

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.062



商业综合体冷站用能分析与优化

刘猛, 衷逸群, 陈希, 肖倩, 晏璐

(重庆大学 城市建设与环境工程学院; 绿色建筑与人居环境营造国际合作联合实验室;
国家级低碳绿色建筑国际联合研究中心, 重庆 400045)

摘要:商业综合体由于在内部空间结构、功能及人员行为方面的复杂性,其负荷特征、空调运行及室内环境等状况复杂,冷站设计及节能优化需要结合自身特点。首先,针对商业综合体分析其空调使用需求特征,通过室内热湿环境实测分析,发现室内环境较传统商业建筑波动较大,不同业态室内环境有显著差异。其次,通过冷站实际运行工况分析其能耗特征、供冷系统运行模式及问题,发现商业综合体冷负荷稳定、冷站运行时间长、冷机设计容量普遍存在过大的问题。最后,利用 DeST 软件对两类典型空间分布(环绕型、中庭型)的商业综合体建立模型,分析不同区域、不同时间段的负荷特征,并根据业态负荷或时间负荷特征对冷源设计方案进行优化设计和对比,发现按照业态负荷特征对体量大、业态布局分散且各业态负荷差异大的商业综合体进行冷源设计对冷站节能有利。

关键词:商业综合体; 负荷需求; 室内环境; 冷站用能; 空调系统

中图分类号: TU831.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2019)03-0154-08

Refrigeration system operation and design optimization of commercial complex

Liu Meng, Zhong Yiqun, Chen Xi, Xiao Qian, Yan Lu

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering; Joint International Research Laboratory of Green Building and Built Environment, Ministry of Education; National Centre for International Research of Low-carbon and Green Buildings, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Because of the complexity of the internal space structure and function diversity, personnel behavior in commercial complex, the load characteristics, plants operation and indoor environment are complex. Therefore, the chiller plants design and energy optimization need to combine their own characteristics. Firstly, through indoor thermal environment test to analyze the air conditioning demand of commercial complex, it is found that the indoor environment fluctuates more greatly compared with traditional commercial buildings, and there are significant differences among different commercial types. Secondly, the refrigeration system operation is analyzed through chiller plants operation records. It is indicated that the cooling load of commercial complex is relatively stable with the refrigeration system running for a long time, and the design capacity of the plants is generally too large. Finally, the load characteristics is analyzed through DeST modelling, and different chiller plants design optimization is

收稿日期: 2018-08-02

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0700300)

作者简介: 刘猛(1979-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事绿色建筑技术、建筑节能研究, E-mail: liumeng2033@126.com.

Received: 2018-08-02

Foundation item: National Key R & D Program of China(No. 2016YFC0700300)

Author brief: Liu Meng (1979-), professor, doctoral supervisor, main research interests: green building technology and energy conservation in buildings, E-mail: liumeng2033@126.com.

compared. The result shows that the refrigeration system design method according to the commercial type load distribution is beneficial for energy efficiency, especially in the commercial complex with scattered commercial type layout and large difference in cooling load of different commercial type.

Keywords: commercial complexes; load demand; indoor environment; chiller plants energy; air conditioning system

近年来,中国商业综合体经历了爆发式增长,城市及经济发展导致城市功能呈现集约化、复合化的趋势,建筑综合体应运而生。“商业综合体”^[1]是建筑综合体中的一类,是以商业经营活动为主,结合餐饮、休闲娱乐、文化、办公等多种功能于一体的综合性建筑^[2-3]。

商业综合体内部空间结构及功能的复杂性、人员行为及数量变化的多样性,导致商业综合体建筑室内环境状况复杂^[4]。商业综合体由于其体量大、客流量大、运行时间长、照明等设备密度高,造成总耗电量较大,通常情况下,空调系统耗电量比重最大,可达到50%^[5-8]。中国除东北外,大部分地区在节能标准基础上降低围护结构 K 值,这对降低能耗影响很小,甚至会增大能耗,说明对于商业建筑的节能应主要关注室内热源及供冷系统^[9]。商业综合体这类大体量建筑冷站往往采用多台大冷量机组,由于负荷的逐时变化,多台机组同时运行时能达到整体高效就显得非常重要^[10]。商业综合体冷机设计容量大于实际运行时峰值冷量是较为普遍的情况,许多投入运营的商业综合体供冷系统设计容量都大大超过实际需求,不仅浪费投资,还降低了冷机效率,增加了系统能耗^[11-13]。

