

原初引力波望远镜环境保护罩高度轴系结构方案及控制策略

乐中宇^{1,2}, 蒋粲奕^{1,2,3}, 徐进^{1,2}, 邓壮壮^{1,2,3}, 郑波^{1,2,3}, 陈亮^{1,2}

- (1. 中国科学院南京天文光学技术研究所, 江苏南京 210042;
2. 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏南京 210042;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 阿里原初引力波项目为保护望远镜提出了独特的环境保护罩方案, 该研究针对该方案的高度轴系结构及控制策略展开。首先, 根据望远镜运行模式对高度轴系进行运动及结构方案设计, 建立系统的接触和摩擦模型, 并进行动力学仿真。基于仿真结果提出基于目标位置的力矩补偿双电机控制策略, 并为主动电机设计了基于 SAPSO-BP 策略的 PID 控制器。控制系统仿真结果表明, 基于 SAPSO-BP 的 PID 控制器在 $1^\circ/\text{s}$ 阶跃信号下, 相对于调节时间相同的 PSO-BP 策略超调量减少了 6%, 且在一定扰动下能够更好地抑制峰值误差。通过对高度轴系系统验证, 该控制策略在 $1^\circ/\text{s}$ 及 $2^\circ/\text{s}$ 阶跃信号、梯形信号以及正弦信号下表现出了良好的跟随性能, 并可以实现主从电机的协调分配与稳定运行, 其速度跟踪误差均满足设计要求。

关键词: 环境保护罩高度轴系; 多体动力学; 双电机控制策略; BP-PID 控制器; SAPSO 优化算法

中图分类号: P111.33; TH753; TP273 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20240464

引用格式: YUE Zhongyu, JIANG Canyi, XU Jin, et al. The altitude axis structure scheme and control strategy of the environmental protection cover of Primordial Gravitational Waves Telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(1): 20240464.

乐中宇, 蒋粲奕, 徐进, 等. 原初引力波望远镜环境保护罩高度轴系结构方案及控制策略[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(1): 20240464.

0 引言

地基原初宇宙微波背景 (Cosmic Microwave Background, CMB) 引力波望远镜设计用来接收微波波段的辐射, 其观测需要高度精准和稳定的设备, 以捕获并解读微弱的信号^[1]。地球物理噪声源 (如风和温度) 会影响地面引力波探测, 造成瞬态灵敏度恶化和数据采集的空白^[2]。望远镜一般需要圆顶结构提供良好的保护, 国内阿里原初引力波项目拟采用一种环境保护罩来对望远镜进行噪声、雨、雪和风的防护。

环境保护罩的可靠运行是保障阿里原初引力波望远镜正常探测的关键, 因此文中研究为环境保护罩设计了独特的高度轴系方案。该环境保护罩高度轴

系的运动过程涉及大量的接触。接触是一种动力学高度非线性的现象, 接触过程中产生的接触力大小受接触位置材料特性、相对速度以及侵入深度等多种参数的影响^[3]。传统的 Hertz 模型基于弹性接触理论建立, 该理论根据接触表面压应力分布规律求得表面接触压力所组成的合力应等于外加载荷, 且该理论认为接触过程中没有能量损失^[4-5], 因此, 它不能准确地反映实际的接触过程。近年来针对 Hertz 模型缺少能量耗散项的缺点, 学术界提出了几种考虑能量耗散和冲击持续时间的连续接触模型, 其中 HUNT 和 CROSSLEY^[6], LANKARANI 和 NIKRAVESH^[7] 以及 FLORES 等^[8] 都提出了影响较大的模型。故在针对高度轴运动进行仿真模拟时, 可以选取合理的参数并

收稿日期: 2024-10-04; 修订日期: 2024-11-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC2203302)

作者简介: 乐中宇, 男, 副研究员, 博士, 主要从事大型天文仪器结构设计与优化方面的研究。

通过虚拟样机技术进行动力学仿真分析。

目前国内外圆顶的控制方式主要以单片机或 PLC 实现自动控制,如丽江 2.4 m 望远镜圆顶侧窗控制系统采用 STM32 控制板与步进电机^[9]、兴隆观测基地 85 cm 天文望远镜圆顶及天窗自动控制系统采用 PLC 控制器与直流无刷电机^[10]、Devasthal 光学望远镜圆顶则采用 PIC 单片机控制^[11]。圆顶的控制算法通常采用 PID 这种控制系统结构简单且易于控制的方式^[9-11]。PID 控制的控制性能主要取决于其参数的整定,因此,PID 控制器的参数整定与优化已成为一个重要的研究方向^[12]。近年来,人工智能优化算法和神经网络的发展为 PID 参数整定提供了新的有效方法^[13]。MALEKABADI 等^[14]通过使用人工神经网络对 PID 控制器进行微调,使用遗传算法对神经网络的权重进行优化,经过训练的神经网络的结果相较于反向传播算法表现更好。LIU 等^[15]利用粒子群优化算法对数字干涉式闭环光纤陀螺的 PID 控制器参数进行优化,通过与多种控制方法进行仿真对比,结果表明 PSO-PID 控制器能够缩短调节时间,减小超调,并且易于实现。

文中提出了一种应用于阿里原初引力波望远镜的环境保护罩高度轴系结构,并对该结构进行了动力学研究,提出了一种主从双电机控制策略并验证了该策略的有效性。

1 高度轴结构方案及数学模型

1.1 高度轴结构方案

高度轴的观测范围是阿里原初引力波望远镜与传统光学望远镜运动模式的巨大差别之一。阿里原初引力波望远镜的主要运动模式为:在方位轴以较高速进行反复扫描,一段时间后调整高度轴进行天区切换,然后继续在方位轴进行反复扫描,如图 1 所示,其高度轴运行范围为 45°~135°。

基于阿里引力波望远镜独特的运行模型,文中提出一种新型的适用于原初引力波望远镜环境保护罩高度轴系的卷帘式对拉结构,如图 2 所示,该卷帘式对拉装置主要包括卷帘节、观测窗口、高度轴滑道、定滚轮、收束卷筒以及两侧的电机组,该装置两侧对称,两侧的卷帘一端与观测窗口相连另一端被收束在卷筒。当望远镜高度轴运动时,两侧的电机组通过对拉产

