

环境科学 测试设备和测量

〔美〕Z. A. 亨利 著

机 械 工 业 出 版 社

环境科学测试设备和测量

[美] Z. A. 亨利 著

余 群 冯纪明 等译

廉其杭 等校



机械工业出版社

本书第一章由冼福生、周祖锜、赵志鸿译校；第二章由马廷玺、钟宝瑜、张庆安、赵志鸿译校；第三章由丁至成、吴孔宝译校；第四章由丁至成、尹龙超、汪裕安、赵志鸿译校；第五章由吴孔宝、张家颀、杨存葆译校；第六章由冯纪明、王绍林、张庆安译校；第七章由孙士还、王绍林、杨存葆译校；第八章由陈侍良、曹崇文、周祖锜、吴孔宝译校；第九章由邱丽娟、曹正清、周一鸣、罗光荣、赵志鸿译校；第十章由冯纪明、罗光荣、吴孔宝译校；第十一章由冯纪明、王绍林译校；第十二章由唐荣麟、丁至成、王绍林译校；第十三章由冼福生、吴孔宝译校；第十五章由余群、朱一轨、王绍林译校，附录由朱一轨、罗曼仪、余群译校；全书由廉其杭审校。

**INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT
FOR ENVIRONMENTAL SCIENCES**

Z. A. Henry

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS

1 9 7 5

• • •
环境科学测试设备和测量

【美】Z. A. 亨利 著

余 群 冯纪明 等译

廉 其 杭 等校

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

· 重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 新华书店经售

*

开本787×1092 1/16 · 印张22¼ · 字数541千字

1986年9月重庆第一版 · 1986年9月重庆第一次印刷

印数 0.001—3.050 · 定价 5.25 元

*

统一书号：15033 · 5966

序 言

自动化过程的出现以及在农业和环境科学方面最新的科学进展导致对测量系统需求的急剧增加,有时对特定的问题还需要设计出专门的测量系统。对此不但十分需要以通常惯用的参数提供定量信息的方法和技术,更特别需要对迄今未曾定义过的新参数作出鉴定和估算。为满足这种需要,必需建立新的适用的标准测试设备,发展新的专门仪器和设计能恰当地提供信息的创新的测量系统。查阅一下任何一种专业性的科学期刊,例如美国农业工程师协会学报(TRANSACTIONS of the ASAE),在这一领域内陆续发表的文章,不难看出上述这种日益增长的需要。

为适应这种需要,在一些大学的农业工程学和其他环境科学的教学计划中设立了特殊测试设备的导论课程。

自从五十年代起美国农业工程师协会测试与控制学委员会就提出需要编写一部论述有关环境科学测试设备的教材和参考书。为开展这一工作提供素材,该委员会着手征集了一些侧重于测试设备方面重要的论文和提纲。其中一些论文已在美国农业工程师协会学报上发表过。随后,在六十年代初期,委员会又提出了一个专门的大纲,选出了一系列有特色的文章,提出作为编写一本测试设备参考书的组成部分。后来调查表明编写此书所需的材料也正是农业和环境科学领域中所需要的参考资料。委员会的一系列努力促成了本教程的编写。

编写本教程各章节的科学家是经过审慎选聘的,以便使本书有可能针对学生或科学工作者的需要,并能在教学、科学、研究和工业各方面提供最广泛的综合性专门知识。

本教程在编写中重视并强调测量系统与仪器具有同等的重要性,为此,教程题材的安排由以下几个逻辑部份组成。

1. 系统分析

书中有一章讨论“课题分析”,另有一章讨论“数据的分析和处理”。这部分内容强调适当地探讨特定的测量问题和恰如其份地估算所取得的信息的重要性。前一章排在本书的开头,处理测量的开始阶段。后一章排在本书的末尾,以强调正确地处理所取得的数据。

2. 主传感元件

对某一参数的测量以及感受代表该参数的信号的主元件是本书的一个重点。元件讨论的先后次序是由彼此的关联性决定的。某一测量有可能对其它测量是有用的,例如“应变”的感测对“位移、速度和加速度”,“压力”以及“流量”的测量通常是必需的;还有“温度”的感测不论对“水分”和“湿度”都是必需的。电磁辐射则随时是一个极端重要的领域。然而在介绍应用与效能时,对系统的计算和工艺却不作过多的讨论。书中也同时介绍了有关这一领域中一些近期发展起来的创新题材。

3. 信号匹配

由传感元件给出的信号作合宜的调节和馈送此信号输出设备,对每一测量系统都提出一

些特殊的问题。“信号处理——滤波、放大、计算和控制”、“无线电遥测”、“系统的响应”和“数字数据的采集”。各章是由不同的科学家根据他们的测量经验认为是必需的知识。这一部分的主要重点放在初级信号响应和对有效的测量系统所必需的有关电子学。

