

高性能滚动轴承设计技术前沿

西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 洪
军、闫柯



轴承是影响国民经济与生产的核心基础零部件



已严重制约我国各类高端装备的自主研发进程!

高端轴承依赖进口，国产中低端却面临残酷市场竞争

- ✓ 全球高端轴承市场**600亿**容量：中国企业仅占**30亿**（5%）
- ✓ 八大轴承集团中国布局**60**多家工厂——**垄断国内70%中高端市场**



- ✓ 国内**2000**多家轴承企业——**产品80%中低端**，产能过剩率高达**50%**
在中低端轴承领域，我国早已是全球最大的生产和销售基地。

汇报提纲

- 1 滚动轴承研制技术体系
- 2 知名企业的轴承设计制造案例
- 3 滚动轴承的设计制造技术前沿
- 4 轴承先进设计体系与学科交叉思考

滚动轴承研制技术体系



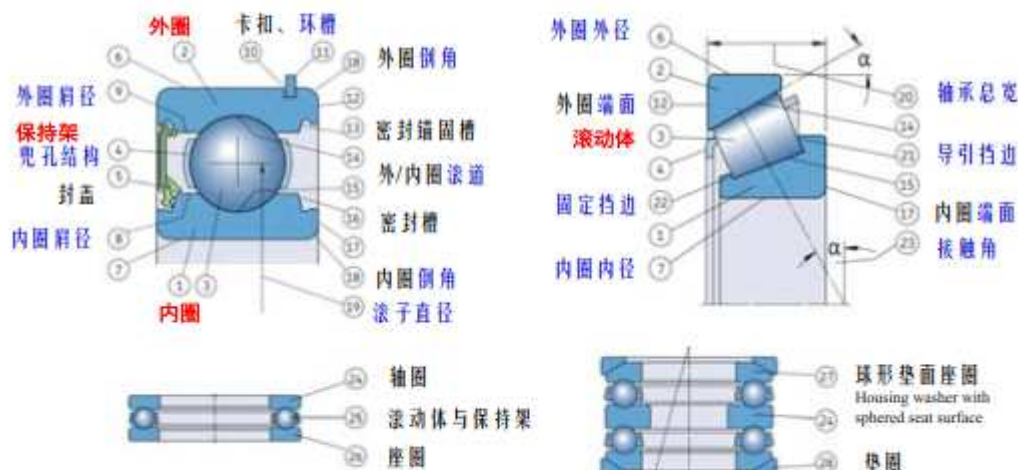
1.1 滚动轴承研制技术体系——设计技术

设计技术是擎画轴承性能与性能保障的**源头技术**！

✍ 结构与精度

✍ 表面与形貌

✍ 疲劳与寿命



主要设计对象与设计参量

1.2 滚动轴承研制技术体系——润滑技术

润滑技术是保障轴承性能实现的**“强心剂”**！



1.3 滚动轴承研制技术体系——材料技术

材料技术是决定和保障轴承性能的“基石”！



1.4 滚动轴承研制技术体系——热处理技术

热处理技术是轴承性能保障的“强化剂”！

热处理条件 热处理温度 热处理时间



连续淬火

多道回火

渗碳

球化处理

渗氮

深冷处理

等温淬火

保持架镀银

碳氮共渗

退火、正火

1.5 滚动轴承研制技术体系——精密加工技术

精密加工技术是裁制和保障轴承设计结构的“柳叶刀”！

✍ 结构尺寸精度 ✍ 表面粗糙度 ✍ 面型精度 ✍ 波纹度 ✍ 圆度

锻造

挤压

轧制

辗扩

光球/光饰

精密车削

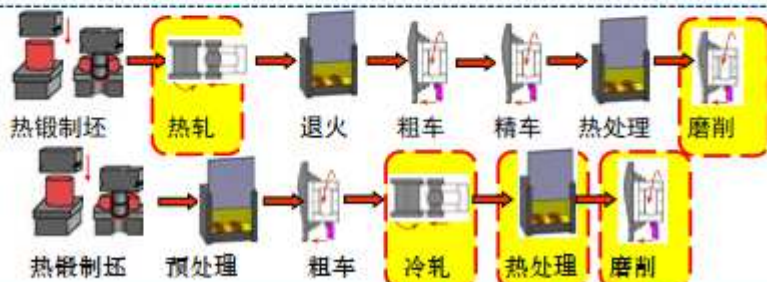
精密铣削

精密磨削

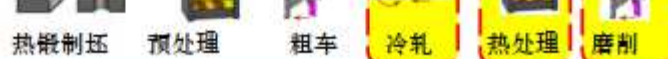
精研

套圈轧制工艺

精密热轧：



精密冷轧：



1.6 滚动轴承研制技术体系——精益装配与调装技术

精益装配与调装技术是保障轴承整体性能实现的“锚定技”！

装配误差

配合公差

轴向游隙

油封间隙

形位公差

装配预紧力

松紧度

轴承组件选配

装配工艺

自动装配装备

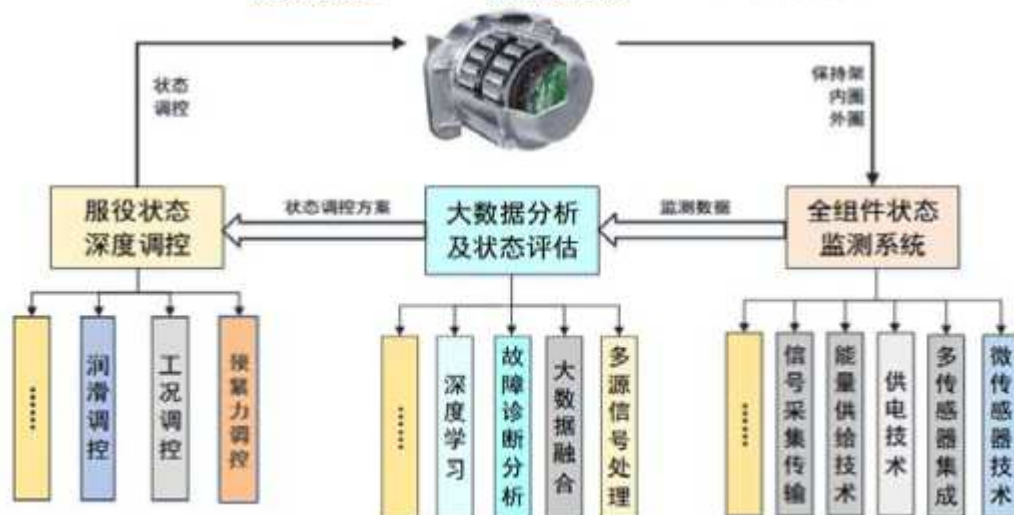
虚拟装配（数字孪生）



1.7 滚动轴承研制技术体系——性能检测与监控技术

性能检测与监控技术是号脉轴承性能状态的“千金圣手”！

▮ 跳动度 ▮ 同轴度 ▮ 温度 ▮ 振动
▮ 油液状态 ▮ 摩擦力矩 ▮ 预紧力监测



