

点、线耦合聚焦塔式太阳能线菲定日镜追踪角 时空变换特性研究

马 玄, 代彦军, 李 显, 王如竹

(上海交通大学机械与动力工程学院 太阳能发电与制冷教育部工程研究中心, 上海 200240)

摘 要: 介绍一种新型的点、线耦合菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光系统, 推导该系统定日镜追踪太阳光线的理论追踪角(俯仰角 β_h 和滚转角 β_m)公式, 利用理论追踪角公式计算上海地区一年中4个典型日系统线菲定日镜追踪角的时空变换特性。以夏至日定日镜 H3 为例, 详细计算其子镜与中心子镜的理论俯仰角差 $\Delta\beta_{h,id}$ 和理论滚转角差 $\Delta\beta_{m,id}$ 。该文的目的是通过研究菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光系统定日镜理论追踪角的时空变换特性, 确定系统定日子镜追踪太阳的实际滚转角差, 并利用 Soltrace 软件模拟系统在夏至日实际追踪和理论追踪时的光学效率, 差值最大为 8.20%, 最小为 0.28%。

关键词: 太阳能系统; 定日镜; 光束追踪; 理论俯仰角公式和理论滚转角公式; 理论俯仰角差和理论滚转角差; 实际滚转角差

中图分类号: TK519

文献标识码: A

0 引 言

塔式聚焦太阳能技术已被 Kalogirou^[1]证明是一种将太阳能转换为热能或电能较有效的技术。二次反射塔式太阳能聚焦的概念由 Rabl^[2]于 1976 年首次提出, 然后由以色列 Weizmann 机构的 Segal 和 Epstein 在 1997 年研发。到目前为止, 很多文献资料对不同的二次塔式太阳能聚光系统的光学性能进行了研究: Segal 等^[3-5]对比研究了二次反射镜为双曲面型和椭圆面型时系统的光学性能, 并且证明二次反射镜为双曲面型时系统的效率更高, 随后详细分析了双曲面型二次反射镜塔式太阳能聚光系统的光学原理; Leonardi^[6]对二次反射塔式太阳能聚焦系统相关装置的参数进行分析, 同时分析双曲面二次反射镜的偏心距对定日镜尺寸的影响, 并提出 CPC 特性参数的最佳值; Wei 等^[7]推导了二次反射塔式太阳能聚光系统聚焦的光线和 CPC 出口平面的交点坐标, 并可计算出光线在 CPC 中被反射的次数。

基于以上研究, 本文提出一种新型的二次反射

塔式太阳能聚光系统, 研究其定日镜理论追踪角, 从而确定其实际运行时定日子镜滚转角差的设置。

1 点线耦合二次反射塔式太阳能系统

1.1 系统组成

点线耦合菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光系统主要由线性菲涅尔定日镜(heliostat, 简称 H)、二次反射镜(beam-down concentrator, 简称 BC)组成, 如图 1a 所示。3 组定日镜 H1、H2 和 H3 的朝向为正南、正西和正北, 分别对应二次反射镜 BC1、BC2 和 BC3。系统聚光原理为: 以二次反射镜 BC 的上焦点(upper focal point)为目标点, 与其对应的线性菲涅尔定日镜 H 将入射的太阳光线聚焦到塔顶的二次反射镜 BC, 再由二次反射镜 BC 将反射的太阳光线进行二次聚光, 将光线其下焦点(lower focal point)位于系统中央接近地面处, 如图 1b 所示。由于线菲定日镜是线聚焦, 而二次反射镜是点聚焦, 故称该系统为点线耦合聚焦系统。

收稿日期: 2016-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(51276112)