4. 数据输出与控制

处理数据输出的方法和设备的日新月异显示出迅速发展领域的一个方面。然而输出的类型通常并不影响基本测量系统，这里不作为一个基本重点加以讨论。但数据展现的形式是重要的。在“指示与记录”一章的讨论中使用了更为传统的数据输出处理方法。控制一个测量或操作系统通常是最初感受信号的一个主要目的，在处理“控制”一章时采取了更基本的探讨方式，这可能更便于在特定情况下加以引用。“控制”和前面提到的“数字数据采集”这两章主要是从逻辑电路角度进行讨论的。

贯穿整个教程还有一个着重点：即指出参考资料，这些资料给读者以更多的专题知识或者给出了所讨论课题的实际应用。在可能情况下系统的或方法的实例被作为本教程的组成部分对待，此外，每章的末尾编入了习题。

作者和美国农业工程师协会测试设备与控制学委员会认为本书并非对所需的各种知识无所不及，所以希望就任何一点提出建议和批评，包括指出再版时所需要的新的或应增加的内容。

Zachary A. Henry

Gerald C. Zoerb

Gerald S. Birth

1975. 7.

目 录

序 言

第一章 课题分析	1
一、制定实验计划	1
1. 明确课题任务	1
2. 误差分析	2
3. 探索性统计学设计	4
4. 测量精度与重复次数的关系	4
二、选择适合计划的仪器	4
1. 选择主传感器	4
2. 耦合	5
3. 选择输出设备	5
4. 校准	6
三、实施计划	6
1. 收集数据	6
2. 数据分析	6
3. 校验	6
4. 总结	6
第二章 应变	8
一、材料的性质和状态	8
二、应变测量设备的一般类型	12
1. 机械方法	12
2. 光学方法	13
3. 表面涂敷技术	13
4. 栅格技术	14
5. 电感应变仪	14
6. 电容应变仪	15
7. 电阻应变仪	15
8. 半导体应变片	15
三、应变片技术	18
1. 应变片的选择	18
2. 贴片	19
3. 检测仪器	19
4. 说明	23
第三章 位移、速度和加速度	26
一、位移测量	27

1. 机械位移传感器	27
2. 电位移传感器	27
3. 光学方法	31
4. 射流位移传感器	31
5. 旋转编码装置	31
二、速度测量	32
1. 机械式速度传感器	32
2. 电测速度传感器	32
3. 光学方法	33
三、加速度测量	33
1. 机械式加速度传感器	34
2. 电测加速度传感器	34
四、标定	35
第四章 压力和真空	38
一、机械式压力测量元件	39
1. 液柱式元件	39
2. 弹性元件	43
3. 弹性元件的误差	45
二、电测压力传感器	46
1. 应变片	46
2. 电容式压力传感器	49
3. 压电式压力传感器	50
4. 磁压力传感器	51
5. 电阻滑动接触式压力传感器	52
6. 其它类型压力传感器	52
三、低压力测量——真空度	54
1. 绝对压力计	54
2. 热传导真空计	56
3. 电离压力计	57
4. 超高真空压力计	57
5. 其它真空压力计	58
6. 真空计的标定	58
四、动态压力测量	58
1. 压力传感器的动态特性	59
2. 峰值压力计	60

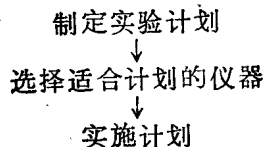
3. 动态标定	60
第五章 流量	64
一、前言	64
二、数量流量计	64
1. 测重式流量计	65
2. 测容积式流量计	69
三、速率流量计	72
1. 示差压头流量计	72
2. 文氏管	73
3. Dall流量管	74
4. 变面积的流量计	77
5. 变压头和面积的流量计	78
6. 力-位移的流量计	81
7. 力-动量(质量)	83
8. 力-速度流量计	84
9. 热力流量计	86
10. 化学稀释测定法	87
11. 特殊的测量方法	88
四、展望	91
第六章 温度	99
一、前言	99
二、热膨胀测温法	100
1. 双金属温度计	100
2. 玻璃管液体温度计	100
3. 压力温度计	101
三、热电测温法	101
1. 热电回路定律	102
2. 热电偶的选择	104
3. 延伸导线	105
4. 参考结	105
5. 热电偶测量仪器	106
四、电阻测温法	108
1. 电阻温度计	108
2. 电阻温度计的测量	108
3. 半导体温度计	110
五、辐射测温法	112
1. 全辐射高温计	113
2. 部分辐射高温计	114
3. 光测高温计	115
六、测量误差的来源和校正	115
1. 时间响应	116
2. 传导的影响	117
3. 辐射的影响	118

