

文章编号 1004-924X(2026)17-2622-11

大型圆顶对开门双电机误差补偿同步控制

戴博群, 刘 洋, 邓永停*, 杨晓霞, 张 斌, 刘秀峰
(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:针对大型圆顶单侧对开门上下电机齿条安装不平行造成的固有几何误差,提出一种位置相关固有误差补偿的同步控制方法,以实现门体在不增加额外高成本应力传感器的前提下,抑制运行过程中因单侧门上下电机输出驱动力不平衡使门体产生的门体内应力。首先,介绍了大型圆顶对开门的构造与电机齿轮齿条的传动方式,明确了单侧对开门使用上下双电机驱动齿轮齿条传动的结构,并建立了单侧门上下双电机驱动刚性耦合数学模型。接着,以单侧门上电机为主动电机,下电机为仅电流闭环的从动电机的形式测量对开门系统因上下齿条不能保证绝对平行而引入的固有系统几何误差。然后,分析此固有误差与对开门开、关行程的关系,将此关系补偿到单侧门双电机同步控制算法中,并分析固定负载下系统在速度和风阻变化时的稳定性。最后,通过实验分析应用补偿同步控制算法前后单侧门两电机反馈电流。模型仿真表明,在设定的速度范围内,同步误差变化较小。4~7 m/s 风阻工况下,电机所需的驱动力矩随风速增加而上升,但均处在伺服电机额定力矩范围内。实验结果表明,在应用本文提出的误差补偿同步控制算法后,单侧门上下电机反馈电流差值的绝对峰值得到显著降低,由 1.7 A 减小到 0.7 A。本文提出的测量方法可在物理条件受限的情况下有效测量系统固有几何误差,且误差补偿同步控制方法可抑制因单侧对开门上下电机驱动力不均匀产生的门体内应力;提出的电气测量和误差补偿同步控制方法可以适用于系统几何误差不便测量,且系统几何误差有重复性的双/多电机刚性耦合驱动系统。

关键词:大型圆顶对开门;双电机驱动;固有误差补偿;同步控制

中图分类号:TP273 **文献标识码:**A

doi:10.3724/OPE.20263417.2622 **CSTR:**32169.14.OPE.20263417.2622

Error compensation synchronous control for dual-motors of double doors of large dome

DAI Boqun, LIU Yang, DENG Yongting*, YANG Xiaoxia, ZHANG Bin, LIU Xiufeng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

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

Abstract: To address inherent geometric errors caused by misalignment between the upper and lower racks of a single door leaf in dual-motor-driven large-dome doors, an error-compensated synchronous control method is proposed. The method reduces unbalanced loads in the dual-motor drive system without requiring additional stress sensors. The structure of the large-dome door and the transmission mechanism of the dual-motor gear-rack system are first described. The rigidly coupled configuration used to drive a single door leaf is clarified, and a mathematical model of the dual-motor gear-rack system is established. The

收稿日期:2026-07-20;修订日期:2026-08-04.

基金项目:海外 BSH 引才专项

inherent geometric error is subsequently measured using a master – slave scheme, and its relationship with door travel is analyzed and incorporated into the synchronous control algorithm. The robustness of the algorithm under constant-load conditions, over the specified operating-speed range, and under wind resistance is evaluated. Feedback currents of the two motors are compared to assess structural stress variations during operation. Simulation results indicate that the synchronization error varies only slightly within the specified speed range. As wind speed increases from 4 to 7 m/s, the required driving force increases accordingly but remains within the rated torque range of the motors. Experimental results demonstrate that the proposed synchronous control method substantially reduces the difference between the feedback currents of the two motors. The absolute peak current difference is reduced from 1.7 A to 0.7 A, indicating a significant reduction in unbalanced dual-motor drive loads on the single door leaf. The proposed measurement method enables effective identification of inherent geometric errors under physically constrained conditions. The error-compensated synchronous control method effectively reduces internal door stresses induced by unbalanced loads in the dual-motor drive system. The proposed approach is applicable to rigidly coupled dual- or multi-motor drive systems in which geometric errors are difficult to measure directly but are repeatable.

Key words: double doors of large dome; dual-motor drive; inherent error compensation; synchronous control

1 引言

随着地基光电探测、空间目标监测以及天文探测技术的不断发展,大口径光电望远镜对观测环境的稳定性、指向精度与环境防护能力提出了更高要求。大型随动圆顶作为大口径光电望远镜的关键防护与跟踪基础设施,可通过与观测设备同步转动,隔绝圆顶外风扰、圆顶内外温湿度变化、沙尘以及降雨等环境干扰,保障光学系统成像质量与长期运转安全。而其对开门系统需在大跨度、大惯量及高精度随动工况下实现平稳快速开启关闭,其运转稳定性直接关系到观测效率、指向精度与设备安全^[1-2]。单侧门上下双电机驱动齿轮齿条传动因结构简洁可靠、行程大、承载能力强,被广泛应用于大型圆顶对开门系统驱动。但受制造、安装影响,上下齿条不可避免存在平行度误差,形成固有的几何误差,导致门体运行偏载、电机卡滞、系统振动与同步丢失,严重时引发齿轮齿条异常磨损、门体歪斜甚至结构损坏^[3],制约圆顶随动精度与可靠性提升^[4-5]。

多电机系统常见的同步控制包括并行控制、主从跟随和交叉耦合控制策略^[6-7]。并行或主从结构便于实现,但对驱动支路间的相对误差利用

较少;交叉耦合控制将两轴位置或速度差引入反馈,能够直接调节同步误差,但缺乏对驱动力矩不均衡调节。而在工程实际应用中还有布设高精度压力传感器实时监控结构应力数据,反馈给伺服控制系统的控制方法。然而高精度应力传感器成本较高,易受圆顶内震动冲击以及电磁干扰影响进而出现信号漂移与测量误差。且应力传感控制属于被动补偿方式,无法从根源消除门体应力产生^[8-9]。而大惯量望远镜轴系的工程研究也涉及多电机驱动架构的同步控制^[10],但其控制方法目的在于提高指向精度,不适用于存在系统几何误差的刚性耦合系统中。针对大型随动圆顶公开的研究内容多集中于结构与安装工艺^[2-3,11-12],对门体驱动电机同步控制的讨论较少。

