

## 摘 要

起重运输机械属于容易引发安全事故的设备，国家安全管理部门制定了一系列标准来规范人的行为和条件，成立了一系列管理、检验机构和实施各种许可制度来保证设备质量和人员财产安全。尽管如此严格，起重事故仍然不断发生。为了防范起重机发生机械事故的发生，及时控制和消除事故的危害，最大限度地减少事故造成的人员伤亡和财产损失，应当让起重机整个事故过程的实际情况在时间和空间上得以重现，作为事故的分析和鉴定的一种方法。

门座式起重机是港口码头装卸作业中最常见的大型设备之一，臂架系统是起重机主要的承载部件，臂架的性能直接关系到起重机作业的效率和安全。臂架坠落事故是门座式起重机事故的常见类型，对此加以研究也具有一定的典型意义。

本论文以门座起重机 MQ4599 为研究对象，对该类型起重机臂架坠落事故的过程再现平台进行更深入的研究与开发，以建模软件 SolidWorks 和动画制作渲染软件 3Dmax 为手段，制作了事故发生过程的模拟动画。主要工作包括以下几个方面：

(1) 定性分析影响臂架坠落事故结果的参数，在此基础上运用平台开发软件 VC++6.0 搭建人机互动的仿真平台，实现各类事故发生过程的再现。

(2) 运用建模软件 SolidWorks2010 对选定的门座起重机各机构进行实体建模并装配，处理 SolidWorks 与 3Dmax 之间的接口格式问题。

(3) 在 3Dmax 中对门座式起重机工作场景港口码头进行建模，在 SolidWorks 导入模型的基础上添加钢丝绳的模型，将各机构进行成组操作，增加适当的链接关系。

(4) 分析起重机从正常工作状态到事故发生时的运动规律，得出不同关键帧起重机各机构的位置，在 3Dmax 中制作整机的关键帧动画，对事故状态下受损部件的形态进行模拟，渲染出视频文件，分别再现臂架坠落时与地面碰撞、不碰撞两种情况下的事故过程。

关键词：门座式起重机，平台开发，动画制作，SolidWorks，3Dmax

## Abstract

Crane and Conveyor is considered to be one of the equipment which cause accident easily. So the National security management department made series of standard to regularize workers' behavior and the condition of the equipment, created some managing and inspecting institutions, implemented lots of permit systems to guaranteed the quality of facilities and the security of people. However, the accident of Portal Crane still kept happening. In order to avoid this situation, control and eliminate hazards timely, furthest reduce casualties and property damage, reappearing the reality of the process of accidents is also can be one method of malfunction analysis and appraisal.

Portal Crane is one of the common equipment of the port wharf. The Jib System is the main beaning parts of Portal Crane, its' performance decided the efficiency and security of the Portal Crane. Jib Falling is a typical accident of Portal Crane. It is significant to make some research on reappearing the truth.

This paper takes the Portal Crane MQ4599 as its study object. Based on the predecessor's research, Simulation Platform of this kind crane are deeply researched. Take advantage of software SolidWorks and 3Dmax, imitating the process of Jib Falling. The main work includes the following aspects:

(1) Qualitative analysis the parameters which influence the result of the jib falling accident. Design a man-machine interaction simulation platform with the use of VC++6.0, reappear the process of all kinds of accident.

(2) The mechanisms structure models of selected Portal Crane are built and assembled on SolidWorks 2010. The problem of interface between SolidWorks and 3Dmax also need to be solved.

(3) Virtual work scene of Portal Crane in the port wharf is established in 3Dmax2010. Import the SolidWorks Model into 3Dmax2010 and add wire rope model. Make each mechanism model into group, append proper link relationship between them.

(4) By analyzing the motion law in the ideal state of every stage of jib falling

accident process, getting the key frames in cartoon, helping to simulate the process of jib falling and impacting the earth or not.

**Key words:** Portal Crane, Study on Simulation Platform, 3D Cartoon production, SolidWorks, 3Dmax

# 第 1 章 绪论

## 1.1 事故再现的研究现状和发展方向

事故再现，是在事故发生后通过对事故后设备的形态和位置进行分析，事故处理人根据自己的经验和所学知识，建立适当的动力学和运动学模型，通过软件的计算和人工的总结，使事故发生的过程和结果生动地在时间和空间上再次出现，从而对事故的发生原因和责任方鉴定提供了依据，成为一种行之有效的手段<sup>[1]</sup>。随着计算机技术的发展，事故再现的方法和手段也在不断的更新，新的分析思路和新的软件的出现，极大地丰富了不同事故类型的处理方法，使得结果更加趋近于真实情况，事故再现技术也得到了更大的发展和应用<sup>[2]</sup>。

### 1.1.1 事故再现研究方法

现在使用到的事故再现方法通常有两种，一种是分析法，由事故后的状态推断事故前的状态；另一种是模拟法，通过假设事故前的一系列状态，模拟在该假设条件下得到的事故结果，将该结果与实际结果做比较，将与实际结果最为接近的假设认定为事故发生前真实状态<sup>[3]</sup>。实际使用时通常将两者结合起来，取其各自的优势来进行事故再现。一般来说，采用分析法中的模型建立方法，通过计算来推算事故初始时各机构的速度，再结合模拟法中对现场进行分析的部分，根据专家的经验，对所得初始速度进行验证，反复比较分析得出最终的结果<sup>[4]</sup>。

### 1.1.2 事故再现研究方向

计算机仿真技术的发展带动了事故再现的发展，如今，设备事故的再现不仅已经成为可能，而且已在机械的安全性的研究中发挥着重要作用<sup>[8]</sup>。事故再现技术在未来的研究趋势主要包含以下几个方面。

#### (1) 设备模型的进一步合理化

现在有关汽车的碰撞模型已经日趋成熟，但对其它机械设备事故的研究仍比较少，如起重机等类型的机械设备，也曾引发过一些导致人员伤亡和财产损失的重大事故：桥式起重机主梁断裂坍塌事故；铸造起重机钢丝绳断裂或脱落



导致钢水泼出事故；门式起重机和港口集装箱装卸桥被大风吹翻的整机倾覆事故；塔式起重机断臂或倾翻事故；钢包旋转塔断臂或倾翻导致钢水溢出事故等。对于这些设备要进行实验研究难度较大，存在塑性变形与速度变化的关系、接触点位置的确定、理论与实践的对比等问题，使得基于实验和碰撞理论的计算机仿真的难度加大，还需寻求更多新的解决途径<sup>[9]~[10]</sup>。

#### (2) 模拟人、设备、环境三者之间的相互作用

在设备故障发生过程中，人体、设备和环境之间在极短时间内发生强烈的相互作用，比如翻车时，汽车与地面因此都发生了大幅度变形，但现有事故再现软件不能对此予以准确反映。为此，建立完善的力学模型，改进接触算法，加入二次碰撞分析，确切描述碰撞阶段发生的变化，以便从不同角度了解事故过程，更加准确地进行再现<sup>[11]</sup>。然而这样的复杂功能还有待于深入研究。

#### (3) 研发更贴近实际情况的人体模型

人是设备事故的直接受害者也是设备安全操作中需要重点保护的對象，“以人为本”也已成为设备安全性研究的最基本要求。针对中国人的体格特点，研发建立新的、更加合理的人体模型，在事故再现中实现对操作员、工人及行人的运动模拟和分析，更准确地判断人在设备事故过程中的角色和行为，进一步提高事故分析鉴定结果的准确程度<sup>[12]</sup>。

另外，研究扮演不同角色的人在行进过程中遇到危险时的做出的反应行为和动作变化(速度、加速度等)，从而改进对人的保护措施，减少事故带来的人员伤亡。事实上，我国在人机工程学方面的研究已经取得了一些成果，虚拟事故技术应该充分利用并继续研究开发这些现有结果。

#### (4) 建立严格的理论检验方法。

对于事故再现的计算机分析结果，目前并无明确严格的理论检验方法。如设置事故各种参数及再现分析后所得结果具有较大的不确定度，还应对其进行不确定度分析<sup>[13]</sup>。在事故重现的求解基本方程中引入不确定度理论，建立严格的数学理论体系和误差分析方法，从而为校验计算结果提供必要的理论依据。

#### (5) 开发更加实用的专家系统

人工智能技术已成为研究设备事故的一种重要手段，其中的关键是建立更为实用的专家系统<sup>[14]</sup>。结合人工神经网络和模糊数学等方法，开发完备的推理机和知识库，不断充实和更新专家经验，使其达到准确而高效的分析，实现智能化，真正让机器成为事故分析专家，对事故的鉴定分析起到很好的辅助作用。

#### (6) 推广和普及事故再现技术在国内的应用

尽管用于事故再现分析的系统软件采用的模型和算法一直在不断改进，事故的分析也变得越来越高效和实用，但大部分仍处于试验状态或仅在小范围内使用，始终没有达到能够推广普及的程度。

国外流行的事故再现软件系统在国内也没有被广泛地推广使用<sup>[15]</sup>。主要原因在于当前的计算机软件大都采用统一的模型和方法，取不同的特征参数取值来表达不同的碰撞形态，需要事故分析人员根据实际情况的不同、碰撞阶段的不同特点自主确定这些参数的取值。现有的软件系统本身只能对模型进行简单的计算，而最主要的对碰撞阶段的分析处理工作需要事故分析人员来完成。我国的事事故分析人员大多为基层民警，没有经过相关技术的培训，且国内采集到的模拟事故情况的试验数据很少，导致事故分析人员在处理事故时，难以根据事故现场信息准确地选择对计算结果影响较大的特征参数值，故现有的国外计算机软件即使经过汉化也很难在我国日常事故处理中得到应用<sup>[16]</sup>。

因此，研制更加实用化、智能化和易于推广的事故再现技术仍是一项艰巨的任务，还需不断开发和完善适用于我国事故再现分析实践的实用化计算机软件。此外，改善原有事故再现分析软件的人机界面，简化操作，使其易学易用，也能满足基层事故分析人员的实际需求。同时，在缺乏专业性软件的情况下，可以利用现有的通用软件，比如用 CAD 软件作为建模工具，用通用的仿真软件和有限元分析软件作为主要分析工具<sup>[17]</sup>，用图形处理软件作为显示和动画制作工具等。

为了更好的发展事故再现技术，应进一步加强理论与实际的接合，充分利用现有的先进理论和方法，深入研究和解决实际的事故问题。不能仅停留在实验室和教室，应大胆用于事故处理等实际中去，提高事故处理的高效性、公正性和准确性，依法惩治肇事者，保护事故受害者的正当权益<sup>[18]</sup>。

总之，结合先进的计算机仿真技术和人工智能技术，研制新设备和人的模型和算法，提高仿真运算速度，改善再现结果的可靠性，开发出实用化专家系统软件，尽可能包含更详尽的法规和经验数据，仍是今后事故再现研究发展的重点。

## 1.2 课题研究的目的是与意义

起重运输机械是容易引发安全事故的设备，我国把它与电梯等都归类于特种设备，需要专门的设备安全监督管理部门对其进行检测和维护<sup>[19]</sup>，尽管如此，

还是难以避免事故的发生。因此，对起重机械事故进行再现具有非常重要的现实意义。

随着计算机技术的发展，计算机仿真技术也被广泛的应用到事故的分析 and 再现中，帮助人们清晰的认识事故发生的过程，辅助事故处理人准确高效的进行事故原因分析和责任认定，进而研究出预防事故再次发生、减少人员和财物损失的新对策。

### 1.3 课题研究的主要内容

本论文以门座起重机 MQ4599 为研究对象，对该类型起重机臂架坠落事故的过程再现平台进行更深入的研究与开发,以建模软件 SolidWorks 和动画制作渲染软件 3Dmax 为手段，制作了事故发生过程的模拟动画。主要工作包括以下几个方面：

(1) 定性分析影响臂架坠落事故结果的参数，在此基础上运用平台开发软件 VC++6.0 搭建人机互动的仿真平台，实现各类事故发生过程的再现。

(2) 运用建模软件 SolidWorks 对选定的门座起重机结构进行实体建模并进行装配，处理 SolidWorks 导入 3Dmax 时的接口问题。

(3) 在 3Dmax 中对门座式起重机工作场景港口码头进行建模，在 SolidWorks 导入模型的基础上添加钢丝绳的模型，将各机构进行成组操作，增加适当的链接关系。

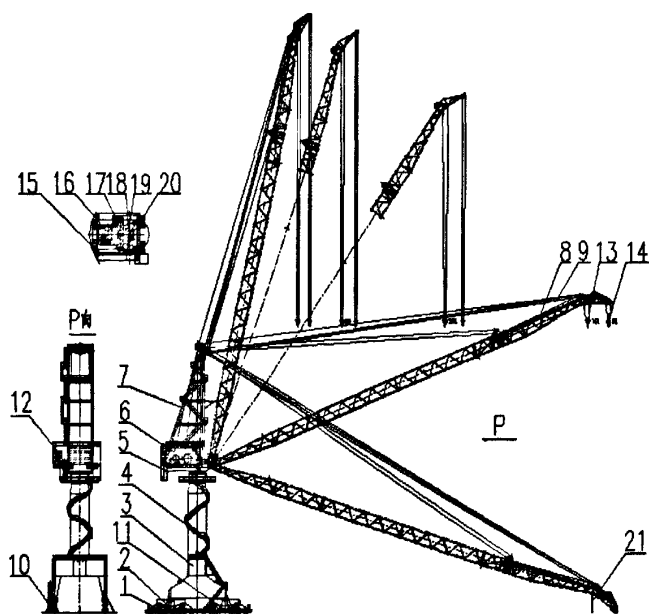
(4) 分析起重机从正常工作状态到事故发生时的运动规律，得出不同关键帧起重机各机构的位置，在 3Dmax 中制作整机的关键帧动画，对事故状态下受损部件的形态进行模拟，渲染出视频文件，分别再现臂架坠落时与地面碰撞、不碰撞两种情况下的事故过程。

## 第 2 章 门座起重机事故分析

### 2.1 门座起重机的结构及工作原理

门座式起重机是一种港口常见的有轨运行起重机，门形座架的四条腿形成四个门洞，可供铁路车辆货车其他车辆通过。一般用来装卸港口和露天堆场的物料，对船台、浮船坞进行船体拼接等进行吊装工作，在书店站进行大坝浇灌设备和预制件进行吊装等，大大减少了人工的体力劳动，改善了工人的工作环境，提高了劳动生产率，是大型装卸机械化过程中不可或缺的重要设备<sup>[22]</sup>。其中，MQ4599 为船厂其中设备，可供船厂在码头或船坞边安装和起吊作业。

门座起重机的工作机构包括起升机构、变幅机构、回转机构、运行机构。各机构均为独立的系统，分别完成确定的任务。起升、回转机构安装在机器房内，变幅机构位于立柱变幅平台上，运行机构安装在行走台车上，支承起重机传来的全部重量。各机构如图 2-1 所示。



- 1.运行机构; 2.铆钉装置; 3.圆筒门架; 4.梯子平台系统; 5.转台总成; 6.机器房; 7.人字架系统;  
 8.臂架系统; 9.绕绳系统; 10.防风拉锁; 11.夹轨装置; 12.司机室; 13.主吊钩总成;  
 14.副吊钩总成; 15.电器控制系统; 16.主起升机构; 17.变幅机构; 18.中心滑环装配;  
 19.回转机构; 20.副起升机构; 21.臂架头部防风拉锁装置

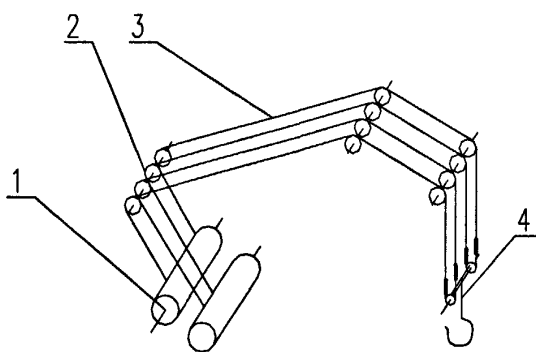
图 2-1 MQ4599 门座起重机结构图

### 2.1.1 起升机构

起升机构是用来实现货物升降的工作机构，它是起重机械中不可缺少的部分，是起重机中最基本重要的机构，其工作性能的优劣直接影响起重机的技术性能。

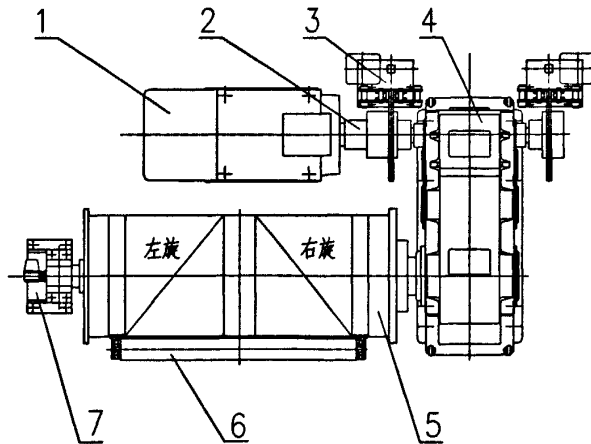
本机起升机构采用两套双联绞车系统，分别由交流变频电机、制动器、减速器、联轴器、卷筒、起升高度限制器、压绳器等部件组成。在减速器高速轴上装有两台液压推杆盘式制动器，用于起升机构的停车制动。电动机与减速器的高速轴联接采用梅花形弹性联轴器。减速器低速轴与卷筒的联结采用齿式联轴器，卷筒的一端支承在减速器的低速轴上，另一端由滚动轴承支承在轴承座上<sup>[23]</sup>。卷筒采用单层绕双联卷筒，左旋绳槽部分配右交互捻钢丝绳，右旋绳槽部分配左交互捻钢丝绳。在卷筒轴上安装有起升高度限位开关，具有在起升高度的上、下极限位置报警和切断起升电机电源的双重功能。在起升卷筒的钢丝绳绕入侧装有压绳装置，通过该装置引导钢丝绳绕入、绕出卷筒，防止钢丝绳脱槽和乱绳。压绳器的钢丝绳导向轮在卷筒上的压紧程度可以通过该装置上的张紧弹簧进行调节。

