

doi: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2020.12.012

本文引用格式: 王雪峰, 张斌, 王鸣浩, 等. 赤道式望远镜的变结构 PI 控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学) 2020, 34(12): 89-95.

Citation format: WANG Xuefeng, ZHANG Bin, WANG Minghao, et al. Motion Control of Large Equatorial Telescope Based on Variable Structure PI Controller[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science) 2020, 34(12): 89-95.

赤道式望远镜的变结构 PI 控制

王雪峰^{1,2}, 张斌¹, 王鸣浩¹, 杨晓霞¹, 李玉霞¹, 吴庆林¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为提高赤道式望远镜伺服系统的性能, 分析了经典 PI 控制器的特点, 并结合变结构的思想, 设计了一种变结构 PI 控制器(VSPI)。构造了以速度误差为自变量的比例增益函数和以位置误差为自变量的积分增益函数, 通过这两个函数, VSPI 能够根据误差的变化实时改变其结构和参数。针对某赤道式望远镜的传递函数模型, 仿真比较了经典 PI 和 VSPI 的控制结果, 验证了 VSPI 的作用, 同时在望远镜上进行了实验。实验结果表明: 应用 VSPI 控制器后, 赤道式望远镜的 1° 位置阶跃过渡时间由 0.68 s 缩短至 0.59 s, 稳态误差由 0.62" RMS 减小到 0.13" RMS, 等效正弦跟踪误差由 3" RMS 减小到 1.87" RMS。采用变结构 PI 控制器的伺服系统性能明显提高, 满足赤道式望远镜跟踪精度高、响应速度快的要求。

关键词: 赤道式望远镜; 变结构; PI 控制器; 位置控制; 速度控制

中图分类号: TH751; TH691.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-8425(2020)12-0089-07

Motion Control of Large Equatorial Telescope Based on Variable Structure PI Controller

WANG Xuefeng^{1,2}, ZHANG Bin¹, WANG Minghao¹,
YANG Xiaoxia¹, LI Yuxia¹, WU Qinglin¹

(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)

Abstract: In order to improve the performance of the equatorial telescope servo system, the characteristics of the classical PI controller are analyzed, and a variable structure PI controller (VSPI) is designed based on the idea of variable structure. The proportional gain function with velocity error as independent variable and the integral gain function with position error as independent

收稿日期: 2019-07-05

基金项目: 粤港关键领域重点突破项目(2004A10403021); 广东省攻关项目(2006A10401006)

作者简介: 王雪峰, 男, 硕士研究生, 主要从事主动光学面形控制系统、伺服控制、电机控制研究, E-mail: 1217299052@qq.com; 通讯作者 张斌, 男, 博士, 副研究员, 主要从事望远镜伺服系统、主动光学控制系统等方面研究, E-mail: 13844908289@163.com。

variable are constructed. Through these two functions, VSPI can change its structure and parameters in real time according to the variation of error. According to the transfer function model of an equatorial telescope, the effect of VSPI is verified by comparing the simulation result of classical PI and VSPI, and experiments are carried out in the same telescope. The experimental data show that, by using VSPI controller, 1 degrees position step transition time of equatorial telescope is shortened from 0.68s to 0.59s, the steady-state error is reduced from 0.62 "RMS to 0.13" RMS, the equivalent sine tracking error is reduced from 3 "to 1.87". The performance of the servo system with variable structure PI controller is obviously improved, which meets the requirement of high tracking accuracy and fast response of equatorial telescope.

Key words: equatorial telescope; variable structure; PI controller; position control; velocity control

根据跟踪架结构形式的不同,光电望远镜可以分为赤道式、地平式、水平式等^[1]。赤道式望远镜的最大优点是在视场上观测目标位置没有相对转动,同时在观测条件最好的天顶位置没有盲区。由于具有上述优点,赤道式跟踪架是光电望远镜设计中常采用的一种结构形式。然而,赤道式望远镜的缺点是赤经轴的摩擦力大且不均匀,这是因为赤经轴在镜筒和叉臂的重力作用下产生了变形,且望远镜底座与赤经轴之间可能产生温差膨胀变形。上述两种变形都会导致赤经轴摩擦力变大^[2]。

