DOI:10. 3969/j. issn. 1674-1951. 2020. 05. 001

抛物槽式集热器双轴跟踪方式性能研究

Performance study on two-axis tracking method of parabolic trough collectors

张智,孙杰*,祁昊均 ZHANG Zhi,SUN Jie*,QI Haojun

(西安交通大学化学工程与技术学院,西安710049)

(School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘 要:针对抛物槽式集热器双轴跟踪方式进行了性能影响分析与几何受限条件下不同跟踪方式对比,开发了基于Matlab的抛物槽式集热器逐时集热量模拟程序并对程序进行了验证。研究结果表明:随着海拔的升高,单位面积全年累积接收太阳辐射总量先上升后缓慢下降,随着纬度的升高,单位面积接收太阳辐射量在一年内中分布不均匀性增强;在几何受限条件下,对于单轴跟踪,当边长比大于1时,南北布置相比东西布置全年累积接收太阳辐射总量Q更高,而边长比小于1时,东西布置比南北布置单轴的Q更高;随着单轴跟踪排数的增加,Q逐渐增加且一般高于双轴跟踪;在选定地理条件下,全年减排量与Q成正比;双轴跟踪方式下年平均单位接收太阳辐射量所需费用 最低,南北方向布置比东西方向布置所需费用更低。

关键词:太阳能;抛物槽式集热器;太阳辐射总量;双轴跟踪;地理因素;几何受限

中图分类号:TK 519 文献标志码:A 文章编号:1674-1951(2020)05-0001-07

Abstract: The performance affecting factors of two-axis tracking method taking by parabolic trough collectors were analyzed, and various tracking methods under different geometrically constrained conditions were compared. A time-intime heat collection simulation program for parabolic trough collectors was developed based on Matlab and validated. According to the analysis results, the solar radiation per unit area received annually shows an increase trend followed by a slight decline as the altitude rises, and its uneven distribution is more prominent as the latitude increases. Under geometrically constrained conditions, when the ratio of side length is greater than 1, the solar radiation per unit area received annually (Q) of a one-axis tracking device displayed in north-south direction is higher than that of the device displayed in east-west direction. As the row number of one-axis tracking devices increases, the Q gradually increases and is generally higher than that of two-axis tracking devices. Under the selected geographic conditions, the annual emission reduction is proportional to Q, and the cost of solar radiation per unit area received annually by two-axis tracking method is the lowest among various methods, and the cost of the devices displayed in north-south direction is lower than that displayed in east-west direction.

Keywords: solar energy; parabolic trough collector; solar radiation received annually; two-axis tracking; geographical factor; geometrically-confined

1 问题的提出

目前,全球一次能源消费中传统化石能源依旧 处于主导地位,但事实上,全球能源结构正在发生 深刻的改变。如2015年,全球一次能源消费仅增长 了1.0%,远低于10年平均水平1.9%,这是自1998 年以来的最低增长率。而可再生能源发电量增长 了15.2%,其增量创历史新高,几乎是全球发电量的 全部增量。因此,在未来的能源领域中,可再生能

收稿日期:2020-04-10;**修回日期:**2020-04-25 **基金项目:**国家自然科学基金项目(51776196) 源具有巨大的发展潜力。可再生能源中的太阳能 具有资源丰富、分布广泛、环保、安全等特点,成为 目前世界上最清洁、最现实、大规模开发利用最有 前景的可再生能源之一。国际能源署发布的《世界 能源展望2017中国特别报道》预测:中国能源结构 将逐渐转变为清洁发电,强有力的政策扶持与市场 推动将继续降低可再生能源的成本,其中太阳能光 热发电在2040年之后将在能源结构中占主导地位。 能源结构预测如图1所示^[1]。

在太阳能利用技术中,抛物槽式集热技术是目前主要应用于大规模中温型集热系统的集热技术,



也是目前太阳能热发电技术中相对比较成熟且已 实现商业化的一项技术。槽式集热器是槽式太阳 能集热系统的核心元件,需要时刻跟踪太阳位置以 保证聚光。传统抛物槽式集热器为单轴跟踪策略, 以抛物线顶点所在线为轴,采用南北轴或东西轴布 置,使跟踪系统始终保持太阳在抛物槽中心面上, 从而保证最大的太阳辐射投入面积,但会存在余弦 效应导致的余弦损失。而以双轴跟踪策略为基础, 可以使抛物槽面接收太阳辐射的角度始终最优,消 除余弦损失。但具体实施时往往对资金和工程技 术要求较高,且会受到不同地理位置的影响。因 此,根据不同地理因素设计合理的跟踪策略,对实 际的跟踪和工程应用均具有重要意义。

