

# 一种新型太阳能冷热联产系统的设计

陈永根<sup>1</sup>, 吴阿峰<sup>1</sup>, 李伟科<sup>1</sup>, 郭祚刚<sup>1</sup>, 梁培婷<sup>2</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 清华大学热能工程系, 北京 100084)

**摘要:** 基于节能环保的理念, 设计了一种新型太阳能冷热联产系统。该系统利用太阳能作为能量来源, 半导体制冷片作为制冷元件, 同时回收系统的废热, 整套系统的能源利用效率较高。以能量平衡与传热理论为基础, 结合理论计算和数值模拟, 证明该系统可实现冷热联产的功能, 制冷能效 COP 为 0.7, 热量利用效率达 73.5%。

**关键词:** 太阳能; 冷热联产; 半导体制冷片; 系统

中图分类号: TK513

文献标志码: A

文章编号: 2095-8687(2015)02-0076-04

## Design of a New Solar-powered Combined Heating and Cooling System

CHEN Yonggen<sup>1</sup>, WU Afeng<sup>1</sup>, LI Weike<sup>1</sup>, GUO Zuogang<sup>1</sup>, LIANG Peiting<sup>2</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A new solar-powered combined heating and cooling system is designed based on the concept of energy saving and environmental protection, this system has high efficiency which use semiconductor chilling plate powered by solar energy to produce refrigeration effect, and the waste heat is used to supply domestic hot water. Theoretical calculation and numerical simulation are finished based on energy balance and heat transfer theory, the results shows that this system can realize the function of the refrigeration and hot water supply, which COP is 0.7 and energy utilization efficiency is 73.5%.

**Key words:** solar energy; cooling and heating function; semiconductor chilling plate; system

我国目前城镇民用建筑运行耗电占我国总发电量的 22% ~ 24%<sup>[1]</sup>, 而空调能耗占建筑能耗的 50% ~ 65% 左右<sup>[2]</sup>, 可见传统空调用电在建筑能耗用电中占较大比重。因此, 做好空调系统的节能工作对节能减排有着重要的意义。太阳能是一种储量丰富、清洁安全的可再生能源, 将太阳能应用于空调是有效利用太阳能的重要方式<sup>[3]</sup>。太阳能半导体制冷空调具有系统简单、噪音小、不使用制冷剂等优点<sup>[4]</sup>, 有学者对此做过一些基础研究<sup>[5-8]</sup>, 但对系统如何更高效利用太阳能则鲜有研究, 本文提出了一种具有较高能源利用效率的太阳能冷热联产系统。

## 1 设计方案

本系统由太阳能光伏发电系统、半导体制冷系

统、冷却水回路系统、智能温控系统构成(见图 1)。工作原理是: 太阳能电池板吸收太阳能发电, 电能储存在蓄电池中; 蓄电池给半导体制冷片供

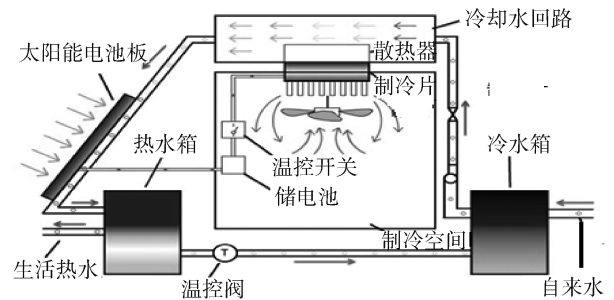


图 1 新型太阳能空调系统示意图

Fig. 1 Schematic of Solar-powered Air-conditioner System

电, 产生冷热两个端面; 冷端面温度低, 通过风扇的强迫对流, 降低室内空气温度, 并由温控系统控制室内温度; 从冷水箱流出的冷却水依次流经半导体制冷片热端面和太阳能电池板背面, 带走热量, 采用水冷的方式冷却半导体的热端和太阳能电池板

收稿日期: 2015-01-29

作者简介: 陈永根(1990), 男, 湖南长沙人, 工程师, 硕士, 主要从事热机专业设计研究(email)chenyonggen@gedi.com.cn。

的背面, 可以同时提高制冷片和太阳能电池板的工作效率<sup>[9]</sup>。最后流往热水箱作为生活热水使用, 当热水箱水温低于设定值时, 冷却水可继续流回冷水箱参与冷却水循环。

