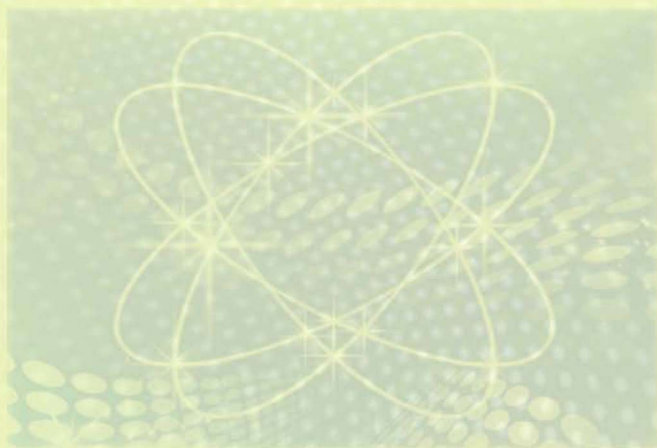


基于计算机仿真的三坐标测量机 非刚性误差补偿技术研究

刘 鹏 著



重庆大学出版社

内容提要

随着社会发展和生活水平的提高,人们对工农业产品质量的要求也越来越高。在信息科学技术高速发展的今天,保证产品质量的重要因素是对生产过程进行监测和控制,并且对产品质量进行检测。因此,测量技术已成为工农业生产和国民经济中不可或缺的一个环节。但关于坐标测量机非刚性误差补偿技术的研究相对来说仍比较少,本书根据移动桥式三坐标测量机非刚性效应测量误差的分布特征,通过对坐标测量机构件的受力变形分析与建模,详细研究了测量机非刚性效应测量误差。因此,本书为高精度坐标测量机的误差补偿技术提供了新的思路。

本书适用于从事测量技术、计算机仿真技术、人工智能技术开发和研究的科研人员,以及高等院校的研究人员、学生等。

图书在版编目(CIP)数据

基于计算机仿真的三坐标测量机非刚性误差补偿技术研究/刘鹏著.—重庆:重庆大学出版社, 2015.7

ISBN 978-7-5624-9065-4

I. ①基… II. ①刘… III. ①计算机仿真—应用—三坐标测量机—误差补偿—研究 IV. ①TH721

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 099778 号

基于计算机仿真的三坐标测量机 非刚性误差补偿技术研究

刘 鹏 著

策划编辑:曾显跃

责任编辑:陈 力 版式设计:曾显跃

责任校对:关德强 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

POD:重庆新生代彩印技术有限公司

*

开本:787×1092 1/16 印张:12.25 字数:158 千

2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5624-9065-4 定价:38.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究

序 言

该书为重庆电子工程职业学院刘鹏博士在分析目前国内外三坐标测量机测量误差补偿技术研究的现状和发展趋势的基础上,根据移动桥式三坐标测量机非刚性效应测量误差的分布特征,通过对坐标测量机构件的受力变形分析与建模,详细研究了测量机非刚性效应测量误差。故本书为高精度坐标测量机的误差补偿技术提供了新的思路。

首先,简单回顾了现在的误差补偿技术,并对现有补偿技术进行了分析与比较。然后,对三坐标测量机进行了误差源的分析。之后,采用材料力学的方法,对三坐标测量机导轨受力变形进行了分析,研究了测量机非刚性效应基本运动误差分布特征及其新的误差补偿模型。目前的基于刚体运动假设的几何误差补偿模型,从模型的形式上是补偿各项几何误差。根据本书的分析结果,实际上是补偿了纯几何误差和部分非刚性误差。18项运动误差中包含非刚性误差项的有:直线度误差 $\delta_{zw}(x)$ 和 $\delta_{zw}(y)$ 、角度误差 $\alpha_w(x)$ 和 $\alpha_w(y)$ 。其他14项运动误差均不含有非刚性误差项。因此,现有的基于刚体运动假设的几何误差补偿模型,未能考虑非刚性效应。在精度要求高的场合,往往难以达到满意的高精度要求。最后,针对BP神经网络建模存在的训练速度慢、局部极小点、网络结构和隐节点选择等问题,本专著在简要介绍神经网络和遗传算法的基础上,采用了一种改进的遗传神经网络算法。经过实验数据的验证,可以看出这种遗传神经网络算法比普通BP收敛更快、精度更高,而且可以克服局部极小点等问题。

