

自抗扰技术在船载天线伺服系统中的应用研究

贾建辉¹, 汪 洋¹, 曾铖璐², 张 雪¹, 崔慧敏¹

(1 北京遥测技术研究所 北京 100094

2 中国酒泉卫星发射中心 酒泉 736200)

摘要: 为减小船摇扰动对船载天线伺服系统指向及跟踪精度的影响, 引入线性自抗扰控制器 (LADRC) 对伺服系统位置环进行改进。首先对天线伺服系统模型进行简要分析, 建立系统状态空间方程; 然后利用 LADRC 对系统进行改进, 并对其参数设计进行了详细介绍, 同时为提高系统动态跟踪性能, 利用 TD 微分器提取目标速度信息进行前馈补偿; 最后经实验测试验证, LADRC 相对于传统 PID 控制器能够保持天线伺服系统动态性能不下降, 同时有效提高系统的抗船摇性能。

关键词: 船摇扰动; LADRC; 参数整定; TD 微分器; 伺服系统

中图分类号: TP275 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2020)06-0069-07

Study and application of active disturbance rejection control technology in ship borne antenna servo system

JIA Jianhui¹, WANG Yang¹, ZENG Chenglu², ZHANG Xue¹, CUI Huimin¹

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China;

2. Jiu Quan Satellite Launch Center in China, Jiuquan 736200, China)

Abstract: To reduce the influence of ship shake disturbance on tracking and pointing accuracy of ship borne antenna servo system, LADRC is used to modify the position loop of servo system. Firstly, the antenna servo system model is briefly analyzed and the state space equation is established. Then the system is improved by using LADRC, and its parameter design is introduced in detail. At the same time, in order to improve the dynamic tracking performance of the system, TD differentiator is used to extract the target velocity information for feedforward compensation. Finally, it is verified by experimental tests that compared with the traditional PID controller, LADRC can keep the dynamic performance of the antenna servo system from declining, and effectively provide its anti-ship shaking disturbance performance.

Key words: Ship shaking disturbance; LADRC; Parameter tuning; TD differentiator; Servo system

引 言

船载天线伺服系统是无线电测控系统的重要组成部分。由于天线波束有宽度限制, 因此, 执行任务时必须保证飞行目标始终处于天线波束内, 且有一定的精度要求。随着测控频段越来越高, 天线波束越来越窄, 对天线伺服系统的要求更高, 而船载天线伺服系统跟踪目标过程中存在齿隙、摩擦、风、船摇等扰动因素, 严重影响伺服系统的跟踪及指向精度, 其中, 船摇影响最为严重。目前, 天线伺服系统的控制器普遍采用 PID 控制器, 传统 PID 算法存在对控制增益敏感、“快速性”和“超调性”不可调和以及微分很难选取等缺点^[1], 且其抗扰性能有限, 往往难以满足船载天线伺服系统的精度要求。为提高天线伺服系统隔离船摇能力, 常采用的方法是加装速率陀螺, 把敏感的船摇速度信息折算到天线轴上, 然后进行船摇前馈补偿^[2], 这增加了系统的复杂度。另外, 速率陀螺与天线座一体, 属于室外设备, 增加了设备故障的风险。为减轻系统复杂度、提高设备可靠性, 同时降低经济成本, 进行算法策略的研究设计来提高天线伺服系统隔离船摇能力成为一个有意义的课题。

