

通 信 系 统
理 论 讲 座

貝 福 德 蒂 主 編 · 胡 征 等 譯 · 人 民 郵 電 出 版 社

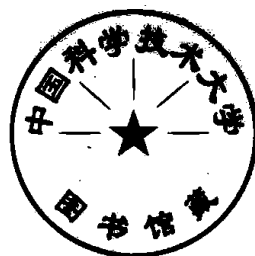
73.458
297

通 信 系 統 理 論 講 座

貝 福 德 蒂 主 編

胡 征 等 譯

胡 征 樊 昌 信 校



3655 2/10

人 民 郵 電 出 版 社

內 容 簡 介

本书論述通信系統的基本理論并介紹新的发展。对分集抗衰落、最佳判决、匹配过滤、編碼、反饋糾錯、模拟調制、噪声极小化等，都作了讲解与評述。通过这些問題，闡明了减少傳輸信道中引入的乘性干扰和加性干扰的校正方法和信号設計与处理技术。特別适于具有通信技术基础知識的工程技術人員用作基本参考书。

通 信 系 統 理 論 讲 座

主編者：（美 国） 貝 福 德 蒂
譯 者： 胡 征 等
校 者： 胡 征 樊 昌 信
出版者： 人 民 邮 电 出 版 社

北京东四6条19号

（北京市书刊出版业营业许可证出字第〇四八号）

印刷者： 北 京 市 印 刷 一 厂
发行者： 新 华 书 店 北 京 发 行 所
經售者： 各 地 新 华 书 店

开本 850×1168 1/32	1966 年 4 月北京第一版
印张 20 14/32 页数 327	1966 年 4 月北京第一次印刷
印刷字数 566,000 字	印数 1—1,470 册

統一书号：15045·总 1507—无 433

定价：（科 7）3.80 元

譯 者 的 話

在通信系統的理論和設計方面，近年來發表的文章不少，但全面地系統地闡述這方面的基本問題和新近發展的書籍尚不多見。這本書雖由講稿整理而成，各章之間聯繫不夠緊密，但就全書看，卻比較全面地論述了通信系統理論的各个方面：既講基本理論，又介紹新的進展。因此特別適宜作為具有通信技術基礎知識的工程技術人員的基本參考書。

原書作者都是美帝國主義的資產階級學者，他們的資產階級觀點在書中常有所流露。譯文中區別不同情況，有的作了修改，有的已經刪除，但可能尚有遺漏與考慮不到之處，請讀者注意批判地學習書中有益的東西。

譯者分工如下：胡征：原序，第一、十二、二十三章；郭建屏：第二、三章；樊昌信：第四、五、六、十、十一、十九章，索引；郭梯云：第七章；謝高覺：第八、九章；王育民：第十三章；顧慰文：第十四章；劉導涵：第十五、十六、十七章；榮琨璧：第十八、二十、二十一、二十二章。

由於譯者水平不高，經驗缺乏，對譯文謬誤之處，請讀者多批評指正。

譯 者

1965年7月

原 序

本书是由“可靠远程无线电通信”夏季特别课程^①所用讲稿整理而成。此课程系于1959年8月17日至28日，在麻省理工学院为许多从事实际工作的通信工程师所设。其主要目的，当时规定为“对发展新通信系统的近代处理方法，作相当完整的陈述”，其中“强调了作为…系统设计及估价的指导的基本模型和数学技巧的应用”。此课程也企图“给[麻省理工学院]电机系和[麻省理工学院]林肯实验室的工作人员们一个机会，来发表他们自己新的研究成果…[以及]他们自己对别人工作的见解”。

本书的大纲系由编辑委员会所草拟。编辑委员会包括布阮南(D. G. Brennan)，达文波特(W. B. Davenport, Jr.)，莫诺(W. E. Morrow, Jr.)，西伯特(W. M. Siebert)，而以笔者为主委。原计划编辑工作由编委会成员分担，但不久即发现，还需要大量重写和重新组织，并且最好只由一位编辑与每位及全体撰稿人密切合作。编委会主委十分乐观地担负了这项工作，对前途有多大困难估计是不足的。

按目前的形式，本书包括了原来的讲稿，其中大部分是完全重写的，并包括了许多在编辑时加进去的材料。有几处（其中有两处明白指出与编者的意愿相反）是由编者重写的，而且几乎所有推导和计算都在编辑过程中校验过。布阮南、达文波特、莫诺和西伯特对编辑工作很有帮助，但依照他们自己的意见，没有将他们的名字印在封面上。我个人愿对布阮南特别表示感谢，感谢他对我写的第七章提了宝贵意见。

