

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.02.024

机载四框架二轴稳定跟踪平台速率稳定回路控制

夏静萍, 王道波, 甄子洋

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 在机载四框架二轴机载稳定跟踪平台机理分析的基础上, 对其速率稳定回路进行了建模研究。在速率稳定回路的校正环节设计中, 针对传统的超前滞后校正抗干扰性能差的缺陷, 提出了两种控制方法: 高阶 PI 校正以及高阶 PI 校正加超前校正。并以内俯仰速率稳定控制回路为例进行分析。仿真结果表明, 采用高阶 PI 校正加超前校正不仅具有更好的抗干扰性能, 还改善了高阶系统的动态性能。

关键词: 稳定跟踪平台; 机理分析; 速率稳定回路; 控制算法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Control of Stabilization Loop for Four-Gimbal and Two-Axis Airborne Stabilization and Tracking Platform

XIA Jing-ping, WANG Dao-bo, ZHEN Zi-yang

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The velocity stabilization loop of the four-gimbal and two-axis airborne stabilization and tracking platform is modeled based on the mechanism analysis. In the design of the correction in velocity stabilization loop, the traditional advanced-lag correction method has the disadvantage of bad anti-jamming ability. In order to improve the anti-jamming ability, two algorithms are proposed, one is a higher-order PI correction, and the other one is a higher-order PI correction together with an advanced correction. Simulation results show that the latter algorithm not only has better anti-jamming performance, but also improves the dynamic performance of the high-order system.

Keywords: Stabilization and tracking platform; Mechanism analysis; Velocity stabilization loop; Control algorithm

0 引言

机载稳定跟踪平台是安装在无人机等运动载体上的伺服稳定平台。飞机飞行时风阻力矩、姿态角变化或震动均会导致平台上探测装置视轴相对惯性空间发生晃动, 从而影响跟踪精度。故视轴稳定的控制设计是保证精确跟踪的关键环节^[1]。以色列研制的 MOSP 型无人机载光电侦察平台, 采用四框架二轴机械结构, 方位转角范围无限, 俯仰转角范围 $\pm 10^\circ$, 视轴稳定精度达 $25 \mu\text{rad}$ 。国内对平台的稳定控制算法开展了研究: 文献[2]和[3]设计了滞后超前环节, 提高系统开环增益, 抑制干扰力矩。文献[4]和[5]采用双环控制结构, 分别采用编码器和测速机作为数字测速组成速率内环, 陀螺作为空间测速组成外环, 提高了平台抗干扰的性能。此外, 国内目前在工程中应用较广泛的是采用超前滞后环节作为速度校正器, 使系统具有良好的稳定性和动态性能, 但由于系统型别的限制, 无法实现在有干扰输入时角速度和角度输出的无静差。故针对某四框架二轴机载稳定跟踪平台, 分析速率稳定控制回路, 提出了一种高阶比例积分加超前校正器。

1 机载四框架二轴稳定跟踪平台

四框架二轴机载稳定跟踪平台系统主要由以下部分构成: 四框架平台, 角速度陀螺仪, 码盘, 电机, 功率放大器, 控制器等, 其机械结构图如图 1。为分析方便, 定义外方位框为 A 框架、外俯仰框为 E 框架、内方位框为 a 框架、内俯仰框为 e 框架。

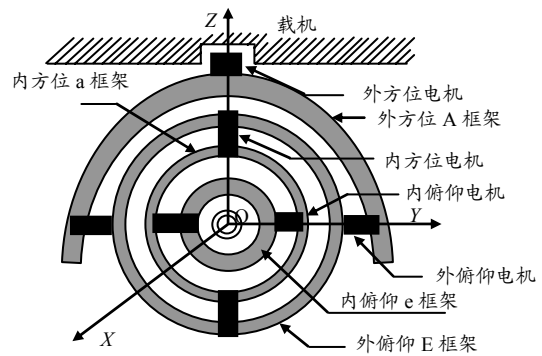


图 1 四框架稳定跟踪平台结构示意图

在内俯仰框架上装有稳定负载及陀螺仪, 陀螺仪分别敏感绕方位、俯仰轴向上的干扰运动及真实角运动。当载体运动时, 载体产生的干扰角运动将通过轴系间的摩擦约束耦合和几何约束耦合, 从外方

