

美国大学测试技术经典教材

Mc  
Graw  
Hill

# 测量系统 应用与设计

(第五版)

Measurement Systems Application and Design

(Fifth Edition)

[美] Ernest O. Doebelin 著

王伯雄 等译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

<http://www.phei.com.cn>

美国大学测试技术经典教材

# 测量系统应用与设计 (第五版)

**Measurement Systems  
Application and Design (Fifth Edition)**

[美] Ernest O. Doebelin 著

王伯雄 等译

电子工业出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是美国大学测试技术设计与应用的经典教科书。全书共分三部分：第 1 部分讲解测试技术的原理概念；第 2 部分介绍各种测量仪器；第 3 部分论述有关测试数据的处理、传输和记录，以及 MATLAB 和 SIMULINK 计算机分析软件以及 DASYLab 实验室模拟软件在测试技术中的应用。全书内容丰富，并提供有众多的参考文献和网页，能使读者得到超出本书范围以外的广大资源。

本书可作为高等院校仪器、测控、机械、自动化等专业测试技术课程的教科书，也可作为相关工程技术人员的参考书。

Ernest O. Doebelin

Measurement Systems Application and Design

ISBN: 0-07-243886-X

Copyright ©2004 by the McGraw-Hill Companies, Inc.

Original Language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No Part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. And Publishing House of Electronics Industry ©2007

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和美国麦格劳-希尔（亚洲）出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签，无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字：01-2006-7671

## 图书在版编目（CIP）数据

测量系统应用与设计：第 5 版/（美）都布林（Doebelin, E. O.）著；王伯雄等译. —北京：电子工业出版社，2007.7

书名原文：Measurement Systems-Application and Design: Fifth Edition

ISBN 978-7-121-04612-4

I. 测… II. ① 都… ② 王… III. 测试技术 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 091533 号

责任编辑：杨丽娟 特约编辑：明足群

印 刷：北京牛山世兴印刷厂

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：787×1092 1/16 印张：51.5 字数：1318 千字

印 次：2007 年 7 月第 1 次印刷

定 价：68.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

## 译 者 序

由美国俄亥俄州立大学 E. O. Doebelin 教授所著的《测量系统应用与设计》一书是测试技术领域的经典著作。全书共分三部分：第 1 部分为测试技术的原理概念；第 2 部分介绍各种测量仪器；第 3 部分为有关数据的处理、传输和记录。全书内容广泛，涉及测试技术的各个领域。所介绍的测试方法和仪器之丰富是其他相关的著作所无法比拟的。在原理性介绍的同时，作者注重对测试方法的应用性介绍。因此，本书不仅适合作为大学的教材或教学参考用书，也被广大的科技和工程技术人员所应用。多年来历经再版，深受广大读者欢迎。

这本第五版的《测量系统应用与设计》在原有内容的基础上进行了更新。尤其在传感器和利用计算机进行测量和数据采集等方面增加了内容和篇幅。在本书的第 14 章增添了微纳米测量与测试技术方面的内容，介绍用于许多变量的微机电系统 (MEMS) 类传感器。这些都反映了本书内容的先进性和时代性，也是同类其他的书籍所没有的或少有涉及的。本书还增加了约 30% 的习题内容，在第 13 章添加了 MATLAB&SIMULINK 计算机分析软件和 DASYS Lab 实验室模拟软件的内容，读者可利用本书提供的软件和程序进行仿真，且能在很短的时间内掌握 DASYS Lab 技术，十分有利于读者对本书内容的学习和理解。另外书中提供了经过仔细选择的参考文献和网页，能使读者得到超出本书范围以外的广大资源，全书叙述的材料始终辅以详细的分析和设计信息。

本书长期以来为我国的科技和工程人员所使用，也作为一本教学参考书被广泛使用在许多大学的测试技术课程的学习中。因此，本书的翻译和出版十分有意义，必将对我国的测试技术、仪器技术、自动化和控制技术等领域的发展起到推动作用。

本书各章节翻译情况如下：第 5 版序言 (王伯雄)，第 1、2 章 (王伯雄)，第 3 章 (王伯雄，陈华成，张明照)，第 4 章 (余超，贾倩倩，史辉)，第 5 章 (蓝金辉)，第 6 章 (郝彦爽)，第 7 章 (张朝晖)，第 8 章 (王伯雄，贾倩倩，史辉，王瑞，张明照，郑汉卿)，第 9 章 (王伯雄，罗秀芝)，第 10、11 章 (王瑞)，第 12、13、14 章 (郑汉卿)。另外蓝金辉做了第 8 章和第 9 章的前期翻译工作。全书译文由王伯雄统一审校。

