

微位移平台数据采集与处理技术

邵萌 赵德宏 王赛男 著



东北大学出版社
Northeastern University Press

微位移平台数据采集与处理技术

邵 萌 赵德宏 王赛男 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 邵 萌 赵德宏 王赛男 2018

图书在版编目 (CIP) 数据

微位移平台数据采集与处理技术 / 邵萌, 赵德宏,
王赛男著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2018. 9

ISBN 978-7-5517-2022-9

I. ①微… II. ①邵… ②赵… ③王… III. ①控制系
统—数据采集—研究 ②控制系统—数据处理—研究 IV.
①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 239335 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83683655(总编室) 83687331(营销部)

传真: 024-83687332(总编室) 83680180(营销部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm×240mm

印 张: 11

字 数: 209 千字

出版时间: 2018 年 9 月第 1 版

印刷时间: 2018 年 9 月第 1 次印刷

责任编辑: 孟 颖

责任校对: 刘新宇

封面设计: 潘正一

ISBN 978-7-5517-2022-9

定 价: 59.00 元

序 言

微位移定位技术是实现高精度运动控制的一门综合技术，是现代科学中最重要的技术之一，其发展水平反映了一个国家经济和技术的综合水平，也是国家制造技术水平的重要标志。数据采集与处理系统是微位移定位技术中的重要组成部分，只有实现了高精度的数据采集才能实现高精度的微位移定位。

本书主要内容和结构安排：本书以沈阳建筑大学微纳检测与运动控制实验室的微位移平台为研究对象，对微位移平台数据采集(包括控制系统数据采集部分以及检验系统数据采集部分)进行介绍，并对控制系统数据和检验系统数据的处理进行论述。

全书共分 8 章，具体内容安排如下。

第 1 章：主要介绍微位移平台的国内外发展现状及其主要应用领域；简单介绍本书两个数据采集系统，即控制系统数据采集和检验系统数据采集；并介绍数据处理相关内容。

第 2 章：给出微位移平台数据采集的整体结构设计，分别介绍控制系统数据采集部分及检验系统数据采集部分的整体结构。

第 3 章：主要介绍控制系统数据采集原理，介绍香农采样定理，模数转换和数模转换的方法，并对电容传感器进行特性分析。

第 4 章：主要介绍检验系统数据采集原理，包括光的干涉理论，基于光的干涉理论的位移测量，激光的物理性质，激光干涉仪的测长原理。

第 5 章：主要阐述控制系统数据采集部分的实现方法，提出控制系统数据采集整体设计方案，介绍主要器件的选择和 A/D 电路设计及 D/A 与 DSP 接口电路设计，并给出信号完整性分析方

法。

第6章：主要阐述检验系统数据采集部分的实现方法，首先介绍系统硬件设计过程，主要包括标定测量组件和标定测量方法；然后介绍系统软件设计过程，主要包括人机界面设计、主程序设计、硬件连接程序设计、数据保存程序设计、复位程序设计等；最后描述实验过程及结果分析。

第7章：主要介绍控制系统数据处理，包括精密定位控制系统噪声来源分析，传统数字滤波器设计与分析，重点介绍 FIR 滤波器设计及结合文化算法与案例推理的数字滤波器设计方法，最后介绍电容传感器的非线性校正方法。

第8章：主要介绍检验系统数据处理，针对微位移平台的各项技术参数分别介绍测量方法和计算方法。

本书由沈阳建筑大学机械工程学院教师邵萌、赵德宏，沈阳科技学院教师王赛男联合撰写。由于时间和作者水平有限，本书存在不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

作者

2018年2月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 微位移平台概述	1
1.2 数据采集系统概述	5
1.3 数据处理概述	8
第 2 章 整体结构设计	12
2.1 控制系统数据采集部分	12
2.2 检验系统数据采集部分	17
第 3 章 控制系统数据采集原理	20
3.1 香农采样定理	20
3.2 ADC/DAC 转换指标	21
3.3 电容传感器的特性分析	23
第 4 章 检验系统数据采集原理	27
4.1 基于光的干涉理论的位移测量	27
4.2 激光干涉仪的测长原理	28
4.3 空气折射率算法	30
第 5 章 控制系统数据采集部分的实现方法	36
5.1 控制系统数据采集整体设计方案	36
5.2 主要器件选择	37
5.3 A/D 电路设计	41
5.4 D/A 与 DSP 接口电路设计	48

