

〈制导与对抗〉

小型红外成像制导稳定平台控制算法研究

李锐华, 林宇

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 针对小型稳定平台转动惯量小易受冲击力矩扰动影响制导精度的问题, 先对稳定平台的力矩刚度进行分析, 根据分析结果对传感器与执行机构进行选型。然后利用经典控制理论为速率闭环设计了普通 PID 控制器。通过分析普通 PID 控制的不足, 对其进行抗饱和积分、适时不完全微分与非线性优化, 在此基础上引入对误差变化率的观测量, 针对大冲击力矩扰动设计了专家 PID 控制器。最后利用 dSPACE 搭建的半实物仿真平台对算法进行仿真测试, 测试结果表明专家 PID 控制减小了冲击扰动造成的角速率误差与角位置误差, 使稳定平台具有更好的动态力矩刚度。

关键词: 小型稳定平台; 力矩刚度; 专家 PID 控制; 红外成像制导

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2014)02-0142-06

Research on the Control Algorithm of Lightweight Infrared Imaging Guidance Platform

LI Rui-hua, LIN Yu

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Aiming at the difficulty that the guidance accuracy of lightweight infrared imaging guidance platform was reduced by the impulsive moment disturbing, this paper analyzes the torque stiffness of stabilized platform then selects sensors and actuators according to the results of the analysis. Then we use the classical control theory to design the speed closed-loop common PID controller. After analyzing the shortcomings of common PID control, to get the anti-saturation integral, timely incomplete differential resistance and nonlinear optimization, on the basis of introducing the error rate of the observation, the expert PID controller is designed against the large impact torque disturbance. Finally the algorithm is simulated and tested on the hardware-in-the-loop simulation test platform based on dSPACE. The simulation test results show that the expert PID control reduces the impact of disturbance error and angular position error caused by angular rate, which makes the stabilized platform has better dynamic torque stiffness.

Key words: lightweight platform, torque rigidity, expert PID control, infrared imaging guidance

0 引言

红外成像稳定平台是红外制导武器的重要组成部件, 其稳定精度是影响红外成像制导精度的主要因素。在制导过程中, 红外成像探测器安装在隔离弹体扰动的平台上, 使红外成像的视线轴在惯性空间中保持稳定, 为跟踪处理模块提供清晰的图像。目前, 由于红外探测技术与跟踪算法技术的发展,

红外成像制导对目标的探测距离与跟踪距离越来越远。这种情况下, 如果视轴产生任何轻微偏转, 都会造成目标在视场中大幅度的位置移动甚至丢失目标。同时, 稳定平台的工艺性误差使其具有一定的质心偏移, 在制导过程中平台受到冲击力矩和其他扰动时, 产生角速率偏差引起红外成像部件视轴偏转, 最终影响制导精度与命中率, 甚至使制导失效。

收稿日期: 2013-12-14; 修订日期: 2013-01-30。

作者简介: 李锐华 (1989-), 男, 云南昆明, 硕士研究生, 主要研究方向: 自动控制。E-mail: liruihua_km@139.com。

通讯作者: 林宇 (1972-), 男, 云南昆明, 博士, 主要研究方向: 光电技术。

随着对制导系统尺寸、重量要求越来越严格，研制更小、更轻的制导平台是未来主要的发展方向，但轻小型伺服稳定平台由于转动惯量小，受冲击力矩的扰动更为严重，仅通过传统的质心配平难以达到理想的抗冲击效果。因此，展开对小型稳定平台控制系统的研究，提高对冲击力矩扰动的抑制能力有实际意义。

目前主要采用双速率闭环控制结构提高伺服力矩刚度；利用非线性 PID 控制算法增加系统带宽；引入扰动观测器对干扰进行等量补偿等控制技术来提高对强冲击力矩扰动的抑制。王连明等使用双速率环 PID 控制配合加速度反馈来提高力矩刚度^[1]；姬伟等提出视轴稳定自适应模糊 PID 复合控制算法^[2]与基于干扰观测的模糊 PID 控制^[3]；朱海荣等提出基于扰动观测的非线性 PID 控制来提高平台对干扰力矩的抑制^[4]；花文涛等提出利用粒子群算法实现对速率环控制器参数的整定^[5]。上述文献提及的算法，部分还停留在理论分析与数学仿真阶段，实际工程应用仍以经典 PID 的优化算法为主。且大部分文献主要针对大型稳定平台受摩擦力矩扰动的问题进行研究，就轻小型平台如何克服强冲击力矩扰动的研究还不多见。

