



精度理论

JINGDU LILUN

与应用

YU YINGYONG

金泰义 编著

中国科学技术大学出版社

精度理论与应用

金泰义 编著

中国科学技术出版社

2005·合肥

内 容 简 介

《精度理论与应用》是现代生产和高科技领域中一项常用的基础理论与技术。它系统地论述了静态精度基本理论,并结合实际进行了精度分析、分配与误差补偿,较全面地阐述了稳态、动态特性和精度。并用不确定度表征了量值的位置参数与分散性参数。使读者对精度有个全面的系统知识。本书从精密机械系统和测控系统出发,在论述构成系统各环节精度之后,进一步阐述了系统的总体精度。使读者对系统与零部件之间的精度关系有个完整的知识,便于科学地、系统地、合理地进行精度分析和分配,设计制造出性能价格比最优产品。

本书主要论述精度与生产、科学技术发展之间关系;论述静态、稳态、动态精度的基本理论与应用;对精密机械装置、信号转换元件、信号处理电路、驱动元件、精密 $x-y$ 工作台、机电光相结合的一体化系统进行了精度分析、分配与综合。

本书可作精密仪器与精度机械专业的本科生、研究生教材。也可供测控技术与仪器、机械工程等专业学生研究生选用,还可以供有关科学研究和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

精度理论与应用/金泰义编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2005.2
ISBN 7-312-01139-X

I. 精… II. 金… III. 精度—理论 IV. 0241.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 119369 号

出版发行 中国科学技术大学出版社

(安徽省合肥市金寨路 96 号,230026)

印 刷 中国科学技术大学印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 850×1168/32 印张 10.375 字数 260 千

版 次 2005 年 2 月第 1 版

印 次 2005 年 2 月第 1 次印刷

印 数 1—3000 册

ISBN 7-312-01139-X/TH·8 定 价 15.00 元

前 言

从 20 世纪初至现在,几何量精度已经从 10^{-4}m 提高到 $10^{-8}\sim 10^{-9}\text{m}$,提高了四个数量级左右。产品精度要求从零件、部件发展到系统,精度特性要求也从静态发展到动态。然而目前研究最多、最成熟的是静态精度,它的理论基础主要是参数方程、数理统计理论等。目前已建立起完善的量值传递和标定体系,有统一的规范和标准,在科研、教学、生产中应用较为方便。而稳态精度和动态精度的研究尚处在发展阶段,动态、稳态精度涉及微分方程、传函方程、各种数理方程和广泛的物理概念及量值特性。建立物理、数学模型更为复杂,而且很多系统还涉及到非线性问题。目前对动态、稳态精度的描述有时域法和频域法,仅限于特性描述和特征参数的名义值解,没有对特征参数的分散性程度进行定量描述,是一种不完善的描述,而且没有较系统的标定方法和量值传递体系,也较少有统一的规范和标准,所以也给应用带来一定困难和限制。

目前许多设计资料中较少看到精度分析和精度分配内容,精度指标存在盲目性,缺乏科学性,给制造和装调乃至测量带来许多不便,影响了产品质量的提高,特别是精度、稳定性的提高,也影响到我国产品以优越的性能与价格比占领国内外市场。为此提高工程技术界质量为本、精度第一的意识是当务之急。精度应从设计抓起,从学习与教育入手,在执行 ISO 9000 与 ISO 1993(E)的同时,在高等学校相关专业应开设精度理论与应用方面的课程,普及精度理论知识;同时还应强化精度理论应用,在今后新产品的设计和定型时,必须有精度分析和分配内容。

著者从 80 年代开始即从事精度理论与应用教学,在学习、研

究中积累了大量资料,为编写该书奠定了基础。本书从系统出发全面论述了精度理论和精度分配、精度补偿技术,对系统的稳态、动态精度和特性进行了定量的描述,并对动态精度特性参数给予了数值解和不确定度表征。全书引用不确定概念和评定方法对各种物理量的量值进行了严密和准确的评定,并作为精度评价的基本方法介绍给读者。

精度理论和应用是设计学、测试学、制造学、光学、信息学的一部分,是集机、电、光、算于一体的综合学科,涉及的理论和知识较为广博。由于本人知识水平所限,书中难免有不完善和不妥之处,敬请读者给予指正,为共同推动精度理论研究和发 展做出贡献。

在本书编写过程中,葛芸副教授执笔撰写了第五、六两章,张爱玉同志执笔第十章的初稿,徐敏、许在春同学对本书的计算机绘图投入了很多精力;潘薇燕、黄健新、王平、季莉莉等同志也参加了本书的录入工作。支持本书编写的还有李胜利等同志,在此表示衷心的感谢。

