

一种水下磁场测量基阵的设计

张学斌^{1,2}

(1. 中国船舶重工集团公司第七一〇研究所;
2. 国防科技工业弱磁一级计量站, 湖北 宜昌 443003)

摘要 针对水下被测磁场目标,根据磁场测量的要求,分析计算了测量单元的布置方式和基阵的受力,设计了一种用于布放该磁场测量系统的基阵结构。通过海上试验验证,该基阵入水姿态平稳,着底姿态良好,满足测试要求,为水下装备磁场指标评估提供依据和方法。

关键词 磁场测量系统; 测量单元; 基阵; 布放试验

中图分类号 TB22 文献标识码 A

Design of an Underwater Array for Magnetic Field Measurement

ZHANG Xuebin^{1,2}

(1. No. 710 R&D Institute, CSIC;
2. 1st Class Weak Magnetic Metering Station of NDM, Yichang 443003, China)

Abstract Aiming at measured underwater magnetic field target, according to requirements of magnetic field measurement, the arrangement form of measuring units and stress of array are analyzed and calculated, and an array structure for deployment of the magnetic field measurement system is designed. Through the verification of the sea test, the array has a smooth water-entry attitude and a good bottom attitude. It meets the test requirements and provides basis and method for magnetic field index evaluation of underwater equipment.

Key words magnetic field measurement system; measurement unit; array; deployment test

0 引言

磁场测量系统是用于水下外场综合磁场测试的系统,可测量自航水雷、UUV等具有磁防护要求装备的三分量磁场特性,以判定装备磁防护能力。同时也可作为磁探测设备布放于重要水域,美国、日本、俄罗斯、英国等在港口、海峡和重要航道等建立起便携式磁性检测站,探测水下航行的潜航器,尤其是安静型常规潜航器、深潜器等^[1-3]。磁场测量系统也可用于水下磁探测定位、高精度地磁辅助导航等^[4-6]。

本文介绍的磁场测量系统包含多个测量单元组成阵列,每个测量单元包含三分量磁场测量传感器、姿态传感器、深度传感器、同步测距模块及实现数据采集记录和实时传输的数据采集模块等。系统内还包含有水声定位系统、无线数传电台通讯系统、回收系统等组成部分^[7]。磁场测量系统功能庞大,组成复杂,根据系统的特点设计了一种用于测量系统准确可靠布放的基阵,并实现磁场数据的有效测量。

收稿日期:2017-09-29

作者简介:张学斌(1988-),男,硕士,工程师,主要从事磁场测量系统设计研究。

1 测量单元间隔设计

测量单元是集多种测量传感器于一体的基本测量结构,多个测量单元以线阵列的方式固定在无磁安装支架上,均布于水底,多段安装支架连接组成测量基阵。被测目标从测量基阵上方通过,测量单元采集被测目标的剩磁特性,测试示意图如图 1 所示。



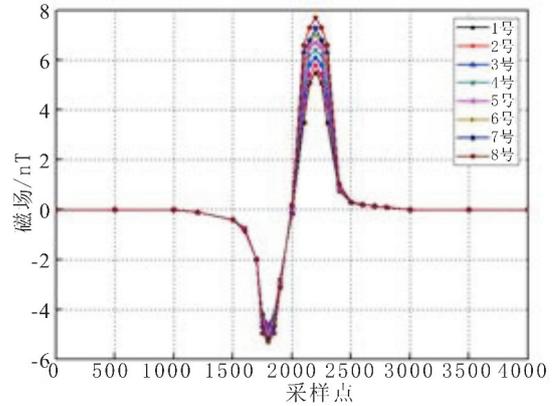
图 1 测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of testing

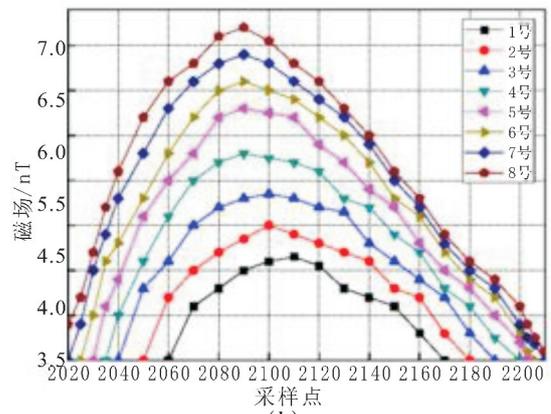
初步设计将 15 个测量单元(依次编号 1~15)安装在测量基阵上,测量单元之间间隔的选择非常重要。若测量间隔设置较小,则整个测量基阵的长度较短,当被测目标的航行精度不高时,难以保证其一次航行从测量基阵正上方通过,影响剩磁测量的准确性。若测量基阵间隔较大,虽能最大限度地保证被测目标从测量基阵正上方一次成功通过,但间隔较大,则测量基阵整体长度增大,这将给整个测量系统的布放和回收过程带来许多困难,同时可能导致被测目标剩磁值测量不准确,漏掉被测目标剩磁的最大值点。因此需要对测量单元之间的间隔的选取进行分析计算,给出一个合理的间距。

