

普通高等教育“十三五”规划教材

# 激光原理与技术实验

Experiment of Laser Principle and  
Technology

崔小虹 张海洋 王庆 ◎ 编著

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

# 激光原理与技术实验

Experiment of Laser Principle and  
Technology

崔小虹 张海洋 王庆◎编著



## 内 容 简 介

本书为北京理工大学本科教学工程经费资助项目。

全书内容共3篇,主要包括绪论、测量及测量误差的基础知识和激光实验。其中激光实验又分为三部分:激光原理与激光器件实验、激光技术实验和激光应用实验,共设计了14个实验。

本书可作为理工科类大学光电信息科学与工程专业、测控技术与仪器专业和电子科学与技术专业高年级本科生的教材,也可作为物理电子学专业和光学工程专业研究生的教学参考书,同时可供相关专业或研究领域的科技人员阅读与参考。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

激光原理与技术实验 / 崔小虹, 张海洋, 王庆编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2017. 5

ISBN 978 - 7 - 5682 - 4146 - 5

I. ①激… II. ①崔…②张…③王… III. ①激光理论 - 高等学校 - 教材②激光技术 - 实验 - 高等学校 - 教材 IV. ①TN241

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 109810 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 9.5

字 数 / 225 千字

版 次 / 2017 年 5 月第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷

定 价 / 28.00 元

责任编辑 / 李秀梅

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

# 序

激光是一门理论与实验兼重的学科。因此，作为北京理工大学光电子研究所前身的北京工业学院激光教研室，从专业设立之初，就在注重理论教学的同时，也十分重视实验课的教学。很多教师都参加过指导学生实验的工作，或曾参与实验讲义的编写。20世纪80年代，正式出版了教材《激光实验》，从此实验课进一步正规化，与“激光原理”等理论课程一起，成为该学科必修的专业课。20世纪90年代专业调整，激光专业拓展为光电子专业，激光实验仍为该学科必修的专业课。

几十年来，激光器件、技术及应用均得到迅速发展，激光实验课程的内容随之不断充实。作为北京理工大学本科教学工程经费资助项目，由崔小虹副教授、张海洋博士和王庆博士编著的《激光原理与技术实验》，即包含了不少反映激光技术和应用领域近些年发展的较先进的内容。器件方面，如LD泵浦固体激光器、掺钛蓝宝石激光器和光纤激光器等；应用方面，如激光通信等。因此，本教材应能在较大范围和较高程度上满足普通高等院校相关专业本科高年级学生对有关知识在校学习和毕业后工作的需要。

本书的三位作者现均为北京理工大学光电子所工作在科研与教学第一线的教师，多年从事激光原理与技术等理论课的教学和指导激光实验，并参与了相关教材的编著，有一定的编写经验。崔小虹副教授曾作为主要编著者参与编写《激光原理与技术》和《激光原理技术及应用》。其中《激光原理与技术》第一版为“普通高等教育‘十五’国家级规划教材”，2005年由高等教育出版社出版后曾多次重印，并于2007年以繁体字在我国台湾出版发行。2011年再版，2013年获北京高等教育精品教材奖。《激光原理技术及应用》为北京市高等教育精品教材立项项目，出版两年后获北京高等教育精品教材奖。足见崔小虹副教授在本领域有相当的学术造诣和写作水平。相信《激光原理与技术实验》的出版必将对相关学科的课程建设与完善及人才的培养有所裨益，特此谨致数语，是为序。

北京理工大学光电子所

阎吉祥

2017年5月20日

# 前 言

根据教育部关于深化本科教学改革、建设本科名牌专业的精神和要求，北京理工大学启动了相关的建设项目，《激光原理与技术实验》教材即本科教学工程经费资助项目。

“激光原理与技术实验”是面向光电信息科学与工程专业和测控技术与仪器专业高年级本科生的必修课程。通过本实验课程的学习，学生能够综合运用所学到的激光原理与技术等课程的基础知识，在实验中发现、分析和解决问题，实验技能也会得到极大提高。

