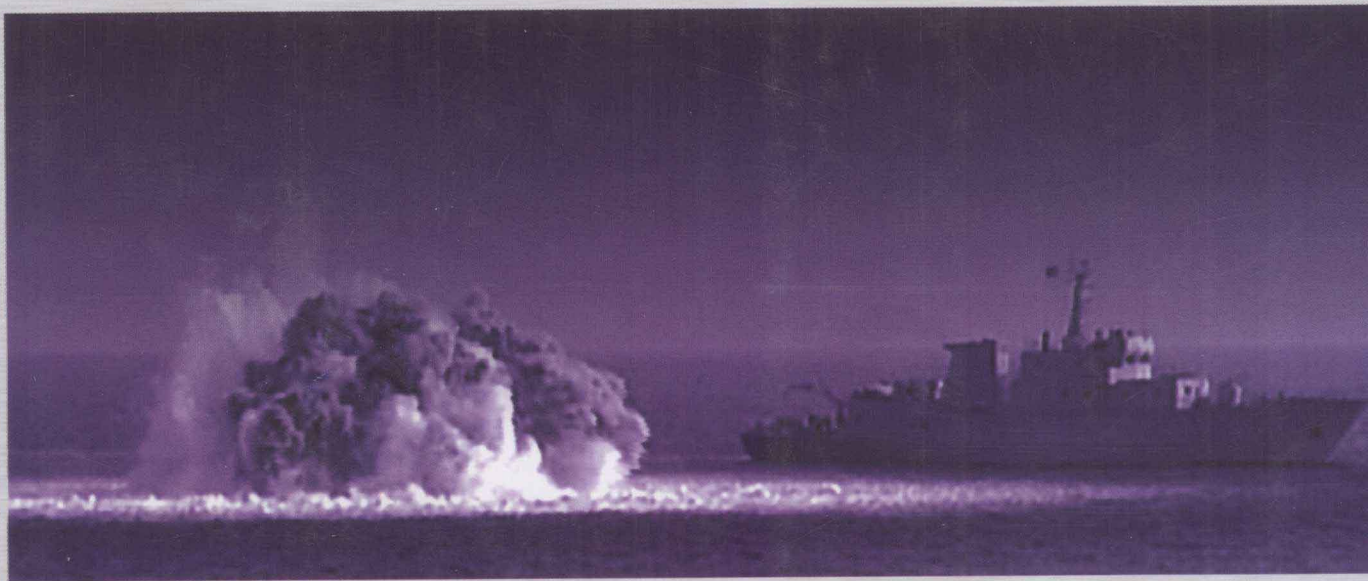


# 实船水下爆炸 冲击试验及防护技术

SHICHUAN SHUIXIA BAOZHA  
CHONGJI SHIYANJI FANGHU JISHU



汪玉◎主编



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 实船水下爆炸冲击试验及 防护技术

汪玉 主编

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

为总结近年来我国在实船水下爆炸冲击试验中取得的研究成果,交流研讨我国在舰艇抗冲击技术领域研究进展,海军舰艇抗冲击研究试验中心与中国造船工程学会军船学术委员会抗冲击学组联合于2009年9月在黑龙江省哈尔滨市召开了“第三届全国舰艇抗冲击技术交流会”。会议共收到论文130余篇,经编委会校阅,本书现刊登出版论文121篇。内容主要包括实船水下爆炸冲击试验技术、舰艇水下爆炸冲击环境与总体防护技术、舰体结构冲击及防护技术、舰载设备系统及人员冲击与防护技术等。本书可供从事舰艇抗冲击技术研究与应用的技术人员阅读,也可供高等院校相关专业的本科生与研究生学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

实船水下爆炸冲击试验及防护技术 / 汪玉主编. —北京:  
国防工业出版社,2010.10  
ISBN 978-7-118-07076-7

I. ①实… II. ①汪… III. ①军用船-水下爆破-船  
舶试验-文集 ②军用船-水下爆破-防护-技术-文集  
IV. ①U674.7-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第220574号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 880×1230 1/16 印张 36 $\frac{3}{4}$  字数 1267千字  
2010年10月第1版第1次印刷 印数 1-800册 定价 180.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422  
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474  
发行业务:(010)68472764

## 本书编委会名单

主 编 汪 玉

副主编 (排名不分先后)

王 强 华宏星 刘建湖

姚熊亮 李兆俊 杜俭业

## 前 言

第二次世界大战以来的多次海战表明,海军舰艇在战时不可避免地会受到水中兵器的攻击。与空气相比,水是一种近似不可压缩的流体,水中兵器爆炸产生的冲击载荷强、传播距离远,因此,即使在较远距离的水下非接触爆炸也会引起舰艇强烈的冲击响应,导致舰载设备损坏失效和人员伤亡,以及船体结构变形屈曲甚至折断沉没。特别随着现代水中兵器爆炸威力的显著提高和舰载精密仪器设备的广泛应用,舰艇及舰载设备面临的作战环境更加严酷,提高舰艇的抗冲击能力业已成为现代海军舰船的迫切需要。

