

塔式光热发电技术在新疆典型地区的风速适应性分析

周翔宇, 杨都堂, 李建华, 薛刚强, 余翔
(浙江可胜技术股份有限公司, 浙江 杭州 310053)

摘要:近年来,以塔式、槽式、线性菲涅尔式技术路线为主流的光热发电技术得到了广泛关注。该研究以新疆哈密、吐鲁番等典型地区拟建的光热电站为研究对象,参考站址附近气象站、风电站实测风速及卫星数据提供的风速数据,综合判断站址处的实际风速,并重点分析高环境风速的气候情况对塔式光热电站发电量变化情况的影响。研究表明,新疆哈密、吐鲁番等典型地区光热站址的年平均风速分别约为 5.31 m/s 及 5.55 m/s。为了适应新疆地区的高环境风速气候环境,在当地设计和建设塔式光热电站时,需要采用性能比较合适的聚光集热系统设备来保障电站的发电量数据,例如选用合适设计工作风速和精度要求的定日镜设备,以及热损失较低的吸热器设备等。研究结果对新疆地区塔式光热电站的设计和选型提供了参考依据。

关键词:塔式光热电站;新疆地区;风速;设备选型

中图分类号:TK513.1

文献标志码:A

文章编号:1672-545X(2023)12-0149-05

0 引言

太阳能光热发电系统是指将太阳辐射能转化为热能,通过热电转换发电的系统。目前主流的太阳能光热发电技术路线分为塔式、槽式、碟式和菲涅尔式 4 种。其中槽式光热电站在全球市场上的装机规模最大,但是近几年,塔式光热电站已经迅速发展为可商业化应用的发电形式,成为未来最具潜力的光热发电技术。而光资源较为丰富的新疆地区更是建设光热发电项目的沃土。根据 2022 年 7 月 4 日新疆维吾尔自治区发改委发布的自治区 2022 年第二批市场化并网新能源项目清单,共计 13 个储热型光热发电项目被列入需电网消纳项目,光热总装机高达 135 万千瓦^[1]。

但与此同时,新疆地区的气候也有风速较高的特点。而塔式光热电站在新疆地区高风速条件下的运行表现如何,成为了众多光热项目投资方关注的问题。

通过对新疆第二批市场化新能源项目(表1)光热站址的卫星风速、实测风速及周边风电站实测风速的分析,推测出站址处的具体风速情况。并通过分析风速对塔式光热系统中各设备的影响分析,结合仿真计算的情况,旨在分析新疆地区的高风速气候对塔式光热电站出力情况的影响。

表 1 新疆第二批市场化新能源项目中配储光热发电项目清单

序号	所属集团	光热(万千瓦)	储热时长	区市
1	中国能建	15	8	
2	三峡新能源	10	8	哈密
3	国家电投	10	8	
4	大唐	10	8	
5	鲁能	10	8	昌吉
6	中国电建 & 鲲鹏储能	10	8	
7	唐山海泰	10	12	吐鲁番
8	国家电投	10	12	
9	中国能建	10	12	
10	国投电力	10	8	
11	中国电建	10	8	巴州
12	新华水发	10	8	
13	新华水发	10	8	博州

1 站址分布

中国幅员辽阔,纬度范围从 3°51'N~53°33'N,经度范围从 73°33'E~135°05'E,并且太阳能资源十分丰富,陆地每年接受太阳辐射能约为 50×10^{15} MJ,太阳辐射总量为 3350 ~ 8370 MJ/m²[2]。其中,新疆地区年日照时间较长,日照百分率为 60% ~ 80%,全疆日照 6 h 以上的天数在 250 ~ 350 天,水平面年辐射总量为 1400 kWh/m² ~ 1900 kWh/m²,年平均值为 1600 kWh/m²,

收稿日期:2023-09-11

第一作者:周翔宇(1995-),男,浙江台州人,硕士,工程师,研究方向:能源系统。

年总辐射量比同纬度地区高 10% ~ 15%^[3]。

同时,新疆也是全国风资源最丰富的地区之一,拥有九大风区,可安装风力发电机的面积约 1000 km²,风电装机规模仅次于内蒙古,位居全国第二^[4]。新疆特有的“三山加两盆”的地形条件会形成“狭管效应”,使得风速加大,形成了新疆风多、风大的气候特点^[5]。因此在新疆设计光热电站时,应充分考虑大风条件对电站运行带来的影响。

