

微弱信号检测

陈佳圭 编著

1.71

中央广播电视大学出版社

微弱信号检测

陈佳圭 编著

微弱信号检测

陈佳圭 编著

*

中央广播电视大学出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京师范大学印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 16.5 千字 379
1987年7月第1版 1987年10月第1次印刷
印数 1—6,000

定价 2.90元

ISBN 7-304-00155-0/TN·1

前 言

将淹没在强背景噪声下的微弱信号,通过新的检测手段,抑制噪声,获得信号的恢复,是本书要阐述的内容。微弱信号检测是一门新兴的分支技术学科,在各个领域中得到广泛的应用,成为新技术中引人关注的一个方面。当读者读完第一章以后,对它的意义、进展及应用前景便有了基本的了解,也就明白为什么目前国内外已将此作为知识更新与科技人员基本素质训练内容的理由。

作者由于科研工作的需要,自1972年以来,与同事们根据国际上的发展,开展了这方面的研究。并与EG&G PARC合作成立了中美联合微弱信号检测实验室,因此多少积累了一些资料与工作经验和心得。近十年来,也为国内一些高等院校与研究生院以及历次学习班比较系统地介绍过这门学科。虽然不少同志建议整理成文,但因为工作繁忙与其他因素而未能如愿。

1986年中央电视大学、中国科学院和国家科委举办继续教育卫星节目,作者应邀作了20小时的讲座。播出以后收到不少询问教材的来信,这些热情观众的来信,使我很高兴,也为未能及时提供参考物而内疚。因此在中央电大的要求与出版社的鼓励下,决心动笔撰写,历时数月,断续成文,甚为仓促。脱稿以后又有录相时那种遗憾的感觉,总觉得还应补充些新材料,文字上还需斟酌润色。但是,铅槩已定,只好有待读者指正了。

有关微弱信号检测的系统的出版物,国内外只有相干检测方面的,其他均散于文献之中,完整系统的书还未得见,因此编写本书是一种赏试,作为引玉之砖。相信随着学科的发展和时间的推移,将会有更成熟的出版物与读者见面的。

本书内容较多,着重于技术应用,适应于有一定实践经验和基础的读者。为此,在文字上相对省些笔墨,期望能节省一些读者宝贵的时间。是否能达到预期效果,请读者评价。

作者热忱地希望非电子技术专业的科技工作者、大专院校师生与研究生能阅读拙作,藉以了解这方面的新知识并加以实际应用,在工作中取得更大成绩。读者如在微弱信号检测中遇到困难和问题,作者非常乐意本着共同提高的目的,予以回答、协助和讨论。

本书撰写过程中,得到很多同志的帮助,并引用了他们的工作与资料,为此深表谢意。

中国科学院物理研究所 研究员

陈 佳 圭

于北京 1987年5月

目 录

| | |
|------------------------------------|-------|
| 第一章 绪论 | (1) |
| § 1-1 微弱信号检测的目的和意义..... | (1) |
| § 1-2 噪声和传感器..... | (2) |
| § 1-3 微弱信号检测的应用成效..... | (7) |
| § 1-4 微弱信号检测的基本方法..... | (12) |
| § 1-5 计算机处理方法..... | (15) |
| § 1-6 小结..... | (16) |
| 参考文献..... | (18) |
| 第二章 噪声、低噪声前置放大和屏蔽接地技术 | (20) |
| § 2-1 随机过程的概率分布..... | (20) |
| § 2-2 电子噪声..... | (24) |
| § 2-3 低噪声前置放大器的噪声和噪声因子..... | (30) |
| § 2-4 利用变压器改善信噪比..... | (37) |
| § 2-5 NF 图的进一步讨论..... | (41) |
| § 2-6 低噪声前置放大器的结构..... | (46) |
| § 2-7 屏蔽与接地..... | (49) |
| 参考文献..... | (58) |
| 第三章 频域信号的相干检测 | (59) |
| § 3-1 概述..... | (59) |
| § 3-2 相敏检波的原理和基本特性..... | (61) |
| § 3-3 相敏检波器的具体电路..... | (66) |
| § 3-4 锁相放大器..... | (71) |
| § 3-5 动态范围..... | (79) |
| § 3-6 谐波响应与 PCM 技术..... | (84) |
| § 3-7 同步频率选择和调零扩展..... | (89) |
| § 3-8 滤波器..... | (92) |
| § 3-9 移相电路..... | (96) |
| § 3-10 旋转电容滤波 LIA..... | (99) |
| § 3-11 同步外差 LIA..... | (105) |
| § 3-12 数字相敏检测..... | (108) |
| § 3-13 LIA 的应用..... | (115) |
| 参考文献..... | (125) |
| 第四章 时域信号的积累平均 | (127) |
| § 4-1 概述..... | (127) |
| § 4-2 BOXCAR 积分器..... | (130) |

| | | |
|------------|-----------------------------|--------------|
| § 4-3 | BOXCAR 积分器 SINR 的数学分析 | (137) |
| § 4-4 | BOXCAR 积分器的参数图解 | (141) |
| § 4-5 | 基线取样与双通道快速 BOXCAR 系统 | (146) |
| § 4-6 | BOXCAR 积分器的结构与性能 | (150) |
| § 4-7 | 数字平均的特点和原理 | (152) |
| § 4-8 | 数字多点平均器 | (163) |
| § 4-9 | 多点平均的发展 | (168) |
| § 4-10 | 时域平均的应用 | (173) |
| | 参考文献 | (177) |
| 第五章 | 离散信号的计数技术 | (180) |
| § 5-1 | 低功率辐射的特殊测量问题 | (180) |
| § 5-2 | PMT 的特性、噪声和光子发射的概率分布 | (184) |
| § 5-3 | 用作光子计数的 PMT 的特点与要求 | (192) |
| § 5-4 | 光子计数器 | (199) |
| § 5-5 | 光子计数器的实际结构与应用 | (207) |
| | 参考文献 | (216) |
| 第六章 | 并行检测 | (218) |
| § 6-1 | 概述 | (218) |
| § 6-2 | 光电器件和硅靶摄像管 | (221) |
| § 6-3 | 光二极管阵列 | (228) |
| § 6-4 | 光多道(OMA)系统 | (239) |
| § 6-5 | OMA 的应用 | (247) |
| | 参考文献 | (257) |

