军事装备测控技术

计算机测量与控制.2018.26(5) Computer Measurement & Control

**文章编号:**1671-4598(2018)05-0097-05

DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2018.05.025 中图分类号:TJ630.3

• 97

#### 文献标识码:A

# 基于协同防御的水下拦截组合制导

# 程瑞锋<sup>1</sup>, 刘卫东<sup>1,2</sup>, 高立戦<sup>1,2</sup>, 康智强<sup>3</sup>

(1. 西北工业大学 航海学院,西安 710055; 2. 西北工业大学 水下信息与控制重点实验室,西安 710055)3. 西安建筑科技大学 机电工程学院,西安 710055)

**摘要:** 拦截器协同对抗来袭目标的组合制导策略; 该策略在三方运动关系基础上,得出视线制导的相互约束关系,将优化控制与海战博弈相结合,建立协同防御微分对策模型;根据水下拦截器的反馈控制回路,采用伴随原理求解终端问题的方法,进行具有协同特性的最优导引与微分对策制导律设计;对两种拦截制导效果进行性能比较,表明基于协同防御的最优导引与微分对策制导组合制导控制系统对水下拦截器的机动性能要求低,能有效完成拦截,具有较强的鲁棒性。

关键词:水下拦截器;微分对策制导;协同防御;零效脱靶量

# Integrated Guidance Strategy of Underwater Interception Based on Cooperative Defense

Cheng Ruifeng<sup>1</sup>, Liu Weidong<sup>1,2</sup>, Gao Li-e<sup>1,2</sup>, Kang Zhiqiang<sup>3</sup>

(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710055, China;

2. Laboratory of Science and Technology on Underwater Information and Control, Northwestern Polytechnical

University, Xi'an 710055, China;

3. College of Mechanical & Electrical Engineering, University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: According to the pursuit—evasion characteristics between the ship, underwater interceptor and the incoming torpedo, an integrated guidance strategy for anti—torpedo interception based on cooperative defense engagement between underwater interceptor and the ship is proposed. Combining the pursuit relationship in combat and the line of sight guidance principle, the cooperative underwater interceptor attack constraints is established based on the tripartite game model. By taking the terminal miss distance and the minimum control energy as performance index, using the adjoint theory to solve the problem of terminal method, which can be applied to arbitrary order control, the zero effort miss is deduced. When the ship makes optimal evasion, underwater interceptor can achieve the accurate positioning of the torpedo by cooperative engagement and real successful intercept. Simulation results show that the integrated guidance strategy has strong robustness, under which can make underwater interceptor complete interception effectively with lower maneuve.

Keywords. underwater interceptor; different guidance law; cooperative engagement; zero effort miss distance

# 0 引言

水下主要作战武器智能化程度的不断提高,使得当今乃至 将来的海战进入一个武器对抗的时代。但由于海洋复杂环境的 制约,基于协同对抗方面的研究主要集中在航空方面。文献 [1]利用微分对策理论将目标、防御方和攻击方三者的对策问 题转化为二体问题,体现了协同的概念,但是该制导律的推导 需要解二点边值问题,且需较多的测量信息和估计信息,不利 于工程实现。文献 [2]基于微分对策理论,给出防御方与拦 截方协同对抗攻击方的微分制导策略,但未考虑防御方的有效 机动规避与实际应用性。文献 [3]利用基于视线指令制导原 理,应用逆系统控制方法设计目标飞行器反拦截协同制导策

**收稿日期:**2017-09-13; 修回日期:2017-10-23。

**基金项目:**国家自然科学基金(61473224);陕西省教育厅基金(17JK0445)。

作者简介:程瑞锋(1980-),女,山西太谷人,博士生,主要从事精确 制导,水下航行器控制与仿真方向的研究。

刘卫东(1962-),男,教授,博导,主要从事精确制导,水下航行器控制与仿真方向的研究。

略,需要信息多、鲁棒性差。

随着传感器管理技术、水声通信技术、数据分发技术、水 下多传感器信息融合技术的发展,各水下战斗单元的探测传感 器进行联网管理,实现水下战场信息共享,为"水下协同防 御"提供了必要条件。为此,鉴于我方舰艇进行鱼雷报警后, 可捕获的来袭目标信息并不多,无法对来袭目标的机动策略进 行精确预测,本文参考文献 [1] 和文献 [3] 思想,基于海战 中来袭目标攻击我方舰艇、水下拦截器和我方舰艇协同防卫的 特点,根据三方运动关系推导水下拦截器与我方舰艇协同防卫的 特点,根据三方运动关系推导水下拦截器与我方舰艇协同对抗 来袭目标的数学模型,利用伴随理论解决终端控制的最优制导 问题方法,以终端脱靶量和控制能量为性能指标,分别求解用 于最优导引与微分对策制导的零效脱靶量。通过仿真与性能分 析,设计基于协同防御的组合制导律。

