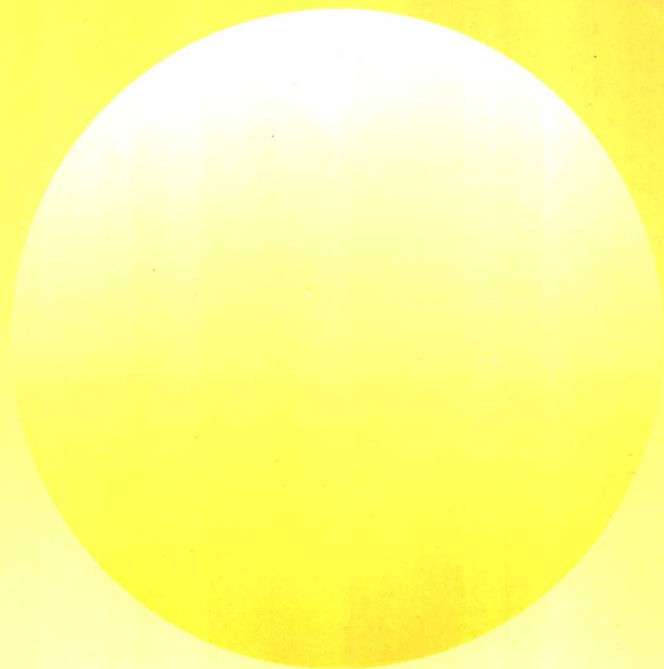


本书获全国高等学校机电类专业优秀教材奖

● 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



# 机械工程测试·信息·信号分析

(第二版)

# 机械工程 测试·信息·信号分析 (第二版)

卢文祥 杜润生

华中理工大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

机械工程测试·信息·信号分析/卢文祥  
武汉:华中理工大学出版社, 1999年8月  
ISBN 7-5609-1961-8

I. 机…

Ⅱ. ①卢… ②杜…

Ⅲ. 机械工程-测试-信息-信号分析

N. TH113

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

封面设计:刘 卉

责任校对:熊九玲

监 印:张正林

出版发行:华中理工大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87542624

经销:新华书店湖北发行所

录排:华中理工大学出版社照排室

印刷:华中理工大学出版社沔阳印刷厂

开本:850×1168 1/32

印张:15.375 插页:2

字数:360 000

版次:1999年8月第2版

印次:1999年8月第4次印刷

印数:6 001—8 000

ISBN 7-5609-1961-8/TH·100

定价:19.80元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行科调换)

## 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;信号的时频分析;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, time-frequency analysis of signal, 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.

## 写在“研究生用书”出版 10 周年

在今天,面对科技的迅速发展,知识经济的已见端倪,国际竞争也日趋激烈,显然,国家之间的竞争是国家综合实力的竞争,国家综合实力的竞争关键是经济实力的竞争,而经济实力的竞争关键又在于科技(特别是高科技)的竞争,科技(特别是高科技)的竞争归根结底是人才(特别是高层次人才)的竞争,而人才(特别是高层次人才)的竞争基础又在于教育。“百年大计,教育为本;国家兴亡,人才为基。”十六个字、四句话,确是极其深刻的论断。目前,国际形势清楚表明:我们国家的强大与民族的繁荣,主要立足于自己,以“自力更生”为主;把希望寄托于他人,只是一种不切实际的幻想。这里,我们决不是要再搞“闭关锁国”,搞“自我封闭”,因为那是没有出路的;我们强调的是要“自信,自尊,自立,自强”,要“自力更生”为主,走自己发展的道路。

显然,知识经济最关键的是人才,是高层次人才的培养,而作为高层次人才培养的研究生教育就在一个国家的方方面面的工作中,占有十分重要的战略地位。可以说,没有研究生教育,就没有威伟雄壮的科技局面,就没有国家的强大实力,就没有国家在国际上的位置,就会挨打,就会受压,就会被淘汰,还说什么知识经济与国家强大?!