汇报提纲

- 1 滚动轴承研制技术体系
- 2 知名企业的轴承设计制造案例
- 3 滚动轴承的设计制造技术前沿
- 4 轴承先进设计体系与学科交叉思考

2.1 知名企业的轴承设计制造案例



高性能滚动轴承设计制造案例之一：SKF盾构机滚刀轴承

硬岩掘进所面临的挑战

- ◆ 工地现场刀具组装条件不易受控
- ◆ 极高、复杂的载荷
- ◆ 破岩时的冲击、振动和偏心
- ◆ 高温、污染、润滑化不良



对滚刀轴承提出更高的要求

- 优质钢材、特殊热处理
- 高尺寸一致性、安装便利性
- 优化的轮廓曲线
- 低摩擦力矩
- 良好的表面质量、表面耐磨性



2.1 知名企业的轴承设计制造案例



机械与材料的多学科交叉提供了创新解决方案！



2.1 知名企业的轴承设计制造案例



高性能滚动轴承设计制造案例之二：舍弗勒10MW风机主轴轴承

海上风力发电所面临的挑战

- ◆ 极高、复杂随机的载荷
- ◆ 海浪冲击、振动
- ◆ 高潮湿环境



对风电轴承提出更高的要求

- 优质钢材、特殊涂层
- 耐腐蚀润滑剂
- 优化的轮廓曲线、滚子修型
- 低摩擦力矩
- 良好的表面质量、表面耐磨性

2.1 知名企业的轴承设计制造案例



机械与材料的多学科交叉提供了创新解决方案！



2.1 知名企业的轴承设计制造案例



高性能滚动轴承设计制造案例之三：舍弗勒变速箱传动轴支撑轴承
传统定位轴承方案——圆锥滚子轴承成对搭配安装于传动轴两端



传统定位轴承和非定位轴承搭配应用方案



✓ 可减少甚至消除定位轴承上的轴向力，降低系统的摩擦损耗

定位轴承—深沟球 + 非定位轴承—圆柱滚子

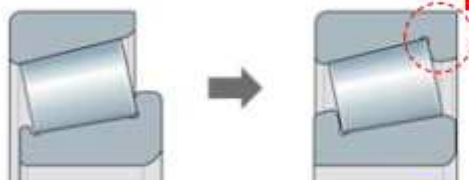
✗ **缺陷：**深沟球轴承要达到与圆锥滚子轴承相同的承载力，需要增加轴承尺寸，对系统空间提出了额外要求，应用受限。

2.1 知名企业的轴承设计制造案例



机械与材料的多学科交叉提供了创新解决方案！

舍弗勒超低摩擦力角接触滚子轴承



◆ 新型角接触滚子轴承在结构上与圆锥滚子轴承类似

外圈上增加挡边



先进涂层

新材料外圈

外圈上增加挡边



可以承载两个方向的轴向力

可以用作定位轴承

✓ 兼具了圆锥滚子轴承的高承载能力及球轴承的低摩擦

2.1 知名企业的轴承设计制造案例

MOTION & CONTROL
NSK

高性能滚动轴承设计制造案例之四：NSK长寿命耐摩擦轴承

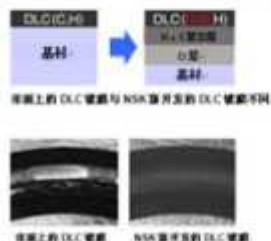
极端工况装备面临的挑战

- ◆ 乏油、润滑不良的工况
- ◆ 载荷冲击
- ◆ 主轴涡动、失速
- ◆ 组件碰磨



对轴承提出更高的要求

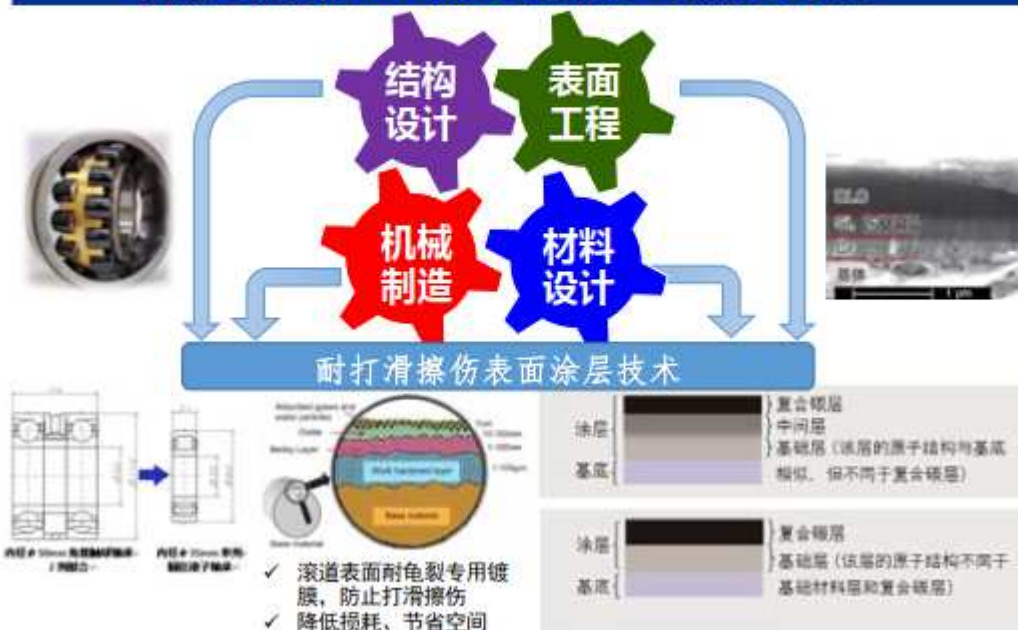
- 耐摩擦涂层
- 表面应力层优化
- 优化的滚道轮廓曲线
- 耐打滑蹭伤
- 良好的表面质量、表面耐磨性



