

建筑能耗模拟的校验方法及其应用

同济大学 潘毅群[☆] 黄治钟

上海现代建筑设计(集团)有限公司 吴 刚

摘要 总结了建筑能耗模拟的校验方法与步骤,并将其应用于某建筑的能耗分析。采用 Visual DOE 4.0 建立了建筑能耗基本模型,比较了模拟结果与实际能耗数据,对模型进行了调整和校验,直至误差符合相关标准。用经过校验的基本模型分析了该建筑的能耗构成,并模拟分析了三种节能措施的节能效果。

关键词 建筑能耗模拟 校验模拟 基本模型 节能措施

Verification method for building energy simulation and its application

By Pan Yiqun[★], Huang Zhizhong and Wu Gang

Abstract Summarizes the verification method and procedures of building energy simulation, and applies the method to the energy performance analysis of a building. With the Visual DOE 4.0, develops a basic building energy model. Model verification is conducted on the comparison between simulation outputs and measured energy data. The energy model is adjusted until its statistical indices are met in compliance to applicable standards and guidelines. Based on the verification model, analyses energy end-use breakdown and simulates the effects of three energy conservation measures.

Keywords building energy simulation, verification simulation, basic model, energy conservation measure

★ Tongji University, Shanghai, China

①

0 引言

近年来,随着我国经济的高速发展,能源需求与供应之间的矛盾越来越凸显,节能成为热点问题。据统计,我国的建筑能耗占社会总能耗的 18%~20% 左右,而且呈现上升的趋势,建筑节能越来越受到关注。而建筑节能工作的基础是对建筑能耗的准确把握、科学分析和合理预测。计算机能耗模拟方法是目前最常用的建筑能耗分析方法,世界上许多国家都开发出具有不同特点的建筑物能耗模拟计算软件,比较有代表性的有 DOE-2, EnergyPlus, Energy-10, HAP, TRNSYS, TRACE, HASP, ESP-r, DeST 等^[1]。由于功能和复杂程度不尽相同,这些软件有些仅被用于设计新建筑时计算空调负荷、预测建筑物能耗和节能计算等,有些则还被用于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,这种软件又称建筑全能耗分析软件(whole building energy analysis tools),例如 DOE-2, EnergyPlus, TRNSYS, ESP-r, DeST 等。在对建筑及其系统的

实际运行能耗进行模拟时,非常重要的一项工作就是用实际的建筑资料和历史能耗数据对计算机模型进行校验,没有经过校验的计算机模型是无法对建筑能耗进行准确预测的,也就无法在该计算机模型上进行进一步的研究工作,如预测某种节能措施的节能效果等。

1 校验模拟

文献[2-4]规定和叙述了四种对于节能改造方案的节能量进行测试与认证的方法,包括:方法 A,将改造部分与建筑其他设备系统隔离,通过约定部分参数和现场测量部分参数来确定节能量;方法 B,将改造部分与其他设备系统隔离,通过现场测量确定节能量;方法 C,通过确定整个系统的能耗水平来确定节能量;方法 D,通过模拟部分或整

①☆ 潘毅群,女,1970 年 12 月生,博士,副教授
201804 上海市曹安公路 4800 号同济大学中德工程学院
(021) 69584741
E-mail: yiqun_pan@163.com
收稿日期:2006-10-26
修回日期:2007-06-05

个设备系统的能耗水平来确定节能量。方法 D 可简称为校验模拟,这种方法首先建立模型模拟建筑的能耗状况,然后采用电力公司每小时或每月收费单数据和终端用户的计量数据来进行校验。校验模拟适用于以下情况:

1) 无法获得整个建筑系统改造前或改造后的能耗数据,例如,该建筑为新建建筑或者在改造之后有新的设备尚未安装而需测试;

2) 无法很方便地通过改造前后的测试确定节能量,例如,空调系统改造后的节能量与天气状况密切相关,简单地进行改造前后的现场测试无法准确确定节能量;

3) 被测试的部分与建筑其他系统相互影响、无法隔离的情况,例如,改进照明系统会使得室内照明负荷下降,从而影响到空调系统;

4) 仅可获得整个建筑的能耗数据,而无法获得各建筑系统的分项能耗数据;

