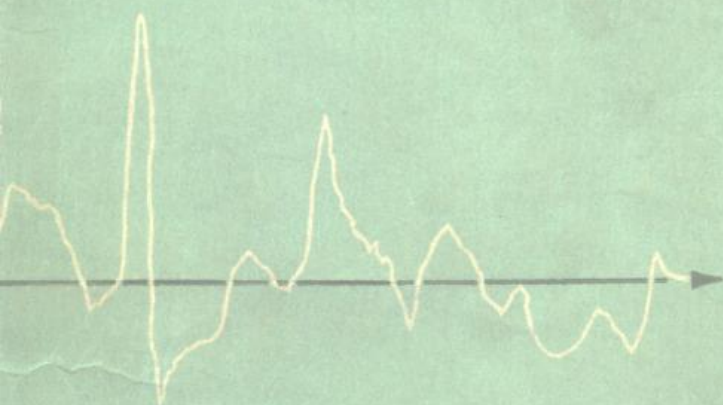


电噪声手册

〔美〕 查理·A·弗格斯

张 伦 李镇远 译



计 量 出 版 社

电 噪 声 手 册

(测试与技术)

〔美〕查理·A·弗格斯

张 伦 李镇远 译

蔡新泉 校

计 量 出 版 社

1982

内 容 提 要

本书简要地论述了有关电噪声及其测量的各个方面。其内容包括：噪声类型、表示电噪声的常用术语、热噪声、器件和网络中的噪声、通信系统中的噪声、噪声系数和噪声温度的定义和计算、噪声测量仪器和设备、噪声测量以及低噪声电路设计等。

本书内容通俗易懂，概念和计算叙述清楚。每章都有实例和习题，书末还附有实验。可供从事无线电测量工作的广大工人、科技人员和大专院校的无线电、通讯、自动控制等专业的师生参考。

Handbook of electrical noise

Charles A. Vergers

Copyright © 1979 by TAB BOOKS

Printed in the United States of America

电 噪 声 手 册

[美]查理·A·弗格斯

张 伦 李镇远 译

蔡 新 泉 校

—

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张 $7 \frac{3}{8}$

字数 165千字 印数 1—10 000

1982年 1 月第一版 1982年 1 月第一次印刷

统一书号 15210·95

定价 1.00 元

科技新书目：8—184

出版说明

电噪声测量是无线电测量的一个重要方面。电子器件、雷达、通讯、射电天文和电子对抗等技术领域都要涉及噪声特性这一共同的技术指标。尤其在所有接收放大设备中，噪声系数更是一个至关重要的指标。研制低噪声元、器件已成为发展国防和各种尖端科学技术的关键之一。因此，了解并掌握电噪声的来源和测量方法，是近代无线电电子学技术中的重要课题。然而，迄今为止国内有关电噪声测量的书籍还不多见，广大读者迫切要求我们提供有关读物。美国 Charles A. Vergers 著的《Handbook of Electrical Noise》一书，是论述这一专题比较浅显的入门书，具有教科书的特点。虽然，原书从论述和编排上有些不妥之处，但从其内容来看，对从事无线电测量的工人、科技人员以及高等院校有关专业的师生还是很有参考价值的。故将此书翻译出版。

本书由张伦、李镇远二同志翻译，蔡新泉校，出版前由我社编委席德熊同志（中国计量科学研究院无线电室）作了复校。



出版社编辑部

1981年3月

作 者 序

这是一本论述电噪声的入门书。由于我在马里兰州凯星顿城国会工学院任教时，手头上没有适用于噪声课程的满意的教材，故决定自己写一本书，想使其既适于作为大学电子工程技术课程的教学参考书，同时又是一本论述电噪声问题的一般性读物。

