



**WUCHALILUNYU
YIQIJINGDU**

误差理论与仪器精度

马 宏 王金波 主编

兵器工业出版社

WUZHAI LUNYU YU JINGDU

五宅理论与人居环境

王其成 著

北京 中国建筑工业出版社

误差理论与仪器精度

马宏 王金波 主编

兵器工业出版社

内 容 简 介

在国防、工程实践及其他各技术领域都离不开科学实验、测量、测试及产品设计，因此误差和精度备受关注，对误差和仪器精度的研究也得到越来越高度的重视。特别是对将误差理论与实验测试和产品设计，包括仪器总体精度设计及零部件设计中精度分配、精度分析、装校、鉴定结合起来，成为一个体系。这是本书的一个主要特色。

本书主要内容包括误差理论与仪器精度两部分。误差理论部分主要阐述了误差和精度的基本概念，误差的概率分布，随机误差的基本特性，等精度测量，不等精度测量中随机误差估计，误差的置信区间，系统误差产生原因、分类，发现的方法以及减小和消除系统误差的方法。粗大误差的判别准则，误差的传递与误差的合成，测量结果不确定度评定及数据处理的最小二乘法；精度分析部分主要阐述的是仪器精度的参数、特性及精度指标，仪器静态精度的评定方法，仪器动态精度的估计，机械系统中典型机构的精度分析，光学元件及系统的精度分析，电气系统的精度分析，仪器总体精度设计的步骤，精度分配，精度分析的方法，仪器的精度计算方法以及提高仪器精度的措施，并给出了光电经纬仪精度分析的实例。

本书知识更新，结构合理，理论联系实际。可作为测控技术、仪器仪表、机电类等专业的本科生和研究生教材，也可供有关科研生产部门工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

误差理论与仪器精度/马宏,王金波主编. —北京:兵器工业出版社, 2007. 2

ISBN 978 - 7 - 80172 - 815 - 9

I. 误… II. ①马…②王… III. ①误差理论②仪器 - 精度 IV. P207 TH701

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 008406 号

出版发行: 兵器工业出版社

发行电话: 010 - 68962596, 68962591

邮 编: 100089

社 址: 北京市海淀区车道沟 10 号

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市登峰印刷厂

版 次: 2007 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1 - 1050

责任编辑: 范小伊

封面设计: 李 晖

责任校对: 全 静

责任印制: 赵春云

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 26

字 数: 660 千字

定 价: 40.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

**《误差理论与仪器精度》
编写组**

主 编：马 宏 王金波

编 委：沙定国 王志坚 冯进良

徐熙平 王春艳 白素平

前 言

随着现代科学技术的飞速发展，在世界各国，对误差和精度的研究越来越受到人们的高度重视。这是由于当今世界处于信息时代，测试技术作为信息科学的源头和重要组成部分备受青睐，信息提取的准确性、科学实验及工程实践中大量数据信息的合理处理和科学的评价显得越来越重要，同时对仪器精度的要求也越来越高。我校根据科学技术发展的趋势和培养目标的要求，从1962年以来陆续在研究生中开设了《仪器精度理论》课，在本科生中开设了《误差理论与数据处理》课和《仪器精度分析》课，并由毛英泰教授编写了《误差理论与精度分析》教材，毕业生在工作中深受裨益。本书就是在此基础上，吸取兄弟院校教材的长处，经过长期的教学和科研实践编写的。

本书贯彻教育部“十一五”普通高等学校教材建设与改革意见的精神，适应21世纪人才培养的需要，力求结构合理，内容准确，知识更新，理论与实践结合。本书的特点是，系统阐述了误差理论和仪器精度分析的基本概念、基本理论和基本方法，以及它们在计量测试和仪器设计及精度评价等方面的应用，并将误差理论与仪器精度同产品设计、装校、测试、鉴定等结合起来，成为一个体系。

全书共分十六章。第一章至第八章为误差理论部分，其内容包括：误差和精度的基本概念，误差分布，随机误差，系统误差，粗大误差，误差传播与误差合成，测量结果的不确定度评定，最小二乘法；第九章至第十六章为仪器精度部分，其内容包括：仪器精度的基本概念，仪器精度评定方法，精密运动机构精度，传动与变换机构精度，光学系统及其元件精度分析，仪器电子系统精度分析，仪器总体精度设计及典型仪器的精度分析等。本书可作为高等学校仪器仪表类、机械类、电子类和其他有关专业研究生及本科生教材，同时也可作为科研及生产部门的工程技术人员的参考。

