

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.05.04

水声传感器自动测试位移机构设计

王胜超, 穆嘉星, 杜颖, 赵国

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 在水声传感器研制过程和实际装机应用之前, 需进行大量的试验来测试其性能及可靠性。根据水声传感器的性能测试需求, 设计了能够搭载水声传感器进行水下测试的五自由度精密位移试验台, 实现传感器在试验水槽内三个直线方向和两个回转角度方向上位置的全覆盖, 并提出了一种可以快速检测梯形丝杠螺母传动回程误差的工程测量方法, 通过软件补偿的方法来克服回程误差, 实现机构运动的准确定位, 满足了低成本模式下多自由度精密定位需求。最终, 应用激光跟踪仪对试验设备进行了误差检测, 保证测试过程中传感器相对位置的准确性。

关键词: 水声传感器; 五自由度; 软件补偿; 激光跟踪仪

中图分类号: TH822; TP212

文章标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)05-0014-04

Design of Displacement Mechanism for Automatic Testing Experiment of Underwater Acoustic Sensors

WANG Shengchao, MU Jiaying, DU Ying, ZHAO Guo

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The performance and reliability of underwater acoustic sensors must be tested by a lot of experiments both during the development process and before actual application installed. According to the test requirements, this paper designed the five-freedom-degree precision displacement experimental device which can mount underwater acoustic sensors to complete the process of testing with achieving full coverage in the experimental tank in three linear and two rotational directions. This paper introduces a new engineering measurement method that can quickly detect the location error of screw hysteresis and overcome the hysteresis error by software compensation. Ultimately, the works of calibration and error detection for the experimental equipment have been completed with a laser tracker to ensure the accuracy of the relative position of sensors in the process of testing.

Key words: underwater acoustic sensor; five degrees of freedom; software compensation; laser tracker

0 引言

近年来, 我国在深海探测及远航舰船等诸多科研领域均取得了长足的进步, 标志着我国在对海洋的利用和探知已由近海走向深蓝。伴随着深海海底地质勘查、海底电缆及天然气管道铺设、深海生物探寻等诸多科研项目的发展, 对水声传感器性能的要求越来越高^[1]。由于水声传感器实际应用的特殊工况, 声学传感器的稳定性和可靠性指标相比于常规环境下的各类传感器要求更为苛刻^[2]。因此, 水声传感器在研发过程中和正式装机应用之前, 均需进行大量性能测试试

验, 搭载被测试传感器完成指定水下测试的坐标定位机构是最常用的测试设备之一。为更好地模拟传感器水下运行状态, 测试过程对位移机构的运动行程、运动自由度和定位精度提出更高的要求^[3]。

1 试验装置设计

1.1 测试装置技术要求

水声传感器自动测试精密定位机构需具有五个自由度, 以实现传感器在试验水槽内三个直线方向和两个回转角度方向上位置的全覆盖。确定 X , Y , Z 方向运动行程根据水声传感器测试水槽外观尺寸, 满足相应的测量及控制精度, 如表 1, 其中俯仰方向运动为实现功能即可, 仅要求运动角度范围, 其运动精度暂不要求。且各运动方向均可协同作用, 其中水下测试部分均采用不锈钢材质。

收稿日期: 2016-06-20; 修回日期: 2016-09-18

作者简介: 王胜超 (1990-), 男, 河北唐山人, 助理工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为机电产品研发与电学计量。

表 1 主要技术指标

	X 方向/mm	Y 方向/mm	Z 方向/mm	回转方向	俯仰方向
运动范围	2000	1200	600	> ± 180°	± 10°
运动精度	0.1	0.05	0.1	0.1°	/
控制精度	0.5	0.1	0.5	0.1°	/