针对现有误差补偿过程中,误差表达式烦琐、精度低等问题,首次提出了一种新的遗传神经网络算法建立三坐标测量机非刚性误差模型,这种算法解决了现有 BP 算法神经网络建模存在的训练速度慢、局部极小点、网络隐单元数选择等问题。

同时,以国产 ZOO 型三坐标测量机为例进行了非刚性运动误差神经网络的研究。实验结果表明:采用本书所提出的遗传神经网络建立的误差模型比普通 BP 训练算法具有更快的收敛速度和更高的预测精度。

本书的出版得到了重庆市教委科学技术研究项目(编号:KJ1402909)和重庆市教育科学“十二五”规划 2014 年度重点课题(编号:2014-GX-055)的资助,在此一并致谢。

因时间与能力所限,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者与相关研究人员批评指正,以使本书更为完善。

刘 鹏

2015 年 3 月

目 录

第 1 章 三坐标测量机误差补偿技术概况	1
1.1 测量的基本概念	3
1.2 三维测量技术的演变、分类及发展趋势	6
1.3 三坐标测量机误差补偿技术的意义及现状	16
第 2 章 移动桥式三坐标测量机的误差源分析 ..	24
2.1 研究误差的意义	26
2.2 误差的基本概念与分类	27
2.3 机构误差	33
2.4 光栅误差	39
2.5 阿贝误差	39
2.6 温度误差	40
2.7 动态误差	41
第 3 章 移动桥式三坐标测量机非刚性误差建模	45
3.1 概述	45
3.2 移动桥式测量机误差源分析	47
3.3 等效坐标运动链分析	48
3.4 三坐标测量机力变形分析	49
3.5 三坐标测量机非刚性误差分析及其建模	55
3.6 本章小结	60

第 4 章 实验过程及结果分析	61
4.1 主要检定工具及检定条件	62
4.2 实验步骤及结果	63
4.3 本章小结	74
附表 实验数据	75
第 5 章 基于遗传神经网络三坐标测量机非刚性 误差补偿	95
5.1 神经网络概述	96
5.2 遗传算法概述	106
5.3 遗传算法与神经网络的结合	112
5.4 一种改进的遗传算法优化神经网络结构 和权重矢量的方法	115
5.5 遗传神经网络新算法建模结果与普通 BP 算法建模结果比较	123
5.6 本章小结	128
第 6 章 总结与展望	129
附录	131
附录 I BP 神经网络 C 语言程序	131
附录 II 改进遗传算法优化 BP 神经网络 C 语言 程序	147
参考文献	184

第 **1** 章

三坐标测量机误差补偿技术概况



当今国际市场需求快速变化的特点和 21 世纪更加个性化的市场趋势,促进了快速设计和制造技术的发展。三坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, CMM)作为几何量仪的重要组成部分,具有灵活性、通用性强,测量范围大,精度高,效率高,性能好等优点,如今它已成为检测中应用广泛的关键性仪器之一,被广泛地用于机械制造、电子、汽车和航空航天等工业中。CMM 可以进行零件和部件的尺寸、形状及相互位置的检测,例如箱体、导轨、涡轮和叶片、缸体、凸轮、形体等空间型面的测量。此外,还可用于划线、定中线孔、光刻集成线路等,并可对连续曲面进行扫描及制备数控机床的加工程序等^[1]。坐标测量机是基于坐标测量原理,即将被测物体置于坐标测量机的测量空间,获得被测物体上各测点的坐标位置,根据这些点的空间坐标

值,经过数学运算,求出被测的几何尺寸、形状和位置。也就是说,坐标测量机的任务是以一定的精确度将长度基准“米”的定义传递给工件。

自 1956 年第一台三坐标测量机出现以来,其发展过程大约经历了下述 4 个阶段。

①原始的测量机是属于测长机、万能工具显微镜之类的测量仪器,由于具有导向机构、检测元件,同时还有放置工件的工作台,测量头可以手动移到被测点上。因此,有人称之为原始的测量机。

②初期测量机的结构特点是采用悬臂式结构和刚性测头。悬臂式结构对装卸被测零件比较方便,刚性测头则定位比较迅速。

③带有小型电子计算机进行数据处理的测量机,这种测量机可以进行多种运算,例如计算差值、超差、两点间的距离,求中点、投影线段长度、相交点,测量平行度、垂直度、平面度,计算直角坐标与极坐标的偏差等。

