

聚光式太阳能热发电技术的现状及发展趋势

徐 明, 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] 能源与环境的突出矛盾, 给太阳能热发电产业带来了新的契机. 从全球太阳能热发电的现状出发, 简要介绍了塔式、槽式、碟式等太阳能热发电技术及国内外的研究成果, 并对这 3 种主流的太阳能热发电技术进行了分析和比较, 最后立足本国实际, 指出了我国太阳能热发电行业面临的问题和挑战, 提出其广阔的发展前景.

[关键词] 太阳能热发电, 塔式热发电, 槽式热发电, 碟式热发电

[中图分类号] TM615 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2011) 01-0027-06

The Status and Development Trend of Light-Concentrating Solar Power Technology

Xu Ming, Zhu Xuemei

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

Abstract: The prominent contradiction between energy and environment has brought solar thermal power industry new opportunities. Based on the present situation of global solar thermal power, three main forms of solar thermal power are briefly introduced and compared: tower solar power, groove solar power and disc type solar power, including research results at home and abroad. Considering the situation of our country, the problems and challenges of solar thermal power in China were proposed, and the broad development prospects were also put forward in the paper.

Key words: solar thermal power, tower solar power, groove solar power, disc type solar power

在全球可持续发展的大背景下,“绿色能源”和“低碳生活”的概念正受到越来越多的关注,各国竞相开展以风能、太阳能、生物能、地热能、海洋能等可再生绿色能源为主的研究和应用.同时从国家能源局获悉,我国首轮太阳能光热发电特许权招标项目,已于 2010 年 6 月底至 7 月初正式开始.此政策的颁布,打破了常规化石燃料发电占据整个发电行业的局面,意味着太阳能因其储量的无限性、利用的清洁性等特点一跃成为最热门的新能源之一,太阳能热发电技术将迅速进入商业化成长时期,成为解决当前能源、资源、环境等一系列问题的新兴产业.

人们最早对太阳能热发电的研究,可以追溯到 18 世纪 70 年代在巴黎建立的第一个小型点聚集太阳能热交互蒸汽机,自此之后,各国对太阳能热发电技术的研究从未终止.在 1981 年至 1991 年间,全世界建造了多种不同形式的兆瓦级太阳能热发电试验电站 20 余座(塔式为主);另外在 1985 至 1991 的 6 年间,在美国加州沙漠建成的 9 座槽式太阳能发电站,更是将发电成本降至 8 美分/kWh,太阳能热发电项目已成为各国建立新能源系统的方向之一^[1].经过近 30 年的发展,部分太阳能热发电技术已完成试验和示范阶段,正向低成本、高产业化迈进.本文以目前研究最为广泛的聚光式太阳能热发电技术为对象,对各种聚光式太阳能热发电技术进行介绍、分析和比较,希望能得出对我国太阳能热发电行业具有建设性的意见.

1 太阳能热发电技术的概念与分类

太阳能热发电主要是将聚集到的太阳辐射能,通过换热装置产生蒸汽,驱动蒸汽轮机发电^[2].太阳能

收稿日期: 2010-08-24.

基金项目: 国家人事部资助项目(2008111SB90204).

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流程工业中的应用. E-mail: zhuxuemei@njnu.edu.cn

热发电与常规化石能源在热力发电方式上的原理是相同的,都是通过 Rankine 循环、Brayton 循环或 Stirling 循环将热能转换为电能,区别在于热源不同,太阳能发电的热源来自太阳辐射,因而如何用聚光装置将太阳能收集起来是大多数太阳能热发电的关键技术之一.此外,考虑到太阳能的间歇性,需要配置蓄热系统储存收集到的太阳能,用以夜间或辐射不足时进行发电,因此成熟的蓄热技术成为太阳能热发电中的另一关键技术.

直接光发电和间接光发电是太阳能热发电中最常用的分类方式.直接光发电可分为太阳能热离子发电、太阳能温差发电和太阳能热磁体发电;间接光发电可分为聚光类和非聚光类,其中聚光类按照太阳采集方式可分为太阳能塔式发电、太阳能槽式发电和太阳能碟式发电;非聚光类主要有太阳能真空管发电、太阳能热气流发电和太阳能热池发电等^[3].通常所说的太阳能热发电,主要指间接光发电,直接光发电尚在实验阶段.目前主流的太阳能热发电技术集中在塔式、槽式和碟式,它们因开发前景巨大而受到极大的关注.

