新世纪高等学校规划教材 · 环境科学与工程系列

固体废物处理处置与资源化实验与实习教程

马俊伟◎主编

GUTI FEIWU CHULI CHUZHI YU ZIYUANHUA SHIYAN YU SHIXI JIAOCHENG

北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

学校规划教材 · 环境科学与工程系列

固体废物处理处置与资源化实验与实习教程

马俊伟◎主编

GUTI FEIWU CHULI CHUZHI YU ZIYUANHUA SHIYAN YU SHIXI JIAOCHENG

北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

固体废物处理处置与资源化实验与实习教程/马俊伟主编. —北京：北京师范大学出版社，2018.6
（新世纪高等学校规划教材·环境科学与工程系列）
ISBN 978-7-303-23079-2

Ⅰ. ①固… Ⅱ. ①马… Ⅲ. ①固体废物处理－高等学校－教材 Ⅳ. ①X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 288188 号

营销中心电话 010-62978190 62979006
北师大出版社科技与经管分社 www.jswsbook.com
电子信箱 jswsbook@163.com

出版发行：北京师范大学出版社 www.bnup.com
北京市海淀区新街口外大街 19 号
邮政编码：100875
印　　刷：北京京师印务有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：787 mm×1092 mm　1/16
印　　张：7
字　　数：145 千字
版　　次：2018 年 6 月第 1 版
印　　次：2018 年 6 月第 1 次印刷
定　　价：20.00 元

策划编辑：刘风娟　　责任编辑：刘风娟　邢　颖
美术编辑：刘　超　　装帧设计：刘　超
责任校对：赵非非　黄　华　　责任印制：赵非非

版权所有　侵权必究
反盗版、反侵权举报电话：010-62978190
北京读者服务部电话：010-62979006-8021
外埠邮购电话：010-62978190
本书如有印装质量问题，请与印制管理部联系调换
印制管理部电话：010-62979006-8006

内容简介

本书为《固体废物处置工程》课程配套的实验和实习教材。通过对本书的学习，学生可以真正做到理论联系实际，总体上把握固体废物处理与处置技术基础理论知识及最新进展，具有实际进行固体废物处理处置工程设计与过程操作的基本技能。

《固体废物处置工程实验》与《固体废物处置工程》理论课在同一学期开设，对理论课程的难点或实践性较强的部分进行实验，增加学生的感性认识，使学生能学以致用。学期结束后安排《固体废物处置工程课程实习》，到转运站、堆肥厂、焚烧厂、填埋场实习，进一步理论联系实际。

本书可作为高等院校环境类专业学生实习教材，也可作为环境相关专业科研、工程和管理人员参考用书。

前　言

固体废物环境污染问题日益引起人们的重视，许多高校开设了固体废物处理处置与资源化相关课程，由于该课程实践性较强，固体废物处置的实践教学也引起各高校的重视。但与理论教学相比，实践教学相对薄弱，没有系统的实验和实习指导书籍供教师和学生参考使用。为此，我们在长期的固体废物处理处置实验和实习教学工作积累的基础上，吸取国内外大学环境类专业实验实习经验，编写了《固体废物处理处置与资源化实验与实习教程》。

本书包括3章内容，第1章为基本理论，即实验教学和实习教学的基本要求，误差分析和数据处理；第2章介绍固体废物处理处置与资源化实验，包括15个实验：生活垃圾的采样与特性分析，生活垃圾热值测定实验，材料密度、孔隙率、吸水率的测定，固体废物破碎实验，固体废物筛分实验，固体废物风力分选实验，固体废物磁选实验，固体废物电选实验，固体废物摇床分选实验，生活垃圾好氧堆肥实验，有机肥腐熟度表征实验，餐厨垃圾厌氧消化实验，污泥絮凝脱水实验，污泥比阻测定实验，浸出毒性实验。第3章介绍固体废物处理与处置实习，包括垃圾转运站实习、堆肥厂实习、焚烧厂实习和填埋场实习。

