

文章编号: 1671-6612 (2020) 02-197-05

水平轴跟踪槽式太阳能集热器 动态集热量计算与分析

刘少锋¹ 杨正武² 司鹏飞² 戎向阳² 石利军²

(1. 中国城市建设研究院有限公司 北京 100120;

2. 中国建筑西南设计研究院 成都 610041)

【摘要】 介绍了两种槽式单轴太阳能集热跟踪模式, 建立了一种适用于不同跟踪方式下槽式水平轴集热器的动态集热量计算模型和计算流程。以拉萨为例详细分析了水平东西轴, 南北轴追踪模式下的集热器效率与集热量。结果表明, 该地区槽式水平轴集热追踪方式对集热器效率的影响很小, 对于供暖系统而言, 采用东西轴跟踪比南北轴跟踪方式提高约7%的集热量。

【关键词】 槽式太阳能集热器; 水平轴; 集热量; 集热效率

中图分类号 TU83 文献标识码 B

Calculation and Analysis of Dynamic Solar Energy Heat Collection by Parabolic trough Horizontal Axis Tracking

Liu Shaofeng¹ Yang Zhengwu² Si Pengfei² Rong Xiangyang² Shi Lijun²

(1. China Urban Construction Design & Research Institute Co., Ltd, Beijing, 100120;

China Southwest Architecture design and Research Institute Co., Ltd, Chengdu, 610041)

【Abstract】 This paper introduces two kinds of single-axis solar energy heat collection and tracking modes, a heat collection calculation model and calculation flow of horizontal axial collector with grooved surface are established for different regions, different times and different solar radiation intensities. Take Lhasa as an example, the collector efficiency and heat collection of horizontal east-west axis and north-south axis are analyzed in detail, the results show that, the efficiency of slot horizontal shaft collector in this area does not change with the change of tracking mode, with the horizontal layout of north and south focal lines, the east-west tracking mode is more conducive to increasing the heat collection, increasing the proportion by about 7%.

【Keywords】 Parabolic trough collector; Horizontal axis; Heat-collecting capacity; Collection efficiency

0 引言

随着全球能源问题日渐突出, 太阳能等可再生能源在全球范围内逐渐兴起。槽式太阳能光热转换技术因其集热温度高、易规模化等优点, 目前在城镇供暖工程中已被广泛关注。

目前对槽式跟踪太阳能集热器的研究主要集

中在传热特性研究和数值模拟方面。Dudley 等人^[1]通过实验方法研究了影响抛物面槽式集热管热效率、热损失的各种因素。熊亚选^[2]等建立了槽式太阳能聚光集热系统的二维经验模型, 应用试验数据验证了模型的可靠性。高志超^[3]针对 30m² 槽式太阳能集热试验装置研究了集热器关键结构参数和

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(编号: 51708532)

作者简介: 刘少锋(1983.08-), 男, 工学学士, 工程师, E-mail: 364158040@qq.com

通讯作者: 司鹏飞(1984.08-), 男, 工学博士, 在站博士后, 高级工程师, E-mail: 175987342@qq.com

收稿日期: 2019-06-14

运行参数对集热性能的影响规律。王金平^[4]等人分析了聚光集热器的传热过程特征，建立不同传热阶段的一维数学模型，分析了太阳入射角对槽式太阳能集热器的传热影响。罗继杰^[5]等提出一种槽式太阳能供暖方案，并通过工程实例分析检验该技术的供暖效果。许木成^[6]对槽式聚光集热器光热转换过程的基础理论及相关技术进行了概括，提出了一种计算 PTC 焦线能流密度分布的方法，并利用 Origin 软件对采用柱面接收器、V 形腔体接收器和平面接收器的 PTC 系统的焦线能流密度分布进行了计算；对抛物槽式太阳能集热器的余弦损失效应和末端损失效应进行了理论分析和实验研究；对槽式太阳能系统的跟踪模式以及跟踪控制设计的相关问题进行了分析研究；设计了具有快速粗略和慢速精确跟踪模式的跟踪控制系统。

现有研究基本侧重理论分析，在实际工程应用中不能快速指导设计计算，本文通过建立槽式水平轴跟踪太阳能集热器动态集热量计算数学模型，分别分析了槽式水平轴东西轴追踪与南北轴追踪集热器性能参数，为槽式太阳能供暖系统设计提供参考。

1 太阳跟踪计算模型

1.1 太阳跟踪的物理模型

为提高对太阳能的利用率，槽式跟踪集热器在应用中需要在方位角和高度角两个方位上不断跟踪太阳。常用的单轴跟踪方式包括：焦线南北水平布置，东西跟踪；焦线东西水平布置，南北跟踪（见图 1），工作原理基本相似。

