

文章编号 1004-924X(2022)23-3070-11

基于轨迹规划的地基望远镜快速高精度定位策略

刘京¹, 邓永停^{1*}, 费强², 李洪文¹, 邵蒙¹

(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. 季华实验室, 广东 佛山 528033)

摘要:为了提高地基望远镜的定位性能,实现快速无超调的高精度位置切换控制,提出了基于近似最优指令整形算法的轨迹规划定位策略。利用近似最优指令整形算法设计指令修正器,指令修正器位于位置控制器之前,依据参考指令、速度、加速度限幅信息进行轨迹规划,引导系统快速平滑地到达目标位置。相比传统梯形指令整形算法,近似最优指令整形算法解决了抖振问题,因此可获得更优的位置控制性能。实验结果表明,系统响应 2.5° 和 30° 位置阶跃信号时,相比无轨迹规划定位策略,采用轨迹规划定位策略后位置响应超调量大大降低,系统进入 $2''$ 误差带的调节时间分别降低了1.14 s和1.57 s。仿真和实验结果一致,基于近似最优指令整形方法的轨迹规划定位策略,可有效提高望远镜的定位性能。

关键词:地基望远镜;定位性能;轨迹规划;指令整形算法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20223023.3070

Fast and high precision positioning strategy based on trajectory planning for ground based telescope

LIU Jing¹, DENG Yongting^{1*}, FEI Qiang², LI Hongwen¹, SHAO Meng¹

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

2. Ji Hua Laboratory, Foshan 528000, China)

* Corresponding author, E-mail: dyt0612@163.com

Abstract: In order to achieve fast and high-precision position switching control of a ground-based telescope, without overshoot and while improving the positioning performance, a trajectory-planning strategy based on an approximate optimal-command-shaping algorithm is proposed. The approximate optimal-command-shaping algorithm is utilized to design the command shaper, which is located before the position controller. The designed command shaper is able to perform trajectory planning, using the reference command, and the speed- and acceleration-limit information of the system. As a result of the algorithm-designed command shaper, the system can be guided to its destination quickly and smoothly. Compared to the traditional trapezoidal-command-shaping algorithm, the proposed approximate optimal-command-shaping algorithm overcomes the problem of chattering, thus achieving better position-control performance. The experimental results demonstrate that, compared to the positioning strategy without trajectory plan-

收稿日期:2022-09-30;修订日期:2022-11-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11973041, No. 12122304);中国科学院青年创新促进会资助项目(No. 2019218)

ning, the system using the proposed positioning strategy has a reduced adjustment time. In particular, the adjustment time for the system to enter the $2''$ error band in response to a 2.5° and 30° step reference is reduced by 1.14 s and 1.57 s, respectively. In addition, the overshoot of the position response is significantly reduced. The simulation and experimental results show that the positioning performance of the telescope can be improved effectively by the trajectory-planning positioning strategy, based on the proposed approximate optimal-command-shaping method.

Key words: ground based telescope; positioning performance; trajectory planning; command shaping algorithm

1 引 言

地基光学望远镜在观测运行过程中,通常需要执行两类快速精确定位动作,一是小角度切换定位,主要用来实现特定天区目标的步进搜索动作;另一个是大角度调转定位,主要用来实现望远镜视轴方向的调转动作。特别是对于某些天文大视场望远镜、激光测距望远镜来说,为了保证望远镜系统的观测效率,通常要求伺服控制系统在固定时间内步进单个视场,以及在固定时间内调转视轴。因此,固定时间内的快速高精度定位对于望远镜来说十分重要。

在实际的望远镜伺服控制系统中,由于驱动器功率、电机功率等因素的影响,一般会对伺服驱动控制电流进行限制,即对速度控制器输出的电流参考指令进行限幅处理。此外,出于安全性的考虑,一般也会对系统运行的最大速度进行限制,即对位置控制器输出的速度参考指令进行限幅处理。PI等常规控制器的参数是线性区域整定的,只有工作在线性区域才能保证控制效果。但是,望远镜在定位过程中,特别是大型望远镜,由于伺服控制系统中的限幅环节,控制器非常容易进入饱和非线性工作状态,进而导致控制性能下降,出现积分饱和现象。控制器积分饱和会导致系统超调量增大,调节时间变长,不利于系统实现快速高精度定位^[1-4]。

针对伺服控制系统中由于控制输出限幅导致的积分饱和问题,传统的解决方法是从控制器的角度出发使用抗积分饱和算法,如条件积分法^[5]、反计算法^[6]、积分状态预测法^[7]、变结构控制^[8-9]及一些新型抗积分饱和方法^[10-13]等。它们通过削弱或关闭控制器饱和时积分项的作用,来抑制积分饱和给系统带来的影响。此外,有研究

人员提出从轨迹规划的角度来实现伺服控制系统的快速平滑定位,即依据系统的限幅信息利用算法对输入位置指令进行整形,再利用生成的修正指令引导系统进行闭环控制^[14-17]。修正指令中包含了系统的限幅信息,可有效抑制积分饱和现象。与传统的抗积分饱和方法不同,通过轨迹规划实现抗积分饱和仅在参考指令和位置控制器之间加入一个指令修正器,其优点在于不影响伺服系统的位置和速度闭环控制结构,仅在使用时开启即可。该方法不需要将抗积分饱和和算法设计到控制器中,可大大降低控制器设计的复杂度。

Gawronski提出了基于闭环反馈控制的指令整形方法,该方法的指令修正效果与反馈控制器的参数直接相关,但是无法直接确定生成的修正指令可引导系统以最大能力快速到达目标位置^[18]。相比基于闭环反馈控制的指令整形方法,梯形指令整形方法^[19]避免了复杂的参数调整问题,直接依据限幅信息生成修正指令,修正指令能够引导系统以最大能力在最短时间内到达目标位置。但是,该方法的一个缺点是,在生成修正指令速度信号的过程中存在切换函数,导致引导轨迹中包含一定程度的抖振。这可能导致伺服控制系统定位稳态时仍存在抖振,定位精度降低。

