摘 要

锁相放大器（**Lock-in AiiiplifierJLIA)**是一种根据相关检测原理设计的同步相干检测 仪，能够准确检测提取出淹没在强噪声背景中的周期性有用信号，是微弱信号检测 **(Weak Signal Detection)**领域中最重要和最有效的精密仪器之一，广泛地应用与基础科 学研究、国防科技、生物医学信号、物理探伤等领域。

相敏检波器**(Phase Sensitive Detector, PSD)**是锁相放大器的核心器件，能够实现对 待测信号和参考信号进行相关运算; 而低通滤波器的通频带宽决定了相敏检波器输出信 号的谐波成分，进而对锁相放大器的精度产生影响。因此，本文着重研究了相敏检波器 和低通滤波器的设计环节，并在参考信道设置了两路正交的参考信号以避免了输出结果 对相位差的依赖。

本文通过分析锁相放大器的工作原理，利用虚拟仪器技术，基于**LabVIEW**软件开发 平台实现了双锁相放大器的设计方案。经测试证明，本文设计的正交矢量型数字锁相放 大器具有较好的抑噪性能，能够大幅度提高输出信号的信噪比。

关键词：锁相放大器；虚拟仪器；相敏检波器

Function realization of lock-in amplifier by LabVIEW programming

Abstiact

Lock-in Amplifier (LIA),based on the principle of correlation-detecting, is one of tlıe most effective meansin weak signal detections and prove to be able to detect and measure periodical signals, the magnitude of wlıich are usually so weak against the Siinounding noise, widely used in the fields of scientific research, national defense science and teclmology, biomedical engineering, physical detection, and so on.

Phase sensitive detector(PSD) is the core of the lock-in amplifier and can identify the measured signals whose frequency is the same as the reference signal; and its output is detemiined by tlıe pass band-width of frequency of the LPF, wlıich also affects the precision of the lock-in amplifier. Tlius, tlıis paper StUdieS the realization of the PSD and the LPF, and set up two orthogonal reference signal channels to avoid tlıe dependence on the phase difference.

ʳ∏ıe paper analyses the realization of the lock-in amplifier, and use LabVIEW to realize the dual-phase lock-in amplifier. And, it proves to be effective tlıouglı the simulations, shows a good perfoπnance in the detection of weak signals, and greatly improves the SNR of the output signals.

Key Words： Lock-in Amplifier； Viıtual Inshˢument; Phase Sensitive Detector

目 录

摘要 I
Abstract ..... ∏
1绪论 1
1.1 课题研究背景及意义 1
1.2 微弱信号检测 1
1.3 锁相放大器发展概况 3
1.4 虚拟仪器技术与LabVIEW简介 4
1.4.1 虚拟仪器技术 4
1.4.2 LabVIEW 简介 6
1.5 本章小结 9
2 锁相放大器的基本理论 10
2.1 相关检测原理 10
2.2 相关检测技术 11
23正交矢量型锁相放大器 12
2.4 模拟与数字锁相放大器性能对比 12
2.5 数字滤波器的设计 13
2.6 本章小结 15
3数字锁相放大器的软件设计 17
3.1 数字锁相放大器的前面板 17
3.2 数字锁相放大器程序框图 18
3.3 各子模块设计及功能介绍 20
3.3.1 信号生成模块 20
3.3.2 前级滤波模块 22
3.3.3 相敏检波模块 23
3.3.4 信号还原模块 25
3.3.5 测量显示模块 26
3.3 本章小结 27
4系统性能测试与分析 28

4.1 部分模块功能仿真与调试 **28**
4.1.1 信号生成模块仿真与调试 **28**
4.1.2 前级滤波模块仿真效果分析 **29**
4.1.3 相敏检波模块仿真测试 **29**
4.2 整体模块性能测试 **30**
4.2.1 系统准确性测试 **30**
4.2.2 系统动态检测范围与抑噪性能测试 **30**
43锁相放大器与普通带通滤波器性能比较 **32**
4.4 本章小结 **34**
结论 **35**
参考文献 **36**
致谢 **37**

1绪论

1.1课题研究背景及意义

锁相放大器功能的十分强大和应用极其广泛，属于精密仪器范畴，设备维护专业化 要求高，体积庞大且价格十分昂贵，数据处理不太灵活，而且不能够实现多个用户的交 流使用。虚拟仪器技术采用可视化的图形化编程环境和平台，提供功能强大的数据处理 软件包，具有编程入手快速、使用高效灵活等特点。因此，本文以微弱信号检测技术中 的较为重要的锁相放大器为例，利用**LabVlEW**软件开发平台，设计了一种虚拟锁相放大 器。

虚拟仪器语言**LabVIEW**具有通用性强、便于移植、维护方便等特点，使用**LabViEW** 制作的锁相放大器参数配置更加方便灵活，用户可以根据自身需求更改配置；成本低廉， 只有软件、标准化硬件的开发成本，而且标准化硬件的通用性使其相对成本较低；操作 方便，只需在计算机上对前面板操作即可实现模拟实际仪器的功能，用户不需要对仪器 内部的设计完全了解也可以根据说明进行操作和应用；数据处理方便且便于多用户共享，可接住**LabViEW**提供的工具包将数据写入文本文档或电子表格中，直接保存在计算机的 硬盘上，为实验数据处理带来了极大的便利条件，还可以直接通过打印机等设备将数据、 波形等打印出来；而且可利用互联网实现远程仪器共享，方便多用户交流使用。