选择新疆两个规划光热项目最多的站址——哈密三塘湖镇和吐鲁番鄯善地区作为研究对象。这两个地区的光资源条件适宜光热电站开发的同时,也地处风区之中,全年的风速较大,对于本文的分析而言比较具有代表性。

2 站址风速数据分析

目前站址风速数据的来源主要有三种,分别是风电站的风速数据、中尺度的多年卫星风速数据、项目站址处短期的实测风速数据。而站址处的全年实测风速目前则是处于缺失状态。

为了探究站址处的实测风速情况,从而更详细地评估塔式光热电站在新疆高风速地区的运行表现,本文收集了站址附近风电场的实测风速,并根据风电场和站址的经纬度数据,搜集到了这些地点的多年中尺度卫星风速。当光热站址与附近的风电场的多年卫星风速均较为接近时,即可视为风电场的实测数据具有一定的代表性,可以作为依据去推断光热站址处的实测风速数据。

2.1 风速定义

在实际应用中,根据不同的测风高度与时距,在同一个地点亦会有多组不同的风速数据。为了便于理解,在此对部分风速术语的定义做如下规定:

年平均风速: 目标地点在一年的时间序列中,在 10 m 高测风,所有连续风速数据的平均值(不限时距)。

最大平均风速: 目标地点在在给定时间段中,10 m 高测风,所有连续 10 min 风速平均值的最大值。

最大瞬时风速: 目标地点在在给定时间段中,10 m 高测风,所有连续 3 s 风速平均值的最大值。

环境风速: 目标地点在 10 m 高测风的 10 min 平均风速。

2.2 吐鲁番鄯善地区风速分析

吐鲁番地处三十路风区和百里风区,有“陆地风库”之称。已知吐鲁番鄯善地区,站址经纬度为 90.95°E, 43.2°N 时,在站址附近有两座风电站,分别标记为 #1

风电站和 #2 风电站。两座风电站与站址处的距离约为 22 km 与 19 km。

2.2.1 卫星风速分析

对 3 个地址的近 20 年的年平均卫星风速进行统计分析得到的结果,如图 1 所示。

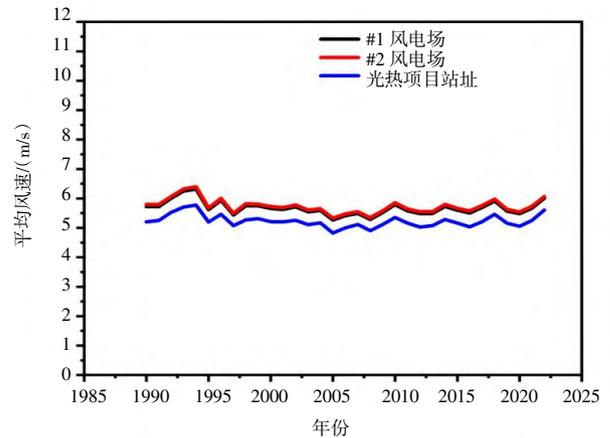


图 1 吐鲁番项目年平均卫星风速对比折线图

由图 1 可知,站址风电场的卫星风速与站址处的风速基本一致。可以得出风电站的风速数据与光热站址处的实际风速是接近的,因此若能收集到附近风电站的实测数据,以此为依据去推算光热站址处的风速数据是可行的。

2.2.2 风电场实测数据分析

现收集到 #2 风电站的实测的一整年的风速数据,统计得到表 2 所示的结果。

表 2 #2 风电场风速统计情况

参数	数据
年平均风速/(m/s)	5.55
最大平均风速/(m/s)	29.91
最大瞬时风速/(m/s)	44.86

由表 2 #2 风电场风速统计情况可知,该风电场测得的年平均风速为 5.55 m/s,最大瞬时风速为 44.86 m/s。

2.2.3 风速数据总结

根据收集到本项目周边风电测风数据推算,吐鲁番鄯善地区的年平均风速约为 5.55 m/s,最大瞬时风速约为 48.19 m/s。

2.3 哈密三塘湖镇风速分析

哈密三塘湖镇地处巴里坤县北部,区域面积 11000 km²。属丘陵、盆地地貌,海拔 900 ~ 990 m,云少雨稀,全年太阳总辐射量达到 2056.69 kWh/m²,是全国太阳辐射量较大的地区之一。三塘湖镇地处三塘湖-淖毛湖风区,多年平均最大风速达到 13.9 m/s,平均风速最大值为 1977 年的 18.74 m/s^[6]。

