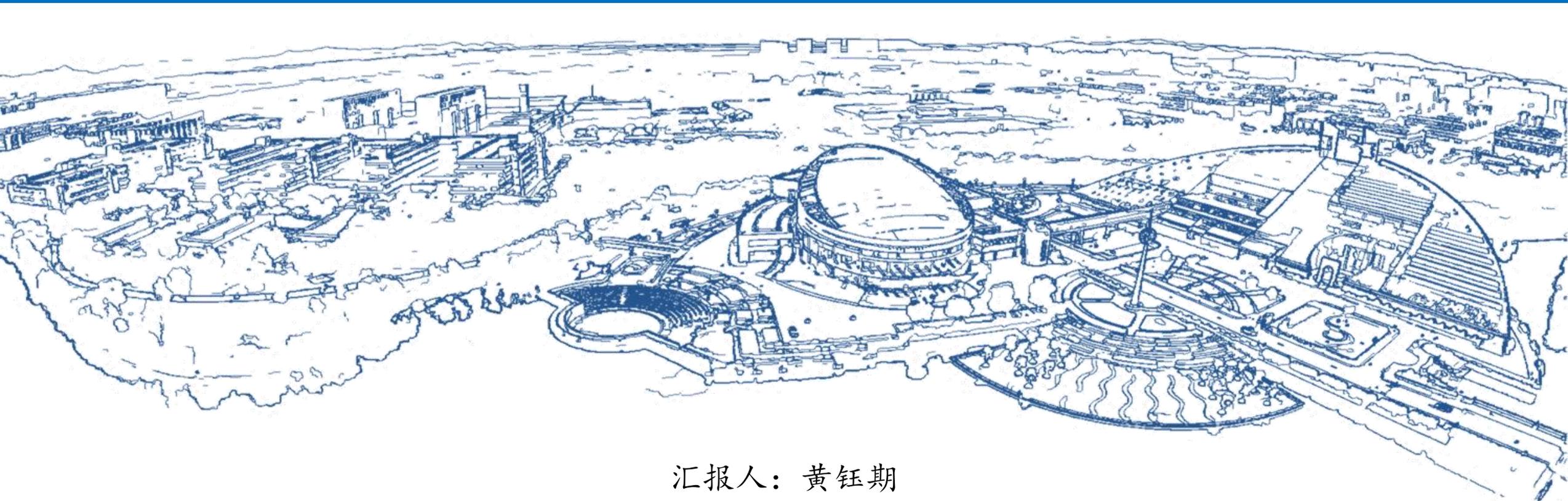


# 基于CFD的润滑空化过程仿真研究

## CFD Simulation and Influence Analysis of Lubrication Cavitation Process

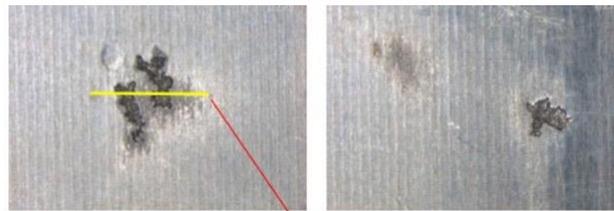
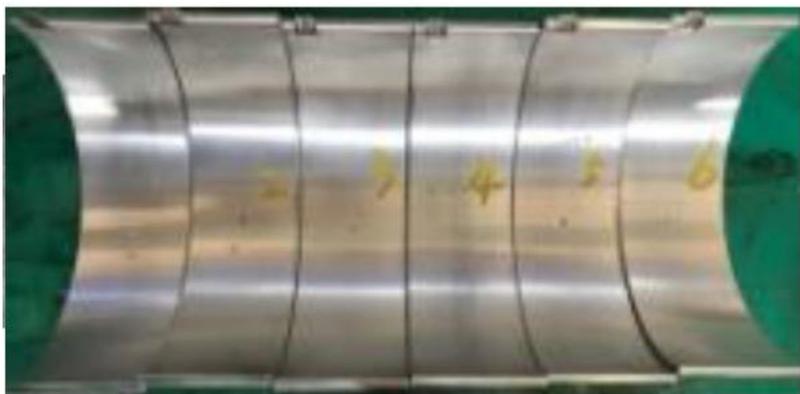
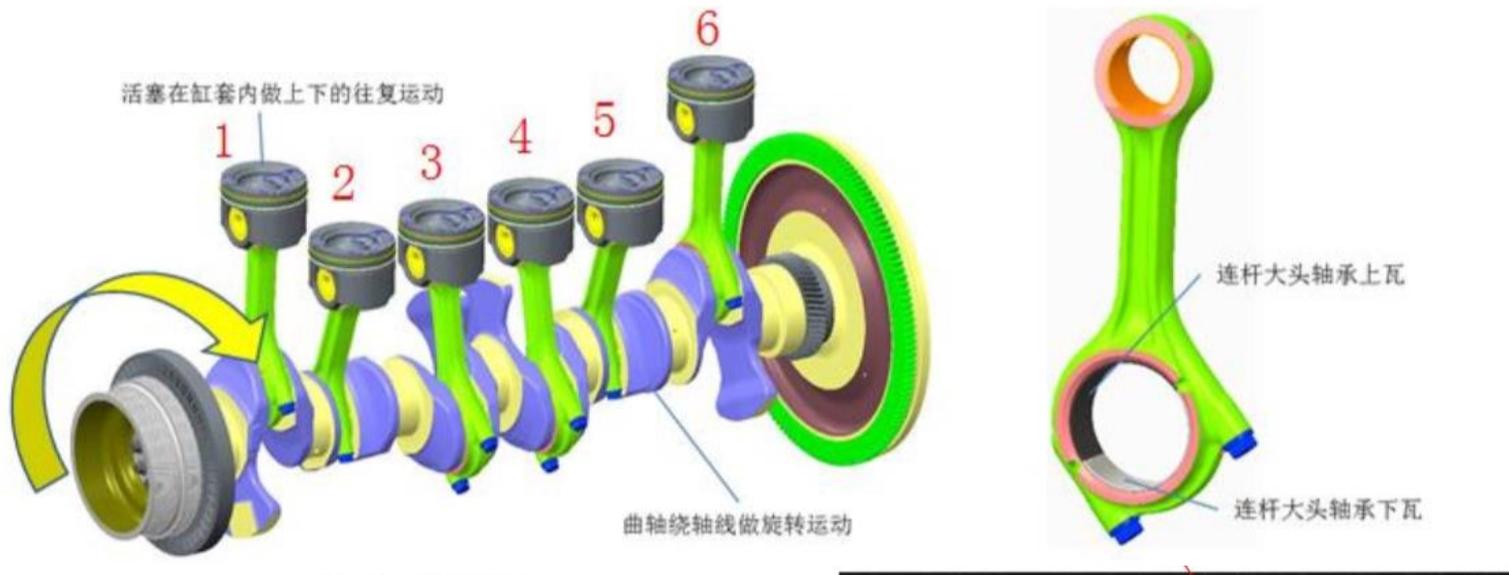


汇报人：黄钰期

# 主要内容

- 1 径向轴承简化模型分析方法研究
- 2 主轴承/连杆轴承空化仿真
- 3 动网格的影响分析

# 连杆轴承穴蚀现象



The cavitation attack is limited within lining alloy.  
Depth of influence at sampling position: 203μm.

- 高强度柴油机连杆轴承下瓦常见不同程度的损伤。
- 功率密度提升，现象更为显著。
- 相同转速、负载、工艺、材质，各连杆轴承破坏程度存在差异。

- 这种破坏是什么？是否属于穴蚀？
- 损伤出现的时间、位置可否预测？

# 连杆轴承穴蚀现象

穴蚀产生的原因<sup>[1]</sup>:

1. 溃灭瞬间产生高压，产生压力波。
2. 不凝性气体的存在使得空泡在溃灭瞬间被迫反弹，产生高振幅膨胀冲击波。
3. 溃灭过程中产生了微射流，微射流向壁面发展，穿过气泡高速撞击壁面，产生冲击波。

