

舰载光电伺服设备的设计

周俊鹏^{1,2}, 李焱¹, 年轮¹, 张恩东²

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 长春工业大学电气与电子工程学院, 长春 130012)

摘要: 舰载光电伺服设备由于受到横摇、纵摇、艏摇的扰动, 从而对系统的稳态和动态精度会有很大的影响。为解决在海面上远距离跟踪目标精度不高的问题, 提出通过 CA 模型最小二乘法以及船地坐标转换滤波原理, 将速度前馈到双闭环伺服控制的速度环中。其位置环、速度环采用一阶、二阶滞后超前串联校正调节器, 根据不同的跟踪状态在程序中切换一阶、二阶调节器以达到良好的跟踪效果, 最后再加上 19 位高精度的旋转变压器构成完整的双闭环伺服控制系统, 提高了跟踪精度。试验表明: 某舰载光电伺服设备使用中波红外跟踪方式远距离跟踪目标, 脱靶量最大为 35", 旋变反馈角度位置合成值与雷达测得目标实际角度值一致, 最大跟踪误差仅为 100", 远小于工程中要求 4' 的跟踪精度。

关键词: 光电伺服设备; 目标跟踪; 中波红外; CA 模型; 视轴校正

中图分类号: V271.4 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2015)12-0088-05

Design of a Shipborne Photoelectric Servo Device

ZHOU Jun-peng^{1,2}, LI Yan¹, NIAN Lun¹, ZHANG En-dong²

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. School of Electrical & Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: Due to the roll, pitch, yaw disturbance, the shipborne photoelectric servo device has a great influence on the system steady state and dynamic accuracy. To improve the target remote tracking accuracy on the sea surface, the CA model least square method is used together with ship-to-earth coordinate transformation filtering, and the velocity is fed forward to the velocity loop of double closed-loop servo control system. The position loop and velocity loop adopt first-order or second-order lag-lead series correction adjuster, based on different tracking states. The first-order and second-order adjuster can be switched into another one in the program, so as to achieve a good tracking effect. Finally, a 19-bit high-precision rotary transformer is added to form a complete double closed-loop servo control system for improving the tracking accuracy. In a test, a certain ship-borne photoelectric servo device performed target remote tracking with medium wave infrared tracking mode. The result shows that: 1) The maximum miss distance is 35"; and 2) The composite angle value of rotary transformer feedback is in agreement with the actual angle value of target measured by radar, and the maximum tracking error is only 100", which is far less than the tracking accuracy of 4' required in engineering.

Key words: photoelectric servo device; target tracking; medium wave IR; CA model; sight calibration

0 引言

光电设备一直广泛应用于工业生产, 在抑制谐波

干扰、智能控制方面均已成熟^[1]。舰载光电伺服设备应运而生, 带有光电自稳定隔离扰动法的光电伺服设备已在某军舰上成功使用, 其控制算法中的船摇前馈、速率陀螺反馈视轴稳定分析方法能减小载体运动对跟踪瞄准带来的扰动误差^[2-5]。文献[6]中带有 CA 模型的前馈控制速度滤波控制系统能减少系统误差, 弥补雷达的不足, 从而将光电设备跟踪好的目标信息通过武控系统“反引”导弹对抗来袭目标, 但没有提到跟踪误差方面的信息; 文献[7]中“近似-比较”控制视

收稿日期: 2015-01-10

修回日期: 2015-02-10

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2006aa701410); 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目

作者简介: 周俊鹏(1984—), 男, 吉林吉林人, 硕士生, 研究方向为电子学设计、舰载光电系统伺服控制、快速反射镜伺服控制。

轴稳定跟踪低空掠海目标的能力有所提高,但也没有涉及目标跟踪误差方面的情况。本文以中波红外跟踪目标加上 CA 模型最小二乘速度滤波前馈,配合高精度旋转变压器形成双闭环伺服控制系统,其中旋转变压器的精确性影响伺服系统跟踪精度。价格不高的旋转变压器及其集成度高的数据采集模块已经应用于实验室设备,并给出了角度位置-时间曲线图,但没有指明工业方面的应用情况^[8]。有限记忆的最小二乘滤波与“近似-比较”超低空控制技术相结合,提出一种稳定跟踪目标角度信息的全息控制策略,在跟踪目标精度方面有了一定的提高^[9-13]。本文的控制方法,用中波红外跟踪目标最大跟踪误差仅为 100”。

