

德国法兰克福市 100% 可再生能源发展之路及启示

胡润青

(国家发展和改革委员会能源研究所, 北京 100038)

摘要: 德国法兰克福市是全球低碳和 100% 可再生能源城市行动计划的先行者。在详实的可行性研究的基础上, 2015 年法兰克福市议会批准了“法兰克福市 100% 气候保护总体规划”, 提出到 2050 年实现能源消费总量减少 50%、温室气体减排 95%、100% 可再生能源的城市发展目标。本文分析了法兰克福 100% 可再生能源城市发展目标的形成路径; 重点介绍了 2050 年 100% 气候保护总体规划的可行性研究工作, 包括分行业能源需求总量的控制和目标、100% 可再生能源供应情景研究和供应方案的确定、保障措施等; 并提出了我国建设 100% 可再生能源城市的思考和建议。

关键词: 低碳城市; 新能源城市; 100% 可再生能源

中图分类号: TK01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2355-(2016)03-0009-05

Doi: 10.3969/j.issn.1003-2355.2016.03.002

Abstract: Frankfurt city of Germany is a pioneer of low carbon development and 100% renewable energy city in the world. In 2015, Frankfurt city announced Master Plan 100% Climate Protection, identified the city development target in 2050 which is 50% reduction of energy consumption, 95% reduction of GHG emission and 100% renewable energy supply. As an international large city with high population densities and developed industry and commerce, Frankfurt 100% renewable energy roadmap is very useful for renewable energy city development in China. This article analyzes the roadmap of Frankfurt city development target, and mainly introduces the feasibility study for Master Plan 100% Climate Protection, including target and measure of energy demand by sector scenarios analysis and final plan of energy supply, and insuring measure. And it submits recommendations for how to promote 100% renewable energy city in China.

Key words: Low Carbon City; Renewable Energy City; 100% Renewable Energy

德国法兰克福市是全球低碳和可持续能源行动计划的先行者。法兰克福市于 2009 年签署了欧洲市长盟约, 确定了低碳、可持续的发展方向。2015 年 9 月, 在可行性研究的基础上, 法兰克福市议会批准了“法兰克福市 100% 气候保护总体规划”, 明确 2050 年城市发展目标是: 与 1990 年相比, 能源消费总量减少 50%; 温室气体排放减少 95%; 实现 100% 可再生能源供应。

作为一个人口密度高、工商业发达的国际大

都市, 法兰克福市 100% 可再生能源的发展之路对我国有非常高的借鉴价值。

1 城市能源发展现状

2010 年法兰克福市的能源消费总量为 220 亿 kWh (按照发电煤耗法, 330gce/kWh, 约折 726 万 tce)。法兰克福市工业和商业发达, 工业用能和商业用能的占比分别达到 30% 和 29%, 居民用能占比 22%、交通用能占比 19%。作为一个人口密集、工商业发达的大型都市, 法兰克福市人均能耗

收稿日期: 2016-02-24

作者简介: 胡润青, 女, 副研究员, 主要从事可再生能源政策研究。

约为 3.1 万 kWh (约 10tce), 远高于德国的平均水平 (5.72tce) 和 OECD 国家的平均水平 (6.27tce)。

近年来, 法兰克福市的可再生能源发展迅速。2010 年可再生能源消费总量为 7.09 亿 kWh, 在能源消费总量中的比例为 3.2%。2013 年可再生能源占比增至 6%, 大型可再生能源项目有: ①垃圾焚烧电厂, 热电联产机组, 年发电量为 2.33 亿 kWh; ②费海姆生物质能源发电厂, 年处理 8 万 t 生物质, 包括城市垃圾、植物垃圾和枕木废料, 年发电量 4900 万 kWh。