在该地区选择的光热电站站址经纬度为东经

94.295°, 北纬 44.426°。已知在站址附近 100 km 范围内有三座风电站, 分别标记为 #1 风电场、#2 风电场以及 #3 风电场。

2.3.1 卫星风速分析

图 2 是三个风电站址多年年平均卫星风速的情况。

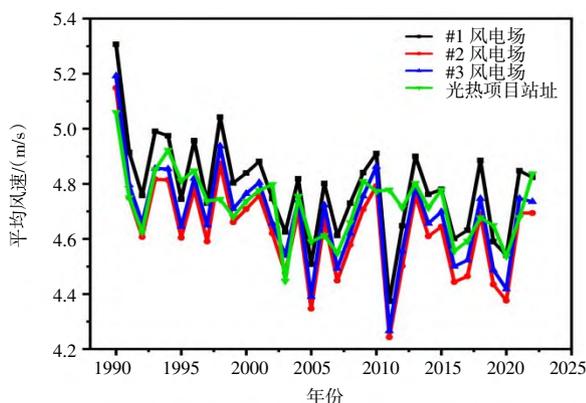


图 2 哈密三塘湖镇年平均卫星风速对比折线图

由图 2 可得, 三塘湖镇三处风电场的平均卫星风速与站址处的平均卫星风速的变化趋势一致, 因此以附近风电站的实测数据为依据去推算光热站址处的风速数据同样是可行的。

2.3.2 风电站实测数据分析

现在已经收集到 #1 风电场的 2021 年的全年实际测风数据。经过统计分析得到结果, 见表 3。

表 3 2021 年风速数据统计对比

参数	数据
年平均风速/(m/s)	5.31
最大平均风速/(m/s)	31.08
最大瞬时风速(瞬时, m/s)	43.57

2.3.3 风速数据总结

根据收集到本项目周边风测风数据推算, 吐鲁番鄯善地区的全年平均风速约为 5.31 m/s, 最大瞬时风速约为 43.57 m/s。

3 塔式光热电站的风速适应性分析

塔式光热电站的选址大多在戈壁地区, 聚光集热系统必须在露天的环境下工作, 不论是定日镜还是吸热器, 均会直面大风条件的影响。风速对塔式光热电站的影响包括定日镜运行风速、定日镜跟踪准确度(影响截断效率)、吸热器效率等, 后面对这几部分因素分开讨论。

3.1 定日镜生存风速

塔式太阳能聚光系统是由许多定日镜组成的庞大的定日镜镜场及其辅助系统, 定日镜分布在吸热塔的四围, 其投资占电站静态投资的 40% 左右。定日镜

的性能, 主要包括光斑大小、跟踪精度、抗风性能等, 直接影响着电站的发电量, 是影响塔式光热电站技术经济性优劣的关键因素之一。

3.1.1 定日镜风载荷

定日镜的风载荷一直是定日镜结构设计中的一个重要性能参数。对定日镜做风抗模拟分析后, 得到单镜风抗模拟的流线分布图如图 3 所示。从图 3 看, 大气边界层湍流遇到定日镜后, 会发生分离、漩涡脱落等绕流现象, 使湍流内部结构尺度不同的涡旋遭到破坏分解。如图所示, 气流在定日镜迎风面“停滞”, 气流速度接近为 0 m/s, 气流从定日镜四周绕过结构, 在定日镜背部形成涡流, 呈现负压特性。

