



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

现代机械工程系列精品教材

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



Fundamentals of
Measurement Techniques for
Mechanical Engineering

机械工程测试技术基础

第④版

熊诗波 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

机械工程测试技术基础

第4版

主 编 熊诗波
副主编 熊晓燕 柳亦兵
参 编 武 兵 姚爱英 杨洁明 郝惠敏

机械工业出版社

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材、“十三五”国家重点出版物出版规划项目——现代机械工程系列精品教材。按照教育部和国家新闻出版广电总局的要求，总结了编者多年来的教学经验以及许多高校使用本书的反馈建议，特对教材第3版进行了修订。

修订中删除了第3版的“计算机测试系统与虚拟仪器”一章，增加了“测量仪器与数字接口”和“智能仪器与虚拟仪器”两章，并对章节顺序和一些章节的个别内容做了调整和修改。

本书仍保持注重物理概念和工程应用的阐述、重点突出、条理清晰和分析透彻的优点，以便于师生的教与学。

本书内容包括：绪论，信号及其描述，测试装置的基本特性，常用传感器与敏感元件，信号的调理与记录，信号处理初步，测量仪器与数字接口，智能仪器与虚拟仪器，位移测量，振动测试，声学测量，应变、力与扭矩测量，流体参量测量共十二章。

本书可作为高等学校机械类专业及相近专业本科生的教材，也可供大专和成人教育相关专业选用，还可作为有关专业高等学校教师、研究生和工程技术人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

机械工程测试技术基础/熊诗波主编.—4版.—北京：机械工业出版社，2018.7

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代机械工程系列精品教材
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-111-59610-3

I. ①机… II. ①熊… III. ①机械工程-测试技术-高等学校-教学参考资料 IV. ①TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 065937 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：刘小慧 责任编辑：刘小慧 王 荣

责任校对：张晓蓉 封面设计：张 静

责任印制：孙 炜

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2018 年 9 月第 4 版第 1 次印刷

184mm×260mm·20.75 印张·509 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-59610-3

定价：53.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

第4版前言

本书第3版出版至今已11年，这期间机械工程测试的理论与技术和其他工程技术一样得到了快速发展。为适应机械工程类专业教学的需要，并参考读者使用中的意见与建议，对第3版进行补充与修订。

与第3版相比，第4版除了章节顺序有所调整外，还删除了第3版第十一章“计算机系统与虚拟仪器”，增加了第7章“测量仪器与数字接口”和第8章“智能仪器与虚拟仪器”。此外，对第3版的第八章“声与声发射测量”（现为第11章）和第十章“流体参量的测量”（现为第13章）也做了一些修改。

本书由熊诗波主编，熊晓燕、柳亦兵为副主编，参加编写的有武兵、姚爱英、杨洁明、郝惠敏等。

限于编者水平，书中疏漏之处在所难免，希望同行专家和读者不吝指教。

编者

第3版前言

20世纪是一个伟大的世纪,就制造业而言,各种各样的先进制造技术层出不穷,用这些技术制造了汽车、机床、机器人、飞机、火箭、计算机、电视机、移动通信设备等成千上万的机电产品,极大地改变和丰富了人类的生产和生活方式。而在这个过程中,机电产品本身也发生了重大变化,20世纪50年代数控机床的发明揭开了机械发展史上新的一页,标志着机械制造业向着信息化迈出了第一步。随后,以计算机技术、网络技术、通信技术为代表的信息技术被广泛应用于制造业的各个领域。于是信息这一要素取代历史上在制造系统占主导地位的物质和能量两大要素,而上升为制约现代制造系统的主导因素,并成为现代制造业中最重要的资源。进入21世纪,信息在制造业的作用更显重要,而试验和机器运行中的测试则是获取信息,特别是准确、定量信息的重要手段。

现代机械设备与机电系统的大型、大功率化和小型、精密或微型化是其发展的两个主要方面,但不论何种设备,大多是集机械、电子、信息、控制为一体的复杂机电系统。与这些设备的创新设计、运行监测、故障诊断与维护以及其他全寿命过程相关的问题,将涉及多学科理论知识和现代工程试验技术。鉴于问题的复杂性,现代工程试验显得尤其重要,试验开发已经成为机械工程领域创新设计过程中的一个不能回避的重要方面,也是获取信息的重要途径,同时经试验研究所获取的知识又不断地支持了设计的理论体系。

