

文章编号 1004-924X(2014)05-1212-08

基于 ADAMS 和 Simulink 的太阳跟踪器联合仿真

郑黎明*, 黄剑波

(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: 为了了解太阳跟踪器的具体性能, 提高设计效率, 采用 ADAMS 和 Simulink 软件对太阳跟踪器的工作过程进行了虚拟仿真分析。首先利用 ADAMS 软件建立了系统的动力学模型; 利用 Simulink 软件建立了基于速度闭环的双轴控制系统。然后搭建了机-电联合仿真模型, 并进行了仿真研究。分析了太阳跟踪器双轴控制系统的基本性能, 确定了太阳跟踪器的目标输入曲线, 完成了联合仿真计算。联合仿真结果表明: 系统对太阳高度角输入曲线具有较好的跟踪能力, 开始跟踪 1.5 s 后系统跟踪非常稳定, 跟踪误差小于目标幅值 0.1%。得到的结果表明: 所建的动力学模型和控制系统模型能够准确地描述跟踪器的工作过程, 提高设计效率, 可为实际物理样机的开发提供可靠依据。

关键词: 太阳跟踪器; 虚拟样机; 联合仿真; ADAMS; Simulink

中图分类号: V556 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142205.1212

Co-simulation of solar tracker based on ADAMS and Simulink

ZHENG Li-ming*, HUANG Jian-bo

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

* Corresponding author, E-mail: dayan_zlm@aliyun.com

Abstract: To understand the performance of a solar tracker and to improve its design efficiency, the virtual simulation towards the working process of a solar tracker was accomplished by using software ADAMS and Simulink. First, the dynamics model of the solar tracker was constructed by using ADAMS. Then, the control system suitable for the double axis of solar tracker was established based on a speed closed loop by using Simulink. Thereafter, the co-simulation model was set up and the corresponding simulation was completed to determine the basic performance of control system. Finally, the target curve was input into the model, and the co-simulation was accomplished. The simulation results demonstrate that the system has excellent path tracking ability according to the sun elevation angle input curve. After 1.5 s tracking, the system becomes stable as well as the tracking error is less than 0.1% of the target value, which shows that the dynamics model and control system model are accurate and can provide a reliable basis for the development of actual physical prototypes.

Key words: solar tracker; virtual prototype; co-simulation; ADAMS; Simulink

收稿日期: 2013-09-20; 修订日期: 2013-10-23.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2010CB227101); 国家自然科学基金资助项目 (No. 11174275); 大尺寸有障碍空间角度与基面位置测量关键技术资助项目 (No. 11174275)

1 引言

太阳跟踪器能够搭载某些光电仪器载荷, 完成对日轨迹跟踪, 从而辅助这些载荷实现对日观测工作^[1, 2]。太阳跟踪器实际上是一种光电经纬仪^[1-3], 根据不同地点对日观测的需求, 需选用不同的结构形式, 具体包括水平式和地平式两种^[4-5]。实现天顶观测时, 一般采用水平式结构, 其由经轴和纬轴构成, 工作时经轴轴线与地球经线重合, 纬轴轴线则在某一地球纬线平面内, 但该结构无法对初升太阳进行精确跟踪。不需对天顶观测时, 可采用地平式结构, 其由方位轴和俯仰轴构成, 方位轴实现方位角调整, 俯仰轴实现俯仰角调整, 这种结构能够完成初升太阳的精确跟踪。

本文研发了某种型号的太阳跟踪器, 用于对北半球高纬度地区的太阳观测。该跟踪器采用 T 型地平式结构, 通过驱动方位轴和俯仰轴, 保证光电载荷视轴对太阳的精确对准, 实现精确跟踪。在未构建物理样机的情况下, 虚拟样机仿真是研究太阳跟踪器性能的重要方法^[6, 7]。

本文利用 ADAMS 和 MATLAB/simulink 搭建了太阳跟踪器的机-电联合仿真虚拟样机平台, 并在该平台上实现了太阳跟踪过程的虚拟仿真, 可了解太阳跟踪器的具体性能, 为实际物理