通信作者: 代彦军(1971—), 男, 博士、教授, 主要从事太阳能热利用方面的研究。yjdai@sjtu.edu.cn

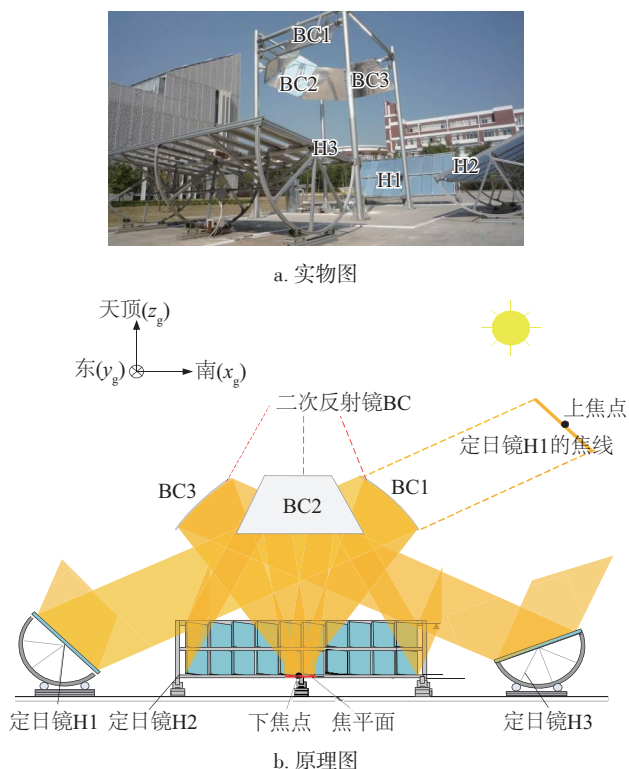


图1 二次反射塔式太阳能聚光系统原理图

Fig. 1 Schematic of beam-down concentrating solar tower system

1.2 系统部件

1.2.1 线性菲涅尔定日镜

点、线耦合菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光系统中每组定日镜结构如图2所示,定日镜尺寸长 W_h 为4.2 m,宽 I_h 为2.2 m,共由20片子镜组成;上下2排子镜平行,分为10组,子镜长 I_m 为0.4 m,宽 W_m 为1 m,相邻子镜中心的间距 ΔW 为0.42 m。

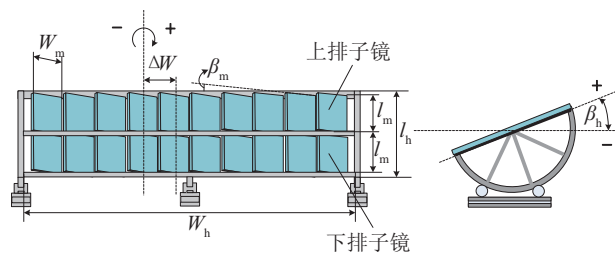


图2 定日镜结构

Fig. 2 Structure of the heliostat

为了方便分析每个子镜的光学性能,根据子镜在定日镜中的位置进行编号,用 id 表示,如图3所示。定日镜按照俯仰角 β_h -滚转角 β_m 的方式进行跟踪。整个镜框进行俯仰角方向运动,俯仰角正负

号规定:当定日镜框架水平放置时,定义俯仰角为 0° ,当定日镜框架面向塔转动时,俯仰角此时为正;当定日镜背向塔转动时,则俯仰角为负。子镜进行滚转角方向追踪,滚转角正负号规定:子镜与定日镜框架平面平行时,定义滚转角为 0° ,当人站在塔中央面向定日镜看过去,顺时针转动为正,逆时针转动为负。

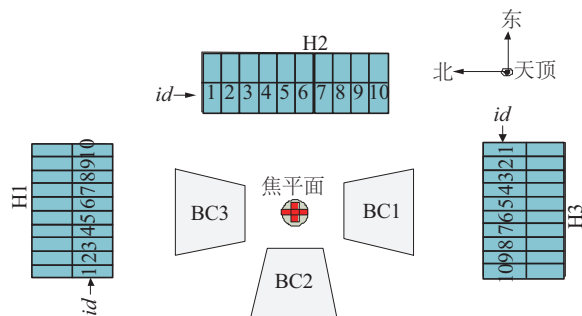


图3 二次反射塔式太阳能聚光系统俯视图

Fig. 3 Top view of beam-down concentrating solar tower system

定日镜俯仰角和滚转角分别由步进电动机控制;每组定日镜追日系统主要有2个步进电动机及与其对应的驱动器组成,整个定日镜场则有中央控制器进行集控,控制部件主要技术参数如表1所示。定日镜上下两排子镜通过同一步进电机进行控制,具有相同的运行规律,在系统追踪太阳的过程中,定日子镜之间的滚转角之差保持不变。

表1 控制系统组成部件参数

Table1 Partrs parameters of the control system		
主要部件	技术指标	参数
控制器 (单片机)	CPU 芯片	Atmegal
	时钟芯片	Maxim/Dallas DS 3231 精度:2 min/a
步进电机	型号	110BYG
	步距角	1.2°
	保持转矩	1.5 Nm
驱动器	型号	SH-32206N
	驱动方式	恒相流 PWM 控制
	细分数	400~30000步可选
	最大输出电流	6 A

1.2.2 二次反射镜 BC

本系统采用球面作为二次反射镜,以降低加工难度及加工成本。球面是由圆弧沿一个方向拉伸

而成的,面型如图4所示,其正面开口为等腰梯形。表2为二次反射镜BC的具体尺寸。

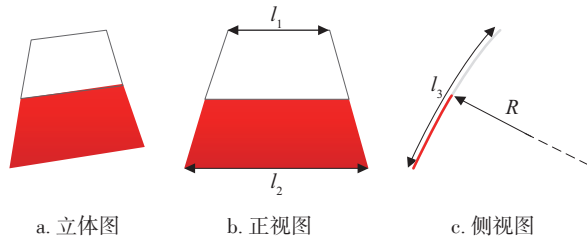


图4 二次反射镜

Fig. 4 The view of beam-down concentrators

表2 二次反射镜(BC)的几何尺寸参数

Table 2 Geometric parameters of BCs

参数	反射镜编号		
	BC1	BC2	BC3
开口上底边长度 l_1/m	1.1463	1.1369	1.1463
开口下底边长度 l_2/m	2.1305	2.1418	2.1305
侧面圆弧长度 l_3/m	1.643	1.643	1.643
圆弧半径 R/m	10.4584	10.3328	10.4584
总面积 S/m^2	约为8.0440		