我国机械制造业远远落后于世界发达国家,特别是在高技术含量、大型高效或精密、复杂的机电新产品开发方面,缺乏现代设计理论和知识的积累,试验研究和开发能力较弱,停留在引进与仿制国外同类产品阶段,大部分关键机电产品不能自主开发和独立设计,仍需依靠进口或引进技术。造成这种情况的重要原因之一是缺乏掌握现代设计理论知识、具有试验研究和创新开发能力的人才。

在机械制造业信息化和创新型人才培养中,测试技术和测试技术课程起着极为重要的作用。因此,20世纪五六十年代以后,在国外许多大学中,测量和仪表课程受到高度重视。我国在1978年正式将“测试技术”课程列入各机械类专业教学计划,20世纪80年代初出版了各专业的测试技术教材。在此基础上,于1985年统编出版了《机械工程测试技术基础》,被广泛用作机械类专业的技术基础课教材。1994年出版了《机械工程测试技术基础》(第2版)。该书第1版出版至今已近20年,第2版出版也已12年。经过20年来的教学实践,全国高校广大“测试技术”课程的教师积累了丰富的教学经验,对本教材提出了许多宝贵的意见和建议,特别是几年前我国新专业目录的公布实施,几个机械类专业合并为“机械设计制造及自动化”一个专业,课程内容也做了相应的调整,因此有必要在此基础上重新审视本书的全部内容,做一次全面的修改。况且从第2版至今,随着科学技术的飞速发展,“工程测试”作为一门技术科学也有了长足的发展,也有必要对它做一次大面积的更新,于是编写出版《机械工程测试技术基础》(第3版),以适应机械工程学科教学改革的需要。

自机械类专业设立“测试技术”课程以来,教材内容几经变革,但20多年来的教学经

验证明,定位于技术基础课这一课程性质,并注意本课程特有的实践性、多学科交叉和与其他课程的衔接,以此来决定本教材的深度、广度和内容取舍是合适的,这也是本次重新修订的指导思想。

“测试技术”是测量与试验的统称,教材也理应包含这两方面的内容,但兼顾国内各类高等学校的实际情况和多年来的教学传统,本次修订仍沿用前两版的做法,只安排测量技术的内容。至于试验技术的内容,读者可参阅本书第2版编者于2000年出版的另一本教材——《机械工程测量和试验技术》。

修订后,本书仍是一部适用于高等学校各类机械设计制造及其自动化、机械工程及其自动化及相近专业的教材,也可作为有关专业研究生和从事机械工程测试的工程技术人员自学、进修用的参考书。

与第2版相比,除了各章内容编排、具体写法都有较大的变动外,同时增加了第八章“声与声发射测量”,并用新的第十一章“计算机测试系统与虚拟仪器”来代替原来的第十章“计算机辅助测试”,以适应当前科技的发展。

本次修订的第3版由熊诗波教授、黄长艺教授主编,程珩教授级高级工程师、李文英教授、杨洁明教授、熊晓燕副教授、郑渝副教授、马怀祥教授、博士生武兵参加编写。

作为教材,应当吸取各方面的观点和科研成果,因此本书在修订过程中,参阅了书后所列的许多文献,从中受益匪浅,在此特向有关作者深表谢意。尤其要对我们过去的合作者——《机械工程测试技术基础》(第2版)、《机械工程测量与试验技术》的全体作者表示深深的谢意,因为本书多处引用了两书的内容或观点。

限于编者学识和经验,本书疏漏之处在所难免,望同行专家和读者不吝指教。

编者

第2版前言

在1978年前后,测试技术作为专业课开始列入部分机械类专业的教学计划,先后出版了一批试用教材,如《机械制造中的测试技术》(黄长艺、卢文祥编)、《液压测试技术》(熊诗波主编)、《试验技术》(丁汉哲主编),等等。这批教材适应了当时教学改革和科学技术发展的需要,对以后的课程建设、教材建设和师资培养有着深远的影响。

