

上海某大学体育中心能耗分析

郁丛¹, 王秋涧¹, 李玉明², 潘毅群¹

(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: 应用 EnergyPlus 能耗模拟软件对上海某大学体育中心进行能耗模拟。其中建筑几何使用 DesignBuilder 软件建立,而后利用 EnergyPlus 进行空调建模并计算能耗。在此基础上,由于各个场馆使用情况的不同,挑选典型日对篮球比赛、游泳比赛、羽毛球比赛这三种典型情景分别模拟,计算其能耗,并分析能耗特点,在一定程度上预估该体育中心投入使用后的耗能情况。

关键词: 体育中心; DesignBuilder 软件; EnergyPlus 软件; 能耗; 模拟

中图分类号: TU29 ;TU-9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-7237(2014)04-0085-06

Energy Consumption Analysis of a University Sports Center in Shanghai

YU Cong¹, WANG Qiu-jian¹, LI Yu-ming², PAN Yi-qun¹

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

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

Abstract: This paper aims at characterizing the energy performance of a university sports center in Shanghai with software EnergyPlus. The construction geometry is built by software DesignBuilder, while air-conditioning modeling is made by software EnergyPlus. Due to the diverse operation time, some typical days are selected and modeled respectively (Basketball Match, Swimming Match and Badminton Match). Then the energy consumption is calculated in the above conditions. Moreover, Based on the result of energy consumption analysis, the energy performance is estimated for the sports center putting into use.

Keywords: sports center; DesignBuilder; EnergyPlus; energy consumption; simulation

0 引言

体育中心是体育设施中工艺最为复杂的建筑,体现了建筑学、体育工艺学、城市景观学、生态科学、工程经济学等多学科的交互,其包含了比赛性和训练性游泳馆、篮球馆、羽毛球馆等屋顶跨度大、高度高、工艺复杂的空间,耗能形式较其他民用建筑有所不同,体育中心类建筑的特殊性也决定其具有较大的节能空间。目前,国内关于体育中心的模拟案例较少。齐虹等采用 ECOTECT 分析了北方某高校体育馆能耗及特点^[1];郑妍等通过对北京地区某体育馆建筑的基本信息及用能情况进行实地调研得出体育馆类建筑的基本能耗情况及节能技术应用^[2];王凡等采用 CFD 模拟分析了游泳馆内温度、湿度、风速在某种空调方式下的变化规律,得到防止室内结露和满足舒适性要求的优化设计方案^[3]。

本文利用了 EnergyPlus 能耗模拟软件对上海某大学体育中心进行全年能耗模拟并对篮球比赛、游泳比赛以及羽毛球比赛这三种典型情景挑选典型日分别模拟,计算能耗。

收稿日期 2013-11-27; 修回日期 2013-12-22

1 建筑概况

上海某大学体育中心总建筑面积 13 410 m²,地下 1 层,地上 2 层,总建筑高度为 19.350 m。该建筑外立面为透明与非透明幕墙,幕墙上可开启外窗。标准比赛池区屋顶可敞开也可封闭。主要包括 A 区球类场馆和 B 区游泳馆两部分主体建筑。其中主要有标准比赛泳池区、训练泳池区、室内篮球场、羽毛球场、乒乓球室、健身房、舞蹈房、更衣室、淋浴室、各类办公室,以及其他辅助房间。

体育中心内的篮球馆、游泳馆、羽毛球馆和乒乓球室采用全空气系统。活动室、舞蹈房等房间采用风机盘管加新风系统。另外游泳馆、淋浴房、更衣室还设有地板辐射采暖系统。以上空调末端系统采用风冷热泵机组作为冷热源。办公室、更衣室及其他辅助用房则采用 VRV 系统。游泳馆采用泳池专用除湿热泵机组(带辅助制冷)。

泳池采用 2 台风冷热泵加热池水,池水全年维持 27℃。风冷热泵机组设置于裙房屋面通风良好处,循环水泵及水处理装置等系统组件均设置于地下 1 层空调机房内。初次加热时,采用 1 台空调用风冷热泵