本文分析了上述两种指令整形算法,针对传统梯形指令整形方法的缺点,提出近似最优指令整形算法。近似最优指令整形算法引入双曲正切函数来近似逼近切换函数,利用双曲正切函数平滑的过渡段,解决传统梯形指令整形方法稳态时的抖振问题。最后,通过实验验证了基于近似最优指令整形算法的轨迹规划定位策略对于实现望远镜快速高精度定位的有效性。

2 传统指令整形算法

2.1 基于闭环反馈控制的指令整形算法

基于闭环反馈控制的指令修正结构框图如图 1 所示,该指令修正器的核心是变增益控制器的设计。指令跟踪误差定义为 $\delta_\theta = \theta_{\text{ref}} - \theta_{\text{cm}}$ 。根据推导可得,当前采样周期的跟踪误差 $\delta_\theta(i+1)$ 和前一个采样周期的跟踪误差 $\delta_\theta(i)$ 之间满足如下关系:

$$\delta_\theta(i+1) = (1 - k_p \cdot \Delta T) \cdot \delta_\theta(i) = \alpha \cdot \delta_\theta(i), \quad (1)$$

式中 α 为误差收敛系数。

变增益控制器设计的表达式如下^[20]:

$$G(s) = k_p(\delta_\theta) = k_{p0} + k_{pr} \cdot e^{-|\beta \cdot \delta_\theta|}, \quad (2)$$

式中: k_{p0} 为常值系数部分, $k_{pr} \cdot e^{-|\beta \cdot \delta_\theta|}$ 为变系数部分,即变增益系数; β 为常值系数,它影响控制器增益随指令修正误差的变化率。

该变增益控制器的设计可满足:当指令跟踪误差较大时, k_p 减小以增大 α 值,保证系统快速逼近给定指令;当指令跟踪误差较小时, k_p 增大以减小 α 值,保证系统平稳的末端收敛以及高精度稳态跟踪。常值系数部分保证系统稳定收敛,变增益系数部分调整系统的收敛速度,二者共同构成了变增益控制器。变增益控制器的输出量 u 先后经过加速度限幅和速度限幅环节后输出修正指令速度 v_{cm} , v_{cm} 再经过积分环节便可输出修正指令 θ_{cm} 。

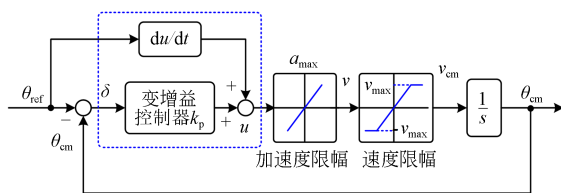


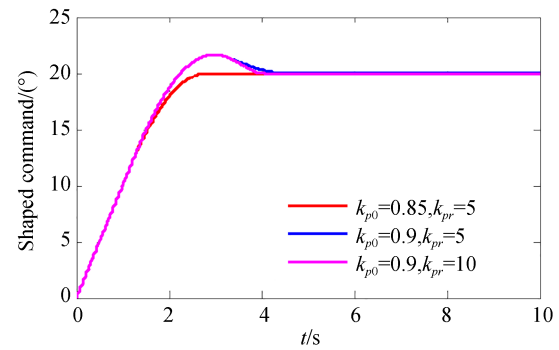
图 1 基于闭环反馈控制的指令修正结构框图

Fig.1 Block diagram of command shaper based on closed-loop feedback control

给定幅值为 20° 的位置阶跃参考指令,速度限幅为 $10 (^\circ)/\text{s}$,加速度限幅为 $6 (^\circ)/\text{s}^2$,采用基于闭环反馈控制的指令整形算法,变增益控制器取不同控制参数 ($k_{p0}=0.85, k_{pr}=5$; $k_{p0}=0.9, k_{pr}=5$; $k_{p0}=0.9, k_{pr}=10$) 时,轨迹规划仿真结果如图 2 所示。可以看出,该指令修正器对给定参考

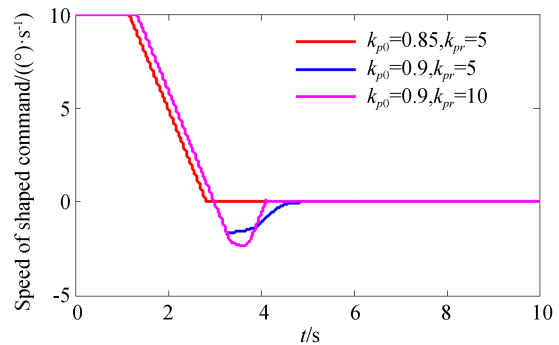
指令的整形效果完全取决于变增益控制器;当变增益控制器的常值系数和变增益系数改变时,修正指令曲线均发生变化。

当 $k_{p0}=0.85, k_{pr}=5$ 时,修正指令快速无超调,获得了较优的指令整形效果;当 k_{p0} 增加至 0.9 时,修正指令中出现了较大超调,这对系统的



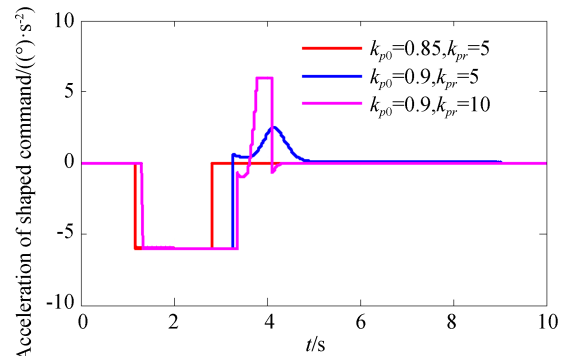
(a) 修正指令

(a) Shaped command



(b) 修正指令速度

(b) Speed of shaped command



(c) 修正指令加速度

(c) Acceleration of shaped command

图 2 基于闭环反馈控制的指令整形结果

Fig.2 Command shaping results based on closed-loop feedback control

快速无超调精确定位是十分不利的。因此,变增益控制器的参数选取尤为重要,它决定系统的指令整形效果,影响最终的位置控制性能。

2.2 梯形指令整形算法

梯形指令整形算法不采用闭环控制结构,而是直接根据给定限幅信息生成修正指令,其重点在于轨迹变化过程中的减速段。

减速段修正指令的速度表达式如下:

$$v_{\text{dec}} = v_r + \text{sign}(\epsilon) \sqrt{2a_{\text{max}}|\epsilon|}, \quad (3)$$