编者

2002年9月

目 录

第一章	绪论	(1)
	一、精度与科学技术的关系	(1)
	二、精度理论与国民经济建设	(1)
	三、精度理论的建设与发展	(3)
	四、精度理论与应用的内容	(5)
第二章	静态特性与精度基本理论	(6)
2-1	概率论与数理统计基本知识	(6)
	一、基本概念和术语	(7)
	二、常见随机变量分布特征参数	(14)
2-2	不确定度的基本概念	(17)
	一、测量不确定度产生的背景及意义	(17)
	二、不确定度的概念和术语	(17)
2-3	不确定度的评定与合成	(19)
	一、两类标准不确定度评定划分原则	(19)
	二、标准不确定度的 A 类评定	(20)
	三、标准不确定度的 B 类评定	(22)
	四、合成标准不确定度的表示方法	(25)
	五、范围不确定度表示方法	(26)
	六、结语	(28)
	七、综合应用举例	(29)
2-4	静态精度基本概念和术语	(29)
	一、基本术语	(29)
	二、静态精度特征参数	(32)
2-5	系统静态特征参数方程与精度方程	(35)
	一、静态特征参数方程	(35)

	二、系统静态精度方程·····	(37)
第三章	动态稳态特性与精度基本理论 ·····	(42)
3-1	基本概念 ·····	(42)
	一、动态稳态系统的基本特性·····	(42)
	二、动态特性的基本术语·····	(43)
3-2	线性定常系统的数学模型 ·····	(44)
3-3	线性系统传递函数 ·····	(45)
	一、传递函数一般特点·····	(45)
	二、系统传递函数的定义和公式·····	(45)
	三、常用微分方程与传递函数·····	(46)
3-4	建立数理模型方法 ·····	(51)
	一、建立数理模型方法·····	(51)
	二、从物理模型到传递函数建立步骤·····	(54)
3-5	线性系统动态与稳态特性分析 ·····	(56)
	一、系统动态与稳态特性的时域法分析·····	(56)
	二、二阶系统对单位阶跃响应的动态特征参数·····	(60)
3-6	线性系统动态不确定度的探讨 ·····	(64)
	一、建立不确定度方程的依据·····	(64)
	二、不确定度的来源与计算·····	(65)
	三、二阶系统动态不确定度方程·····	(66)
3-7	线性系统的频域特性 ·····	(71)
	一、系统的频率特性及有关概念·····	(71)
	二、系统的幅频相频特性的对数坐标图(伯德图)·····	
	·····	(72)
	三、系统的频域特性参数·····	(76)
	四、频域特性不确定度的讨论·····	(78)
第四章	精密机械装置及机构精度分析 ·····	(79)
4-1	概述 ·····	(79)
	一、精密机械装置的作用和地位·····	(79)

	二、精密机械装置精度分析的内容·····	(79)
4-2	精密机械装置精度分析·····	(79)
	一、几何量精度的分析方法·····	(80)
	二、典型精密机械装置精度分析·····	(81)
4-3	精密机构的精度分析·····	(96)
	一、典型精密机构结构参数精度分析·····	(96)
	二、精密机构的工作原理误差对精度的影响·····	(100)
	三、影响机构工作精度的因素·····	(101)
4-4	精密轮系与螺旋传动精度分析·····	(104)
	一、齿轮传动系统精度分析·····	(104)
	二、螺旋传动精度分析·····	(107)
第五章	信号变换元件精度分析·····	(112)
5-1	可变电阻式位移传感器精度分析·····	(112)
	一、线性电位器的空载特性参数方程与精度方程 ·····	(113)
	二、线性线绕电位器的负载特性与误差补偿方法 ·····	(116)
	三、工作于交流电路中电位器的等效电路·····	(122)
5-2	可变磁阻式位移变换器精度分析·····	(122)
	一、可变磁阻变换器的特性参数方程及静态精度 ·····	(123)
	二、在实际状态下变阻式电感变换器的精度分析 ·····	(125)
	三、影响变磁阻电感变换精度的其它因素·····	(128)
5-3	定位检测元件精度分析·····	(129)
	一、光栅测量系统的基本结构与要求·····	(129)
	二、光栅转换原理与特性方程·····	(131)
	三、光栅副在全程范围内精度分析·····	(133)
	四、提高光栅测控系统精度的技术措施·····	(141)