5) 需要进行基准年能耗量的调整,气象参数、运行日程和出租率等参数都会对建筑能耗产生影响,而这些因素与节能改造措施没有关系,因此需要把它们的影响剔除。

当出现以上情况中的一种或几种时,就可以考虑采用校验模拟的方法。通过校验模拟所建立的建筑能耗分析模型还可用于分析和预测建筑系统将来可能的变化所造成的能耗变化。

然而,校验模拟也有一些不适用的情况,例如,有更为简单的方法(现场测量)可以得到节能量;较难模拟的建筑(外形不规则);空调系统无法模拟;改造措施无法模拟;建筑及系统的数据无法充分获得。

1.1 校验模拟的步骤

校验模拟主要有以下几个步骤^[2-4]。

1) 制定一个校验模拟计划

在进行校验模拟之前,必须首先确定:采用哪种模拟软件?是采用逐月还是逐时实测数据来校验模型还是两者都用?采用哪种标准来判断校验?

2) 收集数据

需收集的数据包括:建筑围护结构特性参数、几何尺寸、逐月和逐时的能耗数据、空调系统和其他系统的铭牌数据、运行时间表、部分空调系统和其他系统的现场测试数据、气象参数等。

3) 输入数据,建立模型

将收集的数据输入软件,建立模型。在输入时,要注意内部负荷、空调分区、运行时间表、渗透率等问题。

4) 将模拟结果与实际能耗数据进行比较

根据可获得的实测数据的不同,这个步骤有所不同。最简单的是将模拟结果与逐月能耗账单及现场测试数据进行比较;最好的则是将模拟结果与逐时数据比较。可以用图示和统计两种方法进行比较。

5) 调整模型使模拟结果与实际能耗数据的误差可以接受

如果模拟结果与实际能耗数据的比较结果不符合标准,就需要对模型进行修正,经过多次修正,直至达到标准的要求。

6) 建立基准模型和改造后模型

基准模型表示未采用节能措施的建筑,改造后模型表示节能改造措施实施之后的建筑。

7) 计算节能量

节能量等于基准模型的能耗减去改造后模型的能耗,用来计算节能量的基准模型和改造后模型必须采用同一气象参数文件。

1.2 校验模拟评价标准

文献[2-4]都对校验模拟的误差指标进行了规定,见表1。可以用月误差 E_m 、年误差 E_y 和均方差变异系数 δ_m 来检验模型的准确性,这三个值越小,模型越准确。

表1 可接受的误差指标范围

指标	文献[2]	文献[3]	文献[4]
E_m	±15	±5	±20
E_y	±10		
δ_m	±10	±15	±5

2 校验模拟的实际应用

2.1 建筑基本信息

模拟建筑位于上海浦东陆家嘴,建筑面积约 300 000 m²,建于 1999 年,是以办公和宾馆为主且集餐饮、娱乐多种功能于一体的综合性建筑。

2.2 模型建立和校验

采用 Visual DOE 4.0^[5]为该建筑建模,Visual DOE 4.0 是以 DOE-2.1E 为计算核心开发的界面,而 DOE-2.1E 是逐时的建筑能耗分析工具。

2.2.1 参数输入及建模

1) 气象参数

在初次模拟时采用 DOE-2 建立的上海市典型

气象年的数据作为气象参数的输入。

2) 围护结构

表 2 列出了围护结构的相关特性参数。

表 2 围护结构特性参数

		特性参数
外墙		传热系数 $0.441 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
内墙		传热系数 $2.196 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
屋顶		传热系数 $0.416 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
门		传热系数 $2.675 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
		可见光传导率 0.13
		遮阳系数 0.22
地板	地面	传热系数 $0.143 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
	内部	传热系数 $1.034 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
吊顶		传热系数 $4.229 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
窗	GL-1 型	传热系数 $2.675 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
		可见光传导率 0.13
		遮阳系数 0.22
	GL-2 型	传热系数 $2.675 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
		可见光传导率 0.35
		遮阳系数 0.44
天窗		传热系数 $2.677 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
		可见光传导率 0.08
		遮阳系数 0.13

3) 内部负荷

内部负荷包括照明、设备和人员负荷,这些均根据设计值输入模型,见表 3“校验前”项。

表 3 内部负荷

	照明负荷/(W/m ²)		设备负荷/(W/m ²)		人员密度/ (人/(100 m ²))
	校验前	校验后	校验前	校验后	
办公部分	20	12	30	15	10.9
宾馆	10	15	15	5	4.3
饭店	20	30	12	10	71.4
办公大堂	30	10	15	1	20
宾馆大堂	30	30	15	1	20
商店	30	30	15	10	21.7
会议室	10	15	10	5	20
车库	10	8	10	1	0.1
仓库	10	8	10	1	0.1
机房	20	8	30	1	0.1

