



甘良才 倪焕明 编译
张肃文 陆兆熊 审校

无线电通信系统

——理论·例题·习题

电子工业出版社

458

5

无线电通信系统

理论 · 例题 · 习题

甘良才 倪焕明 编译

张肃文 陆兆熊 审校



电子工业出版社

8710641

内 容 简 介

本书是一本学习无线电通信系统理论的教学参考书,用简明的数学分析和大量的例题来阐明无线电通信系统的基本概念。全书包括通信系统概论、网络定理、等效和简化、谐振与调谐耦合电路、信号分析与系统响应、振幅调制与角度调制系统、脉冲调制与脉冲编码调制、传输线与波导、天线、短波、微波和雷达系统、噪声等十章。针对无线电通信中的各重要课题,在每一章中先扼要介绍基本理论,然后提供大量的示范性例题,最后给出一定数量的习题。书末给出了习题答案及附录。

本书可供高校无线电、通信、雷达等专业的学生阅读,也可供有关专业研究生、教师及自学无线电通信的科技人员参考。

Dt63/19

无线电通信系统—理论·例题·习题

甘良才 倪焕明 编译

张肃文 陆兆熊 审校

责任编辑 王昌喜

•

电子工业出版社出版 (北京海淀区万寿路)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京市昌平环球科技印刷厂印刷

•

开本: 850/1168毫米1/32 印张: 11.125 字数: 295千字

1987年7月第1版 1987年7月第1次印刷

印数: 1—5,500册 定价: 2.70元

统一书号: 15290·419

编 译 者 序

近年来，无线电通信获得了迅猛的发展，从事无线电通信的科技人员及学习无线电、通信、雷达等专业的学生越来越多，急需一些概括阐明无线电通信基本理论并提供大量例题和习题的书籍，供高等院校无线电、通信、雷达专业的学生及有关专业的科技人员参考。为此，我们全文译出《ELECTRICAL COMMUNICATIONS Theory, Worked *examples and Problems*》(R. G. MEADOWS著)一书(共七章)，并译出R. G. MEADOWS所著姊妹篇《ELECTRICAL CIRCUIT THEORY》一书中对通信理论有重要意义的两章(网络定理、等效和简化及谐振与调谐耦合电路)，同时参阅国内外有关教材及文献，撰写了“通信系统概论”一章；并结合教学的实际情况，既考虑到全书的系统性、完整性，又考虑到保持原著的内容、风貌，故完全按原著(九章)通译，仅对其章节顺序作了适当调整，最后编译成《无线电通信系统——理论·例题·习题》一书，以适应无线电通信科学发展的需要。

全书包括通信系统概论，网络定理、等效和简化，谐振与调谐耦合电路，信号分析与系统响应，振幅调制与角度调制系统，脉冲调制与脉冲编码调制，传输线与波导，天线，短波、微波与雷达系统，噪声等十章。除第一章外，各章均由三个基本部分组成：首先简明扼要地介绍基本理论；然后提供相当数量的示范性例题；最后给出一定数量的习题。书末给出了习题答案及五个有用的附录。

本书着重基本概念的阐述和简明的数学分析，内容精炼，清晰明瞭，基本上概括了高等学校有关专业学生经常碰到的通信系统方面的重要课题。因此，本书适合于有关专业学生阅读，也可

供研究生、教师及自学通信系统理论的科技人员参考。

本书第一章由甘良才同志撰写，第三章、第五章至第九章由甘良才同志翻译，第二章、第四章、第十章及附录、习题解答由倪焕明同志翻译。全书由陆兆熊副教授校阅。

本书编译过程中，始终得到武汉大学无线信息工程系主任张肃文教授的热情鼓励和指导，并由张教授最后审校定稿；陈昌浩同志给予了大力的协助，陈昌藩、高增吉二同志绘制了全部插图，在此一并表示衷心感谢。