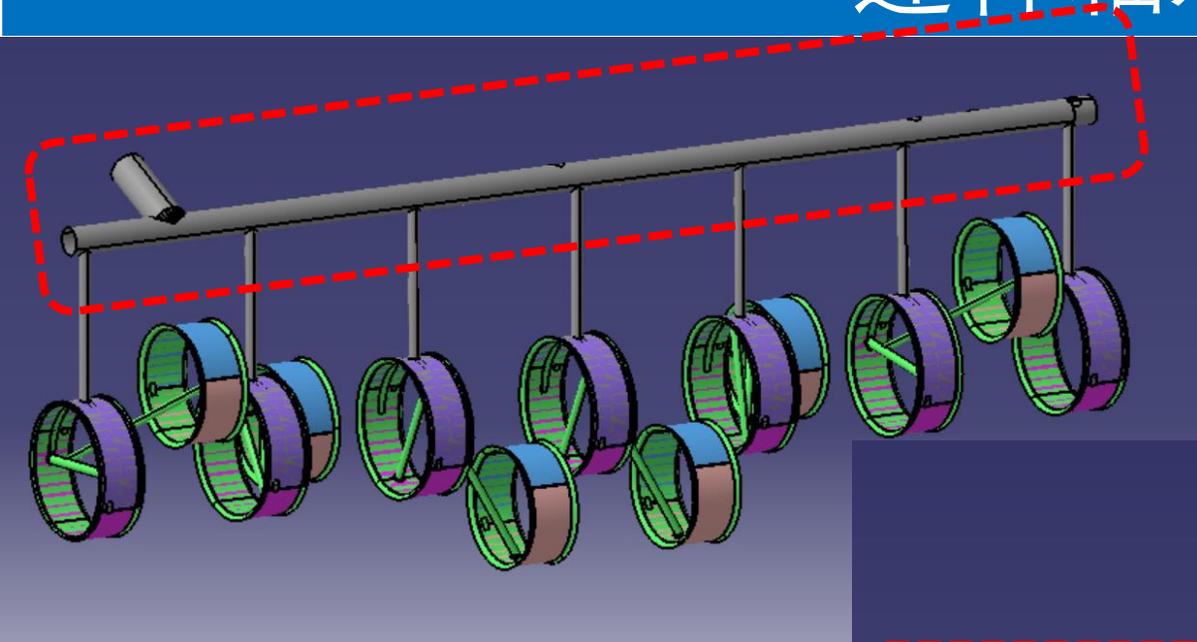
气泡溃灭过程中，泡壁速度不断增加，尤其在溃灭结束时，若忽略可压缩性的影响，界面速度将趋于无穷，最大压力也趋于无穷。

例如，一个气泡在 $P_{\infty}=1\text{bar}$ 压力下溃灭，当气泡半径变为原始半径的1/50时，最大压力达到了1GPa，这个值与材料的屈服强度甚至是极限强度相当，因此会发生损伤。

$$\Pi = \frac{P_{max} - P_{\infty}}{P_{\infty} - P_v} \cong 0.157 \left( \frac{R_0}{R} \right)^3$$

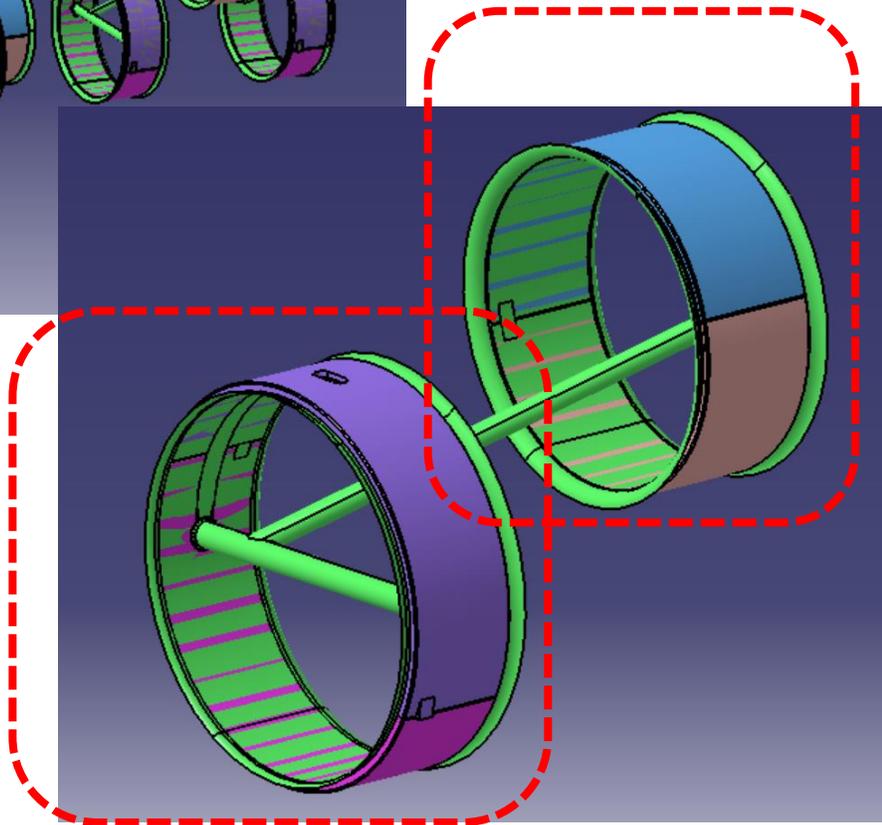
[1] Jean-Pierre Franc. The Rayleigh-Plesset equation: a simple and powerful tool to understand various aspects of cavitation. **Fluid Dynamics of Cavitation and Cavitating Turbopumps**, CISM Courses and Lectures, 496, Springer, pp.1-41, 2007, 9783211766682. 10.1007/978-3-211-76669-9\_1.hal- 00265882

# 连杆轴承穴蚀现象



## 问题拆解：

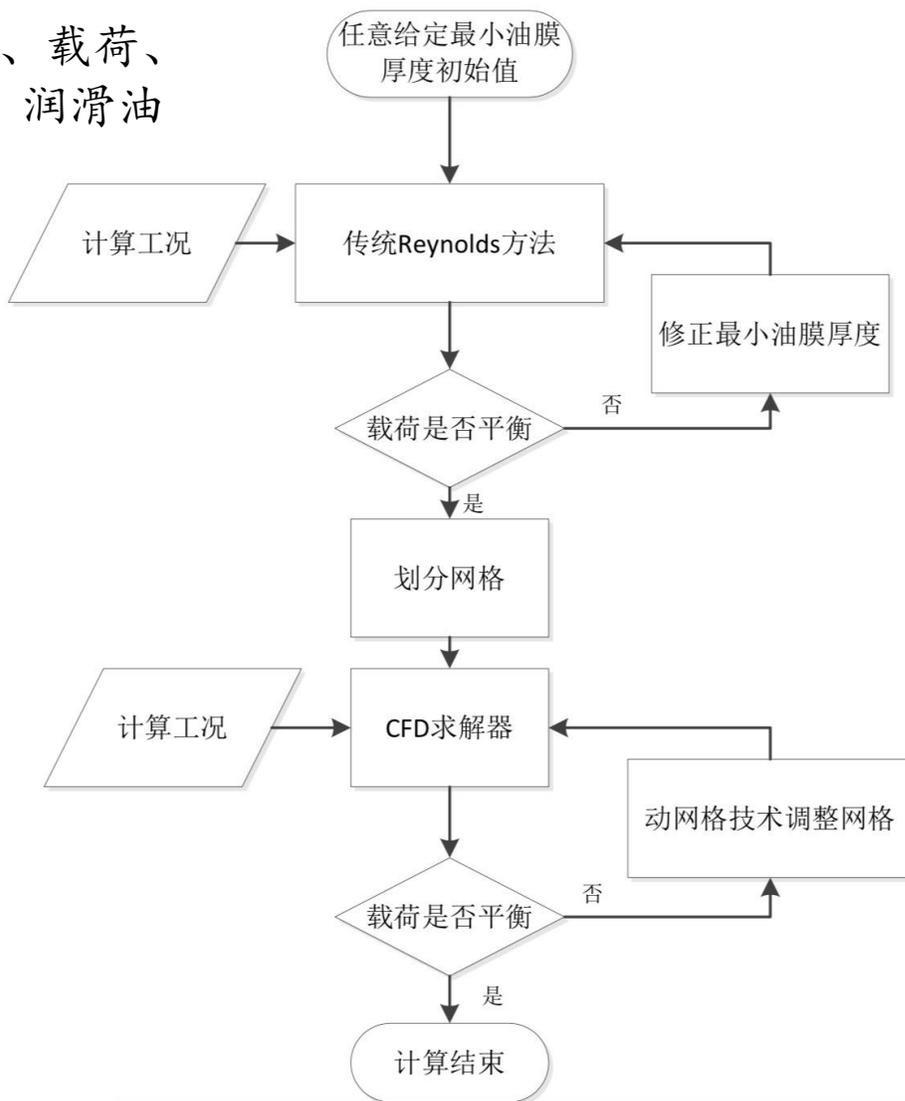
1. 油路系统供油特性分析[4]；
2. 主轴承润滑特性研究；
3. 连杆轴承润滑特性研究。