注:1) 车库、仓库和机房为非空调空间。

2) 空调空间的夏季室内设定温度为 24°C , 冬季为 22°C 。

4) 空调系统和分区

表 4 列出了空调系统的输入参数(见“校验前”项)。办公部分的空调系统在非办公时间(18:00~次日 7:00)不运行。办公标准层空间被划分为内区和外区,分隔线距外墙 4.2 m。外区的风机动力箱带有再热盘管。

5) 新风与渗透率

根据设计值,新风量为 $9.5 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{s})$ ($34.2 \text{ m}^3/(\text{人} \cdot \text{h})$),渗透空气换气次数在空调系统开启时为 0,空调系统关闭时为 0.2 h^{-1} 。

6) 非空调系统

非空调系统包括照明系统、办公设备、电梯、厨房设备、洗衣房设备、游泳池设备、生活热水系统

表 4 空调系统输入参数

	输入参数	
	校验前	校验后
末端	裙房和办公区:风机动力箱;宾馆:四管制 风机盘管系统	
供冷设定温度/ $^\circ\text{C}$		24 ± 2
供热设定温度/ $^\circ\text{C}$		22 ± 2
制冷机	1 台离心式冷水机	8 台冷水机组,其中 6 组,制冷量由软件 根据负荷自动计 算, $\text{COP}=5.5$
		台 4 220 kW/台, $\text{COP}=4.89$, 2 台 $\text{COP}=4.28$
冷水出水温度/ $^\circ\text{C}$	5.6	6.5
冷却塔	1 台,单速风扇,水流量自动计算	6 台 90 kW/台,水流量 1 814.4 L/s,双速风扇,电动机效率 0.9
冷却水温度/ $^\circ\text{C}$	29.5/35.1	32.2/37.8
冷水二次泵	定速,扬程 50 m,效率 0.8(电动机效率 0.9)	
燃气锅炉	1 台,制热量自动计算,效率 0.7	效率 0.85
热水温度/ $^\circ\text{C}$	70/53.3	55/45
热水泵	定速,扬程 40.8 m,效率 0.8(电动机效率 0.9)	

等。其中,照明系统和办公设备的能耗可以用 DOE-2 计算得到,其他的设备和系统则根据设计值和现场测定估算或者现场记录得到。

7) 初次模拟结果

空调系统、照明设备、办公设备的能耗用 DOE-2 模拟得出,然后与其他设备系统的能耗相加,就得到整幢建筑的总能耗。图 1 为初次模拟的总能耗结果与 2002—2004 年实际能耗的比较,图中短竖线是以 2004 年数据为基础的 $\pm 20\%$ 误差线。由图 1 可知,初次模拟的结果与 3 年的实际能

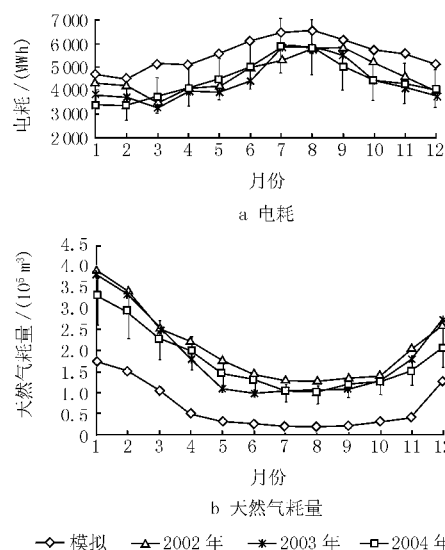


图 1 初次模拟的总能耗结果与 2002—2004 年实际能耗的比较

耗之间的误差较大,与 2004 年实际能耗的误差基本上大于 $\pm 20\%$ 。

2.2.2 模型校验

在对模型进行校验时,根据现场实测数据,对气象参数、内部负荷、空调系统参数、渗透率和非空调系统参数进行了调整和校验。

1) 气象参数

在校验模型中,采用 2004 年实际气象年数据代替标准气象年数据进行计算^[6]。

2) 室内负荷

在某工作日对末端能耗进行了 24 h 的逐时测试和记录之后,根据测试结果对内部负荷中的照明和设备部分进行了调整(见表 3“校验后”项),并且对其负荷率也进行了调整。图 2 显示了校验前后办公部分和酒店的照明和设备的负荷率。由图 2 可知,办公部分非工作时间的实际负荷率明显比较

