

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代海军兵器技术丛书

水压场检测技术

姜润翔 张晓兵 史建伟 著

兵器工业出版社

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代海军兵器技术丛书

水压场检测技术

姜润翔 张晓兵 史建伟 著

兵器工业出版社

内容简介

本书在大量实测数据的基础上,研究了舰船水压场、背景干扰水压场的特性以及两者之间的特征差异,简要介绍了不同种类压力传感器的工作原理、结构和特点,初步总结了影响水压场测量的有关因素,并给出了典型水压场测量系统的设计方法,重点介绍了现代水压场信号处理的几种方法并对比了它们的优劣。

本书可供从事水压引信研究的技术人员阅读参考,也可作为高等院校相关专业本科高年级学生的专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

水压场检测技术 / 姜润翔, 张晓兵, 史建伟著. —
北京: 兵器工业出版社, 2015. 3

(现代海军兵器技术丛书 / 林春生, 滕克难主编)

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978 - 7 - 5181 - 0097 - 2

I. ①水… II. ①姜… ②张… ③史… III. ①航海通信—信号—信号检测 IV. ①U675. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 047531 号

出版发行: 兵器工业出版社

发行电话: 010-68962596, 68962591

邮 编: 100089

社 址: 北京市海淀区车道沟 10 号

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京圣夫亚美印刷有限公司

版 次: 2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

责任编辑: 陈红梅

封面设计: 正红旗下

责任校对: 郭 芳

责任印制: 王京华

开 本: 710 × 1000 1/16

印 张: 11.25

字 数: 196 千字

定 价: 56.00 元

现代海军兵器技术丛书

编审委员会

主 任：程锦房

副主任：林春生 滕克难 王德石

委 员（按姓氏笔画排序）：

田福庆 付 强 齐 欢 许 诚 严卫生

李国林 吴茂林 余湖清 张晓晖 张效民

张静远 陈 川 周穗华 郑学合 赵修平

黄俊斌 龚沈光 颜 冰

总主编：林春生 滕克难

丛书序

海军肩负着保卫国家海洋领土完整、海洋运输线安全和国家海洋权益的重大使命，先进的海军兵器是海军履行使命的基本保证。新中国建立以后，伴随着我国海军部队的发展和壮大，海军兵器从无到有，在科学原理、设计理论、制造技术、保障方法等方面得到了全方位的发展。我国海军兵器技术的发展经历了二十世纪五十、六十年代的全面仿制阶段和七十、八十年代的原理模仿与技术创新阶段，从九十年代起，进入了全面自主设计阶段，使得我国海军在役兵器的主体具备了完全的知识产权，海军兵器技术理论也逐步得到发展和完善。特别是最近十几年来，随着国家海洋权益意识的不断提高和海军转型改革的不断深入，海军兵器得到了更加迅速的发展，大量新型高技术兵器已经装备部队或者即将装备部队；不少新装备采用了新概念、新技术、新材料、新能源，海军兵器正朝着智能化、信息化、精确打击的目标发展。

随着海军大批高新技术兵器装备部队，以及兵器学科理论的发展与完善，迫切需要一套全面反映海军兵器学科基础理论、设计制造技术、保障方法的丛书，一方面方便广大海军官兵系统掌握现代海军兵器的基础理论、技术原理和使用维护方法，以便科学合理地运用兵器、充分发挥高新技术兵器的作战效能；另一方面，对海军兵器学科理论的发展做一个比较全面系统的归纳和总结，以促进海军兵器学科理论和技术方法的创新。为此，我们组织编撰了《现代海军兵器技术丛书》。该丛书以相关专业教学、科研人员近十几年来的学术积累为基础，同时广泛收集国内相关技术领域的代表性研究成果，着重论述新兴技术对海军装备的影响，结合海军装备技术

发展热点，全面阐述海军兵器的新理论、新技术、新发展；丛书内容涉及舰炮、鱼雷与反潜武器、水雷与反水雷、导弹等多种海军兵器；丛书编撰注重学科理论和技术原理的阐述，同时兼顾内容的系统性，力争使丛书兼备较高的学术水平和较好的实用性。

