

# 区域可再生能源规划模型述评与展望

吉平, 周孝信, 宋云亭, 马世英, 李柏青

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Review and Prospect of Regional Renewable Energy Planning Models

JI Ping, ZHOU Xiaoxin, SONG Yunting, MA Shiying, LI Baiqing

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** Effectively planning regional renewable energy sources is favorable for fully utilizing abundant renewable energy resources in China, promoting the proceeding of energy-saving and emission reduction, improving low-carbon degree of power source structure and promoting the development of intelligent and green electric power. After the presentation on the sustainable development problem of energy sources that China has to be faced with at present and the framework for regional renewable energy resource planning model, a review on integrated structural models, which are researched and applied to energy source plannings home and abroad, is given; the structures and application situation of the IIASA-WEC energy economic environment, the integrated policy assessment model for China (IPAC), prospective outlook on long-term energy systems (POLES), the national energy modeling systems (NEMS) and hybrid optimization model for electric renewables (HOMER) are emphatically summarized, and some existing problems and the development trend of renewable energy planning in future are pointed out.

**KEY WORDS:** energy planning; renewable energy; integrated- structure model; hybrid energy model

**摘要:** 有效进行区域可再生能源规划有利于充分利用我国丰富的可再生能源资源、推动节能减排进程、提高电源结构低碳化程度、促进智能化绿色电力的发展。在介绍我国当前面临的能源可持续发展问题以及区域可再生能源规划模型框架的基础上,对目前国内外应用于能源规划研究的集成结构模型及其现状进行了综述,重点总结了 IIASA-WEC 能源-经济-环境模型、中国能源环境综合评价模型系统(the integrated policy assessment model for China, IPAC)、能源系统长期前景规划模型(prospective outlook on long-term energy systems, POLES)、国家能源模型(the national energy modeling systems, NEMS)以及可再生电力混合优化模型(hybrid optimization model for electric renewables, HOMER)等混合能源模型的结构及应用现状,并指出了当前存在的一些问题和未来的发展方向。

**关键词:** 能源规划; 可再生能源; 集成结构模型; 混合能源模型

## 0 引言

当前,在我国能源生产和能源消费结构中,常规能源所占比重均超过九成<sup>[1-2]</sup>。能源资源的过度消耗导致不可再生化石能源供给能力的不断衰减,过度依赖常规能源造成的环境污染问题也日益严重<sup>[3]</sup>。

我国丰富的风能、水能、太阳能、海洋能以及生物能等可再生能源具有发展电力的潜在优势<sup>[4]</sup>。在逐渐形成的以大型集中式发电和分布式发电相结合的第 3 代电网中,非化石能源发电的比例将会有较大提高<sup>[5]</sup>。可再生能源规划作为发展中的一个基础环节,对整个可再生能源优化、有序、高效地发展起着重要作用<sup>[6]</sup>。文献[7]研究认为,区域可再生能源规划是落实国家可再生能源规划主体的重要环节,进行区域可再生能源规划对落实国家可再生能源规划、实施可再生能源重点发展领域、项目实施优先布局及制定相关政策具有重要的理论与应用价值。通过研究,文献[7]提出一种区域可再生能源规划模型框架,该框架中资源评价模型是基础,可再生能源规划模型是核心,2 者分别给出所研究区域的可再生能源资源量以及在给定资源分布、能源需求和政策情景下的区域可再生能源发展目标 and 结构,规划评价模块则对规划的优劣性进行评价。

科学合理地制定能源规划是解决能源问题的有效前提和基础,而可再生能源规划、电力规划是能源规划中非常重要的专项规划,区域能源规划是落实国家能源规划主体的重要环节,将 3 者相结合进行研究,有利于充分利用我国丰富的可再生能源资源、推动节能减排进程、提高电源结构低碳化程度、促进智能化绿色电力的发展。

本文对目前国内外集成结构能源模型及其现状进行了综述，指出了存在的一些问题及未来发展方向，旨在为科学合理地制定能源规划提供参考。

1 区域可再生能源规划模型研究现状

1.1 能源规划模型发展过程简述

在能源系统分析中，定性方法具有主观局限性且不可重复，定量方法的完全客观抽象则与真实结果出入较大，而能源模型的研究则能客观真实地模拟能源系统。

能源系统模型经过独立的能源模型、大规模的能源模型系统及人机交互的能源模型系统 3 个发展阶段，目前已取得大量研究成果，形成了数据外推系统模型和集成结构模型 2 大类。数据外推系统模型不直接研究经济系统的相互作用和平衡规律，而仅仅根据数据之间的相关关系进行外推；集成结构模型则综合考虑经济能源系统各种变量之间的相互关系，采用经济学和能源学的规律建立模型。其中，集成结构模型的应用更为方便、范围更广。

1.2 能源规划集成模型

在能源规划模型研究方面，国内外有 2 种典型的建模角度<sup>[8-9]</sup>，即自上而下(top-down)的宏观经济角度和自下而上(bottom-up)的工程角度。按照起源、研究内容、研究方法、模型功能、研究层面、建模方法对能源规划模型可进行分类<sup>[10-12]</sup>，如表 1 所示。

当前国内外常用的区域可再生能源规划模型基本上是延用能源规划模型或者国家规划模型<sup>[7]</sup>，包括能源市场分配(market allocation, MARKAL)模型、长期能源替代规划系统(long-range energy alternatives planning system, LEAP)模型、能源供应战略方案及其环境综合影响(model of energy supply strategy alternatives and their general environmental impacts, MESSAGE)模型、亚洲气候变化综合评价模型(AIM, 也称亚太地区温室气体综合评价模型)、清洁能源项目分析软件(RETScreen)等；另一类为针对电力领域的能源规划模型，主要是可再生电力混合优化模型(hybrid optimization model for electric renewables, HOMER)。文献[7]对 MARKAL、LEAP、MESSAGE、AIM 和 RETScreen 模型的开发者、用途、基本原理及模型优缺点进行了简要的对比，本节则从模型的结构入手，对国内外应用相对较广的模型进行综述。

