

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.10.023

基于 BTT 的反鱼雷鱼雷控制技术

高璇, 周徐昌, 潘逊

(海军工程大学 兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要: 针对传统的采用侧滑转弯 (Skid-to-Turn, STT) 控制技术的缺点, 对倾斜转弯 (Bank-to-Turn, BTT) 技术进行研究。分析了反鱼雷鱼雷 (Anti-Torpedo Torpedo, ATT) 的研究现状, 详细介绍了基于 BTT 的鱼雷控制方法以及 BTT 控制技术相对于 STT 技术在鱼雷控制方面的优点。然后, 对 BTT 控制在 ATT 上应用的可行性进行了分析。最后, 对 BTT 控制在未来的 ATT 应用中需要着重解决的关键技术进行了探讨。研究表明: BTT 鱼雷较传统 STT 鱼雷而言, 在提高鱼雷机动性能方面具有明显的优势, 但 BTT 鱼雷在工程应用中还需要解决一系列的问题。

关键词: 反鱼雷鱼雷 (ATT); 倾斜转弯 (BTT); 制导与控制; 自动驾驶仪

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Control Technologies of Anti-Torpedo Torpedo Based on BTT

Gao Xuan, Zhou Xuchang, Pan Xun

(Dept. of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Considering the disadvantages of skid-to-turn (STT) control technology, characteristic of Bank-to-Turn (BTT) control technology is studied, and research statement of ATT is analyzed. The control means of ATT based on BTT, and advantages compared with STT technology, are introduced in detail. Then, application feasibility of BTT technology used on ATT is analyzed. Finally, the key technologies of BTT that should be settled specially in the future use on ATT are discussed. The result of the research shows that, compared with STT technology, BTT technology has obvious advantages in improving the flexibility of ATT. But, there are still a series of questions to be solved in engineering application.

Keywords: anti-torpedo torpedo (ATT); bank-to-turn (BTT); guide and control; automatic pilot

0 引言

目前, 鱼雷技术发展迅猛, 已达到相当智能化的程度, 并能以各种方式主动搜捕目标并发起攻击。但水面舰艇对鱼雷的防御仍沿用传统的被动方式。如实施机动规避、施放假目标诱饵对鱼雷进行欺骗、利用干扰设备和其它噪声发生器对鱼雷进行误导等^[1]。只是在有限的情况下, 才采用发射深水炸弹等对抗器材对鱼雷进行主动的硬杀伤^[2]。

多层次的鱼雷防御系统一般分为 3 个阶段: 远程的鱼雷告警和舰船规避、中程的鱼雷诱饵或干扰器软杀伤以及近程的破坏性硬杀伤^[3]等 3 层防御。由于鱼雷具有再搜索攻击的能力, 一次甚至再次的“软”对抗成功并不能排除其继续攻击的可能性。反鱼雷鱼雷是一种积极、主动搜寻并拦截来袭鱼雷的“硬杀伤”武器。反鱼雷鱼雷可以拦截声自导鱼雷、尾流自导鱼雷以及直航雷^[4], 是鱼雷对抗中最理想的硬杀伤手段。故对基于 BTT 的反鱼雷鱼雷控制技术进行研究。

1 反鱼雷鱼雷技术发展现状

美国在反鱼雷鱼雷武器的研究开发方面处于世

界领先地位。美国海军研究局于 20 世纪 90 年代初提出了一种全新的反鱼雷鱼雷研究计划, 目的是推出一种超小型反鱼雷鱼雷, 直径 159 mm, 长度 2.7~2.9 m, 航速和航程应大大超过现役鱼雷, 可由舰载或潜载多用途发射装置发射, 应具有对来袭鱼雷进行探测、识别、跟踪、攻击并直接硬摧毁的能力。

