

当代新思维新学科系列画库

信息论

民盟北京市委图象传播研究所编
河南美术出版社



当代新思维新学科系列画库

信 息 论

魏 宏 森 著
李 薛 伟 绘
方 晶 摄 影

民盟北京市委图象传播研究所编
河 南 美 术 出 版 社 出 版

当代新思维新学科系列画库

信 息 论

魏宏森 著
李薛伟 绘

河南美术出版社出版
北京人民美术印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

开本16 印张3.25 印数 1—5,000册

1991年11月第1版 1991年11月第1次印刷

书号: ISBN 7-5401-0199-7/J·133 定价: 3.60元

总 序

历史发展到今天，人类正面临着跨越世纪的转换。世界范围内的变革与发展以及科技革命浪潮，对处于九十年代的中国人既是机遇，也是挑战。

当代科学技术的发展与社会的进步，使自然科学与社会科学紧密结合，并已成为不可抗拒的历史洪流。在这种背景下，二者的互相渗透、融合、交叉，诞生了一系列新思维、新学科。它不仅开拓了人们的视野、带来了观念性的变革，而且也极大地提高了社会生产力。

发展科技、振兴经济、造福人民是我们最高和最终目标。为了向亿万群众普及传播新学科、新知识，使我们民族的科学文化素质和现代科学技术同步前进，民盟北京市委图象传播研究所组织编辑了这套图文并茂的《当代新思维新学科系列画库》，愿它引起广大学生、群众、干部的兴趣，并成为大家进一步探索科学新天地的桥梁。

这套画库是编辑者的初次尝试，还要陆续出下去。希望得到广大读者的关心和指正，使之不断完善。

錢伟长

1991年12月

顾 问：钱伟长 冯之浚
 程述武 叶家铮

主 编：王效池 刘立宾

编 委：闵惠泉 张世德
 孙肃显 姜吉维
 钱 炜

责任编辑：孙肃显 赵智文

封面设计制作：沈小川

信息论与社会信息化



一、什么是信息论

信息论是一门应用数理统计方法来研究信息处理和信息传递的科学。它的主要任务是揭示通讯和控制系统中普遍存在着的信息传递的共同规律，以及如何提高各信息传输系统的有效性和可靠性。所以，它是解决通讯技术问题的一门通讯理论，它是控制论的基础。又称狭义信息论。如电报系统是一个广泛应用的通讯系统，这里从甲到乙传递信息有什么规律？如何提高信息传输系统的有效性、效率和可靠性？采用哪些技术措施来解决？这就需要狭义信息论来加以解决。随着信息论的普遍应用，渗透到其他学科，以至渗透到生产、生活和社会各个领域，不仅涉及客观现实领域，而且亦涉及人的思维领域，人们逐渐从广泛意义上使用信息这个词，原来信息论的范围就太窄了，尤其是在今天新的技术革命的形势下，迫切要求人们对信息的概念和实质、信息熵以及信息的语义、信息的效用等问题作进一步的探讨，要求有更确切的理解和更进一步的探讨，以适应社会信息化的需要。

30年来，人们试图突破申农信息论的局限性，把信息论中的概念、原理、方法运用于生物学、心理学、物理、化学、经济管理、社会学等许多领域。出现了研究一切信息的产生、获取、变换、传输、存贮、处理、显示、识别和利用的广义信息论。在美国称信息科学，西欧称信息系统。

