

普通高等教育“十二五”规划教材

测试技术 实验教程

王明赞 孙红春 韩 明 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

测试技术实验教程

王明赞 孙红春 韩 明 编

张洪亭 主审



机械工业出版社

本书重点介绍机械工程测试技术实验方面的基本原理和实用技术。全书按照测试技术背景知识的结构安排顺序,首先介绍工程实验的设计及其技术文件的编制,说明文件的格式、内容和基本要求;然后介绍与测试技术实验密切相关的内容,包括数据处理和误差分析、测量系统的性质、传感器的应用、测量信号的采集与分析、力参数和振动参数的测量、旋转机械的运行监测和故障诊断等,其中穿插了20个实验项目的指导书。实验内容主要包括测量系统特性的仿真、传感器的性能试验及应用、基于LabVIEW的虚拟仪器设计、力和振动参数的测量、转子动平衡等。最后介绍了测试技术在工程中的应用。

本书主要作为高等学校机械类专业机械工程测试技术、传感器与测试技术课程的实验教材,也可作为测控等专业的实验教材。对于与机械工程测试技术有关的工程技术人员也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

测试技术实验教程/王明赞,孙红春,韩明编. —北京:机械工业出版社,2011.7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-35002-6

I. ①测… II. ①王…②孙…③韩… III. ①机械工程—测试技术—实验—高等学校—教材 IV. ①TG806-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第108426号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘小慧 责任编辑:刘小慧 张利萍 邓海平

版式设计:霍永明 责任校对:申春香

封面设计:张静 责任印制:李妍

北京外文印刷厂印刷

2011年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·5.75印张·120千字

标准书号:ISBN 978-7-111-35002-6

定价:14.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

测试技术是与工程实践密切相关的课程，不但要求有广泛的背景知识，而且还要求有良好的实验技能。学习中必须把理论学习与实验密切结合起来，才能为将来的实际工作打下坚实的基础。

为了帮助实验课程的学习，特编写本实验教程，作为测试技术主教材的辅助和补充。本书简要介绍了与实验最为密切的几项基本知识和原理，包括技术文件的编制、误差分析、测量系统的性质和有关的实验原理。

本书介绍了20项教学实验，主要包括传感器的原理及应用、测量系统的仿真、力和振动参数的测量、转子的振动测量和动平衡技术等内容；还简要介绍了3项工程实验，包括轧机的轧制力和转矩的测试、车辆载荷谱的测试。从教学的角度，每项实验用2学时，这些实验可分为基本实验、设计和创新型综合性实验、虚拟实验和课外科技实验。

实验顺序的编排以测试技术课程的教学大纲为主线，配合测试技术理论描述的层次。

本书第4、6章由韩明编写，第5、8章由孙红春编写，其余由王明赞编写；全书由王明赞统稿，张洪亭主审。

由于编者的能力有限，书中难免存在错误和不足之处，恳请各位专家和读者给予批评指正，不胜感谢。

编 者

目 录

前言

第 1 章 工程实验的设计及其技术文件的编制	1
1.1 实验报告的编写	1
1.1.1 实验目的	1
1.1.2 实验设备及材料	1
1.1.3 实验原理	1
1.1.4 实验方法及实验数据	1
1.1.5 实验分析及结论	2
1.2 工程实验项目的程序	2
1.2.1 确定实验目的	2
1.2.2 实验设计	2
1.2.3 实验系统的构成和开发	3
1.2.4 明确安全操作规范	3
1.2.5 数据采集和数据分析	3
1.2.6 数据解释和实验报告	3
1.3 工程实验程序的正式报告	4
1.3.1 题名页	4
1.3.2 摘要	4
1.3.3 目录	4
1.3.4 综述	4
1.3.5 绪论	5
1.3.6 设备和步骤	5
1.3.7 结果	5
1.3.8 讨论	6
1.3.9 结论和建议	6
1.3.10 参考文献	6
1.3.11 附录	6
1.4 技术备忘录	7
1.5 投标书	8
1.5.1 概述和背景	8
1.5.2 投标计划、研究方法和工作范围的描述	8