式中: v_{dec} 为理想减速段的修正指令速度, ϵ 为指令跟踪误差, a_{max} 为加速度限幅值, $v_r = dr/dt$,为修正指令终段参考速度, r 为给定参考指令。

在初始段,修正指令速度 v_{cmd} 以最大加速度 a_{max} 不断增加到最大速度 v_{max} 。此时, $v_{\text{cmd}} < v_{\text{dec}}$ 。随着指令跟踪误差逐渐减小, v_{dec} 不断减小,直至与 v_{cmd} 相等,修正指令速度 v_{cmd} 开始进入下降段, v_{cmd} 和 v_{dec} 的变化如图3所示。

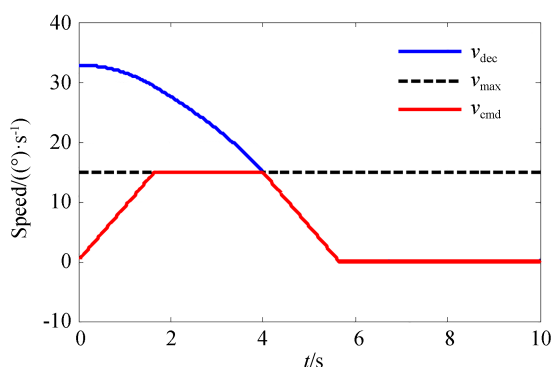


图3 v_{cmd} 和 v_{dec} 的变化曲线

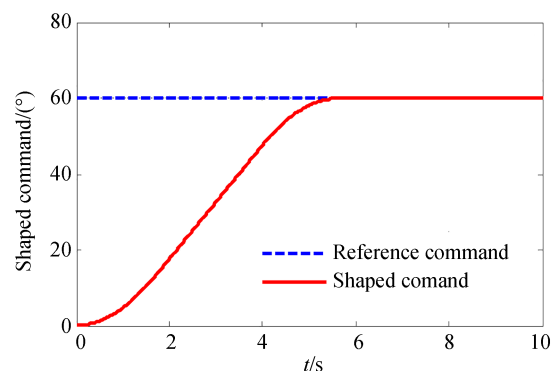
Fig. 3 Variation curves of v_{cmd} and v_{dec}

梯形指令整形算法表达式如下:

$$\begin{cases} v_a = v_{\text{cmd}}(k) + a_{\text{max}} \Delta t \\ v_{\text{cmd}}(k+1) = \text{sat}\{v_a, \min(v_{\text{dec}}, v_{\text{max}})\} \end{cases} \quad (4)$$

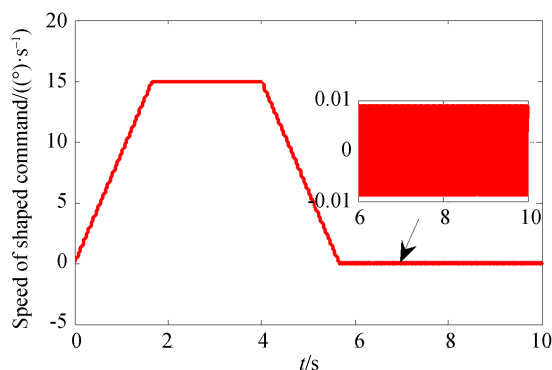
从梯形指令整形算法的设计过程可以看出,该方法无需调整控制参数,仅依据速度和加速度限幅信息,便可通过公式计算实现指令整形。相比基于闭环反馈控制的指令整形算法,该方法解除了指令整形效果对控制参数的依赖。

假定参考指令为幅值为 60° 的位置阶跃信号,系统速度限幅为 $15^\circ/\text{s}$,加速度限幅为 $9^\circ/\text{s}^2$ 。采用梯形指令整形算法进行轨迹规划生成修正指令,仿真结果如图4所示。由图4可



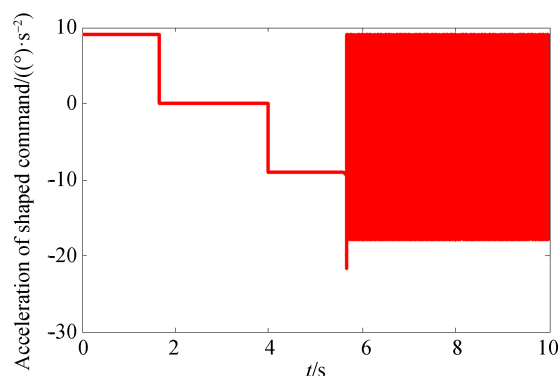
(a) 修正指令

(a) Shaped command



(b) 修正指令速度

(b) Speed of shaped command



(c) 修正指令加速度

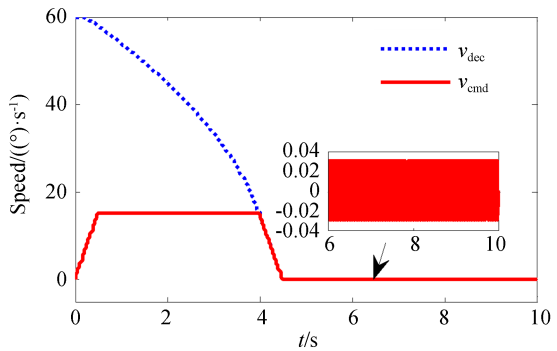
(c) Acceleration of shaped command

图4 梯形指令整形算法结果

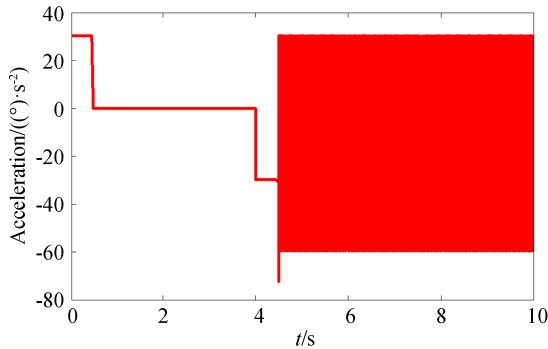
Fig. 4 Results of trapezoidal command shaping algorithm