本丛书可供海军兵器论证、设计、制造、使用和维护领域的技术人员和管理人员阅读参考，也可用作相关高等院校专业师生的教学参考书。

《现代海军兵器技术丛书》编委会

2015 年 2 月

序

近日有幸阅读《水压场检测技术》书稿。作为“现代海军兵器技术丛书”之一，该书由海军工程大学青年教师姜润翔博士等三人合著，着实可喜可贺。可喜的是，该书内容丰富、深入浅出，融入了作者悉心研究、实验、探索的第一手资料和成果，摒弃了浮躁、虚夸的学风和文风；可喜的是，海军兵器学科领域的青年学者在老教授的指导下迅速成长，锐意进取、敢于创新。可贺之处在于，这本书填补了舰船水压场检测领域学术专著的空白。我认为这本专著的出版，对于相关领域的科学研究、教学和军事应用，具有重要的参考价值。

水压场检测技术的应用背景是水雷。水雷是一种历史悠久的武器，在现代战争中持续地展示威力，例如在朝鲜战争中阻滞美军元山登陆、在越南战争中美军封锁北部湾以及伊拉克在海湾战争中都有运用。现代水雷已经不再是传统意义上的单纯防御武器，它也可以演变为“进攻性”武器，甚至被用作“恐怖袭击”的武器。想要掌握制海权的任何国家，不得不充分重视水雷战（以及反水雷）的重要性。水雷的目标检测、识别、定位和动作控制，是依靠水雷引信来完成的。现代水雷引信所利用的诸多物理场中，最主要的是舰船水压场、磁场和声场，尽管电场、地震波、红外检测等也有研究。利用水压场进行舰船目标检测的显著优点是，它的抗扫性特别好。但是水压引信长期以来面临着一个技术难题，就是如何抑制海洋环境中涌浪等形成的自然干扰，实现低信噪比条件下对于舰船目标的可靠检测。

本书作者着眼于水压场物理机制与先进信息电子技术相结合，对水压场检测技术进行了系统深入的研究，提出了新的水压场目标检测算法，研制了实验测量系统，经海上试验证明其抗海浪性能和低信噪比目标检测性能都有很显著的提高。这些成果集中反映在“第6章现代水压场信号实时

检测技术”中。前五章主要介绍水压场的基础知识、水压引信接收器、水压场测量系统设计以及传统水压场信号处理技术等。作者消化、整理了有关技术资料，给出了若干典型范例以及作者的分析计算结果，帮助读者加深理解。本书的写作简明扼要，文字流畅，篇幅适度，便于阅读。我认为是一本很好的参考书和教学用书，值得从事海军武器装备研究、设计、运用、教学的科技人员善加利用。

A handwritten signature in black ink, consisting of three stylized Chinese characters: '马' (Ma), '勇' (Yong), and '良' (Liang), which together read '马勇良' (Ma Yongliang).

2014 年 11 月 1 日

前 言

水雷武器由于具有攻击突然、威力强大、隐蔽性好、易布难扫、对敌造成长期威胁、能以兵器封锁替代兵力封锁、作战效费比高等特点而受到各国海军的青睐。水雷引信是水雷的核心部件，目前应用最多的是水雷磁引信、声引信和水压引信及其组合。水压引信是借舰船水压场动作的，由于舰船水压场极难人工模拟，因此水压引信因具有独特的抗扫性而被广泛应用于各型水雷中。

与水雷磁引信、声引信相比较，水压引信最大的问题是抗海浪干扰的能力相当薄弱，不仅不能在较大的海浪条件下检测到目标，同时还可能发生误动作(虚警)。为了提高水压引信抗干扰的能力，国内外进行了大量的研究，取得了进展。但关于水压引信设计中的核心问题——水压场检测技术，尤其是高海况下的水压场信号检测方法，仅见诸零星的文献，不便于从事这方面工作的同志参考。基于此，作者在已有资料的基础上，结合自身和团队的最新研究成果撰写此书。书中以大量实测数据为基础，对舰船和海洋环境水压场信号的特性、测量技术和信号处理技术进行了系统论述，供同行参考。