舰艇抗冲击技术作为提高现代舰船生命力和战斗力的重要内容,受到世界各主要海军强国的高度关注。其中,实船水下爆炸试验因其以贴近实战的方式全面考核舰艇抗冲击能力而尤为受到重视和发展。以美国为例,其在第二次世界大战后一直坚持首制舰进行实船水下爆炸验收试验,并将这一要求写入了美国法典,包括航空母舰、巡洋舰、驱逐舰、护卫舰、扫雷舰甚至两栖船坞运输舰等辅助船只都要在交船后进行例行的水下爆炸冲击考核试验。有资料显示,美国自 20 世纪 40 年代进行实船水下爆炸试验以来,已先后开展了 200 余艘舰艇的实船爆炸试验,其中 60 余艘新研舰艇的考核试验,积累了丰富的试验数据,为新研舰艇抗冲击优化设计提供了科学依据。我国近年来在舰艇抗冲击技术方面也开展了深入系统的研究工作,在实船水下爆炸试验和舰艇抗冲击性能评估、防护设计等某些方面取得了重要突破,有力推动了我国舰艇抗冲击技术的快速发展,为提高我海军舰艇的作战能力和生存能力发挥了重要作用。为及时交流各方面的研究成果,根据军船抗冲击学组第三届学术交流会征集的论文,经过优选和整理,我们特编辑出版了本书,总结了我国近些年来实船水下爆炸试验取得的研究成果和舰艇抗冲击技术领域研究进展,可供广大从事舰艇抗冲击技术研究的专家学者参考。

值此论文集出版之际,谨向各位论文作者表示衷心的感谢,同时,也向郑茂礼高工、薛亚凡高工、高向东高工等老专家及张阿漫教授、杨莉博士、程晓达博士对本书出版所给予的支持和帮助表示由衷的谢意!由于编者水平有限,书中恐有疏漏之处,敬请各位读者批评指正。

编 者  
2010 年 7 月

# 目 录

## 实船水下爆炸冲击试验技术

水面舰艇抗冲击试验定位方法综合分析 .....	3
动态抗冲击试验指挥显示系统研究 .....	7
实船水下爆炸试验标准装药研究(摘要) .....	12
舰艇抗冲击试验爆源引爆方法研究 .....	14
综合监视系统在舰船水下爆炸试验中的应用 .....	18
某型舰艇静态抗冲击试验组织实施方法研究 .....	21
瞬态强冲击试验测试技术初探 .....	27
水面舰艇抗冲击试验测点优化布置研究 .....	29
实船抗水下非接触爆炸冲击试验技术状态检查、结果评定技术及舰载设备的失效模式研究(摘要) .....	33
实船冲击试验测量数据集成管理技术研究(摘要) .....	34
核爆炸对舰艇的破坏效应浅析(摘要) .....	36
舰船水下爆炸试验标准研究 .....	38
浅谈舰艇抗冲击试验成果的应用 .....	42
实船爆炸试验中舰艇姿态对冲击响应影响研究 .....	45
实船爆炸试验中近水面压力测量与分析 .....	49
潜艇抗冲击试验中靶艇布放方案探讨 .....	54
瞬态强冲击试验与冲击机试验对比分析 .....	58
簧片式冲击谱测量仪电测技术研究 .....	60
PVDF 压电传感器在水下爆炸压力测量中的应用 .....	64
高速摄影技术在测量水下爆炸作用下船体绝对位移中的应用 .....	68
舰艇非接触爆炸冲击响应信号时间尺度特性研究 .....	77
基于动力缩聚法的舰艇冲击响应数据扩展方法研究 .....	82
Hilbert-Huang 变换在冲击试验数据处理中的应用 .....	85
测试仪器缓冲平台研究 .....	91
抗冲灯具冲击试验研究 .....	95
19 英寸通信机柜抗冲击研究 .....	97
船体钢板焊缝的金属磁记忆检测的研究 .....	101
船用钢板焊接结构应力的磁弹、记忆检测与估计 .....	105
非常规情况下金属磁记忆检测方法的研究 .....	112
浅析磁场强度(大小)对 MBN 释放的影响 .....	118
隔离器实船水下爆炸冲击试验技术研究及应用 .....	123
线阵传感器在抗冲元件冲击变形测试中的应用 .....	127
光学稀疏孔径成像系统研究与实践 .....	130

