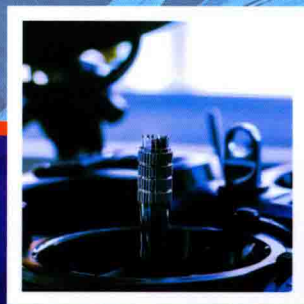




仪器科学与技术学科研究生教学用书

精密仪器精度理论

李东升 郭天太 禹静 ○ 编著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

仪器科学与技术学科研究生教学用书

精密仪器精度理论

李东升 郭天太 禹 静 编著

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 简 介

本书总结了作者多年的科研和教学实践经验,对精密仪器精度理论的有关知识和最新进展作了系统介绍,包括仪器精度理论概述、仪器静态特性与基本精度理论、仪器原理误差、仪器工艺误差、仪器受力作用误差、误差分离技术与补偿技术、实验室环境控制技术等内容。

本书可作为仪器科学与技术学科及仪器仪表工程领域研究生的教学参考书,也可作为信息类、机械类等其他有关方向的研究生教材,同时可供仪器仪表研发和计量测试工作人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

精密仪器精度理论/李东升,郭天太,禹静编著. —武汉:华中科技大学出版社,2017.5
仪器科学与技术学科研究生教学用书
ISBN 978-7-5680-2688-8

I. ①精… II. ①李… ②郭… ③禹… III. ①仪器-精度-研究生-教材 IV. ①TH7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 059019 号

精密仪器精度理论

Jingmi Yiqi Jingdu Lilun

李东升 郭天太 禹 静 编著

策划编辑:万亚军

责任编辑:姚 幸

封面设计:原色设计

责任校对:李 琴

责任监印:朱 玟

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉鑫昶文化有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:9.25

字 数:193千字

版 次:2017年5月第1版第1次印刷

定 价:29.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

仪器精度理论是从事仪器仪表设计研发、应用的人员必备的专业知识。仪器精度理论课程是包含面广、信息量大、综合性强的研究生课程,它涉及概率统计、量仪原理及设计、精密机械、光电工程等多学科知识,并具备工程实践背景。近年来,我国制造业的产业升级对制造和测量的精度提出了更高的要求,探索性价比及测量效率都高的测量方法是仪器工作者的近期重点工作目标。为实现这样的目标,就必须熟悉、掌握和制约仪器或测量系统的误差来源,从而达到减少、规避或利用误差的目的。

作者长期从事精密工程领域的教学和科研工作,书中许多内容来自作者的科研实践和成果,对本学科研究生的科研工作有一定借鉴意义。但由于我国仪器精度理论研究的历史相对较短,因此,这方面理论的系统性和科学性还不够充分。尽管如此,作者还是敢于做也愿意做“抛砖引玉”之人,为我国的仪器精度理论的发展与完善贡献一份微薄之力。

本书为仪器科学技术等学科及仪器仪表工程领域研究生的教学参考书,也可作为信息类、机械类等其他有关方向的研究生教材,同时可供仪器仪表研发和计量测试工作人员使用。

全书共7章,由李东升教授、郭天太副教授、禹静博士共同编著。本书的内容从2010年起就作为自编教材在校内使用,得到了中国计量大学仪器科学与技术学科研究生和教师的大力支持。作者的想法是:在正规出版发行前,每年做一次修订工作,以保证正规出版时的质量。自编教材在2016年度的修订中得到了多方面的帮助和支持,参与本次修订工作的硕士生有陈颖、刘泽国、华芳芳、刘林青、常旭、李喆、刘续、徐靖涛、汪成立、孙志鹏等。

