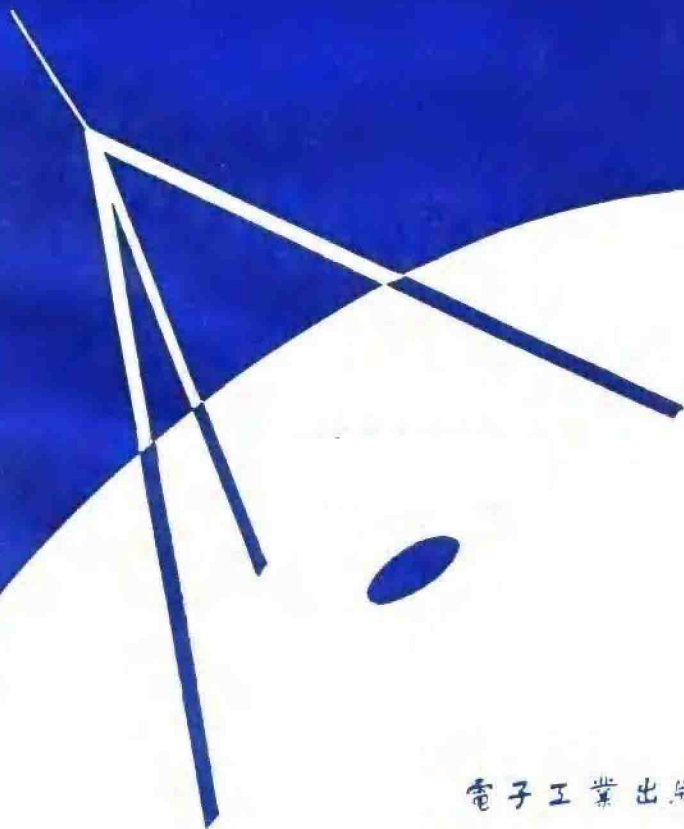


# 现代雷达基础

[法] M·卡尔庞蒂埃 著

吴明德 胡朝阳 译

方能航 审校



電子工業出版社

# 現代雷达基础

〔法〕 M·卡尔庞蒂埃 著

吴明德 胡朝阳 译

方能航 审校

電子工業出版社

## 内 容 简 介

本书系法国著名雷达专家M·卡尔庞蒂埃所著。作者总结了他近三十年来对雷达系统的研究和教学经验,从信息论观点出发,系统地分析了六、七十年代出现的各种雷达新体制及其工作原理,给出了先进雷达的参数选择、精度分析以及基本设计方法等。全书行文简洁、语句畅达。本书除在法国作为大学教材外,曾被译成俄文和英文,作为苏联和英、美各国的大学教材或参考书。

本书可用作高等院校雷达专业的教材,亦可供雷达及有关专业的科技人员参考。

## **RADARS BASES MODERNES**

M. CARPENTIER

Paris 1981

### **现代雷达基础**

〔法〕M·卡尔庞蒂埃 著

吴明德 胡朝阳 译

方能航 审校

责任编辑 王昌喜

\*

电子工业出版社出版(北京海淀区万寿路)  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
大白楼印刷厂印刷

\*

开本: 850×1168毫米1/32 印张: 12 字数: 319千字

1987年7月第1版 1987年7月第1次印刷

印数: 1—2250册 定价: 2.75元

统一书号: 15290.480

ISBN7—5053—0073—3/TN56

## 作者序

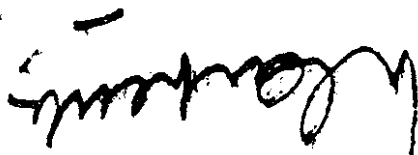
我以十分喜悦的心情从我的朋友方能航处获悉：吴明德和胡朝阳先生将把我的著作《现代雷达基础》的新版本译成中文。

对此，我感到荣幸，因为我想，这样做可对中法两国在雷达领域中的关系从质量上和密度上都得到提高作出贡献。

我感到高兴，因为在最近召开的南京国际雷达会议上，我确信，中国研究人员是高水平的，他们的工作是卓有成效的。

我冒昧地希望，我这本书的译成中文能对中国雷达技术的发展有所贡献；并希望，所有在中国读我这本书的人能够知道，在远离他们的美丽的法国，他们有许多真诚的朋友。

Michel H. 卡尔庞蒂埃



1986年11月10日

于布列塔尼

## 译者的话

过去，我国翻译出版了许多英文和俄文科技书，介绍了美、英和苏联的科技情况，翻译出版法文科技书却很少，可以说几乎没有。由于我国科技人员能阅读法文的较少，从而给学习法国的科学技术带来了困难。事实上，法国的科学技术在很多方面是有相当水平的，而且法文书又以严谨、简练闻名。为此我们选译了这本《现代雷达基础》法文新版本第四版，希望能在介绍法国科学技术方面起到抛砖引玉的作用，为促进与法国的科学技术交流作出贡献。

