

基于自抗扰理论的舰载武器随动控制研究

张 杨, 王志勇, 王 镇, 姜宗民
(北京航天发射技术研究所, 北京, 100076)

摘要: 舰载平台在复杂海面风浪环境下保持姿态的稳定, 是舰载武器工作的重要基础。针对舰载平台的姿态稳定控制, 设计了自抗扰控制器提高了舰载平台对目标角度随动跟踪的精度, 并保证了系统快速响应, 抑制风浪扰动及负载扰动等不确定因素的影响。为进一步提高控制器的控制效果, 提出粒子群算法进行了控制器的智能化参数寻优, 经过仿真分析及样机试验验证了自抗扰控制器在提高系统随动跟踪快速性、精准性及鲁棒性的作用。

关键词: 舰载武器; 随动跟踪; 自抗扰控制; 参数优化; 粒子群算法

中图分类号: TN820.3; V19

文献标识码: A

Servo-control Strategy of Shipborne Weapon based on Active Disturbance Rejection Theory

ZHANG Yang, WANG Zhiyong, WANG Zhen, JIANG Zongmin
(Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing, 100076)

Abstract: The stability of shipborne platform in complex sea surface wind and wave environments is an important foundation for the operation of shipborne equipment. Attitude stability control for shipborne platform, an active disturbance rejection controller is designed, which improves the tracking accuracy of the shipborne platform to the target angle, ensures the rapid response of the system, and suppresses the influence of uncertain factors such as wind wave disturbance and load disturbance. In order to further improve the control effect of the controller, the particle swarm optimization algorithm is used to optimize the intelligent parameters of the controller. The simulation results show that the ADRC can improve the tracking speed, accuracy and robustness of the system.

Keywords: shipborne weapon; servo tracking; active disturbance rejection controller; parameter optimization; particle swarm optimization algorithm

0 引言

舰载平台是舰载武器发射的状态基准^[1-2], 其在复杂海面环境伴随风浪扰动等不确定干扰因素下, 能够保持姿态平稳或主动反向抵消扰动, 可有效地保障武器发射后对目标的快速跟踪及精准命中。为满足舰载武器在复杂海况下的作战需求, 故进行舰载武器发射平台的伺服控制策略研究。

针对舰载平台随动系统的控制问题, 由于系统外部存在海浪冲击及负载扰动, 内部存在摩擦力矩, 其自身具有大的惯量, 常规的PID控制算法在这种复杂情况下控制效果不甚理想^[3]。文献[4]~[5]在稳定平台PID控制中引入滑模控制并加以改进, 以克服扰动力矩以及摩擦对平台的影响, 但难点是滑模控制会给系统带来较为严重的抖颤问题; 文献[6]~[7]

在PID算法之外设计自适应控制器, 用于参数多变的位置伺服系统, 提升了系统鲁棒性和快速自适应性, 但自适应控制算法比较复杂且限制条件较多。自抗扰控制继承常规PID“以误差克服误差”的思想, 其设计不依赖系统模型, 适用于存在内部及外部干扰的伺服系统, 本文基于自抗扰控制理论开展舰载武器位置随动控制的研究。

1 舰载武器随动控制算法设计

1.1 随动控制整体方案

海浪的冲击扰动会使舰船产生横摇、纵摇、艏摇、横荡、纵荡和垂荡六个自由度的运动。目前舰船航向、航迹的控制多是以艏摇、横荡和纵荡三自由度的运动模型展开, 故而可通过舰船的操纵系统来对上

述三自由度进行弥补控制，而纵摇、横摇和垂荡很大程度上取决于海况和舰船结构参数，对发射平台的影响更为显著，通过文献 [8] ~ [9] 可得不同海浪等级下中型舰船的运动参数，如表 1 所示。

表 1 不同海况等级中级舰船运动参数

Tab.1 Motion parameters of different sea situations

海况	横摇		纵摇		垂荡	
	幅值/(°)	周期/s	幅值/(°)	周期/s	幅值/m	周期/s
4级	4~9	9~9.5	0.4~1.5	4.5~5.5	0.4~1	4.5~5.5
5级	9~15		1.5~3		1~2.5	
6级	15~20		3~4.5		2.5~4.5	
7级	≥30		≥7		≥7	

通过对舰船姿态变化的监测，可获得舰船的横摇、纵摇及垂荡的运动参数信息，采用将舰船姿态角与目标发射角进行解耦计算得到舰载武器的目标起竖、回转角的方式可将船体摇摆隔离问题转化为对位置跟踪系统的伺服控制问题，跟踪伺服控制整体方案如图 1 所示，主要进行舰载武器发射平台俯仰轴与方位轴的控制，即起竖角与回转角的跟踪伺服控制。

