

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802059

# 复合并行控制的无人机视轴稳定方法\*

王 秀 侯宏录 唐 瑞 任梦茹

(西安工业大学 光电工程学院 西安 710021)

**摘要:** 为提高无人机视轴稳定平台的抗扰动能力,提出一种定量反馈理论(QFT)和PID复合并行控制的视轴稳定方法。首先采用回路整形法设计QFT视轴稳定控制器,然后以QFT为主控制器,采用PID实现QFT的动态补偿。最后对该方法进行仿真实验,结果表明,QFT和PID并行的控制系统相比独立的QFT控制系统,阶跃响应稳定时间缩短了57%,平台的扰动隔离度提升了75%。实验结果验证了该方法可以满足无人机对视轴稳定性的要求,且优于QFT单独控制的方法。

**关键词:** 无人机;视轴稳定;并行控制;定量反馈理论;PID

**中图分类号:** TN97;V249.1 **文献标识码:** ; A **国家标准学科分类代码:** 590.35

## Line of sight stabilization method of unmanned aerial vehicle based on composite parallel control

Wang Xiu Hou Honglu Tang Rui Ren Mengru

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to improve the anti-disturbance ability of the unmanned aerial vehicle Line of sight stabilization platform, a method of visual axis stabilization for the quantitative feedback theory (QFT) and PID composite parallel control is proposed. First, the QFT stabilization controller is designed by loop shaping method, then the QFT is used as main controller and PID is applied to realize the dynamic compensation of QFT. Finally, the simulation experiment is carried out. The results show that the QFT and PID parallel control system reduces the step response stabilization time by 58% and the platform disturbance isolation by 75% compared with the independent QFT control system. The experimental results verify that the method can meet the requirements of the unmanned aerial vehicle for the stability of the visual axis and is superior to the QFT control method.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; line of sight stabilization; parallel control; quantitative feedback theory(QFT); PID

## 0 引言

无人机在电视新闻采集<sup>[1]</sup>、森林防火<sup>[2]</sup>、国境巡逻及高压输电线路的维护等领域中得到了广泛应用。然而无人机在飞行过程中,视轴稳定平台会受到多种扰动的影响<sup>[3]</sup>,主要包括无人机本身的角运动<sup>[4]</sup>、摩擦力矩的扰动<sup>[5]</sup>、气流扰动<sup>[6]</sup>等因素。这些因素产生的扰动会引起系统视轴抖动<sup>[7]</sup>,不仅影响成像质量,而且使得目标信息提取困难,甚至会导致侦察、跟踪等任务无法完成。因此,如何提高无人机视轴稳定平台的抗扰动能力,已成为制约视轴稳定平台发展与应用的关键问题。

目前,针对无人机视轴稳定平台抗扰动能力不足的问题,目前提出的方法有动态逆控制<sup>[8]</sup>、 $H_\infty$ 控制和定量反馈

理论(quantitative feedback theory, QFT)等。动态逆控制建立在系统模型精确对消的基础上,在阵风干扰和模型参数扰动时难以取得理想的控制效果<sup>[9]</sup>;  $H_\infty$ 控制主要应用在线性定常系统<sup>[10]</sup>中,因此设计出的控制器比较保守<sup>[11]</sup>,对可能存在非线性因素的系统<sup>[12]</sup>不适用; QFT将系统的性能设计要求与模型参数的不确定性以量化的方式表现出来,得到满足系统鲁棒性能的控制,与其他控制方法相比, QFT运用图形化设计方法,通过回路整形技术获得控制器,有利于工程实现。因此, QFT广泛应用于飞行器<sup>[13]</sup>、机器人<sup>[14]</sup>、船舶运动控制<sup>[15]</sup>等领域。但是 QFT作为一种鲁棒控制方法,设计时需要在系统的稳定性和控制精度之间进行折衷,精度要求较高时,必然导致稳定性的下降。因此,对于高精度要求的无人机视轴稳定系统,仅使用 QFT

收稿日期:2018-08-28

\* 基金项目:陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(15JS035)、陕西省工业科技攻关项目(2016GY-051)资助