2.1 知名企业的轴承设计制造案例

MOTION & CONTROL
NSK

机械与材料的多学科交叉提供了创新解决方案！



2.2 知名轴承企业的专用软件工具



FAG: 解析技术与数据库融合的贯通式设计分析工具

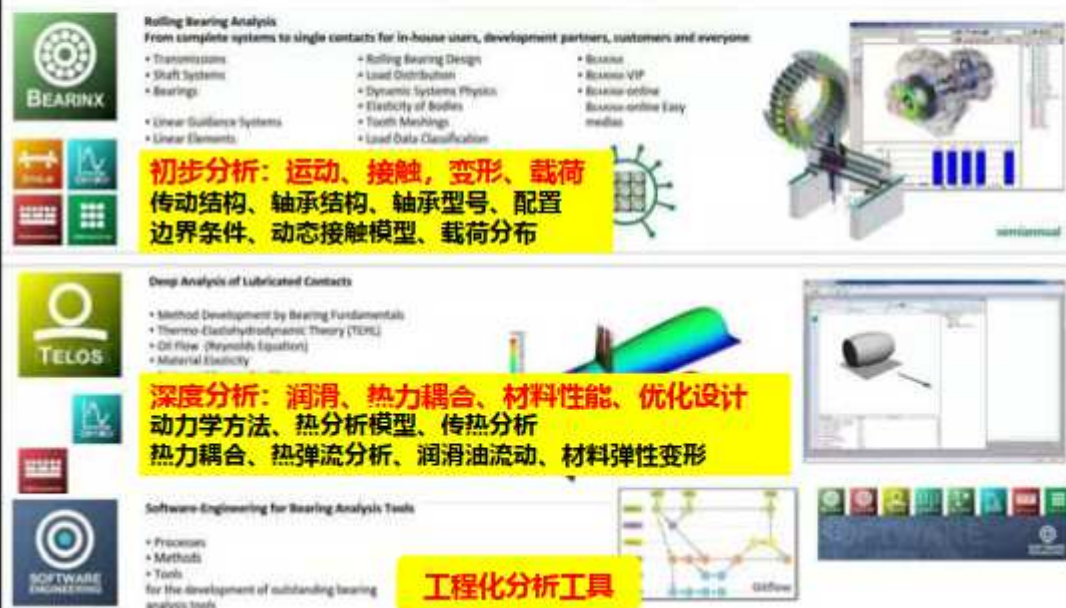


FAG的轴承设计工具优势在于强大的辅助设计数据库，涵盖了从接触分析基础理论到服役性能模拟评价的贯通式分析。

2.2 知名轴承企业的专用软件工具



FAG: 解析技术与数据库融合的贯通式设计分析工具



2.2 知名轴承企业的专用软件工具



FAG: 解析技术与数据库融合的贯通式设计分析工具



Virtual Test Rig for Rolling Bearing Analysis - Deep Dive into Dynamic Rolling Bearing Behavior

- Analysis of the dynamic processes in bearings
- Detailed contact and friction model
- Prediction and prevention of bearing damage

- 3D-kinematics of bearing elements
- Dynamic load distribution
- Damage characteristic values
- Cage dynamics



- Under Development:
- Flexible Cages
- Mechanical Systems with multiple Bearings



The powerful modeling and processing platform to

analyse complete systems dynamically

- Getriebschwingungen simulieren
- Anregung und Übertragungsverhalten in simulierten Produkten verstehen
- Einflussfaktoren auf Akustik ermitteln
- Maßnahmen zur akustischen Optimierung identifizieren und überprüfen



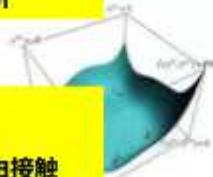
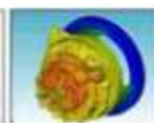
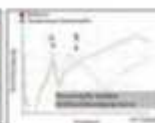
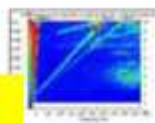
Optimization Component for ABAQUS

- Robust Optimization
- Optimization Algorithms library
- Robustness Analysis
- Full Enumeration
- Free Constraints, Objectives
- Integrated in Simulia, Truex, Bionics, etc.

性能虚拟试验:
动态载荷、接触模型
性能预测分析、损伤预测
保持架运动、弹性保持架

强大的系统分析:
装配过程与工艺
轴系性能分析

优化设计:
动态优化模型
强健设计、自由接触



2.2 知名轴承企业的专用软件工具



NSK: BRAIN高级设计工具 (BeaRing Analysis In NSK)

系统功能

轴承单体运转解析程序 — PACS

- 可对应NSK所有轴承产品(各种球轴承, 滚子轴承)
- 滚动体(球, 滚子)的运动, 模拟滑动发热等情况

轴-轴承系统变形解析程序 — STIFF

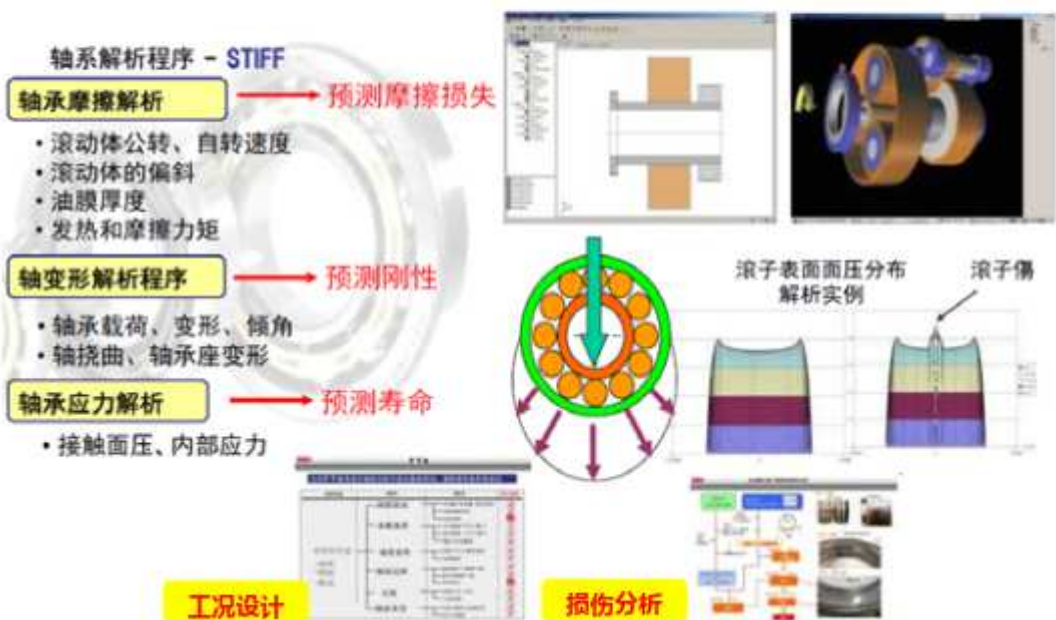
- PACS程序分支化
- 考虑轴和轴承箱的变形(FEM)



