文章编号 1004-924X(2021)04-0749-14

地平主焦点式大视场望远镜的双电机消旋系统

李玉霞*,王 帅,王建立,李洪文,曹玉岩,刘 洋

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春130033)

摘要:大口径大视场地平式望远镜长时间曝光时,主焦点探测器会由于地球自转产生像旋,即视场中除中心外其余星体 均绕视场中心旋转,进而导致目标不能正确提取与观测。为消除图像旋转的影响,某大口径大视场望远镜的消旋跟踪精 度需小于5"。本文根据星体像旋原理对主焦点探测器像旋的位置特性和速度特性进行系统分析及实验验证,提出采用 双电机驱动消间隙消旋机构进行消旋,利用复合电流指令控制方法消间隙并进行控制。实验结果表明:像旋特性符合消 旋公式,测量误差不超过2%。最终在低速15(")/s及高速170(")/s时消旋机构的跟踪精度小于1",进行高变速切换 即7.86°sin(2π×0.5t)时,控制精度仍然小于1",采用双电机消间隙控制方法可有效提高系统的稳定性和精度。 关键 词:望远镜;双电机消间隙;大口径大视场;消焱控制;地平式望远镜 中图分类号:TH743;TP273 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20212904.0749

Dual-motor de-rotator system of prime focus alt-azimuth telescope with large field of view

LI Yu-xia*, WANG Shuai, WANG Jian-li, LI Hong-wen, CAO Yu-yan, LIU Yang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China) * Corresponding author, E-mail: wangjianli@ciomp. ac. cn

Abstract: Owing to the Earth's rotation, image rotation always appears on the primary focus detector during the long exposure of Alt-Az telescopes with large aperture and wide field of view. This implies that except for the central point, other stars rotate around the center of the field of view; thus the target cannot be accurately identified and observed. To eliminate the image rotation, the de-rotator tracking error of a telescope with a large aperture and wide field of view should be less than 5". The position and velocity of the image rotation of the primary-focus detector were analyzed and verified based on the star rotation principle. Subsequently, a dual-motor driving de-rotator system was designed, where the clearance of the mechanism was removed by the recombination current command. The experimental results indicate that the image rotation characteristics are consistent with the expression of image rotation, and the measurement error is less than 2%. The dual-motor diving de-rotator system can improve the stability and accuracy of the tracking system; thus the tracking accuracy of the de-rotator mechanism can be less than 1" both at a low velocity of 15 (")/s and at a high velocity of 170 (")/s. In addition, the tracking error remains less than 1 arcsec when the de-rotator operated at a variable and high velocity of 7.86°sin($2\pi \times 0.5t$).

收稿日期:2020-08-13;修订日期:2020-10-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11803035, No. 11973041);天文联合基金资助项目(No. U2031126)

Key words: telescope; dual motor anti-backlash; large caliber and field of view; de-rotator control; altazimuth telescope

1引言

地球自转造成了天体目标的周日视运动,采 用地平式望远镜对天体目标进行观测时,会因为 物像旋转引起像旋的问题。主焦点式大口径大 视场望远镜长时间曝光进行天体观测时,视场边 缘目标会绕着视场中心旋转,最终导致视场中除 中心外其他观测星体都是弧线状,影响天文目标 的提取和观测。为解决这个问题,需要进行消旋 控制^[1-7]。

消旋机构旋转探测器是一种有效的消旋方 式^[1,6]。消旋控制作为成像系统终端的运动机构, 其运动特性及控制精度具有极其重要的地位。 采用此种消旋方式时,首先需要对不同天区中的 星体的位置和速度特性进行系统分析,然后选用 特定的消旋机构进行实现^[8]。因此,建立起天体 目标位置和速度与消旋机构位置的对应关系极 其重要。

采用位置和速度同时引导需要消旋机构能 保证高速切换和高精度的低速跟踪,且当消旋系 统不工作时需要保证静止不动。TNG和DNG 望远镜的消旋控制方案采用直驱电机结构,但电 机不上电时,望远镜在不同俯仰角位置时很难保 持稳定不动,除非加额外的抱闸机构,但增加额 外的抱闸机构会导致局部发热。LBT的消旋^[8] 和国内某设备的消旋^[9]采用步进电机虽然具有一 定的自锁力矩,但精度不高,不能满足需求。

本文系统分析了大口径大视场地平式望远 镜的主焦点的位置和速度像旋特性,在进行像旋 分析时对数据奇点进行处理,与实际更相符。根 据像旋特性进行位置和速度控制,提出采用类似 ELT和LSST望远镜的消旋机构^[1,3],采用双电 机驱动的消旋控制系统。双电机驱动齿轮结构 转动相机进行消旋控制,保证消旋位置控制时的 高速切换,及低速跟踪时的控制精度。实验及仿 真结果表明,长时间曝光时天体按照速度像旋特 性运动,运动方向和速度大小与理论公式匹配, 对双电机驱动的消旋机构进行建模,并采用双电 机消间隙控制方法进行验证。若不加消间隙控 制方法,系统是震荡不稳定的;若增加的消间隙 控制方法,同样控制参数下可将位置误差控制在 一个编码器噪声内。