1 设计原理

1.1 最小二乘法速度前馈

发现所需目标时,调用 CA 最小二乘滤波函数,将目标角位置数据过滤出速度数据,前馈到速度回路,并与电视脱靶量位置误差码值作运算,实现光电伺服设备的闭环控制。

二阶系统 CA 最小二乘滤波公式为

$$\begin{cases} \hat{x}_s = \hat{x}_{s/s-1} + \frac{3(3n^2 - 3n + 2)}{n(n+1)(n+2)}(z_s - \hat{x}_{s/s-1}) \\ \hat{\dot{x}}_s = \hat{\dot{x}}_{s/s-1} + \frac{18(2n-1)}{n(n+1)(n+2)\Delta t}(z_s - \hat{x}_{s/s-1}) \\ \hat{\ddot{x}}_s = \hat{\ddot{x}}_{s-1} + \frac{60}{n(n+1)(n+2)\Delta t^2}(z_s - \hat{x}_{s/s-1}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\hat{x}_{s/s-1} = \hat{x}_{s-1} + \Delta t \hat{\dot{x}}_{s-1} + \frac{\Delta t^2}{2} \hat{\ddot{x}}_{s-1}$; $\hat{\dot{x}}_{s/s-1} = \hat{\dot{x}}_{s-1} + \Delta t \hat{\ddot{x}}_{s-1}$; $\hat{x}_{s/s-1}$ 和 $\hat{\dot{x}}_{s/s-1}$ 分别表示在 t_{s-1} 时刻未接受新的测量值 z_s 前,只根据目标运动规律对 t_s 时刻的位置、速度预测; Δt 为采样周期; z_s 为 s 时刻新的测量值; n 为有限记忆的维数。

二阶系统的状态转移矩阵即 CA 模型为

$$\phi(\Delta t) = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

观测方程的增益矩阵为

$$K_n = (K_1 \quad K_2 \quad K_3) \quad (3)$$

式中: $K_1 = \frac{3(3n^2 - 3n + 2)}{n(n+1)(n+2)}$; $K_2 = \frac{18(2n-1)}{n(n+1)(n+2)\Delta t}$; $K_3 = \frac{60}{n(n+1)(n+2)\Delta t^2}$ 。它们为观测方程增益矩阵的 3 个增益系数。

为避免由于 $\lim_{n \rightarrow \infty} K_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} K_2 = \lim_{n \rightarrow \infty} K_3 = 0$,使新的测量值 z_s 在滤波计算中不起作用,导致滤波计算与实际

情况的偏差变得“发散”而采用有限记忆处理,本文设 n 为 40。

1.2 船地坐标转换

惯导角速度经过建模滤波后由主控计算机送出的速度数据是在大地坐标系下的船体受到艏摇、纵摇、横摇时得到的数据 $(\omega_H \ \omega_P \ \omega_R)^T$,所以大地直角坐标系要转换为甲板直角坐标系才能保证稳定跟踪目标,最终

实现编程调用,即
$$\begin{pmatrix} \omega_{xc} \\ \omega_{yc} \\ \omega_{zc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -\sin P \\ -\cos P \cos R & \sin R & 0 \\ \cos P \sin R & \cos R & 0 \end{pmatrix} \cdot$$

$\begin{pmatrix} \omega_H \\ \omega_P \\ \omega_R \end{pmatrix}$,其中, $\omega_{xc}, \omega_{yc}, \omega_{zc}$ 分别为惯导角度数据在甲板坐标系下的转换值。

由以上转换后的甲板坐标系下的角度数据和艏摇 H 、纵摇 P 、横摇 R 角度数据,得到方位和俯仰的速度扰动^[15],即

$$\begin{cases} A_{cv} = \omega_p \sin R - \omega_H \cos P \cos R - \tan E_c [(\omega_R - \omega_H \sin P) \cdot \\ \quad \cos A_c + \omega_p \cos R + \omega_H \cos P \sin R] \sin A_c \\ E_{cv} = -(\omega_p \cos R + \omega_H \cos P \sin R) \cos A_c + (\omega_R - \omega_H \sin P) \sin A_c \end{cases} \quad \circ$$