2.2 知名轴承企业的专用软件工具

MOTION & CONTROL
NSK

NSK: BRAIN高级设计工具



2.2 知名轴承企业的专用软件工具

SKF

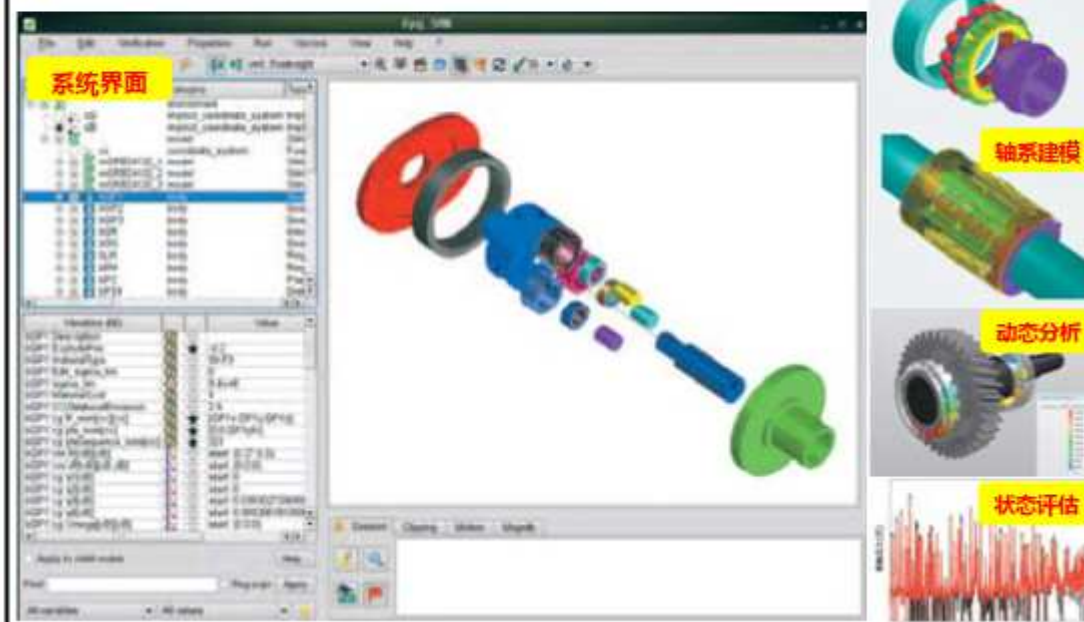
SKF: SimPro Quick 快速简易设计工具



2.2 知名轴承企业的专用软件工具



SKF: Beast高级设计分析工具



汇报提纲

- 1 滚动轴承研制技术体系
- 2 知名企业的轴承设计制造案例
- 3 滚动轴承的设计制造技术前沿
- 4 轴承先进设计体系与学科交叉思考

3.1 NSK的轴承设计制造技术

MOTION & CONTROL™
NSK

NSK：围绕四大核心技术的滚动轴承设计制造



NSK的轴承设计制造体系源于其四大核心技术的交叉融合，强调利用专用的解析技术联合工程摩擦学与材料学开展轴承创新设计与制造。

3.1 NSK的轴承设计制造技术

MOTION & CONTROL™
NSK

NSK四大核心技术—摩擦学技术

润滑剂设计技术

润滑脂流动性控制
物理性能设计，降低阻力
润滑脂成分设计
对应轴承不同使用环境

表面控制技术

表面涂层及形貌、纹理设计
纳米材料、表面纹理
有机基团
高强度、自润滑涂层

润滑状态观测

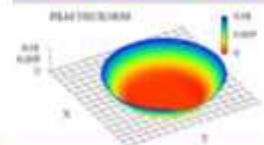
轴承内部可视化
润滑流动观测，油膜数值化

分析评价技术

摩擦化学分析、构性分析
成分分析、纤维增稠、纳米硬度



轴承内部穿透观测



表面处理调节油膜厚度

3.1 NSK的轴承设计制造技术

MOTION & CONTROL
NSK

NSK四大核心技术—材料学技术

材料设计技术

合金设计、复合材料、陶瓷
根据使用环境、轴承性能设计最佳材料配方

热处理技术

通过控制组织实现材料高性能化
高效热处理工艺、变形矫正



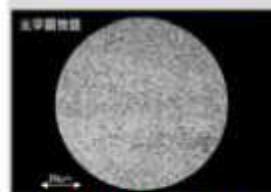
高频热处理

分析评价技术

金属组织、疲劳现象数值化
结晶相位分析、高分解能观测、疲劳分析

性能评估技术

性能分析试验群、失效再现
耐久寿命试验、可靠度评价
特殊环境的寿命试验



材料组织成分
定量分析

3.1 NSK的轴承设计制造技术

MOTION & CONTROL
NSK

NSK四大核心技术—性能解析技术

将力、热以及润滑可视化，模拟现象和性能，提升开发效率

性能解析技术

动力学分析，极限设计
保持架运动分析
轴承摩擦力矩计算

润滑状态解析

流动分析，磨损控制
润滑脂流动模拟
油膜观测、模型修正

加工制造解析

制造工程分析
产品结构分析
加工、热处理分析模拟