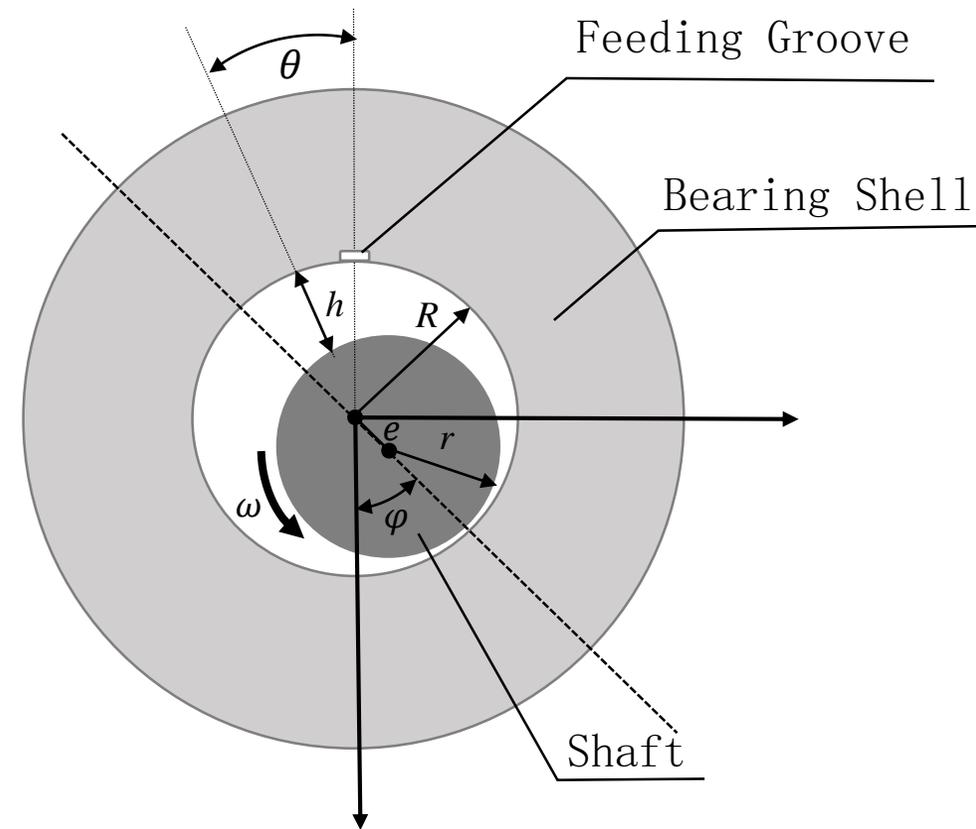
[4] 黄伟伟. V 型多缸柴油机润滑系统流动特性仿真研究[D]. 2015, 北京理工大学

# 径向滑动轴承简化模型分析方法研究

(1) 已知转速、载荷、热边界等条件，润滑油膜厚度未知

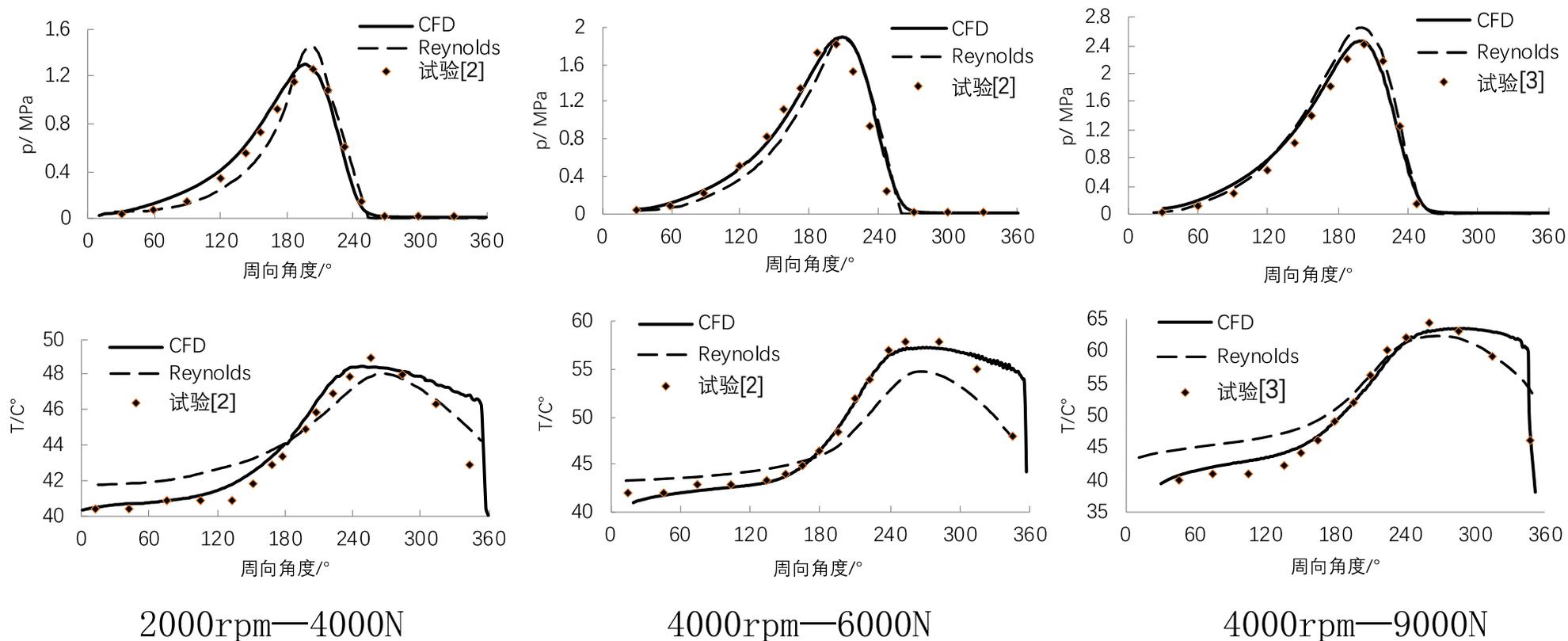


(2) 已知转速、偏心率、热边界条件等，直接CFD求解



# 简化计算与空化模型选择

CFD方法与传统Reynolds方法比较:

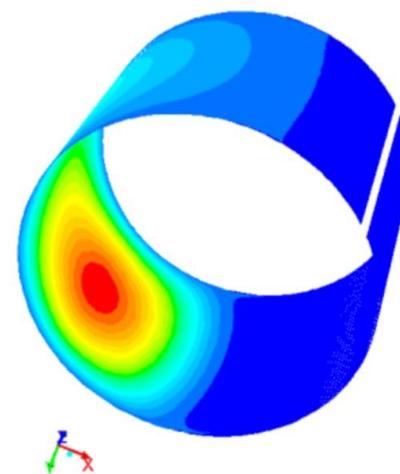
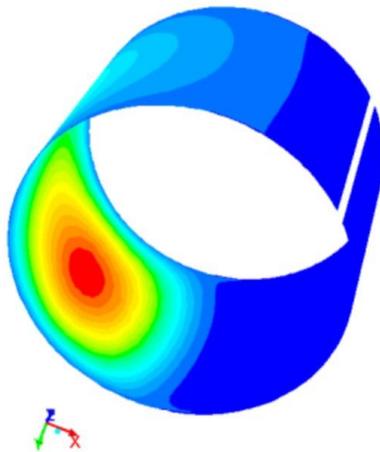
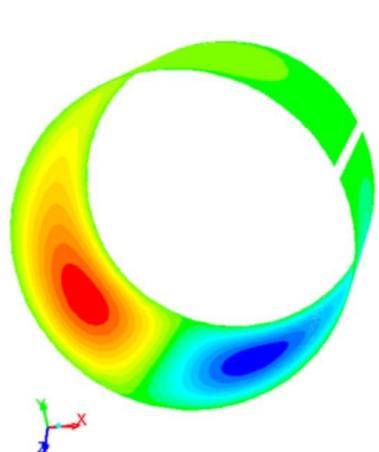
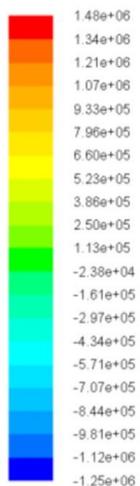


[2] J. Ferron, J. Frene, R. Boncompain. A Study of the Thermohydrodynamic Performance of a Plain Journal Bearing Comparison between Theory and Experiments. *Journal of Tribology*. 1983, 105 (3): 422-428

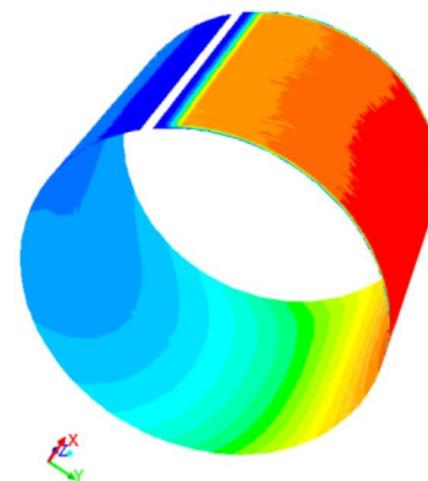
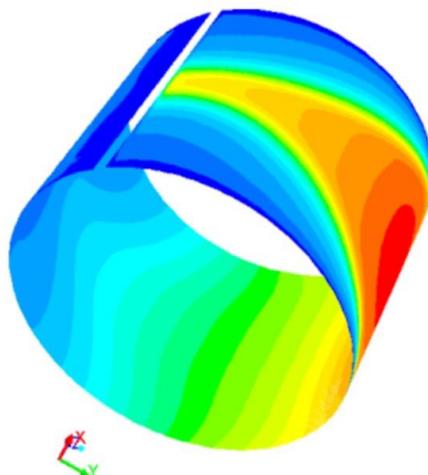
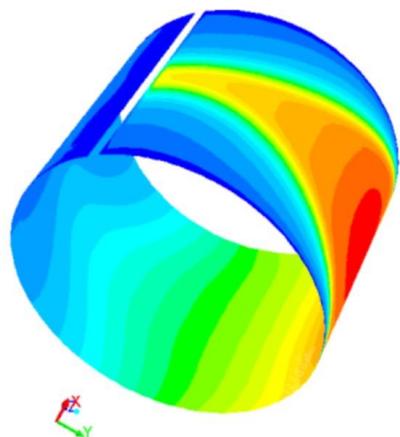
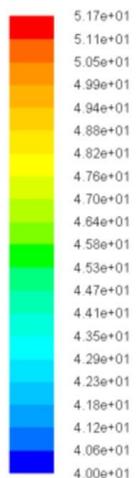
[3] I. Pierre, M. Fillon, J. Bouyer. Thermohydrodynamic behavior of misaligned plain journal bearings: Theoretical and experimental approaches. *Tribology Transactions*, 2004, 47(4): 594-604