本书共分为3篇。第1篇为绪论，介绍了激光实验的基本要求、操作规范和激光安全的注意事项等内容。第2篇为测量及测量误差的基础知识，介绍了测量、测量误差的概念及分类，以及测量结果的不确定度等知识。第3篇为激光实验，共包含14个实验，其中激光原理与激光器件部分7个实验，激光技术部分5个实验，激光应用部分2个实验。在激光实验内容的选取上，作者本着加强基础、体现技术进步的宗旨，注重激光原理、器件、技术和典型应用的结合。在实验内容的编写上，包含“实验目的”“实验原理”“实验装置与调整”“实验内容与要求”和“思考题”5个部分。

本书的编写分工如下：崔小虹编写第1篇、第2篇和第3篇中实验1、实验6、实验9和实验11，并负责全书的策划和组织工作；张海洋编写第3篇中实验2、实验4、实验8、实验13和实验14；王庆编写第3篇中实验3、实验5、实验7、实验10和实验12，并负责全书的排版工作。

本书是“激光原理与技术实验”课程教研组多年来的教改成果，饱含着多位参与课程教学的教师和实验室工作人员的努力和付出。除三位编著者外，课程组内近年来还有下列教师参与了实验讲义的修改和实验装置的改造工作，他们是：高明伟、于常青、刘莉、王茜蓓、冯义民、丁仁强、徐丽和彭中。北京理工大学阎吉祥教授于百忙之中

为本书审稿并作序，提出了很多中肯的意见和具有前瞻性的建议。北京理工大学朱宝亮教授、中国计量科学研究院钱进研究员对本书的编写给予了很多具体的指导。北京理工大学硕士生龙美辰、王雅兰、李文静和朱亚文为部分实验绘图。在此，作者对以上各位一并表示衷心的感谢！

限于作者的水平 and 经验，书中难免存在谬误和不妥之处，恳请读者和同行指正。

作者

2017年4月



# 目 录

<b>第1篇 绪论</b> .....	1
1.1 激光原理与技术实验课程的教学目标 .....	1
1.2 激光原理与技术实验课程的教学要求 .....	2
1.3 激光原理与技术实验课程的教学程序 .....	3
1.4 激光实验装置的基本调整方法 .....	3
1.5 激光防护的基本知识和激光实验注意事项 .....	4
<b>第2篇 测量及测量误差的基础知识</b> .....	6
2.1 测量及其分类 .....	6
2.2 测量误差及其分类 .....	6
2.3 测量结果的不确定度 .....	9
2.4 有效数字的基本知识 .....	10
<b>第3篇 激光实验</b> .....	13
第一部分 激光原理与激光器件实验 .....	13
实验1 He-Ne 放电管荧光光谱及其增益特性的测量 .....	13
实验2 He-Ne 激光器纵横模的测量分析 .....	21
实验3 高斯光束的参数测量及透镜变换实验 .....	29
实验4 半导体激光器主要参数的测量 .....	39
实验5 脉冲激光器的装调和最佳输出耦合的选取 .....	49
实验6 掺钛蓝宝石激光器及其调谐性能的测量 .....	57
实验7 可调谐环形腔掺铒光纤激光器的输出特性实验 .....	70
第二部分 激光技术实验 .....	78
实验8 电光调制及语音传递实验 .....	78

## 2 ■ 激光原理与技术实验

实验 9	电光调 $Q$ 技术实验 .....	87
实验 10	LD 泵浦的 Yb:YAG 声光调制锁模激光器实验 .....	96
实验 11	兰姆凹陷稳频激光器原理实验 .....	108
实验 12	固体调 $Q$ 激光器腔内倍频实验 .....	113
第三部分	激光应用实验 .....	126
实验 13	激光脉冲测距实验 .....	126
实验 14	激光通信实验 .....	134
参考文献	.....	141



