

doi: 10.7690/bgzd.2021.09.012

# 基于跟踪微分器和负载观测器的伺服系统优化

许永衡, 李 波

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司武器装备信息与控制中心, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对常规三环式伺服系统抗扰性较弱、跟踪精度差等不足, 借助跟踪微分器和负载观测器对常规伺服系统进行优化设计。利用自抗扰控制技术中的跟踪微分器单元来规划运动轨迹和获取负载突变信息, 同时引入负载观测器进行慢速的负载波动的观测。实验结果表明: 新设计伺服系统的抗扰性得到了很大改善, 在提高跟踪精度、减小机械冲击等方面也取得了更好效果。

**关键词:** 跟踪微分器; 负载观测器; 伺服系统

**中图分类号:** TP21 **文献标志码:** A

## Optimization of Servo System Based on Tracking Differentiator and Load Observer

Xu Yongheng, Li Bo

(Weapon Equipment Information & Control Center, Automation Research Institute Co., Ltd.  
of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of weak anti-disturbance and poor tracking accuracy of conventional three-ring servo system, this paper optimizes the conventional servo system with the aid of tracking differentiator and load observer. The tracking differentiator unit of anti-disturbance control technology is used to plan the trajectory and acquire the information of load mutation, and the load observer is introduced to observe the slow load fluctuation. The experimental results show that the anti-disturbance performance of the new designed servo system is greatly improved, and better effect is obtained in improving the tracking accuracy and reducing the mechanical impact.

**Keywords:** tracking differentiator (TD); load observer; servo system

### 0 引言

伺服系统是实现机电系统运动控制的执行部件, 被广泛应用于国民生产的各行各业。随着现代技术的不断发展, 对伺服系统的性能要求越来越高。常规伺服系统一般由单纯的电流环、速度环和位置环组成, 而这 3 个控制环路往往仅由常规比例-微分-积分 (proportion-integral-differential, PID) 控制技术实现, 虽具有算法简单、参数较少的优点, 但由于控制系统中总会包含负载波动、机械卡顿等不确定的扰动因素, 难以满足伺服系统高指标的控制要求。

为改善伺服系统的性能, 很多学者提出模糊控制、神经网络、预测控制、最优化控制或者各种智能控制技术与 PID 相结合的方法<sup>[1-7]</sup>, 但这些智能控制算法往往具有结构复杂、资源占用大等缺点, 很难在控制系统中得到实际运用。自抗扰控制技术是韩京清提出的一种全新控制器, 继承了经典 PID 控制器的精华, 引入了现代控制理论的状态观测器

技术, 且对控制对象的数学模型几乎无任何要求, 其性能指标远超经典 PID 控制, 具有性能优越、抗扰性强、鲁棒性好等优点, 已经在很多场合得到了实际应用<sup>[8-11]</sup>。

笔者在常规三环结构基础上, 利用自抗扰控制技术中的跟踪微分器单元来规划运动轨迹和获取负载突变信息, 同时引入 1 个负载观测器进行较慢速的负载波动的观测。实验结果表明: 新设计伺服系统的抗扰性得到了很大改善, 同时在其他方面也有更好表现。

### 1 常规伺服系统

如图 1 所示, 常规伺服系统的结构是由位置控制、速度控制、电流控制 3 个环节串联而成, 每个环节都包括 1 个调节器, 每个调节器都包括控制逻辑和输出限幅, 前级调节器输出作为后级环节的命令给定。为保证系统的稳定和调优, 参数匹配时每个环都按照经典系统, 依照规范从内到外依次进行设计。该方法比较简单且易于调整<sup>[9]</sup>。

收稿日期: 2021-04-20; 修回日期: 2021-06-15

作者简介: 许永衡(1986—), 男, 四川人, 硕士, 工程师, 从事伺服驱动控制研究。E-mail: xyhh4@163.com。

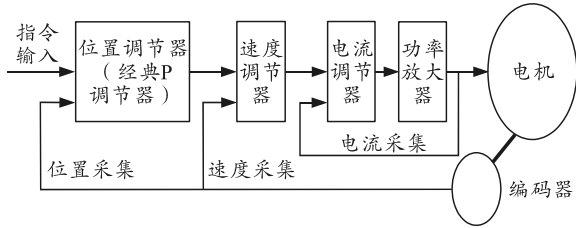


图 1 常规伺服系统的结构

现代伺服控制系统都是数字控制，模块信号都是串级传输，每个控制周期中的给定值和采样值需经过多个环节的传输才能到达最后的功率放大级，会限制伺服系统的性能，需对其进行改进。

