



夏热冬冷地区太阳能 空调系统性能模拟与经济性分析

■ 黄莉^{1*} 宋波² 邓琴琴² 郑荣跃¹

(1. 宁波大学建筑工程与环境学院; 2. 中国建筑科学研究院有限公司)

摘要: 以浙江省宁波市一幢公共建筑为例, 采用 Polysun[®] 软件对小型太阳能光伏和热利用空调系统进行了性能模拟与经济效益分析。研究表明, 光伏与热利用空调系统的节能效果相近, 一次能源的节约率分别为 30.7% 与 30.2%; 而二者的投资回收期相差较大, 光伏空调系统为 6~7 年, 热利用空调系统则超过 20 年。因此, 就太阳能空调系统而言, 光伏技术更适用于夏热冬冷地区, 而热利用技术只有在有大量余热的情况或大中型中央空调系统中应用才具有经济性。

关键词: 太阳能光伏空调系统; 太阳能热利用空调系统; 夏热冬冷地区; 一次能源节约量; 投资回收期

0 引言

近年来, 随着经济的发展与人们生活水平的提高, 建筑能耗也迅速增长。据统计, 我国建筑能耗占社会总能耗的 30% 以上^[1], 其中 50%~60% 的能耗用于建筑的制冷或采暖^[2]。传统的空调系统采用压缩式制冷机, 运行过程中会消耗大量的能源, 加剧了夏季电网的负担, 导致用电高峰期的出现。同时, 传统制冷空调中的工质 CFC8 及其替代产品 R134a 等与臭氧层的破坏、温室效应、全球变暖等环境问题都有关系。因此, 为了适应建筑可持续发展的需求, 制冷界一直在寻求一种新的制冷方式及工质。

太阳能空调技术正是解决上述问题的一种有效途径。该技术在夏季利用太阳能作为主要能源驱动制冷机制冷, 冬季则利用太阳能提供采暖, 可有效降低建筑的制冷与采暖能耗, 是解决太阳能利用和空调节能这一行业困境的重要技术。其

核心优势在于:

1) 充分利用全年的太阳能资源, 可提供夏季制冷、冬季采暖及生活热水。尤其是在夏季, 太阳能辐射越强, 制冷效果越好, 可大幅降低电网负担。

2) 该技术是可再生能源应用技术的提升, 可显著提高太阳能利用率, 实现节能减排。

3) 相比于传统的压缩式空调, 太阳能空调不排放氟利昂, 对于缓和温室效应、全球变暖等环境问题具有重大意义。

当前的太阳能空调技术主要分为两类: 太阳能光伏空调技术与太阳能热利用空调技术, 针对这两类系统已有不少相关的研究成果。其中, Boopathi 等^[3]对居住建筑中采用单效溴化锂制冷机的太阳能空调系统进行了总结, 并发现决定太阳能空调系统经济性的 2 个因素分别是太阳能集热器与储能装置的费用, 以及制冷技术的能效。

收稿日期: 2018-03-21

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题 (2015BAL02B03)

通信作者: 黄莉 (1978—), 博士、副研究员, 主要从事太阳能应用与相变储能技术方面的研究。huangli@nbu.edu.cn



Noro 等^[4]采用 TRNSYS 软件分别对太阳能吸收式制冷空调与显热储能及相变储能相结合的系统进行了模拟和对比分析。研究表明,只有在天然气价格较高或相变材料价格较低时,才能体现太阳能空调与相变储能一体化系统的经济性。Beccali 等^[5]采用生命周期评估方法(LCA)将2类太阳能空调系统(热利用空调与光伏空调)与传统的压缩式制冷机空调进行了对比评估。研究表明,在大多数情况下,采用光伏并网空调的效果最好。Eicker 等^[6]利用 TRANSO 与 INSEL 软件模拟分析了采用传统压缩式制冷机的光伏空调系统和采用溴化锂制冷机的热利用空调系统这两类太阳能空调系统的一次能源消耗量与经济性。模拟结果表明,光伏空调系统比热利用空调系统更为经济。空调系统的初始投资对整套系统的投资回报期与一次能源的节约量有很大的影响。