法兰克福市可再生能源发展也面临较大的挑战, 城市垃圾、生物质能和水电的资源潜力已基本完成开发, 同时城市能够用于可再生能源和新能源利用的土地和屋顶资源有限。

2 城市发展目标

2.1 2020 年和 2030 年实现低碳发展目标

法兰克福市是欧洲可持续能源行动计划的先行者, 2009 年就签署了欧洲市长盟约, 确定了低碳和可持续的发展方向, 提出了 2020 年和 2030 年城市发展目标。为保障低碳目标的实现, 2009 年法兰克福市批准了“2008 年能源行动方案和 CO₂ 排放清单”。

法兰克福市的可持续发展目标是: 在 2005 年的基础上, 每 5 年减排 10% 的温室气体, 到 2020 年减排 31%, 到 2030 年减排 50%。

人均 CO₂ 排放量将由 2005 年的 12.2t/人, 降至 2020 年的 8.4t/人。

2.2 2050 年实现低碳及 100% 可再生能源的发展目标

2015 年法兰克福市议会决议通过了该市 2050 年 100% 气候保护总体规划。2050 年的发展目标是: 建立稳定、高效、100% 可再生能源的能源供应体系, 保证任何时间和季节 (特别是冬天) 都能够提供稳定的能源供应, 同时要求能源供应成本是可接受的、可负担的; 届时, 全市能源消费总量将降低 50%, 所有能源 100% 由可再生能源提供, 包括电力、热力和城市交通用能源, 可再生能源供应立足于本地; 与 1990 年相比, 温室气体排放减少 95%。

3 2050 年 100% 可再生能源的可行性研究和方案设计

为了实现 2050 年发展目标, 法兰克福市委托 Fraunhofer 建筑物理研究所完成了 2050 年 100% 气候保护总体规划的可行性研究。该项研究在可

再生能源资源评估、社会发展和能源供需预测的基础上, 详细评估了电力、热力和交通能源的需求量和变化趋势, 研究分析了可再生能源资源潜力和技术可行性, 通过 2012 年至 2050 年的三个发展情景研究, 经优化分析, 提出了具体的行动方案; 同时, 还对 100% 气候变化保护总体规划的投资需求、经济效益和就业等进行了分析。

3.1 能源需求总量研究

法兰克福市将大力推动交通、建筑、居民用能、商业等各个领域的节能和能效提高工作, 在保证城市经济发展、可靠能源供应的前提下, 大幅度降低能源需求量, 将 2050 年能源需求总量降为 102.40 亿 kWh, 仅为 2012 年的 50%。

3.1.1 不同领域的能源需求量

针对不同领域的现状、发展趋势和用能特点, 法兰克福市研究确定了交通、互联网、工业、商业和建筑领域的不同应对策略和目标。交通、居民、商业领域是法兰克福市节能和提高能效的重点领域, 节能降耗潜力巨大。为保障工业领域的可持续发展以及致力于打造互联网枢纽和数据中心, 工业领域的能源消费量降幅较小。

表 1 法兰克福市节能领域的现状和应对措施

领域	现状和问题	应对措施
交通	是交通枢纽, 上下班人群巨大	鼓励完善公共交通, 汽车全部改为电动汽车
互联网	是互联网枢纽, 耗电量巨大	加强设备检测、余热利用、高效制冷
工业	是能耗占比最大的领域, 热加工需要高温	生物质能供热用于工业, 使用余热和氢能设施
商业	商业建筑面临更大的挑战, 节能降耗的关键是制冷和照明	鼓励零排放商业区, 加强对企业的咨询服务
建筑	85% 的建筑房龄超过 30 年, 建筑节能改造任务量大	制定建筑改造标准, 确保建筑改造的质量, 提高节能改造的经济性和社会接受度, 提高改造比例

(1) 交通用能: 法兰克福市既是德国和欧洲的交通枢纽, 且本地居民的上下班通勤交通出行也很多。因此将大力推动公共交通体系和绿色出行, 城市交通将全部采用电动汽车; 到 2050 年交通领域的电力消费量将降低 79%, 不消费热力和燃料。