起升机构的起升钢丝绳滑轮组倍率为 1，其驱动传递路径为：电动机→梅花形弹性联轴器→平行轴减速器→卷筒用鼓形齿式联轴器→双联卷筒→钢丝绳滑轮组→吊钩。它采用变频调速的方式，由电控 PLC、变频器实现，具有良好的调速性能。起升机构钢丝绳卷绕系统图如图 2-2；起升机构传动简图 2-3 所示。



1-起升卷筒；2-滑轮；3-起升钢丝绳；4-吊钩

图 2-2 起升机构钢丝绳卷绕系统图



1-电动机；2-联轴器；3-制动器；4-减速器；5-卷筒；6-压绳器；7-轴承座支座

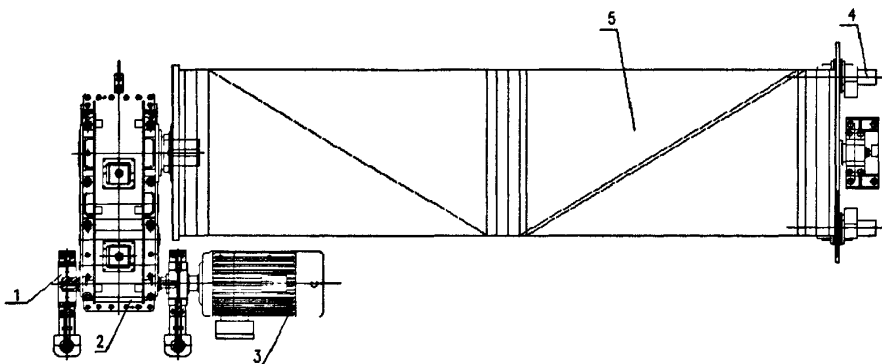
图 2-3 起升机构传动简图

### 2.1.2 变幅机构

变幅机构由臂架系统和变幅驱动系统组成<sup>[24]</sup>。它是用来改变起重机幅度的机构，即改变取物装置中心线到起重机旋转中心线之间的距离。变幅机构的变幅速度在很大程度上决定了装卸生产率的高低，在装卸类型的起重机中，一般采用较高的变幅速度以提高装卸生产率。

本机幅机构采钢丝绳变幅，传动系统主要由电动机、传动轴、制动器、减速器、联轴器、变幅卷筒等组成。

变幅机构驱动传递路径为：变频电机→联轴器→浮动轴→联轴器→减速器→低联轴器→卷筒。它采用变频调速的方式，由电控 PLC、变频器实现，具有良好的调速性能。变幅机构传动简图如图 2-4 所示。



1-制动器；2-减速器；3-电动机；4-液压钳盘式制动器；5-变幅卷筒

图 2-4 变幅机构传动简图

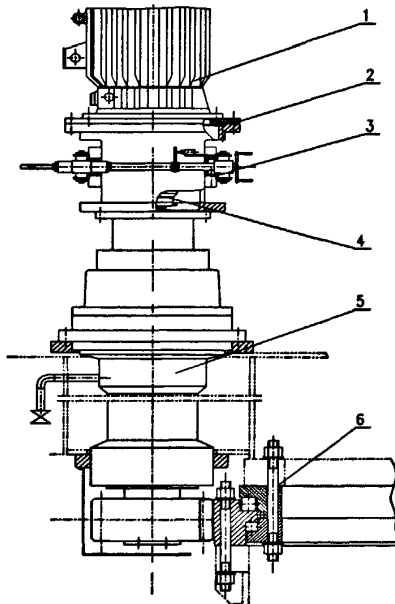
### 2.1.3 回转机构

回转机构包括回转支承装置和回转驱动装置<sup>[25]</sup>。回转支承装置为起重机回转部分提供稳固支承，并将来自回转部分的压力传递给门架。回转驱动则用来驱动回转部分相对于门架实现回转。回转机构的作用是绕起重机的垂直轴线在水平面内沿圆弧弧线运移物品。

本机回转机构由两台驱动装置、三排滚柱式回转支承、安全装置（极限力矩联轴器、锁定装置）等组成，其中驱动装置由 YZR 绕线式电机、极限力矩联轴器、行星齿轮减速机、回转小齿轮等组成，用来驱动起重机上部回转。两台驱动装置左、右对称布置。行星齿轮减速机采用全封闭硬齿面齿轮的减速箱，采用油浴或油泵强制润滑，并设置排油孔便于废油排放。行星齿轮减速机采用 YZR 电动机驱动，工作平稳、可逆，可作 360°回转。并配有极限力矩联轴器防止过载，发生事故。其组成为：电机，行星齿轮减速机，回转支承等。回转机构布置图如图 2-5 所示，回转机构俯视图如图 2-6 所示。

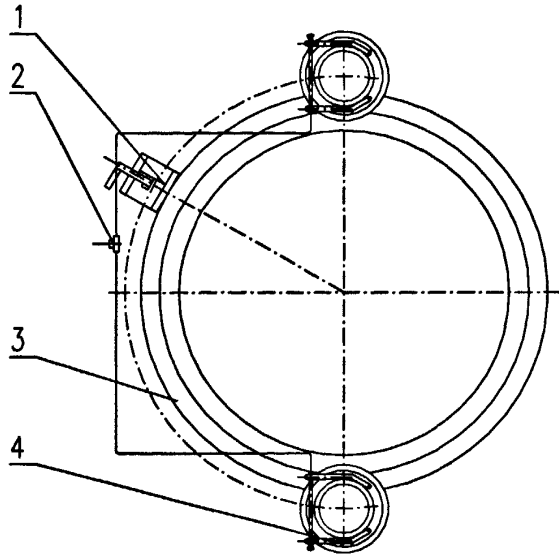
回转机构设计充分考虑了安装、维修和保养的方便，外露的旋转部件（如小齿轮、大齿圈）周围设有安全罩和接油盘，保证工作时人员安全。

回转机构驱动传递路径为：电机→极限力矩联轴器→行星齿轮减速机→回转小齿轮→回转支承。回转机构电机采用变阻调速方式，分 4 档控制。回转机构制动器采用常开式脚控液压式制动器。



1-电机；2-上箱体；3-制动器；4-极限力矩联轴器；5-减速器；6-回转支承

图 2-5 回转机构布置图



1-回转过锁装置；2-制动操作系统；3-回转支承；4-回转驱动

图 2-6 回转机构俯视图

#### 2.1.4 运行机构

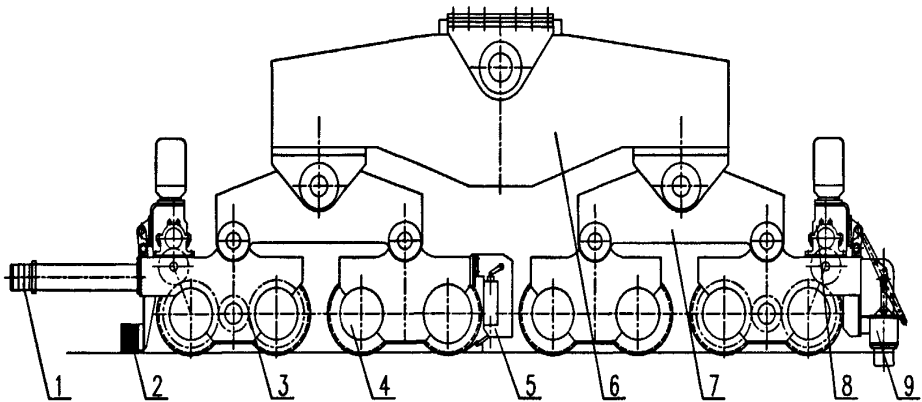
运行机构的作用是用来改变门座起重机的工作位置，从而达到在水平方向移动物品或改变起重机工作范围的目的<sup>[26]</sup>。门座起重机为有轨运行式起重机，它只能沿着专门铺设的轨道运行。它由运行驱动装置、运行支承装置和运行安全装置三部分组成。运行支承装置包括均衡梁、车轮、销轴等，其作用是支撑起重机的重量；运行驱动装置用来驱动车轮使起重机沿着轮道移动；运行安全装置用来保证起重机的安全运行。

本机的运行机构采用四腿分别驱动，每条支腿上各有两套独立的驱动装置，每套驱动装置由三合一减速器（含电机）、开式齿轮传动、车轮组、大均衡梁及小均衡梁等部件组成。减速电机通过开式齿轮传动驱动车轮滚动。每个支腿上分别装有 8 个车轮，总共车轮数为 32 个，其中驱动轮数为 16 个。

为了防止碰撞造成机损，运行机构两端设有橡胶缓冲块和行程限位开关。为了防止起重机在非工作状态下遭遇暴风袭击，在车体上分别设有锚定装置、防风系统装置和电力液压防风铁楔。在断电的情况下，电动液压防风铁楔能自动或手动工作。且电动液压防风铁楔与门机运行机构连锁，并且有足够的锁紧力。在小均衡梁上设有顶升装置以方便门机修理及更换车轮。

运行机构采用变频调速的方式，其运行机构简图如图 2-7。





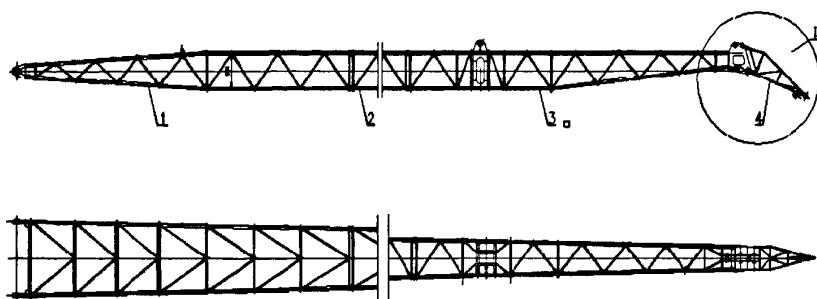
1-聚胺脂缓冲器；2-扫轨板；3-开式齿轮；4-车轮；5-电动液压防风铁楔；6-大均衡梁；7-小均衡梁；8-三合一减速电机；9-锚定装置

图 2-7 运行机构简图

### 2.1.5 单臂架系统

臂架是门座式起重机的主要承受载荷的部件。门座式起重机可以根据臂架结构的不同分为两类，单臂架起重机和四连杆组合臂架式起重机。臂架作为主要的受力杆件，其性能的高低直接决定了起重机整机的性能。由于臂架的工作频率较高，工作强度也较大，容易发生变形或者弯折的事故，可能造成人员伤亡和巨大的财产损失。因此，研究臂架的安全可靠性对于提高起重机作业的效率 and 安全性具有重要的意义。

MQ4599 中臂架用四根 245 x 10mm 的无缝钢管作主肢组成矩形截面。腹杆全部采用  $\Phi 121 \times 6\text{mm}$  俐管布置成无竖杆腹杆体系(图 2-8)。设计计算证实，只要合理地选择节间长度，采用无竖杆三角形腹杆体系对减轻自重，充分利用弦杆材料是有利的(有资料提到可减轻自重 10~12%)<sup>[27]</sup>。同时，采用无竖杆三角形体系后，两个相交平面的弦杆节点不一定汇交，这对降低节点处的应力集中，减少焊接变形是有利的。值得注意的是，在计算弦杆局部稳定性时仍应按一个平面内的最大节间长度考虑。一般弦杆和腹杆的直径比( $d/D$ )控制在 0.4 左右较为合理。



1.臂架后段 2.臂架中段 3.臂架前段 4.副臂架结构

图 2-8 臂架简图

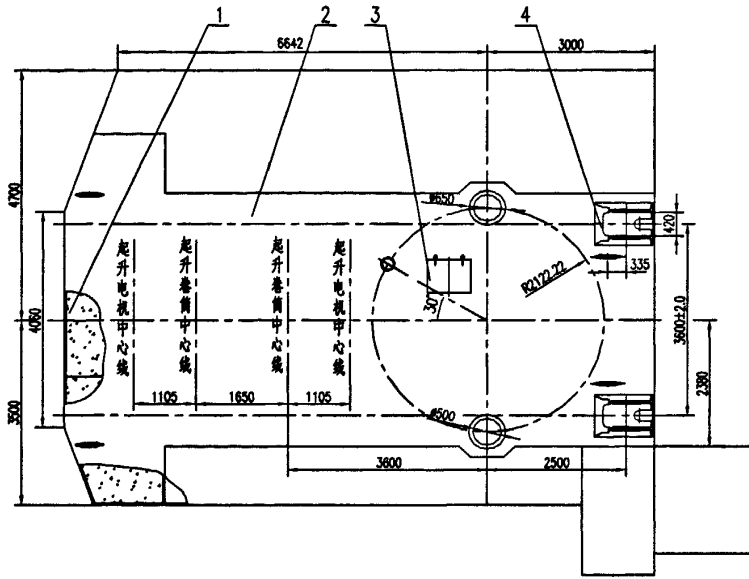
根据臂架空间抗扭刚度的需要，沿臂长方向每隔一定距离必须设置斜撑杆或横隔板，并在横隔板对应的断面上增设竖腹杆以构成一横向框架。臂架两端用钢板及撑杆加强，钢管和钢板的过波处采用钢板直接插入管子，然后施焊。

管结构桁架的杆件连接方式，以前习惯上都采用节点板形式，主要是为了备料和施工的方便，以及便于杆件轴线在节点处汇交。但这不仅带来制造麻烦、自重增加，而且在节点板平面外连接刚性较差。因此，近年来，对于管子结构，一般均不采用节点板形式，而是腹杆和弦杆直接施焊。

管子结构外形清晰美观，风阻力较小，是一种较理想的受压杆件断面型式，因此，在桁架式臂架中应用越来越广泛。此外，为了便于选材，简化制造工艺，采用角钢等型材作肢杆的桁架式臂架也很普遍。

### 2.1.6 转台结构

转台是起重机的机构平台，也是起重机的重要承载传力构件，主体结构材质为 Q235B。转台为板梁结构，两根主梁及其连接横梁均为工字形截面<sup>[28]</sup>。转台通过法兰与回转支承的外圈用螺栓连接。起升、回转机构和电气控制设备均放置在转台上。在转台上具有集中力作用的地方均进行了加强处理。转台结构总成如图 2-9 所示。

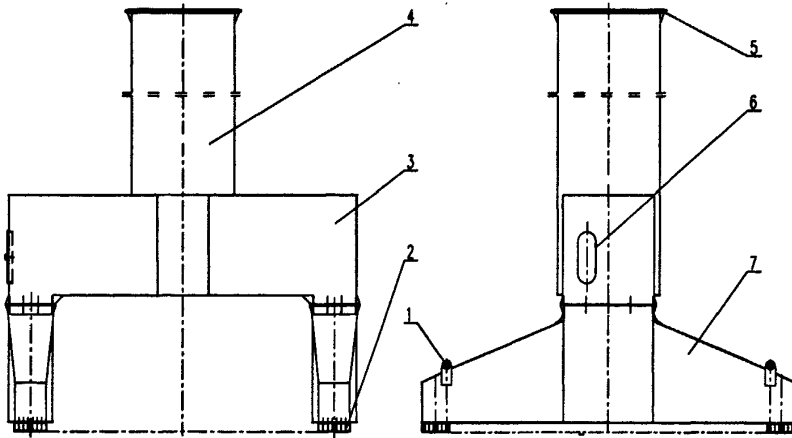


1-混凝土配重；2-转台结构；3-人孔盖；4-臂架铰座

图 2-9 转台结构图

### 2.1.7 圆筒门架

圆筒门架结构由圆筒体、门架主梁和端梁（牛腿）等组成，结构简图如图 2-10 所示。结构全部采用钢板焊接，主要材料为 Q235-B。圆筒门架上部安装回转大轴承，下部与运行机构大均衡梁连接，在门架结构上面设有防风拉索连接铰点、爬梯、维修平台、扶手、栏杆、电缆卷筒、警铃等装置。



1-防风拉索连接铰点；2-连接支座；3-主梁；4-圆筒；5-接油盘；6-门；7-端梁

图 2-10 圆筒门架结构简图

## 2.1.8 辅助装置

### 1) 吊钩

吊钩为本机的取物装置，主吊钩为双向钩，由锻造制作。在钩头上装有防钢丝绳脱落保险卡，钩头可以 360° 回转，以方便起吊货物的转向换位。在吊钩的轭板上均焊有保护圈，防止滑轮轴和吊钩横梁的端部卡板、螺栓和油嘴的碰撞和损伤。吊钩总成如图 2-11 所示。