精密测量技术+大规模计算+基础设施+试验评价技术

精密测量、快速建模、并行计算技术
可视化系统、系统基础试验

3.1 NSK的轴承设计制造技术

MOTION & CONTROL
NSK

NSK四大核心技术—机电一体化技术

机械技术

发挥组件的机械性能

优化组合装配、多轴组合
轴系结构设计、精密操作装置

控制技术

运动控制、智能化

控制模型
服役控制模拟

电机

传感器

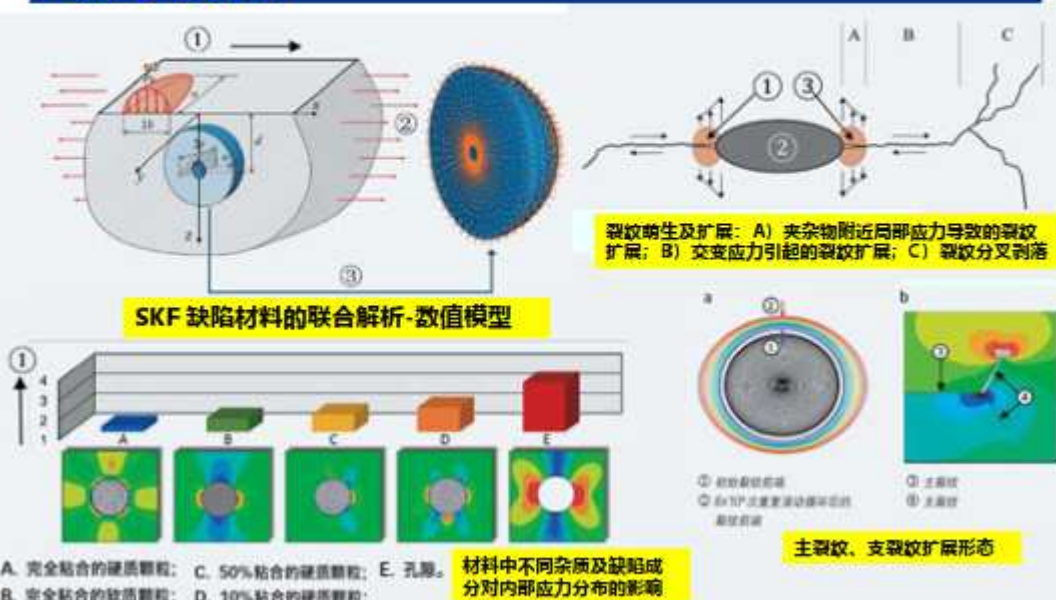
智能电路

一体化、智能化

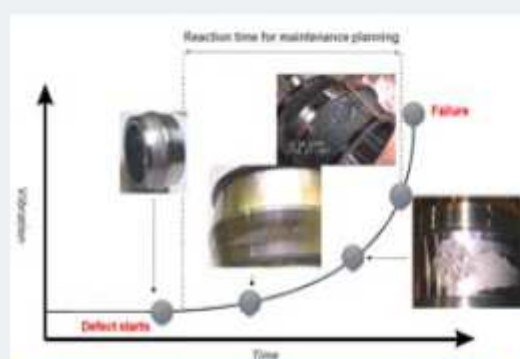
电机磁场分析、轴承高功能设计
电路小型化可靠性、无线通信、供电

3.3 轴承疲劳解析技术—SKF解析模型

SKF：利用组合解析-数值模型，研究了缺陷材料的裂纹萌生不同阶段及其扩展行为



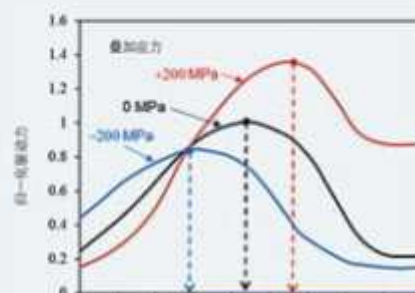
3.3 轴承疲劳解析技术—SKF解析模型



轴承潜在故障-功能故障预测模型

SKF:

基于对表面下夹杂物引起的疲劳裂纹萌生和扩展的研究，SKF开发了专用模型来预测轴承钢的极高周疲劳 (VHCF) 强度和疲劳极限

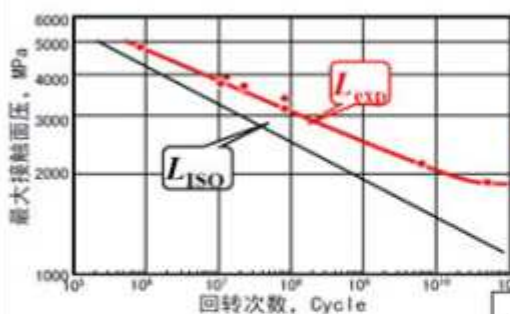


受叠加应力影响的球型夹杂物引发的裂纹扩展驱动力



SKF不同疲劳模型的设计值、剩余寿命变化

3.3 轴承疲劳解析技术—SKF解析模型

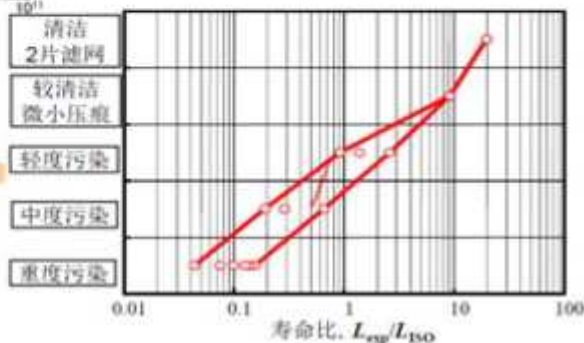


目前国内仍然沿用传统的材料疲劳经验公式
NSK、SKF等：公司独有的寿命设计修正模型

滚动轴承有疲劳极限载荷状态下
(清洁润滑情况时)

在洁净润滑的条件下，由于最大接触面压变小的缘故，实际寿命要长于理论寿命。

轴承寿命根据润滑油污染度情况
(润滑状态)有很大差异



3.4 滚动轴承精密加工制造技术

轴承组件的加工工序：锻造加工——车削加工——热处理——**精密加工**

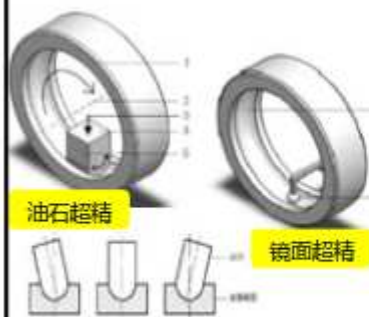
精密加工是决定轴承表面质量、几何精度、应力与寿命的最重要环节！



3.4 滚动轴承精密加工制造技术

滚动轴承组件的精密加工——**镜面超精、油石超精研技术**

- ✓ 加工速度：SKF工厂轴承内沟道磨削线速度120m/s，国内45-60m/s
- ✓ 自动化程度：日本NSK工厂36条生产线/人，国内1-2条生产线/人
- ✓ 加工精度：国内油石超精研加工表面质量 $R_a=0.1$ 微米
NTN、SKF轴承工厂超精研加工表面质量 $R_a=0.04$ 微米