针对商业综合体空间、业态、室内环境等因素进行调研,分析其对空调的使用需求,通过冷站全年运行记录,分析冷站供冷能力、能耗及运行工况;再对典型商业综合体建立模型,分析负荷特征,并根据业态负荷特征或季节负荷特征对冷源进行优化设计 and 对比。

1 空调使用需求特征分析

商业综合体内热源是其负荷分析的重点,对空调使用需求影响大。从空间、业态和客流量三方面分析商业综合体的特点,与传统商业建筑进行比较,为之后室内环境和冷站运行分析及优化提供基础。

1.1 空间布局

商业综合体多种多样的空间布局类型造成相应不同的空调需求特征。20世纪,商业综合体整体布

局紧凑,而近年来新建商业综合体体量大,出现大面积的中庭及贯通空间,对空调需求影响较大。因此,对5个商业综合体空间布局进行调查,基本信息见表1。

表1 A~E商业综合体概况

Table 1 Overview of the A~E commercial complexes

商业综合体	总建筑面积 (万 m ²)	建成时间	建筑层数
A	10.0	1997年	8F(B1~7F)
B	24.4	2012年	6F(B1~5F)
C	17.0	2012年	6F(B1~5F)
D	13.0	2016年	5F(B1~4F)
E	16.6	2015年	5F(B1~4F)

同时,结合文献调研的商业综合体空间布局,将其分为两个典型类别:环绕型和中庭型,见图1。环绕型整体空间较紧凑,中庭型空间分布较线性化,以中庭的分布串联起整个空间。

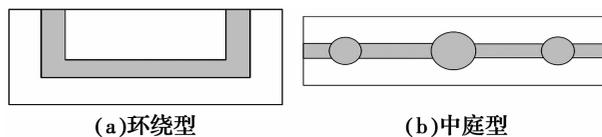


图1 商业综合体空间分布典型类型(灰色为主路径)

Fig. 1 Typical types of spatial distribution of commercial complexes

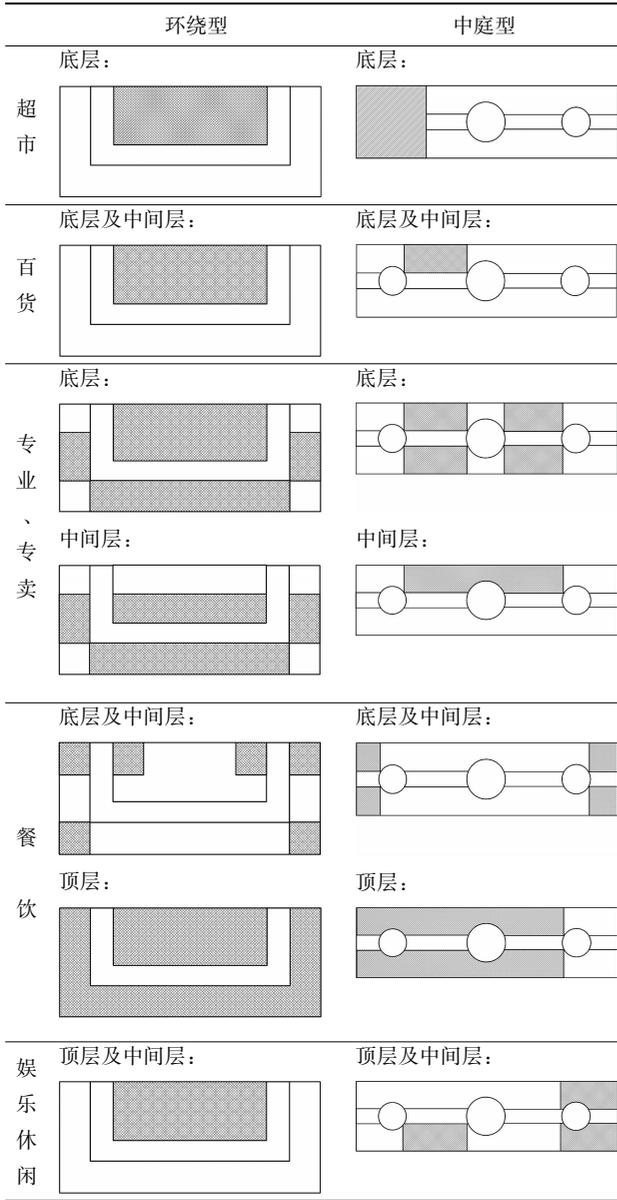
1.2 业态分布

不同业态在商业综合体的功能中发挥不同的作用,其空间分布模式是商业综合体规划中非常重要的部分,同时,也会影响室内不同区域的负荷需求和变化,影响空调系统的划分。对于商业综合体,其业态主要为5大类^[14]:超市、大卖场;百货店;专业专卖店;餐饮店;娱乐休闲店。

