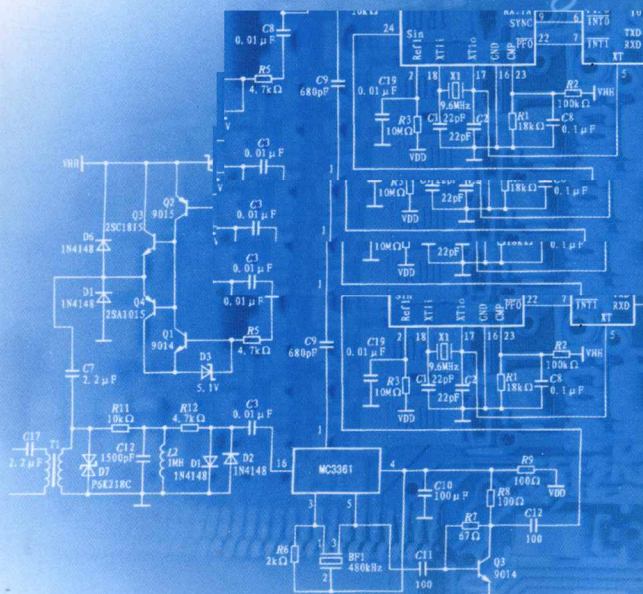


高等学校电子信息类系列教材

# 通信系统原理实验

王根英 王 琴 周春月 编著



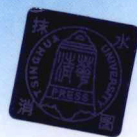
清华大学出版社

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



北京交通大学出版社

<http://press.bjtu.edu.cn>



高等学校电子信息类系列教材

# 通信系统原理实验

王根英 王 琴 周春月 编著

清华大学出版社  
北京交通大学出版社

·北京·

## 内 容 简 介

通信系统原理实验,是掌握通信基本原理至关重要的实践环节,对于通信工程和电子信息专业的学生来说,打下扎实的基础是很重要的。本书共13章:第1章主要介绍通信系统原理实验箱的总体构成,第2章为语音信号编译码及其实验,第3章对AMI和HDB<sub>3</sub>编译码进行分析和实验,第4章介绍PCM30/32路系统及帧同步原理,第5章为数字多路复用与帧同步系统实验,第6章介绍FPGA及其在数字调制解调中的应用,第7章介绍载波同步的方法,第8章分析从基带信号中提取位同步和从数字调相信号中提取位同步的方法,第9章为数字调制与解调实验,第10章为基带信号和频带信号的频谱测试,第11章主要是频带传输系统的误码性能测试,第12章是差错控制技术和实验方法;第13章为通信系统的综合设计实验。

本教材适合高等院校通信工程和电子信息专业的本科教学使用,也可作为通信和电子信息专业工程技术人员参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

### 图书在版编目(CIP)数据

通信系统原理实验/王根英,王琴,周春月编著. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社,2010.10

(高等学校电子信息类系列教材)

ISBN 978-7-81123-442-8

I. ①通… II. ①王… ②王… ③周… III. ①通信系统-高等学校-教材  
IV. ①TN914

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第180537号

责任编辑:吴嫦娥

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京交大印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:12.5 字数:319千字

版 次:2010年10月第1版 2010年10月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-81123-442-8/TN·61

印 数:1~4 000册 定价:25.00元

---

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监局反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。  
投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn.

# 高等学校电子信息类系列教材 编审委员会成员名单

主任 谈振辉

副主任 张思东 赵尔沅

委员 (以姓氏笔画为序)

王志刚 邓忠礼 冯玉珉 冯锡生 卢先河

刘云 齐立心 朱定华 严国萍 李承恕

汪希时 沙斐 张有根 张林昌 陈常嘉

郑光信 屈波 钟章队 徐佩霞 薛质

# 总 序

近年来,我国高等教育经历了重大的改革,已经在教育思想和观念上、教育方法和手段上有了长足的进步,在较大范围和较深层次上取得了成果。为了推进课程改革、加快我国大学教育国际化的进程,教学内容和课程体系改革已经是势在必行。特别在通信与信息领域,随着微电子、光电子技术、计算机技术及光纤等相关技术的发展,尤其是计算机技术与通信技术相结合,使得现代通信正经历着一场变革,各种新技术、新业务、新系统和新应用层出不穷,传统的教学内容和课程体系已不能满足要求,同时教材内容也需要更新。在此背景下,我们决定编写一套紧跟国际科技发展又适合我国国情的“高等学校电子信息类系列教材”,以适应我国高等教育改革的新形势。

