

文章编号:0253 - 4339(2016) 02 - 0065 - 05

doi:10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2016. 02. 065

热泵在开发可再生能源领域的作用及其贡献率的计算方法

马一太 代宝民

(中低温热能高效利用教育部重点实验室 热能研究所 天津大学机械工程学院 天津 300072)

摘要 热泵是可再生资源的“开采机械”,可以用一份电能或机械能,得到数倍的可再生能源,是重要的节能和环保技术。随着我国能源需求剧增和电力工业的快速发展,需要提高我国可再生能源的比例,热泵技术有着极其重要的作用。本文介绍了欧盟把热泵技术列为可再生能源的政策,进而说明了我国相应的政策。通过对我国燃煤电厂的发电效率和电网的输电效率的数据进行分析,得出热泵是获得可再生能源的一种技术。文中提出了我国热泵一次能源倍数 α 和可再生能源贡献率 β 两种计算方法供业内参考。由于电厂的烟气排放指标远比一般燃煤锅炉严格得多,用热泵代替燃煤锅炉可改善大气质量。因此本文建议把热泵可再生能源贡献率的计算方法写入国家标准,以促进我国热泵制造产业,大力推广热泵节能技术。

关键词 热泵;可再生能源;一次能源利用率;SPF;可再生能源贡献率

中图分类号:TQ051.5; F124.5

文献标识码:A

Role of Heat Pump Playing in Developing Renewable Energy and Contribution Rate Calculation Method

Ma Yitai Dai Baomin

(Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, MOE, Thermal Energy Research Institute, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

Abstract Heat pump can be used for renewable energy recovery. Several units of renewable energy can be obtained with the consumption of one unit of electric or mechanical energy. Therefore, heat pump is an important energy saving and environmental protection technology. With the significant increase in energy demand and rapid development of electric power industry, the proportion of renewable energy in our country needs to be improved. Thus, heat pump technology plays a critical role. Heat pump technology has been listed as renewable energy in European Union. Then, the corresponding policy for our country is proposed. Based on the data of the power generating efficiency and transmission efficiency, it is concluded that heat pump is a technology for renewable energy recovery. Two calculation methods, including primary energy multiple α and renewable energy contribution rate β , are introduced, to provide a reference for the industry. The target of flue gas emission for power plant is much more stringent than the common coal-fired boiler, so utilizing heat pump to replace coal-fired boiler can improve atmosphere environment. It is suggested that the calculation method of renewable energy contribution rate for heat pump should be listed as a national standard. The heat pump manufacturing industry should be further developed, and heat pump technology should be widely applied.

Keywords heat pump; renewable energy; primary energy utilization ratio; SPF; renewable energy contribution rate

随着我国经济建设的发展和工业化、城市化进程的推进,制冷空调和采暖的需求迅速增加。大约有 30% 的总化石能源消耗于空调、采暖和热水供应。尤其在冬天,我国很多地区主要靠燃煤锅炉或小炉灶供暖,造成能量利用的浪费及持续雾霾等严重的环境污染。同时,随着国内各种供热和冬季供暖需求不断加大,如何高效低污染的利用以煤炭为主的化石能源,加强低品位可再生能源的利用是国家的重大战略需求。

我国《可再生能源法》^[1]规定:可再生能源,是指

风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等非化石能源。在第四章“推广与应用”中指出“国家鼓励和支持可再生能源并网发电”。也规定“国家鼓励单位和个人安装和使用太阳能热水系统、太阳能供热采暖和制冷系统、太阳能光伏发电系统等太阳能利用系统”。这说明,我国对可再生能源的利用,有两种主要方式,一是发电,二是热利用。

运用热泵技术可以高效地开发利用可再生能源。例如,在电厂燃烧 1 吨煤来发电,将电能通过远距离输电输送到目的地驱动热泵供热,其供热能力多于在

当地使用燃煤锅炉燃烧同样煤的效果,多出来的热量,来自环境的低品位能源。由此可见热泵技术在节能和环保方面的意义。

开展热泵技术的基础研究和应用研究,可以带动我国制造产业升级换代,推动产业结构战略性调整,消耗具有过剩产能的钢铁和有色金属,以热力学循环制热替代煤油气的直接燃烧放热,实际是通过技术和材料高效率地换取能量和解决环境污染的最终解决方案。本文论证了热泵在开发可再生能源、实现节能减排过程中的重要作用。

