

锁相放大器的新进展

孙志斌 陈佳圭[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 主要介绍了模拟锁相放大器和数字锁相放大器原理、特点、过渡和发展过程. 通过数字锁相放大器的硬件的模块化结构、灵活的算法设计、软件的升级能力、应用的范围和特点以及性价比等, 说明锁相放大器发展的前景和动力.

关键词 模拟锁相放大器, 数字锁相放大器, 正交相关算法, 数字锁相环, 数字低通滤波

Advance of lock-in amplifier

SUN Zhi-Bin CHEN Jia-Gui[†]

(Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract This review gives an introduction to the principle, character and development of the analog and digital lock-in amplifier. Especially, the digital lock-in amplifier has the following advantages: the model hardware, flexible arithmetic, updatable software, extensive application and low cost. So the development of the lock-in amplifier would have a bright future and powerful strength.

Keywords analog lock-in amplifier, digital lock-in amplifier, orthogonal vector arithmetic, digital phase locked loop, digital low pass filter

1962年,美国EG&G PARC(SIGNAL RECOVERY公司的前身)的第一台锁相放大器(Lock-in Amplifier,简称LIA,也称锁定放大器)的发明,使微弱信号检测技术得到标志性的突破,极大地推动了基础科学和工程技术的发展^[1,2].目前,微弱信号检测技术和仪器的不断进步,已经在很多科学和技术领域中得到广泛的应用(如电、光、磁、声、热、超导、振动等测量,各种谱仪、电镜扫描探头、原子力显微镜等应用;以及AC阻抗测量、AC桥、反馈控制环等),未来科学研究不仅对微弱信号检测技术提出更高的要求,同时新的科学技术发展反过来促进了微弱信号检测新原理和新方法的诞生^[1-3].

早期的LIA是由模拟电路实现的,随着数字技术的发展,出现了模拟与数字混合的LIA,这种LIA只是在信号输入通道,参考信号通道和输出通道采用了数字滤波器来抑制噪声,或者在模拟锁相放大器(简称ALIA)的基础上多了一些模数转换(ADC)、数模转换(DAC)和各种通用数字接口功能,可以实现由计算机控制的监视和显示等辅助功

能,但其核心相敏检波器(PSD)或解调器仍是采用模拟电子技术实现的,本质上也是ALIA.直到相敏检波器或解调器用数字信号处理的方式实现后,就出现了数字锁相放大器(简称DLIA),DLIA比ALIA有许多突出的优点而倍受青睐,成为现在微弱信号检测研究的热点,但是在一些特殊的场合中,ALIA仍然发挥着DLIA不可替代的作用^[4-5].

本文将介绍ALIA的基本结构、不足和特点,接着将重点介绍DLIA的一般结构,并通过硬件、软件和算法三方面来说明DLIA的发展趋势.

1 模拟锁相放大器(ALIA)^[1-5]

以SIGNAL RECOVERY公司的产品为例,SIGNAL RECOVERY公司的5209、5210和5105、5106型是通用的ALIA,图1是其典型的结构,主要由信

