

文章编号 1004-924X(2021)12-2797-09

卫星星间激光通信粗跟踪转台控制系统

王文杰^{1,2,3}, 徐 伟^{1,3*}, 朴永杰^{1,3}, 冯汝鹏^{1,3}, 周美丽^{1,3}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 天基动态快速光学成像技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:为了满足卫星星间激光通信粗跟踪系统高的动态性能和稳态性能,针对普通PID控制存在阶跃响应超调量大、调节时间过长等问题,以永磁同步电动机为控制对象建立粗跟踪系统的三环控制模型,并进行matlab仿真分析。在普通PI控制的基础上提出一种自适应增益控制,为跟踪系统缩短调节时间改善超调等动态性能提供新的方法,在基于FPGA主控单元的控制下。地面实验表明,在 $187.25\ \mu\text{rad}$ (500码)阶跃信号的激励下,改进的自适应增益控制策略较普通PI控制,超调量由35.8%下降到10%,调节时间由100 ms缩短到70 ms,稳态精度保持在 $\pm 2.247\ \mu\text{rad}$ (3码),控制性能得到了显著改善。在轨工况下,自适应增益控制策略能够实现星间激光通信跟踪转台的高精度控制,同时对其他高精度伺服系统设计具有借鉴意义。

关 键 词:伺服控制;跟踪转台;永磁同步电机;自适应增益;控制性能

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20212912.2797

Control system for coarse tracking turntable of laser communication between satellites

WANG Wen-jie^{1,2,3}, XU Wei^{1,3*}, PIAO Yong-jie^{1,3}, FENG Ru-peng^{1,3}, ZHOU Mei-li^{1,3}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Space-based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: xwciomp@126.com

Abstract: With regard to meeting the highly dynamic and steady-state performance of the coarse tracking system used for laser communication in a satellite, under the action of the step signal, the ordinary PID control has drawbacks such as large step response overshoot and long adjustment time to fulfill the engineering requirements. This study uses permanent magnet synchronous motor (PMSM) as the control object to establish a three-loop control model of the coarse tracking system and performs MATLAB simulation analysis. An adaptive gain control is proposed on the basis of ordinary PI control, and theoretical proof and simulation are executed. It provides a new method for the tracking system to shorten the adjust-

收稿日期:2021-03-29;修订日期:2021-05-21.

基金项目:钱学森空间技术实验室创新工作站开放基金资助项目(No. GZZKFJJ2020003)

ment time and reduce the overshoot. The tracking system is controlled by the FPGA main control unit. In the ground test, under the excitation of a $187.25 \mu\text{rad}$ (500 yard) step signal, the improved adaptive gain control strategy is better than ordinary PI control, the overshoot is reduced from 35.8 % to 10 %, and the adjustment time of the system is shortened from 100 ms to 70 ms. The state accuracy is maintained at $2.247 \mu\text{rad}$ (± 3 yards), and the control performance is significantly improved. Under orbital conditions, the adaptive gain control strategy shows good control performance, meeting the high precision requirements of the tracking turntable used for inter-satellite laser communication, and it has reference significance for the design of other high-precision servo systems.

Key words: servo control; tracking turntable; permanent magnet synchronous motor; adaptive gain; control performance

1 引 言

卫星星间激光通信较其他通信方式具有通信容量大、保密性强等优势,同时可以减小卫星通信器件的质量和体积,是未来卫星星间通信的发展方向。卫星搭载的跟踪转台承载着信标、信号的收发光路,在异轨卫星激光通信终端实现光束收发的粗瞄准、扫描和跟踪控制。所以,高精度转台控制技术是建立稳定可靠通信链路的前提,也是星间激光通信的关键技术之一。

转台伺服控制工程上多采用经典比例积分微分 (Proportional-integral-differential, PID) 控制^[1-2]。PID 控制对控制对象建模的精确性依赖小、稳定性较好,但是其参数的整定尚无统一的方法,并对系统动态性能和稳态性能的控制能力有限。雷阳等^[3]提出用控制系统带宽的方法整定 PID 参数,以加快系统的响应速度和跟踪误差^[3]。林貽翔利用神经网络控制算法计算出非线性控制量,并作用于系统以减小摩擦力矩干扰,提高系统的动态过程和精度^[4],但算法相对复杂,对硬件要求较高。李争等通过设计自适应观测器对永磁同步电机电流进行预测,消除了传统 PI 电流控制器对参数的依赖,同时降低了系统的复杂性,提高了系统的控制性能和抗干扰能力^[5]。蒋祺等提出了一种考虑状态约束和随机扰动的模糊自适应反步方法对永磁同步电机随机系统进行位置跟踪控制,克服了随机扰动的影响,提高了目标跟踪速度^[6]。朱煜秋等提出一种基于 Takagi-Sugeno (T-S) 型模糊神经网络逆系统的

