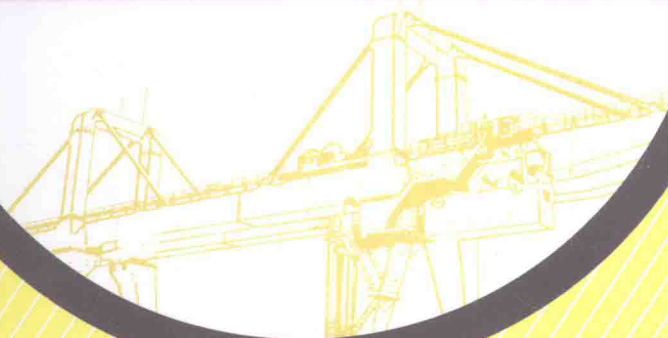


绵阳师范学院学术著作出版基金资助项目

张大鹏 王宴平 著

桥门式起重机

挠度检测与预测



科学出版社

绵阳师范学院学术著作

桥门式起重机挠度检测与预测

张大鹏 王宴平 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从起重机金属结构安全检验检测出发,系统叙述了桥门式起重机金属结构静刚度的检测方法,详细介绍了国内外该领域的发展动向及趋势,着重论述了起重机主梁挠度的预测方法、理论依据及关键技术,其中包括作者及其团队的最新科研成果。本书内容系统、方法新颖、理论推导严谨、实验验证有效。全书分为绪论、基于有限元法的起重机检测系统、基于经典力学桥门式起重机挠度的预测方法、门式起重机支腿弯矩对主梁跨中挠度的影响、基于最小势能原理起重机挠度的计算方法、桥门式起重机结构模型加载试验、基于摄影测量的起重机挠度检测方法、起重机挠度的支持向量机预测方法 8 个章节。

本书可作为起重机设计、制造、使用、质量检验检测部门及结构安全评估等部门工程技术人员的参考用书,也可作为高等院校机械工程、结构工程等专业及结构检验检测相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

桥门式起重机挠度检测与预测 / 张大鹏, 王宴平著.
—北京: 科学出版社, 2017.3
ISBN 978-7-03-049618-8

I. ①桥… II. ①张…②王… III. ①门式起重机—挠
度观测 IV. ①TH213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 196973 号

责任编辑: 张 展 杨悦蕾 / 责任校对: 杨悦蕾
责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码: 100717
<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017 年 3 月第一次印刷 印张: 10 3/4

字数: 220 千字

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

起重机械是国民工业重要的基础设备,应用十分广泛,全国在用的起重机械约 210 万台,其安全问题备受人们关注。我国对起重机实行强制检验制度,在检验桥门式起重机时,主梁在额定载荷下的挠度是检验的重要项目,以此判断金属结构的静刚度是否满足要求。此时需要额定吨数的砝码,大吨位桥门式起重机在这项检验中所需费用昂贵。另外,有时由于使用地点和环境的限制无法进行起重机额定载荷试验测试。若不进行起重机额定载荷试验,则该机的后续使用是非法的,同时也会给安全生产带来巨大隐患。诸如此类情况大量存在,在工程实际应用中,针对检测砝码重量不足的情况,评估起重机结构的静刚度是检测中亟须解决的问题,因此,研究大吨位桥门式起重机主梁挠度的预测方法十分必要,也非常有意义。

传统的起重机主梁挠度预测方法多是线性的,计算精度有待提高。本书针对大吨位桥门式起重机主梁挠度预测方法展开了深入的研究,借助广义刚度概念,采用经典弹性理论、能量法、支持向量机理论和试验研究相结合的方法,考虑了桥门式起重机的加载历程、疲劳程度、使用年限、主梁拱度、走台布置、小车轨道、生产工艺、安装工艺等外部因素对挠度的影响,通过小载荷试验检测结果准确地预测大吨位桥门式起重机主梁挠度。这为大吨位桥门式起重机检验检测及主梁挠度预测提供了具有理论意义和实用价值的方法。

本书共分为 8 章,讨论了桥门式起重机挠度检测与预测方法:第 1 章介绍了起重机械的发展、分类,起重机检测国内外相关技术发展现状和检测的背景及意义;第 2 章介绍了起重机金属结构传统的检测方法和基于有限元法的起重机检测系统,分析了起重机的应力状态及检验测试;第 3 章借助广义结构刚度概念和经典力学理论,提出了三次小载荷法预测桥门式起重机挠度和主梁三位置法预测起重机挠度的方法,并通过实例分析验证了上述方法的正确性;第 4 章在分析起重机挠度影响因素的基础上,基于图乘法计算门式起重机支腿弯矩对主梁跨中挠度的影响,得到了刚度比和支腿惯性矩的变化对主梁挠度影响的规律和两侧支腿惯性矩的变化与主梁挠度的关系,并通过构造拉格朗日函数对实例进行计算,证明上述结论;第 5 章基于最小势能原理,考虑了双刚接支腿门架结构在两侧支腿惯性矩不同的情况下起重机挠度的计算方法,进而在此基础上推导出门架结构刚度问题中存在的楞次定律,得到了挠度的非线性解析解,并分析了结构参数与载荷对主梁挠度影响的灵敏度;第 6 章进行了桥门式起重机结构模型和实物起重机的