粗略地说，本书包括的内容是：

(a) 信号和干扰的数学表示。其基本概念在第二章和第三章介绍；

^① 麻省理工学院于8月设有“可靠远程通信课程”Proc. IRE, Vol. 47, P. 18 A, July, 1959。

如何把这些概念应用于具体情况,則貫穿在其余各章中。在这两章里,和在本书的其余部分一样,着重于以工程教学語言叙述有用的数学概念。例如,在第二章里,布阮南以簡练的数学局法,描述了通信工程师的概率的概念,并精确地分析了諸如通信系統工程的随机信号和噪声模型里所作的各态歷經假設等問題的确切性。在第三章里,西伯特对用指数变换表示信号作了具有启发性的叙述,并論述了这种表示法在綫性系統分析中的地位,而着重指出了选择这样表示法的动机。就其讲述的方法言,应能消除現存的、关于应用傅里叶-拉普拉斯方法的某些主要的錯誤概念。

(b) 用发送与接收端所观察到的行为来表述傳輸信道。这种表述的各个方面,在第四、五、六章和第七章的相当大篇幅內討論。发展新通信系統的現代观点,是把傳輸媒质作为系統的整体和中心部分来看待。媒质的干扰和传播特性,在发送端选择信号和在接收端复制信号过程中,必須考虑进去。理想上,待傳輸的消息必須呈現为在傳輸过程中遇有干扰最不易受影响的形式,而在接收机处理受破坏的信号时,它必須能最大限度地利用对信号比对于干扰有利的特性。对系統要精确、可靠、保密和有效的要求,已經提高到这样的程度,以致已有的关于傳輸信道的知識往往不足,而在作最后設計之前,还必须进行專門的測量。在进行測量的过程中,有必要用适当的信道模型以为指导。这方面对于显示传播机构的实物模型,并不象对用四端网络端子上的可观察的参量来表述系統特性那么需要。

(c) 討論各种目的在于减少傳輸信道中引入的乘性干扰和加性干扰的校正方法和信号設計与处理技术。例如,应用分集技术抗御衰落,在第七章討論;最佳判决和匹配过滤技术,在第八、九、十一、十二章討論;編碼和从接收机至发射机的反饋技术,在第十三和十四章討論;模拟調制技术在第十九章討論;接收机—噪声的极小化技术,則在第十五、十六和十七章討論。

(d) 基本內容在組成通信系統上的应用。在第一和第廿一章,达文波特和莫諾扼要地叙述了設計通信系統的各种考虑因素和准則。在

第十八章，波萊克 (Pollack) 討論了語言系統的工作准則。在第二十二章，威斯納 (Wiesner) 就地球卫星对远程通信的未来的影响，作了精确的估計；最后，在第二十三章，費諾 (Fano) 展望了計算机在将来的通信系統里所起的重要作用。

虽然全书重点在于以教学方式来讲述，然而几乎每一章都包含新的观念和結果，它們不是沒有发表过，就是在写本书时加以发展的。几乎在討論到的每个領域內，許多重要的、尚未解决的研究問題，都在有关部分被指出来了。因此，本书不仅作为实际工程师或本課程教师的参考书應該是有价值的，而且作为高年級或研究生水平的学生的教科书也應該是有价值的。虽然沒有特別提供习题，但讀者應該可以从驗證已導出的結論、为未加証明的敘述作出証明，或将所敘述的推理加以引伸等方面，得到很大的益处。

貝福德蒂 (Elie J. Baghdady)

目 录

譯者的話

原序

第 一 章	緒論：通信系統的設計	1
第 二 章	通信系統工程的概率論	7
第 三 章	綫性非时变系統中的信号	35
第 四 章	信道表述：基本方法	62
第 五 章	信道表述：快乘性干扰	73
	附录	
第 六 章	信道表述：时变色散信道	97
	附录	
第 七 章	分集接收	128
	附录	
第 八 章	統計判決理論和通信：简单的二进制判決問題	181
第 九 章	統計判決理論和通信：更一般的表示法	196
第 十 章	信号的表示	209
第 十 一 章	信号的設計	254
第 十 二 章	时变色散傳輸的序列接收	293
	附录：随机时变信道的估值和相关检测	
第 十 三 章	編碼和譯碼	338
第 十 四 章	反饋通信系統	364
	附录：无編碼的信道容量	
第 十 五 章	接收系統的噪声表述	389
第 十 六 章	半导体的微波应用	422
第 十 七 章	脉泽及低噪声系統	438
第 十 八 章	語言系統的性能准則	450
第 十 九 章	模拟調制系統	459
第 二 十 章	长期变化的分析	581
第 二 十 一 章	通信綫路的設計	591
第 二 十 二 章	利用地球卫星的通信	600
第 二 十 三 章	結論：目前趋向	618
	中英人地名对照表	627
	索引	630

第一章 緒 論

通信系統的設計

達文波特(W. B. Davenport, Jr.)

我們需要可靠、迅速和有效的通信方法，從來沒有今天這樣迫切；將來這一需要也不會減低。現代科學技術的迅速發展，愈來愈強調需要在更遠的距離上進行通信。無論在政治或經濟領域里，許多重大的事情，能夠在任何時候和今天地球上任何地方發生，甚至在外層空間發生。因此，關於這類事情的信息的獲得、傳輸、處理和利用的問題，是今天擺在通信工程師和科學家面前最重要的課題之一。

在本書里，我們企圖給出通信系統分析和綜合的某些方法。其中有些是一目了然的，有些則需要作仔細的分析。不管怎樣，重點將首先放在方法所涉及的概念上，而不是放在方法的具体應用於某些特定的問題上。還有，我們主要將限於討論兩點之間的通信問題；特別是一條通信綫路的设计問題。至於連接許多條這樣的綫路以組成通信網的問題，它本身是一個很大的問題，不能在這裡討論。

I. 基本設計因素

決定通信綫路設計的因素很多，其中基本的是：

- (a) 待傳輸的信号的類型，
- (b) 可以利用的傳輸信道，
- (c) 性能的最終准則，以及
- (d) 容許的費用。

典型的信号有語言、圖片和數字數據；可利用的信道可以包括高頻電離層傳播信道、海底電纜信道以及利用有源人造衛星接力站的信道等；性能的准則可能是復制的保真度或錯誤的概率；而容許的費用則

包括一年的運轉費和維護費，以及初始設計費，研究、制造与安裝費等。

通信綫路的設計，从对上述基本因素給出規範开始。任何一个因素的改变，通常都导致設計的改变。因此，一个講話者的声音复制的保真度认为是最重要的語言通信綫路的設計，与一个接收所讲消息的錯誤概率很低是最重要、而辨認講話者是誰則无关重要的語言通信系統的設計，可能完全不同。永远不应忘記，在任何給定情況下，基本設計因素的最初規範，可能是不完全的，也可能是互相矛盾的；因此容許变动。例如，原来确定性能的主要准則是錯誤概率不得超过某一数值，但后来发现达到这样性能水平的設計，由于費用太大而不能采用。在这种情况下，不能設計出滿足最初規範的通信綫路，并应决定哪一規範（如果有的話）能够放寬以使設計成为可能。

I. 設計步驟

待傳輸的信号的类型、可以利用的信道、性能准則以及容許的費用等已經确定之后，便可进行通信綫路的詳細設計。通信理論在过去几年中虽已发展到很高的水平，然而在設計中技巧性仍然同科学性一样大。有許多問題我們仍然不知道如何用分析方法来处理。本书虽然強調某些可用的分析方法，但是不应忘記，在許多实际情況下，这些方法以及由这些方法導出的結果，在我們設計一通信綫路时，最多能够對我們的直覺給予帮助。

設計的第一步也許是选择“最好的”現有信道。为了作出这一决定，有时对每一种現有信道都要进行几乎完全的設計；有时則粗略地分析就够了。也有这样的情况，即沒有一种前述現有信道能够用来設計出有用的綫路，而必須寻找新的信道。寻找合适的新信道可能是通信綫路設計中最困难的一部分。

所选信道的物理特性（例如，平均总衰耗、衰落速率、干扰的类型及大小、頻率特性等）决定何种信号能够最好地通过信道传送信息。但可惜适合一給定信道的信号通常很少就是信息源所发出的信

号。因此，在大多数无綫电路里，至少需要将頻率搬移至指定的頻段；而在多径效应很严重和干扰很强的电路里，则需要更为复杂的信道信号。因此通信綫路的設計，一般要求确定适当的信道信号，其次要求确定产生和检测这些信号的方法。

应用分析方法于通信綫路的設計，需要构造一个通信綫路的概念模型。这样一个信道模型构成分析所需寄托的框架。模型的詳細結構，部分是由实际情况的物理学所决定，部分是为了分析的方便而确定的。因为一个“方便”的模型，可能不是真实情况很好的代表，因此在簡化模型以便于分析时，应注意不要把問題的本质部分丢掉。例如高斯統計特性是信道噪声最方便的模型，但在某些情况，它是一个不好的模型，据以分析会导致虛假的結果。

将通信信号分为模拟信号和数字信号是方便的。語言和音乐是模拟信号，电报信号和电传信号則是数字信号。同样，将通信系統分为模拟系統和数字系統也是方便的。因此，普通調幅制广播系統是模拟系統；脉冲編碼調制系統則是数字系統。然而，模拟系統不一定是傳輸模拟信号最好的系統；例如在某些情况下，語言信号最好是用脉冲編碼系統来傳輸。

模拟通信綫路的簡單模型如图 1 所示。信号源可能是話筒、电视攝象机或压力計。除提供功率放大外，調制器將給定的輸入信号变换成适合在信道上传輸的信号；它可能直接用輸入信号去調制射頻載波的振幅或頻率。信道的特性都包含在标为“受扰信道”的方框里。当然，任何詳細的分析都需要更詳細的信道模型。信道信号的检测，亦即将信道信号变换成适合于使用者的信号，則由解調器完成。这种綫路的性能准則常常是保真度准則；例如由人来評判复制的忠实程度，或最小均方誤差准則，或頻率响应的均匀性和諧波电平或交叉調制失真电平的大小等。

如果恰当地解释調制器和解調器的作用，則图 1 也可用来作为数字通信綫路的模型。不过在数字通信綫路情况下，有必要将模型表示得更詳細一些，因此得到图 2 的模型。这里假定信号源产生从有限符

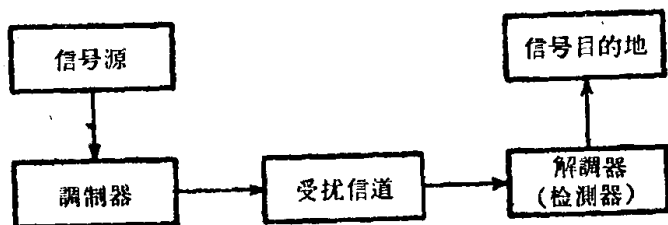


图 1 模拟通信线路

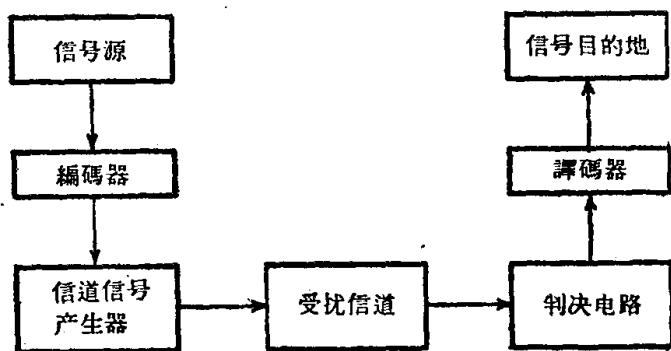


图 2 数字通信线路

号集里取出的符号序列，例如文字的字母序列，或二进制数字“1”和“0”的序列。（注意，模拟信号用取样法可以变换成数字信号。）

輸入符号序列必須变换成适合給定信道传输的信号序列。通常适于将这一变换过程分为两部分：編碼过程和信号产生过程。因为輸入符号序列的多余度或約束（如果有的話），可能不适合抗拒信道的干扰，因此也許需要將它們去掉，而代之以适合信道的約束（例如采用糾錯編碼）；这是編碼器的作用。將經過編碼的符号序列变换成信道信号的序列，是由信道信号产生器来完成。至于力量究竟應該放在編碼上，还是應該放在信道信号的产生上，只有根据手头特定問題的詳細情况才能确定。在某些情况下，也許最好采用較简单的信道信号（例如頻率不同的一組正弦波，如移頻鍵控系統中那样）和較复杂的編碼；而在另一些情况，也許有必要把最大的力量放在信道信号的产生上。

