

塔式太阳能热发电相关技术的最新进展

田 枫, 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] 塔式太阳能热发电是大型太阳能发电中最为经济和最具市场前景的发电方式. 本文在简要介绍了塔式太阳能热发电系统的工作原理和系统组成的基础上, 详述了国内外塔式太阳能电站的最新发展现状, 进一步对其核心部件定日镜的形制、镜场布局及主要设备吸热器及其吸热介质等关键技术进行了重点介绍和分析, 为推动塔式太阳能热发电技术在我国推广应用提供了相应的依据和技术参考.

[关键词] 塔式太阳能热发电, 定日镜, 聚光镜场, 吸热器

[中图分类号] TM615 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2015)03-0001-10

The Latest Development of Solar Power Tower Technology

Tian Feng, Zhu Xuemei

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

Abstract: Solar power tower is the most economical and market potential method in large-scale solar power generation plants. In this paper, on the basis of a brief introduction to the operating principle and system composition of solar power tower, the latest developments of solar power tower plants in domestic and international are described in detail. The technologies of heliostats, heliostat layout, and solar receiver, which are the core components of a solar power plant, are introduced and analyzed for providing the basis of the promotion of the solar power system in our country.

Key words: solar power tower plant, heliostat, energy concentrating field, solar receiver

自工业革命以来,人类社会科技高速发展,人口迅速增长. 20年后世界人口将从目前的70亿增至87亿^[1],带来的电力需求日益增长. 使用煤炭等传统能源发电带来了空气污染与温室效应等问题,太阳能发电则是解决这些问题的有效途径之一.

太阳能发电可分为两类,一类是利用半导体光生伏特效应的光伏发电(Photovoltaic, PV),另一类是利用太阳辐射的光热发电(Concentrating Solar Power, CSP). 光伏发电系统的核心是太阳能电池板,目前广泛应用的有单晶硅电池、多晶硅电池及薄膜电池^[2]. 光热发电的核心是聚光系统,根据聚光方式的不同,可将光热发电分为碟式、槽式和塔式等3种方式^[3]. 塔式系统采用了点聚焦式的集热方式,其结构如图1所示. 由图1可知,塔式系统主要由定日镜场、吸热塔和电力转换3个主要的子系统组成. 定日镜跟踪太阳,将太阳辐射光聚集至高塔上的吸热器,加热吸热器中的载热流体,以产生高温蒸汽,驱动汽轮机发电. 整个定日镜场中的太阳辐射能聚集到吸热器上,因此塔式系统可以达到较高的温度(最高可达1 000 ℃)^[4]和较大的功率级别(1 MW~500 MW),从而有效降低成本、提高效益. 自20世纪80年代以来,塔式太阳能热发电技术已完成试验、示范阶段,迈入商业化成长时期. 本文在总结塔式电站发展历程以及目前现状的基础上,重点对系统中定日镜场和吸热器等关键设备的相关技术进行了详细的介绍,其中包括定日镜的形制、定日镜的跟踪运转方式、定日镜场布局以及吸热器的结构、载热流体的特点等.

收稿日期:2014-12-30.

基金项目:国家自然科学基金(61273100)、国家高技术研究发展专项(2013AA050201).

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控制中的应用. E-mail:zhuxuemei@njnu.edu.cn

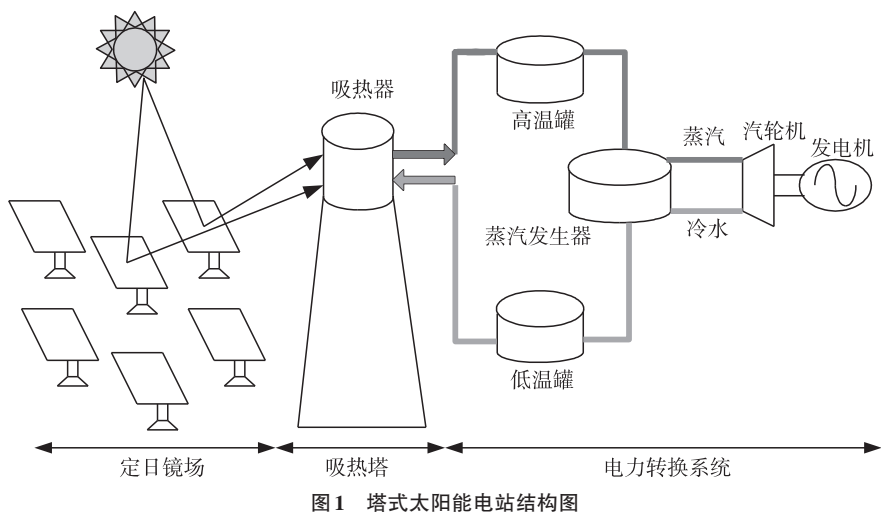


图1 塔式太阳能电站结构图

Fig.1 Structure diagram of solar power tower plant

1 塔式太阳能电站国内外发展现状

自20世纪80年代起,塔式太阳能技术吸引了全世界的目光. 西班牙、美国等国家率先建立了试验性质的塔式发电厂. 1981年西班牙 SSPA 电站运行,1983年 CESA-1 电站运行. 美国于1983年在加利福尼亚州建成了 Solar One 电站(后升级为 Solar Two)^[5]. 20世纪主要的塔式太阳能电站如表1所示. 由表1可知,此时塔式太阳能电站基本集中在发达国家,且最大发电量只有10 MW. 但这些电站证明了塔式太阳能技术的可行性及经济潜力,并对塔式系统的主要组成部分、热力系统、载热流体及储热部分进行了设计与优化,为之后新电站建设积累了重要的经验^[6-8].