加载试验,将试验结果结合前面章节的理论分析,对门架结构理论计算挠度方法进行了比较、分析、讨论,证明了理论计算方法的正确性,同时,分析讨论了门架结构承载后水平侧移量的影响因素及影响门架结构挠度的其他因素;第7章介绍了基于摄影测量进行起重机挠度检测的方法;第8章提出了基于支持向量机起重机挠度的预测方法,着重论述了支持向量机预测模型输入向量预报因子的确定方法,并通过前面章节的试验数据,验证了基于支持向量机挠度预测方法的精准性。

全书主要由绵阳师范学院张大鹏撰写。在本书写作过程中,西南交通大学程文明教授给予了整体性的指导;上海铁路局王宴平参与了第3、4、6章的撰写;同课题组的蔡锐参与了第2章的撰写;肖武能、吴鑫、张双科、贺春红等也付出了大量的劳动;科学出版社在本书的出版过程中给予了许多帮助,在此一并表示衷心感谢。

还要感谢国家质量监督检验检疫总局科技计划项目“大吨位桥门式起重机模拟加载测试分析系统研究”(编号2010QK02)和绵阳师范学院科研项目“机械零部件加载后几何尺寸变形量检测分析系统研究”(编号QD2012A10)对本书出版的支持。

书中引用的参考文献较多,未能一一列出,在此向原作者致谢。由于作者的学术水平和视野所限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 起重机械的发展	(1)
1.2 起重机械的分类	(2)
1.3 起重机检测国内外相关技术发展现状	(5)
1.4 起重机金属结构挠度检测的背景及意义	(9)
参考文献	(11)
第 2 章 基于有限元法的起重机检测系统	(13)
2.1 起重机金属结构的传统检测方法	(13)
2.2 起重机主梁有限元法静力学分析与检验测试	(18)
参考文献	(24)
第 3 章 基于经典力学桥门式起重机挠度的预测方法	(27)
3.1 广义结构刚度理论	(27)
3.2 双刚支腿门式起重机三次小载荷法的挠度预测	(28)
3.2.1 双刚支腿门架结构主梁挠度计算模型	(29)
3.2.2 实例分析	(35)
3.3 三次载荷法在铰接式门式起重机挠度预测中的应用	(37)
3.3.1 铰接式支腿门架结构主梁挠度计算模型	(37)
3.3.2 实例分析	(41)
3.4 桥门式起重机主梁三位置挠度预测方法	(42)
3.4.1 分析影响起重机结构挠度的因素	(43)
3.4.2 主梁下挠值的预测	(47)
3.4.3 实例分析	(50)
参考文献	(51)
第 4 章 门式起重机支腿弯矩对主梁跨中挠度的影响	(52)
4.1 基于图乘法主梁挠度的分析及计算	(52)
4.1.1 水平约束力计算	(52)
4.1.2 载荷和支腿弯矩共同作用下的挠度	(54)
4.2 刚度比和支腿惯性矩的变化对主梁挠度的影响	(55)
4.2.1 刚度比对挠度的影响	(55)

4.2.2 两侧支腿惯性矩的变化与主梁挠度的关系	(57)
4.3 分析与讨论	(58)
4.4 小结	(59)
参考文献	(59)
第 5 章 基于最小势能原理起重机挠度的计算方法	(60)
5.1 最小势能原理	(60)
5.2 双刚接支腿门架结构主梁挠度的计算与分析	(62)
5.3 门架结构刚度问题中的楞次定律	(67)
5.3.1 门架结构挠度的计算与分析	(67)
5.3.2 结构参数与载荷对主梁挠度影响的分析	(74)
第 6 章 桥门式起重机结构模型加载试验	(81)
6.1 试验目的和试验设备	(81)
6.2 试验模型制备	(83)
6.2.1 相似原理与量纲分析	(83)
6.2.2 确定相似系数和试验模型	(84)
6.3 试验方案与试验研究及传感器布置	(86)
6.4 试验结果与讨论	(91)
6.4.1 门架结构理论计算挠度与试验结果的比较分析	(92)
6.4.2 试验中门架结构水平侧移量的分析	(96)
6.4.3 门架结构挠度其他影响因素的分析	(97)
参考文献	(98)
第 7 章 基于摄影测量的起重机挠度检测方法	(99)
7.1 MATLAB 与摄影测量	(99)
7.1.1 MATLAB 简介	(99)
7.1.2 MATLAB 图像处理功能	(100)
7.1.3 数字图像理论	(100)
7.2 图像轮廓线提取	(100)
7.2.1 图片导入和初步处理	(101)
7.2.2 二值图转化	(102)
7.3 边缘检测	(105)
7.4 MATLAB 绘制轮廓图	(107)
第 8 章 起重机挠度的支持向量机预测方法	(109)
8.1 支持向量机和 LIBSVM 工具箱简介	(109)
8.1.1 支持向量机简介	(109)
8.1.2 LIBSVM 工具箱简介	(110)

