

太阳能热发电聚光系统的研究进展

韩雪冰^{1,2}, 魏秀东¹, 卢振武¹, 吴宏圣¹, 郭邦辉¹, 杨洪波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:概述了太阳能热发电技术的发展状况,介绍了用于太阳能热发电的5种聚光系统,包括槽式、碟式、塔式、线性菲涅耳式以及地面接收起式。详细阐述了这些聚光系统的光学结构、聚光原理以及聚光器件的设计方法和制作工艺,指出了不同聚光系统在聚光过程中的优缺点。文中的讨论可为太阳能热发电聚光系统的设计提供参考。

关键词:太阳能热发电;聚光系统

中图分类号:TK513.1 **文献标识码:**A

Review of concentration system in solar thermal power plant

HAN Xue-bing^{1,2}, WEI Xiu-dong¹, LU Zhen-wu¹, WU Hong-sheng¹, GUO Bang-hui¹, YANG Hong-bo¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The development of solar thermal power generation technology is introduced. Five kinds of concentration systems, including parabolic trough concentrators, solar dishes, solar towers, lineal Fresnel concentrators and beam down concentrators, are presented. The optical structures, concentration principles, design methods and production process for the solar concentrators are described and the advantages and disadvantages of the different optical systems in the solar thermal power plant are commented. The discussion in this paper can provide references for design of solar thermal power plant concentration systems.

Key words: solar thermal power plant; concentration system

1 引言

能源和环境问题已经成为当今社会的重大研究课题,太阳能作为清洁、丰富、可再生并可广泛获取的能源备受关注。近10年来,太阳能热发电技术^[1]以其生命周期排碳低、电价低和对电网冲击小等优势发展迅猛。与传统火力发电不同,太阳能热发电利用聚光集热系统收集太阳辐射并获得高温热能,再将热能转化为高温蒸汽推动热轮机发电。太阳能热发电系统主要由聚光器、集热器、储热/补燃装置和热发电装置组成。与光伏发电技术相比,太阳能热发电技术最大的优势是可以使用廉价的储热/补燃装置实现电站的无间断运行,并持续为用户供电。另外,随着电站规模的扩大,太阳能热发电成本可以进一步降低并实现与传统化石能源的竞争,因此具有很好的发展前景。

我国太阳辐射资源丰富,发展太阳能热发电的前景非常广阔,因此开展太阳能热发电研究意义重大。本文概述了国内外太阳能热发电的发展状况,介绍了5种太阳能热发电用聚光系统,包括槽式、碟式、塔式、线性菲涅耳式和地面接收式。详细阐述了这5种聚光系统的光学结构、聚光原理以及聚光器的设计方法和制作工艺,指出了不同聚光系统在聚光过程中的优缺点。

2 太阳能热发电研究状况

太阳能热发电技术研究始于20世纪中叶,但由于当时技术尚不成熟,发展比较缓慢。自1977年石油危机发生以后,对太阳能利用研究的兴趣被重新激起,从而使太阳能热发电技术得到了突飞猛进的发展。近年来,随着能源需求的不断增长以及对环境污染和气候变化问题的重视,在全世界范围内掀起了太阳能热发电研究的热潮。到目前为止,太阳能热发电技术已经发展了5种方式:槽式、碟式、塔式、线性菲涅耳式和地面接收式,其中以槽式聚光技术最为成熟,已经实现商业化运行,碟式、塔式和菲涅耳式的商业化示范电站已经建立,其商业化投资和运行成本还需证实,地

