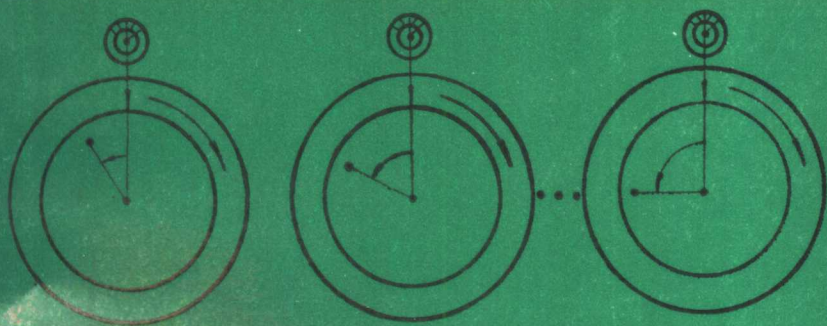


精密测量中的 误差补偿技术

谭久彬 著



哈尔滨工业大学出版社

精密测量中的误差补偿技术

谭久彬 著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本文主要介绍了精密测量中误差补偿技术的有关理论和具体形式, 主要内容包括: 误差补偿技术的概念与模型; 误差补偿效果的评价指标; 基于信息源变换的误差分离技术; 基于模型参数估计的误差分离技术; 误差修正技术和误差抑制技术。本书可供精密测量与精密仪器专业的研究人员、教师、研究生、高年级学生和工程技术人员参考。

精密测量中的误差补偿技术

Jingmiceliangzhong de Wuchabuchang Jishu

谭久彬 著

*

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

哈尔滨工大节能印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 4.625 字数 103 千字

1995 年 6 月第 1 版 1995 年 6 月第 1 次印刷

印数 1-1000

ISBN 7-5603-1087-7/TH·47 定价: 8.00 元

序

误差补偿技术是随着精密工程研究水平的不断提高而产生并迅速发展起来的一门重要技术分支。该技术在现代精密工程发展中起着重要的技术支柱作用。时至今日,几乎所有的精密、超精密及纳米测量技术及仪器都把误差补偿技术作为其自身发展的关键技术之一。

一方面,误差补偿技术极大地丰富了现代精密工程学,对精密工程学的发展作出了重要贡献;另一方面,误差补偿技术作为一门新技术分支,又有自己的特点与独立内容。因此,对现有误差补偿技术进行归纳整理,使其理论化、系统化和实用化,将具有十分重要的学术意义和工程价值。

谭久彬博士一直从事精密测量技术与仪器的研究与教学工作,特别是近些年负责多项大型精密仪器、超精密测量仪器及纳米传感器等课题的研究工作。在课题研究中,提出并应用了很多新的具有较高工程意义和学术价值的误差补偿技术,在实践中取得了很好的效果。

谭久彬博士认真总结了本人的研究成果和教学心得,出版了名为《精密测量中的误差补偿技术》这一专著。书中就精密测量中误差补偿技术的有关内容进行了比较系统的归纳和总结,特别对圆度、圆柱度测量技术中的误差补偿,从理论到方法进行了深入的、有特色的、系统的讨论。本书的出版是误差补偿这一技术理论化和系统化的一个可喜尝试。

误差补偿技术涉及精密工程领域的各个方面，误差补偿技术的内容、理论和体系尚有待进一步充实和完善。本书作为国内这一领域的第一本专著，难以尽善尽美。但本书的问世，必将有助于误差补偿技术的深入研究和更广泛的应用，必将促进误差补偿技术的进一步发展。