2 聚光式太阳能热发电技术

2.1 塔式太阳能热发电

塔式太阳能发电主要由大量的跟踪太阳的定向反射镜(定日镜)和装在中央塔上的热接收器这两大部分组成,成千上万面定日镜将太阳光聚焦到中央接收器上,接收器将聚集的太阳辐射能转化为热能,然后再将热能传递给热力循环工具,驱动热机做功发电.随着镜场中定日镜数目的增加,塔式太阳能发电系统的聚光比也随之上升,最高可达 1 500,运行温度为 1 000℃~1 500℃^[4].它因其聚光倍数高、能量集中过程简便、热转化效率高等优点,极适合大规模并网发电,图 1 为塔式太阳能发电的系统图^[5].

从图 1 可以看出,塔式太阳能发电系统包括:跟踪太阳光的定日镜、接收器、工质加热器、储能系统以及汽轮机组等部分.收集装置由多面定日镜、跟踪装置、支撑结构等构成.系统通过对收集装置的控制,实现对太阳的最佳跟踪,从而将太阳的反射光准确聚焦到中央接收器内的吸热器中,使传热介质受热升温,进入蒸汽发生器产生蒸汽,最终驱动汽轮机组进行发电.此外,为了保证持续供电,需要蓄热装置将高峰时段的热量进行存储以备早晚和阴雨间隙使用.

作为欧洲首座商业性太阳能发电厂,2007 年 3 月,PS10 电站,如图 2 所示,利用 624 个面积均为 120 m² 的巨大日光反射器将太阳光聚焦在高约 90 m 的塔上,产生 1.1 万 kW 的电力,电站每年向电网供电 1 920 万 kWh,年平均发电效率可达 10.5%^[6].2009 年 5 月,在 PS10 电站的基础上,PS20 电站正式动工.PS20 电站使用 1 225 个面积为 120 m² 的定日镜将太阳光聚集在高约为 162 m 的塔上,能提供满足 18 万个家庭日常需求的用电量,整个电站预计在 2013 年竣工.

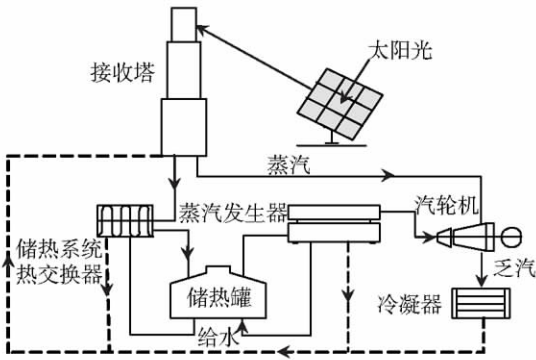


图 1 塔式太阳能热发电示意图

Fig.1 Schematic diagram of tower solar thermal power



图 2 PS10 镜场图

Fig.2 Illustrations of heliostat field of PS10

我国在这方面起步较晚,并且由于工艺、材料、部件及其相关技术尚未得到根本性的解决,加上经费不足,一直裹足不前.近年来,中国工程院院士张耀明教授带领团队刻苦钻研,在自动跟踪、聚光、集热等技术上取得了突破.国内首座“70 kW 塔式太阳能热发电系统”已于 2005 年 10 月在南京江宁顺利建成并成功投入并网发电^[7],填补了我国在这方面的空白.

2.2 槽式太阳能热发电

槽式太阳能发电采用多个槽形抛物面式聚光器,将太阳光聚集到接收装置的集热管上,加热工质,产生高温蒸汽后推动汽轮机发电. 收集装置的几何特性决定了槽式太阳能发电的聚光比要低于塔式,通常在 10 ~ 100 之间,运行温度达 400℃^[8].

如图 3 所示^[1],槽式太阳能发电包括聚光集热部分、换热部分、发电储能部分等. 其中,发电储能部分与塔式基本相似,不同之处在于聚光集热和换热部分. 聚光集热是整个槽式发电系统的核心,它由聚光阵列、集热器和跟踪装置组成. 在此部分,集热器大多采用串、并联排列的方式,可按南北、东西和极轴 3 个方向对太阳光进行一维跟踪. 在换热部分,预热器、蒸汽发生器、过热器和再热器 4 组件实现了工质加热、换热、产生蒸汽、进行发电的过程. 由于槽式发电系统结构相对紧凑,其收集装置的占地面积比起塔式和碟式来说,相对较小,因而为槽式太阳能发电向产业化发展奠定了基础.

