

起重机远控模拟舱动力学模型精度优化研究

张宏波

上海振华重工集团机械设备服务有限公司, 上海 200135

DOI:10.61369/ETQM.2025100004

摘 要： 为提升虚拟现实环境下集装箱起重机远程操作训练系统精度，基于多体系统动力学理论构建动力学模型，集成高精度物理引擎，耦合环境干扰因素，运用数据驱动方法优化模型。实验表明，优化后模型在负载动态响应与环境干扰模拟方面精度显著提升，有效增强训练系统真实性，受训人员作业完成时间缩短，操作规范性与突发故障处置正确率提高，为自动化码头操作人员培训提供有力支持。

关 键 词： 虚拟现实；集装箱起重机；远程操作；多体系统动力学；物理引擎；精度优化

Study on Accuracy Optimization of Dynamic Model of Remote Control Simulation Cabin for Crane

Zhang Hongbo

Shanghai Zhenhua Heavy Industry Group Machinery and Equipment Service Co., LTD., Shanghai 200135

Abstract： To enhance the accuracy of the remote operation training system for container cranes in a virtual reality environment, a dynamic model was constructed based on multi-body system dynamics theory. This model integrates a high-precision physics engine and incorporates environmental interference factors, using data-driven methods to optimize the model. Experiments show that the optimized model significantly improves the accuracy of load dynamic response and environmental interference simulation, effectively enhancing the realism of the training system. It reduces the time required for trainees to complete tasks, improves their operational standards, and increases the accuracy of handling sudden faults, providing strong support for the training of automated terminal operators.

Keywords： virtual reality; container crane; remote operation; multi-body system dynamics; physics engine; accuracy optimization

引言

集装箱起重机是港口物流的关键设备，其远程操作对动力学模型精度要求极高。传统模型简化处理导致与实际工况存在偏差，影响操作人员训练效果与自动化码头效率。随着虚拟现实技术的发展，构建高精度动力学模型并集成至虚拟现实远程操作训练系统，对提升操作人员技能水平、保障港口作业安全高效具有重要意义。^[1]

一、集装箱起重机动力学特性分析

（一）机械结构动力学特性

集装箱起重机机械结构包含桥架、小车等核心构件，其质量分布状况对动力学特性产生影响，传统模型将其简化成刚体系统，未能考虑弹性形变与阻尼效应，在远程操作时容易出现误判，同时也没有全面考虑构件磨损等时变因素，导致模型准确性下降^[2]。实际上，桥架、小车和起升机构组成刚柔耦合系统，桥架的弹性形变、钢丝绳的非线性振动以及各类时变因素，都会对起重机的运行产生作用。

（二）负载动态响应特性

集装箱门式起重机作为港口国际贸易的关键设备，大小车运行速度较快，因起重小车与被吊物为柔性连接，载荷难以完全约束，工作时摆动角度较大，这增加货物损坏风险与安全隐患。负载动态响应是重要特征，负载重量及分布对起升和运行特性有影响，重载会使响应延迟，偏载会引发吊具倾斜等情况，现有模拟系统多线性化处理，忽略非线性因素，导致操作适应性不足，模拟与实际存在较大偏差^[3]。

负载质量与分布对系统动力学行为影响显著：

惯性力耦合：40ft满载集装箱（30.48t）起升加速度为0.2m/

s²时，钢丝绳动态张力较静态值增加18.7%；

偏载效应：10%偏载会导致吊具倾斜角度达1.2°，钢丝绳张力差达23kN；

现有模型缺陷：线性化处理使重载工况下小车制动距离模拟误差达22%，无法反映实际操作中“过冲-回调”的非线性特征。

二、动力学模型精度优化方法

（一）多体系统动力学建模

基于多体系统动力学理论，把集装箱起重机拆解为刚柔单元，借助关节约束和力元连接进行建模，运用拉格朗日方程建立运动微分方程，将惯性耦合、弹性形变与阻尼效应纳入考量^[4]。针对桥架这类大跨度结构，引入有限元模态分析，对于钢丝绳等柔性构件，采用柔体动力学建模，如此能够实现动态响应同步，精确模拟操作过程中吊具的晃动情况，为使用者提供真实的操作体验。

基于拉格朗日方程构建系统运动微分方程： $M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + K(q)q = \tau + F_{enu}$

