

基于 PULSE 系统的矢量水听器实时校准

刘 星^{1†} 孔庆荣¹ 高 苗¹ 吴向前²

(1 哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

(2 第715研究所 杭州 310012)

摘要 基于对 PULSE 系统的应用开发研究,建立了矢量水听器实时校准可视化系统,利用 ActiveX 技术解决了 PULSE 系统与 MATLAB 实时通讯问题,这是实时校准的基础。并以矢量水听器理论基础为依据,用比较校准法原理通过 MATLAB 语言完成编程,同时解决了数据转化问题,通过建立的可视化界面实现对矢量水听器实时校准,提高了校准精度和可靠性,为矢量水听器使用前进行快速高效的校准创造了条件,同时也为其它声学设备校准提供了测量平台。

关键词 PULSE 系统, 矢量水听器, 实时校准

Real-time calibration of vector hydrophone using a PULSE system

LIU Xing¹ KONG Qing-Rong¹ GAO Miao¹ WU Xiang-Qian²

(1 College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(2 Research Institute of 715, Hangzhou 310012, China)

Abstract This paper sets up a visualization real-time calibration system of vector hydrophone through development and application of the PULSE system. For real-time calibration it is made use of ActiveX technique to resolve the problem of between PULSE and MATLAB real-time. We have accomplished the program in MATLAB according to the principle of vector hydrophone and the theory of comparison method calibration and resolved the data conversion problem. Furthermore, calibration measurement is made through visualization interface, which has higher accuracy of calibration and reliability. We have created conditions for carrying out the fast highly effective calibration before the vector hydrophone is used, and have supplied measurement platform for calibration of some acoustical equipments.

Key words PULSE system, Vector hydrophone, Real-time calibration

2006-09-06 收稿; 2007-01-04 定稿

作者简介: 刘星 (1958-), 女, 哈尔滨市人, 高级工程师, 研究方向: 水声工程。

孔庆荣 (1981-), 男, 硕士研究生。

高苗 (1983-), 女, 硕士研究生。

吴向前 (1981-), 男, 学士。

[†] 通讯联系人 E-mail: liux250188@sohu.com

1 引言

水声计量是水声技术领域中的一个重要环节。由于矢量水听器在检测能力和获取声场信息等方面具有优于传统声压水听器特点^[1]，因而成为人们研究的热点。随着研究的深入，对它校准的精度提出了更高的要求。矢量水听器的指向性和灵敏度是衡量矢量水听器性能的重要技术指标，校准的精度直接影响到后续信号处理。如何提高矢量水听器的校准精度和测量的可靠性，如何在矢量水听器研制中提供快捷方便的校准，从而提高研制效率，这是我们一直在探讨的问题。我们通过对 B&K 公司 PULSE 系统的研究，在利用其良好的采集性能的基础上，对其进行了拓展开发，首次在 PULSE 中很好地解决了这一问题，不仅改变了原有的校准方法，而且更重要的是利用 PULSE 系统建立了一套适合矢量水听器实时校准的系统。在校准的过程中不需要人为地干预，在校准结束的同时，即可显示校准结果。这一开发研究不仅提高了校准的精度和准确性，还缩短了校准时间，大大提高了效率及校准的可靠性，使长期困扰的校准问题得到一定的解决。同时根据校准的需要建立了一套相应的处理软件，编制了可视化界面，校准时可根据此界面进行操作，使校准更加方便简洁快速。这种基于 PULSE 的开发研究将在水声设备校准和测量方面具有广泛的应用前景。

2 实时校准系统

快速校准系统主要由 PC 机、B&K 的 PULSE 分析仪、PULSE 前端硬件设备、自编的校准软件、PULSE 软件和数据采集前端配套设备组成，见图 1 实时校准系统组成示意图。

其中，PULSE 分析仪，是一个多用途、多样化的、面向任务的声学 and 振动分析系统，具有开放性、模块化，且测量功能可增可减的特点。它为一系列基于 PC 机的测量设备解决方案提

供了一个开放的标准平台，它不仅具有多通道采集功能，而且具有多个分析仪，可对同一组物理输入同时进行分析，并可将数据不间断地记录在实时直接存储盘上。PULSE 与其它采集系统不同之处不仅仅是它具有声学测量软硬件支持，更重要的是，它在测量中引入了全新的概念：系统以 PC 机为基础，通过选择不同模块组合来满足相应的测试需求，因而，它可以根据测量需要建立自己的测试分析系统，而当需求改变时，可进行扩展。因此将 PULSE 系统平台与其他应用软件结合后在声学 and 振动测量及分析方面具有更好、更强大的处理能力^[2-4]。