本书系集体编著，由长春理工大学马宏教授和王金波教授担任主编。负责各章编写的有：长春理工大学马宏教授（第一，二，十，十五，十六章），王金波教授（第三，四，五，六章），王志坚教授（第十三章），北京理工大学沙定国教授（第八章），长春理工大学徐熙平教授（第十四章），冯进良教授（第十一，十二章），王春艳副教授（第四，七章），白素平副教授（第二，九章）。本书的全部图表由王春艳、白素平完成，并得到闫钰锋、朱道松、冯利、郭锐等人的帮助。

本书在编写过程中，兵器工业出版社范小伊责任编辑做了认真细致的编辑工作；也得到了长春理工大学光电工程学院邸旭、付跃刚、车英，研究生部史国全、周庆才，教材科耿丽华等人的大力支持，在此一并表示感谢！

鉴于编者水平有限，书中难免有错误和不妥处，希望读者批评，指正。

编者
2006年12月

目 录

第一章 误差和精度的基本概念	(1)
第一节 研究误差理论的意义	(1)
一、研究误差的重要意义	(1)
二、误差理论的基本任务	(2)
三、误差理论的实际应用	(2)
第二节 误差	(2)
一、误差的定义	(2)
二、误差的来源	(3)
三、误差的表示方法	(4)
四、误差的分类	(6)
五、系统误差和修正值	(7)
第三节 精度	(7)
一、精度的一般含义	(7)
二、精度的具体含义	(8)
三、精度的其他含义	(8)
四、分辨力、精密度和准确度的关系	(9)
第四节 测量的基本问题	(9)
一、测量与测量过程	(9)
二、测量的分类	(10)
三、测量要素	(11)
四、测量误差处理中应注意的问题	(12)
第二章 误差分布	(13)
第一节 测量误差的统计特性	(13)
一、测量值点列图	(13)
二、统计直方图和概率密度分布图	(13)
三、测量误差统计分布的特征值	(15)
第二节 常见误差分布	(23)

一、正态分布	(23)
二、其他常见误差分布	(24)
三、常用的统计量分布	(27)
第三节 误差分布的分析与检验	(29)
一、误差分布的分析判断	(29)
二、误差分布的统计检验	(29)
第三章 随机误差	(36)
第一节 随机误差概述	(36)
一、随机误差的产生原因	(36)
二、随机误差的基本特性	(38)
第二节 算术平均值	(39)
一、算术平均值	(39)
二、算术平均值的标准差	(40)
第三节 标准差的计算方法	(41)
一、贝塞尔公式	(41)
二、极差法	(42)
三、最大误差法	(43)
第四节 置信区间	(45)
一、正态分布的置信区间	(46)
二、 t 分布的置信区间	(47)
三、其他分布的置信区间	(48)
第五节 不等精度测量时随机误差的估计	(49)
一、权的概念及权的确定方法	(50)
二、加权算术平均值	(51)
三、加权算术平均值的标准差	(52)
第四章 系统误差	(54)
第一节 系统误差概述	(54)
一、研究系统误差的重要意义	(54)
二、系统误差产生的原因	(54)
三、系统误差的分类	(55)
四、系统误差对测量结果的影响	(57)
第二节 系统误差的发现	(58)
一、残余误差观察法	(58)

二、马利科夫判据	(61)
三、阿贝判据	(61)
四、其他判别准则	(63)
五、 t 检验法	(65)
六、多组测量的方差分析	(66)
第三节 系统误差的减少与消除	(68)
一、消除误差源法	(68)
二、加修正值法	(69)
三、改进测量方法	(69)
第五章 粗大误差	(73)
第一节 粗大误差概述	(73)
一、粗大误差产生原因	(73)
二、防止与消除粗大误差的方法	(73)
第二节 粗大误差的判别准则	(73)
一、来伊达准则	(74)
二、格拉布斯准则	(75)
三、狄克逊准则 (Dixon criterion)	(77)
四、测量数据的稳健处理	(79)
第三节 测量结果的数据处理实例	(80)
一、等精度直接测量列测量结果的数据处理实例	(80)
二、不等精度直接测量列测量结果的数据处理	(82)
第六章 误差传播与误差合成	(84)
第一节 函数误差	(84)
一、函数系统误差计算	(84)
二、函数随机误差计算	(86)
三、函数误差分布的模拟计算	(90)
四、传播定律的应用	(93)
第二节 误差的合成	(98)
一、误差合成概述	(98)
二、随机误差的合成	(100)
三、系统误差的合成	(101)
四、系统误差和随机误差的合成	(102)
五、微小误差取舍准则	(105)

