

● 研 究 生 用 书 ● MEASUREMENT
INFORMATION
SIGNAL ANALYSIS IN
MECHANICAL ENGINEERING
华中理工大学出版社



卢文祥 杜润生

31
机械工程测试·信息·信号分析

• 研究生用书 •

机 械 工 程

测试 · 信息 · 信号分析

卢文祥 杜润生

责任编辑 黎秋萍

责任校对 严志勇

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

武汉大学出版社印刷总厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 15.75 插页: 2 字数: 384 000

1990年3月第1版 1990年3月第1次印刷

印数: 1—2 000

ISBN 7-5609-0368-1/TH·37

定价: 3.42元



**Measurement,
Information and
Signal Analysis
in Mechanical
Engineering**

Lu Wenxiang Du Runsheng

内 容 简 介

本书主要内容有: 信号分析基础; 信息论基础知识, 信息与信息技术; 信息转换与传输, 信息探测工程的发展; 模拟信号分析; 数字信号分析, DFT, FFT, 数字滤波; 维纳滤波; 同态滤波与时谱技术; 窄带谱分析技术; 信号分析设备; 机械工程中的信号分析技术, 模态分析、设备诊断、声谱分析等。

本书除可作为机械工程类硕士生教材外, 尚可作为与动态测试有关专业的本科生的选修课教材或教学参考用书; 亦可供有关教师与科技人员参考。

Abstract

This book includes: basic knowledge of signal analysis and information theory, information technique, information conversion and transmission, the development of information acquisition engineering, analogue signal analysis, digital signal analysis, DFT, FFT, digital filter, Wiener filter, homomorphic filter and cepstrum, narrow-band spectrum analysis, signal analysis equipment, signal analysis technique applied in mechanical engineering, modal analysis, equipment diagnosis, spectrum analysis of sound, etc.

This book can be used not only as a textbook for graduate students, but also as a reference book for the undergraduate students, teachers and technologists who are studying this subject.

“研究生用书”总序

研究生教材建设是提高研究生教学质量的重要环节，是具有战略性的基本建设。各门课程必须有高质量的教材，才能使学生通过学习掌握各门学科的坚实的基础理论和系统的专门知识，为从事科学研究工作或独立担负专门技术工作打下良好的基础。

我校各专业自1978年招收研究生以来，组织了一批学术水平较高、教学经验丰富的教师，先后编写了公共课、学位课所需的多种教材和教学用书。有的教材和教学用书已正式出版发行，更多的则采用讲义的形式逐年印发。这些讲义经过任课教师多年教学实践，不断修改、补充、完善，已达到出书的要求。因此，我校决定出版“研究生用书”，以满足本校各专业研究生教学需要，并与校外单位交流，征求有关专家学者和读者的意见，以促进我校研究生教材建设工作，提高教学质量。

“研究生用书”以公共课和若干门学位课教材为主，还有教学参考书和学术专著，涉及的面较广，数量较多，准备在今后数年内分批出版。编写“研究生用书”总的要求是从研究生的教学需要出发，根据各门课程在教学过程中的地位和作用，在内容上求新、求深、求精，每本教材均应包括本门课程的基本内容，使学生能掌握必需的基础理论和专门知识；学位课教材还应接触该学科的发展前沿，反映国内外的最新研究成果，以

适应目前科学技术知识更新很快的形势；学术专著则应充分反映作者的科研硕果和学术水平，阐述自己的学术见解。在结构和阐述方法上，应条理清楚，论证严谨，文字简炼，符合人们的认识规律。总之，要力求使“研究生用书”具备科学性、系统性和先进性。

我们的主观愿望虽然希望“研究生用书”的质量尽可能高一些，但由于研究生的培养工作为时尚短，水平和经验都不够，其中缺点、错误在所难免，尚望校内外专家学者及读者不吝指教，我们将非常感谢。

华中理工大学研究生院院长

陈 挺

1989.11.

