

文章编号:0254-0096(2020)05-0336-09

太阳能光伏制冷系统与其他制冷系统的 能耗模拟及经济性比较

高毓壑, 季 杰, 赵 志, 郭泽伟, 苏 鹏

(中国科学技术大学热科学与能源工程系, 合肥 230027)

摘 要: 以合肥、成都和海口地区为例,对当地建筑所用的太阳能光伏空调制冷系统、太阳能吸收式空调制冷系统及传统的蒸气压缩式空调制冷系统进行能耗模拟。用费用年值法对3种制冷的经济性进行分析,同时讨论“全额上网”及“自发自用,余电上网”2种光伏并网模的经济性,并将3种制冷的系统经济性进行比较,讨论当光伏上网标杆电价降到当地脱硫煤上网标杆电价且不计入光伏补贴时光伏制冷的经济性。结果表明:太阳能光伏制冷在2种并网模式下的经济性均优于太阳能吸收式制冷和传统蒸气压缩式制冷;且即使不考虑国家对光伏产业的各项扶持政策,光伏制冷的经济性仍优于太阳能吸收式制冷和传统蒸气压缩式制冷。

关键词: 光伏; 制冷; 经济性分析; 费用年值法; 能耗模拟

中图分类号: TK519

文献标志码: A

0 引 言

每年夏季,全球消耗大量的能源用于制冷。为了减少制冷对常规不可再生能源的消耗,太阳能制冷技术受到日益重视^[1]。

太阳能制冷可通过2种途径实现,即太阳能光热转换制冷和太阳能光电转换制冷。太阳能光热转换制冷技术最成熟、应用最多的是太阳能吸收式制冷,即利用太阳能集热器将太阳能转换成热能,再利用热能驱动吸收式冷水机来制冷。太阳能光电转换制冷主要是太阳能光伏制冷,一般利用太阳能电池将太阳能转换成电能,再利用电能来驱动传统的蒸汽压缩式冷水机来制冷。

经济性是决定一种制冷方式能否被广泛应用的重要指标,有很多学者对太阳能制冷的经济性做过研究。Kim等^[2]比较了多种太阳能光热制冷和太阳能光电制冷系统的设备成本,得出太阳能光伏制冷系统的设备成本明显高于各种太阳能光热制冷系统的结论。Otanicar等^[3]研究太阳能光电制冷与太阳能光热系统设备成本的变化趋势后,预测到2030年太阳能光伏制冷的设备成本将下降到最低,而太阳能吸收式制冷的设备成本将不会大幅下降。近年来,已有一些关于太阳能制冷经济性的研究显示,一些地区的太阳能光伏制冷的经济性好

于太阳能光热制冷。Mokhtar等^[4]基于阿联酋首都阿布扎比市的气象条件,对25种不同结构的太阳能制冷系统进行经济性比较。结果显示,在小型制冷系统中,多晶硅太阳能电池与蒸气压缩式冷水机组组成的制冷系统总成本远低于单效吸收式冷水机与平板集热器或真空管集热器组成的制冷系统。Ferreira等^[5]比较了西班牙中部及荷兰地区太阳能光热制冷与太阳能光电制冷的经济性,得出太阳能电池与蒸气压缩制冷机组组成的制冷系统经济性最好,而在太阳能光热制冷系统中,双效吸收式冷水机与槽式聚光集热器组成的制冷系统经济性最好。Noro等^[6]比较了意大利的米兰和特拉帕尼地区多种太阳能光伏制冷系统与太阳能光热制冷系统的经济性,得出成本最低的是非晶硅太阳能电池与水冷式压缩制冷机组组成的系统。而其所研究的制冷系统中,太阳能光热制冷系统的成本均高于太阳能光伏制冷系统。

成本过高限制了光伏制冷的大规模推广。然而,结合已有研究结果可知,太阳能光伏制冷在经济性方面已有较大改善。而且,近几年光伏组件价格的继续下降以及当下中国对光伏产业的补贴政策,使得光伏制冷的经济性进一步提升。在技术方面,太阳能光伏制冷系统相比于其他形式的太阳能制冷系统而言,具有结构简单、

收稿日期: 2017-11-06

通信作者: 季 杰(1963—), 男, 博士、教授, 主要从事太阳能利用方面的研究。jijie@ustc.edu.cn

易于维护、使用寿命长等优点。在当前情况下,如果光伏制冷在经济性方面也呈现出优势,将具有被大规模推广的价值。故本文对当前太阳能光伏制冷的经济性进行研究,并与太阳能吸收式制冷和传统压缩式制冷进行对比。

以中国合肥、成都及海口地区的建筑用空调制冷系统为例,模拟太阳能光伏制冷系统、太阳能吸收式制冷系统和传统压缩式制冷系统的能耗情况,并分别将3个地区的3种制冷系统的经济性进行分析与比较。

