文章编号:1671-4598(2023)12-0076-08　DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2023.12.012　中图分类号:TP277.3　文献标识码:A

水下无人装备声呐发射机自动测试系统设计

熊童满，王　维
（中国船舶集团有限公司 第710研究所，湖北 宜昌　443003）

摘要： 针对某型水下无人装备声呐发射机的工作原理和现有声呐发射机检测方式落后、检测能力不足等问题，设计了基于国产PXI总线仪器平台的水下无人装备声呐发射机自动测试系统，实现了声呐发射机的工作电压电流、发射信号频率、发射电压一致性等特性参数的自动测试，同时还实现了测试数据管理、测试平台自检和计量等功能；首先分析了发射机的工作原理和检测需求，进行声呐发射机自动测试系统的总体设计；其次介绍自动测试系统的软硬件平台实现方法和关键技术，包括国产PXI总线仪器选型、接口单元设计、测试平台软件架构设计和实现以及数据处理算法设计和实现等技术；最后对声呐发射机自动测试系统的试验结果进行分析；应用结果表明：该系统能实现某型水下无人装备声呐发射机主要参数的测量，相较传统测试方法，自动测试系统能够节约大量的测试时间与人力，实现测试工作效果的最大化提高，并且还能防止人为因素对测试结果造成的不良影响。

关键词： 声呐发射机；PXI总线；虚拟仪器；LabWindows/CVI；自动测试；硬件国产化

Design of Automatic Testing System for Underwater Unmanned Equipment Sonar Transmitters

XIONG Tongman，WANG Wei
(No.710 R&D Institute，CSSC，Yichang　443003，China)

Abstract: In response to the working principle of an underwater unmanned equipment sonar transmitter and outdated detection methods and insufficient detection capabilities of existing sonar transmitters, an automatic testing system for underwater unmanned equipment sonar transmitters based on a domestic PXI bus instrument platform was designed, which achieved the automatic test characteristic parameters of working voltage and current, transmission signal frequency, and transmission voltage consistency of the sonar transmitter. At the same time, it also implements the functions of test data management, test platform self-inspection and metering; Firstly, the working principle and detection requirements of the transmitter were analyzed, and the overall design of the sonar transmitter automatic testing system was carried out; Secondly, the implementation methods and key technologies of the software and hardware platform in the automatic test system are introduced, including the selection of domestic PXI bus instruments, the design of interface units, the design and implementation of the software architecture of the test platform, and the design and implementation of data processing algorithms; Finally, the experimental results of the sonar transmitter automatic testing system are analyzed; The application results show that the system can realize the main parameter measurement of the underwater unmanned sonar transmitter. Compared with traditional test methods, the automatic test system can save a lot of test time and manpower, achieve the improvement of the test efficiency, and prevent the influence of human factors on test results.

Keywords: sonar transmitter; PXI bus; virtual instruments; LabWindows/CVI; automatic testing; domestic hardware

0　引言

水下无人装备的自导系统一般由声基阵、发射机、接收机及信号处理机组成，是装载在水下无人装备上的小型声呐[1-3]。声呐发射机作为自导系统的核心部分之一，其主要功能为将信号源产生的特定的小功率电信号经过功率放大、脉冲变压、宽带匹配网络转换为大功率电信号，最后通过水声换能器将大功率电信号转换为声信号。因此声呐发射机的性能直接影响着声呐的整体性能[4-10]。

传统的声呐发射机的调试和检测方法大都是通过连接电缆将系统的信号输入输出端和稳压源、示波器、信号源、万用表等通用仪器设备连接，一般需由2～3名操作人员根据需要检测的技术指标事先规划好测试流程，按照测试流程手动逐一检测发射机各项性能指标，检测过程通常需要1～2小时，每项测试完成后还需要对大量测试数据进行人工读数并记录，效率低，同时还存在着人为误差、读数记录错误的风险。此外，由于小型声呐发射机具有布线空间狭小、电压高、电流大、功率大和热耗大等特点，又多以脉冲形式工作[9]，在用传统方式检测时，人员操作不当会引起电路板烧毁等严重后果，因此对操作人员和外接标准检测工具都有较高的要求。传统检测方式给检测维修人员带

收稿日期:2023-06-20；　**修回日期:**2023-07-04。
作者简介:熊童满(1981-),男,硕士,高级工程师。
引用格式:熊童满,王　维.水下无人装备声呐发射机自动测试系统设计[J].计算机测量与控制,2023,31(12):76-83.

来了很大的不便，增加了人力成本和经济成本。因此传统的声呐发射机检测方法已不能满足实际测试需求，采用自动测试系统已经成为一个通用选择。目前，国内针对声呐发射机设计的相关研究文献较多，而对声呐发射机自动测试系统的相关研究较少，如文献［4－6］对呐发射机的驱动信号进行了相关研究；文献［7－9］对声呐发射机的工作原理和相关电路进行了深入研究；文献［9］从工程研制角度出发，探讨了小型声呐发射机故障原因的一般方法和过程；文献［10］设计了一种基于 LabView 的声呐多通道接收机测试系统，只实现了对接收机通道各项性能指标的测试；文献［11］设计了一种基于 LabView 和 NI 仪器的声呐声学段自动测试设备，但只能完成声呐声学段的整体测试，无法对声呐发射机单独进行检测。

综上所述，需要研制出一套水下无人装备声呐发射机的自动测试系统。目前自动测试系统常用的硬件技术有面向仪器系统的 VME 总线技术（VXI，VMEbus extensions for instrumentation）以及面向仪器系统的 PXI 总线技术（PXI，PCI extensions for instrumentation）[12]。其中 PXI 总线技术综合了 GPIB 总线、VXI 总线、VME 总线、PCI 总线的优点，已经被广泛应用于电子产品、航空航天、船舶、兵器、无线电等各测试领域和诊断平台中，具有模块化、小型化、数据传输速率高、兼容性强、高性能和高集成度等特性[11-18]。