表 1 能源规划模型分类简表  
Tab. 1 Classification of energy planning model

分类方法	划分类别	典型代表	主要研究的问题	时间跨度
按起源分类	能源情报署(EIA)	NEMS <sup>[13]</sup>	能源经济、环境、政策	中期
	欧洲委员会(EC)	POLES <sup>[14]</sup>	能源经济	长期
	国际原子能机构(IAEA)	MACRO <sup>[15]</sup>	能源经济	长期
	国际能源署(IEA)	MARKAL <sup>[16-23]</sup>	能源经济、环境	长期
	其它机构	LEAP <sup>[24-29]</sup>	能源经济、环境	长期
按研究内容	能源-经济模型	MACRO	能源经济	长期
	能源-环境模型	AIM <sup>[30]</sup>	能源消费、能源环境	长期
	能源-经济-环境模型	3Es-Model <sup>[31]</sup>	能源经济、环境、政策	长期
	综合模型	IIASA-WEC E3	能源技术、经济、环境	长期
按研究方法	能源仿真模型	POLES	能源经济	长期
	能源优化模型	MESSAGE <sup>[32-33]</sup>	能源经济、经济、政策	长期
	能源均衡模型	CGE	能源经济、环境	中期
	能源投入-产出模型	EFOM <sup>[34]</sup>	能源经济	中期
按模型功能	能源供应模型	PRIMES <sup>[35]</sup>	能源经济、环境、技术	长期
	能源需求模型	MEDEE <sup>[36]</sup>	能源技术、经济	长期
	能源技术模型	ERIS <sup>[37]</sup>	能源技术、能源发电	
按研究层面	全球能源模型	IIASA-WEC E3 <sup>[38]</sup>	能源技术、经济、环境	长期
	区域能源模型	GEM-E3 <sup>[39]</sup>	能源经济、环境	长期
	国家能源模型	NEMS	能源经济、环境、政策	中期
	部门能源模型	LEAP	能源经济、环境	长期
按建模方法	自上而下模型	CGE <sup>[40]</sup>	能源经济、环境	中期
	自下而上模型	MARKAL	能源经济、环境	长期
	混合能源模型	NEMS	能源经济、环境、政策	中期

1.3 基于自下而上角度的能源规划模型

基于自下而上角度的能源规划模型中，MARKAL 模型和 LEAP 模型应用较为广泛，MESSAGE 模型在上世纪 90 年代也得到一定范围的应用，3 者的模型结构分别如图 1<sup>[17]</sup>、图 2<sup>[26]</sup>和图 3<sup>[32-33]</sup>所示。

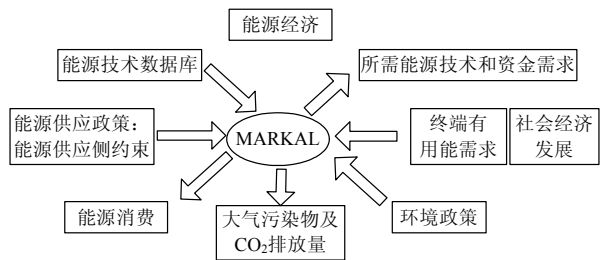


图 1 MARKAL 模型结构  
Fig. 1 Structure of MARKAL model

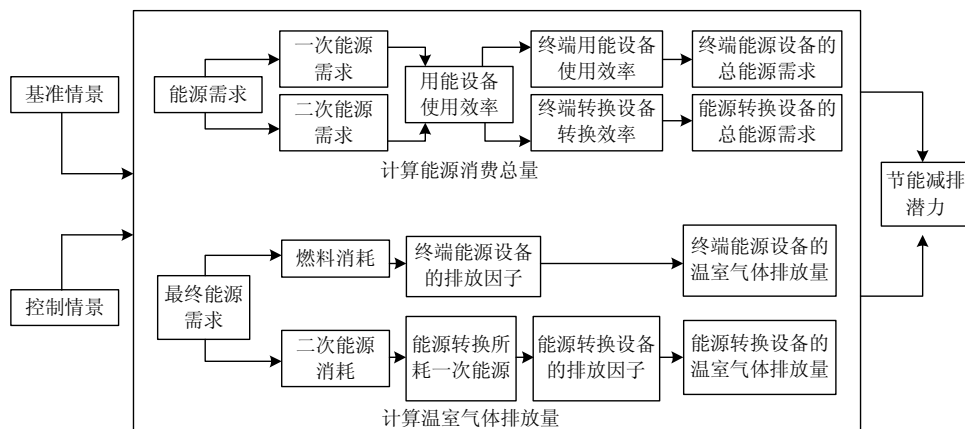


图2 LEAP模型结构

Fig. 2 Structure of LEAP model

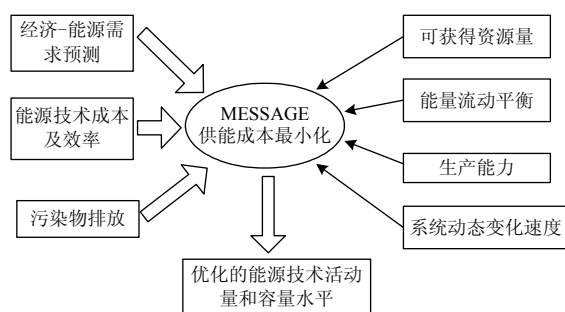


图3 MESSAGE模型结构

Fig. 3 Structure of MESSAGE model

MARKAL 和 MESSAGE 模型是动态线性规划模型, LEAP 模型是基于情景分析的能源-环境模型工具, 3 者进行能源规划的方法不同, 但都是基于自下而上的工程角度的, 这就使得它们能够描述底层技术经济微观变化引起的综合效应, 却不能反映资源、经济的相互关系, 也不能做出对一般经济和非技术市场要素的反馈<sup>[17,26]</sup>。

#### 1.4 混合能源模型结构及其应用

##### 1.4.1 混合能源模型概述

仅从单一的自上而下或者自下而上的角度建模的方法, 不能进行经济与技术的综合分析。当模型的结构性较强且设计有外部接口时, 才能与外部经济或技术模型相结合, 进而在能源规划中综合考虑经济、技术因素。因此, 既包括自上而下宏观经济模型又包括自下而上能源供应及需求模型的混合能源模型(mixed energy model)得到进一步的研究<sup>[10,12]</sup>。

较具代表性的混合能源模型有: IIASA-WEC 能源-经济-环境模型(the IIASA-WEC Energy Economic Environment, IIASA-WEC E3)、中国能源环境政策综合评价模型(integrated policy assessment model for China, IPAC)<sup>[41-42]</sup>、能源系统