赤道式望远镜是一种精密观测设备,对伺服系统的定位精度、响应速度和动态跟踪精度等指标的要求非常高,但赤经轴上较大且不均匀的摩擦力导致上述性能指标很难实现。主要体现在动态跟踪误差大,速度换向时出现位置误差尖峰,低速运行和精确定位时产生滞滑、爬行及极限环等有害特性^[3-6]。要提高伺服系统的性能,必须减小或消除摩擦力的影响,为此,提出了多种摩擦力补偿方法。如神经网络补偿、自适应补偿、模糊补偿等,但这些算法较复杂,并不适合工程应用。

光电望远镜伺服系统通常采用由速度环和位置环组成的双闭环控制结构。速度环为内环,位置环为外环,控制算法主要以PID为主。PID控制是通用的控制方法,其结构简单,易于程序实现,同时具有很好的鲁棒性,可靠性高,在运动控制系统有非常广泛的应用。但是,PID控制器的参数在控制过程中是不变的,这严重制约了控制性能。

为此,研究人员提出了多种新型PID控制器^[7-25]。按照控制理论,PID控制的微分环节对外界扰动非常敏感,因而对于光电望远镜而言,采用省去微分环节的PI控制器更加合适^[26]。

针对赤道式望远镜存在的问题,结合PI控制器和变结构思想,利用双闭环控制结构的特点,本文中设计了一种变结构PI控制器(VSPI),构造了以速度误差为自变量的比例增益函数和以位置误差为自变量的积分增益函数,可根据误差的变化实时调整比例积分。VSPI控制器结构简单,参数调节方便,经过仿真分析和实验发现,VSPI控制器能够减小望远镜赤经轴摩擦力的影响,提高伺服系统的定位精度、响应速度和动态跟踪精度。

1 变结构PI控制器

1.1 经典PI控制器的特点

经典PI控制器的时域表达式为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt \quad (1)$$

式中: $u(t)$ 是控制器的输出; $e(t)$ 为误差; K_p 为比例增益; K_I 为积分增益。根据式(1),PI控制器的特点可总结为:①误差 $e(t)$ 和误差的积分 $\int e(t) dt$ 是产生控制量 $u(t)$ 的两个基本要素;②控制量 $u(t)$ 是 $e(t)$ 和 $\int e(t) dt$ 的线性组合,在控制过程中,比例增益 K_p 和积分增益 K_I 保持不变。大量研究成果和实际应用结果表明,PI控制器的这种线性特性制约了控制性能^[25]。

分析PI控制器的特点,可以发现比例作用 K_p

和积分作用 K_I 在控制过程中的作用: ① K_p 的作用是使控制器的输出和输入成正比关系, 是有差调节, 增大 K_p 可以减小误差, 也能够提高响应速度, 但 K_p 不能无限增大, 否则会导致系统不稳定; ② K_I 的作用是消除稳态误差, 但会降低快速性和稳定性, 在大误差阶段, 积分作用很容易使系统达到积分饱和, 导致出现很大的超调量, 调节时间也会变长^[12]。

综合上述分析, 考虑将 PI 控制器的参数改为实时性和非线性, 以获得更好的控制性能。

1.2 位置、速度双闭环控制结构分析

赤道式望远镜伺服系统采用位置、速度双闭环的控制结构, 如图 1 所示。位置回路为外环, 速度回路为内环, 位置回路的输出是速度回路的输入。

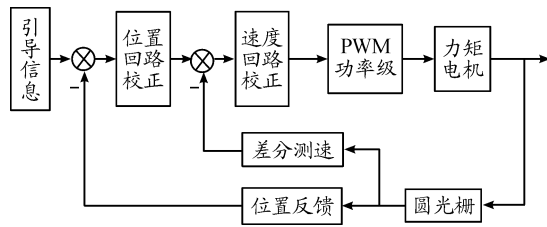


图1 赤道式望远镜伺服控制结构框图

速度回路的作用是克服摩擦力矩等非线性干扰。速度回路的性能直接影响伺服系统性能。如果速度回路能够快速、稳定地跟踪位置回路的输出, 则伺服系统能够达到很高的跟踪精度。