每章中所举的例题都有助于加深对所述内容的理解，各章的末尾附有小结和习题。

本书第一章对各种类型的噪声加以分类，并介绍在电噪声研究中使用的一些术语。此外，还介绍了为理解电噪声问题所必需的若干统计学用语。由此出发，进而讨论含有噪声的信号与系统。往后几章是论述热噪声、电子器件中的噪声以及较复杂网络的噪声计算。对噪声系数和等效噪声温度的论述安排在噪声测量仪器与设备的前面。专辟了一章介绍噪声测量、通信系统中的噪声以及低噪声电路设计。

书末附有七个实验，可以用最少量的电设备完成这些实验。书中还有许多用来说明内容的插图。

为理解起见，全书有必要进行最少量的计算。本书或许能对学习电子工程技术方面的同仁或学士学位课程的学生适用。我想对于那些对电子学有兴趣、同时因工作或是一般爱好而需要了解有关电噪声知识的人，本书也是一本实用的参考书。

查理·A·弗格斯

目 录

作者序

第一章 噪声的类型、术语及统计学用语	(1)
1-1 噪声的分类	(1)
1-2 有关噪声的术语	(9)
1-3 噪声的概率与统计学	(12)
1-4 小结	(16)
1-5 习题	(17)
第二章 有关噪声的基本信号与系统	(18)
2-1 信号的分类	(18)
2-2 信号的参量	(19)
2-3 系统	(33)
2-4 小结	(40)
2-5 习题	(41)
第三章 热噪声	(42)
3-1 电阻中的热噪声	(42)
3-2 热噪声与能量的关系	(46)
3-3 基本统计学知识	(48)
3-4 噪声计算	(49)
3-5 高频热噪声	(52)
3-6 小结	(52)
3-7 习题	(53)
第四章 电子器件中的噪声	(55)
4-1 散粒噪声	(55)
4-2 P-N 结中的散粒噪声	(63)
4-3 双极晶体管中的噪声	(66)

4-4	晶体管中的其它噪声形式	(68)
4-5	场效应晶体管中的噪声	(69)
4-6	真空管中的噪声	(70)
4-7	等效噪声电阻	(70)
4-8	信噪比	(75)
4-9	小结	(76)
4-10	习题	(77)
第五章 较复杂网络的噪声计算		(79)
5-1	白噪声通过一个理想的放大器	(79)
5-2	电感器和电容器产生噪声吗?	(80)
5-3	电感器与电容器在确定噪声过程中起什么作用? ...	(81)
5-4	并联调谐电路输出端的热噪声	(82)
5-5	等效噪声带宽	(84)
5-6	什么是等效噪声带宽?	(87)
5-7	小结	(93)
5-8	习题	(93)
第六章 噪声系数和噪声温度		(95)
6-1	噪声系数	(95)
6-2	并联电路的噪声系数	(100)
6-3	并、串联网路的噪声系数	(102)
6-4	一些实用电路的噪声系数的计算	(105)
6-5	等效噪声温度	(110)
6-6	等效噪声电阻与等效噪声温度之间的关系	(112)
6-7	等效噪声温度一词的定义	(115)
6-8	级联电路的等效噪声温度	(115)
6-9	两个并联电路的等效噪声温度	(116)
6-10	小结	(118)
6-11	习题	(119)
第七章 噪声测量仪器和设备		(121)
7-1	电压表	(121)
7-2	真有效值电压表	(124)

7-3	平均值电压表和真有效值电压表之间的比較	(125)
7-4	噪声发生器	(126)
7-5	频谱分析仪	(129)
7-6	小結	(134)
7-7	习题	(135)
第八章	噪声测量	(136)
8-1	等效噪声电阻的测量	(136)
8-2	等效噪声带宽的测量	(138)
8-3	信噪比	(141)
8-4	等效噪声电压的测量	(142)
8-5	噪声系数的测量	(143)
8-6	等效噪声温度	(147)
8-7	小結	(149)
8-8	习题	(150)
第九章	通信系统中的噪声	(151)
9-1	双边带全载波	(151)
9-2	双边带抑制载波	(157)
9-3	单边带	(160)
9-4	调频	(161)
9-5	小結	(165)
9-6	习题	(166)
第十章	低噪声电路设计	(167)
10-1	如何预测放大器的噪声?	(167)
10-2	电压放大器噪声系数的确定	(173)
10-3	共漏极电路的噪声系数	(176)
10-4	共栅极电路的噪声系数	(178)
10-5	共源极电压放大器噪声系数的最小化	(179)
10-6	双极晶体管电压放大器中噪声系数的最小化	(182)
10-7	集成电路中的噪声	(186)
10-8	运算放大器的噪声曲线图	(189)
10-9	在采用运算放大器的电路中降低噪声的方法	(190)