## 2 伺服系统优化设计

### 2.1 跟踪微分器

自抗扰控制技术包括跟踪微分器、非线性状态反馈(非线性组合)和扩张观测器 3 部分，笔者采用其中的跟踪微分器。

PID 算法容易产生超调，主要原因是初始误差很大，为解决此问题，有必要对给定信号进行过渡过程的平滑安排，同时给出目标跟踪信号的微分信息，其中最常见为“快速离散跟踪微分器”，表达式如下：

$$\left. \begin{aligned} r_1(k+1) &= r_1(k) + hr_2(k) \\ r_2(k+1) &= r_2(k) + h * fst(r_1(k) - v(k), r_2(k), \delta, h) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $h$  为采样周期； $v(k)$  为第  $k$  时刻的输入信号； $\delta$  为决定跟踪快慢的参数； $fst$  为最快速控制综合函数，表达如下：

$$fst(x_1, x_2, \delta, h) = \begin{cases} -\delta \operatorname{sgn}(a), & |a| > d \\ -\delta a / d, & |a| \leq d \end{cases}, \quad (2)$$

$$a = \begin{cases} x_2 + ((a_0 - d) / 2) \operatorname{sgn}(y), & |y| > d_0 \\ x_2 + y / h, & |y| \leq d_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $d = \delta h$ ,  $d_0 = hd$ ,  $y = x_1 + hx_2$ ,  $a_0 = \sqrt{d^2 + 8\delta|y|}$ 。

采用以上公式，可实现当  $v(k)$  为输入信号， $r_1(k)$  为被安排过的输出信号， $r_2(k)$  为其微分信号时，即使  $v(k)$  中包含了高频噪声，仍可获得正确的微分信号。

跟踪微分器 TD 只涉及 2 个参数，配置很方便， $h$  为 TD 模块采样周期，值越大滤波越强； $\delta$  为决定跟踪快慢的参数，值越大过滤后的输出越接近输入。本文中给定跟踪微分器主要用于平滑给定信号，变化率不能太快，其参数配置为  $h = 5 \times$  控制步长， $\delta = 50$ ；反馈跟踪微分器的主要目的是用于检测位置的变化率，同时在反馈信号中包括较大干扰信息，所以其

参数应该加大滤波效果，设置参数为  $h = 10 \times$  控制步长， $\delta = 500$ 。

### 2.2 负载观测器

伺服系统运行过程中会遭遇各种扰动，其中对其性能影响最大的是负载扰动，假如有一发射装置连续动作(有很大后座力)，当第  $k$  次动作过程时，必然产生极大的负载扰动及位移，从而影响发射装置的朝向，如果位移量过大或纠正时间过长，就会影响第  $k+1$  次的动作精度。

如图 2 所示，减小扰动位移量的有效措施是引入负载观测器。负载观测器获取实际转速  $Spd_{fdk}$  和实际负载(等效为实际电流  $I_{fdk}$ )，计算出电动机负载转矩估计值(等效为负载电流估计值  $I_{ob}$ )， $I_{ob}$  和速度调节器的输出相加，共同产生转矩给定信号。

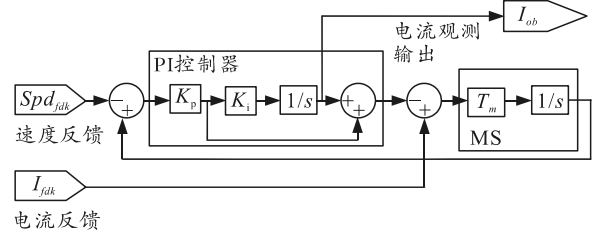


图 2 负载观测器模块

负载观测器由负载调节器(经典 PI 结构)和对模拟电动机行为的积分器 MS 组成，MS 的积分时间常数等于环路的机电时间常数  $T_m$ ，在观测器内，满足以下表达式：

$$spd_{ob} = (1/(T_m s))(T - T_{ob}) = (k_t/(T_m s))(I_{fdk} - I_{ob}) \quad (4)$$

而在实际的电机中，满足以下表达式：

$$spd_{fdk} = (1/(T_m s))(T - T_{real}) = (k_t/(T_m s))(I_{fdk} - I_{real}) \quad (5)$$