2 追日理论分析模型

2.1 坐标系

为了推导系统定日镜追踪太阳光线的理论追踪角公式,需要设定整个系统所在的全局坐标系(x_g, y_g, z_g),如图5所示, O 点为原点(反射镜BC2中心点在地面的投影), x_g 轴为正南方向, y_g 轴为正东方向, z_g 指向天顶方向。定义每个定日镜中子镜的局部坐标系:原点 o 为定日镜中子镜的中心, x_m 沿子镜表面指向系统中心, z_m 轴垂直于子镜指向天

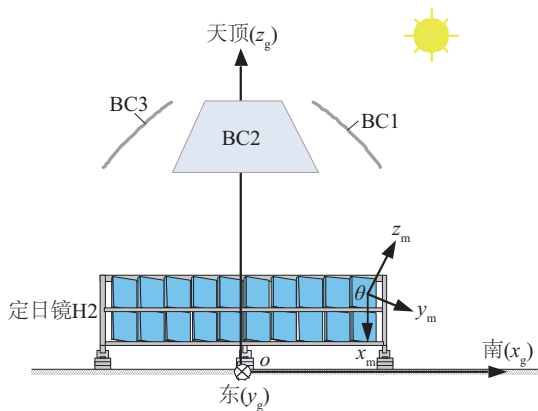


图5 全局和局部坐标系

Fig. 5 Global and local coordinate systems

顶,根据右手法则,即可确定 y_m 轴指向。表3给出了定日镜和二次反射镜的几何中心在全局坐标系下的坐标。

表3 各个部件的几何中心在全局坐标系中的坐标(m)

Table 3 Geometric center coordinates for each assembly in the global coordinate system(m)

组成部分	x_g	y_g	z_g
H1 几何中心	-5.35	2.650	1.300
H2 几何中心	0	6.850	1.300
H3 几何中心	5.350	2.650	1.300
BC1 几何中心	2.000	2.650	5.000
BC1 球心	-5.215	2.650	-2.571
BC2 几何中心	0	0.650	5.000
BC2 球心	0	7.506	-2.731
BC3 几何中心	-2.000	2.650	5.000
BC3 球心	5.215	2.650	-2.571
F	0	2.650	0.500

2.2 系统定日镜理论追踪角的推导

太阳位置每时每刻都在变化,Noone等^[8]提出了关于太阳位置的计算模型,何梓年^[9]给出了关于计算太阳赤纬、太阳时角的公式,据此可确定不同时刻太阳的位置,即太阳的高度角和方位角。

随着太阳位置的移动,为了维持系统聚光的效率,定日镜的空间姿态(俯仰角和滚转角)也会随太阳光线的变化而变化。但定日镜的追踪角是由太阳位置、定日镜几何中心和二次反射镜下焦点之间的相对位置关系决定的,所以从太阳光线入射方向以及定日镜法向量和二次反射镜法向量之间的几何关系出发可推导出定日镜的理论追踪角。

图6给出了系统定日镜追踪太阳光线时各装置的空间几何原理图,其中 G 点为二次反射镜的几何中心; T 为二次反射镜的上焦点,即目标点; F 为二次反射镜的下焦点; C 点为定日镜的几何中心; S 点为太阳所在的位置。在系统追踪太阳过程中,定日镜子镜的瞬时空间姿态可通过其单位法向量的空间坐标变换得到。图6中的初始坐标系即为图5全局和局部坐标系中定日子镜的局部坐标系,另外2个坐标系 $o-x_{m,s}-y_{m,s}-z_{m,s}$ 和 $o-x_{m,t}-y_{m,t}-z_{m,t}$ 是全局坐标系经过3次旋转变换得到:1)全局坐标系 $O-x_g-y_g-z_g$ 绕 z_g 轴旋转 θ 角度变化为初始坐标系 $O-x_{m,f}-y_{m,f}-z_{m,f}$;2)定日镜绕 $y_{m,f}$ 轴旋转 β_h 角度使

初始坐标系 $o-x_{m,f}-y_{m,f}-z_{m,f}$ 变换为 $o-x_{m,s}-y_{m,s}-z_{m,s}$ 坐标系; 3) 定日镜子绕 $x_{m,s}$ 轴旋转 β_m 角度使 $o-x_{m,s}-y_{m,s}-z_{m,s}$ 坐标系变换为 $o-x_{m,l}-y_{m,l}-z_{m,l}$, 3 个坐标系中 $z_{m,f}$ 轴, $z_{m,s}$ 轴和 $z_{m,l}$ 轴分别为表示定日镜空姿态的单位法向量 n_f , n_s 和 n_l 的方向。