本文作者 M·卡尔庞蒂埃，是法国著名雷达专家，法国几所高等学校的教授，汤姆逊-布朗台公司的技术总经理，也是享有国际声望的学者之一，曾多次在美国和西欧诸国讲授雷达技术。本书是作者类似内容著作的最新版本。第一版于1962年在《雷达原理》基础上，以《现代雷达理论》为名正式问世（1965年由苏联无线电出版社译成俄文）。第二版《雷达新概念》于1966年出版，它在内容和形式上比前一版有了更新和改进。第三版改名为《现代雷达基础》，在1977年出版。第二和第三版都被译成英文，并被美国和西欧诸国的一些高等学校用作教科书。

本书译稿承方能航高级工程师仔细审校；张直中高级工程师、李玉文高级工程师和郭燕昌博士对原书进行了评审，并肯定了本书的实用价值；丁燮华、沈育廉、戴可达同志对译稿作了最后审阅；陶晓峰、谭绍杰、郑美鸳同志帮助做了一些工作，译者特此表示深切的谢意。

原书有一些错漏、重复及印刷上的错误，译成中文时已经作了删除和修正，书中未一一加注说明。

由于水平所限，译文中难免有错误和欠妥之处，敬请读者指正。

## 序

本文系法国雷达专家M·卡尔庞蒂埃所著1981年出版的第四版本《现代雷达基础》。作者总结了他近三十年来对雷达系统进行的研究和教学经验，从信息论观点出发，系统地分析了六、七十年代出现的各种雷达新体制及其工作原理，给出了先进雷达的参数选择、精度分析以及基本设计方法等。全书行文简洁，语句畅达。因此，本书除在法国作为大学教材外，前面的三个版本曾被译成俄文或英文，作为苏联和英、美的大学教材或参考书。

本书的主要读者对象是大学高年级雷达专业或与雷达有关的其它专业的学生。因此，本书的特点之一是着重讲清基本物理概念，尽量避免涉及高深数学问题。从数学观点看，虽然有些论证不够详细，但对大学生来说，却达到了便于弄清物理概念的首要目的。

本书的另一个特点是着重阐明各种新型雷达的基本原理和主要特征，不多阐述实际工作中会碰到的各种琐碎复杂的技术细节。因此，本书虽然包罗了六、七十年代发展起来的多种新体制、新技术，但仍是一本简练的薄书。

本书与美国M·I·斯柯尔尼克1980年出版的第二版《雷达系统导论》相比较，主要区别在于本书只写基本原理和与此有关的重点内容，而《雷达系统导论》的内容则更广泛和深入，篇幅也比本书大得多。这是由于两本书的读者对象不同所致：本书的主要对象是大学生，而《雷达系统导论》主要用作研究生教材或参考书。当然，这两本书对高等院校教师和从事雷达研制工作的同志也均有一定的参考价值。

应该指出，本书尽管看来浅显，但要掌握它却不容易，必须付出艰苦的劳动才行。这是因为文字叙述非常扼要，所以必须仔细思索才能透彻理解，而这对学生和其它有关读者来说具有

启发创造力的优点。由于我国能阅读法文的学生和技术人员较少，因此译出本书在国内发行是很有必要的。

张直中

1986年1月9日

## 前 言

本书是类似内容著作的最新版本，最初几版的出版时间可上溯到1961年和1962年。初版以“大学讲义”（《雷达原理》，由高等航空工业学校出版）形式介绍了雷达的新理论基础及其基本应用，而这些新理论基础当时还处于萌芽阶段，因为美国在将近1958年的时候才建成首批脉冲压缩雷达，而在欧洲（包括法国）则在1959和1960年才试验脉冲压缩雷达和相关接收雷达。

因此，《雷达原理》并不是一本完善的教材，它有不少谬误之处。但它仍受到了读者的欢迎，从而导致1962年底正式出版《现代雷达理论》（1965年由《苏联无线电出版社》译成俄文），这说明又向前进了一步。