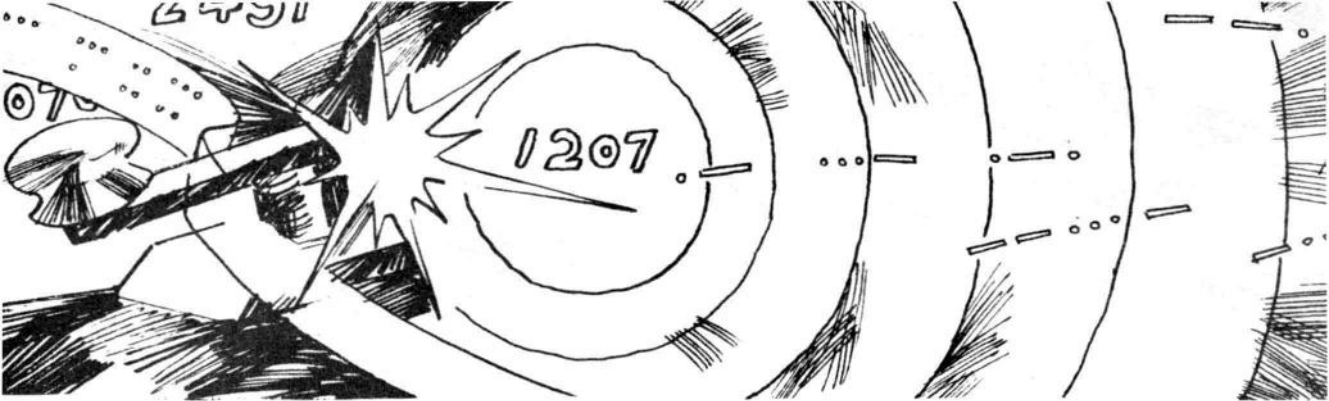


二、信息论的产生进程

(一) 问题的提出

人类在自己的实践活动中早已与信息打上了交道，无论是人类社会，还是每个人在自己的生活中，都要不断地获取信息、传递信息、存贮信息、处理信息和利用信息。例如，打仗时要刺探军事情报就是获取信息。古代人“结绳记事”就是存贮信息，我国古代长城的烽火台就是“举烽火为号”的原始的光通讯设施。大家知道我国古代周幽王烽火戏诸侯的故事，说的是东周末年周幽王昏庸无道，有一次，为了博得妃子的欢喜，便命令点起了烽火，那时烽火一起说明有军情，各路诸侯只要看见烽火便不约而同地领兵到达，以便听从他的调遣抵抗来犯者，可是等诸侯们赶到周幽王那里，一看他正在与妃子们寻欢作乐，周幽王见诸侯们都惊慌失措地赶来哈哈大笑置之。诸侯们无可奈何地各自回去了，但等到后来真的敌兵来犯再起烽火，诸侯们便不再来了，结果导致东周的灭亡。这说明通讯信号有一定的约定、不能随便乱用。

古罗马地中海沿岸诸城市以悬灯表示迦太基人进攻的消息，悬灯为号亦是光通讯；印第安人采用长短的烟信号；非洲人采用高低鼓音进行通讯。这就是传递信息。但是，谁都没有理解这是信息。直到20世纪40年代信息论产生以前，人们对信息的认识仍然处于非常模糊的朦胧状态。人类从利用信息到把信息从消息中分离出来，并且精确地加以定量的度量是经过漫长的过程的。据考证，中国古代《三国志》中有这样的句



子“先知动静、而为之备”《男经·系辞上》中有“动静有常，刚柔断矣”，其中动静就是指取得的信息。在唐诗《碧云集》中有“梦断美人沉信息，目穿长路倚楼台”的诗句，第一次出现了信息这个词。但长期来对信息的认识尚处于朦胧之中。

从科学技术发展的历史来看，信息论的产生是随着近代，特别是现代通讯技术的发展而发展起来的。19世纪30年代，德国人韦伯和高斯发明了电报，英国发明家科特、惠斯通发明了实用电磁电报机（1937年）。美国人莫尔斯发明了高效率编码的电报法。这人原来是个画家，对科学技术完全是外行，1832年回国船上遇上杰克逊，为了排除船上的寂寞，杰克逊利用三种电气