1.5.3 任务描述、进度、成本、人员和能力	8
第2章 数据处理和误差分析	9
2.1 测量误差的分析	9
2.1.1 误差的基本概念	9
2.1.2 测量不确定度的分析方法	10
2.2 测量系统的校准和曲线拟合	11
2.2.1 校准	11
2.2.2 曲线拟合	11
第3章 测量系统的性质	13
3.1 测量系统的基本性质	13
3.1.1 测量系统的静态特性	13
3.1.2 测量系统的动态特性	13
3.2 测量系统特性的仿真	14
3.2.1 实验1 采用 MATLAB 的动态仿真	14
3.2.2 实验2 测量电路的 Multisim 仿真	17
第4章 传感器的应用	20
4.1 传感器的定义和分类	20
4.2 传感器的性能实验	20
4.2.1 实验3 应变计电桥性能的测试	21
4.2.2 实验4 涡流传感器静态特性的测试	23
4.2.3 实验5 电容传感器静态特性的测试	25
4.2.4 实验6 压电传感器的测试	26
4.2.5 实验7 霍尔传感器静态特性的测试	27
4.3 传感器的应用	28
4.3.1 实验8 箔式应变计在电子秤中的应用	28
4.3.2 实验9 霍尔传感器在电子秤中的应用	29
第5章 测量信号的采集与分析	30
5.1 计算机数据采集与分析系统	30
5.1.1 计算机数据采集系统	30
5.1.2 信号的时域和频谱分析	31
5.2 虚拟仪器的设计	32
5.2.1 虚拟仪器概述	32
5.2.2 实验10 基于 LabVIEW 的虚拟仪器的设计	32

第6章 力参数和振动参数的测量	42
6.1 力参数的测量	42
6.1.1 实验11 电阻应变计的安装	42
6.1.2 实验12 静态应变测量	43
6.1.3 实验13 传动轴转矩的标定	45
6.2 振动参数的测量	46
6.2.1 振动测量基础	46
6.2.2 实验14 悬臂梁振动参数的测量	50
6.2.3 实验15 采用不测力法的简支梁振动测试	51
6.2.4 实验16 采用测力法的简支梁振动测试	54
6.2.5 实验17 拉索负荷的测试	56
第7章 旋转机械的运行监测和故障诊断	59
7.1 转子的动力学特性	59
7.1.1 转轴组件的振动特性	59
7.1.2 实验18 转子振动参数的测试	62
7.2 转子故障的修正	64
7.2.1 转子动平衡的基本原理	64
7.2.2 实验19 失衡转子的单面动平衡	67
7.2.3 实验20 失衡转子的双面动平衡	69
第8章 测试技术在工程中的应用	71
8.1 轧机载荷的测试	71
8.1.1 力和转矩测量的基本方法	71
8.1.2 实验21 轧机载荷的测试	72
8.2 车辆载荷的测试	77
8.2.1 载荷谱测试的目的和意义	77
8.2.2 实验22 摩托车载荷谱的测试	77
8.2.3 实验23 摩托车前叉部件的应力测试	81
参考文献	83

读者信息反馈表

第1章 工程实验的设计及其 技术文件的编制

1.1 实验报告的编写

关于基础性教学实验的报告书，正文之前一般包括题目、作者姓名、班级、学号、实验日期、时间和地点等。

正文一般包括以下内容：

- 1) 实验目的。
- 2) 实验设备及材料。
- 3) 实验原理。
- 4) 实验方法及实验数据。
- 5) 实验分析及结论。
- 6) 参考文献。

课程的作业和心得体会可以放在附录中。

1.1.1 实验目的

简要说明通过本实验需要得到的结果，主要说明技术上的结论，不必要说明学习的目的和要求，例如对某些知识点的掌握或了解。如果实验方法对结果有重要的意义，可以写明采用的方法或技术。