全书共分6章，第1、2章研究舰船水压及其干扰场，在大量海上实测数据的基础上，分析了舰船水压场和背景干扰水压场的特性；第3、4章研究水压场测量技术，简要介绍了不同种类压力传感器的工作原理、结构和特点，初步总结了影响水压场测量的有关因素，并给出了典型的水压场测量系统；第5、6章研究水压场信号处理技术，简要介绍了传统水压场信号处理方法，重点介绍了现代水压场信号处理的几种方法并对比了它们的优劣。

本书在撰写过程中得到海军工程大学兵器工程系、中国船舶重工集

团第 710 研究所和 662 厂的支持。西北工业大学马远良院士、张效民教授，海军工程大学龚沈光教授、颜冰教授，中国船舶重工集团第 710 研究所杨树鑫研究员、汪小亚研究员审阅了书稿并提出了宝贵意见，在此一并表示感谢！

受作者学术水平和对技术问题认识深度的限制，本书难免存在缺陷和不足，甚至是错误，欢迎读者批评指正。

作者

2014 年 10 月于武汉

目 录

第 1 章 舰船水压场	1
1.1 舰船水压场的计算	1
1.2 舰船水压场仿真及分析	3
1.3 实测舰船水压场特性分析	6
1.4 尾流水压场	10
1.4.1 尾流的水动力特征	10
1.4.2 舰船兴波尾流的速度场模型	12
1.4.3 实测尾流水压场特性	16
第 2 章 背景干扰水压场	19
2.1 海洋环境水压场	19
2.1.1 静水压	19
2.1.2 海浪水压场	19
2.1.3 海流水压场	44
2.1.4 潮汐水压场	48
2.2 雷体运动干扰水压场	49
2.2.1 雷体运动	49
2.2.2 雷体运动水压场特点	51
2.3 水中爆炸干扰水压场	54
2.3.1 激波	55
2.3.2 气泡脉动	55
2.3.3 水中爆炸水压场特点	56

第3章 水压引信接收器	58
3.1 水压引信接收器的工作特点	58
3.2 继电式水压引信接收器	59
3.2.1 气体式水压引信接收器	59
3.2.2 液体式水压引信接收器	61
3.3 输出连续信息的压力传感器	65
3.3.1 压电式压力传感器	65
3.3.2 应变式压力传感器	79
3.3.3 压阻式压力传感器	83
第4章 水压场测量系统设计	100
4.1 压阻式压力传感器测量系统	100
4.1.1 压力传感器的选择	101
4.1.2 85 系列压力传感器	102
4.1.3 传感器信号调理电路	103
4.1.4 低功耗数据采集系统	104
4.2 水中爆炸压力测量电路设计中的注意事项	108
4.3 现场测量的有关技术问题	109
4.3.1 传感器的现场安装质量问题	109
4.3.2 电缆、连接插头、插件的防潮和防振	109
4.3.3 测量水域的选择	110
第5章 传统水压场信号处理技术	111
5.1 水压引信的信号处理要求	111
5.2 采用继电式接收器的水压引信的信号处理	112
5.2.1 基本原理	112
5.2.2 存在问题	114
5.2.3 硬件实现	115
5.2.4 改进措施	116
5.3 采用输出连续信息接收器的水压引信的信号处理	117
5.3.1 “Stone Fish”水雷水压引信信号处理方法	117
5.3.2 “MRP”水雷水压引信信号处理方法	120