自抗扰控制器 ADRC (Active Disturbances Rejection Controller) 是中科院韩京清研究员提出的一

种新型非线性鲁棒控制器, 它发扬了 PID 控制技术的精髓并吸取现代控制理论的成就, 相对 PID 控制器具备更好的抗扰性能^[3]。但 ADRC 的不足之处是需要调节的参数较多且算法复杂, 限制了其应用。美国克利夫兰州立大学高志强教授在 ADRC 基础上, 提出了线性自抗扰控制 LADRC (Linear ADRC) 方法, 便于工程实现, 极大地促进了自抗扰控制技术的实践和应用^[4]。但是 LADRC 控制器的最主要目标是面向工厂的工程应用^[5], 其功能主要是抗扰, 而天线伺服系统除抗扰需求外, 还需要具备较高的动态响应能力, LADRC 控制器应用时需要进一步改进。本文通过改进的 LADRC 控制器取代传统的 PID 控制器, 仅通过软件算法就可以使天线伺服系统达到较高的隔离船摇能力, 而自抗扰技术的特点决定了它不仅能够减小船摇扰动对伺服系统的影响, 同时, 也能对伺服系统内的其他扰动因素进行抑制。另外, 船摇扰动作为一种便于测量的扰动信息, 可以定量地对自抗扰控制技术的抗扰效果做出判定, 对自抗扰技术的推广应用也起到一定促进作用。

1 天线伺服系统模型简介

天线伺服系统属于三闭环系统, 从内到外依次为位置环、速度环和电流环。为便于分析, 把速度环和电流环合并为速度环闭环环节, 进而等效为一阶惯性环节, 其传递函数如公式 (1) 所示。

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \tag{1}$$

其中, K 为速度环闭环增益, T 为速度环时间常数, 然后在前向通道上串联位置环 PID 调节器、积分环节, 进而形成角度反馈系统, 即天线伺服系统, 如图 1 所示。图中, $w(t)$ 为船摇在天线轴上的扰动, θ 为大地指令角, e 为角度残差, u 为速度指令, v 为天线速度, J 为实时角, y 为船摇扰动下的实时角。当天线指向固定时, 若无船摇扰动, 天线稳定时 $e=0$, 使天线指向固定角, 通过分析 e 可以判断系统隔离船摇的能力。

把图 1 中的船摇扰动移动到积分环节前端, 图 1 可转换为图 2 形式, 其中, x_1 为实时角, x_2 为叠加船摇扰动后的天线速度, 然后构建天线伺服系统的状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{T} \cdot x_2 + \frac{1}{T} \cdot \dot{w} + \dot{w} + \frac{K}{T} u \\ y = x_1 \end{cases} \tag{2}$$

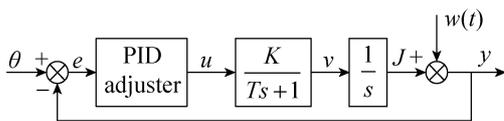


图 1 天线伺服系统结构
Fig. 1 Antenna servo system

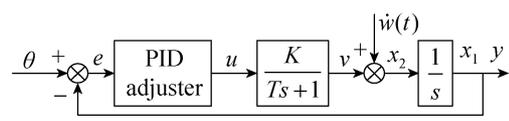


图 2 基于图 1 的等效变换
Fig. 2 Equivalent transformation of fig. 1

2 线性自抗扰控制器设计

自抗扰控制通过扩张状态观测器, 实时估计并及时补偿系统内部和外部扰动的总和, 进而把存在外部扰动输入、模型不确定性和非线性的被控对象还原成标准的积分串联型^[6]。文献[7]提出了基于线性状态观测器的线性自抗扰控制器, 如图 3 所示, 简化了参数设计及调试的难度, 推动了自抗扰技术在实际工程中的应用, 后续所述的 LADRC 均为图 3 所示形式。

利用 LADRC 技术对图 2 中的 PID 调节器及反馈支路进行修改, 形成自抗扰策略控制下的天线伺服系统, 如图 3 所示, 其中, k_p 、 k_d 、 b_0 为常数, LESO 为线性扩张状态观测器, 是 LADRC 设计的核心, LESO 通过对被控对象输入输出进行观测, 提取出状态变量 x_1 、 x_2 及系统内综合扰动项的观测值 z_1 、 z_2 、 z_3 , 然后构建反馈进行补偿。能否准确地从扩张状态观测器中提取系统状态、模型和外扰的实

