

一种基于全站仪的大型碟式太阳能双轴跟踪装置轴线测量方法

余佳焕¹, 彭佑多¹, 颜 健¹, 谭新华²

(1. 湖南科技大学机械健康维护省重点实验室, 湘潭 411201; 2. 湘电集团太阳能事业部, 湘潭 411101)

摘 要: 提出一种基于全站仪的碟式太阳能发电系统双轴跟踪装置轴线测量方法, 通过利用全站仪对安装在立柱与热机支撑桁架处的目标棱镜进行跟踪测量, 获得不同时刻棱镜分别绕高度角和方位角轴线旋转的三维坐标; 采用基于最小二乘法的空间圆拟合方法, 直接解算空间圆的圆心坐标以及所在平面法向量, 从而计算出双轴跟踪装置轴线相对位置关系。现场测量结果表明, 基于全站仪的大型碟式太阳能双轴跟踪装置轴线测量方法操作简单, 结果处理快捷、精度高。

关键词: 全站仪; 双轴跟踪装置; 最小二乘法; 空间圆拟合; 轴线测量

中图分类号: TK513.4

文献标识码: A

0 引 言

碟式太阳能热发电系统通过采用双轴跟踪技术对太阳位置进行实时跟踪大幅提高了系统的太阳能利用率。双轴跟踪装置能够依照太阳的运动规律作相应机械运动, 使太阳光收集器的采光面始终对准太阳^[1]。目前, 针对双轴跟踪装置国内外学者开展了研究, 王林军等^[2,3]及邵 磊^[4]分析了碟式太阳能自动跟踪装置各部分(包括控制部分、传动部分和其他部分)误差产生的原因, 并结合大气扩散模型 ADMS(机械系统动力学仿真软件)与 ANSYS(有限元分析软件)综合分析机械传动机构对碟式太阳能自动跟踪系统造成的误差, 整体评估系统工作性能; 文献[5,6]对实现双轴太阳跟踪器运动的控制方法进行了研究; 周平旺等^[7]分析了跟踪系统在制造或安装过程中可能引起的轴线偏差类型, 并采用 Matlab 模拟计算出不同轴系偏差对跟踪精度的影响变化规律。综合上述研究可发现, 要实现太阳精确跟踪, 一方面需要跟踪控制方法准确, 另一方面需要跟踪装置机械传动部分的精度来保证^[7]。但不论采用何种形式的控制方法, 实际操作中存在的机械加工和组装以及现场安装引起的

机械传动误差都远大于控制算法误差^[8], 机械传动误差的存在将导致双轴跟踪装置轴线位置产生偏移并影响系统的跟踪精度。因此有必要寻求一种既经济可行又满足精度要求的轴线位置测量方法。针对碟式太阳能热发电系统项目中双轴跟踪装置轴线测量的需要, 本文提出一种利用全站仪配合反射棱镜测量双轴跟踪装置轴线位置的方法, 并将测量的数据结果进行空间圆拟合, 分别计算出系统绕高度角和方位角运行时的圆心坐标以及两轴线之间的相对位置关系, 测量结果可为碟式太阳能热发电系统的设计、安装和校准提供依据。

1 双轴跟踪装置空间轴线

项目所研制的碟式太阳能发电系统为单碟结构形式, 聚光器直径达 17.7 m, 焦半径为 9.49 m, 总采光面积为 225 m², 总质量达 23.06 t^[9]。图 1 为系统所采用的双轴跟踪装置, 主要由方位角驱动回转机构和高度角传动机构组成, 2 个机构有独立的驱动系统及传动系统, 其中方位角跟踪是以蜗轮为目标执行件, 实现机架可动部分绕轴线方位轴 D 的旋转功能。而高度角跟踪是以螺旋升降机的丝杆为目标执行件(图 1 中 A 、 B 指丝杆运动轴线), 通过改