长期前景规划模型(prospective outlook on long-term energy systems, POLES)、国家能源模型(the national energy modeling systems, NEMS)、RETScreen 模型以及 HOMER 模型<sup>[43-44]</sup>。IPAC 模型自 1992 年着手研发, 完成了从能源模型不断向能源、经济和环境综合模型完善的过程, 也得到了相对较广泛的应用。HOMER 模型于 2000 年 2 月 14 日发布第 1 代软件初始版本 HOMER Original Version 1.0 后迅速在全球范围内得到应用, 目前在可再生电力能源规划中已成为应用最为广泛的优化模型。

IIASA-WEC E3 模型由 SCENARIO GENERATOR (SG)、RAINS、MESSAGE、MACRO、BLS、MAGICC、GCM 和 Soft-Linking and Scenario Definition and Evaluation 等子模型组成<sup>[12,38]</sup>。子模型可以单独使用, 也可组合使用。文献[45]利用 SG、MESSAGE、MACRO 和 MAGICC 模型的组合, 采用场景分析法进行了全球温室气体排放及能源消费结构的研究。文献[46-47]单独采用 RAINS 模型, 分别对东欧的经济结构和能源效率、中国和印度等亚洲国家的可再生能源发展潜力及污染物排放成本进行了研究, 制定了相应的污染物减排策略。

POLES 模型的多个子模块相互连接、多层嵌套, 能够描述全球范围内不同地区的能源需求、供应及价格的协调发展, 在油气资源的相关仿真中应用较多<sup>[12,48]</sup>。文献[49-50]应用 POLES 分别在实行碳排放交易的经济潜力、世界能源需求预测方面做了分析。

与 IIASA-WEC E3 模型、POLES 模型相似, NEMS 模型也是由多个子模块组合而成<sup>[13]</sup>, 各子模块独立实行不同的功能。文献[51]结合场景分析方法, 将 NEMS 模型应用于美国电力发展的政策制定

与选择中,分析了温室气体及其它大气污染物对环境的影响。

#### 1.4.2 中国能源环境政策综合评价模型(IPAC)

IPAC 主要包括能源与排放模型、环境模型和影响模型 3 个部分,由 IPACSGM、IPAC-Material、IPAC-e、IPAC-TIMER、IPAC-tech、IPAC-Message、IPAC-AIM、IPAC-AIM/Local、IPAC-air、IPAC-Climate、IPAC-Health、IPAC-Water 共 12 个子模块组成<sup>[42]</sup>,各子模块可单独使用。IPAC-AIM/Local 区域模型的结构如图 4 所示。文献[14]以北京市能源环境对策为例,采用 IPAC-AIM/Local 区域能源环境综合评价模型,综合考虑技术现状及发展前景、环境保护政策以及经济发展等因素,量化分析了节能减排技术所能产生的本地环境效应及对全国范围气候变化政策的影响。在能源需求不断增长以及节能减排的影响下,许多学者将 IPAC 模型或其子模块应用到了交通<sup>[52]</sup>、石油<sup>[53]</sup>、电力<sup>[54]</sup>、环境保护<sup>[55]</sup>等各方面,研究能源与经济、环境的相互影响,推动低碳化经济、技术发展,提供政策措施支持<sup>[56]</sup>。文献[54]以中国电力工业的发展及其污染物排放控制现状为蓝本,构建了电力温室气体减排评价模型,对电力行业 2010—2050 年最优技术路线进行计算和预测,给研究电力行业温室气体排放控制的机构提供了参考方案。

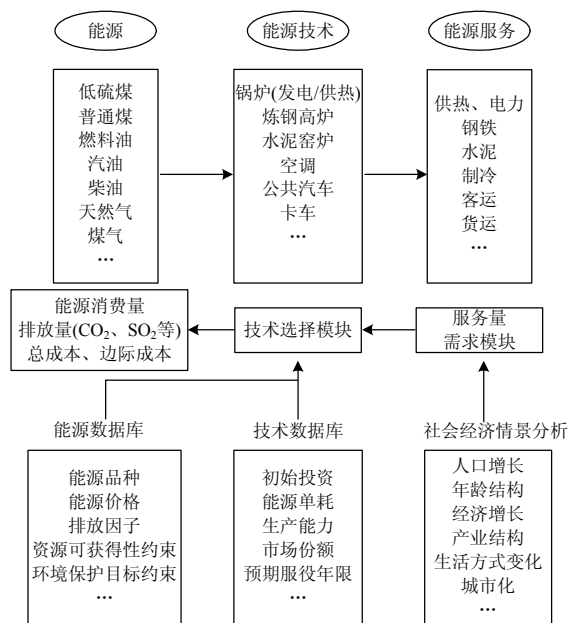


图 4 IPAC-AIM/Local 区域模型结构示意图

Fig. 4 Structure of IPAC-AIM/Local model

#### 1.4.3 HOMER 模型

HOMER 是由美国可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)着手研发的可

再生能源混合发电经济-技术-环境优化分析计算模型,并开发了相应软件。

HOMER 以净现值成本(net present cost, NPC),即可再生能源混合发电系统在其生命周期内的安装和运行总成本,为基础模拟不同可再生能源系统规模、配置<sup>[43-44,57-69]</sup>,在一次计算中能同时实现仿真、优化和灵敏度分析 3 种功能。其优化和灵敏度分析算法,可以用来评估系统的经济性和技术选择的可行性,可以考虑技术成本的变化和能源资源的可用性<sup>[69]</sup>。它能够模拟系统的运行过程,提供全年每小时各种可再生能源发电量及系统电力平衡情况;能够详细计算系统全年燃料、环境、可靠性、电源、电网等各项成本;能给出不同限制条件下的最优化可再生能源发电规划方案。其计算原理、结构示意图分别如图 5、6 所示。

HOMER 在计算时,建立为期 1 a、步长为 1 h 的模型来模拟每一组系统配置,该步长小到足以跟踪负载波动以及可再生资源统计特性的变化,但是却不影响计算速度;其详细的计算结果可以提供全年可再生能源系统性能分析<sup>[59]</sup>。

HOMER 模型适用范围较广,无论系统规模大小都可应用<sup>[44]</sup>,目前已在城市<sup>[58]</sup>、海岛<sup>[60-61]</sup>、村庄<sup>[62-64]</sup>、社区<sup>[66]</sup>、住宅<sup>[67-68]</sup>等规模下的可再生能源规划及电网优化设计<sup>[69]</sup>中得到应用。

