

# 电动汽车轮毂电机 多学科仿真设计集成平台

史浩然/比亚迪股份有限公司



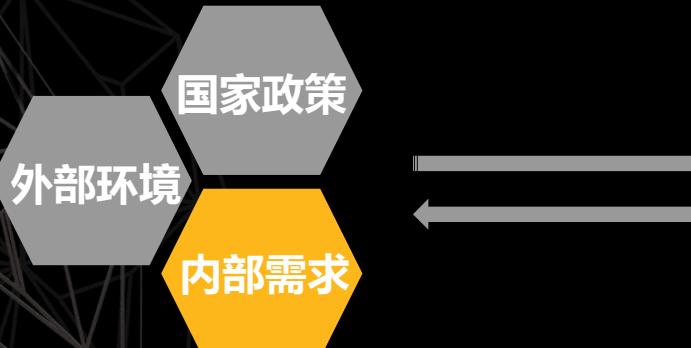
# 目录

- 1 背景、问题、需求
- 2 主要内容
- 3 技术方案
- 4 平台研究

# 1. 背景、问题、需求

## 研究背景

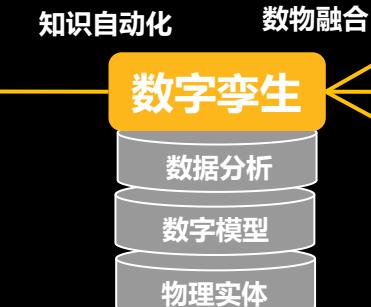
企业数字化转型  
势在必行



数字化产品

数字营销

智能制造  
智慧园区



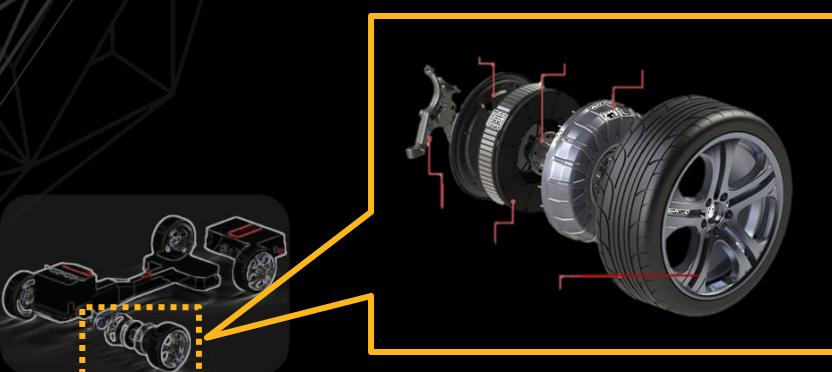
造型设计  
样机实验  
仿真设计

研发能力

系统化、协同化

高性能

电磁性能  
散热性能  
机械强度  
振动噪声



# 轮毂电机开发设计的行业问题

- 软件种类多样
- 设计流程割裂

磁密云图  
磁力线分布  
电磁转矩、转矩脉动  
相/线电压、电磁损耗

冷却液流速云图  
各部件温度云图  
(转子、定子、绕组等)

- 分析模型构建复杂
- 输入输出数据多样

多类型电机结构参数  
(定子结构, 转子结构, 绕组、永磁体)  
材料, 网格尺寸, 激励等仿真计算参数

**电机电磁学仿真**  
AEDT  
电磁场分析模型

**电机传热学学仿真**  
Fluent  
温度场分析模型

传热系数  
(外壳、定子、绕组、转子、气隙等)  
材料、网格尺寸、温度等仿真计算参数

敏感性分析参数  
(设计实验样本点、取样方法)  
多目标优化相关参数  
(优化变量、目标、约束条件、算法)

