

doi: 10.3969/j.issn.1007-7162.2015.01.009

水冷冷水机组中央空调系统的能流模型分析

刘丽孺, 吕崇花, 王晓霞

(广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 通过分析水冷冷水机组中央空调系统供应冷量的空调房间提取热量到最终排放到环境中的 5 个连续子环路的能流情况, 建立了以水冷冷水机组为冷源的中央空调系统整个环路的能流分析模型. 并通过实验测试获得了广州某一次回风定风量全空气集中空调系统运行的相关数据, 绘制了该系统的能流图, 定量分析了系统内各部分的能流变化规律及能流之间的关联性, 直观地表达出该系统中各能流的大小和方向, 以及各系统的能量平衡关系及能量损失, 并识别出系统的主要能流, 为中央空调系统的能耗分析及节能提供了理论分析模型.

关键词: 集中空调; 水冷冷水机组; 数学模型; 能流; 全空气系统

中图分类号: TU831.3

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2015)01-0038-04

Analysis of Energy Flow Model of Central Air Conditioning Systems with Water-cooled Chiller

Liu Li-ru, Lv Chong-hua, Wang Xiao-xia

(School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Through analyzing the energy flow of five consecutive loops extracting energy from the air-conditioned rooms to the surroundings, this paper proposes an energy flow mathematical model of the whole air conditioning loop with water-cooled chiller, and draws an energy flow diagram based on the data derived from a typical all-air system of an office building at Guangzhou. It also quantitatively discusses the variation principles and relations of energy flow, presents the magnitude and direction of energy flow, energy balance and loss of systems as well as recognizes the dominant energy flows. Finally, a theoretical analytic model is suggested for the energy-consuming and energy-saving of central air conditioning system.

Key words: central air conditioning system; water-cooled chiller; mathematical models; energy flow; all-air system

目前,人们已经认识到:降低空调系统,尤其是中央空调系统的运行能耗是降低建筑能耗的重要途径之一.对影响中央空调系统运行能耗的主要因素进行分析是降低其能耗的前提条件.目前对系统能耗分析的方法有很多,主要包括空调系统单体设备能耗的定量分析、空调子系统能耗的定量分析以及系统设备能耗的仿真模拟研究^[1-11]等.其中对空调系统能耗的定量研究往往忽略了系统内部各部分能耗之间的关联性.中央空调系统的型式具有多样性,本文选取具有代表性水冷冷水机组为冷源的中央空调系统作为研究对象,通过建立从空调房间提取热

量到最终排放到环境中的整个能耗环路的能流分析模型,并通过实测数据绘制了典型工程应用的能流图.该模型既可以定量分析系统内部各部分的能流变化规律及各能流之间的关联性,又可以通过能流图直观地表达出系统各能流的方向及各部分能流的大小.

1 能流分析模型的建立

1.1 以水冷冷水机组为冷源的集中空调系统的能流链图

以水冷冷水机组为冷源的集中空调系统,从空

收稿日期: 2014-04-22

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(S2012010009470); 国家留学基金资助项目(留金法[2013]5045)

作者简介: 刘丽孺(1971-)女,教授,博士,主要研究方向为建筑节能、空调系统节能、室内空气品质保障技术.

调房间提取热量到最终排放到环境中,其完整的能流环路^[12]如图 1 所示。

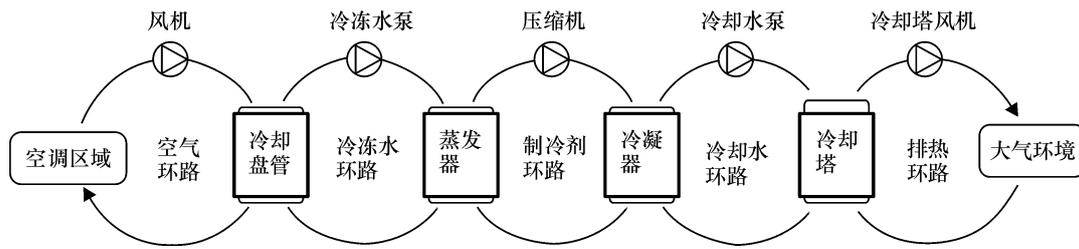


图 1 以水冷冷水机组为冷源的集中空调系统能流链图

Fig. 1 Energy flow chain chart of central air conditioning system with water-cooled chiller