# 第 篇 绪 论

## 1.1 激光原理与技术实验课程的教学目标

### 1. 教学对象及授课学时

本实验课程为理工科类高等院校中光电信息科学与工程专业、测控技术与仪器专业和电子科学与技术专业三年级至四年级本科生的专业必修课程，也可以作为理工科类高等院校中非光电类高年级本科生的选修课程。建议授课学时为 32 学时。

### 2. 课程教学目标

(1) 通过实验教学，学生知悉和理解气体、固体、半导体及光纤激光器的基本构成、工作原理和工作特性，掌握各类增益介质的光谱特性和谐振腔的损耗特性。

(2) 通过实验教学，学生深入理解与掌握激光模式、电光调制、调  $Q$ 、锁模、稳频及倍频的基本概念与原理，掌握高斯光束的传输变换特性，掌握固体激光器的装调及调谐方法。

(3) 通过实验教学，学生能够利用所掌握的激光原理、器件和技术的基础知识，实现对气体、固体、半导体及光纤激光器以及应用了电光调制、调  $Q$ 、锁模和稳频等技术的激光系统主要性能参数的测量和分析；能够独立操作相关的激光器和实验仪器；能够独立完成对两镜腔  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  激光器的装调。

(4) 通过实验教学，学生能够根据所掌握的激光原理、器件和技术的理论及分析方法，针对如激光脉冲测距、激光通信等典型应用系统，具有分析其工作原理和测量其性能参数的能力，并形成对激光系统进行设计分析的合理思维模式。

## 1.2 激光原理与技术实验课程的教学要求

根据激光原理与技术实验课程的培养目标,对课程的基本教学要求分为教学内容的基本要求和能力培养的基本要求两部分。

### 1. 教学内容的基本要求

#### 1) 激光原理部分基础知识的基本要求

掌握 He - Ne、Nd<sup>3+</sup>:YAG、掺钛蓝宝石、掺铒光纤和半导体等各类增益介质的能级结构、辐射跃迁过程和光谱特性,掌握谐振腔的作用和损耗特性,掌握激光模式的概念,掌握高斯光束的主要参数和通过透镜的传输变换特性。

#### 2) 激光器件部分基础知识的基本要求

掌握 He - Ne、Nd<sup>3+</sup>:YAG、掺钛蓝宝石、掺铒光纤和半导体等各类激光器的基本结构、泵浦方式和工作原理,会计算激光器相关的效率,掌握上述各类激光器基本的调试方法。

#### 3) 激光技术部分基础知识的基本要求

掌握调 Q、锁模、调制、稳频和倍频的基本概念、原理以及工作方式,掌握上述各单元技术的基本装置和调试方法。

#### 4) 激光应用部分基础知识的基本要求

掌握典型激光应用,如激光脉冲测距、激光通信的基本装置和工作原理。

### 2. 能力培养的基本要求

#### 1) 独立操作激光器的能力

通过实验课程的训练,学生具备独立操作 He - Ne、Nd<sup>3+</sup>:YAG、掺钛蓝宝石、掺铒光纤和半导体激光器的能力,具备独立装调两镜腔 Nd<sup>3+</sup>:YAG 激光器谐振腔的能力。