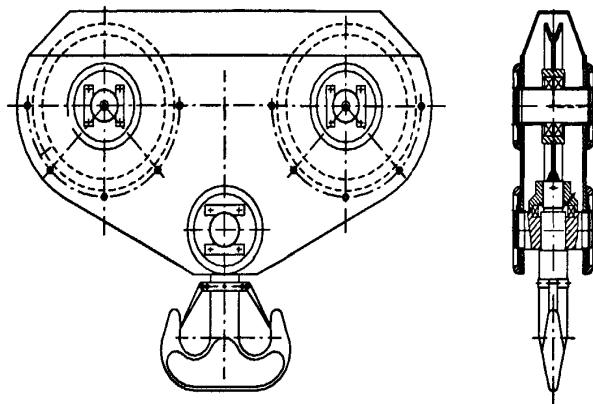


图 2-11 主吊钩总成

### 2) 供电电缆卷筒

本装置为卷绕连接地面电源箱提供给起重机电源用电缆而设置，本装置安装在起重机圆筒门架的端梁上。

力矩电机通过传动装置驱动电缆卷盘转动带动电缆卷筒卷缆，起重机行走时通过电缆拉力产生的力矩克服由力矩电机产生的力矩而实现卷盘反转实现电缆卷筒的放缆。当电缆释放到终点时，为防止电缆拉断，设有终端保护开关。

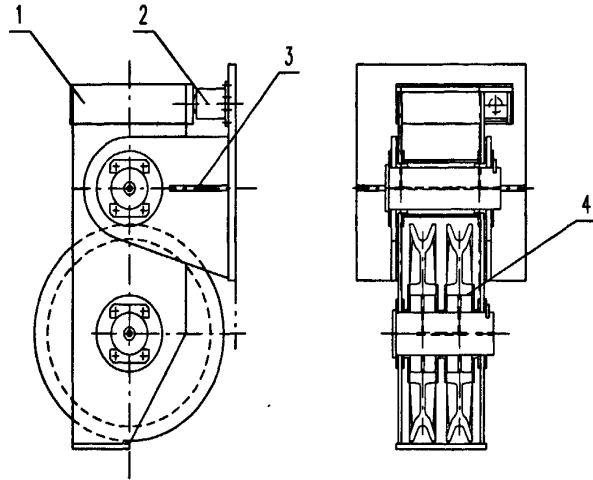
### 3) 中心受电器装置

中心受电器装置用来将起重机的固定部分和回转部分的动力电源和控制信号联接起来，安装于圆筒上部的平台上，受电器的固定部分与平台上的支座固连，回转部分通过连接爪与转台结构相连。为了消除由于受电器安装不能完全对中带来的影响，连接爪做成双向铰接型。

### 4) 负荷取力装置与力矩限制器

本装置采用取力滑轮取力方式，通过二次仪表控制起吊货物的重量<sup>[29]</sup>。该装置安装在立柱上部。当起吊重物时，钢丝绳绕过取力滑轮，其张力的合力形成对传感器的压力。传感器将其转化为电信号，并传至二次仪表，通过二次仪表对预置信号的比较，达到负荷限制的目的。负荷取力装置如图 2-12 所示。

力矩限制器将负荷取力装置传感器检测的起重量信号和布置在臂架上的角度传感器检测的幅度信号传至二次仪表，当实际称重超过额定起重量的 90%时发出满载连续警报，超 110%时发出超载连续警报。实际幅度小于最小允许工作幅度或超过最大允许幅度时发出连续警报。



1-摇架；2-压力传感器；3-支座；4-滑轮

图 2-12 负荷取力装置图

## 2.2 常见起重机事故原因分析及应对措施

起重机事故的发生原因大致可分为人的因素和设备因素两个方面，其中人的因素主要是由于使用者或管理者抱有侥幸、省事和逆反等心理，从而导致产生非理智行为；设备的因素主要是由于未按要求进行设计、制造、安装、维修和保养，特别是未定期按要求进行检验，未发现已经存在的问题，从而埋下安全隐患<sup>[30]</sup>。

### 2.2.1 吊钩

吊钩是门座式起重机用的最多的取物装置之一，它承载着吊运的全部载荷，在使用过程中，吊钩一旦损坏断裂易造成重大事故。造成吊钩损坏断裂的原因是由于摩擦及超载使得吊钩产生裂纹、变形、损坏断裂<sup>[31]</sup>。因此，在使用时应当做到以下几点：

- (1) 运行过程中严禁吊重超过额定值。

(2) 定期对吊钩进行检查, 对于开口度、危险断面的磨损情况应给予足够的重视。

(3) 定期对吊钩进行退火处理

(4) 若发现吊钩有裂纹, 则应根据国家的相关规定判断是否应当报废, 决不允许补焊。

## 2.2.2 钢丝绳

### 1) 故障分析

钢丝绳在运行过程中也起到承受载荷的作用, 每根钢丝绳的受力情况都非常复杂, 由于每根钢丝卷绕时在绳中的位置不同, 有内层和外层的区别, 即使当钢丝绳受到最简单的拉伸力时, 每根钢丝之间受力也不尽相同, 此外, 钢丝绳绕过卷筒和滑轮时还会产生弯曲应力、钢丝与钢丝之间的挤压力等, 都会导致难以精确计算其受力, 经过专家分析, 通常采用静力计算法。

钢丝绳中的最大静拉力应满足下式要求:

$$P_{\max} \leq P_d/n \quad (2-1)$$

式中:  $P_{\max}$ —钢丝绳作业时可以承受的最大静应力;  $P_d$ —钢丝绳的破断应力;  $n$ —安全系数。

$$P_{\max} = (Q+q)/(a\eta) \quad (2-2)$$

式中:  $Q$ —起重机的额定起重量;  $q$ —吊钩组重量;  $a$ —滑轮组承载的绳分支总数;  $\eta$ —滑轮组的总效率。

钢丝绳最大允许工作拉力的计算式为:

$$P = P_d/n \quad (2-3)$$

式中:  $P$ —钢丝绳作业时额定的最大静应力  $P \geq P_{\max}$  是安全的。

由上几个式子分析可知, 钢丝绳破断的主要原因是超载, 同时还与其在滑轮、卷筒间的卷绕次数有关, 每卷绕一次钢丝绳就产生由直变曲再由曲变直的过程, 卷绕次数越多就越易损坏、破断; 其次钢丝绳的破断与绕过的滑轮和卷筒的直径、保养情况、工作环境以及工作类型有关。

### 2) 预防措施

1. 起重机在作业运行过程中起重量不要超过额定起重量。
2. 根据起重机工作类型及环境选择适合的钢丝绳。
3. 对钢丝绳要进行定期的润滑 (根据工作环境确定润滑周期)。

4. 起重机在作业时不要使钢丝绳受到突然冲击力。
5. 在高温及有腐蚀介质的环境里的钢丝绳须有隔离装置<sup>[32]</sup>。

### 2.2.3 减速器齿轮

#### 1) 故障分析

减速器是门座式起重机的重要传动部件，通过齿轮啮合传递扭矩，根据不同的传动比，把电动机的高速转速调节到需要的转速，在传递扭矩过程中齿轮可能会出现齿面点蚀、轮齿折断、齿面磨损、齿面胶和等机械故障<sup>[33]</sup>，造成齿轮故障原因大致分为以下几点：

- (1) 短时间内齿轮过载或受到冲击载荷，多次重复弯曲引起疲劳折断；
- (2) 齿面不光滑，有凸起点产生应力集中；
- (3) 由于温度过高引起润滑失效；
- (4) 由于硬的颗粒进入摩擦面引起磨损，或润滑剂不清洁。

#### 2) 预防措施

- (1) 起重机使用时不能过载，缓慢启动、制动；
- (2) 选择适当型号的润滑剂，定期更换润滑剂，并把壳体清洗干净；
- (3) 要经常检查润滑油是否清洁；发现润滑不清洁要及时更换。

### 2.2.4 卷筒及钢丝绳压板

卷筒是门座式起重机重要的受力部件，常见的主要故障有筒壁减薄、孔洞及断裂。卷筒和钢丝绳接触相互挤压摩擦是造成这些故障的主要原因。当卷筒的厚度因磨损变薄到某个值时，钢丝绳的压力大于卷筒的承受能力，卷筒会发生断裂。为了防止上述情况的发生，国家制定了一系列的规范和标准，一般来说，卷筒的筒壁磨损达到原来的 20% 或出现裂纹时，则表示卷筒已经无法正常运行，应及时更换。此外，润滑剂的使用和环境卫生也对卷筒和钢丝绳的使用寿命影响极大。

### 2.2.5 制动器

#### 1) 故障分析

制动器是具有使运动部件减速、停止或保持停止状态等功能的装置。在门座式起重机里，它也是一个重要的安全部件，具有停车和阻止悬吊物下落的功能。

能。实际上，由于制动器使用频繁，很容易出现故障，例如制动力不足或者突然失灵、制动臂无法张开、制动轮温度过高或者制动垫片冒烟等。

经过分析，原因如下：

(1) 制动带或制动轮磨损过大；制动带有小块的局部脱落；主弹簧调的得过松；制动带与制动轮间有油垢；活动铰链外有卡滞的地方或有磨损过大零件；锁紧螺母松动整拉杆松脱；液压推杆松闸器的叶轮旋转不灵活；

(2) 制动垫片严重或大片脱落，或长行程电磁铁被卡住，主弹簧失效，或制动器的主要部件损坏；

(3) 制动器与垫片间的间隙调的过大或过小；

(4) 铰链有卡死的地方或制动力矩调得过大，或液压推杆松闸器油缸中缺油及混有空气，或液压推杆松闸使用的油脂不符合要求，或制动片与制动轮间有污垢。

## 2) 预防措施

严格制定并执行制动器的检查、维护周期，一般情况下，运行机构的制动器要每天检查一次，起升机构的制动器必须每班一次，主要检查以下内容：

(1) 铰链处有无卡滞及磨损，各紧固处有无松动情况；

(2) 各活动件的动作是否正常；

(3) 液压系统是否正常；

(4) 制动带与制动轮间磨损是否正常、是否清洁。根据检查的情况来判断制动器是否正常，决不允许带着问题运行，同时对制动器要定期进行保养和润滑。为了保证起重机的安全运行，制动器必须经常进行调整，从而满足相应机构的工作要求。

## 2.2.6 车轮与轨道

门座式起重机在运行过程中，车轮与轨道常见的故障为车轮的啃轨及小车的不同高、打滑。其中很多原因都会导致车轮啃轨，且其形式是多样的。一般来说，啃轨轻则减少起重机的使用寿命，重则会造成严重的伤亡事故，因此啃轨已经引起了特种设备管理人员和操作人员的足够重视<sup>[32]</sup>。因此各单位的特种设备主管部门在安装、维修起重机时一定要找有资质的单位进行安装、维修，从而保证设备安全及运行寿命；平时也应加强特种设备管理人员对设备的检查管理，在检查过程中要认真、细致地找出啃轨的原因，并采取相应的措施，避



免起重机发生啃轨的故障。小车各个车轮的不等高是起重机运行中的一个极不安全的因素，小车的不同高使小车在运行中一个车轮悬空或轮压太小可能引起小车车体的震动。造成小车车轮不等高的因素也是多样化的，但是主要原因是安装误差不符合要求及小车设计本身重量不均匀，因此对小车不等高的故障要全面分析。

起重机在运行过程中由于小车轨道不平、主动轮之间的轮压不等、车轮出现椭圆、轨道不清洁、启动过猛的原因使得小车产生打滑现象，这就要求特种设备管理人员在检查过程中一定要认真仔细，发现问题要及时解决，避免产生小车打滑的现象。

### 2.2.7 安全附件

安全附件是门座式起重机中不可或缺的一个部门，它是一种预防事故发生的保护装置。按照相关的规定，应该加强对安全附件的管理及监察力度，时刻保证安全附件的有效性，从而保障整个机器的安全运行<sup>[33]</sup>。

## 2.3 本章小结

本章介绍了门座式起重机各部分的结构和工作原理，对其发生的各种典型事故分类，从起重机设备本身出发，分析了事故产生的原因，介绍了减少此类事故发生的经验，为今后起重机安全运作、预防事故提供了借鉴的措施。

总而言之，门座式起重机可能发生的机械故障种类较多且复杂，一般采用加强设备管理的方法来预防其发生，按时向有关部门提出年审申请，经过特种设备检查部门的检查和诊断，对可能导致事故的部件进行维修或者更换，把潜在的危险消灭在萌芽状态，从而保障人员和财物的安全。

## 第 3 章 平台的开发

### 3.1 平台开发软件 VC++6.0 简介

开发软件的选择的原则是减少开发的工作量，避免低级的和重复的开发作，而且还要考虑软件的运行效率，同时考虑到仿真平台要有很好的可携带性最好仿真平台的使用能够不受开发软件的限制。为了开发出能够满足要求的仿平台，同时能够满足以上原则，本文选择采用 VisualC++6.0 软件，VisualC++是一个基于 Windows 的可视化集成开发环境，它集成了编辑器、编译器、调试程序向导 AppWizard 和类向导 AppWizard 等。由于 C++语言源于 C 语言，而 C 语言是过去和现在被广泛使用的语言，故 VisualC++有广泛的通用性。利用 VisualC++可以编制各种类型的 Windows 应用程序，从最简单的单文档和对话框程序到复杂的多文档和组合界面程序。VisualC++源代码编辑器提供了自动语句完成功能，编辑输入源程序时，它能够自动显示当前对象的成员变量和成员函数，并指明函数的参数类型。VisualC++6.0 的编译器增加了新的编译参数，改进了对 ANSI C++标准的支持，并采用 Microsoft 的代码优化技术，使生成的目标代码更短小，应用程序运行的速度更快。而且使用 MFC 设计的仿真平台可以产生 release 文件，该文件可以脱离 VisualC++6.0 软件进行编译运行，实现仿真平台的使用能够不受开发软件的限制的要求<sup>[34]</sup>。

### 3.2 设计目标

本次设计的目的就是搭建一个平台，以满足人们足不出户就能对起重机臂架坠落事故过程有一个比较清晰认识的需求，该平台应当能够根据使用者设置的参数进行仿真，并将仿真结果以视频的形式输出显示。要求该平台软件包占用计算机资源少、仿真响应速度快、仿真形式直观形象、仿真结果与实际情况相差较小、仿真结果显示直观。

### 3.3 变量设置

起重机臂架坠落事故过程和结果较为复杂,不同工作状态下事故的结果都不相同。结果与很多因素有关,货物的质量、失效时臂架的幅度、失效时货物的高度和运动的速度都有一定的关系,根据资料分析得知,具体参数与结果的关系如下:

其他条件相同时,货物的质量越大,臂架坠落后产生的形变越大,毁坏越严重;失效时臂架的幅度越小,坠落时产生的冲量越大,臂架坠落后产生的形变越大;失效时货物的高度越高,臂架坠落后产生的形变可能越大,集装箱损坏的程度也越大;运动的速度,臂架坠落后产生的形变越大,集装箱损坏的程度也越大。

### 3.4 仿真界面设计

窗口是 Windows 应用程序中一个非常重要的元素,一个 Windows 应用程序至少要有个窗口,称为主窗口。窗口是屏幕上的一块矩形区域,通过不同的对话框,达到用户与应用程序进行交互的目的<sup>[35]</sup>。利用窗口,可以接收用户的输入,以及显示输出。一个完整的应用程序窗口通常都包含标题栏、菜单栏、系统菜单、最小化框、最大化框、可调边框,有的还有滚动条。

打开 VisualC++6.0 集成开发环境,进入文件→新建→工程,选中 MFCAppWizard[exe],并在工程名称中输入“门座式起重机臂架坠落事故仿真平台”。这样就把所建命名为“门座式起重机臂架坠落事故仿真平台”。

单击“确定”后,在下一步骤中选中“单文档”。在接下来的步骤中一直选择默认下一步就可以完成 MFC 应用程序向导工作,从而完成建立“门座式起重机臂架坠落事故仿真平台”工程的操作。

本文中的参数输入采用单行编辑框输入显示文本,采用编辑框的形式。编辑框是一个矩形的控制窗口,它一般在对话框中,允许用户从键盘输入并编辑文字,当编辑框成输入焦点时,将其显示一个插入符,然后用户就可以利用键盘和鼠标来输入文本。