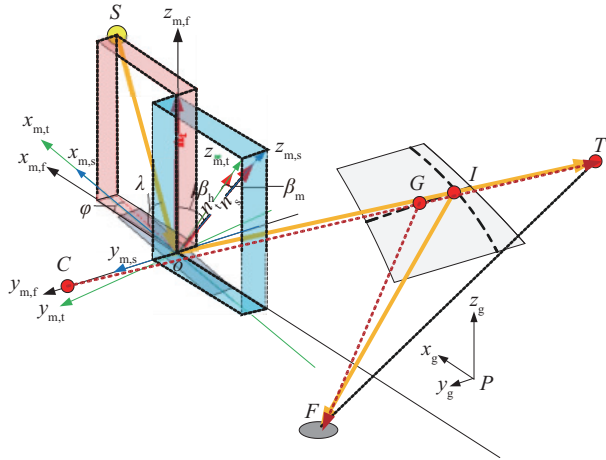


图6 二次反射塔式太阳能聚光系统中定日镜
追日角度示意图

Fig. 6 Schematic diagram of heliostat tracking angles for
beam-down concentrating solar tower system

在系统运行过程中, 二次反射镜固定, 因此目标点 T 的坐标不变, 而且目标点 T 由定日镜几何中心 C , 二次反射镜几何中心 G , 以及二次反射镜 BC 的下焦点 F 决定。因此首先确定目标点 T 的坐标, 根据几何关系可以求得 3 组定日镜的目标点 T :

对于 H1 和 H3:

$$\begin{aligned} \frac{z_{g,G} - z_{g,C}}{x_{g,G} - x_{g,C}} &= \frac{z_{g,T} - z_{g,C}}{x_{g,T} - x_{g,C}} \\ (x_{g,G} - x_{g,F})^2 + (z_{g,G} - z_{g,F})^2 &= (x_{g,G} - x_{g,T})^2 + (z_{g,G} - z_{g,T})^2 \\ y_{g,T} &= y_{g,G} \\ \text{H1: } x_{g,C} < 0, \quad x_{g,G} > 0, \quad x_{g,T} > 0 \\ \text{H3: } x_{g,C} > 0, \quad x_{g,G} < 0, \quad x_{g,T} < 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$c_2 = \frac{\sqrt{[c_1(x_{g,T} - x_{g,o}) + \cos \lambda \cos \varphi]^2 + [c_1(y_{g,T} - y_{g,o}) - \cos \lambda \sin \varphi]^2 + [c_1(z_{g,T} - z_{g,o}) + \sin \lambda]^2}}{2} \quad (7)$$

而全局坐标系 z_g 的旋转变换矩阵为:

$$[\theta] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, θ ——坐标系旋转的角度, ($^\circ$)。对

式中, $x_{g,T}$ 、 $y_{g,T}$ 、 $z_{g,T}$ —— T 点在全局坐标系下的坐标; $x_{g,G}$ 、 $y_{g,G}$ 、 $z_{g,G}$ —— G 点在全局坐标系下的坐标; $x_{g,F}$ 、 $y_{g,F}$ 、 $z_{g,F}$ —— F 点在全局坐标系下的坐标;

对于 H2:

$$\begin{aligned} \frac{z_{g,G} - z_{g,C}}{y_{g,G} - y_{g,C}} &= \frac{z_{g,T} - z_{g,C}}{y_{g,T} - y_{g,C}} \\ (y_{g,G} - y_{g,F})^2 + (z_{g,G} - z_{g,F})^2 &= (y_{g,G} - y_{g,T})^2 + (z_{g,G} - z_{g,T})^2 \\ x_{g,T} &= x_{g,G} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $x_{g,C}$ 、 $y_{g,C}$ 、 $z_{g,C}$ —— C 点在全局坐标系下的坐标。

入射光线 so 的单位向量为:

$$so = \begin{bmatrix} \cos \lambda \cos \varphi \\ -\cos \lambda \sin \varphi \\ \sin \lambda \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, λ ——太阳高度角, ($^\circ$); φ ——太阳方位角, ($^\circ$)。

定日子镜的反射光线可用目标点 T 和 o 点的坐标来描述反射光线单位向量 oT , 以表示为:

$$oT = c_1 \begin{bmatrix} x_{g,T} - x_{g,o} \\ y_{g,T} - y_{g,o} \\ z_{g,T} - z_{g,o} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, c_1 ——常量。

向量 oT 为单位向量, 可得 c_1 :

$$c_1 = \frac{1}{\sqrt{(x_{g,T} - x_{g,o})^2 + (y_{g,T} - y_{g,o})^2 + (z_{g,T} - z_{g,o})^2}} \quad (5)$$

定日子镜的单位法向矢量 n_l , 可由入射光线单位向量 so 和反射光线单位向量 oT 得到:

$$n_l = \frac{so + oT}{2c_2} = \frac{1}{2c_2} \begin{bmatrix} c_1(x_{g,T} - x_{g,o}) + \cos \lambda \cos \varphi \\ c_1(y_{g,T} - y_{g,o}) - \cos \lambda \sin \varphi \\ c_1(z_{g,T} - z_{g,o}) + \sin \lambda \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, c_2 ——常量。