“高等学校电子信息类系列教材”涉及传输技术、交换技术、IP技术、接入技术、通信网络技术及各种新业务等。我们在取得教学改革成果的基础上,组织了一批具有多年教学经验、从事科研工作的教师参与编写这套专业课程系列教材。

## 本系列专业课程教材具有以下特色:

- 在编写指导思想,突出实用性、基础性、先进性和时代特征,强调核心知识,结合实际应用,理论与实践相结合。

- 在教材体系上,强调知识结构的系统性和完整性,强调课程间的有机联系,注重学生知识运用能力和创新意识的培养。

- 在教材内容上,重点阐述系统的基本概念和原理、基本组成、基本功能及基本应用,对一些新技术和新应用做较系统的介绍;内容丰富,层次分明,重点突出,叙述简洁,通俗易懂。

## 本系列专业课程教材包括:

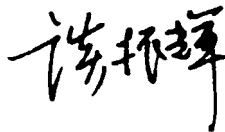
《现代通信概论》、《通信系统原理》、《通信系统学习指南》、《数字通信》、《现代交换技术》、《光纤通信理论基础》、《光纤通信系统及其应用》、《光接入网技术及其应用》、《现代移动通信系统》、《数字微波通信》、《卫星通信》、《现代通信网》、《自动控制原理》、《单片机原理与应用》、《蓝牙技术原理与协议》、《计算机通信网基础》、《多媒体通信》、《数字图像处理学》、《网络信息安全技术》、《光电检测技术》、《通信系统原理实验》等。

本系列教材的出版得到北京交通大学教务处的全力支持,同时也得到北京交通大学出版社、清华大学出版社有关同志的精心指导和全力帮助。

本系列教材适合于高等院校通信及相关专业本科生教育,也可作为从事电信工作的技术人员自学教材及培训教材。

“高等学校电子信息类系列教材”

编审委员会主任



2010年10月

# 前 言

随着通信技术的飞速发展,移动通信、卫星通信、光纤通信等通信方式在通信技术发展过程中不断发展,各种调制技术、编码技术、差错控制技术、复接技术不断得到完善。通信技术不仅在理论上不断深化,而且在自动化、自动控制、计算机技术、数据通信、互联网等领域互相渗透和融合,通信技术在很多领域已经逐渐成为不可分割的一部分。无论通信技术应用于哪个领域,其基础理论是万变不离其宗的。然而,对于高等院校学生来说,打下坚实的基础是至关重要的,要达到真正掌握和深刻理解通信基础理论,需要一个深化过程。通信系统原理实验,对于掌握通信的基本理论是至关重要的实践环节。特别是对于通信工程专业和电子信息专业的本科学生,学习和掌握通信系统原理实验是很重要的。全书实验主要以南京哲华科技有限公司研制的通信系统原理实验箱为实验环境,误码测试是以南京捷辉科技有限公司研制的误码仪为实验环境,频谱分析是采用虚拟仪完成的。全书体现了理论和实验相结合:理论建立在实验的基础上,实验内容安排在理论分析和理解的条件下,通过实验可以证实理论的正确性,进一步理解基础理论。

本教材共分13章。第1章为通信系统原理实验系统概述,主要介绍通信系统原理实验箱的总体构成、通信系统原理实验箱的菜单操作方法及实验过程中的注意事项;第2章是语音信号编码与译码,主要介绍PCM、ADPCM原理并完成其实验相关内容;第3章是基带信号的码型变换,对基带信号的定时提取、AMI编译码、HDB<sub>3</sub>编译码进行分析和实验;第4章是PCM30/32路系统及帧同步原理,主要分析PCM30/32路系统帧结构、PCM30/32路帧同步系统,为PCM30/32路系统复用和帧同步实验打好基础;第5章是数字多路复用与帧同步系统,其内容是数字多路复用,以4路信号为例进行数字复用,其中一路为语音信号,对帧同步系统的相关问题进行了实验分析;第6章是FPGA及其在数字调制解调中的应用,介绍软件无线电和FPGA的基本概念,分析FPGA技术在数字调制和解调中的应用;第7章是载波同步技术,主要介绍载波同步的方法,分析数字调相信号中提取载波的方法;第8章是位同步技术,分析从基带信号中提取位同步和从数字调相信号中提取位同步的方法;第9章是数字调制与解调,主要对FSK、BPSK、DBPSK的调制与解调原理进行分析,对相应的实验步骤、实验内容及思考题进行论述;第10章是基带信号和频带信号的频谱测试与分析,首先对虚拟仪的基本功能和使用方法进行介绍,然后分别对基带信号和频带信号的频谱构成进行分析,最后给出基带信号和频带信号要求测试的内容;第11章是基带信号和频带信号的误码性能测试与分析,主要分析基带和频带信号的误码性能,对频带传输系统的误码性能测试过程也进行论述;第12章是数字差错与控制,主要以汉明码为例进行分析,并