“工欲善其事,必先利其器。”教学用书是教学的重要

基本工具与条件。这是所有从事教育的专家所熟知的事实。所以,正如许多专家所知,也正是原来的《“研究生用书”总序》中所指出,研究生教材建设是保证与提高研究生教学质量的重要环节,是一项具有战略性的基本建设。没有研究生的质量,就没有研究生教育的一切。

我校从 1978 年招收研究生以来,即着力从事于研究生教材与教学用书的建设。积十多年建设与实践的经验,我校从 1989 年起,正式分批出版“研究生用书”。第一任研究生院院长陈珏教授就为之写了《“研究生用书”总序》,表达了我校编写这套用书的指导思想与具体要求,“要力求‘研究生用书’具备科学性、系统性、先进性”。后三任研究生院长,也就是各任校长黄树槐教授、我本人和周济教授完全赞同这一指导思想与具体要求,从多方面对这套用书加以关心与支持。

我是十分支持出版“研究生用书”的。早在 1988 年我在为列入这套书中的第一本,即《机械工程测试·信息·信号分析》写“代序”时就提出: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“这一特定方面”,他也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;如果一个研究生的主要兴趣在“这一特定方面”,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。这就是我赞成为研究生编写系列教学用书的原因。

目前,这套书自第一本于 1990 年问世以来,已经渡

过了10个春秋,出版了8批共49种,初步形成规模,逐渐为更多读者所认可。在已出版的书中,有15种分获国家级、部省级图书奖,有16种一再重印,久销不衰。采用此套书的一些兄弟院校教师纷纷来信,赞誉此书为研究生培养与学科建设作出了贡献,解决了他们的“燃眉之急”。我们感谢这些赞誉与鼓励,并将这些作为对我们的鞭策与鼓励,“衷心藏之,何日忘之?!”

现在,正是江南春天,“最是一年春好处”。华工园内,红梅怒放,迎春盛开,柳枝油绿,梧叶含苞,松柏青翠,樟桂换新,如同我们的国家正在迅猛发展、欣欣向荣一样,一派盎然生机。尽管春天还有乍寒时候,我们国家在前进中还有种种困难与险阻,来自国内与来自国外的阻挠与干扰,有的还很严峻;但是,潮流是不可阻挡的,春意会越来越浓,国家发展会越来越好。我们教师所编的、所著的、所编著的这套教学用书,也会在解决前进中的种种问题中继续发展。然而,我们十分明白,这套书尽管饱含了我们教师的辛勤的长期的教学与科研工作的劳动结晶,作为教学用书百花园中的一丛鲜花正在怒放,然而总会有这种或那种的不妥、错误与不足,我衷心希望在这美好的春日,广大的专家与读者,不吝拔冗相助,对这套教学用书提出批评建议,予以指教启迪,为这丛鲜花除害灭病,抗风防寒,以进一步提高质量,提高水平,更上一层楼,我们不胜感激。我们深知,“一个篱笆三个桩”,没有专家的指导与支持,没有读者的关心与帮助,也就没有这套教学用书的今天。我衷心祝愿在我们学校第三次大发展的今天,在百年之交与千年之交的时候,这套教学用书会以更

雄健的步伐,走向更美好的未来。

诗云:“嚶其鸣矣,求其友声。”这是我们的心声。

中国科学院院士

华中理工大学学术委员会主任

杨叔子

于华工园内

1999年5月15日

## 代 序

《机械工程测试·信息·信号分析》一书是卢文祥、杜润生两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份努力。

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。

一本书的读者是多方面的,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,西安交通大学顾崇銮教授,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。但对有些内容的舍取,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

1988年8月14日

于华中理工大学

## 第二版前言

本书作为机械工程专业研究生教学用书,自 1990 年 3 月初版发行后,蒙全国三十余所高等院校有关专业采用.不少兄弟院校的有关导师和研究生在使用本书过程中,对本书的内容、体系等,提出了许多宝贵意见,给予了我们热心指导与帮助,特别是,上海交通大学、西安交通大学、清华大学、哈尔滨工业大学、重庆大学、浙江大学、东南大学、吉林工业大学、北京机械工业学院、江西工业大学、内蒙古工业大学、湖北工学院、长沙国防科技大学、长沙铁道学院、太原理工大学、武汉汽车工业大学、武汉钢铁学院、中国矿业大学、焦作工学院等高校的机械工程专业的教师,在此,我们谨向有关同志致以衷心的感谢.

本书于 1997 年获机械工业部机电类优秀教材二等奖,并获湖北省科技进步三等奖.这对我们既是鼓励又是鞭策,我们将继续努力,不断地开拓和实践.