编译者对原著九章中的一些差错已作了更正。

限于编译者水平，难免有疏漏及不当之处，敬希广大读者不吝赐教。

1984年9月

于武汉大学

目 录

第一章 通信系统概论

§1.1 概述	1
§1.2 通信系统历史的回顾	2
§1.3 通信的频段	5
§1.4 通信系统的模式	9
§1.5 通信系统的质量指标	13

第二章 网络定理、等效和简化

§2.1 概述	17
2.1-1 迭加原理、互易定理、补偿定理	17
(一) 迭加原理	17
(二) 互易定理	18
(三) 补偿定理	19
2.1-2 最大功率传输定理	20
(一) 定理	20
(二) 部分最大功率传输条件	20
2.1-3 网络等效原理	21
(一) 网络等效	21
(二) 物理可实现性	22
2.1-4 T - Π (星形-三角形) 网络变换	22
2.1-5 罗森 (Rosen) 定理	23
2.1-6 网络的简化	24
2.1-7 网络的综合	25
2.1-8 对称格形 (X形) 网络等效定理	28
2.1-9 戴维宁 (Thevenin) 定理和 诺顿 (Norton) 定理	29

(一) 戴维宁定理	29
(二) 诺顿定理	29
2.1-10 米尔曼 (Millman) 定理	30
§2.2 示范性例题	31
§2.3 习题	48
第三章 谐振与调谐耦合电路	
§3.1 概述	59
3.1-1 电谐振的条件: 谐振频率的定义	59
(一) 电谐振	59
(二) 谐振频率	59
3.1-2 串联与并联谐振电路	60
(一) 串联谐振电路	60
(二) 并联谐振电路	61
3.1-3 品质因数 Q	63
3.1-4 归一化与通用谐振曲线	64
3.1-5 复杂谐振电路	69
(一) 复杂谐振电路	69
(二) 复杂谐振电路的谐振频率与电抗曲线	69
(三) 福斯特 (Foster) 电抗定理	71
3.1-6 调谐耦合电路	73
(一) 双调谐耦合电路的电压响应	73
(二) 在窄带阻抗匹配中的应用	80
§3.2 示范性例题	83
§3.3 习题	99
第四章 信号分析与系统响应	
§4.1 概述	109
4.1-1 引言	109
4.1-2 傅里叶级数: 周期信号的频谱	109
(一) 傅里叶级数的实数形式	109

(二) 傅里叶级数的指数形式 (或复数形式)·····	110
(三) 周期信号的归一化功率——帕塞瓦尔 (Parseval) 定理 ·····	111
4.1-3 傅里叶变换: 非周期信号的频谱·····	114
(一) 由傅里叶级数导出傅里叶变换 ·····	114
(二) 非周期信号的归一化能量——瑞利 (Rayleigh's) 定理·····	115
4.1-4 用傅里叶变换确定系统响应 ·····	117
4.1-5 信号的互相关与自相关·····	119
(一) 互相关 ·····	119
(二) 自相关 ·····	120
§4.2 示范性例题 ·····	121
§4.3 习题 ·····	134
第五章 振幅调制与角度调制系统	
§5.1 概述 ·····	142
5.1-1 振幅调制 (AM)·····	142
(一) 双边带调幅 (DSB-AM)·····	142
(二) 载波抑制与单边带振幅调制 ·····	145
5.1-2 角度 (频率与相位) 调制·····	146
(一) 调频波与调相波 ·····	146
(二) 调频波的带宽 ·····	147
5.1-3 频率划分 (频分) 调制 (FDM) ·····	149
§5.2 示范性例题 ·····	150
§5.3 习题 ·····	158
第六章 脉冲调制与脉冲编码调制	
§6.1 概述 ·····	170
6.1-1 脉冲振幅调制与脉冲时间调制·····	170
(一) 脉冲振幅调制 (PAM)·····	170
(二) 脉冲时间调制 (PTM) ·····	172

6.1-2 取样和恢复定理	172
(一) 取样定理 1	172
(二) 取样定理 2	173
(三) 恢复定理	173
6.1-3 脉冲编码调制 (PCM)	173
(一) 量化	174
(二) 压扩	175
(三) 编码与译码	175
6.1-4 时分多路调制 (TDM)	176
§6.2 示范性例题	177
§6.3 习题	187

第七章 传输线与波导

§7.1 概述	195
7.1-1 传输线方程式	195
7.1-2 稳态解	196
7.1-3 终端线的参数	199
(一) 反射系数	199
(二) 输入阻抗	201
(三) 驻波与电压驻波比	203
7.1-4 同轴线与波导管的场解	207
(一) 同轴线	207
(二) 平行板带状线	208
(三) 矩形波导	209
(四) 圆形波导	211
§7.2 示范性例题	213
§7.3 习题	221