虽然当前已有不少针对太阳能空调技术的研究,但该技术并未得到广泛的应用,主要原因在于其初始投资较高,且投资回报期长。截止至2014年,全世界范围内仅有1200多套系统建成并运行^[7],且大多数为太阳能热利用空调系统。本文拟在典型的夏热冬冷地区——浙江省宁波市滕头村建成一套太阳能空调系统。为了提高拟建系统的技术经济效益,采用“博日胜”Polysun[®]软件对太阳能光伏与热利用空调系统进行了性能模拟,然后在此基础上比较了两套系统的年收益与投资回报期,并最终确定适用于夏热冬冷地区的太阳能空调技术体系。

1 模拟方法与边界条件设置

1.1 模拟软件

本文采用 Polysun[®] 太阳能系统模拟计算软件对太阳能空调系统进行性能模拟。该软件由瑞士太阳能测试中心 SPF 在总结测试经验的基础上开发,包含太阳能热利用、光伏发电、热泵及太阳能空调4个模块,用于设计或优化建筑的能源系统^[8]。软件以气象统计数据为基础,采用热力

学系统的塞流模拟进行计算^[9-10]。

1.2 宁波市气候条件

宁波市位于夏热冬冷地区,该地区冬季阴冷、夏季湿热,且高温时间持续较长。其中,7月份温度最高,平均温度达到27.6℃;而1月份温度最低,平均温度为6℃。另外,夏热冬冷地区湿度很大,相对湿度一般为75%~80%,宁波市湿度达到了75.6%。因此,宁波地区对夏季制冷与冬季采暖的需求较高,空调用电是建筑能耗中主要的部分。

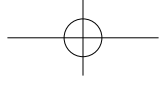
位于夏热冬冷地区的大多数城市属于太阳能资源Ⅳ类地区,年辐射量在1000~1500 kWh/m²之间。宁波市平均全年日照时数为1855.6 h,平均每天的日照时数为5.41 h;年辐射量为1280.5 kWh/m²,为全国平均年辐射量1627.8 kWh/m²的78%;最冷月份为11月~次年3月,总辐射量为378.3 kWh/m²;最热月份为6~9月,总辐射量为559.8 kWh/m²。

1.3 建筑特点

拟安装太阳能空调系统的新建建筑为滕头村老年活动中心。该建筑为南向单层建筑,使用面积为420 m²,室内高度为4.2 m;其中,200 m²的屋顶面积用于安装光伏组件或集热模块,其余屋顶部分用于绿化;建筑内部设置了诊所、办公室、阅览室、棋牌室等。建筑的结构参数如表1所示。

表1 滕头村老年活动中心建筑性能参数

参数		数值
建筑总传热系数 U 值 /W·(m ² ·K) ⁻¹		1.38
外墙的窗墙比 /%	北面	21
	西面	0
	东面	7
	南面	19
窗户类型	窗框	PVC-U
	玻璃	双层玻璃 (5/9/5)
窗户传热系数 U 值 /W·(m ² ·K) ⁻¹		3.0
窗户总太阳透射率 g 值 /-		0.8
换气次数 /hr ⁻¹		1.0



1.4 模拟系统定义

为了便于系统的性能模拟与经济分析,首先定义了1套参照系统和2套太阳能空调系统。其中,2套太阳能空调系统的光伏组件/集热模块阵列总面积均为屋顶最大可用面积 200 m^2 。

1.4.1 参照系统

参照系统定义为热泵中央空调系统,由2套风冷热泵模块机组组成,运行时产生冷水或热水,通过风机盘管向建筑供冷或供热。2台热泵的额定制冷功率分别为 28 kW 与 65 kW ,制热功率分别为 30 kW 与 69 kW 。在模拟过程中,参照系统的制冷 COP 值取 2.82 ,采暖 COP 值取 3.11 。热泵机组运行所需电量由电网直接提供。