5.3.3 频域信号检测算法	121
第6章 现代水压场信号实时检测技术	122
6.1 AR 模型	122
6.2 功率谱估计	125
6.3 尺度—小波能量谱	126
6.4 水压场时域特征提取技术	127
6.4.1 基于 AR 模型参数的特征提取技术	127
6.4.2 基于 AR 模型滤波的特征提取技术	128
6.5 水压场频域特征提取技术	131
6.5.1 基于尺度—小波能量谱的特征提取技术	131
6.5.2 基于累计功率谱的特征提取技术	133
6.6 水压场滑动检测算法	134
6.6.1 基于 AR 滤波误差值的检测算法	134
6.6.2 基于累计功率谱的检测算法	135
6.7 算法性能检验及比较	135
6.7.1 算法参数设定	135
6.7.2 实测数据算例	136
6.7.3 仿真数据算例	139
6.8 雷体运动对累计功率谱检测算法的影响及解决对策	149
6.8.1 雷体运动引起算法的误动作	149
6.8.2 解决方法	150
6.8.3 实测算例	152
6.9 水中爆炸对累计功率谱检测算法的影响及解决对策	154
6.9.1 水中爆炸引起算法的误动作	154
6.9.2 解决方法	155
6.10 潮汐对累计功率谱检测算法的影响	156
参考文献	158
索引	163

第 1 章 舰船水压场

舰船静浮于水中时，船体水下部分不对周围水质点产生任何形式的扰动，而舰船航行时，船首排开前方的水并占有这部分原有水所占有的空间，船尾周围的水则聚向船尾前进后所留下的空间，这就形成了运动舰船对周围空间水质点的扰动，从而使水下流场的速度分布和压力分布发生变化。这种由于舰船运动引起的流场和水底的压力变化称为舰船水压场^[1]。其水下某一深度的平面特性如图 1-1 所示。舰船水压场一经发现，就因其极难人工模拟的特点引起广泛的重视。早在第二次世界大战末期，德、美、苏等国就先后研制了借舰船水压场作用而动作的水压水雷，并投入实战，收到了良好的效果。因此，舰船水压场的研究是设计新型水压水雷及舰船自身防护的依据，具有重要的军事意义。

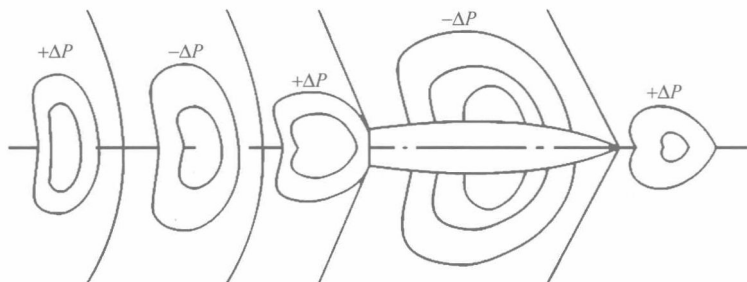


图 1-1 舰船水压场特性平面示意图

1.1 舰船水压场的计算

在舰船水压场理论研究方面，早在第二次世界大战期间，英国泰勒教授就首次提出了一个计算舰船水压场的简易公式。在此基础上，许多学者

对泰勒公式进行了简化和改进。如苏联克雷洛夫海军学院假设舰船水下部分的横截面面积沿舰船纵向呈梯形分布来代替泰勒公式中的抛物线分布,提出了被称为苏联公式的舰船水压场计算公式。1978年后,国内有学者对泰勒公式和苏联公式进行了一些改进和计算。船速较低,水面平静,舰船航行无兴波是这些计算公式的假设前提。文献[1]给出了一种舰船水压场计算公式,简单介绍如下:

设舰船水线长 $L(\text{m})$ 、船宽 $B(\text{m})$ 、吃水深度 $T(\text{m})$ 的薄船,其排水体积为 $V(\text{t})$ 、纵向棱形系数为 φ 、方形系数为 δ ,航速为 v_0 。研究其在海底一点 $M(x_0, y_0, d_0)$ 引起的压力变化。引进无因次量:

$$\bar{x} = \frac{x_0}{L}, \bar{y} = \frac{y_0}{L}, \bar{d} = \frac{d_0}{L} \quad (1-1)$$

$$\bar{T} = \frac{T}{L}, \bar{B} = \frac{B}{L}, \bar{c} = \varphi - 0.5 \quad (1-2)$$