#### 2) 调试激光系统的能力

通过实验课程的训练,学生初步具备以下能力:能调试含有调 Q、锁模、调制、稳频和倍频单元技术的激光器。

#### 3) 独立操作实验测量仪器的能力

通过实验课程的训练,学生具备独立操作激光能量计(功率计)、光纤光谱仪、共焦球面扫描干涉仪、CCD 相机和示波器等硬件及相应的控制软件的能力。

#### 4) 测量和分析激光系统主要性能参数的能力

通过实验课程的训练,学生具备针对上述激光系统主要性能参数进行测量和分析的能力,以形成对激光系统进行设计分析的合理思维模式。

#### 5) 团队合作的能力

通过分组实验,培养学生相互配合、协调以共同完成一项实验任务的团队合作精神。

综上所述,通过实验课程的训练,调动学生将激光原理与技术等先修课程的基础知识与实际的激光系统相结合,培养学生在实际应用中发现问题、分析问题和解决问题的能力。

## 1.3 激光原理与技术实验课程的教学程序

### 1. 撰写预习报告

(1) 预习报告的主要内容包括实验目的、实验原理、实验装置与调整、实验内容与要求和思考题5个部分。要求学生在实验之前必须完成预习报告,并鼓励学生带着预习中的问题和思考题进入实验操作环节。这样做,有利于启发学生的思维,加深学生对实验内容的理解,减少实验中的盲目性。

(2) 实验开始前,辅导教师要检查实验预习报告,并按照要求给出预习报告的分数。

(3) 对于未完成预习报告者,辅导教师有权拒绝其参加实验。

### 2. 实验操作

(1) 记录实验时间、地点、人员和环境,核对并记录所用实验装置及测量仪器的名称和型号。

(2) 严格按照操作规程调试激光器等实验装置和测量仪器,积极动手操作,同组学生之间要相互配合。注意不要违反操作规程,不要粗心大意。

(3) 如实记录实验数据,并将数据列表。将需要采集的实验图像和软件界面拷至U盘。

(4) 实验数据要经辅导教师签字认可。严禁抄袭他人的实验结果。

(5) 故障的处理。实验中,若发生实验装置和测量仪器故障,应立即停止操作并报告实验辅导教师。在辅导教师的指导下,分析原因,并和教师一起排除故障。

(6) 激光防护。按照实验辅导教师的要求,佩戴相应的激光防护用品。

(7) 实验结束后,将实验装置和测量仪器复原,关断电源和水源。对于带水冷装置的重频激光器,需注意应待激光器冷却后再关机。

### 3. 完成实验报告

(1) 按照实验辅导教师的要求处理实验数据,包括将实验数据列表、给出主要的计算过程、绘制相应的实验曲线和编写相应的程序等,并进行误差分析。

(2) 给出实验结论。

(3) 回答思考题。

(4) 可就实验收获进行总结,并就实验装置及实验方法的改进等提出建议。

## 1.4 激光实验装置的基本调整方法

激光实验装置一般由两部分组成:一是激光器,二是激光器外部由测量仪器等构成

的测量装置。激光实验装置的调整主要是指，调整激光器的谐振腔及腔内元件，调整测量装置与激光器光轴基本同轴。下面以平-平腔固体激光器为例，简单介绍调整的方法。

### 1. 使用 633 nm He-Ne 激光粗调谐振腔

调整激光器，使棒状固体增益介质的轴线平行于光学平台台面。在 633 nm He-Ne 激光器输出镜外设置一小孔，调整 He-Ne 激光器的俯仰和方位，使小孔出射的 He-Ne 激光束与固体增益介质的轴线同轴（棒入射和出射端面的两个反射像返回小孔）。再用上述方法依次调整谐振腔的两个腔镜。

### 2. 使用平行光管粗调谐振腔

也可以使用平行光管，依次调整棒状固体增益介质和谐振腔两腔镜。

### 3. 打动态激光精调谐振腔

启动激光电源，打动态激光。使用激光能量计，边测量激光能量边微调腔镜，同时使用相纸接光斑，调至激光能量最大且光斑最圆为止。

对由测量仪器等构成的外部测量装置的调整，可按照上述粗调谐振腔的方法，使用 633 nm He-Ne 激光逐一进行调整。

## 1.5 激光防护的基本知识和激光实验注意事项

### 1. 激光防护的基本知识

激光是一种强相干光源，具有很高的单色亮度。激光的工作波长也非常丰富。激光对人体的伤害主要表现在对人眼的伤害，故很多国家开展了对激光致盲武器的研究。下面简要介绍针对人眼的激光防护问题。