8.1.3	线性和非线性回归的算法实现	(114)
8.1.4	SVM 及其方法的特点和优点	(118)
8.1.5	CMSVM 简介	(119)
8.1.6	CMSVM 软件和 LIBSVM 工具箱用于预测的研究现状和发展趋势	(120)
8.2	运用 CMSVM 2.0 预测主梁挠度的方法与步骤	(121)
8.2.1	建立 SVM 预报模型及构造预报因子	(121)
8.2.2	数据的规范化处理	(122)
8.2.3	确定核函数和参数选择	(122)
8.3	运用 LIBSVM 工具箱预测主梁挠度的方法与步骤	(124)
8.3.1	建立 SVM 预报模型	(124)
8.3.2	SVM 模型参数优化	(128)
8.3.3	LIBSVM 工具箱的预测结果分析	(133)
8.4	运用 CMSVM 对主梁挠度进行预测	(138)
8.4.1	确定 SVM 模型输入向量预报因子	(139)
8.4.2	建模数据及规范化处理	(142)
8.4.3	SVM 预测模型	(143)
8.4.4	SVM 模型参数优化	(145)
8.4.5	基于 SVM 模型进行挠度预测	(148)
参考文献		(151)
附录		(155)
索引		(161)

第 1 章 绪 论

1.1 起重机械的发展

起重机械的历史在我国最早可追溯到春秋战国时期, 辘轳作为卷扬起升机构, 在春秋战国时期已用于从竖井中提升铜矿石。1974 年, 在湖北铜绿山春秋战国古铜矿遗址发掘中发现木制辘轳轴两根, 其中一根全长 2500mm, 直径 260mm, 经鉴定为用于提升铜矿石的起重辘轳的残件。早期的起重辘轳记载见于南朝宋刘义庆所著的《世说新语》。从最早的简单的卷扬起升机构到现代复杂的大型起重机, 这种机械一直贯穿着人类的生产活动。

自起重机被发明以来, 其结构已经历了两个多世纪的发展与变化, 结构的材料从最原始的木质材料到如今的金属材料, 从之前的小吨位起重机到如今的超大吨位起重机, 从原来的单一作用到如今的多范围、多领域运用, 起重机的结构和性能已经发生了翻天覆地的变化。进入 20 世纪, 由于机械制造业、钢铁冶金业、建筑业和铁路、公路、港口等交通运输业的发展与壮大, 促进了起重机行业的发展与革新。如今, 起重机作为物料搬运的重要组成部分与主力设备, 已经成为需求量十分庞大的搬运机械。同时中国起重机制造业有了新的发展, 已具有相当的规模和水平, 基本形成了全面的产品系列、较好的技术体系和庞大的企业群体, 成为国家装备制造业的一个重要分支(《国民经济行业分类与代码》中起重运输设备制造代码为 C353)。目前国内起重机制造业上规模的企业超过 2000 家, 从业人员超过 40 万人。国内设计的大型起重机有: 中船(中国船舶工业集团)第九设计研究院工程有限公司研发的目前技术最先进的 1800t×234m 门式起重机, 利勃海尔的 LR11200 型 1200t 起重机, 振华重工 2010 年建造的“三星 5” 8000t 起重船, 德马格的 CCI 2600 型 1600t 起重机, 烟台来福士海洋工程有限公司研制的目前世界上起重量最大的 20160t 桥式起重机, 大连重工自行开发研制的 20000t 吊点桥式起重机, 等等。“十一五”期间, 行业累计实现销售收入 12182.57 亿元, 利润总额 811.16 亿元, 年均复合增长率均超过 20%。随着生产规模的扩大、自动化程度的提高, 起重机在现代化生产过程中的应用越来越广, 作用越来越大, 2010 年, 工业行业总产值占 GDP 的比重为 0.34%。起重机械是工业企业的基础设备, 21 世纪是一个新经济时代, 对起重设备的需求也越来越高。国民经济的快速稳定发展, 基础产业的信息化、工业化推进和节能环保可持

续发展战略的贯彻，都为起重机制造业提供了良好的发展机遇。由于现代起重运输机械承担着繁重的物料搬运任务，同时随着科学技术的飞速发展及现代设计制造能力的大幅提高，国际市场竞争日趋激烈与白热化，起重机的技术性能也在逐步提高，并向着大型化、高速化、自动化和智能化方向发展。