限于作者水平,编辑加工时间也较仓促,书中难免有错误和不当之处,恳请读者批评、指正。

作 者

2016年11月

目 录

第 1 章 仪器精度理论概述	(1)
1.1 仪器精度理论研究的意义与内容	(1)
1.2 我国仪器精度理论的发展状况	(8)
1.3 仪器误差的来源	(9)
1.4 提高仪器精度的途径与方法.....	(11)
复习思考题	(11)
第 2 章 仪器静态特性与基本精度理论	(12)
2.1 概率论及数理统计基础.....	(12)
2.2 测量不确定度基本概念.....	(14)
2.3 不确定度的评定与合成.....	(16)
2.4 系统静态特性与精度方程.....	(18)
复习思考题	(21)
第 3 章 仪器原理误差	(23)
3.1 仪器原理误差及其计算方法.....	(23)
3.2 避免和减小原理误差的方法.....	(27)
3.3 叶片厚度仪的原理误差分析.....	(30)
复习思考题	(34)
第 4 章 仪器工艺误差	(35)
4.1 仪器工艺误差概述.....	(35)
4.2 仪器工艺误差的模型分析方法.....	(36)
4.3 直线度测量平差.....	(47)
复习思考题	(68)
第 5 章 仪器受力作用误差	(69)
5.1 仪器的受力种类.....	(69)
5.2 计算受力作用误差的方法.....	(72)
5.3 减小受力作用误差的方法.....	(76)
复习思考题	(80)

第 6 章 误差分离技术与补偿技术	(82)
6.1 圆度仪主轴径向误差的分离技术	(82)
6.2 圆柱度仪导轨与轴线误差分离技术	(85)
6.3 直线基准误差分离技术	(88)
6.4 气体静压轴系的误差均化机理	(90)
6.5 转矩仪直流漂移误差信号的补偿	(97)
复习思考题	(99)
第 7 章 实验室环境控制技术	(100)
7.1 需要控制的环境因子	(100)
7.2 超净环境技术	(101)
7.3 恒温、恒湿技术	(108)
7.4 超精密隔振技术	(110)
复习思考题	(138)
参考文献	(139)

第 1 章 仪器精度理论概述

1.1 仪器精度理论研究的意义与内容

1.1.1 研究仪器精度理论的意义

测量仪器是指单独或连同其他设备一起用来进行测量的装置。按照《通用计量术语及定义》(JJF 1001—2011),测量是通过实验获得并可合理赋予某量一个或多个量值的过程。这表明,测量是实现确定被测量量值的一组操作。测量方式可以是简单的,也可以是复杂的,可以是直接的,也可以是间接的。但不论采用何种测量方式,都存在着从被测对象中抽取一定的能量或对其状态构成干扰的问题,这样就导致测量结果与被测量的真实情况之间的不一致,即所谓的“误差”。另外,从微观的角度看,根据量子力学著名的“测不准关系”理论可知,不论多么精确的测量,总是存在一个误差的极限值,只不过目前绝大多数的量值的测量结果离这个极限值还较远。作者大胆断言,误差的存在是永恒的,即误差永恒性理论。在大多数情况下,误差都是精度的反义词。误差的永恒性决定了精度理论研究的持久性。

由此可见,我们必须正确评价所获得的量值是否准确。所谓“精度”是指对量值测量结果的可信度或准确程度的一种评价,现今的术语中“准确度”一词与其较为接近,更多时是用“测量不确定度”来表示。由于对“精度”本身的定义没有“测量不确定度”那样完善,有学者建议逐渐用其他词汇取代。但对仪器设计人员来说,“精度”一词更通俗易懂,含义更广泛丰富,使用更方便,也不至于与“准确度”“测量不确定度”等概念混为一谈。因此,仪器研发人员还是习惯于使用“精度”一词作为仪器的主要技术指标。可见,在对仪器的所有要求中,精度要求是对所有仪器的基本要求,是仪器设计者、制造者、使用者共同关心的问题。作为专业人员,对这方面的内容进行全面、系统、深入的研究是极其必要的。作者认为“精度”与“误差”是两个含义相反的概念,即误差越小,精度越高。而仪器研发人员和测量工作者就是要同误差进行持久不懈的斗争,从而使测量精度不断获得提高。但误差也只是呈不断降低的趋势,永远都不会为零,这是因为测量的介入会给被测量带来一定的干扰,即使不接触,这种干扰

也会以一定的形式存在。在提高测量精度的实践中,“追求卓越,挑战极限”成为仪器科学领域的人员永恒的理念。在追求精度不断提高的过程中,我们千万不要忘记“精度”与“经济性”指标之间的协调问题,合理优化“精度”与“经济性”的指标也是仪器工作者必备的能力。