不能满足要求,需要采取其他措施,弥补 QFT 控制的不足。

由于 PID 控制器具有控制算法易实现、参数调整方便、有良好的响应特性等优点,因此本文将 QFT 控制和 PID 控制相结合,提出了一种适用于高精度无人机视轴稳定平台的复合并行控制方法,以提高系统的抗扰动力,保证其视轴稳定性要求。

### 1 并行控制器设计

对于无人机飞行过程中的参数不确定和外界扰动带来的影响,QFT 控制器在理论上具有良好的稳定性,可实现抗干扰功能,但在实际应用过程中,QFT 在保证系统稳态性的同时,会牺牲系统的动态性能,因而设计的控制器实际效果并不理想。由于 PID 控制中的比例环节可以及时反映系统的计算结果与实际的偏差,控制器可根据偏差大小对偏差立即产生调节作用,以减少偏差;积分环节主要作用是消除偏差,保证测量结果的准确性;微分环节能够在偏差变大之前根据变化趋势提前引入修正值,可有效提高系统的动态性能。

因此提出 QFT 控制和 PID 相结合的并行控制方法。QFT 用于克服受控对象的参数不确定性,以满足视轴稳定平台的鲁棒性要求。通过调整 PID 控制器参数来改善 QFT 控制的动态响应性能。并行控制系统包括前置滤波器 F、QFT 控制器 C、受控对象 P、干扰信号  $d$ 、PID 控制器,传感器为 MEMS 陀螺仪, $R$  和  $Y$  分别为系统的输入和输出,QFT 和 PID 并行控制结构如图 1 所示。

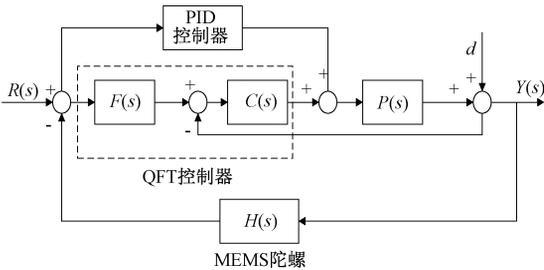


图 1 QFT 和 PID 并行控制结构

#### 1.1 QFT 控制器设计

并行控制器的核心是设计 QFT 控制器。QFT 控制结构如图 2 所示,包括受控对象 P、控制器 C、前置滤波器 F, $R$  和  $Y$  分别为系统的输入和输出、 $d$  为干扰信号。控制器 C 用来克服对象的参数不确定性,使系统满足鲁棒性需求。前置滤波器 F 用于对闭环频率特性进行整形,使其能够满足跟踪性能的要求。

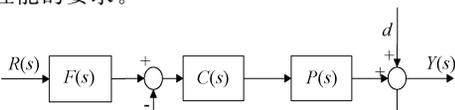


图 2 QFT 控制结构

QFT 的开环传递函数为:

$$L(s) = P(s)C(s) \tag{1}$$

QFT 控制系统的闭环传递函数为:

$$T(s) = \frac{P(s)C(s)F(s)}{1 + P(s)C(s)} = \frac{L(s)F(s)}{1 + L(s)} \tag{2}$$

1)受控对象 P 的传递函数

本设计针对某型号无人机视轴稳定平台进行设计,受控对象 P 是电机及负载平台。系统模型参数的不确定性因素主要来源于电机和负载的装配、电机振动以及电路器件等误差,因此不确定性参数选取为  $C_e$ 、 $T_e$ 、 $T_m$ ,其中  $C_e$  为电机反电动势系数, $T_e$  为电机的电磁时间常数, $T_m$  为电机的机电时间常数。选取受控对象 P 的模型为:

$$P(s) = \frac{1/C_e}{(T_e s + 1)(T_m s + 1)} \tag{3}$$

已知受控对象的参数为反电动势系数  $C_e = 0.06 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{rad}$ ,力矩系数  $C_m = 0.06 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$ ,转动惯量  $J = 6 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,电阻  $R = 17 \pm 1.7 \Omega$ ,电感  $L = 4.5 \pm 0.5 \text{ mH}$ ,机电时间常数  $T_m = JR_a/C_e C_m$ ,电磁时间常数  $T_e = L_a/R_a$ 。由于被控对象参数存在扰动,其变动范围取基准值的  $\pm 10\%$ ,故  $C_e$  的范围为  $[0.051, 0.069]$ , $T_m$  的范围为  $[0.255 1, 0.311 7]$ , $T_e$  的范围为  $[0.000 238 5, 0.000 291 5]$ 。

