



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

马宏 王金波 主编

仪器精度理论 (第2版)



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

014032446

TH701
06-2



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

仪器精度理论

(第2版)

马宏 王金波 主编



北京航空航天大学出版社



北航

C1720814

01032448

内 容 简 介

本书主要介绍了误差和数据处理、测量不确定度评定与仪器总体精度设计的基本理论和方法,及其在计量测试、兵器试验、仪器设计、产品鉴定与精度评价等方面的应用。

误差理论部分主要阐述了测量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。仪器精度部分内容包括:仪器精度基本概念,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实例。各章附思考与练习题,书末附9个误差分布表。

本书可作为高等学校光学工程、仪器科学与技术、机电类等专业的本科生和研究生的“误差理论与数据处理”和“仪器精度设计”两门课程的教材,也可供有关科研单位、计量机构及企业从事仪器设计、计量检定、产品检验、质量管理及科学实验的人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

仪器精度理论 / 马宏,王金波主编. --2版. --北京 :
北京航空航天大学出版社,2014.3

ISBN 978-7-5124-1466-2

I. ①仪… II. ①马… ②王… III. ①仪器—精度 IV.
①TH701

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 017143 号

版权所有,侵权必究。

仪器精度理论(第2版)

马 宏 王金波 主编

责任编辑 史 东 史世芬 郭秀英

*

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(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpess@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:28.5 字数:638千字

2014年3月第2版 2014年3月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-5124-1466-2 定价:59.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

《仪器精度理论(第2版)》

编委会

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,在各国,对误差和仪器精度理论的研究愈来愈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。长春理工大学根据科学技术发展的趋势和培养目标的要求,从1962年以来陆续在本科生中开设了“机构精度原理”和“误差理论与数据处理”课,在研究生中开设了“仪器精度分析”课和“仪器精度理论”课,1982年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。在此基础上,我们吸取兄弟院校同类教材的长处,总结了多年教学和科研实践成果,于2006年由马宏、王金波等8位教授共同编写了《误差理论与仪器精度》教材。2009年改编为《仪器精度理论》教材。

本书贯彻教育部“十二五”国家级规划教材建设的精神,适应21世纪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、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16章。第1~8章为误差理论部分,内容包括:测量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9~16章为仪器精度理论部分,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。本书注重理论与实践相结合,除教材内的实例分析和典型光、机、电系统及其元件的精度特性参数表外,各章均附有思考题。通过本书的学习,学生基本上可以对各类光电检测仪器、精密仪器与设备中的光学、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法进行测量精度分析计算,为仪器的设计、制造、检测与鉴定提供依据。

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、10、15、16章),王金波教授(第3、5、6章),王志坚教授(第13章),徐熙平教授(第14章),冯进良教授(第11、12章),王春艳教授(第4、7章),白素平副教授(第2、9章);北京理工大学沙定国教授(第8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。

本书在编写过程中,得到了长春理工大学光电工程学院邸旭、付跃刚、车英,教材科耿丽华等人的大力支持,另外,北京航空航天大学出版社的责任编辑也做了认真细致的编辑工作,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

2013年5月

目 录

第 1 章 误差和精度的基本概念	1
1.1 研究误差理论的意义	1
1.1.1 研究误差的重要意义	1
1.1.2 误差理论的基本任务	2
1.1.3 误差理论的实际应用	2
1.2 误 差	2
1.2.1 误差的定义	2
1.2.2 误差的来源	3
1.2.3 误差的表示方法	4
1.2.4 误差的分类	7
1.2.5 系统误差和修正值	8
1.3 精 度	8
1.3.1 精度的一般含义	8
1.3.2 精度的具体含义	8
1.3.3 精度的其他含义	9
1.3.4 分辨力与精密度和准确度的关系	10
1.4 测量的基本问题	10
1.4.1 测量与测量过程	10
1.4.2 测量方法的分类	11
1.4.3 测量要素	12
1.4.4 测量误差处理中应注意的问题	13
思考与练习题	14
第 2 章 误差分布	16
2.1 测量误差的统计特性	16
2.1.1 测量值点列图	16
2.1.2 统计直方图和概率密度分布图	17
2.1.3 测量误差统计分布的特征值	19



