

文章编号 1004-924X(2008)12-2544-07

全自动太阳跟踪器的研制和应用

吕文华,贺晓雷,于贺军,李建英

(中国气象局 气象探测中心,北京 100081)

摘要:为了解决太阳辐射观测台站直接辐射表跟踪不准等问题,成功研制了全自动太阳跟踪器。跟踪器具有两种可自行切换的跟踪方式:传感器跟踪方式和太阳运行轨迹跟踪方式。介绍了这两种模式的工作原理,这两种方式自行切换,互相配合,实现了高精度的全天候太阳自动跟踪。经过数月的原理试验和一年半的台站试验,跟踪误差在 $\pm 0.14^\circ$ 内。全自动太阳跟踪器的研制成功,在没有改进辐射传感器的情况下,可提高直接辐射、总辐射的测量准确度;解决了直接辐射表信号线缠绕的难题;实现了直接辐射、日照时数和散射辐射的全自动测量。

关键词:全自动太阳跟踪器;研制;应用

中图分类号:P414.5 **文献标识码:**A

Development of full-automatic solar tracker and its applications

LÜ Wen-hua, HE Xiao-lei, YU He-jun, LI Jian-ying

(Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to realize accurate tracking the sun by a pyrheliometer, a full-automatic solar tracker has been developed. The tracker has two tracking modes, one is to calculate the sun moving and the other is to control the solar displacement. This paper introduces the principle of two tracking modes, and realizes the high-precision automatic sun tracking of all weather by switching automatically and cooperation with each other. The track error is within the rang of $\pm 0.14^\circ$ on the basis of experiments for 18 months. Putting pyrheliometer and pyrometer on the tracker, it can improve the measurement accuracies of direct radiation and total radiation, which solves signal wire of pyrheliometer intertwist and achieves full-automatic measurements of direct radiation, sunshine duration and diffusive radiation.

Key words: full-automatic solar tracker; development; application

1 引言

太阳辐射的观测是研究太阳辐射的重要手段之一,它对气象和气候预测、国防、航空航天、太阳能利用以及人民生活等具有重要意义。长期以

来,在太阳辐射观测中存在着一个难题,就是如何对太阳实现可靠而准确的跟踪。直接辐射由于观测的是直接来自太阳的入射能量,其观测结果的不确定度对跟踪精度的依赖性最大^[1-2]。当太阳直接辐射表的轴线与太阳光线入射角度偏离时,将使入射到传感器表面的能量降低。世界气象组

收稿日期:2008-09-27;修订日期:2008-11-12.

基金项目:国家科技部科研院所开发研究资助项目(No. 2003EG137177)

织世界气候研究计划(WCRR)对地面辐射基准站网(BSRN)和少数国家已使用了高精度的太阳辐射传感器和太阳跟踪器,但是,目前世界多数国家仍采用简单的单轴跟踪装置作为太阳直接辐射的跟踪设备。

上世纪 90 年代初期,气象台站的辐射测量仪器全部换型,启用我国自行研制开发的遥测太阳辐射测量仪器,直接辐射也从人工改为半自动单轴跟踪太阳。直接辐射测量,由于太阳自动跟踪装置存在的问题,经常出现缺测、误测等现象,有些台站还因跟踪器的故障而多日不能观测,只能用理论计算来代替观测值,使得观测结果不具备客观性。本项目组针对辐射观测台站直接辐射表跟踪不准等问题,经过几年的研究和实验,成功地研制出全自动太阳跟踪器,该系统具有全自动、全天候、跟踪精度高、不绕线等优点,在没有改进辐射传感器的情况下,通过使用全自动太阳跟踪器,能够提高太阳辐射观测的准确度,并大大减轻观测人员的劳动强度。

2 全自动太阳跟踪器原理和结构

2.1 原理

全自动太阳跟踪器具有两种可自行切换的跟踪方式:传感器跟踪方式和太阳运行轨迹跟踪方式。传感器跟踪方式是通过光电转换器实时采样,计算机分析比较太阳光强的变化,从而驱动机械机构实现太阳跟踪的方式。太阳运行轨迹跟踪方式是根据当地的地理位置和时间来确定太阳的位置进行跟踪太阳。在本系统里,这两种方式自行切换,互相配合,实现了高精度的全天候太阳的自动跟踪。全自动太阳跟踪器系统原理框图如图 1 所示。

