



# 直膨式太阳能 辅助热泵技术的研究进展

南京航空航天大学 方贤德<sup>☆</sup>

**摘要** 概述了直膨式太阳能辅助热泵(DX-SAHP)系统的基本结构型式。回顾了 DX-SAHP 技术的研究历史。总结了 DX-SAHP 制热系统若干关键技术的研究进展,包括系统热性能研究、制冷剂对系统性能影响的研究、压缩机变容量调节对系统性能影响的研究以及光热/光电一体化的研究等几个方面。扼要介绍了 DX-SAHP 空调热水系统的研究情况。

**关键词** 直膨式 太阳能 热泵 研究

## Research development in direct-expansion solar-assisted heat pump technology

By Fang Xiande<sup>★</sup>

**Abstract** Outlines basic configurations of the direct-expansion solar-assisted heat pump (DX-SAHP) system. Reviews development of the research on the DX-SAHP. Summarizes the research development of several aspects of DX-SAHP heating systems, including the thermal performance, effects of refrigerant on the system performance, effects of variable compressor capacity on the system performance, as well as the DX-SAHP with photovoltaic and photo-thermal hybrid panels. Presents simply the research development of the water heating system in DX-SAHP air conditioning system.

**Keywords** direct expansion, solar energy, heat pump, research

★ Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China

①

### 0 引言

在全球能源紧张、污染加剧、环境恶化的形势下,供暖、空调与生活热水系统的节能减排已成为重要议题。目前,我国民用建筑的运行能耗约占社会总能耗的 25%,其中大部分是供暖、空调与生活热水能耗<sup>[1]</sup>。建筑节能、可再生能源在建筑领域中的开发利用已被纳入《国家中长期科学和技术发展规划纲要》和《节能中长期专项规划》。

利用空气源热泵和太阳能供暖、空调和制取生活热水,是建筑节能和可再生能源利用以及污染物减排的重要议题。空气源热泵空调器具有节能、环保及冷暖联供等优点,在国内外已获得广泛应用。空气源热泵热水器近年来发展迅速,空气源热泵集中空调热水器已开始进入市场。然而,空气源热泵冬季制热运行时,一个严重的问题是当室外气温过低时,室外换热器表面会结霜,导致热泵性能衰减,制热量不足,甚至出现故障导致死机。传统的太阳

能热水器节能环保,在我国已有较好的应用,但是存在着阴雨天运行间断,冬季太阳能集热器效率低、制取热水困难等问题。

直膨式太阳能辅助热泵(DX-SAHP)系统的制冷剂流经太阳能集热器/蒸发器,吸收太阳能和集热器/蒸发器周围空气的热能,用于供暖和(或)制取生活热水<sup>[2-10]</sup>,由于将太阳能热利用与空气源热泵技术有机地结合起来,综合了太阳能热利用与空气源热泵的优点,系统的热经济性能显著提高。制热(供暖、制热水)运行时,与空气源热泵相比,DX-SAHP 系统的年能效比可提高约 27.7%<sup>[11]</sup>。

本文主要对 DX-SAHP 系统的基本结构型式、

①☆ 方贤德,男,1954 年 9 月生,博士研究生,博士,教授,博士生导师  
210016 南京御道街 29 号南京航空航天大学航空宇航学院  
人机与环境工程系  
(025) 84896381  
E-mail: xd\_fang@nuaa.edu.cn  
收稿日期:2007-11-12  
修回日期:2009-04-18

DX-SAHP 技术的研究历史概况、DX-SAHP 制热系统若干关键技术的研究进展、DX-SAHP 空调热水系统的研究进展情况进行扼要介绍。

### 1 DX-SAHP 系统的基本结构型式

图 1 为 DX-SAHP 制热系统的典型结构原理图,图 2 为其热力循环的压焓图。由图 2 可见,DX-SAHP 制热循环是基本的蒸气压缩热泵循环。节流装置出口的低温低压两相流制冷剂进入太阳能集热器/蒸发器,吸收太阳能和环境空气的热能,汽化成低温低压的制冷剂气体(过程 1-2)。低温低压的制冷剂气体进入压缩机后被压缩成高温高压气体,继而被送往冷凝器(过程 2-3)。在冷凝器中,制冷剂释放热量给别的介质(本文指水),冷凝成高温高压液体(过程 3-4)。高温高压的液体制冷剂通过节流装置(膨胀阀或毛细管)膨胀成低温低压两相流(过程 4-1)。完成一个热泵循环。

