

上海某办公楼变流量变水温冷/热水空调系统节能性案例分析

卢清， 阳丽娜， 吴丽媛

摘要：降低商用建筑的空调能耗对实现节能减排目标具有重要意义。本文通过某办公大楼节能改造案例介绍系统化综合节能的方法和手段，揭示变流量变水温冷/热水空调系统在商用建筑应用中的优势和效果。

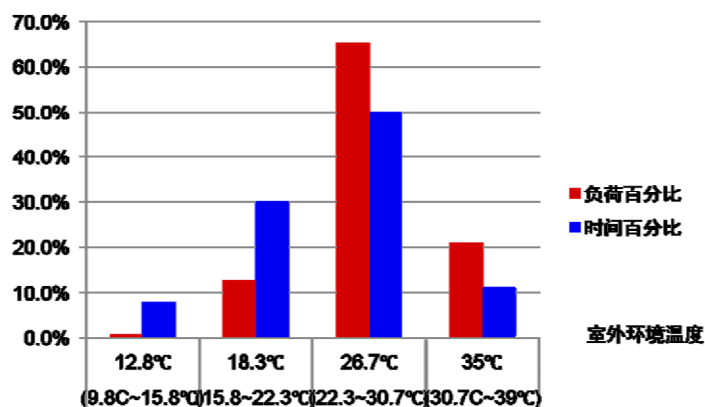
关键字：变流量变水温冷/热水空调系统，节能减排，按需新风控制

引言

对于商业建筑而言，中央空调系统能耗约占建筑总能耗的 40%，实现中央空调的节能对于响应国家节能降耗的目标有非常现实的意义。

中小型的商业建筑的空调系统主要包括三大类型设备，风冷热泵主机，水泵和室内风盘/新风机。对于通常的中央空调系统来说，这三个设备采用独立控制的方法：主机提供固定出水温度的供水（一般夏季为 7℃，冬季为 45℃）；水泵采用定速输送，一旦供水量超过需求，压差式旁通阀会逐步开启降低室内供水量；风盘通过温控器调节室内温度，以满足室内控温的要求；虽然该方法简单，但并不节能。因为每个设备的运行工况变化将直接影响其它设备的能耗变化，三者是相互关联的。因此，需要将整个空调系统集中管控方能实现系统的节能和室内舒适性控制的需求。

空调系统一般按照满负荷工况设计以，但其长年工作于部分负荷状态，在评价系统能耗，必须充分考虑系统运行于部分负荷的能耗状况。如图一所示为不同的环境温度下所统计的负荷占比和运行时间占比。由此可见，系统只有少部分时间运行满负荷。因此提高系统部分负荷下的能效对整个空调系统的节能更具现实意义。如图一所示为该办公楼的制冷负荷分布情况。



图一、办公楼制冷季能耗分布



室内空调系统负荷主要由两个方面构成，室内基本负荷和新风负荷。基本上，新风负荷占到整个空调负荷的 30%左右。而空调系统的能耗主要由三个部分构成，空调主机能耗，水泵能耗和风盘（新风机）能耗；

$$W_{\text{系统}} = W_{\text{主机}} + W_{\text{水泵}} + W_{\text{风盘}} \quad (1)$$

其中，

$W_{\text{系统}}$ 为空调系统总能耗；

$W_{\text{主机}}$ 为主机能耗；

$W_{\text{水泵}}$ 为水泵的能耗；

$W_{\text{风盘}}$ 为风盘和新风机能耗；

目前，评价空调系统的运行效率，一般采用某一段时间内（日、月、年）提供的总冷量($Q_{\text{供冷}}$)除以这段时间内的系统总耗能（ $W_{\text{系统}}$ ），本文评价采用全年冷热负荷供应和全年电耗比值用于评价系统效率：