《现代雷达理论》的供不应求促使作者在1966年编写了《雷达新概念》（1968年出了英文版一书）。由于作者在现代雷达样机上所取得的成果和积累了丰富的教学经验，故此书在内容和形式两方面都有所改进。这个版本虽然还存在错误和缺点，但已被许多高等学校（美国和包括法国在内的欧洲一些高等学校）用作“教科书”。

经过修订和补充的第三版本于1977年问世。同前一版本一样，美国、欧洲的一些高等学校也都曾采用它作教科书。作者在本版中也努力进行了补充和修订，特别是增加了电扫描的新篇章。因此，该最新版本可以看成是作者长期工作经验的总结。

M·卡尔庞蒂埃

1981年6月于法国布列塔尼

# 目 录

## 前 言

## 第一章 随机函数引论

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| 1.0 绪言 .....                                         | 1  |
| 1.1 概述 平稳性 .....                                     | 1  |
| 1.2 幅度分布的概念 .....                                    | 5  |
| 1.3 频谱分布 $A^2(f)$ 的概念 .....                          | 13 |
| 1.4 信号在线性滤波器中的通过过程 .....                             | 20 |
| 1.5 卷积定理的应用 自相关函数 $\rho(\tau)$ .....                 | 22 |
| 1.6 $\rho(\tau)$ 和 $A^2(f)$ 的计算实例 (自相关函数和频谱密度) ..... | 26 |
| 1.7 采样定理 .....                                       | 33 |
| 1.8 向正态定律的逼近 高斯现象(拉普拉斯现象) 瑞利定律 .....                 | 39 |
| 1.9 实际相关的不完善性 .....                                  | 46 |
| 1.10 习题 .....                                        | 51 |
| 附录 希伯特空间引论 .....                                     | 59 |
| A.1.1 阿贝尔群的定义 .....                                  | 59 |
| A.1.2 环的定义 .....                                     | 60 |
| A.1.3 体的定义 .....                                     | 61 |
| A.1.4 矢量空间的定义 .....                                  | 62 |
| A.1.5 希伯特空间 .....                                    | 64 |

## 第二章 信号与噪声 理想接收机

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 2.1 雷达 .....                          | 71 |
| 2.2 先验概率和后验概率 .....                   | 74 |
| 2.3 经过一次实验后高斯型噪声中存在或不存在信号的后验概率 .....  | 76 |
| 2.4 连续几次实验后高斯型噪声中存在或不存在信号的后验概率 .....  | 78 |
| 2.5 连续高斯型噪声中存在或不存在连续信号的概率 理想接收机 ..... | 88 |
| 2.6 理想接收机的严格定义 .....                  | 92 |

### 第三章 装有理想接收机雷达的性能

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 3.1 制造理想接收机的两种方法 .....       | 101 |
| 3.2 理想接收机输出信号的性质 .....       | 103 |
| 3.3 虚警概率和检测概率 距离模糊度 .....    | 109 |
| 3.4 有用信号为高频信号时对结果的修正 .....   | 115 |
| 3.5 测距精度 .....               | 117 |
| 3.6 距离分辨力 .....              | 122 |
| 3.7 径向速度的测量精度 .....          | 130 |
| 3.8 径向速度模糊度 .....            | 132 |
| 3.9 径向速度分辨力 .....            | 134 |
| 3.10 距离-速度模糊度 .....          | 138 |
| 3.11 距离-速度分辨力 .....          | 150 |
| 3.12 关于消除干扰目标(杂波)的几点说明 ..... | 158 |
| 3.13 结论 .....                | 163 |

### 第四章 几种雷达工作原理的分析

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 4.1 相关接收雷达 .....    | 168 |
| 4.2 “脉冲多卜勒”雷达 ..... | 178 |
| 4.3 雷达接收的新算法 .....  | 181 |
| 4.4 经典的脉冲雷达 .....   | 182 |
| 4.5 脉冲压缩雷达 .....    | 192 |
| 4.6 恒虚警率接收 .....    | 218 |

### 第五章 实际目标的表现 目标的起伏

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 5.1 概述 .....             | 238 |
| 5.2 平面反射镜的等效截面 .....     | 239 |
| 5.3 金属球的等效截面 .....       | 241 |
| 5.4 信号反射镜 .....          | 243 |
| 5.5 理想全向辐射目标的再辐射场 .....  | 246 |
| 5.6 由两个相同点状目标构成的目标 ..... | 247 |
| 5.7 由两个不同点状目标构成的目标 ..... | 253 |
| 5.8 遵守瑞利定律的起伏 .....      | 256 |
| 5.9 频率分集 随机跳频雷达 .....    | 266 |

|               |     |
|---------------|-----|
| 5.10 结论 ..... | 268 |
|---------------|-----|