**电机优化设计**  
OptiSlang  
优化设计模型

**电机静力学仿真**  
Mechanical  
应力场分析模型

转子结构参数  
(减重孔、隔磁桥、永磁体等)  
材料, 网格尺寸、载荷等仿真计算参数

- 信息孤岛复杂度高
- 数据通讯有效性低

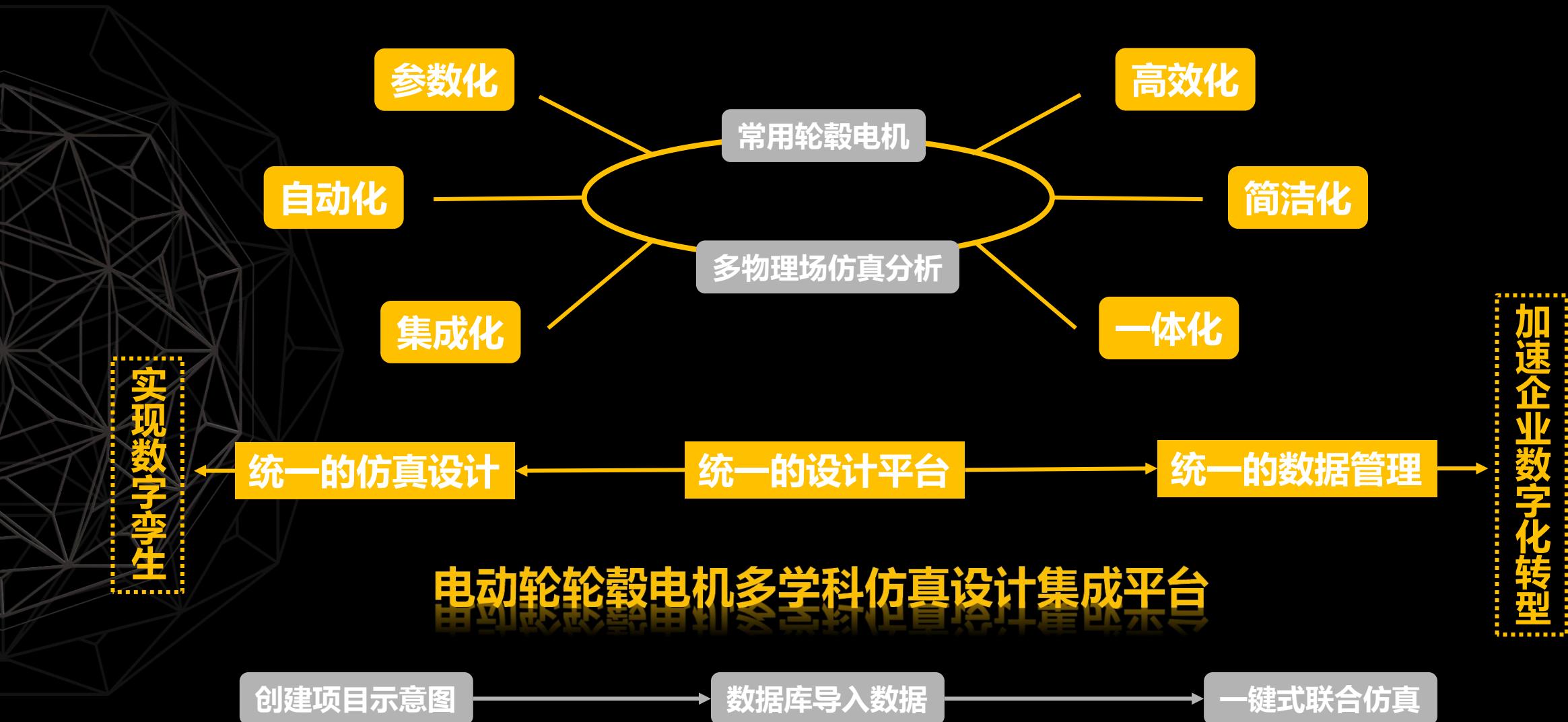
响应面、  
相关性矩阵、相关系数  
Pareto图、  
响应值、最优参数

总变形云图  
等效应力云图  
剪应力云图  
等效应变云图

- 设计复性高
- 开发效率低

分析软件的独立性、设计数据的繁杂性、仿真流程的专业性以及人工操作依赖性强

## 行业需求



## 2. 研究内容

# 研究内容

## 模型构建

轮毂电机转子、定子、绕组、永磁体等几何结构的参数化与模型构建的自动化。

电机设计理论

选型、关键参数

电机几何模型

二维、三维

尺寸约束关系

## 多学科仿真

轮毂电机电磁学、结构静力学、流固耦合热仿真设计的参数化与自动化实现。

流程代码化

二次开发方案

仿真分析流程

参数化程度

多种分析模型

输入输出数据

## 数据管理与交互

多学科数据库建立，轮毂电机多学科仿真设计输入与输出数据的存储与访问，多学科仿真设计间的数据通讯。

数据库框架

数据读写

数据增删改查

SQL

仿真结果访问

SQL

## 仿真设计集成

多学科仿真设计模块的构建与集成，各仿真设计模块与数据库间的数据通讯，统一的仿真设计集成平台搭建。

软件架构

Python、Qt

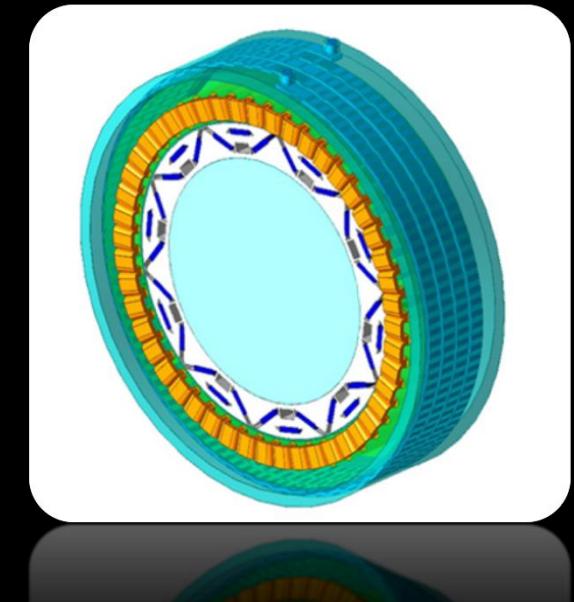
用户交互界面

接口设计

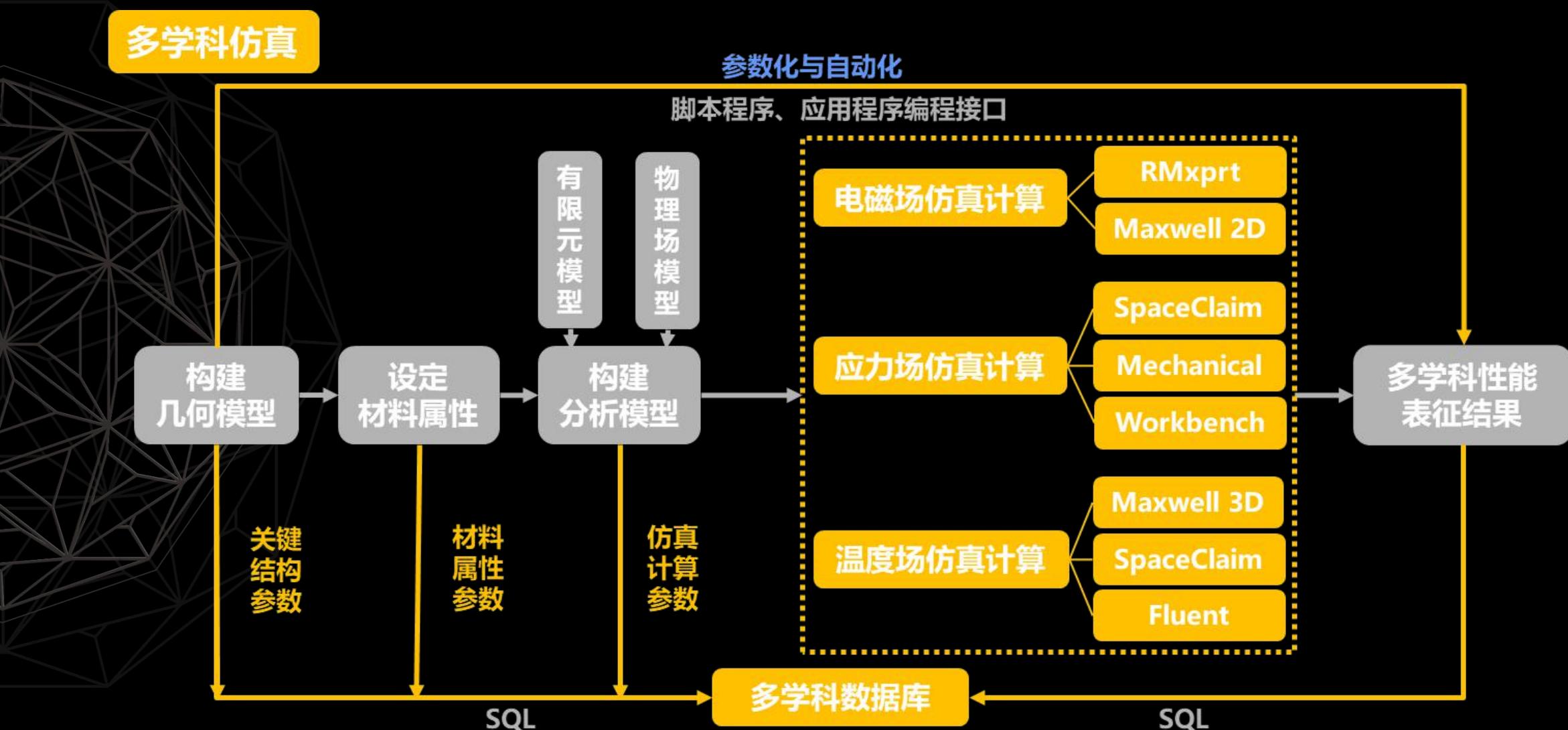
### 3. 技术方案

# 电机几何模型构建参数化与自动化

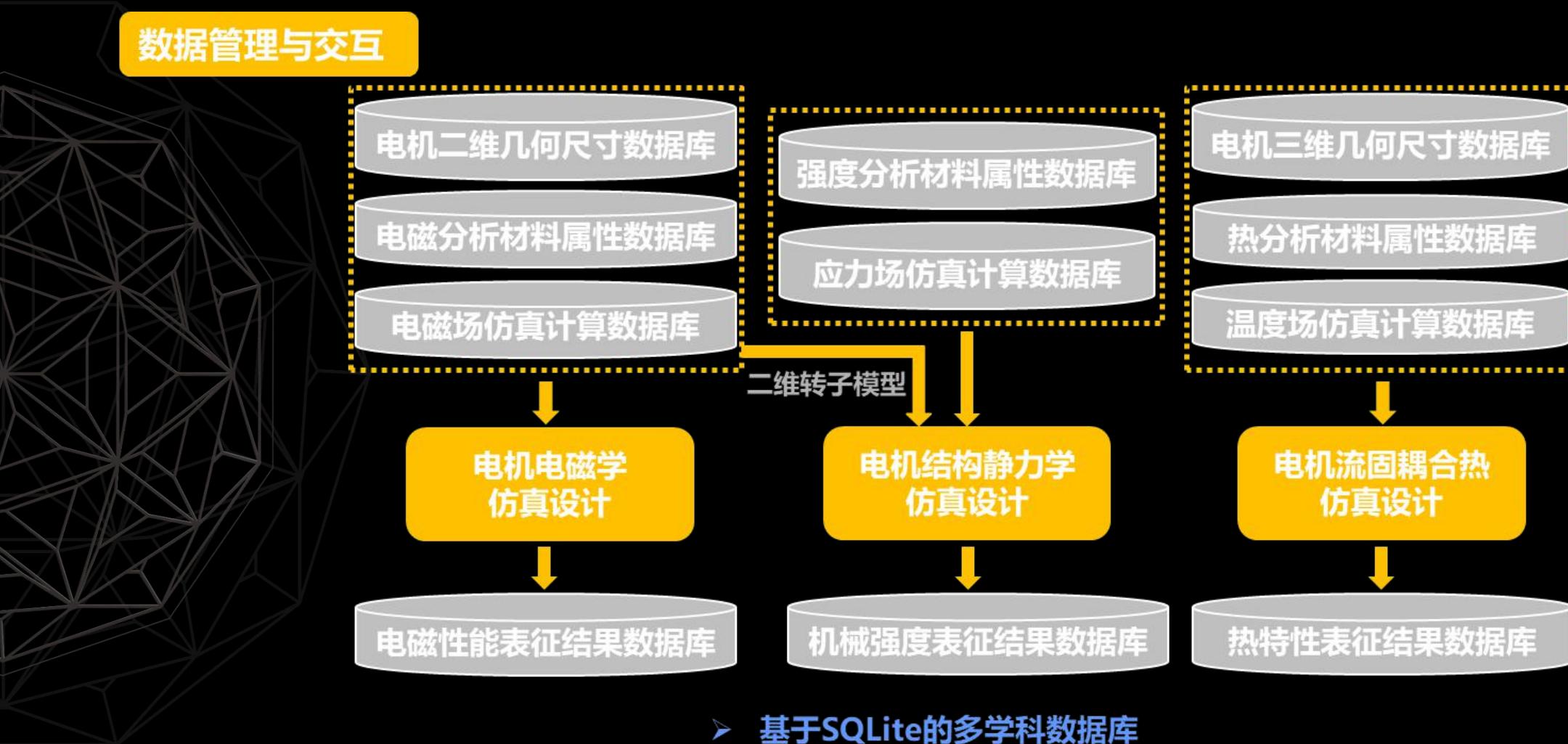
## 模型构建



# 电机多物理场仿真设计参数化与自动化



# 电机多学科仿真设计数据管理与交互



# 电机多学科仿真设计集成平台软件架构

## 仿真设计集成

### 分层式平台架构

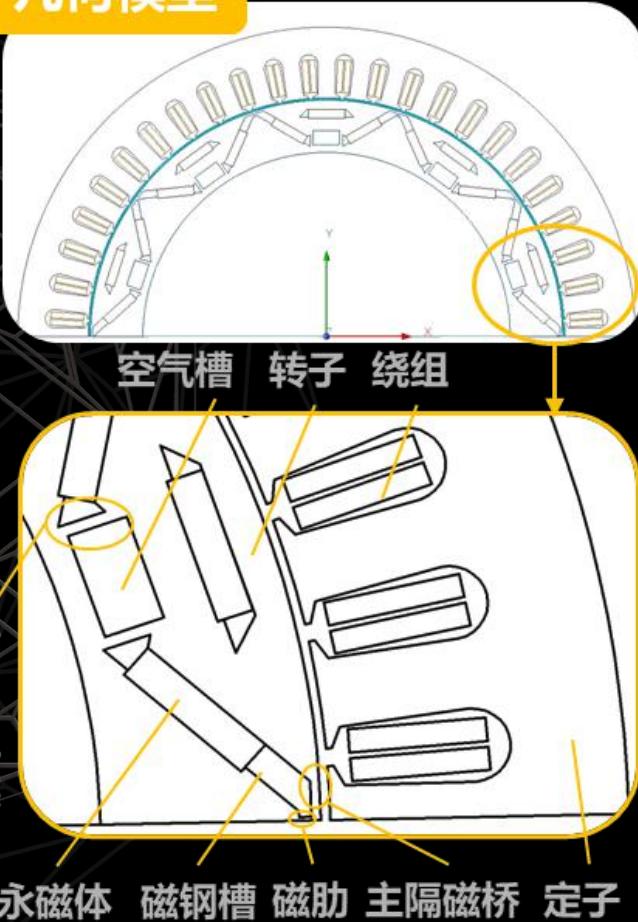
- 标准的架构，各层分工明确
- 结构简单，易于开发
- 适合分层开发，层与层间通过接口通讯
- 每层可以独立测试



