

董明晓 徐书娟 鲁萌萌 著

起重机虚拟操作系统开发 理论与实践

QIZHONGJI
XUNI CAOZUO XITONG KAIFA
LILUN YU SHIJIAN



化学工业出版社

起重机虚拟操作系统开发 理论与实践

董明晓 徐书娟 鲁萌萌 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以起重机虚拟操作系统的开发为例,介绍视景系统的建模理论和技术,以及模型驱动理论和技术。全书主要包括三部分:第一部分系统地介绍了起重机的结构特点和安全操作规范,重点分析了起重机的动力学特性和货物的摆动特性;第二部分重点叙述了构建起重机和工作场景三维实体模型的理论和技术,实现起重机机构运动和场景变换的模型驱动、碰撞检测及碰撞响应的理论和技术,以及提高虚拟操作系统的真实感和运行速度的方法和技巧;第三部分介绍了虚拟操作系统应用程序发布和系统测试的方法。

本书可供高等院校、科研机构等从事机械工程、自动化和计算机应用等专业的师生和研究人员及相关领域的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

起重机虚拟操作系统开发理论与实践/董明晓,徐书娟,鲁萌萌著. —北京:化学工业出版社,2017.1
ISBN 978-7-122-28651-2

I. ①起… II. ①董…②徐…③鲁… III. ①起重机械-计算机仿真-操作 IV. ①TH21-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 308403 号

责任编辑:张兴辉 曾 越

文字编辑:陈 喆

责任校对:王 静

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京云浩印刷有限责任公司

装 订:三河市瞰发装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张10 $\frac{1}{4}$ 字数199千字 2016年12月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:69.00 元

版权所有 违者必究

前言

起重机装卸、搬运货物属于高空危险作业的特种工作，起重机的操作直接影响到人们生命和财产安全。为此，我国对起重机司机的安全技术培训进行了立法，规定新司机必须到省市指定单位参加培训，取得资格证书后方可从事此项工作。目前，我国起重机司机的训练是采用师傅带徒弟的方式来完成的，这种传统的教授方式受人为因素的影响和天气条件的限制，存在着事故率高、培训内容欠规范、效率低等问题，尤其是新手操作，加大了培训工作的危险性。现代科学技术的迅速发展使基于虚拟现实技术开发无起重机械结构和机构，具有与起重机一样的操作功能和真实再现起重机工作过程及场景变化的虚拟设备，在室内对起重机司机进行高素质的训练与考核成为可能。

虚拟现实是一种提出不久而极有发展潜力的新理论和新技术，基于虚拟现实技术开发的起重机虚拟操作系统在国内外还没有被广泛地推广和应用，更没有一部书完整地叙述开发能真实再现起重机操作过程和工作场景的虚拟操作系统的理论和技术。笔者在前人研究的基础上，根据多年来起重机虚拟操作系统开发的研究成果和研究经验，把开发虚拟操作系统的关键理论和技术，以及在开发过程中遇到的问题和解决方案写成这本著作，希望能与正在研究机械工程和虚拟现实技术的同仁共享。

本书从起重机的结构特点和安全操作技术规范着手，通过分析起重机的动力学特性和货物摆动特点，以桥门式起重机、塔式起重机和港口起重机为例详细叙述了开发起重机虚拟操作系统的总体设计和开发流程，重点讨论了构建起重机和工作场景三维实体模型的理论和技术，实现起重机机构运动和场景变换的模型驱动、碰撞检测及碰撞响应的理论和技术，以及提高虚拟操作系统的真实感和运行速度的方法和技巧，最后介绍了系统应用软件的发布和测试方法。

本书的部分工作包括了董明晓的博士学位论文和鲁萌萌（山东

省聊城建设集团)的硕士学位论文的内容,同时参考了徐书娟(临沂市技师学院)硕士学位论文的内容,在本书的编写过程中引用了书后有关文献中的材料和思想,谨向这些文献的作者表示衷心的感谢!在确定书稿的写作思路和写作宗旨方面,北京陆航学院的郑康平博士给予了很好的建议和指导,在此向郑康平博士表示由衷感谢!本书由国家自然科学基金项目(项目编号是51475277)资助出版。

