

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.025

# 太阳能蔬菜生产配送基地组合系统\*

宁静红 刘圣春 严雷

(天津商业大学天津市制冷技术重点实验室, 天津 300134)

**【摘要】** 设计了可为蔬菜种植、挑选清洗、预冷、冷藏(速冻和冻藏)各个环节的空间场所提供太阳能辅助热源,并以水和CO<sub>2</sub>为工质的蔬菜生产配送基地组合系统,通过对中国4个典型地区的计算分析,并与完全用电驱动的组合系统比较得出,不同地区由于环境温度和太阳辐射能不同,太阳能组合系统的性能具有明显的差别,广州地区环境温度高,太阳能组合系统全年节约电能和运行费用达69.6%,兰州地区太阳辐射强度大,全年节约60%的电能和运行费用,乌鲁木齐地区全年节约电能和运行费用为49.2%,北京地区尽管环境温度和太阳辐射强度较低,全年也可节约7.8%的电能和运行费用。

**关键词:** 蔬菜 生产配送基地 太阳能 组合系统

**中图分类号:** TK519 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)09-0131-05

## Combined System of Solar Energy Vegetable Growth and Distribution Center

Ning Jinghong Liu Shengchun Yan Lei

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

### Abstract

A combined system driven by solar energy and used in vegetable growth and distribution center was designed. This combined system used solar energy as the assistant heat source, water and CO<sub>2</sub> as the working fluid. It can provide fit temperature environmental space needed by many different locations such as vegetable growth, pick, wash, pre-cooling, cooling storage (or quick freeze and frozen storage). By calculation and analysis to the combined system driven by solar energy and used in four representative areas selected in China, and the comparison between the combined system driven by solar energy with that driven by full-electricity, the results were obtained. They show that the performances of the combined system driven by solar energy in different areas have obvious differences. In Guangzhou area, the combined system driven by solar energy saved about 69.6% of electricity and the running cost in a year due to the higher environmental temperature. In Lanzhou area, the combined system driven by solar energy economized about 60% of the electricity and running cost in a year owing to the higher solar radiation intension, and in Urumchi area, the combined system driven by solar energy can also reduce about 49.2% of electricity and running cost in a year. However, even though the lower environmental temperature and solar radiation intension in Beijing area, still the electricity and running cost consumption of the combined system driven by solar energy reduced by 7.8% all year round too.

**Key words** Vegetable, Growth and distribution center, Solar energy, Combined system

### 引言

随着经济的快速发展,人们生活水平的不断提

高,新鲜蔬菜的需求量、消费量大幅增长,与之相适应的应是发展工厂化、规模化、标准化的蔬菜生产配送基地。基地需要种植大棚的供暖、蔬菜采后预冷、

收稿日期: 2011-10-22 修回日期: 2011-11-13

\* 国家自然科学基金资助项目(51006073)

作者简介: 宁静红,副教授,博士,主要从事制冷装置优化节能关键技术与食品冷链技术研究, E-mail: ningjinghong@126.com

冷藏或冻藏保鲜等供热、制冷技术。传统的氯氟烃类人工合成制冷、供热循环工质引起的臭氧层破坏及产生的温室效应,已成为日益严峻的全球环境问题,开发自然工质新设备与新工艺,保护生态环境,节约自然资源,与自然和谐相处,实现农业的可持续性发展具有重要的现实意义。太阳能清洁、无污染、可再生,是各种可再生能源中最重要的基本能源,也是人类可利用的最丰富的能源,国内外有许多学者研究太阳能辅助热源的热泵、农产品干燥、喷射系统以及 CO<sub>2</sub> 作制冷剂的循环系统<sup>[1-10]</sup>,结果表明系统在节约能源、保护环境方面具有良好的效果。本文提出利用太阳能辅助热源部分替代常规能源,以自然工质水和 CO<sub>2</sub> 为循环工质的集种植、采后处理、保鲜加工于一体的蔬菜生产配送基地的组合系统,并对其性能进行分析比较,以实现蔬菜产业现代化,解决蔬菜周年均衡供应,节约能源、保护环境。

## 1 组合系统的功能

蔬菜生产配送基地集蔬菜种植、采后挑选、清洗、预冷、包装、冷藏(或速冻和冻藏)各环节,组合系统应具有以下功能:

