

# 既有公共建筑空调工程 能效诊断方法问题探讨

重庆大学 重庆科技学院 余晓平<sup>☆</sup>

重庆大学 付祥钊 肖益民

**摘要** 从空调工程寿命周期能效评价角度,提出了空调工程装机能效比和综合运行能效比概念和计算方法,介绍了既有建筑空调工程能效诊断方法、分级分项能效指标体系和能效判定基本步骤,探讨了空调工程能效判定的基本条件,通过案例简要分析了开展空调工程能效诊断需要解决的相关基础理论问题。

**关键词** 既有公共建筑 空调工程 能效诊断 装机能效比 综合运行能效比

## Discussion on energy efficiency diagnosis for air conditioning engineering in existing public buildings

By Yu Xiaoping<sup>★</sup>, Fu Xiangzhao and Xiao Yimin

**Abstract** From the view of the life cycle analysis theory, puts forward the concepts and calculating method for installation energy efficiency ratio and integrative running energy efficiency ratio. Presents the energy efficiency diagnosis method, energy efficiency index system and basic program of energy efficiency decision. Discusses the basic conditions of energy efficiency decision for air conditioning projects. With a case, analyses related fundamental research problems that should be solved in energy efficiency diagnosis.

**Keywords** existing public building, air conditioning project, energy efficiency diagnosis, installation energy efficiency ratio, integrative running energy efficiency ratio

★ Chongqing University, Chongqing, China

①

### 0 引言

据统计,我国 400 多亿  $\text{m}^2$  既有建筑中,真正达到节能标准的不到 10%,其他的都是高耗能建筑。

以重庆为例,笔者对现有的酒店、商场、写字楼、学校、医院、车站、办公楼等 1 024 幢公共建筑开展了能耗调研,其年能耗平均指标为  $167 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,高于北京的  $150 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和武汉的  $104 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,能耗密度总体偏大<sup>[1]</sup>。表 1 中数据表明,相同类型建筑不同项目的能耗相差 2~5 倍,表明建筑能耗个体差异显著,建筑使用特征与运行管理水平都直接影响建筑能耗大小,既有公共建筑节能存在较大潜力。表 1 中建筑能耗的综合平均值可以用来估算不同类型建筑能耗规模和总量范围,但难以作为建筑能效诊断依据,无法指导建筑能效改造实践。

表 1 国内不同单位调查的公共建筑运行能耗

		$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$		
	调查单位	北京、上海、深圳		
		清华大学	上海建筑科学研究院	重庆大学
办公建筑	一般 20~50	58~245	16~306	111
	大型 >100			
商场、购物中心	200~300	82~377	176~398	216
宾馆酒店	100~200	186~251	107~308	121

既有公共建筑的节能改造是一项系统工程,包括了能耗统计与能源审计、能效判定、改造方案设计与实施,以及节能改造效益的分析与评价等,其中,难度最大的环节就是建筑能效的判定和节能改

①☆ 余晓平,女,1973 年 7 月生,在读博士研究生,副教授  
401331 重庆市沙坪坝区虎溪大学城重庆科技学院建筑工程学院  
(023) 60837724  
E-mail: yuxiaoping2001@126.com  
收稿日期:2009-02-12

造效益的评价。公共建筑能效标识的对策研究已经开始,但对既有公共建筑空调工程综合运行能效的理论研究尚不透彻,能效指标体系建设相对滞后。国家已经出台了既有公共建筑(尤其是大型公共建筑和政府办公大楼)用能的相关规定和对策,说明既有建筑节能实践在我国的迫切性,同时业内人士也倍感开展既有建筑节能改造科学理论研究所面临的压力。本文围绕既有公共建筑空调工程开展能效诊断的一般方法,重点探讨以下问题:1)既有公共建筑能效诊断应采用什么方法;2)如何构建空调工程能效诊断的指标体系;3)空调工程综合能效如何判定。