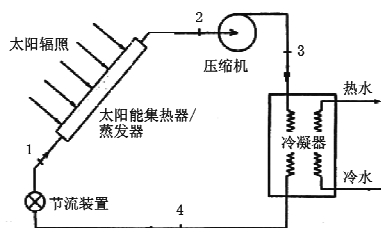


图 1 DX-SAHP 制热系统典型结构原理图

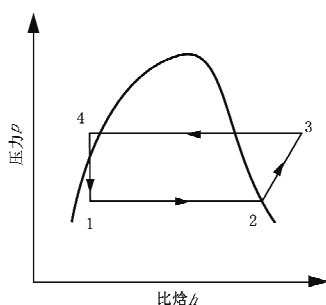


图 2 DX-SAHP 制热循环  $p-h$  图

Huang 等人开发了接近于商业应用的一体化 DX-SAHP 热水器<sup>[12-13]</sup>,如图 3 所示。其实验机已运行多年,性能稳定<sup>[14]</sup>。该热水器的特点是冷凝器与需要加热的生活用水直接接触的地方不是在水箱内,而是在水箱外的套管内。热虹吸作用推动冷水从水箱底部进入冷凝器套管底部,热水从冷凝器套管上部进入水箱上部,形成对流。太阳能集热器/蒸发器作为热水器的外壳。这种一体化设计可以省去太阳能集热器/蒸发器的现场安装工作。

Morrison 等人开发出了两款紧凑式 DX-SAHP

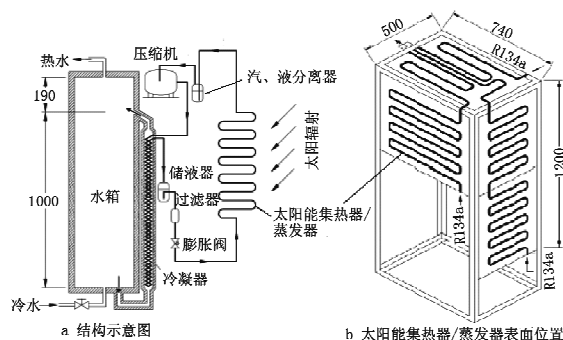


图 3 Huang 等人开发的一体化 DX-SAHP 热水器结构示意图

热水器(见图 4,5),已经商品化并进入市场<sup>[9-11]</sup>。这两款设计的共同特点是,冷凝器外绕在水箱的金属内壳上,不与水直接接触。图 4 所示的热水器,太阳能集热器/蒸发器为平板型,与水箱分离。这种设计的优点是水箱位置灵活,可以放在室内;缺点是太阳能集热器/蒸发器需要现场安装。图 5 所示的热水器,太阳能集热器/蒸发器是水箱的圆桶外壳,与水箱成为一体,省去了太阳能集热器/蒸发器的现场安装工作,其设计思路与图 3 的相同。

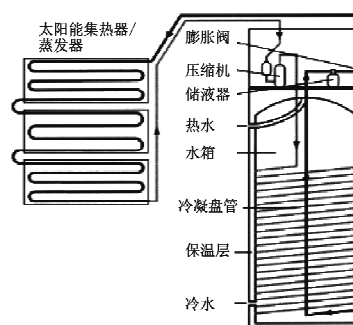


图 4 太阳能集热器/蒸发器分离的 DX-SAHP 热水器

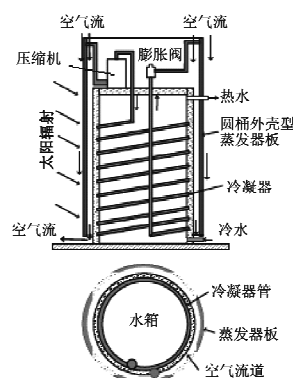


图 5 蒸发器为圆桶外壳型的 DX-SAHP 热水器

笔者设计了一种 DX-SAHP 空调热水器,其结构原理如图 6 所示<sup>[15-17]</sup>。图中,辅助附件如汽液分离器、干燥过滤器、储液器等未标出。该 DX-

