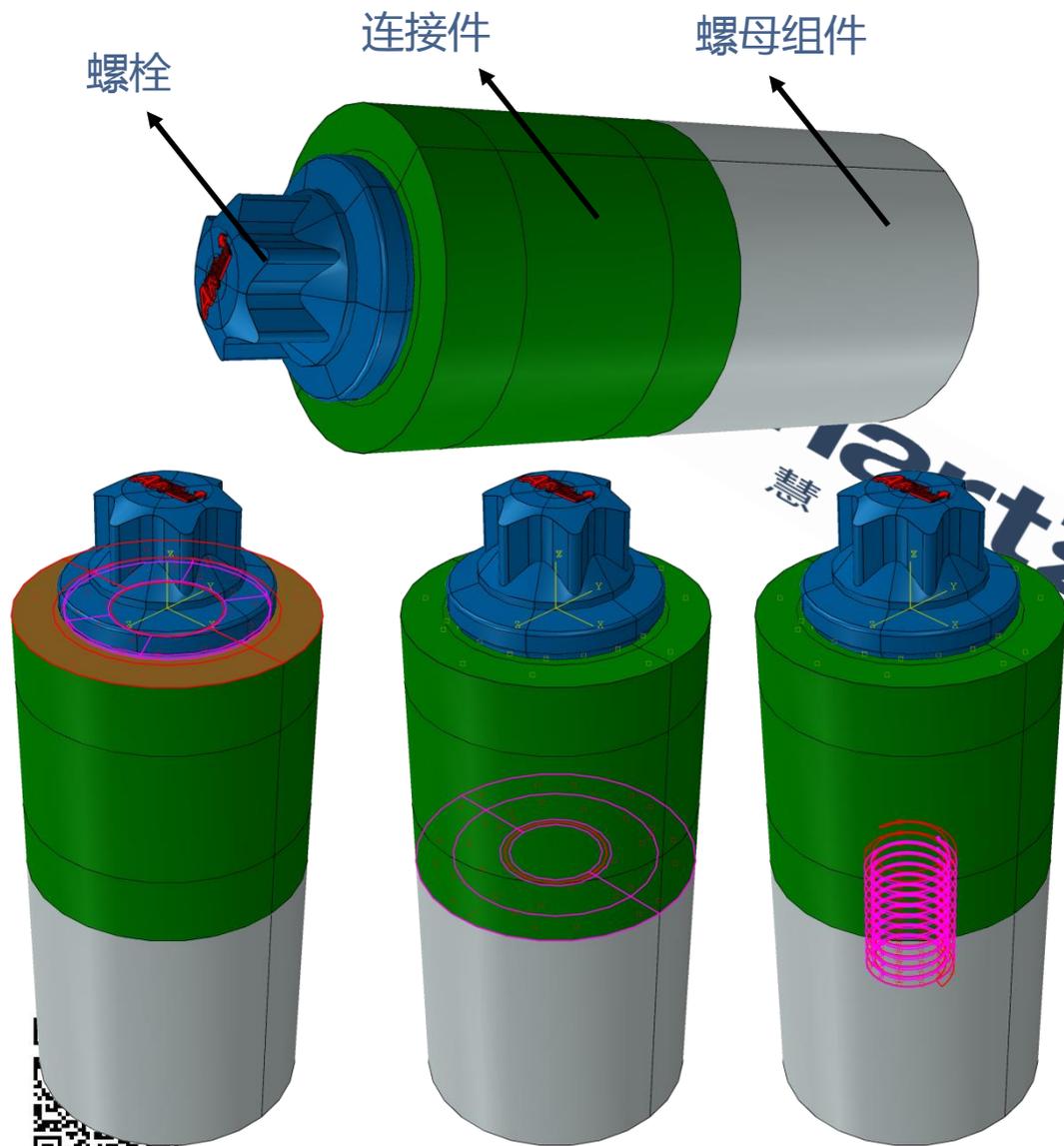


一些点的值可以参考标准使用。



3. 螺纹连接有限元仿真简介

接触定义



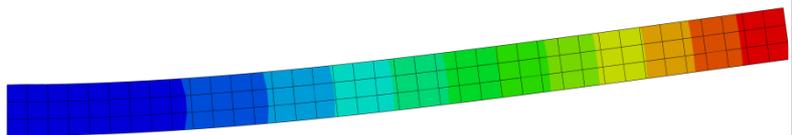
- 一个典型的螺栓连接将有三个接触界面
- 螺栓头部和被连接件
- 零件间的接触面，螺母与零件接触面
- 螺栓螺纹和螺母螺纹接触面
- 在大多数情况下，带有表面到表面离散化的小的滑动模型公式足以进行模拟
- 通过公式可以有效地描述摩擦和正常行为

3. 螺纹连接有限元仿真简介

收敛性检验

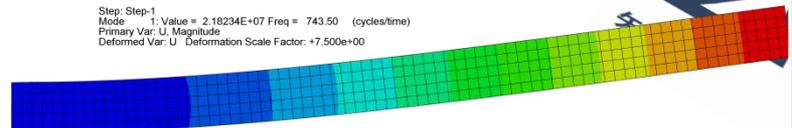
元素大小 (mm)	第一自然频率 (Hz)
2	743.5
1	735.24
0.5	733.96
0.25	733.57

- 第一次建立的有限元模型可以进行收敛性检验。
- 这里的例子展示了一个长度为75mmx5mm x 5mm的矩形钢筋截面
- 有限元模型的网格被不断地细化，直到问题的解决方案没有显示出显著的变化。



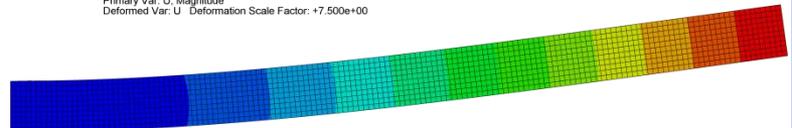
ODB: conver_2.odb Abaqus/Standard 6.13-6 Mon Oct 08 18:28:27 GMT+02:00 2018

Step: Step-1
Mode 1: Value = 2.18234E+07 Freq = 743.50 (cycles/time)
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +7.500e+00



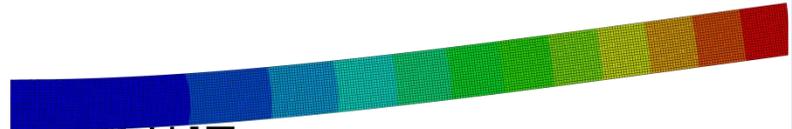
ODB: conver_1.odb Abaqus/Standard 6.13-6 Mon Oct 08 18:34:32 GMT+02:00 2018

Step: Step-1
Mode 1: Value = 2.13413E+07 Freq = 735.24 (cycles/time)
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +7.500e+00



ODB: conver_0p5.odb Abaqus/Standard 6.13-6 Mon Oct 08 18:36:05 GMT+02:00 2018

Step: Step-1
Mode 1: Value = 2.12678E+07 Freq = 733.98 (cycles/time)
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +7.500e+00



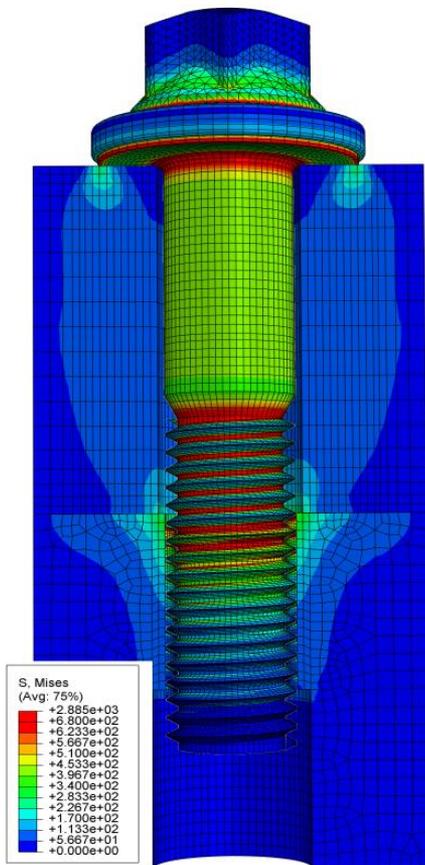
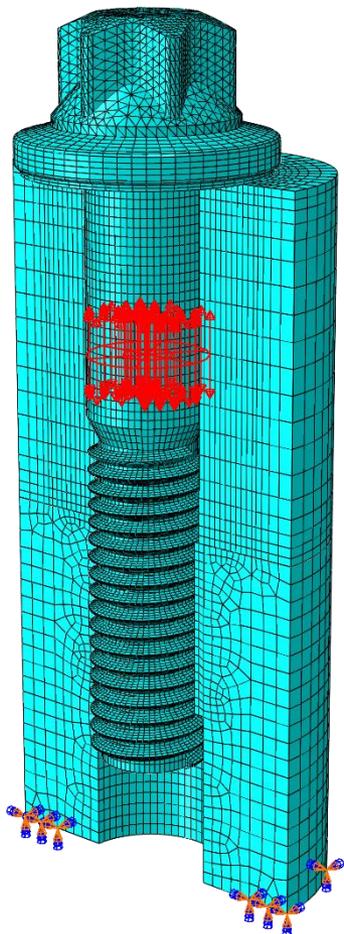
ODB: conver_0p25.odb Abaqus/Standard 6.13-6 Mon Oct 08 18:47:09 GMT+02:00 2018

Step: Step-1
Mode 1: Value = 2.12595E+07 Freq = 733.57 (cycles/time)
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +7.500e+00



3. 螺纹连接有限元仿真简介

预紧力的引入



Y
↑
X →

Step: Preload
Increment 4; Step Time = 1.000
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