## 4. 平台研究

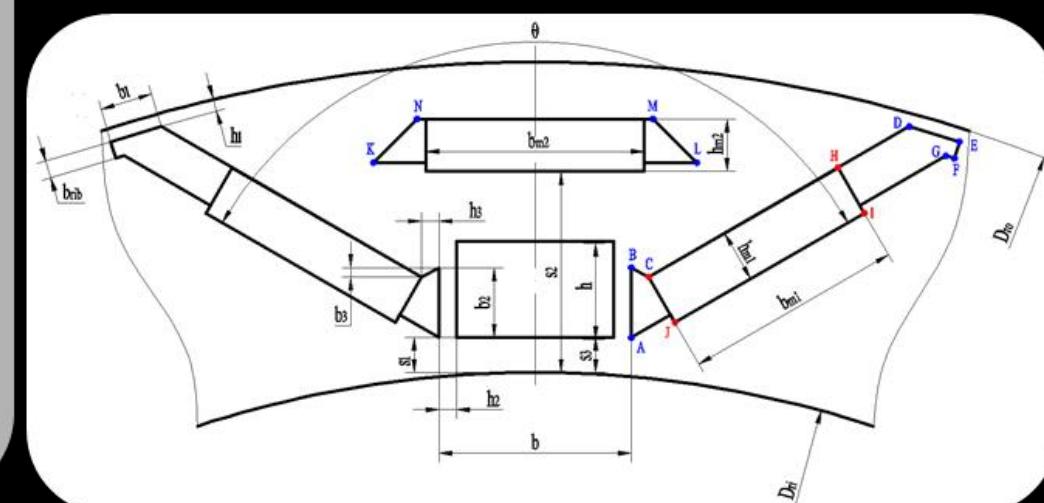
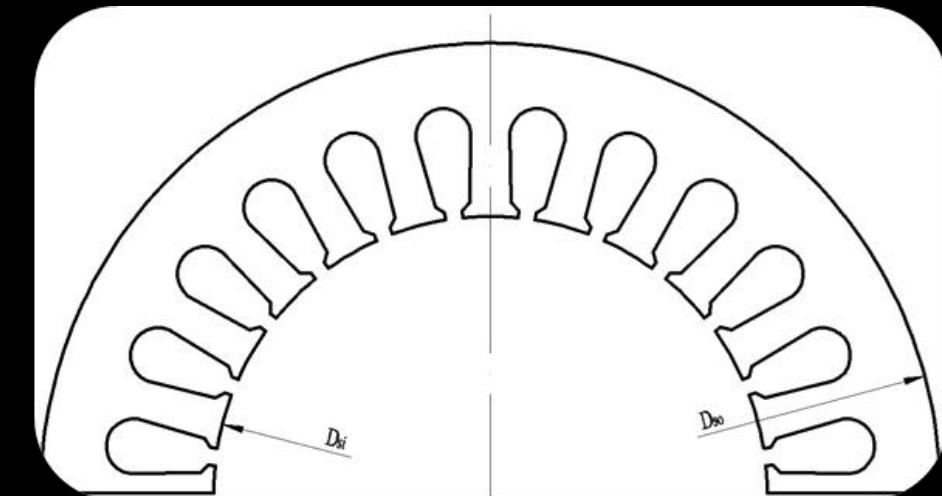
## 电机二维几何模型参数化

几何模型



基本结构参数

- 定、转子外径与内径
  - 定子槽尺寸
  - 永磁体宽度、厚度
  - 隔磁桥宽度、厚度
  - 磁肋宽度
  - “V”型磁钢槽间距、轴距
  - “V”型永磁体夹角
  - “一”型永磁体轴距
  - 空气槽高度、轴距
  - 定子槽型、极槽配合



#### ✓ 构建轮毂电机参数化二维几何模型

# 电机二维几何模型构建自动化

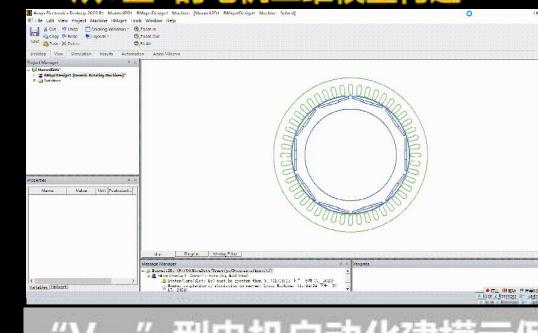
## 自动化几何建模

- 定子、转子、永磁体几何尺寸
- 定子槽型、尺寸
- 定子槽数、永磁体极数

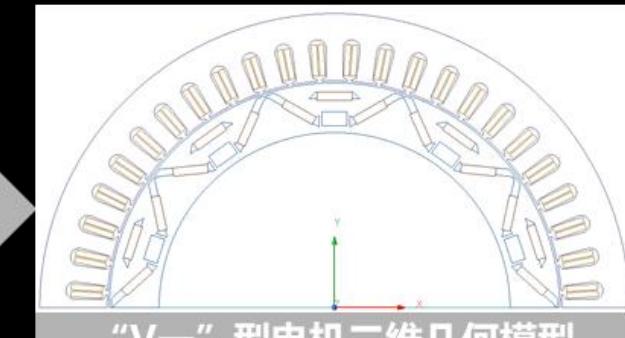
脚本程序  
接口程序  
→  
IronPython  
PyAEDT

RMxprt Maxwell 2D

- 从0至1的电机二维模型构建



“V一”型电机自动化建模示例



“V一”型电机二维几何模型

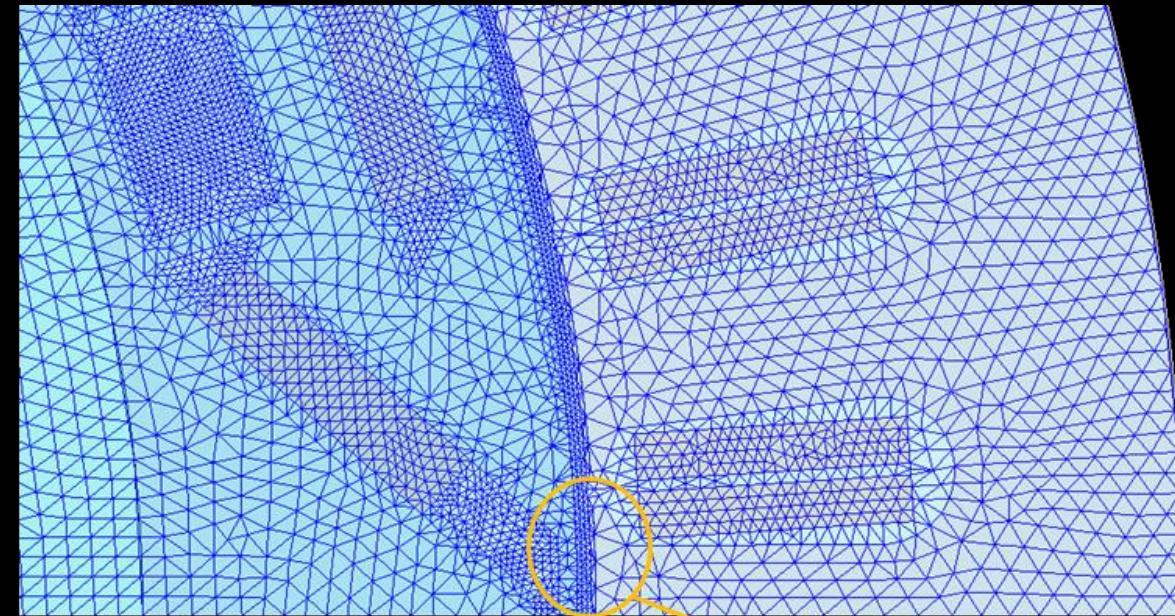
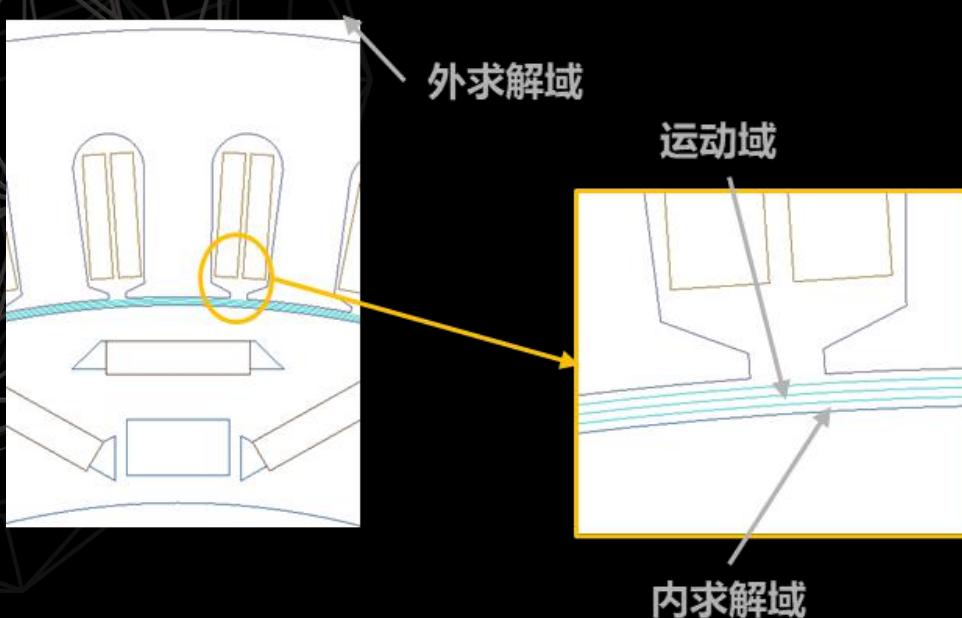
定子→绕组→磁钢槽→永磁体→空气槽  
→转子

