

学校编码: 10384 分类号__密级__

学号: X2009182003 UDC__

厦 门 大 学

工 程 硕 士 学 位 论 文

桥式起重机钢结构分析检测与延寿措施研究

Bridge crane steel structure reliability analysis and life
extension measures research

何国军

指导教师姓名: 吴榕 副教授

专 业 名 称: 机电工程系

论文提交日期: 2013 年 4 月

论文答辩时间: 2013 年

学位授予日期: 2013 年

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 年 4 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：何国军

2013年 4月 15日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：何国军

2013年4月15日

摘 要

近年来，随着港口集装箱运输行业的不断发展，水路运输已经成为运输业的主流。各港口建设规模越来越大，运输船舶越来越大型化，也带动了港口集装箱装卸设备的兴起。据统计，目前全世界约有 2000 多台港口桥式起重机（简称“桥吊”），其中约 70%均由中国上海振华重工（集团）股份有限公司生产制造。

桥吊的一般设计使用寿命为 20 年，而实际上，为节约成本，最大限度的发挥设备的使用价值，使用单位使用该类型设备的时间远远超过设计寿命。比如，漳州港两台由日本日立公司 1976 年制造出厂的桥吊，已经使用 36 年，至今钢结构性能仍然较好。事实上，全世界的港口机械协会或者管理机构均未对港口集装箱起重机的报废提出一个标准。一方面需要提高港机设备的使用价值，另一方面，目前，又必须保证港机设备作业的安全可靠。中国港口机械协会正组织北京水运研究所和上海振华重工草拟港口机械报废的标准。

本文基于有限元理论和起重机动力学理论，以有限元分析软件 ANSYS 为平台，重点对桥吊桥架结构进行模态分析和瞬态动力学分析，并采取对钢结构进行检测的手段，实现对港口桥式起重机的钢结构安全性和使用寿命判断，并采取有效措施延长设备使用寿命，规避安全风险。本文主要研究内容如下：

1. 理论分析：

根据起重机动力学理论，建立了相关动力学模型，并对桥架结构进行动态性能分析（包括固有频率、振型以及动应力）的分析。

2. 钢结构检测：

对主要金属结构焊缝进行超声波探伤，对主要金属结构板厚检测，对主梁下挠度检测，对主要承载结构静应力检测，对主要承载结构动应力检测，对主要受力构件的疲劳寿命测试和疲劳寿命估算。

通过数据建模理论分析和对机械设备现场实际检测结果，能够实现实施掌控机械设备的钢结构性能状况，并可根据检测出的问题，采取有效措施，延长设备使用寿命。

关键词：桥架结构； ANSYS； 桥式起重机； 检测； 延寿。

Abstract

In recent years, with the continuous development of the port container transportation industry, water transport has become the mainstream of the transport industry. The increasing of the port construction, transport ship more and more large-scale, has also led to the rise of the port container load handling equipments. According to statistics, more than 2,000 cranes around the world (referred to as the "Quay Crane"), of which approximately 70% were manufactured by Shanghai ZhenHua Heavy Industry (Group) Co., Ltd.

The general Quay Crane design life is 20 years. In fact, to save costs, maximize the value in use of the equipment, the use of the unit using the time far exceed the design life of this type of equipment. For example, at ZhangZhou Port, two cranes manufactured by Hitachi of Japan in 1975 has been used for 36 years, the structure performance is still in good condition. In fact, the world's port machinery association or management agencies were not proposed a standard in terms of container crane scrapped. The Port Machinery Association of China is organizing with the Beijing the water transport Institute and the Shanghai Zhenhua Heavy Industries draft the standard.

Based on the theory of finite element theory and crane dynamics, finite element analysis software ANSYS platform, focusing on the modal analysis of the crane bridge structure and transient dynamics analysis, and take the steel structure detection means measured realize the Harbour Bridge, to judge the steel structure of the crane safety, reliability and life, and to take effective measures to extend the life of equipment, to avoid security risks. The main contents are as follows:

1. Theoretical analysis:

Crane dynamics theory to establish the related dynamics model, and the bridge structure dynamic performance analysis (including inherent frequencies, mode shapes,

as well as the analysis of the dynamic stress).

2. Steel structure detection:

The main metal structure through weld ultrasonic testing, the plating thickness detection of the main metal structure, the main beam deflection detection of the main load-bearing structure of static stress testing, detection of dynamic stress of the main load-bearing structure, the main force component fatigue life test as well as fatigue life estimation.

