



国防特色教材·仪器科学与技术

# 仪器精度理论

YIQI JINGDU LILUN

——○ 马 宏 王金波 主编 ○——

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社  
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·仪器科学与技术

# 仪器精度理论

马 宏 王金波 主编

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社  
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

## 内 容 简 介

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,等精度测量和不等精度测量中随机误差的估计,误差的置信区间,系统误差产生的原因、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。仪器精度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测量精度的措施,并给出电子经纬仪、光电坐标测量仪、万能工具显微镜三种军民两用的精密仪器的精度分析实例。

本书知识较新,结构合理,理论联系实际,可作为高等院校光学工程、仪器科学与技术、机电类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

仪器精度理论/马宏,王金波主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2009.9

ISBN 978-7-81124-627-8

I. 仪… II. ①马…②王… III. 仪器—精度 IV. TH701

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 108694 号

## 仪 器 精 度 理 论

马 宏 王 金 波 主 编

责任编辑 宋淑娟

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: [bhpress@263.net](mailto:bhpress@263.net)

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:28.5 字数:638 千字

2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-81124-627-8 定价:45.00 元

## 《仪器精度理论》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

主审：杨 牧 邸 旭

# 前 言

随着现代科学技术的飞速发展,在各国,对误差和仪器精度理论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评价都显得越来越重要,同时对仪器精度的要求也越来越高。长春理工大学根据科学技术发展的趋势和学生培养目标的要求,自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。

本教材贯彻“十一五”国防特色学科专业教材建设的精神,适应21世纪军工科技人才培养的需要,力求结构合理、内容准确、知识更新、理论与实践结合,反映了课程体系改革的成果,引用了现代国防科研的新技术和新成果。本书的特点是,系统阐述了误差理论和仪器精度设计的基本概念、基本理论和基本方法,以及它们在计量测试、兵器试验和仪器设计及精度评价等方面的应用,并将仪器精度理论同产品设计、装校、测试、鉴定等结合起来,成为一个体系。

全书共分16章。第1章至第8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9章至第16章为仪器精度理论部分,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。通过本教材的学习,学生基本上可以对各类光电检测仪器、精密仪器以及设备中的光学、机械、电控系统精度和仪器总体精度进行分析与设计,也可对各种检测系统和测试方法进行测量精度分析与计算,并为仪器的设计、制造、检测与鉴定提供依据。

本书可作为高等院校仪器科学与技术、机械工程、光学工程、电子类和其他直接为国防科技工业服务的学科专业研究生及本科生的教材,同时可供科研及生产部门的工程技术人员参考。

本书系集体编著,由长春理工大学马宏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1、2、10、15、16章)、王金波教授(第3、4、5、6章)和王志坚教授(第13章),北京理工大学沙定国教授(第8章),长春理工大学徐熙平教授(第14章)、冯进良教授(第11、12章)、王春艳副教授(第4、7章)和白素平副教授(第2、9章)。本书的全部图表由白素平、王春艳完成,并得到闫钰锋、朱道松、冯利、郭锐等人的帮助。

在本书编写和出版过程中,北京航空航天大学出版社责任编辑做了认真、细致的编辑工作;长春光学精密机械与物理研究所杨牧研究员和长春理工大学邱旭教授担任主审,为本书提出了宝贵意见;也得到了长春理工大学光电工程学院付跃刚、车英和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之处,希望读者批评、指正。

编 者  
2009年7月

# 目 录

## 上篇 误差理论

<b>第 1 章 误差和精度的基本概念</b> .....	3
1.1 研究误差理论的意义 .....	3
1.1.1 研究误差的重要意义 .....	3
1.1.2 误差理论的基本任务 .....	4
1.1.3 误差理论的实际应用 .....	4
1.2 误 差 .....	4
1.2.1 误差的定义 .....	4
1.2.2 误差的来源 .....	5
1.2.3 误差的表示方法 .....	6
1.2.4 误差的分类 .....	9
1.2.5 系统误差和修正值.....	10
1.3 精 度.....	10
1.3.1 精度的一般含义.....	10
1.3.2 精度的具体含义.....	11
1.3.3 精度的其他含义.....	12
1.3.4 分辨力与精密度和准确度的关系.....	12
1.4 测量的基本问题.....	12
1.4.1 测量与测量过程 .....	12
1.4.2 测量方法的分类.....	13
1.4.3 测量要素.....	15
1.4.4 测量误差处理中应注意的问题.....	15
<b>第 2 章 误差分布</b> .....	17
2.1 测量误差的统计特性.....	17
2.1.1 测量值点列图.....	17
2.1.2 统计直方图和概率密度分布图.....	18