样机的开发提供了依据。

2 联合仿真基本原理

机电联合仿真平台建模的关键技术包括三维建模、动力学建模、控制系统建模以及接口技术。对机械系统采用 UG 建模, 动力学采用 ADAMS 建模, 控制系统采用 MATLAB 软件的 Simulink 模块实现, 联合仿真的平台为 ADAMS/View 模块。

图 1 所示为 ADAMS 和 MATLAB 联合仿真的框架图。首先利用 UG 软件建立机械系统的三维模型, 并将 UG 软件建立的三维模型导入至 ADAMS 软件中, 即实现 UG 软件与 ADAMS 软件之间单向非实时的数据传递; 其次利用 ADAMS 软件完成机械系统的动力学建模, 并且利用 ADAMS/Control 模块生成被控制模块。然后将 ADAMS 动力学模型导入到 MATLAB/Simulink 模块中。最后在 Simulink 模块中建立仿真控制系统模型, 设置仿真参数, 即可进行 ADAMS 软件和 Simulink 之间实时双向传送数据的机电一体化联合仿真。联合仿真的工作方式机械系统采用 ADAMS 解算器, 控制系统采用控制软件解算器, 二者之间通过状态方程 (S-function) 联系。

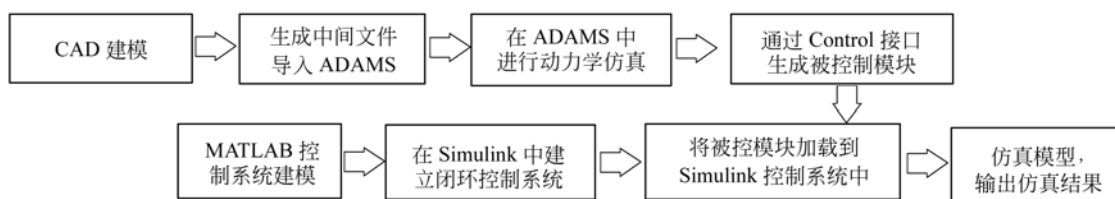


图 1 机电一体化建模框架图

Fig. 1 Frame diagram of mechatronics integrative modeling

3 机械系统动力学模型

开发的太阳跟踪器包括基座、方位轴系统、壳体、俯仰轴电机、变速箱、俯仰轴系统和光电载荷等, 具体结构如图 2 所示。采用 UG 软件构建太阳跟踪器三维模型, 将模型以 Parasolid 格式导入 ADAMS 动力学仿真软件中。

所有零件均定义为刚体, 并设置材料、密度和转动惯量等属性。确定各零部件之间运动副, 主要运动副如表 1 所示, 在方位轴与壳体、壳体与变速箱之间分别施加固定副。通过调整涡轮蜗杆副放置点的坐标及方位角信息, 完成该运动副传动比设置^[8], 传动比为:

$$i = d_2 / d_1 \tan \gamma, \quad (1)$$

式中: d_2 和 d_1 分别是涡轮和蜗杆的分度圆直径,

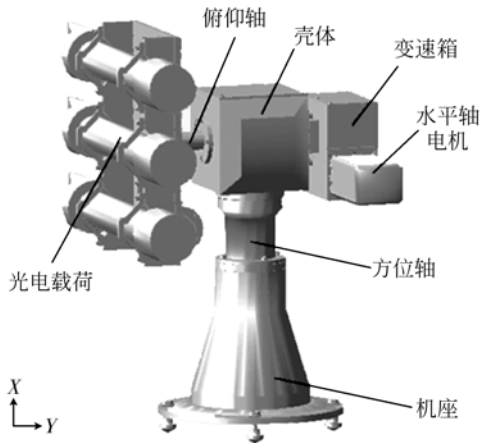


图 2 太阳跟踪器机械系统模型

Fig. 2 Mechanism system of solar tracker

$d_2 = 60 \text{ mm}$, $d_1 = 20 \text{ mm}$; γ 为蜗杆导程角, $\gamma = 2.85^\circ$; 经计算可知俯仰轴传动比约为 60.26。设置运动副相关的摩擦属性, 并设置驱动属性。驱动分别添加在方位轴和俯仰轴的转动副上, 施加扭转作用力完成双轴驱动。在方位轴和俯仰轴上建立相应 Mark 点, 根据 Mark 点的位移及速度信息判断太阳跟踪器的跟踪性能。