# 径向滑动轴承简化模型分析方法研究

压力分布:



温度分布:



空化边界比较:

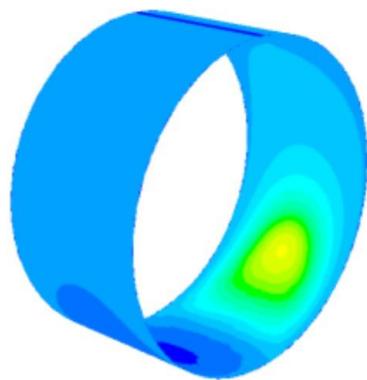
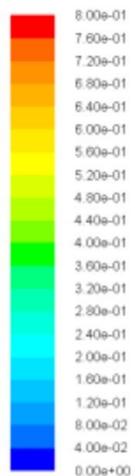
Sommerfeld 边界

Half-Sommerfeld 边界

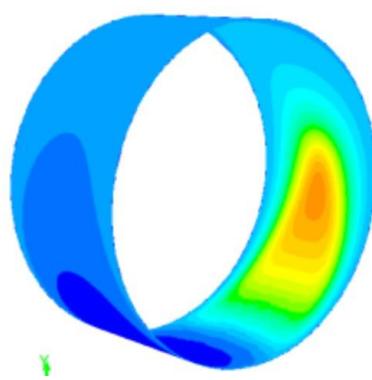
Singhal全空化模型

# 径向滑动轴承简化模型分析方法研究

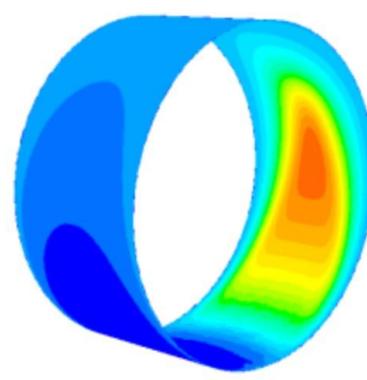
空化范围:



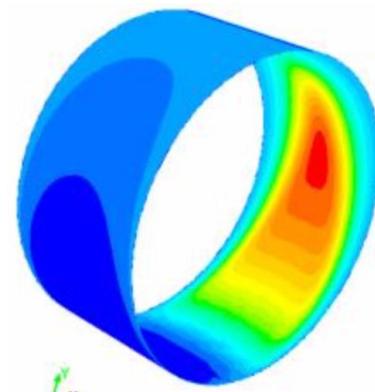
转速: 500rpm



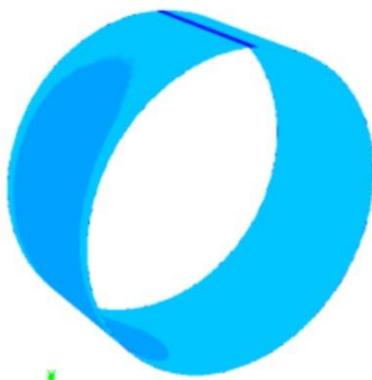
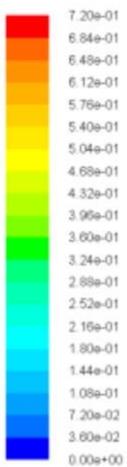
1500rpm



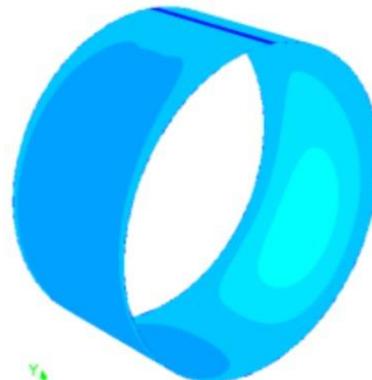
2500rpm



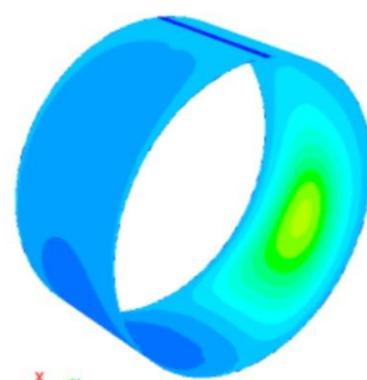
3500rpm



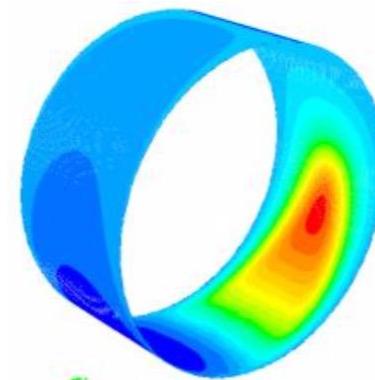
偏心率: 0.2



0.4



0.6



0.8

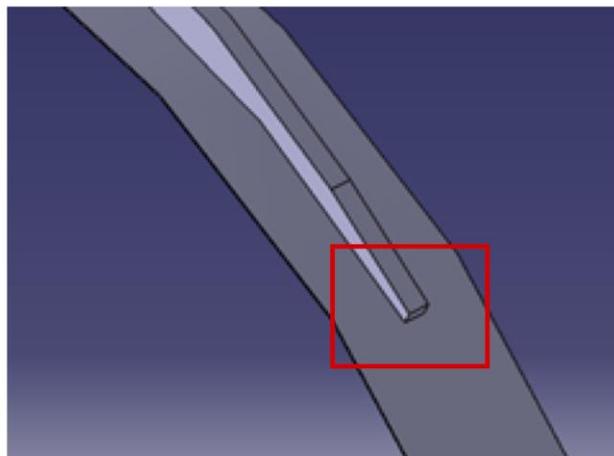
# 简化计算与空化模型选择

1. 相比于Reynolds方法，用CFD获得的油膜最高压力点计算结果与试验值更接近；同时整体压力分布也与试验值更相符。
2. 在CFD方法中引入Singhal全空化模型，可以获得更为精确的流动、传热、粘性产热计算结果，从而得到更精确的润滑油三维温度分布。结合粘-温分布的实时耦合手段，可使油膜压力分布计算结果更准确。而仅在CFD方法中应用简化的空化处理边界条件时，温度分布计算结果与实际存在较大差异。
3. CFD方法在求解气穴生成-溃灭、流动传热、粘性产热等流动-传热问题上，采用的数值处理方法更符合物理实际。但是，在油膜结构发散段的气穴溃灭混合和温度计算问题上，现有空化模型仍有进一步改进的空间。

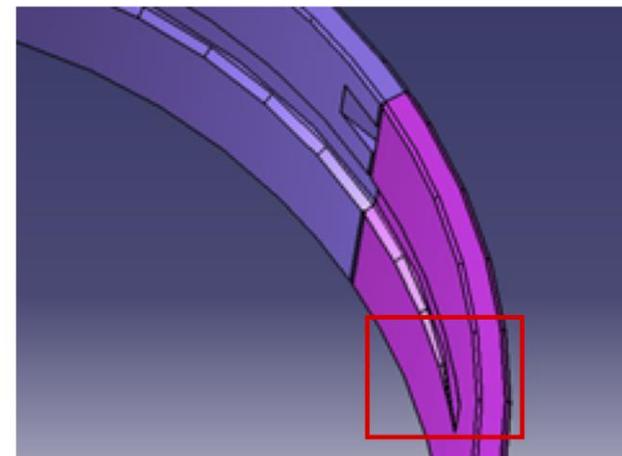
# 主轴承润滑分析

项目	主轴承
轴瓦内径R (mm)	56.005
轴颈r (mm)	55.945
径向间隙 (mm)	0.12
偏心距 (mm)	0.058
最小油膜厚度 (mm)	0.002
进油口	长方形7.2mm*4.9mm

