



普通高等教育“十二五”规划教材

信息论理论基础教程

杜玉华 李永全 主 编

张刚兵 王圆妹 时 翔 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

信息论理论基础教程

主 编 杜玉华 李永全

副主编 张刚兵 王圆妹 时 翔

编 写 强捍芬 赵泓扬 肖闽进 王 苻

主 审 张正炳



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书共分8章,主要包括信息论概述、信息的度量、离散信源、离散信道及其容量、无失真信源编码、有噪信道编码定理、限失真信源编码、纠错编码等。为了便于教学和读者自学,每章后都有本章重点及小结、习题。在内容编排上由浅入深,表述简洁,注重可读性,以最易接受的方式介绍信息理论的基本内容及其应用,既保证理论的完整性及系统性,又注意形成理论研究面向应用的特点。

本书可作为普通高等院校信息科学与信息技术等专业的教材用书,也可作为从事通信、雷达、导航、计算机、系统工程、生物工程、管理工程等相关领域的科研和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

信息论理论基础教程/杜玉华,李永全主编. —北京:中国电力出版社,2014.2

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-5473-9

I. ①信… II. ①杜… ②李… III. ①信息论-高等学校-教材 IV. ①TN911.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第007536号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014年2月第一版 2014年2月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 10.25印张 244千字

定价 20.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

信息论是 20 世纪中叶从通信中发展起来的理论,是应用近代数理统计的方法研究信息的度量、编码和通信的科学。信息论将信息作为研究对象,主要研究提高信息系统有效性和可靠性的理论和方法,从而使信息系统最优化。人们已经认识到,在现代科学技术高速发展的进程中,学习和掌握信息论日益成为一种需要。

近年来,笔者在多年的教学中发现,由于信息论涉及众多学科,需要广泛的数学基础,许多学生虽然认识到信息论的重要性,但在繁杂的数学公式面前只好望而却步。针对这种情况,笔者根据多年的教学经验,把信息论涉及的数学知识限制在工科高等数学和工程数学的范畴内,省去某些性质和定理的证明,并尽量以通俗形象的语言强化物理概念的描述,使读者读得懂、有兴趣学。本书力图在内容编排上由浅入深,表述简洁,注重可读性,以最易接受的方式介绍信息理论的基本内容及其应用,既保证理论的完整性及系统性,又注意形成理论研究面向应用的特点。为了提高学生分析问题和解决问题的能力,各章后面都配有一些难易程度不等的习题,可根据实际需要选用。为了方便教学,本书开发了配套的多媒体课件和部分习题答案或题解。

本书基本覆盖了信息论的主要内容。首先介绍信息的统计度量、离散信源、离散信道和信道容量;然后介绍无失真信源编码、有噪信道编码及限失真信源编码。这些内容是香农信息论的核心部分。本书将摒弃连续信源的信息测度、波形信道的信道容量,主要针对信息理论的基础理论部分作为主要学习内容,使得本书可作为更多相关专业有关信息理论方面的普及教材。

本书由杜玉华(常州工学院)、李永全(长江大学)担任主编,张刚兵(常州工学院)、王圆妹(长江大学)、时翔(常州工学院)担任副主编。杜玉华和李永全编写了第 1、2、3、5 章,张刚兵和王圆妹编写了第 4、6、7 章,时翔编写了第 8 章,常州工学院的强捍芬、赵泓扬、肖闽进、王苻参与了编写。全书由杜玉华统稿。此外,特别感谢常州工学院的徐樱樱、刘海、吴彬昕等人,在本书编写过程中进行协助文稿整理工作。

本书由长江大学张正炳教授担任主审。同时,本书在编写过程中引用、借鉴了相关专家的教材、著作。在此一并致谢。

限于作者水平及时间紧张,书中难免有疏漏之处,希望广大读者批评指正。

笔 者

2013 年 10 月

目 录

前言

1 信息论概述	1
1.1 信息	1
1.2 信息论	3
1.3 信息论的形成和发展	6
1.4 信息论的主要研究成果	10
本章重点及小结	12
2 信息的度量	14
2.1 信息量	14
2.2 信息熵	20
2.3 离散集的平均互信息量	30
本章重点及小结	35
习题	39
3 离散信源	42
3.1 信源的数学模型及分类	42
3.2 离散无记忆的扩展信源	44
3.3 离散平稳信源	47
3.4 马尔可夫信源	50
3.5 信源的相关性和剩余度	55
本章重点及小结	56
习题	59
4 离散信道及其容量	63
4.1 信道的数学模型及其分类	63
4.2 离散无记忆信道	64
4.3 信道的组合	69
4.4 信道容量	71
4.5 信源和信道的匹配	81
本章重点及小结	81
习题	84
5 无失真信源编码	88
5.1 编码的定义	88
5.2 定长编码定理	92
5.3 变长码定理	94
5.4 最佳编码	97

本章重点及小结·····	102
习题·····	104
6 有噪信道编码定理 ·····	107
6.1 错误概率和译码规则 ·····	107
6.2 错误概率与编码方法 ·····	110
6.3 有噪信道编码定理 ·····	116
本章重点及小结·····	117
习题·····	118
7 限失真信源编码 ·····	120
7.1 失真测度 ·····	120
7.2 信息失真函数 ·····	123
7.3 限失真信源编码定理和逆定理 ·····	127
7.4 信息率失真的函数的计算 ·····	132
本章重点及小结·····	141
习题·····	142
8 纠错编码 ·····	143
8.1 纠错编码的基本概念 ·····	143
8.2 纠错编码分类 ·····	144
8.3 线性分组码 ·····	145
8.4 循环码 ·····	149
本章重点及小结·····	152
习题·····	153
参考文献 ·····	156

