

基础信息论

〔日〕 藤田 广一 著

魏鸿骏 陈尚勤 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书介绍信息论中最基础的知识。全书共分十四章，从信息论的背景开始依次介绍信息量、香农线图、熵、信道、编码、连续随机函数的信息量、频谱、抽样定理、信道传输特性、信道频率特性与信息量的关系、波形的传输变换和检出等。书中配有大量例题和习题(习题均有详细答案)，讲解由浅入深容易接受。是学习信息论的一本好的入门书籍。

本书可供高等学校有关专业作为教材或教学参考书，也可供工程技术人员作为自学用书。

基礎情報理論

藤田広一 著

株式会社昭晃堂1977年14版

*

基础信息论

〔日〕藤田広一 著

魏鸿骏 陈尚勤 译

*

国防工業出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张7⁷/₈ 197千字

1982年9月第一版 1982年9月第一次印刷 印数：0,001—9,200册

统一书号：15034·2397 定价：1.00元

译者前言

“信息论”和“通信理论”几乎是同义语，但信息论范畴更广，后者只是前者中与通信有关的一个部分。信息论是信息科学的基本理论之一。由于信息论具有高度的科学概括性，因而使它与很多学科都有联系，起着指导的作用。同时这些学科的发展又对信息论的发展起着推动作用。自从1948年香农以他的名著奠基以来，这一领域已作了大量工作，有了很大的发展。作为基础知识，对于科研和工程人员来说，其需要似日胜一日。因此，目前高等院校各专业大多已开设这一门课程。

为了透彻掌握这些内容，对初学者来说最迫切的需要还是一本好的入门读物。这本书正是为此而写的便于自学的入门基础教材。作者是工程学博士、教授，从事了多年的教学工作，因而使他的书能由浅入深，循序渐进、概念清楚、分析简洁明瞭、结构严整、系统性强；加之每章配有提要、小结、大量例子和习题（均有详细解答）使得本书浅近易懂、重点突出、易于理解和掌握。所以本书自1969年出版以来一再再版，颇受欢迎。为此我们根据第十四版将它译出以飨国内读者。

正如作者所指出的，本书是不够严密和全面的；不过，我们相信谁都不会对此求全责难。

翻译过程中，对原书个别地方作了订正。限于水平，定有许多翻译错误和不妥之处，切盼批评指正。

作者原序

“当代乃信息革命的时代”，“信息企业将是大有可为的”，这类强调信息处理重要性的呼声已愈来愈高。书店中有关信息的书籍也愈来愈多。在这种背景下，本人才疏学浅，竟敢出版新书，的确有些不知高低，颇感惭愧；但我还是终于下定决心将自己多年来在大学的讲义整理编成了一本教科书。

因为本书是为大学工科学生编写的一本信息论的入门书籍，因此打算尽可能浅易些，并把重点放在思考方法上。可是这样一来，理论上不够严密之处就比较多此，有些歉然，不过对初学的学生说来，着重考虑的应是尽量减少阻力，使其容易入门。

为了回答“究竟讲的是什么？”，“是怎么回事？”，对于这些疑问本书大量采用了实例与习题，以努力使之容易理解。

为了使繁忙的工程技术人员能迅速抓住要点，我认为本书是可供参考的。

最后，虽然担心书中会有很多应予指正的错误，但若本书对有关信息处理技术的发展多少还有所助益的话则感到荣幸之至。

目 录

第一章 信息论的背景	1
1.1 准确性与经济性	1
1.2 信息与频率	2
1.3 信息论的先驱	5
第二章 信息的定量表示	6
2.1 定量表示信息的必要性	6
2.2 信息量的性质	6
2.3 概率与信息量	9
第三章 随机过程的信息	12
3.1 马尔可夫过程	12
3.2 香农线图	13
3.3 迁移概率	17
3.4 香农线图的应用	19
第四章 熵	22
4.1 熵	22
4.2 剩余度与熵	26
4.3 错误与熵	28
4.4 独立事件与熵	32
第五章 信道	39
5.1 信息传输的速度	39
5.2 信道容量	41
5.3 香农线图与信道容量	44
5.4 有错系统的信道容量	46
第六章 编码	50
6.1 信源与信道	50
6.2 香农第一编码定理	51
6.3 香农编码法	55

