

■ 鲍超 编著

信息检测技术



Technology
Information Of
Measurement

浙江大学出版社

信息检测技术

鲍超 编著

浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

信息检测技术 / 鲍超编著. — 杭州: 浙江大学出版社,
2002. 9

ISBN 7-308-03143-8

I. 信... II. 鲍... III. 传感器—检测—技术
IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 069325 号

责任编辑 杜希武

封面设计 张作梅

出版发行 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 杭州杭新印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 17

字 数 435 千

版、印次 2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷

印 数 0001—2000

书 号 ISBN 7-308-03143-8/TP·237

定 价 25.00 元

前 言

本书系根据浙江大学光电信息工程学系本科教学大纲,为电子信息和光学工程类专业编写的教材。本书在以往光电检测技术教材的基础上简化了光探测器叙述,突出了信息论,加强系统设计知识,适当增加了非光电检测系统。教材力图贯穿信息—信号—传感器—检测系统—成像和特种检测系统这一主线。本教材共分为七章,第一章讲述了信息论和信息检测技术,叙述了信息熵概念,把信息检测技术视为广义通信系统,介绍了仪器仪表和测量系统的基本特性。第二章叙述了信号的基本概念,配合典型应用系统,叙述了信号的时域、频域和相关分析。第三章讲述了常用的电阻、电容、电感传感器。第四章叙述了辐射传感器,讲述了组成辐射传感器的光源、光学系统和光电、热电探测器。第五章介绍了几种常用的检测系统。第六章讨论了成像器件和图像检测系统。第七章探讨了信息检测技术中几种特殊系统,介绍了超高灵敏度和超快速的检测系统,它们在现代科学研究中有十分重要的应用。

由于编者水平和篇幅有限,不当和欠妥之处,请不吝赐教。

目 录

第一章 信息检测技术基础	(1)
1.1 信息、信号和检测技术.....	(1)
1.2 测量仪表与测量系统	(12)
第二章 信号分析基础	(23)
2.1 信号	(23)
2.2 信号的时域统计分析	(25)
2.3 信号的相关分析	(29)
2.4 信号的频域分析	(37)
第三章 电参量传感器	(42)
3.1 工程中常用传感器的分类	(42)
3.2 电阻式传感器	(43)
3.3 电容式传感器	(48)
3.4 电感式传感器	(51)
第四章 辐射传感器	(58)
4.1 辐射源	(58)
4.2 光学系统	(66)
4.3 光探测器特性	(73)
4.4 光辐射探测器工作原理	(81)
4.5 热电探测器	(108)
第五章 常用信息检测系统	(124)
5.1 光电直接探测系统	(124)
5.2 光外差探测系统	(154)
5.3 光纤传感器检测系统	(171)
5.4 核辐射检测系统	(189)
第六章 图像传感器检测系统	(197)
6.1 真空摄像系统	(197)
6.2 像管	(202)
6.3 医用真空图像传感器检测技术	(207)
6.4 固体图像传感器检测技术	(213)

第七章 特殊领域的信息检测系统	(240)
7.1 光子计数器	(240)
7.2 取样积分器	(248)
7.3 锁相放大器	(255)
7.4 超高速光电测量	(257)
参考文献	(264)

第一章 信息检测技术基础

1.1 信息、信号和检测技术

一、信息与信息科学

1. 信息

近年来,以计算机(Computer)、通讯(Communication)和信息采集(Collection)及控制(Control)为主要特征的信息技术的飞速发展,已迅猛地改变了我们生存的社会。信息技术已成为经济发展的关键因素之一,人类由工业社会开始进入信息时代。第二次世界大战后发展起来的信息论是信息科学的理论基础,是运用数理统计方法研究信息的获取、变换、传输和处理的学科。信息论的基础知识已广泛地渗透到各种科学技术领域。

然而信息究竟是什么?有人说,信息既不是物质,也不是能量。也有人说,信息在整个世界,整个宇宙中是无所不在的。虽然人们对信息还没有一个统一的确切的定义,但人们确切地知道信息所包含的意义。例如“某人病了”这类消息,它既不是物质也不是能量,但我们知道有一定的能量和物质与它相对应,如有体温的升高(能量变化)、脉搏加快(运动)、白血球增加(数量变化)等。体温、脉搏、白血球数都需要通过检测技术来得到它们的定量变化量,它们可通称为信号。信号是物理性的,它是物质,具有能量,信号是信息传输的载体。一般来说,一个信息可能有多个信号与它相对应;反过来,一个信号也可能蕴含着多种信息。这种信息与信号之间的多元关系,给信息的采集、检测和分析处理展示了广阔的天地。

从哲学观点看,信息是现实物质世界的客观反映。因此我们可以把信息定义为客观世界物质运动的内容。换句话说,信息就是事物运动的状态和方式。这里所说的事物,既包括一切形式的物质,也包括精神。宇宙间所有一切事物都在运动,绝对静止的事物是不存在的。状态和方式反映了事物运动的两个方面,状态反映运动的相对稳定的一面,方式则反映运动变化的一面。人从外部世界获得的信息,即是有关事物运动变化的状态和方式。因此也有人把信息简单地理解为消息、情报和知识。例如,商品报道是经济信息;遗传密码是生物信息;语言文字则是社会信息。