5.5	电路的 PCB 板制作与数据采集实验	49
5.6	信号完整性分析	54
5.7	数据采集	70
第 6 章	检验系统数据采集部分的实现方法	72
6.1	系统硬件设计	72
6.2	系统软件设计	74
6.3	实验过程及结果分析	79
第 7 章	控制系统数据处理	92
7.1	精密定位控制系统噪声来源分析	92
7.2	传统数字滤波器设计与分析	94
7.3	FIR 滤波器设计	105
7.4	结合文化算法与案例推理的数字滤波器设计	116
7.5	电容传感器的非线性校正	142
第 8 章	检验系统数据处理	151
8.1	检验系统简介	151
8.2	测量参数	153
8.3	检验方法与数据处理	156
参考文献	166

第1章 绪论

1.1 微位移平台概述

近年来,随着微电子技术、宇航、生物工程等学科的迅速发展,世界正式进入“亚微米-纳米”时代。在电子、光学、机械制造等众多技术领域中,迫切需要高精度、高分辨率、高可靠性的微定位系统,用以直接工作或配合其他仪器设备完成高精度的工作。微位移定位技术在微机电系统、纳米制造技术、微电子及纳米电子技术、纳米生物工程等众多高科技领域将发挥越来越重要的作用。微纳米加工技术的发展,离不开精密工作台技术的发展与进步,所有纳米操作及超级精密制造的研究及应用领域的进一步发展,都需要依靠高精度的定位平台和更高的控制精度。

高精度微位移控制技术是集控制技术、电子技术、数字技术、传感技术、驱动技术、测量技术及精密机械技术于一体,实现高精度范围内的运动控制的一门综合技术。运动控制技术的应用大多以各种形式的运动平台机构或产品来实现。在为纳米科学技术研究提供小范围(微米量级运动范围)纳米级精度的微运动时,最常见的是以压电陶瓷 PZT 作为驱动部件的柔性铰链机构微动工作台。然而,要为纳米科学技术研究提供大范围(指毫米量级运动范围)纳米级精度的微运动时,柔性铰链机构、压电堆、丝杆滑动机构和气浮微动工作台等却都不能满足要求,它们不能同时实现纳米级运动精度和满足大运动范围的要求。

技术先进国家对微位移定位技术的发展给予了高度重视,美国在 21 世纪初提出了超电子学科研计划,此计划的目的是实现以后的电子元器件的存储密度比现有的至少高 100 倍,速度也能达到现有的 100 倍,然而元器件的功率消耗则需要降到现有器件的 2%。要实现这样的标准,电子器件的尺寸要在纳米级范围内。因此,微电子元器件由原始尺度升级到纳米级是 21 世

纪科技发展的必然。2003年, Serbin 等采用飞秒激光诱导无机/有机混合材料的双光子聚合, 获得了结构尺寸小于 200nm、周期为 450nm 的三维结构和光子晶体。先进的半导体芯片制造技术和大规模存储器制造技术的发展更是将微位移定位技术不断推上新的极限, 纳米检测和加工在这些领域里占有举足轻重的位置, 随着集成度的不断提高, 器件加工精度要求已逼近纳米甚至亚纳米的水平, 传统的检测技术和手段正在受到严峻的挑战。

1.1.1 微位移控制技术的国内外发展现状

微位移定位技术的水平反映了一个国家的经济和技术综合水平, 是国家制造技术水平的重要标志, 是先进制造技术的重要支柱。随着微位移平台在各个领域的广泛应用, 世界上许多国家都开始重视微位移技术的发展, 并投入了大量的研究经费。