## 舰艇水下爆炸冲击环境与总体防护技术

我国水面舰船抗爆抗冲击设计若干问题探讨 .....	137
国外大型舰船抗爆抗冲击要求研究(摘要) .....	140
论舰艇抗冲击性能的评估认证 .....	142
各主要国家海军舰艇抗冲击标准之比较 .....	146
基于二阶 DAA 算法的舰船水下非接触爆炸冲击环境预报方法 .....	155
舰船敷设抗冲瓦后的阻力计算与试验研究 .....	160
单壳体潜艇冲击环境研究 .....	165
气泡载荷作用下舰船总体折断研究 .....	170
舰船冲击环境快速预报方法研究 .....	173
基于聚类分析的舰船区划划分方法研究 .....	176
舰船甲板等效动力模型分析 .....	180
气泡帷幕及非耦合装药对水中爆炸自由场压力波形影响试验研究 .....	183
水下爆炸气泡脉动周期试验研究 .....	188
装药沉底爆炸气泡脉动特性研究 .....	191
有限水域爆炸气泡周期修正方法研究 .....	196
水下爆炸反射冲击波与气泡相互作用研究 .....	200
水下爆炸气泡作用下椭球体载荷特性分析 .....	205
应用 SPH 方法模拟水下爆炸气泡的射流 .....	209
基于谱单元方法的瞬态流固耦合机理研究 .....	213
一种计算冲击响应谱的新方法 .....	220
粒子方法在军事技术中的典型应用 .....	222
光滑粒子法在近边界水下爆炸数值模拟中的应用 .....	228

## 舰体结构冲击及防护技术

水下爆炸对舰船结构毁伤研究进展 .....	237
水下爆炸冲击波与气泡对舰船结构毁伤数值模拟 .....	242
鱼雷对舰船结构的毁伤效能评估方法 .....	244
舰船板架在水下爆炸载荷下的动响应分析 .....	248
典型水面结构在水中爆炸气泡作用下鞭状运动计算方法研究 .....	251
爆炸冲击载荷下耐压鞍形舱壁结构弹塑性动力屈曲 .....	258
平板水下爆炸动响应分析 .....	264
固支气背板在不同能量输出结构水中爆炸载荷作用下的动态响应研究 .....	269
大型板架结构水下爆炸试验装置 .....	275
双层加筋圆柱壳水下爆炸损伤特性研究 .....	279
圆柱壳结构在水下爆炸气泡崩溃水射流作用下的损伤研究 .....	284
舷侧防护结构舱内爆炸动响应研究 .....	290
多舱防护结构水下接触爆炸吸能研究 .....	294
舰船舷侧防护液舱舱壁对爆炸破片的防御作用研究 .....	301
爆炸破片在防护液舱内运动规律研究 .....	305
舰船舷侧防护水舱在水下爆炸载荷作用下的数值研究 .....	310

LASCOR 夹层板防护性能研究 .....	317
舰船舷侧防护结构抗爆抗冲击性能研究 .....	323
被撞船舷侧典型结构单元的吸能分析 .....	327
固支加筋方板在均布冲击载荷作用下动态响应的相似畸变研究 .....	332
加筋板结构在水下爆炸冲击波作用下动态响应的近似相似方法研究 .....	338
舰船局部板架结构在水下爆炸冲击波下动态响应的相似律研究 .....	343
原型和模型不同材料时加筋板冲击动态响应的相似预报方法研究 .....	350
钢管列缩比模型抗穿甲能力的试验与数值计算研究 .....	354
新型材料在基本防护隔壁板中的应用研究 .....	359
敷设声学覆盖层的潜艇结构抗水下爆炸能力数值试验研究 .....	363
弹性体涂覆钢板抗冲击性能的数值模拟 .....	369
超轻金属夹芯结构的抗爆炸冲击 .....	373
轻质多孔金属材料与结构抗冲击特性研究 .....	377
弹性泡沫夹芯结构的水下爆炸响应分析 .....	382
三维格架芯层夹芯板受爆炸载荷时的响应分析 .....	388
舰船上层建筑在空中核爆炸下的变形数值模拟 .....	393
水面舰船新型复合夹层防护舱壁抗爆炸冲击性能研究 .....	397
新型矩形蜂窝夹芯夹层加筋圆柱壳抗水下爆炸冲击载荷性能分析 .....	402
<b>舰载设备、系统及人员冲击与防护技术 .....</b>	<b>409</b>
某型柴油机冲击响应分析 .....	411
舰艇机械设备冲击响应仿真建模计算方法综述 .....	416
考虑间隙效应的转子—轴承系统冲击响应计算 .....	422
柴油机主要固定件受水下爆炸冲击的强度分析 .....	428
并车齿轮装置抗冲击计算分析 .....	432
低噪声柴油机动力装置冲击防护设计方法 .....	437
子模型方法在舰船设备齿轮结构强度研究中的应用 .....	440
基于 DDAM 方法的舰艇导弹发射装置冲击仿真 .....	445
电动舵机装置冲击试验仿真分析 .....	449
舰船某大型刚性安装设备实船冲击试验研究 .....	452
美军标 MIL - STD - 901C 和 901D 的差异分析(摘要) .....	457
强冲击条件下舰船设备的振动与冲击隔离 .....	459
舰船轴系抗冲击性能仿真平台 .....	463
舰船管道抗冲减振优化研究 .....	468
舰船基座冲击振动波传递特性研究 .....	473
典型隔振元器件抗冲击试验研究 .....	478
基于控制体积法及等效黏性阻尼法的空气弹簧冲击数值仿真 .....	480
浮筏系统非线性冲击动响应计算软件包 .....	484
基于磁流变设备的船舶减振特性分析 .....	491
某型过载保护器的冲击特性试验研究 .....	496
浮动冲击平台数值仿真研究 .....	501
基于 ABAQUS 的陀螺仪模态分析 .....	505