表1 20世纪全球主要塔式太阳能电站

Table 1 Typical solar power tower plant in the 20th century

项目名称	国家	运行日期	单机容量/MW
SSPA	西班牙	1981	0.5
EURELIOS	意大利	1981	1
SUNSHINE	日本	1981	1
Solar One	美国	1982	10
CESA-1	西班牙	1983	1
THEMIS	法国	1984	2.5
SPP-5	俄罗斯	1986	5
TSA	西班牙	1993	1
Solar Two	美国	1996	10

进入21世纪,美国、西班牙等国在积累经验后建成了成熟的商业化发电站,发电量最高达377 MW. 此外载热流体呈现多样化,西班牙 Gemasolar 和美国 Tonopah 电站采用了熔盐,熔盐可直接作为储热介质,因此其储热时间远远长于其他电站, Gemasolar 甚至可24 h不间断发电.

相对于国外,国内塔式太阳能热发电发展得较晚. 2007年国内首座发电量70 kW的塔式太阳能发电系统在南京江宁建成并发电成功. 2008年北京延庆建造的亚洲首座1 MW级塔式太阳能电站,其主要目的就是研究塔式太阳能发电技术,并建立太阳能热发电实验系统和实验平台,为我国太阳能热发电技术的研究和发展奠定基础. 2013年7月5日,青海中控太阳能公司德令哈50 MW塔式太阳能电站一期10 MW工程顺利并网发电,标志着我国自主研发的太阳能光热发电技术向商业化运行迈出了第一步,填补了我国没有塔式太阳能光热发电的空白,为我国建设并发展大规模应用的商业化太阳能热发电站提供了强有力的技术支撑与示范引领. 全球主要运行的塔式太阳能电站如表2所示^[9-11].

表2 21世纪全球主要运行的塔式太阳能电站
Table 2 Typical solar power tower plant in the 21st century

项目名称	国家	运行日期	单机容量/MW	镜子面积/m ²	镜子数量	塔高/m	吸热器类型	载热流体	储热时间/h
PS10	西班牙	2007.06	11.0	120.000	624	115	腔式	水	1
Jülich	德国	2008.12	1.5	8.200	2 153	60	腔式	空气	1.5
PS20	西班牙	2009.04	20.0	120.000	1 255	165	腔式	水	1.5
Sierra	美国	2009.07	5.0	1.136	24 360	55	腔式	水	无
ACME Solar Tower	印度	2011.04	2.5	1.136	14 280	46	双面腔式	水	无
Gemasolar	西班牙	2011.04	19.9	120.000	2 650	140	腔式	熔盐	15
Lake Cargelligo	澳大利亚	2011.05	3.0	9.800	620	24	石墨式	水	无
大汉	中国	2012.08	1.5	100.000	100	118	腔式	水	1
Ivanpah	美国	2013.02	377.0	15.000	173 500	140	外露式	水	无
德令哈	中国	2013.07	10.0	2.000	217 440	80	外露式	水	2.5
Tonopah	美国	2013.10	110.0	62.400	17 170	165	外露式	熔盐	10

2 定日镜场中的关键技术

定日镜场是塔式太阳能电站中的核心系统,其建设费用约占建设电厂总成本的50%^[12],能量损失占比高达47%^[13].因此,降低定日镜成本对塔式电站投资至关重要.定日镜的研发以高反射率、耐磨损、易清洗以及低成本为目标,镜场的设计以提高镜场聚光比、土地利用率为原则.以下分别从定日镜的形制、定日镜的跟踪运转方式以及定日镜场布局3个方面逐一进行介绍.

2.1 定日镜的形制

定日镜主要由镜面、支架、基座等部分组成.镜面用以反射光线,其聚光性能至关重要,而聚光性能则与面型有关.定日镜面型有平面镜、曲面镜两种.平面镜对于光线没有汇聚作用,因此平面镜的面积不能过大,一般在1 m²~2 m²间,否则无法形成较好的光斑,典型的如德令哈的2 m²定日镜.曲面镜则与之相反,面积可达到100 m²以上,但其成本高、安装调试困难.镜面材料有两种,一种是低铁玻璃反射镜,如图2所示.国内外的定日镜场一般采用此种镜面,并会在镜面镀银,因为银的光反射率最高可达97%^[14],是最适合太阳光反射的材料之一.这种镜面结构简单,反射率高^[15].另一种是张力金属膜反射镜,如图3所示.这种镜面由一张金属膜构成,可以通过调节定日镜内部压力来调节定日镜的焦距^[16],但此类镜面未被广泛使用,因为这种镜面结构复杂,金属膜的清洁繁琐.魏秀东等人提出了一种轮胎面定日镜,此种定日镜会使光斑面积变小,聚光比增高^[17],但由于技术限制,加工较困难,难以推广.定日镜有矩形、圆形、多边形等多种形状.考虑土地利用率的条件下,定日镜设计为六边形最佳^[18].考虑强风作用下反射光偏离原有轨道,定日镜设计为正方形最好^[19].定日镜的支架一般采用金属框架,钢板结构镜架的抗风沙强度较好,对镜面有保护作用;钢框架结构镜架能减小镜面重量,减小定日镜运行时的能耗.定日镜的基座有如图2所



图2 玻璃反射镜
Fig.2 Faceted glass heliostat



图3 金属膜反射镜
Fig.3 Metal membrane heliostat

示的独臂支架式和如图3所示的圆底座式.独臂支架式结构简单,为保证稳定性需消耗较多原料;圆形底座式稳定性较好,机械结构强度高,但其结构比独臂支架式复杂.

