

“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

水雷总体技术

周穗华 张晓兵 编著
蒋培 张文成

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

水雷总体技术

周穗华 张晓兵 编著
蒋培 张文成

兵器工业出版社

内容简介

水雷总体技术涉及面很广，本书重点介绍和研究水雷及水雷总体技术的发展、水中爆炸威力及其毁伤标准、水雷装药及其安全性保障、水雷结构强度及稳定性校核、水雷攻击及打击概率分析、水雷反猎及隐身等内容，对水雷发展史、水中爆炸、毁伤标准、强度稳定性校核、声隐身等方面做了较为深入的研究。全书力求系统，但有所侧重。

本书适合水中兵器专业领域的工程技术人员参考使用，也适合相关专业的教师、研究生、高年级本科生阅读。

图书在版编目（CIP）数据

水雷总体技术 / 周穗华等编著. — 北京：兵器工业出版社，2015. 11

（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 978-7-5181-0156-6

I. ①水… II. ①周… III. ①水雷—军事技术 IV. ①E925. 21

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第263493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11月第1版第1次印刷

责任编辑：周 琦 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：17

字 数：262千字

定 价：56.00元

（版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换）

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

前 言

长期以来，水雷技术分为水雷总体技术和水雷引信技术两大部分。这在水雷发展初期是比较合理的，当时水雷总体最多只是包含雷体、雷锚、定深、雷索和附件等，但水雷发展到今天，水雷技术发生了很大的变化，增加了很多内容，再如此划分就显得有点头重脚轻，水雷总体技术包含的内容过于宽泛。同时，引信技术也赋予了新的内涵。

现代水雷技术研究内容主要包括：水雷系统配置及战术技术指标、水雷装备的论证、水雷研制及管理、水雷战斗部及装药、水中爆炸及威力、水雷结构强度及稳定性、水雷布放及水中定位、水雷攻击及打击效果、水雷反猎抗扫及隐身、水雷导航定位、水雷能源及推进、水雷制导及控制、水雷目标探测系统(Target Detecting System, TDS)及引信、水雷试验训练及评估、水雷六性(可靠性、维修性、保障性、测试性、安全性、环境适应性)、水雷作战效能分析等。而上面所指的引信是水雷接近目标引爆水雷的电子装置，也称近炸引信。其中，水雷目标探测系统就是传统中所说的水雷引信，有些水雷引信和 TDS 是分离的，有些水雷引信和 TDS 是合二为一的，传统水雷引信和 TDS 一般都合二为一。

将水雷技术分为总体技术、TDS 及引信技术、导航定位技术、动力推进技术、制导控制技术、水雷试验训练与评估技术、六性相关技术、水雷作战效能分析等是比较合理的。在此，水雷总体技术就不再是除引信技术外的所有技术了，而是将其限定在一定范围内。

综上所述可知，水雷总体技术实际上是指针对水雷武器作战使命，运用系统科学的理论与方法，结合保障和使用环境要求，对水雷的功能、性能进行协调设计，解决水雷武器装备和系统研制中面临的总体设计与系统集成等技术。水雷总体技术具体包括总体设计与系统集成技术，结构布局、材料及隐身技术，水中爆炸及其毁伤威力，任务规划与弹道设计