本书可作为环境类专业学生实验和野外实习的基本教材，也可作为环境类专业科研人员、管理人员及技术推广人员的参考用书。

本书编写过程中，得到了清华大学蒋建国教授、岳东北教授的帮助和指导，参与本书编写的还有李玉倩等，在此一并致谢！

由于编者水平有限，书中不当之处在所难免，敬请读者提出批评和建议，以便加以修正。

编　者

2018年5月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目 录

第 1 章 基本理论 …… 1

1.1 实验教学基本要求 …… 1

1.2 实习教学基本要求 …… 2

1.3 误差分析和数据处理 …… 6

第 2 章 固体废物处理处置与资源化实验 …… 24

2.1 生活垃圾的采样与特性分析 …… 24

2.2 生活垃圾热值测定实验 …… 31

2.3 材料密度、孔隙率、吸水率的测定 …… 37

2.4 固体废物破碎实验 …… 40

2.5 固体废物筛分实验 …… 45

2.6 固体废物风力分选实验 …… 47

2.7 固体废物磁选实验 …… 51

2.8 固体废物电选实验 …… 55

2.9 固体废物摇床分选实验 …… 60

2.10 生活垃圾好氧堆肥实验 …… 62

2.11 有机肥腐熟度表征实验 …… 66

2.12 餐厨垃圾厌氧消化实验 …… 71

2.13 污泥絮凝脱水实验 …… 74

2.14 污泥比阻测定实验 …… 76

2.15 浸出毒性实验 …… 80

第 3 章　固体废物处理与处置实习 …… 85
3.1　垃圾转运站实习 …… 85
3.2　垃圾堆肥厂实习 …… 88
3.3　垃圾焚烧厂实习 …… 91
3.4　垃圾填埋场实习 …… 95

附录 1　实习教学工作总结 …… 102

附录 2　学生实习成绩考核标准 …… 103

参考文献 …… 104

第1章 基本理论

1.1 实验教学基本要求

1.1.1 实验教学目的

实验教学的目的在于培养学生理论联系实际的能力，是培养学生发现问题、分析问题、解决问题的能力的重要途径。本课程的教学目的有：

(1)加深学生对基本概念的理解，对固体废物基本性质、处理与处置知识的巩固；

(2)使学生了解实验方案的设计，并逐步掌握固体废物实验研究的方法和基本测试技术；

(3)使学生初步掌握数据分析处理技术，主要包括：实验数据的收集、正确分析、归纳整理、运用实验成果验证已有的概念和理论等。

1.1.2 实验教学程序

实验研究工作的一般程序包括：

1. 提出问题

根据掌握的知识，提出验证的基本概念或者需要研究的问题。

2. 设计实验方案

确定实验目标后，根据人力、设备、药品和技术等方面的条件进行实验方案的设计。实验方案应包括实验目的、实验装置、实验步骤、测试项目和测试方法等。

3. 实验研究

根据设计的实验方案进行实验，按时进行测试。

4. 收集实验数据

定期整理分析实验数据。实验数据的可靠性和定期整理分析是实验工作的重要内容。实验者需要根据已掌握的基本概念对收集的实验数据进行分析，并通过分析加深对基本概念的理解，发现实验设备、操作运行、测试方法和实验方案等方面的问题，以便及时解决，使实验工作能够顺利进行。

5. 实验小结

通过实验数据的分析，对实验结果进行评价。实验小结应包括：

(1)通过实验掌握了哪些新的知识；

(2)是否解决了提出的问题；

(3)是否证明了某些猜想；

(4)实验结果是否可以用改进已有的工艺设备和操作运行条件进行优化；

(5)当实验数据不合理时，应分析原因，提出新的实验方案。

1.1.3 实验教学要求

1. 课前预习

学生在课前需要认真阅读实验教材，清楚地了解实验的目的和要求、实验原理和实验内容，写出简明的预习提纲，包括：

(1)实验目的和主要内容；

(2)测试项目和测试方法；

(3)实验中的注意事项；

(4)准备实验记录表格。

2. 实验设计

实验设计是实验研究中的重要环节，是获得满足要求的实验结果的基本保障。在实验教学中，宜将此环节放在部分实验项目完成之后进行，以达到使学生掌握实验设计方法的目的。

3. 实验操作

学生实验之前应仔细检查实验设备、仪器仪表是否完整齐全。实验时应严格按照操作规程认真操作，仔细观察实验现象，精心测定实验数据并详细填写实验记录。实验结束后，要将实验设备和仪器仪表恢复原状，将周围环境整理干净。学生应培养自己严谨的科学态度和良好的工作学习习惯。