1 国外在可再生能源方面的进展

可再生能源受到世界各国的重视。2004 年,美

国、德国、英国和法国可再生能源发电量占总发电量的比重分别为 1%、8%、4.3% 和 6.8%;到 2010 年分别达到 7.5%、20.5%、10% 和 22%;到 2020 年将都提高到 20% 以上;到 2050 年,德国和法国可再生能源发电将达到 50%^[2]。

欧盟已经认定所有热泵技术,包括空气源热泵都是可再生能源技术。有关法规见表 1。欧盟在 2009 年通过法令将空气源热泵纳入可再生能源技术范围。在 2009/28/EC^[3] 第二章中将可再生能源范围认定为“各种可再生非化石能源,比如风能、太阳能、空气热能、地热能、水热能和海洋能、水能、生物质能、沼气、垃圾填埋气、污水处理厂天然气”。其中空气热能被定义为“在环境空气中存在的能量”。

表 1 欧盟相关法规政策^[4]

Tab.1 Regulations and policies of European Union^[4]

欧盟法规名称	发布时间	主要内容
欧盟可再生能源指令(2009/28/EC)	2009-4-23	确定 2020 年的可再生能源总体目标并将空气源热泵纳入可再生能源范围
成员国可再生能源行动计划	2013-3	确定了各国具体的可再生能源发展计划
热泵纳入可再生能源计算导则(2013/114/EU)	2013-3-1	确定了各成员国如何计算热泵技术中可再生能源利用量

在 2009/28/EC^[3] 中的附件 7 (Annex VII) 中,设定了对于空气源热泵的最低要求即季节性能系数 (Seasonal Performance Factor, SPF):

$$SPF > 1.15 \times \frac{1}{\eta} \quad (1)$$

式中: η 为一次能源转换电能的效率。

一次能源转换电能的效率数据来源于每年的欧盟统计年报 (EUROSTAT)。根据一次能源转换电能的效率,欧盟统计年报显示其值越来越高,这对纳入可再生能源的空气源热泵的能效要求反而越来越低,入门 SPF 值一般在 2.5 ~ 2.6 之间,如表 2 所示。

表 2 欧盟热泵纳入可再生能源范围的 SPF 计算^[4]

Tab.2 Calculated SPF due to the regulated limitation of renewable energy in EU^[4]

年份	2006	2007	2008	2009	2010
发电效率 η	44.1	43.9	44.7	45.1	45.5
SPF 值	2.61	2.62	2.57	2.55	2.53

欧盟热泵所提供的可再生能源总量计算公式如下:

$$E_{RES} = Q_{usable} \left(1 - \frac{1}{SPF}\right) \quad (2)$$

$$Q_{usable} = H_{HP} \times P_{rated} \quad (3)$$

式中: Q_{usable} 为预估的热泵产生的总可用热量, GWh; H_{HP} 为等效满负荷运行小时数, h; P_{rated} 为热泵的装机容量, GW。

这种贡献率的算法很直观,热泵从环境抽取的热量即可再生能源,可是欧盟的标准中规定只要和电能相比多出来的能量,就是可再生能源。

2 可再生能源占一次能源的消费比例

由于化石能源的不可持续性,以及化石能源在燃烧应用中对环境产生的污染,人们越来越重视可再生能源的使用。能源中非化石能源的比例代表了能源结构的先进性。

我国可再生能源占一次能源的消费比例可按照以下公式计算:

$$\text{可再生能源的比例} = \frac{\text{利用的可再生能源的量(标准煤)}}{\text{全社会能源消费的总量(标准煤)}} \times 100\% \quad (4)$$

在统计计算中,任何能源,无论是发电或直接热利用,都要转换成一次能源的标准煤。可再生能源发电相当的标准煤,可以用统计年份全国燃煤电厂的平均效率来计算。我国国土幅员辽阔,由于能源技术的

不断进步,在可再生能源的比例中,目前可能还存在统计是否全面和计算是否准确的问题。

我国政府宣布可再生能源比例 2013 年的数字为 9.8%,2020 年计划达到 16%,2030 年将达到 20%^[5]。要注意这个比例是分子和分母都增加,分母增加很快。例如 2013 年我国的能源消费总量是 36.7 亿吨标煤,到 2020 年、2030 年能源消费总量可能分别达到 45 亿吨、50 亿吨的水平。因此,可再生能源的绝对数量也要随着增加。