2 数理模型与计算方法

2.1 连续投影算法

本文主要针对抛物槽式集热器的双轴跟踪方 式开展研究。首先需要对抛物槽式集热器接收太 阳辐射过程进行建模与计算,在建立理论直射辐射 强度(Direct Normal Irradiance, DNI)计算模型前,需 要计算天顶角与太阳方位角,以完成对太阳的定 位。 连续投影算法(Successive Projections Algorithm, SPA)提供了一个精确的太阳位置计算方 法,从公元前2000年到公元6000年的不确定度仅 为±0.0003°。这种算法以世界时间(Universal Time, UT),即格林尼治公民时间为计算标准,因此, 对不同经度的地区进行计算时,需要考虑时区,将 当地时间转化为UT后再进行计算。除时间变量 外,地区的经纬度、年平均温度和气压、海拔都是必 要的输入量。SPA流程如图2所示^[2]。

SPA除了可以计算太阳天顶角,还可计算理论 太阳日出、日落时间。但计算得到的理论高度角在 一天中的每一时刻都有一个非零值,这与事实不 符,因为一天中日出前及日落后高度角为零。因 此,理论计算后,可根据日出日落时间对天顶角进 行修正。日出与日落时间计算流程如图3所示^[2]。



图3 日出与日落时间计算流程



2.2 理论DNI计算模型

理论DNI值E_{then}计算公式如下^[3]

$$E_{\rm theo} = E_{\rm on} \tau_{\rm h}$$
,

式中: E_{theo} 为理论直射辐射强度, W/m^2 ; E_{on} 为大气层 外太阳辐射强度, W/m^2 ; τ_{b} 为大气透射率。

$$E_{\rm op} = E_{\rm sc} \{ 1 + 0.033 \cos[360(3 + N)/365] \}$$

式中: E_{sc}为太阳常数^[4], 1367 W/m²; N为天序数。

$$\tau_{\scriptscriptstyle b} = a_{\scriptscriptstyle 0} + a_{\scriptscriptstyle 1} \exp\left(-k/\cos\theta_{\scriptscriptstyle z}\right) \,,$$

式中: a_0 , a_1 , k为修正系数; θ_2 为天顶角,其值由SPA

算法确定。

$$\begin{cases} a_0 = a_0^* r_0 \\ a_1 = a_1^* r_1 , \\ k = k^* r_k \end{cases}$$
$$\begin{cases} a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6.0 - A)^2 \\ a_1^* = 0.5055 - 0.00595(6.5 - A)^2 \\ k^* = 0.4237 - 0.01858(2.5 - A)^2 \end{cases}$$

式中: r_0 , r_1 , r_k 为气象因素修正系数;A为海拔,km。

理论DNI值需要地理、气象因素的修正,不同的 气候类型下修正系数不同,见表1^[5]。需要说明的 是,该理论DNI值只考虑天气状况为晴而不考虑多 云、雨等其他天气情况。

2.3 理论 DNI 计算程序验证

结合以上理论设计完成基于 Matlab 的 DNI 计算 程序编写后,本小节对本文计算结果与文献中的结

Гab. 1	Corre	ection coefficients under different climate
	表1	不同气候类型下的修正系数

types					
气候类型	r_0	r_1	r _k		
热带	0.95	0.98	1.02		
中纬度夏季	0.97	0.99	1.02		
亚北极夏季	0.99	0.99	1.01		
中纬度冬季	1.03	1.01	1.00		

果进行对比,以验证程序计算结果的准确性。

图4为文献[6]中已有计算结果,图5为本文计 算结果。通过对比图4、图5可知,本文计算结果与 文献计算结果十分接近。分析出现偏差的原因,主 要在于计算天顶角与方位角的方法不同。由此可 见,该计算程序具有一定的精确性,可用于之后的 计算。



图5 本程序计算所得的全年逐时理论DNI分布

b $\varphi = 40^{\circ}$

Fig. 5 DNI distribution according to hourly theory throughout a year based on the developed program