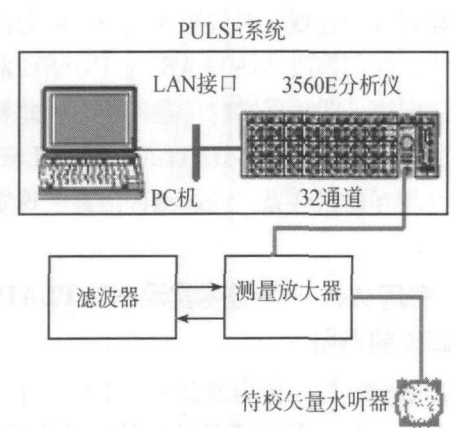


图 1 实时校准系统的组成示意图

快速校准系统所用的 PULSE 分析仪为 3560E，共有 36 通道，并可提供三个独立的信号源，分析带宽为 102kHz。PULSE 分析仪具有它独立的软件，可进行 PULSE 项目的建立，即设置工作内容。关于 PULSE 的详细内容请参考文献 [3] 和 [4]。

自编的校准软件是用 MATLAB 语言实现的，主要解决 MATLAB 与 PULSE 的实时通讯问题；完成与 PULSE 数据格式的转换和数据处理，编制可视化校准软件，实时显示校准结果。

3 PULSE 系统的开发研究

PULSE 系统虽然是一套可应用在噪声、振动测量等方面的多用途、面向任务的分析系

统,且在信号处理方面具有普遍性,但在专业性较强的应用中,需要在其原有的功能基础上对其进行拓展开发,以满足我们的需求。

3.1 PULSE 系统中的 Bridge To MATLAB

Bridge To MATLAB 是 PULSE 系统与 MATLAB 通讯的一种方式,是 PULSE 系统特有的功能。利用此项功能可以将 PULSE 的一组数据传递给 MATLAB 中定义的数组,并可使数据在 MATLAB 中得到处理。但是每传送一组数据都要在 PULSE 中进行一次设置,此方法适合于后置处理,难以实现实时处理。

要想进行在线实时校准和测量,问题的关键在于,如何解决 MATLAB 与 PULSE 双向通讯的问题,即数据实时传递问题。为此我们引入 ActiveX 技术,使 MATLAB 和 PULSE 之间建立相互通讯联系,经过编程最终实现实时校准。

3.2 利用 ActiveX 技术实现 MATLAB 对 PULSE 的调用

ActiveX 是一种集成技术,主要基于 Microsoft Windows 操作系统的组件集成协议,是各种面向对象技术的集合。这些技术共同基础是“组件对象模型,简称 COM(Component Object Model)。也就是说 ActiveX 控件是作为基于 COM 服务器进行操作的,并且可以嵌入在包容器宿主应用程序中。ActiveX 不同于编程语言,它提供了另一种完全不同的优越特性:由于 ActiveX 控件与开发平台无关,因此,在一种编程语言上开发的 ActiveX 控件可以无须作任何修改,即可在另一种编程语言中使用,其效果如同使用 Windows 通用控件一样。借助 ActiveX 技术,开发商和终端用户能把来自不同商家的 ActiveX 组件无缝地集成在自己的应用程序中,从而完成特定的目的^[5-7]。

由于 MATLAB 支持 ActiveX 自动化技术。而 MATLAB 能控制和受控于其它组件。当 MATLAB 受控于其它组件时,表现为自动化服务器;当 MATLAB 控制于其它组件时,

表现为自动化客户。当 MATLAB 作为自动化客户,调用其它 ActiveX 组件时,必须先查阅 ActiveX 组件的相关文件,从中得知:组件的名字,即 ProID,以及该组件所采用的接口名、方法(Method)、属性(Property)和事件(Event),从而利用调用自动化服务器的基本指令完成自动化服务器的开启及数据传输等任务。

至此,利用 ActiveX 技术,我们可以建立 MATLAB 与 PULSE 之间的调用关系。根据需要将 MATLAB 作为自动化客户,而将 PULSE 分析仪作为服务器。由此可以在 MATLAB 中启动 PULSE,调用 PULSE 组件,控制对 PULSE 的操作。

