

**ZOOMLION**  
中联重科

5月28日, 2024 | 北京

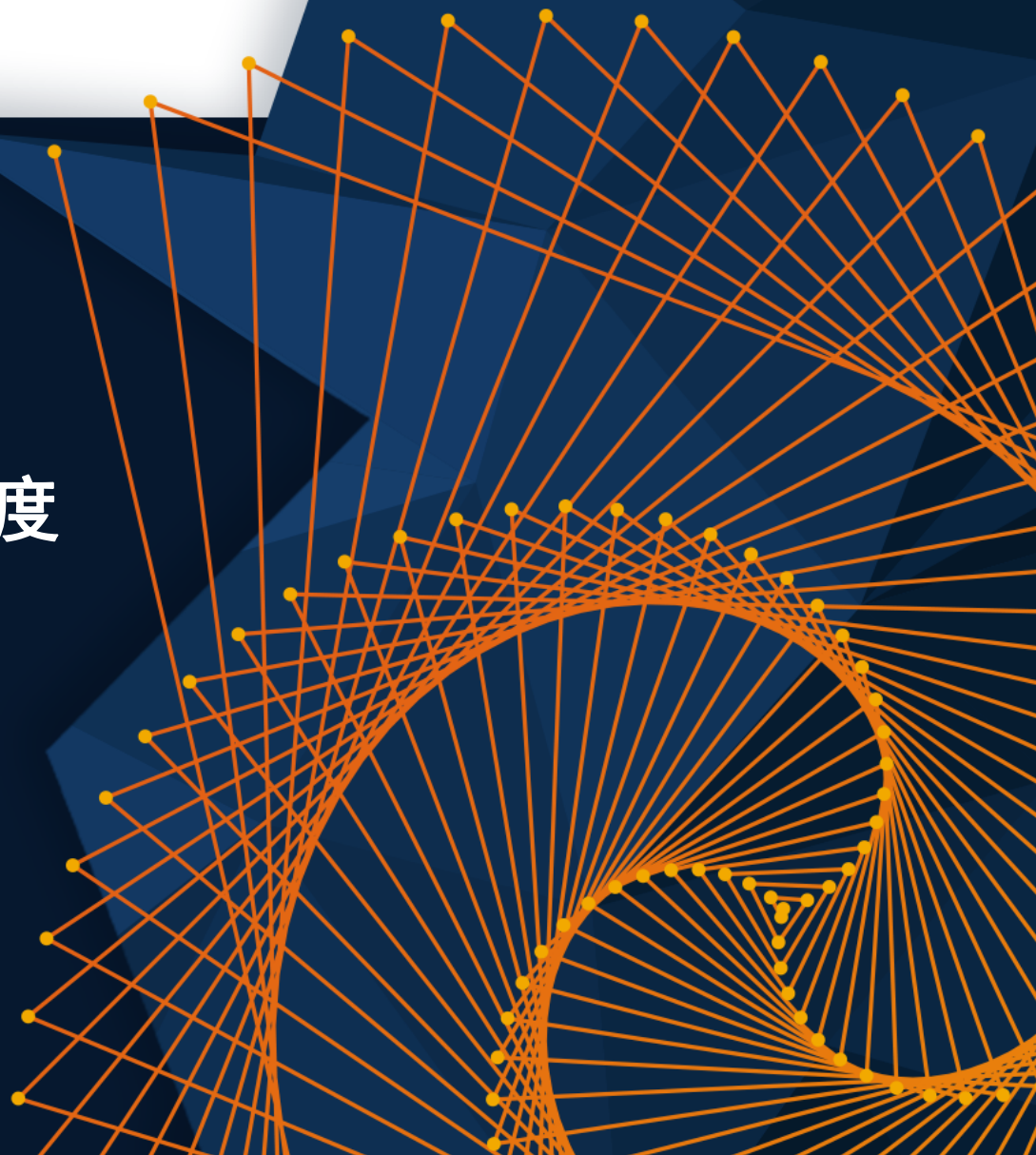
数字化设计驱动产品革新

**MATLAB/Simulink 在大型柔性臂架扰度  
分析与控制中的应用**

张迁, 中联重科智能技术有限公司总经理助理



MATLAB EXPO



## 关于 中联重科



- 中联重科创立于1992年，业内首家A+H股上市公司；
- 工程机械、农业机械等高新技术装备及新型建筑材料的研发制造业商
- 主导和参与制修订460多项国家和行业标准、27项国际标准，引领行业技术发展。
- 产品销售100余个国家和地区，在20个国家建有分子公司，并在全球设立50多个常驻机构



# 数字化设计驱动产品革新

## MATLAB/Simulink 在大型柔性臂架扰度分析与控制中的应用

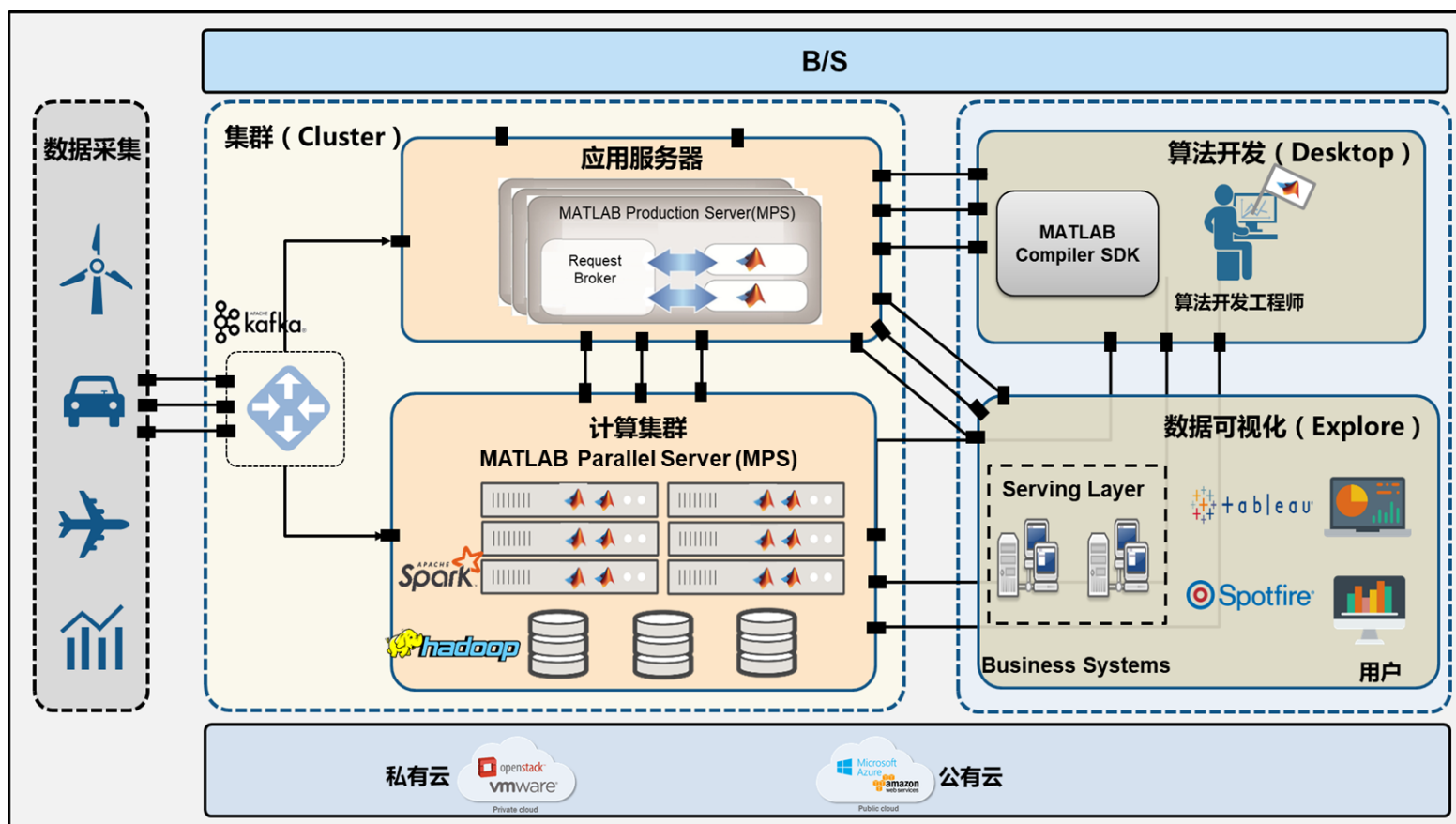
- 数字化设计与仿真的最新趋势
- 柔性臂架类产品在智能化应用面临的主要挑战
- 构建柔性臂架的数学模型及运动学仿真
- 臂架动力学的正逆求解及末端轨迹的自动控制设计