本书篇幅浩大，内容覆盖面广。由于译者水平有限，译文中错误和缺点在所难免，恳请广大读者批评指正。

译 者

## 作者介绍

Ernest O. Doebelin 分别在凯思理工学院 (Case Institute of Technology, 现已合并为凯思西部保留大学 (Case Western Reserve University) ——译者注) 和俄亥俄州立大学 (Ohio State University) 获机械工程学士、硕士和博士学位。早在俄亥俄州立大学攻读博士学位期间, 他就已经作为全时讲师开始从事教学工作了, 在那里执教 4 年。完成博士工作后, 继续作为助理教授从事教学。那时 (1958 年), 在机械工程领域还基本没有听说把控制作为必修课的, 但当时的系主任就鼓励 Doebelin 博士从事该课程的开发。多年来, 他开创并讲授了系统动力学、测量和控制等 8 门课, 授课对象从本科二年级学生到博士生, 并编写了课程教材。在这些课程中, 有 7 门课设有实验, 实验的建设均由 Doebelin 博士自己设计、指导和讲授。在其学术生涯中, 除了培养研究生助教外, 还一直讲授所有这些实验课。在一个通常能选择侧重教学而非完全研究的时代, 出于对写书的爱好, 他先后出版了 11 种教材: 动态分析和反馈控制 (1962); 测量系统 (1966); 系统动力学: 建模和响应 (1972); 测量系统, 修订版 (1975); 系统建模和响应: 理论方法及实验途径 (1980); 测量系统, 第 3 版 (1983); 控制系统原理及设计 (1985); 测量系统, 第 4 版 (1990); 工程实验 (1995); 系统动力学: 建模分析、仿真和设计 (1998); 测量系统, 第 5 版 (2004)。另外还编写了所有实验课的学生手册, 外加简明的、用户友好的软件手册。

在系统分析和设计中使用计算机技术, 从 20 世纪 50 年代的首批模拟计算机开始, 一直到今天无处不在的个人计算机, 并作为嵌入式软硬件用在控制和测量系统操作中, 这一点已成为他所有教材内容的一大特点。尤其要指出的是, 书中特别强调使用动态系统仿真软件作为一种有力的教学工具, 外加其在实际设计工作中的数字处理能力。这在一开始使用 IBM 公司的 CSMP 语言, 然后逐渐过渡到 PC 版本的 MATLAB/SIMULINK 语言。所有这些教材都尝试在理论概念和实际实现之间得到最佳的平衡, 采用种种例子来使读者熟悉实际系统的“积木块”, 在一个许多工科学生是“计算机头脑的”但却经常不知道能用哪些控制和测量硬件的时代里, 这一点尤为重要。

在一个侧重教学的职业生涯中, Doebelin 博士幸运地赢得许多奖励, 其中包括多个院系的奖励, 以及校级杰出教学奖 (每年从学校的全部教师中选出 5 名)。ASEE (美国电气工程师协会) 曾授予他“实验教学杰出奖”称号。1990 年退休后, 他仍然保持着一个全时的理论和实验教课计划, 但每年减为仅仅一个学期。他还以志愿者的身份为文科学校奥特本学院 (Otterbein College) 讲授“理解技术”课程 (Understanding Technology), 其目的是为了帮助普通民众解决全国性的技术文盲问题。成为一名政治/经济学爱好者, 是其退休后另一种“爱好”, 尤其关注各种新的全球化观点。

## 第五版序言

本书首次出版于 1966 年；在此我们来快速回顾一下本书在过去 38 年中的变化的情况也许是有用的。本书的原始前提是，测量科学和技术凭其自身的资格就是一个具有工程意义的领域，而不是属于诸如流体力学或振动等不同专业领域的一个附属物。因此，它有理由有其自己的课程和实验室，用它们强调了这一总的观点。但这并不意味着，在比如振动测量或热传递测量方面的专业课程不适合列在教学计划之中，相反，在这些课程之前（或至少在某点上），学生应该遇到过测量，把它作为学习和解决所有各类工程问题的一种基本方法。理解这种通才看法所需的背景有两个主要组成部分：测量系统的硬件和软件，以及实验分析的方法学。本书已经集中在这两者中的第一个上了，而在 1995 年，我在一本新书中讲到了第二个方面。<sup>[1]</sup>这一观点继续贯穿在第五版中。

