

Energy Analysis and Economic Operation of Central Air Conditioning System

Shoulu Deng, Guisheng Wang, Liang Zhou

Shengli Oilfield Technology Inspection Center, Dongying
Email: sljc16888@126.com

Received: Sep. 5th, 2012; revised: Sep. 17th, 2012; accepted: Jan. 6th, 2013

Copyright © 2013 Shoulu Deng et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The energy-balance analysis of central air conditioning system for (FC + OA) is done. The energy-balance models and equations for central conditioning system are given, the energy analysis for subsystem is done. According to calculation example, effective way to ensuring economic operation of central air conditioning system is given.

Keywords: Central Air Conditioning; Energy Analysis; Coefficient of Performance; Way

中央空调的能量分析与经济运行

邓寿禄, 王贵生, 周亮

胜利油田技术检测中心, 东营
Email: sljc16888@126.com

收稿日期: 2012年9月5日; 修回日期: 2012年9月17日; 录用日期: 2013年1月6日

摘要: 本文对风机盘管 + 新风系统(FC + OA)的中央空调系统进行了能量平衡分析。给出了中央空调系统的能量平衡模型和能量平衡方程, 并对中央空调系统的各子系统进行了能量分析。依据中央空调系统的能量分析计算实例, 提出了保证中央空调系统经济运行的有效途径。

关键词: 中央空调; 能量分析; 制冷系数; 途径

1. 前言

能源的有效利用是当今世界的重要研究课题。在我国, 建筑能耗占全社会总能耗的比例已接近 30%, 随着国民经济的发展、人民生活水平的提高, 空调应用日益广泛和普及, 空调用电占用电总量的比例在不断上升。如一些发达国家用于空调(包括供暖)所消耗的能量约占总消耗能量的 1/3, 有的甚至达到消耗能量的 45%。我国的一些安装空调设备的生产单位所消耗的能量也相当可观。有的单位用于空调冷冻的用电量占全厂用电量的三分之一, 甚至更高。如果将空调冷冻和供暖耗能量加到一起, 所耗煤量占全国耗煤量

的三分之一。因此, 降低空调能耗, 特别是在当今用电情况趋紧的状况下, 加强空调用电管理的意义重大^[1,2]。

本文以热力学第一定律为基础, 对中央空调系统进行能量分析, 建立中央空调系统能量分析模型, 分析了确保中央空调经济运行的有效途径。

2. 中央空调系统的能量平衡模型^[3]

风机盘管 + 新风系统(FC + OA)的中央空调系统可以视为由冷却水系统、制冷机系统、空气处理系统和空调对象系统四个子系统组成。冷却水系统主要

由冷却塔、冷却水泵及冷却塔风机组成；制冷机系统主要由制冷机组组成；空气处理系统主要由空气处理机组和冷水泵组成，空调对象系统主要由送回风管道、冷水泵及末端送风装置组成。其能量平衡模型图如图1所示。图1中各符号的含义如下： h_1 、 h_2 分别为冷却塔进出口空气的比焓，kJ/kg； h_3 、 h_4 分别为冷却水进出口比焓，kJ/kg； h_5 、 h_6 分别空气处理系统冷水供水比焓，kJ/kg； h_7 、 h_8 空调对象系统冷水供水比焓，kJ/kg； h_9 、 h_{10} 分别为空调送、回风比焓，kJ/kg； h_{11} 为新风比焓，kJ/kg； h_{12} 为排风比焓，kJ/kg； G_1 为进出冷却塔空气质量流量，kg/s； G_2 为冷却水质量流量，kg/s； G_3 为空气处理系统冷水质量流量，kg/s； G_4 为空调对象系统冷水质量流量，kg/s； G_5 为空调送风质量流量，kg/s； G_6 为新风质量流量，kg/s； G_7 为排风质量流量，kg/s； W_1 为冷却塔风机功率，kW； W_2 为冷却水泵功率，kW； W_3 为制冷机功率，kW； W_4 为空气处理系统冷水泵功率，kW； W_5 为空气处理机组风机功率，kW； W_6 为空调对象系统冷水泵功率，kW； W_7 为末端空气处理设备功率，kW； Q'_1 为空调对象系统的冷量损失，kW； Q'_2 为冷却塔的散热量，kW； Q'_3 为制冷机系统的散热量，kW； Q'_4 为空气处理系统的能量损失，kW； Q_1 为空调系统冷负荷，kW。

