

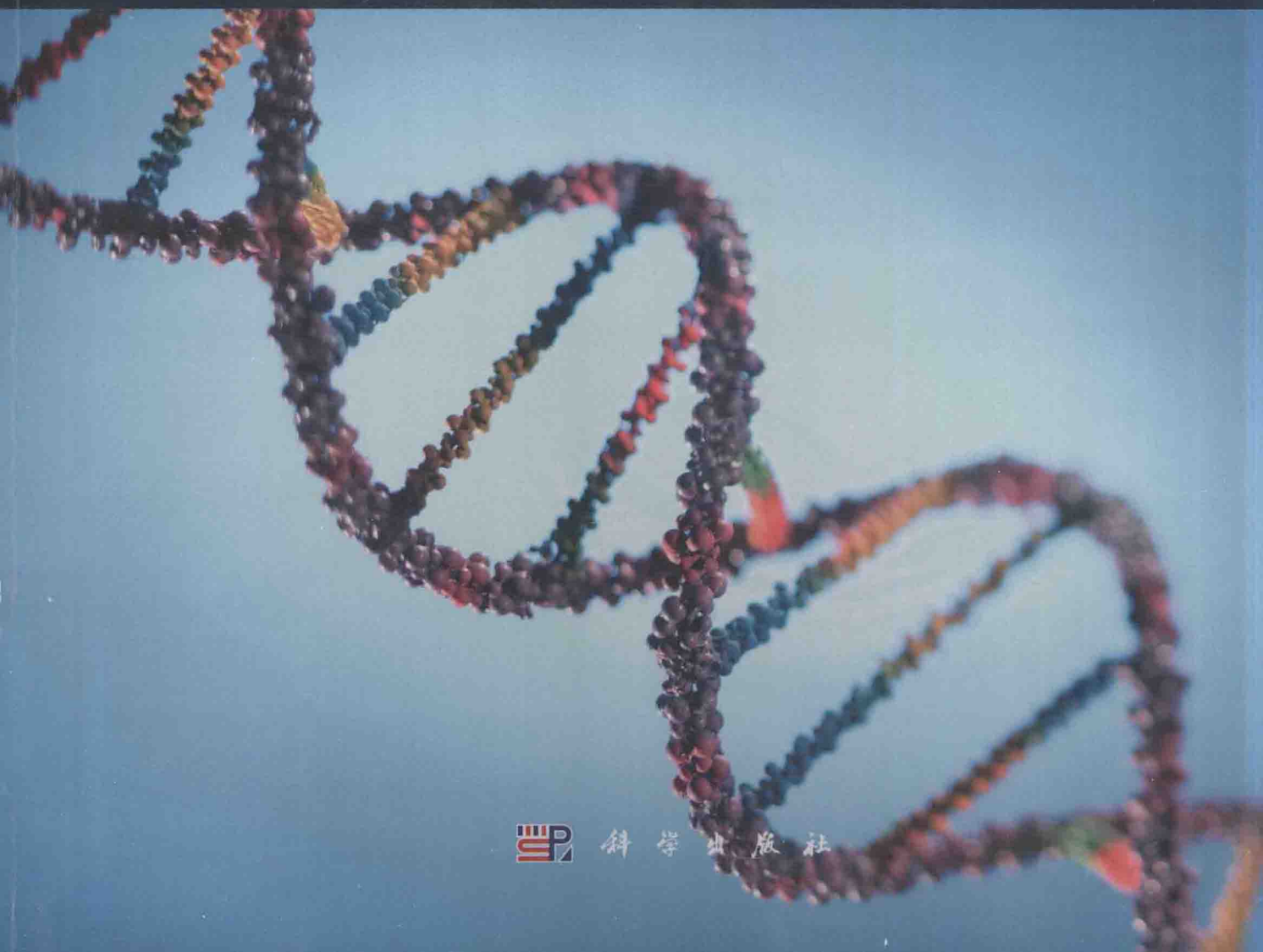


生命科学实验指南系列



现代生物化学与分子生物学 仪器与设备

雷东锋 编著



科学出版社

生命科学实验指南系列·典藏版

现代生物化学与分子 生物学仪器与设备

雷东锋 编著

西安交通大学学术专著出版基金资助

西安交通大学博士后课题经费资助

西安交通大学生物医学信息工程教育部重点实验室资助项目

科学出版社

北 京

内 容 简 介

“生命科学实验指南系列”图书均出自名家,包括众多从 Cold Spring Harbor Laboratory Press 和 John Wiley & Sons 等国际知名出版社引进的实验室必备工具书,是生命科学领域最先进、实用、权威的实验手册类优秀图书。该系列图书简单明了,囊括了全世界最著名的生物类实验室操作方法,无论是初学者还是需要深入研究的科研工作者都能从中获益。该系列图书在读者群中有较高的知名度和美誉度,特别是以《分子克隆实验指南》和《精编分子生物学实验指南》为代表,堪称经典,分别被喻为生命科学领域的“蓝宝书”和“红宝书”。现挑选其中的精品集成典藏版。

图书在版编目(CIP)数据

生命科学实验指南系列:典藏版/雷东锋等编著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-047486-5

I. ①生… II. ①雷… III. ①生命科学—实验—指南 IV. ①Q1-0

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 043878 号

责任编辑:王 静 李 悦

责任印制:张 伟 / 封面设计:刘新新

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 7 月第一次印刷 印张:1310 1/2

字数:31 074 000

定价:4500.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

生物技术近年来突飞猛进的发展，在医药、农林等领域中已经得到了许多应用。现代生物学已经解决了所谓传统生物学和生物化学以前不能解决的问题。新的检验和研究的手段不断出现，也在推动各个和生物体有关学科的研究。

新的检测方法和仪器日新月异地在市场上出现，现在医院和农林研究机构的实验室和十多年前的生化实验室相比都给人面目全非的感觉。正是这些现代化的仪器和设备，推进了生物学科的发展，也在挑战仪器研制机构的创造性。