面接收式也正在开展示范性研究。在太阳能热发电研究方面,美国和欧盟国家投入较早,在技术上处于领先地位。美国于1983~1990年间在加州建成了9座商业化槽式电站,总装机容量为353.8 MW,年发电总量为 8×10^8 kW·h。1981年,美国在加州建成首座塔式太阳能示范电站,装机容量为10 MW。法国于1983年建成Themis塔式试验电站,输出电功率为2 MW。西班牙于1984年建成塔式试验电站CESA-1,峰值功率为1 MW。德国在太阳能聚光设备加工方面处于世界领先地位,生产的抛物槽式聚光镜以及真空集热管在太阳能热发电市场占有很大比重。近年来,美国及欧盟政府非常重视可再生能源的开发利用,并在政策上对太阳能热发电研究给予大力支持。这些政策加快了太阳能热发电的商业化进程。2005年,西班牙建成欧洲第一座商业化示范运行的塔式电站PS10,峰值发电功率为11 MW^[2]。2008年,美国的Esolar公司开发了模块化塔式聚光发电技术,建成了模块化示范电站,发电功率为5 MW^[3]。2009年,德国的NOVATEC公司在法国南部建成世界上第一座菲涅耳式商业化太阳能示范电站,峰值发电功率为1.4 MW。与美国及欧盟国家相比,世界其它国家对太阳能热发电的研究投入较晚,只是近年来才开始加大研究力度,并在政策上给予支持。2005年,澳大利亚建成CSIRO塔式聚光系统^[4],镜场采光面积为800 m²,另外对密集型线性菲涅耳聚光技术进行了试验研究,建成了功率为1 MW的示范电站^[5]。以色列的Weizmann实验室对地面接收式聚光进行了试验,并将该系统用于太阳炉的相关研究^[6]。2006年,中国建成70 kW塔式太阳能热发电系统^[7],并将于2010年底在北京延庆建成1 MW塔式太阳能电站^[8]。另外,日本和韩国也开展了太阳能热发电的研究,力求掌握相关技术。印度、北非以及中东等太阳能资源丰富的地区,通过引进或自行研发等方式,也在加快发展太阳能热发电技术。

目前,太阳能热发电面临的主要问题是发电成本较高,仍无法与常规化石能源发电竞争,因此,降低发电成本、提高发电效率是太阳能热发电研究的主要目标。近年来采取的研究方案主要包括电站的规模化、聚光系统的优化、吸热传热系统

的优化及新材料的制备等,另外,太阳能电站对环境的影响也是需要考虑的问题。

3 太阳能聚光系统

太阳能聚光系统用于将低密度的太阳辐射会聚到吸热器表面,进而获得可用于热发电的高温热流。目前,太阳能热发电常用的聚光方式主要有抛物槽式、碟式、塔式和线性菲涅耳式,地面接收式由于在某些方面具有优势,也受到了关注。

3.1 抛物槽式聚光系统

抛物槽式聚光系统由抛物柱面聚光镜和真空吸热管组成,如图1所示。

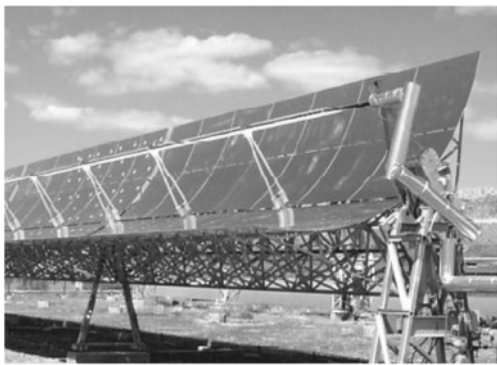


图1 西班牙 EuroTrough 抛物槽式聚光发电系统
Fig. 1 “EuroTrough” parabolic trough concentration system in Spain

抛物柱面聚光镜利用抛物面对平行光的理想会聚特性将太阳直射光会聚于焦线处的吸热管上。聚光镜呈水平放置,可绕单轴旋转跟踪太阳。旋转轴沿南北方向,并与吸热管平行。在聚光镜跟踪太阳的过程中,太阳直射光方向始终平行于旋转轴与吸热管所在的平面,保证系统具有最好的聚光特性。