由于起重机虚拟操作系统开发理论和技术是一种提出不久而尚未被广泛应用的技术,还存在着许多有待研究和解决的问题,加之虚拟现实技术知识面宽,属于交叉学科,新的复杂现象不断被人们认识和发现,因此本书的内容尽力跟踪这一领域的进展情况,笔者希望它能起到良好的抛砖引玉的作用。由于笔者学识有限,书中难免存在着不足之处,希望广大读者和同行给予批评指正。

著者

第 1 章 绪论 001

1.1 起重机械简介	001
1.1.1 起重机械的基本类型	001
1.1.2 起重机的基本参数	001
1.1.3 起重机司机的培训教育与考核	004
1.1.4 塔式起重机安全操作考核实例	005
1.2 起重机虚拟操作系统	008
1.2.1 虚拟现实技术	008
1.2.2 虚拟操作系统	009
1.2.3 起重机操作系统开发背景	010
1.2.4 起重机虚拟操作系统的先进性	011
1.3 起重机虚拟操作系统的国内外研究现状及发展趋势	011
1.3.1 国内研究现状	011
1.3.2 国外研究现状	013
1.3.3 国内外发展趋势	014
1.4 起重机虚拟操作系统的关键技术简介	014
1.4.1 起重机动态特性及其在虚拟操作系统中的实现	014
1.4.2 三维实体模型建模技术	015
1.4.3 三维虚拟视景仿真技术	016
1.4.4 三维实体模型的碰撞检测及碰撞响应	016

第 2 章 起重机的结构特点及安全操作规程 017

2.1 桥门式起重机的结构及安全操作规程	017
2.1.1 桥门式起重机的金属结构	017
2.1.2 桥门式起重机运行机构	019
2.1.3 桥门式起重机安全操作规程	019
2.2 塔式起重机的结构特点及安全操作规程	021
2.2.1 塔式起重机金属结构	021

2.2.2 塔式起重机运行机构·····	023
2.2.3 塔式起重机安全操作规程·····	024
2.3 岸边集装箱起重机的结构特点及安全操作规程·····	025
2.3.1 岸边集装箱起重机的金属结构·····	025
2.3.2 岸边集装箱起重机运行机构·····	026
2.3.3 岸边集装箱起重机安全操作规程·····	027

第3章 起重机动力学模型及动态特性分析

030

3.1 桥式起重机动力学模型及动态特性分析·····	030
3.1.1 桥式起重机非线性动力学模型·····	030
3.1.2 桥式起重机实验台及非线性化模型验证·····	033
3.1.3 桥式起重机线性化模型及动态特性分析·····	034
3.2 塔式起重机动力学模型及动态特性分析·····	035
3.2.1 塔式起重机非线性动力学模型·····	035
3.2.2 塔式起重机实验台及非线性化模型验证·····	038
3.2.3 塔式起重机线性化模型及动态特性分析·····	040
3.3 起重机货物摆动误差分析·····	041
3.3.1 模型线性化引起的货物摆动误差分析·····	041
3.3.2 惯性力引起的货物摆动最大幅值估计·····	043
3.3.3 忽略起升运动引起的货物摆动误差分析·····	044
3.4 操作环境不确定性对起重机货物摆动特性的影响·····	046
3.4.1 起吊偏摆引起的货物摆动·····	046
3.4.2 风载荷对货物摆动的影响·····	046
3.4.3 空气阻力对货物摆动的影响·····	048
3.5 门式起重机动力学模型及动态特性分析·····	048
3.5.1 门式起重机非线性动力学模型·····	048
3.5.2 门式起重机线性化模型及动态特性分析·····	049

第4章 岸边集装箱起重机虚拟操作系统总体设计

051

4.1 岸边集装箱起重机操作过程分析·····	051
4.1.1 岸边集装箱起重机运行机构分析·····	051
4.1.2 岸边集装箱起重机装卸船作业过程分析·····	052
4.2 岸边集装箱起重机虚拟操作系统结构设计·····	054
4.2.1 虚拟操作系统功能要求分析·····	055
4.2.2 虚拟操作系统结构组成·····	056

4.2.3 虚拟操作系统操作流程	057
4.3 岸边集装箱起重机虚拟操作系统开发的软、硬件平台	057
4.3.1 系统开发软件	057
4.3.2 系统开发硬件	059
4.4 岸边集装箱起重机虚拟操作系统开发流程	060
4.4.1 开发流程简介	060
4.4.2 开发流程分析	060