(2) 居民用能: 法兰克福市 85% 的建筑房龄超过 30 年, 建筑节能改造任务量大。因此将提高对建筑能耗的要求, 大力推动开展建筑节能改造

工作；到 2050 年居民用能的电力消费量将降低 64%，热力消费量降低 72%。

（3）商业用能：法兰克福市的商业发达，商业建筑用能面临更大的挑战，节能降耗的关键是制冷和照明。因此将鼓励零排放商业区，加强对企业的咨询服务；到 2050 年商业用能的电力消费量将降低 53%，热力消费量降低 78%。

（4）工业用能：目前法兰克福市工业领域的用能占比最大，为保障工业领域的可持续发展以及致力于打造新的互联网枢纽和数据中心的发展战略，未来工业领域用能总量的降幅不大。计划采用高效设备、余热利用等多种节能手段，在保证稳定增长的前提下，工业领域的电力消耗量和热力消耗量将分别减少 11% 和 10%。

3.1.2 用能种类和构成

到 2050 年，法兰克福市电力需求量和热力需求量分别为 49.64 亿 kWh 和 52.76 亿 kWh，其占比分别为 48.5% 和 51.5%，热力需求量略大于电力需求量。

在电力消费中，工业领域的电力消费量最多，约占电力消费总量的 42%，商业、交通和居民等领域的占比分别为 32%、17% 和 9%。

在热力消费中，工业领域的热力消费量最高，约占热力消费总量的 61%，居民用能和商业领域的占比分别为 21% 和 18%，交通领域不消耗热力。

3.2 能源供应情景研究

2050 年实现 100% 可再生能源供应是法兰克福市的基本目标，作为一个人口密集、工商业发达的大型都市，当地可再生能源资源供应有一定的局限性，可再生能源供应的本地保证率是 2050 年法兰克福市总体规划实施方案的重点研究内容之一。

法兰克福市对城市中心区、城市大区和城市所在的黑森州的可再生能源资源进行了全面的调查和评估。根据可再生能源资源的评估情况看，如果要做到 100% 当地可再生能源供应，从资源供应的角度可以做到，但开发成本会随应用规模增长而增长，用户的用能成本和价格会大幅度增加。

为此，研究团队开展了完全自主自足、进口 10% 电力、不限制能源来源 3 个能源供应情景的研究和优化，以便找到最佳可再生能源供应方案。

自给自足模式：要求做到可再生能源供应的完全自给自足，100% 由当地供应，从可再生能源

资源供应的角度可以做到。但需要配备较大规模的电储能设备（9.1GWh），用能成本和价格会大幅度增加，供电成本将达到 22 欧分 / kWh。

表 2 法兰克福市 2050 年 3 个能源供应情景的测算结果

发展情景	测算结果
自给自足模式	100% 本地供能，9.1GWh 电储能，供电成本 22 欧分 / kWh
进口 10% 电力模式	90% 本地供电，100% 本地供热，2GWh 电储能，供电成本 12 欧分 / kWh
不限制能源来源模式	75% 本地保证率，没有电储能，供电成本 9 欧分 / kWh

进口 10% 电力模式：电力的 10% 由外地输入，热力 100% 由当地供应，本地能源保证率为 95%。需配备 2GWh 电储能和 2.3GWh 热储能设备，供电成本为 12 欧分 / kWh。

不限制能源来源模式：不限制可再生能源资源的来源，本地可再生能源保证率为 75%，25% 的能源需从外地输入。无需配备储能设施，供电成本可降至 9 欧分 / kWh。

3.3 能源供应方案的确定

根据情景研究和优化的结果，法兰克福市选择“进口 10% 电力模式”作为实现 2050 年 100% 可再生能源发展目标的路径。届时，法兰克福市能源 100% 由可再生能源供应，本地能源保证率为 95%，其中电力的 10% 由外地供应，热力 100% 由本地供应。