机组兼作热源。另外,淋浴用生活热水采用太阳能集热加燃气锅炉辅助热水系统。本工程选用3台螺杆式风冷热泵冷热水机组,其中1台风冷热泵机组,在泳池水初次加热时,临时兼做热水机组。

2 能耗模拟软件介绍

本次能耗模拟应用 EnergyPlus 能耗模拟软件。其中建筑几何使用 DesignBuilder 软件建立,而后利用 EnergyPlus 进行空调建模并计算能耗。

DesignBuilder 是一款针对建筑能耗动态模拟程序(EnergyPlus)开发的综合用户图形界面模拟软件。其采用了易操作的 OpenGL 固体建模器。由此,在 3D 空间中配置(块)通过拉伸、剪切可直观地进行建筑物模型的制作。可对建筑部件的厚度、房间的面积及体积进行可视化把握。此外,对模型的几何学形状和表面形状没有限制。

EnergyPlus 是由美国能源部和劳伦斯伯克利国家实验室共同开发的一款建筑能耗分析软件。它吸收了业界熟知的 DOE-2 和 BLAST 两者的优点,是如今最常用的能耗模拟软件之一。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。它在计算负荷时采用 CTF 来计算墙体传热,利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,同时,改变了以往 DOE-2 在进行日照计算时只计算 20 个不同太阳高度的采光系数,逐时计算太阳位置和采光系数,并引入各向异性的天空模型使得在计算日光照时更加准确可靠^[4]。

3 建模过程

3.1 建筑几何

根据该体育中心的平面图纸进行几何建模并作如下简化:

(1)建筑外立面简化: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型计算的时间。室外楼梯平台等因为不涉及该建筑能耗,因此不建模。

(2)模型分区简化:由于该建筑空间分布比较复杂,房间众多,因此,模型的分区按照功能空间、使用情况和空调系统设置进行。个别功能相同且位置相邻的房间进行合并,合并后模型共分 45 个区。

(3)窗户简化:窗户按图纸设置,玻璃幕墙上的各个不同高度的造型窗户则按该方位的窗墙比来简化设置。

简化后建立几何模型并输出为 idf 文件,最后模型外观如图 1。

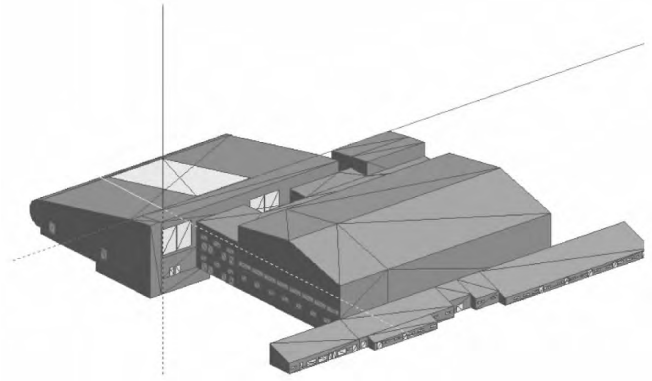


图 1 建筑模型外观

Fig.1 Building facade model

3.2 气象数据

本次模拟用上海典型气象年数据,为 ASHRAE (美国采暖、制冷与空调工程师协会)和 NCDC(美国国家气候数据中心)利用 DATSAV3 数据库生成的 I-WEC 格式文件,下载自美国能源部 Energy Efficiency and Renewable Energy 网站。表 1 给出了冬季与夏季设计日的气象参数。

表 1 设计日气象参数

Table 1 Meteorological parameter in design day

	最大干球温度/°C	日较差/°C	湿球温度/°C	风速/(m/s)
夏季设计日	34.40	5.20	27.30	0.00
冬季设计日	-1.70	0.00	-1.70	8.10

3.3 建筑参数设置

将几何模型输出的 idf 文件导入 EnergyPlus,按照设计图纸,提取能耗有关参数进行设置。

围护结构中外墙和屋顶等的设置是通过 DesignBuilder 里新建墙体材料或屋顶材料,再输入该结构层数以及选择与实际最接近的材料后,输入传热系数 U 值确定。输入 U 值后软件自动生成每层材料厚度(见表 2、3)。