自上世纪 80 年代起,美国 Luz 公司在加州莫哈维沙漠陆续建成了 9 座槽式聚光热发电站(SEGS I – SEGSIX)^[9],总装机容量为 35.4 万 kW,年发电总量 108 亿 kWh,产生的电力可供 50 万人使用. 随着技术不断发展,系统效率由起初的 11.5% 提高到 13.6%,每 kW 电能装机容量的投资已由 6000 美元降至 2000 多美元,电费也由每度 24 美分降至 7.5 美分. 自 1984 年以来,Luz 公司先后开发了 1.4 万 kW、3 万 kW 和 8 万 kW 的多种系统,太阳辐射能转化至电能的最高瞬时效率可达 24%,年平均效率最高为 15%. 在广泛采纳和吸取 SEGS 电站多年运行经验的基础上,在内华达州建造的装机容量为 6.4 万 kW 的槽式太阳能热发电站 SOLAR – 1,只需要 30 min 的储热容量和 2% 的天然气作为辅助能源即可保证投入并网发电^[10],且运行结果表明该电站在效率和稳定性方面均有一定提高.

在槽式太阳能发电领域,我国已在太阳光方位传感器、自动跟踪系统、抛物面反射镜、接收器方面取得了突破性进展,并且拥有具有完全自主知识产权的 100 kW 槽式太阳能热发电试验装置^[11].

国际权威机构的统计显示,截止 2009 年,全世界运行的槽式光热发电站占整个光热发电站的 88%,占在建项目的 97.5%,可见槽式太阳能热发电技术已取得了大规模商业化生产的能力.

值得注意的是,虽然槽式太阳能热发电已具备了大规模投产的条件,然而其核心部件高温真空管仍存在技术缺陷,涂层技术还有待改进,因而加强核心部件的技术研发、工艺改进将是今后提高槽式太阳能热发电效率、降低成本的关键,也将成为推动槽式太阳能发展的重要动力.

2.3 碟式太阳能热发电

作为目前热发电效率最高的方式,碟式太阳能发电整合多个反射镜组成抛物面蝶形聚光镜,通过对其的旋转,将太阳光聚集到接收器中,经接收器吸热后加热工质,进一步驱动发电机组发电^[12]. 旋转抛物面蝶形聚光镜的应用使得碟式太阳能发电的聚光比达到 3000 以上,这一方面有效地提高了光热转换的效率,但是另一方面也由于其较高的接收温度,对接收器的材料和工艺提出了更高的要求.

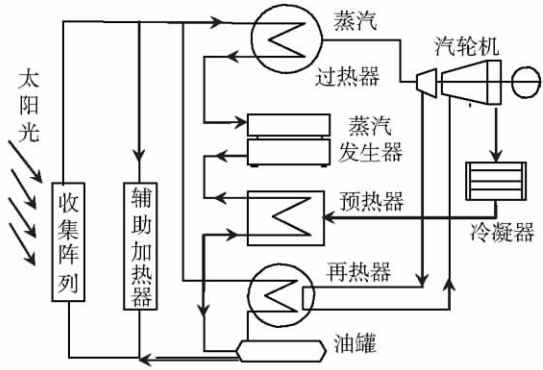


图 3 槽式太阳能发电示意图
Fig.3 Schematic diagram of groove solar power



图 4 碟式太阳能发电示意图
Fig.4 Schematic diagram of disc type solar power

从图 4 看出^[13],碟式太阳能发电系统包括抛物面蝶形聚光镜、高温接收器、跟踪传动装置、发电储能装置等. 与塔式和槽式不同的是,碟式太阳能发电主要采用斯特林(Stirling) 热力循环,完成热能到机械能的转化,但由于斯特林(Stirling) 热机的技术开发尚未成熟,因而碟式太阳能发电尚在试验示范阶段.

