

现代电子信息技术丛书

# 现代电子测试技术

(第2版)

—— 信息化武器装备的质量卫士

主编 李立功 副主编 年夫顺 王厚军 刘祖深 田书林



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

**现代电子信息技术丛书**

# **现代电子测试技术** (第2版)

——信息化武器装备的质量卫士

主编 李立功

副主编 年夫顺 王厚军 刘祖深 田书林

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书在保留第1版特色的基础上,大幅度增加了测试新技术和新仪器的介绍。主要内容有:测试技术与仪器概述,测试信号的发生、测量与分析,测试接收机,时间与频率测量,功率测量,网络参数测量与分析,光电测试,通信测试,数据域测试,自动测试系统等。其中重点介绍了目前军事斗争中远距离测试、控制、数据传输和故障诊断等新技术的原理与应用。

读者对象:中专以上文化程度、从事测试技术及相关专业的工程技术人员、管理人员以及大专院校师生。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代电子测试技术 / 李立功主编. —2版. —北京:国防工业出版社, 2008.7

(现代电子信息技术丛书)

ISBN 978-7-118-05726-3

I. 现... II. 李... III. 电子测量设备 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 068863 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 30 字数 747 千字

2008 年 7 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 55.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 《现代电子信息技术丛书》

## 编 审 委 员 会

|         |     |     |     |     |     |  |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 名 誉 主 任 | 陈炳德 |     |     |     |     |  |
| 主 任     | 李安东 |     |     |     |     |  |
| 常务副主任   | 童志鹏 | 张 弛 | 王志刚 |     |     |  |
| 副 主 任   | 刘成海 | 王小谟 | 熊群力 | 王 峰 | 许建峰 |  |
|         | 程洪彬 |     |     |     |     |  |
| 委 员     | 蔡 镛 | 彭华良 | 王 政 | 毕克允 | 夏乃伟 |  |
|         | 张光义 | 刘 兴 | 雷 厉 | 张冬辰 | 黄月江 |  |
|         | 李 跃 | 胡爱民 | 范茂军 | 瞿兆荣 | 张学孝 |  |
|         | 李立功 | 梅遂生 | 廖复疆 | 程辉明 | 骆光明 |  |
|         | 汪继强 | 许西安 | 陈 洁 |     |     |  |

## 总 编 委

|       |     |     |
|-------|-----|-----|
| 总 编   | 童志鹏 |     |
| 副 总 编 | 王晓光 |     |
| 委 员   | 张雅丽 | 线珊珊 |

# 《现代电子测试技术》(第2版)

主 编 李立功

副 主 编 年夫顺 王厚军 刘祖深 田书林

编著人员 (按姓氏笔画排序)

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 王 娜 | 王亚海 | 王恒飞 | 牛大胜 | 史红旗 |
| 包思云 | 师奕兵 | 刘 军 | 刘 亮 | 闫继送 |
| 朱 健 | 朱文星 | 江 岩 | 许建华 | 孙 宏 |
| 杜以涛 | 李 力 | 李坤党 | 李洪胜 | 陆耀东 |
| 吴 杰 | 陈 丽 | 陈向民 | 何攀峰 | 应承平 |
| 宋 斌 | 冷 朋 | 罗文建 | 周 辉 | 赵秀才 |
| 郝绍杰 | 胡亚平 | 柏海鹰 | 费 丰 | 贺永亮 |
| 钱志国 | 钱时祥 | 郭利强 | 黄建国 | 盛振旗 |
| 梁胜利 | 韩晓东 | 韩敬伟 | 程根法 | 满春阳 |
| 樊晓腾 |     |     |     |     |