2.2 常见误差分布	25
2.2.1 正态分布	25
2.2.2 其他常见误差分布	26
2.2.3 常用的统计量分布	30
2.3 误差分布的分析与检验	33
2.3.1 误差分布的分析判断	33
2.3.2 误差分布的统计检验	33
思考与练习题	40
第3章 随机误差	41
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	51
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
思考与练习题	59
第4章 系统误差	61
4.1 系统误差概述	61
4.1.1 研究系统误差的重要意义	61
4.1.2 系统误差产生的原因	61



4.1.3	系统误差的分类	62
4.1.4	系统误差对测量结果的影响	64
4.2	系统误差的发现	65
4.2.1	残余误差观察法	65
4.2.2	马利科夫判据(残余误差校核法)	67
4.2.3	阿贝判据	68
4.2.4	其他判别准则	70
4.2.5	t 检验法	73
4.2.6	多组测量的方差分析	74
4.3	系统误差的减少与消除	76
4.3.1	消除误差源法	76
4.3.2	加修正值法	76
4.3.3	改进测量方法	77
	思考与练习题	81
第 5 章	粗大误差	83
5.1	粗大误差概述	83
5.1.1	粗大误差产生的原因	83
5.1.2	防止与消除粗大误差的方法	83
5.2	粗大误差的判别准则	83
5.2.1	莱伊达准则($n \leq 10$ 不成立)	84
5.2.2	格拉布斯准则	85
5.2.3	狄克逊准则	87
5.2.4	测量数据的稳健处理	89
5.3	测量结果的数据处理实例	90
5.3.1	等精度直接测量列测量结果的数据处理实例	90
5.3.2	不等精度直接测量列测量结果的数据处理	92
	思考与练习题	94
第 6 章	误差传播与误差合成	95
6.1	函数误差	95
6.1.1	函数系统误差计算	95
6.1.2	函数随机误差计算	97
6.1.3	函数误差分布的模拟计算	101



6.1.4	传播定律的应用	104
6.2	误差的合成	109
6.2.1	误差合成概述	109
6.2.2	随机误差的合成	111
6.2.3	系统误差的合成	112
6.2.4	系统误差和随机误差的合成	114
6.2.5	微小误差取舍准则	116
	思考与练习题	118
第7章	测量结果的不确定度评定	120
7.1	研究不确定度的意义	120
7.1.1	研究不确定度的必要性	120
7.1.2	不确定度名词的由来	120
7.1.3	不确定度的应用领域	121
7.2	不确定度的基本概念	122
7.2.1	不确定度的定义	122
7.2.2	不确定度的来源	122
7.2.3	不确定度的分类	124
7.3	标准不确定度的两类评定	124
7.3.1	A类评定方法	124
7.3.2	B类评定方法	125
7.3.3	自由度	129
7.3.4	应用举例	131
7.4	合成标准不确定度	132
7.4.1	合成公式	132
7.4.2	有效自由度	133
7.4.3	应用举例	133
7.5	扩展不确定度	136
7.5.1	概述	136
7.5.2	自由度法	136
7.5.3	超越系数法	137
7.5.4	简易法	139
7.6	测量结果的表示方法	140
7.6.1	测量结果报告的基本内容	141



