

学校编码: 10384
学 号: 19920131152905

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

大行程三坐标测量机全局空间运动
误差标定技术研究

Research on Calibration Methods of Volumetric Motion
Errors for Large Scale Coordinate Measuring Machine

张艳婷

指导教师姓名: 杨平 助理教授
专业名称: 精密仪器及机械
论文提交日期: 2016 年 月
论文答辩时间: 2016 年 月
学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2016 年 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

三坐标测量机作为工业零部件的主要检测设备,具有通用性强、自动化程度高、测量精度高等特点,被广泛应用于工业制造及科研技术开发领域。随着制造技术的发展,零部件朝着大尺寸,复杂面形,高精度等方向发展,这使得大行程三坐标测量机不可或缺,同时也对大行程三坐标测量机的检测精度提出了更高的参数要求。然而,目前大行程三坐标测量机的误差标定仪器主要是激光干涉仪和激光跟踪仪,它们在标定过程中存在使用成本高、测量周期长、需配专用调试人员等不足,无法得到广泛应用。鉴于此,本文创新性地提出了一种基于球杆仪循环联动误差测量实现三坐标测量机局部空间误差识别与补偿的方法,并通过拼接数据处理将球杆仪多个位置的误差数据进行整合,最终实现大行程三坐标测量机的全局空间误差标定,主要研究内容包含以下部分:

1. 结合自主研发的三坐标测量机结构特点,分析测量机主要存在的 21 项几何误差;基于球杆仪联动误差测量原理,分析球杆仪的联动误差测量模型;分析了球杆仪测量数据存在中心偏置误差的原因,建立中心偏置误差补偿算法;提出利用最小二乘圆心拟合和迭代逼近两种方法对联动误差中包含的中心偏置误差量进行识别。通过仿真分析,确定中心偏置补偿算法的准确性和有效性。

2. 基于球杆仪联动误差测量模型,提出平面联动误差分离方法,以实现基于球杆仪测量所得区域联动误差分离出直线运动轴误差分量;针对提出的联动误差分离方法进行仿真及实验,以验证各分离方法的可行性和准确性,并实现三坐标测量机局部空间误差标定。

3. 在球杆仪多位置局部区域联动误差测量基础上,结合重叠区域具有相同误差信息,分别提出了全局联动误差拼接分离法和局部联动误差分离拼接法两种误差拼接数据处理方法,以解决球杆仪测量范围受到球杆长度限制的问题,实现对大行程三坐标测量机的全局空间误差标定;以实验室自行研制的三坐标测量机为标定对象,进行标定实验,对比上述两种方法的可行性和有效性。

关键词: 三坐标测量机; 球杆仪; 误差标定

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

Three coordinate measuring machines (CMMs) are known as main detection equipment for industrial parts with the characteristics of good universality, high automaticity, high precision and so on. CMMs are widely used in industrial manufacturing and scientific research. With the development of manufacturing technology, nowadays, more and more elements have large size, complex surface and high precision. This development makes large scale CMMs become indispensable in detection field. At the same time, it puts forward higher requirements on measurement accuracy of large scale CMMs. However, when it comes to calibrate large CMMs, laser interferometers and laser trackers are the instruments which are mainly adopted. There are disadvantages existing in the processes of calibrating, such as high cost, long measurement cycle, and even they need professionals to cooperate with. All these keep the calibration by laser interferometer or laser tracker from wide application. In view of this, a new identification and compensation method for volumetric error of CMMs is proposed in this paper based on the characteristic of double ball bar (DBB) in circular test of linkage error. And through the data processing of stitching, error data of multiple locations is integrated together. Then finally, the overall volumetric error calibration of large scale CMMs is realized. The main research contents include the following parts:

1. Based on the structure features of CMM independently developed by our laboratory, 21 geometric errors of the CMM is analyzed; linkage error measuring model of the DBB is analyzed according to the theory of DBB measurement; reason of center bias error contained in data of DBB is find out with algorithms to compensate it; least square circle fitting and iterative approximation method are proposed to identify the center bias error; Through the simulations and analyses, the veracity and effectiveness of these two algorithms are find out.

2. Linkage error separation methods are proposed based on the linkage error measuring model of the DBB, in order to realize the separation of error components of linear motion axes from linkage error measured by DBB. Then simulations and experiments are put forwarded for linkage error separation methods to prove their feasibility and accuracy. Finally local volumetric error calibration of CMM is achieved.