表 1 机械系统模型主要运动副信息

Tab. 1 Main kinematic pairs of mechanism model

名称	属性	构件 1	构件 2
JOINT_1	固定副	机座	大地
JOINT_2	转动副	方位轴	机座
JOINT_3	转动副	俯仰轴	壳体
JOINT_4	转动副	蜗杆轴	变速箱
JOINT_5	涡轮蜗杆副	蜗杆轴	俯仰轴

4 电机控制工作原理

太阳跟踪器的方位轴与俯仰轴控制原理相同, 其工作原理如图 3 所示。系统以速度为控制目标变量, 将方位轴的实际速度与目标速度进行比较产生误差; 控制系统通过电压-扭矩传递函数输出控制扭矩, 机械系统模型根据输入扭矩值, 对方位轴的工作速度进行调整, 并将速度信息反馈给控制系统, 形成闭环控制。

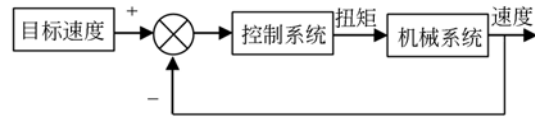


图 3 控制系统原理框图

Fig. 3 Principle diagram of control system

根据直流伺服电机工作原理^[9], 可得电机的电压-角位移传递函数, 如图 4 所示。图中 V_a 、 I_a 、 R_a 、 L_a 分别为电机控制回路的工作电压、电流、电阻和电感; C_m 和 C_e 分别为电机转矩系数和电动势系数; J 为电机轴总转动惯量; M_d 为电机轴输出扭矩; M_f 为电机轴摩擦扭矩; ω 和 θ 分别为电机轴角速度和角位移。

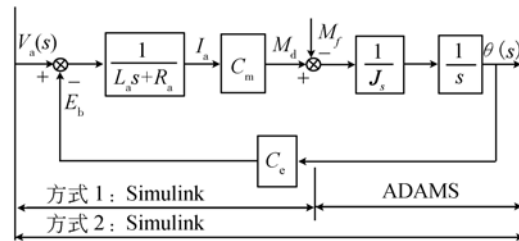


图 4 方位轴电机传递函数框图

Fig. 4 Transfer function block diagram of azimuth axis motor

图 4 采用两种方式对系统传递函数建模。方式 1 中, 电压-扭矩传递函数采用 Simulink 建模, 扭矩-角位移传递函数采用 ADAMS 建模。方式 2 中, 电压-角位移传递函数采用 Simulink 建模。方式 1 采用 ADAMS 建立机械系统模型, 其建模过程更加精确, 并且能够有效地估计摩擦扭矩, 因而方式 1 更加贴近实际物理样机的情况, 因此采用方式 1 建模更加合理。方式 1 的电压-扭矩传递函数为:

$$M_d = \frac{V_a(s) - C_e \theta(s)s}{\frac{1}{C_m} + \frac{T_e}{C_m} s}, \quad (2)$$

方式 2 的电压-角位移传递函数为:

$$\theta(s) = \frac{V_a(s)}{\frac{L_a J}{C_m} s^3 + \frac{R_a J}{C_m} s^2 + C_e s} = \frac{V_a(s)}{C_e (T_e T_m s^3 + T_m s^2 + s)}, \quad (3)$$

其中: T_e 和 T_m 分别为电机控制回路电磁时间常数和电机常数, $T_e = \frac{L_a}{R_a}$, $T_m = \frac{J R_a}{C_e C_m}$ 。