单个房间的制冷与模型的工作原理类似, 对于整幢建筑, 例如学生公寓(见图2), 自来水进入蓄冷水箱, 蓄冷水箱的冷水先依次经过房间带走半导体制冷片热端的热量, 再流经太阳能电池板背面, 电池板温度降低, 冷水进一步被加热, 最后流入蓄热水箱。在某栋建筑中, 冷水箱设置在高位, 热水箱设置在低位, 利用重力使冷却水一次流过半导体制冷片热端和太阳能电池板, 最终热水汇集到热水箱中。

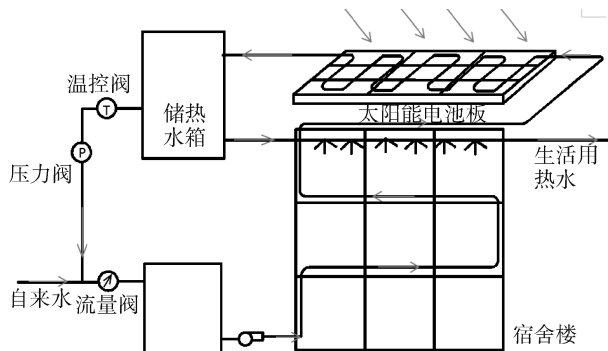


图2 本套系统在某栋学生宿舍楼中应用示意图

Fig. 2 Solar-powered Air-conditioner System in Dormitory

## 2 制冷功能的实现

### 2.1 制冷原理

本系统制冷原理是: 蓄电池给半导体片供直流电, 半导体制冷片由于帕尔贴效应<sup>[10]</sup>产生冷端、热端, 通过强化冷热面的传热, 半导体片就会像热泵一样, 吸收房间的热量, 从热端散出, 从而降低房间温度。由于单个制冷片制冷量有限, 一般采用多片组成热电堆; 同时由于半导体片工作时单位面积制冷量较大, 所以需要合理设计冷热端的换热, 以提高制冷性能系数。

### 2.2 制冷系统的优化措施

制冷的优化分两大方面, 一是通过优化冷热面传热提高性能系数, 二是采用分布式制冷。

#### 2.2.1 冷热面的传热优化

热端的传热有风冷、水冷、热管冷却等方式。其中风冷效果差, 会导致制冷性能系数降低; 而热管成本较高, 不适宜大范围应用; 水冷换热效果

好, 性能系数较高, 且自来水获取方便, 通过合理设计后, 既可以实现热端冷却, 加热后的水又能作为生活用温水。冷端面的传热采用空气强迫对流。本文对尺寸为  $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 40\text{ cm}$  的制冷空间温度分布进行了数值模拟, 边界条件为: 两个冷风口(代替2个半导体制冷片冷面), 风速  $0.05\text{ m/s}$ , 冷风温度为  $10^\circ\text{C}$ ; 除了朝阳墙为  $30^\circ\text{C}$  外, 其余墙为  $28^\circ\text{C}$ ; 考虑了浮升力, 密度随温度变化; 采用  $K-\varepsilon$  湍流模型<sup>[11]</sup>。模拟结果如图3所示, 上部深色区域代表最低温  $10^\circ\text{C}$ , 中间浅色区域代表最高温  $30^\circ\text{C}$ , 绿色区域在  $22^\circ\text{C}$  左右。由图3可见, 半导体制冷片产生的冷面, 经过空气强迫对流后产生冷风, 房间温度得到降低且温度分布较为均匀。

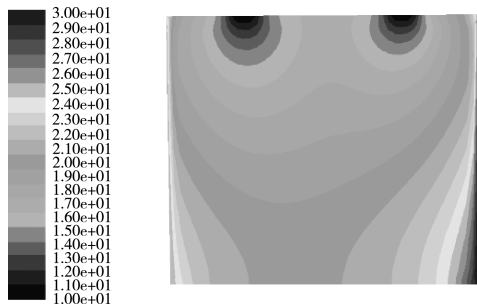


图3 数值模拟模型空间内温度分布

Fig. 3 Temperature Distribution Simulated by FLUENT

#### 2.2.2 分区冷却

分区冷却是指利用半导体制冷方式的灵活性, 实现房间不同区域的按需制冷。人员活动密集区域可以多放置制冷片, 其他空闲区域可以少放置制冷片。同时, 半导体制冷方式具有无机械运动、不使用制冷剂、低噪等特性, 将大大改善居住环境。