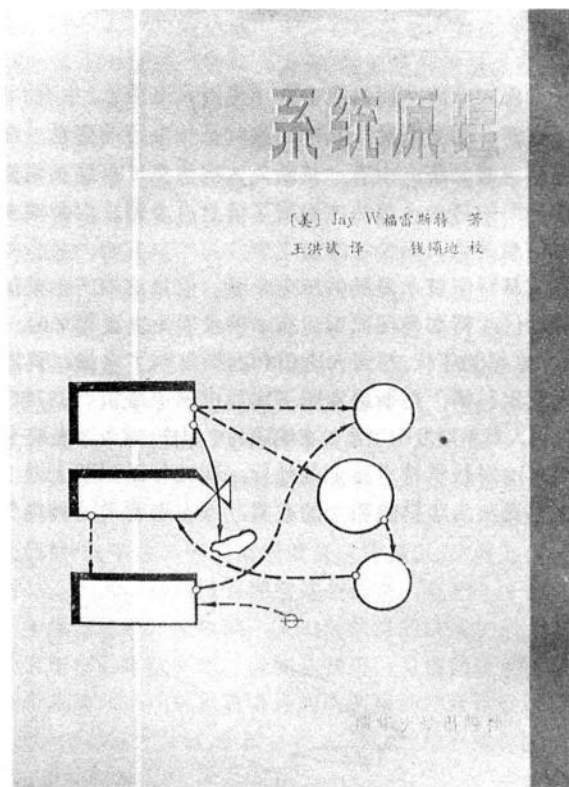
设备进行实验。这引起莫尔斯极大兴趣，他突然闪现出一个念头，并把它写在笔记本上，“电流发生一瞬间，如果它能不断地传送10英里，我就可以让他传遍全球。可以骤然地切断电流，使之闪现电火花，电火花是一个信号，没有电火花是另一种信号，没有电火花的时间长度又是另一种信号，这三种信号可以结合起来，代表各种数字或字母。数字和字母可以按顺序编排。这样文字就可以经电线传送出去，而远处的仪器就把信息记下来”。于是他提出了快速传输信号的方法。这就是现在还一直使用的莫尔斯电码。1846年惠斯通实现了电线传输信号。人类终于找到了比较先进的通讯工具。





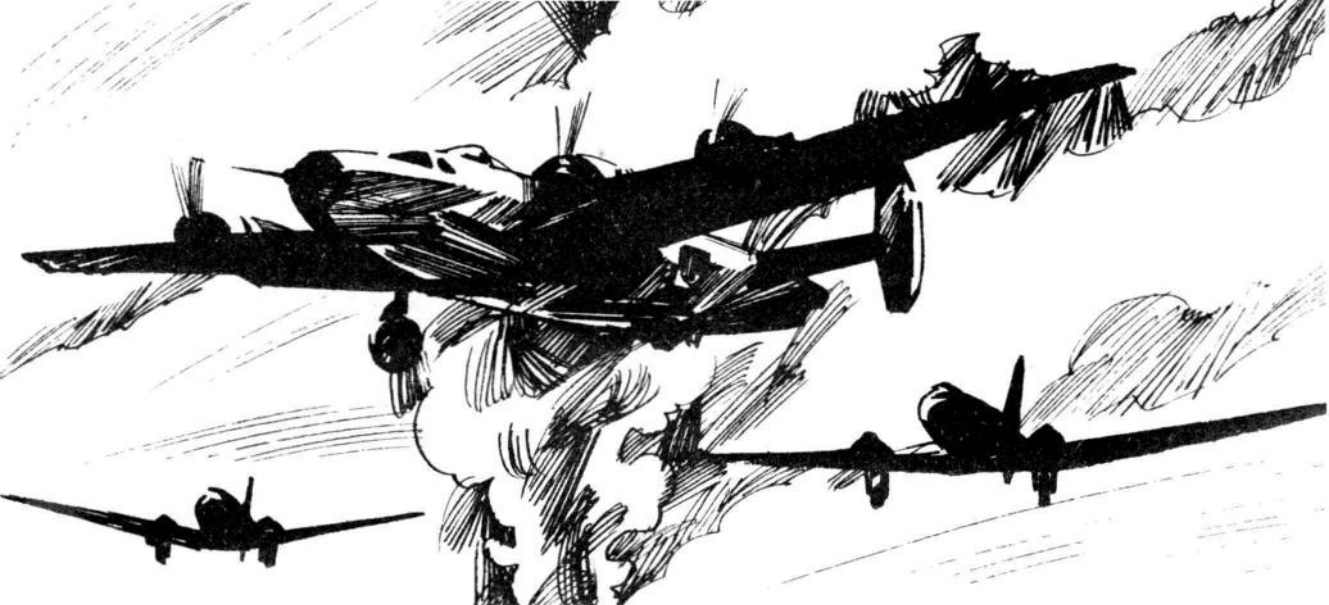
后来人们敷设了许多条海底电缆，其中以横跨大西洋的海底电缆最为著名，他是在W·汤姆逊(即凯尔文勋爵)指导下成功的。但是建成以后却出现了问题，实际传送信号时，接收机的工作竟不像预想的那样，明知发送是什么，但收到的却是与发送信号完全不相干的波形，根本无法传递信息，对此人们都困惑不解。发射机的功率、接收机的灵敏度、电缆的绝缘都是正常的，可是接收的信号波形与发送的波形完全不同，这成了一个不可思议的谜。