收稿日期: 2009-09-01; 修回日期: 2009-10-11

作者简介: 夏静萍 (1983-), 女, 江苏人, 南京航空航天大学在读硕士, 从事稳定平台伺服控制研究。

位框、外俯仰框、内方位框、内俯仰框逐一传送到视轴上, 从而影响视轴的稳定。安装在内环架上的陀螺感受到该干扰速率后, 将敏感到的信号经稳定回路分别送到内俯仰 e、内方位 a 框架力矩电机, 以产生控制力矩, 驱动力矩电机运动, 产生与干扰速率大小相等, 方向相反的补偿角运动, 从而抵消干扰速率, 保证视轴的稳定指向。同时安装在 e 框架轴上和 a 框架轴上的角度传感器将 2 个内框架 e、a 相对 2 个外框架 E、A 的角度偏差信号, 经控制回路分别送到两个外框架上的伺服电机, 从而控制外方位和外俯仰框架随动于内方位和内俯仰框架^[6]。

2 机理分析与数学建模

以内俯仰速率稳定控制回路为例进行分析。在该回路中, 陀螺将敏感到的角速度信号经速度校正环节和功率放大环节送给内框架的电机, 控制电机产生与干扰力矩大小相等、方向相反的补偿力矩, 控制原理框图如图 2。

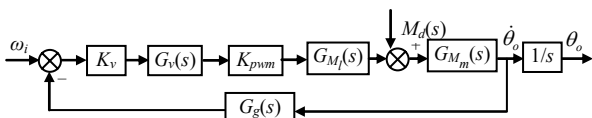


图 2 速率稳定回路控制原理框图

图 2 中, $K_v(s)$ 为增益, $G_v(s)$ 为校正环节, K_{PWM} 为功率放大系数, $G_{M_l}(s)$ 为力矩电机的电气环节, $G_{M_m}(s)$ 为力矩电机的机械环节, $G_g(s)$ 为角速率陀螺传递函数, ω_i 为角速度输入指令, $M_d(s)$ 为干扰力矩, θ_θ 为角度输出。根据图 2, 可得如下传递函数:

$$\omega_\omega = \frac{K_v G_v(s) K_{PWM} G_{M_l}(s) G_{M_m}(s)}{1 + K_v G_v(s) K_{PWM} G_{M_l}(s) G_{M_m}(s) G_g(s)} \omega_i(s) + \frac{G_{M_m}(s)}{1 + K_v G_v(s) K_{PWM} G_{M_l}(s) G_{M_m}(s) G_g(s)} M_d(s)$$

可见, 为隔离平台的扰动力矩和载体运动耦合到视轴的干扰角速率, 并提高跟随能力, 均需要提高控制回路的开环增益。设计校正环节需权衡系统的稳态性能和动态性能。

对系统的主要组成部件建立数学模型分析:

1) 电机模型: 电机的电气环节模型与机械环节模型分别表示为:

$$G_{M_l}(s) = \frac{C_m/R}{T_L s + 1}, \quad G_{M_m}(s) = \frac{R/C_e C_m}{T_m s + 1}$$

式中, C_m 为电机的力矩系数, R 为电机的电枢回路电阻, C_e 为电机的反电势系数, T_L 为电机的电

气时间常数, T_m 为电机的机电时间常数。

2) 陀螺模型: 将角速率陀螺近似成比例环节:

$$G_g(s) = k_g;$$

3) 干扰力矩: 主要包括摩擦力矩, 偏心力矩及耦合力矩等。经试验分析, 本例中的内俯仰框所受的干扰力矩不大于 600 gf.cm。

3 速率稳定回路控制策略分析

1) 高阶 PI 校正

在阶跃干扰输入下, 输出的角速度和角度要达到稳态无静差, 需将系统设计成 III 型或 III 型以上的系统^[7]。由上面推导模型可得, 在如下力矩干扰

输入 $M_d(s) = \frac{M_{d_0}}{s}$ 可得系统的角度误差传递函数为:

$$E_\omega(s) = \frac{G_{M_m}(s) M_d(s)}{1 + K_v G_v(s) K_{PWM} G_{M_l}(s) G_{M_m}(s) G_g(s)} = \frac{\frac{R/C_e C_m}{T_m s + 1} \cdot \frac{M_{d_0}}{s}}{1 + K_v K_{PWM} K_g \frac{1/C_e}{T_m s + 1} G_v(s)}$$

$$E_\theta(s) = \frac{1}{s} \cdot E_\omega(s)$$

由终值定理知, 角速度稳态误差和角度稳态误差分别为:

$$e_{s\omega} = \lim_{s \rightarrow 0} s E_\omega(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{-G_{M_m}(s)}{1 + K_v K_g K_{PWM} G_v(s) G_{M_l}(s) G_{M_m}(s)} \cdot M_d(s)$$

$$e_{s\theta} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{-G_{M_m}(s) \times 1/s}{1 + K_v G_v(s) K_{PWM} G_{M_l}(s) G_{M_m}(s) G_g(s)} \cdot M_d(s)$$