收稿日期: 2016-01-06

基金项目: 湖南省高校产学研基金(11CY020); 湖南省科技计划(2012FJ6121); 湖南科技大学研究生创新基金(S140018)

通信作者: 彭佑多(1964—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事机械系统振动及新能源技术等方面的研究。ydpeng1964@163.com

变丝杆长度 L (单位 mm) 来实现机架可动部分绕轴线高度轴 C 的旋转功能。理想情况下, 碟式太阳能发电系统双轴跟踪装置空间轴线位置关系为: 方位角轴线 D 垂直于水平面, 高度角轴线 C 平行于水平面, 两轴线的交点即系统的轴心位置。工作时, 双轴驱动装置可根据太阳位置绕方位角轴转动改变方位角, 绕高度角轴线做俯仰运动改变高度角, 从而使聚光器的轴线始终对准太阳光线, 保证会聚后的焦点光斑位于斯特林热机吸热腔口内。太阳可视时间内方位角 α 运动幅值为 180° , 高度角 β 也在 $0^\circ \sim 90^\circ \sim 0^\circ$ 区间^[10]。然而, 实际工程中却很难达到如此精确, 因为在实际中不可避免地存在有机械加工、组装以及现场安装上的误差, 使得双轴跟踪装置的实际轴线位置产生偏差, 当回转轴偏离理想位置就会很难实现理论上的精确跟踪。因此, 为了便于设备的加工制造、安装调试以及后续分析轴线偏差对跟踪精度的影响提供理论依据, 有必要对碟式太阳能发电系统双轴跟踪装置的轴线位置进行现场测量, 并判断出系统安装后两轴线的空间相对位置关系。

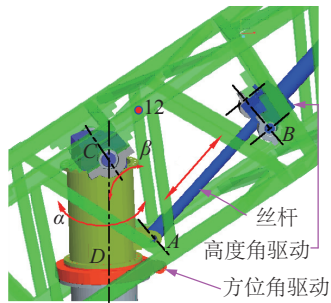


图1 高度角-方位角双轴驱动装置

Fig. 1 Two-axis tracking device

2 轴线测量方法

2.1 测量方案设计

双轴跟踪装置轴线测量采用的主要设备为徕卡 TS30 全站仪 (含 360° 反射棱镜), 全站仪在大型空间构件的安装检测中应用广泛, 具有测量范围大、单台仪器设备简单、对环境要求低等优点, 通过测量 1 个斜距和 2 个角度, 直接计算得到测点的三维坐标。该设备的测量距离可达 1500 m, 测角精度为 $0.5''$, 测距精度 1 mm。为了便于现场测量及项目后期实验监测, 在安装场地周围提前布

设有 3 个测量墩 Station A~C, 构成高精度的测量控制网, 同时在轴线测量开始之前对观测墩做了导线控制测量, 目的是将测量数据统一到同一个坐标系, 控制测量完成后再对双轴跟踪装置轴线进行测量。

碟式太阳能发电系统运行过程中, 总是按照设计好的运动方式追踪太阳, 其运动轨迹可分解为绕高度角和方位角轴线的旋转运动。本文将按照分解后的运动轨迹分别对双轴驱动装置轴线位置进行测量, 具体测量方案如图 2 所示。图中, 在碟式太阳能发电系统的立柱与桁架联接处固定有 360° 反射棱镜 (即上图 1 中点 12 代表位置), 利用安装在观测墩上的 TS30 全站仪对该目标棱镜进行跟踪测量, 在 Station A 上建立观测直角坐标系, X 、 Y 、 Z 分别为其坐标轴, 测量方位角轴线时, 保持系统高度角不变, 驱动碟式太阳能发电系统沿方位角运动, 方位角每旋转一定角度测量一次目标棱镜, 所采集到的数据为目标棱镜绕方位角轴线旋转时形成的一系列空间点坐标; 同理, 测量高度角轴线时, 保持系统方位角不变, 驱动碟式太阳能发电系统沿高度角转动, 也可获得一系列空间点坐标, 再分别将 2 组测量数据按照最小二乘法进行空间圆拟合, 解算出空间圆圆心坐标和所在平面法向量, 则沿该空间平面法向量并过空间圆圆心的直线即为双轴跟踪装置轴线。