对于刚性结构件链接的双、多驱动系统,位置同步与驱动支路内力调节耦合是同步控制中常见的问题。目前研究的解耦方法可将双驱动电机分解为平动与转动模态^[13],使用推力分配控制分别调节各驱动支路的内作用力^[14],但其需要在系统内加设加速度传感器,增加成本与系统复杂度。另一类工程方法是预先测量各驱动轴之间的可重复位置偏差,便能够将其作为前馈量进行补偿^[15],然而这种测量多为物理几何测量,在

大型机构如大型圆顶对开门中,这种物理测量多受空间限制而无法实施。但此研究表明,当系统几何误差随机构行程稳定复现时,离线识别误差可反馈指导同步控制。

本文面向大型随动圆顶对开门中单侧门上下电机在系统固有几何误差条件下的同步控制需求,提出一种可以稳定测量系统几何固有误差特征,并将此特征补偿到同步控制器的控制方法。实测结果表明,本文提出的控制方法可显著抑制因系统固有几何误差造成的运行过程中单侧对开门上下电机驱动力不均衡而产生的门体内应力,为大口径天文望远镜随动圆顶系统的精密控制提供了技术支持^[16-18]。

2 对开门伺服系统构成与数学模型

2.1 门体结构与电机驱动系统

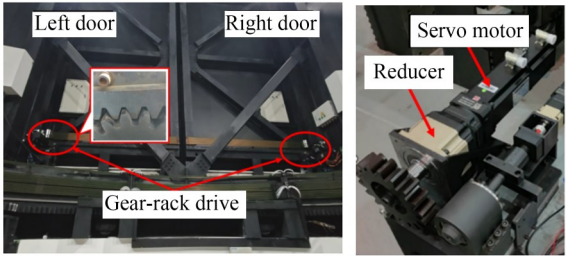
图 1(a)为大型随动圆顶对开门结构图。如图所示,对开门左、右两扇门扇由钢架与保温蒙板构成,且单侧对开门的重量预估为 1.5 t,由对向安装的上下两台电机进行驱动。图 1(b)为宁波菲仕 U30506A153B 伺服电机,配备 23 位绝对值式编码器。电机输出轴经由 40:1 减速器后与齿轮相连,传动齿轮的驱动半径为 0.2 m。电机参数如表 1 所示。该电机额定力矩为 7.0 N·m,额定电流为 2.6 A,额定转速为 1 500 r/min,堵转扭矩为 7.2 N·m,峰值扭矩为 28.0 N·m,峰值扭矩为 11.8 A。

表 1 伺服电机参数

Tab. 1 Characteristic of the servo motor

Parameter	Unit	Value
Rated torque	N·m	7.0
Rated current	A	2.6
Rated power	kW	1.1
Rated speed	r/min	1 500
Stall torque	N·m	7.2
Peak torque	N·m	28.0
peak current	A	11.8
Rated voltage	V	308
Torque constant	N·m/A	2.98
Rotor inertia	kg·m ²	3.85×10 ⁻⁴

值电流为 11.8 A。本文研究对象对开门系统未安装直线传感器,门体的平移距离依靠电机编码器、减速器减速比与传动齿轮驱动半径算得。

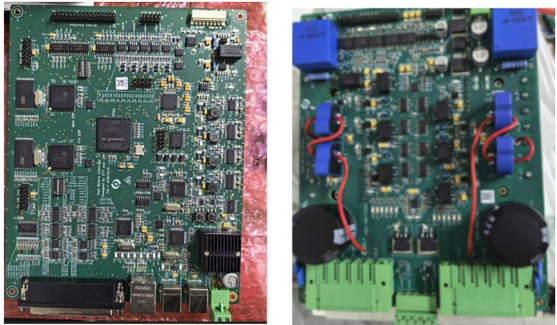


(a) 对开门结构 (b) 伺服电机
(a) Double doors structure (b) Servo motor

图 1 对开门机构与伺服电机

Fig. 1 Double doors structure and servo motor

图 2(a)为伺服系统控制板,图 2(b)为伺服系统驱动板。伺服系统由控制板与驱动板协同完成电机闭环控制。控制板作为信号运算单元,接收主控命令与电机编码器位置信息、差分计算速度反馈值,经位置-速度-电流三环比例-积分(Proportional-Integral, PI)控制器算法运算后,输出弱电脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)信号;驱动板作为功率执行单元,将弱电 PWM 信号经由驱动芯片放大,通过三相逆变电路把直流母线电压转换为幅值、频率可调的三相交流电驱动伺服电机,同时采集相电流和母线电压信息以实现过流、过压和欠压保护。二者通过两条软排线相连以实现信号交互。



(a) 控制板 (b) 驱动板
(a) Control board (b) Drive board

图 2 伺服控制硬件

Fig. 2 Servo control hardware

2.2 单侧门上下电机刚性耦合驱动数学模型与分析

为建立同步误差分析与控制器设计的数学模型,对本文研究对象对开门系统作出如下说明:门体钢架焊接成型,门体结构刚度远大于齿轮齿条啮合刚度,门体视为单自由度刚性负载;系统几何误差为静态误差,有重复性;由于齿轮齿条传动存在齿隙,电机的电气动态响应远快于系统机械动态响应,且在本文电机转速区间下,磁链近似恒定、未进入弱磁或饱和范围,电机电流环可等效为比例环节。

以电机转子为分析对象,单台电机的机械运动方程为:

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m = T_e - T_L, \quad (1)$$

其中: θ_m 为电机转子机械角度, J_m 为电机转子转动惯量, B_m 为电机黏滞摩擦系数约为 0.000 9 Nms/rad, T_e 为电机电磁转矩, T_L 为折算到电机轴的负载转矩。本文电机控制采用矢量控制,即电机 d 轴电流为 0,在上述说明工况下电机电磁转矩与电机 q 轴电流成正比:

$$T_e = K_t \cdot i_q, \quad (2)$$

其中: K_t 为电机转矩常数, i_q 为电机 q 轴电流。门体位移与电机转角的关系为:

$$x = \frac{R}{N} \theta_m, \quad (3)$$

其中: x 为门体平行位移, R 为齿轮驱动半径 0.2 m, N 为减速器减速比 40:1。假设下电机齿条安装在理想位置,其运动学约束为:

$$x = \frac{R}{N} \theta_{ml}, \quad (4)$$

其中: θ_{ml} 为下电机转动角度。上电机以下电机为基准,因存在齿条安装不平行误差等几何误差影响,且两电机为对向安装,其运动学约束为:

$$x = -\frac{R}{N} \theta_{mu} + \delta(x), \quad (5)$$

其中: θ_{mu} 为上电机转动角度, $\delta(x)$ 为系统等效几何误差,由公式(4)、(5)可知,电机转角与几何误差的关系:

$$e = \theta_{ml} + \theta_{mu} = \frac{N}{R} \delta(x), \quad (6)$$

其中: e 是系统几何误差造成的同步误差。如公式(6)所示,当 $\delta(x) \neq 0$ 时,单侧门上下两电机存在转角差。由于门体为刚性结构,单侧门上下双

电机的驱动力通过门体实现机械耦合。上下电机分别通过齿轮齿条向门体施加驱动力,门体受驱动的动力学方程为:

$$M \ddot{x} + B_L \dot{x} = \frac{N}{R} (T_{Ll} - T_{Lu}), \quad (7)$$

其中: M 为门体等效质量, B_L 为门体平动摩擦系数约为 7 862 Ns/m, T_{Ll} 和 T_{Lu} 分别为下电机和上电机的电机轴驱动转矩。使用单纯位置同步控制方法时,未考虑系统固有误差,门体会产生一个弹性恢复力矩,此力矩以内力形式存在于门体结构中,其对单侧门上下双电机的作用相反,则得到:

$$T_{Ll} = \frac{R}{2N} (M \ddot{x} + B_L \dot{x}) + \tau_c, \quad (8)$$

$$T_{Lu} = -\frac{R}{2N} (M \ddot{x} + B_L \dot{x}) + \tau_c, \quad (9)$$

其中: τ_c 为单侧门体产生的因上下双电机驱动力不平衡而产生的内应力力矩,可由下式计算:

$$\tau_c = K_g \cdot e, \quad (10)$$

其中: K_g 为电机轴的等效啮合刚度约为 1 250 N·m/rad。将式(2)、式(8)和式(9)带入公式(1)即可得到单侧门的双电机耦合动力学方程式:

$$J_m \ddot{\theta}_{ml} + B_m \dot{\theta}_{ml} = T_{el} - \frac{R}{2N} (M \ddot{x} + B_L \dot{x}) - \tau_c, \quad (11)$$

$$J_m \ddot{\theta}_{mu} + B_m \dot{\theta}_{mu} = T_{eu} + \frac{R}{2N} (M \ddot{x} + B_L \dot{x}) - \tau_c, \quad (12)$$

其中: T_{el} 和 T_{eu} 分别为单侧门下电机和上电机的电机电磁转矩。将公式(10)减去公式(11)并结合公式(6)可得到门体所受应力与单侧门上下双电机电流与系统固有误差的关系:

$$J_m \ddot{e} + B_m \dot{e} + 2K_g e = K_t (i_{ql} - i_{qu}) + \frac{N}{R} K_g \delta(x), \quad (13)$$

其中: i_{ql} 和 i_{qu} 分别为下电机和上电机的 q 轴电流值。如公式(13)所示, $\frac{N}{R} K_g \delta(x)$ 项是由系统几何误差直接引发的扰动,即使控制单侧门上下两电机电流完全相等,受到系统固有误差的影响仍会产生门体内部应力。此项的影响与系统几何误差 $\delta(x)$ 成正比关系,在大型圆顶对开门这种大跨度、高刚性的传动系统中,影响尤为明显。

2.3 系统几何误差分析

图 3 为单侧门上下电机与齿条安装位置示意图。如图所示,在关门状态下,上下电机安装在

门体外侧并对向安装。在理想条件下,上下两齿条绝对平行不存在偏差,然而因制造和安装等原因,上下齿条不可避免存在平行度误差,形成固有的系统误差,导致出现 2.2 节分析中出现的系统几何误差。

上下两齿条安装时,高度跨度过大,圆顶内还设置有小型吊车和加固斜梁等结构,常规的激光跟踪仪、水平仪等大尺度测量手段受限于结构遮挡,无法建立起足以指导机械修正的稳定可靠测量场。针对这些客观存在的问题,本文提出了使用主从电机系统测量系统固有几何误差并离线补偿的同步控制手法。

在不进行系统误差补偿,单侧门上下电机使用位置同步控制策略的情况下,开、关门行程中对开门两电机的反馈电流及其差值如图 4 所示,因两电机对向安装,在计算电流差值时对下电机反馈电流值作取反处理。圆顶对开门在开、关门行程中速度保持不变,可近似视为稳态工况,惯性项和摩擦项可忽略。此时公式(11)与公式(12)可近似为:

$$T_{el} = K_t \cdot i_{ql} \approx \frac{R}{2N} (M\ddot{x} + B_L \dot{x}) + \tau_c, \quad (14)$$

$$T_{eu} = K_t \cdot i_{qu} \approx -\frac{R}{2N} (M\ddot{x} + B_L \dot{x}) + \tau_c, \quad (15)$$