以看出,梯形指令整形算法充分利用系统速度和加速度的最大能力生成修正指令,能够引导设备以最优时间到达目标位置。但是,从修正指令的加速度曲线可以看出,修正指令到达稳态时,加速度信号出现振荡。加速度的振荡必然会导致速度和位置信号发生抖振。

由式(3)和式(4)可知,修正指令速度信号中的抖振程度与指令跟踪误差和加速度限幅值相关。设定系统速度限幅 $15(^{\circ})/\text{s}$ 不变,加速度限幅增大至 $30(^{\circ})/\text{s}^2$,采用梯形指令整形算法进行轨迹规划,修正指令的速度和加速度仿真结果如图5所示。对比图4和图5可知,加速度限幅由 $9(^{\circ})/\text{s}^2$ 增大至 $30(^{\circ})/\text{s}^2$ 时,修正指令的速度稳态抖振幅值由 $0.009(^{\circ})/\text{s}$ 增加到 $0.03(^{\circ})/\text{s}$ 。因此,对于加速度限幅值较大的系统,传统梯形指令整形算法的抖振问题更为明显。



(a) 修正指令速度
(a) Speed of shaped command



(b) 修正指令加速度
(b) Acceleration of shaped command

图5 加速度限幅 $30(^{\circ})/\text{s}^2$ 时梯形指令整形算法结果
Fig. 5 Results of trapezoidal command shaping algorithm with acceleration limit of $30(^{\circ})/\text{s}^2$

轨迹规划生成的修正指令和修正指令速度信号作为伺服控制系统的输入,若含有抖振信号,会将抖振引入伺服系统导致闭环控制稳态精度下降。对于高精度伺服控制系统,这是传统梯形指令整形算法应用时需要解决的问题。

3 近似最优指令整形算法

针对传统梯形指令整形算法中加速度和速度信号存在抖振的问题,本文采用双曲正切函数 $\tanh(\cdot)$ 来近似替代传统算法中的切换函数 $\text{sign}(\cdot)$,以平滑修正指令的加速度和速度信号。该方法可实现近似最优时间的指令整形,故称为近似最优指令整形算法。

近似最优指令整形算法设计如下:

$$\begin{cases} v_{\text{dec}} = v_r + \tanh(b \cdot \epsilon) \sqrt{2a_{\text{max}} |\epsilon|} \\ v_a = v_{\text{cmd}}(k) + a_{\text{max}} \Delta t \\ v_{\text{cmd}}(k+1) = \text{sat}\{v_a, \min(v_{\text{dec}}, v_{\text{max}})\} \end{cases} \quad (5)$$

双曲正切函数曲线如图6所示。可以看到,选取适当的参数 b 可以实现双曲正切函数 $\tanh(\cdot)$ 对切换函数 $\text{sign}(\cdot)$ 的近似逼近。

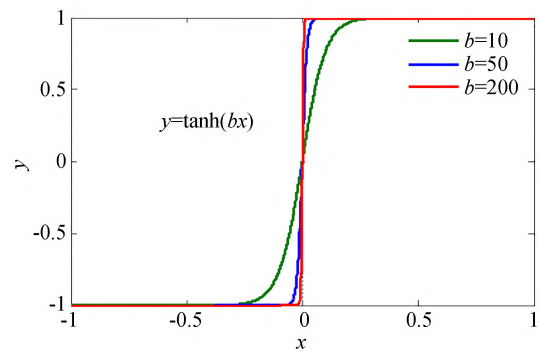
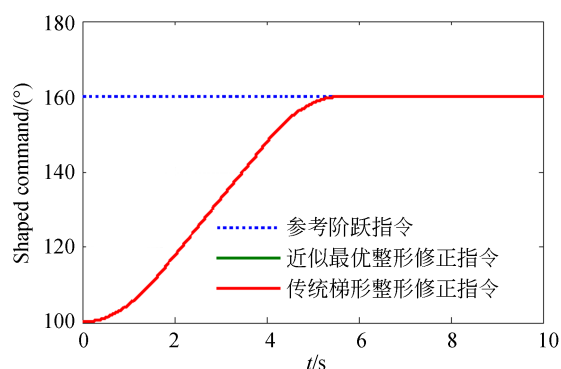


图6 双曲正切函数曲线

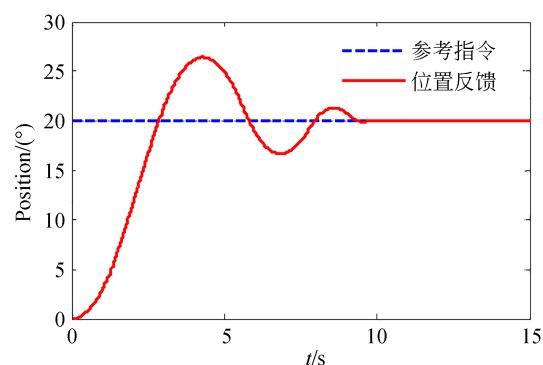
Fig. 6 Curves of hyperbolic tangent function

采用2.2节传统梯形指令整形算法相同的仿真条件,近似最优指令整形算法与传统梯形指令整形算法的轨迹规划仿真结果对比如图7所示。可以看出,近似最优修正指令曲线和传统梯形算法修正指令曲线的动态响应能力基本相同;但是,相比传统梯形指令整形算法的修正指令速度和加速度,近似最优指令整形算法生成的修正指令速度和加速度抖振大大降低。伺服控制系统的引导信号抖振量降低,有利于系统的高精度控制。