文献[58]选择澳大利亚境内 3 个气候、地理位置各不相同的中小规模旅游城市进行可再生能源规划研究,采用了光伏发电与柴油机发电配合的策略,并以净现值成本、可再生能源比例和投资回收期为标准对设计的规划方案做了评估。

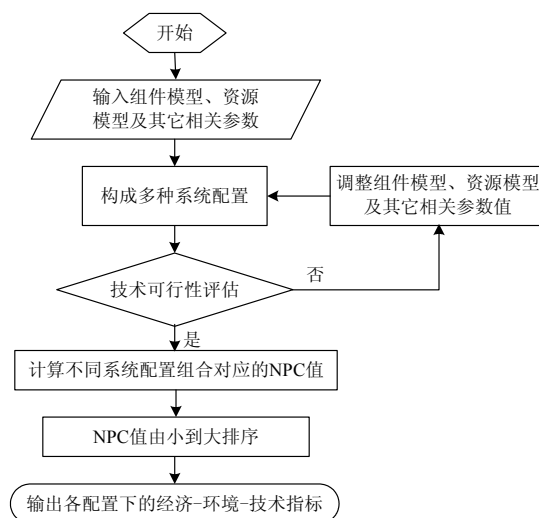


图 5 HOMER 计算原理示意图

Fig. 5 Calculating schematic diagram of HOMER

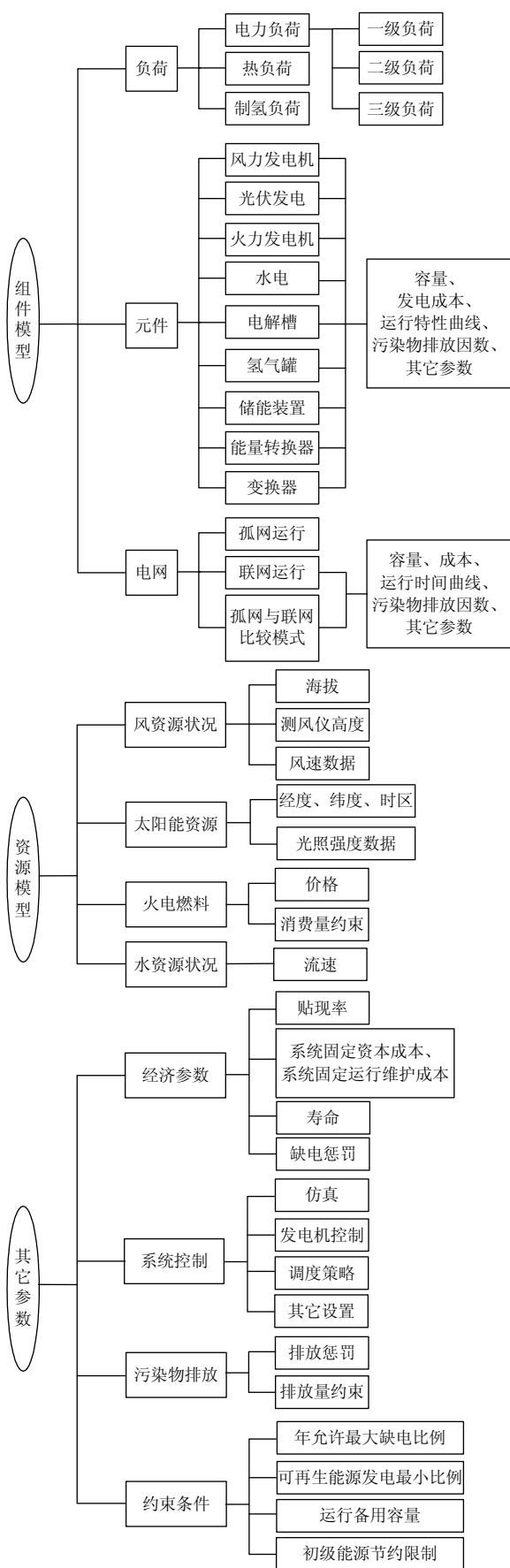


图 6 HOMER 模型结构示意图  
Fig. 6 Structure of HOMER model

文献[60]以希腊的基斯诺斯岛为例,分别以燃料电池、电解槽、 $H_2$  储能组合和柴油机、光伏发电、储能电池组合作为供电系统进行了海岛能源规划。计算的经济-环境指标均表明,可再生能源的引入能够降低对化石能源的依赖程度,大幅减少购买燃料的经济成本,优化环境效益。文献[61]对希腊的喀帕苏斯岛进行了可持续发展的能源规划,所设计的电网运行于孤岛模式,涵括了柴油机、风机、光伏、电解槽等 4 种发电形式,配备逆变器和储能装置,并对引入  $H_2$  储能对系统的影响做了分析。

文献[62]对加拿大北部建有约 300 个社区的村庄,分析了可再生能源供电的潜力,在原来柴油机发电的基础上增加了风力发电,大量减少柴油消耗、 $CO_2$  排放及资金投入。

文献[63]以阿拉斯加较偏远的村庄 Lime 为研究对象,用 HOMER 分析了同时设有光伏发电、储能装置以及柴油机发电的供电系统的经济和环境效益,并用 MATLAB Simulink 建立了一个经济-环境优化模型进行仿真,比较二者计算结果发现经济、环境指标的区别很小,仅在储能电池的相关结果中有区别,而这是由电池充放电阈值设定不同引起的。文献[64]将研究对象的地域范围做了扩大,在印度 Uttarakhand 州的阿尔莫拉区,对 7 个村庄进行了供电能源规划和设计,并与 the LINGO software 的结果进行了比较。

文献[67]以位于澳大利亚皇后岛上的亚热带沿海地区大型观光酒店为例进行了能源规划及优化设计,与 HYBRIDS 的计算结果进行了比较后发现二者的净现值成本可相比拟。文献[68]以 HOMER 为工具,以几个家庭或者几栋建筑为对象,构建了完全依靠可再生能源供能的系统,成为不消耗化石能源的“零能源之家”(zero energy home)。

#### 1.4.4 RETScreen 模型

RETScreen 模型是用以评估一些可再生能源技术的能源生产、寿命周期成本和温室气体排放减少程度的标准化的、完整的可再生能源计划分析模型<sup>[70-73]</sup>,其中可再生能源包括了风能、小水电、光伏、燃料电池、热电联产、太阳能采暖供热、地热能以及海洋能等。与 HOMER 模型类似,RETScreen 模型在结构上设置了系统参数、资源条件和其它参数等模块,如图 7 所示,只是 2 个模型在各模块中涉及的参数有所区别。此外,RETScreen 以美国国家航空航天局(NASA)的全球卫星太阳能数据为基础开发