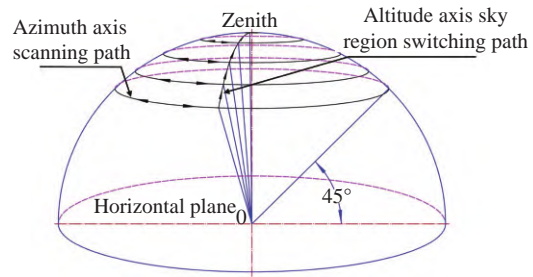


图 1 原初引力波望远镜运行模式

Fig.1 Primordial gravitational wave telescope operation mode

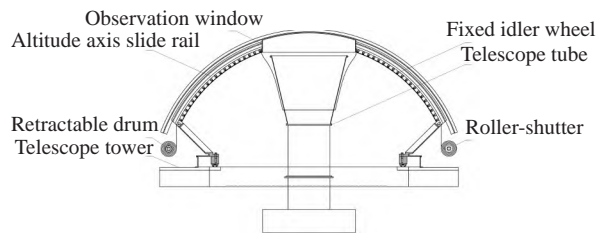


图 2 环境保护罩结构图

Fig.2 Environmental protection cover structure diagram

生的拉力差控制卷帘运动,从而带动密封窗口位置沿高度轴滑道跟随望远镜运动。同时采用定滚轮减小小卷帘和罩体之间的摩擦。

该环境保护罩高度轴系结构可满足原初引力波望远镜高度轴预期实现运行指标如表 1 所示。

表 1 望远镜预期运行指标

Tab.1 Telescope expected operational indicators

	Rotation range	Maximum speed	Maximum acceleration
Altitude axis motion parameters	45°-135°	1 (°)/s	1 (°)/s ²

考虑窗口运行过程中的跟踪误差,在保证环境保护功能的基础上令观测窗口有±2°的旋转角度误差余量,如图 3 所示。

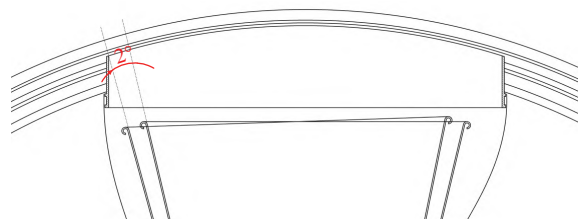


图 3 望远镜观测角度与观测窗口角度关系

Fig.3 The relationship between the telescope observation angle and the observation window angle

1.2 环境保护罩高度轴数学模型

假设向右旋转为正向,由上述高度轴结构可推导高度轴观测窗口和卷帘系统的运动方程为:

$$\left(J_w + \sum J_s \right) \ddot{\theta} = \tau_R - \tau_L - \tau_f + m_w g R \cos(\theta) + \sum m_s g R \cos(\theta_s) \quad (1)$$

式中: J_w 为窗口的转动惯量; J_s 为单个卷帘节的转动惯量; m_w 为窗口的质量; m_s 为单个卷帘节的质量; R 为窗口和卷帘滑道与旋转轴之间的距离; g 为重力加速度,取 9.98 m/s^2 ; θ 为窗口的质心角度; θ_s 为某单个卷帘的质心角度; τ_L 和 τ_R 为左侧和右侧卷筒产生的力矩; τ_f 为摩擦力矩。

通过结构模型可得观测窗口与卷帘节的数据,如表 2 所示。

表 2 观测窗口与卷帘节数据

Tab.2 Observation window and roller shutter section data

Parameter	Value
Window rotational inertia $J_w/\text{kg}\cdot\text{mm}^2$	28518438.239
Roller-shutter section rotational inertia $J_s/\text{kg}\cdot\text{mm}^2$	7815220.498
Window mass m_w/kg	45
Roller-shutter section mass m_s/kg	1.35
Pulley radius R/mm	2228

令 θ' 为旋转角度,初始角度为 $\theta_0 = 90^\circ$, 则 $\theta' = \theta - \theta_0$, 即 $\cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta'\right) = -\sin(\theta')$, 此时系统运动方程为:

$$\left(J_w + \sum J_s \right) \ddot{\theta}' = \tau_R - \tau_L - \tau_f + m_w g R \sin(\theta') + \sum m_s g R \sin(\theta'_s) \quad (2)$$

忽略环境保护罩结构运行过程中的不连续现象,即假设卷帘运动是连续的,且分布在滑道上的质量是连续的,公式 (2) 右侧后两项可等效为:

$$m_w R g \sin(\theta') + \sum m_s R g \sin(\theta'_s) = \Delta m R g \sin(\theta') \quad (3)$$

此时系统运动方程等效为:

$$\left(J_w + \sum J_s \right) \ddot{\theta}' = \tau_R - \tau_L - \tau_f + \Delta m g R \sin(\theta') \quad (4)$$

式中: Δm 为随动窗口与其对应的圆心角相等角度的

卷帘重力差,其值为 15.43 kg 。

2 环境保护罩高度轴运动学分析

2.1 环境保护罩高度轴接触模型

环境保护罩在运动过程中产生的接触为窗口与卷帘节两者间的接触,以及两者与保护罩滑道和卷筒之间的接触。文中的仿真分析采用 IMPACT 接触模型,其碰撞函数的接触算法基于迟滞阻尼接触模型。

迟滞阻尼接触模型认为两个相互接触物体产生的接触力是关于渗入深度 δ 和渗入速率 $\dot{\delta}$ 的函数,法向接触力 F_n 的表达式如下:

$$F_n = K \delta^n + \xi \delta^n \dot{\delta} \quad (5)$$

式中: δ 为渗入深度; $\dot{\delta}$ 为渗入速率; 右式中左侧为 Hertz 定律,其中 K 为接触刚度系数,指数 n 取决于两个相互接触面的拓扑性质; 右侧是与碰撞体阻尼相关的耗散分量,其中 ξ 为滞后阻尼系数。