1.2 起重机械的分类

起重机械是用于垂直升降或垂直升降并水平移动重物的机电设备，范围上规定为额定起重量大于或等于 0.5t 的升降机，额定起重量大于或等于 3t(或额定起重力矩大于或等于 $40\text{t} \cdot \text{m}$ 的塔式起重机，或生产率大于或者等于 300t/h 的装卸桥)且提升高度大于或等于 2m 的起重机，层数大于或等于 2 层的机械式停车设备^[1-6]。水平移动包括前后左右、水平旋转等。

按特种设备目录分类，起重机械分为 12 类，即轻小型起重设备、旋臂式起重机、桥式起重机、门式起重机、塔式起重机、流动式起重机、铁路起重机、门座起重机、桅杆起重机、缆索起重机、升降机和机械式停车设备，共 83 个品种。按功能和构造特点分类，起重机械分为轻小型起重设备、升降机、起重机和机械式停车设备 4 类，如图 1-1 所示。轻小型起重设备主要包括起重滑车、千斤顶、手动葫芦、电动葫芦和普通绞车，大多体积小、质量轻、使用方便。升降机的特点是重物或取物装置只能沿导轨升降。升降机虽只有一个升降机构，但在升降机中还有许多其他附属装置，所以单独构成一类。起重机根据结构可分为以下几类：①梁式型起重机，包括桥式起重机、门式起重机、悬挂式起重机等；②臂架型起重机，包括固定式回转起重机、塔式起重机、汽车起重机、轮胎、履带起重机等；③缆索型起重机。机械式停车设备是用于存取停放车辆的机械或机械设备系统，是一种机电一体化的成套设备。

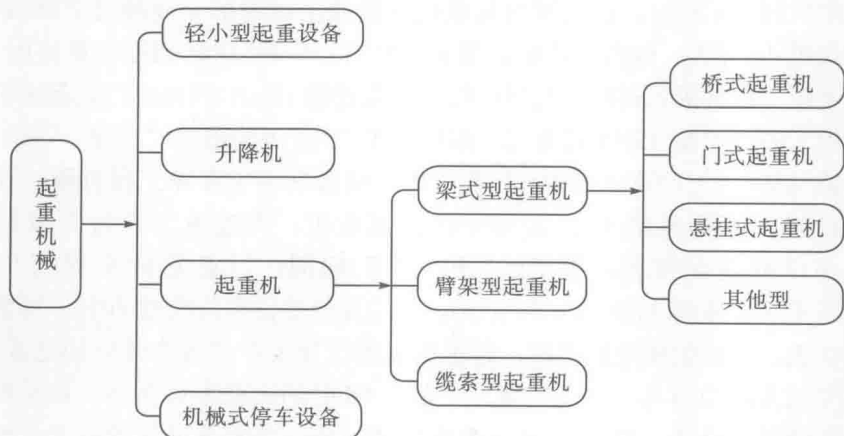
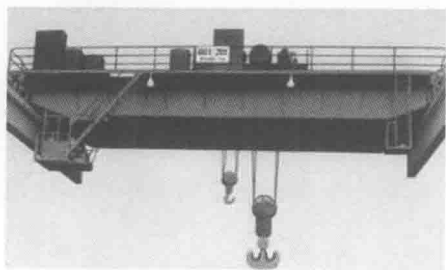


图 1-1 起重机械分类

起重机是起重机械的主体部分。桥式起重机和门式起重机是起重机的重要分支,其应用范围广,起重量范围大。大型桥门式起重机设计技术含量高,操作时通常需要多人协同作业,危险系数高。

桥式起重机和门式起重机属于梁式型起重机的桥架型起重机,其特点是以桥形结构作为主要承载构件。桥式起重机中使用最广泛的有单主梁和双主梁桥式起重机。桥式起重机由桥架和小车两大部分组成,桥架为矩形框架,由四段箱形梁组合而成,其中长的两段为主梁,短的两段为端梁。端梁的端部下面装有车轮,整个桥架由车轮支承,可以沿厂房上空的轨道行走;主梁上面也装有轨道,小车在主梁上面行走,桥架的行走方向是厂房的长度方向,小车的行走方向则是厂房的宽度方向;小车上的卷扬机构收放钢丝绳,牵引着吊钩上下运动,实现对货物的提升。整个起重机直接运行在建筑物高架结构的轨道上。在矩形三维空间内完成物料搬运作业。这类起重机多用于车间、仓库、露天堆场等,如图 1-2 所示。门式起重机是桥式起重机的一种变形^[7,8],它的金属结构像门形框架,也称门架结构,承载主梁下安装两条支腿及下横梁,可以直接在地面轨道上行走,主梁两端具有外伸悬臂梁,外伸到支腿外侧的主梁悬臂部分可扩大作业面积。其主要梁通过支撑在地面轨道上的两个刚性支腿或刚一柔支腿,形成一个矩形三维空间,完成物料搬运作业。门式起重机多用于铁路货站、港口、工业、水利、电力等行业部门,以及集装箱的堆垛和装卸作业,如图 1-3 所示。