第八章 天线

§8.1 概述	231
8.1-1 天线的参数	231

(一) 功率增益 G 与方向增益 G_D	231
(二) 辐射图	231
(三) 束宽(射束宽度)与旁瓣	232
(四) 辐射电阻 R_r	233
(五) 有效孔径 A_e	233
(六) 直线型天线的有效长度 L_e	233
8.1-2 功率密度、辐射与接收功率	234
(一) 电磁波的功率密度, 坡印 廷(Poynting)定理	234
(二) 天线辐射的总功率 P_r	234
(三) 天线接收的总功率	234
8.1-3 天线阵	235
(一) n 单元等间隔直线型天线阵的辐射图	235
(二) 射束控制	237
8.1-4 孔径照射与远场图	237
(一) 惠更斯-菲涅尔(Huygens-Fresnel)原理	237
(二) 弗朗霍费(Fraunhofer)区中的远场图	238
§8.2 示范性例题	239
§8.3 习题	246
第九章 短波、微波和雷达系统	
§9.1 概述	254
9.1-1 短波电波通过电离层的传播	254
(一) 传播途径	254
(二) 折射率 n	254
(三) 给定电离层的临界频率以及最大可用频率	254
(四) 最大作用距离	255
9.1-2 视线与微波通信系统	255
(一) 自由空间中视线中继线传输的功率	255
(二) 直射波与反射波之间的干扰	256

(三) 典型微波无线电中继线方框图	256
(四) 接收机的信噪比	258
9.1-3 雷达系统	258
(一) 自由空间雷达方程式	258
(二) 脉冲雷达系统方框图	260
(三) 调频连续波 (FM-CW) 雷达	261
(四) 多普勒雷达	263
(五) 利用三角波调频连续波雷达测定 距离与速度	264
§9.2 示范性例题	265
§9.3 习题	274

第十章 噪声

§10.1 概述	278
10.1-1 热噪声	278
10.1-2 散粒噪声	279
10.1-3 有效信号和噪声功率	279
10.1-4 有效功率增益和等效噪声带宽	280
10.1-5 噪声温度	280
(一) 标准环境温度 T_0	280
(二) 源的有效噪声温度 T_s	280
(三) 放大器的有效噪声温度 T_A	281
(四) 电阻衰减器在 T_0 时的噪声温度	282
10.1-6 噪声系数	282
10.1-7 级联网络的噪声系数和噪声温度	283
§10.2 示范性例题	284
§10.3 习题	289

习题答案	394
------------	-----

附 录	332
--------------	-----

A1 三角恒等式	332
----------------	-----

A2	傅里叶级数	332
A3	傅里叶变换	336
A4	sinc 与 si 函数值表	338
A5	贝塞尔函数	339
参考文献		341

第一章 通信系统概论

§1.1 概 述

在人类社会里，人们总是离不开消息的传递。古代的烽火台、金鼓、旌旗，现代的书信、电报、电话、传真、电视……等，都是传递消息的不同方式。就一般而言，通信乃是从一地向另一地传递消息。尤其是人类社会发展到今天，通信的方式是举不胜举的。

随着社会生产力的不断发展，人们对传递消息的要求也会愈来愈高。然而在各种各样的通信方式中，利用“电”来传递消息的通信方式（或称电通信）获得了非常迅速的发展，得到了极其广泛的应用。这是因为电通信方式几乎在任意通信距离上都能使消息实现迅速、有效、准确、而又可靠传递的缘故。以至当今在自然科学中，“通信”一词几乎已变成了“电通信”的同义词。

电通信（简称通信）中传递的信息，有各种不同的形式。例如：符号、文字、语言、音乐、数据、图片，活动画面等等。因此，根据所传递消息的不同，在目前的通信业务上又分为电报、电话、数据传输、传真、可视电话等。倘若从广义的角度上来看，广播、电话、电视、雷达、导航、遥控、遥测等也可列为通信的范畴。