在我们生活的现实社会中,每时每刻都需要对大量的参量进行测量,可以毫不夸张地说,人类已完全处身于一种到处充满测量的现代社会,在科学研究、工农业生产、国际贸易和国防科研中更是如此。离开测量,我们将寸步难行!我们已经进入到对测量依赖型的社会。这些精确确定各种参量的工作都是通过各种测量方法实现的。谈到测量就涉及具体的仪器或测量装置,测量装置或仪器的精度成为影响测量结果不确定度的重要因素。由此可以看出:当今社会中仪器仪表的品种和数量呈逐年增多的趋势,并成为现代科学技术的重要组成部分,迫使我们必须投入相当的人力、物力、财力进行研究,以满足社会经济发展的需求。关于测量仪器的基本功能可从仪器的定义中得到答案。

仪器科学隶属于信息科学领域,且处于该领域的源头,尽管它在信息科学领域所占的比例不算太大,但位置相当重要。源头若存在误差,则会被逐级放大,传播至中下游,带来的影响和危害将难以估量。为减小源头误差对中下游的影响,就必须把源头的工作做好。

科学技术是第一生产力。20世纪30年代前,推动精度提高的基础主要是机械学和机械方面的技术进步,长度尺寸测量精度约50年提高一个数量级;在20世纪30至80年代,光学和电子学的发展进入机械工程领域,长度尺寸测量精度发展速度加快,约20年提高一个数量级;进入21世纪以来,信息化等技术推动科技发展速度,长度尺寸测量精度有望10年左右提高一个数量级。当然,再往前发展,速度不可能一直快下去,可能会相当艰难地逼近极限。这种趋势与制造业的发展趋势具有很好的 consistency。

发达国家在测量方面的投入占本国GDP的4%~6%,在欧盟是每年几千亿美元。国家越发达,对测量越重视,投入力度越大,形成良性循环。因此,测量技术水平的高低(包括了仪器精度的高低)成为评价一个国家综合国力高低的显著标志。仪器科学是一门高新技术领域,其基础性核心技术涉及技术壁垒,是国家间商业及军事竞争的重要筹码,无法通过技术引进的方式解决,必须要靠自行研发的方式获得。

我国新近提出的“节能、降耗、减排、保障民生”的号召,对测量领域技术人员提出了新的要求和挑战,从事本领域工作的工程技术人员要抓住这千载难逢的机遇,尽快掌握这方面的高新技术,为国家建设与发展做出应有的贡献。

从学科发展的角度来看,仪器精度理论是仪器科学与技术学科的核心内容。通过本课程的学习,我们可以更科学、合理、经济地实现精度指标,以及协调其与经济性之间的问题。仪器精度理论对解决工程上的问题将具有重要的借鉴意义。

1.1.2 仪器精度理论中的若干基本概念

仪器精度理论主要研究影响仪器精度的各项误差来源及特性,研究误差的评定和估计方法,掌握误差的传递、转化和相互作用的规律,误差合成与分配原则,从而为精度设计提供可靠的科学依据。更关注对仪器各组成部分形成的各种误差源的识别,以利于在仪器设计时对各环节的精度进行分解(或分配),因此,仪器精度理论学科以精度分析为主要研究内容。

1. 误差

当对某物理量进行测量时,测得的量值与参考量值(真值)之间的差称为误差。即

$$\Delta_i = x_i - x_b \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1-1)$$

式中: Δ_i ——真误差值;

x_i ——测量值;

x_b ——标称值;

i ——测量次数。

(1) 误差的大小反映了测量值相对标称值的偏离程度,它具有以下特点。

① 客观性 对任何测量过程而言,无论精度多高,都总是有误差存在。这是因为所采用测量方式会对被测量产生或多或少的干扰,甚至是因负载效应消耗一些能量。即使是非接触式的长度测量,在瞄准方式中依然存在误差。这就表明测量误差是客观存在的,当然会随着测量方法的创新而逐渐减小,但永远都不能为零。

② 离散性 多次重复测量某物理参数时,各次的测定值并不相等,这是误差不确定性的反映。只有当仪器的分辨力过低时,才会出现测量值相等的情况。这种离散性可以用随机误差的理论来减弱。