表 2 围护结构设定参数

Table 2 Setting parameter of building envelope

围护结构名称	传热系数/[W/(m ² ·K)]
外墙	涂料外墙 0.66; 铝板幕墙,带 基层墙体 0.65; 铝板幕墙,不 带基层墙体 0.75
隔墙	1.05
楼板	1.09
屋顶	金属屋面 0.33; 上人屋面 0.43; 非上人屋面 0.41;
天窗及幕墙	2.8

表3 各朝向幕墙及天窗窗墙比和太阳辐射得热系数 SHGC
Table 3 Curtain wall and skylight for each orientation and solar radiation
heat gain coefficient(SHGC)

SHGC		窗墙比	
幕墙	0.38	东	0.19
		南	0.11
		西	0.38
		北	0.37
天窗	0.35	0.06	

3.3.1 内部热扰

照明负荷按照设计资料来设置,其中2层羽毛球馆、乒乓球馆照明 30 W/m^2 ;1层标准泳池照明 $P_e=26\text{ kW}$;1层训练泳池照明 $P_e=8\text{ kW}$ 等,除设计资料给的房间之外一般房间按照平均照明密度设置: 12 W/m^2 。

设备负荷和人员密度参照公共建筑节能设计标准设定^[5]。

3.3.2 室内环境控制参数

根据房间功能与使用时间的不同,分以下7个控制方案:

(1)室内恒温泳池区:夏季 $29\text{ }^\circ\text{C}$,65%;冬季 $29\text{ }^\circ\text{C}$,65%,新风 1 ach ;

(2)体育馆:夏季 $27\text{ }^\circ\text{C}$,55%;冬季 $18\text{ }^\circ\text{C}$,50%,新风 $20\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{p})$;

(3)更衣:夏季 $27\text{ }^\circ\text{C}$,60%;冬季 $27\text{ }^\circ\text{C}$,60%;

(4)乒乓球、羽毛球等:夏季 $26\text{ }^\circ\text{C}$,55%;冬季 $18\text{ }^\circ\text{C}$,50%,新风 $20\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{p})$;

(5)健身房、舞蹈、活动:夏季 $26\text{ }^\circ\text{C}$,55%;冬季 $18\text{ }^\circ\text{C}$,50%,新风 $40\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{p})$;

(6)办公、技术用房等:夏季 $26\text{ }^\circ\text{C}$,55%;冬季 $20\text{ }^\circ\text{C}$,50%,新风 $30\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{p})$;

(7)门厅:夏季 $27\text{ }^\circ\text{C}$,60%;冬季 $18\text{ }^\circ\text{C}$,50%,新风 $10\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{p})$;

3.3.3 空调系统

该建筑内部的房间类型和空间分布比较复杂,不同的房间会单独分设空气处理机组对空气进行处理,而在建立模型时没有必要花很大的工作量去完全依照实际系统设置室内机。因此,根据房间的朝向使用功能系统类型,将整个建筑分为45个区,其中空调区为21个。模拟了1个集中空调系统和恒温泳池池水加热系统以及5个VRV系统。

3.3.3.1 集中空调系统

冷热源为3台螺杆式风冷热泵冷热水机组,标准制冷量和制热量分别为 684 kW/台 和 775 kW/台 ,冬

季空调计算温度下制热量为 605 kW/台 。空调系统冷热水供回水温度分别为 $7\sim 12\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50\sim 45\text{ }^\circ\text{C}$ 。且体育中心内各空调机组采用双风机全热回收空调机组,以充分回收排风中的废热。

(1)风机盘管加独立新风系统:共6个空调区,含活动室、舞蹈房等房间。

(2)全空气空调系统:共11个空调区,含场地面积比较大的羽毛球场、乒乓板球场、篮球场以及2个泳池等。

(3)低温热水地板辐射供暖系统:共5个空调区,含2个泳池的地面、更衣室以及淋浴室。

3.3.3.2 VRV系统

按照设计资料共10个空调区设置了VRV系统,每个区设置1个室内机,共5台室外机。

3.3.3.3 恒温泳池池水加热系统

由2台风冷热泵作为加热热源,热水供回水温度分别为 $50\sim 45\text{ }^\circ\text{C}$ 。室内恒温泳池池水加热热量为 1200 kW (取平时加热量)。2台热泵冬季空调计算温度下制热量为 605 kW/台 。