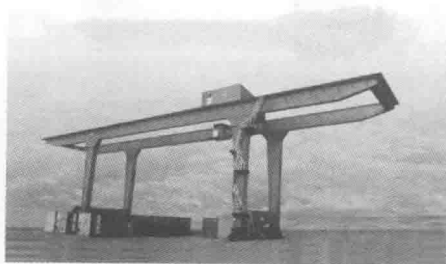


(a)

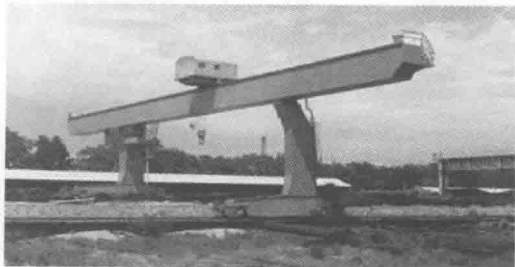


(b)

图 1-2 桥式起重机



(a)



(b)

图 1-3 门式起重机

国家质检总局在国质检锅〔2003〕305号文件中给出了一个型号的含义,并规定起重机械的型式试验以产品型号规格为基本单位进行;之后为了更加明确型号的含义,在型式试验细则中又表述为:型号是指主要结构形式、主要受力结构件材料和关键工艺相同,主要机构符合系列配置要求的一种机型,其代号由产品品种(型式)、结构形式、主要参数组成,并用字母、数字或其组合表示。起重机械产品型号编制方法(推荐)由两部分组成。①一般情况,起重机的型号由产品名称代号、结构型式代号和企业特定代号构成,仅供设计制造、使用、销售、检测、管理等部门使用。产品名称代号用大写印刷体汉语拼音字母表示,结构型式代号由企业根据产品结构型式自行确定,企业特定代号(企业自主选择)采用大写汉语拼音字母表示,推荐采用下标。起重机型号示例:天津××××厂生产的电动单梁起重机,其电动葫芦安装在角形小车上,型号表示为LDP_{TQ}型;武汉××××厂生产的电动单梁起重机,其电动葫芦布置在主梁侧面,型号表示为LDC_{wQ}型。②型号后面的规格(参数)由企业根据相应产品标准中推荐的优先数值表示,若企业产品规格(参数)没有与相应标准中对应的优先数值,由企业自定。例如,起重量16/3.2t,跨度16.5m,工作级别A6的吊钩桥式起重机,其型号表示为QD16/3.2-16.5A6。

根据具体型号,桥式起重机可分为通用桥式起重机、单梁桥式起重机、双梁桥式起重机三种。常见的是通用桥式起重机,是指用吊钩、抓斗或电磁吸盘做取物装置的一般用途的桥式起重机,其分类见表1-1;单梁桥式起重机有装在起重小车上的起升机构、小车运行机构和装在桥架上的大车运行机构三种工作机构,通常为电驱动,一般大车运行轨道为直线,起重机在长方形场地作业;双梁桥式起重机由桥架和起重小车两大部分组成。桥架两端通过运行装置支承在厂房或露天货场上空的高架轨道上,沿轨道纵向运行,起重小车在桥架主梁上沿小车轨道横向运行。

表 1-1 通用桥式起重机分类

序号	名称	小车	代号
1	吊钩桥式起重机	单小车	QD
2	吊钩桥式起重机	双小车	QE
3	抓斗桥式起重机	单小车	QZ
4	电磁桥式起重机	单小车	QC
5	抓斗吊钩桥式起重机	单小车	QN
6	电磁吊钩桥式起重机	单小车	QA
7	抓斗电磁桥式起重机	单小车	QP
8	三用桥式起重机	单小车	QS

门式起重机是桥式起重机的一种变形,它具有场地利用率高、作业范围大、适应面广、通用性强等特点,在港口货场广泛使用。

门式起重机一般根据门架结构形式、主梁形式和吊具形式来分类。

1)按门架结构形式分

(1)全门式起重机:主梁无悬伸,小车在主跨度内进行。

(2)半门式起重机:支腿有高低差,可根据使用场地的土建要求而定。

(3)双悬臂门式起重机:常见的一种结构形式,其结构的受力和场地面积的有效利用都是合理的。

(4)单悬臂门式起重机:这种结构形式往往是因场地的限制而被选用。

2)按主梁结构形式分

(1)单主梁门式起重机:单主梁悬臂门式起重机结构简单,制造安装方便,自身质量小,主梁多为偏轨箱形架结构。与双主梁门式起重机相比,整体刚度更弱。因此,当起重量 $Q \leq 50t$ 、跨度 $S \leq 35m$ 时,可采用这种形式。单主门梁式起重机门腿有 L 型和 C 型两种形式, L 型的制造安装方便,受力情况好,自身质量较小,但吊运货物通过支腿处的空间相对较小。C 型的支脚做成倾斜或弯曲形,目的在于有较大的横向空间,以使货物顺利通过支腿。