在右边的显示区域内连接一个播放器,针对不同的参数下的事故过程建立一个库,实现参数不同显示的动画也不同。

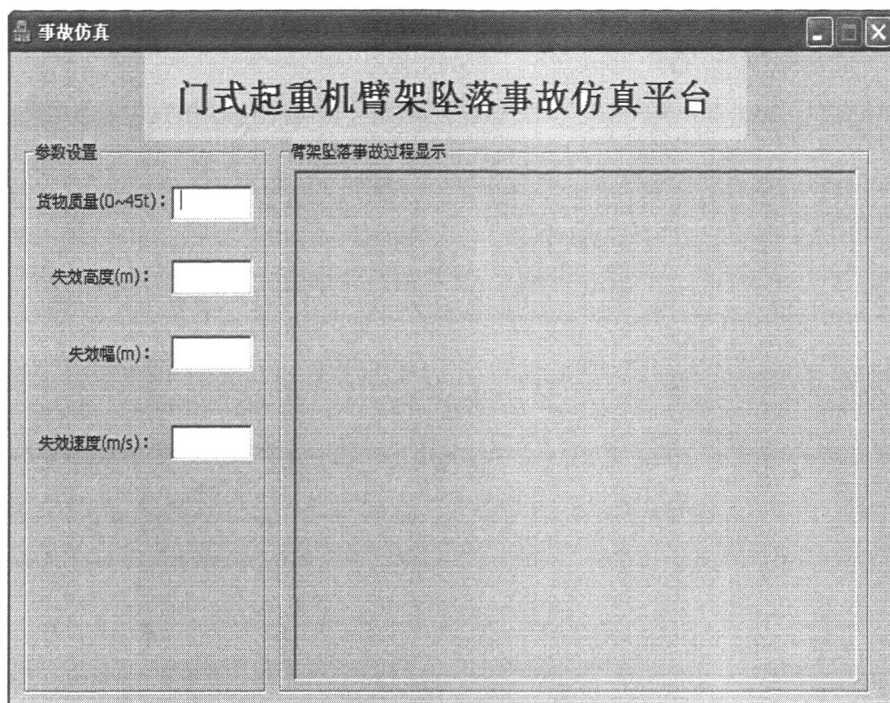


图 3-1 仿真平台界面

### 3.5 各机构的运动规律分析

门座式起重机臂架坠落事故较为复杂,实现不同参数下动画过程实时变化的工作量十分巨大,故本文以 MQ4599 为研究对象,选取臂架坠落与地面碰撞和臂架坠落被钢丝绳拉住不与地面碰撞,这两种典型事故过程来分析。

#### 3.5.1 MQ4599 正常工况下运动情况

结合门座起重机在实际使用中运动的情况,同时为了简化模型,起重机各机构的运动速度均取匀速,当起重量为 40t 时,正常工况下各机构运动仿真路线为:

初始状态:臂架摆动平面与轨道垂直,并处于最小幅度位置,空载;

动作 1: 臂架绕转台旋转至适当位置;

查取资料, MQ4599 变幅机构平均速度为 15m/min, 在动作 1 中, 幅度从 24m~35m。

此段的时间  $t_1 = (35 - 24) / 15 = 0.73 \text{ min} = 44 \text{ s}$

动作 2: 起升机构控制吊钩慢慢向下运动, 勾住物体;

空钩时起升速度为  $0.2\sim 20\text{m/min}$ ,取平均速度为  $15\text{m/min}$ ,吊钩从初始高度  $6.4\text{m}$  的位置下落到集装箱所在高度, 设定在  $1.2\text{m}$  的位置, 下落高度为  $5.2\text{m}$ 。

此段的时间  $t_2 = 5.2/15 = 0.34\text{min} = 21\text{s}$

动作 3: 吊钩向上运动, 回到起吊的初始位置;

主起升工作速度为  $0.2\sim 10\text{m/min}$ , 在起重量为  $45\text{t}$  时, 起升平均速度取  $8\text{m/min}$ , 运动的距离与下落时一致, 为  $5.2\text{m}$ 。

此段的时间  $t_3 = 5.2/8 = 0.65\text{min} = 39\text{s}$

动作 4: 臂架收幅至最小幅度;

动作 4 与动作 2 互为相反的过程, 所需时间一致, 故

此段的时间  $t_4 = t_3 = 5.2/8 = 0.65\text{min} = 39\text{s}$

动作 5: 臂架顺时针回转  $90^\circ$ ;

旋转速度为  $0.03\text{r}\sim 0.3\text{r/min}$ , 取平均速度为  $0.2\text{r/min}$ , 旋转的角度为  $90^\circ$ 。

此段的时间  $t_5 = 0.25/0.2 = 1.25\text{min} = 75\text{s}$

动作 6: 臂架增幅至最适当幅度;

根据接应集装箱的货车的位置, 大致位置在变幅  $12.5\text{m}$  的位置, 可以在后阶段做动画的过程中根据货车放置的位置确定。

此段的时间  $t_6 = 12.5/15 = 0.83\text{min} = 50\text{s}$

动作 7: 起升机构控制吊钩向下运动, 直到物体回落到货车的斗箱内, 制动。

动作 7 与动作 3 过程相反, 时间可取相等。

此段的时间  $t_7 = t_3 = 5.2/8 = 0.65\text{min} = 39\text{s}$

动作 8: 空载的吊钩回到初始高度;

动作 8 与动作 2 过程相反, 时间可取相等。

此段的时间  $t_8 = t_2 = 5.2/15 = 0.34\text{min} = 21\text{s}$

动作 9: 臂架收幅至最小幅度;

动作 9 与动作 6 过程相反, 时间可取相等。

此段的时间  $t_9 = t_6 = 12.5/15 = 0.83\text{min} = 50\text{s}$

动作 10: 臂架逆时针回转  $90^\circ$ , 此时完成一个完整起吊到安放货物的过程。

动作 10 与动作 5 过程相反, 时间可取相等。

此段的时间  $t_{10} = t_5 = 0.2/0.2 = 1\text{min} = 60\text{s}$

上述所有动作均连贯完成, 为简化模型, 副钩只参与回转运动, 所有抓取的动作均由主吊钩独立完成。

### 3.5.2MQ4599 事故发生时的运动情况

#### 1) 臂架坠落与地面碰撞

模型中设定在第二次臂架回转之后开始发生事故, 由于电机、钢丝绳等零部件的损坏, 导致臂架失去变幅的约束力, 直接坠落, 为了简化模型, 让臂架只在与地面接触的瞬间发生形变, 形变的过程持续 2s。因此, 事故发生过程中各机构运动仿真路线为:

初始状态: 臂架摆动平面与轨道垂直, 并处于最小幅度位置, 空载;

动作 1: 臂架绕转台旋转至适当位置;

此段的时间  $t_1 = (35 - 24) / 15 = 0.73 \text{ min} = 44 \text{ s}$

动作 2: 起升机构控制吊钩慢慢向下运动, 勾住物体;

此段的时间  $t_2 = 52 / 15 = 0.34 \text{ min} = 21 \text{ s}$

动作 3: 吊钩向上运动, 回到起吊的初始位置;

此段的时间  $t_3 = 5.2 / 8 = 0.65 \text{ min} = 39 \text{ s}$

动作 4: 臂架收幅至最小幅度;

此段的时间  $t_4 = t_3 = 5.2 / 8 = 0.65 \text{ min} = 39 \text{ s}$

动作 5: 臂架逆时针回转  $90^\circ$ ;

此段的时间  $t_5 = 0.25 / 0.2 = 1.25 \text{ min} = 75 \text{ s}$

前五个动作均是正常工况下, 在第五个动作完成时, 臂架失去约束。

动作 6: 臂架围绕转台坠落;

臂架从幅度最小处坠落, 重心下落的高度约为臂架初始位置时臂架头部高度的一半, 即 6.7m, 若臂架不受转台的约束, 从初始速度为零的状态下落 6.7m, 时间为  $t = \sqrt{2s/g} = \sqrt{2 \times 6.7 / 9.8} = 1.58 \text{ s}$ , 受到转台和损坏状态下钢丝绳的影响, 此时间应大大增加, 估算约为 10s。

此段的时间  $t_6 = 10 \text{ s}$ 。

动作 7: 臂架与地面碰撞, 产生形变。

此段时间极短  $t_7 = 2 \text{ s}$ 。

#### 2) 臂架坠落受钢丝绳约束未落地

臂架从最小幅度处坠落, 但是变幅系统未完全失效, 变幅钢丝绳将臂架拉住, 臂架经过震荡停在半空中。

前五个动作与臂架落地的相同, 均是正常工况下, 在第五个动作完成时, 臂架开始坠落。

#### 动作 6: 臂架围绕转台坠落

臂架从幅度最小处坠落, 设定从初始速度为零的状态下落 4m, 时间为  $t = \sqrt{2s/g} = \sqrt{2 \times 4/9.8} = 0.9s$ , 受到转台和损坏状态下钢丝绳的影响, 此时间应大大增加, 估算约为 10s。

此段的时间  $t_6 = 10s$ 。

动作 7: 臂架受到钢丝绳的拉力, 经过一段时间的震荡, 停在半空中。

此段时间设置为  $t_7 = 4s$ 。

### 3.6 本章小结

本章搭建了事故的仿真平台, 分析了事故过程中不同阶段各个机构的运动规律, 为后文动画的制作打下了基础。

## 第 4 章 MQ4599 三维实体的建模与装配

### 4.1 SolidWorks 简介

SolidWorks 是由美国 SolidWorks 公司于 1995 年 11 月开发出的基于 Windows 界面的 CAD/CAE/CAM/PDM 桌面集成系统,它是一款受到世界各地用户喜爱的软件,也是一种最为常见的三维建模软件。SolidWorks 的设计原理在于参数化特征造型,具有强大的三维零件实体造型、虚拟装配和生成二维工程图的功能。使其接受范围如此之光的另一重要原因在于, SolidWorks 可以与 CAE 软件无缝集成,功能强大、易学易用,且为纯中文界面<sup>[36]</sup>。

SolidWorks 的特点鲜明,其建模方式为非全约束特征建模,且设计过程具有全相关性。尤其在产品数据管理(PDM, Product Data Management)<sup>[37]</sup>方面,最初版本就通过特征管理器以及自动生成 BOM(材料明细表)等技术资料来体现详细的数据信息,以反应软件对于设计、分析、加工和数据管理的全过程集成。随着版本的不断提升,不仅可以进行工程图样的管理,也可以对 CAD 文件进行高效管理。

目前,该公司推出的 SolidWorks Premium2010 软件,集成了 SolidWorks Simulation 分析功能、SolidWorks Workgroup PDM 以及 3DVIA Composer 产品文档应用程序。在具体的应用过程中,完成相关部署后,对于容量巨大的如数万个零件的装配体的处理能力明显提高,且大大缩短了文档编制的时间。此外,产品数据管理(PDM)软件采用的版本控制技术可以确保每个人不会同时修改同一张图纸,而 3DVIA Composer 可以确保文档与设计保持同步更改

总之, SolidWorks Workgroup PDM 具有很高的开放性和集成能力,能对 CAD、CAPP、CAE 等通过 PDM 进行集成,可以真正实现企业级的信息集成和过程集成,已经日益成为企业设计和工艺部门的基础数据平台,被广泛使用<sup>[38]</sup>。

### 4.2 建模思路

在 SolidWorks 系统中,零件、装配体和工程都属于对象,它采用了自顶向下的设计方法创建对象<sup>[39]</sup>,常用的建模思路有以下两种:



第一种思路最为常见，一般的步骤是先从一个装配体开始，通过布局草图、关联特征等方法建立各零部件。布局草图体现设计意图，控制总体结构，设计修改也容易通过布局草图传递到各个零部件，并且布局草图可以有多个。关联零件由于存在外部参考，只能用于此装配中，不方便多个部件共用。关联特征和关联零件越多，管理起来则越不容易，在传递设计修改时越可能出错。所以自顶向下和自底向上的结合使用才能发挥这一方法的效率。

另一种思路较少适用。首先从零件开始，建立布局草图，然后建立产品的主要结构特征，此零件应是单实体的，且各个结构特征之间是相联结的。现在已经建立了一个“顶层源零件”。第二步，将顶层的源零件分割成需要的几个实体，这时会在特征管理栏生成一些分割特征，零件变成多实体的。第三步，插入\特征\生成装配体，从此多实体零件生成装配体；装配体中各个零件都和顶层源零件相关联。第四步，对第三步生成的各个零件进行局部详细建模。用这种思路，要注意设计修改的传递。在第四步中对各个零件进行局部详细建模时所生成的特征不会影响顶层源零件，只会影响第三步中所生成的装配体。而要使在顶层源零件中进行的设计修改或特征影响装配体中的各个零件，必须退回到第一个分割特征之前进行修改。

上述两种思路，第一种是通用和普遍适用的，是“正”；第二种思路在某些情况下比头一种方法好用，可以看作是“奇”。奇正结合，无往不利。

考虑到 SolidWorks 与其他软件间数据传输的方便性，有必要统一模型的度量单位，本文中选用“mm、kg、N”的单位制。

### 4.3 门座式起重机 MQ4599 三维实体零件建模

SolidWorks 实现了基于特征的实体建模功能，具体来说，通过拉伸、旋转、薄壁特征、高级抽壳、特征阵列以及打孔等操作来建立产品的实体模型；同时可以通过对特征和草图的动态修改用拖曳的方式实现实时的设计修改，为了有效地发挥系统的功效，加快模型的创建速度，节省零件设计的时间，少走弯路，正确的设计方法是必要的<sup>[40]</sup>。

经过分析，MQ4599 整机模型可以通过分别建立各个机构的模型，再对其进行装配的方法完成。根据门座式起重机结构的特点，MQ4599 可以被分为臂架、人字架、圆筒门架、转台、行走机构、吊钩组及卷筒几个部分分别建模，此处为了简化模型，电机、减速器等配套设施都用示意模型代替。

### 4.3.1 臂架建模

MQ4599 的臂架为圆管桁架结构的单臂架, 这种结构特征决定了其建模思路为先在草图中建立每根管的中心线, 然后用 SolidWorks 的结构件功能将其生成实体管, 再在其基础上添加其他构件。

由于其臂架分为臂架前段、中段、后段和副臂架, 建模时为了看图方便也可采用分段建立再装配的方法。

以臂架后段为例, 其中的管件的中心线为互相对称的线, 但其所在的平面并非都与已有基准面平行, 故可以通过绘制三维草图的方式来构建, 定义每条线的尺寸和位置, 得到如图 4-1 所示草图。

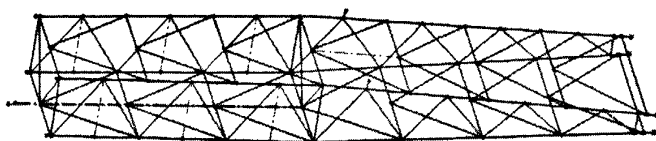


图 4-1 臂架后段主要杆件草图

SolidWorks 软件的焊件轮廓库中只有 Ansi Inch 和 Iso 两种标准的结构构件轮廓。但种类有限, 因此可以根据需求自己建造这样一个构件轮廓库以供使用。

在臂架后段中有两种不同规格的管, 分别是  $\Phi 121 \times 6$  和  $\Phi 245 \times 10$ , 均不是标准规格, 需新建两个轮廓尺寸的文件。首先新建一零件图, 任选一个面进行草图绘制, 标注尺寸, 将草图的原点成为默认穿透点, 然后把文件保存为选择库特征零件即\*.sldlfp 格式。直接将所生成的文件放置在 SolidWorks\data\weldment profiles\iso 文件夹中, 此时已将自己生成的库导入 SolidWorks 了, 可以在结构构件中直接使用。

将不同规格的管的中心线分别选中, 分为两次定义臂架后段中的管件的轮廓形状, 臂架后段的主体部分生成, 如图 4-2。

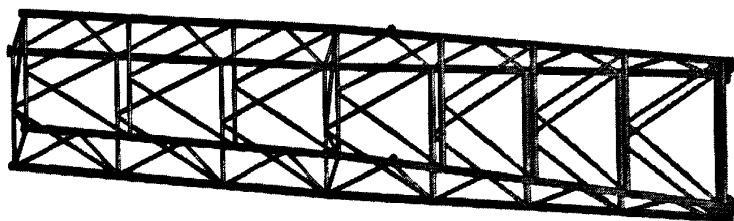


图 4-2 结构构件

最后将其他的筋板、耳板、法兰等结构添加到桁架结构中，将文件存为臂架后段.Sldprt。

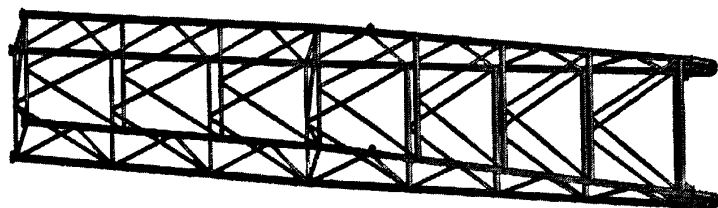


图 4-3 臂架后段完整结构

使用同样的思路和方法建立臂架其他部分的模型，其中将臂架前段和副臂架在同一个零件中构建。

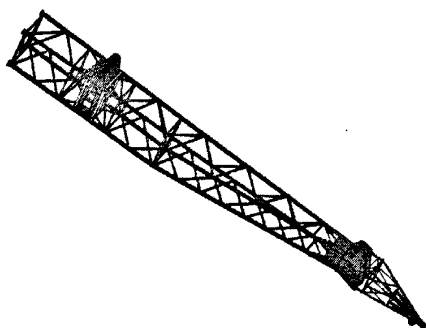


图 4-4 臂架前段

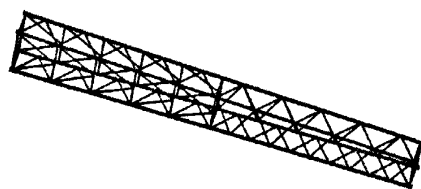


图 4-5 臂架中段

将三个模型装配到一起，选择共线圆管的中心线，添加共线的配合关系，将臂架的三个部分完全定义，存成一个装配体的文件。至此，臂架的模型已经完成。

#### 4.3.2 人字架、圆筒门架和转台建模

人字架、圆筒门架和转台的结构较为简单，主体部分都是由不同形状的板组合起来的。

在人字架的建模中，主要采用二维草图拉伸的方法，生成板的实体。需要注意的问题有以下几个：1.在绘制二维草图时方向不规则的草图平面的建立；2.在拉伸时，选项中的合并结果选项都不选中，这样可以方便后续的线性阵列，来达到简化建模步骤的效果。