(1) 生产各种品种的蔬菜,采用集中供热的方式,根据不同品种蔬菜生长的环境需要,提供适宜的温度和湿度。

(2) 除去蔬菜中的异物、砂子和残留农药,除去根、皮、叶、蒂等不可食用部分后洗涤。为方便工作,冬季空间供暖,夏季空间供冷以及提供适宜温度的洗涤蔬菜的净水。

(3) 把蔬菜放入流动的高温蒸汽中进行短时间的加热处理,使蔬菜中含有的各种酶类失去活性,防止蔬菜在解冻过程中品质的恶化。一般蒸汽温度为 100℃ 左右。

(4) 采用冷却后达 5℃ 以下的冷水为冷媒,将挑选清洗后的新鲜蔬菜或烫漂处理后的蔬菜浸入冷水中(或将冷水喷淋在蔬菜上),将新鲜蔬菜或烫漂处理后蔬菜的热量快速带走。

(5) 将烫漂加工处理后制成的小包装食品,快速冻结,速冻终结时的品温接近冻藏温度,以保持冻藏后蔬菜的品质。

(6) 从速冻装置中把冻菜取出,放入冻藏库内长期贮藏,较程度地保持蔬菜原有的色泽、风味和维生素,起到对蔬菜市场淡旺季的调节作用。不同品种的蔬菜冻藏温度不同,一般冻藏室的温度在 -20℃ 以下。

(7) 经过预冷处理后的新鲜蔬菜,放入冷藏库

内贮藏,根据需要进入超市、酒店、餐饮店等,向消费者提供完全符合食品卫生标准的新鲜蔬菜。一般冷藏室的温度在 2℃ 左右。

## 2 组合系统的结构

图 1 中所示的是太阳能蔬菜生产配送基地组合系统,A 为预冷间,B 为蔬菜种植大棚,C 为挑选清洗间,D 为速冻间,E 为冻藏间,F 为冷藏间,G 为漂烫间。

### 2.1 太阳能集热循环

该循环由太阳能集热器、蓄热器和水泵 2 组成。经水泵 2 的驱动,水在太阳能集热器中吸收太阳能,温度升高的热水回到蓄热器中。在水泵 3 的驱动下蓄热器中的热水进入发生器,温度传感器感受发生器内的水温,如果水温低于所需要的值,则温度传感器给温度控制器传送信号,由温度控制器控制的辅助加热器自动加热,达到所需的温度时,辅助加热器自动断开停止加热。

### 2.2 蒸汽喷射制冷循环

由喷射器 1、喷射器 2、蒸发换热器、发生器、蒸发器、换热器、膨胀阀 1、膨胀阀 2、水泵 5 组成蒸汽喷射制冷循环。发生器上部的部分高温高压蒸汽通过喷射器 1 中的喷嘴膨胀并以高速流动,在喷嘴出口处造成很低的压力,因流出速度快、压力低,吸引蒸发器内蒸发生成的低压蒸汽,进入喷射器 1 的混合室,混合室中的蒸汽混合后一起进入喷射器中的扩压段,在扩压段中流速降低、压力升高后进入喷射器 2 的喷嘴膨胀并以高速流动,在喷嘴出口处造成很低的压力,因流出速度快、压力低,吸引蒸发换热器内蒸发生成的低压蒸汽,进入喷射器 2 的混合室,混合室中的蒸汽混合后一起进入扩压段,在扩压段中流速降低、压力升高后进入换热器,在换热器内与管外的水进行热交换温度降低,凝结成液体水,一路经膨胀阀 1 截流降压后,进入蒸发器,为预冷间制取冷水提供冷源;另一路经膨胀阀 2 截流降压后进入蒸发换热器,为 CO<sub>2</sub> 制冷循环中制冷压缩机排出的 CO<sub>2</sub> 气体的冷却降温、凝结放热提供冷源;第三路经水泵 5 回到发生器形成蒸汽喷射制冷循环。

### 2.3 CO<sub>2</sub> 制冷循环

蒸发换热器、制冷压缩机、热力膨胀阀 1、热力膨胀阀 2、热力膨胀阀 3、冷风机 1、冷风机 2、冷风机 3 以及单向阀 1 和单向阀 2 组成 CO<sub>2</sub> 制冷循环。从制冷压缩机出来的 CO<sub>2</sub> 气体,在蒸发换热器中与换热管外的冷水进行热交换,放出热量凝结成 CO<sub>2</sub> 液体,分别经热力膨胀阀 1、热力膨胀阀 2 和热力膨胀阀 3 截流降压后,进入速冻间、冻藏间和冷藏间内的