第七章 测量结果的不确定度评定	(107)
第一节 研究不确定度的意义	(107)
一、研究不确定度的必要性	(107)
二、不确定度名词的由来	(107)
三、不确定度的应用领域	(108)
第二节 不确定度的基本概念	(108)
一、不确定度的定义	(108)
二、不确定度的来源	(109)
三、不确定度的分类	(111)
第三节 标准不确定度的两类评定	(111)
一、A类评定方法 (Type A Evaluation of Uncertainty)	(111)
二、B类评定方法 (Type B Evaluation of Uncertainty)	(112)
三、自由度	(116)
四、应用举例	(117)
第四节 合成标准不确定度	(118)
一、合成公式	(118)
二、有效自由度	(119)
三、应用举例	(120)
第五节 扩展不确定度	(122)
一、概述	(122)
二、自由度法	(123)
三、超越系数法	(123)
四、简易法	(125)
第六节 测量结果表示方式	(127)
一、测量结果报告的基本内容	(127)
二、测量结果的表示方式	(127)
三、评定测量不确定度的步骤	(129)
四、数字位数与数据修约规则	(130)
第八章 最小二乘法	(135)
第一节 最小二乘法原理	(135)
第二节 线性参数的最小二乘估计	(136)
一、正规方程组	(136)
二、不等权的正规方程组	(139)

三、标准差的估计	(140)
第三节 非线性参数的最小二乘估计	(143)
第四节 用最小二乘法解决组合测量问题	(145)
第九章 仪器精度的基本概念	(152)
第一节 仪器参数与特性	(152)
一、示值与示值范围	(152)
二、刻度与分辨力	(153)
三、测量范围	(153)
四、灵敏度与鉴别阈	(153)
五、仪器的稳定性与漂移	(153)
六、滞差	(154)
七、零值误差和基值误差	(154)
第二节 测量仪器的准确度和准确度等级	(155)
一、准确度	(155)
二、准确度等级	(155)
三、以最大允许误差评定准确度等级	(156)
四、以实际值的测量不确定度评定的准确度等级	(162)
五、测量仪器多个准确度等级的评定	(163)
第三节 影响仪器精度的主要因素	(164)
一、仪器原理误差	(164)
二、形状特性	(165)
三、外部干扰特性	(165)
四、运动特性	(167)
第十章 仪器精度评定方法	(171)
第一节 仪器静态精度的计算方法	(171)
一、仪器的静态精度特性	(171)
二、仪器静态精度计算方法	(172)
第二节 测量仪器的示值误差及其评定	(182)
一、示值误差的定义	(182)
二、测量仪器示值误差的评定方法	(183)
第三节 测量仪器的重复性评定方法	(191)
一、测量仪器重复性评定的基本方法	(191)
二、重复性条件	(192)

第四节 测量仪器动态精度及其估算	(194)
一、测量仪器动态精度的基本概念	(195)
二、传递函数	(196)
三、系统的动态精度	(199)
第十一章 精密运动机构精度	(201)
第一节 轴系精度	(201)
一、轴系精度的基本概念	(201)
二、主轴回转误差	(202)
三、影响轴系精度的因素	(205)
四、轴系精度分析	(208)
第二节 导轨副的导向精度	(210)
一、导向精度的概念	(210)
二、导轨副精度及提高导向精度的措施	(210)
第十二章 传动与变换机构精度	(213)
第一节 螺旋机构与传动精度	(213)
一、螺纹参数误差及其对旋合性的影响	(213)
二、螺旋副传动精度	(216)
三、螺旋副的空回	(218)
四、螺旋副传动精度计算实例	(219)
五、精密滚珠螺旋副精度	(220)
六、提高螺旋副传动精度措施	(224)
第二节 齿轮机构的传动精度	(227)
一、齿轮机构传动误差主要来源	(227)
二、齿轮机构空回	(231)
第十三章 光学系统及其元件精度分析	(236)
第一节 光学仪器的对准精度	(236)
一、横向对准误差	(236)
二、纵向调焦误差	(237)
三、提高对准精度的几种方法	(239)
第二节 透镜误差分析	(239)
一、透镜的等效节点、等效节平面	(239)
二、透镜的位置误差	(240)

