

塔式太阳能光热电站控制系统研究

仇韬^{1,✉}, 许燦羚², 王伟¹

(1. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 西安 710075;
2. 中国能源建设集团规划设计有限公司, 北京 100120)

摘要: [目的] 旨在解决塔式太阳能光热电站控制领域的难点问题。[方法] 首先基于太阳位置计算天文算法, 发明了一种高精度, 易于工程实现的定日镜跟踪控制算法; 其次对定日镜场控制系统的主要控制技术进行了研究, 包括系统架构、硬件与软件设计方案、基于图像处理的反馈测量方案; 最后对电站的全厂控制系统进行了整体设计规划并提出了镜场控制系统与DCS主控系统之间的信号接口。[结果] 可大幅度降低工程成本, 缩短建设周期。[结论] 研究成果体系完整、易于工程实现, 可用较低的工程造价满足塔式光热电站控制精度的要求。

关键词: 塔式光热; 追日天文算法; 定日镜跟踪; 镜场控制; DCS; 误差校正

中图分类号: TP273; TK519

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)02-0060-05

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Control System of Tower Concentrated Solar Power Plant

QIU Tao^{1,✉}, XU Canling², WANG Wei¹

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China;
2. China Energy Engineering Group Planning & Engineering Co., Ltd, Beijing 100120, China)

Abstract: [Introduction] In order to solve the control problem of Tower Concentrated Solar Power. [Method] Firstly based on the astronomical algorithms for calculating the position of the sun. Secondly, this article studied the main control technology of solar field control system, including system architecture, hardware and software design, feedback measurement program based on image processing. At last, it made an overall design and planning for the whole plant control system, and proposed a signal interface between solar field control system and DCS. [Result] This article invented a high-precision and easy engineering implementation algorithm for heliostats tracking and controlling, which will reduce engineering cost and shorten the construction period. [Conclusion] The research is structural integrity and easy to be realized, it improves accuracy of heliostats tracking and controlling with a lower cost.

Key words: tower CSP; astronomical algorithm; heliostat tracking; solar field control; DCS; error correction

0 引言

塔式太阳能光热发电站控制系统是整个电站安全高效运行的大脑, 其中定日镜场的控制技术更是整个电站控制的核心环节^[1]。塔式太阳能光热发电站的控制系統具体包括定日镜单体控制^[2]、定日镜场控制^[3]、全厂控制^[4], 其中定日镜单体控制要求满足高精度跟踪控制的同时还要尽可能的降低工程

造价, 此项技术目前仅掌握在少数几家塔式光热电站EPC工程公司手中, 目前国内光热控制技术掌握较好的有北京首航、浙大中控等, 国际上的企业有Brightsource、Abengoa、sener、SolarReserve等。定日镜单体的跟踪控制方式主要有两种, 分别是光电跟踪方式和视日运动轨迹跟踪方式^[5]; 前者是闭环的控制系统, 通过传感器测量太阳的实时位置来实现控制, 后者是开环的控制系统, 通过实时计算当前时刻太阳和支架的相对位置来控制执行机构并利用计算的方法消除控制误差^[6]。本文研究了太阳位置天文计算方法, 开发了具有自主知识产权的定

收稿日期: 2019-12-20 修回日期: 2020-03-30

基金项目: 中国能建工程研究院科技项目“国家标准《塔式太阳能光热发电站设计标准》”(GB/T51307—2018)

日镜法线算法和定日镜反射跟踪算法, 目的是进一步的提高控制精度、降低成本。

1 定日镜控制算法

光热塔式聚热发电技术, 是通过大量定日镜跟踪太阳, 将太阳光线反射至聚光塔聚热加热吸热器进行发电。根据太阳、定日镜、吸热器的空间关系, 定日镜通过计算太阳的变化改变自身角度实现反射光线准确对焦, 入射光线通过定日镜镜面反射, 求得入射光线与反射光线的法线即可计算定日镜的水平角和俯仰角^[9]。

选取任意一个定日镜作为研究对象, 并将太阳光热发电系统中定日镜角度的计算及控制简化为单一定日镜将太阳光反射到聚光靶位中心, 并计算测量太阳位置、定日镜位置、聚光靶位位置。其中定日镜位置和聚光靶位位置可通过高精度经纬仪进行测量(经度、纬度、海拔), 并以定日镜中心位置作为原点, 正东为 X 正向、正南为 Y 正向、正上为在正向建立空间三维坐标系, 其中记定日镜中心为坐标原点 $O(0, 0, 0)$, 靶位中心位置 B 坐标为 (X_B, Y_B, Z_B) 。太阳位置相对于定日镜, 由定日镜经纬度和海拔可由SPA(太阳位置计算方法)计算出相对于定日镜的太阳高度角 SUN_H 、方位角 SUN_A 。