两式相减可得:

$$\tau_c \approx \frac{K_t}{2} (i_{ql} - i_{qu}). \quad (16)$$

由公式(16)分析可知,单侧门上下两电机的反馈电流差可以反应上下两电机输出驱动力不均匀而产生的门体内应力力矩。在理想同步状态下,单侧门上下电机输出驱动力一致,门体仅承受均匀推拉载荷,不产生扭转变形和应力累积。然而因为对开门系统存在上述分析的系统几何误差,在位置同步控制工况下,门体上下两部分实际位移存在差异,导致两电机在位置同步工况下输出转矩不同,进而使刚性门体结构产生内应力。同时,随对开门反复启闭过程中持续存在此问题,会进一步造成门体结构扭转应力的累积。如图 4 所示,与公式(13)分析相同,此扭转应力随着对开门开启进程而增加,电流差值绝对峰值达到 1.7 A,说明门体在几何误差影响下会因上下两电机输出驱动力不平衡而产生门体内应力力矩。

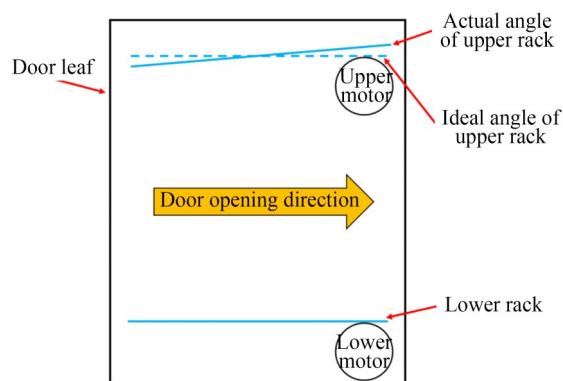


图 3 单侧门伺服电机与齿条安装示意图

Fig. 3 Schematic diagram of servo motor and rack installation of single door leaf

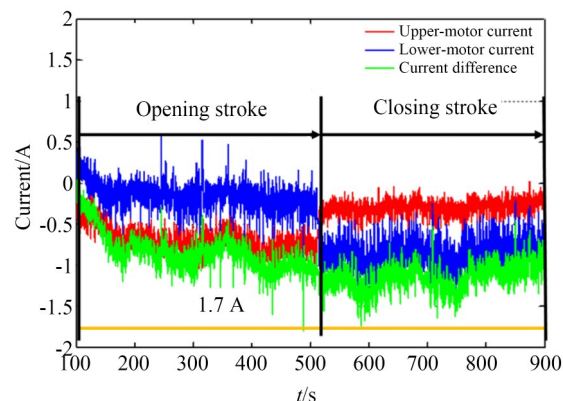


图 4 无误差补偿时单侧门上下两电机反馈电流与其差值

Fig. 4 Feedback currents of two motors of single door and absolute current difference without error compensation

3 系统几何误差测量和误差补偿实验

3.1 系统固有几何误差测量方法与实验测量

系统固有几何误差测量的目的是确认在单侧门不产生因上下两电机输出驱动力不平衡导致的门体内应力的条件下,两电机因几何误差所产生的位置差值,并得到此差值与对开门开、关进程的关系。

在本次系统固有误差的测量实验中,固定单侧门上电机为主动电机,下电机为从动电机,两电机共同使用同一套驱动控制器时钟、反馈采样时序,保证控制信号与反馈信号时序对齐,避免时序延时给测量结果引入其他误差。主动电机

工作于速度-电流双闭环的控制模式,接收主控系统下发的恒定速度指令,根据自身编码器反馈计算得到的速度反馈完成速度闭环,同时输出实时电流环指令。从动电机关闭位置环、速度环反馈调节控制功能,工作在纯电流闭环跟随模式,不使用速度反馈信号,直接使用上电机输出的电流环指令作为自身电流环输入给定值。

根据 2.2 节建立数学模型,在本文使用矢量控制与限定工况的条件下,永磁同步电机输出转矩与 q 轴电流成正比关系,从动电机直接使用主动电机电流指令且保证时序对齐,两电机实时输出转矩相等,即单侧门体上下两端所受的电机驱动力相同。此时,门体刚性结构在对开门开启关闭进程中不受到因上下两电机输出驱动力不平衡导致的门体内应力。此时驱动控制器采用同步时钟进行采样,两电机编码器信号同步触发采集,采样频率统一为 500 Hz,保证位置差值数据可靠有效。

图 5 为在上述测量实验工况下,单侧门上下电机的电流反馈值及其差值。在计算电流差值时对下电机反馈电流值作取反处理。如图所示,两电机反馈电流的绝对值基本一致,且其差值在 0 A 附近跳动。此结果证明本论文使用的测量方法可以确保在对开门开启关闭与误差测量的过

程中,门体刚性结构不受因上下两电机输出驱动力不平衡产生内应力,保证了实验测量系统固有几何误差的可靠性。本文进行多次循环测量,确定此误差具有重复性。

图 6 为测量到的上下两电机编码器差值与对开门启闭进程的关系。与上述分析相同,误差随着对开门开启进程增加,且开关门行程中误差曲线的趋势与数值基本对应,可以确认所测量的误差为上下齿条安装不平行所引入的系统结构几何误差。

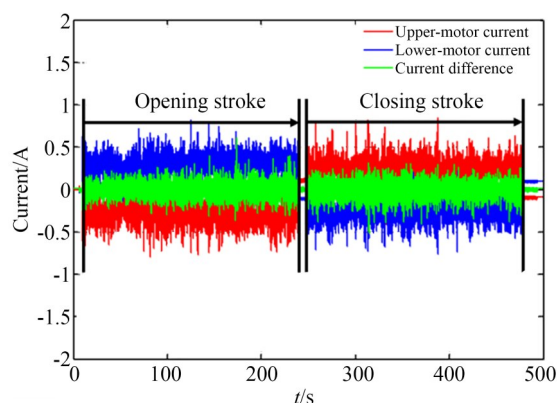


图 5 误差测量工况单侧门上下两电机反馈电流与其差值
Fig. 5 Feedback currents of two motors and absolute current difference of single door under error measurement condition