三、透镜的制造误差	(244)
第三节 平行玻璃板及分划板误差分析	(251)
一、平行玻璃板	(251)
二、分划板	(255)
第四节 反射棱镜误差分析	(260)
一、反射棱镜的作用矩阵	(260)
二、反射棱镜的特征方向和极值轴向	(263)
三、反射棱镜的位置误差	(271)
四、反射棱镜的制造误差	(273)
五、应用举例	(278)
第十四章 仪器电子系统精度分析	(284)
第一节 概述	(284)
第二节 仪器电子测量系统的精度原理	(284)
一、电子测量系统的组成及其精度特点	(284)
二、测量元件的精度	(287)
三、信号处理电路的误差	(289)
四、电子测量系统误差计算方法	(291)
五、提高电子测量系统精度的主要措施	(291)
六、减小干扰与噪声的措施	(292)
第三节 仪器控制系统的精度分析	(293)
一、光电仪器控制系统的组成与分类	(293)
二、控制系统的精度	(296)
三、控制系统参数与精度之间的关系	(299)
第四节 控制系统误差计算实例	(300)
一、控制系统误差计算步骤	(300)
二、电视跟踪系统的误差计算	(300)
三、摄影机同步控制系统的误差计算	(306)
第五节 计算机及通信误差分析	(308)
一、计算机误差	(308)
二、串行通信误差	(310)
第六节 感应同步器的误差	(313)
一、感应同步器的误差分析	(313)
二、细分误差	(315)
三、数显表的误差分析	(315)

第七节 光电倍增管四象限跟踪系统和弱光像增强 CCD 跟踪系统的比较	(316)
一、两种跟踪系统的基本原理	(316)
二、探测噪声误差	(318)
三、控制特性	(319)
四、闭环噪声	(320)
第十五章 仪器总体精度设计	(322)
第一节 仪器总体精度设计概述	(322)
一、仪器总体精度设计的目的	(322)
二、仪器精度设计的步骤	(323)
三、总体精度分析方法	(324)
第二节 仪器设计的基本原则	(325)
一、阿贝原则	(325)
二、最小变形原则	(326)
三、基准面统一原则	(328)
四、精度储备	(329)
五、测量链最短原则	(330)
六、匹配性原则	(331)
七、最优化原则	(331)
八、互换性原则	(331)
九、经济性原则	(331)
第三节 仪器精度计算	(332)
一、最大误差法	(332)
二、概率计算法	(338)
三、综合计算法	(339)
第四节 仪器精度分配	(342)
一、误差分配方法	(343)
二、球径仪误差分配与调整实例	(346)
第五节 提高仪器测量精度的措施	(348)
一、设计时从原理和结构上消除误差	(348)
二、从装配调整中消除误差	(350)
三、对仪器的误差进行修正	(350)
四、采用误差补偿法提高仪器或系统的精度	(350)
五、采用误差自动校正原理	(352)

第十六章 典型仪器的精度分析	(354)
第一节 电子经纬仪的精度分析	(354)
一、电子经纬仪的测角原理和基本结构	(354)
二、经纬仪不满足几何条件时所产生的误差	(355)
三、电子经纬仪的总体精度分析	(357)
第二节 光电坐标测量仪的精度分析	(362)
一、光电坐标测量仪概述	(362)
二、光电坐标测量仪的精度分析	(366)
第三节 万能工具显微镜的精度分析	(369)
一、万能工具显微镜概述	(369)
二、万能工具显微镜精度分析	(378)
附录	(383)
参考文献	(398)

第一章 误差和精度的基本概念

第一节 研究误差理论的意义

一、研究误差的重要意义

人们在生产斗争和科学实验中，不断地探索和揭示客观世界的规律性。其方法有两种：一是理论分析的方法；二是实验测量的方法。在这个过程中常常需要极其精确的实验测定，以希望得到没有误差的测量结果，因为误差会在一定的程度上歪曲客观事物的规律性。