激光对人眼造成伤害，主要的损伤部位是视网膜和角膜。视网膜上的黄斑区一旦受损，就会造成人视力下降甚至失明。由于人眼组织对不同波长的光具有不同的透过率，因而激光的波段不同，产生损伤的部位亦不同。如人眼对 1.4  $\mu\text{m}$  以上的红外光透过率低，几乎不会伤至视网膜，而仅对角膜产生一定损伤。从这个意义上说，1.4  $\mu\text{m}$  以上波段的激光器也被称为人眼安全激光器。人眼组织对可见光波段的光具有很高的透过率，尤其对黄绿光敏感。因此，Nd<sup>3+</sup>:YAG 激光器倍频后所产生的 532 nm 绿光，最易对视网膜造成损伤。

激光防护镜从防护机理上主要分为吸收式和反射式两种类型。下面以 EP-1 宽光谱连续吸收式激光防护镜（北京金吉宏业产品）为例，说明防护镜的性能参数和适用的激光器种类。

该型号激光防护镜片材料由聚碳酸酯（PC）和特定波长的光吸收材料合成，其光学安全性能满足 GJB 1762—1993《激光防护镜生理卫生标准》及欧洲标准 EN207A1:2002，并已获得欧盟 CE 认证。

EP-1 宽光谱连续吸收式激光防护镜性能参数和适用的激光器种类如表 1.5.1 所示。

表 1.5.1 EP-1 宽光谱连续吸收式激光防护镜性能参数和适用的激光器种类

防护波段/nm	防护激光器的种类	防护波长/nm	光密度 (OD)
200 ~ 540	四倍频 Nd <sup>3+</sup> :YAG 激光器	268	4+
	Ar 离子激光器	488.0 ~ 514.5	4+
	He-Cd 准分子激光器	441.6	4+
800 ~ 2 000	倍频 Nd <sup>3+</sup> :YAG 激光器	532	3+
	半导体激光器	808, 810	4+
		904, 980	4+
	Nd <sup>3+</sup> :YAG 激光器	1 064	4+
半导体激光器	1 510, 1 530, 1 610	—	

关于激光安全国家标准，读者可查阅 GB 7247.1—2011。

## 2. 激光实验注意事项

(1) 按照激光防护要求，佩戴激光防护镜。

(2) 严禁眼睛直视激光器和光路。在调整激光器和实验过程中，始终保持眼睛处在高于激光器和光路的位置。无论激光器的工作波长是位于可见光区还是非可见光区，严禁将眼睛置于光路之中或可能出现的反射光路之中。

(3) 尽量避免暗室环境下操作。在调整激光器的过程中，有时需要在暗室环境下进行操作，但切记，打激光（激光器工作）时，一定要避免暗室环境，要在亮环境下进行。

(4) 禁止在激光器或激光系统的输出光路中出现或放置与实验装置无关的镜面反射物。

(5) 当同一实验室内有多组激光实验同时进行时，各实验装置之间要使用遮光板阻隔光路。

(6) 禁止用手触碰闪光灯、放电管和电光晶体等器件的电极，严格按照操作规程进行操作。

(7) 禁止用手触摸腔镜表面、增益介质和调制晶体的通光面等光学元件的表面。光学表面若有灰尘，一般可使用橡皮球吹去。光学表面若有指纹印等污痕需要清洁，应由实验辅导教师或实验室管理人员使用混合液等进行清洁。

(8) 所有实验仪器，应轻拿轻放，避免损坏。

# 第 2 篇

## 测量及测量误差的基础知识

### 2.1 测量及其分类

测量是将待测物理量的量值与测量仪器相比较的实验过程。测量应给出被测物理量的量值大小、单位和以不确定度表示的可信程度。

根据测量是否可由仪表直接读出待测物理量的测量值，测量分为直接测量与间接测量两种。

#### 1. 直接测量

直接测量是指由测量仪器直接读出测量结果，相应的物理量叫作直接测量量。例如，使用米尺测量物体的长度、使用激光能量计测量激光器的输出能量等。

#### 2. 间接测量

间接测量是指由直接测量结果经过公式计算得出测量结果，相应的物理量叫作间接测量量。例如，对某矩形场地面积的测量，就需要先直接测量出该场地的长度  $L$  和宽度  $W$ ，然后根据公式  $S = L \times W$  计算出该场地的面积  $S$ 。面积  $S$  即间接测量量。

