

智能酒店客房末端控制系统节能潜力分析 模型与软件开发

徐蕾, 潘毅群¹

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海, 201804)

摘要: 随着人民生活水平的日益提高, 我国酒店业市场呈现显著增长趋势。从国家能源安全和节能减排工作的角度出发, 酒店类建筑面积的日益增长所带来的能源消耗和碳排放问题日益凸显; 从酒店提高自身效益的角度出发, 设备节能则是扩大利润的有效途径。本文根据酒店客房实测数据, 确定了酒店客房人员在室率时间表; 根据调研数据, 建立了不同气候区不同客房尺寸的典型客房模型, 并开发软件根据用户选择的节能措施对模型进行修改, 模拟计算得到客房负荷; 同时, 建立了采暖空调设备侧模型用于计算能耗。通过基准模型和设计模型的能耗比较, 可以得到选用的节能措施的节能效果。

关键词: 酒店节能, 在室率, 能耗模拟, 典型模型

Abstract: With the rise of people's living standards, China's hotel industry is rapidly growing. From the perspective of energy safety and emission reduction, hotels' energy consumption and carbon emissions are gaining attention. Energy savings can also bring profits to hotel owners. This paper analyzed the monitored data from hotel rooms and determined the occupancy schedule of hotel rooms. Prototypical hotel room models of different climate zones and different room sizes are built according to investigated data. A program was developed for users to choose different energy-saving measures and modify corresponding simulation files. The simulated results of coil loads were import into equipment models to calculate the energy consumption. By comparing the energy usage of baseline model and proposed model, energy saving can be obtained.

Key words: Hotel energy efficiency, occupancy, energy simulation, prototypical model

0. 引言

随着我国经济的快速发展和国民生活水平的快速提高, 我国成为了最热门的酒店投资地之一。平均每四天就有一家国际品牌酒店开业, 中国成为酒店行业增长最快的市场^[1]。研究表明, 中国酒店业整体仍然处于高能耗阶段, 酒店能耗水平远远高于居民能源消费水平, 具有巨大的节能减排潜力^[2]。周伟业^[3]对全国 310 家五星级酒店能耗情况进行了调研, 与模拟能耗区间进行对比, 发现实际能耗值比模拟能耗值明显偏高。模型设定建筑所有热工性能及设计参数均满足节能性要求。刘芳^[4]等人调研广州 3 家酒店能耗数据及空调用能现状, 发现在选型及运行阶段均存在不合理造成能源浪费。黄崎^[5]等人对上海地区酒店建筑进行了最长达 5 年的数据采集和分析, 发现部分二、星级酒店的单位建筑面积能耗数值远远高于合理值, 并且酒店的供暖空调能耗占比最高。马明明^[6]对重庆主城区的 14 家酒店能耗进行调研, 发现酒店的空调能耗占比平均为 34.13%, 总电耗指标平均值为 131kWh/m²。

¹ 潘毅群, 同济大学教授, 博导;

通讯地址: 上海市嘉定区曹安公路 4800 号同济大学开物馆 A441;

Email: yiqunpan@tongji.edu.cn.

因此，越来越多建筑节能技术在酒店中得以实施。刘蕾^[7]等人对我国酒店的节能状况进行了调研与分析，总结了主要节能技术与节能管理经验。调研发现通过技术节能，如使用高效照明产品，智能化控制系统，变频改造等，节能量占总结能量的60%。Rajesh Chedwal^[8]等人对印度斋普尔地区酒店进行实测和模拟发现按照节能规范设计酒店建筑和使用节能措施将会大幅减少酒店能耗，并且拥有较短的投资回报周期。

随着酒店行业的不断发展繁荣，酒店建筑的能源消耗水平也会逐渐提高，这不仅给环境和能源供给造成巨大压力，同时也给酒店经营者带来不小的经济压力，酒店建筑节能势在必行。本研究旨在提出一套通用快速且较为准确的智能客房末端控制系统的节能量分析方法或模型。研究主要由两部分构成：酒店客房负荷计算和能耗计算。本文有以下几个研究目标：