$$\text{COP}_{\text{系统}} = \quad (2)$$

其中，

$\text{COP}_{\text{系统}}$ 为空调系统的运行效率；

$Q_{\text{供冷/热}}$ 为系统总供冷/热负荷；

1. 项目介绍

上海某办公楼，建筑面积约为 1000 平方米。负荷为 160kW。原系统采用制冷能力为 33kW 的主机 5 台。4kW 的定速水泵 1 台，室内采用制冷能力为 6kW 的风盘 36 台，风量为 2500m³/h 的新风机 2 台。原系统不具备有系统控制能力，主机制冷出水温度设定为 7℃，制热出水温度设定为 45℃。水泵为定速水泵配合定压差旁通阀用于旁通平衡室内外总管压力。风盘由温控器控制，采用开关型两通水阀

根据空调系统的历史运行数据观测与分析，发现该系统存在的一些问题，提出节能改造的方案。此次改造主要是改造空调系统的控制系统，主机，水系统和新风系统。

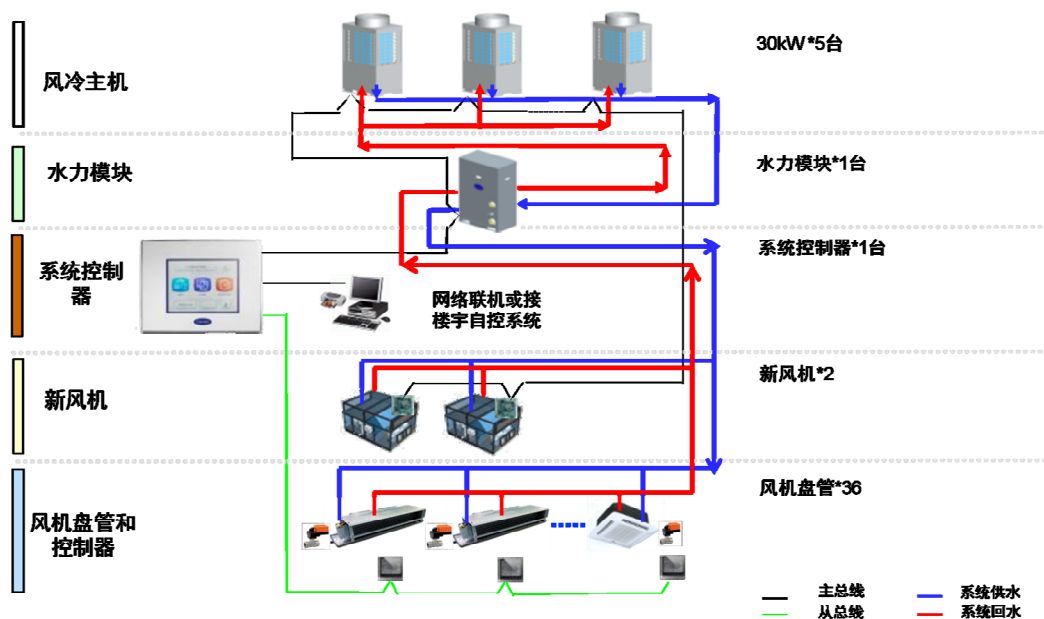
表一、空调系统低效的主要问题

项目	系统运行状况分析
1	系统缺乏统一管理，主机和水泵无法根据风盘的需求响应，运行效率低下。
2	室外主机并联运行，存在混水问题，主机相互竞争无法运行。
3	水泵始终运行于工频，部分负荷时水泵的效率低下。
4	主机提供固定温度供水，过渡季节造成过冷或过热，既浪费能源又影响舒适性。
5	采用定风量新风，经常提供超量新风，系统排风冷量无法回收，造成较大的浪费
6	分散的管理造成浪费，例如会议室在无人时，空调仍然开着。
7	主机综合能效较低；