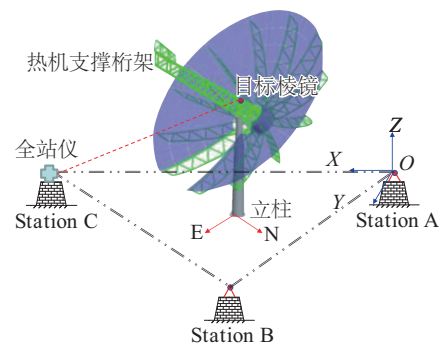
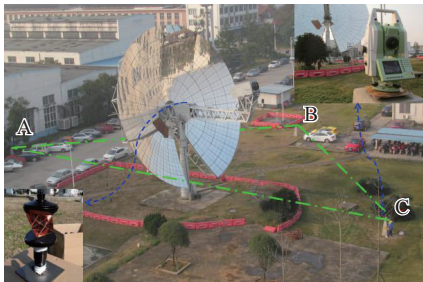


图2 双轴跟踪装置轴线测量方案

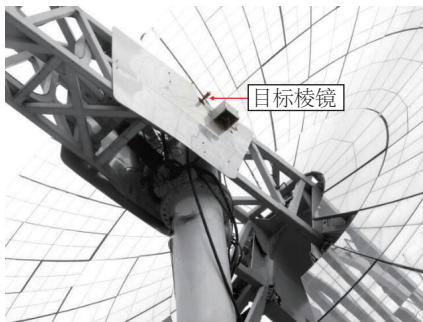
Fig. 2 Axis measurement scheme

2.2 轴线拟合计算方法

双轴跟踪装置的轴线拟合原理如图 3 所示。图中, T_i 为目标棱镜绕高度角轴线等角度旋转时所形成的运动轨迹坐标点, T_i 为目标棱镜绕方位角轴线等角度旋转时所形成的运动轨迹坐标点。 P_1 、 P_2



a. 碟式太阳能双轴跟踪系统现场测量图



b. 现场棱镜安装位置图

图4 碟式太阳能双轴跟踪轴线测量现场图

Fig. 4 Field axis measurement of the dish solar system

表1 方位角轴线测量时目标棱镜坐标

Table 1 Prism coordinates when measured the azimuth axis

点号	方位角/ (°)	高度角/ (°)	坐标值/m		
			X	Y	Z
1	36.805	15.766	1034.4964	1001.0645	20.6338
2	33.301	15.766	1034.4716	1001.0308	20.6345
3	30.169	15.766	1034.4484	1001.0033	20.6349
4	27.005	15.766	1034.4229	1000.9742	20.6354
5	24.204	15.766	1034.3993	1000.9506	20.6356
6	20.842	15.766	1034.3699	1000.9244	20.6361
7	17.996	15.766	1034.3432	1000.9029	20.6364
8	14.920	15.766	1034.3134	1000.8813	20.6367
9	12.019	15.766	1034.2842	1000.8624	20.6370
10	9.086	15.766	1034.2542	1000.8409	20.6373
11	6.087	15.766	1034.2221	1000.8288	20.6376
12	3.032	15.766	1034.1893	1000.8141	20.6381
(13)	42.244	15.766	1034.5296	1001.1206	20.6332

注:表中点号(13)为方位角轴线测量时的最后一次测量数据,后同。

将表1数据拟合后得到平面 P_1 方程为:

$-0.0033x - 0.0118y - z + 636.3731 = 0$ (12)

球壳拟合得到空间圆圆心 O_1 坐标 $(x_1, y_1, z_1) = (1033.9232, 1001.4499, 20.6313)$, 半径 $R_1 = 690.0807\text{ mm}$ 。