时作用量，对整个控制器的品质至关重要。

令 $f(x_1, x_2, \omega, t) = -1/T \cdot x_2 + 1/T \cdot \dot{w} + \dot{w}$, $b_0 = K/T$, 则公式 (2) 等效为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, \omega, t) + b_0 u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (3)$$

令扩张的状态 $x_3 = f(x_1, x_2, \omega, t)$, $\dot{x}_3 = \omega$, 形成扩张系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0 u \\ \dot{x}_3 = \omega(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4)$$

根据自抗扰相关理论构建线性扩张状态观测器 (LESO)

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 e_1 + b u \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 e_1 \end{cases} \quad (5)$$

选取合适的观测器增益 β_1 、 β_2 、 β_3 , 则 z_1 、 z_2 、 z_3 能分别实现对公式 (4) 中变量 x_1 、 x_2 、 x_3 的实时跟踪。

根据图 3 , 可以得出

$$\begin{cases} \ddot{y} = \dot{x}_1 = x_3 + b_0 \cdot (-z_3 + u_0) / b_0 = u_0 \\ u_0 = k_p \cdot (\theta - z_1) - k_d \cdot z_2 = k_p \cdot (\theta - y) - k_d \cdot \dot{y} \end{cases} \quad (6)$$

进而得出图 3 对应的系统闭环及开环传递函数为

$$\begin{cases} G_c = \frac{k_p}{s^2 + k_d s + k_p} \\ G_o = \frac{k_p}{s(s + k_d)} \end{cases} \quad (7)$$

根据公式 (7) 可以看出, 天线伺服系统经 LADRC 改进后形成了 I 型二阶系统, 其跟踪等速信号有固定静差且不能跟踪加速度信号, 而天线伺服系统的输入信号为机动信号, 根据目标距离天线远近, 其速度及加速度信号均呈变化趋势, 所以, 上述的 LADRC 控制器不能满足天线伺服系统的应用需求。

通过 TD 微分器提取输入速度信号, 然后前馈至系统中, 实现对图 3 所示 LADRC 控制器进行改进, 形成如图 4 所示的 TD+LADRC 控制器。

结合公式 (6), 可以得出

$$\dot{y} = k_p \cdot (\theta - y) + k_d \cdot (\dot{\theta} - \dot{y}) \quad (8)$$

对应的闭环及开环传递函数为

$$\begin{cases} G_c = \frac{k_d s + k_p}{s^2 + k_d s + k_p} \\ G_o = \frac{k_d s + k_p}{s^2} \end{cases} \quad (9)$$