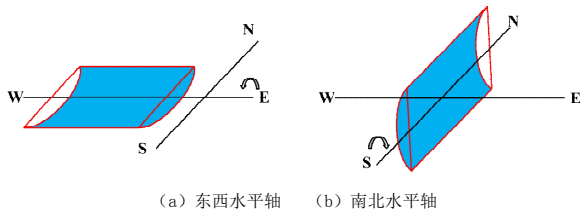


图 1 常用槽式水平轴聚光系统的跟踪方式

Fig.1 Tracking mode of horizontal axis

以图 1 (a) 为例，跟踪系统的转轴（或焦线）系东西方向布置，根据太阳赤纬角的变化使柱形抛物面反射镜绕转轴作俯仰转动，以跟踪太阳，采用这种跟踪方式时，一天之中只有正午时刻太阳光与柱形抛物面的母线相垂直，此时热流最大。而在早上或下午太阳光线都是斜射，所以一天之中热流的

变化比较大。采用单轴跟踪方式的特点是结构简单。

1.2 太阳跟踪的控制方式

太阳能自动跟踪装置是用来跟踪太阳，使集能器的主光轴始终与太阳光线相平行的装置，在使用中需要在方位角和高度角两个方位上不断跟踪太阳。自动跟踪装置由传感器、方位角跟踪机构、高度角跟踪机构和自动控制装置组成。当太阳光线发生倾斜时^[7]，传感器输出倾斜信号，该信号经放大后送入控制单元，控制单元开始工作，指示执行器动作调整太阳能集能器，直到太阳能集能器对准太阳。

1.3 太阳跟踪的数学模型

1.3.1 太阳跟踪角与入射角

太阳光线以入射角 θ 投射到集热器开口面上（见图 2）。

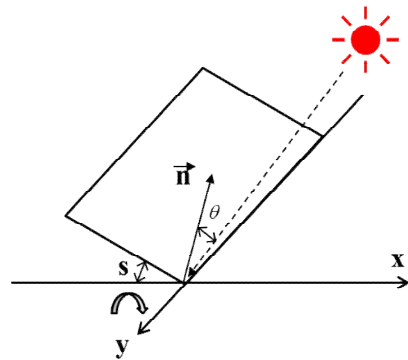


图 2 太阳光投射到集热器开口面示意图

Fig.2 Diagram of sunlight projecting onto the collector

于是可得：

$$\cos \theta = \sin S \cdot \cos \alpha_s \cdot \cos(r_s - r_n) + \cos S \cdot \sin \alpha_s \tag{1}$$

式中： S 为槽型开口面与水平面之间的夹角， $^\circ$ ； α_s 为太阳高度角， $^\circ$ 。

为了使入射角 θ 最小，式 (1) 对 S 求导，并令其为 0，可得：

$$\frac{d(\cos \theta)}{d(S)} = \cos \alpha_s \cdot \cos S \cdot \cos(r_s - r_n) - \sin S \cdot \sin \alpha_s = 0 \tag{2}$$

$$\text{即 } \tan S = \cot \alpha_s \cdot \cos(r_s - r_n) \tag{3}$$

(1) 东西水平轴跟踪

集热器绕东西水平轴旋转, 槽型开口面向南, 集热器方位角为 0° , 由式 (3) 可得集热器的跟踪角和入射角满足下列三角函数关系式:

集热器的跟踪角:

$$\tan S = \frac{\sin \alpha_s \cdot \sin \Phi - \sin \delta}{\sin \alpha_s \cdot \cos \Phi} \quad (4)$$

太阳光线入射角:

$$\cos \theta = (1 - \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega)^{1/2} \quad (5)$$

式中: S 为槽型开口面与水平面之间的夹角, $^\circ$; α_s 为太阳高度角, $^\circ$; Φ 为地理纬度; δ 为太阳赤纬角; ω 为时角, 每小时对应的时角为 15° , 从正午算起, 上午为负, 下午为正, 数值等于离正午的时间 (h) 乘以 15° ; θ 为入射角 (太阳入射光线与接收表面法线之间的夹角), $^\circ$ 。

(2) 南北水平轴跟踪

集热器绕南北水平轴旋转, 集热器方位角上午为 -90° , 下午为 $+90^\circ$, 由式 (3) 可得集热器的跟踪角和入射角满足下列三角函数关系式:

跟踪角:

$$\tan S = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\sin \Phi \cdot \sin \delta + \cos \Phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega} \quad (6)$$

太阳光线入射角:

$$\cos \theta = (\sin^2 \alpha_s + \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega)^{1/2} \quad (7)$$

