

# 基于非线性伪微分的稳定平台自抗扰控制

王仁臻 吉书鹏

(中国空空导弹研究院 洛阳 471009)

**摘要:** 为了进一步提高稳定平台的抗干扰能力,首次采用非线性误差反馈 NLEF、伪微分负反馈 PDFF 和 ADRC 相结合,形成算法形式较为简单的 NLE\_PDFF\_ADRC 控制器。建立了稳定平台的等效扰动数学模型,设计了 NLE\_PDFF\_ADRC 控制器;对首次提出的 NLE\_PDFF 控制器在飞行器模拟转台上对 3~5 Hz、188~314(°)/s 载体正弦速度扰动作用,测试其抗扰动的性能。实验结果表明,对比传统的平方 PI 控制器,采用 NLE\_PDFF\_ADRC 控制器,系统的扰动隔离度在 3~5 Hz 提高 30%。该控制器成功应用于某型稳定平台中,经充分考核,验证了其有效性。

**关键词:** 稳定平台;非线性伪微分;扩展状态观测器;自抗扰;滑模变结构;隔离度

**中图分类号:** TP273; TN97 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.30

## ADRC based on nonlinear PDFF of stabilized platform

Wang Renzhen Ji Shupeng

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** In order to improve isolation degree of disturbance, a new ADRC based on NLE\_PDFF feedback was proposed. Firstly, Mathematical model for precision analysis was formulated to evaluate the performance of the presented approach. And then, the NLE\_PDFF\_ADRC controller was designed. Finally, An experiment was performed to test the disturbance rejection of the NLE\_PDFF\_ADRC controller when the speed disturbance was from 3 to 5 Hz as compared with the traditional square PI compensation method. The results show that NLE\_PDFF\_ADRC can reduce the disturbance error 30%. The algorithm has been successfully applied to a stabilized platform.

**Keywords:** stabilized platform; NLE\_PDFF; ESO; ADRC; VSC; isolation degree

## 0 引言

稳定平台被广泛应用于各种先进武器中,其中在光电稳瞄准吊舱实现对目标的精确指向和对准。稳定平台大多采用力矩电机直接驱动,故动载体对稳定平台速度回路的影响将更为直接<sup>[1]</sup>。目前仍然采用提高低频增益的“被动抗扰”的思想来提高扰动隔离度。然而,稳定平台的开环剪切频率被机械谐振频率和谐振峰值所限制,采用经典的控制器,稳定平台的低频增益很难进一步提高,单纯采用经典的比例-积分校正难以进一步提高航空光电平台惯性稳定性能<sup>[2]</sup>。采用现代控制理论设计控制器,进行工程应用时存在难度大、计算量大、成本高等问题<sup>[3]</sup>。与之相比,自抗扰控制技术(active disturbance rejection control, ADRC)采用“主动抗扰”思想、控制器简便,不需稳定平台精确模型,基于从控制器输出和稳定平台输出估计稳定平台收到的总和扰动,并对稳定平台进行实时补偿<sup>[4]</sup>。

黄浦等人<sup>[5]</sup>将自抗扰控制技术应用到稳定平台中,在不采用积分控制的前提下实现了位置和速度的零稳态误差。李嘉全等人<sup>[6]</sup>在闭环控制系统中引入了扰动估计和补偿来改善光电稳定平台低速性能,对于 1 Hz、6.3(°)/s 的载体正弦速度扰动,平台的扰动隔离度相对 PI 控制提高了约 14 dB。张钊等人<sup>[7]</sup>为提高稳定平台速度稳定精度,提出基于扩展状态观测器实时对系统综合扰动量进行观测并予以补偿,以提高稳定平台速度稳定精度及平滑度。李贤涛等人<sup>[8]</sup>,提出一种基于电流环的自抗扰控制新方法以进一步提高航空光电稳定平台的抗干扰能力。对 2.5 Hz 以内任意频率扰动的抑制能力,相对平方滞后超前校正扰动隔离度至少提高了 6.56 dB。李贤涛等人<sup>[9]</sup>,提出一种基于扰动频率自适应的自抗扰控制新方法,以 2.5 Hz 以内任意频率扰动,相对平方滞后超前校正扰动隔离度至少提高了 6.72 dB。刘翔等人<sup>[10]</sup>提出了一种将包含了非线性跟踪微分器、扩张状态观测器、非线性状态误差反馈 3 个环节的结