给出实验方法；第13章是通信系统原理的综合设计实验，主要对提高学生对通信系统的综合设计能力给出实验要求和内容。

本教材第3章和第11章由王琴副教授编写，第12章由周春月高工编写，其余各章由王根英副教授编写，全书由王根英副教授统稿。

本教材适合高等院校通信工程和电子信息专业的本科教学使用，也可作为通信及电子信息专业及工程技术人员参考书。

由于作者水平所限，加之时间仓促，尽管花费了很大精力，在教材中也难免有错漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编者  
2010年8月

# 目 录

<b>第 1 章 通信系统原理实验系统概述</b> .....	1
1.1 通信系统原理实验系统的构成 .....	1
1.2 通信系统原理实验箱使用说明 .....	4
1.3 实验过程需要注意的问题 .....	6
<b>第 2 章 语音信号编码与译码</b> .....	7
2.1 PAM 原理 .....	7
2.2 PCM 单路编码与译码原理 .....	12
2.3 ADPCM 原理 .....	22
2.4 实验一 脉冲幅度调制 (PAM) .....	28
2.5 实验二 PCM 编译码器 .....	32
2.6 实验三 ADPCM 编译码器 .....	36
<b>第 3 章 基带信号的码型变换</b> .....	40
3.1 AMI/HDB <sub>3</sub> 编码与译码原理 .....	40
3.2 从基带信号中提取定时的原理 .....	43
3.3 实验四 AMI/HDB <sub>3</sub> 码型变换 .....	45
3.4 实验五 CMI 码型变换 .....	57
<b>第 4 章 PCM30/32 路系统及帧同步原理</b> .....	63
4.1 PCM30/32 路系统的帧结构 .....	63
4.2 PCM30/32 定时系统 .....	64
4.3 PCM30/32 系统帧定位字和帧同步对告电路 .....	71
4.4 PCM30/32 接收定时系统电路 .....	72
4.5 PCM30/32 帧同步系统 .....	73
<b>第 5 章 数字多路复用与帧同步系统</b> .....	77
5.1 实验六 自定义帧结构的帧成形及其传输 .....	77
5.2 实验七 自定义帧结构的帧同步系统 .....	81
<b>第 6 章 FPGA 及其在数字调制中的应用</b> .....	86
6.1 现场可编程门阵列 .....	86
6.2 FPGA 在数字调制中的应用 .....	89
<b>第 7 章 载波同步技术</b> .....	99
7.1 自同步法载波提取 .....	99
7.2 外同步法载波提取 .....	102



7.3	载波同步的主要性能指标 .....	105
<b>第 8 章</b>	<b>位同步技术</b> .....	107
8.1	从基带信号中提取位同步的方法 .....	107
8.2	从数字已调信号中提取位同步的方法 .....	110
<b>第 9 章</b>	<b>数字调制与解调</b> .....	113
9.1	FSK 调制与解调原理 .....	113
9.2	BPSK 调制与解调原理 .....	116
9.3	DBPSK 调制解调原理 .....	124
9.4	实验八 FSK 传输系统 .....	127
9.5	实验九 BPSK 传输系统 .....	133
9.6	实验十 DBPSK 传输系统 .....	139
9.7	实验十一 现代调制技术星座 .....	143
<b>第 10 章</b>	<b>基带信号和频带信号的频谱测试与分析</b> .....	145
10.1	虚拟频谱分析仪的功能及使用 .....	145
10.2	基带信号的频谱分析 .....	149
10.3	频带信号的频谱分析 .....	155
10.4	实验十二 基带信号的频谱测试 .....	157
10.5	实验十三 频带信号的频谱测试 .....	159
<b>第 11 章</b>	<b>基带信号和频带信号的误码性能测试与分析</b> .....	161
11.1	基带信号传输的误码特性 .....	161
11.2	数字调制及解调信道的误码特性 .....	165
11.3	实验十四 数字调制及解调信道的误码性能测试 .....	171
<b>第 12 章</b>	<b>数字差错与控制</b> .....	176
12.1	汉明编码和译码原理 .....	176
12.2	实验十五 汉明编码和译码实验 .....	178
<b>第 13 章</b>	<b>通信系统原理综合设计实验</b> .....	185
13.1	实验十六 基带传输综合设计 .....	185
13.2	实验十七 频带传输综合设计 .....	186
<b>附录 A</b>	<b>实验报告格式</b> .....	188
<b>附录 B</b>	<b>ZH5001A 跳线初始位置状态图</b> .....	189
<b>附录 C</b>	<b>ZH5001A 测试孔位置图</b> .....	190
<b>参考文献</b>	.....	191