解开这个谜的是凯尔文，他对信号畸变的因素作了定量的描述。指出这种海底电缆实际上具有不合适的特征，它只允许低频通过，而信号却都是高频发出的，所以都衰减掉了，不能到达接收端，这是电信号中的干扰造成的，这就有一个传递信息的信道频率特性问题。于是，提出一系列亟待解决的研究课题。例如，怎样解决通讯中信息传输的效率问题、准确性问



题、干扰问题、频率特性问题等，这些问题吸引了许多科学家的工作，于是如何解决这类问题成了信息论发展的重要根据。

本世纪20年代，对信息论的研究有一些进展。如1922年卡松、1924年美国的奈奎斯特和德国的凯夫曼尔，找到了传送电报信号所需时间与频率的关系，即找出传输低频信号所花的时间少、传输高频信号如果延长传输时间就可以了。为了以一定的速率传送电报信号，就要求有一定的频率，这里特别要提出的是1928年哈特莱发表了《信息传输》一文，首次提出了消息是代码、符号、序列而不是内容本身。它与信息有区别，消息是信息的载体，信息是包含在消息中的抽象量，把信息从消息中区别开来，并且提出用数学公式，用对数来度量其中包含的信息。这是科技史上概念的又一次突破，对申农信息论的创立具有决定性意义。



（二）申农等人的贡献

推动信息论产生的直接动因，还是战争期间和战后通讯事业的迅猛发展的需要。由于雷达的发明，真空电子管的广泛利用，电子技术、通讯技术、自动控制、计算技术的发展，以及防空系统的需要。例如：在第二次世界大战中希特勒飞机到达英吉利海峡上空，就被英国雷达盯住了，雷达准确地引导英国飞机进行轰击，发挥了很大作用。后来飞机上装有无线电干扰，使雷达失灵，使得击落飞机的命中率降低四倍，仅此一项美国就使得4500名飞行人员免于死亡。1944年英美联军在诺曼底半岛登陆的成功，就使用了电子干扰，使得雷达收不到准确的信息，结果德军在这个岛周围

布置的120台雷达全部陷于瘫痪，因而获得了登陆的胜利。这些都促使许多科学技术工作者同时在不同的国家和地区进行大量的研究。当时对信息论有独特贡献的有以下几位科学家。

美国贝尔电话公司贝尔电话研究所的数学家申农首先创立了信息论。早在30年代，他做博士论文时的题目就是“布尔代数在逻辑开关理论中的应用”。他特别注重计算机的数字通讯工作，于1940年就开始从事信息论的研究工作，1948年他在《贝尔系统技术》杂志上发表了一篇论文，即《通讯的数学理论》，它奠定了现代信息论基础，具有划时代的意义。后来他与魏沃尔合著了《信息论》。