抛物槽式聚光系统的光学结构简单,需要设计的几何参数包括聚光镜口径、焦距、边缘角等,在设计中需要考虑的性能参数包括聚光比、光斑溢出损失等。槽式聚光镜经过了几代的发展,其口径、焦距、边缘角等参数不断加大。早期 LS1 的口径为 2.55 m,焦距为 0.7 m,边缘角为 85° ,聚光比为 60 suns。目前,HelioTrough 的口径为 6.78 m,焦距为 1.71 m,边缘角为 89.5° ,聚光比为 97 suns。

利用光学设计软件如 Zemax、Tracepro、ASAP 等可对抛物槽式聚光系统进行建模,并借助 MATLAB 对聚光系统进行蒙特卡罗光线追迹,分析聚光系统的光学性能,最终确定聚光结构。

抛物槽式聚光系统的关键工艺在于真空集热管和抛物柱面反光镜的加工。真空集热管由玻璃外管、不锈钢内管及表面选择性吸收涂层、内外管间高度真空环形空间、内管内插固体阻塞件以及绝热端等部分组成,其关键技术包括能耐 400°C 以上高温、高效率吸热涂层材料且在高温下不脱落、长寿命真空度、玻璃-金属间的有效衔接等。抛物柱面反光镜的制作工艺较真空集热管简单,关键技术在于镜面面形的高精度。目前多采用 4 mm 厚的热弯玻璃并在背面镀银反射膜及多层保护膜,也可采用在基底材料上粘贴薄玻璃反射镜或高反射耐候性薄膜。

目前,抛物槽式聚光技术已经成熟,并已实现商业化,在聚光镜及真空集热管的加工方面均已具备生产能力,电站设计规模为 30 ~ 100 MW,聚光比约为 50 ~ 90 \times ,年光电转化效率约为 14%,发电成本约为 12 cent/kW \cdot h,当发电成本降到 8 cent/kW \cdot h 时,太阳能发电可与常规矿物能源发电相媲美。为了进一步降低发电成本,槽式聚光的研究主要集中在:通过光学、机械等优化设计降低聚光镜成本,提高聚光效率;延长真空集热管的使用寿命并实现 500°C 高温运行等。

3.2 碟式聚光系统

碟式聚光发电系统可分为单碟式和多碟式两



图2 西班牙 EuroDish 碟式聚光发电系统
Fig. 2 “EuroDish” solar dish concentration system in Spain

种。单碟式聚光系统由单个旋转抛物面反光镜和斯特林发动机组成,如图2所示。多碟式聚光系统由多个尺寸较小的碟形反光镜和斯特林发动机组成,如图3所示。



图3 北京通县多碟式聚光系统

Fig. 3 Multi-dish concentration system in Beijing

碟式聚光镜利用旋转抛物面对平行光的理想会聚特性将太阳光会聚于焦点处的斯特林发电机上。聚光镜可绕双轴旋转实现对太阳的三维跟踪,始终使阳光的入射方向与聚光镜的光轴方向一致,保证聚光镜有最好的聚光性能。多碟式聚光镜与单碟式的聚光原理一致,聚光性能相近,多碟式聚光镜用多个尺寸较小的碟形反光镜代替单个大尺寸抛物面镜,降低了聚光镜的加工难度。

碟式聚光系统的光学结构简单,设计方法与槽式聚光系统相似。碟式聚光系统的关键技术在于斯特林发动机和旋转抛物面反光镜的加工。斯特林发动机是一种外燃(或外部加热)封闭循环活塞式发动机,其对燃烧方式或外燃系统的特性无特殊要求,只要外燃温度高于闭式循环中的工质温度即可。近年来,美国、日本、德国等对斯特林发动机进行了研究,并具备生产能力,如西班牙的Eurodish碟式聚光发电系统采用了德国SOLO公司生产的斯特林发动机。抛物面反光镜的制作关键在于面形精度的控制。制作方法主要有两种,一种是采用小尺寸的曲面镜进行拼接,另一种是在基底材料上粘贴薄的镀银玻璃反射镜或高反射耐候性薄膜。

碟式聚光系统的聚光比较高,可超过 $1\,000\times$,工作温度达 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用斯特林发动机,最高光电转化效率可达 29.4% 。碟式聚光发电系统单台