### 2.3 制冷系统的热力计算

假定制冷的房间尺寸为  $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3\text{ m}$ , 其中高为  $3\text{ m}$ , 设空调运行一段时间后, 房间从原来的温度  $t_0 = 28^\circ\text{C}$  降低至稳态  $t_\infty = 26^\circ\text{C}$ , 对处于稳态条件下单个房间进行热力计算。

#### 1) 外界向房间的传热量

假设房间散热面主要是4个侧面(尺寸为  $3\text{ m} \times 4\text{ m}$ ), 墙壁温恒定, 设室内3个侧面墙壁温  $t_{w1} = 28^\circ\text{C}$ , 1个向阳面墙壁温  $t_{w2} = 30^\circ\text{C}$ 。考虑室内空气流动速度较小, 冷空气自上而下流动, 则室内气体与墙壁的换热可以看做无限大空间的自然对流换热进行计算。对室内侧墙壁, 由经验公式得努赛尔数和内墙壁面对流换热系数<sup>[12]</sup>,

$$Nu = 0.1 \times (GrPr)^{1/3} = 171.16 \quad (1)$$

$$h_1 = \lambda Nu/l = 1.51 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (2)$$

所以, 房间内墙壁与室内空气换热量为:

$$\Phi_1 = h_1(t_{w1} - t_\infty)A = 36.23 \text{ W} \quad (3)$$

采用类似计算, 可以得到向阳墙壁向室内传递热量为:

$$\Phi_2 = h_2(t_{w2} - t_\infty)A = 91.1 \text{ W} \quad (4)$$

墙壁向房间内空气传递的总热量为:

$$\Phi = 3\Phi_1 + \Phi_2 \approx 200 \text{ W} \quad (5)$$

## 2) 制冷片冷端制冷量的计算

制冷片冷端面与散热器连接, 散热器尺寸如下, 两个制冷片共用一个散热器, 翅片厚度为 2 mm, 长度为 90 mm, 高度为 40 mm, 间距为 8 mm, 基底尺寸为 140 mm × 90 mm, 以两个制冷片为一个制冷单元, 散热器下方布置一个功率为 7.2 W(40 mm × 40 mm)的风扇, 将热空气吸入冲击到散热器底部(基底面积为  $A_1$ , 侧面面积为  $A_2$ ), 被冷却了的空气从侧面流出, 流向制冷空间。

由图 4 可看出, 空气通过风扇后经过两翅片间, 对两翅片间的底面可以近似为射流冲击换热。

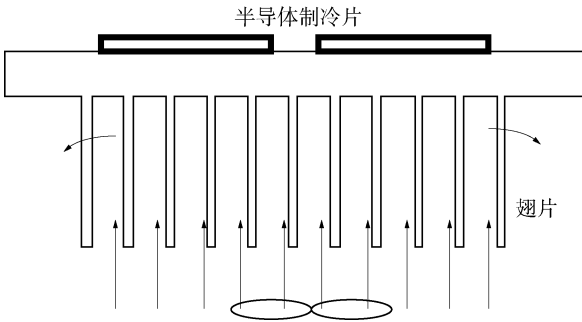


图 4 半导体制冷片冷端散热示意图

Fig. 4 Heat Transfer of Semiconductor Chip Cold Side

$$Re_D = \frac{ur}{\nu} = 53763.4 \quad (6)$$

根据射流冲击换热经验公式<sup>[11]</sup>:

$$Nu = 551.2 \quad (7)$$

进而求得空气与翅片基部射流冲击换热系数为:

$$h_{\text{冲}} = \frac{nu\lambda}{r} = 354.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k}) \quad (8)$$

单个制冷单元射流冲击换热量

$$q_{\text{冲}} = h_{\text{冲}} \Delta t A_1 = 40.9 \text{ W} \quad (9)$$

空气在翅片两侧流动时, 可看作横掠平板换热,

根据经验公式<sup>[11]</sup>, 得到翅片侧面换热系数:

$$h_{\text{侧}} = 87.96 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (10)$$