4. 实验数据处理

通过实验取得大量的数据之后，学生必须对数据作科学的整理和分析，去伪存真、去粗取精，以得到正确可靠的结论。

5. 编写实验报告

将实验结果整理编写成一份实验报告，这一环节可为今后写好科学论文和科研报告打下基础。实验报告包括：

(1)实验目的；

(2)实验原理；

(3)实验装置和方法；

(4)实验数据和数据整理结果；

(5)实验结果与讨论。

另外，对于科研论文，还要列出参考文献。对于实验教学的实验报告，参考文献可以省略。实验报告的重点是实验数据的处理和实验结果的讨论。

1.2 实习教学基本要求

实习教学是高等学校进行基本训练的重要实践教学环节，也是学生了解和认识社会十分重要的社会实践环节。为加强学生的实践能力，提高综合能力，特制订实习教学工作规范。

1.2.1 实习目的和要求

(1)实习教学的具体内容与时间安排要有利于学生全面发展，通过适当的社会调查、勘察测绘、生产劳动、技术工作和管理技能锻炼，培养学生爱岗敬业，对工作认真负责，不怕吃苦，甘于奉献的精神和热爱劳动，热爱集体的观念；

(2)使学生获得工程对象和生产技术与管理的实际知识和技能，包括：掌握工艺流程、设备实施运行、操作条件、运行参数和综合利用；了解企业管理和规划以及主要设备和工艺的设计、设施设备的维修和保养。使学生获得行业领域和运作规程与管理的实际知识和技能，巩固、验证和应用所学的理论知识，加强理论联系实际，培养独立工作能力；

(3)通过现场参观、调研、实际操作或参加生产与管理，提高学生分析与解决实际问题的能力，并为后续课程的学习及毕业设计(论文)打下良好的基础。

1.2.2 编制实习计划

为组织好实习和提高实习质量，所有实习必须制订实习计划，提出实习要求。其主要内容应包括：

(1)实习类别、名称；

(2)实习专业班级、人数、领队或负责人；

(3)实习时间、地点；

(4)实习目的与要求；

(5)实习内容与方法；

(6)实习步骤和逐日或分阶段的具体时间安排；

(7)现场教学内容与学时计划(包括外请专家或技术人员讲课与指导)；

(8)实习队的组织及其分工；

(9)实习交通与食宿安排，实习经费预算；

(10)思想政治教育、安全教育与纪律教育工作安排及对学生的具体要求；

(11)专题调研与思考题；

(12)实习报告或总结的内容、形式、字数等要求；

(13)实习成绩的考核内容、标准与考核办法；

(14)实习工作总结与汇报。

1.2.3 实习地点和场地的选定

应根据专业特点和本专业实习大纲的要求进行选点，在选点时应进行全面考虑。

(1)专业要对口，实习内容和时间、现场条件能基本满足实习大纲的要求。如有条件，应尽可能建立长期合作关系，签订合作协议，确定实习定点单位或建立实习基地；

(2)应本着保证实习质量又节约的原则，尽量在本地就近安排。个别实习需要到外埠时，应先行考察并及早申请，特别是经费预算与经费来源、交通与食宿安排、安全措施等，经主管院长审核同意，由教务处审查汇总报主管校领导批准后实行；

(3)每次实习应尽量选定在一个工地、工厂、企事业单位或管理部门等场所内进行，需要跨单位实习时，也要相对地集中，尽量在同一地区就近安排；

(4)实习单位和地点一般由教研室和指导教师选定，也可以在教师指导下组织学生自行选择、指导教师现场认定，但不得让学生自由选定。

1.2.4 实习前的准备工作

(1)必须重视和做好实习队的组织和动员工作。三天以内的认识实习可由指导教师负责，1周以上(含1周)的实习，应建立实习队，在有关专业教研室教师或管理人员中任命正副领队各一名，其他成员由教研室自定，并争取接受实习单位派人参加实习队的领导和组织工作，并聘任实习单位技术与管理人员作为指导教师；

