

学校编码: 10384

分类号__密级__

学号: 32020111152717

UDC__

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

电磁谐振式高频疲劳试验机动态特性研究

Dynamic Properties of Electromagnetic Resonance Fatigue
Testing System

王 萌

指导教师姓名: 陈立杰 副教授

专 业 名 称: 航空宇航制造工程

论文提交日期: 2014 年 4 月

论文答辩时间: 2014 年 5 月

学位授予日期: 2014 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2014 年 5 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):

年 月 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）：

年 月 日

摘要

电磁谐振式高频疲劳试验机是一种基于共振原理的用于测定金属材料疲劳特性的试验设备，因其工作频率高、试验时间短、能量消耗低、试验费用低等优点广泛应用于高等院校科研教学及工业生产等各部门。近年来，随着制造及测试技术的发展与提高，以及各种新型材料的研制及实际应用需求，疲劳试验机测试结果的准确性与可靠性越来越受到重视。目前，对于疲劳试验机的静态力校准，测试手段和方法已趋于成熟；而动态循环力的校准仍处于研究发展阶段。因此，为了完善疲劳试验机的高精度校准，我们对试验机进行了系统建模以及动态特性理论及仿真分析，主要研究工作如下：

(1) 以电磁谐振式高频疲劳试验机 GBQ-100 为研究对象，基于有限元方法建立了疲劳试验机的整机有限元模型，通过模态分析与谐响应分析，得到了试验机各阶固有频率及对应振型，并分析了试验机参振质量、试样刚度、整机刚度等对试验机固有频率的影响规律。

(2) 基于疲劳试验机的工作原理及振动力学理论，建立了电磁谐振式疲劳试验机的三自由度线性振动力学模型，由系统动力学方程得到了系统中各参振质量的运动规律表达式、各弹性体变形规律表达式以及固有频率求解方程；通过数值求解得到了振动系统固有频率，并分析了砝码质量、试样刚度对固有频率的影响；由传感器与试样之间的作用力方程，推导得出了试验机动态力示值误差表达式，并分析了其影响因素，为疲劳试验机的动态力校准提供了理论依据。

(3) 分析了疲劳试验机同轴度误差产生的原因及对试验结果的影响，并将同轴度误差分为设备上下夹具的几何同轴度误差与试样的力值同轴度误差两部分；在线弹性范围内，通过固体力学中的组合变形理论，将几何同轴度误差与力值同轴度误差关联起来，得到了力值同轴度误差表达式及由同轴度误差引起的动态力示值误差的表达式，为实际检定过程中试样棒直径的选择及动态力校准提供了理论依据。并从理论上，使得生产与计量部门，由于所使用的同轴度概念的不同而引起的不同测试数据间有了可比性。

关键词: 电磁谐振式疲劳试验机 动态特性 有限元方法 动态力示值误差 同轴度误差

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Electromagnetic resonance high-frequency fatigue testing machine is a testing system for measuring the fatigue properties of materials, which is based on the resonance theory. Because of high working frequency, short testing time, low energy consumption and low cost, it has been widely applied in scientific research and teaching in universities, research institutes and industrial departments, etc. In recent years, with the improvement of manufacturing and testing technology, as well as the development and practical application demand of new materials, the accuracy and reliability of the testing results by fatigue testing machine have drawn more and more attention of relevant researchers. Currently, testing tools and methods for the static force calibration of fatigue testing machine are relatively mature and the dynamic force calibration is still in its developing stage. Therefore, in order to improve the calibration precision of fatigue testing machine, we must accurately model the fatigue testing system, and perform systematic theoretical analysis and simulations on the dynamic characteristics of the system. The main contents of the thesis are as follows:

(1) Taking the electromagnetic resonance fatigue testing machine GBQ-100 as an example, this thesis establishes finite element models of the whole fatigue testing machine. Through modal and harmonic response analysis, the natural frequencies of the testing machine and the corresponding vibration shapes are obtained. The influence of different factors, such as the vibration mass, the specimen stiffness and the whole machine stiffness, on the natural frequency are analyzed.

(2) Based on the working principle of electromagnetic resonance fatigue testing machine and mechanical vibration theory, a linear three-degree-of-freedom mechanical vibration model of fatigue testing machine is established, the vibration mass movement rule is expressed, and the elastic deformation law and the natural frequency solving equation of the vibration system are given. The natural vibration frequencies are obtained with numerical calculations and the effects of vibration mass and specimen stiffness on the natural frequency are illustrated. In the end, according to the force-transferred equation between the sensor and the specimen, the expression of dynamic force error are proposed and influence factors of the error are analyzed,

which can provide a theoretical reference for dynamic force calibration.