美国麻省理工学院的维纳，他从控制和通讯的角度进行长期的研究，提出了著名的维纳滤波理论，信号预测以及在负延迟下的有噪声信号的接收理论。他从统计观点出发，将消息看作为可测事件的时间序列，提出了将消息量化的原则和方法。他提出：“单位信息量就是对具有相等概率的二中择一事件作单一选择时所传递出去的信息。”他独立地提出了测量信息量的数字公式，他把信息作为处理控制和通讯系统基本的概念和方法，并推广运用于许多领域，为信息的应用开辟了广阔前景。如果说申农主要是从信息的发送端来研究信息，那么，维纳则着重从接收端如何利用信息来加以研究。

美国另一名统计学家R·A费希尔，他从古典统计理论的角度研究了信息论。

布里渊对信息论做了大量工作。50年代，信息论在各部门学科的渗透给人们带来了意外的希望，各个学科的科学家试图用信息概念、方法来解决本学科面临的许多未能解决的问题。试图把信息论用于解决组织化、语义学、神经生理学、生物学、物理学、心理学等问题。人们尽可能从广泛意义上来解释信息论。



这一时期，比较有成就的是物理学和生物学方面的突破。法国旅美物理学家布里渊把信息论推广到物理学，在分子生物学研究中信息学派取得了成功，这些就是明显的例证。



布里渊在1950年发表了《生命、热力学、控制论》，认为“为了能把类似的概念可靠地应用于有关生命和智力的基本问题上，除了旧的古典物理熵概念以外，还需要一些大胆的新的推广和概括”。在物理中熵是一个系统无序程度的度量。它的大小标志着该系统内分子的无秩序的程度。1956年他出版的《科学与信息论》一书，力图把信息与具体物理过程联系起来，把信息熵与物理学熵直接联系起来。他把申农抽象表达的信息称为“自由信息”，而把热力学中描述物理状态的量——熵称为“约束信息”。他成功地建立了信息的物理模型，给出了广义熵增原理。提出“信息和负熵原理”即认为“信息与负熵等价”并找到信息熵与热力学中熵的相互之间的对应关系为：

$$1 \text{ 比特} = k \log_2 2 = 10^{-16} \text{ 尔格} / \text{K}^{\circ}$$

(k 为波尔兹曼常数， K° 为绝对温度)

从而扩展了热力学第二定律，即 $\Delta S - \Delta I \geq 0$ (ΔS 是热熵的增量，而 ΔI 是信息的增量)。按照布里渊的理论，在封闭系统中，若有信息参与，则不能说热熵一定增加，而且 $\Delta S - \Delta I$ 必然增加。这就成功地解释了热力学中一个难题“麦克斯韦妖”的佯谬。什么是“麦克斯韦妖”佯谬？热力学定理认为，在一个封闭系统中熵总是趋向于增加，即 $\Delta S > 0$ 。麦克斯韦就提出了一个理想实验来反驳。他假设有一个封闭的小盒子，在一定的温度和压力下，盒子里充满了气体，盒子中间放一块隔板，开一个无摩擦的小门。这个小门由一个小妖看守，他能识别气体分子的速度，凡快速的分子都可以从A进入B，相反，慢速的分子则由B进入A。最终结果是B室充满了快速分子，A室充满了慢速分子。这样一来熵不仅没有增加，反而减少了。系统变为 $\Delta S < 0$ ，总的熵不仅没有增加，反而减少了，这就与热力学第二定律相违背。这种现象科学史上称之为“麦克斯韦妖”佯谬。对这种由前题推导出的结论反过来否定前题的现象，人们一直没有找到正确的解释。而布里渊的理论就解决了这一难题，因为小妖在识别气体分子速度时需要信息，传输信息是需消耗能量的，即消耗功。因此，在封闭系统中熵的增加与否是与信息有关的， ΔS 应理解为广义熵增加，即：