自抗扰控制方法,提高了控制系统的解耦性能、控制精度以及鲁棒性^[7]。谭平军等设计了一种新型前馈反馈复合控制器,该复合控制器重构了系统的误差传递函数,使系统能够准确跟踪给定信号,提高了伺服系统的跟踪性能和稳定性^[8]。刘国海等提出一种基于开关表的容错直接转矩控制 (Direct Torque Control, DTC) 策略,抑制了三次电流谐波以及转矩脉动,提高了永磁电机的运行稳定性和容错性^[9]。孙恺英等提出了一种基于超螺旋滑模自适应观测器 (Super-Twisting Algorithm Adaptive Observer, STA-AO) 的转速估计策略,替代观测器中的 PI 自适应机构,提高了观测器的鲁棒性,使控制系统具有更好的动态性能和鲁棒性^[10]。另有学者将一些先进的控制方法如鲁棒控制、最优控制、专家控制等综合运用在伺服控制上,但是这些先进算法还处于实验室阶段,工程应用实例较少。

本文采用 24 位绝对式光电编码器,要求跟踪转台的角位置控制精度不大于 $2.247 \mu\text{rad}$,阶跃幅值为 $187.25 \mu\text{rad}$ (500 码) 时,上升时间不大于 20 ms,超调量不大于 30 %;阶跃幅值为 $374.51 \mu\text{rad}$ (1 000 码) 时,上升时间不大于 25 ms,超调量不大于 20 %;阶跃幅值为 $561.76 \mu\text{rad}$ (1 500 码) 时,上升时间不大于 30 ms,超调量不大于 20 %。基于上述高精度控制需求,在普通 PI 控制算法的基础上提出一种自适应增益控制方法。该方法能够满足星间激光通信跟踪转台高的稳态性能和动态性能要求。

2 系统组成与工作原理

转台控制系统主要由二维转台台体和转台驱动控制器组成。二维转台台体主要包含伺服框架及底座、力矩电机和绝对式光电编码器(24位)等。伺服框架采用方位、俯仰两轴U型架结构以及高精度轴系等,框架安装在底座上,台体具体结构模型如图1所示。转台驱动控制器主要包含现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array,FPGA)核心处理器、AD和通信接口模块等,如图2所示。

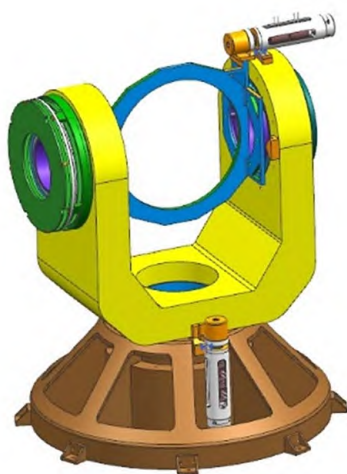


图1 转台台体结构模型
Fig. 1 Model of turntable body mechanism

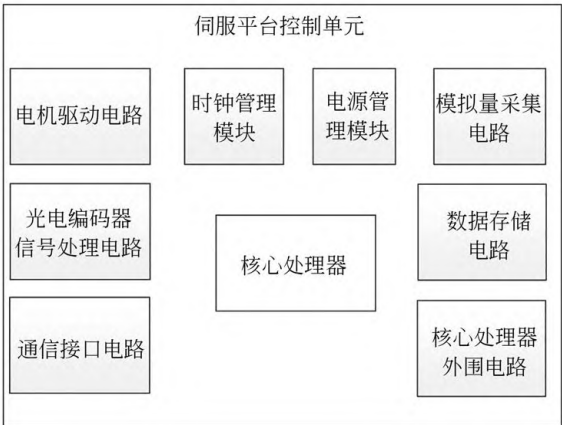


图2 转台驱动控制器
Fig. 2 Turntable drive controller

当星上中心计算机发现并确认目标后,发送指令命令粗跟踪系统进行视轴控制。当目标卫星进入跟踪精度范围并连续多个周期逼近跟踪中心时,星上中心计算机通过星历和轨道高度等计算出接收光束出现的不确定区域,并实时提供不确定区域的坐标。粗跟踪转台控制系统接收位置信息,经过数据处理后驱动方位轴电机和俯仰轴电机转动,使得光学载荷对捕获不确定区域进行一定轨迹的扫描,目标捕获后进入精瞄过程。精瞄由测角系统完成,随后进行目标跟踪,最终建立完整的通信链路。工作原理如图3所示。