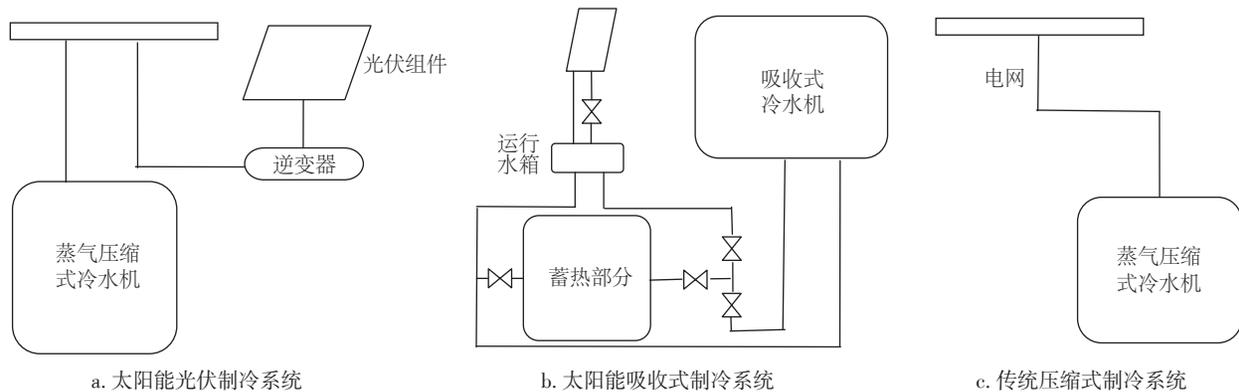


图1 3种制冷系统的基本结构图

Fig. 1 Basic layout configuration of three cooling systems

1.1 太阳能光伏制冷系统

目前,大装机量的光伏发电系统普遍采用并网形式,即光伏系统发出的电直接传输到电网。故本文以并网型太阳能光伏制冷系统为分析对象。其结构为:将光伏阵列通过逆变器连接到电网,且冷水机也接入电网。其中,太阳电池选择价格较低的多晶硅太阳电池,冷水机为蒸汽压缩式冷水机。

太阳能光伏制冷系统的运行方式:光伏系统发出的直流电经过逆变器的转换,形成交流电,再传输给电网,同时由电网为冷水机组供电。

1.2 太阳能吸收式制冷系统

应用太阳能吸收式制冷系统时,国内多采用真空管集热器与单效溴化锂吸收式冷水机的组合^[7]。在真空管集热器中,全玻璃真空管集热器虽便宜,但承压性不好,易损坏,热管式真空管集热器是更合适的选择。故本文所分析的太阳能吸收式制冷系统,结构为:单效溴化锂吸收式冷水机与热管式真空管集热器通过水箱部分相连接。水箱部分包括一个运行水箱与多个蓄热水箱,运行水箱的容积远小于各蓄热水箱的总容积,且运行水箱带有辅助加热设备。由于单效溴化锂机组需求的热水温在100℃以下,故水箱选择非承压水箱。

1 3种制冷系统的基本结构及运行方式

太阳能光伏制冷系统具有多种组合方式,太阳能吸收式制冷系统也是如此。比如,由于太阳能吸收式制冷所用的集热器可分为平板型、真空管型以及聚光型等。本文从实用性、应用的普遍性及经济性等方面综合考虑,从3种制冷形式中各选取1种典型结构的制冷系统进行研究。3种制冷系统的基本结构如图1所示。

太阳能吸收式制冷系统的运行方式为:当集热器的集热量除满足冷水机的需求外还有剩余时,集热器产生的热量经由运行水箱供给冷水机,剩余部分储存在蓄热部分中;当集热器的集热速率满足不了冷水机的需求时,若蓄热部分中存在水温高于某一下限温度的水箱,则由这一蓄热水箱为冷水机供能,否则需要开启辅助加热设备对运行水箱进行辅助加热并给冷水机供能。

1.3 传统蒸汽压缩式制冷系统

传统蒸汽压缩式制冷系统的结构为:将蒸汽压缩式冷水机接入电网。传统蒸汽压缩式制冷系统运行时,由电网直接为冷水机供电。

2 制冷系统的能耗模拟方法

2.1 选择模拟地点

进行制冷系统的能耗及经济性模拟时,需要明确应用制冷系统的特地点。为了使地点的选择具有代表性,本文从太阳能资源及制冷需求量2方面考虑,选取合肥、成都和海口3个地区进行分析。从太阳能资源来看,成都属于中国各地区中太阳能资源最少的地区;而合肥与海口的太阳能资源相近,属于太阳能资源中等的地区。从制冷需求来看,3个地区均属于制冷需求较大

的地区,其中合肥与成都的制冷需求相近,海口的制冷需求量大。

2.2 建筑冷负荷模拟

为了便于比较,需要为3种制冷系统的制冷能力确定统一标准。本文选取的统一标准为:3种空调制冷系统均可满足同一栋办公楼的制冷需求。故模拟过程中,先对办公楼的冷负荷进行模拟,进而设计出适合此建筑的制冷系统的额定制冷量。

首先,假想3所办公楼分别地处合肥、成都和海口。假设3所建筑内的房间总面积均为7000 m²,3所办公楼每日的制冷时间均为08:00~18:00。假设合肥与成都的制冷日期为6月1日至9月30日,海口的制冷日期为4月1日至10月31日。利用EnergyPlus对3所建筑的冷负荷进行模拟。利用EnergyPlus自带的空调系统设计功能,分别设计出3所建筑制冷系统的额定制冷量,并以此作为文中所分析的制冷系统的额定制冷量。为便于分析,在设计制冷系统的额定制冷量时,通过对3所建筑内用电设备的散热速率在合理范围内进行调整,使得3所建筑制冷系统的额定制冷量均为844 kW。

2.3 3种制冷系统的能耗模拟

首先,对制冷系统所用冷水机的COP进行模拟。其中,传统压缩式制冷系统与光伏制冷系统所用的冷水机均为蒸气压缩式冷水机;太阳能吸收式制冷系统所用的冷水机为溴化锂单效吸收式冷水机。