门类众多的各种仪器设备，所用的工作原理多种多样，方法的改进层出不穷。不出几年就有更新、更方便使用的新机型面市。

目前尚没有一本能涵盖众多品种的参考书来满足培训实验室工作人员的需要。更没有能供已在岗位上的实验室人员的自学进修的学习材料，以使能跟上学科高速发展的步伐。

我所知道的雷东锋博士，在他攻读本校博士学位以前，曾在一些实验仪器的制造厂中工作，收集了很多仪器的技术资料。因此他不但能熟练地使用这些设备进行研究，而且对其工作原理和维护也有较好的认识。在谈话之间我曾鼓励他写作一本书以帮助广大的实验室工作者，了解各种仪器的工作原理和维护知识，以便他们能更好地掌握新的技术，紧跟时代。

在雷东锋获得博士学位以后，在他的博士后工作期间，完成了本书的写作。因此，我乐于向读者推荐此书。

本书基本上囊括了一个现代生物化学和分子生物学实验室的所有仪器设备，从简单的 pH 计到最新最复杂的一些谱仪。在计算技术和电子技术已深入并整合到各种仪器的内部时，本书尚能简单地阐明了它们的工作原理，这是不容易做到的，有助于读者能在有更新的改进型号出现时，能跟上它的脉络。

本书的特点还在于，不仅阐明了各种仪器的工作原理，还按照常见的国内外产品型号介绍了它们的保养和维修的基本知识。这对实验室工作者提高工作效率，减少成本消耗也是很有用的。

当然这样一本希望包罗万象的参考书也仅是一个尝试，书中难免有错漏之处，还望各位看到此书的专家，不吝指出，以便以后能有改进，这也是作者的希望。总的说，希望这本书能对广大的实验室工作者有所帮助。

蒋大宗

2005 年 8 月

于西安交通大学

前 言

编写本书的想法始于 10 年前，当时我接触了国内外众多的生物学实验室、化学实验室，甚至环保、电力、自来水、石化方面的检测实验室。我发现，尤其是在我国，国家花费了大量的经费（有些是贷款）购买了许多国际先进的实验仪器和设备，但是它们作用的发挥却十分有限，当然有众多的原因，比如说科研水平与仪器配置的先进性不符、配套设施和耗材准备不足，其中最重要的原因之一是仪器使用者和科研人员对仪器设备的组成结构、使用和维护以及实验室管理的知识比较缺乏，造成了设备与仪器太多的闲置、浪费甚至报废。处于这种考虑，我把这种想法告诉给我的两位导师——生物医学工程的著名科学家西安交通大学蒋大宗教授和西安交通大学免疫与病理专家王一理教授。他们鼓励并指导我将多年积累的材料进行整理，力图让读者在这些方面有所收获，于是编写了这本拙著，因此我由衷地再次感谢我的两位恩师。