# 数字化设计与仿真的最新趋势

## 云计算和大数据分析

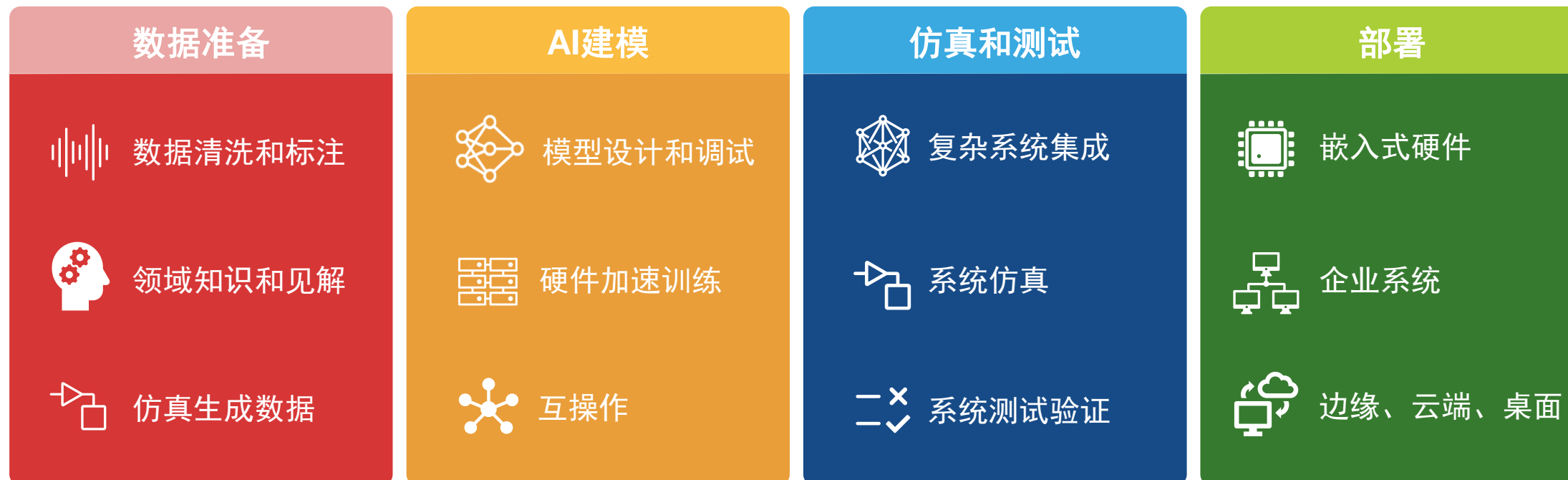
利用大规模的数据和计算资源，实现更复杂的仿真和分析，缩短开发周期。



# 数字化设计与仿真的最新趋势

## ■ 人工智能和机器学习

被应用于设计和仿真软件中，用于优化设计、预测产品性能、识别潜在问题并提供智能建议。

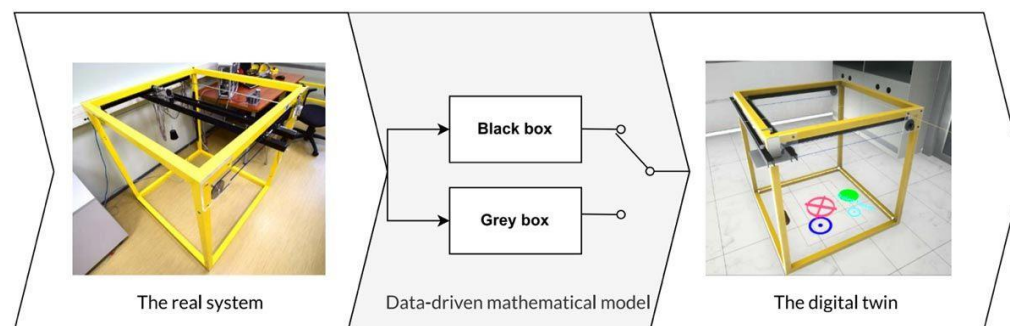


# 数字化设计与仿真的最新趋势

## ■ 增强现实（AR）和虚拟现实（VR）

爱沙尼亚塔林理工大学用数字孪生和扩展现实增强实操、远程和虚拟控制工程实验

作者 Saleh Alsaleh 和 Aleksei Tepljakov, 塔林理工大学



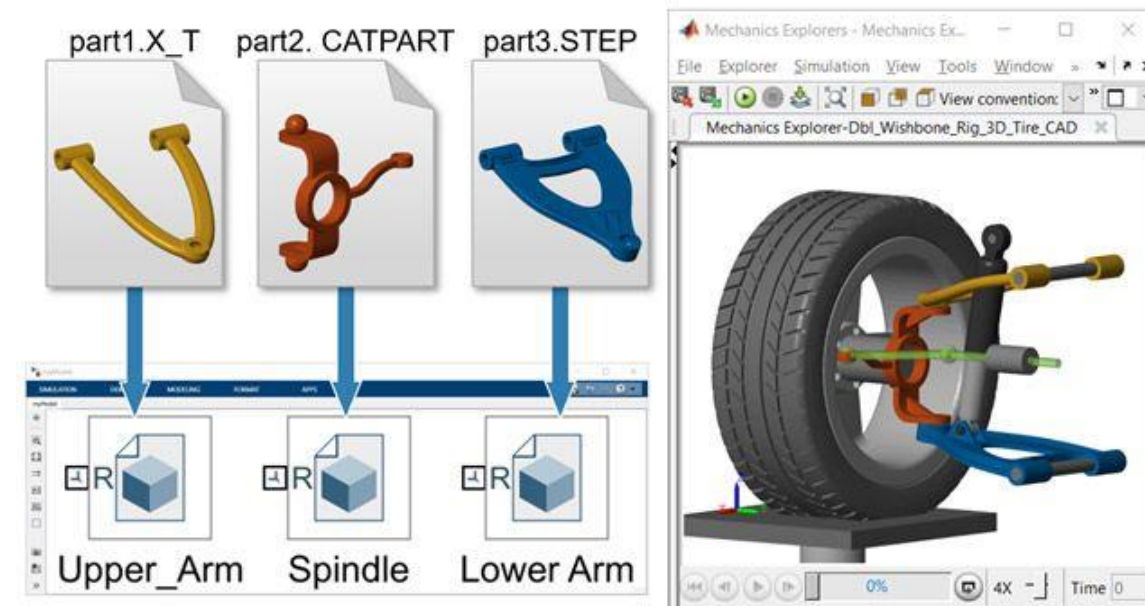
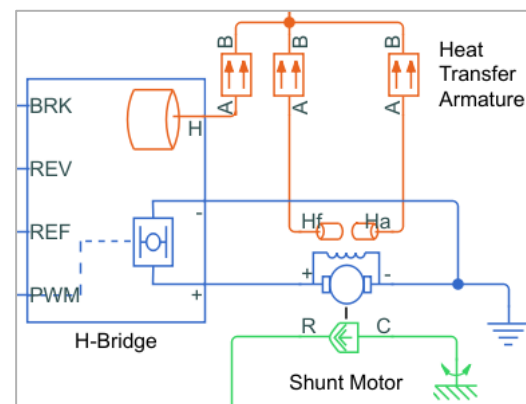
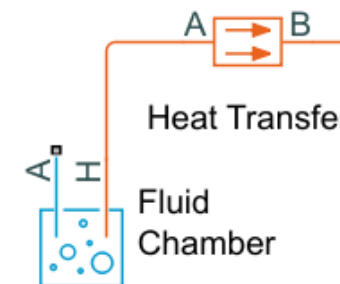
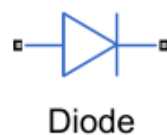
[链接：技术文章](#)



