

# 专题研讨 建筑全能耗分析软件 EnergyPlus 及其应用

同济大学 潘毅群<sup>☆</sup>

特灵空调公司 吴刚

美国卡内基梅隆大学 Volker Hartkopf

**摘要** 介绍了新一代建筑全能耗分析软件 EnergyPlus 的基本原理、特点和新功能及其与 DOE-2 的比较,并将其应用于某一实际的建筑冷热电联产系统的模拟,根据模拟结果对整个系统进行了全年能耗和经济性分析。

**关键词** EnergyPlus 建筑全能耗分析 建筑冷热电联产 经济性分析

## Whole building energy analysis tool —EnergyPlus and its application

*By Pan Yiqun, Wu Gang and Volker Hartkopf*

**Abstract** Presents the basic principles, features, and new functions of the software and compares it with DOE-2. Simulates the real building cooling, heating and power (BCHP) system using the software. Analyses the whole energy consumption and economics of the system according to the simulation results.

**Keywords** EnergyPlus, whole building energy analysis, building cooling heating and power, economics analysis

Tongji University, Shanghai, China

①

### 0 引言

EnergyPlus 是在美国能源部 (Department of Energy, DOE) 的支持下,由劳伦斯·伯克利国家实验室 (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)、伊利诺斯大学 (University of Illinois)、美国军队建筑工程实验室 (U. S. Army Construction Engineering Research Laboratory)、俄克拉何马州立大学 (Oklahoma State University) 及其他单位共同开发的,是一个全新的软件,它不仅吸收了建筑能耗分析软件 DOE-2 和 BLAST 的优点,并且具备很多新的功能,被认为是用来替代 DOE-2 的新一代的建筑能耗分析软件<sup>[1]</sup>。

正因为 EnergyPlus 具备其他软件所没有的很多优点和功能,笔者选择它来对一个建筑冷热电系统进行全面的能耗模拟和经济分析。该建筑是即

将在美国卡内基梅隆大学内建造的一幢 6 层办公教学楼,将主要采用一个 250 kW 的固体氧化物燃料电池和双效吸收式制冷机组为建筑提供冷、热、电。

### 1 EnergyPlus 简介

#### 1.1 建筑全能耗分析软件

EnergyPlus 是一个建筑全能耗分析软件 (whole building energy analysis tool)<sup>[2]</sup>。世界上有很多用来设计或分析建筑及暖通空调系统的软件,

① ☆ 潘毅群,女,1970年12月生,博士,副教授  
200092 上海市赤峰路67号同济大学南校区楼宇设备工程与管理系  
(021) 65072569  
E-mail: pyqbb@online.sh.cn  
收稿日期:2003-04-09  
修回日期:2004-07-28

它们具有不同的功能和复杂程度,面向不同的用户,大致可分为以下四大类。

a) 设计用软件(practitioner design tools):建筑师、工程师等用来进行建筑及系统设计的软件,如 AutoCAD;

b) 建筑全能耗分析软件:用来模拟建筑及系统的实际运行状况,从而预测年运行能耗和费用的软件;

c) 能耗与环境影响分析软件(energy and environmental screening tools):主要用来分析采用新的节能技术所带来的经济及环境效益,往往对计算进行简化,输入也比较简单,并能够迅速地给出比较直观的结果;

d) 专业分析软件(specialized analysis tools):用于科研,拥有专门开发的精确的模型,例如计算流体力学(CFD)模拟软件 Fluent、照明模拟软件 Radiance 等。