6.4	霍夫曼编码法	58
6.5	编码效率	60
6.6	有错时的编码定理	61
6.7	汉明距离	65
6.8	奇偶校验	69
6.9	循环编码	71
第七章	连续随机函数的信息量	74
7.1	连续随机变量	74
7.2	连续信源的熵	78
7.3	正态分布函数的熵	81
7.4	连续随机函数的信道容量	83
第八章	频谱	90
8.1	内容与形式	90
8.2	频率	92
8.3	相关函数	93
8.4	频谱	95
8.5	高次谐波	100
8.6	时域与频域	105
8.7	噪声的功率	110
8.8	脉冲的功率	115
第九章	抽样定理	120
9.1	连续波形表现信息的能力	120
9.2	抽样定理	122
9.3	抽样定理的应用	127
第十章	信道的传输特性	131
10.1	信道	131
10.2	非线性系统	134
10.3	信道频率特性的表示方法	136
10.4	各种频率特性表示方法的比较	145
第十一章	信道的频率特性与信息量	153
11.1	信道带宽的限制造成的信息损失	153
11.2	由于带宽限制使熵减小的公式	154

第十二章 波形的传输	160
12.1 冲激响应与阶跃响应	160
12.2 信道的延迟特性	164
12.3 脉冲的传输	165
12.4 脉冲序列的传输	168
12.5 停留相位原理	170
12.6 S/N (信号噪声比) 最大的信道	173
12.7 输出波形失真最小、 S/N 最大的信道	177
12.8 信道特性与相关函数	181
第十三章 波形的变换	185
13.1 编码、调制与压扩	185
13.2 调制的方式	186
13.3 幅度调制	188
13.4 频率调制	191
13.5 脉冲调制	199
第十四章 信号的检出	203
14.1 检波	203
14.2 埋没于噪声的信号的检出	205
14.3 统计判定法	206
附表 1	210
附表 2	211
习题解答	212

第一章 信息论的背景

本章提要

本章就为什么要对“信息”作工程学方面的研究，以及为什么目前研究还十分盛行，这类有关“信息论的目的”的历史背景及现状等作了叙述。

1.1 准确性与经济性

工程学的目的是要把自然界中所存在的能量用来代替人力，它是从“以尽量少的劳动完成尽量多的工作”这一人类的愿望出发的。最近工程学的各个领域已有了相当惊人的发展，发展到了几乎不使用人力而能简单地完成庞大工作的程度。而且这种能量的利用正象由山涧中转动的水车以及荷兰的风车的例子中所看到的那样，在很早以前就下功夫了。

与此相反，对于与能量无直接关系的信息论的“信息”作定量研究的尝试却是第二次世界大战以后的事情了。在此以前，有组织地进行有关信息论的研究几乎还没有。

这可能是因为“信息”这个东西与人的感情和知识等因素有联系，通常是由人文科学和社会科学来处理的，可能认为它与工程学之类自然科学领域没有什么关系。

但是，细想起来，在个别具体问题上，从人类开始考虑传送信息以来，作为生活技能总是在工程学方面下功夫。譬如，人们并不要深入研究就会利用书信和电报这两种完全不同的文体。在信上就要写“敬告预定明日回来”，电文则只要简单地写出“明归”却也不为失礼。这是在精简掉多余的字上下了工夫的结果。

实际上,从信息论的观点来看,作定量计算也表明这种精简是合理的。又如报告火灾的钟声,火灾地点越近敲打得就愈快愈激烈,而远处的火灾则慢慢敲打,这是从江戸时代就有的习惯了。单从道理上说,如果采取相反的敲法也是可以的,不过从人们的心情来看,对于附近的火灾采取缓慢的间歇长的钟声会感到很不自然。从信息论的观点来看,那种能更准确更迅速地报告火灾的方法是合理的。

这两个例子包含了非常重要的想法。即究竟怎样才能无浪费地、准确地传输信息?简明与准确这两个要求是互为矛盾的,要求无误必然会使效率下降,反之如果只想大大提高效率的话,就会发生一些错误。用信息论作定量表示也可看出它们的确是相反的要求。这点在后面通过讲述就清楚了。

此外,对于信息论的另一重要研究对象——噪声,这个例子也给出了一个重要的启示。

以钟声为例,汽车、谈话声这些钟声以外的声音,对于“有火灾”这个信息而言都是噪声。在这些噪声背景中,更可靠地报告“有火灾”的方法,当然是附近的火灾应作连续激烈的敲打。稍微想一下就会知道,对无线电和电话中的噪声人们是很讨厌的,理想状态应该没有噪声,不过作理论研究时,可以暂不考虑噪声。但是实际上,噪声是不能忽略的,是固有的东西。如果说一切信息处理几乎都是在与噪声进行斗争,一点也不过份,其理由将在后面各章再来说明。总而言之,虽然人们讨厌噪声,但也不能弃之不顾,作为无论如何也不可避免的东西,就必须从正面去适应它,必须进行系统地、定量地研究。这正是信息论的主要课题之一。