3. 中央空调系统的能量平衡方程

中央空调系统的能量平衡方程是系统输入的能量、有效利用的能量和损失的能量的平衡关系，根据能量守恒原理，其能量平衡方程为：

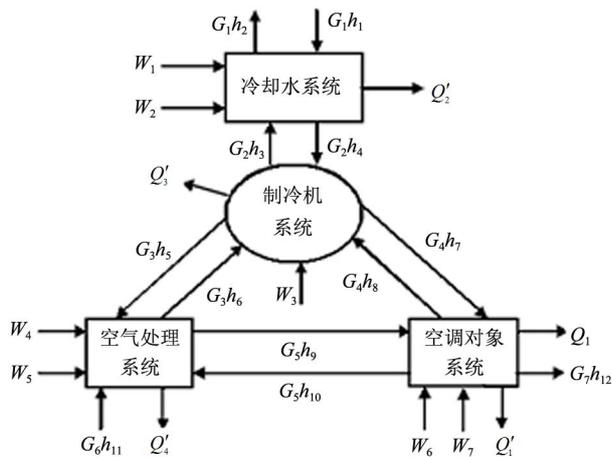


Figure 1. Energy-balance chart of central air conditioning system
图1. 中央空调系统的能量平衡图

$$W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7 = (G_1 h_2 - G_1 h_1) + Q_1 - (G_6 h_{11} - G_7 h_{12}) + Q'_2 + Q'_1 + Q'_3 + Q'_4 \quad (1)$$

式中， Q_1 、 Q'_1 、 Q'_4 为系统的有效冷量和冷量损失，其值为负。

4. 各子系统的能量平衡分析

4.1. 冷却水系统的能量平衡分析

- 1) 冷却水系统的能量平衡模型(图2)
- 2) 冷却水系统的能量平衡方程

$$(W_1 + W_2) + (G_2 h_3 - G_2 h_4) = (G_1 h_2 - G_1 h_1) + Q'_2 \quad (2)$$

- 3) 冷却水系统的能量传递效率

根据冷却水系统的能量平衡模型和能量平衡方程，还可以得出其能量传递效率，能量传递效率为系统输出有效能量与输入系统全部能量之比，即

$$\eta_1 = \frac{G_1 (h_2 - h_1)}{W_1 + W_2 + G_2 (h_3 - h_4)} \quad (3)$$

式中 η_1 ——冷却水系统的能量传递效率。

4.2. 制冷机系统的能量平衡分析

- 1) 制冷机系统的能量平衡模型(图3)
- 2) 制冷机系统的能量平衡方程

$$W_3 + Q_C = (G_2 h_3 - G_2 h_4) + Q'_3 \quad (4)$$

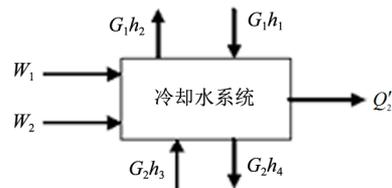


Figure 2. Energy-balance model of cooling water system
图2. 冷却水系统的能量平衡模型

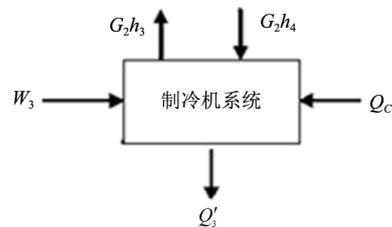


Figure 3. Energy-balance model of chiller system
图3. 制冷机系统的能量平衡模型

其中

$$Q_C = G_3(h_6 - h_5) + G_4(h_8 - h_7) \quad (5)$$

3) 制冷机系统的制冷系数

$$\text{COP} = \frac{Q_C}{W_3} \quad (6)$$

式中 COP——制冷机系统的制冷系数； Q_C ——制冷机系统总的制冷量，kW。

4) 制冷机系统的能量传递效率

根据制冷机系统的能量平衡模型和能量平衡方程，还可以得出其能量传递效率，即

$$\eta_2 = \frac{G_2(h_3 - h_4)}{W_3 + G_3(h_6 - h_5) + G_4(h_8 - h_7)} \quad (7)$$

式中 η_2 ——制冷机系统的能量传递效率。

4.3. 空气处理系统的能量平衡分析

1) 空气处理系统的能量平衡模型(图 4)