建筑全能耗分析软件可以用来模拟建筑及空调系统全年逐时的负荷及能耗,有助于建筑师和工程师从整个建筑设计过程来考虑如何节能。大多数的建筑全能耗分析软件由四个主要模块构成:负荷模块(loads)、系统模块(systems)、设备模块(plants)和经济模块(economics)——LSPE。这四个模块相互联系形成一个建筑系统模型。其中负荷模块模拟建筑外围护结构及其与室外环境和室内负荷之间的相互影响。在负荷模块中有多种计算墙体传热和负荷的方法,如反应系数法(response factor)和热传导传递函数法(conduction transfer functions, CTF)用来计算墙体传热;传递函数法(transfer function method, TFM)、热平衡法(heat balance method)和热网络法(thermal network method)用来将窗、墙得热及内部负荷转变为冷、热负荷。系统模块模拟空调系统的空气输送设备、风机、盘管以及相关的控制装置。设备模块模拟制冷机、锅炉、冷却塔、能源储存设备、发电设备、泵等冷热源设备。经济模块计算为满足建筑负荷所需要的能源费用。有些软件没有经济模块,有些软件把系统模块和设备模块合并为一个模块。

目前世界上比较流行的建筑全能耗分析软件主要有:Energy-10, HAP, TRACE, DOE-2, BLAST, Energy Plus, TRNSYS, ESP-r, DeST 等。这些软件具有各自的特点,例如,Energy-10 只能用

来模拟  $1\ 000\ m^2$  以下的小型建筑,DOE-2 能够准确地模拟较复杂的围护结构的负荷,TRNSYS 在模拟空调系统时能够提供最大的灵活性,等等。

## 1.2 Energy Plus

### 1.2.1 负荷模拟

EnergyPlus 是一个建筑能耗逐时模拟引擎,采用集成同步的负荷/系统/设备的模拟方法。在计算负荷时,时间步长可由用户选择,一般为  $10\sim 15\ min$ 。在系统的模拟中,软件会自动设定更短的步长(小至数秒,大至  $1\ h$ )以便于更快地收敛。Energy Plus 采用 CTF 来计算墙体传热,采用热平衡法计算负荷。CTF 实质上还是一种反应系数法,但它的计算更为精确,因为它是基于墙体的内表面温度,而不同于一般的基于室内空气温度的反应系数法。热平衡法是室内空气、围护结构内外表面之间的热平衡方程组的精确求解方法,它突破了传递函数法的种种局限,如表面传热系数和太阳辐射得热可以随时间变化等。在每个时间步长,程序自建筑内表面开始计算对流、辐射和传湿。由于程序计算墙体内表面的温度,因此可以模拟辐射式供热与供冷系统,并对热舒适进行评估。区域之间的气流交换可以通过定义流量和时间表来进行简单的模拟,也可以通过程序链接的 COMIS(LBNL 开发的用来模拟建筑外围护结构的渗透、区域之间的气流与污染物交换的免费专业分析软件)模块对自然通风、机械通风及烟囱效应等引起的区域间的气流和污染物的交换进行详细的模拟。窗户的传热和多层玻璃的太阳辐射得热可以用 WINDOW5(LBNL 开发的计算窗户热性能的免费专业分析软件)计算。遮阳装置可以由用户设定,根据室外温度或太阳入射角进行控制。人工照明可以根据日光照度进行调节。在 EnergyPlus 中采用各向异性的天空模型对 DOE-2 的日光照度模型进行了改进,以更为精确地模拟倾斜表面上的天空散射强度。

### 1.2.2 系统模拟

EnergyPlus 采用模块化的系统模拟方法,时间步长可变。空调系统由多个部件构成,这些部件包括风机、冷热水及直接蒸发盘管、加湿器、转轮除湿装置、蒸发冷却装置、变风量末端装置、风机盘管等。部件的模型有的简单,有的复杂,输入的复杂性也不同。这些部件由模拟实际建筑管网的水或空气环路连接起来,每个部件的前后都需设定一个

节点,以便连接。这些连接起来的部件还可以与房间进行多环路的连接,因此可以模拟双空气环路的空调系统,如独立式新风系统(dedicated outdoor air system, DOAS)。一些常用的空调系统类型和配置已做成模块,包括双风道的定风量空气系统和变风量空气系统、单风道的定风量空气系统和变风量空气系统、组合式直接蒸发系统、热泵、辐射式供热和供冷系统、水环热泵、地源热泵等。

