

浅谈仪器的噪音干扰问题

蔡嘉坤

(中国科学院上海生物化学研究所)

与其他许多学科一样,当今的生物物理,生物化学工作者愈来愈多地依赖科学测量仪器去获得各种各样的实验数据,而且科学家们还常常设想甚至亲自动手装置新式科学仪器来满足他们的特殊需要。在上述一切活动中常常会遇到这种情况:仪器不稳定。但是,为什么不“稳定”?怎样去克服,改进?许多人对此知之甚少。在这里谈谈这方面的问题和一些感受,再粗浅地介绍一些有关技术的进展情况。

假如我们仅仅考虑被测的量是由适当的换能器(Transducer)变换成电讯号而用电子设备进行测量显示,那末,在这种情况下,“仪器不稳定”这样一个习惯说法往往可以归结为噪音干扰问题,因此如何克服这种“不稳定”也就是一个尽可能地抑制噪声、提高信噪比(S/N)的问题。要完全避免噪声干扰是不可能的。从理论上去探讨和推导容易使初学者有不得要领之感,在这里将只给出一些诸如“切不可将电流表直接接到电池两端来测量电流”这样的忠告。

一、噪声的几个来源

产生噪声的根本原因大致有二:与温度有关的质粒布朗运动以及光、电荷量的量子特性。例如,用玻璃电极测定溶液 pH 时

$$\left(E_H = 2.303 \frac{RT}{nF} [\text{pH}] + K \right)$$

电极尺寸愈小、氢离子浓度愈小,电极电位的起伏就愈大,这是由于布朗运动使出现在电极活性区的离子浓度起伏较大,在测定微弱光时,光电器件(例如光电倍增管)所测得的光电流起伏颇大,而且被测光越弱这种现象越明显,其中光量子的不连续性是起决定作用的因素之一。

从电子学的角度来看,根据噪声的性质可分成电阻噪声、散粒噪声、闪变效应噪声等。电阻噪声(Johnson 噪声),产生于电阻器内质粒的布朗运动,散粒噪声(Shot noise)是由于电子管阴极或晶体管 PN 结的带电粒子无规则发散。这两种噪声较平坦地分布在很宽的频带范围,所以往往看成是“白噪声”(White noise)。所有的电子器件除了上述两种噪声外还具有闪变效应(Flicker-effect)噪声,但其生成机理现在尚不十分清楚。有人用下面这种形象化的比喻来描述这种噪声:把一个电子器件看成是由许许多多的开关将电阻器无规则地组合联接起来,而这许许多多的开关按照某种统计分布无规则地开和关。对于许多电子管和晶体管来说,这种噪声的大小正比于 $1/f^n$ [f 为频率]而且 $n \approx 1$,所以有时称这种噪声为 $1/f$ 噪声。

周围环境,如温度变化,50 赫市电、地磁场及用电器的杂散磁场、开关或马达的电火花、无线电台或电视台的信号、建筑物的震动等等因素都有可能闯入你的测量仪器而引起噪声。所有这些环境因素引起的噪声的总和也具有近似的 $1/f$ 噪声的性质。

二、抑制噪声的方法

我们简要地罗列了各种噪声及其性质,使讨论抑制噪声的方法有了一定的基础。对仪器测量来说,抑制噪声就是在设法提高有用信号的同时尽可能压低噪声,使信噪比(S/N)提高。因为噪声干扰具有无规则的特点,所以进行多次测量平均可以改善 S/N,如果对信号进行 n 次测量平均,则 S/N 可得到 $1/\sqrt{n}$ 倍的改善。装备有计算机的仪器进行这种多次测量平均具

有得天独厚的优越性。要根本消除器件的“白噪声”是不可能的(除非是绝对零度),但是器件的质量情况却与噪声有相当的关系,例如炭质电阻与线绕电阻相比有大得多的 Johnson 噪声,因此,如果你打算动手制作仪器设备,应该注意选择元器件的质量,有些元器件在手册中给出其 N_F^* 值,这是判别元件噪声性能的主要根据。器件的白噪声电流正比于绝对温度 T ,所以有些时候用降低器件的环境温度来降低噪声,例如,有些光谱仪器中将光电倍增管置于零下几十度的环境中。另一方面,因为白噪声平坦地分布在所有的频率范围内,所以“任何时候都不要将仪器设计成(或使用在)超出你传输数据所需要的频率范围”!许多仪器面板上的“时间常数(或“响应速度”)旋钮在使用时就是要根据这一原则来选择,当需要观察记录较快速度的变化时(如较快的反应速度测量)应该使用较快的响应速度,即使此时记录的结果噪声较大,也必须如此,而观察记录变化速度不大的信号时才可以考虑使用较慢的响应速度来改善记录结果的 S/N 。