同理, n_l 为单位法向矢量, 可得 c_2 :

于 H1, $\theta = 0^\circ$; 对于 H2, $\theta = 90^\circ$; 对与 H3, $\theta = 180^\circ$ 。

定日镜转动 β_h 的角度时, 其单位法向矢量的旋转变换矩阵(从 n_f 到 n_s)为:

$$[\beta_h] = \begin{bmatrix} \cos\beta_h & 0 & \sin\beta_h \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta_h & 0 & \cos\beta_h \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, β_h ——定日镜俯仰角, ($^\circ$)。

定日子镜转动 β_m 的角度时, 其单位法向矢量的旋转变换矩阵(从 n_s 到 n_l)为:

$$[\beta_m] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_m & \sin\beta_m \\ 0 & -\sin\beta_m & \cos\beta_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, β_m ——定日子镜滚转角, ($^\circ$)。

定日子镜单位法向量在不同坐标系中的关系为:

$$\begin{bmatrix} x_{m,l} \\ y_{m,l} \\ z_{m,l} \end{bmatrix} = [\alpha][\theta][\beta_h][\beta_m] \begin{bmatrix} x_{m,t} \\ y_{m,t} \\ z_{m,t} \end{bmatrix} \quad (11)$$

将式(7)、式(10)和式(11)代入式(8)整理可得定日子镜追踪太阳的理论俯仰角公式和理论滚转角公式:

对于 H1:

$$\begin{cases} \beta_m = \sin^{-1} \left[\frac{c_1(y_{g,T} - y_{g,O}) - \cos\lambda \sin\varphi}{2c_2} \right] \\ \beta_h = \sin^{-1} \left[\frac{c_1(x_{g,T} - x_{g,O}) + \cos\lambda \cos\varphi}{2c_2 \cos\beta_m} \right] \end{cases} \quad (12)$$

对于 H2:

$$\begin{cases} \beta_m = \sin^{-1} \left[\frac{c_1(x_{g,T} - x_{g,O}) + \cos\lambda \cos\varphi}{2c_2} \right] \\ \beta_h = -\sin^{-1} \left[\frac{c_1(y_{g,T} - y_{g,O}) - \cos\lambda \sin\varphi}{2c_2 \cos\beta_m} \right] \end{cases} \quad (13)$$

对于 H3:

$$\begin{cases} \beta_m = -\sin^{-1} \left[\frac{c_1(y_{g,T} - y_{g,O}) - \cos\lambda \sin\varphi}{2c_2} \right] \\ \beta_h = -\sin^{-1} \left[\frac{c_1(x_{g,T} - x_{g,O}) + \cos\lambda \cos\varphi}{2c_2 \cos\beta_m} \right] \end{cases} \quad (14)$$

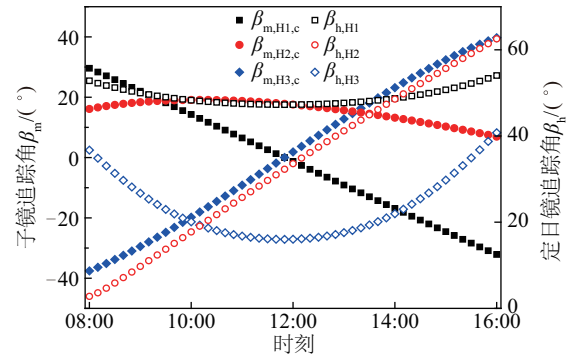
3 结果与分析

3.1 线非定日镜理论追踪角

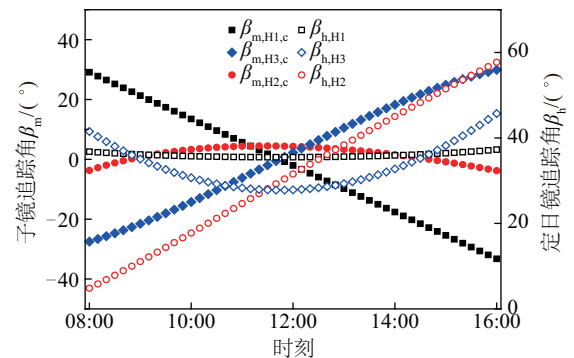
根据上海地区($121^\circ 8' 47'' E$, $30^\circ 55' 18'' N$) 1 a 之中春分、夏至、秋分、冬至 4 个典型日的太阳高度角和方位角, 通过式(12)~式(14)可计算出 3 组定日