如同物质和能量是人类生存和发展的条件一样,信息也是人类不可缺少的资源。从“适者生存”的生物进化法则来看,任何生物如果不能从变化着的环境中获得与它的生存直接有关的信息,就不能适应环境的变化。如果人类不能获取外部世界变化的信息,就无法认识世界和

改造世界。甚至可以说,没有信息,也就没有人类生存的希望。

只要事物在运动,就有信息存在。人们可以通过自己的感觉器官直接采集和识别信息,也可以通过如探测器等现代化的手段间接获得和识别信息;信息可以从一种形态转换成另一种形态,携带信息的信号可以从一种形式转换成另一种形式,例如语言文字、图像、图表可以转换成计算机代码及广播电视等电信号形式;人类通过自己的脑神经细胞记忆(存贮)信息;计算机用存贮器存贮信息;信息亦可以通过信号进行传输。人与人之间的信息传递依靠语言、表情、动作;社会信息的传输借助报纸、杂志、广播;工程信息则可以通过声、光、电等信号传输。

2. 信息科学与技术

信息科学是研究信息现象和规律的科学。信息科学研究如何认识信息和利用信息,在认识信息方面,它研究和探讨信息的本质,建立信息问题的完整的数学描述形式和定量度量的方法。探明信息是如何产生的,研究识别、提取、变换、传递、检测、存贮、检索、处理和分析信息过程中的基本规律和关系;在信息的应用方面,主要研究利用信息进行有效控制和设计最佳系统的普遍原理和方法。研究信息的一个很重要的目标就是扩展人类的信息功能。我们知道,人的信息功能主要由人类的一系列信息器官来承担,如感觉器官承担信息提取、变换和检测的功能;神经系统承担信息传递和某些信息处理的功能;大脑则承担信息存贮、分析和产生决策的功能。信息科学的目的是任务在于在分析、探索和掌握这些功能的机制的基础上,运用信息科学的原理和方法及各种技术,产生新的人工系统来延长、增强、补充和扩展人的信息器官的功能。

凡是扩展人的信息功能的技术,都是信息技术。传感、通讯和计算机技术构成了信息技术的核心。传感技术是人类感觉器官功能的延伸和扩展;通讯技术则是人类神经系统的延伸和扩展,它包含信息的变换、传输及某些控制和调节技术;计算机技术则是人类大脑功能的补充,它可以进行信息的存贮、检索、处理、分析以及控制工作。信息技术向人类提供了各种有用的知识,它是现代技术的灵魂,在新的技术革命中扮演主要的角色。信息技术在改造传统工业方面的主要贡献在于使传统工业生产过程实现自动化和智能化。整个生产过程可以由一系列传感器和仪表进行观察、测量和数据记录;数据的处理和分析则由计算机完成。计算机主机根据来自生产过程的信息和预期的目标信息,进行分析比较,作出相应的决策,发出指令去控制系统,对生产过程实行相应的控制和调节。

二、信息论与信息检测技术

1. 信息论和广义通讯系统

信息科学的理论基础是信息论,信息论作为一门科学始于 20 世纪 40 年代末。在这一时期发展了关于噪声理论、信号滤波和统计、检测和估计的理论、调制及信息处理的理论。这些理论的特点在于,运用概率和数理统计的方法系统地讨论了通讯的基本问题,得到了解决一系列带有普遍意义问题的结论,奠定了现代信息论的基础,并首先在通讯工程领域获得应用。现代信息理论在科学技术上的重要性,早已超越了狭义的通讯工程范畴。信息论中关于信息源、信息通道、干扰噪声、信号调制、滤波等理论和处理方法广泛地渗透到其他科学技术领域。也有人把与信息流通有关的系统统称为广义通讯系统,诸如生物的神经系统,人类社会的管理系统,各种工程物理系统等。

将信息论应用于包括光电检测技术在内的工程检测领域始于 20 世纪 60 年代,即在本质

上把工程检测系统看作是一个广义通讯系统。把探测器和传感器看做一种信息检测和转换装置；引入熵的概念，作为被观测系统不确定性的尺度；基于最大熵定理的最大熵谱分析方法；运用信息通道容量理论来分析检测系统的最佳信息传输条件；运用滤波理论研究剔除噪声、提取源信号的方法等，对于拓宽和加深理解及研究工程测试中的有关问题，是卓有成效的。广义通讯系统可归纳为图 1-1 所示的模型。

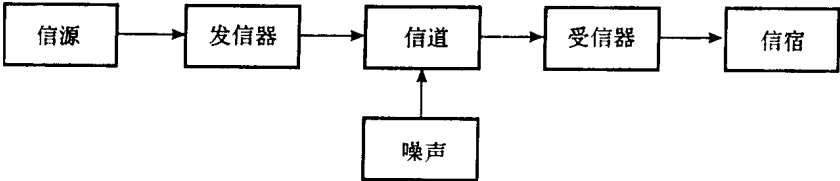


图 1-1 广义通讯系统模型

在这个系统中，发信器又称为编码器，是把信息变换成物理信号的装置；受信器亦称为译码器，是把物理信号转换为信息传送对象能够感知的信息装置。信息通道(信道)即是传送信号的媒介；信息对象(信宿)即接收信息的人或机器。它之所以称为“广义”，是因为表达了信息传输过程的共同规律。