1.2 信息与频率

在人类打算通过电线传送信号的初期,实际上就有了信息论这一著名的术语。十九世纪初有关电气的知识已迅速丰富起来,

人们开始敷设海底电线。自然在施工之前已作了充分的调查研究。其结果测出当信号通过电线时，稍稍会变得弱些。如果电线加长，则衰减必然增大。只要加大发送功率，发出更强的信号，并在接收端提高接收机的灵敏度，那么即使衰减之后也一定能完全检测出信号。这样考虑之后就开工投建了。但是在完工后实际传送信号时，接收机的工作竟不象预想的那样，明知发送的是什么，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。这点当时的人们都困惑不解。发射机的功率、接收机的灵敏度、电线的绝缘都是正常的，可是信号的波形竟然与发送波形完全不同，这成了一个不可思议的谜。

解开这个谜的是凯尔文（Kelvin）。他把电线的电阻和静电电容看成分布参数，列出偏微分方程，对于信号波形畸变的理由作了定量的描述。试想一下就会知道，这种海底电线实际上具有不合适的特性。比如说，控制电炉的开关以通断方式来传输莫尔斯信号，我们企图根据电炉上水壶的热水中的温度计刻度来检测这一信号，正是这种情况。将这种情况的解释用到这里来，就可以看出信号所具有的高频成分在电线中被衰减掉了。但是电线对于缓慢的变化，即低的频率成分则可以无衰减地通过，因此信号通不过电线，最终是一个频率特性问题。

传送信息的信道的频率特性，在工程学的意义上成了信息论发展的根据。信息论发展起来的重要理由是通信发展的同时，引起了最初没有料到的信道的相互干扰。很多不同的电波在空中混合在一起造成了串扰。巨额投资建成的通信线路往往也由于串扰而无法正常使用。这些问题在通信工程学发展的过程中常常成为所面临的难题。为了解决这些难题，不断地涌现出各种巧妙的发明。这些巧妙的发明几乎都与信道频率特性的利用方法有关。前述海底电线的例子在频率方面已经暗示了一个重要的事实，即传输时间与频率的关系。即使不能传输普通莫尔斯电码的、特性很差的电线，如果慢慢地传输，多花费些时间也是可以传送信息的。

要是在一秒内还不能接收发送的“点”和“划”，那么增加到例如10秒电压、10秒休止来表示“点”，30秒电压10秒休止来表示“划”，象这样竟花费一分钟时间来表示“点”和“划”总可以传输信息了吧。这就是说，虽有频带窄的限制，只要增长传输时间就行了，很多学者研究了这个问题。综上所述，可以说以下这些问题就是信息论发展的背景：

- (1) 信息传输的效率问题；
- (2) 信息传输的准确性问题；
- (3) 噪声问题；
- (4) 频率特性问题。

现将信息论发展的年表列在表1.1中，谨供参考。

表1.1 有关信息处理研究的历史年表

	有关通信的研究	噪声的研究	信息论的研究
1846	沃森 (Watson) 用电线传输信号		
1856			凯尔文对海底电线的分析
1876	贝尔 (Bell) 发明电话		
1914	坎贝尔 (Campbell) 发明滤波器		
1922	卡森 (Carson) 的调幅边带想法	肖特基 (Schottky) 发现噪声	
(一次大战)	发明单边带		
1924			奈魁斯特 (Nyquist) 等提出时间 $\times$ 频带的想法
1928		奈魁斯特的热噪声研究	哈特莱 (Hartley) 信息量的想法
1936	阿姆斯特朗 (Armstrong) 发明调频	兰登 (Landon) 对噪声波形的研究	
1940		弗朗茨 (Fränz) 对检波器噪声的研究	冈田等划分信息传递与能量传递
1944	发展了脉冲调制	赖斯 (Rice) 的统计研究	
(二次大战)			
1947			维纳 (Wiener) 的控制论
1948			香农 (Shannon) 的通信理论

1.3 信息论的先驱

二次世界大战以后信息论也传到了日本，并迅速发展起来。其迅速发展的原因是社会工业化程度的进展，而且从工业本身制造上的特点出发，也有必然向包括信息处理业在内的所谓近代企业体系发展的社会背景。但是不管怎么说，与维纳和香农两人天才的研究关系很大。