蒸气压缩式冷水机的COP与环境温度的关系式如式(1)^[4]所示,溴化锂单效吸收式冷水机的COP与环境温度的关系式如式(2)^[4]所示:

$$COP_{vc} = 5 \times (-0.03647T_a + 2.271) \quad (1)$$

$$COP_{ab} = 0.7 \times [-0.05046(T_a + 4) + 2.472] \quad (2)$$

式中, T_a ——环境温度, °C。

2.3.1 传统蒸汽压缩式制冷系统的能耗模拟

传统蒸汽压缩式制冷系统的耗电功率:

$$P_{vc} = \frac{Q_0}{COP_{vc}} \quad (3)$$

式中, Q_0 ——建筑冷负荷, W。

利用EnergyPlus提供的标准年气象数据,并用Python编程模拟,得出不同时刻的冷水机耗电功率,并由此计算出冷水机每年的总耗电量。

2.3.2 太阳能光伏制冷系统的能耗模拟

太阳能电池的光电转换效率,太阳能电池的温度,太阳能电池外各层的透过率如式(4)~式(6)所示:

$$\eta_{pv} = \tau_{pv} \eta_0 [1 - 0.0045(T_{cell} - 25)]^{[8]} \quad (4)$$

$$T_{cell} = T_a + 0.03G^{[9]} \quad (5)$$

$$\tau_{pv} = \tau_{pv0} \left[1 - 0.1 \times \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

式中, τ_{pv} ——太阳能电池外各层的透过率; η_0 ——标准测试条件下太阳能电池的效率,参照天合光能有限公司TSM-PD05型多晶硅光伏组件的产品资料,取 $\eta_0 = 16.5\%$; T_{cell} ——太阳能电池温度, °C; T_a ——环境温度, °C; G ——太阳光在单位面积光伏板面上的辐照强度, W/m²; τ_{pv0} —— τ_{pv} 在太阳能电池平面上的辐射入射角为0°时的取值,取0.81^[8]; θ ——光伏板平面上的辐射入射角, (°)。

假设太阳能电池水平放置,则光伏板倾角为0°,入射角的余弦值由式(7)计算。考虑到逆变器的转换效率 η_i ,光伏系统的实际发电功率由式(8)计算:

$$\cos \theta = \sin \delta \times \sin \phi + \cos \delta \times \cos \phi \times \cos \omega \quad (7)$$

$$P_{pv} = \eta_i \eta_{pv} G S_{pv} \quad (8)$$

式中, δ ——赤纬角; ϕ ——纬度; ω ——时角; η_i ——逆变器的效率,取90%^[3]; S_{pv} ——光伏板面积,利用EnergyPlus提供的设计日的天气数据,根据设计日中光伏发电总量满足此日的制冷需求,计算出所需光伏板面积。

由于光伏制冷系统所用的冷水机与传统蒸气压缩式制冷系统相同,故其冷水机的耗电功率等于 P_{pv} 。

利用EnergyPlus提供的标准年气象数据,并用Python编程模拟,得出不同时刻的冷水机耗电功率及光伏发电功率,并由此计算出冷水机每年的总耗电量及光伏每年的总发电量。

2.3.3 太阳能吸收式制冷系统的能耗模拟

对于热管式真空管集热器,光热转换效率如式(9)^[10],集热器的集热速率如式(10)所示:

$$\eta_{ab} = 0.735 - \frac{1.96(T_m - T_a)}{G} \quad (9)$$

$$q_{col} = \eta_{ab} G S_{ab} \quad (10)$$

式中, T_m ——集热器内热管的温度, °C; T_a ——环境温度, °C; S_{ab} ——集热器面积, m²。同样,利用EnergyPlus提供的设计日的天气数据,根据设计日中集热器内热水的净总得热量满足此日的制冷需求,计算出所需集热器面积。

溴化锂单效吸收式冷水机的耗电功率:

$$P_{ab} = \frac{Q_0}{COP_{ab}} \quad (11)$$

对于蓄热部分,取蓄热水箱的总容积与集热器面积

的比为 $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^2$, 计算出蓄热水箱的容量^[11]。

为简化计算, 将蓄热部分看做一个整体, 假定其内水温度分布均匀, 当集热器集热速率大于冷水机的需求时, 蓄热部分的能量平衡方程如式(12)所示; 蓄热水箱的表面散热速率如式(13)所示:

$$m_2 c \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_{\text{col}} - P_{\text{ab}} - q_s \quad (12)$$

$$q_s = UA_s(T_s - T_a) \quad (13)$$

式中, c ——水的比热容, 取 $4200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_s ——蓄热部分内水的温度, $^{\circ}\text{C}$; t ——时间变量, s ; q_s ——蓄热部分水箱的表面散热速率, W ; U ——蓄热水箱外表面与环境间的换热系数, 对于自然对流情况, 取 $U=0.72 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[12]; A_s ——蓄热水箱外表面积, m^2 ; T_a ——环境温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

