

塔式太阳能热发电系统中定日镜 运动规律分析及其仿真

何丽娟 祝雪妹

(南京师范大学 电气与自动化工程学院 江苏 南京 210042)

[摘要] 定日镜在追日过程中的聚光精度是影响塔式太阳能热发电系统工作效率的重要因素之一. 分析了塔式太阳能热发电系统中定日镜的运动规律. 利用光学反射原理建立定日镜运动轨迹模型, 并以我国西部某市作为算例, 根据太阳轨迹运算法则以及定日镜与吸热器之间的相对位置, 对该地春分日与冬至日定日镜的运动轨迹进行仿真与分析, 得到所仿真定日镜的运动规律.

[关键词] 塔式太阳能, 光学反射原理, 定日镜运动规律, 仿真

[中图分类号] TM615 [文献标志码] A [文章编号] 1672-4292(2012)04-0001-05

Analysis and Simulation of Motion Laws for Heliostats in Solar Tower Power Plant

He Lijuan Zhu Xuemei

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The accuracy of sun-tracking methods for heliostats is one of the most important factors that influences the efficiency of solar tower power plant. Regarding the motion laws for heliostats in solar tower power plant, a model of motion trails for heliostats is developed with optical reflection principle. Based on the relative location between heliostats and the receiver, simulations of motion trails for heliostats of a city in West China are performed under the solar position algorithm on Spring Equinox and Winter Solstice. The results show motion laws for heliostats in solar tower power plant.

Key words: solar tower power plant, optical reflection principle, motion laws for heliostats, simulation

全球气候的不断恶化以及能源危机的快速加剧正促使越来越多的国家将目光转向可再生能源. 太阳能作为一种可再生能源, 取之不尽, 用之不竭. 与其他可再生能源相比, 其具有储量无限、存在普遍、利用清洁及开发经济的优势, 太阳能以其独特的优势正得到世界各国的密切关注与积极开发. 我国有着丰富的太阳能资源, 可利用太阳能的国土面积占 $2/3$ 以上, 约 600 万 km^2 , 全年日照时数在 $2\ 200 \sim 3\ 300 \text{ h}$ 之间, 年总辐射量超过 $1\ 670 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$, 因此我国拥有建立大规模太阳能热发电站的地理条件^[1]. 利用太阳能发电是解决当前能源、资源、环境等问题的有效途径.

太阳能发电的主要形式为: 光伏发电与光热发电. 光热发电主要是将聚集到的太阳辐射能, 通过换热装置产生蒸汽, 驱动汽轮机发电. 与光伏发电相比, 光热发电的转换效率更高, 规模可以达到小型或中型常规火电厂的规模, 避免了昂贵的硅晶光电转换工艺, 大大降低了太阳能发电的成本^[2]. 而且, 这种形式的太阳能利用与其他形式的太阳能转换具有无法比拟的优势, 即太阳能所加热的工质可以储存在巨大的容器中, 在太阳落山后几个 h 内仍然能够带动汽轮机发电. 太阳能热发电有槽式、塔式、碟式 3 种形式^[3]. 与槽式以及碟式太阳能光热发电技术相比, 塔式太阳能光热发电技术聚光倍数更高, 更容易达到较高的工作温度, 同时其热转换效率也更高, 并且由于其能量集中过程是靠反射光线一次完成, 方法更为简捷有效^[4].

定日镜作为塔式太阳能热发电系统中的聚光部件, 在追日过程中的聚日精度是影响塔式太阳能热发电系统工作效率的重要因素之一. 现根据光学反射原理建立定日镜运动轨迹数学模型. 在此基础上, 仿真

收稿日期: 2012-10-15.

基金项目: 国家自然科学基金(61273100).

通讯联系人: 祝雪妹, 博士, 教授, 研究方向: 先进控制理论及其在工业过程中的应用. E-mail: zhuxuemei@njnu.edu.cn

西北某市的春分日与冬至日的定日镜运动轨迹,对结果进行分析与比较,得到所仿真定日镜的运动规律.