最大装机容量约为 25 kW ,可单独供电,也可多台并网发电,无需用水,适合在沙漠地区使用。由于聚光镜、驱动装置以及斯特林发动机等关键元件的制造成本较高,导致碟式聚光系统的投资成本较高,约为 $12\,000\text{ } \$/\text{kW}$ 。为了实现商业化,还需进一步降低碟式聚光发电的成本。

3.3 塔式聚光系统

塔式聚光系统可分为单塔式和多塔式聚光阵列,单塔式聚光系统由镜场、单塔和塔顶吸热器组成,如图4所示。

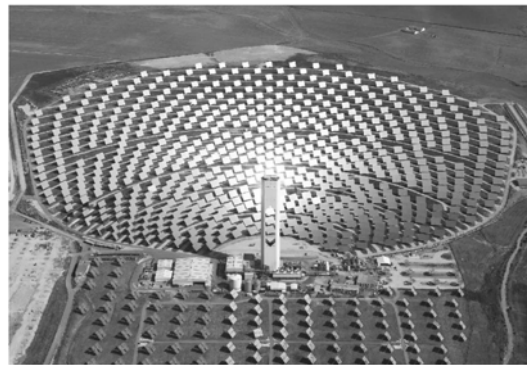


图4 西班牙PS10塔式聚光发电系统

Fig. 4 PS10 solar tower concentration system in Spain

镜场将低密度的太阳辐射会聚于塔顶吸热器,再由吸热器将高密度能流转化为热能并通过传热工质传输到地面进行发电。镜场由定日镜布置而成,定日镜绕双轴旋转实现对太阳的三维跟踪,并将阳光反射到塔顶吸热器上。定日镜的聚光性能决定了镜场光斑的质量。定日镜的面形有平面和曲面两种,平面定日镜加工装调简单,成本低,由于对光线无会聚作用,定日镜尺寸一般较小,以保证较小的镜场光斑。曲面定日镜加工装调较困难,成本高,但聚光性能较好,定日镜可以做得很大。

单塔式聚光系统的规模受到塔高以及定日镜跟踪精度的限制,电站的规模不能无限大。为了实现更大规模的塔式太阳能发电,提出了多塔式太阳聚光阵列结构^[9],如图5所示。

多塔式镜场聚光阵列由定日镜场和多个装有吸热器的塔组成,各塔之间距离较近以至于不同塔的定日镜场部分重叠,传热工质通过吸热器加热到高温以后汇聚起来,实现规模化发电。随着

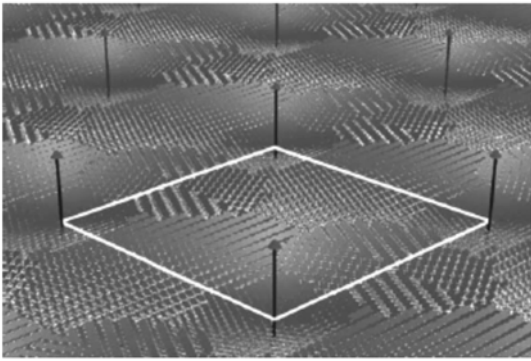


图5 多塔式太阳聚光阵列

Fig. 5 Multi-tower solar concentrator array

太阳的运动,定日镜场一些区域的光学效率不断变化,为了获得最大的镜场光学效率,可有选择地控制定日镜场的一些区域将太阳辐射投射到不同塔上的吸热器上,有效减少了入射余弦损失和定日镜间的阴影挡光损失,并提高了土地使用率。