国外对碟式太阳能发电的研究已有 20 余年,自 1982 年美国加州建造的碟式斯特林太阳能发电实验装置起,美国、沙特、德国、日本、西班牙等国相继建设了不同形式的碟式太阳能发电示范工程,碟式太阳能发电的研究得到了迅速发展.国内一些高校和科研院所也对此做过一些实验研究:中国科学电工研究所与皇明太阳能集团及新疆新能源公司联合研制了 4 套太阳能发电多碟聚光器和单碟聚光器^[14],多碟式聚光器采用多碟复合聚光方式,采光 $\phi 5\text{ m}$,输出的峰值热功率为 12 kW,系统跟踪精度达 3.14 mrad.

2.4 其他方式

近来,一种新型的太阳能热发电系统的设计引起了广泛的关注.该设计采用一系列同轴排列的反射镜取代传统意义上的抛物面反射镜,将太阳光首先聚焦在上部的中央反射镜上,再由中央反射镜向下反射,将太阳光聚焦到地面接收器中,这种新型的聚光方式称为向下反射式或非涅尔反射式(如图 5).由于二次聚焦,保证了较高的聚光比;同时,向下反射的方式不但避免了高塔上安装接收器的风险,也解决了塔顶热量损失大、安装维护成本高等问题,势必成为未来太阳能热发电的一个重要研究方向^[5].

2.5 3 种太阳能热发电技术的比较

上述 3 种太阳能热发电方式各有优点,就理论而言,塔式太阳能发电由于聚光比高、运行温度高、系统容量大和热转换效率高等特点,较适合大规模生产;槽式太阳能发电因其系统结构相对简单、技术较为成熟,成为了第一个进入商业化生产的热发电方式;而碟式太阳能发电因其热效率最高、结构紧凑、安装方便等特点,非常适合分布式小规模能源系统.另一方面,前期投入过高且难以降低成本使得塔式太阳能发电始终没有广泛投入商业化生产;聚光比小、系统工作温度低、核心部件真空管技术尚未成熟、吸收管表面选择性涂层性能不稳定等问题,阻碍了槽式太阳能发电的推广;碟式发电系统中,斯特林热机关键技术难度大、开发时间短等原因,致使其仍处于试验示范阶段.下表 1 给出了 3 种太阳能热发电的具体参数比较^[15].

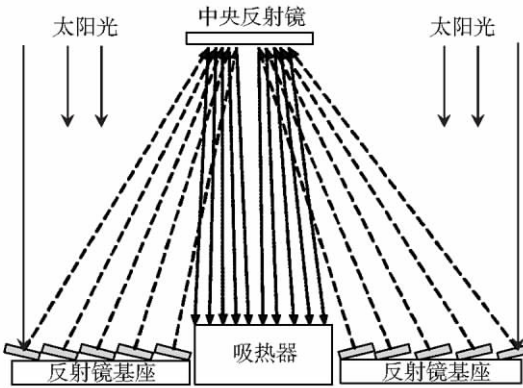


图 5 非涅尔反射式示意图
Fig.5 Schematic diagram of Fresnel reflection

表 1 3 种发电方式参数比较
Table 1 Comparison of three kinds of solar power

发电方式	塔式	槽式	碟式
电站规模	1~10 万 kW	1~10 万 kW	1~1 万 kW
聚光方式	平、凹面反射镜	抛物面反射镜	旋转对称抛物面反射镜
跟踪方式	双轴跟踪	单轴跟踪	双轴跟踪
光热转换效率	60%	70%	85%
峰值效率	23%	20%	29%
年净效率	7%~20%	11%~16%	12~25%
可否储能	可以	有限制	蓄电池
单位面积造价	200~475 美元/m ²	275~630 美元/m ²	320~3100 美元/m ²
单位瓦数造价	2.7~4.0 美元/W	2.5~4.4 美元/W	1.3~12.6 美元/W
发展状态	试验示范阶段	可商业化	试验示范阶段
优点	① 较高的转化效率,有很好的开发前景	① 可商业化,投资成本较低	① 最高的转换效率
	② 可混合发电	② 3 种方式中占地最少	② 可模块化
	③ 可高温储能	③ 可混合发电	③ 可混合发电
	④ 可通过改进定日镜和蓄热方式降低成本	④ 可中温储能	
缺点	① 聚光场和吸热场的优化配合还需研究	① 只能产生中等温度的蒸汽	① 造价高、无与之配套的商业化斯特林热机
	② 初次投资和运营的费用高,商业化程度不够	② 真空管技术有待提高	② 可靠性有待加强,大规模生产还需研究
开发风险	中	低	高