2.2 定日镜的跟踪控制运转方式

太阳时刻在运动,定日镜为保证将不同时刻的太阳光反射至吸热器,必须跟踪太阳运动.定日镜的跟踪方式有闭环、开环以及开闭环相结合3种.闭环跟踪是使用传感器形成反馈跟踪,传感器测定太阳的位置作为反馈信号,提供位置的误差来控制定日镜调整形态.常用的传感器有光敏传感器、光电池等.这种方法精度高、成本高,但在多云等恶劣的天气情况下无法使用,无法规模化应用.开环跟踪是确定当前时刻太阳位置、定日镜的空间位置和吸热器的空间位置,通过光的反射定理即入射角等于反射角,从而确定定日镜的姿态.这种方式成本低,被广泛应用,但存在累计误差,需要定时校正定日镜.计算太阳位置有多种算法,迄今为止最精确的算法是由Reda和Andreas发表的太阳位置算法(SPA),这种算法适用于公元前2000年至公元6000年,且精度可达 0.0003° .表3中列出了主要的算法作者及其精度^[20,21].开闭环结合是以开环跟踪为主,闭环跟踪为辅,利用传感器进行误差校正,Solar One、PS10均采用了这种跟踪方式.

定日镜采用双轴转动以保证跟踪精度.目前转动方式有两种,方位角-仰角转动和自旋-仰角转动.如图4所示,图左为方位角-仰角转动,分为绕竖直轴和水平轴旋转;图右为自旋-仰角转动,采用镜面自旋,同时调整镜面仰角的方式实现定日镜朝向的改变.在非成像聚焦的情况下,定日镜分别采用方位角-仰角和自旋-仰角转动,采用自旋-仰角转动可以减少10%~30%的光斑溢出,与方位角-仰角相比,自旋-仰角使光斑更均匀地集中在吸热器上^[22],但自旋-仰角转动方式会消耗更多的能量.

定日镜一般采用集中控制和集中供能,目前已开发出由平行安装于定日镜表面的光伏电池提供电能的自主定日镜^[23].

表3 主要太阳位置算法列表

Table 3 Major solar position algorithm

作者	发布年代	精度/(°/mrad)
McFee	1975	0.5/8.73
Michalsky	1988	0.01/0.175
Blanco-Muriel (PSA)	2001	0.008/0.14
Grena	2008	0.002 7/0.047
Reda & Andreas (SPA)	2008	0.000 3/0.005

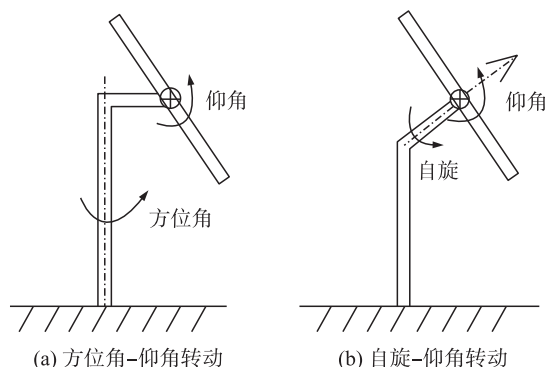


图4 两种转动方式

Fig.4 Two sun-tracking methods

2.3 定日镜场布局

在技术允许范围内以经济性为目标确定定日镜场布局,主要遵循两个原则:定日镜近塔密、远塔疏;在北半球的电站塔北密,塔南疏,南半球则反之.因此以塔的数量划分,布局有单塔镜场和多塔镜场两种.

单塔镜场的布局常见的有长方形、圆形、扇形、贝形等.在长方形、圆形的镜场中,吸热塔位于在镜场中心位置,因此镜场分为南北镜场两部分,如图5所示.由于余弦效应的存在,北镜场定日镜密度大于南镜场.扇形、贝形镜场是整个镜场位于吸热塔的北面.定日镜布置一般采用径向交错方式^[24],如图6所示,这种排列方式可以避免定日镜处于相邻定日镜反射光线的正前方而造成的遮挡损失.单塔镜场不能无限大,镜场的边界由吸热塔的高度和吸热器的相关尺寸决定^[25].一般塔的高度越高,镜场的面积越大.而在塔高一定的情况下,则要求边界定日镜的反射光斑能够被吸热器接收.为了避免定日镜相互碰撞,定日镜之间需要留有一定安全空间,如图7所示.定日镜的对角线长度 C ,为确保相邻定日镜之间无碰撞,取一定的安全间距 D ,相邻定日镜自由转动所需空间的大小是直径为 C 与 D 之和的球体,这样可完全避免定日镜发生机械碰撞.