1.1.2 实验设备及材料

说明实验设备的型号、名称及技术指标，特别是测量仪器的精度指标。列出实验所需的工具及材料。

1.1.3 实验原理

说明测量系统的架构，给出系统的框图，说明参数转换的过程。阐述实验依据的基本原理及理论计算的公式，明确定义变量和常数的符号及单位。

1.1.4 实验方法及实验数据

按照时间顺序列出操作步骤，并记录原始数据。在本节，可以进行求和和平均等简

单的计算，以表格的形式表示原始数据和计算的结果，注意标明计量单位。

1.1.5 实验分析及结论

处理实验数据，分析实验的结果并得出结论。原则上，对结论中的数据和公式（或曲线）都要进行误差分析。

1.2 工程实验项目的程序

1.2.1 确定实验目的

建立一个工程实验程序时，首先要明确实验的目的和技术要求，并且明确非实验的方法是不足的或不适用的。立项时，要在多种实验方案之间进行比较和论证，尽可能采用成本低、有成功把握的实验程序，使用有限的实验和较少的仪器设备获取预期的结果。任何实验程序都是既有优点也有缺点的，因此，在高风险、低成本方法和安全、高成本方法之间存在取舍的问题。必须非常精心地选择实验的类型，如果在确定实验项目时花费的时间不足，那么在开始设计时，可能已经排除了许多更好的选择。

1.2.2 实验设计

这是实施实验程序的主要步骤，它可能包括下列主要内容：

- 1) 收集资料（一般是文献检索）。
- 2) 实验方案的确定。
- 3) 进度和成本的确定。
- 4) 数据分析模型的确定。
- 5) 测量变量的指定。
- 6) 仪器的选择。
- 7) 实验不确定度的估计。
- 8) 实验矩阵（被实验的独立变量的值）的确定。
- 9) 实验装置的机械设计。
- 10) 实验步骤的说明。

以上内容是相互作用的。例如，如果不确定度分析得不到允许的精确度，就不得不放弃实验方法或者作出重大修改。

如有可能，开始时应构思多种实验方案，分析之后从某种角度选取最佳方案。在绝大多数实验程序中，设计阶段分两部分进行：初步设计和随后的最终设计。初步设计阶段的研究是校验型的，包括成本的估计，所形成的文件称为设计方案。然后，该方案由项目的投资单位审查。

1.2.3 实验系统的构成和开发

该阶段可能是程序中费用最高的部分。对于采购需要的设备和开发实验装置,为了确定合适的仪器设备和装置,要进行一系列试运转试验。一般根据试运转试验的结果对设备或装置作出修正。有时需要进行小规模实验。在子系统或最终实验装置的几何相似模型上进行实验。小规模实验的目的是在最终实验装置上进行主体实验之前确定装置的有效性。

根据资金管理的规定,购置昂贵的仪器设备,需要采用招标的方式。

1.2.4 明确安全操作规范

根据工程实验环境、被测量设备的工况和测量系统的特性,确定安全工作规范,防止人身或设备安全事故的发生。落实每个实验人员的职责,并确定操作步骤和注意事项。

1.2.5 数据采集和数据分析

构造和调试实验装置之后,就可以按照规定的实验矩阵进行数据采集。

在大多数实验程序中,可以使用市售的数据分析软件,或者是在设计阶段(分析阶段)开发的计算机程序。在实验程序中,为了检查数据的有效性,必须在数据采集的同时完成某些数据分析过程。采用计算机数据采集系统时,初步的数据分析程序一般应有实时分析功能。

有些实验需要特殊的或复杂的数据分析,有必要提出或改进算法,开发新的数据分析程序。

1.2.6 数据解释和实验报告

数据分析之后,必须对数据作出解释。要求用合乎逻辑的原理来说明数据的趋势,同时必须找出理由说明异常的数据。可以利用先前的或类似实验的结果进行比较和验证。对照实验目的,检查实验数据的完整性。解释数据之后,必须把结果写进最终报告并送达投资单位。