2 像旋特性分析

2.1 像旋原理

地平式望远镜进行长时间观察时,由于各运 动轴线与地球自转轴不再平行,因此天体的视运 动不能简单地用一根轴的旋转运动来补偿,望远 镜在定位和跟踪过程中都要求方位轴和高度轴 协调运动,其运动变化规律可以根据球面三角导 出。而视场的像旋位置及速度可以用视场中心 观测星体的星位角计变化率表示,各个参量在赤 道坐标系下的表示如图1所示^[10-14]。其中各个参 量表示如下:A为方位角,从北到东为正方向,正 北为0°;t为时角,正南为0°,望东方向为正方向, 在为负方向;z为天顶距,从天顶计算,正天顶 为0°,Z=90-EL;EL为俯仰角,从地平计算,地 平为0°,EL=90-Z; δ 为天体目标所在赤纬; θ 为 像旋角; φ 为望远镜安装的地理纬度; ω_0 为地球 转速, ω_0 =15(")/s。

由球面三角形,正弦公式和五元素公式从球 面三角形PZE中可以导出地平坐标参数方位角、 俯仰角与时角坐标参数的赤纬及时角的关系



图1 赤道坐标系下各个参量的表示



(9)

如下:

$$\cos Z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t, \quad (1)$$

$$\sin A \sin Z = \cos \delta \sin t, \qquad (2)$$

$$\cos Z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t. \quad (3)$$

由此可以得到观测不同赤纬和时角时的方 位角和俯仰角如下:

$$\tan A = \frac{\sin t}{-\sin\phi\cos t + \cos\phi\tan\delta},\quad(4)$$

$$\cos Z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t. \quad (5)$$

方位角和俯仰角的速度表示如下:

$$\frac{Z'}{\omega_0} = \sin A \cdot \cos \phi, \qquad (6)$$

$$\frac{A'}{\omega_0} = \sin \phi + \tan \left(EL \right) \cdot \cos A \cdot \cos \phi. \quad (7)$$

根据球面三角形的知识,可以得到像旋的速 度和加速度公式如下:

$$\frac{\theta'}{\omega_0} = \frac{\cos A \cdot \cos \phi}{\cos EL},\tag{8}$$

$$\frac{\theta''}{\omega_0} = \frac{\cos A \cdot \sin 2\phi}{2\sin Z} - \frac{\cos Z \cdot \sin 2A \cdot \cos^2 \phi}{\sin^2 Z}.$$

像旋的位置公式如下:

$$\tan \theta = \frac{\sin t}{\tan \phi \cos \delta - \sin \delta \cos t}.$$
 (10)

分析中各个方向规定如下:望远镜方位角方 向,0°为正北方向,180°为正南方向消旋旋转速度 方向,逆指针为负方向,顺时针为正方向;消旋位 移方向,(*t*<0)西方向为负角,(*t*>0)东方向为 正角。

由以上公式可知,由不同天区天体的时角 *t* 和赤纬δ,则可获得星体像旋的位置及速度。在 计算机离散化实现时需要进行以下处理:

$$(T_k) = \operatorname{a} \operatorname{tan} \left(\frac{\sin t(T_k)}{\tan \phi(T_k) \cos \delta(T_k) - \sin \delta(T_k) \cos t(T_k)} \right) + \theta_0.$$
(11)

消旋速度可以由以下公式获得:

A

$$\theta'(T_k) = \frac{\cos A(T_k) \cdot \cos \phi(T_k)}{\cos EL(T_k)} \omega_0, \quad (12)$$

其中: T_k 为时间,随着计算机中的采样时刻k增 加; $\delta(T_k)$ 为 T_k 时刻的赤纬, $\phi(T_k)$ 为望远镜的地 理纬度, $EL(T_k)$ 为 T_k 时刻望远镜的俯仰轴位置, $A(T_k)$ 为 T_k 时刻望远镜的方位位置, θ_0 为像旋的 初始位置, ω_0 为地球自转速度。

为保证全天区的星体对应到带限位的消旋 机构的位置是全部可以覆盖的,设定特定赤纬和 时角的星体为初始像旋角,同时需要考虑消旋机 构的中心点位置,即有:

 $\theta_0 \propto (EL(T_{k0}), AZ(T_{k0}), \Delta \theta_0),$ (13) 其中 $\Delta \theta_0$ 为消旋机构中心编码器位置与初始像旋标定值对应的编码器位置之间的差值。需要保证该差值要小于一定的 E_0, E_0 是限位编码器值与最大消旋位置间的差值。

当 $\tan \phi(T_k) \cos \delta(T_k) - \sin \delta(T_k) \cos t(T_k) =$ 0,为一个较大的奇异点值,需要寻找出该点后对 它进行处理,保证计算出的数据正确。取:

$$E(\theta(T_k)) \leq \theta(T_{k+1}) - \theta(T_k).$$
(14)

$$\ddot{E}E(\theta(T_k)) \leq 0, \text{ JJ} \dot{f}:$$

$$\begin{cases} \theta(T_{k1 \sim k2})' = \theta(T_{k1 \sim k2}) + \pi \\ \theta(T_{k2 \sim \text{end}})' = \theta(T_{k2 \sim \text{end}}) + 2\pi \end{cases}$$
(15)

若 $E(\theta(T_k)) > 0, 则有:$

$$\begin{cases} \theta(T_{k1\sim k2})' = \theta(T_{k1\sim k2}) - \pi\\ \theta(T_{k2\sim \text{end}})' = \theta(T_{k2\sim \text{end}}) - 2\pi \end{cases}, \quad (16)$$

其中: $\theta(T_{k1})$ 和 $\theta(T_{k2})$ 为 $|E(\theta(T_k))| > \epsilon_1$ 时的奇点 值, ϵ_1 为设定的判定曲线不连续的阈值。