除上述测量分类外，测量还可根据测量次数分为单次测量和多次测量。对于多次测量，按照测量精度，测量又可分为等精度测量和非等精度测量。

### 2.2 测量误差及其分类

真值，是指在一定实验条件下，待测物理量所具有的确定值。真值是反映物质自身特性且客观存在的物理量。

测量就是力求获得待测物理量的真值。但受仪表精度、实验方法、实验技能和环境

等多方面因素的制约,无法通过测量获得真值,只能使测量值近似于真值,称为近真值。实际测量中,一般将多次等精度测量的平均值作为近真值或最佳值。这使得任何测量都存在测量误差。

## 1. 测量误差

测量误差定义为测量值与真值之差。

任何测量均包含一定的测量误差,测量误差存在于测量过程的始终。随着测量仪器精度的提高和测量方法的进步,可以将测量误差控制在极小的范围,但却不会降为零。

### 1) 绝对误差

绝对误差是评价某一测量结果优劣的指标。若某一物理量的真值为  $a$ , 测量值为  $x$ , 则测量的绝对误差  $\Delta x$  定义为

$$\Delta x = x - a \quad (2-2-1)$$

### 2) 相对误差

相对误差用于对不同测量结果的优劣进行比较。

相对误差  $E$  定义为绝对误差  $\Delta x$  与多次测量结果的平均值  $\bar{x}$  之比, 即

$$E = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \quad (2-2-2)$$

相对误差  $E$  也可以用百分数表示, 称为百分误差, 表示为

$$E = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times 100\%$$

## 2. 测量误差的分类

按照传统的误差分类方法,根据误差产生的性质和原因,可将测量误差分为系统误差、随机误差和过失误差三种。

### 1) 系统误差

系统误差指在相同的测量条件下,对同一物理量进行多次测量时,其测量误差的符号和绝对值保持不变或按照确定的规律变化。系统误差的特征是具有稳定性(恒定性),不可能通过增加测量次数而使之减小。系统误差的存在,是影响测量结果准确度的主要因素。因此,在测量中设法发现并消除系统误差是非常重要的。

系统误差产生的主要原因有以下几方面:测量仪器本身(标准和结构)存在固有缺陷;测量方法或理论存在误差;环境误差以及测量人员自身生理和心理特点所引起的误差。

### 2) 随机误差

随机误差(偶然误差)指即使消除了系统误差,在等精度条件下对同一物理量进行测量时,其测量值时大时小,分布在一定范围内且无确定的规律。随机误差的特征是具有随机性。虽然对单次或某几次测量而言,随机误差无规律可循,但在多次重复测量