1.4.2 太阳能光伏空调系统

该系统采用与参照系统一致的风冷热泵模块机组。如图1所示,热泵系统运行优先采用光伏组件产生的电能,不足时再采用电网供电。若光伏组件所产生的电量高于热泵机组所需电量,则富余的电量并网。该系统由80块光伏组件与1套并网逆变器组成,光伏组件的最大总功率为 20.4 kW ,并网逆变器的最大交流功率为 20.0 kW 。

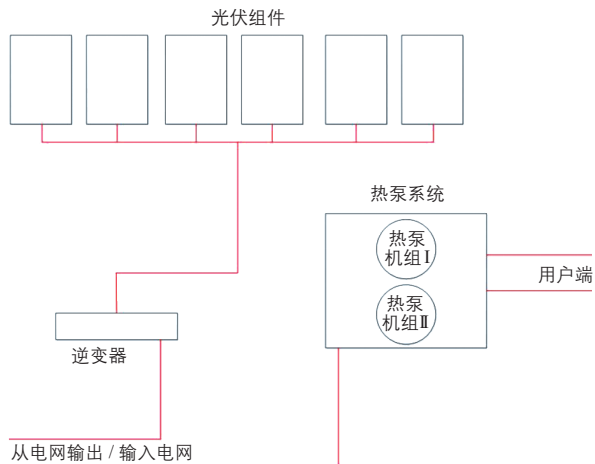
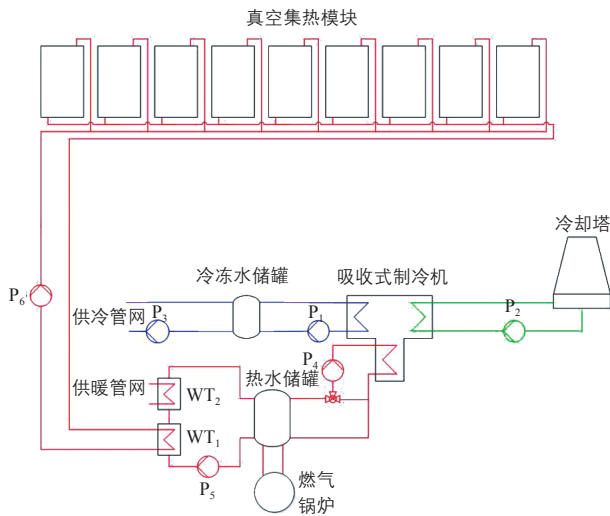


图1 太阳能光伏空调系统示意图

1.4.3 太阳能热利用空调系统

该系统主要由40组真空集热模块、燃气锅炉、溴化锂吸收式制冷机、冷却塔、热水与冷水储罐组成,如图2所示。在夏季制冷时,集热模块利用太阳能产生 $70\sim 95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热水并储存在热

水储罐里,热水驱动制冷机产生 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷冻水并储存在冷水储罐里用于供冷,而制冷机所产生的热量通过冷却塔释放;在冬季采暖时,制冷机关闭,集热模块利用太阳能产生 $50\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热水储存在热水储罐里用于供暖。系统采用燃气锅炉作为辅助系统,在太阳能不足时提供热水驱动制冷机制冷或直接提供热水采暖。系统真空集热模块的总采光面积为 120 m^2 ,制冷机的额定制冷功率为 35 kW ,燃气锅炉的加热功率为 40 kW 。



注:图中P代表水泵,WT代表换热器

图2 太阳能光热空调系统示意图

2 结果与分析

2.1 建筑制冷与采暖能耗

老年活动中心每天的使用时间为 $08:00\sim 20:00$,时长 12 h ,在能耗模拟中仅考虑夏季制冷和冬季采暖需求,不考虑生活热水供应。根据GB 50189-2005《公共建筑节能设计标准》与JGJ 134-2010《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》,将制冷温度设置为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$,采暖温度设置为 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

