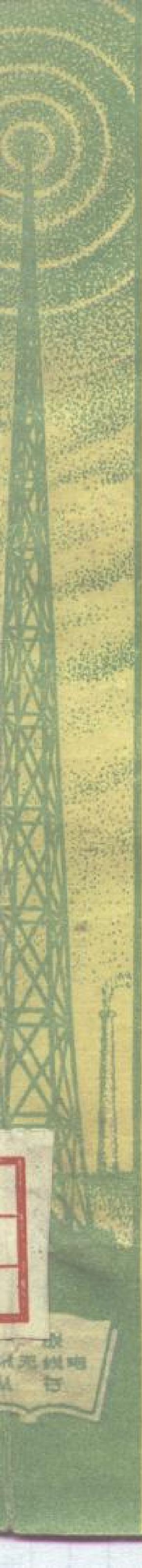

通信论浅说

P. A. 卡 扎 页

苏联 Б. И. 庫伏申諾夫著

M. B. 納 扎 罗 夫

人民邮电出版社

随着通信技术的发展，产生了一些問題：怎样来評价現有的各种通信系統，在今后的发展中应着重解决甚么問題，应該朝什么方向努力？要解决这些問題，必須建立各种通信系統的共同的比較标准，必須建立一定的理論从原則上闡明問題。通信論就是在这样的要求上产生的。通信論的建立，使得通信技术的发展有了专門的科学理論来作为指导，因而大大促进了通信技术的发展。

本书是向广大的电信工程技术人員和无綫电爱好者介紹这門新兴的科学。为了便于閱讀，本书首先介紹了通信論有关的、但为一般讀者不熟悉的知識，并且避免引用較深的数学，着重从物理意义解釋，使一般讀者都可直接閱讀本书。

本书的內容着重說明通信論的任务：解决通信有效度和可靠度两个基本問題。对通信論的理論根据，也作了一般的介紹，并且介紹了通信論已有的一些成就，指出了一些提高有效度和可靠度的新的方法，例如关联收信法、預測相減收信法、及接收微弱信号的濾过法、累积法等等。关于多路通信的信号划分原理，本书也結合举例，介紹了几种新的划分信号的方法。

·譯　者·

引　言

通信論的建立，是綜合通信技术成就的結果。为甚么有必要来綜合通信技术的成就呢？

通信技术的发展，从开始到現在，曾經而且一直是力图提高通信的經济性（即尽可能用最窄的頻带沿通路发送消息，尽可能快，尽可能少消耗能量），以及力图提高通信質量（即尽可能使收得的消息与发送的消息相符）。但是发展到一定阶段后，进一步实現上述意图却遇到了不可避免的困难。例如，为了要想提高傳輸速率就不能不扩展通路的通过頻带。又如企图在通路中傳輸信号时，信号的功率超过干扰的功率較小，也会产生这同样的結果。在这些方面的經常失敗，便促使科学家們想象到，一定存在一种在理論上不可超过的一定界限。美国科学家山农（*ШЭННОН*）确定了信号頻譜的寬度、信号功率超过干扰功率的值和通路的通过能力（傳輸速率）三者之間的一般关系。如果頻带寬度和信号平均功率超过干扰平均功率的值預先給定，則利用这关系可以确定傳輸速率（通路通过能力）的上限。

为了从数值上比較各种通信系統傳輸信息的能力，必須确定信息数量的量度。

美国科学家哈特来（*Хартли*）提出用可能消息数的对数作这种量度。在估量各种各样不同物理特性的消息所包含的信息数量时，利用这种量度是方便的。

特高頻技术的发展，使得有必要考虑一种特殊类型的干扰

——起伏干扰（見58頁），因此就必須研究潛在的（最高可以达到的）抗扰度（即通信系統抵抗干扰扰乱作用的能力）。

潛在抗扰度的理論是苏联科学家柯捷里尼可夫（*Котельников*）創立的。他証明每一种調制方式都有一个一定的最大抗扰度，并且用改善接收器电路的方法可能达到这样的抗扰度（但不可能超过）。运用潛在抗扰度理論可以估量現有的接收器的抗扰度，到底与潛在抗扰度相差多少，因而可以估計出今后在这一方面可能提高多少。格兰諾夫斯基（*Грановский*）、拉衣斯（*Райс*）、布湼莫維奇（*Бунимович*）等人的論著，促进了对起伏干扰特性的研究。