1 定日镜运动规律分析

1.1 定日镜的追日工作原理

塔式太阳能热发电站主要由定日镜系统、吸热与热能传递系统(热交换系统)、发电系统 3 部分组成,其系统如图 1 所示.它利用定日镜将太阳光聚焦在吸热塔的吸热器上,聚焦的辐射能转变成热能,然后传递给热力循环的工质,再驱动汽轮机做功发电.同时,为了保证持续供电,需用储热装置将高峰时段的热量进行存储以备早晚和阴雨天气使用^[5].其中,定日镜是一种由镜面(反射镜)、镜架(支撑结构)、跟踪传动机构以及控制系统等组成的聚光装置^[6],用于跟踪接收并聚集反射太阳光线进入位于接收塔顶部的吸热器内,它的装置如图 2 所示.现有的塔式太阳能热发电系统中多采用开环控制方法,即根据太阳运动轨迹计算定日镜的实时状态,利用程序控制定日镜传动机构,实现追日跟踪.这种方法减少了成本,有利于大规模应用^[7].

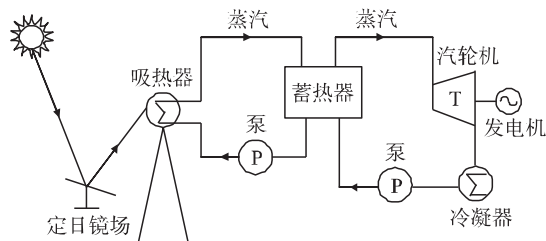


图 1 塔式太阳能热发电系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of solar tower power plant

定日镜采用方位角—高度角二维传动机构跟踪方式跟踪太阳.方位角—高度角跟踪方式是指定日镜运行时采用转动基座(圆形底座式)或转动基座上部转动机构(独臂支架式)来调整定日镜方位角变化,同时调整镜面高度角的方式^[8],其角度定义如图 3 所示.

其中 N : 定日镜镜面法线向量.

ψ : 定日镜方位角,定日镜方位角为定日镜法线在地平面上的投影与正南方向所成夹角.

γ : 定日镜高度角,定日镜所在地的地平面与定日镜之间的夹角为定日镜高度角,与定日镜镜面法线和定日镜所在地的天顶之间的夹角大小相等.

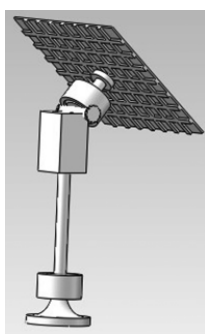


图 2 定日镜装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heliostat

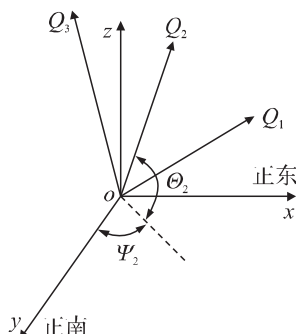


图 3 定日镜角度定义

Fig. 3 The definition of the angle of heliostat

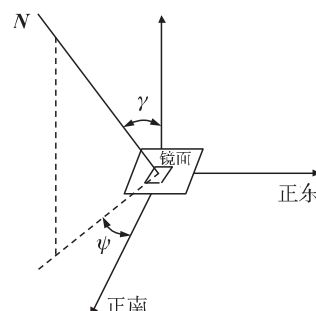


图 4 定日镜运动规律分析图

Fig. 4 The analysis diagram of the law of the motion for heliostat

1.2 定日镜运动规律分析

当定日镜中心点反射的太阳光线入射在吸热器表面目标点时,认为此时定日镜对太阳实现了绝对跟踪.由光学反射原理以及事先得到的太阳运动轨迹可计算出定日镜的方位角与高度角^[9].计算过程如下:

如图 4 所示,假设定日镜中心点位置为 O 点,吸热器表面目标点位置为 Q_1 ,太阳至镜面的直线为 OQ_3 ,镜面法线所在直线为 OQ_2 .令 OQ_1 为向量 V_1 , OQ_2 为向量 V_2 , OQ_3 为向量 V_3 ,假设 V_1, V_3 的模均为 1.并假设 OQ_1 的方向余弦分别为 a_1, b_1, c_1 ; OQ_2 的方向余弦分别为 a_2, b_2, c_2 ; OQ_3 的方向余弦分别为 a_3, b_3, c_3 .由镜面法线平分入射角与反射角这一基本定理可得: $V_2 = V_1 + V_3$,则 V_1, V_2, V_3 必然在同一平面内,且 V_2 在 X, Y, Z 轴上的分量分别为 $a_1 + a_3, b_1 + b_3, c_1 + c_3$.根据余弦定理可得:

$$|V_2| = \frac{a_1 + a_3}{\sqrt{2(1 + a_1 a_3 + b_1 b_3 + c_1 c_3)}} = \sqrt{1 + 2(a_1 a_3 + b_1 b_3 + c_1 c_3)} = 2\sqrt{2(1 + a_1 a_3 + b_1 b_3 + c_1 c_3)}, \quad (1)$$