④第四个阶段出现的是计算机控制的测量机,这种自动化测量机如同数控机床一样,当程序编好后,能自动按照程序测量,并自动打印出测量结果或以纸带的形式输出^[2]。

当前,除正在研制高精度、快速检测的三坐标测量机外,还在拓宽程序与自动化检测的功能,并开发出新型测量软件,以适应各式各样复杂测件的要求。同时,也在开发各种用途的可转位、高灵敏度、高精度(如纳米级)的测头。

1.1 测量的基本概念

测量是科学实验的前提,误差与测量是紧密联系的。因此,在研究三坐标测量机之前,必须掌握测量的一些基本概念。

1.1.1 测量的定义

测量是人们借助专门设备,以确定量值为目的所进行的操作。它是一个实验的比较过程,即通过实验将一个量(被测量)和另外一个量(标准量)相比较。关于测量,涉及下面两个概念。

(1) 测量过程

测量过程执行测量所需的一系列操作。测量有时比较简单,可以用量器的单位量直接与被测量比较得到被测量值。有时不能直接进行比较,而必须通过仪器或某些辅助设备间接得到被测量值。因此,测量过程常常包括建立单位、设计工具、设计测量方法、研究分析测量结果、寻求消除或减小误差的方法等。

(2) 测量结果

测量结果是由测量所获得的被测量的值。一般情况下,测量结果由3部分组成,

即被测量值、单位及结果精度的评定。测量值实质上是被测量与其计量标准(单位)的比值;单位一般采用国际单位;而结果的评定则采用不确定度。

1.1.2 测量的分类

按获取测量结果的方法,或测量条件及测量结果的不同,测量具有不同的分类法。

(1) 根据测量结果划分

1) 直接测量

直接测量是将被测量与作为测量标准的量直接进行比较,或用预先按标准校对好的测量仪器对被测量进行测量,直接读到被测量数值大小,这种测量称为直接测量,用式(1.1)表示。

$$y = x \quad (1.1)$$

式中 y ——被测量的值;

x ——其直接测量结果。

在工程测量中,用刻度尺测长度、钟表测时间、砝码与天平测质量、温度计测温度、电表(电压表和电流表)测电压和电流、频率计测频率等,这些都属于直接测量。

2) 间接测量

先测量一个或多个直接测量值,然后利用已知的函数关系运算得到被测量,这种测量称为间接测量。间接测量可用式(1.2)的一般公式表示。

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (1.2)$$

式中 y ——被测量的值;

$x_1, x_2, \dots, x_m$ ——其直接测量结果。

在实际测量中,如果用直接测量的方法不能得到被测量,或能够测量但测量过程比较复杂,常常采用间接测量。例如体积、密度等量的测量往往用间接测量。

3) 组合测量

通过测量所有被测量的各种组合,列方程求解被测量的测量方法,称为组合测量。在进行组合测量时,可以使各被测量以不同的组合形式出现,然后根据所得的结果,建立一组方程,通常采用最小二乘法进行处理。例如测量几个电阻或电容,除了可以单独测量每个电阻或电容外,还可能通过测量它们的组合值,如串联值、并联值等来计算每个电阻或电容值。

(2) 根据测量条件划分

1) 等精度测量

在相同的测量精度条件下(同一测量水平的观测者、同一精度的测量仪器、同样环境条件、同样实验方法等)对同一待测量所做的重复性测量,称为等精度测量。等精度测量所获得的数据,不能判定哪一个数据更接近于真实值,只能一视同仁,同等对待,即对所有数据的信赖程度是相同的。

实际测量中,等精度的测量条件很难满足。一般情况下只是近似地认为是等精度测量。

2) 非等精度测量

在不同的测量精度条件下(不同测量水平的观测者、不同精度的仪器、不同方法、不同环境等)对同一待测量所做的测量,称为非等精度测量。

非等精度测量获得的各个数据,由于测量条件不同,因此,不能一视同仁,应区别对待,即对各数据的信赖程度是不同的。

(3) 根据观测对象在测量过程中所处的状态划分

1) 静态测量

被测量在测量过程中是固定不变的,对这种被测量进行的测量称为静态测量。静态测量不需考虑时间因素对测量的影响,即将被测量或误差作为随机变量来确定。

2) 动态测量

被测量处于随时间不断变化的状态,对这种被测量进行的测量称为动态测量。动态测量要考虑时间对测量的影响,即将测得值或误差作为随机过程来进行研究。

随着科学技术的发展,工程技术中越来越重视动态测量及其数据处理。因为在动态测量数据中,包含着大量有关被测量、测量器具以及外界环境加入的干扰等方面的信息,正确分析和处理动态测量数据,能得到许多反映客观事物规律的有用信息,所以动态测量数据处理是误差理论与数据处理的重要组成部分。