3 前景与展望

全世界能源危机与环境问题的加重,迫使很多国家加快了开发太阳能热发电的步伐;在美国加州莫哈

为沙漠,SES公司与电力公司SOE携手合作,力争在2011年建造一个占地1 822 hm²的巨型太阳能发电站,预计发电功率可达50万kW;在西班牙的特莱斯坎多斯,一个发电功率达300 MW的大型太阳能发电厂也在建造中。此外,以色列、德国、澳大利亚也都有大型的太阳能热电站正在建设中^[16]。我国也不甘落后,很多学者强烈呼吁大力开展太阳能热发电示范项目,有些地方正在筹措巨资购买国外塔式或槽式太阳能热发电设备,在国内建设较大规模兆瓦级示范电站。国人的过度热情,不禁让人担忧^[17]。

首先,国外的技术尚未完全成熟,还需要解决一些关键技术才能在太阳能热发电站商业化上实现更大的突破;其次,如将国外的技术照搬过来而没有考虑我国特殊的地形与气候,大型太阳能热发电站的适用性不得而知。鉴于以上两点原因,我国的太阳能热发电技术仍需要在充分认清我国国情的基础上,做到以下几个方面^[18]:

(1) 充分了解我国的气候与环境,因地制宜,采用合适的太阳热发电方式。首先,调查气象条件:只有在年太阳辐射大于2 200 h的地区才适合采用太阳热发电。第二,了解土地资源是否紧张:在地域辽阔、土地资源丰富的区域,可建立大规模大容量集中式的太阳热电站,而在人口密集处不合理也不经济。第三,需要考虑建热电站的财政投入问题^[19]:例如对于一些交通不便、人力资源匮乏的区域,碟式抛物面斯特林发电系统较为适合,其单机容量为几十kW至几百kW,系统效率高,可以满足急需的电力补充。

(2) 鉴于单纯利用太阳能进行热发电还存在许多问题,特别是考虑到开发太阳能热发电系统的投资较大以及目前的蓄热技术还不够成熟,因而将太阳能发电系统与常规的发电系统集成成多能源互补的系统,既有效地解决了太阳能利用不稳定的问题,同时也能利用成熟的常规发电技术,降低开发利用太阳能的技术风险和经济成本^[20]。

(3) 大力研发关键技术,完善工艺,降低成本,并对系统进行有机集成,实现高效的热工转化,突破常规系统中太阳能发电效率低的限制,增强系统整体的可靠性和安全性,加快产业化的步伐。

综上所述,我国的太阳能热发电的发展方向应是立足国情,选择性地开展,因地制宜,实现太阳能向电能的高效转化,努力将太阳能热发电发展成为低成本、高效益、零污染的“阳光”产业!

[参考文献](References)

- [1] 袁建丽,林汝谋,金红光,等. 太阳能热发电系统与分类(上) [J]. 太阳能报,2007(4):27-33.
Yuan Jianli, Lin Rumou, Jin Hongguang, et al. Classification of solar thermal power system I [J]. Solar Energy, 2007(4): 27-32. (in Chinese)
- [2] 张耀明. 太阳能热发电技术 [J]. 高科技与产业化,2009(7):28-30.
Zhang Yaoming. Solar thermal power generation technology [J]. High Technology and Industrialization, 2009(7): 28-30. (in Chinese)
- [3] 张耀明. 太阳能热发电技术 [J]. 山西能源与节能,2009(3):1-4.
Zhang Yaoming. Solar thermal power generation technology [J]. Shanxi Energy and Conservation, 2009(3): 1-4. (in Chinese)
- [4] 宿建峰,李和平. 太阳能热发电技术的发展现状及主要问题 [J]. 华电技术,2009,31(4):78-82.
Su Jianfeng, Li Heping. Development and main problems of solar thermal power generation technology [J]. Water Conservancy and Electric Power Machinery, 2009,31(4): 78-82. (in Chinese)
- [5] 杨敏林,杨晓西,林汝谋,等. 太阳能热发电技术与系统 [J]. 热能动力工程,2008,23(3):221-226.
Yang Minlin, Yang Xiaoxi, Lin Rumou, et al. Systems and technology of solar thermal power generation [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(3): 221-226. (in Chinese)
- [6] 章国芳,朱天宇,王希晨. 塔式太阳能热发电技术进展及在我国的应用前景 [J]. 太阳能,2008(11):33-37.
Zhang Guofang, Zhu Tianyu, Wang Xicheng. Development of solar power tower technology and its prospect in China [J]. Solar Energy, 2008(11): 33-37. (in Chinese)
- [7] 张耀明,刘德有,张文进. 70kW塔式太阳能热发电系统研究与开发(上) [J]. 太阳能,2007(10):19-23.
Zhang Yaoming, Liu Deyou, Zhang Wenjin. Research and development of 70kW tower solar thermal power generation system I [J]. Solar Energy, 2007(10): 19-23. (in Chinese)
- [8] 汤延令. 太阳能热发电技术现状及发展 [J]. 福建电力与电工,2008,28(4):12-16.