✓ 实现“V一”型轮毂电机二维几何模型构建自动化

# 电机电磁场有限元网格模型参数化

## 有限元网格模型

- 绕组、磁钢网格尺寸：较细密
- 定子、转子网格尺寸：较稀疏
- 气隙（计算域）网格尺寸：四层网格加密

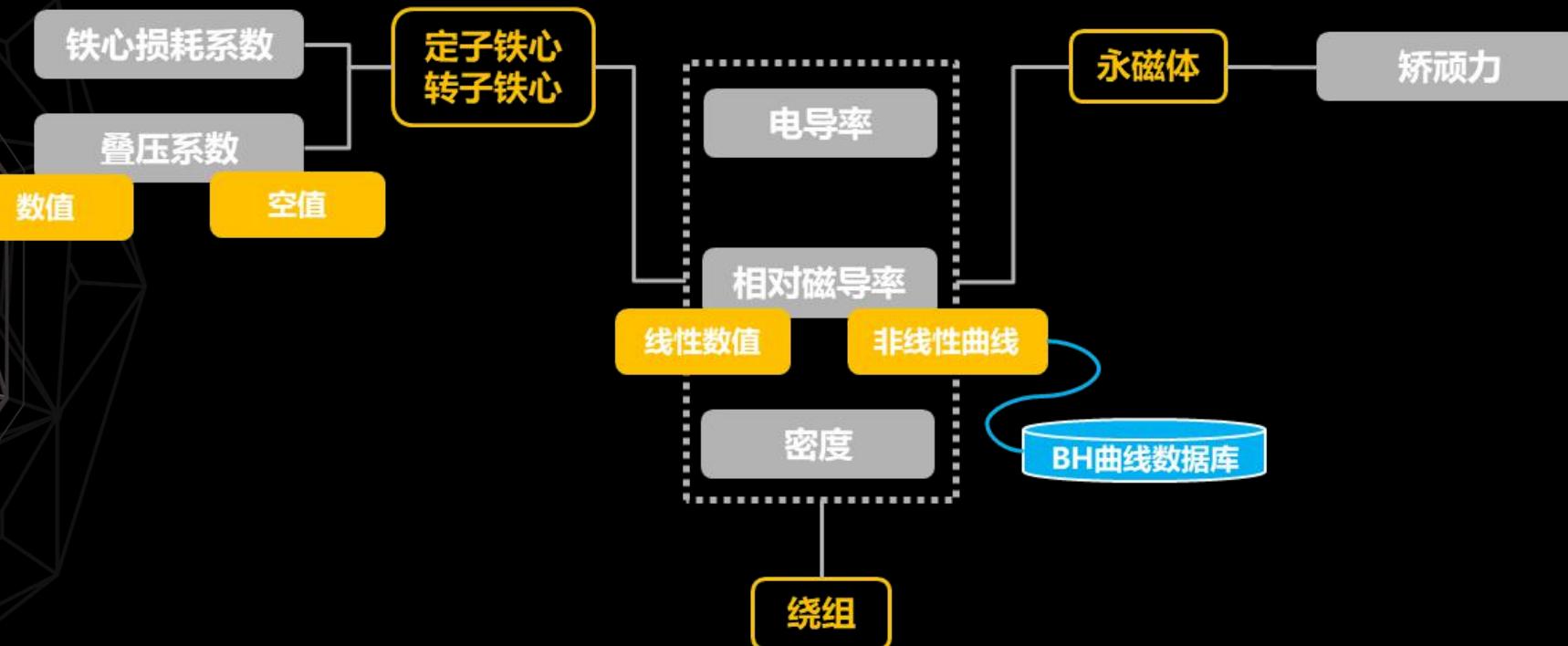


- 求解精确
- 求解速度
- 求解收敛性

✓ 构建轮毂电机电磁场参数化有限元网格模型

# 电机电磁场有限元仿真参数化

## 电磁场仿真材料



✓ 构建轮毂电机电磁场参数化材料

# 电机电磁场有限元仿真参数化



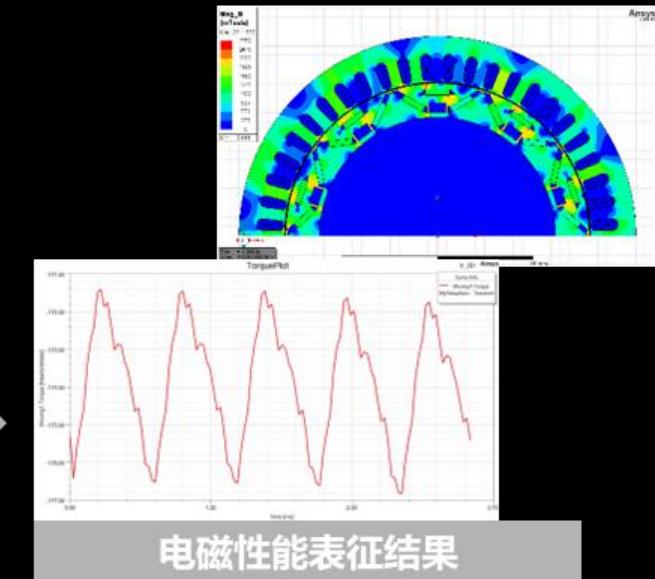
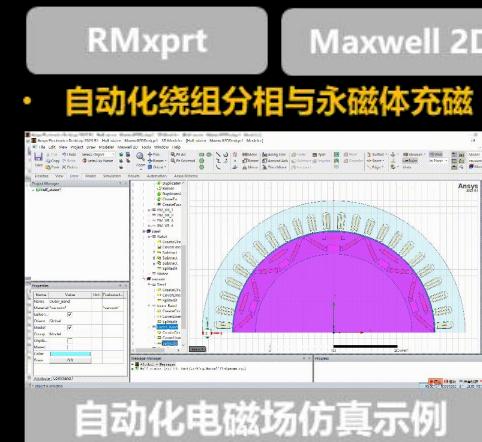
✓ 构建轮毂电机电磁场参数化分析模型

# 电机电磁场有限元仿真自动化

## 自动化电磁场仿真

- 二维电机模型
- 电磁场网格模型
- 电磁场材料参数
- 电磁场分析输入

接口程序  
PyAEDT



材料构建→磁钢充磁→模型设定→  
运动设定→边界设定→激励设定（  
绕组分相）→损耗设定→求解设定  
→结果输出

✓ 实现不同结构尺寸、极槽配合的“V一”型轮毂电机电磁学仿真设计自动化

# 电机转子几何模型预处理自动化

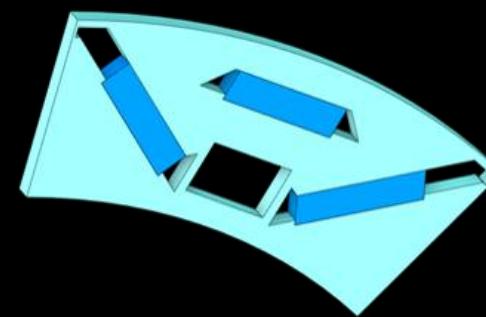
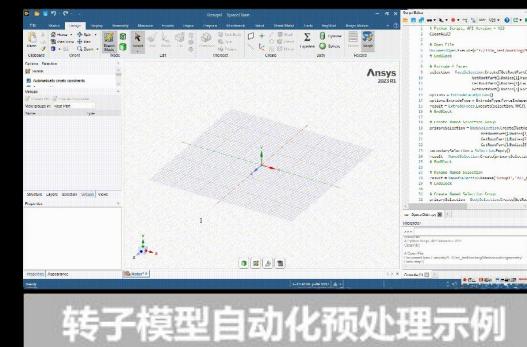
## 自动化预处理