波形在信道輸出端一經接收到，便須判決所接收到的究竟是可能的信道信號中的哪一個；這是判決電路的作用。正確判決的能力是信道中干擾電平的函數。判決電路輸出的符號序列，經過譯碼然後送到信號目的地。

圖 2 所示模型的優點是，它使通信綫路各組成部分必須完成的基本作用十分清楚。至於圖中各方框的詳細結構（即用器件來實現那些基本作用的詳細方法），當然依賴於所研究的綫路的假定特性和設計時工程技術發展的水平。

Ⅰ．統計學與通信綫路

在本緒論里我們一再指出，通信綫路的設計細膩地依賴於輸入信號的特性和給定信道的特性。但是必須注意，信號和信道詳細的特性並非永遠固定不變的，而是這一時刻與那一時刻不同；因此，對所有意圖和目的來說，它們是不可預料的，在性質上是“隨機”的。事實上，輸入信號在某種意義上必須是不可預料的，才能傳遞信息給最終的使用者。如果輸入信號完全可以預料，那末通信綫路就根本不需要了！另一方面，信道的隨機性可能單純由於發生作用的各種原因的力量不都是已知的因而才明顯。但即使在此種情況，對通信綫路的設計者來說，信道的性質也是隨機的。

輸入信號和信道的特性雖然不能詳細預料，但是它們的變化，平均而言，通常是足夠有規律的，以致可以根據它們的統計特性來設計有用的通信綫路。重要的典型統計特性可能是：數字系統里各種可能的輸入符號出現的概率；當某一規定的測試信號，例如正弦波，加在給定的信道時，其輸出端功率在頻率上的分布，等等。

自然，通信綫路的性能準則也必定是統計性質的，這是輸入信號和信道的隨機性質（因而也是將通信綫路的設計建立在它們統計性質的基礎上）的結果。因此人們只能要求均方誤差為最小，或錯誤概率低於某一界限。

IV. 关于本书

本章试图介绍通信线路设计中某些基本概念，并指出它们相互间的关系。在实际中应用这些概念的能力决定于当时工程技术发展的水平。今天，我们能够提到的问题还远多于我们能够完全解决的问题。然而，我们已经取得了重大的进展，已经有了将来工作上的指南。

在后面的几章里，将给出概率论和统计学中有关的概念和技术。然后将应用这些概念和技术来表征信号和信道。其次将讨论某些纠错接收与传输技术，以及与信道信号的选择与检测和符号的编码与译码等紧密相联的方面。最后将讨论并说明把这些概念应用于由当前几种重要的信道组成的通信线路的合成问题。

第二章 通信系統工程的概率論

布阮南(Donald G. Brennan)

I. 引 言

想要事先一点不差地預示通信綫路上信号和噪声电压、傳輸媒质所引入干扰的准确結構或綫路待传消息的精确性质，这都是不可能的。但是我們仍然能够作到預示有关这些系統的某些事項；即某些統計事項，例如平均值或概率分布。究竟有哪些事項可以預示，其准确程度又有多大，則有待实验証实，这是靠任何数学理論都不能完全解决的問題。在通信系統設計中概率論的作用是：(1)为实验观察提供理論性的指导，(2)为探求和表述能預示的統計事項提示新的可能有用的方法，(3)使我們能够根据数学模型計算复杂系統在理論上的性能，这个模型“模拟”已知或設定的系統特性，和(4)按多少能够明确的方式将这些理論計算的性能和实际的驗證性实验联系起来。就本书所处理的大部分問題而言，特别是就上述(3)和(4)两点來說，目前概率論尚未达到很滿意的境地。我們往往不得不使用几乎不知其准确程度的近似法，或者使用几乎不能証明其为正确的假定。最后，无綫电通信系統的設計，是帶有“試凑”性质的工程——虽有大量的公式出現于本书的这章或其他章中。但无论如何，由于概率論的适当运用，有可能在这种設計中使不能确定的因素大为减少，且近三十年以来在这方面有相当大的进展。概率的数学理論、可資应用的实验資料的数量和质量，以及我們对上述理論和实际之間的了解都有进展。

不过，在此簡短的一章中很难显示这些进展于万一，在这里只能指出目前进展的概况。首先，概率的純数学理論是完全抽象的学科，它对設計通信系統或现实生活領域中的任何其他系統是完全无能为力的。自然这样的理論在这里与我們无关。除了这种抽象范畴的“概率”以

