

# 微弱信号检测讲座

## 第一讲 微弱信号检测概论

陈 一 询

(中国科学院物理研究所)

实验物理学的发展,与其说先有原理,毋宁说是新的检测技术提供新数据,从而发现新现象,开辟新领域。科学史上许多事实说明,实验方法的建立对整个科学进展影响很大。

人类对自然的认识越来越深入,也就是说所检测的样品越来越小,浓度越来越低,激励越来越弱<sup>[1,2]</sup>。例如,半导体硅及陶瓷中杂质含量达 $10^{-9}$ — $10^{-12}$ g/g;表面1—10nm内存在 $10^{-10}$ — $10^{-13}$ g/cm<sup>2</sup>极微量物质的成分、元素分布、原子排列、化学结合等差异;弱至以一个个光子来计算的光流;比地磁场小10—11个数量级的脑诱发磁场及视网膜磁场,甚至比电磁辐射弱23个数量级的尚在探索的引力波等等。因此,微弱信号检测已成为从事实验科学的工作者必须掌握的知识。

微弱信号检测所涉及的内容应该包含两个方面,即根据什么样的原理和用什么样的方法将我们所需检测的有用信号检测出来;研究所检测到的信息与原始信息的“相似”程度。

在近代物理研究中常采用,各种高灵敏度的仪器,但是甚至是用最高灵敏度的仪器来进行我们所需要的测量,原则上讲也不是绝对精确的,它属于“极限”测量。如果被测的物理量可与其热的或量子的涨落相比拟,则应该指出由于热或量子噪声造成的随机测量误差。

经典领域中的情况不同于量子领域中的,但“量子限制”距我们可能做到的界限并不太远,例如对光电现象的研究,超高频或超低温现象的研究、激光器及光电倍增器的研究等,它们的量子特征是主要的,对于这些特征,人们已进行了许多工作。

量子测量与经典测量的原则区别在于,物理仪器对测量对象总是有一定影响的,在经典物理范围内,这种影响可以被考虑到并在测量时进行校正,但在量子领域中原则上是不可能的。这是由于经典的仪器和量子的对象间相互作用,不可避免地要歪曲原始的(被测的)波函数,这个波函数描述量子对象在确定时间间隔内某一参数的几率分布,所以被测对象行为的信息原则上不是原始的未被歪曲了的波函数的近似<sup>[3]</sup>因此,为了检测微弱信号,我们必需了解被测物理量、传感器以及电子仪器的噪声机理和信号特性。

通常,各种物理量大多数是通过传感器转换为电信号而进行检测的,所以传感器的固有噪声和将此电信号放大的放大器的噪声皆直接影响测量结果。它们使实验结果与理论计算值偏离。所以,实验工作者要研究和善于选择低噪声传感器件及放大器。

实际上存在着许多其他干扰,如市电电源频率及其谐波的干扰,汽车引爆、电弧、电火花产生的噪声,无线电台、电视台发射信号的干扰,光照的影响、气压的变化、宇宙线的辐射、结构振动、温度涨落、地线污染等环境噪声的影响。所以,被测信号常常是“埋”在形形色色的噪声中的,这些噪声的电平远远大于被测信号电平。

因此,从电子学的角度来看<sup>[4]</sup>,应设法提高电信号在检测仪器输出端的信号噪声比,这个电信号即为我们要测的物理量。到目前为止,从信号及噪声谱、噪声的基本概率论处理开始,至模拟信号处理及数字信号处理,国内外已做

了大量的工作。应该指出，人类或者动物的信息传递及信息处理是模拟和数字两者混用的。

自然界的噪声谱多数是随频率的增大而减小的，如  $\frac{1}{f}$  噪声即是。晶体管，场效应管的噪声在几十 kHz 以下皆以  $\frac{1}{f}$  噪声为主。图 1 表示微弱信号检测中各种噪声源的功率谱。如

