

文章编号:1000-582X(2008)06-0637-05

# 公共建筑空调系统能耗实测与分析

白雪莲,孙纯武,郭林文,王洪卫

(重庆大学 城市建设与环境工程学院,重庆 400030)

**摘要:**为了掌握公共建筑暖通空调系统的实际运行与能耗状况,选取重庆市 3 座典型公共建筑,对其空调系统进行夏季能耗测试。根据实测结果,分析了空调系统主要组成部分的电耗、冷水机组和空调水系统的能效、3 座建筑的室内热环境状况。研究表明,目前公共建筑空调系统存在设计选型偏大、设备运行效率低、运行管理不规范、缺乏室温控制等诸多问题。提出了基于准确负荷计算的系统设计和部分负荷下的运行调控等节能建议。

**关键词:**公共建筑;暖通空调系统;部分负荷;运行能效

中图分类号:TU831.3

文献标志码:A

## Tests and analysis on energy consumption of heating ventilating and air-conditioning systems in commercial buildings

BAI Xue-lian, SUN Chun-wu, GUO Lin-wen, WANG Hong-wei

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University,  
Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** Three typical commercial buildings in Chongqing, P. R. China were selected to study the actual summertime operation and energy situations of heating ventilating and air-conditioning (HVAC) systems in commercial buildings. Based on tests of energy consumption of HVAC systems in these three buildings, we analyzed the electricity consumption of the main components of the air-conditioning systems. The energy efficiency of the chillers and air-conditioning water distribution systems were studied. The indoor thermal environment in these three buildings were also tested and discussed. It is concluded that problems exist in the air-conditioning systems of commercial buildings. Among the problems are over-sized system design, low equipment operating efficiencies, poor operation management, and lack of indoor temperature controls. To reduce energy consumption of HVAC systems in commercial buildings, we propose energy-efficient strategies such as sizing systems based on accurate load calculation and automatic control under partial-load conditions.

**Key words:** commercial buildings; heating ventilating and air-conditioning systems; part load; operation energy efficiency

目前中国每年城镇新建公共建筑约 3 亿 ~ 4 亿 m<sup>2</sup>,既有公共建筑约 40 亿 m<sup>2</sup>。根据一些大城市的能耗实测资料,特大型高档公共建筑的单位面

积能耗约为城镇普通居住建筑能耗的 10~15 倍,一般公共建筑的能耗也会是普通居住建筑能耗的 5 倍<sup>[1-2]</sup>。公共建筑用能数量巨大,浪费严重。在公

收稿日期:2008-01-05

基金项目:重庆市科委自然科学基金资助项目(CSTC,2007BB9129)

作者简介:白雪莲(1973-),女,重庆大学副教授,博士,主要从事建筑环境与设备工程方面的研究,(Tel)023-65127190;  
(E-mail)xuelianbai@163.com。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

共建筑的全年能耗中,大约 50%~60%消耗于空调制冷与采暖系统<sup>[3]</sup>,因此其节能潜力也最大。

在对公共建筑能耗现状基本掌握的基础之上,为了重点研究公共建筑中的耗能大户——空调系统的节能潜力和节能措施,课题组选择了 3 座重庆地区的典型公共建筑,进行了能耗实测。重庆地处中国长江中上游,是典型的夏热冬冷地区。气候属亚热带湿润

季风气候,夏季连晴高温少风,冬季阴冷、湿度大,日照率低。测试期间,重庆处于典型夏季高温天气,以晴天为主,测试日室外最高温度持续 35℃以上。

## 1 公共建筑空调系统能耗实测

### 1.1 测试建筑概况

所选 3 座建筑的基本情况见表 1。

表 1 测试建筑基本情况

建筑编号	功能	总建筑 面积/m <sup>2</sup>	空调系统投 入运行时间	空调 面积/m <sup>2</sup>	冷水机组		
					机型	冷量/kW	功率/kW
A 建筑	酒店	21 000	2003 年 6 月	15 500	螺杆式机组	2×1 320	2×273.7
B 建筑	政府 办公楼	16 000	1996 年	14 000	螺杆式机组	2×1 744	2×400
C 建筑 <sup>1)</sup>	商场+ 办公楼	50 000	2003 年 1 月	21 000	2 离心式+ 1 螺杆式机组	2×2 461+ 1×1 392	2×470+ 1×279

1)C 建筑中央空调的冷源只负责为 1-7 层商场(共 2.1 万 m<sup>2</sup>)供冷,塔楼采用局部空调机组供冷。

### 1.2 测试内容及方法

测试的内容主要包括室外气象条件,室内温、湿度,制冷机组实际制冷量,制冷机组实际输入功率,以及建筑各用电终端的电耗情况。

冷水机组制冷量通过测量机组冷水进出口温度和流量,根据式(1)可计算得到。

$$Q = cm(t_{in} - t_{out}), \quad (1)$$

式中:  $Q$  为制冷机产生的冷量, kW;  $c$  为冷水比热容, kJ/(kg·K);  $m$  为冷水流量, kg/s;  $t_{in}$  为制冷机冷水进口温度, K;  $t_{out}$  为制冷机冷水出口温度, K。

冷水机组的电耗通过测量或读取冷水机组的电压  $U$ 、电流值  $I$  以及功率因数  $\cos \varphi$ , 根据式(2)可计算得到<sup>[4]</sup>

$$P = UI \cos \varphi, \quad (2)$$

式中:  $P$  为制冷机的电耗, kW;  $U$  为交流电压, 由配电柜上电压表测得, V;  $I$  为交流电流, 由配电柜上电流表测得, A;  $\cos \varphi$  为功率因数, 由功率因数表测得。

## 2 公共建筑空调系统能耗实测结果分析

### 2.1 冷水机组的能效分析

测试期间 A 建筑开启 1 台冷水机组, 额定冷量 1 320 kW。图 1 为 A 建筑冷水机组在测试日的实测制冷量。

从图 1 中可以看到 A 建筑一天的负荷变化可以明显分为 2 个阶段, 0:00-8:00 为夜间运行阶段, 8:00-24:00 主要为日间运行阶段。在夜间运行阶

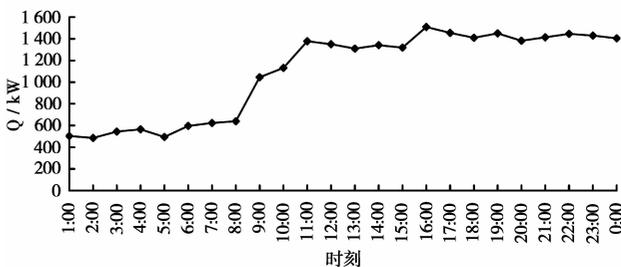


图 1 A 建筑测试日冷水机组实测制冷量

段, 空调负荷较小, 实际制冷量仅为 1 台冷水机组额定制冷量的 40% 左右, 但 COP (coefficient of performance) 平均都超过了机组额定 COP (4.82), 个别时刻其 COP 甚至达到了额定水平的 120% 以上。分析其原因可能如下: 该建筑夏季一般采用单机对双泵和双塔的运行模式。使得冷却水进机组水温夜间在 25.9~27.1℃ 之间波动, 远低于机组额定工况水温, 与当天夜间同时测得的室外湿球温度 25.5℃ 相比, 冷却水温已临近冷却水极限水温。另外, 夜间机组上载率都是 25% (开 1 个机头), 即冷凝器和蒸发器的传热面积增大了 1 倍。从而使得冷水机组 COP 值较高。这种运行模式在提高了冷水机组 COP 的同时加大了水泵、冷却塔的能耗, 其运行并不合理。在日间运行阶段, 空调负荷较大, 11 点后机组基本上在超负荷下运行, 此时管理人员开启第 3 台冷却塔, 一直到第 2 天凌晨 1 点多关闭, 机组 COP 一般在额定值的 90% 以上。

图 2 为测试日 B 建筑冷水机组的实测制冷量变化情况。由冷水机组自带的控制系统控制开启机组数和机头数。

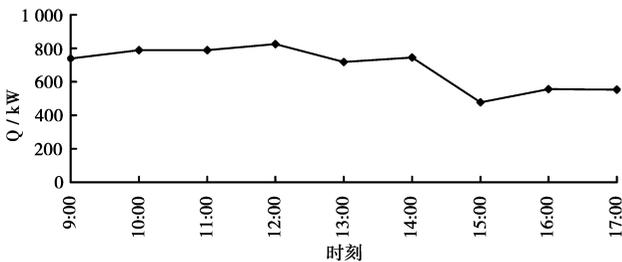


图 2 B 建筑测试日冷水机组实测制冷量

从图 2 中可以看出:该办公楼负荷随着室外温度上升负荷略有上升,到 12:10 达到顶峰,然后随着室内办公人数的减少,负荷逐渐减少。另外还可以发现 B 建筑实际需冷量极低,测试当天最大制冷量仅 826 kW,还不到一台机组的额定制冷量 1 744 kW 的 1/2。机组运行的 COP 也较低,平均只有额定值 4.36 的 65% 左右。主要原因是 B 建筑建成时间较早,中央空调系统 1996 年开始投入运行。由于已经运行多年,而空调系统缺乏完善的维修保养措施,导致设备老化严重,冷水机组制冷量大幅衰减。而且中央空调主要负责 1-6 楼的房间,6 楼以上都改用了局部空调机组,使得机组还有较多的制冷量闲置。

C 建筑的测试结果见图 3。测试期间,C 建筑始终开启 1 台制冷量为 2 461 kW 的冷水机组。从图 3 可以看到 C 建筑 1 d 的负荷比较平稳,冷水机组

几乎一直都在满负荷状态下运行,但机组 COP 仍未达到额定值(5.23),只有额定值的 80% 左右。而 2 台型号、参数、已运行时间完全相同的冷水机组,在其他外部条件也相同的情况下实测 COP 值却有很大的差别。可见,设备本身的质量对空调能耗有很大的影响。

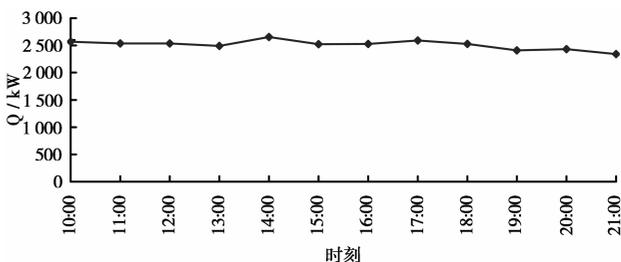


图 3 C 建筑测试日冷水机组实测制冷量

### 2.2 空调系统的电耗分析

表 2 统计了 3 座建筑空调系统各设备的设计装机容量和所占百分比。3 座建筑的空调系统设备装机容量中,制冷机装机容量最大,所占比例都超过了 50%。冷水泵和冷却水泵所占比例稳定在 10%~20% 之间。A、B 建筑空调末端所占百分比均在 10% 左右,而以商场为主的 C 建筑空调末端装机容量所占比例达到了 22%。对 3 座建筑的空调系统设备电耗量进行实测,结果反映出了相类似的分配。可见,空调采暖系统在公共建筑中是能耗大户,而空调冷热源机组的能耗又占整个空调采暖系统的大部分。

表 2 3 座建筑中央空调系统设备装机容量统计表

设备名称	电机装机容量/kW			占总装机容量的百分数/%		
	A 建筑	B 建筑	C 建筑	A 建筑	B 建筑	C 建筑
制冷机	548	400	1219	64.0	53.0	54.0
冷水泵	90	110	225	10.5	14.5	10.0
冷却水泵	111	150	270	13.0	20.0	12.0
冷却塔	22	11	44	2.5	1.5	2.0
空调末端	85	80	500	10.0	10.5	22.0

### 2.3 水系统能效分析

A 建筑共配备 3 台同型号变频冷水泵。冷水泵单台额定功率均为 30 kW,额定流量 262 m<sup>3</sup>/h,额定扬程 31.5 mH<sub>2</sub>O,水泵设于冷水机组出口管路上。原空调系统设计为单机对单泵的运行模式,则单台冷水泵的额定流量完全可以满足单台冷机 227 m<sup>3</sup>/h 的额定冷水流量。但该建筑在夏季实际运行时采用单机对双泵的运行模式,测试管路压力结果如图 4。从图中可以看到夜间运行时,单台水泵的流量、扬程完全可以满足要求。因此管理人员采

用的水泵运行方式是非常不合理的。

衡量空调水系统是否节能的综合指标是水输送系数<sup>[5]</sup>,其定义为供冷的水循环所输送的显热交换量(kW)与所选配循环水泵电机的额定功率(kW)之比。《旅游旅馆建筑热工与空气调节节能设计标准》(GB 50189—93)中规定空调供冷的水输送系数不得小于 30<sup>[6]</sup>。在忽略管道冷损失的情况下,根据某时间段两端点的制冷量平均值除以该小时内水泵的耗电量作为某时刻水输送系数的方法,计算所得的水输送系数如图 5 所示。

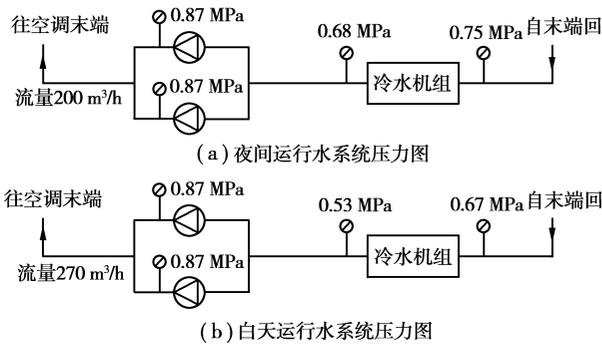


图4 A建筑水系统压力示意图

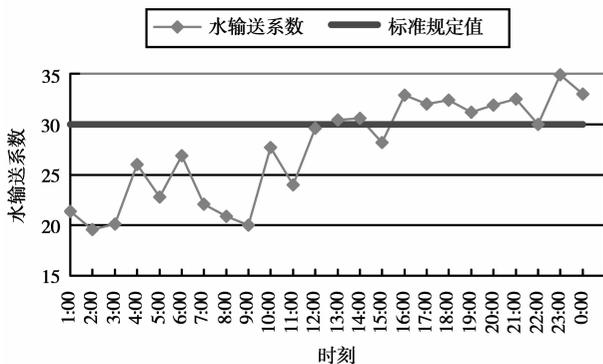


图5 A大楼冷水系统水输送系数

图5中显示,在12点之后,冷水泵的水输送系数基本上都大于30,达到了标准要求。但在12点之前,冷水泵的水输送系数均低于标准规定的30。可见,A建筑采用了水泵变频技术后,仍未实现夜间运行的节能。

B、C建筑采用的都是一机一泵的运行模式,B建筑测试期间由于冷水温差仅有 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,所以存在“大流量,小温差”问题,冷水泵运行是不节能的。C建筑冷水泵选型比较合理,其单台额定流量为 $530\text{ m}^3/\text{h}$ ,实测期间开1台机组1台水泵,流量一直在 $529\sim 536\text{ m}^3/\text{h}$ 之间变化,测得其运行功率一般为 $75\text{ kW}$ ,根据实际制冷量约 $2500\text{ kW}$ ,得其水输送系数为 $2500/75=33.3$ ,达到标准规定值。

水处理是空调系统中重要的一环,是降低换热器水侧污垢热阻的重要措施<sup>[5,7]</sup>。良好的水处理可以保持冷却环路的洁净度,减少维修率,节约能源,提高系统的可靠性。但在所测试的3座建筑中,只有C建筑安装了电子水处理仪,其它2座楼均无水处理设备。

#### 2.4 室内热环境状况

在室内温湿度的测试中,A建筑的温湿度基本上满足要求,测试期间没有客人反映对空调效果不满意。而在对B、C建筑测试中发现如下问题:

1) B建筑为办公楼,该楼2、3层空调为全空气

系统,主要为餐厅和一些办公室供冷。由于一些较大的办公室后来被分隔成一半空间放置办公用具,一半空间用于办公,室内人员减少了,但空调原设计送风量未进行调整,引起室内温度过低,室内存在过冷现象;而同时其它房间却存在室内温度降不下来的现象,尤其是有西晒的房间,室内温、湿度明显高于其他房间,有的房间为了保证室内温度要求甚至另外加装了窗机或柜机。导致这种现象的主要原因是空调系统没有安装必要的风阀,调节能力差,自动控制水平不高。另外有些设备老化,换热能力减弱,过滤网没有清洗也是原因之一。

2) C建筑为商场,室内温湿度的测试结果显示,温度比较稳定,各层温度基本保持在 $24\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。但对室内湿度的测试发现有的楼层相对湿度达80%。分析其原因,与空调冷水供水温度偏高有关。测试期间冷水机组供回水温度一般为 $13\text{ }^{\circ}\text{C}/17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,导致空调末端除湿能力下降。另外值得一提的是在冬季和过渡季节C建筑开启了1台制冷量较小的冷水机组( $1392\text{ kW}$ )供冷,极大地增加了建筑物在过渡季节和冬季的能耗。如果能充分利用室外新风,并通过排风机进行机械排风,则既能满足室内温度要求又能实现节能。

### 3 公共建筑空调系统节能建议

#### 3.1 空调系统的设计

从已有的测试和调研结果看,全国普遍存在的设计冷负荷偏大的问题在重庆市同样存在。在对重庆某四星级酒店的调研中发现其冷量配备了2台额定制冷量为 $1584\text{ kW}$ 和1台额定制冷量为 $2112\text{ kW}$ 的冷水机组,而实际一般开启1台 $1584\text{ kW}$ 的机组就够了,最不利情况下开启1台 $2112\text{ kW}$ 的机组也够用了,其设计冷量大过实际最大负荷一倍还多。这样必然导致初投资增大,制冷设备利用率下降<sup>[8]</sup>。因而在设计阶段对冷负荷的精确计算非常重要,不能一概采用概算值。图6为3座测试建筑单位面积装机容量和实际测试最大单位面积供冷量的比较结果。

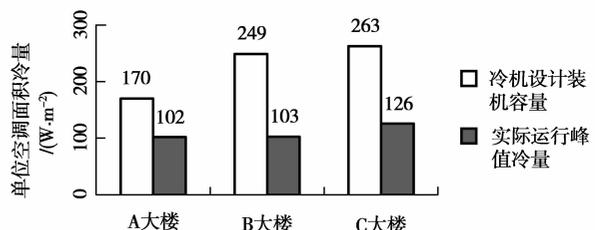


图6 测试大楼设计冷量和实际峰值冷量

要降低建筑的空调能耗,设计阶段很重要,一个设计好的空调系统可以极大地减少运行能耗<sup>[9]</sup>。在设计阶段,合理确定室内设计温湿度,准确计算建筑冷热负荷,选择合理的系统形式。根据建筑的实际负荷变化合理配备冷水机组装机容量和台数,以及恰当

的输配系统等,都将大大提高暖通空调系统的能效<sup>[10]</sup>。

### 3.2 空调系统的运行控制

在对3座建筑的测试中发现无论是老建筑还是新建筑其自控水平都较低,都没有楼宇自动化系统,完全靠人工凭经验控制机组运行。而且没有发现一幢公共建筑有用能管理制度,大多数管理人员根本不具备必要的制冷空调知识,许多既有建筑虽然负荷在随时变化,但空调系统运行却始终不做任何调节<sup>[11]</sup>。公共建筑空调系统自动化水平不高,给空调系统的节能带来很大的障碍。对于既有建筑的这种现状,应重点通过建筑能耗基础数据的准确收集和部分负荷下系统的运行调控实现节能<sup>[12]</sup>。

作为公共建筑能耗中的大户,暖通空调系统的节能潜力和意义都很大。对于新建建筑,可通过设计阶段室内设计参数的合理确定,准确动态地计算建筑冷热负荷以及一些节能技术的采用,大大提高暖通空调系统的能效<sup>[13]</sup>。对于既有建筑则应重点通过建筑能耗基础数据的准确收集和部分负荷下系统的运行调控,弥补由于管理模式或能源设计本身不合理的缺陷,加强对设备运行的控制能力,选择合理的运行策略,尽量使得制冷机运行在较高的负荷下,以获得较高的COP,达到节能的目的。合理使用能源,如过渡季和冬季充分利用室外新风作为自然冷源,有效提高舒适性并实现节能<sup>[14]</sup>。

## 4 结 语

重庆市典型公共建筑空调系统的测试研究表明,重庆市公共建筑空调系统主要存在的问题有:设备效率达不到额定值,冷水机组冷量配备过大,酒店在夜间低负荷运行时空调系统能效比很低,水系统输送效率低下,“跑冒滴漏”现象严重,运行管理混乱等。这也是目前中国大部分公共建筑暖通空调系统的用能现状。对于公共建筑暖通空调系统,通过设计阶段的准确计算和严格控制,以及运行阶段的合理调节和实时管理,能够大大地提高其能效。

### 参考文献:

[1] 江亿. 我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J]. 暖通空调, 2005, 35(5):30-40.  
JIANG YI. Current building energy consumption in china and effective energy efficiency measures [J]. HVAC, 2005, 35(5): 30-40.

[2] 薛志峰,江亿. 商业建筑的空调系统能耗指标分析[J]. 暖通空调, 2005, 35(1): 37-41.  
XUE ZHI-FENG, JIANG YI. Study on the air conditioning energy consumption guideline in commercial buildings[J]. HVAC, 2005, 35(1): 37-41.

[3] 中华人民共和国建设部. 公共建筑节能设计标准(GB 50189—2005)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.

[4] 王长庆,龙惟定,黄治钟,等. 上海公共建筑空调制冷系统的能耗测试与分析[J]. 暖通空调, 2002, 32(6):1-3.  
WANG CHANG-QING, LONG WEI-DING, HUANG ZHI-ZHONG, et al. Energy audit and analysis of chilled water system in commercial buildings in Shanghai [J]. HVAC, 2002, 32(6):1-3.

[5] 张玮. 水输送系数:水系统的重要评价指标[J]. 暖通空调, 2004, 34(9):68-70.  
ZHANG WEI. Water transport factor: an important evaluation target for water systems [J]. HVAC, 2004, 34(9):68-70.

[6] 中华人民共和国建设部. 旅游旅馆建筑热工与空气调节节能设计标准(GB 50189—93)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1994.

[7] 林守雄,谢榕. 中央空调冷却水系统的安全、经济型检测与监控[J]. 能源工程, 2004(1):65-66.  
LIN SHOU-XIONG, XIE RONG. Safety and economy measuring and monitoring of cooling water system[J]. Energy Engineering, 2004(1):65-66.

[8] 郭林文,白雪莲,孙纯武,等. 重庆市酒店类建筑用电量调研与测试分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(3):96-98.  
GUO LIN-WEN, BAI XUE-LIAN, SUN CHUN-WU, et al. Tests and analysis of electricity consumption in hotel buildings of Chongqing [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(3):96-98.

[9] KENZO YONEZAWA, FUMLO YAMADA, YUKO WADA, et al. Comfort air-conditioning control for building energy-saving [C] // Industrial electronics society. 26th annual conference of the IEEE, 2000: 1737-1742.

[10] CLAUDE-ALAIN ROULET. Indoor environment quality in buildings and its impact on outdoor environment[J]. Energy and Buildings, 2001, 33:183-191.

[11] 王洪卫,白雪莲,孙纯武,等. 重庆市大型公共建筑集中空调系统能耗状况及分析[J]. 洁净与空调技术, 2005(4): 47-50.  
WANG HONG-WEI, BAI XUE-LIAN, SUN CHUN-WU, et al. Analysis of energy consumption status and energy efficiency potential in large commercial buildings of Chongqing [J]. Contamination Control and Air-conditioning Technology, 2005(4): 47-50.

[12] MATHEWS E H, BOTHA C P, ARNDT D C, et al. HVAC control strategies to enhance comfort and minimize energy usage [J]. Energy and Buildings, 2001, 33:853-863.

[13] BAI XUE-LIAN, LIU HUI-FANG. Strategies for improving energy efficiency of HVAC systems of public buildings[J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14(3): 167-172.

[14] BJARNE W OLESEN. The philosophy behind EN15251: indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings[J]. Energy and buildings, 2007, 39: 740-749.