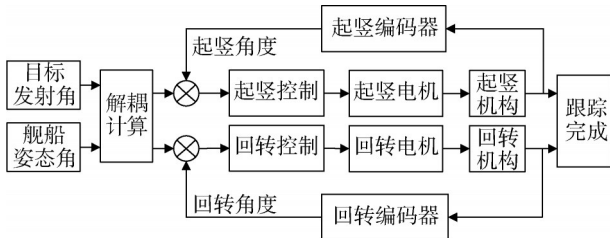
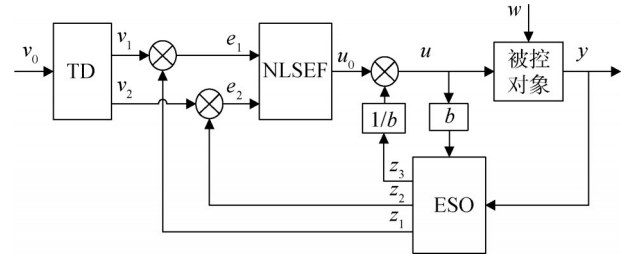


图 1 随动跟踪控制整体方案

Fig.1 Control strategy of servo system

1.2 自抗扰控制器设计

自抗扰控制器 (Active Disturbance Rejection Control, ADRC) 是中国科学院针对同时具有内部和外部不确定性的非线性系统控制问题而提出的。自抗扰控制的核心是将系统的内部不确定因素 (无论是定常还是时变, 线性还是非线性) 和外部扰动一起作为系统的“总扰动”^[10], 通过构造扩张状态观测器对系统“总扰动”进行估计并实时补偿以获得较强的控制不确定性的能力以及较好的控制精度。自抗扰控制器主要由跟踪微分器 (Tracking Differentiator, TD)、扩张状态观测器 (Extended State Observer, ESO) 和非线性状态误差反馈 (Non-linear State Error Feedback, NLSEF) 3 部分组成, 如图 2 所示。



v_0 —被控系统的参考输入; v_1 —参考信号 v_0 的快速跟踪信号; v_2 — v_0 的近似微分信号; u —控制器输出的控制量; b —控制放大系数

图 2 自抗扰控制器组成

Fig.2 Consistent of active disturbance rejection controller

1.2.1 跟踪微分器设计

跟踪微分器以积分形式获得位置设定输入信号的微分, 可有效克服输入高频噪声的影响; 同时为位置给定信号安排过渡过程, 避免直接采用被控对象实际输出与目标值之间的误差来设计控制律导致控制律初始作用过大的问题, 解决伺服系统响应速度与超调的矛盾。

跟踪微分器的算法实现为

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = \text{fst}(v_1 - v_0, v_2, r, h) \end{cases} \quad (1)$$

$\text{fst}(v_1 - v_0, v_2, r, h)$ 为快速控制最优综合函数, 定义如下:

$$\begin{cases} d = r \times h \\ d_0 = d \times h \\ y = (v_1 - v_0) + h \times v_2 \\ \alpha_0 = \sqrt{d^2 + 8 \times r \times |y|} \\ \alpha = \begin{cases} v_2 + \text{sgn}(y) \times (\alpha_0 - d)/2, & |y| > d_0 \\ v_2 + \frac{y}{h}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ \text{fst} = \begin{cases} -r \times \text{sgn}(\alpha), & |\alpha| > d \\ -r \times \frac{\alpha}{d}, & |\alpha| \leq d \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中 r 为跟踪速度因子; h 为滤波因子。

1.2.2 扩张状态观测器设计

扩张状态观测器是在状态观测器的基础上, 提取影响系统输出的扰动信号将其作为扩张状态输入到状态观测器中而形成的, 能够对系统状态和系统总扰动进行实时估计。

对于含有干扰的舰载位置随动系统, 建立其二阶状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + w(t) + u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中 x_1, x_2 为系统状态; $f(x_1, x_2)$ 为未知项; $w(t)$ 为

干扰项。设定 $x_3 = f(x_1, x_2) + w(t)$, $\dot{x}_3 = \rho(t)$, 则系统状态方程变为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + u \\ \dot{x}_3 = \rho(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4)$$

可构造扩张状态观测器数学表达式:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 \text{fal}(e, \alpha_1, \delta_0) + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 \text{fal}(e, \alpha_2, \delta_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中 β_1 、 β_2 、 β_3 为状态观测器增益系数; fal 函数如式 (6) 所示:

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sgn}(e), & |e| > \delta \\ \frac{e}{\delta^{(1-\alpha)}}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (6)$$

非线性函数 fal 实际上是控制工程界的一个经验知识“小误差大增益, 大误差小增益”的数学拟合, δ 是为避免函数在原点振荡而引入的一个小正数, 代表线性区域的宽度, 非线性因子 α 决定非线性饱和函数的非线性形状。

1.2.3 非线性状态误差反馈设计

非线性状态误差反馈是对跟踪微分器的输出量与扩张状态观测器反馈的状态变量做差, 得到系统误差量, 通过非线性组合方式得到控制量 u_0 , 并将观测到的系统扰动反馈到控制量, 得到实际控制量 u , 实现扰动补偿。非线性组合实现如下式:

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - z_2 \\ u_0 = \beta_4 \text{fal}(e, \alpha_3, \delta) - \beta_5 \text{fal}(e, \alpha_4, \delta) \\ u = u_0 - z_3/b \end{cases} \quad (7)$$

式中 β_4 和 β_5 为控制器的增益系数。

2 基于粒子群算法的自抗扰控制器参数整定

2.1 自抗扰控制器参数整定分析

在自抗扰控制器设计过程中, 控制参数的整定选取决定着控制器的控制性能。共存在 14 个参数需要整定, 分别是 TD 的 $\{r, h\}$; ESO 的 $\{\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \delta_0\}$; NLSEF 的 $\{\alpha_3, \alpha_4, \beta_4, \beta_5, \delta, b\}$ 。

依据文献 [11] ~ [13] 以及仿真实践经验可知, ESO 的参数 $\alpha_1, \alpha_2, \delta_0$ 与 NLSEF 的 $\alpha_3, \alpha_4, \delta$ 均为非线性函数 fal 的内部参数, 这些参数的微小变化将极大地影响其他参数的整定, 故而依据实际经验, 可对这些非线性参数取固定值且后续一般不会再作变动。在

ESO 中, 设定 $\alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.25, \delta_0 = 0.05$; 在 NLSEF 中, 设定 $\alpha_3 = 0.75, \alpha_4 = 1.25, \delta = 0.05$ 。其余的参数 $r, h, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, b$ 则需要依据实际控制系统在线修改。

跟踪速度因子 r 决定 TD 的跟踪速度, 应充分考虑系统对超调性和快速性的需要来决定 r 的大小。 h 为滤波因子, 即对输入信号提取的微分信号进行一定的滤波, 一般取采样时间的 1~10 倍 [13]。通过实际仿真的方法观察参数 r 的变化对过渡过程的影响。仿真中设定采样时间 h_0 为 0.001 s, 取参数 h 为 $10h_0$, 依据四级海况下舰船摇摆的幅度, 选定阶跃响应目标值为 7° , 可得跟踪微分器输出的跟踪信号和微分信号的变化趋势如图 3~4 所示。

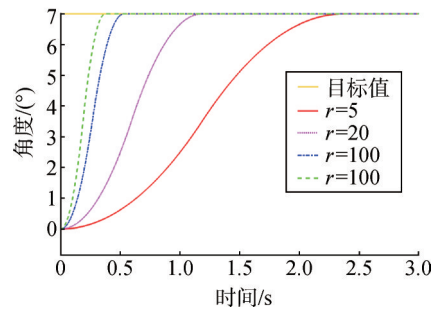


图3 h 不变, r 取不同值跟踪信号响应曲线

Fig.3 Response curves of tracking signal when h stable, r variable

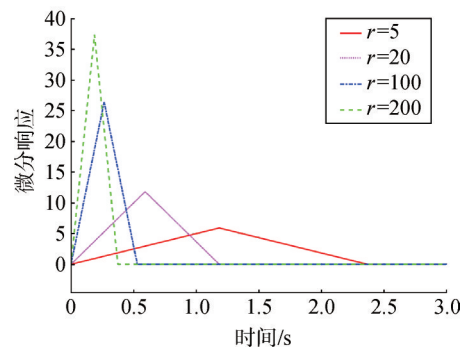


图4 h 不变, r 取不同值跟踪信号微分响应曲线

Fig.4 Response curves of tracking differential signal when h stable, r variable

经仿真分析可知, r 取值过小容易导致系统响应滞后, 如果 r 过大, 跟踪信号近似于输入, 则无法体现对输入信号安排过渡过程的作用, 同时会带来系统微分信号振荡。对于四级海况, 设定目标值为 7° , 取 $r=200$ 时, 可以看到仿真过渡时间约为 0.35 s, 所以暂取 $r=200, h=0.01$ s。