负载观测器在完成闭环调节后，其输入满足

$$\left. \begin{aligned} spd_{ob} - spd_{fdk} &= 0 \\ I_{ob} &= I_{real} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

可见，完成调节后，负载观测器调节器的输出就等于负载的等效电流  $I_{real}$ ，在实际使用中，负载观测器调节器的输出往往包含较大噪声，实际使用过程中，往往采用其积分器的输出结果。

负载观测器的参数配置首先应测量准确的  $T_m$  时间常数，这是观测器获得正确结果的前提，观测器的调节器结构为经典 PI 结构，可按照典型 II 型系统进行优化<sup>[12-13]</sup>。

### 2.3 新型伺服系统的总框架

根据前面的设计分析，新型伺服系统的架构如图 3 所示(对改进部分进行了线条加粗)。

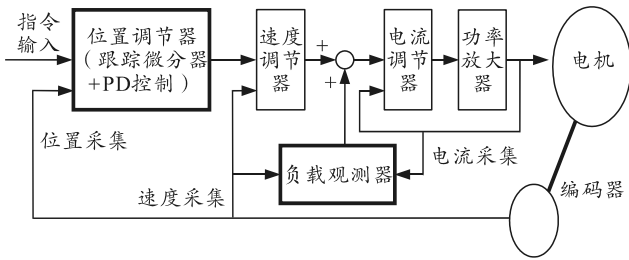


图 3 新型伺服系统总框架

如图 4 所示，位置控制器由经典 P 控制替换为跟踪微分器加 PD 控制形成的综合架构，在反馈回路和给定回路中都分别引入了 1 个跟踪微分器，反馈跟踪微分器的主要作用是获取速变信号的微分  $z_2$ ，给定跟踪微分器的作用是对给定信号进行平滑安排得到平滑输出  $v_1$ ，同时给出其一阶导数信号  $v_2$ ；2 个跟踪微分器的结果进行数学运算后得到误差结果  $e_1$  和微分误差  $e_2$ ，然后进入 PD 控制器进行运算得到最终输出  $u_0$ 。由于跟踪微分器可在包含高频干扰的信号中提取可用的微分量，所以可在比例 P 控制中再增加微分 D 环节以改善系统瞬态响应性能。当负载突变时，反馈跟踪微分器可快速获得引起负载突变的位置变化率，然后通过微分 D 环节实现实时补偿，减小负载扰动引起的位置突变。阶跃给定时，给定跟踪微分器可同时给出平滑后的结果及其微分信号，在 PD 控制的作用下，响应的超调问题得到改善，输出响应平滑，对机械系统的冲击较小。

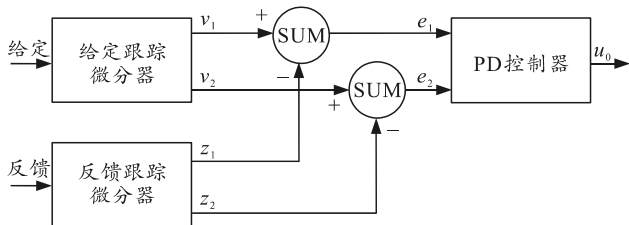


图 4 位置调节器(跟踪微分器+PD)的结构

在发生负载冲击后的极短时间内，可通过反馈跟踪微分器输出信号  $z_2$  获得位置变化率进行微分 D 环节纠正控制，但随着时间推移，系统已形成固定的偏移量， $z_2$  输出将接近于 0，由于该偏移误差量很小，所以形成的控制量也很小，通过后级单纯的 PI 模块纠偏调节时间会很长，在很多场合不能满足要求。笔者增加了负载观测器模块，在经过很短时间的观测运算后，即可推算出需求负载电流  $I_{ob}$  与速度调节器的输出叠加后再作为电流给定，可实现负载扰动的快速纠正。

### 3 仿真结果

用 Matlab 对伺服系统进行对比仿真，仿真参数

为：直流永磁电机、电枢电阻  $4.8 \Omega$ ，电枢电感  $1.6e-3 \text{ mH}$ ，转矩常数  $0.066 \text{ Nm/A}$ ，系统始终包括  $0.02 \text{ Nm}$  摩擦力矩。

#### 3.1 阶跃响应

如图 5 所示，0 s 时刻设定位置信号为  $100 \text{ rad}$ ，负载设置为  $0 \text{ Nm}$ 。观察普通架构和新型架构的响应波形区别。