Through the analysis of data modelling theory and actual test results of mechanical equipment, that able to achieve the implementation of the real time control of the steel structure of the mechanical equipment performance status, and can detect the problem and take effective action to extend the life of equipment.

Keywords: bridge structure; the ANSYS; steel structure detection; life extension.

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究目的和意义	1
1.2 国内外相关研究动态	2
1.2.1 动力学分析理论及应用	2
1.2.2 机械系统建模与动态分析应用软件简介	7
1.2.2.1 动态系统建模与仿真分析软件——simulink	7
1.2.2.2 基于有限元的大型结构建模与仿真分析软件——ANSYS	8
1.2.2.3 机械系统动力学仿真分析软件——ADAMS	9
1.2.3 模态分析理论及 ANSYS 在模态分析中的应用和发展	9
1.3 课题研究内容	11
第 2 章 动态设计理论和有限单元法	12
2.1 动态设计的基本理论	12
2.1.1 机械结构振动系统数学模型的建立	14
2.1.2 振动系统的求解方法	15
2.2 有限元法理论	19
2.2.1 有限单元法概述	19
2.2.2 有限元法的发展及其在各领域中的应用	20
2.3 机械结构动力分析的有限元方法	22
2.3.1 结构系统的运动方程	22
2.3.2 结构动力响应的数值计算方法	25
2.4 本章小结	28
第 3 章 起重机金属结构动力分析	29
3.1 起重机动力学问题	29
3.2 起重机动力载荷和动力系数的概念	30
3.3 重物悬吊在空中起动和制动时的动载荷	31
3.4 ANSYS 软件简介	32
3.4.1 有限元分析与 ANSYS	32
3.4.2 ANSYS 软件的特点	33
3.4.3 ANSYS 软件的计算分析过程	34
3.5 本章小结	36
第 4 章 钢丝绳弹性对桥式起重机桥架结构动态特性影响分析 ..	37

4.1 ANSYS 进行模态和瞬态分析的基本过程	37
4.1.1 ANSYS 模态分析简介	37
4.1.2 ANSYS 瞬态分析简介	39
4.2 有限元分析中钢丝绳滑轮的处理	41
4.3 考虑钢丝绳振动情况下桥架结构的动态特性分析	42
4.3.1 钢丝绳滑轮组的模态分析	43
4.3.2 钢丝绳滑轮组动态激励力计算	45
4.3.3 桥架结构的静态计算和模态分析	46
4.3.4 考虑钢丝绳振动下桥架结构得瞬态振动分析	50
4.4 本章小结	53
第 5 章 桥式起重机起制动时的动态分析	54
5.1 上升启动工况	54
5.2 上升制动工况	56
5.3 结果分析	57
5.4 本章小结	57
第 6 章 桥式起重机钢结构检测	58
6.1 QC01 桥式起重机主要技术参数	58
6.1.1 桥式起重机主要技术参数	58
6.1.2 桥式起重机主要工作机构性能参数	59
6.2 主要金属结构超声波探伤	60
6.3 主要金属结构板厚检测	61
6.4 主梁下挠度检测	65
6.4.1 测试目的	65
6.4.2 测试工况	65
6.4.3 下挠度检测结果	65
6.5 主要承载结构静应力检测	65
6.5.1 测试目的	65
6.5.2 测点布置	66
6.5.3 测试工况	66
6.5.4 检测结果	68
6.5.5 结果分析	70
6.6 主要承载结构动应力检测	70
6.6.1 测试目的	70
6.6.2 测点选择	70
6.6.3 测试工况	71

6.6.4	检测结果.....	71
6.6.5	结果分析.....	72
6.7	主要受力构件的疲劳寿命测试和疲劳寿命估算	75
6.7.1	现场数据采集.....	75
6.7.2	数据统计后处理分析.....	76
6.7.3	金属结构进行寿命估算.....	76
6.7.4	结论.....	83
6.8	本章小结.....	83
第 7 章	钢结构延寿措施.....	84
7.1	钢结构日常维护保养措施.....	84
7.2	钢结构维修、加固措施.....	84
7.2.1	海、陆侧联系横梁与大梁连接部位的修复方案.....	85
7.2.2	海侧、陆侧上横梁内机加强.....	85
7.2.3	小车架主结构加固	86
7.2.4	司机室加固方案.....	87
第 8 章	结论与展望	88
	参考文献	90