1.2 三维测量技术的演变、分类及发展趋势

在三坐标测量机出现以前,测量空间三维尺寸已有一些原始的方法,如采用高度尺和量规等通用量具在平板上测量,以及采用专用量规等量具测量孔的向轴度及相互位置精度。这种方法劳动强度大、效率低、精度不易保证,专用量规制造成本高,使用麻烦,即使是熟练的测量人员,也难以获得稳定的、精确的测量结果;另一种方法是采用坐标镗床测量,即在镗床用其三坐标机构,在轴上安装测微仪(指示表或

传感器),对工件进行三维测量。这些传统的测量方法既费力又费时,也不易达到精度要求。

除此以外,为了测量复杂的轮廓或型面,常常设计专用测量装置或专用仪器。其原理是从理论上形成需要的复杂运动(如转子发动机缸体需要形成次摆线运动。齿轮需要形成渐开线运动),再装上测微仪去与实际工件的轮廓进行比较测量,描绘出实际轮廓曲线。这种测量装置的专用性强、成本高,如果机构不精确,产生的误差大。尽管此类专用仪器仍在发展,但由于通用性差,不适宜作通用型的三维检测之用。

三坐标测量机基于坐标测量原理。坐标测量机的发展与其他事物一样,是由简单到复杂逐步形成的。早期出现的测长机可在一个坐标方向上进行工件长度的测量,即为单坐标测量机,仅完成一维测量。后来出现的万能工具显微镜具有 x 与 y 两个坐标方向移动的工作台,可测量平面上各点的坐标位置,即为二维测量,也可称为二坐标测量机。而三维测量需要 x 、 y 、 z 方向的运动导轨,可测出空间范围内各测点的坐标位置。因此,从理论上讲,三维测量可对空间任意处的点、线、面及相互位置进行测量。

到了20世纪60年代初期,精密机械、电工技术和电厂计算机快速发展,解决了精密导轨的设计与加工和大位移测量装置(如感应同步器、光栅等)的制作,并引入厂电子计算机及计量软件,才使得坐标测量机得到迅速发展。因此,当代三维测量技术是在坐标测量机的基础上发展起来的,而三维坐标测量机的发展又丰富、完善了三维测量技术。

当前,除正在研制高精度、快速检测的三坐标测量机外,还在拓宽程序与自动化检测的功能,开发研制新型计量软件,以适应各式各样测件的要求。同时,也在开发各种用途的可转位、高灵敏度、高精度的测头,以完成复杂零件内外形及难以检测部

位的测量任务。

到目前为止,三坐标测量机可以按下述分类方法进行分类。

(1) 按机械结构分

常用的三坐标测量机主要有水平臂测量机、活动桥式测量机和固定龙门型测量机。其中水平臂测量机又分为双水平臂和单水平臂两种,主要用于对车身的测量,也可测中小件。活动桥式测量机精度较高,主要用于形状复杂的薄壁工件,特别适用于在生产现场对中小型冲压件和焊接件进行在线测量。固定龙门型测量机的精度高于水平臂测量机,主要用于如航空、汽车等细长件的测量。

1) 水平臂测量机

单水平臂可以配置手腕测座 CW43L,这种测头增加了两个回转坐标,并可以使用加长杆,最长可达 800 mm,这种形式的结构能使测头易于进入工件的各个被测部位,包括车身骨架的内部区域或各种配件的底部甚至底部内侧,最多时控制系统可以操作 10 个坐标的双臂,同时可从两侧对工件进行检测,适用的工件如车身等,根据测量任务的需要,承载平台上可设置测头库,即可在检验一个复杂的工件过程中通过更换测头,一次完成任务。

双水平臂测量机,如德国 Dimension 系列双水平臂式三坐标测量机(图 1.1)的特点为:水平臂采用无磨损,高品质的线性导轨。高质量、高精度的空气轴承与花岗岩导轨组合保证高精度工作要求。所有 CNC 机器的驱动装置和导轨全部是封闭式的,可防尘、防损,且不受热力影响。所有的测量轴可机动;轴向的运动由控制系统和测量软件进行管理; x 和 y 轴的移动部件在空气轴承上运动, z 轴配置由机械导轨及空气轴承组成的混合运动系统;所有各轴由直流电机驱动, y 及 z 轴采用带传动, x 轴采用齿轮齿条传动;气动控制的机械安全制动装置实现中心滑架的自动锁紧;光学光