在自抗扰控制器中, 参数 β_1, β_2 主要影响对 TD 开

环系统对象的2个状态变量的估计, β_3 影响对未知扰动的估计, 3个参数相互耦合共同影响ESO的稳定, 参数不合适会导致估计值的振荡或发散, 应当协同整定; β_4 、 β_5 相当于PD控制中的比例系数与微分增益; 参数 b 则与被控对象息息相关。这6个参数也是自抗扰参数整定的重点及难点。本文针对此6个参数的选取, 从已建立的仿真模型出发, 利用粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization Algorithm, PSO)进行参数智能优化整定。

2.2 粒子群优化算法整定参数

粒子群算法基于种群和适应度两个概念, 基本思想是通过种群中间的每个单独的个体相互影响和信息的共享来获取最优解^[14-15]。

对于自抗扰控制参数的优化来说, 每一个粒子代表需要整定的6个参数的一种取值集合, 多个粒子形成一个种群, 经过调用实际仿真模型并选用合适的适应度函数计算得到粒子的适应度, 通过对适应度的对比选出更优的粒子, 并对粒子状态进行更新, 多次迭代得到最优的参数取值。

2.2.1 粒子群算法设计

适应度函数是决定粒子群算法优化效果的一个关键因素, 对于舰载位置随动跟踪系统来说, 可以将控制系统瞬时误差 $e(t)$ 为泛函的积分作为目标适应度函数。本文选取时间乘以绝对误差积分准则(Integral of Timed Absoluted Error, ITAE)作为评价函数, 如下:

$$J = \int_0^t |e(t)| dt \quad (8)$$

仅采用以上评价函数所设计出的控制器将会过于追求控制系统的动态性能, 所给出的控制参数相对较大, 从而在系统响应过程中的控制量容易过大。为了减小在控制器工作过程中的控制信号, 在适应度函数中加入了带有权重因子的控制输入量的平方项:

$$J = \int_0^t (|e(t)| + \epsilon u^2(t)) dt \quad (9)$$

粒子群算法本身需要调整设定的参数主要为粒子维数 N , 种群数目 D , 迭代次数 T , 学习因子 c_1 、 c_2 , 惯性因子 ω , 最大速度 V_{\max} 。如表2所示。

表2 粒子群算法参数

Tab.2 Parameters of particle swarm optimization algorithm

参数	取值	参数	取值
粒子维数 N	6	学习因子 c_1	1.49445
种群数目 D	20	学习因子 c_2	1.49445
迭代次数 T	60	惯性因子 ω	0.7928

2.2.2 粒子群算法参数整定实现

将粒子群算法应用于自抗扰控制器参数整定, 需在仿真过程中进行在线迭代优化。本文针对舰载武器发射平台起竖系统仿真模型进行控制参数的整定, 如图5所示。

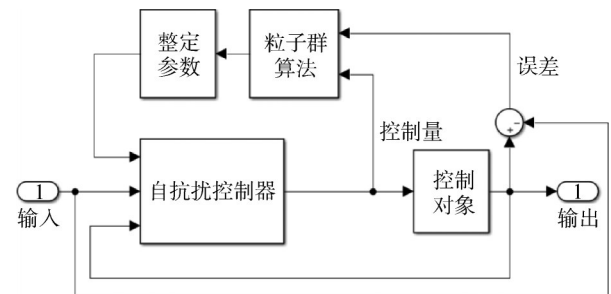


图5 参数整定系统

Fig.5 Parameters setting system

粒子群算法基本流程见下述伪代码:

初始化粒子群维数 N 、种群数目 D 等参数;

初始化粒子个体的位置和速度;

DO

For 每个粒子

调用仿真模型计算其适应值 X_i ;

If (适应值 X_i 优于粒子历史最优值 P_i)

更新 $P_i=X_i$;

End

选取当前粒子群中最佳粒子 g_i ;

If (当前最佳粒子 g_i 优于种群历史最优值 P_g)

更新 $P_g=g_i$;

For 每个粒子

更新粒子速度;

更新粒子位置;

End

While 未达到最大迭代次数

绘制粒子寻优适应值的迭代曲线及6个参数的迭代优化曲线如图6~7所示。

至此, 确定舰载武器随动系统起竖过程模型自抗扰控制器的全部参数如表3所示。

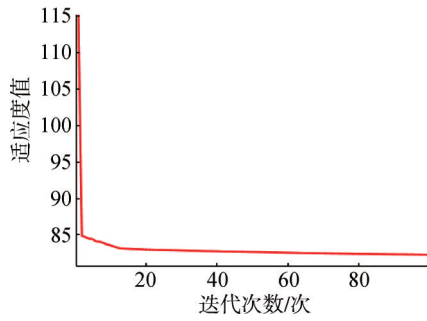


图6 适应度迭代进化曲线

Fig.6 Fitness iterative optimization curve

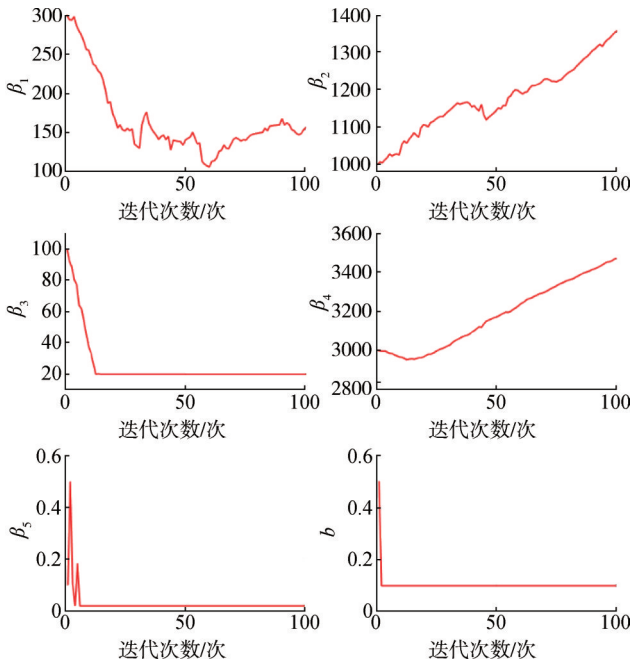


图7 参数迭代优化曲线

Fig.7 Parameters iterative optimization curve

表3 自抗扰控制器参数

Tab.3 Parameters of active disturbance rejection controller

参数	取值	参数	取值
α_1	0.5	β_1	160
α_2	0.25	β_2	1360
α_3	0.75	β_3	20
α_4	1.25	β_4	3500
b	0.1	β_5	0.02
r	200	δ_0	0.05
h	0.01	δ	0.05

3 仿真分析

建立仿真模型将舰载武器起竖系统作为控制对象单独进行仿真，验证自抗扰控制器在起竖角度随动跟踪上的控制效果。起竖角度控制系统的被控对象为永磁同步电机，永磁同步电机驱动电动缸做直线位移运

动，以电动缸耳轴为旋转中心，带动发射平台进行俯仰方向的起竖运动。

通过对永磁同步电机的结构及其矢量控制进行分析建立其等效数学模型，与传动机构电动缸的数学模型以及执行机构的数学模型联合得到被控对象整体模型；位置闭环控制策略采用上述设计的自抗扰控制器。

3.1 单位阶跃响应仿真

针对自抗扰控制器在调节控制系统动态响应快速性与超调性的控制能力验证，对控制系统进行单位阶跃响应仿真，并与位置环常规PI控制器的控制效果进行对比分析。

自抗扰控制器参数采用上文整定得到的14个参数，PI控制器参数通过仿真经验获取。设置恒定负载力矩为80 N·m，可以得到控制系统单位阶跃响应如图8所示。

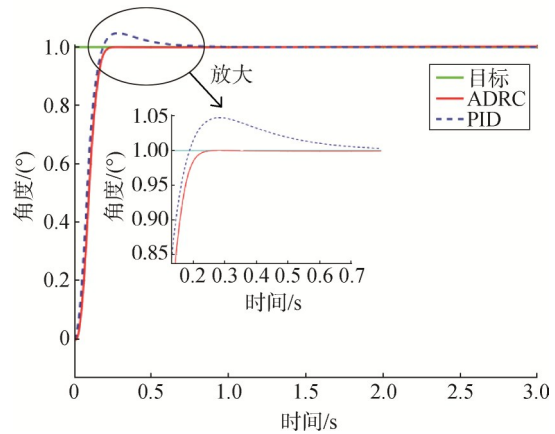


图8 单位阶跃响应曲线

Fig.8 Unit step response curve

由图8中放大部分可以看到，在PID控制与自抗扰控制的过渡时间接近时，PID控制的单位阶跃响应存在超调，超调量约为5%；而自抗扰控制则可以无超调地到达稳定状态。可见自抗扰控制在系统动态响应上可以更好的保证快速性与无超调。

3.2 负载扰动响应仿真

为模拟在海面环境下，舰载平台受到风浪扰动的影响，在系统均达到稳定状态的 $t=4$ s后加入风载及负载总扰动力矩，设置为60 N·m，得到ADRC与PID的控制效果如图9所示。

由图9中放大部分可以看到，在 $t=4$ s出现相同负载扰动后，两种控制方式响应曲线均出现了一定的波动。传统PID控制器偏离平衡位置 0.015° ，成功抑制

扰动的时间约为0.8 s；而自抗扰控制器偏离平衡位置约0.005°，成功抑制扰动的时间约为0.35 s。可见在抑制扰动的能力上，自抗扰控制器的调整波动更小，抑制扰动的的时间更短，抗干扰能力更强。

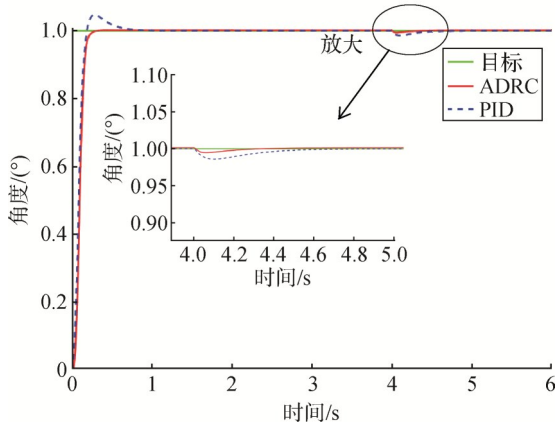


图9 扰动响应曲线
Fig.9 Disturbance response curve

3.3 正弦曲线跟踪仿真

以五级海况下舰载平台进行俯仰及方位方向运动为基础，进行系统伺服电机及机械执行机构设计选型，本文对舰载平台的随动控制仿真分别选取四级、五级海况下的不同摇摆情况进行验证分析。为方便进行对比，设定舰载发射平台在40°起竖角附近，依据控制变量原则分别选取幅值7°、周期7s的正弦曲线，幅值7°、周期9s的正弦曲线以及幅值9°、周期9s的正弦曲线作为目标跟踪曲线，分别得到如图10~13所示的正弦响应曲线，其中图11是对图10曲线的局部放大结果。

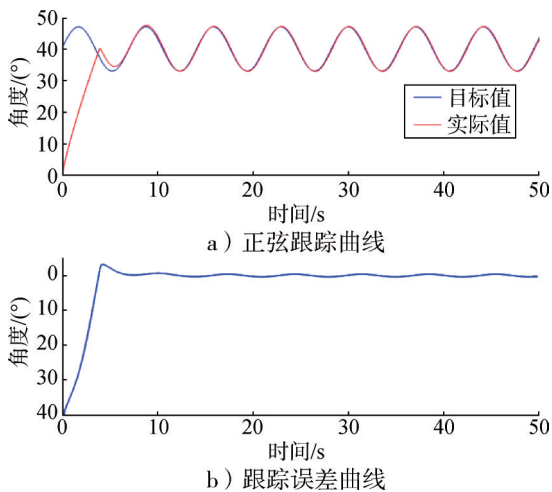


图10 正弦响应曲线(幅值7°,周期7s)

Fig.10 Sinusoidal response curve (amplitude 7°, period 7s)

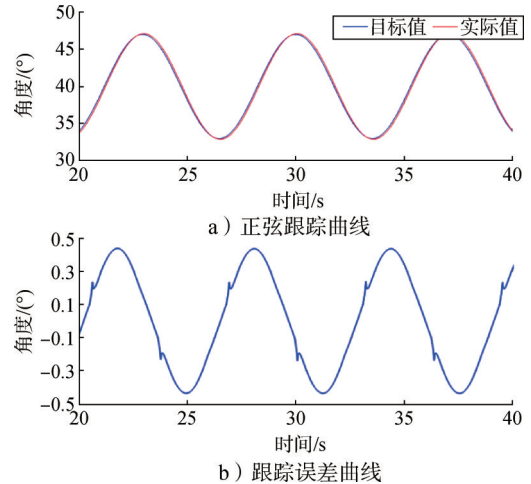


图11 正弦响应曲线(幅值7°,周期7s)

Fig.11 Sinusoidal response curve (amplitude 7°, period 7s)