1975年, 美国国家标准局的 Fredric Escric 和 Eelayton Teague 首先以柔性铰链为向导机构, 以压电陶瓷微位移器为驱动原件成功研制出一维精密工作台, 并应用于光电学和电子显微镜。1991年, 美国国家与技术研究院(NIST)的 J. Fu 等人研制出二维 X-Y 精密工件台, 用于扫描隧道显微镜(STM), 实现了样品大范围二维扫描。同年, 日本学者 T. Fujii 等人研制出三维精密工件台, 成功地用于 AFM(原子力显微镜)中以测量半导体集成电路微观表面形貌。1999年, 新加坡南洋理工大学 Peng Gao 利用两级放大原理和双平行四杆机构原理设计出大位移高分辨率微定位平台, 运动范围达到 $40\mu\text{m}\times 45\mu\text{m}$, 分辨率分别达到 $0.020\mu\text{m}$ 和 $0.018\mu\text{m}$ 。2004年, 韩国科学技术的 Dongmin Kim 等人研制出基于柔性铰链的三维精密工件台, 并应用于原子力显微扫描仪中, 减小了阿贝误差。2006年, 伊利诺伊大学香槟分校的 Qing Yao 等人研制出二维并联 XY 微动平台, 该微动平台用压电陶瓷驱动, 采用柔性铰链为弹性支承的柔性平行四连杆结构为运动导向, 工作行程为 $87\mu\text{m}\times 87\mu\text{m}$, 开环谐振频率为 536Hz, 闭环的定位精度达到了 20nm, 且具有很好的线性度。2008年, 纽卡斯尔大学的 Yuen Kuan Yong 等人研制出基于柔性铰链的二维微动平台, 工作行程 $25\mu\text{m}\times 25\mu\text{m}$, 一阶固有频率为 2.5kHz, 两坐标轴的交叉耦合达到了 -35dB。美国 nPiont 公司为美国 Veeco 公司、Agilent 公司生产的原子力显微镜配套生产计量型三维纳米位移平台和一系列的纳米位移系统, 可方便地接入当前主流的几个不同厂商的 SPM 系统, 该公司还为全球的高端设备制造商提供委托生产(OEM)服务。2010年, 德国的 PI 公司已经有从 1 轴到 6 轴运动、最小 0.02nm 分辨率和最大 1.8mm 行程的成熟的产品上市。可见, 国外的高精度微位移平台的研究已

经取得了大量的成果，并且很多研究成果已经成功应用到工业生产中去。目前，微位移平台的研究方向是高精度、大行程、高速度。

国内学者对于微位移平台的研究尚处于起步阶段，并且主要集中在对压电材料驱动性能以及各类微位移实验系统的开发研究上，还不能为纳米技术和相关产业的发展提供必要的高端计量基准和检测技术方面的支持及相关的仪器设备。天津大学的“压电陶瓷纳米定位系统”的行程为 $10\mu\text{m}$ ，定位精度为 10nm ，定位分辨率为 2nm 。电子工业部1426所研制的二维精密微位移平台，行程为 $20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$ ，分辨率为 1nm ，重复定位精度为 $0.1\mu\text{m}$ 。

21世纪，世界进入知识经济时代，微位移定位控制技术因其对信息科学和生命科学的巨大推动作用而被发达国家列为绝对的国家机密和商业机密，严格限制对我国出口。但我国比发达国家起步不晚，传统科学影响较小，为我国跨越式发展提供了可能，我们应抓住这一机遇，使我国的微位移控制技术产生飞跃。

1.1.2 微位移平台的主要应用领域

随着微位移平台定位技术的不断发展，电子产品进入微型、轻便、高集成的时代。由此，芯片的集成程度日益提高、I/O密度日益增大，芯片尺寸、焊盘的直径以及芯片引线间距正不断减小。正是由于微位移平台技术的不断发展，推动了光刻技术的发展，Intel公司创始人之一的Goldon Moore提出过一个摩尔定律，即每隔18个月单个芯片上的晶体数目将增加1倍。基于这些原因，微位移平台被应用在芯片的生产设备上可以提高芯片的精度和集成度。