在 1966 年，个人计算机尚是遥远的事情，但以一种“批量模式”被使用的大型计算机已经对工程和工程教育产生了重大冲击。随着计算机技术变得越来越普及，本书认识到这一趋势并增加了那些适合测量过程的计算机相关主题。这些主题包括测量系统动态响应的计算机仿真、方便的统计软件，以及在计算机辅助机器和过程中起关键作用的传感器。后一种应用领域在今天对上述测量的总看法已成为一个主要的明证。当今由工程师所设计的几乎每一台机器和每一个过程均使用着某种形式的由数字硬件和软件实施的反馈控制。每一个这样的系统包括一个或多个传感器，它们对于实施正确的系统功能来说是绝对关键的。一个没有接触到测量的“多面手”看法且由此来认识所用的装置和分析方法的设计者，他在“发明”一个新的过程或机器方面明显处于劣势。由于所需的计算机技术如此强大且价格合理，因此实现一种新的设计概念的主要障碍常常不在计算机方面，而是在传感器和执行器。尽管本书不是一本控制技术的书籍，但也始终包括对简单控制概念的使用，因为反馈控制系统使用传感器，而许多传感器则使用反馈原理（热线风速计、伺服加速度计、激冷反射镜式高温计等）。由于本书并不假定在之前已经有一门关于控制的课程，因此书中介绍了这些应用，这样使这些读者能理解它们。对这些动态系统有好的理解能够通过由功能强大的、容易使用的仿真软件所增加的简单描述来实现，这对某些人来说可能会感到吃惊。在这一版中，主要使用 MATLAB/SIMULINK 仿真来提供这种有效的学习工具。

从 1966 年开始，本书就提供大量篇幅来阐述测量系统动态响应的系统动力学观点。这一点最初受到作者讲授不同程度的系统动力学课程以及撰写几本有关该领域的教科书的影响<sup>[2]</sup>（对 1972 年出版的书进行了修改并在 1988 年扩展了内容<sup>[3]</sup>）。当早期在教学计划中包括有一门系统动力学课程时，在后面的应用课程中，比如控制、振动、测量系统、飞行器动力学、声学等，便可应用并且加强这一总的背景。这种教学计划的设计是有效和有用的，因为基本系统动力学仅仅需要被介绍一次，而其后的应用课程可以更加深入地渗透进它们的专

<sup>1</sup>E. O. Doebelin, "Engineering Experimentation: Planning, Execution, Reporting," McGraw-Hill, New York, 1995.

<sup>2</sup>E. O. Doebelin, "System Dynamics: Modeling and Response," Merrill, Columbus, OH, 1972; "System Modeling and Response: Theoretical and Experimental Approaches," Wiley, New York, 1980.

<sup>3</sup>E. O. Doebelin, "System Dynamics: Modeling, Analysis, Simulation, Design," Marcel Dekker, New York, 1998.

业内容中，并在同时加强学生对以前材料的理解。尽管我相信所要求的系统动力学课程服务于这一有价值的功能，但本书的某些读者并不具备这种准备。因此，本版和以前的几版以浓缩但有效的形式提供所需的背景材料。目前的这一版继续强调频谱方法，在所有适用的地方使用 MATLAB（比如 FFT）软件。

本新版中保留了原始的、分为三个主要部分的组织形式：

1. 一般概念
2. 测量装置
3. 数据处理、传递和记录

在这一结构框架中，目录给出一个详细的细分，教师可依据课程教学需求选择教学内容。对一个未来的使用者（教师或学生）来说，尽管本书的篇幅看起来有些吓人，但我们不难浏览全书内容并做出选择。我们在俄亥俄州立大学面临一种类似的情况，其中将本书用于 3 门课程：2 门必修课，1 门选修课。第一门必修课有一个 4 小时的实验和 3 小时的分开讲课，用于一个（3 个月）学期共 5 个学分。讲课的分量可能重于一门典型的测量课，因为我们选择包括一个应用统计学和有关技术交流（书面的和口头的）方面的大量材料的“小型课程”。这两个主题是从我的《工程实验》一书的内容来讲授的，该书有详细的覆盖范围。统计学材料用于总的应用性目的，并不仅为测量环境安排，因为在教学计划中的其他地方不再教授统计学。对一门单独的课程要求采用两本教科书（《测量系统》和《工程实验》）似乎也太昂贵了，但这两本书也用在紧接本课程之后的一门必修的“专题实验”课中，因此总的费用也不是不合理。第三门课只使用《测量系统》一书，该课程是高年级本科生和研究生的一门选修课，它在第一门必修课的基础上从深度和广度上加以扩展。如果《测量系统》对一门单独的课程显得内容太多，但请想一想，大多数学生在他们毕业后可能会遇到对这类信息的需要，用于设计经常需要传感器和关联信号处理的计算机辅助系统，或用于实验设计/研发项目。如果他们通过在课程中学习书中的某些部分而熟悉了本书，这将成为他们工程实践的有用资源，这一特点是其他不太综合的教科书所没有的。