# 第 1 章 通信系统原理实验系统概述

## 1.1 通信系统原理实验系统的构成

通信系统原理实验所涉及的仪器和设备有双踪示波器、函数发生器、频谱分析仪、误码测试仪和通信系统原理实验箱 ZH5001A。双踪示波器是用来进行测试的主要仪器，可以显示测试波形；函数发生器可以用来产生实验过程所需要的各种信号；频谱分析仪可以用来测试基带和频带信号的频谱分布情况；误码测试仪用于进行传输系统的误码性能测试。由于双踪示波器和函数发生器实验仪器均为标准的仪器，其构成和使用方法在此不再赘述。本节主要详细叙述通信系统原理实验箱 ZH5001A 的总体构成。频谱分析仪的功能和使用在后续章节中将作简介。

### 1. 通信系统原理实验箱模块的组成

通信系统原理实验箱 ZH5001A 主要由下列功能模块组成：

- (1) 电话 1 和 2 模块；
- (2) 终端 A 和 B 模块；
- (3) DTMF1 和 DTMF2 模块；
- (4) 接续控制模块；
- (5) ADPCM1 和 ADPCM2 模块；
- (6) CVSD 发模块；
- (7) CVSD 收模块；
- (8) PAM 模块；
- (9) 复接模块；
- (10) 解复接模块；
- (11) HDB<sub>3</sub> 码模块；
- (12) CMI 编码模块；
- (13) CMI 译码模块；
- (14) D/A 模块；
- (15) 调制模块；
- (16) 解调模块；
- (17) A/D 模块；
- (18) 汉明编码模块；
- (19) 汉明译码模块；

- (20) 噪声模块;
- (21) 锁相环模块;
- (22) DSP+FPGA 处理模块;
- (23) 显示控制模块;
- (24) 接口模块;
- (25) 同步接口模块;
- (26) 测试模块;
- (27) DC/DC 模块;
- (28) 电源模块。

2. 通信系统原理实验箱的电路布局

通信系统原理实验箱 ZH5001A 具体电路布局如图 1-1 所示。对各模块之间的分割, 在电路板上用白色线条标出。通信系统原理实验箱的电源插座与电源开关在实验箱的后面, 均为 220 V 交流电压作为输入。电源模块在实验箱电路板的下面, 它是由开关电源组成的, 主要完成交流 220 V 变换为 +5 V、+12 V、-12 V 的直流电压, 这三种电压给整个实验箱供电。