为了提高速度回路的性能, 改进经典 PI 控制器, 通过实时调整比例和积分作用来提高控制器的性能。比例作用的调整依据是速度误差的变化, 当速度误差较大时, 增大比例增益以加快响应速度、缩短调节时间, 而随着速度误差的减小则逐渐减小比例增益。积分的作用是减小稳态误差, 但是增强积分作用容易导致系统不稳定, 因此需要限制积分作用的强度。对于双闭环伺服系统, 调整速度回路积分作用时需要考虑位置误差的变化。速度回路要跟踪位置输出, 必须克服摩擦力矩等干扰因素, 而由文献[12]可知, 加强速度回路的积分作用能够减小摩擦力矩的影响。依据控制

原理, 伺服系统对位置输入的响应过程可分为动态过程和稳态过程。在动态过程中, 位置误差大, 速度也较大, 摩擦力对速度回路的影响相对小一些, 速度回路需要快速响应以尽快减小位置误差, 此时速度控制应以比例控制为主, 而积分作用不宜太强, 这样既能快速响应, 又能避免控制器饱和, 可获得良好的动态性能。当位置响应进入稳态过程后, 由于受到摩擦力矩的影响, 速度回路对位置回路输出信号的跟踪能力减弱, 速度回路的响应变慢, 这会使稳态位置误差变大, 并可能导致极限环振荡。此时, 应加强速度回路的积分作用, 减小摩擦力矩的干扰, 从而提高位置跟踪精度。

1.3 基于误差函数的变结构 PI 控制器

设计一种变结构 PI 控制器 (VSPI) 并用于赤道式望远镜的速度回路, VSPI 的结构如图 2 所示。

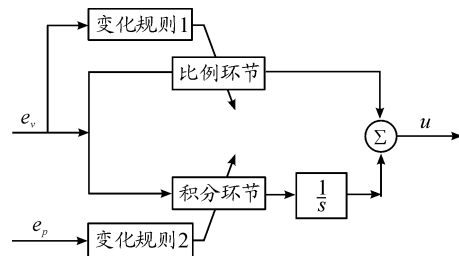


图2 变结构PI控制器结构示意图

VSPI 的比例增益 K_p 是速度误差的函数, 而积分增益 K_I 是位置误差 e_p 的函数。 e_p 、 e_v 是伺服系统的实时速度误差和位置误差, K_p 、 K_I 的变化规则如式 (2) (3) 所示。

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + K_{p1} (1 - \exp(-c_0 |e_v|)) \\ K_I = f(e_p) K_{I0} \end{cases} \quad (2)$$

$$f(e_p) = \begin{cases} K_{I1} \exp(-c_1 |e_p|) & |e_p| \leq e_{p0} \\ 1 & |e_p| > e_{p0} \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_p 、 K_{p0} 、 K_{p1} 、 c_0 、 K_I 、 K_{I0} 、 c_1 、 K_{I1} 、 e_{p0} 均为正常数。

比例增益 K_p 的调整依据是 e_v 的变化。当 $e_v = 0$ 时, K_p 取最小值为 K_{p0} ; 当 $e_v \rightarrow \pm \infty$ 时, K_p 取最大值为 $K_{p0} + K_{p1}$ 。 K_p 的变化趋势与误差的变化趋势相同。调整 c_0 的大小可调整 K_p 变化的速率, 图 3 为 K_p 随 e_v 的变化曲线。变化的比例增益既

能提高响应速度、减小超调量,也能保证稳定性。

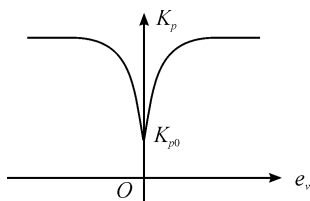


图3 K_p 变化曲线

积分增益 K_I 的调整依据是 e_p 的变化,通过函数 $f(e_p)$ 动态地调整 K_I 。式(2)为 $f(e_p)$ 的变化规则,图4所示为 $f(e_p)$ 的变化曲线。 e_{p0} 用于界定动态过程和稳态过程。当 $|e_p| > e_{p0}$ 时,伺服系统的响应处于动态过程, $f(e_p)$ 的值恒为 1, K_I 取最小值 K_{I0} , 积分作用保持不变;当 $|e_p| \leq e_{p0}$ 时,响应进入稳态过程, $f(e_p) > 1$, 通过 $f(e_p)$ 对 K_I 进行动态放大,从而动态地加强积分作用,减小摩擦力矩的影响,进而提高速度回路对位置回路输出的跟踪能力。 $f(e_p)$ 的值随着 e_p 的减小而逐渐变大,当 $e_p = 0$ 时 $f(e_p)$ 取最大值,此时积分作用最强。