结合商业综合体环绕型和中庭型两类典型的空间分布,对各业态的空间分布进行对比,见表2。环绕型空间布局相对紧凑,业态分布集中;中庭型空间布局较分散,体量普遍较环绕型更大。

表2 两类商业综合体典型空间分布下的分层业态空间分布模式

Table 2 Layered spatial distribution patterns of business States under typical spatial distribution of two types of commercial complexes



注: □ 为主路径; ■ 为业态分布

1.3 客流量

商业综合体相较其他类型建筑而言,客流量大、随时间波动频繁,因此,人员负荷的分布情况对负荷计算以及冷源设计优化至关重要。

结合文献及实际调研发现:标准及设计手册的取值单一,只对商业建筑人均占有面积有统一参考值,不能涵盖不同时代和不同类型商业综合体的真实情况。相关设计标准规范中对商业建筑的客流量取值有相关规定,如《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015)附录B中,介绍商业建筑人均占

有面积为 $8 \text{ m}^2/\text{人}$;《实用供热空调设计手册》中对商业建筑人均占有面积为 $3 \text{ m}^2/\text{人}$ (一般商店)和 $4 \text{ m}^2/\text{人}$ (高档商店)。20世纪90年代,传统商业建筑体量小,人均占有面积在 $2.0\sim 10.0 \text{ m}^2/\text{人}$ ^[15],近年来,商业综合体爆发式增长,其人均占有面积在 $4.0\sim 20.0 \text{ m}^2/\text{人}$ ^[16]。

2 供冷季室内环境分析

冷站用能问题需要首先关注室内环境需求,室内热湿环境状况对节能是非常重要的参数^[17]。根据文献调研^[18-20],商业综合体室内环境复杂,温度分布范围大,繁忙时段及客流量较大处易出现 CO_2 浓度超标的情况。原因在于,商业综合体体量大、功能多,且商业综合体有其特殊空间,如半开放区域、中庭,其室内环境及控制措施都与传统商业建筑有较大差别。

因此,为分析各区域冷量、新风是否满足要求,从而为进一步分析冷站运行做基础,对商业综合体供冷季室内热湿环境进行实测,主要是了解不同区域室内环境状况。2017年7月—8月,选取不同典型夏季气候条件,结合工作日以及节假日等分别对A、B、C三个商业综合体室内环境进行测试,测试内容包括室内温湿度及 CO_2 浓度分布,测试仪器型号及精度见表3。

表3 测试仪器参数

Table 3 Test instrument parameters

仪器 参数	HOBO U12-012		TELAIRE-7001
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	湿度/%	CO_2 质量分数/ 10^{-6}
量程	$-20\sim 70$	$5\sim 95$	$0\sim 2499$
精度	± 0.35	± 2.5	± 50 或 $\pm 5\%$
	$(0\sim 50^{\circ}\text{C})$	$(10\%\sim 90\%)$	
分辨率	0.1	0.01	1

2.1 公共区域室内环境

公共区域主要包括公共走廊、中庭、大厅等区域,商业综合体内的公共区域往往是客流往来频繁的地方,因此,顾客对室内环境的感受十分重要。

图2为3个商业综合体的分层室内环境对比,有以下特点:

1) 总体来看,室内环境较为舒适,温度多分布在 $25\sim 27^{\circ}\text{C}$,新建综合体B、C室内环境舒适,温度稳定在 $25.5\sim 26.5^{\circ}\text{C}$ 范围内。相比之下,年代久远的综合体A整体温度偏高且温度分布差异大。

2) 室内温度分布普遍是从底层至顶层温度逐

渐升高,顶层比底层升高3%。主要原因是,顶层传热量大,且顶层一般多为餐饮,热源大,客流量也大。

3)由于客流量大,底层CO₂浓度普遍较高,周末CO₂浓度明显高于工作日,一日中CO₂浓度逐渐

累积,晚间达到峰值。

4)局部区域存在问题有:顶层温度易过高,尤其顶层为餐饮;部分位于建筑形体突出处的外区温度高;部分区域CO₂质量分数接近或超过1 000×10⁻⁶,尤其是底层及部分人员密集的店铺内。