图 1-2 所示为无线电通讯系统。信息源是人脑的思维活动，通过语言表达了要传送的信息，拾音器把语音转换为电信号，经过调制用天线以电磁波的形式发送出去，拾音器、调制器和天线系统等构成了发信器。电磁波是一种电信号，它携带着新闻、音乐在天空传播由接收端的天线接收，经过解调和滤波，再由喇叭转换为声音。这里接收天线、解调器、滤波器、喇叭等构成了受信器，再由听众人耳所感知，经过大脑思维分辨，获取所传输的信息。

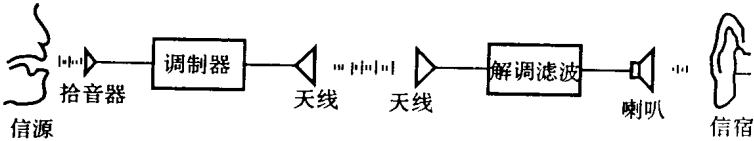


图 1-2 无线电通讯系统

图 1-3 所示为光电检测工件伤痕的一个系统。信息源即工件的伤痕。通过光源照射，工件表面产生漫反射形成散斑图形，即把工件伤痕信息加载在光信号中。通过传输，该光信号经过滤光片和透镜，由固体图像传感器(受信器)接收，转换成电信号，再经放大和标准样板信号进行比较、校正等信号处理，最后显示工件伤痕信息，确定表面粗糙度的等级。

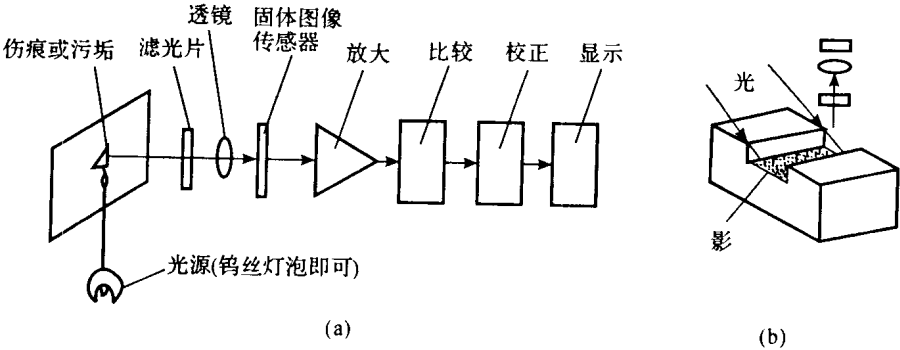


图 1-3 工件伤痕检测系统

由以上叙述可知，包括光电检测技术在内的工程测试系统是一个广义的通讯系统。它符合

信息转换、传输与分析处理的共同规律。因此,运用广义信息论来认识、分析信息检测领域中的问题,是符合客观规律的。

2. 信息检测技术

测量是人类认识客观事物本质的基本手段。通过实验及测量能使人们对事物获得定量的概念和发现事物的规律性。在人类的一切活动领域中,如科学研究、生产过程甚至日常生活中都离不开测量,没有测量也就没有科学。科学上很多新的发明和理论,都建筑在实验及其测试的基础上。工业生产中产品的制造及工艺过程的研究和分析等,都与测量有紧密的联系。

为了检查、监视和控制某个实验或生产过程或运动对象,使它们处于最佳工作状态,就必须掌握描述它们特性的各种参数,这就首先要测量这些参数的大小、方向、变化速度等。通常把这种过程中含有检查、测试等比较宽广意义的测量叫做检测。

人类认识世界,是从以感官感知自然信息开始的。物体的颜色、形状、声响和温度变化等,可以由人的视觉、听觉、触觉等器官感知,但人的感官感知事物的变化有局限性。现代信息探测工程延伸了各种人类感官的功能。在人类所有的感官中,大脑对各器官采集的信息的吸收率分别为:视觉83%;听觉11%;嗅觉3.5%;味觉1%;触觉1.5%。视觉具有最重要的意义。外界信息由视觉系统所接收、处理和感知;视觉系统的各种功能使人类能够分辨万物,感知它们的大小、形状、颜色、亮暗、动静、远近等。从某些意义上来说,光电信息检测系统正是人类视觉系统的延伸和扩展,是一种广义的通讯系统。

光电信息检测系统是在人类探索和研究光电效应的进程中产生和发展起来的。人类最早从1873年就发现光电导现象,1929年制造出第一个实用的光接收器件,共用了56年时间。随着现代材料科学和半导体技术的迅速发展,产生了各种各样的光探测器,并正朝着功能化、集成化和智能化的方向发展,为光电信息检测技术的发展奠定了基础。