### 1.2.3 设备模拟

EnergyPlus 模拟的冷热源设备包括吸收式制冷机、电制冷机、引擎驱动的制冷机、燃气轮机制冷机、锅炉、冷却塔、柴油发电机、燃气轮机、太阳能电池等。这些设备分别用冷水、热水和冷却水回路连接起来。设备模拟采用曲线拟合法。

### 1.2.4 EnergyPlus 的特点

EnergyPlus 具有以下主要特点<sup>[3]</sup>:

- a) 采用集成同步的负荷/系统/设备的模拟方法。
- b) 在计算负荷时,用户可以定义小于 1 h 的时间步长;在系统模拟中,时间步长自动调整,以加快收敛。
- c) 采用热平衡法模拟负荷。
- d) 采用 CTF 模拟墙体、屋顶、地板等的瞬态传热。
- e) 采用三维有限差分土壤模型和简化的解析方法对土壤传热进行模拟。
- f) 采用联立的传热和传质模型对墙体的传热和传湿进行模拟。
- g) 采用基于人体活动量、室内温湿度等参数的热舒适模型模拟热舒适度。
- h) 采用各向异性的天空模型以改进倾斜表面的天空散射强度。
- i) 先进的窗户传热的计算,可以模拟包括可控的遮阳装置、可调光的电铬玻璃等。
- j) 日光照明的模拟,包括室内照度的计算、眩光的模拟和控制、人工照明的减少对负荷的影响等。
- k) 基于环路的可调整结构的空调系统模拟,用户可以模拟典型的系统,而无需修改源程序。
- l) 与一些常用的模拟软件链接,如 WINDOW5, COMIS, TRNSYS, SPARK 等,以便用户对建筑系统作更详细的模拟。

m) 源代码开放,用户可以根据自己的需要加入新的模块或功能。

虽然 EnergyPlus 具备以上的特点,但还需要明确的是,它仅是模拟引擎,而不是一个用户界面,其界面有待开发;它现在还不是生命周期费用的分析工具,也不是建筑师或暖通设计师的设计工具。

### 1.2.5 EnergyPlus 与 DOE-2 的比较

DOE-2 是现今世界上最为流行的建筑全能耗分析软件,EnergyPlus 与它的主要区别如表 1 所示。

表 1 EnergyPlus 与 DOE 2 的比较

	EnergyPlus	DOE-2
计算方法	集成同步的负荷/系统/设备模拟	顺序的负荷/系统/设备模拟
负荷模拟	CTF 与热平衡法结合	传递函数法(反应系数法)
系统模拟	可以调整系统结构	不可以调整系统结构
温度计算	精确模拟	无法准确模拟
自然通风	可模拟(COMIS)	不可模拟
墙体传湿	可模拟	忽略
热舒适	可模拟	基本上不可模拟
辐射顶板	可模拟	不可模拟
DOAS	可模拟	不可模拟

示。图 1 为集成同步的负荷/系统/设备模拟与顺

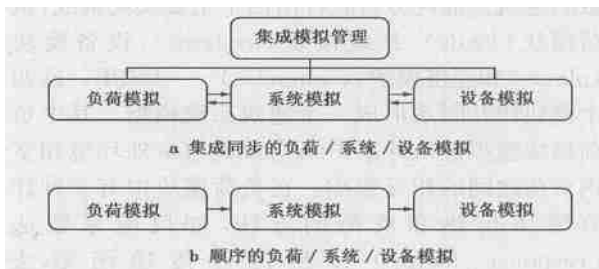


图 1 集成与顺序的负荷/系统/设备模拟比较

序的负荷/系统/设备模拟比较的示意图。由图 1 可知,EnergyPlus 采用的集成同步的模拟方法在三个模块(负荷、系统、设备)之间都有反馈,因此模拟更为精确,而 DOE-2 采用顺序的模拟方法,三个模块之间没有反馈,容易造成较大误差。