1.2 机械系统设计

根据水声传感器水下测试对传感器位置和姿态的要求，如表 1 所示，确定机械结构设计方案如图 1。

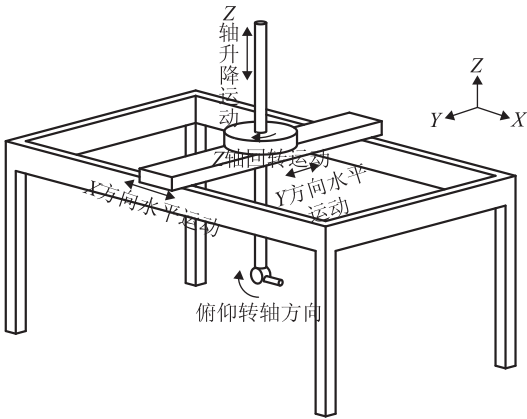


图 1 机械结构示意图

在满足支撑刚度的前提下，装置基座采用铝合金型材拼接而成，便于安装调试。 X 向运动行程长，且带动运动平台整体运动所需承载力大，传动速度范围较大，因此采用齿轮齿条传动方式，并由带托架的直线导轨与开口型直线轴承的导向组合作导向机构，齿条可连续拼接安装在支架内侧，结构紧凑。 X 向运动精度由电机控制精度、蜗轮蜗杆减速器间隙精度、齿条精度和装配精度四部分组成。步进电机编码器最大细分数为 2000 P/R，分辨力 0.018° /脉冲， X 向直线位移控制精度如式(1)，齿条累计精度 $\pm 0.042\text{ mm}$ ，蜗轮蜗杆减速器间隙精度如式(2)，装配精度 0.01 mm ， X 向运动精度为四项代数和约为 0.0773 mm ，满足技术指标要求。

X 向控制精度

$$= \frac{\pi \cdot \text{齿轮分度圆直径}}{\text{减速机减速比} \times \text{步进电机编码器最大细分数}}$$
$$\approx 1.3 \times 10^{-3}\text{ mm}$$

(1)

蜗轮蜗杆间隙

$$= \frac{\pi \cdot \text{齿轮分度圆直径} \times \text{蜗轮蜗杆减速比}}{360}$$
$$\approx 0.024\text{ mm}$$

(2)

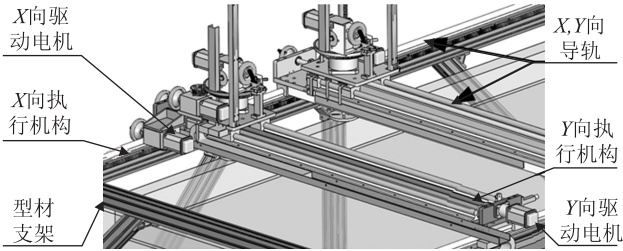


图 2 X、Y 方向运动机构设计

Y 向运动精度要求较高，采用步进电机驱动不锈钢 T 型丝杠的方式，此类执行机构的运动精度较高，同时易于控制和运动误差的补偿， Y 向运动精度主要由电机控制精度、丝杠导向精度和装配精度组成。除此之外，在丝杠螺母副运动方向发生变化时，由于制造误差及安装间隙会引入回程间隙，回程间隙的大小相对于运动精度属于粗大误差，需采用硬件或软件补偿的方法予以消除，文后将对回程误差的检测方法及软件补偿方式做详细说明，此处不做具体展开。步进电机编码器最大细分数为 2000 P/R，分辨力 0.018° /脉冲， Y 向直线位移控制精度如式(3)，C6 级精密丝杠导向精度为 $\pm 0.023\text{ mm}$ ，装配精度 0.01 mm ，最终运动精度为三者代数和 0.035 mm ，优于技术指标要求。

$$Y \text{ 方向直线位移控制精度} = \frac{\text{梯形丝杠导程}}{\text{步进电机编码器最大细分数}}$$
$$\approx 2 \times 10^{-3}\text{ mm}$$

(3)

试验装置的升降和回转运动的实现如图 3，回转运动通过大小齿轮啮合传动来实现，小齿轮固定在 Y 向滑台上，当小齿轮转动时，带动大齿轮及安装之上的升降杆在轴承座中作回转运动。回转方向运动精度主要由蜗轮蜗杆减速机和齿轮啮合回程差叠加，即二者传动比乘积约为 0.044° 。

Z 轴方向的升降运动通过齿轮齿条传动方式实现升降杆在直线轴承中运动，同时切有齿条的升降杆可兼顾导向的作用。其中升降齿轮需连接蜗轮蜗杆减速器，以实现升降杆在 Z 轴方向上的自锁^[4]。

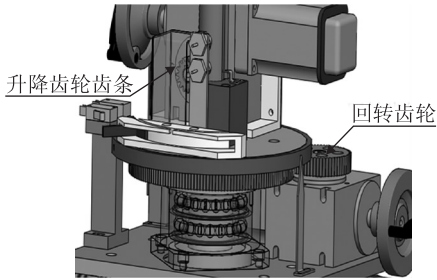


图 3 机械结构原理图

传感器在测试过程中姿态的调整均在水下进行，这就造成要求俯仰机构的驱动装置均在水面上方且无需引进电气部件，否则会引入一系列水下密封问题。本试验装置升降杆空心轴内装有不锈钢细杆，与联接法兰上的零件组成四杆机构，再由不锈钢细杆上的直流电机控制四杆机构的运动实现俯仰运动，如图 4。同时，通过选择不同尺寸的法兰连接杆，来实现对不同俯仰角度的要求，大大的增加了试验装置的适用性^[5]。