同时根据正切函数的特性,即当消旋角增加 超过<u>Nπ</u>时,其中N为自然数,计算出的结果是重 复且不连续的。但实际中消旋角度是连续增加 的,考虑到星点赤纬位置及望远镜的地理安装纬 度之间的关系,得到:

$$\begin{cases} \theta(T_k) = \theta(T_k)' - \frac{\pi}{2} + \theta_0, \phi > \delta \\ \theta(T_k) = \theta(T_k)' + \frac{3\pi}{2} + \theta_0, \phi \leq \delta \end{cases}$$
(17)

将计算后的消旋位置和速度生成引导位置 和速度信息,规划消旋转台的运动轨迹。当望远 镜跟踪不同星体时,首先根据不同星区的像旋位 置特性切换到该星体对应的像旋位置,然后再根 据该星体的像旋速度跟踪特性进行高精度跟踪, 便可以实现位置和速度消旋,补偿由于地球自转 造成的图像旋转现象。

2.2 像旋位置特性分析

当望远镜对恒星进行长时间曝光时,像场

中星的位置随时间在不同位置的变化通常用星 位角表示。若标定一个初始的星位角后,天球 中任意星体的星位角均可以描述出来,星位角 可以表示像旋角,而星位角的变化率也就是像 旋的速度。不同天区的星位角可通过图 2 描述。





图 2 表示了不同天区中不同星体的星位 角,为了描述方便,将天子午圈 PZ放在中央位 置,其中 P为北天极,Z是天顶。其中 S_0 , S_1 , S_2 , S_4 , S_5 表示不同天区下的星体,则 $\angle PSZ$ 为星位 角,所以 θ_0 , θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 , θ_5 为对应的星位角,规 定以观测时角 t=0 h时星体 S_0 的星位角 θ_0 为 0°,观测 t<0 h时星位角为负,t>0 h时星位角 为正。

由式(10)可以获得不同天区下,时角及 赤纬不同时像旋角度的变化如图3所示。由 图3(a)可知,在*t*<0h时,不同赤纬下的星位角 为-180°~0°;当*t*>0h时,不同赤纬下的星位角 为0°~180°。

图 3(b)能更清晰描述像旋位置在消旋机构 上的位置,其中0°表示时角 t=0 h时的像旋角度, 可知不同星体在像旋机构上的位置是一一对应 的。通过旋转像旋机构可以对星体进行消旋 控制。



Fig. 3 Position of image rotation in different sky zones

2.3 像旋速度特性分析

像旋速度特性包括连续长时间跟踪一个天 区星体时的像旋跟踪速度,以及望远镜在不同天 区切换时的像旋切换速度。

连续长时间跟踪一个天区星体时,星体的赤 纬一定,而赤经是一直变化的,因此由跟踪星体 的赤纬在不同赤经下的速度变化轨迹来确定其 跟踪速度。由于跟踪不同星体的方位俯仰角也 随着赤经赤纬变化,因此由望远镜的方位俯仰角 则可以获得像旋跟踪速度。

像旋切换速度表示不同天区切换时的像旋 速度,全天区中的星体的赤纬是变化的,赤经也 是变化的。由全天区不同星体赤经赤纬的星位 角,可获得不同天区星体的像旋位置差。望远镜 观测天区发生变化时,望远镜的方位角和俯仰角 也是需要随之切换的,此时消旋控制系统需要与 方位俯仰角切换同步,即当消旋机构在方位俯仰

角切换准备跟踪之前也要切换到位,因此消旋控 制系统的切换速度由方位俯仰角的切换时间以 及不同天区星体的像旋差共同确定。

考虑天顶盲区为-4°~4°,按照俯仰角最大 为86°,方位角为0°~360°,假设站址为地理纬度 37.5°,可获得全天区下的方位角、俯仰角与消旋 速度曲线,如图4和图5所示。







Fig. 5 Velocity of image rotation in different sky zones

像旋跟踪速度特性总结如下:

(1)最大像旋跟踪速度:全天区下对应的像 旋速度最大约为170(")/s。

(2)赤纬与望远镜俯仰角及像旋速度的关系:在时角 t=0h及观测星体的赤纬δ在望远镜地理纬度φ附近时,俯仰角最大,消旋速度最大; 在赤纬为33.5°时,站址纬度为37.5°,望远镜的俯仰角达到最大86°,方位角为180°,此时的消旋速度最大,为170(″)/s。

(3)像旋速度方向:观测赤纬 $\delta > \varphi$,与观测赤 纬 $\delta < \varphi$ 的像旋速度相反。假定观测 $\delta < \varphi$ 的天体 时消旋速度为正,则观测 $\delta > \varphi$ 时的消旋速度为 正当观测北天区赤纬>37.5°,方位角为0°~90° 和270°~360°时,俯仰角为0°~86°,消旋速度为 负,望远镜物方视场随星体运动逆时针旋转;当 观测南天区<37.5星体时,方位角为90°~270° 时,俯仰角为0°~86°,方位角消旋速度为正,望远 镜物方视场随星体运动顺时针旋转。

(4)望远镜方位角与像旋速度的关系:当方 位角为90°和270°时,消旋速度基本为0;当方位 角为0°或者180°时,像旋速度最大,且随俯仰角 的增大而增大。天区不同,消旋速度是变化的。