第七章 水分	122
一、水分和物料间的相互影响	122
二、取样	123
三、烘箱法	123
四、干燥剂法	124
五、蒸馏法	124
1. 甲苯蒸馏法	124
2. 布朗-达维耳蒸馏法	125
3. 德克斯特油液蒸馏法	125
六、化学法	125
1. 碳化钙法	125
2. 氢化钙法	126
3. 卡耳-菲舍法	126
4. 重铬酸盐法	126
七、气相层析法	126
八、电测法	127
1. 电导式测量仪	127
2. 电容式测量仪	128
九、分光光度计法	129
1. 光谱学技术	129
2. 红外光谱学技术	130
3. 微波波谱法技术	130
十、核方法	130
1. 核磁共振法	130
2. 中子散射法	131
十一、平衡相对湿度法	131
十二、空吸法	132
十三、摘要	133
第八章 湿度	140
一、原理	140
1. 大气中水蒸汽的度量单位	140
2. 饱和蒸汽压	140
3. 大气中水蒸汽量的表达	141
4. 汽液平衡的物理原理	142
5. 水蒸汽对辐射能的吸收	145
6. 光在空气中折射	146
二、湿度的测定	146
1. 湿度测定法	146
2. 其它湿度测定技术	154
第九章 电磁辐射——光	157
一、前言	157
二、术语	157
1. 光谱	157

2. 辐射的量子化	158	3. 二阶系统	233
三、辐射源	160	4. 其它的传递函数	235
1. 热辐射	160	二、系统分析	236
2. 电辐射	162	1. 频率响应法	236
3. 短波辐射	162	2. 控制	237
4. 化学辐射	162	第十二章 无线电遥测	242
5. 特殊的辐射源	162	一、前言	242
四、辐射的控制	167	二、无线电遥测技术	243
1. 几何条件	167	三、无线电遥测装置的基本原理	243
2. 波长的控制	169	1. 振幅调制	244
五、辐射的探测	170	2. 角调制	244
1. 目测法	170	3. 脉冲调制	245
2. 摄影术	172	四、发射机电路	246
3. 电探测器	172	1. 反馈振荡器	246
六、与物质的相互作用	175	2. 射频振荡器	247
1. 光滑表面	175	3. 调谐射频振荡器	247
2. 粗糙表面	177	4. 副载波振荡器	249
3. 天然材料	179	五、多路调制	251
七、应用	183	1. 分频	251
1. 环境辐射	183	2. 时间分割	252
2. 仪器	188	六、传输链	252
第十章 信号处理——滤波、放大、计		1. 选频	253
算和控制	200	2. 发射天线	254
一、无源电路及器件	201	3. 接收天线	255
1. 滤波器	201	4. 接收机	257
2. 相移网络	204	七、副载波鉴频器	257
3. 控制电路	205	八、电源	259
4. 计算电路	205	1. 电池	259
二、有源电路及器件	206	2. 其它电源	259
1. 运算放大器	206	3. 开关	259
2. 运算放大器的型式	207	九、在农业工程中的应用	260
3. 运算放大器的各种误差	207	十、总结	261
4. 运算放大器的基本方程式	209	第十三章 数字数据的采集	266
5. 控制电路	212	一、前言	266
6. 模拟	215	二、A/D转换器	266
7. 放大	215	1. 电气机械式A/D转换器	267
8. 有源滤波器	217	2. 频率型A/D转换器	269
9. 零件的选择	223	3. 电压型A/D转换器	269
第十一章 系统的响应	228	三、逻辑电路	271
一、系统模型	228	1. “与”逻辑	271
1. 通用的微分方程	229	2. “或”逻辑	272
2. 一阶模型	232	3. “非”逻辑	272

4. 组合的逻辑门电路	273	3. 磁头	297
5. 触发电路	275	4. 电子编码与译码——记录技术	298
四、实例	276	五、数字显示	300
1. 风向	276	1. 数字指示器	300
2. 风速	278	2. 电子计数器	301
第十四章 指示与记录	283	3. 模拟-数字转换器	301
一、电气指示仪表	283	4. 数字打印机和穿孔	302
1. 磁电系表头	283	第十五章 数据的分析和处理	304
2. 电动式仪表	285	一、试验误差	305
3. 电磁系仪表	286	1. 误差分析	306
4. 静电伏特计	287	2. 舍弃不适用的数据	307
5. 电量的热测量	287	3. 数据变换	310
6. 多用表	287	4. 测量精度的综合	313
7. 电子管伏特表	287	二、量纲分析	314
二、记录器	288	1. 概念	314
1. 直写式电流计记录器	288	2. 过程	315
2. 检流计光线示波器	289	3. 矩阵运算	317
3. 电位计记录仪	292	三、计算技巧	320
4. X-Y记录仪	293	1. 平均	320
5. 特种记录仪	294	2. 微分	322
6. 记录仪的选择	294	3. 峰值的检波	322
三、示波器	294	4. 概率分析	323
四、磁带记录仪	296	附录	326
1. 磁带	297	计算机控制词汇表	326
2. 磁带传动	297		