从图 1 中可以看出,该集中空调系统包含室内空气环路、冷冻水环路、制冷剂环路、冷却水环路和室外排热环路 5 个连续的子环路,每个子环路都由特定的换热设备和耗能设备组成,各子环路之间分别以末端冷却盘管、蒸发器、冷凝器和冷却塔等 4 种换热设备为能流联系的桥梁,使得空调系统各子系统的能流紧密联系在一起。

1.2 能流分析模型

本文分析的前提条件是各空调区域的空调效果满足室内设计参数要求,因此能流分析将按照图 1 从左到右的顺序依次进行分析。对于末端的室内空气环路,为了满足空调区域的热舒适性及室内空气质量,末端的冷却盘管提供的冷量,既要消除室内的余热和满足新风负荷及再热负荷(若存在再热系统),还要承担冷风输送过程的传热和输送设备—风机的机械能所转变的热量。因此,对末端冷却盘管列能量平衡方程有

$$Q_{PG} = Q + Q_{XF} + Q_{ZR} + C_{FJ} + L_{SS} \quad (1)$$

式中 Q_{PG} 、 Q 、 Q_{XF} 、 Q_{ZR} 分别为冷却盘管的冷负荷、房间的冷负荷、新风负荷和再热负荷, kW; C_{FJ} 为风机的耗功率, kW; L_{SS} 为送风系统的冷损失, kW。其中,风机的耗功率可直接测量出来,其他几个负荷量需要测量相应的风量 and 焓值间接计算出来,它们的计算式分别为 $Q = m_{SF}(h_{HF} - h_{SF})$; $Q_{XF} = m_{XF}(h_{XF} - h_{HF})$; $Q_{ZR} = m_{SF}(h_{SF} - h_L)$; $L_{SS} = L_{SF} + L_{XL}$; $L_{SF} = \Delta m_{SF}(h_{HF} - h_{SF})$; $L_{XL} = \Delta m_{XL}(h_{XF} - h_{SF})$ 。式中, m_{SF} 、 m_{XF} 、 Δm_{SF} 、 Δm_{XL} 分别为送风量、新风量、送风管道与房间的风量净泄露量, kg/s; h_{HF} 、 h_{SF} 、 h_{XF} 、 h_L 分别为回风、送风、新风和冷却盘管机器露点的焓值, kJ/kg; L_{SF} 为风管由于一定温升而产生的冷损失, kW; L_{XL} 为通过风管等不严密处所产生的泄露冷损失, kW。

对冷冻水环路,蒸发器的冷负荷包括冷却盘管的冷负荷,冷冻水输送过程的传热和输送设备—水泵的机械能所转变的热量。因此,列蒸发器的能量平衡方程有

$$Q_{ZF} = Q_{PG} + C_{LS} + L_{LS} \quad (2)$$

式中 Q_{ZF} 为蒸发器提供的冷量, kW; C_{LS} 为冷冻水泵的耗功率(可直接测量), kW; L_{LS} 为冷水输送管道与外界的热交换而引起的冷负荷, kW; 其计算式为 $L_{LS} = CM\Delta T$, C 为水的热容, kJ/(kg·°C); M 为冷冻水水流量, t/h; ΔT 为蒸发器出水温度与末端换热设备进水温度的差值, °C。