图3展示了该建筑在宁波市典型气象年逐月制冷/采暖负荷的模拟结果,其中,4月、5月和10月不需要空调。该建筑在夏季的制冷总负荷为 70.16 MWh/a ,在冬季的采暖总负荷为 148.20 MWh/a ,全年总负荷为 218.33 MWh 。根据热泵机组制冷与采暖的 COP 值,参照系统每年用于制冷的耗电量为 24.88 MWh ,用于采暖的

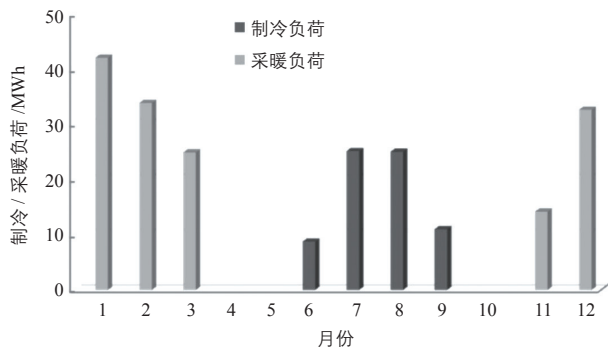
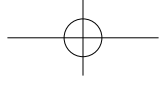


图3 老年活动中心在典型气象年逐月制冷/采暖负荷模拟

耗电量为 47.65 MWh, 合计为 72.53 MWh。

2.2 系统性能模拟结果

太阳能光伏空调系统的模拟结果如表 2 所示。光伏组件的年产电量约为 22.3 MWh, 可覆盖热泵机组全年制冷与采暖所需电量的 30.7%。由图 4 可知,除了不需要空调的 4 月、5 月和 10 月,光伏组件的发电量均小于热泵机组的耗电量。因此,热泵机组每年需另外从电网获取 50.23 MWh 的电量,以覆盖建筑全年的制冷与采暖负荷。

表 2 太阳能光伏空调系统模拟结果

参数	数值
总面积 /m ²	128.4
直流电发电量 $Q_{pvt}/\text{MWh}\cdot\text{a}^{-1}$	23.10
交流电发电量 $Q_{inv}/\text{MWh}\cdot\text{a}^{-1}$	22.28
总额定功率发电机磁场 /kW	20.4
性能系数	80.5
年能量产出 / $\text{MWh}\cdot(\text{kW}_p\cdot\text{a})^{-1}$	1.09
相不平衡 /kVAh	0
无功电能 Q_{invr}/kVarh	0
表观能量 Q_{inva}/kVAh	22280.9

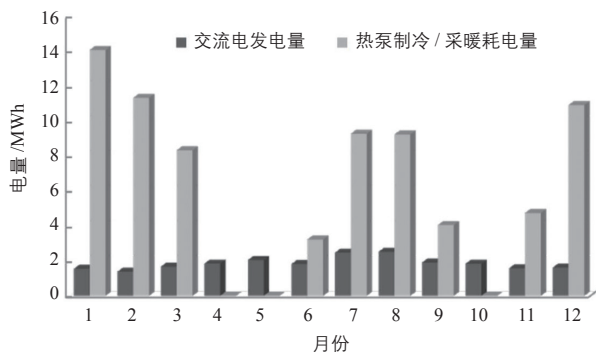


图4 太阳能光伏空调系统逐月交流电发电量与热泵制冷/采暖耗电量

太阳能热利用空调系统的模拟结果如表 3 所示,逐月太阳能保证率如图 5 所示。在夏季 6~9 月,集热系统的得热量最高,平均太阳能保证率为 27.75%;在冬季 11 月~次年 3 月,平均太阳能保证率为 32.8%。因此,全年制冷与采暖的平均太阳能保证率为 30.6%。若太阳能热利用空调系统在春秋季节(4 月、5 月与 10 月)另外提供生活热水,则全年太阳能保证率可以达到 40% 左右。