在航空航天方面，微位移定位技术可应用于微型昆虫机器人上，用于侦察敌方的武器储备和生产情况；可应用于卫星上，用来导航定位，其不仅能够降低发射费用，而且可以提高性能和可靠性；可用于微型飞行器上，满足军用或民用侦察需要；可用于纳米导弹上，提高隐蔽性和机动性。

在半导体工业方面，硅片需要对小于 $1\mu\text{m}$ 的瑕疵进行检测，因此需要实现以低于 $1\mu\text{m}$ 的像素尺寸对瑕疵进行成像。图像呈现的特点是像素总数越多，速度越稳定，图像呈现效果越好，因此需要利用微位移定位技术进行定位，确保速度恒定。

在生物工程领域中，生物医学的研制过程往往需要针对单一的游离细胞进行控制操作，例如捕捉或释放单一细胞，或向某单一细胞内部注射某些成分，并且在操作过程中能够同时测定和记录细胞生物的特定电参数。为了达到这个目的，科学家研制出了游离细胞捕捉仪，该仪器针对只有几微米的细

胞进行控制，并且要求对细胞的控制分辨率达到几十纳米，因而其关键操作是在最接近单一细胞时进行精细的微调。为了完成以上操作，微驱动定位系统需要定位精度高、操作能力精细。因此高精度微驱动定位系统可以完成细胞级的操作，真正地实现生物的工程化，不仅提高了控制效率，并且打破了该领域中只有少数人可为的局面。

在医疗科学方面，近些年兴起了在多学科交叉领域中应用计算机辅助医疗外科技术与医疗机器人相结合的医疗技术。应用前沿研究课题之一的高精度定位系统成为越来越受到关注的技术。显微外科手术引领着外科手术的发展，应用该手术方式可以使病人身体损伤小、伤口愈合快、降低病人痛苦程度、减少病人失血量，并且降低病人医疗费用。目前显微外科手术主要在显微镜下由人工完成，需要依靠具有多年外科手术经验的专家完成手术。在显微外科手术中采用微动机器人系统，不仅可以减轻医生的负担，还能够提高手术的成功率，缩短手术的时间，因此该技术的应用前景非常广泛。该技术基于微位移控制技术，常见的显微外科手术有心血管搭桥手术、神经外科手术、脑外科显微手术等精密的手术。为了让手术完成得更加精细，基于微位移控制技术的机器人显微外科手术系统备受推崇和关注。目前，一种能够缝合人体静脉血管以及疏通眼球视网膜静脉堵塞的微操作机器人已经被研制出来。由此可见基于高精定位系统的医疗技术在治疗过程中病患的痛苦小、伤害小、治疗效果高，因此该技术将会得到广泛应用。医生可以运用带有传感器的微动机器人完成脑外科手术、神经外科手术、心血管搭桥等显微作业手术。科学家将微位移定位技术与扫描显微镜技术相结合，开创了纳米可视靶向定位清除术，对人体腋下组织进行定向探测、可视准确定位，精细分离狐臭患者的大汗腺与正常组织。突破传统手术、抹药、激光手术、高频电针等方法不能根治的难题，取得了可视准确定位、创口小、无疤痕、愈合快、手术时间短、无副作用等效果。

网络技术的发展带来了数字通信市场的繁荣，继而信息媒介的光纤在现代化信息建设中被广泛应用，从而使对光纤波导和光纤耦合器的需求激增。由于光纤波导和光纤耦合器的对接校准困难，因此其体积虽然很小，但是价格昂贵。目前基于微位移平台技术的精密校准平台被广泛用于光纤对校技术中，该精密校准平台可以被认为是一套高精度微位移操作机器人，其校准精度为 $0.1\mu\text{m}$ 。应用该机器的左右精密微位移操作手可以完成光纤与器件之间的位置对接，并且能够自动补偿这一控制过程中产生的任何误差，最终实现器件与光纤在最佳耦合功率位置对接。应用微精校准平台可以取代人工操作，减少人工费用，缩短生产周期。