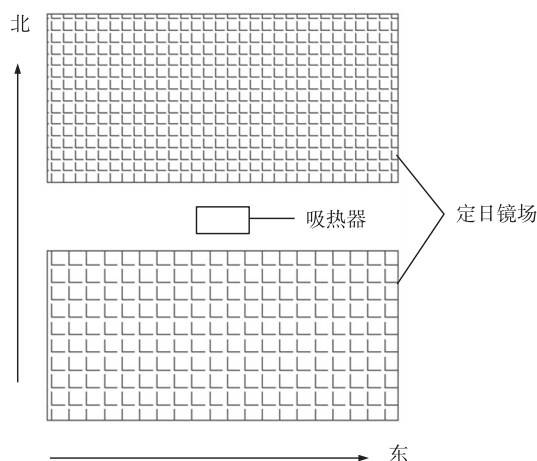


图5 长方形定日镜场

Fig.5 Rectangular heliostat field

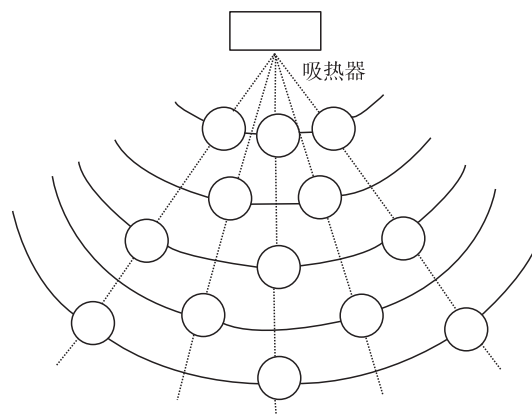


图6 定日镜场径向交错布置图

Fig.6 Radial staggered layout for positioning heliostats

Noone 等人提出了叶序螺旋布局. 通过比较径向交错状的 PS10 镜场, 叶序螺旋布局可以在效率高的位置放置更多的定日镜, 从而提供更高的光学效率并显著减少用地面积^[26]. 采用光线跟踪技术和参数搜索算法估计光学效率开发出的 HFLD^[27] (定日镜场布局设计), 是基于吸热器的开口大小和定日镜的效率因子进行镜场优化, 确保定日镜布置在光学效率高的区域内^[28]. 土地利用效率是由余弦效率、大气衰减率和截断效率三项乘积确定, 定日镜应放置在土地利用效率高的地区, 以提升电站的整体效率^[29]. Augsburg 和 Favrat 则研究了定日镜场的热量经济性能, 提供了有利于投资成本和环境效益的设计^[30].

由于单塔镜场面积不能无限大, 为了实现更大规模的发电, 提出了多塔式镜场的布局^[31]. 多塔镜场是在定日镜场中安装多个吸热塔, 吸热塔周边镜场呈现模块化, 并可加以拼接, 如图 8 所示. 多塔镜场中可以控制定日镜面向不同的吸热塔, 获得更多的热量, 提高土地利用效率, 减少阴影遮挡问题. eSolar 新的镜场设计抛弃了之前的长方形单塔布局而采用了多塔式布局. 单个模块镜场为六边形结构, 由四个子镜场围绕一个吸热塔构成, 如图 9 所示. 单个模块镜场共配装 47 000 面定日镜, 使得单个六边形镜场的集热面积从 28 000 m² 大幅增加至 103 000 m²^[32].

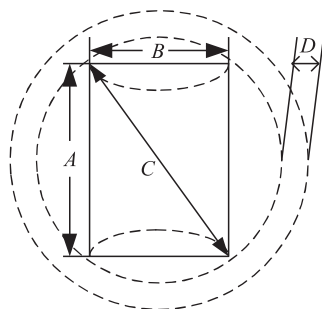


图7 定日镜旋转无障碍所需空间

Fig.7 The unimpeded space volume of the heliostat

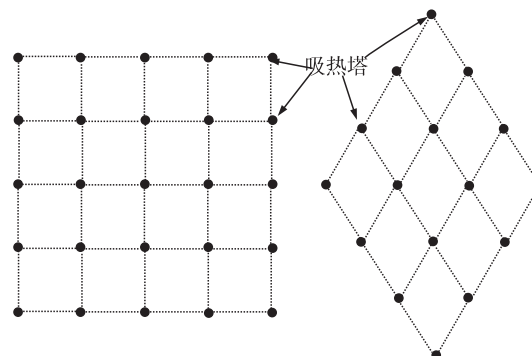


图8 多塔镜场阵列

Fig.8 Multi-tower solar array

3 吸热器中的关键技术

吸热器位于吸热塔的顶部, 吸收定日镜反射的太阳辐射, 将其转换成热量, 并将热量传递给载热流体. 根据吸热器的设计和传热流体的性质, 吸热器工作温度的范围可以从 250 ℃ 至 1 000 ℃^[11]. 目前塔式系统的吸热器种类相对于其他系统较少. 以结构形式可分为外露管状吸热器 (External Tube Receiver)、腔式吸热器 (Cavity Receiver) 和容积式吸热器 (Volumetric Receiver); 以载热介质可分为熔盐式吸热器、空气式吸热器、水/水蒸气式吸热器.

3.1 吸热器结构

外露式管状吸热器和腔式吸热器在吸收太阳辐射过程中, 载热流体流经管道吸收管道内壁的热量,

因此传热过程涉及了两个传导表面. 太阳辐射被管道外壁吸收, 外壁升温后将热量传递给内壁的载热流体. 在这类吸热器中, 管内外壁之间有一定的温度差, 所以材料由于经受到强热应力常常导致其会变形, 甚至会折断. 为了最大限度解决这一问题, 可引入辅助能源以均衡管两侧的温度.