在材料的整理和收集过程中，西安交通大学生命科学与技术学院的祝蒙蒙硕士、冯怡硕士、吴明宇硕士做了大量的工作，对他们的鼎力协助一并表示由衷感谢。此外我还要感谢西安天隆科技有限公司彭年才博士为我提供了 PCR 方面的一些宝贵资料。

在本书编写过程中，烟草行业从事烟气分析的一些专家给我提出了很好的建议，如陕西中烟工业公司龚朝凯总经理、高峰副总经理、陈晖副总经理以及汉中卷烟二厂席耀鹏厂长等，本书的一些仪器设备也可供烟草行业烟气和相关化学成分检测的人员参考，在此感谢他们的指导。

西安交通大学生物医学信息工程教育部重点实验室

雷东锋

2005 年 11 月 12 日

目 录

序言
前言

第一篇 称量、洗涤和消毒设备

第一章 电子天平..... 3

 第一节 简介..... 3

 第二节 电磁力平衡式电子天平..... 6

 第三节 操作使用..... 8

 第四节 电子天平的应用与发展 11

第二章 超声波清洗仪 13

 第一节 简介 13

 第二节 结构性能及使用 14

 第三节 在生物学中的应用 16

 第四节 超声波清洗仪的发展 16

第三章 高压蒸汽灭菌器 19

 第一节 概述 19

 第二节 结构与特点 20

 第三节 操作使用 21

 第四节 高压蒸汽灭菌器的发展 24

第四章 自动洗板机 25

 第一节 基本原理 25

 第二节 结构及性能 26

 第三节 自动洗板机的使用 27

 第四节 洗板机的应用 29

 第五节 自动洗板机的发展 29

第二篇 控温设备

第五章 超低温冰箱 33

 第一节 制冷原理 33

 第二节 实验设备 33

 第三节 常见故障维修和保养 34

 第四节 发展趋势 35

第六章 制冰机	37
第一节 简介	37
第二节 实验设备	38
第三节 操作使用	39
第四节 制冰机的最新进展	40
第七章 液氮罐	42
第一节 简介	42
第二节 使用与保管	43
第三节 液氮罐在生物学实验中的应用	44
第四节 液氮罐联用仪器简介	44
第三篇 水质制备系统	
第八章 超纯水器	49
第一节 基本理论与技术	49
第二节 超纯水器简介	55
第三节 超纯水器的使用	58
第四节 超纯水的应用	60
第五节 超纯水器的发展趋势	60
第四篇 材料培养和处理设备	
第九章 超声波破碎仪	65
第一节 实验仪器	65
第二节 使用操作	66
第三节 应用	67
第十章 细胞电穿孔仪和电融合仪	69
第一节 基本原理和影响效率的因素	69
第二节 细胞穿孔仪	72
第三节 细胞电融合仪	73
第四节 细胞电融合仪和电穿孔仪在生物学中的应用	74
第五节 细胞电穿孔仪和电融合仪的发展	75
第十一章 核酸杂交箱	77
第一节 基本原理与基本概念	77
第二节 组成结构和性能特点	79
第三节 使用方法	79
第四节 在生物学方面的应用	81
第五节 发展趋势	82
第十二章 摇床	84
第一节 结构与特点	84

第二节 操作使用	86
第三节 在生物学方面的应用	87
第四节 摇床的发展	87
第十三章 生物反应器	89
第一节 不同类型生物反应器的性能特点	89
第二节 生物反应器的发展	94
第十四章 二氧化碳培养箱	95
第一节 基本原理与影响因素	95
第二节 实验设备	97
第三节 二氧化碳培养箱的应用	99
第十五章 智能人工气候箱	101
第一节 基本原理	101
第二节 实验仪器	102
第三节 仪器的操作使用	103
第四节 人工气候箱的应用	105
第五节 智能人工气候箱的发展	105
第十六章 冻干机	106
第一节 基本概念与基本原理	106
第二节 组成结构	109
第三节 仪器操作	116
第四节 应用举例	119
第十七章 超净工作台	122
第一节 基本原理与基本概念	122
第二节 结构与性能特点	122
第三节 操作使用	126