镜中心子镜在 4 个典型日里任意时刻的理论追踪角。如图 7 所示, 分别为上海 1 a 中春分、夏至、秋分和冬至 4 个典型日里该系统追踪太阳过程中定日镜中心的理论追踪角, 系统运行时间为每天 08:00~16:00。从图 7 可看出, 对于同一组定日镜, 在不同典型日其理论追踪角随时间的变化趋势相同, 说明处于同一方向的定日镜具有相同追踪太阳的规律; 定日镜理论追踪角在不同节气日的变化范围不同, 以定日镜 H3 为例进行说明: 由于春分日和秋分日太阳高度角和方位角大小接近, 在这两天中定日镜 H3 的理论俯仰角和理论滚转角的变化范围相近; 而在夏至日随着太阳高度角的增大和方位角的变化范围加大, 定日镜 H3 的理论俯仰角和滚转角的变化范围为 $20^\circ \sim 50^\circ$ 和 $-30^\circ \sim 30^\circ$; 冬至日太阳高度角和方位角变化与夏至日相反, 定日镜 H3 的理论俯仰角和滚转角的变化范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 和 $-50^\circ \sim 50^\circ$ 。

由于同一组定日镜中子镜位置的不同, 在追踪太阳过程中, 定日镜中子镜的追踪理论俯仰角和理论滚转角在同一时刻都不相同。为了简单而精确地描述同一组定日镜中子镜的理论追踪角的时空变换特性, 在此需定义 2 个角差变量: $\Delta\beta_{h,id}$ 和 $\Delta\beta_{m,id}$



a. 春分日



b. 夏至日

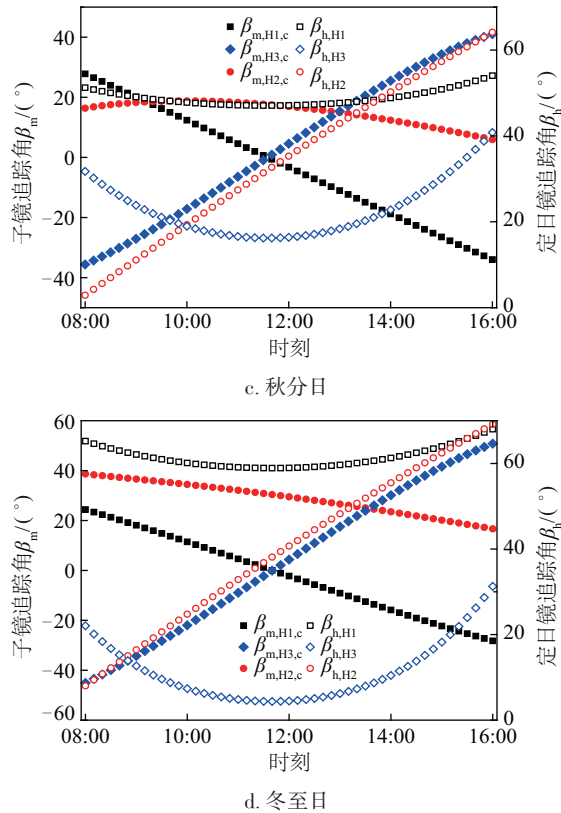


图7 3组定日镜中心子镜的理论追踪角在典型节气随时间的变化情况

Fig. 7 Ideal tracking angles of central sub-mirrors of three heliostats as a function of local time in the typical days

(其中 id 为定日镜中子镜的编号), 其中 $\Delta\beta_{h,id}$ 表示定日镜中第 id 个子镜与该定日镜中心子镜的俯仰角之差, $\Delta\beta_{m,id}$ 表示镜场中第 id 个子镜与该定日镜中心子镜的滚转角之差。根据定日子镜在系统运行过程中计算得到的理论俯仰角和理论滚转角来计算其与定日镜中心子镜在不同运行时刻的理论俯仰角差 $\Delta\beta_{h,id}$ 和理论滚转角差 $\Delta\beta_{m,id}$ 。

以定日镜 H3 夏至日(其他 2 组定日镜类似)为例进行说明。图 8 为夏至日定日镜 H3 及其子镜的理论追踪角差随时间的变化情况。从图 8a 可看出, 定日镜的理论俯仰角差的变化趋势相同, 但关于定日镜几何中心不对称, 对于单面定日子镜而言, 最大俯仰角差出现在 12:00; 离定日镜几何中心越远, 定日子镜的俯仰角差越大, 离定日镜几何中心最远的子镜在一天之中最大俯仰角差: 1 号子镜为 -0.12659° , 10 号子镜为 -0.20843° 。从图 8b 可看出, 沿定日镜中心对称的子镜的理论滚转角差大小相等, 方向相反, 且在所有子镜中最大的滚转角差