在任何工程实验程序中,文件的编制工作都是很重要的。在实验开始之前,应制订一些提案即计划文件,其内容为陈述目的,确定课题的范围,提出实验方法,初步估计成本和安排进度。在实验进行期间,有一系列的阶段报告。在实验和数据分析完成之后,要完成最终报告。

在一些常规实验程序中,文件编制不外乎填写一些表格。在绝大多数研究和开发程序中,提案、阶段报告和最终报告都是必要的,其中提案和最终报告包括测试的最大误差。

实际上,编制工程测试技术文件没有普遍正确的方法。许多单位或部门有自己的标

准报告格式，并且要求其成员使用这些格式。本章仅介绍一些常用的报告结构和格式。

1.3 工程实验程序的正式报告

正式报告一般是在主要工程活动结束（或完成主要的阶段）时写成的文件。编制正式报告的目的是：

- 1) 向他人传播实验或调查工作的结果和结论。
- 2) 建立实验或调查工作的永久记录，供日后相关工作使用。

正式报告可以由以下部分组成。

1.3.1 题名页

题名页（title page）应有实验题目、报告日期、作者及合作者的名字。题名页也可以显示其他信息，其中包括完成项目的单位名称、投资单位的名称以及报告和合同的编号等。如果题名页可以容纳全部摘要，也可以把摘要放在题名页。

1.3.2 摘要

摘要（abstract）是报告所介绍材料的非常简短的独立的概述。摘要应高度概括整篇报告的信息，使读者快速地确定该报告对其是否有用，是否继续阅读全文。因此，写好摘要极其重要的。可以设想一下，如果进行文献检索，需要得到哪些信息。摘要的长度一般不超过 100 ~ 200 个词。虽然摘要只引证报告中描述的材料，但是在摘要中不直接引用报告中的材料。不要在摘要中引用图、表和表达式，因为它们不便于存储在计算机数据检索系统中。

摘要的开头应叙述实验的内容或目的。接着用一两句话说明获取结果的方法，就是作一些实验方法、装置和所有不常见的仪器设备的描述，然后叙述某些关键的结果。例如：“对 C-15A 型旋转空气压缩机进行性能实验。用仪器设备测量轴的转速、空气流量、进口和出口空气压力、温度。用电动回转测功器测量需要的轴功率。在 600r/min 的转速下获得的最高效率是 65%。在此条件下，空气流量为 $47 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ，轴功率为 1.98kW。”

1.3.3 目录

目录（contents）只是报告章节的名单和可以查找其位置的页码。目录中一般最多出现三级标题。有的报告还用单独的页列出报告中出现的全部图和表。

1.3.4 综述

像摘要一样，综述（summary）给出全部报告的纵览。综述一般比摘要长和完整，如果需要，还包括图表。摘要供读者确定是否读此报告，综述一般被那些对所描述工作

感兴趣的人阅读。综述说明目的,简述使用的技术,叙述最重要的结果和结论。把引用的图表放在报告主要部分之后对于通过报告搜索信息的读者是不方便的。如果使用图表,最好把它复制在报告的综述部分。复制图表的另一个理由是该综述有时被复制成独立的文件并且不和报告的其他部分一起分发。

综述拟定了报告的其他框架并使其容易查找。但是,如果读者不直接使用报告的结果,综述可能是报告中被阅读的唯一部分。综述的长度取决于实验程序的规模。对于较短的实验程序,可能只有1~2页或者省略。对于涉及数千工时的较大程序,综述可有数十页长(并且综述本身也分若干卷表示)。

1.3.5 绪论

绪论(introduction)主要是对项目背景和目的的陈述,通常包括以下内容:

- 1) 清楚地说明目的,并且提供使读者确信其工作价值的信息。
- 2) 适当的文献评述,如果评述的量很大,可以在绪论之后作为独立的章节。
- 3) 勾画出工作的界限(范围,将做哪些实验,不做哪些实验)。

4) 如果实验目的是验证现有的理论或者使用特殊的方法分析数据,则通常在绪论中介绍这些理论。如果在实验结果的基础上发展理论,则最好在报告的讨论部分提出。如果介绍现有的理论,则可以作为绪论之后的独立的节。

- 5) 可以概括介绍报告的其他部分,尤其是在与标准作法不同时。

1.3.6 设备和步骤

设备(apparatus)应同时用文字和图像表示,并且用框图表示全部(或主要)传感器的位置。一般包括设备的照片。在这里可以引用详细的工程图,但是应把它放在附录中。要求提供仪器设备的明细表,其中包括使用的每台仪器的制造厂、型号和序列号。如果实验步骤(procedure)简单,被引用的仪器设备明细表可以放在正文中;如果实验步骤多,可以把明细表放在附录中。

1.3.7 结果

应当以图或表的形式显示测试的主要结果(results)。应当有简短的文字,说明包括什么结果和它们包括在哪些图或表中。每个图和表都应标上唯一的号码和标题。一般图的标题放在图的下边,表的标题放在表的上边。

如果数字结果不太多,则以表格形式表示结果。如果结果列表很长,可以在正文中引用并放在附录中。一般只列出读者直接感兴趣的结果,不包括中间计算。使用计算机数据采集系统,可以获取海量数据,把它们全部用表格形式表示是不实际的,只需将数字结果的汇总形式(例如平均值、最小值和最大值)列表。

图像结果的格式是很重要的。对图像应注意以下几点:

- 1) 图像的幅面不要超过页边距,在报告中放置的方向应与文字页面的阅读方向相

同，或者与报告从文字方向顺时针旋转 90° 。

2) 离散的数据点应画成用例如圆或方块图形圈起来的点。如果有大量的数据点，图形符号有可能重叠（例如在使用计算机数据采集系统进行时变数据采集时可能存在这种情况），最好删除图形符号并且用直线连接这些数据点。

3) 连续理论上的预报和相关表示为直线或曲线，建议不画成离散的点。如果没有提出理论或者理论与这些点的一致性很差，一般通过数据点画出最佳拟合曲线。如果数据呈现一种趋势（例如降雨量与年中月份的关系）并且 y 轴数据与 x 轴不成函数关系，那么理论和最佳拟合曲线是没有意义的。这时一般用一系列的线段连接这些点。棒图对于呈现趋势的数据也是适用的。

4) 使用图例区分不同类型的数据。

5) 无论是用计算机函数还是用曲线板，所有曲线都应圆滑地画出。

1.3.8 讨论

讨论 (discussion) 是报告的主要部分，其范围、长度和复杂性视研究的性质而定。此外，在讨论中评价和解释结果，审查其重要性。它是引导读者从结果得出结论的桥梁。也可以把讨论和结果合并到一个章节，讨论一般包括以下内容：

- 1) 被显示的每个结果的说明，包括其重要性和与工程项目的关系。
- 2) 任何意外结果的讨论。
- 3) 实验不确定度原因的讨论。
- 4) 结果与理论或预测的实验结果的比较。
- 5) 对结果说明的个人意见。
- 6) 如有可能，对基于实验数据开发的任何新理论的描述和比较。

1.3.9 结论和建议

结论和建议 (conclusions and recommendations) 是回答实验目的和解释没达到目的的特殊的讨论和建议。在本节报告中将不显示新的结果。本节可以包括主要结果的明细表。对后续工作的建议或改进实验的方法可以包括在本节中。