令镜面法线的高度角为 φ_2 ,方位角为 θ_2 .则有:

$$a_2 = \cos\varphi_2 \cos\theta_2 = \frac{a_1 + a_3}{\sqrt{2(1 + a_1 a_3 + b_1 b_3 + c_1 c_3)}}, \quad (2)$$

$$b_2 = \cos\varphi_2 \sin\theta_2 = \frac{b_1 + b_3}{\sqrt{2(1 + a_1 a_3 + b_1 b_3 + c_1 c_3)}}, \quad (3)$$

$$c_2 = \sin\varphi_2 = \frac{c_1 + c_3}{\sqrt{2(1 + a_1 a_3 + b_1 b_3 + c_1 c_3)}}, \quad (4)$$

由(3)/(2)可得:

$$\tan\theta_2 = (b_1 + b_3) / (a_1 + a_3). \quad (5)$$

令 φ_1 为定日镜中心点与吸热器目标点连线与地平面之间的夹角, θ_1 为定日镜中心点与吸热器目标点连线在地平面上的投影与正南方向之间的夹角, φ_3 , θ_3 分别为太阳的高度角与方位角. 将式(4)、(5)中的方向余弦都用角度表示, 可得镜面法线的方位角与高度角表达式为:

$$\tan\theta_2 = \frac{\cos\varphi_1 \sin\theta_1 + \cos\varphi_3 \sin\theta_3}{\cos\varphi_1 \cos\theta_1 + \cos\varphi_3 \cos\theta_3}, \quad (6)$$

$$\sin\varphi_2 = \frac{\sin\varphi_1 + \sin\varphi_3}{\sqrt{2[1 + \sin\varphi_1 \sin\varphi_3 + \cos\varphi_1 \cos\varphi_3 \cos(\theta_1 - \cos\theta_3)]}}. \quad (7)$$

由于定日镜方位角与其法线方位角相同, 定日镜高度角与其法线方位角互余, 在已知太阳高度角, 方位角以及吸热器目标点坐标的情况下, 根据式(6)、式(7)可计算出任意位置的定日镜的高度角与方位角随时间的变化关系.

2 定日镜运动规律仿真

2.1 太阳运动轨迹运算法则的选择及其变化规律

由式(6)、式(7)可知, 要得出定日镜运动规律必须知道太阳的运动轨迹. 在塔式太阳能热发电系统中, 太阳的运动轨迹精度比其他太阳能发电系统要求更高. SPA^[10] 为高精度的太阳轨迹运算法则, 它计算出来的太阳位置误差小于 0.0003° , 可信度高. 在工程应用中, 太阳的高度角和方位角可以根据当地的经度、纬度、海拔、温度、时间、时区、气压等参数^[11] 利用 SPA 计算得到.

根据 SPA 仿真出太阳的运动轨迹, 图5~图8描述了我国西部某市(经度: 97.37° , 纬度: 37.37°) 在2011年的春分日(2011-3-21)、秋分日(2011-9-23)、夏至日(2011-6-21)、冬至日(2011-12-22)太阳方位角及高度角的变化情况.

由图比较可得: (1) 对于北半球而言, 一天中太阳方位角呈递增趋势, 在正午时分变化速率最快. 符合太阳方位角的定义, 与太阳及地球的相对运动规律相吻合; 太阳高度角则先增大后减小, 在正午时分太阳高度角达到最大后逐渐减小, 该变化规律符合太阳升起、落下的现象;

(2) 对于北半球而言, 春分日与秋分日太阳角度变化情况相似, 这一现象是由于春分日与秋分日太阳均直射赤道, 符合上半年与下半年对称这一规律. 夏至日太阳方位角与高度角变化最大, 冬至日太阳角度变化最小, 这一现象是由于冬至日太阳直射南回归线, 夏至日太阳直射北回归线, 所以对于北半球而言, 冬至日太阳角度比夏至日太阳角度变化小.