2)性能边界约束

根据无人机视轴稳定系统的性能要求,确定如下设计指标。

(1) 系统稳定性:

$$\left| \frac{1}{1 + L(s)} \right| \leq 1.2 \tag{4}$$

式中: $L(s)$  为 QFT 的开环传递函数。

(2) 抗干扰性能:

$$\left| \frac{L(s)}{1 + L(s)} \right| \leq 1.4 \tag{5}$$

(3) 跟踪指标上、下边界:

$$T_{\pm}(s) = \frac{480.443}{s^2 + 26.67s + 480.443} \tag{6}$$

$$T_{\mp}(s) = \frac{146.9238}{s^2 + 26.67s + 146.9238} \tag{7}$$

3)控制器 C 和前置滤波器 F 设计

(1)控制器 C 设计

根据模型参数的不确定性范围,选定一组频率点  $\omega = [0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 5, 10, 50] \text{ rad/s}$ 。在每个频率点处计算不确定模型的频率响应,得到对象模板,在对象模板中选择一个标称点作为设计的参照点。根据稳定性、抗干扰性和跟踪指标要求,得到复合边界曲线。由于系统基准开环频率曲线上各频率点均低于边界曲线,因此需要对系统进行回路整形,设计控制器 C。QFT 回路整形结果如图 3 所示,其中贯穿上下的曲线为设计后的系统开环频域响应曲线  $L_0(s)$ 。

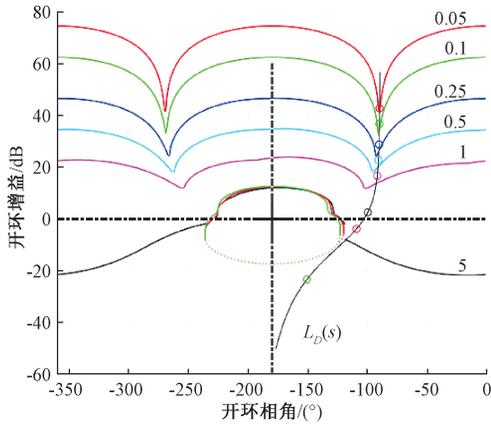


图 3 QFT 回路整形结果

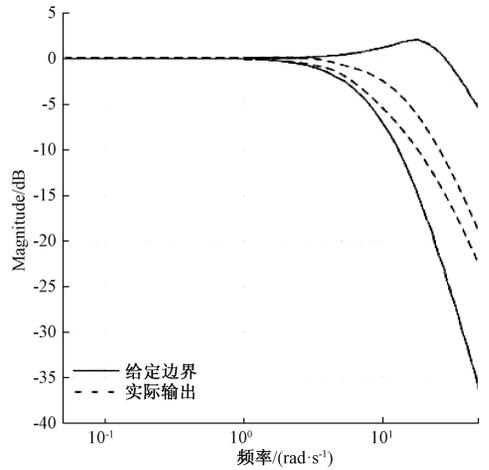


图 5 加入前置滤波器 F 后系统闭环响应曲线

设计所得控制器 C 的传递函数为:

$$C(s) = \frac{208.805s + 813.6712}{60.0024s^2 + 1720.7018s + 1} \quad (8)$$

(2)前置滤波器 F 设计

控制器 C 作用下系统闭环响应曲线如图 4 所示,系统频域响应并未完全处于上下边界函数之间,难以保证系统具有较好的动态特性。

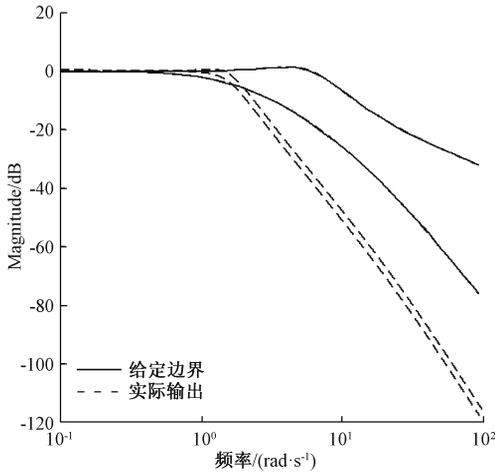


图 4 控制器 C 作用下系统闭环响应曲线

为了满足系统的闭环响应设计要求,利用回路整形原理对系统的跟踪性能进行补偿,使得闭环系统的频率特性处于跟踪上、下界曲线之间,得到前置滤波器 F。

$$F(s) = \frac{0.1014s + 1}{0.1445s + 1} \quad (9)$$

加入前置滤波器 F 后系统闭环响应曲线如图 5 所示。

### 1.2 PID 控制器设计

并行控制系统是在 QFT 控制器的基础上,通过调节 PID 控制器的参数,使系统动态性能得到修正,从而改善无人机视轴稳定平台的控制效果。PID 参数调整采用 Z-N 整定方法,具体整定方式如式(10)。

$$\begin{cases} K_p = 0.6k_m \\ K_d = \frac{k_p \pi}{4\omega_m} \\ K_i = \frac{k_p \omega_m}{\pi} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $k_m$  为系统开始振荡时的比例系数; $\omega_m$  为振荡频率。通过参数整定,得到并行控制系统中 PID 控制器的参数为  $K_p=1; K_i=9; K_d=0.003$ 。

## 2 性能对比试验及仿真分析

并行控制系统数学模型如下。

受控对象:

$$P(s) = \frac{16.67}{0.000075s^2 + 0.2836s + 1}$$

前置滤波器:

$$F(s) = \frac{0.1014s + 1}{0.1445s + 1}$$

QFT 控制器:

$$C(s) = \frac{208.805s + 813.6712}{60.0024s^2 + 1720.7018s + 1}$$

PID 控制器:

$$G(s) = 1 + \frac{1}{9s} + 0.003s$$

### 2.1 单位阶跃响应实验

系统阶跃响应对比曲线如图 6 所示,由图 6 可见,QFT 控制系统作用下的阶跃响应稳定时间为 0.021 s,QFT 和 PID 并行控制系统作用下的阶跃响应稳定时间为 0.009 s。经实验对比可知,QFT 和 PID 并行控制系统相比独立的 QFT 控制系统,稳定时间缩短了 57%。实验结果表明,在相同的输入条件下,QFT 和 PID 并行控制系统相比独立的 QFT 控制系统具备更加优异动态性能。

### 2.2 抗扰动实验

当输入信号为  $\omega(t) = \sin(\pi t)$ ,引入幅值为  $2^\circ$ ,频率为

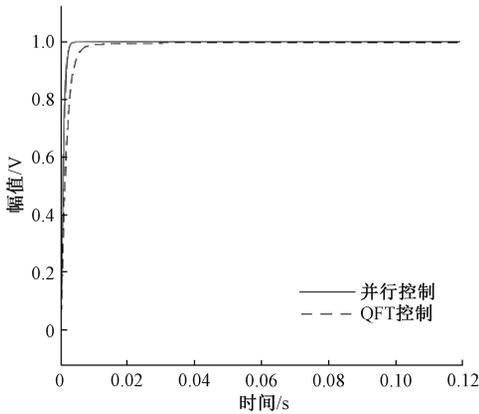


图 6 系统阶跃响应对比曲线

2.5 Hz 的正弦扰动,得到系统稳态误差对比曲线如图 7 所示,独立的 QFT 控制系统稳态误差的最大正负值分别为 0.027 和  $-0.032$ ,其扰动隔离度为 1.6%,QFT 和 PID 并行控制系统稳态误差的最大正负值分别为 0.007 和  $-0.008$ ,其扰动隔离度为 0.4%,扰动隔离度提升了 75%。实验结果表明,在相同的扰动条件下,QFT 和 PID 并行控制系统相比独立的 QFT 控制系统具备更加良好的扰动隔离性能。