10-10	光纤通信系統	(203)
10-11	用于录音系統的噪声处理系統	(210)
10-12	小結	(211)
10-13	习题	(212)
第十一章	实验	(214)
11-1	音频放大器噪声和交流声的测量	(214)
11-2	利用齐納二极管的随机噪声发生器	(215)
11-3	集成电路噪声发生器	(217)
11-4	利用晶体管产生噪声	(218)
11-5	等效噪声帶寬	(219)
11-6	用光缆降低噪声	(222)
11-7	直流电动机的电噪声	(224)

第一章 噪声的类型、术语及 统计学用语

每一个在电子学领域工作的人，迟早都会熟悉一个问题，这就是电噪声。

噪声乃是这样一种信号：它干扰信号通过网络的传输，或使网络输出端所希望的信号失真。

根据电噪声的定义可以知道，噪声在性质上既可能是周期性的，也可能是非周期性的。但是，通常电噪声具有随机性，它是周期与非周期波形两者的复杂过程的综合表现。

考察噪声既可在电系统的外部，也可以在电系统的内部。雷雨造成的电干扰是产生于系统之外的噪声的一例；而电子电路中的电阻和有源器件所产生的噪声则是系统的内部噪声。

1-1 噪声的分类

可以将噪声分成多种不同的类别。这里采用三种主要的类别，即自然界噪声、人为噪声和电路噪声。自然界干扰可分为大气噪声和宇宙噪声两个方面。大气噪声或天电是由于闪电引起的放电和导致放电现象的其它自然界的电干扰所造成；宇宙噪声则来源于太阳和遥远的星体。

人为噪声是由发出电火花的机器或点火系统所造成的。

电路噪声来源于电阻、真空管和晶体管。这些元器件产生一种自发产生的起伏。造成这种起伏的原因是这些元器件

都有热效应和真空管与晶体管中所谓散粒效应的附加过程。
图 1-1 示出了一个噪声体系图。我们必须记住，现在讨论的是电噪声而不是声学噪声。

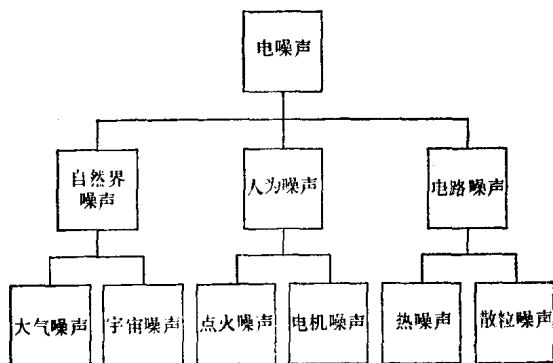


图 1-1 噪声体系图

现在让我们来稍微详细地讨论每类噪声，首先是自然界噪声。为此，必须了解一些静电学的知识。

1. 静电学

静电学研究的是静止电荷的问题。电荷的单位是库仑，一库仑是由 6.28×10^{18} 个电子所呈现出的电量。换句话说，若有 6,280,000,000,000,000 个电子聚集在某一点，其等效电荷即认为是一库仑。若缺少了这些电子，则认为电荷为正。这是因为电子是带负电荷的。因此我们可以说，过剩电子形成负电荷，缺少电子则形成正电荷。从已学过的物理学基础知识可知，同类电荷互相排斥，不同类电荷互相吸引。