考虑到自动测试系统通用性、扩展性和高性价比等需求以及 PXI 总线技术综合优势，本文优先选用国产 PXI 总线仪器作为硬件平台设计并实现了某型水下装备声呐发射机的自动测试系统。该系统通过控制模块化硬件板卡生成激励信号，并实时采集数据，同步显示测试结果，最终自动生成报告，完成对发射机的自动测试。检测过程中，测试人员操作简单，测试效率高，同时还能防止人为因素对测试结果造成的不良影响。

1　系统结构和原理

1.1　需求分析

水下无人装备自导系统的发射机主要由电源、电源转换电路、信号转换与驱动模块、功率放大模块、脉冲变压器和宽带匹配网络组成，整个系统在相应频带内驱动水声换能器实现宽带发射[7-11]。发射机原理如图 1 所示。

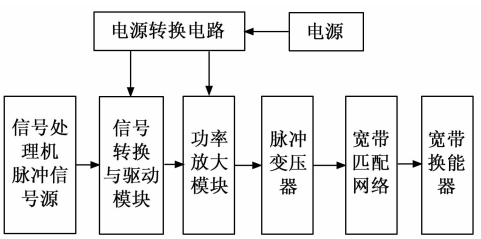

图 1　发射机原理框图

根据发射机工作原理，其发射功率和效率决定了整个发射机的作用距离和有效工作时间，同时其工作带宽也决定了发射机的检测能力、抗干扰能力等关键指标，因此发射机自动测试系统需要实现的如下功能：

1）工作电压检测：提供声呐发射机所需要的工作电源，监测其稳压之后的工作电压；

2）静态工作电流检测：将发射机信号输入端接地，检测发射机静态工作电流；

3）动态工作电流检测：产生一路单频周期调制波信号加载至发射机信号输入端，检测发射机动态工作电流；

4）输出电压检测：产生一路单频周期调制波信号加载至发射机信号输入端，检测发射机信号测量端的信号，计算输出信号电压峰峰值；

5）输出电压一致性检测：根据发射机工作频段，产生满足要求的 10 组单频周期调制波，依次加载至发射机信号输入端，在发射机信号测量端分别检测各频率所对应的输出信号，计算电压起伏；

6）发射功率控制测试：检测发射功率控制功能，分别在小功率发射和大功率发射时检测输出信号电压峰峰值；

7）保护功能测试：为了减小了因激励信号异常和故障给发射机带来的危害，该型发射机设计了保护电路，当输入异常信号时，保护电路会使发射机输出端输出脉冲信号，保护功率器件。检测软件需要模拟异常信号的输入，并检测发射机输出信号是否满足要求；

8）检测结果管理：能够保存、查询、打印、删除检测结果；

9）设备自检和计量：能够完成检测设备自检和计量。

1.2　系统组成和检测原理

声呐发射机自动测试系统的系统结构组成如图 2 所示，由机械结构单元、硬件平台和软件三部分组成。

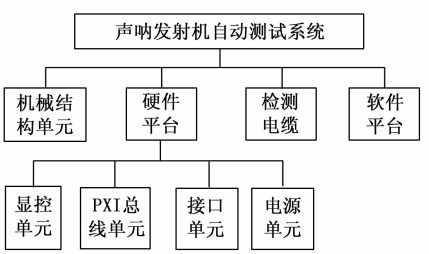

图 2　系统结构组成框图

机械结构单元主要为硬件平台提供装配接口和安装空间，并起到保护作用，分为箱体、箱盖、内框架、托盘、脚轮等。

硬件平台主要完成串口通讯、测试激励信号的产生、响应信号的采集与分析并通过开关通道控制各信号和电源的通断等测试功能，还提供人机交互接口。硬件平台包括显控单元、PXI 总线单元、接口单元和电源单元。显控单元提供人机交互接口；PXI 总线单元是整个系统的控制核心，包括嵌入式控制器、多功能数据采模块、串行口扩展模块、通用开关模块以及 PXI 电磁屏蔽机箱。在软件的辅助下，由嵌入式控制器控制多功能数据采集模块、数字多用表模

块、多路开关模块、串口扩展模块完成检测任务；电源模块为被测产品和相关资源提供电源，由多路开关模块控制电源的接通和断开；接口单元为 PXI 总线单元与被测产品之间提供适配接口，主要完成对被测信号的转接、隔离和调理。

检测电缆用于自动测试系统和被测产品的连接。

软件单元包括平台软件和检测程序两大部分，平台软件采用 Labwindows/CVI 作为软件平台，为自动测试系统的检测软件提供一个通用的软性系统环境；检测软件则是在此环境下开发的具体被测发射机的性能指标测试程序。

声呐发射机自动测试系统的工作原理如图 3 所示。软件平台运行在 PXI 总线单元的嵌入式控制器中，实现对多功能数据采集模块、串行口扩展模块、数字多用表模块、多路开关模块等虚拟仪器模块的控制以及检测流程的实现；硬件平台通过内部导线将各单元连接；待检发射机通过检测电缆和适配接口单元上的检测接口连接。