(5)像旋切换速度:像旋切换速度由主要观 测的赤纬-15°~15°天区中的星体来确定,由图4 可知方位角为78°~282°,俯仰角为0°~67°,而像 旋为-53.46°~53.46°。方位俯仰角的速度限定 如下:方位角的最大速度为15(°)/s,俯仰角的最 大速度为6(°)/s,因此可以获得消旋的切换速度 为7.86(°)/s。

3 消旋控制系统设计

3.1 双电机驱动消旋机构

由以上分析可知,消旋控制系统需要具有高 精度的低速跟踪性能及高速切换性能。同时在 消旋控制系统不工作时需要保证消旋控制系统 完全静止,否则会因为轴向晃动和径向窜动而影 响成像质量。

目前,望远镜上采用的消旋结构主要有电机 直驱、步进电机加减速箱及齿轮机构和双电机+ 减速箱+齿轮消轮机构3种模式。其中,电机直 驱模式采用交流电机或者直流电机直接驱动消 旋机构进行闭环控制,采用高精度的编码器进行 反馈,其优点是没有间隙,但是掉电后电机没有 自锁能力,当望远镜俯仰轴发生变化时会带来较 大误差。

步进电机加减速箱及齿轮机构模式采用步 进电机驱动齿轮机构带动消旋机构进行控制,该 控制方式的优点是具有一定的自锁能力,但是齿 轮间隙会导致低速及反向跟踪运动时控制精度 不会很高,另外步进电机长时间工作时发热会比 较严重。

双电机+减速箱+齿轮消旋机构兼容了上 述两种模式的优点,双电机消间隙控制可以解决 齿轮间隙问题,提高低速时的控制精度,同时两 个电机共同驱动可以提高运行速度,但控制结构 及策略较为复杂,如图6所示。

本文根据要求消旋转台小于5"的控制指标 要求,设计采用了双直流电机加减速箱驱动双齿 轮带动大齿轮的消旋控制系统。具体为采用双 直流电机进行齿轮消间隙,同时利用终端的高精 度编码器进行高精度的位置闭环跟踪控制。采 用的控制架构如图7所示,电机1和电机2共用一 个位置环,但分别有各自的速度环和电流环,可 以各自工作在速度模式和力矩模式下,操控计算 机产生位置及速度引导指令给电机控制器,两个 电机的位置环反馈采用大齿轮上的圆光栅作为 反馈。经过位置控制器计算出各自的运动速度。



电机1和电机2后端有各自的编码器。

当处于低速跟踪模式时,按照消旋运动的 方向,电机1作为正向电机驱动,此时电机1工 作在速度控制模式下,电机1进行速度闭环,运 行经过位置控制器计算出的运动速度,即消旋 速度;而电机2作为消隙电机,运行在力矩模式 下,输出一个与运行速度相反的消间隙力矩,以 保证电机2驱动的齿轮2一直抵在大齿轮啮合 面上。当进行反向时,此时电机2进行速度闭 环,运行经过位置控制器计算出的速度,即消旋 速度,电机1作为消隙电机运行在力矩模式下, 输出与电机1速度相反的消间隙力矩。消间隙 力矩需要根据两电机的控制指令及速度反馈和 间隙进行合理规划。通过复合电流指令控制器 添加至电机上。



Fig. 7 Framework of dual motor derotator system

3.2 双电机消旋控制系统建模

3.2.1 双电机驱动消旋机构动力学模型 为实现对消旋系统的高精度控制和高速度 切换控制,需要对消旋系统进行建模分析^[15-16]。 根据传递力矩关系,双电机消旋组成结构可 简化为图8所示的弹簧质量模型。



图 8 双电机消旋控制模型 Fig. 8 Model of dual motor derotator system

力矩传递公式可表示为:

$$\begin{cases}
J_{e1} \ddot{\theta}_{e1} = T_{e1} - T_{m1} \\
J_{e2} \ddot{\theta}_{e2} = T_{e2} - T_{m2} \\
T_{m1} = K_{m1} (N\theta_{p1} - \theta_{m1}) + C_{m1} (\dot{\theta}_{m1}) + J_{p1} (\ddot{\theta}_{m1}) + T_{p1} \\
T_{m2} = K_{m2} (N\theta_{p2} - \theta_{m2}) + C_{m2} (\dot{\theta}_{m2}) + J_{p2} (\ddot{\theta}_{m2}) + T_{p2}, \\
T_{p1}' = J_{L} (\ddot{\theta}_{p3}) + K_{m3} (\theta_{p1} - \frac{N_{2}}{N_{1}} \theta_{p3}) + C_{m3} (\dot{\theta}_{p3}) \\
T_{p2}' = J_{L} (\ddot{\theta}_{p3}) + K_{m4} (\theta_{p2} - \frac{N_{2}}{N_{1}} \theta_{p3}) + C_{m4} (\dot{\theta}_{p3})
\end{cases}$$
(18)

其中: T_{e1} , T_{e2} 为电机1和电机2的输出扭矩, J_{e1} 为电机1转子的转动惯量, J_{e2} 为电机2的转动惯量, \tilde{J}_{e2} 为电机2的转动惯量, $\tilde{\theta}_{e1}$, $\tilde{\theta}_{e2}$ 为电机转动的角加速度, T_{m1} , T_{m2} 分别