在美国全力开发新一代反鱼雷鱼雷武器的同时, 北约西欧盟国也开始了这方面的研究, 计划将现役的 MU-90 轻型反潜鱼雷直接改进为反鱼雷鱼雷^[5]。Mu-90 反潜鱼雷内部结构如图 1。根据 MU-90 鱼雷本身的性能特点, 北约 PG37 项目组对 MU90HK 反鱼雷鱼雷提出了几点关键技术指标: 速度快, 攻击作战时间短; 反应迅捷, 末段机动性好; 自导头探测能力强, 能搜捕到反射信号极为微弱的来袭鱼雷目标; 制导精度高, 战雷头威力应满足近炸要求; 使用时不受载舰软杀伤防御系统的干扰^[6]。

MU90HK 反鱼雷鱼雷是在先进的 MU-90 反潜鱼雷的基础上改进而来的, 开发进度快, 生产成本低, 是目前世界海军中第一种最先进、最成熟的反鱼雷硬杀伤性武器, 很可能早于美国的超小型反鱼

收稿日期: 2010-04-11; 修回日期: 2010-05-17

作者简介: 高璇 (1980-), 男, 辽宁人, 在读博士研究生, 从事制导与控制技术研究。

雷鱼雷而率先投入使用。

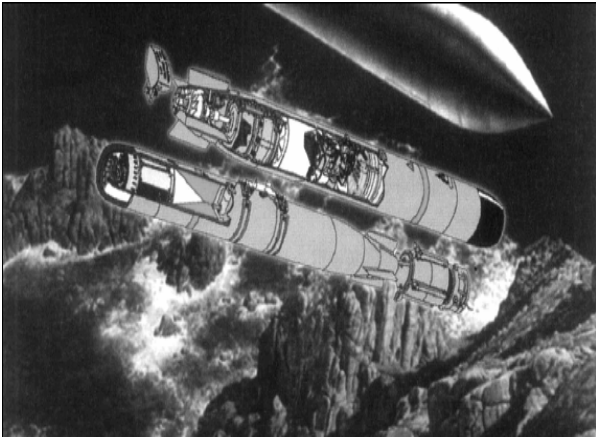


图 1 Mu-90 反潜鱼雷的内部结构图

2 反鱼雷鱼雷 BTT 控制技术

反鱼雷鱼雷对鱼雷的机动性要求比较高，鱼雷的机动性一般用最大可用过载来表示，即鱼雷在最大舵偏角下产生的过载。鱼雷拦截目标时所需要的过载为需用过载。通常决定需用过载的因素有：目标的运动特性、初始散布、目标信号起伏的影响、系统零位的影响。由于来袭鱼雷具有高速大机动运动特性，反鱼雷鱼雷跟踪攻击目标时，就应不断地改变自己的运动方向，因而对反鱼雷鱼雷的机动性要求较高，这就对控制系统提出了更高要求，反鱼雷鱼雷只有解决好高机动性和快速响应的问题，才能有效地拦截来袭鱼雷，经过仿真计算，反鱼雷鱼雷最大允许角速度应不小于 $80^\circ/\text{s}$ ，且在 1 s 内对指令的跟踪误差不大于 15% ^[7]。

在鱼雷截击目标的过程中，随时绕鱼雷纵轴转动，使其所要求的法向过载矢量始终落在鱼雷对称面上或者中间对称轴上，这种控制方式称为倾斜转弯（Bank-to-Turn, BTT）技术^[8]，BTT 控制技术是通过倾斜来实现鱼雷转弯（或机动）。一般鱼雷的流体动力外形布局多为轴对称十字控制，在鱼雷寻的过程中保持雷体相对纵轴稳定不动，控制鱼雷在俯仰和偏航平面上产生相应的法向过载，其总法向力指向控制率所要求的方向上，这种控制方式称为侧滑转弯（Skid-to-Turn, STT）技术，STT 控制技术是通过侧滑来实现鱼雷转弯（机动）。STT 控制技术对于中近程、小机动的鱼雷较为适宜，但对超大机动鱼雷和远程拦截鱼雷，尤其是反鱼雷鱼雷来说，由于要求鱼雷阻力小、机动过载大（或升阻比大），STT 方式则不适用，只有 BTT 控制才是合适的选择。