如图1所示, 在以定日镜中心为原点建立空间三维坐标系之后, 以定日镜中心到靶位中心位置的距离 OB 为半径 R 建立辅助球面, 其中:

$$R = \sqrt{X_B^2 + Y_B^2 + Z_B^2} \quad (1)$$

以太阳位置发出光线与辅助球面的交点作为参考

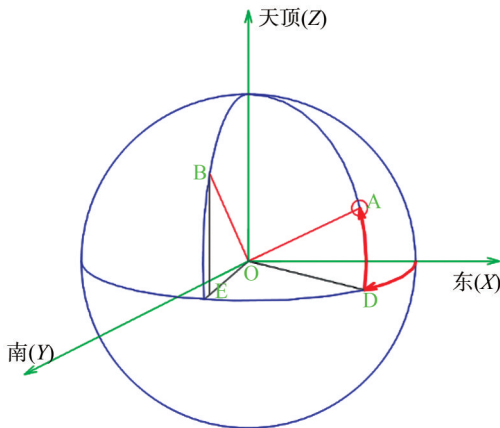


图1 参考坐标系几何示意图

Fig. 1 Geometric diagram of reference coordinate

太阳位置, 相对于定日镜入射光线是等效的。记参考太阳位置为 A , A 点坐标为 (X_A, Y_A, Z_A) , 其中:

$$\begin{aligned} X_A &= R \cos(\text{Sun_A}) \cos(\text{Sun_H}) \\ Y_A &= R \sin(\text{Sun_A}) \cos(\text{Sun_H}) \\ Z_A &= R \sin(\text{Sun_H}) \end{aligned} \quad (2)$$

记聚光靶位中心位置 B 点到参考太阳位置 A 点间中点为 C 点, 可知 \vec{OC} 为 \vec{OA} 和 \vec{OB} 的角平分线, 根据光学反射原理, \vec{OC} 为定日镜镜面法线。

对于任意时刻 t , 有 C 点坐标为 (X_i, Y_i, Z_i) :

$$X_i = \frac{X_B + X_A}{2}, Y_i = \frac{Y_B + Y_A}{2}, Z_i = \frac{Z_B + Z_A}{2} \quad (3)$$

代入式(2)得:

$$\begin{aligned} X_i &= \frac{X_B + R \cos(\text{SUN_A}) \cos(\text{SUN_H})}{2} \\ Y_i &= \frac{Y_B + R \sin(\text{SUN_A}) \cos(\text{SUN_H})}{2} \\ Z_i &= \frac{Z_B + R \sin(\text{SUN_H})}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

其中法线 \vec{OC} 相对于空间球面参考坐标系中的高度角记为 Normal_H 、方位角记为 Normal_A 。

则有:

$$\begin{aligned} \sin(\text{Normal_A}) &= \frac{Y_i}{\left| \vec{OC} \right| \cos(\text{Normal_H})} = \\ &= \frac{Y_i}{\cos(\text{Normal_H}) \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2}} \\ \sin(\text{Normal_H}) &= \frac{Z_i}{\left| \vec{OC} \right|} = \frac{Z_i}{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2}} \end{aligned} \quad (5)$$

可求得:

$$\begin{aligned} \text{Normal_A} &= \\ &= \arcsin\left(\frac{Y_i}{\cos(\text{Normal_H}) \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2}}\right) (X_i > 0) \\ \text{Normal_A} &= 180^\circ - \\ &= \arcsin\left(\frac{Y_i}{\cos(\text{Normal_H}) \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2}}\right) (X_i < 0) \\ \text{Normal_H} &= \arcsin\left(\frac{Z_i}{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2}}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