## 第六章 雷达测角

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 6.1 概述 .....                        | 270 |
| 6.2 环视雷达 .....                      | 271 |
| 6.3 “单脉冲”雷达的一般原理 .....              | 275 |
| 6.4 目标的角度起伏 .....                   | 278 |
| 6.5 “单脉冲”雷达简介 .....                 | 281 |
| 6.6 “圆锥扫描”雷达 .....                  | 298 |
| 6.7 目标起伏对雷达测量精度的影响 .....            | 301 |
| 6.8 关于目标视在中心闪烁问题的再次讨论 角“目标标志” ..... | 305 |

## 第七章 雷达信息的处理 雷达威力区

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 7.1 相干积累 .....         | 309 |
| 7.2 检测后的积累 .....       | 309 |
| 7.3 环视雷达中的积累 .....     | 315 |
| 7.4 数字处理机的应用 .....     | 318 |
| 7.5 经典环视雷达预设计的例子 ..... | 323 |

## 第八章 电扫描天线在雷达中的应用

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 8.1 引言 .....              | 329 |
| 8.2 电扫描天线的基本原理 几点简化 ..... | 331 |
| 8.3 电扫描天线的一般介绍 .....      | 337 |
| 8.4 电扫描雷达天线方向图的类型 .....   | 347 |
| 8.5 结束语 .....             | 355 |

## 附录

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| A.一 习题1 检测概率 .....                    | 358 |
| A.二 习题2 各种型式雷达的使用 .....               | 359 |
| A.三 习题3 确定雷达的覆盖范围 .....               | 362 |
| A.四 $\Theta(x)$ 函数表 .....             | 368 |
| A.五 检测概率 $P_d$ 与能量信噪比 $R$ 的关系曲线 ..... | 369 |

## 参考文献

# 第一章 随机函数引论

## 1.0 绪言

本章介绍随机函数的基本特性。这些特性对于理解以下几章的推导是有用的。

本章并不想就随机函数内在的完善性来介绍数学。因此，叙述是不太严格的，但只要求这样的叙述能为读者所接受。笔者是有意这样做的，并且一点也不感到遗憾。

当然，也绝不能因为世界上有专门热衷于严格的数学定义和论证的“公正的”数学家，也不能因为他们以前就证明过本书以后各章中的“数学上的不严格”会影响结论的正确性，从而得出本章（因而也是全书）叙述方式不确切的结论。

## 1.1 概述 平稳性

人们一般通过**噪声**这个概念来从物理上形成随机函数的概念。那么，噪声又怎样来定义呢？一种可能的定义是：

噪声是一种伴随着有用信号的**随机和不希望**的现象，它会使有用信息畸变。

这个定义意味着噪声是一种主观的概念，对这个人**是**噪声，对另一个人可能就不是噪声了。

这一点是很明显的：一个教师的讲课内容，可以通过话筒以作为时间函数的电压形式

$$V = f(t)$$

记录下来。

从对应于教师讲课内容的曲线 $V=f(t)$ 来看，此曲线似乎是完全随机的。但经过放大器和扬声器转换后被熟悉讲课内容的教师听到时，曲线就变成了一种不完全随机的现象。

对懂法文的大学生来说，讲课内容比不懂法文的大学生随机程度要小些。同一种现象对各种各样的人来说不一定是随机的。

同样，干扰对被干扰的人或装置来说可以是随机的，但对于施放干扰的人或装置可能就不是这样的。

同样可以说（这往往是自然的推论），一种现象对有些人是不希望的，而对另一些人则是有趣的。教师在阶梯式教室中讲课，对感兴趣的大学生是希望的，而对相互之间正在谈论趣闻的大学生则是不想听的。同样，上课时有些学生相互谈论“精采的趣闻”，这

——对讲趣闻的学生是不随机的；

——对听趣闻的学生是随机的（否则便不是趣闻）；

——对在讲课的教师来说是讨厌的；

——对于不是来听课，而是来听消息和说笑的大学生是不讨厌的。

此外，现象的随机性质（这样说是合乎逻辑的，因为人们知道，任何一种现象或多或少总是随机的）并不说明现象如同从摇奖滚筒中“出来”的数字那样，完全遵循偶然的“规律”，但至少可以说它不是可确切地预料到的。