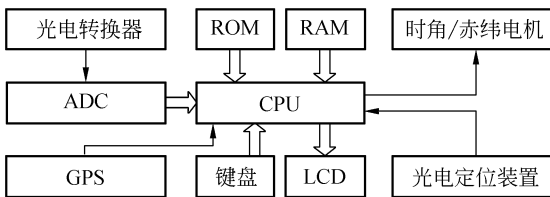


图 1 全自动太阳跟踪器系统原理图

Fig. 1 System schematic diagram of full-automatic solar tracker

当太阳辐照度较强时用光电传感器进行跟踪,当太阳光线弱时,则根据太阳运行轨迹时间函数确定太阳的位置。

2.1.1 太阳运行轨迹跟踪方式

在天文学上,太阳相对地球上某一点的视位置是可以近似计算的,太阳运行轨迹跟踪模式就是根据当地的经纬度坐标和时刻来确定太阳的位置进而进行太阳跟踪的一种控制方式。一般在太阳辐照度较低,传感器跟踪模式难以响应太阳位置的变化时采用此种方法。

太阳方位角和高度角的计算是基于天球模型实现的。假设以观察者的眼睛为球心,做一个无穷大的正球体,将所有天体包括太阳投影到天球的球面上,这个假象的球体就称为天球^[3-5]。这样,天体的具体位置就可以由其在天球上的投影所描述。如图 2 所示。

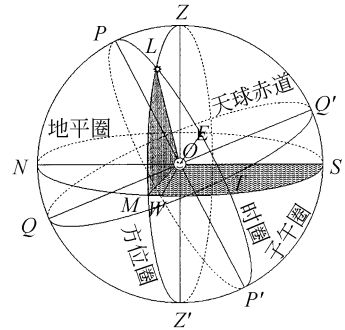


图 2 天球模型

Fig. 2 Celestial sphere model

在图 2 中,O 点是观测地点,L 点是太阳位置。因此,PLZO 构成了一个球面三角形。图中: $H = \angle MOL$, $A = \angle SOM$, H 为太阳高度角, A 为太阳方位角。

根据球面三角形定理,球面三角形边的余弦等于其他两边余弦的乘积,加上该两边正弦与其夹角余弦的乘积。即有:

$$\sin(\angle TOL)\sin(\angle PON) + \cos(\angle TOL)\cos(\angle PON)\cos(\angle LPZ) \quad (1)$$

根据前面的说明,可以知道,∠TOL 是太阳的赤纬,用 δ 表示,∠PON 是观测地点的地理纬度,用 lat 表示,∠LPZ 是太阳当前所处的时角,通常用 τ 表示。因此,得到太阳高度角与太阳赤纬、时角和观测地点的纬度关系的表达式:

$$\sin H = \sin(\text{lat}) \sin(\angle \delta) + \cos(\angle \text{lat}) \cos \delta \cos \tau, \quad (2)$$

同样,根据球面三角形定理有:球面三角形的正弦和其对角的正弦成正比,则:

$$\frac{\cos H}{\sin \tau} = \frac{\cos \delta}{\sin(\angle LZQ')}. \quad (3)$$

由前面的介绍可见, $\angle LZQ'$ 就是太阳的方位角,通常用 A 表示。由此,可以得到太阳方位角 A 与高度角 H , 赤纬 δ 以及时角 τ 的关系如下:

$$\sin A = \frac{\cos \delta \sin \tau}{\cos H}. \quad (4)$$

可见,只要确定了观测地点的时角 τ 、赤纬 δ 、地理纬度 lat , 就可以求解出观测时刻该点的太阳高度角和方位角。

2.1.2 传感器跟踪方式

传感器跟踪方式主要由太阳位移探测装置和机械驱动部分组成^[6]。太阳位移探测装置包括传感器和测量电路两个部分,如图 3 所示。

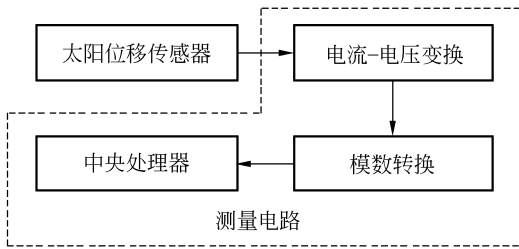


图 3 太阳位移探测装置示意图

Fig. 3 Sketch map of solar displacement detector

传感器主要是将跟踪器与太阳的角偏差转换为电信号,测量电路的主要功能是对传感器的输出信号进行测量和处理,来判定偏差状态。

探测装置的基本探测原理是通过类似于太阳直接辐射表准直光筒的机械结构获取太阳直射光线在四象限光伏探测器上形成的圆形光斑,再根据由于太阳的运动引起的光斑在四象限光伏探测器上的位置变化来判断太阳的位置变化。传感器的结构如图 4 所示。