文中联合仿真控制系统的方式 1 模型根据式(2)建模, 方式 2 模型根据式(3)建模, 其中方式 2 中取摩擦扭矩 $M_f=0$, 即忽略摩擦力的作用。

5 ADAMS 与 Simulink 联合仿真

5.1 接口模块

利用 ADAMS/Control 模块建立动力学模型和控制系统模型两者之间的状态方程, 进而实现数据双向传递^[10]。首先确定系统的输入和输出变量, 输入状态变量包括俯仰轴力矩 (. Sun_tracker. fuyang_Torque) 和方位轴力矩 (. Sun_tracker. fangwei_Torque); 输出状态变量包括俯仰轴位移 (. Sun_tracker. fuyang_Displacement)、俯仰轴速度 (. Sun_tracker. fuyang_Velocity)、方位轴位移 (. Sun_tracker. fangwei_Displacement) 和方位轴速度 (. Sun_tracker. fangwei_Velocity)。

5.2 控制系统模型

在 ADAMS 中导出机械系统控制接口, 将接口模块导入 MATLAB/Simulink 模块中。采用 Simulink 建立太阳跟踪器方位轴和俯仰轴的 PID

驱动控制模型。将接口模块和 PID 控制模型连接, 建立联合仿真控制系统模型, 由俯仰轴驱动单元、方位轴驱动单元、接口模块 3 部分构成, 如图 5 所示。方位轴与俯仰轴具有相同的驱动控制结构, 以方位轴为例分析控制系统的基本特性, 表 2 给出了方位轴的基本工作参数。利用 PID 控制器, 确定方位轴驱动单元速度环最优的比例、积分和微分参数来提高系统的控制精度和响应速度。

表 2 方位轴控制系统模型基本参数

Tab. 2 Basic parameters of control system model of azimuth axis

参数名称	参数幅值
转动惯量 $J/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	5.13×10^{-5}
电磁时间常数 T_e/ms	0.09
电机时间常数 T_m/ms	5.4
转矩系数 $c_m/(\text{Nm} \cdot \text{A}^{-1})$	0.017
电动势系数 $c_e/(\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	0.81