本文采用**LabVIEW**软件开发平台设计了一种虚拟数字锁相放大器，实现了测量仪器 的智能化、多样化、模块化，并且用数字锁相放大器完成了参数测量实验，可以将测量 结果实时、直观地显示出来，具有较好的抑噪能力和信噪改善比。

1·2微弱信号检测

科学家和工程师们在探索地球物理现象、规律及其工程应用中，时常会碰到感兴趣的 微弱有用信号（可达毫微伏量级）被背景噪声覆盖的问题，比如生物电信号测量、机械 震动波的频谱特性分析以及弱电信息的噪声过滤等，微弱信号检测技术的迅速发展使这 些问题的解决成为可能。

微弱信号检测是一门综合利用电子学、信息论及物理学的方法，探索噪声源的产生 和统计学规律，研究感兴趣的未知信号的特性和相干关系，从而检测并恢复被背景噪声 覆盖的微弱信号的新兴学科。微弱信号一般来讲具备两个特征含义：既表示有用信号本 身的幅度绝对值较小，也指相对背景噪声比较微弱甚至于被噪声淹没。噪声是一种无法 预知任一瞬时量的随机信号，对有用信号的检测和提取造成了干扰。研究如何提取背景

噪声下的微弱信号是当今信号分析与处理领域的热点之一，在雷达与电子对抗、无线通 信、传感器、系统辨识、地球物理勘测等领域有着非常广泛的应用前景。

微弱信号检测技术的研究重点在于抑制噪声和改善信噪比。当前，学术上对微弱信 号检测技术的研究重点内容包括：（1）研究噪声的成因和统计学规律，寻找抑制措施；（2）输出信号多次平均，提高信噪改善比；（3）根据功率谱的理论获取单次信号；（4） 改善传感器的低噪声前置放大器的设计；（5）快速瞬变的处理；（6）减少测量时间及 随机噪声的平均；（7）检测恢复低占空比信号；（8）模拟锁相量化混合数字平均技术。

从强噪声背景下提取并检测微弱信号，在无线通信、传感器及机械故障诊断等领域 应用广泛。传统的检测理论和算法主要包括相关检测法、取样积分法、光子计数技术和 现代谱估计理论等。常规的微弱信号检测方法具有一定的限制，一般要求有较高的检测 阈值。近年来，一些学者在对非线性系统进行深入的研究后，提出了诸如混沌振子、谐 波小波、随机共振和其他的新理论和研究成果，并把这些理论逐步应用于微弱信号检测 领域。

1928年，**JOhnSOn**在研究电子热骚动运动产生的噪声过程中，提出了随机共振与混沌 等理论，在微弱信号检测领域有了突破性的研究成果。**1992**年，**D. L. BirX**和**S. JPipenberg** 利用混沌复杂转换前馈网络初步研究了如何对背景噪声下的信号进行分类和提取等，之 后**J.StarkftB. V. ArUmugam**又研究了从强噪声背景下提取微弱小信号的新算法。

D. S. BroOmhead等人在非线性反滤波的基础上提出了相空间重构方法，并成功地提取 出淹没在噪声中的有用信号。**1993**年，**SimOnHaykin**和**LiXiaoBOb**在对海面弱信号回波 中的微弱目标信号检测中应用了混沌理论和神经网络检测算法。次年，他们又研究了混 沌背景下微弱信号的检测问题，并建立了基于**BP**算法训练的多层感知器网络的模型，分 别提出了相干与非相干检测法。**1997**年**Ward Small IV**和**Pete[M. CeIlieTS**人成功研发出双 色红外测温仪，如锁相放大器通过光纤和低温的测量，使用探测器调制，再通过锁相放 大器解调检波器的信号，实现了对低温对象发射微弱信号的检测。**2000**年西北轻工业学 院刘建等人依据相关性原理，通过**80C552**处理器成功滤除了信号中的白噪声，并在信号 处理电路中配置了信号通道以及参考信号通道，研制出**"BHJ. 400"**型红外测温仪，有 效地把深埋在强噪声中的微弱信号提取出来。**2001**年哈尔滨工业大学戴景民教授领导课 题组提出由折反式闪耀光栅分光红外光学系统，八元确镉汞探测器阵列接收光谱福射能 量和相敏检波检测微弱信号的方案，并成功研制出了红外多光谱辐射温度测量系统实现 了微弱光电信号的检测。**2003**年，戴景民教授又利用双向反射分布函数（**BRDF**）**NU**量理论 进行研究，设计出了一套集光、机、电于一体的**BRDF**自动测量系统**.2007**年，郝剑、柯

熙政、李建勋等人曾对有限精度下的时空混沌伪随机序列进行了深入研究，取得了一定 的成果。

很长的一段时间里，国内外学者对于微弱信号的检测主要还是基于相关检测的原理。 相关检测技术的发展方向是进一步提高灵敏度和信号处理能力，使定位精度得到增强。 相关检测技术是根据待测信号的周期性和噪声的随机性的特点，与之进行自相关或互相 关运算，从而达到滤除噪声的目的。也就是说，相关检测主要是对信号和噪声进行相关 性分析，最大限度压缩带宽和抑制噪声以实现检测出微弱信号的功能。由于互相关检测 的抗干扰性能比自相关好，因此本文中以互相关检测为原理。