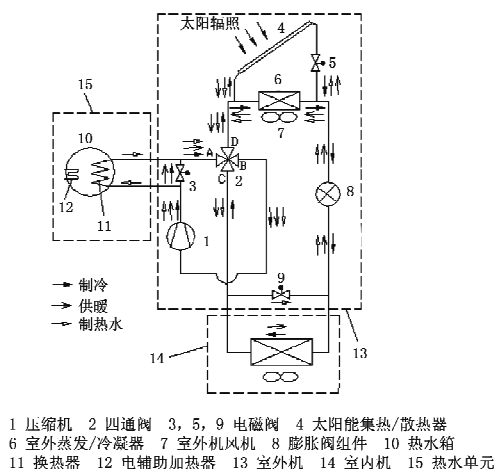


图6 笔者开发的DX-SAHP空调热水器  
结构原理及典型运行模式

SAHP 空调热水器由室外机、室内机和热水生成单元组成。室内机可以是多联机式室内机群,也可以是由风机、蒸发/冷凝盘管和金属箱体组成的空气处理机,风机和蒸发/冷凝盘管在金属箱体内。该金属箱体有一个回风口、一个送风口。太阳能集热/散热器上表面还可以安装太阳能光伏电池板。该设计尤其适用于住宅集中供暖、空调和供热水。

王如竹等人设计了一种 DX-SAHP 水蓄热(冷)空调系统,生产热水(或冷水),可用于供暖、供生活热水或制冷<sup>[18-19]</sup>,图7为其结构原理和冬季供暖工况示意图。该系统具有蓄能空调的特点,可以在一定程度上避开高峰用电。

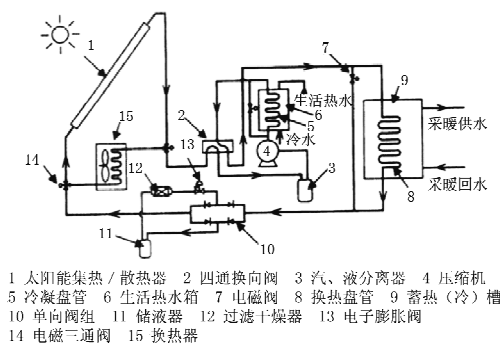


图7 王如竹等人开发的DX-SAHP空调热水系统  
结构原理图和冬季供暖工况

## 2 DX-SAHP 技术的研究概况

DX-SAHP 的概念由 Sporn 等人于 1955 年首次提出<sup>[2]</sup>。此后的 10 多年内,DX-SAHP 技术没有引起人们的关注。1973 年的石油危机推动了太阳能利用研究的兴起,带动了对 DX-SAHP 技术的研究。直到 20 世纪 70 年代后期,对 DX-SAHP 技

术的研究才比较深入,形成了 DX-SAHP 技术的第一个研究高峰期<sup>[3-8]</sup>。该高峰期持续了约 10 年时间。其间,最著名的研究团队是美国老统治大学(Old Dominion University)的 Chaturvedi 教授所在的研究小组。Chaturvedi 等人对 DX-SAHP 系统进行了一系列理论和实验研究,取得了丰硕成果<sup>[4-8]</sup>。

1988 年后的近 10 年时间,研究活动相对处于低谷。其间,值得一提的是澳大利亚学者 Morrison 的研究。他研究设计出了接近于商业应用的一体化 DX-SAHP 热水器,进行了 24 h 的运行测试,发现其 COP 在 2.4~3.0 之间<sup>[9]</sup>。该研究还将 DX-SAHP 热水器与空气源热泵热水器进行了性能比较,结果表明,DX-SAHP 热水器具有明显优越的经济性能。此后不久,该研究成果便转化为商业产品进入市场<sup>[10]</sup>。长期性能评估表明,与空气源热泵相比,DX-SAHP 系统制热的年能效比可提高约 27.7%<sup>[11]</sup>。