1 信息论概述

1.1 信 息

1.1.1 信息的定义

“信息”这个词相信大家不会陌生，几乎每时每刻都会接触到。在当今“信息社会”中，人们在各种生产、科学研究和社会活动中，无处不涉及信息的交换和利用。迅速获取信息，正确处理信息，充分利用信息，就能促进科学技术和国民经济的飞跃发展。可见，信息的重要性是不言而喻的。那么，什么是信息呢？

在物质世界中，天空中的星座变化，气温冷暖交替是一种信息，告诉人们一年分四季；花朵开放的色彩是一种信息，它可以引来昆虫为其授粉；成熟的水果会产生香味，诱来动物觅食，动物食后为其传播种子，所以果香也是一种信息；听老师讲课可以得到许多知识，知识也是信息。由此可见，信息在人们的周围无处不在，不仅人类能感受到它的存在，连地球上的动植物也能感受到。只是由于以往科学技术的落后，人们并不知道这就是信息，在浑然无知的状态下，利用已知信息进行探索发现新的信息，由此推进人类社会的发展。时到今日，人们开始发现，信息对我们的生活起着越来越重要的作用。

由上述几个实例当中，人们似乎懂得了什么是信息。从人们发现信息的过程中得知，信息其实就是事物从一种状态变化到另一种状态，如种子发芽，破土而出，这就产生了信息，由此得知信息不是静止的过程，只有运动、变化才能产生信息。当信息产生以后，由人们或其他动物获取这个信息，对这个信息进行记录（或记为存储），然后传递。近几十年，人们逐渐意识到信息的存在。对信息的认识随着社会文明程度的提高而不断提高和深入，逐渐形成一门新的科学——信息科学。然而，信息科学毕竟还是一门年轻的科学，人们对信息还没有一个全面的、系统的、准确的、一致的认识。从不同的科学、不同的角度、不同的方面、不同的层次、不同的深度，对信息有不同的认识。

最早对信息进行科学定义的，是哈特莱（R. V. L. Hartley）。他在1928年发表的《信息传输》一文中，首先提出“信息”这一概念。他认为，发信者所发出的信息，就是他在通信符号表中选择符号的具体方式，并主张用所选择的自由度来度量信息。此外，哈特莱还注意到，选择的具体物理内容是无关紧要的，重要的是选择的方式。也就是说，不管符号代表的意义是什么，只要符号表的符号数目一定，“字”的长度一定，那么，发信者所能发出的信息的数量就被限定了。所以他认为“信息是选择的自由度”。

1948年，控制论的创始人之一，美国科学家维纳（N. Wiener）出版了《控制论——动物和机器中通信与控制问题》一书。维纳在该书中是这样论述信息的，他指出：“信息是信息，不是物质，也不是能量。”这就是说，信息就是信息自己，它不是其他什么东西的替代物，它是与“物质”、“能量”同等重要的概念。正是维纳，首先将“信息”上升到“最基本概念”的位置。

同年，另一位美国数学家香农在《贝尔系统电话杂志》发表了题为“通信的数学理论”的长篇论文。用概率论的方法研究通信系统，揭示了通信系统传递的对象就是信息，并对信

息给以科学的定量描述,提出了信息熵的概念。指出通信系统的中心问题是在噪声下,如何有效而可靠地传送信息以及实现这一目标的主要方法是编码等。但是香农并没有给出信息的确切定义,他认为“信息就是一种消息”。

香农信息论仅考虑了事物运动状态及其变化方式的外在形式,实际上研究的是语法信息。从这个角度出发,可以对信息下这样的定义:信息是对事物运动状态和变化方式的表征,它存在于任何事物之中,可以被认识主体(生物或机器)获取和利用。从数学观点出发研究香农信息论,可以认为信息是对信息统计特性的一种定量描述。

信息存在于自然界,也存在于人类社会,其本质是运动和变化。可以说哪里有事物的运动和变化,哪里就会产生信息。

在日常生活中,信息常常被认为就是“消息”、“知识”。的确,信息与它们之间是有着密切联系的。但是,信息不能等同于消息、知识。信息不能等同于知识。知识是人们根据某种目的,从自然界收集得来的数据中整理、概括、提取得到有价值、人们所需的信息。知识是一种具有普遍和概括性质的高层次的信息。知识是以实践为基础,通过抽象思维,对客观事物规律性的概括。知识信息只是人类社会中客观存在的部分信息。所以知识是信息,但不等于信息全体。

信息也不能等于消息。消息是指包含有信息的语言、文字和图像等。人们也常常错误地把信息等同于消息,认为得到了消息,就是得到了信息。例如当人们收到一封电报,接到一个电话,收听了广播或看了电视等以后,就说得到了“信息”。但是,信息和消息并不是一回事,不能等同。例如,有人告诉你一条消息,这条消息告诉你许多原来不知道的新内容,这条消息就很有意义,信息量就大;反之,如果这条消息告诉的是原来你已经知道的旧内容,那么这条消息意义就不大,信息量就小。