为电机 1,2 传递到后端负载的转矩, K_{m1} , K_{m2} 为 电机 1和 2与齿轮 1和 2间的传动刚度, C_{m1} , C_{m2} 为电机 1和 2与齿轮 1和 2间的传动刚度, J_{p1} , J_{p2} 为一级负载减速箱齿轮 1和 2间的转动惯量,N为减速箱的传动比, N_1 为小齿轮 1和 2的模数, N_2 为大齿轮的模数, K_{m3} , K_{m4} 为小齿轮机 1和 2 与大齿轮 3的传动刚度, C_{m3} , C_{m4} 为小齿轮机 1 和 2与大齿轮 3 的传动阻尼, J_L 为负载转动 惯量。

采用弹性死区模型齿轮1、齿轮2和齿轮3之间的间隙进行非线性力矩传递描述,小齿轮与大齿轮之间的力矩传递关系如下:

齿轮1与齿轮3、齿轮2和齿轮3之间的扭矩 传递关系分别如下:

$$\begin{cases} T_{p1}' = J_{L}(\ddot{\theta}_{p3}) + K_{m3} \left(\theta_{p1} - \frac{N_{2}}{N_{1}} \theta_{p3} - \alpha \right) + C_{m3}(\dot{\theta}_{p3}), \left(\theta_{p1} - \frac{N_{2}}{N_{1}} \theta_{p3} \right) \geqslant \alpha \\ T_{p1}' = 0, -\alpha < \left(\theta_{p1} - \frac{N_{2}}{N_{1}} \theta_{p3} \right) < \alpha \\ T_{p1}' = J_{L}(\ddot{\theta}_{p3}) + K_{m3} \left(\theta_{p1} - \frac{N_{2}}{N_{1}} \theta_{p3} - \alpha \right) + C_{m3}(\dot{\theta}_{p3}), \left(\theta_{p1} - \frac{N_{2}}{N_{1}} \theta_{p3} \right) \leqslant -\alpha \end{cases}$$
(19)

$$T_{p1}' = J_{L}(\ddot{\theta}_{p3}) + K_{m3} \left(\theta_{p1} - \frac{N_{2}}{N_{1}} \theta_{p3} - \alpha \right) + C_{m4}(\dot{\theta}_{p3}), \left(\theta_{p2} - \frac{N_{2}}{N_{1}} \theta_{p3} \right) \geqslant \alpha$$

$$T_{p1}' = 0, -\alpha < \left(\theta_{p2} - \frac{N_{2}}{N_{1}} \theta_{p3} \right) < \alpha \qquad , \qquad (20)$$

$$T_{p1}' = J_{L}(\ddot{\theta}_{p3}) + K_{m3} \left(\theta_{p2} - \frac{N_{2}}{N_{1}} \theta_{p3} - \alpha \right) + C_{m4}(\dot{\theta}_{p3}), \left(\theta_{p2} - \frac{N_{2}}{N_{1}} \theta_{p3} \right) \leqslant -\alpha$$

其中α为小齿轮与大齿轮之间的间隙。

由式(18)~式(20)可建立双齿轮驱动大齿 轮带负载的力矩传递模型。由此可知,由于间隙 的存在,电机到负载的传递力矩是非线性的。

采用的电机为直流电机,其电机力矩电气模 型传递函数为:

$$T_{\rm el}(s) = K_{\rm t} \frac{\frac{U(s)}{R}}{\frac{L}{R}s+1}, \qquad (21)$$

其中:K₁为电机力矩系数,U(s)为电机电压,R为 电机电阻,L为电机电感,s为频域的微分算子。 3.2.2 复合电流指令控制设计

为消除上述齿轮非线性间隙的影响,采用增加消间隙复合电流控制方法实现齿轮间的间隙 消除,即电机1和电机2的输出控制力矩为经过



图 9 变偏置力矩的两电机力矩输出

Fig. 9 Toque output of dual motor with dynamical offset toque

速度控制器计算出的指令力矩加上复合控制电流力矩控制器计算出的合力矩^[17-18]。

综上可知,电机1、电机2的实际输出力矩分别为:

$$T_{\text{ref}}, T_{\text{ref}} \ge T_{2}$$

$$\frac{T_{2} - T_{1} - T_{0}}{T_{2} - T_{1}} (T_{\text{ref}} - T_{2}) + T_{2}, T_{1} \le T_{\text{ref}} < T_{2}$$

$$T_{\text{out1}} = \begin{cases} T_{\text{ref}} + T_{0}, - T_{1} \le T_{\text{ref}} < T_{1} & . \\ \frac{T_{2}}{T_{2} - T_{1}} (T_{\text{ref}} - T_{2}) - T_{2}, - T_{2} \le T_{\text{ref}} < -T_{1} \\ T_{\text{ref}}, T_{\text{ref}} \le -T_{2} \end{cases}$$

$$T_{\text{out2}} = \begin{cases} T_{\text{ref}}, T_{\text{ref}} \ge T_{2} \\ \frac{T_{2} - T_{1} - T_{0}}{T_{2} - T_{1}} (T_{\text{ref}} - T_{2}) + T_{2}, T_{1} \le T_{\text{ref}} < T_{2} \\ T_{2} - T_{1} - T_{0} - T_{1} \le T_{1} \\ T_{\text{ref}} - T_{0}, - T_{1} \le T_{\text{ref}} < T_{1} \\ \frac{T_{2}}{T_{2} - T_{1}} (T_{\text{ref}} + T_{2}) - T_{2}, - T_{2} \le T_{\text{ref}} < -T_{1} \\ \frac{T_{2}}{T_{2} - T_{1}} (T_{\text{ref}} + T_{2}) - T_{2}, - T_{2} \le T_{\text{ref}} < -T_{1} \end{cases}$$