(2)实习指导教师必须事先到实习单位和工厂、工地现场，商讨落实有关实习事宜，聘请实习指导人、授课人和确定现场讲课内容，按照实习教学大纲的要求制订实习计划；

(3)实习队伍出发前或实习开始前，由学院领导和教研室主任对全体师生进行实习动员，讲清实习内容、目的、意义、要求和安全、保密、纪律等有关注意事项；

(4)实习前带队教师要做好师生食宿、交通、劳保等生活方面的安排，领取和购置有关实习用品。

1.2.5 实习期间的组织工作与基本要求

1. 实习队与指导教师工作要求

(1)认真贯彻《学生手册》《学生实习守则》等有关规定，结合现场情况与接受实习单位共同研究，并对学生进行政治思想教育、专业教育、组织纪律教育和劳动、安全以及艰苦奋斗等方面的教育。可通过聘请单位或现场负责人做有关报告，与现场技术人员、管理人员、先进生产者、生产骨干或校友进行座谈；

(2)根据实习计划安排好实习小组的任务和学生的实习岗位，并根据实习内容及进程指导学生不断深入，按期完成实习任务；

(3)组织好师生的政治与业务学习，做到劳逸结合，安排好作息时间和文体活动；

(4)根据实习计划按时组织现场课，协助现场技术与管理人员指导学生完成实习任务；

(5)定期或不定期检查、审阅学生的实习日记、作业、听课和参观笔记、考察记录、收集资料等内容和质量，作为评定成绩的参考依据；

(6)为保证实习任务的顺利完成，要及时做好学生的思想、政治工作，搞好与单位和现场人员的团结，适当组织学生参加一些有益的社会工作和活动；

(7)在实习期间，根据现场实际，通过师生座谈，听取学生意见，及时改进工作，对于重大问题及时向学院、系领导报告。

2. 注意处理好几个关系

(1)根据专业特点和实习内容配备得力的指导教师，发挥指导教师的主导作用，指导教师要对学生全面负责；

(2)实习中应注意理论与实践紧密结合，对现场课的内容要与现场技术与管理人员协

需要全本请访问 www.ertongbook.com

商好。讲授学时不宜过多，现场教学时长一般不应超过实习时间的10%(以每周40学时计)；

(3)根据专业的不同和实习地点比较分散的特点，适当地安排好现场技术与管理人员指导学生人数的比例，一般以1∶6为宜；

(4)生产实习与毕业实习或作为毕业设计(论文)前期工作需要连续进行时，要注意同时完成所需要的实习任务，并符合毕业设计(论文)教学工作的要求；

(5)实习中应根据实习目的和任务，处理好劳动与教学、一般体力劳动与专业技术劳动、专业技术与不同层次的管理工作之间的关系，防止忽视一方面和片面强调另一方面的倾向。

3. 对学生的要求

(1)在指导教师的指导下，按计划认真、主动、积极地完成规定的实习任务；

(2)遵守实习守则，按规定时间参加实习，不得迟到早退，有事必须向指导教师请假，未经同意，不得擅自离队；

(3)遵守当地的政策法令和所在实习单位的各项规章制度；尊重实习单位的各级人员，遵守指导教师在现场提出的各项规定；

(4)按现场规定和规范认真负责地完成各项技术和管理工作任务，认真做好实习日记、作业、听课和参观笔记、考察记录、收集资料、实习报告和总结等内容；

(5)对违反纪律者，及时给予教育和处理，情节严重者经系主任批准后，停止其实习，勒令返校，听候处理，实习成绩记为不及格。

1.2.6 实习结束工作

(1)妥善地处理好实习现场的一切结束工作，注意与实习单位和现场的交接；

(2)实习队和指导教师要及时做好学生的实习日记、实习报告和实习交流工作，完成较好的学生应予以表扬；

(3)实习队和指导教师要做好实习工作总结，填写《实习教学工作总结表》(附录1)，实习结束后一周内交于系办公室。

1.2.7 实习成绩考核与评优工作

(1)实习时间在2周以上(含2周)，均作为一门课单独进行考核和记载成绩，按照《学生实习成绩考核标准》(附录2)和优、良、中、及格、不及格五级评定成绩。

(2)实习时间在2周以下，均应单独进行考核，可以单独记载成绩，也可以不单独记载成绩，只记入相应的课程的成绩中，其所占比例，由教研室研究确定，随实习计划报学院主管院长批准。

