

工程师用的实验方法

(上册)

J.P. 荷尔曼

成都科学技术大学机械工程系

一九八〇年十二月

译者序

由于许多工科专业的新教学计划中都新设了《测试技术》这门课，而且许多专业课及专业基础课的新教材中，都有一些有关实验方法的问题，而过去这方面的教材又较少，特别是有例题和习题的教材就更少，所以为了满足教学需要，我们特组织了部分教师翻译了《工程师用的实验方法》一书。

本书的特点是内容比较广泛，每章都附有大量的例题和习题，使学生可以把理论和实践很好地结合起来。

本书由赵 炳、杨兴邦、杨凤鸣、高云钦、唐瑞云、陈必清、贾昭、刁克明、李治钧、石章林、刘学恕、吴再鸣、肖俊泽、张光涵、王适智、张成孝、周述易、黄宗南、吴荣珍、刘超、王德超、张志林、马长松、张流富、李燕等同志按专业分工翻译，由刘祖烈、王琳、赵安瑞、张凝、支鉴等人分别对其部分章节进行了审校，最后由赵 炳进行了总审校。由于时间仓促，边校边印，所以有一小部分名词术语没有完全统一，如“校准”与“标定”、“小时”与“时”等等，请读者原谅。原书中有个别错误之处，在译校过程中一经发现，即予以更正，但肯定还有未发现的错误，请读者发现后予以指正。

本书牵涉的知识面较广，加以译校水平又不高，因此在译校过程中肯定有不少错误之处，请读者不吝指正。

一九八〇年十二月

序

选读的书刊目录

第一章 绪言

第二章 基本概念

2-1. 前言

2-2. 名词定义

2-3. 校准

2-4. 标准

2-5. 量纲和单位

2-6. 一般测量系统

2-7. 动态测量的基本概念

2-8. 系统响应

2-9. 失真

2-10. 阻抗匹配

2-11. 实验设计

2-12. 写报告

第三章 实验数据分析

3-1. 前言

3-2. 实验误差的原因和类型

3-3. 误差的直观分析

3-4. 不确定性的分析

3-5. 实验数据的统计分析

3-6. 概率分布

3-2 高斯分布或正态误差分布

3-8 概率坐标纸

3-9 拟合优度的 χ^2 检验

3-10 最小二乘方法

3-11 均值的标准偏差

3-12 图解分析和曲线拟合

3-13 数据分析中的一般见解

第四章 基本电气测量和检测器件

4-1 前言

4-2 电磁力

4-3 波形的度量

4-4 基本模拟式仪表

4-5 基本数字仪表

4-6 基本输入电路

4-7 放大器

4-8 电源

4-9 信号加工

4-10 电子管压力表 (VTVM)

4-11 数字电压表

4-12 示波器

4-13 取样示波器

4-14 记录示波器

4-15 计数器——时间及频率测量

4-16 传感器

4-17 可变电阻传感器

4-18 差动变压器 (LVDT) 传感器

4-19 电容传感器

4-20 压电传感器

4-21 光电效应

4-22 光导传感器

4-23 光生伏打电池

4-24 电离传感器

4-25 磁力探测线圈

4-26 霍尔效应传感器

4-27 小结

第五章 位移和面积测量

5-1 前言

5-2 尺寸测量

5-3 块规

5-4 光学法

5-5 气动位移计

5-6 面积测量

5-7 面积仪

5-8 面积测量的图解法和数值法

5-9 表面积

第六章 压力测量

6-1 前言

6-2 动态响应的研究

6-3 机械式的压力测量器件

- 6-4 静重测试器
- 6-5 波登管压力计
- 6-6 薄膜压力计和膜盒压力计
- 6-7 布里曼压力计
- 6-8 低压测量
- 6-9 麦氏真空计
- 6-10 皮拉尼导热率压力计
- 6-11 努森压力计
- 6-12 电离真空压力计
- 6-13 α 离子电离压力计
- 6-14 总结

第七章 流量测量

- 7-1 前言
- 7-2 变容法
- 7-3 阻流法
- 7-4 阻流计的实际研究
- 7-5 音速喷嘴
- 7-6 用阻力效应测量流量
- 7-7 热线式及热膜式风速计
- 7-8 磁力流量计
- 7-9 流动显影法
- 7-10 阴影法
- 7-11 纹影法
- 7-12 干涉仪
- 7-13 激光多普勒风向仪

- 7-14 烟雾法
- 7-15 压力测头
- 7-16 超声速流动中的冲击压力
- 7-17 总结

序

实验测试可能是繁难的，一本关于实验方法的教材不可能解决使实验工程师为难的全部问题。工程教育已经强调了个人对问题进行理论分析的能力。实验方法并不是不重要的，但分析研究有时似乎更值得强调。在现代工程教学计划中，实验室工作也已经变得更成熟了。传统的实验课也在不断地现代化，包括用相当复杂的电子仪表的实验。但是，令人吃惊的是许多大学毕业生似乎并不能以满意的精度来进行简单的工程测量。更有甚者，当问到他们“测量有多么正确”这一问题时，他们表现得令人惊异的无知。