为 4.574° 和 -4.563° , 亦分别对应离定日镜几何中心最远的 2 面子镜: 1 号子镜和 10 号子镜。

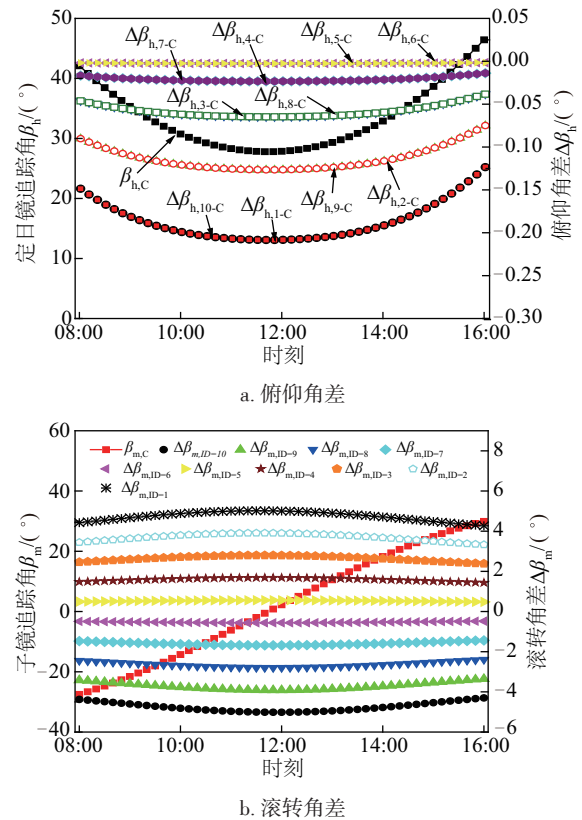


图8 夏至日定日镜 H3 及其子镜的理论追踪角随时间的变化

Fig. 8 Ideal tracking angles of each sub-mirror for H3 as a function of local time in summer solstice

3.2 线菲定日镜中子镜实际滚转角差的确定

该系统通过 1 个步进电机调节菲涅尔定日镜的俯仰角从而调节该定日镜中所有子镜的俯仰角, 而定日子镜的俯仰角差因为受到该系统定日镜机械结构的影响无法改变, 同时也为了削弱焦斑像散的影响, 同一定日镜中子镜的实际俯仰角都相同, 且与定日镜中心子镜的理论俯仰角保持一致; 从理论计算结果可看出, 定日子镜之间的理论俯仰角差相比其理论滚转角差不在同一个数量级上, 所以可忽略俯仰角差对整个系统光学性能的影响。

对于滚转角的控制则通过另一个步进电机同时进行调节, 无法对每个子镜的滚转角差按其理论滚转角差的变化进行实时的调节, 与定日子镜理论追踪角随时间的变化相比, 系统实际追踪太阳过程中定日子镜之间只能存在一个固定的滚转角差。

因此,在实际系统运行前,只能在其运行初始时刻设定定日镜中所有子镜滚转角差 $\Delta\beta_{m,id,act}$ 。在此定义一个新的变量滚转角跟踪误差:

$$\varepsilon_{m,id} = \Delta\beta_{m,id} - \Delta\beta_{m,id,act} \quad (15)$$

式中, $\Delta\beta_{m,id}$ 、 $\Delta\beta_{m,id,act}$ ——定日子镜的实际滚转角差与理论滚转角差, (°)。由滚转角跟踪误差的定义可知定日子镜的滚转角差的变化范围越小,其跟踪误差越小。因此,为保证定日镜系统具有最小的溢出损失,应当使定日子镜滚转角差的最大与最小追踪误差的绝对值相同,即定日子镜的实际滚转角差应设定为其理论追踪过程中最大滚转角差和最小滚转角差的算术平均值:

$$\Delta\beta_{m,id,act} = \frac{\Delta\beta_{m,id,max} + \Delta\beta_{m,id,min}}{2} \quad (16)$$

式中, $\Delta\beta_{m,id,max}$ 、 $\Delta\beta_{m,id,min}$ ——定日镜中子镜的滚转角差 $\Delta\beta_{m,id}$ 在理论计算时得到的最大值和最小值, (°)。

表 4 为用式(16)计算出的夏至日定日子镜的追踪角差。

表 4 夏至日 3 组定日镜中定日子镜的追踪角差 (°)

Table 4 Tracking angle difference of sub-mirrors for H1, H2 and H3 in summer solstice (°)

定日子镜 id	$\Delta\beta_{m,H1,act}$	$\Delta\beta_{m,H2,act}$	$\Delta\beta_{m,H3,act}$
1	4.574	6.011	4.642
2	3.570	4.691	3.622
3	2.557	3.359	2.594
4	1.538	2.018	1.559
5	0.513	0.673	0.520
6	-0.512	-0.672	-0.520
7	-1.534	-2.013	-1.561
8	-2.551	-3.345	-2.599
9	-3.561	-4.665	-3.632
10	-4.563	-5.969	-4.659

利用 Soltrace 软件模拟该系统在理论追踪和实际追踪时的光学效率,如图 9 所示,无论理论追踪还是实际追踪,系统的光学效率都先增后减,且均在夏至日 10:00 达到最大,分别为 61.22% 和 60.94%;实际追踪时系统的光学效率和理论追踪相比较差值最大为 8.20%,最小为 0.28%,说明实际滚转角差的设置较合理。