光电信息检测系统就是利用光探测器把目标携带的光信息转变成电信号,同时在光学系统和电子线路或计算机中进行信号处理,以使光波携带的信息转换成可以理解的信号,从而实现目标参数的(自动)测量、显示和记录;或者显示清晰的目标图像和提供图像参数;或者输入自动控制系统自动跟踪目标以及完成其他的测控任务。信息检测技术研究与此过程有关的被测信号的采集、调制、解调,信号的变换、传输、处理的理论和技术,研究检测仪表和检测系统及其设计的基本原理和技术。

把光能或光波的各种参数(可见光或不可见光)的变化转换为电量(例如电阻、电流和电压等)变化的器件叫光电探测器,如光电倍增管等。用一个或几个光电器件通过光学系统把欲检测的物理量(长度、宽度、直径、压力、转速、温度、溶液浓度等)转换成可测量的电量的装置称为光电传感器。

图1-4显示了光电检测零件直径的原理图。光电传感器由光源、物镜组成的光学系统及光探测器(光电二极管)组成。若被测物的直径越大,则被遮断的光通量越多,照射到光电二极管的光通量就少,光电二极管产生的光电流亦小。因此光电二极管输出的光电流的大小就对应着被测物直径的粗细。

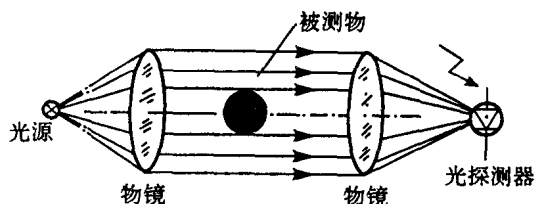


图 1-4 光电检测直径的原理图

光电检测主要由光电传感器进行测量。光源(或辐射源)产生的光和辐射的参数(如辐射

能流的横截面积、光谱成分及光强度、光波的频率和相位等)受被测对象控制,光和辐射参量(包括辐射源自身的)的变化由光电器件接收后转变成电参数的变化来进行测量。光源可采用白炽灯、气体放电灯、激光、发光二极管及其他能发射可见光谱、紫外线光谱、红外光谱的器件。此外,还可采用X辐射及同位素放射源。有时被测对象本身就是辐射源,例如需要测温的发热体。光学系统中常用的元件有透镜、滤光片、光阑、光楔、棱镜、反射镜、斩光器、光栅及光导纤维等。用于检测系统的光电器件有光电二极管、光敏电阻、光电倍增管、摄像管,等等。检测系统中选用何种器件,取决于光电器件的性能、光源特性及仪器的运用环境和条件等。

在光电检测中,大多数情况下,光传感器输出的信号较小,因此常需要设置放大器,把光电信号放大到一定幅度后再进行信号处理,然后驱动显示系统或测量机构,或者驱动报警器及产品分选装置等。由它们显示出被测物理量的数值,或对产品进行自动分类。

光电检测通常是无接触测量,在检测过程中没有力和力矩作用于被测物,因此即使被测物有较大的冲击作用,对检测仪表也无损害。光电检测中通常无机械运动部分,故测量装置具有寿命长、反映速度快、工作可靠、准确度高、对被测物无形状和大小要求等优点。

随着科学技术、工农业生产飞速向前发展,对检测技术的要求也越来越高。先进的检测方法和仪器,应能在不破坏被测物工作状态的过程中进行高度自动化的检测,光电检测技术在这方面有其独特的优点。在工业生产中,先进的光电检测装置能在零件的加工过程中进行在线(online)测量,或在传送带上产品的传输过程中检测和发出信号,这可以减少工作人员,节省检测时间,提高生产率。

在光电信息检测系统中,信息的传输是以光为媒介,光子是信息的载体。被测信息与光的光子数、光的波长和相位、光的速度等参数联系在一起,所以光电检测的精确度高、灵敏度高,可以检测变化速度极快的现象。例如:以光的波长为基准的激光干涉比长仪,其分辨率为波长的 $1/8$,采用细分后甚至更小;光栅测长系统的分辨率可小于 1nm ;采用光子计数技术,可以测量到单个光子(约为 10^{-16}W 的光功率);采用条纹相机可以测量到皮秒(10^{-12}s)和飞秒(10^{-15}s)的光学事件。

20世纪的信息工程主要依靠电子学和微电子学,例如,从无线电到微波通信,从电子管到大规模集成电路为基础的电子计算机。随着信息容量骤增,由于光子的速度比电子速度快得多,光的频率比无线电的频率高得多,为提高传输速度和载波密度,由电子发展到光子是必然趋势。把光子作为信息载体,是20世纪中的一个划时代的变化,光纤通讯代替电缆和微波通信,使信息的传输发生了本质性的变化,使信息传输的容量、速度、质量都得到了提高。利用光信息远距离传输的特点,可以实现光电遥测、遥控,例如,激光测距、光电制导和光电跟踪等。