3 热泵对低温可再生能源的开发

可再生能源是一次能源,同时具有不同品质,风能、水能属于机械能,可直接转换为电能。而在环境空气中的热能,或各种水源中(浅层地下水、河水、湖水、海水等)的热能、浅层土壤热也是可再生能源,只是这些能源品位过低不能直接利用,需要通过热泵技术提高温度加以利用。

在建筑能耗和工业用能中,有相当一部分是低温热能,如采暖、热水、干燥等。房间采暖不需要很高的温度,常规冬季取暖室内温度略高于 18℃,一般维持 20~22℃ 就很好。如果用燃烧方式采暖,燃烧温度可达 1000~2000℃,用来给 20℃ 的房间供暖是最不合理的方式。生活热水一般需要 40~60℃,很多宾馆饭店用烧煤、烧油或气的锅炉来生产热水,如果采用热泵生产热水或回收制冷的冷凝热,都是合理的方式。

热泵不仅可以节能,还带来环保的效果。由于热泵不用燃烧方式,可以大大减轻城市大气污染。热泵用电能驱动,电能可以高效率、方便地进入千家万户。在很多情况下,热泵也不用增加额外的设备,夏天的空调开启制热模式即为冬季的热泵。

3.1 热泵节能的基本公式

有关热泵的用能效率和节能率,有如下简单公式。

热泵的制热系数:

$$COP = \frac{\text{得到的热能}}{\text{消耗的电能}} = \frac{Q_k}{W} \quad (5)$$

热泵的一次能源利用率:

$$PER = \frac{\text{得到的热能}}{\text{发电所需的热能}} \quad (6)$$
$$= \frac{Q_k}{Q_f} = \frac{Q_k}{W/\eta_{\text{pow}}\eta_{\text{net}}} = COP \times \eta_{\text{pow}}\eta_{\text{net}}$$

式中: η_{pow} 为电厂发电效率; η_{net} 为电网输电效率。电厂发电效率目前可设为 38.7%。电网输电效率与输送距离和输电电压有关,长距离输电可设为

90%。 η_{pow} 和 η_{net} 的乘积称为发电输电综合效率,为 34.83%,近似取 35%。

3.2 锅炉的一次能源利用率

一般计算锅炉的效率比较直观,即锅炉送出的有效热量比上煤的发热量。进入锅炉的煤由遥远的煤矿运输而来,经过装载、电气化铁路、中转、存储、堆放、短途运输、卸车等过程。这个过程中大量的工作由机械完成,而驱动机械的电力,在我国基本还是由煤炭发电得到。煤炭从矿井到锅炉房的运输过程中消耗的也是煤。锅炉的一次能源利用率 η_b 可表示为:

$$\eta_b = \frac{Q_{\text{out}}}{Q_{\text{comb}}/\eta_{\text{trans}}} = \frac{Q_{\text{out}}}{Q_{\text{comb}}} \times \eta_{\text{coal.trans}} = \eta_{\text{boiler}}\eta_{\text{coal.trans}} \quad (7)$$

式中: Q_{out} 为锅炉送出的热量,由锅炉房出水、进水的温度差乘以流量和比热得出,GW; Q_{comb} 为进入锅炉的煤的燃烧热量,GW; η_{boiler} 为锅炉效率; $\eta_{\text{coal.trans}}$ 为煤炭运输能源效率。

这里煤炭运输能源效率长距离时可假设为 80%,如果再假设锅炉效率为 80%,远距离运煤的锅炉一次能源利用率只有 64%。

3.3 热泵的可再生能源贡献率

评价热泵对可再生能源的贡献,有两种评价方法,分述如下。

3.3.1 热泵比锅炉的一次能源利用倍数

第一种方法是热泵比锅炉的一次能源利用倍数,公式为:

$$\alpha = \frac{PER}{\eta_b} \quad (8)$$

根据热泵一次能源利用率公式(6)可得出,当 COP=3~3.5 时,PER=105%~122.5%,相比燃煤锅炉一次能源利用率是 64%,可得出 $\alpha=1.64\sim 1.91$ 。