并令

$$A = (2n-1)\bar{d} + \bar{T}, R = (2n-1)\bar{d} - \bar{T} \quad (1-3)$$

$$E = (\bar{x} + \bar{c})^2 + \bar{y}^2, F = (\bar{x} - \bar{c})^2 + \bar{y}^2 \quad (1-4)$$

$$G = (\bar{x} + 0.5)^2 + \bar{y}^2, K = (\bar{x} - 0.5)^2 + \bar{y}^2 \quad (1-5)$$

则可得舰船水压场计算公式为:

$$\Delta P = \frac{\rho v_0^2}{2} C_p \quad (1-6)$$

式中 ρ ——海水密度 (kg/m^3);

C_p ——舰船水压场压力系数。

如 $\bar{y}=0$, 且 $\bar{x}=\bar{c}=\varphi-0.5$, 即 $F=0$, 则:

$$C_p = \frac{-\delta \bar{B}}{\pi \varphi (1-\varphi)} \left\{ \sum_{n=1}^j \ln \left[\frac{A(A + \sqrt{E + A^2})(-A + \sqrt{G + A^2})(-A + \sqrt{K + A^2})}{RE} \right. \right. \\ \times \left. \frac{(-R + \sqrt{E + R^2})(R + \sqrt{G + R^2})(R + \sqrt{K + R^2})}{GK} \right] \\ \left. + \frac{\bar{T}}{d} \ln \frac{(-W + \sqrt{E + W^2})(W + \sqrt{G + W^2})(W + \sqrt{K + W^2})}{2WE} \right\} \quad (1-7)$$

如 $\bar{y}=0$, 且 $\bar{x}=0.5$, 即 $K=0$, 则:

$$C_p = \frac{-\delta\bar{B}}{\pi\varphi(1-\varphi)} \left\{ \sum_{n=1}^j \ln \left[\frac{R(A + \sqrt{E + A^2})(-A + \sqrt{G + A^2})(A + \sqrt{F + A^2})}{AE} \right. \right. \\ \left. \times \frac{(-R + \sqrt{E + R^2})(-R + \sqrt{F + R^2})(R + \sqrt{G + R^2})}{GF} \right] \\ \left. + \frac{\bar{T}}{d} \ln \frac{2W(-W + \sqrt{E + W^2})(-W + \sqrt{F + W^2})(W + \sqrt{G + W^2})}{EF} \right\} \quad (1-8)$$

在其他各点, 即 $FK \neq 0$ 时, 则:

$$C_p = \frac{-\delta\bar{B}}{\pi\varphi(1-\varphi)} \\ \left\{ \sum_{n=1}^j \ln \left[\frac{1}{EFGK} \times (A + \sqrt{E + A^2})(A + \sqrt{F + A^2})(-A + \sqrt{G + A^2})(-A + \sqrt{K + A^2}) \right. \right. \\ \left. \times (-R + \sqrt{E + R^2})(-R + \sqrt{F + R^2})(R + \sqrt{G + R^2})(R + \sqrt{K + R^2}) \right] \\ \left. + \frac{\bar{T}}{d} \ln \frac{(-W + \sqrt{E + W^2})(-W + \sqrt{F + W^2})(W + \sqrt{G + W^2})(W + \sqrt{K + W^2})}{EF} \right\} \quad (1-9)$$

大量计算结果表明, 在舰船水压场的流体力学模型中引用源汇模型后, 取 $j=1$ 所算得的 C_p 正负极值与取 $j=12$ 算得的正负极值, 其相对误差已不大于 5%, 因此在编程计算 C_p 时, 取 $j=7 \sim 12$ 已可满足实际工程需要。

1.2 舰船水压场仿真及分析

根据 1.1 节分析可知, 影响舰船水压场的参数主要包括: 舰船吨位、船长、纵向菱形系数、吃水深度、航行速度和水深等。为了研究这些参数对舰船水压场特性的影响程度, 进行了仿真计算, 计算时都取 $y=0$, 结果如图 1-2 所示。

分析图 1-2 可以得到如下结果: ①舰船水压场正、负压区的长度只与船长有关, 而与其他参数基本无关, 若换成时间上观察, 正、负压持续时间只与航速和船长有关, 而与其他参数无关; ②舰船水压场正、负压区幅值随水深变化较大, 而且在水深较浅的情况下, 有时会出现两个负峰;