第一章 绪 论

§ 1-1 微弱信号检测的目的和意义

当今科学技术的进步,使测量技术得到日臻完善的发展,但同时也提出了更高的要求。尤其是一些尖端条件下的测量已成为深化认识自然的重要手段,例如对物质的微观结构与弱相互作用等所获得的极为微弱量的检测,无疑是当今科学技术的前沿课题。

测量技术的发展,始终是围绕着两个问题逐渐解决和提高的,即所谓速度和精度。测量精度意味着检测灵敏度的提高和动态范围的扩大,即能容纳更多的噪声和从噪声中提取信号能力的提高;而测量的速度表示快速的瞬变响应和处理的能力。

微弱信号检测(Weak Signal Detection)则是测量技术中的综合技术和尖端领域,由于它能测量传统观念认为不能测到的微弱量,所以才获得迅速的发展和普遍的重视。

对于众多的微弱量(如弱光、小位移、微振动、微温差、小电容、弱磁、弱声、微电导、微电流、低电平电压及弱流量等等),一般都通过各种传感器作非电量转换,使检测对象转变成电量(电压或电流)。但当检测量甚为微弱时,弱检测量本身的涨落以及所用传感器的本底与测量仪表的噪声影响,表现出来的总效果是,有用的被测信号被大量的噪声和干扰所淹没,使测量受到每一发展阶段的绝对限制。

自从1928年约翰逊(Johnson)对热骚动电子运动产生的噪声进行研究以来,大量科学工作者对信号的检测作出了重要贡献。尤其是近三十年来,更加取得了突飞猛进的发展,测量的极限不断低于噪声的量级。例如1962年美国PARC第一台相干检测的锁相放大器问世,使检测的信噪比突然提高到 10^3 ;1968年从大量二次电子的背景中测得Auger电子;到八十年代初,在特定的条件下可使 $<1\text{nV}$ 的信号获得满度输出(使信号的放大量接近200dB),信噪比提高到 10^6 。粗略估计,即平均每5~6年测量极限提高一个数量级。因此,过去视为不可测量的微观现象或弱相互作用所体现的弱信号,现在已成为可能,这就大大地推动了物理学、化学、电化学、天文学、生物学、医学以及广泛的工程技术领域等学科的发展,微弱信号检测技术,也就成为一门被人重视的、新兴的分支技术学科。

微弱信号检测的目的乃是利用电子学的、信息论的和物理学的方法,分析噪声产生的原因和规律,研究被测信号的特点和相干性,检测被背景噪声覆盖的弱信号。它的任务是发展微弱信号检测的理论,探索新的方法和原理,研制新的检测设备以及在各学科领域中的推广应用。

微弱信号检测在某种意义上说,是一种专门与噪声作斗争的技术:只有抑制噪声,才能取出信号。噪声对于弱检测几乎是无处不在,无地没有,它总是与信号共存,因此有人将噪声比作“魔

鬼”那样的令人讨厌。

微弱信号检测技术进步的标志是检测灵敏度的提高。更确切地说，应是信噪比改善(SNIR)。它的定义为

$$\text{SNIR} = \frac{(S/N)_{\text{out}}}{(S/N)_{\text{in}}} \quad (1-1-1)$$

是输出信噪比 $(S/N)_{\text{out}}$ 与输入信噪比 $(S/N)_{\text{in}}$ 之比。例如输入端的噪声比信号大 100 倍，而通过微弱信号检测的手段得到信号比噪声大 2 倍，则 $\text{SNIR} = 200$ 。SNIR 越大，表示处理噪声的能力越强，检测的水平越高。

例如在光谱测量中，信噪比 S/N 为

$$\frac{S}{N} \propto (\Delta\nu)^2 \tau^{1/2} \quad (1-1-2)$$

$\Delta\nu$ 是与狭缝有关的分辨率， τ 为响应时间。同时还有关系

$$R \propto \Delta\nu \tau^{-1/2} \quad (1-1-3)$$

R 是光谱的扫描速度。因此有

$$\left(\frac{S}{N}\right)^2 \propto \Delta\nu^5 / R = \text{常数} \quad (1-1-4)$$

式 1-1-4 表示当 $\Delta\nu$ 与 R 一经确定， S/N 亦为一常数。如果分辨率要求高，或光谱扫描速度要求快，则信噪比必然降低。另一方面，如果我们利用微弱信号检测技术，或者将传感器降温到液 He 温度 (4.2K)，而使 S/N 提高 20 倍。这时，若要求测量的 S/N 不变，却可使光谱扫描速度 R 提高 400 倍，或分辨率 $\Delta\nu$ 提高 3.3 倍。

表 1-1-1 列出若干物理量或化学量利用常规测量方法与微弱信号检测技术的最高灵敏度对照，从表内数值可看出采用微弱信号检测技术以后，灵敏度大为提高：常规检测的 $\text{SNIR}_{\text{max}} = 10$ ，通过弱检测可达 $\text{SNIR} = 10^4 \sim 10^5$ ，至少可提高 $10^3 \sim 10^4$ 的水平。这是一般测量所望尘莫及的。

表 1-1-1 微弱信号检测灵敏度提高的比较

| | 电压 | 电流 | 温度 | 电容 | 微量分析 | 噪声抑制 |
|------|-----------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|
| 常规检测 | 1 μ V | 0.1nA | >0.1mK | 0.1pF | 10 ⁻⁵ 克分子 | SNIR = 10 |
| 弱检技术 | 0.1nV | 10 ⁻¹⁴ A | 5 \times 10 ⁻⁷ K | 10 ⁻⁵ pF | 10 ⁻⁸ 克分子 | SNIR = 10 ⁵ |
| 提 高 | 10 ⁴ | 10 ⁴ | 10 ³ | 10 ⁴ | 10 ³ | 10 ⁴ |