代 序

《机械工程测试·信息·信号分析》一书是卢文祥、杜润生两位同志为机械类研究生而写的。这两位同志长期从事机械工程中的测试技术与信号分析这方面的教学与科研工作。这本书既包含了他们长期从事机械类研究生、本科生的测试技术与信号分析方面的教学工作的宝贵经验，包含了他们在这同一方面的长期的科研工作的丰硕成果，也包含了他们所在教研室的其他有关同志的科研与教学的劳动结晶，也包含了国内外有关的科学技术的成就。

我是十分支持出版本书的，因为“机械工程测试·信息·信号分析”这门课程在我校是作为机械类研究生的学位课程之一来开设的。本书主要作为与此学位课相配套的教学用书而出版，是适应当今世界潮流的。当今时代是信息革命的时代。这门学位课的开设，这本书的出版，正是这个时代的产物之一。“他山之石，可以攻玉”。微电子技术，特别是计算机技术（其中尤其是微计算机技术）的迅速发展，给机械工程、机械工业带来了极其深刻的变化。机械产品的结构与功能产生了质的跃变，机械产品由以往取代、延伸与放大人的体力的作用，跃变到还能取代、延伸与加强人的部分脑力的作用，机电一体化产品的蓬勃兴起与发展正是这一跃变的体现；机械产品的制造过程也发生了飞跃，制造过程不仅包含物质流与能量流，而且还包含了信息流，制造过程正在走向柔性化、集成化、智能化，FMS（柔性制造系统）与CIMS（计算机集成制造系统）的出现与发展正是这一趋势的体现。而这一切的关键问题，就在于信息的获取、传输、转换、贮存、处理与分析、利用。我支持本书出版的一个原因就是支持

作者在信息时代，在我们教育改革中所作的适应当今世界潮流的努力，支持他们在采用测试、信息理论与技术改造机械工程这一传统学科的工作中尽到他们的一分努力。

我支持本书出版的另一个原因，就是支持作者为机械类研究生提供一本这一方面较为系统的参考书。一个研究生应该博览群书，博采百家，思路开阔，有所创见。但这不等于他在一切方面均能如此，有所不为才能有所为。如果一个研究生的主要兴趣与工作不在测试与信号分析方面，他就可以选择一本有关的书作为了解与学习这方面专业知识的参考，本书可作为候选书之一。如果一个研究生的主要兴趣与工作同测试与信号分析密切有关，他更应选择一本有关的书作为主要学习用书，寻觅主要学习线索，并缘此展开，博览群书，这时，本书更可作为候选书之一。进而言之，这也就是我赞成成为研究生编写系列的教学参考书的原因。

一本书的读著是多方面的，一个读者在读一本书时，要求又是多方面的，所以，要求一本书同时满足不同读者所有方面的要求，这是不现实的。本书作者在多年教学实践的基础上，按照1987年9月修订的教学大纲来编写本书，而且于1987年12月将完成的初稿，作为讲义，送到了许多同行手中，请他们提出宝贵意见。同行的专家，例如，西安交通大学顾崇銓教授，清华大学严普强教授，上海交通大学洪迈生副教授等等，都提出了不少宝贵意见。作者充分考虑了专家的意见，对不妥之处尽可能作了修改，这种精益求精，见善而从的精神是值得赞扬的。但对有些内容的取舍，仍有不同意见，如何解决为好，则有待于实践来检验。

作者在前言中介绍了本书的内容，从这些内容可见，的确，本书除了作为机械类研究生教学用书外，还可作为有关专业本科生教学参考书与有关科技人员工作参考书。事实上，在我校听取卢文祥同志等讲授“机械工程测试·信息·信号分析”这门课的，不仅有机械类的研究生，还有非机械类的研究生。学科就是

这么交叉而发展的。

应作者之邀，写了这么一个序言，作为自己一点心意。我祝愿作者在进一步的教学与科研工作中取得更大的成就，并欢迎读者与同行对本书更多地提出批评与建议，以帮助作者进一步做好工作。

杨叔子

于华中理工大学，武昌

1988. 8. 14

前 言

“机械工程测试·信息·信号分析”是华中理工大学机械工程类专业硕士生的一门学位课，是以培养研究生掌握现代测试与信号分析理论与技术、提高其科学试验能力为主的课程。本门课程从1980年开设以来，经过多年探索与实践而逐步成熟。目前，选修本课程的研究生，除机械制造专业的以外，尚有锻压、液压、船舶、力学、金属学、铸工、仪表、计量标准化以及矿业、地质勘探等专业的。实践表明，这是一门有生命力的课程，对于研究生的培养发挥了一定作用。该课程曾于1985年获得华中理工大学研究生教学研究成果奖。