2006-08-14 收到

[†] 通讯联系人, Email: chenjiagui@xiaoxiaotong.org

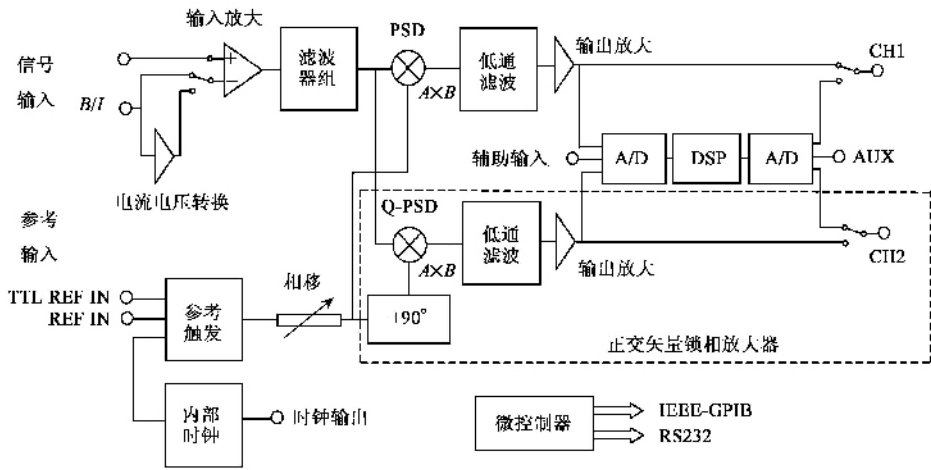


图1 模拟锁相放大器(ALIA)的典型结构

号输入通道、参考输入通道、相敏检波器和正交相敏检波器、输出通道、微处理器和辅助数字部分组成。输入通道包括信号输入、低噪声前置放大、电流电压转换、放大和组合滤波器。信号输入有3种方式：单端电压输入、差分电压输入和电流输入方式，可以适应被测信号为电压和电流两种形式。在被测信号为电压信号的情况下，单端电压输入方式是常用的方式，如果信号中存在共模干扰信号，就采用差分输入方式。低噪声前置放大器的增益可调，也可根据频率和源阻抗选择最小噪声因子的外接低噪声前放或阻抗匹配变压器。滤波器组主要分为陷波滤波器、组合滤波器。陷波滤波器是滤除工频及其二次谐波的干扰，组合滤波器可灵活组成低通、高通、带通和陷波4种模式。参考输入通道由参考触发、内部时钟、可调相移器和90°固定相移器组成0—370°可变移相。参考输入可用外部输入，或内部时钟信号（也可输出用作被测信号的同步调制），由于参考触发整形电路的存在，只要求外部参考信号在一个周期内有2个过零点，并且有一定的幅度，这就意味着方波、三角波和其他信号以及如TTL信号或逻辑电平，都可以像正弦信号一样作为参考信号使用；内部时钟产生内部相位开关来驱动相敏检波器和正交相敏检波器，使仪器运行于正交的双相ALIA模式。相移器的调节使输入信号与参考信号的相位差为零。在双相位ALIA中，90°相移器输出一个与输入信号正交的参考信号，用来驱动两个相敏检波器，同样通过后续的低通滤波器，分别检测被测信号，经过直流放大器由电压表显示其结果。

相敏检波器实质是个模拟乘法器（或称同步解调器），主要作用是将输入信号与参考信号（正

弦或方波）相乘，其结果会出现输入信号与参考信号的差频项及和频项，再通过低通滤波器滤除和频项，保留差频项，最后输出的直流信号与被测信号的振幅成正比，其关系可用下式简单表示：

$$u_o(t) = kV_s V_r \cos\theta, \quad (1)$$

式中 u_o 是低通滤波器输出信号， V_s 是输入信号的幅值， V_r 是参考信号的幅值， θ 是输入信号与参考信号之间的相位差，系数 k 由输入信号和参考信号的波形及相敏检波器的工作模式来共同确定。要使输出直流信号与被测信号的振幅成正比，必须保证输入信号与参考信号的频率相同，相位差为零（或固定的相位差），振幅也应该是固定不变的常量，只有在这些条件都满足的情况下，LIA的直流输出信号才真正反映实际信号的变化。

正交矢量锁相放大器是多了一个正交相敏检波器，两个相敏检波器的工作原理完全相同，唯一差别就是正交相敏检波器的参考输入多了一个90°相移器，当同相输出为 $I = kV_s V_r \cos\theta$ 时，正交输出则为 $Q = kV_s V_r \sin\theta$ ，由上述两路输出可以计算出被测信号的幅度和相位：

$$V_s = \frac{1}{kV_r} \sqrt{I^2 + Q^2} \quad \theta = \arctan\left(\frac{Q}{I}\right). \quad (2)$$

如果同相输出与正交输出通过ADC转换为数字信号，在数字信号处理单元中，按照(2)式的算法计算出被测信号的幅值和相位，并将数字形式的幅值和相位通过DAC转换为模拟信号。正交矢量ALIA由于能计算出被测信号的幅值和相位，可以避免在测量时对参考信号做可变的移相调节，可避免移相的调节误差对测量准确性的影响。

ALIA的进步是微控制器的应用，图1示出了两

种常用数字通信接口,即 232 串行通信接口和虚拟设备通用的 GPIB 接口. 通过这 2 个接口可以用计算机去设置 ALIA 的各个参数,可以便利操作与设备的系统集成.