那么如何建立自动化客户和自动化服务器?这是 MATLAB 与 PULSE 通讯的关键。当我们进入 MATLAB 平台时,就建立了 MATLAB 自动化客户的资格。而用 MATLAB 提供的函数 Actxserver 即可创建 ActiveX 自动化服务器。由 OLE 可知组件 PULSE 的 ProID。即“Pulse.Labshop.Application”,格式: pulse=Actxserver(‘Pulse.Labshop.Application’) 其作用是:启动 PULSE 系统作为 MATLAB 的自动化服务器,并返回名为 PULSE 的服务器对象。

这一步的建立,实现了在 MATLAB 程序中启动 PULSE 系统的目的,由此建立了 MATLAB 与 PULSE 的通讯联系。当联系被建立起来后,还要对 PULSE 的相应对象进行操作。

解决了 MATLAB 与 PULSE 通讯问题之后,如何将 PULSE 数据转换为 MATLAB 数据格式,又是一个关键问题。经过不断的研究、编程、修改、调试,最终成功实现了数据的转换,并将这一程序以函数的形式保存下来,即: transformCOM(s) 函数。在今后的使用中,用户直接调用此函数,即完成 PULSE 数据与 MATLAB 数据的转换。

经过对自动化客户和自动化服务器的创建,完成了 MATLAB 与 PULSE 的链接和调用关系,利用 ActiveX 技术实现了 MATLAB

与 PULSE 的实时通讯，使对矢量水听器实时校准成为可能。

4 校准原理

实时校准系统对矢量水听器指向性和灵敏度的校准原理是依据矢量水听器原理和比较校准法原理而编程的。

4.1 矢量水听器的指向性和灵敏度

由于矢量水听器是由一个声压水听器和三个振速分量传感器组成，可以共点、同步、独立地测量声场空间一点的声压 p 和相互正交的三个质点振速分量 v_x 、 v_y 和 v_z 。声压是标量，三个质点振速是矢量，各输出分量分别表示为：

$$\begin{cases} p(t) = x(t) \\ v_x = \cos \theta_s \cdot \cos \alpha_s \cdot x(t) \\ v_y = \sin \theta_s \cdot \cos \alpha_s \cdot x(t) \\ v_z = \sin \alpha_s \cdot x(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中， $x(t)$ 为接收的信号， θ_s 为水平面的方位角， α_s 为声线与水平面的夹角。

从 (1) 式中不难看出，振速传感器均具有偶极子指向性。因此，其指向性应为“8”字形。而声压灵敏度 M_p 、声压梯度灵敏度 M_g 、振速灵敏度 M_v 、加速度灵敏度 M_a 和位移灵敏度 M_s 之间的关系见公式 (2)。

$$M_P = \frac{\omega}{c} M_g = \frac{1}{\rho c} M_v = \frac{\omega}{\rho c} M_a = \frac{1}{\omega \rho c} M_s \quad (2)$$

由此可得加速度型矢量水听器的声压灵敏度及质点振速灵敏度与频率成正比，其灵敏度级随频率的增加以 6dB/ 倍频程的速度增加；位移灵敏度与频率的平方成正比，其灵敏度级则随频率的增加以 12dB/ 倍频程的速度增加；声压梯度灵敏度与频率无关，其加速度灵敏度级和声压梯度灵敏度级也与频率无关。由原理可知，加速度型矢量水听器振速指向性的测量结果理论上应该是“8”字形指向性，而振速灵敏度的测量结果应该是 6dB/ 倍频程的一条斜

线^[8,9]。所以在实际校准中，其结果应该与理论分析基本相符。

4.2 比较校准法原理^[10]

在灵敏度校准中，比较校准法是水声换能器校准的典型代表。通常都是在自由场中用标准水听器作比较法校准。利用声场中同一点声压相等的原理，将待测水听器和标准水听器分别放在同一点上，测得声压： $P = e_s/M_s = e_x/M_x$

$$\text{得： } M_x = \frac{e_x}{e_s} \cdot M_s \quad (3)$$

P 为自由场中某点的声压； M_s 为标准水听器灵敏度； M_x 为待测水听器灵敏度； e_s 为标准水听器测量的电压值； e_x 为待测水听器测量的电压值。

5 实时快速校准系统的应用实验

实时校准系统的应用实验是在水声技术国防科技重点实验室声纳系统环境实验室的消声水池中进行的，实验的目的是验证实时校准系统开发应用的实时性、可行性和正确性。待测换能器分别为圆柱型二维高频矢量水听器 (200Hz~10kHz) 和三维同振球式高频矢量水听器 (1kHz~12.5kHz)。

