

基于虚拟样机技术大型复杂设备的吊装研究

李民，李明，王永强，陈慧祺

广西电力职业技术学院，广西 南宁 530000

DOI: 10.61369/SSSD.2025110022

摘要： 大型复杂设备（汽轮机顶盖、盾构机刀盘等）往往是能源、基建领域的核心设备，其吊装作业因“结构不规则、重心偏移风险高、空间约束复杂”成为工程建设中的关键工序，其安全性和效率直接关系到整个项目的成败。传统吊装方案设计严重依赖人工计算和经验判断，尤其在设备重心确定环节存在简化模型、计算繁琐、误差较大等问题。本文提出一种基于虚拟样机技术的复杂设备吊装方案编制方法。通过建立高精度三维数字化模型，可快速、精确地计算设备重心；通过模拟真实的吊装运动过程，可在虚拟环境中提前发现干涉、倾覆、绳索受力不均等潜在风险，从而对索具配置和吊装路径进行优化。研究表明，虚拟样机技术具有快速、准确、可视化的显著优势，能有效提升吊装方案的设计效率与作业安全性，为现代大型工程吊装提供了可靠的数字化解决方案。

关键词： 虚拟样机技术；复杂设备；吊装方案；重心计算

Research on Hoisting of Large-Scale Complex Equipment Based on Virtual Prototyping Technology

Li Min, Li Ming, Wang Yongqiang, Chen Huiqi

Guangxi Electrical Polytechnic Institute, Nanning, Guangxi 530000

Abstract : Large-scale complex equipment (such as steam turbine top covers and shield machine cutter heads) is often the core equipment in the energy and infrastructure fields. Their hoisting operations have become a key process in engineering construction due to "irregular structures, high risks of center-of-gravity deviation, and complex spatial constraints", and the safety and efficiency of these operations are directly related to the success or failure of the entire project. The design of traditional hoisting schemes relies heavily on manual calculations and empirical judgments, especially in the process of determining the equipment's center of gravity, which has problems such as simplified models, cumbersome calculations, and large errors. This paper proposes a method for formulating hoisting schemes for complex equipment based on virtual prototyping technology. By establishing a high-precision 3D digital model, the center of gravity of the equipment can be calculated quickly and accurately; by simulating the real hoisting movement process, potential risks such as interference, overturning, and uneven force on ropes can be identified in advance in a virtual environment, thereby optimizing the rigging configuration and hoisting path. The research shows that virtual prototyping technology has the significant advantages of speed, accuracy, and visualization, which can effectively improve the design efficiency of hoisting schemes and the safety of operations, and provide a reliable digital solution for modern large-scale engineering hoisting.

Keywords : virtual prototyping technology; complex equipment; hoisting scheme; center-of-gravity calculation

引言

随着高端装备制造业的飞速发展，大型、复杂、精密设备（如风力发电机组、核反应堆压力容器、大型化工塔器、汽轮机顶盖等）的应用日益广泛。此类设备往往具有外形不规则、质量分布不均、价值高昂等特点，其吊装运输过程已成为工程施工中的重大挑战。一旦在吊装过程中发生设备倾覆、碰撞或结构变形，将导致巨大的经济损失和严重的安全事故。

传统的吊装方案的制定通常采用“经验主导 + 简化计算”模型，设计人员需要通过手工计算或简单的二维 CAD 图纸来估算设备的重心位置、计算吊索具的受力，并据此制定吊装方案。这种方法在面对结构复杂的设备时，暴露出诸多局限性：计算过程繁琐且易出

基金项目：2023年广西高校中青年教师科研基础能力提升项目——复杂条件下的大型机电设备吊装方案的可行性研究，编号2023KY1359，负责人：李民。

作者简介：李民（1983-），男，山东德州人，硕士，高级工程师，广西电力职业技术学院，研究方向：虚拟样机技术，职业教育。

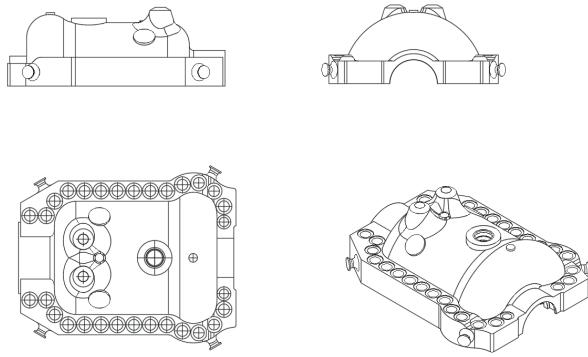
错、难以全面考虑空间干涉问题、无法动态模拟吊装全过程。因此，寻求一种更高效、精确、可靠的设计与验证手段已成为工程实践的迫切需求。