3. Based on multi-section linkage error measurement of DBB, two data processing methods of error stitching are proposed. These two methods are overall linkage error stitching and separation, as well as local linkage error separation and stitching. Both these two methods work according to the same error message of overlapping region which belongs to two adjacent sections. And these methods solve the problem that the range of DBB is limited by the length of its rod. Since these, the global error calibration of large scale CMM is realized. Then the CMM developed by ourselves is taken as an object for the calibration experiments to compare the feasibilities and effectiveness of these two methods.

Key words: CMM; DBB; Error calibration

目录

第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 误差标定研究现状分析	2
1.2.1 现有误差建模方法.....	2
1.2.2 误差测量技术.....	4
1.2.3 球杆仪的应用现状.....	9
1.3 本课题研究内容	10
第二章 三坐标测量机误差分析及球杆仪误差测量模型	13
2.1 三坐标测量机系统误差分析	13
2.2 球杆仪联动误差测量模型	15
2.2.1 球杆仪误差测量原理.....	16
2.2.2 球杆仪安装误差.....	18
2.3 小结	24
第三章 最优平面联动误差分离方法	27
3.1 平面联动误差分离方法	27
3.1.1 角度分离法.....	27
3.1.2 联立方程法.....	29
3.1.3 激光干涉仪辅助法.....	33
3.2 平面误差分离法仿真对比	34
3.2.1 角度分离法.....	37
3.2.2 联立方程法.....	39

3.2.3 激光干涉仪辅助法.....	41
3.2.4 仿真结果对比.....	42
3.3 平面误差分离及补偿实验	43
3.3.1 XY 平面误差分离实验.....	45
3.3.2 XZ、YZ 平面误差分离实验.....	48
3.4 小结	50
第四章 大行程三坐标测量机全局联动误差识别与补偿	53
4.1 全局联动误差拼接分离法	54
4.1.1 全局联动误差拼接分离法模型.....	54
4.1.2 全局联动误差拼接分离法参数仿真.....	56
4.1.3 全局联动误差拼接分离法实验.....	59
4.2 局部联动误差分离拼接法	61
4.2.1 局部联动误差分离拼接法模型.....	62
4.2.2 局部联动误差分离拼接法实验.....	64
4.3 误差拼接数据处理方法对比分析	66
4.4 XZ、YZ 平面误差标定	66
4.5 小结	68
第五章 总结与展望.....	69
5.1 总结	69
5.2 展望	70
参考文献.....	71
致 谢	79
硕士期间科研成果.....	81

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background of Thesis	1
1.2 Technical Researches on Error Calibration	2
1.2.1 Development of Error Modeling Methods	2
1.2.2 Error Measuring Technology	4
1.2.3 Researches on the Application of DBB	9
1.3 Outline of Thesis	10
Chapter 2 Analysis of CMMs' Geometric Error and Linkage Error Measuring Model of DBB	13
2.1 System Error of CMMs	13
2.2 Linkage Error Measuring Model of DBB	15
2.2.1 Theory of DBB Error Measuring	16
2.2.2 Installation Error of DBB	18
2.3 Conclusions	24
Chapter 3 The Optimal Linkage Error Separation Methods	27
3.1 Linkage Error Separation Methods	27
3.1.1 Separation Method According to Angle	27
3.1.2 Separation Method According to Simultaneous Equations	29
3.1.3 Separation Method assisted by Laser interferometer	33
3.2 Simulations and Comparison of Error Separation Methods	34
3.2.1 Separation Method According to Angle	37
3.2.2 Separation Method According to Simultaneous Equations	39
3.2.3 Separation Method assisted by Laser interferometer	41
3.2.4 Comparison of Simulation Results	42

3.3 Experiments of Error separation and Compensation	43
3.3.1 Error Separation Experiment of XY Plane	45
3.3.2 Error Separation Experiment of XZ and YZ Plane.....	48
3.4 Conclusions	50
Chapter 4 Overall Linkage Error Recognition and Compensation of Large CMM	53
4.1 Overall Linkage Error Stitching and Separation Method.	54
4.1.1 Model of Overall Linkage Error Stitching and Separation Method. ..	54
4.1.2 Simulation of the Parameters in Overall Linkage Error Stitching and Separation Method.	56
4.1.3 Experiments of Overall Linkage Error Stitching and Separation Method.	59
4.2 Local Linkage Error Separation and Stitching Method.	61
4.2.1 Model of Local Linkage Error Separation and Stitching Method	62
4.2.2 Experiments of Local Linkage Error Separation and Stitching Method	64
4.3 Comparison of Data Processing methods for Error Stitching	66
4.4 Error Calibration of XZ and YZ Plane	66
4.5 Conclusions	68
Chapter 5 Conclusions and Prospect	69
5.1 Conclusions	69
5.2 Prospect	70
References	71
Acknowledgement	79
Achievements	81