# Preface

## 序

《现代电子信息技术丛书》(以下简称《丛书》)自1999年首次出版,至今已8年了。《丛书》综合地反映了20世纪90年代电子信息技术的发展,受到广大科技工作者、大专院校师生和部队官兵的欢迎。进入新世纪以来,鉴于国内外电子信息的飞速发展,世界与局部形势发生了许多新的变化,电子信息技术循着摩尔定律预计的发展速度得到了持续的增长与进步。我国电子信息技术不论在基础层次还是在系统层次也取得了许多世界先进的成果,例如突破了纳米级的金属氧化物场效应器件(MOSFET)的设计与制造技术,研制成功了数十万亿次运算速度的巨型计算机,实现了计算栅格的研制与试验,成功地开发出世界级的第三代数字蜂窝移动通信系统,研制出空中预警与控制机系统和区域级一体化综合电子信息系统等。国际上,美国等发达国家在电子信息技术发展上处于领先地位,成功地研制出45nm的微处理器并进行批量生产,正向20nm及以下迈进。美国启动了从工业时代到信息时代的军事转型,提出从平台中心战(PCW)向网络中心战(NCW)的转型,并以全球信息栅格(GIG)为基础。GIG是美国所构想的、正在研发的国防信息基础设施,预计在2015年可形成初始作战能力。它以面向服务的结构(SOA)为体系构架,向联网的实体提供成套的、安全的信息服务与电信服务,以加强信息共享、决策优势与异构协同。GIG包括多模态数据的传递媒介,如陆上电路、空间单元和无线电台等,其所组成的互联网络可动态地、透明地将信息从发源处路由至目的地。以GIG为依托,美国军队加速向网络中心化演进,如陆军的未来战斗系统(FCS),海军的兵力网(Forcenet),空军的指挥控制星座( $C^2$  constellation)等。这里涉及十分巨大(Herculean)的技术挑战,必须通过从基础到系统的多层次创新和突破,才能在未来有限的时间内实现超越前15年Web网发明以来的发展。凡此种种,都是我们在编著《丛书》第1版时只能预测而无法探知的。然而今日,这些高新技术的面貌已逐渐清晰并迅速渗入人们的生活和竞争。这使《丛书》的作者们意识到进行再一次创作的必要性;同时,热心的读者们也期盼我们能及时对第1版进行

修改以便与时俱进。

基于以上原因,在各级领导机关的大力支持下,《丛书》各分册的原作者与新分册的新作者们在从事繁重业务工作的同时,废寝忘食、辛勤耕耘,对《丛书》各分册进行了精心修订、编撰,为第2版的问世做出了卓越的贡献。我谨代表《丛书》编审委员会向他们致以衷心的敬意与感谢。

第2版承袭了第1版的编写宗旨、编写特色及服务对象。在维持原结构不变的基础上,对内容进行了大幅度更新,并明显加大了军事科技的比重,增、删了7个分册,总册数由17分册变为18分册,总字数由800万字增加到1400万字。新版《丛书》仍以先进的综合电子信息系统为龙头,分层次、全方位地介绍各项先进信息技术,具体包括以下分册:

#### 系统性技术分册

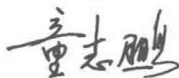
- 综合电子信息系统(第2版)
- 综合电子战(第2版)
- 侦察与监视
- 军事通信(第2版)
- 雷达与探测(第2版)
- 数据链
- 导航与定位(第2版)
- 计算机技术(第2版)
- 计算机软件技术(第2版)
- 信息安全与保密(第2版)

#### 基础性技术分册

- 微电子技术(第2版)
- 光电子技术(第2版)
- 真空电子技术(第2版)
- 传感器技术
- 微声电子器件
- 化学与物理电源(第2版)
- 现代电子测试技术(第2版)
- 先进电子制造技术(第2版)

这两个系统分别从横向、纵向对众多先进的信息技术形成了有机的集成。

《丛书》的编写出版得到总装备部、中国电子科技集团公司及其有关研究所的领导的大力支持,得到国防工业出版社领导及编辑们的积极推动与努力,谨对他们表示由衷的感谢。



2007年8月26日

# Preface

## 第1版序

---

信息技术是一个复杂的多层次多专业的技术体系,粗略地可以分为系统和基础两个层次。属于系统层的一般按功能分,如信息获取、通信、处理、控制、对抗(简称为5C技术,即Collection, Communication, Computing, Control, Countermeasure五个词的第一个字母)等;基础层技术一般按专业分,如微电子、光电子、微波真空电子等。

信息技术革命的火炬是由微电子技术革命点燃的,它促进了计算机技术、通信技术及其他电子信息技术的更新换代,迄今,尚未有尽期。信息技术革命推动产业革命,使人类社会经历了农业、工业社会后进入了信息社会。

大规模集成电路的集成度是微电子技术革命的重要标志,它遵循摩尔(Moore)定律,每18个月翻一番,预计可延伸到2010年。届时,每个芯片可包含100亿( $10^{10}$ )个元件,面积可达到 $10\text{cm}^2$ ,作为动态存储器的存储量可达64Gb(吉比特),接近理论极限 $10^{11}$ 个元件和256Gb存储量。微处理器芯片的运算速度每5年提高一个数量级,到本世纪末,每个芯片运算速度可达 $10\sim 100$ 亿次每秒,有人认为,实现2000亿次的单片微处理器在技术上是可能的。与此相适应,每芯片比特存储量与每MIPS(兆指令每秒)运算量的成本将呈指数式下降,现在一个100兆指令/s专用数字信号处理芯片只售5美元。如果飞机的价格也像微电子那样呈指数式下降的话,70年代初买1块比萨饼的费用在90年代就可以买1架波音747客机。3年内1部电话机将只用1块芯片,5年内1台PC机的全部功能可在1个芯片上实现,6年内1部ATM交换机的核心功能也可用1个单片完成。由于微处理器芯片价格持续不断地下降,构成了它广泛应用的基础。现在,在一般家庭、汽车和办公室中,就有100多个微处理器在工作,不仅是PC机,而且在电话机、移动电话机、电视机、洗衣机、烘干机、立体声音响、家庭影院中也有。1辆高档汽车中包含20多种可编程微处理器,1架波音777客机含有100多万行的计算机程序代码。