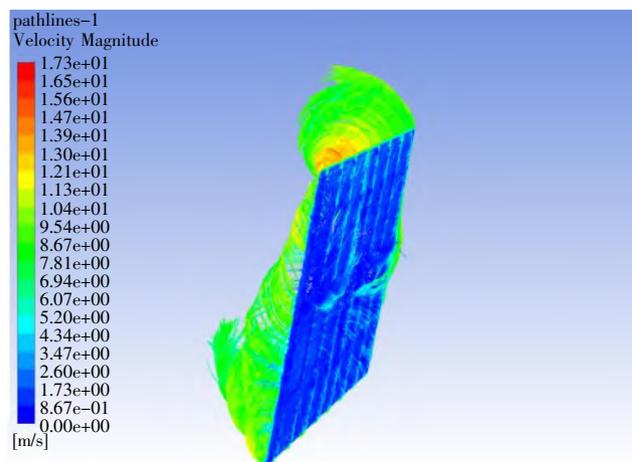


图 3 单镜风抗模拟流线图

当暴露定日镜于较大风速条件下时, 镜体前端边缘处出现由大涡旋破裂引起的高压区域, 诱使峰值较链力矩的出现及共振现象的产生, 导致结构破坏^[7]。

3.1.2 镜场运行风速

基于上文中对定日镜的风抗分析可知, 定日镜在设计时一般会有特定的最大工作风速, 当镜场中的环境风速高于定日镜的设计工作风速时, 定日镜场就必须启动关场流程, 此时定日镜就必须停止工作并转为安全姿态, 从而避免定日镜损坏的情况发生。Emes 提出了一个关于光热电站镜场运行的算式^[8]:

$$P = DNI|_{>threshold} \cdot \eta_f \cdot \psi_{CF} \quad (1)$$

其中: $DNI|_{>threshold}$ 为高于镜场的启动 DNI 的值 (W/m^2); η_f 为定日镜场效率; ψ_{CF} 为二进制的容量系数, 当环境风速低于定日镜设计风速时为 1, 高于定日镜设计风速时为 0。

由式(1)可知, 当镜场中环境风速高于定日镜的设计运行风速时, 容量系数会置 0, 从而在当前时刻镜场将无法提供能量输出。因此当定日镜的工作风速发生变化时, 镜场的运行时间也会发生变化, 从而影响到光热电站的年发电量。以哈密地区为例, 在相同

的镜场反射面积的前提下,分别仿真模拟了在采用不同风抗的定日镜在该风速下的发电量变化情况如图4所示(以采用12 m/s设计工作风速的定日镜时对应的发电量为基准值)。

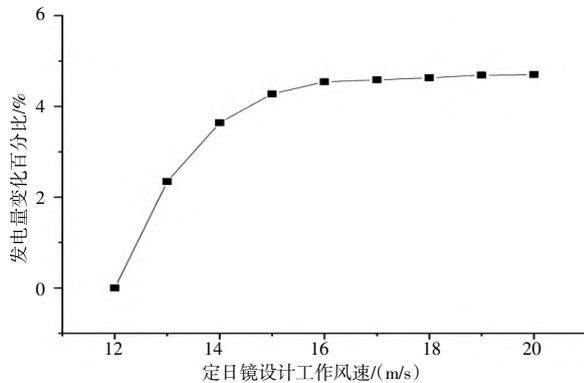


图4 不同定日镜设计工作风速对发电量的影响

由图4可知,在一定范围内提升定日镜的设计工作风速可以使塔式光热电站的发电量得到显著的提升。然而当定日镜的设计工作风速达到16 m/s后继续向上提升时,光热电站的发电量提升速率将会放缓。与此同时,为了达到更高的设计工作风速,定日镜的制造成本会不断提升。过高不必要的成本投入亦会造成电站的经济性下降。所以建议定日镜的设计工作风速最好介于15~16 m/s之间。

3.1.3 定日镜精度

定日镜作为塔式太阳能热发电系统中的聚光器,承担着持续不断将太阳光反射到吸热器的重任,定日镜的精度对于整个系统的聚光效率和聚光精度具有重要影响。定日镜旋转中心相对于太阳光经定日镜会聚于目标靶面上所形成图案的几何中心点与靶面上目标点之间连线的张角,被称为定日镜的跟踪准确度,又称跟踪误差^[9]。而大风所引起的定日镜及吸热塔的晃动,会对定日镜的跟踪准确度造成明显的影响,从而影响电站的整体效率。因此在设计和建设塔式光热电站时,需要考虑不同定日镜精度带来的影响。