• 二维转子模型

脚本程序  
IronPython

SpaceClaim

• 自动化命名组创建



电机三维转子模型

模型拉伸→命名组创建（转子、永磁体  
、几何面）

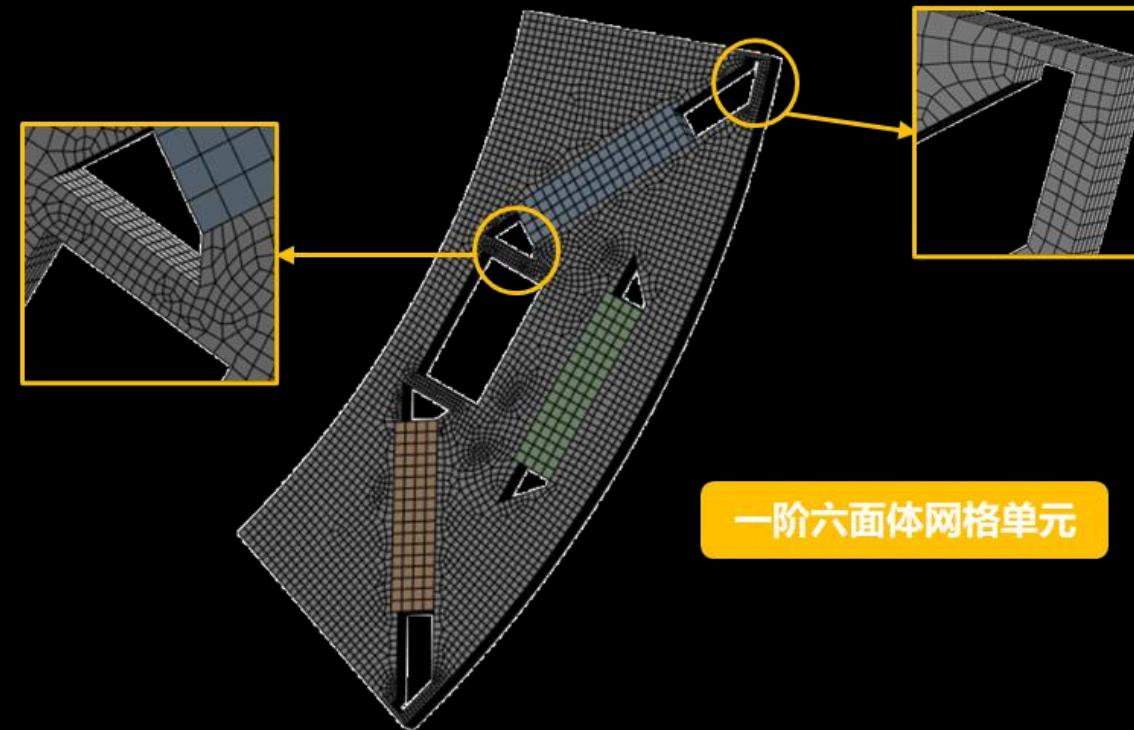
✓ 实现轮毂电机转子几何模型预处理自动化

# 电机应力场有限元网格模型参数化

## 有限元网格模型

- 永磁体网格尺寸: 较稀疏
- 转子网格尺寸: 较细密
- 隔磁桥网格尺寸: 局部加密

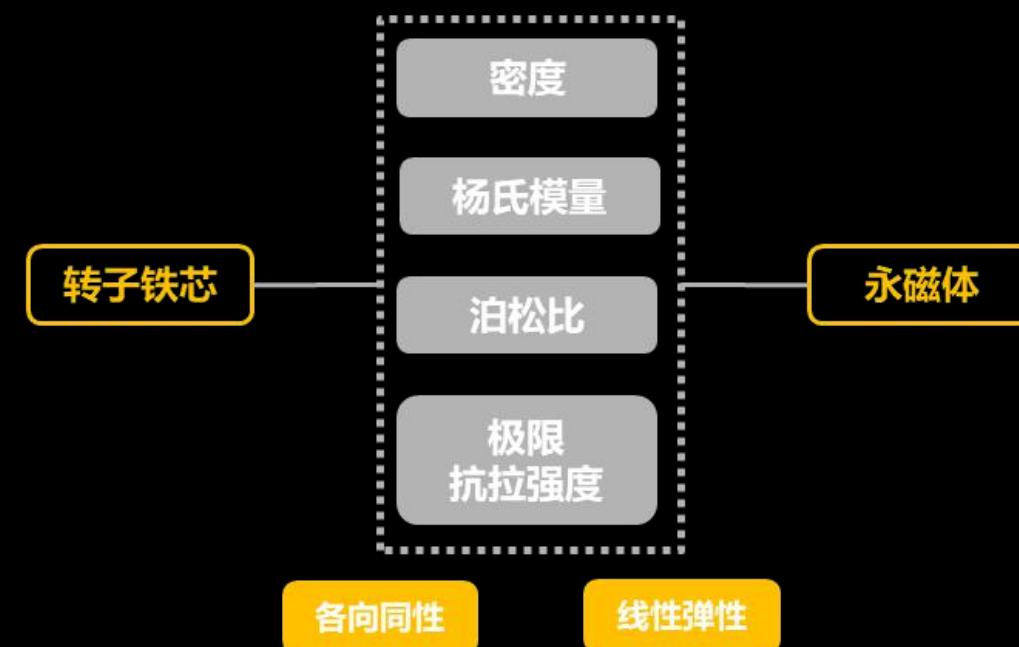
- 求解精度
- 网格数量



✓ 构建轮毂电机应力场参数化有限元网格模型

# 电机应力场有限元仿真参数化

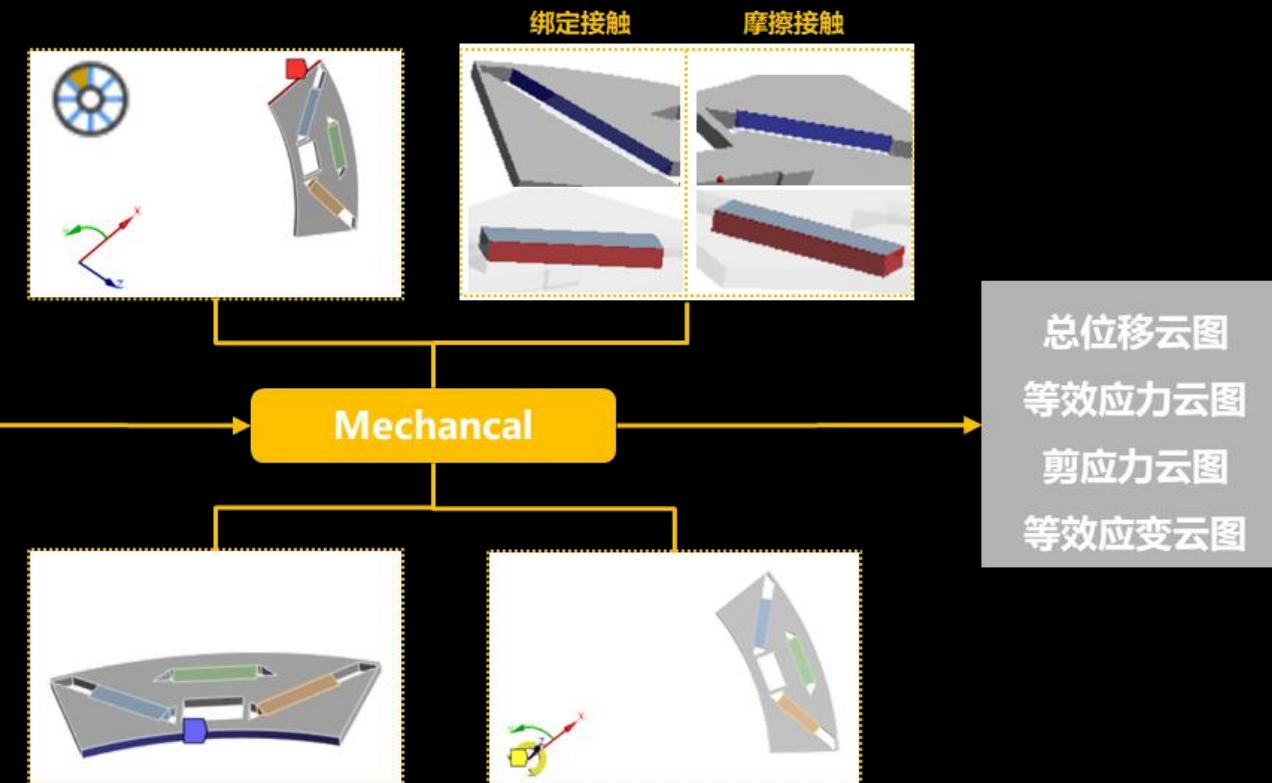
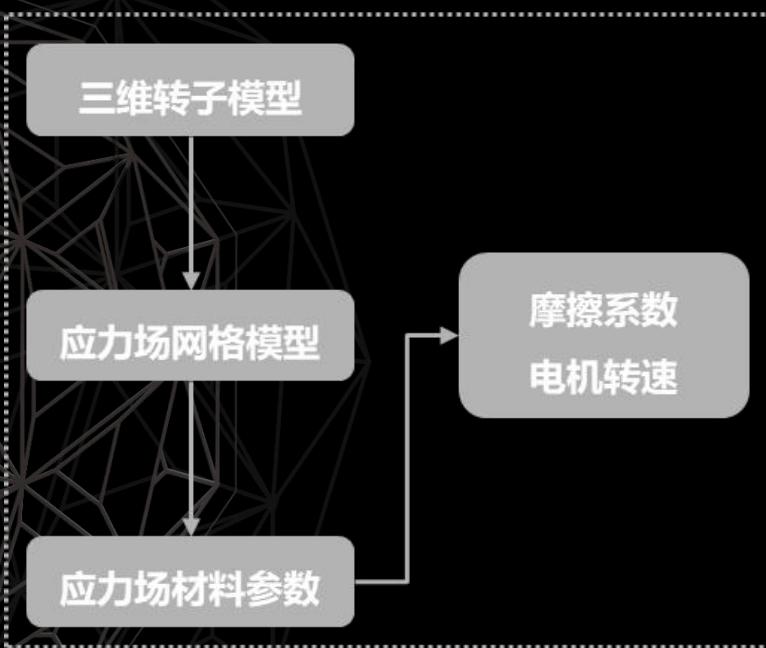
## 应力场仿真材料



✓ 构建轮毂电机应力场参数化材料

# 电机应力场有限元仿真参数化

## 应力场分析模型



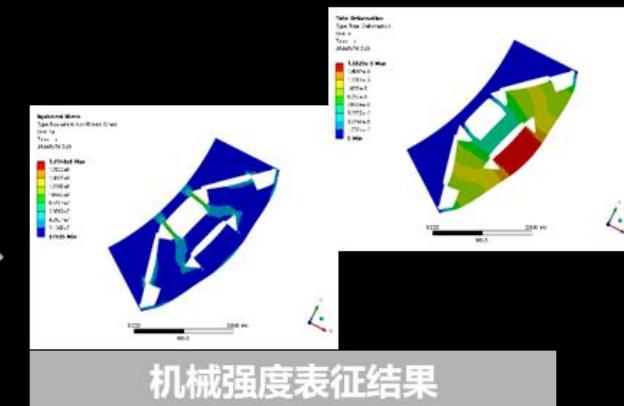
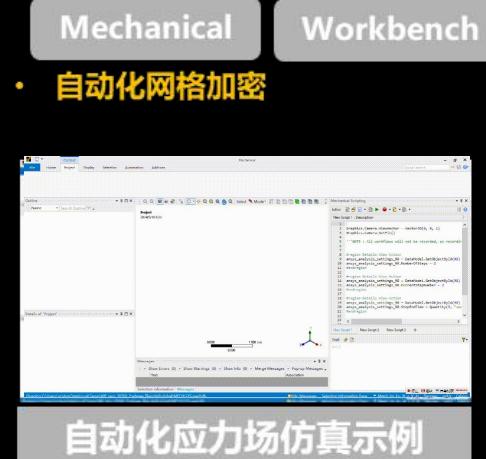
✓ 构建轮毂电机应力场参数化分析模型