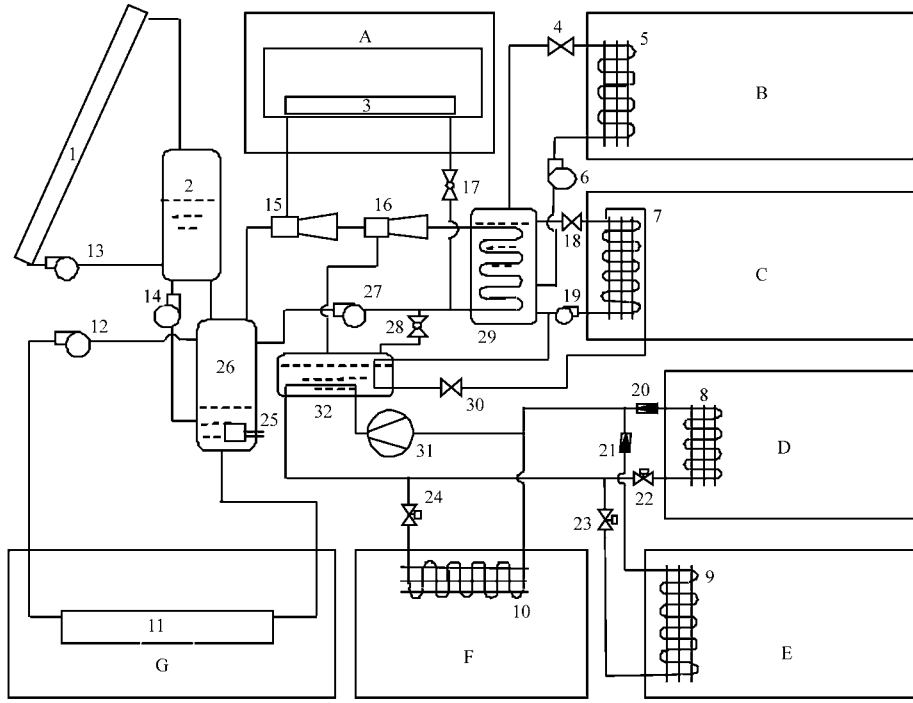


图1 太阳能蔬菜生产配送基地组合系统流程图

Fig. 1 Combined system diagram of solar energy vegetable growth and distribution center

1. 太阳能集热器 2. 蓄热器 3. 蒸发器 4. 截止阀1 5. 供热器 6. 水泵1 7. 室内热交换器 8. 冷风机1 9. 冷风机2 10. 冷风机3  
 11. 蒸汽漂烫池 12. 蒸汽泵 13. 水泵2 14. 水泵3 15. 喷射器1 16. 喷射器2 17. 膨胀阀1 18. 截止阀2 19. 水泵4 20. 单向阀1  
 21. 单向阀2 22. 热力膨胀阀1 23. 热力膨胀阀2 24. 热力膨胀阀3 25. 辅助加热器 26. 发生器 27. 水泵5 28. 膨胀阀2 29. 换热器  
 30. 截止阀3 31. 制冷压缩机 32. 蒸发换热器

冷风机1、冷风机2和冷风机3中,吸收热量蒸发产生的CO<sub>2</sub>气体回到制冷压缩机,为速冻间、冻藏间和冷藏间提供冷源,完成CO<sub>2</sub>制冷循环,单向阀1和单向阀2防止蒸发压力不同的回路间制冷剂的流动。

### 2.4 温室供热循环

换热器、截止阀1、供热器、水泵1组成蔬菜种植温室供热循环。在水泵1的驱动下,经换热器中吸收热量温度升高的热水,经过截止阀1控制流量,在供热器中放出热量,为需求不同生长温度环境的蔬菜温室提供适宜的温度空间。

### 2.5 挑选清洗间循环

#### 2.5.1 冬季供热循环

由换热器、截止阀2、室内热交换器、水泵4组成冬季供热循环。关闭截止阀3,打开截止阀2,在水泵4的驱动下,经换热器中吸收热量后温度升高的热水经截止阀2,在室内热交换器放出热量为挑选清洗间冬季取暖提供热源。