随着教学改革的深入,教学经验的积累,对测试技术课程在高等工业教育中的作用和地位有了新的认识。1985年该课程被确认为重要的技术基础课。十多年来,由于各类教学实践的广泛开展,测试技术课在培养学生、改造专业和促进科技发展等方面的重要作用得到公认,并受到普遍的重视。许多高校纷纷将该课程列为本科教学中的主干课程和研究生的学位课程,并切实加强师资和改善实验条件,以提高其教学质量。在这种形势下,《机械工程测试技术基础》应运而生,于1985年出版,并为多种学制、多种专业所采用,深得广大师生和工程技术人员的欢迎。曾多次重印,发行数量较大。该书1991年荣获第二届全国高等学校机电、兵工类专业优秀教材二等奖。但在科技飞速发展和教学改革不断深入的今天,为了反映十余年来教学实践的新经验和教学研究新成果、吸取新技术和修改初版的缺点,修订该书显然是十分必要的。为此,机械工业部高等工业学校机电兵工类机制专业教学指导委员会“测试技术”课程教学指导小组和全国高校机械工程测试技术研究会曾做过多次研究和具体安排。

修订后,本书仍是一部适用作高等学校各种机械设计、机械制造、机械电子工程类专业以及相近专业的教材,也可作为有关专业研究生和从事机械工程测试技术的工程技术人员自学、进修用的参考书。

和初版相比,第2版在内容增删、具体写法等方面均有较大的变化。首先是各章的内容和具体写法都有较大的改动,以期能更好地适应大多数学校的教学需要和更便利学生的自学,其次,新增了“计算机辅助测试”一章。关于是否编入微机在测试中应用的内容和如何编写,自1984年初编写本书以来,就有各种不同的意见。几年来,微机已广泛用于科研和教学中,新版编入这方面的内容是必要和可能的。至于如何编写才合适,也只有通过实践并从中总结经验的办法来加以解决。现在书中的写法是在充分考虑计算机在测试中应用的实际、教学的方便和许多教师的意见的基础上提出的,我们希望以此推动计算机技术和测试技术的结合。

多年教学实践表明,各校的教学计划,特别是教学要求、课时数和课程安排次序有很大的差异。因此,任课老师可根据本校专业的特点、课时数的多少和前行课程来适当地删减、调整 and 补充教学内容,以便适应本校的教学实际。我们设想,一般可以讲授第一~五章为主,而后在其余各章中再选讲一、两章即可。

测试技术是一门实践性很强的课程,为了保证教学质量,必须开设适量的实验。有关本课程教学实验的内容,可参阅配套教材《机械工程测试技术基础实验》(杜润生、王崇义编,机械工业出版社出版)。

参加本书第2版编写的有北京机械工业学院翁善惠、上海交通大学洪迈生、华中理工大学卢文祥、重庆大学梁德沛、山西矿业学院熊诗波、厦门大学黄长艺等教授和浙江大学陆乃炎、南京理工大学梁人杰、清华大学吴正毅等副教授。由厦门大学黄长艺和清华大学严普强教授主编，最后由黄长艺教授统稿。

本书第2版由烟台大学施雄茂教授和华北工学院潘德恒教授主审。

本书在编写过程中，得到机电部高等工业学校机电兵工机制专业教学指导委员会“测试技术”课程教学指导小组各位委员的指导，得到全国高校机械工程测试技术研究会广大会员的支持，在此一并表示衷心的感谢。

作为教材，势必应当吸取各方面的观点和成就，因此本书在编写过程中，参阅了许多文献，尤其是书后所列的文献，从中得益匪浅，在此特向有关作者致谢。

由于编者水平所限，书中肯定存在诸多缺点和错误，恳切希望读者批评指正。

编 者

第1版前言

本书系根据1983年4月机械制造(冷加工)类专业教材编审委员会的测试技术教材编审小组筹建组扩大会议所审订的《机械工程测试技术基础课程大纲》而编写的试用教材,适用于高等学校各种机械设计和机械制造类专业,也可作为从事机械工程测试技术的工程技术人员自学、进修用的参考书。

“机械工程测试技术基础”是一门技术基础课。本书前七章着重介绍从事测试工作,特别是动态测试工作所必需的基础知识。这部分内容包括:测试信号的描述、分析和处理,测试装置的静、动态特性的评价方法,常用的传感器、中间转换电路及记录器的工作原理及其特性。

为了加深对上述基础知识的理解,本书后几章介绍了几种典型参数的测试方法。这部分内容可以看作是上述基础知识的应用举例,不同的专业可以根据其教学要求从中选择一章进行讲授。