③ 未知性 通常真值是未知的,所以真误差是未知的。

(2) 为了能正确地表达精度,人们在长期实践中,确定了以下基本概念。

① 理论真值(即名义值) 它是设计时给定的或是用数学、物理公式计算的给定值,如零件的名义尺寸等。

② 约定真值 世界各国公认的一些几何量和物理量的最高基准的量值。如作为国际单位制长度单位的基准米,约定为光在真空中($1/299\,792\,458$)s的时间间隔内所行进的距离,其中 299 792 458 为光在真空中的速度常数(这是一个极其重要的基本物理常数),被国际计量委员会定义为约定真值。这个值不是通过长度测量方法获得的,而是通过测量光学频率再经计算得到的。这是因为时间频率的测量具有世界上最高的准确度,而依靠长度测量方法获得的光速值要比这种方法低 1~2 个数量级。此外,实践中也常用不含系统误差的算术平均值(数学期望)作为约定真值。

③ 相对真值 如标准仪器的误差比一般仪器的误差小一个数量级,则标准仪器的测定值可视为真值,称作相对真值。

(3) 误差的分类。

按误差的性质,误差可以分为以下三种。

① 随机误差 随机误差是由一些独立因素的微量变化的综合影响造成的,其数值的大小和方向没有一定的规律,但总体上来说,其服从统计规律。大多数随机误差服从正态分布。

② 系统误差 系统误差的大小和方向在测量过程中恒定不变,或按一定的规律变化。一般来说,系统误差是可以理论计算或实验方法求得的,可预测它的出现,并可以进行调节和修正。系统误差中占大多数的是设计原理方面的误差。除此之外,仪器零件制造和安装不正确也会引起系统误差。

系统误差可以分为定值系统误差、变值系统误差(如线性误差、周期误差和按复杂函数关系变化的系统误差)。目前,对变值系统误差进行随机化处理是一个难点。

③ 粗大误差 一般是由于疏忽或错误,在测得值中出现的明显歪曲测量结果的数据,在计量学中称为异常值。对这类误差应采取科学的甄别处理方法,但确实需要剔除时要做到科学谨慎。从误差的定义上看,该类误差也属于误差的范畴。

另外,按被测参数的时间特性,又可以分为静态参数误差和动态参数误差。

① 静态参数误差 不随时间而变化的被测参数称为静态参数,测定静态参数所得的误差称为静态参数误差。

② 动态参数误差 被测参数是时间的函数,这类参数称为动态参数,测定动态参数所得的误差称为动态参数误差。

还有,按误差间的关系,可以分为独立误差和非独立误差(或相关误差)。

① 独立误差 彼此相互独立、互不相关、互不影响的误差称为独立误差。

② 非独立误差(或相关误差) 一种误差的出现与其他的误差相关联,这种彼此相关的误差称为非独立误差。在计算总误差时其相关系数不为零。

(4) 误差的表示方法。

① 绝对误差 测量误差通常是指测量的绝对误差,即测得值 x 与被测量真值 x_0 (或相对真值)之差。绝对误差具有量纲,能反映出误差的大小和方向,但不能反映出测量的准确程度。

② 相对误差 绝对误差与被测量真值的比值称为相对误差。相对误差无量纲,但它能反映测量的准确程度。

另外,引用误差也是相对误差的一种表示形式,很多仪表的精度指标都是用它表示的。引用误差是测量仪器某一刻度点的示值误差与测量范围上限或全量程的比值,即

$$\delta_{x_{\text{lim}}} = \frac{\Delta x}{x_{\text{lim}}} \quad (1-2)$$

例如,家用计量仪表基本都是用引用误差来表示的,如准确度等级为 2 级的家用水表,示值为 100 m^3 时,实际值只要处于 98 m^3 至 102 m^3 之间,就表示该表是合格的。

2. 精度

1) 精度的含义

精度是误差的反义词,精度的高低是用误差来衡量的。误差大则精度低,误差小则精度高。随着不确定度概念的日益普及,精度的概念有和不确定度概念等同起来的趋势。

2) 重复精度与复现精度

重复精度是指在同一测量方法和测试条件(仪器、设备、测试者、环境条件等)下,在一个不太长的时间间隔内,连续多次测量同一物理参数所得到的数据分散程度。重复精度反映一台仪器固有误差的精密度。

复现精度又称再现精度,它是指用不同的测量方法,由不同的测试者,采用不同的测量仪器,在不同的实验室内,在较长的时间间隔对同一物理参数做多次测量,所得数据相一致的接近程度。对于某一物理参数的测量结果,若重复精度和复现精度都很高,则表示该设备精度稳定,测量结果准确可信。否则,需要找出不一致的原因。复现精度一般应低于重复精度,因为测定复现精度时所包括的随机变化因素多于测定重复精度时。