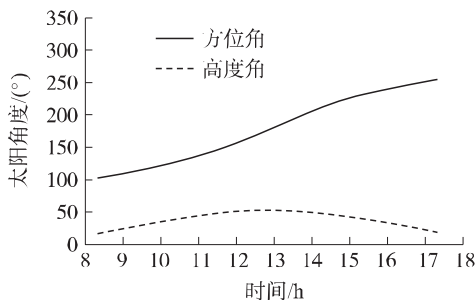


图5 春分日太阳角的变化曲线图

Fig. 5 The variation of Spring Equinox solar angel

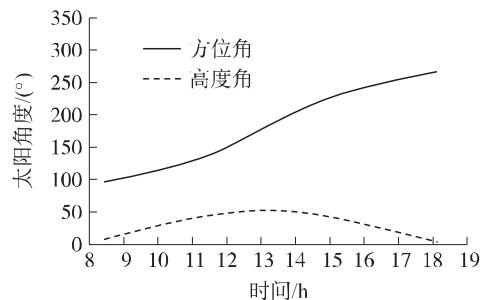


图6 秋分日太阳角的变化曲线图

Fig. 6 The variation of Autumn Equinox solar angel

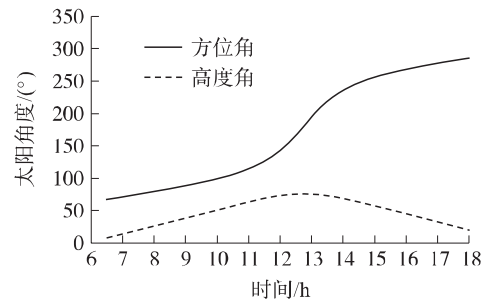


图 7 夏至日太阳角的变化规律图
Fig. 7 The variation of Summer Solstice solar angel

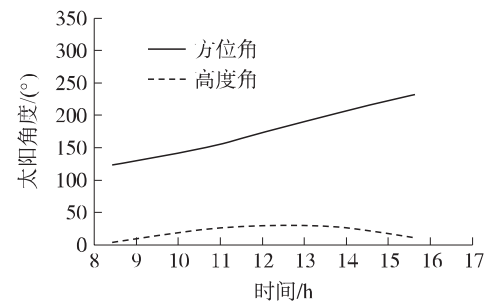


图 8 冬至日太阳角的变化规律图
Fig. 8 The variation of Winter Solstice solar angel

2.2 定日镜运动规律的仿真与分析

仍以我国西部某市为例,根据已得的太阳运动轨迹,仿真该地 2011 年春分日与冬至日定日镜运动规律.参数如表 1.

表 1 春分日、冬至日定日镜仿真参数表

Table 1 The table of simulation parameters for heliostat in spring equinox and winter solstice

	时区	经度(°)	纬度(°)	时间	定日镜中心点坐标/m	吸热器目标点坐标/m
春分日	+8	97.37°	37.37°	2011.3.21	(-100 0 0)	(0 0 75)
冬至日	+8	97.37°	37.37°	2011.12.22	(-100 0 0)	(0 0 75)

根据太阳轨迹运算法则,以及式(6)、式(7),对该地 2011 年的春分日与冬至日每隔 1 min 分别做一次定日镜聚光,并记录 8:00~16:00 每 20 min 定日镜角度的变化情况.数据如表 2 所示.

表 2 春分日、冬至日定日镜角度一天内不同时刻的仿真结果

Table 2 The simulation results of heliostat angel for different moments in spring equinox and winter solstice

时间	春分日定日镜方位角/(°)	春分日定日镜高度角/(°)	冬至日定日镜方位角/(°)	冬至日定日镜高度角/(°)
8:00	48.940369	59.842277	44.802417	48.185022
8:20	51.448876	57.502828	47.462640	45.954136
8:40	53.955641	55.165847	50.136995	43.732793
9:00	56.456269	52.802158	52.820222	41.504614
9:20	58.948578	50.380467	55.523616	39.254603
9:40	61.433187	47.867380	58.266936	36.971003
10:00	63.914942	45.227803	61.078395	34.646769
10:20	66.405592	42.426156	63.996553	32.281542
10:40	68.928523	39.429040	67.072916	29.884461
11:00	71.526792	36.210269	70.374569	27.478091
11:20	74.276366	32.759517	73.985696	25.103769
11:40	77.306884	29.096171	78.005801	22.828427
12:00	80.831640	25.290659	82.782826	20.655998
12:20	85.183623	21.497631	87.955404	18.939771
12:40	90.836890	18.009460	93.770355	17.749103
13:00	98.344153	15.336625	100.152878	17.280633
13:20	108.042706	14.272803	106.879751	17.703575
13:40	119.459802	15.744415	113.590552	19.096292
14:00	130.992088	20.184159	119.871176	21.396655
14:20	140.767705	26.866362	125.371679	24.404529
14:40	147.863501	34.272879	129.886477	27.841804
15:00	152.387663	41.150502	133.361948	31.432621
15:20	154.878686	46.965063	135.854158	34.960424
15:40	155.888545	51.685057	137.476624	38.286570
16:00	156.851066	55.476944	138.361135	41.341209