将被测目标作为一个单磁偶极子模型^[8-9],依据常用水下磁防护设备技术指标要求,其最大磁矩应小于 $80 \text{ A} \cdot \text{m}^2$,假设目标三轴方向磁矩大小分别为 $70 \text{ A} \cdot \text{m}^2, 20 \text{ A} \cdot \text{m}^2, 10 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 。假设测量单元之间间隔设置为 0.5 m ,被测目标在测量基阵正中 8 号测量单元正上方 10 m 处通过测量基阵,通过计算可得到 1~8 号测量单元中三分量磁传感器 Z 轴测得的目标磁场值如图 2 所示(图 b 为图 a

峰值放大部分)。测量单元目标总场数据如图 3 所示。由于安装位置的对称性,1~8 号和 8~15 号测量单元磁传感器 Z 轴磁场值和磁场总场数据对应相同。



(a)



(b)

图 2 1~8 号测量单元 Z 轴的探测数据

Fig. 2 Detection data of Z axis from measuring unit 1 to 8

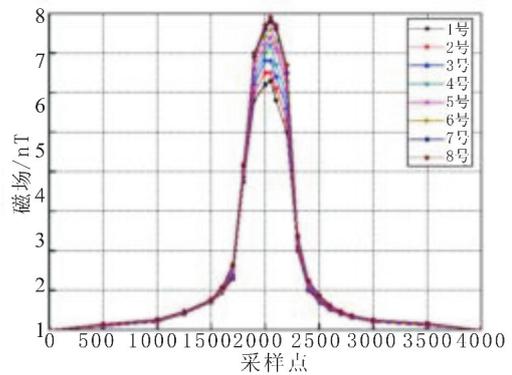


图 3 1~8 号测量单元目标总场探测数据

Fig. 3 Detection data of target's total field from measuring unit 1 to 8

依据同样的计算原理,假设测量单元间距分别为 0.75 m 和 1.0 m,计算出 1~8 号测量单元磁传感器 Z 轴磁场值和磁场总场数据,并得到 1 号测量单元与 8 号测量单元的峰值之差,如表 1 所示。

表 1 不同测量单元间隔探测结果对比

Table 1 Comparison of detection results of different measuring units' intervals

测量单元间隔/m	8 号测量单元与 1 号测量单元 Z 轴磁场峰值之差/nT	8 号测量单元与 1 号测量单元总场峰值之差/nT
0.5	2.5	1.8
0.75	4	3
1.0	5	4

由表 1 分析可得,当被测目标从测量基阵中央正上方垂直通过,目标磁场值差别随测量单元之间的间隔变大而增加,磁场差值增加的幅度随测量单元间隔的增大而变小。不同间距下系统的测量精度均能满足指标要求,被测目标的航行精度约为 10 m,综合考虑测量系统的测量精度、被测目标的航行精度以及整个测量系统布放和回收的便利性,将测量单元之间的间隔设置为 0.75 m。

2 测量基阵设计

测量单元的数量设置为 16 个,基阵由 4 段安装支架组装而成,每段支架上布置有 4 个间距 0.75 m 的测量单元,满足测量系统航行精度的要求。四段安装支架结构相同,接口一致,可互换使用,满足系统更高的使用灵活性。

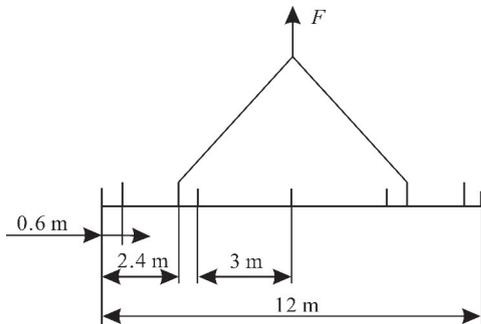


图 4 基阵吊点位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of suspending point position on array

安装支架采用无磁角铝结构件和铝管,结构上

均匀分布整个基阵,因此整个基阵受到均布载荷。单段安装支架设置吊装位置,单段安装支架与基阵共用吊点,吊点位置设置在基阵长度的 0.2 处所受横向弯矩较小,受力最为合理,单段支架的位置也分布在总长的 0.2 处。如图 4 所示为基阵的起吊点位置设计。