本文首先对影响稳定平台力矩刚度的关键因素进行分析。然后以一个小型两轴两框架的稳定平台为例，先进行经典 PID 控制算法的设计，着重针对大冲击力矩扰动对算法进行专家 PID 优化，提高小型稳定平台动态力矩刚度。最后通过 dSPACE 搭建的半实物仿真平台对算法进行仿真测试，得到比较满意的控制效果。

1 原理概述

两轴两框架的小型稳定平台主要由内框架、外框架组成。内框架上安装了光学系统、探测器、电机、角度传感器和陀螺等一系列组件，外框架作为内框架的承载机构也配有相应的电机和角度传感器。内框架部分和外框架部分可以独立绕各自的旋转轴转动。

红外制导过程中，稳定平台有不同的状态，如下图 1 所示，当开关 K2，K3 闭合，K1 断开时，稳定平台工作在跟踪状态。此时整个系统包含两个控制闭环，一个是由红外成像系统、跟踪器与稳定平台联合构成的位置闭环，主要实现对目标的跟踪；另一个是伺服稳定平台内部由控制器、电机与速率陀螺构成的速率闭环，主要抑制载体在飞行过程中对红外探测器视线轴的力矩干扰与角速率干扰，保证视线轴在空间上始终指向目标。

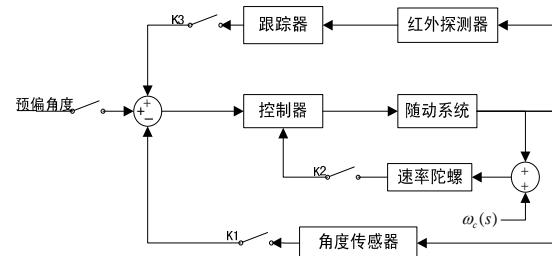


图 1 稳定平台工作原理图

Fig.1 Working principle of the stabilized platform

当载体做大动态运动时，会给稳定平台施加相应的冲击力。理想状态下，稳定平台的质心在俯仰转动轴与偏航转动轴的交叉点处，由于作用在质心上的冲击力其力臂为零，所以冲击干扰力矩为零，不会引起框架角位置偏移，对视轴指向没有影响。但是，实际存在质心偏移误差，一旦受到冲击力扰动，其力臂就是质心的偏移量，此时冲击干扰力矩不再为零，它会使平台视轴偏移，影响稳定精度与制导精度。为克服冲击力矩干扰，在结构上可以通过质心配平减小扰动影响。对于受扰动影响更为严重的小型平台，在质心配平的基础上，还需通过对速率闭环控制器的设计与优化来提高力矩刚度，减小冲击扰动的影响。

图 2 为稳定平台速率闭环控制模型框图。其中 K_{pwm} 为 PWM 波功率放大器的放大系数， K_t 为电机力矩系数， K_e 为电机反电动势系数， L_a 为电枢电感， R_a 为电枢电阻， J 为电机与负载转动惯量的和， ω_n 为陀螺的固有频率， ζ 为速率陀螺的阻尼系数， K_{gyro} 为陀螺的标度因数。 T_c 为折算到框架轴上的干扰力矩， ω_c 为干扰角速率。

2 力矩刚度分析

在控制中，利用力矩刚度来表征平台抗力矩扰动的能力，其定义为干扰力矩与干扰力矩造成角位置误差的比值，如(1)式：

$$R_M(s) = \frac{T_c(s)}{\theta_c(s)} \quad (1)$$

由式(1)推导得力矩刚度表达式：

$$R_M(s) = J s^2 + \left[\frac{K_t K_{\text{pwm}}}{R_a} \cdot \frac{K_{\text{gyro}}}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \right] G_{\text{pid}}(s) + \frac{K_e K_t}{R_a} s \quad (2)$$