BTT 控制采用经典设计方法，把俯仰、偏航、

滚动之间的耦合看作未知干扰，采用经典频率设计方法分别设计俯仰、偏航、滚动控制系统，通过引入协调控制指令消除耦合因素，即给偏航通道引入协调转弯信号，使鱼雷在航行控制过程中的侧滑角尽可能接近于零。

2.1 反鱼雷鱼雷 BTT 控制技术的优势

在截击目标的过程中，采用 BTT 控制技术的反鱼雷鱼雷（简称 BTT 鱼雷）通过滚动控制，快速地把鱼雷的最大升力面转到理想的机动方向，同时俯仰控制系统控制鱼雷在最大升力面内产生需要的机动加速度。此时鱼雷转弯的向心力由升力而不是侧滑力产生的侧向力提供，因此侧滑角基本保持不变，但攻角有所增加。

BTT 控制技术提高和改善了鱼雷的性能指标。BTT 鱼雷较传统的采用 STT 控制技术的鱼雷（简称 STT 鱼雷）具有以下几个方面的优势^[9-10]：

1) 提高了鱼雷的升阻比。BTT 控制能有效地提供鱼雷最佳流体动力特性，阻力小、升力大，升阻比大，明显地提高了鱼雷的末段速度，缩短了作战时间，扩大了鱼雷的作战海域，提高了鱼雷的法向过载，达到了高精度、高命中概率截击机动目标的目的。

2) 能在一个平面（最大升力面）内产生很大的升力，并在空间任意方向上有效地使用。BTT 鱼雷之所以能提供这么大的法向过载，是因为它摒弃了传统的 STT 鱼雷轴对称外形的设计思想，并采用了流体动力学方面近年来的一些新技术。如轴向对称流体动力布局、大攻角非线性设计思想等。BTT 控制为这些新技术、新思想的实现创造了条件。

3) 提高了鱼雷的航行稳定性。由流体动力学原理可知，当 BTT 鱼雷在最大升力面内产生机动时，不存在侧向机动力或侧向机动力很小，即侧滑角为零度或近似为零度，鱼雷具有良好的稳定性。此时由侧滑角产生的诱导力矩为零，因此对鱼雷最大攻角的限制可进一步放宽。

4) 可采用定向战斗部。除 BTT-45 外，BTT-90 与 BTT-180 控制方法提供的鱼雷与目标遭遇的姿态是基本一致的，这就给采用定向战斗部提供了基础，从而提高了战斗部的威力，使鱼雷的杀伤概率大为提高。

5) 与 STT 鱼雷相比，在同样的航程条件下，BTT 鱼雷质量可以更小。BTT 鱼雷有多种因素有利于减轻鱼雷质量，如可采用大升阻比设计和不等强

度的结构设计方案减少鱼雷的结构质量。

6) 可采用双轴控制。对付目标机动性很小的鱼雷, 在保证雷体具有侧向静稳定性的条件下, 允许用两个控制通道(俯仰和滚动)代替常规的 STT 鱼雷的三个控制通道(俯仰、偏航和滚动), 可进一步减轻质量, 缩小体积。

2.2 BTT 控制技术应用于反鱼雷鱼雷的可行性

反鱼雷鱼雷的目标是破坏来袭鱼雷的进攻, 而鱼雷是要摧毁目标舰艇或潜艇, 因此反鱼雷的体积和装药量可以比鱼雷小得多, 就能达到所需的作战要求; 同时, 反鱼雷也不需要像鱼雷那样有必须近炸或聚能爆炸等要求, 这方面对制导控制系统的要求相对低。