构完整的自抗扰控制器。金翔等人<sup>[11]</sup>通过跟踪微分器实现了平台给定位置的快速稳定跟踪;非线性扩张观测器能进行平台运动位置、速度和系统扰动的估计,通过非线性反馈控制对系统总扰动进行补偿,实现了平台定位的精确控制。杨晓霞等人<sup>[12]</sup>设计了3个扩张状态观测器分别估计速度环和电流环的总扰动,进而设计出具有扰动前馈补偿和误差反馈律相结合的复合控制器。王婉婷<sup>[13]</sup>利用三阶非线性扩张观测器估计系统状态变量,实现对不确定性因素的补偿,提高系统精度。魏永清等人<sup>[14]</sup>在系统模型参数变化等引起的不确定性干扰下有效提高了伺服系统的鲁棒性。姚志英等人<sup>[15]</sup>验证了自抗扰解耦控制器的性能优于PID控制器,可以较好地估计和补偿系统的内部和外部扰动。

上述文献提出的自抗扰控制器均只对2.5、15.7(°)/s以内载体正弦速度扰动进行了提升和实验测试,但是对3~5 Hz、188~314(°)/s载体正弦速度扰动尚无自抗扰控制方面的文献。本文针对3~5 Hz、188~314(°)/s以上载体正弦速度扰动下隔离度提升,首次采用非线性误差反馈NLEF、伪微分负反馈PDFF<sup>[12]</sup>和ADRC<sup>[13]</sup>相结合,形成算法形式较为简单的NLE\_PDFF\_ADRC控制器,并完成该控制器在某型稳定平台上的工程应用研究和测试,实现对稳定平台3~5 Hz扰动隔离度的提升。

### 1 稳定平台数学模型

本文的研究对象为某型稳定平台,它采用电机直驱和惯性空间陀螺测速。为了回避对各种干扰复杂的建模过程,本文对稳定平台进行建模时,采用“等效总和扰动”代替系统中的各种扰动,其作用原理如图1所示。

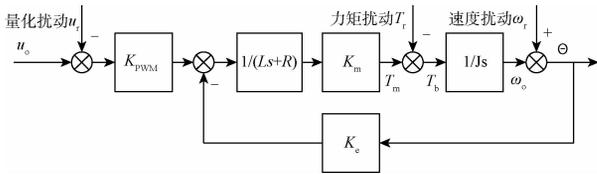


图1 稳定平台扰动作用

稳定平台控制系统总和扰动下的微分方程如下:

$$\begin{cases} K_{PWM} \cdot (u - u_r) - K_e \cdot \dot{\theta} = L \frac{di}{dt} + R \cdot i \\ J \frac{d(\dot{\theta} - \omega_r)}{dt} = K_m \cdot i - T_r \end{cases}$$

式中: $u$ 为控制量; $K_{PWM}$ 为功率放大系数; $L$ 为电机电枢回路电感; $R$ 为电机电枢回路电阻; $J$ 为电机轴上等效力矩系数; $K_e$ 为电机反电动势系数; $u_r$ 为控制器量化噪声; $T_r$ 为力矩扰动; $\omega_r$ 为载体速度扰动。

