

基于实际能耗数据分析上海某商厦 空调系统节能改造方案及效果^{*}

上海市建筑科学研究院 卜震[☆] 王安光

摘要 以上海某商业大厦为例,从建筑实际运行能耗数据出发,通过调研和空调系统性能测试,找出该大厦空调系统冷热源存在的能耗方面的问题,确定了节能改造方案并分析了实际改造效果。在对改造后的建筑能耗数据进行深入分析的基础上,进一步提出了继续开展节能改造的方向和技术措施,供上海市类似大型商业建筑节能改造借鉴。

关键词 节能改造 空调系统 实际能耗 性能测试 冷热源

Energy saving reformation measures and effects of HVAC system for a commercial building in Shanghai based on actual energy consumption data

By Bu Zhen[★] and Wang Anguang

Abstract Taking the commercial building as an example, based on the actual building energy consumption data, finds out the existing problems related to energy consumption of the HVAC system cold and heat sources through investigation and performance testing, determines the energy saving reformation measures and analyses the reformation effects. On the basis of analysing building energy consumption data after reformation, gives energy saving suggestions for further improvement of the building energy performances, providing references for energy saving reformation in similar buildings in Shanghai.

Keywords energy saving reformation, HVAC system, actual energy consumption, performance testing, cold and heat source

[★] Shanghai Research Institute of Building Sciences, Shanghai, China

①

0 引言

建筑面积超过 2 万 m^2 且采用集中空调系统的大型公共建筑是建筑能源消耗的高密度领域,以上海市为例,既有大型公共建筑的单位建筑面积年耗电量约为 $70 \sim 300 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,是居住建筑的 10~20 倍^[1],大型公共建筑节能是建筑节能工作的重点。另外,目前大型公共建筑中的用能系统设备,特别是集中空调系统设备,由于投入运行时间大多在 10 年以上,其制冷、制热效果普遍存在变差的趋势。同时,我国早期空调系统设计存在设备选型偏大、冷热源选择不当等不合理情况,加上目前我国商业建筑中能源系统的运行维护技术水平较低,导致我国大型公共建筑平均能耗水平呈上

升趋势。调查结果表明,大型公共建筑具有较大的节能潜力,是既有建筑节能改造的一个主要方向^[2]。

在大型公共建筑中,大型商业建筑体量大、总能耗高,与办公建筑和宾馆建筑相比单位建筑面积能耗更高,本文以上海某大型商业建筑为典型案例(以下简称“大厦”),通过对比分析空调系统节能改造前后的效果,探讨适用于大型商业大厦的节能改造技术,为既有大型商业建筑的节能改造工作提供借鉴。

1 建筑及空调系统概况

①[☆] 卜震,男,1976 年 8 月生,博士,高级工程师
201108 上海市申富路 568 号 1 号楼
(021) 54831104
E-mail: buzhen@126.com

收稿日期:2013-07-28

修回日期:2013-09-09

^{*} 上海市科委研发平台专项“公共建筑节能专业技术服务平台建设”资助项目(编号:12DZ2294100)

大厦位于上海市区内,是一座集餐饮、娱乐、购物为一体的综合性商业建筑。该建筑于1997年竣工投入运行,建筑总高度48 m,地上8层,地下2层。总面积约6.7万m²,其中营业面积约3.3万m²。

大厦的围护结构采用玻璃幕墙结构,未采取保温遮阳措施。原空调系统设计中,大厦的冷热源分别采用4台蒸汽型溴化锂冷水机组和2台燃油蒸汽锅炉。溴化锂冷水机组的单台额定制冷量为3 165 kW(900 rt),最大供冷能力可达12 661 kW。燃油蒸汽锅炉的单台额定蒸发量为11 t/h,夏季向溴化锂冷水机组提供蒸汽用于供冷,冬季通过2台汽-水换热器为大厦供热,单台换热能力4 071 kW。

大厦空调系统按照冷水机组定流量、负荷侧变流量一级泵系统设计,采用两管制,冷水供回水设计温度为7℃/12℃,热水供回水设计温度为60℃/50℃。冷水循环泵和冷却水循环泵均为四用一备,冷水泵、冷却水泵与溴化锂冷水机组按照一对一方式运行,冷却塔设在屋顶,分成4组,每组有4台定速风机。供热工况下,设3台热水循环泵,其中1台备用。冷水、冷却水和热水循环泵均为立式泵,均无变频装置,定流量运行。水泵详细参数见表1,空调水系统见图1。