# 数字化设计与仿真的最新趋势

数字化设计与仿真近年来随着5G、物联网、云计算、大数据、人工智能和混合现实等新一代信息技术的发展，在理论层面和应用层面均取得了快速发展。

## ■ 多物理场耦合仿真



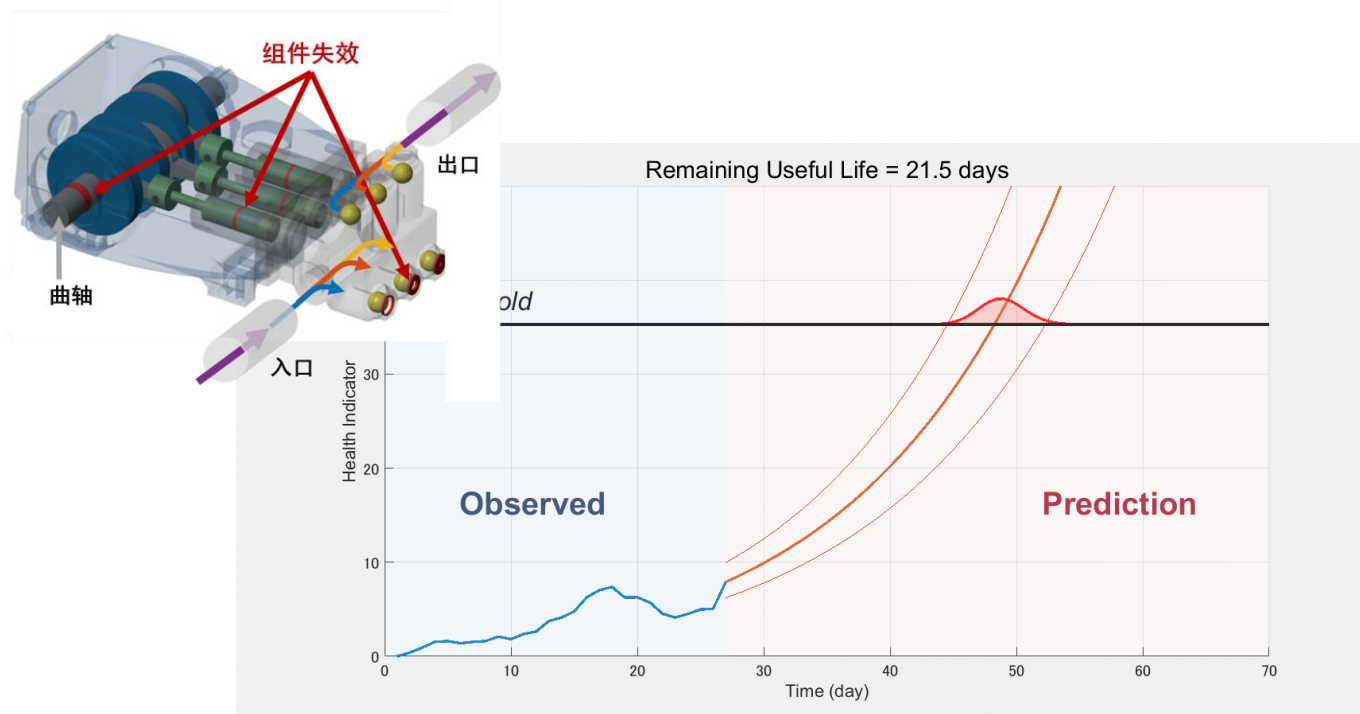
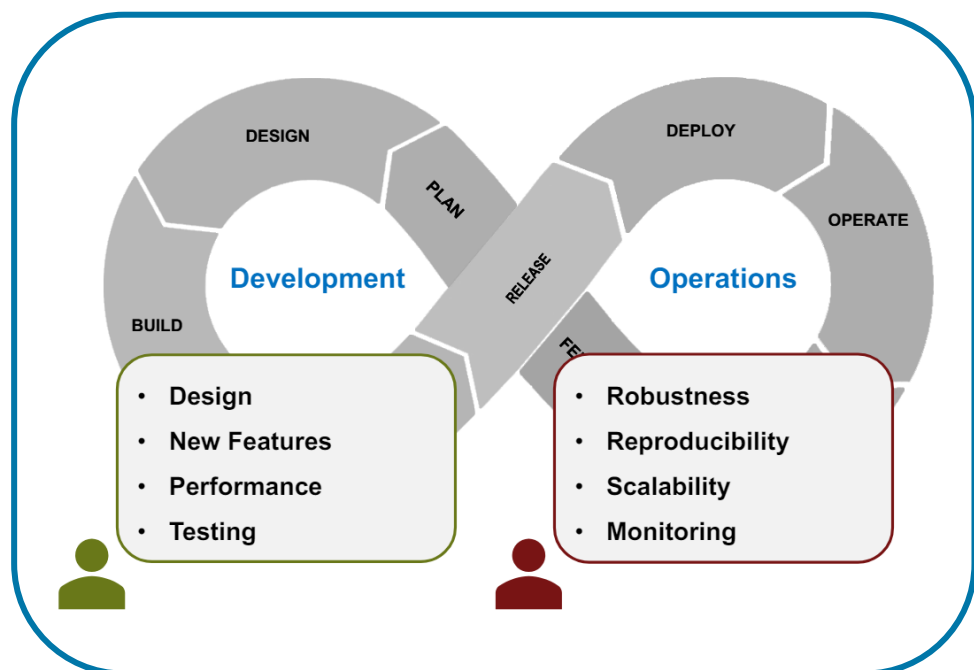
进一步集成不同物理场的仿真技术，如结构、流体、热传导等，实现更全面、准确的仿真分析，更好地模拟真实世界中的复杂系统



# 数字化设计与仿真的最新趋势

## ■ 可持续设计和生命周期分析

从设计阶段就考虑产品的可持续性和环境影响，并提供生命周期分析工具来评估产品的全面性能。





# 柔性臂架类产品在智能化面临的主要挑战

- 当前工程机械产品逐渐走向大型化和重载化

- 全球最长臂架泵车



中联重科101米臂架泵车

- 全球最大吨位全地面起重机



ZAT24000H

- 全球最大塔式起重机



R20000-720

# 柔性臂架类产品在智能化面临的主要挑战

## 大型化和重载化带来的智能化挑战

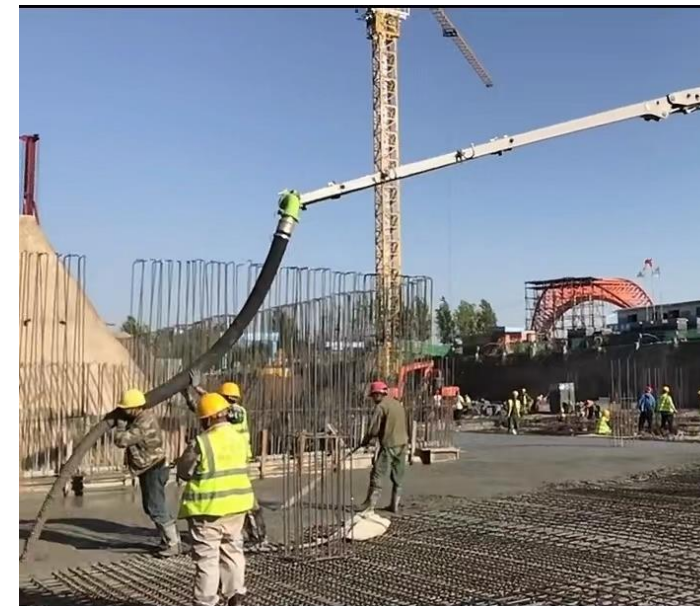
- 大变形使得末端定位困难
- 弹性振荡导致臂架操控困难，降低工作效率
- 柔性运动模态建模复杂，加大了臂架实时路径规划的难度



起重机扰度变形大



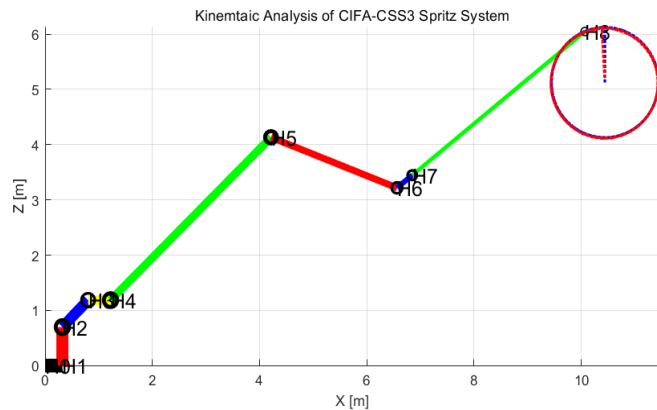
消防车臂架需要高精度定位



泵车末端需要精准定位和防摇

# 柔性臂架类产品在智能化面临的主要挑战

- 应对大型柔性臂架的这些挑战，需要解决以下问题：



## 柔性臂架数学建模

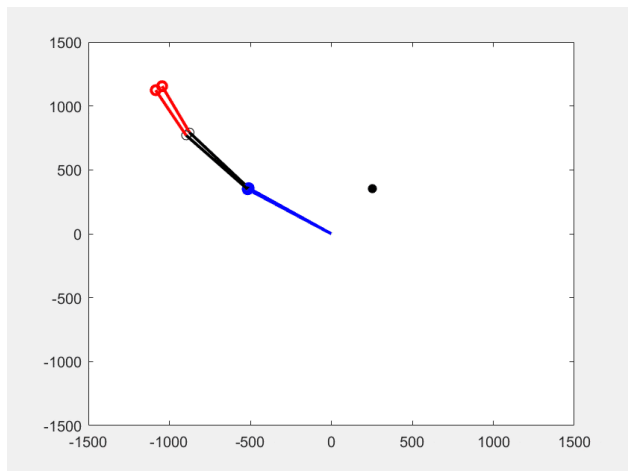
对柔性臂架的末端位置进行轨迹规划和自动控制时，需要根据传感器数据实时求解末端位置，但建模误差、传感器噪声和结构弹性振动都会影响末端位置的计算精度。

## 柔性臂架逆运动学求解

高效准确的求解多关节柔性臂架的逆动力学目前仍是国际难点，通常基于弹性小变形假设，采用近似迭代法求解柔性臂架的逆运动学，但该方法的迭代收敛性、计算实时性和适应范围有待实例验证。