通信技术的进步还得力于光子技术的进步。光通信速率(比



特每秒)每两年翻一番,现在实验室中已可做到  $10^{12}$  b/s,即可将全世界可能传输的全部通信量于同一时刻内在 1 根光纤中传送,或相当于 1s 内传输 1000 份 30 卷的百科全书。通信速率的提高和通信容量的增大,使光通信成本也不断降低,与 80 年代相比,降低了两个数量级。

因特网是全球信息基础设施的雏形,其发展速度惊人。现在每 0.4s 增加一个用户,每 4min 增加一个网络。1996 年联网数大于 10 万,联网主机数大于 1000 万,用户数大于 7000 万(预计到本世纪末,将大于 2 亿),PC 机总量将达 5 亿,联网主机达 3000 万,信息量每 5 年翻一番。越来越多的公司、团体、机关、个人通过信息网络相互联接,其应用范围从单纯的电子函件通信扩大到远程合作(包括教育、诊断、办公、会议、协作等)、按需点播、多媒体文娱、电子商务、银行、支付等,人类社会生存与发展的另一维空间,即信息空间或称为赛博空间(Cyberspace)正在形成。如果说工业社会是建筑在汽车与高速公路上的话,信息社会则是建筑在信息与信息高速公路上的。政府、军队、经济、金融、电力、交通、电信等关键部门都要依赖于信息基础设施的正常运行。信息技术和信息产业的水平已成为综合国力的重要标志,也是国际竞争力的焦点与热点。

信息技术的飞跃发展及其渗透到各行各业的广泛应用,不仅推动了产业革命,而且也深刻地改变了人们的工作、学习和生活的方式。信息技术不仅扩展了人的视觉、听觉等感知能力,而且还渗透到思维领域,减轻或部分地替代人的脑力劳动,提高思维的效率和质量,实现人的思维能力的延伸,增强人的认知能力。信息作为事物的属性与相互关系的状态的表达是客观存在的,但不是显在的,很多是潜在的,有的是深埋的,有待挖掘与提炼。信息技术大大地丰富了信息采集的内容,提高了信息处理的能力,为人们对外观事物及其规律的认识提供了创新的工具,也为人们正确认识与有效改造主观世界和客观世界提供了源泉,将使社会的物质文明与精神文明建设得到极大的发展。

信息、能源与物质是人类社会赖以生存与发展的三大支柱。在信息社会中,信息是最重要的支柱和最重要的产业,它影响着其他两个支柱的健康发展,包括生产、传输、分配、运行、减少损耗、改善管理、提高效率、降低成本等等;同时,它还能不断地培育与发展新物质和新能源的发明与生产,不断地改善生态环境,从而使人类社会进入可持续发展的健康轨道。

信息革命在带动产业革命的同时也带动军事革命,使得军事技术、武器装备、作战思想、作战方式、战争形态、军事原则、军事条令与部队编成等都将发生深刻的变化。如果农业社会是冷兵器时代,工业社会是热兵器时代,那么信息社会则是信息兵器时代。信息、信息系统与信息化平台、武器与弹药成为战场上的主战兵器。信息优势成为传统的陆地、海洋、空中、空间优势以外的新的争夺领域,并深刻地制约着传统领域的战斗胜负,从而构成信息化战争的新形态。在这种战争中,战争胜负决定于敌对双方掌握信息与信息技术的广度与深度。信息不仅是兵力倍增器,它本身就是武器和目标,是双方必争的制高点。1991 年初的海湾战争,被称为硅片战胜钢铁的战争,即源于这样的认识。它开启了赛博空间战、网络战、信息战等簇新的作战方式。

以信息优势为核心的军事革命是建筑在先进的指挥、控制、通信、计算机、情报、监视、侦察及其一体化的信息战能力的基础上的,这个众系之系(系统的系统)我国称为综合电子信息系统,与美军后来提出的 C<sup>4</sup>ISR/IW 相当,它由以下 6 部分组成。