根据多年来的教学实践与本门学科的发展情况,我们对本书进行了修订,主要情况如下:

1. 对书中有关内容体系进行了一些调整,如卷积与相关、细化技术等,调整后较有利于教学的循序渐进规律;
2. 对部分内容作了适当增删,如加强了数字信号分析,删简了有关模拟信号分析内容;
3. 为适应数字信号分析领域的不断扩展,增加了信号的时频分析一章.时频分析提供了非平稳、非高斯信号的处理,以及非线性、非因果、时变系统的分析理论和方法;
4. 加强了有关信号分析处理的工程应用内容,如故障诊断方面的进展和实例等,这有利于开阔思路.

对原书中的论述错误或不妥之处,作了修改,修订后的本书,  
错误与不妥之处仍在所难免,切望读者不吝指教.

编者

1999年5月

于华中理工大学

# 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,也可作为机电一体化、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 engineering 界许多博士生导师、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年7月

# 目 录

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| <b>第一章 绪论</b> .....           | (1)   |
| 1-1 测试·信息·信号.....             | (1)   |
| 1-2 测试信号分析的基本内容 .....         | (2)   |
| 1-3 测试信号分析技术的发展概况 .....       | (3)   |
| 1-4 测试信号分析技术在机械工业发展中的作用 ..... | (4)   |
| <b>第二章 信号分析的基础</b> .....      | (6)   |
| 2-1 信号的分类 .....               | (6)   |
| 2-2 系统 .....                  | (18)  |
| 2-3 信号的时域分析 .....             | (23)  |
| 2-4 信号的频域分析 .....             | (37)  |
| 2-5 卷积与相关定理 .....             | (52)  |
| <b>第三章 信息论基础知识</b> .....      | (66)  |
| 3-1 信息与信息技术 .....             | (66)  |
| 3-2 信息论与广义通信系统 .....          | (78)  |
| 3-3 信息的定量描述——信源模型与信息熵 .....   | (82)  |
| 3-4 连续信源及最大熵定理 .....          | (91)  |
| 3-5 信息与熵的守恒定律 .....           | (102) |
| <b>第四章 信息转换与传输</b> .....      | (104) |
| 4-1 信息转换 .....                | (104) |
| 4-2 信息传输 .....                | (144) |
| 4-3 信息传输过程中的干扰噪声 .....        | (156) |
| <b>第五章 模拟信号分析</b> .....       | (167) |
| 5-1 调制 .....                  | (167) |
| 5-2 滤波 .....                  | (177) |
| 5-3 估值 .....                  | (189) |

|                                   |       |
|-----------------------------------|-------|
| <b>第六章 数字信号分析( I )——DFT 与 FFT</b> | (197) |
| 6-1 模拟信号离散化                       | (197) |
| 6-2 离散 Fourier 变换                 | (207) |
| 6-3 快速 Fourier 变换                 | (226) |
| 6-4 谱分析与谱估计                       | (245) |
| 6-5 现代谱分析方法——最大熵谱估计               | (258) |
| <b>第七章 数字信号分析( II )——数字滤波</b>     | (265) |
| 7-1 数字滤波与模拟滤波                     | (265) |
| 7-2 离散时间系统的时域分析                   | (270) |
| 7-3 Z 变换                          | (276) |
| 7-4 离散时间系统的 Z 域分析                 | (284) |
| 7-5 数字滤波器的原理与结构                   | (289) |
| 7-6 数字滤波器的设计方法概述                  | (298) |
| <b>第八章 维纳滤波</b>                   | (318) |
| 8-1 维纳滤波                          | (318) |
| 8-2 反滤波                           | (323) |
| 8-3 预测反滤波                         | (328) |
| <b>第九章 同态滤波与时谱技术</b>              | (334) |
| 9-1 同态滤波系统                        | (334) |
| 9-2 解乘积同态系统                       | (336) |
| 9-3 解卷积同态系统                       | (337) |
| 9-4 时谱技术                          | (345) |
| <b>第十章 信号的时频分析</b>                | (352) |
| 10-1 短时傅里叶变换                      | (353) |
| 10-2 小波变换                         | (360) |
| <b>第十一章 信号分析设备</b>                | (371) |
| 11-1 频谱分析仪                        | (371) |
| 11-2 数字信号处理系统的构成及分类               | (380) |
| 11-3 数字信号处理系统中的主要部件               | (386) |