单个制冷单元横掠换热功率

$$q_{\text{侧}} = h_{\text{侧}} \Delta t A_2 = 67.3 \text{ W} \quad (11)$$

计算得单个制冷单元制冷功

$$q_{\text{冷}} = q_{\text{冲}} + q_{\text{侧}} = 108.2 \text{ W} \quad (12)$$

墙壁向房间传递的热量  $\Phi = 200 \text{ W}$ , 房间空气传热过程达到稳态时, 设房间需要  $n$  个制冷单元(2  $n$  片制冷片),  $n = \Phi/q_{\text{冷}} \approx 2$ , 考虑制冷余量的需要, 则系统需要 5 个制冷单元(共 10 片制冷片)。系统总制冷功率

$$\Phi_{\text{总制冷量}} = 5 \times 108.2 = 541 \text{ W} \quad (13)$$

## 3) COP 计算

制冷系统由 5 个制冷单元(10 片制冷片), 单个制冷单元工作电压 12 V, 工作电流 6 A, 每个单元使用一个风扇, 风扇功率 7.2 W, 整个系统配备一个水泵, 泵的功率 15 W, 根据 COP 定义<sup>[13]</sup>, 可以计算得到 COP 为 0.7。

## 3 供热功能的实现

### 3.1 供热水原理

本系统将被加热的冷却水用作生活热水, 提高能量的综合利用率。从系统模型的布局可以看出, 冷却水箱通过自来水的补充存储一定量的冷却水, 水泵抽取冷却水箱的冷却水, 通过流量调节阀, 依次流经半导体的热端和太阳能电池板的背面吸走热量, 被加热后的冷却水流入热水箱。至此冷却水完成了一个工作循环。用户可以从热水箱中取出生活热水。在热水箱底部设有温控调节阀, 当热水箱中的水温度低于某设定值时, 阀门打开, 热水箱中的冷却水流入冷水箱继续进行下一个工作循环; 如果热水箱的水温度高于设定值, 阀门关闭, 热水箱的水作为生活热水使用。

### 3.2 供热水循环的计算

系统水泵提供的冷却水流量  $Q = 0.407 \text{ kg/s}$ , 实验测得制冷片热面的散热功率约  $q_{\text{散1}} = 1312 \text{ W}$ , 根据  $q_{\text{散1}} = C_p Q \Delta t_1$ , 得到冷却水温升  $\Delta t_1$ :

$$\Delta t_1 = 0.77 \text{ }^\circ\text{C} \quad (14)$$

要为 4 m × 4 m × 3 m 的房间制冷, 蓄电池需要为系统提供的电量约为 772 W。为保证蓄电池电量充裕, 选择 8 块太阳能电池板(单片尺寸约为 1.58 m × 0.808 m)。太阳能电池板电能转换效率约为  $\eta$

=15%<sup>[14]</sup>, 其中工作过程中有  $\zeta = 5\%$  太阳能被反射, 其余被吸收。某型号太阳能电池板工作在北京, 安装尺寸示意图如 5 所示:

北京平均总太阳能辐射约  $q_{\text{辐射}} = 500 \text{ W/m}^2$ <sup>[15]</sup>, 则太阳能电池板背面散热量为:

$$q_{\text{散2}} = q_{\text{辐射}} A_{\text{电池板}} (1 - \eta - \xi) = 4085 \text{ W} \quad (15)$$

考虑到太阳能电池板背面散热量不能完全被冷却水吸收, 冷却水只吸收 60% 的热量, 则冷却水经过太阳能电池板背面后的温升为:

$$\Delta t_2 = q_{\text{散2}} \times 0.6 / C_p Q \approx 1.44 \text{ }^\circ\text{C} \quad (16)$$

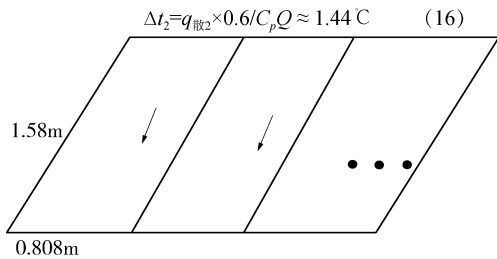


图5 太阳能电池板安装示意图(北京地区)