(3) The thesis analyzes the factors resulting in the coaxiality error of the fatigue testing machine and its influence on the testing force. Here, coaxiality error is divided into two parts: geometric coaxiality error caused by the uncoaxial of the upper and lower fixture and force coaxiality error of the specimen. Under a linear elastic condition, the geometric and the force coaxiality errors are connected by the combinational deformation theory of solid mechanics so as to obtain the expressions of force coaxiality error and dynamic force error, which can provide a recommended testing bar dimension during the certification process and reference for dynamic force calibration. Theoretically speaking, this result also makes different test data due to different concepts of coaxiality between the production and measurement departments comparable.

Keywords: electromagnetic resonance fatigue testing system; dynamic properties; finite element method; dynamic force error; force coaxiality error.

目录

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| 摘要..... | I |
| Abstract..... | III |
| 第一章 绪论..... | 1 |
| 1.1 课题背景及意义..... | 1 |
| 1.1.1 疲劳及疲劳试验机..... | 1 |
| 1.1.2 疲劳试验机应用及待解决问题..... | 2 |
| 1.2 国内外研究现状..... | 3 |
| 1.2.1 疲劳试验机相关的振动力学研究..... | 3 |
| 1.2.2 疲劳试验机振动特性研究..... | 4 |
| 1.2.3 疲劳试验机循环力校准研究..... | 5 |
| 1.2.4 课题的提出..... | 8 |
| 1.3 本文主要研究内容..... | 8 |
| 第二章 疲劳试验机动态特性有限元分析..... | 10 |
| 2.1 有限元分析简介..... | 10 |
| 2.1.1 有限元分析法..... | 10 |
| 2.1.2 基于 ANSYS 的动力学分析..... | 10 |
| 2.2 疲劳试验机有限元建模..... | 12 |
| 2.2.1 疲劳试验机总体结构及工作原理..... | 12 |
| 2.2.2 疲劳试验机有限元模型..... | 12 |
| 2.3 疲劳试验机振动特性分析..... | 14 |
| 2.3.1 不同试样对应试验机模型的模态分析..... | 14 |
| 2.3.2 疲劳试验机模态分析..... | 15 |
| 2.3.3 疲劳试验机谐响应分析..... | 18 |
| 2.4 参振质量对疲劳试验机固有频率的影响..... | 19 |
| 2.4.1 砝码质量对固有频率的影响..... | 19 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 2.4.2 试样质量对固有频率的影响 | 21 |
| 2.5 刚度对试验机固有频率的影响 | 22 |
| 2.5.1 砝码刚度对试验机刚度的影响 | 22 |
| 2.5.2 试样刚度对试验机刚度的影响 | 23 |
| 2.5.3 整机刚度对试验机固有频率的影响..... | 26 |
| 2.6 底座质量对疲劳试验机固有频率的影响..... | 27 |
| 2.7 本章小节 | 28 |
| 第三章 疲劳试验机振动系统力学特性研究 | 29 |
| 3.1 两种有限元模型比较..... | 29 |
| 3.2 主机结构力学模型及分析..... | 30 |
| 3.2.1 力学模型及力学特性分析 | 30 |
| 3.2.2 振动系统能量分析..... | 33 |
| 3.3 振动系统固有频率研究..... | 34 |
| 3.3.1 振动系统组成参数确定 | 34 |
| 3.3.2 振动系统固有频率求解..... | 35 |
| 3.3.3 砝码质量及试样刚度对系统固有频率的影响 | 38 |
| 3.4 动态力示值误差研究..... | 43 |
| 3.4.1 动态力示值误差来源..... | 43 |
| 3.4.2 动态力示值误差表达式及影响因素..... | 43 |
| 3.4.3 动态力示值误差数值分析 | 45 |
| 3.5 本章小节 | 49 |
| 第四章 同轴度误差研究..... | 49 |
| 4.1 疲劳试验机同轴度误差分类..... | 51 |
| 4.1.1 几何同轴度误差 | 51 |
| 4.1.2 力值同轴度误差 | 52 |
| 4.2 试样尺寸误差对力值同轴度误差的影响..... | 54 |
| 4.3 几何同轴度误差对力值同轴度误差的影响..... | 55 |
| 4.4 几何同轴度误差对动态力示值误差的影响..... | 59 |
| 4.5 本章小节 | 60 |

| | |
|-------------------|----|
| 第五章 总结与展望 | 61 |
| 5.1 总结..... | 61 |
| 5.2 展望..... | 63 |
| 参考文献 | 64 |
| 致 谢 | 68 |
| 攻读研究生期间发表的论文..... | 69 |

