

文章编号 1004-924X(2012)05-1048-07

太阳自动跟踪机构的设计和位姿分析

贺新升^{1*}, 高春甫¹, 王彬^{1,2}, 谢楚雄¹

(1. 浙江师范大学工学院, 浙江金华 321004;

2. 兰州交通大学机电工程学院, 甘肃兰州 730070)

摘要:设计了一种新型三自由度并联跟踪机构, 以使太阳能板全方位地跟踪太阳并最大限度地输出有效发电量。采用三角平台上的万向节使太阳能板的大部分重量传递到支架上, 通过 3 条细钢丝绳的协调动作使太阳能板的姿态发生变化, 达到跟踪机构驱动电机耗能小, 输出有效发电量多的目的。利用坐标变换理论建立了该三自由度并联跟踪机构的位置正解方程, 然后用牛顿迭代法数值求解正解方程组; 最后, 依据空间投影理论对该并联跟踪机构的空间位姿进行实测分析, 并对设计的跟踪机构与传统二轴跟踪机构进行驱动耗能对比实验。结果表明: 本文建立的位置正解方程与实测结果的趋势基本相同, 输出位姿空间角 α 、 β 和距离 z_B 的平均误差分别为 1.8%、2.6%、0.84%, 满足跟踪机构的误差要求, 设计的跟踪机构的耗电量约为传统二轴跟踪机构的 25%。

关键词:太阳能板; 太阳自动跟踪; 并联机构; 位置正解; 牛顿迭代

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122005.1048

Design and positional posture analysis of parallel sun auto-tracking mechanism

HE Xin-sheng^{1*}, GAO Chun-fu¹, WANG Bin^{1,2}, XIE Chu-xiong¹

(1. College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2. School of Mechanical and Electronics Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

* Corresponding author, E-mail: hxs7909@126.com

Abstract: A new type of 3-DOF sun parallel tracker was designed to track the sun all-around and to maximize its effective output powers. By using the cardan joint on a triangular platform to transfer the most of the weights of solar panels to the stand and to change the positional posture of the solar panels in all direction through three thin steel ropes, the track mechanism could reduce the electrical power consumption of own motor and could generate more efficient powers. Firstly, the forward position equations of the 3-DOF parallel tracker were established based on the theory of coordinate transformation. And then the forward position equations were solved by Newton's iterative method numerically. Finally, the space positional posture was measured and analyzed with the theory of the space parallel projection to verify the accuracy of the forward position equations. A driven energy experiment was performed to contrast the power consumption between the designed mechanism and a traditional two-axis tracker. The experimental results show that the established forward position equations and meas-

收稿日期: 2011-12-29; 修订日期: 2012-02-15.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 51075371); 浙江省教育厅资助项目 (No. Y201120857); 浙江省金华市科技计划资助项目 (No. 2010-1-102)

ured results have the same trend basically, and the average errors of output positional postures for space angles α , β , and distance z_B are 1.8%, 2.6%, 0.84%, respectively. This accuracy can meet the requirements of the tracking mechanism for errors. Moreover, the power consumption of the designed tracking mechanism is about 25% that of the traditional two-axis tracker.

Key words: solar energy panel; sun auto-tracking; parallel mechanism; positional forward solution; Newton iteration

1 引言

精确的太阳自动跟踪机构,可使太阳能板接收更多的太阳辐射能量,从而提高太阳能的利用率^[1]。实验证明,当太阳光线入射角度与太阳能板法线平行时具有最佳的转换效率,可以获得最大功率点。目前的跟踪机构就结构而言可分为单轴跟踪和双轴跟踪。现有的双轴跟踪机构种类很多,有传统的二轴跟踪机构、极轴跟踪机构、三自由度并联跟踪机构等^[2-3]。