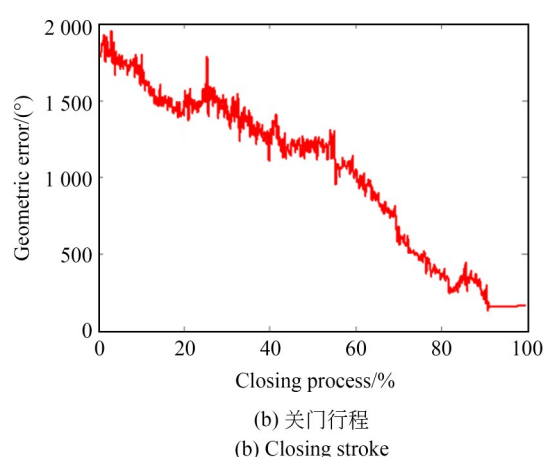
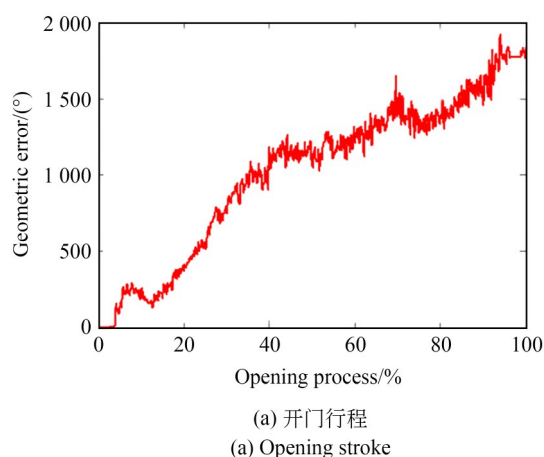


图 6 系统固有的几何误差
Fig. 6 System inherent geometric error

3.2 误差补偿算法与稳定性分析

图 7 为本论文设计的误差补偿同步控制方法

的原理框图。如图所示,本系统采用双电机同步误差补偿控制与三环级联控制的复合架构,在实

现电机高精度位置跟踪的同时,通过主动在同步控制中加入系统固有误差补偿,抑制门体刚性结构在运行过程中产生因单侧门上下电机输出驱动力不平衡导致的门体内应力。

主控制器下发的开关门位置值与由两电机编码器采集的位置信息的差值作为两电机位置环的输入。同时,将位置信息送入同步控制器,该同步控制器使用两电机的位置偏差对速度环的输入进行调节,“走的多”的电机速度减小,“走的少”的电机速度增加,使两电机实现位置同步。加入固有误差补偿前速度环的输入为:

$$V_{uin} = P_{uout} - V_{ufd} - k_{syn} \cdot e_{ul}, \quad (17)$$

$$V_{lin} = P_{lout} - V_{lfd} - k_{syn} \cdot e_{ul}, \quad (18)$$

其中: V_{uin} 和 V_{lin} 分别为上电机和下电机速度环的输入量, P_{uout} 和 P_{lout} 分别为上电机和下电机位置环的输出, V_{ufd} 和 V_{lfd} 分别是上电机和下电机的反馈速度,此反馈速度依靠电机编码器反馈值差分算得, k_{syn} 为同步控制系数决定同步控制的刚性, e_{ul} 为上下两电机编码器实时差值,因单侧门上下两电机对向安装,所以两式均减去 e_{ul} 。

如图 8 所示,当 $k_{syn} < 0.005$ 时,其值越大系统稳定时间越短,但当其值超过 0.005 后,系统稳定时间开始上升,此时系统出现轻微震荡,本文同步控制算法中 k_{syn} 的值取 0.005。如公式(17)和(18)所示,同步控制器根据两电机位置误差对两电机速度环的输入量进行调整。

如图 6 所示,对开门系统所测定的固有误差曲线近似三角波,则本论文拟合的误差补偿曲线与对开门开度的关系为:

$$e_{comp} = e_{pk} \cdot K_{Proc}, \quad (19)$$

其中: e_{comp} 是当前对开门位置需要补偿的误差量, e_{pk} 是开门进程达到最大时的误差峰值, K_{Proc} 是表示当前对开门位置所处开启程度的百分比系数。对开门系统的 e_{pk} 约为 1800° ,但误差曲线不是理想的三角波,为了使拟合曲线全程更贴近实际误差曲线,拟合曲线的 e_{pk} 取 1550° 。如图 7 所示,以上电机为基准,将系统固有误差补偿量 e_{comp} 补偿至下电机速度环控制器输入给定值,加入误差补偿后下电机的速度环输入量为:

$$V_{lin} = P_{lout} - V_{lfd} - k_{syn} \cdot (e_{ul} + e_{comp}). \quad (20)$$

根据系统固有几何误差特性,同步控制算法以使单侧门体刚性结构不产生因上下两电机输

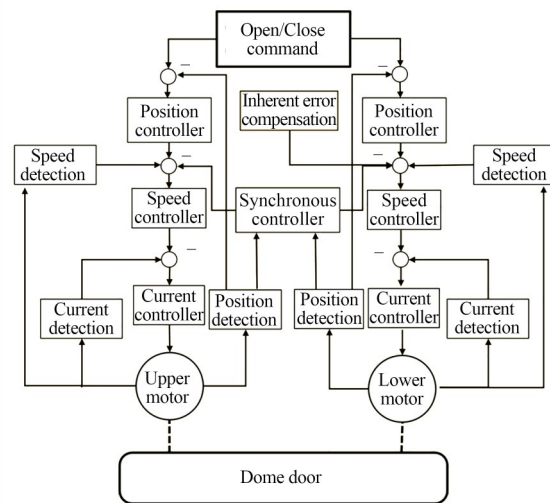


图 7 双电机误差补偿同步控制方法原理框图

Fig. 7 Block diagram of synchronous control principle for dual-motor error compensation