# 电机应力场有限元仿真自动化

## 自动化应力场仿真

- 三维转子模型
- 应力场网格模型
- 应力场材料参数
- 应力场分析输入

脚本程序  
ACT Python

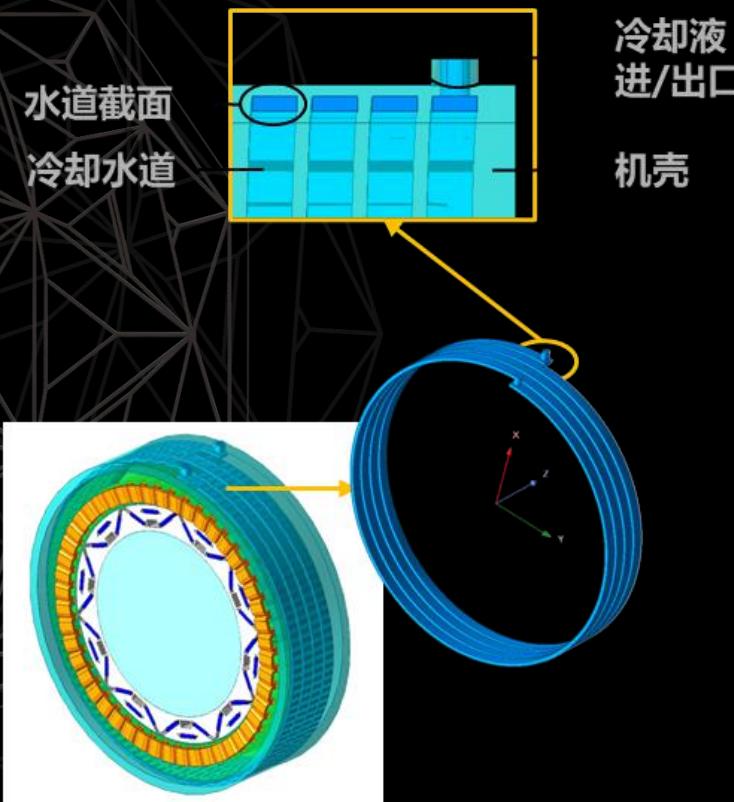


材料构建→参考坐标系创建→循环  
对称设定→接触条件设定→约束设  
定→载荷设定→结果输出

✓ 实现轮毂电机转子结构静力学仿真设计自动化

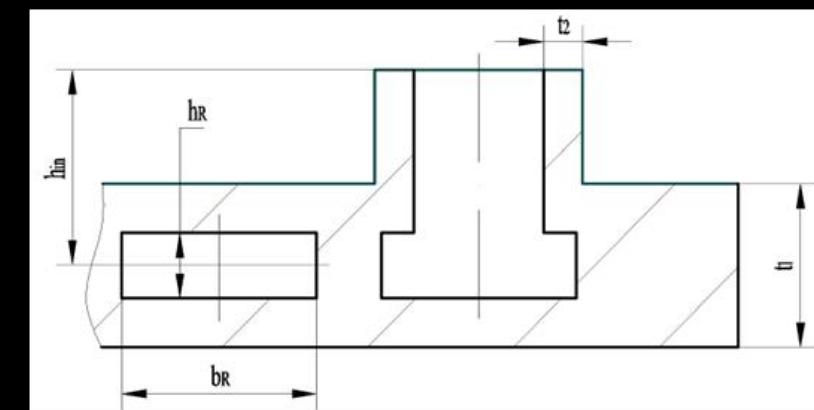
# 电机三维几何模型参数化

## 几何模型



## 基本结构参数

- 机壳厚度
- 进出口壁厚
- 入口高度
- 出口高度
- 水道截面宽度
- 水道截面高度
- 定、转子外径与内径
- 铁芯长度
- 定子槽结构参数
- 冷却水道层数



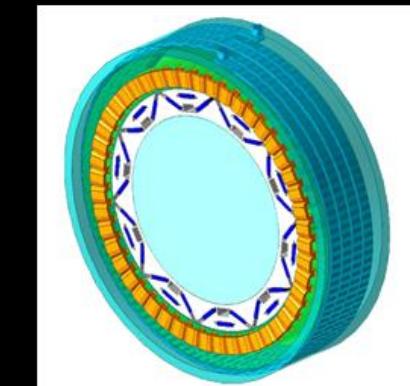
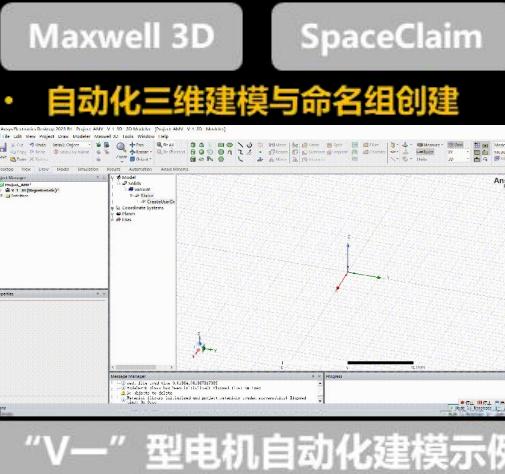
✓ 构建轮毂电机参数化三维几何模型

# 电机三维几何模型构建自动化

## 自动化几何建模

- 定子、转子结构参数
- 冷却水道结构参数
- 二维转子模型

脚本程序  
接口程序  
→  
IronPython  
PyAEDT



"V—" 型电机三维几何模型

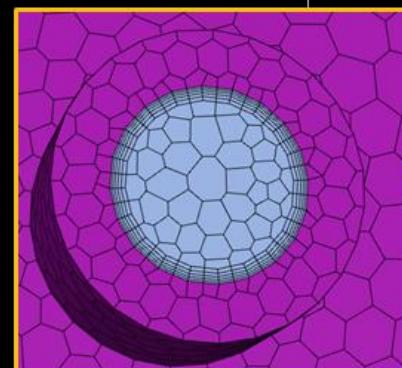
定子铁芯 → 绕组 → 等效绝缘层 → 冷却水道 → 机壳 → 气隙 → 转轴 → 转子铁芯与永磁体 → 命名组创建（计算域分区） → 共享拓扑

✓ 实现 "V—" 型轮毂电机二维几何模型构建自动化

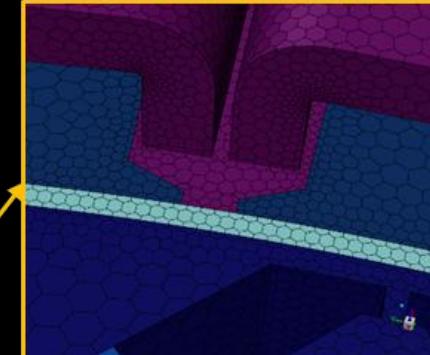
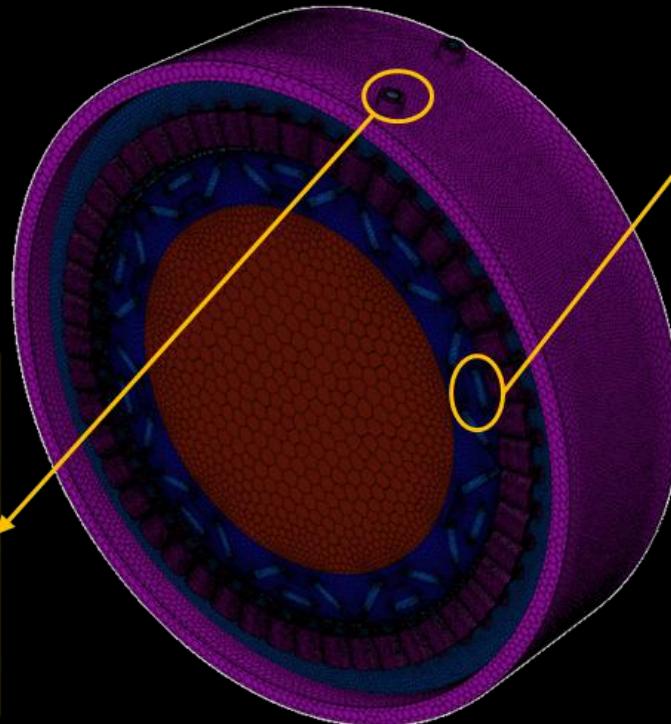
# 电机温度场有限元网格模型参数化