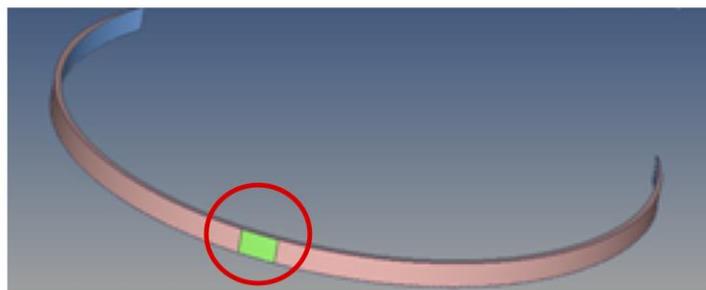
- 根据提供文件，选取合适的尺寸进行三维建模
- 简化了油槽端部和进油口



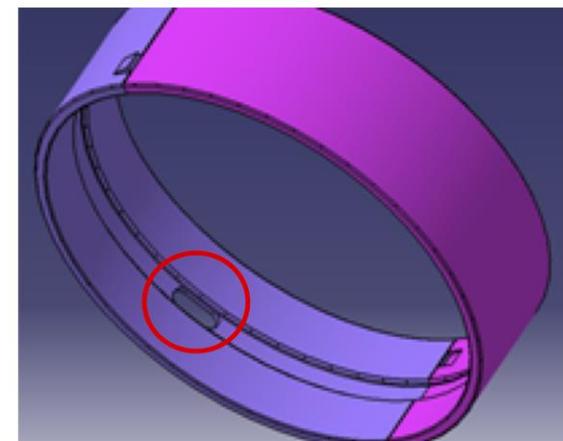
(a) 简化的油槽端部



(b) 原油槽端部



(a) 简化的进油口



(b) 原进油口

# 主轴承的网格模型

(a) 主轴承

(b) 进油口

(c) 油槽端部

(d) 轴承端部  
(油膜出口)

- 在Hypermesh中分别处理主轴承的油膜和油槽，重合处设置为interface

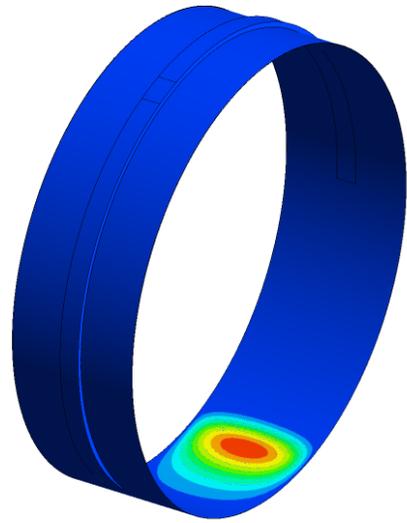
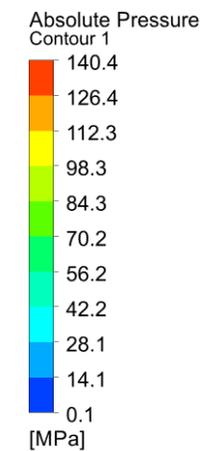
项目	网格层数（径向/轴向/周向）	网格总数
主轴承油膜	10/360/1250	3250000
主轴承油槽	50/40/650	1300000

# 主轴轴承的仿真设置

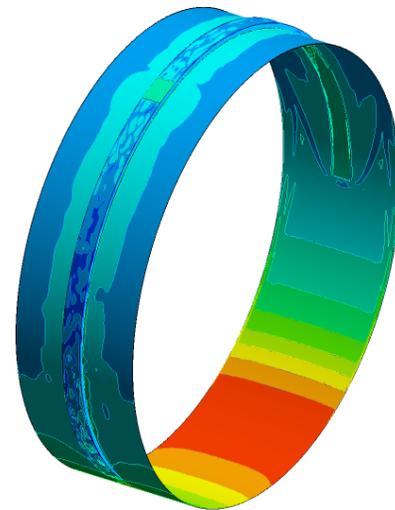
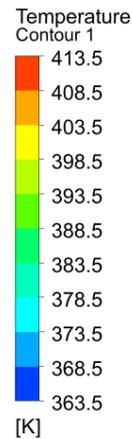
- ANSYS Fluent 19.2
- 3D-Double Precision-Steady-Pressure Based
- Mixture 多相流模型 (**Singhal全空化模型**)
- 采用SAE10W/40的空化压力**0.5bar**
- 层流 (考虑粘性生热)
- 润滑油密度和动力粘度采用**变物性**设置
- 压力速度耦合采用SIMPLE算法

离散方法	
梯度项	Least Squares Cell Based
压力项	PRESTO!
密度、动量、能量	Second Order Upwind
Vapor	QUICK
边界条件	
轴颈	<b>Moving wall</b> (1800rpm) ; 140°C
轴瓦	Wall; 90°C
进油口	压力入口 ( <b>400000Pa</b> ) ; 110°C
端面	压力出口 (0Pa) ; 110°C

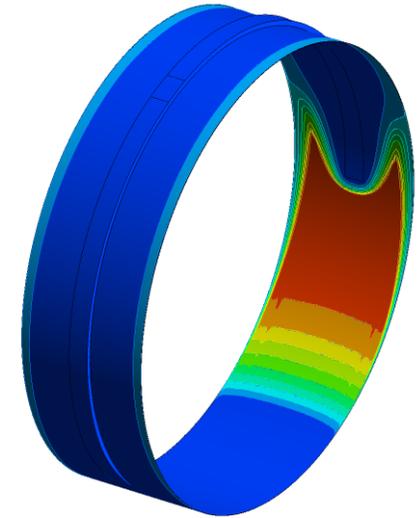
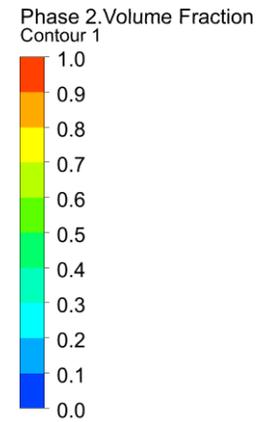
# 主轴承仿真模拟计算结果



主轴承压力分布



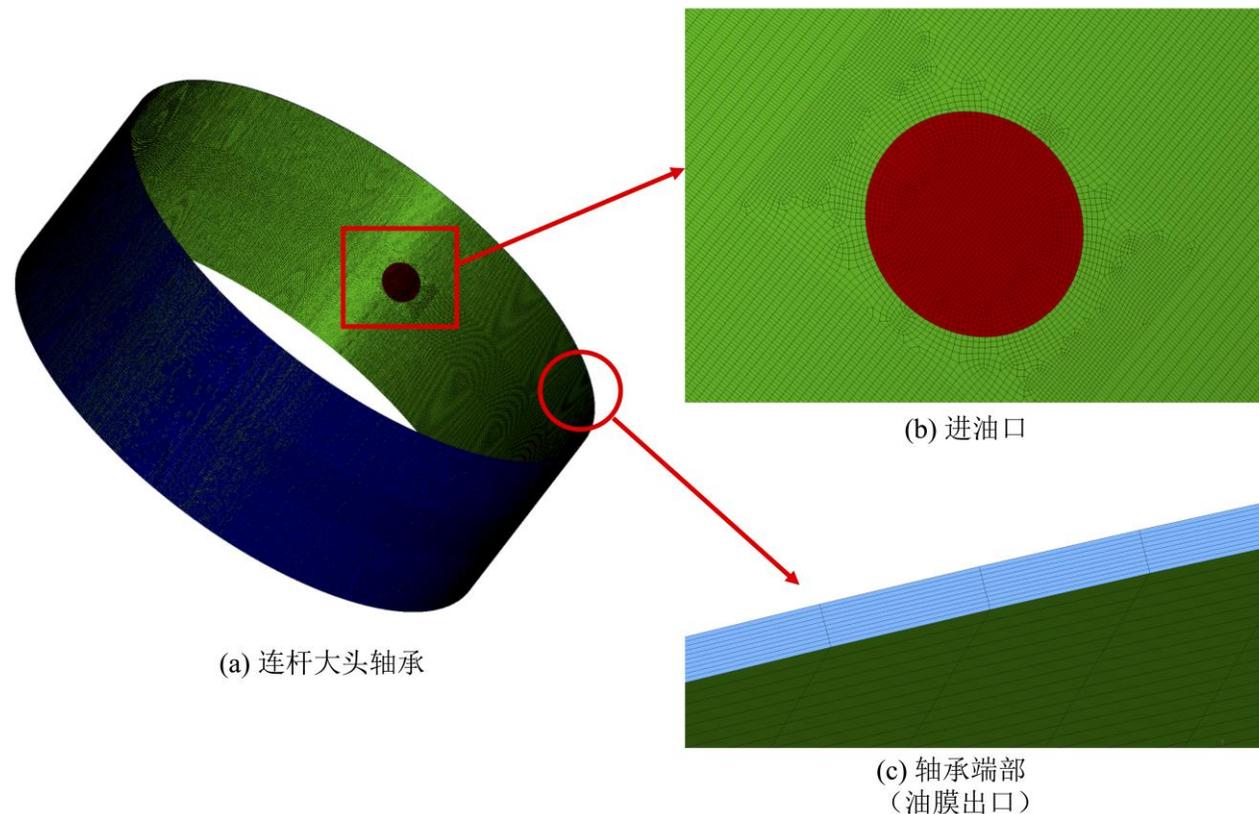
主轴承温度分布



主轴承气相分布

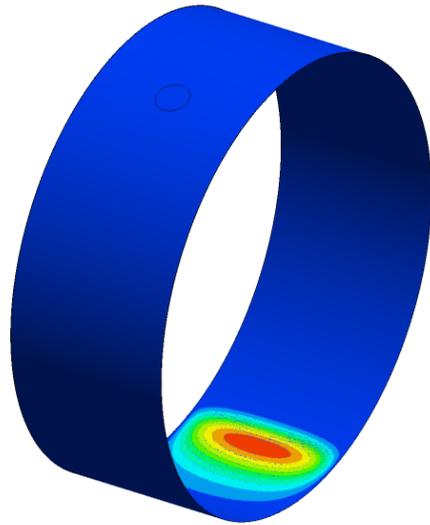
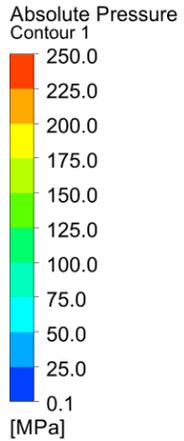
# 连杆轴承润滑分析

