

基于协同防御的水下拦截组合制导

程瑞锋¹, 刘卫东^{1,2}, 高立斌^{1,2}, 康智强³

(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 Ruifeng¹, Liu Weidong^{1,2}, Gao Li-b^{1,2}, Kang Zhiqiang³

(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 maneuver.

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

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_0 点的航向 C_s 和航速 V_s , 发现距离 R_{SR} 的 L_0 点航速为 V_R 的来袭目标 R, 经作战决策后, 发射航速为 V_A 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:

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。

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:

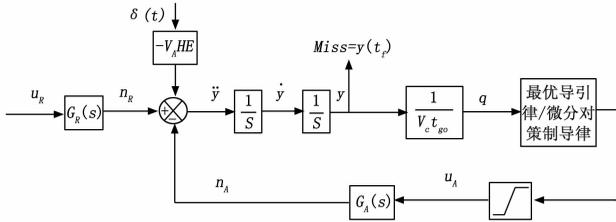


图 2 水下拦截器拦截来袭目标的控制系统模型

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^[8]。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:

$$J = \frac{1}{2} (x(t_f))^T G x(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [\beta_1 u_{\dot{x}}^2(\tau) + \beta_2 u_{\dot{y}}^2(\tau) - \gamma u_{\dot{z}}^2(\tau)] d\tau \quad (10)$$

式中, $G = \text{diag}(\alpha_1 \ 0 \ 0_{1 \times n_R} \ 0_{1 \times n_x} \ \alpha_2 \ 0 \ 0_{1 \times n_A})$, $-\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \gamma > 0$ 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。 γ 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, γ 取小值^[2]。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:

$$H = \frac{1}{2} \beta_1 u_{\dot{x}}^2(\tau) + \frac{1}{2} \beta_2 u_{\dot{y}}^2(\tau) - \frac{1}{2} \gamma u_{\dot{z}}^2(\tau) + \lambda^T(t) (Ax + B_A u_{Ac} + B_S u_{Sc} + B_R u_{Rc}) \quad (11)$$

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:

$$x(t_{fi}) = \Phi(t_{fi}, t) x(t) + \int_t^{t_{fi}} \Phi(t_{fi}, t) [B_A u_{Ac}^* + B_S u_{Sc}^* + B_R u_{Rc}^*] d\tau \quad (12)$$

其中: $\Phi(t_f, t)$ 为状态转移矩阵, $t_{i1} = t_{iSR}, t_{iAR}$ 。

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^[9]。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:

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

其中: $t_{goj} = t_{fj} - t$ 为待航行时间。

同理可求得最优控制下的脱靶量为:

$$z_{OG} = y_j + t_{goj} \dot{y}_j + 0.5 t_{goj}^2 \tilde{a}_k - \tau_l^2 \psi(0, t_{goj} / \tau_l) \tilde{a}_l \quad (14)$$

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

$$u_{OG} = N z_{OG} / t_{goj}^2 \quad (15)$$

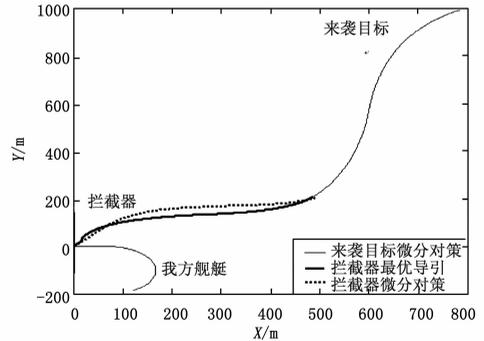
其中: $N = \frac{6x^3 - 6x^2 + 6x + 3 - 12xe^{-x} - 3e^{-2x}}{2x^3 - 6x^2 + 6x + 3 - 12xe^{-x} - 3e^{-2x}}$, $x = t_{goj} / \tau_l$ 。具有边界控制的微分对策制导律为:

$$u_{DG} = a^{\text{max}} \text{sign}(z_{DG}) \quad (13)$$

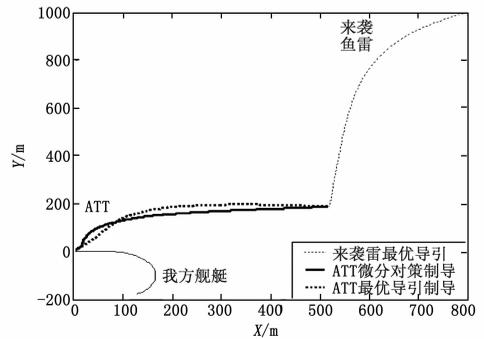
3 仿真及性能分析

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二阶控制系统, 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, 经短暂无速直航, 然后再采用“旋回+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。