维纳的“控制论”与香农的“通信理论”使战后年轻的日本研究者入了谜。他们两人各自的研究都涉及到军事，但洞察力之深远远超出了具体的军用密码及自动射击等狭隘的问题，而对人类信息活动的本身一直挖掘到它的深处。

“控制论”这一术语按希腊语是“舵手”的意思，但如维纳著作的副标题所表示的那样，“通信”与“控制”是两个关系密切的工程学领域。

这些著作的内容介绍不打算在这里列出，不过本书整个说来已基本全部涉及到了，以另一种形式作了介绍。如今已有很多有关信息论的书出版，恐怕都是以他们的研究为其根据的。

志在必得

本章小结

(1) 我们的时代正从“能量”万能的时代向“信息”的时代转移。

(2) 信息传输的“准确性”与“效率”是相互矛盾的要求。

(3) 噪声是不可避免的，是固有的。

(4) 频率特性问题的重要性。

(5) 信息论的历史年表。

第二章 信息的定量表示

本章提要

对信息作定量研究是从“信息”的定量描述方法开始的，本章就这个问题对考虑方法及具体的表示方法加以说明。

2.1 定量表示信息的必要性

自然科学通常都应该作定量的描述。定性描述只能解释一些现象，即使认为能作直观理解也是悬而未决的，尚未上升到学术水平。对某个量作定量表示时，往往将它与某一适当的标准量进行比较。例如，长度、重量、时间等都是与国际规定的标准作比较来表示的。这是物理学的一个基本问题。功、电量、克当量等量与时间及长度等相比，较难理解，因为对于比较的标准我们可能没有切身的体验。

由于我们要从理论上研究信息，所以必须对信息的大小作定量的描述。但是，看来信息也不能象重量、长度那样定出标准进行比较。究竟怎样才能对信息作定量描述呢？这是一个长期没有解决的问题，因而信息论也没有作为一门科学建立起来。

2.2 信息量的性质

下面请看两句一对的几个例子。这些句子所具有的信息量究竟哪一个更多呢？即使不知道信息量是什么也可以根据常识直观地感觉出哪个的信息更多。

(1)(A) 客机坠落

(B) 小型卡车掉到了马路外面

(2)(A) 读者的话: “这本书极好”

(B) 出版社的广告: “这本书极好”

(3)(A) 6 月份的天气预报 “明日有雨”

(B) 11 月份的天气预报 “明日有雨”

(4)(A) 民用电源的电压表指示为 100 伏

(B) 民用电源的电压表指示为 85 伏

(5)(A) 高才的 J 君考取了

(B) 高才的 K 君落第了

(1) 的 (A) 是新闻速报栏上应该报导的大事件, 故信息量多。

(2) 的 (B) 是广告宣传方式, 怎么也被认为是些奉承话, 因此 (A) 的信息量多。

(3) 不太明显, 不过 (B) 信息量多些, 其原因是 11 月份晴天很多, 雨天非常少见。

(4) 电力公司有保证的供电通常是 100 伏, 出现 85 伏几乎不可能, 因此出现 85 伏成了一大新闻, 故 (B) 的信息量大。但是在大战刚结束后的战乱地区, 什么时候电压都低, 这时出现 100 伏倒是少见, 这时 (A) 的信息量多。

(5) 当然是 (B) 的信息量多。

由以上各例可见, (1)、(2)、(3)、(4)、(5) 各自对应的 (A)、(A)、(B)、(B)、(B) 情况都是少见的, 表明信息量多些。如果改用统计学的术语来描述, 则出现概率小的事件信息量多, 即对应有

概率 → 小 信息量 → 大

因此, 信息量应该是概率的单调减函数。

其次, 信息量应具有必要的特性——可加性, 现举例说明。O 公司以某大楼的第 5 层左起第 3 间借作办公室。这个大楼第一层的房间编号为 11, 12, …, 18。二层编号为 21, 22, …, 28,

三层编号为 31, 32, ..., 38 等。每层都有 8 个房间。这时告知 O 公司的“办公室在 53 号房间”这一消息应与告知“办公室在第 5 层”和“从左数起第 3 间”这两个消息是一致的。这时后面两个消息具有的信息量合起来应该等于前一消息的信息量才合理。为此应该取怎样一种函数才行呢？按此例，前一消息所示事件出现的概率应等于后面二个事件出现的概率之积。能将“乘积”以“求和”方式表示的单调函数是什么函数呢？显然，对数函数是恰当的。因此作为信息量的定义被确定为事件出现概率的倒数的对数。为了方便，对数的底取为 2，这时信息量的单位是比特。以 2 为底的对数已在书末给出。即信息量定义为