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

三坐标测量机作为测量设备，具有测量精度高，自动化程度高，且通用性强等特点，被广泛应用于工业制造和科研开发领域，甚至它也成为生产线上的重要环节之一^[1]，被广泛应用于元件尺寸精度检测或进行反向工程制造^[2]。三坐标测量机的基本测量原理使其能适用于复杂三维元件的检测，其测量功能包括元件的尺寸精度、定位精度、几何精度及轮廓精度等。这些优点使得三坐标测量机作为主要工业零部件检测设备广泛流行^[3]。随着制造技术的发展，制造元件朝着大尺寸，复杂曲面和高精度等方向不断发展，因此大行程三坐标测量机在精密检测领域是不可或缺的，已广泛应用于机械、模具、汽车、航空航天等制造行业的检测中。为了确保大行程三坐标测量机获取的测量信息准确可靠，需要保证三坐标测量机本身的精度，这对测量机的整体定位和定向精度都提出更高的参数要求^[4]。

三坐标测量机精度提高的方法包括误差防止和误差补偿两种。其中误差补偿的方法能弥补误差防止的不足，减少因高精度制造和装配产生的生产成本，因此，误差补偿是提高三坐标测量机精度的有效途径^[5-6]。故误差标定是提高三坐标测量机整体精度的重要手段，同时也是运动机构学发展的关键步骤之一。

三坐标测量机的误差标定主要步骤可分为误差建模、误差测量、误差辨识和误差补偿。其中误差建模是标定方法的核心，误差建模的方法直接决定了误差的测量量，而误差测量量的确定也决定了误差的测量方式。基于刚体 21 项几何误差的标定方法在传统三坐标测量机误差标定中应用最为广泛。该标定方法的误差测量量为三坐标测量机的 21 项几何误差，而几何误差的测量方式可分为直接测量法和间接测量法。当以大行程三坐标测量机为标定对象时，目前普遍采用激光干涉仪的直接测量法以及激光跟踪仪的间接测量法。采用激光干涉仪的直接测量法虽然可以实现各几何误差的测量，但存在测量工序繁琐、测量周期长、测量成本高等问题；采用激光跟踪仪的间接测量法虽然可通过联动误差测量实现几何误差的高效分离，但由于测量成本高，无法得到广泛推广^[6-8]。

综上所述，误差标定技术的发展决定了大行程三坐标测量机整体精度提升的

高效化和经济化。现有误差标定的误差建模方法和误差测量方法严重制约了大行程三坐标测量机精度提高的便捷性和市场性。因此,寻求新的运动误差建模途径并实现高效率、低成本的误差测量方法是解决三坐标测量机误差标定所面临问题的关键。

1.2 误差标定研究现状分析

误差标定过程通常包括误差建模、误差测量、误差辨识和误差补偿4个环节。在对机床误差源的分析中发现,机床包括几何误差、力变形误差、热变形误差、动态误差等,其中几何误差这一误差源对机床运动精度的影响最大,达到40%以上^[9]。同时,环境因素对机床几何误差的影响较小,因此几何误差可在长时间内处于稳定状态,且几何误差的重复性好,易于进行误差测量,所以是机床误差补偿的主要研究方向^[10]。

1.2.1 现有误差建模方法

误差建模是误差补偿的重要前提。误差标定的效果很大程度上取决于误差模型的准确性。几何误差建模的研究受到国内外学者的广泛关注,其研究已有很长的历史。

国外对误差建模的研究起步较早。1960年,D. L. Leete首次基于三角关系,推导并建立了三轴机床的几何误差模型^[11]。1968年,D. French和S.H. Humphries改进与发展了D. L. Leete所建立的几何误差模型^[12]。1973年,W. J. Love和A. J. Searr将几何关系运用到了多轴机床空间误差的分析与建模中^[13]。1977年R. Schultschick通过矢量表达法得到了三轴镗床空间误差模型^[14],并于1979年在空间误差模型的基础上,对机床有载情况下的误差进行分析研究^[15]。同一时间,R. Hocken运用多维误差矩阵,推导出了三坐标测量机的误差模型^[16]。1982年,V. T. Portman以刚体运动学作为机床误差建模的理论基础^[17]。1985年G. Zhang和K. Busch等人建立了三坐标测量机的多维误差矩阵模型,并进行误差补偿,提高了三坐标测量机的精度^[18-19]。1986年,P. M. Ferreira和C. R. Liu以刚体运

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts 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.