— 对于螺栓连接的有限元模拟，必须在连接中加入螺栓预紧力。这可以通过受拉力的截面施加，在Abaqus和ANSYS，会有相应的模块

— 在其他模块中，这可以使用一个虚拟的热膨胀系数来实现，在室温或通过冷却以收缩螺栓施加力。这对于多螺栓系统来说是很困难的。

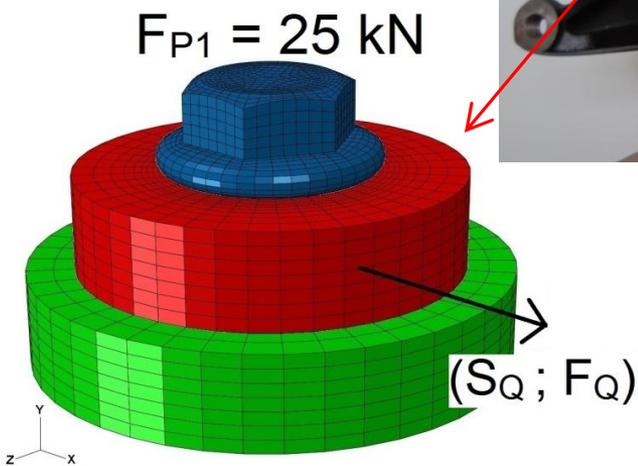
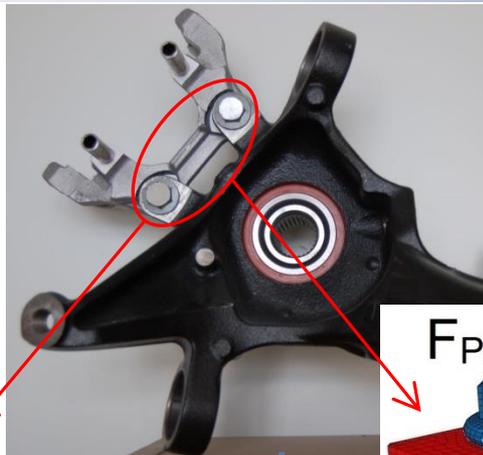
拧紧
固

— 在Abaqus(左边的例子)中，这可以通过内置的螺栓卸载函数来执行



3. 螺纹连接有限元仿真简介

抽象建模-多螺栓连接

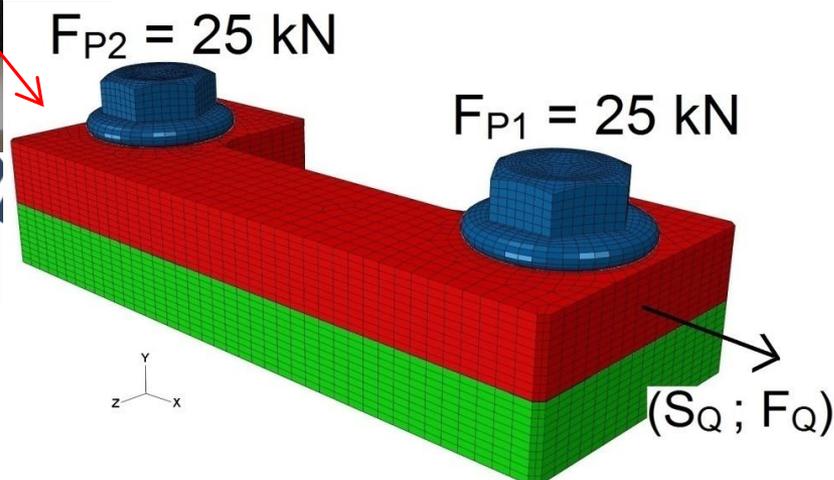


抽象为单个螺栓连接

无多螺栓相互作用的影响，计算简单



Source: Self-loosening behavior of multi bolted joints.



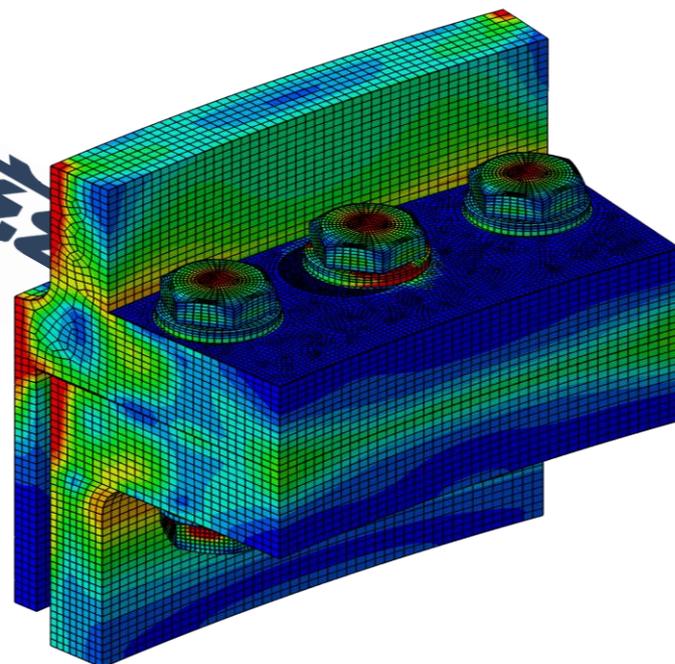
抽象为多螺栓连接，螺栓之间的距离= 75 mm

更精确确定行为，特别是对于高利用率和/或轻量化设计(受载变形特性)).

3. 螺纹连接有限元仿真简介

抽象建模-减少大型模型

- 在诸如风塔这样的工程结构中，许多零件存在于一个装配组件中
- 减少尺寸可以有效的提高时间效率

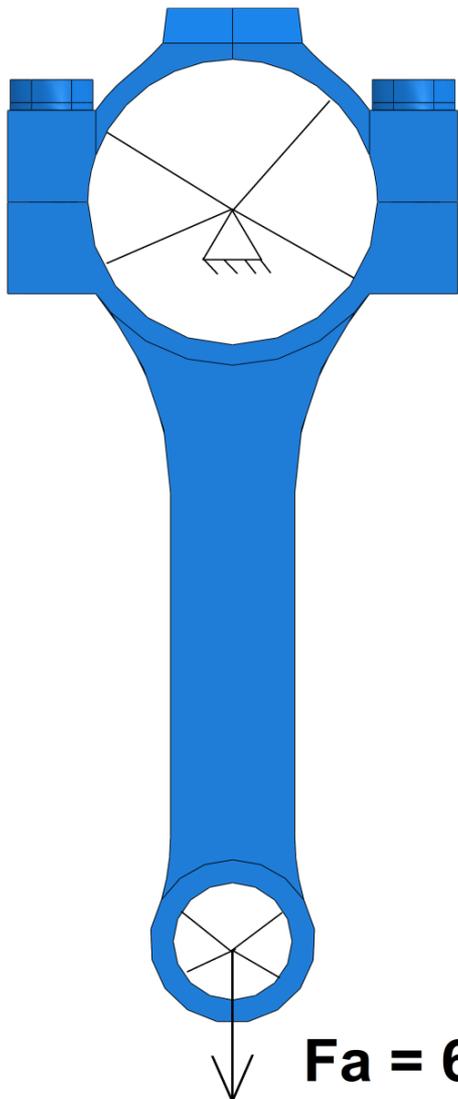


- 为了实现逼真的模拟运行时间，需要进行一些抽象



3. 专题讨论 – 连杆螺栓分析

案例描述



■ 应评估连杆螺栓是否能够承受来自最大轴向力 F_a 的产生的荷载

■ 数据：

- ◆ 2个M10x35 10.9螺栓
- ◆ 2件由铝7075制成的连杆
- ◆ 无螺母，内螺纹连接
- ◆ 每一个都拧紧至扭矩 $M_A = 50 \text{ Nm}$