$1/f$ 噪声对于测量仪器的影响和干扰是最讨厌的问题之一。因为愈接近零频(直流)它就愈显著而且愈是无法用简单的办法克服,反映到仪表上就是指示数据的上下起伏(有时周期很长)和漂移。用直流放大器直接放大被测信号的测量方法根本不可能克服这种长周期起伏或漂移的 $1/f$ 噪声影响。所以我们应该记住这样一个原则:从改善 S/N 的角度上考虑,应尽可能避免直接采用直流测量技术。

一般情况下,环境噪声的影响主要是电网干扰。工频电源(50 赫)及其谐波很容易串到测量系统中来,有时可达几百毫伏到几伏的干扰电平使你的测量根本无法进行。在设置实验装置或动手制作仪器时,应特别注意屏蔽与接地等问题,以便尽量减少电网干扰。但是,不适当的接地有时可使测量信号面目皆非,已有不少专著^[1-5]讨论这个问题,有兴趣者当然可以从获取教益。不过,有一个原则应该记住:如果接地回路是干扰的主要问题,则应考虑采用

差分测量方法。共模抑制比(CMRR)是衡量差分系统抑制共模干扰能力的指标。

三、提高 S/N 的一些进展

既然所有的噪声都有其频率特性,那末,是不是可以把欲测量的信号安排在某一个很窄的频带范围内来减少绝大部分噪声的干扰呢?回答是肯定的。这个道理很简单,举例来说,当你将收音机或电视机调谐在你所选择的节目时,世界上许许多多其他电台或电视台(当然大部分传输不到)的信号对你来说都可以被看成是噪音,但此时你竟不觉得有这许许多多“噪音”存在。设法将被测信号调制在某一频率,用选频放大器专门放大这个频率的信号而抑制其他噪声,最后将该交流信号整流后,经低通滤波器恢复成直流电平再输出,这是六十年代前较普遍采用的方法。可惜选频放大器的通频带很不容易稳定,所以不可能把通频带做得很窄从而限制了抑制噪声的能力。六十年代从相关技术发展起来并开始逐步采用的锁相(Lock-in)方法较选频放大优越得多,有人称它为相敏检测(Phase sensitive detector),它除了将信号调制在某一频率外,还以一个与该频率相关的方波脉冲(一般是同步的相同频率)与信号相乘使被测信号恢复成直流,在输出前用极其简单的低通滤波器将系统的通频带压缩得非常小(例如 Δf 为几个赫芝或更小),从而能极其有效地抑制噪声,提高信噪比。这种方式是由光学分析仪器的研制而发展起来的,我们在实践中也体会到这一优点,此外它还具有固有线性好的特点,值得注意的是选择调制频率时应注意避开电网工频及其谐波频率。

由于研究工作的深入,要处理的信号可能非常微弱而噪声成分反而大于有效信号,通常我们称这种情况是信号湮没在噪声之中,如何有效地提取这种信号一直是电子学和仪器学的重大课题之一。除了上述提到的一些改善信噪

$$* N_F = 10 \log \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o}$$

式中: S_i/N_i 为输入端信号与噪声功率之比
 S_o/N_o 为输出端信号与噪声功率之比

比的方法外,近年来还发展了取样积分法(Bo-xcar),相关函数法,光子计数法等许多技术,本文不可能涉及如此广泛的范围,生物物理与生物化学工作者应经常注意这方面的进展,不断用新的技术进展来丰富和发展他所从事的领域的科学研究。

参 考 文 献

[1] Thomas, Coor.: *J. Chem. Education* 45, 7, 8,

1968.

[2] P. C. G. Danby: *Electronic Engineering* 42, 503, 1970.

[3] Ralph, Morrison: *DC Amplifies in Instrumentation* Wiley-Interscience 1970.

[4] Henry, W. Ott.: *Noise Reduction Technique in Electronic Systems*, Wiley-Interscience, 1976.