- 1) 得到酒店客房人员在室率时间表
- 2) 建立不同地区不同房间尺寸的典型酒店客房模型
- 3) 根据用户对节能措施的选择修改模拟文件，模拟得到客房负荷
- 4) 建立采暖空调设备侧模型，根据负荷输入得到客房能耗

1. 方法

1.1. 在室率

人员是影响建筑能耗的主要因素之一^[9]。酒店客房人员主要通过开关空调，使用设备等活动对建筑能耗产生影响。因此，在对酒店客房负荷进行计算时，首先需要确定酒店客房人员在室率情况，才能较为准确地对负荷进行模拟估算。

本文在室率数据来源于上海市某星级酒店。人员是否在室内的判断原理为：每当房门动作（开关）一次，房间内人员动作探测器启动工作，若监测到有人活动，则判断为有人，若没有检测到人员活动，则判断为无人，将数据记录到数据库。

处理数据时，首先去掉非客人卡操作和未出租房间数据记录。同一房间，两条记录间隔时间内的房间人员在室情况和第一条记录相同。例，第一条记录显示房间有人，第二条记录显示房间无人，则两条记录之间的时间间隔内房间内有人。

$$\text{Occupancy}(t_1 \text{ to } t_2) = \text{Occupancy}_1(t_1)$$

$$\text{Occupancy} = \begin{cases} 1 & \text{(有人)} \\ 0 & \text{(无人)} \end{cases}$$

各个房间逐时的在室率为该房间该小时内，有人的时间除以一小时得到的数值。所有房间逐时在室率的平均值则为总的在室率。

$$\text{在室率} = \frac{\text{某小时内房间有人的时间 (分钟)}}{60 \text{ (分钟)}}$$

1.2. 建立典型模型

典型酒店客房模型的建立的数据主要通过工程经验以及调研相关设计规范^[10, 11]得到。本研究考虑了表 1 中所列出的四种气候区以及九种客房面积，相应的模型设计参数也列在表中。表中所列照明和设备功率设定值均可以通过用户在软件界面输入进行修改。

$$\text{设备/照明密度} = \frac{\sum \text{功率} \times \text{使用系数}}{\text{房间面积}}$$

建立典型模型时，考虑了朝向对负荷的影响，因此在几何模型中，各个尺寸的客房均有四个朝向的模型，如图 1 所示。对于无人房间，根据客房出租与否，又分为已租无人房间和待租房间。无人房间默认为无新风需求和照明设备需求。

酒店客房中，由于沐浴造成的空调系统的湿负荷较大，也将此部分负荷考虑到模型中。对于有人房间，在 EnergyPlus 中设置了 WaterUse:Equipment 用于计算洗澡造成的湿负荷。

表 1 典型酒店客房模型参数

地区	夏热冬冷	寒冷	严寒	夏热冬暖	
面积	20-60m ² ，每 5m ² 一个模型				
层高	3m				
窗墙比	50%				
墙体	U 值- W/(m ² ·K)	0.8	0.5	0.38	1.5
	U 值- W/(m ² ·K)	2.4	2.2	1.9	2.7
外窗	SHGC	0.35	0.43	0.43	0.35
	VT	0.7	0.7	0.7	0.7
供冷设定温度℃	24				
供暖设定温度℃	20				
设备密度 W/m ²	15				
照明密度 W/m ²	7				
渗透 次/h	0.1				
人员/个	2				
新风量	100 (m ³ /zone·h)				