由(2)式可知，动态力矩刚度与平台转动惯量成正比，图 3 利用数学仿真实验分别讨论了不同转动惯量平台在同一个冲击力矩扰动下，视线轴角速率与角位置的变化情况。

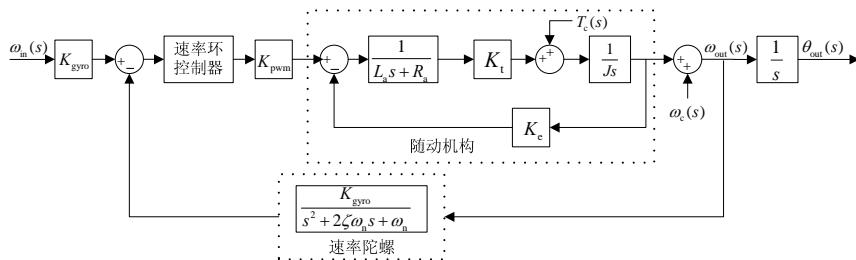


图2 速率闭环控制框图

Fig.2 Speed closed-loop control block diagram

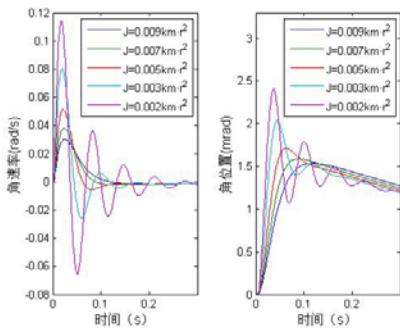


图3 转动惯量与冲击干扰力矩

Fig.3 Impact moment of inertia and the disturbance torque

图3显示，在相同冲击力矩扰动下，随着平台转动惯量的减小，冲击扰动造成的角速率偏差越大，引起的位置偏差也越大。所以，小转动惯量的稳定平台，动态力矩刚度小，更容易受冲击力矩影响。综合上述分析得出结论：

1) 平台抗冲击干扰能力与平台转动惯量成正比。在实际应用中，尤其是对质量与体积有严格限制的轻小型平台，转动惯量较小，受冲击干扰力矩影响的更大；

2) 陀螺带宽对抵抗高频干扰力矩性能有影响^[6]，随着干扰力矩频率的增大，平台角速率变化也相应增加，使陀螺的输出衰减，降低平台对力矩扰动的抑制能力；

3) 力矩刚度与电机的力矩系数成正比，选用力矩系数较大的电机有利于提高平台对干扰力矩的抑制。但增加电机力矩系数，必然使电机体积与质量增加，所以小型平台对电机的选型，需要综合考虑结构限制与性能要求；

4) 速率环控制器需要加入积分控制，保证控制系统对低频干扰力矩的抵抗。同时，通过提高控制器的比例系数可以有效增加力矩刚度^[3]。但控制器增益过大，会引起平台自激振荡，影响系统稳定性。所以设计控制器时要综合考虑平台力矩刚度与系统稳定性。

根据结论可推断，要在控制上提高稳定平台的动态力矩刚度，需合理选择传感器、执行机构以及

合理设计与优化控制算法。综合考虑结构设计与性能指标要求，选择抗冲击性强，带宽为系统带宽2.5倍的速率陀螺作为角速率传感器；选择力矩系数为0.5左右的直流力矩电机为执行机构；对普通PID控制进行专家控制优化，提高小型稳定平台动态力矩刚度。

3 控制算法设计

经典PID控制因其结构简单，鲁棒性强，便于现场调试等优势，在工业控制中占有基础地位。但在高精度小型稳定平台控制中，在低频段要求平台具有较高的稳态精度，高频段要求具有较强的动态力矩刚度，平台受大冲击力矩扰动时，能保持像素级别的稳定精度。线性PID控制难以同时满足平台在低频段与高频段的高精度要求。因此，对线性PID进行优化提高控制器带宽，对提升平台稳定精度具有实际意义。