书中标以“*”的章节可视为参考、补充的内容。

本书由华中工学院等11所院校的有关教师协力编写。参加编写的有齐永顺、翁善惠、洪迈生、卢文祥、吴正毅、蔡鹤皋、陆乃炎、梁德沛、施雄茂、戚昌滋、熊诗波等同志,由清华大学严普强和华中工学院黄长艺主编。

本书由唐统一教授和程高楣教授主审。参加审稿的还有邬惠乐、邓延光、艾茂生、冯国华、郭之璜、张松涛、杨仁逖、傅庭和、杜永祚、孙鲁杨等同志。

本书在编写过程中参考了一些兄弟院校的讲义和资料,并得到许多同志的关心、帮助和指正,谨表谢意。本书在正式出版前,为了满足部分院校的使用要求,也为了更广泛地征求意见,曾由“全国高校机械工程测试技术研究会”组织印刷“试用本”。但由于时间紧迫,未能广泛汇集试用意见进行修改。恳切希望教师、学生和读者对本书的内容编排、材料取舍以及书中的错误、欠妥之处提出批评、指正和修改意见。

严普强 黄长艺

1984年11月

目录

第4版前言	
第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
第1章 绪论	1
1.1 测试技术概况	1
1.2 测量的基础知识	4
第2章 信号及其描述	19
2.1 信号的分类与描述	19
2.2 周期信号与离散频谱	23
2.3 瞬变非周期信号与连续频谱	29
2.4 随机信号	40
第3章 测试装置的基本特性	46
3.1 概述	46
3.2 测量装置的静态特性	50
3.3 测量装置的动态特性	52
3.4 测量装置对任意输入的响应	61
3.5 实现不失真测量的条件	62
3.6 测量装置动态特性的测量	64
3.7 负载效应	67
3.8 测量装置的抗干扰性	68
第4章 常用传感器与敏感元件	73
4.1 常用传感器分类	73
4.2 机械式传感器及仪器	76
4.3 电阻式、电容式与电感式传感器	78
4.4 磁电式、压电式与热电式传感器	94
4.5 光电传感器	106
4.6 光纤传感器	115
4.7 半导体传感器	119
4.8 红外测试系统	125
4.9 激光测试传感器	130
4.10 传感器的选用原则	133
第5章 信号的调理与记录	137
5.1 电桥	137
5.2 调制与解调	143
5.3 滤波器	150

5.4	信号的放大	158
5.5	测试信号的显示与记录	162
第6章	信号处理初步	167
6.1	数字信号处理的基本步骤	167
6.2	离散信号及其频谱分析	168
6.3	相关分析及其应用	175
6.4	功率谱分析及其应用	182
6.5	现代信号分析方法简介	188
第7章	测量仪器与数字接口	192
7.1	概述	192
7.2	测试信号采集的基本原理与装置	193
7.3	插卡式测试系统	201
7.4	仪器前端及控制	203
7.5	测量系统的数字接口	208
第8章	智能仪器与虚拟仪器	213
8.1	概述	213
8.2	智能仪器简介	214
8.3	虚拟仪器与软件	218
第9章	位移测量	228
9.1	概述	228
9.2	常用的位移传感器	229
9.3	位移测量的应用	234
第10章	振动测试	239
10.1	概述	239
10.2	惯性式传感器的力学模型	240
10.3	振动测量传感器	245
10.4	振动测量系统及其标定	255
10.5	激振试验设备及振动信号简介	258
第11章	声学测量	264
11.1	概述	264
11.2	声测量传感器与仪器	270
11.3	声发射测量传感器与仪器	274
第12章	应变、力与扭矩测量	279
12.1	应变与应力的测量	279
12.2	力的测量	285
12.3	扭矩的测量	291
第13章	流体参量测量	298
13.1	压力的测量	298
13.2	流量的测量	309
参考文献		322

第1章

绪论

1.1 测试技术概况

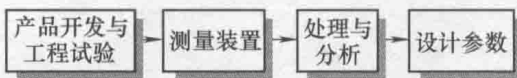
1.1.1 测试和测量系统

测试技术是测量和试验技术 (Measurement and Test Technique) 的统称。试验是机械工程基础研究、产品设计 (特别是创新设计、动态设计和控制系统设计) 和研发的重要环节。在现代机电设备的研发和创新设计、老产品改造以及机电产品全寿命的各个过程的研究中, 试验研究是不可缺少的环节。在工程试验中, 需要进行各种物理量的测量, 以得到准确的定量结果。当然, 不仅是各类工程试验需要测量, 机器和生产过程的运行监测、控制和故障诊断也需要在线测量。这时, 测量系统大多就是机器和生产线的重要组成部分。一般来说, 测量系统的用途如图 1-1 所示。本书的主要内容是测量技术和仪器 (Measurement Technology and Instrumentation)。关于试验技术, 读者可参阅相关书籍。