根据公式 (9) 可以得出, 图 4 对应的系统为 II 型二阶系统, 对动态输入信号有更好的跟踪能力,

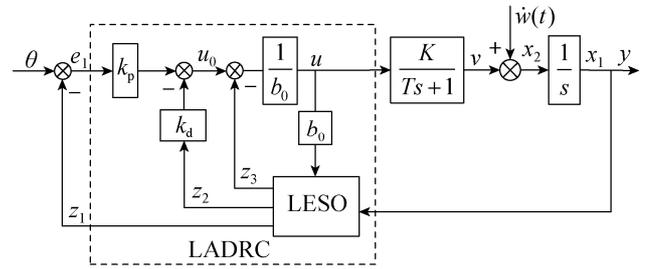


图 3 采用 LADRC 策略的伺服系统结构框图

Fig. 3 Block diagram of antenna servo system using LADRC strategy

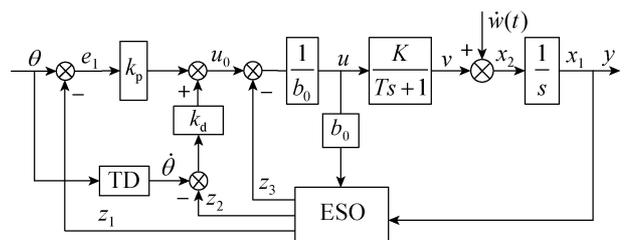


图 4 采用 TD+LADRC 策略的伺服系统结构

Fig. 4 Block diagram of antenna servo system using TD+LADRC strategy

此处为简化设计, 微分信号的提取采取简单的线性 TD 微分器, 实际应用中为使微分信号更准确, 噪声更低, 可采用卡尔曼滤波器进行微分信号提取^[9]。

3 控制器参数设计及分析

参数设计是自抗扰控制器的设计难点, 文献[9]至文献[12]对线性自抗扰控制的参数设计均有详细论述。根据前文分析, 线性自抗扰控制器涉及的参数包括 k_p 、 k_d 、 b_0 、 β_1 、 β_2 、 β_3 , 结合被控对象, 涉及的参数还包括速度环闭环增益 K 和速度环时间常数 T 。

设速度环输入指令 u 的单位为 $^\circ/s$, 则 $K=1$, 由于一阶惯性环节的时间常数与其单位阶跃上升时间满足 $t=2.2T$ 关系^[13], 通过速度环阶跃测试可以得出 T , 进而可得出 $b_0=K/T$ 。

自抗扰控制抗扰动的本质是通过扩张状态观测器, 观测出系统中扰动量, 然后进行扰动补偿。结合图 3, 通过 z_2 、 z_3 补偿的量为

$$\begin{cases} z_2 / b_0 = k_d T x_2 \\ z_3 / b_0 = -x_2 + \dot{w} + T \ddot{w} \end{cases} \quad (10)$$

从上述可以看出, 通过 z_3 补偿量中包括扰动的速度及加速度, 且补偿系数与扰动的前馈补偿系数相同, 消除公式 (10) 中的 $-x_2$ 即可认为自抗扰实现了扰动的速度及加速度补偿。

令 $k_d=1/T$, 通过 z_2+z_3 , 即可消除公式 (10) 中的 $-x_2$ 分量, 此时近似于原 PID 控制策略下的比例控制, 通过在 $1/T$ 附近调整 k_d , 即可实现 PD 控制。

根据文献[9]分析, 系统带宽及观测器带宽对系统的稳定性、抗扰特性、鲁棒性及噪声抑制能力等具有重要的影响, 且两者可以独立调整。根据文献[10]所述的系统带宽 ω_c 、LESO 带宽 ω_0 分别与 LADRC 参数的关系可进行下一步设计。

设图 3 对应系统带宽为 ω_c , 则 $k_d=2\xi\omega_c$, $k_p=\omega_c^2$, 令 $\xi=0.7\sim 1.0$, 即可以求出 k_p 、 ω_c 。

令 LESO 带宽为 ω_0 , β_1 、 β_2 、 β_3 与扩张状态观测器带宽满足以下关系

$$\beta_1 = 3\omega_0, \beta_2 = 3\omega_0^2, \beta_3 = 3\omega_0^3 \quad (11)$$

经大量实验验证, $\omega_0=(2.5\sim 3.5)\omega_c$ 较为合适, ω_0 取值过小, 会导致观测误差较大, 抗扰能力差; 取值过大, 易引入高幅值噪声, 造成天线运行抖动。

至此, LADRC 参数设计完毕。

4 测试及验证

为考核采用自抗扰控制器的天线伺服系统性能, 在某波束宽度为 0.2° 的舰载测控系统上进行了 PID 策略与自抗扰策略下系统船摇隔离能力对比试验和不同观测器带宽下的船摇隔离试验, 同时对系统动态跟踪能力进行了测试。

4.1 抗船摇能力测试

LADRC 设计完毕后, 为验证改造后系统隔离船摇扰动的效果, 进行了 PID 与 LADRC 控制器的抗扰对比实验。具体方法为天线指向固定大地角, 同时在系统中输出端添加周期为 10s, 幅度为 6° 的正弦波模拟船摇, 然后记录系统残差, 测试结果如图 5 所示, 系统采用 PID 控制策略时系最大残差为 0.08° , 采用自抗扰控制策略时系统