基于位移法的陀螺仪抗冲击性能研究 .....	508
舰船用 CLH80 - 50 - 4.5 型电动消防泵组抗冲击设计分析研究 .....	511
舰船艉轴端面密封装置结构抗冲击研究 .....	516
可用于潜艇平台的 SMA 抗冲击吸能器设计 .....	521
基于模糊随机理论的艇员生命力评估方法研究 .....	526
船舶管路系统冲击响应时域仿真与试验研究 .....	533
设备典型接合面的处理方法研究 .....	536
舰艇人员典型姿态建模分析探讨 .....	542
爆炸冲击环境真人与假人动态响应对比分析 .....	546
舰艇坐姿人员冲击安全限值研究 .....	550
非接触水下爆炸对舰船人员的冲击影响及防护研究 .....	554
电阻应变片测量主要影响因素与特殊环境的应变测量方法 .....	558
水幕减爆防护技术数值仿真 .....	563
利用高速 CCD 改进传统动光弹试验系统方法研究 .....	568
结构落水的抗冲击等效试验方法 .....	571
舰用柴油机与船体耦合的抗冲击特性分析 .....	574

# 实船水下爆炸冲击试验技术



# 水面舰艇抗冲击试验定位方法综合分析

李兵 金辉 鞠晓春  
(91439 部队 大连)

**摘要:**舰船实船抗冲击试验中,试验爆距的准确设定和测量对于保证试验效果和试验结果分析至关重要。本文主要阐述了适用于水面舰艇抗冲击试验的机械定位法、冲击波零时法、GPS 定位法、水声与 GPS 联测法的工作原理,并对各方法的应用特点、适用条件进行了综合比较和分析。

**关键词:**水面舰艇 抗冲击试验 机械定位法 GPS 定位法 冲击波零时法 水声 GPS 联测法

## 1 引言

在舰船抗冲击试验的实施过程中,由于海上试验条件的复杂性,被试舰位置、爆源布放会受到舰船操控、水流、风力、涌浪等多方面因素影响,使被试舰和爆源的相对位置产生极大不确定性。爆距过远,则达不到试验考核效果;而爆距过近,会使被试舰遭受到比设计指标更为严厉的冲击,可能导致舰体的破损或舰载设备的失效。因此,试验爆距的准确设定,是试验组织单位、实施单位、舰船研制部门、部队使用部门都密切关注的一个问题。同时,被试舰、爆源的位置关系也是毁伤评估的一个关键判据,试验爆距的准确测量,对于试后的数据结果分析和毁伤评定都将起到至关重要的作用。因此,为实时、精确测定被试舰与爆源的相对位置,保证爆炸试验在预设距离上进行,保证试验实施效果,必须对定位方法进行深入研究。

本文的研究背景主要针对被试舰为水面舰艇、爆源为沉底布放的试验态势进行,提出机械定位法、冲击波零时法、GPS 水面定位法和水声 GPS 联测法 4 种定位方法,并进行分别讨论。

## 2 机械定位法

### 2.1 机械定位法原理

机械定位法适用于水面舰艇静态抗冲击试验,是结合试验布放的一种定位方法。该方法通过被试舰上固定的两条定位索(定位索长度根据爆距要求进行调整)及连接被试舰、爆源、布雷船的拖缆,对爆源进行定位,如图 1 所示。

实施方法:被试舰抛锚完成后,布雷船沿被试舰舷

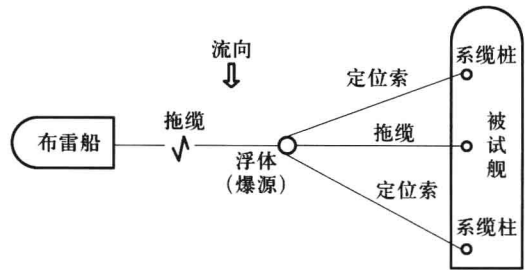


图 1 机械定位法示意

侧平行顶流进入,到达预定位置抛锚就位,将与爆源连接的拖缆和定位索传送到被试舰,然后,布雷船用吊车将爆源吊放至海面,用绞盘使爆源下沉至距海底约 5m 处,被试舰上操作人员拉拽拖缆,将已依据爆距要求做好标记的定位索拉到舰上,并分别固定于系缆桩上,布雷船起锚开动,直到拖缆拉紧时,将爆源放至海底,完成定位布放。

### 2.2 机械定位法应用特点

严格说来,机械定位法实质上是一种布放方法,它是在被试舰抛锚状态下保证爆源与被试舰相对位置满足试验要求的一种试验布放方法。

从机械定位法的实施方法及海上实测结果来看,机械定位法可以保证布放时刻的爆距满足试验要求;但是,由于海上试验参试设备多,试验环节多,实施复杂,从爆源布放到最终的爆炸实施时间间隔较长,在此期间,由于海水流速、流向发生变化,以及被试舰抛锚等因素,舰位容易发生较大漂移,导致实施时的爆距产生较大偏差。所以,机械定位法更适于在湖上等静水条件下使用。对于海上试验,必须严格选择试验时段(即流速流向稳定时段),并尽量缩短从爆源布放到起爆的时间,保证被试舰舰位稳定。