虚拟样机技术（Virtual Prototyping Technology）是建立在多体系统动力学、计算机图形学和数值分析基础上的先进数字化设计方法。它允许工程师在计算机上构建产品的三维数字化模型（即虚拟样机），并模拟其在真实工作环境下的各种力学性能和运动行为。本文将深入探讨如何利用虚拟样机技术解决复杂设备吊装中的核心难题，并通过实例验证其优越性。

一、传统吊装方案重心计算的局限性

设备的重心位置是吊装方案设计的基石，它直接决定了吊点的选择、吊索的长度与角度，是确保设备平稳吊离、空中姿态可控的关键。对于规则、匀质的物体，其重心可通过几何中心直接确定。然而，大型复杂设备通常由多种材料、多个部件装配而成，内部结构错综复杂，质量分布极不均匀^[1]。

在传统方法中，工程师通常采用分割法与力矩平衡原理进行计算。即将复杂设备简化为若干个规则形状的部件（如长方体、圆柱体等），分别计算每个部件的重量和重心，再通过公式求解整体重心坐标。以汽轮机上盖为例分析^[2]。



汽轮机顶盖二维图

汽轮机顶盖的简化需要遵循“核心结构不遗漏、次要部件可合并”原则，将其简化为顶盖本体、底部密封法兰、侧面吊柱、内部加强筋、顶部凸台等5个模块。

$$\text{模块重量: } m_i = \rho \times V_i$$

m_i ——第 i 个模块重量 (Kg)

ρ ——模块材质密度 (Kg/mm³)

V_i ——模块简化后的几何体积 (mm³)

汽轮机顶盖整体重心遵循“质点系重心矢量合成原理”，按以下公示计算顶盖重心坐标 (XG, YG, ZG)

$$X_G = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

$$Y_G = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

$$Z_G = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

n——简化模块总数

m_i ——第 i 个模块的重量

(xi, yi, zi) 为第 i 个模块的重心坐标。

该方法的局限性显而易见。1. 模型简化误差：将复杂曲面、

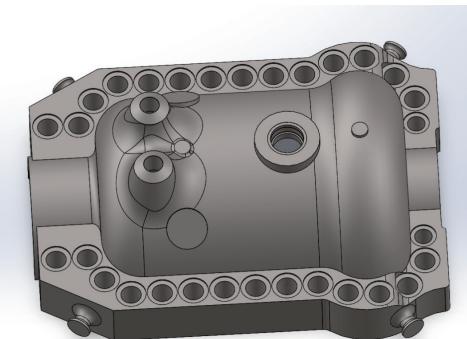
异形结构强制简化为规则几何体，必然引入计算误差，简化程度越高，误差越大。2. 计算过程繁琐：设备结构越复杂，需要分割的部件数量越多，计算量呈指数级增长，耗时耗力。3. 依赖准确的质量参数：计算精度高度依赖于每个简化部件质量估算的准确性，对于内部结构不明的设备，估算本身误差就很大。4. 缺乏直观验证：计算结果是抽象的数据，无法直观展示，其正确性难以验证，只能通过后续实际吊装来检验，风险后置^[3]。

二、虚拟样机技术在吊装方案中的优势应用

虚拟样机技术为解决上述痛点提供了解决方案，其中 SolidWorks 作为主流计算机辅助设计 (CAD) 软件，凭借其“参数化驱动 + 可视化操作 + 多模块集成”特性，成为复杂机电设备三维建模的优选工具^[4]。

(一) 三维建模

SolidWorks 采用“特征驱动”的参数化建模逻辑，可通过尺寸参数（如半径、厚度、距离）精准定义汽轮机顶盖的各结构特征（如弧形本体半径、法兰厚度、吊耳直径）。更关键的是保持各特征间具备关联性，若后续调整顶盖本体半径，底部密封法兰的内半径会自动同步更新，避免传统二维设计中“一处修改、多处返工”的问题，大幅提升建模效率^[5]。



汽轮机顶盖三维模型

(二) 确定重心

材质参数（密度）直接决定各模块重量，进而影响重心计算结果，需按汽轮机顶盖实际材质精准赋值。汽轮机顶盖材质为 ZG15Cr1Mo，在 solidworks 中没有直接对应的材料，可以通过设计树“材质”点击右键“编辑材料”，定义其密度为 0.00785kg/cm³。