本文首先为稳定平台速率控制闭环设计了线性PID算法。然后通过分析线性PID的不足，对算法进行动态力矩刚度优化。最后利用半实物仿真平台对控制性能进行测试，结果显示优化算法较普通PID算法有更好的控制效果。

3.1 经典控制算法设计

由速率闭环控制框图可知，速率闭环控制的开环传递函数是一个三阶系统：

$$GH(s) = \frac{K_{gyro}/K_e}{(\tau_e s + 1)(\tau_m s + 1)(2\zeta\omega_n s + 1)} \quad (3)$$

用带积分的超前滞后校正器进行校正：

$$G_c(s) = K \cdot \frac{1 + \tau_d s}{1 + \tau_i s} \cdot \frac{s + \omega_i}{s} \quad (4)$$

得校正前后系统开环Bode图对比（如图4）。

图4显示，校正后的系统具有更高的穿越频率和更大相角裕度，校正器同时提高了系统的稳定性与动态性。利用数学仿真手段得到校正前与校正后的系统阶跃响应图，如图5所示。

校正后的系统与校正前相比，阶跃响应具有更小的超调量与更短的调节时间。同时由于积分控制

的作用, 阶跃响应的稳态误差为零。

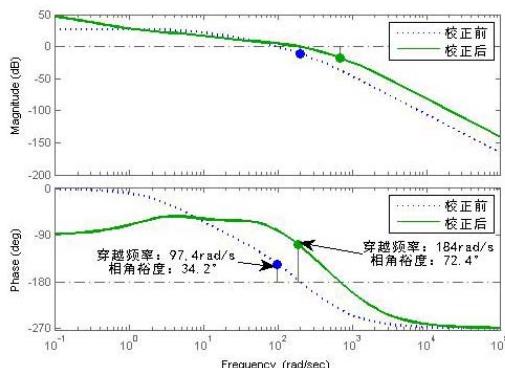


图4 校正前后 Bode 图对比

Fig.4 Bode chart comparison before and after correction

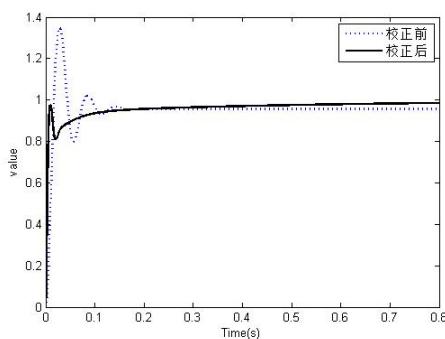


图5 校正前后系统阶跃响应图

Fig.5 System step response before and after correction

3.2 针对冲力干扰力矩的算法优化

由于线性 PID 算法控制参数固定, 难以同时保证平台的静态性能与动态性能。尤其高精度小型平台对动态力矩刚度的要求更为苛刻。所以本文对线性 PID 控制进行抗积分饱和优化, 适时不完全微分优化, 非线性 PID 优化以及专家 PID 控制优化, 使平台既保证低频段的静态精度又具有较强的动态力矩刚度。

积分饱和是指, 平台受冲击扰动出现较大误差时, 线性 PID 的输出由于积分控制作用不断累加, 使控制器输出超过电机最大供电电压, 导致控制输出饱和, 影响其动态性与稳定性。可以通过比较控制器的输出与电机最大额定控制电压, 一旦超过最大额定控制电压, 则停止累加同向误差, 避免积分饱和的影响, 利于提高平台的动力学刚度。

不完全微分控制相当于在微分控制后加入一个一阶滤波器, 对抑制微分引入的高频噪声有显著帮助。但是, 当受冲力矩扰动时, 会使平台角速率出现幅值较大的尖峰, 滤波器在抑制噪声的同时也衰减了有效的高频信号, 降低系统带宽, 不利于稳定平台对冲力矩的抑制。所以, 可以根据角误差大小, 适时取消不完全微分, 使平台在微分控制下迅速产生反向力矩抑制冲力矩。根据实际测试实