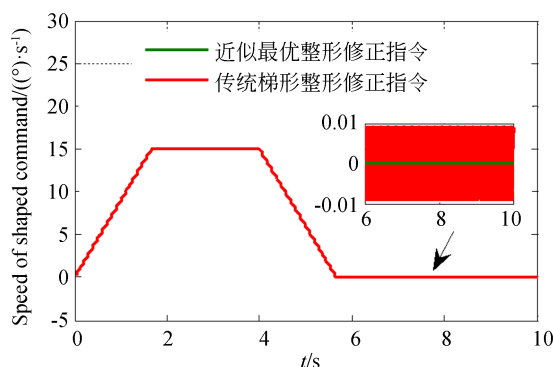
给定幅值为 20° 的位置阶跃参考指令,速度限幅为 $10(^{\circ})/\text{s}$,加速度限幅为 $6(^{\circ})/\text{s}^2$,伺服控制系统速度环、位置环控制器参数保持不变,采用基于近似最优指令整形的轨迹规划定位策略



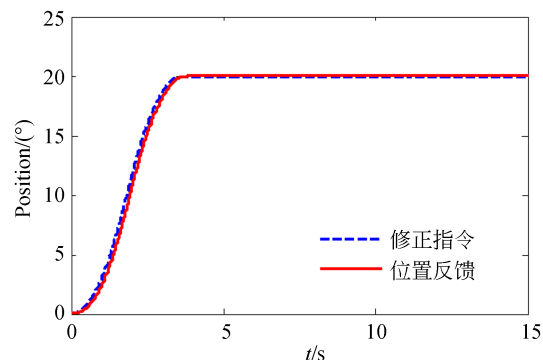
(a) 修正指令对比
(a) Comparison of shaped command



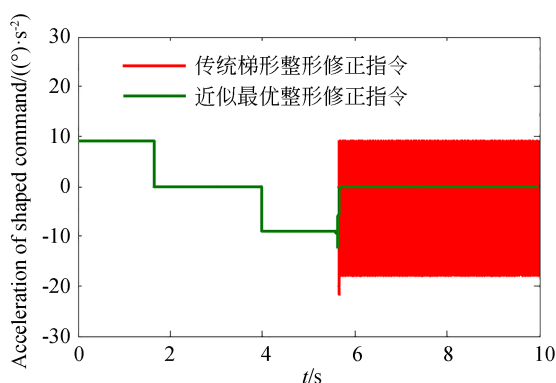
(a) 无轨迹规划位置响应
(a) Position response without trajectory planning



(b) 修正指令速度对比
(b) Comparison of shaped command speed



(b) 采用轨迹规划位置响应
(b) Position response with trajectory planning



(c) 修正指令加速度对比
(c) Comparison of shaped command acceleration

图 7 近似最优指令整形算法与传统梯形指令整形算法对比

Fig. 7 Comparison between approximate optimal command shaping algorithm and traditional trapezoidal command shaping algorithm

前后,位置阶跃响应如图 8 所示。可以看到,未使用指令修正器进行轨迹规划时,位置响应出现了

图 8 位置阶跃响应对比

Fig. 8 Comparison of position step response

较大的超调量;而采用指令修正器进行轨迹规划后,位置响应平滑无超调,且调节时间大大降低,系统能够以更短的时间无超调地到达指定位置。仿真结果验证了轨迹规划定位策略的有效性。

4 实 验

在某激光测距望远镜的方位轴伺服控制系统中进行轨迹规划定位实验测试。望远镜步进搜索示意图如图 9 所示,方位轴电机的主要参数见表 1。基于轨迹规划的位置闭环控制结构框图如图 10 所示。实验测试包含以下内容:(1)近似最优指令整形算法与基于闭环反馈控制指令整形算法和传统梯形整形算法对比;(2)采用轨迹规划定位策略前后,位置定位性能对比。

调整伺服控制系统的电流限幅值,对加速度限幅值进行设置。为了验证算法的正确性和有

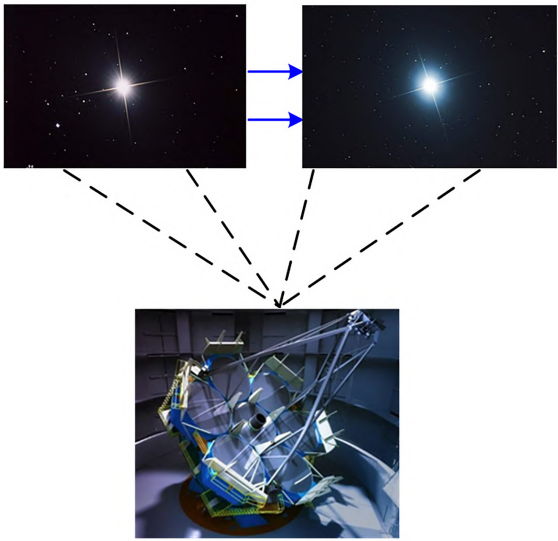


图 9 望远镜步进搜索目标示意图

Fig. 9 Schematic diagram of telescope step searching target

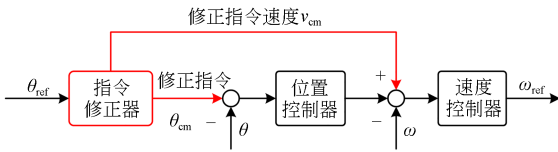


图 10 基于轨迹规划的位置闭环控制结构框图

Fig. 10 Block diagram of position closed-loop control structure based on trajectory planning

表 1 望远镜方位轴电机的主要参数

Tab. 1 Main parameters of telescope azimuth motor

参 数	数 值
电机极数	90
额定转矩	912.34 N·m
额定电流	5.54 A
转矩系数	166.724 N·m·A ⁻¹
线包电阻	3.893 Ω
绕组电感	56.48 mH

效性,在小角度切换定点和大角度指向调转两种典型情况下进行测试。

4.1 近似最优指令整形算法有效性验证

为了验证提出的近似最优指令整形算法的有效性,分别采用传统梯形指令整形算法和近似最优指令整形算法对 2.5°位置阶跃参考信号进行指令整形,实现轨迹规划,实验结果如图 11 所示。可以看到,在给定 8 (°)/s 速度限幅、

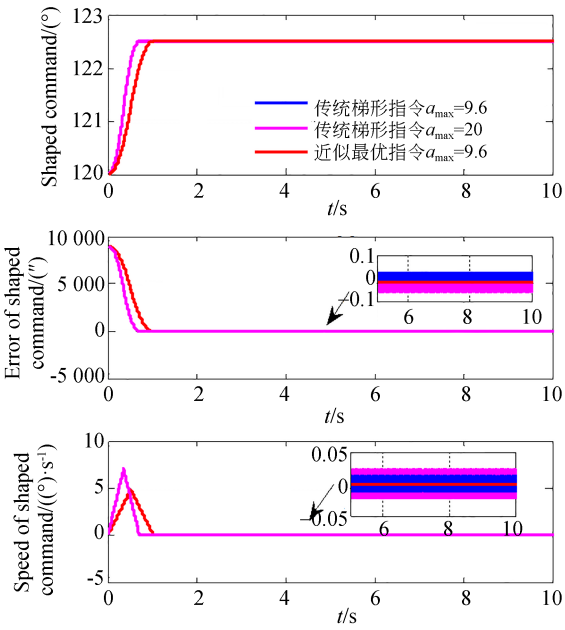
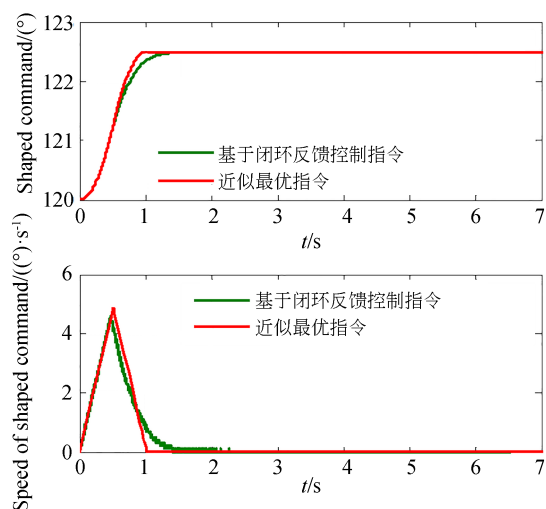


图 11 2.5°阶跃信号指令整形对比结果

Fig. 11 Comparison results of command shaping for 2.5° step signal

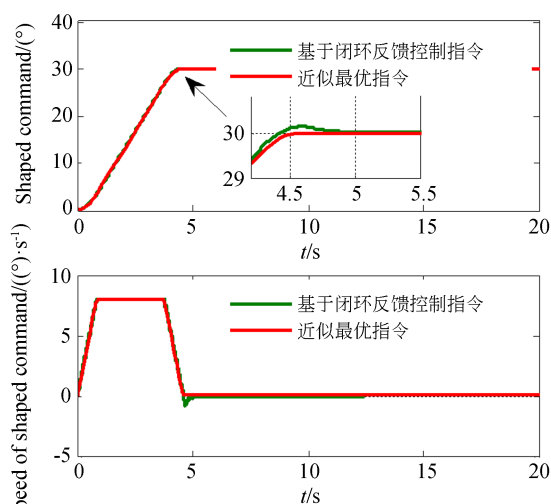
9.6 (°)/s²加速度限幅的条件下,对 2.5°阶跃信号进行指令整形时,不论是传统梯形指令整形算法,还是近似最优指令整形算法,均严格按照限幅条件生成了修正指令。但是,采用传统梯形指令整形算法的修正指令、修正指令速度和加速度均出现了一定幅值的抖振;且当加速度限幅从 9.6 (°)/s²增大到 20 (°)/s²时,修正指令的速度中呈现出更大幅值的抖振。利用该修正指令和修正指令速度信号引导控制系统,会导致系统速度响应出现抖振。而采用近似最优指令整形算法的修正指令,其动态响应能力与传统指令整形算法的修正指令近似,但修正指令速度和加速度均十分平滑,可避免上述问题。

在 8 (°)/s 速度限幅、9.6 (°)/s²加速度限幅的条件下,分别采用基于闭环反馈控制的指令整形方法和近似最优指令整形方法进行轨迹规划。基于闭环反馈控制指令整形算法中控制器各个参数取值不变,上述两种方法分别于 2.5°和 30°位置阶跃参考信号进行轨迹规划,结果如图 12 所示。从图 12 可以看出,基于闭环反馈控制的指令整形在变增益控制器参数取值不变的条件下,对小角度阶跃指令整形时,修正指令和速度平滑,但到达目标位置的时间比基于近似最优指令整



(a) 2.5°阶跃信号指令整形对比

(a) Comparison results of command shaping for 2.5° step signal



(b) 30°阶跃信号指令整形对比

(b) Comparison results of command shaping for 30° step signal

图 12 指令整形结果对比

Fig. 12 Comparison results of command shaping

形更长;对大角度阶跃指令整形时,修正指令和速度中均出现了超调,因此到达目标位置的动态响应能力也更低。相比于基于闭环反馈控制的指令整形方法,近似最优指令整形方法不论对小角度阶跃信号还是大角度阶跃信号,均呈现出更佳的指令整形效果,无超调且具有更好的动态响应能力。

实验结果表明,近似最优指令整形算法可有效避免传统梯形指令整形算法的抖振问题,在速度、加速度限幅的条件下可生成动态响应能力近

似最优的平滑修正指令,以引导系统快速无超调到达指定位置。

4.2 轨迹规划定位策略有效性验证

在伺服控制系统中,为了降低系统位置定位时的超调量,令系统平稳到达目标位置,工程上通常采用位置分段控制方法。位置分段控制方法的思想是依据当前位置误差决定系统的工作状态。当位置误差较大时,位置控制器工作在非线性段,系统以恒速运行,且根据误差大小选择不同的速度;当位置误差较小时,位置控制器切入线性工作段,进行正常的位置闭环控制。

为了验证轨迹规划定位策略的有效性,位置控制器参数不变,对比无轨迹规划定位策略、位置分段控制、基于闭环反馈控制的指令整形算法以及基于近似最优指令整形算法的轨迹规划定位策略4种条件下系统的位置定位性能。其中,基于闭环反馈控制指令整形算法中控制器的各个参数取值不变。分别给定2.5°和30°位置阶跃参考指令,系统位置响应结果如图13和图14所示,图中轨迹规划1对应基于近似最优指令整形算法的轨迹规划的位置响应结果,轨迹规划2对应基于闭环反馈控制指令整形算法的轨迹规划的位置响应结果。可以看到,无轨迹规划定位策略、位置分段控制、基于闭环反馈控制的指令整

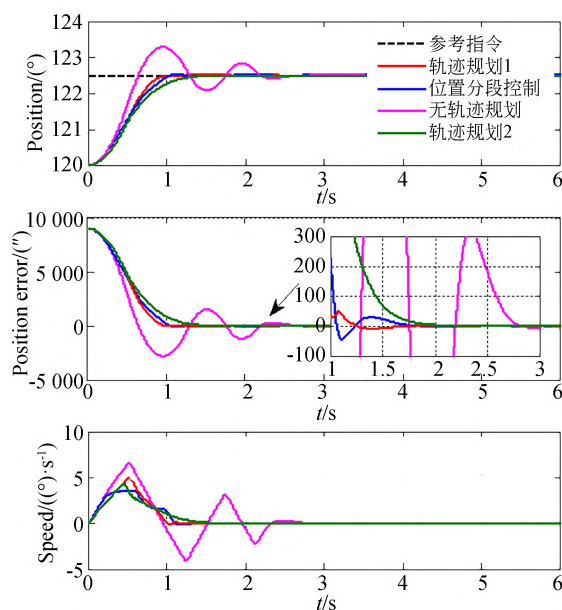


图 13 2.5°阶跃信号位置响应结果对比

Fig. 13 Comparison of position response for 2.5° step signal

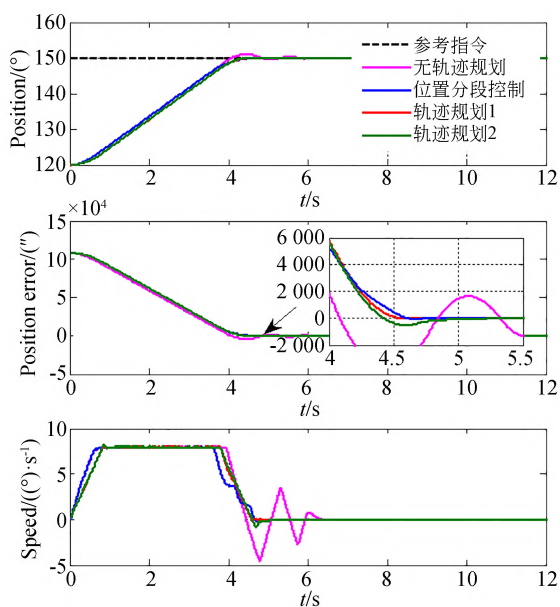


图 14 30°阶跃信号位置响应结果对比

Fig. 14 Comparison of position response for 30° step signal

形以及基于近似最优指令整形算法的轨迹规划定位策略 4 种控制条件下,系统响应 2.5° 位置阶跃信号时位置进入 2″ 误差带的时间分别约为 2.82, 1.79, 2.13 和 1.68 s; 系统响应 30° 位置阶跃信号时位置进入 2″ 误差带的时间分别约为 6.79, 5.33, 5.5 和 5.22 s。相比无轨迹规划定位策略,位置分段控制和轨迹规划定位策略均可进一步降低调节时间,提高定位的平稳性和动态响应能力。

此外,在响应 30° 位置阶跃信号时,可以看到采用基于闭环反馈控制的指令整形的位置响应和速度响应中均出现了超调,与图 12 的实验结果一致,且位置调节时间甚至大于位置分段控制,这也是它的缺点。而采用基于近似最优指令整形算法的轨迹规划定位策略时,指令整形过程无参数需要调整,位置响应调节时间最短,相比无轨迹规划定位策略,调节时间分别降低约 1.14 s 和 1.57 s。

无轨迹规划定位策略、位置分段控制和基于近似最优指令整形算法的轨迹规划定位策略 3 种条件下,位置稳态定位误差如图 15 所示。可以看到,无轨迹规划稳态误差 RMS 值为 0.01″,位置分段控制稳态误差 RMS 值为 0.008 4″,轨迹规划稳态误差 RMS 值为 0.009 9″。在该实验条件下,3 种方法的位置响应稳态误差 RMS 值十分接近。基于近似最优指令整形算法的轨迹规划定

位策略不产生抖振信号,且在系统位置控制器不变的条件下不影响系统的位置稳态误差精度。

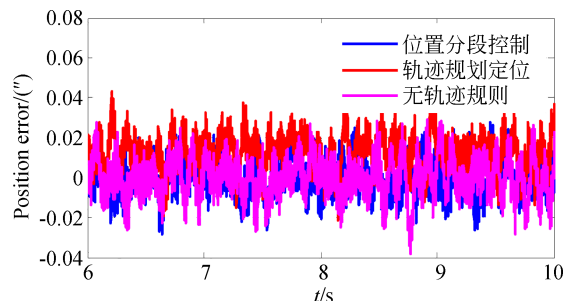


图 15 位置响应稳态误差对比

Fig. 15 Comparison of steady-state errors in position response

从上述实验结果可以看出,未采用轨迹规划策略时,无论是小角度切换还是大角度调转,位置定位响应均存在超调,且进入稳态的时间较长。这是因为传统 PI 控制方法下动态响应能力和超调量之间存在一个折中的关系,不能以最快的速度无超调到达指定位置。采用位置分段控制后,超调量大大降低,动态响应能力得到一定提高。但是位置分段控制条件下,为了实现良好的位置响应性能,需要设计人员进行详细的位置控制器分段设计,匹配位置误差和运行速度等信息,控制器设计复杂度增加。采用基于闭环反馈控制指令整形算法的轨迹规划策略时,指令整形的控制器参数调整尤为重要,且有时无法兼顾小角度和大角度阶跃信号的整形效果。而采用基于近似最优指令整形算法的轨迹规划策略时,指令整形过程无参数需要调整,系统能够快速无超调平稳到达目标位置,调节时间最短。