表 3 太阳能热利用空调系统模拟结果

	参数	数值
系统概况	系统总燃料和电能消耗量 $E_{\text{tot}}/\text{MWh}$	151.5
	总能量输出量 $Q_{\text{use}}/\text{MWh}$	126.3
	系统性能 $(Q_{\text{use}}+E_{\text{inv}})/(E_{\text{aux}}+E_{\text{par}})$	0.83
光热系统概况	集热器面积 /m ²	133
	集热器阵列获得总量 / $\text{MWh}\cdot\text{a}^{-1}$	52.8
	平均太阳能保证率 $SF_{\text{H}}/\%$	30.6
	节省燃料最大量(天然气)/m ³	5535.9
吸收式制冷机	最大节能量 / $\text{MWh}\cdot\text{a}^{-1}$	58.13
	季节性能因子—制冷	0.68
	制冷量产出 / $\text{MWh}\cdot\text{a}^{-1}$	71.78
燃气锅炉	提供发生器热量 / $\text{MWh}\cdot\text{a}^{-1}$	104.82
	功率 /kW	40
	总效率 /%	86.9
	供给系统能量 /MWh	119.6

注: E_{inv} 指系统产生/节约的能量; E_{aux} 指锅炉所消耗的燃料和电能总量; E_{par} 指泵设备所消耗的电能总量

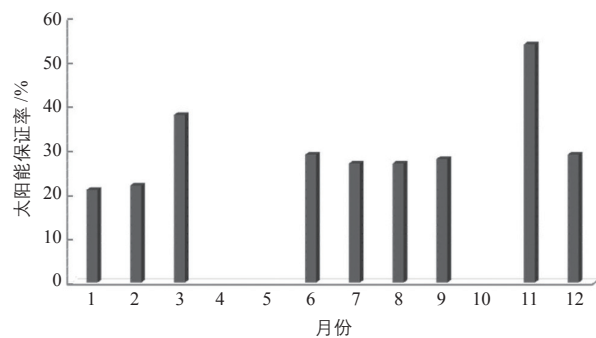
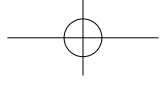


图5 太阳能热利用空调系统逐月太阳能保证率

2.3 一次能源节约量

为了比较两套太阳能空调系统的节能量,所有能源消耗量均转换为一次能源消耗量。电能转



换为一次能源的系数为 0.36，燃气转换为一次能源的系数为 1^[1]。

表 4 展示了两套太阳能空调系统与参照系统相比所节约的一次能源使用量。其中，参照系统年耗电量为 72.53 MWh，转换为一次能源为 201.47 MWh；光伏空调系统年产电量为 22.3 MWh，转换为一次能源为 61.94 MWh，节能率为 30.7%；太阳能热利用空调系统的最大节能量为 58.13 MWh，若该部分热量由燃气锅炉供给，所需燃气量为 60.81 MWh，转换为一次能源为 60.81 MWh，节能率为 30.2%。由此可见，两套系统的一次能源节约量非常相近。

表 4 太阳能光伏与热利用空调系统一次能源节约量

参数 \ 类型	参照系统	光伏空调	热利用空调
一次能源消耗量 /MWh·a ⁻¹	201.47	139.53	140.66
一次能源节约量 /MWh·a ⁻¹	—	61.94	60.81
一次能源节约率 /%	—	30.7	30.2

2.4 经济性分析

两套太阳能空调系统相对于参照系统的增量成本如表 5 所示。其中，参照系统与光伏空调系统均采用 2 套热泵机组，而太阳能热利用空调系统则采用燃气锅炉作为辅助系统，无需热泵机组，因此在计算增量成本时，将热泵机组的费用扣除。

表 5 太阳能光伏与热利用空调系统的增量成本

	光伏空调 / 万元	热利用空调 / 万元
光伏组件/集热模块(含支架)	13.46	26.63
并网逆变器	3.22	—
交流防雷配电柜	0.77	—
吸收式制冷机(含冷却塔)	—	13.71
热水、冷水储罐	—	5.27
控制系统	2.22	10.12
线缆/管道、水泵、阀门、热交换器等配件	0.92	6.86
热泵系统	0	-6.81
锅炉	—	1.20
合计	20.59	56.98

