

# 火箭运输船协同吊装模拟训练系统的研究与实现

杨洋, 邢成欢, 蓝盈, 姚怡超, 苏智勇

(南京理工大学自动化学院, 南京 210094)



**摘要:** 针对超大型火箭集装箱协同吊装的实际需求, 研究和实现了一种基于虚拟现实技术的协同吊装模拟训练系统, 首先阐述了系统的总体架构; 然后基于开源物理引擎 ODE (Open Dynamic Engine), 提出了一种基于多刚体动力学模型的钢丝绳模拟方法; 在深入分析协同吊装作业过程和特点的基础上, 研究和建立了一种协同吊装动力学模型; 针对协同吊装过程中各仿真计算机的视景同步显示问题, 提出了一种有效的视景同步显示方法。实验结果表明, 该系统可以逼真的模拟船载起重机对超大型火箭集装箱进行协同吊装作业的全过程, 能够满足日常吊装训练需求, 节省训练成本, 提升训练效果。

**关键词:** 协同吊装; 虚拟现实; 开源物理引擎; 动力学模型

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2013) 09-2258-05

## Research and Implementation of Cooperative Crane Simulation for Rocket Transport

YANG Yang, XING Cheng-huan, LAN Ying, YAO Yi-chao, SU Zhi-yong

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Aiming at the need of very large rocket container cooperative lifting, a cooperative lifting training system was proposed based on virtual reality technology. First of all, the overall architecture of the system was described; then a multi-body dynamic model of wire rope was proposed based on the open source physics engine ODE (Open Dynamic Engine); with the depth analysis of process and characteristics in collaborative lifting, a dynamic model was researched and established. Aiming at synchronizing visual display problems for each simulation computer in lifting process, an effective view synchronization method was proposed. The experimental results show that the system could realistically simulate the entire process of collaborative lifting for large rocket container, and meet the needs of daily lifting training, reduce training costs and enhance the training effect.

**Key words:** cooperative lifting; virtual reality; ODE; dynamic model

## 引言

火箭吊装是航天发射试验过程中一个重要的环节。由于运载火箭不同于一般意义的货物, 其集装箱的非标准化设计(超大、超重等)对吊装作业提出了较高要求。此外, 由于某些集装箱长度超过 30 米, 宽度和高度超过 6 米, 需要

2 台起重机实施协同吊装, 这对指挥程序、操作流程、操作人员的技能和素质、集装箱的装卸效率等提出了严格要求。传统的培训、评估集装箱吊装操作人员大都是采用真实设备, 由有经验的师傅手把手地培训, 用这种方式培训操作人员存在周期长、容易存在事故隐患, 培训费用高等不足。吊装模拟训练系统采用真实设备与软件模拟相结合的设计, 具有以下优点<sup>[1]</sup>: 可避免实车操作中的各种事故隐患, 安全性高; 可以模拟吊车作业过程中的各种工作状态、天气状况, 并可进行特殊工况和事故处理能力的培训, 缩短培训周期, 提高培训质量; 不影响码头的正常作业, 在减少人力、物力消耗的同时, 通过对软硬件进行维护和

收稿日期: 2013-04-21 修回日期: 2013-06-24

作者简介: 杨洋(1989-), 男, 江苏徐州人, 硕士, 研究方向为系统仿真与虚拟现实; 邢成欢(1990-), 男, 江苏苏州人, 硕士, 研究方向为系统仿真与虚拟现实; 蓝盈(1990-), 男, 江苏常州人, 硕士, 研究方向为嵌入式设计; 姚怡超(1990-), 男, 江苏苏州人, 硕士, 研究方向为系统仿真与虚拟现实; 苏智勇(1981-), 男, 江苏泰州人, 博士, 讲师, 研究方向为系统仿真与虚拟现实。