采用四象限方式判断太阳位置变化的原理示意图 5。

A、B、C、D 4 个区域分别是 4 个光伏探测器。中心填充部分为太阳直射光线形成的光斑。当传感器对准太阳时,光斑位于 4 个光伏探测器所构成的平面中心,即在 4 个光伏探测器上形成均匀分布^[5]。当太阳移动时,光斑将在 4 个光伏探测

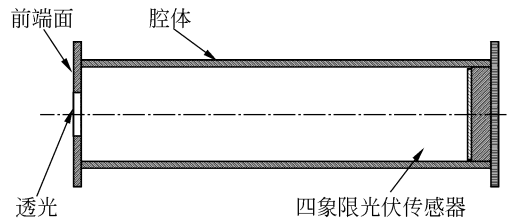


图 4 传感器的结构

Fig. 4 Sense configuration

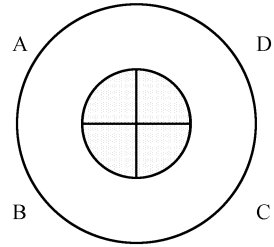


图 5 四象限定位原理示意图

Fig. 5 Sketch map of four quadrant locating

器所构成的平面上移动,从而造成光照面积在 4 个光伏探测器上的分布情况发生变化,从而使 4 个光伏探测器的输出信号发生变化。根据信号的变化情况,即可以判断光斑的移动情况,进而确定太阳位置的移动。

随着太阳视位置的变化,准直筒底部的准直传感器接收到的太阳光线会有变化,传感器跟踪模式就是通过准直传感器把太阳光线的变化转化为电流的相应变化,单片微控制器分析比较光线的这种变化,进而控制机械机构动作来实现自动太阳跟踪的一种方式。

2.2 结构

全天候的太阳跟踪器具有两个相互垂直的轴,即时角轴和赤纬轴。准直筒与赤纬轴垂直安装,光电转换器安装在准直筒的底部。时角轴带动准直筒实现方位角的改变,赤纬轴带动准直筒实现仰角的改变^[7]。这两部分均由步进电机和减速机构构成,方位角和仰角的正交运动的合成实现了对太阳的跟踪。太阳跟踪器外观如图 6 所示。

全自动太阳跟踪器具有两种可自行切换的跟踪方式:传感器定位和太阳运行轨迹定位。传感器定位是通过光电转换器实时采样,计算机分析比较太阳光强的变化,从而驱动机械机构实现



图 6 全自动跟踪器外观图

Fig. 6 Outside drawing of full-automatic solar tracker

太阳跟踪的方式。太阳运行轨迹定位是根据当地的地理位置和时间来确定太阳的位置。这两种方式自行切换,互相配合,实现了高精度的全天候太阳的自动跟踪。

2.3 主要功能

2.3.1 系统初始化

系统初始化主要完成两个功能:系统的资源配置和机械机构基准位置的搜索^[8]。确定机械机构的基准位置是十分必要的,在系统运行过程中,偶尔的掉电是可能的,系统再加电时会因无法确定当前的机械位置而产生严重的错误;另外,日落后系统需要按原路线返回至基准位置,以避免电缆的缠绕和减小因机械机构的加工精度而产生的误差累积,这也要求系统必须有一个可以确定的基准位置。这一过程是通过光电定位技术来实现的。

2.3.2 太阳运行轨迹跟踪方式

在天文学上,太阳的观测位置是可以根据当地的地理位置和时间来确定的。GPS(全球定位系统)在本系统的应用保证了系统定位和授时的高准确性和高可靠性,提高了系统的通用性,使本系统可以全天候地在任何地点可靠工作,而不需要人工的干预。另外,这个模块还完成日出时间和日落时间的计算。日出前,准直筒需要按照一定的运行轨迹到达预定的位置等待日出;日落后,准直筒又需要按原路线返回到机械基准位置,以避免电缆的缠绕问题。

