

# 不同最大可达新风比对商场建筑中空气侧经济器节能效果的影响研究

王秋润<sup>1</sup>, 潘毅群<sup>1</sup>, 黄治钟<sup>2</sup>

(1.同济大学机械与能源工程学院,上海 201804 2.同济大学中德工程学院,上海 201804)

**摘要:** 空气侧经济器(Air-side economizer)由于其具有节能效果显著、可提高室内空气品质等优点越来越受到行业内人们的关注。然而在我国,应用空气侧经济器的空调系统的实际可以达到的最大新风比往往远达不到全新风工况的100%。选择北京、上海、成都、西安和哈尔滨5个城市,利用eQUEST能耗模拟软件针对1栋商场建筑的典型模型,对焓差控制、温差控制和固定温度控制3种控制策略下的空气侧经济器在不同可达新风比下的节能量进行了模拟计算,并对计算结果进行对比,分析了不同气候、不同控制策略下,空气侧经济器的节能效果对最大可达新风比的敏感性。

**关键词:** 空气侧经济器; 新风免费供冷; 最大新风比; 商场建筑; 能耗模拟

**中图分类号:** TU831.3<sup>1</sup> **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-7237(2013)11-0013-08

## Impact of Different Ratio of Maximum Outdoor Air to Supply Air on the Energy Saving of Air-side Economizer Applied in Typical Shopping Mall

WANG Qiu-jian<sup>1</sup>, PAN Yi-qun<sup>1</sup>, HUANG Zhi-zhong<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2.Sino-German College of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** As air-side economizer has a significant energy saving rate, the ability to improve IAQ and other advantages, it is being paid more and more attention by industry insiders. However, many air-side economizers implemented in China could not achieve 100% ratio of maximum introduced outdoor air to total supply air. Therefore, this study employed the dynamic building energy simulation program eQUEST to compute the energy savings of a prototype shopping mall model applying economizers under dual-enthalpy, dual-temperature and fixed temperature control strategies in Beijing, Shanghai, Chengdu, Xi'an and Harbin to analyze how the energy-saving ratio(ESR) of economizer responds to variable ratio of maximum outdoor air to supply air.

**Keywords:** air-side economizer; free cooling; maximum ratio of outdoor air to supply air; shopping mall; energy simulation

## 0 引言

随着人们生活水平的提高以及对于能源危机和环境问题的不断重视,在提高人居环境舒适度的同时,建筑节能也日益受到人们的关注。对于像商场等室内得热较大的建筑,即使当室外环境很凉爽的情况下,也不得不开启冷机,以消除室内冷负荷,造成了能源的极大浪费。空气侧经济器(air-side economizer)就是针对这一情况的一种十分有效的节能技术。空气侧经济器通过在过渡季、冬季时加大新风量,将室外低温低焓的空气直接引入室内制冷,从而达到节能的目的。由于其能全部或部分代替人工冷源,空气侧经济器与水侧经济器(water-side economizer)也被称为免费供冷(free cooling)。

所谓最大可达新风比,即配备空气侧经济器的空调系统在室外空气满足直接供冷条件时能够引入的

收稿日期 2013-07-29; 修回日期 2013-09-09

最大新风量与总送风量之比。而为判别新风是否满足直接供冷条件,常见的空气侧经济器控制策略有焓差控制、温差控制、固定温度控制和固定焓值控制。温差、焓差控制通过比较新风与回风的温度或焓值,当新风的数值较低时,即开启经济器,而固定温度、焓值控制是事先设定好固定温度值或焓值,当新风温度或焓值低于设定值时,开启经济器。

美国最早从二十世纪中叶就开始了空气侧经济器的研究。目前美国约有60%的建筑空调系统中使用了经济器;美国能源信息部1995年的商业建筑调查结果显示,46万栋建筑中,采用该项技术的空调面积多达15亿m<sup>2</sup>。在很多州,空气侧经济器甚至作为强制条款被写入能源法规或行业标准中,可见经济器的节能效果显著。

对于空气侧经济器的研究,国内方面,叶大法等人<sup>[1]</sup>详细介绍了新风供冷技术的工作原理,并与水侧

经济器进行比较,给出了空气侧经济器的控制方法、各方法适用地区和设计时的注意事项。李魁山等人<sup>[2]</sup>根据ASHRAE 90.1标准中对于空气侧经济器使用条件的规定,分别选用室外空气温度和焓值作为控制因子,计算得出了我国268个主要城市的新风供冷可用时间,对空气侧经济器的设计具有一定指导意义。另外也有一些设计人员<sup>[3-5]</sup>就具体工程项目中新风供冷技术的应用情况进行了详细的介绍,总结了项目设计和实施过程中的问题和解决办法,同样,也具有一定参考价值。潘毅群等人<sup>[6]</sup>运用EnergyPlus软件对2栋包括数据中心的办公楼进行能耗模拟,计算了4种不同节能措施的节能量,其中空气侧经济器的节能效果最优。周兰兰等人<sup>[7]</sup>介绍了某数据中心空调系统的节能优化设计,并进行了经济性分析,指出该项目中的过渡季新风供冷系统可节约50%的空调系统运行费用,1.2年即可收回设备投资。Ye Yao等人<sup>[8]</sup>选取中国6个典型气候区的代表城市,针对办公建筑典型模型模拟计算了温差和焓差控制下的空气侧经济器节能情况,指出经济器在中国南部热湿气候地区的节能率高于北部干冷气候地区,焓差控制经济器在热湿气候地区要明显优于干球温差控制,但在干燥气候区不一定胜过干球温差控制,提高室内温度设定值可以进一步提高经济器的节能效果。Kuei-Peng Lee等人<sup>[9]</sup>对ASHRAE 90.1中划分的17个气候区中的17个代表城市,利用eQUEST对1栋3层办公建筑中的数据机房部分,模拟计算了应用焓差控制经济器前后的能耗情况,横向比较了在17个典型气候城市中的空调系统节能率。结果显示4A(33%)、3C(32%)、4C(29%)这3个地区的节能率最高,上海所处的3A地区的节能率约为25%。文章还计算比较了最大可达新风量占总送风量的比例在不同气候条件下对于节能量的影响情况,以及节能率与节能器运行时间之间的关系,发现运行时间长并不一定等同于节能率高。