http: www.china-simulation.com

• 2258 •

扩展, 适应码头不断发展的需求。因此, 研制安全、高效的吊装模拟训练系统具有重要的现实意义。

国外对吊车仿真系统的研究涉及路径规划<sup>[2,3]</sup>、数值建模<sup>[4]</sup>等方面, 国内的则偏重半实物仿真。上海海运学院<sup>[5]</sup>、武汉理工大学<sup>[6]</sup>、上海海事大学<sup>[7]</sup>以及大连海事大学<sup>[8]</sup>、大连理工大学<sup>[9]</sup>等相关研究机构在吊装训练仿真器的研究方面做了大量相关的工作, 也开发了许多功能类似的训练装置, 用于教学和科研用途, 如表 1 所示。对比这几个系统可以发现, 他们采用了与实车一致的吊车操作台为操作人员提供了一个逼真的操作环境, 有的还使用了网络通信, 提供教员监控功能, 可帮助指挥观察人员观看操作员在操作过程中的各种动作, 及时发现并纠正问题。

表 1 国内部分吊装仿真器

吊装仿真器	虚拟环境	单吊/协同	网络通信
文献[5]	双屏幕	单吊	有, 提供教员监控
文献[6]	桌面式大屏幕	单吊	无
文献[7]	单屏幕	单吊	有, 提供教员监控
文献[8]	球幕	单吊	有, 提供教员监控
文献[9]	立体投影	联吊	有, 提供教员监控

为了满足火箭运输船吊装训练的需求, 本文设计开发了火箭运输船协同吊装仿真训练系统。针对吊装过程中钢丝绳模拟的问题, 设计了钢丝绳多关节刚体模型; 针对火箭吊装过程中的联吊问题, 设计了协同吊装吊动力学模型; 同时解决了多机器显示时的视景同步问题。系统除了具有 5 通道大型环幕外, 采用了两套与真实吊车中完全一致的操作设备以实现火箭吊装的联吊操作, 同时为吊车操作员提供了 3 维显示头盔对吊车和集装箱的运动进行实时观察与控制; 高分辨率的摄像头和对讲机用来接收地面指挥人员传来的口令、旗语等指挥信号。

## 1 系统总体架构

火箭运输船吊装仿真训练系统的硬件部分主要包括两套吊车操作台、三台图形工作站、两套头盔显示器以及环幕、投影仪、音响系统等; 软件部分主要两大部分组成: 运算控制和实时动态显示控制。这两部分又由几个子系统构成, 共同实现吊车的运动及场景模拟, 图 1 为系统总体架构图。

吊装操作设备仿真可以采用两种方式<sup>[10]</sup>: 一种是虚拟操纵设备方式, 如由图形系统生成操纵杆、按钮、虚拟手等, 通过数据手套操作这些虚拟设备; 另一种方式是采用实物操纵设备。为了给操作人员提供一个真实的操控环境, 本系统采用了与实车完全一样的操作联动台。大型环幕、投影仪以及音响设备的采用, 为指挥、观察人员提供了震

撼的临场感受, 并方便其对吊装过程进行分析; 3 维头盔显示器, 可以实时的获得操作人员头部的运动姿态角, 根据这些角度动态的调整操作人员看到的视景, 产生逼真的感受。该头盔显示器还可以同时输出声音信号, 将指挥人员的口令或者吊车驾驶舱内的嘈杂声播放出来, 提升了操作人员的沉浸感。