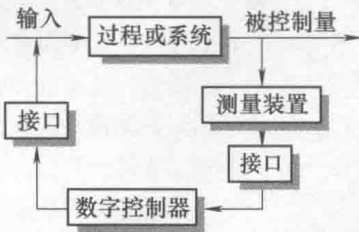
工程测量可分为静态测量和动态测量。静态测量是指不随时间变化的物理量的测量, 例如机械制造中通过被加工零件的尺寸测量, 试图得到制成品的尺寸和形位误差。动态测量是指随时间变化的物理量的测量, 也是本书的主要研究对象。

在产品开发或其他目的的试验中, 一般要在被测对象运行过程中或试验激励下, 测量或记录各种随时间变化的物理量, 通过随后的进一步处理或分析, 得到所要求的定量的试验结果。在运行监测或控制系统中, 实时测量的各种时间变量则用于过程参数监视、故障诊断或者作为控制系统的控制、反馈变量。不同的用途对测量过程和结果的要求也不同, 例如在反馈控制系统中, 可能要求测量系统的输出以很小的滞后 (理想的情况是没有滞后) 不失真地跟踪以一定速率变化的被测物理量。如果只要求不失真地测量和显示物理量的变化过程, 则对滞后就没有要求。因此, 用途和要求不同, 测量系统的组成环节及其构成方式也不同。本节只讨论测量系统的一般构成。而不同测量环节的原理、特性及系统构成细节将在以后各章讨论。

测量系统的一般构成如图 1-2 所示。



a) 产品开发与工程试验过程



b) 过程与系统控制



c) 监测与诊断

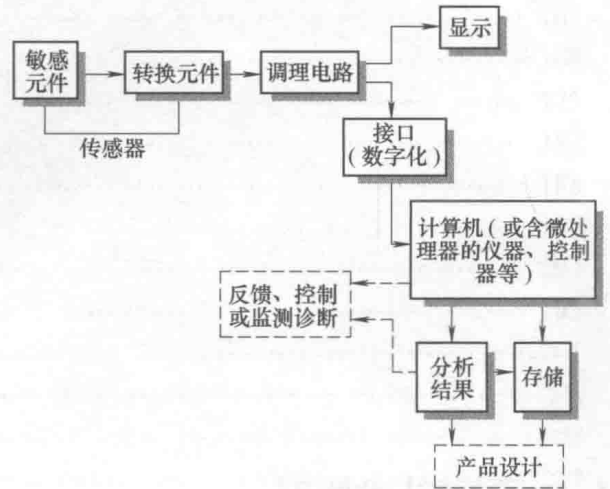


图 1-2

测量系统的一般构成

图 1-1

测量系统的用途

图 1-1 中实验及各种过程中的物理量真值、变量或测量值，若随时间变化，通常称为信号。

图 1-2 中被测物理量（或信号）作为测量系统的输入，它经传感器变成可做进一步处理的电量，经信号调理（放大、滤波、调制解调等）后，可以通过模-数转换变成数字信号，从而得到数字化的测量值，将其送入计算机（或仪器控制系统）进行分析与存储，用于各种用途。

模拟信号泛指随时间连续变化的物理信号（各种随时间变化的物理量），经传感器变换后成为电信号，但同样还是模拟信号。这种信号在时间上是连续的，可以取任意时间值；在幅值（大小）上也是连续的，即可以得到任意的合理值。数字量虽然也表示随时间变化的物理量，但在时间和幅值上都是离散的，亦即只能得到一定间隔的离散的时间和物理序列，而幅值的变化也不是连续的，而是以某个最小量（最小量化电平）的个数来表示。一般传感器的输出（经或未经信号调理）是模拟量，而只有数字量才能被计算机所接收，才能进行各种数字计算或处理。由模拟量到数字量必须通过图中所示的“数字化”处理，即“模-数转换”。