将式(1)代入式(4), 式(4)代入式(6)可求得定日镜镜面法线向量高度角 Normal_H 、方位角 Normal_A 。

记镜面方位角为 Heliostat_A 、高度角为 Heliostat_H , 根据定日镜镜面与法线的垂直关系, 可得

以下定日镜反射角度计算公式:

$$\text{Heliostat_A} = \text{Normal_A} - 90^\circ$$

$$\text{Heliostat_H} = \text{Normal_H} - 90^\circ \quad (7)$$

建立控制试验台(如图2所示)对以上控制算法进行测试验证,具体测试方法为:通过计算机进行图像采集。选择太阳光线较为强烈的一天,从上午7点至下午4点每隔半小时采集一次光斑的图像。并利用图像处理技术对实际采集的定日镜反射光斑图像进行处理,通过图像处理等手段获取定日镜反射光斑中心的位置。计算太阳光斑能量中心位置坐标的偏移量,从而获得定日镜的定日误差,记录控制误差数据。测试结果如表1所示。



图2 塔式太阳能控制试验台测试实景图

Fig. 2 Control test bench test reality

表1 塔式太阳能控制试验台跟踪误差测试结果

Tab. 1 Control test bench tracking error test results

时间	高度角/mrad	方位角/mrad	偏差距离/m	偏差弧度
7:00	0.003 7	0.000 1	0.8	0.46
8:00	0.002 5	0.002 5	1.1	0.63
9:00	0.002 3	0.002 0	1.0	0.57
10:00	-0.003 3	-0.002 0	0.8	0.46
11:00	-0.004 7	-0.000 5	0.6	0.34
12:00	-0.001 7	-0.000 5	0.5	0.29
13:00	0.002 3	0.002 3	0.8	0.50
14:00	0.001 0	-0.004 1	1.0	0.59
15:00	0.001 3	0.002 6	1.0	0.59
16:00	0.003 2	-0.003 0	0.9	0.50

2 定日镜场控制系统

定日镜场的控制系统包括上位控制计算机、上位控制器、定日镜就地控制单元以及用于校正跟踪误差的光斑特征系统。

上位计算机主要功能是监控定日镜的运行,操作人员通过上位计算机可以调度全部定日镜,可以

通过手动或自动的方式,使定日镜分别处于不同的工作状态。达到控制吸热器表面的温度的目的。

上位控制器是上位控制计算机与定日镜就地控制单元之间通讯的纽带,接收上位计算机的控制指令,运行对应的控制策略,使定日镜按照预先设定的跟踪目标点执行控制指令。

定日镜就地控制单元用于控制定日镜的动作,其核心控制部件是小型PLC(Programmable Logic Controller),PLC通过伺服电机驱动器控制伺服电机旋转,达到移动定日镜光斑的目的。操作人员可以通过就地控制单元上的按钮,直接操作定日镜,也可以使其处于远程控制模式,按照上位控制器提供的目标位置或动作模式,驱动定日镜旋转到指定的目标位置。就地控制单元的箱体上包括以下按钮:远程/就地选择开关、水平顺时针(定日镜水平方向顺时针旋转点动开关)、水平逆时针、俯仰顺时针、水平逆时针、故障复位钮。操作人员选择就地控制时,可以通过点动开关旋转定日镜,此时该定日镜不再接收上位系统的指令。

图像采集处理系统由位于吸热器下方的朗勃靶、CCD(Charge Coupled Device)照相机、图像采集卡以及图像采集处理软件构成,其功能为采集定日镜投射到朗勃靶的图像并计算出光斑中心的偏差。镜场控制系统根据偏差信息决定该定日镜需要的校偏量。

上位控制器可以接收气象站提供的信号,包括:风速、风向、环境温度、太阳的直射辐射、总辐射。定日镜场控制系统通过风速参数决定是否进入大风保护模式,根据太阳的直射辐射值确定是否可以满足电厂运行的需要。

镜场控制系统接收全场控制系统的指令,控制定日镜移动到指定的位置。指定的位置状态包括:紧急避险状态、初始位置状态、竖直清洗状态、自动跟踪状态、待命点状态、自动校准状态。

3 塔式太阳能光热电站全厂控制系统

塔式太阳能热发电厂一般可采用定日镜场、吸热器、储能系统、汽机、发电机、辅助系统集中控制方式,全厂设一个集中控制室,采用一套以微处理器为基础的DCS(Distributed Control System)完成一台汽轮发电机组、发变组及厂用电、辅机冷却

水泵房、循环水、化学补给水、凝结水精处理、汽水取样、化学加药等的监控, 电子设备间布置在靠近汽机房的位置。

当塔式太阳能热发电厂配置多个镜场及多台机组时, 每台机组、镜场及辅助系统作为一个发电单元单独配置一套 DCS 及相应的电子设备间。集中控制室可设置在全厂统一的生产办公区附近, 以便于人员运行组织。从全厂范围看, DCS 的电子设备间随各机组呈分散布置状态, 各台机组 DCS 的上位机均布置在集中控制室, 与电子机柜间采用光纤连接, 一般有 2~4 km。不单独设网控控制室, 网络控