既然信息不同于消息,当然也不同于信号。信号是消息的物理体现。为了在信道上传输消息就必须把消息加载(调制)到具有某种物理特征的信号上去。信号是信息的载体,是物理性的,如电(光)信号。在通信系统中,实际传输的是信号,但本质内容传输的是信息。信息包含在信号之中,信号是信息的载体。

经过以上论述后,可以将信息的定义总结为以下三方面。

自然信息:信息存在于自然界,也存在于人类社会,其本质是运动和变化。可以说哪里有事物的运动和变化,哪里就会产生信息。例如太阳东出西落、不同季节开不同的花、宇宙星辰的位置变化等。

表征信息:用文字、符号、数据、语言、图片、图像等能够被人们感觉器官所感知的形式,把客观物质运动和主观思维活动的状态表达出来。例如电报、电话、数学公式等。

概率信息:采用概率论的方法对信息统计特性的一种定量描述。

1.1.2 信息的性质

目前,哲学家和科学家普遍认为,物质、能量和信息是物质世界的三大支柱,是科学历史上三个最重要的基本概念。

世界是物质的。没有物质就没有世界,就没有一切,也就没有信息。可以说信息与物质同存,信息是物质的一种普遍属性。

在物质世界中任何事物都处于永恒的运动和普遍的相互作用之中。只要有运动和相互作用的事物,就需要有能量,也就会产生各种各样事物运动的状态和方式,就产生了信息。信

息是作为物质存在方式和状态的自身显示,同样也是相互作用的自身显示。可见信息源于物质世界本身,源于物质世界的运动和相互作用之中,所以信息是普遍存在的。

综合起来,信息有如下的重要性质。

(1) **无形性**。信息本身是看不见、摸不着的,它必须依附于一定的物质形式,通过物质形式承载信息,表达信息。例如,语言、文字、图像、电波等都能体现一定的信息。

(2) **相对独立性**。信息是物质的属性,但不是物质自身,信息具有相对独立性。事物运动的状态和方式一旦体现出来,就可以脱离原来的事物而相对独立地附载于别的事物上,而被提取、变换、传递、存储、加工或处理。因此,信息不等于它的源事物,也不等于它的载体。

(3) **可度量性**。信息虽然很抽象,但它是可以度量的。信息的多少可从结构、统计和语义三个方面进行度量。结构理论是通过简单计算信息元的方法,或大量信息简易编码所提供的组合方法对信息进行测量。统计理论是利用熵的概念,作为统计发生概率的不确定性度量,从而得到信息的信息量。

(4) **永恒性**。信息作为事物运动状态和存在状态的一般描述,与事物及它们的运动一样是永恒的。只要世界不停止运动、变化,信息就永远在产生、更新、演变,是一种取之不尽、用之不竭的源泉,因此信息在时空上还具有无限性和可扩展性。

(5) **可存储、传输与携带性**。信息依附于信息载体而存在,而任何物质都可以成为信息的载体。既然物质可以存储、传输和携带,所以信息可通过信息载体以多种形式存储、传输和携带。

(6) **共享性**。信息是可以共享的。当信息持有者传递一条信息给另一个人的时候,他自己所拥有的信息并不会丧失。正如每天报纸都会刊登很多信息,每一个阅读的人都能接收到相同的信息,但不能因为读者收到信息后,报纸上的信息就会消失。信息的这种特性对人类具有特别重要的意义。如果没有信息的共享性,人们就不可能学到老一辈人流传的知识,没有信息的共享性就没有人类社会的发展和进步。

(7) **时效性**。整个世界不断运动使之不断地变化,随之而来的是不断产生新的信息。每一次变化带来的状态具有一定的信息。对于同一事物,后一个状态取代前一个状态,那就意味着新的信息产生,而前一个信息消亡。因此,信息是有“寿命”的。

(8) **不确定性**。信息是能使认识主体对某一事物的未知性或不确定性减少的有用知识,例如自己有某种形式的信息要告诉对方,此时会有两种可能:①估计对方既会对这种信息感兴趣,而又尚不知道这个信息。也就是说,对方在对于这个信息上存在着不确定性;②估计对方已经了解了所欲告之的消息,自然就没有必要通信了。对于后一种情况,如果自己没有疑问,当然就不必询问了。这里所谓“疑问”、“不知道”,就是一种知识上的“不确定性”,即对某个事情的若干种可能结果,或对某个问题的若干可能答案,不能做出明确的判断。

1.2 信 息 论

1.2.1 信息论研究的主要内容

信息论是在信息可以量度的基础上,研究有效地和可靠地传递信息的科学,它涉及信息量度、信息特性、信息传输速率、信道容量、干扰对信息传输的影响等方面的知识。

目前,对信息论研究的内容一般有以下三种理解。

1. 狭义信息论

狭义信息论,也称经典信息论,主要是以香农的研究成果为主,在信息可以度量的基础上,研究信息的测度、信道容量及信源和信道编码理论等问题。这部分内容是信息论的基础理论,又称为香农基本理论。

在各种通信系统中,其传递的形式是消息。但消息传递过程的一个最基本、最普通却又不十分引人注意的特点是:收信者在收到消息以前是不知道消息的具体内容的。在收到消息以前,收信者无法判断发送者将会发来描述事物运动状态的具体消息;他也无法判断是描述这种状态还是那种状态。再者,即使收到消息,由于干扰的存在,他也不能断定所得到的消息是否正确可靠。总之,收信者存在着“不知”、“不确定”和“疑问”。通过消息的传递,收信者知道了消息的具体内容,原先的“不知”、“不确定”和“疑问”消除或部分消除了。因此,对收信者来说,消息的传递过程是一个从不知到知的过程,或是从知之甚少到知之甚多的过程,或是从不确定到部分确定或全部确定的过程。