1.3.2 槽型开口面太阳辐射

由于聚光集热器只能利用槽型开口面接收到的直射太阳辐射, 故槽型开口面太阳辐射强度只需计算直射辐射部分。槽型开口面上的太阳直射辐射照度为^[8]:

$$I_{D\theta} = I_{DH} \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \alpha_s} \quad (8)$$

式中: I_{DH} 为水平面上的直射辐射照度, W/m^2 。

2 槽式太阳能集热器动态集热量计算方法

2.1 槽式太阳能集热器性能参数

2.1.1 性能特征

以某品牌槽式集热器为例, 分别测试了五种不同太阳辐射强度下集热器效率与介质 (导热油) 温度间的变化关系 (见图 3)。数据表明在同一辐照度下, 随集热温度的不断升高, 集热器效率逐步下降; 当集热温度低于 100°C 时, 不同辐照度下集热器效率差异极小, 当集热温度超过 100°C 时, 集热

器接收的辐照度越低, 集热效率越低且随介质温度升高集热效率下降速率越快。

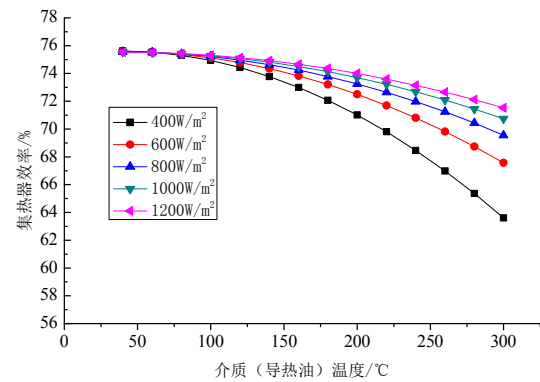


图 3 某品牌槽式集热器性能参数

Fig.3 Performance parameters of groove collector

2.1.2 效率方程

集热效率是槽式太阳能聚光集热器性能的一个重要指标。为进一步研究集热量计算方法, 通过对测试数据进行多元线性回归, 得到如下形式的瞬时效率方程:

$$\eta = 0.755 \cdot K_{\theta} + 0.037462 \cdot \left(\frac{\Delta T}{I_{D\theta}}\right) - 6.9526 \times 10^{-4} \cdot \left(\frac{\Delta T^2}{I_{D\theta}}\right) \quad (9)$$

式中: η 为槽式集热器的集热效率; ΔT 为室外空气与集热介质的温差, $^\circ\text{C}$; $I_{D\theta}$ 为槽式集热器开口面太阳直射辐射强度, W/m^2 ; K_{θ} 为入射角修正系数。

可以看出, 对集热效率的影响因素主要包括: 太阳直射辐照强度, 太阳入射角, 导热油与环境温差。

2.2 动态集热量计算

2.2.1 计算模型

通过式 (9) 建立的集热效率方程, 供暖季节有效集热量的数学描述为:

$$Q_u = \sum_{h=0}^{h=H} \frac{3600 \eta(h) \cdot A \cdot I_{D\theta}(h)}{1000} \quad (10)$$

式中: Q_u 为供暖季节的有效集热量, kJ ; A 为集热器采光面积, m^2 ; $I_{D\theta}(h)$ 为第 h 时刻槽式集热器开口面太阳直射辐射强度, W/m^2 ; H 为供暖季节的终了时刻, h ; $\eta(h)$ 为第 h 时刻集热器瞬时效率, $\%$ 。