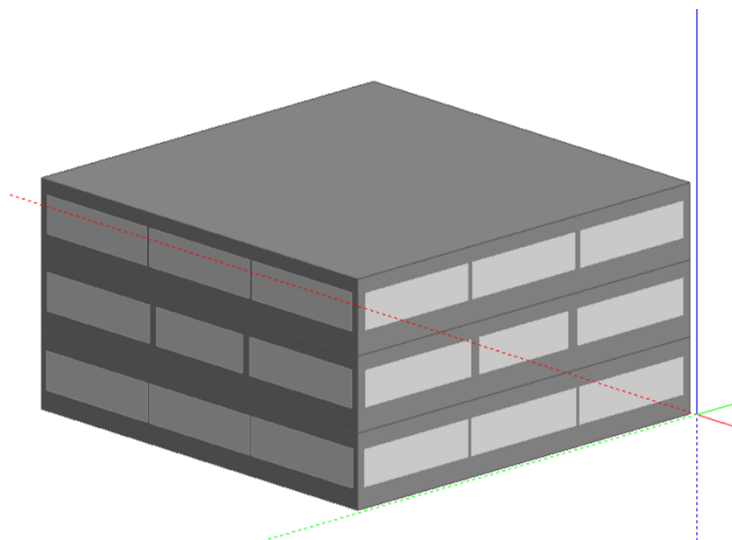


图 1 典型酒店客房模型示意图

为便于采暖空调设备侧能耗计算，本文所指负荷均为盘管侧负荷。因此，在各个典型酒店客房模型中搭建风机盘管加新风系统。模拟时，直接输出房间盘管侧负荷。

1.3. 负荷计算

计算负荷时，将酒店房间模型分为设计模型和基准模型。基准模型为不添加任何节能措施的模型。设计模型又分为有人房间，已租无人和待租房间，根据房间类型不同，用户可以选择不同的末端节能措施。节能措施包括：1) 客人离房关闭窗帘；2) 智能插卡取电，即能通过判断室内是否有人关闭室内照明设备，调节空调设定等；3) 无人房间或有人房间夜间空调温度改变；4) 改变空调设定温度可调节上下限；5) 待租房间关闭空调等。

因此，需要根据用户输入修改对应的模拟文件，得到房间盘管侧负荷，再把不同朝向不同类型房间的负荷叠加，得到总的盘管侧负荷。

$$\text{酒店t时总负荷} = \sum_{\text{房间类型}}^3 \sum_{\text{朝向}}^4 \text{各朝向房间t时负荷} \times \text{各朝向房间数}$$

各个类型房间数计算如下：

t时刻，某朝向有人房间数：

$$\text{RoomNum}_{occ}(t, \text{orientation}) = \text{Sum} \times R \times \text{Occupancy}(t)$$

t时刻，某朝向已租无人房间数：

$$\text{RoomNum}_{unocc,r}(t, \text{orientation}) = \text{Sum} \times R \times (1 - \text{Occupancy}(t))$$

t时刻，某朝向待租房间数：

$$\text{RoomNum}_{unrent}(t, \text{orientation}) = \text{Sum} \times (1 - R)$$

其中，

Sum——某朝向总房间数；

R——出租率；

Occupancy(t)——t时刻在室率。

1.4. 节能措施

本文所考虑的节能措施如图3中所示。对于不同类型的房间，用户可以设定不同的节能措施，节能措施的实现如下：

1) 电动窗帘

若用户选择保留状态，则不对模拟文件进行修改；若用户选择关闭，则在模拟文件中，将内遮阳设置为开启状态。

2) 插卡取电

普通插卡取电为只要取电卡槽内有卡插入，则判断房间有人；带身份识别插卡取电为取电卡槽内的卡需为客人房卡才将房间判断为有人房间；无插卡取电则是根据室内声波探测器监测室内是否存在人员活动来判断房间是否有人。不拔卡系数为已经出租的客房中，客人离房后不取出房卡的比例。对于无插卡取电来说，不拔卡系数为0。对于其他两种取电方式，由于存在不拔卡系数，则已租房间中有人和无人的房间数将会有所改变：

t时刻，某朝向有人房间数：

$$\begin{aligned} \text{RoomNum}_{occ}(t, \text{orientation}) \\ = \text{Sum} \times R \times \text{Occupancy}(t) + \text{Sum} \times R \times (1 - \text{Occupancy}(t)) \times \text{NoPull} \end{aligned}$$

t时刻，某朝向已租无人房间数：

$$\text{RoomNum}_{\text{unocc},r}(t, \text{orientation}) = \text{Sum} \times R \times (1 - \text{Occupancy}(t)) \times (1 - \text{NoPull})$$