为保证角速度和角度稳态误差为零, 速度校正环节需包含 2 个积分环节。经计算后初步确定校正环节形式为 $G_v(s) = \frac{(s+a)^2}{s^2}$, 即高阶 PI 校正环节。

2) 高阶 PI 校正加超前校正环节

在反馈控制系统中, 设置积分环节以消除稳态误差, 将降低系统动态稳定性。所以在设计 $G_v(s)$ 必须权衡系统稳态误差、稳定性与动态性能之间的关系。为改善系统的动态性能, 在高阶 PI 校正的基础上增加超前校正环节:

$$G_v(s) = \frac{1+bTs}{1+Ts}$$

通过超前环节增大系统的开环稳定裕度, 使中频段占据充分宽的频带。校正环节的传递函数如下:

$$G'_v(s) = \frac{(s+a)^2}{s^2} \frac{1+bTs}{1+Ts}$$

采用基于频域的设计方法确定超前校正环节的参数，即根据被控对象的开环频率特性和期望的系统动态和稳态性能指标，选择合适的校正环节并确定其结构和参数。

4 仿真实证

通过计算，可得超前滞后校正器为：

$$G_{v1}(s) = \frac{(0.8s+1)(0.033s+1)}{(1.724s+1)(0.001s+1)}$$

高阶 PI 校正器为：

$$G_{v2}(s) = \frac{(s+28.9)^2}{s^2}$$

高阶 PI 校正加超前校正器为：

$$G_{v3}(s) = \frac{(s+28.9)^2 \cdot 0.033s+1}{s^2 \cdot 0.001s+1}$$

将传统的滞后-超前校正器与高阶 PI 校正器及校正加超前校正器的仿真结果放在一起，以便对比。

4.1 单位阶跃响应

3 种校正器的单位阶跃响应比较曲线如图 3。仅采用超前滞后校正，调节时间为 0.13 s，可见系统具有良好的动态性能；仅采用高阶 PI 校正，系统超调量 $\sigma\% = 26\%$ ，与超前滞后校正相比有明显增加，

但调节时间减少， $t_s = 0.108\text{ s}$ ；加入超前校正后高阶 PI 校正动态性能得到很大改善，超调明显减小，约为 $\sigma\% = 5\%$ ，调节时间 $t_s = 0.084\text{ s}$ ，响应速度加快。

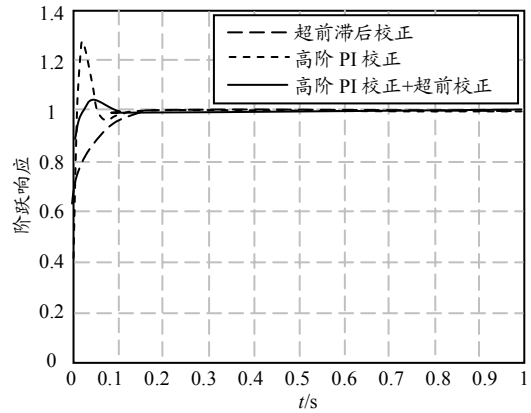


图 3 单位阶跃响应

4.2 开环特性分析

开环伯德图的比较曲线如图 4。与超前滞后校正相比，系统加入高阶校正环节后，低频段开环增益提高较大。高阶 PI 校正的相位裕度相对减小，减小的原因在于低频段的负斜率较大，相角滞后大，从而影响了相位裕度的增大。加入超前环节后，相位裕度有了一定改善，满足工程中相位裕度的要求。