除了光电传感器外,信息检测系统中还采用各种其他的传感器来把需要检测的信息转换成电信号,并通过信号分析和信号处理,实现对信息的传输、处理、记录、显示和控制的目的。

早期发展的传感器是利用物理学场的定律(电场、磁场等)所构成的“结构型”传感器,其基本特征是以结构的部分变化或变化后引起场的变化来反映被测量的变化(如力、位移等)。

利用物质特性构成的传感器称为“物性型”传感器。新的物理、化学、生物效应都可能被应用而产生一种新型的敏感元件。例如除常见的力敏、压敏、光敏、磁敏元件外,还有声敏、湿敏、气敏、色敏、味敏元件等。新材料和新元件的应用,有力地推动了传感器和信息检测技术的发展。物性型传感器的性能全依赖于敏感功能材料。被开发的敏感功能材料有半导体、电解质(晶体或陶瓷)、高分子合成材料、磁性材料、超导材料、光导纤维、液晶、生物功能材料、凝胶、稀土金属等。现代传感器正向多功能、集成化、智能化发展。

信息检测系统和计算机技术的紧密结合是当今信息检测技术的又一个特点。检测系统采用微处理器后,能实现常规检测仪表无法实现的许多功能,能使检测系统的测量精度、速度和性能得到显著提高。它能使检测系统的灵活性提高、测量项目增多,能实现多个传感器检测,对检测信息进行存贮、提取、加工和处理;并能适应被测参数的变化、自动补偿、自动选择量程、自动校准、自动寻找故障、自动进行指标判断与分选,以及进行逻辑操作、定量控制与程序控制等。

三、信息熵

1. 离散信源模型与自信息

(1) 信源

信源一般是以符号(或信号)的形式发出信息。例如,人通过大脑的思维活动,指挥口腔或手以语言或文字的形式把信息表达出来,语言文字是一种表达信息的符号,是物理性的。语言是声信号,而文字是光信号。同一件事情,可用不同语言表达,也就是同一信息可用不同的编码方式转换成符号(或信号)。

在工程系统中,例如雷达遥测系统,被搜寻物在空间的坐标、速度、形状等构成了信息源,当电磁波射向它,反射波中就携带着这些信息,故而反射波就是经过编码的符号(或信号)。

必须指出,信源的输出是不确定的,因为,如果事先已经知道信源的输出,那么就无信息可言。正如所研究的物理过程,它应是未知的,这时才有研究的价值。信源的输出常用随机变量或随机矢量来描述,或者说用概率空间来描述。从随机变量出发来研究信息量是信息论的基础。

从概率论可知,随机变量可取值于某一离散集合,也可取值于某一连续区间,相应的信源称为离散信源或连续信源。

(2) 离散信源模型

离散信源的数学模型是离散型概率空间,即

$$[x, P] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_N \\ P(x_1) & P(x_2) & \cdots & P(x_N) \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

$$\sum_{i=1}^N P(x_i) = 1 \quad (1-2)$$

集合中的元素 $x_1, x_2, \dots$ 描述了信源输出的可能状态;各元素的概率 $P(x_1), P(x_2), \dots$ 描述了各个状态出现的可能性;状态的出现往往是不相容的。

例如掷硬币,在未抛下之前,可认为是一个未知的物理系统,抛下之后,必须是正、反两种状态之一,其信源模型为

$$[x, P] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$\sum_{i=1}^2 P(x_i) = 1$$

其中, $P(x_1) = P(x_2) = 0.5$,表明该系统是等概率事件。此可称之为先验概率,与人们对该事物的认识有关,是根据历史或知识的积累而分析判断的。

(3) 自信息

物理系统可能出现的状态是随机的,是不确定性的,这种不确定性是客观存在的,一旦信

源的输出经过变换、传输、处理而被人们所理解,才能消除系统的不确定性,人们就获得了信息。

如果信源中某一状态发生的先验概率很小,那么,一旦它发生,人们获得的信息量就多。例如,一台仪器具有正常工作和发生故障两种可能状态,如果正常工作的概率为 $P(x_1) = 0.99$;发生故障的概率 $P(x_2) = 0.01$,则可认为这台仪器一般处于正常工作状态。但是,一旦发生故障,则是一件非常值得注意的事件,值得人们去研究它,因此说这里蕴含着许多信息。

事件发生的不确定性与事件发生的概率有关。事件发生的概率越小,事件发生所包含的不确定性和信息量就越大。而事件发生的概率越大,人们猜测这件事发生的可能性就越大,不确定性就越小。对于发生概率等于1的必然事件,就不存在不确定性。因此,某事件发生所含有的信息量,应该是该事件发生的先验概率的函数,即

$$I(x_i) = f[P(x_i)]$$

式中, $P(x_i)$ 是事件 x_i 发生的先验概率, $I(x_i)$ 表示事件 x_i 发生所含有的信息量。函数 $I(x_i)$ 应满足以下条件:

- ① $P(x_i)$ 越大, $I(x_i)$ 越小;
- ② 当 $P(x_i) = 1$ 时, $I(x_i) = 0$, 必然事件信息量为零;
- ③ 当 $P(x_i) = 0$ 时, $I(x_i) = \infty$, 不可能发生的事件发生了,其信息量为无穷大;
- ④ 两个独立事件的联合信息量,应等于它们各自信息量之和。