(3)考核方式：可采用面试(口试)、答辩或现场操作等形式。实习日记、作业、听课和参观笔记、考察记录、收集资料、实习报告和总结及专题材料应作为评定成绩的主要依据。

1.3 误差分析和数据处理

1.3.1 误差分析与数据处理的目的

固体废弃物实验中，通常需要做一系列的测定，并取得大量的实验数据。误差为实验值和真实值之间的差异。误差是由于实验环境不理想、实验人员技术水平不高、实验设备与实验方法不完善等因素引起的。随着研究人员对研究课题认识的提高、仪器设备的不断完善，实验中的误差不断减少，但是不可能做到没有误差。因此，必须对所测对象进行分析研究，估计测试结果的可靠程度，对取得的数据给予合理解释，并对所得的数据进行整理归纳，用一定的方式表示出各数据之间的相互关系。前者即为误差分析，后者为数据处理。

对实验结果进行误差分析和数据处理的目的在于：

(1)根据科学实验的目的，合理选择实验装置、仪器、条件和方法；

(2)正确处理实验数据，以得到在一定条件下最接近真实值的最佳结果；

(3)合理选定实验结果的误差，避免由于误差选取不当造成人力、物力的浪费；

(4)总结测定的结果，得到正确的实验结论，并通过必要的整理归纳(如绘制实验曲线或得到经验公式)，为验证理论分析提供条件。

1.3.2 误差的基本概念

1.3.2.1 真值与平均值

实验过程中，由于仪器、测试方法、环境、人力、实验方法等都不可能做到完美无缺，因此各种测试工作并不能测到真值。如果对同一考察项目进行无限多次测试，然后根据误差分布定律中正负误差出现的概率相等的理论，可以求得各测试值的平均值，在无系统误差的情况下，此值为接近于真值的数值。通常测试的次数总是有限的，用有限测试次数求得的平均值，只能是真值的近似值。

常用的平均值有算术平均值、均方根平均值、加权平均值、中位值和几何平均值等。计算平均值方法的选择，主要取决于一组观测值的分布类型。

1. 算数平均值

算术平均值是最常用的一种平均值，当观测值呈正态分布时，算术平均值最近似真值。

设 x_1，x_2，…，x_n 为各次的观测值，n 为观测次数，则算数平均值为：

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

2. 均方根平均值

均方根平均值计算公式为(式中符号意义同前)：

$$\bar{x} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$

3. 加权平均值

若对同一事物用不同方法测定，或不同人测定，常用加权平均值计算平均值，其计算公式为(式中，ω_1，ω_2，…，ω_n 为各观测值相应的权，各观测值的权可以是观测值的重复次数、观测值在总数中所占的比例，或者根据经验确定。其他符号意义同前)：

$$\bar{x}=\frac{\omega_1 x_1+\omega_2 x_2+\cdots+\omega_n x_n}{\omega_1+\omega_2+\cdots+\omega_n}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\omega_i x_i}{\sum_{i=1}^{n}\omega_i}$$

4. 中位值

中位值是指一组观测值按照大小次序排列的中间值。若观测次数是偶数，则中位值为正中间两个值的平均值。中位值求法简单，但只有当观测值的分布呈正态分布时，中位值才能代表一组观测值的中间趋向，近似于真值。

5. 几何平均值

如果一组观测值是非正态分布，当这组数据取对数后，所得图形的分布曲线更对称时，常用几何平均值。几何平均值的计算公式为(式中符号意义同前)：

$$\bar{x}=\sqrt[n]{x_1\cdot x_2\cdot\cdots\cdot x_n}$$

也可以用对数表示为：

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

1.3.2.2 误差与误差的分类

实验过程中，各项指标的监测通常需要通过各种测试方法来完成。由于被测量的数值形式通常不能以有限位数表示，且因认识能力不足和科技水平的限制，测量值与其真值并不完全一致，这种差异表现在数值上称为误差。任何监测结果均有误差，误差存在于一切实验中。