### 2 卡内基梅隆大学冷热电联产项目简介

位于美国宾西法尼亚州匹兹堡的卡内基梅隆大学建筑性能与诊断中心将在大学校园内建一座名为 BAPP(building as power plant, 以建筑为热电厂)的示范教学办公楼<sup>[4]</sup>,包括教室、工作室、实验室、办公室等。该建筑将采用各种先进的建筑技术,包括先进的围护结构、空调系统、清洁能源(燃料电池)和可再生能源(太阳能)等。BAPP 由两部分构成:中庭和主楼,中庭面积 704 m<sup>2</sup>,主楼共 6 层,总面积 5 019.84 m<sup>2</sup>,西侧与中庭相连,主楼的

南北两侧为空调机房。这座建筑的热电发生系统是一个 250 kW 的固体氧化物燃料电池。该燃料电池的净交流发电量 226 kW，发电效率 46%，排出的 755 °C 的废气经过二级回热器及余热锅炉回收后，能够产生热量高于 150 kW 的 185 °C/800 kPa 高温高压蒸汽，足可以驱动一台冷量为 196 kW 的双效蒸汽吸收式制冷机，为建筑供冷。该建筑的详细情况可参见文献[5]。

### 3 用 EnergyPlus 进行全年能耗模拟

#### 3.1 模拟参数设定

模拟相关参数如表2所示。表中所列内部负

表2 基本算例的有关参数设定

围护结构	外墙	$R=1.94 (m^2 \cdot K)/W$
	屋顶	$R=7.044 (m^2 \cdot K)/W$
	窗(Low-e 双层窗)	$S_c=0.4325, V_t=0.73,$ $K=1.4 W/(m^2 \cdot K)$
	中庭天窗(单层透明玻璃)	$S_c=1.00, V_t=0.90,$ $K=6.31 W/(m^2 \cdot K)$
	渗透风量	相当于 0.2 h <sup>-1</sup> 换气
内部负荷	照明 主楼、地下室、空调机房	5 W/m <sup>2</sup>
	中庭	10 W/m <sup>2</sup>
设备	主楼 1,2 层(娱乐技术中心)	50 W/m <sup>2</sup>
	主楼 3,4 层(工作室)	70 W/m <sup>2</sup>
	主楼 5,6 层(办公室)	20 W/m <sup>2</sup>
人员	中庭	26 人
	主楼 1,2 层(娱乐技术中心)	35 人
	主楼 3,4 层(工作室)	17 人
	主楼 5,6 层(办公室)	100 人
空气系统	单风道式变风量系统	
冷热源	天然气锅炉、吸收式制冷机、电制冷机	

注: R 为热阻; S<sub>c</sub> 为遮阳系数; V<sub>t</sub> 为可见光穿透率; K 为传热系数(R 的倒数)。

荷为最大值，模拟时设定了负荷变化时间表。遮阳装置及日光照明自动调光系统的控制也作了考虑。因主楼 1,2 层及 3,4 层分别为娱乐技术中心和工作室，将配置大量的计算机设备，因此设备负荷比一般的办公室要高很多。中庭、地下室和空调机房不提供空调。在基本算例中采用了最为常用的冷热源及空调系统，即天然气锅炉、吸收式制冷机、电制冷机及单风道式变风量系统的组合，由城市电网供电。

#### 3.2 模拟算例

笔者对基本算例及以下的两个算例分别进行

了全年逐时的模拟。

a) 算例 1: 固体氧化物燃料电池, 吸收式制冷机、电制冷机、单风道式变风量系统;

b) 算例 2: 固体氧化物燃料电池, 吸收式制冷机、电制冷机、固体转轮除湿器、显热回收装置、单风道式变风量系统。

在基本算例和算例 1, 2 中, 吸收式制冷机的冷量均设为 196 kW。因 EnergyPlus 的功能局限, 算例 2 中的固体转轮除湿器的再生热源为天然气, 而非固体氧化物燃料电池的废气。

#### 3.3 建筑与空调系统模型

图 2, 3 为算例 2 的空调系统模型示意图。在模拟中, 主楼每层被分为 8 个区, 每个区设一个带热水盘管的 VAV 末端。每层设一台新风空调箱(由冷盘管、新回风混合箱、显热交换器、除湿转轮等部件构成), 对新风进行处理后送入各个变风量末端。为方便起见, 图 2 仅画出一个区和一个 VAV 末端。