3. 灵敏度与分辨力

灵敏度是指输出值与输入值的变化量之比。对测量仪器来说,灵敏度等于被观测的示值增量(dI)与测量的增量(dG)之比。对电信号而言,不赞成采用提高放大器放大倍数的方法改善灵敏度,这是因为在增加放大倍数的同时,噪声信号也得到了放大,信噪比没改善,所以灵敏度没有得到改善。

分辨力是仪器设备的一个重要技术指标,是仪器设备能感受、识别或探测的输入量(或能产生、能响应的输出量)的最小值。如光学系统分辨力是指光学系统可分清的两物点间的最小间距。分辨力与分度值的概念是有区别的,但有时不加区分。

4. 分辨力和准确度之间的关系

分辨力和准确度之间的关系如下。

(1) 要提高仪器的测量准确度,必须相应地提高仪器的分辨力。

(2) 仪器的分辨力低,一定达不到高精度。通常取分辨力为仪器精度的 $1/3 \sim 1/10$,通常按这个原则确定仪器的分度值。因此,有时用分度值(或刻度值)表示精度。提高分辨力是提高准确度的有效措施。

1.1.3 现代精密仪器的基本硬件组成

相对软件而言,现代精密仪器硬件的组成具有复杂、不易掌握的特点。因此,有必要在这里简单介绍精密仪器基本硬件的组成。现代精密仪器现已包罗从“吃穿用”到“海陆空”的所有领域,种类繁多、原理多样,但仍可以从中抽取出具有共性的组成部分。不妨以大家熟悉的几台仪器为例来分析现代精密仪器的基本组成部分。图 1-1 至图 1-3 所示的是几台典型的几何量测量仪器的实物图。

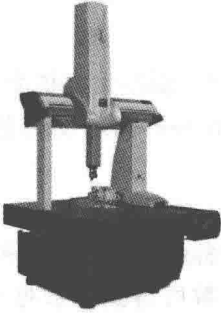


图 1-1 三坐标测量机

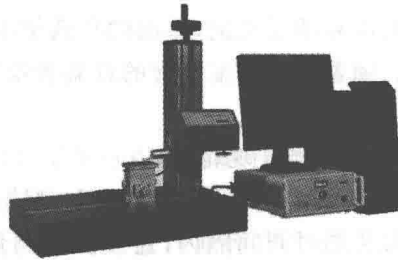


图 1-2 表面粗糙度测量仪



图 1-3 光学投影坐标测量仪

由图 1-1 至图 1-3 可见,从宏观上看该类仪器总体上可分为机械系统、电控系统和软件系统三大模块。但对仪器研发人员来讲,仅进行这样的划分还是太粗略,必须达到熟知仪器硬件详细构成的程度,才便于开展现代意义上的精密仪器总体设计。总体设计环节的最重要工作是对精度指标进行分解和分配,最终还要通过硬软件环节予以实现。因此,仪器设计者必须对影响仪器精度的硬件特点予以充分掌握。影响仪器精度的硬件可分为八个组成部分,但值得强调的是,并不是说每台仪器都必须具有这八个部分硬

件,甚至有时存在多种功能体现在一个部件上的现象。对这八个组成部分介绍如下。

1. 基准部件

基准部件是仪器最重要的部分,由它对被测量的量值进行确定,因此,是决定测量仪器精度的主要环节。本课中,有必要把基准部件再进一步划分为测量基准和定位基准两大类。

1) 测量基准部件

测量基准部件是指能够获得测量数据和结果的部件。三坐标测量机中的测量基准部件是光栅尺。目前较高精度的光栅尺都是从国外进口的。从制造材料上看,光栅尺有金属光栅和玻璃光栅两种。玻璃光栅大多采用透射直读方式工作,而金属光栅采用的是反射及衍射方式。除光栅尺外,较常用的测量基准部件还有激光干涉仪、容栅、磁栅、感应同步器、精密丝杠、CCD 等。这类部件的误差将直接进入测量结果,因此,为重点误差源。