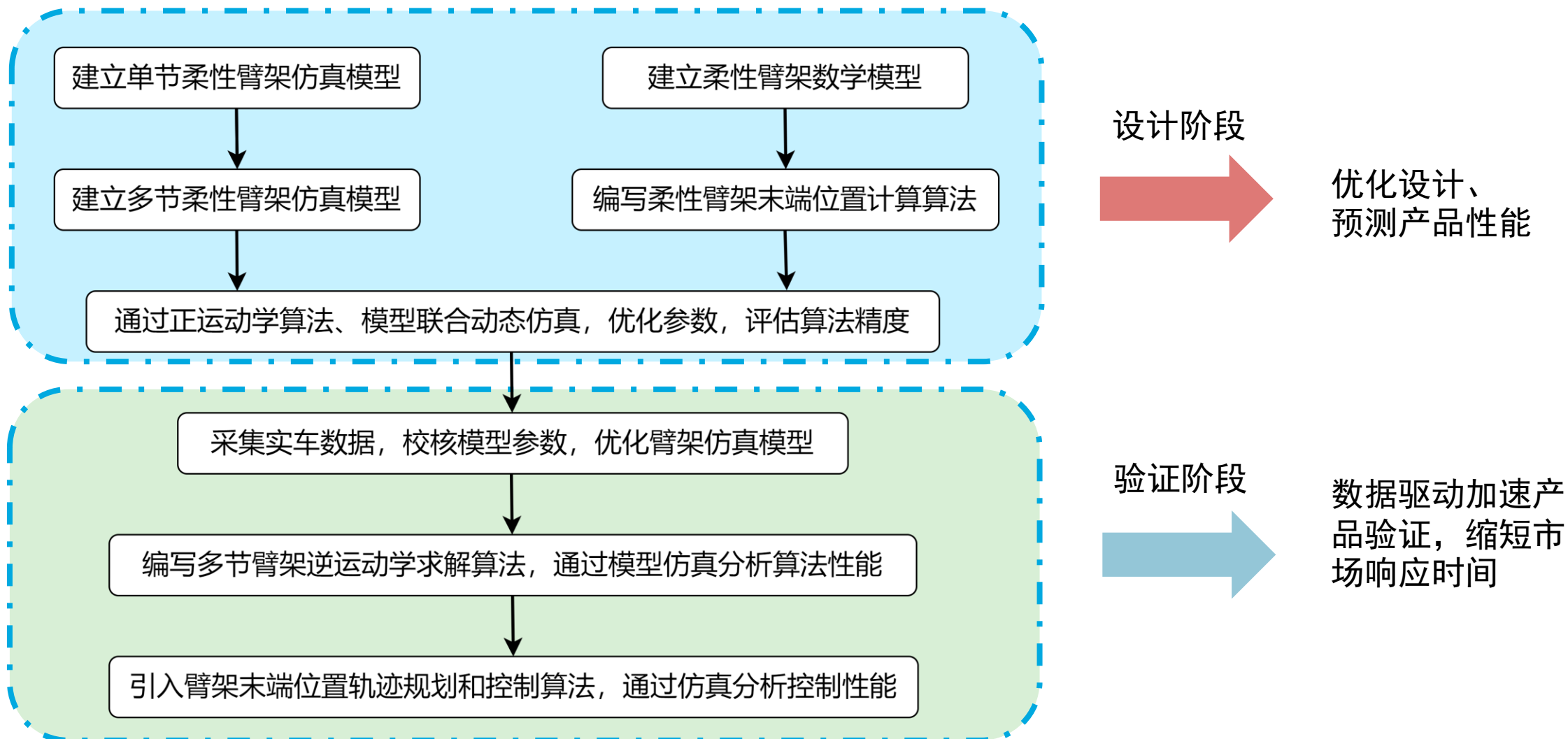
## 臂架末端轨迹规划及控制

整合仿真系统搭建、传感器、控制系统技术，臂架末端轨迹规划及控制，如何提升工作效率及智能化水平



# 构建柔性臂架的数学模型及运动学仿真

- 柔性臂架 Simulink/Simscape 建模仿真流程：



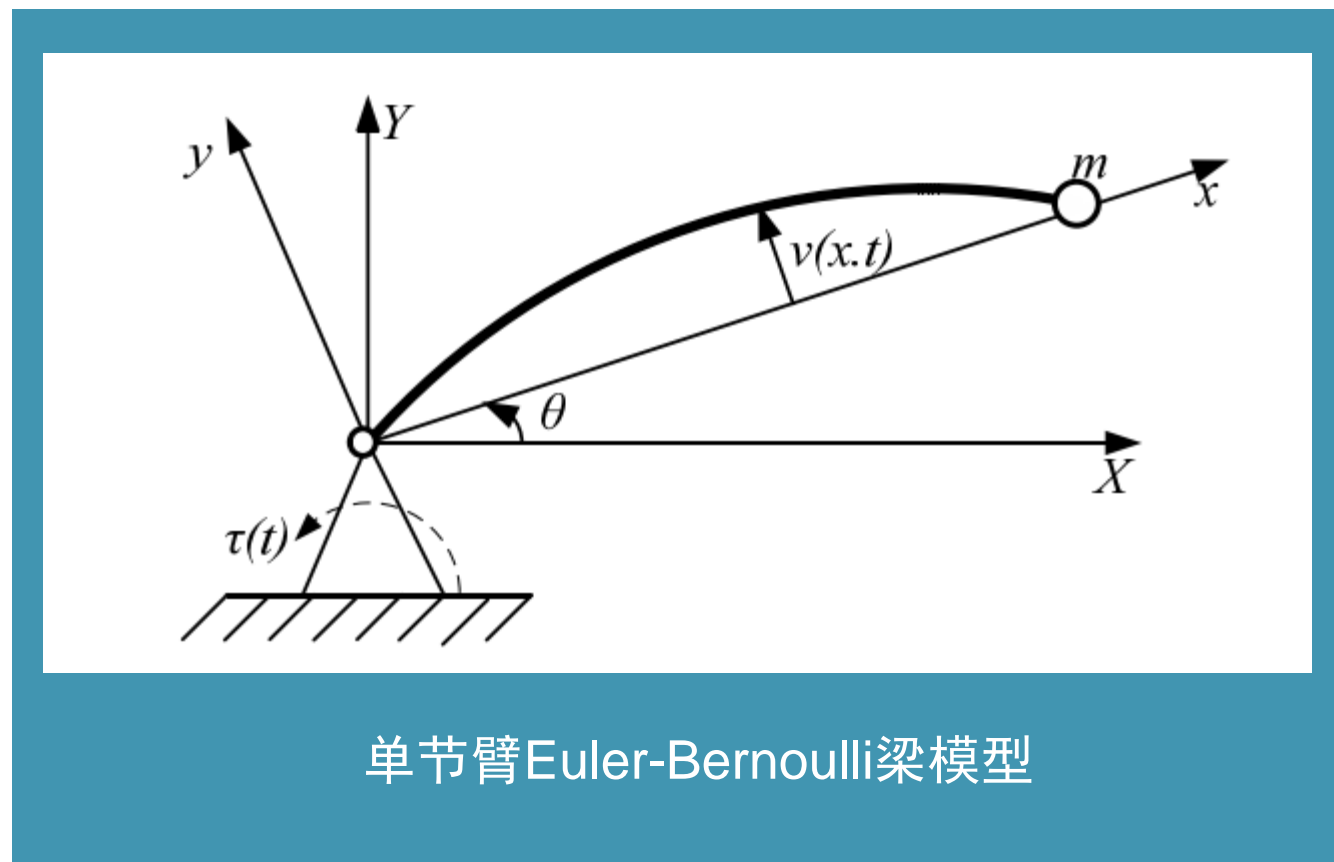


# 构建柔性臂架的数学模型及运动学仿真

## 臂架数学建模方法

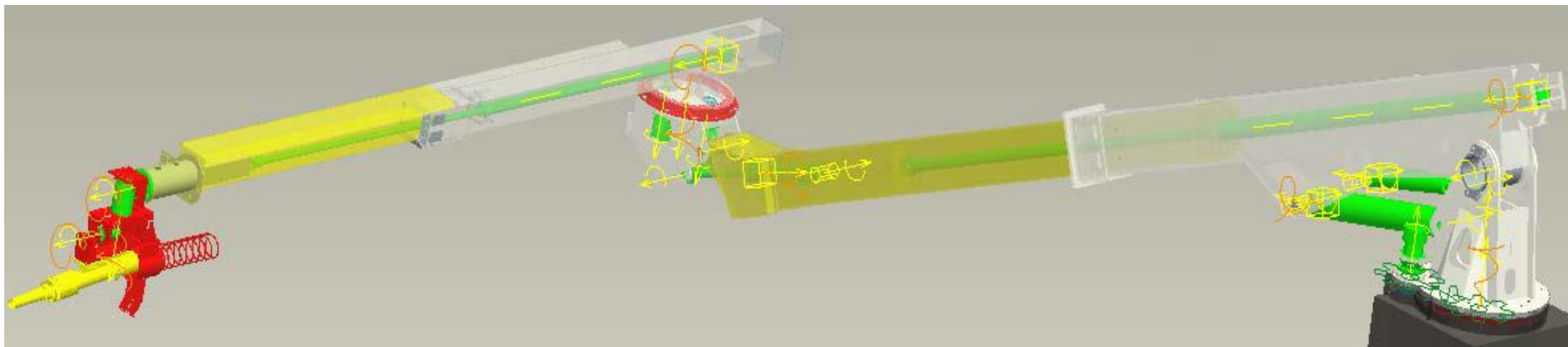
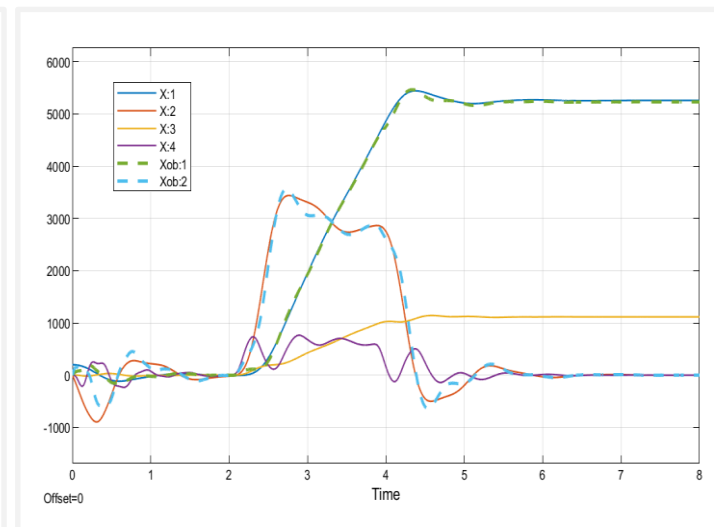
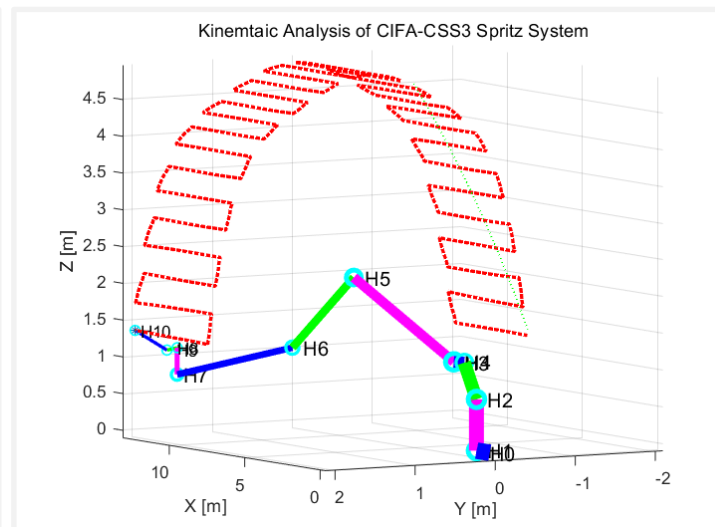
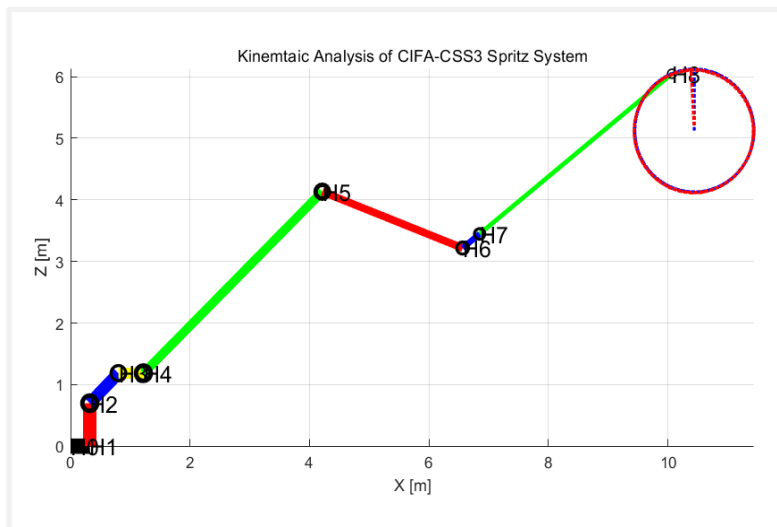