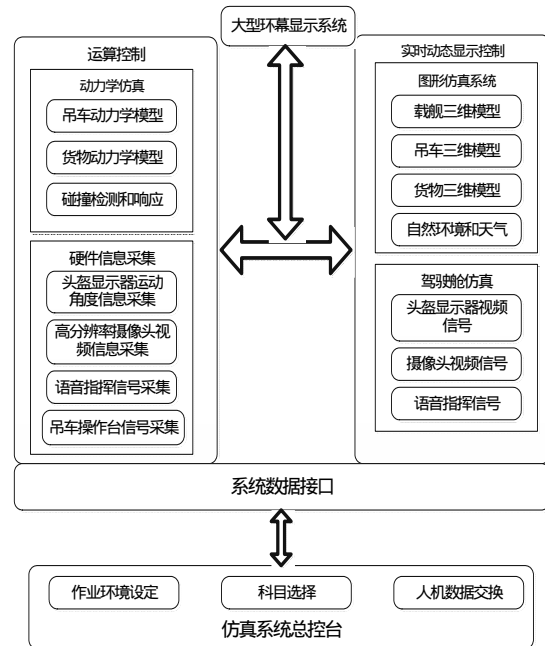


图 1 系统总体架构

实时动态显示控制主要是为了实现场景的动态更新, 包括图形仿真和驾驶舱仿真。图形仿真系统还原现实中的场景, 给操作人员、指挥观察人员真实的感受, 同时也是动力学仿真模块的基础, 包括载船、吊车、货物、自然环境和天气的建模和显示。驾驶舱仿真模块为操作人员提供虚拟现实场景, 包括 3 维头盔显示器的图像显示、摄像头视频信息显示以及语音指挥信号输出。

运算控制是整个吊装仿真系统的核心, 包括动力学仿真和硬件信息采集。它对硬件设备采集到的信息进行解算分析, 将结果输出到动力学仿真模块, 控制吊车的运动。而动力学仿真模块通过对吊车及货物进行动力学建模, 真实地模拟出吊车的各种运动。

## 2 系统关键技术

### 2.1 钢丝绳模型的建立

随着计算机仿真技术的发展, 多体动力学仿真中经常涉及钢丝绳类索结构的建模。在本系统中, 钢丝绳的模拟

是仿真的重要环节。货物通过钢丝绳与吊车连接，货物的实时运动都有钢丝绳地参与。为了真实地模拟货物的各种运动，钢丝绳需要具有伸缩和弯曲的功能。传统的钢丝绳建模手段主要有三种<sup>[11,12]</sup>：利用轴套力建模、利用 Polyline 建模和利用刚性细实杆代替钢丝绳。前两种建模方法利用特定的仿真分析软件对钢丝绳的运动特性进行分析，评估整个系统的稳定性及可靠性，无法满足本系统的需求；第三种建模方法无法模拟钢丝绳的伸缩和弯曲行为，因此需要重新建立钢丝绳的动力学模型。

本文主要基于 ODE (Open Dynamics Engine, 开源动力学引擎) 对钢丝绳进行动力学建模。ODE 是免费的，具有工业级质量的动力学仿真库，适合模拟结构化的刚体——所谓结构化的刚体，是指由各种形状的刚体通过各种关节连接而成。

ODE 中的关节具有一下三个约束方程：

$$J_1 v_1 + \Omega_1 \omega_1 + J_2 v_2 + \Omega_2 \omega_2 = c + C \lambda \quad (1)$$

$$\lambda \geq l \quad (2)$$

$$\lambda \leq h \quad (3)$$

公式(1)的左右两边所得到的都是  $m \times 1$  的向量。 $J$  和  $\Omega$  是  $m \times 3$  的 Jacobian 矩阵， $v$  和  $\omega$  分别表示关节连接中刚体的线速度和角速度， $c$  是  $m \times 1$  的向量， $C$  又叫做约束力混合矩阵，是一个  $m \times m$  的对角阵，大多数情况下设为 0。 $\lambda$  是作用到刚体上保证公式(1)成立的  $m \times 1$  的约束力向量，由 ODE 自动计算并限制每个元素的取值范围。在下一个仿真步中，作用在刚体上用以保持关节约束的力为

$$F_c = J^T \lambda \quad (4)$$

根据所得到的约束力，可以推动关节中刚体的运动。

ODE 并未直接提供建立钢丝绳模型的方法，传统的基于物理引擎建立钢丝绳动力学模型的方法是将钢丝绳看作一段刚体，这种方法的缺陷在于无法模拟钢丝绳的收缩和弯曲行为；或者把钢丝绳分成两段刚体，之间通过关节连接，该方法可以在一定程度上模拟钢丝绳的伸缩行为，但无法模拟出货物动态运动时钢丝绳的弯曲。本文利用多段圆柱形刚体通过关节连接来近似模拟钢丝绳，如图 2 所示。