强锡富 张善钟

1995年6月16日

前 言

随着精密工程水平的不断提高,特别是近年来超精密技术的迅速发展和纳米技术的掘起,对制造技术和测量技术的精度水平提出了越来越高的要求。其中,因测量技术担负着技术发展的先导和产品质量检测的双重使命,所以最先发展起超精密测量技术与纳米测量技术。测量技术从亚微米级向纳米级发展的过程有两个显著特点,一个是不断采用其它学科的最新技术,测量学与其它学科的交叉愈加普遍;另一个是误差补偿技术在精密测量中的作用日益重要,在很多情况下,其作用是其它技术无法替代的。误差补偿技术与“硬技术”互相补充,分别发展成为精密工程的两大技术支柱。

误差补偿技术是精密工程学的新的重要分支,总结整理这一新技术,使其理论化、体系化不仅具有重要的工程意义,而且具有重要的科学意义。笔者结合近些年来所从事的该方面的科研和教学实践,仅就超精测量和纳米测量中的误差补偿技术方面的内容进行总结,并在理论体系上作一探讨。为便于叙述,本书将超精密测量和纳米测量仍统称为精密测量,并定名为《精密测量中的误差补偿技术》。

本书将精密测量中的误差补偿技术分为三种形式,即误差分离技术、误差修正技术和误差抑制技术,并提出关于误差补偿技术的有关概念、相应模型和补偿效果的评价方式

等。本书内容包括:基于误差源变换的误差分离技术、基于模型参数估计的误差分离技术、误差修正技术和误差抑制技术。各章节内容均为笔者在近年来科研项目的研究中提出并使用的。由于时间关系,笔者尚有许多提出并使用的补偿方法与实例未能整理并收入本书,这确是一件遗憾的事。笔者非常愿意今后有机会不断充实本书的内容,并希望通过本书与同行学者交流,以得到指教,起到抛砖引玉的作用。

本书得以撰写,得到强锡富教授、张善钟教授和唐余勇教授的热情鼓励和支持,同时三位教授还对全本进行了认真的审阅,在此谨致由衷的谢意!

在本书撰写过程中,得到了课题组成员,李东升博士、赵维谦讲师、杨文国工程师和王伟杰工程师、赵熙萍助理工程师、周海助理工程师和博士生孙彤、硕士生黄楚雄和邓春梅的大力协助,完成了很多有价值的实验和图表绘制与校对工作。在此一并表示感谢!

由于笔者水平所限,加之成书仓促,因此书中难免有疏漏之处,敬请同行学者及广大读者批评指正。

谭久彬

1995年6月8日

于哈尔滨工业大学

目 录

第一章 绪论	(1)
§1-1 误差补偿技术研究的内容	(1)
§1-2 有关误差补偿技术的概念与模型	(5)
§1-3 补偿效果的评价指标	(11)
第二章 基于信息源变换的误差分离技术	(13)
§2-1 两点转位分离法	(13)
§2-2 多重多步分离法	(19)
§2-3 空间误差运动的多截面分离法	(35)
§2-4 倒向分离法	(47)
第三章 基于模型参数估计的误差分离技术	(52)
§3-1 圆轮廓测量中偏置误差的分离	(52)
§3-2 圆柱轮廓测量中偏置误差的分离	(70)
§3-3 球体轮廓测量中偏置误差的分离	(92)
§3-4 回转体精密测量仪器动态校准中偏置误差的分离	(96)
第四章 误差修正技术	(108)
§4-1 显示轮廓畸变的修正方法	(108)
§4-2 传感器特性误差的修正方法	(115)
§4-3 测长机测量中状态偏移的修正方法	(120)

第五章 误差抑制技术	(124)
§5-1 七米激光测长机“闲区误差”的抑制	(124)
§5-2 传感器零位频率漂移的闭环抑制法	(131)
§5-3 定位工作台机械漂移的结构抑制法	(133)
参考文献	(137)

第一章 绪 论

§ 1-1 误差补偿技术研究的内容

一、误差补偿技术研究发展简述

误差补偿技术 (Error Compensation Technique, 简称 ECT) 是随着精密工程发展水平的不断提高而出现并发展起来的一门新兴技术。

在精密工程发展初期, 提高精度水平的主要途径是完善传统技术。随着精度水平的进一步提高, 如果继续提高精度水平, 除采用新技术外, 还必须考虑各误差源的影响方式及如何消除其影响。针对这一问题, 各国学者结合自己的特长, 主要采取两种途径。