2) 空气处理系统的能量平衡方程

$$(G_3h_5 - G_3h_6) + (W_4 + W_5) = (G_5h_9 - G_5h_{10}) - G_6h_{11} + Q'_4 \quad (8)$$

3) 空气处理系统的能量传递效率

$$\eta_3 = \frac{G_5(h_9 - h_{10})}{W_4 + W_5 + G_3(h_5 - h_6) + G_6h_{11}} \quad (9)$$

式中 η_3 ——空气处理系统的能量传递效率。

4.4. 空调对象系统的能量平衡分析

1) 空调对象系统的能量平衡模型(图 5)

2) 空调对象系统的能量平衡方程

$$(W_6 + W_7) + (G_4h_7 - G_4h_8) + (G_5h_9 - G_5h_{10}) = Q_1 + G_7h_{12} + Q'_1 \quad (10)$$

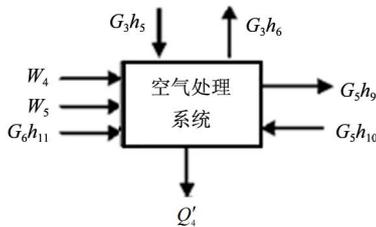


Figure 4. Energy-balance model of air handling system
图 4. 空气处理系统的能量平衡模型

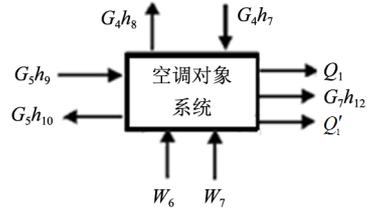


Figure 5. Energy-balance model of air-conditioning object system
图 5. 空调对象系统的能量平衡模型

3) 空调对象系统的能量传递效率

根据空调对象系统的能量平衡模型和能量平衡方程，可以得出其能源利用率，即

$$\eta_4 = \frac{Q_1 + G_7h_{12}}{(W_6 + W_7) + (G_4h_7 - G_4h_8) + (G_5h_9 - G_5h_{10})} \quad (11)$$

式中 η_4 ——空调对象系统的能量传递效率。

5. 中央空调系统的能效比

中央空调系统的能效比为中央空调系统的制冷量与消耗的电功率的比值。即假设中央空调系统新风量等于排风量，则有：

$$\begin{aligned} \text{EER} &= \frac{Q_1 + G_6(h_{12} - h_{11})}{W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7} \\ &= \frac{Q_1 + G_6(h_{12} - h_{11})}{\sum_{i=1}^7 W_i} \end{aligned} \quad (12)$$

6. 中央空调系统的能量分析计算

以某商业综合办公楼供冷系统为例，其空调系统运行参数如表 1 所示。

7. 中央空调系统经济运行分析

7.1. 中央空调运行工况计算结果分析

计算实例中，中央空调系统采用普通电制冷方式，3 台大容量离心式冷水机组配一台小容量螺杆式冷水机组；风系统为：大空间采用全空气系统，小房间采用风机盘管 + 新风系统。由表 2 可见，制冷机系统的制冷系数为 5.08，计算结果高于标准规定的 4.60 考核值，说明该制冷系统的制冷性能良好，运行正常。该中央空调系统的水输送系数为 30.96，GB/T-50189 标准规定的水输送系数不小于 30，结果表明，该中央空调系统的水输送系数刚刚达到标准规定要求。

Table 1. Operating parameters of central air conditioning system
表 1. 中央空调系统运行参数

项目	数值	项目	数值
空调室外计算温度/℃	32.6	制冷机功率 W_3 /kW	1616
冷却塔进/出口水温/℃	36.5/32	空气处理系统冷水泵功率 W_4 /kW	102.6
冷水供/回水温度/℃	7/12	空调对象系统冷水泵功率 W_6 /kW	158.5
冷却塔风机功率 W_1 /kW	72.8	制冷机供给空调对象系统的负荷/kW	4948.6
冷却水泵功率 W_2 /kW	326	平均送风温度/℃	18
冷水质量流量(kg/s)	392.5	空气处理机组风机功率 W_5 /kW	768.6
冷却水质量流量(kg/s)	492.8	空调冷负荷/kW	7896
制冷机冷凝器的放热量/kW	9715	末端空气处理设备功率 W_7 /kW	2866.2
制冷机供给空气处理机的负荷/kW	3268	室内平均温度/℃	26
空气处理机组冷负荷/kW	3135		