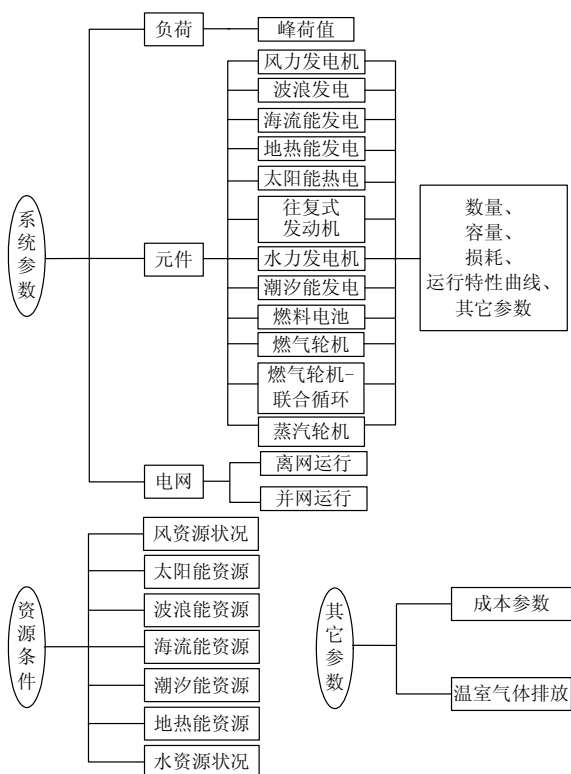


图7 RETScreen 模型结构示意图

Fig. 7 Structure of RETScreen model

了一种新的全球气候数据库<sup>[70]</sup>，节省了大量成本，增加了对潜在的可再生能源进行评估的可行性。

### 1.5 混合能源模型的比较

IIASA-WEC E3、IPAC、POLES 和 NEMS 模型具有如下共同特点：1) 基于线性规划理论；2) 能源、经济、供应、转化、需求、社会、环境等功能在相应的独立子模块中实现；3) 子模块相互连接、多层嵌套构成；4) 自上而下和自下而上的模型间的供需平衡、数据传递由集成模块完成；5) 模块之间相互联系、相互影响；6) 多针对全球、国家或区域范围进行研究；7) 规划软件的约束条件为经济和社会因素。因此，IIASA-WEC E3、IPAC、POLES 和 NEMS 等混合能源模型虽然在以电力为对象的能源规划中也有一些应用，但所得规划结果多为较宏观地描述经济、社会因素的指标值。RETScreen 模型中虽然能够进行完整的可再生能源规划分析，但在规划中通常只能考虑一种可再生资源发电形式。

HOMER 模型在结构上由能源组件模型、资源模型等组成，能源、经济、供应、转化、需求、社会、环境等功能统一实现，而不是在独立子模块中完成；不仅能够输出技术可行的最优化规划方案，还能模拟系统的运行过程，提供全年每小时各种可

再生能源发电量及系统电力平衡情况；能够提供每个组件每小时的能量流动以及成本、性能的年度情况；能提供经济最优化条件下，各组件参数输入值的指导量；约束条件不仅包括经济、环境条件，也包括供电可靠性和资源可获得量等约束条件。因此，HOMER 模型在近几年国外的区域可再生电力能源规划或者规模更小的村庄、社区、住宅的能源规划及优化设计中得到了较为广泛的应用，其仿真优化结果能为发展规划的制定、技术措施的实施提供有力的信息支持和指导意见，但在其研究对象的规模方面还有待更深入的探索。

## 2 启示与展望

### 2.1 启示

通过可再生能源规划模型对比及应用研究发现：

1) 目前在可再生能源规划模型基本框架方面的研究还较少，框架的模块内容尚未有标准可依，从而也导致了模型的系统性和友好性较差。

现有基本框架不能较明晰地反映不同规模研究对象、不同行业等方面的特点。

现有基本框架模块的输入数据量较大，统计数据严重缺失成为阻碍能源规划研究有效进行的一个重要问题；同时，较多重要规划参数的人工确定缺乏相关方法的支撑。

2) 在已有的可再生能源规划模型中，所包含的可再生资源种类较少，以当前开发技术较为成熟的水能、风资源和太阳能资源较多。

我国可再生能源种类及储量丰富，开发利用风能、太阳能、水能、海洋能、生物质能、地热能等储量丰富的可再生能源，开发氢能、天然气水合物、核聚变等新型能源对保障国家能源安全有着重要意义，因此，海洋能、生物质能、地热能等可再生能源的相关模型亟待建立。

3) 多种能源形式的组合更有利于提高能源综合利用效率，仅能考虑单一能源类型的规划模型在实践中受到很大限制。

基于单一角度的能源规划模型需要与其它模型相结合最终完成经济、技术的综合考量，降低了模型的实用性；而混合能源模型恰能弥补这一缺点，在能源规划中应用将更为广泛。

4) 当前大多数可再生能源规划模型较为宏观，往往是寻求给定技术条件下的最优能源结构及发展目标，从规划的输出结果中能获取的可执行规划

方案不够具体,对技术实施方案的指导性不足;而相对较具体的规划模型,其规划目标多为在给定技术和资源条件下的经济性最优;这些模型都缺乏对技术形式的具体指导。

## 2.2 展望

可再生能源规划能够为可再生能源发展提供发展方向和思路,因此,需要进一步提高研究、开发、使用能源规划模型解决能源规划、布局问题必要性和重要性的认识。解决能源可持续发展问题的迫切需求将会促进可再生能源规划模型的迅速发展。从目前的研究情况来看,未来可再生能源规划模型在以下几个方面将得到更为深入的研究:

1) 为更有效地开发海洋能、生物质能、地热能等可再生能源以及氢能、天然气水合物、核聚变等新型能源,能源规划模型中必将涵括这些形式的能源模型,因此,模型中可再生能源种类将更为丰富,合理的、有参考价值的规划结果将有利于可再生能源的开发利用走出实验室阶段,加速其商业化进程。

2) 可再生能源规划模型功能将继续得到优化,具备多种能源形式统一协调规划功能的能源规划模型将得到更长足的发展,能综合考虑经济、环境、技术等方面因素的混合能源模型功能将得到优化。