(2)双梁桥式起重机:双梁桥式起重机承载能力强,跨度大、整体稳定性好,品种多,但自身质量与相同起重量的单主梁门式起重机相比要大些,造价也较高。根据主梁结构不同,又可分为箱形梁和桁架两种形式。目前一般多采用箱形结构。

门式起重机的型号用代号、额定起质量、跨度、工作级别 4 个主要要素特征来表示,代号含义如下:

M 表示门式类型, M 后加一个符号为双梁门式起重机,其符号有 MG、ME、MZ、MC、MP、MS;加两个符号为单主梁门式起重机,其符号有 MDG、MDE、MDZ、MDN、MDP、MDS。

MG 表示双梁单小车吊钩门式起重机。

ME 表示双梁双小车吊钩门式起重机。

MDN 表示单主梁单小车抓斗吊钩门式起重机。

MDS 表示单主梁小车三用门式起重机。

由于桥式起重机和门式起重机金属结构相近,因此通常将桥式起重机和门式起重机(以下统称桥门式起重机)放在一起进行金属结构刚度的研究。

1.3 起重机检测国内外相关技术发展现状

桥门式起重机金属结构静刚度的评估是通过对主梁挠度的检测来实现的。刚度是指受外载荷作用的材料、构件或结构抵抗弹性变形的能力。强度是材料在外

载荷作用下抵抗永久变形或破坏的能力。强度强调的是原始物性,即在一定受载模式下材料对外载荷的本征抗性,也就是材料内部结构的键合性对外载荷的抗性;刚度强调的是服役物性,即在一定受载模式下材料对外载荷的形态抗性,也就是材料宏观形态对外载荷的抗性。

桥门式起重机承受额定载荷(以下简称额载)时主梁跨中(悬臂端)的挠度是桥门式起重机整机试验极为重要的检测指标。挠度(英语: deflection, 德语: durchbiegung, 法语: la flèche)指结构构件的轴线或中性层面由于弯曲引起垂直于轴线或中性层面方向的线位移。对于桥门式起重机,挠度是指小车在主梁跨中(悬臂端),在额载下,主梁跨中(悬臂端)向下产生的弹性变形量,从加载前实际位置计算,也叫下挠度或下挠值。挠度在检测时通常指的是正值。在计算过程中,由于垂直坐标轴方向的选取不同,挠度的计算值有时是负值。本书中在论述检测时仍沿袭惯例取挠度为正值,在计算时为了与材料力学、弹性力学等有关教材保持一致,取垂直坐标轴向上为正方向,故取挠度值为负值,即挠度的相反数。桥门式起重机结构的静刚度通常是针对某一点(或几个点)而言的,即通过某一点(或几个点)所受的外载荷与外载荷作用下的位移之比来描述静刚度。

起重机的安全检测始于 19 世纪 70 年代,经过 100 多年的发展,在检测手段和检测技术上都有了相当大的进步。很多国家和机构,如美国机械工程师协会(ASME)、中国特种设备检测研究中心(CSEI)、德国技术监督协会(TUV)、英国技术联合会(AOTC)等,都制定了相应的检测方法和检测标准^[9]。我国通过对起重机采取强制性检验检测的办法来评估起重机服役的安全状态与可靠性。对起重机结构安全状态与可靠性的评估^[10]多从刚度和强度两方面进行。通常采用静态方法,即利用动态系数将动态问题转化为静态问题处理,然后根据相关的经验公式和同类产品的相关资料进行计算。虽然这样可以得到初步的评价结果,但是并不能准确地反映出起重机械在各个工况的动态性能及遇到突发工况时对起重机运行状态的影响^[9,10]。桥门式起重机的检测主要还是采用比较传统的检测方法^[11],即利用试验砝码对金属结构进行检测。

目前国内外常用的几种检测方法如下:

桥门式起重机的主梁下挠度、静刚度等安全参数的检测,早期主要采用拉丝测量法^[12]、水准仪法^[13]等。目前国内主要采用光学仪器测量法,如经纬仪法、全站仪法、激光准直仪法、激光测距仪法^[14]、近景摄影测量法^[15]等。

将金属制成规范的重块,用于大型桥门式起重机载荷试验^[15],采用金属重块试验法,简便易行、安全可靠。太原重机设计研究所结合葛洲坝多台起重机成功应用此法。参考文献^[16]介绍了一种起重机起升机构载荷试验台。它由试验对象产生试验载荷,无需专用吊具和试块,试验装置的基础承载能力要求低,可安装于一般制造车间,适用于制造监督检验。参考文献^[17]针对 MYD2500T/100M 门式液压可变幅起重吊运系统研制了全新的负荷试验工艺。采用“全高直