#### 2.5.2 夏季供冷循环

截止阀3、蒸发换热器、水泵4、室内热交换器组成夏季供冷循环。打开截止阀3,关闭截止阀2,在水泵4的驱动下,经蒸发换热器中放出热量温度降低的冷水,经截止阀3,在室内热交换器中吸收热量为挑选清洗间夏季提供冷源。

### 2.6 蒸汽漂烫循环

蒸汽泵、发生器、蒸汽漂烫池组成高温蒸汽漂烫循环。发生器上部的部分高温蒸汽在蒸汽泵作用下输送到漂烫间内的蒸汽漂烫池中对蔬菜进行加热漂烫处理,温度降低的蒸汽回到发生器中完成蔬菜的蒸汽漂烫循环。经过短时间漂烫处理的蔬菜迅速取出,送入预冷间进行降温处理。

## 3 组合系统的性能

### 3.1 负荷计算

计算参数选取为:预冷间内蒸发器中水的蒸发温度为1℃,制取的冷水温度为5℃;蒸发换热器中水的蒸发温度为7℃;CO<sub>2</sub>制冷循环的冷风机1、冷风机2、冷风机3中CO<sub>2</sub>的蒸发温度分别为-32、-30和-5℃;发生器中蒸汽的温度为100℃。假设各个泵的功耗忽略不计。预冷间的制冷负荷Q<sub>YL</sub>为10kW;挑选清洗间夏季制冷负荷Q<sub>TXX</sub>为10kW,冬季热负荷Q<sub>TXD</sub>为10kW,漂烫间的热负荷为20kW;速冻间、冻藏间和冷藏间的总制冷负荷计算公式为<sup>[11]</sup>

$$Q_1 = 1.07 \left( n_1 \sum Q_1 + \sum Q_2 + \sum Q_3 + \sum Q_4 + \sum Q_5 \right) \quad (1)$$

其中  $Q_1 = KF(t_w - t_n)/1\ 000$   
 式中  $Q_1$ ——各冷间围护结构传热量, kW  
 $K$ ——各冷间围护结构传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $F$ ——各冷间围护结构表面积, 取  $100\ m^2$   
 $t_w$ ——外界空气温度  
 $t_n$ ——各冷间内的空气温度  
 $n_1$ ——各冷间围护结构传热量季节修正系数  
 $Q_2$ ——蔬菜热量, kW  
 $Q_3$ ——通风换气热量, kW  
 $Q_4$ ——电动机运转热量, kW  
 $Q_5$ ——操作热量, kW

速冻间、冻藏间和冷藏间的蔬菜热量、通风换气热量、电动机运转热量和操作热量总和为  $60\ kW$ ; 围护结构传热量根据地区和季节分别进行计算。

夏季蔬菜温室总供热负荷计算公式为

$$Q_{SX} = Q_J + Q_g + N + Q_{YL} + Q_{TX} \quad (2)$$

式中  $N$ ——制冷压缩机的功耗, kW

$Q_g$ ——发生器需要的热量, kW

冬季蔬菜温室总供热负荷计算公式为

$$Q_{SX} = Q_J + Q_g + N + Q_{YL} - Q_{TXD} \quad (3)$$

根据太阳能资源分布, 选取乌鲁木齐、兰州、北京和广州作为研究对象, 结合各地区的太阳能辐射强度和月平均温度, 分析各地使用太阳能蔬菜生产配送基地组合系统的可行性及系统性能。

### 3.2 太阳能保证率

太阳能保证率计算公式为<sup>[12]</sup>

$$f = \frac{Q_{col}}{Q_g} \quad (4)$$

其中  $Q_{col} = A_{col} I \eta_{col} / 1\ 000$

式中  $Q_{col}$ ——太阳辐照能, kW

$A_{col}$ ——太阳能集热器的面积, 取  $1\ 500\ m^2$

$I$ ——太阳能的辐射强度,  $W/m^2$

$\eta_{col}$ ——太阳能集热器的效率

$$\eta_{col} = 0.8 - F_R U_L \frac{T_{col} - t_w}{I} \quad (5)$$

式中  $F_R$ ——热转移因数

$U_L$ ——集热器的总热损失系数

$T_{col}$ ——集热器内的水温, 取  $100^\circ C$

式(5)中  $F_R U_L = 2\ W/(m^2 \cdot K)$ <sup>[12]</sup>。在太阳辐照量较丰富的乌鲁木齐和兰州两地, 年平均太阳辐射强度分别是  $5\ 090\ MJ/m^2$  和  $5\ 463\ MJ/m^2$ , 而在北京和广州, 年平均太阳辐射强度为  $4\ 104\ MJ/m^2$ 、 $4\ 867\ MJ/m^2$ 。