测量基阵采用两耳吊装时,两耳的最中间位置受到均布载荷的作用,将产生一定的挠度。将该段安装架独立考虑,根据简化结构分布载荷下的挠度计算公式,在安装架轴线中点处,挠度最大,最大挠度为

$$w_{\max} = \frac{5ql_1^4}{384EI} \tag{1}$$

式中: q 为分布载荷, N/m; l_1 为吊点间距, m; E 为材料弹性模量, GPa; I 为无磁支架横截面在吊耳安装处的惯性矩, cm^4 。

测量基阵总重量约为 630 kg,根据所选材料的参数结构尺寸,得到 $I = 662.21 \text{ cm}^4$ 、 $E = 70 \text{ GPa}$ 、 $q = 525 \text{ N/m}$ 和 $l_1 = 7.2 \text{ m}$ 。可求出双耳吊装时,安装架最大挠度为 $w_{\max} = 0.040 \text{ m}$,起吊中的变形量满足安全使用要求。为了简化计算,密封铝管产生的刚度忽略不计。同时,由于吊耳位置位于无磁支架总长度的 0.2 l 处,一定程度上减少无磁支架中点处的变形量。

在测量基阵安装架双耳起吊的过程中,弯曲正应力是控制安装架强度的主要因素。所以弯曲正应力的强度条件是安装架抗弯设计和校核的主要依据。安装架抗弯强度条件公式为

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \leq [\sigma] \tag{2}$$

式中: M_{\max} 为安装架的最大弯矩, N·m; W 为安装架的抗弯截面系数, m^3 ; $[\sigma]$ 为安装架的许用应力, MPa。

测量系统安装架总质量为 $m = 630 \text{ kg}$,安装架总长度 $l = 12 \text{ m}$,安装架的分布载荷 $q = mg/l = 525 \text{ N/m}$,根据公式可求得安装架的最大弯矩为 $M_{\max} = 1890 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。安装架底部框架材料选用的是 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 角铝横截面重心处的抗弯截面系数为: $W_0 = 12.83 \text{ cm}^3$ 。由于安装架底部

框架由2根角铝组成,整个框架的抗弯截面系数为 $W_{\min}=2W_0=25.66\text{ cm}^3$,此时根据公式(1)可求出最大的弯曲正应力为 $\sigma_{\max}=73.7\text{ MPa}$ 。取安全系数 $S=1.5$,安装架材料为防锈铝合金,其屈服强度 $\sigma_s=\sigma_{p0.2}=120\text{ MPa}$,可根据许用应力公式 $[\sigma]=\sigma_s/S$,求出安装架的许用应力 $[\sigma]=80\text{ MPa}$ 。 $\sigma_{\max}\leq[\sigma]$ 满足弯曲强度要求。

3 安装支架结构设计

无磁安装支架主体结构采用角铝材料和铝管设计,角铝和铝管均为通用型材,角铝主要是支撑和安装的功能,铝管的作用主要是保护测量单元和调整浮心高度。如图5所示为无磁支架的截面结构,图6为单段安装支架结构。

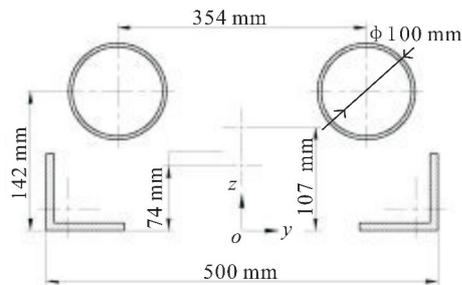


图5 安装支架截面结构

Fig. 5 Section structure of installing support



图6 单段安装支架结构

Fig. 6 Structure of single-stage installing support

单段无磁支架的重量约为72 kg,在水中能提供的浮力约为59 kg,单个测量单元的重量约为8 kg,可提供的浮力约为6.5 kg,因此单个安装架总重量为104 kg,可提供的浮力约为85 kg。为了获得系统布放时的稳定性参数,对系统的质量特性进行了初步分析和计算。单段安装架重心距离底部高度为74 mm,浮心距底部高度约为107 mm。

在整个布放过程中,首先通过将整个测量基阵水平吊放到海面,由基阵上的漂浮布放浮体保持其海面姿态。浮体释放后,测量基阵入水,要求基阵

在入水过程中尽量保证姿态的稳定性和设备的安全,最终实现测量基阵的水平着底姿态。

4 布放试验验证

测量单元内安装有磁罗盘传感器测量其姿态信息,通过首尾两端的测量单元姿态可判断测量基阵的姿态。基阵从漂布于海面到着陆于海底,可通过观测深度和姿态分析其布放中的动作路径。测量单元数据通过水密电缆和无线通信浮标传输到上位机中,可实时观测。如下图7所示为布放时1号和16号测量单元随深度变化时的姿态变化曲线。