项目	连杆轴承
轴瓦内径R (mm)	48.005
轴颈r (mm)	47.955
径向间隙 (mm)	0.1
偏心距 (mm)	0.049
最小油膜厚度 (mm)	0.001
进油口	圆形 (D=7mm)
网格信息	径向10/轴向300/周向850 总数2564160

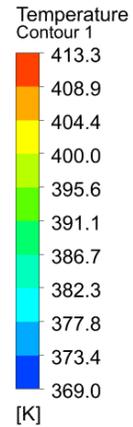


- 结构网格+非结构网格
- 最小油膜厚度比主轴承还小 $1\mu\text{m}$
- 进油口位于轴颈上，压力为 $565000\text{Pa}$ ，轴颈固定，轴瓦转动

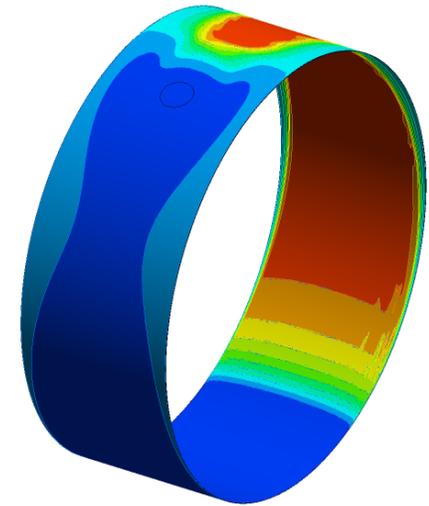
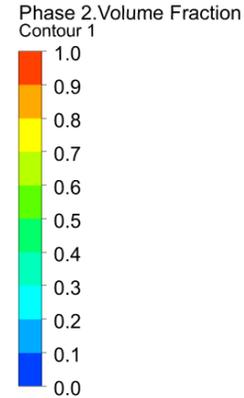
# 连杆轴承仿真模拟计算结果



连杆轴承压力分布



连杆轴承温度分布

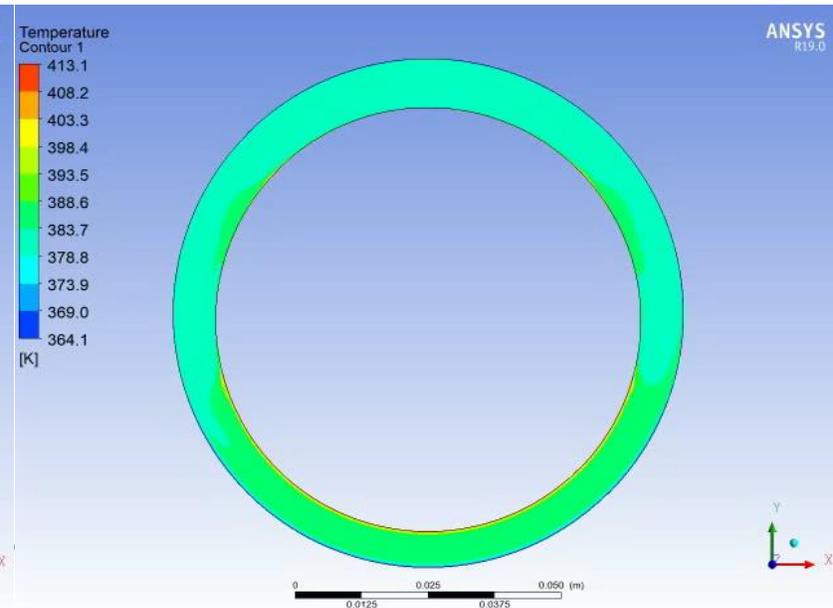
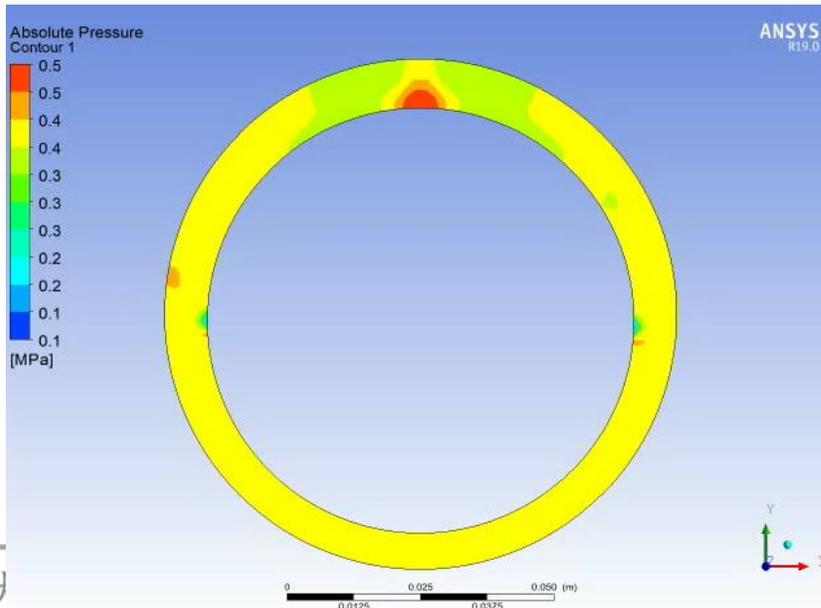
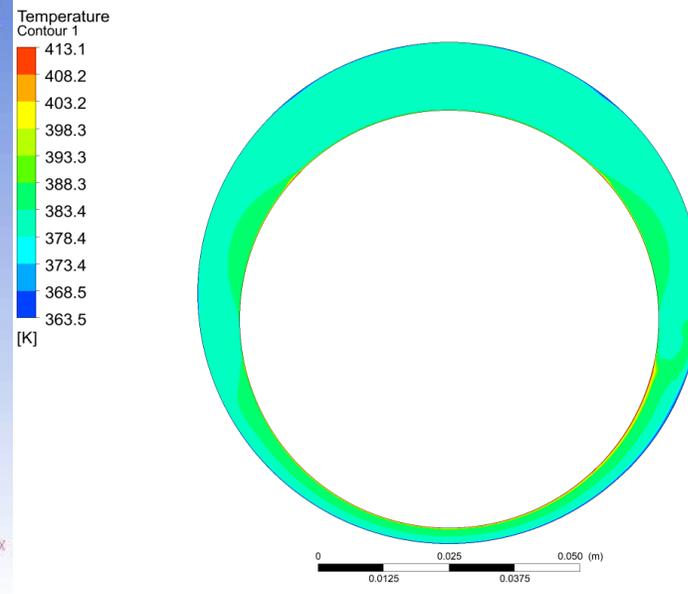
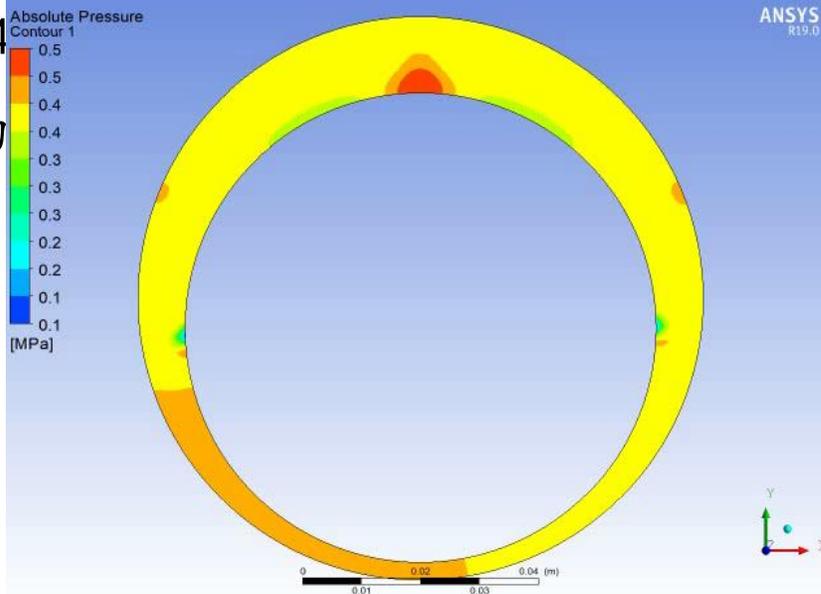
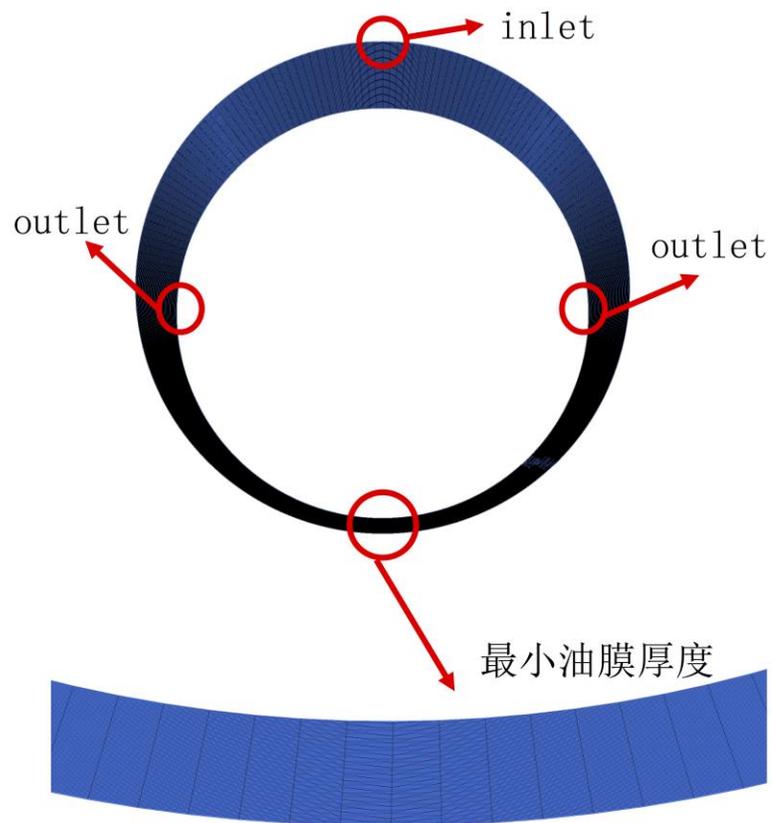