LANKARANI 和 NIKRAVESH^[7] 利用结合阻尼项的 Hertz 接触定律的一般趋势,提出了一种连续接触力模型,该模型的滞后阻尼系数被表达为:

$$\xi = \frac{3K(1-c_r^2)}{4\dot{\delta}^{(-)}} \quad (6)$$

式中: $\dot{\delta}^{(-)}$ 为两物体相对运动的初始接近速度; c_r 为恢复系数。

结合上述公式,迟滞阻尼接触模型的法向接触力 F_n 表达式如下:

$$F_n = K \delta^n \left[1 + \frac{3(1-c_r^2)}{4} \frac{\dot{\delta}}{\dot{\delta}^{(-)}} \right] \quad (7)$$

由上述公式可知,法向接触力 F_n 主要与产生接触的两物体的接触刚度系数和滞后阻尼系数有关。根据 Hertz 接触假设,两个各向同性球体物体的接触刚度为:

$$K = \frac{4}{3(\sigma_1 + \sigma_2)} \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \quad (8)$$

式中: R_1 和 R_2 为等效半径; σ_1 和 σ_2 为材料参数,其大小与物体的泊松比和杨氏模量有关。

以迟滞阻尼接触模型为基础的 IMPACT 接触模型的碰撞函数是将阻尼相关的耗散分量表达为阶跃函数,其法向接触力 F_n 表达式如下:

$$F_n = \begin{cases} K \delta^n - \text{step}(g, 0, 0, d_{\max}, c_{\max}) \frac{dg}{dt} & \delta \geq 0 \\ 0 & \delta < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中： d_{\max} 为最大渗入深度； c_{\max} 为最大渗入深度时的最大阻尼系数； $step$ 为三次多项式逼近海维赛阶梯函数。

2.2 环境保护罩高度轴摩擦模型

环境保护罩高度轴模型为多体模型，在工作时产生的摩擦较为复杂，文中采用一种改进的可处理静摩擦效应的连续库伦摩擦力模型，其数学表达式为：

$$F_f = -\mu F_n \text{sign}(v) \quad (10)$$

式中： F_f 为摩擦力； μ 为摩擦系数，其大小受相接触物体的相对滑动速度影响，如图 4 所示； v 为接触点相对滑动速度； sign 为符号函数。

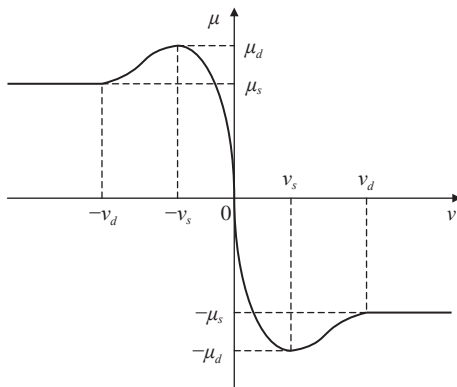


图 4 摩擦力与运动速度关系

Fig.4 Relation between friction force and velocity of motion

在该库伦摩擦模型中， μ 的表达式为：

$$\mu = \begin{cases} -\text{sign}(v)\mu_d & |v| > v_d \\ -\text{step}(|v|, v_d, \mu_d, v_s, \mu_s) \text{sign}(v) & v_s < |v| \leq v_d \\ \text{step}(v, v_d, \mu_d, -v_s, -\mu_s) & |v| \leq v_s \end{cases} \quad (11)$$

式中： μ_d 为动摩擦因数； μ_s 为静摩擦因数； v_s 为静摩擦转换速度； v_d 为动摩擦转换速度。

2.3 环境保护罩高度轴运动学模型搭建及仿真

根据环境保护罩高度轴结构及运行原理，建立该结构的三维模型。根据环境保护罩高度轴的运动模式，对各运动部位添加连接及接触。

环境保护罩高度轴的运行主要目标是保证观测窗口与望远镜之间的高度轴同步运行。为验证随动窗口能够跟随望远镜运动，将一侧收束卷筒附加驱动设为主动轮，根据望远镜高度轴最大速度，主动轮的线速度取为 1 m/s 并进行仿真，仿真设置及模型如图 5 所示。



图 5 环境保护罩高度轴运动学模型

Fig.5 Kinematics model of altitude axis of environmental protection cover

观测窗口的角速度与时间关系曲线如图 6 所示，0~1.8 s 时观测窗口在初始位置抖动，此时由于重力作用两侧卷筒处的卷帘节有下垂的现象，这段时间内主动轮驱动卷筒，起到收束卷帘与消除连接件间隙的作用。1.8~24.2 s 时观测窗口进行加速并将速度维持在 1 (°)/s 上下波动，随着时间的增加观测窗口速度波动也相对增大。24.2~26.8 s 时观测窗口运行受重力分量影响，速度急速增加发生失控现象。

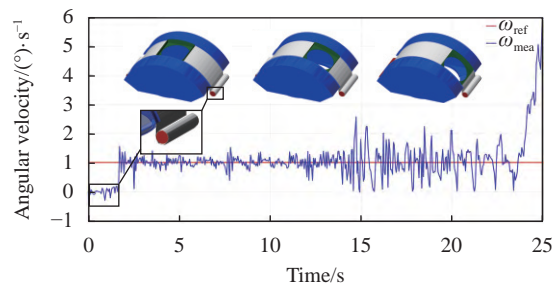


图 6 环境保护罩高度轴角速度时序图

Fig.6 Angular velocity timing diagram of the altitude axis for the environmental protection cover

由上述现象可知，当仅有一侧电机驱动时，系统主要经历卷帘收束与消除、系统正常运行和失速失控三个过程。文中针对系统运行过程中产生的失速等问题进行双电机控制策略研究，根据运行目标对两侧电机进行合理的力矩分配，确保观测窗口始终稳定运行。

3 环境保护罩高度轴控制策略及设计

3.1 环境保护罩高度轴运动策略

文中采用基于目标位置的力矩补偿双电机控制策略，通过观测窗口的编码器信号以及望远镜的编码器信号设定主动轮与从动轮的力矩差并进行主从电

机分配,实现双电机的速度控制。

分析系统正向运行情况(假设运动角度为 90°~45°),可将系统起始至停止运行过程分为静止(卷帘收束及消除)、加速、匀速、减速、静止五个步骤。由公式(1)~(4)可知,环境保护罩高度轴系统的主要干扰项是系统中的摩擦力,当不考虑摩擦力的影响时,影响观测窗口运动的力为两侧拉力以及重力,此时力矩关系如表3所示。