$$(23)$$

其中:*T*_{out1},*T*_{out2}为电机1和电机2的实际输出力 矩,*T*_{ref}为速度控制器计算得到的力矩指令值,*T*₁ 为偏置力矩与电机速度控制器力矩指令之和为0 时的阈值1,*T*₂为偏置力矩动态变化输出时的力 矩指令设定阈值2,*T*₀为恒定偏置力矩设定值。 其中复合电流指令的设定值如下所示:

$$I_{\text{offset}} = \begin{cases} 0, T_{\text{ref}} \ge T_2 \\ \frac{T_0/Kt}{T_2 - T_1} (T_{\text{ref}} - T_2), T_1 \leqslant T_{\text{ref}} < T_2 \\ T_0, -T_1 \leqslant T_{\text{ref}} < T_1 \\ \frac{T_0/Kt}{T_2 - T_1} (T_{\text{ref}} + T_2), -T_2 \leqslant T_{\text{ref}} < -T_1 \\ 0, T_{\text{ref}} \leqslant -T_2 \end{cases}$$

(24)

由此通过复合电流指令控制器计算出复合 消间隙控制指令作为消间隙的输入。

4 测量实验与结果

4.1 像旋特性验证实验

在长春采用1.2m望远镜进行长曝光跟踪 恒星实验,验证像旋的运动轨迹是否符合理论分 析。将望远镜置于不同的方位俯仰位置,观测视 场中的恒星,一张图片曝光2s,存储几分钟左右 的图片选取两张进行分析。重点关注方位角在 0°,180°和270°时及不同俯仰角下的速度和方向。 相机的像元个数为2K×2K。

4.1.1 方位角11°及俯仰角84°

将望远镜方位角置于11°附近,俯仰角置于 84°,此时像旋理论速度如图10所示。其中,图 10(a)为通过理论公式计算出的像旋度,图10(b) 为实际观测的像旋位置及变化。由于实验中探 测器不能进行长时间曝光,曝光时间最长为2s, 因此采取长时间记录星点位置来测试像旋的轨 迹和速度,具体为连续拍4 min的多帧图像,取中





(b) 实测像旋位置 (b) Actual position of image rotation





心点星和上下距离一定的星体1和星体2,在视场中取3个星体的坐标值进行记录,4min内取多帧同样的星体1和星体2记录3个星体的坐标值,然后计算如下:

$$\begin{cases} r_{1,t_{1}} = \sqrt{\left(x_{1,t_{1}} - x_{c}\right)^{2} + \left(y_{1,t_{1}} - y_{c}\right)^{2}} \\ r_{1,t_{2}} = \sqrt{\left(x_{1,t_{2}} - x_{c}\right)^{2} + \left(y_{1,t_{2}} - y_{c}\right)^{2}} \\ l_{t_{1,t_{2}}} = \sqrt{\left(x_{1,t_{1}} - x_{1,t_{2}}\right)^{2} + \left(y_{1,t_{1}} - y_{1,t_{2}}\right)^{2}}, (25) \\ \theta_{t_{1},t_{2}} = \arctan\left(\frac{2l_{t_{1},t_{2}}}{r_{1,t_{1}} + r_{1,t_{2}}}\right) \\ \dot{\theta}_{t_{1},t_{2}} = \arctan\left(\frac{2l_{t_{1},t_{2}}}{r_{1,t_{1}} + r_{1,t_{2}}}\right) \\ \end{cases}$$

其中: r_{1,t_1} 为 t_1 时刻星体1距中心星体的距离, r_{1,t_2} 为星体1在 t_2 时刻距中心星体的距离, l_{t_1,t_2} 为星体 1在 t_2 ~ t_1 内变化的弧线位移, θ_{t_1,t_2} 为星体1在 t_2 ~ t_1 内变化的角度, θ_{t_1,t_2} 为星体1变化的速度。

通过式(25)计算出的星体变化位置并绘出 位移变化,如图10(c)所示。

4.1.2 方位角183°及俯仰角86°

将望远镜方位角置于183°附近,俯仰角置

于86°,验证方位角对像旋位移速度及方向的影 响。此时星体像旋实测位置及像旋理论速度与 位移变化如图11所示。同理测试了其他情况

下的像旋位置及速度,不再一一列出,最后获 得不同方位、俯仰角下的像旋位移及速度,如 表1所示。



(b) Variation of star position



Fig. 11 Position and velocity image rotation at azimuth angle of 183° and elevation angle of 86°

表1	不同条件下的像旋速度	
----	------------	--

Tab. 1 Rotation velocity of image under different working conditions

序号	条件	理论速度/((")·s ⁻¹)	星1实际速度/((")・s ⁻¹)	星2实际速度/((″)・s ⁻¹)	方向
1	俯仰 84°	-103.3	-100.5	-102.8	顺时针
	方位11°				
2	俯仰 80°	-62.2	-62.45	-63.25	顺时针
	方位358°				
3	俯仰 75°	-41.7	-42.3	-42.2	顺时针
	方位0°				
4	俯仰 70°	-31.5	— 30. 6	-30.0	顺时针
	方位356°				
5	俯仰 60°	-21.6	-20.0	-21.0	顺时针
	方位4°				
6	俯仰 86°	154.8	153.4	154.3	逆时针
	方位183°				
7	俯仰 78°	3.6	3.67	3.7	逆时针
	方位266°				