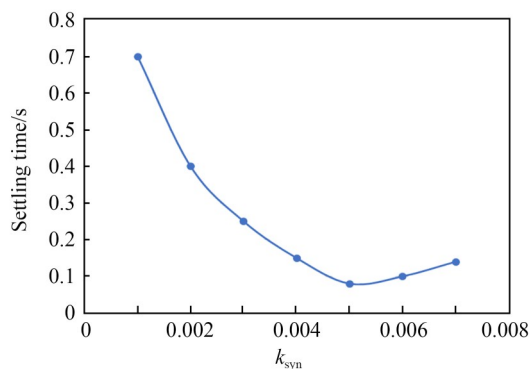


图 8 系统稳定时间与 k_{syn} 的关系

Fig. 8 Relationship between system settling time and k_{syn}

出驱动力不平衡导致的内应力为目标,使两电机向允许位置偏差存在但单侧门上下两电机输出驱动力平衡的状态进行闭环跟踪。

单电机控制采用经典的位置环-速度环-电流环三闭环结构,实现伺服电机高精度动态响应。外环为位置环,位置指令信息与当前反馈位置的差值作为位置环输入给定值,经由位置环控制器执行后输出至速度环;速度环接收位置环输出减去根据编码器反馈差分出的当前速度,同时单侧门上电机叠加同步控制器补偿;下电机叠加同步控制器补偿和几何误差补偿 e_{comp} 作为速度环输入给定值,经速度环控制器执行后输出至电流环;电流环为最内环,以速度环输出与反馈电流值的差值为输入给定值,经电流环控制器调节后

驱动伺服电机。

在未加入控制器时,单侧门上下电机驱动系统同步误差动态方程如公式(13)所示,本文各环节控制单元使用PI控制器,引入PI控制后,闭环系统的特征方程变为:

$$J_m s^3 + B_m s^2 + (2K_g + k_p) + k_i = 0. \quad (21)$$

根据劳斯-赫尔维茨判据,系统稳定性的充要条件为: $k_p > -2K_g$ 且 $0 < k_i < \frac{B_m(2K_g + k_p)}{J_m}$, 该条件给出 k_p, k_i 取值的边界条件,在设计控制器时严格遵循此边界条件以确保大型圆顶对开门系统的稳定性。

为分析本文提出的同步控制方法的稳定性,在 Simulink 环境中分别设置门体速度为额定速度的 40%, 60%, 80%, 100% 和 120% 进行运行全程仿真,记录同步误差的 RMS 值。其中,门的额定速度为 0.087 m/s。仿真中,系统固有几何误差按本文拟合的误差补偿曲线公式(20)建模,PI 控制器参数设定与实验相同。

图 9 为不同速度下同步误差的 RMS 值,在 5 组速度工况下,同步误差 RMS 值维持在 0.28° 以下,且未出现随速度增加而恶化的趋势。这一结果表明,本文提出的误差补偿同步控制手法在较宽的速度范围内可以保持稳定的同步精度,具有良好的变速稳定性。

为进一步验证本文控制方法在外部风载扰动下的稳定性,针对大型圆顶对开门实际运行中可能承受的风载荷,在 Simulink 环境中施加不同强度的等效风载,并考虑门体滑动摩擦阻力,考核在使用本文同步控制方法时系统的力矩裕量。

摩擦阻力 F_{friction} 按门体运动额定速度 0.087 m/s 及 B_L 算得值为 684 N,风载力按下式建模:

$$F_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho C_d A v_{\text{wind}}^2, \quad (22)$$

其中: F_{wind} 为风载力, ρ 为空气密度取 1.225 kg/m³, C_d 为风阻系数取 1.2, A 为单侧门迎风面积为 54 m² (门体高 18 m, 宽 3 m), v_{wind} 为风速,经现场对可进行观测的时间段以及气象条件的测量,本文对 4~7 m/s 风速进行仿真。

仿真结果见表 2,门体运行过程中的阻力根据电机减速比以及驱动齿轮半径转换为所需电机力矩。由表可知,电机所需驱动力矩随风速增加而平稳增加,由额定力矩的 51.3% 增加至

91.8%,但在仿真风速范围内均处在电机额定范围,说明系统具有抗风稳定性,满足在观测地点的气象条件下运行。

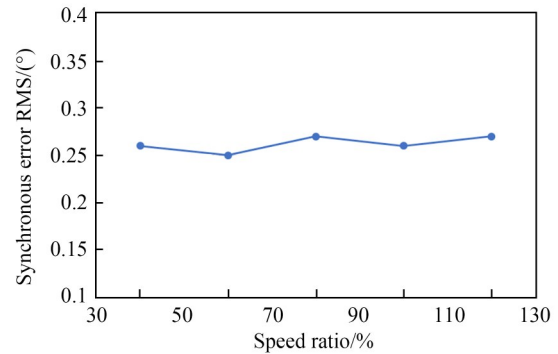


图 9 不同速度下同步误差的 RMS 值

Fig. 9 RMS value of synchronous error under different speeds

表 2 不同风阻下仿真结果

Tab. 2 Simulation result under different wind speed

Wind speed/ (m·s ⁻¹)	Wind load/ N	Friction/N	Percentage of rated torque
4	635	684	51.3%
5	992	684	64.0%
6	1 429	684	79.6%
7	1 945	684	91.8%

3.3 实验验证

图 10 为固有几何误差补偿后,单侧门开启、关闭行程中单侧门上下电机编码器反馈位置的差值,此曲线即为拟合出的补偿量 e_{comp} 。如图所示,固有误差补偿后,单侧门两电机向存在拟合误差补偿量 e_{comp} 的状态闭环。