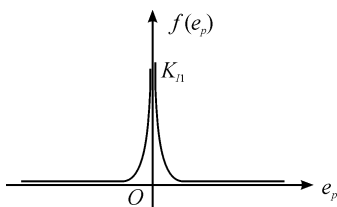


图4 $f(e_p)$ 变化曲线

2 仿真研究

为了验证 VSPI 算法的有效性,仿真分析等效正弦跟踪过程。仿真时采用某赤道式望远镜赤经轴的实测模型作为控制对象,模型的传递函数为:

$$G(s) = \frac{0.85}{(1.12s + 1)(0.006s + 1)} \quad (4)$$

仿真模型的结构如图5所示,在位置回路采用双超前-滞后校正,速度回路分别采用 PI、VSPI 控制器。

位置回路控制器传递函数为

$$G(s) = \frac{8(2s + 1)(2s + 1)}{(20s + 1)(20s + 1)} \quad (5)$$

PI 控制器的参数根据文献[27]确定,望远镜模型的机械时间常数 $T_m = 1.12$ s,电气时间常数 $T_e = 0.006$ s,增益 $K = 0.85$ 。根据内模 PID 原理,比例增益 $K_p = T_m / K\lambda$,积分增益 $K_I = 1 / K\lambda$,其中 λ 值越小越有利于动态性能, λ 值越大则越有利于增强鲁棒性。取 $\lambda = 0.05$ 附近,再对 K_p 、 K_I 适当调整,最后得到 $K_p = 28$ 、 $K_I = 20.21$ 。

VSPI 控制器的参数与 PI 控制器的参数有一定关联,VSPI 参数的确定原则为: K_{p0} 值约为 K_p 的 0.5 ~ 0.6 倍, K_{p0} 与 K_{p1} 二者之和同 K_p 相当; K_{i0} 约为 K_I 的 0.5 ~ 0.6 倍, K_{i1} 取值范围是 20 ~ 40, c_0 、 c_1 的取值范围是 15 ~ 30, e_{p0} 、 e_{i0} 的取值要尽量小一些。根据以上原则,最后选取 $K_{p0} = 15.02$, $K_{p1} = 12$, $c_0 = 18$, $K_{i0} = 10.43$, $K_{i1} = 30$, $c_1 = 25$, $e_{p0} = 0.02^\circ$, $e_{i0} = 0.1 (^\circ) / s$ 。

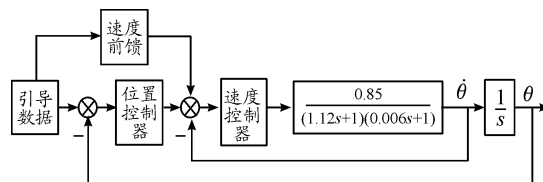


图5 仿真模型的结构示意图

图6、7所示为仿真得到的等效正弦跟踪位置误差曲线,图7是图6的局部放大图。图6、7中位置误差曲线的尖峰产生在速度换向阶段,此时摩擦力对动态跟踪精度的影响最大。表1表示 PI、VSPI 仿真结果,仿真结果表明:采用 VSPI 算法的误差明显小于采用 PI 算法的误差,VSPI 算法能够提高伺服系统的动态跟踪精度。