 $e \varphi = 60^{\circ}$

3 地理因素对抛物槽式集热器双轴跟踪性 能的影响

a $\varphi = 0^{\circ}$

3.1 地理因素对单位面积全年累积接收太阳辐射 总量 **Ψ**的影响

针对不同的纬度,计算分析双轴跟踪抛物槽式 集热器的 Ψ随海拔 A 的变化规律,如图 6 所示。由 图 6 可以看出:随着海拔的上升,Ψ先上升,到达一 个峰值后开始下降;在海拔达 3 800 m 左右时,不同 纬度下的 Ψ近乎相同;之后,纬度越高 Ψ越小。

3.2 地理因素对全年单位面积接收太阳辐射量 *Ψ*_d 分布的影响

分别计算分析不同纬度 φ 、不同海拔下 Ψ_a 的分 布规律,结果如图7所示。纬度较低时 Ψ_a 分布较为



d $\varphi = 80^{\circ}$



均匀,纬度较高时Ψ。则变化较大。

 $\varphi=0^{\circ}$ 时 Ψ_{d} 有2个峰值,海拔相同的条件下, Ψ_{d} 的极差为3.5 MJ/m²; $\varphi=20^{\circ}$ 时, Ψ_{d} 先增加,之后近似不变,最后减少,海拔相同的条件下, Ψ_{d} 的极差为5.0 MJ/m²; $\varphi=40^{\circ}$ 时, Ψ_{d} 先增加,之后增长速率变慢,

到达峰值后开始减小,海拔相同的条件下,Ψ_d的极 差约为17.0 MJ/m²;φ=60°时,Ψ_d先增加,之后下降, 最后趋于平缓,海拔相同的条件下,Ψ_d的极差存在 一定差别,海拔较低时极差为33.0 MJ/m²,海拔较高 时极差为44.0 MJ/m²。



4 几何受限条件下抛物槽式集热器跟踪模 式优化

针对城镇土地资源宝贵导致的区域几何受限 情况,寻找抛物槽式集热器在几何受限条件下的最 优跟踪方式具有重要意义。

本研究的几何受限区域是指总面积S一定,2条 边长分别平行于南北轴线和东西轴线且具有单连 通性质的矩形区域。研究的主要跟踪方式为单轴 跟踪(东西方向和南北方向)、双排单轴跟踪(东西 方向和南北方向)、3排单轴跟踪(东西方向和南北 方向)以及双轴跟踪,通过分析各跟踪方式下全年 累积有效太阳辐射量Q和全年有效太阳辐射量的分 布规律来寻求最优跟踪方式。

本文选取总面积为2 500 m²的方形区域,以南 北方向边长 l_{N-s}与东西方向边长 l_{W-E}的比r(l_{N-s}/l_{W-E}) 为自变量,计算分析r值不同时,不同跟踪方式下Q 和全年有效太阳辐射量的分布规律,并进行方案对 比评估以及经济性、环境性分析。

4.1 不同跟踪方式下的Q值

在几何受限条件下,以Q为指标,对抛物槽式集 热器的不同跟踪方式进行评估。通过图8可以很直 观地看出不同纬度、不同跟踪方式下Q与r的关系 (图中:1A_{N-S}为南北方向布置的单轴;1A_{W-E}为东西方 向布置的单轴;2×1A_{N-S}为南北方向布置的双排单 轴;2×1A_{W-E}为东西方向布置的双排单轴;3×1A_{N-S}为 南北方向布置的3排单轴;3×1A_{W-E}为东西方向布置 的3排单轴;2A为双轴)。整体而言,当r小于1时, 1A_{N-S}跟踪相比1A_{N-S}跟踪较优;当r大于1时,南 1A_{N-S}跟踪相比1A_{W-E}跟踪较优。同样方位下的单轴 跟踪,排数越多,Q越大。而双轴跟踪的Q一般小于 单轴跟踪,但r在1附近时,纬度较高时Q更大。

因此,r小于1时,可选择3×1A_{w-e}跟踪;r在1附 近时,对于低纬度可选择3×1A_{N-s}跟踪,高纬度可选 择双轴跟踪;r大于1时,可选择3×1A_{N-s}跟踪。