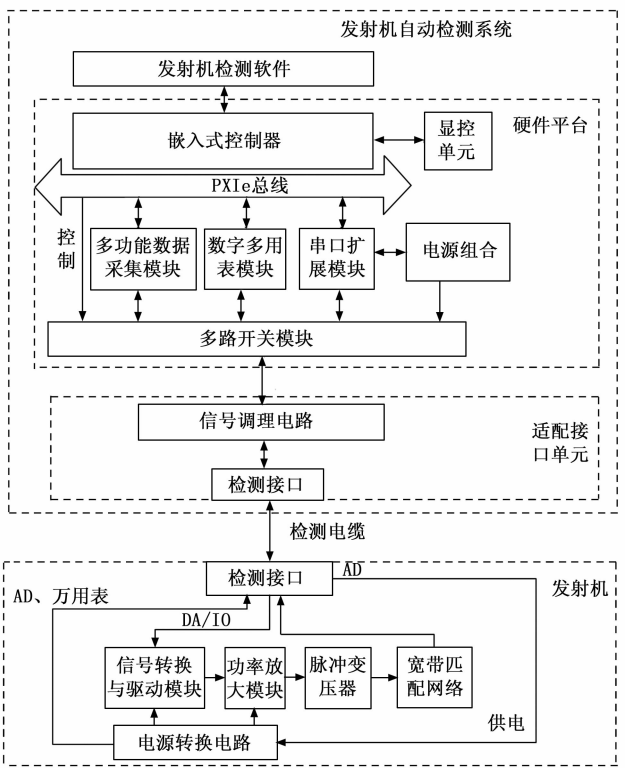

图 3 系统工作原理图

2 系统硬件设计

由图 2 和图 3 可以看出，PXI 总线单元为整个系统的核心。PXI 总线是美国 NI 公司 1997 年推出的测控仪器总线标准，具有开放性和模块化的特点，便于本系统快速搭建测试平台以及系统未来随着检测项目增加后的扩展应用[12-14]。

接口单元是被测对象和 PXI 总线单元之间的信号传输的桥梁，对输入信号进行预处理和分配采集信号通道，以及提升系统的抗干扰能力并起到对硬件系统保护的作用。

因此，发射机自动测试系统硬件设计的关键技术有以下两点：

1）选择合适的国产 PXI 总线仪器：目前基于 PXI 总线来搭建的自动测试系统比较常见，相关研究文献也较多，但多采用国外厂商的 PXI 总线仪器，国外产品的占有率远远高于国内产品[11-18]。近几年，随着中美贸易摩擦不断，美国对我国实施了出口管制，对关键的进口器材进行全面禁运，导致进口元器件未来存在断档和停产的风险[19-20]。此外发射机自动测试系统提出的工作温度范围为－20～50 ℃，国内市场上的进口 PIX 总线仪器无法满足自动测试系统的环境适应性要求。因此本系统在硬件选型上采用国产化替代产品，以减少装备对进口电子元器件的依赖，满足环境适应性要求，促进装备国内自主保障和自主创新能力提升。

PXI 板卡选型时要考虑发射机的工作特点和技术指标，例如 DA 要能产生要求频段内的信号；AD 采样频率必须能够覆盖信号频率；具有足够数量的 I/O 口用于传送控制指令；万用表卡量程应满足发射机的技术指标；串口卡的串口类型、波特率、串口数量应满足检测需求等。

2）设计合适的接口单元：接口单元的设计需要结合待测发射机的型号，根据其尺寸、电路接口协议和型号设计出相应的适配器、检测电缆和检测接口，并考虑对后续产品测试的兼容性和通用性，同时具备防错插功能。

2.1 硬件选型

国内对 PXI 总线研究和产品研制开始于 2000 年左右，经过 20 多年的发展，NI 公司的大部分 PXI 总线数据采集卡硬件设计技术都已被国内厂家掌握并国产化[21-22]。北京航天测控技术有限公司作为国内最早对 PXI 总线技术进行研究的厂家之一，其 PXI 总线产品已经系列化和规模化，并成功应用在多个行业的上千套测试系统和保障信息系统中。本系统以北京航天测控技术有限公司生产的 PXI 总线仪器为基础搭建自动测试系统的硬件平台。

2.1.1 PXI 屏蔽机箱

为满足系统电磁兼容性的要求并综合考虑扩展性和经济性，自动测试系统硬件平台采用 AMC57301 机箱，嵌入式控制器为 AMC4198。AMC57301 是一款 PXI 总线 8 槽电磁屏蔽机箱，支持 3U 尺寸板卡，主要由总线背板、电源和机械结构等部分组成。其封闭式屏蔽外壳保证系统具有良好的电磁屏蔽性能。

PXI 嵌入式控制器是构建 PXI 总线测试系统必不可少的核心部件。AMC4198 是一款宽温嵌入式控制器，组合了各种仪器控制接口，采用可靠的机械及电气设计，可满足各种基于 PXI 测试系统的需求特性。

2.1.2 多功能采集模块

检测的准确率是建立在测试数据精确度的基础上的，因此采样信号的精确度将直接影响测试结果。为了减少采样信号的失真度，根据香农采样定律，A/D 采样率必须至少是信号最高频率的两倍。在实际应用中，A/D 采样率需要为信号最高频率的 5～8 倍才能更好地恢复信号波形。同

理，为了保证激励信号的精确度，D/A 转换的数据更新速率也应为需产生的模拟信号最高频率的 5～8 倍。

因此，为了减少采用信号和激励信号的失真度，根据发射机的最高工作频率，多功能数据采集模块选用 AMC4332B，该模块是基于 PXI 总线的多功能测量模块，具有 32 通道单端/16 通道差分 A/D，采样率为 500 kSa/s；4 路 D/A，输出速率 2.0 MHz；32 路双向 I/O 通道。该模块用于多通道 A/D 采集、D/A 输出控制以及数字 I/O 的测量与控制，在测试过程中用于对发射机工作特征电压、发射波形等信号进行采样，同时通过 D/A 端给发射机提供激励信号、通过 I/O 通道控制发射机的发射功率。

2.1.3　数字多用表模块

数字多用表模块采用 AMC4312，该模块是基于 PXI 总线的六位半数字多用表模块。可以对直流电压、交流电压、直流电流、交流电流、频率、电阻等进行高精度测量。该模块主要用于测试过程中监测发射机的工作电流。

2.1.4　串口扩展模块

串口扩展模块采用 AMC5214C，该模块是一种基于 PXI 总线的多协议通用异步串行通讯模块，具有 4 个独立的 RS-232/RS-422/RS-485 的串口通讯端口，每个端口可通过拨码开关设定为需要的串口通讯模式，最大数据通讯速率为 921.6 kbps，4 个端口之间采用光电隔离，端口具有±15 KV 的静电放电保护能力。在测试过程中用于对程控电源的控制和发射机参数设置。