1997 年开始,DX-SAHP 技术的研究热重新兴起<sup>[10,20-23]</sup>。Chaturvedi 教授所在的研究小组仍然是世界上引人瞩目的研究团体,不断有研究成果<sup>[22-24]</sup>发表,但已不再是一枝独秀。Huang 等人的研究也很有成效<sup>[12-14]</sup>。Ito 教授所在的研究小组也开展了较多的研究<sup>[20-21,25]</sup>,尤其是在光热/光电一体化研究方面。他们在太阳能集热器/蒸发器的上表面安装太阳能光伏电池,二者紧密接触成为一体<sup>[20,25]</sup>。

国内对 DX-SAHP 的研究进入 21 世纪才开始,上海交通大学起步较早、研究较多<sup>[18-19,26]</sup>。南京航空航天大学、中国科学技术大学、东南大学、山东科技大学、云南师范大学、河北省能源研究所等单位也分别开展了一些研究<sup>[15-17,27-31]</sup>。

近 5 年来,对 DX-SAHP 空调热水多功能系统的研究得到重视,而此前的所有研究基本上集中在 DX-SAHP 制热方面。南京航空航天大学、上海交通大学以及山东科技大学等单位对 DX-SAHP 空调热水多功能系统进行了研究<sup>[15-19,29]</sup>。

## 3 DX-SAHP 制热系统若干关键技术的研究及其进展

这里重点概述系统热性能研究、制冷剂对系统性能影响的研究、压缩机变容量调节对系统性能影响的研究以及光热/光电一体化设计研究等几个方

面的情况。

1) 系统的热性能研究。某种结构设计和匹配关系下,在给定气候条件下的系统性能研究包括理论研究和实验研究,近 10 年来,大部分的研究集中在这两个方面<sup>[2-14,19-35]</sup>。理论研究中,目前多数采用能量分析方法。近 10 年来,焓分析方法逐步得到重视<sup>[22,26,32-35]</sup>。对系统进行焓分析能够更好地剖析系统的有效性和能量损失因素,有利于确定系统性能改进的潜力和方向。由于各地气候条件、系统结构参数和匹配关系的差异,使得各研究者研究得到的系统热性能差别很大,系统性能系数在 2~9 之间。因此需要根据我国的具体情况,开展自主创新研究。

2) 制冷剂选用情况。10 年前大多数系统使用 R12,少数系统使用 R22。近 10 年 R12 基本被淘汰,使用 R22 的较多,其次是 R134a<sup>[13-14,24,36]</sup>。Chaturvedi 教授所在的研究团队对使用 R12, R22, R134a, R404A, R407C 和 R410A 制冷剂的系统的性能进行了研究,结果表明使用 R134a 的系统具有最优的性能<sup>[24]</sup>,如图 8 所示。Huang 等人开发的、接近商业化的直膨式太阳能辅助热泵热水器使用的制冷剂也是 R134a<sup>[13-14]</sup>。R22 是 HCFC 物质,具有破坏臭氧层的缺点,发达国家必须在 2030 年前全面禁用,发展中国家也不得迟于 2040 年。因此从长远看,不宜作为 DX-SAHP 热水系统的制冷剂。在未来很长时间内,预计 R134a 将会作为 DX-SAHP 热水器的主要制冷剂之一。CO<sub>2</sub> 作为空气源热泵热水器的制冷剂在日本被大量使用,虽然在目前的 DX-SAHP 热水器研究中尚未见使用 CO<sub>2</sub> 的报道,但预计它也将成为 DX-SAHP 热水器的主要制冷剂之一。

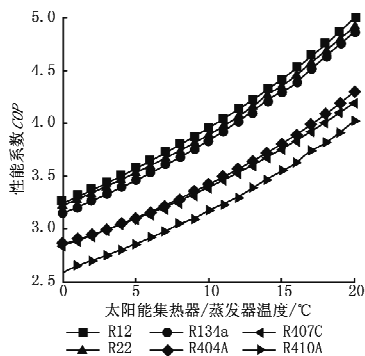


图 8 制冷剂对 DX-SAHP 制热性能的影响 (水温 60 °C)