对制冷剂环路,列冷凝器的能量平衡方程有

$$Q_{LN} = Q_{ZF} + C_{YS} \quad (3)$$

式中 Q_{LN} 为冷凝器的热负荷, kW; C_{YS} 为压缩机的耗功率, kW。

同理,对冷却水环路,列冷却塔的能量平衡方程:

$$Q_{LT} = Q_{LN} + C_{LQ} \quad (4)$$

对最右边的室外排热环路,若没有能量回收,则最终全部排放耗散到大气中的能量 L 为

$$L = Q_{LT} + C_{LT} \quad (5)$$

式中 Q_{LT} 、 C_{LQ} 为冷却塔的换热量和冷却水泵的耗功率, kW; L 为空调系统排放到室外大气中的总能量, kW; C_{LT} 为冷却塔风机的耗功率, kW。

1.3 能流分析的可视化

能流图,也叫桑基能量平衡图^[13-15],是将能流可视化的一种数据分析方法。图中各分支的宽度对应着各股能流的大小,箭头代表能流流动方向。桑基图最明显特征就是:所有主支宽度的总和应与所有分出去的分支宽度的总和相等,始终保持能量平衡。

联合式(1)~(5)可以看出,以水冷冷水机组为冷源的集中空调系统,各环路间的能流是通过各中间换热设备紧密联系在一起的。每个环路中的换热设备,都存在着能量平衡关系。为了保证空调区域的空调效果,空调区域的冷负荷、新风负荷、再热负荷和冷风输送过程的传热及风机的能耗所转变的热量,决定了末端冷却盘管负荷的大小;该末端冷却盘管负荷连同冷冻水输送环路的能耗及传热损失,又变成了制冷机组蒸发器需负担的负荷;蒸发器的冷负荷

和压缩机的耗功一起,又变成了冷凝器的热负荷;冷凝器的热负荷和冷却水输送过程中水泵、风机的能耗一起,最终全部通过冷却塔排放到室外大气中。

可见,对于一个实际集中空调工程,只要能实测出式(1)~(5)中相应的物理量,就可以绘制出该工程的能流图,从而实现能流分析的可视化,并通过该图很容易地看出整个系统能流的大小,各部分的能量平衡关系及能量损失,识别出主要的能流,为该系统的节能提供有用的信息。

2 能流图分析实例

2.1 实际能流图

下面将结合一具体的工程实例,来说明上述能流分析的具体应用。该工程位于广州市,是一栋23层办公建筑;夏季空调总负荷为6000 kW,选择2台2400 kW的离心式冷水机组和1台1200 kW的螺杆式冷水机组;空调设计供回水温度7/12℃,冷却水供回水32/37℃,选用4台冷冻水泵和冷却水泵,5台冷却塔。空调系统采用一次回风定风量全空气系统。

2012年7月对该建筑的集中空调系统进行了连续1周的实测。根据实测的平均数据,通过公式(1)~

(5)计算出各环路的各能流,并以办公区的空调负荷为基准进行折算,最终绘制出为了消除办公区1 kW余热,该空调系统的实际能流图如图2所示。

可以清晰地看出,实际能流图中各环路中主要有3种能流:(1)各换热设备的负荷 Q ;(2)各耗能设备的能耗 C ;(3)由于和外界的热交换及管道、设备等的不严密引起的泄漏能量损失 L 。

2.2 实际能流分析

从图2可以看出,为了消除办公区1 kW余热,整个空调系统最终需要向环境排放1.787 kW的热量。其中,在消除办公区余热量的同时,需要消除的新风负荷也较显著(占空调区域冷负荷的16%)。此外,整个空调系统耗能设备的能耗所占比例比较显著,占空调区域负荷的比例高达59.3%(将图2中各耗能设备的能耗相加得出)。其中水冷机组的能耗占很大一部分,达到38%,水冷机组的能耗依旧是节能的重点;尽管各动力设备风机和水泵的耗电比例不大,但它们的能耗总和也达到了制冷机组能耗一半的比例,达21.3%,该部分能耗应该受到重视。输送过程中的各种损失所占的比例较小,总共3.4%左右,说明管路的保温和严密性做得相对较好。