2. 节能策略

为配合节能改造，对整个空调系统重新制定了改造计划，改造后系统的拓扑结构如图二所示，系统包括 5 台 30kW 热泵主机，1 台变流量水力模块，36 台风盘和 2 台新风机，所有的控制通过通讯线连接与系统控制器构成一个整体系统。整个系统的节能改造主要体现在：

1. 系统节能控制方面：通过系统控制器统计室内风盘群的需求，使主机和水泵准确响应室内负荷需求。在过渡季节采用两种方法调整负载。第一、通过调整水温设定达到室外主机变出水温度供水目标；第二、根据室内负荷需求百分比，采用变流量技术，改变进入室内风盘的水量，进而改变风盘的供冷量以适应变动负荷需求，更准确跟踪室内负荷需求，减少水阀频繁开关，并减少过度季节过冷和过热的问题。
2. 水系统改造方面：采用变频水泵配合变压差控制的旁通阀，每台主机并联水路加装开关型的电磁阀，当该支路主机停机时，关闭该支路以减少系统流量，并解决混水问题。
3. 新风系统的改造方面，更换成带热回收型新风机，而且监控室内的二氧化碳浓度以及室内风盘的开停率，控制新风机的换气量。配合系统集中控制，在过渡季节充分使用 Free cooling 和 Pre-cooling 达到节能目的。
4. 系统运营管理方面：通过集中管理，可以通过单一界面对整个系统进行管控，通过设定全系统运行日程表，达到减少浪费的目的。内置有能量分析模块，可以分析系统的能源利用率。
5. 主机从低能效机组更换成能效一级的 30kW 机组，新机组能效为 3.2，综合能效为 5.2。



图二 节能改造后系统结构图

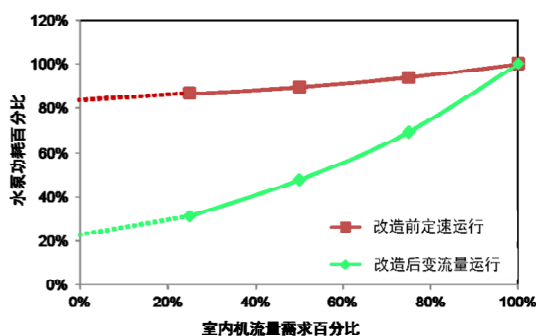
节能效果分析

3.1 水系统节能分析

未改造前，水路系统主要存在三个问题。问题一：水泵能耗偏大。采用多主机并联供冷、热，水路采用定速水泵，水泵始终于工频，即使低负荷时室内风盘大量关闭，水泵功耗仍然偏高。问题二、混水造成能源浪费。主机回路没有水阀隔离，室外主机运行于部分负载时，关停的主机出水会与运行的主机出水混合，造成能源浪费。问题三：无法实现控制目标的精准。如果热泵主机群按照总管进水控制，则混水后总管出水温度将达不到设定值；如果采用出水控制或者温差控制将会造成运行的机组出水温度过低且供冷量超过实际需求。

改造后，热泵主机加装隔离水阀，在机组停机时自动关闭该阀门，消除了系统混水现象，通过简单的进水控制或者出水控制即能实现准确供水温度控制。进而防止机组运行于低出水温度的低能效区，减少大量浪费。主机加装隔离水阀的同时减少主机群的总流量，通过将水泵更换成变频控制，通过系统控制器统计室内风盘和新风机的需求和室外主机群的运行状态，结合水泵模块的温度、压力等输入参数，智能控制水泵的转速，调节系统的供水量，精确满足室内负荷需求。

通过改造，水泵能耗大幅下降，如图三，分别测量系统改造前后的能耗对比，在部分负荷时，系统将大幅节能，例如 50% 负荷需求时，节能效果将达到 35% 以上，整个运行期，水泵整体节能效果在 20~30% 以上。