验, 当角速率误差大于 $15^\circ/\text{s}$ 时, 取消不完全微分控制可以达到较为理想的控制效果。

由于稳定平台对静态性能与动态性能都有较高的要求, 线性 PID 难以达到满意的控制效果。此时根据误差大小动态调整比例, 积分与微分系数, 保证稳定平台在高、中、低频都匹配最佳的控制参数。非线性 PID 的结构如下式:

$$U(s)=K_p(e) \cdot \frac{s + \omega_i(e) \cdot \tau_d(e)s + 1}{\tau_f s + 1} \quad (5)$$

调整比例 K_p 随误差的增大而增大, 实现迅速缩小误差的目的。积分转折频率 ω_i 选用积分分离与变速积分的结合如下式:

$$\omega_i = \begin{cases} i_{\max} & \text{when } e \leq a \\ -\frac{i_{\max}}{b-a}(e-a) & \text{when } a < e < b \\ 0 & \text{when } e \geq b \end{cases} \quad (6)$$

误差大于 b 后就取消积分, 在 a 与 b 之间时, 进行变速积分, 避免平台因冲击扰动造成的大误差使积分累积过大, 影响动态性能。当误差小于 a 后加大积分, 保证平台静态精度。微分控制能够根据误差变化率做出相应的超前控制, 当误差不大但以较大加速度增大时, 微分控制能提高控制量, 抵消干扰力矩, 减慢误差增大速度。当误差变化率方向与误差方向反向后, 微分会减弱控制量避免超调, 但延长了调整时间。由于稳定平台对角速率的超调限制不是很严格, 所以设计微分时间 τ_d 随误差的增大而减小, 充分发挥微分提前预估干扰力矩迅速减小干扰角加速度的作用, 减弱其克服超调的作用, 提高稳定平台对大冲力矩的抑制能力。

上述优化算法较线性 PID 算法, 具有更强的鲁棒性与抗干扰能力, 对大冲力矩有较好的抑制作用。但还存在问题: 该算法的参数调整仅依靠角速率误差量的大小作为依据, 控制器超前预估性不强, 面对不同量级的冲力矩, 难以实现较有针对性的控制, 影响控制精度的提升。

针对上述问题, 分析冲力矩对平台角加速度与角速度造成的影响, 设计稳定平台冲力矩专家 PID 控制器, 实现对冲力矩模态的准确判断及该模态下的专家控制。如图 6 所示, 伺服稳定平台专家控制系统利用当前误差, 误差变化率对平台的运行模态进行判断, 然后给出最优的控制策略。

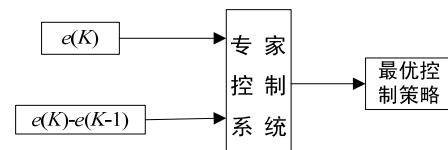


图6 专家 PID 示意图 Fig.6 Expert PID schematic diagram

图7为处于稳定状态的平台受到冲击力矩干扰后,角速率误差与误差加速度的变化曲线。利用角速率误差,把平台克服冲击的过程分为两个阶段:

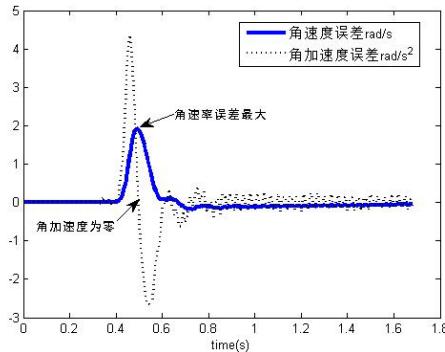


图7 冲击扰动响应图 Fig.7 Shock disturbance response

1)角速率误差从零到角速率误差达到最大为第一阶段。此时要求电机快速产生反向力矩抵消干扰力矩,使光轴的误差加速度迅速减为零。

2)视线轴角速率误差从最大值减为零是第二阶段,这个阶段要求视线轴角速率迅速减为零。

控制难点在于,冲击干扰力矩信号带宽较宽,产生得很快,消失的也很快。如果在第一阶段施加太大的反向控制力矩,第二阶段若一味追求缩短减速时间,一旦冲击力矩消失后,稳定平台由于控制产生的反向力矩过大,形成巨大的反向加速度,引起很大的反向速率超调,影响控制精度甚至造成系统的不稳定。可如减弱控制力度又难以实现对大冲击力矩的有效抑制,达不到高精度控制。所以需要综合考虑平台响应速度与控制精度对控制器进行专家控制优化。