随着对检测理论和算法研究的不断深入，高精密设备在微弱信号检测中使用越来越 多。高性能和低成本的数字集成电路器件如数字信号处理器(**DSRDigitalSignal Processing)** > 现场可编程逻辑器件(**FPGA, FieldPrograinmable Gate Array)**等，模拟 电路部分功能数字化实现了先进的信号处理算法，因此大幅度改善和提升检测设备的测 试性能。数字化、智能化和便携式是微弱信号检测设备的发展方向。目前，技术相对成 熟的微弱信号检测仪器主要有：锁相放大器、光子计数器、低噪声放大器和取样积分器 等。

1·3锁相放大器发展概况

锁相放大器是在相关检测技术的基础上，依据互相关原理研发的一种相干检测设备。 具体来讲，锁相放大器是一种对检测信号和参考信号进行互相关运算的电子设备，利用 参考信号与待测有用信号相关而与噪声频谱不相关的特性，从背景噪声中检测出微弱有 用信号。不同于一般的带通放大器，锁相放大器输出的信号不是输入信号的简单放大， 而是把交流分量放大并变成响应的直流信号输出。由于具有稳定的中心频率、较窄的通 频带、较高的品质因数等优越性能，锁相放大器在微弱信号检测领域得到了广泛应用。

美国**EG&PARC (SlGANLRECoVERY**公司前身）公司于**1962**年成功发明出了世界 上第一台锁相放大器**(Lock-in Amplifier, LIA,**也称锁定放大器），解决了微弱信号检 测过程中去除噪声的技术难关，极大促进了微弱信号检测与提取技术的发展。近**20**年以 来，学者们不断向前推进和深入锁相放大器的研究，使其各项检测技术性能也获得了极 大的改善。目前微弱信号检测技术和仪器的不断发展，已经广泛应用在诸多基础科学研 究和实际工程实践技术领域中，科学研究引领着当前锁相放大器的发展方向，同时工程 应用反过来对锁相放大器的检测性能也提出了更高的要求指标。

以前的锁相放大器都是通过模拟电子线路来实现，在动态范围、线性失真、噪声以 及零点漂移等方面表现不佳。由于数字技术的出现和不断发展，促使出现了模数技术相

结合的模拟锁相放大器，一则是在输入信号通道、参考信号通道和输出信号通道增加了 数字滤波功能来抑制部分噪音，又或者在模拟锁相放大器的原来设备上增加了一些模拟 数字转换、数字模拟转换和各种普通数字接口功能，能够实现由计算机操作、监控和显

示等附加功能，但其核心相敏检波器或调制解调器仍使用模拟电子技术实现，实质上也 是模拟锁相放大器。直到相敏检波器或解调器也使用数字电路实现后，就出现了真正意 义上的数字锁相放大器，数字锁相放大器比模拟锁相放大器有许多杰出的优点而备受欢 迎，成为现在微弱信号检测领域的热点。数字技术的不断向前推进，逐渐出现了使用 **FPGA**、**DSP**或者单片机技术实现的新型数字锁相放大器，系统误差小、稳定性好、功 能丰富、独立于温度和直流偏置影响之外，从而对锁相放大器的主流发展方向产生了深 刻影响。特别是基于**PC**的系统级模块化数字锁相放大器，其最大优点在于数字处理单元 的核心是由内部资源库巨大、性能十分强大的**CPU**构成，各种应用软件在操作系统平台 上运行，且算法设计不受硬件平台的限制，大大提高了数字锁相放大器的可扩展性。

外国的科研机构对于锁相放大器的研究较早，技术相对成熟。当前市场上通用的主 流锁相放大器主流产品都来自美国和日本，其中比较典型有美国斯坦福研究系统**(SRC, Stanford Research System)**设计与生产的**SR8XX**系列，美国信号还原公司**(Signal ReCOVery)**提出的**MOdel 7256**系列产品，和日本**NF**公司的**LI5630/5640**产品等。这些锁相 放大器具有非常高的稳定性和灵敏度，已然成为自动化与测控领域的标准。

相比国外，国内方面对锁相放大器的研究要晚一些，主要集中在一些高等院校及科 研机构。目前国内自主研制的通用锁相放大器产品种类还较少，主要有南京大学唐洪宾 等研发的**FS**型和**ND**型系列产品，中电第四十一所研制的**AV3891**型锁相放大器等。

1.4虚拟仪器技术与LabVI EW简介

1.4.1 虚拟仪器技术

1986年，美国国家仪器**(NatiOnal Iiistninients Corp,**简称**NI)**推出了虚拟仪器**(VirtUal In,trUment,** 简称**VI)**的概念。虚拟仪器技术深层结合了现代计算机技术与仪器技术，成为 计算机辅助测试**(Computer-aided Test, CAT)**领域中的一项重要技术口］。