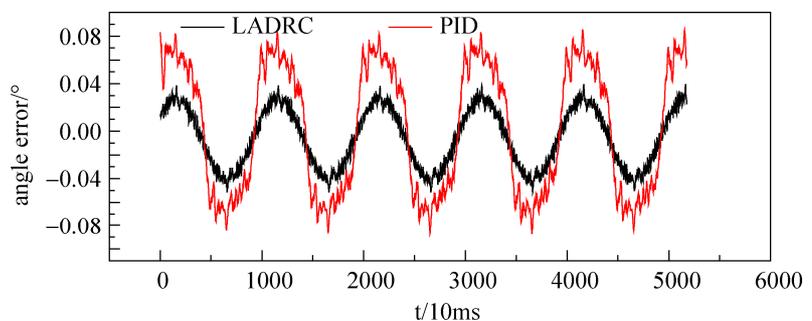


图 5 PID 与 LADRC 控制策略下的系统船摇残差对比
Fig. 5 Comparison of ship shaking angle residual under PID strategy and LADRC strategy

最大残差为 0.04°。

为验证在真实船摇下自抗扰技术的可用性，在真实船摇下进行了相关测试，由于测试现场船摇幅度较小，只进行了定性测试，不再分析具体数据，测试结果如图 6 所示。从图中可以看出，在实际系统中自抗扰技术有更好的抗船摇效果，自抗扰技术能够在真实扰动环境下应用。

4.2 观测器带宽对自抗扰控制器抗扰效果影响分析

为验证扩张状态观测器 LESO 带宽对自抗扰控制器抗扰效果影响，在 4.1 所述的基础上分别进行了 $\omega_0=\omega_c$ 、 $\omega_0=3\omega_c$ 、 $\omega_0=5\omega_c$ 时的三组抗船摇实验，当 $\omega_0=\omega_c$ 时，测试结果如图 7 所示，在周期 6°、幅值 10s 的正弦船摇扰动下，最大船摇残差达 0.25°，超出天线波束宽度，不能满足要求；当 $\omega_0=3\omega_c$ ，测试效果如图 6 所示，最大船摇残差为 0.04°；当 $\omega_0=5\omega_c$ ，由于系统内噪声过高，天线抖振，不再进行数据分析。

经实验测试验证，LESO 带宽 ω_0 相对于控制器带宽 ω_c 不能过低或者过高，必须保持一种合理的比例关系，经后续多次补充实验， $\omega_0=(2.5\sim 3.5)\omega_c$ 较为合理。

4.3 LADRC 动态跟踪能力测试

为验证线性自抗扰控制器的动态跟踪能力，在系统输入端添加周期为 20s，幅值为 15°的正弦信号，图 8 为 PID 控制策略下的测试曲线，系统跟踪均方差为 0.04°，最大跟踪角误差为 0.08°；图 9 为不添加 TD 微分器进行前馈的 LADRC 测试曲线，系统跟踪均方差为 0.52°，最大跟踪角误差为 0.73°，不满足船载天线伺服系统的动态跟踪指标。

经实验测试验证，LADRC 控制器跟踪动态目标具有较大的偏差，这与 LADRC 控制器把原系统改造为 I 型二阶系统相

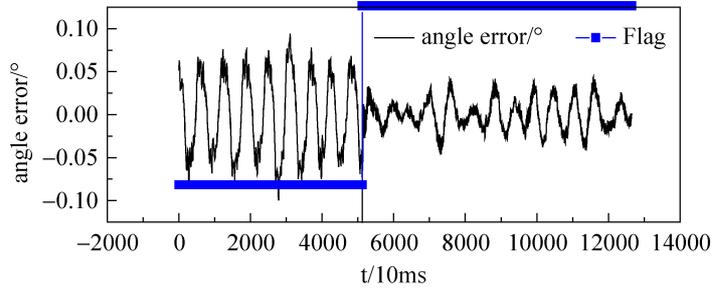


图 6 真实船摇下 PID 与 LADRC 控制策略下的系统船摇残差比对

Fig. 6 Comparison of actual ship shaking angle residual under PID strategy and LADRC strategy