钢丝绳的段数  $N$  可以由如下公式确定：

$$N = \frac{H_{\max} - H_{\min} - \Delta}{l - \Delta} \quad (5)$$

公式中， $H_{\max}$  为吊臂抬升到最大角度时顶端点的高度，

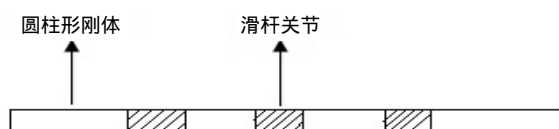


图 2 钢丝绳模拟示意图

$H_{\min}$  为船舱底面的高度， $l$  为刚体长度。理想情况下，对滑杆关节两刚体同时施加两个大小一致方向相反的力，平衡时两刚体之间的距离应为 0，但由于 ODE 的解算有一定的误差，会出现刚体分离的现象， $\Delta$  是为了防止钢丝绳拉伸时刚体分离而设定的余量。

针对  $N$  段刚体组成的钢丝绳，其约束方程为如下形式：

$$\sum (J_i v_i + \Omega_i \omega_i) = c + C \lambda, 1 \leq i \leq N, l \leq \lambda \leq h \quad (6)$$

## 2.2 联吊动力学模型的建立

由于某些火箭集装箱的超大、超重，单台吊车是无法完成吊装作业的，需要两台吊车进行联吊操作才能实现。为了建立吊车的联吊动力学模型，需要对吊车的基本运动有所了解。一般吊车的运动主要有整机行走、转台回转、吊臂变幅和吊钩升降等基本运动以及由它们组成的复合运动<sup>[13]</sup>。本系统中使用的是船载吊车，包括三种基本运动：转台回转、吊臂变幅以及吊钩升降。

针对上述三种运动，可将吊车分解为基座、驾驶室（旋转机构）、吊臂、钢丝绳以及集装箱组成的结构化的刚体，采用 ODE 进行仿真<sup>[13]</sup>，图 3 给出了仿真示意图。图中数字代表关节，大写字母表示刚体。A 为吊车基座，B 为驾驶室，C 为吊臂，D 为集装箱，E 为钢丝绳分解出的一段刚体。1、2 为合页关节，3 为球套关节——其中 1 的关节轴沿 Z 轴正向，可以实现驾驶室在 XY 平面上的旋转；2 的关节轴沿 Y 轴正向，使得吊臂可以在 XZ 平面上俯仰；3 为球套关节，实现货物在惯性作用下的自由运动。4 为滑杆关节，轴向方向为 Z 轴，钢丝绳可以沿着 Z 轴的方向拉伸和收缩；5 为球套关节，为货物在上升、旋转的过程中提供了运动的灵活性；6 为固定关节，起到固定吊车位置的作用。

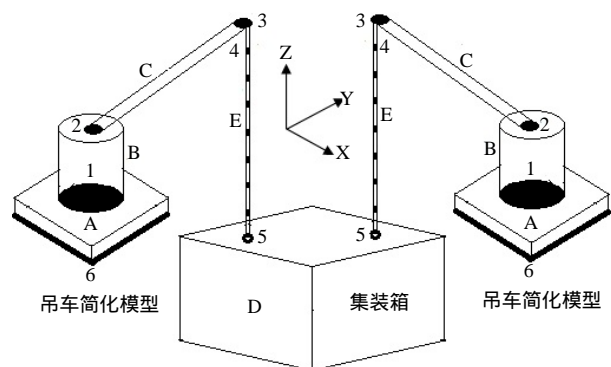


图 3 联吊动力学模型

## 2.3 视景的同步显示

本系统使用了三台图形工作站，其中一台作为主控机，

安装有信号采集卡,用以接收操作台发送来的控制信号,另外两台机器分别对应两套操作台,并接有头盔显示器。在系统运行时,每位驾驶员通过头盔显示器既可以观察到自己所操作吊车的运动状态,同时也可以看到另外一台吊车的运动状态。另外,还有一路场景信号由主控机输出到大型环幕系统,提供给指挥、观察人员,这三者的显示需要保持同步,这就涉及到了视景的同步显示问题。对于本系统,视景同步显示有两种方案:

(1) 主控机及两台操作机器均具有动力学仿真模块和实时显示控制模块,其中主控机将操作台的控制信号分别发送给两台操作机器,由各自机器上的动力学仿真模块进行解算,然后交由实时显示控制模块进行动态显示。

(2) 三台操作机器均具有实时显示控制模块,但只有主控机具有动力学仿真模块,运动解算由主控机来完成,并将解算得到的集装箱和吊车的位置、姿态信息分别发送给另外两台机器,由两台机器上的实时动态显示模块更新场景,实现实景同步。

对于方案一,由于动力学仿真模块进行运动解算需要一定的时间,场景越复杂、关节数越多,时间开销就越大,当另外两台机器接收到主控机的控制信号后再进行仿真推进势必会产生滞后;且运动解算所需的时间步长与帧速有关,而三台机器不同的硬件性能决定其帧速难以保持一致。方案二由于只有主控机进行运动解算,因此不存在上述问题。从理论分析来看,方案一的同步效果没有方案二好,而实验结果也证明了上述观点,因此本系统采用了如图 4 所示的视景同步方案。

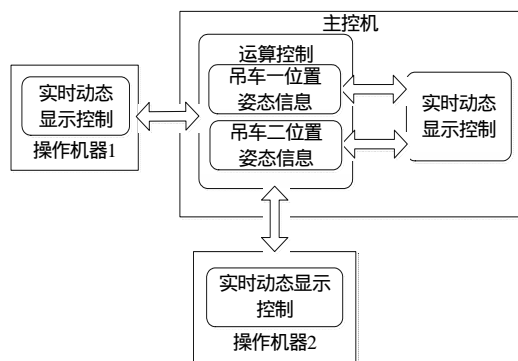


图 4 视景同步显示

### 3 仿真软件设计

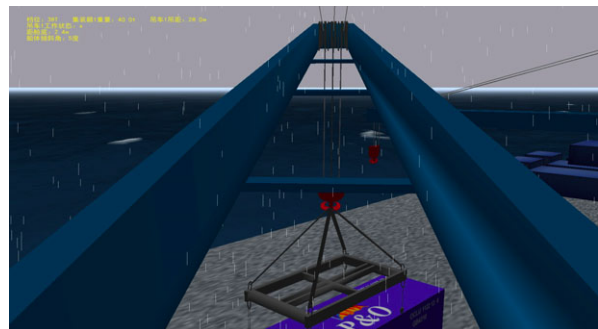
本系统基于 ODE 建立钢丝绳及协同吊装的动力学模型,基于 Delta3D 实现吊装环境仿真。信号采集卡使用的是研华 PCI-1682U 2 端口 CAN 总线通讯卡。吊车操作台采



(a) 吊车操作台



(b) 带头部运动跟踪的 3 维显示头盔



(c) 头盔视景(雨天)



(d) 协同吊装

图 5 仿真示意图

用的德国 NMF 公司生产的设备,与实车完全一致。三维头盔显示器采用的是美国 Sensics 的 zSight 数据头盔。

系统软件方面包括两大核心模块——运算控制和实时

动态显示控制。每个模块下辖几个子模块，既能完成与自身相关的数据输入输出功能，又可与其他某些模块进行数据交互，共同组成一个完整的吊装仿真训练软件平台。

1) 动力学仿真模块既是运算控制的核心部分，也是整个吊装仿真训练系统的核心部分。利用 Delta3D 设置各个物体的位置、属性，然后由 ODE 的运动函数驱动吊车各部分运动。碰撞检测组件为动力学仿真的碰撞检测和不同精细程度的碰撞检测算法，以适应系统的不同需求。

2) 驾驶舱仿真和硬件信息采集紧密相关。吊车操作台摇杆产生的模拟信号由硬件设备中的信号采集卡实时采集，首先转化为控制信号传输给动力学仿真模块，进行归一化处理后为速度调节系数改变吊车的运动速度。头盔运动角度采集处理模块实时地采集头盔的三个姿态角并传送给动力学仿真模块，由其实现吊车视景的更新。