### 1 既有公共建筑能效诊断方法

#### 1.1 两种建筑能效诊断的基本模式

##### 1.1.1 基于建筑能耗模拟的能效诊断

在欧洲标准 EN 15232—2007(E)《建筑能效—建筑自动化、控制及建筑管理的影响》中,提出了建立评估楼宇自动化控制系统(BACS)以及智能建筑管理(TBM)的能效及能耗的惯例及方法——BAC有效因子,该因子采用了基于建筑能耗模拟的能效诊断程序和方法,可以与建筑能源利用效率评估联合使用。

BAC有效因子以既有建筑用能系统能耗为出发点评价建筑物的能效,通过建立参考建筑模型,采用能耗评价软件对参考建筑能耗需求进行分析模拟,获得参考建筑能耗作为被评建筑能效评价的基准值,定义既有建筑能效因子 $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{E_M}{E_R} \quad (1)$$

式中  $E_M$  为参考建筑的总能耗; $E_R$  为实际被评建筑的总能耗。

$\epsilon$  越大,被评建筑运行能效越高。当  $\epsilon \geq 1$  时,判定建筑用能水平合理,建筑综合能效达到要求;当  $\epsilon < 1$  时,判定建筑用能水平不合理,需要对建筑分项用能系统进行能效诊断。该方法的优点是在综合考虑了建筑所在地气候条件,建筑物各种传热方式、朝向、墙体材料的性能、门窗性能、热惰性、功能分区、新风需求、用户作息时间以及供暖通风空调制冷等各种建筑设备的选择和使用等因素的基础上,在满足室内环境综合控制要求和集中空调供热或供冷系统运行管理规范要求的前提下进行模拟评价,重点体现了建筑运行模式与管理水平对建

筑能耗的影响。

基于能耗模拟的评价指标和方法,可以体现既有建筑理论上的节能水平,是建筑使用过程中实现运行节能的重要基础<sup>[3]</sup>。但是,模拟分析节能的建筑实际运行不一定节能,模拟能耗数据也不是建筑实际运行的能耗。由于既有建筑使用过程中影响能源利用效率的因素错综复杂,建筑使用过程中诸多主观因素的影响难以量化,建筑使用特征模型还没有分类和归纳,其运行能耗的基本规律还没有充分掌握。因此,对既有建筑开展能效诊断,在考虑其设计节能水平的基础上,更重要的是提出建筑运行过程中能效诊断的方法和程序,客观评价建筑不同运行模式下的合理能耗量,作为既有建筑能效水平判定的科学依据。

##### 1.1.2 基于建筑能耗统计模型的能效诊断

目前,各地围绕公共建筑能耗统计平台的研究与实践已广泛开展<sup>[4]</sup>。基本方法是,根据建筑能耗统计模型,获得不同类型公共建筑能耗数据并分类排序,对同一地区相同类型的建筑能耗及能效进行比较,获得被评建筑在数据库中的排序位置。按能效从低到高的顺序排列: $BEE_1, BEE_2, \dots, BEE_i, \dots, BEE_N$ , 数据库中同类建筑总数为  $N$ , 被评建筑  $i$  在排序中的名次为  $n$ , 令  $\epsilon = \frac{n}{N}$ ,  $0 < \epsilon \leq 1$ , 越接近 1, 建筑能效越高。

按统一建筑能耗统计模型对样本统计结果分析、排序,根据节能改造目标值确定改造范围。如果既有建筑节能改造的目标是对 50% 的低能效建筑实施改造,则当  $\epsilon \leq 0.5$  时,既有建筑判定为低能效建筑,需要实施节能改造。该评价方法需要以建立运行能耗数据库管理系统为基础,采用单一的单位建筑面积的能耗量为主要指标作为排序依据,存在一定的片面性。建筑能耗的统计是开展建筑节能的科学基础,建筑实际运行能耗数据及其特征研究为用能分项计量、节能诊断、用能管理与考核、节能技术改造等提供基础,相关的研究还处于初级阶段。

上述两种基本方法都用于建筑综合能效或能耗总量的评价,可对被评建筑能耗总体水平作出初步判定,作为能源审计和用能定额管理的重要依据。大型公共建筑和采用集中空调系统的一般公共建筑,其运行能耗中供暖通风和空调能耗的比例较大,占 40%~60% 以上,能源消耗总量巨大,且