第5章 塔式起重机虚拟操作系统总体设计

064

5.1 塔式起重机操作过程分析	064
5.1.1 塔式起重机工作过程	064
5.1.2 塔式起重机操作模式	066
5.2 塔式起重机虚拟操作系统的功能要求	067
5.3 塔式起重机虚拟操作系统结构	068
5.3.1 塔式起重机虚拟操作系统的结构	068
5.3.2 塔式起重机虚拟操作系统的操作流程	069
5.4 塔式起重机虚拟操作系统开发流程	069
5.4.1 系统开发软、硬件平台	070
5.4.2 开发流程简介	071

第6章 岸边集装箱起重机虚拟操作系统三维实体建模理论与技术

074

6.1 建模软件 Multigen Creator 简介	074
6.2 基于 Multigen Creator 软件的建模理论与技术	074
6.2.1 常用建模技巧	075
6.2.2 多自由度 DOF 建模技术	077
6.2.3 模型优化技术	077
6.3 岸边集装箱起重机三维实体模型的创建	078
6.3.1 岸边集装箱起重机主体结构和几何参数	078
6.3.2 岸边集装箱起重机层次结构特点分析	081
6.3.3 创建岸边集装箱起重机几何模型	082
6.3.4 创建岸边集装箱起重机模型自由度节点	085
6.3.5 创建吊装设备几何模型	085
6.4 岸边集装箱起重机虚拟场景模型的创建	086
6.4.1 建模数据采集	086
6.4.2 虚拟场景模型创建	087

7.1 虚拟操作系统三维实体建模准备工作	090
7.1.1 数据采集	090
7.1.2 数据处理	091
7.2 塔式起重机三维实体模型的创建	093
7.2.1 塔式起重机的结构分析	093
7.2.2 塔式起重机建模方案	094
7.2.3 塔式起重机三维实体模型的创建	094
7.3 塔式起重机虚拟场景模型的创建	096
7.3.1 虚拟场景建模方案	096
7.3.2 建筑物模型	097
7.3.3 树木模型	098
7.3.4 山体模型	099
7.3.5 地面、路面模型	100
7.4 用于系统建模的高级建模技术	101
7.4.1 多层次 LOD 建模技术	101
7.4.2 多自由度 DOF 建模技术	101
7.4.3 纹理映射技术	102
7.4.4 公告牌技术	102
7.5 模型数据库优化技术	103
7.5.1 调整数据库层次结构	103
7.5.2 实例化技术	103
7.5.3 减少多边形数量	104
7.5.4 外部引用技术	104
7.6 虚拟场景建模过程中遇到的问题及解决方案	105
7.6.1 蓝边问题及解决方案	105
7.6.2 面闪烁问题及解决方案	105
7.6.3 模型在场景中自由漂移问题及解决方案	106

8.1 Vega 软件简介	109
8.1.1 Lynx 图形界面	109
8.1.2 Vega 的 API 函数	110
8.1.3 Vega 应用程序	111

8.2 Vega 驱动技术	112
8.2.1 Vega 应用程序的执行流程	112
8.2.2 Vega 应用程序的初始化	113
8.2.3 Vega 应用程序的编译	114
8.3 岸边集装箱起重机机构运动的实现	114
8.3.1 大车机构和小车机构运动的实现	114
8.3.2 起升机构运动的实现	115
8.3.3 驾驶室内外多视点的设定	115
8.3.4 集装箱抓取和就位动作的实现	117
8.4 集卡运动的实现	117
8.4.1 集卡路径规划和导航技术	117
8.4.2 集卡运动的实现	118
8.5 虚拟人行走	119
8.5.1 虚拟人行走技术	119
8.5.2 虚拟人行走的实现	119
8.6 动态海洋仿真	120
8.6.1 基于 Vega Marine 模块仿真动态海洋技术	120
8.6.2 动态海洋的实现	121

第9章 塔式起重机虚拟操作系统三维虚拟视景仿真技术

123

9.1 塔式起重机虚拟操作系统模型驱动	123
9.1.1 虚拟场景三维模型驱动	123
9.1.2 塔式起重机三维模型驱动	125
9.2 塔式起重机机构运动的实现	128
9.2.1 塔式起重机联动台的布局	128
9.2.2 起升运动的实现	129
9.2.3 变幅运动的实现	130
9.2.4 回转运动的实现	131
9.2.5 同时起升和回转运动的实现	131
9.2.6 同时起升和变幅运动的实现	132
9.3 货物摆动的实现	133
9.3.1 货物摆动特性的简单描述	133
9.3.2 货物摆动的实现技术及技巧	134
9.4 特殊效果的渲染	135
9.4.1 云层效果的实现	136
9.4.2 昼夜交替效果的实现	137