### 3 冲击波零时法

#### 3.1 冲击波零时法原理

冲击波零时法是通过准确获取爆炸零时信号,测量得到水下爆炸冲击波由炸点到自由场压力测点的时延,进而计算求取炸点到测点的距离。如果在被试舰上布设至少3个自由场压力测点,建立靶船坐标系,即可解算得到炸点相对于被试舰坐标系的坐标。对于冗余测点,可利用最小二乘法,提高炸点的定位解算精度。

设在被试舰上建立三维坐标系,布设已知坐标的 $n(n \geq 3)$ 个自由场压力传感器阵元,坐标为 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$  ( $i=0, 1, \dots, n-1$ ),爆源在该坐标系下的坐标为 $P(X, Y, Z)$ ,见图2所示。在爆源处固定“零时传感器”,炸药完全爆轰时,可将零时信号通过电缆传送给测量设备,同时,爆炸冲击波到达各自由场压力测点的时间也可由测量设备记录下来,所以,爆源至各阵元的距离即可计算得到,设为 $R_i$ ,则有下式成立:

$$(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2 = R_i^2, \\ i = 0, 1, \dots, n - 1$$

这样,通过解算上述的定位方程组,即可得到爆源相对于被试舰坐标系的坐标。

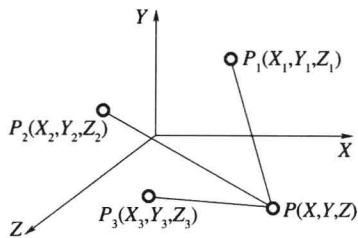


图2 冲击波零时法示意

#### 3.2 冲击波零时法应用特点

由冲击波零时法工作原理可知,冲击波零时法通过建立被试舰坐标系,将自由场压力测点全部纳入该坐标系下,利用各测点冲击波到达时间与爆炸零时信号的时延,求取测点与爆源的斜距,最后求解定位方程组计算得到爆炸瞬时爆源相对于被试舰坐标系的三维坐标。冲击波零时法的主要误差源为爆距测量误差、阵元坐标测量误差和解算误差等,其中以爆距测量误差的影响最大,且该误差随着爆距的增加呈逐渐增大的趋势。

冲击波零时法具有以下特点:

(1) 冲击波零时法需要在爆源上安装“零时传感器”,在被试舰上安装至少3个自由场压力传感器,测

量设备需对以上信号进行采集和记录;

(2) 冲击波零时法可以在爆炸实施后给出被试舰与爆源的准确相对位置,无法对试验布设和指挥提供参考;

(3) 冲击波零时法适用于近距离的抗冲击试验,不适于远距离(爆距大于150m)试验情况。因为,首先,远距离试验时,零时电缆连接、实施困难,其次,随着爆距的增加,冲击波零时法误差会逐步增大;

(4) 冲击波零时法适用于静态实船抗冲击试验,当被试舰处于航行状态的试验态势时,由于自由场压力传感器支架无法安装、固定,所以,无法采用冲击波零时法。

### 4 GPS 定位法

#### 4.1 GPS 定位法原理

全球定位系统(GPS)是具有海、陆、空全方位实时三维导航与定位能力的卫星导航定位系统,以其高精度、全球性、全天候、全天时、高效率等优势,已广泛应用于大地控制测量、海洋测绘、航海航空导航等领域。应用GPS载波相位差分技术(RTK),更是可使实时三维定位精度达到厘米级<sup>[1,2]</sup>。

GPS定位法是基于GPS载波相位差分技术、大地测量技术等的一种定位方法。该方法对于爆源和被试舰的定位均采用GPS设备实现,具体可分为三个阶段:(1)对爆源定位;(2)对被试舰定位;(3)解算爆源与被试舰的相对态势。

##### 4.1.1 爆源定位

GPS定位法对爆源的定位采用布放时的水面布放点位置代替其水下位置,在爆源沉底不动的情况下,水下与水面的位置偏差主要由爆源布放过程中海流的影响引起。

实施方法是:在布雷船布放爆源的过程中,将GPS天线置于布放钢缆处,在爆源置底的同时,记录下此时天线处的水面坐标,作为水下爆源的水平面投影点坐标。

##### 4.1.2 被试舰定位

不论被试舰艇处于航行或抛锚状态,被试舰位置、航向均可由舰上加装的双天线GPS设备实时给出。在被试舰无人操控的情况下,可在被试舰与指挥舰间通过数传电台建立数据传输链路,由指挥舰对被试舰的操作进行遥控,并实时接收被试舰测量结果。