本书初步综述了适用于大学生的实验方法。因此，本书课题内容比较广泛，而对其中某些问题深度不够。在遇到这种情况时，读者可参阅某些专著中更详尽的论述，以便能进一步理解。

工程师要能进行成功的实验是重要的，而且同等重要的是他们应该知道或者估计出他们测量的精度。本书打算讨论相当广泛范围的仪表和测试技术。强调了解题方法并且在所有讨论中始终强调了测试中的精度、误差和不确定性。本书一般适用于传统工程教学计划中三、四年级一个学期的课程。这种课程应按书中内容每周进行一次实验课。为了补充实验工作，最好对教材中某些内容进行讲授。讲授课应该讲述仪表的原理，而实验课则应使学生有机会去使用书中讲到的一些设备以及准备本课程的教职工现有的其他一些设备。进行哪些实验以及实验课中要使用的设备决定于现有设备以及教学计划中预定的目的。为了推导，需要常微分方程方面的数学基础，并且以本教材为依据的课程应该有热力学、工程力学和电路理论方面的基础课作为先行课。

不管本教材用于什么样的课程安排，都要强调对每章末的习题加以

特别注意。这些习题将促使学生去测验几种仪器以便决定其精度，并且决定由于测试技术不佳而引起的不确定性。在许多场合下，习题都与教材中的数字例题很类似。其他一些习题则要求学生通过推导、设计实验等等把教材加以引伸。对一定的课程来说，习题的选择当然决定于实验的类型和实验室中能用于本课程的现有设备。

关于教材内容的安排还必须作几点说明。对所有课题都要作简要说明，以便能够在适用于一个学期的课程期间内讲述范围比较广泛的试验方法。第一、二两章讲述一些启蒙性的说明以及所有测量系统公用的重要名词的定义。然后在第三章中简要地讲述一些数据统计分析原理。第三章中的某些概念，特别是关于实验不确定性的概念，在本书以后的各章中都要用到。

第四章讲述几种简单的电气测量电路和一些典型电气传感器的工作原理。其中许多传感器都可用于以后各章中讲述的测量问题。讲述尺寸和压力测量的第五、第六两章，除了用一些数字例题和习题以强调在用各种设备时实验不确定性的重要性外，只是比较简单地叙述了这些课题。第七章中比较简要地讲述了流量测量。本章值得注意的一个特点是流量显影法那一节。也用了一些例题和习题来说明各种测试技术的一些优缺点。第八章的特色在于关于温度测量装置的讨论。特别强调了由于温度测量装置和其温度环境之间的传导、对流和辐射传热而可能引起的误差。提出了校正这些影响的方法。

第九章是简要的，但使读者深入理解与传热性测量有关的问题。本章内容取决于第六、七、八章中所讲述的测量技术。可以看出，第九章的内容可以分配到前面三章中去而仍能得到相同的效果；但是著者相信把它们集中在一章中以便更清楚地理解传热特性和热测量的作法更好一些。

在第十章中讲述静力、扭矩和应变的测量。应变测量与应力分析试验的某些基本原理有关，强调了电阻应变仪的使用。

第十一章讲述运动和振动测量装置的某些基本原理。本章还包括了关于声波、声压水平和声学测量的讨论。把声学内容放在第十一章中并不是非这样不可，因为把这些内容放在第六章中也同样适当。

第十二章讲述热辐射和核辐射的测量，它们在许多工业中都得到了日益广泛的应用。讲述是扼要的，但探讨了某些较重要的检测技术，还举了一些例子来说明重要原理。用计数法测定放射性的统计学的简短叙述，说明核辐射检测中背景放射性的重要性。热辐射测量与第八章中的材料有一定关系。

第十三章讲述空气污染控制所用的一些测量技术。这种测量应用了第六、七、八章中所讲述的压力、流量、温度的基本测量技术。在第十四章中一般性地讲述了电子学处理数据的重要性和它与第四章中基本电子测量装置的关系。由于电子微处理器和数据收集系统的领域变化很快，所以只能比较一般地加以讲述。