技术，载荷释放技术，水中控位与稳定技术等。

本书共分5章，内容涉及水雷毁伤标准及战斗部装药、水雷雷体强度与形状稳定性、水雷攻击及其弹道、水雷声隐身技术等内容。第1章对水雷及水雷总体技术的发展、水雷系统基本结构组成等进行了较全面的介绍。第2章对水雷的毁伤标准进行了较为系统全面的论述，介绍了三种毁伤标准，结合实际水中爆炸对目标的毁伤程度，对三种毁伤标准的宽严程度进行了对比分析，给出了其最低毁伤标准的推荐值。特别是在被打击目标的冲击加速度的计算中，引入了目标舰船深度线密度系数这一参量，并根据统计结果及其变化规律，给出了线密度系数与目标舰船吨位近似关系以及典型目标条件下线密度系数的期望值，大大降低了对被打击目标其他参数的依赖性，为冲击加速度标准走进实用迈进了一大步。本章还对水中爆炸及其物理现象进行了较为详细的介绍，同时对战斗部装药及其安全进行了简要介绍。第3章重点对薄壳无矩理论下水雷常用壳体强度和稳定性计算的解析方法及其强度稳定性校核方法进行了较为详细的介绍，特别是对球头尾锥圆柱形雷体及带环形肋骨圆柱形雷体的强度及其稳定性进行了较为详细的论述。同时，对水雷击水、击底情况下的冲击过载计算及其壳体和装药的强度校核也作了介绍。最后，介绍了可用于水雷壳体强度计算的仿真计算软件及仿真计算结果。第4章主要对锚系水雷平台(雷体)在水中的状态及其受水流和波浪的影响及平台在水下的姿态和运动进行了论述。在此基础上，主要对定向攻击水雷的攻击策略对总毁伤概率及攻击误差对毁伤概率的影响作了比较详细的介绍。第5章着重对水雷的形状隐身和涂层隐身进行了较为系统的论述，同时简单介绍了自掩埋技术。

本书撰写分工：第1、4章由周穗华撰写，第2章由周穗华、张晓兵撰写，第3章由周穗华、蒋培撰写，第5章由周穗华、张文成撰写，全书由周穗华统稿。张宏欣、孙玉松博士等也做了大量辅助性工作。蔡鹏研究员、颜冰教授、林春生教授在书稿审阅中提出了许多宝贵意见，特此表示感谢！

水雷总体技术涉及领域很广，内容很多，受方方面面的限制，有些技术没有展开，或论述不够充分，如有不当之处，敬请读者批评指正。

作者

2015年9月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 水雷及水雷总体技术	1
1.1.1 水雷历史	1
1.1.2 水雷的作战使命	6
1.1.3 水雷发展	6
1.1.4 水雷总体技术发展	14
1.2 水雷系统结构	15
1.2.1 沉底雷及其基本组成	16
1.2.2 锚系水雷及其基本组成	17
1.2.3 特种雷及其基本组成	20
1.2.4 水雷战斗部及其基本组成	20
1.3 水雷总体技术研究的问题	21
1.3.1 威力	21
1.3.2 适应性	21
1.3.3 兼容性	21
1.3.4 生存能力	22
1.3.5 制造成本	22
1.3.6 可靠性	22
1.3.7 布雷平台适配性	22
第2章 水雷毁伤标准及战斗部装药	23
2.1 概述	23
2.2 水中爆炸	23
2.2.1 水中爆炸的基本物理现象	23
2.2.2 水中爆炸冲击波计算	28

2.2.3	水中爆炸气泡脉动计算	34
2.3	水中爆炸毁伤标准	36
2.3.1	水雷对舰船的毁伤	37
2.3.2	冲击波峰值压力标准	38
2.3.3	冲击因子标准	43
2.3.4	冲击加速度标准	48
2.3.5	毁伤标准对比	57
2.3.6	水中非接触爆炸对水下潜艇的毁伤	59
2.4	水雷装药量的确定	69
2.4.1	爆炸装药量确定原则	69
2.4.2	爆炸装药量计算模型	71
2.5	水雷战斗部装药	73
2.5.1	对水雷装药的要求	73
2.5.2	各种炸药的性能	75
2.6	水雷起爆	78
2.6.1	传统起爆	78
2.6.2	聚能起爆	80
2.6.3	直列式起爆	87
2.7	水雷安全及保险	90
2.7.1	水雷安全	90
2.7.2	水雷保险装置	92
2.8	小结	93
第3章	水雷雷体强度与形状稳定性	95
3.1	概述	95
3.2	薄壳无矩理论	95
3.2.1	基本概念与假设	95
3.2.2	壳的无矩状态	97
3.3	在静载荷作用下雷体强度计算	103
3.3.1	计算载荷	103
3.3.2	雷体柱面壳部分及其两端底盖的应力分析	105
3.3.3	带有环形肋骨的柱面壳雷体强度计算	109