本模型适用于不同跟踪方式下槽式水平轴集热器的动态集热量计算。

2.2.2 计算流程

针对确定的地理区位，导入典型气象年（TMY）数据库，建立槽式水平轴跟踪太阳能集热量计算流程，如图4所示。

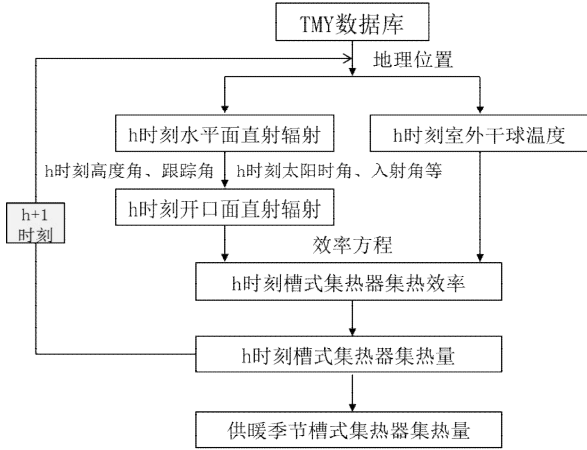


图4 槽式水平轴跟踪太阳能集热量计算流程

Fig.4 Calculation process of solar energy collection heat

3 槽式集热器在拉萨地区的性能分析

以拉萨为例，采用本文数学模型与计算流程，研究槽式水平追踪集热器集热量计算与其在该地区的性能。

拉萨地区^[9]太阳辐射强烈、冬季干燥寒冷、日较差大、采暖时间长等特征。拉萨其他气象参数如图7所示，年平均气温8.1℃，供暖设计室外温度-7.5℃，最冷月平均温度为-1.6℃，最热月平均温度16.4℃，全年太阳辐照量高达7331.2MJ/m²。该地区全年供暖时间段约为11月01日~次年3月31日。

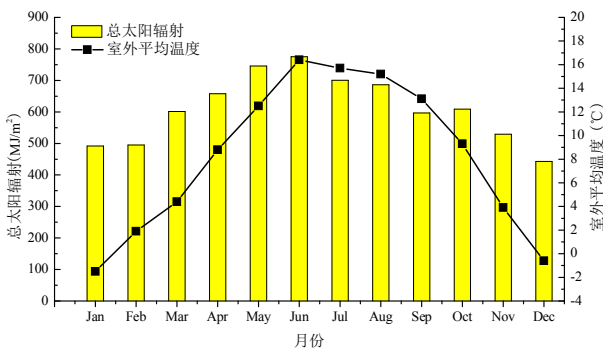


图5 拉萨主要气象参数

Fig.5 Main meteorological parameters of Lhasa

3.1 集热器跟踪角

集热器跟踪角与焦线布置方式相关，图6表述

了拉萨集热器采用东西、南北水平轴跟踪时角度的逐时变化情况。白天全天范围内，东西水平轴追踪集热器与水平面夹角范围45°~75°；南北水平轴追踪集热器与水平面夹角范围15°~85°；正午时刻夹角最小。

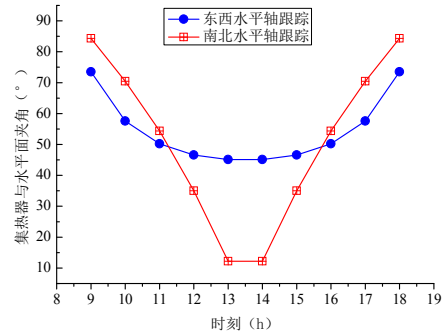


图6 集热器与水平面夹角的逐时变化

Fig.6 Hourly variation of the Angle between the collector and the horizontal plane

3.2 开口面接受的辐射量

两种追踪方式在典型日开口面接受到的辐照量变化如图7所示。东西水平轴追踪开口面全天辐照量与太阳直射辐射全天变化规律一致，曲线呈抛物物状，中午13:00-14:00最大，最高辐照强度1000W/m²；南北水平轴追踪开口面辐照量全天逐步增大，8:00-11:00快速增长到600W/m²后基本趋于稳定状态，15:00-16:00缓慢增长到800W/m²后达到最大。

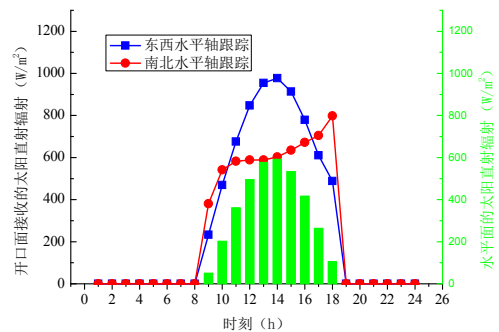


图7 两种跟踪方式典型日接收的辐照量变化

Fig.7 Changes of radiation received on typical days

由图7可知，典型日条件下东西水平轴追踪开口面接受到的辐照量大于南北水平轴追踪方式，最高可达66%，日平均差异约10%。

基于典型日条件下的辐照量变化，将计算区间放大至全年，以供暖季与非供暖季分别计算两种方式的开口面接收的辐射量，计算结果如图8所示。

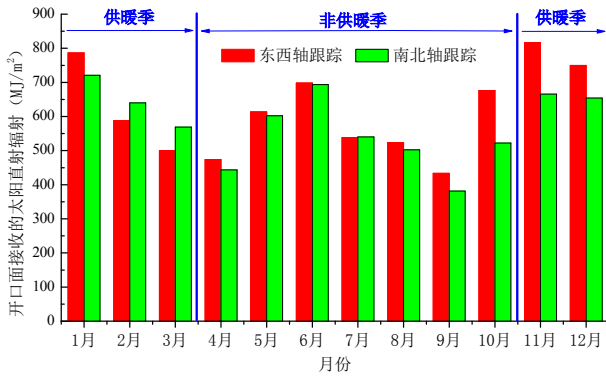


图 8 两种跟踪方式全年接收的辐照量变化

Fig.8 Changes of radiation received throughout the year

结果表明, 全年工况下, 东西轴追踪方式开口面辐射量 7399.44MJ, 南北轴追踪方式开口面辐射量 6934.68MJ; 供暖季东西轴追踪方式开口面辐射量 3441.96MJ, 南北轴追踪方式开口面辐射量 3249.72MJ。东西轴追踪方式集热量较南北轴追踪方式多 5.9%。