3.3.1 资源来源

为保证本地的能源供应，不仅仅要充分利用法兰克福中心城区的可再生能源资源，还需要开发法兰克福城市大区及其所在的黑森州的可再生能源资源。

（1）中心城区：所有可再生能源资源要能用尽用，包括太阳能、风能、生物质能、水电等等，资源利用率达到 100%。

（2）城市大区：垃圾要全部无害化处理和能源化利用，资源利用率 100%；光伏发电、风电和生物质发电需部分利用，资源利用率 50%。未考虑利用城市大区的太阳能热利用和水电。

（3）黑森州：仅利用部分风电和生物质发电，资源利用率仅为 11.6%。未考虑利用黑森州的城市垃圾、光伏发电、太阳能热利用和水电。

（4）外部：电力总需求的 10% 需从外部电网输入。

表 3 法兰克福市可再生能源资源利用率

单位: %

	光伏发电	风电	生物质发电	水电和太阳能热	城市垃圾
中心城区	100	100	100	100	100
城市大区	50	50	50	0	100
黑森州	0	11.6	11.6	0	0

可以看出,在这个能源供应方案中,黑森州的可再生能源资源利用率很低,只利用了风电和生物质能发电的 11.6%。如果需要,法兰克福大区和黑森州还可以提供更多的可再生能源供应。

3.3.2 供能种类和构成

从能源供应的资源种类看,城市垃圾能源量的占比最高,达到 23%,其次是风电占比 22%、光伏发电占比 20%、生物质固体燃料占比 17%、太阳能热利用占比 12%、生物质沼气占比 6%、水电占比 0.4%。

电力供应主要来自于风电占比 43%、太阳能发电占比 39%、生物质(城市垃圾、固体燃料、生物质燃气)热电联产发电占比 24%,同时有 8% 的电力净外送(其中向外送出 18%、从外购入 10%)。

热力供应主要来自于生物质能热电联产供热、生物质锅炉供热、太阳能供热(22%),以及热泵

供热。

风电、光伏发电和水力发电技术直接用于发电。城市垃圾、生物质固体燃料、生物质燃气等均采用热电联产技术,既发电也供热;同时广泛采用热泵技术为建筑供热。太阳能热利用技术将用于供热和制冷。

在整个能源供给系统中,电储能技术和储热技术的配备也都非常重要,电储能容量为 2GWh,储热容量为 2.3GWh,容量基本相当。

4 实现 100% 可再生能源的保障措施

为了保证实现 100% 可再生能源的目标,法兰克福市着重推动以下几个方面的工作。

一是最大限度地利用当地的可再生能源。重点开展三个方面的工作:(1)最大限度地挖掘太阳能的巨大开发潜力,计划大力支持本地的光伏发电和太阳能热利用;(2)推动生物质热电联产技术的推广和应用,推动热泵和余热的广泛使用,大幅度地提高能源生产能效;(3)建设与可再生能源发展相配套的电储能和热储能设施。

二是提高能效,充分挖掘节能领域的巨大潜力。为了保证能源消费总量减少 50% 的节能目标,法兰克福市针对不同领域的现状、发展趋势和用能特点,研究确定了能源生产、交通、互联网、工业、商业和建筑领域的不同应对方向和措施。