多路通信是提高通信經济性的一种方式。苏联科学家阿格也夫（*Агеев*）研究了信号划分的理論基础，对多路通信理論的发展有巨大的貢献。

通信論进一步发展后，导致在通信論中引用概率—統計的观点（山农提出的）。概率—統計观点的运用，改善了哈特来提出的信息数量的量度，使这量度对不相等的概率和相关的消息也能适用。

山农提出的信息数量的量度，其优点在于比哈特来所提出的更接近实际情况。这是因为通信系統发送的眞实消息是随机过程，具有不相等的概率和相互关联性。俄国和苏联时代的数学家馬尔科夫（*Марков*）、李亚普諾夫（*Ляпунов*）、柯尔莫葛罗夫（*Колмогоров*）、亨琴（*Хинчин*）等人的論著，对建立統計学理論起了极大的作用。近年来国內和国外科学家在通信論方面提出的很多大有成效的設想，使通信論发展到現阶段，不仅能綜合通信技术的成就，而且指出了解决通信基本問題的新的途徑，愈来愈显著地促进通信技术的发展。

目　　录

第　一　章

通信論的基本問題及其解决方法

第一节　几个主要的定义

首先应当确定通信的定义。任何类型的通信，其基本作用都是把发信者的信息傳送給收信者。通信可以利用各种不同物理特性的信号进行，例如可以利用：光的信号，声的信号，电的信号等等。通信論所得出的規律对任何类型的通信都适用，但通信論主要的研究对象是电气通信。

通信是靠通信系統实現的。通信系統包括发送器和接收器，发送器和接收器則由通信綫路相互接通。因此，通信綫路是一种傳輸信号的物理介質。最初，通信綫路是金属綫对。近代的无綫通信綫路則是发送器和接收器之間的无綫电波的傳播空間。首先，通信系統可以按系統中所傳輸的信号的物理特性进行分类。但是这样的分类，由于信号的物理特性不能完全反映通信系統中过程的实質，所以有很多缺点。按照消息在通信系統中（更准确点說在系統的发送端）的变換特征来区分通信系統，要方便得多。

任何通信系統的工作，都按下述方式进行。消息从消息源（发信者）送至发送器。发信者可能是人、自动机械或其他等等。在电視和遥控系統中，发信者即是某一种发送变換器①。

消息是必須发送給收信者的信息总体，也就是傳輸的对

註①：　发送变換器是一种設备，用來將某一种可測量的物理量变換为信号（电的，光的或其他的信号）。

象。在傳輸电报时，消息就是某一种电文。在通电話时，消息中不仅包括句子，而且包括話音的音調、节奏和类似的特性。通常，发送器把消息变换成相应的电信号，然后沿通信綫路傳送至接收器。这种变换，在某种程度上是由所使用的通信綫路的特性决定的，通常可分为三步：1)固有的变换，将原始消息变换为电的量（典型的例子是送話器，它将声压的变化变换为电流的变化）；2)編碼；3)調制。

后面的兩个变换步驟将在以后詳細敍述。

这样，从发送器送至綫路的是一种反映消息的信号。

通信系統的最显著特征是調制方式，而我們正是按照調制类型来区分通信系統。

在通信綫路的另一端接有接收器，它将信号还原为消息。

因此，同一消息用各种不同的通信系統都可以傳送，但是最合适的还是用这样的通信系統，即能保証傳送最快而且質量最好的通信系統。从这观点出发，通信系統的最重要特性就是通信系統的通过能力。所謂通信系統的通过能力，就是該系統在保証必需的傳輸精确度的条件下单位时間內所能发送的信息数量。“保証必需的傳輸精确度”这一附带条件，是极重要的。在通电話时如果說得过快，則收听的清晰度会变坏。这个簡单的例子，說明如果尽量提高发送速度（即通过能力），会由于通信系統的特性限制而破坏傳輸精确性。今后将証明，某些限制通过能力的因素基本上可以消除掉，但是还存在不可能消除的因素，其中最主要的是干扰。

提高通信系統通过能力的問題，可以称为提高有效度的問題。这一問題自开始有通信起即已产生，而且实質上隨后通信技术和理論的发展方向，就正是对这一問題寻求解决方法。

另一个同样重要的問題是提高傳送精确度的問題。这是因为实际情况中所接收的信号与发送的信号不尽相同，换句話說，发信者送出的消息与收信者所收得的消息有区别。造成这种区别的原因就是干扰。不論在通信綫路中，或是在发送器与接收器中，都有干扰《迭加》在信号上。通常，干扰与有用的信号相仿，也是某种形式的电气过程。干扰与信号《迭加》的特性可能是非常多种多样的。最普遍的，受干扰破坏的信号就是有益信号瞬时值与干扰瞬时值直接相加形成的，然而也不能說沒有其他的干扰作用形式。很明显，我們希望通信系統具备抗扰能力，以便消除干扰产生的有害的扰乱作用。这种抗扰能力既与所采用的調制方式有关，也与接收器結构及其他很多情况有关。通信系統全部抵抗干扰扰乱作用的能力，通常叫做通信系統的抗扰度。

因此，通信論需要解决的另一个最重要的問題是提高通信系統的抗扰度。以下將証明，提高有效度和抗扰度这两个要求是相互矛盾的：提高通信有效度就会降低通信系統的抗扰度，反之，要提高抗扰度就只有减低通信系統的通过能力。很明显，实际上最好用折衷的办法来解决問題，即在預定的抗扰度下去求得最大的通过能力。

这样，在消息重放的精确度給定的情况下（亦即在給定的抗扰度下）求得的通信系統的通过能力，是用来比較各种通信系統的一个标准，而根据这个标准来比較各种通信系統的問題，則是通信論已成功地解决了的主要問題之一。

按照以上所述的定义，可以將通信系統用图1来表示。图中发信者和收信者未包括在通信系統內。可以很方便地认为，所有干扰合併成为一个干扰源，就是这一干扰源对通信綫路中

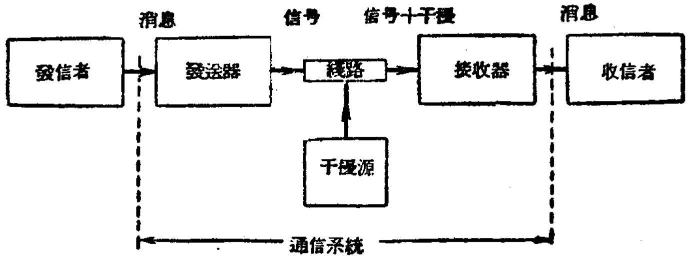

圖 1. 通信系統方框圖

傳輸的信号起作用。

还必須指出，通信綫路可用来同时发送若干个不同的消息。这时各个消息沿各自专用的通路傳輸。所謂通路，就是保証在一条公共綫路上独立傳輸某一消息的技术設备总和。

这样，我們可以看出多路通信是一种依靠《复用》通信綫路而提高通信系統有效度的方法。

既然在多路通信时是沿着同一綫路傳輸若干个不同的信号，所以首先就应解决各路信号的划分問題。

实际上在多路通信时，不可能将各通路的消息完全独立地傳送。每一通路都不可避免地或多或少地干扰其他通路，并且本身亦受其他通路的干扰。因此，多路通信时，相邻通路間的干扰是一种特殊的干扰。遏制这种干扰的方法之一，是选擇更完善的划分通路的方法。

第二节 应用的数学理論

傳輸消息是某种随时間变化的随机过程，这一概念在研究通信論的大多数方法中都要引用。《随机》这个詞着重指出这一情况，即不可能預測某一尚未发生的过程的精确全貌。接收器

輸入端的电压，可作为随机过程的典型例子，在观察了某一瞬时的电压值时，我們不可能完全精确地指出下一时刻（例如一分鈡以后）电压将为何值。这是因为，第一，我們不能准确地知道发送器在我們預測的时刻內将发出何种数值的信号；第二，由于接收的电压受到一种与所希望的傳送无关的随机电磁扰动（即所謂无綫电接收干扰）的作用，其数值起了变化。

观察封閉在有限容器中的大量分子的各种特性时，可以发現很多随机过程的其他例子。例如，冲击容器表面某一点的分子数目随时間而变化，这就是一种随机現象；又如分子由一碰撞到另一碰播所經过的路徑长短，也是一种随机現象等等。

总之，某一种观察的結果的随机性、不定性可解釋如下：我們不能預知在发生某一現象时的所有各种条件，而这些条件的总和却决定了这一現象的最后結果。如果这些条件中有若干个条件发生了变化，那末即使其他条件不变，也会影响观察的結果，使与我們預期的結果不相同。

对同一現象多次观察所得的各个結果虽然是有随机性，但是并不是說現象或过程不依从于某种規律性。实际上，大量观察所得的平均結果是很平稳的，恆定的。換言之，随机現象和过程依从于統計的（平均的）規律性。大量事件的平均值是一种綜合的特性，反映一种規律性，但是这种規律性不是各单独的事件所依从的，而是所有事件的总和所依从的。

概率論即研究随机現象和过程所固有的規律性，現在我們来向讀者介紹概率論的基本概念。

多次投擲硬币时，硬币的图象一面或花紋一面朝外的事件，可看作为典型的随机事件。現在我們来投擲硬币，并記下图象一面朝外的次数。如果投擲硬币的次数为N，而图象一面

朝外的次数为n，則比値

$$\frac{n}{N}=P_N \quad (1)$$

称为图象一面朝外这一事件的频数。

大量重复上述試驗，并且記下每次試驗所得的P_N，可以得出如图2所示的曲綫。

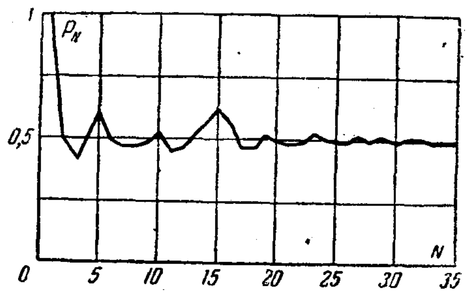

圖 2. 硬幣人象一面向外的頻数与投擲次数的关系

增加試驗次数N，則頻数P_N与某一常数値P相差很大的机会就愈少，这时就出現了所謂的統計平稳性。如果試驗次数N非常大（N无限增加），則P_N与某一平均数P相差很大的机会实际上可認为不存在，当然，P_N較小的波动仍然是有的。在这种情况下，p值称为图象一面朝外这一事件的概率。

实际上可以方便地認为，所有可能的概率值都在0—1范圍內，即

$$0 \leqslant P \leqslant 1。$$

概率为零，表示事件不可能出現。确定的（必然出現的）事件，其概率为1。在投擲硬币的例子中，图象一面朝外的概率等于1/2。

如果重复某一試驗可得到数种結果，那末这种随机現象可

用概率分布来表征。

例如，我們用普通尺多次測量某一模型的长度。这时，每次測量都得出一个一定的結果。假設測量进行了N次，得出結果l_1的有n_1次，得出結果l_2的有n_2次，依此类推。

如果測量次数N无限增加，則可分別得出l_1的概率P_1，l_2的概率P_2，依此类推。

現在，用水平軸标出測量可能得出的結果，用垂直軸标出各結果的概率，則可得出所謂概率分布曲綫。这种曲綫示于图3。

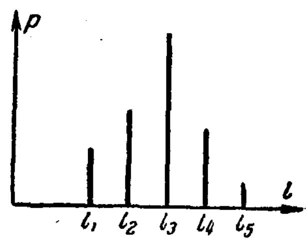

圖 3. 离散随机量的概率分布

概率分布的一个重要特性如下：

$$P_1+P_2+P_3+\cdots=\sum_{i=1}^{k}P_i=1, \qquad (2)$$

卽是說，試驗的所有可能結果的总和为1。当試驗的所有結果中只有某一个或某数个結果的概率未知时，可用这一特性求出这一結果或这数个結果的概率。

現举一个例子，这个例子是想象的（因为例中所选定的概率是任意的），但是仍可說明公式（2）的应用。

假設我們有一架收音机，可以收听三个波段的电台：長波，中波，短波。再假設，收音机用来收听短波电台的概率为0.25，收听長波电台的概率为0.15。知道这两个概率以后，并且能肯定收音机只能收听三个波段，則可利用公式（2）求出該收音机用来收听中波的概率：

$$1-0.25-0.15=0.6\ 。$$

随机量的数值特性可以用随机量的平均值或数学期望值表

示，該值由下式确定：

$$M(\xi)=\lim_{N\to\infty}\left(\frac{n_1}{N}\xi_1+\frac{n_2}{N}\xi_2+\cdots+\frac{n_i}{N}\xi_i+\cdots\right)$$
$$=\sum_{N}p_i\xi_i \qquad (3)$$