图三、变流量控制节能分析；

3.2 风盘需求分析

室内总负荷分为显热负荷和潜热负荷，前者主要是用于降低室内空气温度，后者主要是去除空气的水蒸气。通常用湿热比来衡量风盘的除湿能力。湿热比即风盘的潜热占全热的百分比，如公式 3 所示。

$$K = \frac{Q_{\text{潜热}}}{Q_{\text{全热}}} \quad (3)$$

其中，

K 为湿热比；

$Q_{\text{潜热}}$ 为风盘潜热；

$Q_{\text{全热}}$ 为风冷盘管全热；



United Technologies

你信赖的专家



通常的风盘系统中，一般提供恒定温度和恒定流量的冷冻水到风盘中，通过温控器控制水阀的开启占空比来保证室温达到设定温度。为了保证风盘有足够强的除湿能力，必然需要较低的供水（夏季一般为 7℃），这带来三个问题：第一、风盘只能通过开关水阀来调节室内负荷，无法按比例来适应，水阀必须频繁响应。第二、在过渡季节容易造成过度除湿，既影响舒适性，又浪费能源。第三、固定的湿热比无法兼顾控温和控湿，无法充分满足舒适度的需求。

在绝大多数情况，风盘运行于部分负荷状况，温控器通过频繁开关风盘水阀来满足室内负荷，这样的控制不精准，容易过冷或者过热，造成浪费。因此在系统改造时，通过系统控制器统计室内负荷并改写室外主机和水泵的设定值来实现变水温、变流量供应。即通过改变进入风盘的流量和水温，实现风盘变冷量输出和变湿热比的控制。如表一所示，某型风盘，通过水量和水温调节，即可实现低到 50% 的负荷输出和 0~27% 的变湿热比控制。

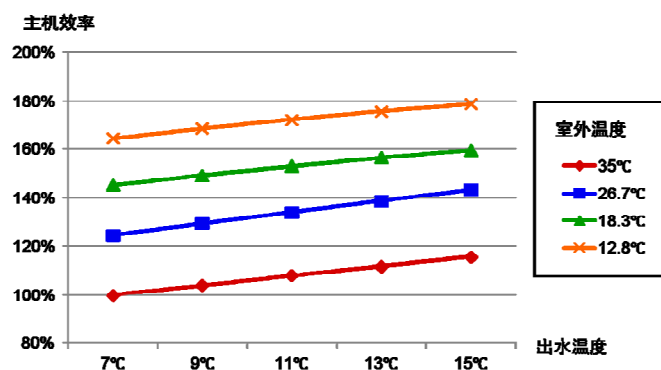
表一、某型风盘性能表

风盘水 流量(%)	风盘进水温度									
	7℃		9℃		11℃		13℃		15℃	
	全热 (%)	湿热 比 (%)	全热 (%)	湿热 比 (%)	全热 (%)	湿热 比 (%)	全热 (%)	湿热 比 (%)	全热 (%)	湿热 比 (%)
80%	93%	25%	80%	20%	67%	13%	55%	4%	46%	0%
90%	97%	26%	83%	21%	69%	14%	57%	5%	47%	0%
100%	100%	27%	86%	22%	72%	15%	58%	6%	48%	0%

工况说明：进风工况 27/19.5℃

3.3 变水温工况节能分析

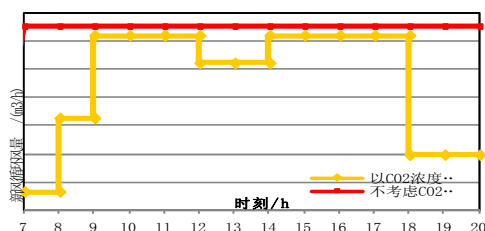
变水温供水更好贴合室内变动负荷，也提高系统能效。制冷工况，室外主机运行于较高的出水温度会提高主机能效。在满足室内负荷的前提下，可以充分提高主机的出水温度，使主机运行于高能效区域。根据统计，该系统在 80% 的时间运行于较高水温即可以满足室内制冷、除湿需求。基于此，可以通过系统控制器改写主机群的设定温度达到节能的目标。如图四所示，分析了在不同的环境温度工况下，通过调节出水温度能实现平均 10% 以上的主机节能。