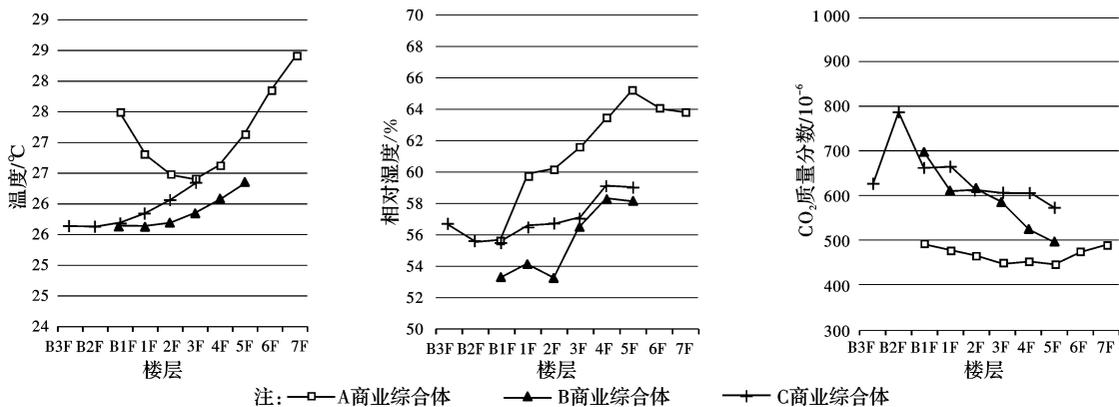


Fig. 2 Commercial integrated somatic environmental distribution of A, B and C

2.2 不同业态室内环境

百货、专业专卖、休闲娱乐、餐饮及超市5种不同业态及公共区域的室内热湿环境状况均值,见表4。数据表明,各业态的温度值相差不大,休闲娱乐及超市温度低于26℃;专业专卖和超市的相对湿度偏低;各业态CO₂浓度相差较大,百货的CO₂浓度较其他区域最低,这与其内部客流量较小有关。

表4 不同业态区域室内环境

Table 4 Indoor environment in different industries

功能区域	温度/℃	相对湿度/%	CO ₂ 质量分数/10 ⁻⁶
公共区域	26.34	58.18	558.2
百货	26.55	57.15	420.0
专业专卖	26.39	52.32	879.6
休闲娱乐	25.74	59.98	712.7
餐饮	26.96	58.60	700.5
超市	25.75	55.24	743.6

为了比较不同业态的室内热湿环境参数是否有显著差异,用Kruskal-Wallis检验对不同商业体内不同业态进行分析,结果见表5。可看出,B商业综合体的超市、百货、专业专卖、餐饮、娱乐5个业态间的室内环境存在显著差异,说明由于功能的特点,不同的业态形式形成了不同的室内热湿环境状况。

3 冷站运行特点分析

通过供冷季室内环境分析可以看出,商业综合体整体环境舒适,说明冷站运行基本不存在大的问题,室内环境问题主要表现为局部时间和局部空间的不舒适,该问题可通过空调设计及控制加以优化改善。以下对冷站全年运行情况进行分析。

表5 B商业综合体不同业态室内热湿环境 Kruskal-Wallis 检验
Table 5 Kruskal-wallis test for indoor hot and wet conditions in different types of the B business complex

参数指标	显著性(双尾)	自由度	个案数	检验统计
温度	0.000	3	104	40.425 °C
相对湿度	0.000	3	104	78.076 %
CO ₂ 浓度	0.000	3	104	78.974 × 10 ⁻⁶

注:显著性水平为0.01(双侧检验)。

获取A商业综合体2017年7月15日—7月19日、8月7日—8月10日及B商业综合体2015年全年运行记录数据进行分析。A、B商业综合体的冷站设备见表6、表7。

表6 A商业综合体冷站设备表

Table 6 List of cold station equipment for the A commercial complex

设备	容量/RT	额定功率/kW
1#~6#冷水机组	1 100	
7#冷水机组	350	
1#~7#冷冻水泵		132
1#~7#冷却水泵		110
1#~6#冷却塔		45

表7 B商业综合体冷站冷机表

Table 7 List of cold station equipment for the B commercial complex

冷机	容量/RT	制冷剂	额定功率/kW	设计冷冻水温/℃	设计冷却水温/℃	额定COP
1#~4#(离心机)	2 013	R134a	1 215	5.5/10.5	37/32	5.8
5#~6#(离心机)	572	R134a	369	5.5/10.5	37/32	5.4