许多测量系统的一个重要部分是数据采集和处理软件，通常在一台个人计算机（台式机或笔记本电脑）上实现。在编写以前的版本时（20 世纪 80 年代末），个人计算机还刚刚出现，尚未能够广泛得到相关的数据采集软件。第 4 版的第 14 章简单介绍了 AD 公司（Analog Devices）专门为数据采集和控制应用——该公司希望利用的一个未享用但很向往的市场——所设计、建造和推销的一个个人计算机/软件系统（MACSYM）。我们得到了几套这种系统用于教学和研究，并在当时，这些系统能很好地满足需要。对 AD 公司来说不幸的是（该公司是相当成功的，且继续忙于其他的产品生产线），个人计算机很快就成为一个大市场，价格一落千丈，使得 MACSYM 系统尽管技术上出色但经济上没有出路。许多用于个人计算机设计采集和控制的软件产品相继出现，并在今天竞争该重要的领域。当然，最出名和最广泛使用的是国家仪器公司（National Instruments）的 LABVIEW，许多工程教育家将该产品应用于教学/研究，特别是因为该公司提供了很好的教学折扣价格。对个人来说，他不可能全面练习然后来评价所有能得到的该类软件，因此，判断是否适合于本科生教学的目的似乎便被染上了个人的经验和爱好的色彩。根据我自己的调查和从我实验室里的学生那里取得的经验，我的结论是，DASYLab 软件在教学和许多工业应用上具有显著的优点。国家仪器公司可能也认识到了这种潜能，因为它们最近收购了生产 DASYLab 产品的德国软件公司。

本版的第 13 章着重介绍 DASyLab, 本书的每个拷贝均提供有该软件的一个版本。当然, 这一版本不允许它使用实际的传感器, 但所有 DASyLab 版本的有用特点之一是一种仿真操作模式, 能容易和快速地建立起数据采集系统的整个软件部分, 并用任何所需种类的仿真传感器信号来试验。这样, 我们就能够在连接外部传感器、放大器之前开发和“调试”软件。这一特点也使 DASyLab 成为一个不被超越的教学工具, 因为每个学生在采用专门的系统测量软件之前, 都能快速试验用于一个特定应用的任何想法。我发现, 学习 DASyLab 的过程要比学习 LABVIEW 的过程快得多, 因此你不用上整个课程来学习该系统; 可容易地把它结合到任何现有的测量实验中去。另外, 尽管有时以一种“黑箱”模式来使用 LABVIEW (其中教师或研究生来编程, 而本科生只是使用所产生的系统来收集数据), 但采用 DASyLab, 即使很高级的系统, 仅仅练习过几个小时的本科生也可以来组建。在第 13 章中, 我尝试过使这一最初的经验对读者更有启发性。从与工业界的接触中, 我听到许多公司也正在发现 DASyLab 是非常物有所值的, 即使对相当复杂的应用也如此。我相信, LABVIEW 经常被应用方面的程序员所使用, 他们不做其他的任何事情, 也即他们花费了全部的时间来为某个复杂的测量/控制系统或为使某种商业仪器(如一个电流计)实现自动化来开发高级的软件。每个出售的电流计均包括该软件; 因此, 编程费用(时间和钱)被分摊在许多仪器上了。当你一次又一次地使用着该软件(LABVIEW)时, 你为此得到一条较长的学习曲线是值得的, 且由于每天都使用它, 就不会忘记如何使用。另外, LABVIEW 的通用性使它能处理那些可能会让一个不太综合的软件包无法对付的情况。当然, 如同用任何类型的软件那样, 这种通用性的代价是其复杂性。然而, 大多数机械工程师并非编程专家, 相反, 他们偶尔需要开发一个数据采集系统, 且是在一种“一次性”基础上, 这意味着学习曲线必须短, 且在不再使用该软件达数月之后再次回忆起它来时应该快。我相信 DASyLab 能以最优的方式满足这类要求。希望读者至少能试试它, 从而再做出自己的判断。

本书主题覆盖面的详细情形可从目录中快速查阅。另外, 我尽了很大努力做了一个综合的索引, 因此当寻找一个专门条目时可尝试用它。对以前版本的使用者, 也许有必要在此提一下那些更重要的改动(比如我们刚讨论过的第 13 章)。第 14 章也是新的, 在该章中, 我决定集中于一个特定的行业, 以便表明测量系统是怎样用在其中的。在许多的可能性中, 我挑选了集成电路和 MEMS 制造。它们极大地依赖于微纳米制造工艺, 其中使用:

- 扫描探针显微镜
- 真空系统分压分析器
- 微运动测量与控制
- 污染粒子测量系统和超净室
- 磁悬浮传送器

来制造微电路以及微尺度的传感器和执行器。对所列主题领域的每一个均做了详细考察, 并确认了测量技术对它们的贡献。[在本书合适的地方也对 MEMS 型传感器(压力传感器、加速度计、红外成像器、质量流传感器等)进行了讨论。]

除了第 13 章和第 14 章以外, 在第五版中还有许多重要的修改和补充, 外加许多小改动, 因太多在这里不再一一列出。重要的改动包括:

1. 彻底更新了有关标定和不确定度计算的材料, 以反映 ISO 和 NIST 的最新地位。
2. 用 MATLAB/SIMULINK 更新了仿真例子来替代过时的 CSMP, 增加了装置仿真的用法作为选择传感器的一种辅助手段。



3. 包括进了传感器融合(“辅助滤波”),结合飞机高度和姿态的传感例,还包括使用观测器用于不可接近变量测量的内容。

4. 增加了对参考资料和硬件制造商的脚注和因特网地址。

5. 解释了标定精度与安装精度间的关系。

6. 解释了如何采用叠加图来决定一个实验是否正确或与理论相矛盾。

7. 增加了测量系统误差对质量控制决策的影响内容。

8. 在所有可应用和能有启发性的地方均使用了 MINITAB 统计软件。

9. 讲述了计算机辅助标定和测量中的多重回归技术。

10. 讨论了在所有物理变量中由本征噪声波动引起的一种噪声底限的概念。

11. 增加了经典的幅值比和相位的频率响应图以及延时图,使之能更容易地判断精确频率范围。

12. 讨论了磁阻式和霍尔效应运动传感器。

13. 扩展了有关电容运动传感器的内容。

14. 增加了使用运动控制系统用于位置传感器和其他元件的内容。

15. 扩展了使用高速胶片和视频摄像机用于运动研究的内容。

16. 增加了使用转速表编码器、激光器和微波(“雷达”)方法的速度传感内容。

17. 扩展了对“非经典”陀螺,如陀螺芯片和光纤类陀螺的讲解。

18. 增加了全球定位系统用在测量应用方面的内容。

19. 包括了对一个测力传感器详细的材料力学分析,增加了有限元研究和实验验证。

20. 包括了采用富士压力薄膜、荧光漆,以及“交叉”型压阻传感器阵列测量压力分布的方法的内容。

21. 增加了分析流体流动的粒子成像速度测量法的内容。

22. 修改了压缩流孔板流量测量的内容。

23. 更新和修改了涡轮流量计的流量测量内容。

24. 改正了基本热电偶原理中的一个概念错误。

25. 更详细地讨论了热辐射探测器,增加了非冷却式微热辐射计成像系统内容。

26. 更新了热通量传感器的材料。

27. 彻底修改了有关模拟电微分法的设计例。

28. 增加了采用 MATLAB FFT 方法实施数字离线动态补偿的内容。

29. 去除了用在光线示波器中的电流计内容,但增加了用在运动控制系统中的电流计的使用内容,如激光扫描器。

30. 增加了对普通的  $\Sigma$ - $\Delta$  模拟/数字转换器的讨论。

31. 彻底修改了射频遥测法一节内容,增加了更现代的无线技术,如蓝牙(Bluetooth)技术。

32. 增加了一节“仪器可连接性”内容。

33. 修改了有关条形图、 $xy$  记录仪和电流计记录仪的章节。

34. 包括进了虚拟仪器的概念。

35. 增加了一节关于电流和功率测量的内容。

对改动所作的最后一点评论是关于题解手册方面。这是我的第 11 本工程类教科书,对前面的十本,我始终倾向于提供一本题解手册。这一怪僻并非由于我的懒惰,而是有关于我

所重视（无论对还是错）的某些“哲理”的位置。（在这里不想用这些来加重你的负担，但我始终愿意与任何一位想听的人来一起讨论。）有出版商总是对我解释，而我也同意，缺少一本题解手册将肯定会失去人们对本书的某些选用。对本书来说，出版商表明，这次要有一本题解手册，无论是由我还是另外一个人来做该手册。面对这一情形，我决定，如果必须要有一本题解手册，我要求它是一本好的题解手册，因此决定亲自去做它。没有研究生或本科生做帮手，我自己做照相，包括所有问题和插图。我希望该书有用，但由于我第一次这样来做这件事，欢迎大家提出意见和批评。