- 矢量力学方法：Newton-Euler
- 分析力学方法：Lagrange

基于Euler-Bernoulli梁模型建立臂架  
Lagrange方程，通过虚功原理求解，可以得到柔性臂架数学模型。



# 构建柔性臂架的数学模型及运动学仿真

## 臂架运动学 MATLAB 仿真



# 构建柔性臂架的数学模型及运动学仿真

## Simulink

Blocks: Math Operators

Lines: Data Signals

Purpose: First Principles

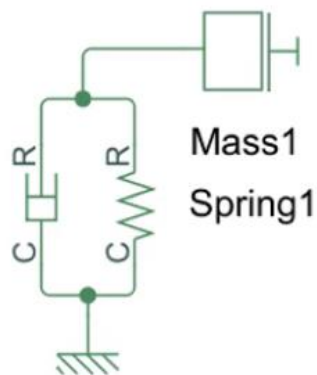
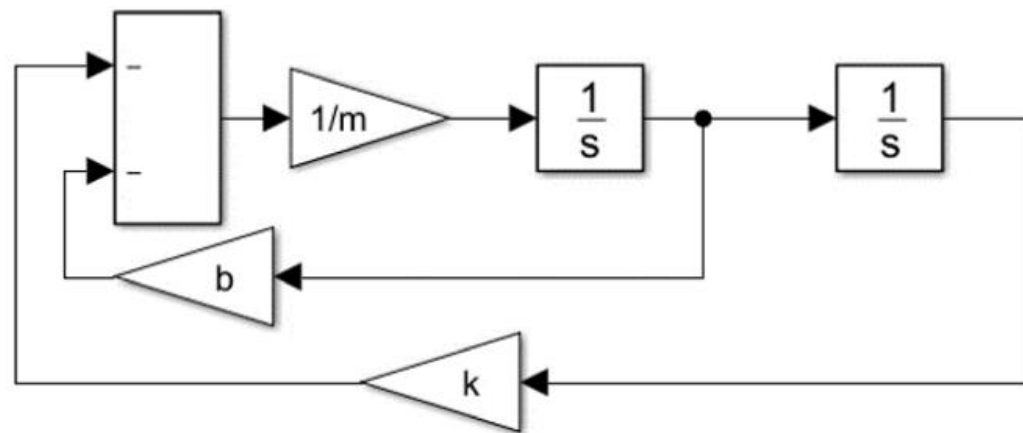
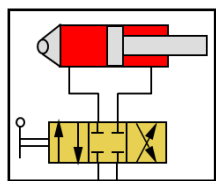