图四-30kW 热泵制冷变水温工况能效分析

3.4 新风节能分析

新风负荷占到整体负荷的 20~30%左右，因此提高新风能效利用率对提高系统节能至关重要。原系统采用定风量送风，在占用模式时，机组连续供风，能源消耗可想而知。改造后，首要方法是在满足室内舒适性的前提下，通过减少新风供应量来达到节能的目标。将新风机并入系统控制中，通过采集各个区域的二氧化碳浓度作为新风量控制的目标，通过控制送风机开停来调制新风量供应。由图五所示，通过“按需通风”控制，新风量供应减少 30%以上，节能效果明显。



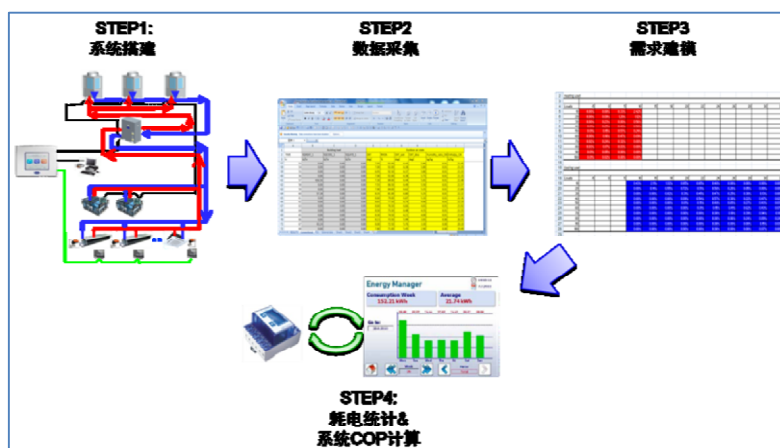
图五、典型工作日新风需求量分布

改造后还采取了一些技术手段提高能源利用率，例如新风机增加全热回收段，可以回收 60%左右的冷量。配合系统控制改造，新风机增加多个模式，在过渡季节运行的 Free-cooling 和 Pre-cooling 均能节约相当可观的能源。

3.5 系统节能分析

为了分析节能效果，2012 年 9 月~10 月每日采用优化控制和原有控制交替运行的方式。其中，单数日期采用优化控制系统，双数日期采用原有控制系统。但是，由于 9、10 月份每天的温度波动都比较大，而且建筑能耗也在每天变化，很难选出室外气候条件一致，建筑负荷也一致的两天进行比较。

为分析比较系统的节能效果，通过分别采集该建筑空调系统改造前后一年的运行数据作为分析比较的基础。虽然不同年份各个月份的天气状况略有不同，但从总体上看每年需求基本不变。首先可以通过电表采集系统实际耗电量。其次，可以通过室内外温度、湿度和新风的供给量等参数估算各时段建筑内空调制冷量和制热量。通过建模分析，从而得到改造前后年化的耗电量、空调制冷量、空调制热量的对比。整个分析过程如下图：第一、系统搭建，建立节能改造后的新系统；第二、逐日收集和整理空调系统的运行工况，包括室内外温度、湿度、新风量、主机运行工况等，用于系统负荷的估算；第三、估算室内负荷的进行整理和分析，获取室内需求数据；第四、通过与耗电量的比较，计算系统效率。最后，分别比较改造前的历史数据，获取改造效果分析。



图六、系统能效分析

通过分析和比较，改造前后的能效分析和耗电量比较如表二。分析其节能效果，由于热回收和 CO₂ 控制，新系统在制冷和制热负荷方面少约为 13%；总耗电量降低了 26.3%。系统能效提高了 35.6%。因此，此次系统改造取得良好的效果。