1.1.2 测试技术的发展概况

现代生产的发展和工程科学研究对测试及其相关技术的需求极大地推动了测试技术的发展，而现代物理学、信息科学、计算机科学、电子与微机械电子科学与技术的迅速发展又为测试技术的发展提供了知识和技术支持，从而促使测试技术在近 30 年来得到极大的发展和广泛应用。例如工程创新设计，特别是动态设计对振动分析的需求促使振动测量方法、传感器和动态分析技术与软件的迅速发展；对汽车性能和安全性要求的不断提高，使得“汽车电子”技术得到迅速发展，这种发展是以基于总线技术的传感器网络的发展为基础的。现

代工程测试技术与仪器的发展主要表现在以下方面:

1. 新原理新技术在测试技术中的应用

近30年来,随着基础理论和技术科学的研究进展,各种物理效应、化学效应、微电子技术,甚至生物学原理在工程测量中得到广泛应用,使得可测量的范围不断扩大,测量精度和效率得到很大提高。例如在振动速度测量中,激光多普勒原理的应用,使得不可能安装传感器进行测量的计算机硬盘读写臂与磁盘片等轻小构件的振动测量成为可能;使用自动定位扫描激光束,使得大型客机机翼、轿车本身等大型物体的多点振动测量达到很高的效率,只需几分钟时间就可完成数百点的振动速度测量;高达10MHz以上采样频率的数据采集系统可实现伴随金属构件裂纹发生与发展的脉冲声发射信号的采集。类似的例子不胜枚举。

2. 新型传感器的出现

随着人造晶体、电磁、光电、半导体与其他功能新材料的出现,微电子和精密、微细加工技术的发展,作为工程测量技术基础的传感器技术得到迅速发展。这种发展包括新型传感器的出现、传感器性能的提高及功能的增强、集成化程度的提高以及小型、微型化等。微电子技术的发展有可能把某些电路乃至微处理器和传感测量部分集成为一体,而使传感器具有放大、校正、判断和某些信号处理功能,组成所谓的“智能传感器”。这些方面的有关细节将在以后各章中讨论。

3. 计算机测试系统与虚拟仪器的应用

传感器网络及仪器总线技术、互联网与远程测试、测试过程与仪器控制技术,以及虚拟仪器及其编程语言等的发展都是现代工程测试技术发展的重要方面。

1.1.3 课程的主要环节和本书概要

本课程的研究对象是机械工程领域与设计有关的试验、控制和运行监测中涉及物理量及其他工程量的测量和测量装置与系统的性能,包括物理量和其他工程量的测量方法、测试中常用的传感器、信号调理电路及记录、显示仪器的工作原理,测量装置基本特性的评价方法、测试信号的分析 and 处理等。每章均给出思考题与习题。

对高等学校机械类的各有关专业而言,“机械工程测试技术基础”是一门技术基础课。通过本课程的学习,培养学生能合理地选用测试装置并初步掌握静、动态测量和常用工程试验所需的基本知识和技能,为学生进一步学习、研究和处理机械工程技术问题奠定基础。

学生在学完本课程后应具有下列几方面的知识:

- 1) 掌握信号的时域和频域的描述方法,建立明确的信号频谱结构的观念;掌握频谱分析和相关分析的基本原理和方法,掌握数字信号分析中的一些基本概念。
- 2) 掌握测试装置基本特性的评价方法和不失真测试条件,并能正确地运用于测试装置的分析 and 选择;掌握一阶、二阶线性系统动态特性及其测定方法。
- 3) 了解常用传感器、常用信号调理电路和记录、显示仪器的工作原理和性能,并能较合理地选用。
- 4) 对动态测试的基本问题有一个比较完整的概念,并能初步运用于机械工程中某些参量的测量和产品的试验。

本课程具有很强的实践性。只有在学习中密切联系实际,加强实验,注意物理概念,才能真正掌握有关理论。学生只有通过足够和必要的实验才能受到应有的实验能力的训练,才

能获得关于动态测试工作的比较完整的概念。也只有这样,才能初步具有处理实际测试工作的能力。

作为一门课程,测试技术既综合应用了许多学科的原理和技术,又被广泛应用于各个学科中。作为高等教育中的一门课程,它在教学计划中有其特定的地位、作用和范围。它必须以前期课程为基础来展开讨论,培养学生掌握测试技术的基本理论、基本知识和基本技能。