通过谨慎地选择主题，《测量系统》和《工程实验》两本书被广泛使用，无论是个人还是集体。对大学一年级课程来说，该课程介绍学生接触工程并使用一个动手实践的实验室，可能还包括某种装置的“逆向工程”，进而展示工程问题的两种主要的解决途径（理论和实验），《工程实验》一书能提供许多有用的阅读作业。这些作业包括对统计观点和方法的一种容易理解的和实践上有用的介绍、实验在设计和开发中的作用，以及对笔头和口头交流的指导。在教学计划中，我们常常发现已经完成了与某个理论课联系在一起的实际或在某些理论课之后出现的单独实验。当一个实验集中于一个专门领域时，比如振动，那么《测量系统》便能够提供有关合适的传感器、信号调理，以及数据采集和处理软件所需的背景。当然，这种用途仅仅采用本书的一部分材料，因此花费便成了一个问题。可能有也可能没有一本专门有关振动的合适测量书籍，但这本书似乎也是昂贵的。如果一个教学计划有多个这样的专业实验，《测量系统》便似乎具有所有这些实验所需的材料。这种情况下，你就会希望对教科书的要求进行协调，这样学生仅购买一本书便可用于所有的实验。如果某些实验包括了统计方法、实验设计和技术交流内容，《工程实验》一书的价格很可能便被“分摊”到几个课程上。如果像在俄亥俄州立大学那样，你难以“挤入”数学或统计学系中所开设的一门统计学课程的话，由《工程实验》所提供的“小型课程”可以被嵌入一个或几个实验中，且能提供在数学系的介绍中所经常缺乏的一种实际观点。

许多教学计划现在都包括一门或多门强调设计的“支柱”课程，并给予学生实践机会来应用他们以前学习过的专业课程内容。在俄亥俄州立大学，有两门这样的专业必修课程：一门关于设计；另一门有关实验方法。目前，我们正在试验另外的途径，采用一系列课程/实验使学生能设计、建造和实验验证一个机器或过程。这些题目常常是由我们的工业赞助者建议的，他们与学生和教师交互作用来提供一种更具实际工程实践的经验。这些赞助商提供某些设备或装置，以及某些经济资助。对专门针对实验的课程或对包含实验作为一个重要组成部分的系列课程，《工程实验》一书可以由《测量系统》一书加以补充，提供有用的内容。

如前所述，我相信最佳的组织是在教学计划的某处提供一门一般的测量实验/课程，其中将测量科学技术介绍为一个其本身确为重要的工程领域。对这样一门课，《测量系统》一书是一个很好的选择，根据课程所倾向的内容和范围以《工程实验》作为补充。即使对这样一门课，由于本书的深度和广度，有必要仔细选择学生的作业，这一点实际上做起来比较容易，因为可供选择的内容很多，从中可满足大多数的要求。在俄亥俄州立大学，如果有一门更高级的测量系统课程（可能是选修课，为四年级学生和/或研究生开设），那么《测量系统》将再次为广人的需求提供所需的材料。对这门高级课程，我在过去的数年里开发了一些作业题和大作业，由于它们篇幅大，没有把它们包括在任何一本我的书籍中，而是提供在一本当地印刷的手册中。在教该课时，除了每周布置的作业外（有些是来自《测量系统》书，

有些来自该手册), 我还布置一个“大作业”, 该大作业占了学期的大部分时间。手册除了所要求的学生作业外, 还提供广泛的背景注释。目前手册中包含三个这样的大作业:

1. 初步设计一个黏度计;
2. 传感仪器和机器用的隔振方法;
3. 设计一个振动柱超精密压力传感器。

手册中的某些“每周”作业题属如下的领域:

1. 对一个载波放大器系统的理论和仿真研究;
2. 为一个降落试验振动机选择加速度计;
3. 热电偶的动态补偿;
4. 相关函数用于管道泄漏检测;
5. 传感器融合 (“辅助滤波”);
6. 调频 (FM) 传感器和数字集成;
7. FFT 法用于传感器动态补偿;
8. 基于振动管试验采用 FFT 分析法来记录压力传感器动力学特性。