表二、新旧系统的能效分析

	改造前	改造后	节约/提高 (%)
建筑年空调负荷(kWh)	136,980	136,980	\
系统年热回收及新风减少负荷(kWh)	0	17,807	\
系统年制冷/制热负荷(kWh)	136,980	119,173	-13.0%
系统年消耗电能(kWh)	47,532	35,053	-26.3%



系统年能效比	2.88	3.91	35.6%
--------	------	------	-------

4. 结论

综上所述，本次通过基于系统方案的综合节能改造，系统运行得到极大优化。系统的节能主要体现在三个方面：第一、系统管控节能，系统化的控制手段通过系统控制器集中管理，从而减少系统能量的浪费，降低建筑的能耗；第二、系统协调配合节能，子系统之间的不协调也是传统空调系统能耗偏高的一个主要原因，本案例通过系统控制器统一协调各个子系统的运行以适应变负荷工况，系统通过变流量，变水温手段来提高部分负荷时能源使用效率，进而达到节能目的；第三、系统引入新技术节能，通过引入高效的机组和新的热回收技术来实现系统节能。

当然，本次改造由于系统限制，有些新的技术没有实施，例如，可以采用直流变频的风机盘管等，可以进一步降低空调电耗。

在本案例中，系统控制器主动修改主机的出水温度，在满足各个工况室内环境舒适度的前提下，实现了大幅的节能。但是当前的国标在考核主机效率时通常采用定出水温度的方式，该标准并不适合系统控制的变流量冷热水系统。因此，建议针对该类型的系统，需要重新探讨新的标准。

今年 6 月，开利在中国隆重推出 AquaFlow™VWV 水多联系统，作为亚洲第一站推出的市场，开利 VWV 水多联系统通过结合空调水系统与多联机的先进技术，提供出色的室内舒适度和最优化的系统效率。

VWV 水多联系统的冷量范围覆盖 25kW~320kW，从而实现了出众的室内舒适性、节能高效性、设计灵活性和安装便捷性，整个系统集成在能管理暖通空调系统并优化系统效率的可靠控制平台中。

开利 VWV 水多联系统空调系统是系统集成化的冷水（热泵）空调机组。一台或数台冷水（热泵）空调机组室外机通过水力模块，组成集成冷(热)站，并通过系统集中控制器，连接多台不同或相同型式、容量的空调系统末端（如风机盘管、空气处理机组、新风机组等），构成一个集成化的冷水（热泵）空调系统，优化系统运行能效，避免无谓的能耗。

开利 VWV 水多联系统室外机获得中国国家 1 级能源效率标准认证，根据开利研究显示，VWV 水多联系统创新的系统设计与优化的集中控制，系统综合部分负荷性能系数（IPLV）比传统空调水系统高出 40%，比传统多联机系统高出 10%。

VWV 水多联系统通过系统控制器可以把整个系统控制起来，从而可以实现统一管理、联网控制，优化系统运行能效，避免无谓的能耗，而且可以通过自适应变水流量控制及水温自适应调节（冷媒蒸发温度调节）来实时采集并响应不断变化的室内负荷，降低水泵功耗（及水泵运行效率）以及主机能耗。带新风机的系统还可以在制冷(制热)季节通过热回收实现免费取冷(取热)，过渡季节最大利用新风从而实现免费取冷，同时在全年通过 CO2 按需新风供应控制进一步降低新风能耗。



参考文献

1. 陈汝东, 岳孝方, 制冷技术与应用, 同济大学出版社, 2006.
2. 陆耀庆主编, 实用供暖通风空调设计手册, 中国建筑工业出版社, 1993.
3. 高养田, 空调变流量水系统设计技术发展, 暖通空调, 1996.(4).
4. 石巧慧, 旷玉辉, 郭荣光, 上海国金中心 (IFC) 空调冷站节能优化控制案例分析, 建筑节能, 2013.(6).