制操作员站布置在集中控制室。全厂控制系统结构图如图 3 所示, 厂级信息管理系统、镜场控制系统、分散控制系统 (DCS) 组成的自动化网络, 实现控制功能分散, 信息集中管理的设计原则。全厂自动化系统结构分为厂级管理监控信息层、生产级监控层、控制层、现场层。全厂控制系统联网, 纵向各层之间通过网络连接, 实现数据传递; 横向各控制系统通过网络连接, 实现数据交换和集中监控方式, 消除了自动化“孤岛”现象, 成为一个完整的控制体系, 实现全厂信息共享, 最大限度地利用各级资源, 实现电厂的优化管理。

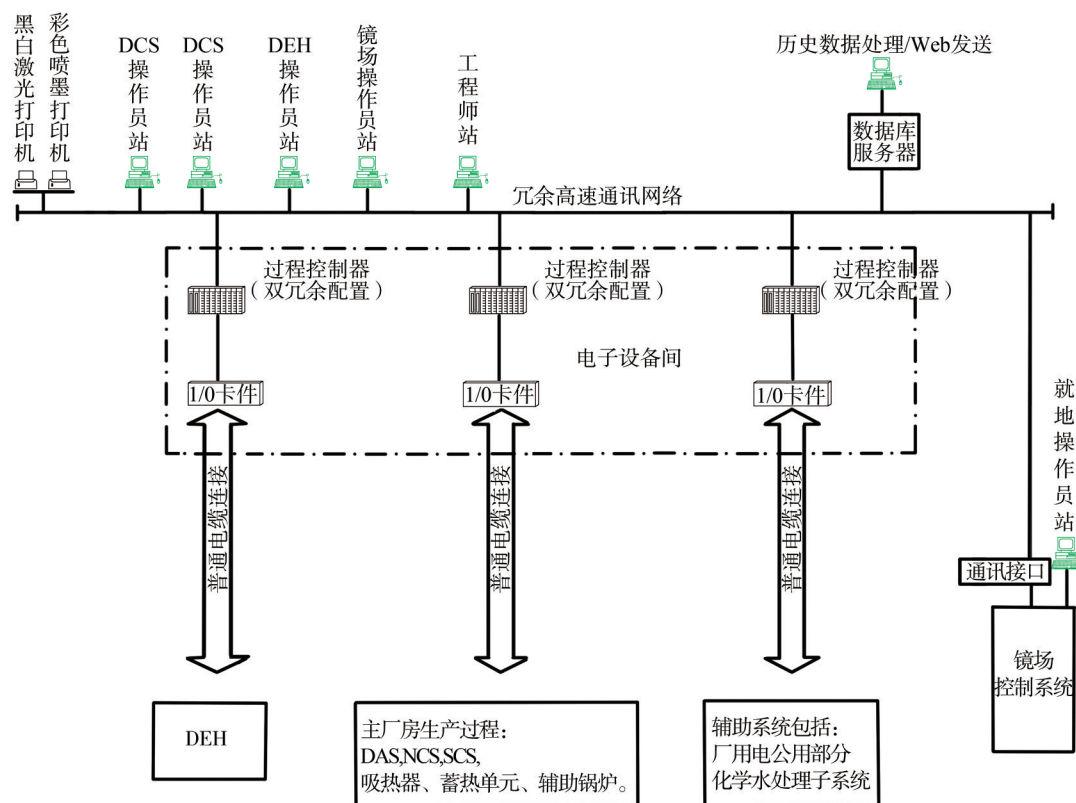


图 3 塔式太阳能光热电站全厂控制系统结构

Fig. 3 control system structure for tower CSP plant

定日镜场的控制由镜场控制系统 (SFCS, Solar Field Control System) 来实现, 镜场控制系统操作员站也布置在集中控制室内, DCS 和 SFCS 通过硬接线或者通讯的方式交换数据。塔式太阳能热发电厂运行组织为主控室设置数名运行人员, 在就地人员的巡回检查和配合下, 在集中控制室以操作员站的 LCD (Liquid Crystal Display) 及大尺寸等离子显示器为监控中心, 完成整个系统的启动、停止, 正常运行的监视控制和异常工况处理。