实验前的准备，建立 PULSE 前端与 PC 机及网络通讯的连接，同时建立各测量设备的连接和矢量水听器的吊放等工作。实验准备就绪后，启动可视化校准软件，在界面上根据校准需要，用户选择校准任务，设置校准参数。见图 2 可视化校准软件界面。

当进行矢量水听器指向性校准实验时，在界面的指向性校准区域内，设置参数，然后点击指向性按钮，此时后台将启动 PULSE 系统，并开始指向性实时校准。校准结果将实时地显示在可视化界面的显示区内。圆柱型二维高频矢量水听器振速 x 在频率为 5kHz 时校准过程及校准结果见图 3。图 4 是三维同振球式高频矢量水听器振速 x 在频率为 10kHz 时，指向性实时校准结果，图 5 是三维同振球式高频矢量水听器在频率为 8kHz 时，声压指向性实时校准

结果。

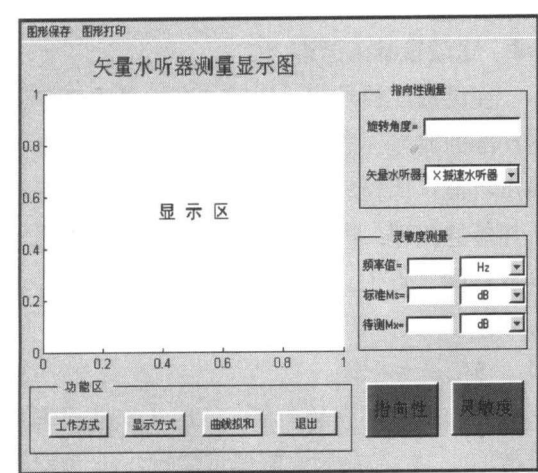


图 2 矢量水听器可视化校准界面

矢量水听器灵敏度的校准实验是按比较校准方法的要求布放矢量水听器和标准水听器。在可视化界面的灵敏度校准区域内，设置参数，然后点击灵敏度按钮，开始灵敏度实时校准。图 6 和图 7 是三维同振球式高频矢量水听器分别在振速 X 和振速 Y 时的灵敏度校准结果。

由图 3 和图 4 可以看出，矢量水听器指向性校准结果与理论中的“8”字形指向性相吻合，且校准结果能反映出矢量水听器的对称性。由于实验的目的是检验快速实时校准系统的可行性和实用性，而对矢量水听器的性能和表征参数不做讨论。所以在指向性校准前，没