2.1.5　多路开关模块

多路开关模块采用 AMC4615，该模块是基于 PXI 总线的大电流通用开关模块，可以实现 15 通道信号通断控制，用于测试过程中电源和信号的通断控制。其最大允许通过电流为 8 A（纯阻性负载）；最大允许电压：250 VAC、125 VDC；最大允许功率：2 000 VA，240 W。

各 PXI 总线仪器的工作温度均为－20～＋55 ℃，储存温度均为－40～＋70 ℃，满足自动测试系统的环境适应性要求。

2.2　接口单元设计

接口单元原理如图 4 所示，检测接口单元为 PXI 总线单元与被测产品之间提供适配接口，主要完成对被测信号的转接、隔离、调理以及产品的上电控制。PXI 总线单元通过接口单元与被测对象相连。

检测接口单元按功能可分为 5 个单元电路：1）供电单元电路；2）电流测量单元电路；3）多功能采集单元电路；4）开关单元电路；5）通讯接口单元电路。

为满足电磁屏蔽要求，从结构上为接口单位设计了电磁屏蔽柜，该电磁屏蔽柜为抽屉模式，高度为 3 U，安装在机械结构单元上，整个接口单元封闭在电磁屏蔽柜中，通过航插和屏蔽电缆与 PXI 机箱的接口连接。

3　系统软件设计

3.1　软件总体设计

检测软件实现的关键技术有两点：设计合适的软件架构和设计合理的数据处理算法。本文基于 LabWindows/

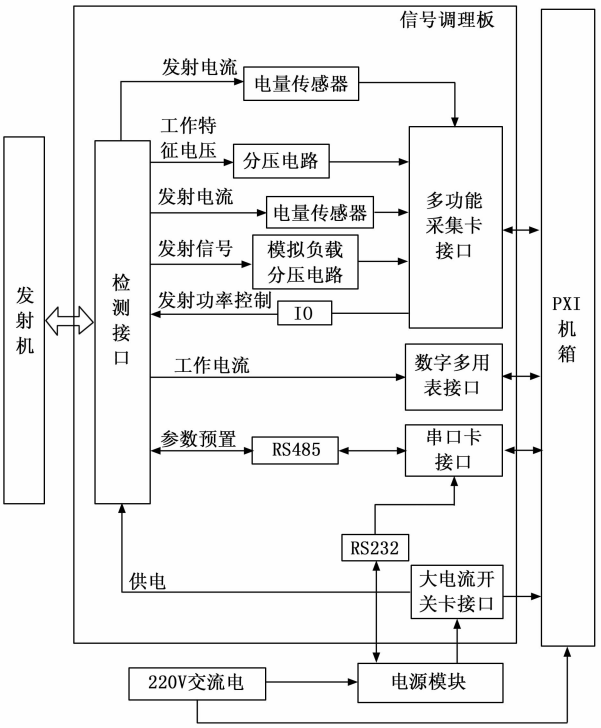

图 4　接口单元原理框图

CVI 软件开发环境，采用自顶向下和模块化的程序设计方法开发了自动测试系统的软件平台。

LabWindows/CVI 是 NI 公司推出的虚拟仪器软件开发环境，是面向测控领域的专业开发平台，提供了直观的图形显示界面，具有极其丰富的函数库和仪器驱动库，全面支持 C 语言，便于开发具有良好人机界面和操作方便的应用程序[23-24]。

为了提高软件的可扩展性和通用性，在软件结构设计时分别采用两种设计思想，一种是模块化设计，一种是软件分层化设计。模块化是将系统按照功能进行细分成不同的功能模块，各个功能模块相互独立，彼此之间通过调用约定的接口连接起来。这种设计方法能够使系统设计结构紧凑、整体性强、开销小，同时开发效率高。在整体软件设计采用模块化的同时，每个模块设计时使用层次化结构，各层之间单向依赖，不构成循环，这种层次结构在设计模块低层时可以不用考虑高层的实现，各层之间独立性强；高层的错误不会影响到低层中，方便了软件模块的调试、修改、维护和扩充；同时，由于各层之间不会产生递归调用，避免了死锁发生的可能，提高了系统的可靠性[25-26]。

从功能上整个软件可划分为：发射机内部工作电源检测模块、静态工作电流检测模块、功率控制检测模块、输出电压检测模块、动态工作电流检测模块、输出电压一致性检测模块、保护功能检测模块、测试数据管理模块。图 5 为检测软件的功能模块框图。

从软件层次上，整个软件设计成 4 个层次：人机交互层、测试规则层、板块应用层和硬件驱动层，如图 6 所示。

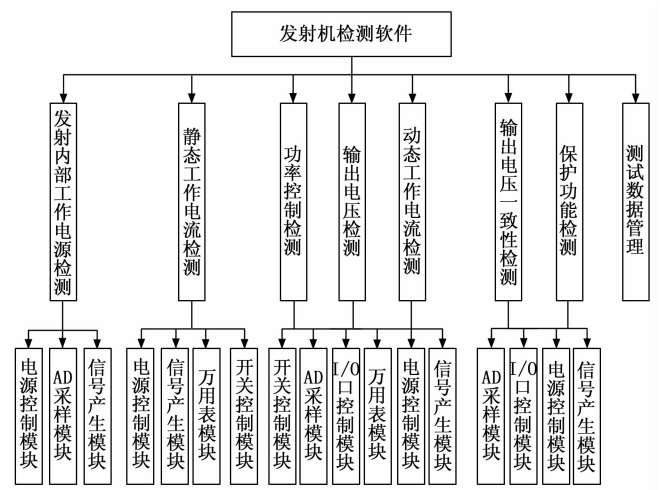

图 5 发射机检测软件功能模块框图

各层之间独立性极强，只通过函数接口进行数据交互，本层的更改不影响其余各层的功能，这种软件结构大大提高了测试软件的扩展性、可复用性和可移植性。当需要对测试功能进行扩展时，只需要在人机交互层和测试规则层中增加相应功能，而不需要修改所有代码；当需要将测试软件移植到其他平台时，只需要根据硬件厂商提供的驱动来修改板卡应用层，就能快速将软件成功移植。