栅尺读数头编译系统;可利用附件及选项配置机器应对特殊的应用需求;开敞的水平臂结构便于工件的装卸操作;随动罩使得测量人员更容易更安全地接近测量区域,并和外罩、防尘罩一起提供完全的内部保护;在手动模式下,操作者通过操纵杆单元实现系统的控制;一组风扇防止在测量机本体自身内部发生温度层化;可通过软件对机器几何误差进行自动补偿。



图 1.1 用于生产线上的双水平臂测量机

2) 活动桥式测量机

瑞士 TESA 品牌的 Micro-Hite 3D 桥式测量机(图 1.2)。该测量机具有独特的



图 1.2 瑞士 TESA 品牌的 Micro-Hite 3D 桥式测量机

优点:它是同类产品中性价比非常好的一款测量仪器,填补了传统精密测量仪器和测量机之间的空白。这样,它在精密测量领域占有自己的一席之地。这是真正由瑞士在 Renens 生产和制造的产品,它尤其可以满足工业生产对高性能测量产品的要求。

TESA 最新的 Micro-Hite 3D 的测量精度可达微米,即使在操作者并不熟悉测量操作的情况下,也可实现简单操作。Micro-Hite 3D 使用的测量软件 REFLEX 具有用户友好的界面操作方式,操作者在使用其几个小时后就可以测量复杂的工件。

Global Image 是一种集单点探测和模拟扫描技术为一体的高性能检测设备,同时可配制接触式和非接触扫描测。基于新一代高稳定性控制系统,与温度和精度补偿系统进行结合与优化,加上先进的算法,实现了高速、高精度模拟开环以及闭环扫描。获有专利的快速探测模式中的指向、点击和扫描技术,可把扫描测头当作触发式测头使用,而不会损失速度和精度。

(2) 按尺寸大小分

可分为大、中、小 3 种机型。

大型机 x 轴的测量范围一般在 3 000 mm 以上;中型机 x 轴测量范围一般为 600~1 200 mm;小型机则主要用于电子行业及机器制造业中的小型零件检测。

CMM 在操纵上有数控和手动两种,数控 CMM 的操作与 CNC 机床相似。

先进制造技术、各种工程项目与科学实验的需要也对三坐标测量机不断提出新的、更高的要求。从目前国内外三坐标测量机发展情况和科技、生产对三坐标测量机提出的要求看,在今后一段时期内,它的主要发展趋势可以概括为以下几个方面。

1) 普及高速测量

质量与效率一直是衡量各种机器性能、生产过程优劣的两项主要指标。传统的概念是为了保证测量精度,测量速度不宜过快。随着生产节奏的不断加快,用户要求测量机保证测量精度的同时,会对 CMM 的测量速度提出越来越多的要求。而提高测量机测量速度这一目的,会为 CMM 带来以下几个方面的革新。

①测量机的结构设计改进及材料的变化,结构优化以提高刚性,减轻运动部件的质量;使用轻质材料来降低运动惯性,即由普遍使用的花岗石等传统材料转变为密度与杨氏模数之比低的材料、薄壁空心结构等。铝、陶瓷、人工合成材料在测量机中获得了越来越多的应用。

②高速的动态性能要求提高动态补偿能力,动态误差与测量机的结构参数和运动规程有关。在研究这些特性的基础上,既可以改进测量机的结构设计,提高控制系统性能,又可以进行动态误差补偿,在实现高速测量的同时保证高精度。

③采用非接触式测头测量方式。在触测情况下,由于工件与测头的接触速度不能太快,这就给测量速度带来了很大的限制。扫描测量方式虽比点位测量方式效率高得多,但仍受触测的限制。采用非接触测头,可避免频繁加速、减速、碰撞等,可大大提高测量速度,特别是从对可靠性与安全保护提出更高的要求看,非接触测头也有很大的优越性。

④脱机编程技术成为一种趋势,所谓脱机编程技术,就是在 CAD 技术的辅助下,在不上测量机的情况下,在三维图形的环境下完成对测量程序的编制工作。这样不但能有效提高测量机的实际使用效率,也提高了测量程序的编制效率。脱机编程技术的应用使我们能完全与生产准备及生产过程同步进行测量的准备工作,从而可更好地节约宝贵的 CMM 机时。