经验证,像旋位移、速度与方向与理论分析 一致。其中速度误差公式为:

$$E = \frac{\dot{\theta}_{t_1, t_2} - \dot{\theta}_{\text{ideal}}}{\dot{\theta}_{\text{ideal}}}, \qquad (26)$$

其中 θ_{ideal} 为理论计算出的像旋速度。速度较大 时为154.8(")/s,实际速度误差与理论计算不超 过2%,方向也与规定方向相符,速度误差主要是 由选取的星点坐标的随机误差造成的。将像旋 特性分析的运动轨迹及速度进行路径规划及轨 迹引导,便可实现全天区的像旋消除。

4.2 双电机消间隙实验

消像旋另外一个关键问题是跟踪精度及速 度的需求,而采用双电机带齿轮的驱动机构需要 解决齿轮间隙问题。为验证复合电流指令消间 隙的效果,搭建系统模型,参数选择按照实际选 用的电机及机械系统参数,采用不同速度下的位 置引导进行实验验证。

4.2.1 15(")/s时的跟踪精度

采用15(")/s的低速位置引导,测试该系统 的低速跟踪性能,不加消间隙时的位置和速度响 应如图12所示。







由图12可知,在不加消间隙控制时系统的位置响应是发散震荡的,速度响应也不能稳定到15(")/s。

增加了复合电流指令消间隙控制后,采用同 样的控制参数,位置响应和速度响应如图13所 示。位置从1s时刻开始引导,4s后位移运动了 60",位置响应误差除在开始加速时动态响应为 0.65",其他均在编码器噪声以内。但由于采样 频率较高,为1kHz,低速时的速度响应不能 显示。

4.2.2 170(")/s时的跟踪精度

采用消旋最大跟踪速度170(")/s作为输入 条件,不加消间隙控制的速度响应如图14所示。 由图可知,不加消间隙的速度响应是震荡的,其 位置响应和误差也是震荡的,本文不再一一 列出。





Fig. 14 Tracking accuracy at 170 (")/s without backlash elimination

在同样的控制参数下,增加复合电流指令控制后,其跟踪精度如图15所示,可见位置在4s内运行了680",速度也能分辨出来,位置误差除动态阶段为0.7″,稳态误差为0.2″。





图 15 加复合电流指令消间隙 170 (")/s时的跟踪精度 Fig. 15 Tracking accuracy at 170 (")/s with backlash elimination

4.2.3 正弦曲线的跟踪精度

为验证赤纬-15°~15°在不同时角下位置切换是高速切换速度变化时能否满足要求,设计了速度为正弦引导曲线7.86sin($2\pi \times 0.5t$)((°)/s),位置为5cos($2\pi \times 0.5t$)((°)/s),不加消间隙时,系统是震荡的,不再列出;加消间隙后获得了正弦曲线响应,如图16所示。

由此可知,在变速度正弦曲线的引导下,系



图 16 加复合电流指令消间隙正弦引导的跟踪精度 Fig. 16 Tracking accuracy at sine guide with backlash elimination

统仍能保证跟踪精度,跟踪误差在编码器噪声以 内,最大误差小于1″,满足指标需求。

4.2.4 已有消旋系统对比测试

已有望远镜自适应系统中的消旋控制采用 步进电机加皮带结构,在速度幅值为170"、周期 为2Hz的正弦位置引导下,正弦位置跟踪误差如 图17所示。由图可知,位置跟踪误差最大在 200",不满足本文中的望远镜消旋需求。

在另一直流电机加抱闸的平台上测试抱闸



对位置控制的影响,结果如图18所示。在阶跃位 置定位完成后,锁紧抱闻会对控制精度产生较大 影响,最大会产生13"的误差。另外,直流电机工 作时需要抱闸一直通电,抱闸会产生很大热量, 对主焦点成像质量的影响较大,不满足系统 需求。



图18 直流电机加抱闸消旋控制系统误差

Fig. 18 Tracking accuracy at sine guide using DC motor with brake

参考文献:

- [1] BARBOZA S, POTT J U, ROHLOFF R R, et al. Design of a large image derotator for the E-ELT instrument MICADO [C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI. Edinburgh: SPIE, 2016,9908:99089H-1-14.
- [2] 罗秀娟,刘辉,张羽,等.地球同步轨道暗弱目标 地基光学成像技术综述[J].中国光学,2019,12
 (4):753-766.
 LUO X J, LIU H, ZHANG Y, *et al.* Review of ground-based optical imaging techniques for dim GEO objects [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 753-766. (in Chinese)
- [3] NEILL D R, SNEED R, DAWSON J, et al. Baseline design of the LSST hexapods and rotator
 [J]. SPIE, 2014, 9151: 91512B-1-16.
- [4] ADRIANOG, MANUEL G, P VHECTOR, et al. A new telescope control system for the Telescopio Nazionale Galileo: I - derotators[J].
- [5] JEREMRE B, LAURENT J, ONURK, et al. Design of a derotator for the 4 m DAG telescope [J]. SPIE, 2016, 9908:1-7.
- [6] 柳光乾,付玉,程向明.1米太阳望远镜光谱仪像 旋转及消旋控制[J].天文研究与技术,2012,9
 (1):86-92.