# 1 问题描述与建模

海战中对抗三方的相对运动关系如图1所示,设本艇 S 在 W<sub>0</sub>点的航向 C<sub>s</sub>和航速 V<sub>s</sub>,发现距离 R<sub>SR</sub>的 L<sub>0</sub>点航速为 V<sub>R</sub>的 来袭目标 R,经作战决策后,发射航速为 V<sub>A</sub>的水下拦截器 A 进行拦截。

由图1可知来袭目标与水下拦截器之间的运动关系为:



图 1 制导末端三方的相对运动关系

$$\overline{R}_{AR} = V_A \cos(\gamma_A - q_{AR}) - V_R \cos(\gamma_R - q_{AR})$$

$$Rq_{AR} = V_A \sin(\gamma_A - q_{AR}) - V_A \sin(\gamma_A - q_{AR})$$
(1)

同理可得来袭目标与舰艇,水下拦截器与舰艇之间的运动 关系。基于视线角制导原理对水下拦截器与来袭目标的相对运 动关系式(1)进行求导得:

$$\overline{R}_{AR}\overline{q}_{AR} + \overline{R}_{AR}\overline{q}_{AR} = v_A(\overline{\gamma}_A - \overline{q}_{AR})\cos(\gamma_A - q_{AR}) - v_R(\overline{\gamma}_R - \overline{q}_{AR})\cos(\gamma_R - q_{AR}) + a_R\cos(\gamma_R - q_{AR}) - (2$$

因 $\tilde{\gamma}_m = \tilde{a}_m / v_m$ ,其中, $m = \{S, R, A\}$ 分别表示我方舰艇、 来袭目标与水下拦截器。 $\tilde{a}_m$ 为加速度估计,则由(2)可得瞬 时加速度之间的关系为:

$$\tilde{a}_{R} = \frac{a_{Splos}\left(1 + \cos(q_{SR} - \gamma_{s})\right) - 2\bar{R}_{SR}\bar{q}_{SR} + 2\bar{R}_{SR}q_{SR}}{1 + \cos(\gamma_{R} - q_{SR})}$$

$$\tilde{a}_{A} = \frac{a_{Rplos}\left(1 + \cos(\gamma_{R} - q_{AR})\right) - 2\bar{R}_{AR}\bar{q}_{AR} + 2\bar{R}_{AR}q_{AR}}{1 + \cos(\gamma_{A} - q_{AR})}$$
(3)

其中: *a*<sub>Splos</sub> 为垂直于舰艇与来袭目标视线角方向的瞬时舰 艇加速度。*a*<sub>Rplos</sub> 为垂直与水下拦截器与来袭目标视线角方向的 瞬时鱼雷加速度。设 *a*<sub>Sx</sub>, *a*<sub>Sy</sub>, *a*<sub>Rx</sub>, *a*<sub>Ry</sub> 分别为舰艇与来袭目 标加速度在参考坐标方向的分量。由图 1 运动方位可知:

$$a_{Sx} = a_S \sin\gamma_S, a_{Sy} = a_S \cos\gamma_S$$
$$a_{Rx} = \tilde{a}_R \cos(3\pi/2 - \gamma_R)$$
$$a_{Ry} = \tilde{a}_R \sin(3\pi/2 - \gamma_R)$$
(4)

由此可知:

 $a_{Rh}$ 

$$a_{Splos} = a_{Sx} \sin q_{SR} + a_{Sy} \cos q_{SR}$$

$$a_{los} = -a_{Rx} \sin q_{AR} - a_{Ry} \cos q_{AR} \tag{5}$$

其中:我方舰艇加速度 $\tilde{a}_s$ 已知, $\tilde{a}_R$ 可通过已捕获的来袭 目标信息,经过相关制导律的逆向求解进行预测。

由于在制导初始对准良好的情况下,三方都可近似为线性 动态特性的质点,并可沿初始视线方向进行线性化<sup>[5]</sup>,且来袭 目标与水下拦截器的初始目标视线位于"碰撞三角形"附近, 整个飞行过程相对"碰撞三角形"偏离不大,因此可通过鱼雷 命中条件<sup>[6]</sup>和各自作战目的求解对策三方的相互航向角约束 关系:

$$\eta_{RS} = \arcsin(V_S \sin(q_{SR} - \gamma_s)/V_R)$$
$$\gamma_R = \pi + q_{SR} + \eta_{RS}$$
$$\eta_{AR} = \arcsin(V_R \sin(\gamma_R - q_{AR})/V_S)$$
$$\gamma_A = q_{AR} - \eta_{AR}$$
(6)

假设对策三方具有线性控制系统动态,但不对其阶次进行 约束。设水下拦截器具有 n<sub>A</sub> 阶控制系统(自动驾驶仪)动态,

且状态空间实现为 
$$\{A_A, b_A, c_A, d_A\}$$
,其传递函数表示为:  
 $G_A(s) = c_A(sI - A_A)^{-1}b_A + d_A$  (7)

定义中间状态变量 
$$x_A \in \mathbf{R}^{*_A}$$
 ,则进一步表示为:

$$\begin{cases} a_A = c_A x_A + d_A u_{Ac} \\ a_A = c_A x_A + d_A u_{Ac} \end{cases}$$
(8)

其中: $u_{Ac}$ 为水下拦截器的控制命令,同理,可对来袭目 标和舰艇的控制系统动态进行相应假设,状态空间实现分别为  $\{A_{R}, b_{R}, c_{R}, d_{R}\}$ 和 $\{A_{s}, b_{s}, c_{s}, d_{s}\}$ ,传递函数可表示为 $G_{R}(s)$ 和 $G_{S}(s)$ ,相应的控制命令为 $u_{Rc}$ 和 $u_{Sc}$ 。

由于海战中对抗的实质是"攻"与"防"双方在战场态势 空间上的博弈问题,即舰艇规避来袭目标的攻击的同时促进水 下拦截器对来袭目标的成功拦截,来袭目标攻击舰艇的同时规 避水下拦截器,水下拦截器促进舰艇逃逸的同时拦截来袭目 标。为提高我方舰艇的防御能力,当舰艇接收到来袭目标预警 后,应立即启动防御系统。考虑到复杂海洋环境对信息传递的 干扰作用,在舰艇无法通过最优机动成功摆脱来袭目标的情况 下,对我方舰艇实施"匀速+旋回+加速"的机动规避。即舰 艇发现目标后,保持匀速航行并发射水下拦截器,然后以最快 角速度旋回至将来袭目标甩到我舰舰尾舷角 120°~160°范围 后<sup>[7]</sup>,进行加速直航,这样,有效确保了拦截器发射信息的准 确性。

根据来袭目标攻击我方舰艇、水下拦截器和我方舰艇协同 防卫的特点,将两组拦截控制以我方舰艇为交叉归为一组。通 过相对位置变化进行水下拦截器与舰艇协同对抗来袭目标的控 制律的设计。结合图 1 三方的相对运动关系模型,选择  $x = [y_{SR} \quad \bar{y}_{SR} \quad \bar{x}_{R} \quad \bar{x}_{S} \quad y_{AR} \quad \bar{y}_{AR} \quad \bar{x}_{A}]^{T}$ 为状态变量建立协同对 抗数学模型,状态方程为:

$$\overline{x} = Ax + B_A u_{Ac} + B_S u_{\mathcal{X}} + B_R u_{Rc} \tag{9}$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0_{1 \times n_{R}} & 0_{1 \times n_{S}} & 0 & 0 & 0_{1 \times n_{A}} \\ 0 & 0 & -c_{R} & c_{s} & 0 & 0 & 0_{1 \times n_{A}} \\ 0_{n_{R} \times 1} & 0_{n_{R} \times 1} & A_{R} & 0_{n_{R} \times n_{S}} & 0_{n_{R} \times 1} & 0_{n_{R} \times 1} & 0_{n_{R} \times n_{A}} \\ 0_{n_{S} \times 1} & 0_{n_{S} \times 1} & 0_{n_{S} \times n_{A}} & A_{S} & 0_{n_{S} \times 1} & 0_{n_{S} \times 1} & 0_{n_{S} \times n_{A}} \\ 0 & 0 & 0_{1 \times n_{R}} & 0_{1 \times n_{S}} & 0 & 1 & 0_{1 \times n_{A}} \\ 0 & 0 & c_{R} & 0_{1 \times n_{S}} & 0 & 0 & -c_{A} \\ 0_{n_{A} \times 1} & 0_{n_{A} \times 1} & 0_{n_{A} \times n_{R}} & 0_{n_{A} \times n_{S}} & 0_{n_{A} \times 1} & 0_{n_{A} \times 1} & A_{A} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0_{1 \times n_{R}} & 0_{1 \times n_{S}} & 0 & -d_{A} & b_{A}^{T} \end{bmatrix}^{T}, \\ \mathbf{B}_{s} = \begin{bmatrix} 0 & d_{s} & 0_{1 \times n_{R}} & b_{s}^{T} & 0 & 0 & 0_{1 \times n_{A}} \end{bmatrix}^{T}, \end{bmatrix}$$

 $u_i$ 为相应的控制命令,  $|u_i| < 1, i = \{A_c, S_c, R_c\}$ ; 且  $z_i = a_i^{\max}/u_i$ 。

由于运算中将三方当作具有多个控制的单个对象看待,针 对存在的两组不同对抗,可将航行时间表示为 $t_{JSR} = R_{SR0}/V_{cSR0}$ 与 $t_{fAR} = R_{AR0}/V_{cAR0}$ , $R_{SR0}$ , $R_{AR0}$ 分别为来袭目标与我 方舰艇和水下拦截器与来袭目标的初始距离, $V_{cSR0}$ , $V_{cAR0}$ 为相 对应的接近航速。要实现成功防御的目的,要求水下拦截器先 于来袭目标完成任务,即 $\Delta t = t_{JSR} - t_{fAR} > 0$ 。

## 2 制导律的设计

根据我方舰艇、来袭目标、水下拦截器三方作战特点及追

逃关系,可将三者对策分解为两两之间的对策与综合。其中水 下拦截器拦截来袭目标的反馈控制回路为:



图 2 水下拦截器拦截来袭目标的控制系统模型

同理,可推导来袭目标攻击我方舰艇的控制系统模型,其 中我方舰艇为两组拦截运动的公有项。

根据反馈控制原理,控制系统的主要目标是寻求最佳的控制量 u 使拦截方与目标方的终端脱靶量最小和控制拦截方完成 拦截所需的机动能量<sup>[8]</sup>。为达到这两目标,对终端脱靶量和控制函数加以性能指标约束。则线性二次性能指标表示为:

$$J = \frac{1}{2} (x(t_f))^T G x(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \left[ \beta_1 u_{\&}^2(\tau) + \beta_2 u_{Ac}^2(\tau) - \gamma u_{Rc}^2(\tau) \right] d\tau$$
(10)

式中, $G = diag(\alpha_1 \ 0 \ 0_{1 \times n_R} \ 0_{1 \times n_s} \ \alpha_2 \ 0 \ 0_{1 \times n_A}), -\alpha_1, \alpha_2,$  $\beta_1, \beta_2, \gamma > 0$ 为加权设计参数, $-\alpha_1, \alpha_2 \rightarrow \infty$ 表示理想拦截情形, 此时攻击方的脱靶量趋于最大化,拦截方的脱靶量趋于零。 $\gamma$ 反映了攻击方相对于防御方和拦截方的机动性能,当目标具有 较强的机动性能时, $\gamma$ 取小值<sup>[2]</sup>。根据微分对策最优化理论, 水下拦截器捕获时间越短越好,而目标在被拦截过程中则尽量 延长捕获时间。

结合系统状态方程构造哈密顿函数:

$$H = \frac{1}{2}\beta_{1}u_{sc}^{2}(\tau) + \frac{1}{2}\beta_{2}u_{Ac}^{2}(\tau) - \frac{1}{2}\gamma u_{Rc}^{2}(\tau) + \lambda^{T}(t)(Ax + B_{A}u_{Ac} + B_{S}u_{Sc} + B_{R}u_{Rc})$$
(11)