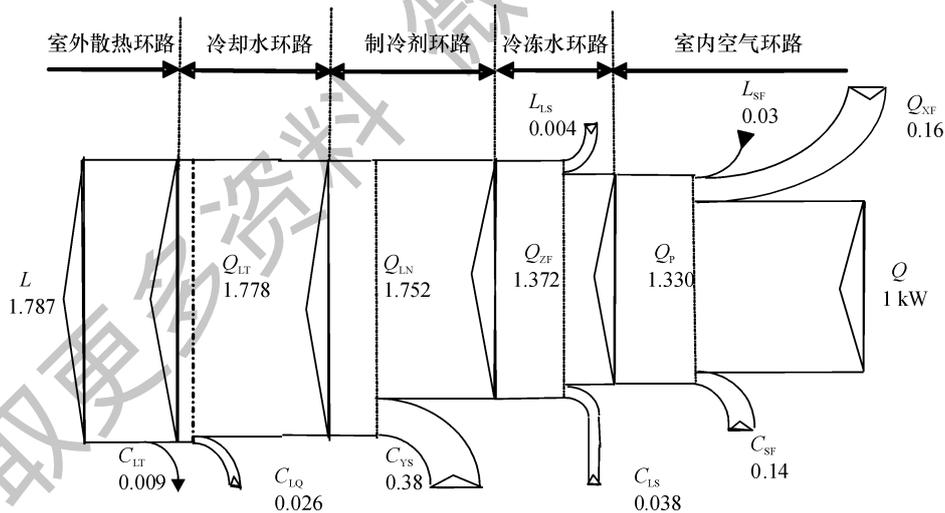


图2 水冷式冷水机组一次回风定风量全空气系统夏季实际工况能流图

Fig.2 On-site energy flow diagram for air conditioning system of constant air volume with water-cooled chiller

2.3 节能措施分析

通过上述能流分析,影响整个空调系统能耗的主要因素是:新风负荷、制冷机组的能耗和输配系统的能耗,应主要针对这几个方面提出相应的节能措施:

(1) 新风负荷的正负取决于室外新风焓值 h_{XF} 与室内空气焓值 h_{HF} 的相对大小。当 $h_{XF} > h_{HF}$ 时,新

风负荷为正,增加了末端冷却盘管负荷。此时,在满足室内空气品质的条件下,尽可能地采用最小的新风量。当 $h_{XF} < h_{HF}$ 时,新风负荷为负值,在能流图中表示新风负荷的箭头和空调区域负荷的箭头方向相反,这意味着新风在抵消部分或全部室内负荷。因此,此时应加大新风量或全新风运行,充分利用这种免费供冷来有效降低空调系统的总能耗。

(2) 该系统中水冷机组在设计条件下的 COP 值为 5.1, 但实测值仅为 3.61. 经实测发现, 机组的冷却水进水温度达到 33.6 °C, 比设计的 32 °C 高出了 1.6 °C, 从而使机组的制冷量下降, COP 降低. 应充分利用冷却塔的换热面积, 优化冷却塔的运行条件, 提高其换热效率, 降低冷却塔的出水温度, 为水冷机组具有较高的制冷量创造条件.

(3) 根据换热量公式 $Q = CM\Delta T$ 可知, Q 一定时, 可以采用大温差送风和加大水系统供回水温差, 均能有效降低风机和水泵的能耗. 该系统中送风系统、冷水系统、冷却水系统设计温差分别为 13 °C、5 °C、5 °C, 实际运行温差分别为 10 °C、4.2 °C、4 °C, 这是由于风机水泵选型、调节不当, 导致大流量、小温差运行, 应加强设备选型及运行调节方面的管理, 来有效降低动力设备风机和水泵的能耗, 最终达到降低系统总能耗的目的.