Table 2. Calculated data for energy analysis of central air conditioning system
表 2. 中央空调系统能量分析计算数据

项目	数值	项目	数值
冷却水系统的能量传递效率/%	91.80	空气处理系统的能量传递效率/%	77.66
制冷机系统的制冷系数	5.08	空调对象系统的能量传递效率/%	71.08
制冷机系统的能量传递效率/%	98.80	空气输送系数	4.08
水输送系数	30.96	中央空调系统的能效比	1.336

该中央空调系统的空气输送系数为 4.08，标准规定的空气输送系数为 4~10，可见，该中央空调系统的空气输送系数亦刚刚达到标准规定要求。该中央空调系统的能效比为 1.336，标准规定制冷机额定功率大于 1163 kW 的空调系统的能效比应大于 4.4，可见，该中央空调系统的能效比小于标准规定的要求。通过能量分析计算结果可见，冷却水系统的能量传递效率为 91.80%，制冷剂系统的能量传递效率为 98.80%，空气处理系统的能量传递效率为 77.66%，空调对象系统的能量传递效率为 71.08%。

7.2. 中央空调系统经济运行分析

7.2.1. 制冷机系统的经济运行

在空调系统中，制冷机系统的能耗是最大的。经验表明，制冷机系统的 COP 随部分负荷的大小和机型的不同而变化。存在制冷机在部分负荷下运行 COP 值不高这个问题的原因是多方面的。如对部分负荷时的节能优化运行认识不足，受传统调节控制模式的制约，制冷系统配件(如热力膨胀阀)存在缺陷，机组运行的安全要求(回油)得不到满足等等。因此为了使机组具备调节能力，常常由多台压缩机组成一台制冷机系统，每个压缩机构成一个独立的制冷回路。运行时

保持机组的冷凝压力恒定(或在一个较小的范围内变化)。众所周知，系统实际运行性能系数 COP 是由系统内部(制冷循环，压缩机效率、传热效果等)因素和外部条件共同影响的，而通常在部分负荷下运行时，其外部条件较满负荷时优越，环境温度相对较低。在不考虑传热性能变化影响的情况下，可充分利用环境温度的降低来降低冷凝温度、缩小压缩机的高低压力差以改善系统性能系数，COP 最大能提高 20%。许多研究者针对制冷机系统，从冷却水和冷水调节控制策略入手，获得了一些有效的优化运行的方法^[4]。

7.2.2. 水输送系统和空气输送管系统的经济运行

空调系统中，空气与水通常是冷量载体。输送过程能耗包括：通过传热的冷量损失和输送过程的流动阻力损失。对于输送冷量的水系统或空气的管路系统，克服流动阻力的能量又转变为热量导致冷量损失。由实测数据可见，本计算实例中，中央空调水输送系数和空气输送系数分别为 30.96 和 4.08，其结果刚好达到有关资料规定的要求，距离先进水平还有差距。减少输送过程的能耗主要可以从以下方面着手：

- 1) 做好输送冷量的水管、风管的保温。
- 2) 精心设计、正确计算系统阻力，选择合适的泵

与风机的型号与规格,切忌选择流量、扬程或全压过大的泵与风机,避免不必要的能量损失。

3) 在满足工艺和舒适条件下,应尽可能地增大送风温差和供回水温差。常规空调的冷冻水和冷却水温差为 5°C ,大温差系统冷冻水温度可增加到 $8^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$,冷却水温差增加到 8°C 。常规的空调系统送风温差一般在 $6^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$,最大不超过 15°C ,大温差系统的送风温差在 $14^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。大温差不仅可以减少输送过程的能耗,同时减少了管路的断面,从而降低了管路系统的初投资。但是大温差也会影响空调设备的性能。如冷冻水大温差会导致风机盘管、表冷器冷却能力和除湿能力的下降,为弥补这不利的影 响,可以降低冷冻水的供水温度,这样又使冷水机组的性能系数降低和能耗增加。因此确定温差时必须对利弊充分估计。也就是说,应综合考虑系统总能耗(包括输送能耗和冷水机组能耗)、经济性、环境控制质量等多方面来选择合理的温差^[5]。