由于定日镜一般是采用双轴跟踪的方式追日,因此可以分为水平精度与方位精度。不同精度的定日镜在哈密的高风速条件下的发电量变化情况如图5及图6所示(分别采用水平精度0.2 mrad和方位精度0.5 mrad定日镜对应的发电量为基准值):

根据仿真结果,建议在新疆的高风速地区,选用水平精度小于1.2 mrad,方位精度小于1.5 mrad的定日镜,有利于保证光热电站维持在一个较高的发电量水平。

3.2 吸热器热损失

在塔式光热发电系统中,吸热器是实现光热转化

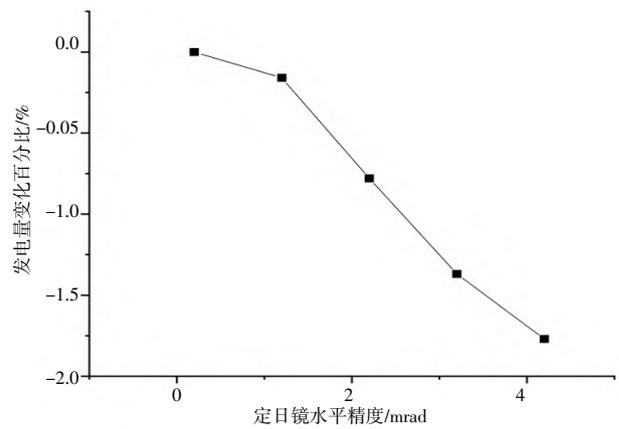


图5 不同定日镜水平精度对发电量的影响

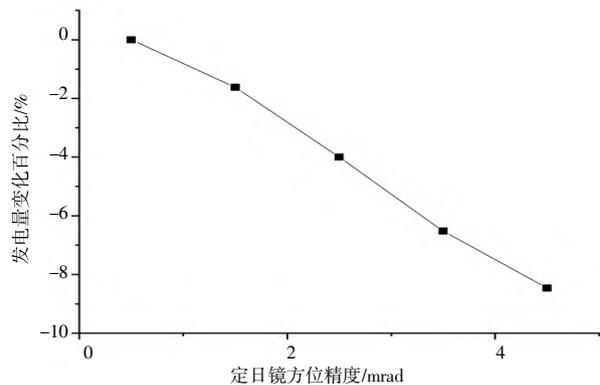


图6 不同定日镜方位精度对发电量的影响

的关键部件,其热效率会极大地影响整个系统的光热转换效率。由于吸热器一般安装在光热电站的中央塔顶部分,所以吸热器通常会在更高的风速下工作。以吐鲁番某100 MW项目为例,吸热器的中心标高高达210 m,根据不同高度风速折算的指数算式,吸热塔顶的风速会达到10 m高空的风速的1.44倍。吸热器的热效率计算式为:

$$\eta = \frac{Q_i - Q_{\text{loss}}}{Q_i} \quad (2)$$

式中: η 为吸热器热效率; Q_i 为入射热负荷; Q_{loss} 为吸热器热损失。

对于高空布置的熔盐吸热器,其热损主要包括有反射热损、对流热损、辐射热损及热传导热损算式为:

$$Q_{\text{loss}} = Q_{\text{ref}} + Q_{\text{rad}} + Q_{\text{conv}} \quad (3)$$

其中对于热传导热损,由于所占比例很小,效率估算时可忽略不计。而反射热损 Q_{ref} 主要取决于吸热器表面涂层的吸收率。辐射热损 Q_{rad} 与吸热器的有效受热面积、发射率以及吸热器管壁温度有关。仅有吸热器的对流热损失 Q_{conv} 会受到环境风速的影响。根据《传热学》^[10]中的公式,搭建的数学模型:吸热器的对流热损失包括沿吸热器圆周方向上的强制对流热损和沿高度方向上的自然对流热损,通常采用格拉晓夫数

Gr 与雷诺数 Re 来权衡二者的效应。当 $Gr/Re^2 \leq 0.01$ 时, 自然对流的影响可以忽略; 当 $Gr/Re^2 \geq 10$ 时, 强制对流的影响相对于自然对流可以忽略不计; 当 $0.01 \leq Gr/Re^2 \leq 10$ 时两种对流传热的作用都应加以考虑, 称为混合对流, 当两种对流同向时, 混合对流的努赛尔数为两种对流的努赛尔数之和。