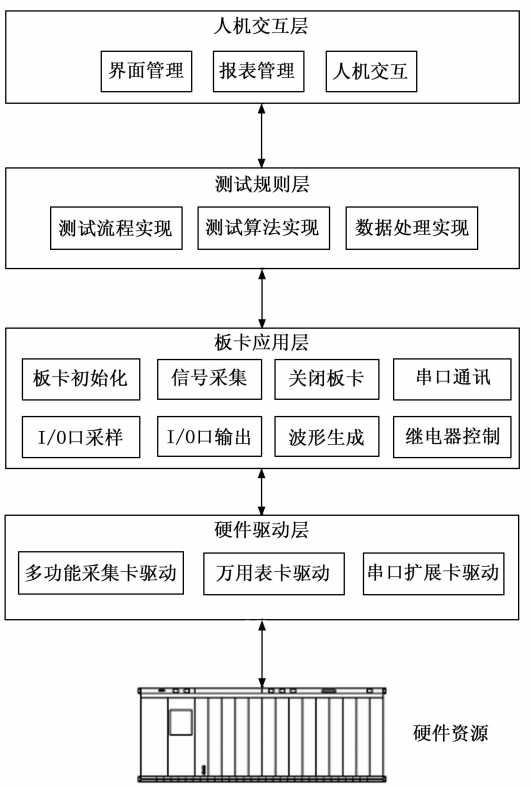

图 6 检测软件层次图

3.2 软件实现流程

在发射机检测过程中会遇到需要处理多个任务的情况，如果采用单线程编程方法，会降低程序的执行效率，为了保证自动测试系统的实时性和可靠性，本文在设计检测软件时采用了多线程技术，通过主线程来创建人机界面和用户交互，通过次线程完成数据采集、数据处理和显示、状态监控等其他对时间要求严格的操作。多线程是一种基于操作系统的时间片轮转调度机制，在同一个时间段内至少有两个独立的线程运行各自的程序，因为每一个线程都有自己独立的堆栈，使多个任务在宏观上并行执行，大大提高了 CPU 使用率和程序的运行效率，最大限度地提高了系统运行速度和响应速度[24,27]。

LabWindows/CVI 中有两种设计线程的方法。一种方法是创建线程池，该方法适合于在循环内执行或不连续地执行若干次的任务，另一种方法是创建异步定时器，该方法适用于按照固定时间间隔执行的任务。

本软件在设计时采用线程池技术建立了 1 个主线程和 4 个次线程。主线程用于响应用户的操作，具有最高的优先级，保证了用户的操作能够被及时地响应处理，4 个次线程包括采集线程、显示线程、监控线程以及处理线程，4 个线程同时运行，这样就可以进行连续数据采集的同时，执行其他任务，而不用担心出现数据大量流失的现象。检测软件流程如图 7 所示。

检测开始后，先完成检测系统硬件资源的初始化，包括各板块初始化、电源初始化、I/O 控制口线初始化等。随后通过控制开关卡给被测产品上电，在检测完工作电压和电流后就开始创建主线程和次线程。主线程用于完成激励信号的生成和加载、检测流程的控制等。4 个次级线程依次为监控线程、采集线程、数据处理线程和显示线程，分别完成被测产品状态参数监控、A/D 采集、检测数据处理和检测结果判断显示等功能。

多线程的实现过程主要由创建线程池、创建线程标志、创建工作线程（此处以监控线程为例）、等待线程结束、释放线程、释放线程标志、释放线程池等步骤完成，具体实现流程如图 8 所示。

3.3 激励信号生成算法设计和实现

在检测发射机的过程中，需要产生多种波形。以满足特定频率、周期和脉宽要求的余弦波脉冲信号（*CW* 信号）为例，*CW* 信号的复数形式如式（1）所示：

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j^2 \pi f_0 t} \tag{1}$$

式中，T 是方波包络宽度，f_0 是载频频率。相应的复数谱如式（2）所示：

$$U(f) = \sqrt{T} \operatorname{sinc}[\pi(f - f_0)T] \tag{2}$$

CW 信号主要参数包括发射周期 T，更新速率 f_n，脉冲宽度 t，脉冲信号频率 f 以及初始相位 φ。脉冲信号的幅度 A 与后续放大电路相结合控制发射信号发射声源级的大小[5]。

对于一个周期的正弦波形来说，组成的点数是固定的，根据 AMC4332B 的信号生成方法，要生成频率为 f 的信号，需要将板卡的刷新速率设置为合适 f_n，假设生成一个周期