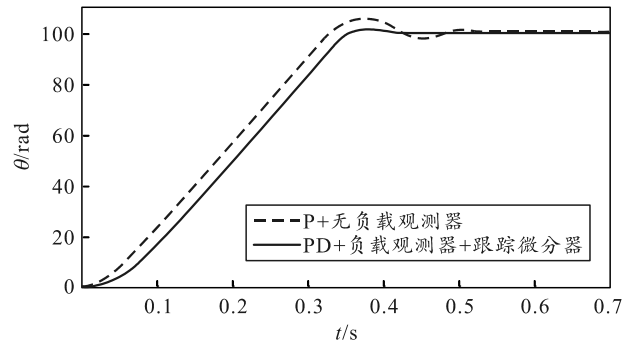


图 5 阶跃响应对比

如以位置误差最终控制在 1% 以内为控制目标，从上图可见，普通 P 控制的超调量约为 5%，调节时间约 0.5 s，新架构的超调量约为 1%，调节时间约 0.35 s，新架构明显有更好的过渡性能，且超调较小，对机械系统的冲击更小。

#### 3.2 负载扰动

如图 6 所示，阶跃响应后 1 s 时，突加负载  $0.2 \text{ Nm}$ ，2 s 时，恢复为  $0 \text{ Nm}$  空载状态，观察输出结果。

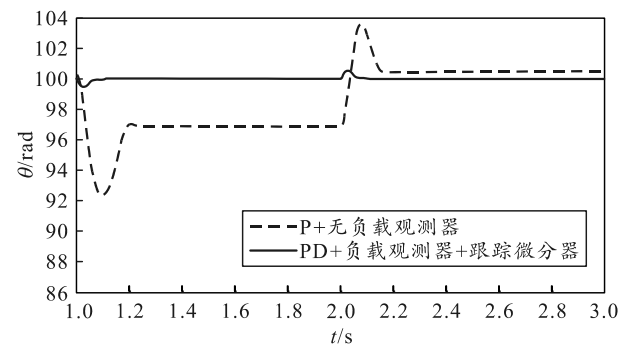
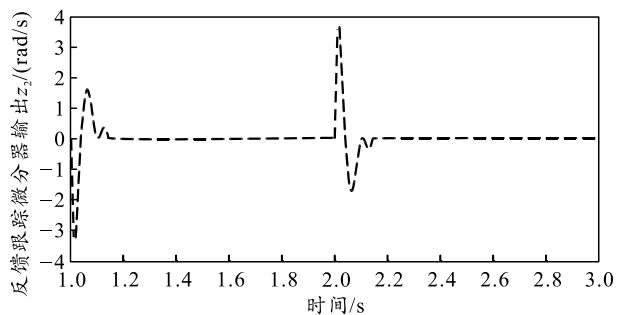


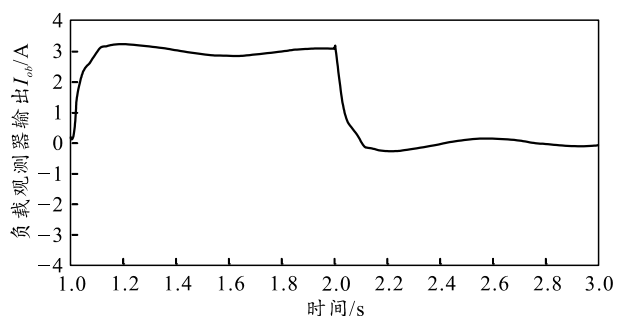
图 6 负载扰动对比

仍以位置误差最终控制在 1% 以内为控制目标，从上图可见，普通架构为 P 控制器在最严重时跌落到  $92.3 \text{ rad}$ ，当恢复为空载状态时，又回升到  $103.4 \text{ rad}$  的位置，且迟迟未回到 1% 的误差范围内，性能表现较差，完全不能满足控制目标。新型架构有更好的抗扰性能，在负载扰动时，仍保证了系统波动不超过 1%，为进一步分析新型架构抗扰的机理，图 7 单独给出了在负载扰动时，负载观测器和