5 结 论

本文将轨迹规划定位策略引入望远镜伺服控制系统,对比传统基于闭环反馈控制的指令整形算法和传统梯形指令整形算法的缺点,提出了近似最优指令整形算法来实现轨迹规划。实验结果表明,在基于近似最优指令整形的轨迹规划策略下,望远镜实现了快速无超调的小角度切换和大角度调转位置控制;相同控制参数下跟踪

2.5°和30°的位置阶跃信号时,相比于无轨迹规划策略时,进入2"稳态误差带的时间分别提高了约1.14 s和1.57 s;相比于位置分段控制,进入2"稳

态误差带的时间分别提高了约0.11 s和0.11 s。由此验证了基于近似最优指令整形的轨迹规划定位策略的优越性。

参考文献:

- [1] 杨明,徐殿国,贵献国. 永磁交流速度伺服系统抗饱和设计研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 28-32.
YANG M, XU D G, GUI X G. Study of AC PMSM speed servo system anti-windup design[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(15): 28-32. (in Chinese)
- [2] 张超洋. 带有抗积分饱和和补偿的自抗扰控制器设计及其应用[D]. 天津: 天津大学, 2019.
ZHANG CH Y. *Design and Application of Active Disturbance Rejection Control with Anti-windup Compensation* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [3] TARBOURIECH S, TURNER M. Anti-windup design: an overview of some recent advances and open problems[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2009, 3(1): 1-19.
- [4] 蒋邱雨. 永磁同步电机转速环控制策略研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
JIANG Q Y. *Research on Speed Loop Control Strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [5] 李垣江,董鑫,魏海峰,等. 表贴式永磁同步电机转速环复合PI无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(10): 2119-2129.
LI Y J, DONG X, WEI H F, *et al.* Sensorless compound PI control for surface permanent magnet synchronous motor speed regulation system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(10): 2119-2129. (in Chinese)
- [6] 于艳君,柴凤,高宏伟,等. 基于Anti-Windup控制器的永磁同步电机控制系统设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 66-70.
YU Y J, CHAI F, GAO H W, *et al.* Design of PMSM system based on anti-windup controller[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(4): 66-70. (in Chinese)
- [7] 牛里,杨明,唐思宇,等. 基于积分状态预测的Anti-Windup PID控制器设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 145-152.
NIU L, YANG M, TANG S Y, *et al.* Design of anti-windup PID controller with integral state prediction[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(9): 145-152. (in Chinese)
- [8] 付金宝,丁亚林,李清军,等. Anti-Windup变结构自适应PID控制在航空相机位角控制系统的应用[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 626-632.
FU J B, DING Y L, LI Q J, *et al.* Application of Anti-Windup variable structure adaptive PID control to position angle control system of aerial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 626-632. (in Chinese)
- [9] 张斌,李洪文,郭立红,等. 变结构PID在大型望远镜速度控制中的应用[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1613-1619.
ZHANG B, LI H W, GUO L H, *et al.* Application of variable structure PID in velocity control for large telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1613-1619. (in Chinese)
- [10] 王慎航,王云宽,胡建华,等. 基于干扰抑制和非线性摩擦力补偿的速度环PI控制器抗饱和设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(9): 3224-3230.
WANG SH H, WANG Y K, HU J H, *et al.* Anti-windup design for PI-type speed controller based on nonlinear compensation and disturbance suppression[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(9): 3224-3230. (in Chinese)
- [11] SHIN H B, PARK J G. Anti-windup PID controller with integral state predictor for variable-speed motor drives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(3): 1509-1516.
- [12] 张兴华,姚丹. 感应电机直接转矩控制系统的“抗饱和”控制器设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 181-188.
ZHANG X H, YAO D. Anti-windup speed controller design for direct torque controlled induction motor drives[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(5): 181-188. (in Chinese)
- [13] CHOI J W, LEE S C. Antiwindup strategy for PI-

- type speed controller[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(6): 2039-2046.
- [14] TYLER S. A trajectory preprocessor for antenna pointing [J]. *The Telecommunications and Data Acquisition Report*, 1994.
- [15] GAWRONSKI W. *Modeling and Control of Antennas and Telescopes*[M]. Boston, MA: Springer US, 2008.
- [16] *Digital Implementation of Minimum Time Control of Double Integral System with Limits on Velocity and Acceleration*[M]. Systems Technology, Inc, 1992.
- [17] SMITH D R, SOUCCAR K. A polynomial-based trajectory generator for improved telescope control [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 7019, Advanced Software and Control for Astronomy II, Marseille, France*. 2008, 7019: 91-102.
- [18] GAWRONSKI W. Control and pointing challenges of large antennas and telescopes [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(2): 276-289.
- [19] SAVARESE S, PERROTTA F, SCHIPANI P, *et al.* Trajectory generation methods for radio and optical telescopes [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 11445, Ground-Based and Airborne Telescopes VIII*. 2020, 11445: 959-970.
- [20] GAWRONSKI W, ALMASSY W T. Command preprocessor for radio telescopes and microwave antennas[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2002, 44(2): 30-37.

作者简介:



刘 京(1991—),女,辽宁铁岭人,博士,助理研究员,2013年于南京航空航天大学获得学士学位,2018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,主要从事望远镜精密跟踪控制方面的研究。E-mail: nu-aaliujing@163.com

通讯作者:



邓永停(1987—),男,山东潍坊人,博士,研究员,2010年于中国石油大学获得学士学位,2015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,主要从事望远镜精密跟踪控制及电子学设计方面的研究。E-mail: dyt0612@163.com