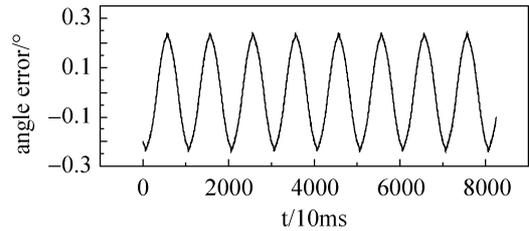


图 7 $\omega_0=\omega_c$ 时，LADRC 控制策略下系统船摇残差曲线

Fig. 7 When $\omega_0=\omega_c$, ship shaking angle residual curve under LADRC strategy

表 1 不同观测器带宽下的抗船摇测试结果

Table 1 Test results of ship roll isolation under different observer bandwidth

序号	类型	ω_0	输入	船摇扰动	最大跟踪残差 (°)
1	PID	无效	固定值	6°、10s 正弦	0.08°
2	LADRC	15	固定值	6°、10s 正弦	0.23°
3	LADRC	40	固定值	6°、10s 正弦	0.04°

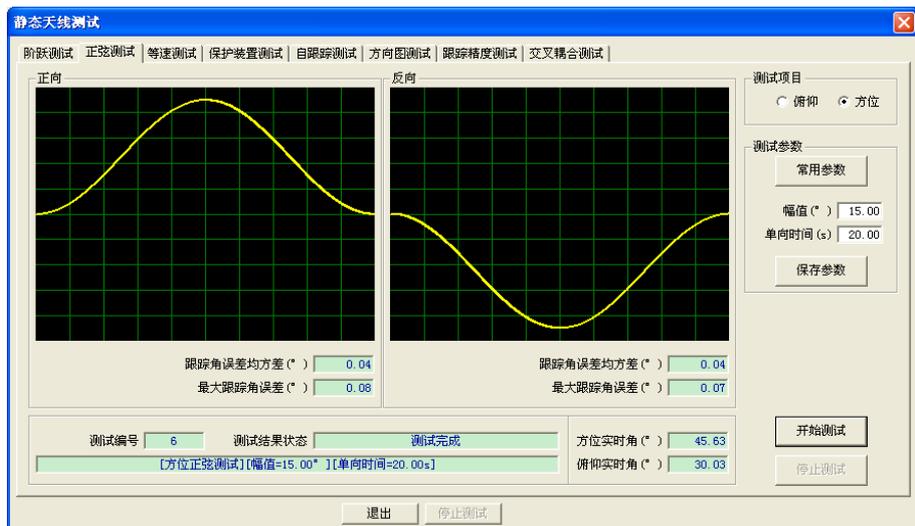


图 8 PID 控制策略系统正弦测试

Fig. 8 Sinusoidal test under PID strategy

符, 要想在车载天线伺服系统中采用线性自抗扰技术, 必须对 LADRC 进行改进。

4.4 TD+LADRC 动态跟踪能力测试

根据前文分析, 采用 LADRC 控制器, 天线伺服系统被改造为 I 型二阶系统, 其跟踪等速信号尚有静差, 不能跟踪加速度信号, 而正弦信号为变加速信号, 所以其跟踪偏差较大。通过在上述线性自抗扰控制器中添加 TD 微分器, 形成 TD+LADRC 控制器, 把天线伺服系统改造为 II 型二阶系统, 提高系统型别, 提高了系统动态跟踪能力。