3.3.3.4 生活热水系统

模型中假设太阳能热水系统和燃气热水系统各提供总用水量的50%,即 $8.4\text{ m}^3/\text{h}\times 50\%=4.2\text{ m}^3/\text{h}$ 。忽略太阳能热水的循环泵能耗。最终能耗结果中的生活热水能耗全为燃气系统能耗。

3.3.4 能源费率设置(见表4)

3.4 各功能房间使用时间

体育中心设定为全年开放,但使用情况有所区别。建筑室内负荷的运行时间按照图2设置。建模过程中,假设寒暑假、学期中的节假日以及工作日(考虑到工作日大部分学生上课,仅有一小部分学生会使用体育中心设施)的使用情况大致相同,负荷比例较小,称为情形一;学期的周末使用频率较高,负荷比例较大,称为情形二。情景一和情景二的人员照明以及设备使用情况如图2。

空调系统运行时间为 $7:00\sim 21:30$ 。空调供给房间见本文3.3.3节。空调供热时间为12月至2月,供冷时间为6~9月。过渡季(3月、4月、5月和10月、11月)不使用空调进行空气处理,只保证恒温泳池池水加热以及生活热水。其他按照设计资料来设置。

4 比赛情景典型日设置

空调运行设置分为基准情景和篮球比赛、羽毛球比赛以及游泳比赛三个比赛情景设置。4个情景中过渡季(3月、4月、5月和10月、11月)整个体育中心所有房间均不使用空调。

4.1 基准模型

考虑到篮球馆、羽毛球馆和游泳馆三个面积较大的场馆在日常使用中开空调的可能性较小,故将篮球馆和羽毛球馆设置为非空调区,游泳馆只保证冬季供

表 4 能源费率设置
Table 4 Energy rates setting

				夏季	冬季
电费计价/(RMB/kW·h)	分时电价	峰时	8: 00—11: 00 13: 00—15: 00 18: 00—21: 00	1.232	1.197
		平时	6: 00—8: 00 11: 00—13: 00 15: 00—18: 00 21: 00—22: 00	0.779	0.744
		谷时	22: 00—6: 00	0.291	0.356
燃气计价/(RMB/Nm ³)	统一气价			3.82	