厦门大学博硕士学位论文库

Table of Contents

Chapter1 Introduction	1
1.1 Research topics and sources.....	1
1.2 Study on the dynamic issues associated with.....	2
1.2.1 Dynamics analysis theory and its application.....	2
1.2.2 Software modeling and dynamic analysis.....	7
1.2.3 The development of modal analysis and ANSYS.....	9
1.3 Research content.....	11
Chapter2 Dynamic design theory and finite element method..	12
2.1 The basic theory of dynamic design.....	12
2.1.1 The basic theory of dynamic design.....	14
2.1.2 Method of solving vibration system.....	15
2.2 The theory of finite element method.....	19
2.2.1 Overview of the finite element method.....	19
2.2.2 Development of finite element method and application.	20
2.3 Finite element method for dynamic analysis.....	22
2.3.1 The equations of motion of the structural system....	22
2.3.2 Numerical method for calculating the dynamic response	25
2.4 Summary.....	28
Chapter3 Introduction to dynamic analysis and ANSYS ...	29
3.1 Dynamics problem.....	29
3.2 The concept of dynamic loads and dynamic coefficients....	30
3.3 Dynamic load weight during starting and braking.....	31
3.4 ANSYS software.....	32
3.4.1 Finite element analysis and ANSYS.....	32
3.4.2 The features of ANSYS software.....	33
3.4.3 Calculation of ANSYS software analysis process.....	34
3.5 Summary.....	36
Chapter4 The influence of wire rope on the dynamic characteristics of bridge structure	37

4.1 The basic process of ANSYS modal and transient analysis...	37
4.1.1 ANSYS modal analysis.....	37
4.1.2 ANSYS transient analysis.....	39
4.2 The finite element analysis of the steel wire rope pulley	41
4.3 Analysis of dynamic characteristics of the steel wire rope vibration under consideration.....	42
4.3.1 Modal analysis of the steel wire rope pulley block....	43
4.3.2 The calculation of drive force of steel wire rope pulley group dynamics.....	45
4.3.3 Static analysis and modal analysis of the bridge structure	46
4.3.4 Considering the transient vibration of bridge structure, steel wire rope vibration.....	50
4.4 Summary.....	53
Chapter5 Dynamic analysis of braking	54
5.1 Hoist starting.....	54
5.2 Hoist braking.....	56
5.3 Resluts.....	57
5.4 Summary.....	57
Chapter6 Steel structure of bridge crane detection	58
6.1 QC01Main technical parameters.....	58
5.1.1 Main technical parameters.....	58
5.1.2 Main working technical parameters.....	59
6.2 Ultrasonic inspection.....	60
6.3 Thickness measurement.....	61
6.4 Measure the deflection of girder.....	65
5.4.1 The purpose of testing.....	65
5.4.2 Test conditions.....	65
5.4.3 Deflection test results.....	65
6.5 The main bearing structure static stress test.....	65
5.5.1 The purpose of testing.....	65
5.5.2 The arrangement of measuring points.....	66
5.5.3 Test conditions.....	66
5.5.4 Resluts.....	68
5.5.5 Conclusion.....	70

6.6 Bearing structure dynamic stress test	70
5.6.1 The purpose of testing.....	70
5.6.2 The arrangement of measuring points.....	70
5.6.3 Test conditions.....	71
5.6.4 Resluts.....	71
5.6.5 Conclusion.....	72
6.7 Estimation of fatigue life test and fatigue life	75
5.7.1 Data capture.....	75
5.7.2 Data analysis.....	76
5.7.3 Life estimation.....	76
5.7.4 Conclusion.....	83
6.8 Summary	83
Chapter7 Life extension method	84
7.1 Daily maintenance measures	84
7.2 Repair and reinforcement measures	84
Chapter8 Conclusion and Prospect	88
Appendix	90

第1章 绪论

1.1 课题研究目的和意义

多年以来,港口起重机设计大都将静强度作为主要设计准则,目前在起重机结构设计中,通常以动载系数的方法来考虑其在工作时所受的动载荷作用,即将静载荷增大一定的倍数作为等效的动载荷,在计算时采用静力计算的方法,这实际上仍是静态设计的方法。