模拟电子器件存在温度漂移,又由于各个有源模拟器件本身就是个噪声源,而无源器件也会引入噪声,这些电子系统的噪声会影响 ALIA 输出信噪比的提高,也影响输出直流放大器的放大倍数的提高. 更为重要的是 ALIA 本身是一个开环系统,无法对干扰造成的误差予以纠正. 这些因素限制了 ALIA 性能的提高和更进一步的发展. 目前,在要求短时间响应的二级锁相检测系统、二级锁相闭环检测系统和高频率的锁相系统检测等的应用中,ALIA 仍然不可替代.

2 数字锁相放大器(DLIA)^[4]

如果 LIA 的相敏检波器(或同步解调器)是用数字信号处理的方式实现的,就成为 DLIA. SIGNAL RECOVERY 公司提供了多种的、系列的 DLIA,如 7210、7225、7225BPF、7265、7280 和 7280BPF 等,其原理如图 2 所示. 一般的结构包括以下一些部分,即信号输入通道、参考输入通道、数字相敏检波器、正交数字相敏检波器、数字低通滤波器、输出通道、辅助输入通道、输出微处理器、辅助输出通道和微控制器部分. 其中信号的输入通道与 ALIA 相同,只不过是交流放大必需保证转换为数字信号时有足够大的幅值. 抗混叠滤波器是模拟信号数字化之前所要考虑的,其作用是滤除不需要的频率信号,并将要数字化的信号在不失真前提下将其频率上限限制在采样频率的一半以下,避免 ADC 的信号出现虚假信号,即主 ADC 的采样频率必须满足采样定律. 被转换后的数字信号被送入数字信号处理器(DSP)中,依据一定的算法完成相敏检波器的功能,再通过数字低通滤波器后获取差频后的直流信号. 参考通道以信号输入通道相同的采样速率提供数字相敏检波器所需要的相位信息,参考输入通道同样有内部和外部参考信号两种. 在外部参考信号模式下,输入的模拟参考信号或逻辑电平,被一个 DSP 单元采用数字锁相环算法测量其频率,并产生所需要的相位信号. 在内部参考信号的模式下,只需要给参考 DSP 单元输

入所需要的参考信号频率值,就可以在所选定的频率上产生数字相敏检波处理单元所需要的相位信号,这种方式不需要外部参考信号和 ALIA 所需要的相位锁相环,因此不需要时间锁相就可直接输出相位信号,降低了相位噪声. 参考通道中的 n 倍频器不仅可以在与输入信号相同的频率上进行锁相,而且还可以在输入信号的 n 倍谐频上进行锁相检测,这在俄歇光谱学等领域中是非常有用的,但是 n 倍频后最大频率是受最大参考频率限制的. 参考信号处理单元也可实现数字参考相移,其精度可达到毫度. 同相相位和正交相位信号在数字处理单元中一般通过查询的方式实现,可以使同相相位信号和正交相位信号同时提供给两个数字解调器,使输出的两个分量能同步输出. 输出通道中的数字低通滤波器,可以减小模拟滤波器的截止频率不稳定所造成的误差. 输出 DAC 将数字信号转换为模拟信号输出,输出处理单元可以通过和的平方根算法和除法算法计算出被测信号的幅值和相位. 输出微处理器可以对从辅助 ADC 的数字信号进行必要的运算,在通过 DAC 转换为模拟信号输出或数字显示. 另外 DLIA 还包括一个微控制器,该微处理器有辅助数字输出、数字显示、键盘通信、IEEE-488 通信和 RS232 通信功能.