1.2 数据采集系统概述

在计算机有着广泛应用的今天,数据采集在计算机数据处理及控制领域是一个非常重要的方面,它是连接计算机数字处理与外部模拟信号的桥梁。而且随着计算机和数字电路的高度发展,高精度信息数据的采集、处理与存储等在雷达、通信、水声、遥感、地质勘探、振动工程,无损检测、语音处理等诸多领域已有广泛的应用。

数据采集(Data Acquisition)就是将被测对象的各种参量(物理量、化学量、生物量)通过各种传感元件转换为电信号,再经过信号调理、采样、量化、编码及传输等步骤,最终送至处理器进行数据处理、分析和存储记录的过程。实时数据采集是测量系统中不可或缺的组成部分。因此实现数据高速和高精度采集,保证信息的完整性、有效性是系统能可靠工作所必须满足的条件之一。

本书所介绍的微位移平台数据采集系统主要包括控制系统数据采集和检验系统数据采集两部分内容。

1.2.1 控制系统数据采集概述

控制系统数据采集主要有三个部分:第一部分是对模拟信号预处理,主要是对信号进行滤波和放大等。第二部分是模拟/数字转换,将模拟信号转变为易于被处理的数字信号。第三部分是数字信号的处理、存储以及处理结果的显示和输出。

20世纪中期出现了数据采集系统的研发。1956年,美国成功地在军事测试系统上运用了数据采集技术,完成了传统技术不能够完成的工作。在20世纪中后期,国外把较成熟的数据采集产品投放到市场,但在这个时期,数据采集系统只能为特别产品服务,有很大的局限性。到了20世纪末期,随着微型计算机的发明,伴随着微型计算机生产出了一种可以和其相互兼容的数据采集系统。此兼容系统也在随后的发展中不断转化成两种产品:一种是在实验室运用的数据采集系统;还有一种是工业生产中的实时数据采集系统。利用计算机、单片机和集成电路组合,并使用软件管理,有效地使系统的成本降低、体积减小、功能增强,数据处理的能力也大大加强了。将来,利用片上系统(SoC)、现场可编程门阵列(FPGA)、ARM处理器及数字信号处理器(DSP)等高性能处理芯片,根据实验与工业生产不同的需求,通过运用增减或者修改模块并结合系统软硬件的编程,就能够实现扩充与修改

系统，快速地完成一个新的数据采集系统。

受当前 A/D 转换芯片发展水平的限制，单片 A/D 很难同时做到高速率采样，用多片相对低速的 A/D 转换芯片采样是提高系统采样率的一种有效方法。

1.2.2 检验系统数据采集概述

检验系统数据采集主要有两个部分：第一部分是激光干涉仪，主要是采集位移数据，用以检验微位移平台技术参数。第二部分是上位机，用以显示激光干涉仪的测量数据。

二十几年前，精密机床定位的最大误差是丝杆的螺旋误差及丝杆的膨胀误差导致的，现在上述误差已经被大幅度降低，机床的主要误差也变成了垂直度误差和直线度误差。为了得到更好的精度，3 个位移误差、6 个直线度误差以及 3 个垂直度误差都必须得到测量和补偿。因此，需要更加精密的校准工具来完成它的测量，激光干涉仪就是这种工具的典型代表。

阿尔伯特·亚伯拉罕·迈克尔逊在 19 世纪 80 年代发明了迈克尔逊干涉仪，其基本原理是利用光的波长作为度量单位进行精密测量。第一个迈克尔逊干涉仪使用白光作为光源，用一个固定镜子和一个可移动镜子测量线性位移。后来使用氦氖激光器发射激光代替白光，最终分辨率可达到 $0.001\mu\text{m}$ 。如今，单频系统和双频系统的干涉仪所使用的氦氖激光已经完全取代了白光，其中英国 ML-10 和 XL-80 与惠普的 5529A 分别为单频和双频系统的代表产品。