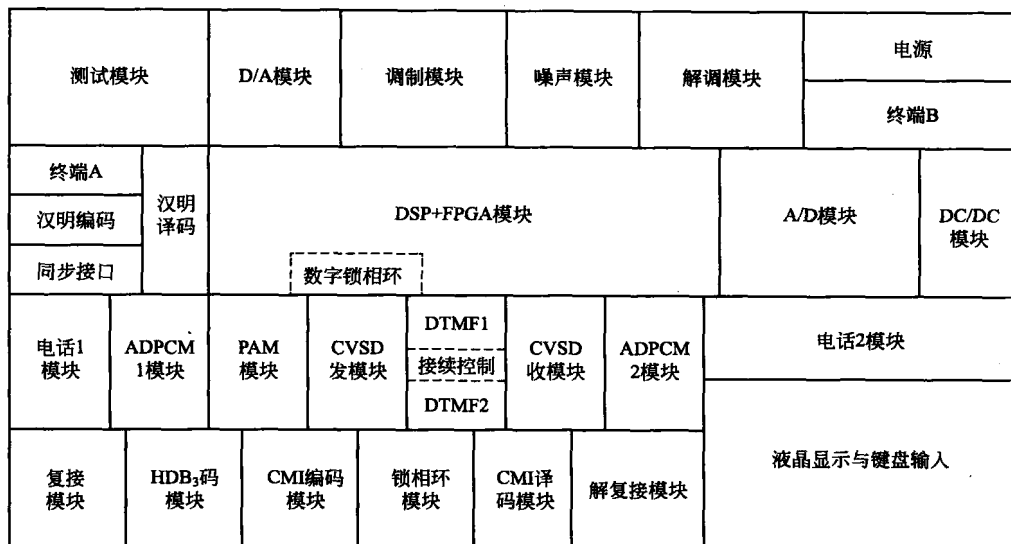


图 1-1 通信系统原理实验箱 ZH5001A 电路布局图

在实验箱的右下方, 有液晶显示屏和输入键盘, 在进行每一个实验时, 按实验要求可以通过输入键盘和液晶显示屏选择和设置合适的参数。液晶显示是以菜单方式出现的, 菜单的构成及使用在下一节进行介绍。

3. 通信系统原理实验箱的总体构成

通信系统原理实验系统的各模块之间既相互独立, 又相互关联, 全部模块连接在一起, 则构成了一个比较完整的通信系统, 各个实验是以模块进行划分的, 可以单独开设

实验。各模块之间的系统连接见图 1-2 所示。由图可以看出，在系统中通信双方的传输信道是不对称的，上面是调制信道，输入信号从左输入，在实验箱的左中部，有一电话插座，可以通过该插座接入一部电话，经过语音编码后，变为数字信号，如果经过 PCM 编码，则编码速率为 64 kbps，如果经过 ADPCM 编码，则数据速率为 32 kbps，该数据信号送到汉明编码模块，可以经过汉明编码，也可以通过汉明编码电路中的选择开关旁路汉明编码功能。汉明编码电路输出信号送到调制模块，调制方式可以选择 FSK、BPSK、DBPSK，经过调制后的信号通过中频电缆进行传输，送到接收解调模块，在传输过程中，可以通过噪声模块引入噪声，从而可以模拟信道产生的噪声。经过解调的信号再送到汉明译码模块，然后送到 ADPCM 译码器，将数字信号反变换为模拟信号，再送到接收端的电话，即可实现从左到右的信息传输。