与 ALIA 相比,DLIA 有以下优点:

(1) 由于 DLIA 在输出通道中没有直流放大器,可以避免直流放大器的工作特性随时间变化的不稳定性,和由于温度变化引起的温度漂移带来的干扰,这是 ALIA 不可解决的问题之一;

(2) DLIA 的内部晶振时钟源随时间和温度变化小,用这种稳定性高的时钟源来做调制信号和参考信号能降低参考信号的不稳定所带来的误差,同时在内部参考模式中,数字信号处理单元能在最短时间甚至能不需要延时就能完成锁相功能,尤其在频率扫描测量中有其明显的优点;

(3) 如果被测信号有较强的正交性,采用 DLIA 的高性能的正交解调技术,使微弱信号检测精度能得到很大程度上的提高;

(4) 随着技术的发展,数字信号处理单元的性能提高,使 DLIA 的性价比也得到相应的提高,数字锁相技术将会更深入地影响未来的测量技术.

3 数字锁相放大器(DLIA)的新发展^[6,7]

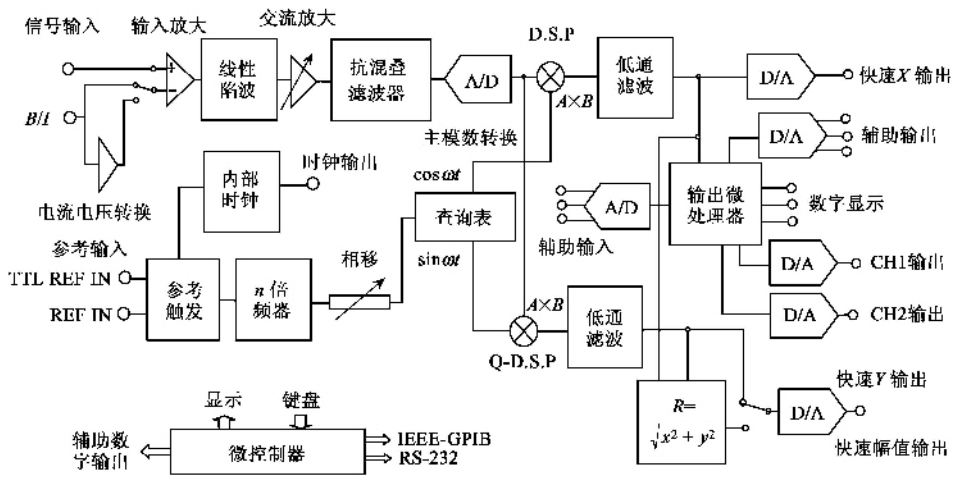


图2 数字锁相放大器(DLIA)的典型结构

3.1 基于单片机的DLIA

目前通用单片机一般是8位型单片机,工作频率最大为20MHz。随着单片机技术的进一步发展,也逐渐出现了16位型单片机,工作频率也逐渐提高到100MHz。由于单片机的廉价和开发的便利性,使单片机将广泛地应用于DLIA,但受到单片机处理能力的限制,因此用单片机的DLIA的算法要进行优化,使算法更加简单、有效,并适合单片机的硬件特性。

文献[6]报道了由DDC112和At89c82528位单片机构成的DLIA。主要目的是用来测微弱缓慢变化的光信号,由于背景光比较强,因此需要DDC112作为20位的ADC来提高探测系统的动态范围。该系统的最大采样频率是2kHz,这主要受DDC112的采样速度限制。At89c8252限制了系统的运算能力,需要高效地优化算法来完成数字锁相放大功能。

作为LIA首要解决的问题是如何消除低频噪声,现在大多采用一种叫频谱倒置的算法。这种算法主要是通过交替交换采样点的正负号,实现比较简单,便于单片机处理。文献报道了一种适合于8位单片机的低通滤波算法,这种算法是单极点的2.5Hz的Butterworth低通滤波器,此算法的主要优点是滤波器的系数是1/256的倍数,可以通过简单的移位操作即可完成系数的除法运算。将上述两个算法融合在一起,即可同时完成频谱倒置和低通滤波器的作用,其数学表达式如下^[6]:

$$y_n = \frac{x_n}{256} + \frac{x_{n-1}}{256} + y_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{256} - \frac{y_{n-1}}{256} \quad (3)$$

在实现过程中,由于采样数据是20位数据,中间运算数据要采用32位才能保证其精度,这要用4个字节才能完全表示,并且在读写存储器过程中也比较

困难,这主要使用了C或C++中的枚举数据结构来解决的。另外文献还报道了通过数字查表方式修正由于系统中DDC112的两个不匹配积分电容所带来的误差^[5],从而保证了系统的最大动态范围,提高了系统性能。