当我们考察作用于电荷上的力时，就会发现：

(1) 力的大小取决于两电荷的乘积，且与此乘积成正比，

(2) 力与两电荷之间的距离的平方成反比。

上述事实已由库仑定律总结成公式的形式，如 (1.1) 式所示：

$$F = \frac{KQ_1Q_2}{D^2} \quad (1.1)$$

符号 F 表示电荷之间的作用力，单位是牛顿； Q_1 与 Q_2 是所考察的电荷； D 是电荷之间的距离，单位是米； K 是与电荷所在媒质有关的常数，其值约为 9×10^9 米·伏/库仑。图 1-2 具体说明了 (1.1) 式的使用。

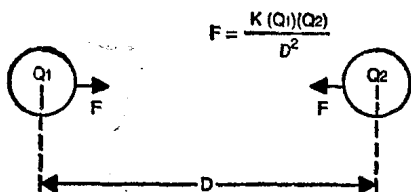


图 1-2 运用库仑定律的图解

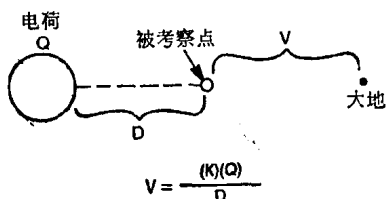


图 1-3 空间某点的电位差

现在来考察一个更有用的公式，它可以用来计算一个电荷附近的某点对地的电位差。参见图 1-3，可以看出，这一对地的电压取决于电荷到该点的距离、电荷的大小和一个比例常数 K 。

此公式是：

$$V = \frac{KQ}{D} \quad (1.2)$$

作为应用上述公式的实例，让我们做这样一个例题：某电荷的电量为 6 毫库仑，位于距空间中某点 9 厘米处。试计算该点对地的电压。

解：

$$\begin{aligned} V &= \frac{KQ}{D} = \frac{(9 \times 10^9) \text{ 米} \cdot \text{伏/库仑} \times (6 \times 10^{-3}) \text{ 库仑}}{9 \times 10^{-2} \text{ 米}} \\ &= 6 \times 10^8 \text{ 伏} \end{aligned}$$

在讨论雷雨产生的静电放电时，可以利用上述理论。在所有的静电放电中，最引人注目的是闪电放电。在雷雨天，强风把微小的水滴吹成各种大小的细滴。一种理论认为，较小的水滴将带负电，而较大的水滴带正电。带电区在云层中逐渐加大，当电位差足够高时，便产生放电现象。这种我们称为闪电的放电现象也可以发生在云层与大地之间。无论是哪种情况，闪电都会给无线电通信带来严重的干扰。为了说明这一点，让我们通过 (1.2) 式来推测闪电电压的大小。设想在暴风雨期间一团负电荷从高处进入云层，产生闪电的电压大小取决于积累的电荷量和被考察点到该电荷的距离。因为产生放电的点非常靠近这团电荷，距离 D 很小，因而电压极高。在某些情况下，此电压可达几亿伏。

自然界噪声这个论题对我们非常重要，因为它会对无线电与电视广播造成干扰。让我们略为详细地研究一下闪电的问题。

业已发现，地球相对于电离层的电位为负 300,000 伏。这是因为宇宙射线总是在给各大气层充电，结果电子不断从地面拉出陡直升至天空。雨云被卷入这个电通路时，如上所述，云中的水滴便带了电，冰晶也是这样。通常，云层的底部带负电，因为这里有吸引来的电子；而云层下面的大地相对于云层底部而言是正的。这样，当雨云移动时，地面的正电荷也跟着移动。随着时间的推移和暴风雨形成，云中的电荷不断增加，导致地面电荷也不断增加。