式中，如上所述，$\frac{n_i}{N}$——其中第 i 个事件的频数；p_i——第 i 个事件的概率；ξ——所考察的随机量。

公式（3）括弧中的式子并非其他，正是随机量 ξ 的算术平均值。因而，数学期望值就是在观察次数无限增加（$N\to\infty$）时的算术平均值的极限。

假設我們来观察某一电路中安培計的讀数。为了方便起見，我們假定电流的变化是不連續的，是步进的，有 5 个数值：0安；1安；2安；3安；4安。我們可見到的讀数的概率假定为：0安的等于0.1；1安的等于0.2；2安的等于0.4；3安的等于0.25；4安的等于0.05。这些概率的总和等于1。現在来求电路中电流的平均值。将必需的数值代入公式（3），得

$$M(I)=\sum_{N}p_iI_i=0.1\times0+0.2\times1+0.4\times2+0.25\times3+0.05\times4=1.95\text{安。}$$

可以看出，在这个例子中平均值与最大概率的讀数极接近。但是，不能認为这种情况是經常的。出現这种情况是因为概率分布对最大概率而言几乎是对称的。如果是完全对称〔例如$p(0)=p(4)=0.1$，$p(1)=p(3)=0.2$，$p(2)=0.4$〕，則不难証明平均值与最大概率的讀数相等。一般情况下，概率分布可能是不对称的，因而最大概率的随机量的值与其平均值可能相差很大。

通常，在随机量上面加一短划表示取平均。因此，随机量的平均值写成 $\overline{\xi}$。

随机量的平均值表示一种平均的水平，随机量的可能值即在这一水平上下变动。为了在数值上估量这种变动，通常引用随机量方差，用符号$D(\xi)$表示，等于

$$D(\xi)=M(\xi^2)-M^2(\xi)。\qquad (4)$$

因此，为了計算方差，必須知道所考察的随机量ξ的平均值（数学期望值），以及随机量ξ的平方的平均值，即ξ^2的平均值。

随机量的方差，表示随机量与其平均值$\overline{\xi}$的平均偏离程度。但是，方差是以平方量度来估量这种偏离的。因为，ξ^2的平均值是以ξ的单位計量的某一ξ值的平方，而ξ的平均值的平方也是某一数值$\overline{\xi}$的平方，所以，方差的因次等于随机量平方的因次。例如，設随机量是以安培計量的电流，則$\overline{\xi}$的因次为安培，$M^2(\xi)$的因次将为a^2（即安培^2），ξ^2的因次将为a^2，$M(\xi^2)$的因次亦为a^2，因而$D(\xi)$的因次是a^2。

估量偏离时必須使用平方量度，原因是随机量偏离的平均值可能等于或接近于零，因为各个偏离值可能是正也可能是負，因此取平均时正負相消。但是，平方后不論是負值或正值总都成为正值，所以偏离值平方后再取平均值不会有相消情況，而所有偏离值都能考虑在內。

方差的平方根值叫做**均方差**，用符号σ表示。因此，

$$\sigma=\sqrt{D(\xi)}=\sqrt{M(\xi^2)-M^2(\xi)}。\qquad (5)$$

均方差σ的因次，不难看出，是与随机量ξ的因次相同的。

現在来研究一下方差$D(\xi)$和均方差σ的物理意义。假設所考察的随机量是負荷上的电压，或通过电阻为1欧姆的負荷的电流。

我們仍采用以前求电流平均值的例子。我們假定$R_н=1$欧姆。这时平均值$M(I)$給出直流分量电流值，而平均值的平

方，即$M^2(I)$，則給出这直流分量的功率。

既然全部平均功率等于瞬时功率的平均值（即$\overline{I^2}$），那末方差（当$R_H=1$欧姆时）就等于电流圍繞其本身平均值变动的功率。因此，方差等于电流I的交流分量的平均功率。

在特殊情況下，电流的直流分量[平均值$M(I)$]等于零，則方差表示电流的全部功率。

研究作用于1欧姆負荷上的电压时，可得到与上述相同的結論，而且讀者自己可以很容易地进行必要的說明。

至于均方差σ的物理意义，則表示电流或电压的交流分量的有效值。

这样，所研究的随机量如果是电流或电压，而負荷电阻等于1欧姆，則

$M(\xi)$——直流分量；

$M^2(\xi)$——直流分量的功率；

$D(\xi)$——交流分量的功率；

$M(\xi^2)$——全部平均功率；

σ——交流分量有效值。

在上述例子中，随机量取的是分离的（单个的）值。但是，随机量也可以是連續变化的。这时得出的不是由各个点构成的概率分布，而是連續平滑的曲綫，叫做**概率密度**曲綫。