9.4.3 大雾效果的实现	138
---------------------	-----

第 10 章 三维实体模型的碰撞检测及碰撞响应	141
--------------------------------	------------

10.1 基于 Vega 的碰撞检测原理与技术	141
10.1.1 碰撞检测原理	141
10.1.2 相交矢量方法	142
10.2 碰撞检测分析	142
10.3 碰撞检测和碰撞响应的实现	143
10.3.1 吊具的碰撞检测	144
10.3.2 货物的碰撞检测	145
10.3.3 碰撞响应	146

第 11 章 虚拟操作系统应用程序发布及系统测试方法	148
-----------------------------------	------------

11.1 应用程序发布	148
11.2 系统测试方法	148
11.3 系统性能分析	150

参考文献	151
-------------	------------

第1章

绪论

起重机虚拟操作系统是基于虚拟现实技术开发的能再现起重机操作环境和操作过程用于起重机司机培训与考核的设备。本章首先介绍了起重机的基本类型和起重机司机安全操作培训与考核要求,然后介绍虚拟操作系统的研究现状和发展趋势,最后根据作者多年来开发起重机虚拟操作系统的研究经验和研究成果,论述了开发起重机虚拟操作系统的关键理论和技术。

1.1 起重机械简介

起重机械是一种能在一定范围内垂直起升和水平移动物品的机械,是现代各工业企业中实现生产过程机械化、自动化、提高繁重体力劳动生产效率的重要工具和设备。下面首先介绍起重机的基本类型和基本参数,然后介绍起重机司机的培训与考核要求。

1.1.1 起重机械的基本类型

目前,通常是按起重机的主要用途和构造特征进行分类。按主要用途分类,有通用起重机、建筑起重机、冶金起重机、港口起重机、铁路起重机和造船起重机等;按构造特征分类,有桥门式起重机和臂架式起重机,旋转式起重机和非旋转式起重机,固定式起重机和运行式起重机。运行式起重机又分为轨行式(在固定的轨道上运行)和无轨式(无规定轨道,由轮胎或履带支承运行)。起重机形式多样,种类繁多,起重机按主要用途和构造特征可分为如图 1.1 所示的基本类型。