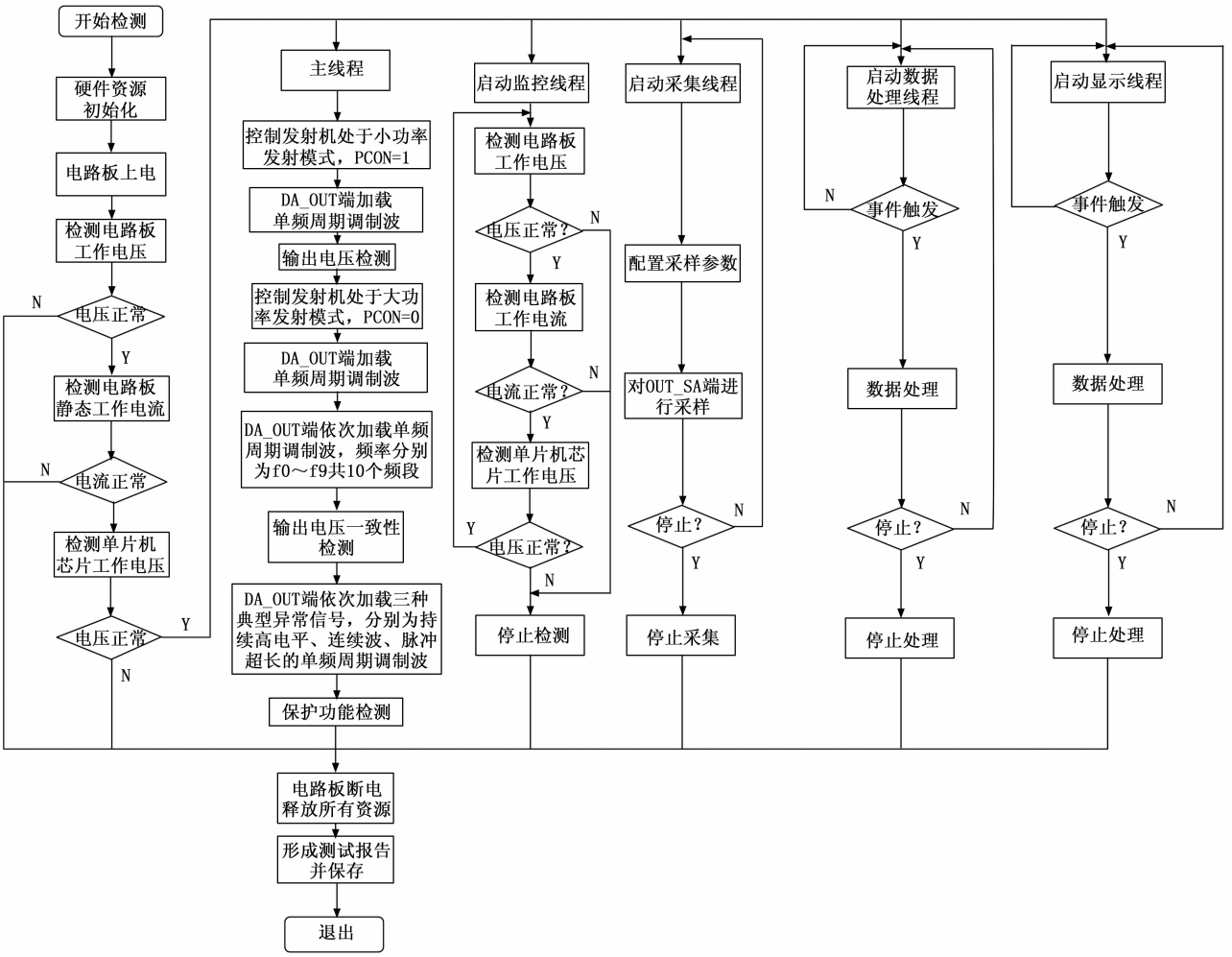

图 7　发射机检测流程图

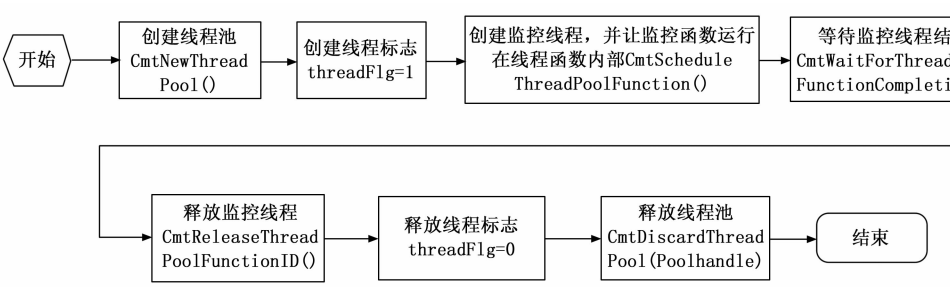

图 8　多线程实现

的正弦波的点数为 N，则 f_n 和 f 之间的关系为：$f_n = N \times f$，一个发射周期为 T 的 CW 信号的点数 $N_T = T \times N \times f$。

在 Labwindows/CVI 中生成一个幅值为 A，频率为 f，脉冲宽度为 t，发射周期为 T，初始相位为 0 的 CWP 信号的流程如图 9 所示。

算法生成的 CW 信号如图 10 所示，多功能采集卡 DA 端实际输出的 CW 信号如图 11 所示，检测到的换能器端驱动信号如图 12 所示。

3.4　信号处理算法设计和实现

在发射机检测过程中，数据采集卡得到大量的原始数据，这些数据来自发射机的各个测试点，有电压信号、频率信号等，要想判定各测试点的状态，必须对这些数据进行处理和解算，正确的解析算法才能准确得到各测试点的状态值（幅度、频率及相位等），为结果判定提供依据。

这里主要介绍输出电压一致性的计算方法和实现过程。输出电压一致性检测用于检测发射机在频带内发射电压的起伏。其检测原理为选取发射机工作频段内的 10 种频率，按照 3.3 节的方法依次产生的 10 种频率的 CW 信号并依次接入发射机输入端。分别采集各频率所对应的 OUT _ SA1