当集热器的集热速率小于冷水机的需求且蓄热水箱中水温低于 $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 需要辅以燃气加热来维持运行水箱为冷水机供水的温度。相对于蓄热水箱, 运行水箱内水的质量和表面积较小, 故忽略其表面散热及其内水的热容量, 辅助燃气供能速率为:

$$q_{\text{gas}} = P_{\text{ab}} - q_{\text{col}} \quad (14)$$

利用 EnergyPlus 提供的标准年气象数据, 并用 Python 编程模拟, 得出不同时刻的辅助燃气消耗速率, 并由此计算出每年辅助燃气消耗总量。

2.4 经济性评估方法

每年等额支付的总成本如式(15)所示, 根据费用年值法, 初始投资的年等额支付成本如式(16)所示:

$$T = A + R \quad (15)$$

$$A = (A_1 + A_2) \frac{(1+i)^m i}{(1+i)^m - 1} \quad (16)$$

式中, A ——初始投资的年等额支付成本, 万 ¥ ; R ——每年的运营成本, 万 ¥ ; A_1 ——冷水机组的价格, 不同型号的吸收式冷水机与压缩式冷水机的价格分别见表1和表2, 由于文中3种空调系统额定制冷量的计算结果为 8444 kW , 故以型号为 16JLR024A 与 30XW0902 的冷水机价格作为文中计算时所用的吸收式与压缩式冷水机价格; 对于太阳能吸收式制冷系统, A_2 为太阳能集热系统的价格与蓄热水箱价格之和, 根据市场调查, 每平方米热管式真空管集热器的价格约 760 ¥ , 每立方米容积的蓄热箱价格约 650 ¥ ; 对于光伏制冷系统, A_2 为包含太阳电池组件、逆变器、控制器在内的成套光伏发电系统的价格, 根据市场调查, 每千瓦装机量的光伏发电系统价格约 4000 ¥ , 对应多晶硅光伏板面积约 6.7 m^2 ; i ——部门内部的标准收益率, 对于住户自用

设备, i 为储蓄利息, 根据中国银行 2015 年 10 月起执行的储蓄利率, i 取 2.75% ; m ——设备使用年限, 取 20 a 。

表1 开利吸收式冷水机价格

Table 1 Prices of carrier absorption chillers

机组型号	额定制冷量/kW	价格/万 ¥
16JLR011A	388	42.30
16JLR024A	844	58.60
16JLR038A	1336	830.00

表2 开利蒸汽压缩式冷水机价格表

Table 2 Prices of carrier vapor-compression chillers

机组型号Z	额定制冷量/kW	价格/万 ¥
30XW0352	369.7	18.50
30XW0902	856.6	42.00
30XW1402	1448.2	63.35

由于运营成本中主要为能源消耗的成本, 故以能源消耗成本近似运营成本。其中, 计算光伏制冷的运营成本时, 还要考虑卖电及光伏补贴的收益。

2.4.1 传统蒸汽压缩式制冷的年运营成本

对于传统蒸汽压缩式制冷系统, 年运营成本为:

$$R_{\text{tr}} = E_{\text{tr}} p_1 \quad (17)$$

式中, E_{tr} ——传统蒸汽压缩式制冷系统每年运行期间的总耗电量, kWh ; p_1 ——每度电的价格, 取各城市的商业用电价格。

2.4.2 太阳能光伏制冷的年运营成本

光伏并网有“全额上网”及“自发自用, 余电上网”2种模式。“全额上网”模式即光伏系统发出的电全部以光伏上网标杆电价卖给电网; “自发自用, 余电上网”模式即光伏系统发出的电一部分用于满足用户的用电需求, 剩余部分以当地脱硫煤上网标杆电价卖给电网, 并且此种模式下光伏系统发出的每度电都享受国家光伏补贴。在市级光伏补贴的规定年限内, 2种模式下光伏系统发出的电均可享受市级光伏补贴。将“全额上网”及“自发自用, 余电上网”2种模式分别记为模式1、模式2, 具体计算方法如下:

并网模式1下, 光伏制冷系统的年运营成本:

$$R_{\text{pvt1}} = E_1 p_1 - E_2 (p_2 + p_5) \quad (18)$$

式中, E_1 ——模式1下每年消耗的来自电网的电能总量, kWh ; E_2 ——每年制冷运行期间的总发电量, kWh ; p_2 ——光伏标杆上网电价; p_5 ——市级光伏补贴的折算价格, 折算方法如下: 市级光伏补贴的年限为 k 年, 为方便计算, 假设光伏系统每年发电量相同, 将 k 年的光

伏补贴平摊到 20 a 的设备使用年限中,则市级光伏补贴的折算价格:

$$p_5 = \frac{kp_6 E_2}{20E_2} \quad (19)$$

式中, p_6 ——实际的市级光伏补贴价格。

并网模式 2 下光伏制冷系统的年运营成本:

$$R_{pv2} = -(E_2 - E_1)p_3 - E_2(p_4 + p_5) \quad (20)$$

式中, p_3 ——当地脱硫煤机组标杆上网电价; p_4 ——国家光伏补贴的价格。

2.4.3 太阳能吸收式制冷的年运营成本

对于太阳能吸收式制冷系统,能源消耗分天然气消耗与电能消耗 2 部分。由于太阳能吸收式制冷系统辅助电能的消耗量占辅助能源总消耗量的比例很小,故忽略电能消耗。则年运营成本和每年辅助供能消耗天然气如式(21)和式(22)所示:

$$R_{ab} = V_g p_g \quad (21)$$

$$V_g = \frac{E_g}{q_g \eta_g} \quad (22)$$

式中, V_g ——每年消耗的天然气体积, m^3 ; p_g ——天然气价格,取各城市的商业用天然气价格; E_g ——太阳能吸收式制冷系统每年需要的天然气辅助供能总量, MJ ; q_g ——天然气的热值,取 $35 MJ/m^3$; η_g ——天然气的燃烧效率,取 $0.8^{[12]}$ 。