能源利用效率普遍很低,节能潜力很大,是建筑节能诊断和节能改造效益评价的重点环节,下面以空调工程能效诊断为例进行分析。

### 1.2 空调工程寿命周期能效分类及计算方法

空调工程寿命周期包括规划设计、安装调试、运行管理和系统改造或废置四个阶段,从能效诊断的角度,本文提出前三个阶段的能效综合评价指标,见图 1。

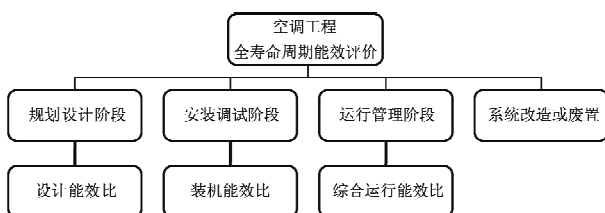


图 1 空调工程寿命周期能效分类

#### 1.2.1 空调工程设计能效比

设计能效比可考核空调工程节能设计水平。重庆大学“美国能源基金会(EF)中国可持续能源项目——提高中国公共建筑能源效率”项目组提出用空调工程设计能效比  $D_{AC}$  (design energy efficiency ratio) 表征空调工程节能设计总体水平。 $D_{AC}$  定义为空调工程的设计总冷负荷(热负荷)  $Q$  与设计耗功率  $P_{AC}$  的比值,即

$$D_{AC} = \frac{Q}{P_{AC}} \quad (2)$$

式中设计总冷负荷(热负荷)  $Q$  是基于在设计工况计算条件下,在设计依据充分、计算方法合理、计算结果符合当前暖通设计规范的规定条件下获得的设计总冷/热负荷。空调工程设计耗功率  $P_{AC}$  包括空调工程各系统设计所有用电设备的铭牌电功率与非用电设备额定(铭牌)燃料耗量的折算电功率之和<sup>[5]</sup>。

由于受不同设计阶段图纸变更影响,同一项目空调工程设计能效比在方案阶段、初步设计阶段、施工图设计及深化设计阶段会有不同的计算值;同时,空调设计冷/热负荷的计算因人而异,设备铭牌功率因厂家而异, $D_{AC}$  计算值具有不确定性。因此,单一工况的设计能效比还无法反映出设计者的节能设计水平,需要对部分负荷设计能效比进行研究,确定部分负荷的时间权重等。空调系统设计能效水平是节能运行的重要基础。

#### 1.2.2 空调工程装机能效比

由于商业建筑项目招商常常引起使用功能改变或考虑发展要求,业主要求预留冷热源设备或用电量,空调工程实际装机容量与设计条件下的设备配置存在较大差异,设计节能的空调系统其实际装机容量与输配系统配置不一定合理。需要根据竣工图与工程现场调查,确定冷热源实际装机容量、空调设备安装容量、空调系统实际分区情况等。

定义空调工程装机能效比  $I_{EER}$  (installation energy efficiency ratio) 为:空调工程设计总需冷量/需热量  $\sum Q$  与空调系统所有制备或输送冷/热媒的实际安装的耗能设备铭牌功率总和  $\sum P$  之比,即

$$I_{EER} = \frac{\sum Q}{\sum P} \quad (3)$$

这也是一个静态指标,可以在一定程度上反映空调工程的安装能效水平,评价工程安装能效与设计能效水平的符合程度。工程竣工设备安装容量不仅影响整个建筑寿命周期的安装成本、冷热源设备的装机容量与输配系统动力装置的配置水平,也直接关系到空调系统部分负荷下的运行效率,设备装机容量过大或系统配置不合理常常是导致空调系统运行效率低下的重要原因。