跟踪微分器的输出波形。



(a) 反馈跟踪微分器的微分输出



(b) 负载观测器的微分输出

图 7 负载观测器和跟踪微分器的微分输出

如上图所示：1 s 时刻负载刚发生变化时，反馈跟踪微分器的输出  $z_2$  输出了位置变化率，可利用该值进行微分运算调整偏差，到 1.15 s 时刻，位置的变化量变小，所以  $z_2$  输出接近于零，但此时负载观测器运算已基本完成，所以后续阶段负载观测器的输出  $I_{ob}$  可以作为纠偏的主力军，2 s 时刻的卸载过渡过程也类似。可见，新架构引入的跟踪微分器和负载观测器能快速感知负载的变化，保证了系统的位置波动在整个时间段内都在 1% 以内，具有很强的抗扰性能。

### 3.3 正弦跟踪

修改给定信号为正弦波，1 s 时突加负载 0.2 Nm，2 s 时恢复为 0 Nm 空载状态，对比观察采用不同控制架构时的跟踪曲线和误差曲线如图 8—10 所示。

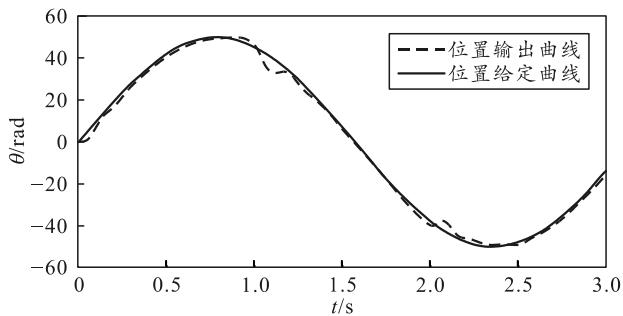


图 8 常规架构正弦给定和输出

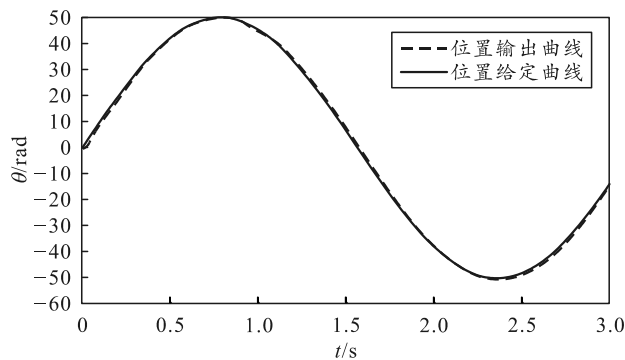


图 9 新型架构正弦给定和输出

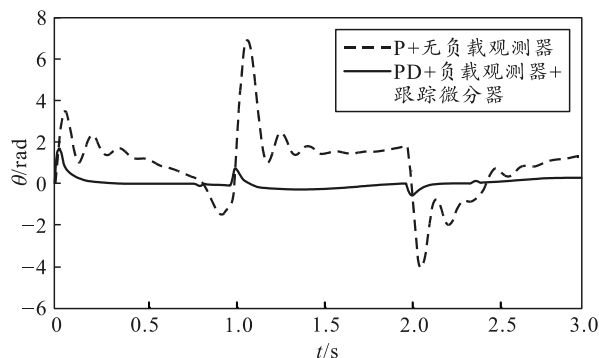


图 10 常规架构和新型架构的正弦跟踪误差对比

通过图 8—10 可见：常规架构在大部分时间内都处于跟踪失调的状态，性能较差；而新型架构在正弦跟踪过程中，除起始阶段有较大的跟踪误差外，后续过程都保证了跟踪精度在 1% 以内，即使中间出现了 2 次负载突变。新型架构在正弦曲线追踪性能中也有明显优势。

## 4 结束语

分析结果表明：跟踪微分器和负载观测器能够显著提升系统的抗扰性能；同时在平滑输出、减小机械冲击、减小跟踪误差等方面都取得了更好的表现。该新型伺服系统架构简单，涉及参数较少且易于配置，值得推广使用。

## 参考文献：

- [1] 金波, 陈伟, 胡羲. 开关磁阻电机航空作动器模糊控制方法[J]. 兵工自动化, 2016, 35(3): 6-10.
- [2] 李雪恺, 陈勇, 张鑫彬, 等. 自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 兵工自动化, 2016, 35(9): 73-77.
- [3] 王希彬, 宋广大, 杨飞. 基于最优控制的无人机主动 SLAM 航迹规划[J]. 兵工自动化, 2018, 37(12): 55-57.
- [4] 王军, 张幽彤, 王完成, 等. 神经网络结构 PID 方法在电液供油提前器中的应用研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(10): 1163-1166.
- [5] 李国平, 林君焕, 韩同鹏, 等. 车削振动的免疫 PID 控

制研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(5): 580-585.