3.3.4	带有环形肋骨圆锥壳雷体强度计算	118
3.3.5	锥-柱结合壳在结合处的应力计算	119
3.3.6	水雷壳体强度校核	120
3.4	水雷壳体形状稳定性的验算	122
3.4.1	稳定性计算的意义和方法	122
3.4.2	具有环形肋骨的圆柱形壳体总失稳的理论临界压力	124
3.4.3	圆柱壳板局部失稳的理论临界压力	124
3.4.4	孤立肋骨失稳的理论临界压力	125
3.4.5	正圆锥壳失稳的理论临界压力	126
3.4.6	锥柱壳失稳的实际临界压力	128
3.4.7	球形壳失稳的理论临界压力	131
3.4.8	雷壳稳定性校核	134
3.5	空投水雷击水时的强度计算	134
3.5.1	水雷击水时的撞击力和过载系数	135
3.5.2	水雷头部击水时强度计算	139
3.5.3	水雷仪器仪表的减振	143
3.6	水雷击底时的强度计算	143
3.7	最小布雷间隔的计算	147
3.8	数值计算	149
3.8.1	数值计算方法简介	149
3.8.2	水雷强度校核	151
3.8.3	水雷稳定性校核	151
3.8.4	高速入水水雷结构特性数值仿真计算	151
3.8.5	水雷击底过程数值仿真计算	155
3.9	小结	157
第4章	水雷攻击及其弹道	158
4.1	概述	158
4.2	海洋中的水流对锚系水雷的影响	159
4.2.1	锚系水雷在水流中的状态	159
4.2.2	雷体在水流中的平衡	161
4.2.3	雷索在水流中的状态	164

4.2.4	锚系水雷在潮汐流中的状态	170
4.3	锚系水雷的自动定位	172
4.3.1	锚系水雷的自动定位方法	172
4.3.2	雷索及制动	175
4.4	水下平台稳定技术	188
4.4.1	平台形状的选择	188
4.4.2	系留技术	189
4.4.3	抗流技术	190
4.5	水下发射技术	190
4.6	定向攻击及其弹道	191
4.6.1	定向攻击水雷组成及动作过程	191
4.6.2	定向攻击弹道	193
4.7	定向攻击水雷总毁伤概率计算数学模型	196
4.7.1	水雷攻击误差	196
4.7.2	定向攻击水雷总毁伤概率计算	202
4.8	小结	205
第5章	水雷声隐身技术	206
5.1	水雷声隐身技术概述	206
5.1.1	水雷声隐身技术的研究内容	206
5.1.2	水雷声隐身技术的研究现状	207
5.2	水雷目标声散射特性	208
5.2.1	散射声场的解算方法	209
5.2.2	不同外形水雷的目标特性	211
5.2.3	隐身外形沉底雷的目标特性	217
5.3	吸声材料与吸声结构的设计	219
5.3.1	黏弹性材料的吸声机理	220
5.3.2	黏弹性材料参数的影响	221
5.3.3	多层壳体目标回波结构	225
5.3.4	敷薄黏弹性层沉底雷目标特性	229
5.3.5	多吸声层阻抗渐变结构设计	231
5.4	隐身水雷模型	237

5.4.1 隐身水雷模型设计	237
5.4.2 隐身水雷模型的目标特性	241
5.5 自掩埋隐身	244
5.5.1 自掩埋技术	244
5.5.2 振捣液化原理	245
5.5.3 振捣液化技术微模型实验	246
5.5.4 振捣液化技术自掩埋装置试验	247
5.5.5 振动注水式样机试验	250
5.6 小结	251
参考文献	253
索 引	256