上述微分方程可进一步表示为:

$$\ddot{\theta} = K_m \cdot \frac{K_{PWM} \cdot (u - u_r) - K_e \cdot \dot{\theta} - Li}{J \cdot R} - \frac{T_r}{J} +$$

$$\dot{\omega}_r = k_1 \cdot \dot{\theta} + k_2 \cdot u + d$$

$$k_1 = -\frac{K_m \cdot K_e}{J \cdot R}, k_2 = \frac{K_m \cdot K_{PWM}}{J \cdot R}, k_3 = \frac{K_m \cdot L}{J \cdot R}, k_4 = \frac{1}{J}$$

$$d = -k_2 \cdot u_r - k_3 \cdot i - k_4 \cdot T_r + \dot{\omega}_r$$

$$K_{pcm} = 56, K_m = 0.17 \text{ Nm/A}$$

$$K_e = 0.17 \text{ V/rad/s}, J = 0.00075 \text{ kgm}^2$$

转换为状态空间方程形式,同时将等效控制将 $k_1 \cdot x_2$ 也视为干扰项,图1可以进一步简化,如图2所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = k_1 \cdot x_2 + k_2 \cdot u + d \\ y = x_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = k_c \cdot u_c + d \\ y = x_1 \end{cases}$$

式中: $x_1 = \theta$ 。

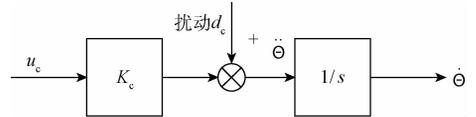


图2 稳定平台等效扰动效果

图中 $\theta$ 为稳定平台方位轴的角位置; $d_c$ 为稳定平台受到的“总和扰动”; $u_c$ 为控制量。

### 2 经典平方PI控制器的控制方法

稳定平台经典控制的工程实现中,均采用平方PI或平方滞后超前控制器,针对上述稳定平台设计的经典控制器其频域形式如下:

$$G_c = k \left( \frac{s/\omega_1 + 1}{s} \right)^2 = 1950 \cdot \left( \frac{0.0101s + 1}{s} \right)^2$$

离散化后的控制算法为

$$u_c(k) = 2u_c(k-1) - u_c(k-2) + 1950(0.0001e(k) - 0.0001795e(k-1) + 0.000805e(k-2))$$

平方PI控制器的思想为采用高型控制策略,以提高低频增益。但是,一方面双积分环节影响稳定平台的动态特性,另一方法当扰动频率稍高时,增益迅速下降,稳定平台抗扰动能力也同时降低。

### 3 NLE\_PDFF\_ADRC设计和实验

首先依据NLE和PDFF形成作为变结构控制的部分分量,依据最速离散函数fhan和fal函数的变阻尼滑模面作变结构控制的非线性分量,构建完成的NLE\_PDFF\_VSC控制器;依据扩张状态观测器ESO获取稳定平台速度信号的观测值、加速度信号的观测值以及扰动信号的观测值。将目标速度值和速度观测值间误差提供给NLE\_PDFF\_VSC控制器,将观测速度和观测加速度信号提供给变阻尼fhan函数形成控制律;用扰动信号的观测值对NLE\_PDFF\_VSC控制器的输出进行补偿,形成最终控制量;将最终控制量和稳定平台的陀螺速度值提高给ESO进行状态观测。

NLE\_PDFF\_ADRC控制器的算法如下:

1)以稳定平台的陀螺输出  $y$  和 NLE\_PDFF\_VS 控制律输入  $u$  作为输入来跟踪估计稳定平台的状态和扰动总和:

$$\begin{cases} e = y - z_1, fe = fal(e, 0.5, \delta), fe = fal(e, 0.25, \delta) \\ z_1 = z_1 + h(z_2 - \beta_1 e) \\ z_2 = z_2 + h(z_3 + f(z_1, z_2) - \beta_2 fe + bu) \\ z_3 = z_3 + h(-\beta_3 fe_1) \end{cases}$$

$$fal(e, \alpha_0, \delta_0) = e \cdot \delta_0^{-1} \cdot s + |e|^{\alpha_0} sign(e)(1 - s)$$

$$s = (sign(e + \delta_0) - sign(e - \delta_0))/2$$

式中:  $\beta_1 = 150, \beta_2 = 60\ 000, \beta_3 = 3\ 000\ 000, h = 0.001, \delta = 0.2$ 。