方位角轴线测量完毕后,保持该方位角不变,开始对高度角轴线进行测量,为了提高拟合精度,将方位角最后测量点(13)作为高度角轴线测量的起始点,现场采集的数据如表2所示。

表2 高度角轴线测量时目标棱镜坐标

Table 2 Prism coordinates when measured the elevation axis

点号	方位角/ (°)	高度角/ (°)	坐标值/m		
			X	Y	Z
(13)	42.244	15.766	1034.5296	1001.1206	20.6332
1	42.277	18.084	1034.5218	1001.1149	20.6448
2	42.277	21.094	1034.5116	1001.1070	20.6598
3	42.277	24.160	1034.5001	1001.0987	20.6735
4	42.277	27.115	1034.4885	1001.0901	20.6864
5	42.277	30.125	1034.4763	1001.0813	20.6988
6	42.277	33.125	1034.4634	1001.0718	20.7104
7	42.277	36.124	1034.4501	1001.0622	20.7210
8	42.288	39.091	1034.4366	1001.0522	20.7307
9	42.288	42.090	1034.4226	1001.0419	20.7396
10	42.288	45.144	1034.4078	1001.0310	20.7478
11	42.288	48.133	1034.3931	1001.0202	20.7548
12	42.299	51.121	1034.3780	1001.0094	20.7610
13	42.299	53.132	1034.3679	1001.0015	20.7644
14	42.299	55.142	1034.3574	1000.9941	20.7676

在对高度角轴线进行测量时,方位角驱动机构并未工作,表2中所显示方位角偏差产生的原因可能来源于机械传动部分的误差以及测量现场的随机风载荷。进行数据处理时,可先选择按所有数据点进行拟合,计算出两轴线的位置关系,再对测量结果进行精度分析,将测量数据中的粗大误差剔除,同时选择表2中方位角未变动的一组数据重新校核计算,从而获得最佳的拟合结果。具体操作如下:首先,对高度角所有测量点拟合得到平面 P_2 方程为:

$9.1491x - 13.5029y - z - 2569.1640 = 0$ (13)

球壳拟合得到空间圆圆心 O_2 坐标 $(x_2, y_2, z_2) = (1034.276, 1000.9672, 20.4010)$,半径 $R_2 = 376.3960\text{ mm}$,拟合后测量点与两空间圆的位置关系如图5所示。

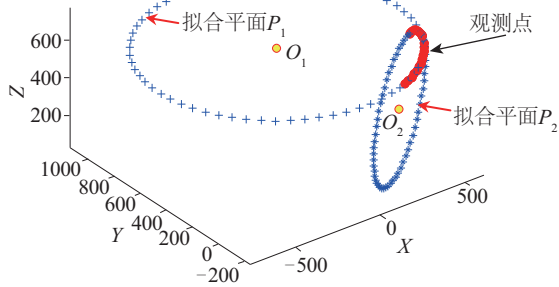


图5 测量点以及两空间圆的位置关系(mm)

Fig. 5 The position of the point and two space circle(mm)

两轴线之间的夹角(θ)以及距离计算可由式(14)和式(15)得:

$$\cos \theta = \frac{N_1 \cdot N_2}{|N_1| |N_2|} \quad (14)$$

$$d = \frac{\begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \end{vmatrix}}{\sqrt{\begin{vmatrix} B_1 & C_1 \\ B_2 & C_2 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} C_1 & A_1 \\ C_2 & A_2 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix}^2}} \quad (15)$$

式中, $O_i = (x_i, y_i, z_i)$, $N_i = (A_i, B_i, C_i)$, $i = 1, 2$ 分别表示两空间圆圆心坐标和所在空间平面法向量。首次计算两轴线之间的夹角 $\theta = 86.036^\circ$, 空间距离 $d = 25.4857 \text{ mm}$ 。