以十月份北京地区的天气为例,经常出现的天气是“晴转多云”、“晴”或“多云”,其次是“多云转阴”、“阴”、“阴有小雨”等,而“小雪”这种天气状态出现的概率是极小的,“大雪”的可能性则更小。因此,在听气象预报前,人们大体上能猜出天气的状况。由于出现“晴转多云”、“晴”或“多云”的可能性大,人们就比较能确定这些天气状况的出现。因此,当预报明天白天“晴转多云”或“晴”,人们并不觉得稀奇,因为和猜测的基本一致,所消除的不确定性要小,获得的信息量就不大。若出现“小雪”的预报,人们就要大吃一惊,感到气候反常,这时候获得更大的信息量。由此可知,某一事物状态出现的概率越小,其不确定性就越大;反之,某一事物状态出现的概率接近于1,即预料中肯定会出现的事件,那它的不确定性就接近于零。

由此可见,“不确定性”与概率的大小存在着一定的联系,“不确定性”应该是概率的某一函数;那么,“不确定性”的消除量(减少量),也就是狭义信息量,也一定可由概率的某一函数表示。这样就完全解决了作为“通信的消息”来理解的“狭义信息”的度量问题。

2. 一般信息论

一般信息论,也称工程信息论,主要也是研究信息传输和处理问题。除了香农理论外,还包括噪声理论、信号滤波和预测理论、统计检测与估计理论、调制理论、信息处理理论等。虽然维纳和香农等人都是运用概率和统计数学的方法来研究准确的或近似地再现消息的问题,都是为了使消息传送和接收最优化,但它们之间却有一个重要的区别。

维纳研究的重点在接收端。研究一个信号(消息)如果在传输过程中被某些因素(如噪声、非线性失真等)所干扰,在接收端怎样把它恢复、再现,从干扰中提取出来。在此基础上,创立了最佳线性滤波理论(维纳滤波器)、统计检测与估计理论、噪声理论等。

而香农研究的对象则是从信源到信宿之间的全过程,是收、发端联合最优化问题,其重点放在编码上。他指出,只要在传输前后对消息进行适当的编码和译码,就能保证在干扰的存在下,最佳的传送和准确或近似地再现消息。为此发展了信息测度理论、信道容量理论和编码理论等。

3. 广义信息论

广义信息论不仅包括上述两方面的内容,而且包括所有与信息有关的自然和社会领域,

如模式识别、计算机翻译、心理学、遗传学、生物学、神经生理学、语言学、语义学，甚至包括社会学、人文学和经济学中有关信息的问题。它也就是新兴的信息科学理论。

综上所述，信息论是一门应用概率论、随机过程、数理统计和近代代数的方法，来研究广义的信息传输、提取和处理系统中的一般规律的学科；它的主要目的是提高信息系统的可靠性、有效性、保密性和认证性，以便达到系统最优化；它的主要内容（或分支）包括香农理论、编码理论、维纳理论、检测和估计理论、信号设计和处理理论、调制理论、随机噪声理论和密码学理论等。

在本课程中讨论的范围限于一般信息论之内。以香农提出信息理论为基础，从研究通信系统传输的实质出发，讨论信息的测度、信道容量及信息传输的可靠性的知识。

1.2.2 通信系统模型

从 1.2.1 节关于信息概念及性质的讨论中已经看到：信息具有共享性、可传输性，这就要通过系统将信息传输给接收者，各种系统如电报、电话、电视、广播、遥控、雷达和导航等，虽然它们的形成和用途各不相同，但本质是相同的，都是信息的传输系统。为了便于研究信息传输和处理的共同规律，将各种通信系统中具有共同特性的部分抽取出来，概括成一个统一的理论模型，通常称它为通信系统模型，如图 1.1 所示。

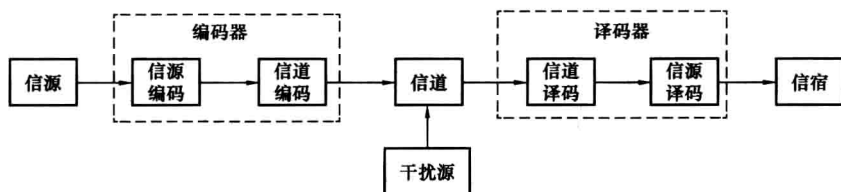


图 1.1 通信系统模型

信息论研究的对象正是这种统一的通信系统模型。人们通过系统中消息的传输和处理来研究信息传输和处理的共同规律。

通信系统模型主要分成以下五个部分。

1. 信源

顾名思义，信源是产生消息的源。它可以是人、生物、机器或其他事物。它是事物各种运动状态或存在状态的集合。如打电话、天气、浏览照片是信源。人的大脑思维活动也是一种信源。信源的输出是消息，消息是具体的，但它不是信息本身。消息携带着信息，消息是信息的表达者。