本仿真的定日镜角度都是由模型算法得出,因此定日镜高度角范围为 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$,定日镜方位角范围为 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 。表2中数据皆有效。该地春分日、冬至日定日镜角度仿真结果随时间的变化规律绘制如图9与图10所示。

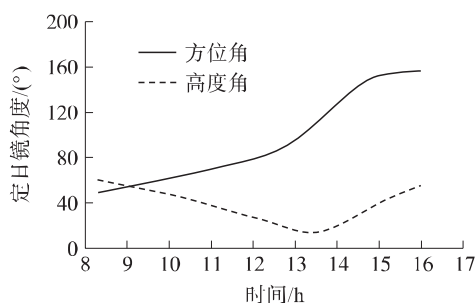


图9 春分日定日镜角度的变化曲线图

Fig. 9 The variation of Spring Equinox heliostat angel

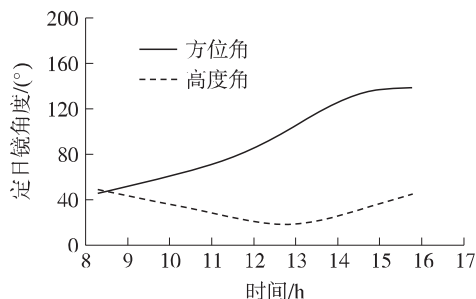


图10 冬至日定日镜角度的变化曲线图

Fig. 10 The variation of Winter Solstice heliostat angel

由仿真所得的运动轨迹可总结定日镜角度的变化规

律如下:

(1) 对于北半球而言,定日镜方位角呈递增规律,符合光学反射原理以及此仿真中吸热器与定日镜的相对位置。定日镜高度角呈现先减小后增大的趋势,符合定日镜高度角定义,并与光学反射原理相符。

(2) 对于北半球而言,春分日定日镜变化比冬至日变化大,并且变化速率相对也较快,与太阳角度变化规律相符合。根据春分日与秋分日太阳运动轨迹相似可知其定日镜角度变化也相似,又由冬至日比夏至日太阳运动轨迹变化小可知冬至日定日镜角度变化也比夏至日定日镜角度变化小。

(3) 由上述规律可知,定日镜的高度角和方位角随太阳角度变化而变化,方可达到跟踪聚光效果。太阳、定日镜与吸热器三者的相对位置共同决定了定日镜聚光跟踪角度的变化。

3 结论

本文根据光学反射原理建立了定日镜运动轨迹计算模型,根据太阳轨迹运算法则以及定日镜与吸热器之间的相对位置对西部某市定日镜的运动轨迹进行仿真与分析。得出对于北半球而言,定日镜方位角呈递增规律,定日镜高度角呈现先减小后增大的趋势,结果与定日镜角度定义以及光学反射原理相符合。这种计算定日镜运动轨迹的方法是基于数学理论依据的,可计算出任何时刻、任何地点定日镜的高度角与方位角。如果太阳运动轨迹计算精确同时目标位置测量准确,那么对于一般的太阳能发电系统结果已经是足够好了。上述仿真的是理想情况下的定日镜运动规律,但事实上由于机械加工精度所限而产生的机械误差、转轴转动产生的误差和定日镜安装产生的误差等都会导致跟踪精度的下降,反射光线是不可能一直反射到吸热塔的目标点的。克服这些外在误差,提高跟踪精度使得镜面反射率最大,以确保塔式太阳能热发电系统高效稳定运行是十分必要的。

[参考文献](References)

- [1] 李金光,曹淦,陈广娟. 基于 FUZZY-AHP 的太阳能热发电站选址综合评价[J]. 电力勘测设计, 2008, 12(6): 77-80.
Li Jinguang, Cao Gan, Chen Guangjuan. Site optimization for solar thermal power stations basing on fuzzy synthesis evaluation [J]. Electrical Power Investigate and Designing, 2008, 12(6): 77-80. (in Chinese)
- [2] 张明宝,张春伟,唐卉. 浅析太阳能光热发电技术的发展[J]. 锅炉制造, 2011, 11(6): 41-46.
Zhang Mingbao, Zhang Chunwei, Tang Hui. Analyze the development of solar thermal power generation [J]. Boiler Manufacturing, 2011, 11(6): 41-46. (in Chinese)
- [3] 徐明,祝雪妹. 聚光式太阳能热发电技术的现状及发展趋势[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2011, 11(1): 27-32.
Xu Ming, Zhu Xuemei. The status and development trend of light-concentrating solar power technology [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2011, 11(1): 27-32. (in Chinese)