3) 三维场景中模型位置、姿态的更新主要通过设置变换矩阵完成，显示控制模块通过实时地计算各模型的变换矩阵完成场景的更新。利用 OSG 的纹理映射、粒子和雾化技术，可以实现阴、晴、雨、雾等动态天气效果，使得整个虚拟场景达到较好的逼真效果。

图 5 给出了仿真示意图。

## 4 结论

本文在对系统功能分析的基础上，设计并开发了火箭运输船吊装仿真训练系统，以满足吊装训练的需求。针对吊装过程中钢丝绳模拟的问题，提出了采用多关节刚体模拟钢丝绳的方案，实验结果表明，该方案既可以模拟钢丝绳的收放行为，又可使钢丝绳具有较好的柔性，为钢丝绳的动力学模拟提供了一种新的思路。针对火箭吊装过程中的联吊问题，通过对船用吊车基本运动的分析，设计了联吊动力学模型，该模型可以较好的模拟吊车的基本运动。该系统可以较好的满足吊装的日常训练需求，为火箭吊装操作人员的培训提供了一种新的途径。

## 参考文献:

- [1] 王重华, 梁岗, 梁承姬. 集装箱起重机仿真驾驶训练器[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(7): 904-906. (WANG Chong-hua, LIANG Gang, LIANG Cheng-ji. The Training Simulator of Container Crane [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2002, 14(7): 904-906.)
- [2] Homam AlBahnassi, Amin Hammad. Near Real-Time Motion Planning and Simulation of Cranes in Construction Framework and System Architecture [J]. Reston: Journal of Computing in Civil Engineering (S0887-3801), 2012, 26(1): 54-63.
- [3] Shih-Chung Kang, Hung-Lin Chi, Eduardo Miranda. Three-Dimensional Simulation and Visualization of Crane Assisted Construction Erection Processes [J]. Reston: Journal of Computing in Civil Engineering (S0887-3801), 2009, 23(6): 363-371.
- [4] Shih-Chung Kang, Eduardo Miranda. Numerical Methods to Simulate and Visualize Detailed Crane Activities [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering (S1467-8667), 2009, 24(3): 169-185.
- [5] 李向荣. 集装箱起重机仿真训练器中的教员台系统设计[D]. 上海: 上海海运学院, 2003: 22-49.
- [6] 杨珠敏. 塔式起重机模拟系统实时仿真关键技术的研究与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011: 51-56.
- [7] 张欣. 面向对象方法在岸边集装箱起重机仿真训练器中的应用[D]. 上海: 上海海事大学, 2004: 21-26.
- [8] 林锦尧. 基于虚拟现实的集装箱装卸仿真系统[D]. 大连: 大连海事大学, 2004: 16-21.
- [9] 王洪路. 基于开源引擎的协同吊装仿真研究与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 26-36.
- [10] 尹勇, 林锦尧, 郭国忠. 采用 VR 技术的集装箱吊装模拟器原型机的研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 258-260. (YIN Yong, LIN Ji-yao, GUO Guo-zhong. Research on Prototype System of Container Crane Simulator Based on VR [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2004, 16(2): 258-260.)
- [11] 王定贤, 殷亮, 李颖, 等. 钢丝绳的建模及动力学仿真分析[J]. 矿山机械, 2010, 8(38): 20-23.
- [12] 方子帆, 吴建华. 钢丝绳类索结构的动力学仿真研究[J]. 起重运输机械, 2009, (2): 71-75.
- [13] 吴迪, 林远山, 王欣, 王秀坤. 面向吊装方案演示的履带起重机仿真系统设计[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(5): 1187-1191. (WU Di, LIN Yuan-shan, WANG Xin, WANG Xiu-kun. Simulation System of Crawler Crane for Demonstrating Lifting Proposal [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2008, 20(5): 1187-1191.)