并联机构具有刚度大,结构稳定,承载力强,精度高,易于实现实时运动控制等优点,在医疗器械、机床、太阳跟踪等领域多有应用^[4]。应用在太阳自动跟踪上的并联机构除了河北工业大学张顺心教授提出的三自由度并联球面跟踪机构^[5]外,鲜有相关方面的报道。该并联球面跟踪机构具有结构紧凑、刚度较高、工作空间较大等特点,较好地解决了传统二轴跟踪机构跟踪范围小,精度较低的问题,实现了对太阳的全方位跟踪,大大提高了接收效率。但由于整个装置的重力都落在3个电机上,所以电机的自身耗电量大,输出有效发电量小。为了解决上述太阳跟踪机构出现的问题,本文提出了一种新型三自由度并联跟踪机构,它的优点是结构简单、能耗低、跟踪范围大。

2 并联跟踪机构的建模及位置正解

2.1 新型并联跟踪机构工作原理

新型并联跟踪机构主要由固定平台和动平台构成,如图1所示。固定平台由3副步进电机、齿轮齿条、导向轮等机构组成;动平台由太阳能板托盘、万向节组成。在太阳能板托盘边缘处以 120° 间隔设置了3个球铰链,3个球铰链的3个固定点成正三角形分布,通过球铰链分别连接3条细钢丝绳,细钢丝绳通过导向轮固定在齿条上。万

向节通过螺栓固联在太阳能板托盘上,这样可以使太阳能板的重量通过万向节传递到三角支架上。在三角平台上有3套连杆机构,3套连杆机构的上端通过球铰链与太阳能板托盘相连,3个球铰链的3个固定点在太阳能板托盘上构成一个正三角形,该机构可以对太阳能板的转动进行限位,当驱动器出现故障或大风天气时能防止太阳能板的脱落,起到加固太阳能板的作用。

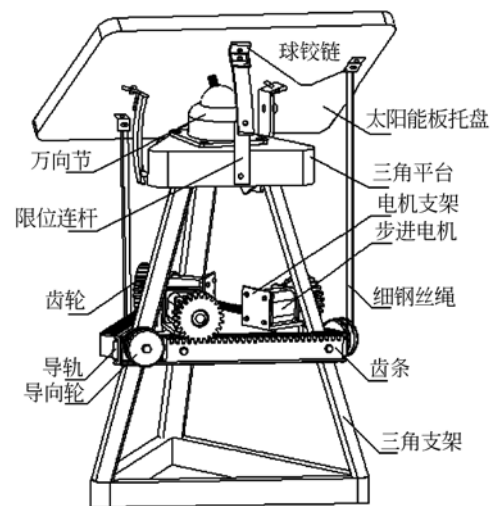


图1 新型并联跟踪机构

Fig. 1 New parallel tracking mechanism

该机构的工作原理为电机通过齿轮齿条机构,带动连接在其上的细钢丝绳,从而使太阳能板的姿态发生改变。3条细钢丝绳的协调运动可以使太阳能板的方位角达到 360° ,俯仰角达到 110° ,实现了全方位的跟踪。

现有的单轴、双轴跟踪机构都是将整个太阳能板的重量落在驱动电机上,当太阳能电池板的重量较大时,需要较大功率的电机驱动,而一般驱动电机的能源由太阳能发电提供,如果驱动电机能耗较大,则输出的有效能量就大大减少。而在本结构中,由于太阳能板的重量主要落在三角支

架上,其位姿变化时只需极小的力矩就能实现,因此可以用极小功率的电机来驱动,从而使输出的有效电量增多。

2.2 并联跟踪机构建模

2.2.1 坐标系的建立

根据上述并联跟踪机构的结构特点,将其分为固平台和动平台。固平台是整个机构装配的平台,步进电机安装其上,实现运动的输入;动平台为机构的末端件,实现运动的输出。该并联跟踪机构的简化模型如图 2 所示。简化模型由上下 2 个等边三角平台,中间 3 条连接细钢丝绳组成。每条细钢丝绳与齿轮齿条等结构相连组成 3 个运动副,3 个导向轮与固平台相连组成 3 个转动副,3 条细钢丝绳与动平台的球铰链相连组成 3 个球面副。