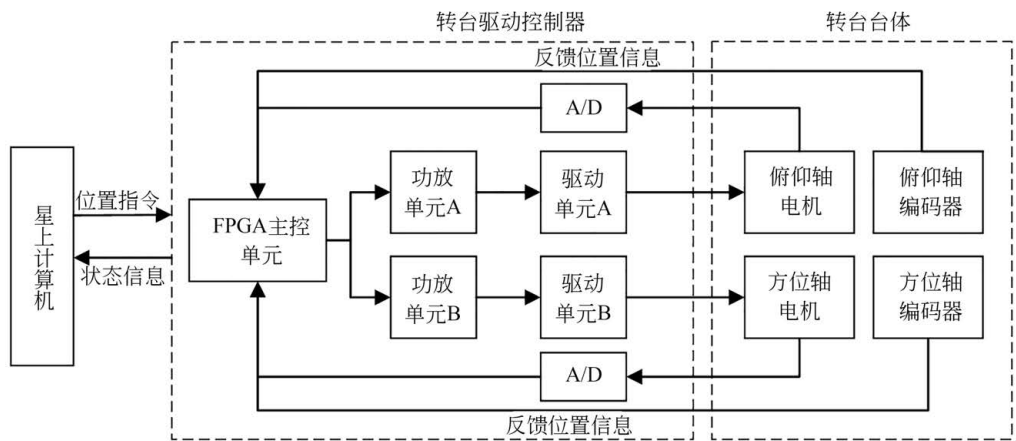


图3 粗跟踪转台控制系统的工作原理
Fig. 3 Working principle of coarse tracking turntable control system

3 仿 真

3.1 电机模型

转台粗跟踪系统采用三相表贴式永磁同步

电机为控制对象,此类型电机结构简单、体积小、质量轻,无换向火花干扰,可靠性和寿命极高,还具有高转矩质量比、效率高、输出线性度高及力矩波动小等优点,在空间环境得到了广泛应用。

同时采用 $i_d=0$ 的基于转子磁场的矢量控制算法,这种算法具有线性转矩特性、控制效率高、调节器设计容易实现及速度调节范围较宽等优点。

为简化分析过程,建模前做如下假设:(1)定子三向绕组产生的电枢反应磁场和永磁体产生的励磁磁场在气隙中呈正弦分布;(2)永磁体内部的磁导率和气隙相同,永磁材料电导率为零;(3)忽略定转子的铁芯磁阻,无涡流损耗和磁滞损耗;(4)定子三相绕组呈 Y 型对称连接。永磁同步电机在 d, q 轴旋转坐标系下的数学模型为^[11]:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + p\psi_d - \omega\psi_q \\ u_q = Ri_q + p\psi_q - \omega\psi_d \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p_n i_q \psi_f \quad (3)$$

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (4)$$

其中: u_d, u_q 分别是定子电压矢量的 d, q 轴分量; R 为定子一相电阻; p 是微分算子; i_d, i_q 分别是定子电流矢量的 d, q 轴分量; ψ_d, ψ_q 分别是定子磁链矢

量的 d, q 轴分量; ψ_f 是转子磁链矢量; T_e 为电磁转矩; P_n 为极对数; ω_m 为转子的角速度; J 为电机轴端的转动惯量; B 代表阻尼系数; T_L 为负载转矩。式(1)~式(4)分别描述了永磁同步电机在 d, q 旋转轴下的电压方程、磁链方程、转矩方程和运动方程,此外还应注意两个重要关系式:

$$\begin{cases} \omega_e = p_n \omega_m \\ \theta_e = \int \omega_m dt \end{cases} \quad (5)$$

其中 ω_e 为电角度, θ_e 为转子磁场矢量位置。

通过分析以上永磁电机的数学模型可知,控制转速以及位置的关键在于转矩的控制,而转矩的控制在于电流分量 i_q 的控制。对于三相永磁同步电机的控制系统,其本质是一个高精度的位置、速度闭环电气伺服系统。由于转台需要高精度的位置控制,所以控制方案采用了经典的电流环、速度环、位置环“三环结构”^[12]。电流环和速度环的作用是提高了系统的刚度,以抑制系统的非线性及外部扰动,位置环用来保证控制系统的精度。由此确定控制策略,再结合式(1)~式(4)得到 PMSM 矢量控制结构框图,如图 4 所示。