另外，信源可能出现的状态（即信源输出的消息）是随机的、不确定的，但又有一定的规律性。

2. 编码器

编码是把消息转换成信号的方法，而译码就是编码的反变换。编码器输出的是适合信道传输的信号，信号携带着消息，它是消息的载荷者。

编码器可分成两种，即信源编码器和信道编码器。信源编码是对信源输出消息进行适当的变换和处理，目的是为了提高信息传输的效率。而信道编码是为了提高信息传输的可靠性而对消息进行的变换和处理。当然，对于各种实际的通信系统，编码器还应包括换能、调制、发射等各种变换处理。

3. 信道

信道是指通信系统把载荷消息的信号从甲地传输到乙地的媒介。在狭义的通信系统中实际信道有明线、电缆、波导、光纤、无线电波传播空间等，这些都是属于传输电磁波能量的信道。当然，对广义的通信系统来说，信道还可以是其他的传输媒介。

信道除了传送信号以外，还有存储信号的作用，如书写通信方式就是一例。

在信道中引入噪声和干扰，这是一种简化的表达方式。为了分析方便起见，把在系统其他部分产生的干扰和噪声都等效为折合成信道干扰，看成是由一个噪声源产生的，它将作用于所传输的信号上。这样，信道输出的已是叠加了干扰的信号。由于干扰或噪声往往具有随机性，所以信道的特性也可以用概率空间来描述。而噪声源的统计特性又是划分信道的依据。

4. 译码器

译码就是把信道输出的编码信号（已叠加了干扰）进行反变换。要从受干扰的编码信号中最大限度地提取出有关信源输出的信息。译码器也可分成信源译码器和信道译码器。

5. 信宿

信宿是消息传送的对象，即接收消息的人或机器。信源和信宿可处于不同地点和不同时刻。

研究这样一个概括性很强的信息传输系统，其目的即是要找到信息传输过程的共同规律，以提高信息传输的可靠性、有效性、保密性和认证性，以达到信息传输系统最优化。

所谓可靠性高，就是要使信源发出的消息经过信道传输以后，尽可能准确地、不失真地再现在接收端。而所谓有效性高，就是经济效果好，即用尽可能短的时间和尽可能少的设备来传送一定数量的信息。

以后会看到，提高可靠性和提高有效性常常会发生矛盾，这就需要统筹兼顾。例如，为了兼顾有效性（考虑经济效益），有时就不一定要求绝对准确地在接收端再现原来的消息，而是可以允许一定的误差或一定的失真，或者说允许近似地再现原来的消息。

1.3 信息论的形成和发展

信息论从诞生到今天，已有半个世纪，现已成为一门独立的理论科学。回顾它的发展历史，可以知道理论是如何从实践中经过抽象、概括、提高而逐步形成的。

信息论是在长期的通信工程实践和理论研究的基础上发展起来的。

通信系统是人类社会的神经系统，即使在原始社会也存在着最简单的通信工具和通信系统，这方面的社会事件是悠久漫长的。

电的通信系统（电信系统）已有 170 年的历史了。在一百余年的发展过程中，一个很有意义的历史事实是：当物理学中的电磁理论及后来的电子学理论一旦有某些进展，很快就会促进电信系统的创造或改进。这是因为通信系统与人类社会的发展的关系实在是太密切了。日常生活、工农业生产、科学研究及战争等，一切都离不开信息传递和流动。

例如，当法拉第于 1820—1830 年期间发现电磁感应的基本规律后，不久莫尔斯就建立起电报系统（1832—1835 年）。1876 年，贝尔又发明了电话系统。

1864 年麦克斯韦预言了电磁波的存在，1888 年赫兹用实验证明了这一预言。接着 1895

年英国的马可尼和俄国的波波夫就发明了无线电通信。20 世纪初 (1907 年), 根据电子运动规则, 福雷斯特发明了能把电磁波进行放大的电子管。之后, 很快出现了远距离无线电通信系统。大功率超高频电子管发明以后, 电视系统就建立起来了 (1925—1927 年)。电子在电磁场运动过程中, 能量相互交换的规律被人们认识后, 就出现了微波电子管 (最初是磁控管, 后来是速调管, 行波管), 接着, 在 20 世纪 30 年代末和 40 年代初的第二次世界大战初期, 微波通信系统、微波雷达系统等就迅速发展起来。20 世纪 50 年代后期发明了量子放大器。20 世纪 60 年代初发明的激光技术, 使人类进入了光纤通信的时代。

随着工程技术的发展, 有关理论问题的研究也逐渐深入。

1832 年莫尔斯电报系统中高效率编码方法对后来香农的编码理论是有启发的。

1885 年凯尔文曾经研究过一条电缆的极限穿信率问题。

1922 年卡逊对调幅信号的频谱结构进行了研究, 并明确了边带的概念。

1924 年奈奎斯特和屈夫缪勒分别独立地指出, 如果以一个确定的速度来传输电报信号, 就需要一定的带宽。证明了信号传输速率与信道带宽成正比。

1928 年哈特莱发展了奈奎斯特的的工作, 并提出把消息考虑为代码或单语的序列。在 s 个代码中选 N 个码即构成 s^N 个可能的消息。他提出“定义信息量 $H = N \log s^N$ ”, 即定义信息量等于可能消息数的对数。其缺点是没有统计特性的概念。他的工作对后来香农的思想是有很影响的。