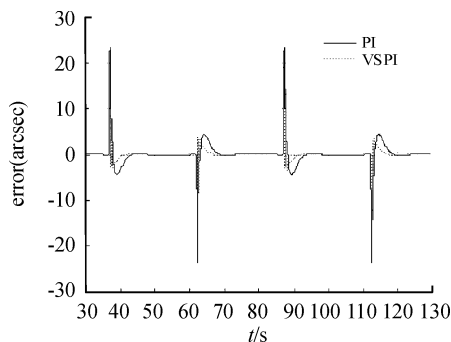


图6 等效正弦跟踪误差曲线

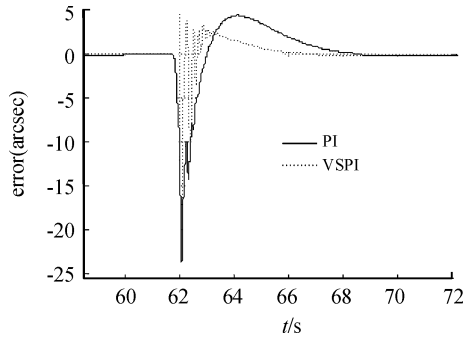


图7 等效正弦跟踪误差曲线的局部放大图

表1 两种控制算法的仿真结果

控制算法	PI	VSPI
最大正向误差	23.49	19.34
最大负向误差	23.60	-19.45
稳态误差(RMS)	2.49	1.50

3 实验与结果

为了进一步验证 VSPI 算法性能,在某赤道式望远镜赤经轴上进行实验,该赤经轴由直流力矩电机驱动。赤道式望远镜结构如图 8 所示,转动惯量约为 $1\ 050\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$,控制系统选用文献[28]所设计的通用集成伺服控制系统。如图 9 所示,该伺服控制器系统由 1 个配电模块、2 个大功率开关电源、1 个双轴电机驱动器、1 个伺服控制器组成。配电模块的作用是为开关电源、双轴功率驱动器、伺服控制器供电。2 个开关电源作为双轴电机驱动器的功率电源,每个开关电源的功率可达 $2\ 800\ \text{W}$ 。双轴功率驱动器可独立驱动 2 台直流力矩电机。伺服控制器由 PC/104 CPU 模块(SCM/LX-3072,主频 $500\ \text{MHz}$)和接口电路板组成,伺服控制器的功能是接收编码器数据和主控计算机的控制命令,进行位置闭环、速度闭环校正运算,输出 PWM 给电机驱动器,最终实现对电机的精确控制。赤经轴的位置反馈由圆光栅提供,圆光栅的角分辨率为 $0.032\ 4''$,速度反馈由位置反馈数据差分获得,系统的闭环校正频率为 $500\ \text{Hz}$ 。位置环采用超前-滞后校正,速度环分别采用 PI 和 VSPI 算法,PI、VSPI 算法的参数与仿真设置相同。

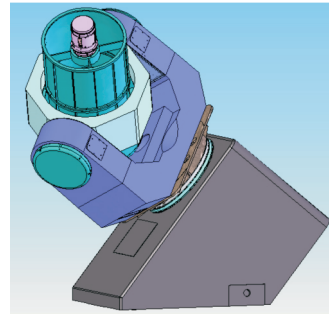


图8 赤道式望远镜结构

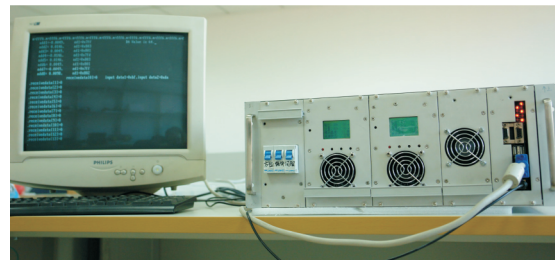
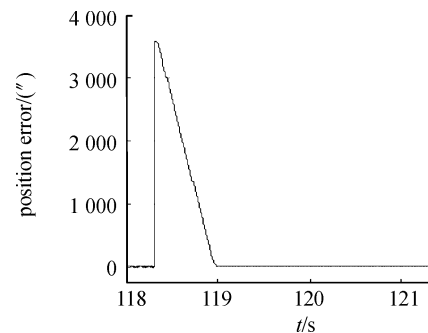


图9 通用大功率集成伺服系统

3.1 位置定位实验

图 10、11 是采用 PI 算法得到的 1° 位置阶跃响应误差曲线,图 12、13 是采用 VSPI 算法得到的 1° 位置阶跃响应误差曲线。表 2 是 1° 位置阶跃实验数据。计算表 2 中的稳态误差(RMS)时,选取的数据源是进入稳态后 $25\ \text{s}$ 内的稳态误差数据。从实验结果可以看出:采用 PI 算法时,过渡时间为 $0.68\ \text{s}$,位置阶跃稳态阶段存在稳态极限环振荡,稳态误差为 $0.62''$,并且经过 $60\ \text{s}$ 仍无法达到稳定状态;而采用 VSPI 算法后,过渡时间为 $0.59\ \text{s}$,消除了极限环,系统可以快速稳定,稳态误差仅为 $0.13''$ 。