塔式聚光系统的光学结构比较复杂,在设计中需要考虑定日镜和镜场两部分。定日镜的光学设计主要在于面形设计,可采用光学设计软件如ZEMAX,设计过程比较简单。定日镜在聚光过程中阳光的入射角变化范围较大,球面或其它旋转曲面存在较大的像散,致使定日镜的光斑较大,不利于吸热器的接收。采用可校正像散的轮胎面聚光镜^[10]可减小光斑的变化,提高聚光性能,但缺点是加工装调比较困难,制作工艺还需验证。镜场设计是通过优化镜场的结构参数,设计出成本低、年聚光效率高的镜场布置,设计过程比较复杂,需要编制专用的设计软件。镜场的结构参数包括地理纬度、定日镜尺寸及数量、定日镜的布置方式及间距、吸热器位置及倾斜角度等,需要在设计中考虑的性能参数包括镜场的余弦效率、相邻定日镜间的阴影挡光损失、大气对会聚光束的吸收散射损失、光斑在吸热器上的溢出损失等。镜场的设计软件^[11]主要有 HELIOS、DELSOL3、HFLCAL、WinDELSOL1.0、SENSOL 等,国内的镜场优化设计软件有 HFLD1.0^[12],已用于北京延庆1MW塔式电站的镜场设计与性能分析中。

塔式聚光系统的关键在于低成本高精度的定日镜加工及跟踪控制。对于小尺寸平面定日镜,镜面成本较低,但定日镜数量庞大,控制复杂。对

于大尺寸曲面定日镜,镜场控制成本较低,但曲面反射镜的加工装调成本高,且在外场环境下受风力、温度变化及自身重力等影响,镜面变形和跟踪误差均较大。目前,平面定日镜多采用4 mm厚的镀银玻璃反射镜,曲面定日镜则采用在曲面基底上粘贴薄的镀银玻璃反射镜或反射膜,曲面基底材料可以是玻璃钢或不锈钢等。

由于塔式聚光发电系统的结构比较复杂,在镜场规模、镜场结构设计、镜场跟踪控制、定日镜的加工与装调等方面还不成熟,塔式发电技术目前还处于商业化运行的示范阶段。目前,塔式商业示范电站的设计规模约为10~20 MW,聚光比约为300~1 000×,年光电转化效率约为15%。塔式聚光系统的研究焦点在于定日镜光学、机械结构及镜场布置结构的优化设计。

3.4 线性菲涅耳聚光系统

线性菲涅耳聚光系统由主、次聚光镜和吸热管组成,它是由抛物槽式聚光系统演化而来的,如图6所示。



图6 德国 NOVATEC 公司的线性菲涅耳聚光发电系统

Fig. 6 NOVATEC's linear Fresnel concentrator system in Germany

菲涅耳聚光系统的主聚光镜由一系列可绕水平轴旋转的条形平面反射镜组成,可跟踪太阳并将阳光会聚于镜场上方的吸热管上。为了提高聚光比,在吸热管的上方需增加次聚光镜,进行二次聚光,次聚光镜的面形为二维复合抛物面(CPC),CPC是一种理想的非成像聚光器,聚光性能可达到最优。

菲涅耳聚光的另一种改进形式是密集型线性

菲涅耳聚光,它具有两个或多个吸热管,在工作过程中,相邻的条形反射镜可瞄准不同的吸热管进行聚光,这样可以减少反射镜间的阴影挡光损失及镜场占地面积。菲涅耳式聚光系统采用二次聚光方式,光学结构比较复杂,需要设计的参数包括条形反射镜的尺寸及间距、主聚光镜场的口径及边缘角、吸热管的高度、次聚光镜的口径及接收角等,需要在设计中考虑的性能参数包括阴影挡光损失、聚光比、光斑溢出损失以及主、次聚光镜的匹配等。菲涅耳聚光系统主聚光镜为一系列离散的条形反射镜,且不同时刻反射镜的法线方向不同,次聚光镜为 CPC 非成像聚光镜,利用传统光学设计软件如 Zemax、ASAP 等很难对菲涅耳聚光系统进行实时模拟和分析,可使用 MATLAB 进行编程,并采用蒙特卡罗光线追迹法对聚光系统进行建模和分析,最终确定聚光系统的光学参数。