第五篇 基因扩增和转移设备

第十八章 基因枪	131
第一节 基本原理及影响因素	131
第二节 实验仪器	132
第三节 基因枪的使用操作	132
第四节 基因枪在生物学及医学方面的应用	134
第十九章 PCR 仪	135
第一节 PCR 的基本概念与基本原理	135
第二节 PCR 仪的组成与结构	139
第三节 使用操作	140
第四节 PCR 的应用	144
第五节 新型 PCR 分析方法及新型 PCR 仪	147

第六篇 生物大分子制备系统及附属设备

第二十章 微量移液器	153
第一节 移液器的检测与校准.....	153
第二节 性能特点.....	155
第三节 使用方法.....	156
第二十一章 自动部分收集器	159
第一节 操作使用.....	159
第二节 自动部分收集器的发展.....	160
第二十二章 DNA 合成仪	162
第一节 基本概念与基本原理.....	162
第二节 组成和性能.....	165
第三节 使用方法.....	168
第四节 在生物学中的应用.....	172
第五节 DNA 合成仪的发展	173
第二十三章 自动化多肽合成仪	174
第一节 基本概念与基本原理.....	174
第二节 结构与特点.....	177
第三节 操作方法.....	178
第四节 在生物学方面的应用.....	181
第五节 自动化多肽合成仪的发展.....	181

第七篇 分离分析系统

第二十四章 毛细管电泳仪	185
第一节 基本概念与基本原理.....	186
第二节 组成和性能.....	197
第三节 使用方法.....	202
第四节 在分子生物学领域中的应用.....	207
第五节 毛细管电泳仪的进展和发展趋势.....	209
第二十五章 DNA 测序仪	212
第一节 DNA 测序的基本原理	212
第二节 结构和性能.....	214
第三节 使用方法.....	217
第四节 在分子生物学领域中的应用.....	219
第五节 DNA 测序仪的发展趋势	220
第二十六章 高效液相色谱仪	222
第一节 基本原理与基本概念.....	222
第二节 组成和性能.....	226

第三节	操作使用·····	233
第四节	在生物化学和分子生物学领域中的应用·····	236
第五节	高效液相色谱仪的进展和发展趋势·····	237
第二十七章	生化分析仪·····	239
第一节	基本概念与基本原理·····	239
第二节	半自动生化分析仪·····	242
第三节	全自动生化分析仪·····	244
第四节	生化分析仪的基本操作及要点·····	247
第五节	生化分析仪在生物学中的应用·····	250
第六节	生化分析仪的发展·····	251
第二十八章	离心机·····	252
第一节	基本原理与基本概念·····	252
第二节	离心机概述·····	255
第三节	操作使用·····	263
第四节	在分子生物学领域中的应用·····	265
第五节	离心机的进展和发展趋势·····	267
第二十九章	蛋白质测序仪·····	269
第一节	基本概念与基本原理·····	269
第二节	结构与分类·····	272
第三节	在生物学中的应用·····	275
第四节	蛋白质测序仪的发展·····	276
第三十章	氨基酸分析仪·····	278
第一节	基本概念与基本原理·····	278
第二节	组成和性能·····	279
第三节	操作使用·····	280
第四节	在生物学领域中的应用·····	285
第五节	氨基酸分析仪的发展·····	286

第八篇 检测与观察系统

第三十一章	pH 计·····	291
第一节	原理·····	291
第二节	组成及特点·····	291
第三节	操作使用·····	293
第四节	在分子生物学领域中的应用·····	295
第五节	pH 计的发展趋势·····	296
第三十二章	紫外-可见分光光度计·····	298
第一节	基本概念与基本原理·····	298
第二节	紫外-可见分光光度计·····	300