2) 定位基准部件

定位基准部件主要是用来保证测量基准部件能正确工作的部件。典型的定位基准部件不外乎轴系和导轨两大类,也有两者结合在一起的情况。这里所说的轴系是指实现精密或超精密回转运动用的部件,通常采用气体静压技术,即俗称“气浮轴系”

“空气轴承”等。导轨是实现精密或超精密直线运动的部件,也采用气体静压技术。海克斯康的三角形横梁导轨是该公司的新型专利产品。

此外,微位移机构也属于定位基准部件。常用的微位移部件有精密丝杠、PZT、柔性铰链等。这类部件本身的精度可对测量结果构成严重影响。

2. 感受转换部件

感受转换部件通常为传感器。有些情况下该类部件与测量基准部件为同一个部件(如三坐标测量机中的光栅尺就属此类),也存在该类部件与瞄准部件为一个部件的场合(如光学投影坐标测量仪中 CCD 就是在作为感受转换部件的同时还具有瞄准的功能)。该类部件是实现仪器精度的主体,其误差也将直接进入测量结果。

3. 转换放大部件

这里主要指电信号的转换放大。转换放大部件的功能是将感受到的微弱信号做进一步的放大,成为能为后续处理电路所接收的信号。例如光栅传感器输出的信号就要经过转换放大环节才能进入微处理器。激光干涉仪的转换放大环节有多种。放大环节将引入所用器件的噪声,往往还不能通过滤波的方法滤除,所以,转换放大部件成为制约仪器分辨力的关键因素。

4. 瞄准部件

从某种意义上来说,瞄准部件也可以视为定位基准部件。为概念清晰起见,把这类部件单独列为仪器部件的一个类别。瞄准部件在现代几何量测量仪器中扮演着非常重要的作用,其误差值将直接进入测量结果。提高瞄准精度是改善仪器精度的主要措施。它的功能是用来发出测量的各类采样起始信号。可分为接触式标准和非接触式瞄准等类型。所谓瞄准,不一定非得是通过视觉方式实现,而基于触碰、感应等原理的数据采样起始信号也归结在瞄准方式中。

1) 接触式瞄准

接触式瞄准部件用最典型的形式是测头,有一维、二维和三维测头。三坐标测量机用的是三维测头,我国目前还不具备制造这类测头的技术。

2) 非接触式瞄准

非接触式瞄准又可分为视觉式、感应式和光电式瞄准等类型。影像法就属于典型的视觉式瞄准,而地基沉降仪中的电磁测头就采用了感应式瞄准技术。

5. 处理与运算部件

对数据进行加工处理、计算等的部件,主要指微处理器、计算机等。现在用得较多的有 ARM、DSP、430 及 51 单片机等。

6. 输出与显示部件

测量数据的输出部分,如指针表盘、数字或液晶显示器、打印机等,也包括数据传输及网络连接部分。仪器智能终端的出现使该类部件的重要性大为提高,云测量技术的应用已初见端倪。

7. 驱动控制部件

为完成测量功能所必须设置的部件,如电动机、驱动卡等。目前,这类器件已经标准化,仪器设计者的主要工作任务就是进行正确选用。

8. 机械结构部件

机械结构部件包括基座、支架、工作台、导轨、轴系、滚珠丝杠、轴承等,有些部件对仪器精度起决定性的作用,而轴系和导轨作为基准部件已进行了介绍。机械结构部件在仪器中占有相当重要的地位,在总体设计时就应予以充分考虑。这类部件基本上都已是标准化部件。反过来说,总设计师必须精通机械结构的设计要点。

除了这些硬件部分外,软件(包括控制软件 and 数据处理软件)在仪器中所占的比例呈逐渐增多的趋势,特别是“以软代硬”的技术使仪器的结构更简洁,技术附加值更高。

1.1.4 本书的主要内容

本书的主要内容是精密仪器的精度理论,这是仪器科学与技术学科的主干内容,对新型仪器的设计、测量方法的改善、计量测试装置与仪器的评价而言具有重要价值。具体内容主要包括精度分析、精度分配、误差补偿三大部分。其中,精度分析包括精度指标、误差来源、误差识别、误差合成、误差计算、减小误差的原理与方法等。精度分配研究如何将总误差分配到各环节中,如何经济合理地给各环节规定精度,属于精度设计问题。误差补偿研究如何将系统误差从误差信号中分离出来,然后进行补偿,是近年来研究的热点。本书较多实例来自作者的科研实践,且以几何要素的误差分析为主。