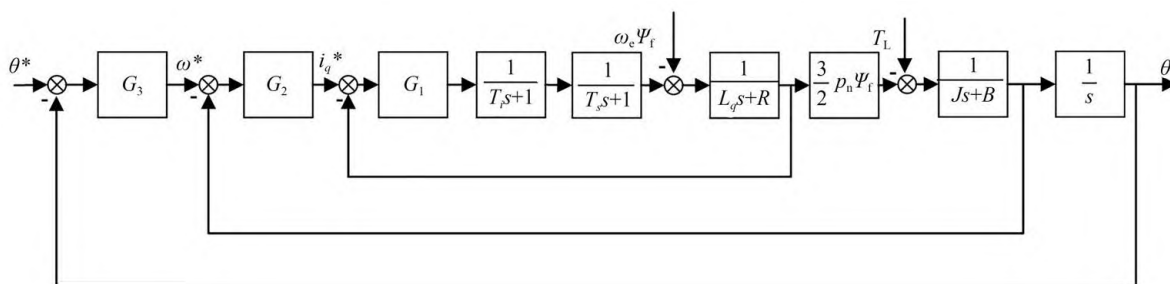


图 4 PMSM 矢量控制伺服系统结构框图

Fig. 4 Block diagram of PMSM vector control servo system structure

3.2 电流环设计

依据工程设计的原则从内环到外环依次进行设计,在设计过程中进行必要的合并和转化。实际工况下,电机由于惯性的影响,转速的变化比电流慢很多,为简化分析,暂不考虑反电势以及阻尼的扰动影响^[13]。 G_1 为电流调节器, G_2 为速度调节器,可表示为:

$$\begin{cases} G_1 = k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} = k_{ip} \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \\ G_2 = k_{\omega p} + \frac{k_{\omega i}}{s} = k_{\omega p} \frac{\tau_\omega s + 1}{\tau_\omega s} \end{cases} \quad (6)$$

综上电流环开环传递函数描述为:

$$G_{io} = k_{ip} \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \cdot \frac{1}{T_i s + 1} \cdot \frac{1}{T_s s + 1} \cdot \frac{1}{L_q s + R} \quad (7)$$

当开关频率很高时, $\frac{1}{T_i s + 1}$ 与 $\frac{1}{T_s s + 1}$ 都是小惯性环节, 只会对系统的高频特性有所影响, 而系统的中低频决定系统的动态过程和稳态过程, 所以上述电流环开环可简化为:

$$G_{io} = k_{ip} \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \cdot \frac{1}{2T_s s + 1} \cdot \frac{1}{L_q s + R}. \quad (8)$$

在稳态情况下, 希望电流内环的稳态误差为零, 并且能很好地跟随电流的参考值, 所以工程上一般将电流环设计成二阶环节。同时为实现降阶处理, 令:

$$\tau_i = \frac{L_q}{R}. \quad (9)$$

由此可以得到二阶形式的电流环开环传递函数, 可描述为:

$$G_i(s) = \frac{k_{ip}}{R_1 \tau_i s (2T_s s + 1)} = \frac{K_1}{s(T_1 s + 1)}. \quad (10)$$

工程上, 希望电流超调量不要太大, 阻尼比通常选取最佳值 0.707, 由此整定 $T_1 K_1 = 0.5$ 。控制器参数为:

$$\begin{cases} k_{ip} = \frac{L_q}{4T_s} \\ k_{ii} = \frac{R}{4T_s} \end{cases}. \quad (11)$$

3.3 速度环设计

在设计速度环时, 利用 pade 降阶算法^[14], 可将上述电流环简化为一阶环节, 可描述为:

$$G_1 = \frac{1}{4T_s s + 1}. \quad (12)$$

将简化后的电流环放入速度环, 得到的控制框图如图 5 所示。

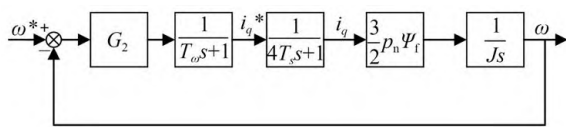


图 5 简化速度环结构

Fig. 5 Simplified speed loop structure

在设计速度环时, 希望稳态过程对速度的跟踪无静差, 并且能较好地抵抗外界的干扰, 因此可将速度环设计成典型的 II 型系统。将上述框图中两个小惯性环节近似处理成一个, 得到的速度

