

电荷放大器对压电式水声换能器测量的影响分析

朱培斌 许肖梅 黄身钦 张小康 吴剑明 陶毅
(厦门大学海洋与地球学院, 厦门, 361005)

摘要 为考察电荷放大器对压电式水声换能器测量的影响, 通过电荷放大器转换后采集和数据采集卡直接采集的水声声压信号实测实验数据的比对分析, 表明受水声换能器线缆的分布电容较大和数据采集卡输入阻抗相对较小等因素影响, 数据采集卡直接采集压电式水声换能器信号会对信号的幅值和相位产生影响, 且在低频段影响较大, 进而给出在各类常见海洋水声应用中的考虑因素和使用建议。

关键词 压电式; 水声换能器; 电荷放大器; 电压放大器; 数据采集

压电式水声换能器作为水声应用中的核心传感器具有测量频率范围广和灵敏度高优点, 多应用于水声测量和水声通信等领域。压电式水声换能器的输出为电荷信号, 目前在水声测量中较为普遍的方法是将其输出信号经电荷放大器转换为电压信号后采集, 但由于电荷放大器设计较为精密, 长期使用后会随时间产生零飘, 需要定期进行校准^[1], 并且电荷放大器体积较大, 在现场水声测量中携带也不方便。为简化现场测量, 水声测量工作中往往会将压电式水声换能器的输出信号直接用数据采集卡进行采集, 并由换能器指标书提供的电压灵敏度将采集的电压值换算为声压值。因此, 有必要针对使用电荷放大器和直接接入数据采集卡这两种情况对压电式水声换能器测量的影响进行分析和讨论。

1 测量原理

压电式水声换能器是一种不需外部激励电压的自发电式传感器, 在变化的声压作用下, 换能器内部的电介质表面会产生电荷, 从而实现声压的测量。因为电荷信号较易受到干扰, 所以电荷信号的传输一般采用带有屏蔽层的同轴电缆, 电缆内芯外围的屏蔽层能有效的屏蔽外界电磁干扰, 但较长的电缆长度使其具有一定的分布电容。

本文采用的水声换能器型号为 BK 8105 型, 电荷放大器采用 BK 2692 型, 后端的数据采集卡型号为 NI USB-4431, 设备均在正常校准周期内。设备的具体指标见表 1。本文的理论和实验结果分析均基于表中硬件型号的性能指标。

2 理论分析

2.1 电荷放大器的工作原理

近年来, 电荷放大器的研发和设计不断取得进

步^[2], 但其基本工作原理不变。电荷放大器一般由电荷变换级、适调级、低通滤波器、高通滤波器、末级放大器、电源等多个部分组成。本文仅对电荷变换级进行讨论。

表 1 水声换能器、电荷放大器及数据采集卡的型号和主要指标

	BK 8105 型 水声换能器	BK 2692 型 电荷放大器	NI USB-4431 数据采集卡
主要性能指标	1、集成线缆长 20 m; 2、开环电压灵敏度: 46.6 $\mu\text{V}/\text{Pa}$; 3、电荷灵敏度: 0.390 pC/Pa; 4、电容值 (含线缆): 8 371 pF; 5、泄漏电阻 40 G Ω 。	1、4 通道电荷输入; 2、滤波器可调, 典型值为 10 Hz~30 kHz; 3、匹配传感器电荷灵敏度可调; 3、输出灵敏度为 1 mV/Pa; 5、输出接口形式可调, 典型采用浮地输出。	1、ADC 分辨率 24 bit; 2、最高采样率: 102.4 kHz; 3、-3 dB 带宽: 0.49 f_s (采样率); 4、输入电压: $\pm 10\text{ V}_{\text{pk}}$; 5、输入阻抗: 200 k Ω 。

电荷放大器的电荷变换级起到电荷量转化为电压量和阻抗变换的作用, 等效电路如图 1 所示。

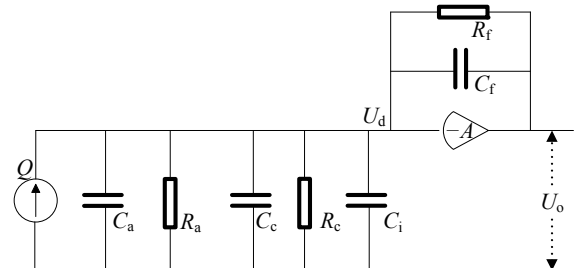


图 1 电荷变换级的等效电路

换能器内的压电晶体受压后产生电荷 Q , C_a 是换能器的级间电容, R_a 则是换能器的输出电阻, C_c 是换能器传输电缆的分布电容, R_c 是传输电缆的漏电阻, C_i 是电荷放大器的输入电容, U_d 是在运算放大器反相输入端上产生的差动电压, C_f 是电荷放大器的反馈电容, R_f 是运算放大器的反馈电阻。设运

算放大器的开环放大系数为 A , 由于电压是反向输入, 因此反馈电容 C_f 两端的电压 U_{Cf} 为:

$$U_{Cf} = U_d - U_o = (1 + A)U_d \quad (1)$$

开环放大系数 A 的值一般很大, 且反馈电阻 R_f 的值也很大, 当假设为无穷大时, 则有:

$$U_o = \frac{-AQ}{C_a + C_c + C_i + (1 + A)C_f} \approx \frac{-Q}{C_f} \quad (2)$$

由此可见, 在 A 和 R_f 均很大的理想状况下, 在电荷放大器校准后的可靠期内^[3], 因反馈电容的存在, 输出电压 U_o 与产生电荷 Q 成正比。在实际情况中因传输线缆较长而使得电缆的分布电容值 C_c 较大, 如果是在没有反馈电容的电压放大器或数据采集卡系统中, 分布电容的存在对压电式换能器的测量结果会有较大影响, 下面我们进一步讨论这种情况。

2.2 数据采集卡直接采集电荷信号的分析

数据采集卡直接采集可等效为放大倍数 K 为 1 的电压放大器对压电式水声换能器信号进行采集。图 2 是换能器与电压放大器连接的等效电路, 因压电式水声换能器的绝缘电阻极大可近似为开路, 当与数据采集卡连接时, 测量中必须考虑电缆的分布电容和电压放大器的输入电阻、输入电容对测量的影响。

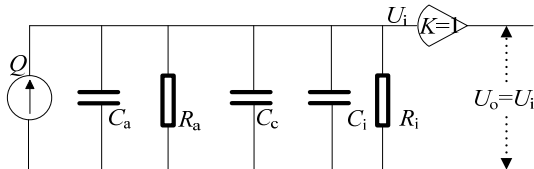


图 2 电压放大器的等效电路

图 2 中, 各物理量定义与图 1 中一致, R_i 是电压放大器的输入电阻, 则有输入的等效电阻 R_{eq} 和等效电容 C_{eq} 为

$$R_{eq} = \frac{R_a R_i}{R_a + R_i} \quad (3)$$

$$C_{eq} = C_a + C_c + C_i$$

假设作用于压电器件上的力为周期性的, $F = F_m \sin \omega t$ 。由图 2 等效电路可知, 电压放大器的输入电压 \dot{U}_i 为

$$\dot{U}_i = \dot{I} \frac{R_{eq}}{1 + j\omega R_{eq} C_{eq}} = d\dot{F} \frac{j\omega R_{eq}}{1 + j\omega R_{eq} C_{eq}} \quad (4)$$

因此, 电压放大器输入电压的幅值 U_{im} 为

$$U_{im} = \frac{dF_m \omega R_{eq}}{\sqrt{1 + (\omega R_{eq} C_{eq})^2}} \quad (5)$$

输入电压 \dot{U} 和作用力 \dot{F} 的相位差 φ_i 为

$$\varphi_i = \frac{\pi}{2} - \arctg(\omega R_{eq} C_{eq}) \quad (6)$$

从 2.1 节的分析中可知, 电荷放大器的输入接近于理想状况下的输入电阻无限大, 即不产生电荷泄漏, 在已校准的系统中查询表 1 得到确切的等效电容值, 理想放大器的输入电压幅值 U_{om} 为

$$U_{om} = \frac{dF_m}{C_{eq}} \quad (7)$$

将式 (5) 和式 (7) 相除得到 U_{im} 和 U_{om} 比值为

$$\frac{U_{im}}{U_{om}} = \frac{\omega R_{eq} C_{eq}}{\sqrt{1 + (\omega R_{eq} C_{eq})^2}} \quad (8)$$

由式 (6) 和 (8) 可知电荷放大器 (近似理想输入) 的主要影响因素为等效电容和等效电阻, 在等效电容和等效电阻已知时, 幅值和相位的影响与角频率 ω 相关。通过查询表 1 可得: 当 $R_{eq} \approx 200 \text{ k}\Omega$ 且 $C_{eq} \approx 8371 \text{ pF}$ 时, 通过式 (8) 和 (6) 计算得到如图 3 的幅值频响和相位差频响曲线。

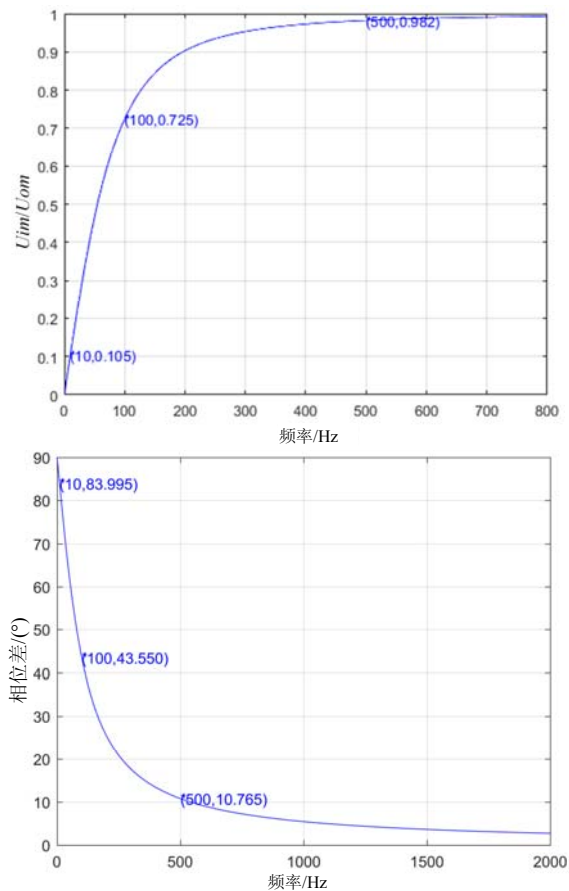


图 3 输入电压幅值比和相位差的频响曲线

由以上分析和图 3 结果可知, 由于受到电缆分布电容和输入阻抗相对较小的影响, 电压放大器输入电压幅值和相位的影响随频率而变化, 低频影响较大, 高频则影响较小; 而采用电荷放大器则可较大程度的消除该影响, 使得幅频响应和相频响应曲线较为平直。

3 实验分析

实验采用表 1 中的压电式水声换能器、电荷放大器及数据采集卡型号, 实验中电荷放大器滤波器参数和输出接口形式的设置也采用表 1 中的典型值, 主要考察电荷放大器对压电式水声换能器测量结果的影响。水池中, 发射和接收换能器的放置应保证声波处于远场稳定的情况下进行测量, 发射换能器于 100 Hz 和 22 kHz 这两个频点发射大小不同的声压, 接收换能器则分别采用由数据采集卡直接采集和通过电荷放大器后进行采集这两种方式进行, 所得的实验结果列于表 2 中。由表 2 实验结果可知, 当接收 100 Hz 低频水声信号时, 两者测量的声压差值较大, 采用数据采集卡采集的声压值显著偏小, 其比值与理论计算较为一致; 而当接收 22 kHz 高频水声信号时, 测量的声压差值则较小, 这也与理论分析一致。

表 2 两种方式采集高频和低频水声信号的实验结果

发射频率	发射电压/V	4431 直接采样/Pa	2692 电荷放大器输出后采样/Pa	比值
22 kHz	0.5	54.5	54.3	1.004
	1	109.8	109.5	1.003
	1.5	164	163.6	1.002
	2	217.6	217	1.003
	2.5	273	272.2	1.003
100 Hz	0.5	38.84	53.8	0.722
	1	78.66	108.8	0.723
	1.5	117.85	163	0.723
	2	155.88	216.2	0.721
	2.5	195.66	271	0.722
计算方法		采集电压的 RMS 值除以换能器的开路电压灵敏度 (46.6 $\mu\text{V}/\text{Pa}$)	采集电荷放大器电压输出除以电荷放大器的输出灵敏度 (1 mV/Pa)	

通过以上的理论分析和实验测量结果的验证, 将压电式水声换能器输出信号通过电荷放大器后采集、电压放大器采集或采集卡直接采集的测量方式比较结果见表 3, 并依据理论和实验的分析结果

给出在各类常见海洋水声测量应用中的使用建议。

表 3 设备对比及使用建议

	电荷放大器	电压放大器	采集卡直接采集
频率响应	频率响应相对平稳, 可选取合适的通频带范围	因受输入电阻和等效电容的影响, 低频影响差	可视为电压放大器放大倍数 K 为 1 的情况, 为保证精度, 建议采用 24 bit ADC 采集卡或采集系统
稳定性	输入电阻大且反馈电容存在, 消除外部电缆分布电容等的影响, 相对稳定	因等效电容的存在且等效电容的温度变化, 使得频响曲线变化, 稳定性较差	
使用建议	电荷放大器调理输出	电压放大器或高分辨率卡直采 (24 bit)	低分辨率卡直采 (16 bit 及以下)
	1、低频海洋噪声测量 2、海洋生物发声低频段测量 3、低频水声通信 4、水声信号精确测量	1、高频海洋噪声测量 2、海洋生物发声高频的测量 3、高频水声通信 4、长距离水声通信建议使用电压放大器	不推荐使用

4 结论

通过对电荷放大器和电压放大器等效电路的理论分析和实验数据表明: 因受压电式水声换能器传输线缆的分布电容较大和数据采集卡输入阻抗相对较小等因素影响, 数据采集卡采集压电式水声换能器的输出信号会对其幅值和相位产生影响。由频响曲线可知在低频段测量结果影响较大, 因此, 对于海洋低频水声精确测量的应用, 必须采用电荷放大器采集以保证测量准确度; 而对于高频水声测量, 则可采用高分辨率的数据采集卡直接进行采集, 但在使用中需注意若是更换或加长剪短线缆, 改变测量链路中的等效电容值^[4], 应对水声换能器重新校准后再进行测量。

参考文献:

- [1] 张宁宁, 王显伟, 邵新慧, 等. 电荷放大器的校准及装置的不确定度评定[J]. 计量技术, 2010, 30(3):44-45.
- [2] 李桂磊, 徐中, 贺长波. 一种小型电荷放大电路设计[J]. 机电工程技术, 2015, 44(10):5-9.
- [3] 魏冬, 张志杰, 裴东兴. 电荷放大器可靠性分析[J]. 中国测试技术, 2007, 33(1):86-87.
- [4] 王兴举, 李炜恒. 引线分布电容对压电式传感器性能的影响[J]. 实验科学与技术, 2007, 5(3):21-23.