第一章 课题分析^①



一、制定实验计划

1. 明确课题任务

进行任何实验工作最重要的一个阶段是作出“有待完成的是什么”这一构思。这取决于研究者，而且开始也只能给出一些去完成这一重要工作的粗略的指导原则。有几种方法可以用来检验一个概念的正确性，最熟知的方法是“科学法”，这是一种归纳法。而“专门法”则基本上是一种演绎法在演绎法中用公式表达出支配系统本质的规律并赋以独特的约束条件。有时单纯用公式表示的内在关系还不够完备，还需要找出它的解。

在实验开始阶段最重要的步骤是拟定出所要解决的问题的具体规划。由于什么是重要的还不清楚，因此经验证明这是最困难的步骤之一。弄清以下三个因素有助于作出有效的规划。

- (1) 目标；
- (2) 手段；
- (3) 环境。

即使研究者对以上各个因素都心中有数，但将它们罗列出来以供深思熟虑是有点好处的。在这个阶段缺少什么资料一般是明显的，对大多数研究者来说弄清什么是要解决的问题和那些事物的本质是已知的。是一个反复过程。如图 1-1 的流程所示。

用公式表达出函数关系以后，求解过程是直接了当的。实验所希望达到的准确度是可以指定的，每一次测量所要求达到的准确度也可以按此要求加以确定。为了建立一个测量系统，这是需要预先做到的，因为仪器的选择取决于每一次测量所要求达到的准确度。准确度的估算方法将在误差分析部分进行讨论。然而如果在课题不是用演绎法推出并且不能建立一种函数关系时，那么就须要运用统计学方法。选定实验设计所依据的准则将在“实验设计”一章中讨论，不论用归纳法或演绎法所取得的结果都需要回答下列问题：

要求达到什么样的测量准确度？

测量的频繁次数如何取？

① 本章作者为：

K. A. JORDAN, Minnesota 大学农业工程系教授。

J. I. SEWELL Knoxville, Tennessee 大学农业工程系教授、副主任。

均为美国农业工程师协会会员。

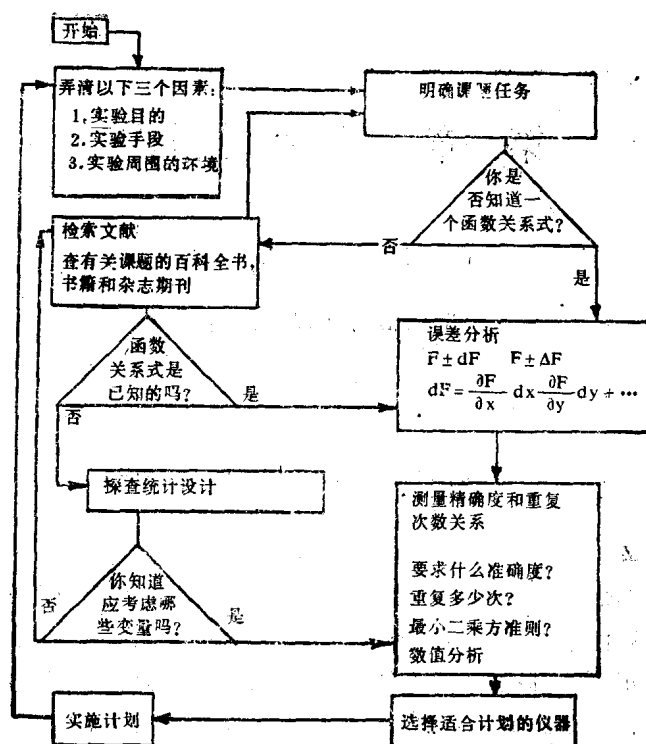


图 1-1 制定实验计划

2. 误差分析

在科学研究所取得的实验数据中测量误差和观察误差总是存在的。这些误差通常区分为系统误差、过失误差和偶然误差。系统误差对所有测量结果产生同样的影响，这种误差通常是由于仪器本身的不良和调整不正确而造成的。它们通常是能够校正的。过失误差通常是由于在仪表读数和记录时不仔细而造成的。偶然误差或称实验误差是由于一些不知道的原因造成的。这些误差一般不大并且常常构成一个正态总体。与误差分析有关的统计理论仅可处理偶然误差（实验误差）。

在一个实验中，实验装置可能产生的概率误差的期望值在实际应用中是十分有价值的。在实验设计中能应用这个资料估计测量需要重复的次数。

误差经常有不只一项组元，考察一个线性函数 F ，它有二项误差组元， x 和 y 。如果 F 的误差用 dF 表示，则

$$F + dF = F + \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy + \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} (dx)^2 + 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} dx dy + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} (dy)^2 \right] + \dots$$