国外方面,美国AirTest技术公司在其Economizer Control Design Guide a White Paper<sup>[10]</sup>中针对温差和焓差控制策略忽视新风湿度的问题,指出焓差控制时,随着新风引入的湿量在之后空调开启时仍需被除去,这部分的能耗在经济器节能量计算时要考虑进去,提出露点—干球温度控制策略可以有效地保证新风显热潜热都满足直接供冷的要求。另有一些学者<sup>[11-12]</sup>针对经济器风阀控制,比较了现存的经济器变新风比风阀连锁控制策略,并提出了新的策略,减少了风机能耗的增加量。O. Seppanen等人<sup>[13]</sup>研究指出空气侧经济器的益处不仅在于节省能耗,更因为其加大了新风量,室内空气品质得到提升,降低了室内人员请病假的频率,从而挽回了相当可观的由病假带来的经济损失。

虽然经济器的优点显而易见,但是在实际应用

当中,也会因为实际情况的限制导致无法采用空气侧经济器或节能效果不乐观。钱峰<sup>[14]</sup>在成都某项目设计过程当中,由于受到建筑层高的限制,最终放弃了空气侧经济器方案,转而选择了水侧经济器。张春枝<sup>[15]</sup>等人结合国内具体情况,指出由于我国大气环境不佳、常用风机盘管半集中式空调系统且空调系统自控管理水平不高,认为现阶段空气侧经济器不宜在国内推广。

根据笔者的了解,实际应用当中的所谓过渡季可实现全新风运行的空调系统,除非经过特殊设计,否则空调箱实际引入的新风量占总送风量的比例并不能达到100%。这是因为一般在设计制作空调箱时,是按照最小新风量在留有一定余量的前提下确定新风口尺寸的,之后再配备相应的风机、盘管。假如,总风量为100,最小新风量为30,那么可以合理地认为该空调箱最多可以引入35~40的新风量,如要进一步加大新风量,则由于风口尺寸、风机功率的限制无法实现。而若按照最大新风量即送风量的100%确定新风口尺寸,则需要利用风阀在夏季正常制冷工况时将大尺寸新风管中的风量降至最小新风量。这对新风阀、回风阀和排风阀之间的联动控制要求较高,同时,也会造成相当大的能量浪费。而且最大新风比越大,由于风阀调节精度的限制,始终保持良好的箱体静压平衡也越困难。

那么,在实际的最大可达新风比下,空气侧经济器的节能效果如何,在我国不同的气候区,节能量对最大可达新风比的敏感性如何,在不同控制策略下,该敏感性又如何?目前针对此类问题的研究尚少,故而本文借助eQUEST快速能耗模拟软件对1栋商场建筑的典型模型进行模拟,分别在我国北京、上海、成都、西安和哈尔滨5个城市的天气参数条件下,改变空气侧经济器的最大可达新风比,并选用不同的控制策略,计算各种情形的节能量,而后进行比较,得出结论。

## 1 eQUEST 能耗模拟及典型模型介绍

### 1.1 eQUEST 能耗模拟

本文借助全年动态建筑能耗模拟软件eQUEST对空气侧经济器的节能效果进行分析。eQUEST软件是在DOE-2框架下开发的,在众多的能耗模拟软件中,因为其计算严谨、操作灵活、程序开放以及具有丰富的可设置变量,受到国内外专家学者的欢迎。很多学者<sup>[16-18]</sup>都是借助于该软件进行建筑能效研究的。

### 1.2 典型模型介绍

本文中,笔者选择1栋商场建筑的典型模型进行模拟。该建筑模型的3D外形如图1所示。建筑总建筑面积33800m<sup>2</sup>,包括地上7层、地下1层,层高3.5m。地下1层为地下车库,地上部分1~6层主要功能区为购物区和楼梯间,7层主要为餐厅就餐区域,另外还包括厨房和楼梯间。其余详细建筑参数见表1。

表 1 典型模型详细建筑参数

Table 1 Detailed information of prototype building model

设计参数	描述
围护结构	外墙 :1.304 W/(m <sup>2</sup> ·K) ; 屋顶 :0.653 W/(m <sup>2</sup> ·K) ; 窗户 :3.667 W/(m <sup>2</sup> ·K) ,SHGC=0.697 ,VT=0.781
空调系统	制冷 :离心式冷水机组 2 台 ,COP=5.8 ,7 °C 供水 温差 5.56 °C ; 单速风机冷却塔 2 台 ,29 °C 供水 温差 5.56 °C ; 制热 :燃气锅炉 1 台 效率 80% ,60 °C 供水 温差 11.1 °C ; 系统容量 根据设计日自动计算 ; 水系统 :冷冻水泵、热水泵定流量 ,冷却水泵变流量 效率均为 26.76 W/GPM ; 末端风系统 :全空气系统 ,风机定风量 送风机扬程 2 000 Pa 总效率 0.7 ; 送风温度 :夏季 16 °C / 冬季 32 °C ;
室内热湿控制设定值	有人时 :夏季 24 °C ,冬季 22 °C ; 无人时 :夏季 40 °C ,冬季 10 °C ; 相对湿度 :夏季 50% ,冬季 50% ;
室内负荷	照明负荷 车库 :5 W/m <sup>2</sup> 购物区 :15 W/m <sup>2</sup> 楼梯间 :11 W/m <sup>2</sup> 餐厅、厨房 :13 W/m <sup>2</sup>
	设备负荷 购物区 :1 W/m <sup>2</sup> 楼梯间 :1 W/m <sup>2</sup> 厨房 :50 000 W 餐厅 :20 000 W
	人员密度 车库 :200 m <sup>2</sup> / 人 购物区 :3 m <sup>2</sup> / 人 楼梯间 :20 m <sup>2</sup> / 人 厨房 :5 m <sup>2</sup> / 人 餐厅 :3 m <sup>2</sup> / 人
空调区域人均新风量 :20 m <sup>3</sup> /(人·h)	