1. 鲁棒的多探测器信息栅格网络。为作战部队提供作战空间感知优势。
2. 先进的指挥控制与作战管理栅格网络。为部队提供作战的先期规划、胜敌一筹的作战部署,执行作战指挥控制与一体化兵力管理能力。
3. 从探测器到射击器的栅格网络。为部队提供精确制导武器的动态目标管理、分配与

引导,协同作战,一体化防空,快速战损评估和再打击能力。

4. 联合的通信、导航与定位栅格网络。提供可靠、安全、大容量与高精度的信息,以支持部队的机动行动,确保全面优势。

5. 信息进攻能力。采取侵入、操纵与扰乱等手段,阻碍敌人作战空间感知、认知与有效用兵能力。

6. 信息防护能力。保证我方信息系统的安全,防护敌方对我信息网络的利用、干扰和破坏。

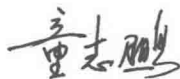
这个系统的系统涉及众多先进的信息技术的横向与纵向的有机集成,它包括雷达和光电的有源与无源探测技术、有线和无线及固定和移动通信技术、计算机硬件和软件技术、精确导航定位技术、航天航空测控技术、信息安全保密技术、电子战技术等横向专业技术的集成;也涉及微电子技术、光子与光电子技术、真空电子技术、压电与传感器技术等先进元器件技术,电子材料技术、电源技术、测试技术、先进制造技术等纵向基础技术的集成。当代军事革命要求在创新的军事思想指引下,发展有层次多专业的纵横集成的信息技术;同时,又要求在先进的信息技术驱动下,培育与发展新的军事思想,并在此基础上推动作战原则、军事条令与部队编成的变革,形成军事革命与信息革命的有机结合。

我们正处于世纪之交,党的第十五次代表大会的胜利召开,启动了有中国特色的社会主义事业在邓小平理论的指引下全面进入21世纪。我国的国防与军队现代化建设的跨世纪历史进程已经开始。为了适应军事革命环境下的高新技术军事斗争的需要,我军必须拥有信息优势,必须拥有以先进的综合电子信息系统为基础结构的性能优良的武器装备,必须提高部队素质,把人才培养推上新的台阶。

江泽民总书记非常重视人才的培养,他多次指示,要用高新技术知识武装全军头脑。在未来的信息化战场上,知识将成为战斗力的主导因素,敌对双方的较量将更突出地表现为高素质人才的较量。本丛书的编写出版就是为贯彻这个伟大号召提供系统基础知识。全书以先进的综合电子信息系统为龙头,多层次、全方位地介绍相关的各项先进信息技术,既包括系统技术,也包括基础技术,共17个方面,荟萃成17个分册。丛书的编写以普及先进信息技术知识为目标,以中专以上文化程度,从事军、民用电子信息技术有关业务的技术人员和管理干部为主要对象,努力做到深入浅出,雅俗共赏,图文并茂,引人入胜,文字简练,语言流畅,学术严谨,论述准确,使其具有可读性、可用性、先进性、系统性与权威性。参加丛书各分册撰写的作者都是长期从事现代信息技术研究与发展的专家,他们在繁重的业务工作的同时,废寝忘食,长期放弃节假日的休息,辛勤耕耘,鞠躬尽瘁,为本丛书做出了卓越的贡献。他们以自己的模范行动,“努力成为先进思想的传播者、科学技术的开拓者、‘四有’公民的培育者和优秀精神产品的生产者”。我谨代表总编委向他们致以衷心的感谢!

本丛书的编写出版得到原国防科工委与原电子工业部领导的大力支持,得到国防工业出版社领导及责任编辑们的积极推动与努力,借此之机,向他们表示由衷的感谢!

中国工程院院士  
原电子工业部科技委常务副主任



# Preface

## 前言

---

“装备要发展,测试须先行”。测试技术是国家现代化建设的关键基础技术,应用于“农轻重、陆海空、吃穿用”,无所不在,在国民经济中具有“四两拨千斤”的作用。尽管这里所说的仪器仪表除电子测试仪器外,还包括工业控制仪表、生物、医疗、化学分析仪表等电量和非电量测试仪器仪表,但也足以说明仪器仪表工业的重要地位。仪器仪表作为信息获取的物质基础,是信息化时代信息获取—处理—传输链的源头,在武器装备现代化建设和国民经济持续协调发展过程中占有重要地位,是武器装备现代化建设的先行官,是国民经济高新技术产业的重要基石和倍增器,是衡量一个国家科学技术发展水平以至国防现代化水平的重要标志。如果得不到应有的重视和发展,在国防军工方面往往会成为制约武器装备发挥作战效能的“瓶颈”,对武器装备健康发展带来不利影响;在国民经济建设方面,将导致长期依赖进口仪器设备,使产品成本居高不下,市场竞争能力下降。在国际政治、经济和军事斗争当中,高精尖仪器常常作为政治筹码,用以对他国进行种种限制和禁运。