2.3.3 传感器跟踪方式模块

在这种方式里,光电转换器是敏感元件,太阳光强的变化引起光电转换器输出电信号的变化,这一信号经过模数转换器转换成数字信号,并被

计算机所识别,计算机及时响应这一变化,并根据分析判断的结果驱动时角电机或赤纬电机改变其位置,从而调整准直筒的方向,使光电转换器重新达到平衡。如此往复,构成一个信号反馈调节系统。

2.3.4 跟踪方式切换

阴天时,太阳辐照度较弱(而散射光相对会强些),光电转换器很难响应光线的变化,系统必须自行切换到太阳运行轨迹跟踪方式。晴天时,太阳辐照度较强,光电转换器能很好地响应光线的变化,系统会自行切换到传感器跟踪方式,以便实现更高精度的太阳跟踪。

在系统实际运行中,按照天文学计算的太阳位置和实际的机械机构的位置是存在误差的,这将致使在两种跟踪方式切换时可能会出现跳动。由于机械机构的加工工艺限制以及算法本身的误差等因素的影响,这个误差很难避免。因此,在太阳辐照度足够强,仪器跟踪角度误差足够小的情况下,系统将自动进行机械机构位置 and 实际太阳运行轨迹的校正,以平滑这两种跟踪方式间的跳动,从而实现了两种方式的无缝隙衔接。

2.3.5 键盘显示

这个模块提供人机交互接口,完成系统的功能设置和系统信息的输出。可显示:日期、时间、当天的日出时间、日落时间,当时的太阳高度角、方位角及太阳传感器的参数。

3 实验结果

在辐射观测台站试验时,每天记录两次传感器光点的位置。传感器前端有直径为 1.5 mm 光孔,传感器的后端安装了一个圆形光靶,直径为 2 mm。二者严格同心,间距为 103 mm。当传感器正对太阳时,太阳光穿过光孔,在光靶中心形成一个圆形光斑,直径为 1.5 mm。当传感器偏离太阳时,光斑会在光靶上移动,偏离光靶中心。测量光斑偏离光靶中心的距离,可计算出跟踪太阳的误差。经过数月原理试验和一年半台站试验(2007-02-08~2008-08-31日在北京市观象台观测试验),光斑与光靶始终处于内含或内切关系,从未出现相交甚至外离状态,证明了全自动太阳跟踪器跟踪误差在 $\pm 0.14^\circ$ 内。其计算方式如下:

如图 7 所示,两同心圆的内圆是靶点,外圆

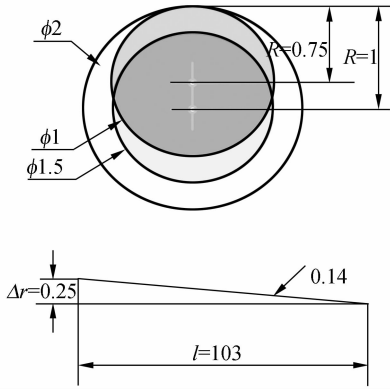


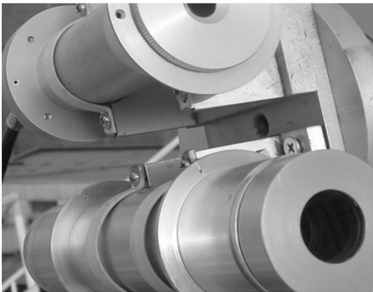
图 7 跟踪最大偏差计算示意图

Fig. 7 Sketch map of max tracking deviation calculation

是光点,两半径分别为 $R=0.75$ 和 $R=1$,当两圆重合时两圆心距为 0 mm,跟踪误差为 0° ,当两圆偏离到相切时,跟踪偏差最大。按照最大值两圆相切的位置计算,得到最大偏差。两圆相切时两中心距离为 0.25 mm;光筒深度为 103 mm,则:

$$\tan^{-1}(0.25/103)=0.14^\circ. \quad (5)$$

经过一年半的辐射台站观测试验,实际上传感器的光点从未偏离到光点和靶点相切的位置。跟踪误差在 $\pm 0.14^\circ$ 内,跟踪效果如图 8 所示。



(a)跟踪图 1

(a) Tracking Fig. 1



(b)跟踪图 2

(b) Tracking Fig. 2

图 8 全自动太阳跟踪器的跟踪效果

Fig. 8 Tracking results of full-automatic solar tracker

4 主要应用

利用传感器反馈信号和太阳运行轨迹相结合控制的全自动太阳跟踪器已研制成功,可广泛应用于气象辐射测量中。在图 6 所示的全自动太阳跟踪器的基础上,研制出了高精度太阳辐射测量系统(如图 9 所示)。其主要应用如下:



图 9 高精度太阳辐射测量系统

Fig. 9 High accuracy measurement system for solar radiation

4.1 直接辐射的测量

目前,我国太阳辐射观测中广泛采用赤道架型单轴自动太阳跟踪装置。在观测时,首先必须按照当地的纬度调整好仪器,再按当日的太阳赤纬角度来对准太阳。但由于赤纬角的变化,所以每天需要检查调整赤纬角,以便能进行连续观测。由于机械加工精度和仪器安装带来的影响,加之这种装置本身固有的误差——即地球围绕太阳做椭圆轨道运动,其运动速度也不均匀,而这种装置只能实现方位角的匀角速度改变,这样势必造成装置跟踪精度不高。另外,还存在难以解决的绕线问题,即使在跟踪架上增加导电环,解决了直接辐射表输出线的缠线问题,但是容易引起接触不良,若密封不好,进入灰尘会影响直接辐射测量准确度。将直接辐射表安装在全天候自动太阳跟踪器上,可自动连续地观测直接太阳辐射,不需要人工干预,并解决了长期以来困扰的缠线问题,太阳跟踪的精度可由原来的 1° 提高到 0.14° 。

4.2 散射辐射的自动测量

在这种全天候自动太阳跟踪器上安装遮光装置,将总辐射表安装在遮光装置下,能够对散射辐射进行自动测量,并代替现在台站使用的遮光环装置,避免了人工调整和计算散射时的遮光系数

的订正,实现了太阳散射辐射的自动观测,并提高了观测准确度。

4.3 总辐射的准确测量

将总辐射表安装在全天候自动太阳跟踪器上,可使太阳光线入射固定在总辐射表的一个方位上,只是在高度上有变化(一般在 $0\sim 90^\circ$ 范围内)。为此,可按照这样的入射光线确定好方位,在实验室内,检测出仪器的余弦响应曲线进行修正,从而可以大大提高总辐射测量的准确度。特别是在低太阳高度时,如太阳高度 10° 时,可造成 15% 以上的误差,利用此装置,就可将这一固定误差消除掉。目前台站使用的总辐射表水平固定放置,太阳光线一年四季的变化,使得照射在总辐射表上的轨迹是一条有 $\pm 23.5^\circ$ 的宽带轨迹,利用这种方法,余弦响应误差造成的测量不准确无法进行修正的难题得以解决。

4.4 大气长波辐射的准确测量

将长波辐射表安装在自动太阳跟踪器上,利用遮光装置遮住太阳,这样可消除由于太阳光照射到长波辐射表的硅罩上所造成约 10% 的误差,从而提高大气长波辐射的测量准确度。

4.5 日照时数的准确测量

世界气象组织将太阳直接辐射 $\geq 120 \text{ W/m}^2$ 定为日照阈值。将直接辐射表安装在全天候自动太阳跟踪器上,记录下 $\geq 120 \text{ W/m}^2$ 的时间累积作为每小时的日照时数和每天的日照时数。由于

全天候、全自动和准确地跟踪太阳,使得日照时数的自动测量成为可能。这套装置还可作为日照时数的标准,以填补我国日照时数自动测量的空白。

4.6 其它应用

另外,这种全天候自动太阳跟踪器还可应用到直接辐射表的检定、比对、太阳能电池的标定及太阳能利用的科研和业务工作中。为此,全天候自动太阳跟踪器的研制成功,对太阳辐射的自动观测和提高测量准确度具有重要意义。

5 结 论

全自动太阳跟踪系统具有全自动、全天候、高精度的突出优点。该系统是一套计算机控制的光、机、电一体化的自动太阳跟踪系统,具有太阳运行轨迹跟踪方式和传感器跟踪方式两种可自行平滑切换的工作模式。经过数月的原理试验和一年半辐射观测台站试验,跟踪误差在 $\pm 0.14^\circ$ 内。