第六章	测控系统信号处理电路精度分析	(147)
6-1	概述	(147)
	一、测控系统信号基本特点	(147)
	二、信号处理电路主要关键	(147)
	三、信号处理电路精度分析要点	(148)
	四、不同电路系统的精度差别	(148)
6-2	精密放大电路精度分析	(148)
	一、理想放大器的基本特性	(149)
	二、实际工作状态下放大器的参数方程及精度分析	(150)
	三、噪声的来源与抑制方法	(154)
	四、失调和漂移的影响和抑制	(158)
	五、抑制外来干扰方法	(160)
	六、应用举例:PSD的前置放大电路	(161)
	七、精密放大电路小结	(161)
6-3	精密滤波电路精度分析	(162)
	一、低通滤波器(LPF)精度分析	(162)
	二、高通滤波电路(HPF)特性与精度分析	(170)
	三、带通滤波器(BPF)	(170)
	四、滤波电路小结	(173)
6-4	稳压与基准电路精度分析	(173)
	一、常用稳压电路精度分析	(174)
	二、精密稳压电路精度分析	(174)
6-5	用相关处理与锁相放大技术提高信号质量和精度	(176)
	一、自相关函数与自相关处理	(177)
	二、互相关函数与互相关处理	(178)
	三、锁相放大器的高精度选频功能	(179)
第七章	测控系统驱动元件精度分析	(184)

7-1	概述	(184)
7-2	直流控制电机精度分析	(185)
	一、直流电机的基本方程和特性	(185)
	二、直流电机转速精度方程	(188)
	三、直流电机的传函方程及动态特性	(191)
	四、伺服电动机的性能比较与选用	(194)
	五、几种优良性能的直流电动机	(195)
7-3	步进电机的特点和应用	(197)
	一、步进电机的基本知识	(198)
	二、稳态特性与步距角精度	(198)
	三、步进电机的动态特性	(200)
	四、步进电机的稳态运行精度	(203)
	五、几种特殊的步进电机	(206)
	六、步进电机小结	(207)
第八章	测控系统总体精度分析	(208)
8-1	概述	(208)
8-2	系统静态精度分析	(210)
	一、系统的静态参数特征方程	(210)
	二、系统静态精度基本方程	(210)
8-3	系统静态精度的分配原则	(211)
	一、设计方案与精度关系	(211)
	二、精度与经济性的关系	(212)
	三、精度分配的基本方法	(212)
	四、精度分配的要求	(214)
8-4	误差补偿技术	(215)
	一、误差规律的分析	(215)
	二、误差补偿方法	(218)
	三、补偿元件(系统)的分辨力范围和方向	(220)
	四、补偿参数选择	(220)

8-5	精度理论的应用	(220)
	一、测温装置	(220)
	二、测温系统的动稳态特性	(224)
8-6	测控系统稳态精度分析	(225)
	一、稳态精度传递函数	(226)
	二、稳态精度方程及精度系数	(227)
	三、系统的动态精度与动态精度系数	(231)
	四、实际测控系统稳态精度	(235)
8-7	影响测控系统精度的因素	(242)
	一、干扰信号对测控系统的影响	(242)
	二、磨擦对系统精度的影响	(243)
	三、转动惯量 J 对精度的影响	(249)
	四、间隙对系统精度和稳定性的影响	(250)
	五、刚度的影响	(251)
	六、阻尼对系统的影响	(255)
第九章	精密 $x-y$ 工作台精度设计	(260)
9-1	概述	(260)
9-2	精密 $x-y$ 工作台主要精度指标及分配方案	(261)
	一、精密 $x-y$ 工作台的主要技术指标	(261)
	二、精密工作台的结构方案	(262)
	三、广动工作台精度设计与分配方案	(263)
9-3	超精微进工作台	(268)
	一、弹性铰支微动工作台	(268)
	二、高分辨率驱动元件——压电陶瓷	(269)
	三、高精度检测系统	(272)
	四、超精微动工作台组合补偿功能	(273)
9-4	精密工作台动态特性分析	(274)
第十章	光电小位移测量系统精度分析	(277)
10-1	概述	(277)

一、光电检测发展概况	(277)
二、在线检测在国民经济发展中的作用	(279)
三、光电检测系统精度分析特点	(279)
10-2 光三角法测量精度控制	(279)
一、光电转换精度分析	(282)
二、前置放大电路精度分析	(283)
三、提高弱信号处理的质量与精度的方法	(285)
四、提高系统稳定性和精度的方法	(288)
10-3 光电检测系统输出特性参数方程与不确定度	(293)
一、标定原理和方法	(293)
二、标定过程	(296)
三、测量数据不确定度的表示方法	(297)
四、关于标定的说明	(299)
附录 A 附表	(300)
附表 1 正态分布积分值	(300)
附表 2 t 分布临界值	(302)
附录 B 不确定度应用举例	(303)
附录 C 各章思考题	(307)
参考文献	(319)