一种是“误差可隔离(减弱)”的途径。倾向此途径的学者认为: 通过分析和诊断各种误差源, 可采取有针对性的“硬技术”, 使误差得以消除或减小, 例如采用严格的温度控制、隔振措施、气流扰动及环境状态的控制, 以消除或减小系统外的误差源影响, 并通过提高仪器设备中关键部件的制造精度减小系统内的误差源影响。就测量仪器而言, 可将这种观点归结为“误差隔离模型”, 如图 1-1 所示。

其中 S_i 为被测量; S_0 为测量系统输出; $e_1, e_2, \dots, e_n$ 为各种干扰误差; $P_1, P_2, \dots, P_n$ 为针对不同误差源而设置的隔离(或减弱)环节。持这种观点的多为美国的一些研究机构, 较

有代表性的有美国的 Lawrence 实验室和莫尔公司等。

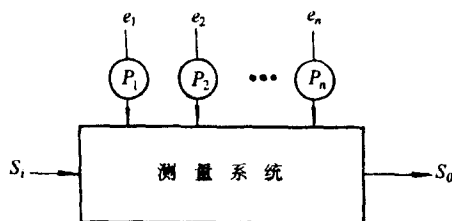


图 1-1 误差隔离(减弱)模型

另一种是“误差可补偿”的途径。倾向此途径的学者认为：误差源可以通过测试经验或其它方法诊断出来，这些误差都有确定的特点和自身表现规律，并以其确定的规律影响测量结果。在不改变测量环境和仪器主要结构的前提下，通过补偿方法和补偿环节(软件或硬件)的加入，便可利用误差的特点与规律，消除或大大减弱这些误差的影响，这种观点可归结为“误差补偿模型”，如图 1-2 所示。

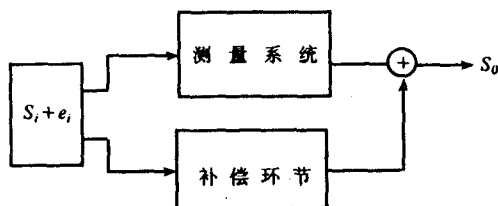


图 1-2 误差补偿模型

其中 e_i 为干扰误差。倾向此途径的学者主要有英国 Warwick 大学微工程和计量中心的 Whitehouse 教授和 Chetwynd 博士，美国 Wisconsin-Madison 大学机械系的 X. M. Wu(吴贤铭)教授。

误差补偿技术用很小的代价便可获得“硬技术”难以达到的精度水平,因而误差补偿技术以其强大的技术生命力迅速被各国学者、专家所认识,并使之得以迅速发展和推广。时至今日,几乎所有的精密仪器、精密制造设备和精密控制设备均采用了误差补偿技术。误差补偿技术已成为现代精密工程的重要技术支柱之一。

二、误差补偿技术研究的意义

误差补偿技术的研究具有非常重要的科学意义和工程意义。

1. 科学意义

误差补偿技术的迅速发展极大地丰富了精密仪器设计理论、精密测量学和整个精密工程学,成为这一学科新的重要分支。特别是误差补偿技术与其它学科有着非常密切的联系。一些典型的误差补偿环节都是由机、电、光、计算机和传感器等项技术的有机复合而形成的。误差补偿技术是计量学、测量工程学、精密仪器设计理论、传感技术、机械工程学、光学、电子学、电工学、材料工程学、数字信号处理技术和计算机技术等多学科内容高度交叉的一门新技术。作为一门新技术分支,误差补偿技术具有自己的独立内容和特色。进一步研究误差补偿技术,使其理论化、系统化,将具有非常重要的科学意义。