7.6.2	测量结果的表示方式	141
7.6.3	评定测量不确定度的步骤	143
7.6.4	数字位数与数据修约规则	144
	思考与练习题	148
第 8 章	最小二乘法	149
8.1	最小二乘法原理	149
8.2	线性参数的最小二乘估计	150
8.2.1	正规方程组	150
8.2.2	不等权的正规方程组	153
8.2.3	标准差的估计	154
8.3	非线性参数的最小二乘估计	157
8.4	用最小二乘法解决组合测量问题	160
	思考与练习题	166
第 9 章	仪器精度的基本概念	168
9.1	仪器参数与特性	168
9.1.1	示值与示值范围	169
9.1.2	刻度与分辨力	169
9.1.3	测量范围	169
9.1.4	灵敏度与鉴别阈	169
9.1.5	仪器的稳定性与漂移	170
9.1.6	滞 差	170
9.1.7	零值误差和基值误差	170
9.2	测量仪器的准确度和准确度等级	171
9.2.1	测量仪器的准确度	171
9.2.2	以最大允许误差评定准确度等级	173
9.2.3	以实际值的测量不确定度评定的准确度等级	179
9.2.4	测量仪器多个准确度等级的评定	181
9.3	影响仪器精度的主要因素	181
9.3.1	仪器原理误差	182
9.3.2	形状特性	182
9.3.3	外部干扰特性	183
9.3.4	运动特性	185



1 思考题	189
第 10 章 仪器精度估算与评定方法	190
10.1 仪器静态精度的计算方法	190
10.1.1 仪器的静态精度特性	190
10.1.2 仪器的静态精度计算方法	191
10.2 测量仪器的示值误差及其评定	201
10.2.1 示值误差的定义	201
10.2.2 测量仪器示值误差的评定方法	203
10.3 测量仪器的重复性评定方法	211
10.3.1 测量仪器重复性评定的基本方法	211
10.3.2 重复性条件	212
10.4 测量仪器动态精度及其估算	215
10.4.1 测量仪器动态精度的基本概念	215
10.4.2 传递函数	216
10.4.3 系统的动态精度	219
10.4.4 测量系统动态精度分析	221
思考与练习题	227
第 11 章 精密运动机构精度	228
11.1 轴系精度	228
11.1.1 轴系精度的基本概念	228
11.1.2 主轴回转误差	229
11.1.3 影响轴系精度的因素	232
11.1.4 轴系精度分析	236
11.2 导轨副的导向精度	238
11.2.1 导向精度的概念	238
11.2.2 导轨副精度及提高导向精度的措施	238
思考题	241
第 12 章 传动与变换机构精度	242
12.1 螺旋机构与传动精度	242
12.1.1 螺纹参数误差及其对旋合性的影响	242
12.1.2 螺旋副传动精度	245



12.1.3	螺旋副的空回	248
12.1.4	螺旋副传动精度计算实例	248
12.1.5	精密滚珠螺旋副精度	249
12.1.6	提高螺旋副传动精度的措施	254
12.2	齿轮机构的传动精度	257
12.2.1	齿轮机构传动误差的主要来源	257
12.2.2	齿轮机构的空回	261
	思考题	266
第 13 章 光学系统及其元件精度分析		267
13.1	光学仪器的对准精度	267
13.1.1	横向对准误差	267
13.1.2	纵向调焦误差	268
13.1.3	提高对准精度的几种方法	270
13.2	透镜误差分析	270
13.2.1	透镜的等效节点、等效节平面	270
13.2.2	透镜的位置误差	271
13.2.3	透镜的制造误差	275
13.3	平行玻璃板及分划板误差分析	282
13.3.1	平行玻璃板	282
13.3.2	分划板	286
13.4	反射棱镜误差分析	291
13.4.1	反射棱镜的作用矩阵	292
13.4.2	反射棱镜的特征方向和极值轴向	294
13.4.3	反射棱镜的位置误差	303
13.4.4	反射棱镜的制造误差	305
13.4.5	应用举例	310
	思考题	316
第 14 章 仪器电子系统精度分析		317
14.1	概 述	317
14.2	仪器电子测量系统的精度原理	317
14.2.1	电子测量系统的组成及其精度特点	317
14.2.2	测量元件的精度	320