连杆轴承气相分布

# 动网格仿真

几何模型：轴瓦R=48.005mm；轴颈r=4

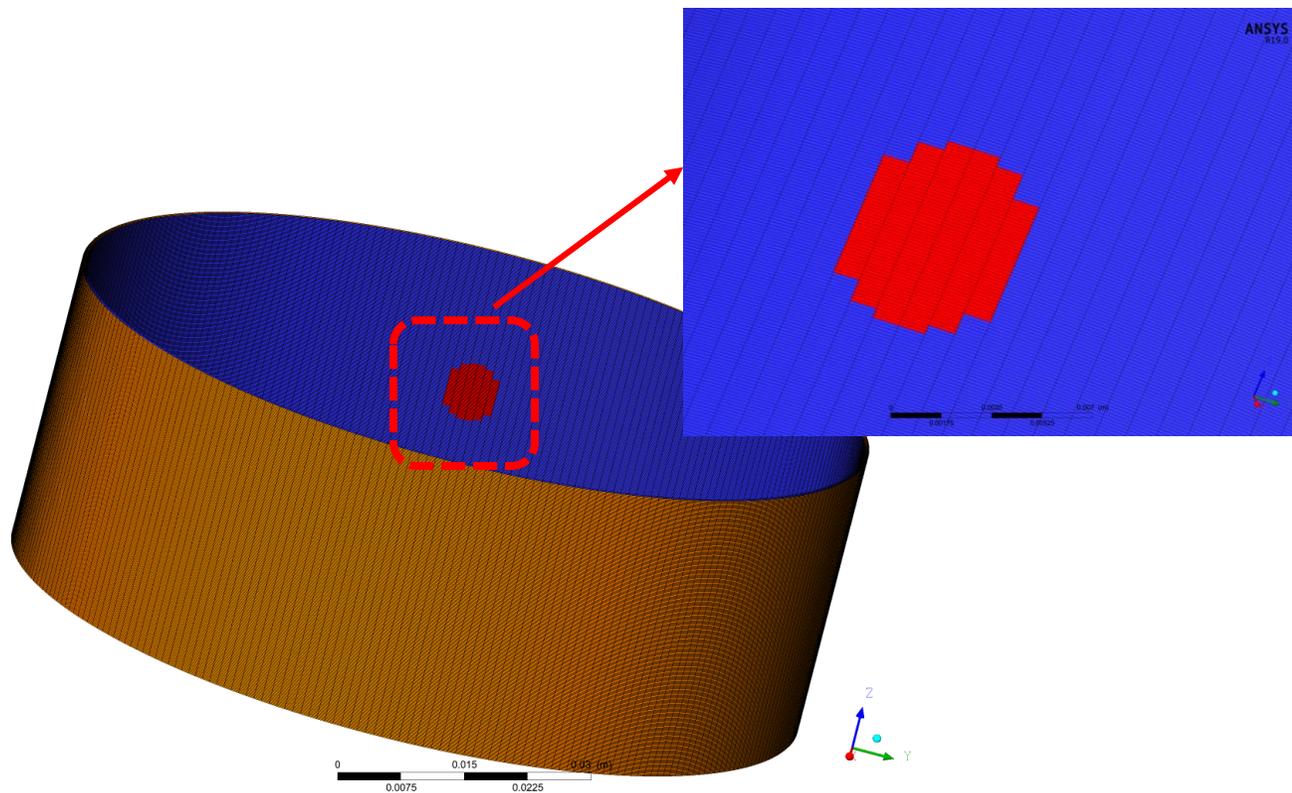
瞬态计算+udf：使轴颈以0.0001m/s的



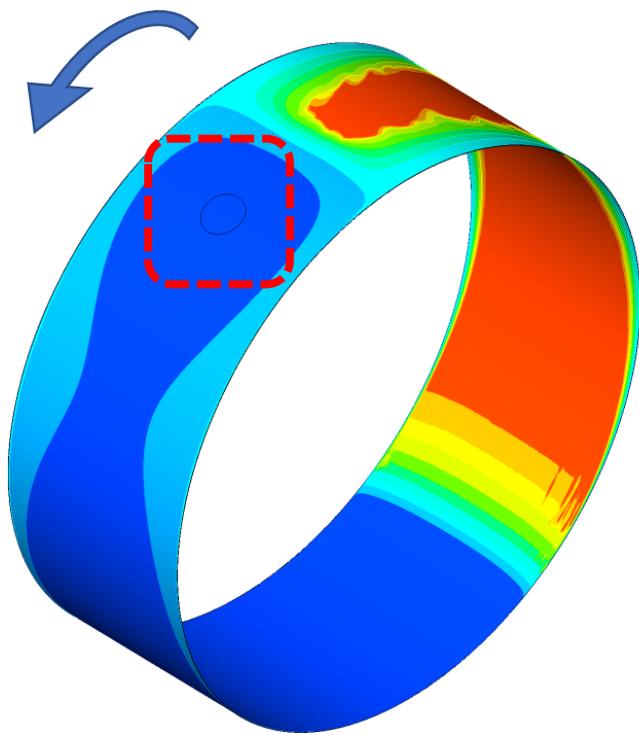
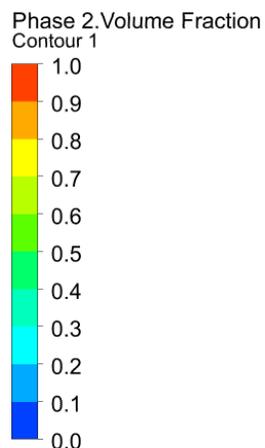
# 动网格仿真 (3D)

项目	连杆轴承
轴瓦内径R (mm)	48.005
轴颈r (mm)	47.500
径向间隙 (mm)	0.505
网格信息	径向50/轴向300/周向300 总数4410000
瞬态计算	通过 udf 使轴颈以 <b>0.00001m/s</b> 的速度向X轴 正向运动50s, 得到最小 油膜厚度0.005mm; 轴瓦 设置为 <b>Moving wall</b> (1800rpm)