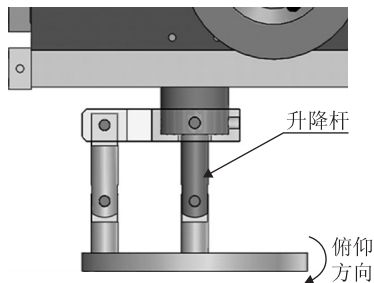


图 4 俯仰机构

表 2 给出主要运动方向运动精度设计方案与技术指标对比结果，设计方案充分满足技术指标要求。

表 2 技术指标与设计指标

指标内容			
X 向精度/mm	Y 向精度/mm	Z 向精度/mm	回转精度
技术要求	±0.1	±0.05	±0.1
方案设计	±0.077	±0.035	±0.065

1.3 丝杠回程误差检测及补偿方法

本文中坐标定位机构 Y 轴方向所采用的丝杠螺母副执行机构，是一种在精密仪器中应用最为广泛的直线运动机构。该机构具有导向精度高、易于电机精细控制等优点，但丝杠螺母由于制造误差及安装间隙所引入的回程误差，严重影响丝杠螺母副的重复定位精度。目前，针对丝杠螺母副回程误差的研究，主要集中在各类中高档数控机床及微纳运动平台，具体检测过程需要借助激光干涉仪等光学仪器，并通过线性插补算法来实现误差补偿，测量精度高，但技术复杂，成本昂贵^[6]。

本文所介绍的试验装置由于自身结构和空间的限制，丝杠螺母副为非标准件，正反向运动产生的回程间隙相对于标准件大，如文献[6]中所述小导程机加丝杠的回程误差大概在 1/4 导程的量级。另一方面，本试验装置丝杠运动方向的精度要求较其它运动方向高，如表 1，所以本文提出了一种可以检测非标准丝杠螺母

副回程误差的方法，无需外加专用测量设备，通过软件输出脉冲指令控制步进电机，来实现检测回程误差并补偿。图 5 为回程误差检测示意图。

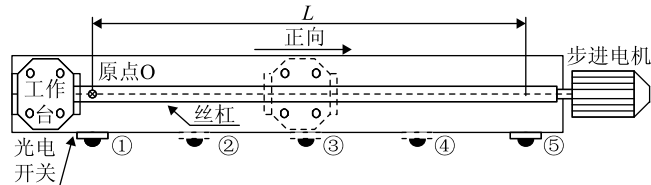


图 5 回程误差检测示意图

如图 5 所示，丝杠工作行程 $L=1200\text{ mm}$ ，工作行程内，基座上均布五个光电开关，通过手轮将工作台移动到原点 O 之外的非工作行程位置。步进电机发送脉冲驱动工作台移动，但工作台移动至光电开关①位置，触发光电开关并停止电机，程序存储驱动器发送脉冲数 n_1 ，再次启动电机直至触发光电开关②，程序存储驱动器脉冲数 n_2 ，此过程中丝杠螺母正向运动无间隙。然后反向驱动电机运动，由于回程间隙的存在，工作台会迟滞运动，直至再次触发光电开关①，程序存储驱动器脉冲数 n_3 。已知丝杠螺距 $l=4\text{ mm}$ ，步进电机分步数 $D=800$ ，代入下式即可获得丝杠螺母副的回程误差 ΔL 为

$$\Delta L = \frac{(n_3 - n_2) - (n_2 - n_1)}{D} \cdot l \quad (4)$$

从而，各分段内正向运动和反向运动的回程误差，均可按上述方法测得。理论上来说，检测精度取决于电机分步数和丝杠螺距，具有足够的检测精度。按如上检测方法完成回程误差的检测，获得表 3 中数据。

表 3 丝杠回程误差 mm

	丝杠回程误差	
	正向运动	反向运动
ΔL_1	0.87	0.91
ΔL_2	0.95	0.81
ΔL_3	0.79	0.88
ΔL_4	0.83	0.74

根据上表回程误差检测数据，代入三阶多项式，进行数据拟合，数据拟合精度 ≤ 0.0001 ，最终获得正反向回程误差计算公式，如式(5)。由于数据点相对较少且线性度好，回程误差计算公式退化为一阶多项式。

$$\begin{aligned} y &= a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \\ \Delta L_+ &= 0.0025x + 0.6025 \\ \Delta L_- &= -0.0021x + 1.1425 \end{aligned} \quad (5)$$