这样简单的系统之所以能取得较好的性能,主要用了优化的算法和通过数字查表方式得到解决。但是该系统由于单片机较差的处理能力和较慢的运行速度,使该系统只能应用于低频信号检测中。

3.2 基于专用DSP的DLIA

自从专用DSP诞生以来,使信号的数字实时处理成为可能。这主要得益于DSP中的乘加求和的快速运算功能,使复杂的算法能在几个指令周期内完成。DLIA的相关运算和数字滤波算法正是DSP的优势所在。文献[7—11]报道了以AT&T的DSP32C, TI的TMS320C30和TMS320C6xEVM,以及MOTOROLA的DSP56002EVM作为DSP的DLIA。这几种LIA根据实际需要和ADC与DAC转换速度的限制,工作频率在几Hz到几十kHz的低中频范围内,如果采用高速的ADC、DAC器件和高速的DSP处理器并采用并行分布式设计方法,工作在MHz的DLIA也是不难实现的。下面将着重介绍基于上述硬件结构的DLIA所需要的基本常用算法。

一般DLIA所共有的双通道正交相关算法,这种算法的基本思想源于正交矢量LIA,但又有不同,如图2所示。参考信号的两个正交分量是根据内部触发或外触发参考信号的频率和相位,通过DSP的内部查表方式而产生的。因此这两个正交信号不会因为内部触发信号和外部触发信号的形式(即正、

余弦,方波或三角波参考信号)而改变.因此能消除由于参考信号是其他形式而造成的谐波分量的干扰.在内触发模式下,采用 DAC 和 ADC 的相同的采样频率,能使采样得到的被测信号和参考信号在相同采样点上的相位差恒定,从而消除了由于相位差不恒定而造成的干扰.相同采样时刻的采样数据分别与正交的两个参考信号在 DSP 中通过相乘运算就可以完成相关算法.为了降低由于采样和量化引入的各种相位噪声,还需要使采样频率设置为参考信号频率的整数倍,满足采样定理并要对被测信号进行抗混叠滤波.

在参考信号由外触发信号提供情况下,为了准确获得与外触发信号的频率和相位相同的两个正交参考信号,就需要能准确跟踪外触发信号,在数字信号处理上就需要一个数字相位锁相环算法来实现该功能.文献[7,9]详细讨论了数字相位锁相环算法和实现过程,如图3所示.数字相位锁相环主要由数字检相器、低通滤波器和数控振荡器构成,其传递函数的数学公式如下^[7]:

$$H(z) = \frac{\varphi(z)}{\theta(z)} = \frac{F(z)}{(z-1) + F(z)}$$

$$F(z) = K_1 + \frac{k_2}{(2-z^{-1})} \quad (4)$$

(4)式中的具体系数要根据硬件系统和算法来确定.另外,文献[7]还对外触发信号采用了频率与幅值估计算法来跟踪外触发信号的频率与幅值,以防数字相位锁相环失锁和调节直流增益,防止 DLIA 溢出.这些复杂的算法之所以能在 DLIA 中实时处理,主要得益于这种专用 DSP 的特点.最后文献还报道了在信号输出通道中采用低通滤波器来对输出信号进行滤波.此低通滤波器一般都采用 IIR 结构的 Butterworth 算法,因为该滤波器具有较好的频谱特性.

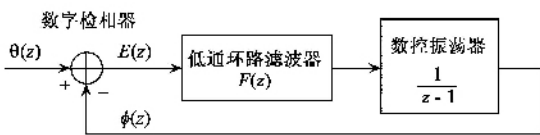


图3 数字相位锁相环

在上述算法的基础上,使得 DLIA 的在0.5Hz—20kHz 频段上的动态储备比 ALIA 要高. DSP 的自动加载程序特性使 DLIA 能独立运行并嵌入到其他系统中,文献[10]就是将 DLIA 作为一个模块嵌入到分光光度计系统中的例子.随着 DSP 的处理功能的

增强和相应算法的发展,DLIA 的性能会进一步得到提高,并出现新的特征和用途.