主体部分建模完成后，在人字架顶部添加滑轮、支板和轴等结构。

圆筒门架主要是由一个圆筒、一个主梁、两个端梁和四个连接支座组成，采用自顶向下的顺序来实现特征。

转台的结构较为复杂，由很多形状不规则的板焊接而成，选择正确的基准面拉伸即可。

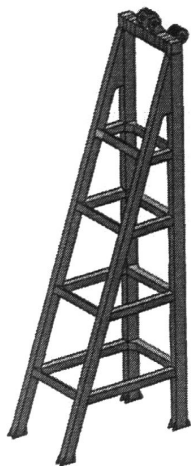


图 4-6 人字架

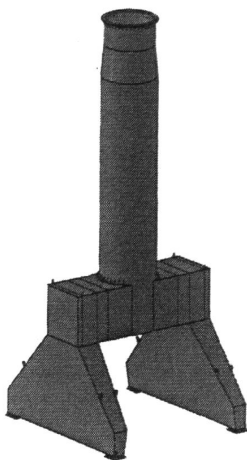


图 4-7 圆筒门架

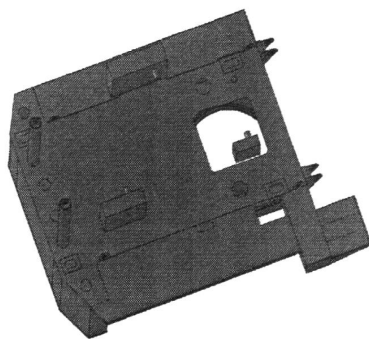


图 4-8 转台

### 4.3.3 吊钩组建模

MQ4599 有两个吊钩，主吊钩为双头吊钩，副吊钩为单头吊钩。

吊钩的形状不规则，在 SolidWorks 中，扫描和放样都可以用来创建复杂的形状。两者之间的本质区别在于：扫描使用单一轮廓草图，放样使用多个轮廓草图。经过对图纸的分析，主吊钩和副吊钩中给定的截面均不止一个，故都采用放样的方法建模。

因此建模的关键在于选择合适的截面轮廓和扫描路径。以主吊钩为例，吊钩的头部为对称的结构，因此先构造一边的钩，再镜像。构造如图示的截面和路径，放样。

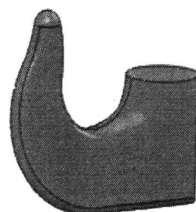
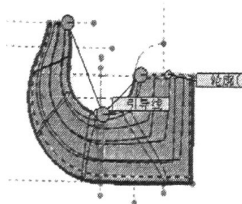
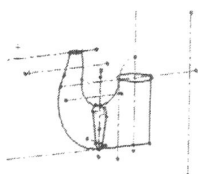
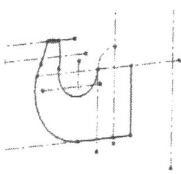


图 4-9 放样路径 图 4-10 放样截面 图 4-11 放样设置 图 4-12 放样结果

钩的顶部为一个半球，构造这个半球，镜像，完成钩的头部。添加钩的上

部圆台。如图。

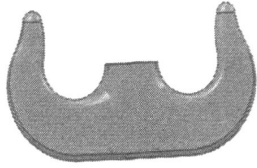


图 4-13 吊钩头部

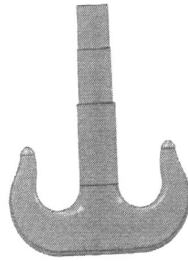


图 4-14 完整吊钩

构建滑轮罩、滑轮、连接板等结构，主要采用旋转和拉伸的方法生成实体，副钩组也用同样的方法完成，在此不再赘述。完整的吊钩组如图示。

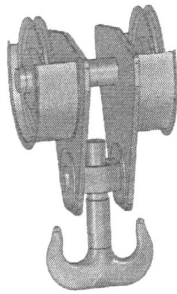


图 4-15 主吊钩组

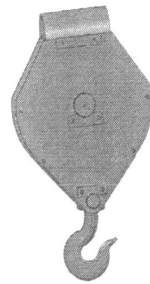


图 4-16 副钩组

#### 4.3.4 卷筒建模

在 MQ4599 中，卷筒包括变幅卷筒、起升卷筒和副起升卷筒。每个卷筒的主体部分均由两边的挡板和中间的圆柱板组成，这些特征又拉伸得到。圆柱外表面的螺纹用扫描切除的方式成型，用螺旋线作为扫描路径，其中螺旋线的参数包括螺距、圈数、起始角度和旋转方向，在起始位置构造合适大小的圆作为扫描轮廓。为了简化模型，卷筒中间的隔板不建。

三个卷筒中，变幅卷筒的螺纹是由两段组成的，另外两个则是一段成型。

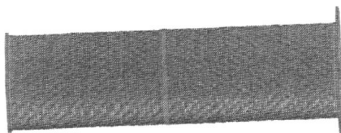


图 4-17 变幅卷筒

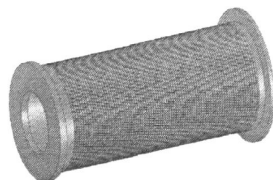


图 4-18 起升卷筒

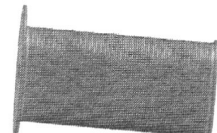


图 4-19 副起升卷筒

### 4.3.5 运行机构建模

运行机构共有四组，呈两两轴对称布置，建模时只需建一组即可。

运行机构结构较为复杂，经过简化后，其中板的形状均为规则的，处理起来并不复杂。

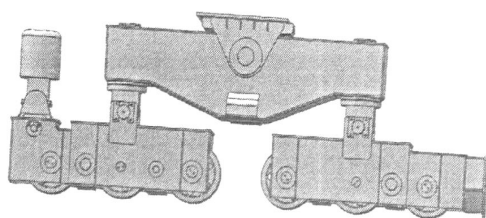


图 4-20 运行机构

## 4.4 装配

### 4.4.1 装配设计的基本概念

在 SolidWorks 的装配环境中，可以对配体中的独立零件和各级子装配体进行操作。在以子装配体为操作对象时，子装配体将被视作一个整体，其大多数操作与独立零件并无本质区别。

比较传统的设计方法通常采用“自下而上”的设计思路。所谓“自下而上”，是指先分别设计好各零件，然后将其逐个调入到装配环境中，再根据装配体的功能及设计要求对各零件之间添加约束配合。与“自上而下”的方法相比，可以使设计者更加专注于单个零件的设计工作<sup>[42]</sup>。

装配主要应体现产品零部件之间的配合关系，这样就自然地产生了相对位置的关系，这里提出一个参照的概念。对于静态装配而言，参照的意义并不是很突出，但是如果两个零件之间存在运动关系时，就必须明确装配过程中的参照零件。在本文中，模型之间静态和动态的装配关系都是存在的。一般在装配过程中采用一个零件作为“地”零件，它是相对于基准坐标系静态不动的零件。装配体中起支承作用的零件或子装配体最长被选做为“地”零件，即位置固定的零件，不可以进行移动或转动的操作。在具体的装配过程中，SolidWorks 默认第一个导入装配体的零件扮演这个“地”零件的角色。

相应的，装配环境下另一个重要概念就是——“约束”。当零件被调入到装配

体中时，除了第一个调入的之外，其它的都与任何零件之间没有约束关系，位置处于任意的“浮动”状态，也就是说可以分别沿三个坐标轴移动或转动，即共有六个自由度。当给零件添加某些装配关系后，可消除零件的几个自由度，限制了零件的某些运动，此种情况称为不完全约束。当添加的配合关系将零件的六个自由度都消除时，称为完全约束，零件将处于“固定”状态，同“地”零件一样，无法进行拖动操作。

本文中，先将臂架各段装配成一个子装配体，再构建整机的装配体。

#### 4.4.2 臂架装配

由于之前臂架是分成三段建的，现需要将三段臂架装配成一个整体。

新建一个装配体，选择“臂架后段”作为“地”零件，因此先导入它，再导入“臂架中段”和“臂架前段”，注意选择合适的摆放位置，便于后面的装配。

在这个小装配体中，配合关系选择臂架上部六根管的中心线分别重合，且互相接触的法兰的轮廓线重合。装配完成的臂架如图 4-21 所示。

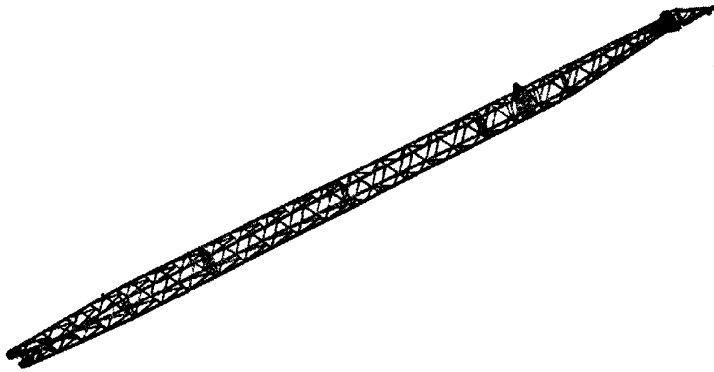


图 4-21 臂架装配体

#### 4.4.3 整机装配

整机装配的整体思路与臂架装配类似，新建一个整机装配体文件，按位置的顺序导入各个零件。需注意的是运行机构有四个，先将运行机构导入装配体，然后直接在左侧状态栏中复制为四个，再在右侧的主界面中拖到合适的位置即可。

有装配关系的零件分别为：转台与几个卷筒、转台与人字架、转台与圆筒门架、转台与臂架、圆筒门架与运行机构。

转台与变幅卷筒、起升卷筒和副起升卷筒的配合为几个卷筒的中心轴与用示意电机的立方体中孔的轴位置重合，卷筒的方向也应与设计图保持一致。

转台与人字架之间有几块安装板，这几块板在人字架的模型中，将人字架的四个脚的板放在安装板的正中间即可。

转台与圆筒门架的位置关系由人字架上的法兰和转台上的环状板两者中心线共线、相应的两个平面重合来决定。

臂架围绕转台上的支座的轴旋转，此处的配合为臂架的绞点的轴与支座的轴重合，臂架放在工作幅度之内的任一位置。

运行机构安装在圆筒门架的四个连接支座上，连接处的两块板边界完全重合。

为了方便在 3dmax 中对模型进行处理，需要将起重机模型调整到圆筒门架的轴与 Y 轴重合，因此再添加一个定位关系，固定整机的放置方向。

整机装配结果如图，得到一个.SLDASM 的文件。这个文件中保存了两方面的内容：各零件之间的配合关系和进入装配体中各零件的路径。一个零件放入装配体中时，这个零件文件会与装配体文件产生链接的关系。在打开装配体文件时，SolidWorks 要根据各零件的存放路径找出零件，并将其调入装配体环境。因此装配体文件不能单独存在，要和零件文件一起存在才有意义。

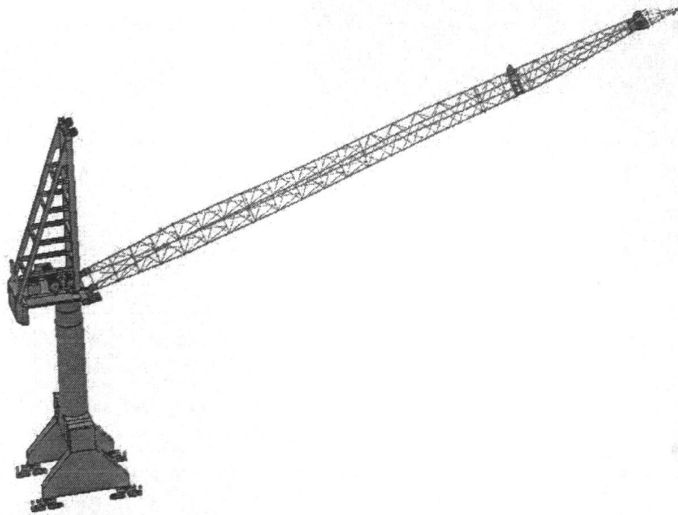


图 4-22 整机装配体

至此，MQ4599 门座式起重机除了钢丝绳和吊钩没有添加到模型中，其余部



分均已完成。

## 4.5 SolidWorks 与 3dmax 接口处理

SolidWorks 在做动画方面功能远不如 3dmax 强大,因此需要将 SolidWorks 模型导入到 3dmax 中再做动画设计。但两者之间无法直接转换,故需要通过某些格式的文件作为中介介质将 SolidWorks 中的文件导入到 3DMAX 中, SolidWorks 本身就可以另存为几种不同格式的文件,比较常见的有.IGS、.STL、.STP 和.WRL,它们分别有自己的优劣。

.IGS 仍然是目前为各国广泛使用的事实上的国际标准数据交换格式,然而,IGES 在文件结构中却又不合理地定义了直接存取的指针系统。其在应用中暴露的主要问题有:数据文件过大,数据转换处理时间过长;某些几何类型转换不稳定;只注意了图形数据转换而忽略了其他信息的转换。故不能将 SolidWorks 文件存为.igs 格式,否则会在 3dmax 会出现破面,而且速度慢。

.STL 是一种为快速原型制造技术服务的三维图形文件格式。由于 STL 模型仅仅记录了物体表面的几何位置信息,没有任何表达几何体之间关系的拓扑信息,所以在重建实体模型中凭借位置信息重建拓扑信息是十分关键的步骤。STL 模型是以三角形集合来表示物体外轮廓形状的几何模型。在实际应用中对 STL 模型数据是有要求的,对 STL 模型数据均需要经过检验才能使用。且.IGS 和.STL 格式的文件转换只能看,不能修改。

.STP 格式是国际标准化组织制定的描述整个产品生命周期内产品信息的标准,是一个正在完善中的“产品数据模型交换标准”。用 step 格式能修改参数,更有助于数据交流的真实。STEP 标准存在的问题是整个体系极其庞大,标准的制订过程进展缓慢,数据文件比 IGES 更大。

.WRL 文件是一种虚拟现实文本格式文件,是纯 ASCII 文件,所以可以用文本编辑器打开和编辑。对于较大型的 3D 文件,用纯手工的方法是不可取的,应该选择用三维软件(maya,max 等)进行场景建模和输出。

本文中 SolidWorks 模型较为复杂,文件大小也较大,综合考虑到转换效果,转换速度和对计算机性能的要求,采用.WRL 格式作为中间的转换文件。

在 SolidWorks 软件中打开整机装配体文件,另存为“整机.WRL”,同样的方法处理吊钩组和副吊钩组。

## 4.6 场景建模

### 4.6.1 3dmax 软件简介

3D Studio Max, 常简称为 3DMax 或 MAX, 是 Autodesk 公司开发的基于 PC 系统的软件, 具有强大的三维建模、效果图及动画和渲染功能<sup>[43]</sup>。广泛应用于广告、影视、工业设计、建筑设计、多媒体制作、游戏、辅助教学以及工程可视化等领域。拥有强大功能的 3DS MAX 被广泛地应用于电视及娱乐业中, 比如片头动画和视频游戏的制作, 深深扎根于玩家心中的劳拉角色形象就是 3DMax 的杰作。在影视特效方面也有一定的应用。而在国内发展的相对比较成熟的建筑效果图和建筑动画制作中, 3DMax 的使用率更是占据了绝对的优势。根据不同行业的应用特点对 3DMax 的掌握程度也有不同的要求, 建筑方面的应用相对来说要局限性大一些, 它只要求单帧的渲染效果和环境效果, 只涉及到比较简单的动画; 片头动画和视频游戏应用中动画占的比例很大, 特别是视频游戏对角色动画的要求要高一些; 影视特效方面的应用则把 3DMax 的功能发挥到了极至。

### 4.6.2 建模思路

为了使实验过程更形象生动, 搭建了简单的环境。场景的主要内容包括: 堆场布置、货船、集装箱、堆场上的龙门吊、集装箱、货车, 一个聚光灯(主光灯), 一个泛光灯(辅光灯), 一架摄像机。其中龙门吊、货船和货车的形状和结构较为复杂, 可在 SolidWorks 里建模, 再导入 3DMax 中。建模的过程不再赘述。

其余的部分基本为形状规则的长方体, 直接在 3dmax 中构建。集装箱用标准基本体中的长方体构建一个大小合适的, 复制, 按照集装箱排放的位置排列, 为简化模型, 直接整体复制拖动到合适的位置, 构成堆场上的货物堆。