如果有教师需要一份该手册的拷贝, 请与我联系 (电话: 614-882-2670) 来安排获得这些材料, 但是要“照原价”收费。我没有一个电子拷贝。

# 目 录

## 第 1 部分 一般概念

<b>第 1 章 不同种类的测量仪器应用</b> .....	3
1.1 为什么要研究测量系统 .....	3
1.2 测量应用分类 .....	4
1.3 计算机辅助机器和过程 .....	7
1.4 结论 .....	7
习题 .....	7
参考文献 .....	8
<b>第 2 章 测量仪器的广义化结构和功能描述</b> .....	10
2.1 仪器的功能元件 .....	10
2.2 有源传感器和无源传感器 .....	13
2.3 模拟和数字工作方式 .....	15
2.4 归零法和偏移法 .....	15
2.5 仪器和测量系统的输入-输出结构 .....	16
干扰输入和修正输入的校正方法 .....	19
2.6 结束语 .....	28
习题 .....	28
<b>第 3 章 仪器的广义化性能特征</b> .....	30
3.1 序言 .....	30
3.2 静特性和静态标定 .....	30
静态标定的意义 .....	30
被测值与真值的关系 .....	32
基本统计学知识 .....	34
最小二乘标定曲线 .....	40
标定精确度与安装精确度的关系 .....	46
在总的系统精确度计算中组合元件误差 .....	49
用实验试验来验证理论 .....	53
测量误差对制造中质量控制决策的影响 .....	54
静态灵敏度 .....	56
计算机辅助标定和测量: 多次回归 .....	58
线性 .....	63
阈值、噪声底限、分辨率、迟滞和死区 .....	64

刻度可读性 .....	67
跨度 .....	67
广义静态刚度和输入阻抗: 负载效应 .....	68
关于静特性的结束语 .....	76
3.3 动特性 .....	77
测量系统的广义数学模型 .....	77
动态响应分析的数值仿真方法 .....	78
算子传递函数 .....	79
正弦传递函数 .....	80
零阶仪器 .....	81
一阶仪器 .....	82
一阶仪器的阶跃响应 .....	84
一阶仪器的斜坡响应 .....	89
一阶仪器的频率响应 .....	91
一阶仪器的脉冲响应 .....	94
二阶仪器 .....	97
二阶仪器的阶跃响应 .....	99
二阶仪器的有限斜坡响应 .....	100
二阶仪器的斜坡响应 .....	103
二阶系统的频率响应 .....	103
二阶仪器的脉冲响应 .....	104
空载时间元件 .....	106
频率响应曲线的对数坐标图 .....	107
一般形式的仪器对周期输入响应 .....	112
一般形式的仪器对瞬态输入的响应 .....	117
幅值调制信号的频谱 .....	125
随机信号的特性 .....	134
保证精确测量而对仪器传递函数提出的要求 .....	146
使用计算机仿真选择传感器 .....	149
动态数据的数字修正 .....	152
测量系统参数的实验确定 .....	152
动态条件下的负载效应 .....	158
习题 .....	161
参考文献 .....	166

## 第 2 部分 测量装置

<b>第 4 章 运动和尺寸的测量</b> .....	171
4.1 概述 .....	171
4.2 基本标准 .....	171

4.3	相对位移: 平动和转动 .....	173
	标定 .....	173
	电阻式电位计 .....	175
	电阻应变片 .....	182
	差动变压器 .....	191
	同步器和分解器 .....	199
	可变电感式和可变磁阻式传感器 .....	202
	涡流非接触式传感器 .....	205
	电容传感器 .....	207
	压电传感器 .....	215
	光电装置 .....	221
	照相成像技术和电子成像技术 .....	236
	光弹性、脆性涂层及莫尔条纹应力分析技术 .....	241
	位移-压力(喷嘴挡板)传感器 .....	242
	数字式位移传感器(平动式编码器和旋转式编码器) .....	247
	超声波传感器 .....	253
4.4	相对速度的测量——平动和转动 .....	255
	标定 .....	255
	采用位移电压信号的电微分得到速度 .....	256
	从测量的 $\Delta x$ 和 $\Delta t$ 得到平均速度 .....	256
	飞球(离心)机械角速度传感器 .....	258
	机械转数计数器和计时器 .....	259
	转速计编码器方法 .....	259
	基于激光的方法 .....	260
	雷达(微波)速度传感器 .....	261
	频闪法 .....	262
	平动速度传感器(动圈式传感器和动铁式传感器) .....	262
	测量转速的直流测速计发电机 .....	263
	测量转速的交流测速计发电机 .....	264
	涡流托杯式测速计 .....	265
4.5	相对加速度测量 .....	266
4.6	地震式(绝对)位移传感器 .....	266
4.7	地震式(绝对式)速度传感器 .....	269
4.8	地震式(绝对式)加速度传感器(加速度计) .....	270
	偏转型加速度计 .....	271
	零位平衡(伺服)式加速度计 .....	278
	用于惯性导航的加速度计 .....	282
	加速度计对试验物体的机械负载 .....	282
	激光多普勒振动计 .....	282