3.1 冷站设计容量过大

以B商业综合体为例,其冷站有4台大冷机和2台小冷机,从图3中可以看出,设备利用率低,最常开启的组合为“1小”和“1大”,这两种组合的小时数为3262,占全年总开启小时数的77.5%。说明该冷站设计容量过大,大部分时间设备未得到充分利用。

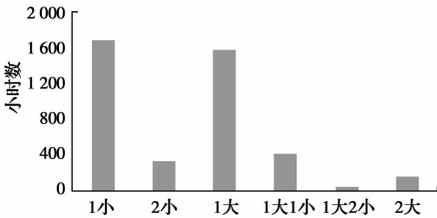


图3 Hours of start-up for different units of the B commercial complex

3.2 冷站开启时间长

B商业综合体内部为贯通大空间,存在大面积内区,全年都存在空调冷负荷。根据商业综合体冷站运行数据,冷站每天都运行,从图4中也可看出,2015年、2016年冬季冷站能耗均占13%。

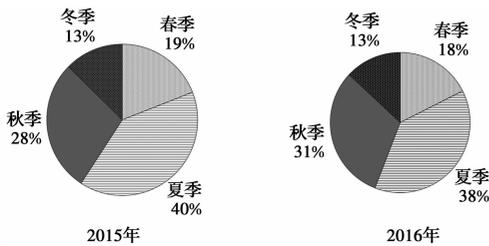


图4 Cold station quarter energy consumption of the B commercial complex in 2015 and 2016

3.3 冷站负荷率及COP分布

从图5负荷率分布可以看出,绝大部分时间均在50%以上,无低于25%的情况,说明大型商业综合体负荷率波动较为稳定。

图6为机组COP分布情况,可以看出,小冷机运行使用频率高,COP大多达到或超过额定值;大冷机由于容量大,反而易处于低COP工况运行;单台机组运行时COP较高,多台机组组合运行往往不能同时实现高效;不同组合开启方式存在供冷量大小的重叠的区域。如部分“1大”的运行COP低于4.0,这部分工况供冷量较低,可由“2小”的工况代替,负荷率高且幅值小,基本在50%以上,说明商业综合体负荷稳定,台数控制相对来看更为重要。

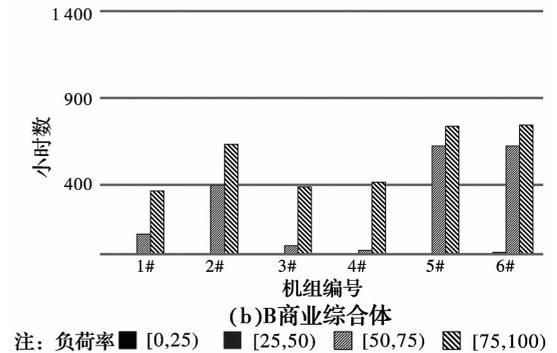
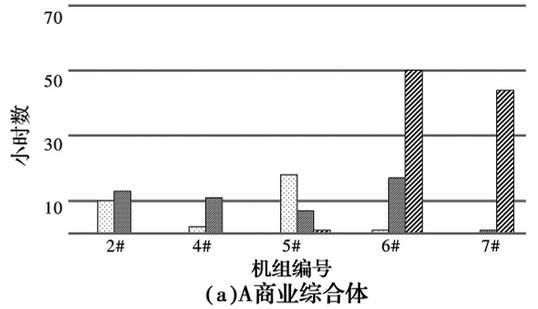


图5 商业综合体负荷率分布

图5 Load-rate distribution of commercial complexes

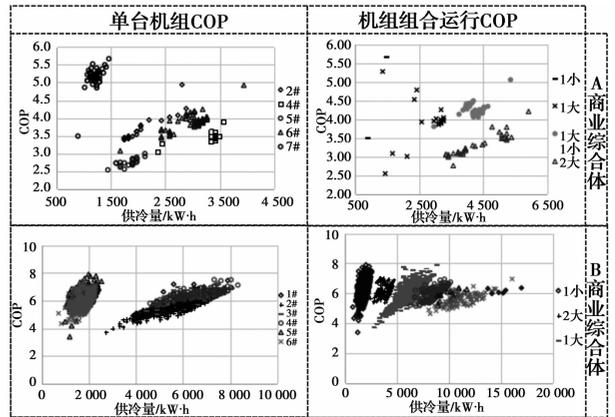


图6 Cop distribution of cold machine operation in commercial complex

4 冷源设计优化

商业综合体冷站耗能大,冷源设计优化尤为重要。传统负荷计算及进行冷源设计时,关注负荷的最大值,再以不同容量比例的大小机进行配置,并未对负荷的季节分布、业态分布进行详细分析。结合商业综合体常见冷源的调研发现:

- 1) 多将建筑整体考虑设1个冷源,少数将超市、百货和其他业态分设冷源。
- 2) 商业综合体负荷稳定,冷机多采用离心机,少数会加设1~2台螺杆机(冷量通常约为离心机的1/2)。

以上方案多根据惯例或经验确定,而针对商业综合体这类与传统商业建筑空调需求有较大差异的建筑,应根据自身负荷特征合理进行冷源设计。由于不同业态的负荷在时间、空间方面的分布特征不尽相同,可考虑不同业态负荷由不同冷水机组承担。结合不同业态空间分布模式以及不同业态负荷特征,利用 DeST 软件对 B、D 商业综合体建模,并对比根据业态负荷和季节负荷选择机组两类冷源设计方法来具体分析冷源设计优化。

4.1 根据业态负荷选择机组

将商业综合体分为公共区域、商铺、餐饮、超市、娱乐 5 个区域,统计其峰值负荷,见图 7。可以看出,B、D 商业综合体的各业态负荷特征不同:D 业态布局比较规整,同一业态大多组团集中分布,因此,各业态负荷相近;而 B 体量大,专业专卖类占比大且较集中,因此,专业专卖的负荷占了非常大的比例。

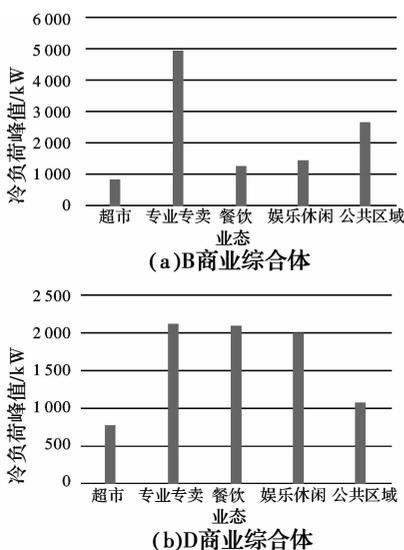


图 7 B、D 商业综合体各业态峰值冷负荷

Fig. 7 Peak cold load for various industries in the B and D business complex

4.2 根据季节负荷选择机组

结合商业综合体负荷时间规律进行分析:全年都有冷负荷,且不同季节冷负荷数量相差巨大,低于 50% 最大建筑冷负荷的小时数过半;商业综合体日负荷较稳定,一日中负荷峰谷差不显著。因此,考虑可由季节负荷的变化规律选择冷机,以适应不同负荷段的需求。

图 8 为不同冷负荷率的小时数分布,从图中可以看出,绝大多数时间内建筑的冷负荷率低于 50%,主要原因是内区负荷持续稳定。

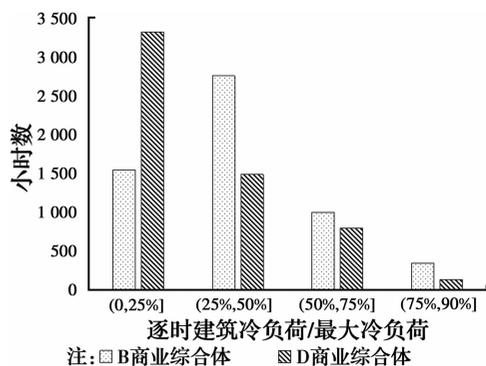


图 8 建筑冷负荷率分布

Fig. 8 Cold load rate distribution in buildings

从图 9 看,1 月—3 月及 12 月平均逐时供冷量稳定,与 1 台小冷机冷量相近,4 月、5 月、11 月与 2 台小冷机冷量相近,6 月、10 月与 1 台大冷机冷量相近,7 月—9 月与 2 台大冷机冷量相近。