§ 1-2 噪声和传感器

一、噪声与干扰

噪声的定义是有害信号。它普遍存在于测量系统之中，因而妨碍了有用信号的检测，成为限制测量信号的主要因素。

除噪声外,实际上还存在干扰,它与噪声有本质的区别。噪声由一系列随机电压组成,其频率和相位都是彼此不相关的,而且连续不断;而干扰通常都有外界的干扰源,是周期的或瞬时的、有规律的。例如冲击电压、电或磁的干扰等。

无论是噪声还是干扰,它们都是有害信号,有时为方便计,统称噪声。图 1-2-1 表示了测量中的电子噪声的来源与分类情况,其中自然噪声来自宇宙辐射、大气以及背景噪声等,不过它们所产生的干扰频率都很高。如银河系的辐射频率大于 1GHz,水蒸气、雪等频率为 20GHz 以上的散射,大气层中的氧分子吸收所产生的频率为 60GHz 以上的散射等。这些自然噪声由于谱密度较低以及频率远高于检测系统的工作频率范围,基本上可以忽略。但对于宇宙辐射中的高能粒子或射线,若在传感器上产生与信号相同效果时,则需认真对待,以免乱真。

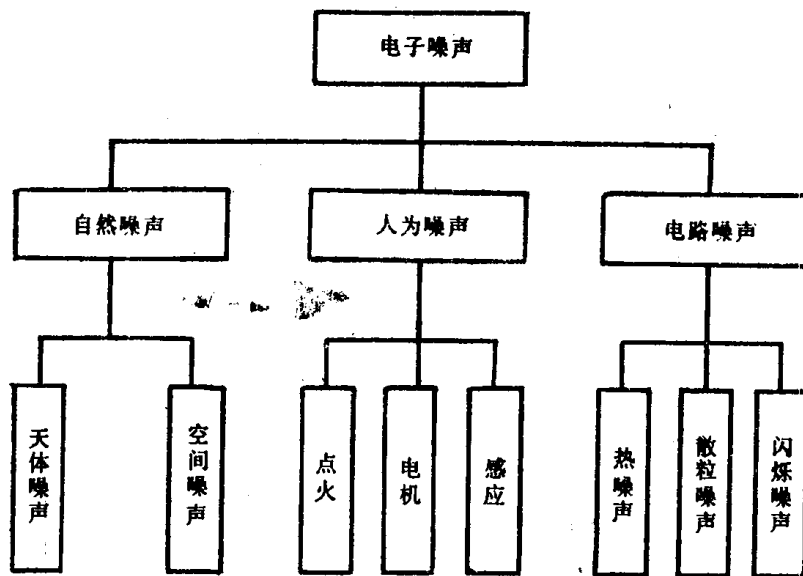


图 1-2-1 电子噪声

人为噪声则来自周围环境的用电系统和电器设备,它们都是外界的干扰源,表 1-2-1 作了比较详细的说明。这些干扰源通过辐射,感应和耦合到被测系统,使被测系统的噪声增大。这些干扰是可以通过噪声(干扰)抑制器、电源净化器,改善设计、布线工艺,改善地回路以及屏蔽方式加以抑制和消除。

表 1-2-1 人为噪声(干扰)源

| | | |
|----------|-----|--|
| 人为噪声(干扰) | 感应 | —电磁——变压器、马达、继电器、供电电源 —开关——闸流管、继电器驱动、电火花 |
| | 非感应 | —电磁波辐射 —接地与地回路 —接触噪声 —绝缘恶化 —温度 |
| | 其他 | —振动、开关换档 —电源开关的过渡噪声 |
| | | |

第三类电路噪声,才是真正的噪声而非干扰,它普遍地存在于电路及检测系统之中,这部分

噪声的讨论将在第二章中加以阐述。

二、电源和环境干扰

交流市电电源是我们工作中不可缺少的能源,给我们带来极大的方便,但在测量中,尤其在弱检测时,电源的干扰必须引起足够的重视。

图 1-2-2 说明了一般供电情况下的干扰问题:从发电厂将电源输送到用户时,在长途输送过程中引入诸如雷电、电台、高压汞灯等的干扰,更重要的干扰源乃是其他用户的各种电器设备,因此在你实验室的配电盘上存在常模干扰。同时,实验室其他电器的用电以及供电线路的电阻感应的常模和共模干扰,造成大量干扰,以致使设备(计算机)或测量不能正常工作。