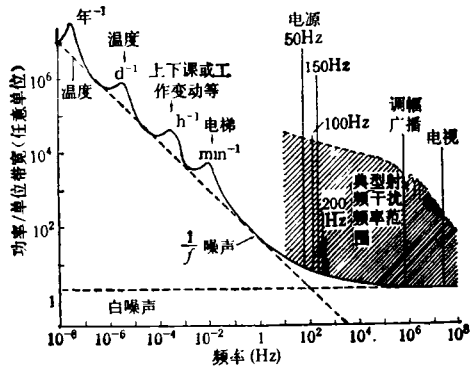


图 1 环境噪声

果信号功率谱的主要成分在低频段，则  $\frac{1}{f}$  噪声就显然至关重要了。常见的改善信噪比的办法是将信号变换到高频段，例如用各种调制、斩波办法，加选频放大以躲过  $\frac{1}{f}$  噪声。但是，这些方法有其局限性，例如仅仅利用了信号的频率特征，频带不能太窄，低频段存在的其他困难等等。所以，为了提高信噪比以检测出深埋在噪声中的有用信号，已发展出下列检测方法和仪器。

### 1. 相干检测<sup>[5]</sup>

根据周期信号与噪声自相关函数特性的不同，用相关器可在噪声干扰中检测出微弱的周期信号。这种检测方法，既利用了信号的频率特征，也利用了信号的相位特征，即利用与被测信号同步的参考信号来和被测信号进行相干检测，从而仅仅检测出与被测信号同频同相的信息，因此噪声大为减小。埋在比自己大百万倍噪声中的信号，已可用这种方法检测出来。用这种原理制成的放大器，称为锁相放大器。

### 2. 移动平均及数字滤波<sup>[6]</sup>

根据取样定理，若被测信号  $x(t)$  不含  $\omega_c$  以

上的频率，则用截止频率为  $\omega_c$  的低通滤波器通过取样信号，当其时间间隔为  $\pi/\omega_c$  时，可从取样信号中再现原信号的波形。取样时间间隔如较  $\pi/\omega_c$  短则更好。

对于任一伴随有噪声的重复信号，若在其观测期间对信号重复  $m$  次取样和积累，则信号得到增强，噪声被抑制，结果信噪比增大  $\sqrt{m}$  倍。

根据取样定理和  $\sqrt{m}$  法则，我们可将被测信号按时间坐标分为几个间隔，顺次进行重复取样和积累平均。取样间隔越小，信号再现越准确；平均次数越多，信噪比改善越大。此法称为移动平均。根据这种原理制成的平均器称为取样平均器。

若对信号进行取样，则可得到离散信号。取样间隔  $T$  确定之后，信号的有效带宽也就被限制在  $[-\frac{1}{2T}, \frac{1}{2T}]$  之内。设计频谱范围在

$[-\frac{1}{2T}, \frac{1}{2T}]$  之间的数字滤波器，可有效地滤除噪声频谱成分。当前，在数字技术和微计算机技术渗入的信号检测仪器里多采用数字滤波。

### 3. 概率密度函数测量<sup>[7]</sup>

以上所讨论的情况是信号幅值是确定的。对于信号本身按概率出现的情况（例如光子），必须采用另一种方法进行检测。如果被测光极微弱，例如  $10^{-14}W$ （~每秒一万个光子的光子流）以下的可见光，则入射到探测器上的这种光束可看作是一个个光子的光子流。这时，可利用限定能量的窗口来消除大于或小于被测光子脉冲能量的背景噪声，并通过计数方法测出单位时间入射光子的数量（即光强）。当然，这种方法也可测量其它弱的粒子（如电子、离子等）束。用这种方法制成的测量设备称为光子计数器。

### 4. 相关检测<sup>[8]</sup>

相关函数是用来测定两个信号在时域内的相似性的，在微弱信号检测中有其特殊意义。随着快速傅里叶变换 (FFT) 及其反变换 (IFFT) 的实现，相关仪的数字化有现实意义了。用这种方法实现的仪器称为相关仪。

## 5. 并行检测<sup>[9]</sup>

以上谈到的检测方法皆为单通道或双通道。为了提高效率,出现了并行检测方法。典型的仪器有光多道分析仪或称光学光谱仪或光多道光谱分析仪。它是综合了现代多道检测器工艺、球面全息光栅及微处理机的最新成就而产生的一种并行光检测的多道系统。用这种系统可同时采集和分析整个被测波长范围内光谱的数据,并可达到光子数量级的测量。