举个例子来说吧，把一个人与其住所之间的距离 $D$ 作为变量。这个距离是一种作为时间函数的随机现象，它具有下面一些特性：

a) 首先， $D$ 永远是正的；根据概率的定义， $D$ 为负数的概率为零。此外，如果考虑今后任一时间内 $D$ 在1000~1001公里之间的概率，那么，这个概率通常比 $D$ 在0~1公里之间的概率要小。

而 $D$ 在50000~50001公里之间的概率，如果不是零的话，那么一般是极小的。这些以数学形式表示的说明 $D$ 变化范围的特征，给出了所谓 **$D$ 的幅度分布**。

b) 如果已知时间 $t=0$ 时 $D=15$ 公里，那么， $t=1$ 秒时 $D$ 为14.9~15.1公里的概率比 $D$ 为15.5~15.7公里的概率( $t$ 始终为1秒)一般要大些(尤其当这个人不是现代飞机驾驶员时)， $D$ 为30~30.2公里的概率( $t=1$ 秒)则几乎为零。此外， $D$ 值一般是以每天1(或2)次相当有规律的节奏变为零的。这种以数学形式表示来说明 $D$ 的变化节奏或速度的特征b)给出了所谓的 **$D$ 的频率分布**，或更确切地说，给出了 **$D$ 的频谱密度**(它以一一对应的方式与 **$D$ 的自相关函数**相联系)。

由此可见，若作为时间的函数 $D$ 的变化是随机的(人们不能早就确切地预测出 $D$ 值的大小)，那么，这个随机现象是受“统计”规律支配的。这里，这些规律取决于一个人的职业、性格以及年龄。规律在短时间间隔内(例如一个月内)是比较固定的，在这个时间间隔里，我们说，现象是**平稳的**。但在很长的时间间隔内，例如在10年内，规律就不太固定了(因为一个人可能搬了家，换了职业等)。

随机现象的平稳性概念，通过实例可以理解得更透彻一些。

1) 考虑用以下方式获得的随机函数：每隔10秒钟掷一次没有缺陷的骰子，得出的数字给出随机函数 $V$ 的值。这样就得到图1.1所示的时间的不连续函数。

其幅度分布是简单的，可表述为：1~6的每个整数值的存在概率都是 $1/6$ 。而 $V$ 的所有其它值的存在概率均为零。

要算出 $V(t)$ 的频谱密度就不这么简单了，但可以设想，如用1秒的间隔来代替10秒的间隔，则幅度分布是不会变的，而频谱密度的速度将增长10倍。

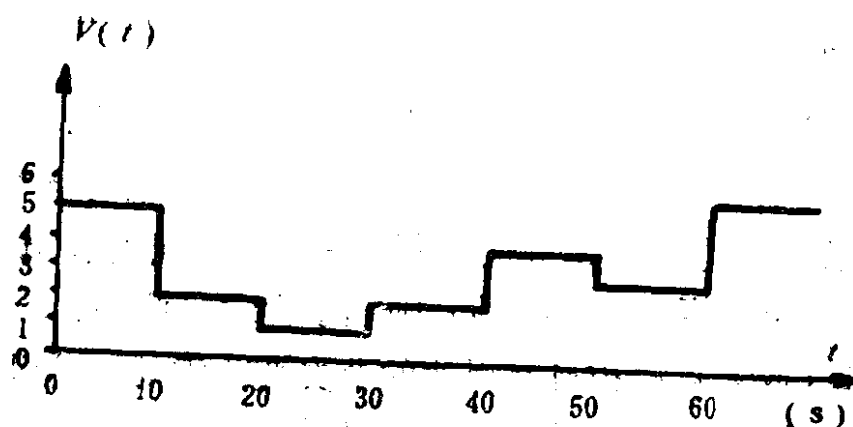


图 1.1

在上述情况下，只要骰子一直是好的和读数是公正的，确定节奏的钟快慢不变，那么函数  $V(t)$  就是平稳的。但是，随着时间的推移，如果由于这样或那样的原因，骰子的重心朝某一个面偏移，例如移至1的那一面，那么6就慢慢地变得更有可能出现了，这时就不再认为  $V(t)$  仍是平稳的。同样，如果钟有规律地变慢，那么也不能认为这个现象是平稳的。但是，如果重心的移动速度比10秒钟要慢得多，比如说需要一天的时间才会使出现6的概率从  $1/6$  上升到  $1.05/6$ ，同样，如果需要一天的时间才会使时间间隔从10秒钟增加到10.5秒，那么，通常可以认为，在1个小时之内，这个现象是相当平稳的。