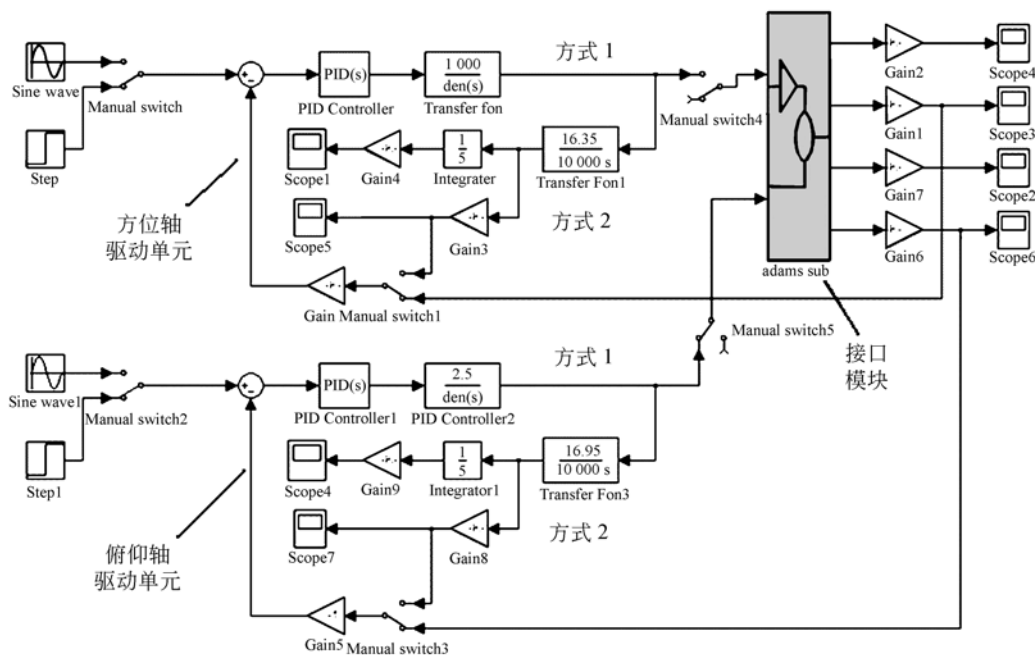


图 5 太阳跟踪器控制系统模型

Fig. 5 Control system model of solar tracker

设置通讯时间间隔为 0.05 s, 动画模式为交互式计算, 仿真模式为离散性模式, 然后根据仿真要求来设置相应的仿真时间。采用方式 1 跟

踪时, 对仿真模型输入阶跃信号和正弦信号, 得到方位轴运动速度响应及误差曲线如图 6 所示。从图 6(a)可知, 阶跃信号输入时, 超调量

为 9%，调整时间约为 1 s，调整误差小于 0.1%。从图 6(b)~(d)可知，在正弦曲线跟踪过程中，跟踪误差为滞后跟踪误差，其随正弦曲线频率变化而变化。当角频率为 1 rad/s 时，跟踪误差值约为目标值的 18%；当角频率为 0.5 rad/s 时，跟踪误差值约为目标值的 6%；当角频率为 0.002 rad/s 时，跟踪误差维持在目标值的 0.4% 以下。在正弦跟踪的开始阶段，由于系统跟踪存在调整时间，导致跟踪误差大，随后跟踪误差逐渐降低。即随着跟踪输入曲线频率的降低，控制系统的跟踪误差越小，也就是说控制系统对频率较低的曲线具有较好的跟踪性能。

采用方式 2 跟踪时，输入的阶跃和正弦信号的实际速度数据与目标跟踪数据存在较大的系统跟踪误差，最终导致实际位移数据与目标位移数据存在较大误差。摩擦扭矩及转动惯量信息不准确可能导致以上现象，需要进行必要的修正。因此采用方式 1 方法建模更加准确合理。

在太阳跟踪过程中，跟踪器对控制系统的响应时间要求不敏感，对跟踪精度要求较高，即跟踪误差越小越好。由于地球自转速度很低，即太阳跟踪过程的输入曲线频率很低，该情况下搭建的太阳跟踪器双轴控制系统能够满足跟踪精度需求，完成太阳跟踪任务。

5.3 太阳跟踪仿真计算

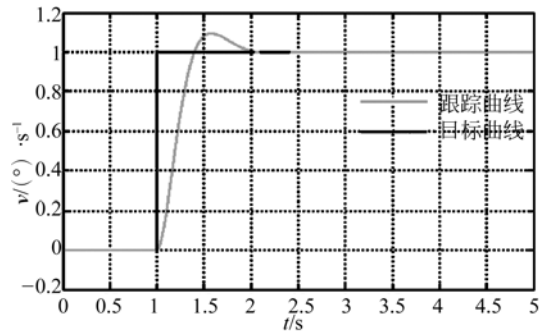
将长春地区(纬度:43.88°;经度 125.35°;时区:东八区)冬至日的太阳高度角随时间变化曲线作为太阳跟踪器数字引导跟踪仿真研究的输入数据。太阳高度角为^[11-12]:

$$h = \arcsin(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t), \quad (4)$$