3.2 测量结果精度分析

平面拟合的残差可用测量点到拟合平面的距离 Δd_i 来表示^[13]:

$$\Delta d_i = \frac{Ax_i + By_i + Cz_i + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (16)$$

拟合圆的残差可以用测量点到圆心距离与半径的差值 Δr_i 来表示:

$$\Delta r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} - r \quad (17)$$

方位角和高度角拟合精度分别如图6和图7所示。由图6和图7可知, 测量点的平面拟合精度范围都控制在1 mm以内, 但方位角轴线拟合时, 10号点的拟合圆残差较大, 为3.126 mm, 明显高于其余点, 校核时将10号点剔除, 同时高度角轴线拟合选用方位角数据稳定的1~7号点进行计算, 再次计算结果为: $\theta = 89.318^\circ$, $d = 25.3997 \text{ mm}$ 。与首次计算结果对比不难看出: 两轴线之间的距

离基本一致, 但夹角变化较大, 选用数据稳定的点拟合精度更高。

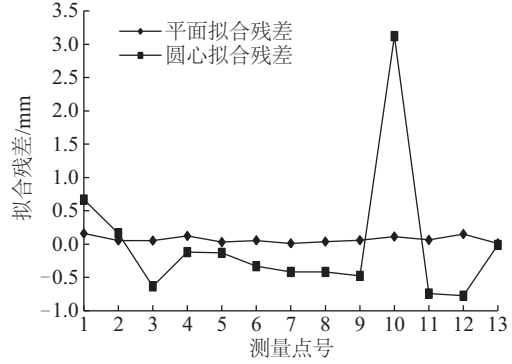


图6 方位角平面拟合残差及圆心拟合残差

Fig. 6 Plane and circle fitting residual of the azimuth axis

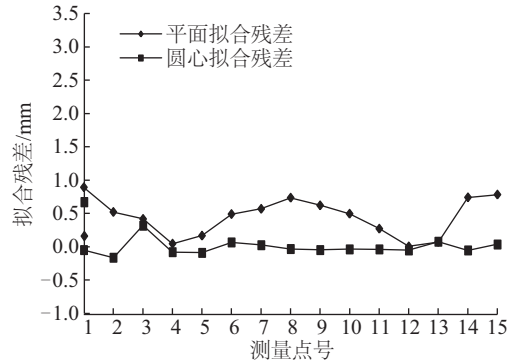


图7 高度角平面拟合残差及圆心拟合残差

Fig. 7 Plane and circle fitting residual of the elevation axis

4 结 论

针对碟式太阳能发电系统项目中双轴跟踪装置轴线测量的需要, 本文从工程实际出发, 提出一种基于全站仪的大型碟式太阳能双轴跟踪装置轴线测量方法, 通过利用全站仪采集目标棱镜的三维坐标, 然后直接在三维空间进行拟合, 计算出两轴线之间相对位置关系。实际操作中, 双轴跟踪装置轴线测量还需注意以下2点:

1) 关于数据采集, 建议测量时在棱镜选型上应尽量采用球形棱镜, 避免在旋转测量时视野被聚光器遮挡, 同时可获得更多的测量数据。

2) 关于数据处理, 由于外部环境和制造、安装带来的影响, 轴线的测量过程中系统的运转可能会导致角度产生偏差影响到结果计算, 建议选择其中测量数据稳定的一组进行拟合。

[参考文献]