当地面电荷缓慢地移向高大物体，例如大树和教堂的塔尖时，由于我们在讨论库仑定律时所提到的力的作用，这些地面电荷即趋向飞上云端。地面电荷是正的，云中电荷是负的，异性电荷相吸，所以出现地面电荷会合云中电荷的倾向。

因为云层与地面之间的空气是电的不良导体，故地面电荷不易与云中电荷相会合。在地和云层之间必须存在一极大的电压，才有可能发生放电，这个电压也许高达1亿伏乃至更高。

为了理解实际的雷击情况，我们必须弄清造成发光雷击的一系列背景事实。首先，一连串所谓阶跃导电脉冲（step leaders）由云层冲向地面。这些导电脉冲是不发光的，且持续时间多达2微秒。直到这些导电脉冲通过空气建立起一条充分电离了的导电通道，它们才能到达地面。地面的电荷则向上运动去会合导电脉冲。当双方发生接触时，地面电荷便迅速进入云层，同时将周围的空气分子加热到白炽发光的程度。结果我们就看见了闪电。因为闪电的行程由大地直至云端，故它的可见部分称为“回程”（return stroke）。回程一般很复杂，可能由多个雷击组成，通常有四次雷击，总持续时间为0.2秒。已经知道闪电的作用距离可长达约20至100哩。最典型的闪电约有1哩长，其储能可相当于400马力。一天中所有落地的雷击的储能总量相当于1700万次雷击，每次4亿马力的能量。回程速度的典型值为60,000哩/秒（图1-4）。

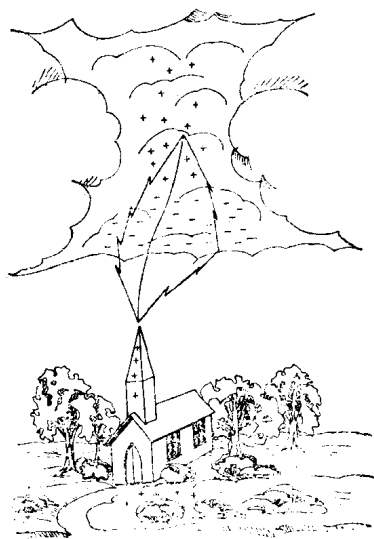


图 1-4 大地与云层之间
导电通道的建立

由于闪电通道中空

气爆炸造成的气压剧烈变化，便产生所谓音响噪声，即常说的打雷。而我们称之为闪电的巨大火花则产生另一类噪声，这就是电噪声。

如果画出一条导线上由闪电所引起的感应电压的变化过程，就可以说明闪电脉冲的电性质。在1.2微秒左右的时间内，闪电感应电压达到最大值，过了约48.8微秒之后，最大值下降50%，图1-5示出了这个变化过程。约150微秒后，脉冲下降到接近0伏。

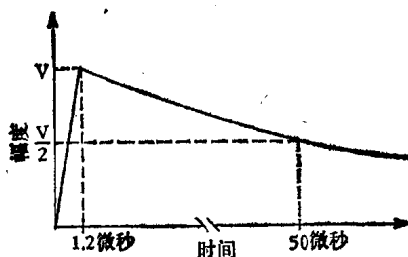


图 1-5 闪电在一条导线上所感应的电压变化过程

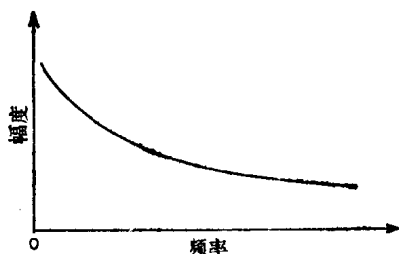


图 1-6 闪电所感应的电压的频谱情况

如果我们将这感应电压进行一下频谱分析，就会发现其频谱随频率变化缓慢下降，图1-6示出了对此频谱的很粗略的估计。

有人估计，地球上每一时刻约有2000次雷雨发生，于是收音机或电视机就会接收到这些雷雨造成的干扰。这是因为闪电脉冲的频率组成与收音机—电视发射频谱的频率组成有所重叠。显然，与地球上其它地方发生的雷雨相比