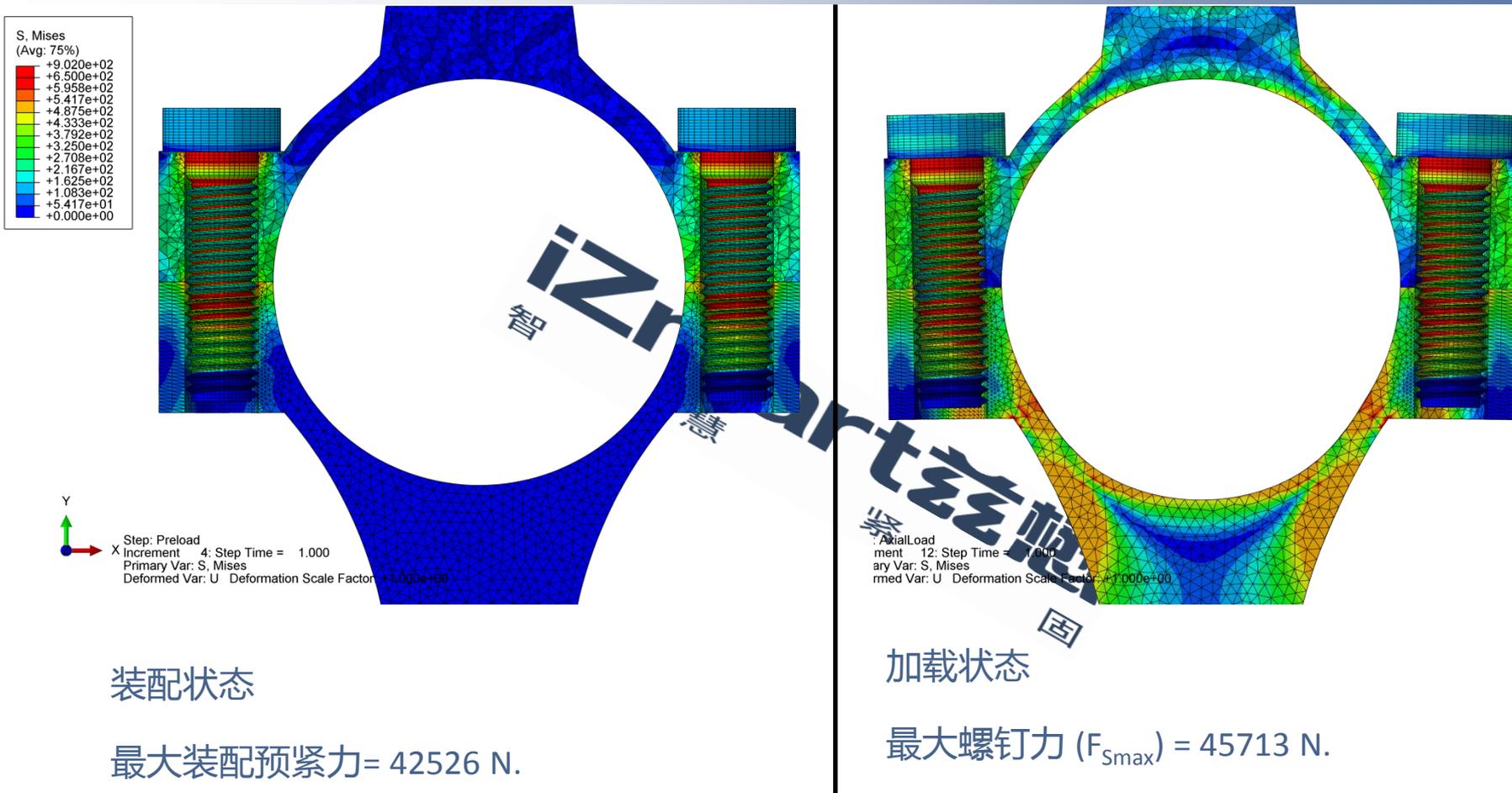
$F_a = 60 \text{ kN}$

mart 兹 固



3. 专题讨论 – 连杆螺栓分析

采用有限元仿真进行扩展分析



❖ 通过分析计算，我们知道 $F_{S_{max}}=50000N$ 时达到屈服点

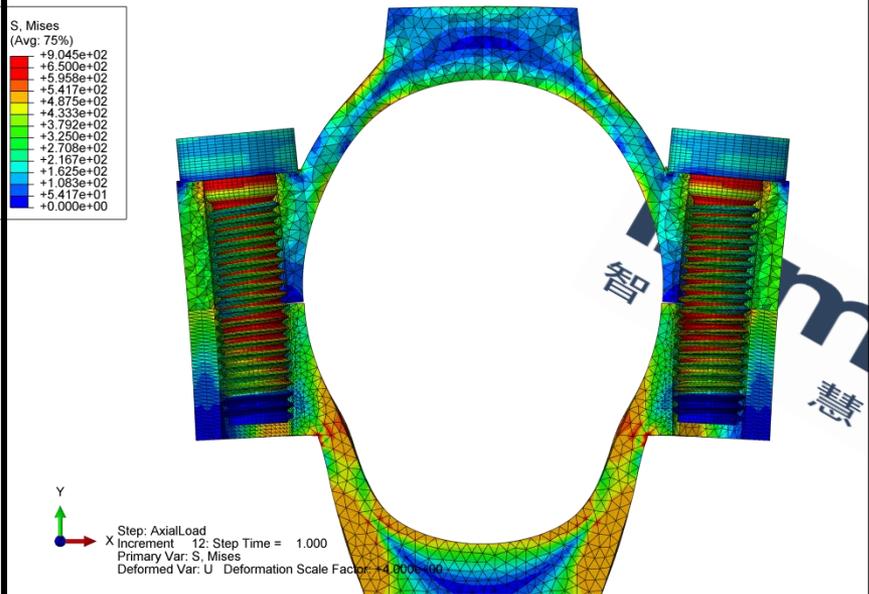
因此，对于最大负载为60kN，设计是安全的



4.专题讨论 – 连杆螺栓分析

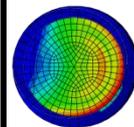
有限元扩展分析-弯矩

静荷载为60kN，变形尺度因子为4

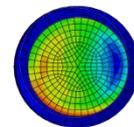


螺栓的弯曲可以直观地反映出来

- 拉伸应力图显示最大差525MPa的弯曲
- 弯曲疲劳极限分析应采用解析数值耦合的方法

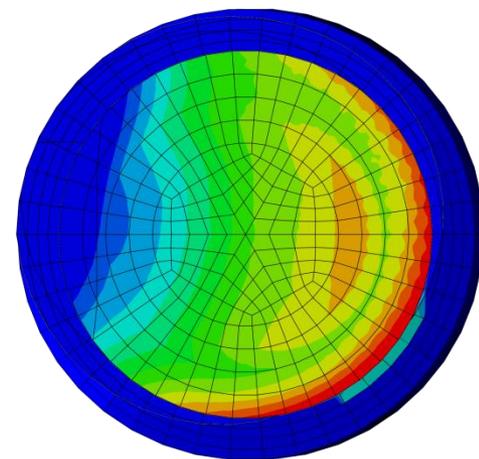
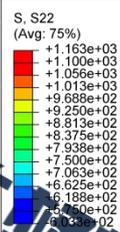


顶部视图显示了两个螺栓的弯曲应力



Step: AxialLoad
Increment 12: Step Time = 1.000
Primary Var: S, S22
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

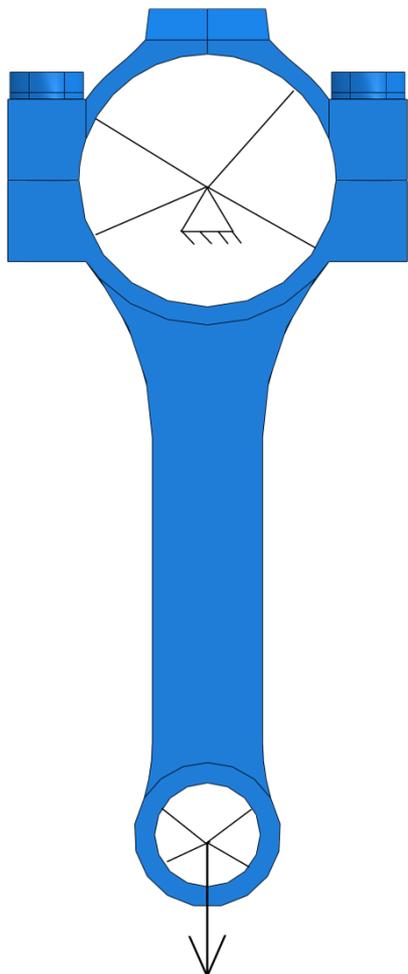
顶部视图显示弯曲应力在一个螺栓



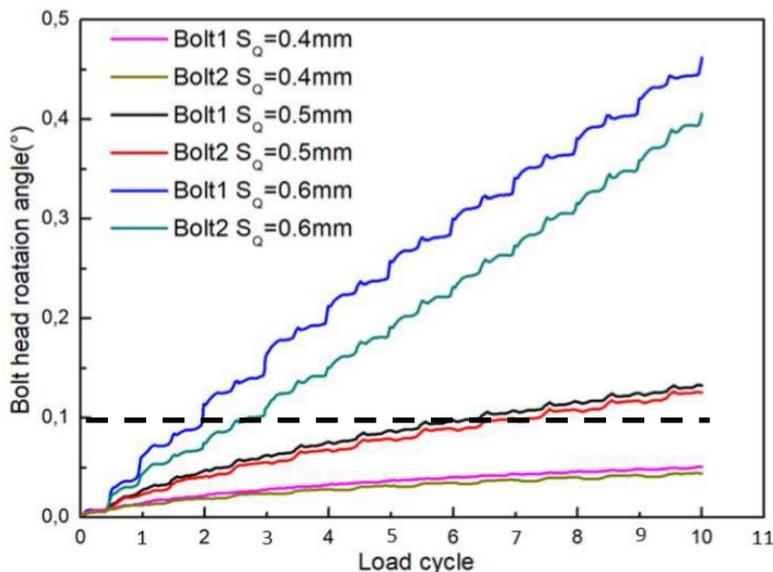
Step: AxialLoad
Increment 12: Step Time = 1.000
Primary Var: S, S22
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

4.专题讨论 – 连杆螺栓分析

有限元扩展分析-自松松动



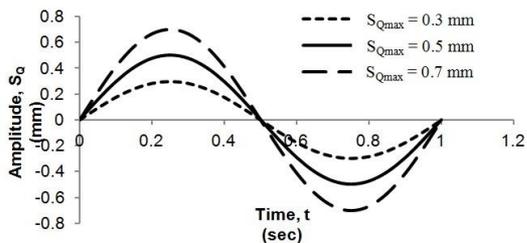
$$S_Q = S_{Qmax} \sin(\omega t)$$



自松评价的关键角度 $\theta_{LH} = 0.1^\circ$

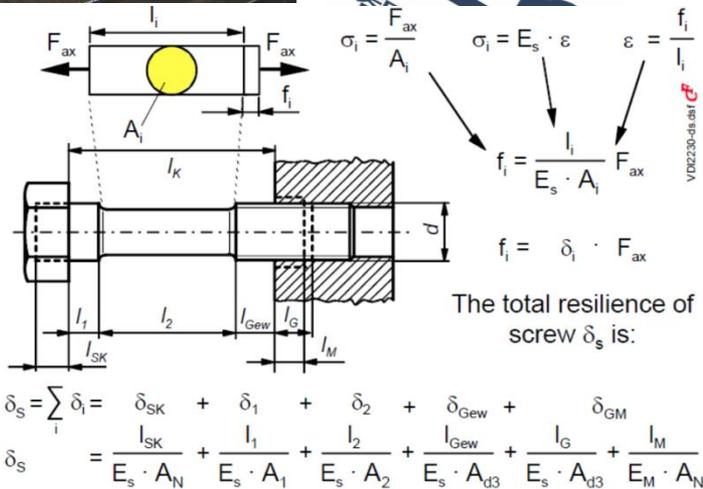


- 有时连接螺栓会发生自松
- 利用正弦位移对连杆模型进行自松解分析
- 螺栓头处可观察到松动角
- 极限值 $S_{关键} = 0.5\text{mm}$ ，对应的轴向荷载 $F_a = 30\text{kN}$