本书是按照1987年9月修订的教学大纲（见附录）编写的，主要论述工程测试、信息与信号分析领域的理论与技术，是从信息探测工程学出发，为适应机械工程技术的新发展（自动化、智能化、精密化）而编写的一本跨学科的教材。其主要内容包括：信号分析基础；信息论基础知识，信息与信息熵，最大熵定理；信息转换与传输，信息探测工程的发展；模拟信号分析，调制、滤波与估值；数字信号分析，DFT与FFT；谱分析与谱估计，周期图法与最大熵谱分析；数字滤波，FIR与IIR滤波器；维纳滤波，预测反滤波；同态滤波与时谱技术，复时谱、功时谱、解卷积；窄带谱细化分析，ZFFT分析与Chirp-Z变换；信号分析设备，典型数字信号处理系统；机械工程中的信号分析技术，模态分析、声谱分析、机械设备故障诊断等。

本书除了可作为机械工程类硕士生教学用书外，尚可作为机电一体化、仪器仪表、计量与质量管理等有关专业教学参考用书，机械专业本科生提高用书，以及从事工程测试与信号分析的

有关工程技术人员参考用书。

本书是在杨叔子教授的指导下，由卢文祥、杜润生同志编写的。黄长艺教授为本课程的设置、教学内容与体系的建立等作出了重要贡献；李柱、师汉民、熊有伦、胡庆超、邓星钟、李淑珍等各位老师以及张福润、余蔚淳、黄含等同志为本课程的改革、大纲的修订、教材编写等给予了指导和帮助；霍静娴、王治藩、赵星、赵振平、陈小鸥、丁洪、李震、潘立民等同志，为开设本课程的实验作了大量工作。在此，对他们深表感谢。

本书原稿于1987年12月作为讲义印刷后，受到了机械工程界许多博士生、硕士生导师的热诚关注与支持。西安交通大学顾崇銓教授、清华大学严普强教授、山西矿业学院程高楣教授、哈尔滨工业大学蔡鹤皋教授、烟台大学施雄茂教授、华中理工大学路亚衡教授、徐恕宏教授、唐泳洪教授、上海交通大学洪迈生副教授、北京航空航天大学韩云台副教授、重庆大学雷继尧教授、梁德沛副教授、北京机械工业管理学院翁善惠副教授、江西工业大学熊瑞文副教授、西北轻工业学院徐元昌副教授等，对本书提出了许多宝贵意见，给予作者极大鼓舞和鞭策。在此，对这些前辈和同行老师表示衷心感谢。

限于编者的水平，书中定有不少错误之处，恳切希望各位读者给予批评指正。

编者 1988.7

绪 论

1° 测试·信息·信号

测试是人们认识客观事物的方法。测试过程是从客观事物中提取有关信息的认识过程。

测试包含测量与试验，在测试过程中，需要借助专门设备，通过合适的实验和必要的数据处理，求得所研究对象的有关的信息量值。

测试科学属于信息科学范畴，所以又被称为信息探测工程学。

对于信息，一般可理解为消息、情报或知识（关于信息的定义详见§2-1）。例如，语言文字是社会信息；商品报导是经济信息；遗传密码是生物信息等。然而，从物理学观点出发来考虑，信息却是物质所固有的，是其客观存在或运动状态的特征。

信息本身不是物质，不具有能量，但信息的传输却依靠物质和能量。一般说，传输信息的载体称为信号，信息蕴涵于信号之中。例如，古代烽火，人们观察到的是光信号，它所蕴涵的信息是“敌人来进攻了”；又如，防空警笛，人们听到的是声信号，其含义则是“敌机空袭”或者“敌机溃逃”；在无线电通讯中，电磁波信号运载着新闻或音乐信息。

作为物理过程的一个例子，一座桥梁或者一台机器，它本身具有抵抗外力的能力，这是物质的固有特性。怎样探测这一客观存在呢？当所研究的系统受到外力激励后，所发生的位移-时间历程就包含了描述该系统的固有频率和阻尼比的信息。因此，对所测得的位移-时间信号进行分析，就可以获得该系统的刚度。

信号具有能量，它描述了物理量的变化过程，在数学上可以

表示为一个或几个独立变量的函数，可以取为随时间或空间变化之图形。例如，噪声信号可以表示为一个时间函数；机械零件的表面粗糙度，则可表示为一个二元空间变量的高度函数。