其中: A_c, E_c 分别为视轴指向的方位和俯仰角度; E_{cv}, A_{cv} 为视轴速度扰动; $\omega_H, \omega_P, \omega_R$ 分别为通过有限记忆最小二乘滤波得到的速度值 $\dot{H}_{n+1/n}, \dot{P}_{n+1/n}, \dot{R}_{n+1/n}$ 。将校正后得到的视轴方位、俯仰速度扰动 E_{cv}, A_{cv} 前馈引入到速度回路,即实现了舰载光电搜索跟踪系统的前馈控制,良好的前馈控制能消除系统误差。位置环和速度环采用传统的滞后超前补偿串联控制,根据需要在程序中设置合适的一阶、二阶调节器相互切换,以达到最佳调节的目的,图 1 为相应的控制方框图。

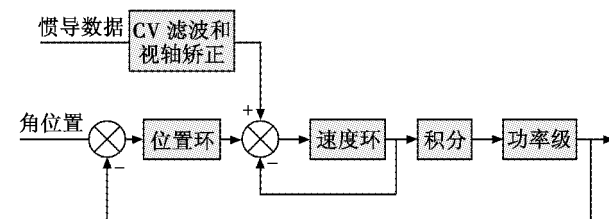


图 1 控制方框图

Fig. 1 Block diagram of control

1.3 控制过程

程序中设置循环等待 400 Hz 中断信号,当 400 Hz 触发伺服控制电路板时程序运行。400 Hz 中断信号则由所设计的硬件电路产生。收到的相关主控脱靶量和收到电视、红外发来的数据的子函数都在各自的中断程序中,由 TL16C754 接收和发送。本文主要以控制为主,所以只给出双闭环和产生功率级所需的 PWM 调

用的相关程序,见图 2。

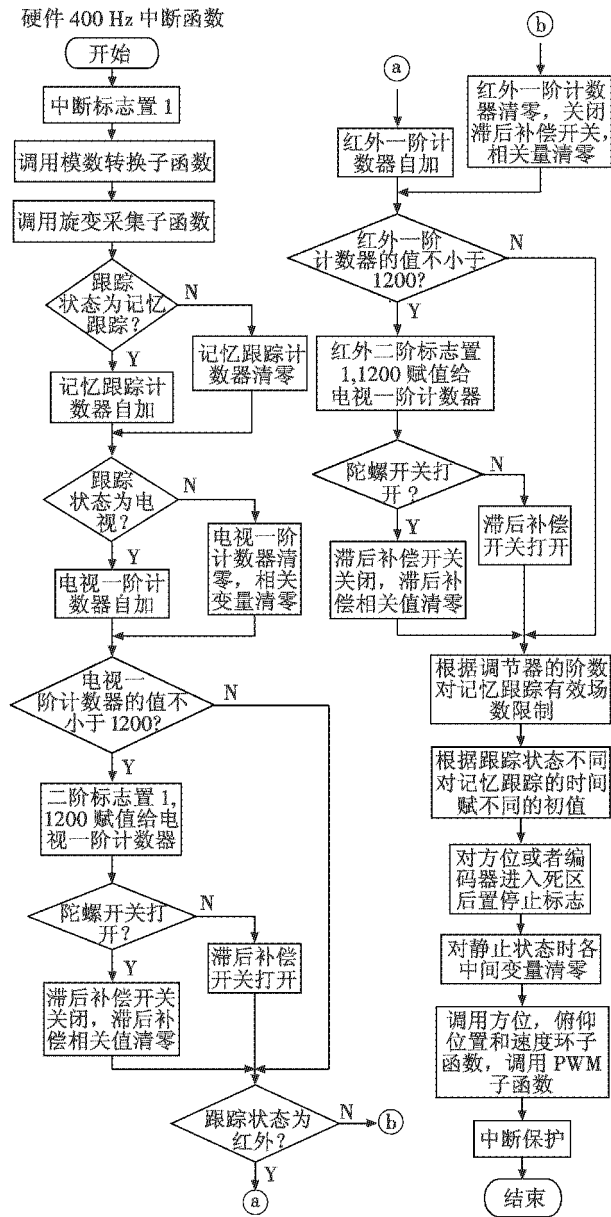


图 2 硬件 400 Hz 中断流程图
Fig. 2 Flow chart of interrupt

1.4 旋转变压器

舰载光电伺服控制系统闭环反馈位置角度码值主要由旋转变压器给出。由 19 位旋变转出的位置码值与图像处理发出来的位置码值运算得到位置偏差,根据这个偏差值结合 CA 模型最小二乘滤波和船地坐标转换再经过位置速度环调节器的共同调节,输出双极性 PWM 波对跟踪架进行控制,用以带动 CCD 相机跟踪目标,所以旋转变压器返码精度高可以提高跟踪精度。旋转变压器在其定子侧施加正弦信号,利用磁耦合关系通过空间相差 90° 的 2 个转子感应与之对应的正、余弦电压,并且感应电压大小与输入角度 θ 的正、余弦成比例,见式(4)。最后模拟输入信号通过数据