全自动太阳跟踪器的研制成功,使各项太阳辐射测量准确度都有了不同的提高。该系统设计合理,技术先进,性能稳定可靠,功能强,彻底改变了目前太阳辐射观测的技术现状,显著提高了太阳辐射的整体技术水平和数据质量。若能推广全国辐射站业务使用,将彻底解决目前我国辐射观测领域的众多难题。

参考文献:

- [1] 中国气象局. 气象辐射观测方法[M]. 北京:气象出版社, 1996.
China Meteorological Administration. *Observation Method of Meteorological Radiation*[M]. Beijing: Meteorological Press, 1996. (in Chinese)
- [2] 世界气象组织. 仪器和观测方法指南(WMO-No. 8 1983)[R]. 5 版. 北京:气象出版社, 1992.
World Meteorological Organization. *Guide to Meteorological Instrument and Methods of Observation* (WMO-No. 8 1983)[R]. 5th ed. Beijing: Meteorological Press, 1996. (in Chinese)
- [3] 吉林省建筑设计院. 建筑日照设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1979.
Jilin Construction Design Institute. *Design of Buildings Insolation* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1979. (in Chinese)
- [4] 王家骥, 金光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2):105-116.
WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):105-116. (in Chinese)
- [5] 贺晓雷, 吕文华, 李建英, 等. 一种用于太阳被动跟踪的光电角偏差探测装置[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(8 增)IV: 234-239.
HE X L, LV W H, LI J Y, et al.. An effective photo angle bias detector for passive solar tracking[J]. *Chinese*

Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(8)IV: 234-239. (in Chinese)

- [6] 贺晓雷, 于贺军, 李建英, 等. 太阳方位角的公式求解及其应用[J]. 太阳能学报, 2008, 29(1): 69-73.
HE X L, YU H J, LI J Y, *et al.*. An engineering formula solution for the solar azimuth and its application [J].
Acta Energiae Solaris Sinica, 2008, 29(1): 69- 73. (in Chinese)
- [7] 李建英, 吕文华, 贺晓雷, 等. 一种智能型全自动太阳跟踪装置的机械设计[J]. 太阳能学报, 2003, 24(3): 330-333.
LI J Y, LV W H, HE X L, *et al.*. Mechanism Design of an Intelligence Automatic Solar Tracker[J]. *Acta Ener-*
giae Solaris Sinica, 2003, 24(3): 330 -333. (in Chinese)
- [8] 于贺军, 吕文华. 全自动太阳跟踪器的软件设计研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2001(2): 7-11.
YU H Y, LV W H. Software Research of Automatic Solar Tracker[J]. *Meteorological Hydrological and Marine*
Instruments, 2001(2): 7-11. (in Chinese)

作者简介: 吕文华(1956—), 男, 河北武邑人, 高级工程师, 主要从事测量仪器与计量技术的研究。E-mail: lwhaoc@cma.gov.cn

贺晓雷(1971—), 男, 硕士, 辽宁凌源人, 高级工程师, 主要从事测量仪器与计量技术的研究。E-mail: hxlaoc@cma.gov.cn

于贺军(1972—), 男, 硕士, 河北永清人, 高级工程师, 主要从事测量仪器与计量技术的研究。E-mail: yhjaoc@cma.gov.cn

李建英(1964—), 女, 北京顺义人, 高级工程师, 主要从事测量仪器与计量技术的研究。E-mail: ljyaoc@cma.gov.cn

(本栏目编辑 严寒)

●下期预告

适用于星敏感器预测未知恒星星像质心的算法

李葆华, 马衍宇, 刘 睿, 王常虹

(哈尔滨工业大学 空间控制与惯性技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

提出了一种自主预测视场内未知恒星星像中心的算法。该算法提取视场内已知恒星星像坐标时采用星跟踪算法。根据已知恒星信息从主星表中搜索视场内所有未知恒星, 并采用这些信息预测所有未知恒星的理想像平面中心, 在以这些预测的理想坐标为中心的范围内提取相应的实际星像坐标。同时采用已知恒星来验证未知恒星星像坐标。最后, 对该算法进行了外场观星测试。实验结果表明: 该方法提取未知恒星星像坐标时扫描星图的像元只有局部提取星像算法的 0.12%, 进一步提高了数据更新率。