立上下对拉加载,吊点处安装测力传感器监测加载数值”评价法进行载荷试验,载荷动力由设备自身的液压提升机构提供,载荷值的大小由测力传感器监测。经过实践,起重载荷真实可信,载荷数值计量准确,保证了设备法定验收检验的顺利完成,使相应机构和受力构件的承载能力得到了检验证实,为设备以后的使用提供了依据。山东建筑工程学院于承新和武汉测绘科技大学徐芳等利用数字相机进行了钢结构的变形监测^[18],得到了与经典钢架力学分析相同的结果,成功地反映了钢结构的受力变形状况。同济大学程效军、杨世渝采用近景摄影测量法对匀矿取料机的梁体进行了变形监测^[19],中国矿业大学高井祥等对近景摄影测量法进行了理论误差分析和精度评定的理论分析^[20],证实了该方法检测小变形体的可行性。

国外对桥式起重机的安全检测主要着眼于对金属结构(主梁、端梁等组成桥架的主要构件)健康状况和疲劳状况的监测。Ma 和 Asundi^[21]采用光纤偏振传感器(FOPS)和光纤弯曲传感器(FOCS)对带不同裂纹的金属铝梁进行了整体健康监测。将传感器粘贴在铝梁底面中心,试件的刚度下降和含裂纹梁的损伤程度分别采用静态损伤因子(SDF)和动态损伤因子(DDF)来描述。试验结论表明,两类传感器都可以作为结构整体健康监测的定量监测元件。Hale^[22]采用光纤传感器进行了对金属结构疲劳裂纹监测的研究工作。将光纤用高模量黏接剂粘在结构表面,然后用电子红外衰减检出装置检测光的衰减。如果用钨灯代替红外光源,则可由纤维断裂逸出的可见光清楚地显示出裂纹位置。Lee 等^[23]也采用基于强度的光纤传感器(IOFS)研究了由循环载荷引起的低碳钢疲劳裂纹扩展的监测问题。试件裂纹的起始长度为1mm,其采用MTS液压试验机对试件施加频率为4Hz的正弦波形循环载荷。IOFS将采集的数据经过A/D转换后传送给计算机,计算机再将分析结果在监视器上实时地显示,从而实现钢板疲劳裂纹扩展的实时监测。ICH Inose K. 等^[24]也通过类似的方法,采用光纤传感器研究了由循环载荷引起的钢结构破坏区域的监测问题。综上所述,国外使用光纤传感器等智能结构对起重机金属结构进行变形监测取得了一些阶段性研究成果。澳大利亚墨尔本大学的Clive S. Fraser 和德国不伦瑞克大学的Bjorn Riedel^[25]使用三台CCD摄像机,完成了对钢主梁从1100℃降温到室温期间的变形监测,其精度为 $\pm 1\text{mm}$;2002年,澳大利亚科廷理工大学的T. Whiteman 等^[26]利用两台实时摄像机测出混凝土梁在破坏试验中竖直方向上的变形,其精度为 $\pm 0.25\text{mm}$;2007年,英国纽卡斯尔大学的M. P. Lightfoot 等^[27]使用数码相机,成功完成了对金属板焊接过程中变形的监测,其精度高达 $\pm 0.02\text{mm}$ 。

美国J. Jurenka 申请的实用新型专利^[29]介绍了一种起重机试验载荷测试的平台,该测试平台由四纵框架、升降机构和测试设备三个基本构件组成。测试平台起重机设备通过铰链等安装在底座平台上,该底座平台装有砝码和测试设备,在起重机的主梁中间安装一个升降装置和测试装置。通过升降装置吊着起重机,起

重机吊着砝码,然后通过传感器测试起重机的应变。该试验平台的底座可实现快速安装,而底座上安装的砝码可根据要检测的起重机进行增加或减少,从而实现不同载荷起重机的检测要求。

预测挠度需要分析与计算结构的竖向刚度。结构性能的评价依赖于对结构的力学分析与计算,而分析结果的精确性在一定程度上取决于结构构件力学模型的精度和非线性全过程跟踪算法的可靠性和稳定性,合理的力学模型应该符合实际构造且能考虑影响结构性能的各种因素。完备的结构分析理论应该对框架结构自身变形引起的几何非线性、结构钢本构关系的非线性、弯扭屈曲变形、剪切变形、刚性节点连接、翘曲变形、局部屈曲等影响因素给予精确的考虑^[30,31]。

中国台湾高雄海洋科技大学吴佳璋教授提出根据起重机在实验室的动态特性建立起重机的有限元模型。首先,有限元模型和试验模态测试的起重机同时建立连接负载和测试耦合进行可实现更好的试验结果。然后,根据试验结果修改有限元模型。试验结果表明,新的修正有限元模型可以取代起重机相应的铰链和弹簧,可以更加精确地预测起重机的振动特性。