通过 TD +LADRC 控制器对系统进行改造后, 测试结果如图 10 所示, 系统跟踪均方差为 0.03° , 最大跟踪角误差为 0.07° , 由此可知, 添加了 TD 微分器的 LADRC 控制器与 PID 控制器的在跟踪动态信号时效果一致。

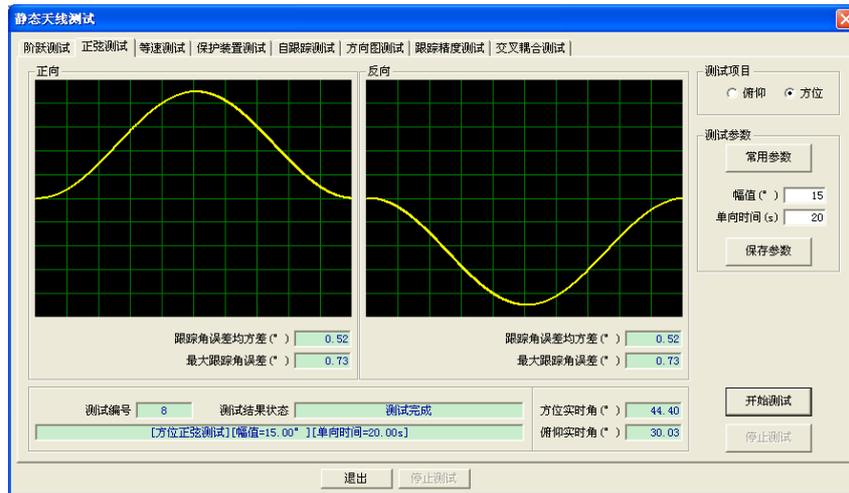


图 9 LADRC 控制策略系统正弦测试
Fig. 9 Sinusoidal test under LADRC strategy

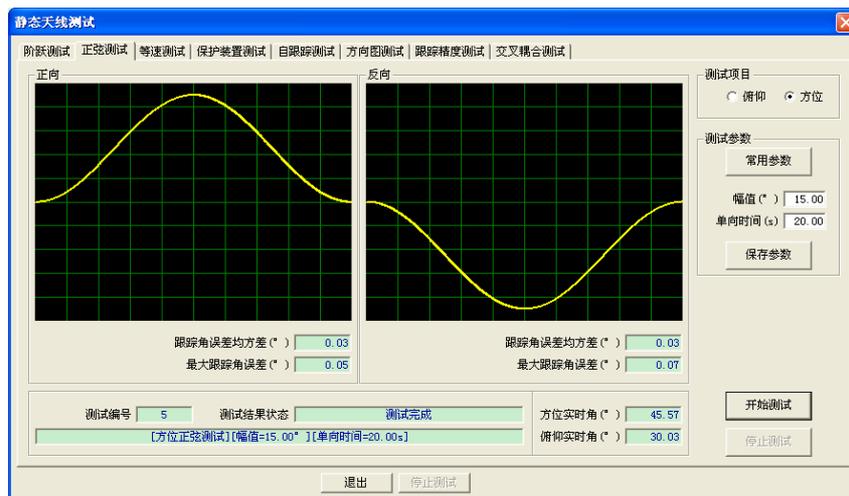


图 10 TD+LADRC 控制策略下系统正弦测试
Fig. 10 Sinusoidal test under TD+LADRC strategy

5 总结

本文详细介绍了 LADRC 控制器在车载天线伺服系统的设计及实现原理, 提供了具体的参数设计方法, 同时在 LADRC 基础上添加 TD 微分器进行输入信号速度补偿, 提高了系统型别, 使得 LADRC 同时具有较好的动态跟踪和抗扰动性能, 并通过实验对其进行了验证, 结果表明, LADRC 技术比 PID