[6] 李乐, 张佩杰, 宋克非, 等. 基于 PID 自整定算法的高精度滤光片热控系统[J]. 四川激光, 2015, 36(3): 7-9.

[7] 何亚屏, 文字良, 许峻峰, 等. 永磁同步电机新型开环控制策略研究[J]. 机车电传动, 2011(3): 13-16, 30.

[8] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13.

[9] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用, 2013(12): 1498-1510.

[10] 吕卫强, 席静, 章百宝, 等. 液压缸位置伺服系统模糊 PID 控制器[J]. 兵工自动化, 2020, 39(9): 41-44.

[11] 黄凤娇, 杨雪, 许祥威. 改进增量式 PID 算法在物料分拣流水线中的应用[J]. 兵工自动化, 2020, 39(9): 37-40.

[12] 马小亮. 高性能变频调速及其典型控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 261-264.

[13] 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, 2004: 76-84.

(上接第 43 页)

通过分析可知, 舰载直升机着舰时大部分时间处于悬停状态, 本文中对舰载直升机悬停时纵向操纵输入进行短周期飞行品质评定, 如图 15 所示, 由 ADS-33E 规定的直升机纵向带宽评定标准(图 2 所示)可知直升机纵向姿态指令姿态保持响应飞行品质达到了一级。

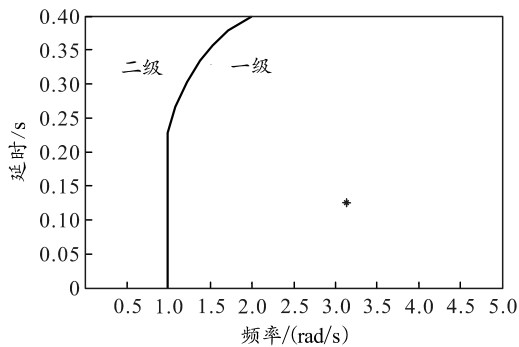


图 15 悬停时纵向带宽评定结果

### 5 结束语

舰载直升机着舰时受到复杂的组合外部扰动, 如何精确稳定控制其姿态是直升机控制系统设计的难点。笔者通过分析舰载直升机着舰任务科目基元及 ADS-33E 飞行品质规范, 确定以 ACAH 响应作为舰载直升机着舰时的响应类型。同时, 为了提高舰载直升机的抗扰特性, 笔者基于混合灵敏度鲁棒  $H_\infty$  控制方法设计了鲁棒控制器, 并进行仿真分析和飞行品质评定。结果表明: 该控制器满足 ACAH 响应类型, 飞行品质为等级一。

### 参考文献:

[1] 林富生, 陈瑶, 刘江平. 全维海战的空中利器—海军直

升机[J]. 现代军事, 2005(7): 59-64.

[2] 杨文凤, 张宏林, 宋攀. 直升机横向 TRC 响应类型及飞行品质仿真分析[J]. 航空科学技术, 2018, 29(3): 15-19.

[3] 杨文凤, 宋攀, 张宏林. 电传直升机速率控制/航向保持响应类型验证试飞技术研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28(7): 7-11.

[4] LUSARDI J A. Control Equivalent Turbulence Inputs Model for the UH-60[D]. Davis, CA: Dissertation, Dept. of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of California, 2004: 35-61.

[5] CHO A, KIM J, LEE S, et al. Fully automatic taxiing, takeoff and landing of a UAV using a single-antenna GPS receiver only[C]//International Conference on control, Automation and Systems. Seoul, South Korea: [s. n.], 2007: 2485-2489.

[6] CAI G, CHEN B M, LEE T H. Unmanned rotorcraft systems[M]. Springer Science & Business Media, 2011: 136-191.

[7] 高正, 陈仁良. 直升机飞行动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 31-64.

[8] 杨一栋. 直升机飞行控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 7-98.

[9] 任倩倩. 无人直升机建模与控制方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 5-22.

[10] 陈仁良, 高正. 基于 ADS-33 的直升机纵向操纵响应研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(3): 3-6.

[11] 廖智麟, 陆晓安, 黄一敏, 等. 直升机着舰引导与控制研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(6): 745-754.

[12] 黄誉. 无人直升机自主着舰关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015: 30-32.

[13] 周克敏, DOYLE J C, GLOVER K. 鲁棒与最优控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 294-403.