在过去的**20**年里，计算机的迅速普及极大地推动了用于测试、测量和自动化等领域 的仪器发展。虚拟仪器是计算机普及以来最主要的一个发展产物，使得科学家和工程师 们能够在科学研究和工程应用中得以提高生产效率、改善测量仪器的精度和性能。虚拟 仪器由一个工业标准计算机或工作站配备了功能强大的应用软件、高性价比的模块化软 件（如插件板和驱动软件），共同完成传统仪器的功能。虚拟仪器代表了从传统的硬件 为中心的仪器系统的根本性转变，虚拟仪器的硬件系统（尤其是**I/O**接口设备）对输入

信号进行采集、测量与调理；软件才是仪器系统的关键，计算机软件完成信号数据的运

算、分析和处理过程，在计算机显示器上模拟传统仪器的控制面板，以数据、表格及波 形等各种形式输出检测结果，实现满足用户需求的各种测试功能。虽然计算机技术和集 成技术在过去的**20**年里都有了显著的进步，但虚拟仪器技术提供了建立在这个强大的 硬件技术上的虚拟仪器，能够更好地使用创新的方法实现测试、测控以及自动化等功能， 显著降低成本，提高效率。随着虚拟仪器的发展，工程师和科学家们得以彻底满足他们 对设计的需求（用户自定义），而不是通过传统仪器的固化了的功能用于测量和自动化 领域（供应商定义）。

传统仪器如示波器、波形发生器等都具备很强大的功能，但是一般价格比较昂贵， 而且只能够按照供应商的定义进行一个或多个任务。一般情况下，用户不能跨领域或自 定义使用的硬件仪器设备。提供给用户的传统仪器的旋钮和按钮，内置的电路及其功能， 都是特定于仪器的性质。此外，专用的技术和昂贵的资金投入使得这些传统仪器的开发 周期非常长，不利于科学技术和工程应用的长期发展。相比之下，由于虚拟仪器是基于 **PC**的，可以充分利用最新技术的优势将其纳入现成的计算机体系内。这些先进的技术 和性能，正在迅速地减小独立仪器和计算机技术之间的差距。

所谓虚拟仪器，是以通用计算机为核心，根据用户度对仪器的设计定义，用软件实 现虚拟控制面板和测试功能的一种计算机仪器系统。在虚拟仪器系统中，硬件积极式为 了解决信号的输入、输出、和调理，软件才是整个仪器系统的关键，上使用者可以通过 修改软件，方便地改变、增减仪器系统的功能与规模，所以说“软件即是仪器”。

虚拟仪器由通用仪器平台（简称硬件平台）和应用软件两大部分构成。随着测试、 测量应用的日益复杂，目前市场上提供的模块化硬件产品也非常丰富，比如，总线类型 支持**PCI**、**PXI**、**PCMCIA. USB**和**1394**总线等，产品种类从数据采集、信号调理、声 音和振动测量、视觉、运动、仪器控制、分布式**I/O**到**CAN**接口等工业通信等。按照 硬件接口的不同，虚拟仪器可分为基于**PC**总线、**GPIB**总线、**VXI**总线、**PXI**总线和 **LXI**总线的**5**种标准体系结构。虚拟仪器的软件构架从底层到顶层，由**VISA （Viitiial Iiistnimentation Software Arcliitechire）**库、仪器驱动库、应用软件三部分组成。**VlSA**库 实质上就是标准**I/O**库函数及相关规范的总称，一般将**I/O**函数库称为**VISA**库。**VISA** 库驻留于计算机系统中执行仪器总线的特殊功能，起着连接计算机与仪器的作用，以实 现对仪器的控制。仪器驱动程序是指能实现某一仪器控制系统与通信的软件程序集，是 语言程序实现仪器控制的桥梁。仪器的驱动程序有仪器生产商以源代码形式提供给用户 使用，每个仪器模块都有自己的仪器驱动程序。仪器驱动程序又称为驱动器。目前，广 泛使用的驱动器规范有**VPP （VXlPIUg&P1US,**即插即用型驱动器）规范和**IVl （Interchangeable Virtual Iiistniments,**互换型驱动器）规范两种类型。应用软件是直接 面向操作用户的程序，该软件简历在仪器驱动程序之上，通过提供的测控操作界面（或 称仪器面板）、丰富的数据分析与处理功能等完成自动测试任务。尤其是应用软件的通

用数字处理软件，集中体现了虚拟仪器的特点。虚拟仪器应用软件的开发工具有通用编 程软件和专业图形化编程软件两类。通用编程软件主要有**Miaosoft**公司的**Visual Basic** 与**Visual C++**、**Borland**公司的**Dephi**和**Sybase**公司的**PowerBuildero**这类软件功能强 大，但不是专门为虚拟仪器而设计，因此利用通用编程软件开发虚拟仪器需要开发者具 备较高的软件编程技术，同时又对虚拟仪器技术也有相当的了解。专业化图形编辑软件 主要有**HP**公司的**VEE, NI**的**LabVlEW**和**Lab Windows/CVI**等。这类软件专门为虚拟 仪器的开发而设计，对开发者的要求较低，只要了解软件的总体功能以及所要设计的虚 拟仪器的功能就可以快捷方便地进行开发。**LabViEW**这一行业标准图形化编辑软件， 不仅能轻松方便地完成与各种软硬件的连接，更能提供强大的后续数据处理能力，设置 数据、转换、存储的方式，并将结果显示给用户。