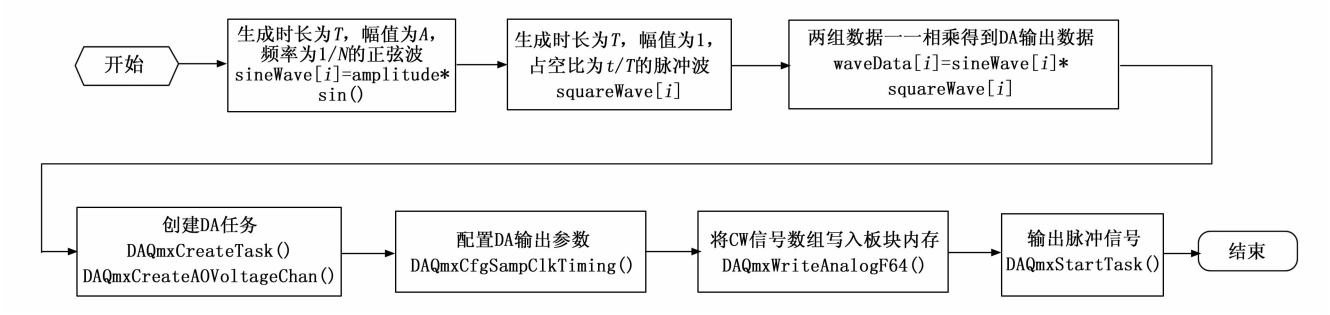

图 9　脉冲信号生成流程

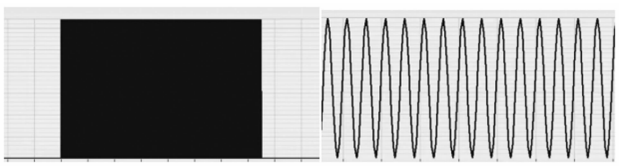

图 10　算法生成的 CW 信号

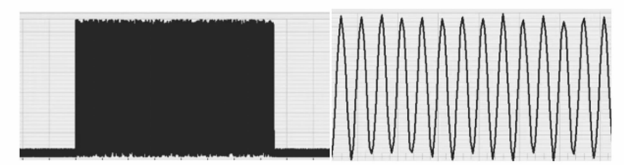

图 11　多功能采集卡输出信号

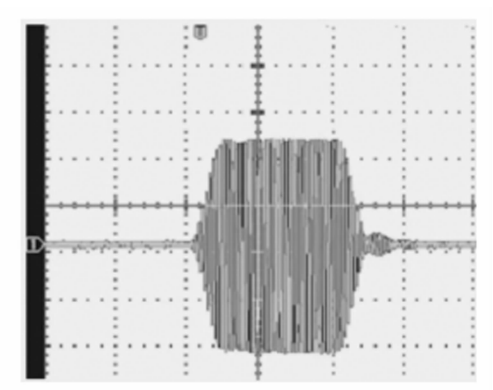

图 12　换能器驱动信号

和 OUT _ SA2 信号，并计算每个信号中脉冲信号的发射电压峰峰值，将最大输出电压记为 V_{max}，最小输出电压记为 V_{min}，若满足关系式 $20\log(V_{max}/V_{min})\leqslant 3$ dB 则发射机合格，否则不合格。

检测方法的实现关键在于设计合适算法分析出发射信号中脉冲信号的起止位置，常用的方法是设置一个电压门限值 Vm，根据经验确定一个数量门限值 N，当有 N 个点的电压都大于 Vm 时，认为该点为信号起点，当 N 个点的电压均小于 $1/2\ Vm$ 时，认为该点为信号结束点。该算法的缺点在于：1）当 Vm 和 N 设置不合适时容易出现误判，且对于周期波信号，Vm 和 N 值的选择与信号的频率相关；2）当 N 值较大时，会增加循环判断次数，降低程序效率。

在本文中采用另一种算法实现信号的分离。其原理为：先求出信号的包络，在对包络数组进行门限判断，即可分析出信号中脉冲信号的起始位置。

在 Labwindows/CVI 中实现代码如下：

```
ArrayData[i] = pow(sampleData[i],2); //采样数组每个元素求平方
Bw_LPF (ArrayData, SAMPLENUM, Sampling_Frequency, Cutoff_Freq, 5, ArrayData);//巴特沃斯低通滤波
```

将 ArrayData 中的元素依次和门限值 Vm 比较，计算出脉冲信号的起止位置。

图 13 为采样信号和经过信号处理算法计算出的信号包络图。

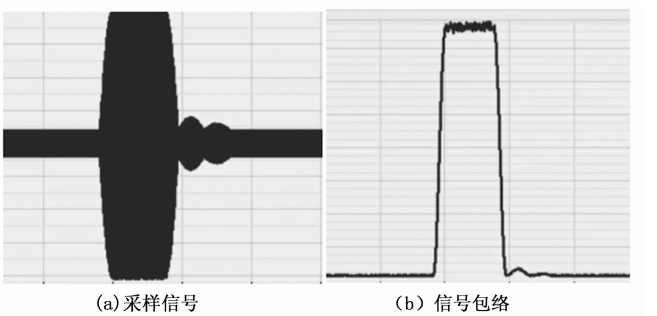

图 13　信号处理算法结果图

4　试验结果与分析

依据被测对象的产品规范，分别采用传统手动测试方式和自动测试方式，先后针对 5 套声呐发射机对每一测试项目按规定的技术要求、测试方法、误差范围、合格判据等要求逐项的进行测试，记录检测时间和所需测试人员数量，对测试结果进行对比，验证了自动测试系统的性能，如表 1 所示。

由表 1 可见，相较于某型无人水下装备声呐发射机的传统测试方法，本文设计的声呐发射机自动测试系统在减少人力成本和提高检测效率上有明显的优势。传统手工测试方式检测 1 套发射机至少需要两人：一人操作稳压源给发射机上电，同时设置好信号源参数；另一人操作通用测试仪器。两人需要同步进行工作，在加载信号时，采集输出端信号，并在合适的时刻对信号进行捕捉、测量、分析和计算，最后将计算结果记录到记录表中。按此过程完成一

表 1　传统人工测试与自动化测试对比表

序号	发射机编号	手动方式			自动方式		
		测试时间/min	测试人员数量	检测结果记录方式	测试时间	测试人员数量	检测结果记录方式
1	FSJ-2021-N01	87	2	纸质，手工抄写，可更改	2 min 40 s	1	电子表格，可打印为纸质表格，不可更改
2	FSJ-2021-N02	92	2	纸质，手工抄写，可更改	2 min 42 s	1	电子表格，可打印为纸质表格，不可更改
3	FSJ-2021-N03	74	2	纸质，手工抄写，可更改	2 min 43 s	1	电子表格，可打印为纸质表格，不可更改
4	FSJ-2021-N04	78	2	纸质，手工抄写，可更改	2 min 40 s	1	电子表格，可打印为纸质表格，不可更改
5	FSJ-2021-N05	95	2	纸质，手工抄写，可更改	2 min 41 s	1	电子表格，可打印为纸质表格，不可更改