3.3 集热器效率参数

以集热介质 (导热油) 温度 190~200℃ 为基准, 以典型日工况条件下, 分析两种追踪方式下集热器效率, 如图 9 所示。

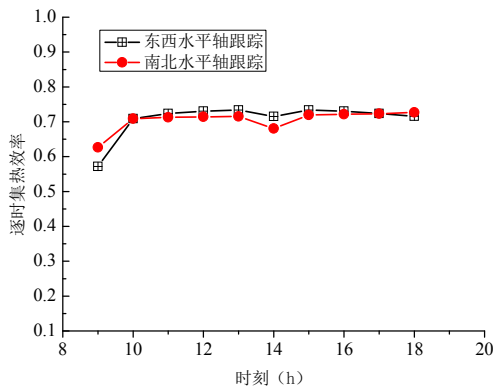


图 9 两种跟踪方式典型日集热效率变化

Fig.9 Variation of heat collection efficiency in typical daily

计算结果表明, 全年周期条件下东西轴追踪方式集热器效率约为 65.0%, 南北轴为 64.2%; 其中供暖季东西轴追踪效率约为 65.4%, 南北轴 64.7%。两种追踪方式下集热器效率变化很小。

3.4 集热量随时间的变化

基于槽式集热器开口面逐月辐照度与典型日集热器效率参数, 计算两种追踪方式全年集热量, 计算结果如图 10 所示。

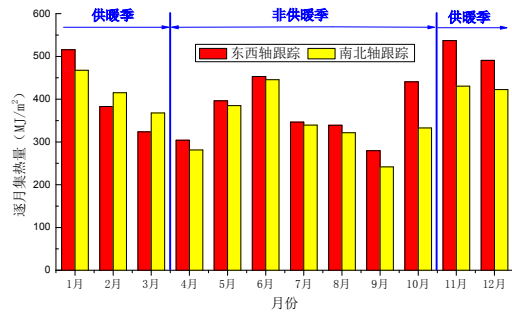


图 10 两种跟踪方式全年集热量变化

Fig.10 Variation of heat collection throughout the year

结果表明, 东西轴追踪方式全年集热量约 4809.6MJ, 供暖季集热量约 2251MJ; 南北轴追踪方式全年集热量约 4452.06MJ, 供暖季集热量约 2102.56MJ; 东西轴追踪方式集热量较南北轴方式提高了 7%。

4 结论

本文分析了两种槽式单轴太阳能集热跟踪模式, 建立了一种适用于不同跟踪方式下槽式水平轴集热器的动态集热量计算模型和计算流程。以拉萨为例, 计算了东西轴追踪与南北轴追踪的集热量与集热效率, 计算结果表明该地区槽式水平轴集热追踪方式对集热器效率的影响很小, 对于供暖系统而言, 采用东西轴跟踪比南北轴跟踪方式提高约 7% 的集热量, 实际工程应用中采用焦线南北水平布置, 东西跟踪方式更有利于增加系统集热量。

参考文献:

- [1] Dudley V E, Kolb G J, Mahoney A R, et al. Test re-sults:SEGS LS-2 Solar collector[J]. NASA STI/Recon Technical Report N, 1994,96:11437.
- [2] 熊亚选,吴玉庭,马重芳,等.槽式太阳能聚光集热器热性能数值研究[J].工程热物理学报,2010,31(3):495-498.
- [3] 高志超.抛物槽式太阳能集热技术系统集成研究[D].北京:中国科学院,2011:3-20.
- [4] 王金平,王军,张耀明,等.槽式太阳能聚光集热器传热特性研究[J].农业工程学报,2015,31(7):185-192.
- [5] 罗继杰,吉劼,倪龙,等.基于槽式太阳能供暖技术的工程实例分析[J].暖通空调,2016,46(10):112-117.
- [6] 许成木.槽式聚光太阳能系统光热能量转换利用理论与实验研究[D].昆明:云南师范大学,2014.

(下转第 208 页)