德国索菲娜Sofina轴承超精机



日本大阪轴承超精机

3.4 滚动轴承精密加工制造技术

滚动轴承套圈精密加工—新型超精加工技术



3.4 滚动轴承精密加工制造——共性关键技术

共性关键技术——轴承组件控形控性制造技术



砂轮工作面氧化膜状态控制机理

界面层形貌演变机制与复合强化机理

表层接触区材料冲蚀碎裂形成与发展机制

热处理内应力产生与演变规律

残余应力形成与控制机理

滚道谐波形态跨工艺调控机制

表面热震裂纹形成与发展机理

脉冲射流能量传递机理

制造过程不均匀变形对组织结构与性能参数演化的影响规律

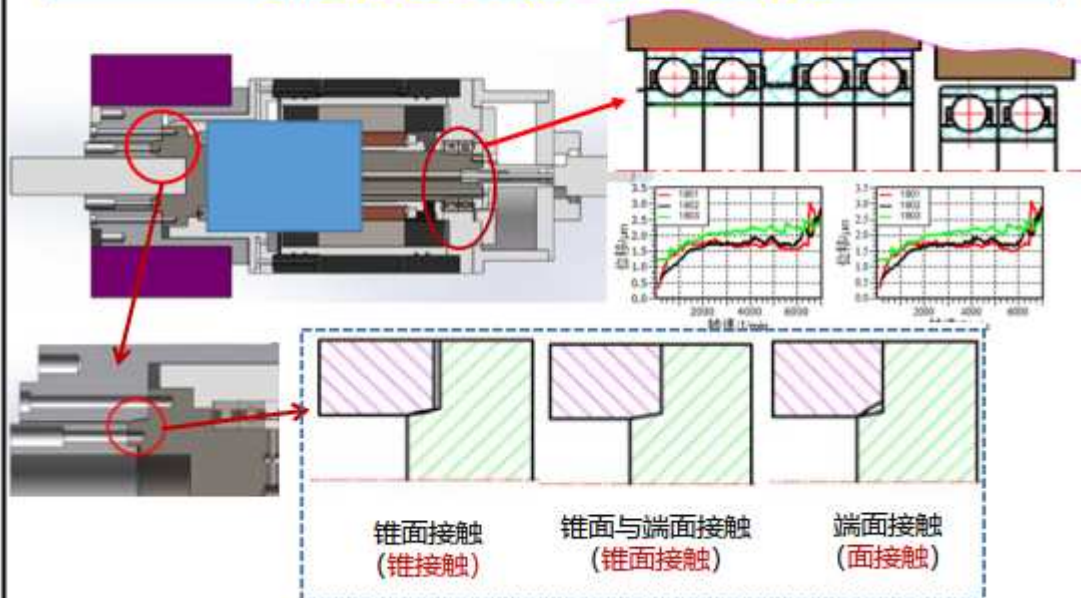
新型复合加工原理及技术

组合工艺新原理新方法

基础理论研究

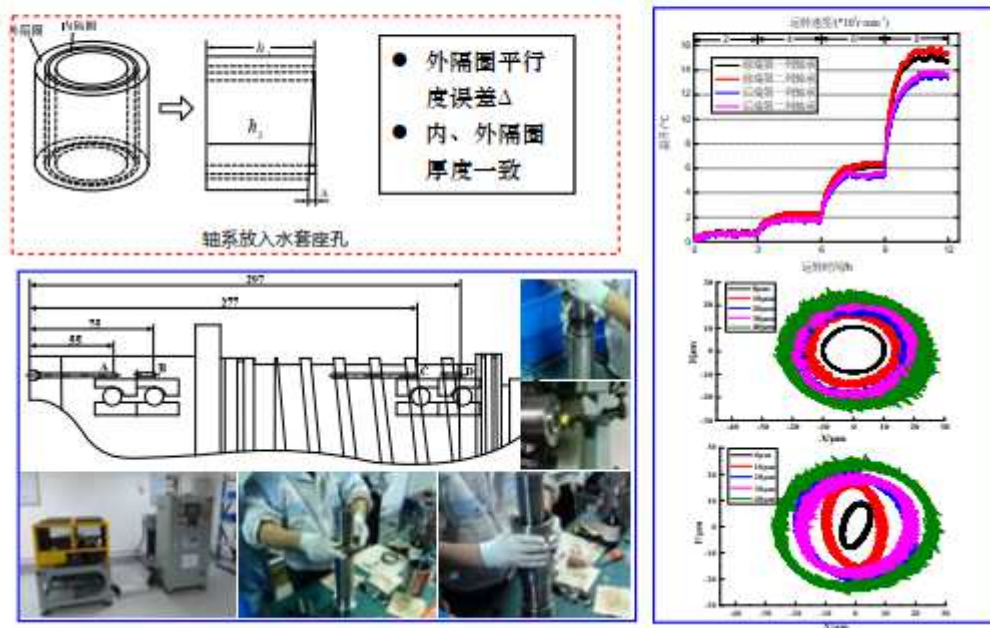
3.5 精密轴承装配质量控制技术

SKF考虑了装配间隙与轴承结合面状态变化



3.5 精密轴承装配质量控制技术

NSK也开展了装配质量与轴承性能的解析与实验设计



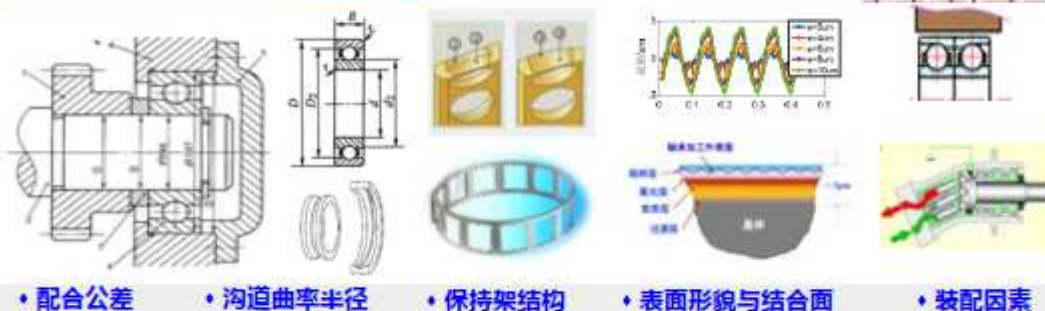
汇报提纲

- 1 滚动轴承研制技术体系
- 2 知名企业的轴承设计制造案例
- 3 滚动轴承的设计制造技术前沿
- 4 轴承先进设计体系与学科交叉思考

4.1 轴承设计中的共性关键技术

□ 共性关键技术之一：结构与精度设计技术

结构/尺寸/精度设计参量



古语云：“差之毫厘，谬以千里。”

尺寸精度的毫厘之差，可能会引起物理性能的千里之别！

✓ 动力学性能

✓ 接触热阻、温升等热力学性能

✓ 刚度

...

4.1 轴承设计中的共性关键技术：结构与精度

目前工程上精度、公差带等的选取主要是根据基础零部件的类型、使用工况以及结构尺寸，通过查阅《滚动轴承设计手册》或者凭借经验确定并给出公差范围；尚未达到“精确设计”的程度，也无法满足理想尺寸与精度设计的技术需求。



结构尺寸 > 公差带的基准 > 物理性能
精度等级 > 公差带的范围 > 物理性能的变动范围

理想设计应涵盖内容

✓ 精度与物理性能之间的精准关系 ✓ 物理性能协同保障的公差匹配设计信息
✓ 物理性能协同保障的装配工艺设计信息 ...