控制策略具有更好的抗扰性能,对LADRC进行适当改进后,能达到甚至超过PID控制器的动态响应能力,具有很好的应用前景。后续可针对TD微分器进行改进,采用更有效的策略提取目标速度。另外,非线性自抗扰控制在船载天线伺服系统的应用也值得进一步研究。

参考文献

- [1] 金亮亮, 杨瑗霞, 刘亚云. 线性自抗扰控制在雷达伺服系统应用[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(5): 567-570.
JIN Liangliang, YANG Aixia, LIU Yayun. Application of linear auto disturbance rejection control in radar servo system[J]. Radar Science and Technology, 2017, 15(5): 567-570.
- [2] 吴昊, 邢云龙, 马红涛. 船载伺服系统船摇隔离算法设计研究[J]. 制造技术研究, 2016(6): 48-50, 59.
WU Hao, XING Yunlong, MA Hongtao. Design and research on ship shake feedforward arithmetic of shipborne servo system[J]. Research on Manufacturing Technology, 2016(6): 48-50, 59.
- [3] 韩京清. 自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [4] 陈增强, 程贻, 孙明伟, 等. 线性自抗扰控制理论及工程应用的若干进展[J]. 信息和控制, 2017, 46(3): 257-263.
CHENG Zengqiang, CHEN Bin, SUN Mingwei, et al. Surveys on theory and engineering applications for linear active disturbance rejection control[J]. Information and Control, 2017, 46(3): 257-263.
- [5] 朱斌. 自抗扰控制入门[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017.
- [6] 陈上上, 何英姿, 刘贺龙. 线性自抗扰控制系统的鲁棒稳定性[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(5): 662-668.
CHEN Shangshang, HE Yingzi, LIU Helong. On robust stability of linear active disturbance rejection control system[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(5): 662-668.
- [7] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]. IEEE Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003: 4989-4996.
- [8] 赵增基, 李俊峰, 梁宝生, 等. 卡尔曼滤波器和跟踪微分器在光电跟踪系统中的应用[J]. 火力与控制研究, 2016, 41(10): 174-176.
ZHAO Zengji, LI Junfeng, LIAN Baosheng, et al. Research of Kalman filter and tracking-differentiator in forward feedback control of photoelectric tracking system[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(10): 174-176.
- [9] 纪恩庆, 肖维荣. 二阶自抗扰控制器的参数简化[J]. 自动化仪表, 2008, 28(5): 27-31.
JI Enqing, XIAO Weirong. Parameters simplification of two-order auto-disturbance rejection controller[J]. Process Automation Instrumentation, 2008, 28(5): 27-31.
- [10] 梁青, 王传榜, 潘金文, 等. 线性自抗扰控制参数 b_0 辨识及参数整定规律[J]. 控制与决策, 2015, 30(9): 1691-1695.
LIANG Qing, WANG Chuanbang, PAN Jinwen, et al. Linear active disturbance rejection control parameter identification frequency analysis robustness[J]. Control and Decision, 2015, 30(9): 1691-1695.
- [11] 袁东, 马晓军, 曾庆含, 等. 二阶系统线性自抗扰控制器频带特性与参数配置研究[J]. 控制理论与应用, 2013, 12(30): 1630-1640.
YUAN Dong, MA Xiaojun, ZENG Qinghan, et al. Research on frequency-band characteristics and parameters configuration of linear active disturbance rejection control for second-order systems[J]. Control Theory & Applications, 2013, 12(30): 1630-1640.
- [12] CHEN Xing, LI Donghai, GAO Zhiqiang, et al. Tuning method for second-order active disturbance rejection control[C]//Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, 2016.
- [13] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[作者简介]

- 贾建辉 1987年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为伺服总体设计。
汪 洋 1987年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为伺服软件设计。
曾铖璐 1983年生, 本科, 工程师, 主要研究方向为无线电遥测遥控
张 雪 1987年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为伺服软件设计。
崔慧敏 1990年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为控制算法设计。