第1章 绪论

1.1 水雷及水雷总体技术

1.1.1 水雷历史

水雷是一种古老而又充满活力的海军武器。19 世纪初水雷开始在各种海战中广泛使用，特别是在两次世界大战中发挥过重要的作用。在战后的局部战争中，从朝鲜战争、越南战争到海湾战争都表明水雷武器是一种威力强大、效果显著的武器。随着科学技术的发展，水雷武器得到了不断的改进和提高，现代水雷，无论外部形状还是内部结构都与早先的水雷有较大的差别，种类不断增加，其功能也发生了很大的变化。对于水雷是何时出现的，由哪国人发明的可以说是众说纷纭，各执一词。美国人说水雷是在 1776 年由大卫·布什内尔发明的；俄国人说水雷是在 1769 年由俄国人发明的；英国人说在 1628 年他们围困法国的拉罗歇尔时实验了一种在白铁皮中装火药的漂雷；比利时人说水雷是在 1585 年由比利时人发明的；中国人说水雷是在 1549 年由中国人发明的。笔者认为，水雷最早由中国人发明的这一说法应该是正确的。据史料记载，早在 1558 年，明朝唐顺之编纂的《武编》中就详细记载了一种“水底雷”的构造和布设方法，它用于打击当时侵扰中国沿海的倭寇。这是最早的人工控制机械击发的锚雷。但真正意义上的水雷战始于第一次世界大战。具体资料综述如下：

第一枚水雷是中国明朝嘉靖年间(1549 年前后)发明的“水底雷”，又名“大将军”。该雷用木箱做雷壳，油灰黏缝，下面用绳索连接铁锚，

控制雷壳深度，其击发装置用一根长绳索连接，依靠人工拉绳索控制“水底雷”击发起爆。它比欧美制造和使用的水雷早了 200 多年。

第一枚定时爆炸的水雷是中国明朝万历年间(1590 年)发明的“水底龙王炮”。该雷用牛脬做雷壳，内装黑火药，用香火做引信，依靠香燃烧控制定时时间长短，从而实现定时引爆水雷。

第一枚触线水雷是中国王鸣鹤在 1599 年发明的“水底鸣雷”。水雷上装有数根打有绳套的绳索，绳索与引信相连接，漂浮在水面，船只挂上绳索即拉动引信，引爆水雷。1621 年又将其改进为触线漂雷，这是世界上最早的触发漂雷。

第一枚触发水雷是中国明朝末年(1637 年)发明的“混江龙”水雷。该雷是通过与舰船直接接触触发发火装置而引爆的水雷。

北美独立战争中，北美人为攻击停泊在费城特拉瓦河口的英国军舰，于 1778 年 1 月 7 日，把火药和机械撞击引信装在小啤酒桶里制成水雷，顺流漂下。当时虽然没有碰上军舰，但在被英军水兵捞起时突然爆炸，史称“小桶战争”。

19 世纪中期，俄国人 B. C. 亚图比发明了用电解液构成原电池实现触发的锚雷。在 1854 ~ 1856 年的克里米亚战争中，俄国沙皇曾将这种触发锚雷应用于港湾防御战中。

1628 年，英国人在围困法国的拉罗歇尔时实验了一种在白铁皮中装火药的漂雷。

1585 年，在比利时的安特卫普，比利时人将意大利人吉安尼伯里组装的内装 3500kg 火药、铁屑、碎石的漂雷顺流而下，炸毁了西班牙围困安特卫普的浮桥，炸死了 1000 多名守桥的西班牙士兵。

1939 年 9 月，德国率先使用磁性水雷；1940 年 8 月，德国率先使用音响水雷；1944 年 1 月，德国率先使用水压水雷；20 世纪 60 年代，苏联曾研制过核水雷。

这里无须细究水雷出现的年代和发明者，但可以认定用黑火药在水上打击舰船的设想和行动已有数百多年的历史，而装有硝化甘油炸药以及威力比黑火药大 3 ~ 5 倍的黄色炸药的水雷迄今也有 150 多年。可以

说水雷是一种历史悠久的水中兵器。

水雷武器是世界海军武器库中储备量最多的武器装备之一，特别是海湾战争后，水雷又获得了很大的发展，出现了一些新型水雷和新概念水雷，对水雷的智能性、攻击性、灵活性、防护性和杀伤性的研究也进一步深入。据美国估计，现在拥有水雷武器的国家已经增加到 50 多个，水雷种类已达到 300 多种。