表3 窗口状态和双电机输出力矩关系

Tab.3 Relationship between window state and dual-motor torque

Window state	Torque relationship
Static or uniform speed	$\tau_R + \Delta mRg\sin(\theta') = \tau_L$
Acceleration	$\tau_R + \Delta mRg\sin(\theta') > \tau_L$
Deceleration	$\tau_R + \Delta mRg\sin(\theta') < \tau_L$

由表3可知,决定两侧电机力矩大小的因素为观测窗口状态和观测窗口所在角度。由于卷帘结构只

能提供拉力,此时两侧对拉电机提供的力矩大小应根据观测窗口的具体运行状态和实时位置进行变化。

因此,文中采用的基于目标位置的力矩补偿双电机控制策略主要利用力矩分配控制系统,通过望远镜的参考速度以及观测窗口实时位置判断两侧电机的主动和从动属性,其中从动电机输出力矩作为一个自由变量,大小由系统卷帘及观测窗口位置决定,主动电机则采用PID控制。

3.2 双电机伺服系统结构设计

双电机伺服控制系统主要由控制器、伺服电机和机械传动装置等部分构成。参考信号来源为望远镜机架的编码器以及观测窗口的编码器。主从电机分配决策以及从动电机力矩大小均由编码器捕获的信号决定。系统将观测窗口编码器获得的速度信号作为实际速度,将机架编码器获得的速度作为参考速度,控制器根据PID控制器计算出相应的主动电机所需力矩,将其转化为数字信号输入驱动器,进而驱动电机的旋转,双电机伺服系统结构原理如图7所示。

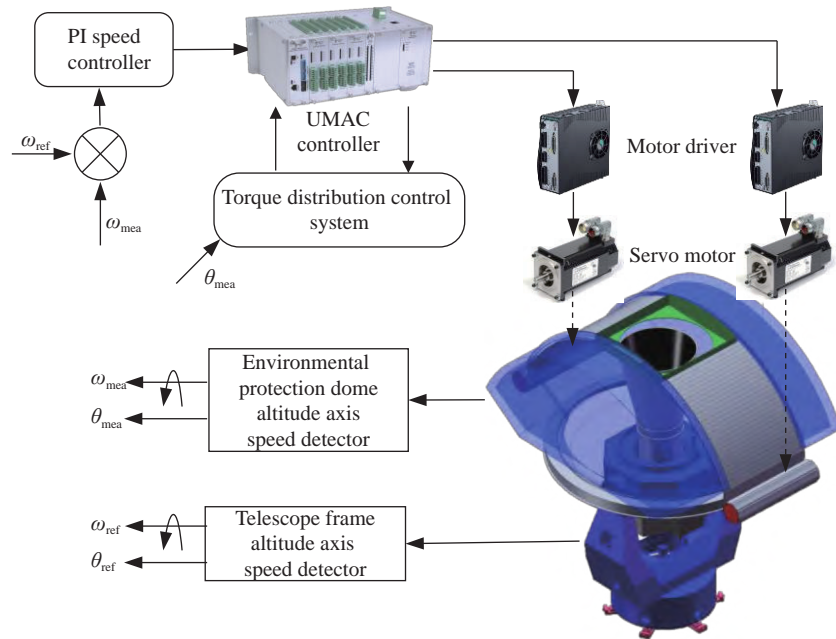


图7 双电机伺服系统结构

Fig.7 Dual-motor servo system structure

3.3 主动电机PID控制器设计

当主动电机采用PID控制时,被控对象为包括从动电机和望远镜高度轴系机械结构,此时,系统的误

差主要包括系统中各个接触产生的摩擦力、收束卷筒处卷帘重力、滑道上卷帘及观测窗口切向重力分量产生的力矩误差等。

3.3.1 BP-PID 控制器设计

传统的 PID 控制难以寻找最优解, BP 神经网络 PID 控制可以有效地解决非线性控制问题^[16-17]。BP 神经网络是一种基于误差反向传播算法的多层前馈神经网络,其隐含层神经元的范围决定其学习能力,三层神经网络能够近似表达任意的非线性函数^[18],故文中采用 4-5-3 型 BP 神经网络架构,如图 8 所示。

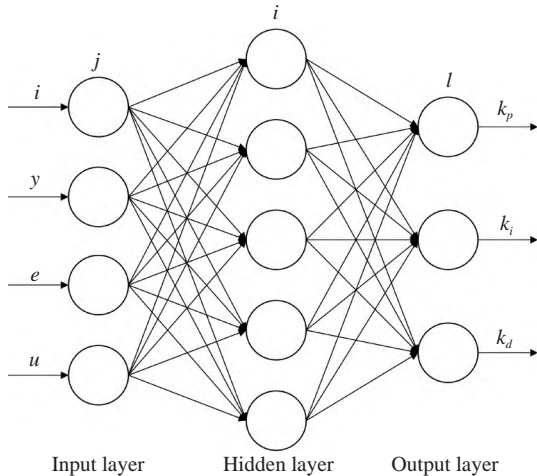


图 8 4-5-3 型 BP 神经网络结构

Fig.8 Type 4-5-3 BP neural network structure

BP 神经网络隐含层的输入输出表达式为:

$$\begin{cases} net_i^{(2)}(k) = \sum_{j=1}^m w_{ij}^{(2)} x_j^{(1)} \\ O_i^{(2)}(k) = f(net_i^{(2)}(k)) \\ f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $w_{ij}^{(2)}$ 为隐含层的加权系数; $f(x)$ 为正负对称的 Sigmoid 活化函数; $net_i^{(2)}(k)$ 、 $O_i^{(2)}(k)$ 分别为隐含层的输入输出。

BP 神经网络输出层的输入和输出为:

$$\begin{cases} net_i^{(3)}(k) = \sum_{j=1}^n w_{ji}^{(3)} O_j^{(2)} \\ O_1^{(3)} = k_p(k) = g(net_1^{(3)}(k)) \\ O_2^{(3)} = k_i(k) = g(net_2^{(3)}(k)) \\ O_3^{(3)} = k_d(k) = g(net_3^{(3)}(k)) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $w_{ji}^{(3)}$ 为输出层的加权系数; $g(x)$ 为非负的 Sigmoid 活化函数; $net_i^{(3)}(k)$ 、 $O_i^{(3)}$ 分别为输出层的输入输出。