2. 工程意义

误差补偿技术的工程意义是非常显著的,它包含三层含义:其一是,采用误差补偿技术可以较容易地达到“硬技术”要花费很大代价才能达到的精度水平,如一台普通的三

坐标测量机空间坐标测量的最大综合误差为 $\pm 40\mu\text{m}$,经误差补偿后,其最大综合误差降为 $\pm 4\mu\text{m}$;其二是,采用误差补偿技术,可以解决“硬技术”通常无法达到的精度水平,如现代天文望远镜和X射线显微镜镜头的圆度要求达 $\pm 5\text{nm}$,这首先要求测量仪器的准确度应优于 $\pm 2.0\text{nm}$ 。事实上,目前圆度仪轴系回转误差只能达到 $\pm 20\text{nm}$,这在目前情况,对精密轴系的加工能力已接近极限水平,“硬技术”已颇感吃力。而采用误差分离技术和修正技术消除掉圆度仪轴系的回转误差中的系统分量之后,其残余回转误差便可小于 $\pm 2.5\text{nm}$;其三是,在满足一定的精度要求情况下,若采用误差补偿技术,则可大大降低仪器和设备制造的成本,具有非常显著的经济效益。

精密工程中的实际问题层出不穷,对精密仪器和精密测量技术、精密制造设备和精密工艺及精密控制的精度要求不断提高,因此,不断完善现有的误差补偿技术,不断研究新的误差补偿技术,具有非常重要的实际意义。

三、误差补偿技术研究的内容

误差补偿技术是精密工程学新的重要分支,其研究范围非常广泛,这里仅就精密仪器工程和精密测量技术范畴进行研究。

精密测量中的误差补偿技术研究的目的是,在确切掌握误差源及其作用规律的基础上,通过测量方法或仪器结构的合理调控,使误差的影响得以消除或减小,而这个合理的调控过程是依一定的理论和模型进行的。研究误差补偿技术主要是研究这些可实现合理调控的理论、模型及相应的工程方法

与工程结构,其主要内容可归纳如下。

(1) 从误差补偿的角度去进一步深入认识各误差环节,掌握误差的性质、产生规律和在测量过程中或仪器工作过程中的作用规律,并确切掌握所研究误差与其它误差和有用信号之间的关系,为建立对该误差的补偿模型做好准备。

(2) 研究误差补偿的各种原理模型。针对误差的性质、产生和作用规律,建立起可对该误差进行补偿的相应模型,如数学模型、状态模型或系统结构模型等。

(3) 研究可实现补偿模型功能的工程方法或系统。根据误差补偿模型的要求,结合现有的各类技术,建立起工程上可行的具体测量技术和仪器结构。如补偿电路,补偿光路,补偿机构和补偿算法等。

(4) 研究误差补偿技术的评价方法。当一个补偿系统建立起来后,应对该系统的补偿效果,即测量系统或仪器有关性能指标的改善程度进行分析,以便进一步改进补偿模型或系统。

§1-2 有关误差补偿技术的概念与模型

根据对误差处理的方式不同,精密测量中的误差补偿技术可分为三种形式:即误差分离技术、误差修正技术和误差抑制技术。现在对三种形式的误差补偿技术的概念含义、相应模型、分类方法和补偿效果的评价方法分述于下。

一、误差分离技术

误差分离技术(Error Separation Technique)是通过信息源变换或模型参数估计的方式,使有用信号分量与误差分

量相分离的一种测量技术。

通过误差分离技术,可以实现下述两个目的:一是可以获取修正量;二是通过对误差分量的排除,可直接获取被测量信号。误差分离技术有两种类型:一种是基于信息源变换,另一种是基于模型参数估计。

基于信息源变换的误差分离技术是这样一个测量过程,即通过测量方法和相应测量装置的适当设计,改变误差分量与有用信号间的组合关系,并从信息源(误差分量与有用信号相混迭的信息源)的不同位置拾取信号,再根据在不同位置处拾取的信号间的联系,建立起误差分量与有用信号间的确定的函数关系,最后经相应的信号处理,使有用信号与误差分量分开。

