

冷水机组的优化运行

东南大学 张韵辉[☆] 吕震中 张小松

摘要 针对冷水温度、冷却水温度及机组启停控制等影响冷水机组运行的主要因素进行了分析,指出适当提高冷水出口温度和(或)降低冷却水出口温度,采用智能调节策略对多台制冷机和水泵的启动顺序进行合理调配,采用 BP 网络预测最小预热(冷)期和最长提前停机时间对压缩机进行最优启停控制等,都可以降低系统能耗。

关键词 冷水机组 优化运行 冷水温度 冷却水温度 启动顺序 最优启停控制

Optimum control of chillers

By Zhang Yunhui[★], Lü Zhenzhong and Zhang Xiaosong

Abstract Focuses on the main factors influencing chiller operation, including chilled water temperature, cooling water temperature and start-stop control. Puts forward the corresponding measures to achieve operation optimization for chillers, including properly increasing outlet temperature of chilled water and/or lowering outlet temperature of cooling water, rationally regulating start-up sequence of chillers and water pumps with intelligent control strategies, and predicting minimum preheating/precooling period and maximum advanced stop time by BP network to perform optimal on-off control for compressors.

Keywords chiller, optimum control, chilled water temperature, cooling water temperature, start-up sequence, optimal on-off control

★ Southeast University, Nanjing, China

①

0 引言

随着经济发展及人民生活水平提高,建筑物总能耗逐年增长,其中空调系统能耗所占比例很大。如何能在满足室内负荷要求的前提下,降低空调系统的能耗?

空调系统的主要能耗来自冷水机组和输送系统(冷水泵、冷却水泵、冷却塔等)。冷水机组能耗量取决于室内环境标准、空气处理方式及热利用效率;输送系统能耗量取决于空调方式、管路系统、输送设备性能、效率及工作方式等。过去十多年里,由于能源价格上涨,采用高效制冷机成为主流。除了利用高效制冷机外,为了降低能耗,还有许多其他优化措施,如参数优化、结构优化等。本文主要针对冷水机组运行的几个主要影响因素探讨如何采取相应措施使系统最优化运行,达到节能的目的。

1 冷水机组的优化运行^[1~4]

冷水机组运行的主要影响因素有冷却水温度、冷水温度、机组启停控制等,因此,笔者从以下几个方面来分析冷水机组的优化运行:

- 冷水温度调节;
- 冷却水温度调节;
- 多台冷水机组和水泵顺序启停控制;
- 压缩机的最优启停控制。

首先来看压缩机输入功率的计算公式:

$$P = \frac{G(p_d - p_s)K}{\eta_v \eta_m} \quad (1)$$

①[☆] 张韵辉,女,1977 年 11 月生,在读博士研究生
210096 南京市四牌楼 2 号东南大学动力系 2001 级博
(025) 3794527-8284
E-mail: zhangyunhui1106@sina.com
收稿日期:2003-05-15
一次修回:2003-07-24
二次修回:2004-01-16

式中 P 为压缩机输入功率; G 为制冷剂流量; p_d , p_s 分别为压缩机排气压力和吸气压力; K 为常数; η_v , η_m 分别为压缩机的容积效率和机械效率。

一旦选定压缩机后, 在式(1) 中仅 p_d , p_s , G 可以调节。其中, 流量 G 的调节, 对于往复式压缩机可以通过改变气缸工作个数、变电机极数的变速调节方式来实现; 对于离心式制冷机则常采用改变压缩机入口导流叶片角度的方法实现。对于 p_d , p_s 的调节, 传统的方式是通过操作者来调节。为了改进控制效果, 减轻劳动强度, 目前可以采用基于计算机的 EMCS(能量管理系统) 来进行控制, 通过调节影响蒸发器和冷凝器传热的主要因素——冷水和冷却水进出口水温来实现 p_d , p_s 的自动调节。原因在于蒸发温度是蒸发压力的函数, 冷凝温度是冷凝压力的函数, 因此, 在满足制冷需求的前提下, 可以通过调节冷水温度和冷却水温度来降低压差($p_d - p_s$), 减少压缩机功率输入。

1.1 冷水温度调节

制冷机运行时, 冷水出口温度提高, 蒸发温度也随之提高, 以保持冷水温度和蒸发温度之间的温差不变。同时, 压缩机吸气压力也会提高, 制冷机输入功率减小, COP 值增加, 从而提高了制冷机循环效率。冷水出口温度的提高受冷水供水温度、冷冻站的输送能力、换热器效率等因素的影响。当冷水供水温度达到最大许可值时, 供回水温差下降, 使流量增加以维持一定负荷条件下的总传热效率。然而, 流量增加会使冷水泵运行费用增加, 因此, 最合理的冷水温度应该使泵运行费用的减少与制冷量的增加相协调。