显然,满足条件①、②、③时,应取信息量 $I(x_i)$ 为先验概率 $p(x_i)$ 的倒数;满足条件④时,最好的方法是用对数来定义信息量。

因此,这种函数形式应是对数形式,即

$$I(x_i) = \log \frac{1}{P(x_i)} = -\log P(x_i) \quad (1-3)$$

$I(x_i)$ 描述了事件 x_i 发生时的信息量,故又称为自信息。 $I(x_i)$ 代表两种含义:①当事件 x_i 发生以前,表示事件 x_i 发生的不确定性;②当事件 x_i 发生以后,表示事件 x_i 所含有(或所提供)的信息量。

自信息采用的度量单位取决于所取对数之底,如果以2为底,则所得信息量单位为比特(bit, binary unit的缩写);以e为底,则为奈特(nat, nature unit的缩写);以10为底,则为哈特(hart, hartley的缩写)等。一般都采用以2为底的对数,因为当 $P(x_i) = 1/2$ 时, $I(x_i) = 1\text{bit}$, 所以,1bit信息量就是两个互不相容的等可能事件之一发生时,所提供的信息量。

2. 信息熵

自信息 $I(x_i)$ 是指信源(物理系统)某一事件 x_i 发生时所包含的信息量,物理系统内不同事件发生时,其信息量不同,所以自信息 $I(x_i)$ 是一个随机变量,它不能用来作为整个系统的信息的量度。

把自信息的数学期望定义为信息熵,它表示信源的平均信息量。

$$H(x) = E[-\log P(x_i)] = -\sum_{i=1}^N P(x_i) \log P(x_i) \quad [\text{bit/事件}] \quad (1-4)$$

熵的单位是[bit/事件]或[bit/符号]。

信息熵表征了信源整体的统计特性,是总体的平均不确定性的量度。对某一特定的信源,其信息熵只有一个,因统计特性不同,其熵也不同。例如,两个信源,其概率空间分别为

$$[x, P(x_i)] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ 0.99 & 0.01 \end{bmatrix}$$

$$[x, P(y_i)] = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

则信息熵为

$$H(x) = -0.99 \log 0.99 - 0.01 \log 0.01 = 0.08 [\text{bit/事件}]$$

$$H(y) = -0.5 \log 0.5 - 0.5 \log 0.5 = 1 [\text{bit/事件}]$$

可见, $H(y) > H(x)$ 说明信源 y 比信源 x 的平均不确定性要大, 即在事件发生之前, 分析信源 y , 由于事件 y_1, y_2 是等概率的, 难以猜测哪一个事件会发生; 而信源 x , 虽然也存在不确定性, 但大致可以知道 x_1 出现的可能性要大。正如两场足球赛, 其中一场, 双方势均力敌; 而另一场双方实力悬殊。当然, 人们希望看前一场, 因为胜负难卜, 一旦赛完, 人们获得的信息量大。

亦可以这样理解, 信息熵 $H(x)$ 表征了变量 x 的随机性。如上例, 变量 y 取 y_1 和 y_2 是等概率的, 所以其随机性大; 而变量 x 取 x_1 比 x_2 的概率要大得多, 这时变量 x 的随机性就小。因此, 熵反映了变量的随机性, 亦是表征随机变量统计性能一个特征参数。

信息熵的基本性质如下:

(1) 对称性

当概率空间中 $P(x_1), P(x_2), \dots$ 顺序任意互换时, 熵函数的值不变。例如下面两个信源空间:

$$[x, P(x)] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$[x, P(y)] = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

其信息熵 $H(x) = H(y)$ 。该性质说明, 熵只与随机变量的总体结构有关, 与信源总体的统计特性有关。它不能描述事件本身的主观意义。

(2) 确定性

如果信源的输出只有一个状态是必然的, 即 $P(x_1) = 1, P(x_2) = P(x_3) = \dots = 0$, 则信源的熵

$$H(x) = - \left(1 \times \log 1 + \sum_{i=2}^N 0 \times \log 0 \right) = 0$$

这个性质表明, 信源的输出虽有多种不同形态, 但其中一种是必然的, 这意味着其他状态不可能出现。那么, 这个信源是一个确知信源, 其熵为零。

(3) 非负性

非负性即 $H(x) \geq 0$ 。因为随机变量 X 的所有取值的概率分布为 $0 < P(x_i) < 1$, 当取对数的底大于 1 时, $\log P(x_i) < 0$, 而 $-P(x_i) \log P(x_i) > 0$, 则得到的熵是正值。只有当随机变量是一个确知量时, 熵才等于零。这种非负性对于离散信源的熵是合适的, 但对连续信源的熵来说, 这一性质并不存在。