检测零件精度等特征参数，选配出配对零件，设计/规划出诸如装配过程中何时调整零件位姿等工艺信息，实现物理性能协同保障。

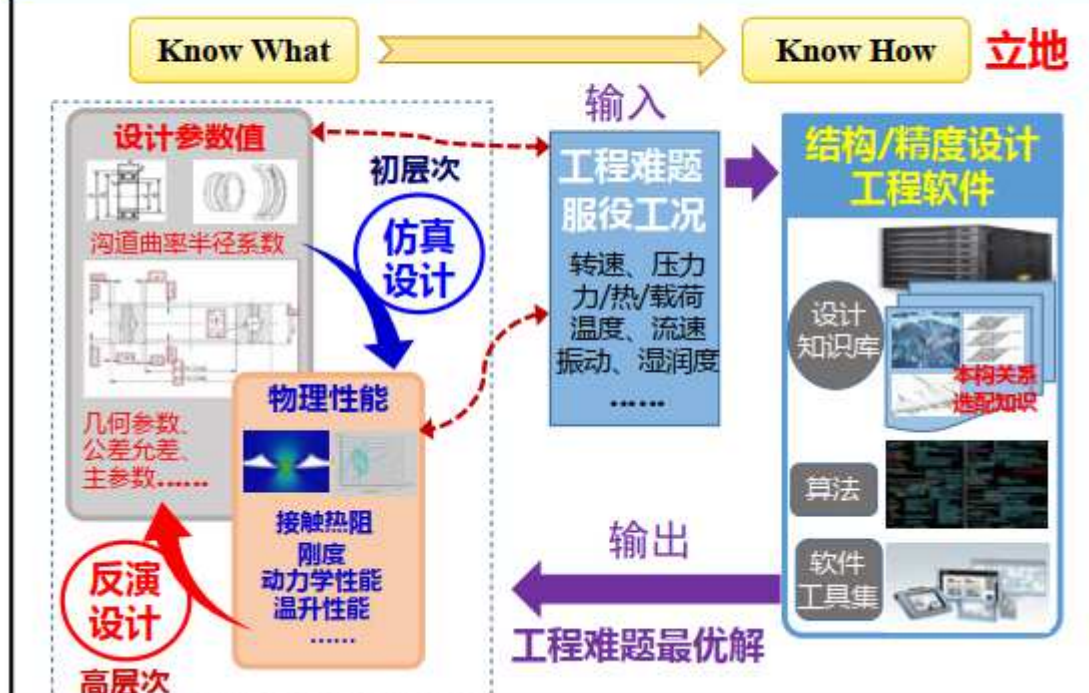
破解之道——设计中真正解决 Know (Why, What, How) 问题

Know
Why
顶天

基础
理论
研究

- 几何精度时间域/空间域演变机理及其保障技术
- 基础零部件几何误差与物理性能的本构关系
- 基础零部件无公差约束选配设计新理论新方法
- 几何精度与物理性能协同保障的装配工艺设计新技术

4.1 轴承设计中的共性关键技术：结构与精度



4.1 轴承设计中的共性关键技术

□ 共性关键技术之二：表面与形貌设计技术



➤ 表面与形貌设计是保障轴承多组件物理性能的“基石”！

✓ 耐磨性 ✓ 耐疲劳性 ✓ 耐腐蚀性 ✓ 配合性质 ✓ 承载 ✓ 密封 ...

但是当前工程界存在对表面与形貌设计有所忽视的问题！



4.1 轴承设计中的共性关键技术：表面与形貌

➤ 理想工程设计图纸应提供的内容 ➡ 以便工程师据此加工实现

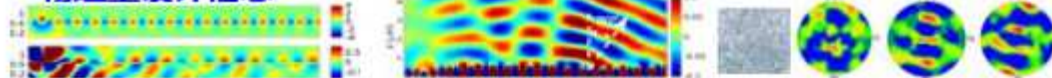
• 几何量设计信息

$$f(x, y) = a + b \cdot x + c \cdot y + d \cdot x \cdot y + e \cdot x^2 + h \cdot y^2 + \dots$$



✓ 表面形貌空间分布、数学表达式 ✓ 微结构参数 ✓ 波度信息 ✓ 粗糙度信息

• 物理量设计信息



✓ 硬度值的表面分布云图、深度方向信息等

✓ 残余应力值的分布云图或理想区间值等

✓ 金相组织信息

破解之道——设计中真正解决 Know (Why, What, How) 问题

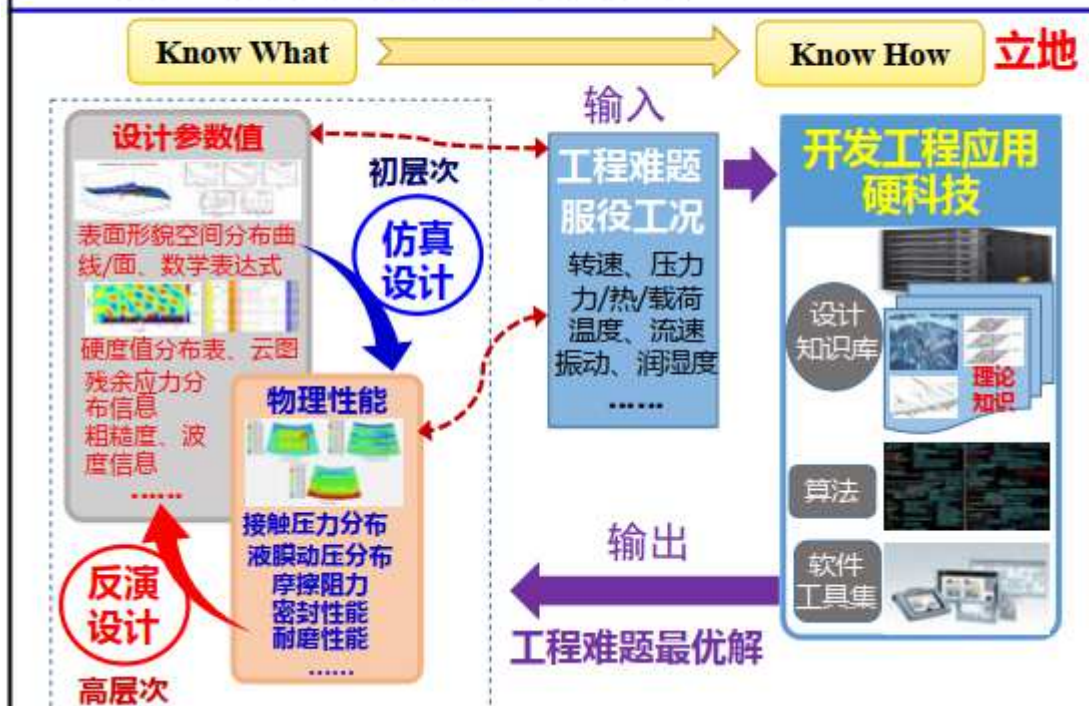
Know
Why

基础
理论
研究

顶天

- 轴承零部件表面几何量对物理性能的影响与演变机理
- 轴承零部件表面物理量对物理性能的影响与演变机理
- 轴承零部件表面几何量设计的新理论新方法
- 轴承零部件表面物理量设计的新理论新方法

4.1 轴承设计中的共性关键技术：表面与形貌



4.1 轴承设计中的共性关键技术

□ 共性关键技术之三：摩擦与润滑共性设计技术



➤ 摩擦与润滑设计是保障轴承多组件物理性能的“强心剂”！

✓ 耐磨性 ✓ 耐疲劳性 ✓ 耐腐蚀性 ✓ 可靠性 ✓ 承载 ✓ 寿命 ...

现行设计要点 模糊、内容少
设计理想 应提供的
✓ 润滑介质粘度等物性参数
✓ 微结构设计参数
✓ 摩擦界面硬度/应力分布云图
✓ 摩擦副材料选配设计
✓ 配对界面形貌数学表达式
✓ 润滑油更换周期、添加剂建议
...