个频率的检测后，再完成另外几个频率的检测，检测完一套发射机最少需要 80 分钟左右。而自动测试方式完成 1 套发射机检测需要 1 人，检测的平均时间为 2 分 40 秒左右。此外，人工检测过程中需要频繁设置和操作信号源、万用表、示波器等仪器，同时还需要更换信号测量端，稍有不慎，就会操作错误，导致测量失败或者损坏样机。而自动测试只需要将检测电缆正确连接后，点击检测按钮即可完成发射机所有参数的检测，生成检测报表，减少了人员出错的概率，防止误操作对产品造成损坏。

5　结束语

某型水下无人装备声呐发射机是其自导系统的重要组成部分，在水下无人装备的水声通信、水声定位、水声导航和水声探测应用中发挥着重要作用。本文针对传统发射机测试方法的局限性与单一性，采用 LabWindows/CVI 作为软件系统开发平台，以国产 PXI 总线仪器设备作为硬件平台，设计了某型水下无人装备声呐发射机的自动测试系统。该自动测试系统测试资源丰富，仪器模块更换、扩展容易，可对该型装备的声呐发射机进行自动测试和故障诊断，具有效率高、研发周期短和经济性强等特点，可有效解决某型水下无人装备发射机生产、维修难题。该系统可由用户根据不同的需求扩展为其他水下装备声呐发射机的维修测试系统，具有较大的应用价值。

参考文献：

[1] 李志舜．现代鱼雷自导系统及其发展趋势［J］．鱼雷技术，1999，7（1）：6－9.

[2] 王东霞，严胜刚，朱云周，等．基于 DSP 的鱼雷自导系统性能测试仪［J］．弹箭与制导学报，2006，26（2）：628－631.

[3] 王　伟，孙　起，许　军．鱼雷自导系统 BIT 设计与分析［J］．鱼雷技术，2010，18（1）：31－34.

[4] 李　骥，段发阶，蒋佳佳，等．基于 D 类功放的声呐发射机驱动信号分析［J］．纳米技术与精密工程，2017，15（4）：311－316.

[5] 杨广利，杨日杰，韩建辉，等．基于 LabWindows/CVI 的主动声呐信号发射机设计［J］．国外电子测量技术，2017，33（6）：81－84.

[6] 周广佼，卢逢春，马秀敏．声呐发射机驱动信号调制性能的研究［J］．应用科技，2017，44（2）：15－22.

[7] 黄　熠，黄建国，景连友．一种小型高效水声发射机的设计与实现［J］．计算机测量与控制，2011，19（6）：1438－1441.

[8] 黎　曙，朱大非，丁　盛，等．一种低压大功率水声发射机的设计与实现［J］．舰船电子工程，2022，42（9）：181－186.

[9] 汶宏刚．小型声呐发射机故障分析［J］．水雷战与舰船防护，2016，24（2）：74－76.

[10] 李淑萍，董卫珍，李玉娥．声呐多通道接收机测试系统的设计与实现［J］．声学与电子工程，2022，42（9）：48－51.

[11] 骆可政，刘　斌，江泽奇．一种声呐声学段自动测试设备的设计［J］．声学与电子工程，2022，42（9）：56－59.

[12] 史　峰，何晓凤．基于 PXI 平台的通用火化机质量检测系统设计［J］．计算机测量与控制，2021，29（4）：80－85.

[13] 柳　颖，宗长龙，周　婷．便携式无线电综合测试系统设计［J］．计算机测量与控制，2022，30（2）：103－109.

[14] 王劭婷，刘晓春．基于 PXI 总线的声呐接收机通用自动测试系统［J］．舰船科学技术，2020，42（6）：145－148.

[15] 任晓飞．基于 PXI 和 LabVIEW 的武器挂架综合测试系统设计［J］．测控技术，2013，32（8）：155－158.

[16] 曹兴冈，赵　斌．基于 PXI 某处理器模块 ATE 设备的设计与实现［J］．计算机测量与控制，2020，28（5）：252－257.

[17] 姜　锋，王　健．基于 PXI 总线的某型飞行器自动测试系统设计［J］．电子测试，2022，36（20）：76－78.

[18] 夏中亚，王　伟，陆晓明，等．基于 LabVIEW 的某型舵机综合性能测试系统［J］．计算机测量与控制，2015，23（1）：53－56.

[19] 廖　勇，袁　圆．进口元器件自主可控的风险分析及对策建议［J］．电子元件与材料，2020，39（6）：14－18.

[20] 李永梅，李先亚，周传祥．军用进口电子元器件的国产化替代验证典型案例分析［J］．质量与可靠性，2017（5）：30－33.

[21] 刘　鑫．进口元器件自主可控的风险分析及对策建议［J］．控制工程，2003（5）：1－9.

[22] 张　荣，王　珏，周继昆，等．总线类测试系统的技术现状及发展方向［J］．装备环境工程，2016，13（5）：151－159.

[23] 苏淑靖，李　莹．总线类测试系统的技术现状及发展方向［J］．计算机测量与控制，2014，22（8）：2684－2686.

[24] 王建新，杨世凤，隋美丽．LabWindows/CVI 测试技术及工程应用［M］．北京：化学工业出版社，2011.

[25] 胡　淼．某无人直升机地面检测软件设计与实现［J］．电子测试，2020（7）：75－76.

[26] 康瑞航，严　宇，刘　奇，等．基于分层架构的硬件电路检测软件设计［J］．汽车实用技术，2021，46（14）：98－100.

[27] 王　嘉，范蟠果，毛　恒．一种改进型多线程机制在数据采集系统中的应用［J］．计算机技术与自动化，2019，38（4）：37－41.