GPS定位法示意如图3所示。

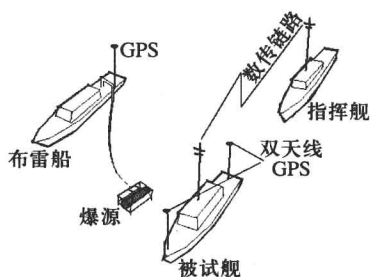


图3 GPS定位法示意图

#### 4.1.3 爆源与被试舰相对位置解算

由前文定位原理可知,系统测量得到的是爆源水面投影点坐标和被试舰天线点的大地坐标及被试舰航向,而试验要求解算出爆源与被试舰迎爆面舷侧中心点的相对位置关系。根据大地测量测绘的相关知识及爆距的定义,可以实时求解得到爆源与被试舰的相对态势,并以图形和数字形式进行显示。具体算法本文从略。

#### 4.2 GPS定位法应用特点

(1) GPS定位法适合于爆源吊布沉底的布放方式,同时,爆源布放点的测量时机选择极为重要,必须与布放实施紧密配合、协调一致,方能保证最佳测量效果。

(2) 由于GPS定位法采用爆源水面位置代替水下位置进行计算,会引入一定误差。

(3) GPS定位法可对从被试舰抛锚、爆源布放到起爆整个试验过程的舰位、爆距变化情况进行实时监控,可为试验组织指挥提供决策依据。

(4) 在实船抗冲击试验数百米的试验区域内,GPS定位法的定位精度不会随爆距的增加产生较大变化。

(5) GPS定位法可适用于被试舰艇抛锚或航行两种试验态势。

### 5 水声与GPS联测法

#### 5.1 水声GPS联测法原理

水声GPS联测法是指对爆源的定位采用水声与GPS联测的方法给出爆源的大地坐标,对被试舰位置、航向仍采用双天线GPS测量给出。

目前,对水下目标定位最有效的方法是声学方法。根据所选用基线的不同,可分为长基线、短基线、超短基线三种声学定位系统<sup>[3]</sup>。对于目前我们所研究的水

面舰艇抗冲击试验态势而言,爆源尚不考虑动态攻击方式,而水面舰艇采用GPS进行测量,所以水声测量区域保守估计应小于 $500\text{m} \times 500\text{m}$ ,采用船载式短基线水声测量方式更为适宜。由于通常的声学定位技术是测定目标相对于某一参考点的位置,无法给出目标的绝对大地坐标。如果将声学定位系统与卫星定位系统(如GPS)组合运用,即可解算出目标三维坐标,起到“水下GPS”的功能<sup>[4]</sup>。

短基线定位示意图如图4所示,设基阵由3个阵元组成,各基元坐标为 $(x_i, y_i, z_i)$  ( $i=1, 2, 3$ ),目标位置坐标为 $(X, Y, Z)$ ,则可得到定位方程如下:

$$(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + (Z - z_i)^2 = (ct_i)^2 = d_i^2, \\ i = 1, 2, 3$$

式中: $t_i$ 为声脉冲从目标到各基元的传输时间; $c$ 为声速。

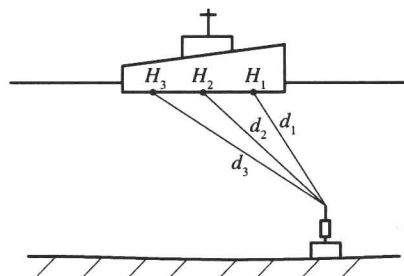


图4 短基线定位示意图

在实际使用中,为简化系统实现,通常可在目标上安装兼具测深功能的水声应答机,深度信息可通过水声通信方式传送至测量船上的信号处理单元。这样,在工程实现时,即可将船载水声基阵由三阵元减至二阵元,降低实施复杂性。同时,通过在测量船上安装GPS测量分机及姿态(方位、纵摇、横摇)测量装置,可解算得出基阵阵元的大地坐标;再通过求解定位方程组,可得到爆源的绝对大地坐标。然后,在爆源大地坐标、被试舰位置和航向已知的情况下,即可解算出爆源与被试舰的相对态势。

#### 5.2 应用特点

水声GPS联测法适用于爆源悬布、沉底两种试验态势,可对爆源及被试舰位置的动态变化情况进行实时监测,定位精度最高,所需设备最多,实施最复杂,实施时间也最长。

### 6 综合分析

对于水面舰艇抗冲击试验的定位测量问题,需结

合试验态势要求、定位测量精度、实施复杂程度、试验兵力、经费保障等多方面因素,进行综合评价、合理选择:

(1) 在舰艇动态抗冲击试验中,如爆源为沉底吊布,可选用 GPS 定位法或水声 GPS 联测法;如爆源为悬布方式,只能采用水声 GPS 联测方法;

(2) 在舰艇静态抗冲击试验的实施过程中,可采用机械定位法进行布放,同时采用 GPS 定位法或水声 GPS 联测法进行实时监测和辅助指挥;在试验实施后,可采用冲击波零时法完成事后精确定位。

## 参 考 文 献

- [1] 徐绍铨,张华海,杨志强,等. GPS 测量原理及应用. 北京:测绘出版社,2003.
- [2] 余小龙,胡学奎. GPS RTK 技术的优缺点及发展前景. 测绘通报,2007,10:39-42.
- [3] 田坦. 水下定位与导航技术. 北京:国防工业出版社,2007.
- [4] 王权,程鹏飞,等. 差分 GPS 水下立体定位系统. 测绘科学,2006,31(5):18-21.