4) 定期对中央空调水系统和风系统的清洗,清除管内结垢或杂质,保证管网畅通以减小流动阻力。

7.2.3. 冷却水系统的经济运行

冷却水系统的能耗在空调系统中所占的比例虽然并不大,但是其使用频率高,累积耗能较大。由计算实例可见,冷却水系统的能量传递效率为 91.8% ,冷却水系统在能量传递过程中的能量损失较小,其能量损失主要由冷却塔的散热损失所致。要实现冷却水系统的经济运行,关键在于实现冷却塔的节能运行。影响冷却塔冷却能力的因素有循环水量、水温、诱导风量和空气干湿球温度和空气中灰尘浓度等,在这些因素中,除空气干湿球温度、空气中灰尘浓度无法控制外,其它因素可以通过一些控制手段来改变冷却塔的工作状态,找出最佳工作状态,从而达到节能目的。例如,根据冷水机组冷却水温度特性,通过合理减少风机运行台数来减少电耗;通过对冷却水塔的清洗和维护,提高冷却水散热面积换热效果、改善冷却水水流分布、减少冷却水污垢、降低冷却水水流失的隐性能耗等来提高系统的运行效率。

7.2.4. 中央空调系统其他方面的经济运行

由实测数据可见,空气处理系统的能量传递效率为 77.66% ,空调对象系统的能量传递效率为 71.08% 。

这两个系统在制冷过程中的能量损失,主要是由其冷量损失和管网阻力损失所致。要保证其经济运行,应做到:1) 加强空气处理系统的保温效果,减少空气在处理过程中的冷量损失;2) 减少空气在输送过程中的阻力损失,尽量减少阀组和弯管在空气处理系统中的使用;3) 合理设定室内温度,室内设计温度每提高 1°C ,空调系统将减少能耗约 6% ;4) 合理设定室内湿度,由于夏季室内设计相对湿度一般不会低于 50% ,所以以 50% 为基准,相对湿度每增加 5% ,节能 10% ;5) 改善围护结构的保温性能,减少通过围护结构向外产生的冷量损失。

水泵是中央空调系统中耗能的主要设备,约占空调系统总能耗的 $15\%\sim 20\%$ 。保证水泵的经济运行,目前主要采取的手段是对水泵进行变频流量控制。在未采用变频变流量系统状况下,也可以通过合理措施来进行节能,如在加班时段和过渡季节,末端冷负荷较小时,可根据制冷系统的不同运行模式,合理控制水泵运行台数,同时调整系统管道相关阀门,来减少不必要的电耗^[6]。

7.2.5. 提高中央空调系统能效比的方法

由计算实例可见,中央空调系统的能效比为 1.336 ,远远低于标准规定的 4.4 。这主要是由于该中央空调采用风机盘管 + 新风系统的结构型式所导致的。要提高中央空调系统能效比除应采取以上保证中央空调系统经济运行的措施以外,还应做到:1) 考虑使用变频压缩机和变排量技术;2) 尽量提高热交换设备的传热性能;3) 制冷和空调装置运行实现智能控制;4) 考虑采用中央空调系统的其他型式,尽量避免使用新风或全新风系统。

8. 结语

本文对风机盘管 + 新风系统的中央空调系统进行了能量分析研究,给出了能量分析物理模型和数学模型。并结合典型实例,对中央空调进行实例计算,通过对计算结果的分析,提出了保证中央空调系统经济运行的主要措施。本文理论联系实际,为今后中央空调系统的运行现状研究提供有益的参考价值。

参考文献 (References)

- [1] 陆耀庆,主编.实用供热空调设计手册[M].北京:中国建筑

中央空调的能量分析与经济运行

- 工业出版社, 2008: 2448-2455.
- [2] 蔚迟斌, 主编. 实用制冷与空调工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 1002-1003.
- [3] 戎卫国, 李永安等. 空调系统热力学分析与节能[J]. 暖通空调, 2006, 36(11): 14-17.
- [4] 程丹. 中央空调系统运行工艺的能耗分析[J]. 山西建筑, 2005, 31(15): 154-155.
- [5] 卓明胜, 梁荣光, 许石嵩. 现代大楼中央空调系统节能探讨[J]. 制冷, 2004, 23(3): 78-81.
- [6] 刘黎明. 冰蓄冷中央空调系统经济运行策略分析[J]. 厦门科技, 2010, 2: 33-37.