1.2 我国仪器精度理论的发展状况

我国从20世纪50年代开始研究精度理论,是在王大珩院士指导下开始研究的。当时涉及的理论主要是自动控制原理和数理统计理论。到目前为止,已经形成了较为完善的理论体系,所涉及的知识结构和学科门类有了质的飞跃。目前,同世界先进水平的差距已达到可评估的程度。

图1-4所示为一维坐标测量系统,一维坐标测量系统相当于三坐标测量机中的一个坐标。下面就以该系统为例来介绍一下精度理论的发展情况。

1. 精度要求

尺寸精度从微米级向亚微米、纳米级发展,参数精度从以几何参数精度为主向所有物理参数精度方向发展。目前最高精度的计量型纳米三坐标测量机由德国蔡司公司生产,不确定度可以达到 $0.25\ \mu\text{m}$,每个分量只有 $10\ \text{nm}$ 左右的误差。该仪器几乎达到了该类仪器几何参数工艺误差的极限值,再往前面发展将面临极大的挑战。在

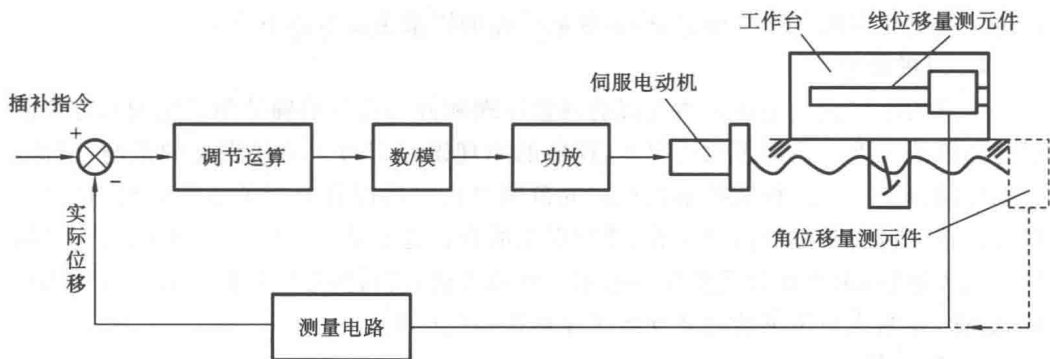


图 1-4 一维坐标测量系统闭环控制框图

生产线上,将被加工件的几何精度控制在微米级是我国制造业目前的主要任务。

2. 产品进步

由单纯的机械系统发展到了机、电、光相结合的综合系统,数控技术也被借鉴到仪器中来。从开环系统发展到了闭环系统,使稳定性和精度大幅度提高,为实现微米加工提供了可行性。目前测量技术已集成到单机设备中,且往智能终端和工业互联网方向发展。

3. 状态要求

从静态要求向稳态、动态精度要求方向发展。因此,微分方程、数理方程、现代控制理论、流体力学、振动理论、小波分析等将成为我们必须掌握的基础理论。

由于稳态、动态的精度研究尚处在发展阶段,所以,在相当长一段时间内还将以试验研究为主。这一点要引起我们的注意。更重要的是精密机械系统往往是非线性系统,目前是采用高阶线性方程描述,这种描述方法本身就是一种近似的方法,已成为影响精度的主要因素。非线性理论的发展,将为仪器精度理论提供更符合实际的理论基础,使之得到突破性发展。在动态精度方面,新的物理效应和传感机理是需要的,如在线测量中现有的电感传感器就不能完成高速切削状态下的尺寸测量,而基于微波和光学原理的传感器则在原理上可以满足这类测量的需求,这就使研究工作重点转移到测量精度和抗干扰能力的提高方面。

应该指出,仪器是包罗万象、种类繁多的,精度的分析评价方法也是相当繁杂的,但为掌握其核心内容,作者更多的是将自己在多年的科研中遇到的典型例子作为讲授内容,使读者能直观地了解分析评价仪器精度的方法,从而达到灵活运用有关方法改善和提高仪器精度的目的。