按照信号变化的物理性质，可分为非电信号与电信号。例如，随时间变化的力、位移、加速度等，可称为非电信号；而随时间变化的电压、电流、电荷、磁通等，则称为电信号。电信号与非电信号可以比较方便地互相转换，因此，在工程中常常将各种非电物理量变换为电信号，以利于传输、变换和分析处理。

信号的分析处理，是指从传感器等一次敏感元件获得初始信息，用一定的设备和手段进行分析处理。图0-1表示了信息-信号的转换、传输与分析处理过程。

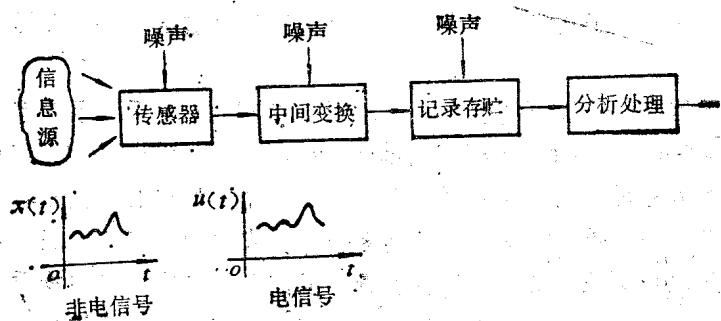


图0-1 信息-信号的转换、传输与分析处理过程

2° 测试信号分析的基本内容

测试信号中携带着人们所需要的有用信息，也常常含有大量人们不感兴趣的其他信息，后者常被称为干扰噪声，它是在测试过程中不可避免地渗入测试系统的。对测试信号的分析处理，例如，滤波、调制、变换、增强、估值等，就是对信号的加工变换，其目的是改变信号的形式，便于分析和识别；滤除干扰噪声，提取有用信息，便于对所研究的事物作出估计。

信号分析的经典方法有时域分析法与频域分析法。时域分析

又可称为波形分析,是用信号的幅值随时间变化的图形或表达式来分析的,可以得到任一时刻的瞬时值或信号的最大值、最小值、均值、均方根值等;也可以通过信号的时域分解,研究其稳态分量与波动分量;对信号的相关分析,可以研究信号本身或相互之间的相似程度;研究信号的幅值取值的分布状态,可以了解信号幅值大小取值的概率及概率分布情况(后者又称为幅值域分析)。

测试信号的频域分析是把信号的幅值、相位或能量变换为以频率坐标轴表示,进而分析其频率特性的一种方法,又称为频谱分析。例如,幅值谱、相位谱、能量谱密度、功率谱密度等。对信号进行频谱分析可以获得更多的有用信息,是近代信息技术发展中的一个重要手段。

3° 测试信号分析技术的发展概况

信号分析技术已被应用于许多学科,诸如:通信、雷达、声纳、地震、遥感、生物医学、机械振动等。特别是近代电子技术、数字计算机及微型机的发展和应用,使信号分析技术得到了迅速的发展,目前它已成为信息科学技术中一种必不可少的工具手段。

50年代以前,信号分析技术主要是模拟分析方法。进入50年代,大型通用数字计算机在信号分析中有了实际应用。当时曾经争论过模拟与数字分析方法的优缺点,争论的焦点是运算速度、精度与经济性。

进入60年代,人造卫星、宇航探测以及通讯、雷达技术的发展,对信号分析的速度、分辨能力提出了更高的要求。1965年美国库列(J.W.Cooley)和图基(J.W.Tukey)提出了快速傅里叶变换(FFT)计算方法,使计算离散傅里叶变换(DFT)的复数乘法次数从 N^2 减少到 $N\log_2 N$ 次,从而大大节省了计算量。这一方法促进了数字信号处理的发展,使其获得更广泛应用。因为卷积可以利用DFT来计算,故FFT算法也可以用正比于 $N\log_2 N$ 的运算次数来计算卷积,而卷积运算在电子计算机科学和其他一

些领域都有广泛应用。

70年代以后,大规模集成电路的发展以及微型机的应用,使信号分析技术具备了广阔的发展远景,许多新的算法不断出现。例如,1968年美国C.M.Rader提出NFFT算法,DFT可用循环卷积运算;1976年美国S.Winograd提出了WFTA算法,用它计算DFT所需要的乘法次数仅为FFT算法乘法次数的1/3;1977年法国H.J.Nussbaumer提出了PFTA算法,结合使用FFT和WFTA方法,在采样点数较大时,较之FFT算法快3倍左右。上述几种方法与DFT方法比较:当采样点 $N=1000$,DFT算法为200万次;FFT为1.4万次;NFFT为0.8万次;WFTA为0.35万次;PFTA为0.3万次。