1.3.10 参考文献

参考文献 (references) 是报告其他部分提及文献的列表，其中包括文献题目、作者名、出版社名、出版日期和其他供读者查找原始文献的相关信息。

参考文献列表的格式应符合国家标准《GB/T 7714—2005 文后参考文献著录规则》的规定。

1.3.11 附录

放在附录 (appendices) 中的材料一般是部分读者而不是所有读者感兴趣的。如果

是大多数读者感兴趣,就应放在报告的主体部分。某些材料放在附录中,以便提供永久记录。附录可包括下列内容:

- 1) 原始的实验数据单。
- 2) 取样计算。
- 3) 报告正文未写进的实验步骤。
- 4) 实验设备的详细图样。
- 5) 部分读者感兴趣但不是报告核心的信息。
- 6) 制造厂的仪器说明书。

对于学生的报告,应把实验数据单放在报告中。对于专业实验,这些项目一般作为独立于报告的记录保存。

1.4 技术备忘录

技术备忘录 (technical memorandum) 有时被称为信函报告,是一种要求不及正式报告严格的信息传递方法。它也是组织内部很常用的信息传递方法。它常常不作为永久记录,原件可以在发布几个月或几年内被销毁。一些更普通的应用是:

- 1) 报告测试的原始记录。
- 2) 报告项目的中间结果 (阶段报告)。
- 3) 先于正式报告的发布,以预报告形式报告最终结果。
- 4) 报告永久记录不需要的研究和计算结果。

与其他种类的文件编制一样,可以由你的组织规定适当的格式。下面推荐的是一种常用的格式。

技术备忘录的标题节一般包括日期、收文单位、发文单位、题目和参考文献等。

正规情况下,作者在其打印名字的后面签字。参考文献是备忘录中引用的相关文件。

信件的正文含有需要传递的信息。确切的内容取决于场合,可能取决于以前传送的信件或报告。通常,信件应至少包含以下内容:

- 1) 备忘录的目的。
- 2) 要传送的结果。
- 3) 结果的重要性。

在大多数情况下正文是连续的,仅仅分段而不用小标题 (尽管小标题在长文中是有用的)。正文不包括的材料称为附件。附件的排列顺序一般为附录 A、附录 B 等,与正文中引用的顺序一样。图和表的格式类似于正式报告,但在备忘录中,它们的质量可以较差。例如,可以接受整洁的徒手画图,可以直接从数据采集系统打印输出报表。在较长的备忘录 (超过两页) 中,一般以一两段长的综述开头为好。这个综述应清楚地叙述备忘录的目的和最重要的结论。

1.5 投标书

在很多情况下，招标方会指定格式要求。如果投资单位在本公司内，投标（propos-als）过程可以不十分正规，可用口头表述的方式提出草图、成本和进度安排。对外部招标方的投标一般比较正规，至少具有某些常见的性质。下面仅是一种可能的格式：

- 1) 题名页。
- 2) 摘要。
- 3) 目录表。
- 4) 概述和背景。
- 5) 投标计划、研究方法和工作范围的描述。
- 6) 任务描述、进度和成本。
- 7) 人员和能力。
- 8) 参考文献。
- 9) 附录。

投标的目的是让投资单位确信投标者是唯一有能力以可接受的成本完成计划的。

前面关于最终报告的题名页、摘要、目录表、参考文献和附录的说明也适用于投标书。其余的节是不同的，将在下面介绍。

1.5.1 概述和背景

介绍投标的实验程序的背景。因为实验者试图让投资单位相信其在投标领域的竞争力，所以在投标书中，这一节的内容常常比最终报告中的多。报告其他部分的基本轮廓也可在这里显示。

1.5.2 投标计划、研究方法和工作范围的描述

本节是投标书的心脏。作者至少以序言的形式描述实验的基本方法、装置和仪器设备以及实验程序。此外，介绍用数据做什么也是重要的。如何处理数据？如何显示数据？有没有修正数据和建立新理论的打算？读者读完本节就会清楚地了解将要做什么。在投标书中，本节显示投标者掌握解决问题的方法论，了解问题和投标的工作的范围和局限。