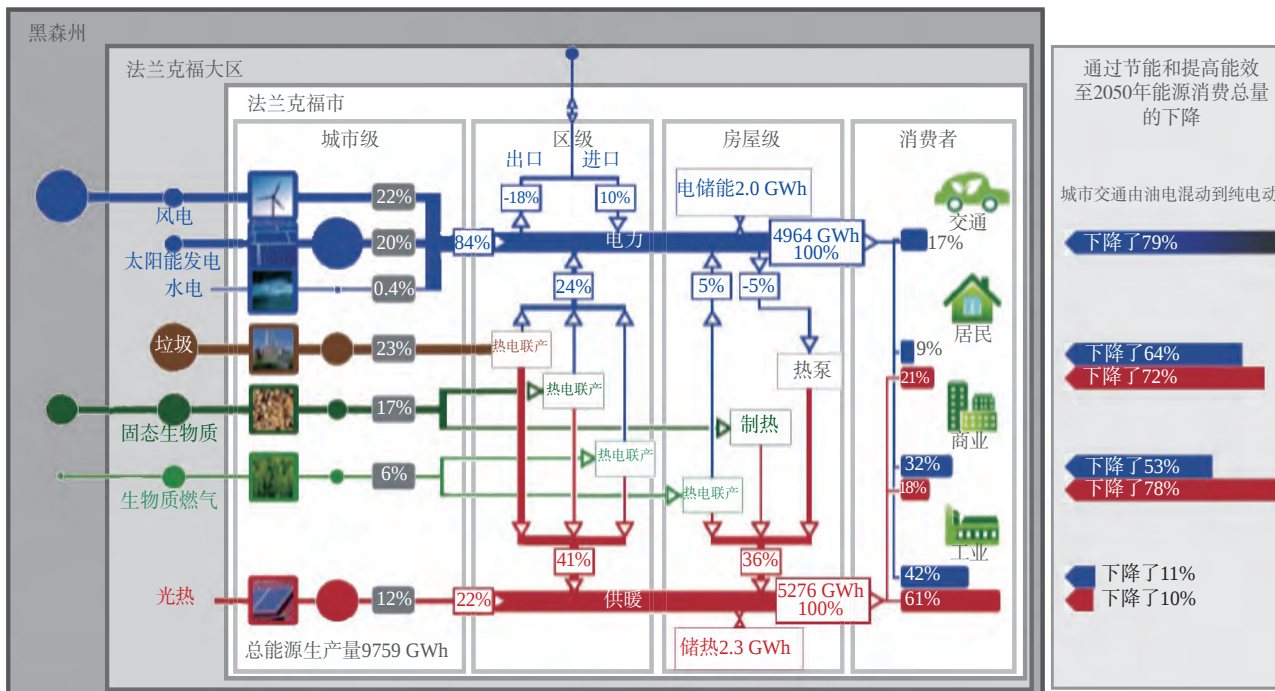


图 1 2050 年法兰克福市能流图

三是加强区域性能源合作。特别是与法兰克福大区和黑森州的合作,编制区域能源规划,推动各部门、各地区通力合作,调动公众的积极性,在挖掘和开发本地可再生能源资源的基础上,加强地区合作,实现 100% 的可再生能源供应。

四是推动智能化解决方案。研究并制定包括智能化电网、蓄能设备、智能交通等等智能化解决方案。

5 思考和启示

法兰克福市的经验表明,大中型城市也具备建设 100% 可再生能源城市的条件。法兰克福市是德国第五大城市,市区人口 70.8 万,大区人口 550 万,人口密度高,是德国乃至欧洲重要工商业、金融、铁路和航空、互联网计算中心。法兰克福市在大力支持工商业、互联网计算中心等高能耗密度行业发展的同时,致力于低碳、100% 可再生能源城市的建设工作。目前,巴黎市、汉诺威市、温哥华等很多经济发达的大城市也都提出了 100% 环境保护、100% 可再生能源的发展目标。越来越多的承诺和经验坚定了中国建设低碳、可再生能源城市的决心。

可再生能源和节能是实现低碳、可持续发展的两个重要手段,相辅相成,缺一不可。首先,通过节能和提高能效工作,大幅度降低能源消费总量。法兰克福市等很多经济发达城市都制定出计划,在保证城市经济发展和可靠能源供应的前

提下,减少 50% 的能源消费总量。第二,大规模提高可再生能源的技术水平和应用规模,替代绝大多数的化石能源消费。只有在节能和提高能效技术的基础上,大幅度减少能源需求,才能实现资源有保障、经济可承受的 100% 可再生能源供应目标。