电子测试技术是测试技术的重要分支,电子测试仪器是电子测试技术的物化产品,是仪器仪表工业的重要组成部分,具有测试频段宽、测试精度高、重复性高、动态范围大、综合性强等特点,测试精度一般高于被测对象一到两个数量级,体现多学科、多专业的综合应用水平和创新能力,属于国防科技和电子信息产业的重要支撑设备和共性基础设施。电子测试仪器属于军民两用产品,面向武器装备研制建设与维修保障的测试需求,用于各军兵种的在役武器装备的维修保障测试,解决武器装备三级维修保障体系的有关测试问题,提供相关技术保障装备;用于电子、航天、航空、兵器、船舶、核工业等国防工业部门各类在研武器装备的科研、生产和试验环节的测试,解决自主创新、集成创新和消化吸收再创新的测试问题,为装备创新发展提供高精尖仪器设备。面向民用通信和消费电子产品的测试需求,用于数字移动通信、数字电视、计算机网络、电子元器件等蓬勃发展的信息产业,解决生产线与运营商的测试与维护修理问

题,为电子信息产业发展提供测试手段和仪器设备。

随着计算机和微电子技术的不断发展,电子测试仪器进入了新的发展时代,更新换代速度由平均10年~15年提高到3年~5年。现代仪器将测试、计算机、通信和控制技术有机综合,体系结构由 $MC^2$ 逐步过渡到 $MC^3$ 结构。奔腾计算机芯片和Windows软件资源、外设和接口直接为仪器所使用,使测试精度和速度都提高了几个数量级。仪器吞并了计算机,又使自己成为庞大计算机网络的一个终端产品,使远距离测试、控制、数据传输和故障诊断成为可能,实现了测试硬件、软件、技术、经验和信息共享,使仪器和计算机保持同步发展。大规模集成电路和可编程器件改变了仪器设计思路和设计方法,不仅提高了仪器集成度,增加了仪器功能,提高了性能指标,而且成为保护知识产权的最有效手段。DSP等集成电路的使用,简化了仪器中频电路,促进了软件无线电技术的应用。

为了及时反映电子测试仪器的新原理、新思想、新方法、新技术和新工艺,突出科技创新理念,我们对本书第1版进行了修订。第2版保留了原书的特色,注重增加了新技术的有关内容,及时反映了新技术与新仪器的综合特点。全书共分11章。第1章绪论,介绍了量值传递与溯源的基本概念,以及电子测试仪器的重要作用、发展方向与发展趋势。第2章信号的发生,重点介绍了函数/任意波形发生器、脉冲发生器、射频合成信号发生器、微波与毫米波合成信号发生器、矢量信号发生器、高纯信号发生器、捷变频信号发生器和信号模拟仿真器等仪器的基本概念、工作原理和典型应用。第3章信号测量与分析,介绍了信号测量与分析的基本概念,重点介绍了动态信号分析、数字存储示波器、频谱分析、矢量信号分析、调制域信号分析和相位噪声测量的基本概念、工作原理和典型应用。第4章测试接收机,重点介绍了通用测量接收机、场强接收机、EMI接收机、测频接收机、测向接收机和电磁信息泄漏接收机的基本概念、工作原理和典型应用。第5章时间与频率测量,重点介绍了电子计数器、连续波微波频率测量、脉冲调制信号载波频率测量、频率及时间标准。第6章功率测量,重点介绍了平均功率测量、峰值功率测量、大功率测量、功率校准与量值传递。第7章网络参数测试与分析,介绍了网络参数的表征方法、阻抗分析仪、标量网络分析、噪声系数分析的基本概念和工作原理,重点介绍了微波、毫米波、脉冲、多端口和非线性等矢量网络分析仪的基本概念、工作原理和典型应用,介绍了矢量网络分析仪的传统校准方法、现代电子校准方法以及误差修正的基本概念。第8章光电测试,介绍了光源、光功率计、光时域反射计、光谱分析仪、可编程光衰减器、光回波损耗测试仪、光纤色散测试仪、光偏振分析、大功率激光参量测量、CCD及红外焦平面阵列测试的基本概念、工作原理和典型应用。第9章通信测试,重点介绍了数字传输、数据通信、网络协议等测试仪器的基本概念、工作原理和典型应用。第10章数据域测试,重点介绍了数据发生器、逻辑分析仪和数字集成电路测试仪的基本概念、工作原理和典型应用。第11章自动测试系统,介绍了自动测试系统的基本概念、体系结构和发展历史,重点介绍了测试仪器与系统的标准总线、测试仪器程控标准、测试系统软件、测试系统系统集成等有关内容,最后给出了自动测试系统的典型应用实例。