4.2 不同跟踪方式下全年接收太阳辐射量分布的 均匀度

变异系数可表示一组数据的离散程度,用标准





差比均值来表示。本小节通过计算分析不同纬度、 不同跟踪方式下,不同r值对应的全年接收太阳辐 射量的变异系数 C,来评估其分布的均匀性,如图9 所示。对于单轴跟踪,单排(东西方向和南北方向) 的 C,对任意纬度均为常数,东西方向的 C,小于南北 方向。随着纬度的上升,C,整体上升。当全年累积 接收太阳辐射量相近时,单轴追踪的集热器排数越 多,C,越大。而双轴跟踪的 C,随纬度、r不规则 变化。

4.3 环境性与经济性分析

4.3.1 环境性分析

相比于传统火力发电厂,采用太阳能集热器集 热可以减少CO₂,NO_x与SO₂的排放。本小节针对不 同跟踪模式的集热器,分别计算全年CO₂,NO_x与SO₂ 的减排量。根据文献[7],不同气体的等效减排量*m* 可分别表示为

$$\begin{split} m_{\rm CO_2} &= Q^{\rm c} f_{\rm CO_2}, m_{\rm NO_x} = Q^{\rm c} f_{\rm NO_x} (1 - \eta_{\rm NO_x}), \\ m_{\rm SO_2} &= Q^{\rm c} f_{\rm SO_2} (1 - \eta_{\rm SO_2}) \,, \end{split}$$

式中: Q^{e} 为输出相同电量时,火力发电厂依靠化石 燃料需要提供的热量,kJ; $f_{CO_{2}}, f_{NO_{2}}, f_{SO_{2}}$ 分别为CO₂, NO_x, SO₂排放因子; $\eta_{SO_{2}}, \eta_{NO_{x}}$ 分别为SO₂,NO_x的减排 效率,%。

对单轴跟踪与双轴跟踪,Q°的计算可表示为

$$Q^{\circ} = E/\eta^{\circ} = Q\eta^{\circ}/\eta^{\circ}$$
,

式中:E为等效全年发电量,kW·h;Q为全年太阳能

集热量,kJ;η°为抛物槽式太阳能电厂效率^[8],14%; η°为火电厂效率^[9],38%。

选取 φ =40°, r=1的条件, 计算几何受限时不同 跟踪方式下全年减少排放CO₂, NO₃与SO₂的情况, 其 结果如图10所示。

对比图 10 与图 8 中相同地理条件下全年累积 接收太阳辐射总量图可知:全年减排量与全年累积 接收太阳辐射总量 Q 成正比。 φ =40°, r=1时,全年 累积接收太阳辐射总量大小关系与全年减排量关 系一致,均为: 3×1A_{N-S}>3×1A_{W-E}>2A>2×1A_{N-S}>2× 1A_{W-E}>1A_{N-S}>1A_{W-E}>

4.3.2 经济性分析

本小节分析不同跟踪方式下抛物槽式集热器1 年的经济效益。定义单位接收太阳辐射量所需费 用为L,可表示为^[10]

$$L = \frac{f_{\rm cr}C_{\rm in} + C_{\rm om}}{E_{\rm Q}} ,$$

式中: E_{q} 为全年累积太阳辐射总量, kW/m^{2} ; f_{er} 为资本 回收率^[11],9.88%; C_{in} 为投资建造费用,欧元; C_{on} 为 操作与维护费用,欧元。

同样选取 φ=40°, r=1 的条件, 计算几何受限时 不同跟踪方式下一年平均单位接收太阳辐射量所 需费用,结果如图 11 所示。从计算结果可以看出, 在 φ=40°, r=1 时, 双轴跟踪具有最低的年平均单位 接收太阳辐射量所需费用。南北方向布置相比东 西方向布置所需 L 更低。



Fig. 9 Relationship between C_{q} and r under different latitudes and tracking methods







Fig. 11 *L* value by different tracking methods under geometrically constrained condition

5 结论

本文主要针对抛物槽式集热器展开研究,对抛 物槽式集热器接收太阳辐射量进行了建模与计算, 开发了基于 Matlab 的抛物槽式集热器逐时集热量 模拟程序,并对程序进行了验证。然后分析了地理 因素对抛物槽式集热器的双轴跟踪性能产生的影 响,并对几何受限条件下的抛物槽式集热器不同的 跟踪方式进行了评估与优化,结论如下。