第三节	使用方法·····	310
第四节	在生物学领域中的应用·····	310
第五节	进展及发展趋势·····	313
第三十三章	凝胶成像系统·····	315
第一节	基本概念与基本原理·····	315
第二节	组成及性能·····	316
第三节	操作使用·····	317
第四节	在生物学领域中的应用·····	319
第五节	凝胶成像系统的发展·····	320
第三十四章	酶标仪·····	322
第一节	酶联免疫技术·····	322
第二节	酶标仪·····	327
第三节	操作使用·····	330
第四节	酶联免疫技术在生物领域的应用·····	332
第五节	免疫技术与酶标仪的发展·····	332
第三十五章	核磁共振波谱仪·····	334
第一节	基本概念与基本原理·····	334
第二节	结构与性能·····	337
第三节	操作使用·····	339
第四节	应用与发展·····	340

第九篇 生化仪器与计算机技术

第三十六章	计算机与智能仪器·····	345
第一节	智能仪器·····	345
第二节	计算机技术对生物化学与分子生物学仪器与设备的影响·····	346
第三节	各种计算机技术在智能仪器中的应用·····	348

第一篇 称量、洗涤和消毒设备

进行生物化学与分子生物学实验，首先要确保配制的各种溶液和缓冲液浓度的准确性，因此对于所使用各种试剂称量的准确度具有较高的要求。在实验室中，最常用的称量设备就是电子天平，它可以满足各种不同的称量要求。

生物实验室中经常进行的微生物培养与实验会使生物实验室内含有大量的微生物，其中的病原微生物可以通过皮肤和呼吸道进入实验者体内而影响健康。在实验室内除了使用一些物理、化学、生物的消毒方法，如紫外线、有机化合物杀菌剂等，对实验室进行整体消毒外，还可以利用实验室内基本的洗涤和消毒仪器，来完成实验室和实验用具的消毒工作，维持实验室内一定的洁净度。超声波清洗仪是实验室最常用的清洗仪器，可用于显微镜、望远镜等光学系统及取样玻璃片的清洗，还可以对生物化学实验室的试管、试剂瓶、烧杯等容器进行清洗。另一种清洗仪器——洗板机，是用于酶标仪微孔板的专用清洗仪。

对于微生物培养、生物大分子提取过程中要求无菌的培养皿、离心管和试剂等，应用灭菌锅和自动灭菌器进行消毒是一项必备措施。本篇将详细介绍上述几种生物实验室使用的常规的洗涤和消毒设备。

第一章 电子天平

天平是生物化学与分子生物学实验中用于称量的最基本和最重要的设备之一，在实验室建设和实验进行的过程中应根据称量对象和称量精度的要求不同，选用合适的天平。例如，称量小型实验动物的体重可使用台秤，对固体试剂进行粗略称量可以使用架盘药物天平，更精确地称量可以使用扭力天平、光电分析天平等，此外还根据实验室研究项目的不同，本着经济、适用的原则，从数量和类型上进行合理搭配。一般来讲，实验室中天平的感量范围和精度都要涵盖一个较宽的范围。

目前有些较先进的电子天平都采用了现代传感器技术、电子技术和微型计算机等先进技术，结构虽简单，但功能较齐全，与机械天平相比，电子天平不仅克服了非等比性误差，还增加了校准、数字显示、自动去皮、自动故障寻迹、数据输出等功能。例如，在生物化学与分子生物学实验室中使用较为广泛的电磁力平衡式电子天平，不仅其最大称量范围可达数百到数千克，而且感量可以从 0.1mg 增至 100mg 。这类电子天平种类繁多，各有特点，使用者可根据自己的需要进行选择。

第一节 简介

一、分类

目前市场上销售的国产或进口的电子天平，其种类多种多样，下面将分类进行介绍。

（一）应变式电子天平

应变式电子天平在受力可变形的弹性体上贴有组成桥路的应变片，并利用半导体电阻应变片作为敏感元件感应载荷质量的变化。这类电子天平结构简单，价格低廉，但精度不高，目前市售的商品，最高精度为 0.01g 。一般商用的电子天平多为应变式电子天平。

（二）振弦式电子天平

物体的重力作用使振弦伸长或缩短，从而改变了振弦频率。当载荷增加时，振弦频率升高，以频率的变化来反映载荷质量的大小。

（三）音叉振动式电子天平

类似于振弦式，如日本石田衡器于 1988 年制成的 QB 系列音叉振动式电子天平。

（四）电容电感式电子天平

这类天平利用霍恩同轴差动电容作衡量元件制成天平。

(五) 晶体振荡式电子天平

利用石英晶体的压频效应制成天平,其缺点是压力与频率之间呈非线性关系,使称量误差增大,且较难修正。

(六) 电磁力平衡式电子天平

目前市售的用于高精度称量的电子天平,普遍为电磁力平衡式电子天平。用电磁力平衡原理制成的天平,精度高,可重复性好;其缺点是称量范围小,直接应用时只能称量小于 500g 的物质,但利用杠杆原理,称量上限可扩展至 1kg 以上。