这是一个泰勒数列展开式^[7]。假定测量误差不大，误差的较高次项通常可以忽略不计，则

$$F + dF = F + \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy$$

计算这些误差项绝对值的总和即可求出最大的可能的误差值。然而^[4]，用均方根综合这些项并且改写成有限差形式

$$\Delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \Delta y\right)^2}$$

如各组元的误差是独立的，这个公式给出了一个更逼真的误差值。这种分析能够推广到有任何个组元的情况。

一个实例：封装在壳体中的一个受热球和壳体间的净辐射热传递公式（用于标定 4π 辐射计—— $A_1 F_{12} = e\pi D^2$ ）可简化成

$$q = \pi \sigma e_g D_g^2 (T_g^4 - T_w^4)$$

由于 $\pi\sigma = 0.538 \times 10^{-8}$ ，这个公式可加以简化并计算如下

$$\begin{aligned} q &= 0.538 e_g D_g^2 [(0.01 T_g)^4 - (0.01 T_w)^4] \\ &= 29.6 \text{ 英热量单位/时} \end{aligned}$$

式中 D_g ——球的直径， 0.6673 ± 0.000833 （英尺）；

e_g ——校准球的比辐射率， 0.98 ± 0.02 ，（2%）；

T_g ——加热球的温度， 90°F ， $550 \pm 0.2\text{R}$ ，（0.04%）；

T_w ——壁温， 70°F ， $530 \pm 0.2\text{R}$ ，（0.04%）；

σ ——斯特藩-玻尔兹曼常数。

求偏导数值如下

$$\frac{\partial q}{\partial D} = 0.538 e_g 2 D_g [(0.01 T_g)^4 - (0.01 T_w)^4]$$

$$= 88.8 \text{ 英热量单位/时} \cdot \text{英尺}$$

$$\frac{\partial q}{\partial e} = 0.538 D_g^2 [(0.01 T_g)^4 - (0.01 T_w)^4]$$

$$= 30.22 \text{ 英热量单位/时}$$

$$\frac{\partial q}{\partial T_g} = 0.538 e_g D_g^2 \cdot \frac{4}{100} \left(\frac{T_g}{100}\right)^3$$

$$= 1.56 \text{ 英热量单位/时} \cdot \text{R}$$

$$\frac{\partial q}{\partial T_w} = 0.538 e_g D_g^2 \cdot \frac{4}{100} \left(\frac{T_w}{100}\right)^3$$

$$= 1.39 \text{ 英热量单位/时} \cdot \text{R}$$

计算每一误差项

$$\frac{\partial q}{\partial D} \Delta D = 0.074 \text{ 英热量单位/时 (误差: } 0.074/29.6 = 0.25\%)$$

$$\frac{\partial q}{\partial e} \Delta e = 0.604 \text{ 英热量单位/时 (误差: } 0.604/29.6 = 2\%)$$

$$\frac{\partial q}{\partial T_g} \Delta T_g = 0.312 \text{ 英热量单位/时 (误差: } 0.312/29.6 = 1.05\%)$$

$$\frac{\partial q}{\partial T_w} \Delta T_w = 0.279 \text{ 英热量单位/时 (误差: } 0.279/29.6 = 0.94\%)$$

从这里看出：当比辐射率误差为 2% 时能使净辐射热传递产生 2% 的误差，而当各个表面温度误差为 0.04% 时，能使辐射热产生 1% 的误差。同样重要的是这样一个事实：用适当方

法涂黑的球（黑色涂料覆盖以乙炔烟灰）可以保证在红外区内有 $\epsilon_g = 0.98 \pm 0.02$ 这是上面列出的数据之一。如果温度用热电偶进行测量，热电偶须经过仔细校准，如果不经仔细校准那么测出的温度的预期误差可达 $2F$ ，由此而引起的最后结果的误差将达10%。

这些考虑说明了在选择测量仪器时误差估计的价值。上述例子中，表面温度的测量不能用标准电位差计记录仪来进行，否则球体辐射系数的测量将是徒劳的。

测量误差和观察误差常常假定为典型的正态总体。然而应该有充分的误差总体的资料可用来证实这样的假定是有效的才能这样做。在误差总体的特征未知时，作出错误假定自然将导致错用统计方法。

例如，泊松分布可用于描述核辐射、热辐射、静电场以及其它各种形式的量，且吻合于泊松分布的步骤^{[7][9]}。

二项式分布，在仪器的数据分析中较少出现，在这种分布中的事件结果只有两种可能输出，如“是”和“否”^[10]。

有时，研究总体的分布是必要的。研究表明分布经常是偏斜的^[11]。

3. 探索性统计学设计

在开始作实验之前应当选择合适的统计学设计。有关实验的假定、变量、预期的响应和相互作用，计划重复的实验次数以及所有关于实验的有用知识都要在选择合适的设计时加以考虑，实验可以有多种设计方案，但是每个设计方案通常适合于特定的场合。选择错误的设计可能得出使人误解的信息或是无法探测到的响应。于是，在选择统计模型时实验知识和合适的统计学设计这两者都是需要的。关于统计学的设计方面的课本很多^{[8][9][10]}。