第一章 绪 论

一、精度与科学技术的关系

科学技术是第一生产力。随着科学技术的发展,社会已进入信息时代,光电子、微电子技术渗透到各领域,推动着设计、制造、测量的精度飞速发展。在 19 世纪末 20 世纪初,推动精度提高的基础主要靠机械学和机械方面的技术进步,约 50 年精度提高一个数量级;从 20 世纪 30 年代到 80 年代,由于国防需要,在光学、电子学、机械学及综合技术推动下,约 20 年精度提高一个数量级;20 世纪末,由于高新技术发展,在现代光学、微电子技术、精密机械以及综合技术科学的共同推动下,精度可望 10 年左右提高一个数量级。科学技术发展是推动精度提高的力量和源泉,仪器设备精度的提高又为现代科学技术发展提供了新的物质条件和研究手段。

从宇航飞行卫星探测到超大规模集成电路生产,从物质结构研究到纳米技术探索,无一不需要高分辨率、高动态特性的仪器设备,在人工智能控制下进行的超高精度的测量控制、定位加工、原子级搬迁等工作。仪器设备的精度愈高,所获取信息的量值精度就愈高、愈可靠,其使用价值也愈高,科学技术就愈快速发展。

二、精度理论与国民经济建设

精度理论是研究各种量的定量属性的一门科学,它是研究量值变化规律和取值区间(范围)的科学,是现代设计学、制造学、测试学的重要组成部分,是与国民经济发展、质量控制和质量保证有密切联系的应用科学。

当今的时代是综合国力竞赛的时代,是科学技术竞赛的时代。科技竞赛的表现之一就是市场的竞争和商品的竞争。而商品的竞争则是质量的竞争,是性能价格比的竞争。质量的主要指标是精度、可靠性以及寿命。我国已进入社会主义市场经济阶段,必然要参与国际市场的大循环和竞争。以性能价格比取胜,是历史发展的必然。

为了使国际商品竞争有统一的标准和规范,国际标准化组织(ISO)发布了ISO 9000 质量认证体系,作为商品的质量管理和质量保证标准。ISO 9000 得到了国际的公认,并在国际通行。我国已经有一批大中型企业通过了ISO 9000 认证,为参与国际市场竞争做好了准备。

为了进一步使各国判断和决定质量的水平相符合,彼此一致,ISO 又联合国际计量委员会(CIPM)、国际法制计量组织(OIML)、国际电工委员会(IEC)、国际理论与应用化学联合会(IUPAC)、国际理论与应用物理联合会(IUPAP)以及国际临床化学联合会(IFCC),制定和公布了ISO 1993(E)——“测量不确定度表示指南”(以下简称“指南”)。该指南提出用不确定度作为定量属性新的概念,来规范产品质量中量值的表征方法。ISO 1993(E)适用于科学和工程技术领域内的基础应用和开发研究,生产过程中的质量控制和质量保证,计量基准的建立、量值传递、计量检定和测量,部件、系统设计和理论分析以及商贸合同、协议、技术报告、科技文献和出版物等各种领域。我国参加了“指南”制定工作,国家有关部门正在组织宣贯,以与国际商贸接轨,参加国际公平竞争与科技学术交流。

占领国际市场的商品,必须是质优价廉的产品。我国原材料品种齐全,劳动力资源丰富,在廉价方面占有优势,关键在于制造优质产品,并使它与国际质量标准接轨。在质量体系,精度是核心指标,而提高产品精度和它的稳定性、可靠性必须从设计、制造、测量抓起;在设计中进行精度分析,确定系统和产品的设计精度

(取值区间),并根据产品结构组成进行精度的分配和合成,确保产品、部件、零件精度符合工作要求;在制造阶段要根据设计要求,以精度理论为指南,通过分析,尽可能地减少各类误差的影响,使制造精度达到设计要求;在测量中要按精度要求,确定测量方法、选择测量仪器,使所测量值既符合 ISO 1993(E)规定,又能达到产品设计精度要求,使精度保证体系贯彻始终。精度理论是设计、制造和测量过程中统一的精度描述的理论基础,ISO 1993(E)和不确定度则是表征和统一描述设计、制造和测量过程中输入输出参数精度指南,使精度得到科学的、统一的控制,使产品质量得到根本保证。