#### 1.2.3 空调工程运行能效比

##### 1) 动态能效比实测

典型工况下,实测冷热源的冷热供应量与各用能设备的能耗量,空调工程运行能效比  $R_{EER}$  (running energy efficiency ratio) 按下式计算:

$$R_{EER} = \frac{\sum Q_{\tau}}{\sum P_{\tau}} \quad (4)$$

式中  $\sum Q_{\tau}$  为  $\tau$  时刻空调系统的冷/热供应量, kW;  $\sum P_{\tau}$  为  $\tau$  时刻整个空调系统所有设备的耗电功率的总和, kW。

##### 2) 综合部分负荷运行能效比计算

对部分负荷条件下系统能耗构成进行分析,部分负荷的时间频率根据历年运行记录确定,综合部分负荷运行能效值按不同负荷率的时间权重计算获得。季节或全年综合部分负荷运行能效比  $IPLR_{EER}$  (integrative part load running energy efficiency ratio) 按下式计算:

$$IPLR_{EER} = \sum_{i=1}^k \varphi_i R_{EER,i} \quad (5)$$

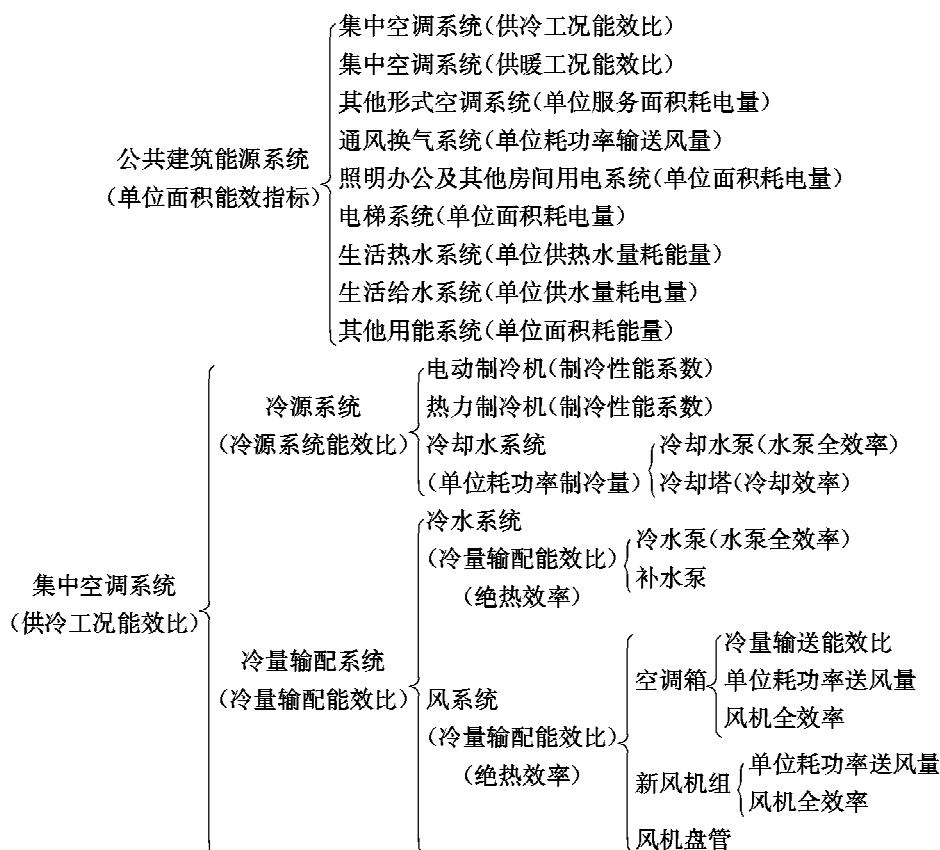
式中  $IPLR_{EER}$  为综合部分负荷运行能效比;  $\varphi_i$  为第  $i$  种部分负荷率的时间权重系数, 且有  $\sum_{i=1}^k \varphi_i = 1$ , 时间权重系数宜根据历年运行记录分析得到, 应按同一地区同类建筑在相同或相近使用条件下通过统计分析获得;  $R_{EER,i}$  为第  $i$  种部分负荷率时