如今激光干涉仪已经在天文、机械等各个领域得到充分利用。激光干涉引力波天文台 (Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory, LIGO) 使用激光干涉仪检测太空中的重力波，进而可以探知黑洞或者太空不明飞行物等物体。由于激光干涉仪测量精度非常高，其对环境的要求就相对更加严格，但是诸如气流、空气压力等可能影响测量精度的自然环境却不易控制，B. K. A. Ngoi 与 C. S. Chin 设计了一个补偿系统，通过测量光在物体表面的折射率来设置补偿参数以得到更精确的数据。此系统可以使激光干涉仪在较为苛刻的环境下完成高精度测量，从而解决了实际应用中的一些问题。在使用激光干涉仪完成精密数据采样时，位移噪声和相位噪声成为制约其精度的两大瓶颈。位移噪声即使用激光干涉仪时干涉仪镜片产生的微小移动，现代技术通过增加干涉仪镜片的数量可以降低这种噪声带来的干扰。相位噪声是在光场的波动阶段产生的，P. Gallion 与 G. Debarge 通过对激光线宽、相位匹配等干涉仪参数的分析与研究得出结论，在连续光谱上使用相位匹配、相位

平衡以及相位关联可以降低相位噪声对数据精度的影响。

英国雷尼绍(Renishaw)公司生产的新型单频激光干涉仪利用偏振光移相方法,得到了三路相位一次正交的激光干涉信号,经光电接收和放大后,可以使 0° 与 90° 、 0° 与 -90° 的光波信号分别输入不同的两个比较器电路当中,这样就生成了错相为 90° 的两路交变方波信号,推动可逆计数器进行计数。这种结构的革新实现了两个重要功能:一是消除了直流分量,并且实现了共模抑制;二是因为三路激光信号完全共路,可以有效地消除由于测量中平台振动等外界因素引起的噪声干扰,从而有效地保证了激光干涉仪低频测量时的稳定性,最终可以令单频激光干涉仪实现双频激光干涉仪的各种功能。

从20世纪70年代开始,激光干涉仪在国内也有较快的发展,并且取得了一定的成绩。1975年,中国科学院等单位联合开发出了我国第一台双频激光干涉仪。其最大量程为60m,测量精度为 0.5×10^{-6} m,虽然在当时不是世界一流水平,但也实现了技术上零的突破,为我国干涉仪的进一步发展奠定了坚实的基础。随后第一台激光量块干涉仪诞生于1979年,是由中国计量研究院等单位协作完成,达到了国际先进水平,量块被誉为“量具之王”,是长度测量的主要基本工具。

在激光干涉仪的改进上,我国也在不断尝试新技术,以取得更大的突破。黎永前等人提出一种外差干涉非限定误差修订方法,可以使外差干涉仪测量的不确定度从20nm降低到10nm。在现代激光干涉仪测量中,除了对精确度有要求,也常常对正交信号进行相位检测,此时可通过改进激光干涉仪的算法来进行检测。基于FPGA的单频激光干涉仪的相位检测器通过差分原理消除共模干扰,然后通过坐标旋转计算机(Coordinate Rotational Digital Computer, CORDIC)算法解决了这一难题。

截至目前,清华大学、哈尔滨工业大学、华中理工大学、沈阳建筑大学、中国科学院等科研院所都相继对激光干涉仪的原理及相关技术进行了研究。其中,20世纪90年代,哈尔滨工业大学精密仪器专业研发出光电接触式的激光干涉仪,该激光干涉仪的分辨率达到 $0.01 \mu\text{m}$,设备的总误差为 $0.01 \mu\text{m} \pm 5 \times 10^{-8} L$ (其中 L 为被测物体的长度)。四川大学研发的双频激光干涉仪测量效果达到了当时国际先进水平,该双频激光干涉仪的分辨率为 0.01nm ,设备测量不确定度为 2.5×10^{-7} m。为了解决高频激光干涉仪抗干扰性差和测量精度低等问题,清华大学的薛实福等研究人员研制出一种利用自动扫描光电二极管阵列(SSPDA)为光束接收装置的迈克尔逊激光干涉仪,使得直流信号转化为交流信号、微处理机处理,这种新型激光干涉仪具有自