表1 大厦空调水系统水泵主要设备参数

	额定流量/ (m ³ /h)	额定扬程/ m	电动机功率/ kW	台数/台
冷水泵	600	35	93	5
冷却水泵	1 100	30	150	5
热水循环泵	385	30	56	3

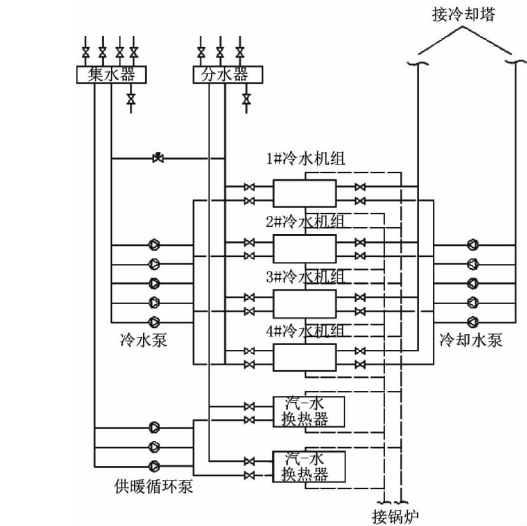


图1 大厦空调水系统图(原设计)

2 大厦用能状况分析(原设计)

2.1 空调系统实际运行情况

通过分析物业部门提供的溴化锂机组和蒸汽锅炉的运行记录可知,空调供冷季为4月下旬至12月上旬,供暖季为12月中旬至次年3月下旬,系统运行时间为10:00—22:00。每年7—9月需要运行4台溴化锂机组和2台蒸汽锅炉满足供冷需求,4—6月和10月一般运行1~2台溴化锂机组和1台蒸汽锅炉即可;冬季供暖一般开启1台蒸汽锅炉,经汽-水换热器换热后向室内供热。蒸汽锅炉根据出口蒸汽压力(夏季0.8 MPa,冬季0.4 MPa)自动调节燃油消耗量。

2.2 建筑总能耗分析

大厦的空调系统从竣工投入运行到2008年,一直未有大的变化。根据收集到的2004—2007年大厦实际用能数据,整理得到大厦的建筑总能耗水平,见表2,其中电、柴油、人工煤气(主要用于餐

表2 大厦2004—2007年的建筑年总能耗数据

	2004年	2005年	2006年	2007年
总耗电量/(万kW·h)	1 650	1 721	1 768	1 813
总耗油量/t	1 167	1 363	1 382	1 320
总耗气量/万m ³	174	180	185	172
总能耗(标准煤)/t	7 646	8 176	8 377	8 347

饮业)的折算标准煤系数分别取0.3 kg/(kW·h),1.457 1 kg/kg,0.571 4 kg/m³。表2数据显示,按照原空调系统运行,2004—2007年大厦能耗水平基本呈逐年上升趋势,平均年能耗(折算成标准煤)为8 136 t,耗电、耗油、耗气分别占总能耗的64%,23%和13%,大厦最大的能源消耗为电耗。笔者通过开展现场能源审计,结合当时主要用能设备的实际运行功率和运行记录分析得出空调系统能耗占建筑总能耗的48%。

由建筑总能耗计算出单位建筑面积年能耗(标准煤)为121 kg/(m²·a),明显高于上海市《大型商业建筑合理用能指南》^[3]中规定的百货店及购物中心类商业建筑的合理能耗范围(≤90 kg/(m²·a)),说明该建筑总体能耗偏高,而空调系统能耗所占比例最大,具有较大的节能改造潜力。

2.3 建筑逐月能耗分析

为明确节能改造方向,笔者以2007年数据为例,对大厦建筑各种能耗的逐月数据进行分析,结果见图2~4。从图2可以看出,7、8月的耗油量全年最高,而2、3月的耗油量较低,最大值与最小值