其中，

NoPull——不拔卡系数。

3) 保温模式

保温模式为客人离房后，上调或下调房间设定温度到保温温度已达到节能目的的措施。用户设置保温温度后，修改已租无人房间和待租房间的制冷供热设定温度。

4) 夜间模式及温度偏差

夜间模式为在用户设定的时间范围内，对设定温度进行调整（制冷季升温，供暖季降温）的节能措施。用户设定起始时间，持续时间及偏差温度后，修改模拟文件中设定温度时间表及制冷供热设定温度。其中，

$$\text{新制冷温度} = \text{默认制冷温度} + \text{温度偏差值}$$

$$\text{新供热温度} = \text{默认供热温度} - \text{温度偏差值}$$

5) 空调面板可设定温度范围

酒店空调面板原可设定温度范围为 16-30℃，通过用户输入数值修改可调节温度范围上下限。由于冬夏季用户设定温度分布数据未知，本文假设设定温度分布服从正态分布。从而得到各个温度设定点的概率值，事先计算好各个设定温度对应的负荷值，以及正态分布下的总负荷：

$$\text{总负荷} = \sum \text{设定点概率} \times \text{设定点负荷}$$

用户输入上下限数值后，可以得到新的概率分布（低于下限温度的设定点概率算入下限温度概率，高于上限温度的设定点概率算入上限温度概率），从而算出新的负荷。事先计算好所有可能设定温度范围的负荷以及其相对于原负荷减少的比例。用户设定温度范围上下限后，将对应的百分比用于修正计算出的总负荷。

$$\text{酒店}t\text{时总负荷}' = \text{酒店}t\text{时总负荷} \times (1 - \text{负荷减少百分比})$$

1.5. 能耗计算

本研究建立了设备侧模型用于快速估算采暖空调能耗。设备包括了冷机，水泵，冷却塔以及锅炉。首先对机组进行选型，冷机放大系数为 1.15，冷却塔为 1.5，锅炉为 1.05。冷机 COP 通过部分负荷率进行修正，修正公式如下：

$$\text{COP}' = [a(\text{PLR})^2 + b(\text{PLR}) + c] \times \text{COP}$$

$$\text{部分负荷率 PLR} = \frac{\text{Chiller Load}(t)}{\text{Chiller's Capacity}}$$

上式中 COP 修正系数，根据 EnergyPlus 中修正曲线系数进行选取。T 时刻冷机功率计算如下：

$$\text{Power}(t) = \frac{\text{Chiller Load}(t)}{\text{COP}'} (W)$$

水泵额定功率计算如下：

$$P_N = Q * H / \eta (W)$$

其中，额定流量为：

$$Q (m^3/s) = \frac{[\text{Cooling Load}]_{\text{max}}}{\Delta t \times \rho \times c}$$

式中， Δt 为进出水温差，冷冻水泵与冷却水泵取 5℃，热水泵取 10℃。 ρ 为水的密度； c 为水的比热容。

H 为水泵扬程，根据工程经验选取； η 为水泵效率，取值为 0.6。水泵实际功率为，

$$P_i = P_N \times PLR$$

锅炉的功率计算如下，

额定效率：Nominal thermal efficiency $\eta = 0.96$

效率修正曲线：Boiler Efficiency Curve Ooutput = $a + b(PLR) + c(PLR)^2$

功率：

$$\text{Fuel used} = \frac{\text{heating Load}}{(\text{Nominal Thermal Efficiency}) \times (\text{Boiler Efficiency Curve Ooutput})} \text{ (W)}$$

因此，通过输入酒店客房盘管侧负荷，可以根据上述方法对采暖空调设备进行选型及能耗计算。

酒店客房内部设备照明等能耗根据用户输入的功率密度和建筑面积计算得到。风机功率通过模拟输出也可以得到。

2. 结果与分析

2.1. 在室率

通过对酒店数据库数据的处理，可以得到如图 2 所示的酒店客房逐时在室率。从图中可以看出，从早上 7 点开始，在室率出现明显下降，客人逐渐离房退房；中午 12 点出现上升，为新客人入住导致在室率升高；而后客人逐渐离开外出，在室率再次降低；晚上 8 点开始，在室率明显上升，说明客人逐渐回到酒店房间内。