目前信号分析技术的发展目标是:(1)在线实时能力的进一步提高;(2)分辨能力和精度的提高;(3)扩大和发展新的专用功能;(4)专用机结构小型化,性能标准化,价格低廉。

4° 测试与信号分析技术在机械工业发展中的作用

现代机械工业的发展,面临着新兴科学技术发展的挑战。宇航、高能物理、红外、激光以及智能机器的发展,对机械工业部门提出了一系列新课题。例如,一些特殊的机械装置,宇航飞行器、原子锅炉、激光器等,都要求在给定的时域内工作绝对可靠、元件具有高精度、高性能,这就要求机械工业部门必须提供优良的机械设备。

另一方面,机械加工精度的提高,生产过程自动化的发展,现代机械加工过程已从单机自动化、生产自动线发展到柔性加工系统,并朝着无人化工厂方向发展。而工程中除了工件加工后的自动测量以外,还应包括在线测试、从备料到产品入库、包装等流程的全过程,以及设备管理、故障诊断和安全监控等。因此,先进的测试与信号分析技术已成为生产系统不可少的一个组成部分。尤其是在智能传感器的开发与微机的应用方面,测试与信号分析技术起着生产系统中感觉器官的作用。

目 录

绪论	(I)
第一章 信号分析的基础	(1)
§ 1-1 信号的分类	(1)
§ 1-2 系统	(13)
§ 1-3 信号的时域分析	(18)
§ 1-4 信号的频域分析	(34)
第二章 信息论基础知识	(50)
§ 2-1 信息与信息技术	(50)
§ 2-2 信息论与广义通信系统	(62)
§ 2-3 信息的定量描述——信源模型与信息熵	(67)
§ 2-4 连续信源及最大熵定理	(76)
第三章 信息转换与传输	(86)
§ 3-1 信息转换	(86)
§ 3-2 信息传输	(127)
§ 3-3 信息传输过程中的干扰噪声	(140)
第四章 模拟信号分析	(151)
§ 4-1 调制	(151)
§ 4-2 滤波器	(162)
§ 4-3 估值	(174)
第五章 数字信号分析(I)——DFT与FFT	(189)
§ 5-1 卷积与相关定理	(189)
§ 5-2 模拟信号离散化	(203)
§ 5-3 离散Fourier变换	(213)
§ 5-4 快速Fourier变换	(283)
第六章 谱分析与谱估计	(255)
§ 6-1 传统谱分析方法——周期图法	(257)

§ 6-2	现代谱分析方法——最大熵谱估计	(270)
第七章	数字信号分析(Ⅰ)——数字滤波	(278)
§ 7-1	数字滤波	(278)
§ 7-2	离散时间系统的时域分析	(280)
§ 7-3	Z变换	(287)
§ 7-4	离散时间系统的z域分析	(294)
§ 7-5	数字滤波器的原理与结构	(299)
§ 7-6	数字滤波器的设计方法概述	(310)
第八章	维纳滤波	(331)
§ 8-1	维纳滤波	(331)
§ 8-2	反滤波	(337)
§ 8-3	预测反滤波	(342)
第九章	同态滤波与时谱技术	(349)
§ 9-1	同态滤波系统	(349)
§ 9-2	解乘积同态系统	(351)
§ 9-3	解卷积同态系统	(352)
§ 9-4	时谱技术	(360)
第十章	窄带谱频率细化分析	(368)
§ 10-1	复调制细化分析方法	(369)
§ 10-2	相位补偿ZFFT	(375)
§ 10-3	Chirp-Z变换	(378)
§ 10-4	最大熵谱的局部表示	(384)
第十一章	信号分析设备	(390)
§ 11-1	频谱分析仪	(390)
§ 11-2	频谱分析仪的主要工作特性	(399)
§ 11-3	数字信号处理系统的构成及分类	(407)
§ 11-4	数字信号处理系统中的主要部件	(415)
§ 11-5	微型机信号处理系统	(424)
第十二章	机械工程中的信号分析技术	(432)
§ 12-1	信号分析中基本参数的选择	(432)
§ 12-2	试验模态分析技术	(436)