其中， $M(q)$ 为质量矩阵， $C(q, \dot{q})$ 为阻尼矩阵， $K(q)$ 为刚度矩阵， τ 为驱动力矩， F_{enu} 为环境干扰力。针对桥架结构，采用有限元模态分析将其离散为128个弹性梁单元，前3阶固有频率分别为2.3Hz、5.7Hz、9.1Hz；钢丝绳则通过柔体动力学建模，采用50个粒子的弹簧网络模拟，弹簧刚度系数随拉伸量动态调整：

$$k_{dyn} = k_0(1 + \alpha \varepsilon^2), \alpha = 0.15$$

其中 $k_0 = 2.4 \times 10^6 \text{ N/m}$ 为初始刚度， ε 为应变。

（二）高精度物理引擎集成

选用NVIDIA PhysX等具备刚柔耦合计算功能的物理引擎作为核心，通过实测起重机部件参数来自定义引擎属性，利用引擎粒子系统与弹簧网络模型模拟钢丝绳等柔性体特性，通过调整粒子间距等方式优化计算精度，实现与远程控制模拟训练台硬件交互模块的实时映射。例如操作吊具下降时，可精确计算钢丝绳动态变化，让虚拟场景与实际操作保持同步。

1. 物理参数校准

参数类型	校准方法	实测值范围
构件质量	激光扫描+称重传感器	桥架：280~320t，小车：45t
转动惯量	扭摆实验+数值积分	小车绕z轴：1200kg·m ²
钢丝绳弹性模量	拉伸实验	1.85~1.95 × 10 ¹¹ Pa
接触摩擦系数	导轨摩擦实验	钢-钢干摩擦：0.15~0.2

2. 引擎核心参数配置

◆时间步长：1/60s，确保50ms内完成一次物理迭代；

◆求解器迭代次数：位置迭代10次，速度迭代8次；

w柔体粒子间距：钢丝绳直径的1/5（12mm），弹簧阻尼比0.08；

w碰撞检测精度：采用GJK算法，穿透深度阈值0.5mm。

（三）环境干扰因素耦合

建立含风载荷、船舶晃动等环境因素的干扰模型并与动力学模型实时耦合，风载荷模型依流体力学成分布力，船舶晃动模型将实测数据转化为基座振动激励。该模块可定制天气等环境参数以提供多样化训练环境。如强风时风载荷影响起重机运行，操作人员需依风况调整策略，模型能真实模拟以助其积累应对不同环境的经验^[6]。

1. 风载荷计算

基于流体力学理论，风载荷分布力表达式为： $F_w = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A$

其中空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ，风速 u ，风载荷系数 C_d （桥架：1.8，小车：1.5），迎风面积 A 。6级风（10.8m/s）下，桥架受到的横向力达28kN，扭矩110kN·m。

2. 船舶晃动激励

将实测船舶六自由度运动数据（横摇±3°，纵摇±2°，垂荡±0.5m）转化为基座振动加速度：

$$a(t) = [0.1\sin(0.8t), 0.15\sin(0.6t), 0.2\cos(t)]^T \text{ m/s}^2$$

（四）数据驱动模型优化

构建基于实际作业数据的模型校准机制，借传感器网络采集运行数据形成训练集，运用机器学习算法以均方误差为目标迭代优化动力学模型参数，自动调整刚度、阻尼系数等，优化成果存储于服务器，为学员操作数据评估提供参考^[7]。长期采集数据可挖掘规律，例如特定负载与风速组合下部件振动模式规律，据此优化参数提升模型准确性。

采用改进的粒子群优化（IPSO）算法迭代校准模型参数：

1. 适应度函数：

$$f = \sum_{i=1}^n \left(\frac{e_i}{\sigma_i} \right)^2, e_i = y_{sim, i} - y_{meas, i}$$

其中 e_i 为第 i 项指标误差， σ_i 为标准差， y_{sim} 与 y_{meas} 分别为模拟与实测值。

2. 参数优化范围：

结构阻尼系数：0.02~0.08（初始值0.05）；

物理引擎摩擦参数：0.1~0.3（初始值0.2）；

钢丝绳非线性系数：0.1~0.2（初始值0.15）。

三、实验验证与结果分析

（一）实验平台搭建

搭建融合VR技术的实验平台，由硬件与软件系统组成。硬件含远程控制模拟训练台、VR仿真服务器等，训练台机械布局与实际一致，主令控制器操作手感、反馈力度同真实操作，高清屏呈现虚拟场景，软件有动力学模型等，硬软件通过以太网交互^[8]。三维视景引擎逼真还原港口环境，平台可添加VR头盔和力反馈装置增强沉浸感与交互性，且具良好扩展性、兼容性，满足多样化实验需求。