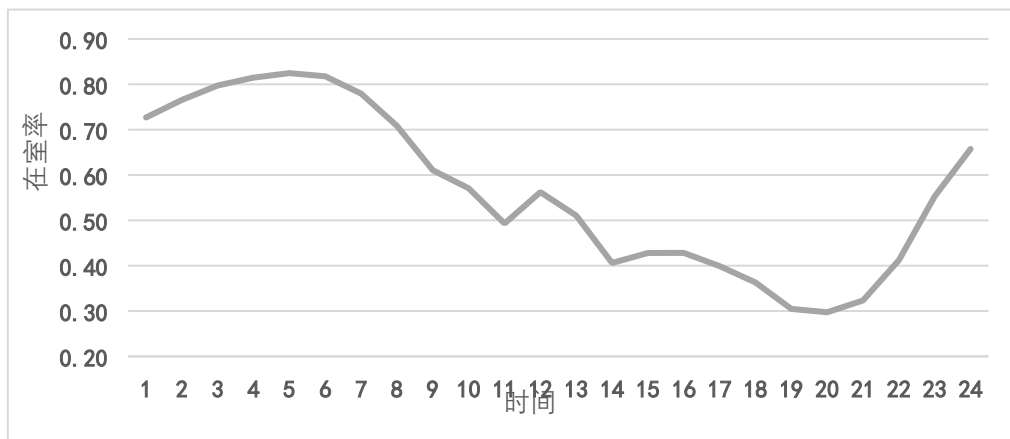


图 2 酒店客房逐时在室率

2.2. 节能量快速估算软件

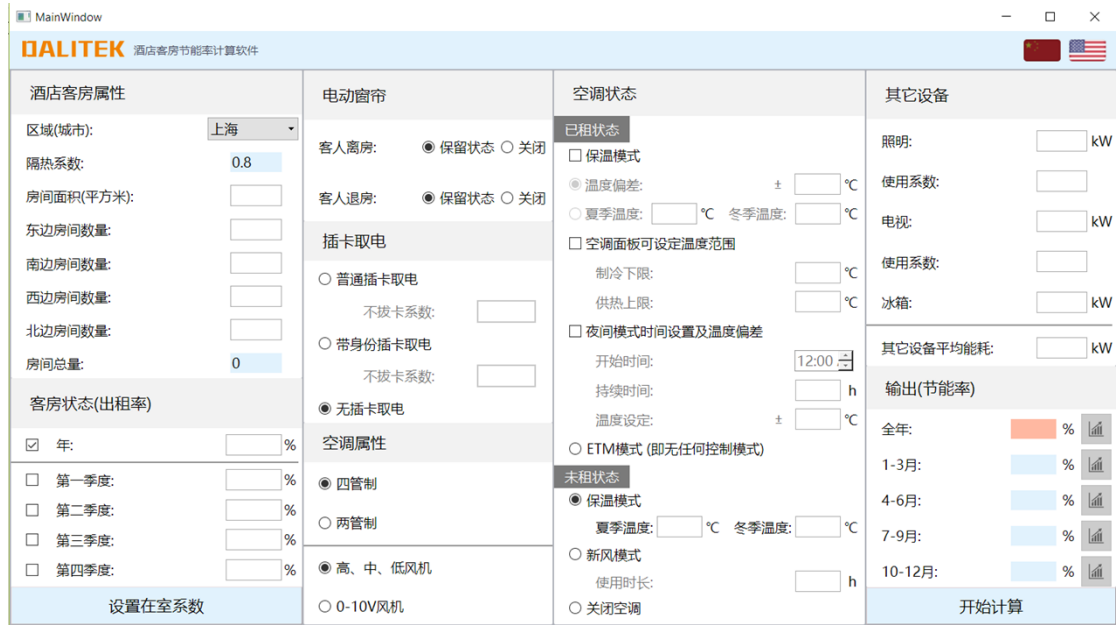


图 3 软件界面

根据节能措施以及用户需求开发了如图 3 所示的节能量快速估算软件。登陆后，用户首先选择酒店所在城市与客房面积，软件会选择对应的模拟文件。然后，用户需要输入各个朝向的房间数量，用于计算总客房负荷时乘以对应的房间数。接着，用户可以输入酒店年平均出租率或者季度平均出租率，在室率使用前文计算出的在室率作为默认值，用户也可以根据经验自行修改或使用某酒店数据库文件通过软件处理得到该酒店在室率数据。接下来，用户将选择对于不同类型的房间使用的节能措施，酒店的空调系统属性以及客房内部照明及设备功率。点击开始计算后，软件将会自动修改模拟文件，调用 EnergyPlus 进行模拟，输出盘管侧负荷，叠加后输入到设备模型中，计算得到能耗数据。通过基准模型和设计模型能耗比较，得到节能率。同时，用户也可通过输出数据查看能耗构成的饼图和逐月能耗比较的柱状图。

3. 结论

本文建立了不同气候区不同几何尺寸的典型酒店客房模型。通过处理酒店数据库文件，得到酒店客房逐时在室率数据。开发了酒店客房节能量快速估算的软件，可以根据用户的输入，修改对应的模拟文件。模拟后，输出房间盘管侧负荷，叠加处理后输入到采暖空调设备侧模型中，得到对应能耗。通过比较设计模型与基准模型能耗，得到采用节能措施的酒店客房的节能率。

随着酒店行业的快速发展，酒店建筑的能耗将会在总建筑能耗中占据越来越大的比例，酒店建筑节能将会成为建筑节能的重要课题之一。本文提出了一种快速通用的估算客房节能措施节能量的方法。同时，本研究也存在以下不足。客房模型中，设备照明以及沐浴的时间表均是根据相关规范以及工程经验选取，需要进一步了解研究其用能时间表。设备侧模型较为简化，没有考虑实际运行中设备的控制策略，同时也只考虑了酒店客房中的负荷，没有考虑酒店其他部分产生的负荷，因此设备选型和能耗不够准确，只能部分反映客房用能情况。

参考文献

- [1] 李艳, 孙文慧. 中国酒店业发展分析[J]. 商业经济, 2013(10):61-62.
- [2] 刘益. 中国酒店业能源消耗水平与低碳化经营路径分析[J]. 旅游学刊, 2012,27(1):83-90.