通过计算得出，光伏空调系统的增量成本为 20.59 万元，热利用空调系统的增量成本为 56.98 万元，约为光伏空调系统的 2.8 倍。

图 6 和图 7 分别展示了光伏和热利用空调系统的初始成本组成。其中，光伏组件/集热模块(含支架)为两套系统最主要的费用支出部分，占比分别为 65% 与 42%。在热利用空调系统中，制冷机与控制系统也是费用的主要组成部分，占比分别为 21% 与 16%，仅次于集热模块。

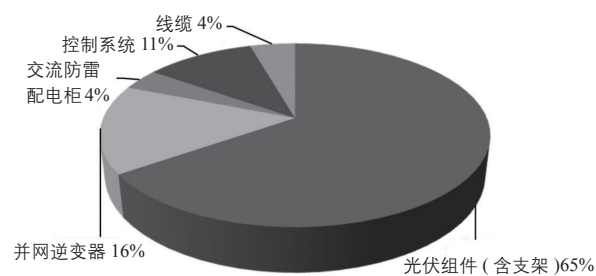


图 6 太阳能光伏空调系统费用组成图

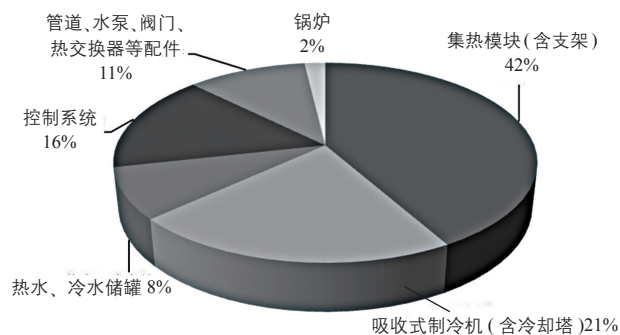


图 7 太阳能热利用空调系统费用组成图

当前，国家对可再生能源利用的资助主要在光伏系统。假设太阳能光伏与热利用空调系统的效率每年下降 0.8%~1.0%，在 20 年的使用周期内，光伏空调系统的总发电量为 408.98 MWh，按照国家商业电价 1 元/kWh、分布式光伏发电补贴 0.42 元/kWh 计算，可得出光伏空调系统的年收益，如图 8 所示。从图中可以看出，光伏空调系统到第 7 年的总收益为 22.94 万元，而系统的增量成本为 20.59 万元。因此，太阳能光伏空调系统的投资回报期约为 6~7 年。