外露式管状吸热器常见的有圆柱型和平板型. 典型的圆柱型管状吸热器如图 10 所示(Solar One 吸热器). 吸热器由 24 块特殊的板子组成一个直径为 7 米的圆筒. 板子是由许多直径很小的竖管子并排焊接而成的. 这些管子是由耐热镍铬铁合金制成的, 外面具有涂层. 由于吸热器温度较高, 必须采用耐高温且高温下吸收率高的涂层, 一般采用 Pyromark2500 系列高温漆作为吸热器的涂层材料^[33]. 平板型管状吸热器如图 11 所示(Brightsource 的 Ivanpah 吸热器), 与圆柱型的区别在于吸热器为立方体, 焊接过程较简单. 管状吸热器的面积要尽量的小以减少热损失, 最小面积是由管子的最大工作温度和载热流体的载热能力决定的. 管状吸热器可以接收镜场各个角度的太阳辐射, 有利于镜场的大规模设计, 且结构简单、成本低, 能够采用多种载热流体, 但由于吸热管直接暴露在外部环境中, 在多风天气时热对流损失较大, 因而管状吸热器的热效率较低.

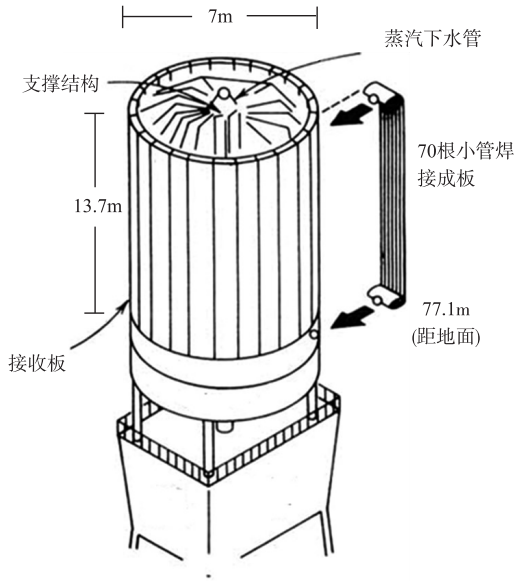


图 10 Solar One 圆柱型管状吸热器
Fig.10 Cylindrical tube receiver of Solar One

为了解决管状吸热器热损失大的问题, 腔式吸热器应运而生. 腔式吸热器将吸热面放置于一个有敞开口的隔热腔内部, 如图 12 所示. 腔式吸热器以一定的倾角固定在吸热塔上, 面对定日镜场. 定日镜场聚集的太阳辐射通过吸热窗口达到吸热面, 窗口面积一般占内部吸热面积的 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$, 窗口要尽量小以减少热对流和辐射损失. 以大汉电站腔式吸热器为例, 吸热器呈六棱柱型, 一天中大部分的辐射能量都分布在腔内的背表面和两侧后表面, 且其背表面中心处的能流密度最高. 根据辐射能量的分布规律, 在腔体内背表面和左右后表面处, 布置由 7 组受热面并联而成的蒸发面, 在左右前面处, 布置 4 组过热装置. 腔式吸热器内的圆管还有螺旋型

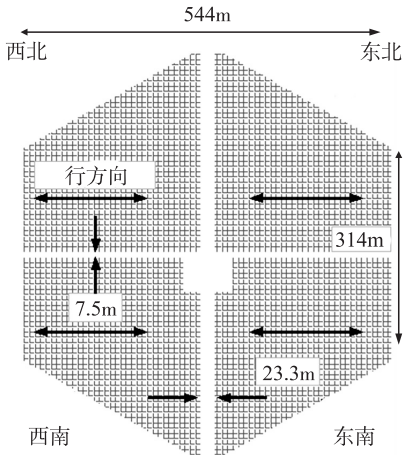


图 9 eSolar 模块镜场结构图
Fig.9 Structure diagram of an eSolar unit heliostat field

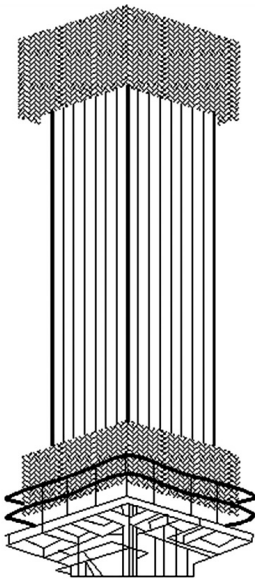


图 11 平板型管状吸热器
Fig.11 Flat tube receiver

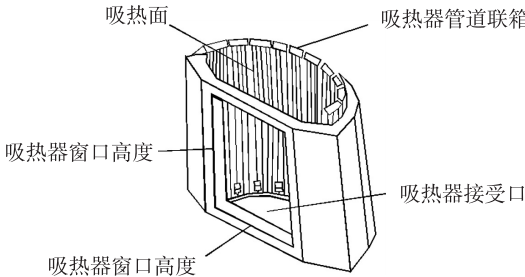


图 12 腔式吸热器
Fig.12 Cavity receiver

布置方式,其制造及安装方便,载热流体从入口处进入,沿螺旋管盘旋流动,吸收太阳能辐射热量.吸热管采用铬镍铁合金,可承受 800 ℃ 的运行温度;采用短纤维强化碳化硅陶瓷,运行温度最高可达到 1 000 ℃^[34].腔式吸热器的窗口限制了定日镜场的布置,较管状吸热器接收的辐射较少,但辐射损失、热对流损失比管状吸热器少,具有较高的热效率.