4.9 振动传感器的标定 .....	283
4.10 冲击传感器 .....	286
4.11 摆式(重力参考式)角位移传感器 .....	287
4.12 陀螺仪(绝对式)角位移和速度传感器 .....	290
4.13 坐标测量机 .....	301
4.14 表面光洁度测量 .....	307
4.15 机器视觉 .....	312
4.16 全球定位系统(GPS) .....	318
习题 .....	319
参考文献 .....	325
<b>第5章 力、力矩和轴功率的测量 .....</b>	<b>326</b>
5.1 标准和标定 .....	326
5.2 测力基本方法 .....	327
5.3 弹性力传感器的特性 .....	332
粘贴式应变片传感器 .....	336
差动变压器式传感器 .....	340
压电传感器 .....	340
可变磁阻/调频振荡器数字系统 .....	343
负载效应 .....	344
5.4 矢量力和力矩分解为直角分量 .....	345
5.5 转轴力矩测量 .....	350
5.6 轴功率的测量(测功计) .....	355
5.7 陀螺力和陀螺力矩测量 .....	357
5.8 振弦力传感器 .....	357
习题 .....	358
参考文献 .....	361
<b>第6章 压力和声的测量 .....</b>	<b>362</b>
6.1 标准和标定 .....	362
6.2 压力测量的基本方法 .....	364
6.3 静重压力计和流体压力计 .....	364
流体压力计的动态特性 .....	369
6.4 弹性传感器 .....	376
6.5 振动缸和其他谐振传感器 .....	388
6.6 体积和连接管的动态效应 .....	389
液体系统, 强阻尼, 慢作用 .....	389
液体系统, 适度阻尼, 快作用 .....	391
管体积为室体积: 小部分的气体系统 .....	394
管体积与室体积具有可比性的气体系统 .....	396

无限长管线压力探头 .....	396
结论 .....	397
6.7 压力测量系统的动态试验 .....	397
6.8 高压测量 .....	402
6.9 低压(真空)测量 .....	403
膜片压力计 .....	403
麦克劳压力计 .....	405
努森压力计 .....	406
动量传递(粘度)压力计 .....	407
热导率压力计 .....	407
电离压力计 .....	410
双压力计技术 .....	411
6.10 声测量 .....	411
声级计 .....	412
麦克风 .....	414
电容麦克风的压力响应 .....	417
声强 .....	425
声发射 .....	427
6.11 压力信号多路复用系统 .....	427
6.12 其他专题 .....	429
压力分布 .....	429
压力计和传感器的过压保护 .....	431
习题 .....	431
参考文献 .....	433
<b>第7章 流量测量</b> .....	<b>434</b>
7.1 局部流速的大小和方向 .....	434
流体可视化 .....	434
用皮托静压管测量的速度值 .....	436
用偏航管、回转叶片和伺服球测量的速度方向 .....	443
动态风矢量指示仪 .....	446
热线和热膜风速计 .....	447
热膜冲击管速度传感器 .....	458
激光多普勒风速计(LDA) .....	459
7.2 总体积流率 .....	462
标定和标准 .....	462
定面积、变压降仪表(“阻塞”式仪表) .....	465
平均皮托管 .....	474
恒压降、变面积仪表(转子流量计) .....	475
涡轮流量计 .....	477



容积式流量计 .....	480
计量泵 .....	482
电磁流量计 .....	483
阻力流量计 .....	486
超声波流量计 .....	486
涡街流量计 .....	491
其他主题 .....	493
7.3 总质量流量 .....	495
体积流量计加密度测量 .....	495
直接质量流量计 .....	498
习题 .....	504
参考文献 .....	506
<b>第8章 温度和热流测量 .....</b>	<b>508</b>
8.1 标准与标定 .....	508
8.2 热膨胀法 .....	513
双金属温度计 .....	514
液体玻璃温度计 .....	515
压力温度计 .....	516
8.3 热电传感器(热电偶) .....	518
普通热电偶 .....	524
参考结的考虑 .....	526
特殊材料、结构和技术 .....	528
8.4 电阻传感器 .....	535
导电传感器(电阻温度计) .....	535
体半导体传感器(热敏电阻器) .....	540
8.5 结半导体传感器 .....	543
8.6 数字温度计 .....	546
8.7 辐射法 .....	546
辐射原理基础 .....	547
辐射探测器:热型和光子型 .....	551
非斩波(直流)宽带辐射温度计 .....	560
斩波(交流)宽带辐射温度计 .....	564
斩波(交流)选带(光子)辐射温度计 .....	565
自动零平衡辐射温度计 .....	568
单色亮度辐射温度计(光学高温计) .....	568
二色辐射温度计 .....	570
顶端黑体光纤辐射温度计 .....	571
荧光光学温度测量 .....	573
红外成像系统 .....	574