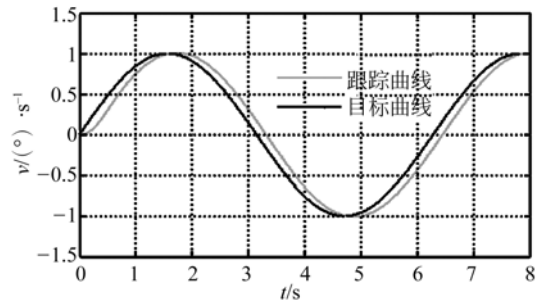
式中: φ 为地理纬度; δ 为太阳赤纬; t 为地方时角。

长春地区冬至日太阳高度角时间曲线如图 7 所示(北京时间)。根据该曲线即可得出太阳跟踪器方位轴和俯仰轴的位移输入目标曲线。

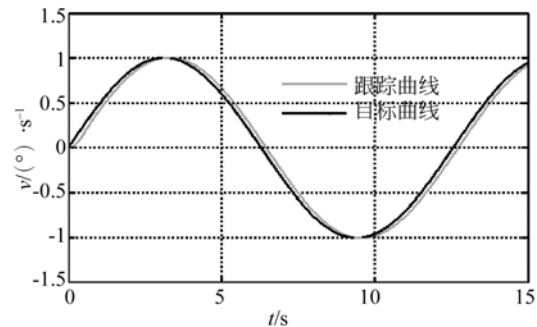
选择太阳跟踪时段为 10:00 am~2:00 pm,



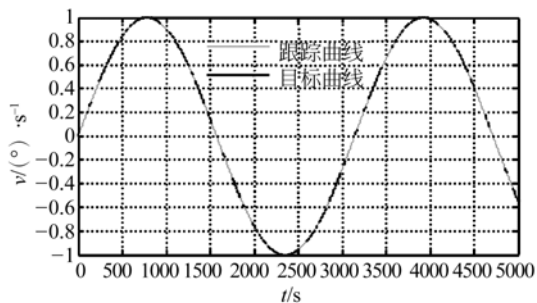
(a) Step 跟踪曲线
(a) Step tracking curve



(b) 正弦跟踪曲线 (f=1 rad/s)
(b) Sinusoidal tracking curve with f=1 rad/sec



(c) 正弦跟踪曲线 (f=0.5 rad/s)
(c) Sinusoidal tracking curve with f=0.5 rad/sec



(d) 正弦跟踪曲线 (f=0.002 rad/s)
(d) Sinusoidal tracking curve with f=0.002 rad/sec

图 6 方位轴跟踪仿真数据

Fig. 6 Tracking simulation data of azimuth axis

方位轴的位移目标输入曲线为过原点倾斜直线的一部分，其方程为：

$$y_1 = 1/240t, \quad (5)$$

式中: t 为时间变量, $0 \leq t \leq 14\ 400$ 。

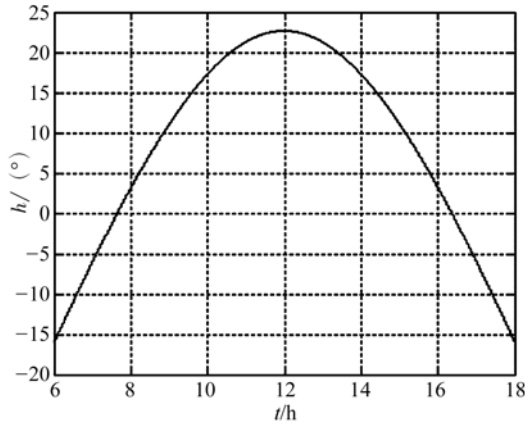


图 7 太阳高度角时间曲线

Fig. 7 Curve between sun elevation angle and time

俯仰轴的位移目标曲线为某余弦曲线的一部分, 其方程为:

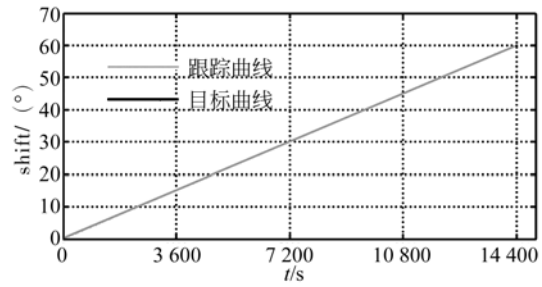
$$y_2 = a \sin[\sin(43.88^\circ) \times \sin(-23.43^\circ) + \cos(43.88^\circ) \times \cos(-23.43^\circ) \times \cos(t/240 - 30)], \quad (6)$$