要认真开展 100% 可再生能源的发展路径研究。法兰克福市的可再生能源供应情景研究表明,多个可再生能源供应方案都可满足 100% 可再生能源的目标,但不同方案的能源成本和社会经济成本有很大的不同,自给自足模式的供电成本(22 欧分/kWh)是不限制能源来源模式的供电成本(9 欧分/kWh)的 2 倍多。各个城市应根据当地及周边的能源资源条件和能源需求特点,开展有针对性的研究,综合分析本地能源保障率、用能成本、社会经济效益等多方面的因素,确定当地的低碳和可再生能源发展路径。

参考文献:

- [1] Town Council decision to the “master plan 100% climate protection” [EB/OL]. [http://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=3076&_ffmpar\[_id_inhalt\]=29779004](http://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=3076&_ffmpar[_id_inhalt]=29779004).
- [2] Energy action plan and CO₂ inventory for Frankfurt am Main 2008[Z]. City of Frankfurt am Main, 2008.
- [3] Frankfurt auf dem Weg zu 100 Prozent Klimaschutz[Z]. Wiebke Flebig, Leiterin Des Energiereferats. Frankfurt, 2015.
- [4] http://www.covenantofmayors.eu/about/signatories_en.html?city_id=23&seap [EB/OL].
- [5] Resource Sciences, 2015, 8 (1): 15–27.
- [6] 姜克隽, 胡秀莲, 庄幸, 等. 中国 2050 年低碳情景和低碳发展之路[J]. 中外能源, 2009, 14 (6): 1–7.
- [7] 2050 中国能源和碳排放研究课题组. 2050 中国能源和碳排放报告[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] 王铮, 朱永彬, 刘昌新, 等. 最优增长路径下的中国碳排放估计[J]. 地理学报, 2010, 65 (12): 1559–1568.
- [9] 渠慎宁, 郭朝先. 基于 STIRPAT 模型的中国碳排放峰值预测研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20 (12): 10–15.
- [10] 方德斌, 董博. 基于 GPR 模型的中国“十三五”时期碳排放趋势预测[J]. 技术经济, 2015, 34 (06): 106–113.
- [11] 柴麒麟, 徐华清. 基于 IAMC 模型的中国碳排放峰值目标实现路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25 (06): 37–46.
- [12] Ohara, Akimoto, Kurokawa, et al. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980–2020[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2007, 7 (3): 6843–6902.
- [13] Garnaut R, Howes S, Sheehan F J A P. Emissions in the Platinum Age: The Implications of Rapid Development for Climate-Change Mitigation[J]. Social Science Electronic Publishing, 2008, 24 (2): 377–401.
- [14] Nan Zhou, David Fridley, Nina Zheng Khanna, et al. China’s energy and emissions outlook to 2050: Perspectives from bottom-up energy end-use model[J]. Energy Policy, 2013, 53 (2): 51–62.
- [15] Xu F, Xiang N, Yan J, et al. Dynamic simulation of China’s carbon emission reduction potential by 2020[J]. Letters in Spatial &

(上接第 18 页)

参考文献:

- [1] Ohara, Akimoto, Kurokawa, et al. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980–2020[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2007, 7 (3): 6843–6902.
- [2] Garnaut R, Howes S, Sheehan F J A P. Emissions in the Platinum Age: The Implications of Rapid Development for Climate-Change Mitigation[J]. Social Science Electronic Publishing, 2008, 24 (2): 377–401.
- [3] Nan Zhou, David Fridley, Nina Zheng Khanna, et al. China’s energy and emissions outlook to 2050: Perspectives from bottom-up energy end-use model[J]. Energy Policy, 2013, 53 (2): 51–62.
- [4] Xu F, Xiang N, Yan J, et al. Dynamic simulation of China’s carbon emission reduction potential by 2020[J]. Letters in Spatial &