## 有限元网格模型

- 定子、转子、等效绝缘层网格尺寸: 狹缝控制
- 气隙、冷却液、绕组网格尺寸: 曲率控制
- 冷却液网格尺寸: 膨胀层



膨胀层网格



狭缝控制

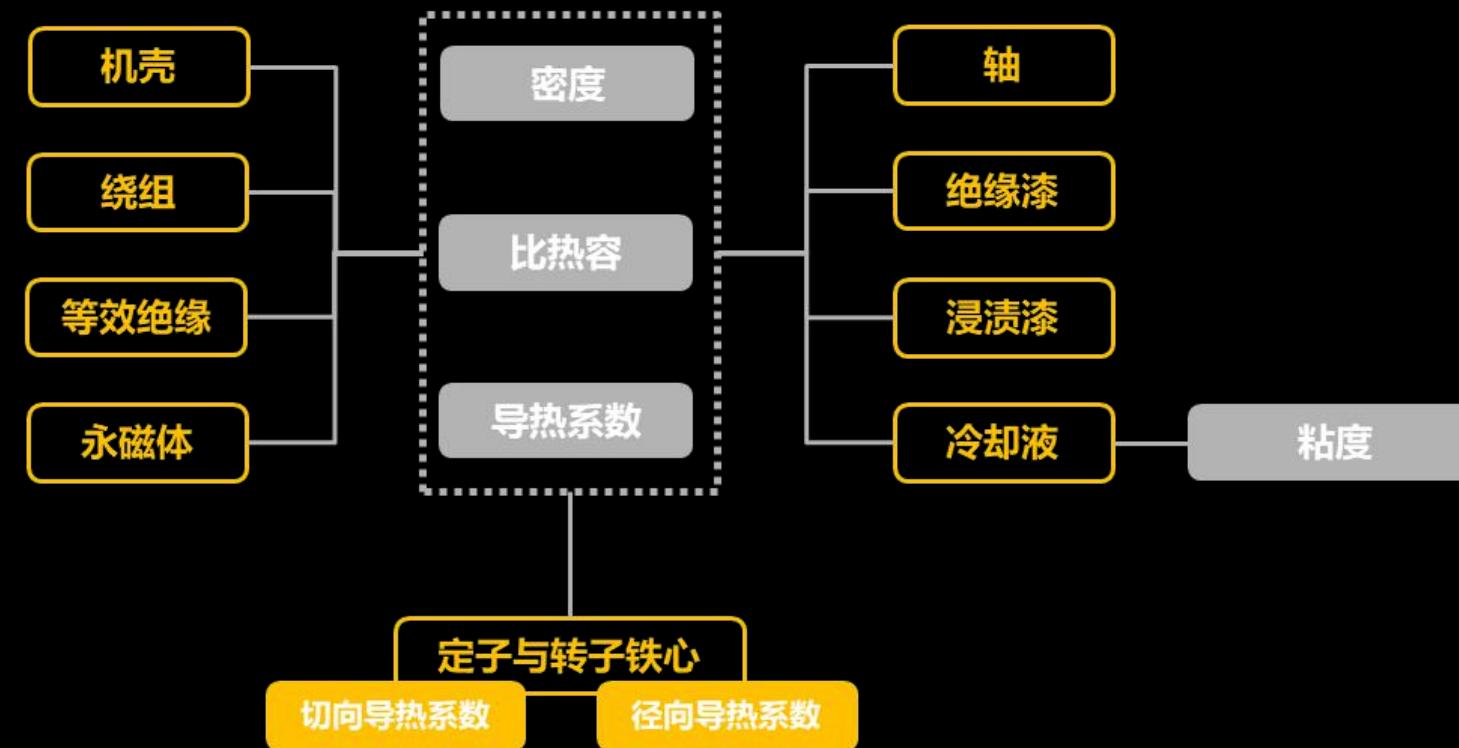
多面体网格单元

- 求解精确
- 网格数量
- 收敛速度

✓ 构建轮毂电机温度场参数化有限元网格模型

# 电机温度场有限元仿真参数化

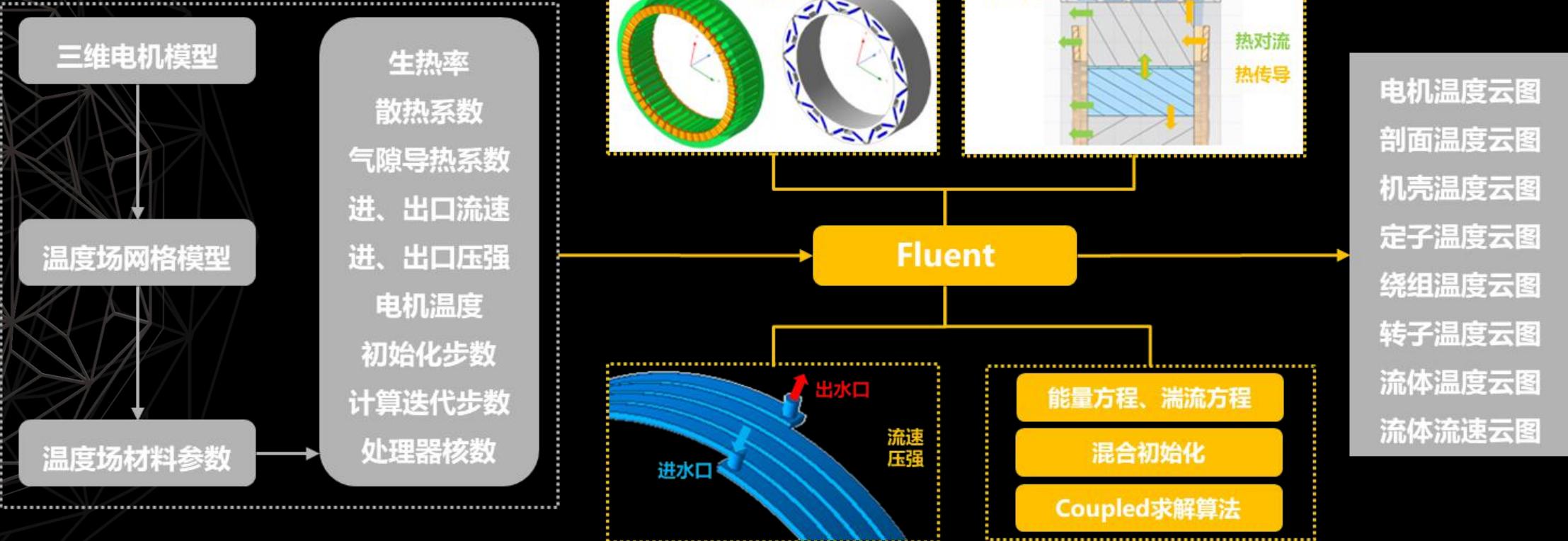
## 温度场仿真材料



✓ 构建轮毂电机温度场参数化材料

# 电机温度场有限元仿真参数化

## 温度场分析模型



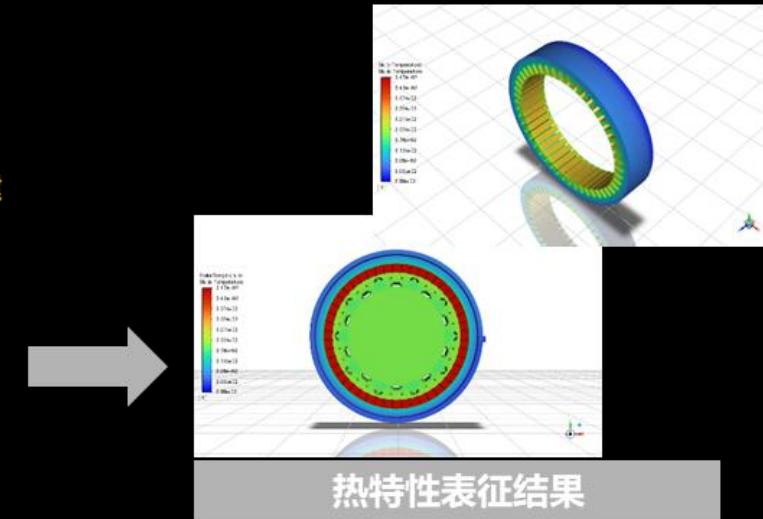
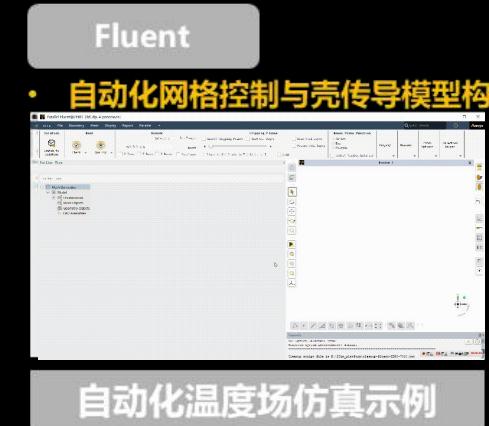
✓ 构建轮毂电机温度场参数化分析模型