虚拟仪器技术的出现，使得科学家和工程师们再也不用封闭在固定传统仪器的狭窄 的操作空间中，能够很容易根据自己的需求建立测量和控制系统。在通信工程、物理勘 探、电子测量、生物医学工程、声学分析、振动分析、机械故障诊断及基础科学研究等 诸多领域应用极为广泛。在自动化测控领域，虚拟仪器可用于采集、控制数据；在航天 航空工程中，虚拟仪器可用于监测和分析火箭或卫星传递来的复杂数据，己被美国航天 航空局（**NASA**）用于火星探险；在电子和通信工程中，虚拟仪器可用于电子测量和信号分 析:在基础学科的研究中，虚拟仪器可用于设计虚拟实验系统，例如用于生化领域中监 测薄膜分子的相互作用，以及医学领域中嗅觉和视觉的理论研究。

1.4.2 LabVlEW 简介

LabVIEW（**Laboratoıy Virtual Iiistniment Engineering Workbench,**实验室虚拟仪器工程 平台）是一种基于**G**（**Grapliic**）语言的开发、调试和运行程序的集成环境。与所有通用 编程环境相同的是，**LabViEW**具备了诸如数据结构、事件处理以及内置编译器等标准 功能；而不同点在于，作为基于**G**语言的开发环境，**LabVlEW**简单、自然、可视化的 程序开发方式允许开发者可以通过各种交互式的方式进行编程。**LabVEEW**支持与多种 总线接口系统的通信连接，成为工业界和学术界中广泛使用做数据采集、仪器控制和数 据显示与分析等测量与自动化领域的有力工具。

LabVIEW的主要特点可概括如下⑵：

（**1**）图形化软件开发环境，可视化技术建立人机友好界面，并使用工程师和科学家们 熟悉的图形符号而不是文本式语言描述程序的行为。

（2）内部配置高效的编译器，提升程序运行速度。

（3）灵活的程序调试手段，用户可以在程序中设置断点单步执行程序，在数据流上设 置探针，加亮执行，便于观察程序运行过程中数据变化。

（4）功能强大的数据处理和分析函数库，几乎包括仪器设计中所需要的所有函数。

（5）支持多种系统平台，不同软件平台之间的程序可以通用。

（6）非封闭式的开发平台，提供**DLL**库接口和**CIN**接口，支持**OLE**功能，可以调用 其他软件平台的编译模块。

（7）强大的网际功能，支持基于**TcP**厂]\ **DDE**、**ACtiVeX**及**DataSoCket**实现网络连接 和数据交流。

一个**LabVIEW**程序一般由都由前面板（**FrontPanel**）.框图（**BlockDiagram**）及图 标连线板（**ICOnandConneCtor**）三部分构成。

L前面板

前面板是**VI**的交互式用户界面，外观和功能都类似于传仪器面板，用户的输入数据 通过前面板船体给框图，计算和分析结果也在前面板上以数字、图形、表格等各种不同 方式显示出来。

前面板上的各类控件根据输入输出功能可分为输入控件（**COntrOl**）和显示控件 （**Indicator**）两类，前者一般用于接受用户输入，包括编辑框、按钮、开关、旋钮等， 或者则一般用于显示输出结构，包括图形、指示灯、指示框等。

以 **LabVIEW** 自带的例程**"AnalyzeFiequeiicyResponseofFilterwi"**为例，其前面板 如图**LI**所示，其中包含了滤波器类型、采样频率、高低截止频率以及阶数等参数设置。

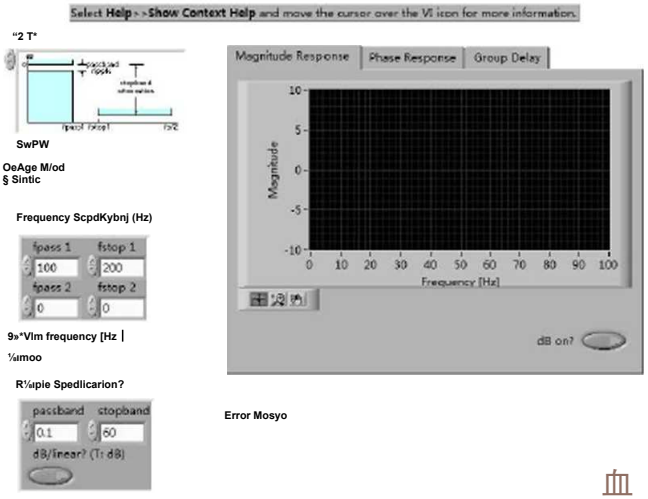


图 1.1 Analyze Frequency Response OfFilter vi 前面板

2 .框图

框图是程序代码的图形化表示，可通过选择菜单项中"窗口一显示程序框图"或者 使用快捷键**Ctrl+E**在前面板和框图之间切换。框图中含有各种图形化的函数、子**VI**、 变量、常量、结构和连线，从前面板中得到用户输入的数据后，按照所编写的程序以数 据流方式进行运算，最后给出结果并反馈给用户。