3) 压缩机变容量调节对系统性能影响的研

究。Chaturvedi 等人<sup>[22]</sup>和 Hawlader 等人<sup>[36]</sup>分别对压缩机变容量调节对系统性能的影响进行了研究。所建立的实验系统采用了变频压缩机。研究结果表明,对压缩机进行变容量调节,DX-SAHP 热水系统的性能系数会显著提高。Chaturvedi 等人的研究表明,在环境温度 12 °C 时,把压缩机频率从 50 Hz 降低到 30 Hz,系统制热性能系数提高约 12%;在环境温度 20 °C 时,把压缩机频率从 50 Hz 降低到 30 Hz,系统制热性能系数提高约 50% (见图 9)。由此可见,根据环境变化调节压缩机容量(转速),节能效果非常显著。Hawlader 等人的研究得到了相近的结论,尽管两者的系统结构不同。

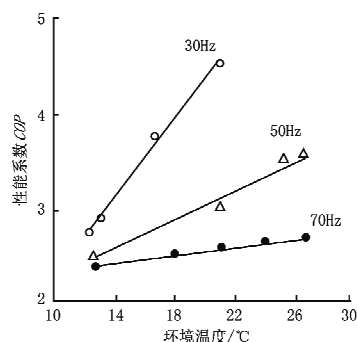


图 9 压缩机变频调节对 DX-SAHP 制热性能的影响

4) 太阳能集热器/蒸发器上安装太阳能光伏电池的研究。Ito 等人率先对带有光伏电池的 DX-SAHP 系统进行了研究<sup>[20,25]</sup>,裴刚等人最近也进行了这方面的研究<sup>[27]</sup>。这种设计中,太阳能集热器/蒸发器与太阳能光伏电池板紧密接触成为一体,热泵循环的制冷剂作为太阳能光伏电池的冷却流体,直接蒸发吸收太阳能光伏电池未能转换的太阳能,改善了太阳能光伏电池的散热条件,使光电转换效率提高,同时又可获得满意的光热效率,系统的总体性能提高。太阳能光伏电池在住宅建筑节能中的应用已成为重要议题,预计太阳能集热器/蒸发器上安装太阳能光伏电池的 DX-SAHP 技术具有良好的前景。

#### 4 DX-SAHP 空调热水器技术

DX-SAHP 空调热水器将太阳能热利用与空气源热泵技术有机结合起来,兼有二者的优点,运行的稳定性和可靠性大大增加。与空气源热泵相比,制热运行时的年能效比可提高约 27.7%<sup>[11]</sup>,制冷性能也得到改善。

DX-SAHP 空调热水系统的提出,初见于日本专利<sup>[37-38]</sup>。而对其进行深入的研究,则是近 5 年的事,我国处于研究工作的最前沿。近几年来,上海交通大学、南京航空航天大学以及山东科技大学对 DX-SAHP 空调热水系统进行了研究<sup>[15-19,29]</sup>。其中,南京航空航天大学的研究侧重于住宅使用的太阳能装置,其室内机可以是多联机,也可以是空气处理机(见图 6)。上海交通大学研究的是将太阳能热泵与水蓄热(冷)空调结合,生产热水(或冷水),用于供暖、供生活热水(或制冷)(见图 7)。

## 5 结语

5.1 随着节能减排意识的增强,供暖、空调与生活热水系统的节能减排已成为重要议题,对 DX-SAHP 技术的重视程度迅速提高。

5.2 与空气源热泵相比,DX-SAHP 系统的经济性大大提高,预期 DX-SAHP 技术具有广阔的应用前景。

5.3 DX-SAHP 系统随着气候条件、结构参数和匹配关系不同,差异很大。因此需要根据我国的具体情况,开展自主创新研究。

5.4 要使 DX-SAHP 技术在我国走向商业化应用,必须在总体设计、部件匹配、系统优化以及运行控制等方面进行全面深入研究,开发出结构紧凑、性价比高、可靠耐用的产品。