# 电机温度场有限元仿真自动化

## 自动化温度场仿真

- 三维电机模型
- 温度场网格模型
- 温度场材料参数
- 温度场分析输入

接口程序  
→  
PyFluent

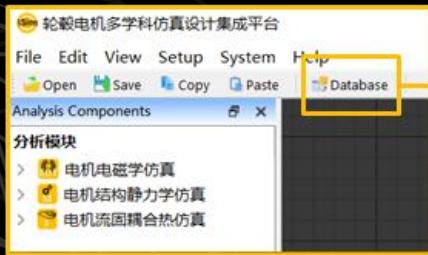


处理器设定 → 数学模型设定 → 热源  
设定 → 热系数设定 → 进出口条件设  
定 → 初始值设定 → 求解设定 → 结果  
输出

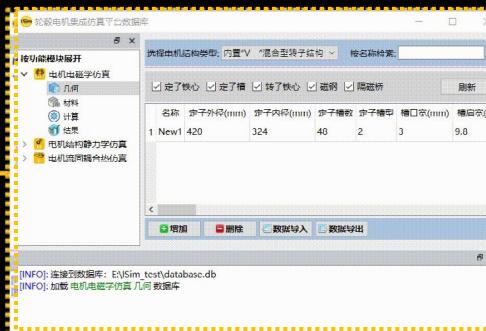
✓ 实现不同冷却结构参数轮毂电机流固耦合热仿真设计自动化

# 电机多学科数据管理与交互系统

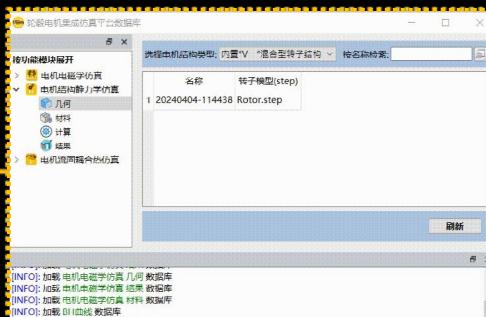
## 多学科数据库



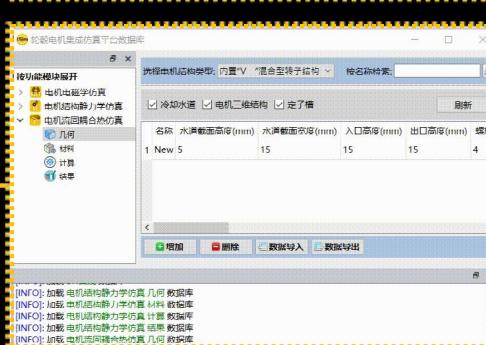
电磁场



应力场



温度场



数据分列显示

数据增删改查

数据本地导入

数据本地导出

计算结果显示

计算结果导出

几何结构参数

材料属性参数

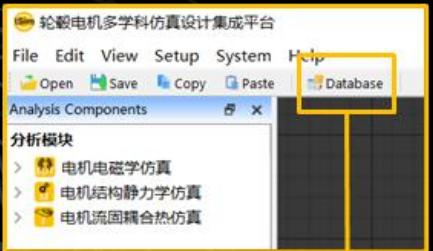
仿真计算参数

性能表征结果

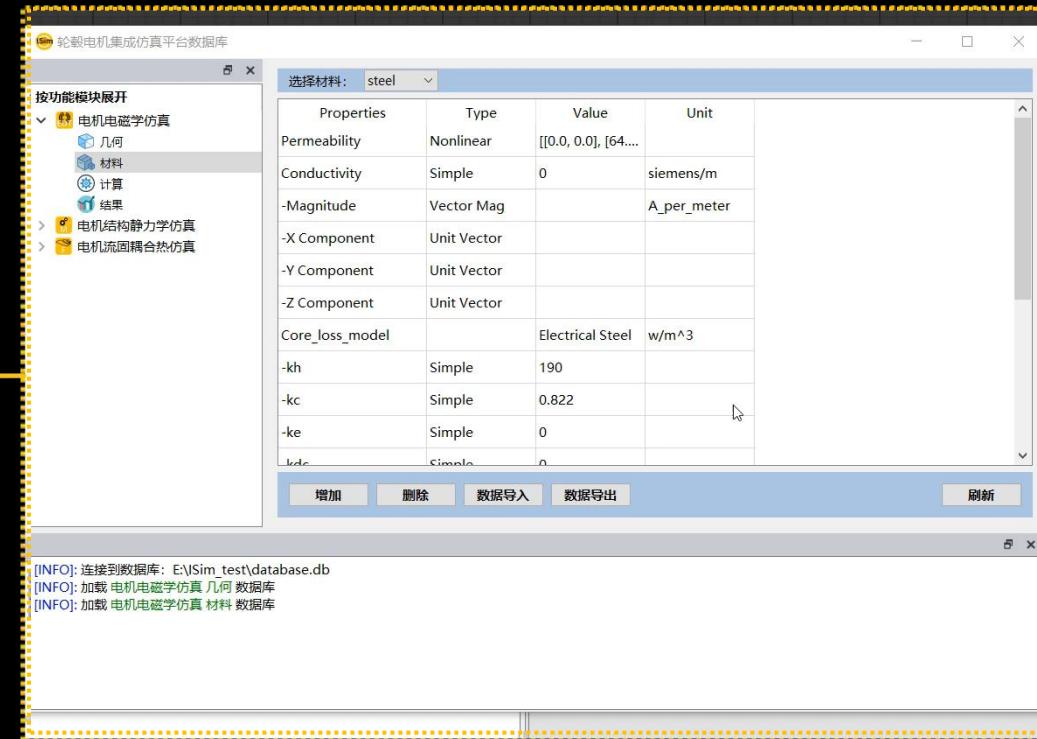
✓ 实现轮毂电机电磁场、应力场与温度场仿真设计数据的统一管理

# 电机多学科数据管理与交互系统

## 多学科数据库



电磁场  
BH曲线



曲线增加

曲线删除

拟合点增加

拟合点删除

曲线导入

曲线导出

✓ 实现轮毂电机电磁场、应力场与温度场仿真设计数据的统一管理

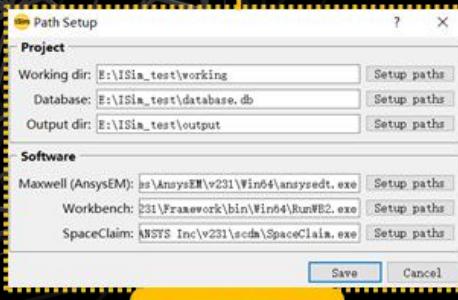
# 轮毂电机多学科仿真设计集成平台

集成平台

模块创建



数据设定



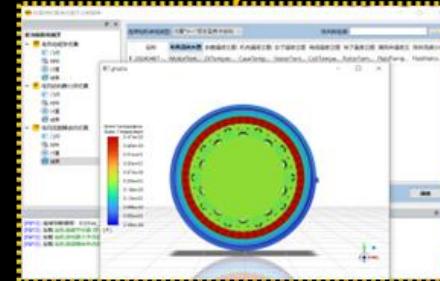
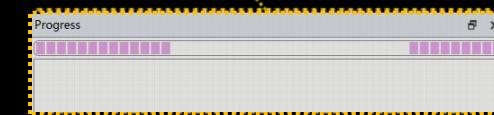
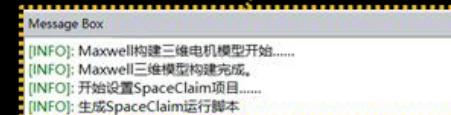
目录设定



方案选定



结果查看

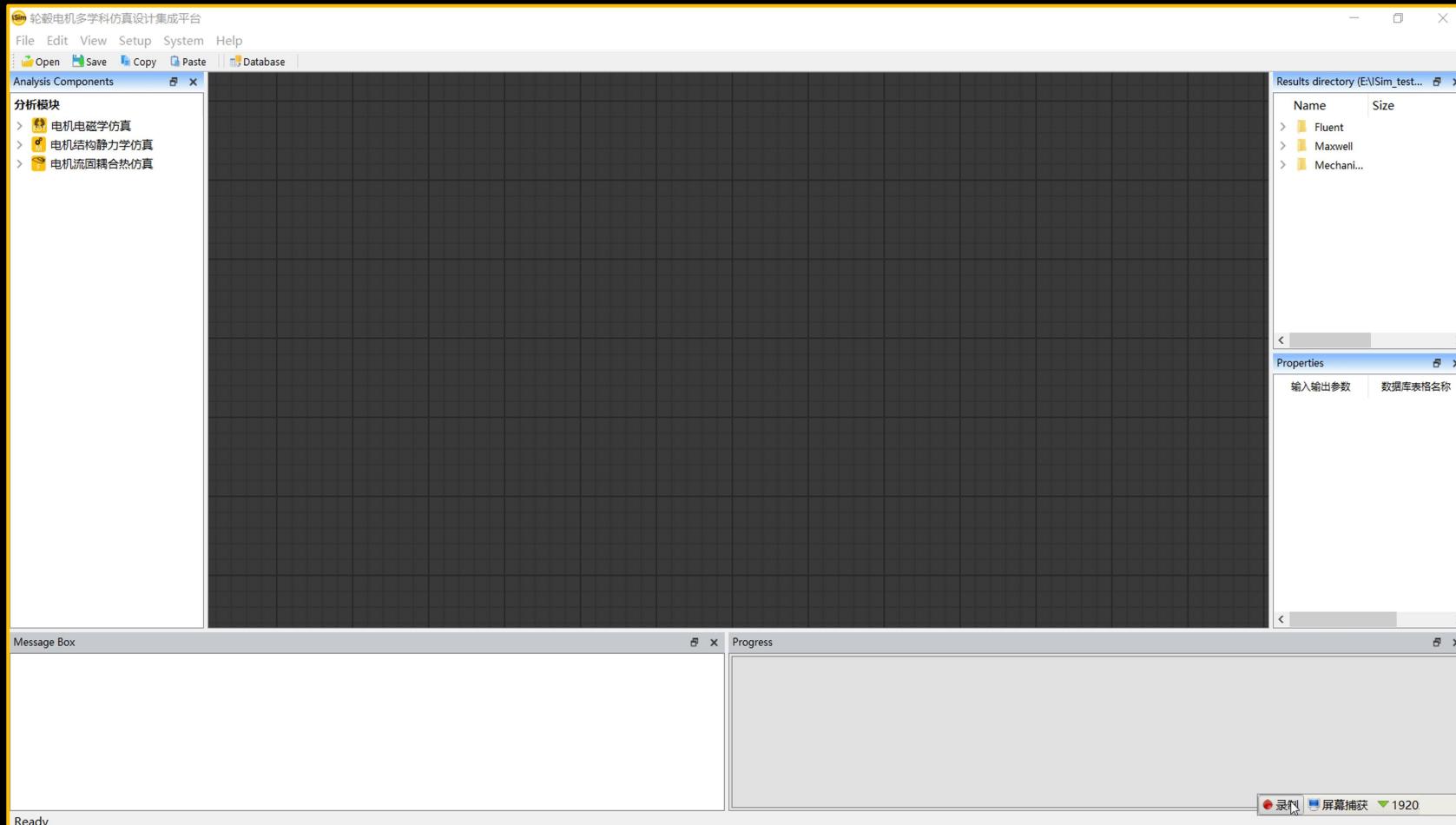


✓ 不同几何尺寸、不同极槽配合的轮毂电机电磁场、应力场与温度场仿真设计一体化

# 轮毂电机多学科仿真设计集成平台

## 集成平台

1. 实现了电机多学科仿真设计的参数化与自动化；
2. 实现了多学科设计数据的统一管理与交互；
3. 实现了多学科仿真设计流程的集成化。



✓ 不同几何尺寸、不同极槽配合的轮毂电机电磁场、应力场与温度场仿真设计一体化



# Ansys 2025 全球仿真大会·中国

THANKS