2.1.3	测量误差统计分布的特征值	20
2.2	常见误差分布	26
2.2.1	正态分布	26
2.2.2	其他常见误差分布	28
2.2.3	常用的统计量分布	31
2.3	误差分布的分析与检验	34
2.3.1	误差分布的分析判断	34
2.3.2	误差分布的统计检验	35
<b>第3章</b>	<b>随机误差</b>	<b>41</b>
3.1	随机误差概述	41
3.1.1	随机误差产生的原因	41
3.1.2	随机误差的基本特性	43
3.2	算术平均值	44
3.2.1	算术平均值原理	44
3.2.2	算术平均值的标准差	45
3.3	标准差的计算方法	46
3.3.1	贝塞尔公式	46
3.3.2	极差法	47
3.3.3	最大误差法	47
3.4	置信区间	50
3.4.1	正态分布的置信区间	50
3.4.2	$t$ 分布的置信区间	51
3.4.3	其他分布的置信区间	52
3.5	不等精度测量时随机误差的估计	54
3.5.1	权的概念及权的确定方法	54
3.5.2	加权算术平均值	55
3.5.3	加权算术平均值的标准差	56
<b>第4章</b>	<b>系统误差</b>	<b>59</b>
4.1	系统误差概述	59
4.1.1	研究系统误差的重要意义	59
4.1.2	系统误差产生的原因	59
4.1.3	系统误差的分类	60



---

4.1.4	系统误差对测量结果的影响	62
4.2	系统误差的发现	63
4.2.1	残余误差观察法	63
4.2.2	马利科夫判据	66
4.2.3	阿贝判据	67
4.2.4	其他判别准则	69
4.2.5	$t$ 检验法	71
4.2.6	多组测量的方差分析	72
4.3	系统误差的减少与消除	74
4.3.1	消除误差源法	75
4.3.2	加修正值法	75
4.3.3	改进测量方法	75
<b>第 5 章</b>	<b>粗大误差</b>	<b>80</b>
5.1	粗大误差概述	80
5.1.1	粗大误差产生的原因	80
5.1.2	防止与消除粗大误差的方法	80
5.2	粗大误差的判别准则	80
5.2.1	莱伊达准则	81
5.2.2	格拉布斯准则	82
5.2.3	狄克逊准则(Dixon criterion)	84
5.2.4	测量数据的稳健处理	86
5.3	测量结果的数据处理实例	87
5.3.1	等精度直接测量列测量结果的数据处理实例	87
5.3.2	不等精度直接测量列测量结果的数据处理实例	89
<b>第 6 章</b>	<b>误差传播与误差合成</b>	<b>91</b>
6.1	函数误差	91
6.1.1	函数系统误差计算	91
6.1.2	函数随机误差计算	93
6.1.3	函数误差分布的模拟计算	97
6.1.4	传播定律的应用	101
6.2	误差的合成	106
6.2.1	误差合成概述	106

6.2.2	随机误差的合成 .....	107
6.2.3	系统误差的合成 .....	109
6.2.4	系统误差和随机误差的合成 .....	110
6.2.5	微小误差取舍准则 .....	113
<b>第7章</b>	<b>测量结果的不确定度评定 .....</b>	<b>115</b>
7.1	研究不确定度的意义 .....	115
7.1.1	研究不确定度的必要性 .....	115
7.1.2	不确定度名词的由来 .....	115
7.1.3	不确定度的应用领域 .....	116
7.2	不确定度的基本概念 .....	117
7.2.1	不确定度的定义 .....	117
7.2.2	不确定度的来源 .....	117
7.2.3	不确定度的分类 .....	119
7.3	标准不确定度的两类评定 .....	119
7.3.1	A类评定方法(type A evaluation of uncertainty) .....	120
7.3.2	B类评定方法(type B evaluation of uncertainty) .....	120
7.3.3	自由度 .....	125
7.3.4	应用举例 .....	126
7.4	合成标准不确定度 .....	127
7.4.1	合成公式 .....	127
7.4.2	有效自由度 .....	129
7.4.3	应用举例 .....	129
7.5	扩展不确定度 .....	131
7.5.1	概述 .....	131
7.5.2	自由度法 .....	132
7.5.3	超越系数法 .....	133
7.5.4	简易法 .....	135
7.6	测量结果的表示方法 .....	136
7.6.1	测量结果报告的基本内容 .....	136
7.6.2	测量结果的表示方式 .....	137
7.6.3	评定测量不确定度的步骤 .....	138
7.6.4	数字位数与数据修约规则 .....	139