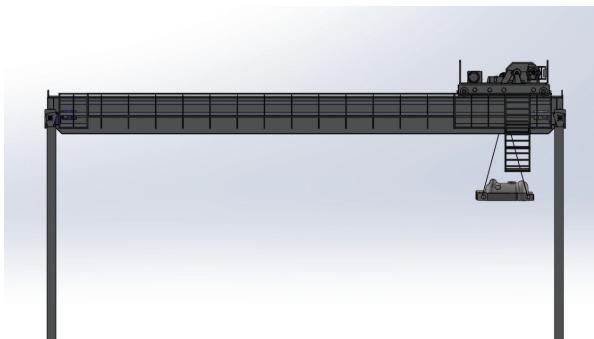
定义完材料属性后，点击“评估”选项下面的“质量属性”，solidworks 会直接计算出重心（即质心）的坐标。这个过程通常

在秒级时间内完成，结果精确可靠，从而避免了人为简化模型和计算错误带来的误差^[9]。



(三) 运动仿真及碰撞检查

将天车设为固定件，钢丝绳与汽轮机顶盖吊柱设为旋转副，建立装配体，并对其进行静态干涉检查，确保无初始干涉^[7]。



SolidWorks Motion 是 SolidWorks 软件中的高级运动仿真插件，主要用于机械系统的运动学与动力学分析。该插件能够精确模拟装配体在真实物理环境中的运动行为，并分析运动过程中的受力情况。

(1) 构建仿真环境进行受力分析：设置重力载荷（选择向下方向）、线性马达（驱动吊钩垂直起升或水平移动），对吊装过程中吊点和钢丝绳进行受力分析，形成云图，能直观反映钢丝绳和吊点的应力分布特征，从而快速验证吊装设备设施的安全性^[9]。

(2) 运动仿真：点击 Motion 模块中“基本运动”^[8]，观察汽轮机顶盖运动情况，并形成运动动画，可用于后期施工交底^[9]。

(3) 碰撞检查：清晰观察汽轮机顶盖从起吊、空中回转、就位的整个路径和姿态变化。提前发现设备在旋转或移动过程中是否会与周围建筑物、管道或其他设备发生碰撞^[10]。

通过“设计 – 仿真 – 发现问题 – 优化方案 – 再次仿真”的迭代过程，可以在实物吊装前将方案打磨至最优，将风险化解于计算机中。

三、结论

本文论述了虚拟样机技术在大型复杂设备吊装领域的应用，与传统方法相比，该技术带来了的进步：

1. 快速性与精确性：利用高精度模型和计算机自动计算，可快速获得重心位置和质量特性，降低人为误差和提升计算效率，缩短工期。

2. 前瞻性与安全性：通过运动仿真，能够在虚拟环境中全方位、多角度地预演吊装全过程，主动识别和规避包括碰撞、倾覆、过载在内的各类潜在风险，将安全控制由“事后补救”变为“事前预防”。

3. 可视化与优化性：将抽象的方案、数据和计算结果转化为直观、动态的三维画面，极大地增强了各参与方的理解与沟通。基于仿真结果，可以科学地优化吊装方案，提高效率，降低成本。

综上所述，虚拟样机技术为复杂设备的吊装作业提供了一套科学、可靠、高效的数字化解决方案，随着计算机技术和仿真算法的不断发展，虚拟样机技术必将在更多工程领域发挥至关重要的作用。

参考文献

- [1] 胡友斌, 谢俊, 蒋涤非. 基于 Solidworks 的大尺寸异形模块吊装技术研究 [J]. 施工技术, 2016, 45 (2) : 85-88.
- [2] 李坤. 300MW 燃煤机组大型设备吊装方案的设计与应用 [D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2006.
- [3] 高越. 计算机辅助吊装造型及碰撞检测研究 [D]. 北京: 北方民族大学硕士学位论文, 2016.
- [4] 张忠将. Solidworks2023 机械设计从入门到精通 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2024.
- [5] 任卫军, 王飞, 史先信, 焦生杰, 朱长建. 基于虚拟墙的汽车起重机吊装防碰撞技术 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (7) : 162-168.
- [6] 王飞. 起重机吊装防碰撞技术的研究 [D]. 西安: 长安大学硕士学位论文, 2014.
- [7] 夏学文, 李峰, 郭小刚, 张俊彦. 基于 Solidworks 的机械手三维建模及其运动仿真 [J]. 煤矿机械, 2010, 31 (10) : 215-218.
- [8] 赵黎明, 杨顺坤, 李仟仟. 窄空间内大型设备吊装方法 [J]. 安装, 2019 (10) : 46-48.
- [9] 孙爱萍, 严永江, 耿惊涛, 解利芹. 大型设备吊装方案优化 [J]. 煤炭技术, 2010, 29 (3) : 155-158.
- [10] 赵晓光. 大型复杂网架吊装方案设计与安装顺序模拟分析 [D]. 内蒙古包头: 内蒙古科技大学硕士学位论文, 2014.