传统的控制方案是使冷水出口温度恒定。对于大多数离心式制冷机和吸收式制冷机, 通过测量冷水出口温度, 并通过 PI 调节, 使冷水出口温度恒定。在这种传统的控制方式中, 当建筑物室内冷负荷下降时, 回水温度降低, 冷水平均温度降低, 蒸发温度也随之降低, 控制机构动作, 减少制冷量, 与实际的建筑物负荷平衡。结果, 在部分负荷时的蒸发温度、冷水平均温度比满负荷时的蒸发温度和冷水平均温度更低, 单位制冷量输入功率值更大。因此, 部分负荷时, 在保证室内需求, 同时保证空调箱及其末端装置在夏季有足够除湿能力的前提下, 可以适当提高空气处理设备冷却盘管入口冷水温度, 这样会使冷水机组单位制冷量功率输入减小。

为了使系统最优化运行, 达到节能的目的, 通常可采用 3 种方式对冷水出口温度进行调节:

a) 根据室外气温对冷水出口温度进行调节。这种方式假设建筑物冷负荷主要是由于室外环境造成的。在许多旧建筑物中采用这种调节, 结果比较令人满意。然而, 新建的建筑物遮阳设施完善, 采用这种方式效果不太好。

b) 依据最恶劣的工作区间来对冷水出口温度进行调节。对应最大冷却负荷的区间, 冷水出口温度最低。但是, 最恶劣工作区间的确定很困难。

c) 根据冷水回水温度对冷水出口温度进行调节。对恒定的冷水出口温度, 回水温度的变化就代表建筑物负荷的变化, 从而确定效率最高时的冷水出口温度。

目前, 可用基于计算机的 EMCS 对参数进行在线监测、调整, 取代传统的制冷控制装置或手动方式, 不仅会大大减少运行维护管理人员的数量和减轻劳动强度, 而且可以大大增强空调系统运行的可靠性和安全性。

1.2 冷却水温度调节

为了维持一定的平均温差, 若冷却水出口温度下降, 制冷剂冷凝温度也会随之下降。同时, 压缩机排气压力下降, 输入功率减小。

冷凝器中冷却水吸收热量的表达式如下:

$$Q_c = c_p m (t_2 - t_1) \quad (2)$$

式中 Q_c 为冷却水吸收的热量, kJ/h ; c_p 为水的比定压热容, $4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; m 为冷却水流量, kg/h ; t_1 , t_2 为冷却水进、出口水温, $^{\circ}\text{C}$ 。

当 Q_c 和 m 一定时, 冷却水进出口温差也一定。因此, 为了降低冷凝器冷却水出口水温, 必须降低入口水温。

在再循环系统中, 离开冷凝器的水经管道送入冷却塔中, 在冷却塔内降温后再送入冷凝器中, 循环使用, 冷凝器冷却水入口水温可以通过控制冷却塔的出口水温来进行控制。冷却塔出口水温的主要影响参数有: 冷却塔入口空气湿球温度, 流经冷却塔的空气流量, 冷却塔进水温度, 冷却塔水流量。其中, 入口空气湿球温度由当地气象条件确定, 可以通过调节流经冷却塔的空气流量和冷却塔进水温度来改变冷凝器冷却水进口温度。在控制冷凝器冷却水进口温度不致过低的情况下, 应尽可能降低冷却水温度, 且不浪费冷却塔风机的功率。若冷

却塔有许多工作元件(如风机和通风管),并且风机采用变频驱动,则所有的风机应以同一速度运行,使风机能耗最低的同时获得较佳的冷却能力。

传统的冷却水入口温度控制方式是测量冷却塔的出口水温,通过比例控制调节流经冷却塔的空气质量,以维持冷却塔出口水温恒定。

而采用 EMCS,可以根据编写的管理与控制程序,通过室外空气的相对湿度或露点温度和干球温度来求得湿球温度,从而对冷却塔水温进行自动调节。冷却塔的水温依据周围空气湿球温度来调节,可以降低冷却塔风机所耗功率。因此,在设计冷却塔和对其进行控制时,需要利用周围环境温度数据。冷却塔出口水温越低,则冷凝器入口冷却水温越低,制冷机功耗下降。