开环传递函数为:

$$G_{\omega o} = \frac{3p_n \psi_f k_{\omega p} (\tau_\omega s + 1)}{2J \tau_\omega s^2 [(T_\omega + 4T_s)s + 1]} = \frac{K_2 (\tau_\omega s + 1)}{s^2 (T_2 s + 1)}. \quad (13)$$

工程实践中, 对于 II 型系统, 常采用最小 M_r 设计法对控制器进行设计, M_r 为系统谐振频率。综合考虑抗扰动性能与跟踪性能, 通常选取中频带 $h=5$, 即:

$$h = \frac{\tau_\omega}{T_2} = 5. \quad (14)$$

并且存在:

$$K_2 = \frac{h+1}{2h^2 T_2^2}. \quad (15)$$

忽略滤波环节的影响, 由式(12)~式(15)计算得 PI 控制器参数为:

$$\begin{cases} k_{\omega p} = \frac{J}{10T_s p_n \psi_f} \\ k_{\omega i} = \frac{J}{200T_s^2 p_n \psi_f} \end{cases}. \quad (16)$$

对于转台伺服控制最外环位置环, 工程中一般将速度环控制器设计为比例调节器, 通过调节比例调节器参数, 控制转台位置环的动态过程以及超调量。因为相较于速度环, 位置环的截止频率低, 所以可将速度环简化为一阶惯性环节。综上, 转台粗跟踪伺服系统采用三环结构, 其中电流环速度环采用 PI 调节器, 电流环依据二阶环节最佳阻尼比确定控制参数, 速度环依据最小 M_r 设计控制器参数。控制系统原理如图 6 所示。

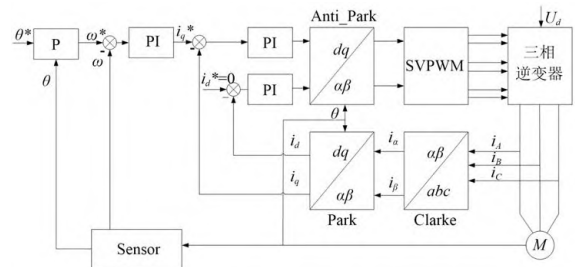


图 6 转子磁场定向控制系统原理

Fig. 6 Principle diagram of rotor field orientation control system

采用上述普通 PI 算法, 选定的永磁同步电机参数如表 1 所示, 并运用 matlab 仿真工具得到转台伺服控制系统的单位阶跃响应, 如图 7 所示。

表 1 永磁同步电机参数

Tab. 1 Parameter of permanent magnet synchronous motor

参 数	值
定子一相电阻 R/Ω	0.40
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.35
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	0.05
电感 L_q/H	0.23
极对数 $P_n/\text{对}$	11

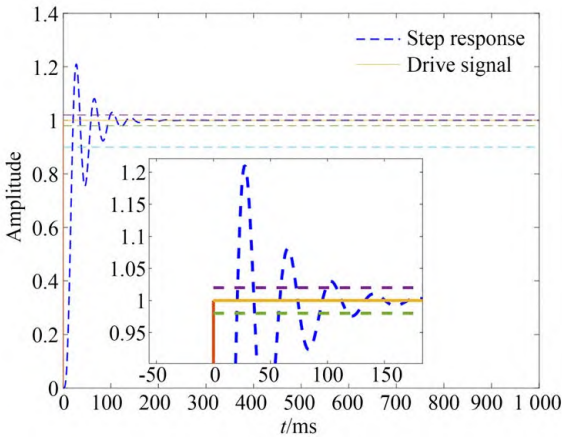


图 7 转台伺服系统阶跃响应

Fig. 7 Step response of turntable servo system

由图 7 可知,系统的调节时间为 108 ms,超调量 21%。由于星间激光通信伺服转台的动态性能和稳态性能要求高,采用普通的 PI 控制无法满足要求。

4 算法改进

基于上述普通 PI 控制策略的基础上,为提高伺服转台的动态性能和稳态性能,将普通 PI 控制的上升时间作为参量来整定位置环增益参数,使得控制过程初期误差较大时增益较大,输出快速上升,提高系统的快速性;在接近目标值时增益自适应降低,以降低超调,缩短调节时间,其控制原理如图 8 所示。图中, t_r^* 为普通 PI 控制的上升时间, t 为控制时间, K_{pp} 为位置环增益, k_i 为增益系数,取值为 0~1,第一个环节为变增益环节,中间环节为控制阶段判定环节,在期望峰值时间之前使得变增益环节作用于控制系统,底层为固定增益环节,在时间 t_r^* 结束后作用于控制系统。通