5. 螺栓有限元仿真建模

螺栓连接的技术验证



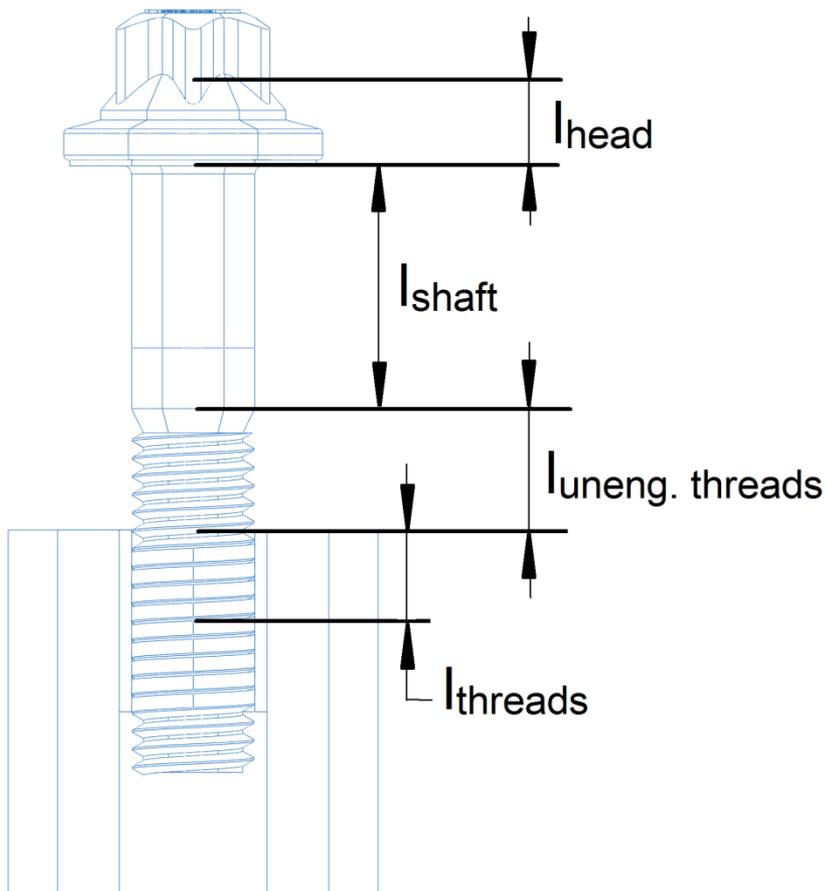
Source:
VDI 2230
part 1

- 网格收敛检验是建立有限元模型的第一步
- 在此之后，需要某种形式的验证以确保系统显示正确的行为
- 这可以通过比较模型的行为和系统的已知行为来实现
- 对于FEA的螺栓连接评估，必须对螺栓和/或夹紧部件的刚度进行全面评估
- 进一步可与实验结果进行比较



5. 螺栓有限元仿真建模

根据VDI 2230计算螺栓的柔度



- 通过将螺栓划分为几个等效圆柱区域，可以计算出螺栓的柔度
- 螺栓变形的主要区域是夹紧长度区域
- 将螺栓头和螺纹啮合区域作为进一步的变形区域，不考虑螺栓的完整长度
- 柔度可以用下式表达

长度变化
预紧力

Artzt
螺栓紧固

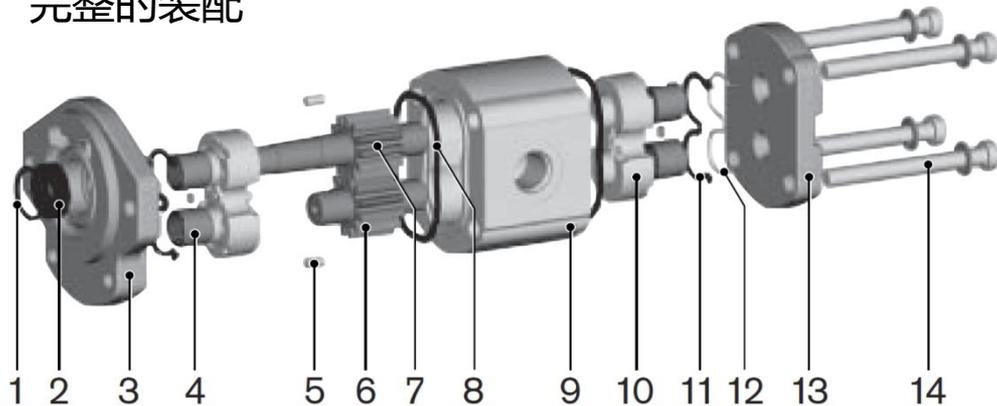
- 圆柱型轴向螺栓的柔度 $f_{bolt} = l / (E \times A)$; 其中 l 是构件的长度， E 是螺栓材料的杨氏模量， A 是截面面积



7. 齿轮泵详细分析

四个螺栓连接的齿轮泵案例

完整的装配



仿真零件



Legend

- | | |
|-------------------|--------------------|
| 1 Retaining ring | 8 Case seal |
| 2 Shaft seal ring | 9 Pump case |
| 3 Front cover | 10 Bearing |
| 4 Slide bearing | 11 Axial zone seal |
| 5 Centering pin | 12 Support |
| 6 Gear (driven) | 13 End cover |
| 7 Gear (drive) | 14 Fixing screws |



- 对一个含有4 x M10螺栓的齿轮泵进行设计失效模式分析，和螺栓连接分析
- 我们使用5个前面描述模型来比较FEA不同模型类的结果
- 通过考虑螺栓预紧力流中的部件，对模型进行了简化

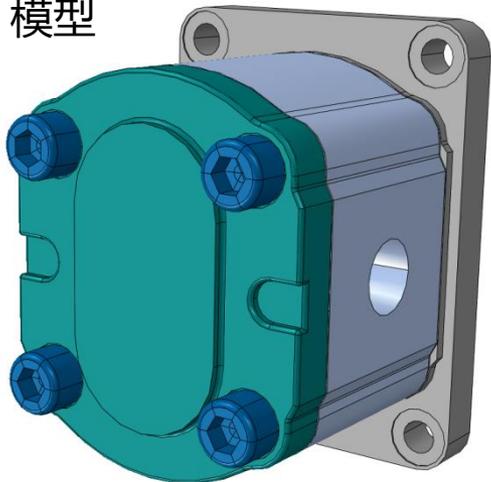
排除内部构件，这些部件对螺栓受力无影响。

固

7. 齿轮泵详细分析

模型和边界条件设置

模型

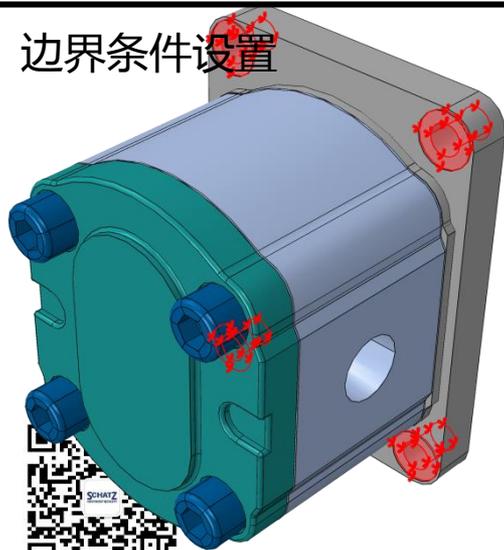


网格

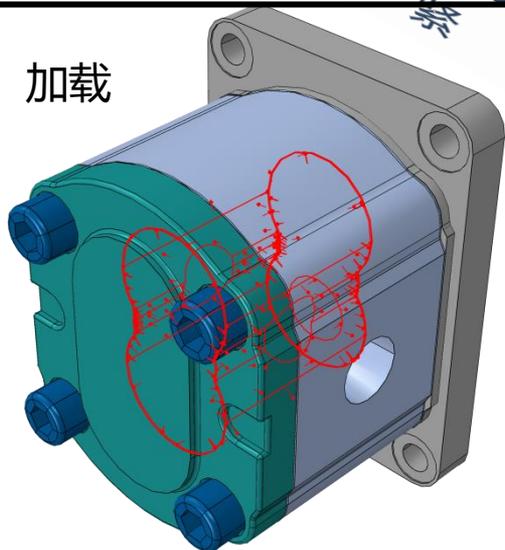


- 泵的FEA模型基于模型类，由706k到970k的单元组成
- 螺栓等级设定为8.8级
- 密封圈是指定性能的PTFE材料
- 其他零件是低碳钢
- 泵壳在使用过程中最大压力可达30bar

边界条件设置



加载



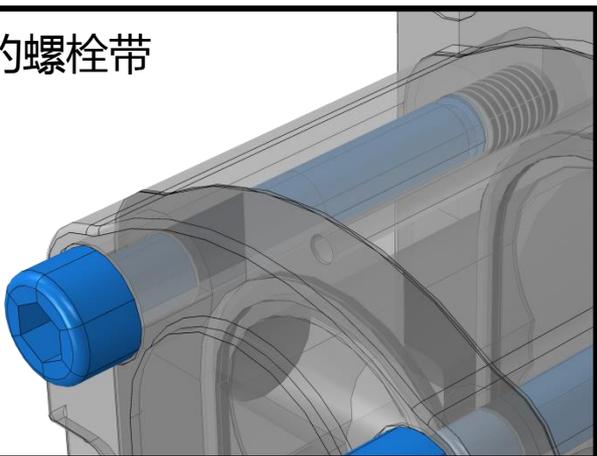
假设最大装配预载荷为30KN

CAE 固

7. 齿轮泵详细分析

参照VDI-2230第二部分的第四种螺栓模型

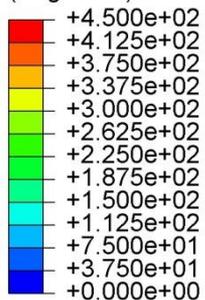
建模的螺栓带
螺纹



- 螺栓使用具有螺纹三维实体表示
- 预紧力可以直接通过预紧力模块施加
- 螺栓存在实际的刚度
- 可以定义所有界面的接触

Legend

S, Mises
(Avg: 75%)