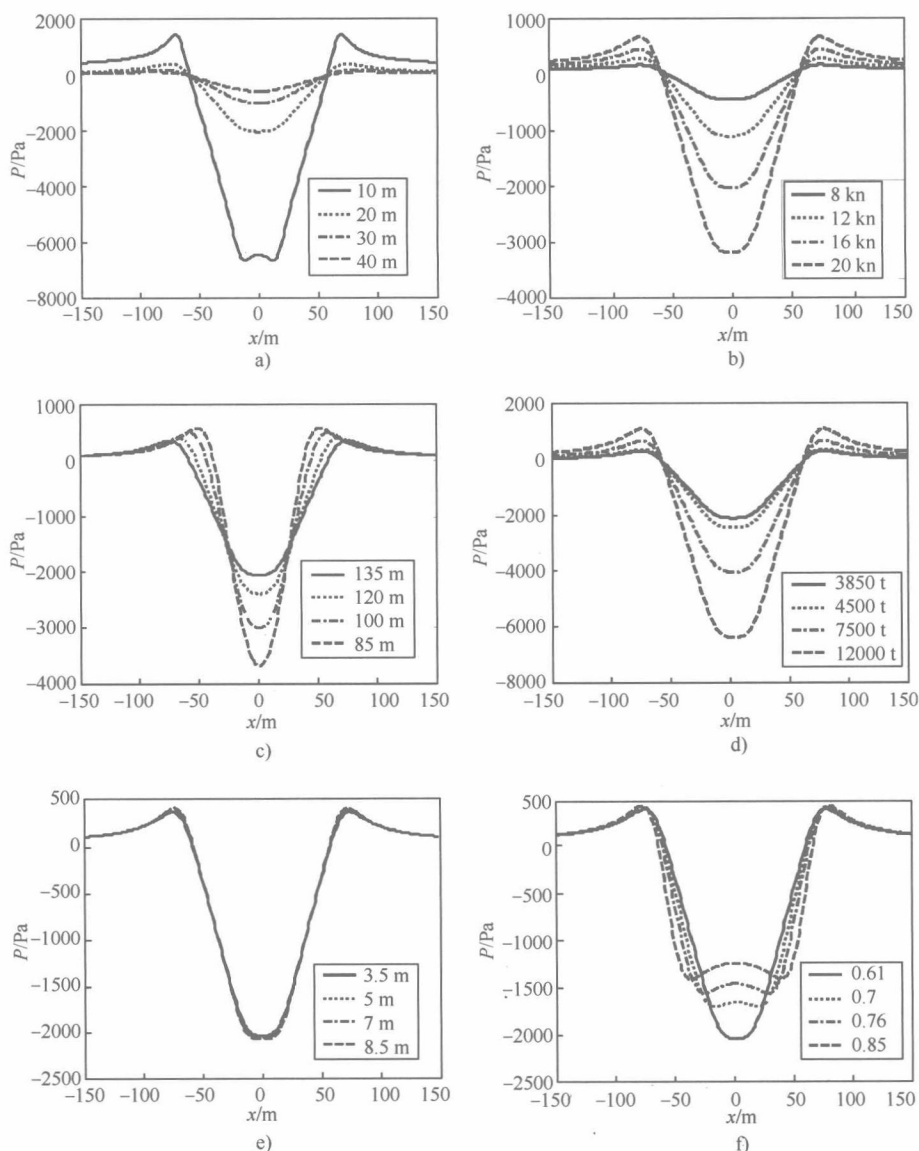


图 1-2 不同舰船参数产生水压场对比

- a) 不同水深舰船水压场; b) 不同航速舰船水压场; c) 不同船长舰船水压场;
d) 不同吨位舰船水压场; e) 不同吃水深度舰船水压场; f) 不同菱形系数舰船水压场

③舰船吃水深度对水压场影响最小; ④菱形系数和船长对水压场影响稍弱, 但菱形系数对负压区双峰现象影响较为明显; ⑤舰船吨位与航速对水