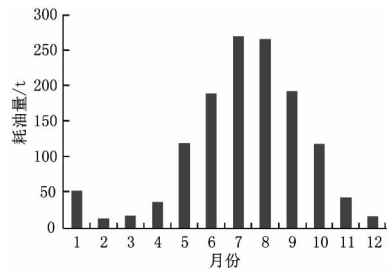


图2 大厦 2007 年逐月耗油量

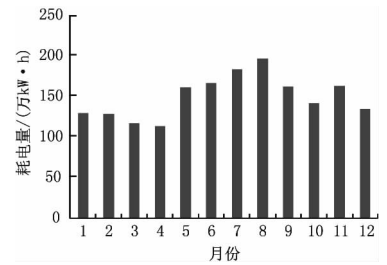


图3 大厦 2007 年逐月耗电量

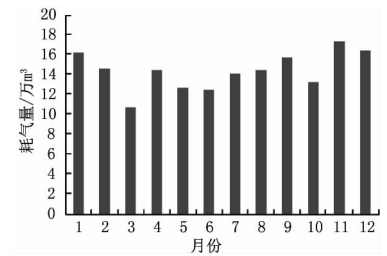


图4 大厦 2007 年逐月耗气量

相差近 20 倍,这说明燃油主要用于空调系统供冷,大厦供冷累计负荷远大于供热累计负荷。

从图 3 可以看出,耗电量变化趋势基本与耗油量一致,但逐月的变化没有耗油量的变化明显,总体上 7、8 月耗电量最高,3、4 月最低,高出的电耗主要是空调输配系统的电耗,包括冷水泵、冷却水泵、热水循环泵和末端空气处理机组及冷却塔风机的电耗。结合图 2、3 进行分析,7、8 月供冷工况下,由于溴化锂机组和蒸汽锅炉的负荷大及运行时间长,导致耗电量和耗油量大幅增加。燃油蒸汽锅炉和蒸汽吸收式溴化锂冷水机组本身的能效比偏低,目前除了有余热或可再生能源的情况,一般不推荐采用该冷热源形式,并且该系统已使用 10 年以上,性能已逐渐衰减,因此节能改造潜力非常明显。

另外,图 4 所示的耗气量的逐月变化相对较小,说明燃气消耗量与季节变化的关联性不大,主要取决于大厦餐饮业的营业状况。图 5 为大厦建

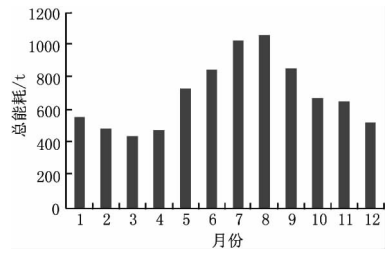


图5 大厦 2007 年逐月总能耗

筑总能耗的逐月变化情况,由于总能耗中电耗所占比例最大,因此反映出的趋势与耗电量的变化规律较为一致。

3 溴化锂机组现场检测

从上述基于实际能耗数据的分析结果出发,对溴化锂机组的实际运行性能进行了现场检测。测试日选择在过渡季,系统运行工况为:开启 1 台溴化锂机组、1 台冷水泵、1 台冷却水泵。测试参数包括溴化锂机组的冷水流量、冷却水流量、冷水和冷却水供回水温差。测试结果见表 3。

表 3 溴化锂机组性能参数测试结果	
冷水流量/(m³/h)	714
冷却水流量/(m³/h)	1 046
冷水供回水温差/℃	1.5
冷却水供回水温差/℃	2.6

由于测试时建筑处于部分负荷工况下,只开 1 台冷水机组和 1 台冷水泵,总冷水量小于冷水设计流量,造成冷水管道的实际阻力减小,单台冷水泵的实际流量大于额定流量。

测试工况下冷水供回水温差在 1.3~1.8℃之间变化,与表 1 中的冷水泵额定参数值对比,可以发现冷水系统存在大流量小温差的现象,实际供回水温差远小于系统设计值(5℃)。主要是因为冷水机组的实际供冷量仅为 1 250 kW,说明测试时大厦的总冷负荷很低,并且在运行单台水泵的工况下,通过水泵和机组的流量偏大,从而导致冷水供回水温差偏小。此外,测试工况下冷却水流量接近额定值,供回水温差在 2.0~3.1℃之间变化,大厦的末端负荷偏低也是造成冷却水供回水温差偏小的主要原因。

根据表 3 的测试结果,笔者计算出测试工况下溴化锂机组的能效比在 0.5~0.93 之间变化,平均值仅为 0.66,与额定值相比明显偏低,说明由于长年运行,其性能已严重衰减。另外根据 2.3 节的分析,溴化锂机组及蒸汽锅炉的能耗非常高,理应优

先作为节能改造的目标。

4 空调系统改造方案和效果分析

根据大厦全年能耗的分析结果和溴化锂机组的性能测试结果,笔者针对大厦空调冷热源提出如下节能改造方案。

4.1 离心式冷水机组替代溴化锂机组

溴化锂机组的性能测试结果表明,其平均能效比仅为 0.66,远低于一般电动压缩式机组,而且溴化锂机组的热源全部由燃油蒸汽锅炉提供,而燃油蒸汽锅炉本身效率和运行经济性都比较差。因此优先考虑采用离心式冷水机组代替溴化锂机组,以降低锅炉的燃油能耗。