4. 测量精度与重复次数的关系

实验的重复次数与若干个因素有关。所要求的精度可能是其中最重要的因素。一般地说，测量或检测的响应越小，需要重复次数就越多。处理的次数也影响实验的精度，特别是在小型实验中更是如此^[10]对于单一样品这个关系式可表示为

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

式中 $s_{\bar{x}}$ ——平均值的标准偏差（标准误差或平均值的标准误差）， s 是标准偏差， n 是样品的个别测量次数。可见 $s_{\bar{x}}$ 是和 n 的平方根成反比。

实验的设计也影响实验的精度。设计的相对精度（相对效率）^[10]，并提出提高准确度的方法^[13]。给出了在一定 d 和 s 的范围内的最少重复次数的表格，其中 d 是新处理的平均值和标准处理平均值之间的观察差值。例如，当测量仪器的 s 是平均值的6%时，如果一位尾数试验以1%的有效位检测，若希望得到的 d 值为平均值的5%，则需重复47次。如果改进测试设备使 s 值仅仅只有平均值的3%，则只需重复13次就够了。在制定实验计划时这种探讨是有价值的。

二、选择适合计划的仪器

1. 选择主传感器

在以实验估算被研究系统的有效手段所限制的范围内确定了实验计划以后，必须对主传感器作出选择。不仅需要考虑主传感器而且还要考虑耦合件以及输出设备的适应性，这用图

解表示在图 1-2 中。

在选择中必须考虑所需要测量的准确度和测量次数以及费用。传感器必须与耦合件、输出设备以及所使用的其他传感器相适应。热电偶风速计可能在黑球温度计研究项目中使用，而杯形风速计可能更适合于小气候气象站使用。系统内部的相互作用也必须加以考虑。抽吸式干湿球温度计能够破坏细微的水分平衡，而露点装置将保持系统的含水量相对地无变化。有关选择主传感器的资料将在具体参数测量的章节中给出。

2. 耦合

来自主传感器的信号，不论是视觉的，机械的或电的信号，通常需要加以放大。主传感器可能需要由外部能源的激励以便指示出原始变量。由于电激励的重要性，因此用于耦合的电路将在单独章节中讨论。

即使在表现上没有耦合装置时，也必须考虑响应，保真度和负载。以水银温度计和电压表为例。温度急剧地增减在水银温度计上不能指示出来，电压的瞬变在电压表上也指示不出来，这是显而易见的。保真度表示测量系统反映所测变量的性能好坏。一个热电偶和一个自平衡电位计相连接通常其保真度是受到限制的。但是有时也希望瞬变信号得到某些衰减。在高频率常因使用滤波衰减外来噪音而使保真度受到限制。负载问题往往被忽视。一个高阻抗的耦合装置将限制负载，但为了传递最大功率应使阻抗匹配。由于在允许有电流流过测量电路时，热电势将下降，所以必须小心考虑热电偶高温计的负载。系统的校准是必需的。

随着模拟和数字计算机元件利用率的增长，信号调节变得越来越普遍。装有运算放大器的电路已有可能扩大滤波器的实用范围以及允许使用复杂的调节电路。通常可能把信号的解调和调制用于直流记录。传统的例子是应变仪装置。但是象平均值、方差和功率光谱密度等参数是可以计算的，而且在目前的许多研究可以用适宜的价格采用运算放大器。模拟-数字混合式计算机计算技术正在出现，并且在数据数字化以前尽量使用模拟调节能节省相当多的时间和费用。

3. 选择输出设备

测得的变量随实验可分成若干类。被研究的主要变量应当按时间间隔记录，而所取的时间间隔应对实验是有意义的。对影响实验但又是保持恒定的变量必须加以控制。但有些变量是不可能保持恒定的。对这些不可能保持恒定的变量数值必须加以测量并且按统计学方法消