- [1] 郑小年, 黄巧燕. 太阳跟踪方法及应用[J]. 能源技术, 2003, 24(4): 149—151.
- [1] Zheng Xiaonian, Huang Qiaoyan. Study on sun-tracking methods and application[J]. Energy Technology, 2003, 24(4): 149—151.
- [2] 王林军, 许立晓, 邵磊, 等. 碟式太阳能自动跟踪系统传动机构的误差分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 63—69.
- [2] Wang Linjun, Xu Lixiao, Shao Lei, et al. Errors analysis of transmission mechanism of dish solar auto-tracking system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(18): 63—69.
- [3] 王林军, 邵磊, 门静, 等. 碟式太阳能自动跟踪系统误差分析[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(1): 249—254.
- [3] Wang Linjun, Shao Lei, Men Jing, et al. Errors analysis of dish solar auto-tracking system[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(1): 249—254.
- [4] 邵磊. 碟式太阳能自动跟踪系统传动机构误差研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [4] Shao Lei. The research of driving mechanism errors of dish solar auto-tracking system[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [5] 郭明华, 孙飞虎, 王智锋, 等. 一般方位—高度跟踪角公式及双轴太阳跟踪器跟踪精度的影响[J]. 太阳能学报, 2013, 34(1): 159—167.
- [6] Chong K K, Tan M H, Range of motion study for two different sun-tracking methods in the application of heliostat field[J]. Solar Energy, 2011, 85(9): 1837—1850.
- [7] 周平旺, 李鹏, 唐自豪, 等. 轴系偏差对双轴太阳跟踪器跟踪精度的影响[J]. 武汉理工大学报, 2014, 36(11): 124—129.
- [7] Zhou Pingwang, Li Peng, Tang Zihao, et al. Axis deviation influence on tracking accuracy of two-axis sun tracker[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(11): 124—129.
- [8] Chong K K, Wang C W. General formula for on-axis sun-tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector[J]. Solar Energy, 2009, 83(3): 298—305.
- [9] 彭佑多, 颜健, 易陈斐, 等. 38 kW级碟式光热发电系统机架结构的承载性能[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2015, 30(1): 29—35.
- [9] Peng Youduo, Yan Jian, Yi Chenfei, et al. Frame bearing capacity mechanism of 38 kW solar dish string power system[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015, 30(1): 29—35.
- [10] 颜健, 彭佑多, 余佳焕, 等. 碟式太阳能光热系统光-机-热多场耦合建模及其聚光性能预测应用[J]. 机械工程学报, 2015, 51(14): 138—151.
- [10] Yan Jian, Peng Youduo, Yu Jiahuan, et al. Research on thermal-structural-optical multi-field coupling modeling and concentrating performance predication of solar dish system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(14): 138—151.
- [11] 谷川, 秦世伟. 圆形隧道端面检测数据拟合新方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(5): 97—101.
- [11] Gu Chuan, Qin Shiwei. A new method for fitting detection data of circular tunnel section[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(5): 97—101.
- [12] 陶本澡, 邱卫宁, 姚宜斌. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [12] Tao Benzao, Qiu Weining, Yao Yibin. Error theory and foundation of surveying adjustment[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.
- [13] 李旭. 空间圆拟合方法在地铁门洞坐标计算中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(3): 177—178.
- [13] Li Xu. The using of spatial circle fitting in tunnel portal coordinates calculating[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2015, 38(3): 177—178.

AN AXIS MEASUREMENT METHOD OF LARGE-SCALE DISH SOLAR TWO-AXIS TRACKING DEVICE BASED ON ELECTRONIC TOTAL STATION

Yu Jiahuan¹, Peng Youduo¹, Yan Jian¹, Tan Xinhua²

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Hunan Electric Group, Solar Energy Group, Xiangtan 411101, China)

Abstract: An axis measurement method of dish solar two-axis tracking system based on electronic total station was proposed, the electronic total station was used to track and measure the target prism mounted on the column and heat engine support trusses, and obtain the three-dimensional coordinates of the prisms rotating around the height angle and the azimuth axis at different moments, respectively; Then the space circle fitting method based on least square method was used to solve the center coordinate of the space circle and the plane normal vector, thereby calculating the relative position of the axis of the biaxial tracking device. The field measurement results showed that the axis measurement method of large-scale dish solar two-axis tracking system based on electronic total station has simple operation, fast results processing, high precision.

Keywords: electronic total station; two-axis tracking device; least square method; spatial circle fitting; axis measurement