<b>第 8 章 最小二乘法</b> .....	144
8.1 最小二乘法原理 .....	144
8.2 线性参数的最小二乘估计 .....	145
8.2.1 正规方程组 .....	145
8.2.2 不等权的正规方程组 .....	148
8.2.3 标准差的估计 .....	149
8.3 非线性参数的最小二乘估计 .....	152
8.4 用最小二乘法解决组合测量问题 .....	154

## 下篇 仪器精度

<b>第 9 章 仪器精度的基本概念</b> .....	163
9.1 仪器参数与特性 .....	163
9.1.1 示值与示值范围 .....	164
9.1.2 刻度与分辨力 .....	164
9.1.3 测量范围 .....	164
9.1.4 灵敏度与鉴别阈 .....	164
9.1.5 仪器的稳定性与漂移 .....	165
9.1.6 滞 差 .....	165
9.1.7 零值误差和基值误差 .....	165
9.2 测量仪器的准确度和准确度等级 .....	166
9.2.1 测量仪器的准确度 .....	166
9.2.2 以最大允许误差评定准确度等级 .....	168
9.2.3 以实际值的测量不确定度评定准确度等级 .....	175
9.2.4 测量仪器多个准确度等级的评定 .....	177
9.3 影响仪器精度的主要因素 .....	177
9.3.1 仪器原理误差 .....	177
9.3.2 形状特性 .....	178
9.3.3 外部干扰特性 .....	178
9.3.4 运动特性 .....	181
<b>第 10 章 仪器精度评定方法</b> .....	185
10.1 仪器静态精度的计算方法 .....	185

10.1.1	仪器的静态精度特性	185
10.1.2	仪器静态精度计算方法	186
10.2	测量仪器的示值误差及其评定	196
10.2.1	示值误差的定义	196
10.2.2	测量仪器示值误差的评定方法	198
10.3	测量仪器的重复性评定方法	206
10.3.1	测量仪器重复性评定的基本方法	207
10.3.2	重复性条件	207
10.4	测量仪器动态精度及其估算	210
10.4.1	测量仪器动态精度的基本概念	210
10.4.2	传递函数	211
10.4.3	系统的动态精度	215
10.4.4	测量系统动态精度分析	216
<b>第 11 章</b>	<b>精密运动机构精度</b>	<b>223</b>
11.1	轴系精度	223
11.1.1	轴系精度的基本概念	223
11.1.2	主轴回转误差	224
11.1.3	影响轴系精度的因素	227
11.1.4	轴系精度分析	231
11.2	导轨副的导向精度	233
11.2.1	导向精度的概念	233
11.2.2	导轨副精度及提高导向精度的措施	234
<b>第 12 章</b>	<b>传动与变换机构精度</b>	<b>237</b>
12.1	螺旋机构与传动精度	237
12.1.1	螺纹参数误差及其对旋合性的影响	237
12.1.2	螺旋副传动精度	240
12.1.3	螺旋副的空回	243
12.1.4	螺旋副传动精度计算实例	243
12.1.5	精密滚珠螺旋副精度	244
12.1.6	提高螺旋副传动精度的措施	249
12.2	齿轮机构的传动精度	252
12.2.1	齿轮机构传动误差的主要来源	253
12.2.2	齿轮机构的空回	256