采用伴随原理,利用终端条件  $x(t_f)$  反向求解当前状态,可得:

$$x(t_{fi}) = \Phi (t_{fi}, t) x(t) + \int_{t}^{t_{fi}} \Phi (t_{fi}, t) [B_A u_{Ac}^* + B_B u_{Bc}^* + B_R u_{Rc}^* ] d\tau$$
(12)

其中: $\Phi(t_f, t)$ 为状态转移矩阵,  $t_{fi} = t_{fSR}$ ,  $t_{fAR}$ 。

由于逐步推导求  $x(t_f)$  的表达式求取最优解的过程比较复 杂,引入具有预测性能的零效脱靶量。零效脱靶量的物理意义 为拦截器从当前时刻到制导结束不再输出制导指令,而目标按 以前的机动方式运动,到制导结束时的脱靶量大小<sup>[9]</sup>。假设符 号  $j = \{SR, AR\}$  分别表示来袭目标与我方舰艇、水下拦截器 与来袭目标的相对关系;  $k = \{S, R\}$  分别表示我方舰艇与来袭 目标;  $l = \{R, A\}$  分别表示来袭目标与水下拦截器。则由(12) 可求得微分对策制导律的零效脱靶量:

$$z_{DG} = y_j + t_{goj} \overline{y}_j + \tau_k^2 \psi(\eta, \frac{t_{goj}}{\tau_k}) \widetilde{a}_k - \tau_l^2 \psi(\eta, \frac{t_{goj}}{\tau_l}) \widetilde{a}_l \quad (13)$$

其中:  $t_{soj} = t_{fj} - t$ 为待航行时间,。 同理可求得最优控制下的脱靶量为:  $z_{\alpha i} = y_j + t_{soj}y_j + 0.5t_{soj}^2 \setminus tilde a_k - til$ 

 $\tau_l^2 \psi(0, t_{goj} / \tau_l) \setminus tilde \ a_l \tag{14}$ 

由图 2 控制系统模型可知  $q = y/R = y/V_c t_{go}$ ,推导可得  $\overline{y}$ =  $\overline{q}V_c t_{go} - qV_c$ 。对可对零效脱靶量前两项进行  $y + t_{go}y = qV_c t^{-2}$  修正。则最优控制对应的控制加速度为:

$$u_{\rm CG} = N z_{\rm CG} / t_{\rm goj}^2 \tag{15}$$

 $t_{gol}/\tau_l$ 。具有边界控制的微分对策制导律为:

$$u_{DG} = a^{\max} \operatorname{sign}(z_{DG}) \tag{13}$$

# 3 仿真及性能分析

结合图 1 运动关系,对上述所推导的制导律进行应用仿真 及性能分析。针对来袭目标机动策略无法预知,假定来袭目标 分别采用最优导引与微分制导策略实施攻击,分析比较当水下 拦截器实施微分对策制导与最优制导策略时,水下拦截器的拦 截效果和舰艇的防御能力。

假设对策三方都具有一阶控制系统,首先根据水下拦截器 捕获目标的条件,假设水下拦截器的搜索扇面角为45°,选*X* 轴为我方舰艇的初始航向,且我方舰艇初始位置为(0,0), 来袭目标初始位置(800,1000),水下拦截器的初始位置 (0,0),我方舰艇速度: $v_s = 10 \text{ m/s}$ ,来袭目标速度: $v_R = 20 \text{ m/s}$ ,水下拦截器速度为: $v_A = 25 \text{ m/s}$ ;一阶系统时间常数分 别为: $\tau_R = 0.2 \text{ s}$ , $\tau_A = 0.08 \text{ s}$ , $\tau_S = 0.2 \text{ s}$ ,来袭目标与水下拦 截器的初始偏航角都为0。我方舰艇发射水下拦截器后,经短 暂匀速直航,然后再采用"旋回十加速"的机动样式进规避。 假定水下拦截器毁伤最大半径为20 m。在水下拦截器成功拦 截同时舰艇至少规避到拦截点100 m外,三方对策仿真曲线和 结果如图3和表1所示。



图 3 来袭雷不同导引策略的三方对策航迹

由图 3 三方对策航迹可看出,舰艇发射水下拦截器后,以

"旋转+加速"方式将鱼雷摆脱在舷尾,增大了鱼雷攻击距离, 提高了生存概率。针对不同制导策略的来袭目标,在制导前 期,水下拦截器采用最优导引策略的弹道航迹比微分对策导引 的平滑,且快速响应性好,便于水下拦截器根据舰船的协同信 息及时调整航行弹道。但在制导后期,其响应速度慢于微分对 策制导曲线,不利于对机动性较强的来袭目标实施快速攻击。 对应的仿真结果为表 1。