14.2.3	信号处理电路的误差	323
14.2.4	电子测量系统误差的计算方法	324
14.2.5	提高电子测量系统精度的主要措施	325
14.2.6	减小干扰与噪声的措施	326
14.3	仪器控制系统的精度分析	327
14.3.1	光学仪器控制系统的组成与分类	327
14.3.2	控制系统的精度和误差	330
14.3.3	控制系统参数与精度之间的关系	334
14.4	控制系统误差计算实例	335
14.4.1	控制系统误差计算步骤	335
14.4.2	电视跟踪系统的误差计算	335
14.4.3	摄影机同步控制系统的误差计算	341
14.5	计算机及通信误差分析	343
14.5.1	计算机误差	343
14.5.2	串行通信误差	345
14.6	感应同步器的误差	348
14.6.1	感应同步器的误差分析	348
14.6.2	数显表的误差分析	350
14.7	光电倍增管四象限型和弱光像增强 CCD 跟踪系统的比较	351
14.7.1	两种跟踪系统的基本原理	351
14.7.2	探测器的噪声误差	353
14.7.3	控制特性	354
14.7.4	闭环噪声	355
	思考练习题	356
第 15 章	仪器总体精度设计	357
15.1	仪器总体精度设计概述	357
15.1.1	仪器总体精度设计的目的	357
15.1.2	仪器精度设计的步骤	358
15.1.3	总体精度分析方法	359
15.2	仪器设计的基本原则	361
15.2.1	阿贝原则	361
15.2.2	最小变形原则	362
15.2.3	基准面统一原则	364



15.2.4	精度储备	365
15.2.5	测量链最短原则	366
15.2.6	匹配性原则	367
15.2.7	最优化原则	367
15.2.8	互换性原则	367
15.2.9	经济性原则	367
15.3	仪器精度计算	368
15.3.1	最大误差法	368
15.3.2	概率计算法	374
15.3.3	综合计算法	375
15.4	仪器精度分配	379
15.4.1	误差分配方法	379
15.4.2	球径仪误差分配与调整实例	382
15.5	提高仪器测量精度的措施	384
15.5.1	设计时从原理和结构上消除误差	385
15.5.2	从装配调整中消除误差	387
15.5.3	对仪器的误差进行修正	387
15.5.4	采用误差补偿法提高仪器或系统的精度	387
15.5.5	采用误差自动校正原理	389
	思考题	391
第 16 章	典型仪器的精度分析	392
16.1	电子经纬仪的精度分析	392
16.1.1	电子经纬仪的测角原理和基本结构	392
16.1.2	经纬仪不满足几何条件时所产生的误差	393
16.1.3	电子经纬仪的总体精度分析	396
16.2	光电坐标测量仪的精度分析	401
16.2.1	概 述	401
16.2.2	精度分析	404
16.3	万能工具显微镜的精度分析	408
16.3.1	概 述	408
16.3.2	精度分析	418
	思考题	423



附表 1	常用误差分布一览表	424
附录 2	标准正态分布表	428
附表 3	t 分布表	429
附表 4	χ^2 分布表	430
附表 5	F 分布表	431
附表 6	夏皮罗-威尔克 α_n 系数	435
附表 7	夏皮罗-威尔克 $W(n, \alpha)$ 值	436
附表 8	偏态统计量 P 分位数 Z_p 表	437
附表 9	峰态统计量 P 分位数 Z_p 表	437
参考文献	438



第1章 误差和精度的基本概念

1.1 研究误差理论的意义

1.1.1 研究误差的重要意义

人们在生产生活和科学实验中,不断探索和揭示客观世界的规律。其方法有两种:一是理论分析的方法,二是实验测量的方法。另外常常需要极其精确的实验测定,以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”。为什么要花许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,减小并尽可能地消除误差,以得到精确的实验测量结果,对于科学技术的进步是非常重要的。

远在伽利略时代,伽利略就研究了提高物理实验的精确性的问题。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,需要非常精确的装定发射角,工业计量则已达到 $0.001\sim 0.0005\ \mu\text{m}$ 的精确度。又如制造光导纤维的材料,其杂质含量要求少于总量的 $1/10^9$ 。可以说,人们在生产生活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。