---

<b>第 13 章 光学系统及其元件精度分析</b> .....	262
13.1 光学仪器的对准精度 .....	262
13.1.1 横向对准误差 .....	262
13.1.2 纵向调焦误差 .....	263
13.1.3 提高对准精度的几种方法 .....	265
13.2 透镜误差分析 .....	265
13.2.1 透镜的等效节点和等效节平面 .....	265
13.2.2 透镜的位置误差 .....	266
13.2.3 透镜的制造误差 .....	270
13.3 平行玻璃板及分划板误差分析 .....	278
13.3.1 平行玻璃板 .....	278
13.3.2 分划板 .....	282
13.4 反射棱镜误差分析 .....	288
13.4.1 反射棱镜的作用矩阵 .....	288
13.4.2 反射棱镜的特征方向和极值轴向 .....	291
13.4.3 反射棱镜的位置误差 .....	299
13.4.4 反射棱镜的制造误差 .....	301
13.4.5 应用举例 .....	307
<b>第 14 章 仪器电子系统精度分析</b> .....	313
14.1 概 述 .....	313
14.2 仪器电子测量系统的精度原理 .....	313
14.2.1 电子测量系统的组成及其精度特点 .....	313
14.2.2 测量元件的精度 .....	316
14.2.3 信号处理电路的误差 .....	319
14.2.4 电子测量系统误差的计算方法 .....	320
14.2.5 提高电子测量系统精度的主要措施 .....	321
14.2.6 减小干扰与噪声的措施 .....	322
14.3 仪器控制系统的精度分析 .....	323
14.3.1 光学仪器控制系统的组成与分类 .....	323
14.3.2 控制系统的精度和误差 .....	327
14.3.3 控制系统参数与精度之间的关系 .....	331
14.4 控制系统误差计算实例 .....	332

14.4.1	控制系统误差计算步骤	332
14.4.2	电视跟踪系统的误差计算	332
14.4.3	摄影机同步控制系统的误差计算	338
14.5	计算机及通信误差分析	340
14.5.1	计算机误差	340
14.5.2	串行通信误差	343
14.6	感应同步器的误差	345
14.6.1	感应同步器的误差分析	345
14.6.2	数显表的误差分析	348
14.7	光电倍增管四象限型与弱光像增强 CCD 跟踪系统的比较	349
14.7.1	两种跟踪系统的基本原理	349
14.7.2	探测器的噪声误差	351
14.7.3	控制特性	352
14.7.4	闭环噪声	353
<b>第 15 章</b>	<b>仪器总体精度设计</b>	<b>354</b>
15.1	仪器总体精度设计概述	354
15.1.1	仪器总体精度设计的目的	354
15.1.2	仪器精度设计的步骤	355
15.1.3	总体精度分析方法	356
15.2	仪器设计的基本原则	358
15.2.1	阿贝原则	358
15.2.2	最小变形原则	359
15.2.3	基准面统一原则	361
15.2.4	精度储备	362
15.2.5	测量链最短原则	363
15.2.6	匹配性原则	364
15.2.7	最优化原则	364
15.2.8	互换性原则	364
15.2.9	经济性原则	365
15.3	仪器精度计算	365
15.3.1	最大误差法	365
15.3.2	概率计算法	371
15.3.3	综合计算法	372

15.4	仪器精度分配	376
15.4.1	误差分配方法	376
15.4.2	球径仪误差分配与调整实例	379
15.5	提高仪器测量精度的措施	382
15.5.1	设计时从原理和结构上消除误差	382
15.5.2	从装配调整中消除误差	385
15.5.3	对仪器的误差进行修正	385
15.5.4	采用误差补偿法提高仪器或系统的精度	385
15.5.5	采用误差自动校正原理	387
<b>第 16 章</b>	<b>典型仪器的精度分析</b>	<b>390</b>
16.1	电子经纬仪的精度分析	390
16.1.1	电子经纬仪的测角原理和基本结构	390
16.1.2	经纬仪不满足几何条件时所产生的误差	392
16.1.3	电子经纬仪的总体精度分析	394
16.2	光电坐标测量仪的精度分析	399
16.2.1	概 述	399
16.2.2	精度分析	403
16.3	万能工具显微镜的精度分析	407
16.3.1	概 述	407
16.3.2	精度分析	417
<b>附 录</b>		<b>422</b>
附表 A	常用误差分布一览表	422
附表 B	标准正态分布表	427
附表 C	$t$ 分布表	428
附表 D	$\chi^2$ 分布表	429
附表 E	$F$ 分布表	430
附表 F	夏皮罗-威尔克 $\alpha_m$ 系数	433
附表 G	夏皮罗-威尔克 $W(n, \alpha)$ 值	434
附表 H	偏态统计量 $p$ 分位数 $Z_p$ 表	435
附表 I	峰态统计量 $p$ 分位数 $Z_p$ 表	435
<b>参考文献</b>		<b>436</b>

# 上篇 误差理论