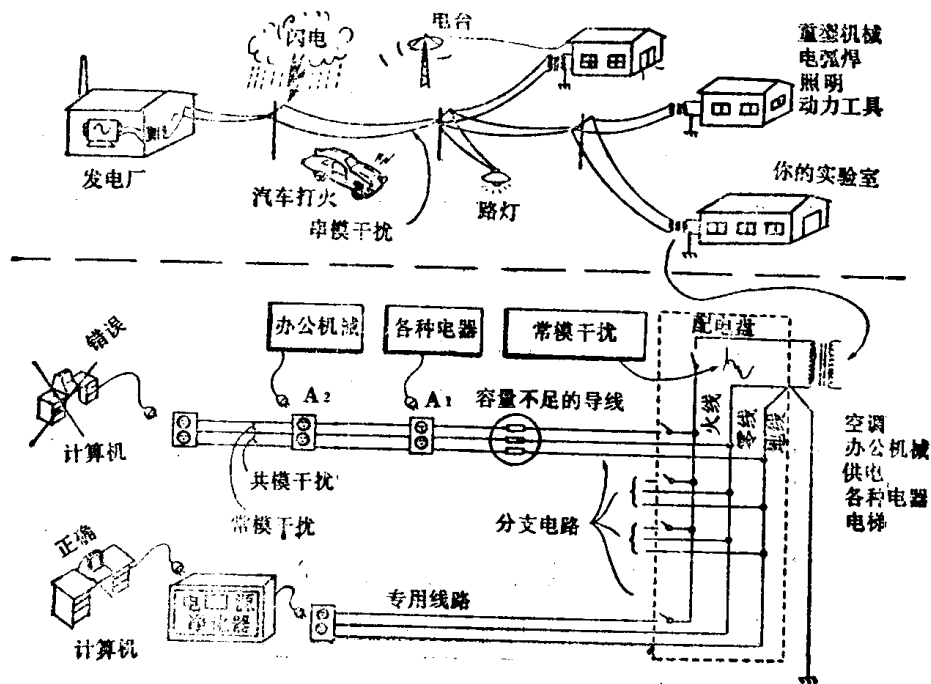


图 1-2-2 电源的干扰

电源中引起的干扰有:

- (1) 供电线路中严重超载引起电压的降低;
- (2) 大负载切断时造成的超压;
- (3) 非线性功率因子负载使基本正弦波失真;
- (4) 频率和相位漂移;
- (5) 叠加在电源上的常模噪声;
- (6) 导线电阻的存在,当短暂的大电流使电位变化引起的共模噪声;
- (7) 瞬变(下陷及波涌)与尖峰干扰;
- (8) 耦合噪声。

这些电源配电系统的干扰幅度与持续时间以及造成影响的情况见表 1-2-2 所示。

除了电源的干扰外,在我们周围还存在着很多的干扰,所以说,我们的环境是很不干净的,它

表 1-2-2 电源干扰

| 干 扰 | | 典型幅度 | 典型持续时间 | 频 次 | 影 响 |
|------------------|-----------|---------------------|--------------|------------|---------------------|
| 常 模 | 下陷 | -15~-20% | 半周~3秒 | 经常/每日 | 电源干扰,逻辑误差及闭锁 |
| | 波涌 | 15~20% | 半周~1秒 | 经常/每日 | 电源干扰,逻辑误差及主要器件失灵 |
| | 欠压和暗灯 | -5~-15% | 几小时~数月 | 夏季月份 | 电源失去稳定,逻辑误差,系数闭锁 |
| | 过压 | 10~15% | 数小时~数月 | 某些地区经常发生 | 超载,过热,最终部件失灵 |
| | 半周降出 | 部分到全部半周损耗 | 半周 | 数次/每月 | 所有恒压和分接开关变压器,烧保险,自毁 |
| | 高能尖峰 | 50V~1,000V | 微秒(μ s) | 频繁/每日 | 逻辑误差,关键元器件失灵 |
| | 传导射频和随机噪声 | 微伏(μ V) | 随机周期性能冲 | 总存在 | |
| 共 模 | 尖峰 | 5~50V | 微秒(μ s) | 经常/每日 | 在设计不高明的设备中容易引起逻辑误差 |
| | 射频和随机噪声 | 微伏(μ V) | 随机或周期性脉冲 | 总存在 | |
| | 零线一地的稳态电压 | 1~3V, 5~20V 尖峰损失 | 连续 | 总存在 | 加剧下陷及降压 |
| 串 模 | 尖峰 | 微伏(μ V) | 随机或周期性的 | 总存在 | 静态背景噪声 |
| | 射频和随机噪声 | 微伏(μ V) | 调制脉冲 | 总存在 | 静态背景噪声 |
| 频 率 | 频率瞬变 | +/-45°相移 | 半周~1周 | 数次/每月 | 恒压变压器和分接开关变压器上有严重干扰 |
| | 频率漂移 | +/-1% | 缓慢漂移 | 持续不断 | 无 |
| 静 电 放 电 | 静电放电 | 5,000V(低能量) | 毫微秒ns | 当湿度低时经常/每日 | 逻辑误差 |

们都将影响信号的检测。图 1-2-3 是实验室环境下的干扰与噪声的分布情况,虚线表示白噪声与 $1/f$ 噪声的量级。由于温度变化,上下课情况(学校)与电梯的起落,都将使 $1/f$ 噪声有所起伏。另外,电源的谐波、广播和电视的干扰等,其频率段与噪声量级都已在图中标明。