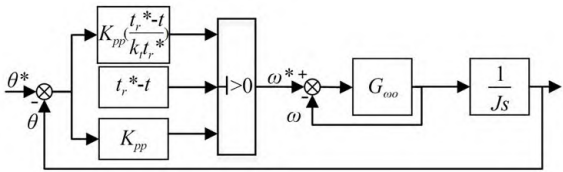


图 8 自适应增益控制原理

Fig. 8 Schematic diagram of adaptive gain control

过 matlab 将普通 PI 控制与自适应变增益控制进行仿真,结果如图 9 所示。其中,实际位置 1 表示采用自适应增益算法时的系统响应,实际位置 2 表示采用经典 PID 算法时的系统响应,控制性能对比如表 2 所示。

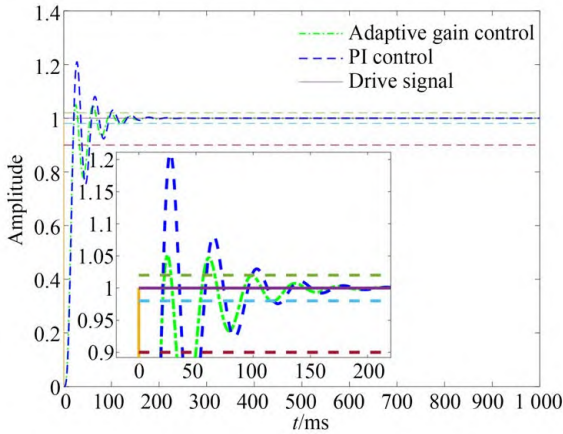


图 9 经典 PI 控制与自适应增益控制的阶跃响应对比

Fig. 9 Comparison of step response between classical PI control and adaptive gain control

表 2 阶跃响应性能指标对比

Tab. 2 Index comparison of step response performance

方 法	超调量 $\sigma/\%$	调节时间 t_s/ms	上升时间 t_p/ms
经典 PID 控制	21	108	19
自适应增益控制	5	89	19

图 9 和表 2 表明,采用自适应增益控制较普通 PI 控制,控制系统的超调量由 21% 下降到 5%,上升时间保持不变为 19 ms。调节时间由 108 ms 缩短到 89 ms,综合来看,采用自适应增益控制提高了控制系统的动态性能和稳态性能,整体控制效果较普通 PI 控制有较大提升。

5 实 验

为了进一步验证改进算法的控制性能,采用卫星激光通信粗跟踪系统进行地面试验,其转台及控制器实物如图 10~图 11 所示。

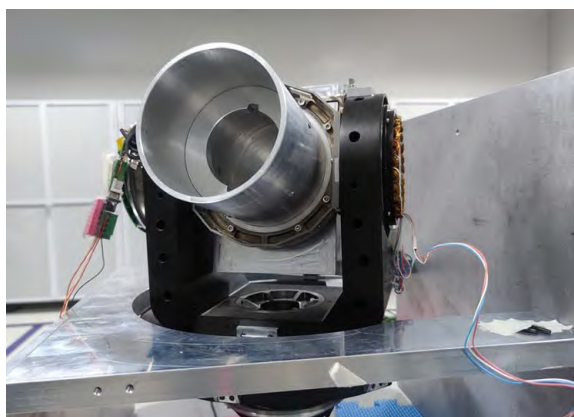


图 10 转台照片

Fig. 10 Physical map of turntable



图 11 控制器照片

Fig. 11 Physical map of controller

激励信号采用阶跃信号,采用幅值分别为 $187.25\ \mu\text{rad}$ (500 码)、 $374.51\ \mu\text{rad}$ (1 000 码)、 $561.76\ \mu\text{rad}$ (1 500 码) 的信号对粗跟踪系统进行阶跃响应实验,实验结果如图 12~图 14 所示。图中实际位置 1 表示自适应增益控制算法下的响应曲线,实际位置 2 代表普通 PI 控制算法下的响应曲线。粗跟踪系统对各个激励信号的响应性能如表 3~表 5 所示。结果显示,自增益控制算法较普通 PI 控制算法,控制系统的超调量大幅减小,