4.3 扰动响应

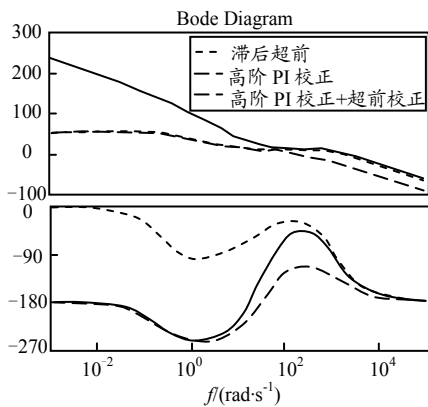


图 4 开环伯德图

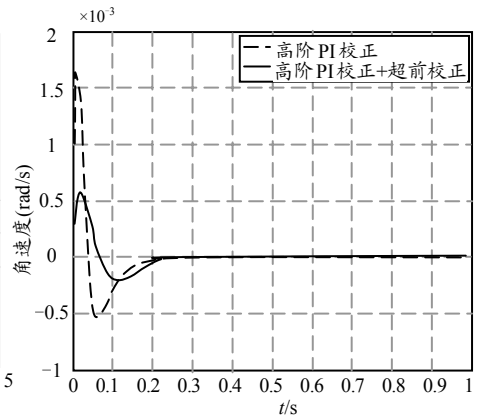
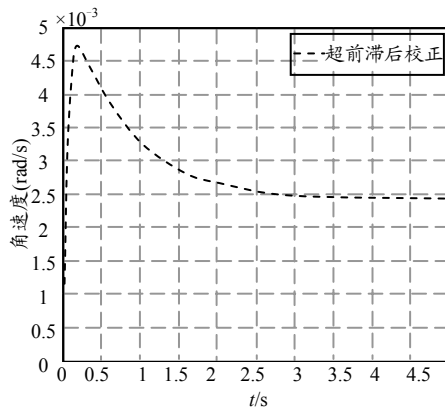


图 5 常值干扰输入下的角速度响应曲线

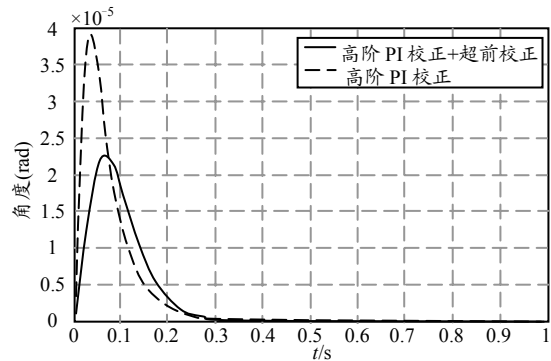
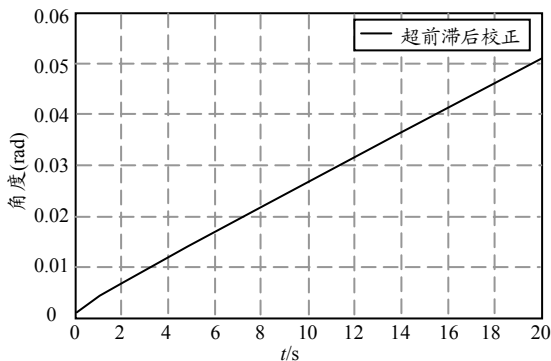


图 6 常值干扰输入下的角度响应曲线

(下转第 84 页)

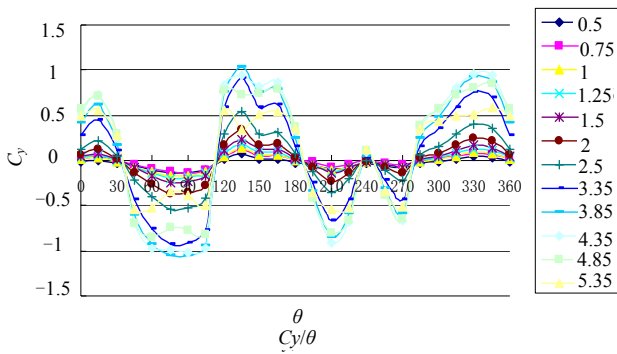


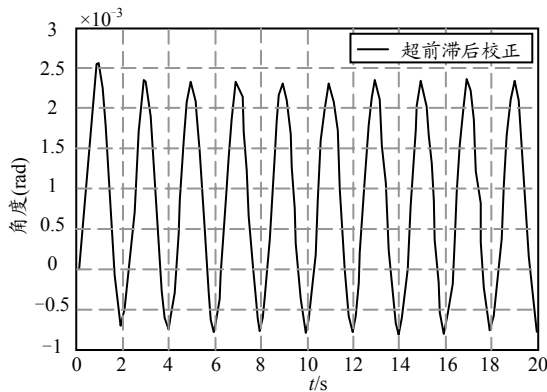
图 9 模型不同截面位置 C_y 随 θ (滚转角) 的变化曲线

6 结论

目前,该系统已在风洞的教学任务及课题研究中投入使用。实验结果表明,该系统不仅能提供精确的测量数据,且采集速度相当快,软件方便灵活,

(上接第 76 页)