验之前的设定要高,这主要是因为大部分电脑处于开机或休眠状态而造成的;宾馆部分的校验后负荷率也比校验前要高很多。

3) 空调系统

根据空调系统的特性参数和现场测试结果,对输入参数进行了调整(见表 4)。另外,根据空调系统运行的实际情况,12 月 16 日到 4 月 1 日之间停止供冷,其他时间均供冷;5 月 15 日到 12 月 1 日之间停止供热,其他时间均供热。冬季(12 月、1 月、2 月)因加湿所消耗的天然气量根据室内外空气状态估算得出。

4) 渗透率

考虑到该建筑密封性很好,办公部分、裙房部分、地下室外区渗透空气换气次数调整为 0.1 h^{-1} ,内区为 0。

5) 校验后的模拟结果

图 3 显示了校验后的能耗模拟结果与 2004 年实际能耗的比较,图中短竖线是以 2004 年数据为基础的 $\pm 10\%$ 误差线。表 5 给出了校验后的模拟误差。从图 3 可以看出,校验之后的模拟结果与实际能耗吻合得较好。从表 5 也可以看出,校验后的模拟误差符合文献[2]的规定,但月误差不足文献[3]的要求。

6) 模拟误差原因分析

经过校验的模型与实际建筑尚有一定的差距,

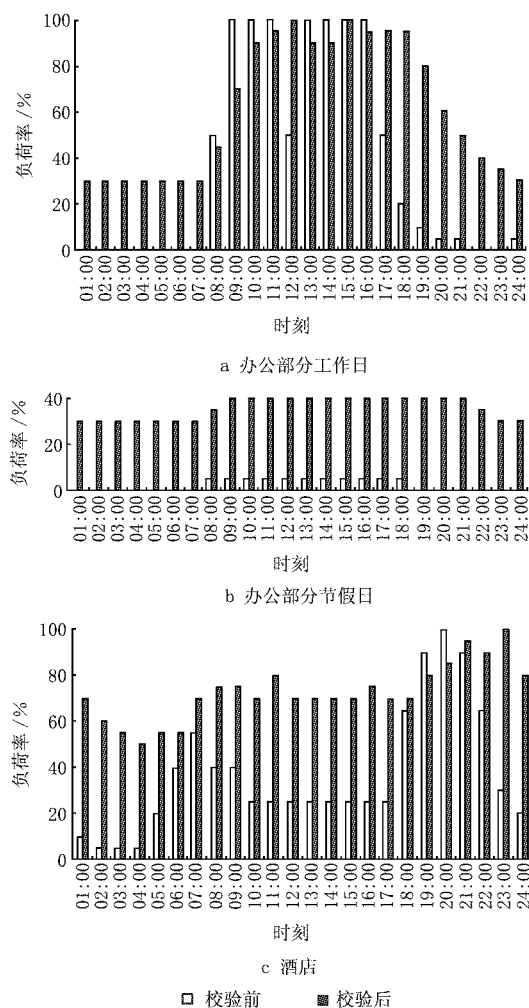


图 2 校验前后办公部分和酒店的照明和设备的负荷率

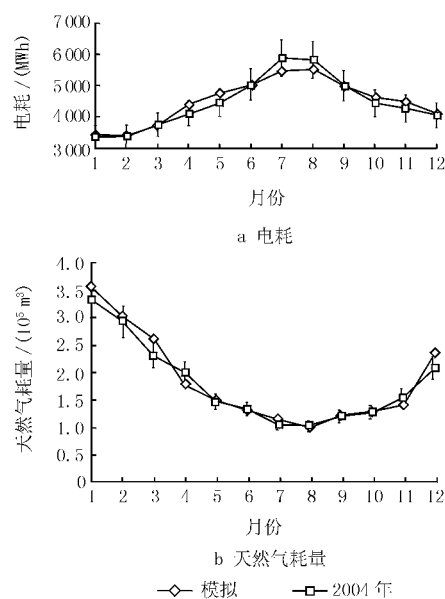


图 3 校验后的能耗模拟结果与 2004 年实际能耗的比较

表 5 校验模拟误差

指标	校验模拟误差(与 2004 年数据比较)		%
	电	天然气	
E_m	± 7.1	± 13.1	
E_y	± 1.2	± 3.1	
δ_m	± 4.71	± 8.92	

产生误差的原因主要有以下几点:

① 实际的各功能空间的使用时间与负荷率具有一定的随机性,例如酒店某一天有一个大型的旅游团入住,会使客房率大幅上升等。而在模型中无法真实反映这种随机性。

② 由于天然气消耗中仅供暖和生活热水部分用模型计算得到,燃气锅炉采用程序自动设定容量,没有按设计容量输入。

③ 所有空调通风设备,包括制冷机、冷却塔、水泵、风机、空调箱、风机动力箱等的特性参数基本按照设计值或额定值输入,设计值或额定值与实际运行参数之间可能会有一定的差距。

④ 冷却塔、水泵、风机的特性曲线很难找到,采用 Visual DOE 4.0 默认值。

⑤ 模型中整幢大厦的冷水由一个系统提供,而实际的冷水系统分高低区。

⑥ 冬季和过渡季高低区各有 1 台 1 400 kW (400 rt) 的制冷机常开,以满足内区的冷负荷要求,但其运行时间可能非常短,模型中无法准确模拟,因此将 12 月 16 日到 4 月 1 日设为非供冷时段,即制冷机、冷却塔、冷水泵、冷却水泵在此期间停机。

以上造成误差的原因基本上都是无法或很难避免的,并且校验模型的误差已在可接受的范围之内,因此将该模型作为基本模型(base case)。

2.3 能耗分析

图 4、5 为该模型全年与逐月的耗电量与天然气耗量的分解。由图 4 可知,在总耗电量中,分解项占最大份额的是照明,其次是风机(包括空调系统风机和排风机),第三是设备。空调电耗(制冷机、冷却塔、水泵、风机的电耗总和)占 40%,在空调电耗中,占最大份额的并非制冷机,而是风机,可见输送空气的能耗是非常大的。此处水泵不仅包括空调系统的冷水泵、冷却水泵和热水泵,还包括生活热水给排水泵,而风机不仅包括空调系统送排风风机,还包括车库送排风风机,但因较难细分,将其能耗全部归入空调能耗。在天然气耗量中,占最大份额的是厨房和洗衣房,其次是供暖,第三是生

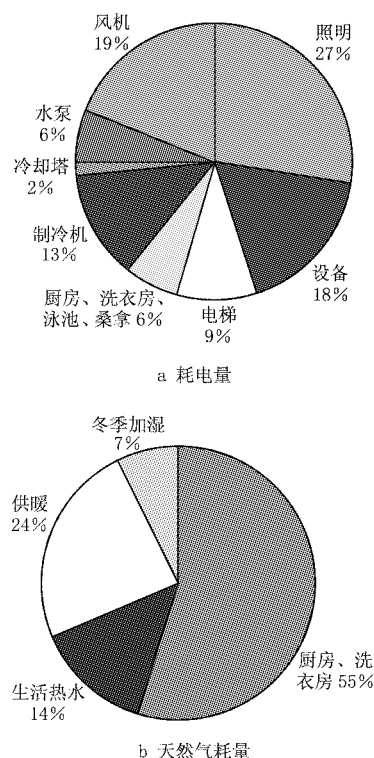


图 4 模型全年耗电量与天然气耗量的分解

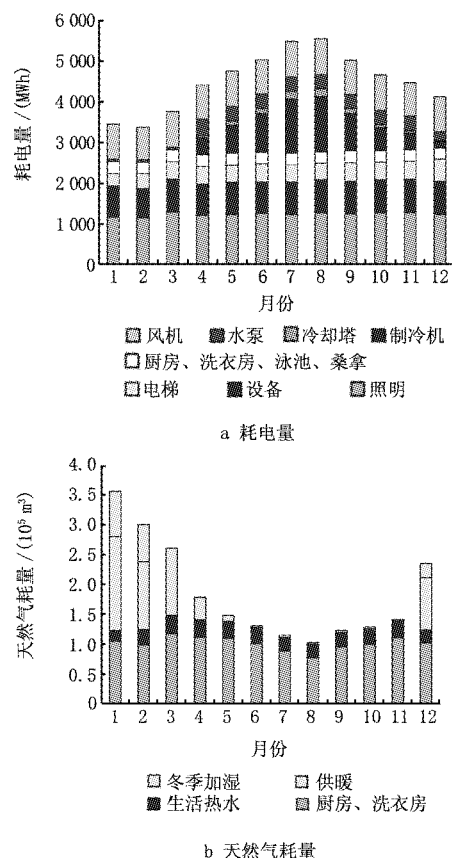


图 5 模型逐月耗电量与天然气耗量的分解

活热水。

由图 5 可知,照明、设备、电梯、风机及厨房、洗衣房、泳池、桑拿的电耗全年逐月变化很小,构成了该建筑的基本电耗,这部分电耗占总电耗的 79%,而制冷机、冷却塔、水泵的电耗逐月变化较大,这部分只占全年总电耗的 21%。厨房、洗衣房、生活热水的天然气的耗量占天然气总耗量的 69%;供暖和冬季加湿天然气的耗量逐月变化很大,占天然气总耗量的 31%。