本书的修订是在丛书总编委的直接指导下,由中国电子科技集团公司第四十一研究所、第十一研究所,电子科技大学的科研人员共同完成的,是集体智慧的结晶。李立功和刘祖深编写了第1章。樊晓腾负责第2章的编写与整理,郭利强、盛振旗、刘亮、何攀峰、朱健、陈向民、刘军和王娜参加了第2章有关章节的编写。许建华负责第3章的编写与整理,王厚军、刘祖深、李洪胜和陈向民参加了第3章有关章节的编写。许建华负责第4章的编写与整理,钱时祥、杜以涛、牛大胜和柏海鹰为第4章的编写提供了素材,刘美娟和张华参加了第4章书稿的整理工作。刘军和王厚军负责第5章的编写与整理。李坤党负责第6章的编写与整理。韩晓东负责第7章的编写与整理,梁胜利、史红旗、江岩、郝绍杰和陈丽参加了第7章有关章

节的编写。罗文建负责第8章编写与整理,朱文星、闫继送、贺永亮、钱志国、费丰、王恒飞、陆耀东、满春阳和应承平参加第8章有关章节的编写。程根法负责第9章的编写与整理,包思云、孙宏和胡亚平参加了第9章有关章节的编写。师奕兵负责第10章的编写与整理,黄建国、李力参加了第10章有关章节的编写。田书林和韩敬伟负责第11章的编写与整理,赵秀才、王亚海、周辉、钱时祥、宋斌、吴杰、冷朋参加了第11章有关章节的编写。

《现代电子测试技术》第2版由李立功任主编,年夫顺、王厚军、刘祖深和田书林任副主编,共同制定了编写大纲,并负责有关章节的组稿与审稿。李立功负责第1章的组稿与审稿,年夫顺负责前言和第2章、第3章、第4章和第7章的组稿与审稿,刘祖深负责第6章、第8章和第9章的组稿与审稿,田书林负责第5章、第10章和第11章的组稿与审稿。

在本书编写过程中,童志鹏院士、毕克允研究员一直关心编写工作的进展,并给予指导与帮助。中国电子科技集团公司第四十一研究所毛继宏研究员参加了本书编写大纲的制定,并审阅了部分书稿,提出了不少修改意见和建议。国防工业出版社王晓光编审为本书的编辑出版作了大量细致的工作,提出了不少修改意见和建议,为提高本书的出版质量付出艰辛的劳动。中国电子科技集团公司第四十一研究所王秦为书稿的收集与整理付出了艰辛的劳动。在此,一并表示感谢!

由于作者水平有限,加上时间比较仓促,书中难免有疏漏和错误,殷切希望领导、专家和广大读者批评指正。

作 者

# Preface

## 第1版前言

---

本书是《现代电子信息技术丛书》的一个分册,全面介绍电子测试技术、仪器和系统的基本原理及方法,并对各种测试仪器和系统在军事及民用方面的应用进行了叙述。

著名科学家门捷列夫说过:“没有测量,就没有科学”。测试技术和仪器是科学研究中信息的获取、处理和显示的重要手段,是人们认识客观世界并取得定性或定量信息的基本方法,是信息工程的源头和重要组成部分。而电子测试技术及仪器则是指利用电子技术对电量或非电量进行测量的方法与设备。它是进行军事装备研究,新产品试制和开发,以及生产与维护运转中不可缺少的测试手段和工具。一切重大的科学技术成就都与测试技术和测试仪器有直接关系。因此,电子测试技术及仪器的水平常常是衡量一个国家科技发展和生产技术水平的重要标志,也是军事实力的重要表现。

在科学技术高度发展的今天,测试工作将处于各种现代军事装备系统设计和制造的首位,并成为生产率、制造能力及实用性水平的重要标志。据有关资料报道:目前,测试成本已达到所研制的军事装备系统总成本的50%,甚至70%;而且,编制测试程序所花的时间比系统设计所花的时间更长。因此,在未来激烈竞争的世界中,测试将与现代军事装备系统的设计和制造构成一个完整的整体,是保证现代军事装备系统实际性能指标的重要手段。