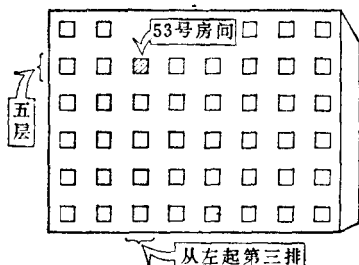


图2.1 信息量的可加性

$$\text{信息量} = -\log_2 p$$

式中 p 是消息所示事件出现的概率。按上例全部共有 48 个房间（见图 2.1），指定其中一间的概率为 $1/48$ 。因此

“O 公司的办公室是 53 号房间” $\rightarrow \log_2 48 = 5.58$ 比特。

指定 6 层中的某一层的概率为 $1/6$ ，故

“O 公司的办公室在 5 层楼” $\rightarrow \log_2 6 = 2.58$ 比特。

指定 8 间中的一间的概率为 $1/8$ ，因此

“O 公司的办公室在第 3 间” $\rightarrow \log_2 8 = 3$ 比特。

故有

$$\log_2 48 = \log_2 6 + \log_2 8$$

即

$$5.58 = 2.58 + 3.00$$

〔习题2.1〕 某学校的班级编为

班 级	A	B	C	D
人 数	41	42	43	42

试求“S君在B班”这一消息的信息量是多少？

〔习题2.2〕 某汽车工厂按相同流程生产四种类型产品U、S、D、B。其中U占10%，S占30%，D占35%，B占25%。有两个消息“现在完成1台U型产品”，“现在完成1台D型产品”，试确定哪一个消息的信息量大些。

2.3 概率与信息量

信息量的定义为 $-\log_2 p$ ，而其中的概率 p 并不限于上例的单纯情况。但是考虑方法的基础是相同的，因此只要具有有关概率的知识，即使十分复杂的消息也能求出它的信息量。本节就来作这种练习。

首先来考虑独立事件的信息量。例如，“今天的天气极好”，“今天是休息日”这两个消息，它们是相互独立的事件。“天气极好”如占一年365天中的1/4，则具有信息量为

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

又设学校一年中有1/4为假日，则“今天是休息日”的信息量也是2比特。

同时给予这两个消息：“今天是天气极好的休息日”，则具有4比特信息量。因此，对于独立事件来说信息量以“和”的形式出现。独立事件同时发生的概率等于各事件发生的概率之积。从这一点来看也是很清楚的。

相反，对于不独立事件，信息量就不是它们之和。例如，某工厂得到“今天停电”的消息，同时又得到“今天是休息日”的

消息, 信息量就不一定是两者信息量之和。因为如已决定停电时作为停电休息日, 那么后一个消息的信息量必为零。

〔习题 2.3〕 某机器的故障率为 6%, 其原因分为

机械方面的占 32%

电气方面的占 12%

材料方面的占 56%

考察“是机械故障”这一消息的信息量以及对于预先知道有故障的人得到“是机械故障”这一消息的信息量之差别。

〔习题 2.4〕 给出消息“现在的气压是 940 毫巴且是满潮”, 试求具有多少比特信息量。已知气压降到 940 毫巴一年只有一天, 满潮在一天中有 2 小时。

相互独立的事件的出现概率是“乘积”, 而信息量是“求和”。很明显, 概率是“和”的情况, 信息量一定不是“和”。

互斥事件的概率以“和”来表示, 而将这些事件的消息结合起来, 则信息量反而会变小。

“骰子的点数是偶数”这一消息具有 1 比特信息量, 它是由骰子的点数是 2 或 4 或 6 三个互斥事件结合而成的, 即“骰子的点数是 2、4、6”, 如果分别只看其中一个消息, 则具有信息量为 $-\log_2 1/6 = 2.58$ 比特, 然而结合在一起时却是 1 比特, 可见并不是它们之和。

〔习题 2.5〕 某汽车工厂按同一流程生产 U、S、D 和 B 型 4 种产品。U 占 10%, S 占 30%, D 占 35%, B 占 25%。工程 A 把 U 与 S 作为同一种产品装配, 而 D、B 则作为不同的产品装配。试求对于这个工程中的人来说, “拿到一个 U 型产品”这一消息的信息量是多少?

〔习题 2.6〕 某装置的温度保持在 $35 \sim 40^\circ\text{C}$ 之间。在 35°C 以下时停止使用, 等待升温, 在 40°C 以上时也停止使用, 必须进一步强制冷却。已知 25% 的工作时间在 35°C 以下, 5% 在 40°C 以上, 求这时以下各种消息所具有的信息量是多少?