1.2 测量的基础知识

在机械(或机电)系统试验、控制和运行监测中,需要测量各种物理量(或其他工程参量)及其随时间变化的特性。这种测量需通过各种测量装置和测量过程来实现。于是,测量装置和过程在总体上需满足什么样的要求,才能准确测量到这些物理量及其随时间的变化是我们关心的问题。为使测量结果具有普遍的科学意义需具备一定的条件:首先,测量过程是被测量的量与标准或相对标准量的比较过程。作为比较用的标准量值必须是已知的,且是合法的,才能确保测量值的可信度及保证测量值的溯源性。其次,进行比较的测量系统必须进行定期检查、标定,以保证测量的有效性、可靠性,这样的测量才有意义。

本节讨论相关的一些基本概念。

1.2.1 量与量纲

量是指现象、物体或物质可定性区别和定量确定的一种属性。不同类的量彼此可以定性区别,如长度与质量是不同类的量。同一类中的量之间是以量值大小来区别的。

1. 量值

量值是用数值和计量单位的乘积来表示的。它被用来定量地表达被测对象相应属性的大小,如3.4m、15kg、40℃等。其中,3.4、15、40是量值的数值。显然,量值的数值就是被测量与计量单位的比值。

2. 基本量和导出量

在科学技术领域中存在着许许多多的量,它们彼此有关。为此专门约定选取某些量作为基本量,而其他量则作为基本量的导出量。量的这种特定组合称为量制。在量制中,约定地认为基本量是相互独立的量,而导出量则是由基本量按一定函数关系来定义的。

3. 量纲和量的单位

“量纲”代表一个实体(被测量)的确定特征,而量纲单位则是该实体的量化基础。例如,长度是一个量纲,而厘米则是长度的一个单位;时间是一个量纲,而秒则是时间的一个单位。一个量纲是唯一的,然而一种特定的量纲——比如说长度——则可用不同的单位来测量,如英尺、米、英寸或英里等。不同的单位制必须被建立和认同,亦即这些单位制必须被标准化。由于存在着不同的单位制,在不同单位制间的转换基础方面也必须要有协议。

在国际单位制(SI)中,基本量约定为:长度、质量、时间、温度、电流、发光强度和物质的量七个。它们的量纲分别用 L 、 M 、 T 、 θ 、 I 、 N 和 J 表示。导出量的量纲可用基本量量纲的幂的乘积来表示。例如,导出量力的量纲是 LMT^{-2} ,电阻的量纲是 $L^2MT^{-3}I^{-2}$ 。工程上会遇到无量纲量,其量纲中的幂都为零,实际上它是一个数。弧度(rad)就是这种量。

1.2.2 法定计量单位

法定计量单位是强制性的, 各行业、各组织都必须遵照执行, 以确保单位的一致。我国的法定计量单位是以国际单位制 (SI) 为基础并选用少数其他单位制的计量单位来组成的。

1. 基本单位

根据国际单位制 (SI), 七个基本量的单位分别是: 长度——米 (Metre)、质量——千克 (Kilogram)、时间——秒 (Second)、温度——开尔文 (Kelvin)、电流——安培 (Ampere)、发光强度——坎德拉 (Candela)、物质的量——摩尔 (Mol)。

它们的单位代号分别为: 米 (m)、千克 (kg)、秒 (s)、开 (K)、安 (A)、坎 (cd)、摩 (mol)。

国际单位制 (SI) 的基本单位的定义为:

米 (m) 是光在真空中, 在 $1/299792458\text{s}$ 的时间间隔内所经路程的长度。

千克 (kg) 是质量单位, 等于国际千克原器的质量。

秒 (s) 是铯-133 原子基态的两个超精细能级间跃迁对应的辐射 9192631770 个周期的持续时间。

安培 (A) 是电流单位。在真空中, 两根相距 1m 的无限长、截面积可以忽略的平行圆直导线内通过等量恒定电流时, 若导线间相互作用力在每米长度上为 $2 \times 10^{-7}\text{N}$, 则每根导线中的电流为 1A 。

开尔文 (K) 是热力学温度单位, 等于水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

摩尔 (mol) 是一系统的物质的量, 该系统中所包含的基本单元数与 0.012kg 碳-12 的原子数目相等。使用摩尔时, 基本单元可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子, 或是这些粒子的特定组合。