图10 1° 位置阶跃过渡过程误差曲线(PI)

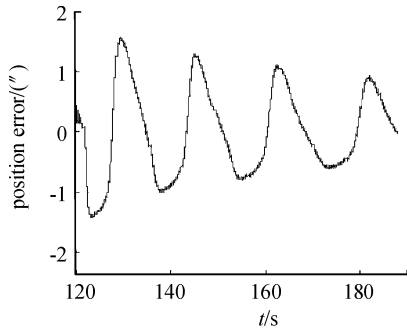


图 11 1°位置阶跃稳态误差曲线(PI)

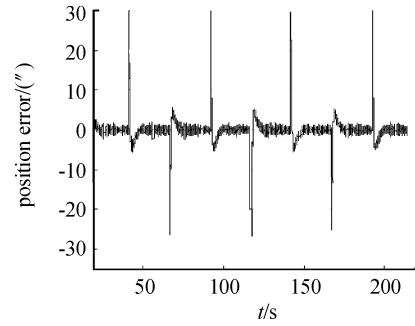


图 14 等效正弦误差曲线(PI)

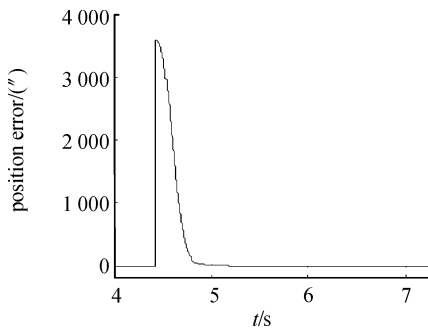


图 12 1°位置阶跃过渡过程误差曲线(VSPI)

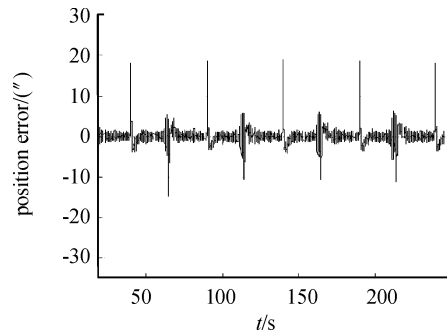


图 15 等效正弦误差曲线(VSPI)

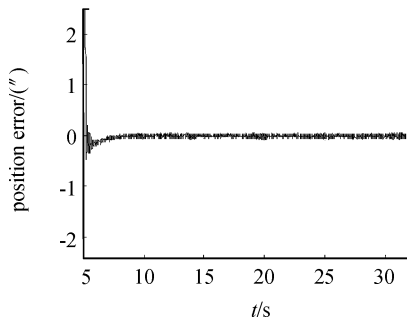


图 13 1°位置阶跃稳态误差曲线(VSPI)

表 2 1°位置阶跃实验结果

控制算法	PI	VSPI
过渡时间/s	0.68	0.59
稳态误差(RMS)/(°)	0.62	0.13

3.2 等效正弦响应实验

为了测试赤经轴的动态跟踪精度,通过等效正弦信号 $r(t) = 64\sin(0.125t)^\circ$ 对系统进行测试。该信号的最大等效速度为 $8(^\circ)/s$,最大等效加速度为 $1(^\circ)/s^2$ 。图 14、15 分别给出了采用 PI、VSPi 算法时的等效正弦响应曲线,表 3 是等效正弦实验数据。

表 3 等效正弦实验结果

控制算法	PI	VSPI
最大正向误差/(°)	30.17	18.94
最大负向误差/(°)	26.89	14.79
稳态误差(RMS)/(°)	3.00	1.87

等效正弦实验数据表明:采用 VSPI 算法后,最大正向误差减小了 37.2%,最大负向误差减小了 44.9%,稳态误差减小了 37.7%,VSPI 算法能够显著提高动态跟踪精度。

4 结论

针对赤道式望远镜伺服系统跟踪精度高、定位响应快的要求,结合经典 PI 控制器原理和变结构思想,提出了 VSPI 控制器。基于双闭环控制结构将经典 PI、VSPI 两种算法分别运用在速度回路进行仿真,最后在某赤道式望远镜赤经轴上进行位置定位和等效正弦跟踪实验。实验数据表明:采用 VSPI 算法后,赤道式望远镜的 1°位置阶跃过渡时间由 0.68 s 缩短至 0.59 s,位置阶跃稳态误

差由 0.62"减小到 0.13",等效正弦跟踪误差由 3"减小到 1.87",各项控制指标满足赤道式望远镜的要求。VSPI 算法可成功应用到赤道式望远镜伺服系统中。

参考文献:

- [1] 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.
- [2] 郑锋华. 天文望远镜装架轻量化及步进正弦传动的研究[D]. 南京: 中国科学院, 2006.
- [3] 周金柱, 段宝岩, 黄进. LuGre 摩擦模型对伺服系统的影响与补偿[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6): 990-994.
- [4] WIT C C D. A new model for control of systems with friction[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(3): 419-425.
- [5] HELOUVRY B A, DUPONT P, WIT C C D. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction[J]. Automatica, 1994, 30(7): 1083-1138.
- [6] 张锦江, 陈兴林, 冯汝鹏, 等. 基于摩擦自适应补偿的转台变结构控制器设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(4): 92-95.
- [7] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [8] 宋世潮, 曲兵妮, 宋建成. 变增益 PI 控制器在开关磁阻电机中的应用[J]. 太原理工大学学报, 2017, 45(8): 61-64.
- [9] 张鹏, 孙树亮, 倪振松. 改进型 PI 控制在纯电动汽车调速系统上的应用[J]. 山东理工大学学报, 2018, 32(3): 21-26.
- [10] 马辉, 程江洲, 王辉, 等. 滑模 PI 控制在 APF 直流侧电压控制中的应用[J]. 电力电子技术, 2017, 51(5): 61-64.
- [11] 吴敏, 肖伸平, 张晓虎, 等. 基于模糊 PI 的永磁同步电机电流预测控制[J]. 电工技术, 2019, 3: 5-8.
- [12] 邢经纬, 徐义鑫. 基于模糊自适应 PID 控制的永磁同步电机控制[J]. 微电机, 2015, 48(11): 58-61.
- [13] 邹敏, 文定都, 何宗卿, 等. 基于前馈补偿的模糊 PI 永磁同步电机调速系统[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(3): 35-40.
- [14] 关欣, 李叶松. 基于实时负载转矩反馈补偿的永磁同步电机变增益 PI 控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 38-45.
- [15] 张海刚, 张磊, 陈文博, 等. 基于无速度传感器的永磁同步电机模糊 PI 控制[J]. 中国科技论文, 2017, 12(11): 1321-1326.
- [16] 胡勤丰, 陈威振, 邱攀峰, 等. 适用于连续加速减速的永磁同步电机模糊增益自调整 PI 控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 907-914.
- [17] 漆海霞, 兰玉彬, 杨秀丽, 等. 无人机电控速度模糊 PI 双闭环控制仿真研究[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(6): 31-37.
- [18] 彭梦光. 无刷直流电机的大惯性负载的模糊 PI 控制[J]. 通信电源技术, 2015, 32(3): 37-40.
- [19] 罗小丽, 范桂林. 无刷直流电机模糊 PI 控制系统建模与仿真[J]. 系统仿真技术, 2019, 15(2): 137-141.
- [20] 温嘉斌, 赵红阳, 刘子宁. 无刷直流电机神经网络 PI 控制系统设计[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(12): 50-54.
- [21] 符慧, 左月飞, 刘闯, 等. 永磁同步电机调速系统的一种变给定增益 PI 控制器[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 168-174.
- [22] 韩京清. 非线性 PID 控制器[J]. 自动化学报, 1994, 20(4): 487-490.
- [23] 熊皓, 范永坤, 吴钦章. 变结构 PI 控制器的设计及其在光电跟踪系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1856-1861.
- [24] DARIO M. A variable structure control law for telescopes pointing and tracking[J]. SPIE, 1997, 3086: 72-84.
- [25] 张斌, 李洪文, 郭立红, 等. 变结构 PID 及其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.
- [26] 王帅, 李洪文, 孟浩然, 等. 光电望远镜伺服系统速度环的自抗扰控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2442-2449.
- [27] 李洪文. 基于内模 PID 控制的大型望远镜伺服系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 327-332.
- [28] 李洪文, 张斌, 孟浩然, 等. 通用集成伺服控制系统[P]. 中国: ZL200810051390. X, 2008.

(责任编辑 杨黎丽)