3) 有必要在可再生能源规划模型的优化目标中增加对技术形式的考量,这样规划结果就不仅仅是经济性最优,同时也对应用各种新技术带来的效益进行了优劣排序,提高能源规划结果的可实现性以及技术实施方案的指导性,从而促进能源技术的研发,为能源可持续发展战略提供技术保障和可实现性。

4) 合理有效评估可再生资源储量的方法有待深入研究,仍需对现有资源评估方法进行优化以减小评估误差,并最终在可再生能源规划模型中应用这些先进的方法,为能源规划奠定良好基础。

5) 我国统计年鉴的数据结构需要进一步得到完善,各项统计指标的历史资料需要有效得到保存,以解决能源规划中可再生能源统计数据严重缺失的问题;需要建立可再生能源相关指标统计的标准体系,完善区域级甚至国家级指标的统计,并研究这些指标的综合处理方法以保证能源规划的客观性,使得各级可再生能源规划的结果更合理、更有指导意义,最终落实国家可再生能源规划,为实施可再生能源重点发展领域、项目实施优先布局及

制定相关政策提供重要的理论与应用参考。

6) 应当结合我国可再生能源资源、开发、利用的特点,研究开发适应于我国能源特点的国产化模型和软件,这也是当前我国可再生能源规划面临的一项重要任务。

为更有效地进行能源规划,更好地发挥能源规划对国家能源战略制定、推动科学技术发展方面的作用,如何更合理地构建能源规划模型框架、实现模型功能还需要国内外专家学者进行更深入的探讨。

## 3 结论

在对可再生能源资源进行评价的基础上,结合区域自身资源优势 and 特点,考虑未来可再生能源技术发展的特征,制定不同时期各种可再生能源的激励政策及发展目标,进行可再生能源规划对能源安全有着重大意义。

本文对目前国内外应用于能源规划研究的集成结构模型及其现状进行了综述,重点总结了混合能源模型的结构,旨在为顺利进行可再生能源规划提供参考。

基于线性规划理论的 IIASA-WEC E3、IPAC、POLES 和 NEMS 等混合能源规划模型能在独立子模块中分别实现能源、经济、供应、转化、需求、社会、环境等功能;在以电力为对象的应用研究中还需要进一步深入研究。专属电力领域的可再生能源发电优化模型 HOMER 能同时考虑经济与技术因素,统一实现能源、经济、供应、转化、需求、社会、环境等功能,进行区域能源规划研究;但在较广阔区域能源规划的应用上有待深入。

可再生能源发电技术的发展为更充分、更合理开发潜力巨大的可再生资源提供了技术基础。为了发挥可再生能源发电在实现能源、经济、环境综合可持续发展中的积极效应,进行区域可再生电力能源规划研究有着重要的理论与应用价值。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国统计局. 我国历年统计年鉴及相关统计数据[EB/OL]. 2011-04-01[2013]. <http://www.stats.gov.cn/>.
- [2] 张丽峰. 中国能源供求预测模型及发展对策研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2006.
- [3] 陈武, 李云峰. 我国能源可持续发展的探讨[J]. 能源技术经济, 2010, 22(5): 17-23.  
Chen Wu, Li Yunfeng. Discussion on sustainable energy development in China[J]. Energy Technology and Economics, 2010, 22(5): 17-23(in Chinese).
- [4] Ji Ping, Zhou Xiaoxin, Wu Shouyuan. Review on sustainable development of island microgrid[C]//The International Conference on