此倍数表说明与普通锅炉相比,热泵使燃煤的利用率提高一半以上。这样在电厂燃烧 1 吨煤发电,送到目的地驱动 COP 为 3 或 3.5 的热泵供热,相当于把 1.64 吨或 1.91 吨煤运输到目的地燃烧的效果。

同时燃煤电厂的排放比普通中小型锅炉房的排放小得多。利用热泵既提高了能源利用率,又大大减轻了环境污染,是一举两得的技术。以上只是一般说明,可根据不同的热泵类型(水源、空气源,或小型、中型或大型)以及所处的气候带,具体分析热泵的节能潜力。如果考虑到我国大约有 80% 的电能来自化石燃料,20% 的电能水电、风电,热泵对可再生能源的贡献率会更高。

表 3 是中国发电效率与热泵的平均制热系数的

历年数据,实际上随着年代发电效率的提高,热泵的制热系数也在提高。表中数据说明,热泵开发可再生能源的潜力在增加。

表 3 中国热泵纳入可再生能源范围的 SPF 计算
Tab. 3 Calculated SPF due to the limitation of renewable energy in our country

年份	2009	2010	2011	2012	2013	2014
平均发电煤耗 / (g/kWh)	341	333	330	326	321	318
发电效率 η / %	36.4	37.3	37.6	38.1	38.7	39.1
SPF 值	3.16	3.08	3.06	3.02	2.97	2.94

对比欧盟的电厂发电效率,中国的效率要低 6 个百分点,纳入可再生能源的热泵 SPF (COP),要比欧盟高 0.4 ~ 0.5。这说明如果照搬欧盟的标准,中国的热泵需要有更高的 COP 值。

3.3.2 热泵的可再生能源贡献率计算

根据我国的实际国情,可以用另一算法,即热泵的可再生能源贡献率,含义是热泵供热量中可再生能源的比例,推导如下。

直接锅炉供热需要烧煤的等效热值:

$$Q_{\text{boiler.coal}} = \frac{Q_{\text{usable}}}{\eta_{\text{coal.trans}} \eta_{\text{boiler}}} \quad (9)$$

热泵供热的驱动电力需要烧煤的等效热值:

$$Q_{\text{elec.coal}} = \frac{Q_{\text{usable}}}{\eta_{\text{pow}} \eta_{\text{net}} \text{SPF}} \quad (10)$$

热泵的可再生能源:

$$\begin{aligned} E_{\text{RES}} &= Q_{\text{boiler.coal}} - Q_{\text{elec.coal}} \\ &= \frac{Q_{\text{usable}}}{\eta_{\text{coal.trans}} \eta_{\text{boiler}}} - \frac{Q_{\text{usable}}}{\eta_{\text{pow}} \eta_{\text{net}} \text{SPF}} \\ &= Q_{\text{usable}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{coal.trans}} \eta_{\text{boiler}}} - \frac{1}{\eta_{\text{pow}} \eta_{\text{net}} \text{SPF}} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

热泵的可再生能源贡献率:

$$\beta_{\text{China}} = \frac{E_{\text{RES}}}{Q_{\text{usable}}} = \frac{1}{\eta_{\text{coal.trans}} \eta_{\text{boiler}}} - \frac{1}{\eta_{\text{pow}} \eta_{\text{net}} \text{SPF}} \quad (12)$$

对比欧盟的公式:

$$\beta_{\text{EU}} = \frac{E_{\text{RES}}}{Q_{\text{usable}}} = 1 - \frac{1}{\text{SPF}} \quad (13)$$

采用欧盟和本文提出的热泵可再生能源贡献率算法的计算结果对比如表 4 所示。欧盟的公式简单,只受 SPF 的影响,SPF 较小时数值偏高。本文的公式稍复杂,受锅炉效率、输煤效率、电厂效率、输电效率和 SPF 的影响。一般可将锅炉效率和输煤、输电效率

率看作定值,也只受 SPF 的影响,但 SPF 较小时 β 也较小;SPF 增加时, β 增幅加大,应该更符合实际情况。总的来说,当 SPF 在 3.0 ~ 3.5 之间时,欧盟的计算方法显示热泵供热量的 67% ~ 71% 是可再生能源,而中国计算方法显示热泵供热量的 61% ~ 75% 是可再生能源,两个公式差别不大。

表 4 新公式 (12) 和欧盟公式 (13) 计算的可再生能源贡献率比较

Tab. 4 Calculation results of renewable energy contribution ratio between China and EU using Eqs. (12) and (13)