干扰来自检测系统的外部,可以设法降低和消除;而噪声来自内部,消除比较困难,需要通过弱检测技术来处理。

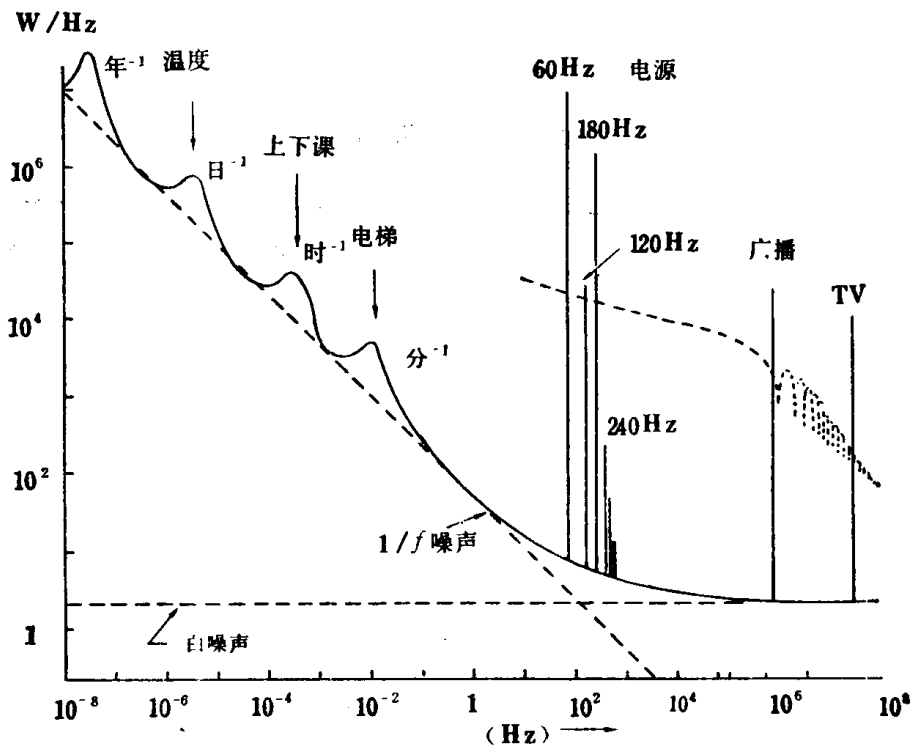


图 1-2-3 实验室的环境噪声

三、传感器和噪声

各种物理量或化学量,都要用各种传感器来检测,因此传感器是首先遇到的噪声源。衡量一个传感器的优劣,需要从四个方面作性能评价。

(1) 幅度响应 即单位被测量所对应的电量(电压和电流),表示为 $\Delta V/\Delta P$ 或 $\Delta I/\Delta P$ 。 ΔP 是物理量的变化,因此 $\Delta V/\Delta P$ 可以是 $V/^\circ\text{C}$ (温度)、 V/mm (长度)或 V/pF (电容)等, $\Delta V/\Delta P$ 越大,表示传感器的灵敏度越高。

(2) 噪声性能 一般用等效噪声功率来表示。传感器的噪声指标,通常都有专门的讨论,它是限制检测的主要因素。

(3) 响应时间 即传感器的反应速度。

(4) 带宽 表示传感器的工作频率范围。

表 1-2-3 介绍了几种传感器的噪声和它响应时间,使读者对噪声的大小有一初步认识。

表 1-2-3 传感器的噪声与响应时间

| | 噪声功率 | 响应时间 |
|------------------|------------------------------|------------------|
| 光导传感器 GeSb, InSb | 10^{-11}W/Hz (4K) | 15 μs |
| 热传感器 (Golay池) | 10^{-12}W/Hz (290K) | |
| Ge电阻温度计 | 10^{-11}W/Hz (4K) | 1ms |
| 光电倍增管 (PMT) | 10^{-19}A 暗流 (273K) | 2ns |

例如光电倍增管(PMT)的使用,图 1-2-4 给出了其输出的误差源。当信号光照射到 PMT,其阳极应有输出电流[图(b)1];但 PMT 的光阴极不可避免地同时接受各杂散光,产生的电流为图(b)2 所示;即使在光阴极完全不接收光信号的情况下,由于光阴极与打拿极的热激发等原因,PMT 亦有一个暗电流[图(b)3];对于阳极与阴极的电压为 2kV,因管脚的绝缘与内部气体的电离,存在一个漏电电阻,产生一定数量的漏电流[图(b)4]。因此,PMT 不是理想的,它不只接受光信息,其输出因杂散光、漏电流和暗电流的存在而使总电流增加,真正的信号电流却被埋在其中。这些不希望出现的背景便是检测中的噪声。

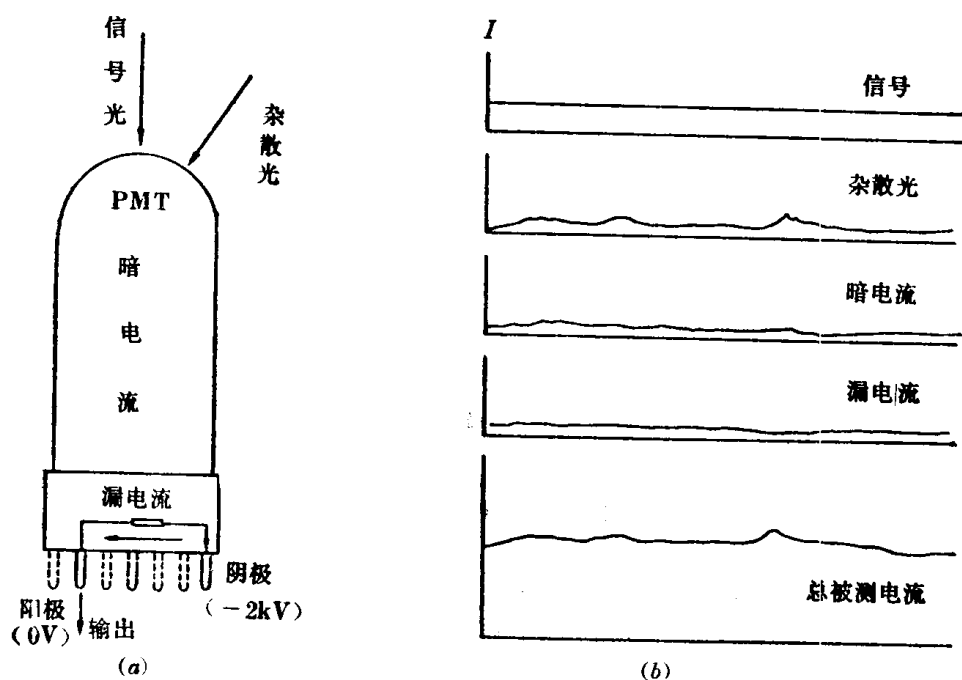


图 1-2-4 PMT 输出的误差源

§ 1-3 微弱信号检测的应用成效

微弱信号检测技术的发展和运用,有效地推动了各学科的进步,这里列举若干例子加以说明。原则上讲,利用这种技术可使 SNIR 提高 $10^3 \sim 10^5$,使原来无法实现的测量成为可能,因此随着微弱信号检测技术的成熟,它将得到更加广泛的运用。

一、促进了表面科学的发展

表面科学是目前发展十分迅速的学科。所谓表面,是指固体表面 $1 \sim 10$ 原子厚的薄层($10 \sim 100 \text{ \AA}$)。这一薄层除受自身的本体原子的作用外,还受到外界环境的影响,结果使表面的结构、成分、形貌和性质与体内原子有所不同,因此对它进行研究将会获得十分重要的信息。