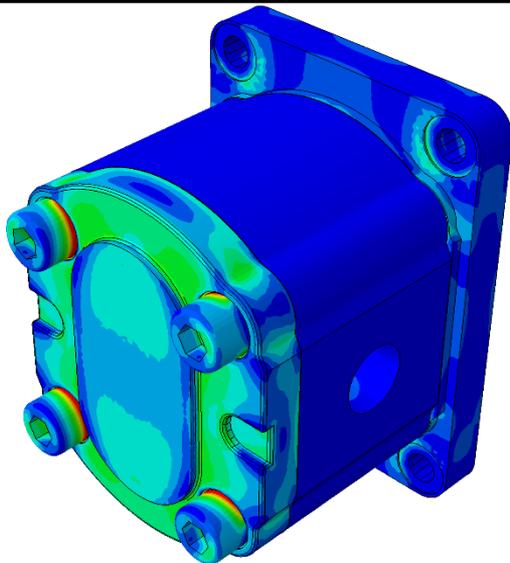


Z

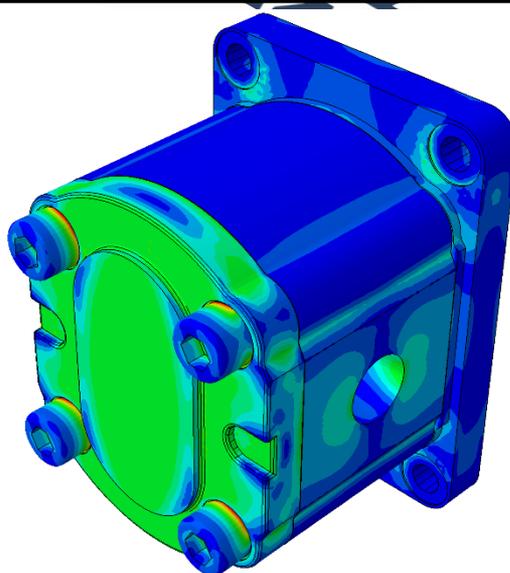
X

Y

Assembly state

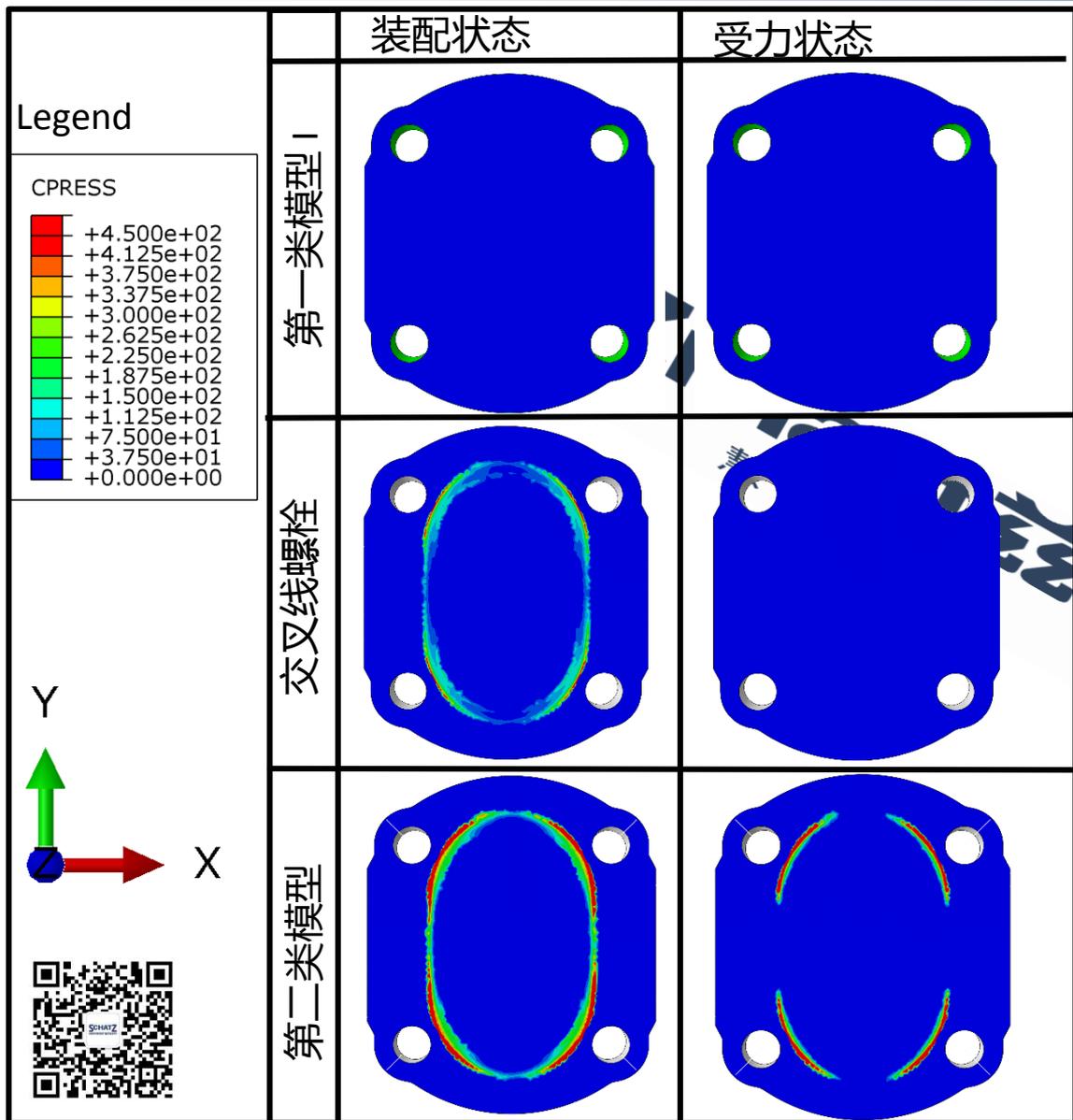


With pressure load



7. 齿轮泵详细分析

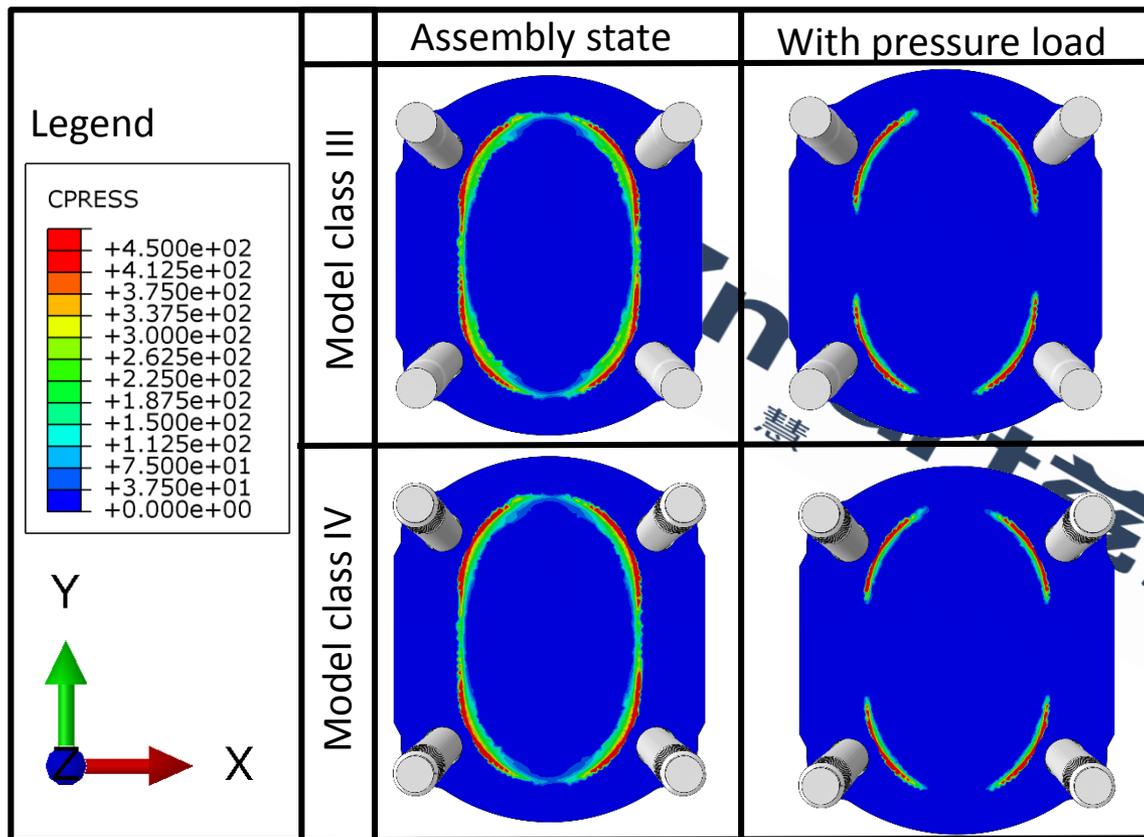
螺栓使用数值表示的齿轮泵的密封性



- 通过在仿真模型中加入螺栓的一些表征，可以检验设计的密封能力
- 第一类节点的建模不适用于任何仿真模型
- 交叉线螺栓模型可以比较好的显示装配性能
- 对于加载受力行为的分析，至少应该使用第二类模型