- Tang Yanling. Status and development of electric power generation technology from solar thermal power [J]. Fujian Electric Power and Electrical Engineering, 2008, 28(4): 12-16. (in Chinese)
- [9] 罗智慧, 龙新峰. 槽式太阳能热发电技术研究现状与发展 [J]. 电力设备, 2006, 7(11): 29-32.
Luo Zhihui, Long Xinfeng. State and trend of solar parabolic trough power generation technology [J]. Electrical Equipment, 2006, 7(11): 29-32. (in Chinese)
- [10] 安翠翠, 张耀明, 王军. 国际主要槽式太阳能热发电站介绍 [J]. 太阳能, 2007(7): 16-20.
An Cuicui, Zhang Yaoming, Wang Jun. Introduction of international solar trough power plants [J]. Solar Energy, 2007(7): 16-20. (in Chinese)
- [11] 高嵩, 侯红娟. 太阳能热发电系统分析 [J]. 华电技术, 2009, 31(1): 70-74.
Gao Song, Hou Hongjuan. Analysis of solar thermal electric power generation system [J]. Water Conservancy and Electric Power Machinery, 2009, 31(1): 70-74. (in Chinese)
- [12] 许辉, 张红, 丁莉. 碟式太阳能热发电技术综述 [J]. 热力发电, 2009, 38(5): 5-17.
Xu Hui, Zhang Hong, Ding Li. An overview of dish solar thermal power technology [J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(5): 5-17. (in Chinese)
- [13] 王军, 刘德有, 张文进. 碟式太阳能热发电 [J]. 太阳能, 2006(31): 31-32.
Wang Jun, Liu Deyou, Zhang Wenjin. Disc type solar thermal power generation [J]. Solar Energy, 2006(31): 31-32. (in Chinese)
- [14] 张梅梅. 太阳能高温热发电技术 [J]. 高科技与产业化, 2008(7): 22-24.
Zhang Meimei. The high temperature solar thermal power technology [J]. High Technology and Industrialization, 2008(7): 22-24. (in Chinese)
- [15] 李京光, 李彦斌. 太阳能热发电现状 [J]. 中国电力教育, 2008(10): 600-601.
Li Jingguang, Li Yanbin. The status of solar thermal power [J]. China Power Education, 2008(10): 600-601. (in Chinese)
- [16] 刘景丽. 太阳能热发电的优势和困境 [J]. 电器工业, 2008(4): 38-41.
Liu Jingli. The advantages and difficulties of solar heat generation [J]. China Electrical Equipment Industry, 2008(4): 38-41. (in Chinese)
- [17] 王亦楠. 对我国发展太阳能热发电的一点看法 [J]. 中国能源, 2006, 28(8): 5-10.
Wang Yinan. Some opinions on developing solar thermal power in our country [J]. Energy of China, 2006, 28(8): 5-10. (in Chinese)
- [18] Qu Hang, Zhao Jun, Yu Xiao. Prospect of concentrating solar power in China the sustainable future [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008(12): 2 506-2 512.
- [19] 汪惟源. 南京电网分布结构的形成及发展规划研究 [J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2009, 9(4): 21-24.
Wang Weiyuan. Research on the formation and planning of Nanjing power grid partitioning [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2009, 9(4): 21-24. (in Chinese)
- [20] 杨宏旻, 李大伟, 侯文慧, 等. IECM 模型在燃煤电站汞污染控制及经济性预测中的应用 [J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2010, 10(1): 31-35.
Yang Hongmin, Li Dawei, Hou Wenhui, et al. Application of IECM in mercury pollution control and economic forecast for coal-fired power plant [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2010, 10(1): 31-35. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]