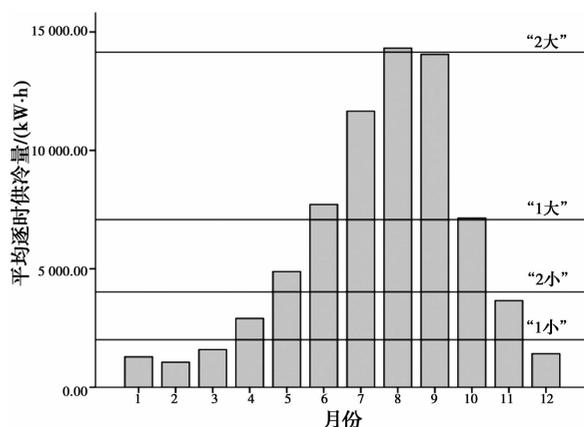


图 9 B 商业综合体不同月份平均逐时供冷量

Fig. 9 Average hourly coolant supply for different months of the B commercial complex

根据以上分析,可初步得出依据负荷季节变化确定商业综合体的冷机容量配置的方法:冬季冷负荷配置 1 台小冷机;夏季冷负荷配置 1~2 台大冷机;过渡季负荷一般在 2 台小冷机至 1 台大冷机的冷量之间。对 B、D 商业综合体冷站用能模拟计算过程中,冷机设计为“1 大 2 小”。

4.3 根据业态/季节选择对比

通过以上分析,现将按业态负荷和按季节负荷两类冷源设计方案进行计算,机组配置及全年能耗模拟结果见表 8。

可以看出,按照业态负荷选择冷源设计方案的冷站总能耗较低,尤其是对于 B 商业综合体来说,节能效果更好,主要原因是,中庭型的 B 商业综合体空间分散,不同业态负荷特征变化明显。D 商业综合

体按照业态负荷选择与按季节负荷方案总能耗略低,主机能耗偏高。这说明对于空间聚集的环绕型D商业综合体,各业态负荷量相近,采用业态负荷选择冷源方案的节能效果不如中庭型的B商业综合体明显。总体来看,商业综合体按照业态负荷进行冷源设计对冷站节能是有利的,尤其是对于中庭型、体量较大、业态空间布局分散,且各业态负荷量相差较大的商业综合体,更应按照不同业态负荷进行冷源设计。

表8 B、D商业综合体业态/季节负荷选择机组
全年冷站能耗

Table 8 Annual Station Energy Consumption for the B and D commercial Complex Operations/Seasonal Load Selection Units

设备电耗	B商业综合体/ (万kW·h)		D商业综合体/ (万kW·h)	
	按业态	按季节	按业态	按季节
冷机全年总电耗	489.03	493.42	258.71	232.16
水泵全年总电耗	202.36	219.7	56.68	83.37
冷却塔全年总电耗	15.95	43.85	7.76	12.03
总计	707.34	756.97	323.15	327.56

5 结论

对商业综合体进行调研,根据负荷特征分析了空调使用需求特征。通过室内热湿环境实测和冷站全年运行记录,分析不同业态、不同区域的室内热湿环境的差异和问题,分析冷站供冷能力、能耗及运行工况。再对两类典型空间分布(环绕型/中庭型)的商业综合体建立模型,分析不同区域、不同时间段的负荷特征,并根据业态负荷特征或季节负荷特征对冷源进行优化设计和对比,以提供对实际商业综合体设计工作的支撑。

主要结论如下:

1)将商业综合体空间类型分为环绕型和中庭型两类,环绕型商业综合体业态分布较中庭型更为集中,商业综合体由于各业态使用时间连续,峰谷特征不明显。人员密度方面,近年来新建商业综合体人均占有面积在 10 m^2 左右,较传统商业建筑大。

2)商业综合体由于功能的综合性,室内环境较传统商业建筑波动较大,不同业态室内环境有显著差异。总体来看,室内环境舒适,温度多分布在 $25\sim 27\text{ }^\circ\text{C}$ 。局部区域存在两方面问题,一是顶层温

度易过高,尤其顶层为餐饮;二是部分底层及部分人员密集区域 CO_2 质量分数接近或超过 $1\ 000\times 10^{-6}$ 。

3)针对冷站实际运行分析发现,商业综合体体量大,存在每天都有冷负荷的情况,冷站运行时间长;冷机设计容量普遍过大;冷机负荷率较高,新建综合体冷机运行COP在 $5\sim 7$ 。

4)商业综合体按照业态负荷特征进行冷源设计对冷站节能有利,尤其是对于体量大、业态布局分散且各业态负荷差异大的中庭型商业综合体来说,更应按照不同业态负荷选择冷源方案。