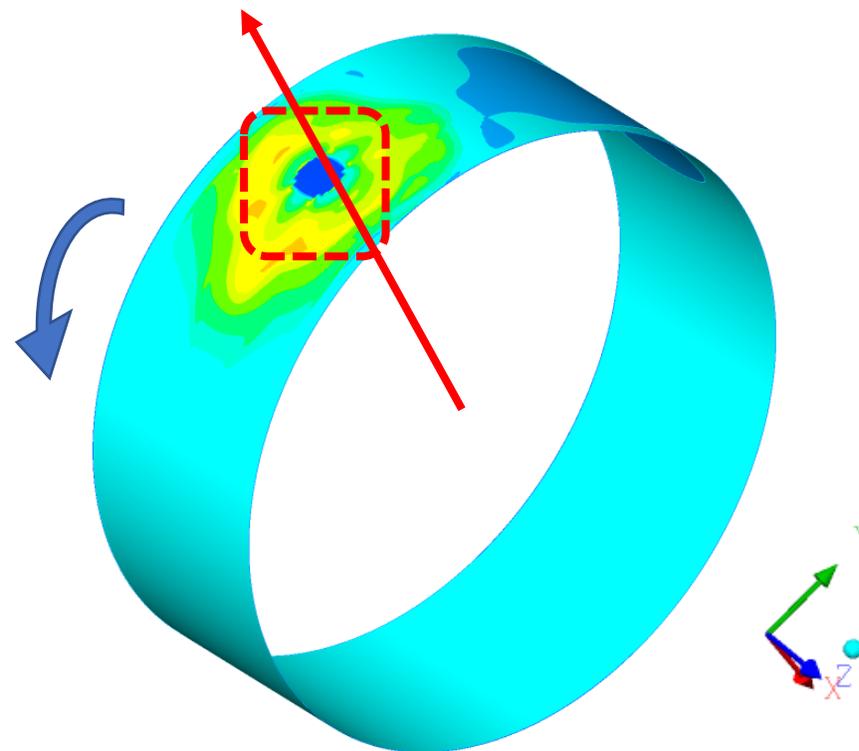
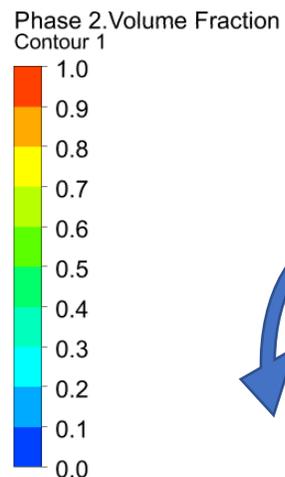
为了使动网格计算能顺利进行, 全部采用结构网格, 因此对**进油口**做了简化处理, 同时根据给定模型设置了进油方向。



# 动网格仿真



(a) 给定偏心距时的气相分布



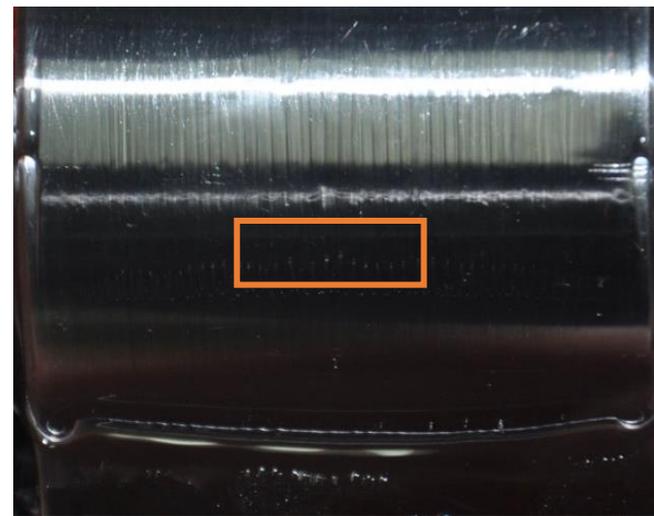
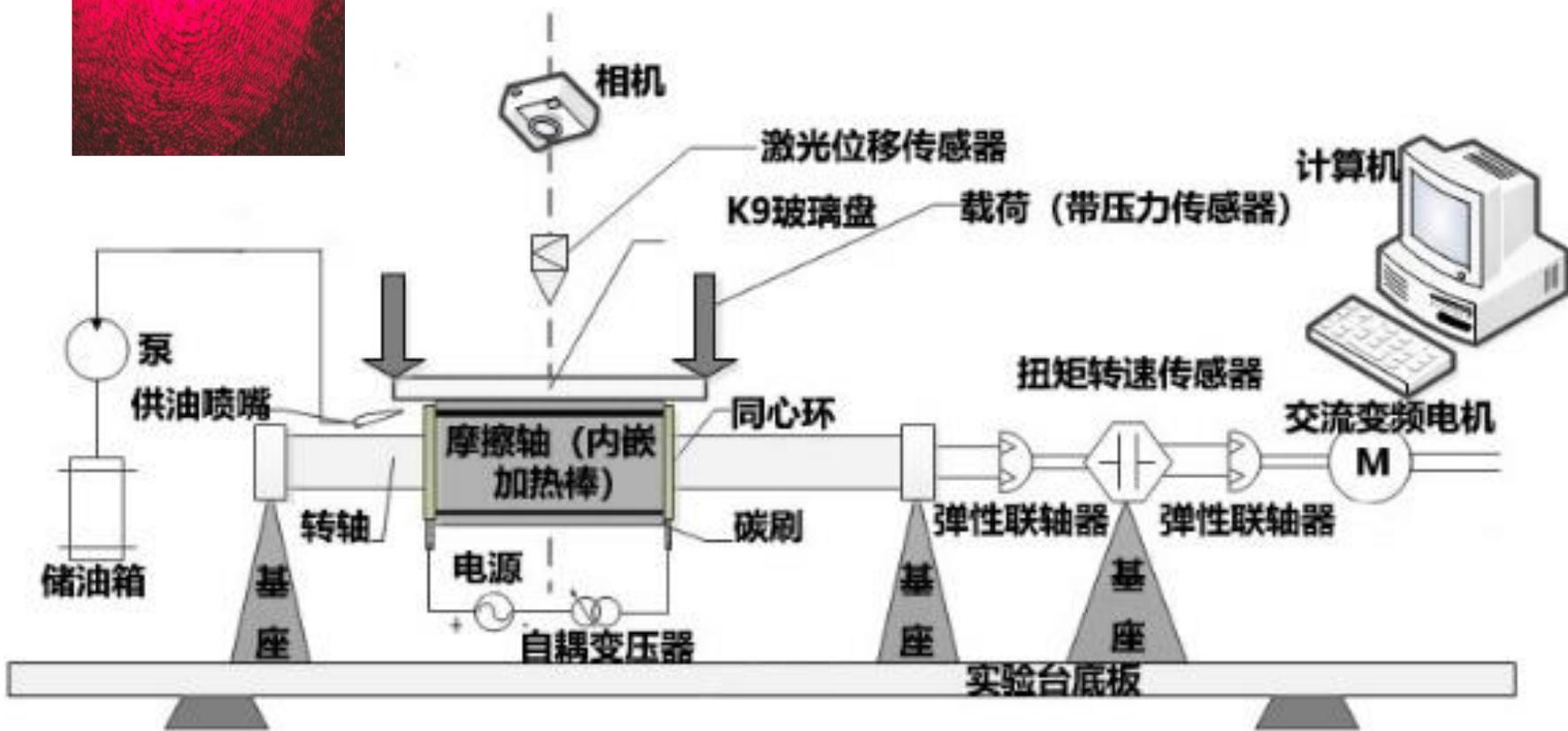
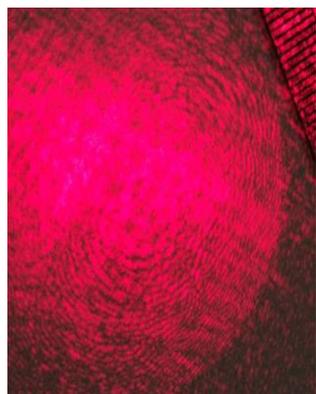
(b) 加入动网格后的气相分布

静态计算时，进口区域空化较少；但考虑轴和轴瓦之间的间隙变化时，即使目前移动较小，也可以看到进口处有明显的空化。

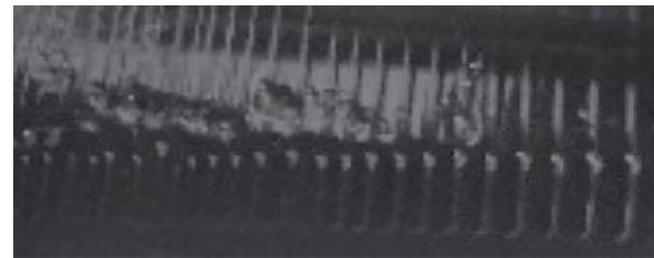
# 研究疑点

1. 供油条件差异是否会激发和影响空化？
2. 是否存在引发穴蚀的空化相分数阈值？
3. 当轴颈靠近轴瓦和远离轴瓦运动时，空化是连续发生，空化范围逐渐迁移；还是存在一个空化发生-消失（溃灭）-再次发生（位置改变）-再次溃灭的过程？
4. 如果空化发生位置迁移或溃灭再生，其时间间隔能否表征空化速度，从而与空蚀损伤程度相关联？

# 实验探索



50rpm



200rpm

# 结论与展望

(1) 主轴承的润滑过程不可避免存在空化和压力波动，轴承内压力的波动极可能导致从主轴承进入连杆轴承的供油波动；

(2) 考虑轴和轴瓦的径向相对运动，会发现轴承内的温度分布、空化位置、空化范围出现显著变化。相同范围内空化的反复出现和溃灭，是造成空蚀的根本原因。

工作展望：

- 计算轴和轴瓦之间的相对运动参数，对CFD模型成三维运动模型的仿真计算；
- 统计一个周期内空化发生及溃灭的时间/位置，标记关键节点，查询空化节点所对应的轴瓦几何，建立表征轴瓦空化烈度与空化发生频率的统计曲线，与穴蚀位置进行对比验证。

**通过模拟实验标定空化仿真的准确性**

谢谢观赏，欢迎批评指正！