为了从众多的检测方法中找到适合需要的方法和仪器,可以根据所测信号的特征,对照图2所示各类仪器加以选择。在图2中的这些仪器都有各自的测量对象和不同的工作条件。例如取样平均器的测量对象是:(1)波形恢复(寿命研究),(2)脉冲强度研究(光谱学),(3)时间延迟测量(瞬态时间测量);锁相放大器的测量特点是:(1)信号可调制,(2)占空比接近50%,(3)信号频率在50MHz以下,(4)信号的相位信息是重要的,(5)不需要信号的波形信息;光子计数器的测量特点是:(1)信号极微弱,(2)只需要信号的幅度信息,(3)可测信号强度的范围较宽,(4)用光电倍增管或电子倍增管分别检测光子流或电子流信号。至于光多道分析仪,前面已经详述,图2中不再列出。

由此可见,微弱信号检测这门科学是利用电子学的、信息论的和物理学的手段,按照噪声产生与抑制,信号的特征以及信号的相关性来

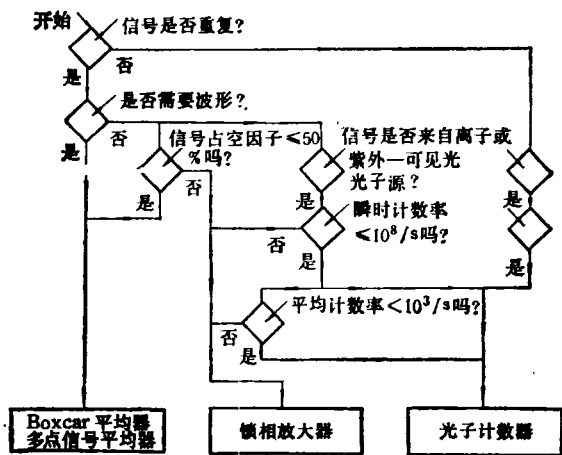


图2 微弱信号检测仪器的选择指南(不包括并行检测)

处理深埋在背景噪声中的极其微弱的有用信号的一门新兴的科学。

为使读者能够了解这一新学科,运用微弱信号检测技术解决面临的各种微弱物理量的检测问题,我们组织了这个专题讲座,邀请有关专家撰写下列专题在本刊连载。希望读者能够从这些专题中对微弱信号检测得到一个较完整的概念,有助于自己的工作。

1.《微弱信号检测概论》 给出微弱信号检测的意义,内容及其定义。

2.《噪声及其设计》 讨论噪声的特点和减少检测系统中噪声的方法。

3.《相干检测》 1946年 Dicke 指出,利用相敏检波器可以进行相干检测,此后发展出锁相放大器。这种仪器已和示波器一样在实验室中得到广泛使用。该文将给出相干检测的原理、锁相放大器特性及使用中的注意事项。

4.《取样积分及数字平均》 1962年 Klein 和 Barton 实现了取样积分器后,信号平均技术得到了实用化。该文将给出取样积分和数字平均的原理、构成仪器的特性及应用中的有关问题。

磁场参数、磁体特性、感应和磁滞现象以及复杂磁路中磁场形状的研究都离不开磁测量。本文将针对弱磁测量中有关检测元件、检测方法 & 处理等问题予以简述。

5.《弱光测量》 物理、化学、生物、医学、天文、地质等几乎所有自然科学领域都离不开弱光的测量。该文将分二部分来讨论,即光子计数和光多道分析,在讨论中还将阐明弱光测量的特点以及与有关测量方法的比较。

## 6.《低温技术在微弱信号检测中的应用》

在微弱信号检测中应用低温技术有许多优越性。首先在于热噪声与温度成正比,故低温条件下可得到极低的热噪声。利用超导体的逆磁性或磁通量子化效应作电磁屏蔽以致绝对屏蔽,高灵敏度检测器件——超导量子干涉器件又是极限测量中的佼佼者。该文将帮助读者了解到低温技术在微弱信号检测中的重要作用以

(下转第 510 页)