1.4 测控系统设计

控制系统基本原理如图 6，主控 ARM 芯片根据上位机发出控制指令，由协处理器 DSP 计算出步进电机的转动量和转动方向^[7]。当工作台运动方向发生改变，控制系统计算出电机驱动脉冲数根据回程误差计算公式进行补偿，增加或减少一定的脉冲数来提高丝杠的定位精度。步进电机编码器实时向 ARM 反馈机构位移及速度参数，ARM 根据实时反馈的数据，实时计算当前位置与目标位置的差值，并相应地校准步进电机的运转参数，实现了整个位移过程的半闭环控制^[8]。

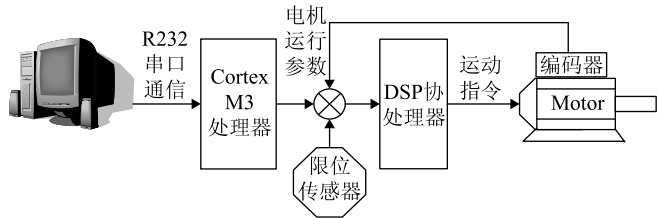


图 6 控制系统原理图

上位机软件是在 LabVIEW2012 环境下编写的，操作界面如图 7，可实现试验装置各向运动目标位置和电机运动参数设定，并显示当前位置参数，同时可以实现各向逐点步进。



图 7 上位机操作界面

最终根据机械结构及相应软硬件设计指标，完成水声传感器自动测试位移定位装置，如图 8。

2 试验装置位移误差检验

2.1 测试设备

根据试验装置设计技术指标，分别对 X 、 Y 、 Z 方向直线运动和 Z 轴回转方向的机构位移误差进行测试，

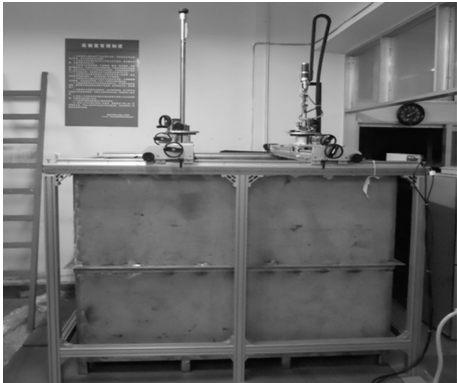


图 8 水声传感器自动测试位移定位装置

并给出误差统计结果。型号规格 API-T3 的激光跟踪仪，坐标测量精度 $10\text{ }\mu\text{m/m}$ ，测量半径 40 m ，测试环境为室内。

2.2 测试方法

位移误差测试过程大致为：通过控制软件控制校准后的运动机构，依次运动至各向运动行程内约定的扫描点，并同步由激光跟踪仪实测上述约定扫描点的位移值，得出试验装置各向位移的位移误差。

2.3 测试结果

根据既定测试方案完成测试，并获得各向运动位移相对激光干涉仪误差数据如图 9，其中俯仰运动主要实现传感器姿态的变化，位移精度相对较低，故本文只给出其他四个方向的位移误差检测结果。根据相对位移误差计算公式即式(6)，获得四个位移方向的位移误差如表 4。

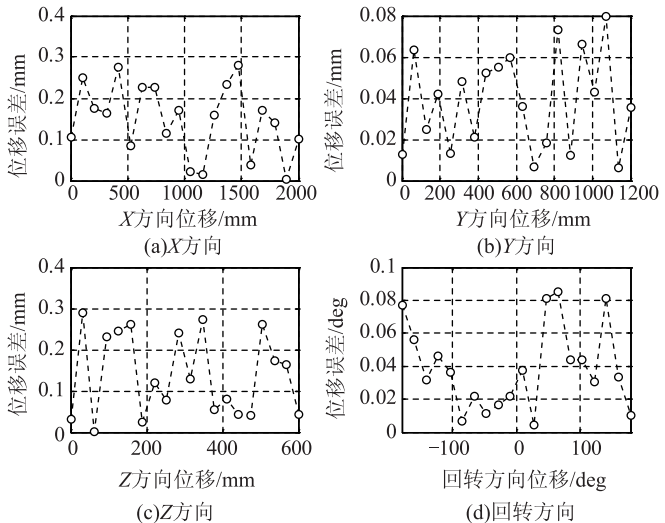


图 9 测试数据结果

势图上有较大的“毛刺”现象，这是由于存在 0°与 360°的方向转换，虽然存在数值上的较大差异，但经方向转换后实际风向数据却相差不大。总体来说船舶气象仪的工作稳定性良好，测量数据可靠。从误差上来看，两台比测仪器的温度、相对湿度和气压数据存在较为稳定的误差，说明两台比测仪器存在稳定的系统误差，这也为仪器的数据修正提供参考；由于受到“风场不确定性”的影响，风速误差表现出一定的不稳定性，但在风速较大即“风场的不确定性”较小时，则能表现出较好的一致性。