## Simscape

Blocks: Physical Components

Lines: Physical Relationships

Purpose: Physical Devices

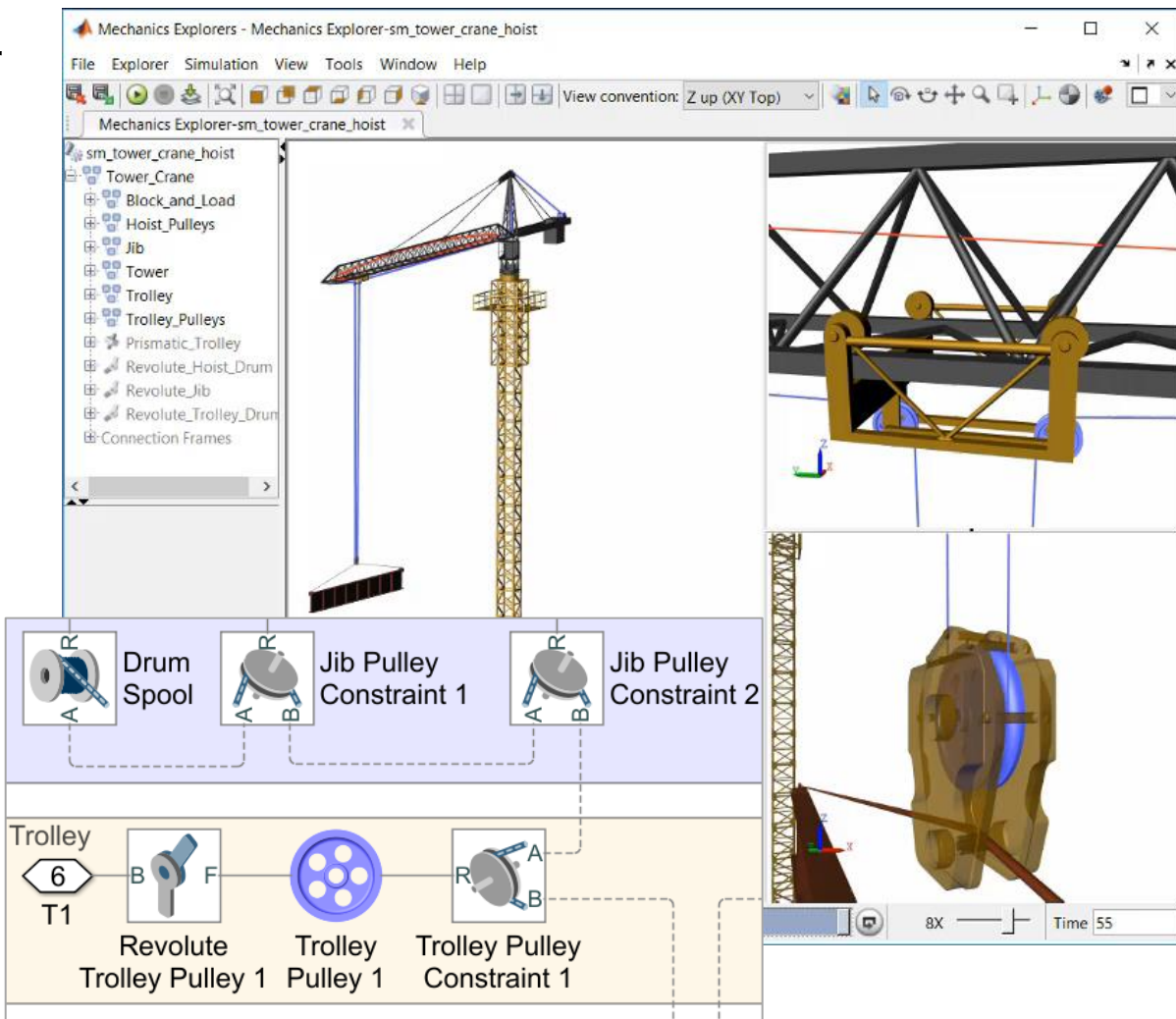


- 允许为多物理域系统构建（无因果）物理模型
- 按原理装配
- 自动推导解析方程式
- 充分利用 MATLAB 和 Simulink 的功能

# 构建柔性臂架的数学模型及运动学仿真

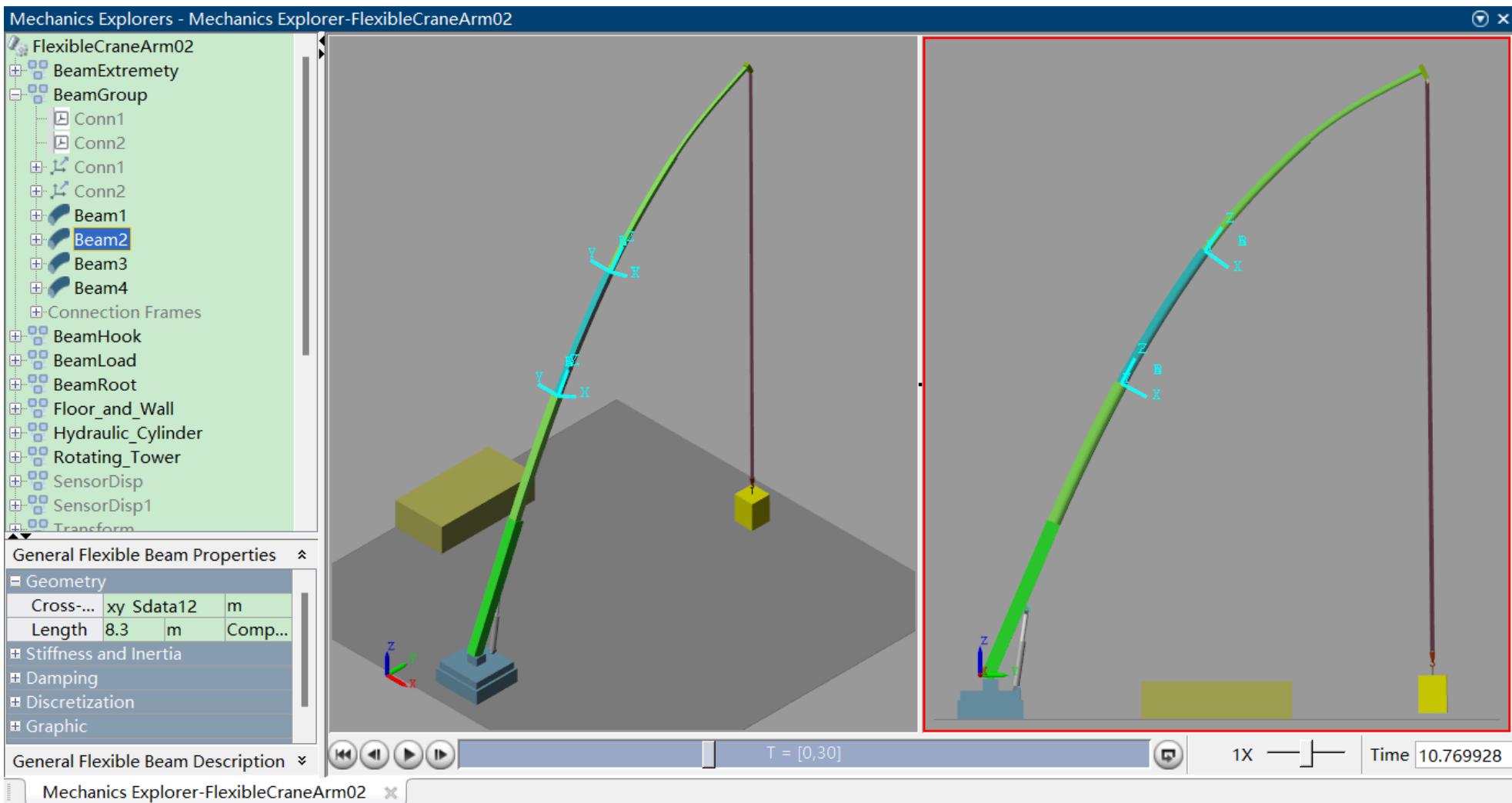
## Simscape Multibody 多体动力学建模仿真工具

- 支持对三维机械系统进行多体仿真
  - 支持实体和关节装配，包括从 CAD 导入
  - 无需推导和编写程序
  
- 利用 Simscape Multibody :
  - 细化机械系统要求
  - 及早发现集成问题
  - 设计控制算法和逻辑
  - 在没有硬件原型的情况下测试嵌入式软件