另一方面，由于国家的新能源补贴仅针对于分布式光伏系统，热利用系统无额外补助，因此，

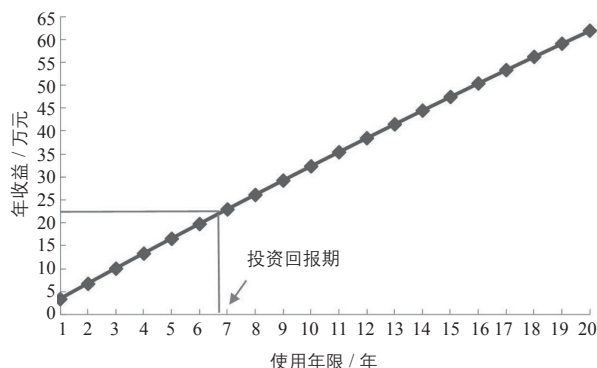


图8 太阳能光伏空调系统年收益及投资回收期

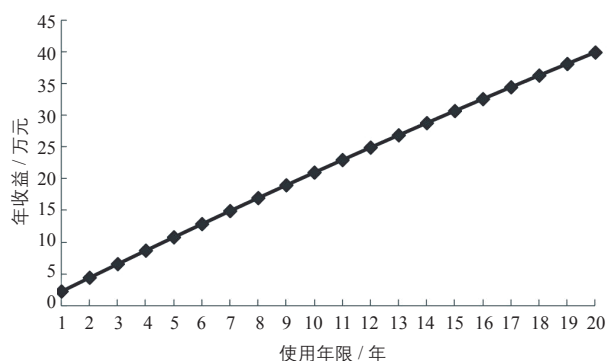


图9 太阳能热利用空调系统年收益

其收益仅来源于所节约的电费。如图9所示，在20年的使用周期内，热利用空调系统的总收益约为40万元，而系统的增量成本为56.98万元。因此，太阳能热利用空调系统的投资回收期大于20年。

虽然太阳能热利用空调系统的初始投资比较高，且当前的投资回收期大于20年，但其作为太阳能的高级综合利用形式，可以全年利用太阳能提供夏季制冷、冬季采暖及生活热水，仍然是未来值得大力推广的太阳能应用技术之一。而且，随着中高温集热器与中小型溴化锂制冷机的产业化推广，在不久的将来，该类系统的初始成本有望大幅降低。

就当前的经济技术条件而言，适用于安装太阳能热利用空调系统的情况有以下2种：

1) 拥有大量余热和废热的用户。从太阳能热利用空调系统的成本分析可以得出，集热模块的成本所占比例最大，且随着制冷功率的增加而呈线性增长。如果用户拥有大量的余热和废热，比

如印染厂、纺织厂、造纸厂、钢铁厂等，可以利用余热和废热产生热水来驱动制冷机，这样可以相应减少集热模块的面积，从而降低初始成本，缩短投资回收期。

2) 大中型中央空调系统。制冷机(含冷却塔)与控制系统所占的增量成本比例仅次于集热模块，分别为21%与16%，然而，这部分的费用并不是随着制冷功率的增加而呈线性增长，而是增长越来越慢。例如，制冷功率分别为115 kW、300 kW、500 kW及1000 kW的溴化锂吸收式制冷机的价格分别为18.7万元、32万元、42万元及64万元。因此，在中大型中央空调系统中，采用太阳能热利用空调技术的经济性比较好。

3 结论

本文以浙江省宁波市滕头村新建老年活动中心为示范建筑，采用 Polysun[®] 软件分别对太阳能光伏与热利用空调系统进行了性能模拟，并在此基础上进行了经济效益分析。研究结果表明，相对于采用热泵机组的参照系统，太阳能光伏与热利用空调系统的节能量非常相近，一次能源节能率分别为30.7%与30.2%。然而，由于热利用空调系统的增量成本较高，为光伏空调系统的2.8倍，且国家新能源补助仅针对分布式光伏系统，因此，两套系统的投资回收期相差较大；其中，光伏空调系统的投资回报期为6~7年，而热利用空调系统的投资回收期大于20年。在当前的经济技术条件下，太阳能光伏空调技术更适用于夏热冬冷地区的建筑应用；而太阳能热利用空调技术的推广则必须通过国家政策的推动，以及太阳能中高温集热技术的提升与中小型制冷机的规模化生产才能得以实现。

参考文献

- [1] Zhao H X, Frédéric Magoulès. A review on the prediction of building energy consumption[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, (4): 3586 - 3592.
- [2] 杨晓敏. 上海地区公共建筑能耗现状与节能分析[D]. 上海:

(转第70页)

表 3 IAT 和 OAT 型添加剂腐蚀年限对比

试片 名称	规格 /mm	表面积 /mm ²	密度 /mg·mm ⁻³	腐蚀量要求 /mg·片 ⁻¹		年腐蚀量 /mg		0.2 mm 板材完全金属 腐蚀时间 / 年	
				OAT 型	IAT 型	OAT 型	IAT 型	OAT 型	IAT 型
紫铜	(50×25×2)×7	2767	8.92	±5	±10	130	261	37.9	18.9
黄铜	(50×25×2)×7	2767	8.50	±5	±10	130	261	36.1	18.1
铸铁	(50×25×4)×7	3111	7.40	±5	±10	130	261	35.3	17.7
304 不锈钢	(50×25×2)×7	2767	7.93	±5	±10	130	261	33.7	16.8
铝	(50×25×3)×7	2939	2.70	±10	±30	261	782	6.1	2.1
锌	(50×25×2)×7	2767	7.14	±5	±10	130	261	30.3	15.2
焊料	(50×25×4)×7	3111	7.82	±10	±30	261	782	18.7	6.2