为方便建模,首先在固平台上建立固坐标系。设固平台正三角形的外接圆半径为 R ,以其圆心为原点建立固坐标系 O_A -XYZ, X 轴过 A_1 点并平分 $\angle A_2 A_1 A_3$, Y 轴与 $A_2 A_3$ 连线平行, Z 轴垂直于固平台指向上方。同理,在动平台上建立动坐标系 O_B -xyz,其动平台正三角形的外接圆半径为 r ^[6-7]。

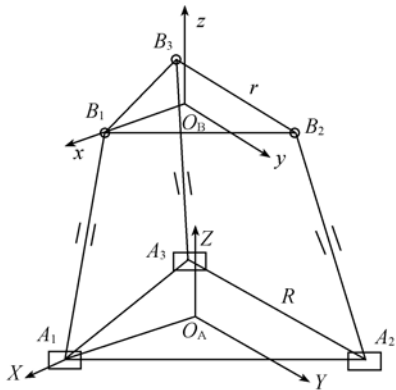


图 2 并联跟踪机构的简化模型

Fig. 2 Simplified model of parallel tracking mechanism

2.2.2 并联跟踪机构的自由度分析

为方便跟踪机构的空间位姿研究,首先应对该机构的自由度进行分析,用“修正的 Grübler-

Kutzbach 公式”^[8]计算:

$$M = d \times (n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v, \quad (1)$$

式中 M 为机构的自由度; n 为包括机架的构件数目; g 为运动副的数目; f_i 为第 i 个运动副的自由度; d 为机构的公共约束因子,其中 $d = 6 - \lambda$, λ 为机构的公共约束数; v 为多环并联机构在去除公共约束后的并联冗余约束因子。

由式(1)计算得: $M = 6 \times (8 - 9 - 1) + 15 + 0 = 3$,所以该并联跟踪机构的自由度是 3,即绕 x 、 y 轴的旋转运动和沿 z 轴的平行移动。

2.3 并联跟踪机构的位置正解分析

按上述方法选定坐标系后,可以确定固平台上的 3 个固定支点 $A_i (i=1, 2, 3)$ 在固坐标系 O_A -XYZ 中的坐标为:

$$\begin{aligned} A_1 &= [R \quad 0 \quad 0]^T, A_2 = \left[-\frac{R}{2} \quad \frac{\sqrt{3}}{2}R \quad 0 \right]^T, \\ A_3 &= \left[-\frac{R}{2} \quad -\frac{\sqrt{3}}{2}R \quad 0 \right]^T, \end{aligned}$$

动平台的 3 个运动支点 B_i 在动坐标系 O_B -xyz 中的坐标为:

$$\begin{aligned} B_1 &= [r \quad 0 \quad 0]^T, B_2 = \left[-\frac{r}{2} \quad -\frac{\sqrt{3}}{2}r \quad 0 \right]^T, \\ B_3 &= \left[-\frac{r}{2} \quad \frac{\sqrt{3}}{2}r \quad 0 \right]^T \end{aligned}$$

依据坐标变换规则^[9-10]

$$\begin{aligned} p_i &= R^* B_i + p_B, \quad (2) \\ R^* &= \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ c\beta s\gamma & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma \\ -s\beta & s\alpha c\beta & c\alpha c\beta \end{bmatrix}, \quad (3) \end{aligned}$$