2)稳定平台的陀螺输出  $y$  与目标设定值间误差的 NLE\_PDFF 控制律

$$U_c = K_{df} \cdot fal(error, \alpha_1, \delta_1) \cdot \frac{1}{S} + K_{bf} \cdot fal(error, \alpha_1,$$

$$\delta_1) - K_{df} \cdot y$$

$$fal(error, \alpha_1, \delta_1) = error \cdot \delta_1^{-1} \cdot s + |e|^{\alpha_1} sign(error)(1 - s)$$

$$s = (sign(error + \delta_1) - sign(error - \delta_1))/2$$

NLE\_PDFF 控制器进行现场调试,确定参数后的控制器离散形式如下:

$$u = u \cdot z^{-1} + 80 fal(e, 0.2, 10)(0.001 - 0.009z^{-1}) - 0.5\theta$$

3)最速开关曲线为滑模面的变阻尼变结构 VS 控制律

$$u_{vs} = -fhan(x_1, fal(|x_1|, \alpha, \delta)cx_2, r, h_1) =$$

$$-fhan(x_1, fal(|x_1|, 0.2, 10)x_2, 3\ 000, 0.002)$$

$fhan$  对应的离散化形式如下式子所示

$$\begin{cases} fal(x_1, \alpha, \delta) = x_1 \cdot \delta^{-1} \cdot s + |x_1|^{\alpha} sign(x_1)(1 - s) \\ s = (sign(x_1 + \delta) - sign(x_1 - \delta))/2 \\ d = r \cdot h_1^2, a_0 = h_0 \cdot |fal(x_1, \alpha, \delta)| \cdot c \cdot x_2, \\ y = x_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d(d + 8|y|)} \\ a_2 = a_0 + sign(y)(a_1 - d)/2 \\ s_y = (sign(y + d) - sign(y - d))/2 \\ a = (a_0 + y - a_2)s_y + a_2 \\ s_a = (sign(a + d) - sign(a - d))/s \\ fhan = -r(a/d - sign(a))s_a - rsign(a) \end{cases}$$

$$a_1 = \sqrt{d(d + 8|y|)}$$

$$a_2 = a_0 + sign(y)(a_1 - d)/2$$

$$s_y = (sign(y + d) - sign(y - d))/2$$

$$a = (a_0 + y - a_2)s_y + a_2$$

$$s_a = (sign(a + d) - sign(a - d))/s$$

$$fhan = -r(a/d - sign(a))s_a - rsign(a)$$

4)NLE\_PDFF\_VSC 控制器

$$u_0 = u_c + u_{vs}$$

5)稳定平台总和扰动的补偿过程

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b}$$

在飞行器模拟转台上分别对采用平方 PI 控制器和 NLE\_PDFF\_ADRC 控制器的稳定平台进行  $10^\circ, 3 \sim 5$  Hz 载体扰动试验,试验测试数据如表 1 所示。

其中,5 Hz 的隔离度曲线如图 3 和图 4 所示。

表 1 两种控制器隔离度测试数据

扰动条件	平方 PI 残余	NLE_PDFF_ADRC	隔离度提升/%
	峰峰值/(°)/s	残余峰峰值/(°)/s	
$10^\circ, 3$ Hz	16.2	11.5	↑ 29
$10^\circ, 4$ Hz	18.3	12.8	↑ 30
$10^\circ, 5$ Hz	21.5	15.7	↑ 27