1. 绝对误差和相对误差

个别观测值 x_i 与真实值 μ 之差称为个别观测值的误差，即绝对误差 E_i，用公式来表示为：

$$E_i=x_i-\mu$$

绝对误差 E_i 的数据越大，说明观测值 x_i 偏离真实值 μ 越远。若观测值大于真实值，说明存在正误差；反之，存在负误差。

实际上，对于一组观测值的准确度，通常用各个观测值 x_i 的平均值 $\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$ 来表示。因此，绝对误差又可以表示为：

$$E_i=\bar{x}-\mu$$

在实际应用中，由于真实值不容易测得，所以常用观测值 x_i 与平均值 $\bar{x}$ 表示绝对误差，严格地说，观测值与平均值之差应称为偏差，但是在工程实践上多称为误差。

绝对误差没有与真实值联系起来，因此，相对误差的概念被提出。相对误差是绝对误差与真实值的比值，即：

$$E_t=\frac{E_i}{\mu}$$

实际应用中，由于真实值不容易测得，因此通常用观测值 x_i 的平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$ 来代替真实值 μ。

相对误差用于不同观测结果的可靠性对比，常用百分数表示。

2. 系统误差和随机误差

根据误差的性质和发生的原因，误差可以分为系统误差、随机误差和过失误差 3 种。

(1)系统误差

系统误差也称为可测误差或恒定误差，是指在测定中由于未发现或未确认的因素引起的误差，其特征为：①单向性，即误差的符号与大小恒定，或按照一定的规律变化；②系统性，即在相同的条件下进行同样的测定时会重复出现。

产生系统误差的原因有以下几个方面：①方法误差：由于分析方法不当造成的，是比较严重的误差，一般都能找到物理或化学的原因；②仪器或试剂误差：由于装置不良或试剂不纯引起的误差；③环境改变引起的误差：主要是指外界的温度、压力和湿度等变化引起的误差；④个人的习惯或偏向：如读数偏高或偏低等。在一般情况下，如果能找到产生的原因，可对其进行校正或设法进行消除。

(2)随机误差

随机误差也称为偶然误差，单次测试时，观测值总是有些变化且变化不定，其误差时大时小、时正时负、方向不定。但是多次测试后，其平均值趋于零。随机误差也服从统计规律，可以通过增加实验的测定次数来减小，并用统计的方法对测定结果作出正确的表述。实验数据的精确度主要取决于随机误差，随机误差是由研究方案和研究条件总体所固有的一切因素引起的。

3. 过失误差

过失误差又称为错误，是由于操作人员粗枝大叶、操作不当、过度疲劳等因素引起的，是一种与事实明显不符的误差。操作者加强责任心，提高操作水平，过失误差是可以避免的。

1.3.2.3 准确度和精密度

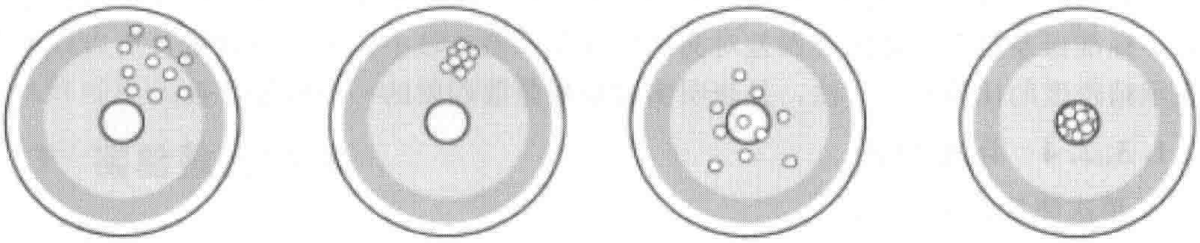
1. 准确度和精密度的关系

准确度是指测定值与真实值偏差的程度，反映系统误差和随机误差的大小，一般用相对误差来表示。

精密度是指在控制条件下用一个均匀试样反复测量，所得数值之间的重复程度。反映了随机误差的大小，与系统误差无关。

因此，评定观测数据的好坏，首先要考虑精密度，然后再考察准确度。一般情况下，无系统误差时，精密度越高，观测结果越准确。但若系统误差存在，则精密度高，准确度不一定高。