DCS 和 SFCS 之间的数据主要通过通信协议传输, 但下列重要信号一般通过硬接线传输:

- DCS 发送至 SFCS 信号: (1) 定日镜紧急退出指令 (一般由吸热器紧急保护逻辑动作或操作员手动按钮); (2) 定日镜场允许起动指令; (3) 定日镜投入方式指令 (吸热器冷态起动和热态起动); (4) 吸热器的表面温度。

SFCS 发送至 DCS 信号: (1) 定日镜场控制系统故障 (控制器故障、电源故障等); (2) 定日镜

投入准备好 (Standby); (3) 定日镜已全部投入 (表示当前最大热负荷已达到); (4) 定日镜场事故跳闸 (定日镜场紧急退出完成)。

4 结论

本文详细研究了塔式光热电站的控制技术, 从工程实施的角度对单体定日镜、定日镜场、全厂的控制机理及设计方案进行详细描述, 研究成果系统完整, 所用核心技术均具有自主知识产权, 可打破国外EPC总包商的技术封锁壁垒, 提高我国塔式光热电站技术在国际市场的竞争力。

参考文献:

- [1] 陆宇, 汤雪华, 唐丽娟. 太阳能光热发电控制技术研究 [J]. 科技传播, 2014, 6(17): 119-121.
LU Y, TANG X H, TANG L C. Research on control technology of solar thermal power generation [J]. Public Communication of Science & Technology, 2014, 6(17): 119-121.
- [2] 杨琛, 薛铮, 方彦军, 等. 塔式太阳能镜场三轴支撑定日镜控制装置 [J]. 热力发电, 2018, 47(12): 35-40.
YANG C, XUE Z, FANG Y J, et al. Three-axis support heliostat control device in tower solar energy mirror field [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(12): 35-40.
- [3] 祝雪妹, 寇霄凌, 黄文君, 等. 塔式太阳能电站中定日镜集群的追日控制 [J]. 控制工程, 2017, 24(6): 1131-1135.
ZHU X M, MI X L, HUANG W J, et al. Sun-tracking control of heliostat clusters in solar tower power plant [J]. Control Engineering of China, 2017, 24(6): 1131-1135.
- [4] 黄国栋, 刘俊秀. 塔式太阳能热发电站自动控制系统的设计与DCS实现 [J]. 自动化应用, 2016(3): 60-62.
- [5] 郝晓弘, 郭铁镔, 汪宁渤, 等. 开-闭环结合控制方式的定日镜跟踪控制策略 [J]. 自动化仪表, 2018, 39(9): 5-9.
HAO X H, GUO T E, WANG N B, et al. Tracking and controlling strategy of heliostat based on open-closed-loop control model [J]. Process Automation Instrumentation, 2018, 39(9): 5-9.
- [6] 马逊, 王平. 塔式太阳能热发电中定日镜无光线位置传感器跟踪控制及误差消除 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(5): 816-820.
Ma X, Wang P. Light-beam sensorless control of heliostats for tower type solar thermal power generation applications [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, 33(5): 816-820.
- [7] 毛启静, 白永军, 张玮, 等. 太阳能热发电厂厂用电率计算方法分析 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(4): 29-33.
MAO Q J, BAI Y J, ZHANG W, et al. Analysis of calculation method for solar thermal power plant auxiliary power rate [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(4): 29-33.
- [8] 刘化果. 高性能塔式太阳能定日镜控制系统研究 [D]. 济南: 济南大学, 2010.
LIU H G. Research on highly efficiency control system of heliostat in center solar receiver [D]. Jinan: University of Jinan, 2010.
- [9] 许继刚, 汪毅. 塔式太阳能光热电站设计关键技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 98-100.
XU J G, WANG Y. Key technology in the design of tower solar thermal power plant [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019: 98-100.

作者简介:



仇韬

仇韬 (通信作者)

1979-, 男, 江苏南京人, 副主工/高级工程师, 博士, 主要从事光热电站控制领域的设计与研究 (e-mail) qjutao@nwepdi.com。

许黎羚

1995-, 女, 北京人, 硕士, 主要从事电力工程技术与管理 (e-mail) clxu@cpcecc.net。

王伟

1980-, 女, 满族, 吉林永吉人, 副经理/高级工程师, 工程硕士, 主要从事光热电站控制领域的设计与研究 (e-mail) wangweid@nwepdi.com。

(责任编辑 李辉)