在众多种类的电子天平中,使用最普遍、精度最高的是磁电式电子天平,将在下一节中重点进行介绍。



图 1-1 瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司 (METTLER) 的 UMx2 超微量天平

二、基本结构

电子天平的结构多样,电磁力平衡式电子天平最有代表性,其基本结构由托盘、磁铁、线圈、横梁、防护罩等组成(图 1-1)。

三、影响称量精度的因素

(一) 预热时间

天平的充分预热是保证天平示值稳定的关键。电子天平的基本工作基础是平衡。一旦失衡,便会利用电磁力将天平重新拉回平衡状态。这个电磁力是由流经线圈中与物体质量成正比的电流在永久磁钢中产生的。电磁力 F 的大小与磁钢的磁通 Φ 、流经线圈中的电流 I 及线圈长度 L 成正比。当天平处于预热阶段时,随着内部温度升高, Φ 会逐渐下降,同时 I 也会减小,这样就导致 F 变小,天平失去平衡,示值会呈现正的单方向漂移。只有经过充分预热,使磁钢达到热平衡,这一变化过程结束,天平才达到平衡。再利用归零/去皮功能,显示归零,此时天平方可使用。为了减少电子器件,如变压器、桥式整流器、三端直流稳压集成电路等发热器件的影响,新一代的电子天平已将主要发热器件——变压器移到天平的外部,成为一个独立部分以尽可能消除温度的影响。对于实际分度值为 $1.0\mu\text{g}$ 或 $0.1\mu\text{g}$ 的微量或超微量天平,都是将称量室与电子部分分成两个独立的部分,其目的是为了减小热噪声对传感器的热影响,以利于更为稳定与准确地称量。另外,电子天平通常都没有类似家用电器的电源开关,只要给天平通电,即使显示器上无显示,天平也已处于预热状态。因此经常称量的天平不必拔掉电源,尤其是高准确度天平,在条件许可的情况下,可长期通电保持天平始终处于预热状态。

（二）预压

电子天平在停止工作一段时间后可能进入休眠状态，为使天平尽快进入工作状态，使用前最好用砝码多次加载，否则天平进程示值与回程示值之差将明显增大。加载时不必在意称量结果和归零情况。电子天平预热好以后，也不要立即进行称量，而要短暂地加载、卸载，以运动天平。电子天平的传感器通常是由 9 片或 11 片簧片构成的弹性支撑体，天平传感器就是利用这些簧片进行力的传递，使天平在平衡-失衡-再平衡的过程之中完成称量。然而，在天平处于通电预热阶段或较长时间停止称量时，天平传感器处于停止工作的休眠状态，当然簧片也处于休眠状态，其恢复性能不佳，若这时进行称量，势必会引起天平加载后归零不佳、示值稳定性不好、重复性差等问题。对于半微量、微量和超微量天平，必须进行预压，否则不易得到稳定的称量结果。

（三）读数时间

天平示值稳定与否，一般都有规定的符号在显示屏上指示。当示值稳定时，稳定指示灯（或符号）亮起，或不稳定灯（或符号）消失。稳定的范围一般都是分档可调，稳定范围的设置与显示屏上出现的稳定示值时间成反比。天平从加载到稳定实际上是一个振荡平衡的过程，当振荡波形的振幅逐渐减小，达到原先所设定的稳定范围时，显示屏上即显示出稳定的符号（或不稳定符号消失）。但实际上此时天平仍未完全稳定，还要再经过一段时间才能趋于稳定。这段时间的长短与原来天平所设定的稳定范围有关，也和天平的检定分度值有关。为此，一般不在稳定符号出现（或不稳定符号消失）后立即进行读数，而是顺延一定时间。每次读数顺延的时间应相对一致，即在天平稳定符号出现（或不稳定符号消失）后顺延一段固定的时间再进行读数。