2.4 节能措施模拟分析

在基本模型的基础上,分析三种可行的节能措施对能耗的影响。

表 6 三种节能措施的节能效果模拟

	单位电耗			单位天然气耗量			一次能耗		
	消耗量/ (kWh/m ²)	节省量/ (kWh/m ²)	节省百分 比/%	消耗量/ (m ³ /m ²)	节省量/ (m ³ /m ²)	节省百分 比/%	消耗量/ (MJ/m ²)	节省量/ (MJ/m ²)	节省百分 比/%
基本模型	180			7.39			1 955		
节能措施一	172	8	4.4	7.39	0	0	1 879	76	3.9
节能措施二	180	0	0	7.39	0	0	1 955	0	0
节能措施三	177	3	1.7	7.43	-0.04	-0.5	1 927	28	1.4

3 结论

3.1 经过实测能耗数据校验的计算机模型能够较为准确地模拟该建筑的全年与逐月能耗。

3.2 该建筑的基本能耗(由照明、设备、电梯、厨房、洗衣房、风机、生活热水等构成的刚性部分)占总能耗比例很大,其中电耗占 79%,而可变能耗(由制冷机、冷却塔、水泵、供热和加湿构成的弹性部分)占比例很小,其中电耗仅占 21%,因此基本负荷很大,全年变化不显著。

3.3 节能措施一的节能效果最好。

参考文献:

- [1] Jacobs P, Henderson H. State-of-the-art review whole building, building envelop, and HVAC component and system simulation and design tools[R]. Final report, prepared for the Air-Conditioning and Refrigeration

1) 节能措施一:将冷水泵和热水泵由定流量变为变流量(流量变化范围为 25%~100%);

2) 节能措施二:冬季、过渡季利用冷却塔免费供冷;

3) 节能措施三:在不降低办公区照度(500 lx)的前提下,更换办公区灯具,将照明负荷由 12 W/m² 降低至 9.31 W/m²。

表 6 列出了三种节能措施的模拟结果,节能措施一的节能效果最好,而节能措施二则没有任何节能效果,分析原因,主要是由于上海过渡季和冬季的室外空气湿度较高,冷却塔免费供冷无法发挥作用。

Technology Institute under Arti 21-Cr Program Contract Number 605-30010/605-30020

- [2] US Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. DOE/GO-102000-0960 M&V guidelines: measurement and verification for federal energy projects[S]. Version 2.2,2000
- [3] ASHRAE Standards Committee. ASHRAE guideline 14—2002 Measurement of energy and demand savings[S],2002
- [4] International Performance Measurement and Verification Protocol Committee. International performance measurement and verification protocol (IPMVP)[S], 2002
- [5] Architectural Energy Corporation. Visual DOE 4.0 user manual[M], 2004
- [6] Huang Zhizhong, Pan Yiqun. A statistics-based method for hourly solar radiation data calculation[C] // SimBuild2006, Boston, 2006

(上接第 118 页)

保温材料的墙体检测是否有效,还需要作进一步的实验测试研究。也欢迎各位同行提出建议。

参考文献:

- [1] 彭昌海. 关于建筑节能现场检测的几点思考[J]. 暖通空调,2005,35(3):51-53
- [2] 黄峥,朱彤,赵鸿. 非稳态法检测建筑围护结构传热系数[J]. 墙材革新与建筑节能,2005(8):45-47
- [3] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2001

- [4] 王沫然. MATLAB 与科学计算[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2003
- [5] 章熙民,任泽霁,梅飞鸣. 传热学[M]. 3 版. 北京:中国建筑工业出版社,1993
- [6] 王秀春,智会强. 人工神经网络和遗传算法在导热反问题中的应用[J]. 河北工业大学学报,2004,33(2):171-176
- [7] 寇蔚,孙丰瑞,杨立. 神经网络求解传热反问题的可行性研究[J]. 激光与红外,2004,34(5):347-349
- [8] 黄峥. 建筑围护结构传热系数现场检测技术的研究[D]. 上海:同济大学,2006