转换模块转变为数字信号送入计算机,值得注意的是这种数据模块的高位码值与最后解出的角位置码值的低位相当,需要通过编程来实现其解码。

$$\begin{pmatrix} V_{s1,s3} \\ V_{s2,s4} \end{pmatrix} = k_e U_{RH,RL} \begin{pmatrix} \sin \theta \cos(\omega t) \\ \cos \theta \cos(\omega t) \end{pmatrix} + \frac{\dot{\theta}}{\omega} \begin{pmatrix} \cos \theta \sin(\omega t) \\ \sin \theta \sin(\omega t) \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: k_e 为常数; t 为时间; $U_{RH,RL}$ 为输入正弦电压; $V_{s1,s3}$ 为输出的正弦电压; $V_{s2,s4}$ 为输出的余弦电压。可见,如果输入侧定子电压频率很高时根据 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\dot{\theta}}{\omega} = 0$, 式(4)可近似为

$$\begin{pmatrix} V_{s1,s3} \\ V_{s2,s4} \end{pmatrix} = k_e U_{RH,RL} \begin{pmatrix} \sin \theta \cos(\omega t) \\ \cos \theta \cos(\omega t) \end{pmatrix} \quad (5)$$

1.5 对比分析

传统的舰载光电伺服跟踪设备速度前馈没有 CA 模型速度滤波,引入 CA 模型速度滤波后稳定性和快速性得到明显改善。现将某次试验获得的速度数据导入到 Matlab 中,在其他条件不变的情况下,用 Matlab 中 Simulink 模块做阶跃响应仿真对比。仿真对比如图 3 所示。

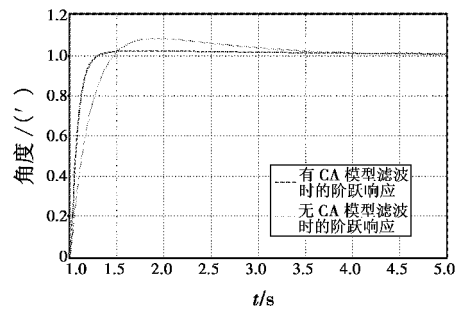


图 3 仿真对比

Fig. 3 Simulation contrast

由图 3 仿真结果可知,CA 模型速度前馈在超量量和快速性指标方面均比传统模型有明显提高,超量量提高了大约 0.09,调节时间大约快了 1 s。此外,该系统的主控部分采用 PC104 作为微处理器,保证了该系统稳定可靠地运行,旋变部分使用激磁模块加数据模块,价格与传统的舰载光电跟踪设备相比大大降低。

2 试验与分析

图 4 为某光电伺服设备中波红外跟踪目标的脱靶量曲线,图 5 为跟踪的目标图。图 4 中,红线代表实测 19 355 组的旋转编码器反馈的角度值,蓝线代表对应的脱靶量值。从图中可见,中波红外跟踪目标脱靶量最大为 35",大概出现在行标为 6200 左右时,其余组段都比较平稳(基本在 10"左右),可见 19 位旋转变压器反馈回来的角位置码值比较精确。

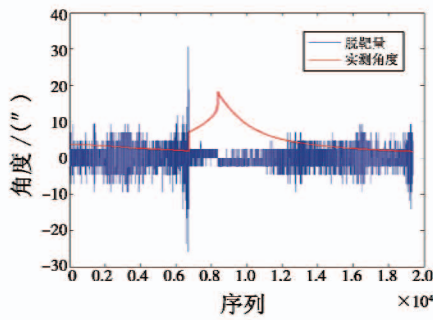


图 4 脱靶量曲线

Fig. 4 Miss distance curve

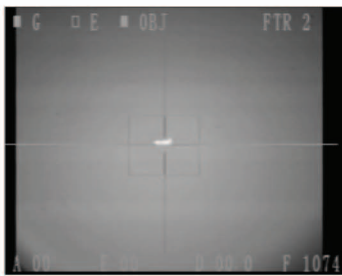


图 5 跟踪目标

Fig. 5 Target tracking

跟踪目标时 19 位旋变反馈的角度值与脱靶量值相减得到角度合成值,最后用雷达测量的目标实际角度值去掉合成值即得到跟踪目标实际误差值。将 19 355 组合成值与雷达测得目标实际角度对比,如图 6 所示。从图 6 中可见两者基本吻合,如果从数据中看仅仅是小数点第二位开始略有区别,误差曲线如图 7 所示。