图 11 为使用固有误差补偿后,单侧门上下电机的反馈电流及其差值。同样因两电机对向安装,在计算电流差值时对下电机反馈电流值作取反处理。与图 4 对比可知,在使用本论文提出的误差补偿控制方法后,在对开门启闭进程中,两电机反馈电流差值整体得到显著降低,且反馈电流差值的峰值由 1.7 A 减小到 0.7 A。即在对开门启闭过程中的由单侧门上下电机驱动力不均匀而产生的门体内应力得到显著降低。

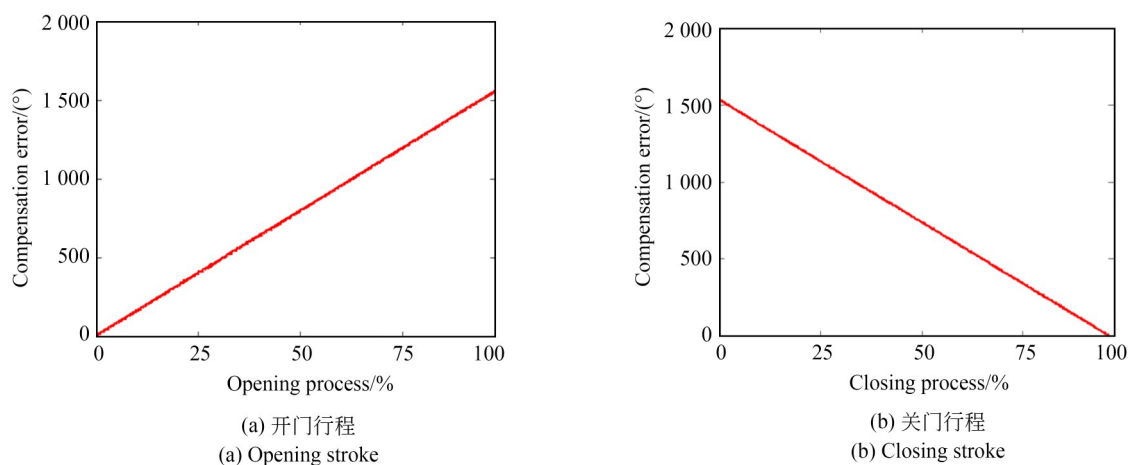


图 10 实测拟合误差补偿量

Fig. 10 Measured fitted error compensation value

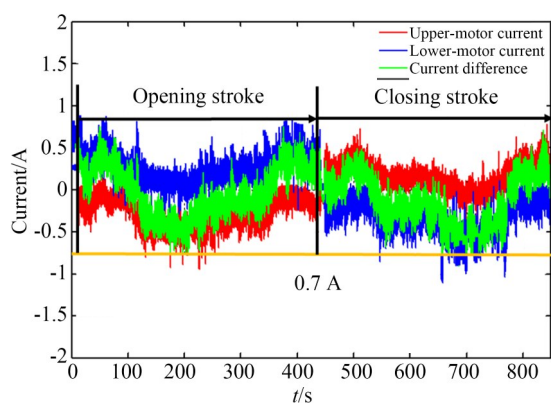


图 11 误差补偿后单侧门上下电机反馈电流与其差值

Fig. 11 Feedback currents of two motors of single door leaf and current difference with error compensation

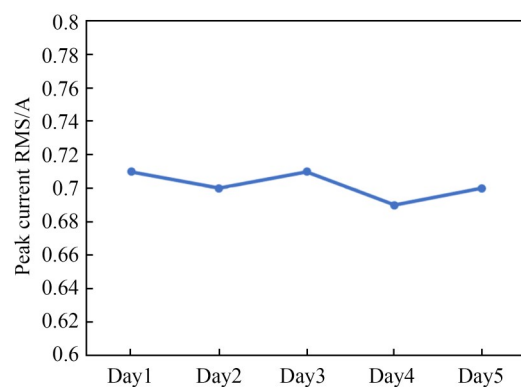


图 12 循环实验单侧门电流差绝对峰值RMS值

Fig. 12 RMS value of absolute peak value of current difference in cyclic experiments of single door leaf

为验证本方法在真实系统上的长期稳定性,针对圆顶对开门进行连续多日重复实验。由于对开门系统已集成完毕,其负载与额定速度均已固定,本次实验从时间维度考核本文提出同步控制算法实验结果的重复性与稳定性。

连续5天,在相同时间段进行20次完整的开关门循环,记录单侧门上下两电机的电流反馈值,计算电流差绝对峰值RMS值。实验结果总结于图12。如图12所示,每天实验的电流差绝对峰值RMS值基本保持一致,证明本文提出的同步控制方法的实验结果在本次实验的时间尺度内具有重复性和稳定性,其长期稳定性将进一步在接下来对开门系统的运行中进行验证。

4 结 论

本文根据大型随动圆顶对开门客观存在的齿条不平行问题,提出了主从动电机形式测量系统几何误差的方法。将测定的误差补偿至同步算法中,令单侧门上下电机向允许两电机存在位置偏差,但门体不受两电机输出驱动力不同而产生的门体内应力的状态进行闭环。实验结果证明,在使用了本文提出的误差补偿控制算法后,两电机输出驱动力不同,产生的门体内应力的两电机反馈电流差值绝对峰值由1.7 A减小到0.7 A。即使用本文提出的控制方法能有效降低

单侧对开门因上下电机输出驱动力不平衡导致的门体内应力,为大型地基望远镜的精确观测提供技术支撑,门体寿命及长期可靠性大型圆顶对开门系统将在长期运转后进一步验证。本文提出的测量系统固有误差并补偿到同步控制算法误差以降低系统内应力的方法,可以适用于系统几何误差不便于测量,且系统几何误差有重复性的双/多电机刚性耦合驱动系统。

参考文献:

- [1] 高昕. 地基超大口径光学望远镜: 技术体系、挑战与展望[J]. 航天技术与工程学报, 2025, 2(6): 1-11.
GAO X. Ground-based extremely large optical telescopes: technology system, challenges and prospects [J]. *Journal of Space Technology and Engineering*, 2025, 2(6): 1-11. (in Chinese)
- [2] 刘祥意, 王志臣, 王志. 地基大口径望远镜圆顶设计[J]. 光学精密工程, 2022, 30(23): 3031-3038.
LIU X Y, WANG ZH CH, WANG ZH. Dome design of large ground-based telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(23): 3031-3038. (in Chinese)
- [3] 王文攀, 王建立, 王志臣, 等. 地基大口径光学望远镜圆顶钢结构设计[J]. 光学精密工程, 2025, 33(21): 3383-3391.
WANG W P, WANG J L, WANG ZH CH, *et al.* Design of steel structure for the dome of ground-based large aperture optical telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(21): 3383-3391. (in Chinese)
- [4] WANG W P, WANG J L, WANG Z C, *et al.* Study on coordinated servo control between observatory dome and telescope [J]. *Applied Sciences*, 2026, 16(12): 5749.
- [5] 李陶然, 王建峰. 兴隆 2.16 米望远镜圆顶吊装通道通风研究[J]. 天文研究与技术, 2020(2): 224-232.
LI T R, WANG J F. A study of hoist-ductventing for Xinglong 2.16 m telescope [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2020(2): 224-232. (in Chinese)
- [6] 叶宇豪, 彭飞, 黄允凯. 多电机同步运动控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(14): 2922-2935.

作者贡献声明:

- 戴博群:误差补偿同步控制方法调查研究和验证, 论文构思与撰写;
刘 洋:误差补偿同步控制方法指导;
邓永停:整体指导与硬件支撑;
杨晓霞:同步控制算法实验验证和数据
分析;
张 斌:问题分析与数据处理;
刘秀峰:实验验证。

- YE Y H, PENG F, HUANG Y K. Overview of multi-motor synchronous motion control technology [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(14): 2922-2935. (in Chinese)
- [7] CHEN S Y, CHEN C S, YANG Z W. Self-tuning cross-coupled two degree-of-freedom PID control for position synchronization of dual linear motors[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 64: 214-234.
- [8] 赵麒蓁, 赵倩, 周家辉, 等. 数据驱动的高分辨成像自适应光学技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2026, 63(8): 0839003.
ZHAO Q ZH, ZHAO Q, ZHOU J H, *et al.* Research progress on data-driven adaptive optics for high-resolution imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2026, 63(8): 0839003. (in Chinese)
- [9] XIE B, YAO Y, LEI L, *et al.* Load torque composite synchronous control of dual-driven systems [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2024, 18(12): 1609-1620.
- [10] 王帅, 邓永停, 刘洋, 等. 多电机同步驱动的大口径望远镜主轴伺服性能分析[J]. 光学精密工程, 2025, 33(21): 3403-3418.
WANG SH, DENG Y T, LIU Y, *et al.* Performance analysis of large-aperture telescope main axes servo based on multi-motor synchronous drive [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(21): 3403-3418. (in Chinese)
- [11] 赵珂. 大跨度椭圆肋环型穹顶钢结构安装方案设计研究[J]. 建筑施工, 2022, 44(7): 1541-1543, 1553.
ZHAO K. Research on installation scheme design of large-span elliptical rib ring dome steel structure [J]. *Building Construction*, 2022, 44(7): 1541-1543, 1553. (in Chinese)
- [12] 黄明华, 赖腾飞, 杨汉文. 半球形穹顶屋面钢结构

- 构预拼装技术[J]. 施工技术, 2016(S2): 419-422.
- HUANG M H, LAI T F, YANG H W. Pre-assembling technology for steel structure of semi-spherical dome [J]. *Construction Technology*, 2016(S2): 419-422. (in Chinese)
- [13] GARCÍA-HERREROS I, KESTELYN X, GOMAND J, *et al.* Model-based decoupling control method for dual-drive gantry stages: a case study with experimental validations [J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(3): 298-307.
- [14] LI C, LI C, CHEN Z, *et al.* Adaptive thrust allocation based synchronization control of a dual drive gantry stage[J]. *Mechatronics*, 2018, 54: 68-77.
- [15] LU H, YANG Y F, FAN W, *et al.* Synchronization precision compensation technology of dual-driving feed mechanism[J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 26: 87-94.
- [16] 高昕, 王建立, 李希宇, 等. 地基空间目标望远镜全天时探测能力特性模型设计及实现[J]. 光学精密工程, 2026, 34(9): 1390-1399.
- GAO X, WANG J L, LI X Y, *et al.* Design and implementation of a model for the characteristics of ground-based space target telescope's all day time detection capability[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2026, 34(9): 1390-1399. (in Chinese)
- [17] ZHANG Y C, LAO J S, CAI Z, *et al.* Quantitative assessment of dome seeing for MUST project [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2025, 137(1): 015003.
- [18] 任志敏, 温海焜, 李国平, 等. 膜圆顶及塔架对南极望远镜风载影响的仿真分析[J]. 天文学报, 2024, 65(1): 31-42.
- REN ZH M, WEN H K, LI G P, *et al.* Simulation analysis of the impact of membrane dome and tower on wind load of Antarctic telescope[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2024, 65(1): 31-42. (in Chinese)

作者简介:



戴博群(1995—),男,吉林长春人,博士,2021年于日本东北大学获得硕士学位,2024年于日本东北大学获得博士学位,主要从事永磁同步电机设计,伺服系统精密跟踪控制相关研究。E-mail: dai.boqun@ciomp.ac.cn

通讯作者:



邓永停(1987—),男,山东潍坊人,博士,研究员,博士生导师,2015年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事地基大口径光学望远镜精密跟踪控制技术和电子学设计相关研究。E-mail: dyt0612@163.com



刘洋(1987—),男,长春德惠人,博士,副研究员,2014年于西北工业大学获得硕士学位,2024年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事光电望远镜伺服控制相关研究。E-mail: liuyang@ciomp.ac.cn