菲涅耳主聚光镜为条形平面玻璃反射镜,次聚光镜与抛物槽式聚光镜相似,生产工艺已经很成熟,因此,菲涅耳聚光系统的加工比较简单。吸热管通过透明的平板玻璃被封闭在次聚光镜中(如图7所示),热损失较小,无需采用真空管,有利于成本的降低。

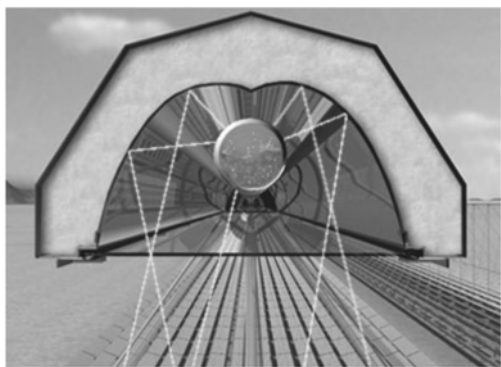


图7 菲涅耳次聚光镜及吸热管

Fig.7 Second concentrator and receiver pipe in linear Fresnel concentrator system

菲涅耳聚光发电技术目前尚处于商业化示范阶段,澳大利亚、德国、法国和西班牙等国对该技术进行了实验研究。德国的 NOVATEC 公司于 2009 年在西班牙南部建成 1.4 MW 的菲涅耳聚光太阳能电站,是世界上第一座采用菲涅耳式聚光的商业化示范性电站,该聚光系统的几何聚光

比约为 $200 \times$,工作介质的温度高于 $270 \text{ }^\circ\text{C}$,压强 $>55 \text{ bar}$,电站的光学效率约为 67%。由于菲涅耳聚光的技术难点较少,成本较低,因此具有较好的发展前景,值得进一步研究和验证。

3.5 地面接收聚光系统

地面接收聚光系统由聚光镜场、塔顶反射镜和地面接收器组成,它是由塔式聚光系统演化而来的,如图8所示。

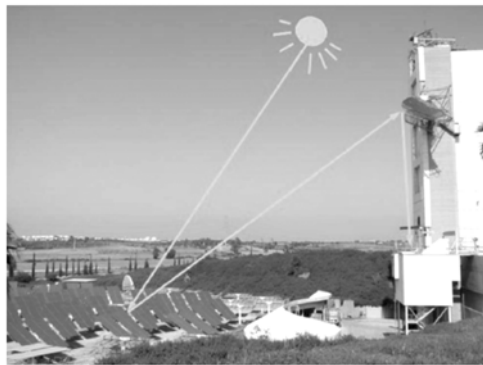


图8 以色列 300 kW 地面接收聚光系统

Fig.8 300 kW beam-down concentrator system in Israel

地面接收聚光系统的镜场与塔式聚光系统相同,由一系列双轴跟踪的定日镜布置而成。塔顶反射镜采用双曲面设计,与镜场构成卡赛格林系统,将镜场会聚而来的光线反射会聚到地面接收器。由于地面接收聚光系统的焦距较长,受太阳发散角、镜面面形误差及定日镜跟踪误差的影响较大,地面接收光斑的尺寸较塔式聚光系统大,聚光比较低。为了提高聚光比,需要增加三维复合抛物面聚光器(CPC)进行3次聚光。地面接收聚光系统光学结构更为复杂,需要设计的参数包括定日镜的几何参数、镜场的布置结构、塔顶反射镜的面形、尺寸及焦距、三维 CPC 聚光器的口径、接收角及高度等参数,需要在设计中考虑的性能参数包括镜场的聚光效率、地面接收聚光系统的溢出损失、光斑的聚光比以及镜场与塔顶反射镜的匹配等。目前,地面接收聚光系统采用的设计方法是:首先利用镜场设计软件设计镜场结构,然后根据镜场的聚光特性设计塔顶反射镜,塔顶反射镜的设计可采用传统光学设计软件如 Zemax,最后使用 MATLAB 工具对地面接收聚光系统进行