3 结论

(1) 建立了以水冷冷水机组为冷源的集中空调系统整个环路的能流分析模型, 并通过能流图直观地表现出来整个空调系统各部分的能流及能流之间的联系.

(2) 能流图分析法是分析一个完整空调系统能流情况的有效工具.

(3) 作为应用实例, 用能流图分析法分析了某办公楼一次回风定风量全空气集中空调系统的能流情况, 识别出影响整个空调系统能耗的主要因素是: 新风负荷、制冷机组的能耗和输配系统的能耗, 并主要针对这几个方面提出了相应的节能措施.

参考文献:

- [1] 胡玮, 陈立定. 基于 Trnsys 的水冷型中央空调系统建模与仿真[J]. 系统仿真技术, 2011, 7(3): 218-222.
Hu W, Chen L D. Modeling and simulation of a water-cooled central Air conditioning system based on trnsys [J]. System Simulation Technology, 2011, 7(3): 218-222.
- [2] 尹余生. 管内插件在卧式中央热水机组中强化传热的应用[J]. 广东工业大学学报, 2007, 24(1): 47-49.
Yin Y S. Application of inserts to horizontal-type central Hot water supplier for heat transfer enhancement [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2007, 24(1): 47-49.
- [3] 吕琪铭, 王长宏, 黄璞洁. 亚热带地区校园建筑空调系统节能技术的应用[J]. 广东工业大学学报, 2012, 29(2): 63-67.

- Lv Q M, Wang C H, Huang P J. Analysis of application of energy saving technology to air conditioning systems on the subtropical campus [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2012, 29(2): 63-67.
- [4] 孟华, 龙惟定, 王盛卫. 适于系统仿真的冷却塔模型及其实验验证[J]. 暖通空调, 2004, 34(7): 1-5.
Meng H, Long W D, Wang S W. Cooling tower model for system simulation and experiment validation [J]. HV&AC, 2004, 34(7): 1-5.
- [5] Andrew Kusiak, Mingyang Li, Fan Tang. Modeling and optimization of HVAC energy consumption [J]. Applied Energy, 2010, 87(10): 3092-3102.
- [6] Nelson Fumo, Pedro Mago, Rogelio Luck. Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(12): 2331-2337.
- [7] Alessandro Beghi, Luca Cecchinato, Mirco Rampazzo. A multi-phase genetic algorithm for the efficient management of multi-chiller systems [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(11): 1650-1661.
- [8] Kusiak A, Li M Y. Cooling output optimization of an air handling unit [J]. Applied Energy, 2010, 87(3): 901-909.
- [9] Bertagnolio S, Lebrun J. Simulation of a building and its HVAC system with an equation solver: Application to audit [J]. Building Simulation, 2010, 3(2): 139-152.
- [10] Wang Y, Cai W, Soh Y, Li S, et al. A simplified modeling of cooling coils for control and optimization of HVAC systems [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(18): 2915-2930.
- [11] Yu F W, Chan K T. Optimization of water-cooled chiller system with load based speed control [J]. Applied Energy, 2008, 85(10): 931-950.
- [12] Luis Perez-Lombard, Jose Ortiz, Ismael R. Maestre. The map of energy flow in HVAC systems [J]. Applied Energy, 2011, 88(12): 5020-5031.
- [13] Mario Schmid. The Sankey diagram in energy and material flow management Part I: History [J]. Journal of Industrial Ecology, 2008, 12(2): 173-185.
- [14] Mario Schmid. The Sankey diagram in energy and material flow management Part II: methodology and current applications [J]. Journal of Industrial Ecology, 2008, 12(1): 82-94.
- [15] 谢士晨, 陈长虹, 李莉, 等. 2006 年中国能流图 [J]. 中国能源, 2009, 31(3): 21-23.
Xie S C, Chen C H, Li L, et al. Chinese energy flow diagram in 2006 [J]. Chinese Energy Source, 2009, 31(3): 21-23.