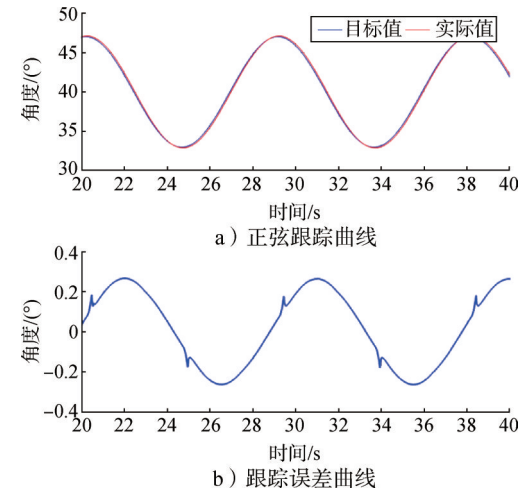


图12 正弦响应曲线(幅值7°,周期9s)

Fig.12 Sinusoidal response curve (amplitude 7°, period 9s)

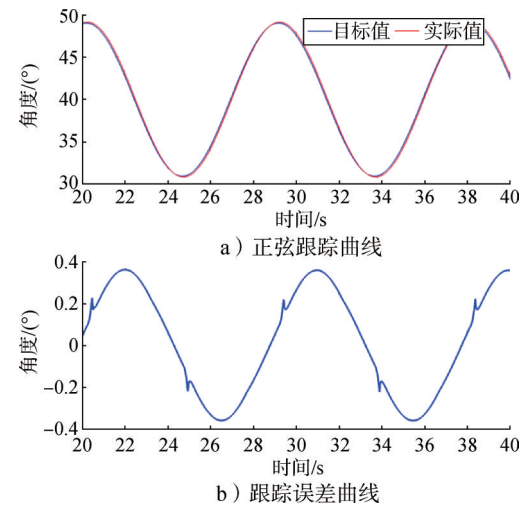


图13 正弦响应曲线(幅值9°,周期9s)

Fig.13 Sinusoidal response curve (amplitude 9°, period 9s)

由仿真结果可以得到如下结论：

a) 在3种跟踪工况下，设计的自抗扰控制器均可

以获得良好的指令曲线跟踪效果，系统具有较好的动态跟踪性能与稳态跟踪精度，验证了经由粒子群优化算法整定得到的一套自抗扰控制器参数对此舰载武器平台系统具有较好的适应性。

b) 舰载平台起竖系统在随动过程中，俯仰角度跟踪曲线存在一定的相位滞后，从而产生一定的跟踪误差，由结果可知，当跟踪曲线为幅值 7° 、周期 7 s 正弦曲线时，跟踪误差峰值约为 0.44° ，当跟踪曲线为幅值 7° 、周期 9 s 正弦曲线时，跟踪误差峰值约为 0.27° ，当跟踪曲线为幅值 9° 、周期 9 s 正弦曲线时，跟踪误差峰值约为 0.36° ，均满足系统俯仰方向随动误差不大于 $60'$ 的指标要求；同时对比分析可得对于目标正弦曲线，更小的正弦幅值或正弦频率，相应的系统有更小的相位滞后及跟踪误差。

c) 仿真系统中引入了减速机齿隙等非线性因素，因此在起竖系统速度方向发生变化时，运动存在空行程，从而导致系统发生抖动，体现为误差曲线出现轻微的毛刺。

3.4 试验验证分析

本文在已有舰载平台试验样机的基础上进行了自抗扰控制器的随动控制验证试验。试验选取幅值 9° 、周期 9 s 的正弦曲线作为目标跟踪曲线，在 40° 起竖角附近进行随动控制。依据试验数据绘制试验结果曲线如图14所示，图15~16是对图14曲线的局部放大结果。