1.1.2 起重机的基本参数

起重机的参数是表明起重机工作性能的指标,也是设计的依据,起重机的主要

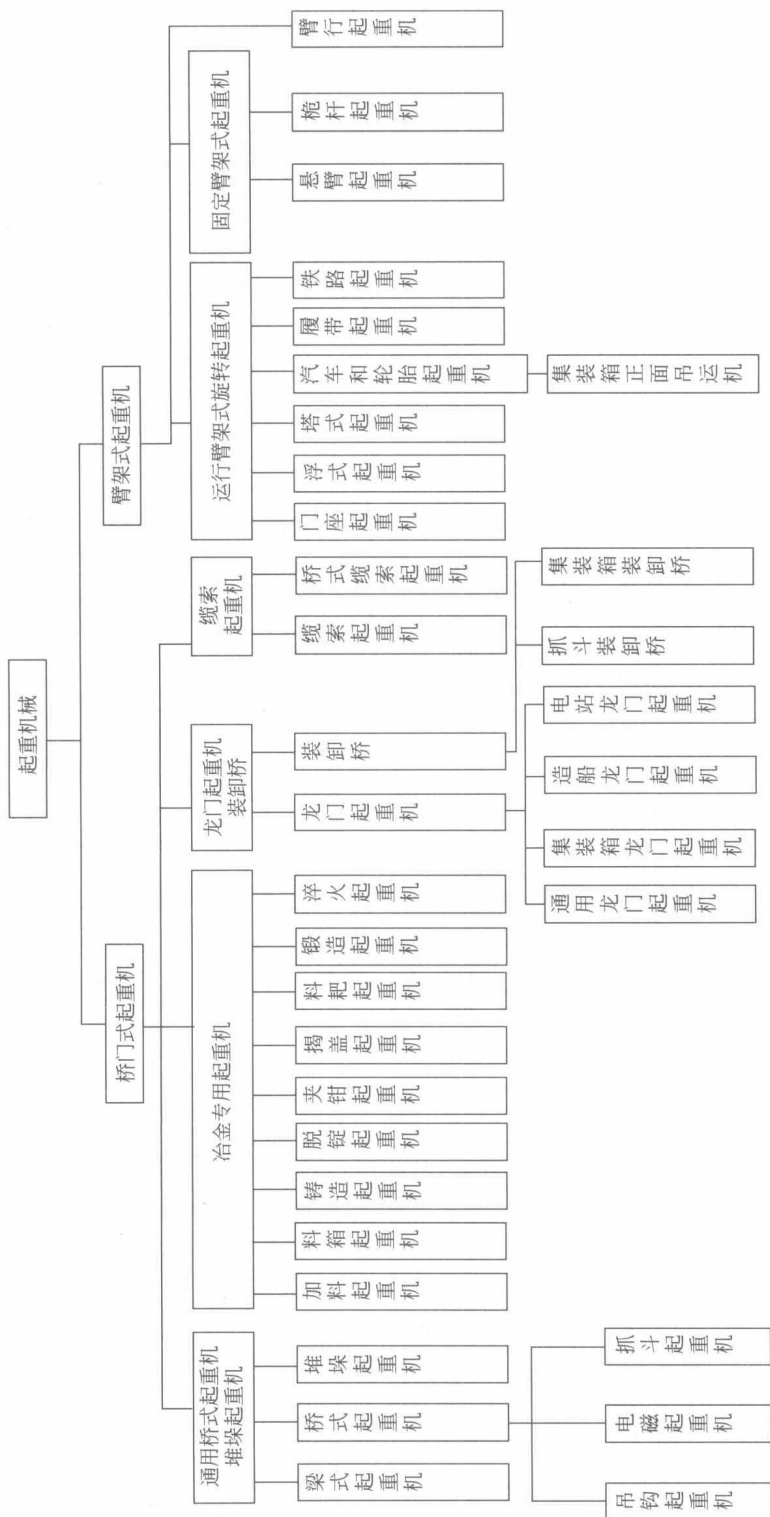


图 1.1 起重机的基本类型

参数如下。

(1) 起重量

起重量是指起重机在正常情况下,被吊物体或移运物体的实际重量,所允许的最大吊起重量称为额定起重量。对于幅度可变的起重机,根据幅度不同规定不同工况下起重机的额定起重量。起重机的额定起重量不包括吊钩、吊环等不可分吊具的重量,但包括抓斗、电磁吸盘、平衡梁、夹钳等可分吊具的重量。

(2) 起重力矩

起重量与幅度的乘积称为起重力矩(载荷力矩)。额定起重力矩是指额定起重量与相对应的幅度的乘积。

(3) 起升高度

起升高度是指起重机运行轨道顶面(或地面)到取物装置上极限位置的垂直距离。另外,还有下降深度和起升范围两个概念:下降深度是指取物装置可以放到地面或轨道顶面以下时,其下放距离称为下降深度,即吊具最低工作位置与起重机水平支承面之间的垂直距离;起升范围为起升高度和下降深度之和,即吊具最高和最低工作位置之间的垂直距离。

(4) 跨度和轨距

跨度是对桥门式类型起重机而言的,它是指起重机运行轨道中心线之间的距离。轨距是指桥门式类型起重机的小车运行轨道中心线之间的距离或者某些地面有轨运行的臂架式类型起重机的运行轨道中心线之间的距离。

(5) 幅度

对可旋转的臂架式起重机而言,幅度是指旋转中心线与取物装置铅垂线之间的距离。对非旋转臂架式起重机常用有效幅度表示,有效幅度是指臂架所在平面内的起重机内侧轮廓线与取物装置铅垂线之间的距离。当臂架倾角最小或小车位置与起重机回转中心距离最大时的幅度为最大幅度,反之为最小幅度。

(6) 工作速度

工作速度是指起重机工作机构在额定载荷下稳定运行的速度。工作速度包括如下几个速度:

① 起升(下降)速度 起升(下降)速度是指起重机在稳定运行状态下额定载荷的垂直位移速度。

② 大车运行速度 大车运行速度是指起重机在水平路面或轨道上带额定载荷的运行速度。

③ 小车运行速度 小车运行速度是指在稳定运动状态下小车在水平轨道上带额定载荷的运行速度。

④ 变幅速度 变幅速度是指在稳定运动状态下在变幅平面内吊挂最小额定载

荷,从最大幅度至最小幅度的水平位移平均线速度。

⑤ 行走速度 行走速度是指在道路行驶状态下流动式起重机吊挂额定载荷的平稳运行速度。

⑥ 旋转速度 旋转速度是指在稳定运动状态下起重机绕其旋转中心的旋转速度。

1.1.3 起重机司机的培训教育与考核

对起重机司机进行培训、教育,是促进起重机司机掌握并提高安全操作技术,确保安全生产,认识起重机的工作规律,合理使用和维护设备的一个很重要的环节。下面主要介绍一些单位在起重机司机培训教育与考核方面的经验和办法。

(1) 司机的培训

① 培训对象 培训对象必须符合下列三个条件:年龄在 18 岁以上;健康条件要无高空、高温禁忌症,无色盲和耳聋(两耳用盲仪测量,距 500mm 能辨别方向),视力不低于 0.4 或矫正视力达 0.7 以上,经过体格检查证明合格者;思想作风好,工作责任心强。

② 培训内容 培训内容包括安全技术理论和安全技术操作两个方面。

a. 安全技术理论:起重机的基本原理、结构、规格和安全装置等,起重机的安全技术操作规程和指挥信号,起重机日常保养、检查和维修常识,起重工地常用工具常识。

b. 安全技术操作:起重机驾驶操作动作,起重机的装卸作业,起重机保养及检修作业。

③ 培训考核 各企业起重机司机均须接受安全技术培训,并通过安全技术考试后发给特种作业操作证。起重机司机学徒及学员除在学习期间接受安全技术教育外,学习期满时还需参加考试。考试不及格者应责令其补习,经一段时间后补考,仍不及格者,以及不认真学习或拒绝教育者,均应考虑适当调换其工作。新任用或调换的起重机司机未经过系统的安全技术培训和考试者,不得单独正式担任起重机的驾驶工作。

④ 培训时间 起重机新司机实习驾驶期为 6 个月,实习驾驶证有效期为一年。在培训期间,不准申领其他种类的起重机学习证。培训人员在培训期间要满 6 个月以上才能参加各种考试,不满 6 个月不能参加考试,不准单独进行操作。

⑤ 培训方式

a. 专人讲课与分头辅导相结合。专人讲课:有组织地集中司机定期上安全技术理论课。分头辅导:可采用订师徒合同,固定跟师傅,现场操作讲解的办法。教练人员必须选择政治思想好、责任心强、技术熟练,能模范遵守安全操作规程,并且有两年以上安全操作经历的职工担任。

b. 进行周期性测验。可按照培训计划, 结合生产实习, 每隔半个月进行一次测验, 也可以分几个阶段进行周期性测验。

c. 组织事故演习。由老师傅布置一些故障, 让实习司机进行检修、排除故障, 以增加学习技术的信心和迅速提高技术水平。做到技术上精益求精, 操作上一丝不苟。

d. 组织实习司机参加地面劳动。了解环境, 熟悉生产操作过程, 体验地面劳动条件, 以加强责任心, 达到互相协作。

e. 定期召开会议。每月召开一次包括起重机司机、指挥人员、小组安全员在内的交流会, 互相交流经验及教训, 共同搞好生产和安全工作。

(2) 起重机司机的安全技术考试办法

① 考试内容 安全技术考试应分为安全技术理论和安全技术操作两个方面。

a. 安全技术理论。以安全技术理论和安全技术操作规程中的重点, 结合生产中的实际问题进行考试。具体内容如下: 所驾驶起重机的基本原理、构造、规格和安全装置等, 起重机的安全技术操作规程, 起重机日常保养、维修和检查常识, 本单位地面常用工具常识和指挥信号。各单位在安全技术理论教育完毕后, 由使用部门按照安全技术内容举行笔试, 不能书写者进行口试。

b. 安全技术操作。起重机正式工作前的空车运转检查, 起重机的安全技术操作, 起重机保养和检修。

② 考试标准和评分办法

a. 安全技术理论考试。安全技术理论考试总分为 100 分, 各部分占分比例如下: 所驾驶起重机的基本原理、构造、规格和安全装置等占 20%, 起重机的安全技术操作规程占 40%, 起重机日常保养、检查和维修常识占 20%, 本单位地面常用工具常识和指挥信号占 20%。