输出层的三个神经元输出控制 PID 的比例、积

分、微分,以提升环境保护罩高度轴系统的控制性能和鲁棒性。

3.3.2 基于模拟退火的粒子群优化算法

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是一种基于群体智能的优化算法,通过模拟鸟群或鱼群的行为来寻找最优解^[19]。其基本思想是通过个体 (粒子) 之间的信息共享,逐步逼近最优解。粒子群算法原理简单,公式迭代易于实现,但容易陷入局部最优。给定一个随机的初始位置和速度,粒子群算法按照公式 (14) 进行迭代更新,使粒子可以在解空间中找到更接近最优解的位置。

$$\begin{cases} v_i^{k+1} = w v_i^k + c_1 r_1 (p_i^k - x_i^k) + c_2 r_2 (p_g^k - x_i^k) \\ x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \end{cases} \quad (14)$$

式中: x_i^{k+1} 、 v_i^{k+1} 为第 $k+1$ 代粒子 i 的位置和速度; x_i^k 、 v_i^k 为第 k 代粒子 i 的位置和速度; p_i^k 为第 k 代粒子的个体最优位置; p_g^k 为第 k 代粒子的全局最优位置; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; c_1 、 c_2 为加速常数。

模拟退火算法 (Simulated Annealing, SA) 是一种概率性搜索算法,模仿物理退火过程中固体降温的过程^[20]。模拟退火算法可以通过接受一定程度较差解来跳出局部最优,逐步逼近全局最优,但受计算时间和速度限制,收敛时间较长。

基于模拟退火的粒子群优化算法 (SA-PSO) 结合了 SA 和 PSO 的优点^[21],利用 SA 的全局搜索能力和 PSO 的快速收敛能力,以提高整体搜索性能。SA-PSO 的迭代步骤如下:

- 1) 随机生成粒子群,初始化粒子速度、位置等粒子群参数,初始化初始温度、退火系数等模拟退火参数;
- 2) 计算当前温度下各粒子 p_{best} 的适应值;
- 3) 选取当前粒子的最优适应值更新在 p_{best} 中,选取全局粒子的最优适应值保存在 g_{best} 中;
- 4) 更新粒子的位置和速度;
- 5) 计算新解的适应度,如果新解优于当前解,则接受新解。如果新解不优于当前解,则以一定概率接受新解,这个概率由以下公式给出:

$$P(\text{accept}) = \exp\left(\frac{-\Delta f}{T}\right) \quad (15)$$

式中: Δf 为当前解与新解的适应度差; T 为当前温度。

6) 进行退温操作;

7) 检查终止条件, 如果满足迭代条件, 则终止, 否则继续搜索新粒子作为个体进行迭代。

8) 迭代结束后, 输出全局最优位置 g_{best} 及其对应的适应度值。

3.3.3 基于 SAPSO-BP 的主动电机 PID 控制器

结合 SAPSO 和 BP 的 PID 控制算法流程图如图 9 所示。BP 神经网络用于调整 PID 控制器的参数, 采用结合了粒子群优化全局搜索能力和模拟退火局部搜索特性的退火粒子群优化算法 (SAPSO), 对 BP 神经网络的权值以及 PID 参数进行联合优化。

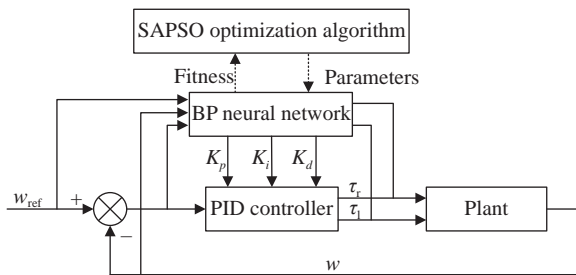


图 9 基于 SAPSO-BP 的 PID 控制流程图

Fig.9 PID control flow diagram based on SAPSO-BP

4 结果分析

4.1 主动电机 PID 控制器优化

由公式 (1)~(4) 及基于目标位置的力矩补偿双电机控制策略可知, 当从动电机力矩补偿质量差在运行滑道上的重力切向分量时, 该分量与从动电机产生的力矩关系为:

$$\tau_L = \Delta mgR \sin(\theta) \quad (16)$$

此时, 系统运动方程等效为:

$$\left(J_w + \sum J_s \right) \ddot{\theta} = \tau_R - \mu \Delta mgR \cos(\theta) \quad (17)$$

定义状态变量旋转角度 θ 和角速度 $\dot{\theta}$:

$$x_1 = \theta$$

$$x_2 = \dot{\theta}$$

则

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{(J_w + \sum J_s)} (\tau_R - \mu \Delta mgR \cos(x_1)) \end{cases} \quad (18)$$

结合上述公式对系统进行数值分析, 依据算法流程图, 将 BP-PID 控制器初始化, 输入层节点数 $j=4$, 隐含层节点数 $i=5$, 输出层节点数 $l=3$, 学习因子 $\alpha=0.5$, 惯性因子 $\eta=0.4$ 。粒子群初始化条件, 加速常数 $c_1=c_2=2$, 惯性权重 $W_{max}=5, W_{min}=-5$, 初始种群个数 $N=20$, 最大迭代次数 $D=300$, 初始温度 $T_0=100$, 终止温度 $T_f=1$, 退火系数 $\beta=0.9$, 电机额定扭矩 $\tau_c=2.86 N \cdot m$, 减速器减速比 $i=70$ 。

取均方误差为适应度参数, 基于 SAPSO 优化策略和 PSO 优化策略的适应度变化曲线如图 10 所示, 可以看出基于 PSO-BP 的策略经过 72 次迭代达到收敛, 基于 SAPSO-BP 的策略在算法的优化下, 跳出了局部最优, 在第 115 次迭代时达到收敛。