- Advanced Power System Automation and Protection(APAP2011). Beijing: Tsinghua University, 2011: 240.
- [5] 周孝信. 未来电网发展路: 智能电网是重中之重[EB/OL]. 2012-03-14[2013]. <http://www.gridsources.com/contents/1475/180229.html>.
- [6] 吉平, 武守远, 周孝信. 含风力发电的市级电网区域可再生能源规划方案确定及重要因素影响研究[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 334-341.
- Ji Ping, Wu Shouyuan, Zhou Xiaoxin. Determination of regional renewable energy planning scheme for urban power grid containing wind farm and its important impacting factors[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 334-341(in Chinese).
- [7] 刘贞, 张希良, 高虎, 等. 区域可再生能源规划基本框架研究[J]. 中国能源, 2010, 32(2): 38-41.
- [8] 张阿玲, 郑淮, 何建坤. 适合中国国情的经济、能源、环境(3E)模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(12): 1616-1620.
- Zhang Ailing, Zheng Huai, He Jiankun. Economy, energy, environment model for the Chinese situation system[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2002, 42(12): 1616-1620(in Chinese).
- [9] Pouloupoulos S G, Samaras D P, Philoppopoulos C J. Regulated and unregulated emissions from an internal combustion engine operating on ethanol containing fuels[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(26): 4399-4406.
- [10] 杨莉. 基于可持续发展的我国电源结构优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [11] Kagiannas A G, Patlitzianas K D, Nletaeiotis K, et al. Energy models in the Mediterranean countries: a survey towards a common strategy [J]. International Journal of Power and Energy Systems, 2006, 26(3): 260-268.
- [12] 高新宇. 北京市可再生能源综合规划模型与政策研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011: 32-34.
- [13] Energy Information Administration(EIA). Annual energy outlook 2003 with projections to 2025[R]. Washington D. C.: Office of Integrated Analysis and Forecasting, U. S. Department of Energy, 2003.
- [14] European Commission. Energy in Europe, European energy to 2020: a scenario approach [R]. Belgium: Directorate general for energy, 1996.
- [15] Mario Contaldi, Francesco Gracceva, Giancarlo Tosato. Evaluation of green-certificates policies using the MARKAL-MACRO-Italy model[J]. Energy Policy, 2007, 35(2): 797-808.
- [16] 中国社会科学院城市与环境研究所新能源与可再生能源经济研究中心. MARKAL 模型[EB/OL]. 2012-01-09[2013]. [http://www.nere.org.cn/nere/ShowNews.asp?News\\_Id=1073](http://www.nere.org.cn/nere/ShowNews.asp?News_Id=1073).
- [17] 陈长虹, 杜静. 实施大气污染物排放总量控制后能源系统的减排效果[J]. 能源研究与信息, 2002, 18(1): 10-16.
- Chen Changhong, Du Jing. Reduction of emissions from energy systems under implementing atmospheric-pollutant emission control[J]. Energy Research and Information, 2002, 18(1): 10-16(in Chinese).
- [18] 周伟, 米红. 中国能源消费排放的 CO<sub>2</sub> 测算[J]. 中国环境科学, 2010, 30(8): 1142-1148.
- Zhou Wei, Mi Hong. Calculation on energy-related CO<sub>2</sub> emissions in China(2010-2050)[J]. China Environmental Science, 2010, 30(8): 1142-1148(in Chinese).
- [19] Subhash Mallah, Bansal N K. Allocation of energy resources for power generation in India: business as usual and energy efficiency[J]. Energy Policy, 2010, 38(2): 1059-1066.
- [20] Martin Borjesson, Ahlgren E O. Biomass gasification in cost-optimized district heating systems: a regional modeling analysis [J]. Energy Policy, 2010, 38(1): 168-180.
- [21] Shrestha R M, Shreekar Pradhan. Co-benefits of CO<sub>2</sub> emission reduction in a developing country[J]. Energy Policy, 2010, 38(5): 2586-2597.
- [22] Fu-Kuang Ko, Chang-Bin Huang, Pei-Ying Tseng. Long-term CO<sub>2</sub> emissions reduction target and scenarios of power sector in Taiwan [J]. Energy Policy, 2010, 38(1): 288-300.
- [23] Sophie Jablonski, Neil Strachanb, Christian Brand. The role of bioenergy in the UK's energy future formulation and modelling of long-term UK bioenergy scenarios[J]. Energy Policy, 2010, 38(10): 5799-5816.
- [24] 刘朝, 赵涛. 2020 年中国低碳经济发展前景研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(7): 73-79.
- Liu Zhao, Zhao Tao. Research on development of China's low-carbon economy in 2020[J]. China Population, Research and Environment, 2011, 21(7): 73-79(in Chinese).
- [25] 高虎, 梁志鹏, 庄幸. LEAP 模型在可再生能源规划中的应用[J]. 中国能源, 2004, 26(34): 34-37.
- [26] 曹斌, 林剑艺, 崔胜辉, 等. 基于 LEAP 的厦门市节能与温室气体减排潜力情景分析[J]. 生态学报, 2010, 30(12): 3358-3367.
- Cao Bin, Lin Jianyi, Cui Shenghui, et al. Scenario analysis of reduction potentials of energy demand and GHG emissions based on LEAP model in Xiamen City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(12): 3358-3367(in Chinese).
- [27] Seungmoon Lee, Jin-Won Park, Ho-Jun Song, et al. Implication of CO<sub>2</sub> capture technologies options in electricity generation in Korea [J]. Energy Policy, 2008, 36(1): 326-334.
- [28] Aumnad Phdungsil. Integrated energy and carbon modeling with a decision support system: Policy scenarios for low-carbon city development in Bangkok[J]. Energy Policy, 2010, 38(9): 4808-4817.
- [29] Mustonen S M. Rural energy survey and scenario analysis of village energy consumption: a case study in Lao People's Democratic Republic[J]. Energy Policy, 2010, 38(2): 1040-1048.
- [30] AIM 能源排放模型项目组. AIM/能源排放模型培训班情况简介 [J]. 中国能源, 1997, 19(10): 49-50.
- [31] Li Zhidong. An econometric study on China's economy, energy and environment to the year 2030[J]. Energy Policy, 2003, 31(11): 1137-1150.
- [32] 中国社会科学院城市与环境研究所新能源与可再生能源经济研究中心. MESSAGE 模型[EB/OL]. 2012-01-13[2013]. [http://www.nere.org.cn/nere/ShowNews.asp?News\\_Id=1074](http://www.nere.org.cn/nere/ShowNews.asp?News_Id=1074).
- [33] 陈荣, 张希良, 何建坤, 等. 基于 MESSAGE 模型的省级可再生能源规划方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(9): 1525-1528.
- Chen Rong, Zhang Xiliang, He Jiankun, et al. Provincial level renewable energy planning based on the MESSAGE model[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(9): 1525-1528(in Chinese).
- [34] Hannele Holtinen, Sami Tuhkanen. The effect of wind power on CO<sub>2</sub>: a batment in the nordic countries[J]. Energy Policy, 2004, 32(14): 1639-1652.
- [35] Pantelis Capros, Leonidas Mantzos. The European energy outlook to 2010 and 2030[J]. International Journal of Global Energy Issues, 2000, 14(1): 137-154.
- [36] 傅月泉, 吴俐. 应用 MEDEE-S 模型对江西中长期能源需求的初步预测[J]. 江西能源, 1994(2): 7-14.
- [37] Leonardo Barreto, Socrates Kypreos. Endogenizing R&D and market experience in the "Bottom-up" energy-systems ERIS model [J]. Technovation, 2004, 24(8): 615-629.
- [38] Leo Schrattenholzer, Patrick Criqui. A longer-term outlook on future energy systems[J]. International Journal of Global Energy Issues, 2000, 14(1): 348-373.
- [39] Capros P, Patoussos L, Stroblos N. Energy saving investment and employment: analysis through the GEM-E3 model[R]. Athens: National Technical University of Athens, 1999.
- [40] Zhang Zhongxiang, Baranzini Andrea. What do we know about carbon taxes?An inquiry into their impacts on copetiveness and distribution of income[J]. Energy Policy, 2004, 32(4): 507-518.
- [41] 杨宏伟. 应用 AIM/Local 中国模型定量分析减排技术协同效应对