7. 齿轮泵详细分析

用三维螺栓表示泵内密封性



- 模型III和模型IV在密封性能上没有太大的差异
- 对于给定的30kN预紧力，预紧力不足以密封内部压力为30bar的泵

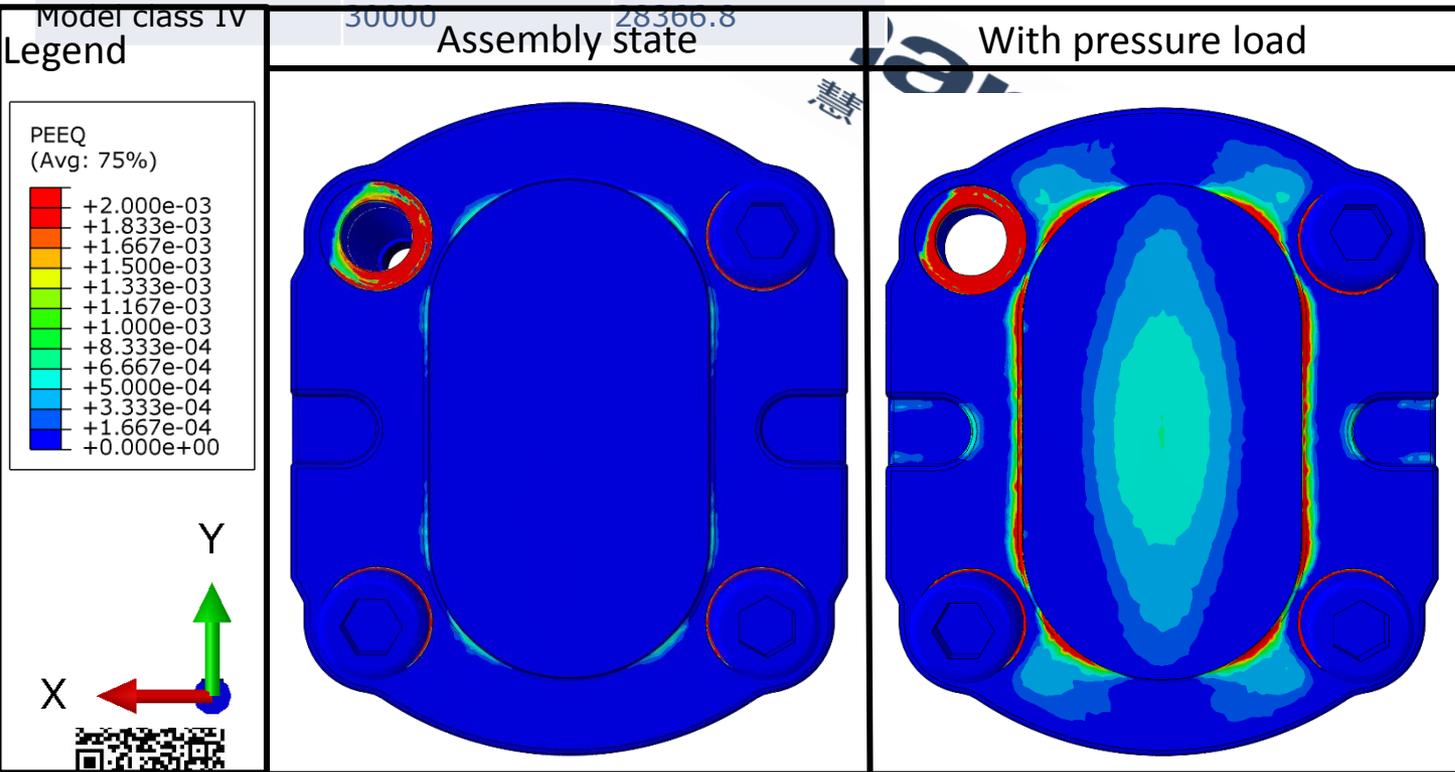


7. 齿轮泵详细分析

本例中的夹紧力

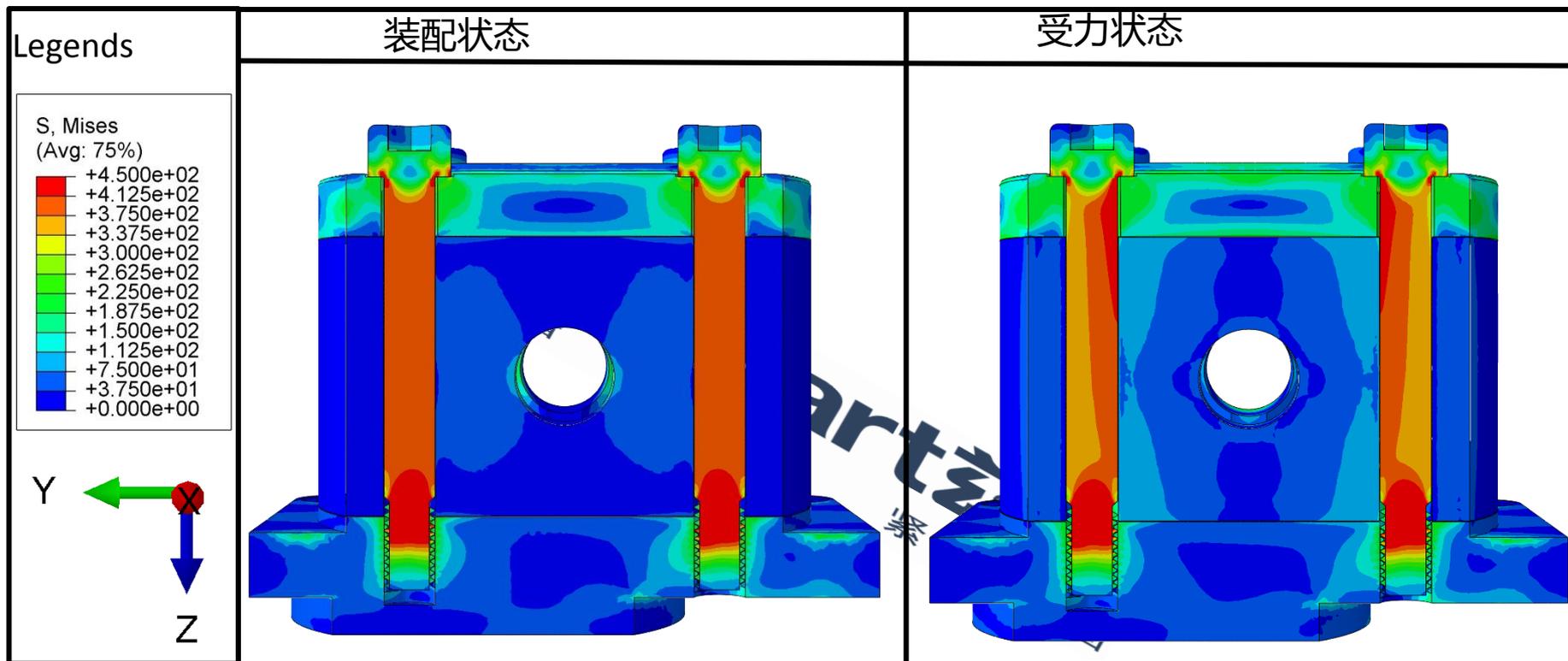
	装配夹紧力 (N)	受载夹紧力(N)
Model class I	无预紧力信息	无预紧力信息
Spider bolt	30000	0
Model class II	30000	29747
Model class III	30000	29588.4

- 仿真模型可以很容易地给出预紧力和夹紧力的变化
- 只有第II类及以上种类模型适用于检测预紧力变化
- 所有模型均显示了内压作用下预紧力的减小
- 这是由于端盖的塑性变形造成的



7. 齿轮泵详细分析

螺栓中的弯矩



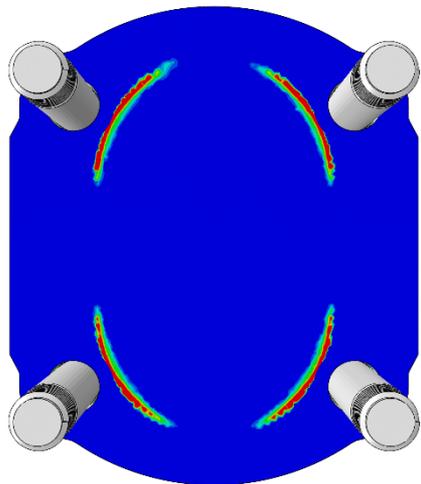
- 泵内偏心加载，螺栓弯矩可见(仅模型3、4类)
- 弯矩也可以用来检测螺栓的疲劳寿命



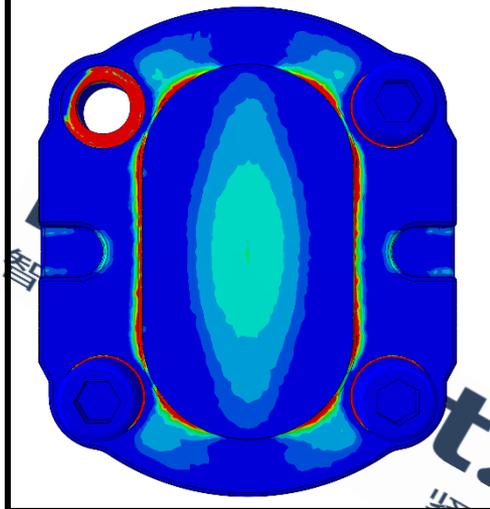
7. 齿轮泵详细分析

结果分析

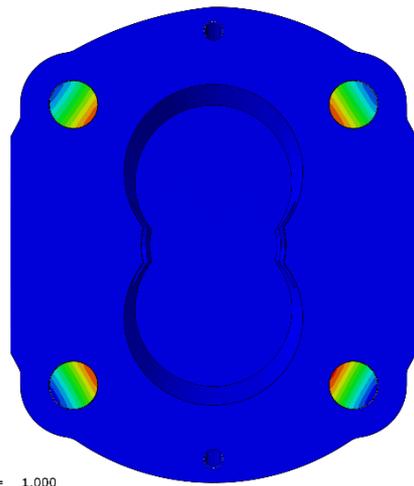
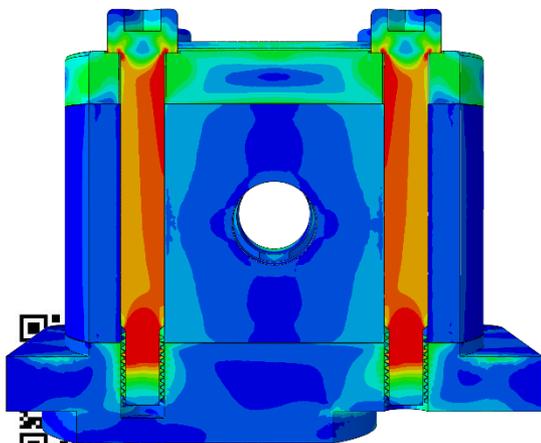
密封不足