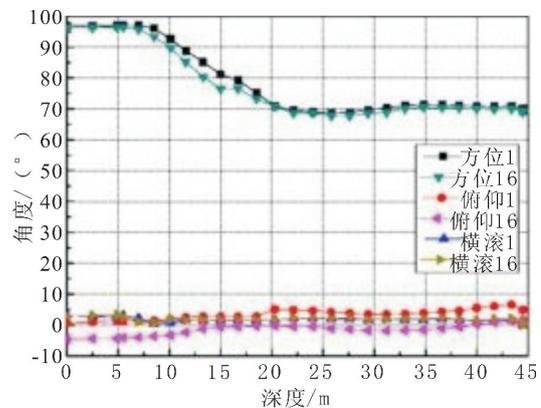


图7 测量单元姿态随深度变化关系

Fig. 7 Attitude of measuring units changing with depth

由曲线可知,测量基阵从海平面布放到45 m的海底,1号和16号测量单元的方位角、俯仰角、横滚角在最初和最终位置都基本相同,表明基阵在水面和水底位置都为稳定直线状态。测量单元俯仰角和横滚角在整个布放过程中变化较小,且接近于零,表明基阵基本以水平状态平稳下沉。方位角在布放中由于水流的作用发生了约27°的偏转,且在水深10~20 m之间偏转速度较快,基阵发生了大约5°的水平弯曲。通过基阵最终姿态信息规划被测目标的航迹。

5 结束语

本文针对设定被测目标的磁场测试要求,对磁场测量单元的间隔进行计算分析,确定出有利于测试和布防回收的方案。依据测量单元特点设计出磁场测量系统的安装基阵,通过布放试验验证,该

测量基阵能实现较好的布放姿态,有效满足目标磁场测试需求,为水底航行目标磁场的评估提供了依据和方法。

参考文献

- [1] 陈文涛. 便携式磁性检测的关键技术及发展方向[J]. 通讯世界, 2015(2): 229-230.
- [2] 彭亮, 王建勋, 邓海华, 等. 水下非声探测与隐身技术综述[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(5): 6-10.
- [3] 吕俊军, 张琼, 刘跃雷. 海战场高灵敏度电磁场传感器研究动向与发展[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(11): 3574-3576.
- [4] 龚天平. 磁探测定位在搜索水下铁磁性物体中的应用[J]. 电子世界, 2014(10): 160-161.
- [5] 赵塔, 朱小宁, 程德福, 等. 水下地磁导航技术中的地磁场空间差分测量方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(1): 316-322.
- [6] 赵塔, 陈雨薇, 周志坚, 等. 一种水下载体干扰磁场的空间差分补偿方法[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(3): 71-76.
- [7] 董昊. 磁场测量系统内记模块的设计[J]. 磁学工程, 2017, 9(3): 29-33.
- [8] 孙焯, 肖昌汉, 周国华. 磁主动式海底磁传感器定位方法及其解析公式[J]. 海洋测绘, 2012, 32(4): 25-28.
- [9] 柯泽贤, 赵俊生, 任来平, 等. 水下物体磁探测线间距的影响因素[J]. 物探与化探, 2010, 34(1): 71-74.

(上接第 35 页)

层板刚度矩阵进行叠加, 计算出层合板的刚度矩阵, 进而计算中面应变, 分解为各单层应变, 得出各单层板的应力应变结果:

2) 基于理论解析法和有限元法计算的结果比较, 有限元方法很精确地对碳纤维层合板强度进行了模拟, 所以采用有限元方法对碳纤维层合板进行强度分析是可行的;

3) 本文研究的是对称层合板, 铺层比较简单, 不存在复杂的耦合效应, 而实际工程运用到的碳纤维结构, 铺层非常复杂, 要考虑到层间耦合系数的影响, 还需要以后做进一步分析。

参考文献

- [1] 张鑫. 基于 ANSYS 的复合材料仿真分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [2] 曹升虎. 纤维缠绕环管的结果设计及强度分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [3] 琼斯 R M. 复合材料力学[M]. 朱颐龄, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.
- [4] 周履, 范赋群. 复合材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.
- [5] CHRISTENSEN R M. Mechanics of Composite Materials[M]. Hoboken: John Wiley&Sons, Inc., 1979.
- [6] 刘新东, 刘伟. 复合材料力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- [7] 龚曙光, 谢桂兰. ANSYS 参数化编程与命令手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [8] 吴祥. 碳纤维-铝合金复合材料气瓶的应力分析与优化设计[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
- [9] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.