3 个地区的各项能源价格如表 3 所示。

表 3 各项能源价格

Table 3 Prices of energy

能源	合肥	成都	海口
商业通电单价/元· kWh^{-1}	0.7793	0.7860	0.8787
商业用天然气单价/元· m^{-3}	3.30	2.98	3.90
脱硫煤上网标杆电价/元· kWh^{-1}	0.3844	0.4012	0.4298
光伏上网标杆电价/元· kWh^{-1}	0.85	0.75	0.85
国家光伏补贴价格/元· kWh^{-1}	0.42	0.42	0.42
补贴年限/a	20	20	20
市级光伏补贴价格/元· kWh^{-1}	0.20	—	—
补贴年限/a	6	—	—

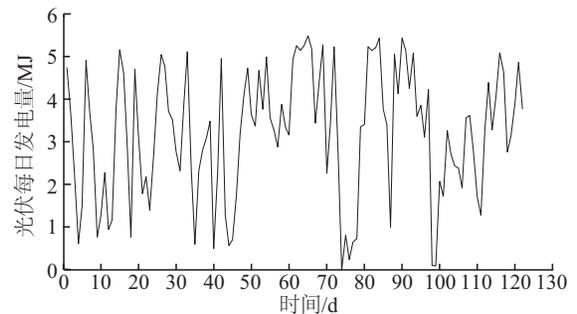
3 结果与分析

3.1 能耗模拟结果

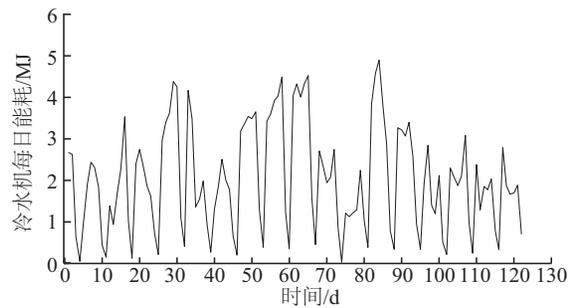
以合肥地区制冷系统的能耗模拟结果为例进行分析。图 2、图 3 分别为合肥地区太阳能光伏制冷系统、

太阳能吸收式制冷系统的能耗模拟结果。图中的横坐标表示 6 月 1 日至 9 月 30 日内的天数。

从模拟结果中可看出,在 6 月初和 9 月末,冷水机的能耗相对较少,因为在此期间合肥地区的气温相对较低,建筑冷负荷较小;而 6 月初与 9 月末的期间内,光伏发电和集热器集热的效果并不比 7、8 月份差,此期间光伏制冷系统每日可净生产较多电能,太阳能吸收式制冷系统则只需要少量的辅助燃气供能。对于 7、8 月份,总体来看冷水机的能耗较大,但也有冷水机能耗很低的时段,这主要由于此期间合肥处于雨季,气温与太阳辐射强度均较低,建筑冷负荷较小;从光伏发电与集热器集热情况也可以看出,雨季内光伏发电量与集热器集热量很少。



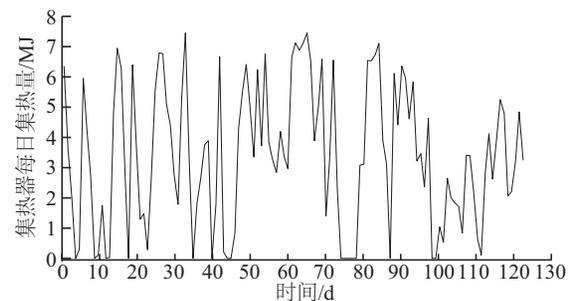
a. 光伏每日发电量



b. 冷水机每日能耗

图 2 合肥光伏制冷系统的能耗模拟结果

Fig. 2 Results of energy consumption simulation of the PV cooling system in Hefei



a. 集热器每日集热量

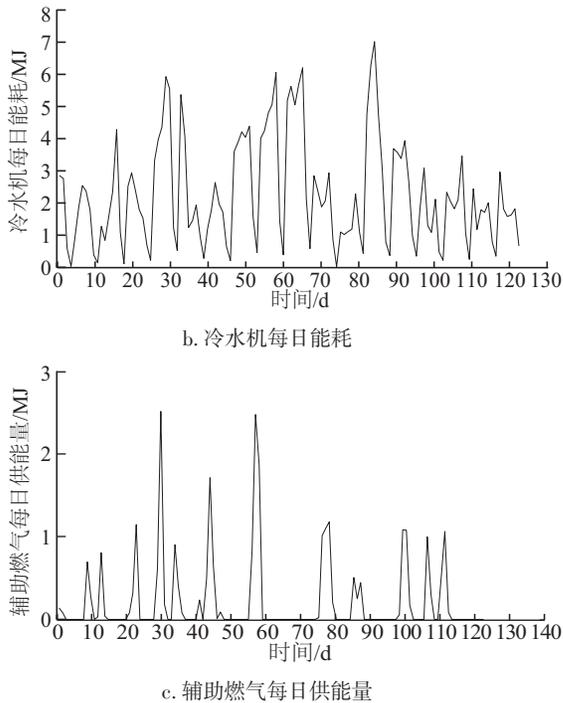


图3 合肥地区太阳能吸收式制冷系统的能耗模拟结果

Fig. 3 Results of energy consumption simulation of solar absorption cooling system in Hefei