动补偿波长的功能。大量实验验证,这种激光干涉仪比其他一般的激光干涉仪抗干扰性更强、测量精度更高。此外,清华大学在激光调谐绝对距离测量领域及外差干涉的相位检测电路设计领域,华中理工大学在声光调制外插干涉的光路设计领域做出了十分出色的成绩。

1.3 数据处理概述

数据处理是对数据的采集、存储、检索、加工、变换和传输。数据是对事实、概念或指令的一种表达形式,可由人工或自动化装置进行处理。数据的形式可以是数字、文字、图形或声音等。数据经过解释并被赋予一定的意义之后,便成为信息。数据处理的基本目的是从大量的,可能是杂乱无章的、难以理解的数据中抽取并推导出对于某些特定的情况来说是有价值、有意义的信息。数据处理是系统工程和自动控制的基本环节,数据处理贯穿于社会生产和社会生活的各个领域。数据处理技术的发展及其应用的广度和深度,极大地影响着人类社会发展的进程。

根据处理设备的结构方式、工作方式,以及数据的时间空间分布方式的不同,数据处理有不同的方式。不同的处理方式要求不同的硬件和软件支持。每种处理方式都有自己的特点,应当根据应用问题的实际环境选择合适的处理方式。数据处理主要有四种分类方式:根据处理设备的结构方式区分,有联机处理方式和脱机处理方式;根据数据处理时间的分配方式区分,有批处理方式、分时处理方式和实时处理方式;根据数据处理空间的分布方式区分,有集中处理方式和分布处理方式;根据计算机中央处理器的工作方式区分,有单道作业处理方式、多道作业处理方式和交互式处理方式。

随着计算机的日益普及,在计算机应用领域中,数值计算所占比重很小,通过计算机数据处理进行信息管理已成为主要的应用。如测绘制图管理、仓库管理、财会管理、交通运输管理,技术情报管理、办公室自动化等。在地理数据方面既有大量自然环境数据(土地、水、气候、生物等各类资源数据),也有大量社会经济数据(人口、交通、工农业等数据),常要求进行综合性数据处理,故需建立地理数据库,系统地整理和存储地理数据,减少冗余,发展数据处理软件,充分利用数据库技术进行数据管理和处理。

本书所介绍的微位移平台数据处理系统主要包括控制系统数据处理和检验系统数据处理两部分内容。

1.3.1 控制系统数据处理概述

在精密定位控制系统中，噪声的存在严重影响系统定位精度。发生的信号在传输过程中可能会遭遇这样或者那样的干扰，导致信号变形。通过对控制系统数据处理，能够把不需要的谐波处理掉，得到原有的信号，从而提高系统定位精度。

噪声，是指观测数据对系统没有贡献或者起干扰作用的信号。在通信中，无用信号表现为特定波段频率、杂波；在传感器数据测量中，无用信号表现为幅度干扰。例如在温度测量中，传感器测量值与真实温度之间往往有一定的随机波动，这个波动就是随机干扰，其实噪声是一个随机过程，而随机过程有其功率谱密度函数，功率谱密度函数的形状决定了噪声的“颜色”。如果这些干扰信号幅度分布服从高斯分布，而它的功率谱密度又是均匀分布的，则称它为高斯白噪声，高斯白噪声是大多数传感器所具有的一种测量噪声。在工程应用中，如雷达测距、声呐测距、图像采集、声音录制等，只要是传感器采集和测量的数据，都携带噪声干扰，这种影响有的很微小，有的则会使信号变形、失真，严重地导致数据不可用。