注：规格是指 (长×宽×厚)×内孔径

添加剂防腐能达到 10 年以上，IAT 型添加剂也能防腐 5 年以上。但是在家用电器中，IAT 型添加剂中亚硝酸盐的毒性是其最大的弱点，坚决不能使用。

5 结论

使用二元醇制备的传热介质的毒性，若根据 LD50>10000 mg/kg 判断，按照《化学品毒性鉴定技术规范》评价为低毒物^[8]。通过实验和相关数据表明，二元醇型传热介质使用 OAT 型添加剂技术能有效地提高防腐年限，降低产品毒性，顺应国家家电产品长效、低毒、环保的要求，值得在传热介质中推广使用。

参考文献

[1] 曾初升. 316L 不锈钢腐蚀性能电化学研究 [D]. 昆明：昆明理工大学，2006.
[2] 周建军，李庆年，冷观俊，等. 汽车冷却液 [M]. 北京：化学工业出版社，2003.
[3] 汪宇. 全有机型车用发动机冷却液缓蚀剂配方的研究 [D]. 武汉：华中科技大学，2007.
[4] 金属腐蚀 [EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/153868.htm>, 2018-03-21.
[5] 陆洪彬. 不锈钢表面高性能纳米防护涂层研究 [D]. 南京：南京大学，2011.
[6] 吴良彪，甘黎明，杨惠玲. 多功能环保型发动机冷却液对多金属腐蚀性的研究 [J]. 兰州石化职业技术学院学报, 2008, 8(1): 5 - 7.
[7] 万书晓，Roberto Ghini，向晖，等. 机动车发动机冷却液 [M]. 北京：中国石化出版社，2014.
[8] 河北省疾病预防控制中心. 太阳能空调环保设备专用导热冷却液 [R]. 石家庄，2017. 太阳能

(接第 76 页)

同济大学，2007.
[3] Boopathi R V, Shanmugam V. A review and new approach to minimize the cost of solar assisted absorption cooling system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(9): 6725 - 6731.
[4] Noro M, Lazzarin R M, Busato F. Solar cooling and heating plants: An energy and economic analysis of liquid sensible vs phase change material (PCM) heat storage[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 39: 104 - 116.
[5] Beccali M, Cellura M, Finocchiaro P, et al. Life cycle performance assessment of small solar thermal cooling systems and conventional plants assisted with photovoltaics[J]. Solar Energy, 2013, 104: 93 - 102.
[6] Eicker U, Colmenar-Santos A, Teran L, et al. Economic evaluation of solar thermal and photovoltaic cooling systems through simulation in different climatic conditions: An analysis in

three different cities in Europe[J]. Energy & Buildings, 2014, 70: 207 - 223.
[7] Mugnier D. State of the art for solar thermal or PV cooling and refrigeration[A]. Solar Heating and Cooling Program SHC 2014 Conference[C]. Beijing, 2014.
[8] Klein S, Beckmann B, Duffie J. Trnsys, a transient system simulation program[Z]. Users manual, 2006, 16.
[9] Duffie J, Beckman W. Solar engineering of thermal processes(3rd ed. Hoboken)[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
[10] Witzig A, Foradini F, Probst M C M, et al. Simulation tool for architects[A]. Proceeding of the 2009 CISBAT international conference[C]. Lausanne, 2009.
[11] Eicker U, Pietruschka D. Design and performance of solar powered absorption cooling system in office buildings[J]. Energy & Buildings, 2009, (41): 81 - 91. 太阳能