(下转第21页)

-
- [4] Santi E ,Cuk S. Modeling of One-Cycle controlled switching converters[C]//Telecommunications Energy Conference 14th International. Washington ,DC ,1992: 131-138.
- [5] Egiziano L ,Femia N ,Fortunato M ,et al. Model of One-Cycle control for converters operating in CCM and DCM[C]//Conference on Industrial Electronics ,32nd Annual IEEE. Paris ,2006: 2150-2155.
- [6] Smedley K M. One-Cycle controller for renewable energy conversion systems[C]//Industrial Electronics ,34th Annual Conference of IEEE. Orlando ,FL ,2008: 13-16.
- [7] 李飞亮,张琳洁. 基于 DSP 的大功率数字开关电源设计[J]. 电子技术 ,2011 ,38(12) : 32-33.
LI Feiliang ,Zhang Linjie. The design of the high power digital switch power based on DSP [J]. Electronic Technology ,2011 ,38(12) : 32-33. (in Chinese)
- [8] 薛家祥,蒙万俊,熊丹枫. 基于 ARM 的多功能数字化逆变电源[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版 ,2010 (5) : 95-99 ,132.
Xue Jiaxiang ,Meng Wanjun ,Xiong Danfeng. Multifunctional digital inverter power supply based on ARM [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition ,2010(5) : 95-99 ,132. (in Chinese)
- [9] 陈坚. 电力电子学[M]. 北京: 高等教育出版社 ,2004.
Chen Jian. Power Electronic [M]. Beijing: Higher Education Press ,2004. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]

(上接第 5 页)

-
- [4] 汤延令. 太阳能热发电技术现状及发展[J]. 福建电力与电工 ,2008 ,28(4) : 12-16.
Tang Yanling. The status and development of solar power technology [J]. Fujian Electric Power and Electrical Engineering ,2008 ,28(4) : 12-16. (in Chinese)
- [5] 高嵩,侯红娟. 太阳能热发电系统分析[J]. 华电技术 ,2009 ,31(1) : 70-74.
Gao Song ,Hou Hongjuan. Analysis of solar thermal electric power generation system [J]. Water Conservancy and Electric Power Machinery ,2009 ,31(1) : 70-74. (in Chinese)
- [6] 郭苏,刘德有,张耀明. 塔式太阳能热发电的定日镜[J]. 太阳能 ,2006(5) : 34-37.
Guo Su ,Liu Deyou ,Zhang Yaoming. Heliostats in solar tower power plant [J]. Solar Energy ,2006(5) : 34-37. (in Chinese)
- [7] 姚梦凯. 塔式太阳能定日镜聚光成像策略研究与控制系统设计[D]. 杭州: 浙江大学控制科学与工程学院 ,2012.
Yao Mengkai. Research and design on heliostats tracking strategies and control system in solar power tower system [D]. Hangzhou: School of Control Science and Engineering of Zhejiang University ,2012. (in Chinese)
- [8] 李艳霞,李胜涛. 定日镜技术研究进展与应用[J]. 中国科技信息 ,2009(24) : 22-23.
Li Yanxia ,Li Shengtao. Development and application of heliostats research [J]. China Science and Technology Information ,2009(24) : 22-23. (in Chinese)
- [9] 徐任学. 塔式定日镜运动规律[J]. 太阳能学报 ,1981 ,2(1) : 101-103.
Xu Renxue. The law of the motion for heliostat of solar tower plant [J]. Solar Energy ,1981 ,2(1) : 101-103. (in Chinese)
- [10] National Renewable Energy Laboratory. Solar position algorithm for solar radiation applications [J]. US Department Energy ,2008(1) : NERL/TP-560-34302.
- [11] Chong K K ,Tan M H. Range of motion for two different sun-tracking methods in the application of the heliostat field [J]. Journal of Solar Energy ,2011 ,85(9) : 1 837-1 850.

[责任编辑: 刘 健]