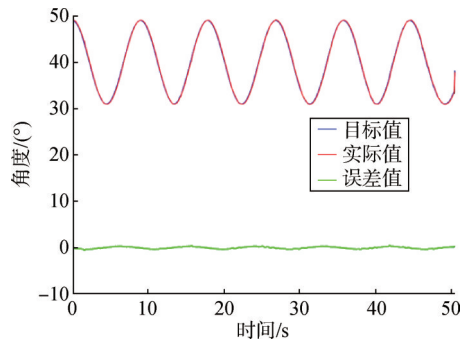


图14 随动试验结果

Fig.14 Performance of following experiment

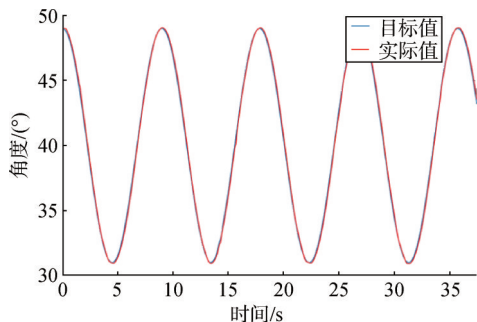


图15 正弦响应试验曲线

Fig.15 Sinusoidal response curve of experiment

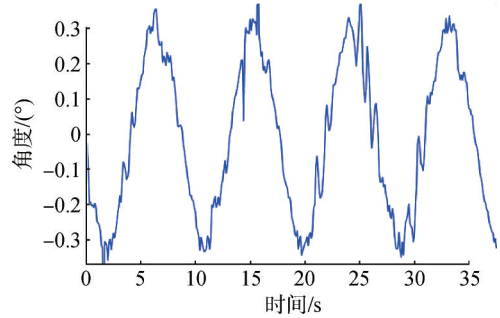


图16 跟踪误差曲线

Fig.16 Tracking error curve

由图14可知，试验结果与仿真结果具有较好的吻合度，系统具有良好的动态性能及稳态精度，可平稳且快速地对目标起竖角度进行跟踪。同时由于实际试验平台系统传感器在数据采集时不可避免地引入了测量噪声，故而实际跟踪曲线存在更多的毛刺。

4 结束语

本文设计了自抗扰控制器用于舰载平台随动系统，实现了舰载平台在复杂海况下隔离舰船摇摆运动的快速伺服控制；利用粒子群算法优化控制器参数，解决了自抗扰控制器参数快速整定的难题；通过仿真分析和样机试验验证了控制器在优化控制系统动态响应以及抑制外部干扰的控制能力，同时验证了整定的参数的高适应性，设计的自抗扰控制器具有在舰载平台的实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] 辛松. 舰载多管火箭发射动力学相关问题研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
XIN Song. Research on launch dynamics of shipborne multiple rocket launchers[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [2] 鲍晓华. 两自由度舰载并联稳定平台的设计与仿真研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.
BAO Xiaohua. Design and simulation of two-degree-of-freedom shipborne parallel stabilization platform[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.
- [3] 史普帅. 基于舰载稳定平台的伺服控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
SHI Pushuai. Research on servo control system based on shipborne stabilized platform[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [4] 王石静, 杨明, 董浩. 考虑摩擦特性的稳定平台变结构控制研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(5): 332-335.
WANG Shijing, YANG Ming, DONG Hao. Research on variable

- structure control of stable plateau considering friction characteristics[J]. Computer Simulation, 2009, 26(5): 332-335.
- [5] 许叙遥. 滚转稳定伺服平台动态滑模控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- XU Xuyao. Research on dynamic sliding mode control of roll stabilized servo platform[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [6] 王瑞明, 蒋静坪. 交流伺服驱动系统模糊自适应控制研究[J]. 控制与检测, 2005(8): 34-36.
- WANG Ruiming, JIANG Jingping. Research on fuzzy adaptive control of AC servo drive system[J]. Control and Detection, 2005(8): 34-36.
- [7] 任如意. 基于时间尺度分析的船舶舵减摇系统在路径跟踪中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- REN Ruyi. Application of ship rudder anti-roll system in path following based on time-scale analysis[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2016.
- [8] 徐明. 摇摆载荷作用下舰载固体发动机界面老化分析研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2008.
- XU Ming. Research on interface aging analysis of shipborne solid engine under sway load[D]. Yantai: Naval Aeronautical and Astronautical Engineering College, 2008.
- [9] 方书申. 海军武器装备与海战场环境概论[M]. 北京: 海军出版社, 2007.
- FANG Shushen. Introduction to naval weapons and equipment and naval battlefield environment[M]. Beijing: Navy Press, 2007.
- [10] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
- HAN Jingqing. Active disturbance rejection controller and its application[J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.
- [11] 于文龙. 时滞系统的自抗扰控制设计及参数稳定域分析[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- YU Wenlong. Design of active disturbance rejection control and parameter stability domain analysis of time-delay system[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [12] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [13] 袁德祥. 基于自抗扰控制技术的AUV运动控制的研究与仿真[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- YUAN Dexiang. Research and simulation of AUV motion control based on active disturbance rejection control technology[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [14] 谢元平. 改进粒子群优化算法的研究及其在控制系统设计中的应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
- XIE Yuanping. Research on improved particle swarm optimization algorithm and its application in control system design[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011.
- [15] 章恩泽. 多目标粒子群优化算法及其应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- ZHANG Enze. Research on multi-objective particle swarm optimization algorithm and its application[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.

作者简介

- 张 杨 (1996—), 男, 工程师, 主要研究方向为信息与控制工程。
- 王志勇 (1982—), 男, 研究员, 主要研究方向为信息与控制工程。
- 王 缜 (1962—), 男, 研究员, 主要研究方向为控制工程。
- 姜宗民 (1994—), 男, 工程师, 主要研究方向为信息与控制工程。