- 气候变化政策的影响[J]. 能源环境保护, 2004, 18(2): 1-4.
- Yang Hongwei. Quantitative analysis of impacts on China's climate change policy from co-benefits of mitigation technologies by applying AIM/Local China model[J]. Energy Environmental Protection, 2004, 18(2): 1-4(in Chinese).
- [42] 中国社会科学院城市与环境研究所新能源与可再生能源经济研究中心. 关于构建区域能源需求预测模型系统的初步思考[EB/OL]. 2012-01-13[2013]. [http://www.nere.org.cn/nere/Show\\_News.asp?News\\_Id=1201](http://www.nere.org.cn/nere/Show_News.asp?News_Id=1201).
- [43] 武亚非, 包毅, 杨丽徙. 含双馈风电机组的配电网运行模拟[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2011, 32(4): 64-67.
- Wu Yafei, Bao Yi, Yang Lixi. Operation simulation of distribution network containing double-fed induction wind generators[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2011, 32(4): 64-67(in Chinese).
- [44] Homer Energy. Energy modeling software for hybrid renewable energy systems [EB/OL]. 2012-02-01[2013]. <http://homerenergy.com/index.html>.
- [45] Keywan Riahi, R Alexander Roehrl. Greenhouse gas emissions in a dynamics as-usual scenario of economic and energy development[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2000, 63(2-3): 175-205.
- [46] Markus Amann, Leen Hordijk, Ger Klaassen, et al. Economic restructuring in Eastern Europe and acid rain abatement strategies[J]. Energy Policy, 1992, 20(12): 1186-1197.
- [47] Boudri J C, Hordijk L. The potential contribution of renewable energy in air pollution abatement in China and India[J]. Energy Policy, 2002, 30(5): 409-424.
- [48] Criqui P, Mima-Avdulaj S, Kitous A. POLES: outlook on long-term energy systems[EB/OL]. 2012-04-15[2013]. <http://www.upmf-grenoble.fr/iepe/Recherche/RechaS.html>.
- [49] Patrick Criqui, Silvans Mima, Laurent Viguier. Marginal abatement costs of CO<sub>2</sub> emission reductions, geographical flexibility and concrete ceiling: an assessment using the POLES model[J]. Energy Policy, 1999, 27(10): 585-601.
- [50] Patrick Criqui. World energy projections to 2030[J]. International Journal of Global Energy Issues, 2000, 14(1-4): 116-136.
- [51] Hadley S W, Short W. Electricity sector analysis in the clean energy futures study[J]. Energy Policy, 2001, 29(14): 1285-1298.
- [52] 张树伟. 基于一般均衡(CGE)框架的交通能源模拟与政策评价[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [53] 李继尊, 姜克隽. 基于 IPAC-SGM 模型的高油价影响分析及政策建议[J]. 中国物价, 2007(4): 35-38.
- [54] 朱然. 基于 TIMES 模型的电力行业控制 CO<sub>2</sub> 方案优选[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [55] 姜克隽, 胡秀莲, 庄幸, 等. 中国的能源与温室气体排放情景和减排成本分析[C]//北京论坛(2008)文明的和谐与共同繁荣——文明的普遍价值和发展趋向. 北京: 北京大学, 2008: 103-117.
- [56] 刘强, 姜克隽, 胡秀莲. 中国能源领域低碳技术发展路线图[J]. 气候变化研究进展, 2010(5): 370-375.
- Liu Qiang, Jiang Kejun, Hu Xiulian. Low carbon technology development roadmap for China[J]. Advances in Climate Change Research, 2010(5): 370-375(in Chinese).
- [57] Lambert T, Gilman P, Lilienthal P. Micropower system modeling with HOMER[EB/OL]. 2012-02-01[2013]. <http://homerenergy.com/documentation.html>.
- [58] Dalton G J, Lockington D A, Baldock T E. Case study feasibility analysis of renewable energy supply options for small to medium-sized tourist accommodations[J]. Renewable Energy, 2009, 34(4): 1134-1144.
- [59] Dalton G J, Lockington D A, Baldock T E. Feasibility analysis of renewable energy supply options for a grid-connected large hotel[J]. Renewable Energy, 2009, 34(4): 955-964.
- [60] Zoulia E, Lymberopoulos N. Techno-economic analysis of the integration of hydrogen energy technologies in renewable energy-based stand-alone power systems[J]. Renewable Energy, 2007, 32(4): 680-696.
- [61] Giatrakos G P, Tsoutsos T D, Mouchtaropoulos P G, et al. Sustainable energy planning based on a stand-alone hybrid renewable energy/hydrogen power system: application in Karpathos island, Greece[J]. Renewable Energy, 2009, 34(7): 2562-2570.
- [62] Weis Timothy M, Adrian Ilinca. Assessing the potential for a wind power incentive for remote villages in Canada[J]. Energy Policy, 2010, 38(10): 5504-5511.
- [63] Wies Richard W, Johnson Ron A, Agrawal Ashish N, et al. Simulink model for economic analysis and environmental impacts of a PV with diesel-battery system for remote village[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 692-700.
- [64] Kanase-Patil A B, Saini R P, Sharma M P. Integrated renewable energy systems for off grid rural electrification of remote area[J]. Renewable Energy, 2010, 35(6): 1342-1349.
- [65] Nfah E M, Ngundam J M, Vandenbergh M, et al. Simulation of off-grid generation options for remote villages in Cameroon [J]. Renewable Energy, 2008, 33(5): 1064-1072.
- [66] Weis Timothy M, Adrian Ilinca. The utility of energy storage to improve the economics of wind-diesel power plants in Canada [J]. Renewable Energy, 2008, 33(7): 1544-1557.
- [67] Dalton G J, Lockington D A, Baldock T E. Feasibility analysis of stand-alone renewable energy supply options for a large hotel[J]. Renewable Energy, 2008, 33(7): 1475-1490.
- [68] Iqbal M T. A feasibility study of a zero energy home in Newfoundland[J]. Renewable Energy, 2004, 29(2): 277-289.
- [69] 元伟, 耿世彬, 高虎杉, 等. 基于 HOMER 仿真的太阳能混合发电系统设计[J]. 电工电气, 2011(8): 27-32.
- Qi Wei, Geng Shibin, Gao Hushan, et al. Design of hybrid power system with solar energy based on HOMER simulation[J]. Electrotechnics Electric, 2011(8): 27-32(in Chinese).
- [70] Leng G J. 国际 RETScreenTM: 一种评估潜在的可再生能源计划的决策支持和能力培养工具[J]. 产业与环境, 2001, 23(3): 22-23.
- [71] Natural resources Canada. Centre overview [EB/OL]. 2012-04-10 [2013]. <http://www.retscreen.net>.
- [72] 谢宜燕, 龚咪咪, 孟祥睿, 等. 北方采暖区应用太阳墙系统采暖的可行性研究[J]. 太阳能, 2011(17): 44-49.
- [73] 王淑娟, 汪徐华, 高赞, 等. 常用于最佳倾角计算的光伏软件的对比研究[J]. 太阳能, 2010(12): 29-31.

收稿日期: 2013-06-08.

作者简介:

吉平(1983), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为新能源规划、电力系统稳定与控制, E-mail: jiping@epri.sgcc.com.cn;

周孝信(1940), 男, 教授级高级工程师, 中国科学院院士, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统仿真与分析, 电力系统稳定与控制, 柔性交流输电技术;

宋云亭(1972), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划及运行控制技术;

马世英(1969), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划及运行控制技术;

李柏青(1963), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行与控制。

(责任编辑 李兰欣)