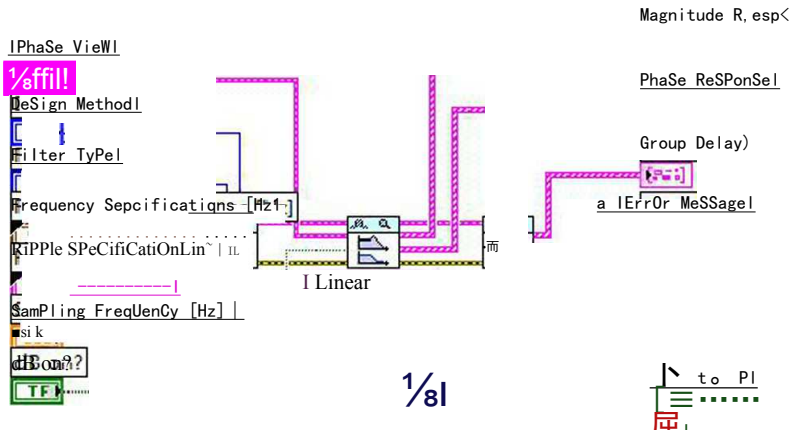


图 1.2 Analyze Frequency Response of Filter vi 程序框图

3 .连线板

连线板则用来定义输入和输出，用户可以在界面右上角的**VI**图标上用鼠标右键点击，选择"显示连线板"，调出当前**VI**的连线板进行设置。

如果将虚拟仪器与固定传统仪器作类比，前面板就像是仪器的操作和显示面板，提 供各种参数设置和数据显示，框图就像是仪器内部的印刷电路板，是仪器的核心运算部 分，对仪器用户来讲则是看不见的，而图标和连线就可以比作电路板上的电子设备集成 电路，确保仪器的逻辑和操作功能是正常的。

与枯燥乏味的文本编程相比，用户在**LabVIEW**编程中要做的步骤是正确设置参数， 并与各个子虚拟仪器连接。编写程序的一般过程就是使用鼠标挑选合适的控件、连线并 设置参数，显然更可视化、易于操作。

LabVIEW从**1986**年面世到现在，已有很多更新版本，可以在多个操作系统运行。 **LabVIEW**的附加工具包更是为不同工程行业的应用和开发提供了支持。历经二十多年的不断进步，**LabViEW**依靠其全新的理念和突出的特点，几乎成为自动化与测控行业 的业界标准。

4 .5本章小结

本章从课题研究背景及其现实意义出发，凸显出锁相放大器在微弱信号检测领域的 重要性以及利用虚拟仪器技术实现数字锁相放大器功能的优势。对锁相放大器发展历程 和**LabViEW**软件开发平台的介绍，指明了本论文后续工作的方向，能够认知课题研究 的关键问题和实现方案。

2锁相放大器的基本理论

锁相放大器(**LIA, Lock-in Amplifier,**又称锁定放大器)是对交变信号进行相敏检 波的检测仪器，以与待测信号同频的参考信号为基准，利用待测信号与参考信号相关而 与噪声不相关的原理检测待测信号，能够极大的抑制噪声，提高检测信噪比⑵。典型的 锁相放大器模型一般由信号通道、参考通道、相敏检波器(**PSD, Phase SensitiveDetector)** 和低通滤波器(**LPF)**构成，如图**2.1**所示：

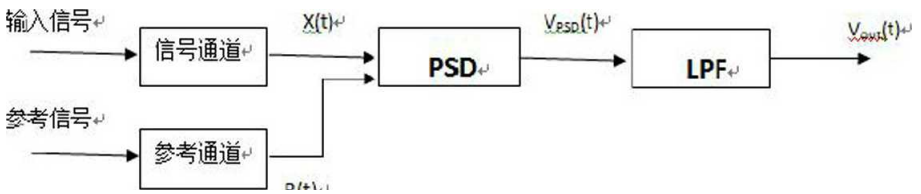


图2.1典型锁相放大器模型

信号通道的作用是将伴有噪声的微弱信号**x(t)**交流放大以推动相关器正常工作，并可 以用带通滤波器滤除部分噪声，以提高相敏检测器的动态范围。参考通道输入与待测信 号同步的参考信号**r(t),**通常为对称方波或正弦波。在**PSD**内完成待测信号和参考信号 的相敏检测，输出信号就是待测信号与参考信号的互相关函数信号，使用通频带较窄的 低通滤波器滤除与参考信号不相关的噪声，最终检测提取出待测信号的幅值和相位。低 通滤波器的通频带宽带宽决定了锁相放大器输出信号**V**。**ut(t)**的信噪改善比，低通滤波器 的通频带宽越窄则锁相放大器的输出信噪改善比越好网。

2.1 相关检测原理

相关检测技术是利用信号周期性和噪声随机性的特点，通过自相关或互相关运算达 到滤除噪声的技术。相关检测技术可细分为互相关检测和自相关检测，前者的抗干扰性 能优于后者，因此锁相放大器通常利用互相关检测原理来实现相敏检波⑸。

设输入信号**X(t)=s(1)+N(t),**其中**S(t)**为待测信号，**N(t)**为加性噪音**,R(t)**为参考信 号。按照互相关的定义，输入信号与参考信号作互相关运算可以得到：