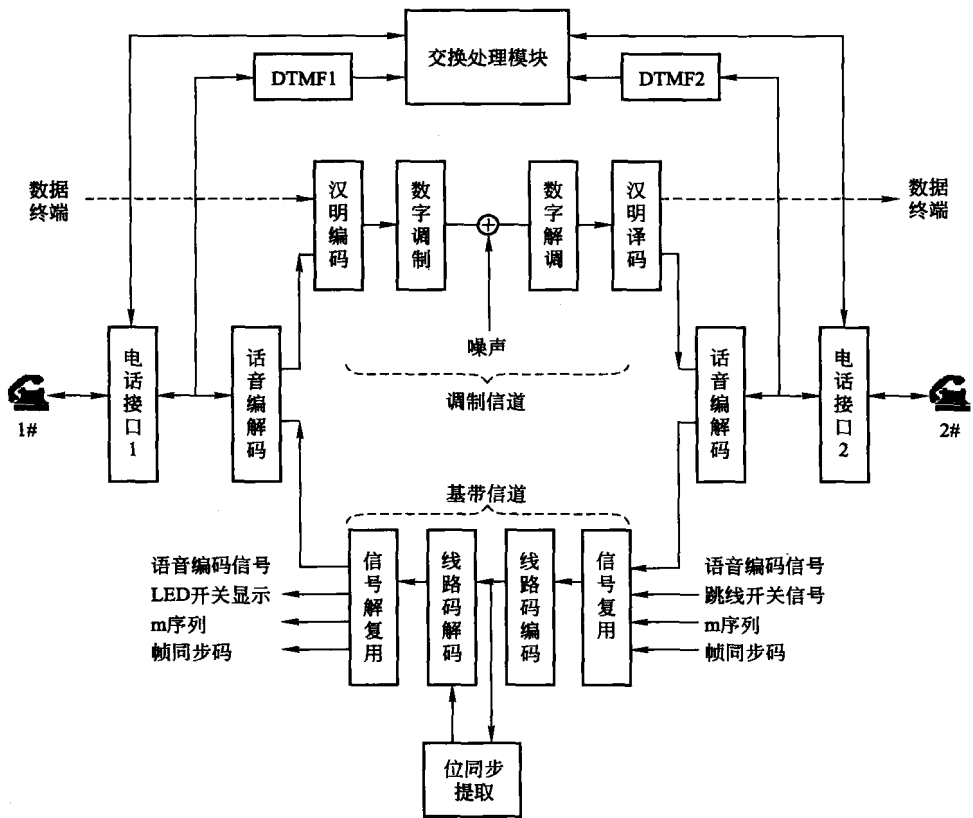


图 1-2 通信系统原理实验各模块间连接

信号从右往左的传输过程则有所不同，它是通过实验箱的下半部来完成的。从右往左的传输不经过调制和解调，而是经过基带传输信道。基带信道的传输过程，引入了信号的复用、线路编码和位同步恢复和信号解复用模块。信号的复用仅考虑了 4 个时隙，

这 4 个时隙分别传输帧同步码、语音信号、开关信号和 m 序列。每个时隙的速率为 64 kbps，所以，4 个时隙的总速率为 256 kbps。在学习过程中，要注意到该部分与实际 PCM30/32 基群系统是有区别的，实验中仅用了很少的时隙，而且没有信令时隙的引入，帧同步码选用的也与实际中的帧同步码型不同。

## 1.2 通信系统原理实验箱使用说明

在完成通信系统原理实验的各部分功能时，有些功能的实现，需要进行不同的 FPGA 程序与数字信号处理 DSP 程序的初始化，每次关机后再次启动，初始化程序与关机前的状态相同，如果需要改变某些功能或状态，可以通过操作实验箱的右下部菜单来进行选择和控制在系统通电后，系统按照上次关机前选择的模式进行初始化，在这期间 DSP+FPGA 模块中的初始化发光管 (DV01) 熄灭。当初始化完成之后，初始化发光管点亮，表明完成了相应选择参数的设置。

### 一、液晶显示屏的显示项目

当完成初始化与参数设定后，液晶显示“调制方式选择”，在这种情况下，除复位键和向下箭头键外，按其他键将不起作用。只有按向下的箭头键才起作用。通过上、下箭头键进行下列项目的选择：

- (1) 调制方式选择；
- (2) FSK 传输系统；
- (3) BPSK 传输系统；
- (4) DBPSK 传输系统；
- (5) 输入数据选择；
- (6) 外部数据信号；
- (7) 全 1 码；
- (8) 全 0 码；
- (9) 0/1 码；
- (10) 特殊码序列；
- (11) m 序列；
- (12) 工作方式选择；
- (13) 匹配滤波；
- (14) PCM (在该菜单上只有上箭头和左箭头起作用)；
- (15) ADPCM。

通过上、下箭头键，可以在选项 1 到 15 之间移动，对已选择的模式或参数打钩，否则显示小手。如要选择某一种模式，当移至该选项时按确认键即可。选项 (2)~(4) 是调制方式选择；选项 (6)~(11) 是输入数据选择；选项 (13) 是一个复选项——第

一次确认选择参数，第二次按确认则取消该参数的设置；选项（14）~（15）是语音编码方式的选择。

## 二、通信系统原理实验箱与外部进行连接的接口

（1）JH02（实验箱左端的同步接口模块内）：同步数据接口方式。该接口电平特性为 RS422，通过该接口接收来自外部的数据，并送入调制器中；同时将解调器解调之后的数据通过该端口送往外部设备。在该接口中，还包括调制解调器提供的收发时钟信号。在使用 RS422 接口时需要通过菜单设置，选择调制器输入信号为“外部数据信号”。

（2）K002（实验箱中上部左端的中频连接器）：为数字调制后的中频信号，数字调制后的中频信号通过该接口可以对外输出，可以通过中频同轴电缆输出。进行频带频谱分析时，可以用该信号作为频谱分析仪的输入信号，也可以作为其他信道仿真平台的待分析信号，用实验箱做实验时，当用到解调模块部分时，需要用中频电缆将数字调制中频信号连接到接收端部分。

（3）JL02（实验箱中上部右端的中频连接器）：从信道发端来的中频信号，由该端口输入，送入解调模块中进行解调。在进行频带信号接收测试时，如果需要可以引入信道噪声，通过噪声模块的跳线可以选择引入噪声的大小，从而可以实现在噪声环境下的各种调制信道的性能测试。