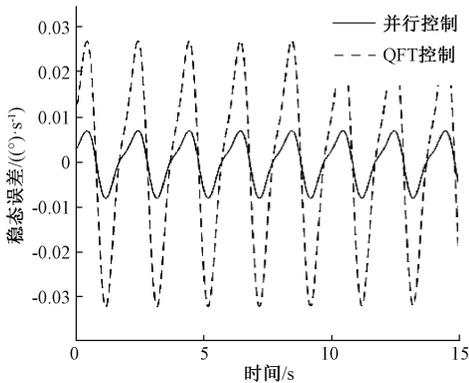


图 7 系统稳态误差对比曲线

### 3 结 论

本文提出一种复合并行控制方法,用来提高无人机视轴稳定平台的抗扰动能力。该方法是以 QFT 为主控制器,保证视轴稳定平台的鲁棒性,再利用 PID 控制来实现系统的动态误差补偿。通过实验证明了本文方法的有效性。实验结果表明,相比独立的 QFT 控制系统,QFT 和 PID 并行控制系统在平台输入为单位阶跃响应时,阶跃响应稳定时间缩短了 57%;当引入幅值为  $2^\circ$ ,频率为 2.5 Hz 的载体正弦速度扰动时,平台的扰动隔离度提升了 75%。因此,该方法相比独立的 QFT 控制具有更加优异的动态响应性能和扰动隔离性能,可实现高精度无人机视轴稳定平台的鲁棒控制。

### 参考文献

- [1] 钱甜甜,苗世洪,冉晓洪,等.基于定量反馈理论的电压源换流器高压直流输电系统鲁棒控制器[J].电工技术学报,2016,31(22):213-222.
- [2] 张福星,朱荣,熊威,等.基于定量反馈理论的微型飞行器增稳控制器[J].清华大学学报(自然科学版),2010,50(2):219-223.
- [3] 季辉,李志坚,陈小刚.基于 Fuzzy-PID 控制的雷达伺服系统研究[J].电子测量技术,2017,40(12):29-32.
- [4] 王向周,林文慧,李建飞.基于定量反馈理论的两轴稳定平台混合控制器设计[J].北京理工大学学报,2012,32(7):715-719.
- [5] 鹿存侃,马骏,闫杰.基于 QFT 的高超声速飞行器鲁棒控制器设计[J].系统仿真学报,2010,22(3):695-698,703.
- [6] 扈宏杰,王元哲.机载光电平台的复合补偿控制方法[J].光学精密工程,2012,20(6):1272-1281.
- [7] 王日俊,白越,续志军,等.基于扰动观测器的机载云台扰动复合补偿方法[J].光电子·激光,2015,26(1):108-115.
- [8] 王飞,史震,马文桥.基于 QFT+DI 的高超声速飞行器控制研究[J].计算机仿真,2013,30(6):59-62,161.
- [9] 谢蓉,王新民,李俨.超机动飞机动态逆-PID 控制器设计[J].飞行力学,2009,27(2):67-71.
- [10] MANSOR H, MOHD N B, RAJA AHMAD R K, et al. Design procedure of robust QFT-based controller for continuous-flow grain dryer plant[J]. Advanced Materials Research, 2011, 328-330:2318-2323.
- [11] IBARRA L, PONCE P, MOLINA A. Robust QFT-based control of DTC-speed loop of an induction motor under different load conditions[J]. Ifac Papersonline, 2015, 48(3):2429-2434.
- [12] KATAL N, NARAYAN S. QFT based robust positioning control of the PMSM using automatic loop shaping with teaching learning optimization [J]. Modelling and Simulation in Engineering, 2016(6): 1-18.
- [13] 张永合,梁旭文,周远强,等.无阻力双星编队的满系数矩阵 MIMO 定量反馈控制[J].宇航学报,2016,37(7): 819-828.
- [14] 石宝兰,付维贤.基于定量反馈理论的弹道导弹俯仰通道姿态控制系统设计[J].导弹与航天运载技术,2013(5):11-14,19.
- [15] 荀盼盼,韩崇伟,赵宇和,等.基于定量反馈理论的火炮随动系统鲁棒控制研究[J].兵工学报,2015,36(10): 1841-1846.

### 作者简介

王秀,硕士研究生,主要研究方向为无人机视轴稳定控制算法。

E-mail:853085008@qq.com

侯宏录(通信作者),教授、博士生导师,主要研究方向为光电测试、信息融合、仿真与作战效能评估。