图2中所示的是冬季典型气象日7:00~16:00之间, 不同地区、不同时刻的太阳能保证率, 可以看出, 广州地区最大, 兰州地区次之, 乌鲁木齐地区低

于兰州地区, 北京地区最小。

图3中所示的是夏季典型气象日7:00~16:00之间, 不同地区、不同时刻的太阳能保证率, 可以看出, 图3和图2具有相似的结果。

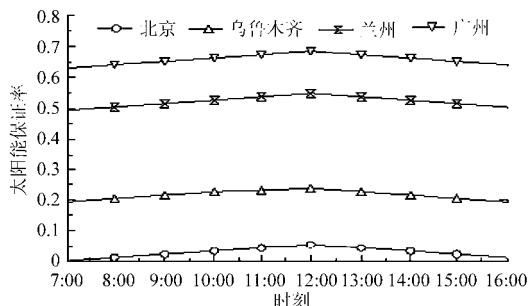


图2 冬季典型气象日不同时刻的太阳能保证率  
 Fig. 2 Solar fraction in typical days in winter at different time

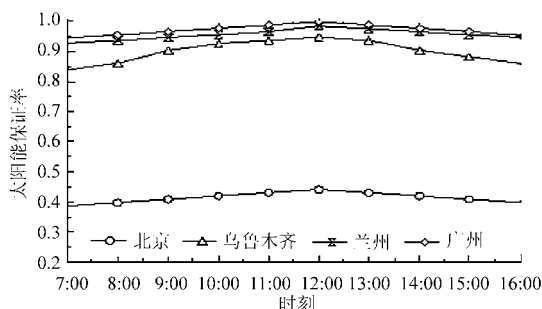


图3 夏季典型气象日不同时刻的太阳能保证率  
 Fig. 3 Solar fraction in typical days in summer at different time

不同地区全年太阳辐照能有很大的差别, 广州地区最高, 兰州地区次之, 乌鲁木齐低于兰州地区, 北京地区最低。

这是由于广州地区环境温度最高, 太阳能保证率最大, 全年太阳辐照能最高, 兰州地区太阳辐射强度最高, 导致其太阳能保证率较大, 全年太阳辐照能较高, 而北京地区太阳辐射强度与环境温度都较低, 其太阳能保证率较低, 全年太阳辐照能较低。由此得出, 环境温度和太阳辐射强度对太阳能保证率有很大的影响。

### 3.3 运行费用

为便于分析比较不同地区组合系统的运行性能, 假设电价为  $0.7\ 元/(kW \cdot h)$ , 如果不利用太阳能, 太阳辐照能与太阳能保证率为零, 组合系统发生器的热源全部来自于电能, 电锅炉的效率为  $0.9$ , 热源全部来自电能的组合系统全年消耗电能为  $638\ 286\ kW \cdot h$ , 运行费用为  $44.68$  万元。

通过表1的计算结果可以看出, 广州地区年运行费用最低, 兰州地区略高于广州地区, 乌鲁木齐地区略高于兰州地区, 北京地区年运行费用相对最多。

表1 不同地区组合系统全年节约费用比较  
Tab.1 Comparison of saving cost of solar energy combined system in different areas all year round

参数	北京	广州	乌鲁木齐	兰州
节电量/kW·h	50 274	444 564	314 064	383 364
节省费用/万元	3.5	31.1	22.0	26.8

与发生器的热源全部来自电能的组合系统相比,广州地区太阳能组合系统全年节约电能和运行费用最高,达69.6%,兰州地区全年节约60%的电能和运行费用,乌鲁木齐地区全年节约电能和运行费用为49.2%,北京地区全年节约电能和运行费用为7.8%。不同地区由于环境温度和太阳辐照能不同,利用太阳能作为辅助热源驱动的蔬菜基地组合系统的性能具有明显的差别,但都不同程度地节约大量能源,如果开发出集热效率高的太阳能集热器,则可节省更多的能源。