上升时间和调节时间缩短,性能改善显著。

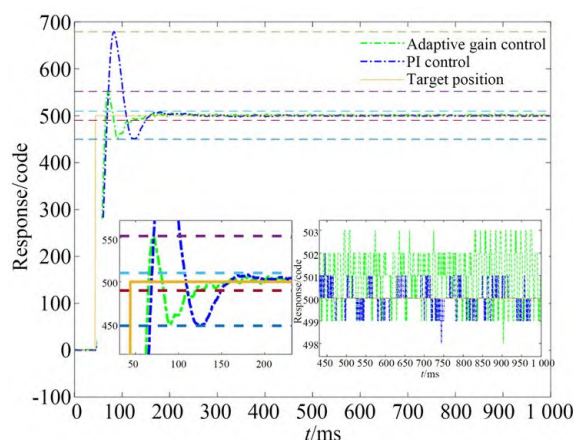


图 12 500 码阶跃响应

Fig. 12 500 code step response

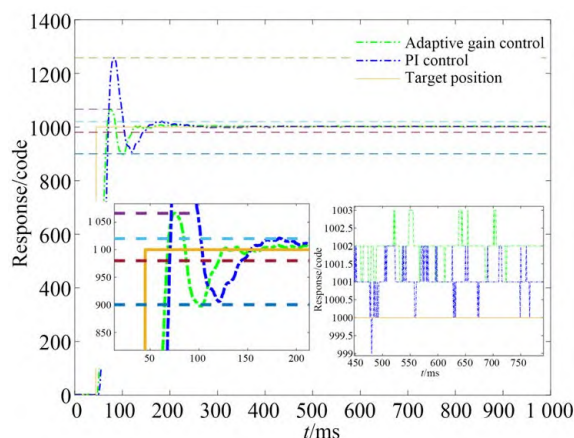


图 13 1 000 码阶跃响应

Fig. 13 1 000 code step response

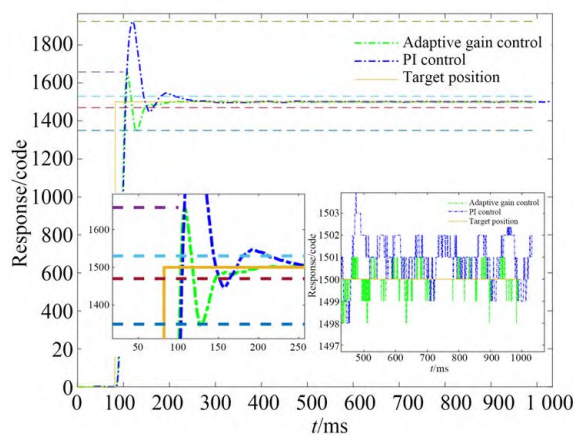


图 14 1 500 码阶跃响应

Fig. 14 1 500 code step response

表 3 500 码阶跃响应性能指标对比

Tab.3 Performance comparison of 500 code step response

方 法	超调量 $\sigma/\%$	调节时间 t_s/ms	上升时间 t_p/ms
普通 PI 控制	35.8	100	18
自适应增益控制	10	70	14

表 4 1 000 码阶跃响应性能指标对比表

Tab.4 Performance comparison of 1 000 code step response

方 法	超调量 $\sigma/\%$	调节时间 t_s/ms	上升时间 t_p/ms
普通 PI 控制	25.7	100	24
自适应增益控制	6.6	75	20

6 结 论

本文介绍了卫星激光通信粗跟踪伺服系统的结构及工作原理,并以永磁同步电机为控制对

表 5 1 500 码阶跃响应性能指标对比表

Tab.5 Performance comparison of 1 500 code step response

方 法	超调量 $\sigma/\%$	调节时间 t_s/ms	上升时间 t_p/ms
普通 PI 控制	29.3	122	23
自适应增益控制	10.5	62	18

象,采用三环结构进行经典 PID 控制器设计。针对采用经典 PID 控制策略控制系统阶跃响应超调量大,调节时间长的问题,提出一种位置环自适应增益控制算法,并进行了 matlab 仿真和地面实验。187.25 μrad (500 码)阶跃响应表明,采用自增益控制算法较经典 PI 算法,超调量由 35.8% 下降到 10%,调节时间由 100 ms 缩短到 70 ms,上升时间由 18 ms 缩短到 14 ms。实验结果表明,自适应增益算法具有先进性及可行性,对其他高性能伺服系统设计具有借鉴和参考意义。

参考文献:

- [1] 郭超勇,刘继奎,程俊波,等. 卫星激光通信粗跟踪系统复合控制策略[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4): 946-953.
GUO CH Y, LIU J K, CHENG J B, *et al.* Compound control strategy of satellite laser communication coarse tracking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(4): 946-953. (in Chinese)
- [2] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
HAN J Q. From PID technique to active disturbances rejection control technique [J]. *Basic Automation*, 2002, 9(3): 13-18. (in Chinese)
- [3] 雷阳,徐静,郝强,等. 基于带宽的永磁同步电机伺服控制器设计[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(6): 677-683.
LEI Y, XU J, HAO Q, *et al.* Design of permanent magnet synchronous motor servo controller based on bandwidth[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2019, 43(6): 677-683. (in Chinese)
- [4] 林貽翔. 神经网络非线性智能控制在光电跟踪系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2018, 26(12):

2949-2955.