对比光伏制冷与太阳能吸收式制冷的能耗情况可知,吸收式冷水机的能耗功率要大于压缩式冷水机。这主要是由于单效吸收式冷水机的 COP 远小于压缩式冷水机。当然,2种冷水机的 COP 差异较大,这与2种冷水机消耗能源的品位不同有关。压缩式冷水机消耗的是电能,吸收式冷水机消耗的主要是热能,而电能相对于热能来说是品位更高的能源。另外,由于文中的办公楼只在日间有制冷需求,且太阳能吸收式制冷系统带有足够大的蓄热部分,故制冷期间只消耗相对少量的燃气。

其他关键能耗模拟结果如表4所示。

表4 模拟结果表

Table 4 Simulation results

指标	合肥	成都	海口
3种系统的额定制冷量/kW	844	844	844
光伏板面积/m ²	2248	2649	2962
光伏制冷的年耗电量/kWh	68756	50601	137146
每年制冷期间光伏发电量/kWh	108614	86947	215350
全年光伏发电量/kWh	306305	248447	362828
集热器面积/m ²	4249	4233	4391
蓄热水箱容积/m ³	170	169	176
年辅助燃气消耗量/m ³	9537	11212	20157
传统压缩式制冷年耗电量/kWh	68756	50601	137146

3.2 经济性分析结果

3.2.1 设备成本分析结果

3种制冷系统的设备成本如图4所示。从图中可看出,不同地区中同一种制冷方式所用设备成本的差异不大。更明显的是,3个地区中太阳能吸收式制冷系统的设备成本均为最高,传统压缩式制冷系统的设备成本均为最低,且3种制冷系统设备成本的差距较大。

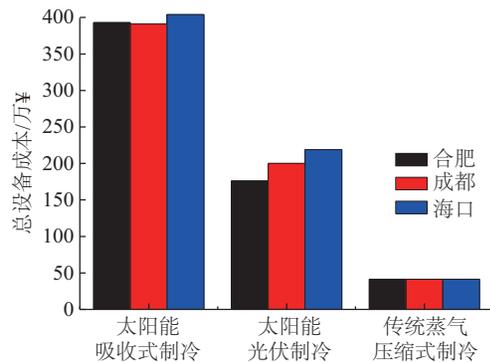


图4 3种制冷系统设备总成本

Fig. 4 Equipment costs of three cooling systems

图5为合肥地区太阳能吸收式制冷系统与光伏制冷系统的各主要部件成本占设备总成本的百分比。从图5中可看出,太阳能吸收式系统的设备成本中,集热器占比最大;而光伏制冷系统的设备成本中,光伏发电系统占比最大。可推断,太阳能集热器、太阳能光伏组件价格的变化将分别对太阳能吸收式制冷、太阳能光伏制冷的经济性产生较大影响。

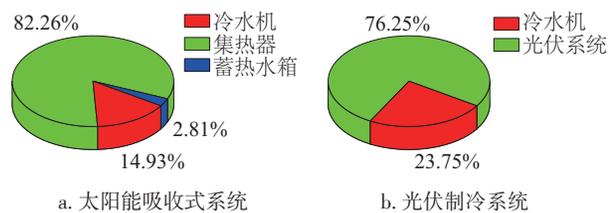


图5 合肥地区制冷系统各主要部件成本占设备总成本的百分比

Fig. 5 Percentages of costs of major system units from equipment cost in Hefei

3.2.2 年制冷成本分析

进行年制冷成本的比较时,首先将光伏制冷与太阳能吸收式制冷进行比较。为便于比较,在计算光伏制冷的年成本时,只计入光伏系统在制冷期间的发电量。同样,也只考虑集热器在制冷期间的集热量。图6分别为合肥、成都、海口3个地区的制冷年成本。图中,“光伏制冷模式1”表示“全额上网”模式,“光伏制冷

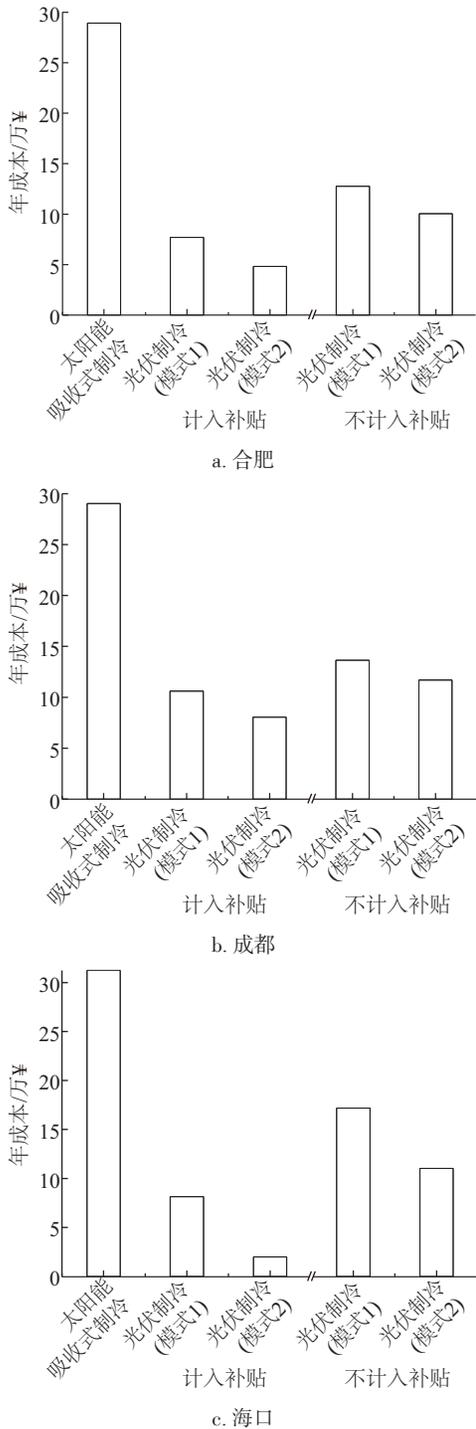


图6 光伏制冷系统与太阳能吸收式制冷系统的成本对比
 Fig. 6 Costs comparison of PV cooling system and solar absorption cooling system