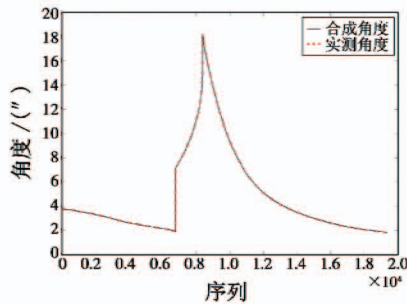


图 6 合成值对比

Fig. 6 Synthetic value comparison

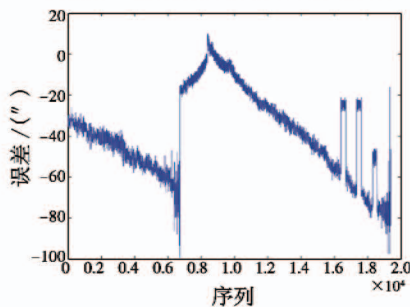


图 7 误差合成

Fig. 7 Error synthesis

跟踪目标误差值合成误差曲线,从图 7 中可见中波红外跟踪目标误差在行标为 6200 左右最大,原因主要是此时的脱靶量突然增大,但是最大为 100"的误差完全满足工程中要求误差不超过 4'的要求,所以跟踪误差还是比较准确的,再次说明了 19 位旋变的作用。

由以上分析可知,在中波红外跟踪目标时,前馈 CA 模型配合视轴船地坐标转换再加上高精度轴角编码器使脱靶量值基本稳定,系统误差大大减小。

3 结论

舰载光电伺服设备极易受到横摇、纵摇、艏摇等海面环境影响而导致跟踪精度下降,通过本文中提出速度前馈法完成的双闭环控制系统稳定跟踪,结合船地坐标转换,实现舰面环境下的中波红外远距离跟踪目标,解决了传统双闭环跟踪远距离跟踪目标精度不高的问题。通过理论分析并结合具体试验,该舰载光电伺服系统最大误差为 100",远小于工程所要求 4'的跟踪误差,增强了远距离跟踪目标的能力,同时提高了舰载火控系统的综合对抗能力。该设计在工程实践中得到应用,具有较高的实用价值。

参考文献

- [1] FRANKENBERG W, TEMPLIN H. Assessment of harmonic interference from shipborne converter equipment for compliance with mains quality requirements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(4): 1735-1739.
- [2] 葛兵, 高慧斌. 舰载经纬仪视轴自稳定方法研究[J]. 舰船科学技术, 2006, 28(6): 93-95. (GE B, GAO H B. Stabilization of LOS for carrier-based theodolite [J]. Ship Science and Technology, 2006, 28(6): 93-95.)
- [3] 邹东明, 刘栖山, 陈长青, 等. 舰载光电跟踪设备视轴稳定分析[J]. 武器装备自动化, 2003, 22(1): 15-19. (ZOU D M, LIU Q S, CHEN C Q, et al. Stabilization analysis of LOS for carrier-based electro-optical tracking equipment [J]. Armament Automation, 2003, 22(1): 15-19.)
- [4] 李焱, 曹立华, 王弟男. 惯导平台下舰载光电搜索跟踪系统的控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1126-1133. (LI Y, CAO L H, WANG D N. Controlling of shipborne optoelectronic searching and tracking system based on inertial navigation platform [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1126-1133.)
- [5] 李焱, 陈长青, 陈涛. 舰载光电跟踪系统全自动低空控制算法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 318-323. (LI Y, CHEN C Q, CHEN T. Full-automatic ultralow-altitude control arithmetic in shipborne optical-electronic tracking system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 318-323.)