容积式吸热器具有金属或陶瓷材质的多孔结构,用以实现容积效应^[34].容积式吸热器里的多孔结构吸收定日镜场的太阳辐射,空气则被强制通过多孔结构,通过热对流的方式将空气加热.容积式吸热器可分为无压式和有压式.早期无压容积式吸热器采用了金属多孔结构,典型的是西班牙 TSA 吸热器,但金属作为吸热面,工作温度受到很大限制^[35].为解决这个问题,西班牙 PSA 平台开发出了碳化硅陶瓷材料,并将其做成模块化结构,每个模块由一个六边形接收器结构和一个 SiSiC 杯组成,水平直径长 120 mm,孔口面积为 0.49 m²,从而使吸热器可以组装为任意尺寸^[36],如图 13 所示.无压容积式吸热器中空气通过多孔结构时近乎层流流动而不是湍流,对流换热过程相对较弱^[37].针对此问题,PSA 设计了名为 REFOS 的有压式容积吸热器,如图 14 所示.在 REFOS 吸热器模块中,其前端设置了一个六棱锥面型的二次聚焦器,用来对定日镜场的反射光进行再次聚焦,以增强吸热器的热能流密度,提高工作温度.经过二次聚光后的太阳光穿过拱形石英窗口进入吸热器内.低温空气在环形空间内进行热对流后,高温空气经出口流出吸热器.此外,以色列开发研制了针状有压容积式吸热器 DIAPP,其采用圆锥型高压熔融石英玻璃窗口,内部主要构件为安插于陶瓷基底上的针状放射形吸收体,可将流经的空气加热到 1 300 ℃^[14].

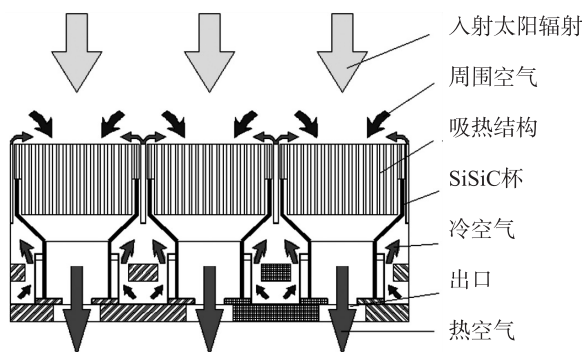


图 13 容积式吸热器结构图

Fig.13 Schematic diagram of a volumetric receiver

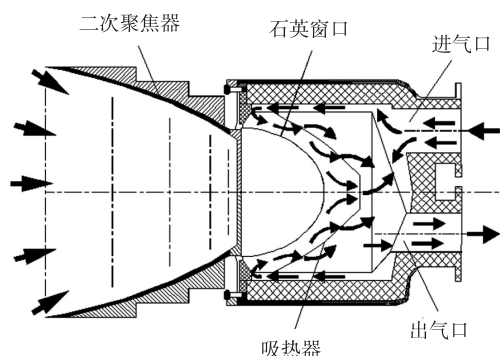


图 14 REFOS 有压容积式吸热器

Fig.14 REFOS pressurized volumetric receiver

3.2 载热流体

熔盐作为载热流体,应具有较大的热容和较好的热传导性能,因此一般采用硝酸钠、硝酸钾.熔盐吸热器一般为外露式吸热器,典型的有 Solar Two 的圆柱型吸热器,其结构与 Solar One 吸热器类似,熔盐从北侧分两路进入吸热器,在中间进行交叉换热,从南侧流出 565 ℃ 的熔盐.熔盐能够承受较高的温度从而提高效率,高温熔盐流入热盐存储罐可蓄热从而简化系统的结构.但熔盐在高温时具有一定的腐蚀性,低温时熔盐凝固会导致管路堵塞,这些问题制约着吸热器的研发.为控制好熔盐的温度,要根据吸热器的管壁温度实时调节熔盐的流量,在系统运行前要对吸热器及其管路进行预热.此外熔盐系统管路上需要保持一定的倾角,保证发生故障时,熔盐可以顺利回流^[38].

采用水作为载热流体,一般为外露式吸热器或腔式吸热器,其设计类似于锅炉. Solar One 吸热器 24 块吸热板采用中有 6 个用于预热水,其余用来产生蒸汽.但水在吸热过程中有相的变化,为避免不饱和蒸汽对汽轮机造成损害,对产生的蒸汽需要进行加热,保证饱和蒸汽流出.水无毒、无腐蚀,比热容大,但加热过程中会出现汽包等现象,蓄热时需要高温、高压环境,对蓄热器提出的要求较高.

由于电站一般建在干燥空旷、远离人烟的地方,有时熔盐和水汲取十分不便.空气作为载热流体,取用便利,不需要预热防止凝固,没有相变,安全无污染.容积式吸热器一般采用空气作为载热流体,吸热器可以达到较高的温度,易于操作和维护.但空气的传热能力差,采用额外强制传热措施会增加吸热器成本.3 种载热流体各有其优缺点,相关的参数比较如表 4 所示^[39].

表4 3种载热流体的参数比较

Table 4 Comparison of the performances of molten salt, water/steam, air

载热流体	吸热器	典型吸热器	出口温度/℃	平均太阳辐射密度/(kW·m ⁻²)
熔盐	管状/腔式吸热器	Solar Two	565	430
水	管状/腔式吸热器	Solar One	510	140
空气	无压容积式	SOLAIR-3000	720	370-520
	有压容积式	DIAPP	1 300	3 600-5 300

4 其他系统

塔式太阳能发电本质上属于热发电,电力转换与其他火力发电的电站原理相同.热能向电能转换效率的高低,依赖于热力循环的效率和元件的性能.3种主要热力循环是布雷顿循环(SCR-BC),朗肯循环(SCR-RC)和复合循环(SCR-CC).由于太阳辐射随着时间的变化而改变,而热发电系统要求输出稳定,所以塔式太阳能热发电站设有蓄热系统和辅助能源系统.蓄热系统把高于负荷的热量送入蓄热器中给予储存,当吸热器接收太阳辐射低于负荷时,由蓄热器储存的热能给予补足,使发电机稳定运行.当没有太阳或者极端天气无法开场的情况下,如黑夜和雪天,塔式太阳能热发电系统设有辅助能源系统,如设有天然气燃气轮机发电,用以供给发电.