Know Why

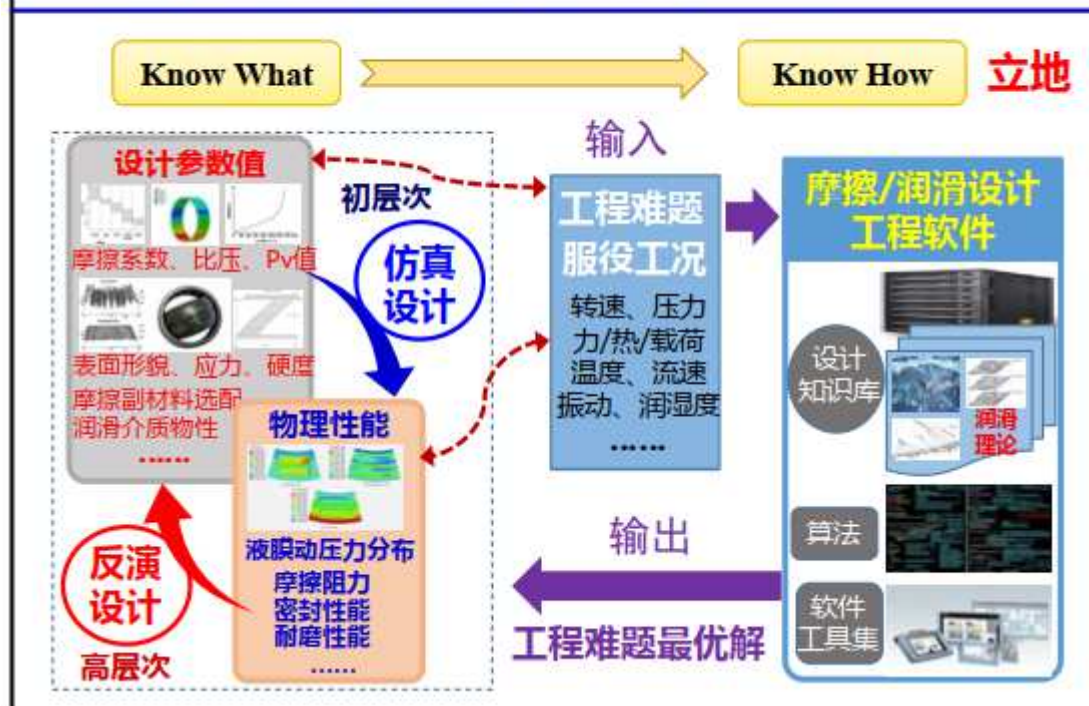
顶天

基础理论研究

- 苛刻服役环境润滑形成、演化与失效机制
- 极端服役工况润滑新理论新方法
- 磨损诱发、形成、演变与破坏机制
- 极端服役工况减摩降磨设计与保障新技术

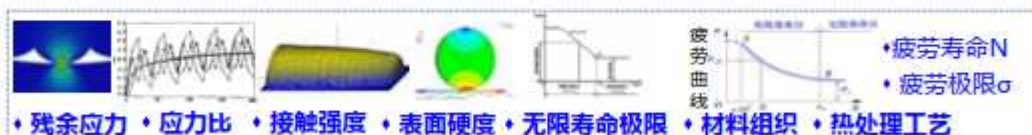
破解之道

4.1 轴承设计中的共性关键技术：摩擦与润滑



4.1 轴承设计中的共性关键技术

□ 共性关键技术之四：疲劳与寿命设计技术



➤ 疲劳与寿命设计是保障轴承多组件物理性能的“落脚点”！

✓ 耐磨性 ✓ 耐疲劳性 ✓ 耐腐蚀性 ✓ 可靠性 ✓ 寿命 ...

现行设计要点
模糊、内容少
理想设计
应提供的信息

✓ 表面残余应力空间分布云图、深度 ✓ 金相信息
✓ 表面硬度空间分布云图、分布深度 ✓ 精细热处理工艺
✓ 单元体疲劳极限/寿命 ✓ 单元体维修或更换时间建议信息
...

Know Why

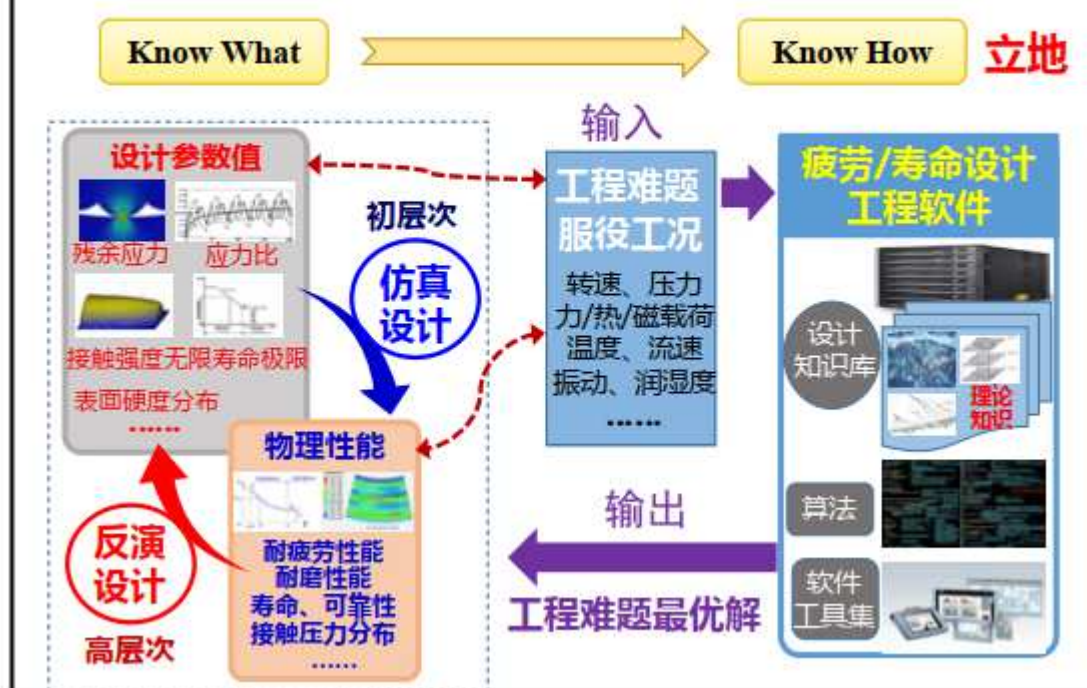
顶天

基础研究

- 极端服役工况轴承组件疲劳演变及其失效机理
- 轴承组件延寿设计新技术与无限寿命理论
- 轴承组件寿命预测新理论新方法
- 轴承组件可靠性设计、增长与保障新技术

破解之道

4.1 轴承设计中的共性关键技术：疲劳与寿命



4.2 轴承先进设计体系与学科交叉思考

滚动轴承：多组件构成的学科交叉体



4.2 轴承先进设计体系与学科交叉思考

滚动轴承：多组件构成的学科交叉体