其中 R^* 为动坐标系 O_B -xyz 到固坐标系 O_A -XYZ 的旋转变换矩阵; R^* 中的 3 列分别为 O_B -xyz 的 3 个坐标轴相对于 O_A -XYZ 中 3 个轴的方向余弦, α, β, γ 分别为 O_B -xyz 绕 O_A -XYZ 的 X 轴、Y 轴、Z 轴的旋转角度, c 和 s 分别为 \cos 和 \sin 。将动平台的 3 个运动支点 B_i 的坐标及式(3)代入式(2),可得:

$$p_i = \begin{bmatrix} rc\beta c\gamma + x_B & -\frac{r}{2}c\beta c\gamma + \frac{\sqrt{3}}{2}rs\alpha s\beta c\gamma - \frac{\sqrt{3}}{2}rc\alpha s\gamma + x_B & -\frac{r}{2}c\beta c\gamma - \frac{\sqrt{3}}{2}rs\alpha s\beta c\gamma + \frac{\sqrt{3}}{2}rc\alpha s\gamma + x_B \\ rc\beta s\gamma + y_B & -\frac{r}{2}c\beta s\gamma + \frac{\sqrt{3}}{2}rs\alpha s\beta s\gamma + \frac{\sqrt{3}}{2}c\alpha c\gamma + y_B & -\frac{r}{2}c\beta s\gamma - \frac{\sqrt{3}}{2}rs\alpha s\beta s\gamma - \frac{\sqrt{3}}{2}rc\alpha c\gamma + y_B \\ -rs\beta + z_B & \frac{r}{2}s\beta - \frac{\sqrt{3}}{2}rs\alpha c\beta + z_B & \frac{r}{2}s\beta - \frac{\sqrt{3}}{2}rs\alpha c\beta + z_B \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 x_B, y_B, z_B 分别为动坐标系 O_B-xyz 沿固坐标系 O_A-XYZ 的 X 轴、Y 轴、Z 轴移动的距离。

由于该并联跟踪机构有 3 个自由度,即只有绕 x, y 轴为中心的转动自由度和沿 z 轴的平动自由度,所以:

$$\begin{cases} x_B=0 \\ y_B=0, \\ \gamma=0 \end{cases} \quad (5)$$

设并联跟踪机构运动时的 3 段绳长分别为 l_1, l_2, l_3 , 由式(4)、(5)可得

$$l_i = \mathbf{A}_i \mathbf{p}_i = [\mathbf{A}_1 \ p_1 \quad \mathbf{A}_2 \ p_2 \quad \mathbf{A}_3 \ p_3] = [p_1 \quad p_2 \quad p_3] - [\mathbf{A}_1 \quad \mathbf{A}_2 \quad \mathbf{A}_3] = \begin{bmatrix} r\cos\beta - R & -\frac{r}{2}\cos\beta + \frac{\sqrt{3}}{2}r\sin\alpha\sin\beta + \frac{R}{2} & -\frac{r}{2}\cos\beta - \frac{\sqrt{3}}{2}r\sin\alpha\sin\beta + \frac{R}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}r\cos\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}R & -\frac{\sqrt{3}}{2}r\cos\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}R \\ -r\sin\beta + z_B & \frac{r}{2}\sin\beta + \frac{\sqrt{3}}{2}r\sin\alpha\cos\beta + z_B & \frac{r}{2}\sin\beta - \frac{\sqrt{3}}{2}r\sin\alpha\cos\beta + z_B \end{bmatrix}, \quad (6)$$

综上可知并联跟踪机构的位置正解方程为:

$$\begin{cases} l_1^2 = (r\cos\beta - R)^2 + (z_B - r\sin\beta)^2 \\ l_2^2 = \left[\frac{R}{2} - \frac{r}{2}\cos\beta + \frac{\sqrt{3}}{2}r\sin\alpha\sin\beta \right]^2 + \left[\frac{\sqrt{3}}{2}r\cos\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}R \right]^2 + \left[\frac{r}{2}\sin\beta + \frac{\sqrt{3}}{2}r\sin\alpha\cos\beta + z_B \right]^2 \\ l_3^2 = \left[\frac{R}{2} - \frac{r}{2}\cos\beta - \frac{\sqrt{3}}{2}r\sin\alpha\sin\beta \right]^2 + \left[\frac{\sqrt{3}}{2}r\cos\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}R \right]^2 + \left[\frac{r}{2}\sin\beta + \frac{\sqrt{3}}{2}r\sin\alpha\cos\beta - z_B \right]^2 \end{cases} \quad (7)$$