5 结语

塔式太阳能热发电聚光比大,工作温度高,与其他太阳能热发电相比成本更低,可实现大功率发电,具有广阔的发展前景.国家相关政策鼓励发展太阳能发电产业,国家能源局发布的《太阳能发电“十二五”规划》提出:到2015年底,我国太阳能光热发电完成装机100万kW.相对国外,国内太阳能发电起步晚,技术尚不成熟.我国太阳辐射量高的地区位于自然环境较恶劣的地区,不仅要考虑提高热发电效率,还必须考虑塔式电站的建造、维护等问题.本文重点阐述了塔式太阳能热发电系统中的核心部件定日镜和吸热器的关键技术,总结了定日镜的形制、跟踪运转方式以及镜场布局,分析了不同吸热器的优势和缺点,为塔式太阳能热发电系统设计提供了依据.

[参考文献](References)

- [1] Anon. Renewable energy outlook[EB/OL]. [2014-11-20]. <http://www.worldenergyoutlook.org>.
- [2] Dhyia Aidroos Baharoon, Hasimah Abdul Rahman, Wan Zaidi Wan Omar, et al. Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently—a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015 (41): 996-1 027.
- [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): 27-33. 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): 27-33. (in Chinese)
- [4] Dolf Gielen. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Volume 1: Power Sector Issue 2/5, Concentrating Solar Power[EB/OL]. [2014-11-20]. http://www.researchgate.net/profile/Dolf_Gielen/publications/6.
- [5] Siva Reddy V, Kaushik S C, Ranjan K R, et al. State of the art of solar thermal power plants—a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013(27): 258-273.
- [6] Robert Pitz-Paal, Jurgen Dersch, Barbara Milow, et al. European concentrated solar thermal road-mapping[EB/OL]. [2014-11-20]. <http://www.promes.cnrs.fr/uploads/pdfs/ecostar/ECOSTAR.Summary.pdf>.
- [7] CSPWorld. CSP markets report series 2014[EB/OL]. [2014-11-20]. <http://www.cspworld.com>.
- [8] CSPToday. Solar tower report 2014: cost performance and thermal storage[EB/OL]. [2014-11-20]. <http://social.csptoday.com>.
- [9] NREL. Power tower projects[EB/OL]. [2014-11-20]. http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/power_tower.cfm.
- [10] Wang Zhifeng, Yao Zhihao, Dong Jun, et al. The design of a 1 MW solar thermal tower plant in Beijing, China[EB/OL]. [2014-11-20]. http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-75997-3_354?LI=true.