厦门大学博硕士论文摘要库

Table of Contents

| | |
|---|------------|
| Chinese Abstract | I |
| English Abstract..... | III |
| Chapter 1 Introduction..... | 1 |
| 1.1 Background and significance..... | 1 |
| 1.1.1 Fatigue and fatigue testing machine | 1 |
| 1.1.2 Applications of fatigue testing machine and unsolved issues | 2 |
| 1.2 Overseas and domestic research status | 3 |
| 1.2.1 Researches related to mechanical vibration of fatigue testing machine | 3 |
| 1.2.2 Vibration performance of fatigue testing machine..... | 4 |
| 1.2.3 Dynamic calibration of fatigue testing machine..... | 5 |
| 1.2.4 Thesis background | 8 |
| 1.3 Research objectives..... | 8 |
| Chapter 2 Finite element analysis of dynamic properties of the fatigue testing machine | 10 |
| 2.1 Introduction to the finite element analysis..... | 10 |
| 2.1.1 Finite element method..... | 10 |
| 2.1.2 Dynamic analysis based on software ANSYS..... | 10 |
| 2.2 Finite element models of the fatigue testing machine | 12 |
| 2.2.1 Structures and working principle | 12 |
| 2.2.2 Finite element models of the fatigue testing machine..... | 12 |
| 2.3 Vibration performance analysis | 14 |
| 2.3.1 Modal analysis of the machine with different specimens | 14 |
| 2.3.2 Modal analysis of the system | 15 |
| 2.3.3 Harmonic response analysis | 18 |

| | |
|--|-----------|
| 2.4 Effect of vibration mass on the natural frequencies of the system | 19 |
| 2.4.1 Effect of weights loaded on the natural frequencies | 19 |
| 2.4.2 Effect of specimen mass on the natural frequencies | 21 |
| 2.5 Effect of stiffness on the natural frequencies of the system | 22 |
| 2.5.1 Effect of weight stiffness on the stiffness of the system | 22 |
| 2.5.2 Effect of specimen stiffness on the stiffness of the system | 23 |
| 2.5.3 Effect of system stiffness on the natural frequencies of the system | 26 |
| 2.6 Effect of base mass on the natural frequencies of the system | 27 |
| 2.7 Summary | 28 |
| Chapter 3 Analysis of the mechanical properties of the fatigue testing system | 29 |
| 3.1 Comparison of different finite element models | 29 |
| 3.2 Mechanical model of the vibration system | 30 |
| 3.2.1 Mechanical model and mechanical properties analysis | 33 |
| 3.2.2 Energy analysis of the vibration system..... | 33 |
| 3.3 Analysis of the natural frequencies of the vibration system | 34 |
| 3.3.1 Parametric analysis of the vibration system | 34 |
| 3.3.2 Natural frequency calculations | 35 |
| 3.3.3 Effect of weight mass and specimen stiffness on the natural frequency.... | 38 |
| 3.4 Analysis of dynamic force error | 43 |
| 3.4.1 Sources of dynamic force error..... | 43 |
| 3.4.2 Expression and influential factors of the dynamic force error..... | 43 |
| 3.4.3 Numerical analysis of the dynamic force error | 45 |
| 3.5 Summary | 49 |
| Chapter 4 Analysis of the coaxiality error | 51 |
| 4.1 Classification of coaxiality error of the fatigue testing machine | 51 |
| 4.1.1 Geometric coaxiality error..... | 51 |
| 4.1.2 Force coaxiality error | 52 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2 Effect of manufacturing errors of specimens on force coaxiality | 54 |
| 4.3 Effect of geometric coaxiality error on force coaxiality error | 55 |
| 4.4 Effect of geometric coaxiality error on dynamic force error | 59 |
| 4.5 Summary | 60 |
| Chapter 5 Conclusions and recommendations | 61 |
| 5.1 Conclusions..... | 61 |
| 5.2 Future work..... | 63 |
| Reference | 64 |
| Acknowledgment..... | 68 |
| Appendix | 69 |

第一章 绪论

1.1 课题背景及意义

1.1.1 疲劳及疲劳试验机

疲劳是指材料在循环应力或循环应变作用下,由于某点或某些点产生了局部的永久结构变化,从而在一定的循环次数后形成裂纹或发生断裂的过程^[1]。疲劳问题普遍存在于现代工业的各个领域,包括机械、航空航天、土木建筑、核工程、水陆运输等,特别是随着机器向高温、高速和大型化方向发展,机器零件的工作环境日趋恶劣,工作应力日趋提高,疲劳破坏事故层出不穷。但是,目前尚未找到有效的理论方法来预测材料在交变载荷作用下的强度性能,因此通过疲劳试验测出各种结构材料在不同的交变应力作用下的疲劳寿命,意义重大^[2]。尤其对于航空材料,针对新研及现役飞机的日历定寿及延寿需求,疲劳试验机已成为航空材料测试中非常重要的实验设备。