3DMax 建模与 SolidWorks 建模相结合, 构建一个物流园区的缩略场景。

将此文件存为“场景.max”, 如图 4-23 示。

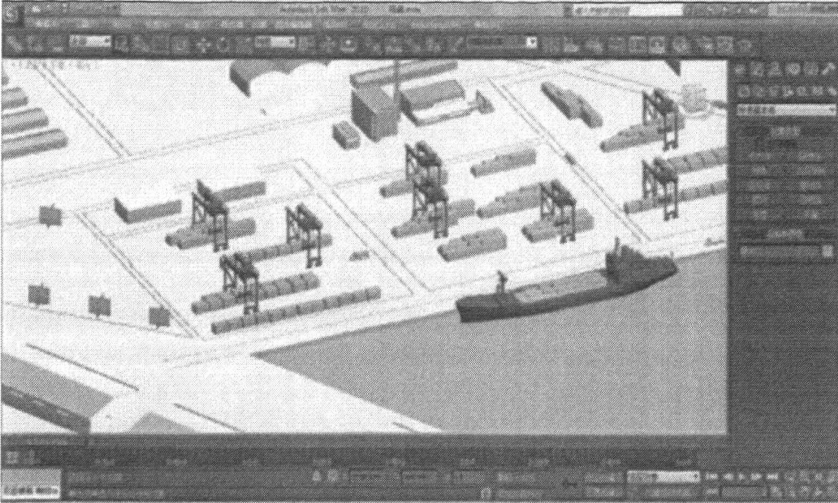


图 4-23 港口码头场景图

## 4.7 臂架损坏分析

门座式起重机臂架坠落事故中，臂架的损坏程度和损坏之后的状态与起重机发生事故时臂架所在的高度有关，经过 Ansys 的分析和计算，得出的结果如下：  
臂架在幅度最小的位置发生事故下坠的结果：

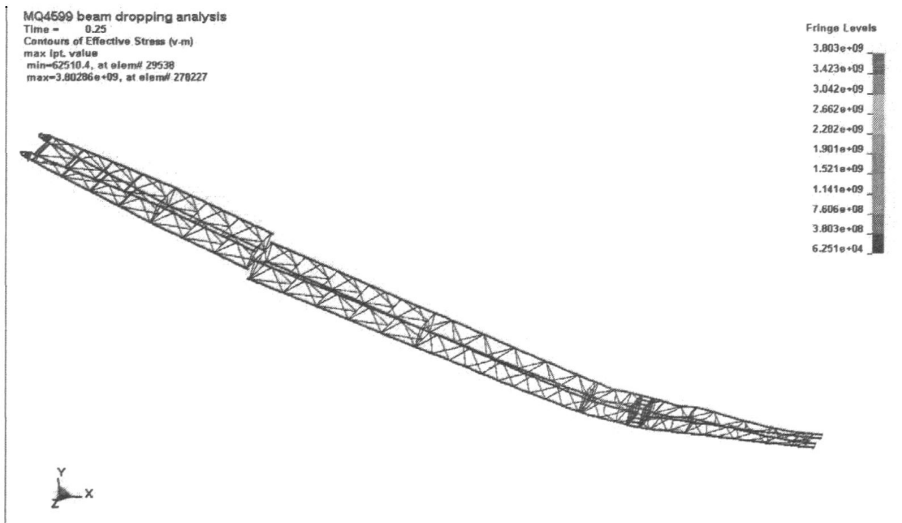


图 4-24 Ansys 分析结果

根据 Ansys 计算分析的结果，臂架坠落在与地面碰撞的过程中，臂架中段与

后段快要断开，头部发生剧烈的形变。碰撞的瞬间虽然时间极为短暂，但还是有一个变化的过程，故根据此结果，在 3DMax 中做动画时再建立臂架毁坏的模型。

## 4.8 本章小结

这一部分完成了整机的 SolidWorks 建模，采用了各种思路相结合的方法，针对不同的实体采用不同的建模方法；分析了 SolidWorks 与 3DMax 之间的各种接口的优劣，选择最为恰当的格式进行转换；结合 Ansys 软件的分析结果，得到臂架碰撞后的损坏情况，为后续动画的制作准备了条件。

## 第 5 章 臂架坠落事故过程仿真

### 5.1 事故过程再现动画制作思路

3DMax 作为世界上最广泛使用,功能最强大的视频动画制作软件,其实时交互性非常的成功,同时它的动力学仿真功能也越来越完善,这样就可能把它的很强大的实时交互环境与一定精度的动力仿真结合起来。通常用来模拟机械零件的运动、人或物的运动以及刚体的碰撞等常见现象,具有仿真度高和效率高的特点,本文中利用这种仿真方法在起重机事故仿真上的应用,来还原事故发生时的情况,再现起重机臂架坠落事故的各种情况。美中不足的是,3DMax 在动力学的模拟方面还存在不足,采用的是线性保守系统,故不能特别精确的模拟实际的运动状况。

### 5.2 模型处理

新建一个 3DMax 文件,导入“整机.wrl”、存为.max 文件,同样处理“吊钩组.wrl”、“副钩.wrl”。这样 SolidWorks 里所建起重机模型已转化成 3DMax 文件。

#### 5.2.1 删除辅助对象

打开“整机.max”文件,里面所有的实体全部转化为可编辑网格,且 SolidWorks 文件导入 3DMax 后,里面有很多辅助对象,这些在后面做动画中都是不必要的,故需要删除。激活“按照名称选择”,将弹出窗口中的 VIFS 开头的文件全部删掉。

#### 5.2.2 模型成组

此时 3dmax 文件中的所有对象之间没有任何的固定的位置关系,都处于可以随意拖动状态。但是实际情况中应该是每个部件中的小实体之间都有相对固定的位置关系,故需要将这些可编辑网格按照他们所属的部件进行“成组”的处理。

整机模型中,可将其分成三个组,分别为臂架、转台和圆筒门架,臂架组仅

包括导入模型的臂架部分；转台包括转台、人字架、起升卷筒、副起升卷筒、变幅卷筒，因为动画模型中不做卷筒的旋转运动，故这几者之间无相对运动，故可以直接组成一个组；圆筒门架也直接选中属于这些部分的可编辑网格，修改命令的轴命令中，选择仅影响轴，居中到对象，然后成组即可。这样既保证了每个网格均有一个独立的中心，又保证了他们之间的位置是相对固定的。独立的中心在后面调整位置时会用到。

同理，处理吊钩组和副钩，分别成组，命名为“吊钩组.max”和“副钩.max”。

选中臂架、转台和圆筒门架三个组，构成一个新组，命名为“整机”，这样在后面的操作中要选中整个模型就比较方便了。

### 5.2.3 臂架重建

此时臂架全部由可编辑网格构成，无法提取任何桁架的骨骼信息，由于在后期还要对其进行变形的操作，但可编辑网格用 FFD 的方式处理后，形变是不规律的，因此也无法控制其形变。经过反复的尝试，最终发现，最好的解决办法是在 3DMax 中重新构建一个臂架，在一开始的时候就替代这个可编辑网格组成的臂架。处理的时候可先隐藏其他两个组，再将臂架的组打开，用实体线的方式重建每个桁架，位置与原来的可编辑网格重合，处理的时候在三个视图中调整新建的桁架的位置，使其在视觉上跟原来的臂架一致。

重新将新的臂架重组，命名为“臂架”。取消隐藏其他组。

### 5.2.4 调整各机构轴的位置

3DMax 中组的轴即是它运动的轴，此轴的位置是可以根据运动关系自己定义的。选定某个对象之后，在修改命令的轴命令中，选择仅影响轴，再移动轴心的位置。在视口中，轴点由 RGB 三轴架清晰地标识，移动轴心位置时可将视图以线框形式显示，便于在各个视口中对每个实体的位置进行观察和对齐，也可对轴所在的位置进行区域缩放，以便更清晰地观察对象。

在 MQ4599 中，臂架绕转台运动，故臂架的轴点可以定义在两者铰点的中心，可以根据铰接处两对称网格的位置来设定臂架轴的位置，分别记录两个对称网格的中心的坐标，计算出两个中心间的线段的中点位置的坐标，拖动臂架的轴，在下面的绝对坐标模式中将这个坐标值赋给臂架的轴。

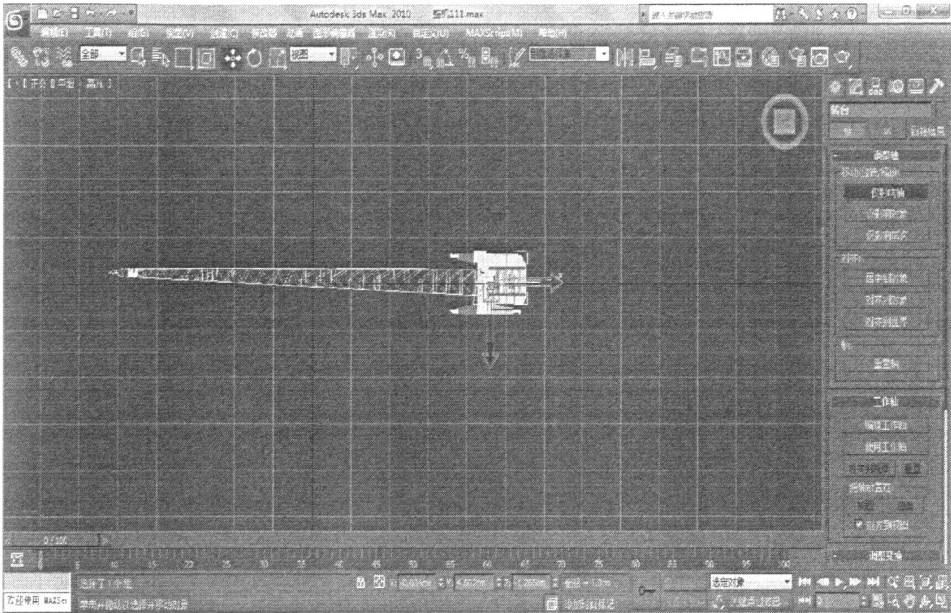


图 5-1 臂架轴的位置

转台绕圆筒门架的圆筒的中心线旋转，即以圆筒的中心线为轴，因此需将转台的轴进行各个方向的调整，在视图上看到与圆筒的轮廓圆的圆心大致重合。也可以使用精确的方法，选择圆筒的轮廓，记录其中心的坐标，再移动转台的轴，将刚才记录的  $x$ 、 $y$  的值赋给轴的  $x$ 、 $y$ ，转台轴的  $z$  的位置移动到与转台平面大致重合即可。

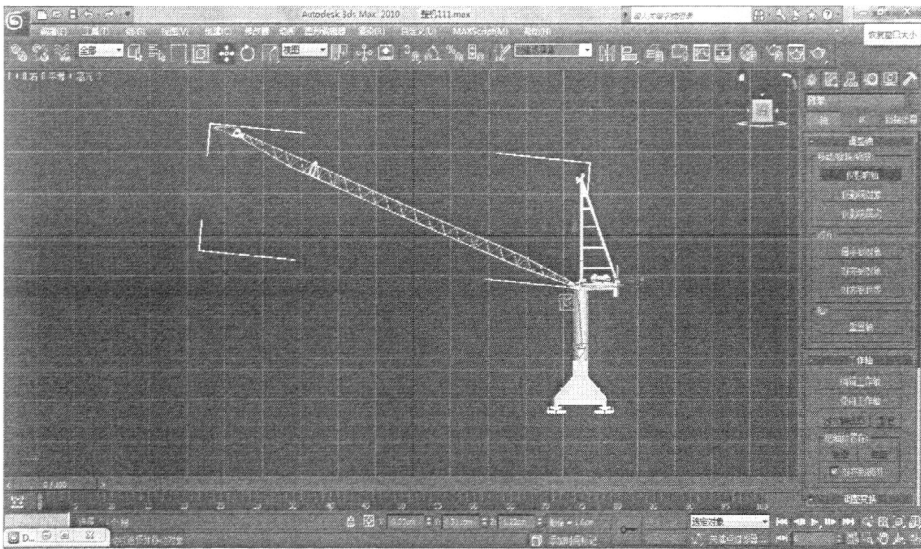


图 5-2 转台轴的位置

圆筒门架在动画中无运动，故其轴的位置不用特殊调整，直接居中到对象即可。

对于吊钩组和副钩，它们在动画中的运动也只涉及到移动而没有旋转，故它们的轴线也可以直接居中到对象，方便在后面的动画中移动它们的位置。

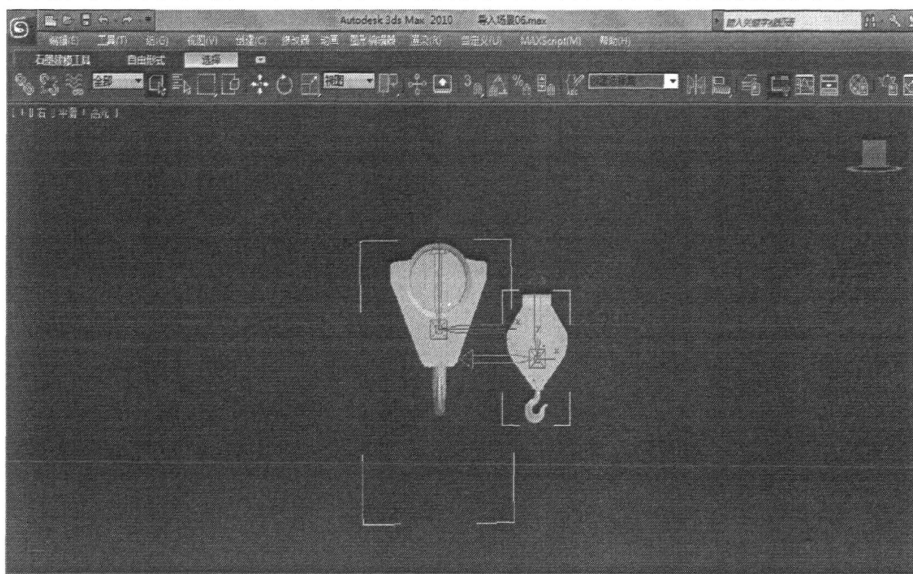


图 5-3 吊钩和吊钩组轴心位置

这样，MQ4599 中各互相有运动关系的机构已经分别成为独立的整体，且运动的中心轴也调整到合适的位置，为后期动画的制作做好了准备工作。

### 5.3 将起重机模型合并到场景中

由于起重机的模型是直接在 SolidWorks 中导入的，其大小与场景中的模型大小的比例与实际情况有一定出入，故需要调整起重机模型的大小。

打开“场景.max”，导入并合并“整机.max”，按快捷键 M，选中整机中所有的组，使用放缩命令，注意选择正确的放缩方向，可以通过调整视角到合适的位置，对整机模型进行各个方向的放缩，与场景中实物大小比较，直到觉得模型大小比较合适即可。

合并后起重机的位置也不在所需的位置，可在各个视口中进行调整，使圆筒门架底面与地面重合，调整门机离货船的距离，保证臂架在变幅过程中，能方



便的起吊集装箱。

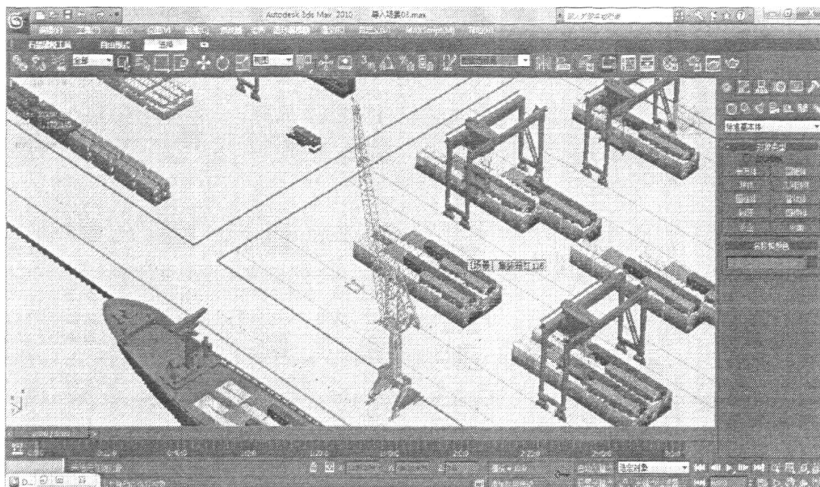


图 5-4 导入场景的起重机 MQ4599

## 5.4 钢丝绳建模

MQ4599 门座式起重机中，钢丝绳包括变幅钢丝绳、起升钢丝绳和副起升钢丝绳。由于相对起重机的整体结构来说，钢丝绳的细节，比如绕绳方式、股数等，在动画中几乎反应不出来，故模型中用有粗细的实体线表示。起升钢丝绳从转台上的卷筒上出来，绕过人字架上的滑轮，到臂架头部，再到吊钩上；变幅钢丝绳从转台上的卷筒上出来，绕过人字架上的滑轮，到臂架中部，若用一根直线表示有一定的难度，可以分成几段直线表示，在视觉上与一根绳区别不大。将变幅钢丝绳设为紫色，主起升钢丝绳设为蓝色，副起升钢丝绳设为绿色，与图纸对应，同时也以示区别。