本文针对小型伺服稳定平台受大冲击力矩扰动的工作模态设计了专家 PID 控制。在以误差为观测量的非线性 PID 基础上引入误差变化率,通过检测误差变化率与误差是否同号,来判断稳定平台所处的状态,以便选择合理的控制策略。

其中 $d < c < b < a$, $\tau_{f_Mid} < \tau_{f_Max}$, e 为误差, e' 为误差变化率, K_p 、 ω_i 、 τ_d 、 τ_f 分别为式(5)中非线性 PID 的参数。

表1 专家 PID 控制策略调整表

Table 1 The expert PID control strategy adjustment

	$ee' \geq 0$	$ee' < 0$
$ e > a$	$K_p \propto 3e, \tau_d = 0, \omega_i = 0, \tau_f = 0$	
$b < e < a$	$K_p \propto 2e, \omega_i \propto 1/2e, \tau_d = \tau_{d_Max}, \tau_f = 0$	$K_p \propto e, \omega_i = 0, \tau_d = 0, \tau_f = 0$
$c < e < b$	$K_p \propto e, \omega_i \propto 1/e, \tau_d = \tau_{d_Max}, \tau_f = 0$	$K_p \propto e, \omega_i = \propto 1/e$
$d < e < c$	$K_p \propto e, \omega_i \propto 1/e, \tau_d \propto 1/e, \tau_f = \tau_{f_Mid}$	
$ e < d$	$K_p \propto e, \omega_i = \omega_{i_Max}, \tau_d \propto 1/e, \tau_f = \tau_{f_Max}$	

表1显示,当误差绝对值大于 a 时,只进行比例控制使误差尽快减小;误差绝对值在 c 与 b 之间时,引入了误差变化率以判断稳定平台所处的状态。误差加速增大阶段,提高 K_p 的增加速率与 ω_i 的减小速率,同时设 τ_d 为最大值,在非线性 PID 控制基础上进一步提高控制输出力度以快速抑制干扰力矩。误差减小阶段,先取消微分的作用使误差快速减小到 b ,然后逐步增加微分作用避免出现较大的反向误差。误差在 $d \sim c$ 之间,为避免引入过多微分误差,取消对误差变化率的观测,同时加入滤波器进一步抑制微分误差;当误差绝对值小于 d 时,增大积分控制与滤波器作用保证稳态精度。

4 实验结果分析

利用基于 dSPACE 搭建的半实物仿真平台对控制算法性能进行测试。图8显示了条件一冲击力矩为 0.026 N·m 的大力矩扰动下,普通 PID 与专家 PID 控制对比结果:采用普通 PID 控制,最大角速率误差 119°/s,最大角位置误差为 1.248°,调节时间为 0.35 s;采用专家 PID 控制,最大角速率误差为 71.11°/s,最大角位置误差为 0.7289°,调节时间为 0.25 s。对应到某红外成像视场中,像素偏移量分别为 50 Pixel 与 26 Pixel。图9显示了条件二冲击力矩为 0.01 N·m 的小力矩扰动下,控制算法对比结果:采用普通 PID 控制,最大角速率误差 48.61°/s,最大角位置误差为 0.478°,调节时间为 0.2 s;采用专家 PID 控制,最大角速率误差为 34.71°/s,最大角位置误差为 0.4234°,调节时间为 0.18 s。对应到某红外成像视场中,像素偏移量分别为 19 Pixel 与 16 Pixel。为使测试结果更为可靠,又分别进行了多次重复性实验,统计计算结果如表2、表3所示。

由实验结果可知:

1)专家 PID 较普通 PID 具有更好的动态性能,使稳定平台在较短的时间内对冲击力矩干扰进行有效抑制。

2) 随着冲击干扰力度的增大, 专家 PID 控制器的性能越明显, 但是专家 PID 的运算复杂性比普通 PID 高, 所以如果伺服运行环境较好, 受到的干扰力矩小于 $0.01 \text{ N}\cdot\text{m}$, 可以考虑只用普通 PID 控制。