目前,数量最多且应用最广泛的疲劳试验机主要有电液伺服疲劳试验机和电磁谐振式高频疲劳试验机,如图 1.1 所示。电液伺服疲劳试验机是基于电液伺服技术设计的疲劳试验机,它是以恒压伺服泵站作为动力源的一类疲劳试验机的总称。电磁谐振式高频疲劳试验机是建立在系统共振原理的基础之上,相较于电液伺服式疲劳试验机,其具有工作效率高的特点,主要体现在工作频率高、试验时间短、能量消耗低、试验费用低等方面;此外,其试验波形好,其波形失真度在动态试验机中最小;再者,其结构简单紧凑、无磨损、节能环保,符合现今经济发展要求^[3]。



(a) 电液伺服疲劳试验机

(b) 电磁谐振式高频疲劳试验机

图 1.1 疲劳试验机

1.1.2 疲劳试验机应用及待解决问题

高频疲劳试验机可应用于进行测定金属、合金材料在室温状态下的拉伸、压缩或拉压交变负荷的疲劳特性、疲劳寿命、预制裂纹及裂纹扩展试验，并绘制材料疲劳寿命曲线(S - N 曲线)；配以各种专用夹具，可以用来测试各种零部件（如操作关节、固接件、螺旋运动件等）的疲劳寿命。目前很多高等院校、科研部门和工矿企业的力学实验室均采用高频疲劳试验机进行断裂韧性试验，测试金属材料裂纹扩展速率及材料的门坎值^[4]。

疲劳试验机发展至今，其主机结构、电控系统和振动系统结构均发生了很大变化；随着微电子技术和计算机技术不断发展，测试手段日趋完善，试验机性能及测试校准设备的准确度也得到了很大的提高，其使用功能亦在不断扩展。但是，高频疲劳试验机在国内起步较晚，在设计及机械制造水平上与国外均存在一定程度的差异。目前，国内的高频疲劳试验机主要存在以下不足^[3]：

- (1) 在载荷谱功能中，动态响应性能较差；
- (2) 缺乏后续数据处理软件；
- (3) 由于频率跟踪技术的不完善和频率分辨率不高，导致系统在整个试验过程中不能始终工作在最佳工作点，从而造成能源浪费；
- (4) 控制软件实时性差，对波形的分析、处理能力较弱；
- (5) 缺乏故障分析能力；

(6) 高频疲劳试验的噪声大, 试验时间长, 对操作人员的身体会造成一定的影响。

在试验技术方面, 国内的高频疲劳试验机目前仅广泛应用于疲劳试验, 包括疲劳寿命(S-N)及载荷谱的试验。长春试验机研究所的 PLG-100C 型高频疲劳试验机虽能进行疲劳裂纹扩展速率试验, 但不能进行疲劳裂纹的自动检测, 且大量的检测及后续数据处理仍需要人工完成。对于高精度试验设备自动式高频疲劳试验机, 尽管国内很多高校和研究所具有此设备, 但其在控制精度、可靠性及功能上不能满足用户的要求, 因此其整体试验水平仍有待提高^[2]。

在动态测量补偿修正技术方面, 国内、国际标准及商业鉴定规程均对疲劳测试结果相关的测量不确定度评估提出了要求^[5,6]。目前, 对疲劳试验机的静态力校准, 测试手段和方法已趋于成熟; 而动态循环力的校准仍处于研究发展阶段。国外通常采用经验公式修正或加速度传感器测量修正等方法, 而国内目前还没有将动态标定列入必须检定范畴, 对高频疲劳试验机的校验工作基本是采用静态标定方法, 或仍然采用早期的疲劳试验机循环力的校正手段和方法, 这在某种程度上影响了试验机研制和生产中的同一性、使用中的正确性和疲劳性能测试结果的可比性。但是, 随着国内动态试验标准的逐步完善, 对动态测量的检定及校准日渐提上议程。

1.2 国内外研究现状

目前, 关于疲劳试验机的动态特性研究主要包括与试验机相关的振动力学研究、试验机的振动特性研究及试验机循环力校准研究这三大方面。

1.2.1 疲劳试验机相关的振动力学研究

高频疲劳试验机系统动态特性分析的技术核心是振动力学在工程技术领域中的实际应用。随着线性微分方程理论的发展, 线性振动理论已经相当完善。

1727 年 John Bernoulli 在研究无重量弹性弦上等距分布等质量质点时, 建立了无阻尼自由振动系统模型, 并解出解析解。1739 年 Euler 研究了无阻尼简谐受迫振动, 从理论上解释了共振现象; 1747 年 Euler 建立了等刚度弹簧联结等质量质点的模型, 不仅列出了运动微分方程并求出精确解, 还发现了系统的振动是各

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.

厦门大学博硕士学位论文摘要库