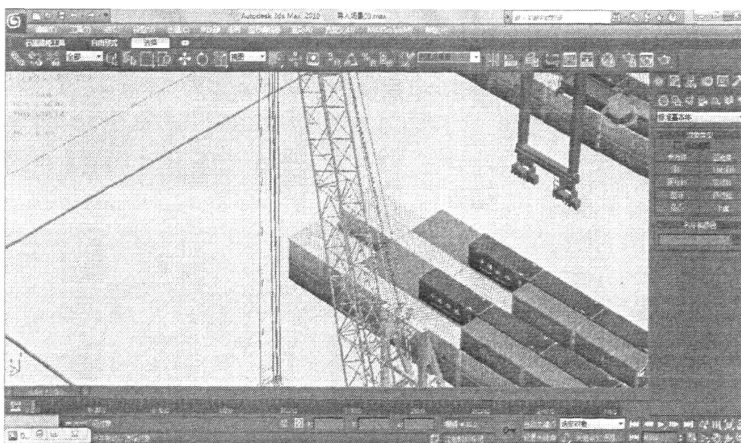


图 5-5 钢丝绳模型

## 5.5 添加链接关系

此时场景中的所有物体之间并没有实质性的关联，如果移动某一个对象，它与其他对象之间的相对位置关系就会发生变化。因此必须给他们添加一些约束关系，实现链接的关系。

在 MQ4599 门座式起重机中，它由多个组组成，从上到下依次为：臂架、转台、圆筒门架、变幅钢丝绳、起升钢丝绳、副起升钢丝绳、吊钩和副钩。他们之间需要的链接结果是：当转台运动时，臂架、吊钩、副钩、钢丝绳都随之转动；当臂架运动时，钢丝绳的一端固结在人字架的滑轮上，另一端随臂架的运动而运动；当吊钩运动时，起升钢丝绳的一端固结在臂架上，另一端随吊钩运动；吊钩吊起集装箱时，集装箱随吊钩运动。起重机在需要的动画中不做移动，故圆筒门架的位置不变，不必做链接。

在 3DMax 中链接和链接变换可以实现这几种相对运动关系。

### 5.5.1 附加

由于钢丝绳有很多条，但是同组的钢丝绳的运动规律和属性都应一致，故可以将他们附加在一起，再进行链接的设置。附加就是两个物体附加成一个物体，贴图材质等就同时给到两个物体上了，若用成组，其实还是很多物体在里面，对于钢丝绳用附加比较合适。将运动规律一致的钢丝绳附加到一起。

### 5.5.2 链接

在 3DMax 中，对象的层次是指将对象链接在一起行程某种组合，以便于制作动画，当两个对象被链接后，一个是父对象，一个是子对象，但一个子对象只能对应一个父对象。在正向运动状态下，父对象移动，子对象必须跟随，但是子对象移动时，父对象不受影响。

经过对运动关系的分析，臂架、吊钩和副钩都链接到转台上，转台是它们三个的父对象；从人字架中穿过的几根钢丝绳在视觉上与人字架没有相对运动关系，故也应链接到转台上，转台是它们的父对象。在做链接时，选中子对象，激活“链接”按钮，拖动到父对象上，若不好选择，也可以通过名称选择父对象。

### 5.5.3 链接变换

“链接变换”修改器将任何对象或子对象选择链接到另一对象中，这一对象称

为控制对象。控制对象的运动、旋转或缩放变换将传递到对象或子对象选择上。链接变换选中的顶点与控制对象之间保持相对不动，这样便可实现钢丝绳一段随臂架的转动运动，同理也可以实现钢丝绳一段随吊钩运动。

分别选中需要做链接变换的钢丝绳，在“修改”命令中选中与臂架或者吊钩、吊钩组相固结的顶点，在修改器列表中选择“链接变换”，在视口中选中相应的控制对象，控制对象的名称将显示在“参数”卷展栏中。

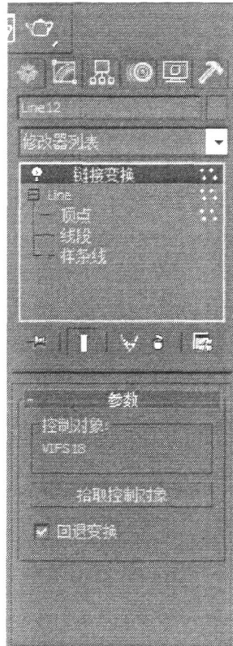


图 5-6 链接变换参数

拖动控制对象，若钢丝绳的一个顶点不动，一个顶点随控制对象运动，说明链接成功，达到了所需的效果。

移动和旋转各个父对象，子对象相应的变化，链接关系均定义成功。

## 5.6 添加材质和贴图

将吊钩组和吊钩导入合并到当前臂架的场景中，一起定义材质和贴图。材质可以更好的表现三维对象的质感、颜色、属性，使设计出来的作品更具真实感。3DMax 中提供了强大的材质编辑功能，可以制作金属材质、布料材质、玻璃材质、大理石材质等。

门座式起重机的颜色通常来说为橙色，带有金属光泽。材质的基本参数聚集

在“明暗器基本参数”和“基本参数”两个卷展栏中，这些参数用于设置材质的明暗器、颜色、反光度、透明度等基本参数。

明暗器的参数可以设置材质的着色模式，同时还可以设置师傅是双面、线框、面状。在 3DMax2010 中，材质的着色模式共有 8 种，我们需要选择的是“金属”，该项明暗器去除了“高光反射”颜色和“柔化”参数值，使“反射高光”与“光泽度”对比很强烈，可以产生逼真的金属质感，用来表现金属、玻璃和钻石材质效果，并且可以产生强镜面反射材质的材质效果。

首先定义材质球的属性。使用快捷键 M 弹出材质编辑器，选择一个样本球，在明暗器基本参数中选择“金属”，其他的几个参数均不勾选。在“金属的基本参数”中，定义漫反射的颜色，设置高光级别和光泽度，使其在视觉上较为接近实物。分别选中臂架、转台、人字架、门架、吊钩组和副钩，将材质球的属性赋给他们。

重新定义三个材质球，使他们的光泽度接近于钢丝绳，调整漫反射的参数，使他们分别为红色、绿色和蓝色，与 CAD 图纸中变幅和起升钢丝绳颜色一致。选中不同的钢丝绳，将适当的材质球的属性赋给他们。

此时看到的起重机已经比较接近于实物。

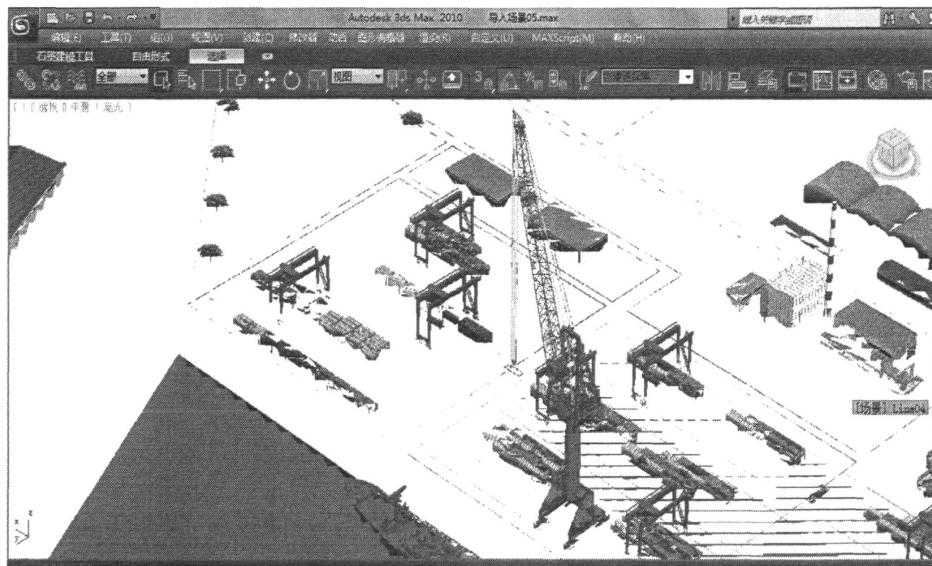


图 5-7 渲染和贴图后的模型

## 5.7 动画制作

本文中采用关键帧动画的方法来制作起重机臂架坠落事故的过程。关键帧动画主要通过时间滑块来实现，即定义运动对象几个关键的点来实现运动效果。通过动画控制工具栏可以查看动画效果。

关键帧动画中有两种定义关键帧的方式，自动关键帧和设置关键帧，自动关键帧由于是自动记录位置点，好处在于方便快捷，坏处在于经常在不需要记录或者误操作的时候也记录，产生废帧。废帧太多会拖慢速度，干扰别的动画帧。手动关键帧只在需要的位置点加帧，速度虽然慢些，但提供了更多的可控性。

### 5.7.1 臂架坠落与地面碰撞

在本章第一节中已经分析了每个动作的关键帧时间，在每个动作的起始位置都定义一个关键帧，于是产生了如下几个关键帧：

第 1 帧：在时间 0:00:0 处默认产生的第 1 帧，将起重机调整到初始状态，即臂架摆动平面与轨道垂直，并处于最小幅度位置，空载；

第 2 帧：0:44: 0 时定义第 2 帧，臂架变幅到准备起吊的位置，吊钩处在使钢丝绳竖直的位置，即将被吊起的集装箱在货船上；

第 3 帧：1:05: 0 时定义第 3 帧，吊钩向下运动到与集装箱勾住的位置；

第 4 帧：1:44: 0 时定义第 4 帧，吊钩回到起吊的初始位置；

第 5 帧：2:23: 0 时定义第 5 帧，臂架回到最小幅度位置；

第 6 帧：3:38: 0 时定义第 6 帧，臂架逆时针回转 90°；

第 7 帧：4:28: 0 时定义第 7 帧，臂架增幅至适当幅度；

第 8 帧：5:07: 0 时定义第 8 帧，吊钩向下运动，直到物体回落到货车的斗箱内，

第 9 帧：5:28: 0 时定义第 9 帧，空载的吊钩回到初始高度；

第 10 帧：6:18: 0 时定义第 10 帧，臂架收幅至最小幅度；

第 11 帧：7:18: 0 时定义第 11 帧，臂架顺时针回转 90°；

第 12 帧：8:02: 0 时定义第 12 帧，臂架旋转准备起吊物体；

第 13 帧：8:23: 0 时定义第 13 帧，吊钩勾住物体；

第 14 帧：9:02: 0 时定义第 14 帧，吊钩回到起吊的初始位置；

第 15 帧：9:41: 0 时定义第 15 帧，臂架收幅至最小幅度；

第 16 帧：12:06: 0 时定义第 16 帧，臂架逆时针回转 90°；

第 17 帧：12:16: 0 时定义第 17 帧，臂架围绕转台坠落；

第 18 帧：12:18: 0 时定义第 18 帧，臂架与地面碰撞，产生形变。

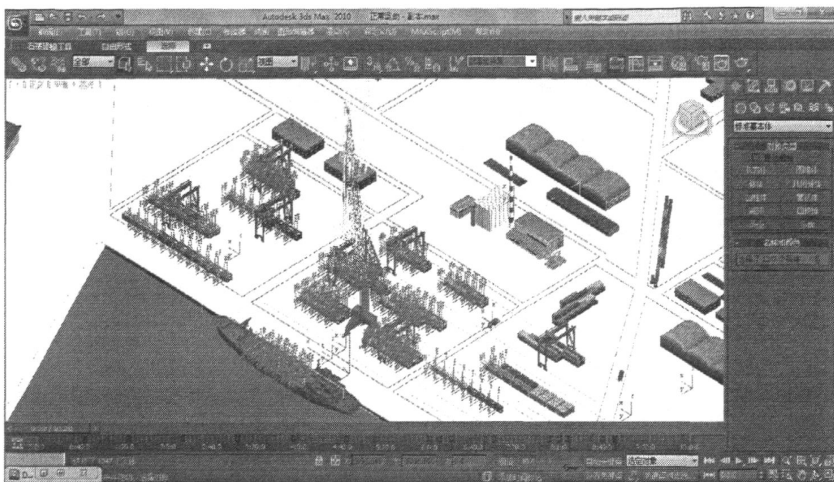


图 5-8 关键帧

其中第 18 帧中，臂架的变形采用将臂架中的桁架分段，移动顶点位置，再平滑这些顶点的方法使其产生变形。但是如果仅在这一帧定义一个形变的臂架，在动画中臂架的形变仍然是从第一帧开始的，解决的方法可以在第 17 帧之后很短的时间内，让臂架产生一个肉眼几乎看不到的形变，让它从起始位置开始变化，这在渲染之后的动画中是看不出来的，但是再从这一帧到第 18 帧的过程中，形变非常明显，基本符合实际运动的规律。

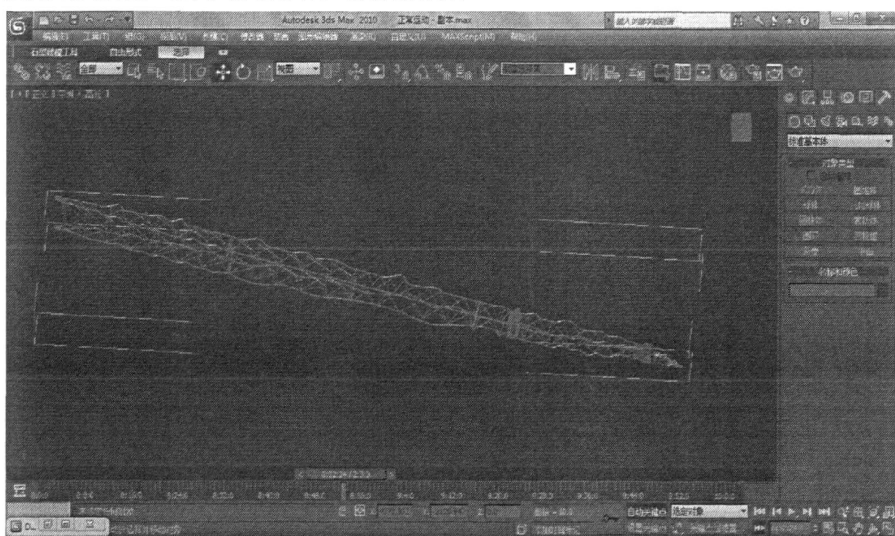


图 5-9 臂架与地面碰撞静止后的形变

除了臂架和转台的位置，吊钩也要始终处在使起升钢丝绳保持竖直的位置，为了使动画看起来更为逼真，吊钩的位置也需在中间位置进行插帧，使钢丝绳在每个时刻都处于竖直的状态。

上述的这些帧只定义了整个起重机的运动，在场景中参与动画的还有货车和集装箱。

货车在起始帧停在岸边，在臂架准备下落放置物体时停在接货物的位置，当集装箱落下后，带着集装箱向前运动，停在指定的位置。具体的帧不再介绍。

集装箱在起始位置时停在货船上，到吊钩抓取到集装箱后，集装箱随吊钩运动，需要注意的是集装箱是链接到转台上的，转台旋转时，集装箱的位置也随之变化，当转台逆时针运动时，集装箱也逆时针运动，但是当转台顺时针运动时，集装箱又随之回来了，故需要将集装箱的位置向下拖动到视野之外的地方，定义一个关键帧，就看不到集装箱一直随转台旋转了。事故状态下的第二个被吊起的集装箱也一样，在开始的时刻也应放在视野之外，到与吊钩接触时再放到货船上适当的位置，否则在起重机正常工作状态下，也会看到这第二个集装箱随转台运动，不符合实际运动规律。

### 5.7.2 臂架坠落受钢丝绳约束未落地

在臂架坠落但不落地的情况下，前面 16 帧跟臂架坠落碰地的情况中一致，故从第 17 帧开始需要重新定义。

第 1 帧：在时间 0:00:0 处默认产生的第 1 帧，将起重机调整到初始状态，即臂架摆动平面与轨道垂直，并处于最小幅度位置，空载；

第 2 帧：0:44: 0 时定义第 2 帧，臂架变幅到准备起吊的位置，吊钩处在使钢丝绳竖直的位置，即将被吊起的集装箱在货船上；

第 3 帧：1:05: 0 时定义第 3 帧，吊钩向下运动到与集装箱勾住的位置；

第 4 帧：1:44: 0 时定义第 4 帧，吊钩回到起吊的初始位置；

第 5 帧：2:23: 0 时定义第 5 帧，臂架回到最小幅度位置；

第 6 帧：3:38: 0 时定义第 6 帧，臂架逆时针回转 90°；

第 7 帧：4:28: 0 时定义第 7 帧，臂架增幅至适当幅度；

第 8 帧：5:07: 0 时定义第 8 帧，吊钩向下运动，直到物体回落到货车的斗箱内，

第 9 帧：5:28: 0 时定义第 9 帧，空载的吊钩回到初始高度；

- 第 10 帧: 6:18: 0 时定义第 10 帧, 臂架收幅至最小幅度;
  - 第 11 帧: 7:18: 0 时定义第 11 帧, 臂架顺时针回转 90°;
  - 第 12 帧: 8:02: 0 时定义第 12 帧, 臂架旋转准备起吊物体;
  - 第 13 帧: 8:23: 0 时定义第 13 帧, 吊钩勾住物体;
  - 第 14 帧: 9:02: 0 时定义第 14 帧, 吊钩回到起吊的初始位置;
  - 第 15 帧: 9:41: 0 时定义第 15 帧, 臂架收幅至最小幅度;
  - 第 16 帧: 12:06: 0 时定义第 16 帧, 臂架逆时针回转 90°;
  - 第 17 帧: 12:16: 0 时定义第 17 帧, 臂架围绕转台坠落;
- 从第 17 帧起, 臂架震荡, 需要根据臂架的位置定义不同的帧。
- 第 18 帧: 12:17: 0 时定义第 18 帧, 臂架向上震荡;
  - 第 19 帧: 12:18: 0 时定义第 19 帧, 臂架向下震荡;
  - 第 20 帧: 12:19: 0 时定义第 20 帧, 臂架向上震荡;
  - 第 21 帧: 12:20: 0 时定义第 21 帧, 臂架静止。