分析大厦的运行记录发现,即使不考虑溴化锂机组的性能下降,机组大部分时间仍处于较低负荷状态运行,说明原设计冷负荷和 4 台 3 165 kW(900 rt)的装机容量选型均偏大。考虑到大厦的配电容量限制,一次性更换所有溴化锂机组非常困难,经过综合分析,大厦于 2008 年和 2009 年分别

用 3 517 kW(1 000 rt)的离心式冷水机组替代了原来的 2 台溴化锂机组。改造完成后,离心式冷水机组一直作为大厦主要的冷源,剩余的 2 台溴化锂机组作为辅助冷源,仅在夏季供冷最不利工况下运行。

同时还计划结合今后大厦的配电系统扩容,继续用电动压缩式制冷机组替换剩余的 2 台溴化锂机组,以完成所有溴化锂机组的更换。另外,考虑到部分冷负荷下的机组运行效率,选用的离心式冷水机组本身均配备变频调速装置。

通过更换溴化锂机组为离心式变频机组,一方面提高了冷水机组本身的能效比及适应部分冷负荷的能力,节省了电耗;另一方面还缩短了燃油蒸汽锅炉的运行时间,节省了油耗。

4.2 改造措施节能效果分析

冷水机组改造过程中及改造后每年大厦实际用能数据见表 4。由于空调系统改造对燃气消耗量的影响不大,所以表 4 中无燃气的数据。

表 4 2008—2012 年的建筑年总能耗数据

	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年
总耗电量/(万 kW·h)	1 926	1 847	1 916	2 134	1 986
总耗油量/t	808	383	245	227	183
总能耗(标准煤)/t	8 054	7 148	7 021	7 680	7 115

对比表 2 和表 4 的数据可以看出,通过节能改造,一方面由于增加了离心式冷水机组,耗电量逐年略有上升,根据离心式冷水机组的运行记录分析统计结果,2 台离心式冷水机组的平均年运行时间为 1 930 h,负荷率为 83%,耗电量共 198 万 kW·h;另一方面通过冷水机组改造,大大降低了蒸汽锅炉作为吸收式溴化锂冷水机组的热源所消耗的燃油量。与 2007 年相比,2008 年替换了第 1 台溴化锂机组后耗油量下降了 512 t,2009 年替换了第 2 台溴化锂机组后耗油量又减少了 425 t,至 2010 年总节油率达 81%。

2 台冷水机组替换完成后,2010 年的建筑总能耗比 2007 年下降了 16%,节能量达 1 326 t(标准煤)。更换溴化锂机组后,蒸汽锅炉的全年运行时间大大缩短,以 2012 年的统计数据为例,蒸汽锅炉全年运行 600 h,其中夏季供冷工况下(4—11 月)仅运行 61 h。从图 6 所示的逐月耗油量也可以看出,用于供暖的油耗远大于用于供冷的油耗,说明目前 2 台 3 517 kW(1 000 rt)的离心式变频冷水机组基本可满足大厦的供冷需求。

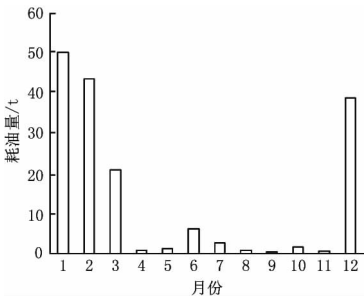


图 6 大厦改造后 2012 年的逐月耗油量

4.3 进一步节能改造措施建议

1) 空气源热泵替代燃油蒸汽锅炉

2012 年大厦供暖季仍需运行燃油蒸汽锅炉约 500 h,从提高能源利用效率和利用低品位热源的角度出发,建议采用空气源热泵机组替代燃油蒸汽锅炉。根据 2012 年的锅炉运行记录,冬季最大日用油量为 3 t/d,每天运行 9 h,若燃油蒸汽锅炉效率按照 80%考虑,可推算出冬季最大供暖负荷为 3 160 kW,建议选择多台模块式空气源热泵机组,以满足最大和部分热负荷下的供暖需求,同时还可以作为夏季供冷的辅助系统,从而完全替代原有的燃油蒸汽锅