实验测量的研究方法是极为重要的。著名的科学家门捷列夫说：“科学始于测量。”实验研究不仅能定性地验证理论分析的正确性，而且能够定量地验证理论研究结果的正确性和可靠程度，并且能够极其精确地测定出许多理论公式中的待定常数。伟大的物理学家爱因斯坦的著名的相对论，直至1919年英国天文学家利用日食进行的天文观测才得到证实。根据爱因斯坦的相对论，光速是宇宙间的最高速度，然而，有些科学家经过多年的精细观测，提出了可能存在超光速的所谓“快子”。为什么要花多年的时间进行辛劳的测量呢？因为误差可能歪曲事实，导致错误的结论。因此，研究误差的来源及其规律性，减小和尽可能地消除误差，以得到精确的实验测量结果，对于科学技术的进展是非常重要的。

远在伽利略时代，伽利略就研究如何提高物理实验的精确性。以后，法国数学家列朗德尔和德国数学家、测量学家高斯在天体运行轨道的理论研究中，都提出了用最小二乘法来处理观测结果，奠定了误差理论的基础。

正是由于实验测量技术和误差处理方法的不断改进，对科学技术的发展和物理定律的发现起了很大的作用。例如对天体质量及其距离的测定，奠定了万有引力定律；我国科学家吴有训与美国科学家康普顿，通过对 x 射线散射角和波长的改变的精密测定，奠定了光量子的能量守恒定律和冲量守恒定律；吴剑雄教授的实验测定证实了杨振宁博士和李政道博士的宇宙不守恒定律，推翻了宇宙守恒定律等。在军事技术和工业技术中，这样的例子也是很多的。例如火箭和导弹的发射，需要非常精确地装定发射角，工业计量则已达到 $0.1 \sim 0.01 \mu\text{m}$ 的精确度。又如制造光导纤维的材料，其杂质含量要求少于 10^{-9} 。可以说，人们在生产斗争和科学实验中所取得的进展和成就，都是通过对误差的正确判定和实验测量技术的改进而取得的。

二、误差理论的基本任务

- (1) 研究误差的来源和特性，对误差做出科学的分类。
- (2) 研究误差的评定和估计的合理方法，研究误差的传递、转化和相互作用的规律性，以及误差的合成和分配的法则。
- (3) 研究在各种测量方式及测量条件下，降低误差提高精度的途径，以最经济简便的方法得到最优的测量结果。

三、误差理论的实际应用

- (1) 对测量数据进行判断和统计处理，如对测量数据的合理性、可靠性、相关性及其分布规律的判断和估计，通过一系列的计算处理，得到测量结果的数学表示及精度评定。
- (2) 综合评定某实验方法或测量仪器的精确性和可靠性。
- (3) 产品设计时，进行误差的综合，预估产品的精度。
- (4) 确定最有利的实验条件。
- (5) 根据被测参数或被检仪器的精度，合理选择测量仪器或检定仪器的精度。
- (6) 根据测量精度，合理选择测量方法、测量方程式及必要的测量次数。
- (7) 判断旧产品的精度是否蜕化降低，或技术革新和改进后的效果。

第二节 误 差

一、误差的定义

研究误差是以测量误差为研究对象，因为它具有普遍性和代表性。测量误差可定量地表示为

$$\text{测量误差值} = \text{测得值} - \text{真值}$$

用符号表示即为

$$\Delta_i = x_i - x_0 \quad (1-1)$$

$$i = 1 \sim n (\text{测量序数})$$

Δ_i 称为真误差，它的大小表示每一次测得值对真值的不符合的程度。此外，我们应从以下几个方面更好地理解误差的含义。

(1) 真误差 Δ_i 恒不等于零，即误差的必然性原理。不管主观愿望如何，以及在测量时怎样努力，实际上误差总是要产生，而且就其理论极限来说，也不可能等于零。例如测量电量时，误差不可能小于一个电子所带的电量，测量块规的长度时，误差决不可能小于块规的材料分子的尺寸。

(2) 真误差 Δ_i 之间，或测得值 x_i 之间，一般是不相等的，即误差具有不确定性。否则，可能是由于测量仪器的分辨力太低的缘故。