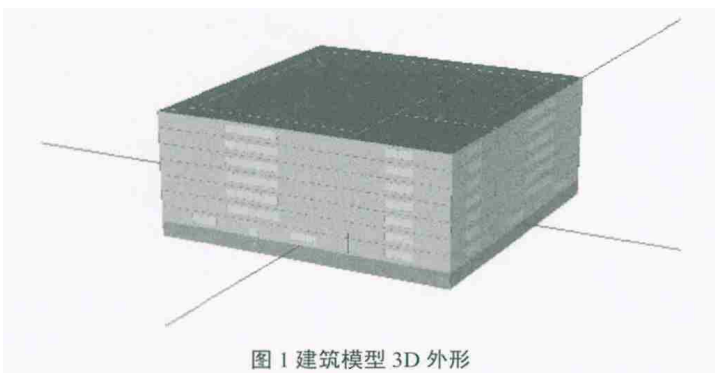


图 1 建筑模型 3D 外形  
Fig.1 3D model

## 2 用 eQUEST 模拟空气侧经济器节能效果

由于夏热冬暖地区城市的温度普遍偏高,空气侧经济器在该地区的节能效果有限,故本文选择北京、上海、成都、西安和哈尔滨 5 个城市进行研究,模拟用天气参数文件来源于清华大学和中国气象局的 CSWD 气象数据,下载自美国能源部 Energy Efficien-

cy and Renewable Energy 网站<sup>[19]</sup>。5 个城市的年均干球温度、年均相对湿度、年均露点温度、年均焓值以及最大干球温度见表 2。

在用 eQUEST 建立的典型模型中套用 5 个城市的天气参数文件,计算未使用空气侧经济器时的各自能耗情况,结果如图 2。图中用电设备能耗按照转化系数为 3.61(其中电厂供电效率为 30.1%,电网输电效率为 92%<sup>[20]</sup>)将电耗折算成一次能源消耗量,燃气锅炉能耗按照转化系数为 1 进行折算,并统一用 MWh 为单位表示。图中可以看到哈尔滨由于地处严寒地区,其供热能耗占的比重最大,但由于电能为二次能源,其一次能源转化系数较大,故而用电较多的上海的建筑一次能源总消耗量最大。

针对每个城市,笔者将空气侧经济器的最大可达新风比设定为 100%、75%、50%和 40%这 4 档,分别计算温差控制、焓差控制和固定温度控制 3 种控制策略



表2 各城市的室外空气条件参数  
Table 2 Outdoor air conditions offive cities

城市	年均干球温度 /℃	年均相对湿度 /%	年均露点温度 /℃	年均焓值 /(kJ/kg)	最大干球温度 /℃
北京	12.6	55.3	2.8	47.79	37.2
上海	16.6	75.9	12.1	61.00	36.8
成都	16.57	81.1	13.0	62.45	34.8
西安	14.05	68.2	7.7	52.97	37.9
哈尔滨	4.02	66.3	2.2	34.77	32.8