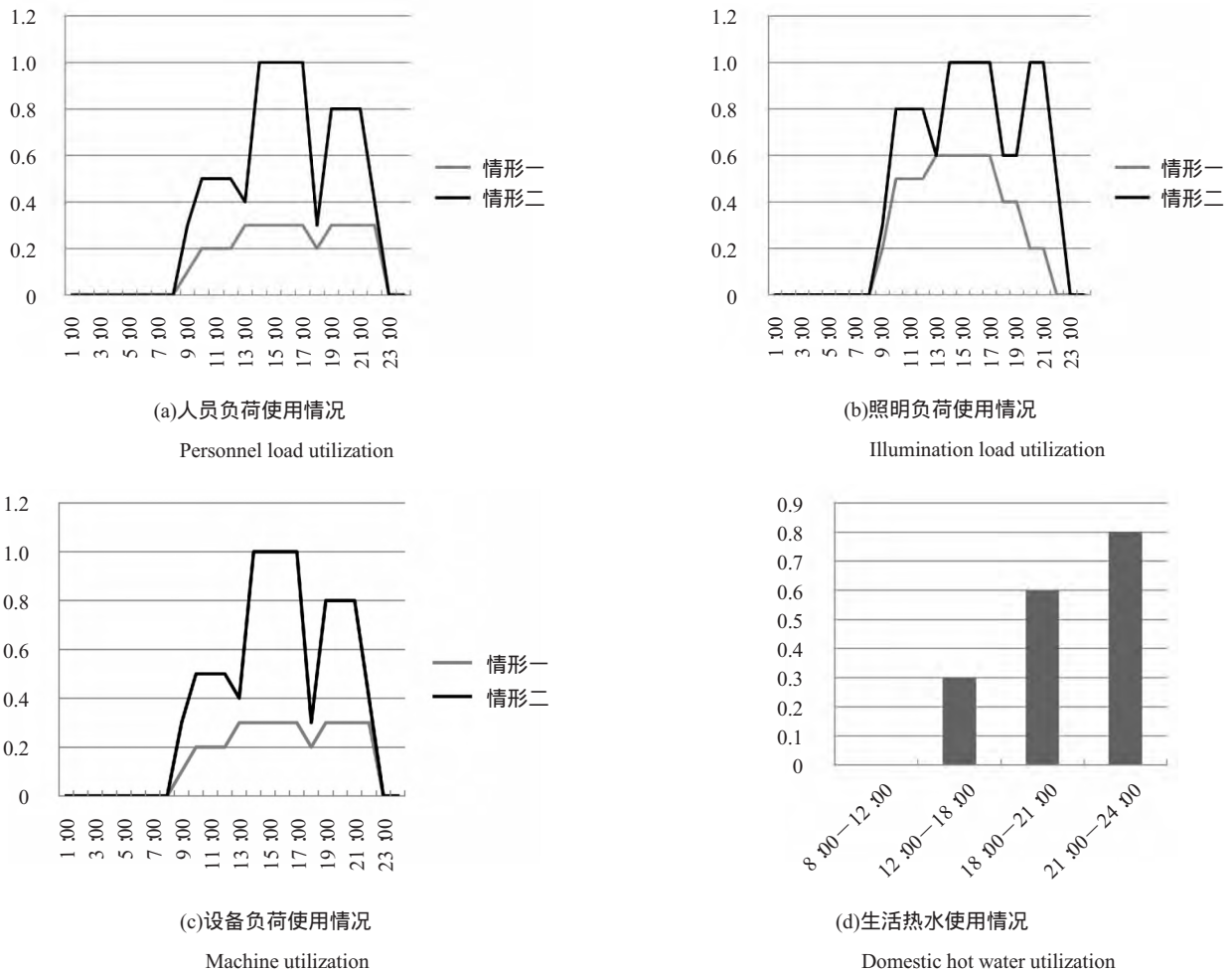


图 2 室内负荷运行时间
Fig.2 Operating time of indoor load

暖需求,将房间维持在室内设计温度,其余功能房间空调除过渡季均正常使用。

4.2 篮球比赛情景

将篮球馆重新设置为空调区域,保证场馆内的室内设计温度,余下两馆与基准情景相同。

4.3 羽毛球比赛情景

将羽毛球馆重新设置为空调区域,保证场馆内的室内设计温度,余下两馆与基准情景相同。

4.4 游泳比赛情景

恢复使用游泳馆的夏季空调进行供冷,冬季采暖

不变,余下两馆与基准情景相同。

4个情景具体设置如表5。

5 能耗结果与分析

5.1 基准情景能耗结果(见表6)

表5 情景设置

Table 5 Setting profiles

	基准模型	篮球比赛场景	羽毛球比赛场景	游泳比赛场景
篮球馆	非空调区	空调区	非空调区	非空调区
羽毛球馆	非空调区	非空调区	空调区	非空调区
游泳馆	夏季非空调, 冬季空调	夏季非空调, 冬季空调	夏季非空调, 冬季空调	夏季供冷, 冬季供暖

表6 基准情景能耗结果

Table 6 The results of energy consumption (baseline scenario)

全年总耗电/kW·h	2 129 081	燃气耗量/Nm ³	154 700
全年电费支出/万元	167.2	全年燃气费用/万元	59.1
全年总运行费用/万元	226.3	单位建筑面积消耗一次能源/(MJ/m ²)	2 077
全年消耗一次能源/J	3.05×10 ¹³	全年能耗折合标准煤/t	1 044

注 折算到一次能源的转换系数 耗电取 3.167、耗气取 1.084。折算标准煤时 取标准煤低位热值为 29.27 MJ。

5.2 比赛情景能耗结果

设置比赛情景的目的是为了模拟出当体育中心承办某类比赛时,该比赛场馆空调系统投入使用的情况下,体育中心的耗能情况。

分别选择7月9日、12月24日和9月17日作为夏季、冬季和过渡季天气情况的典型日。典型日均为正常学期的周末,即体育中心使用程度较高。然后从各个比赛情景的全年能耗结果中选取典型日数据,作为承办某种体育比赛时的典型日单日能耗,结果如表7(由于气耗为生活热水消耗,全年变化幅度不大,故只列出电耗结果)。