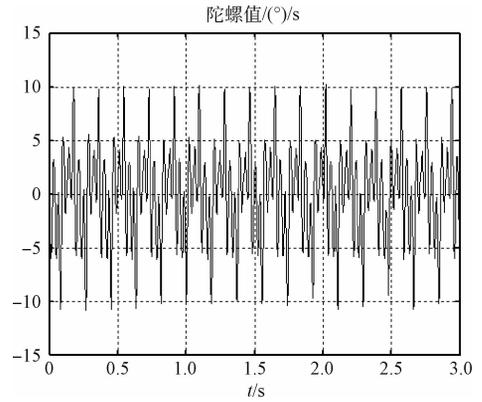


图 3 平方 PI 隔离度

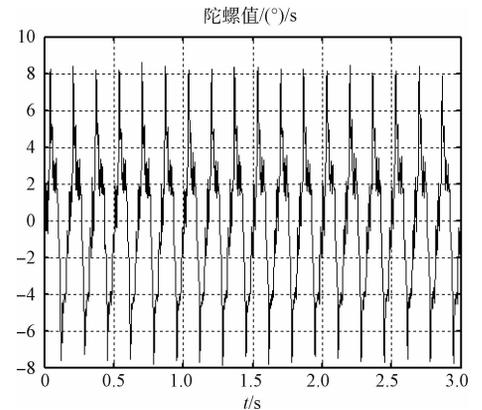


图 4 NLE\_PDFF\_ADRC 隔离度

## 4 结 论

从飞行器模拟转台摇摆测试数据可知,飞行器模拟转台以  $3 \sim 5$  Hz 摇摆时,NLE\_PDFF\_ADRC 控制器相对平方 PI 控制器隔离度提升约 30%。本文提出的 NLE\_PDFF\_ADRC 控制器避免了采用双积分环节带来的负面影响,提升了系统的稳定裕度;同时在较高的频段抗扰动能力明显优于平方 PI 控制器。其 NLE\_PDFF\_ADRC 控制器在稳定平台控制理论工程应用研究提出了实用新途径,具有较高的借鉴价值。

## 参考文献

[1] 李嘉全,丁策,孔德杰,等.基于速度信号的扰动观测

- 器及在光电稳定平台的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5):998-1004.
- [2] 王福超,田大鹏,王昱棠. 基于简化干扰观测器的光电平台稳定与评估[J]. 国外电子测量技术, 2015(12): 13-17.
- [3] 邱晓波,窦丽华,单东升,等. 光电跟踪系统自抗扰伺服控制器的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 220-226.
- [4] 廉明,韩振宇,富宏亚. 自抗扰技术在卫星姿态模拟系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3):616-621.
- [5] 黄浦. 自抗扰控制技术在航空相机镜筒控制系统中的应用研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2011.
- [6] 李嘉全,丁策,孔德杰,等. 基于速度信号的扰动观测器及在光电稳定平台的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5):998-1004.
- [7] 张钊,周勇,王钤. 扩展状态观测器在陀螺稳定平台中的应用仿真[J]. 兵工自动化, 2011, 30(11):83-85.
- [8] 李贤涛,张葆,沈宏海. 基于自抗扰控制技术提高航空光电稳定平台的扰动隔离度[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8):2223-2231.
- [9] 李贤涛,张葆,孙敬辉,等. 航空光电稳定平台扰动频率自适应的自抗扰控制[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5):1574-1581.
- [10] 刘翔,包启亮. 机动平台光电跟踪系统的自抗扰控制研究[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(5):24-29.
- [11] 金翔,唐文献,丁浩,等. 基于自抗扰控制半潜平台动力定位控制器设计[J]. 电子设计工程, 2014, 22(8): 89-91.
- [12] 杨晓霞,王帅,邓永停,等. 利用扩张状态观测器的交流永磁同步电机控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(5):810-816.
- [13] 王婉婷,郭劲,姜振华,等. 光电跟踪自抗扰控制技术研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2):204-211.
- [14] 魏永清,许江宁,马恒. 自抗扰控制器在陀螺稳定平台控制系统中的应用[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(1):39-44.
- [15] 姚志英,曹海青,王渝,等. 小型漂浮式天线姿态的自抗扰解耦控制[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(7): 1529-1537.

## 作者简介

王仁臻,1983年出生,高级工程师,主要研究方向为稳定平台控制技术、控制理论工程应用研究。

吉书鹏,1964年出生,研究员,博士生导师,主要研究方向为军用光电探测技术、稳定平台总体技术、目标识别与跟踪技术、图像信息融合与处理技术研究。

E-mail:wangrenzhen1983@126.com