随着现代工业和技术的发展,起重运输机械的结构愈来愈大型化,机械的负荷量和运转速度不断提高,机械振动的动载荷增大。有害的振动会降低机械的工作性能和产品质量,过大的动载荷会造成机件的破坏。由于起重机在工作过程中,运动状态经常发生变化,存在着诸多不稳定工况,主要包括载荷离地起升、载荷空中起升时对结构产生附加动载荷的作用,载荷起升过程中制动、载荷起动下降、载荷下降过程中制动、突然卸载、行走时冲击及碰撞、小车起动和制动等,在这些工况下起重机的结构和机构都受到不同程度的冲击和振动影响,这种冲击产生的动载荷是起重机的主要载荷之一,对疲劳计算也有很大影响。采用经典力学计算时,对于复杂结构的计算采用的假设和简化太多,导致结果的准确性较差,一方面整机结构或部分构件强度富余,另一方面重大结构件事故,如结构断裂、臂架折断等仍时有发生。另外,我国在起重机的大多数有限元动态分析中,往往只是分析起重机整机金属结构的固有特性,对整机的有限元分析也忽略了钢丝绳滑轮组的影响,而由货物和钢丝绳滑轮组共同对动态特性的影响显然是不能忽略的。

本课题的研究方向是理论联系实际,通过应用大型有限元分析软件ANSYS对漳州招商局码头有限公司的一台老旧桥吊结构进行瞬态分析,以及通过贴应变片、测振等方式,对整体钢结构的钢板厚度、结构强度、刚度、主梁挠度、应力等进行检测,评估出桥式起重机的使用寿命,并制定相应的维护保养规范或改造措施。

1.2 国内外相关研究动态

1.2.1 动力学分析理论及应用

随着现代科学技术的迅速发展, 工业生产规模的扩大和自动化程度的提高, 起重机在现代化生产过程中应用越来越广, 作用愈来愈大, 对起重机的要求也越来越高。现代起重机的特征和发展趋向具体表现在以下几个方面^[1]: 重点产品大型化; 系列产品模块化; 通用产品小型化; 产品性能自动化; 产品组合成套化; 产品设计微机化; 产品构造新型化; 产品制造柔性化。可靠性设计、优化设计、有限元法和CAD技术是国内外广泛采用的现代设计理论方法, 是提高产品设计质量、降低成本、缩短设计周期和提高生产力的有力工具, 更是企业提高应变能力、参与国际竞争的必要手段。他们的主要应用情况和存在的问题介绍如下^[2]:

(1) 有限元法

有限元法70年代初诞生于美国波音公司, 它以连续介质力学为基础, 将物体视为边界连续的有限个单元的集合, 由本构方程、平衡方程和变形协调关系, 建立起单元的力学方程组^[3]。由边界协调与平衡条件将各单元组装, 借助计算机求解方程组。解出物体在外力、内力作用下的应力、应变行为。物理概念和求解方法明确, 计算精度也较高, 适于各种复杂结构的力学问题, 是力学计算方法一次伟大的变革。

有限元法较早地开发了适于起重运输机械金属结构力学分析的通用有限元程序。采用引进的大型程序和自编程序, 对汽车起重机车架、转台、伸缩吊臂及驱动桥壳进行了有限元分析, 验证了强度和刚度, 为结构的方案比较和几何参数改进提供了有力的依据。应用有限元法对桥门式起重机, 以及塔式起重机金属结构验证了结构强度和刚度, 探索了应力和变形规律, 为改进结构设计提供了有力的依据。同时还将有限元法应用于带式输送机传动滚筒等产品的强度和刚度分析中。

有限元法是设计分析复杂结构最有效的手段, 但只有将其前后处理自动化, 与优化方法结合, 用于实际结构的自动设计, 才能最好的发挥其优越性。有限元法的弹塑性分析和动态分析已经成熟, 正向非线性分析、断裂力学分析、疲劳分析方向发展。同时随机理论、结构拓扑理论等已引入其中。所以应用优化随机有

限元法设计出可靠合理的结构，已为时不远。而现有起重运输机械有限元分析，基本上还处在线弹性阶段，动态分析的探索也不多。

(2) CAD技术

借助计算机快速准确的计算功能和数据处理能力及绘图功能，配以打印、绘图设备，通过人机对话实现产品设计过程的自动化即CAD技术。它是提高产品设计质量、降低设计成本、缩短设计周期和提高生产效率的有力途径。优化设计和有限元分析等现代设计均要借助计算机来实现或提高计算速度。因此，CAD技术是现代工程设计不可缺少的手段。我国的CAD技术始于60年代末，80年代初进入全面推广应用时期。