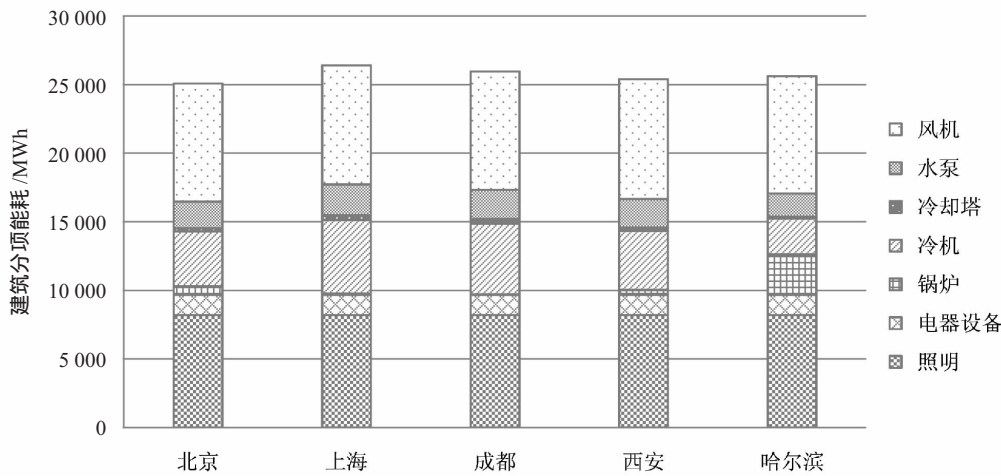


图2 各城市未使用经济器时典型模型能耗结果

Fig.2 Energy use of prototype models in five cities without air-side economizer

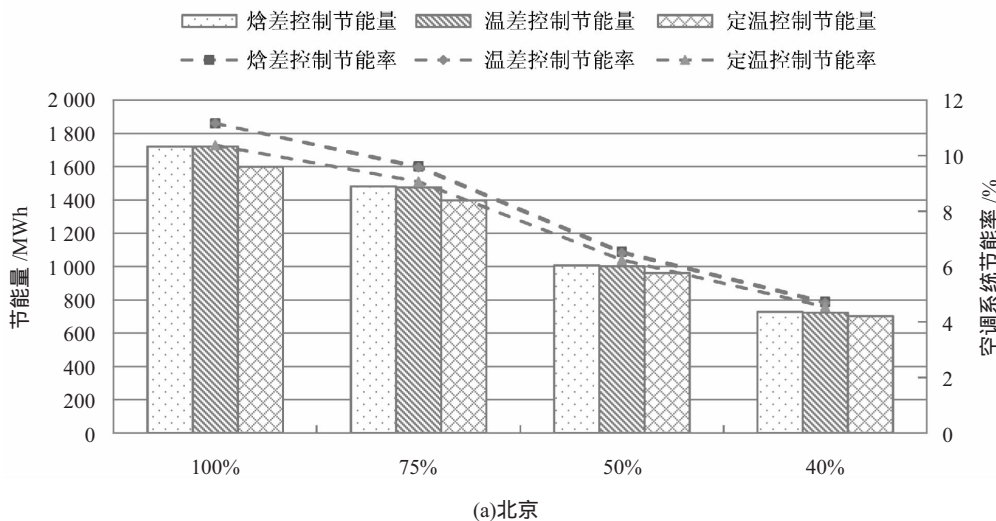


图3 各城市中应用经济器前后的空调系统节能率随可达新风比变化情况

Fig.3 The change of HVAC energy saving and ESR with various maximum outdoor air rates in different cities

下经济器的节能情况。这里将最小的可达新风比设置为40%是由于按照室内人员人均每小时新风量 $20\text{ m}^3$ 来计算,空调系统的最小新风比已为31%,笔者认为该空调系统至少可利用占总送风量40%的新风。另外,定温度控制中的温度设定值按照ASHRAE 90.1标准中的规定选择(除哈尔滨为 $23.89\text{ }^\circ\text{C}$ 外,其余城市温度设定值均为 $18.33\text{ }^\circ\text{C}$ )。计算结果如图3。而对于每一控制策略,图4给出了各个城市在应用经济器前

后,其空调系统节能率的横向对比结果,以便比较可达新风比的减小在不同气候条件下对于节能率的影响。图3和图4中的节能量是指冷机、锅炉、水泵、风机以及冷却塔所消耗的一次能源减少量,而空调系统节能率也是在此基础上计算的。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 不同城市间结果对比与分析

如图3,各个城市中空气侧经济器在最大可达新风比为100%情况下,空调系统节能率为 $8.87\% \sim 13.87\%$ 不等。其中哈尔滨的空调系统节能率最低,而成都的节能率最高。这样的结果是由建筑的供暖能耗比重导致的。因为空气侧经济器节省的是与制冷有关的能耗,成都的供暖能耗比重最低,而哈尔滨的比重最高,故而二者的节能率一大一小。而当最大可达新风比降低时,从

图3中可以明显看到,3种控制策略下的经济器节能率均明显下降。在成都地区,可达新风比为40%时温差控制经济器的节能量仅为100%时节能量的21.6%。可见可达新风比为40%时,节能量的损失甚至可能超过40%。进一步研究发现,最大可达新风比越低,节能率的下降速率越大,图5为上海气候条件下经济器的空调系统节能率随可达新风比变化的回归曲线,可见可达新风比越小,曲线斜率越大,其余各城