外，還有滿足一定定義、公理的概率。以下我們所討論的各類“概率”都滿足這些公理。

但是，在闡明各種不全是眾所熟知的概念和關係的過程中，我們將利用嚴格的數學格式所給的方便。這一章的基本目的在於表明現代概率理論和通信系統工程間的若干關係。它並非為初學者所專設。我們將在數學的隨機變量和實際通信系統工程師所使用的實驗技術和概念之間建立若干聯繫。由此將得出一種簡單的、聯繫着經驗的時間平均值和相應的經驗的分布的矩的理論。然後，此理論將用來表明各態歷經性在通信問題的數學隨機過程模型中的作用。這種關於隨機變量的理論還將（在第二十章中）給出預示某些結果的方法，這些結果是無法根據通常的（和欠明確的）模型預示的。文中還包括足夠的常用資料以供參考。不過只限於在下列情況中最有用的資料：對無線電信道中干擾特性的實驗表述、對語音和其他信號及噪聲電壓特性的統計表述、通信系統和分系統（如頻率复用與分集系統）的設計以及理解信息論的編碼結果。

即使對此比較有限的目的，所談的也還是作較膚淺的。我們僅集中說明基本概念和原理，而省略全部推導過程和主要對運算或推導定理有用的工具（如特徵函數）。對於缺乏概率論先修知識的讀者，建議至少應當掌握極值得一讀的本涅特(Bennett)所寫的指導性文獻^[1]。在克拉姆(Gramér)寫的小冊子^[2]中可以找到關於概率的數學理論的介紹，或者也可以從內容較多（其他方面並不高深）的柯爾莫哥羅夫(Kolmogorov)的著作^[3]中找到。費勒(Feller)的著作^[4]是關於離散數學概率的一本標準基本讀物。討論概率論在通信系統中應用的主要書籍是達文波特(Davenport)和儒特(Root)所寫的教科書^[5]，它特別見長於上面第二段中的第(3)項任務。通信理論的高級研究人員常認為克拉姆的巨著^[6]中的統計資料十分有用。供概率理論方面數學工作者使用的主要教科書^[7,8,9]，對本書的大多數讀者恐怕興趣不大。

II. 随机变量和概率分布

2.1 基本定义和概念

因为我們不能确实詳細地預知通信系統的性能，显然，能够（在某些时候）确切預知的一种知識，就某种意义而言是整个情况的“概括”。作为“概括量”使用的最广泛而成功的工具是概率分布函数和能够由它导出的数据。因此我們从研究分布函数开始。

几乎在討論整个概率論时，仅只研究分布函数的性质而从不談到該分布函数“是”什么，这虽十分不合理，但是却是可能的。不过在这里我們不采用这种办法，而常把分布函数与随机变量相联系来定义。明确地說，一分布函数（有时縮写为 d.f.） $F(x)$ 定义为某随机变量（有时縮写为 r. v.）取值小于或等于 x 的概率。例如，若 g 为一随机变量，則 g 的分布函数为

$$\begin{aligned} F(x) &= g \leq x \text{ 的概率} \\ &= P(g \leq x), \end{aligned} \quad (1)$$

式中把“ $(\cdots)$ 的概率”記为 $P(\cdots)$ 。这就是一維分布函数，或称“一阶”分布函数。 n 个随机变量 $g_1, g_2, \cdots, g_n$ 的类似分布函数应为 n 个变量 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 的函数，即

$$F(x_1, x_2, \cdots, x_n) = P(g_1 \leq x_1 \text{ 及 } g_2 \leq x_2 \text{ 及 } \cdots \text{ 及 } g_n \leq x_n). \quad (2)$$

它叫做随机变量 g_i 的 n 維分布函数或联合分布函数。現在我們首先研究一維分布函数。

显然，这就把定义的主旨轉为什么是一个随机变量的問題。从头說起，我們假設随机变量是任何一个“随机”变动着的事物。現在的困难在于无法对这样一个难于捉摸的“随机”概念进行数学处理。有許多方法解决这个問題，但近几十年来几乎普遍采用的方法是把随机变量定义为滿足某些条件的任何一种数学函数。无需詳細討論这些条件，按我們的目的，可以认为一随机变量是在一概率空間上定义的任何实值函数，所謂“概率空間”是指具有和它相应的概率的任何集合。不管