	来袭雷最优导引(OG)		来袭雷微分对策(DG)	
	水下拦截器	水下拦截器	水下拦截器	水下拦截器
	(OG)	(DG)	(OG)	(DG)
脱靶量/m	2.9475	0.0389	10.934	0.0847
拦截时间/s	31.71	31.675	32.41	32.559
规避距离/m	535.95	536.55	540.26	538.45

表1 三方对策仿真结果

由表1仿真结果可知,针对不同策略的来袭目标,水下拦 截器采用微分对策制导进行拦截时,终端脱靶量小明显小于最 优导引的制导结果,且舰艇可规避到相对较远的距离,提高了 舰船的生存概率。为验证微分对策制导的性能优势,对实施拦 截过程中的零效脱靶量和不同初始距离的终端脱靶量进行仿 真,结果如图4和图5所示。



图 4 水下拦截器不同制导方式的零效脱靶量

由图 4 可知,水下拦截器采用微分对策制导进行拦截时, 零效脱靶量快速逼近 0 位,并在 0 位微小波动,而采用最优导 引进行拦截时,零效脱靶量需经较长时间振荡变化才能逼近 0 位。



由图 5 可知,采用微分对策拦截不同制导策略的来袭目标 时,初始距离变化对终端脱靶量影响不大。而采用最优导引 时,当初始距离大于 1 600 m 时,终端脱靶量数值曲线增速较 快,不利于拦截。虽在距离小于 1 000 m,终端脱靶量有快速 变小趋势,但仍次于微分对策制导。因此,实施近距离攻击时 微分对策制导很具优势。对不同制导策略下水下拦截器的控制 命令进行仿真分析,如图 6 所示。



图 6 水下拦截器不同策略制导加速度曲线

可见,采用最优导引时,在制导末端要求水下拦截器具有 很强的机动性能,控制能量消耗较大,且会增加失速的危险, 不利于控制。采用微分对策时,由于该类型制导律具有"bang -bang"结构,能够满足系统快速性的要求,实现阶跃过程最 小化,较大的提高水下拦截器制导精度,缩短拦截时间。但在 实际控制过程中,控制量在极值之间的快速切换时不可避免地 存在时间滞后,造成系统抖动,且频繁切换控制量会造成执行 机构严重磨损,不利于工程实现<sup>[9]</sup>。

基于微分对策制导与最优导引在制导不同阶段的优势,将 最优导引与微分对策制导组合对水下拦截器进行导引控制。仿 真结果为:当水下拦截器采用组合制导拦截采用最优导引的来 袭目标时,终端脱靶量为:0.788;拦截时间为:24.83 s;舰 艇距拦截点距离为:894.19 m。当来袭目标采用微分对策制导 时,脱靶量为:1.106 7;拦截时间为:23.899 s;舰艇距拦截 点距离为:897.07 m。与表1数据进行对比,组合对策制导拦 截效果优于纯最优导引,稍次于纯微分对策制导。组合对策制 导加速度变化曲线如图 7。



由图 7 可知采用组合制导,既降低了最优导引在制导末端 对水下拦截器的机动性能要求,增强了系统的稳定性,也将 "bang-bang"机动切换频率缩减了 80%,在保证系统优良的 动态特性同时,有效降低控制命令在极值之间的切换频率,提 高了机构的使用寿命,极大的增强了工程应用性。

# 4 结论

为充分提高我方舰艇在海战中的防御能力,针对目标机动 方式的无法预测性,研究了基于协同防御特性的反鱼雷拦截组 合制导问题。

通过水下拦截器制导早期舰艇机动规避方式的设计,利用 视线制导指令得出的加速度与角度约束,建立水下拦截器与我 方舰艇的协同对抗来袭目标的作战模型,有效降低了距离对信 息协同的延迟影响,使水下拦截器实现了制导弹道航迹的实时 调整,为制导末端精确、快速的拦截提供保障。

在控制律推导环节,引入零效脱靶量,应用伴随理论解决 终端控制问题方法,避免了微分制导律推导过程中求解二点边 值的复杂过程,可适用于三方任意阶控制的情形,便于工程 实现。