按**正态規律**分布的随机量，在傳輸消息的問題中最为重要。所謂正态規律就是

$$w(\xi)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma}e^{\frac{-(\xi-\xi_0)^2}{2\sigma^2}}, \qquad (6)$$

式中e——自然对数的底数（$e=2.71$）。

正态分布曲綫的图示于图4。

利用正态分布曲綫时，为了决定随机量ξ在某一很小区間$(\xi_1、\xi_2)$內取某值的概率时，必須算出由概率密度曲綫$w(\xi)$，纵座标ξ_1及ξ_2所組成的面积。这面积卽等于所求的概率。

近似地

$$p(\xi_1 < \xi < \xi_2) \approx w(\xi_1)(\xi_2 - \xi_1)。\qquad (7)$$

正态分布的重要参数是：ξ_0——随机量的平均值；σ—均方差[見公式(5)]。

有时σ亦称为均方起伏。

通常我們注意的是随机量的变化，例如接收器輸入端电压随时間的变化。这时我們研究的是随机过程。如果随机过程的概率特性（平均值，均方差，概率分布）不随时間变化，則这种随机过程叫做平稳的随机过程。

俄国科学家馬尔科夫，李亚普諾夫，柯尔莫葛罗夫，亨琴等等的論著，对平稳随机过程的理論已闡述很詳尽。

我們实际上涉及的随机过程，具有下述特性：过程中某一时刻的值总在某种程度上影响过程中与該时刻相邻的时刻的值。用概率論的术語，这就是說过程中相邻时刻的各值之間存在着依賴关系或关联。因为过程是随机的，所以每一过程的实現都各不相同，因此描述过程的特性时，只能按所有可能的过程的情况取平均（統計）。这样，不論是平均值和方差，或是关联（它反映随机过程中相互依賴关系），都是統計特性。

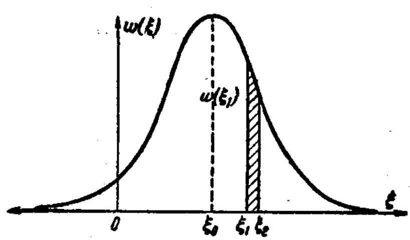

圖 4. 正常概率分布曲綫

过程中各值之間的依賴关系，决定于所研究的值与另一值之間的时間間隔τ。如果我們現在把这一时間間隔τ从零向增大或減小方面变动（減小时τ将为負值），那末关联亦随着变化，这就是說我們可得出**关联函数**，以下我們将用$R(\tau)$表示这函数。

图5画的是一种随机过程。点t_0表示讀数的始点。現在来看随机过程中在$t_1=t_0+\tau_1$，$t_2=t_0+\tau_2$等等时刻的值。很明显，如果τ_1接近零，即如果过程中各值取得彼此非常接近，則值$\xi(t_0+\tau_1)$与$\xi(t_0)$有明显差別的可能性极小。这也就說明了

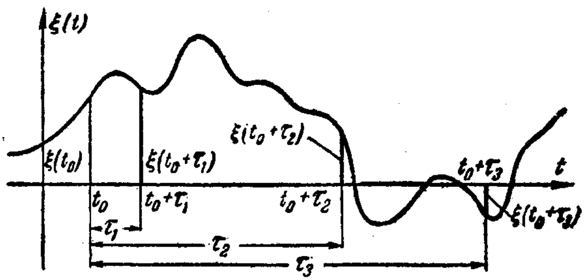

圖 5. 随机过程的示波圖

$\xi(t_0)$与$\xi(t_0+\tau_1)$之間的依賴关系。τ愈增加，这种关联愈減弱，即值$\xi(t_0+\tau)$与$\xi(t_0)$相隔愈远。最后，如果$\tau=\infty$，則过程中$\xi(t_0)$值与$\xi(t_0+\tau)$值之間完全沒有关联，而是彼此独立的，就是說随机量的$\xi(t_0+\tau)$值完全与$\xi(t_0)$值的情况无关。

在数学上，用过程$\xi(t)$乘自原始过程經过时間τ以后該过程的复本所得的乘积再取平均（按所研究的全部时刻），来表示关联函数。利用簡化的写法，关联函数可写成

$$R(\tau)=\overline{\xi(t)\xi(t+\tau)}。\qquad (8)$$

因此，为了取得随机过程的关联函数，必須通过下列步驟。