RXRO==RSRo+RNRO **(2.1)**

因为噪声与参考信号不相关，得至**IJRNRO=0**，则**RXRO=RSRO** **(2.2)**

至此，经过互相关运算滤除了噪声，输出信号为待测信号与参考信号的互相关函数，再将输出信号解调就可以得到待测微弱信号。

2.2 相关检测技术

锁相放大器的核心部件是相敏检测器，由乘法器和窄带低通滤波器构成。其中乘法 器实现相干解调，实现输入仿真信号与参考信号相乘的运算，低通滤波对乘法器输出信 号进行处理，滤除高频含量，得到与被测信号有关的直流量**g)**

任何周期性信号都可以通过傅里叶变换展开为三角级数的形式，因此，正弦信号可 以作为本次设计中的基本信号，从而对锁相放大器的性能进行调试和分析。

假如输入信号为**X(t)=S(t)+N(t), S(t)**为微弱正弦信号，**N(t)**为加性噪声, **R (t)** 为正弦参考信号。

X(t)=S(t)+N(t)=Asin(ω$_s$t+O$_s$)+N(t) **(2. 3)**

R(t)=Rsin(o$_R$t+0$_R$) **(2.4)**

输入信号**X(t)**与参考信号**N(t)**相乘之后，对于的输出**V$_{p5}$D(t)**为：

VpsD（t) = [Asin(ω$_s$t+ θ $_s$)+N(t)]・[Rsin(ω$_κ$t+ 0 $_r$)]

=cos[(ω$_s$-ω$_R$)t+(θ $_s$- θ $_R$)]-cos[(ω$_s$+ω$_R$)t + (θ $_s$+ θ $_r$)]+N(t) Rsin(ω t+ 0 R) (2. 5) 因此，若忽略考虑加性噪声的影响，乘法器的输出得到待测信号和参考信号的差频成分 与倍频谐波分量。对于锁相放大器来讲，参考信号通常是与待测信号同步的，最终通过 低通滤波器后的输出为

V$_{owt}$=Cos (θ$_s$-O$_R$) **⑵ 6)**

这个直流输出信号的大小除了与待测信号和参考信号的振幅相关外，还与两者的相 位差的余弦值成正比，这构成了锁相放大器的基本原理。从频域上来讲，锁相放大器利 用频谱迁移的原理抑制噪声，用调制器将原信号的频谱从**ω**处迁移到**3 =0**和**3 =2 3**处， 再经过窄带低通滤波器滤除输出信号中的高频分量就可以得到与待测信号和参考信号 的幅值、相位都相关的输出信息。相敏检测器的带宽取决于低通滤波器的带宽，而低通 滤波器的性能决定了测量的准确性。因此，低通滤波器的设计指标关乎锁相放大器设计 的抑噪性能和精度，在后面的文章中对低通滤波器会有详细的介绍。

在一路参考信号输入的锁相放大器中，锁相放大器的输出与参考信号的幅度、相位 都有关系。因此，在参考信道中需要设计一个参考信号相位精准可调的移相电路，若不 改变参考信号的幅值，通过改变参考信号的相位来判断待测信号的相值信息。当参考信 号与待测信号同相时，得到的直流输出最大；当参考信号与待测信号相差为**180**。时，

得到负最大的直流输出:当参考信号与待测信号的相差为**90**。或**270°**时，锁相放大器 的输出值为**0**。因此，可以通过调节参考信号的相位以获得待测信号的相值。

2.3 正交矢量型锁相放大器

若将参考信号的相位移动**90**。，使用两个相敏检测电路则可以构成不需调节相位的 双锁相放大器，也称正交矢量型锁相放大器(8)。在参考信号幅度和相位已知情况下，， 这种锁相放大器克服了测量结果对相位差的依赖，根据两个输出分了的正交性可以计算 出被测信号的幅值和相位，避免了对参考信号的可变移相对测量带来的准确性影响。正 交矢量型锁相放大器的基本电路构成如下：

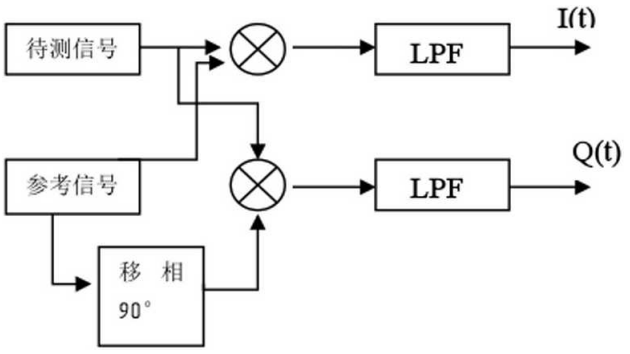


图**2. 2**双锁相放大器模型

由双锁相放大器的模型可以得到两路参考信号下的输出，有：

I=sin(θ_s-θκ) **(2. 6)**

Q=COS(Θ_S-0_R) **(2.7)**

则通过一定的计算很容易就可以得到待测信号的幅值和与参考信号的相位差:

A= **(2)8)**

θ_s- θ R=artan() **(2. 9)**

2. 4模拟与数字锁相放大器性能对比

早期应用于检测强噪声背景下微弱信号的锁相放大器是用模拟电路实现的，虽然在 发展之初大幅度提高了微弱信号检测的技术，但随着数字技术的不断发展，对微弱信号 检测仪器提出了高精度、高稳定性的要求，模拟锁相放大器的局限性越发的凸显出来：

(1)模拟锁相放大器由模拟电子器件构成，本身会产生大量噪声(包括有源噪声和无 源噪声)，进而对锁相放大器的性能造成影响。

(2) 相敏检波器是锁相放大器的核心部件，模拟电子器件的线性范围小，易饱和，难以保证相关运算的精度，以致系统的精度收到很大程度的限制。

(3)模拟锁相放大器的积分器因电容自身的漏电现象,积分时间不可能达到理论上的无限长,导致噪声并没有被完全抑制，使仪器对还变周期信号的检测效果变差。

(4) 模拟锁相放大器是一个开环系统，因此自身无法纠正干扰产生的误差。

如今，各类各样的数字信号处理方法代替了传统的模拟信号处理方法，数字相敏检波器的实现最终出现了真正意义上的数字锁相放大器。与模拟锁相放大器相比，数字锁相放大器有诸多的优势①(1)。

(1) 数字锁相放大器的信号输出通道中不存在直流放大电路，就不会产生由直流放大器的工作特性而引起的温漂和时变性等干扰问题；

(2) 数字锁相放大器的内部晶振时钟稳定性较高，随时间推移和温度变化小，一方面能降低参考信号的不稳定所导致的误差，而另一方面在内部参考模式中，数字信号处理单元能在最短时间甚至能实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势；

(3) 数字锁相放大器具备高性能的正交解调技术，检测正交性的待测信号时可以在很大程度上提高微弱信号检测的准确性；

(4) 数字技术的发展促使数字信号处理单元的集成度不断提高但成本降低，从而使得数字锁相放大器的性价比相应提高,因此数字锁相技术在未来的测试测量领域将中会产生更深入的变革。

2.4数字滤波器的设计

相敏检波器的输出信号为被测信号的差频分量和倍频分量，再通过低通滤波器之后便可以得到含有被测信号幅值、相位信息的直流分量。低通滤波器的通频带宽决定了滤波器的性能和指标，进而影响锁相放大器的精度。因此，有必要在这里对数字滤波器的设计进行讨论，以得到适用于锁相放大器的低通滤波器底(2)。

滤波器是信号处理中的一个常用概念，实际上我们可以将其看作一个黑箱。所谓滤波，是指根据输入信号估计输出信号，其中输入信号与输出信号存在某种程度上的关联。滤波器的种类很多，应用很广。按照滤波器处理信号的不同可分为模拟滤波器和数字滤波器；按照处理信号所处频带的不同，滤波器可分为：低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器、带阻滤波器等；按照构成的元器件的不同可分为有源滤波器和无源滤波器；按照滤波器参数的时变性，可分为时变滤波器和时不变滤波器；按照信号的输入与输出关系可分为线性滤波器和非线性滤波器百(5)。

过去多数采用模拟电路设计滤波器，但是模拟电子技术存在温漂、电压漂不稳定和 引入噪声等复杂的问题，而数字滤波器的发展建立在现代数字信号处理(**DigitalSignal Processing, DSP)**技术基础上，已经可以取代模拟滤波器。数字滤波是数字信号处理的 基本内容之一，本质上讲是对离散的数字量进行合理的运算处理，从频域实现信号分离
的功能。数字滤波器又可以分为有限冲激响应(**FlR)**数字滤波器和无限冲激响应(**HR)** 数字滤波器″″

一个数字滤波器的系统函数可以表示为：

$$H(二)=\frac{£仇二\ \mathbf{K}\ Y(-)}{\cdots\cdots\cdots\cdots} \qquad \textbf{(2. 10)}$$

k=l

由**H (Z)**得出系统输入输出的常函数线性差分方程为:

$$y(n) = \hat{}a_{fc}\sum\sim^{k}y(n-k) + \hat{}b_{k}x(n-k)$$

左=1 Jt=O

设**N**阶**FIR**数字滤波器的单位冲激响应为**h (n) ≠0, n=0, 1, 2,…NT,**则传递函数可表示 为：

$$H(二)=\underset{"=0}{\overset{N-I}{£k(n)}}\sum\sim^{n} \qquad \textbf{(2. 12)}$$

FlR滤波器的频率响应为：

$$Hd) = Eh(n)e" \qquad (2)(3)$$

W=O

可以看出，**FlR**滤波器总是稳定的，因此设计起来也相对简单″闻。

HR滤波器的设计采用递归结构，它的运算结构由时延迟、乘系数和相加等基本运 算组成，传递函数表达式为：

$$H(z) = A\cap k\ \frac{l + \%Z\text{-}+\%Z\text{-}2}{1 — \%广+\%]_{2}} = {}^{A}nHk(Z) \qquad \textbf{(2. 14)}$$

k

其中, QM $\mathbf{a_{2k}}$**. 6μ** 也上**(k=0, 1,2,…,N)**代表**HR**滤波器的系数, 其频率响应为:

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：
https://d.book118.com/486045113131010142