b. 安全技术操作考试。安全技术操作考试总分为 100 分, 各部分占分比例如下: 起重机正式工作前的空车运转检查占 10%, 具体可进行运行前的空车升降、旋转、变幅和前后运行, 以及制动器限位开关的安全检查, 试验、润滑和电气设备的检查; 起重机的安全技术操作占 80%, 各单位可根据具体情况进行操作行驶障碍、吊运物体就位和目测等检验, 考察其动作是否平稳、迅速、安全, 有无违章操作而进行评分, 要求做到稳、准、快、安全、合理, 具体方法和评分可参考《起重机安全技术考试项目》, 但必须选择两个项目的内容进行考试, 得出安全技术操作总分, 起重机的保养和检修占 10%, 检查司机所负责保养的起重机是否清洁、润滑、紧固, 安全装置是否灵敏可靠等保养情况, 结合平时维护保养、排除故障情况进行评分。

1.1.4 塔式起重机安全操作考核实例

塔式起重机司机必须具备塔式起重机理论知识和实际操作能力。判断司机的实际操作能力是否合格, 应依据《关于建筑施工特种作业人员考核工作的实施意见》

(建办质[2008]41号)相关规定,对司机进行6个项目的实际操作考核,即起吊物体定点停放技能、起吊物体运行控制技能、故障识别判断技能、零部件缺陷识别、起重指挥信号识别、紧急情况处置技能。考生在38min内完成全部内容,高于70分者为合格。

(1) 定点停放技能考核

① 以1台QTZ系列固定式塔式起重机为考核工具,起升高度为20~30m。取1只水箱为模拟吊物,水箱外形尺寸1000mm×1000mm×1000mm,吊钩距箱口1000mm,水面距箱口200mm。准备起重吊运指挥信号用红、绿色旗1套,指挥用哨子1只,计时器1个及个人安全防护用品等。

② 考核方法。考生接到指挥信号后,将水箱由A圆吊起,先后放入B圆、C圆内,再将水箱由C圆吊起,返回放入B圆、A圆内,最后将水箱由A圆吊起,直接放入C圆内。水箱由各处吊起时均距地面4000mm,每次下降途中准许各停顿2次。定点停放技能考核场地示意图如图1.2所示。

③ 考核时间为4min。

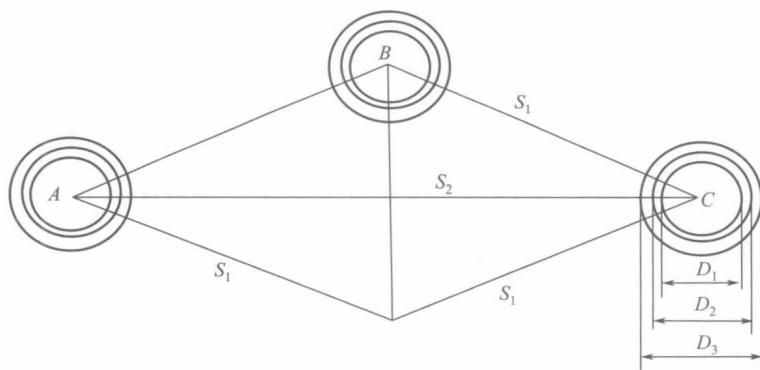


图 1.2 定点停放技能考核场地示意图

(2) 起吊物体运行控制技能考核

① 以1台QTZ系列固定式塔式起重机为考核工具,起升高度为20~30m。取1只水箱为模拟吊物,水箱外形尺寸1000mm×1000mm×1000mm,吊钩距箱口1000mm,水面距箱口200mm。

② 在考核现场内树立标杆23根,每根高2000mm,直径20~30mm。标杆底座23个,每个直径300mm、厚度10mm。

③ 在考核现场内树立柱5根,高度依次为1000mm、1500mm、1800mm、1500mm、1000mm,均匀分布在弧线上。立柱顶端分别立着放置200mm×200mm×300mm的木块。

④ 准备起重吊运指挥信号用红、绿色旗1套,指挥用哨子1只,计时器1个及个人安全防护用品等。