- [11] Anon. The feasibility and policy study on developing concentrating solar power in China[EB/OL]. [2014-11-20]. http://aceii.org/EventAgendas/CSP%20in%20China_EN%20Summary.pdf.
- [12] Kolb G J, Jones S A, Donnelly M W, et al. Heliostat cost reduction study[EB/OL]. [2014-11-20]. <http://www.prod.sandia.gov/cgi-bin/techlib/access-control.pl/2007/073293.pdfS>.
- [13] William B S, Micheal G. Power from the sun[EB/OL]. [2014-11-20]. <http://www.powerfromthesun.net/book.htm>.
- [14] 钟史明. 塔式太阳能热发电综述[J]. 沈阳工程学院学报, 2013, 9(1): 1-6.
Zhong Shiming. Brief description for tower solar thermal power generation[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering, 2013, 9(1): 1-6. (in Chinese)
- [15] 王孝红, 刘化果. 塔式太阳能定日镜控制系统综述[J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2010, 24(3): 302-307.
Wang Xiaohong, Liu Huaguo. Control system of heliostat in center solar receiver[J]. Journal of University of Jinan: Science and Technology, 2010, 24(3): 302-307. (in Chinese)
- [16] 曹传钊, 郑建涛, 刘明义, 等. 塔式太阳能热发电技术的发展[J]. 可再生能源, 2013, 31(12): 21-25.
Cao Chuanshao, Zheng Jiantao, Liu Mingyi. The development of solar power tower technology[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(12): 21-25. (in Chinese)
- [17] 魏秀东, 卢振武, 林梓, 等. 太阳能塔式电站轮胎面定日镜的设计及性能分析[J]. 光子学报, 2008, 37(11): 2 468-2 472.
Wei Xiudong, Lu Zhenwu, Lin Zi, et al. Design and performance analysis of toroidal heliostat in solar tower power plant[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(11): 2 468-2 472. (in Chinese)
- [18] 丁婷婷, 祝雪妹. 塔式太阳能电站聚光镜场的土地利用效率研究[J]. 可再生能源, 2012, 30(10): 11-14.
Ding Tingting, Zhu Xuemei. Study on ground coverage of heliostats field in central receiver solar power plant[J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(10): 11-14. (in Chinese)
- [19] 宫博, 李正农, 王志峰. 定日镜反射板基于薄板弯曲理论的挠度分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(7): 900-903.
Gong Bo, Li Zhengnong, Wang Zhifeng. Deflection for reflector plate of heliostat based on thin plate flexure theory[J]. Acta Energetica Sinica, 2009, 30(7): 900-903. (in Chinese)
- [20] Karel Johan Malan. A heliostat field control system[D]. Stellenbosh, South Africa: Faculty of Engineering, Stellenbosch University, 2014.
- [21] 杜春旭, 王普, 马重芳, 等. 一种高精度太阳位置算法[J]. 能源工程, 2010(2): 41-44.
Du Chunxu, Wang Pu, Ma Chongfang, et al. A high accuracy algorithm for the calculation of solar position[J]. Energy Project, 2010, (2): 41-44. (in Chinese)
- [22] Chen Y T, Kribus A, Lim B H, et al. Comparison of two sun tracking methods in the application of a heliostat field[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2004, 126(1): 638-644.
- [23] 刘琨, 邹琴梅, 胡玉超, 等. 塔式太阳能热发电自主式定日镜系统设计[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(7): 1 073-1 078.
Liu Kun, Zou Qinmei, Hu Yuchao, et al. Design of self-powered heliostat in concentrating solar tower power plant[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(7): 1 073-1 078. (in Chinese)
- [24] Siala F M F, Elayeb M E. Mathematical formulation of a graphical method for a no-blocking heliostat field layout[J]. Renewable Energy, 2001(23): 77-92.
- [25] 张宏丽. 塔式太阳能热发电系统定日镜场的布置[J]. 高科技与产业化, 2008(11): 42-44.
Zhang Hongli. Heliostat field layout of solar thermal power tower system[J]. High-Technology & Industrialization, 2008(11): 42-44. (in Chinese)
- [26] Noone J, Torrilhon Manuel, Mitsos Alexander. Heliostat field optimization: a new computationally efficient model and biometric layout[J]. Solar Energy, 2012(86): 792-803.
- [27] 魏秀东, 卢振武, 林梓, 等. 塔式太阳能热发电站镜场的优化设计[J]. 光学学报, 2010(9): 2 652-2 656.
Wei Xiudong, Lu Zhenwu, Lin Zi, et al. Design and optimization of heliostat field layout for solar tower power plant[J]. Acta Optica Sinica, 2010(9): 2 652-2 656. (in Chinese)
- [28] Wei Xiudong, Lu Zhenwu, Lin Zi, et al. Optimization procedure for design of heliostat field layout of a 1 MW esolar tower thermal power plant[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6 841(684 119): 1-10.
- [29] 张宏丽, 王志峰. 塔式电站定日镜场布置范围的理论分析[J]. 太阳能学报, 2011, 32(1): 89-93.
Zhang Hongli, Wang Zhifeng. Theoretical study on the domain of heliostats field of solar tower power plant[J]. Acta Energetica Sinica, 2011, 32(1): 89-93.

- Solaris Sinica, 2011, 32(1): 89–93. (in Chinese)
- [30] Augsburger Germain, Favrat Daniel. Modelling of the receiver transient flux distribution due to cloud passages on a solar tower thermal power plant[J]. Solar Energy, 2013(87): 42–52.
- [31] 韩雪冰, 魏秀东, 卢振武, 等. 太阳能热发电聚光系统的研究进展[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 233–239.
Han Xuebing, Wei Xiudong, Lu Zhenwu, et al. Review of concentration system in solar thermal power plant[J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 233–239. (in Chinese)
- [32] 文玉良, 丁静, 杨建平, 等. 聚光太阳能热发电中吸热器吸收涂层的选择[J]. 太阳能学报, 2009, 30(6): 764–768.
Wen Yuliang, Ding Jing, Yang Jianping, et al. Selection of solar coatings in concentrating solar power[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009, 30(6): 764–768. (in Chinese)
- [33] 范志林, 张耀明, 刘德有, 等. 塔式太阳能热发电站接收器[J]. 太阳能, 2007(1): 12–15.
Fan Zhilin, Zhang Yaoming, Liu Deyou, et al. Tower solar thermal power station receivers[J]. Solar Energy, 2007(1): 12–15. (in Chinese)
- [34] 许佩佩, 刘建忠, 周俊虎, 等. 塔式太阳能热发电接收器的研究进展[J]. 热能动力工程, 2014, 29(3): 223–230.
Xu Peipei, Liu Jianzhong, Zhou Junhu, et al. Advances in receivers for solar power tower plants[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2014, 29(3): 223–230. (in Chinese)
- [35] Avila-Marin A L. Volumetric receivers in solar thermal power plants with central receiver system technology: a review[J]. Solar Energy, 2011, 85(5): 891–910.
- [36] Behar O A, Khellaf K Mohammedi. A review of studies on central receiver solar thermal power plants[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013(23): 12–39.
- [37] 杨敏林, 杨晓西, 左志远. 塔式太阳能热发电吸热器技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(10): 2632–2640.
Yang Minlin, Yang Xiaoxi, Zuo Yuanzhi. Advances in receiver technologies for solar power tower plants[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(10): 2632–2640. (in Chinese)
- [38] 黄湘, 王志峰, 李艳红, 等. 太阳能热发电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 160–162.
Huang Xiang, Wang Zhifeng, Li Yanhong, et al. Solar Thermal Power Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 160–162. (in Chinese)
- [39] 杨敏林, 杨晓西, 张珊珊. 塔式太阳能热发电吸热器性能及工作介质的比较研究[J]. 陕西科技大学学报: 自然科学版, 2008(5): 21–27.
Yang Minlin, Yang Xiaoxi, Zhang Shanshan. Performance comparisons of solar central receivers and working fluids for solar power tower systems[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2008(5): 21–27. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]