建模,并采用蒙特卡罗光线追迹法对聚光系统进行分析,最终确定聚光系统的光学参数。

地面接收聚光系统的加工工艺关键在于塔顶反射镜和三维CPC聚光镜的制作,目前的加工方法是采用小尺寸的平面反射镜进行拼接,这样做的缺点是面形精度较低且缝隙损失较大。地面接收聚光系统采用多次反射聚光,增加了反射损失,降低了聚光比,但吸热器放置在地面上,减少了热损耗,降低了建塔成本,因此具有一定的优势。近年来,以色列、日本等国对地面接收聚光技术进行了理论及实验研究,其商业化可行性还有待进一步验证。

参考文献:

- [1] STINE W B, GEYER M. *Power from the Sun* [M/OL]. Miami: Miami Country Day School, 2001. [2010-03-01]. <http://www.powerfromthesun.net/book.htm>.
- [2] 10 MW solar thermal power plants for southern Spain [R/OL]. (2006-01-06). [2010-03-06]. http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/csp/ps10_final_report.pdf.
- [3] SCHELL S. Design and evaluation of esolar's heliostat fields [J]. *Solar Energy*, 2010, 185(4): 614-619.
- [4] KEITH L, MIKE D. Solar thermal energy systems in Australia [J]. *International J. Environmental Studies*, 2006, 63(6): 791-802.
- [5] MILLS D R, LIEVRE P L, MORRISON G L. First results from compact linear Fresnel reflector installation [R/OL]. (2004-01-06). [2010-03-05]. http://solarheatpower.veritel.com.au/MILLS_CLFR_ANZSES_FINAL.pdf.
- [6] WIECHERT C, FROMMHERZ U, KRAUPL S, *et al.*. A 300 kW solar chemical pilot plant for the carbothermic production of zinc [J]. *Transactions ASME*, 2007, 129: 190-196.
- [7] 张耀明, 刘德有, 张文进, 等. 70 kW 塔式太阳能热发电系统研究与开发 [J]. *太阳能*, 2007(10): 19-23.
ZHANG Y M, LIU D Y, ZHANG W J, *et al.*. Research and development of the 70 kW solar tower power system [J]. *Solar energy*, 2007(10): 19-23. (in Chinese)
- [8] YAO Z H, WANF Z F, LU Z W, *et al.*. Modeling and simulation of the pioneer 1 MW solar thermal central receiver system in China [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34: 2437-2446.
- [9] SCHRAMMEK P, MILLS D R. Multi-tower solar array [J]. *Solar Energy*, 2003, 75(3): 249-260.
- [10] 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): 2468-2472.
WEI X D, LU ZH W, LIN Z, *et al.*. Design and performance analysis of toroidal heliostat in solar tower power plant [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(11): 2468-2472. (in Chinese)
- [11] GARCIA P, FERRIERE A, BEZIAN J J. Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: a comparative review [J]. *Solar Energy*, 2008, 82(3): 189-197.
- [12] WEI X D, LU Z W, YU W X, *et al.*. A new code for the design and analysis of the heliostat field layout for power tower system [J]. *Solar Energy*, 2010, 84(4): 685-690.

作者简介:韩雪冰(1969—),男,吉林长春人,硕士,助理研究员,主要从事太阳能热发电聚光系统结构设计方面的研究。

E-mail: xbo208@yahoo.com.cn

通信作者:卢振武(1955—),男,博士,研究员,主要从事衍射光学、非成像光学方面的研究。

E-mail: luzhenwu55@yahoo.com.cn

4 结束语

太阳能热发电被认为是发电稳定、对电网冲击小并可实现规模发电的绿色能源利用技术,具有很好的发展前景,如何提高太阳能热发电效率,降低发电成本是目前太阳能热发电研究的焦点。本文重点阐述太阳能热发电聚光系统的光学结构、聚光原理、聚光特性以及聚光器的设计方法和制作工艺,指出不同聚光系统的缺点和优势,为太阳能热发电聚光系统设计提供借鉴。