该方程组即为并联跟踪机构的位置正解方程,根据并联跟踪机构的正解条件, l_1, l_2, l_3 均已知,则 3 个未知数对应 3 个独立的方程,求解(7)式,即可得到并联跟踪机构的输出位姿 α, β, z_B 。

3 并联跟踪机构正解方程的数值求解

由于并联跟踪机构的位置正解是进行机构运动学分析的基础,所以有必要对其正解方程的求解问题进行研究。从上面对并联跟踪机构的位置正解分析看出,该模型是一个复杂的非线性方程

组,用一般的方法很难求解,只能对其进行数值求解。该机构的位置正解方程可通过牛顿迭代法求解。

求解非线性方程组 $F(x) = 0$ 的牛顿迭代方法^[11]为

$$\begin{cases} x^0 \text{ (初始向量)} \\ x^{k+1} = x^k - [F'(x^k)]^{-1} F(x^k) \quad (k=0, 1, 2, \dots) \end{cases}, \quad (8)$$

将并联跟踪机构的位置正解方程组变换成如下形式: $F(x) = 0$ 。并联机构的位置正解方程组的表达式如下:

$$\text{令 } \mathbf{x} = \{\alpha, \beta, z_B\}^T$$

$$F(x) = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{cases} (r\cos\beta - R)^2 + (z_B - r\sin\beta)^2 - l_1^2 \\ \left[\frac{R}{2} - \frac{r}{2}\cos\beta + \frac{\sqrt{3}}{2}r\sin\alpha\sin\beta \right]^2 + \left[\frac{\sqrt{3}}{2}r\cos\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}R \right]^2 + \left[\frac{r}{2}\sin\beta + \frac{\sqrt{3}}{2}r\sin\alpha\cos\beta + z_B \right]^2 - l_2^2 \\ \left[\frac{R}{2} - \frac{r}{2}\cos\beta - \frac{\sqrt{3}}{2}r\sin\alpha\sin\beta \right]^2 + \left[\frac{\sqrt{3}}{2}r\cos\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}R \right]^2 + \left[\frac{r}{2}\sin\beta + \frac{\sqrt{3}}{2}r\sin\alpha\cos\beta - z_B \right]^2 - l_3^2 \end{cases}, \quad (9)$$

为方便叙述,将 $F'(x)$ 表示为如下形式:

$$F'(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_1}{\partial \beta} & \frac{\partial F_1}{\partial z_B} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_2}{\partial \beta} & \frac{\partial F_2}{\partial z_B} \\ \frac{\partial F_3}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_3}{\partial \beta} & \frac{\partial F_3}{\partial z_B} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

给定 3 段绳长的初始值 l_1^0, l_2^0, l_3^0 , 然后将式

(9)、式(10)代入式(8)即可求得该并联机构方程组 α, β, z_B 的数值解。

4 实验研究

通过实验验证本文建立的三自由度并联跟踪机构模型,对该并联跟踪机构的空间位姿进行了

实测研究,然后将实测的结果与正解方程组求得的数值解进行对比分析,从而来验证该模型的准确性。最后对该新型并联跟踪机构进行了驱动电机耗电量对比实验。

4.1 实测原理

实测原理是:依据空间投影理论将动平台上的某 2 个点投影到与固平台相平行的一个平面上,然后将投影的直线通过坐标平移,求 2 条线之间的夹角即可求得动平台绕 x 轴、 y 轴旋转的角度 α, β 。