研究表面需要分析仪器,其原理是利用入射粒子作用到表面上,然后捕获和分析从表面射出的各种带有信息的粒子。一般入射粒子可以是电子,也可以是离子和光子,出射粒子则亦是这三

种粒子,不过带有有效信息。表面分析需要超高真空技术,以便获得和保持清洁的表面,但更需要的则是微弱信号检测技术。

图 1-3-1 是以电子为入射粒子束,作用到固体表面,与表面原子相互作用而得到有关信息的示意图。

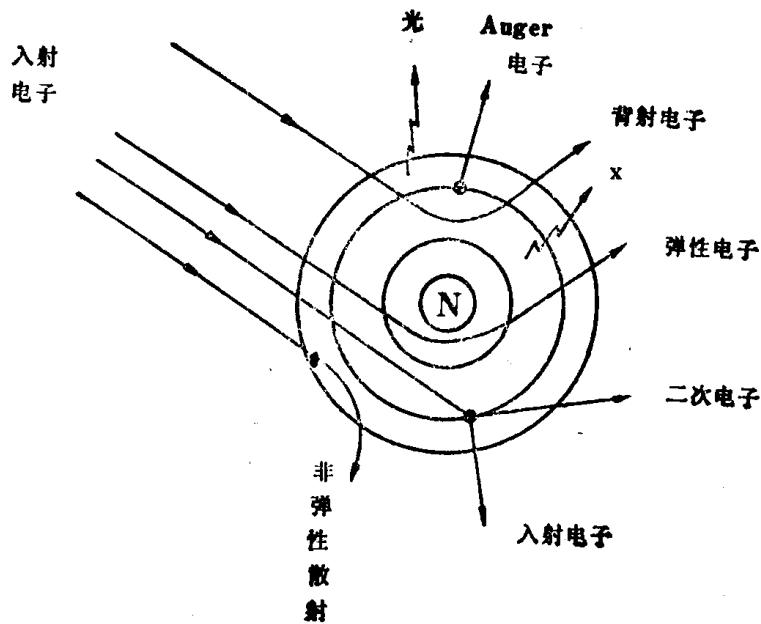


图 1-3-1 电子与表面的相互作用

入射电子作用到固体表面,它的出射粒子可以是电子,如弹性散射、非弹性散射、背射电子、二次电子和 Auger 电子等;它也可以出射离子、X射线;也可以获得光子信息,如磷光、荧光等。这些不同性质的出射粒子充分地反映了物体表面的原子排列、结构、组分、能谱等特殊性质,表 1-3-1 表示了这些信息的特点。只要检测这些信息,就能对表面作有效分析,从而发展了各种表

表 1-3-1 出射粒子所带信息的分析功能

| | 出射粒子信息 | 功 能 |
|-------|-----------------------|---|
| 电子谱 | 弹性散射 非弹性散射 二次电子 | 电子衍射、结构分析、原子排列及相互作用 能量损失下的电子空间分布与原子状态 表面组分分析、形貌分布 |
| X 射线谱 | 特征 X 射线 | 电位能谱 |
| 离子谱 | 离子 | 表面吸附 |
| 发光谱 | 荧光、磷光 | 光谱分析、荧光衰减等 |

面分析手段。它们相对应的仪器如表 1-3-2 所示。这些表面分析方法的实现大都需要微弱信号检测技术。

表 1-3-2 表面分析手段

| 入射 \ 出射 | 电 子 | 光 子 | 离 子 | 声 子 |
|---------|-----------------------------------|-----|----------|-----|
| 电 子 | LEED HEED ILEED AES SAM ELS | APS | EPSMS | |
| 光 子 | UPS XPS AES | 光 谱 | | PAS |
| 离 子 | INS | IIR | ISS SIMS | |

- LEED——低能电子衍射；
- HEED——高能电子衍射；
- ILEED——非弹性低能电子衍射；
- AES——俄歇电子能谱；
- SAM——扫描俄歇电子能谱；
- ELS——电子损失谱；
- UPS(或XPS)——光电子能谱；
- INS——离子中和能谱；
- APS——表观电位能谱；
- IIR——离子诱导X射线能谱；
- EPSMS——电子探针表面质谱；
- ISS——离子散射能谱；
- SIMS——二次离子质谱；
- PAS——光声光谱。

例如俄歇(Auger)电子谱仪的应用就是一个明显的实例。1925年 Auger 即发现了 Auger 电子；1953年 Lander 就认为 Auger 电子可作为表面组分分析的重要手段；1962年第一台 LIA 出现，1968年 Harris 就利用 LIA 首先观察到 Auger 峰，成为第一台 AES。

Auger 电子是二次电子发射，它的原理如图 1-3-2(a) 所示。当入射电子打到 K 层电子，使 K 层电子发射二次电子 (K 激发)，L₂ 的电子便向 K 层填补，形成 KL₂L₂ 激发成 Auger 电子。Auger 电子所生产的电流 $I=10^{-12}A$ ，而真二次电子所产生的电流却为 $I=10^{-10}A$ [见图(b)]。所以 Auger 电子在 $N(E) \sim E$ 的谱图中只是很小的一点变化，被真二次电子所覆盖。利用微弱信号检测技术可以得到 $dN/dE \sim E$ 的微分谱。Auger 电子峰变得十分明显。

又如 SXAPS(软 X 线激发电位能谱)也是表面组分和表面电子能态研究的重要手段。低能电子加速打到表面，激发出软 X 射线，当扫描电压增加时，软 X 线增加，最后到达能级激发限即产生特征 X 射线，提供了信号的指纹识别。但是软 X 线是背景，相当于光电流量为 $10^{-9}A$ ；而特征 X 线是相对很弱的被测信号，其光电流约为 $10^{-12}A$ 。背景比信号强 1000 倍，同样利用微弱信号检测技术而得到测定，发展了 SXAPS 谱仪。