实际上，无论何种通信方式，均是将一地（发送端）的消息传递到另一地（接收端），因而通信可由图1·1来概括地描述。

信息源（可称发送端）——它的作用是将各种各样的消息变换成原始的电信号，为了使这个原始信号适合在信道中传输，由发送设备对原始信号实现某种变换，然后再送入信道。

信道——信号的传输媒介，通常是电话通信时的电缆，明线

或光纤缆；无线电通信时的空间，以及其它较特殊的情况。在接收端，接收设备的功能与发送设备的恰好相反，它将从接收信号中恢复出相应的原始电信号。而受信端，它是将复原后的原始电信号变换成相应的消息。

噪声源——信道中的噪声以及分散在通信系统其它各处噪声的总和。

图1-1是对各种通信系统的抽象描述，又概括了通信系统中的共性，故人们通常称它为通信系统的模型。对通信系统基本原理或基本理论的讨论就是围绕通信系统的模型而展开的。

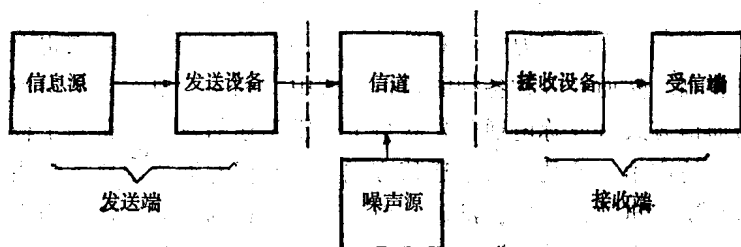


图1-1 通信系统的组成

§1.2 通信系统历史的回顾

人们在长期的生产斗争和社会实践的过程中逐步创造和发展了语言和文字，并使用语言和文字来表达人们的意志和感情，交流文化思想、传递消息等，随着这些活动不断频繁地进行，从低级向高级发展，逐步地形成了一门独立的学科——通信。由此可见，通信也和其他学科一样，在实践中产生，并随着科学技术的迅速发展又不断地更新和完善。

最早的通信方式是很简单的，通信的内容也很单一，并且受时间、空间、环境、距离等条件的限制，使得在比较辽阔的领域

内不能进行广泛的通信。

对于作为一种有实际意义的通信方式而言，是从十九世纪三十年代出现低级有线电报后才开始的。显然，电报通信方式的出现是完全建立在以往人们长期实践基础上的，当时已经积累了有关电学和磁学的丰富知识，十九世纪七十年代又由于电磁感应理论的形成和发展，开始有了电话机，并开始形成了以金属导线作为传输媒质的简单的有线电话通信方式。一八七三年麦克斯韦 (JAMES CLERK MAXWALL) 发表了电磁辐射理论，为无线电通信奠定了理论基础。一八八〇年居里兄弟 (JAQUES AND PIERRE CURIE) 发现了压电效应，一八八二年多毕尔 (AMOS E. DOLBEAR) 登记了第一台无线电通信仪器的专利。一八八七年赫兹 (HEINRICH HERTZ) 用实验证实了电磁波的存在；一八九〇年勃兰利 (EDOUARD BRANLY) 用粉末检波器检验电磁波的存在，于十九世纪末期人们发明了简单的无线电发送和接收装置；一八九五年马可尼 (GUGLIELMO MARCONI) 试验无线电通信获得成功；一八九七年马可尼完成了舰与岸上的无线电通信，从而开辟了无线电通信的广阔发展道路。一九〇〇年海威赛德 (OLIVER HEAVISIDE) 与肯内利 (ARTHUR E. KENNELLY) 提出了地球上空存在电离层的假设。菲生顿 (ROGIRARD A. FESSENDEN) 首次传输无线电话，杜德利 (WILLIAN D. DUDEEL) 发现了电弧振荡，一九〇一年马可尼首次完成了横渡大西洋的无线电通信。一九〇三年波森 (VALDEMAR POULSEN) 设计了一个 100kHz 的电弧振荡器，阿列克孙德森 (ERNST F. W. ALEXANDERSON) 建成第一部高频发射机，一九〇四年弗来明 (JOHN AMBROSE FLEMING) 发明了真空二极管。一九〇六年李·特·福雷斯特 (LEE DE FOREST) 发明了真空三极管，从而使电报与电话通信获得了飞速的发展，可谓是无线电电子学发展的第一个里程碑。一九一二年阿姆斯特朗 (EDWIN HOWARD ARMSTRONG) 发