[5] 中国科学院微弱信号检测协作组《微弱信号检测动态》1980年、1981年。

[本文于1981年8月26日收到]

科技消息

揭开大脑秘密的人——介绍三位诺贝尔奖金获得者

1981九月,瑞典皇家科学院宣布,这一年的诺贝尔医学奖金授予 Sperry (斯皮利) Hubel (休伯尔) 和 Wiesel (威赛尔) 三人,以表彰他们在脑研究中所作出的杰出贡献。

Roger sperry, 美国人, 1913年生。1941年在芝加哥大学得博士学位。1954年起任加州工学院心理生物学教授至今。40年代,人们认为脑细胞是杂乱无章地连接在一起的,只是由于感觉的不断重复,才形成一定功能。Sperry用蟾蜍、蝶螈一类视神经切断后可以再生的动物作实验,发现不论设置什么障碍再生的神经总能找到它们原来的位置。Sperry最重要的贡献是在大脑两半球功能特化方面的研究。对临床切断大脑两半球之间的纤维联系(即胼胝体)的病人(劈脑病人)进行了大量观察和实验,证明:用右手工作的人,其左侧大脑半球和语言、计算及分析能力有关,右侧半球则和情绪、空间关系及对艺术品和音乐的欣赏能力有关。他的工作使人们对大脑的认识大大前进了一步。

David Hubel 1962年生于加拿大,就读于麦吉尔大学。1961年获哈佛大学医学博士。1965—1967年任哈佛医学院神经生理学教授。

Torsten Wiesel 瑞典人, 1924年生。1954年获医学博士学位。1968年任哈佛医学院神经生物学教授。

Hubel 和 Wiesel 从50年代后期开始合作进行视觉系统的研究,主要用猫和猴作实验。他们的成就主要有三个方面。第一,用微电报记录研究了从视网膜到大脑皮层的各级神经细胞对视觉刺激的反应。每个视觉细胞都对应着一小片视网膜,只有光刺激落在此区域内,才能引起有关细胞的反应。这个小区域就称为那一细胞的感受野。Hubel 和 Wiesel 证明大脑皮层的视觉初级接受区细胞的感受野与视网膜神经节细胞和外侧膝状体细胞的感受野不同。它们的组成不是同心圆对称式的。他们大多数对视觉刺激(边,条形等)的取向有一定的要求。按照感受野的空间组织可以把这些细胞分为简单型、复杂型和超复杂型三类。外膝体

细胞,简单型细胞、复杂型细胞和超复杂型细胞形成等级式的串联结构;视觉信息就是在这样的通路中逐级传递和加工的。第二,也是最主要的成就是对大脑皮层功能组织的研究。根据电生理实验,他们提出皮层是由一些互相重叠而又各自独立的垂直于皮层表面的柱状系统组成的。生理实验发现的两种系统已经得到了神经解剖学方法的证实。一种叫“眼优势柱系统”,每个垂直柱内的细胞全部对同一只眼的光刺激有最强的反应。邻近柱内的细胞对眼的选择随柱距离的增加而越来越弱,对另一只眼的选择却越来越强,直到仅仅对另一只眼的刺激起反应。另一种即所谓刺激图形在空间的“取向柱系统”。每个柱内所有细胞都要求刺激在空间上有同一取向,邻近的柱则要求另外的取向。皮层上无数这样柱的镶嵌式排列,包括了对各种取向的刺激的要求。这两种功能柱的存在预示着皮层上也可能还有其他一系列对刺激特征有特定要求的功能柱系统。第三,发现脑内所有的“线路”在出生时就已经连接完毕,只是在出生后一段时间内(关键期)这些联系还不那么精确、那么牢固,很容易受到不正常环境的影响,造成异常视觉。这一发现对于婴儿和儿童的护理是非常重要的。

Hubel 和 Wiesel 从50年代后期就一起工作,历时几十年,为人们树立了坚持合作研究取得成就的典范。尽管性格不同,这三位科学家都对自己的工作充满乐趣,勇于提出新的论点,探索新的课题,严格、谨慎地积累资料,数十年如一日。Hubel 曾在一篇文章中写道:“在神经生物学中可能永远也不会出现哥白尼或达尔文式的革命,至少不会有那种爆发的形式。如果有革命,它可能是一种渐进的……”。三位科学家的工作证明这些话是正确的。Hubel 的这些话也鼓舞和提醒着有志于脑研究的青年和中年科学工作者,通过长期不懈的努力,为揭开大脑的秘密作出自己的贡献。

刁云程(生物物理研究所)