电子测试技术和仪器是直接或间接地为军事目的服务的,它不仅是各种军事装备的研究开发、生产调试和维护修理的重要工具,而且,测试仪器本身常常就是军事装备中的重要组成部分。因此,军用电子测试仪器的性能指标将直接影响军事装备的性能。如军事通信和侦察、导航、遥控遥测、雷达、制导,以及深空探测的精度和准确度等都对频率稳定性和频谱纯度有极高的要求,否则将“差之毫厘,失之千里”;由于毫米波具有独特的传输特性,在军事应用中占有重要位置,因此,电子战、军事指挥系统和机载辐射计等对毫米波测试技术及仪器提出了高的要求;自动微波网络分析系统的出现推动了军用相控阵雷达等军事微波装备的发展;频谱分析仪器则提



高了军事目标识别的能力;动态振动模态分析仪器促进了飞行器及潜艇设计的优化;电磁兼容(EMC)测试技术及仪器使海军和空军的电子装备实现了密集化、小型化,并便于隐蔽;光纤测试仪器推动了军用光纤通信的发展等等。

由于军事电子测试仪器在军事装备中的重要作用,因此,在国际军事竞赛中,军事电子仪器常常是一个重要筹码,用以对他国进行种种限制和禁运。因此,一个国家要在军事装备上实现现代化,则必须具有先进的军事测试技术来予以保证。

本书正是在上述指导思想下写成的,它突出了军事应用中的先进测试技术及仪器。然而,对于测试技术及测试仪器而言,它常常是军民两用的。这一特点使本书可以适应更广泛的应用范围。全书共十一章。第一章电子测试技术及仪器概述。介绍了电子测试技术基础及电子仪器平台的基本概念。第二章测试信号的产生。重点介绍了合成信号源、合成扫频信号源及函数/任意波形发生器。第三章测试信号的分析。介绍了频谱分析、调制域分析、噪声测试和相位噪声测试。第四章数字存储示波器。介绍了数字存储示波器的工作原理及应用。第五章频率和时间测量。重点介绍通用计数器、微波频率计数器及频率标准和时间标准。第六章功率测量。在介绍了功率测量方法的基础上,叙述了热偶式功率计、二极管功率传感器、峰值功率计、功率分析仪及功率计的校准。第七章阻抗与网络分析。在介绍了元器件特性的网络表征方法的基础上,重点叙述了射频阻抗测量、标量网络分析仪和矢量网络分析仪。第八章光电测试。主要介绍了光源、光功率计、光时域反射计、光谱分析仪、光信号分析仪及光元器件分析仪。第九章数据域测试。重点介绍了数字信号发生器和逻辑分析仪。第十章通信测试。主要介绍了规约分析仪、数字传输测试(误码测试、抖动测试)和数字通信测试。第十一章自动测试系统。重点介绍自动测试系统的基本结构、接口标准(IEEE488、VXI接口)、仪器的程控、虚拟仪器和仪器驱动器,以及测试软件的自动生成。

本书是在《现代电子信息技术》丛书总编委的直接指导下,由我国电子测试技术领域的工程技术人员共同编写完成的,是集体智慧的结晶。陈光禔编写了第一章和第九章;马旭飙和郭利强编写了第2.1、2.2节和2.3节;王厚军编写了第2.4、3.2、3.4、10.1节和第六章;刘祖深编写了第3.1和3.3节;李为民编写了第四章、第五章和第11.1、11.2、11.4、11.5节;年夫顺和史红旗编写了第7.1、7.3和7.4节;江岩编写了第7.2节;王健编写了第8.1和8.6节;尹晓民编写了第8.2节;胡为良编写了第8.3节;张家奎编写了第8.4节;王福崇编写了第8.5节;彭善金编写了第10.2节;吴涛编写了第10.3节;袁俭编写了第11.3节。

本书由陈光禔任主编,毛继宏、林春勋、杨福荣、李为民任副主编,共同制定了本书的编写大纲,并负责有关章节的组稿和审稿。毛继宏负责第三章、第七章和第八章的组稿及第六章、第九章和第十章的审稿;林春勋负责第二章和第十章的组稿及第一章、第三章和第四章的审稿;杨福荣负责第六章的组稿及第二章、第七章和第八章的审稿;陈光禔负责第一章、第四章、第五章、第九章和第十一章的组稿及第五章和第十一章的审稿,最后由陈光禔和李为民统编全稿。

在本书编写过程中,原电子工业部电子科学研究院的童志鹏教授、邱荣欣教授、李德珍主任、朱旂同志、张国敏同志和国防工业出版社的王晓光编审都一直关心着本书的编写工作,并参加本书的审稿,提出了不少修改意见;孙中明编审为本书的出版作了大量细致的编辑工作,为提高本书出版质量付出了艰辛劳动;作为本书的挂靠单位电子科技大学科技处对本书的编写给予了极大的支持和帮助。在此,一并表示感谢!