泵体发生屈服



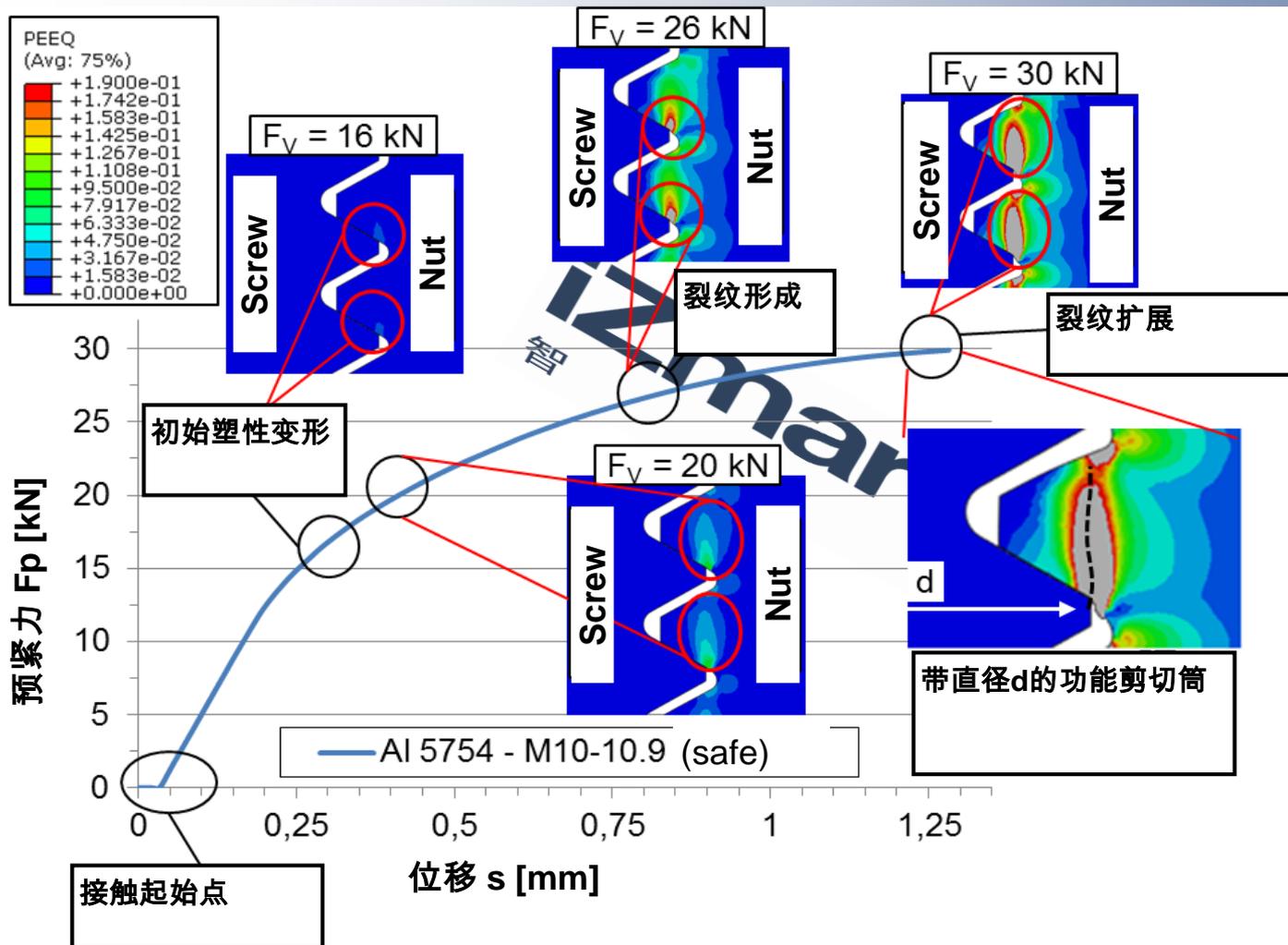
螺栓中的弯矩



- 主要使用模型类3或4进行分析，以捕获螺栓的完整行为。
- 预紧力不足以维持泵在30bar压力下的密封
- 应修改设计以避免螺栓头部支撑面(端盖)发生塑性变形
- 通过观察螺栓中存在弯矩，应采用分析-数值耦合方法对其进行检验，以评估其疲劳寿命

8. 螺栓仿真模拟先进技术

螺纹啮合仿真



– 在过去的几年里，仿真技术得到了很大的发展。紧固设计的未来发展方向是通过复杂模拟进行分析

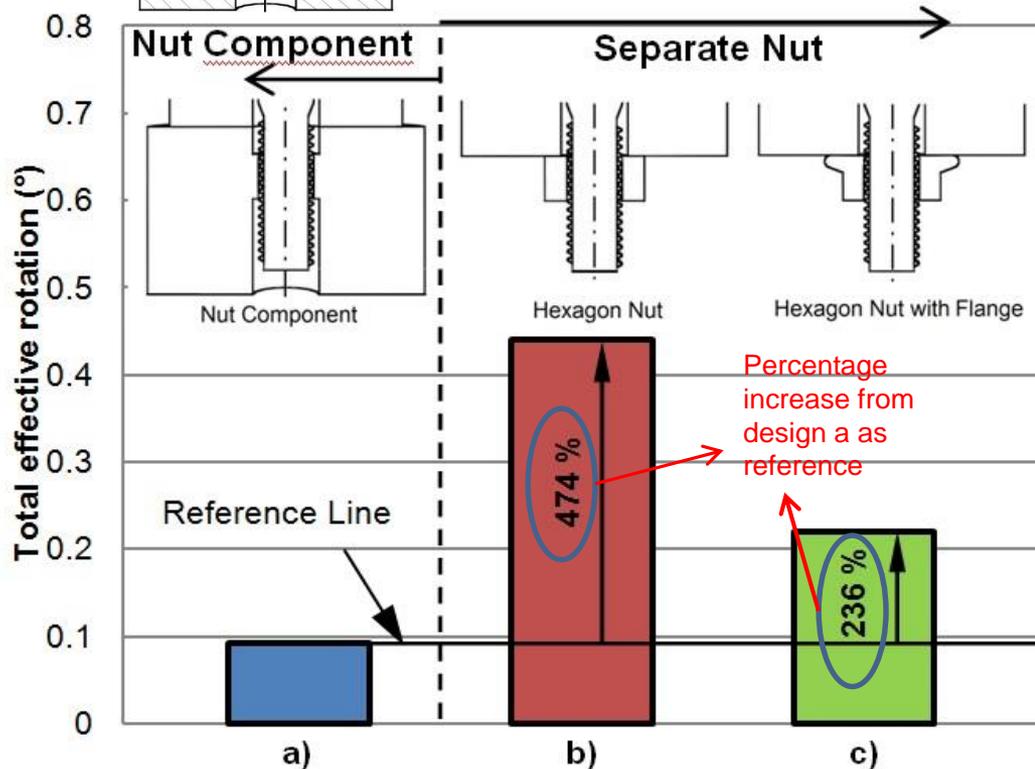
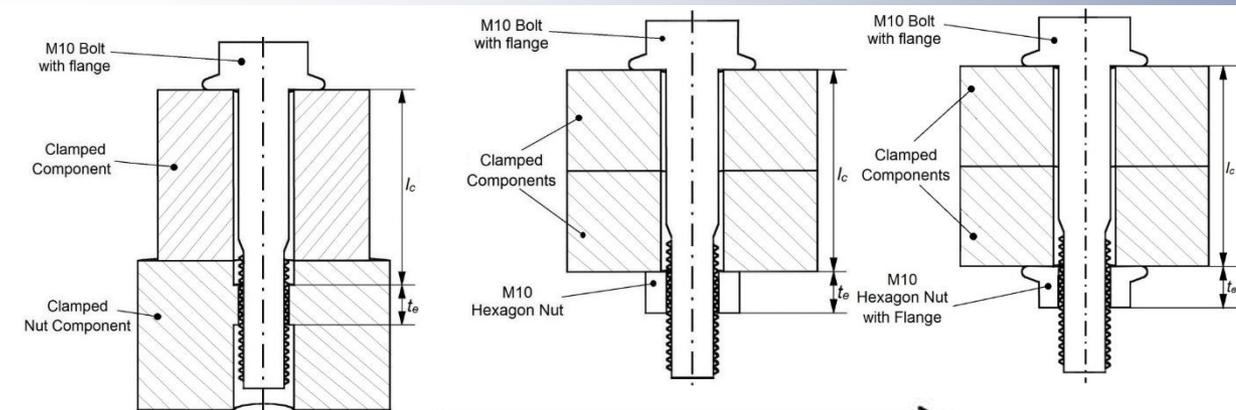
– 左边的图表显示了一个完全模拟的螺纹剥离曲线，在剥离之前进行了塑化处理