还必须说明一下关于单位的问题。毫无疑问，只要可能的话，职业性的工程界都迅速地趋向于采用SI制（公制）。因此，教育系统必须预见到这种趋势并教会学生使用公制。分析性课程（流体力学、传热学、力学等）可用公制作为主制，配以对老英制的适当换算。实验工程师的任务则可能更麻烦一些。他不会为了把刻度改为公制而去购买新的仪器、量器或仪表。通常是在旧仪器用坏后或有更好的仪器可用时，才更新旧仪器。这就是说，实验工程师将在“双重制”下工作许多年。有鉴于此，尽管作者个人希望尽快地改用公制，但还是在全书中采用了把公、英制混合使用的方式。工程师还会遇到另外一个问题。某些工程师要用公制系统中没有的公制单位来完成。例如能量中的卡，压力中的公斤力

／平方厘米。哎！是会碰到一些障碍的，而且必须尽可能去适应它。

在这个第三版中，各章里都增加了各种各样的参考书和最新引证。如前所述，在例题、习题和物性表中都采用了公、英制的混合。描述仪器性能的许多方程式中的重要参数，也列出了两种单位。其目的还是要使学生在测试工作中发挥作用。

第二章中关于温度标准一节已经更新并且加了公制一节。因为交流技术日益改善的缘故，报告写法一节的内容也大大扩展了。第三章中数据统计分析各节也增加了内容。鹿特丹大学的 Gajda, Jr. 重写了第四章和第十四章，以便反映数据的现代化电子收集和电子处理的实践，我对于他把这种材料和传感器特性的叙述合并为整体的工作表示感谢。

第五、六两章稍有修改，第七章扩大了对激光多普勒风速计测量的叙述。第八章增加了由于温度计部分的热传导引起的测量误差的修正，第九章对传热性测量的叙述作了一些修改。对第十、十一、十二章中的参考文献作了更新。第十三章中关于空气污染的测量完全是新的。附录中的材料性质用公制和英制单位表示。

尽管从写出和修改第一版以来，已经过去了几年，但是那时收集到的意见和有益的批评仍然对本书有重要的影响。斯坦福大学的 S. J. Kline 教授的评论特别有用，还要感谢以后由 W. S. Kut, W. L. Rogers, J. H. Dittfach, J. E. Blair 和其他人提出的建议。第一版的经费有一部分是由 G. A. Abbaitton 博士和南方宗教大学科学情报所提供的，在此对他们的帮助表示谢意。最后，作者与 Erich Soehngen 的许多次生动的讨论中所获得的见解，对本书所涉及的测试技术的重要性增添了不少的风味和评价。

显而易见，在篇幅不太长的一本书中，不可能包括读者感兴趣的试验方法的一切细节。为此，下面列出了选读的书刊目录，作为进一步学

习和参考之用。这个书刊目录主要包括了关于仪器和测量的一般情报的来源。任何专门领域内的测试技术，将在那些经常提供该领域内研究成果的杂志中找到。因此，读者应阅读这些专门参考文献，以便得到可能有时用到的新测试技术的情报。

选 读 的 书 刊 目 录

书

1. Ambrosius, H. H., R. D. Fellows, and A. D. Brickman:
"Mechanical Measurement and Instrumentation",
Ronald Press, New York, 1966.
2. Bartholomew, D.: "Electrical Measurements and
Instrumentation," Allyn and Bacon, Inc., Boston,
Mass., 1963.
3. Beckwith, T. G. and W. L. Buck: "Mechanical Measure-
ments," 2ded., Addison-Wesley Publishing Company,
Inc., Reading, Mass., 1969.
4. Cady, W. M.: "Physical Measurements in Gas
Dynamics and Combustion," Princeton University
Press, Princeton, N. J., 1954.
5. Cerni, R. H., and L. E. Foster: "Instrumentation
for Engineering Measurement," John Wiley & Sons,
Inc., New York, 1962.
6. Considine, D. M. (ed): "Process Instruments and
Controls Handbook," McGraw-Hill Book Company,
New York, 1957.

- 7 Cook, N. H. and E. Rabinowicz: "Physical Measurement and Analysis," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1963.
- 8 Dally, J. W., and W. F. Riley: "Experimental Stress Analysis," 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1978.
- 9 Doebelin, E. O.: "Measurement Systems: Application and Design," 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1975.
- 10 Dove, R. C., and P. H. Adams: "Experimental Stress Analysis and Motion Measurement," Charles E. Merrill Books, Inc., Columbus, Ohio, 1964.
- 11 Eckman, D. P.: "Industrial Instrumentation," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1950.
- 12 Hwing, G. W.: "Instrumental Methods of Chemical Analysis," 4th ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1975.
- 13 Frank, H.: "Electrical Measurement Analysis," McGraw-Hill Book Company, New York, 1959.
- 14 Keast, D. N.: "Measurements in Mechanical Dynamics," McGraw-Hill Book Company, New York, 1967.
- 15 Lion, K. S.: "Instrumentation in Scientific Research," McGraw-Hill Book Company, New York, 1959.
- 16 Schenck, H.: "Theories of Engineering Experi-

mentation," 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.