$$\Delta S - \Delta I \geq 0$$

布里渊把这称为广义熵增原理。





三、申农信息论的基本内容

申农信息论的基本思想和出发点，一是把通讯过程作为一个系统来考察，他说“通讯的基本问题就是精确地或近似地在一点复现另一点所选择的信号”；二是把统计和概率观点引入通讯理论。他确定把统计信息源的概率作为工作中心，他认为对象发出的信息具有不确定性；三是以概率论为基础重新定义信息论，使信息得到了更精确的量化。他不仅考虑有可能出现的消息，而且考虑各消息出现的概率，不仅注意到信息，而且注意到在传递过程中出现的噪声。

申农信息论的基本内容就是从通讯技术上来研究信源、信宿、信道噪声的编码问题。我们从以下几方面作大致介绍。

(一) 通讯系统模型

申农第一次从理论上阐明了通讯的基本问题，提出了通讯系统的随机模型。在他看来，所谓通讯就是两个系统之间传递信息。他把由许多复杂的通讯机构简化为由信源、编码、信道、噪声、译码及信宿组成的一个信息系统。



人有人的用处

——控制论和社会

〔美〕维纳著

商务印书馆

General System Theory

Foundations, Development, Applications

Revised Edition

by Ludwig von Bertalanffy



1. 信源：信源顾名思义就是信息的源泉，即发出信息的客体，称之为信息源。可以是人、机器（发射机）或自然界的物体等。信源发出信息时，它一般以符号的形式表现出来，而代表信息的一串符号，称之为消息。消息的形式是多种多样的，如语言、文字、图像等等。

信源所发出的消息（符号）常带有随机性，它是不确定的。如果符号是确定的，而且预先是知道的，那就无信息可言。假如有人告诉你数学考试成绩，而你昨天就已从老师那里知道了，这个消息对你来说就没有任何信息，如果你还不知道，那么你就从他那里获得了信息。所以，作为信息载体而出现的符号（消息）应该是随机的，不确定的。