炉和溴化锂机组。采用空气源热泵替换燃油蒸汽锅炉后,全年预计可减少能耗费用约 85 万元。

2) 冷却水系统改造

大厦在 2008 年和 2009 年采用离心式冷水机组替换溴化锂机组后,并未对原有的冷却水系统进行改造。2 台离心式冷水机组的额定冷却水流量均为 $709 \text{ m}^3/\text{h}$,而表 1 中冷却水泵的额定流量为 $1\,100 \text{ m}^3/\text{h}$,两者并不匹配。目前冷却水系统实际运行时,依靠离心式冷水机组本身及管道、阀门的限流作用,使得通过冷却水泵的实际流量低于其额定流量,冷却水泵的实际工作状态点已偏离了最佳工况点,导致冷却水泵运行效率低、能耗大。建议选择与离心式冷水机组额定流量相匹配的冷却水泵,并重新校核所需要的水泵扬程,通过合理选择水泵,实现冷却水输配系统的节能。

笔者通过现场调研发现冷却水系统在管理控制方面存在一定的节能潜力。即使在只需运行 1 台冷却水泵的情况下,冷却塔的风机仍然全部开启,因为冷却塔风机为定速风机,造成冷却塔风机能耗偏大,建议在室外空气湿球温度较低的气象条件下,优化控制风机的运行台数,降低风机电耗。另外离心式冷水机组的进出水管上未安装电动两通阀,冷水机组停止运行后,物业管理人员需手动关闭机组出水管上的蝶阀,但蝶阀往往关闭不严,导致一部分冷却水旁通,造成冷却水泵能耗浪费。因此笔者建议加强物业管理能力,并在冷水机组的进水或出水管道上安装与对应的冷水机组和冷却水泵联锁开关的电动阀。

3) 热水输配系统改造

大厦的冷热循环水泵均为工频状态运行,而根据离心式冷水机组的运行记录得知,供冷供暖季大部分时间系统处于部分负荷运行工况下,因此冷热热水输配系统具有进一步节能改造的潜力。可以考虑为冷热水循环水泵增加变频调节装置,同时优化水泵运行和控制策略,实现部分负荷工况下的节能。

4) 其他节能改造措施

空调系统改造是个系统性的工作,除了上述提及的关于冷热源和输配系统的改造,在空调系统末端设备和运行管理等方面还存在不小的节能空间。根据大厦的建筑特点和用能特征,可对末端空调箱进行改造,采用新风量调节,在过渡季充分利用室外自然冷源,在节能的同时提高建筑内部的空气品质。

5 结论

5.1 大厦已采用的节能措施是用 2 台 $3\,517 \text{ kW}$ ($1\,000 \text{ rt}$) 的离心式冷水机组替代原有 4 台蒸汽型溴化锂机组中的 2 台,并取得了明显的节能效果。通过改造前后实际能耗数据的对比发现,大厦耗油量降低了 81%,建筑总能耗降低了 16%,节能量为 $1\,326 \text{ t}$ 标准煤。

5.2 通过对改造后大厦能耗数据的分析,提出了以空气源热泵替代燃油蒸汽锅炉供暖,并对冷却水系统和冷热水输配系统进行改造的节能建议。

5.3 空调系统改造是个系统性的工作。对于溴化锂冷水机组,长年运行后的供冷性能衰减应引起关注,特别是采用燃油蒸汽锅炉作为热源的供冷系统,其节能改造潜力一般较大,应从建筑功能、节能减排效果、经济性等多方面综合考虑确定合理的改造方案。

5.4 目前一些大型商业建筑的空调系统设计存在设备选型偏大、冷热源选择不当、输配系统和冷热源设备不匹配等不合理之处,应以节能改造为契机,从建筑实际能耗数据出发,选择适宜的节能技术措施和与建筑负荷特点相匹配的系统设备。大厦的节能改造案例可供上海市采用类似空调冷热源形式的商业建筑节能改造参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 叶倩. 既有大型公共建筑节能改造应用研究[J]. 上海节能, 2008(4): 51-55
- [2] 朱伟峰,金正日. 上海市大型公共建筑分项能耗参考值的分析与探讨[J]. 暖通空调, 2010, 40(8): 18-21
- [3] 上海市质量技术监督局. DB31/T 552-2011 大型商业建筑合理用能指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012

作者更正

由于本人疏忽,《暖通空调》2013 年第 9 期《某商业建筑空调系统优化设计》一文的第 82 页表 8 制冷主机参数对比中,机房设备总功率方案 2 应为 $1\,292.2 \text{ kW}$,差值为 622.2 kW ,空调系统总功率方案 2 为 $1\,604.2 \text{ kW}$,差值为 707.1 kW 。对文中出现的错误深表歉意,并对给予指正的读者张理论表示由衷的感谢。

(乔玲敏)

《暖通空调》2013 年第 9 期《建筑区域供能系统的冷热源选择》一文第 73 页表 2 第一列的“水蓄冷”应改为“水蓄冷(热)”,对给予指正的读者张理论表示感谢。

(衣健光)