图 3 为动平台绕 Y 轴旋转 β 时的实测原理图。

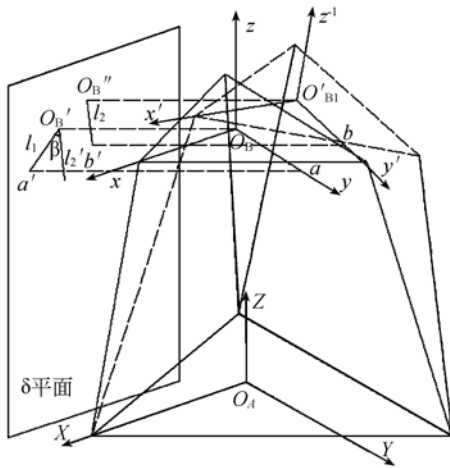


图 3 实测投影图

Fig. 3 Measured projection map

首先在动平台上固定一个坐标系,然后分别在 x, y 轴上开 2 个小孔,用激光束投影到与固平台相平行的平面 δ 上。初始位置时,动平台和固平台平行,此时将动坐标系上的点 O_B, a 投影到 δ 平面上,得到 O'_B, a' 点,即直线 l_1 ;然后通过控制步进电机使齿条带动细钢丝绳上下运动,此时动平台的位姿将会改变,将此时动坐标系上的点 O'_{B1}, b 投影到 δ 平面上,得到的投影点为 O''_B, b' ,即直线 l_2 ,再将 l_2 平移至 O'_B 点, l_1 与 l'_2 相交的角度即为绕 Z 轴旋转的角度,其中 $O'_B O''_B$ 的距离即为 z_B 。同理可求得绕 X 轴旋转的角度 α 。

4.2 实验测量及结果分析

样机实测时的初始条件为:动平台外接圆半径 $r=120$ mm,固平台外接圆半径 $R=200$ mm。首先通过控制步进电机来改变齿条及细钢丝绳的

伸长与缩短,进而改变太阳能板的位姿;然后通过激光跟踪仪上的激光束投影到面板上,用投影坐标变换来测其输出位姿空间角 α, β 和距离 z_B 。输出位姿总共测 7 组数据,再与方程组数值迭代后的数值解做比较分析。图 4 为样机的实物图,图 5(a)、(b)、(c)分别为并联跟踪机构的实测结果与方程组数值迭代后的输出位姿 α, β, z_B 的曲线比较图。

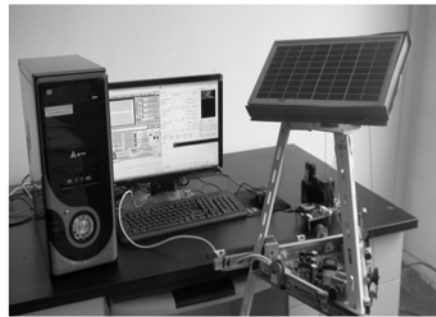
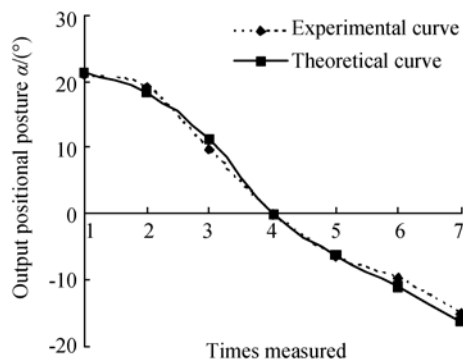