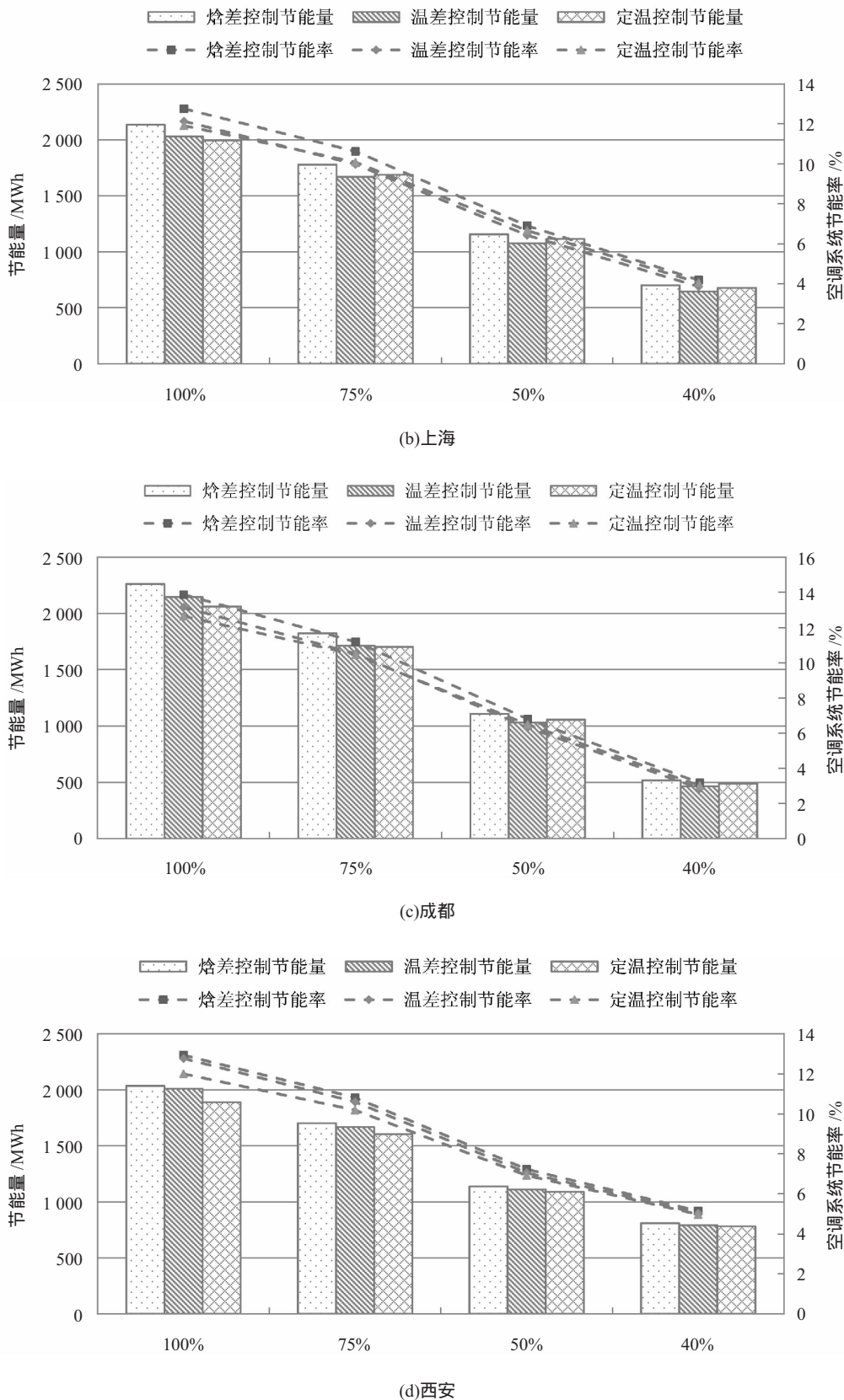


图3 各城市中应用经济器前后的空调系统节能率随可达新风比变化情况(续)

Fig.3 The change of HVAC energy saving and ESR with various maximum outdoor air rates in different cities

市趋势相同。

如图4所示,随着可达新风比的降低,节能率曲线出现交叉现象,说明经济器在不同城市气候条件

效果表现不一。越干燥的城市,温差控制和焓差控制间的差异越小,例如北京、西安和哈尔滨。结合图6中的经济器运行时间,虽然温差控制的运行时间普遍比

下,节能率随可达新风比的变化率各有不同。图4(a)、(b)、(c)三幅图中成都的节能率曲线变化斜率最大。为了解释这一问题,笔者根据e-QUEST逐时报告中新风量与总风量之比与最小新风比的关系,当某1h的新风比比最小新风比高10%,即认为经济器在该小时内具有一定节能效果,并将该小时计为运行时间,从而计算出经济器在不同城市的运行时间,结果如图6。从图6中可以看出,在焓差和温差控制策略下,成都的经济器运行时间均最长;而在定温控制下,除哈尔滨由于其定温控制设定值比其他城市的高5.6℃从而其运行时间较长以外,在其余4个城市中,成都的经济器运行时间也是最长的。这就可以解释为何成都的经济器节能率曲线的斜率较大。以图4中(a)图为例,对于成都而言,当可以利用的新风量下降时,运行时间越长导致损失的节能量越大,故而节能率下降较快。其余两种控制策略的变化情况也可如是解释。

3.2 不同控制策略间结果对比与分析

从图3中3种控制策略的节能率曲线之间间距上可以观察到,不同城市3种控制策略下的经济器节能

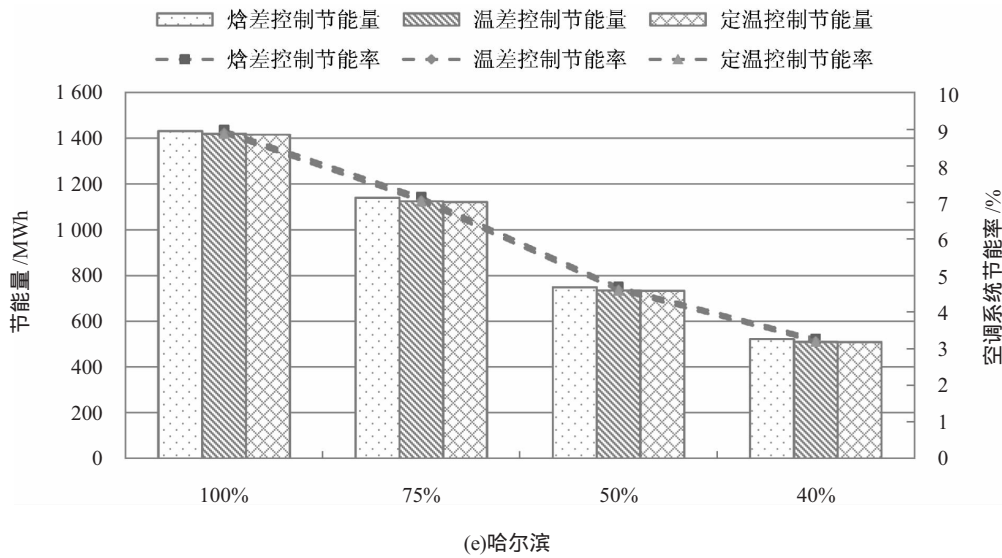


图3 各城市中应用经济器前后的空调系统节能率随可达新风比变化情况(续)

Fig.3 The change of HVAC energy saving and ESR with various maximum outdoor air rates in different cities

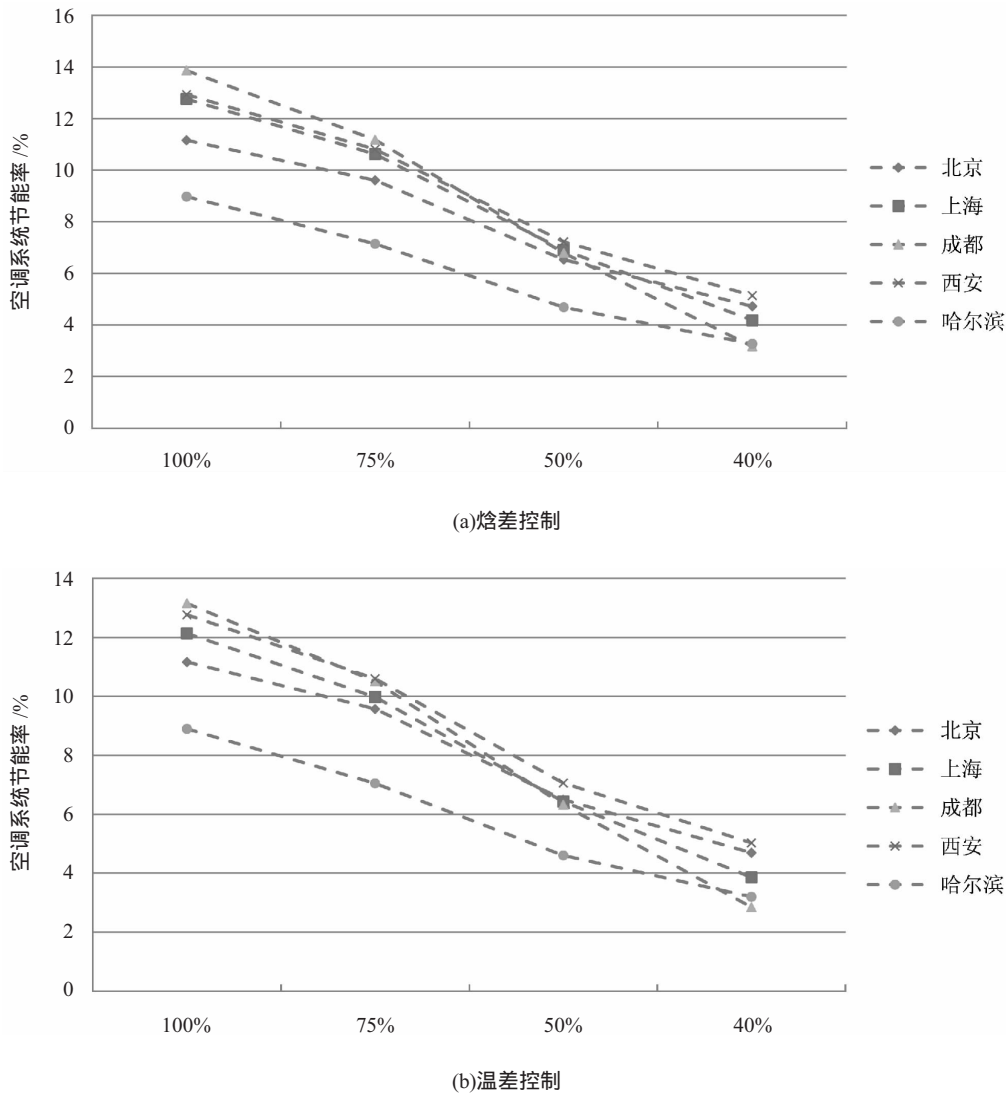


图4 不同经济器控制策略下的空调系统节能率随可达新风比变化情况

Fig.4 The change of HVAC ESR with various maximum outdoor air rates under different economizer control strategies

焓差控制要长,但是节能率方面却落后于焓差控制,且城市气候越潮湿,二者节能率差距越大。这说明经济器的节能效果不仅取决于其年运行时间,更取决于控制策略对室外空气自然冷量的利用程度,在潮湿气候地区,当经济器开启时,焓差控制引入的新风中蕴含的可利用自然冷量更多。

将温差控制和固定温度控制节能率进行比较。从运行时间上看,二者的运行时间差异较大,固定温度控制的运行时间明显小于温差控制。但是从对室外空气自然冷量的利用程度来看,温差控制是室外温度低于回风温度时就开启经济器,回风温度可认为其近似等于室内设定温度 $24^{\circ}\text{C}$ ,而北京、上海、西安、成都的定温控制温度设定值为 $18.33^{\circ}\text{C}$ ,比温差控制低近 $6^{\circ}\text{C}$ 。所以当经济器开启时,固定温度控制利用的自然冷量更多。可见,经济器节能率与运行时间不一定成正比。这一点还可从哈尔滨的节能率和运行时间数据中得到证明。哈尔滨的固定温度设定值为 $23.89^{\circ}\text{C}$ ,与室内温度设定值 $24^{\circ}\text{C}$ 相近,故而运行时间差距不大,单位新风量中的可利用自然冷量也近似相等,故节能率曲线也几乎重合。

随着最大可达新风



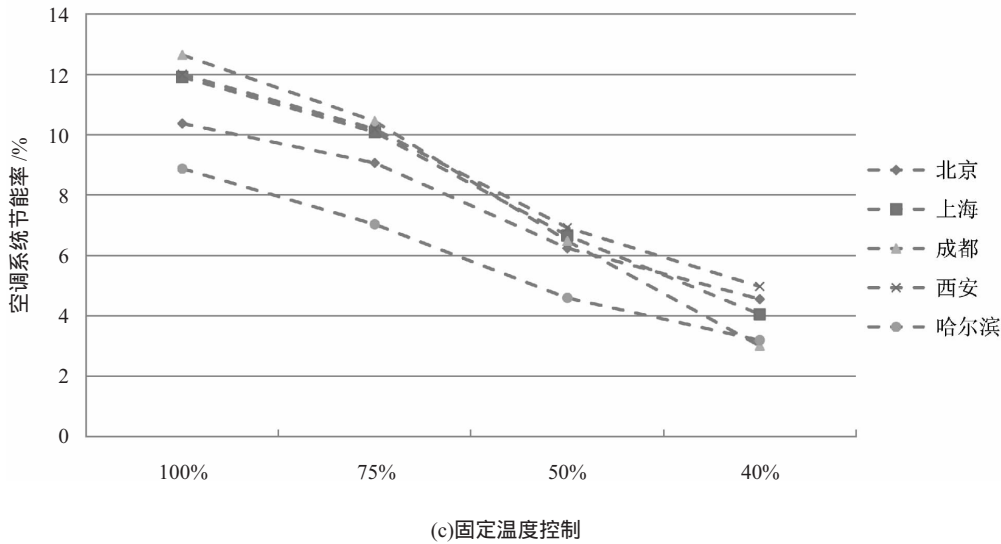


图4 不同经济器控制策略下的空调系统节能率随可达新风比变化情况(续)

Fig.4 The change of HVAC ESR with various maximum outdoor air rates under different economizer control strategies

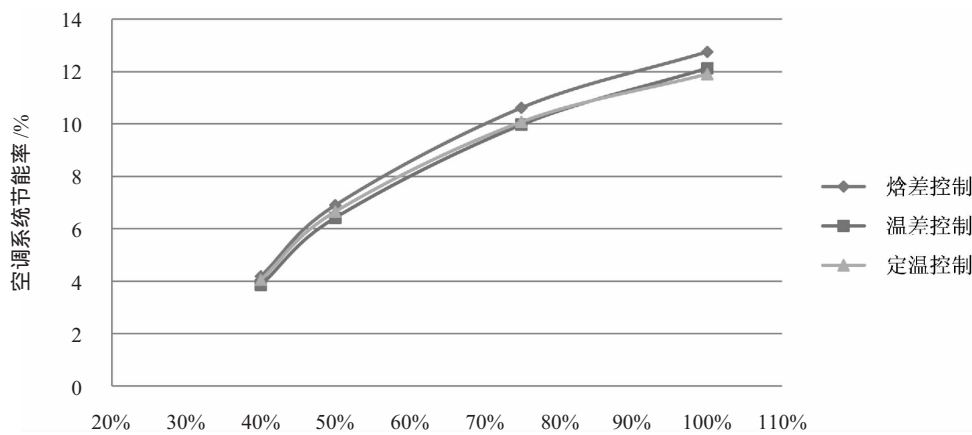


图5 上海地区经济器空调系统节能率随可达新风比变化情况

Fig.5 The change of HVAC ESR with various maximum outdoor air rates in Shanghai

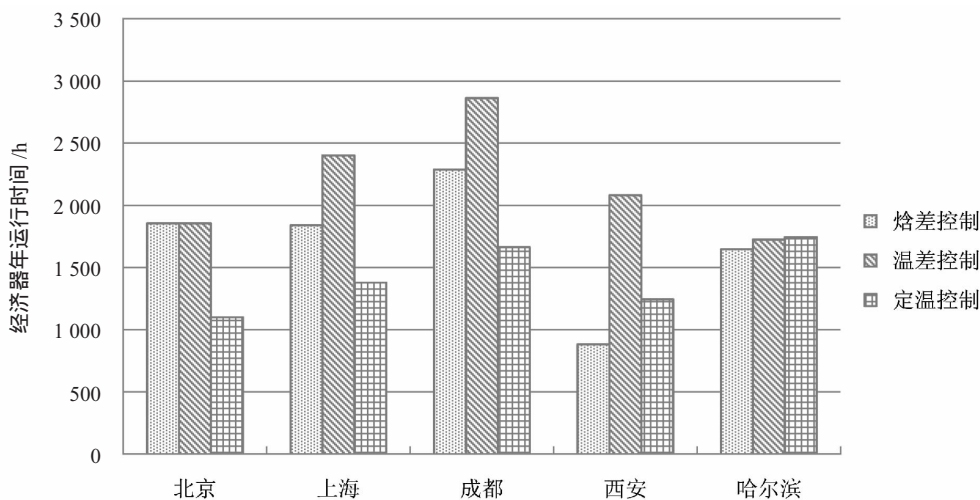


图6 各地区、各控制策略经济器运行时间

Fig.6 Economizer cycle time of different air-side economizers in different cities

比的下降,各控制策略下的经济器节能率曲线下降幅度也有所不同。从图3中可以明显看到,固定温度控制的节能率随着可达新风比的下降逐渐超过了温差控制。这是因为当可利用新风量减少时,进入的新风温度越低,可利用的自然冷量就越多,节能量也就越高。而固定温度控制设定温度值较低,其引入的新风温度普遍低于温差控制,所以固定温度控制的节能率在低可达新风比下超过了温差控制。因此,实际当中若可达新风比无法达到理想的较大比例,固定温度控制策略的节能效果要优于温差控制,另外由于只需投入新风温度传感器,初投资更低,而且传感器数量下降,控制稳定性得以提升,故而适宜选择固定温度控制策略。

#### 4 结语

本文选择北京、上海、成都、西安和哈尔滨5个城市,利用eQUEST能耗模拟软件针对1栋商场建筑的典型模型,对焓差控制、温差控制和固定温度控制3种控制策略下的空气侧经济器在不同可达新风比下的节能量进行了模拟计算,并对计算结果进行对比,分析不同气候、不同控制策略下,空气侧经济器的节能效果对最大可达新风比的敏感性,最终得到以下结论:

(1)随着可达新风

比的下降,节能率总体呈下降趋势,且节能率下降幅度可能超过可达新风比的下降幅度。

(2)经济器运行时间越长,空气侧经济器节能效果随可达新风比减小的下降速率越大,且节能效果与运行时间不一定成正比。

(3)固定温度控制策略在低可达新风比下的经济器节能效果优于温差控制,且初投资少,控制稳定性高,故而在实际中若可达新风比较低,宜选择固定温度控制策略。

参考文献:

[1]叶大法,杨国荣,董涛.变风量空调系统自然冷却节能设计[J].暖通空调,2007,37(1):68-72.

[2]李魁山,马晓琼,王小芝,等.不同类型建筑新风免费冷却时间的研究[J].暖通空调,2012,42(3):70-75.

[3]肖剑仁.某会议中心空调通风系统节能设计实践[J].制冷与空调,2012,12(2):69-73.

[4]刘健刚.上海联洋新建商场暖通空调系统设计[J].发电与空调,2012,33(2):76-80.

[5]许磊,陈超,管勇,等.自然冷却换热技术在电信行业通信机房空调系统中的应用研究[J].制冷与空调,2010,10(5):85-89.

[6]Yiqun Pan, Rongxin Yin, Zhizhong Huang. Energy modeling of two office buildings with data center for green building design [J]. Energy and Buildings,2008,40:1145-1152.

[7]周兰兰,潘毅群.某数据中心空调系统设计与节能优化分析[J].暖通空调,2009,39(10):102-107.

[8]Ye Yao, Li Wang. Energy analysis on VAV system with different air-side economizers in China [J]. Energy and Buildings,2010,42:1220-1230.

[9]Kuei-Peng Lee, Hsiang-Lun Chen. Analysis of energy saving potential of air-side free cooling for datacenters in worldwide climate zones [J]. En-

(上接第8页)Biosystems Engineering,2007(96):633-641.

[6]Yano A, Kadowaki M, Furue A, et al. Shading and electrical features of a photovoltaic array mounted inside the roof of an east-west oriented greenhouse[J]. Biosystems Engineering,2010(106):367-377.

[7]陆亚俊,马最良,邹平华.暖通空调[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.

[8]田国庆,李浙,王志毅.大玻璃幕墙建筑冷负荷分析与节能措施[J].制冷空调与电力机械,2006,27(107):35-38.

[9]陆耀庆.实用供热通风手册[M].第二版.北京:中国建筑工业出版社,2008.

[10]周增产.温室供暖热负荷计算及常用供暖方式和设备[J].中国花卉园艺,2004(20):56-58.

[11]贺平,孙刚.供热工程[M].第四版.北京:中国建筑工业出版社,2009.

[12]曲云霞,张林华,方肇洪,等.地下水源热泵及其设计方法[J].可再生能源,2002(6):11-14.

[13]章长松.上海浅层地热能分布规律及开发应用研究[D].天津:天津大学,2009.

[14]周邦宁.中央空调设备选型手册[M].北京:中国建筑工业出版社,

ergy and Buildings,2013,64:103-112.

[10]AirTest. Economizer Control Design Guide a White Paper[R].

[11]N. Nassif, S. Moujaes. A new operating strategy for economizer dampers of VAV system[J]. Energy and Buildings,2008,40:289-299.

[12]Nabil Nassif. Performance analysis of supply and return fans for HVAC systems under different operating strategies of economizer dampers[J]. Energy and Buildings,2010,42:1026-1037.

[13]B. Fisk, O. Seppanen, J. Huang, et al. Economic Benefits of An Economizer System: Energy Savings and Reduced Sick Leave [Z]. ASHRAE Transactions,2004,6.

[14]钱峰.成都地区免费供冷系统的可行性和经济性[J].建筑热能通风空调,2010,29(4):61-63.

[15]张春枝, Brian A. Rock.空气节能器在空调系统中的应用[J].暖通空调,2011,41(11):45-49.

[16]徐哲恬,潘毅群,李玉明,等.基于能耗模拟的某校园供冷供热系统规划[J].建筑节能,2013,(3):13-19.

[17]Rongxin Yin, Peng Xu, Pengyuan Shen. Case study: Energy savings from solar window film in two commercial buildings in Shanghai[J]. Energy and Buildings,2012,45:132-140.

[18]Yimin Zhu. Applying computer-based simulation to energy auditing: A case study[J]. Energy and Buildings,2006,38:421-428.

[19]U.S.DOE's Energy Efficiency and Renewable Energy,2013, <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata/about.cfm>.

[20]王长庆,龙惟定,丁文婷.各种冷源的一次能耗及对环境影响的比较[J].节能技术,2000,18(4):8-10.

作者简介:王秋润(1990),男,安徽人,供热、供燃气、通风与空调工程专业,从事建筑节能、建筑模拟等方向的研究(wangqiujuan@yeah.net)。

指导教师:潘毅群,同济大学教授,博导。  
黄治钟,同济大学高级工程师。

1999.

[15]蔡军.基于CFD的温室水源热泵控制系统研究[D].浙江:浙江工业大学,2010.

[16]唐扬,杨霞.大型楼宇太阳能综合利用示范工程项目[C]//第七届中国绿色建筑与建筑节能大会论文集,2011:289-292.

[17]赵春江,朱元昊,包大年.200kW太阳能光伏发电系统设计实践[J].节能技术,2007,25(4):326-329.

[18]江耀,卜云龙,周增产,等.浅层地能在农业设施中的应用研究[C]//中国农业工程学会2007年学术年会论文集:1-8.

[19]钱观荣,沈冬冬.世博中心太阳能光伏发电系统设计[J].现代建筑电气,2010(9):6-9.

作者简介:陈慧子(1989),女,山东人,硕士,农业生物环境与能源工程专业,从事农业设施节能方向的研究(676261386@qq.com)。

指导教师:石惠娴(1969),女,河北人,毕业于浙江大学,副教授,农业生物环境与能源工程专业,从事农业设施节能方向的研究(huixian\_shi@tongji.edu.cn)。