(4) 可加性

可加性即统计独立信源 x 和 y 的联合信源的熵等于它们各自的熵之和。如果有两个随机

变量 x 和 y , 它们彼此是统计独立的, 即 x 的概率分布为 $[P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_N)]$, 而 y 的概率分布为 $[P(y_1), P(y_2), \dots, P(y_N)]$, 则联合信源的熵

$$H(xy) = H(x) + H(y) \sum_{i=1}^N P(x_i) = 1, \sum_{j=1}^M P(y_j) = 1$$

可加性是熵函数的一个重要特性, 正因为有可加性, 所以可以证明熵函数的形式是惟一的。

(5) 极值性

信源各个状态为等概率分布时, 熵值最大, 并且等于信源输出状态数, 因为当

$$P(x_1) = P(x_2) = \dots = P(x_N) = 1/N \text{ 时,}$$

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{N} \log \frac{1}{N} = \log N \quad (1-5)$$

例如, 信源有两种状态时, 概率空间

$$[x, P(x_i)] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ P(x_1) & 1 - P(x_1) \end{bmatrix}$$

$H(x) \cdot P(x_i)$ 关系如图 1-5 所示。当 $P(x_i) = 1/2$ 时, 熵有最大值。

以上分析表明, 对于具有 N 个状态的离散信源, 只有在信源的 N 个状态等概率出现的情况下, 信源熵才能达到最大值。这也表明, 等概率分布信源的平均不确定性最大, 这是一个很重要的结论, 称为最大离散熵定理。

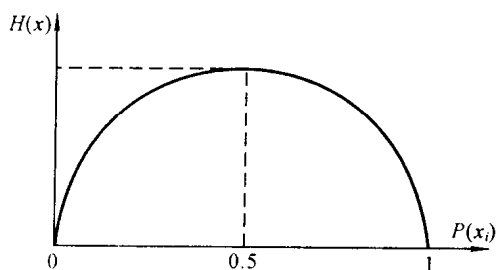


图 1-5 熵函数

3. 连续信源的熵及最大熵定理

(1) 连续信源的熵

以上所述是取值为有限或可数的离散信源, 它们输出的状态(或消息, 符号)是属于时间离散、取值有限或可数的随机序列, 其统计特性可用联合概率分布来描述。而实际上一些信源的输出常常是时间和取值都是连续的信息, 即可能出现的状态数是不可数的无限值。例如语音信号 $x(t)$, 电视信号 $x(x_0, y_0, t)$ 等, 都是时间的连续函数, 而且在任一时刻, 它们的取值也是连续的, 这时可用连续随机变量来描述这些状态, 这种信源称为连续信源。

连续信源的数学模型为连续型的概率空间, 即

$$[x, P(x)] = \begin{bmatrix} (a, b) \\ P(x) \end{bmatrix} \quad \text{或} \quad \begin{bmatrix} R \\ P(x) \end{bmatrix}$$

并满足

$$\int_a^b P(x) dx = 1 \quad \text{或} \quad \int_R P(x) dx = 1$$

式中, R 或 (a, b) 表示数集区间, 而 $P(x)$ 是随机变量 x 的概率密度函数。图 1-6 表示了一般工程测试信号的时域和幅值域图形, 图中(a)表示信号 $x(t)$ 的时域波形, 其幅值(纵坐标)分布区间为 (a, b) ; 图中(b)则表示该信号的概率密度函数, 其幅值区间 (a, b) 在横坐标上。

连续信源的信息测度可以用离散信源的信息测度来逼近。假定随机变量 x 的概率密度函数如图 1-6 所示, 将取值区间 (a, b) 分成几个小区间, 任一小区间的概率为 $P_i = P(x_i) \Delta x$ 。这时

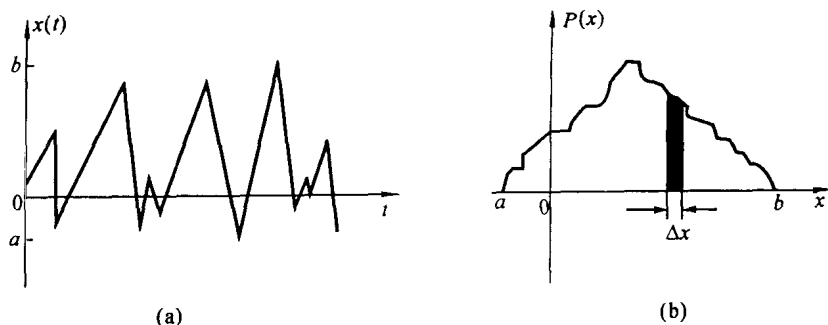


图 1-6 工程信息的时域、幅值域图形

离散信源的熵

$$\begin{aligned} H_n(x) &= - \sum_i P_i \log P_i = - \sum_i P(x_i) \Delta x \log P(x_i) \Delta x \\ &= - \sum_i P_i(x_i) \Delta x \log P(x_i) - \sum_i P(x_i) \Delta x \log \Delta x \end{aligned}$$

当 $\Delta x \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$ 时,若极限存在,则得到连续信源的熵

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} H_n(x) &= - \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sum_i P(x_i) \Delta x \log P(x_i) - \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \log \Delta x \sum_i P(x_i) \Delta x \\ &= - \int_a^b P(x) \log P(x) dx - \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \log \Delta x \end{aligned}$$