1.3 仪器误差的来源

仪器误差是构成测量误差的主要来源,这里重点对仪器本身的误差的来源进行

讨论。经过长期的实践与研究,构成仪器误差的因素主要有以下六个。

1. 原理误差

仪器的原理误差是指采用近似的测量原理和方法代替精确的测量原理和方法而引起的仪器误差。在大多数情况下,仪器的原理误差都属于系统误差的范畴,因此,可以采用修正的方法将其控制在允许的范围之内。后面有专门的章节介绍,这里不展开。根据目前掌握的情况来看,原理误差的存在范围是相当广的。例如,对于电阻应变式传感器,由于在公式推导中采用了近似方法,使得实际的特性具有非线性的特征,这样,在制成力传感器时就导致了原理误差的产生。

2. 工艺误差

仪器中的许多零件都是采用机械加工方法制成,然后再组装成部件或结构的,这些环节都会引入随机误差,从而产生了所谓的工艺误差。工艺误差是仪器零部件在加工、调整、装配过程中产生的。可以说任何加工方法都会对预计值产生偏离,因此,工艺误差目前依然是仪器误差的最主要的来源,应引起我们的充分注意。比较典型的加工误差有尺寸、几何、表面粗糙度误差等。例如,我们所熟悉的电感传感器的零点残余电压就是由工艺误差造成的;导轨的直线度误差也属于典型的工艺误差。这方面的例子比比皆是。

3. 受力作用的误差

当仪器零件的尺寸较大或应力较大时导致零件变形,所构成的仪器误差称为受力作用的误差。例如,设计三坐标测量机的横梁时就必须考虑受力变形误差。零件尺寸较小时,重力所引起的误差基本可忽略。

4. 受温度等环境因素影响的误差

温度对测量的影响已引起我们越来越多的重视,但实现高精度(如 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$)的恒温控制是非常困难的事。其他环境因素如振动、电磁干扰等也是重点控制的对象。激光传感器受气流、空气折射率等因素影响较大。

5. 元器件、部件随时间不稳定引起的误差

组成仪器的所有零件及元件都存在着随时间变化的误差。该类误差具有随机性,但又无法按随机误差处理,因为不服从统计规律,确定不了概率分布特性,属于漂移性的误差。目前归入未定系统误差范畴,处理则按随机误差方法。表 1-1 和表 1-2 列出了国家检定规程中对量块和线纹尺的稳定性要求。

表 1-1 量块尺寸稳定性要求

等	级	每年允许长度变化量/ μm
2	0	$\pm(0.02+0.5l)$
3	1	$\pm(0.05+l)$
4	2	
5	3	
6	4	$\pm(0.1+2l)$

表 1-2 玻璃线纹尺全年长度变化量要求

等 别	长度/mm	年变化量/ μm
1	100	小于 0.15
	200	小于 0.20
2	100	小于 0.35
	200	小于 0.50

6. 仪器的动态误差

对仪器的静态误差研究得较多,方法相对来说也较为成熟。但仪器的静态误差与动态误差存在很大不同,因此,切不可用静态误差代替动态误差。对这些误差概念的解释分别在后续章节中有所体现,这里不做更多叙述。

1.4 提高仪器精度的途径与方法

提高仪器精度的途径与方法如下。

- (1) 新工艺、新材料、新元件的应用。
- (2) 设计方法和理论的创新与突破,包括现代误差理论(如稳健估计、误差分离与补偿方法等)的应用、数学模型的改进等等。
- (3) 相关交叉领域技术的进展。
- (4) 控制环境条件方法。
- (5) 对误差源进行长期排查和跟踪研究。

复习思考题

1. 研究仪器精度理论有何意义?
2. 试述精度理论在工业 4.0 中的地位和作用。
3. 以三坐标和关节臂测量机为例,说明基准部件、感受转换部件、瞄准部件、机械结构部件分别是哪些部件,指出它们是如何对仪器精度产生影响的。
4. 仪器的误差来自哪些方面?
5. 试用科学方法论述“误差是客观存在”的理由。
6. 对传感器的微弱信号进行放大时,放大器本身具有的误差属于什么类型的误差?
7. 在计算中用 3.14 代替 π 所形成的误差可归入何种误差?
8. 提高仪器精度的途径与方法有哪些?
9. 采用千分尺测量圆柱体直径时是如何瞄准的? 基准部件是哪个?