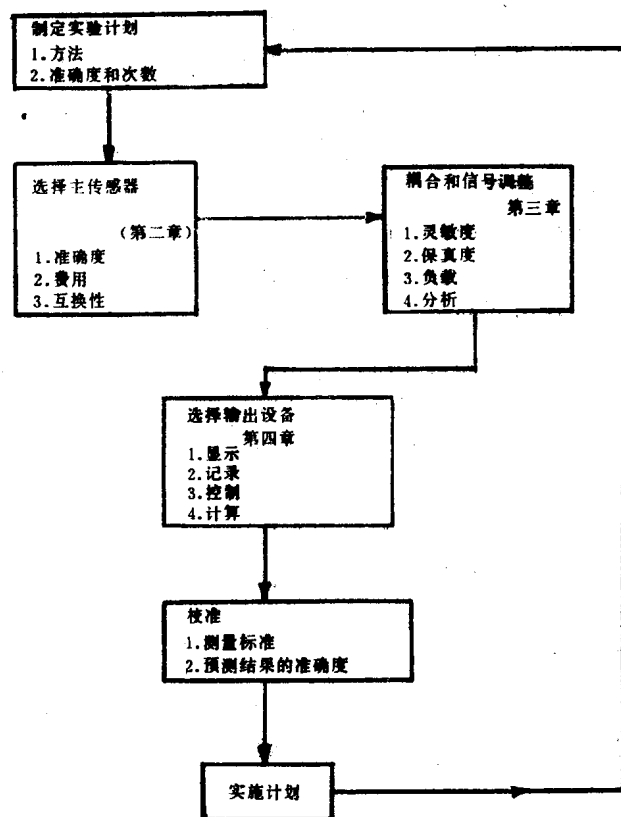


图 1-2 选择适合计划的仪器

除它们的影响。如果实验是时间的函数,变量应当是自动地记录。如果变量达到了某个数值或只是慢慢变化,就可以使用显示装置中的手动记录。随着快速数据显示装置的出现,用计算机处理记录大量数据已经成为现实可行的。在这种情况下,由于数据能自动地处理。因此,可以用更短的时间间隔记录数据并且可以把其他变量也记录下来。

4. 校准

测量系统选定以后,应对系统进行校准。最好采用一组已知的静态条件,加到传感器上并记录输出装置上的数值以待分析之用。当这样做是不可能的时候,测量系统中的每个组成部分都应当试验。这往往是由提供各组成部分的厂家来完成校准。一般还有必要另搞一个有较高精度的测量系统,该系统可作为与原始系统进行比较的标准。校准实验中取得的数据必须校准,系统误差要进行分析估算。

在校准仪器时经常采用回归分析^{[8][12]}。当在最小二乘回归分析中,通常假定自变量 x 在测量时是没有误差的,并且假定因变量 y 的变化与 x 无关^[8],于是通常把经过选择的或者受误差影响最小的变量作为自变量。对于任意校准曲线,预测的响应的准确度是需要注意的。最简单的校准曲线是直线回归^[8]。直线回归系数上确定置信界限的方法是可以抽样的回归系数的标准误差乘以“ t 分布”的适当数值而得。采用类似的程序也可以在直线回归线上建立置信带^[8]。

Deming^[4]提出了计算二次曲线的置信界或误差带的程序。Williams^[12]也概述了当容许界限在各个概率范围时的直线回归计算。

三、实施计划

1. 收集数据

在开始实验以前应检查所有的测量系统,是否能正确有效地工作。收集数据并准备分析,然而由于设备故障而引起的数据遗漏或不正确是经常发生的。决定重做实验或删除和改正数据必须十分慎重。

2. 数据分析

在分析数据时,由被选用的统计学设计所提供的程序通常应当适用于这些数据。有些数据往往有遗漏,或者是证据表明需要对数据进行改正。Snedecor和Cochran^[8]、Cochran和Cox^[8]叙述了数据遗漏时可以使用的方法,Deming^[4]概述了数据改正方法。

3. 校验

实验进行以后的一个最重要的步骤是检验结果的合理性。在设计中的假定或设备的失灵、错用,以及分析中的误差都能引起结果的不可靠。

4. 总结

在任何实验完成时,许多问题已经弄清楚了,这些已搞清楚的问题可以被实验者或其他人使用。随着对所研究系统的响应仔细的和估算,得出某些测得响应的主要原因的认识是可能的。如果提出的解释与公认的原理相反,则实验者可以构成一个为下一步试验的假设,并且用另外设计的实验来验证。如果实验结果证实了现有的概念,对数据可以扼要报导,这些程序表示在图1-3上。