# 动态抗冲击试验指挥显示系统研究

宫国田 李兵 曹庆刚  
(91439 部队 大连)

**摘要:**在水面舰艇动态抗冲击试验中,指挥显示系统负责对被试舰艇与爆源间的相对位置进行实时的测量和解算,从而为被试舰艇操控提供参考、为试验组织指挥提供决策依据。本文介绍了该指挥显示系统的组成原理,重点阐述了其数据处理方法,并对应用情况进行了分析。

**关键词:**水面舰艇 动态抗冲击试验 指挥显示 爆距 横向偏差

## 1 引言

舰船实船抗冲击试验是对舰船及舰载设备抗冲击能力的一种全面考核试验,该种试验对于研究爆炸冲击作用相关的基础理论、检验和改进舰船及舰载设备的抗冲击能力、提高舰船的生命力和战斗力将起到巨大的推动作用,历年来受到各国海军的极大重视。而舰艇动态抗冲击试验更是最为接近实战的一种考核方式,可对舰艇结构强度、舰载设备抗冲击性能及舰员抗冲击强度进行实战性验证。但正由于被试舰艇位置处于动态变化之中,如何使被试舰艇适时调整至合适位置,如何准确把握试验起爆时机,使得试验既能达到作战考核效果,又能保证装备和人员的安全,是试验实施中必须首要解决的问题。

水面舰艇动态抗冲击试验指挥显示系统的主要作用就是在水面舰艇动态抗冲击试验中,实时测量、解算被试舰艇指定特征点与爆源间的相对位置变化态势,为舰艇操船指挥提供参考,为试验组织指挥提供决策依据,从而保证试验实施效果。

## 2 指挥显示系统组成

指挥显示系统基于 GPS RTK 技术<sup>[1]</sup>实现,硬件由一套双天线 DGPS 设备、一套数传电台、一台便携式笔记本电脑、分频器及大屏幕显示器等组成。双天线 DGPS 用于实时测量被试舰的位置和航向,数传电台用于接收爆源坐标,笔记本电脑完成端口控制和数据处理计算工作。相应地,指挥显示软件主要由电台控制模块、DGPS 控制模块、数据处理模块三部分组成,见图 1。

指挥显示软件在 Microsoft Visual Studio. NET 2005

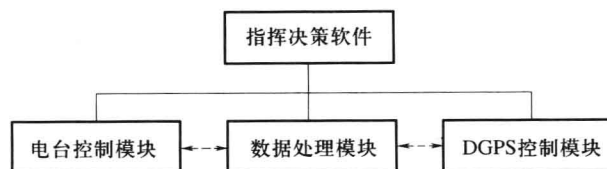


图1 指挥显示软件组成

环境下开发,采用面向对象软件工程技术及 C#<sup>[2]</sup> 编程语言实现。由于数传电台和 DGPS 均采用 RS232C 串口与电脑相连,因此,电台和 DGPS 控制模块可采用 .NET Framework 类库中 SerialPort 类对串口进行操作,用事件驱动方式实现串口读写,并使用委托<sup>[3]</sup> 机制完成多线程的异步操作。本文重点对数据处理算法进行讨论。

## 3 数据处理方法研究

在舰船抗冲击试验中,要求指挥显示软件能够实时解算被试舰迎爆面舷侧中心点(下文简称特征点)与爆源之间的相对位置变化态势。由于特征点位不适于安装 GPS 测量天线,故需将测量点坐标转换到特征点位,并解算得出特征点与爆源的位置关系。同时,指挥显示软件应根据试验要求,对被试舰的操控提供参考,对试验指挥人员把握整体试验进程、适时下达试验指挥口令提供依据。

### 3.1 坐标系定义

#### 3.1.1 WGS84 坐标系

WGS84 坐标系即 GPS 卫星广播星历所采用的世界大地坐标系<sup>[4]</sup>。

#### 3.1.2 ECEF 坐标系

ECEF 坐标系是以地球椭球中心为原点的空间大地直角坐标系,其  $z$  轴与地球平均自转轴相重合, $x$  轴



指向平均自转轴与平均格林尼治天文台所决定的子午面与赤道面的交点,  $y$  轴与此平面垂直, 从而得到右手系的空间直角坐标系<sup>[5]</sup>。

### 3.1.3 船体直角坐标系

坐标原点为 GPS 天线位置,  $z$  轴垂直于甲板, 向上为正,  $y$  轴指向船首,  $x$  轴指向右舷, 并垂直于  $y$  轴和  $z$  轴。

### 3.1.4 站心地平直角坐标系

坐标原点为指定的测量站站心位置,  $z$  轴垂直于水平面, 向上为正,  $x$  轴指向正北,  $y$  轴指向正东, 并垂直于  $x$  轴和  $z$  轴。

## 3.2 被试舰与爆源相对位置计算

由前文测量系统组成及原理可知, 系统可以测量得到:

被试舰 GPS 天线点的 WGS84 坐标, 设为  $(B_0, L_0, h_0)$ ;

爆源 WGS84 坐标, 设为  $(B_1, L_1, h_1)$ ;

特征点在船体直角坐标系下的坐标, 设为  $(x_i, y_i, z_i)$ ;

被试舰航向即被试舰艏艉向与正北向的夹角, 设为  $\theta$ 。

则被试舰与爆源的相对位置可通过如下的计算过程得到。

### 3.2.1 特征点在以 GPS 天线点为中心的站心地平直角坐标系下的坐标

由于特征点在船体直角坐标系下的坐标  $(x_i, y_i, z_i)$  已知, 则其在以 GPS 天线点为中心的站心地平直角坐标系下的坐标, 可以通过坐标旋转得到, 设为  $(x_s, y_s, z_s)$ 。如果被试舰横滚角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$  可以测量得到, 则<sup>[6]</sup>

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中, 横滚角  $\alpha$  定义为被试舰左舷甲板向下倾斜为负, 右舷甲板向下倾斜为正; 俯仰角  $\beta$  定义为被试舰下沉为负, 舰艏上浮为正。如果仅航向角可知, 则式(1)可简化为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 3.2.2 爆源在以 GPS 天线点为中心的站心地平直角坐标系下的坐标

爆源水面点的站心地平坐标可以从 ECEF 坐标系

下进行转换计算, 因此, 需首先计算 GPS 天线点的 ECEF 坐标, 设为  $(ECEF X_0, ECEF Y_0, ECEF Z_0)$ , 以及爆源水面布放点的 ECEF 坐标, 设为  $(ECEF X_1, ECEF Y_1, ECEF Z_1)$ 。

#### 1) 从 WGS84 坐标系到 ECEF 坐标系的转换

GPS 天线点和爆源水面布放点的 ECEF 坐标可由其 WGS84 坐标按下式转换得到<sup>[5]</sup>:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{a \cos(L)}{\sqrt{1 + (1 - e^2) \tan^2(B)}} + H \right) \cos(L) \cos(B) \\ \left( \frac{a \sin(L)}{\sqrt{1 + (1 - e^2) \tan^2(B)}} + H \right) \sin(L) \cos(B) \\ \left( \frac{a(1 - e^2) \sin(B)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(B)}} + H \right) \sin(B) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $a$  为地球椭球的长半轴;  $e$  为椭球的第一偏心率。

#### 2) 爆源站心地平坐标计算

由坐标系定义可知, 站心地平坐标系  $xyz$  为左手坐标系, 它与 ECEF 空间大地直角坐标系  $XYZ$  的坐标原点及三个坐标轴的指向均不同, 存在着平移和旋转的转换关系。因此, 可先将坐标原点从椭球中心平移到站心点  $C$ , 三个平移量即为站心  $C$  点在 ECEF 坐标系中的三个坐标分量, 平移后的坐标系称为站心赤道坐标系, 其三个坐标轴分别用  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  来表示, 分别平行于  $X, Y, Z$  轴, 坐标原点在  $C$  点。为将左手坐标系  $x, y, z$  旋转到右手坐标系, 可先将  $y$  轴反向, 以  $y_1$  为正向而成为右手坐标系。

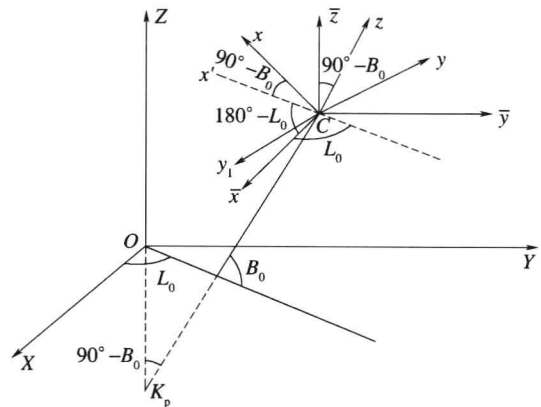


图2 ECEF 坐标系到站心地平坐标系的转换示意

如图2所示,  $z$  轴(椭球面向外法线)与  $Z$  轴的交角为  $(90^\circ - B)$ , 因此与  $z$  轴平行的  $\bar{z}$  轴与  $Z$  轴的交角为  $(90^\circ - B)$ , 且必过  $C$  点的子午面上, 而与  $y_1$  轴(过  $C$  点的平行圈切线方向)正交, 因此以  $y_1$  轴为旋转轴逆转  $(90^\circ - B)$ , 则  $\bar{z}$  轴将与  $z$  轴重合, 而  $x$  轴旋转后, 由切平面向下  $(90^\circ - B)$  而至  $x'$  轴, 因  $x$  轴相对于赤道面的倾斜角即为  $(90^\circ - B)$ , 因此  $x'$  轴与  $OQ$  及赤道面平行, 且与  $x$  轴的夹角为  $(180^\circ - 1)$ , 最后以  $z$  轴为旋转轴, 逆