美国作战防御系统研究中心执行主任特鲁费博士曾这样阐述：“近些年来，美军的作战分析较多地集中在巡航导弹对海上兵力和岸上部队的威胁方面。但是，‘二战’以来对美军舰艇造成最大损失的却是水雷，从朝鲜战争到‘沙漠风暴’，先后有 17 艘美军舰艇遭到敌方的直接打击而不同程度地受损，其中 14 艘被水雷击伤。典型的战例是在 1988 年的两伊战争和海湾战争中，有三枚水雷爆炸，给美军造成了价值 1.25 亿美元的损失，而这三枚水雷的价值仅 3.5 万美元。”值得一提的是，海湾战争期间，为了排除水雷，美、英、比、法、荷、德、意、日等国投入了大规模的反水雷兵力。

水雷隐蔽性强，费效比高，清除困难，使用便利。世界上任何一个国家，无论弱国还是强国，为阻止敌方获得海上控制权，水雷将是一种非常有效的武器。对于第三世界国家来说，水雷更为有效。它还有“弱国原子弹”之美称。

按水中状态分，水雷可分为三种：沉底雷、锚雷和漂雷。随着水雷的发展，每一种又可以包含多种类型。如沉底雷又可包含自航水雷、快速攻击水雷、导弹水雷、遥控水雷、自掩埋水雷等；锚雷又可包含自航水雷、自导水雷、自航自导水雷、遥控水雷、火箭上浮水雷、定向攻击水雷、反直升机水雷、出水攻击水雷等；漂雷又可包含机动待机水雷、控位漂雷等。每个国家对水雷的分类也不尽相同，但总可以将其归到三种水雷中去，即沉底雷、锚雷和漂雷。

世界各国公开发表的水雷资料一般比较简略，详细的资料很难获得，现将部分国家的部分水雷进行归纳总结，其主要型号、雷种、性能等数据如表 1-1 所示。

表 1-1 部分国家部分水雷一览表

国家	型号	雷种	目标探测系统	布放方式	总质量/kg	装药量/kg
美国	MK-60	锚雷	声	潜	—	—
	MOWAM	沉底雷	—	—	—	—
	CAM	沉底雷	—	—	—	—
	MK-62、MK-63、 MK-64、MK-65	沉底雷	声、磁、水压	空	—	—
	MK-67	沉底雷	声、磁、水压	空	—	—
	MK-76	沉底雷	声、磁、水压	空	—	—
英国	石鱼改进型	沉底雷	声、磁、水压	舰/潜/空	770	500
	龙鱼	沉底雷	非触发	—	85	80
	MK5	沉底雷	—	舰/潜	—	—
	MK12	沉底雷	—	空投	—	—
	MK17	锚雷	声	—	—	—
南斯拉夫	M70	沉底雷	磁、声	舰/潜	1000	700
	PLRM-1A	漂雷	触发	舰布	14	10
俄罗斯	MDM-1	沉底雷	非触发	潜布	1120	960TNT
	MDM-2	沉底雷	非触发	舰布	1413	1090
	MDM-3	沉底雷	非触发	空投	525	378
	MDM-3	沉底雷	非触发	舰布	635	378
	MDM-4	沉底雷	非触发	空投	1370	1100
	MDM-4	沉底雷	非触发	舰布	1420	1100
	MDM-5	沉底雷	非触发	空投	1500	1500
	MDM-5	沉底雷	非触发	舰布	1470	1500
	CMDM-1(MDC-1)	沉底雷	声、磁、水压	潜布	1980	480
	CMDM-2(MDC-2)	沉底雷	声、磁、水压	潜布	5500	800
	法国	PMK-1	锚雷	声	潜布	—
MShM		锚雷	声	潜布	—	—
FG18		沉底雷	非触发	潜布	—	—
FG29		沉底雷	磁、声、水压	潜布	1000	600
	MCT15	沉底雷	磁、磁声	舰布	1500	1000
	MCC23	沉底雷	声、磁	潜布	850	530