17. Tuve, G. L., and L. C. Domholdt: "Engineering Experimentation," McGraw-Hill Book Company, New York, 1966.

18. Wilson, H. B., Jr.: "An Introduction to Scientific Research," McGraw-Hill Book Company, New York, 1952.

19. Benedict, R. P.: "Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.

20. Bragg, G. M.: "Principles of Experimentation and Measurement," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1974.

21. Eckert, E. R. G., and R. J. Goldstein (eds.): "Measurements in Heat Transfer," McGraw-Hill Book Company, New York, 1976.

期刊

1. Control Engineering
2. Industrial Laboratory (USSR; English translation)
3. Instruments and Control Systems
4. Instruments and Experimental Techniques (USSR; English translation)
5. Journal of the Instrument Society of America
6. Journal of Research of the National Bureau of Standards

7 *Journal of Scientific Instruments* (Great Britain)

8 *Measurement Techniques* (USSR; English translation)

9 *The Review of Scientific Instruments*

10 *Transactions of the Instrument Society of America*

11 *Transactions of the Society of Instrument Technology* (Great Britain)

第 一 章 绪 言

实验是不容易的事情，也没有任何方法可代替在基本研究和应用生产发展各个领域中的严谨的实验方法。由于在工程技术的各个方面，实验方法是非常重要的，因此，对于工程师来说确实需要熟悉各种测量方法和整理实验数据的分析能力。

随着用于检测主要物理参量和控制过程变量的电子设备的发展，实验技术有相当迅速的改变。现在，在很多情况下，通过运用这些新的电子设备，对于基本物理量能测得更精确。由于在各种各样应用中对物理变量进行测量和控制日益增长的要求，测试技术的进一步发展肯定是十分迅速的。为了适应这种要求，工程师必须掌握测试仪器的基本原理和熟悉影响仪器发展及其使用的各种因素。

显然，为了进行成功的实验，必须熟悉很多工程原理，所以作实验是颇为困难的。为了设计实验，工程师必须能够详细说明所要研究的物理变量以及这些变量在以后的分析工作中所起的作用。其次，为了设计和采购实验所需要的仪器设备，工程师还必须了解许多不同仪器的使用原理。最后，为了分析数据，工程师必须同时具有对所研究的过程的物理原则的敏锐洞察力以及对数据的局限性的了解。

研究工作包括实验工作和分析工作的综合，理论家在根据多年来早已建立起来的基本物理原则作出的解析模型的基础上，力求解释或预测各种实验结果。当遇到实验数据不符合目前的物理原理的方案时，首先是怀疑实验数据，其次才是怀疑相应的理论。在某些情况下，在已确信数据正确后，为了把新的实验数据结果考虑进去，可对理论加以修正或修改。总之，所有的物理理论，最终都必须依赖于实验来验证。

无论是基本性质的研究工作，还是提高性质的研究工作，实验仍然

起到主要作用。正如一个工程师在研究一种新型电子线路或一个新的液压系统时，为了证实所研究的装置有用，一定要进行大量的实验一样，一个核物理学家，为了确信理论的正确，也总是要在实验室对理论进行反复检验。物理实验是大多数理论的基本实验。

在很多工程运用中，某些物理现象是已经熟知的，而且已经有了运用这些物理现象的装置的经验。例如真空管、流量表和某些机构。然而经常会有把这些装置和其他装置组合起来，而使其产生新的用途，例如新型放大器、新型流量控制系统等等。为了设计新用途的装置，工程师必须运用关于上述装置的可用经验。无论设计所依据的资料如何可靠，在设计定案和生产开始以前，工程师必须坚持对新装置进行彻底的实验检验。

可能要求工程师进行各种各样的实验和试验，可能从确定装置的重量的很粗糙的试验到测定原子核的放射性的一些非常精确的电子测量。由于实验范围是如此广泛，因此，为了在很多实验情况下能有效地工作，工程师在实验方面的基础知识必须是相当全面的。显然，要指望任何一个人在实验工作的各个领域都能有效地高水平地进行操作是不切合实际的。对某一个人来说，基本的能力必然应该致力于与他的分析能力和理论水平以及兴趣密切相关的那方面的实验工作。一个人的兴趣越广泛，就可能发展越广泛的实验能力。

在过去，有这样一些工程师，他们首先是经验主义者——这些人是通过反复的试凑方法来设计各种装置，而在实验之前则很少进行分析工作。在一些老工程领域中，这种方法仍然很流行，这主要由于多年的经验已经初步建立了某种可依赖的基础知识。但是在新的领域内，必须更加强调实验和理论的结合。我们可以举出火箭发动机的发展来作为一个太不合理的例子，可以制造不同规格的火箭并加以试验，直到找到一个