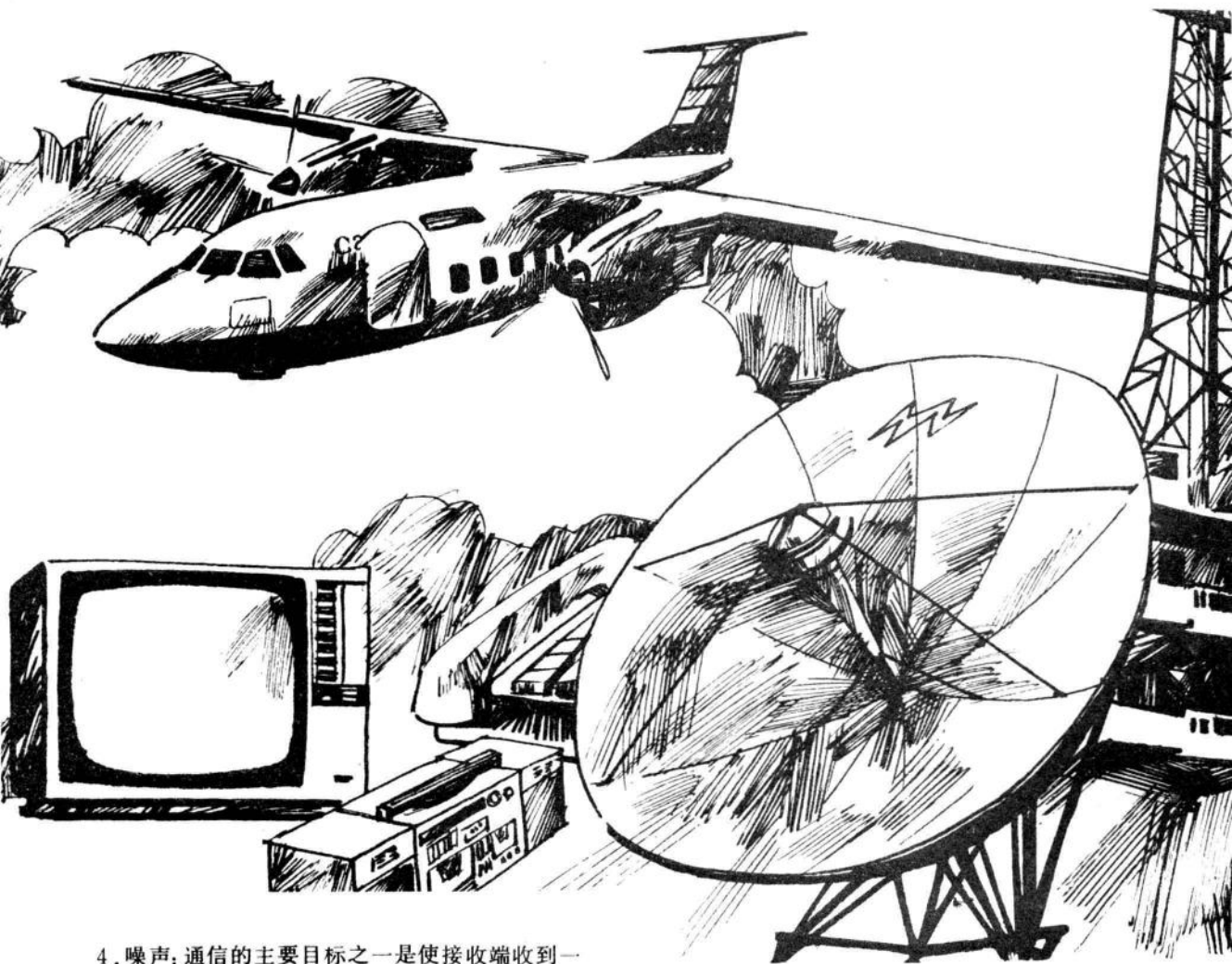
2. 编码：所谓编码就是把信息变换为信号的措施。“码”是什么呢？简单地讲就是一个符号表和将这些符号排列起来所必须遵循的规则。编码过程分为两个部分：一是信息编码。通俗来讲，就是把信源输出的符号序列，用某个给定的字母表中的字母编码成最佳的字母（又称码字）系列；二是信道编码，就是把信源编码后的码字序列变换成适合于在信道中传输的最佳信号序列。信号是多样的，如电信号、光信号、声信号等等。编码设备（编码器）的输入端接信息

源，这时当来自信息源产生的消息（符号）进入编码设备后，就按照编码规则编成信号系列从输出端输出。例如，信息源产生的原始消息是一篇用文字写的文件，用电报传递时，经过编码，0121……再用摩尔斯码的点、划、空白表示出来，通过信道由电信号到达对方，从输出端输出。在通讯系统里，消息常常不是经过一次编码就被送入信道进行传输的，要使消息变成适合于信道传输的信号，常常要经过几次编码。如汉字要先编成四位数的数码（译码），再编为莫尔斯码传送。



3. 信道：信道是传递信号的物理设施。是构成一般信息流通系统的重要部分。从广义上说，它不仅承担了信息的传输，而且也承担了信息的存贮任务。信道的关键问题是信道的容量，即以最大的速率传递最大的信息量。从广义上看，信息的传输过程，也是信息的存贮过程，如用书信传递信息，发信人把信息书写在纸上，通过邮寄，收信人收到了信息，这一传输

过程，也是信息的存贮过程。如用书信传递信息，发信人把信息书写在纸上，通过邮寄，收信人收到了信息，这一传输过程，也是信息的存贮过程。因此，从这一特定意义上来讲，信道问题也是以最大容量存贮最多的信息量；信道也是多种多样的；有线信道，如同轴电缆、光导纤维等。无线信道，如自由空间、电离层等。