SPF	2.5	3.0	3.5	4.0
β_{China} 公式(12)	0.42	0.61	0.75	0.85
β_{EU} 公式(13)	0.6	0.67	0.71	0.75

注: $\eta_{\text{coal.trans}} \eta_{\text{boiler}} = 0.64, \eta_{\text{pow}} \eta_{\text{net}} = 0.35$ 。

我国《能源发展十二五规划》^[6]中可再生能源实际统计数据为:2009 年 8%,2010 年 8.6%,2011 年 8%,2012 年 9.1%,2013 年 9.8%,2015 年计划到 11.4%。如果按发电量推算,2013 年总发电量按当年发电煤耗率 0.321 kg 标煤/kWh 计算,合计为 17.89 亿吨标煤,占全年总能耗的 45.88%。非化石能源发电量占总发电量的 21.6%,折算所占全年总能耗为 9.91%。这个数据与我国公布的可再生能源或非化石能源的比例(9.8%)相差不多。

我国今后对可再生能源寄有很大希望,由于受季节等条件限制,水电、风电和光电的发展会降低速度,热泵技术对可再生能源的贡献将越来越重要。

为将以上观点变为国家层面的共识,建议进行“热泵是可再生能源的开发技术”科技立项,编制“热泵对可再生能源的贡献率计算方法”等标准,以推动中国热泵产业发展。

4 结论

热泵是理论上和工程上都成熟的节能技术,随着我国节能减排和环境保护工作的开展,热泵在开发可再生能源方面具有重要的作用。本文通过对最新电厂的发电效率和电网的输电效率方面的新技术发展进行数据分析,给出我国热泵一次能源倍数 α 和可再生能源贡献率 β 两种计算方法:如果以远距离输电和远距离输煤为前提,热泵平均 COP 为 3 ~ 3.5 时,锅炉一次能源利用率为 64% 计算,热泵的一次能源利用率是锅炉的 1.64 ~ 1.91 倍。同时,热泵供热量的 61% ~ 75% 是可再生能源。提出这些计算方法,可以明确热泵在我国节能减排中的作用。通过大力

推广热泵技术,我国的可再生能源或非化石能源在总能源消耗中的比例可以稳步增长。

参考文献

- [1] 中国人大网. 中华人民共和国可再生能源法(修正案) [EB/OL]. (2009-12-26) [2015-12-1]. http://www.npc.gov.cn/huiyi/cwh/1112/2009-12/26/content_1533216.htm.
- [2] 钱伯章. 世界能源消费现状和可再生能源发展趋势(上) [J]. 节能与环保, 2006(3): 8-11. (QIAN Bozhang. The world energy consumption and renewable energy development trend [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2006(3): 8-11.)
- [3] European Union. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC (Text with EEA relevance) [J]. Official Journal of the European Union, 2009, 140: 16-62.
- [4] 房庆, 宋忠奎, 高屹峰, 等. 中国空气源热泵产业发展研究报告[C]// 2015 中国热泵产业联盟年会暨第四届亚洲空气源热泵论坛. 南京:中国节能协会热泵专业委

员会和国际铜业协会, 2015.

- [5] 新华网. 中美气候变化联合声明(全文) [EB/OL]. (2014-11-13) [2015-12-1]. http://news.xinhuanet.com/energy/2014-11/13/c_127204771.htm.
- [6] 中国新闻网. 国务院印发能源发展"十二五"规划 [EB/OL] (2013-01-23) [2015-12-1]. <http://www.chinanews.com/cj/2013/01-23/4515115.shtml>.

作者简介

马一太,男,教授,热能研究所所长,天津大学机械工程学院, (022)87401539, E-mail: ytma@tju.edu.cn。研究方向: 应用热力学研究、逆循环(制冷和热泵)节能技术的研究;混合工质节能及自然工质研究;太阳能、地热能等可再生能源利用研究。

About the author

Ma Yitai, male, professor, director of Thermal Energy Research Institute, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, +86 22-87401539, E-mail: ytma@tju.edu.cn. Research fields: applied thermodynamics, inverse cycle (refrigeration and heat pump) energy saving technology; mixture and natural refrigerants energy saving technology; renewable energy utilization, including solar energy, geothermal energy, etc.