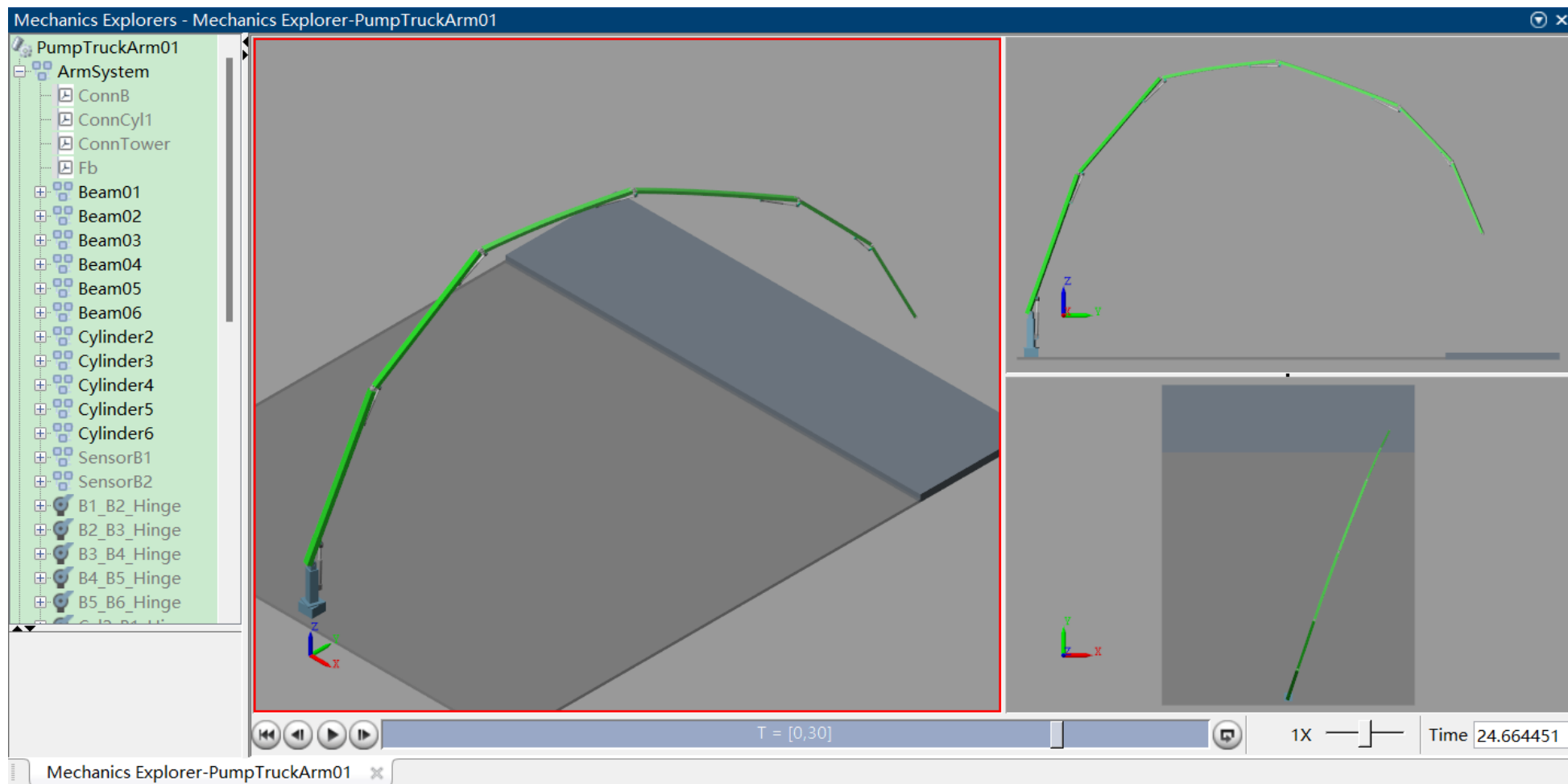


# 柔性臂架 Simulink/Simscape 仿真模型—汽车起重机臂架



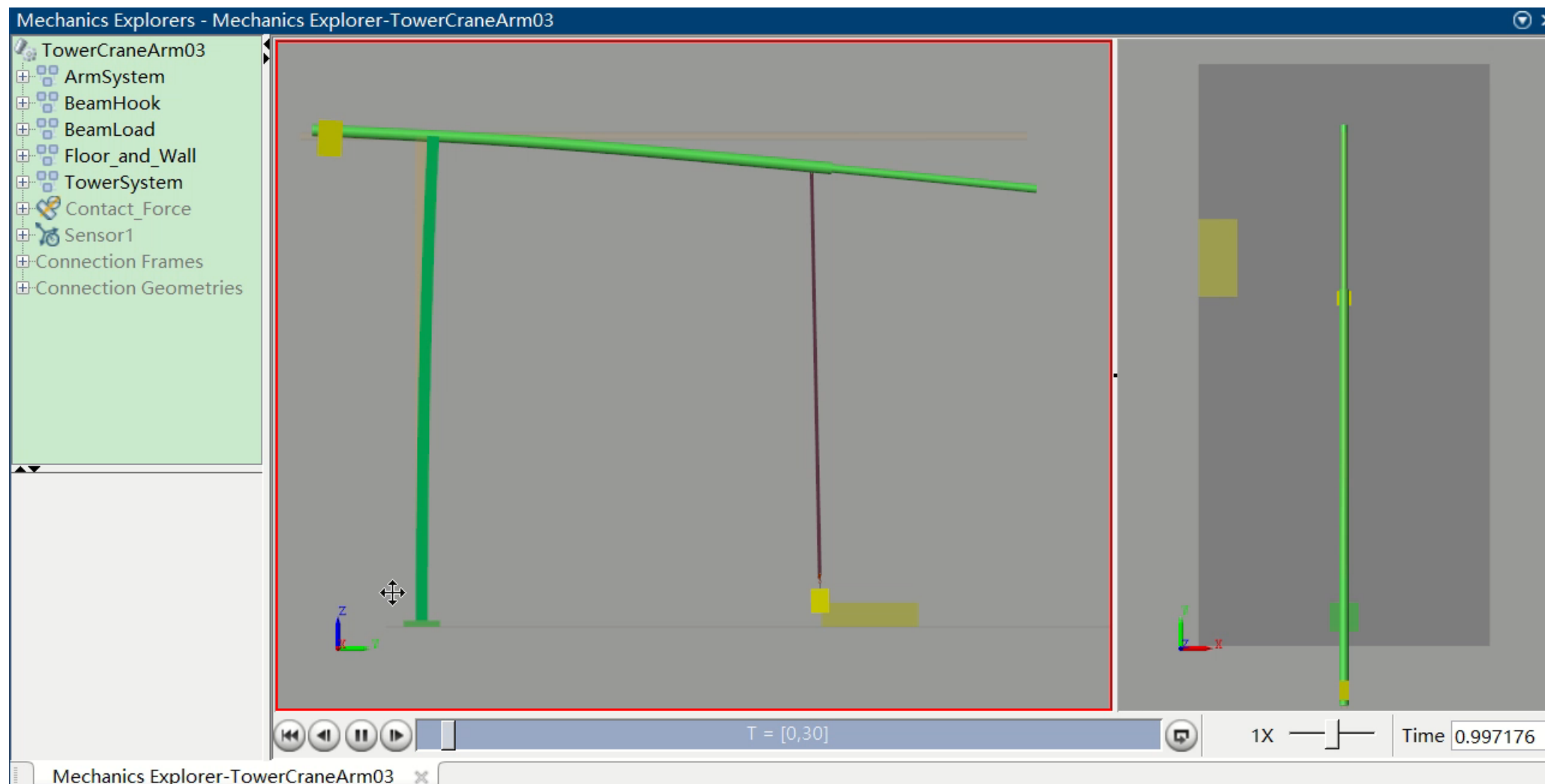
单  
关  
节  
长  
臂  
架

# 柔性臂架 Simulink/Simscape 仿真模型—泵车臂架



多  
关  
节  
长  
臂  
架

# 柔性臂架 Simulink/Simscape 仿真模型—塔式起重机臂架

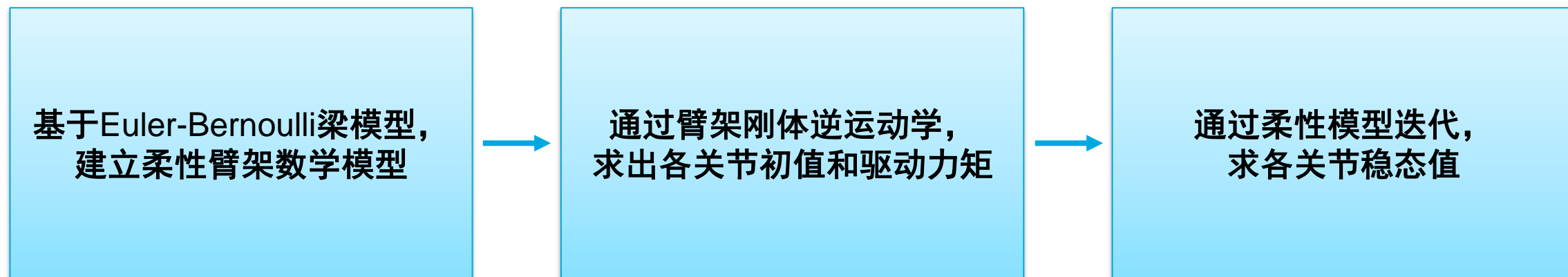


塔式起重机柔性仿真

# 臂架动力学的正逆求解及末端轨迹的自动控制设计

## 多关节臂架逆运动学求解方法

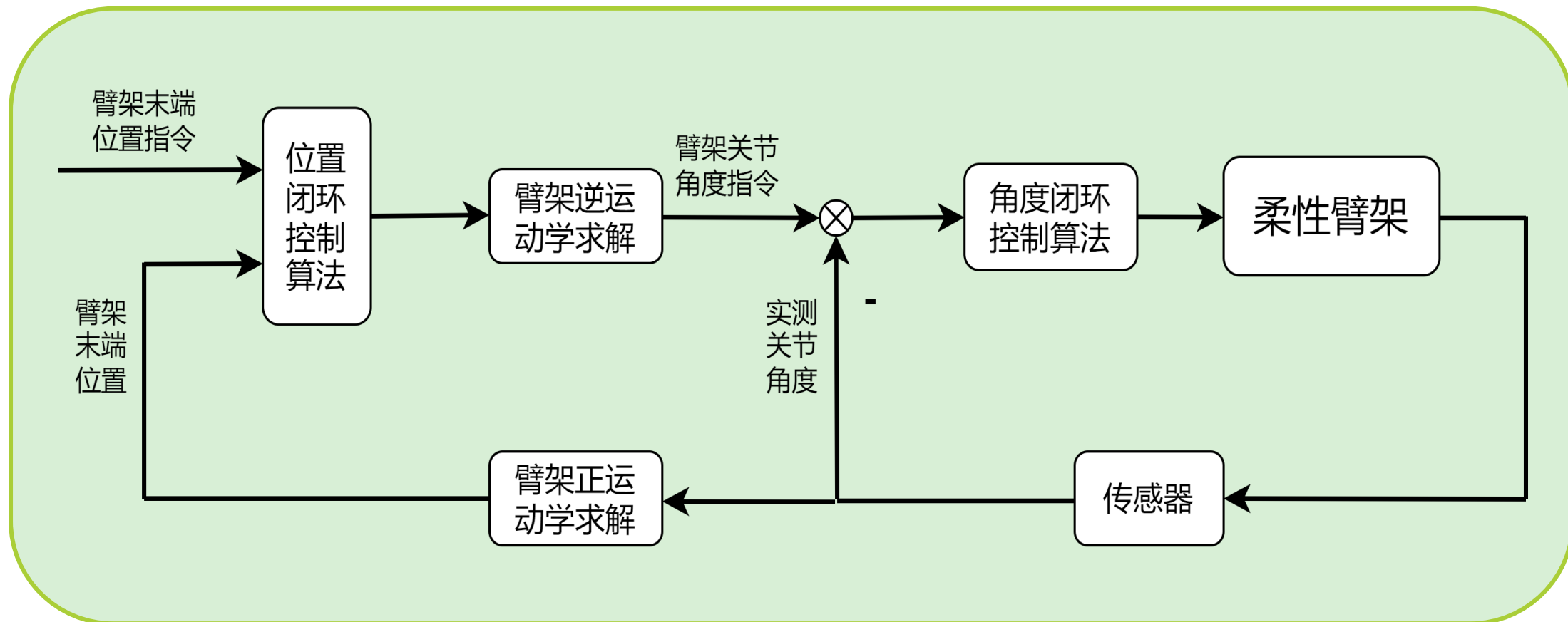
- 刚性臂架逆运动学求解：梯度投影算法、循环坐标下降法
- 柔性臂架逆运动学求解：基于Euler-Bernoulli梁模型的近似迭代法





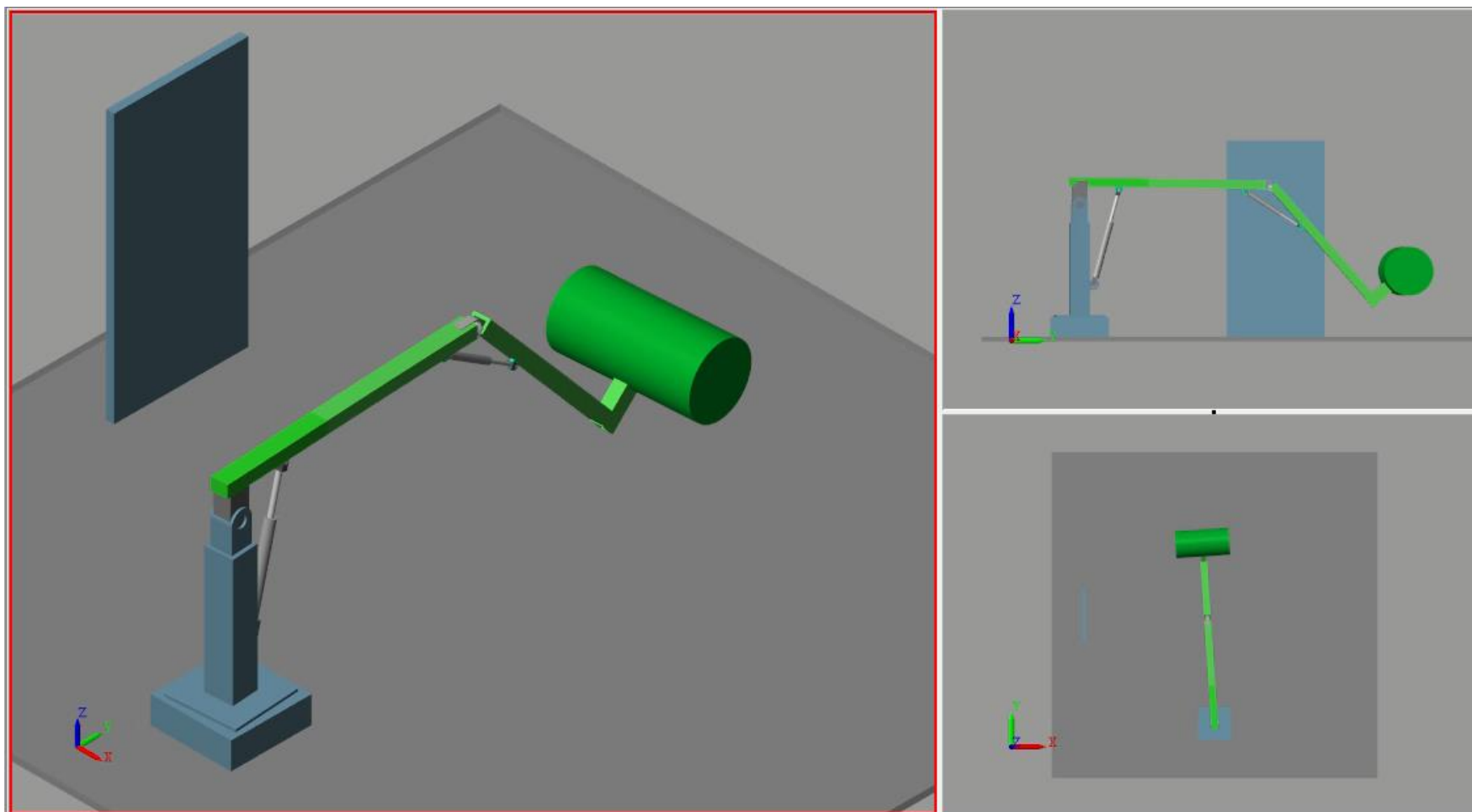
# 臂架动力学的正逆求解及末端轨迹的自动控制设计

## 臂架自动控制原理



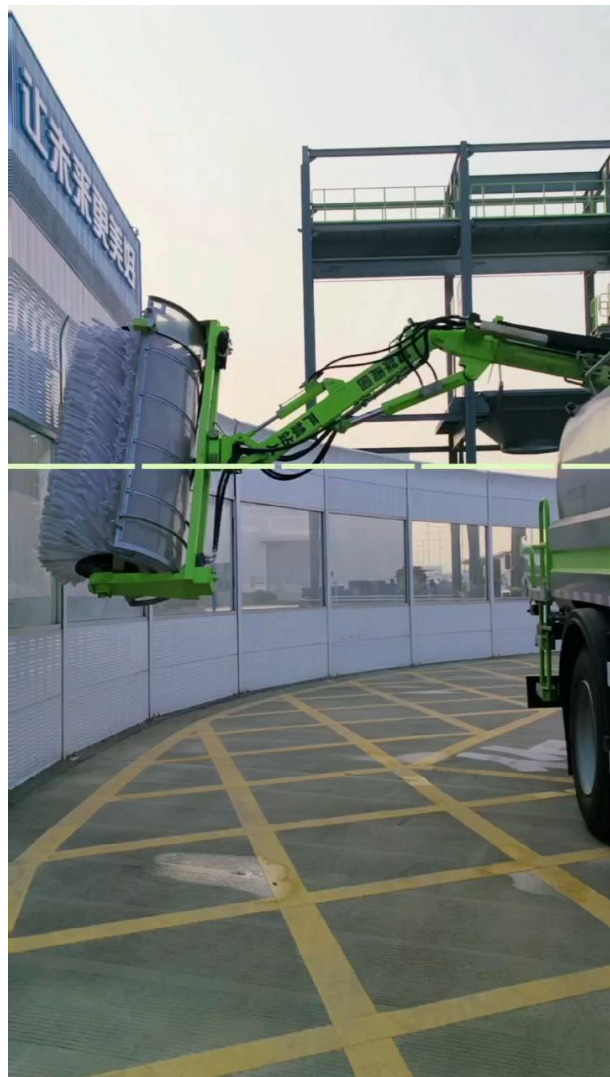
# 臂架动力学的正逆求解及末端轨迹的自动控制设计

闭环控制仿真



# 臂架动力学的正逆求解及末端轨迹的自动控制设计

闭环控制应用



# MATLAB 数字化仿真带来的好处

**01**

## 加速产品开发过程

利用 MATLAB 大规模的数据和计算资源，实现更复杂的仿真和分析，加速产品开发过程

**02**

## 优化设计、预测产品性能

在产品设计初始阶段，进行仿真集成，实现更全面、准确的仿真分析，有利于优化设计、预测产品性能。

**03**

## 降低了制造企业的试错成本和安全风险，缩短了市场响应时间

MATLAB 数字化仿真把研发制造过程转移至虚拟环境中进行“重现”，让大部分工作都可以在制定决策和确定成本前完成，减少实验次数，安全高效。

# MATLAB EXPO

# 谢谢



© 2024 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See [mathworks.com/trademarks](https://www.mathworks.com/trademarks) for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.