较，本地雷雨造成的干扰厉害得多，但次数较少。此外，在夜晚由远处雷雨造成的天电干扰更为严重。在30兆赫以上传输限于视力所及的范围，闪电引起的电噪声影响较小，所以闪电对电视的影响比收音机的小。

2. 宇宙噪声

这类自然干扰来自于太阳和遥远的星体。太阳有着恒定的辐射，同时日冕和黑子产生周期性的电扰动。这种周期是每十一年重复一次，并且看来每 100 年有一个强度增加的大周期。

遥远的星体产生噪声，有时将这类噪声称为黑体辐射或热噪声，因为它是由这些星体的高温所产生的。这种噪声在相当大的频谱范围内都是均匀的。

顺便指出，我们还从其它星系接收到噪声，从约 8 兆赫到 1.5 千兆赫都可以测量到宇宙噪声。天文学的一个分支射电天文学就是研究各种天体的电磁辐射的。许多天文学家已不再认为由这些天体接收到的信号是噪声了，因为这些信号给出了距地球许多光年的天体的信息。

3. 人为噪声

每当电机或点火系统产生一个火花或辐射某些不希望有的电波时，便造成了人为噪声。

例如，每当点火线圈与配电系统出现火花时，就可能产生严重的电磁辐射。老式的火花式发射机是一种极好的人为噪声源，它可产生丰富的噪声频谱。电动机与荧光灯亦是人为噪声源。实际上，开关接通或断开电路时，会产生火花，火花所具有的频谱会干扰无线电频谱。

除非用统计学的方法很难预测人为噪声。作为人为噪声的一个实例，让我们来考察一下马达的电噪声。电噪声有两类：起动型和运转型。

在起动型电噪声中，当马达接近其工作速度时，经常发生轰响，这是由马达的速度—转矩曲线的形状所决定的。当在破坏点以下是平滑的曲线时，只有很小的起动噪声；而当曲线起伏弯曲时，就会听见起动噪声，这种曲线见图 1-7。

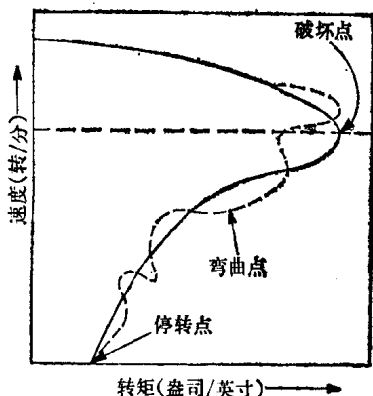


图 1-7 电动机的速度—转矩曲线

在某些应用中，并非不希望有起动型噪声，它可以作为一种信号，例如表明鼓风机已经起动正在排风。当这种噪声不受欢迎时应将其减至最小。

运转型噪声随马达的内部结构而变化。具有光滑转子外壳的磁滞马达属于噪声最小的马达之列。转子上带有突出电极的电感型与磁阻

型马达可能产生的噪声是转子一定子齿数比及输入激励频率的某次谐波。给马达以磁力的定子的过饱和，在马达平稳转动时也可能是一个噪声源。至于直流马达，若有断线擦碰整流子而发生换接接触时，就会产生火花，导致电噪声。

4. 电路噪声

这类噪声可能是由各种各样的过程产生的，而热效应和散粒效应是其中两个主要的过程。

热噪声与温度有关，热噪声功率的变化正比于带宽，这种噪声是电子的热骚动以随机方式在电阻材料中运动造成的。当电子运动时，即形成电流，并在电阻材料上建立起总压降。

散粒噪声是由于某些有源器件存在有直流电平的随机波动而造成的。在真空管中，当电子由阴极向阳极流动时，就有电流出现。这是因为电子带有电荷，且这些电子由阴极向阳极运动要用一定的时间。由于电流定义为单位时间的电荷