的运行能效比。

统计或模拟出建筑物年总耗能量及能耗构成, 分析建筑设备全年的运行状况, 测试典型工况和主要设备的运行能效, 计算出空调工程全年或季节综合运行能效指标, 作为空调工程运行能效判定的依据。

### 1.3 空调工程运行能效诊断的指标体系

公共建筑终端用能系统的分级分项划分和能效评价指标如下(以集中供冷工况为例):



单项设备运行能效指标采用设备性能系数或能效比进行实测计算, 可采用瞬时值、日平均或按运行工况平均等。如, 所有电动制冷机的制冷性能系数, 瞬时  $COP_{ce} = \frac{CL_c}{N_c}$ , 日平均  $COP_{ced} = \frac{CL_{cd}}{W_{cd}}$ , 供冷季平均  $COP_{ces} = \frac{CL_{cs}}{W_{cs}}$ , 其中  $COP_{ce}$  为所有电动制冷机  $\tau$  时刻的性能系数;  $CL_c$  为冷源系统  $\tau$  时刻的制冷量, kW;  $N_c$  为所有电动制冷机的总输入功率, kW;  $COP_{ced}$  为所有电动制冷机供冷日平均性能系数;  $CL_{cd}$  为冷源系统日累计制冷量, kWh;  $W_{cd}$  为所有电动制冷机的日累计耗电量, kWh;  $COP_{ces}$  为所有电动制冷机供冷季平均性能系数;  $CL_{cs}$  为冷源系统供冷季累计制冷量, kWh;  $W_{cs}$  为所有电动

制冷机的供冷季累计耗电量, kWh。

### 1.4 空调工程能效判定的基本原则

- 1) 遵循从整体到局部的层次分析方法和逐级判定原则;
- 2) 应结合建筑使用模式、服务功能、室内环境质量要求进行能效诊断;
- 3) 空调运行能效计算模型应采用两年及以上的历年平均数据与运行记录;
- 4) 能效判定的限值应结合不同地区社会发展水平、气候、建筑类型和能效改造目标确定。

## 2 空调工程能效判定方法

### 2.1 装机能效判定

通过调查空调设备现场和工程竣工图纸, 判断实际空调分区、空调设备的安装容量、空调工程配

电系统负荷等是否与施工图纸设计一致,计算装机能效比。

笔者认为,应通过调查统计节能标准实施后的同类型空调系统的装机能效水平,确定出不同类型空调系统的装机能效限值  $I_{\text{EER}0}$ ,作为空调工程装机能效的评价依据。装机能效比不应低于同类空调工程满负荷时的设计能效比。当  $I_{\text{EER}} \geq I_{\text{EER}0}$  时,判定空调工程安装能效达标,否则确定为装机低能效建筑。

由于空调能耗是在使用过程中产生的,无论装机能效水平如何,都应进行运行能效的诊断。目前,国家节能设计标准中不同类型的空调系统设计能效比指标体系还未形成,不能对空调系统装机能效比给出限值,装机能效比限值还需要进行大量研究。重庆市已出台《公共建筑中央空调工程设计能效比限值的规定》,笔者认为应以空调系统的装机能效限值  $I_{\text{EER}0}$  不低于该地区空调系统的设计能效限值  $D_{\text{AC}}$  作为空调工程安装能效水平的判据。

## 2.2 运行能效判定

通过统计空调工程全年运行能耗、设备启停记录,分析全年空调部分负荷分布时间频率,测试典型工况下设备动态能效比,计算综合运行能效比,判定空调工程运行能效水平。集中空调工程包含各级子系统及设备,其能效指标及其评判过程按照从整体到局部的层次分析方法逐级进行,当上一层

$$\begin{aligned} ERX &> ERX_{\max} \\ ERX_{\min} &\leq ERX \leq ERX_{\max} \\ ERX &< ERX_{\min} \end{aligned}$$

式中  $ERX$  为系统或设备的能效诊断指标的实际检测计算或模拟值; $ERX_{\min}$  和  $ERX_{\max}$  分别为输入的

$$\left. \begin{aligned} \eta_r &\geq 0.8\eta_{\max} && \text{判定设备运行高效} \\ 0.4\eta_{\max} &\leq \eta_r \leq 0.8\eta_{\max} && \text{判定设备工作能效正常,加强运行管理以提升能效} \\ \eta_r &\leq 0.4\eta_{\max} && \text{判定更换设备,采用符合能效标准的新节能产品} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中  $\eta_{\max}$  为设备最高效率,即铭牌效率; $\eta_r$  为设备运行效率,由设备测试或参数模型模拟确定。

分级分项能效指标的判定,可以为空调能效改造提供依据,确定建筑重点改造的系统及设备。空调工程能效诊断模型的建立可采用专家技术系统,以当前公共建筑节能设计标准和集中空调系统节能运行规范为基准,在建筑能耗统计、能源审计基础上开展能效评价工作,建立空调工程能效指标体

次系统被评判为工作能效低时,则进入其所属的下一层次系统或设备的能效指标评判。

### 1) 一级能效指标判定

空调工程综合部分负荷运行能效比不应低于同类系统综合部分负荷平均能效水平。设  $IPLR_{\text{EER}0}$  为当前同类集中空调系统允许的综合部分负荷运行能效比,当  $IPLR_{\text{EER}} \geq IPLR_{\text{EER}0}$  时,则判定空调工程能效达标,不需要进行能效改造;当  $IPLR_{\text{EER}} < IPLR_{\text{EER}0}$  时,则判定空调工程能效低,应进入下一级能效指标的判定。这里给出一级能效指标判定的方法,但同类系统的综合部分负荷平均能效水平未知,需要开展大量基础调查研究。

由于既有建筑多数没有终端用能系统的分项计量装置,按运行记录表难以分析空调系统各子系统在不同负荷率下实际的能耗量。目前,还没有关于供暖空调系统综合运行能效比指标评价体系的系统研究,还需要开展大量的调查与实测工作,以便合理确定综合运行能效比限值指标。笔者认为,空调系统综合运行能效比应不低于同一系统的装机能效水平,以装机能效比作为运行能效限值的初步判据。随着空调设计、施工和竣工验收的节能水平不断提升,系统装机能效水平也将逐步提高,这有助于运行能效限值的提升和建筑使用过程中的节能。

### 2) 二级及以下子系统能效指标判定

二级及以下子系统能效指标评判通式为

$$\left. \begin{aligned} &\text{系统或设备工作能效高} \\ &\text{系统或设备工作能效正常} \\ &\text{系统或设备工作能效低} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

指标下限和上限值,根据不同时期节能目标确定或修改。如,空调用能设备单项能效指标判定如下:

系,实施空调工程能效诊断并对是否开展节能改造进行判定。

## 2.3 空调能效诊断对能效改造的意义

通过综合判断,对于装机能效低,或设计节能、装机能效达标但运行能效不达标的空调工程,则判定需要能效改造。能效改造的具体内容包括:项目改造方案论证,能效改造项目设计,能效改造项目施工,能效改造项目的竣工调试和运行,实施能效

改造项目的效益评价等,最后根据节能改造节能量、经济成本和社会效益来确定节能改造综合效益。

改造方案的确定,需要根据建筑终端用能系统是否分项计量、是否冷热量计量收费、有无建筑节能考核的奖惩制度、建筑设备管理人员是否进行节能专项培训等情况对建筑运行管理与控制水平进行评估。对于建筑终端用能系统没有分项计量的系统,则首先需要实施空调工程各子系统用能设备分项计量改造。综合考虑节能潜力和改造成本,通过能效诊断,在诊断模型中嵌入能源、设备及材料价格指标和运行管理费用体系,就能对节能量及节能改造成本进行描述和评价,使对节能技术改造决策的评价更全面、充分。

### 3 案例分析

以重庆某酒店为例,该酒店集商务休闲娱乐、餐饮、大型会议招待、住宿为一体,整栋建筑 22 层,地下 3 层,地上 19 层。2003 年投入使用,营业面积 2 万余  $\text{m}^2$ 。夏季空调设计总冷负荷为 2 603 kW,冬季空调设计总热负荷为 1 168 kW。

#### 1) 装机能效分析

机房设备与系统冬季工况调查如下。供暖锅

表 2 实测 1 月 15—16 日酒店冬季供暖运行能效

运行时段	供热量/ kW	负荷率/ %	热源耗电 功率/kW	水系统耗电 功率/kW	风系统耗电 功率/kW	系统总耗电 功率/kW	$R_{\text{FEER}}/$ (kW/kW)	供暖锅炉热 效率/%
09:00—13:04	333.45	28.55	173.66	13.41	39.86	226.93	1.47	65
13:04 15:36	20.12	0.02	0.00	12.96	30.60	43.56	0.46	
15:36 20:04	384.81	32.95	178.19	13.20	36.11	227.50	1.69	73
20:04 21:30	37.50	0.03	1.10	12.06	33.21	46.37	0.81	
21:30—22:18	0.00	0.00	1.10	0.00	33.11	34.21	0.00	
22:18—次日 01:54	330.51	28.30	153.11	14.22	39.69	207.02	1.60	73
01:54—05:00	16.84	0.01	1.10	13.22	26.95	41.27	0.41	
05:00—09:00	244.15	20.90	152.48	13.65	27.55	193.68	1.26	54

表 3 综合运行能效分析

	负荷率/%			
	小于 25	25~50	50~75	大于 75
运行时间(运行记录)/h	20	19	4	5
平均能效比	0.08	2.40	2.88	3.22
部分负荷时间频率	0.42	0.40	0.08	0.10
综合部分负荷能效比 $IPLR_{\text{FEER}}$ (采用式(5)计算)	1.56			

#### 4 空调工程能效诊断方法相关问题

文献研究表明,目前的公共建筑空调节能运行研究涉及商场、宾馆、办公楼、医院等典型公共建筑能耗统计、测试与评价,但均未给出不同类型公共建筑在不同使用条件下其能效限值范围,也未涉及到空调系统综合运行能效指标诊断方法。关于公共建筑能耗统计方法,文献[6—8]虽初步建立了大

炉两台,型号 JR0.58—65/55Q,额定出力 581 kW,额定燃气耗量为 63.3  $\text{m}^3/\text{h}$ ,热水供水温度 60  $^{\circ}\text{C}$ 。采用 3 台热水循环泵,单台输入功率 18.5 kW。计算得到空调热源系统装机能效比为 2.77。重庆酒店类建筑采用燃油或燃气锅炉为空调热源的工程,冬季空调系统设计能效比限值为 1.78,其子系统——热源系统设计能效比限值为 2.24;若以此为装机能效水平判定依据,则可判定该空调工程热源系统装机能效比为 2.77,达标。

#### 2) 运行能效判定

采用典型工况实测和部分负荷运行记录进行综合分析。表 2 为部分测试数据,表 3 为综合运行能效统计计算,得到冬季空调系统平均运行能效比为 2.38,而综合部分负荷运行能效比仅为 1.56。这是由于系统 80% 以上的时间供暖负荷率低于 50%。按前述诊断方法,冬季工况综合部分负荷运行能效比低于同一工况装机能效比,可判定系统冬季运行能效不达标,需要改造。次级主机运行能效诊断:供暖锅炉额定工况效率 93%,实际平均运行效率 66%,锅炉不在高效范围内运行,需要加强运行管理。改造建议:提高部分负荷运行能效。

型公共建筑运行能耗评价指标体系,但均未涉及公共建筑按什么原则判断是否进行能效改造的相关科学基础,也没有建立既有公共建筑空调工程综合能效改造的理论依据。

在能效诊断过程中,还需要逐步建立空调工程节能运行标准模式、空调系统使用特征评价模型,这也涉及到空调系统及设备能源转换和利用过程中各项技术的能效评价和判定问题。只有充分掌握了既有建筑能效诊断和评价方法,既有建筑空调系统寿命周期的能效水平才能整体提升。

(下转第 137 页)