参考文献:

- [1] UDAS. Mixed use in urban centers-guideline for mixed use development [R]. Australia: Urban Design Advisory Service, 2000.
- [2] 苏强. 城市综合体的业态功能及规划特征[J]. 城乡建设, 2013(4): 32-33.
SU Q. Functions and planning features of an urban complex [J]. Urban and Rural Development, 2013(4): 32-33. (in Chinese)
- [3] 黄杉, 武前波, 崔万珍. 国内外城市综合体的发展特征与类型模式[J]. 经济地理, 2013, 33(4): 1-8.
HUANG S, WU Q B, CUI W Z. Development features and types of urban complex in the world [J]. Economic Geography, 2013, 33(4): 1-8. (in Chinese)
- [4] KIM J J. Economic analysis on energy saving technologies for complex manufacturing building [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 123: 249-254.
- [5] XU P, HUANG J, SHEN P Y, et al. Commercial building energy use in six cities in Southern China [J]. Energy Policy, 2013, 53: 76-89.
- [6] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告-2014 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Building Energy Conservation Research Centre, Tsinghua University. Annual report on China building energy efficiency-2014 [M]. Beijing: China Architecture & Building press, 2014. (in Chinese)
- [7] JI Y, XU P, XIE J C. A performance assessment method for main HVAC equipment with electricity submetering data [J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 3104-3111.

- [8] JUAIDI A, ALFARIS F, MONTOYA F G, et al. Energy benchmarking for shopping centers in Gulf Coast region [J]. *Energy Policy*, 2016, 91: 247-255.
- [9] 清华大学-太古地产. 建筑节能常见问题分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
Tsinghua University - Swire Properties. Analysis of common problems of building energy conservation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [10] YAN J W, CHEN C, PAN D M, et al. A numerical study on the optimization method to optimize the cooling load sharing for a multi-chiller system in a shopping mall [J]. *Energy Procedia*, 2017, 142: 1977-1984.
- [11] 刘辉, 林波, 王陈栋. 某商业综合体空调冷负荷动态模拟及特性分析[J]. *暖通空调*, 2017, 47(2): 60-62, 59.
LIU H, LIN B, WANG C D. Simulation and analysis of dynamic cooling load of a commercial complex[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2017, 47(2): 60-62, 59. (in Chinese)
- [12] LEE W L, YIK F W H, JONES P, et al. Energy saving by realistic design data for commercial buildings in Hong Kong [J]. *Applied Energy*, 2001, 70(1): 59-75.
- [13] LAM J C, LI D H W. Electricity consumption characteristics in shopping malls in subtropical climates [J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44(9): 1391-1398.
- [14] 易居(中国)控股有限公司, 克而瑞信息集团. 主力店攻略: 商业地产项目招商指南[M]. 南京:江苏人民出版社, 2013.
Yiju (China) Holding Co., Ltd. Kerri Information Group. Main shop strategy: commercial real estate project investment guide [M]. Nanjing: Jiangsu People's Publishing House, 2013. (in Chinese)
- [15] 过畅, 陈超, 胡桂霞, 等. 北京某大型商场冷热源能耗实测分析[J]. *暖通空调*, 2014, 44(10): 50-56.
GUO Y, CHEN C, HU G X, et al. Energy consumption measurement and analysis for cold and heat source center of a shopping mall in Beijing [J]. *Journal of Heating Ventilating and Air Conditioning*, 2014, 44(10): 50-56. (in Chinese)
- [16] 王力申. 商业综合体人流密度及行走规律研究[D]. 长沙:中南大学, 2014.
WANG L S. Research on pedestrian density and pedestrians working rules in commercial complex building in Changsha [D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese)
- [17] PEREZ-LOMBARD L, ORTIZ J, MAESTRE I R. The map of energy flow in HVAC systems [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 5020-5031.
- [18] SHANG Y Z, LI B Z, BALDWIN A N, et al. Investigation of indoor air quality in shopping malls during summer in Western China using subjective survey and field measurement [J]. *Building and Environment*, 2016, 108: 1-11.
- [19] LI W M, LEE S C, CHAN L Y. Indoor air quality at nine shopping malls in Hong Kong [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, 273(1/2/3): 27-40.
- [20] KWOK T F, XU Y, WONG P T. Complying with voluntary energy conservation agreements (I): Air conditioning in Hong Kong's shopping malls [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 117: 213-224.

(编辑 胡玥)