1936 年阿姆斯特朗提出增加信号带宽可以使抑制噪声干扰的能力增强, 并给出了调制指数大的调频方式, 使调频实用化, 出现了调频通信装置。

1939 年达德利发明了声码器。当时他提出的概念是通信所需要的带宽至少应与所传送的消息的带宽相同。达德利和莫尔斯都是研究信源编码的先驱者。

但是, 一直到 20 世纪 30 年代末, 理论工作的一个主要弱点是把消息看成是一个确定性的过程。这就与许多实际情况不相符合。当时所依靠的数学工具主要是经典的傅里叶分析方法, 这是有局限性的。

20 世纪 40 年代初期, 由于军事上的需要, 维纳在研究防空火炮的控制问题时, 提出了“平稳时间序列的外推, 内插与平滑及其工程应用”的论文。他把随机过程和数理统计的观点引入通信和控制系统中来, 揭示了信息传输和处理过程的统计本质。他还利用早在 20 世纪 30 年代初他本人提出的“广义谐波分析理论”对信息系统中的随机过程进行谱分析。这就使通信系统的理论研究面貌焕然一新, 发生了质的飞跃。

1938 年 6 月和 10 月香农在贝尔实验室出版的著名的《贝尔系统技术》杂志上发表了两篇有关“通信的数学理论”的文章。在这两篇文章中, 他用概率测度和数理统计的方法系统地讨论了通信的基本问题, 首先严格定义了信息的度量——熵的概念, 又定义了信道容量的概念, 得出了几个重要而带有普遍意义的结论, 并由此奠定了现代信息论的基础。

香农理论的核心是: 揭示了通信系统中采用适当的编码后能够实现高效率和高可靠地传输信息, 并得出了信源编码定理和信道编码定理。从数学观点看, 这些定理是最优编码的存在定理。但从工程观点看, 这些定理不是结构性的, 不能从定理得结果直接得出实现最优编码的具体途径。然而, 它们给出了编码的性能极限, 在理论上阐明了通信系统中各种因素的相互关系, 为人们寻找最佳通信系统提供了重要的理论依据。

他们将香农已得到的数学结论做了进一步的严格论证和推广, 使这一理论具有更为坚实

的数学基础。在这方面,1954年范恩斯坦的论著是有很大贡献的。

1952年费诺给出并证明了费诺不等式,并给出了关于香农信道编码定理的证明。1957年沃尔维夫兹采用了类似典型序列方法证明了信道编码强逆定理。1961年费诺又描述了分组码中码率、码长和错误概率的关系,并提供了香农信道编码定理的充要性证明。1965年格拉格尔发展了费诺的证明结论并提供了一种简明的证明方法。而科弗尔于1975年采用典型序列方法来证明。1972年阿莫托和布莱哈特分别发展了信道容量的迭代算法。

关于高斯信道是香农在1948年发表的《通信的数学理论》论文中首先分析和研究的。1964年霍尔辛格发展了有色高斯噪声信道容量的研究。1969年平斯克提出了具有反馈的非白噪声高斯信道容量问题。科弗尔于1989年对平斯克的结论给出了简洁的证明。

香农在1948年论文提出了无失真信源编码定理,也给出了简单的编码方法(香农编码)。麦克米伦于1956年首先证明了唯一可译变长码的克拉夫特不等式。关于无失真信源的编码方法,1952年费诺提出了一种费诺码。同年,霍夫曼首先构造了一种霍夫曼编码方法,并证明了它是最佳码。20世纪70年代后期开始,人们把兴趣放在与实际应用有关的信源编码问题上。于1968年前后,埃利斯发展了香农-费诺码,提出了算术编码的初步思路。而里斯桑内在1976年给出和发展了算术编码。1982年他和兰登一起将算术编码系统化,并省去了乘法运算,更为简化、易于实现。关于通用信源编码算法——LZ码是于1977年由齐弗和兰佩尔提出的。1978年他们又提出了改进算法,而且齐弗也证明此方法可达到信源的熵值。1990年贝尔等在LZ算法基础上又做了一系列变化和改进。LZ码已广泛应用于文本的数据压缩中。正是在香农的无损信源压缩编码定理的指导下,无损压缩编码技术和算法得到迅速发展与应用。

在研究香农信源编码定理的同时,另外一部分科学家从事寻找最佳编码(纠错码)的研究工作。这一工作已取得了很大的进展,并已形成一门独立的分支——纠错码理论。纠错码的出现应归功于理查德·汉明。早在1950年,汉明第一个提出了纠正一位错误的编码方法,目的是为了使贝尔实验室的计算机具备检测错误的能力。由此汉明码的纠错思想成为了线形分组码的基本指导思想。接着,格雷提出了纠二位和三位错误的格雷码。1954年Muller和Reed突破了码的参数固定不变的限制,提出新的分组码RM码。随之,1957年,E·Prange在线性分组码中找到子类的循环码。人们在循环码和线性分组码的广泛、深入的研究基础上,形成了系统的理论,即现代编码理论,使其成为应用数学的一个分支。但代数编码的渐近性能较差,难以实现香农信道编码定理所指出的结果。为此,1955年埃利斯提出卷积码的思想。1960年左右提出了序列译码方法,门限译码方法,特别是以维特比为代表的、基于概率和软判决的最大似然译码算法的提出,使卷积码迅速得到广泛应用。如“先驱者”号太空探测器,木星和土星探测器,以及移动通信领域中的欧洲的GSM标准系统和北美IS-95标准等都采用了卷积码技术。然而科学家并没有停止对构造紧致码和逼近香农极限的优异码的研究。先后研究提出了级联码(将两个短码串行级联使用),乘积码及交织(或交错)技术等新的方法。在20世纪80年代前后,又提出了一种网格编码调制方案(TCM),它将编码和调制接合起来,在不扩展信道带宽的情况下提高了系统的功率,从而增强了系统的抗干扰能力。近年来,Turbo码、LDPC码的提出和研究,发现了这两种码误比特率与香农极限相差无几的优异性能。由此不但引起了新的研究热潮,而且使人们更加清晰地认识到香农信道编码理论是真正具有实用意义的科学理论。