- LIN Y X. Application of neural network-based non-linear intelligent control in electro-optical tracking systems[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(12): 2949-2955. (in Chinese)
- [5] 李争,安全峰,肖宇,等. 基于自适应观测器的永磁同步直线电机模型预测控制系统设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(6): 1190-1200.
LI ZH, AN J F, XIAO Y, *et al.* Design of model predictive control system for permanent magnet synchronous linear motor based on adaptive observer [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(6): 1190-1200. (in Chinese)
- [6] 蒋祺,崔英英,于金鹏,等. 基于状态约束的 PMSM 随机系统模糊自适应控制[J]. 控制工程, 2021, 28(2): 222-228.
JIANG Q, CUI Y Y, YU J P, *et al.* Fuzzy adaptive control of PMSM stochastic system based on state constraints[J]. *Control Engineering of China*, 2021, 28(2): 222-228. (in Chinese)
- [7] 朱焜秋,顾志伟. 基于模糊神经网络逆系统的五自由度无轴承永磁同步电机自抗扰控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(2): 72-81.
ZHU H Q, GU ZH W. Active disturbance rejection

- control for 5-degree-of-freedom bearingless permanent magnet synchronous motor based on inverse system using the fuzzy neural network[J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(2): 72-81. (in Chinese)
- [8] 谭华军, 和阳, 赵文祥, 等. 双三相永磁同步电机位置伺服前馈反馈复合控制[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(2): 22-30.
TAN H J, HE Y, ZHAO W X, *et al.* Compound position servo control for dual three-phase permanent magnet synchronous motor by using feedforward and feedback[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(2): 22-30. (in Chinese)
- [9] 刘国海, 曹彦琳, 周华伟, 等. 基于新型开关表的五相永磁同步电机容错直接转矩控制[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(18): 6399-6408.
LIU G H, CAO Y L, ZHOU H W, *et al.* Novel switching-table based fault tolerant DTC for five-phase PMSM[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(18): 6399-6408. (in Chinese)
- [10] 孙恺英, 李冬辉, 姚乐乐, 等. 基于新型超螺旋滑模自适应观测器的永磁同步电机转速估计策略[J]. *高电压技术*, 2020, 46(11): 3771-3781.
SUN K Y, LI D H, YAO L L, *et al.* Speed estimation algorithm for permanent magnet synchronous motor based on novel super-twisting adaptive observer[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(11): 3771-3781. (in Chinese)
- [11] 袁登科, 徐延东, 李秀涛. 永磁同步电动机变频调速系统及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
YUAN D K, XU Y D, LI X T. *Permanent Magnet Synchronous Motor Variable Frequency Speed Regulation System and Its Control* [M]. Beijing: China Machine Press, 2015. (in Chinese)
- [12] 邓永停, 李洪文, 陈涛. 2 m 级望远镜跟踪架控制系统动态性能分析[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(3): 654-661.
DENG Y T, LI H W, CHEN T. Dynamic analysis of two meters telescope mount control system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(3): 654-661. (in Chinese)
- [13] 王莉娜, 朱鸿悦, 杨宗军. 永磁同步电动机调速系统 PI 控制器参数整定方法[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(5): 104-117.
WANG L N, ZHU H Y, YANG Z J. Tuning method for PI controllers of PMSM driving system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(5): 104-117. (in Chinese)
- [14] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计: MATLAB 语言与应用[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2012.
XUE D Y. *Computer Aided Control Systems Design Using MATLAB Language Computer Aided Control Systems Design Using MATLAB Language* [M]. Third Version. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)

作者简介:



王文杰(1996—),男,山东潍坊人,硕士研究生,2003年于郑州大学获得学士学位,主要从事电机伺服控制的研究。E-mail: wjw371617@163.com

通讯作者:



徐伟(1981—),男,黑龙江大庆人,博士,研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航天光学遥感和新体制光学成像技术的研究。E-mail: xw-ciomp@126.com