(1)研究了地理因素对抛物槽式集热器双轴跟 踪性能的影响,发现随着海拔的升高,全年累积接 收太阳辐射总量先上升,在达到峰值后开始下降。 随着纬度的升高,全年累积接收太阳辐射量分布的 不均匀性增强。

(2)对比分析了几何受限时的不同跟踪方式, 得到了不同边长比下的最优跟踪方式。边长比小 于1时,东西布置的3排单轴跟踪全年累积接收太 阳辐射量最高;边长比在1附近时,在低纬度下选择 南北布置的3排单轴跟踪,高纬度下选择双轴跟踪; 边长比大于1时,选择南北布置的3排单轴跟踪。

(3)分析几何受限时不同追踪方式下的全年接 收太阳辐射量分布均匀度,发现单排单轴跟踪时变 异系数在任意纬度下均为常数,东西方向布置的变 异系数小于南北方向布置。当全年累积接收太阳 辐射量接近时,集热器排数越多,变异系数越大,且 随着纬度的增加,变异系数整体上升。对于双轴跟 踪,边长比大于1后,变异系数迅速上升,且随着纬 度的增大变异系数增大。

(4)在选定地理条件下,通过环境性分析发现, 全年减排量与全年累积接收太阳辐射总量成正比; 经济性分析结果显示,双轴跟踪具有最低的年平均 单位接收太阳辐射量费用,南北方向布置比东西方 向布置所需要的费用更低。

参考文献:

- [1]International Energy Agency. Renewable energy technologies-solar energy perspectives [R]. Paris: IEA Publications, 2011.
- [2]MARION W F, DOBOS A P. Rotation angle for the optimum tracking of one-axis trackers[R]. Colorado: NREL, 2008.
- [3]HOTTEL H C. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres[J]. Solar Energy, 1976, 18(2): 129-134.
- [4]DUFFIE J A, BECKMAN W A. Solar engineering of thermal processes [M]. 4th ed. New Jersey: A Wiley-Interscience Publication, 2013.
- [5]GRENA R. An algorithm for the computation of the solar position [J]. Solar Energy, 2008, 82(5): 462–470.
- [6]SUN J, WANG R L, HONG H, et al. An optimized tracking strategy for small-scale double-axis parabolic trough collector [J]. Applied Thermal Engineering, 2017,

郑州科润机电工程有限公司	(后插1)
华电水务科技股份有限公司(跨版)()	后插2,3)
华电环保系统工程有限公司(跨版)()	后插4,5)
华电新能源技术开发公司	(后插6)
国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术	
研发(实验)中心	(后插7)
华电分布式能源工程技术有限公司	(后插8)

112:1408 - 1420.

- [7]EGGELSTON S, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [M].
 Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, 2006.
- [8]WEINSTEIN L A, LOOMIS J, BHATIA B. Concentrating solar power [M]. Chemical Reviews, 2015, 115: 12797-12838.
- [9]PEI S. Analysis and study on thermal system of the 200 MW unit in Haibowan Power Plant [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.
- [10]LI Y, YANG Y. Impacts of solar multiples on the performance of integrated solar combined cycle systems with two direct steam generation fields [J]. Applied Energy, 2015, 160: 673-80.
- [11]PITZ-PAAl R, DERSCH J, MILOW B, et al. Development steps for parabolic trough solar power technologies with maximum impact on cost reduction [J]. Jouranl of Solar Energy Engineering, 2007, 129: 371-377.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

张智(1997一),男,湖南常德人,在读硕士研究生,从事 抛物槽式太阳能热发电技术的研究。

孙杰*(1982—),男,河南郑州人,研究员,工学博士,从 事太阳能热利用关键技术与系统集成等方面的研究(Email:sunjie@xjtu.edu.cn)。

祁昊均(1994—),男,湖北黄石人,在读硕士研究生,从 事抛物槽式太阳能热发电技术的研究。

告索引

Ļ

华电通用轻型燃机设备有限公司(后插9)
华电郑州机械设计研究院有限公司(跨版) … (后插10,11)
郑州科源耐磨防腐工程有限公司(跨版) (后插12,13)
华电重工股份有限公司(跨版)(后插14,15)
华电技术
华电郑州机械设计研究院有限公司(封三)
中国华电科工集团有限公司(封底)