现实世界中的有用信息或噪声均不是确定信号，而是满足某种统计特性的随机信号，因此需要采用统计信号处理方法来处理这类问题。统计信号处理方法是从小信号的统计特性出发提取有用信息。统计信号处理中最具代表性的方法为估计。估计理论是从被噪声污染后的量测数据中恢复无法直接观测的随机变量、随机过程或者系统某些特征的统计信号处理方法，因其具有较强的应用背景，已被广泛应用在信号处理、通信、雷达、生物医学、经济等领域。

滤波一词起源于通信理论，它是一种从含有干扰的接收信号中提取有用信号的技术。而更广泛地，滤波是指利用一定的手段抑制无用信号，增强有用信号的数字信号处理过程。滤波也不是万能的，滤波只能最大限度降低噪声的干扰，即有的滤波是不能完全消除噪声的。

1960年，Kalman提出了经典的卡尔曼滤波器(Kalman Filter, KF)，为线性高斯问题提供了最优解决方法。迄今，卡尔曼滤波器仍然被广泛采用，成为解决现实应用问题的标准框架。然而，在现实世界中，科学领域中的实际问题大都具有非线性特性，使得非线性滤波问题广泛存在于现实问题中，对于这些非线性问题，卡尔曼滤波都无能为力。Anderson和Moore 1979年提出的扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)是解决非线性系统滤波

的利器。该滤波算法的基本原理是将非线性的测量方程和状态方程用 Taylor 公式展开, 得到线性化的结果。这个过程是一种近似, 因为它抛弃了高阶项, 也就是很多文献中提到的截断误差问题, 用这个近似的方程来表征原有系统的方程, 可能会导致滤波发散。

Julier 和 Uhlmann 在 1996 年发表的论文中介绍了一种对高斯分布的近似方法, 后来被命名为无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF), 该方法基于无迹变换与 EKF 的算法框架, 其基本思想是: 近似一种高斯分布比近似任何种线性方程容易的多, 因此 UKF 不对系统模型进行线性化, 从而能够更加真实地反映整个系统的特性。对于任意的非线性系统, 使用 UKF 都能够获得精确到三阶矩的系统后验均值和协方差估计。但是 UKF 的使用具有一定的局限性, 由于它以 EKF 框架为基础, 与 EKF 一样对非线性系统的后验概率密度进行高斯假设, 对于一般的非高斯分布模型仍然不适用。2000 年, Wan 和 Nelson 扩展了无迹卡尔曼滤波的使用, 使其既能同时估计动态系统的状态, 又能估计模型参数。

滤波器是一种对信号有处理作用的器件或电路, 随着电子市场的不断发展, 作为统计信号处理中的关键技术, 滤波器也越来越广泛地被生产和使用, 在通信、自动化控制以及航天技术中扮演着重要的角色。如何高效准确地估计所期望的信号或者状态, 仍是滤波器领域的研究热点。滤波器主要分为有源滤波器和无源滤波器。滤波器一般有两个端口, 一个输入信号, 一个输出信号。滤波器的功能就是允许某一部分频率的信号顺利通过, 而另外一部分频率的信号则受到较大的抑制, 它实质上是一个选频电路。把信号能够通过的频率范围称为通频带或通带; 反之, 信号受到很大衰减或完全被抑制的频率范围称为阻带; 通带和阻带之间的分界频率称为截止频率。滤波器是由电感器和电容器构成的网路, 可使混合的交直流电流分开。电源整流器借助此网路滤净脉动直流中的涟波, 而获得比较纯净的直流输出。

1.3.2 检验系统数据处理概述

有资料显示, 目前有些半导体光刻检测设备对定位和运动精度的要求已经达到 1nm 以下, 高密度磁存储器(硬盘)的技术发展也在迅速逼近纳米量级。正在研制的下一代硬盘磁头的加工工艺要求计量型原子力显微镜在几百微米的扫描测量范围内平面度在 1~2nm 以内、测量精度小于 0.5nm。随着先进制造技术的发展和检测仪器水平的要求不断提高, 运动控制精度正在被不断地推向新的极限, 人类认识和利用微观世界的能力也在不断地扩展。

本书通过搭建以激光干涉仪为主要测量仪器的标定系统, 测量微位移平