定义动画的总帧数、比例, 以便于控制动画的大小, 当帧数越大时, 产生的动画文件也越大, 并且在渲染时花费的时间也越长, 因此要注意帧数的确定<sup>[44]</sup>。

## 5.8 灯光设置

灯光也是 3dmax 中非常重要的部分, 它不仅可以照明, 还影响材质和纹理的效果。在默认情况下, 3dmax 自动为场景设置了两盏泛光灯, 这两盏灯是不受用户控制的, 不可见也无法改变灯光的位置和参数, 当用户在场景假设了一个灯光物体后, 这两盏泛光灯就会自动关闭。

灯光分为标准灯、光度学灯和环境光源。由于门座式起重机工作的环境设置在码头, 故使用的灯光应该接近日照的效果。3dmax 标准灯中的天光就是用来制作室外效果的。

在 3dmax2010 中单击创建-系统面板, 然后单击“日光”, 选中灯头, 得到天光参数面板。各种参数意义如下:

倍增: 用来设置天光的大小。

天空颜色: 设置天空的颜色, 还可以使用贴图。

渲染: 设置采样光线数、灯光偏移量, 还可以设置天光是否有投影阴影。

打开“整机.max”, 在各个视图中调整天光的位置, 设置天光颜色为淡蓝色。



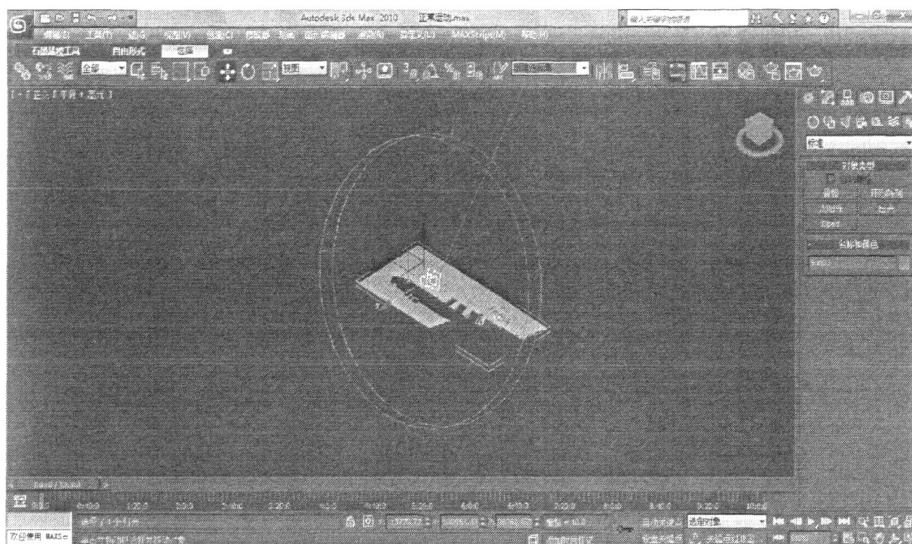


图 5-10 灯光的位置和方向

## 5.9 摄影机设置

3dsmax 中提供两种摄影机，即目标和自由，这两种摄影机的创建完全相同，所不同的是，目标摄影机由起点和目标点构成，起点为摄影机的位置，目标点控制视线方向，常用于创建效果图；自由摄影机只有一个起点，通过旋转起点控制视线的方向，常用于动画场景。虽然本文中要做的是动画，但是由于主要关注的对象为起重机，所以还是选择目标摄影机。

打开“整机.max”，放置一个目标摄影机到视图中，激活摄像机视图，在初始帧时调整摄像机的位置和距离，以观察得到整个起重机运动的角度为宜。



图 5-11 摄像机的起始位置和方向

动画的过程中，为了更清楚的看到事故发生的过程，摄像机的位置也应随着

臂架的运动而发生变化，根据个人的喜好给摄像机的位置和目标定义适当的關鍵帧。

## 5.10 渲染输出

在“渲染场景”对话框中，在“公用参数”卷展栏的“时间输出”组中将“单帧”更改为“活动时间段”<sup>[45]</sup>。这将渲染整个动画。将大小减少为“320x240”。这是更适合于 Web 播放的动画大小。

分别对两个动画进行渲染，在“渲染输出”组中单击“文件”按钮，将要创建的文件命名为臂架坠落碰地.avi 和臂架坠落拉住.avi（用于 Video for Windows 动画）。记下保存该文件的位置。在视频压缩窗口单击“确定”，然后单击“保存”。若要开始渲染，请单击“渲染”。

将出现“渲染”对话框。在渲染每帧时，会有一个进度条显示进度。在渲染进行过程中，可以看到所有类型的信息在“渲染进度”组中更新。

由于本课题中的动画帧的数量较为庞大，故渲染的时间较长。

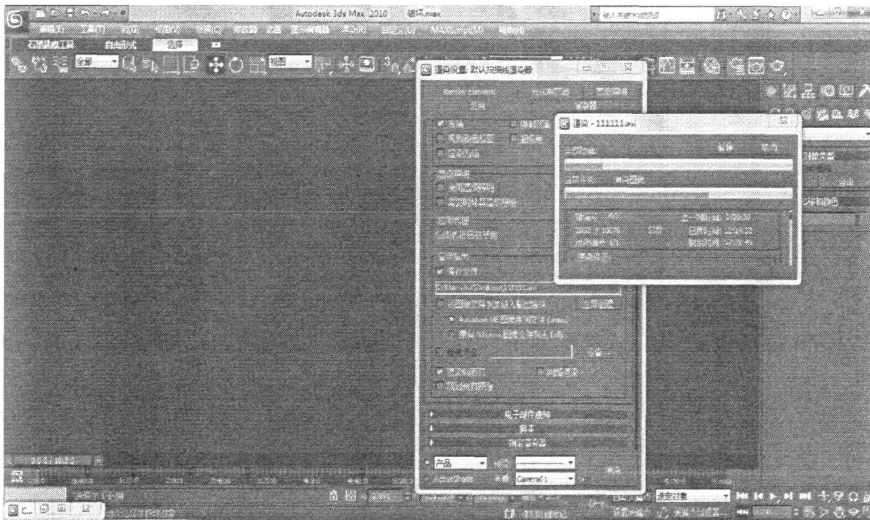


图 5-12 渲染

完成渲染后，关闭“渲染”对话框。在“文件”菜单中选择“查看图像文件”，然后导航到保存该文件的位置并打开该文件。适当的播放器程序将播放动画，做好的动画时间略长，可加速播放或者手动拖动查看。

## 5.11 本章小结

本章介绍了起重机臂架坠落事故的动画制作思路和方法，从模型接口的处理、模型的成组、各组之间添加链接关系、给模型着色和贴图，到动画关键帧的设置和后期动画的渲染，一步步用 3dmax 实现了事故过程的每一个步骤，给人们一个详细直观的认识。

在这一章整个动画的制作过程中，遇到了很多问题，总结如下：

(1) 臂架从 Solidworks 中导入 3dmax 中为可编辑网格，不论是用 FFD 还是移动顶点的位置，都不能进行预想的形变，最终采用重新在 3dmax 中构建臂架的方法解决。

(2) 随吊钩运动的集装箱若链接到转台上，则它会一直随转台往复运动，不符合实际运动规律。应当在货物被货车拖走之后，在视野之外将此集装箱的位置调整到水平面以下，这样转台转回来时集装箱也不在视野中。

(3) 臂架与地面碰撞发生形变的过程，若在臂架与地面碰撞的时刻定义一个关键帧，在碰撞结束时再定义一个形变状态的关键帧，其动画的实际结果都是从起始帧开始发生形变。采用在与地面碰撞的瞬间给臂架所有的杆件都发生一个极为微小的变形，肉眼几乎不可见，这样则可保证从碰撞的时刻开始发生明显的形变。

## 第 6 章 总结与展望

### 6.1 全文总结

门座式起重机是一种重要而又具有代表性的旋转类型的有轨运行式起重机,在无论在港口运输中还是在工业生产过程中都起着重要作用。起重机臂架结构是臂架式起重机的重要承载部件之一,其力学性能对整机的正常运转有直接影响,故障率较高。用仿真平台的形式让臂架坠落这种常见的起重机试过的过程得以再现,通过参数的输入,得到不同情况臂架坠落的动画,可以给人们一个更为直观的印象。

本论文以门座起重机 MQ4599 为研究对象,对该类型起重机臂架坠落事故的过程再现平台进行更深入的研究与开发,以建模软件 SolidWorks 和动画制作渲染软件 3Dmax 为手段,制作了事故发生过程的模拟动画。

本论文的主要工作包括以下几个方面:

(1) 定性分析影响臂架坠落事故结果的参数,在此基础上运用平台开发软件 VC++6.0 搭建人机互动的仿真平台,再现事故发生的过程。

(2) 运用建模软件 SolidWorks 对选定的门座起重机结构进行实体建模并进行装配,处理 SolidWorks 导入 3Dmax 时的接口问题。

(3) 在 3Dmax 中对门座式起重机工作场景和钢丝绳进行建模,对各机构进行成组操作并链接关系。

(4) 分别分析起重机在正常和事故状态下的运动规律,在 3Dmax 中制作整机的关键帧动画,模拟臂架坠落时与地面碰撞或者不碰撞两种情况下的事故过程。

### 6.2 全文展望

由于本人的水平和有限,本论文还存在不尽完善之处,有待于进一步讨论和研究。作者认为可以在以下几方面继续展开工作:

(1) 可以通过 Ansys、Adams 等动力学软件的分析,更为真实的模拟臂架坠落时的情况,以提高事故模拟动画的准确性。

(2) 因为影响起重机臂架坠落事故结果的因素具有很大的复杂性和可变

性，且不同类型的门座式起重机结构也不相同，因此仿真模型的类型也不尽相同，要模拟不同的起重机必须对本文中的仿真模型进行不断的修改和完善，例如，加入四连杆门座式起重机臂架坠落的动画模型，扩充平台的信息量，将平台发展成一个真正通用式的工具。

(3) 在动画的细节方面还可以进一步加强，比如加入各个机构的失效情况的动画，通过摄像机的视角更清晰的看到整个事故发生的原因。

## 致 谢

论文的完成首先要感谢我的导师胡吉全教授，本文是在胡老师的悉心指导下完成的，论文从选题、构思到定稿无不渗透着导师的心血和汗水。在我攻读硕士研究生期间，深深受益于胡老师的关心、爱护和谆谆教导。他作为老师，点拨迷津，让人如沐春风；作为长辈，关怀备至，让人感念至深。能师从胡老师，我为自己感到庆幸。在此谨向胡老师表示我最诚挚的敬意和感谢！

杨艳芳副教授是我的第二导师，杨老师是仿真方面的专家，在专业能力上，杨老师给予我很多指导和帮助，无论是在专业理论还是在工程实践经验上，我都收获颇多，在此，也向杨艳芳导师的无私给予表示感谢！

感谢实验室夏鹏、谷红学、廖哲、袁金虎等各位同窗在课题研究过程中对我的帮助，本论文的完成也有他们的一份关心和支持。

感谢实验室纪岩、胡茂、邓伟明、李哲、成旭金、吴绍强等同门，在学习和生活给予了热情的帮助与鼓励，在此也对他们表示诚挚的谢意和真心的祝福。

最后，对评审论文的各位专家、学者表示衷心的感谢。

## 参考文献

- [1] 杨明亮等.起重机吊装事故状态再现技术的研究 [J].起重运输机械,2010年,12期
- [2] 元文果.基于并行有限元和神经网络的汽车碰撞事故再现分析方法[M].上海交通大学.2006
- [3] 袁泉.交通事故再现的几个关键问题探讨[J].汽车科技.2001年,2期
- [4] 杨兆.交通事故快速再现方法研究[J].长沙理工大学.2006
- [5] 蒲玲玲.汽车-自行车碰撞事故再现及骑车人损伤分析[M].重庆交通大学.2010
- [6] 朱西产.应用计算机模拟技术研究汽车碰撞安全性[J].世界汽车.1997年,3期
- [7] 杨兆等.直角侧面碰撞交通事故再现仿真[J].交通科技与经济.2007年,5期
- [8] 黄靖.汽车碰撞事故再现中车辆运动与乘员损伤的数值模拟研究[M].上海交通大学.2005
- [9] 刘志强.交通事故再现技术研究现状与发展趋势[J].中国安全科学学报.2007年,4期
- [10] Moser A, Steffen H, Kasaniyky G. The Pedestrian Model in PC Crash — The Introduction of Multi Body System and its Validation.[J]SAE199910445
- [11]袁泉等.车辆碰撞事故再现技术研究的现状与发展方向[J].公路交通科技.2002年,2期
- [12] 魏朗, 陈荫三.车对车碰撞事故再现计算机模拟系统的研究.中国公路学报[J]1990, 9(4).
- [13] Cliff W E, Montgomery D T validation of PC — CRASH—A momentum — based accident Reconstruction Program.[J]SAE960885, 1996.
- [14] Mc Henry B G MC Henry R R.SMAC97—Refinement of the collision algorithm.[J]SAE970947, 1997.
- [15]Mc Henry B G MC Henry R R.CRASH97—Refinement of the trajectory solution[J]Procedure.SAE970949, 1997.
- [16]Mc Henry B G,Mc Henry R R.SMAC — 87.SAE88027, 1988.
- [17]贾春华, 肖卫国.虚拟现实技术及其在仿真领域应用的探讨.[J]西安工学院学报.1998, 18(1)
- [18]曾建超, 俞志和.虚拟现实的技术及其应用.北京:清华大学出版社, 1996.
- [19]谌为等.汽车事故中车速计算方法的研究现状及展望[J].科技创新导报.2009年,12期
- [20]王松雷等.起重机伤害事故分析及预防[J].建筑机械: 上半月.2009年,9期
- [21]李剑峰.车辆碰撞事故再现研究 [J]. 计算机仿真 .2006,12
- [22]王景波.四连杆式门座起重机钢结构计算系统研究[J].大连理工大学.2009

- [23]石峰等.国内外起重机制动技术现状及发展趋势[J].山西冶金. 2008 年,2 期
- [24]秦凡.门座式起重机变幅机构的变频调速系统研究[J].武汉理工大学. 2010
- [25]张平等.基于 Pro / E 的起重机械回转支承的建模[J].机械工程师.2008 年,4 期
- [26]井永水等.起重机行走自动纠偏控制器[J].起重运输机械.2005 年,1 期
- [27] 李珩.门座起重机四连杆结构构件的稳定性分析研究[J]. 浙江大学材料与化学工程学院  
浙江大学.2008
- [28]赵殿华等.多点销轴式转台回转自动锁止装置的设计[J].工程机械.2010 年,2 期
- [29]张玉勇.浅析超载限制器[J].计量与测试技术. 2008 年,4 期
- [30]<http://www.gstzsb.com/News/News.aspx?ID=132>
- [31]张芸.桥式起重机常见机械故障分析及预防措施[J].科技信息.2009 年,7 期
- [32]杨嘉祎.起重机常见机械故障分析及预防措施[J].港口科技.2009 年.1 期
- [33]全兰新等.起重机械常见机械故障分析及预防措施[J]中国科技博.2010,年 26 期
- [34]<http://202.201.208.6/download/viewarticle.asp?id=1355>
- [35]仇浩健.操作系统图形用户界面的研究与实现[M]. 南京航空航天大学. 2003
- [36]Rowe, Jeffrey. SolidWorks 2010:analyzing and validating mechanical designs on the fly[J].  
Cadalyst. Volume:22,Issue:8, September, 2005
- [37]刘媛.基于 SolidWorks 的 YH30 液压机参数化设计[M].合肥工业大学,2011
- [38]David Murray. Inside SolidWorks.[M] Albany, NY:Onword press,2000
- [39]Matt Lombard, SolidWorks 2010 Bible, JONE WILEY&SONS INC,2010
- [40]田国富等.基于 SLIDWORKS 和 3DMAX 的成型机快速设计[M]沈阳工业大学学报.2002  
年,5 期
- [41] Zhang, C.F;lu,D.J. Study on a MEMS CAD system based on SolidWorks[J]. Applied  
Mechanics and Materials. Volume:12,Issue:1-2,2008
- [42]许燕.外螺纹斜轧机轧制系建模与数值分析[M].西安建筑科技大学.2005
- [43] Kelly L. Murdock. 3ds Max 2010 Bible[M]. Albany, NY:Onword press,2000
- [44]马凌云,贺洪义,侯川洪.3dsmax 中文版三维动画制作教程[M].人民邮电出版社.2006
- [45]黄剑芳.B12 与 C60 分子球棍模型相互转化动画的制作与启示[J].化学教学.2006 年,2 期