- [3] 周伟业. 五星级酒店建筑能耗水平及节能潜力分析[D]. 天津大学, 2016.
- [4] 刘芳, 周孝清, 陈伟青, 等. 广州市酒店类建筑空调系统能耗现状调查分析[J]. 制冷空调与电力机械, 2008(03):78-80.
- [5] 黄崎, 康建成, 黄晨皓. 酒店业碳排放评估与节能减排潜力研究[J]. 资源科学, 2014(05):1013-1020.
- [6] 马明明. 公共建筑空调系统改造与节能潜力的研究[D]. 重庆大学, 2007.
- [7] 刘蕾, 焦健, 戴彦德. 酒店行业节能调查与分析[J]. 中国能源, 2012(11):17-20.
- [8] CHEDWAL R, MATHUR J, AGARWAL G D, et al. Energy saving potential through Energy Conservation Building Code and advance energy efficiency measures in hotel buildings of Jaipur City, India[J]. Energy and Buildings, 2015,92:282-295.
- [9] YAN D, HONG T, DONG B, et al. IEA EBC Annex 66: Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings[J]. Energy and Buildings, 2017.
- [10] 中国国家标准化管理委员会, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 14308-2010 旅游饭店星级的划分与评定[S]. 2010.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50189-2015 公共建筑节能设计标准[S]. 2015.

作者基本情况表

姓名: 徐蕾

通讯地址: 上海市嘉定区曹安公路 4800 号同济大学开物馆 A441

邮编: 201804

邮箱: xulei_1215@qq.com

电话: 18817599449