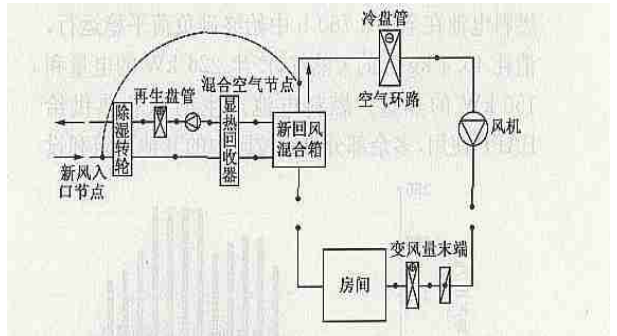


图2 空气环路模型示意图

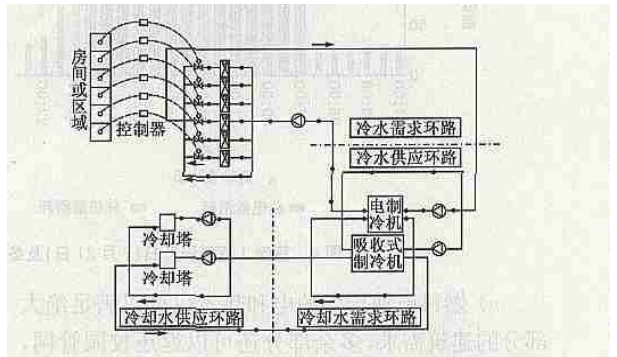


图3 冷水环路与冷却水环路模型示意图

#### 3.4 模拟结果分析

表 3 所示为用 EnergyPlus 模拟得到的建筑运行能耗、费用及收益。其中建筑能耗部分由 EnergyPlus 模拟, 固体氧化物燃料电池部分和能

表3 建筑运行能耗、费用及收益

		基本算例	算例 1	算例 2	
建筑能耗/(kWh/a)	电	照明及设备	692 505	692 505	692 505
		冷热源设备 <sup>1)</sup>	81 807	81 850	92 397
		风机	50 871	50 896	41 033
		总计	825 183	825 251	826 016
	天然气	锅炉	58 424		
		转轮除湿器			78 558
		总计	58 424		78 558
	蒸汽	供热		41 698	9 625
		供冷(吸收式制冷机)	200 075	200 112	259 328
		总计	200 075	241 810	268 952
固体氧化物燃料电池/(kW h/a)	天然气耗量		4 760 900	4 760 900	
	产电量		1 979 760	1 979 760	
	产热量		1 314 000	1 314 000	
能源的消耗与产出/(kW h/a)	电	来自电网	825 183	1 544	2 761
		返还电网	0	1 156 053	1 156 505
	天然气	来自天然气管网	58 424	4 760 900	4 839 458
		来自蒸汽管网	200 075	1 878	1 313
	蒸汽	来自蒸汽管网	200 075	1 878	1 313
		返还蒸汽管网	0	1 074 067	1 046 360
总能源花费与收益 <sup>2)</sup> /(美元/a)		花费: 50 613	收益: 6 947	收益: 4 721	

1) 包括锅炉、制冷机、冷却塔和水泵;

2) 天然气价格 0.191 美元/m<sup>3</sup>, 蒸汽价格 0.018 美元/kg, 电价 0.053 1 美元/(kWh)。

源的消耗与产出部分用 Excel 计算。在模拟时设燃料电池在全年 8 760 h 中始终满负荷平稳运行, 消耗 45.4 kg/h 的天然气, 产生 226 kW 的电量和 150 kW 的热量。燃料电池产生的电和热供给 BAPP 使用, 多余部分供给校园中的其他建筑和设

施使用, 不足部分由校园的电网与蒸汽管网补足。图 4、5 所示为算例 1、2 夏季设计日和冬季设计日的能源消耗与能源产出的情况(不包括燃料电池的天然气消耗)。由表 3 和图 4、5 可以作出以下的分析:

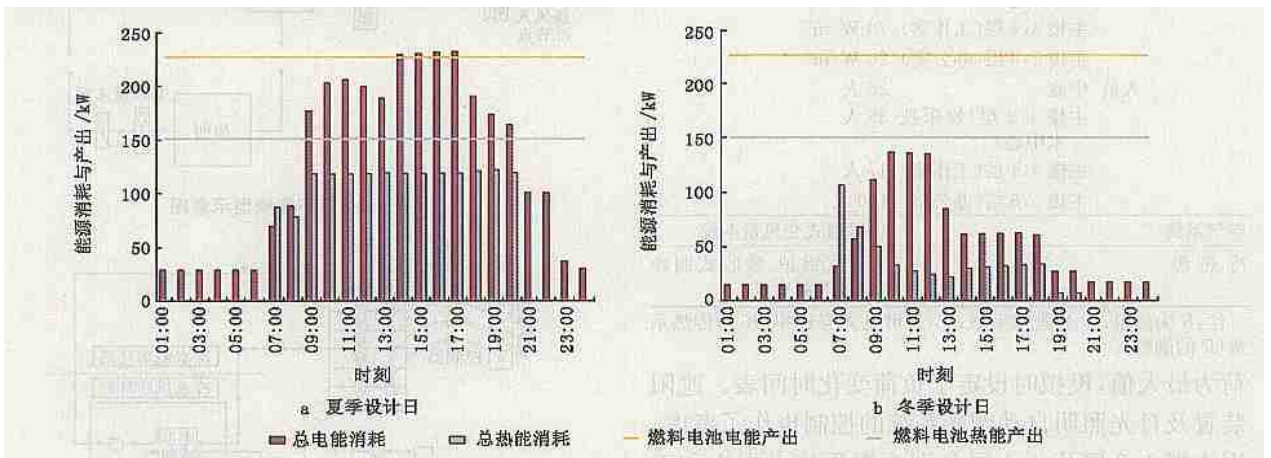


图4 算例1夏季设计日(7月21日)及冬季设计日(1月21日)的能源消耗与能源产出

a) 燃料电池产生的电和热不仅可以满足绝大部分的建筑需求, 多余部分还可以返还校园管网, 供其他建筑使用。

b) 与算例 1 相比, 算例 2 的能耗较高, 收益较低, 这是因为它需要消耗天然气来进行除湿剂的再生, 而冷却转轮除湿器后的空气也需要更多的能量。因 EnergyPlus 现有版本的限制, 在不改变源

程序的前提下, 暂时无法模拟废热再生转轮和全热交换转轮 (enthalpy wheel), 而这两种设备的模拟结果可能完全不同。

c) 因燃料电池产生的电和热的多余部分可以完全由校园内其他建筑消耗, 为学校节省了大量的能源费用, 而节省的能源费用相当于 BAPP 的能源收益, 因此在计算费用和收益时返还管网和来自管