2) 现在来考虑一部以每分钟6转速度绕垂直轴有规律地转动的雷达定向天线（例如环视雷达天线）。同时有一部发射机在离它一定的距离上发射出完全平稳的噪声。显然，发射机方向上的天线增益将随时间而变化：具体地说，当雷达定向天线波束“扫过”发射机时，天线所接收到的“平均功率”将很大，而当天线的波束指向相反方向时，功率将很小。更确切地说，若雷达天线的波束宽度(方位)为  $1^\circ$ ，则天线方向图将具有各个瓣的宽度几乎相等的花瓣形状，因而，在天线转动  $1^\circ$ ，即大约30毫秒的时间

内，接收到的平均功率几乎是固定的。这样，在一个毫秒或更少的时间间隔内，可以把天线接收到的噪声看作是平稳的，在这些时间间隔内，所接收到的噪声无论是幅度分布还是频谱密度，都与发射噪声相同（只差一个考虑衰减的系数）。但是在大约0.1秒的时间间隔内，天线接收到的噪声是不平稳的。

然而，问题并不如此简单。如果考虑天线背向发射机的那几秒钟，那么，在某些应用场合，可以认为发射机方向上的天线其波瓣图形（背瓣）在下列意义上是随机的：即如果没有测（很难测）过这些背瓣，那么它们事先是未知的，这是因为它们取决于天线和周围的环境，但是对处于这种环境下的天线，从统计的意义上讲，人们还是了解这些波瓣特性（幅度分布和频谱密度）的。因此，在这几秒钟之内，由于缺乏足够的知识，只能在计算时假定噪声是平稳的，但应同时考虑发射噪声和背瓣的幅度分布及频谱密度。

现在，如在1秒钟的时间内对接收噪声进行平均（即采用滤波的方法，使信号通过带宽只有几赫的极窄频带接收机来实现平均），所得的结果实际上就是一个周期为10秒的周期信号，它一点也不随机，这是很明显的。

经过这些（有用的）考虑后，下面几节将只讨论平稳随机函数，就是说，这些函数所有统计特性都与时间起点的变化无关<sup>⊖</sup>。

## 1.2 幅度分布的概念

### 1.2.1 概述

#### 1.2.1.1 考虑一个随机函数 $D(t)$ ：可以通过

---

⊖ 事实上，我们也作了各态历经的假设，即假设对随机函数的一个抽样所得的时间平均值与对从随机函数各种可能现实所得的时间平均值是相同的。

$$p(D_0)dD$$

来确定任意给定时刻包含在 $D_0$ 和 $D_0+dD$ 之间的 $D(t)$ 值概率。

$p(D)$ 是概率密度，它表征 $D$ 的幅度分布。

回顾一下有关 $p(D)$ 的某些数学特征是有益的。

1.2.1.2 首先，能用来发现计算错误的公式显然是：

$$\text{根据定义 } \int_{-\infty}^{+\infty} p(D)dD=1$$

1.2.1.3 为了便于计算起见，可以使每一个 $p(D)$ 分别对应于称为“特征函数”的函数 $\varphi(u)$ 。特征函数的特点是 $\varphi(-2\pi f)$ 为 $p(D)$ 的傅里叶变换。由此而得的一个结果是：两个独立变量之和的特征函数是每一个变量的特征函数之积。应当指出， $\varphi(u)$ 一般是没有简单的物理上的解释的。

1.2.1.4 将一阶、二阶矩等定义为 $D$ 、 $D^2$ 等的平均值，即

$$\text{一阶矩} = \int_{-\infty}^{+\infty} D p(D) dD,$$

$$\text{二阶矩} = \int_{-\infty}^{+\infty} D^2 p(D) dD \text{ 等。}$$

在一阶矩(平均值)为零的特殊情况下，二阶矩还称为“均方值”，其平方根为“有效值(英文是:r.m.s.root mean square)”。电子工作者习惯于把零平均值随机函数的二阶矩称为它的“功率”(即有效值的平方)。

最后，在平均值为零的高斯随机变量情况下，其均方值(功率)叫做“方差”，有效值叫做“标准差”。

1.2.1.5 不难证明，若用 $M_1, M_2, M_3, \dots$ 来表示阶数分别为1, 2, 3,  $\dots$ 的矩，则特征函数 $\varphi(u)$ 可写成

$$\varphi(u) = 1 + jM_1u + (j)^2M_2\frac{u^2}{2!} + (j)^3M_3\frac{u^3}{3!} + \dots$$