Fig. 5 Schematic Diagram of Solar Panel Installation

则冷却水经过一个工作循环后温升:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = 2.2 \text{ }^\circ\text{C} \quad (17)$$

由上面计算得, 一个工作循环(冷却水冷却一次制冷片热端面, 冷却一次太阳能电池板背面)温升  $2.2^\circ\text{C}$ , 由冷却水流量  $Q = 0.407 \text{ kg/s}$  和管径, 算得水速  $v = 0.113 \text{ m/s}$ , 设一个工作循环管程  $L = 20 \text{ m}$ , 则一个工作循环所需时间  $t = 20 / 0.113 = 178 \text{ s}$ , 假设水温升高  $15^\circ\text{C}$  后不再循环使用, 则冷却水循环的次数  $n = 15 / 2.2 \approx 7$ , 则冷却水的循环周期  $\tau = 7 \times 178 / 60 \approx 20 \text{ min}$ 。系统供热效率定义为冷却水吸收的热量占投射到太阳能电池板上的总辐射能之比

$$\eta_{\text{热}} = (q_{\text{散1}} + 0.6q_{\text{散2}}) / (q_{\text{辐射}} * A_{\text{电池板}}) \quad (18)$$

代入相关数值, 可求得  $\eta_{\text{热}} \approx 73.5\%$ , 可见本系统中的废热大部分得到回收利用。

## 4 结语

本系统将太阳能发电与半导体制冷结合, 季节匹配性好, 能源利用效率高, 具有以下特点:

1) 太阳能电池板背面实现水冷, 可提高光伏发电效率, 延长电池板使用寿命; 制冷片热端通过水冷, 可迅速带走热端面热量, 维持制冷片冷热端恒定温差, 优化了制冷性能。

2) 将冷却水依次通过半导体热端面和太阳能电池板背面, 被加热后的冷却水可用作生活用温水, 所以本套系统的能量综合利用率较高。

3) 新型太阳能空调系统集成光伏发电、半导体制冷、废热利用等功能于一体, 具有明显的节能环保效益。

当下国家正鼓励太阳能等新能源的大力发展, 且半导体制冷片、太阳能电池板生产成本越来越低, 本套系统的造价将进一步降低, 加上本套系统综合能量利用效率高, 不仅可以制冷, 还可回收废热, 因此应用前景广阔。

## 参考文献:

- [1] 江亿. 我国建筑能耗状况及有效的节能途径 [J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 30-40.
- [2] 邹建忠. 空调系统能耗分析与节能设计探讨 [J]. 中外建筑, 2007(11): 88-91.
- [3] 代彦军, 王如竹. 太阳能空调制冷技术最新研究进展 [J]. 化工学报, 2008, 59(S2): 1-8.
- [4] 钟承尧, 严世胜. 太阳能半导体空调的应用前景 [J]. 海南大学学报, 2000, 18(2): 123-125.
- [5] 张华俊, 董晓俊, 陶文铨, 等. 风冷热电空调器的研制 [J]. 半导体学报, 2001, 22(2): 220-223.
- [6] 秦锋, 李彦, 徐立珍, 等. 太阳能半导体空调的实验研究与数值模拟 [J]. 兰州理工大学学报, 2007, 33(1): 47-51.
- [7] 徐立珍, 李彦, 秦锋, 等. 风冷半导体空调的散热问题 [J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(1): 54-57.
- [8] 黄琪薇, 李彦, 徐立珍. 水冷式太阳能半导体空调的实验研究 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(11): 1826-1829.
- [9] 褚玉芳, 陈维, 沈辉, 等. 热性能对晶体硅太阳能电池的效率影响研究 [J]. 宜春学院学报, 2009, 31(4): 10-13.
- [10] 韩宝琦, 李树林. 制冷原理空调及应用(第二版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [11] 韩占忠, 王敬, 兰小琴. Fluent 流体工程仿真计算实例与应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [12] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [13] 沈维道, 蒋智敏, 童钧耕. 工程热力学(第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [14] 尚华, 王惠荣. 太阳能光伏发电效率的影响因素 [J]. 宁夏电力, 2010(5): 48-50.
- [15] 周晋, 晏刚, 吴业正. 北京地区的太阳辐射分析 [J]. 太阳能学报, 2005, 26(5): 712-716.