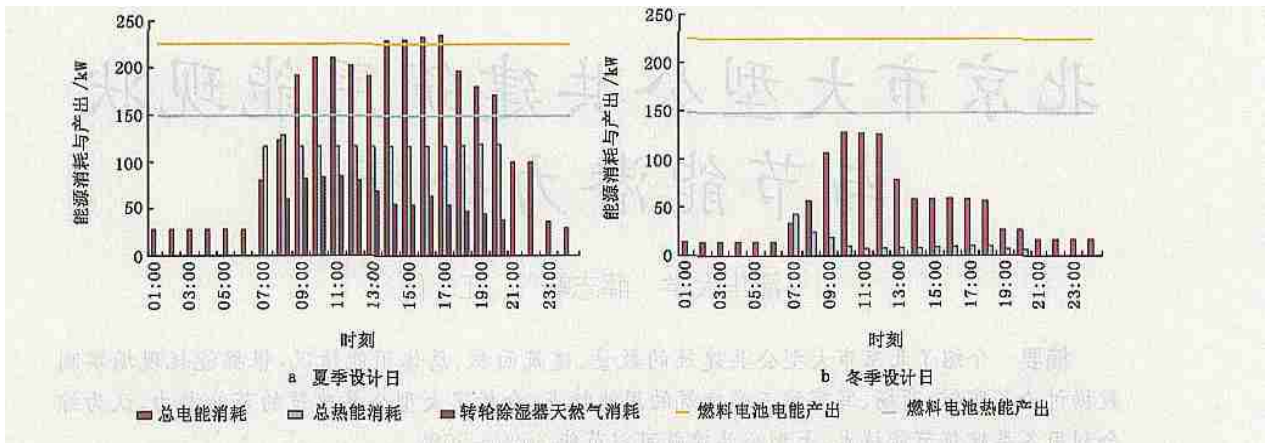


图5 算例2夏季设计日(7月21日)及冬季设计日(1月21日)的能源消耗与能源产出

网的能源价格一样。在采用表3所示的能源价格计算时,算例1和算例2都可以获得一定的净收益,而算例1的收益比算例2高。然而,这里计算的能源费用和收益与能源价格的关系非常密切,能源价格的变化将大大影响计算结果。

### 3.5 使用 EnergyPlus 的心得

因笔者也是初次使用 EnergyPlus,所以在模拟过程中遇到了不少困难,包括:冷热源设备和空调设备的详细性能参数难以确定,因而无法进行精确的模拟;因采用热平衡法,模拟中经常会出现很难收敛的情况,甚至发散;运算时间相对于 DOE-2 来说长得得多;目前版本的功能限制了某些设备和系统的模拟,如以废热驱动的除湿转轮;室内空气的湿度控制尚无法实现;笔者拟对双空气环路系统——独立式新风系统与辐射式供热供冷系统进行模拟,但目前尚未得到合理的结果;等等。尽管如此,笔者还是认为 EnergyPlus 是一个非常强大的建筑全能耗分析软件,具有其他的很多软件所没有的优点和巨大的发展潜力。随着它的不断完善,种种局限会逐步地消除,而且它开放式的结构也为我们提供了加入新模块、进一步开发的可能性。

### 4 结语

EnergyPlus 是新一代的建筑全能耗分析软件,具备很多优点,包括采用先进的集成同步的负荷/设备/系统模拟方法和热平衡法、模块化开发式结构、与其他软件的链接等等。笔者用 EnergyPlus 完成了对建筑冷热电联产项目——BAPP 的全年能耗的模拟。模拟结果的分析显示,该项目可以减少大量的运行能耗,甚至能够取得一定的收益。

### 参考文献

- 1 Crawley D B, Lawrie L K, Winkelmann F C, et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 2001, 33(4): 319-331
- 2 Jacobs P, Henderson H. State-of-the-art review of whole building building envelope, and HVAC component and system simulation and design tools. <http://www.arti-21cr.org/research/>
- 3 EnergyPlus Manual. Version 1.0.3. 2002
- 4 Hartkopf V, Loftness V, Lee S, et al. Building as power plant. U S Green Building Council's International Green Building Conference and Expo, Austin, Texas, 2002
- 5 V 哈特科夫,潘毅群,吴刚,等.固体氧化物燃料电池在建筑冷热电联产中的应用. *暖通空调*, 2003, 33(1): 47-52

·简讯·

## 日本推出“周期性室温自然变化型空调”

由日本三机工业株式会社与独立行政法人建筑研究所、株式会社奥村组共同开发的“周期性室温自然变化型空调”已经在日本获得成功。所谓“周期性室温自然变化型空调”,是指在人体对空调舒适性要求所容许的范围内,利用空调系统停止运行时室内温度自然变化的特性,周期性地间歇运行空调系统以达到节能目的的空调方法。该系统适用于能耗比较大而且空调负荷变动较大的建筑物。

(本刊特约通讯员 吴延鹏)

## 德国宝商用空调热水器新闻发布会

会议于8月28日在北京昆仑饭店举行,共百余人参加。会上德国宝(香港)有限公司推出了集空调、热水器为一体的新产品——空调热水器,该产品主要适用于商业场所。现场演示了该空调热水器的制冷、制热水过程,得到了与会人员的认可。

(本刊)