现规定空气的对应物性参数见表 4。

表 4 空气的对应物性参数表

参数	符号
温度/ $^{\circ}\text{C}$	T_{mat}
密度/ (kg/m^3)	ρ_{mat}
比热容/ $(\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}))$	C_{pmat}
动力粘度/ $\text{Pa}\cdot\text{s}$	μ_{mat}
导热系数/ $(\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}))$	k_{mat}
运动粘度/ (m^2/s)	ν_{mat}
体膨胀系数/ $(1/\text{K})$	α_c
风速/ (m/s)	v_a

格拉晓夫数 Gr 的计算公式为:

$$Q_{\text{loss}} = Q_{\text{ref}} + Q_{\text{rad}} + Q_{\text{conv}} \quad (4)$$

$$Re_n = \frac{v_a L_d}{\nu_{mat}} \quad (5)$$

其中: g 为重力加速度; ΔT_{wa} 为温差。

通过 Gr/Re_n^2 的数值, 即可判断该管段与环境的对流换热状态。

同时, 普朗特数 Pr 为:

$$Pr = \frac{\mu_{mat} C_{pmat}}{k_{mat}} \quad (6)$$

自然对流的努赛尔数 Nu_n 为:

$$Nu_n = 0.098 Gr^{0.333} \left(\frac{T_e}{T_a} \right)^{0.14} \quad (7)$$

其中: T_e 为管屏壁温; T_a 为环境温度。

则自然对流换热系数 h_n 为:

$$h_n = \frac{Nu_n k_{mat}}{L_d} \quad (8)$$

强制对流雷诺数 Re_{fo} 为:

$$Re_{fo} = \frac{v_a d_o}{\nu_{mat}} \quad (9)$$

其中: d_o 为管屏直径。

对强制对流换热的 Nu_f 准则式选取试验准则式, 其中强制对流的努赛尔数 Nu_f 为:

$$Nu_f = 0.00239 Re^{0.98} + 0.000945 Re^{0.89} \quad (10)$$

则强制对流换热的换热系数 h_f 为:

$$h_f = \frac{Nu_f k_{mat}}{d_o} \quad (11)$$

则混合对流换热的换热系数 h 为:

$$h = (h_n^{3.2} + h_f^{3.2})^{1/3.2} \quad (12)$$

式中, h 为混合对流换热系数, h_f 和 h_n 分别为强制对

流与自然对流换热系数。

则吸热器对环境的对流散热损失 Q_{conv} 为:

$$Q_{conv} = \frac{h A_d (T_{wa} - T_a)}{1000} \quad (13)$$

式(13)表明, 吸热器的热损失与众多的因素有关。因此在理论上通过优化吸热器的尺寸, 在一定程度上可以降低吸热器的对流热损失。然而在实际应用中, 吸热器的尺寸设计也需要考虑定日镜的面积, 镜场的规模及排布等因素, 因此只能在较小的范围内进行调整。通过全年的逐时计算, 相同额定功率的吸热器在哈密和吐鲁番的风速下, 吸热器热效率相比较于在风速较小的站址 (平均风速约 3 m/s), 差距仅约为 1.76% 与 1.94%, 并不会成为导致发电量变化的主要因素。

3.3 小结

塔式光热电站的聚光集热设备需要长时间暴露在空旷环境中工作, 会直接受到高风速大风的影响。当环境风速增大时, 设备的工作性能均会出现持续性的下降, 甚至会因为风速超过设备运行风速而导致电站无法正常工作。因此在新疆高风速地区设计和建设塔式光热电站时, 需要充分考虑设备的性能参数能否在较高的环境风速下保持较好的工作状态, 从而保证塔式光热电站的正常出力。例如推荐选用 15 ~ 16 m/s 设计工作风速, 水平精度误差不大于 1.2 mrad, 方位精度误差不大于 1.5 mrad 的定日镜产品。吸热器的热损失并不是主要的影响因素, 可以在合适的范围内进行尺寸优化从而略微提升吸热器效率。