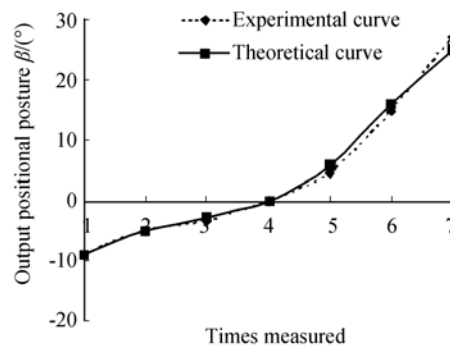
图 4 样机实物图

Fig. 4 Figure of prototype



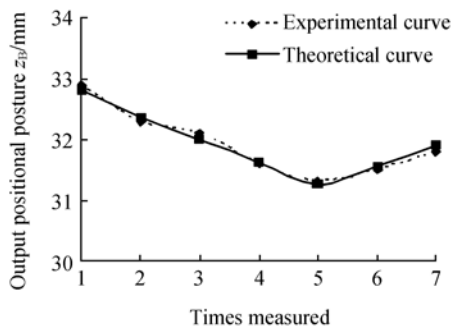
(a) 输出位姿 α 的误差曲线图

(a) Error curve of output positional posture α



(b) 输出位姿 β 的误差曲线图

(b) Error curve of output positional posture β



(c) 输出位姿 z_B 的误差曲线图

(c) Error curve of output positional posture z_B

图 5 各输出位姿量的误差曲线比较图

Fig. 5 Comparison of error curves for output positional postures

从图 5 看出,实测值和理论值的基本趋势大体一致,但有一定的误差,2 者的平均误差分别为 $\xi_a = 1.8\%$, $\xi_\beta = 2.6\%$, $\xi_{z_B} = 0.84\%$ 。造成偏差的原因是:①样机在制造过程中,由于各零件装配不紧密,会出现一定的装配误差;②用投影法测量时,激光束投影的光斑大小会产生一定的实验误差;③实测的实验数据为毫米级别,而正解方程数值迭代时的精度可以达到微米级别。

4.3 驱动电机耗电量对比实验

本文设计的跟踪机构,太阳能板的大部分重量通过万向节落在固定平台上,其驱动整个装置所需的旋转力矩较小,输出的有效发电量较多。在驱动电机耗电量对比实验中,以 10 W 太阳能电池板为例,传统二轴跟踪机构所需的电机为 2 个 100 W 的步进电机,而本文采用的是 3 个 15 W 的步进电机。在实验中,假如跟踪装置每隔一段时间矫正太阳能板姿态一次,每次电机动作的时间为 5 s,一天跟踪 10 h,则跟踪频度不同时得到的新型并联跟踪机构与传统二轴跟踪机构的耗电量对比如图 6 所示。

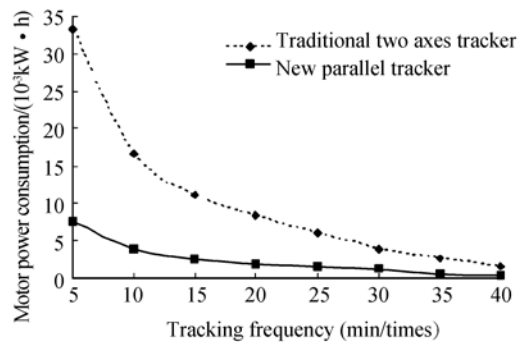


图 6 驱动电机耗电量对比图

Fig. 6 Comparison of power consumption for drive motor

从图 6 看出,在不同跟踪频度下,本文设计的跟踪机构约为传统二轴跟踪机构所需耗电量的 25%。由驱动电机的能耗可知,与传统二轴跟踪机构相比,该新型并联跟踪机构自身电机耗电量较小,输出有效发电量较多。

5 结 论

本文设计了一种新型并联太阳自动跟踪机构,通过对该新型并联跟踪机构进行空间位姿分析及实验研究,实验结果显示:该机构跟踪太阳的方位角可以达到 360° ,俯仰角能达到 110° ,基本实现了对太阳的全方位的跟踪;该机构输出位姿 α 、 β 、 z_B 的数值解与实测值平均误差分别为 1.8%、2.6%、0.84%,表明该机构跟踪太阳的精度较高;另外,该机构电机驱动能耗约为传统二轴跟踪机构的 25%。

本文设计的跟踪机构结构简单、跟踪范围较大、跟踪精度较高,且机构自身的电机耗电量较少,输出的有效电量较多,这对于降低光伏发电成本具有一定的意义,尤其应用到大型光伏发电厂将产生可观的经济效益。

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.
LV 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] ARDEHALI M M, SHAHRESTANI M, ADAMS C. Energy simulation of solar assisted absorption system and examination of clearness index effects on auxiliary heating[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(3): 864-870.