通过对不同机动方式来袭目标的拦截仿真及性能分析,在 保证拦截效果前提下,从控制指令的性能及工程应用合理性出 发,对组合制导优势进行了分析。该组合控制克服了单一制导 的不足,同时具有优良的动态特性和稳定特性,具有强的鲁棒 性,可实现对来袭目标的有效拦截。

## 参考文献:

[1] 陈春玉. 反鱼雷技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

- Rusnak I. Guidance laws in defense against missile [A]. Proceedings of the IEEE 25th Convention of Electrical and Electronics Engineers [C]. Israel: IEEE Press, 2008: 90 94.
- [3] 花文华. 寻的导弹微分对策末制导方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔 滨工业大学, 2011.
- [4] 肖增博, 雷虎民. 目标飞行器反拦截协同制导策略 [J]. 兵工学报, 2011, 12 (32): 1486-1492.
- [5] 李运迁. 大气层内拦截弹制导控制及一体化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011, 6.
- [6] 孟庆玉,张静远. 鱼雷作战效能分析 [M]. 北京: 国防工业出版 社,2003.
- [7] 贾 跃,宋保维. 水面舰船对声自导鱼雷防御机动方法研究 [J]. 火力与指挥控制,2009,34 (1):45-50.
- [8] 徐德民. 鱼雷自动控制系统 [M]. 西安: 西北工业大学出版 社, 2001.
- [9] 李运迁,齐乃明. 基于零控脱靶量的大气层内拦截弹制导律 [J]. 宇航学报. 2010,7 (31):1768-1774.
- [10] 周 萩. 寻的导弹新型导引规律 [M]. 北京: 国防工业出版 社, 2002.

## 

波电压信号,可以更明显地缩短转速正反向切换的时间,更快 地保持转速稳定。并且如图 17 跟踪误差分析所示,模糊 PI 控 制的系统的跟踪误差能更快速地减小为零达到稳态。所以由仿 真结果可知,模糊 PI 控制的系统具有更加优良的跟踪性能。 因此,模糊 PI 控制可以在对跟踪性能要求较高的随动系统中 进行应用。







## 5 结论

本文将模糊控制应用到双闭环直流 PWM 可逆调速系统的 设计当中,在转速环常规 PI 调节器基础之上设计了基于模糊 控制的转速环调节器。以系统的转速误差量和转速误差变化率 作为模糊控制器的输入,采用了根据模糊控制规则进行模糊推 理的方法,实现了转速调节器的比例系数以及积分系数的动态 整定。然后对采用转速环模糊 PI 控制器以及常规 PI 控制器的 调速系统分别进行仿真。通过对在理想空载、恒定负载和突加 负载以及快速正反转切换 4 种状态下的仿真结果进行了对比, 证明了设计出来的转速环模糊 PI 控制的双闭环直流可逆调速 系统具有更好的动态与静态特性、抗扰性能、恢复性能以及跟 踪性能。从而说明了模糊控制可以在对直流可逆调速系统动态 与静态性能、抗扰性能、恢复性能以及跟踪性能要求较高的设 备和装置上进行应用。

#### 参考文献:

- [1] 阮 毅,陈伯时.电力拖动自动控制系统:运动控制系统 [M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [2] 李煌荣. 关注医疗康复器械用微特电机的发展机遇 [J]. 微特电机, 2013, 41 (6): 72-74.
- [3] 杨祖元,杨华芬.双闭环直流调速系统模糊 PID 控制研究 [J]. 计 算机应用研究, 2011, 28 (3): 921-923.
- [4] 孙灵芳,董学曼,姜其锋.模糊控制的现状与工程应用关键问题 研究 [J].化工自动化及仪表,2016,43 (1):1-5.
- [5]应浩.关于模糊控制理论与应用的若干问题[J].自动化学报, 2001 (4): 591-592.
- [6] 陈 智,王贵锋. 模糊 PID 算法的双闭环直流电机调速系统 [J]. 电子科技, 2017, 30 (7): 33-36.
- [7] 陈忠华,康立乾,王 洋.直流调速系统中常规 PI 与模糊 PI 控制器的比较 [J].计算机系统应用,2012,21 (8):80-84.
- [8] 林小峰,廖志伟,方 辉. 隶属函数对模糊控制性能的作用与影响[J]. 电机与控制学报, 1998 (4): 8-11.