限失真信源编码的研究较信道编码和无失真信源编码落后十年左右。香农在 1948 年论文中体现出关于率失真函数的思想。一直到 1959 年他发表了“保真度准则下的离散信源编码定理”，首先提出了率失真函数及率失真信源编码定理。从此，发展成为信息率失真编码理论。1971 年伯格爾著作的“信息率失真理论”一书是一本较全面地论述有关率失真理论的专著。率失真信源编码理论是信源编码的核心问题，是频带压缩、数据压缩的理论基础。有关率失真信源编码理论本身尚有待进一步的研究，所以它一直到今天仍是信息论的重要研究课题。有关数据压缩、多媒体数据压缩又是另一独立的分支——数据压缩理论与技术。

香农 1961 年的论文“双路通信信道”开拓了网络信息论的研究。1970 年以来，随着卫星通信、计算机通信网的迅速发展，网络信息理论的研究异常活跃，成为当前信息论的中心研究课题之一。1971 年艾斯惠特和 1972 年廖 (H. Liao) 找出了多元接入信道的信道容量区。接着，1973 年沃尔夫和斯莱平将它推广到具有公共信息的多元接入信道中。科弗尔、艾斯惠特于 1983 年分别发表文章讨论相关信源在多元接入信道的传输问题。1972 年科弗尔提出了广播信道的研究。伯格曼斯 (1973)、格拉格尔 (1974)、科弗尔 (1975)、马登 (1979)、伊·盖马尔 (1979) 和范·德·缪伦 (1979) 等分别研究了广播信道的容量区问题。有关中继信道的研究，由范·德·缪伦 (1977) 首先引入，科弗尔和伊·盖马尔找到了降价中继信道的容量区 (1979)。近 20 多年来，这一领域研究活跃，发表了大量的论文，使网络信息论的存在理论已日趋完善。

目前，在香农信息论方面，值得注意的研究动向是信息概念的深化；网络信息理论和多重相关信源编码理论的发展和应用；通信网的一般信息论研究；磁记录信道的研究；信息率失真理论的发展及其在数据压缩和图像处理中的应用；以及信息论在大规模集成电路中的应用等问题。这些领域都是与当前信息工程的前景——光通信、空间通信、计算机互联网、移动通信，多媒体通信语音和图像的信息处理等密切相关的。

现在，信息理论与技术不仅在通信、计算机和自动控制等电子学领域中得到直接的应用，而且还广泛地渗透到生物学、医学、生理学、语言学、人文学、社会学和经济学等各领域。在信息论与自动控制、系统工程、人工智能、仿生学、电子计算机等学科互相渗透、相互结合的基础上，形成了一门综合性的新兴学科——信息科学。

信息科学作为一门独立的学科，它是以信息作为主要研究对象，以信息的运动规律和利用信息的原理作为主要研究内容，以信息科学方法论作为主要的研究手段，以扩大人类的信息功能（特别是智能功能）为主要的研究目标的一门新兴学科。

信息科学的研究对象是客观事物的信息属性，这是信息科学区别于传统自然科学而具有独立存在性和广阔发展前景的基本依据。

宇宙间万物世界，都是聚物质、信息、能量与客观事物一身。信息性和物质性、能量性一样，是客观事物最基本的属性。信息是无所不在的，它存在于自然界、存在于人类社会中，还存在于人的大脑之中。而信息科学正是以这无所不在的信息作为自己的研究对象，展开其广阔的研究领域。显然，信息科学的研究范围要更广阔，涉及的内容也更复杂、更深刻。

信息科学由信息科学理论、信息应用技术和信息科学方法三者组成。

信息科学理论主要包含信息定性理论、信息定量理论和信息应用理论。

信息应用技术,狭义地说它是扩展人的信息功能的技术。它包括获取信息、传递信息、加工处理信息、存储信息等代替和延伸人的感官及大脑的信息功能的技术。所以,它主要包括信息获取技术(感测技术)、信息传递技术(电信技术)、信息加工处理技术(计算机技术)及信息控制技术(自动智能控制技术)四个主要方面。

信息科学方法是人类以信息作为窗口去认识世界和改造世界全过程的一整套方法,由信息分析方法和信息的利用方法两大部分组成。它包括信息的获取方法、信息的传递方法、信息的加工处理方法、信息的存储方法、信息的描述和度量方法及信息的调控和利用方法。信息科学方法就是信息科学理论的应用手段。它是适应信息科学研究的需要而产生的一种同传统科学研究方法截然不同的科学研究方法,并将随着信息科学理论的发展而不断完善。