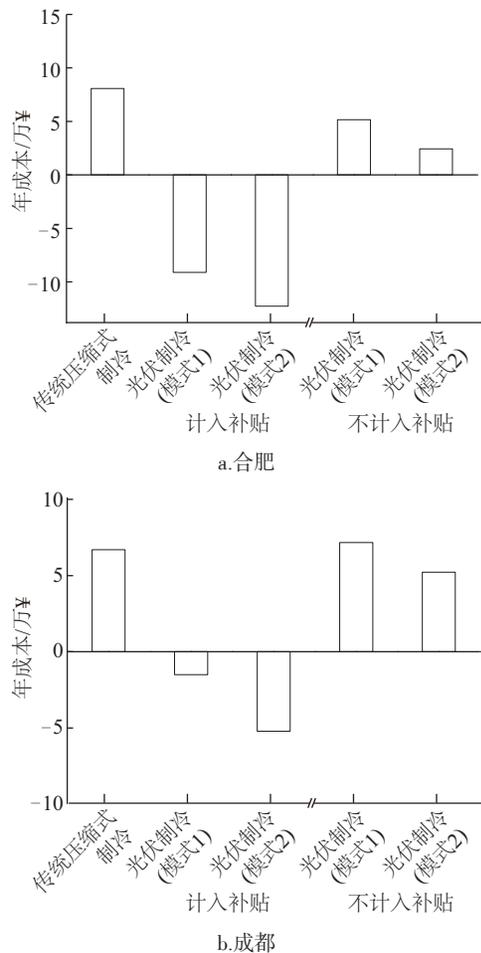
模式2”表示“自发自用,余电上网”模式。“计入补贴”是指计入当前的各项光伏补贴政策。对于“自发自用,余电上网”模式,“不计入补贴”即指不计入各级光伏补贴;对于“全额上网”模式,“不计入补贴”是指不计入各级光

伏补贴,且假设光伏标杆上网电价为当地脱硫煤上网电价。

计入光伏补贴时,在3个地区中,太阳能吸收式制冷的年成本均远高于光伏制冷。在“全额上网”模式下,即使光伏标杆上网电价降到脱硫煤上网电价,且不计入光伏补贴,光伏制冷的经济性仍好于太阳能吸收式制冷;在“自发自用,余电上网”模式下,即使不计入光伏补贴,光伏制冷的经济性仍好于太阳能吸收式制冷。这说明,即使无国家对光伏产业的扶植政策,光伏制冷相较于太阳能吸收式制冷仍有很大的经济性优势。

在比较光伏制冷与传统蒸汽压缩式制冷的年成本时,计入光伏在全年各季节的发电量,并假设每年剩余的发电量均上网卖出。图7分别为合肥、成都、海口3个地区的制冷年成本。图中,“光伏制冷模式1”、“光伏制冷模式2”、“计入补贴”与“不计入补贴”的含义与上文所述相同。

计入光伏补贴时,在3个地区中,光伏制冷的经济性不仅好于传统压缩式制冷,且应用光伏制冷会产生较大的经济收益,“自发自用,余电上网”模式的经济收益



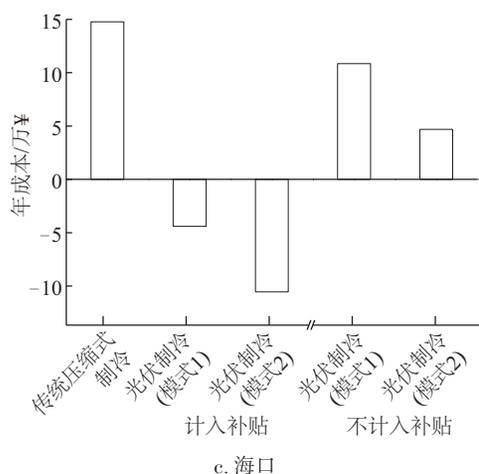


图7 光伏制冷系统与传统压缩式制冷系统的成本对比

Fig. 7 Costs comparison of the PV cooling system and conventional compression cooling system

更为明显。除成都地区外,在“全额上网”模式下,即使光伏标杆上网电价降到脱硫煤上网电价,且不计入光伏补贴,光伏制冷的经济性仍好于传统压缩式制冷;在3个地区中,“自发自用,余电上网”模式下,即使不计入光伏补贴,光伏制冷的经济性均好于传统压缩式制冷。虽然在成都地区,“全额上网”模式下,光伏制冷的经济性稍逊于传统压缩式制冷。以上结果说明,即使没有国家对光伏产业的扶植政策,光伏制冷的经济性仍好于传统压缩式制冷。表5给出经济性分析结果的汇总。

表5 经济性分析结果汇总

Table 5 Summary of economic analysis results

指标	合肥	成都	海口
光伏制冷的设备成本	居中	居中	居中
光伏制冷的年成本(“全额上网”模式)	最低	最低	最低
光伏制冷的年成本(“自发自用,余电上网”模式)	最低	最低	最低
不计入光伏扶植政策时光伏制冷年成本(“全额上网”模式)	最低	居中	最低
不计入光伏扶植政策时光伏制冷年成本(“自发自用,余电上网”模式)	最低	最低	最低