4 结论

新疆地区光资源丰富, 十分适合建设塔式太阳能热电站。目前结合卫星风速数据及周边风电站风速数据, 判断哈密三塘湖镇站址处的平均风速约为 5.31 m/s, 而吐鲁番鄯善地区的平均风速约为 5.55 m/s。相比于国内目前其他塔式光热电站的站址条件, 在新疆地区规划塔式光热电站将会受到更高风速的气候的挑战。

当塔式光热电站在高风速的环境下运行时, 定日镜的跟踪准确度会受到影响而降低。同时分析定日镜的风载荷, 可以得知定日镜在超过设计运行风速的运行情况下容易导致结构破坏。一旦环境风速高于定日镜的设计运行风速, 镜场就必须及时开启关场流程, 从而影响到镜场的年运行时间。因此在新疆地区设计和建设塔式光热电站时, 建议选用设计工作风速在 15~16 m/s 的定日镜产品, 在定日镜的精度要求上, 水

(下转第 157 页)

各串轴伸出轴在滑槽中向下运动,带动模型输送带在近似螺旋面的木板轨道上向下螺旋运动(因为实际的轨道是连续的,所以输送带在木板轨道拼接处的运动按照在无拼接处的运动推论)。



图7 模型俯视图



图8 模型立体图

实验还发现“夹持”传动中对木板轨道的倾斜度、精度及对运行速度等的要求比较低。

4 结语

通过研究螺旋输送带机构“夹持”传动的确定性问题,明确了“夹持”传动的螺旋输送带机构在一定条件下输送带具有确定的形态,实验验证输送带能够位置确定,在转筒驱动下能够平稳地螺旋运动。

参考文献:

- [1] 高宇,尹宏权,邵军晖,等.一种螺旋速冻机外驱动网带的转弯设计[J].冷藏技术,2020(6):38-41.
- [2] 刘永刚,杨文卓,谢金法,等.螺旋式速冻机转鼓的力学分析及结构优化[J].机械设计与制造,2014(7):78-83.
- [3] 王硕,王梦容.浅谈食品速冻技术[J].农家参谋,2019(19):192.
- [4] 岳希举,余铭,崔静,等.速冻食品及速冻设备的发展概况及趋势[J].农产品加工,2012(12):94-96.
- [5] 洪琳,朱必佳,孙宇.自堆积式螺旋速冻装置物理模型建立与验证[J].包装与食品机械,2019(2):40-43.
- [6] 金拯.一种非摩擦驱动螺旋带式输送的作用原理和运动分析[J].装备制造技术,2013(6):208-211.

(上接第153页)

平精度控制在1.2 mrad以内,方位精度在1.5 mrad以内。同时在合理范围内对吸热器的尺寸做适当的优化从而减少吸热器的热损失。合理的产品选型将更有利于塔式光热电站在新疆的高风速环境下维持良好的发电量。

参考文献:

- [1] 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟,新疆三个10万千瓦光热+90万千瓦光伏示范项目开工 [EB/OL].(2023-03-15),<http://www.cnste.org/html/xiangmu/2022/0711/9186.html>
- [2] 袁小康,谷晓平,王济.中国太阳能资源评估研究进展[J].贵州气象,2011,35(5):1-4.
- [3] 韩宇,张艳.新疆能源发展情况浅析[J].克拉玛依学刊,2013,3(6):8.
- [4] 孙智宇.新疆风电现状及发展建议[J].能源与节能,2020(1):2.

- [5] 李长春.新疆的风为什么这么厉害[J].地理教育,2009(1):66.
- [6] 董军.哈密地区最大风速变化及特征分析[J].电力勘测设计,2019,31(A01):4.
- [7] 廖驰,钟杰,戴靠山,等.塔式光热电站定日镜结构风致响应与振动控制研究综述[J].土木与环境工程学报(中英文),2023,45(2):166-178.
- [8] Arjomandi, Maziar, Emes, et al. Effect of heliostat design wind speed on the levelised cost of electricity from concentrating solar thermal power tower plants[J]. Solar Energy, 2015.
- [9] 全国太阳能标准化技术委员会.聚光型太阳能发电术语(标准状态:现行)(SAC/TC 402)GBT 26972-2011[S].北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2011.
- [10] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].4版.北京:高等教育出版社,2006.