## 参考文献:

- [1] 江亿. 我国建筑状况及有效的节能途径[J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 30-40
- [2] Sporn P, Ambrose E R. The heat pump and solar energy[C] // Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy. Menlo Park, CA: Stanford Research Institute, 1955
- [3] Franklin H L, Saaski E W, Yamagiwa A. A high efficiency direct expansion solar panel [C] // Proceedings of 1977 Flat Plate Solar Collector Conference. Orlando, FL, 1977
- [4] Franklin J L. Direct expansion solar collector-heat pump system[J]. J Heat Recovery Systems, 1984, 4(2): 125-126
- [5] Chaturvedi S K, Mei V C. Thermal performance of SAHP system with combined collector/evaporator [C] // AIAA Terrestrial Energy Systems Conference, AIAA 79-0976. Orlando, Florida, 1979
- [6] Chaturvedi S K, Chiang Y F, Roberts A S. Analysis of two-phase flow solar collectors with application to heat pumps[J]. ASME J Solar Energy Engineering, 1982, 104: 358-365
- [7] Chaturvedi S K, Shen J Y. Thermal performance of a direct expansion solar-assisted heat pump[J]. Solar Energy, 1984, 33(2): 155-162
- [8] Chaturvedi S K, Abazeri M. Transient simulation of a capacity-modulated, direct-expansion, solar-assisted heat pump[J]. Solar Energy, 1987, 39(5): 421
- [9] Morrison G L. Simulation of packaged solar heat-pump water heaters[J]. Solar Energy, 1994, 53(3): 249-257
- [10] Morrison G L. Developments in solar water heating [M] // Winoto S H. ASME Yearbook 1997. Singapore, 1997
- [11] Morrison G L, Anderson T, Behnia M. Seasonal performance rating of heat pump water heating [C] // ISES 2001 Solar World Congress. Adelaide, Australia, 2001
- [12] Huang B J, Chyng J P. Integral-type solar-assisted heat pump water heater [J]. Renewable Energy, 1999, 16(1/2/3/4): 731-734
- [13] Chyng J P, Lee C P, Huang B J. Performance analysis of a solar-assisted heat pump water heater [J]. Solar Energy, 2003, 74(1): 33-44
- [14] Huang B J, Lee C P. Long-term performance of solar-assisted heat pump water heater[J]. Renewable Energy, 2003, 29(4): 633-639
- [15] 杨婷婷, 方贤德. 直膨式太阳能辅助热泵空调热水器及其热经济分析[J]. 可再生能源, 2008(4): 78-81
- [16] 方贤德, 杨婷婷. 直膨式太阳能热泵空调热水器: 中国, 200710022284. 4[P]. 2007-01-17
- [17] 方贤德, 杨婷婷. 直膨式太阳能辅助热泵空调热水器的研究[C] // 第二届中国制冷空调工程节能应用新技术研讨会. 南京, 2007
- [18] 王如竹, 旷玉辉, 许焯雄, 等. 直膨式太阳能热泵空调及热水系统: 中国, ZL03150625. 9[P]. 2006-01-04
- [19] Kuang Yuhui, Wang Ruzhu. Performance of a multi-functional direct-expansion solar assisted heat pump system[J]. Solar Energy, 2006, 80(7): 795-803
- [20] Ito S, Miura N, Wang K, et al. Heat pump using a solar collector with photovoltaic modules on the surface [J]. ASME J Solar Energy Engineering, 1997, 119(2): 1-5
- [21] Ito S, Miura N, Wang K. Performance of a heat pump using direct expansion solar collectors [J]. Solar Energy, 1999, 65(3): 189-196
- [22] Chaturvedi S K, Chen D T, Kheireddine A. Thermal performance of a variable capacity direct expansion solar assisted heat pump[J]. Energy Conversion and Management, 1998, 39(3/4): 181-191