基于信息源变换的误差分离技术的结构模型,如图 1-3 所示。

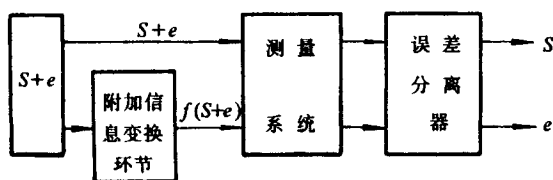


图 1-3 误差分离技术结构模型

其中 S 为有用信号分量, e 为误差分量。

目前使用的一些误差分离方法都具有一定的适用范围,自身都存在一定的缺陷,如因信号抑制而只能分离出有限部分,所以可根据具体的误差分离问题,建立多阶分离模型,

如图 1-4 所示。

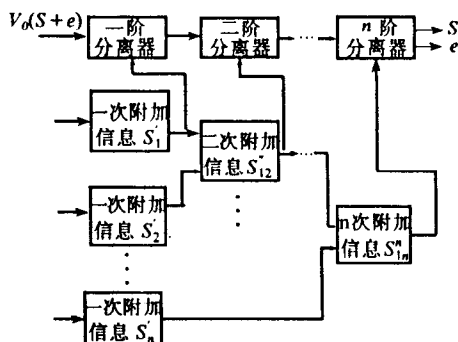


图 1-4 n 阶分离器模型

误差分离方法的核心是利用附加信息，并经处理，使附加信息与源信息中的相同部分得到抑制，进而使误差与信号得以分离。一些分离方法只利用了一次附加信息，而 n 阶分离器模型则是在多次提取一次附加信息的同时，提取二次信息，在一阶分离的基础上，使误差与信号得到进一步分离。根据测量精度的需要和信息提取手段的发展，还可进行三阶分离。作为一般模型，亦可表达成 n 阶分离。

基于模型参数估计的误差分离技术是在确切地掌握了误差的作用规律并建立起相应的数学模型后，对模型进行求解或估计，以获取有关参数估计值的测量信号处理技术，其结构模型如图 1-5 所示。

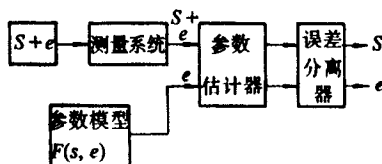


图 1-5 基于模型参数估计的误差分离模型

二、误差修正技术

误差修正技术(Error Correction Technique)是指在以某种方式获取修正量并从测量数据中消除误差分量的一种误差补偿技术。误差修正技术有两个关键环节,一个是修正量的获取方式,一个是修正方式。从这两个环节考虑,这一技术可大致划分为二种类型:基于修正量预先获取的误差修正技术和基于实时测量的误差修正技术。

修正量预先获取方式的种类很多,如通过上级标准检定获取、通过采用误差分离技术的方式获取及通过模型参数估计的方式获取等,相应的误差修正模型如图 1-6 所示。

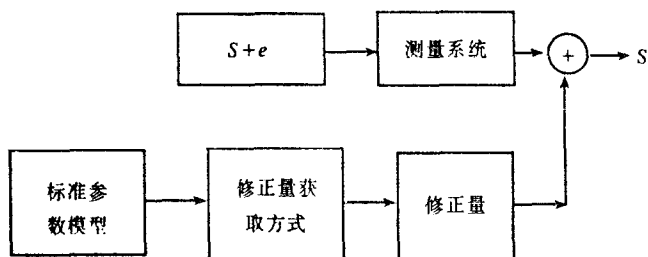


图 1-6 基于修正量预先获取的误差修正技术

如果能确定误差源,并且确认该误差可以单独测量,则可建立对误差的监测系统,并把监测系统并入测量系统中,这样在测量过程中便可实时地修正掉干扰误差,其结构模型如图 1-7 所示。