– 与测试相比的优势：啮合的详细分析，节省时间。



8. 螺栓仿真模拟先进技术

自松行为仿真



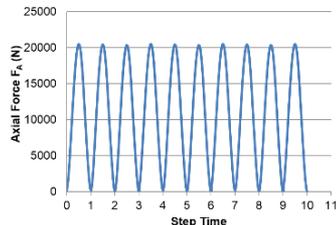
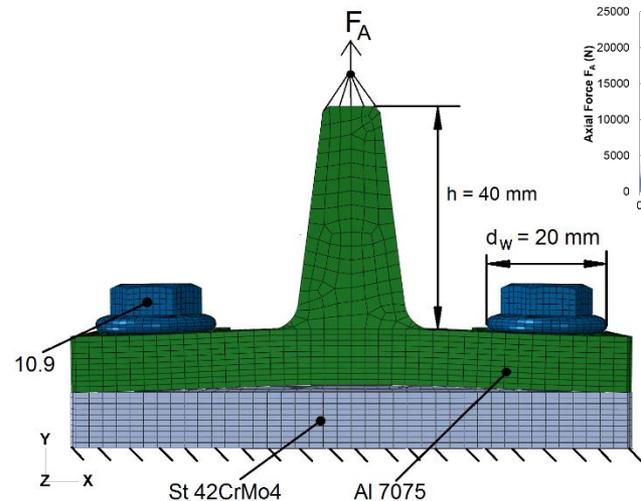
- 可以进行不同螺栓防松的性能对比
- 在这个例子中，三个螺栓相同的螺栓连接模型，夹紧长度和预紧力受到相同的横向振动
- 模型中只有螺母不同
- 不同的设计和不同的载荷下螺栓很容易发生自松现象

螺栓

8. 螺栓仿真模拟先进技术

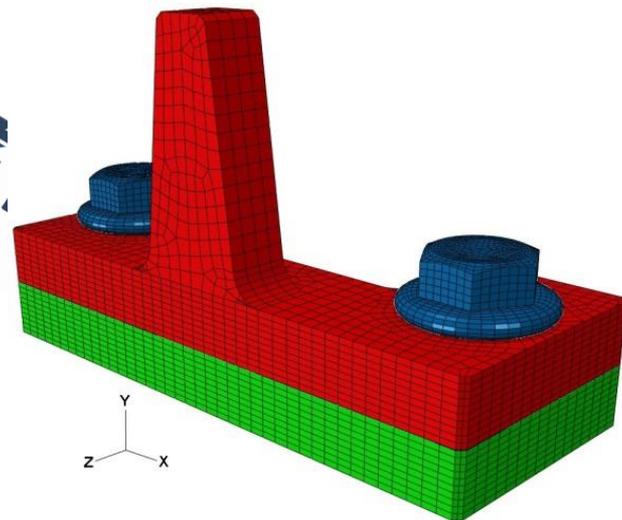
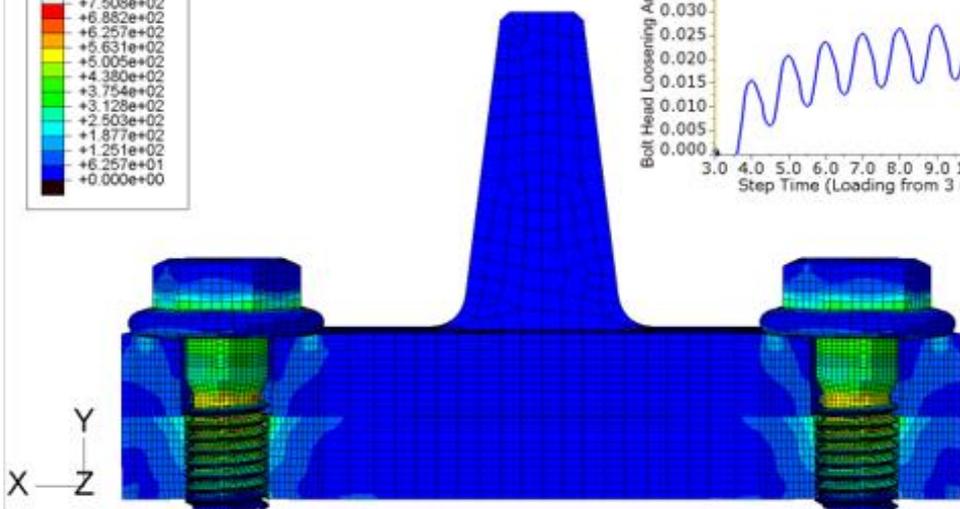
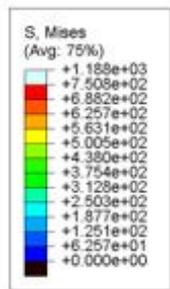
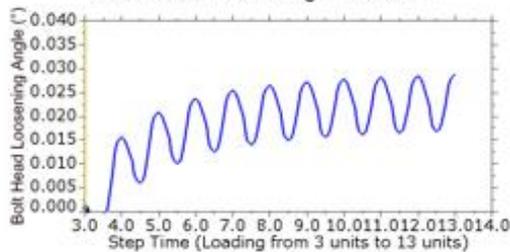
轴向载荷敏感性

- 多螺栓连接案例：带轴向偏心载荷 $F_A = 20 \text{ kN}$
钢 42CrMo4；铝 7075
- 两个螺栓的预紧力 $F_p = 25 \text{ kN}$, 意即负载因子为0.3
- 结果：构件界面最大剪切力 $F = 1859 \text{ N}$



Zmar
慧

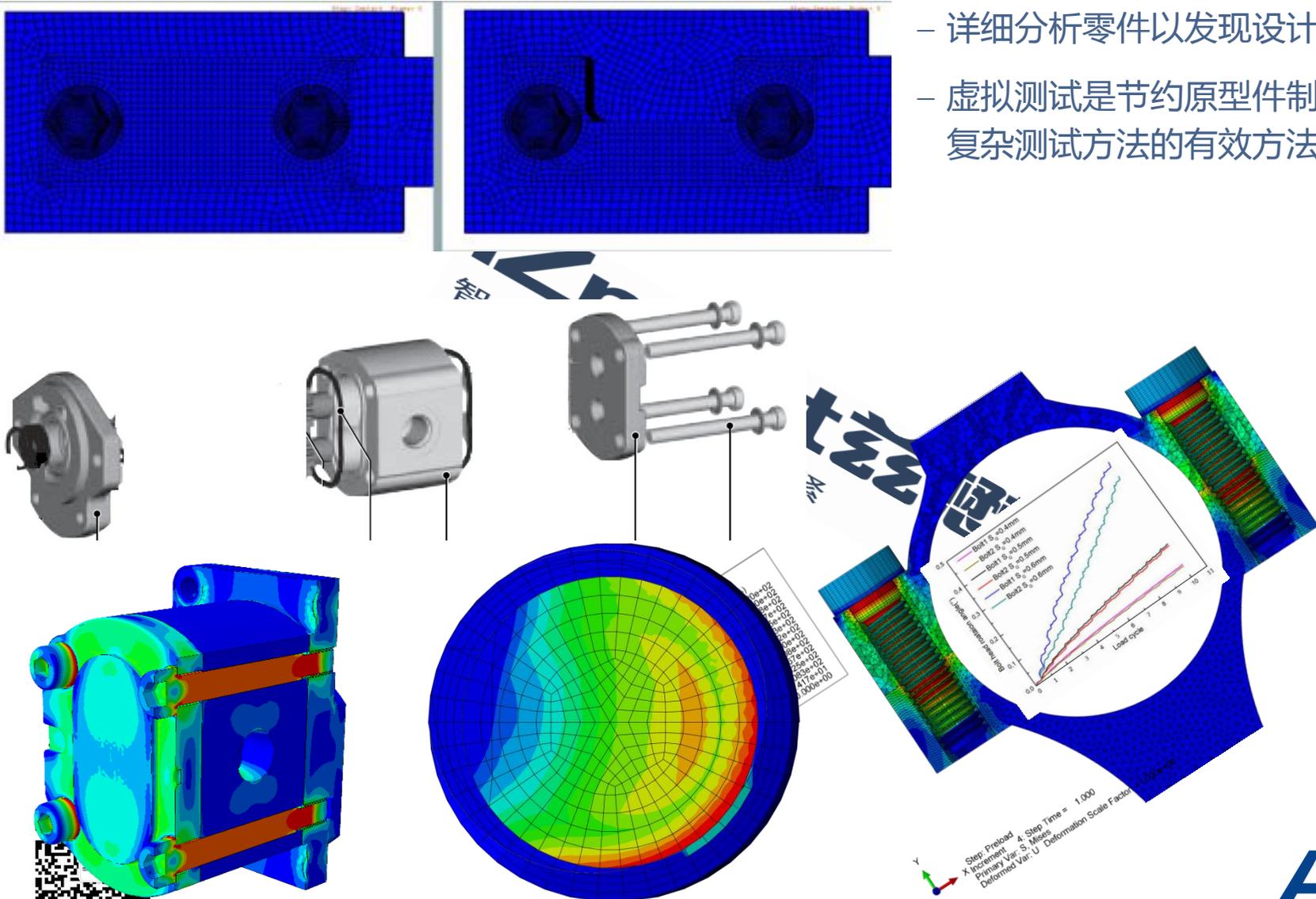
Rotational Loosening in Screw 1



8. 螺栓仿真模拟先进技术

虚拟测试

- 详细分析零件以发现设计中的问题
- 虚拟测试是节约原型件制造成本和复杂测试方法的有效方法



感谢您的参与!

联系方式



扫码留下您对本次培训的宝贵意见和建议



后续课程报名



关注微信公众号 SchatzAFS, 获取连接技术学院的最新课程信息以及拧紧技术的最新资讯!



- 电话：021-20832583
- 传真：021-53521923
- 邮箱：tom.wu@zwick.de
- 地址：上海市浦东新区王桥路999号中邦MOHO 1022幢
- 邮编：201201