（四）样品本身自然物理特性和变化造成的影响

1. 样品和容器的温度

当样品和容器的温度与天平称量室的温度不同时，存在一个温度差，此差异在称量容器外侧会导致产生沿不同方向流动的气流。此气流产生一个向上或向下的作用力，在这个动态空气浮力的作用下就会产生错误的称量结果。为了避免样品和容器的温度影响，在称量时，要保持样品同称量室温度相同后再进行称量，不要对从干燥器或冰箱里取出的样品直接进行称量；为避免手温对容器的影响，要使用镊子夹取容器；尤其要注意，尽可能避免手进入天平称量室，引起称量室温度升高，可使用长柄镊子夹取容器，或者使用长柄样品勺添加样品；在使用容器的形状上也要注意，应使用表面积较小的容器，以减少温度的影响。

2. 样品的吸湿性或挥发性

在称量一些具有吸湿性的样品时，天平显示值会缓慢增大；反之，称量一些具有挥发性的样品时，天平显示值会越来越小。这一现象还往往被一些使用者误解，以为是天

平自身漂移所致，其实不然。为了准确称量这类样品，首先要选择所用容器的形状和大小，例如，称量液体类样品，可选择加塞细颈瓶，从而减少样品的吸湿或挥发；称量固体或粉末类样品，则应给称量器皿加盖，隔绝样品对水分的吸收或挥发。为了减少样品吸湿性和挥发性的影响，应尽量减少称量时间，当天平称量过程刚结束，即指示称量过程的符号如小圆圈或小圆点一消失，立即记下天平显示值，以避免由于样品吸取水分或挥发水分而发生漂移。另外，要保持容器的清洁干燥以及天平称量盘的清洁干燥，不要粘有灰尘、污染物及水滴。

3. 样品和容器的静电现象

称量容器一旦带有静电，会导致天平示值长时间不稳定，无法稳定显示准确的称量结果，导致重复性降低。静电主要是由粉末状或颗粒状样品与这类绝缘容器摩擦而产生的，如果没有良好的泄放途径，这些静电就不能消除或者至少需要几小时才能缓慢地消除。为了消除样品和容器的静电，简单的办法是让三芯电源插座的接地端与地面有良好的接触，标准实验室尤其要注意，应该采用一根专门的接地线，埋入地面，然后将接地线引入电源插座的接地端。此外，还要注意选择不同材料的称量容器，尽量避免使用极易产生静电的塑料容器。玻璃容器在这方面的性能优于塑料容器，金属容器更好。

4. 磁性样品和容器磁化

称量被磁化的物体，由于磁性物体与不锈钢称量盘相互吸引，会产生多余的力被天平误以为是加载，影响称量的准确性，导致称量结果重复性差。这种称量现象很容易被发现，但用户往往忽视其产生的原因，或者误认为是天平自身重复性差的问题。解决这一影响的最基本思路是加大盛有样品的容器与称量盘之间的距离，减弱磁力的影响。最常用的办法是采用下挂秤盘，或者将样品放置在非磁性的支承物上，如高的玻璃量杯或铝、铜支架，从而加大样品与称量室内秤盘的距离。其他的方法还有，对样品和容器进行去磁，或者将样品放置在导磁良好的合金容器内，让其磁力线沿合金容器内壁形成自封闭，也可减少磁力的影响。

第二节 电磁力平衡式电子天平

一、工作原理

由于电磁力平衡式电子天平使用最为广泛，因此以该类电子天平为例，介绍电子天平的工作原理。电磁力平衡式电子天平的工作原理是基于通电导线在磁场中受到安培力的作用。当秤盘上放有被称量物体时，秤盘向下发生线性位移，触动电磁传感器，使原来处于平衡状态的两个光敏三极管在发光二极管的光量发生变化时产生电流，此电流经放大后反馈到磁铁内的线圈中，使受力增大，将秤盘托起，恢复至平衡位置。此时流经线圈的电流通过取样电阻时，产生电压降，电压值与被称量物体的质量成正比。电压信号经过放大、滤波等处理后，进行模/数转换。电流模拟信号转变成数字信号后，再经芯片处理，最终在显示器上显示出质量值。电磁力平衡式电子天平的输出信息处理示意

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com