一般情况下,上式的第一项是定值,而当 $\Delta x \rightarrow 0$ 时,第二项趋于无限大。所以避开第二项,定义连续信源的熵为

$$H(x) = - \int_R P(x) \log P(x) dx \quad (1-6)$$

这样定义的连续信源的熵,在形式上与离散信源的熵相似,但不是实际信源的绝对熵,因为忽略了一个无限大项。这样定义的熵具有相对性,所以有时称为相对熵或差熵。

(2) 最大熵定理

在信息处理过程中,常常希望求得最大熵即找出 $P(x)$ 是什么样的函数时能使连续信源的熵具有最大值。在离散信源中,已经证明,当信源的输出状态是等概率分布时,信源的熵取最大值。在连续信源中,情况有所不同,当各约束条件不同时,信源的最大相对熵值不同,有两种情况。

a. 峰值功率受限条件下信源的最大熵

当信源输出信号的峰值功率受限,即信号的取值区间被限定在某一范围 (a, b) 之内时,则在限定的范围内,当输出信号的概率密度是均匀分布时,信源具有最大相对熵。如图 1-7 所示,输出幅值限为 (a, b) 时的概率密度

$$P(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

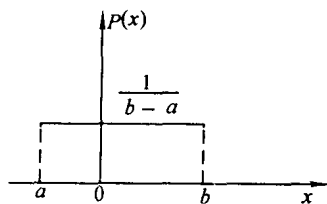


图 1-7 幅值受限信号的等概率分布

则

$$H(x) = - \int_a^b \frac{1}{b-a} \log \frac{1}{b-a} dx = \log(b-a) \quad (1-7)$$

此式表明,熵是幅值区间 (a, b) 的函数,即在峰值功率受限条件下,幅值区间越大,则熵值越大。这也说明,信号的波动范围越宽,则系统的不确定性程度越大。

b. 平均功率受限条件下信源的最大熵

若一个信源输出信号的平均功率有限,则其输出信号幅度的概率密度分布是高斯分布时,信源有最大熵。

一维随机变量 x 的概率密度分布为

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-8)$$

其中 m 是 x 的均值, σ^2 是 x 的方差。这个连续信源的熵

$$\begin{aligned} H(x) &= -\int_{-\infty}^{\infty} P(x) \log P(x) dx \\ &= -\int_{-\infty}^{\infty} P(x) \log \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] \right\} dx \\ &= -\int_{-\infty}^{\infty} P(x) (-\log \sqrt{2\pi\sigma^2}) dx + \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \left[\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right] dx \cdot \log e \\ &= \log \sqrt{2\pi\sigma^2} + \frac{1}{2} \log e = \frac{1}{2} 2\pi e \sigma^2 \end{aligned} \quad (1-9)$$

其中, $\int_{-\infty}^{\infty} P(x) dx = 1$, $\int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^2 P(x) dx = \sigma^2$ 。可见,正态分布的连续信源的熵与数学期望 m 无关,只与其方差 σ^2 有关。当 $m=0$ 时, x 的方差 σ^2 就等于信源输出的平均功率。显然,这一条件下的平均功率受限,就是方差 σ^2 受限。可以证明,当连续信源的方差 σ^2 受限时,任意概率密度分布的信源的熵,都小于正态概率密度分布信源的熵。

这一结论说明,当连续信源输出信号的平均功率受限时,只有信号的统计特性与高斯噪声的统计特性一样时,才会有最大的熵值。从物理意义上解释这是合理的,因为噪声是一个最不确定的随机过程,而最大的信息量只能从最不确定的事件中获得。

此外,为什么在平均功率受限条件下正态分布信源的熵最大,亦可作如下理解:当限制信号时,由于大的幅度值 x 平方后变得更大,因此出现的次数不可能太多,所以 x 值愈增大,出现的概率就愈小,而且对于 x 的正负值是对称的。若 x 较小,则概率尽可能相同时,熵变大。在接近 $x=0$ 时,变得接近于平均的均匀分布,故有正态分布形式。

4. 信息与熵的守恒定律

熵描述了系统的不确定性程度,而信息则是消除了系统不确定性(或事件发生以后)而得到的东西。因此,熵与信息通过一个简单的守恒定律相联系,即一个体系的信息与熵的和保持恒定,并等于该体系在给定条件下所能达到的最多信息或最大熵。这在数学上可以表达为

$$H + I = \text{const} \quad (1-10)$$

或

$$H + I = H_{\max} = I_{\max}$$

式中, H 和 I 分别表示熵和信息的实际值; $H_{\max}$ 和 $I_{\max}$ 分别表示系统熵和信息的最大的可能值。因此,信息与熵的守恒定律亦可表述为,信息有所得,则熵必有所失,而且得失相抵。

根据这一守恒定律,可以得到对系统观测前后的熵与信息的关系:

$$I = H_{\max} - H$$

式中: I ——对系统观测后所获得的信息;

$H_{\max}$ ——系统的原始熵;

H ——观测以后系统仍具有不确定性所具有的熵。