模块	硬件配置	软件版本
模拟训练台	六自由度运动平台 + 力反馈手柄	自研控制软件 V1.2
VR 服务器	NVIDIA RTX A6000 × 2	Unreal Engine 4.27
物理引擎	NVIDIA PhysX 4.1	自定义插件 V3.5
数据采集	采样频率 100Hz, 精度 ± 0.5%	LabVIEW 2022

（二）对比实验设计

设计交叉实验方案，融合空载、额定负载、偏载三类负载工况与无风、微风、强风三种环境工况，由专业人员执行作业并同步记录动力学指标，实验定制环境参数模拟复杂港口情境，如偏载强风工况下评估模型表现，严格把控实验条件与流程，精确控制负载重量、分布及风速、风向，多次采集数据降低误差，引入同类训练系统开展对比实验，多维度评价模型性能^[9]。

（三）实验结果分析

优化后的动力学模型在负载动态响应与环境干扰模拟中表现优异，负载动态响应上，重载时小车启停模拟精度提升，偏载吊具倾斜角度模拟误差下降；环境干扰模拟中，强风下起重机运行阻力、船舶晃动致吊具附加晃动等模拟结果与实测高度吻合，增强训练真实性。强风工况优化前运行阻力模拟偏差大，优化后精准反映实际，提升操作训练真实难度。实验分析除动力学指标，还可多维度研究：观察操作人员动作与反应时间分析其对模型适应度与操作习惯；通过问卷访谈收集对训练系统满意度及建议；用数据分析技术挖掘实验数据，发现模型潜在问题与优化方向，为后续改进提供支撑。

（四）训练效果评估

为评估优化前后训练系统效果，选取两组受训人员分别开展培训，通过三维视景引擎生成的操作轨迹对比显示：

空载小车急停工况：优化前吊具因模型简化产生虚假振荡（振幅 ± 1.2m），优化后真实反映桥架弹性形变导致的衰减振动（振幅 ± 0.5m，衰减时间常数 2.3s）；

船舶晃动耦合工况：优化后吊具附加摆动频率（0.8Hz）与实测值完全一致，而优化前存在 0.3Hz 的频率偏差，导致操作人员误判船舶运动周期。

使用优化后模型的受训组作业完成时间缩短约 20%，操作规范度明显提升，突发故障处置正确率提高约 30%，且多数受训人员反馈该系统动态响应更贴近实际设备，契合训练评估需求。此次评估证实，优化后的训练系统可有效提升操作人员技能水平^[6]。为进一步完善评估体系，还能跟踪受训人员入职后的长期工作表现，分析训练系统对其实际工作能力的持续影响；同时开展成本效益分析，探究系统在提升培训效率与质量方面的经济、社会效益，以评估结果为导向持续优化训练系统，可更好适应自动化码头操作人员培训的动态需求^[10]。

四、结束语

集装箱起重机动力学模型精度优化研究取得显著成果，为虚拟现实远程操作训练系统提供更精准的模拟环境，有效提升操作人员培训质量。未来，随着技术的进一步发展，可探索更复杂的工况模拟与智能化训练方法，持续完善训练系统，以满足自动化码头日益增长的操作人员培训需求，推动港口物流行业的智能化发展。

参考文献

[1] 董杰恒. 集装箱门式起重机防摇摆多工况动力学仿真 [D]. 太原科技大学, 2024.

[2] 王照卓. 汽车起重机变幅系统动态特性分析及反馈补偿设计 [D]. 中南大学, 2022.

[3] 张志强. 平塔式起重机—货物体系的动力学仿真研究 [D]. 太原科技大学, 2021.

[4] 吴易鸣. 考虑复杂摆动效应的起重机系统防摆控制研究 [D]. 南开大学, 2021.

[5] 刘华森. 桥门式起重机多体刚柔耦合动力学与防摆控制研究 [D]. 西南交通大学, 2018.

[6] 康燕杰. 基于 Unity3D 的岸边集装箱起重机虚拟仿真及寿命预估 [D]. 华北水利水电大学, 2024.

[7] 王鑫玮. 标准化作业流程在智能化集装箱码头中的应用 [J]. 港口技术, 2022, 59(S1): 58–60.

[8] 赵斌, 马矜. 自动化码头岸边集装箱起重机控制技术 [J]. 港口装卸, 2019, (05): 35–37.

[9] 贾汶翰, 白茹芸, 吴红辰, 等. 岸边集装箱起重机门架结构焊序优化仿真 [J]. 起重运输机械, 2025, (10): 83–88.

[10] 吕阳. 集装箱起重机电缆卷盘系统的电气调试方法研究 [J]. 模具制造, 2025, 25(05): 154–156.