5 结 论

本文根据主焦点式大视场大口径望远镜的 指标需求,提出了双电机驱动齿轮的消旋控制系 统,对主焦点式大视场望远镜的像旋性能进行了 系统分析,并利用自研的望远镜进行了像旋特性 验证,同时针对双电机驱动齿轮的消旋机构进行 建模分析,利用复合电流指令消间隙的方法对消 旋系统进行消间隙控制。实验结果表明:像旋速 度和位置特性符合理论分析,速度误差不超过 2%,该误差主要来源于选取的星点的坐标随机 误差。采用复合电流指令控制方法可以对齿轮 间隙进行消除,低速15(")/s及高速170(")/s的 速度引导及位移引导下,不加消间隙电流指令, 系统振荡不能稳定到要求误差内,增加复合消间 隙 电 流 指 令 后, 控 制 精 度 小 于 1"。在正弦 0.137sin(πt)的引导下,仍然可以达到小于1"的 控制精度。

LIU G Q, FU Y, CHENG X M. Image-field rotation and control of counter rotation for the spectrograph of the 1m solar telescope of the Yunnan observatory [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2012, 9(1): 86-92. (in Chinese)

 [7] 翰青华,李语强,熊耀恒.1.2m地平式望远镜视
 场旋转角的理论计算[J].天文研究与技术,2009, 6(1):28-35.

JU Q H, LI Y Q, XIONG Y H. Theoretical calculation of the field-of-view rotation angles for the 1.2 m altazimuth telescope in the Yunnan observatory [J]. Astronomical Research & Technology, 2009, 6 (1): 28-35. (in Chinese)

[8] 孙丽娜, 汪永阳, 戴明, 等. 航空光电成像消旋电
 视数字控制器[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(8):
 1300-1304.

SUN L N, WANG Y Y, DAI M, *et al.* Digital controller for aerial camera with despun control[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1300-1304. (in Chinese)

[9] 王岱,李晓燕,吴钦章.某光测设备上消像旋的设计[J].光电工程,2012,39(1):108-112.
WANG D, LIXY, WU Q ZH. Design of eliminating image rotation on opto-electronic imaging tracking and measuring device[J]. Opto-Electronic Engi-

neering, 2012, 39(1): 108-112. (in Chinese)

- [10] 程景全.天文望远镜原理和设计[M].南京:南京大学出版社,2020.
 CHENG J Q. The Principles and Design of Astronomical Telescope[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2020. (in Chinese)
- [11] 郭新胜,周仁勉,谭名栋,等.光学消像旋高精度 位置控制系统的算法与实现[J].光子学报, 2011,40(12):1776-1779.
 GUO X SH, ZHOU R K, TAN M D, et al. Algorithm and realization for optical de-rotation highprecision position control system[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(12):1776-1779. (in Chinese)
- [12] 蒋佶松,美爱民. AIMS太阳望远镜中像旋对稳 像精度的影响分析[J]. 天文研究与技术,2020, 17(3): 376-383.

JIANG J S, JIANG A M. The influence of image rotation on accuracy of stabilization system of AIMS solar telescope [J]. *Astronomical Research* & *Technology*, 2020, 17 (3) : 376-383. (in Chinese)

- [13] 张桢君,王建成,程向明,等.多功能天文经纬仪 光轴指向变化实测与修正[J].光学精密工程, 2019,27(11):2321-2329.
 ZHANG ZH J, WANG J CH, CHENG X M, et al. Measurement and calibration of optical axis changes for multi-function astronomical theodolite [J]. Opt. Precision Eng., 2019, 27(11):2321-2329. (in Chinese)
- [14] 刘先一,张志利,周召发,等.基于恒星像点轨迹 的星图填补[J].光学精密工程,2019,27(5):

作者简介:



李玉霞(1987-),女,山东菏泽人,硕 士,助理研究员,2008于西安电子科 技大学获得学士学位,2012年于西安 交通大学获得硕士学位,主要从大望 远镜精密跟踪及主动光学位置控制方 面的研究。E-mail: lyx26691023@ 163.com 1229-1235.

LIU X Y, ZHANG ZH L, ZHOU ZH F, *et al.* Star image filling based on stellar image point trajectory [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5): 1229-1235. (in Chinese)

- [15] 冯锦平,马文礼,黄金龙.望远镜双电机驱动消齿隙的动力学设计[J].光电工程,2009,36
 (11):64-69.
 FENG J P, MA W L, HUANG J L. Anti-back-lash research of telescopes driven by dual-bias motors using dynamic method [J]. Opto-Electronic
- [16] MANCINI D. VST project: drive system design and strategies for performance optimization [C]. Astronomical Telescopes and Instrumentation. Proc SPIE 4837, Large Ground-Based Telescopes. Waikoloa: SPIE, 2003, 4837: 389-400.

Engineering, 2009, 36(11): 64-69. (in Chinese)

- [17] HAMMERSCHLAG R H, BETTONVIL F C M, JÄGERS A P L, et al. Large bearings with incorporated gears, stiffnesshigh, and precision for the Swedish Solar Telescope (SST) on La Palma
 [C]. SPIE Astronomical Telescopes+Instrumentation. Proc SPIE 6273, Optomechanical Technologies for Astronomy. Orlando: SPIE, 2006, 6273: 627315.
- [18] 隋志刚.基于双电机消隙的六自由度机械手结构 设计与研究[D]. 沈阳:东北大学, 2017.
 SUI ZH G. The Design and Study of 6 Degree of Freedom Manipulator Structure Based on the Dual Motor Anti-backlash [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017. (in Chinese)

通讯作者:



王建立(1971-),男,山东曲阜人,研 究员,博士生导师,主要从事空间探测 技术和地基高分辨率成像光电望远镜 总体技术的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn