

技术交流

# 上海市某商用建筑能耗分析与节能评估

上海房地产科学研究院 陈 晨

同济大学 潘毅群 黄治钟

华东建筑设计研究院有限公司建筑节能部 吴 刚

**摘要** 采用能耗模拟软件 eQUEST 对上海市某商用建筑建立模型,对模型进行校正之后计算出该建筑的能耗情况,在此基础上提出 6 项节能措施,并分析了其节能效果,验证了计算机模拟技术在建筑能耗分析和节能评估中的适用性。

**关键词** 商用建筑 能耗分析 校正 节能评估

Energy consumption analysis and energy efficiency evaluation for a commercial building in Shanghai

By Chen Chen , Pan Yiqun , Huang Zhizhong and Wu Gang

**Abstract** Establishes a model of a commercial building in Shanghai with the energy simulation software eQUEST, and calculates the energy consumption after modification. Suggests six measures for energy efficiency improvement, and analyses their effects. Verifies the feasibility of computer simulation for building energy consumption analysis and energy efficiency evaluation.

**Keywords** commercial building, energy consumption analysis, modification, energy efficiency evaluation

Shanghai Real Estate Science Research Institute, Shanghai, China

## 0 引言

目前许多大型商业建筑的能耗很高,而大多数物业管理部门都没有有效的测量手段和测试设备来了解各设备的性能和效率以及分析运行能耗,也就无法采取有针对性的节能措施,有的建筑即使采取了一些节能措施也无法评价节能效益。为此,笔者对上海市某大型综合写字楼进行了建筑能耗的模拟,并对大厦作了能耗分析和各种节能措施的效果评价,希望对计算机模拟技术在建筑能耗分析和节能评估中的应用作一些研究<sup>[1]</sup>。

### 1 建筑概况

该大厦是一座集金融、商务、餐饮、娱乐于一体的高档综合写字楼,已使用近 10 年,总建筑面积 67 000 m<sup>2</sup>,地上 40 层,地下 1 层,其中可出租面积约为 55 000 m<sup>2</sup>,空调面积约为 58 500 m<sup>2</sup>;该建筑外立面为浅蓝色镜面镀膜玻璃幕墙,部分外窗可开

启;办公区空调系统为两管制风机盘管+独立新风系统,公共区域为定风量全空气系统;空调水系统分高、低区,中间由换热器连接;冷源为离心式电制冷机,3.2 MW 2 台,1.4 MW 1 台;热源为燃油蒸汽锅炉,4.5 MW 3 台。

### 2 建筑能耗模拟计算模型的建立

采用全年 8 760 h 的逐时能耗模拟软件 eQUEST(quick energy simulation tool)对该大厦进行模拟计算。该软件的计算核心是 DOE-2 的高级版本 DOE-2.2,并在其基础上作了许多优化。

陈晨,男,1980 年 3 月生,工学硕士,硕士研究生  
200031 上海市复兴西路 193 号上海市房地产科学研究院  
中心试验室

(021) 64718289-217

E-mail: c\_c777@163.com

收稿日期:2005-11-09

修回日期:2006-01-13

建模过程主要包括建筑几何模型、建筑围护结构等基本参数的输入和内部负荷、运行时间表、空调系统等运行条件的设置<sup>[2]</sup>。

### 2.1 建筑几何模型

根据该大厦的平面设计图纸进行几何建模,并对建筑外立面的一些装饰性结构和内部的一些建筑细节进行了简化,以减小模型规模和缩短模拟计算的时间。模型外观如图 1 所示。



图 1 建筑模型外观

### 2.2 建筑围护结构

由于该大厦已建成 10 年之久,许多原始资料已很难查到,因此尽量从模拟软件的材料库中选取与实际情况接近的围护结构形式,具体参数见表 1。

表 1 模型围护结构参数汇总

围护结构	传热系数/(W/(m <sup>2</sup> ·K))	表面粗糙度/mm	吸收率
外墙	3.05	4	0.25
内墙	2.28	3	0.70
楼板	2.27	3	0.70
地面	0.47	3	0.70
吊顶	2.05	3	0.70
屋面	2.91	1	0.60
玻璃	6.17 <sup>1)</sup> 6.12 <sup>2)</sup>		

注:1) 遮阳系数为 0.95,日射得热系数为 0.81;  
2) 遮阳系数为 0.53,日射得热系数为 0.46。

### 2.3 内部负荷与运行时间

模拟软件需要输入建筑的人员密度、照明负荷和办公设备负荷以及各区域运行时间等信息,根据物业管理提供的资料和设计资料,根据典型区域的实际情况输入到模型中,如表 2 所示。

表 2 各区域内部负荷及运行时间

功能区域	人员密度/(m <sup>2</sup> /人)	照明负荷/(W/m <sup>2</sup> )	设备负荷/(W/m <sup>2</sup> )	运行时段
办公室	18	15	15	09:00~17:30
学校	3	20	25	09:00~20:30
银行	4	15	25	08:30~21:00
饭店	6	40	10	11:30~22:00
桑拿房	20	25		12:00~02:00
商场	5	25	10	10:00~22:00
1 层大堂	5	40		全天
车库	500	5		全天
走廊	35	10		全天

### 2.4 空调系统分区

根据建筑物内高、低区的使用情况和空调系统形式对模型进行了分区,如图 2,3 所示。

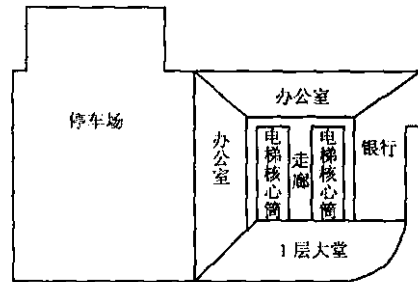


图 2 1 层空调系统分区示意

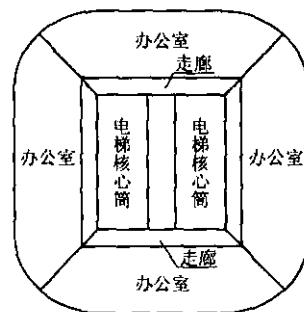


图 3 标准层空调系统分区示意

### 2.5 空调系统运行参数设定

模型的主要部分就是空调系统,根据大厦的实测数据对模型的空调系统(包括空气侧系统和水侧系统)进行设置,如表 3 所示。

表 3 模型空调系统主要参数设置

模型设定值	
系统形式	风机盘管+定风量
供热设定温度/	22 ±2
供冷设定温度/	24 ±2
冷水机组能效比 COP	4.5
冷水供/回水温度/	6/10.5
锅炉效率/ %	60
新风量/(m <sup>3</sup> /(人·h))	30

## 3 模型计算、校正与评价

### 3.1 模型计算与校正

在完成建模过程之后,用上海市的 BIN 格式的典型气象年气象数据进行了模拟计算,将模拟结果与收集到的该建筑 2004 年全年的实际能耗相比较就可以对模型的准确性进行验证。由于该建筑的蒸汽锅炉除了用于大楼冬季的供热以外,还向楼内的桑拿区域提供蒸汽,并且该部分蒸汽用量没有计量,因此无法对空调供热部分的能耗进行比较,只能对模型的用电情况进行验证。

将初次计算的模拟结果与实际数据对比之后,对模型进行了三次校正,以使模型符合实际建筑的运行规律。

1) 用 2004 年的实际气象参数代替上海市典型气象年的气象参数;

2) 调整模型的空调运行时间:供冷季节由 5~10 月调整为 4 月 20 日~11 月 11 日,其中 6 月 16 日~9 月 15 日每天的供冷时间比平时延长 3 h;供热季节调整为 11 月 30 日~次年 4 月 4 日。

3) 用实测的照明负荷替换模型中的假设值:1 层大堂改为  $26.4 \text{ W/m}^2$ 、车库改为  $3.1 \text{ W/m}^2$ 、走廊改为  $6 \text{ W/m}^2$ 。

模拟结果与实际能耗数据的比较如图 4 所示。

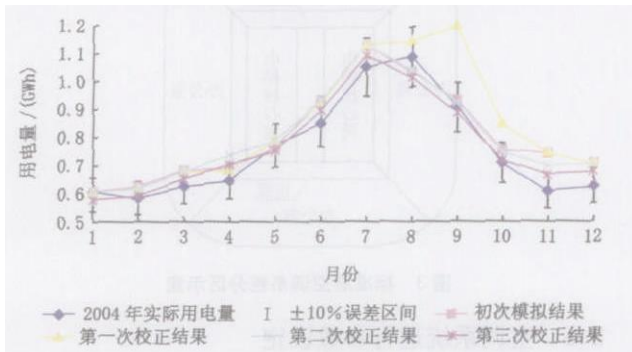


图 4 模拟结果与 2004 年实际用电量的比较

### 3.2 模型的评价<sup>[3]</sup>

经过校正之后的建筑能耗分析模型的准确性

表 4 可接受的误差指标范围与模拟结果误差比较

误差指标	ASHRAE Guideline 14—2002	IPMVP	FEMP	初次模拟结果误差	第一次校正结果误差	第二次校正结果误差	第三次校正结果误差	%
$ERR_{\text{month}}$	±5	±20	±15	- 22.24	- 32.45	- 15.2	- 10.01	
$ERR_{\text{year}}$			±10	- 6.76	- 11.27	- 6.71	- 2.37	
$CV(RSM E_{\text{month}})$	±15	±5	±10	8.65	15.08	8.12	5.70	

从表 3 可以看出,通过三次模型校正,除 ASHRAE Guideline 14—2002 的  $ERR_{\text{month}}$  项和 IPMVP 的  $CV(RSM E_{\text{month}})$  项外,模拟计算的结果已基本符合三个标准的要求。模拟结果与实际数据仍有一定的偏差,主要是以下几个方面原因:

1) 实际建筑每天的使用情况都不同,模拟软件无法对这种随机情况进行模拟;

2) 实际建筑中空调系统的运行由物业管理人员手动控制,而模拟软件只能按事先设定好的情况模拟;

3) 没有详细的建筑围护结构材料的数据,软

件自带的材料库中的围护结构参数与实际情况有差别;

4) 不同的办公区域室内负荷会有所不同,模拟软件也无法模拟这种随机情况。

经过校正的最终模型已基本能够反映实际建筑的运行情况,可作为该建筑的基本模型,并用于能耗分析和节能评估。

4 能耗分析

#### 4.1 能耗指标

通过对基本模型的模拟计算可以得到该建筑的一系列能耗指标:

1) 美国联邦能源管理项目 (FEMP)<sup>[6]</sup>,是为美国政府降低设施运行费用,帮助联邦能源管理者鉴别和征购节能项目而建立的。它的测试与认证指导书 (M & V Guidelines Version 2.2) 遵循 IPMVP 协议,为测试和认证与联邦机构的执行合同有关的能源节省提供了指导和方法。

2) 国际性能测试与认证协议 (IPMVP)<sup>[5]</sup>,给出了目前最新的用于节能、节水和可再生能源项目结果认证的操作方法,还可以帮助设施管理人员评定和改善设施性能。其中的节能测试 (ECMs, energy conservation measures) 包括燃料节省测试、节水测试、设备安装或改进中的负荷转移和节能和/或操作程序的改进。

3) 美国联邦能源管理项目 (FEMP)<sup>[6]</sup>,是为美国政府降低设施运行费用,帮助联邦能源管理者鉴别和征购节能项目而建立的。它的测试与认证指导书 (M & V Guidelines Version 2.2) 遵循 IPMVP 协议,为测试和认证与联邦机构的执行合同有关的能源节省提供了指导和方法。

以上三个标准都给出了全建筑能耗模拟的校正方法,我们以月误差  $ERR_{\text{month}}$  (建筑实测月能耗值与模拟值的相对误差)、年误差  $ERR_{\text{year}}$  (全年各月误差的平均值) 和均方差的变异系数  $CV(RSM E_{\text{month}})$  (标准差与平均数的比值称为变异系数)<sup>[3]</sup> 来验证模型的准确性,比较结果见表 4。

年总耗电量为 9.2 GWh; 年总耗油量为

### 4 能耗分析

#### 4.1 能耗指标

通过对基本模型的模拟计算可以得到该建筑的一系列能耗指标:

年总耗电量为 9.2 GWh; 年总耗油量为

9 719 002 MJ (242.2 t, 模拟软件中按 J 计); 年单位面积耗电量为 157.4 kWh/m<sup>2</sup>; 年单位面积耗油量为 166.1 MJ/m<sup>2</sup> (4.14 kg/m<sup>2</sup>); 年总电费为 7 395 636 元; 年总油费为 1 005 130 元; 年总能耗费用为 8 400 766 元; 年单位面积电费为 126.4 元/m<sup>2</sup>; 年单位面积油费为 17.2 元/m<sup>2</sup>; 年单位面积总能耗费用为 143.6 元/m<sup>2</sup>。

#### 4.2 能耗组成

基本模型中耗电的各系统分别为照明、设备、制冷机、水泵、风机和冷却塔等, 各部分耗电情况如图 5 所示。其中, 设备部分的耗电量最大, 此部分

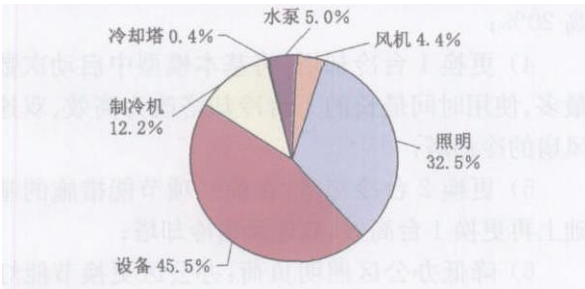


图 5 各系统耗电百分比

除了办公设备以外还包括该大楼 12 台电梯 (共 308 kW) 的年运行耗电量和每层 1 台 12 kW 的电热水炉的年运行耗电量。空调系统的耗电包括制冷机、冷却塔、水泵和风机的耗电总和, 占到了总耗电量的 22%, 照明系统占了 32.5%。

图 6 为基本模型全年各月用电组成情况, 可以

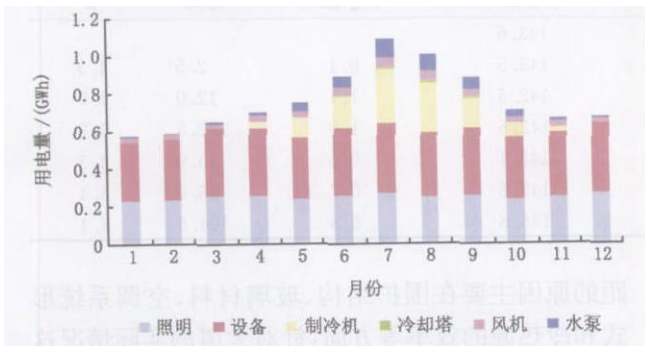


图 6 全年各月用电组成

看出空调系统的能耗与气候变化密切相关, 夏季室外气温升高, 大厦利用电制冷机供冷并且运行相关的冷却塔、水泵等, 用电量明显增加; 而在冬季, 室外气温降低, 大厦利用燃油锅炉供热, 用电量减少, 但风机和水泵仍有一定的使用。另外, 照明和设备耗电量不受气候变化的影响, 因此全年的耗电量比较稳定。

## 5 节能评估

本课题的最终目的是为该建筑提供可靠的节能优化方案, 因此需要在基本模型的基础上进行能耗分析之后, 确定节能目标、提出节能措施、评价节能效果。

### 5.1 模型的模拟与比较

在基本模型的基础上, 参照《上海市公共建筑节能设计标准》(因全国公共建筑节能设计标准于 2005 年 7 月 1 日正式实施, 故在进行本课题的研究时仍以上海市的地方标准为依据) 和《美国非住宅建筑节能标准》(ASHRAE 90.1-2001) 分别建立了两个基准模型: 将基本模型中不符合节能标准的参数进行更改, 保留达到或超过节能标准的参数, 同时保留一些基本的建筑信息、分区情况等内容。更改的参数如表 5~7 所示。

表 5 建筑围护结构材料参数

项 目	基本模型	上海基准模型	ASHRAE 基准模型
单层透明玻璃			
传热系数/(W/(m <sup>2</sup> ·K))	6.17	3.70(窗墙比 0.4) 3.00(窗墙比>0.4)	1.80
遮阳系数 S <sub>c</sub>	0.95	0.60	0.39(北向) 0.29(其他)
蓝色镜面玻璃			
传热系数/(W/(m <sup>2</sup> ·K))	6.12	3.70(窗墙比 0.4) 3.00(窗墙比>0.4)	1.80
遮阳系数 S <sub>c</sub>	0.53	0.60	0.39(北向) 0.29(其他)
外墙总传热系数/(W/(m <sup>2</sup> ·K))	3.05	1.00	0.70
屋顶总传热系数/(W/(m <sup>2</sup> ·K))	2.91	0.80	0.19
楼板总传热系数/(W/(m <sup>2</sup> ·K))	2.27	2.00	

表 6 室内照明负荷 W/m<sup>2</sup>

功能区域	基本模型	上海基准模型	ASHRAE 基准模型
办公室	15	15	14
商场	25	20	16
饭店	40	30	16

表 7 空调系统参数

	基本模型	上海基准模型	ASHRAE 基准模型
系统形式	风机盘管+定风量	风机盘管+定风量	变风量
空气侧经济器	无	无	有
冷水机组 COP	4.5	5.2	6.1
冷却塔	单速风扇	单速风扇	双速风扇
冷却水泵	定流量	定流量	变流量
冷水一次泵	定流量	定流量	变流量
冷水二次泵	定流量	定流量	变流量
锅炉效率	60%	80%	80%
热水一次泵	定流量	定流量	定流量
热水二次泵	定流量	定流量	变流量
风机效率	实测数据	50%	50%
水泵效率	实测数据	60%	60%



对建好的两个基准模型进行模拟计算后得到 其全年能耗情况,如表 8、图 7 所示。

表 8 基本模型、基准模型与综合优化模型全年能耗及费用比较

	全年峰值用电/kW	全年用电/(kWh/m <sup>2</sup> )	全年用油/(MJ/m <sup>2</sup> )	总能耗/(MJ/m <sup>2</sup> )	总能耗成本/(元/m <sup>2</sup> )	节省成本/(元/m <sup>2</sup> )
基本模型	5 476	157.4	166.1	732.9	143.6	
上海基准模型	4 781	148.9	50.4	586.3	124.7	18.9
ASHRAE 基准模型	4 504	141.8	15.3	525.9	115.5	28.1
综合优化模型	5 036	144.4	181.2	701.0	134.8	8.8

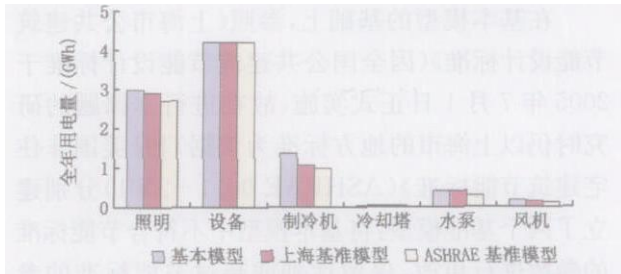


图 7 基本模型与基准模型全年用电组成比较

通过以上的比较可以看出,基本模型的能耗明显高于两个基准模型,是 ASHRAE 基准模型能耗的 1.24 倍,可见该建筑还是有较大的节能潜力,尤其是在照明和空调系统方面,这也是寻找节能优化措施的主要方向。

### 5.2 节能措施的模拟研究

根据上述模拟分析并结合该大厦的实际情况,提出了 6 项节能措施<sup>[7]</sup>。

#### 1) 制冷机及一次水系统(冷、热水)的优化运

行:按室外气温的变化自动调节一次水的温度,根据负荷变化自动启停制冷机;

2) 高区水泵变频控制;

3) 提高风机盘管电动机效率:将风机电动机由交流电动机改为直流无刷电动机,电动机效率提高 20%;

4) 更换 1 台冷却塔:将基本模型中启动次数最多、使用时间最长的 1 台冷却塔改为高效、双速风扇的冷却塔;

5) 更换 2 台冷却塔:在前一项节能措施的基础上再更换 1 台高效、双速风扇冷却塔;

6) 降低办公区照明负荷:办公区更换节能灯具,照明负荷由 15 W/m<sup>2</sup> 降至 10 W/m<sup>2</sup>,照度仍保持在 400~450 lx。

在基本模型的基础上分别对采用以上节能措施的模型进行了模拟计算,并对节能效果进行了比较和经济性分析,如表 9 所示。

表 9 各项节能措施节能效果及经济性比较

节能措施	峰值用电/kW	全年用电/(kWh/m <sup>2</sup> )	全年用油/(MJ/m <sup>2</sup> )	全年能耗总成本/(元/m <sup>2</sup> )	年能耗成本节省/(元/m <sup>2</sup> )	初投资/万元	简单回收期/a
基本模型	5 476	157.4	166.1	143.6			
制冷机及一次水系统的优化运行	5 479	157.4	165.9	143.5	0.1	2.5	4.3
高区水泵变频控制	5 423	155.9	167.6	142.5	1.1	12.0	1.9
提高风机盘管电动机效率	5 357	156.1	166.5	142.6	1.0	22.5	3.8
更换 1 台冷却塔	5 444	156.8	166.1	143.1	0.5	13.0	4.3
更换 2 台冷却塔	5 431	156.5	166.1	142.8	0.7	26.0	6.4
降低办公区照明负荷	5 178	147.3	179.3	136.8	6.8	124.8	3.1

注:简单回收期=初投资/(年能耗成本节省×空调面积)

### 5.3 综合优化模型

将 6 项节能措施全部应用于该大厦形成最终的节能优化模型。综合优化模型的节能效果以及与两个基准模型比较见表 8。综合优化模型能耗及能源成本都比基本模型有显著下降,其中柴油的用量有所上升,这是由于降低了办公区的照明负荷使空调热负荷略有增加,但全年的总能耗还是节省了 6.1%。与两个基准模型相比,综合优化模型的能耗还是略高的,比上海基准模型高出 8.1%,比 ASHRAE 基准模型高出 16.7%。造成这些差

距的原因主要在围护结构、玻璃材料、空调系统形式和冷热源的效率等方面,针对大厦的实际情况这些方面的改进措施比较困难,经济性和可操作性差,因此笔者不做建议。同时,综合优化模型总的初投资为 187.8 万元,每年可节省能源费用 51.48 万元,即 8.8 元/m<sup>2</sup>,如果不考虑利率的影响,3.6 a 即可回收初投资。

## 6 结论

6.1 使用 eQUEST 能耗模拟软件建立了某商用建筑的能耗计算模型,然后对模型进行了三次校

正,使模拟结果与实际能耗数据的误差在允许范围内,月误差最大为 - 10.01%,年误差为 - 2.37%;经过校正的基本模型能够反映该大厦实际的用能规律,通过模拟计算得到了该大厦的一系列能耗指标和能耗组成情况,对该大厦各系统设备的运行规律和耗能情况有了更加深入的了解,可以帮助物业管理 人员更好地进行建筑物的能源管理,在一定程度上弥补了现场测试条件不足而造成的数据缺乏。

6.2 参照《上海市公共建筑节能设计标准》和《美国非住宅建筑节能标准》(ASHRAE 90.1—2001)分别建立了两个基准模型,通过模拟计算可以看出,该大厦的能耗明显高于基准模型,是 ASHRAE 基准模型的 1.24 倍,有一定的节能空间。借助能耗模拟软件可以将实际建筑与节能标准进行比较,确定节能目标和节能方向。但是该建筑在围护结构、空调系统形式等方面进行节能改造的难度很大、成本很高,经济性差,因此很难达到节能标准限定的能耗指标。这也说明了在使用能耗模拟软件进行节能评估和预测时还要充分考虑节能方案的经济性和可操作性。

6.3 在能耗分析的基础上,提出了 6 项节能措施,并逐一进行了模拟计算,得到了各项节能措施的节能效果和 经济性分析,综合以上 6 项节能措施建立了综合优化模型,经过模拟计算可知该方案每年可节省能耗 6.1%、投资回收期为 3.6 a。能耗模拟软件在方案论证和评估方面有很大的优势,它可以模拟计算出各种节能方案和控制策略的节能效果。

6.4 尽管能耗模拟软件能够极大地方便科学研究

和工程实践,但它毕竟只是对实际情况的近似和模拟,对一些随机情况和不可预料的影响因素没有很好的解决办法,不可能完全反映客观实际,应该积极探索更加合理的计算模型和模拟方法,全面掌握专业知识以指导模拟技术。

### 参考文献

- [1] 潘毅群,吴刚,Volker Hartkopf. 建筑全能耗分析软件 EnergyPlus 及其应用[J]. 暖通空调,2004,34(9)
- [2] 侯余波,付祥钊,郭勇. 用 DOE-2 程序分析建筑能耗的可靠性研究[J]. 暖通空调,2003,33(3)
- [3] Chimack M J. Determining baseline energy consumption and peak cooling loads of a 107-year-old science museum using DOE2.1E [C]. Seventh International IBPSA Conference, 2001
- [4] ASHRAE Standards Committee. ASHRAE Guideline 14—2002 Measurement of Energy and Demand Savings[S]. America, 2002
- [5] U S Department of Energy and Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. International Performance Measurement and Verification Protocol [S]. America, 2002
- [6] U S Department of Energy and Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Federal Energy Management Program (FEMP), M & V Guidelines: Measurement and Verification for Federal Energy Projects[S]. America, 2000
- [7] 周巧航,赵加宁,施雪华. 深圳市某办公楼空调系统节能潜力分析[J]. 暖通空调,2004,34(4)

· 简讯 ·

## 特种工区多变调控全新风除湿机通过鉴定

由解放军某部、海军工程设计研究院、广东申菱空调设备有限公司共同研制的特种工区多变调控全新风除湿机鉴定会,于 2006 年 2 月 25 日在广东顺德召开。军内外 19 位代表参加了会议,并由来自全国各地的 9 位知名专家组成鉴定委员会。会议听取了样机研制报告、科研查新报告和国家压缩机制冷设备质量监督检验中心关于样机性能检测报告 的汇报,并察看了样机。与会专家一致认为:该机组具有全新风、大风量、大焓差的特点,在单机容量上取得重大突破;机组结构布置合理,首次采用多制冷系统蒸发器串并联,以及风冷和水冷冷凝器的串并联方案,便于调节控制,节能降耗,系统设计新颖可靠,具有独特的创新性;该机组

采用变频多工况调控技术,能实现在不同进风条件下变工况智能化运行;采取屏蔽等措施,消除了变频运行时各机组间电磁干扰现象,确保机组运行的稳定性;同时,机组采用可编程 PLC 技术,实现了系统全自动控制,有效地消除温度盲区,使温湿度调节更加精确;采取有效的防腐措施,确保机电控制设备、整机设备能在高温、高湿、高盐雾环境条件下可靠运行。

该机组技术先进,性能达到国内领先水平。该机组的研制成功,对国防工程建设具有重要的现实意义,军事经济效益显著。同时对民用地下工程也具有广泛的应用前景。

(姜绍彬)