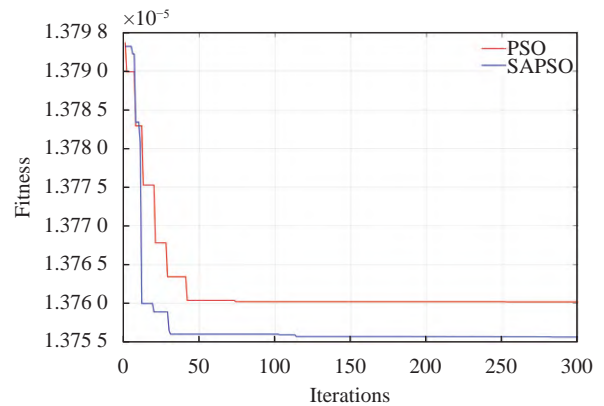


图 10 SAPSO 及 PSO 适应度曲线

Fig.10 Fitness curves for SAPSO and PSO

为评估 SAPSO-BP-PID 控制的动态特性以及系统稳定性, 在仿真软件中搭建模型对 SAPSO-BP-PID 以及 PSO-BP-PID 两种控制策略进行仿真, 以 $1 (^{\circ})/s$ 阶跃信号作为参考转速 (ω_{ref})。由于系统在运行过程中会受到外界环境等因素产生的干扰, 故在 3 s 时添加一定的附加荷载模拟外部干扰。此时系统的响应曲线如图 11 所示。

环境保护罩高度轴系统的动态性能指标如表 4 及表 5 所示。在初始启动阶段, SAPSO-BP 策略具有更小的超调量, 在相同响应时间内具有更短的调节时间。在产生扰动时, 采用 SAPSO-BP 策略能够更好地抑制峰值误差, 具有更小的均值误差和平方误差积分, 表明其控制精度更高, 能够在系统动态变化期间维持更小的整体误差。故 SAPSO-BP 策略在动态

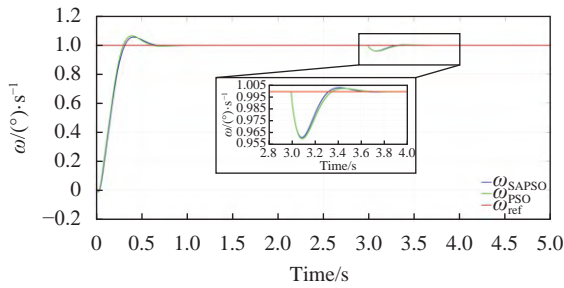


图 11 SAPSO-BP 及 PSO-BP 控制系统响应

Fig.11 SAPSO-BP and PSO-BP control system response

响应、误差控制和抗扰动能力等方面均优于 PSO-BP 策略。

表 4 系统初始启动动态特性

Tab.4 Dynamic characteristics of system initial startup

Parameters	SAPSO-BP-PID	PSO-BP-PID
Overshoot σ	5.489%	5.82%
Rise time t_r	0.17	0.17
Settling time t_s	0.45	0.47
Steady-state errors e	0.00005	0.00005

表 5 系统受瞬发干扰动态特性

Tab.5 Dynamic characteristics of system under instantaneous disturbance

Parameters	SAPSO-BP-PID	PSO-BP-PID
e_{max}	0.03937	0.04036
e_{min}	0.00007	0.00007
e_{mean}	0.01178	0.01277
e_{ise}	0.02137	0.02389

4.2 PID 控制器及电机控制策略跟随结果分析

利用 SAPSO-BP 算法所得 PID 参数对环境保护罩高度轴进行实验验证, 在 1 (°)/s 和 2 (°)/s 的阶跃速度信号下速度跟随结果如图 12、图 13 所示, 在 1 (°)/s 信号下系统响应误差曲线如图 14 所示, 可知系统能较好地进行速度跟随, 且系统在稳定运行状态下误差变化小, 符合设计误差余量。

当考察系统正向运行情况时, 参考速度设计为梯形, 该参考轨迹先静止 (令卷帘收束及消除), 再以 1 (°)/s² 的加速度加速 1 s, 接着保持 1 (°)/s 的速度匀速 5 s, 再以 1 (°)/s² 的加速度进行减速 1 s, 最终保持

静止。此时, 系统速度跟随结果如图 15 所示, 系统响应误差曲线如图 16 所示, 此时系统的误差变化小, 符合设计误差余量。

当考察系统力矩分配系统可行情况时, 参考速度

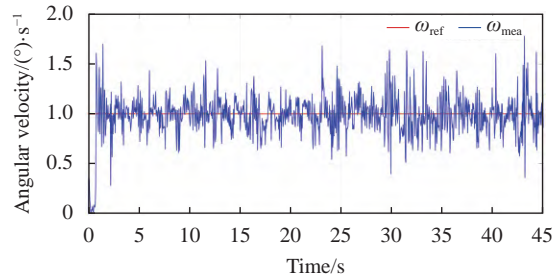


图 12 系统阶跃响应曲线 (1 (°)/s)

Fig.12 System step response curve (1 (°)/s)

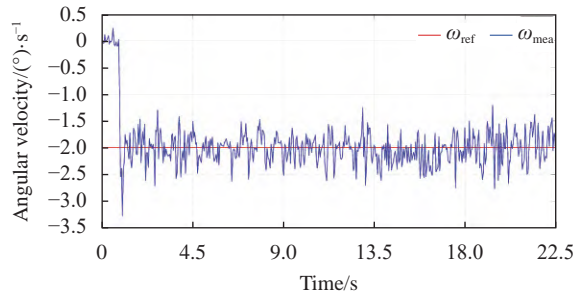


图 13 系统阶跃响应曲线 (2 (°)/s)

Fig.13 System step response curve (2 (°)/s)