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在疏漏和错误。殷切希望领导、专家和读者批评指正。

作者

# Contents

## 目 录

---

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| <b>第1章 绪论</b>         | <b>1</b>  |
| 1.1 测试技术与仪器概述         | 1         |
| 1.2 电子测量仪器的地位、作用和应用需求 | 2         |
| 1.2.1 电子测量仪器的地位和作用    | 2         |
| 1.2.2 电子测量仪器的军事应用     | 3         |
| 1.2.3 电子测量仪器的市场需求     | 4         |
| 1.3 电子测试技术与仪器的现状和发展趋势 | 4         |
| 1.3.1 微波与毫米波测试技术与仪器   | 4         |
| 1.3.2 光电测试技术与仪器       | 8         |
| 1.3.3 数字/数据传输测试技术与仪器  | 9         |
| 1.3.4 数字通信测试技术与仪器     | 10        |
| 1.3.5 基础测量技术与仪器       | 11        |
| 1.3.6 虚拟测试技术与仪器       | 12        |
| 1.3.7 自动测试系统          | 14        |
| 1.4 仪器的量值传递与溯源        | 16        |
| 1.4.1 相关计量术语          | 16        |
| 1.4.2 我国的计量单位制        | 16        |
| 1.4.3 量值传递与溯源         | 17        |
| 1.4.4 量值传递的基本方式       | 18        |
| 1.4.5 检定、校准与测试        | 19        |
| 1.4.6 电子计量测试的现状和发展趋势  | 20        |
| <b>第2章 信号的发生</b>      | <b>22</b> |
| 2.1 信号发生基础            | 23        |
| 2.1.1 信号发生器分类         | 23        |
| 2.1.2 信号发生器主要组成及工作原理  | 25        |



|                                                                                     |                            |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------|
| 2.1.3                                                                               | 信号发生器的主要技术参数               | 26        |
| 2.1.4                                                                               | 信号发生器主要用途                  | 30        |
|    | <b>2.2 函数/任意波形发生器</b>      | <b>30</b> |
| 2.2.1                                                                               | 基本概念                       | 30        |
| 2.2.2                                                                               | 基本工作原理                     | 31        |
| 2.2.3                                                                               | 主要技术指标                     | 34        |
| 2.2.4                                                                               | 典型应用                       | 34        |
|    | <b>2.3 脉冲发生器</b>           | <b>36</b> |
| 2.3.1                                                                               | 基本概念                       | 36        |
| 2.3.2                                                                               | 基本工作原理                     | 37        |
| 2.3.3                                                                               | 主要技术指标                     | 39        |
| 2.3.4                                                                               | 典型应用                       | 40        |
|    | <b>2.4 射频合成信号发生器</b>       | <b>40</b> |
| 2.4.1                                                                               | 基本概念                       | 40        |
| 2.4.2                                                                               | 基本工作原理                     | 41        |
| 2.4.3                                                                               | 主要技术指标                     | 48        |
| 2.4.4                                                                               | 典型应用                       | 49        |
|    | <b>2.5 微波与毫米波合成信号发生器</b>   | <b>49</b> |
| 2.5.1                                                                               | 基本概念                       | 49        |
| 2.5.2                                                                               | 基本工作原理                     | 50        |
| 2.5.3                                                                               | 主要技术指标                     | 52        |
| 2.5.4                                                                               | 典型应用                       | 52        |
|  | <b>2.6 微波与毫米波合成扫频信号发生器</b> | <b>53</b> |
| 2.6.1                                                                               | 基本概念                       | 53        |
| 2.6.2                                                                               | 基本工作原理                     | 54        |
| 2.6.3                                                                               | 主要技术指标                     | 57        |
| 2.6.4                                                                               | 典型应用                       | 58        |
|  | <b>2.7 矢量信号发生器</b>         | <b>58</b> |
| 2.7.1                                                                               | 基本概念                       | 58        |
| 2.7.2                                                                               | 基本工作原理                     | 58        |
| 2.7.3                                                                               | 主要技术指标                     | 60        |
| 2.7.4                                                                               | 典型应用                       | 61        |
|  | <b>2.8 高纯信号发生器</b>         | <b>62</b> |
| 2.8.1                                                                               | 基本概念                       | 62        |
| 2.8.2                                                                               | 基本工作原理                     | 63        |
| 2.8.3                                                                               | 主要技术指标                     | 64        |
| 2.8.4                                                                               | 典型应用                       | 64        |
|  | <b>2.9 捷变频信号发生器</b>        | <b>65</b> |