在船舶气象仪进行海上现场比测试验过程中，温度、相对湿度和气压数据的比测要求条件较为简单：要求传感器周围无遮挡物，船舶发动机等船舶设备对传感器影响最小，同类传感器的位置要尽量靠近且互不影响工作。风速、风向的比测条件要求较为严格，除以上条件外，还需尽量能使相同传感器处于“准稳定性”风场中。虽然可以在风洞中实现上述“稳定性”风场，但是海上使用现场中的温度、湿度以及腐蚀性环境却是风洞环境中难以实现的。试验表明：在较小的风速(<5 m/s)时，两台气象仪的风速、风向误差较大，出现“异常值”的概率较高，而较大的风速能表

现出较为稳定的误差，这说明较大的风速比较小的风速更有利于形成“准稳定性”的风场，但是太大的风速(>18m/s)反而又会出现较大的误差及较多的“异常值”，风场的“不稳定性”增大，不利于数据的比测。

4 结论

通过对船舶气象仪开展海上比测试验，验证了该设备的工作稳定性和可靠性，为此类仪器改进及校准验证工作提供了方法参考。

参考文献

[1] 赵维三, 李希玲. 海洋监测仪器的现场校准和比测[J]. 气象水文海洋仪器, 2004, (1): 52-54.
[2] 张川, 胡波, 王聪, 等. ARGO 浮标海上比测试验研究[J]. 海洋技术学报, 2011, 30(2): 94-98.
[3] 胡波, 李晖, 张川. UCTD 海上比测方法探讨[J]. 海洋技术学报, 2011, 30(1): 41-43.
[4] 程绍华, 刘晓峰, 岳奇. CTD 海上现场比测中的技巧应用[J]. 海洋技术学报, 2010, 29(4): 44-47.
[5] 张铁艳, 王化仁, 杨鲲, 等. 海洋调查观测资料的质量控制[J]. 水道港口, 2006, 27(1): 48-50.



(上接第 17 页)

$$\eta_i = MAX_{k=1, 2, \dots, n} |x_k - \hat{x}_k| \tag{6}$$

式中： η_i 为各运动方向上的相对运动精度误差； x_k 为试验装置测量值； $\hat{x}_k$ 为激光跟踪仪测量值。

表 4 各运动方向位移误差

	X 方向/mm	Y 方向/mm	Z 方向/mm	回转方向/deg
位置误差	0.2732	0.0756	0.2868	0.0836

3 结论

本文设计精密位移试验台结构紧凑、布局合理，功能上实现了水声传感器测试过程中对三个位移方向和两个回转方向的运动需求，实现了多自由度复合运动在机构上的小型化。介绍了一种检测非标准丝杠螺母副回程误差的方法，无需增加外部测量设备，简单可靠、操作性强。通过软件编程方式对回程误差进行了补偿，提高了丝杠的定位精度。应用激光跟踪仪对试验装置进行了误差检测，保证了试验装置运动位移

的准确性。

参考文献

[1] 崔维成.“蛟龙”号载人潜水器关键技术与自主创新[J]. 船舶与海洋工程, 2012, 29(1): 1-8.
[2] 杨江涛, 马喜宏, 邬琦. MEMS 仿生矢量水听器封装结构的隔振研究[J]. 电子器件, 2015, 38(3): 499-505.
[3] 安寅, 黄涛威, 陈棣湘. 便携式水声传感器测试系统的设计与实现[J]. 中国测试, 2015(6): 68-71.
[4] 唐金松. 简明机械设计手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000.
[5] 邹平. 机械设计实用机构与装置图册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
[6] 杨更更, 叶佩青, 杨开明, 等. 数控机床丝杠传动误差正反双向补偿功能的实现[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2002(6): 4-5.
[7] 孙祥国. 基于 ARM 单片机的步进电机控制系统设计[J]. 机电工程技术, 2007, 36(6): 71-73.
[8] 魏衡华, 陈根杰, 张玉斌, 等. 基于 CAN 总线的步进电机控制系统的设计[J]. 自动化与仪表, 2009, 24(1): 29-32.