4. 噪声：通信的主要目标之一是使接收端收到一个与发送端尽可能相同的消息，但在许多实际情况下，收发消息之间常常有差别，这往往是由于噪声干扰所造成的。有内部和外部发生的干扰，例如，在电视屏幕上出现的许多闪烁着白点的“雪花”干扰，打电话时出现的喀喇声和嘶嘶声，这噪声干扰常常影响通讯效果，造成某些失真。

5. 译码：当信号系列通过信道输出端输出后，必须经过译码复制成消息，才能送到收信人手里，译码过程恰好与编码相反，所以译码就是编码的反变换。

6. 信宿：即收信者，信息接收者，可以是人、机器、收音机、电视机、接收机等等。

从现在发展情况来看，申农的这一通讯模型，不仅适用于技术系统，而且具有普遍意义，可以推广到生命和社会系统。我们的兴趣正是在这里（如信息化社会）。

(二) 信息量 (或信息熵)

任何一门科学不仅要定性,而且要进行定量描述。因为定性是定量的基础,而定量则是定性的精确化。申农把信息量化,使通信科学由定性阶段进入定量阶段,是一次飞跃。

怎样才能定量的描述信息呢?申农进行了一系列的抽象,暂时撇开一些因素,把信息加以形式化,只着眼于技术上,从数量关系上进行描述,以概率论作为重要工具。在他看来,世界上的一切现象中,有些是必然事件,具有确定性。有些则是随机事件,具有不确定性。如在标准大气压下,水加热到 100°C 时必然会沸腾;人总是要死的;人手上拿的东西,如果一松手,它必然落到地上。这种在一定条件下必然要发生的现象就是必然事件。它具有确定性。牛顿、拉普拉斯机械决定论就是从他们对必然事件的描述中得出的。只要知道现在状态,就可以评论它的过去。反之,

知道初始条件,就一定能预见它的将来。人们正是按照牛顿力学的精确计算发现了海王星,这在19世纪拉普拉斯已建立了一个严格的逻辑理论体系。当拿破仑问拉普拉斯说:“在你的书里为什么没有上帝的位置?”拉普拉斯回答说:“是的,亲爱的陛下,因为我需要它。”但自然界还存在着另一类现象。其变化发展往往具有几种不同的可能性,究竟出现哪一种结果是带有偶然性的、随机性的?所以称随机事件具有不确定性。它遵循统计规律,如涨落现象和转动硬币等。就以转动硬币为例,如果在同样条件下,它有时出现不同结果,正面或反面。如果重复多次亦可以发现规律。明年春节天气亦可能是晴、阴、雪、雨,概率表示事件发生的可能性大小。如果我们把概率记为 P , $P=1$ 则可能出现事件达到极大值,即成为必然发生的事件,一般随机事件发生在 $0 < P < 1$ 之间。



信息源所发出的信号带有随机性，即不确定性。
申农就把接收端的不确定性的减少或消除称之为信息量。

接受信息量 = $\log_2(\text{后验概率} / \text{先验概率})$ 。先验概率就是在收到消息数据之前，接收端所了解的某消息发送的概率。收到某个消息之后，接收端所了解的该消息发送的概率叫后验概率。在有干扰情况下这很重要，如果忽略干扰则后验概率为 1，因此，信源输出第 i 个消息的信息量可以定义为：

$$I = -\log_2 P(i) \dots\dots (i)$$

这个公式就表明信息量是为某消息所示事件发生概率的倒数的对数（若以 2 为底，其单位是比特）。

例如，考虑独立事件。“今天的天气很好”，一年中如果“天气很好”占 365 天中的 $\frac{1}{4}$ ，这就是先验概率，则这条消息中具有的信息量为：

$$-\log_2 \frac{1}{4} = 2 \text{ (比特)}$$

同样“今天是休息日”，如果一个学校一年中有 $1/4$ 为假日，则这条消息的信息量亦为 2 比特。