- [23] Aziz W, Chaturvedi S K, Kheireddine A. Thermodynamic analysis of two-component, two-phase flow in solar collectors with application to a direct-expansion solar-assisted heat pump [J]. Energy, 1999, 24(3): 247-259
- [24] Gorozabel C F B, Chaturvedi S K. Analysis of a direct expansion solar assisted heat pump using different refrigerants[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(15/16): 2614-2624
- [25] Ito S, Miura N, Takano Y. Studies of heat pumps using direct expansion type solar collectors [J]. ASME J Solar Energy Engineering, 2005, 127(1): 60-64
- [26] Li Y W, Wang R Z, Wu J Y, et al. Experimental performance analysis and optimization of a direct expansion solar-assisted heat pump water heater[J]. Energy, 2007, 32(8): 1361-1374
- [27] 裴刚, 季杰, 刘可亮, 等. 光伏-太阳能热泵在不同冷凝水温下的特性[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(10): 1044-1050
- [28] 徐国英, 张小松. 太阳能-空气复合热源热泵热水器的性能模拟与分析[J]. 太阳能学报, 2006, 27(11): 1148-1154
- [29] 杨前明, 衣秋杰, 李志敏, 等. 新型太阳能热泵多功能复合机原理与热力学分析[J]. 山东科技大学学报, 2004, 23(4): 46-49
- [30] 黄金保, 浦绍选, 范亚云. 直接膨胀式太阳能热泵系统的理论分析[J]. 可再生能源, 2005(5): 12-14
- [31] 王建辉, 刘自强, 彭国辉, 等. 热泵-太阳能热水系统的研究[J]. 河北省科学院学报, 2005, 22(2): 52-55
- [32] Torres-Reyes E, Picon N M, Cervantes de G J. Exergy analysis and optimization of a solar-assisted heat pump[J]. Energy, 1998, 23(4): 337-344
- [33] Torres-Reyes E, Cervantes de G J. Optimal performance of an irreversible solar-assisted heat pump[J]. Exergy, 2001, 1(2): 107-111
- [34] Cervantes J G, Torres-Reyes E. Experiments on a solar-assisted heat pump and an exergy analysis of the system [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(12): 1289-1297
- [35] Ozgener O, Hepbasli A. A review on the energy and exergy analysis of solar assisted heat pump systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(3): 482-496
- [36] Hawlader M N A, Chou S K, Ullah M Z. The performance of a solar-assisted heat pump water heating system[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(10): 1049-1065
- [37] Masao N. Solar heat pump room heater/cooler hot water supplying apparatus; Japan, JP5066065[P]. 1993-03-19
- [38] Akira T, Yasuhiro N. Solar heat pump cooler/heater water heater; Japan, JP2000171105[P]. 2006-06-23

· 简讯 ·

### 暖通空调专业、医院行业精品讲堂——洁净手术部净化空调 节能设计与检测(第2届)培训班圆满结束

2009年4月26~29日,由《暖通空调》杂志社和中国医院协会医院建筑系统研究分会联合主办的暖通空调专业、医院行业精品讲堂——洁净手术部净化空调节能设计与检测(第2届)培训班在上海市举行。此次培训班得到了暖通空调行业、医院行业人士的大力支持,共有来自中国建筑设计研究院、福建省厦门市第一医院、上海东健净化有限公司、中国建筑西南设计研究院有限公司、中国建筑西北设计研究院有限公司、武汉市建筑设计研究院、广州广船国际股份有限公司、解放军总医院、北京大学第三医院、701研究所等30多个单位的60多名学员参加学习。学员完成全部培训课程后获得“国家级继续教育学分证书”。

培训班邀请许钟麟研究员、王铁林院长、沈晋明教授、郭大荣高工、李著萱总工、曹国庆副研究员担任主讲,主要针对洁净手术部建筑的设计标准、手术室设计参数异同与分析、平面布局与通病、净化空调各种系统特点分析和节能措施、防交叉污染措施、理论与技术措施上常见错误、招投标及检测评价中应注意的问题、手术部流程及布置洁净控

制的关键环节、新风设计、节能设计、手术室的检测方法等内容进行了讲授和安全分析及答疑。通过4天的学习,学员普遍感觉受益匪浅。

特别值得一提的是其中的安全分析与答疑环节,学员们踊跃提问,老师们认真解惑,现场讨论气氛非常热烈,很多工程师都是带着实际工作中遇到的问题来参加学习,通过现场与权威专家的沟通,取得了良好的效果。时间飞快,学习接近结束,交流却意犹未尽,留待课下继续讨论。

培训得到了上海新晃空调设备股份有限公司的支持,学员们参观了工厂和医院工程,增加了对医院洁净空调产品和实际工程的了解。

本次培训班是《暖通空调》杂志社为行业内各热点技术的学习、交流、提高而搭建的一个专业水准较高、互动性较强的平台。培训班结束后将建立以两届参培学员为主要成员的QQ群和“暖通空调在线”子论坛,供大家随时参与交流和探讨。

(本刊)