由于反鱼雷鱼雷的体积比鱼雷小, 并且采用 BTT 控制技术, 提高了机动性, 所以机动能力可以比大型声制导或尾流制导鱼雷高, 使反鱼雷成为可能。

反鱼雷鱼雷基本不需要像鱼雷那样要进行对抗声诱饵、反鱼雷深水炸弹等水声对抗, 这就使反鱼雷鱼雷的设计比鱼雷简单并且成本更低。

2.3 反鱼雷鱼雷 BTT 控制的关键技术

BTT 鱼雷在拦截目标时, 由于鱼雷经常处于快速滚动状态, 使得 BTT 鱼雷具有不可忽视的流体动力、惯性交叉耦合和运动学耦合, 对 BTT 鱼雷的稳定控制系统设计提出了严峻挑战。因此, 尽管 BTT 鱼雷相对于传统 STT 鱼雷具有很多优势, 但要实现工程上的成熟应用, 还必须解决几个关键技术。

1) 多变量控制系统

传统的 STT 鱼雷所采用的三通道独立的控制系统设计方法已不再适用于 BTT 鱼雷, 而替代它的将是一个具有运动学耦合、惯性耦合、流体动力耦合和控制作用耦合的多自由度的系统综合问题。就其控制作用来说, STT 鱼雷采用了由俯仰、偏航双通道组成的直角坐标控制方式, 而 BTT 鱼雷则采用了由俯仰、滚动通道组成的极坐标控制方式。如何综合具有上述特点的 STT 控制系统, 保证 BTT 鱼雷良好的控制性能与稳定性, 是研究 BTT 技术面临的一个主要技术问题。

2) 协调控制实现

对于 BTT 鱼雷, 要求鱼雷在航行中保持侧滑角近似为零度, 需要一个具有协调控制功能的系统, 即倾斜转弯协调控制系统 (Coordinated-BTT

Control System, CBTT) 来实现, 该系统保证 BTT 鱼雷的偏航通道与滚动通道的协调动作, 从而实现侧滑角为零的限制。

3) 抑制剧烈滚动对引导回路稳定性的不利影响

足够大的滚动角速率是保证 BTT 鱼雷性能(导引精度以及控制系统的快速响应)所必须的, 而它对鱼雷声纳制导回路的稳定性却会带来非常不利的影响, 必须抑制或削弱滚动耦合作用对鱼雷制导回路稳定性的影响。

4) 控制滚转角的不确定性

在目标瞄准线旋转角速度很小时, 相应的加速度指令也很小, 这时候雷体难以使加速度矢量准确地转到最优取向上。这同样是 BTT 技术研究中需要解决的。

另外, 还需要重视 BTT 控制技术在鱼雷的流体动力外形、制导规律、控制逻辑、自动驾驶仪设计分析方法等的研究。

3 结束语

较传统 STT 鱼雷而言, BTT 鱼雷在提高鱼雷的升阻比、提高航行稳定性、提高鱼雷机动性和采用双轴控制等方面具有明显的优势。下一步, 将深入研究解决一系列的关键技术, 以实现 BTT 鱼雷的工程应用。

参考文献:

- [1] 毛金明. 反鱼雷武器综述[J]. 鱼雷技术, 2004, 12(3): 5-7.
- [2] 高学强, 宋强, 杨日杰. 水声硬对抗技术研究综述[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(2): 28-31.
- [3] 卢万, 李钊. 国外反鱼雷水声对抗技术与发展趋势[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(1): 50-53.
- [4] 易红, 何辰, 陈春玉. 对抗尾流自导鱼雷的防御技术[J]. 鱼雷技术, 2007, 15(1): 6-10.
- [5] 钱东, 张起. 欧洲反鱼雷鱼雷研发展望[J]. 鱼雷技术, 2006, 14(5): 1-11.
- [6] 钱东, 崔立, 顾险峰. MU90 HK 反鱼雷鱼雷的作战效能[J]. 鱼雷技术, 2004, 12(4): 5-8.
- [7] 丁振东. 反鱼雷鱼雷关键技术探讨[J]. 鱼雷技术, 2007, 15(1): 6-11.
- [8] 刘兴堂. 导弹制导控制系统分析、设计与仿真[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 33-135.
- [9] 郑建华, 杨涤. 鲁棒控制理论在倾斜转弯导弹中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 80-81.
- [10] 张靖南, 赵兴锋, 郑志强. BTT 导弹的发展现状与趋势[J]. 飞航导弹, 2006(10): 37-43.