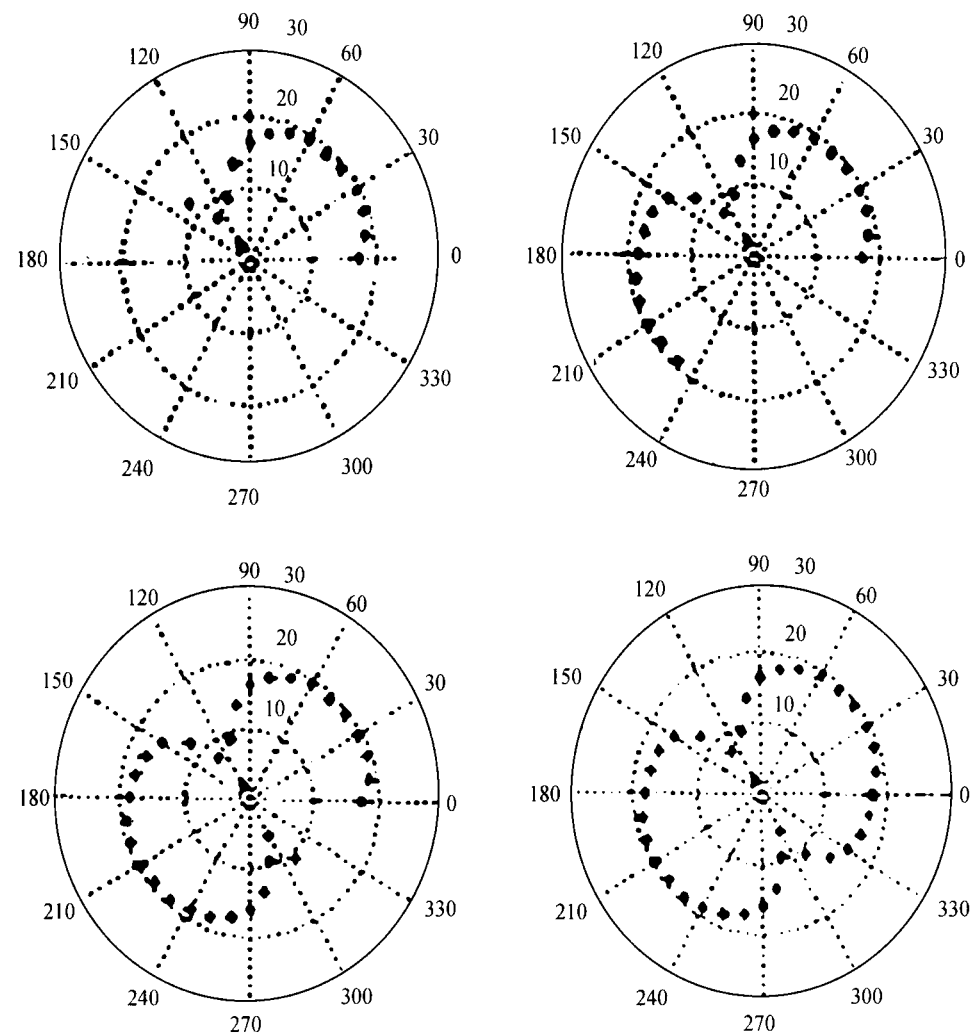


图 3 矢量水听器振速 X 的指向性及实时校准过程 (5kHz)

有对 X 通道的最大值方向进行校正，这与实际测量结果是一致的。从图 3 和图 4 中可以看到，在振速 X 通道的最大值方向上偏离极坐标 0 度值的角度分别为 30 度和 65 度，说明该校准实验反映了实际情况，其结果为：分辨力 $k_d > 20\text{dB}$ ，实验是准确的和可靠的。为了反映实验的实时性，图 3 是以打点的形式表现校准过程的，每 10 度采集和处理一组数据，并实时地显示在图中。图 5 准确地反映了声压的无指向性。

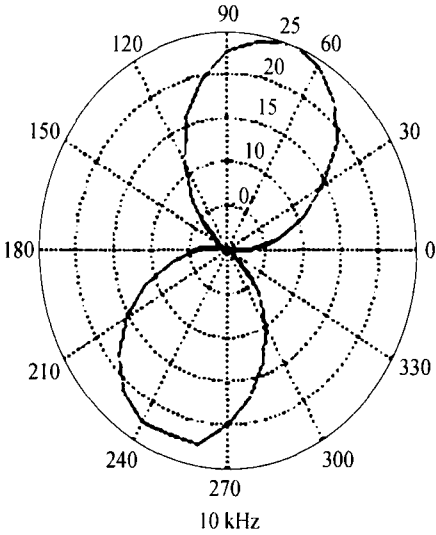


图 4 矢量水听器振速 X 指向性实时校准结果图

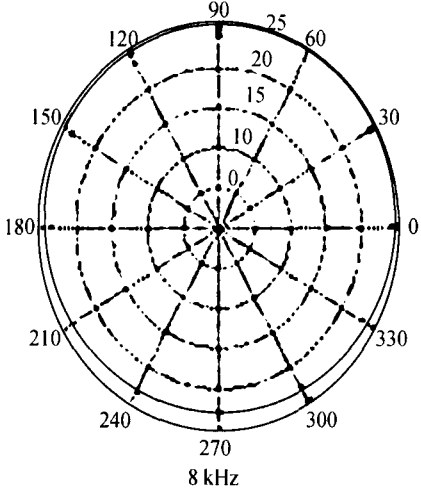


图 5 矢量水听器声压指向性实时校准结果图

图 6 和图 7 是矢量水听器振速灵敏度的实时校准结果，从图中可以看出，校准结果基本上是按照斜率为每倍频程 $6\text{dB} \pm 1\text{dB}$ 的理论