- [6] 李焱. 舰载光电全息显控系统[J]. 液晶与显示, 2012, 27(3):378-384. (LI Y. Full information display and control system for shipborne optical-electronic system [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2012, 27(3):378-384.)
- [7] 刘云清, 姜会林, 佟首峰, 等. 基于交会方式的舰载火控雷达零位误差动态标校仪设计[J]. 仪器仪表学报, 2009, 20(2):428-432. (LIU Y Q, JIANG H L, TONG S F, et al. Design of zero position error dynamic calibration device for radar based on spatial-resection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 20(2):428-432.)
- [8] VANZWIETEN T S, VANZWIETEN J H, BALAS M J, et al. Development of an adaptive disturbance rejection system for the rapidly deployable stable platform—part 2 controller design and closed loop response[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(14/15):1367-1379.
- [9] KAUL S K, KOUL R K, BHAT C L, et al. Use of a “look-up” table improves the accuracy of a low-cost resolver based absolute shaft encoder[J]. Measurement Science Technology, 1997, 8(3):329-331.
- [10] BUNTE A, BEINEKE S. High-performance speed measurement by suppression of systematic resolver and encoder errors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(1):49-53.
- [11] 安源, 钟兴, 贾学志, 等. 单光源高精度正交十字形激光标定装置设计[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3):245-247. (AN Y, ZHONG X, JIA X Z, et al. Design of high precision orthogonal cross laser demarcation device with single laser[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(3):245-247.)
- [12] 陈爱华, 高诚辉, 何炳蔚. 基于正交消失点对的摄像机标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(1):161-166. (CHEN A H, GAO C H, HE B W. Camera calibration method based on orthogonal vanishing point pair [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(1):161-166.)
- [13] 王凤英, 张显库, 任承志, 等. 光电跟踪器船摇自稳定建模及仿真[J]. 光电工程, 2005, 32(7):11-14. (WANG F Y, ZHANG X K, REN C Z, et al. Self-stabilization modeling and simulation on ship-sway of a photoelectric tracker[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(7):11-14.)

(上接第 79 页)

结果将会显著失真。

5 结论

1) 最小布雷间隔是描述水雷抗邻雷爆炸能力的技术参数, 在空投布雷作战中不能直接使用。必须依据布雷散布误差计算战术最小布雷间隔, 方可用于实际应用。

2) 多枚水雷连续投放时的散布误差的相关性, 对战术投雷间隔的选取影响很大, 对布雷作战效果的评估也有显著影响。因此, 该相关性是布雷作战使用中必须考虑的问题。

3) 在最小布雷间隔(反映水雷技术指标)一定的情况下, 战术最小布雷间隔的选取取决于投雷散布误差, 散布误差越大战术最小布雷间隔也越大。但本文仅给出了基本规律, 具体两者的定量关系还需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] SCOTT C. Truver USN mines and mining in the airsea battle concept[R/OL][2011-07-30]. <http://www.sldinfo.com/usn-mines-and-mining-in-the-airsea-battle-concept>.
- [2] 文钢, 玄兆林. 不同流速流向下的某型空投水雷水下散布研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2007(2):39-42. (WEN G, XUAN Z L. Study of dispersion of a certain type hydrobomb under different directions and velocities of seawater [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2007(2):39-42.)
- [3] 张旭, 冷相文, 朱红波. 基于雷位散布误差的舰船触雷毁伤概率计算模型[J]. 海军大连舰艇学院学报, 2010(6):25-27. (ZHANG X, LENG X W, ZHU H B. Damage probability model of warship touching mines based on mine position distribution error[J]. Journal of Dalian Naval Academy, 2010(6):25-27.)
- [4] 康崇禄. 国防系统分析方法(上册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003:334-359. (KANG C L. Military science research (Part I) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003:334-359.)
- [5] 王敏, 张旭. 自航水雷雷位散布特性仿真研究[C]//2008 年水雷技术暨装备发展学术交流会, 2008:311-315. (WANG M, ZHANG X. Simulation application on the intersperse of SLMM [C]//Proceedings of Chinese Conference on Mine Technology and Equipment Development, 2008:311-315.)
- [6] 李洪涛, 高顺林, 高峰. 水雷抗邻雷爆炸模拟实验研究[C]//2008 年水雷技术暨装备发展学术交流会, 2008:514-517. (LI H T, GAO S L, GAO F. Research on neighbor mine antinock test [C]//Proceedings of Chinese Conference on Mine Technology and Equipment Development, 2008:514-517.)