在具体实施时,可针对不同地区的地域条件,综合考虑太阳能组合系统的初始投资和运行费用,对太阳能集热器的面积作相应的调整,如环境温度较高和太阳辐照能较大的地区,可适当减少太阳能集热器的面积,以减少组合系统设备的初始投资。如

环境温度较低和太阳辐照能较小的地区,则需选择较大面积的太阳能集热器,以保证系统的运行性能,节省组合系统的运行费用。

## 4 结论

(1) 利用太阳能作为辅助热源,自然工质水和CO<sub>2</sub>为循环工质的蔬菜生产配送基地组合系统,可为蔬菜种植、采后挑选、清洗、预冷、冷藏(或速冻和冻藏)各个环节的空间场所提供所需适宜的温度环境。

(2) 太阳能蔬菜生产配送基地组合系统的性能,由于不同地区的环境温度和太阳辐照能不同,而具有明显的差别,但都不同程度地节约大量能源。

(3) 广州地区组合系统全年节约电能和运行费用最高,达69.6%,兰州地区全年节约60%的电能和运行费用,乌鲁木齐地区全年节约电能和运行费用为49.2%,北京地区全年节约电能和运行费用为7.8%。

(4) 具体实施时,针对不同地区的地域条件,综合考虑组合系统的初始投资和运行费用,以保证系统的运行性能,节省组合系统的运行费用。

## 参 考 文 献

- Li H, Yang H X. Study on performance of solar assisted air source heat pump systems for hot water production in Hong Kong [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(9): 2 818 ~ 2 825.
- Ronak D, Mohd H R, Mohamad Y S, et al. Review of solar assisted heat pump drying systems for agricultural and marine products [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9): 2 564 ~ 2 579.
- Mohanraj M, Jayaraj S, Muraleedharan C. Performance prediction of a direct expansion solar assisted heat pump using artificial neural networks [J]. *Applied Energy*, 2009, 86(9): 1 442 ~ 1 449.
- Sepehr S, Behzad N. Vertical ground coupled steam ejector heat pump; thermal-economic modeling and optimization [J]. *International Journal of refrigeration*, 2011, 34(7): 1 562 ~ 1 576.
- 田琦. 集热器对太阳能喷射制冷系统性能的影响[J]. *太原理工大学学报*, 2007, 38(5): 250 ~ 252.  
Tian Qi. The effect of collectors on the solar ejector refrigeration system [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2007, 38(5): 250 ~ 252. (in Chinese)
- Humberto V, Sergio C. Simulation and economic optimization of a solar assisted combined ejector-vapor compression cycle for cooling applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(5): 478 ~ 486.
- 杨世昆, 杜建强. 太阳能草捆干燥设备设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(4): 81 ~ 86.  
Yang Shikun, Du Jianqiang. Design and experiment of bale drying machinery using solar energy [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(4): 81 ~ 86. (in Chinese)
- 内孜·阿木提, 毛志怀, 李峰, 等. 整体式果品蔬菜太阳能干燥装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1): 134 ~ 139.  
Rouzi·Amuti, Mao Zhihuai, Li Feng, et al. Design and experiment of integrative fruit-vegetable solar-air drier [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(1): 134 ~ 139. (in Chinese)
- 李海峰, 李勇, 代彦军, 等. 太阳能辅助热泵综合就仓干燥系统实验研究[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 109 ~ 113.  
Li Haifeng, Li Yong, Dai Yanjun, et al. Experiment on hybrid solar drying system assisted by heat pump for grain in-store drying [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 109 ~ 113. (in Chinese)
- 宁静红, 马一太, 苏维诚, 等. R290/CO<sub>2</sub> 蒸汽压缩叠叠式制冷系统实验[J]. *天津大学学报*, 2006, 39(11): 1 341 ~ 1 344.
- 申江, 臧润清, 宁静红, 等. 制冷装置设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- 何曙, 李勇, 李海峰, 等. 太阳能喷射制冷系统性能模拟及其应用[J]. *低温与超导*, 2008, 36(6): 60 ~ 65.