上述的冷水温度调节和冷却水温度调节方式中,前者对制冷机效率影响较大,冷水出口温度每升高 1°C (1.8°F),单位制冷量能耗降低 $1.7\%\sim 3.3\%$;冷却水出口温度每降低 1°C ,单位制冷量能耗降低 $0.8\%\sim 2.5\%$ 。

大多数压缩机必须维持最小压差以保证运行操作安全可靠,因此应合理设定冷水温度和冷却水温度,而不能无限制进行调节。

1.3 制冷机和泵顺序启停控制(或时间启停控制)

大多数制冷系统配备多台制冷机和水泵,它们的效率和运行投资不同,因此根据部分负荷运行特性和冷水泵以及管道特性,顺序启停制冷机和水泵,进行较好的负荷分配,并且能在满足负荷的同时,使得投资最小,获得较好的系统总效率。

如果建筑物配用了 2 台以上制冷机和水泵,传统控制中,由操作人员手动来完成顺序启停。而 EMCS 根据冷水供回水温度与流量的检测值计算实际所需冷负荷,自动调整冷水机组运行台数,预先安排给定负荷下哪些制冷机和水泵应该启动或者停机,EMCS 通过在机组启动时采用一些智能调节策略,对制冷机和水泵进行合适的组合配置,以获得最大的 COP。

图 1 所示为建筑物内配有 2 台 176 kW (50 rt) 的制冷机和 1 台 352 kW (100 rt) 的制冷机不同启动顺序时的制冷效果。其中,方案 1:先启动 1 台 176 kW 制冷机,再启动 1 台 352 kW 制冷机,最后启动另 1 台 176 kW 制冷机;方案 2:先启动 352 kW 的制冷机,再依次启动 2 台 176 kW 的制冷机;

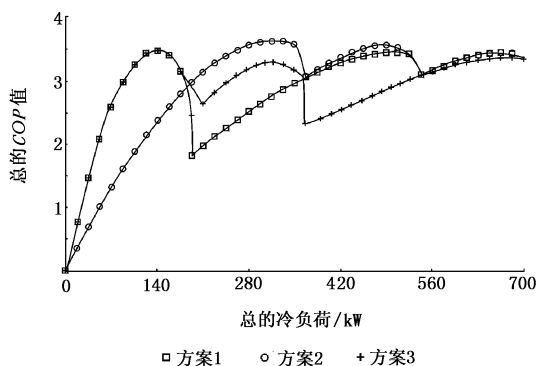


图 1 制冷站总的 COP 值与冷负荷及机组不同启动顺序之间的关系

方案 3:先依次启动 2 台 176 kW 的制冷机,再启动 352 kW 的制冷机。很明显,3 种组合方案制冷效果不同,这在低负荷情况下尤为明显。

方案 1 在总负荷低于 176 kW 时,对应的 COP 值与方案 3 接近,大于方案 2 的 COP 值,总负荷在 $176\sim 352\text{ kW}$ 时,COP 值相对其他方案最低;方案 2 在总负荷为 $176\sim 700\text{ kW}$ 时,COP 值相对其他方案最大;方案 3 在总负荷为 $352\sim 700\text{ kW}$ 时,对应的 COP 值最低。

1.4 压缩机的最优启停控制^[5]

在空调系统中,有相当一部分用户,或者是间歇使用,或者使用时间经常变化。为了满足这些用户的使用要求,空调系统应该在其使用时间内保证达到所要求的环境条件。因此,空调系统在使用前,必须进行预热或预冷,即提前启动空调系统,使房间升温或冷却,以保证使用时室温处于要求范围内。问题的关键在于如何确定预热(冷)期,可以使预热(冷)时间最短,能在达到要求的温度设定值的同时,能耗最小。不同启动时间对建筑物室内温度的影响如图 2 所示。

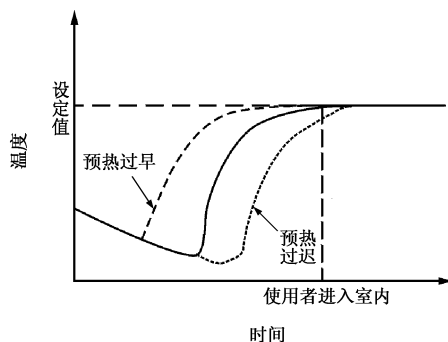


图 2 空调设备不同启动时间对建筑物室内温度的影响

预热(冷)期的确定首先要看预热(冷)负荷的

大小,若启动前室温偏离设定值较大,则所需预热(冷)负荷也较大,预热(冷)期更长一些。空调系统停机时,由于系统存在热惰性,室温不可能很快变化,所以可在停止使用前的某一时间提前停机,并保证在使用期结束前,室温仍保持在要求范围内。利用上述特性,可进行最优启停控制,从而节省预热(冷)能量,推迟启动和提前停止风机、水泵等动力设备,缩短设备运行时间,减小能量消耗,获取更高的运行效率及较好的节能效果。