信息科学理论、信息科学技术和信息科学方法三者之间既有区别,又有联系和作用,构成了信息科学的总体。正是它们在这样的相互依赖、相互促进中交相辉映、共同发展,使人类对信息的认识和利用上升到一个新的水平,把人类推入了高度化发展的信息社会。毫无疑问,随着信息论和信息科学的发展,人们将会揭示出客观世界和人类主观世界更多的内在规律,从而使人们有可能创造出各种性能优异的信息获取系统、信息传输系统、信息控制系统及智能信息系统,使人类从自然的束缚下得到解放和自由。

1.4 信息论的主要研究成果

1. 语音信号压缩

语音信号一直是通信网中传输的主要对象。自从通信网数字化以来,降低语音信号的编码速率就成为通信中的一个重要问题。根据信息理论的分析,语音信号所需的编码速率可以远远低于仅按奈奎斯特采样定理和量化噪声分析所决定的编码速率。几十年来的研究工作已在这方面取得巨大的进展。

长途电话网标准的语音编码速率已从1972年原CCITT G. 711标准中的64kbit/s,降低到1995年原CCITT G. 723.1标准中的6.3kbit/s。

在移动通信中,1989年欧洲GSM标准中的语音编码速率为13.2kbit/s,1994年在为半码速GSM研究的VSELP编码算法中,码速率为5.6kbit/s,IS-96是美国高通公司为CDMA移动通信研制的一种CELP编码,具有4种码速率。

对语音音质要求较低的军用通信,美国NSA标准的速率在1975年时已达到2.4kbit/s。

目前,在实验室中已实现600bit/s的低速率语音编码,特别是按音素识别与合成原理构造的声码器,其速率可低于100bit/s,已接近信息论指出的极限。

2. 图像信号压缩

图像信号的信息量特别巨大,这对图像信号的传输及存储都带来极大的不便。经过多年的研究,到20世纪80年代,图像信号压缩逐步进入建立标准的阶段。

1989年CCITT提出电视电话和电视会议图像压缩及其标准H. 261,其压缩比达到25:1到48:1。

1991年CCITT与ISO联合提出的“多灰度静止图像压缩编码”标准JPEG,其压缩比为24:1。

在运动图像方面,运动图像专家组(MPEG)继成功定义了MPEG-1和MPEG-2之后,于1993年7月开始制订全新的MPEG-4标准,并分别于1999年初和2000年初正式公布了第1版和第2版。到2001年10月,MPEG-4定义了19个视觉轮廓(Visual Profile),其中新定义的简单演播室类和核心演播室类使MPEG-4对MPEG-2类别保留了一些形式上的兼容,其码率可高达2Gbit/s。随着MPEG-4标准的不断扩展,它不但能支持码率低于64kbit/s的多媒体通信,也能支持广播级的视频。

3. 计算机文件的压缩

由于数据库的广泛应用,存储计算机文件所需的存储量问题日益突出。在过去的20多年中对计算机文件的压缩已发展了20余种不同的算法。

目前,各种压缩算法已在计算机中得到广泛的应用。

4. 模拟话路中数据传输速率的提高

20世纪50年代初计算机开始在美国联网,当时模拟话路是几乎唯一可用的信道。

最早的调制解调器,其速率只有300bit/s。

标称带宽4kHz,信噪比25dB的话路信道的极限速率应在25kbit/s。

信息论在以后的30多年中就开始了提高速率的工作。

1967年,速率为4800bit/s;1971年,9600bit/s;1980年,开始进入14.4kbit/s。

1985年,利用多维网格编码调制,速率达到19.2kbit/s,非常接近于理论极限。

5. 降低信息传输所需的功率

在远距离无线通信,特别是深空通信中如何降低信息传输所需的功率至关重要。因为在这种情况下发送设备的功率和天线的尺寸都已成为设备生产使用中的一个困难问题。

正是在这个领域信息论获得了它第一批令人信服的成果。20世纪60年代后期起,NASA发射的所有深空探测器无一例外地在其通信设备中采取了信道编码措施。

根据信息理论的分析,采用低码率的信道编码可以降低传送单位比特所需的能量 E_b 与噪声功率谱密度 N_0 之比。现在利用不太复杂的信道编码就可以使同样误码率下所需的 E_b/N_0 比不采用信道编码时低6dB左右。其中一些好的方案(如用RS码作为外码、卷积码作为内码的方案)可以使误码率在 10^{-5} 的情况下所需的 E_b/N_0 降到0.2dB,比不用信道编码时所需的10.5dB降低了近10dB。

6. 计算机网中数据传输可靠性的保证

随着计算机技术的发展,计算机设备的布局变得越来越分散,各种终端及外围设备离主机也越来越远,这就产生了计算机网。近年来,由于计算机网还与分布式计算机系统相联系,因而变得更为重要。在用各种电缆连接而成的计算机网中电噪声和各种外界的电磁干扰是必须考虑的,因为它使传输的信息发生差错。一般情况下,局域网中的差错率在 10^{-8} 左右,广域网中的差错率为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 。这样高的差错率在实际应用中是无法接受的,目前普遍采用的解决办法是带自动重发请求的差错检测码。

差错检测的方法从最简单的奇偶检验到比较复杂的循环冗余检验都被采用,但规模较大的网一般都用循环冗余检验,这种方法已被各种网络通信协议采用并成为标准。例如ISO制定的高级数据链路协议(HDLC)就采用原CCITT V.41的CRC码进行循环冗余检验,HDLC在全世界已被广泛采用,这一标准有很广的应用领域,许多协议都是从它派生出来的。