式中: t 为时间变量, $0 \leq t \leq 14\ 400$ 。

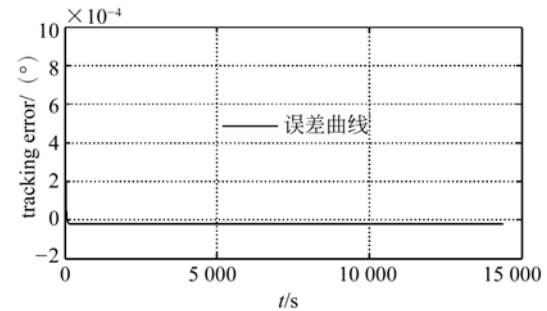
将位移目标曲线对时间求导, 获得速度目标曲线。采用建立的联合仿真模型对速度目标曲线进行跟踪。进而获得的方位轴和水平轴的位移跟踪曲线及位移跟踪误差曲线如图 8 所示。从图 8(a)和(c)可知, 在整个跟踪过程中, 方位轴和俯仰轴的目标位移曲线与实际位移曲线完全重合。从图 8(b)和(d)可知, 方位轴和俯仰轴的跟踪误差维持在目标值 0.1% 以下, 说明控制系统对于太阳变化轨迹具有极好的跟踪性能, 能够满足太阳跟踪的基本需求。跟踪系统 1.5 s 后, 控制系统基本完成调整, 方位轴和俯仰轴达到预定输入幅值, 能够满足跟踪过程对系统调整时间的要求。

6 结 论

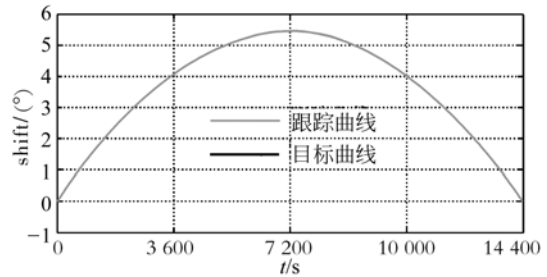
采用虚拟仿真设计方法, 实现了太阳跟踪器机械系统与控制系统的联合仿真分析。仿真



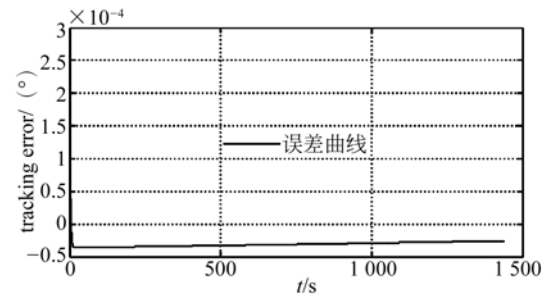
(a) 方位轴位移跟踪曲线
(a) Tracking curve of azimuth axis



(b) 方位轴位移跟踪误差曲线
(b) Tracking error curve of azimuth axis



(c) 俯仰轴位移跟踪曲线
(c) Tracking curve of pitch axis



(d) 俯仰轴位移跟踪误差曲线
(d) Tracking error curve of pitch axis

图 8 太阳跟踪过程仿真数据

Fig. 8 Simulation data of solar tracking processes

结果表明: 联合仿真模型对太阳高度角输入曲线具有极好的跟踪能力, 开始跟踪 1.5 s 后系统跟踪非常稳定, 跟踪误差小于目标值 0.1%, 说明建立的动力学模型和控制系统模型合理, 能够准确地描述跟踪器的工作过程。通过虚拟仿

真设计方法验证了太阳跟踪器设计的可行性和有效性,极大地提高了设计效率。本文仅以速度环作为闭环回路设计了控制系统,此控制系统仅对速度响应敏感,对频率较高的位移信号跟踪时存在明显的跟踪误差,因此仅适合对太

阳等目标运动速度较低物体的进行跟踪,而对高速运动物体跟踪时,则需引入位移环,并选用先进的控制技术。后续工作需对这方面内容进行系统研究,从而能够实现高速运动经纬仪的虚拟跟踪仿真。

参考文献:

- [1] 吕文华,贺晓雷,于贺军,等.全自动太阳跟踪器的研制和应用[J].光学精密工程,2008,16(12):2544-2550.
LU W H, HE X L, YU H J, *et al.*. Development of full-automatic solar tracker and its applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2544-2550. (in Chinese)
- [2] 王红睿,王玉鹏,方伟.智能双模式太阳跟踪器[J].光学精密工程,2011,19(7):1605-1611.
WANG H R, WANG Y P, FANG W. Intelligent solar tracker with double modes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1605-1611. (in Chinese)
- [3] 黄剑波,朴仁官,郭帮辉,等.一种高精度全天候太阳跟踪仪的设计[J].长春理工大学学报(自然科学版),2010,9(3):4-7.
HANG J B, PIAO R G, GUO B H, *et al.*. Design of all-weather and high precision solar tracker [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 9(3):4-7. (in Chinese)
- [4] 薛向尧,高云国,韩光宇,等.水平式经纬仪指向误差的统一补偿技术[J].光学精密工程,2011,19(7):1524-1530.
XUE X Y, GAO Y G, HAN G Y, *et al.*. Total correction method of pointing error for level mounting theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1524-1530. (in Chinese)
- [5] 王槐,代霜,张景旭.大型地平式望远镜的方位轴系支撑结构[J].光学精密工程,2012,20(7):1510-1516.
WANG H, DAI SH, ZHANG J X. Azimuth shafting bearing structure in a large Alt-azimuth telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7):1510-1516. (in Chinese)
- [6] 马梦林,卓仁善.CAD/CAE技术在光电经纬仪跟踪架系统研制中的应用[J].光学精密工程,2004,12(4):10-13.
MA ML, ZHUO E SH. Application of CAD/CAE in the development of tracking system for photoelectrical theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4):10-13. (in Chinese)
- [7] 李慧,沈湘衡.光电经纬仪的机电动力学建模与耦合[J].光学精密工程,2007,15(10):1577-1582.
LI H, SHEN X H. Electromechanical dynamic modeling and coupling for optoelectronic theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10):1577-1582. (in Chinese)
- [8] 刘春景,胡天翔.基于Pro/E与ADAMS涡轮蜗杆传动仿真研究[J].林业机械与木工设备,2007,10:44-45.
LIU CH P, HU T X. Simulation research of worm wheel system based on Pro/E and ADAMS [J]. *Forestry machinery & Woodworking equipment*, 2007, 10:44-45. (in Chinese)
- [9] 杜坤梅,李铁才.电机控制技术[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.
DU K M, LI T C. *Motor control technology* [M]. Harbin:Harbin institute of technology press, 2002. (in Chinese)
- [10] 郑建荣.ADAMS虚拟样机技术入门与提高[M].北京:机械工业出版社,2002.
ZHENG J R. *Introduction and improvement of virtual prototype technology based on ADAMS* [M]. Beijing:Mechanical industry press, 2002. (in Chinese)
- [11] 王国安,米鸿涛,邓天宏,等.太阳高度角和日出日落时刻太阳方位角一年变化范围的计算[J].气象与环境科学,2007,30(9):161-163.
WANG G A, MI H T, DENG T H, *et al.*. Calculation of the change range of the sun high angle and

the azimuth of sunrise and sunset in one year [J].
Meteorological and Environmental Sciences,
2007, 30(9):161-163. (in Chinese)

- [12] 李先华, 黄雪樵, 池天河, 等. 卫星像元太阳高度角和方位角的计算原理与方法[J]. 测绘学报,

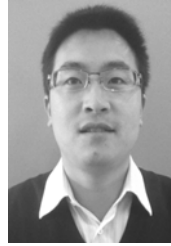
1993, 22(2):149-154.

LI T H, HUANG X Q, CHI T H, *et al.*. Computation of solar elevations and azimuths at pixels of satellite image [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1993, 22(2):149-154. (in Chinese)

作者简介:



郑黎明(1983—),男,山东临沂人,博士,助理研究员。2007年、2012年于吉林大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光电仪器设计、虚拟样机仿真方面的研究。E-mail: dayan_zlm@aliyun.com



黄剑波(1983—),男,四川广元人,硕士,助理研究员,2006年、2008年于吉林大学分别获学士、硕士学位,主要从事光电精密仪器结构设计、机构动力学等方面的研究。E-mail: huangjianbo208@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)