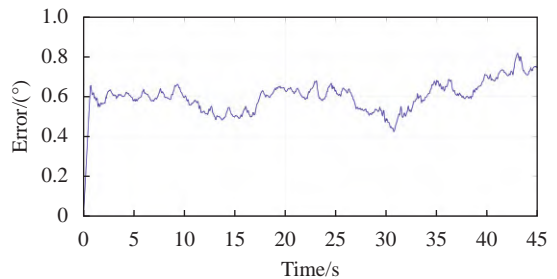


图 14 系统阶跃响应误差积分曲线

Fig.14 Integral of the step response error curve

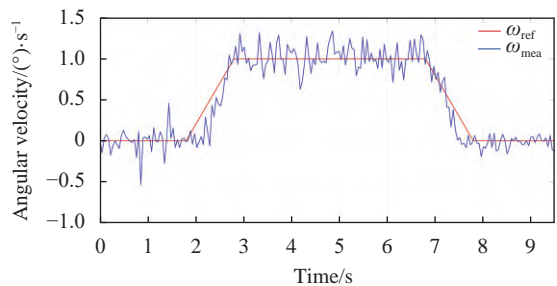


图 15 系统梯形跟踪曲线

Fig.15 System trapezoidal tracking curve

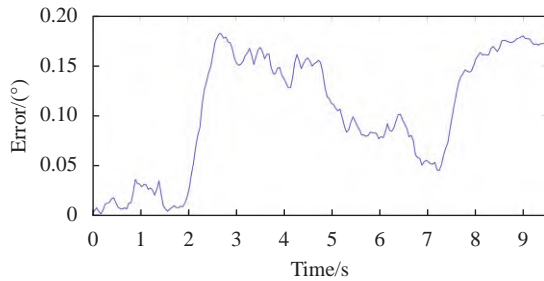


图 16 系统梯形跟踪误差积分曲线

Fig.16 Integral of the trapezoidal tracking error curve

设计为幅值为 1 的正弦波,该参考轨迹先静止(令卷帘收束及消除),再以正弦速度信号作为参考信号。系统速度跟随结果如图 17 所示,系统响应误差曲线如图 18 所示,此时系统的误差变化小,符合设计误差余量。此时,左右两侧力矩变化如图 19 所示,可见基

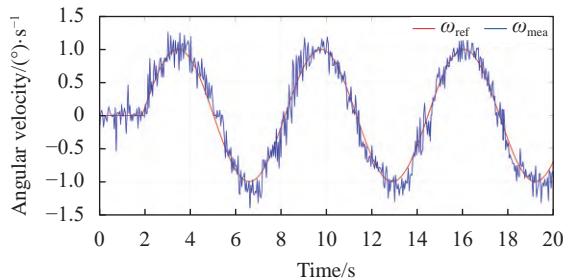


图 17 系统正弦跟踪曲线

Fig.17 System sine tracking curve

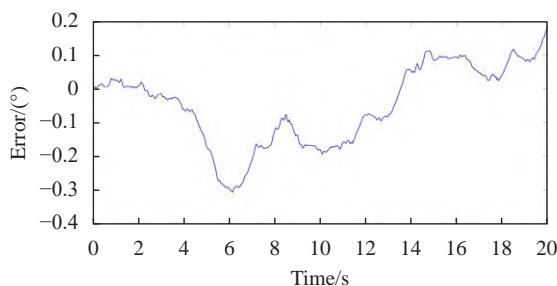


图 18 系统正弦跟踪误差积分曲线

Fig.18 Integral of the sine tracking error curve

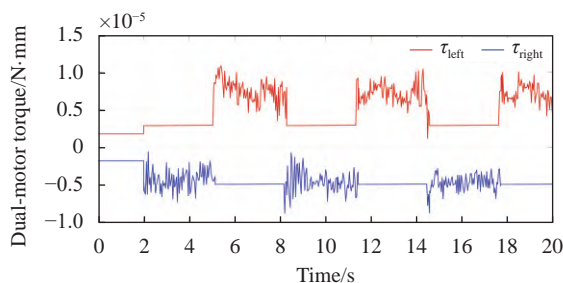


图 19 系统正弦跟踪双电机力矩

Fig.19 Dual-motor torque during system sine tracking

于目标位置的力矩补偿双电机控制策略可以有效的进行主从电机切换与速度跟踪。

5 结论

文中设计了适用于阿里原初引力波望远镜的环境保护罩高度轴系结构及控制策略,通过仿真验证了策略的有效性,所得结论如下:

1) 文中提出一种新型的圆顶式环境保护罩高度轴系,该结构适用于阿里原初引力波望远镜的高度轴大范围运动的要求。该轴系的卷帘式对拉装置可以带动观测窗口随望远镜高度角在 45°~135°范围内转动;

2) 文中提出了基于目标位置的力矩补偿双电机控制策略,从动电机力矩大小依托位置反馈信号控制,主动电机采用 PID 控制;

3) 针对 BP-PID 控制,利用 SA 的全局搜索能力和 PSO 的快速收敛能力,提高整体搜索性能。阶跃响应仿真结果表明,SAPSO-BP-PID 保持响应速度的同时将超调量减小了 6%,其在动态性能和稳定性方面符合实际应用需求;

4) 在不同参考速度曲线下,文中提出的双电机控制策略结合主动电机的 SAPSO-BP-PID 控制器,能够有效实现主从电机的协调分配与稳定运行。尽管系统存在延迟及模型简化等因素引起的误差波动,该策略在响应速度、超调量等动态特性上依然表现出良好的跟随性能。

参考文献:

- [1] CHURCH S E. Predicting residual levels of atmospheric sky noise in ground-based observations of the cosmic background radiation [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1995, 272(3): 551-569.
- [2] ERRARD J, ADE P A R, AKIBA Y, et al. Modeling atmospheric emission for CMB ground-based observations [J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 809(1): 63.
- [3] YANG Y, ZENG Q, WANG L, et al. Research of contact response of an elastic sphere impacting a rigid plate based on the mass-spring-damped oscillator model and dimensionless parameter $\omega\Omega$ [J]. *International Journal of Acoustics & Vibration*, 2020, 25(2): 141.
- [4] MACHADO M, MOREIRA P, FLORES P, et al. Compliant