准确度和精确度之间的关系如图 1-1 所示。



（a）精密度和准确度都不好 （b）精密度好，准确度差（c）精密度差，但准确度好（d）精密度和准确度都好

图 1-1 以打靶为例说明精密度和准确度之间的关系

为了提高实验的准确度和精确度，必须减少和消除系统误差和随机误差，主要应做到：减少系统误差，增加测定系数，选择合适的实验方法。

2. 精密度的表示方法

若在某一条件下进行多次测试，其误差为 σ_1，σ_2，…，σ_n。因为单个误差可大可小、可正可负，无法表示在该条件下的测定精密度，因此常采用极差、算术平均误差、标准误差等表示精密度的高低。

(1)极差

极差又称为误差范围，是一组观测值中最大值和最小值之差，是用来描述实验数据分散程度的一种特征参数。其计算公式为：

$$R=x_{\max}-x_{\min}$$

极差的缺点是只与两极端值有关，而与观测次数无关。用极差反映精密度的高低比较粗糙，但计算简便，在快速检验中可以度量数据波动的大小。

(2)算术平均误差

算术平均误差是观测值与平均值之差的绝对值的算术平均值，其计算公式为：

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

式中：δ 为算术平均误差；x_i 为观测值；$\bar{x}$ 为全部观测值的平均值；n 为观测次数。

算术平均误差的缺点是无法表示出各次测试间彼此符合的情况。因为在一组测试中偏差彼此接近的情况下，与另一组测试中偏差有大、中、小 3 种情况下，所得的算数平均误差可能基本相同。

(3)标准误差

标准误差又称为均方根误差或均方误差，各观测值与平均值之差的平方和的算术平均值的平方根称为标准误差。其计算公式为：

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

式中：d 为标准误差，其他符号意义同前。

有时，在有限观测次数中，标准误差的计算公式为：

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

由此可以看出，当观测值越接近平均值时，标准误差越小，当观测值和平均值相差越大时，标准误差越大。即标准误差对测试中较大误差或较小误差比较灵敏，所以标准误差是表示精密度的比较好的方法，是表明实验数据分散程度的一个特征参数。

1.3.2.4 误差分析

1. 单次测量值误差分析

实验影响因素较多且测试量大，有时由于条件限制或准确度要求不高，特别是在动态实验中不容许对被测值反复测量，故实验中往往对某些指标只能进行一次测量。这些测量值的误差应根据具体情况进行具体分析。例如，对偶然误差较小的测量值，可按照仪器上注明的误差范围进行分析计算；无注明时，可按照仪器最小刻度的 1/2 作为单次测量的误差。

2. 重复多次测量值误差分析

在条件允许的情况下，进行多次测量可以得到比较准确可靠的测量值，并用测量结果的算术平均值近似替代真值。误差的大小可用算术平均误差和标准误差来表示。工程中多用标准偏差来表示。

3. 间接测量值误差分析

实验过程中，经常需要对实测值经过公式计算后获得一些测量值用于表达实验结果或用于进一步分析，称为间接测量值。由于实测值均存在误差，间接测量值也存在误差，称为误差的传递。表达各实测值误差与间接测量值之间的关系的公式称为误差传递公式。

(1)间接测量值算术平均误差计算

采用算术平均误差时，需要考虑各项误差同时出现最不利的情况，将算术平均误差或算术平均相对误差的绝对值相加。

①加、减法运算中间接测量值误差分析

设 $N=A+B$ 或 $N=A-B$，则有：

$$\delta_N=\delta_A+\delta_B$$

式中：δ_N 为间接测量值 N 的算术平均误差；δ_A 为直接测量值 A 的算术平均误差；δ_B 为直接测量值 B 的算术平均误差；

②乘、除法运算中间接测量值误差分析

设 $N=AB$ 或 $N=\dfrac{A}{B}$，则有：

$$\frac{\delta_N}{N}=\frac{\delta_A}{A}+\frac{\delta_B}{B}$$

式中符号意义同前。

(2)间接测量值标准误差计算

若 $N=f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，采用标准误差时，间接测量值 N 的标准误差传递公式为：

$$\sigma_N=\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2\sigma_{x_1}^2+\left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2\sigma_{x_2}^2+\cdots+\left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2\sigma_{x_n}^2}$$

式中：σ_N 为间接测量值 N 的算术平均误差；σ_{x_1}，σ_{x_2}，…，σ_{x_n} 为间接测量值 x_1，x_2，…，

需要全本请访问 www.ertongbook.com