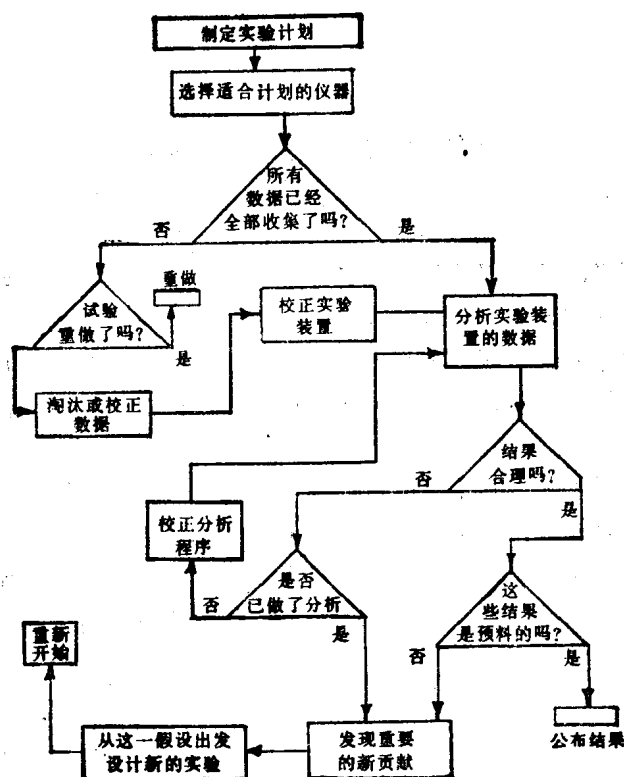


图 1-3 实施计划

参考文献

1. Anderson, R. L. and T. A. Bancroft 1952. Statistical theory in research. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York.
2. Churchman, C. W., R. L. Ackoff and E. L. Arnoff. 1957. Introduction to operations research. John Wiley and Sons, Inc. New York.
3. Cochran, W. G. and G. M. Cox. 1957. Experimental designs. John Wiley and Sons, Inc., New York.
4. Deming, W. E. 1943, Statistical adjustment of data. John Wiley and Sons, Inc. New York.
5. Ostle, Bernard. 1963. Sta.
6. Remington, Richard D. and M. A. Schork. 1970. Statistics with applications to biological and health sciences. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
7. Scarborough, J. B. 1955. Numerical mathematical analysis. The Johns Hopkins Press, Baltimore, Maryland.
8. Snedecor, G. W. and W. G. Cochran 1967. Statistical methods The Iowa State College Press, Ames, Iowa.
9. Sokolinkoff, I. S. and R. M. Redheffer, 1958. Mathematics of physics and modern engineering. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York.
10. Steel, R. G. D. and J. H. Torrie. 1960. Principles and procedures of statistics. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York.
11. Ver Plank, D. W. and B. R. Teare, Jr. 1954. Engineering analysis. John Wiley and Sons, Inc. New York.
12. Williams, E. J. 1959. Regression analysis. John Wiley and Sons, Inc. New York.

第二章 应 变^①

应变的研究和测量，是工程分析和设计中的重要方面。在工程语言中，“应变”一词是指线性变形，即物体尺寸的改变。而这种尺寸的改变，通常是由于外力的作用而引起的。在大多数工程应用中，单位应变（即单位长度内长度的变化量）比总应变具有更实际的意义。因此在单独使用“应变”一词时，通常是指单位应变。所以对于总应变往往要在“应变”的前面强调一个“总”字。

有时，应变的测量是为了它本身的目的而进行的。由于各个构件之间的空间关系，或因某些其他原因，能够预测建筑物或机器中所可能发生的总应变的大小是很重要的。但是，由于应变同应力有关系，所以通常单位应变是更为重要。“应力”是指物体所受的內力，这个內力能抵抗作用于物体上的外力或载荷。应变是应力作用的直接结果。同应变一样，单独使用“应力”一词时，通常指单位应力，即单位面积上所受的力。

物体的应变是基本的物理现象，而应力则具有导出的性质，它是不能直接测量的。但习惯上，通常用应力而不是用应变来表征材料承受载荷或力的能力。在工程设计中，很大程度上依存于应力分析。尤其是对复杂形状构件，应力分析常常是通过实验由应变分析来确定的。因此，应变的测量是应力分析很基本、很重要的方面。

通过对材料性质的认识，或者通过对已知外载的直接标定，也可将应变测量应用到传感器的使用中，以便对载荷、扭矩、压力或其他类似的物理量进行直接测定。

一、材料的性质和状态

为了获取良好的应变读数，并且根据应力应变关系，对这些读数做出正确的解释，就需要对材料的有关性质以及在应力作用下，材料的状态有所了解。在应变测量中，特别值得注意的材料特性是弹性模量 E 、热膨胀系数和泊松比 μ 。弹性模量 E 是材料的弹性常数，并且由虎克定律使应力 σ 和应变 ϵ 建立起关系式，即 $\sigma = E\epsilon$ 。当棒状材料受到轴向拉伸载荷时，在材料的弹性极限范围内，横向线应变与纵向线应变之比值，称为泊松比，并用符号 μ 来表示。工程上常用的一些重要材料的特性，数值列于表 2-1 中。

实验应力分析通常包括测量应变的过程以及根据应力和应变之间所存在的关系，由应变测量结果计算应力。这里预先假定了应力与应变之间存在一定的关系。该假定是以材料处于弹性变化为条件，这种弹性变化的通常特点是应力和应变之间存在单值线性关系。如果出现了非弹性情况，则应力不仅仅只与应变有关，而且与应变变化率、温度及时间等一些因素有关。具有单值而非线性应力应变关系的材料，会增加实验应力分析的困难程度。

① 本章作者为：

Charles M. Milne, 美国，蒙大拿州立大学农业工程系副教授。

Gerald C. Zoerb, 加拿大，萨斯喀彻温大学农业工程系教授。

均为美国农业工程师协会会员。