表5中的“居中”,代表光伏制冷的相应参数介于太阳能吸收式制冷与传统蒸汽压缩式制冷之间;“最低”代表光伏制冷的相应参数低于太阳能吸收式制冷与传统蒸汽压缩式制冷。

以上结果表明,光伏制冷的经济性具有明显优势。

随着光伏组件价格的进一步下降,光伏制冷的经济性优势将会更加明显。若再考虑到光伏制冷系统节约能源、结构简单、便于维护等优点,应用光伏制冷是一种较好的选择。

4 结论

基于合肥、成都、海口地区的实际情况,用数值模拟的方法,对太阳能光伏制冷、太阳能吸收式制冷与传统蒸汽压缩式制冷进行能耗模拟、经济性分析与比较,并得出以下结论:

1)目前在所比较的3个地区,太阳能光伏制冷在“全额上网”与“自发自用,余电上网”2种并网模式下的经济性均优于传统蒸汽压缩式制冷与太阳能吸收式制冷。

2)虽然在成都地区,“全额上网”模式下,光伏制冷的经济性略逊于传统蒸汽压缩式制冷。但即使不考虑中国对光伏产业的各项扶植政策,光伏制冷的经济性仍优于太阳能吸收式制冷与传统蒸汽压缩式制冷。

[参考文献]

- [1] SARBU I, SEBARCHIEVICI C. Review of solar refrigeration and cooling systems[J]. Energy and buildings, 2013, 67: 286-297.
- [2] KIM D, INFANTE F C. Solar refrigeration options-a state-of-the-art review[J]. International journal of refrigeration, 2008, 31(1): 3-15.
- [3] OTANICAR T, TAYLOR R A, PHELAN P E. Prospects for solar cooling-an economic and environmental assessment [J]. Solar energy, 2012, 86(5): 1287-1299.
- [4] MOKHTAR M, ALI M T, BRAUNIGER S, et al. Systematic comprehensive techno-economic assessment of solar cooling technologies using location-specific climate data[J]. Applied energy, 2010, 87(12): 3766-3778.
- [5] FERREIRA C I, KIM D-S. Techno-economic review of solar cooling technologies based on location-specific data [J]. International journal of refrigeration, 2014(39): 23-27.
- [6] NORO M, LAZZARIN R M. Solar cooling between thermal and photovoltaic: An energy and economic comparative study in the Mediterranean conditions[J]. Energy, 2014, 73(14): 453-464.
- [7] 周兴法, 谢应明, 谢振兴. 太阳能单效溴化锂吸收式制冷空调技术研究现状[J]. 流体机械, 2014, 42(7):

- 58-64.
ZHOU X F, XIE Y M, XIE Z X. Research status of solar single-effect lithium bromide absorption refrigeration and air conditioning technology[J]. Fluid machinery, 2014, 42(7): 58-64.
- [8] 易桦. 新型PV-Trombe墙系统的理论与实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
YI H. Theoretical and experimental study of a novel PV-trombe wall system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- [9] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓莹, 等. 太阳能光伏发电技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005, 85-105.
ZHAO Z M, LIU J Z, SUN X Y, et al. Technology and application of solar energy pv generation [M]. Beijing: Science press, 2005, 85-105.
- [10] 何梓年, 蒋富林, 葛洪川, 等. 热管式真空管集热器的热性能研究[J]. 太阳能学报, 1994, 15(1): 73-82.
HE Z N, JIANG F L, GE H C, et al. Study on thermal performances of heat pipe evacuated tubular collectors [J]. Acta energiae solaris sinica, 1994, 15(1): 73-82.
- [11] HUANG Y, QU M, ZHAO F. Economical and environmental assessment of an optimized solar cooling system for a medium-sized benchmark office building in Los Angeles, California [J]. Renewable energy, 2011, 36(2): 648-658.
- [12] 韩崇巍. 太阳能双效溴化锂吸收式制冷系统的性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
HAN C W. Performance Study of a solar double-effect LiBr-H₂O absorption cooling system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.

SIMULATION OF ENERGY CONSUMPTION AND ECONOMIC COMPARISON BETWEEN SOLAR PV COOLING SYSTEM AND OTHER COOLING SYSTEMS

Gao Yuhe, Ji Jie, Zhao Zhi, Guo Zewei, Su Peng

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: This paper makes a simulation of energy consumption of the solar PV solar cooling system, the solar absorption air cooling system and the traditional vapor compression air cooling system based on the conditions of Hefei, Cengdu and Haikou. And then, annual cost method is used to conduct economic analysis of three systems. Two kinds of grid-connect modes, “full power to grid” mode and “self-generated, left power to grid” mode, are discussed when considering the economic performance of the PV cooling system. Finally, the economic performance of three systems are compared. This paper also discusses the economic performance of the PV cooling system in the condition that the PV grid purchase price is equal to the local desulphurized coal grid purchase price and the PV subsidies are ignored. The results show that the economic performance of PV cooling under two kinds of grid-connected modes is better than that of solar absorption cooling and traditional vapor compression cooling. Moreover, even if PV subsidy policies are ignored, the economic performance of PV cooling will also be better than that of solar absorption cooling and traditional vapor compression cooling.

Keywords: PV; refrigeration; economic analysis; annual cost method; simulation of energy consumption