表7 比赛情景能耗结果

Table 7 The results of energy consumption (competition scenario)

单日电耗/kW·h	篮球比赛	羽毛球比赛	游泳比赛
夏季 7月9日	7 893.44	7 105.58	7 012.83
冬季 12月24日	11 029.91	9 487.90	9 410.42
过渡季 9月17日	7 986.22	7 225.02	7 140.16

从表7中可以看出,3种比赛的冬季能耗均大于夏季和过渡季,而过渡季的能耗略大于夏季,其原因可能是因为夏季最热的7、8月份正值学校的暑期,体育中心使用率较低,且基准情景中大型体育场馆设为

全年不开空调,只保证游泳馆的冬季采暖,而过渡季不开空调,因此,冬季能耗最大。3、4、5月和10、11月过渡季节由于空调完全关闭,能耗小于冬夏季。

从比赛场景看,篮球比赛所占能耗最高其次是羽毛球比赛和游泳比赛。

5.3 能耗组成

逐月分项电耗、燃气耗量结果和全年各项耗电比例见图3~5。其中热泵的耗电为体育中心风冷热泵机组夏季6月~9月制冷以及冬季12月、1月和2月制热时的总耗电。

具体来看,全年中12月的耗电最高,为204 697 kW·h,其次为1月份,设为寒假的2月份能耗较1月份而言明显下降。

从全年各项电耗比例来看,照明耗电所占比重最大为总耗电的36%,其次是设备耗电为18%。这两部分占去了总耗电的半壁江山。再者,利用风冷热泵加热泳池池水的耗电也很可观,占17%。在今后运行时可以着重考虑这三者的节能。

由于游泳池地暖系统设计参数不详、能耗软件无法准确模拟设计资料中的泳池区除湿系统能耗以及室内负荷时间表设置与实际使用时不一致等原因,可能与实际能耗数据略有出入,但逐月能耗变化以及全年分项能耗比例大致符合实际情况。