明了再生接收机。一九一三年卡尔逊 (JOHN CARSON) 发明了单边带通信。一九一七年美国电报与电话公司用载波同时传送九路信号, 一九一八年阿姆斯特朗发明了超外差接收机, 一九二〇年在美国匹兹堡建立 KDKA 广播电台, 底特律建立 WWJ 广播电台。一九二一年阿姆斯特朗发明超再生式接收机。哈兹丁 (L. ALAN HAZELTINE) 发明中和式接收机。一九三三年阿姆斯特朗发展调频技术, 解决静电干扰问题。詹斯基 (KART JANSKY) 开始用无线电方法研究天文学。同年阿姆斯特朗开始建立调频电台。一九四八年肖克莱 (W. B. SHOCKLEY) 布拉顿 (W. H. BRATTAIN) 和巴丁 (JOHN BARDEEN) 等人制造出第一支半导体三级管, 这是无线电电子学发展的第二个里程碑。一九五五年皮尔斯 (TOHN R. PIERCE) 提出用卫星进行全球通信的设想, 一九五七年苏联发射了第一颗人造卫星, 促使美国科学界与军方集中力量研究空间探测。一九六〇年美国用 ATLAS 卫星首次实现卫星广播, 在美国和欧洲之间用直径为 100 英尺的铝制气球“回声 1 号”转送电视、音乐等信号。一九六一年美国联邦通信委员会批准立体声调频广播。一九六二年首次用 TIROSL 号卫星观测地球的气象。第一个通信卫星 TELSTAR-1 号横越大西洋传送声音和电视信号。一九六五年第一个同步通信卫星晨岛-1 号射入轨道, 能容纳 240 路声音以及电视和数字信号。一九六九年国际通信卫星 (INTELSAT)-I -F3 卫星在太平洋上空传送 1200 路双向声音和电视信号。同年阿波罗 1 号从月球表面向地球发射回来电视、声音与数据信号。一九七六年宇宙飞船 VIKING-1 号经过 11 个月 5000 万英里的航程后, 传送回火星表面的第一个图象。

最后还应指出在本世纪六十年代出现的“光纤通信”和“卫星通信”, 它们都为大容量, 综合性的通信系统提供了广阔的通道。尤其是卫星通信在解决国际通信中的通道质量方面作出了突出的贡献。同时大规模集成电路的出现、电子计算机的迅速发展均对通信技术的发展起着极其重要的推动作用, 它不仅使得设备

的更小型化，而且寿命长，可靠性高，适合于在空间通信中应用。

通信学科的发展，除了由于新的电子器件的问世以及技术水平的提高，还不能忽视在通信理论方面获得了可喜的进展。在通信理论上先后形成了“过滤和预测理论”，“仙农理论”，“信号与噪声理论”，“纠错码理论”，“信源统计特性理论”等等。在通信的传输方式上，早已打破了人与机器或机器与机器之间的通信。

鉴于上述对通信发展史的简要回顾，可以看到，通信这门学科是逐渐由低级到高级、由简单到复杂发展成长起来的。总的说来，通信是研究传递各种消息的学科。显然电报、电话只能算作狭义的通信内容，而广播、电视、传真及数据通信以及计算机通信才算作广义的通信内容。如果将消息的含义更完整一些来理解，则和通信非常邻近的学科，例如雷达、遥控、遥测、无线电天文学，甚至生物工程学等与信息处理和传递密切相关。因此将它们综合起来就构成一门完整的信息学科，而通信学科成为其中的一个重要组成部分。

展望未来，尽管通信科学与技术已经发展到了一定的高度，但是通信的发展仍然不能满足国民经济和社会的需要。因此，通信科学和技术必将更迅速地向前发展，朝着更新、更高的水平不断挺进，将会出现一个空前未有的崭新局面。

§1.3 通信的频段

综上所述，既然近代通信的内容非常丰富，应用的领域又极其广泛，它们实现的基础都是依靠不同频率的电流（或电磁波）的传输。那么按照传输媒介的不同，则可分为两大类：（1）依靠导线（包括架空明线、电缆和光纤缆等）来传输信号的有线通信；（2）依靠自由空间来传播电磁波的无线电通信。由于它们