- contact force models in multibody dynamics: Evolution of the Hertz contact theory [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2012, 53: 99-121.
- [5] WANG S, GAO P. Development of a contact force model suited for spherical contact event[J]. *Actuators*, 2023, 12(2): 89.
- [6] CHATTERJEE A, JAMES G, BROGLIATO B. Approximate coefficient of restitution for nonlinear viscoelastic contact with external load [J]. *Granular Matter*, 2022, 24(4): 124.
- [7] LANKARANI H M, NIKRAVESH P E. A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1990, 112(3): 369-376.
- [8] GILARDI G, SHARF I. Literature survey of contact dynamics modelling [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2002, 37(10): 1213-1239.
- [9] HE Shousheng, XIN Yuxin, LUN Baoli, et al. Astronomical dome control system based on ASCOM and Modbus/TCP [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2017, 14(3): 356-362. (in Chinese)
- [10] HE Lijuan, JU Dehua, HE Chao, et al. The dome auto control system of the 1.2 m telescope at Yunnan Observatories [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2017, 14(1): 87-93. (in Chinese)
- [11] JIAN Z, DU F. The servo control system of KDUST telescope[C]//Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation. SPIE, 2014, 9151: 1170-1175.
- [12] BORASE R P, MAGHADE D K, SONDKAR S Y, et al. A review of PID control, tuning methods and applications [J]. *International Journal of Dynamics and Control*, 2021, 9: 818-827.
- [13] YANG J, LU W, LIU W. PID controller based on the artificial neural network[C]//International Symposium on Neural Networks, 2004: 144-149.
- [14] MALEKABADI M, HAGHPARAST M, NASIRI F. Air condition's PID controller fine-tuning using artificial neural networks and genetic algorithms [J]. *Computers*, 2018, 7(2): 32.
- [15] LIU Shangbo, DAN Zesheng, LIAN Baowang, et al. Optimization method of PSO-PID control for interferometric closed-loop fiber optic gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(3): 20230626. (in Chinese)
- [16] HE Z, DONG R, TAN Y. BP neural network PID control scheme for electromagnetic scanning micromirror [C]//2022 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). IEEE, 2022: 322-326.
- [17] DEHURI S, CHO S B. A comprehensive survey on functional link neural networks and an adaptive PSO-BP learning for CFLNN [J]. *Neural Computing and Applications*, 2021, 10(21): 187-205.
- [18] LI J, CHENG J, SHI J, et al. Brief introduction of Back Propagation (BP) neural network algorithm and its improvement [J]. *Advances in Intelligent and Soft Computing*, 2012(169): 553-558.
- [19] YANG Sen. Hybrid PSO-AMLS-based method for data fitting in the calibration of the infrared radiometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20200471. (in Chinese)
- [20] YANG S, WANG H, XU Y, et al. A coupled simulated annealing and particle swarm optimization reliability-based design optimization strategy under hybrid uncertainties [J]. *Mathematics*, 2023, 11(23): 4790.
- [21] XIA K, LOU Y, YUAN Q, et al. Optoelectronic torque measurement system based on SAPSO-RBF algorithm [J]. *Sensors*, 2024, 24(5): 1576.

The altitude axis structure scheme and control strategy of the environmental protection cover of Primordial Gravitational Waves Telescope

YUE Zhongyu^{1,2}, JIANG Canyi^{1,2,3}, XU Jin^{1,2}, DENG Zhuangzhuang^{1,2,3}, ZHENG Bo^{1,2,3}, CHEN Liang^{1,2}

- (1. Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;
2. CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:

Objective The ground-based Primordial Gravitational Wave Telescope is designed to detect radiation in the microwave band, but physical noise sources fluctuations can interfere with the detection of gravitational waves, leading to reduced transient sensitivity and data collection gaps. This type of observation requires highly accurate and stable equipment to capture and interpret weak signals. Traditional telescopes often rely on dome structures for protection. For the Ali Primordial Gravitational Wave project in China, a unique environmental protection cover was proposed to protect the telescope. One major difference between this telescope and traditional optical telescopes is the movement range of its altitude axis (Fig.1). To accommodate the motion range of the Ali telescope, this paper focuses on the design of the altitude axis system and its control strategy.

Methods The study first designs the motion and structural scheme for the altitude axis of the protection cover based on the telescope's unique motion pattern (Fig.2). A contact model and a friction model were established, followed by dynamic simulations. Based on the simulation results (Fig.6), a torque compensation dual-motor control strategy targeting specific positions was developed for the environmental protection cover. Additionally, for the non-linear complexity of the altitude axis system, a control strategy using SAPSO-BP-PID was designed for the active motor to enhance system robustness (Fig.9).

Results and Discussions The designed system uses a retractable roller-shutter structure instead of a traditional dome, ensuring protection while maintaining the telescope's observation range. Dynamic simulations show that when only one motor drives the system, three main stages occur roller convergence and clearance compensation, normal operation, and eventual stall or loss of control (Fig.6). Simulation results indicate that, with a 1 (°)/s step signal as the reference input and an external load applied at a certain point to simulate disturbances, the SAPSO-BP strategy achieves a smaller overshoot and shorter settling time during the initial startup phase compared to other strategies with similar response times. Under disturbance conditions, the SAPSO-BP strategy demonstrates superior peak error suppression, resulting in lower mean error and integral of squared error (ISE) (Fig.11). Despite error fluctuations caused by system delays and model simplifications, the proposed dual-motor control strategy, combined with the SAPSO-BP-PID controller for the active motor, ensures effective tracking performance. The integral of speed tracking error under various reference speed curves consistently meets the design requirements (Fig.12-Fig.19).

Conclusions The environmental protection cover system for the altitude axis proposed in this paper meets the requirements for large-range motion of the altitude axis of the Ali Primordial Gravitational Wave Telescope. The

system adopts a dual-roller shutter structure, allowing the observation window to rotate freely within the altitude angle range of 45° to 135° . To achieve precise control, a torque compensation dual-motor control strategy based on target position was designed, and an SAPSO-BP-PID controller was developed by leveraging the global search capability of SA and the fast convergence ability of PSO. Simulation results show that under the same reference input and disturbance conditions, the SAPSO-BP strategy exhibits higher control accuracy compared to the PSO-BP strategy, maintaining smaller overall error during dynamic system changes. Therefore, the SAPSO-BP strategy outperforms the PSO-BP strategy in terms of dynamic response, error control, and disturbance rejection. Across various reference speed curves, the dual-motor control strategy, combined with the SAPSO-BP-PID controller for the active motor, effectively achieves coordinated allocation and stable operation of the master and slave motors. Despite error fluctuations caused by system delays and model simplifications, the strategy demonstrates excellent tracking performance in terms of response speed and overshoot. The integral of speed tracking error consistently meets the design requirements. The system design satisfies the performance needs for high-precision and large-range motion of the telescope, demonstrating its effectiveness and robustness.

Key words: altitude axis system of the environmental protection cover; multibody dynamics; dual-motor control strategy; BP-PID controller; SAPSO optimization algorithm

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2021YFC2203302)