3.3 基于 PC 的系统级模块化 DLIA

基于 PC 的 DLIA 的硬件架构有两种模式:一种是用标准总线及标准机箱的硬件设计,如采用一种通用的 VME-bus 数据总线和 3U,5VME 板的 6 插槽标准机箱结构^[12],这种结构的优点在于能将 DLIA 集成于一个复杂的数字系统中,同时也可以通过采用专用数据采集卡和数据处理卡来提高 DLIA 的性能,第二种是用通用数据总线的设备级硬件结构,这种结构主要是用于集成各种专用数字设备,如由 HP3325A 信号源, HP318 计算机, KEITHLEY705 扫描器和 KEITHLEY194 数字采集器或 HP3561A 数字分析仪通过 IEEE-488 总线连接而成的 DLIA 系统^[13].这两种都是开放式结构,易于系统升级.模块的高性能指标会使 DLIA 系统的性能更强,频带范围能从 DC 到几百 MHz,甚至可以到 GHz.这些优势使得 ALIA 望尘莫及.

这种基于 PC 的 DLIA 的最大优势在于核心数字处理单元是由资源丰富、功能强大的 CPU 构成,各种应用软件在操作系统平台上运行.与此相比,基于 DSP 的 DLIA,为了提高算法的效率,算法是通过汇编语言实现的,这种对硬件依赖性极强的汇编语言不仅易读性差并且移植性也低.而基于 PC 的数字锁相算法是采用 C, C++ 等高级语言实现的,因此可以直接在由不同 CPU 构成的 PC 系统上运行.在算法设计不需要考虑硬件资源的限制,尤其是有利于低通滤波器的设计,设计时可以把各种不同结构和阶数的 FIR 和 IIR 滤波器都包含在一个滤波包中,根据实际需要选择相应的滤波器,这样就提高了 DLIA 的灵活性和性能.如果采用可视化语言 LABVIEW 来实现 DLIA,整个系统可以将控制界面与算法集成在一起,使整个系统集成成为一个虚拟仪器,便于系统的操作.采用这种语言实现的 DLIA 系统已有报道^[14].

由于整个系统运行在 PC 平台上,因此也可以使用各种仿真软件对算法进行预测研究,尤其是算法在极端条件下的性能,将给算法的进一步优化和改进指明方向.例如使用 MATLAB 对算法进行预测,并通过模拟仿真对算法系数进行了优化,提高了算法的性能^[9,10].另外采用 MATLAB, MATHEMATICAL 等仿真软件还可以对自适应滤波、小波分析、神经网络等新的算法进行仿真研究,使其功能更加

多样化。

因此基于 PC 的系统级模块化 DLIA 有以下优势:可以进行多级 DLIA 的研究,可以利用最新的算法来提高特殊的性能,可以通过系统的观点来实现灵活的 DLIA 检测。从灵敏度、动态范围、动态储备、稳定性等性能指标上比较,DLIA 的性能将远远超过了 ALIA

4 讨论

ALIA 是用模拟器件设计的早期产品,由于模拟器件的温漂和噪声影响,限制了 LIA 的输出信噪比的提高,也限制了动态范围;ALIA 不是闭环系统,没有反馈调节,信号失真程度较大;当设计一旦完成,其功能也就完全被确定,系统升级能力差,性能不可能大幅度提高,成本也高,本质上限制了发展。但是,ALIA 在一些特殊场合有不可替代的特性,例如对相位比较敏感的信号检测和高频信号检测。

目前,商品形式的 DLIA 是先将模拟信号转化为数字信号再进行灵活的相关运算处理,因而抗干扰能力强,信噪比高。又因为输出级没有直流放大器漂移的影响,动态范围大。

LIA 的进一步发展是随着数字信号处理硬件技术和软件算法的发展,使 DLIA 对超低频的信号检测能力超过 ALIA,并能设计出 DLIA 所独有的新功能。即使在不变的硬件平台上,也能通过软件算法的升级而使整个系统的性能得到提高。这种数字化硬件平台容易模块化,可以嵌入到其他系统中,使 DLIA 的应用更加广泛。DLIA 与计算机相结合可以成为虚拟仪器,也可被软件化为软件锁相放大器。当

然,要使这些研究转变成商品应用还需假以时日,但新的 DLIA 必将成为十分活跃的发展领域。另一方面,ALIA 也正孕育着新的原理和方法的突破。

参 考 文 献

- [1] 陈佳圭. 微弱信号检测. 北京:中央广播电视大学出版社, 1987 [Chen J G. Detection of Weak Signals. Beijing: Central Radio and TV University press, 1987(in Chinese)]
- [2] 陈佳圭,金瑾华. 微弱信号检测——仪器的使用和实践. 北京:中央广播电视大学出版社, 1989 [Chen J G, Jin J H. Detection of weak signals——Application and practice of apparatus. Beijing: Central radio and TV University press, 1989(in Chinese)]
- [3] 高晋占. 微弱信号检测. 北京:清华大学出版社, 2004 [Gao J Z. Detection of Weak Signals. Beijing: Tsinghua University Press, 2004(in Chinese)]
- [4] The Digital Lock-in Amplifier. SIGNAL RECOVERY, 2006, 95—98
- [5] The Analog Lock-in Amplifier. SIGNAL RECOVERY, 2006, 91—94
- [6] Dorrington A A, Künemeyer R. A simple microcontroller based digital lock-in amplifier for the detection of low level optical signals. In: Proceeding of the First IEEE international Workshop on Electronic Design, Test and Applications. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2002. 486—488
- [7] Gaspar J, Chen S F. Microprocessors and Microsystems, 2004, 28: 157
- [8] 胡绍民,张广发. 数据采集与处理, 2002, 15(2): 222 [Hu Z M, Zhang G F. Journal of Data Acquisition and processing, 2002, 15(2): 222]
- [9] Rev. Sci. instrum., 2001, 72(1): 247
- [10] Alonso R, Villuendas F, Borja J *et al.* Meas. Sci. Technol., 2003, 14: 551
- [11] Qian L P, Cheng D F, Zhang J T *et al.* Design and Analysis of digital lock-in sine-wave amplitude detector based on TMS320C6x EVM. In: ICSP'04-2004 7th International Conference on signal processing Proceedings China, 2004. 2545—2548
- [12] Barone F, Calloni E, Difiore L. Rev. Sci. instrum., 1995, 166(6): 3679
- [13] Dixon P K, Wu L. Rev. Sci. instrum., 1989, 60(10): 3329
- [14] Probst P A, Jaquier A. Rev. Sci. instrum., 1994, 65(3): 747

· 物理新闻和动态 ·

在室温下冻结的冰

大多数的表面并不是很光滑平坦的,当两个物体的表面相互接触时,实际上只有其中的一部分表面是真正地碰在一起的。在正常的条件下,如果说两接触面间是潮湿的,或者说有水蒸汽存在时,表面间就会产生出一种效应,称为“表面张力桥”(capillary bridge)。这些桥倾向于使表面粘结在一起,而使两表面间不易滑动。为了能更清楚地了解这个现象,荷兰 Leiden 大学的 J. Frenken 教授所领导的研究组对这种被限制于两表面缝隙间的液体的物理行为进行了一系列的实验。他们发明了一种称为“摩擦杠杆(tribolever)”的仪器,它是由一个稍有弯曲的微型硅片传感器所组成,其作用是可以感受小于皮牛顿的力。

实验时将一根尖细的钨丝连接在传感器上,然后让钨针在清洁的高纯度的石墨表面上来回地进行扫描。他们发现在室温下,在两个表面间会产生出纳米量级的冰冷的水桥,这类水桥只能持续存在几秒的时间。当水桥产生后,水在两表面间所起的作用类似于胶水,而不是润滑剂。这就是在纳米量级时两界面间的物理行为。下一步,研究组准备利用不同的材料作针尖与基底,同时调节温度参数与针尖的速率来观测这个现象,这些实验的目的是深入地研究在特殊环境下冰对摩擦所作的贡献。这项研究对微观物体,特别是对纳米量级的电机系统有重要的意义,因为若在两表面间的摩擦太大会使这些应用系统失灵。

(云中客 摘自 Physical Review Letters, 4 May 2006)