坎德拉 (cd) 是一光源在给定方向上的发光强度, 该光源发出频率为 $5.4 \times 10^4\text{Hz}$ 的单色辐射, 且在此方向上的辐射强度为 $1/683\text{W/sr}$ 。

2. 辅助单位

在国际单位制中, 平面角的单位——弧度和立体角的单位——球面度未归入基本单位或导出单位, 而称之为辅助单位。辅助单位既可以作为基本单位使用, 又可以作为导出单位使用。它们的定义如下:

弧度 (rad) 是一个圆内两条半径在圆周上所截取的弧长与半径相等时, 它们所夹的平面角的大小。

球面度 (sr) 是一个立体角, 其顶点位于球心, 而它在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积。

3. 导出单位

在选定了基本单位和辅助单位之后, 按物理量之间的关系, 由基本单位和辅助单位以相乘或相除的形式所构成的单位称为导出单位。

1.2.3 测量、计量、测试

测量、计量、测试是三个密切关联的术语。测量 (Measurement) 是指以确定被测对象的量值为目的而进行的实验过程。如果涉及实现单位统一和量值准确可靠的测量, 则称为计

量。因此研究测量、保证测量统一和准确的科学被称为计量学 (Metrology)。具体地说, 计量学将研究可测的量、计量单位、计量基准、标准的建立、复现、保存及量值传递、测量原理与方法及其准确度、观察者的测量能力, 物理常量及常数、标准物质、材料特性的准确确定, 以及计量的法制和管理。实际中, 计量一词只用作某些专门术语的限定语, 如计量单位、计量管理、计量标准等。所组成的新术语都与单位统一和量值准确可靠有关。测量的意义则更为广泛、更为普遍。测试 (Measurement and Test) 是指具有试验性质的测量, 或测量和试验的综合。

一个完整的测量过程必定涉及被测对象、计量单位、测量方法和测量误差。它们被称为测量四要素。

1.2.4 基准和标准

为了确保量值的统一和准确, 除了对计量单位做出严格的定义外, 还必须有保存、复现和传递单位的一整套制度和设备。

基准是用来保存、复现计量单位的计量器具。它是具有现代科学技术所能达到的最高准确度的计量器具。基准通常分为国家基准、副基准和工作基准三种等级。

国家基准是指在特定计量领域内, 用来保存和复现该领域计量单位并具有最高的计量特性, 经国家鉴定、批准作为统一全国量值最高依据的计量器具。

副基准是指通过与国家基准对比或校准来确定其量值, 并经国家鉴定、批准的计量器具。在国家计量检定系统中, 副基准的位置仅低于国家基准。

工作基准是指通过与国家基准或副基准对比或校准, 用来检定计量标准的计量器具。它的设立是为了避免频繁使用国家基准和副基准, 免得它们丧失其应有的计量特性。在国家计量检定系统中, 工作基准的位置仅低于国家基准和副基准。

计量标准是指用于检定工作计量器具的计量器具。

工作计量器具是指用于现场测量而不用于检定工作的计量器具。一般测量工作中使用的绝大部分就是这一类计量器具。

1.2.5 量值的传递和计量器具检定

通过对计量器具实施检定或校准, 将国家基准所复现的计量单位量值经过各级计量标准传递到工作计量器具, 以保证被测对象量值的准确和一致。这个过程就是所谓的“量值传递”。在此过程中, 按检定规程对计量器具实施检定的工作对量值的准确和一致起着最重要的保证作用, 是量值传递的关键步骤。

所谓计量器具检定 (Verification of Measuring Instrument), 是指为评定计量器具的计量特性, 确定其是否符合法定要求所进行的全部工作。检定规程是指检定计量器具时必须遵守的法定技术文件。计量器具检定规程的内容包括: 适用范围、计量器具的计量特性、检定项目、检定条件、检定方法、检定周期以及检定结果的处理等。计量器具检定规程分为国家、部门和地方三种。它们分别由国家计量行政主管部门、有关部门和地方制定并批准颁布, 作为检定所依据的法定技术文件, 分别在全国、本部门、本地区施行。

所有的计量器具都必须实施相应的检定。其中社会公用的计量标准、部门和企事业单位使用的最高计量标准, 用于贸易结算、医疗卫生、环境监测等方面的某些计量器具, 则必须