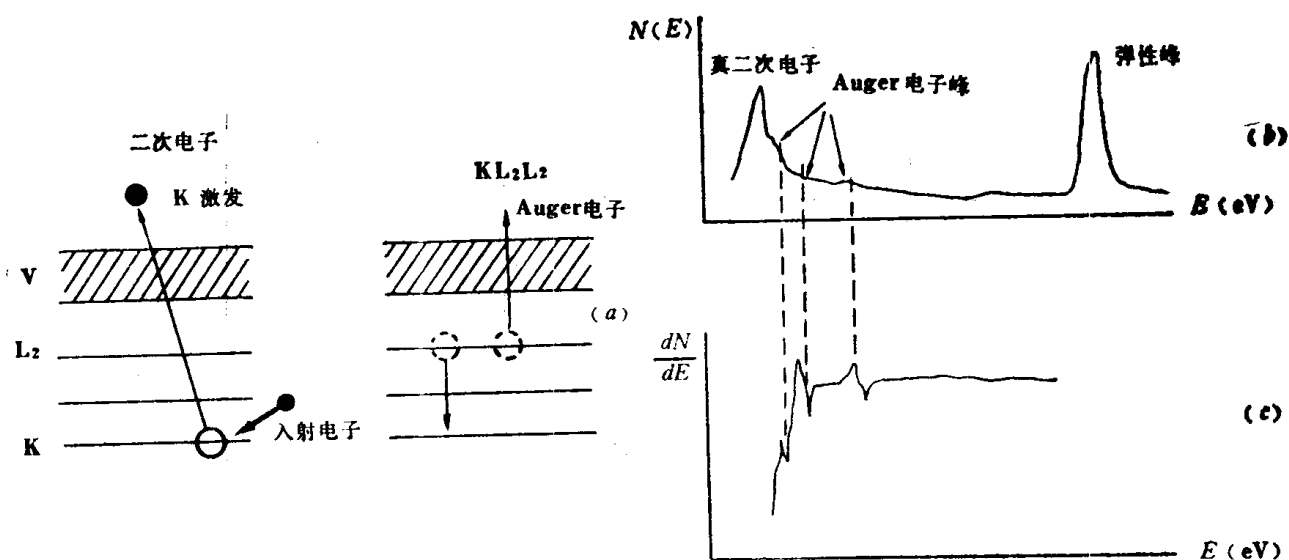


图 1-3-2 Auger 电子谱仪的原理

二、化学和生物中快速反应过程的研究

化学和生物中的快速反应过程 (10ps~10ms) 是动力学研究的领域, 它在生物中的停留技术、温度跳跃技术, 辐射化学中的脉冲辐解, 光化学中的闪光辐解等方面获得重要的应用。它需要用 1ns 的强光或高能脉冲照射溶液, 使两种反应溶液在 100ns 时间内迅速混合, 或者用脉冲红外激光器加热溶液, 使温度在 10~50ns 时间内升高几度。这些技术都是在强电平上的微弱信号的检测问题。

三、微电流的测量

微电流的测量也是弱检测的内容。一般,

$I > 10^{-6} \text{A}$ —— 指针式电流计;

$10^{-10} \text{A} < I < 10^{-6} \text{A}$ —— 灵敏电流计;

$10^{-14} < I < 10^{-10} \text{A}$ —— 灵敏静电计或振子测量仪;

$I < 10^{-14} \text{A}$ —— 微弱信号检测技术。

四、弱磁测量

弱磁测量有很重要的意义, 例如地质勘探、矿藏普查、军事上的潜艇搜索、医学上的临床诊断等等都需对弱磁场作定量检测。但是弱磁的测量中, 常受到地磁场的干扰。尤其是磁噪声和地磁起伏等都将作为背景影响测量。图 1-3-3 是人体磁信号的量级和范围, 人体弱磁场表示铁的含量, 是临床诊断的重要依据。图 1-3-3 左边是人体磁信号的强弱, 右边是相应检测器的噪声大小。检测弱磁场目前比较常用的是磁通门磁力计, 但是利用超导量子干涉器件 (SQUID) 完成的磁力计, 可以检测到更弱的磁场。

1964年 Jakevic 等人发现两个隧道结和超导体连成的闭合环, 其临界电流是环孔中的外磁通的周期函数, 其周期为磁通量子, 这就是 SQUID 器件。如用直流偏置, 则称 DC-SQUID; 若用射频磁通进行偏置, 则称 RF-SQUID。不论哪一种 SQUID, 其功能是一种灵敏的磁通传感器。