精度理论是指导产品设计、制造、测量的基本理论之一,而产品设计和制造过程的技术关键又是创造和丰富精度理论的资源。充分发挥精度理论指导产品的设计制造是创优的基础和捷径,是提高产品档次和竞争力的手段。把精度理论应用到设计、制造、测量之中是科教兴国、科教兴企的具体举措,是保证和提高产品质量的有效方法。产品质量和精度不仅是一个产品、一个企业的生命线,也是国民经济的命脉,因此要加强质量意识教育,使质量第一,精度至上,精心设计,精心施工成为工程界、实业界尽职尽责的格言,优质名牌战略就有保证。

三、精度理论的建设和发展

对精度理论进行系统地研究在我国还处在发展阶段。从 50 年代开始静态精度(主要是几何精度)的理论和应用研究在我国已较广泛地开展。静态精度所涉及的理论主要是输入输出参数方程和数理统计理论。随着科学技术的进步,几何精度已经达到 10^{-9} m 左右。在高新技术推动下,高新产业出现从机械化到自动化、智能化、精密化的转变,机、电、光一体化已成为现代新产品的方向和主体,如图 1-1 所示。精度要求已从几何参数精度为主发展到以物理参数精度为主,产品精度已经从单机发展到机、电、光

一体化系统。在工作中不仅要求产品的静态精度要高,而且还要要求稳态、动态特性好,精度高。稳态和动态精度的研究是从物理模型、数学模型入手,求出特征参数量值的数值解和它的分散性(精度)。研究中涉及的数理基础较为广泛:从微分方程到复杂的数理方程,阶次从一阶到高阶,参数从独立到相关,特性从线性到非线性、从静态到动态,稳态和动态对精度理论的发展提出新的更高的要求。

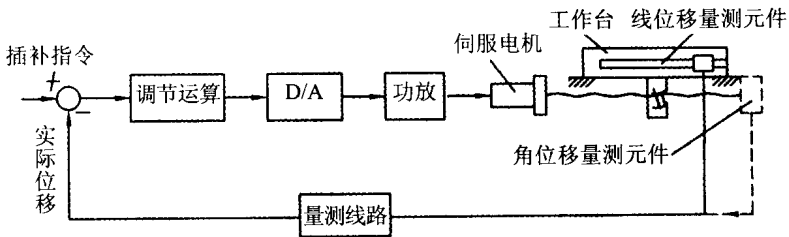


图 1-1 精密测控系统组成原理图

由于稳态和动态精度的研究尚处在发展阶段,一些基本问题尚需加强研究:通过研究建立稳态、动态精度的特征参数和它的分散性程度(精度或不确定度)指标体系;通过测试和研究进一步揭示动态特性的变化规律和测试仪器的精度分布特性,为动态特性及精度研究提供实验基础和依据。精密机械系统或测控系统作为实际物理系统,往往都是非线性系统,对这样的系统现在大多数是用高阶线性方程来描述,这本身就是一种近似的描述。如果非线性科学研究有所突破,将为非线性系统的稳态和动态特性及精度研究提供新的更切合实际的理论依据。此外可应用计算机仿真技术研究系统的稳态和动态特性,对构成物理系统动态结构参数的变动量(不确定度)对输出量的影响以及工作状态下其它因素的影响进行仿真,从而形象地看到或定量地得到各种因素的影响程度,为改善系统结构和特性提供依据。

为了推动精度理论在设计制造和测量中的应用,还应投入人

力、物力,建立元件和系统的精度设计分配的原始资料数据库和专家系统,为设计研究人员提供精度分配与综合原始资料、数据和分析判断功能,使精度设计现代化、实用化。

四、《精度理论与应用》的内容

本书系统地论述了静态精度的基本理论,并结合实际初步进行了精度分析、精度分配和误差补偿;较全面地阐述了稳态、动态特性和精度,使读者对精度有个系统的全面的了解。本书从精密机械系统和测控系统出发,在论述构成系统的各环节精度之后,进一步阐述了系统的总体精度,使读者对产品(局部)与系统(总体)精度之间的关系有透彻的了解和完整的知识,便于科学地、系统地、合理地进行精度分配和精度综合。

本书由下列各章组成:第一章是绪论,主要论述精度理论的作用与意义、精度理论的建设和发展;第二章为静态精度基本理论和概念;第三章为稳态、动态特性与精度基本概念。二、三两章集中将精度有关概念、术语、合成不确定度、基本公式、分析方法介绍给读者,为以后各章讲解精度分析打好基础;第四章为精密机械装置的精度分析,重点讲几何参数精度;第五章为典型传感元件精度分析;第六章为常用电路精度分析;第七章为驱动元件精度分析。这四章所涉及的精度是构成系统总体精度的主要因素,为研究系统(总体)精度奠定基础;第八章为机电系统总体精度分析,是从系统的角度对精度进行分析和研究;第九、十章是典型精密机械系统精度分析。