- [3] 刘俊,刘京诚,谢磊,等. 太阳光自动跟踪装置的设计[J]. 机床与液压, 2010,38(9):45-48.
LIU J, LIU J CH, XIE L, *et al.*. Design of a sunshine auto-tracker[J]. *Machine tool & hydraulics*, 2010, 38(9):45-48. (in Chinese)
- [4] SICILIANO B. The tricept robot: inverse kinematics manipulability analysis and closed-loop direct kinematics algorithm[J]. *Robotics*, 1999, 17(4):437-445.
- [5] 张顺心,宋开峰,范顺成. 基于并联球面机构的太阳跟踪装置研究[J]. 河北工业大学学报, 2003,32(6):44-48.
ZHANG SH X, SONG K F, FAN SH CH, Study on the new two-axes solar tracker based on spherical parallel mechanism[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2003, 32(6):44-48. (in Chinese)
- [6] 叶东,黄庆成,车仁生. 多关节坐标测量机的误差模型[J]. 光学精密工程, 1999,7(2):91-96.
YE D, HUANG Q CH, CHE R SH. A error model for multi-joint coordinate measuring machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(2):91-96. (in Chinese)
- [7] 鲁开讲,牛禄峰,刘亚茹,等. 3-RPS 并联机构奇异位形及工作空间研究[J]. 农业机械学报, 2007,38(5):143-146.
LU K J, NIU L F, LIU Y R, *et al.*. Research on singular configuration and workspace of 3-RPS parallel mechanism[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2007,38(5):143-146. (in Chinese)
- [8] 黄真,赵永生,赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
HUANG ZH, ZHAO Y SH, ZHAO T SH. *Advanced Spatial Mechanism* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [9] 刘善增,余跃庆,佘国宁,等. 三自由度并联机器人的运动学与动力学分析[J]. 机械工程学报, 2009,45(8):11-17.
LIU SH Z, YU Y Q, SI G N, *et al.*. Kinematic and dynamic analysis of a three-degree-of-freedom parallel manipulator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009,45(8):11-17. (in Chinese)
- [10] SOKOLOV A, XIROUCHAKIS P. Dynamics analysis of a 3-DOF parallel manipulator with R-P-S joint structure[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2007, 42(5):541-557.
- [11] 易大义,沈云宝,李有法. 计算方法[M]. 浙江:浙江大学出版社, 2004.
YI D Y, SH Y B, LI Y F. *Method of calculation* [M]. Zhejiang: Zhejiang university press, 2004. (in Chinese)

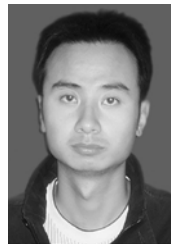
作者简介:



贺新升(1979—),男,河南巩义人,博士,讲师,2006年、2009年于吉林大学分别获得硕士、博士学位,主要从事绿色能源技术、机电设备及其自动化方面的研究。E-mail: hxs7909@126.com



高春甫(1965—),男,吉林公主岭人,博士,教授,2000年于吉林大学获得博士学位,主要从事光伏发电、机电设备及其自动化方面的研究。E-mail: cf-gao2007@zjnu.cn



王彬(1985—),男,甘肃天水人,硕士研究生,2009年于兰州交通大学获得学士学位,主要从事太阳能光伏发电、机械制造方面的研究。E-mail: wb620523@163.com



谢楚雄(1987—),男,湖南娄底人,硕士研究生,2011年于湖南理工学院获得学士学位,主要从事机械电子、机电设备及其自动化方面的研究。E-mail: shehuo168@163.com