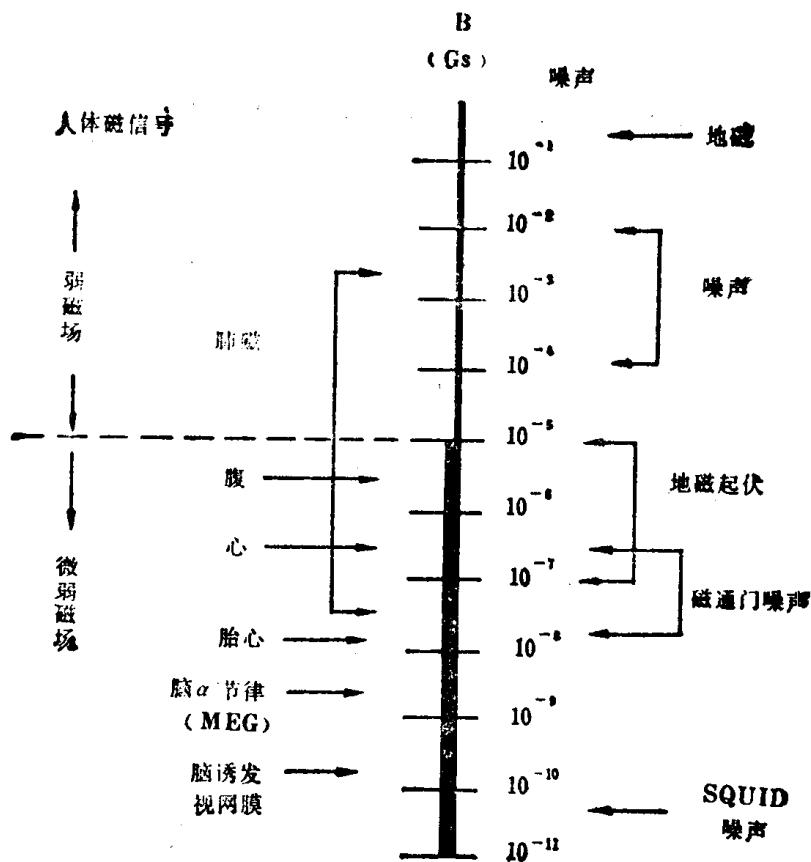


图 1-3-3 人体磁信号

利用 SQUID 已经制成了迄今最灵敏的磁强计、磁场梯度计、磁化力计、检流计、电压表、噪声温度计、电压比较仪和电流比较仪。此外，它在电压基准、射频测量和计算机技术等方面的应用也很有特点。

利用 SQUID 作为传感器构成的弱磁、弱电流、低电压的测量系统具有很高的灵敏度，列表于表 1-3-3。

表 1-3-3 SQUID 的应用

| 设 备 | 性 能 |
|-------|---|
| 超导磁强计 | $f=2000\text{Hz}$ 环面积 1cm^2 磁场变化率 0.4mGs/s 最大 $2\sim 3\text{kGs}$ |
| 磁场梯度计 | 灵敏度 $10^{-10}\text{Gs}\cdot\text{cm}\cdot\text{Hz}^{-1}$ |
| 检流计 | 灵敏度 10^{-7}A (无自感、无电阻) |
| 电压表 | 灵敏度 10^{-10}V |
| 磁化率计 | 灵敏度 10^{-13} (磁场 400Gs 面积 0.5cm^2) |
| 电压比较仪 | 精度 10^{-3} |
| 噪声温度计 | 10^{-2}K |

§ 1-4 微弱信号检测的基本方法

一、信号

被检测的微弱信号各按其特点分类。如稳态的直流信号、重复信号、离散信号和不重复的单次信号,以及具有空间分布的信号等。而重复信号又分为频域信号和时域信号;它们又可分为快速信号、缓变信号、不稳定性信号、周期信号和非周期信号、以及相干和不相干信号等等。

在这里,这些信号都是与噪声共存的微弱信号。

由于信号的特点不同,检测方法亦异,弱信号检测一般有三条途径:一是降低传感器与放大器的固有噪声,尽量提高其信噪比;二是研制适合弱检测原理并能满足特殊需要的器件;三是利用弱信号检测技术,通过各种手段提取信号。这三者缺一不可,但主要的还是第三条,即研究其检测方法。由于检测方法必须根据信号的特点与之相适应,因此在发展检测方法的过程中也就发展了微弱信号检测这门技术。

二、频域的窄带化技术

如果被检测的信号是频域信号,或者被调制成为频域的固定频率 f_0 的正弦振荡或其他信号。过去,对中心频率 f_0 的信号实现窄带化的唯一办法是使它通过带通滤波器(BPF)。但BPF的带宽是有一定范围的,只能允许 $f_0 \pm \Delta f$ 的信号与噪声通过。显然 Δf 越小(Q 值越高),噪声通过的分量也越少,检测越理想。实际上,BPF的 Q 值是有限的,用它直接进行弱检测有一定困难。如果我们将 f_0 的频谱搬迁到 f'_0 ,而使 $f'_0 = 0$ (即直流DC),则BPF就可用低通滤波器(LPF)来代替。对信号则起了平滑作用的积分过程,由于LPF可以使 Δf 很小(取决于积分时常数),这样 f_0 的窄带化得到了解决。图1-4-1就表示了这种窄带化处理技术。实现频谱搬迁的电路称相敏检波器,它是窄带化技术的核心。实现这种检测方法的仪器称锁相放大器(LIA)。

LIA 是一种相干检测,也是相关接收,它是一个积分过程

$$\int_0^t [S(t) + N(t)] \varphi(t) dt$$

其中 $\varphi(t)$ 是一个取决于接收方法的加权函数。若 $\varphi(t) = S(t - \tau) + N(t - \tau)$, 即 $\varphi(t)$ 为经过延迟后的输入函数时,则是自相关。对于频域信号(例如正弦信号)的处理,经过延迟后的输入

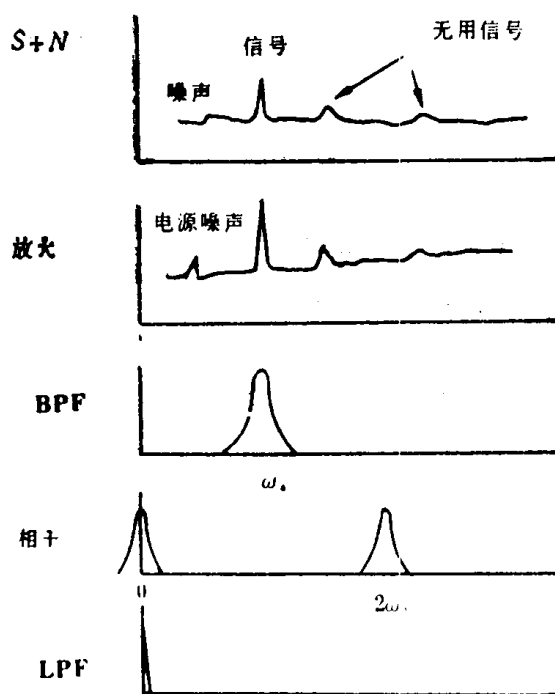


图1-4-1 噪声的窄带化处理过程