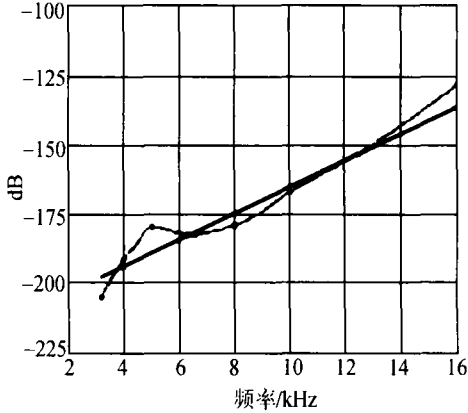


图 6 矢量水听器振速 X 灵敏度实时校准结果

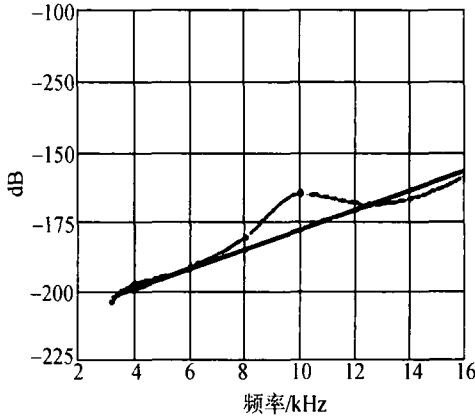


图 7 矢量水听器振速 Y 灵敏度实时校准结果

规律变化的。由于消声水池应用的下限频率为 3.15kHz ，而在临界状态下，自由场范围内的声场有一定起伏，所以对校准结果有一些影响，这一点从图 6 和图 7 中可以看出，在 3.15kHz 时，两图的校准曲线与理论曲线都有不同程度的偏离。

由于待校矢量水听器是三维同振球式高频矢量水听器，频率范围为 $1\text{kHz} \sim 12.5\text{kHz}$ 。当校准频率大于 12.5kHz 时，校准曲线将偏离理论曲线，不遵循 6dB/倍频程 的变化规律，这一点从图中可以看出，与实际校准结果是一致的。在图 6 和图 7 中，当校准频率分别在 5kHz 和 10kHz 时，出现了“野点”，经我们多次试验和分析发现，根据三维同振球式矢量水听器的设计原理，在使用中是利用皮筋儿将其悬挂在一框架上，而皮筋儿的弹性和固定时松紧程度以及对称性都对校准有一定影响。关于

这方面的问题,已做了大量的研究^[11],并设计研制出专用的悬挂皮筋儿,且有较好的应用效果。而此次校准实验的出发点只是为了验证基于 PULSE 的矢量水听器实时校准系统的实时性、快速性、可行性和实用性,所以在安装矢量水听器时没有考虑专用的悬挂皮筋儿,使校准结果在个别频率上出现野点,这一点应在今后的校准实验中给予足够的重视。从图 6 和图 7 中可以看出,在指定的频率范围内,除 5kHz 和 10kHz 个别频点外,其余的频点基本与理论曲线重合,校准结果是符合要求的。

6 结论

基于 PULSE 系统建立了一套矢量水听器实时校准系统,经实验证明:此项研究实现了对矢量水听器的实时校准,缩短了校准时间,提高了校准效率、提高了校准的可靠性和准确性,具有很好的使用价值,这是 PULSE 系统在此方面的首次开发与应用。实验结果表明,校准是实时进行的,校准结果与理论分析是一致的。

参 考 文 献

- [1] 孙贵青,李启虎. 矢量水听器研究进展. 声学学报, 2007, 29(6): 481-490.
- [2] Steven W.Smith. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. U.S.A: California Technical Publishing, 1997, 95-110.
- [3] Brüel&Kjaer 公司. Technical Documentation. 丹麦: B&K 公司, 2003, 5-40.
- [4] Brüel&Kjaer 公司. PULSE-Getting Started. 丹麦: B&K 公司, 2003, 25-30, 39-52, 63-92.
- [5] 盖惠玲. ActiveX、OLE 和 COM. 山西电子技术, 2004, 30(4): 44-46.
- [6] 王海瑞. ActiveX 技术在组态软件中的应用研究. 计算机测量与控制, 2002, 10(6): 407-409.
- [7] 张宏立, 李. 基于 ActiveX 机制的 VB 与 MATLAB 数据交换. 新疆大学学报(自然科学版), 2004, 21(2): 191-193.
- [8] 贾志富. 同振球型声压梯度水听器的研究. 应用声学, 1997, 16(3): 20-25.
- [9] 陈洪娟, 洪连进. 采用双迭片压电敏感元件的同振柱型矢量水听器. 应用声学, 2003, 22(3): 23-26.
- [10] 郑士杰, 袁文俊等. 水声计量测试技术. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1995, 30-46.
- [11] 时胜国, 杨德森. 弹性元件对同振球型振速水听器的影响. 应用声学, 2004, 23(5): 21-26.