（4）J007、J005、J006：J007 为数字测试信号输入、J005 为模拟测试信号输入、J006 是接地点，这三个测试输入点在实验箱左端的中部，当实验要求输入外部信号时，则需要这几个输入端子作为测试信号输入接口，用来向实验系统中送入各种测试信号。测试信号的输入能否加到相应的测试模块还与跳线器的设置有关，具体实验的完成还要做好实验前的设计和跳线的设置。

（5）JF01、JG01：标准异步数据端口 A（JF01）和 B（JG01）。A 到 B 的异步传输经过信道传输，B 到 A 为直通方式。通信系统原理实验箱接口布局如图 1-3 所示。

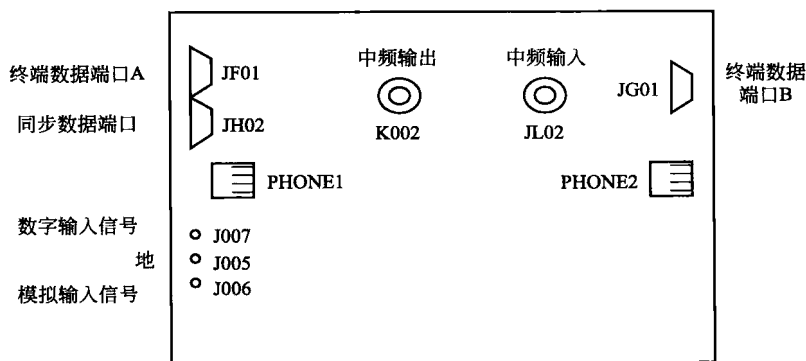


图 1-3 通信系统原理实验箱接口布局

## 1.3 实验过程需要注意的问题

(1) 检查电源、插座是否正常，如果有可以观察到的任何异常现象应禁止接通电源，待修复正常后才可接通电源。

(2) 不要随意触摸实验箱电路板中的芯片，在进行跳线开关插拔时，手尽量不要与插座接触，以免静电损坏芯片和元器件。

(3) 在进行测试时，不要把示波器的探头同时触到芯片的两个管脚或引线，以免短路造成芯片或元器件的损坏。

(4) 在实验过程中，发现实验箱电路板有异常现象，立即关断电源并告诉实验指导教师检查处理。

(5) 由于实验箱输入电压是 220 V 交流电压，经过电源模块将其变换为低压直流电压。如果电源模块发生故障，可能造成线路短路，造成各种故障状态，因此实验过程要尽量减少与实验箱中电路或芯片的接触。

(6) 由于不按操作要求，严重违反操作规程造成人身伤害或仪器和设备损坏者，由个人承担责任。

# 第 2 章 语音信号编码与译码

## 2.1 PAM 原 理

PAM (Puls Amplatude Modulation) 即脉冲幅度调制, 利用抽样脉冲把一个连续信号变为时间离散样值的过程称为抽样, 抽样后的信号称为脉冲幅度调制 (PAM) 信号, 是连续模拟信号离散化传输的理论基础。抽样定理在通信系统、信息传输理论中占有十分重要的地位。抽样是模拟信号数字化的第一步, 不同的抽样方法和性能关系到整个通信系统的性能指标优劣。抽样通常分为三种: 理想抽样、自然抽样和平顶抽样。下面分别对这三种抽样进行分析。

### 一、理想抽样

理想抽样就是利用理想冲击序列作为抽样脉冲, 由此得到的抽样序列为理想抽样序列。理想抽样模型如图 2-1 所示。

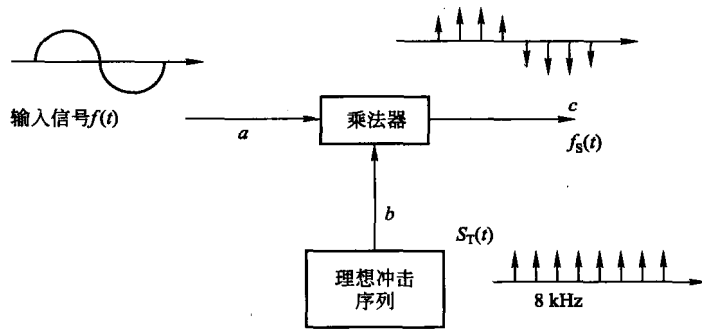


图 2-1 理想抽样模型

设输入信号为  $f(t)$ ,  $f(t)$  的傅氏变换为  $F(\omega)$ ; 理想冲激序列为  $S_T(t)$ ,  $S_T(t)$  的傅氏变换为:  $S_T(\omega)$ ; 抽样序列为  $f_s(t)$ ,  $f_s(t)$  的傅氏变换为  $F_S(\omega)$ 。