分析常值干扰力矩下系统的抗干扰性能,取幅值为 600 gf.cm 的干扰力矩下的内框架角速度和角度输出响应图如图 5、图 6。可见超前校正方式下角速度达到稳态时保持在 2.48 mrad/s,而角度输出呈现发散趋势,不能满足系统静态指标要求。加入高阶 PI 校正时,系统的角速度和角度输出可实现稳定后无静差。其中,高阶 PI 校正角度波动最大值为



系统功能全面,性能可靠。

参考文献:

[1] 恽起麟. 风洞实验[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
 [2] 周昶毅,顾明. 风洞实验中多通道测压管路系统的参数分析[J]. 同济大学学报,2005,33(8): 1001-1005.
 [3] 别德尔日茨基,杜鲍夫,拉德齐格. 空气动力实验的理论与实验[M]. 沈阳:气动研究与实验,1998.
 [4] 柏楠,邓学莹,王延奎. 前体非对称涡Re效应初探及其风洞模拟技术[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(12): 1408-1422.
 [5] 恽起麟. 实验空气动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1991.
 [6] 施洪昌,等. 风洞数据采集技术[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
 [7] 赵元元,韩珠凤. 低速风洞数据采集与处理系统[J]. 南京航空航天大学学报,1995,27(4): 525-532.

38 μ rad、高阶 PI 校正加超前校正的输出角度波动为 22 μ rad。当给定干扰力矩为频率 0.5 Hz,幅值 600 gf.cm 的周期干扰力矩时,内框架角度响应曲线如图 7。超前滞后校正方式下的干扰输出的角度峰峰值约为 3 mrad;采用高阶 PI 校正方式,输出角度峰峰值减小约为 20 μ rad;高阶 PI 校正加超前校正时,较高阶 PI 校正时的稍有减小,约为 16.6 μ rad。

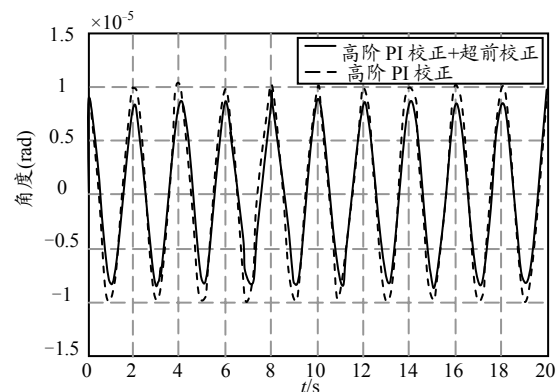


图 7 正弦干扰力矩的角度响应曲线

5 结束语

仿真验证表明,与传统的超前滞后校正相比,该方法可以改善系统的稳态性能,使系统达到稳态无静差。与高阶 PI 校正相比较,采用高阶 PI 校正加超前校正环节有效地改善了系统的动态性能,同时,抗干扰性能也有了进一步提高。

参考文献:

[1] J.M.Hilkert. Inertially Stabilized platform technology[J]. IEEE, 2008, 28(1): 26.
 [2] 毕永利. 多框架光电平台控制系统研究[D]. 长春:长

春光学精密机械与物理研究所,2003.
 [3] 张智勇,等. 光电稳定跟踪装置的控制系统设计[J]. 光学精密工程,2006,14(4): 682-684.
 [4] 王连明. 机载光电平台的稳定与跟踪伺服控制[D]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所,2002.
 [5] 姬伟,等. 陀螺惯性平台视轴稳定双速度环串级控制的研究[J]. 仪器仪表学报,2007,28(1): 114-119.
 [6] Steven T. Jenkins, J. M. Hilkert. Line of sight stabilization using image motion compensation. SPIE, 1989, 1111 (Acquisition, Tracking, and Pointing III): 98-115.
 [7] 裘海涛,等. 基于 DSP 的光学探测陀螺稳定系统的设计与实现[J]. 电子技术应用,2007,33(6): 82.