最优启停控制在很大程度上取决于部分负荷特性和冷水管道的特性。利用神经网络 BP 算法,可以按照既满足用户要求又能耗最小的原则,预测出系统最小预热(冷)期及最长的提前停止时间,在到达这个预测值时,控制装置发出启停指令。这种情况下,启停工况运行的时间就不是固定的,而是由神经网络预测结果确定的。

BP 网络算法的基本思路是:把输出层出现的与期望不符的误差,归因于连接权值 W 和采用的阈值 b 不恰当,通过把输出层节点的误差逐层反向传播以分摊给各连接节点,从而可算出各连接节点的参考误差,并据此对各连接权值和阈值进行相应调整,使网络达到相应的映射要求。在确定最优启动时间时,将启动前室内温度、室外温度、室外空气相对湿度作为神经网络的输入量 X_1, X_2, X_3 ,将最优启动时间的预测值 T_{op} 作为输出量,通过验证,可以得到理想的控制效果和节能效果。其结构如图 3 所示。

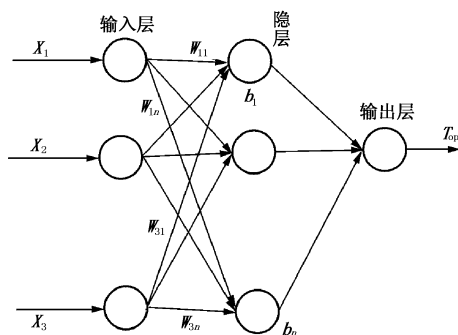


图 3 用 BP 网络进行最优启动时间预测

2 结论

2.1 提高冷水出口温度和(或)降低冷却水出口温度,都可以降低制冷系统能耗;

2.2 如果建筑物配用了 2 台以上制冷机和水泵,通过在机组启动时采用一些智能调节策略,对制冷

机和水泵进行合适的组合配置,可以获得最大的 COP;

2.3 按照既满足用户要求又能耗最小的原则,可以采用 BP 网络来预测系统最小预热(冷)期及最长的提前停止时间以进行最优启停控制。最优启停控制可以节省预热(冷)能量,推迟启动和提前停止风机、水泵等动力设备,缩短设备运行时间,减少能量消耗,获取更高的运行效率及较大的节能效果。

参考文献

- 1 Spethmann D H. Optimized control of multiple chillers. In: ASHRAE Trans, 1985, 91: 848 - 855
- 2 Stephen B Austin. Optimum chiller loading. ASHRAE J, 1991, 33(7): 40 - 43
- 3 Azmi Kaya. Improving efficiency in existing chillers with optimization technology. ASHRAE J, 1991, 33(10): 30 - 38
- 4 丁云飞,冀兆良. 风冷和水冷式冷水机组的运行能耗分析. 制冷, 1999, 18(4): 76 - 79
- 5 刘作军,董砚. 智能建筑 VAV 空调系统的节能控制. 自动化与仪表, 2000, 15(5): 33 - 35

(上接第 72 页)

5 结论

随着背压的增大,变速调节工况的扬程增大,效率降低,从而使轴功率增大,变速调节工况与节流调节工况的轴功率差减小。因此,无背压系统变速调节的节能效益最好,有背压系统则随背压的增大,变速调节的节能效益逐渐降低。背压增大到一定程度,变速调节工况与节流调节工况的轴功率相当接近,若把变速装置的效率考虑在内,二者的实际能耗相差无几,这时变速调节就失去了节能的意义,甚至可能出现变速调节比节流调节耗能更多的情况。因为采用变速调节还增加了系统的投资,所以对于有背压系统选用变速调节装置时,必须针对具体情况,进行认真的分析和计算,以确定其是否节能。

参考文献

- 1 上海经委节能办公室,上海市机电工业管理局,中国电工技术学会,等. 风机水泵调速节能手册. 北京:机械工业出版社,1987. 18
- 2 张燕宾. 变频调速应用实践. 北京:机械工业出版社, 2002. 96 - 99
- 3 符永正. 管路特性对泵与风机变速调节节能效益的影响. 中国给水排水, 1999, 15(9): 26 - 28
- 4 狄洪发,李吉生,戴斌文. 开式系统中变速泵的节能分析. 暖通空调, 2002, 32(1): 59 - 61