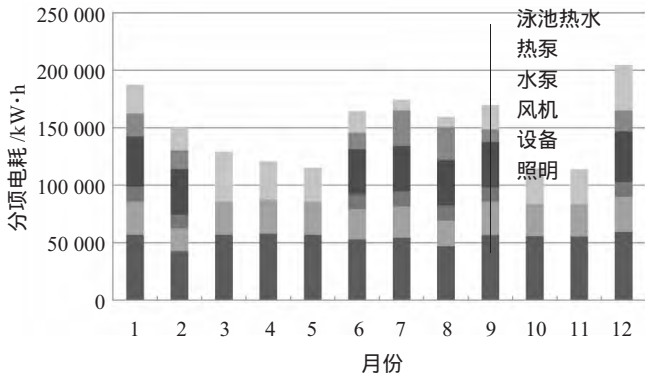


图3 逐月分项电耗结果

Fig.3 Components of monthly power consumption

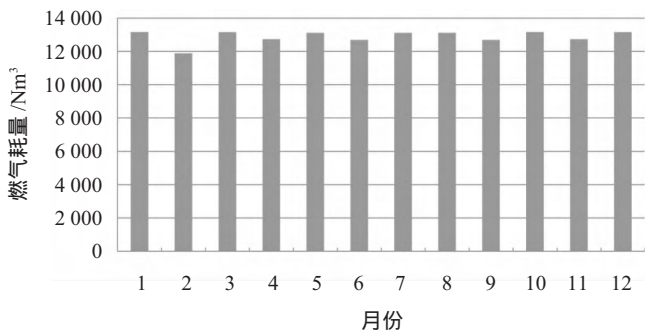


图4 逐月燃气耗量

Fig.4 Monthly gas consumption

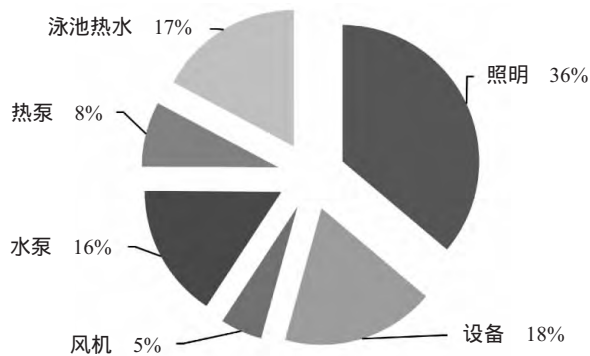


图5 全年各项耗电比例

Fig.5 Proportion of annual power consumption

6 结论

本文利用了 EnergyPlus 能耗模拟软件对上海某大学体育中心进行全年能耗模拟，并对篮球比赛、游泳比赛以及羽毛球比赛这 3 种典型情景挑选典型日

分别模拟，通过模拟计算得到了该体育中心的一系列能耗指标和能耗组成情况，对其各系统设备的运行规律和耗能情况有了更加深入的了解，其计算结果可以在一定程度上为体育中心投入使用后的耗能情况提供参照。通过上文的讨论，可以得出以下结论：

(1)该体育中心在非比赛日(基准模型)时全年总燃气量和电量为 154 700 Nm³ 和 2 129 081 kW·h，基本符合实际情况。

(2)该体育中心耗电比例比较大的有照明、设备和泳池热水。在今后运行时可以着重考虑这三者的节能。对于照明，尤其是比较大的比赛场地，不用时应及时关闭。

(3)对于 3 个典型比赛场景(篮球比赛、羽毛球比赛、游泳比赛)，这三者的冬季耗能均明显高于夏季与过渡季，篮球比赛能耗最高，其次是羽毛球比赛以及游泳比赛。

由于该体育中心较大，大标准泳池又是可关闭的，篮球场、羽毛球场、乒乓球场等空调也可以关闭，办公室等小的辅助用房是 5 台 VRV 室外机带动的，其在非使用时间可以关闭以节能，因此，实际使用时如管理得当能耗还可以进一步降低。

参考文献：

- [1]齐虹,等.北方高校体育馆建筑能耗模拟分析[J].低温建筑技术,2011,(7):113-114.
- [2]郑妍,等.北京地区某体育馆类建筑能耗分析[J].建筑节能,2012,(9):54-58.
- [3]王凡,雷飞.武汉体育中心游泳馆室内环境模拟分析[J].暖通空调,2009,39(6):117-120.
- [4]潘毅群,等.实用建筑能耗模拟手册[M].上海:中国建筑工业出版社,2013.
- [5]同济大学.DGJ08—107—2004,公共建筑节能设计标准[S].上海:上海市建设工程标准定额管理总站,2003.

作者简介：郁丛(1990)女，浙江人，同济大学硕士研究生，供热、供燃气、通风与空调工程专业，主要从事区域能源及负荷预测研究(yu-cong886@126.net)。

指导教师：潘毅群，同济大学教授，博导。

(上接第 84 页)[5]张文宁.干式变压器有功及无功功率损耗的简化计算[J].建筑电气,2005,(1):9-11.

[6]刘兵.民用建筑照明节能改造中 LED 节能效果分析[J].建筑电气,2013,32(7):62-64.

[7]上海市电力公司运维检修部、营销部.上海市新建住宅区供电配套工程技术导则(上电司运检[2012]2220号)[Z].上海市电力公司,2012:8.

[8]上海市统计局.上海统计年鉴(2012)[EB/OL].http://www.stats-sh.gov.cn/tjnj/tjnj2012.htm.

[9]方定琴,张浩,吴开亚.上海市民用建筑能耗的估算与分析[J].环境科学与管理,2012,37(6):41-46.

[10]国务院.“十二五”节能减排综合性工作方案(国发[2011]26号)[EB/OL].http://www.gov.cn/jzwgk/2011-09/07/content_1941731.htm.

作者简介：张旭栋(1982)男，安徽泾县人，毕业于复旦大学环境科学与工程系，理学硕士，工程师，就职于宝钢工程技术集团有限公司，从事环境咨询、能源咨询与规划设计工作(zhangxudong@baosteel.com)。