CAD技术在起重运输机械产品设计中的应用情况有：应用计算机，实现了主型产品主要零部件的优化设计和有限元分析。探索了汽车起重机电气制图、零部件的参数化绘图、方案分析及其集成化的CAD技术。探索了桥式起重机运行机构、金属结构设计与绘图CAD技术。探索了门座起重机电力传动系统、起升机构的CAD技术。探索了塔式起重机塔身、吊臂的CAD技术并开发了整机结构CAD系统。

CAD技术与优化、有限元等现代设计理论方法结合，只有实现了专用化、集成化并用于企业，才能大大缩短产品的设计周期，提高产品设计质量^[3]。目前，不少高校、科研机构和企业，在科研和产品设计中，开发了不少CAD软件，除塔式起重机和门式起重机外，很少见到集成CAD系统成功用于产品自动化设计的报道。相对于其它机械行业，这是起重运输机械行业较弱的方面。

从上述起重机设计方法讨论中可以看出：中国港口起重机设计经过半个多世纪的发展，取得了很大成绩，但是目前仍大都处于类比设计和静态设计阶段。现代起重机设计与计算机技术和动态设计方法密不可分，仅对港口机械进行静态设计是远远不够的，利用计算机开展动态设计已势在必行。现代设计方法中的一个重要组成部分是动态设计技术。动态设计阶段虽然运用了有限元进行设计，但仍处于研究和摸索阶段。国内外许多专家、学者在港口装卸机械动态特性分析及动态设计方面做了大量工作，取得显著成绩。

(3) 动力学分析^[4]

力学中，把研究作用于物体上的力与物体运动状态变化之间的关系叫做动力学。动力学是以牛顿定律为基础，质点系动力学是概括机械运动的最一般的规律。

质点系动力学基本方程反映了作用在质点上的力与质点运动间的关系,它是动力分析的依据。解决动力学问题的方法和步骤,与静力学大致一样。所不同的是,除了选取研究对象、分析力以外,还要分析运动。在静力学中是列平衡方程,而在动力学中是列运动微分方程。

机械系统动力学是研究机械系统在力的作用下的运动和机械在运动中产生的力的科学。机械系统动力学的分析过程,按其任务不同,可分为两类问题:

① 动力学反问题:已知机构的运动状态和工作原理,求解机器的实际运动规律(即已知力求运动)。

② 运动学正问题:给定机器的输入转矩和工作阻力,求解机器的实际运动规律(即已知力求运动)。

对于动力学研究的复杂性,人们常常引入一些假定,使问题简化。随着生产实践的发展,对动力学分析的准确度提出了新的要求,而科学技术的发展,为动力学分析提供了新的理论和手段。因而,动力学研究发展的总趋向是:逐步将各种人为的假定抛弃,逐渐的使分析更接近客观实际情况。在机械系统动力学发展史上,先后提出四种不同水平的分析方法:静力学分析、动态力学分析、动力分析和弹性动力分析。

① 静力分析:对低速运动的机械,运动中产生的惯性力可以忽略不计。对机械运动过程中的各个位置,可用静力学方法求出为平衡载荷而需在驱动构件上施加的输入力或力矩,以及各运动副中的反作用力。这是历史上最早出现的力分析方法。对许多速度不太高的机械,现在仍用静力分析方法来计算原动机的功率,进行构件和运动的承载能力计算。

② 动态静力分析:随着机械运动速度的提高,惯性力不能再被忽略。根据达朗贝尔原理,可将惯性力计入静力平衡方程来求出为平衡静载荷和动载荷而需在驱动构件上施加的输入力或力矩,以及各运动副中的反作用力。这种方法称为动态静力分析。由于运动分析时是假定了驱动构件等速回转,这在本质上是一种理想化运动状态下的力分析。现在对许多速度较高的机械,大多采用动态静力分析代替静力分析。

③ 动力分析:尽管“驱动构件等速回转”的假定在多数情况下是允许的,但在实际运动中常常需要知道系统的真实运动,进行“动力分析”的目的就是要

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库