检测结构在某一载荷下的应力状态,对于推测结构的承载阈度和预测起重机主梁下挠度至关重要,同时,开展无损检测是保障起重机安全运行的重要手段。近年来,声发射技术在压力容器、航空航天等行业的无损检测中得到了广泛应用,与超声、磁粉、射线、渗透等常规无损检测方法相比,它具有对活性缺陷敏感、一次试验中可对被检结构件或设备进行整体检测、检验周期短、效率高等优点,但对于起重机的无损检测,目前还处于起步阶段。吴占稳^[32]对起重机工作过程中的各种典型声发射源特性及识别方法开展了研究。利用声发射有效值电压(RMS)曲线和能量率曲线能清晰地观察到屈服点,也能观测到焊缝试件拉伸过程的多次屈服现象,Q345 钢焊缝试件的双屈服现象尤为明显,而这些现象在应力应变曲线中不能反映。通过大量试验,获取声发射源典型特性确定主梁上的声发射源位置,系统研究了起重机工作现场的声发射源特性,寻求有效的声发射源识别方法。C. Holst 等^[33,34]通过试验对门架结构变形及主梁挠度进行了研究。

美国起重机标准主要由美国机械工程师学会 ASME B30 索道、起重机、臂架式起重机、提升机、吊钩、千斤顶和吊索安全标准委员会起草制定,颁发为 ASME 标准,再经 ANSI 认可颁布成为美国国家标准。与我国相比^[9],美国既没有强制性的起重机标准,联邦政府也没有统一的起重机安全监督法规,只有美国职业安全卫生法及其授权制定的劳动安全卫生规章规定了劳动作业场所中有关起重机的具体要求。美国联邦政府劳工部职业安全卫生管理局(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)负责职业安全卫生法及其授权制定的劳动安全卫生规程的监督执行,各个州得到 OSHA 的批准,可实行自己的劳动安全卫生法规。

1.4 起重机金属结构挠度检测的背景及意义

随着现代化大规模生产的发展,桥门式起重机作为主要的物料运输机,已经广泛地应用于铁路货站、港口码头、生产车间、储运仓库等国民经济生产的各个部门。起重机作业有如下特点。①吊起的货物具有很高的势能。被搬运的物料个大体重、种类繁多、形态各异(包括成件、散料、液体、固液混合等物料),起重搬运过程中重物在高空悬吊。②起重作业是多种运动的组合。四大机构组成多维运动,体形高大的金属结构整体移动,结构复杂、形状不一、运动各异。速度多变的可动零部件形成起重机械的危险点多且分散的特点,给安全防护增加了难度。③作业范围大。金属结构横跨车间或作业场地,高居其他设备、设施和施工人群之上,起重机带载后可以部分或整体在较大范围内移动运行,使危险的影响范围加大。④多人配合的群体作业。起重作业的程序是地面司索工捆绑吊物、挂钩;起重司机操纵起重机将物料吊起,按地面指挥,通过空间运行,将吊物放到指定位置摘钩、卸料。每一次吊运循环,都必须多人合作完成,无论哪个环节出问题,都可能发生意外。因此必须执行呼唤应答制度。⑤作业条件复杂多变。在车间内,地面设备多,人员集中;在室外,受气候、气象条件和场地限制的影响,特别是流动式起重机还涉及地形、周围环境等多因素的影响。总之,重物在空间的吊运、起重机的多机构组合运动、庞大金属结构整机移动性,以及大范围、多环节的群体作业,使起重作业中不安全因素多,安全问题突出。根据美国劳工部统计局(Bureau of Labor Statistics, BLS)2008年7月发布的统计数据^[36],2006年起重机械事故造成全国72人死亡,2003~2005年起重机械安全事故平均死亡78人/年。2008年3月15日,美国纽约曼哈顿发生起重机坠落事故,导致4人死亡,10人受伤。同年5月30日,纽约1架起重机垮塌,导致2人死亡。纽约2个半月内连续发生2起起重机垮塌事故^[37-39]。2007年4月18日,发生在我国辽宁省铁岭市清河特殊钢有限公司的一起起重机械事故造成32人死亡,损失重大。根据国家质检总局公布的数据,近几年(2011~2015年)我国发生的起重机械事故有352起,每年度起重机械在用台数(万台)、全国起重机械事故数(起)、特种设备事故总数(起)、特种设备事故中死亡人数(人)、起重机械事故占特种设备事故总数的比例及起重机械死亡人数占特种设备事故中死亡人总数的比例,列于表1-2。从表1-2中可以看出,起重机械事故在8类特种设备^[1]事故中占的比例较高,人员伤亡比例较大。2015年,起重机械事故占特种设备事故总数的比例和起重机械死亡人数占特种设备事故中死亡人总数的比例较上一年相比,又有了大幅上升。