1.5.3 任务描述、进度、成本、人员和能力

本节包括任务的描述、要求的工作量、进度和成本。

使用户相信投标单位及其人员完成投标工作的能力是很重要的。本节可以包括单位自身能力的介绍，有关设备和前期计划描述等。

用户一般想了解进行投标实验的主要人员的有关情况。可以把主要人员及其有关经历列成明细表。主要人员的履历一般被收入附录。

第2章 数据处理和误差分析

2.1 测量误差的分析

2.1.1 误差的基本概念

1. 量 (quantity) 的值

真值 (true value): 与给定的特定量的定义一致的值。注:

- ① 量的真值只有通过完善的测量才有可能获得;
- ② 真值按其本性是不确定的;
- ③ 与给定的特定量定义一致的值不一定只有一个。

约定真值 (conventional true value): 对于给定目的, 具有适当不确定度的、赋予特定量的值, 有时该值是约定采用的。例如, 常常用某量的多次测量结果来确定约定真值。

2. 误差的表示法

绝对误差 (absolute error): 测量结果减去被测量的真值。

相对误差 (relative error): 绝对误差除以被测量的真值。

在以上误差中, 由于真值不能确定, 实际上用的是约定真值。

偏差, 离差 (deviation): 一个值减去其参考值。

引用误差 (fiducial error): 测量仪器的误差除以仪器的特定值。该特定值一般称为引用值, 例如, 可以是测量仪器的量程或标称范围的上限。

3. 误差的分类

系统误差 (systematic error): 在重复性条件下, 对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差。如真值一样, 系统误差及其产生的原因不能完全获知。测量仪器示值的系统误差又称为偏移 (bias), 通常用适当次数重复测量的示值误差的平均来估计。

随机误差 (random error): 测量结果与在重复性条件下, 对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差。随机误差等于绝对误差减去系统误差。因为测量只能进行有限次数, 所以可能确定的只是随机误差的估计值。

过失误差 (fault error): 一种与事实明显不符的误差, 主要是由于实验人员粗心大意或操作不当等原因引起的。过失误差值可能很大, 且无规律可循, 含有过失误差值的

数据无法修正, 只能舍弃。

4. 测量的精度

精密度 (precision): 表示测量结果中随机误差大小的程度。

正确度 (correctness), 偏移 (bias): 表示测量结果中系统误差大小的程度。

精确度 (accuracy): 被测量的测量结果与 (约定) 真值间的一致程度。精度是准确度和精密度的综合反映, 在消除了系统误差的情况下, 精度等于精密度, 统称为精度。

2.1.2 测量不确定度的分析方法

1. 间接测量误差的传递

若间接测量参数 R 与直接测量参数之间的关系为

$$R = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

分别用 w_R 和 w_{x_i} 表示 R 和 x_i 的不确定度, 则 R 的最大不确定度为

$$w_R = \sum_{i=1}^n \left| w_{x_i} \frac{\partial R}{\partial x_i} \right|$$

最佳估计不确定度为

$$w_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[w_{x_i} \frac{\partial R}{\partial x_i} \right]^2}$$

若

$$R = C x_1^a x_2^b \cdots x_n^N$$

则有

$$\frac{w_R}{R} = \sqrt{\left(a \frac{w_1}{x_1} \right)^2 + \left(b \frac{w_2}{x_2} \right)^2 + \cdots + \left(N \frac{w_n}{x_n} \right)^2}$$

2. 测量结果的综合不确定度

详细的不确定度分析分别追踪系统不确定度 (systematic uncertainty, 记为 B) 和随机不确定度 (random uncertainty, 记为 P)。

随机不确定度用 t 分布估计。若变量 x 被测量 n 次, 其样本标准差和平均值分别定义为

$$S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

对于给定的置信水平, 可以根据自由度数由文献 1 查得 t 的值。 x 的平均值的随机不确定度定义为

$$P_{\bar{x}} = \pm t \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$