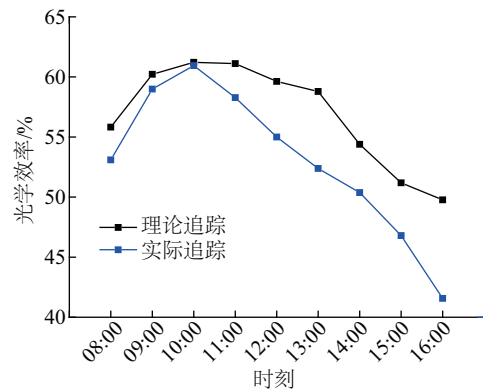


图 9 夏至日系统定日镜理论追踪和实际追踪效率

Fig. 9 Ideal tracking efficiency and virtual tracking efficiency of the system in summer solstice

4 结 论

1) 对于同一组定日镜,在春分日和秋分日其理论追踪角随时间的变化趋势相同;但在夏至日和冬至日其理论追踪角随时间的变化有较大差异。

2) 以计算得到的定日镜 H3 在夏至日追踪太阳的追踪角为例进行研究定日子镜理论追踪角的变化情况,结果表明:所有定日子镜的理论俯仰角差的变化趋势相同;沿定日镜中心对称子镜的理论滚转角差大小相等,方向相反;对于单面定日子镜而言,最大俯仰角差出现在正午,而且离定日镜几何中心越远,定日子镜的理论俯仰角差和理论滚转角差越大。

3) 定日子镜的实际滚转角差设定为其理论最大滚转角差和理论最小滚转角差的算术平均值,通过 Soltrace 模拟得到夏至日系统实际追踪和理论追踪时的光学效率,其差值最大为 8.20%,最小为 0.28%,说明实际滚转角差的设置较合理。

[参考文献]

- [1] Kalogirou S A. Solar thermal collectors and applications [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 3(3): 231—295.
- [2] Rabl A. Tower reflector for solar power plants [J]. Solar Energy, 1976, 18(3): 269—271.
- [3] Segal A, Epstein M. Comparative performances of 'tower-top' and 'tower reflector' central solar receivers [J]. Solar Energy, 1999, 65(4): 207—226.
- [4] Segal A, Epstein M. The optics of the solar tower reflector [J]. Solar Energy, 2000, 69(6): 229—241.

- [5] Segal A, Epstein M. Optimized working temperatures of a solar central receiver[J]. *Solar Energy*, 2003, 75(6): 503—510.
- [6] Leonardi E. Detailed analysis of the solar power collected in a beam-down central receiver system [J]. *Solar Energy*, 2012, 86(2): 734—745.
- [7] Wei Xiudong, Lu Zhenwu, Yu Weixing, et al. Ray tracing and simulation for the beam-down solar concentrator[J]. *Renewable Energy*, 2013, 50: 161—167.
- [8] Noone C J, Gobeity A, Slocum A H, et al. Site selection for hillside central receiver solar thermal plants [J]. *Solar Energy*, 2011, 85(5): 839—848.
- [9] 何梓年. 太阳能热利用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009, 173—174.
- [9] He Zinian. Solar thermal utilization[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009, 173—174.

DETAILED STUDY ON SUN-TRACKING CHARACTERISTIC OF A POINT-LINE-COUPPLING BEAM-DOWN CONCENTRATING SOLAR TOWER WITH LINEAR FRESNEL HELIOSTATS

Ma Xuan, Dai Yanjun, Li Xian, Wang Ruzhu

(*Institute of Refrigeration and Cryogenics, Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of M. O. E., Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

Abstract: A novel point-line-coupling solar tower system, which consists of three linear Fresnel heliostats (H) and corresponding beam-down concentrators (BC) is introduced and studied in this paper. Sun-tracking angle formulas of heliostats of this system are derived and attained, namely heliostats tracking angle β_h and sub-mirror tracking angle β_m , thus obtaining the tracking angle characters of heliostat H1, H2 and H3 on the representative days of spring equinox, summer solstice, autumn equinox and winter solstice entire year in Shanghai. Actually we take H3 as an example to fully calculate frame tracking angle difference $\Delta\beta_{h,id}$ and sub-mirror tracking angle difference $\Delta\beta_{m,id}$ between actual sub-mirrors and the center of heliostat frame. The objective of this work is to identify the actual sub-mirrors' tracking angles including frame tracking angle difference $\Delta\beta_{h,id}$ and sub-mirror tracking angle difference $\Delta\beta_{m,id}$ by investigating heliostats' ideal tracking angles of this point-line-coupling beam-down solar tower system. We also simulate the efficiencies of the systems under ideal sun-tracking angles and actual sun-tracking angles, where the maximum and minimum value of difference is respectively 8.20% and 0.28%, denoting the actual set is reasonable.

Keywords: solar energy; heliostats; beam tracking; equations of frame tracking angle and sub-mirror tracking angle; frame tracking angle difference; actual sub-mirror tracking angle difference