中，随机误差服从统计规律，即高斯分布（正态分布）规律。随机误差的高斯分布曲线如图 2.2.1 所示。

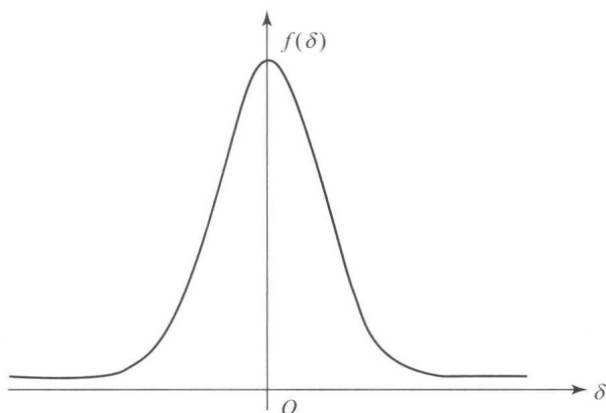


图 2.2.1 随机误差的高斯分布曲线

图 2.2.1 中，横坐标表示随机误差  $\delta$ ，纵坐标表示误差分布函数  $f(\delta)$ 。

高斯分布曲线表明，随机误差服从下列统计规律：

- (1) 单峰性：绝对值小的随机误差出现的概率大于绝对值大的随机误差出现的概率。
- (2) 对称性：绝对值相等的正、负随机误差出现的概率相同。
- (3) 有限性：随机误差的绝对值不会超过某一界限。

根据随机误差所遵循的上述统计规律，可通过增加等精度测量的次数来减小随机误差。

随机误差的产生主要归因于在测量过程中存在着某些不确定因素以及被测物理量本身存在着不稳定性。

### 3) 过失误差

过失误差也称为粗大误差，是指由人为过失引起的明显偏离测量结果的误差。例如采用的实验方法不合理、不能正确使用实验仪器以及数据记录错误等测量者过失。避免上述人为过失，则可在测量中消除过失误差。

## 3. 测量精度

一般采用测量精度描述测量误差的大小。测量精度高，说明测量误差小，反之亦然。为了明确说明测量精度描述的是何种测量误差，将精度细分为精密度、正确度和准确度三种。

(1) 精密度：是评价测量结果重复性好坏的指标，说明了测量结果中随机误差的大小。

(2) 正确度：是评价测量结果与被测物理量真值的符合程度的指标，说明了测量结果中系统误差的大小。

(3) 准确度：准确度也叫精确度，是对上述精密度和正确度的综合，即对测量结果中系统误差和随机误差的综合。

## 2.3 测量结果的不确定度

对测量结果的评价需包含两方面的内容，其一是要有测量值，其二是要评价测量值的可信程度。因无法得到被测物理量的真值，而且每次测量所得到的测量值具有分散性，于20世纪70年代以来提出并现已采用不确定度来评价测量结果。不确定度的概念和评价体系是建立在现代误差理论基础之上的。

### 1. 不确定度的概念

顾名思义，不确定度是指对测量结果可信性、有效性的不确定程度，它是对所测物理量的真值位于某一量值范围内的评定，是表明测量结果具有分散性的一个参数。

需要指出的是，不确定度与误差都是因测量过程的不完善而产生的，但不确定度与误差是两个不同的概念。不确定度是表征测量值分散性的一个参数，它不反映测量结果是否接近真值。

### 2. 不确定度的分类

按照不确定度数值的评定方法，不确定度可分为A类不确定度和B类不确定度。

(1) A类不确定度：采用统计方法计算的不确定度，用 $\mu_A$ 表示。

(2) B类不确定度：采用其他方法估算的不确定度，用 $\mu_B$ 表示。

总不确定度由上述两类不确定度采用方和根合成，用 $\sigma$ 表示：

$$\sigma = \sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2} \quad (2-3-1)$$

### 3. 直接测量结果的不确定度估算

#### 1) A类不确定度 $\mu_A$

对某一物理量 $X$ 进行 $n$ 次（ $n$ 为有限数）等精度测量，其测量所得算术平均值为 $\bar{x}$ ，则使用 $\bar{x}$ 的标准误差 $\sigma_{\bar{x}}$ 来表征其A类不确定度 $\mu_A(x)$ ，有

$$\mu_A(x) = \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2-3-2)$$

式中， $\sigma_x$ 为上述 $n$ 次等精度测量所得结果中任意一个测量结果的标准误差，其表明任意一个测量结果误差在 $[-\sigma_x, \sigma_x]$ 区间内的概率为68.3%。

#### 2) B类不确定度 $\mu_B$

根据定义，采用非统计类的方法估算的误差分量，均为B类不确定度 $\mu_B$ 。