(a) 来袭目标微分对策制导三方对策



(b) 来袭目标微分对策制导三方对策

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。

表 1 三方对策仿真结果

| | 来袭雷最优导引(OG) | | 来袭雷微分对策(DG) | |
|--------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| | 水下拦截器(OG) | 水下拦截器(DG) | 水下拦截器(OG) | 水下拦截器(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 |

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。

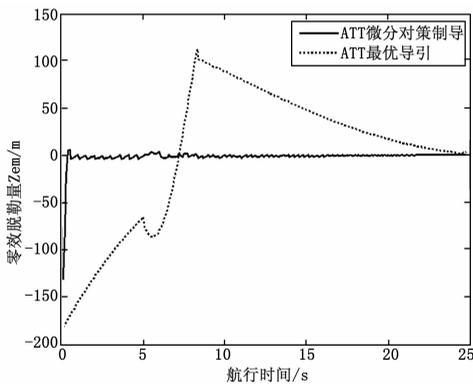


图 4 水下拦截器不同制导方式的零效脱靶量

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。

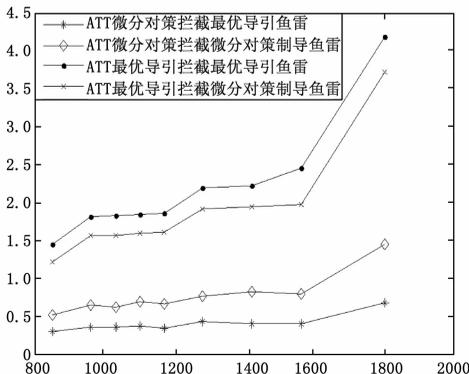


图 5 不同初始距离下不同制导方式的末端脱靶量

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。

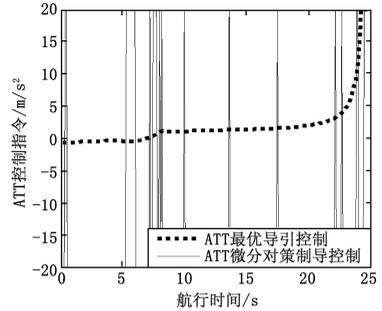


图 6 水下拦截器不同策略制导加速度曲线

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^[9]。

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。

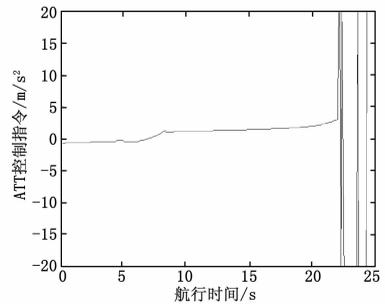


图 7 水下拦截器组合对策制导加速度变化

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。

(上接第 89 页)

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。

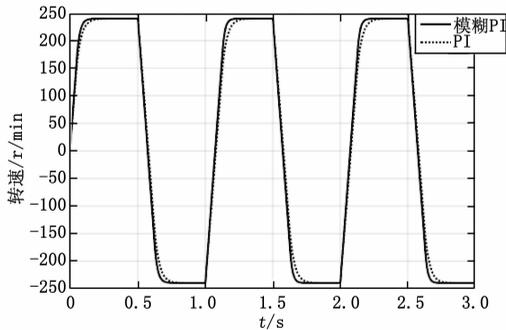


图 16 快速正反切换结果

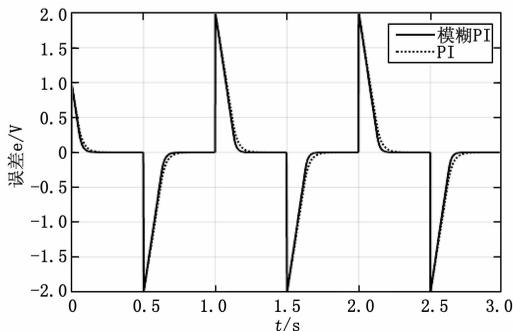


图 17 跟踪误差分析

参考文献:

- [1] 陈春玉. 反鱼雷技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] 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] 周获. 寻的导弹新型导引规律 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

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.