5 结论

本文以小型稳定平台为研究对象, 以稳定回路控制算法作为研究重点, 通过分析影响平台力矩刚

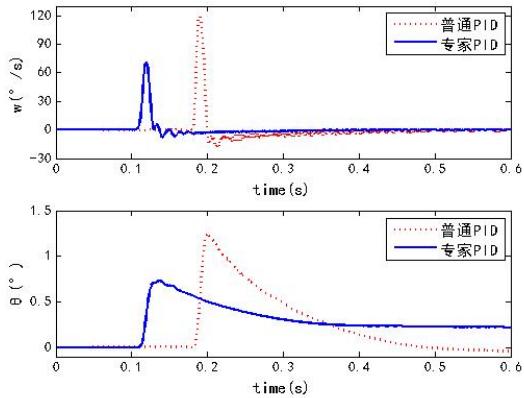


图 8 控制算法对大冲击力矩扰动抑制能力的对比

Fig.8 The control algorithms contrast of the ability to reduce the impact of the large torque disturbance

表 2 大冲击力矩扰动条件算法性能比较

Table 2 Algorithm performance contrast in the condition of large torque disturbance

	普通 PID	专家 PID
调整时间	0.35 s	0.28 s
最大角速率误差	113.4°/s	80.81°/s
最大角位移误差	1.3628°	0.9018°
像素偏移量	53 Pixel	31 Pixel

参考文献:

- [1] 王连明, 葛文奇, 李杰. 跟踪系统中跟踪器延迟的自适应预测补偿方法[J]. 光电工程, 2002, 29(4):13-16.
- [2] 姬伟, 李奇, 杨海峰. 四轴稳定跟踪转台伺服控制系统的研究与实现[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(3):70-75.
- [3] 姬伟. 陀螺稳定光电跟踪平台伺服控制系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2007:59-78.

度的因素, 得出执行机构与传感器的选型方案。并在普通 PID 控制算法的基础上, 针对冲击力矩扰动特性, 对线性 PID 算法进行非线性优化和专家 PID 优化设计。最后搭建半实物仿真平台对算法性能进行仿真比较。仿真结果表明, 专家 PID 控制较线性 PID 控制, 使稳定平台具有更好的动态力矩刚度, 对冲击扰动的抑制更为有效。

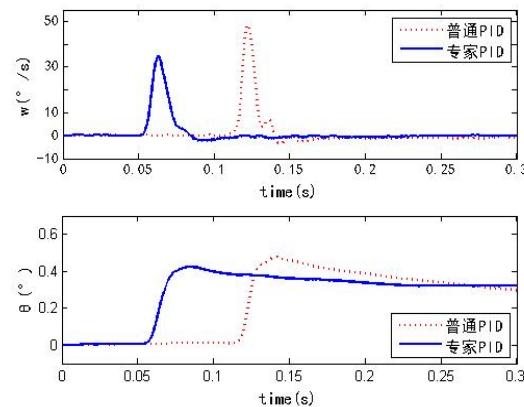


图 9 控制算法对小冲击力矩扰动抑制能力的对比

Fig.9 The control algorithms contrast of the ability to reduce the impact of the small torque disturbance

表 3 小冲击力矩扰动条件算法性能比较

Table 3 Algorithm performance contrast in the condition of small torque disturbance

	普通 PID	专家 PID
调整时间	0.2 s	0.17 s
最大角速率误差	52.82°/s	38.7°/s
最大角位移误差	0.6276°	0.5428°
像素偏移量	22 Pixel	19 Pixel

- [4] 朱海荣, 李奇, 方仕雄, 等. 导引头稳定转台伺服系统设计[J]. 东南大学学报, 2010, 40 (9)(增刊 I): 79-83.
- [5] 花文涛, 贾晓洪, 丁海山. 基于粒子群算法的导引头稳定平台控制参数设计[J]. 红外技术, 2013, 35(8): 507-511.
- [6] 洪华杰. 提高光电稳定平台伺服控制刚度的方法[J]. 光电工程, 2009, 36(8):5-9.