$$\text{即被抽样信号:} \quad f(t) \longleftrightarrow F(\omega) \quad (2-1)$$

$$\text{开关信号:} \quad S_T(t) \longleftrightarrow S_T(\omega) \quad (2-2)$$

$$\text{抽样序列:} \quad f_s(t) \longleftrightarrow F_S(\omega) \quad (2-3)$$

根据周期信号的傅氏变换及理想抽样模型可以得到:



$$S_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \quad (2-4)$$

$$S_T(\omega) = \omega_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_s) \quad (2-5)$$

$$f_s(t) = f(t) \times S_T(t) \quad (2-6)$$

$$F_s(\omega) = \frac{1}{2\pi} [F(\omega) * S_T(\omega)] = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F(\omega - n\omega_s) \quad (2-7)$$

由以上分析可以看出，输入模拟信号与理想冲击序列进行相乘，即可得到理想抽样序列。图 2-2 给出了理想抽样模型中对应各点时域和频域对应的波形。

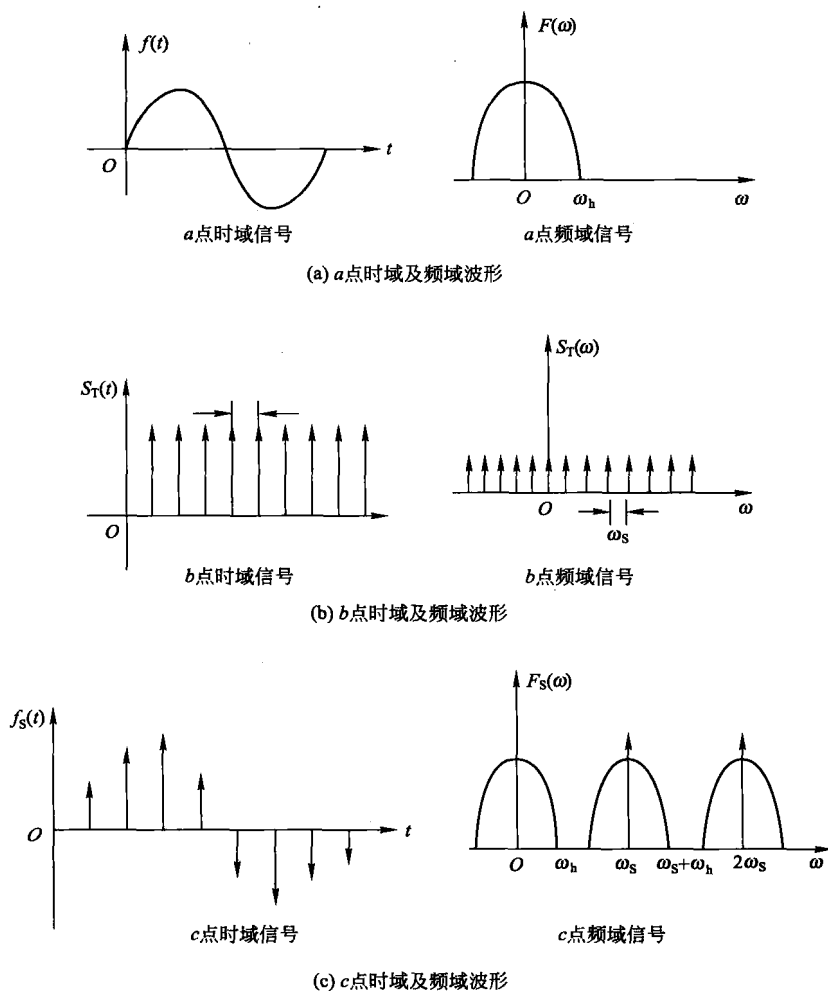


图 2-2 理想抽样模型对应的各点时域和频域波形

理想低通取样定理：一个频带受限的低通信号  $f(t)$ ，设它的最高频率为  $f_h$ ，若用理想冲激序列对  $f(t)$  进行抽样，当抽样频率满足条件  $f_s \geq 2f_h$  时，则抽样序列信号中